

第三高調波電圧誘導法による極低温 J_c 評価システムの開発

Development of J_c measurement system using third harmonic voltage method at low temperature

太田 茂造, 小野 哲, 李 宰勲, 齊藤 敦, 大嶋 重利(山形大); 山崎 裕文(産総研)
 OTA Shigehiro, ONO Satoshi, LEE Jae Hun, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi(Yamagata University);
 YAMASAKI Hirofumi (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)
 E-mail : ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

第三高調波電圧誘導法は超伝導薄膜の臨界電流密度 (J_c) を非接触・非破壊に測定することが可能である⁽¹⁾。しかしこれまで第三高調波電圧誘導法により測定された J_c の温度依存性についての議論はなされていない。そこで今回我々は J_c の温度依存性を測定するため、小型冷凍機を用いた第三高調波電圧誘導法による J_c 評価システムの開発を行った。

2. 実験方法

第三高調波電圧 (V_3) の測定回路を Fig.1 に示す。測定には、内径 2 mm、外径 5 mm、高さ 3 mm、巻き数 300 回、銅線直径 0.1 mm の空芯コイルを用いた。コイルは薄膜直下に配置されるように銅キャビティ内に設置し、薄膜とコイルの間には保護のため 60 μ m のポリイミド粘着テープを貼り付けた。測定周波数は 1 kHz とし、 V_3 検出のためロックインアンプには 3 kHz の参照信号を入力した。サンプルの冷却には小型冷凍機を用いており現在の最低冷却温度は 20 K までとなっている。システムノイズ低減のために可変 RL キャンセル回路を用いた⁽²⁾。測定試料として、25×25 mm² の MgO 基板上、膜厚 500 nm の YBCO 薄膜を用いた。今回は V_3 測定によって得られる閾値電流 I_{th} の温度依存性について測定を行った。

3. 実験結果及び考察

$V_3 / \sqrt{2} - I_0 / \sqrt{2}$ 特性の典型的な温度依存性を Fig.2 に示す。測定薄膜の転移温度は約 80 K であったため、75 K 以下の測定を行い、コイルの発熱の影響が無視できる 30 K までをプロットした。各温度に対して V_3 がきれいにスケールできていることがわかる。今回は閾値電圧を 0.2 mV とし閾値電流 (I_{th}) を決定した。 I_{th} の温度依存性を Fig.3 に示す。65 K 以下で I_{th} 特性が線形的に増加していることが測定できている。

現在の測定システムではドライブコイルの発熱量が多く電流値を制限する必要があったが 30 K まで測定することができた。現在は高 J_c 薄膜の測定が困難となっているが、今後太い径の銅線を使用しコイルの抵抗値を低くするなどしてコイルの発熱を抑えることができればさらに低温の評価が可能となる。また、測定温度もチャンバー内に適切な熱遮蔽を行うことによって 4 K まで測定することが可能になると期待できる。

第三高調波電圧誘導法によって測定できた I_{th} を J_c に換算するためには、通電法により測定した J_c よりコイル定数 $k = (J_c \times I_{th}) / d$ を算出する必要がある。今後は I_{th} から J_c への換算および J_c の温度依存性について検討を行うために、通電法により J_c の温度依存性を測定し第三高調波電圧誘導法との比較を行う予定である。詳細については当日報告する。

参考文献

- [1] J. H. Claassen, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 62 (1991) p.996
- [2] H. Yamada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.106

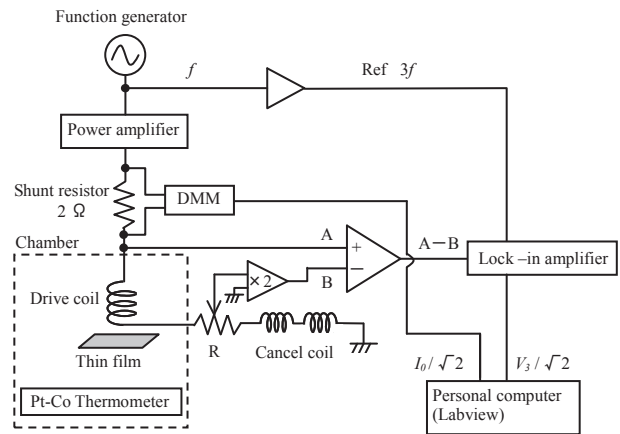


Fig.1 Measurement system.

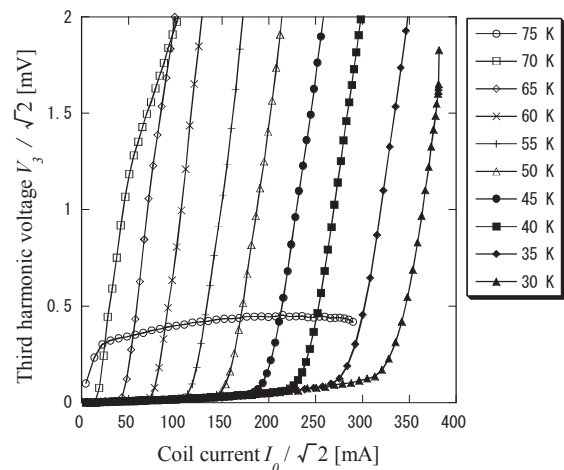


Fig.2 Temperature dependence of V_3 vs I_0 curve.

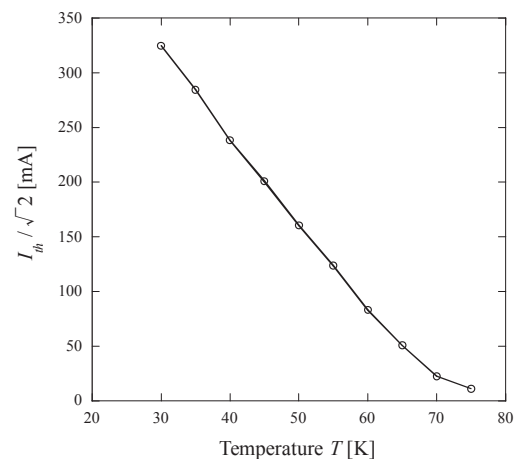


Fig.3 Temperature dependence of I_{th} .

誘導法による RE-123 テープの J_c , n 値測定に対する安定化銀層による表皮効果の影響
 Influence of the skin effect due to the Ag stabilizing layer on the inductive measurement of J_c and n -values in RE-123 tapes

山崎 裕文, 馬渡 康徳 (産総研); 衣斐 颯, 宮田 成紀, 山田 穰 (超電導工学研究所)

YAMASAKI Hirofumi, MAWATARI Yasunori (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST);

IBI Akira, MIYATA Seiki, YAMADA Yutaka (SRL)

E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

I. はじめに

大面積超電導膜における臨界電流密度 J_c の分布を非破壊的に測定する方法として、第3高調波誘導電圧を用いる方法がある。我々はこの方法を拡張し、周波数を変えて複数回の測定を行うことによって、 J_c とともに n 値の測定も可能にした [1]。昨年春・秋の学会で、超電導工学研究所名古屋研究所で作製した IBAD-PLD RE-123 テープについて J_c , n 値分布と磁界角度依存性の測定結果を報告したが、安定化銀層による表皮効果が測定に及ぼす影響が未解明であった [2, 3]。今回、実験と理論の両面でこの問題に取り組み、表皮効果の影響なしに測定する方法を見出したので報告する。

ことが明らかとなった。今回、3 kHz 以下の低周波域で J_c と n 値の分布を測定した結果を図 2 a, b に示す。これらは、外径 2.2 mmφ のコイルを用いてメッシュサイズ 2 mm で測定した。 n 値は、これまでの過大評価されていた値よりも少し低くなり、ほとんどの点で 20 以下である。なお、(1) 線材の長手方向にはほぼ均一であるが、幅方向に少し分布がある、(2) 楕円で囲まれた、少し特性の悪い部分では、 J_c よりも n 値の低下が顕著である、という特徴は変わらない。

[参考文献] (1) H. Yamasaki, Y. Mawatari and Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. **82**, 3275 (2003), (2) 山崎他: 第 74 回 2006 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p. 203, (3) 山崎他: 第 75 回 2006 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 p. 229.

II. 交流誘導法 J_c , n 値測定に及ぼす表皮効果の影響

世界中で活発な開発が行われている RE-123 系超電導テープ線材は、多くの場合、超電導膜の上に安定化層として、厚さ数 μm 以上の銀や銅が蒸着されている。誘導法による測定では数 kHz の交流磁界を印加するため、それが安定化金属層によって遮蔽される表皮効果の影響が気になる。銀の 77 K における表皮厚さ $\delta \propto \omega^{-1/2}$ は、10 kHz においても約 270 μm で銀層の厚さ d_0 に比べてはるかに大きいため、 J_c に及ぼす影響は小さいが、周波数依存性から n 値を求める場合、 n 値への影響は無視できない。均質な THEVA 薄膜に 20 μm と 50 μm の厚さの銀フォイルをかぶせて、その影響を調べた典型的な結果を図 1 に示す。 J_c 値が少し異なるが、これは、試料の特性分布の影響である。銀フォイルをかぶせていない部分で観測されるきれいな冪乗の E - J 特性が、銀フォイルの影響で、高周波域で折れ曲がるのが分かる。詳細は省くが、このような高周波域における表皮効果の影響は理論計算でも確認された。これらの実験や理論から、比較的low周波域においては、表皮効果の影響が無視できることが分かった。即ち、20-50 μm 程度の安定化銀層を有するテープ線材の測定においては、3 kHz 程度以下の低周波域で測定すれば補正は不要である。

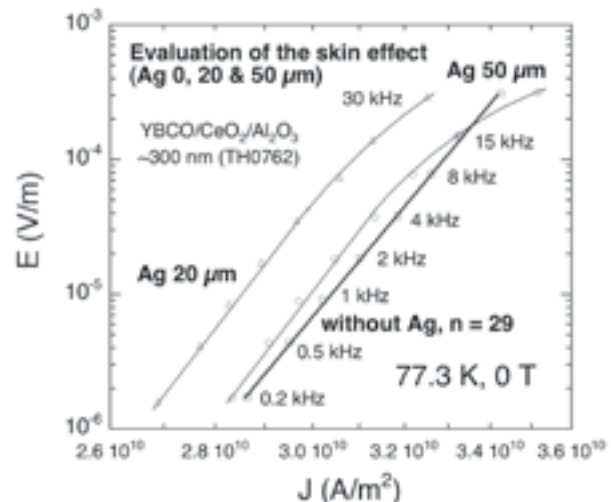


Fig. 1 Influence of the skin effect due to thick Ag foils upon the E - J curves obtained by the ac inductive method.

III. S R L 製 IBAD-PLD テープ線材の J_c , n 分布測定

これまで、超電導工学研究所製の IBAD-PLD YBCO, GdBCO テープ (約 20 μm 厚の安定化銀有り) の J_c と n 値の分布を測定した結果を報告してきたが、最も簡単な近似として、交流磁界の振幅が安定化層がない場合と比較して $A = H/H_0 = \exp(-d_0/\delta)$ 倍に減少すると言う補正を行っていた [2, 3]。今回の結果から、それが過剰補正であり、 n 値を過大評価していた

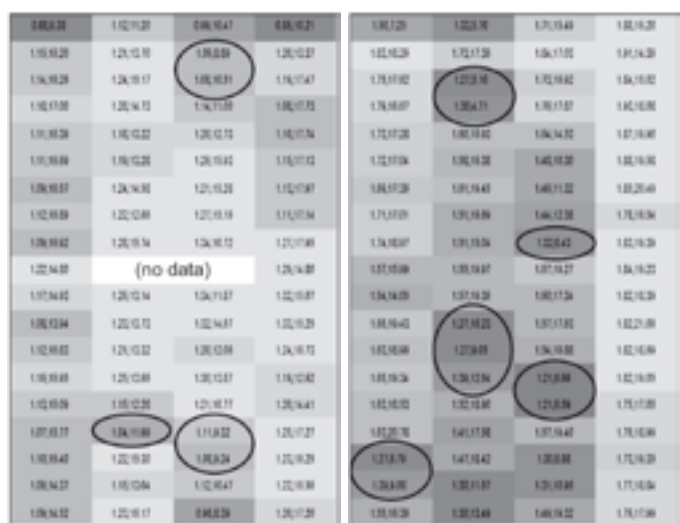


Fig. 2 (a, left) J_c (MA/cm²) and n distribution in 2.25- μm -thick IBAD-PLD YBCO tape, and (b, right) in a GdBCO tape (1.5 μm)

ピックアップコイル群による単層ソレノイド HTS コイルの電流分布測定 Measurement of AC current distributions in a single layer solenoidal HTS coil by a pickup coil array

田代 信人, 川畑 秋馬, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大・工); 塩原 融 (SRL)
TASHIRO Nobuhito, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi,
SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail:bt203043@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では高温超伝導テープ線材・導体内の電流分布を定量的に評価できる測定法を確立し、電流分布特性を把握することを目的としている。これまでに、ピックアップコイル1個をデジタルノギスや X-Y ステージと組み合わせて高い精度で移動させ、Bi-2223 テープ線材やコイル巻線内の電流分布を測定してきた¹⁻³⁾。前回から測定精度を保ったままで簡単に線材内の電流分布測定できるように、20 個程度のピックアップコイルで構成されるコイル群を用いた電流分布測定を試みている⁴⁾。今回はこのピックアップコイル群を用いて単層ソレノイドコイル形状に巻線された線材の電流分布測定結果について報告する。

2. 測定用ピックアップコイル群

今回用いたピックアップコイル群の概観を Fig.1 に示す。このコイル群は、 $\phi 40\mu\text{m}$ の極細 Cu 線で紙製のポピンに巻線されており、20 個で 1 セットのピックアップコイル群である。各コイルは断面積が $4.46\text{mm} \times 0.33\text{mm}$ 、ターン数が 17 である。このピックアップコイル群を Fig.2 に示すように単層ソレノイドコイル形状に巻線された線材表面に直接取り付けて、線材周辺の磁場分布を測定した。

3. 測定方法

測定を行う前にまず、 $\phi 0.22\text{mm}$ の Cu 線を 24 本横並列に並べた校正用導体を用いて、各ピックアップコイルの断面積と位置を校正した。今回の新しいピックアップコイル群での測定精度を調べるために、Cu 線束から成る模擬テープ導体で作製した Cu コイルを用いてその電流分布測定を行った。模擬テープ導体は、 $\phi 0.42\text{mm}$ の Cu 線を 10 本平行に並べて作製したものである。測定精度の評価は、Cu 線に流す既知の電流値とピックアップコイル群での磁場測定結果から算出された電流値とを比較することにより行った。測定周波数は 500Hz とし、各 Cu 線の通電電流値はシャント抵抗を用いて測定し、電流分布の測定を行った。

4. 測定結果

Fig.3 はピックアップコイル群を用いて測定した Cu コイルの電流分布の結果の一例である。横軸は Cu 線の番号、縦軸は Cu 線の電流値である。図中の○印はシャント抵抗によりモニタした実際の通電電流値、棒グラフは算出電流値である。2 つの電流パターンでの結果を示しているが、実測値と計算値には若干の差がみられた。そこで、現在サンプルの両端に校正用線材として Cu 線を設置して、ピックアップコイル群の校正精度の向上を図っている。Cu 線束から成る試験コイルでの再測定を含め、HTS 単層ソレノイドコイルの電流分布の測定結果については、当日発表する。

謝辞

本研究の一部は「超伝導応用基盤技術開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

- 1) S. Kawabata, et al., IEEE Trans. Appl. Suprcond., **15**(2), pp.3628-3631, 2005.
- 2) S. Kawabata, et al., IEEE Trans. Appl. Suprcond., **17**(2), pp.3777-3780, 2007
- 3) 下玉利 他, 2006 年度秋季低温工学・超電導学会講概要集, 1A-p02
- 4) 下玉利 他, 2007 年度春季低温工学・超電導学会講概要集, 2B-a07

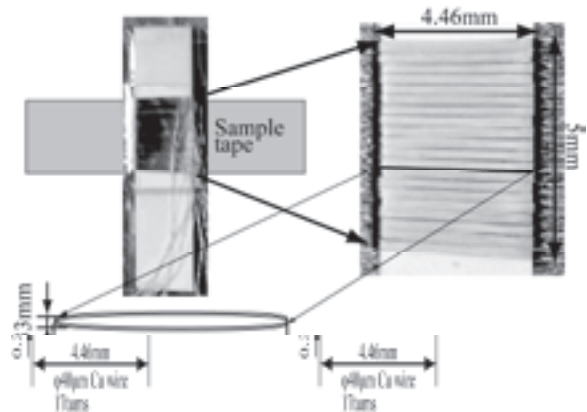


Fig.1 Overview of a pickup coil array

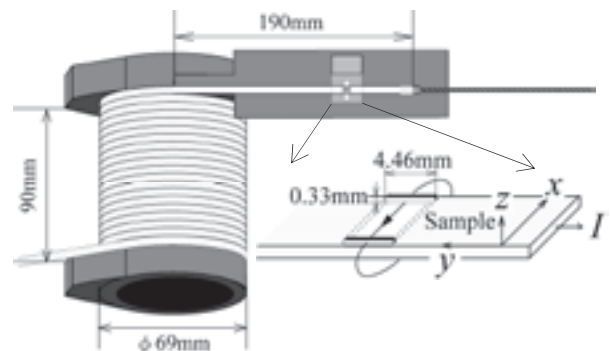


Fig.2 Sample coil and pickup coil array

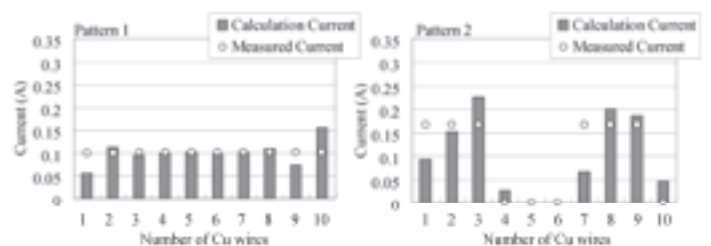


Fig.3 Measured results of Cu coil

絶縁なし YBCO 素線 2 本で構成した導体の結合損失特性

Coupling loss properties of YBCO conductors composed of two non-insulated strands

瀬之口 諭, 川越 明史, 川畑 秋馬, 住吉 文夫(鹿児島大学)
式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

SENOKUCHI Satoshi, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);
SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co)
E-mail: bt202044@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

高磁界中の臨界電流特性に優れた YBCO 線材を用いた超伝導機器の開発が進められている。機器の開発に必要な電流容量を確保するためには、YBCO 線材を複数本束ねた導体にする必要がある。本研究では、線材間を絶縁せずに導体化した場合に発生する結合損失特性を測定することによって、線材間の接触抵抗及び短絡部の接続抵抗を明らかにし、最適な導体の構造に関する知見を得ることを目的としている。

2. YBCO 線材の導体化と測定条件

結合損失を測定した導体の諸元を Table. 1 に示す。測定した導体は、線材幅 10mm、線材長 300mm、厚み 0.2mm の絶縁なし YBCO 素線 2 本で構成された短尺直線状サンプルである。今回はハステロイ基板面同士、Cu 面同士、ハステロイ基板面と Cu 面を接触させた 3 種類の導体を試作した。さらに両端部を短絡したサンプルも作製し、計 6 種類のサンプルを準備した。結合損失の測定は、周波数 3.20~76.6Hz、磁界振幅 2~14mT の交流横磁界を印加し、液体窒素中、液体ヘリウム中でピックアップコイル法で行った。

3. 結合損失と接触抵抗及び接続抵抗

まず、ハステロイ基板面同士を向き合わせ、両端を短絡した導体の測定値を Fig. 1 (a) に示す。横軸に周波数、縦軸に単位体積あたりの交流損失値を $\mu_0 H_m^2$ で規格化した値を示している。また、導体中の線材の接触の有無を 2 種類のトルク値 (4kg・cm は '4'、14kg・cm は '14') で示している。1 周期あたりの交流損失エネルギーは周波数の 1 乗に比例し、磁場振幅の 2 乗に比例した。また 4.2K の損失値は 77K の 10 倍となっていることから、これは導体端部の素線同士の短絡部を介して流れる結合電流による結合損失であると考えられる。測定値から一箇所当りの抵抗を見積もると、77K で約 $10^{-4}\Omega$ 、4.2K で約 $10^{-5}\Omega$ となった。この抵抗値は素線同士を短絡するために使用した銅テープの抵抗値と一致する。さらに、面圧依存がないことと、同種の短絡無し導体の損失値が装置の誤差レベルだったことから、接触抵抗は非常に大きいと考えられる。

次に、Cu 面同士を向き合わせた導体の測定値を Fig.1 (b) に示す。この導体では、線材間の接触状況を変化させることで交流損失がシフトしていることがわかる。トルクを 14kg・cm とした場合には、ピーク周波数が約 25Hz に観測された。このことから、結合時定数は 64msec となることがわかった。

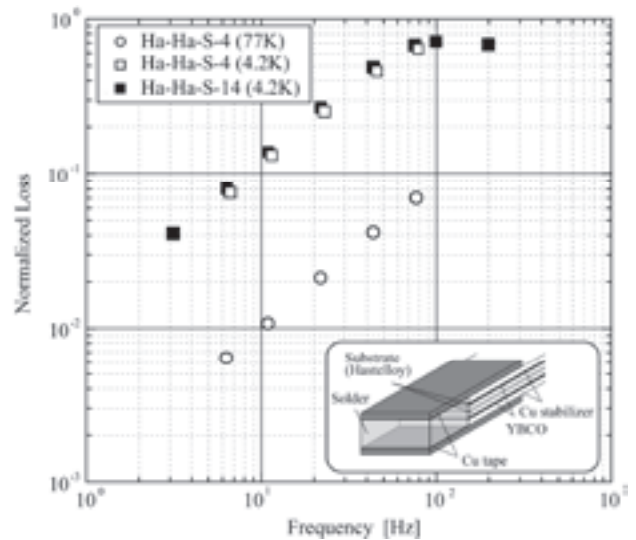
さらに、ハステロイ基板面と Cu 面を接触させた短絡無し導体の測定も行った。このサンプルの損失値は、装置の誤差レベル以下であった。

4. まとめ

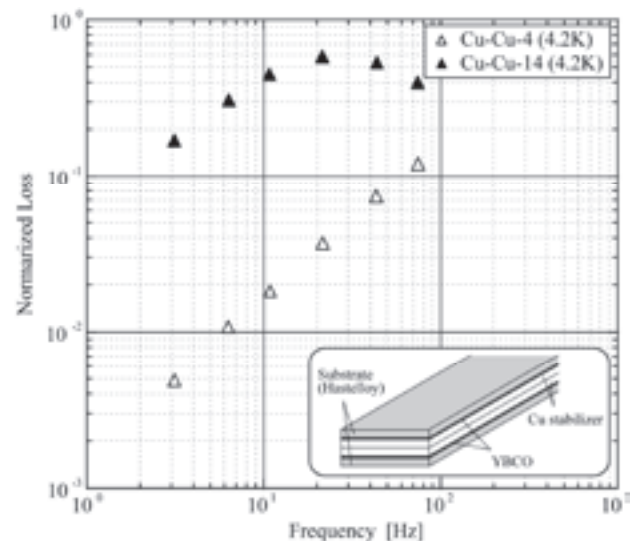
様々な YBCO 導体の結合損失測定を行った。その結果、ハステロイ基板面同士を向き合わせた導体、及びハステロイ基板面と Cu 面を向き合わせた導体では接触抵抗が非常に大きく、結合損失は接続部で発生することがわかった。Cu 面同士を向き合わせた導体では、線材間接触抵抗が小さく、大きな結合損失が発生することがわかった。

Table. 1 Specifications of sample conductor

conductor	
Number of strands	2
Insulation between strands	no
length (mm)	300
strand	
width (mm)	10
thickness (mm)	0.2
I_c (A)	115



(a) sample 'Ha-Ha-S'



(b) sample 'Cu-Cu'

Fig. 1 frequency dependences of ac losses in YBCO conductor composed of two non-insulated strands

YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化の評価

Degradation of YBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive

西尾 幸恭, 王 旭東, 植田 浩史, 河野 秀太郎, 伊豫田 章悟, 石山 敦士(早大);
 鹿島 直二, 森 匡見, 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 飯島 康裕, 斎藤 隆(フジクラ);
 八木 正史, 向山 晋一(古河電工) 山田 穰, 町 敬人, 塩原 融(ISTEC-SRL)

NISHIO Yukiyasu, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, KONO Hidetaro, IYODA Shogo, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 KASHIMA Naoki, MORI Masami, WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro,
 SAITOH Takashi (Fujikura); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa electric);
 YMADA Yutaka, MATI Takato, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導線材を送電ケーブルや限流器などの電力機器に応用する場合、突発的な短絡電流が線材に流入し、それによって線材の温度が急上昇して超電導特性が劣化する恐れがある。したがって線材の超電導特性劣化のメカニズムを知ることは超電導機器の設計において重要である。そこで我々は過電流パルス通電による特性劣化試験を行ってきた⁽¹⁾。今回は、YBCO 層の厚みに注目して試験を行った結果と併せてこれまでの試験結果をまとめる。

2. 実験方法

今回実験に用いた 2 本の線材(Sample 9, Sample 10)とこれまでに劣化試験を行ってきた線材の諸元を Table. 1⁽¹⁾⁽²⁾に示す。線材には安定化層側表面に電圧タップと熱電対温度計を取り付けた。Sample によってその配置は異なるがその代表例を Fig. 1 にしめす。実験は GM 冷凍機による伝導冷却下で運転温度(60-85K)として以下の手順で行った。

- (1) 各区間の臨界電流値 I_c (1V/cm 基準)を測定する。
 - (2) I_c 以上の方形波過電流を 1 秒間通電し、温度を測定する。
 - (3) 再び I_c を測定し、 I_c が劣化していないかを調べる。
- I_c の劣化が観測されるまで、パルス電流の最大値を徐々に上げながら(1)-(3)の手順を繰り返した。このような手順により I_c が劣化したときの最高到達温度を調べた。なお、本実験では 1A 以上の I_c の低下を劣化とした。また、温度は熱電対温度計から得られた値を参考に、安定化層(Ag)の抵抗率の温度依存性を利用して求めた。

3. 実験結果、考察

劣化無しで許容できた最高到達温度(以降、 T_{max})を諸元と合わせて Table. 1⁽¹⁾に示す。ここで示している温度範囲は劣化を確認した区間の中で最も低い温度で劣化を始めた区間の劣化開始温度を下限に、最も高い温度で劣化を開始した区間の温度を上限としている。Table. 1 より、まず製造プロセスの違いに注目すると IBAD/PLD、IBAD/MOCVD 線材共に 500-600K で劣化を開始する傾向が見られた。Ag 層の厚みについてもその厚みに関係なく同様の傾向が見られた。次に、運転温度別に見ると運転温度 70-80K の場合は T_{max} に差は見られなかった。しかし、運転温度が 60K の場合(Sample 3)は 400K 程度で劣化開始する区間が存在した。また、曲げ歪みの有無で比較してみると、曲げ歪み(引張り歪み 0.47%)を加えた線材 Sample 8 とその歪みを無視できる線材 Sample 7 の T_{max} は共に 550-650K 程度であった。以上のように結果を概観して見ると様々な形状、状況下に置かれた線材も 500-600K の範囲に許容できる最高到達温度が含まれる傾向があることが分かる。しかし、YBCO 層の厚みで比較してみると YBCO 膜厚が 0.2-2.0 μ m の線材については上記のような傾向が見られるが、Sample 6(YBCO 膜厚が 2.5 μ m)は温度が 732K に達する区間が存在しても劣化を確

認することができなかった。また、Sample 10 は T_{max} の下限が 477K とやや低めの温度から劣化を開始している。この Sample 10 は 10mm 幅の線材をレーザーを用いて幅方向に 2 分割し細線化したものであり、細線化が Sample 10 の T_{max} に影響を与えた可能性がある。細線化の影響についてはさらに実験を重ねて検証していく必要がある。また、Sample 1 と Sample 2 を比較すると、劣化せずに許容できる I_{peak} は Ag 層の厚み、即ち安定化層の抵抗値に依存している。今後走査型電子顕微鏡(SEM)や透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた表面観察によりさらに詳細な劣化の原因の検証を引き続き行っていく予定である。

Table.1 Specification of YBCO Superconducting Tapes

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Manufacturing Method	IBAD/PLD	IBAD/PLD	IBAD/PLD	IBAD/PLD	IBAD/MOCVD
Length, mm	50	50	50	150	150
Width, mm	10.0	10	10.0	10.0	10.0
Ag Thickness, mm	30	30	30	30	39
YBCO Thickness, mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
Y2O3 Thickness, mm	0.2	0.15	0.15	0.15	-
CoO2 Thickness, mm	-	-	-	-	0.65
GZO Thickness, mm	1.2	1.7	1.7	1.7	0.7
Hastelloy Thickness, mm	100	100	100	100	100
Operating Temperature, K	80	80	60	80	80
Bending Strain, %	-	-	-	-	-
Permissible Temperature, K	600-638	598-689	421-629	482-589	502-613
Initial end-to-end I_c	34.6	21.3	108.9	27.5	101.0
Permissible I_{peak} , A	109-111	168-169	206-207	100-105	168-169
I_{peak} / I_c	3.2	7.9	1.9	3.6	1.7

	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10
Manufacturing Method	IBAD/PLD	IBAD/MOCVD	IBAD/PLD	IBAD/PLD	IBAD/PLD
Length, mm	70	80	60	70	70
Width, mm	3.3	5.0	5.0	5.0	5.0
Ag Thickness, mm	15	11	11	20	15
YBCO Thickness, mm	2.5	0.5	0.5	1.7	2.0
Y2O3 Thickness, mm	0.4	-	-	-	-
CoO2 Thickness, mm	-	0.4	0.4	-	-
GZO Thickness, mm	1.0	1.1	1.1	-	-
Hastelloy Thickness, mm	100	100	100	100	100
Operating Temperature, K	85	80	80	70	70
Bending Strain, %	0.09	0.09	0.47	0.09	0.09
Permissible Temperature, K	732-	581-650	566-637	546-617	477-619
Initial end-to-end I_c	43.7	44.1	40.2	71.4	54.3
Permissible I_{peak} , A	61.7-	69.70	69.70	88.89	72.73
I_{peak} / I_c	-	1.6	1.7	1.2	1.3

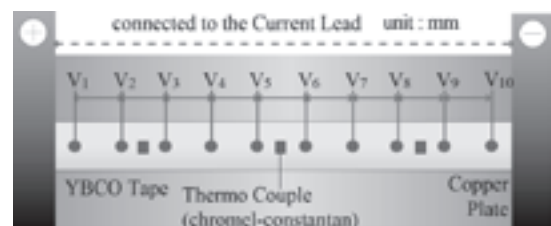


Fig. 1 Arrangement of voltage taps and thermo couples

参考文献

- (1) 石山敦士・田中康武他：2006 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p09
 本研究の一部は超電導-応用基盤技術研究体の研究として新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

輸送電流を運ぶ強磁性基板上の超伝導ストリップにおける電磁特性

Electromagnetic phenomena of superconducting strips on ferromagnetic substrates carrying transport currents

馬渡 康徳(産総研)

MAWATARI Yasunori (AIST)

E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

RE-123 系超伝導テープ線材における金属基板として、Ni-W 合金のような強磁性体がいられることがある。このような強磁性基板を用いた超伝導テープ線材 (SC/FM tape) において、超伝導体と強磁性体との磁氣的相互作用が線材の電磁特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

我々は、強磁性体基板を ideal soft magnet としてモデル化し、SC/FM tape における電流・磁場分布を等角写像により解析的に求める手法を考案した[1]。今回は、垂直磁場中の磁束侵入の様子や交流損失についての理論解析結果を報告したが[2]、今回は、SC/FM tape が輸送電流を運ぶ場合の電磁特性について、非磁性基板上の超伝導テープ線材(SC/NM tape)の場合と比較した結果を報告する。

2. 強磁性基板上の超伝導テープ線材 (SC/FM tape)

幅が $2a$ で z 方向に無限に長く、超伝導層膜の厚さが d_s 、強磁性基板の厚さが d_m の SC/FM tape において、超伝導層が輸送電流を運ぶ場合を考える。簡単のため、バッファ層や保護層は無視し、線材の厚さ d_s+d_m が幅 $2a$ に比べて十分薄い極限を考察する。超伝導層の臨界電流密度 j_c は一定とし、臨界状態モデルに基づいて解析を行う。Ni-W 合金は soft magnet としての性質を持つことから、本研究では、強磁性基板を ideal soft magnet として取り扱う[1,2]。すなわち、強磁性基板は線形で十分大きい透磁率($\mu_m \gg \mu_0$)をもつものとし、磁化の飽和や履歴を無視する。

臨界状態モデルによれば、超伝導層の縁(edge)の付近 $b_0 < |x| < a$ では面電流が $j_c d_s$ に達して磁束が侵入する (x はテープ中心軸から縁へ向かう距離)。磁束侵入の前線(flux front) b_0 と輸送電流 I_0 との関係は、次式で表される。

$$I_0/I_c = \sqrt{\gamma_0} - (1-\gamma_0)\arctan\sqrt{\gamma_0}, \quad \gamma_0 = \sqrt{1-b_0^2/a^2} \quad (1)$$

一方、SC/NM tape の場合は $I_0/I_c = \gamma_0$ である。これらより b_0 を I_0 の関数としてみると、SC/FM tape における b_0 は、SC/NM tape の b_0 より小さい。これは、強磁性基板の縁部に磁場が集中し、超伝導層に磁束が侵入しやすいからである。また、超伝導層の $b_0 < x < a$ における磁場の垂直成分は

$$\frac{H_y(x)}{2j_c d_s/\pi} = \frac{\sqrt{(1+\xi)(\gamma_0-\xi)}}{\xi} \arctan\sqrt{\frac{\gamma_0-\xi}{1+\xi}} + \operatorname{arctanh}\sqrt{\frac{\gamma_0-\xi}{\gamma_0(1+\xi)}}, \quad \xi = \sqrt{1-x^2/a^2} \quad (2)$$

で与えられる。

非現実的ではあるが、強磁性基板の幅が超伝導層の幅より十分大きい場合、SC/FM tape の超伝導層において、面電流分布は SC/NM の場合と同じで、磁場分布はちょうど 2 倍となる。この結果は、鏡像法により簡単に得られる。

3. SC/FM tape における交流損失

交流垂直磁場を印加した場合の損失の磁場振幅依存性においては、SC/FM tape と SC/NM tape の損失の大小が逆転するという現象が理論的に予測され[1,2]、この現象は Suenaga et al.[6] により実際に観測されている。

SC/FM tape が振幅 I_0 の交流輸送電流を運ぶ場合、単位長あたりの損失 Q は次式より求められる。

$$\frac{Q}{\mu_0 I_c^2} = \frac{2}{a^2} \int_{b_0}^a dx (a-x) \frac{H_y(x)}{j_c d_s} \quad (3)$$

(2)式を(3)式に代入して計算すると Q が γ_0 の関数として定められ、これと(1)式より Q vs I_0 が得られる。その結果は数値計算の結論[3,4,5]と同様、全ての I_0 の領域において SC/FM tape の方が SC/NM tape より交流損失が大きい。

SC/FM tape の交流損失の I_0 依存性は、超伝導層が楕円断面をもつ SC/NM tape の振舞に近い。Fig. 1 に、SC/FM tape の損失と SC/NM tape の損失の比を I_0 の関数として表した。実線は SC/NM tape における超伝導層が矩形断面の場合、破線は楕円断面の場合であり、SC/FM tape における超伝導層はどちらの場合も矩形断面である。損失比の I_0 依存性は、矩形断面の場合は実線のとおり大きく変化するのに対し、楕円断面の場合はあまり変化せず、その値は $0.2 < I_0/I_c < 1$ において 2~3 倍程度である。

強磁性基板の幅を超伝導層の幅より大きくすると[5]、強磁性基板の縁部における磁場集中の効果が緩和されるため、SC/FM tape の交流損失はいくらか小さくなるが、SC/NM tape の損失より小さくなることはない。特に、強磁性基板の幅が十分大きい場合の SC/FM tape の損失は、 I_0 によらず SC(矩形)/NM tape のちょうど 2 倍である。

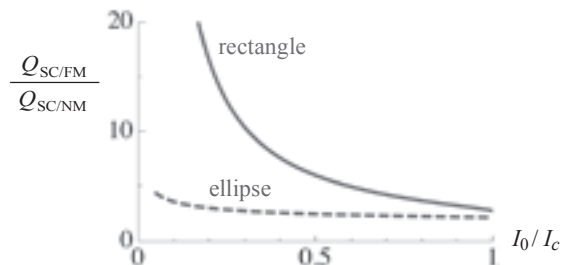


Fig. 1: Ratio of the ac loss of SC/FM tape to that of SC/NM tape as the function of the current amplitude I_0 .

参考文献

- [1] Y. Mawatari, arXiv:0710.2151v1 (submitted to Phys. Rev. B).
- [2] Y. Mawatari: Abstracts of CSJ Conference, vol. 76, p. 109 (2007).
- [3] O. Tsukamoto et al., Physica C 463-465, 770 (2007).
- [4] N. Amemiya et al., Physica C 463-465, 775 (2007).
- [5] D. Miyagi et al., Physica C 463-465, 781 (2007).
- [6] M. Suenaga et al., presented at EUCAS 2007, (2007).

希薄 RE ドープによる Bi 系超伝導体の臨界電流特性の改善

Improved flux pinning properties of Bi-based superconductors by dilute RE doping

滝本 孝太, 影島 慶明, 谷本 亮, 荻野 拓, 堀井 滋, 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大院工)
 K. Takimoto, Y. Kageshima, A. Tanimoto, H. Ogino, S. Horii, J. Shimoyama and K. Kishio (Univ. of Tokyo)
 E-mail: tt076692@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (K. Takimoto)

1. はじめに

Bi 系超伝導線材は既に様々な用途で実用・試用されているが、その応用範囲の拡大には磁場下における臨界電流特性の改善が不可欠である。最近、我々は Bi2223 線材相当の Pb 置換量を持つ Bi2212 単結晶の臨界電流特性が希薄 RE ドープによって向上することを見出した[1]。特に Sr サイトの希薄 Nd ドープにおいても臨界電流特性の改善が認められたことは、Bi2223 相生成の障害となる Ca サイトの RE 置換を避けた方法で Bi(Pb)2223 線材を高特性化できることを意味する。そこで本研究では Bi(Pb)2212 単結晶に様々な軽希土類元素の希薄ドープを行い最適な RE を探索するとともに、Bi(Pb)2223 焼結体に対しても同様な希薄 RE ドープを試みた。

2. 実験方法

仕込組成を $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{RE}_x)\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (RE: La $x=0, 0.002, 0.004$, Pr $x=0, 0.002, 0.004, 0.006$, Nd $x=0, 0.002, 0.004, 0.005$)とした焼結棒を作製し、Floating Zone 法により 99%Ar / 1%O₂ 雰囲気下で Bi(Pb)2212 単結晶を育成した。切断、劈開により約 $1 \times 1 \times 0.05 \text{ mm}^3$ の単結晶試料を切り出した後、キャリアの弱いオーバードープ状態となるように 600°C、 $P_{\text{O}_2} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ atm}$ でアニール後急冷した。金属組成は ICP 法により決定した。また、仕込組成を $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{RE}_x)\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE: Nd $x=0, 0.002, 0.005$, Pr $x=0, 0.002, 0.004, 0.006, 0.008$)とした Bi2223 焼結体は、両端を封じた銀パイプ中にて固相反応法により作製した。Bi2223 焼結体の焼成条件は空気中で 838~853°C、95%Ar / 5%O₂ 雰囲気下で 830°C にて 300 時間焼成し、酸素量は空气中 300~500°C でアニール後急冷することにより制御した。構成相の同定は粉末 X 線回折法により行った。超伝導特性は SQUID 磁束計で評価し、磁化ヒステリシス曲線の幅から拡張 Bean モデルにより J_c を計算した。

3. 結果と考察

Bi(Pb)2212 単結晶試料の T_c は 85~90 K であり、RE 置換量による系統的な変化はほとんどみられなかった。Fig. 1 に示したように Sr サイトへの Pr ドープによっても Bi(Pb)2212 単結晶の J_c 、不可逆磁場ともに改善し、Nd ドープと同様の傾向がみられた。また、この効果は 25 K 以下の低温領域・高磁場で顕著であった。一方、Bi(Pb)2223 焼結体への希薄 RE ドープを試みたところ、焼成温度をやや高くした場合にほぼ単相の試料が得られた。Fig. 2 に示すように T_c はどの試料も 110 K 程

度であったが Nd ドープ量の増加に伴い若干低下する傾向が認められた。Bi(Pb)2223 焼結体の臨界電流特性に対する希薄 RE ドープ効果については当日報告する。

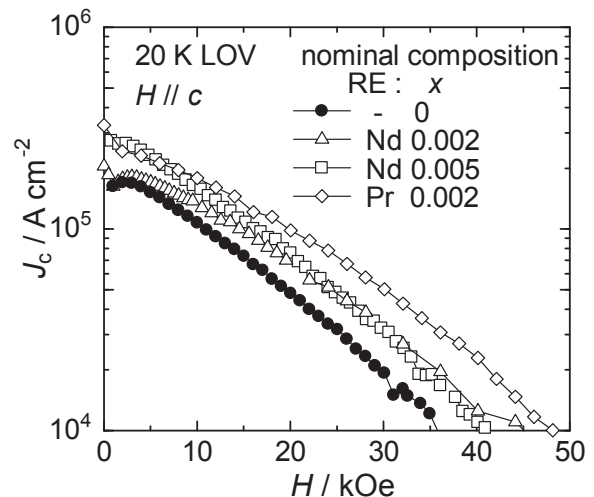


Fig. 1 J_c - H curves at 20 K for undoped, Pr- and Nd-doped Bi(Pb)2212 single crystals with carrier lightly overdoped state.

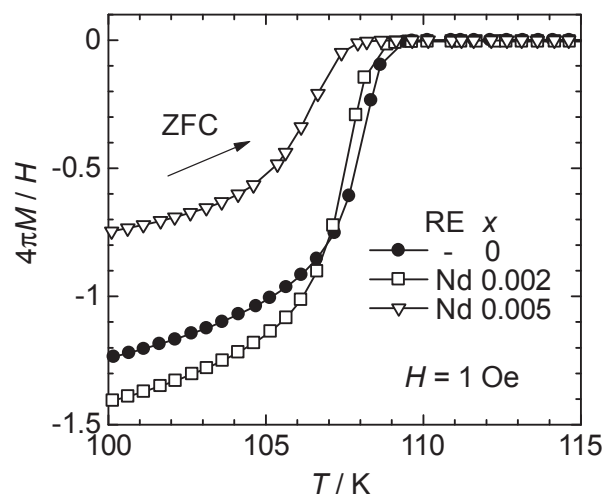


Fig. 2 Temperature dependence of ZFC magnetization curves for Bi(Pb)2223 sintered bulks

参考文献

- [1] 滝本ら、2007 年春季応用物理学会 28p-L-18

前駆体組成および相構成が Ag-Cu 合金シース Bi2223 テープの特性におよぼす影響

The effect of composition and components of precursor on the formation and property of Bi2223 tapes sheathed with Ag-Cu alloy

來原 央, 町田 智弘, 藤原 吉一, 稲田 亮史, 中村 雄一, 太田 昭男(豊橋技術科学大学)

KURIHARA Chikasa, MACHIDA Tomohiro, FUJIWARA Yoshikazu, INADA Ryoji,

NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT)

E-mail: c-kurihara@super.eee.tut.ac.jp

1. はじめに

銀シース Bi2223 超電導テープは各種電力機器への応用のために、機械強度の改善が求められている。テープの機械強度向上の方法の一つとしてシース材の合金化がある。我々は以前の研究において、Ag-Cu 合金シースを用いると、シース中の Cu とフィラメントとの反応により粗大な 14:24(Sr:Ca:Cu =7:7:24)相を生成して、通電特性の低下が生じるが、前駆体粉の平均組成および Bi2223 相の含有量の制御により改善が可能であることを報告した。本研究では、Bi と Sr の含有量が異なる数種類の前駆体を用いて Ag-Cu 合金テープを作製し、その組織および特性の評価を行った。

2. 実験方法

本実験に用いた 3 種類の前駆体の組成を Table 1 に示す。これらは Bi2212 粉と $\text{Ca}_2\text{CuO}_3+\text{CuO}$ 粉を混合する 2 粉末法により作製し、それぞれ Bi2223 相を 2wt% 添加した。シース材には前熱処理を施した Ag-Cu 合金を使用し、PIT 法によりテープを作製した。完成したテープの臨界電流密度 J_c は直流 4 端子法、液体窒素中、電界基準 $1[\mu\text{V}/\text{cm}]$ にて評価した。また、微細組織および相構成は、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDX) および XRD を用いて評価した。

3. 結果及び考察

Fig.1 に組成 1 および 3 の前駆体を使用した完成テープの長手方向断面の SEM 像を示す。各試料で不純物の量には大きな変化は見られないが、EDX で不純物を分析した結果、組成 1 の前駆体を用いて作製した試料に比べ、Bi 量を増やし、Sr 量を減らした組成 2,3 の前駆体を用いて作製した試料は、14:24 相粒子の大きさが小さくなり、粗大な CuO 粒子が多数存在する傾向が認められた。これより、前駆体粉の平均組成の Bi 比率を上げて Sr 比率を下げることで 14:24 相の生成の反応が抑制されると考えられる。また得られたテープの Bi2223 相と Bi2212 相の比率を XRD により評価した結果、組成 1,2 の前駆体で作製した試料の一次焼結 20h 後の Bi2223 相の生成率が約 70%であったのに対し、組成 3 の前駆体で作製した試料では約 15%であった。また二次焼結後も組成 1,2 では約 95%であるのに対し組成 3 では約 85%とやや低かった。このことから、ある組成範囲をはずれることで急激に Bi2223 相の生成反応が遅くなる領域に移行している可能性がある。最終的に得ら

れた J_c は、組成 1,2 の前駆体を用いて作製した試料では $1.1 \sim 1.4 \times 10^4 [\text{A}/\text{cm}^2]$ であるのに対し、組成 3 の前駆体を用いて作製した試料は $0.3 \sim 0.6 \times 10^4 [\text{A}/\text{cm}^2]$ と低かった。この原因の一つとして、組成 3 を用いた試料は Bi2223 相の生成速度が遅く、完成テープにおいて Bi2223 相の比率が低いことが考えられる。

これらのことから、Bi 量を増やし、Sr 量を減らした前駆体を用いて作製した試料では、14:24 相の生成を抑制する傾向が認められた。しかし、組成をずらし過ぎると Bi2223 相の生成速度は低下し、 J_c も低くなった。よって、不純物相の低減と高 J_c 化は、前駆体の調整とそれに合った焼結条件や雰囲気制御などを行っていく必要がある。本研究の一部は、科学研究費補助金(No.17206026)の援助により行われた。

Table 1 Precursor composition
(Bi:Pb:Sr:Ca:Cu=1.7+ α :0.3:1.9- β :2.0:2.6)

	α	β
Composition 1	0.1	0.03
Composition 2	0.15	0.06
Composition 3	0.2	0.06

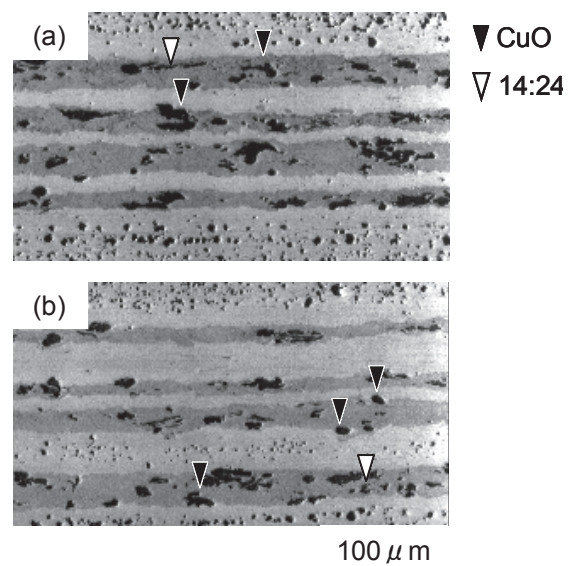


Fig.1 SEM images of the longitudinal section of the final tapes with the compositions (a) 1 and (b) 3.

不定比金属組成制御による Bi2223 の高 T_c 化Enhancement of T_c for Bi2223 sintered bulks by control of cation nonstoichiometry

谷本亮, 下山淳一, 滝本孝太, 影島慶明, 荻野拓, 堀井滋, 岸尾光二(東大院工)
小林慎一, 綾井直樹 (住友電工)

A. Tanimoto; J. Shimoyama, K. Takimoto, Y. Kageshima, H. Ogino, S. Horii, and K. Kishio (Univ. of Tokyo)
S. Kobayashi, and N. Ayai (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: tt66711@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (A. Tanimoto)

1. はじめに

Bi(Pb)2223 [$\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$] 銀シース線材は液体窒素冷却(70~77 K)方式の送電ケーブルや超伝導コイルとして広く実用化されている。我々はこれまで、Bi(Pb)2223 焼結体や実用銀シース線材において、長時間のポストアニール処理によってその T_c が上昇し、それぞれ約 115 K, 117.8 K に達することを報告してきた[1,2]。実用線材では、様々な仕込組成の試料を作製するのに膨大なコストと時間を要するため、本研究では、Bi(Pb)2223 材料のさらなる高 T_c 化および単相化を目指し、合成が比較的簡便な焼結体試料において不定比金属組成を T_c の観点から最適化することを試みた。今回は、不純物相の低減をねらい、Bi-rich および Sr,Ca の比の異なる仕込組成から Bi(Pb)2223 焼結体を作製し、生成する Bi(Pb)2223 相の金属組成を定比に近づけることを狙った。また、加圧焼成法により、緻密な焼結体を作製し、ポストアニールの本質的な効果の解明を試みた。

2. 実験方法

Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO を様々な仕込組成で混合後、空气中 780~810°C で焼成し仮焼粉末を得た。これを約 1 g ずつ銀パイプに充填し、プレスで両端を封じた後粉末充填部を一軸プレス(~300 MPa)によりテープ状とした。これを空气中 848°C または 5% O_2 気流中 830°C で焼成し、Bi(Pb)2223 焼結体を作製した。得られた試料に対し 1% O_2 気流中 700°C で 100 時間アニールを行い、さらに空气中 830°C で 200 時間以上再焼成し、急冷した。また、酸素量は空气中 500~830°C より急冷して制御した。試料の相の同定および格子定数の評価は XRD、微細組織観察は SEM により行い、磁化特性を SQUID 磁束計、抵抗率を四端子法により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に、空气中、848°C での焼成により作製した Bi(Pb)2223 焼結体の XRD パターンを示す。Bi-rich 組成試料では Ca_2CuO_3 などの不純物相が減った。さらに、 T_c はほとんど低下せず、最適化した条件でのポストアニール・再焼成により T_c は約 115 K に達した。また、仕込 Bi 組成の増加に伴い、 c 軸の短縮が認められた。

一方、Sr,Ca 比を変えた $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{2+w}\text{Ca}_{2-w}\text{Cu}_3\text{O}_y$ の試料を作製し、 T_c を調べたところ、Fig. 2 に示すように $w = 0.10$ の as-sintered 試料においてわずかに T_c が上昇した。さらに最適化した条件でポストアニール・再焼成を行うと、定比組成に近い $w = 0$ の試料と同様に約 114 K まで T_c は上昇し

た。このことから、ポストアニール・再焼成プロセスには Sr と Ca の組成比を定比に近づける効果があることが示唆された。当日は加圧焼成法により作製した焼結体のポストアニール・再焼成の T_c に及ぼす効果についても報告する。

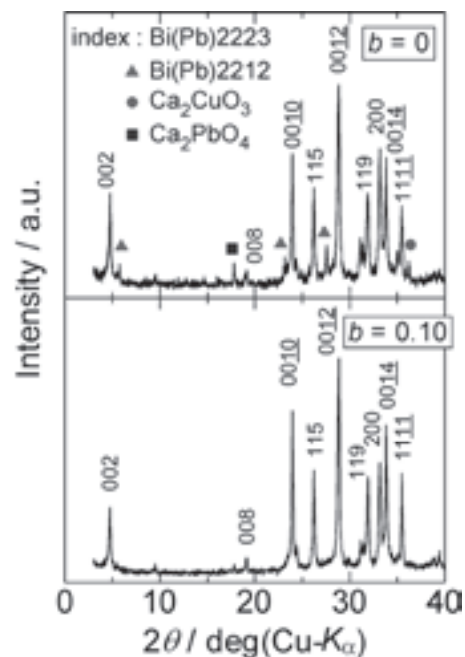


Fig. 1. XRD patterns for $\text{Bi}_{1.7+b}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ sintered bulks with $b = 0, 0.10$.

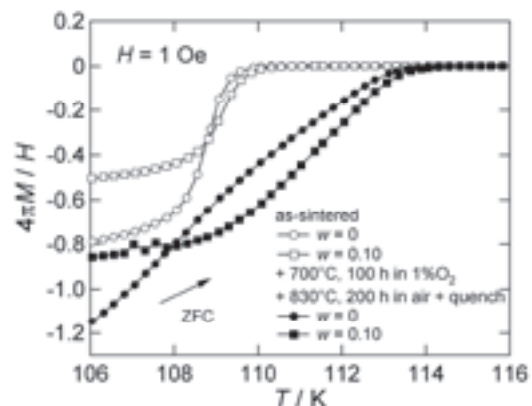


Fig. 2. ZFC magnetization curves for $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{2+w}\text{Ca}_{2-w}\text{Cu}_3\text{O}_y$ sintered bulks with $w = 0, 0.10$.

[参考文献]

- [1] 谷本他, 2006 秋季低温工学・超電導学会, 1A-a02.
[2] 下山他, 2006 秋季低温工学・超電導学会, 1A-a01.

液体ヘリウム中でフープストレスを加えたステンレス鋼補強 Bi2223 超電導線 DI-BSCCO Type HT の挙動

Behavior of stainless steel laminated Bi2223 superconducting wires, DI-BSCCO Type HT where various hoop stress is applied in liquid helium

綾井 直樹, 高畦 秀雄, 高山 弘光(住友電工); 松本 真治, 木吉 司(NIMS); 長村 光造(応用科学研)
 AYAI Naoki, TAKAAZE Hideo, TAKAYAMA Hiromitsu (SEI);
 MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS)
 E-mail: ayai-naoki@sei.co.jp

1. はじめに

銀シース Bi2223 線材は近年の改良によって低温高磁界における臨界電流が飛躍的に向上し、NMR内層コイルなどの高磁界マグネットへの適用が期待されている。しかしながら多大な電磁力が発生するこれらのコイルにおいて、線材に加わるフープストレスが設計上の問題となっていた。半田接合でステンレス鋼を積層した Bi2223 線 DI-BSCCO® Type HT は従来の線材と比べて耐力力・歪み特性が飛躍的に向上しており、上記課題を克服する高磁界マグネット用導体として有望と考えられる。実使用環境に近い条件での検証を目的として、ステンレス補強 Bi2223 テープを 1 ターンコイルとして、液体ヘリウム中、外部磁界約 14T の環境下で通電することにより試料にフープストレスを経験させ、臨界電流の変化を測定した。

2. 実験方法

Table.1に試験コイルの諸元, Fig.1 に試験コイルの外観を示す。同じロットのステンレス補強 Bi2223 テープから長さ約 900mm の試料を 5 本切り出し、直径 280 mm の 1 ターンコイルとして、液体ヘリウム中、バックアップ磁場 14T で、それぞれ Tabel.1 に示した異なる 5 つの最大電流値を流してフープストレスを経験させた。コイル電流は最大値まで 50 A/min の一定比率で上げ、最大電流値を 60 秒保持した後に、再び 50 A/min の一定比率で電流を 0 に戻した。ただし、#4 は電流掃引途中で誤って電源回路が遮断されたため、206 A に達したところで、すぐに 0 A に戻ってしまった。コイル通電の過程で、試料に発生する電界と、テープ長さ方向の歪み変化を測定した。また、フープストレスを与える前後で各試料の臨界電流を 77K、自己磁場で測定した。

Table.1 Specifications of the test coil

Tape	Width	4.4 mm
	Thickness	0.29 mm
	I_c (77K, SF)	200 A
	Reinforcer	Stainless steel 0.02 mm ^t
Coil	Diameter	280 mm ^φ
	Backup Field	14 T
	Max. current	#1: 133A, #2: 165A, #3: 197A, #4: 206A, #5: 230A

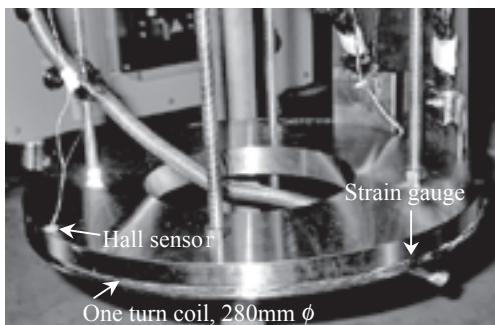


Fig.1 Appearance of the test coil

3. 実験結果

Fig.3 に最大印加フープストレス $B_{J_{max}}R$ に対して、テープに発生した最大歪み ϵ_{max} 、コイル通電終了後の残留歪み ϵ_r 、コイル試験前後で測定した 77K、自己磁場における I_c の変化を示す。 I_c は 316MPa の $B_{J_{max}}R$ を与えた #4 においても低下が認められず、354MPa を与えた #5 で初めて顕著な劣化が確認された。#5 の電流掃引過程では B/J , 336MPa; ϵ , 0.44% に達したところで試料に電界が発生していることから、この辺りの応力・歪みが許容限界であったと考えられる。Fig.4 に $B_{J_{max}}R$, 310 MPa; ϵ_{max} , 0.39% を与えた試料 #3 の $E-I$ 特性を示す。測定した 10^{-9} から 10^{-6} V/cm の電界範囲でフープストレスの経験前後で $E-I$ 特性は一致しており、DI-BSSCO Type HT が多様なマグネットの設計要求に応える高い強度を備えた導体であることを実証できたと考える。

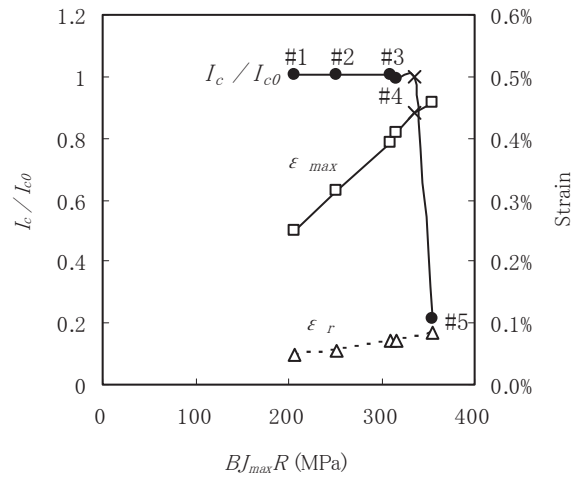


Fig.3 I_c , maximum strains, and residual strains of the specimens after the hoop stress loads in liquid helium

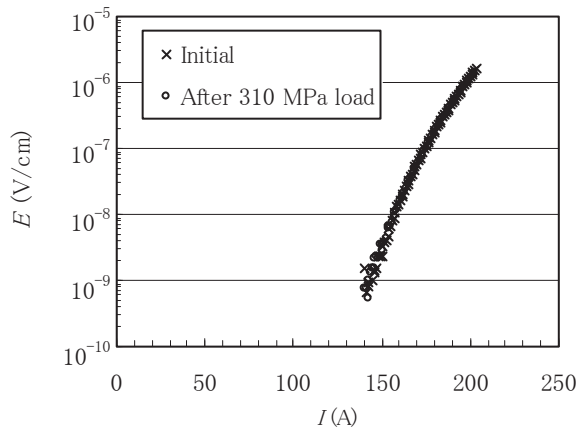


Fig.4 $E-I$ characteristics in 77K, self-field in the specimen #3 before and after 310 MPa hoop stress load

Bi-2223 テープ線材の 4.2K における高磁場中の臨界電流特性

Critical current of Bi-2223 tape conductor at 4.2 K in high magnetic fields

長谷隆司, 財津享司, 濱田 衛 (神戸製鋼); 崔 世鎔, 木吉 司 (NIMS)

HASE Takashi, ZAITSU Kyoji, HAMADA Mamoru (Kobe Steel, Ltd.),

CHOI Seyong, KIYOSHI Tsukasa (National Institute for Materials Science)

E-mail : t-hase@kobelco.jp

1. はじめに

Bi-2223 テープ線材を 4.2 K に冷却することにより、金属系超電導線材のみでは実現が困難である 1.05 GHz (24.7 T) の核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) マグネットなどへの応用が考えられる。しかし、これまで Bi-2223 テープ線材の温度 4.2 K、外部磁場 20 T 以上の条件における超電導特性の評価例は非常に少ない。NMR マグネット用線材としての適用を考えた場合の目標である 200 A/mm² 以上のオーバーオール臨界電流密度が得られるかどうかを調べるために、今回 30 T までの外部磁場中で、Bi-2223 テープ線材の臨界電流を評価した。その結果について報告する。

2. 実験方法

評価用の線材として、加圧焼成 (Controlled Over Pressure, CT-OP) 法によって製造された住友電気工業株式会社製の Bi-2223 テープを用いた。幅 4.2 mm、厚さ 0.22 mm の 2 本の長尺テープ線材より、長さ 35 mm 程度のサンプルを 2 本切り出し、予め用意した銅プレートの上に半田で固定し、高磁場中での通電の際に働く電磁応力によって線材サンプルが機械的なダメージを受けにくい構造とした。外部磁場をテープ面に平行に印加するサンプル #1 (以下、B \parallel と表記) と、外部磁場をテープ面に垂直に印加するサンプル #2 (以下、B \perp と表記) を用意した。全ての臨界電流測定は、4端子法によって行い、電界基準には 100 μ V/m を用いた。

3. 実験結果

液体窒素 77.3 K の自己磁場中で臨界電流を測定して 155 A と 152 A が得られた 2 本のサンプルにおいて、各サンプルをそれぞれ B \parallel と B \perp とし、それらを 0 T から 30 T まで励磁した場合の臨界電流と 30 T から 0 T まで減磁した場合の臨界電流の磁場依存性を Fig. 1 に示す。B \parallel と B \perp のサンプルで、30 T においてそれぞれ 293 A と 226 A の臨界電流が得られた。これらの臨界電流を線材の全断面積で除したオーバーオールの臨界電流密度は、317 A/mm² と 245 A/mm² であり、30 T において目標の 200 A/mm² を上回ることがわかった。

Fig. 1 の 24 T から 30 T の範囲では、励磁時と減磁時の臨界電流が異なり、ヒステリシスループを描いているように見える。この再現性を調べるために、同一断面サイズの別な線材サンプルを用意し、液体窒素 77.3 K の自己磁場中で臨界電流を

測定して 168 A と 164 A が得られた 2 本のサンプルをそれぞれ B \parallel と B \perp とし、それらを 30 T まで励磁した後、30 T \rightarrow 25 T \rightarrow 30 T \rightarrow 25 T \rightarrow 30 T \rightarrow 25 T の順に減磁励磁を繰り返して、臨界電流を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。B \parallel と B \perp の両サンプルで、ヒステリシスループを描くことが確認された。1.05 GHz (24.7 T) 以上の NMR マグネットにこれらの線材を適用する場合は、このヒステリシスループの存在に留意する必要があると思われる。

謝辞

この開発は、独立行政法人科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業による成果である。

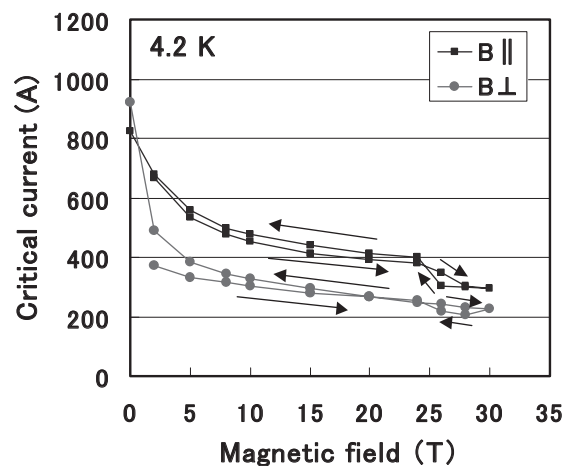


Fig. 1 Magnetic field dependence of critical currents for Bi-2223 tapes.

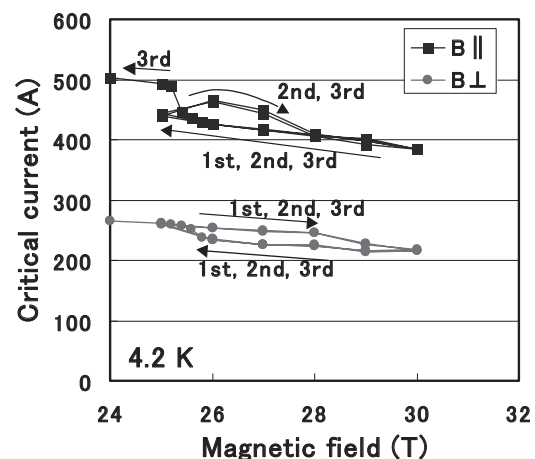


Fig. 2 Hysteresis loops in I_c -B characteristics of Bi-2223 tapes.

ラミネートされた DI-BSSCO テープの機械的性質とその臨界電流に及ぼす影響 Mechanical Behavior and Strain Dependence of the Critical Current of 3ply-DI-BSSCO Tapes

長村光造 (応用科学研), 町屋修太郎, 鈴木裕士 (原子力機構), 落合 庄治郎, 足立 大樹 (京大),
綾井 直樹, 林 和彦, 佐藤謙一 (住友電工)

OSAMURA Kozo(RIAS), MACHIYA Shutarou, SUZUKI Hiroshi (JAEA), OCHIAI Shojiro, ADACHI Hiroki (Kyoto Univ.),
AYAI Naoki, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (SEI)
E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

DI-BSSCO テープの歪特性および機械特性をさらに改良するためにステンレスあるいは真鍮をラミネートした、いわゆる 3ply 材について実験を行った。3ply 材では引張特性が優れるとともに、臨界電流が95%維持される限界歪および応力は 0.4%, 300MPa と著しく改良されている。ラミネートにより内部応力/歪状態がどのように変わるか理論計算の結果から検討を行った。

2. 試料及び実験方法

試料は表1に示すように住友電工で加圧焼成(DI)法により作製された高臨界電流型(HIc)と高強度型(HS)の BSSCO-Bi2223 テープとそれにステンレスおよび真鍮をラミネートした 3 層テープである。室温及び液体窒素温度での引張試験、液体窒素温度での臨界電流の歪依存性の測定を行うとともに、原子力機構東海研究所の RESA で歪測定を行った。

表1 供試料の構造

Category	Sample #	Structure
Original Tape	HS tape	HTS + Ag + Ag Alloy2
	HIc Tape (Insert)	HTS + Ag + Ag Alloy 1
	Insert Tape	HTS + Ag + Ag Alloy 1
3ply Tape	SUS3ply	Insert + Stainless
	Brass3ply	Insert + Brass

3. 実験結果及び考察

77K での応力-歪曲線を図1に示す。Insert 材では 150MPa 程度で破断するが、ラミネート材では 300MPa 付近で超電導フィラメントが巨視的に破断することがわかる。一方図2に臨界電流の引張歪依存性を示すが、95%I_{c0} になるときの歪をみると insert 材では 0.24%、HS テープでは 0.34%、SUS-3ply および Brass 3ply テープでは 0.35%, 0.41%と大幅に増加することが明らかである。この I_c が95%になるときの歪を A(95%)と表せば、これは巨視的に超電導フィラメントが破断する歪に対応すると解釈される。

このような臨界電流の歪特性の違いは複合体の構造と内部応力の違いから理解することができる。まず超電導層にかかる室温での熱残留応力(Ar1)を見積もると表2に示すようになる。一方中性子回折により超電導層に残留する応力を実験的に求めると表2のようになり、Insert 材を除いてはほぼ、計算値と実測値は一致することがわかる。

そこで上述の2つの歪の差 $\Delta A = A(95\%) - A_{r1}$ は超電導フィラメントが引張り応力で破断する歪量に相当することになる。 ΔA の値は Insert テープで 0.13 - 0.16%、3plyテープでは 0.23 -

0.25%となり、ラミネートにより歪特性がさらに改良されることが明らかとなった。

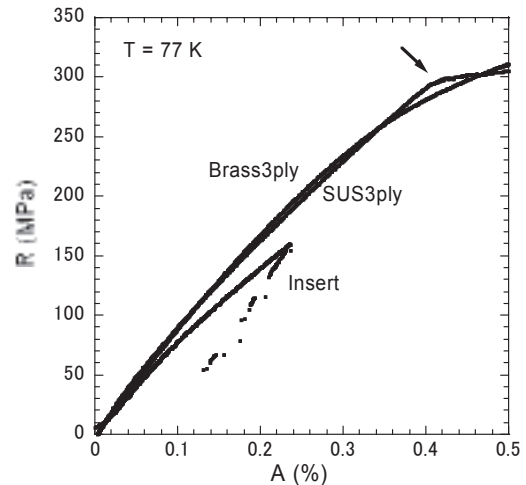


図1 応力-歪曲線

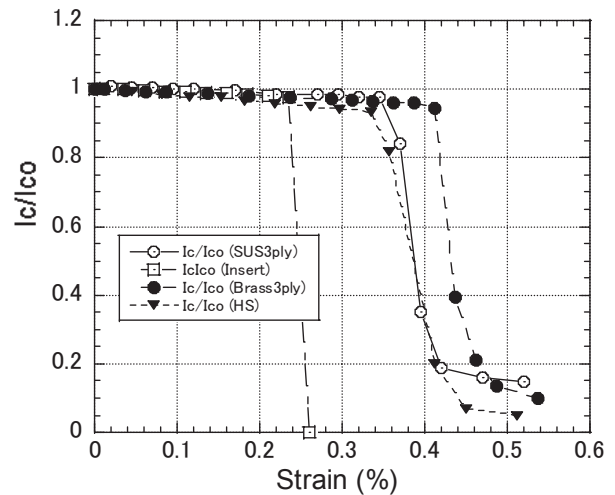


図2 臨界電流の歪依存性

表2 超電導層に残留する室温での圧縮歪の計算値と実測値の比較

	A _{r1} (%) EXP	A _{r1} (%) CAL
HS	-0.090	-0.090
HIc (Insert)	-0.023	-0.059
Insert	-0.0069	
SUS3ply	-0.059	-0.057
Brass3ply	-0.109	-0.086

RE123、Bi 系超伝導体における最適キャリアドーブ状態

Carrier optimally-doped states in RE123 and Bi-based superconductors

下山淳一、浅沼匠、谷本亮、荻野拓、堀井滋、岸尾光二(東大院工)

SHIMOYAMA Jun-ichi, ASANUMA Takumi, TANIMOTO Akira, OGINO Hiraku, HORII Shigeru and KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp (J. Shimoyama)

銅酸化物超伝導体において、不定比化学組成は超伝導特性を決定する重要なパラメータである。RE123 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) では、酸素量 y が 6~7 の間で変化し、6.93 近傍において最高の T_c を示す、つまり最適キャリアドーブ状態になる。RE123 の酸素量は一般に酸素気流中でのポストアニールによって制御され、Y123 では酸素気流中、 $\sim 450^\circ\text{C}$ のアニールによって T_c が最高に至ることが古くよりわかっており[1]、これがポストアニール条件の代表的なものとなっている。一方、RE イオンが大きい、即ち La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy などの中軽希土類 123 相においては、Ba サイトへの RE の部分置換が起こりやすく、酸素欠損を除いてもこれらの熔融凝固バルクや単結晶試料の磁化ヒステリシス曲線には第 2 ピーク効果が現われる。このような RE の部分置換はその量が少ない場合にはピン止め力を増すので、これを意図的に利用した熔融凝固バルクや coated conductor も開発されている。我々のかつての研究[2]より、Nd123 において Nd の Ba サイトへの固溶量を変えた場合、同じ条件で酸素アニールを行えば Nd 固溶量に応じて酸素量が増し、計算上の銅の平均価数が変化しないことがわかっている。しかしながら、Nd 固溶量の増加とともに系統的に T_c は下がり、最適ドーブ状態が実現するアニール温度も低下する。このことは、Nd の Ba サイトへの固溶が構造を歪ませ本質的に T_c を下げることと、 CuO_2 面へのキャリアの分配を減ずる効果があることを意味する。さらに RE123 の CuO 鎖の Cu には意図しない不純物元素、例えば C や Ag が微量ではあるが置換し最高の T_c を与えるポストアニール条件に影響する[3,4]。

一方、Bi 系超伝導体 ($\text{Bi}2201$, $\text{Bi}2212$, $\text{Bi}2223$: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$, $n = 1, 2, 3$) においてもポストアニールによる不定比酸素量の調節でキャリアドーブ状態が制御できるが、最適ドーブ状態にするためのポストアニール条件は試料に大きく依存する。その原因は金属組成の不定比性であり、具体的には Sr が欠損しやすくその分 Bi や Ca が過剰になりやすい。またこれらに良く行われる Pb 置換はホールドーブを伴うので、その置換量も当然アニール条件に影響する。我々は最近の研究で $\text{Bi}2212$ や $\text{Bi}(\text{Pb})2212$ の単結晶において、金属組成比を 2:2:1:2 に近づけることによって、 T_c が若干上昇するとともに 40 K 以下の臨界電流特性が大きく改善することを見出している[5]。さらに、定比金属組成に近いこれらの単結晶では、弱いキャリアドーブ状態～最適キャリアドーブ状態で臨界電流特性が最も優れることも明らかにした[6]。これらは超伝導凝縮エネルギーが大きくなることと、同時にピン止め力が向上することから説明できる。同様な議論は RE123 についても適用可能であり、数多くの実験事実はこれを支持している。

以上より、金属組成を定比に近づけることとキャリア濃度の最適ドーブ状態近傍への制御が RE123 や Bi 系超伝導材料の臨界電流特性最適化の重要な指針であると言える。

新規な RE123 材料候補物質として我々は最近 La123 に注目している。この物質においては La の Ba サイトへの置換が起こりやすく、定比金属組成を持つ試料を得ることが極めて難し

い。この物質の T_c は理想的には約 100 K に達すると考えられるが、95 K 以上の T_c の報告は少ない[7,8]。我々は La123 焼結体の作製過程において熱重量測定を同時に行い、他の RE123 とは明らかに振る舞いを観測している。特に、還元雰囲気下で焼成後の冷却過程における速やかな酸素の吸収はわずかではあるが La の Ba サイトへの置換を促進し、結果的に T_c を低下させていると考えられる。図 1 は RE123 焼結体について酸素アニール温度と T_c の関係を表わしたものである。冷却過程での酸素吸収を考慮して慎重に作製した La123 は $300\sim 350^\circ\text{C}$ の酸素アニールで最高の T_c (~ 94 K)を示した。同様な合成手法を Nd123~Gd123 に適用すれば、これらの T_c のアニール条件依存性は Fig. 1 に示したのから変化する可能性が高い。このような合成条件の見直しも含めて、講演では RE123、Bi 系超伝導体について物質本来の高 T_c を実現するためのプロセスについて総合的に議論する。

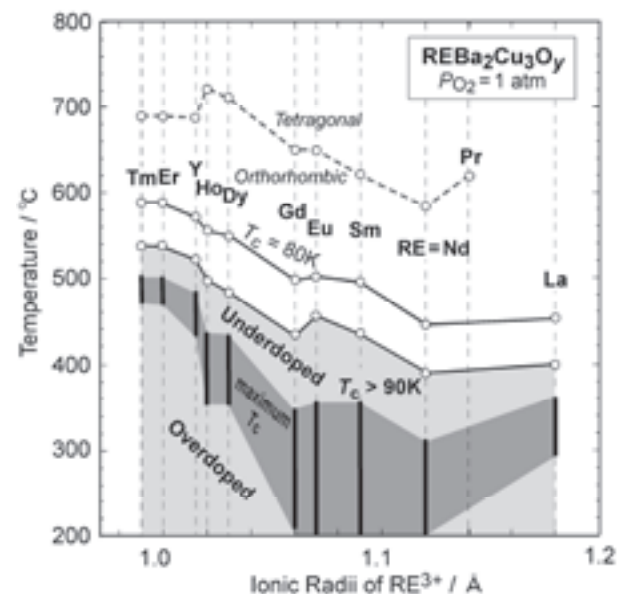


Fig. 1. Relationship between T_c and oxygen annealing temperature (assuming the equilibrium oxygen content) obtained for RE123 sintered bulks.

<参考文献>

- [1] K. Kishio, J. Shimoyama, T. Hasegawa, K. Kitazawa and K. Fueki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26** (1987) L1228.
- [2] 下山淳一ほか、2002 年秋季低温工学・超電導学会。
- [3] T. Nakashima, Y. Tazaki, Y. Ishii, S. Horii, J. Shimoyama and K. Kishio, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 2996.
- [4] 中島隆芳ほか、2007 年春季低温工学・超電導学会
- [5] S. Uchida, J. Shimoyama, T. Makise, S. Horii and K. Kishio, *J. Phys. Conf. Series* **43** (2006) 231.
- [6] 下山淳一ほか、2005 年秋季低温工学・超電導学会。下山淳一ほか、2007 年秋季応用物理学学会。
- [7] T.B. Lindemer, B.C. Chakoumakos, E.D. Specht, R.K. Williams and Y.J. Chen, *Physica C* **231** (1994) 80.
- [8] F. Tao, G.C. Che, Z.J. Zhou, Z.Zhao, C. Dong, S.L. Jia and H. Chen, *Mat. Lett.* **39** (1999) 305.

ナノロッドを含んだ超電導膜の組織 —高密度ナノロッドおよび厚膜化—

Structure of superconducting films containing nanorods

—higher nanorod densities or thicker films—

一瀬 中(電中研); Paolo Mele, 松本 要(九工大); 後藤剛輔, 向田 昌志(九大); 喜多 隆介(静岡大); 吉田 隆(名大); 堀井 滋(東大)

ICHINOSE Ataru(CRIEPI); MELE Paolo, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Univ.); GOTO Gousuke, MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo)

E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y 超電導膜(RE:希土類元素)を用いた超電導線材において磁場中の臨界電流密度(J_c)の向上が超電導機器への適用の1つの鍵となっている。そのため、超電導膜のナノ構造を制御して磁束の動きを止める人工ピンの研究が行われている。c軸相関ピンとしてREBa₂Cu₃O_y超電導膜に導入したBaZrO₃ナノロッドは、その作製方法の簡便さ、および、77K近傍の温度におけるピン力の強さから、実用テープ線材の人工ピンとして期待されている[1,2]。また、BaZrO₃と同様にBaを含んだペロブスカイト構造をもつBaSnO₃もREBa₂Cu₃O_y超電導膜の内部にナノロッドを形成することがわかった[3]。

BaZrO₃およびBaSnO₃ナノロッドともc軸相関ピンとして機能するが、添加量に対する超電導特性、特に、臨界温度(T_c)低下の度合いが異なるなど、材料の違いにより特性に差異が生じる。さらに、高密度BaZrO₃ナノロッドを導入した超電導膜において T_c の低下は著しいものの、 J_c の磁場角度依存性からナノロッドは依然としてc軸相関ピンとして機能している。しかし、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた断面観察からではナノロッドの構造はよく分らない[4]。

2. 実験方法

高密度ナノロッドの試料は約10wt%のBaZrO₃を添加したErBa₂Cu₃O_y材料のターゲットを用いてPLD法により作製した。基板温度は730°C, 400mmTorrである。膜厚は約300nmとした。厚膜化の試料は3wt% BaZrO₃, 3wt% BaSnO₃, 4wt% BaSnO₃を添加したYBa₂Cu₃O_y材料のターゲットを用いてPLD法により作製した。基板温度は800°C, 酸素濃度は200mmTorrである。膜厚は約1μmとした。

作製した超電導膜はマイクロサンプリング法によりFIB装置を用いて薄片化され、TEM観察用試料を得た。

3. 結果および考察

図1に典型的な高密度BaZrO₃ナノロッドを含んだ超電導膜の断面TEM像を示す。BaZrO₃ナノロッドは形成しているように観られるが、ナノロッドとマトリックスの界面が不明瞭なためにナノロッドの構造を明確に確認することは困難である。これは、電子ビームの入射方向にナノロッドが重なったためと推測されるが、断面TEMからは正確なことは分らない。そこで、高密度ナノロッドを含んだ超電導膜の平面TEM観察を行った結果を図2に示す。図2より直径約10nmのナノロッドが一様に分散しており、ナノロッドの一部は擬似的な三角格子を形成している。図2に形成された三角格子の一例を白線で示した。高密度ナノロッドの場合でも、ナノロッド径は低密度の場合とほとんど同じであった。さらに、三角格子を形成していることから、各ナノロッドは何らかの反発力が相互に働いていることが示唆された。

また、膜厚が300μm程度より厚くなると、BaZrO₃ナノロッドは曲がるのが断面TEMでしばしば観察されている。この試料の平面TEM観察を行うことにより、ナノロッド構造を3次元的にとらえられた。その結果、ナノロッドはある点を中心に四方に広がって成長し、その構造がいくつも繋がっていることが

分った。さらに、BaZrO₃とBaSnO₃との材料の違いによる構造の変化も平面TEM観察を行うことで明瞭に分った。

参考文献

1. M. Mukaida, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 30 (2005) p.L953
2. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Tech. 20 (2007) p.244
3. K. Yamada, et al.: Extended Abstracts of JSAP Autumn Meeting, Vol. 68, No. 1 (2007) p.287
4. A. Ichinose, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.133

謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業の一環として行われたものである。

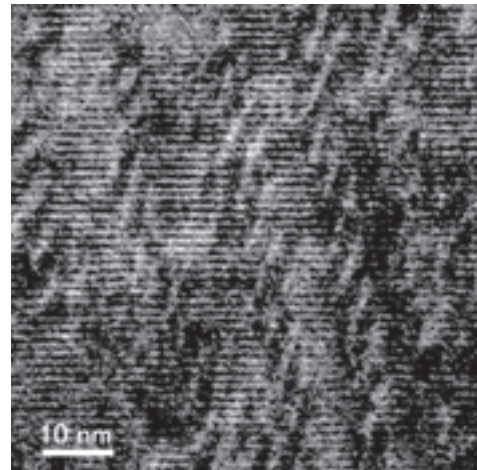


Fig.1 Cross-sectional TEM image of the superconducting film with high-density nanorods

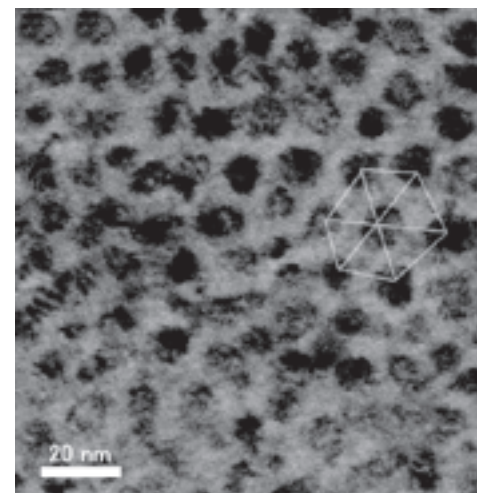


Fig.2 Plan-view TEM image of the superconducting film with high-density nanorods

ナノロッド形成におけるペロブスカイト構造の重要性

向田昌志; 甲斐英樹; 山田和広; 寺西亮; 久恒善美; 森信幸 (九州大学、JST)、新海優樹 (住友電工)、一瀬中 (電力中央研究所、JST)、松本要 (九州工業大学、JST)、吉田隆 (名古屋大学、JST)、堀井滋 (東京大学、JST)、喜多隆介 (静岡大学、JST)

M. Mukaida, H. Kai, K. Yamada, R. Teranishi, Y. Hisatsune, N. Mori (Kyushu-U), Y. Shingai (SED), A. Ichinose (CRIEPI), K. Matsumoto (KIT), Y. Yoshida (Nagoya-U), S. Horii (u-Tokyo), R. Kita (Shizuoka-U)

E-mail: mukaida@zaiko.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

今日、超伝導体の臨界電流密度向上のため、膜中へのピンニングセンター導入に注目が集まっている¹⁾。我々は以前より、BaSnO₃ や BaZrO₃ バッファ層、BaSnO₃-YBCO、BaZrO₃-YBCO 多層膜を用いて、超伝導特性の向上を目指してきた。また、YBCO 膜よりも高い特性が得られる高品質 ErBCO 膜²⁾にもこれらを適用し BaZrO₃-ErBCO 膜の作製と評価、BaZrO₃ 分散導入 ErBCO ターゲットによる BaZrO₃ ナノパーティクル入 ErBCO 膜を作製し、その表面抵抗の低減³⁾を報告してきた。特に、人工ピンニングセンターとして単純ペロブスカイト構造の BaZrO₃ の導入は簡便かつ効果的なため、注目⁴⁾を集めている。一方、我々は、非ペロブスカイト系材料 (BaNb₂O₆、BaWO₄) を人工ピンニングセンターとして導入し、BaZrO₃ 同様ナノロッドが得られることを報告してきた。これらの材料は母材のペロブスカイト系超伝導体中において、その界面で大きな歪みが生じていると考えられる。

このような歪みが生じていると考えると、ナノロッドを形成しているかを、今回明らかにしたので、報告する。

2 実験方法

非ペロブスカイト系材料 (BaNb₂O₆、BaWO₄) を導入した ErBCO 薄膜はパルスレーザー蒸着法で作製した。ターゲットに正方タングステン構造の BNO1.5wt%、またはシーライト構造の BaWO₄ を 1.5wt% 添加した ErBCO 焼結体を用い、基板には SrTiO₃ (STO) を用いた。成膜温度を 730°C とし、レーザー周波数 1Hz で 60 分間成膜した。薄膜の配向性は X-線回折装置により評価した。作製した薄膜の組織観察には透過電子顕微鏡 (TEM) を使用した。また、組織観察時に走査透過電子顕微鏡により、組成分析も試みた。

3 結果と考察

図 1 に BNO1.5wt% 入れた Er123 ターゲットを用いて作製した BNO+Er123 膜の X-線回折パターンを示す。00 l ピークが強く出ていることから、 c -軸配向膜が成長していることがわかる。しかしながら、44° 付近に、これまで Er123 膜ではなかったピークが現れている。このピークは、BaNb₂O₆ の添加量に比例して大きくなることが確認された。ピーク位置から面間隔を計算すると 0.42nm ほどとなる。

この膜の断面透過電子顕微鏡像には、ナノロッドが確認された。図 2 に、このナノロッドのある領域の制限視野回折パターンを示す。母相の回折パターンよりも内側に小さなスポットが出ていることがわかる。このスポットは、図 1 に現れたピークに対応している。さらに、この領域の STEM 像から組成分析すると、ナノロッドのところは、Cu-poor となっているが、Er-poor となっていないことがわかった。すなわち、ここで形成されたナノロッドは導入した BaNb₂O₆ ではなく、ペロブスカイト系の BaEr_{1/2}Nb_{1/2}O₃ となっている可能性が高い。

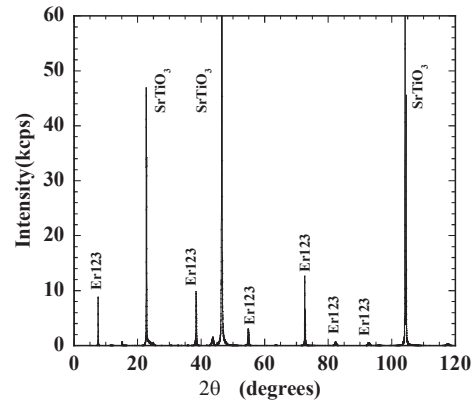


図 1: A typical XRD pattern of Er123 films with BaNb₂O₆.

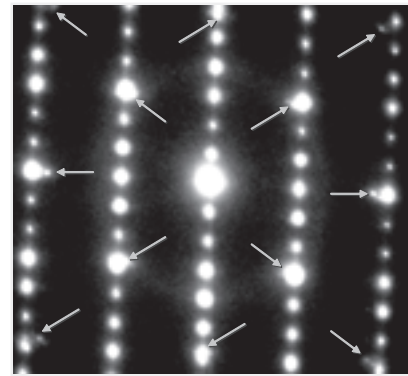


図 2: A selected electron diffraction of the Er123 films with BaNb₂O₆.

4 まとめ

酸化物高温超伝導体中に成長するナノロッドを解析した。その結果、ナノロッドは導入した正方タングステン構造を維持しておらず、導入した材料が母相の元素を一部取り込んでペロブスカイト構造形成して、内部で安定に存在していることがわかった。

参考文献

- [1] T. Oka, *et al.*, *Advances in Superconductivity* **4**, 651 (1992).
- [2] T. Ohazama, *et al.*, *Physica C* **412-414**, 1301 (2004).
- [3] M. Mukaida, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys. Express Letter* **43**, L1623 (2004).
- [4] J. L. Macmanus-Driscoll, *et al.*, *Nature Materials* **3**, 439 (2004).

異なる作製プロセスを用いた

BaZrO₃ 添加 Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y 薄膜の磁束ピンニング特性Flux pinning properties in Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y thin film with BaZrO₃ fabricated by various processes

尾崎 壽紀, 吉田 隆, 一野 祐亮, 原田 崇弘(名大工, JST), 高井 吉明(名大工); 松本 要(九工大工, JST); 一瀬 中(電中研, JST); 向田 昌志(九大工, JST); 堀井 滋(東大工, JST); 喜多 隆介(静大工, JST)

OZAKI Toshinori, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, HARADA Takahiro (Nagoya Univ., JST), TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.) ; MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech., JST); ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo, JST) ; MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ., JST); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ., JST)
E-mail: ozaki_t@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

磁場中における REBa₂Cu₃O_y (REBCO)膜の臨界電流密度(J_c)を向上させるために、ナノ組織制御により人工ピンニングセンター(APC)を導入する研究が世界中で行われている。その中でも BaZrO₃ (BZO)ナノロッドは REBCO 膜における $B//c$ 方向の磁束ピンニング特性を向上させることから、非常に有効な c 軸相関ピンとして注目されている。これまで我々は、低温成膜(LTG)プロセスを用いて LTG-SmBCO 薄膜を作製してきた。その結果、LTG-SmBCO 薄膜はナノサイズの low- T_c 相、高密度な転位が磁束ピンニング点として働くことにより $B = 5$ T まで実用化線材 NbTi と同等の J_c を示すことを報告してきた。^[1,2]そこで本研究では更なる磁場中 J_c 向上を目的として LTG-SmBCO 薄膜に BZO を添加することにより、LTG-SmBCO+BZO 薄膜を作製した。また、通常の PLD-SmBCO 薄膜に BZO を添加した PLD-SmBCO+BZO 薄膜を作製し、LTG-SmBCO+BZO 薄膜との磁束ピンニング特性の違いについても検討を行った。

2. 実験方法

PLD-SmBCO+BZO 薄膜は PLD 法(ArF エキシマレーザー: $\lambda=193$ nm)を用いて、MgO(100)基板上に基板温度(T_s) 850°C で作製した。また、LTG-SmBCO+BZO 薄膜は $T_s = 830^\circ\text{C}$ でシード層(Sm_{1.08}Ba_{1.92}Cu₃O_y)を作製し、その上に $T_s = 760^\circ\text{C}$ で BZO を添加した Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_y の超伝導層を作製した。なお、本研究で Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_y ターゲットに添加した BZO の混合量は 2 vol.%とした。

評価方法は、結晶性、配向性の評価は X 線回折装置(CuK α 線)を用いて $\theta / 2\theta$ 及び ϕ -scan 測定により行った。超伝導特性は直流四端子法を用いた。超伝導薄膜の微細組織観察は透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて断面 TEM 観察を行った。

3. 結果及び考察

図1(a)に PLD-SmBCO+BZO 薄膜、(b)に LTG-SmBCO+BZO 薄膜の断面 TEM 像を示す。PLD-SmBCO+BZO 薄膜、LTG-SmBCO+BZO 薄膜は、ともに BZO ナノロッドが確認できる。PLD-SmBCO+BZO 薄膜の BZO ナノロッドは直径が約 10 nm であり、 $B//c$ 方向にほぼ垂直に導入されている。一方、LTG-SmBCO+BZO 薄膜は全体的にロッドの径が小さく、 $B//c$ 方向に対して傾いて成長している。さらに、PLD-SmBCO+BZO 薄膜と比較してロッド長が短く、密度も高いことがわかる。この不純物の密度、サイズと成長温度の関係については、GaAs(100)基板上に InAs を成長させた場合、成長温度が低いほど密度が高く、サイズは小さくなることが報告されている^[3]。LTG-SmBCO+BZO 薄膜においても基板温度の低下が BZO の成長機構(特に、カイネティクス)に影響を及ぼしていると推察している。図 2 に PLD-SmBCO+BZO 薄膜、LTG-SmBCO+BZO 薄膜の 77 K, 5 T における J_c の磁場印加角度依存性を示す。比較のために PLD-SmBCO 薄膜、LTG-SmBCO 薄膜の J_c の磁場印加

角度依存性も示す^[4]。PLD-SmBCO+BZO 薄膜は $B//c$ 方向にピークが確認された。この $B//c$ 方向の J_c 向上は図 1(a)で示した BZO ナノロッドが c 軸相関ピンとして働いているためと考えられる。一方、LTG-SmBCO 薄膜は異方性の小さい J_c 特性を示し、更に $B//c$ 軸方向にブロードなピークが確認された。これは、微細に分散したナノサイズ low- T_c phase が等方的な磁束ピンニング点として働き、更に $B//c$ 方向に対して傾いたロッド状の BZO が磁束ピンニング点として働いたことによると考えられる。

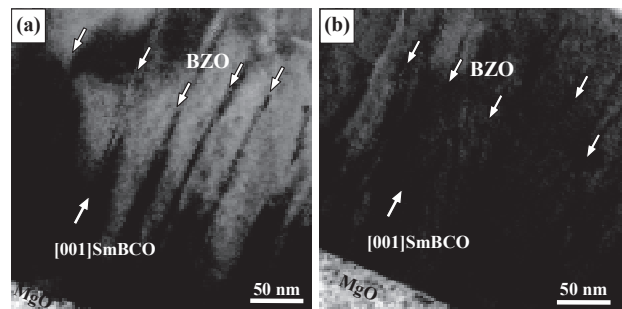


Fig.1 Cross-sectional TEM images of PLD-SmBCO+BZO film (a) and LTG-SmBCO+BZO film (b).

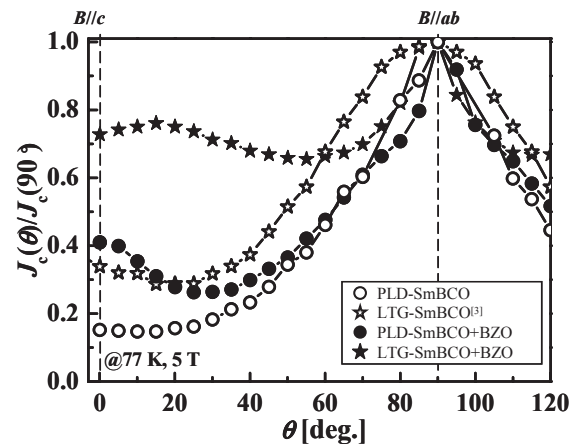


Fig.2 Field angular dependence of J_c in LTG-SmBCO films and PLD-SmBCO films.

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005)の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

1. Y. Yoshida et al., Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L11.
2. M. Miura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3078.
3. P. Chen et al., J. Vac. Sci. Technol. B 12 (1994) 2568.
4. M. Miura et al., J. Cryo. Soc. Jpn. 41 (2006) 428.

電力系統制御用 10MVA/20MJ SMES の実系統連系試験(概要)

Field test result of 10MVA/20MJ SMES for load fluctuation compensation (introduction)

長屋 重夫, 永田 達也, 平野 直樹, 野田 武利, 片桐 敏雄, 玉田 勉,
二條 義雄, 中林 寛明(中部電力);山根 実(三菱電機);石井 祐介(東芝)

NAGAYA Shigeo, NAGATA Tatsuya, HIRANO Naoki, NODA Taketoshi, KATAGIRI Toshio,
TAMADA Tsutomu, NIJO Yoshio, NAKABAYASHI Hiroaki(Chubu Electric Power),
YAMANE Minoru(Mitsubishi Electric), ISHII Yusuke(TOSHIBA)

E-mail: Hirano.Naoki@chuden.co.jp

1. はじめに

超電導を利用した電力貯蔵システムであるSMES (Superconducting Magnetic Energy Storage system)は電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵し、そのエネルギーを電力系統のさまざまな用途に使用できる。このSMESは、超電導コイルを用いて、大電力を瞬時に出し入れでき、繰り返し使用に強いなど、これまでの技術には見られない、優れた特徴を有しており、電力ネットワークの動揺を抑えることによって、高品質な電気をお客さまのもとへお届けすることができ、電力ネットワーク制御用として極めて有望な機器である。

今回、電力系統制御用SMESを実際に製作し、古河電気工業株式会社殿の協力を得て、古河日光発電株式会社殿の細尾発電所(所在地:栃木県日光市)において出力1万kWのSMESを設置し、実系統へ連系してSMESの信頼性を確認している。そのSMESの実系統連系試験について概要を報告する。

2. SMES実系統連系試験の目的

超電導電力貯蔵システムを用いた電力系統制御技術開発が、1991年度から資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして進められてきた。2004年度から2007年度までの4年間の期間で、電力系統にSMESを連系させて電力系統制御機能を検証することを目標にした第3期のプロジェクト「超電導電力ネットワーク制御技術開発」が、中部電力株式会社、九州電力株式会社、財団法人国際超電導産業技術研究センターの共同により実施されている。SMESを用いた10万kW級電力ネットワーク制御システム技術を確認するために、要素技術開発およびシステムコーディネーション技術開発と並行して1万kW級(貯蔵エネルギー20MJ(メガジュール)級)SMESを製作し、負荷の変動による電力系統への影響を低減させる機能や発電機が停止するなどの外乱により電力系統が不安定となることを防ぐ機能を検証することを目的としている。特に、SMESトータルシステムの性能は、工場での試験による要素機器毎の性能検証試験のみでなく、要素機器をシステムとして組合せ、その効果を実地で確認するために、実系統に連系して試験を行っている。これにより、工場試験では検証できない耐久性や制御応答性、監視機能等を検証・評価し、SMESトータルシステムとしての完成度が高められると考えている。

3. 実系統連系試験の構成

Fig.1の試験サイト系統構成に示す細尾発電所11kV母線に接続される分岐線の電流、電圧を計測し、変動負荷である工場の有効電力、無効電力の変動を補償するように電力系統制御用SMESを運転させ、負荷変動の補償の効果をj確認している。また、SMESの構成は Fig.2のSMES鳥瞰図のように配置されている。

4. 実系統連系試験(負荷変動補償動作試験)

Fig.3の有効電力の負荷変動補償結果例に示すように、変動負荷に応じてSMESが有効電力を補償したことにより、細尾発電所の66/11kV変圧器の負荷変動が平坦になってい

る状況が確認できる。

5. 今後の展開

将来、大都市での電源立地が困難な状況において、益々遠距離化する電源立地点からの長距離送電の安定性を図るための設備等とSMESの最適な融合を図り、電力系統制御技術に寄与する技術として一層の技術開発を展開するとともに、次世代線材によるコイル開発などSMESの低コスト化に向けた技術開発と、電力機器に求められる高い信頼性の検証を推し進めていくことが重要であると考えている。

本研究は、NEDOの委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。

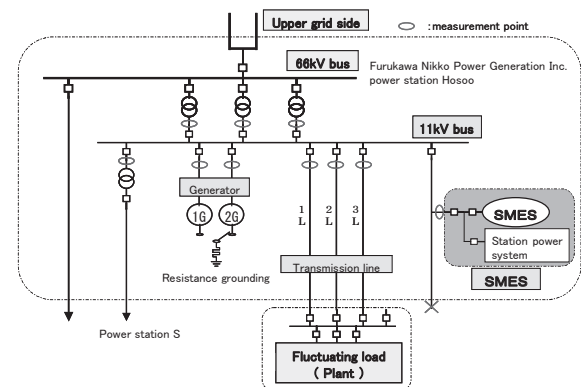


Fig.1 Power system diagram at the field test site

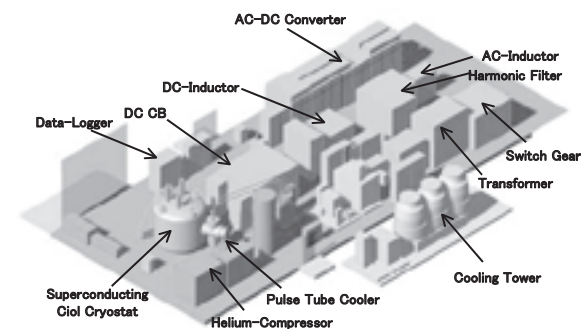


Fig.2 Bird's-eye view of the SMES

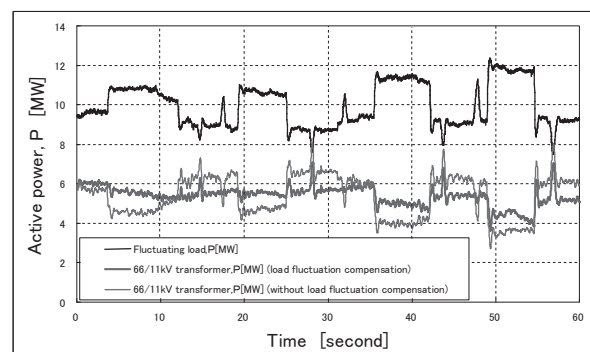


Fig.3 Load fluctuation compensation of the SMES

電力系統制御用 10 MVA / 20 MJ SMES の実系統連系試験(コイルシステム)

Field test result of 10 MVA / 20 MJ SMES for load fluctuation (Coil system)

石井 祐介, 小田島 渉, 金井 芳治, 山下 康博, 嶋田 守, 平野 篤司郎, 川島 秀一, 野村 俊自(東芝);
片桐 敏雄, 平野 直樹, 永田 達也, 長屋 重夫(中部電力)

ISHII Yusuke, ODASHIMA Wataru, KANAI Yoshiharu, YAMASHITA Yasuhiro, SHIMADA Mamoru,
HIRANO Tokushiro, KAWASHIMA Shuichi, NOMURA Shunji (TOSHIBA);

KATAGIRI Toshio, HIRANO Naoki, NAGATA Tatsuya, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)

E-mail: E-mail: yusuke1.ishii@toshiba.co.jp

1. はじめに

日光超電導試験センターの電力系統制御用 10 MVA / 20 MJ SMES のうち、超電導コイルシステムの製作、及び実系統連系試験の結果について報告する。本コイルシステムは、負荷変動補償制御、及び系統安定化制御のシステム検証のために製作、実系統連系試験を行ったものである。

2. 超電導コイルシステム諸元

超電導コイルシステムの諸元を Table 1 に示す。超電導コイルは、NbTi ラザフォード導体、液体 He 浸漬冷却方式を採用している。冷凍機は、定常時の熱負荷を冷却する GM 冷凍機、及び GMJT 冷凍機を搭載しているほか、昼夜連続運転時の交流損失による発熱を冷却するための大型冷凍機を搭載している。また、超電導コイルの保護装置には、機械式直流遮断器、保護抵抗器 (4.2 Ω、減衰時定数 5 秒) を使用している。

3. 工場試験

超電導コイル冷却後に、絶縁性能確認(耐電圧試験: AC 5.25 kV - 1 min)、通電試験を実施し、健全性を確認した。定格 1350 A に対し、最大 1440 A までコイルトレーニングを実施した。コイルトレーニング時には、1350 A までに 7 回、1440 A までに 12 回のクエンチ(トレーニング)が発生した。さらにその後、定格電流にて、5 時間の電流保持を行い、異常のないことを確認した。通電試験時の電流波形を Fig.1 に示す。工場試験後、超電導コイルを室温まで昇温して日光超電導試験センターに輸送した。昇温・再冷却したため、現地での初期通電時にも、コイルトレーニングを実施した。トレーニング後は、クエンチは発生していない。

4. 実系統連系試験

日光超電導試験センターに据付けられているコイルシステムの外観写真を Fig.2 に示す。調整試験実施後、1 MW の入出力運転を行い、SMES システムの健全性確認を行った。その後、実系統に合わせた負荷変動補償試験を行った。負荷変動補償試験時のコイル電流波形、及びコイル電圧波形を Fig.3 に示す。コイル電流、及びコイル電圧ともに、実系統の負荷変動に追従し変化している。その結果、コイルクエンチなどは発生せず、超電導コイルシステムの健全性を確認することができた。また、日中 8 時間程度の運転では、大型冷凍機を使用せず、小型冷凍機のみで運転することができた。

5. まとめと今後の予定

日光超電導試験センターにおいて、実系統連系試験を実施し、超電導コイルシステムの健全性を確認した。今後、大型冷凍機を用いた連続運転試験を計画している。

6. 謝辞

本研究は、NEDO委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。

Table 1 Main parameter of SMES coil

Total inductance	21.1 H
Operation current	1350 A
Stored energy	19 MJ
Size	φ 3120 × H 3855
Maximum magnetic field	4.4 T

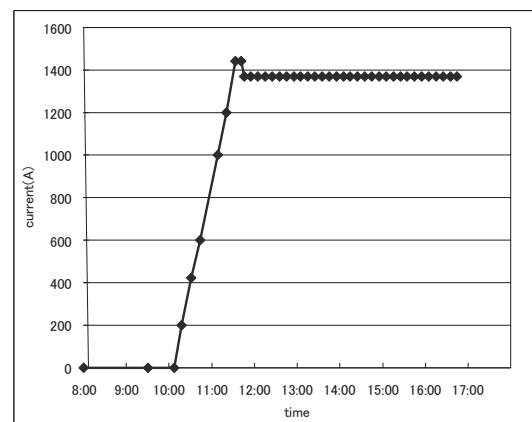


Fig.1 Waveform of rated load test



Fig.2 Photograph of the coil system

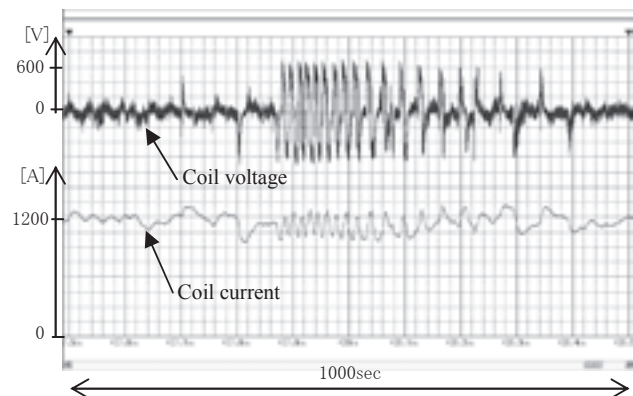


Fig.3 Test result of load fluctuation compensation

電力系統制御用 10MVA/20MJ SMES の実系統連系試験(電源システム)

Field test result of 10MVA/20MJ SMES for load fluctuation compensation (Power Supply System)

長屋 重夫, 永田 達也, 平野 直樹, 野田 武利, 片桐 敏雄, 玉田 勉,
 二條 義雄, 中林 寛明(中部電力); 山根 実(三菱電機); 石井 祐介(東芝)
 NAGAYA Shigeo, NAGATA Tatsuya, HIRANO Naoki, NODA Taketoshi, KATAGIRI Toshio,
 TAMADA Tsutomu, NIJO Yoshio, NAKABAYASHI Hiroaki(Chubu Electric Power),
 YAMANE Minoru(Mitsubishi Electric), ISHII Yusuke(TOSHIBA)
 E-mail: Yamane.Minoru@ah.MitsubishiElectric.co.jp

1. 電源システムの構成

系統連系試験用の電源システムは、将来の10万kW級実用化システムを念頭に置き、そのシステム構成の一部を製作し、要素技術を検証するものであり、構成を Fig.1に示す。その中心部分となるAC/DC電力変換装置は、電圧型インバータとチョッパ回路で構成している。実用化システムでは変換装置の多重化により電源システムの高調波電流を軽減する構成としているが、今回の実系統連系試験用の電源システムでは、交流入力側に高調波フィルタを設置して対策している。

AC/DC電力変換装置の概観および、主要諸元を Fig.2に示す。

2. 電源システムの試験

電源システムの試験としては下記の試験を実施し、電源システムの基本動作を確認すると共に、将来の10万kW級実用化システムの効率等に関する基礎データを取得した。

工場	<ul style="list-style-type: none"> ・交直変換装置の定格試験 ・制御システム試験(主回路ミニモデル使用)
現地	<ul style="list-style-type: none"> ・電源システム単体試験 ・超電導コイルとの組合せ試験 ・基本性能確認試験 ・系統連系試験

本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。



項目	インバータ側	チョッパ側
装置定格容量	10MVA	20MVA
適用素子	GCT	GCT
適用素子電圧	6kV	6kV
適用素子電流	6kA	6kA
変換器構成	1段多重3相インバータ	2並列チョッパ回路
アーム構成	3レベル構成	3レベル構成
冷却方式	純水冷却	純水冷却

Fig. 2 Photo and Parameter of AD/DC Converter

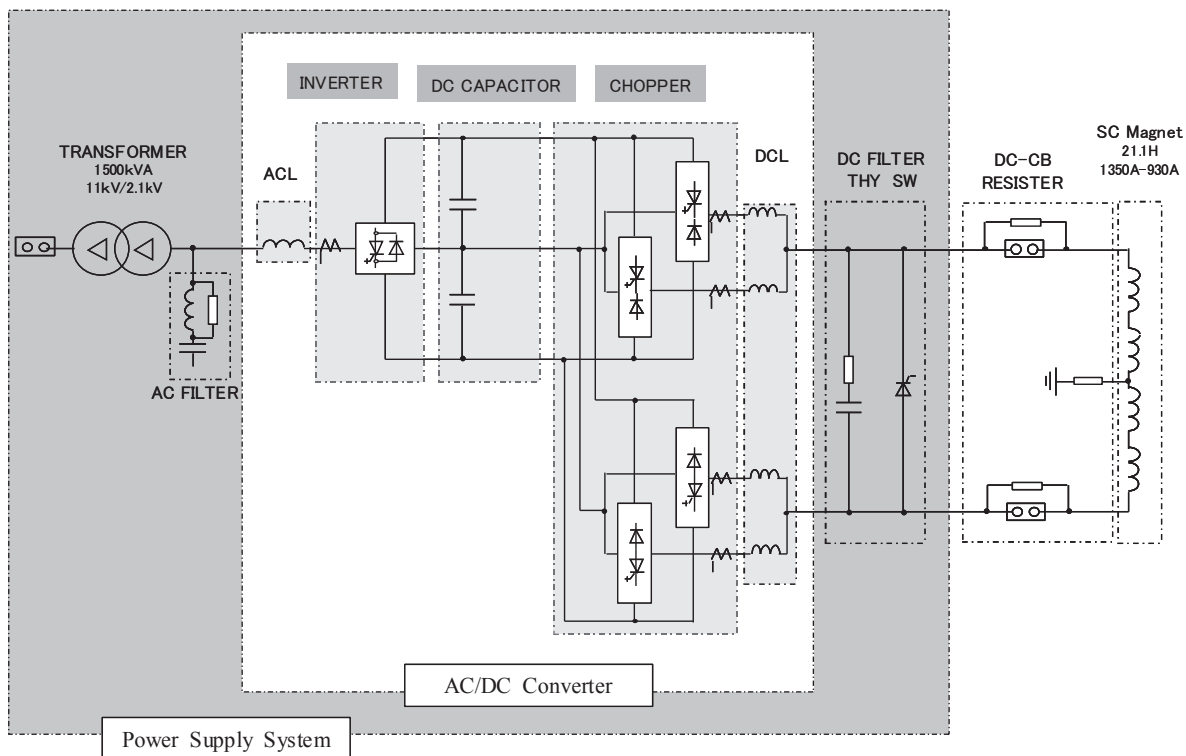


Fig.1 Configuration of Power Supply System

超電導電力貯蔵用 7 T 電磁力平衡モデルコイルの開発—クエンチ特性— Development of a 7-T Force-Balanced Model Coil for SMES -Quench Properties-

田中規博, 野村新一, 粕谷幸司, 坪井謙児, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一 (東工大)

TANAKA Norihiro, NOMURA Shinichi, KASUYA Koji, TSUBOI Kenji,
TSUTSUI Hiroaki, TSUJI-IIO Shunji, SHIMADA Ryuichi (Tokyo Tech)

E-mail: shin@nr.titech.ac.jp

1 7 T 電磁力平衡モデルコイル

SMESには発生する電磁力の大きさからコイル支持が困難になるという問題がある。それに対して、発生応力を平準化させることでコイル支持を容易にする形状を持つ電磁力平衡コイルの開発を行っている。[1]本講演では最大発生磁場 7 T を目標とする電磁力平衡モデルコイルの製作に関する技術と、常温までの昇温を挟んだ 2 回の液体ヘリウム浸漬冷却による通電試験結果を報告する。

2 コイル製作

図 1 に製作した 7 T 電磁力平衡モデルコイルを示す。使用した超電導線は外径 1.17 mm の NbTi 線であり、コイル巻枠はアルミニウム合金製である。モデルコイルの臨界電流値は 552 A であり、その時の最大磁束密度は 7.1 T, 磁気エネルギーは 270 kJ となる。同一規模のソレノイドやトロイダル磁界コイルでは最大発生磁場 7 T を実現するために補強材が必要となるが、電磁力平衡コイルでは外部電磁力支持材を必要とせず、超電導線自体の引張応力で電磁力を支持する巻線構造とした。コイル巻線作業は二人一組で手巻き作業で行い、総ポロイダル巻数 10584 ターンを約 4 ヶ月、実働 500 時間程度で完成させた。

コイル製作の上で特に留意した点は以下の 2 つである。1 つ目は電磁力平衡コイルのヘリカル巻線軌道に関する問題である。図 2 は電磁力平衡コイルの軌道と巻線作業に用いた治具を示している。電磁力平衡コイルはトロイダル方向の曲率が反転するため巻線作業中に張力をかけると NbTi 線が最短軌道へ移動してしまう。そこで、ゴム製のスペーサーと粘土製のストッパーを用いて NbTi 線を固定しながら巻線作業を行った。もう 1 点は、巻線間の隙間の処理についてである。各層の巻線間に隙間を残したまま作業を進めるとコイル全体の乱れにつながるため、各層の巻線作業終了時に NbTi 線の隙間をエポキシパテで埋め込み、巻線各層を整えつつ巻線作業を進めた。

3 クエンチ特性

第 1 次通電試験は 2 月 1 日～6 日の 6 日間、第 2 次通電試験は 9 月 10 日～19 日の 9 日間に行われ、合計で 59 回の励磁試験を行った。コイルは液体窒素による予冷を経て液体ヘリウムで浸漬冷却された。励磁速度を 1 A/s とし、磁束密度 7 T の発生を目標としたトレーニング試験を行った。

図 3 に 7 T 電磁力平衡モデルコイルのクエンチ特性を示す。第 1 次通電試験の初期通電におけるクエンチ電流値はコイル臨界電流値の 54 % に相当する 293 A で、3.8 T を発生した。33 回目の通電でクエンチ電流は臨界電流値の 76 % 相当の 419 A まで向上し、5.4 T までの励磁に成功した。第 2 次通電試験における最初期の通電 (通算 34 回目) ではクエンチ電流が 380 A になり、33 回目の結果より 10 % 程度低下したが、数回の通電で前回の最高値を上回り、通算 54 回目の通電において臨界電流値の 84 % 相当の 461 A, 5.9 T までの励磁に成功した。

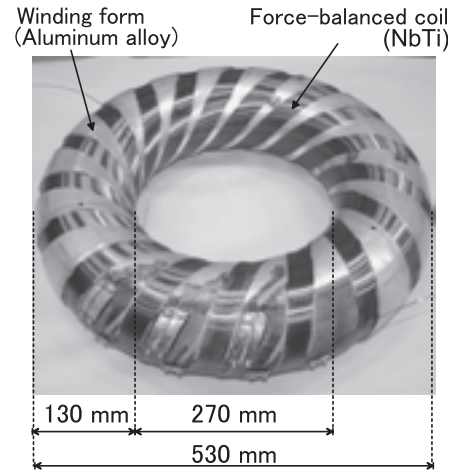


Fig. 1. 7-T force-balanced model coil

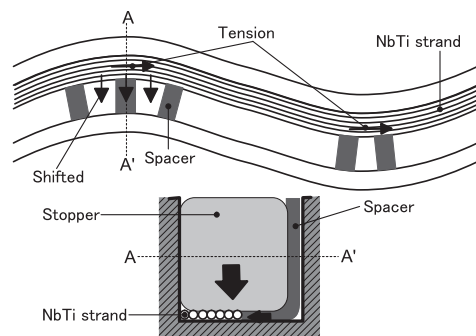


Fig. 2. Schematic illustrations of the helical winding techniques

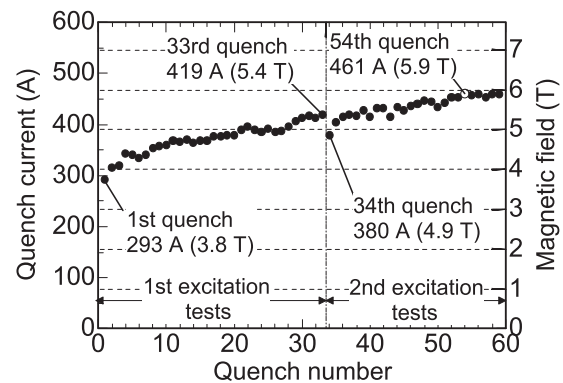


Fig. 3. Training histories of the excitation tests

参考文献

- [1] S. Nomura et al., "Development of a One Tenth Sized Model Coil for 100-MJ Class SMES using Force-Balanced Coil Concept" IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 No. 2, pp. 1998–2001.

超電導電力貯蔵用 7 T 電磁力平衡モデルコイルの開発—繰り返し通電特性— Development of a 7-T Force-Balanced Model Coil for SMES -Charging-Discharging Test Results-

粕谷幸司, 野村新一, 田中規博, 坪井謙児, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一 (東工大)

KASUYA Koji, Nomura Shinichi, TANAKA Norihiro, TSUBOI Kenji,
TSUTSUI Hiroaki, TSUJI-IIO Shunji, SHIMADA Ryuichi (Tokyo Tech)

E-mail: kasuya.koji@torus.nr.titech.ac.jp

1 はじめに

電磁力平衡コイルの SMES 用超電導コイルとしての適性を実証するため、筆者らは 7 T 電磁力平衡モデルコイルの開発を行った。[1] モデルコイル開発の詳細に関しては講演番号 1B-a04 を参照されたい。このモデルコイルを用い、充電・貯蔵・放電の SMES を模擬した一連の通電試験を行い、超電導特性の劣化を伴わず安定した繰り返し通電が可能であるかを確認する。また通電損失を評価し、電磁力平衡コイルを用いた SMES を検討する際の基礎データ取得を目指した。

2 試験方法

コイル電流を電流変化率 20 A/sec (0.25 T/sec) で台形波状 (図 1) に変化させることで SMES 運転の模擬を行った。最大電流値 I_{max} 、最小電流値 I_{min} 及び 1 サイクルあたりの時間 T を表 1 に示す。

繰り返し通電試験において発生する損失は、液面計により液体ヘリウムの蒸発量から評価した。全損失のうち定常損失を分離する目的で、2 時間の一定通電を行い損失を測定した (図 2)。通電による損失増加分はジュール損失が支配的と考え、2 次近似を図 2 中破線として示した。またアルミ合金製巻棒への誘導電流を評価するためにロゴスキーコイルおよび 1 ターンコイル (トロイダル方向・ポロイダル方向) を設置した。

なおモデルコイルでは、直径 1.17 mm (絶縁前 1.07 mm)、フィラメント径 24 μ m、フィラメント数 740 本、銅比 1.66 の NbTi 線を使用している。

3 試験結果

表 1 における各パターンともに連続 50 サイクルの繰り返し通電を行った。各パターンにおける繰り返し通電ではクエンチは発生しなかった。特に磁束密度を 0 T から 5 T まで変化させるパターンは通算 100 サイクル以上 (連続 50 サイクルを 2 回含む) の繰り返し通電に成功している。

図 3 に各通電パターン 1 サイクルで発生する交流損失を示す。すべての通電パターンにおいて、0 A 一定通電時の定常損失を差し引いた値である。またエラーバーの下限は I_{max} 一定通電時の定常損失を差し引いた値である。図中破線の近似曲線は、交流損失が電流変化率でのみ決定されると仮定し、直線近似とした。

今回の測定では、磁束密度が 0 T から 2 T に変化する通電パターンと 3 T から 5 T に変化する通電パターンでの交流損失に有意な差は測定されていない。このことは測定された交流損失は最大磁場には依存せず、磁場変化量によって決まっていることを示唆している。交流損失の大部分はアルミニウム合金製の巻棒に発生する渦電流損失によるものと予想されるが、今後はロゴスキーコイルや 1 ターンコイルの出力信号を分析し、NbTi 線で生じるヒステリシス損失、結合電流損失及びコイル巻棒で発生する渦電流損失を詳細に評価していく予定である。

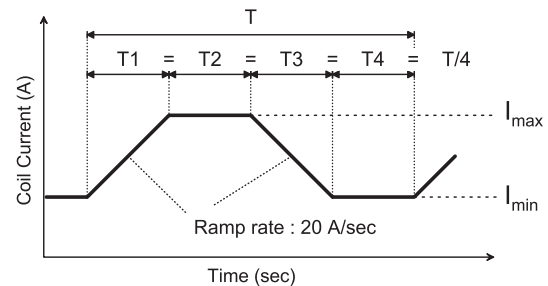


Fig. 1. Schematic diagram of the current waveform

Table 1. Conditions of the charging-discharging tests

case	I_{max}	B_{max}	I_{min}	B_{min}	T
1	0 A	0 T	156 A	2 T	32 s
2	0 A	0 T	234 A	3 T	48 s
3	0 A	0 T	390 A	5 T	80 s
4	234 A	3 T	390 A	5 T	32 s

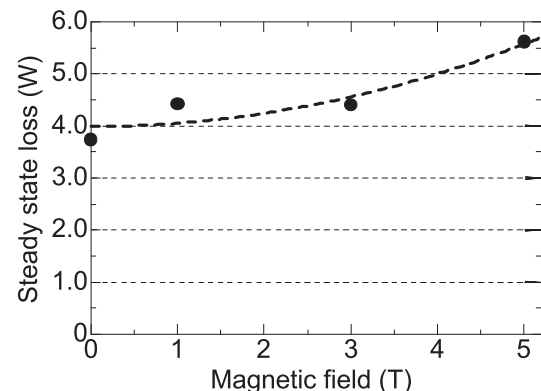


Fig. 2. Steady state loss as a function of magnetic field

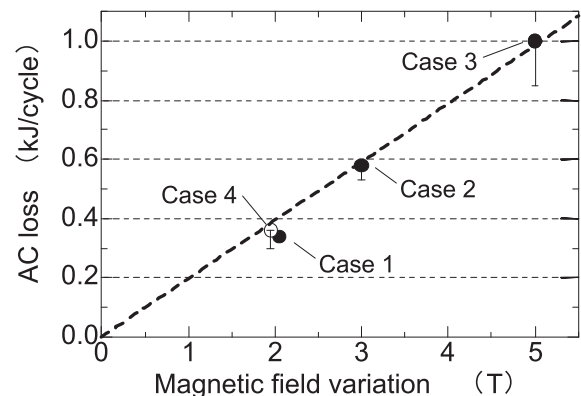


Fig. 3. AC loss dependence of the magnetic field variation

参考文献

- [1] S. Nomura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, pp. 1911-1914.

電磁力平衡コイルのヘリカル巻線技術とトレーニング特性 Helical Winding Techniques and Training Histories of the Force-Balanced Coils

野村新一, 粕谷幸司, 田中規博, 坪井謙児, 筒井広明, 飯尾俊二, 嶋田隆一 (東工大)
 NOMURA Shinichi, KASUYA Koji, TANAKA Norihiro, TSUBOI Kenji,
 TSUTSUI Hiroaki, TSUJI-IIO Shunji, SHIMADA Ryuichi (Tokyo Tech)
 E-mail: shin@nr.titech.ac.jp

1 超電導電磁力平衡コイルのヘリカル巻線技術

大規模 SMES の課題の一つに超電導コイルに発生する強大な電磁力の問題がある。電磁力平衡コイル (FBC: force-balanced coil) は、トロイダル磁界コイルとソレノイドを一体としたヘリカル型ハイブリッドコイルであり、エネルギー貯蔵に必要な電磁力支持材量を大幅に低減可能にするコイルである。これまで著者らは、NbTi 線を用いた手巻き製作のモデルコイルを複数開発し通電試験を行ってきた。

図 1 は、応力最小化の実証を目的とした実験コイル (以下、モデルコイル A) であり、互いにトロイダル方向を反対に巻かれた内層外層の電磁力平衡コイルで構成されている [1]。このコイルは内層外層コイルをそれぞれ別電源で励磁することで様々なコイルの磁場分布を模擬できる。電磁力をコイル巻枠で支持する構造とするため、コイル巻線はエポキシ樹脂 (スタイキャスト 1266/A, B) を用いて巻枠と一体化されている。

図 2 は、大規模 SMES 用超電導コイルとしての適正を実証するために開発した電磁力平衡コイル (以下、モデルコイル B) である [2]。電磁力を NbTi 線自体の引張応力で支持する構造とするため、エポキシ含浸やステンレス線など NbTi 線への補強材を使用せずに製作されている。なお、モデルコイル A および B とともに、直径 1.17 mm の同じ NbTi 線を使用している。

2 超電導電磁力平衡コイルのトレーニング特性

通電試験は液体ヘリウムの浸漬冷却により行われた。モデルコイル A および B の負荷特性とトレーニング特性を図 3 にまとめる。

モデルコイル A における内層および外層ヘリカルコイル単独通電時の臨界電流値は約 1400 A であり、最大磁束密度はそれぞれ 3.2 T, 3.3 T である。初期クエンチ電流は、内層コイルで臨界電流値の 36%, 外層コイルで 23% であったが、トレーニング効果により内層コイルで 72% まで、外層コイルで 62% まで向上した。

一方、モデルコイル B の臨界電流値は 552 A であり、最大磁束密度は 7.1 T である。初期クエンチ電流は臨界電流値 53% 相当の 293 A であったが、トレーニング効果により 84% 相当の 461 A まで向上し、5.9 T までの励磁に成功している。

モデルコイル A および B はそれぞれ 2 回、1 回の昇温を経験しているが、再冷却時においてクエンチ電流の大幅な低減は伴わず、トレーニング効果の履歴が十分に保持されていることが確認されている。

参考文献

- [1] S. Nomura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, no. 2, pp. 1852–1855.
 [2] S. Nomura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, No. 2, pp. 1998–2001.

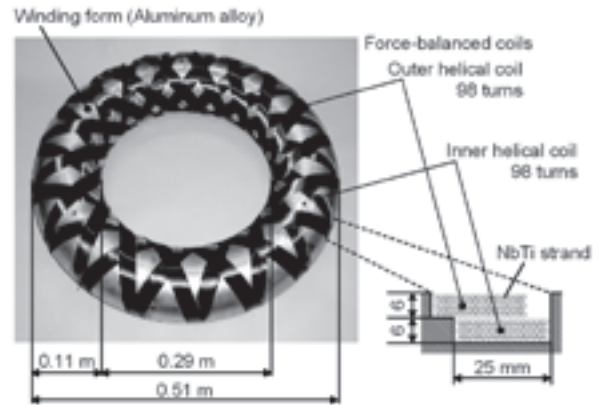


Fig. 1. Model coil for the demonstration of the stress-minimized FBC concept (Model coil A).

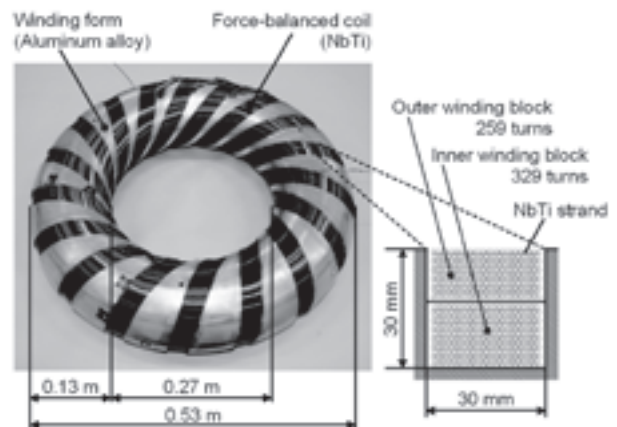


Fig. 2. Model coil for the feasibility study on large-scale SMES (Model coil B). The inner and outer winding blocks are connected in series.

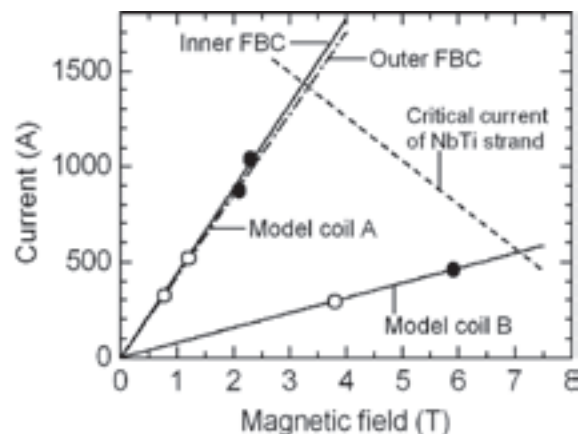


Fig. 3. Excitation test results compared with the load lines of the model coils. The white and black circles indicate the first and maximum quench currents, respectively.

MOCVD-YBCO 導体の電磁機械特性から見た SMES コイルの蓄積可能エネルギーならびに最適運転温度に関する検討

A Study on Possible Stored Energy and Optimal Operating Temperature of SMES Coil Based on Magnetomechanical Properties of MOCVD-YBCO Conductor

東川 甲平, 中村 武恒, 菅野未知央 (京大); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫 (中部電力)

HIGASHIKAWA Kohei, NAKAMURA Taketsune, SUGANO Michinaka (Kyoto University);

SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: kohei@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 平成 16 年度より実施されている NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として、我々は MOCVD-YBCO 線材を用いた電力系統制御用 SMES を検討している^[1]。本研究では、同線材における電流密度・電界特性の温度・磁界・磁界印加角度・機械的ひずみ依存性を考慮した SMES コイルの最適設計^[2]を行い、電磁特性ならびに機械特性の観点から同コイル蓄積可能エネルギーの制約因子を探る。また、上記両特性に優れる線材の能力を最大限に活用するためには、運転温度最適化が極めて有効となることを示す。

2. 蓄積可能エネルギーの制約因子 トロイダルコイルの要素コイルの数・中心からの距離・内半径・外半径・高さを設計変数とし^[1]、以下の制約条件下で使用線材長の最小化を行った^[2]。

条件 (I): 最大電界 (E_{\max}) $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 以下

条件 (II): 全フロー損 (Q) 100 W 以下

条件 (III): 最大フープ応力 (σ_{\max}) 1 GPa 以下

運転温度を 20 K として、様々な蓄積エネルギー (W) に対して求めた必要線材長 (l) を Fig. 1 に示す。同図から、 30 MJ 程度より小さな規模の SMES コイルでは条件 (I) 又は (II) に関連する電磁特性が、逆にそれより大きなコイルでは条件 (III) に関連する機械特性が制約因子になることがわかる。さて、いま運転温度を広く設定できるという高温超電導機器のメリットに着目すれば、さらに重要な知見が得られる。それは、前者では運転温度を下げることで電磁特性が向上すれば使用線材長をさらに低減できる余地があり、逆に後者ではこれ以上の使用線材長の低減は不可能であるものの運転温度を高温化できる可能性が残されていることである。換言すれば、この境界に対応する同図中のクロスポイント、すなわち 30 MJ コイルの 20 K 運転とは、コイルの製作コストを究極に低減した上で、冷却コストも極力低減された形態といえる。以上から、SMES コイルでは規模によって異なった運転温度を選定すべきという考え方が生まれる。

3. 運転温度の最適化 ある蓄積エネルギーを実現する SMES コイルにおいて、線材に働くフープ応力は運転温度によって変化しない。従って、まず条件 (III) において使用線材長の最小化を行い、その後に条件 (I) かつ (II) を満足する最高の運転温度を求めることは、コイルの製作コストの低減を究極に行った上で、さらに冷却コストを極力低減するという画期的な設計手法に成り得る。これは、条件 (I) あるいは (II) に関連する電磁特性と条件 (III) に関連する機械特性の双方に関して、線材の潜在能力を最大限に活用することと等価である。上記の手順により求まる運転温度を最適運転温度 (T_{opt}) と定義し、様々な蓄積エネルギーに対して得たものを Fig. 2 に示す。同図から、確かに SMES コイルの規模によって最適運転温度がそれぞれに定まる様子がわかる。具体的には、蓄積エネルギーの大きなコイルほど高い運転温度を選定すべきとなる。また、同図には、線材の臨界電流を様々に想定した場合の結果も示している。当然、高い臨界電流を有する線材を用いる場合ほど高温運転が妥当となる。さらに、本結果からはもう一つ重要なことを読み取ることができる。それは、運転温度に強い制約 (例えば液体水素冷却に

よる 20 K) が存在する場合、逆に要求される線材の性能を求められることである。例えば、 1 GJ の SMES コイルを 20 K で冷却する場合に必要な線材の臨界電流は、 77 K 自己磁界下で 140 A 強で十分となる可能性がある。このように、本手法によれば機器設計から見た線材開発へのフィードバックも可能となる。講演当日には、もう少し尤度を持った制約条件での結果についても報告する予定である。

謝辞 本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO 線材は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。また、高温超電導コイルの設計コードは、科学研究費補助金 (特別研究員奨励費、課題番号: $18 \cdot 2788$)、ならびに関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団による助成を受けて開発したものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 17, no. 2 (2007) pp. 1990-1993.
 [2] K. Higashikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. accepted for publication (presented at MT20).

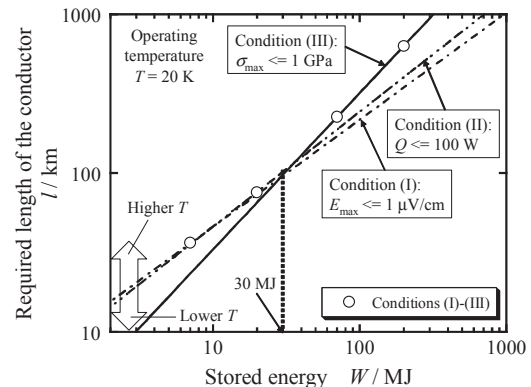


Fig. 1. Required length of the conductor as a function of stored energy.

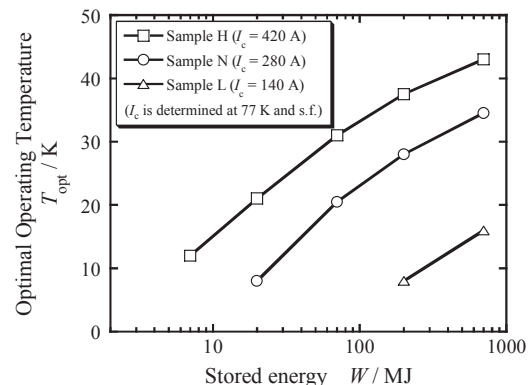


Fig. 2. Optimal operating temperature as a function of stored energy. The variation is obtained for different conductor's critical current.

高温超電導誘導/同期機の全超電導化に関する検討

Study on fully superconducting HTS induction/synchronous machine

中村 武恒, 廣谷 迪, 長尾 和昌 (京大)

NAKAMURA Taketsune, HIROTANI Yu, NAGAO Kazumasa (Kyoto Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、高温超電導 (High T_c Superconductor: HTS) 線材をかご型 2 次巻線に適用した HTS 誘導/同期回転機 (HTS Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) について理論的かつ実験的検討を行っている[1-4]。本回転機では、2 次側 HTS 巻線の非線形通電特性を巧みに利用した同期ならびに誘導モード回転が実現される。一方、固定子についても高温超電導巻線で作成する全超電導化が実現されれば、第一義的には一次銅損低減に伴ってさらなる高効率化が期待される。また、機器的観点からは、特に低速運転時における最大トルク向上が期待される。ただし、固定子巻線では、交流電流に伴う AC ロス発生は免れず、また、HTS 線材のハンドリングを考えた場合には、既存の分布巻線法をそのまま適用することは困難である。

以上の背景を鑑み、本研究では低周波駆動を想定した全超電導化をターゲットとする。即ち、同周波数領域では AC ロスの影響が相対的に小さくなり、既存技術においても全超電導化のメリットを見出せると期待される。また、同期回転を想定し、第一ステップとして所謂集中巻を検討したので、その結果を報告する。

2. 検討方法

本報告では、これまで我々が検討してきたかご型誘導機 (3 相, 4 極, 定格出力 1.5 kW@室温) を対象とする。Fig. 1 には、検討対象とした誘導機の断面写真を示す。同回転機において、固定子スロット数は 36 である。巻線には、ビスマス系高温超電導テープ材の適用を想定し、予め製作したレーストラックコイルをスロット内に収めることで固定子巻線を構成する。Fig. 2 には、試作を検討中の固定子巻線用レーストラックコイルの概略図を示す。なお、同図の集中巻コイルを製作する場合、曲げ半径 23 mm 程度としなければならず、やや劣化が懸念されるが、最新の DI-BSCCO[®]線材 (Type HT) ならば巻線可能と考えられる。既存の銅巻線の起磁力は 300 AT 程度である。従って、臨界電流 150 A (@77 K, self-field) のテープ材を使用するとして、余裕を考え巻数 5 とした。つまり、77 K において臨界電流を流した場合の起磁力は 750 AT となる。なお、HTS-ISM における高温超電導巻線は鉄心中に収められることから、自己磁界における通電特性のみ考慮すれば良い。Fig. 3 には、有限要素法解析に適用したモデル図 (3 相 2 極, 集中巻) を示す。赤色のメッシュが、レーストラックコイルの断面であり、3 相 2 極の回転磁界を形成するために 6 個のコイル (Fig. 2) が収められている。

3. 結果と考察

Fig. 4 には、典型的なギャップ磁束密度の空間分布 (解析結果) を示す。本解析におけるギャップ長は 0.5 mm であり、回転子表面から径方向 0.25 mm におけるギャップ磁束密度分布がプロットされている。同図から明らかなように、ギャップ磁束には大きな歪が含まれており、空間高調波が存在することが分かる。従って、上記固定子巻線をそのまま使用した場合には始動異常を引き起こす危険性があることから、HTS-ISM を完全に同期機として運転する必要がある。なお、ギャップ磁束の空間高調波低減法については、現在検討中である。いずれにしても、固定子巻線を集中巻構成とすることにより、HTS 線材のハンドリングが容易となり、かつ巻線端部のふくらみを小さくすることが可能であることから小型化も期待される。

解析方法や具体的巻線法、あるいは回転機の駆動方法など、詳細は講演当日に報告する。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1A-a07.
2. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1A-a08.
3. T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol., **20** (2007) 911
4. K. Nagao, et al.: The 2007 Annual Meet. Rec. I.E.E. Japan **5** (2007) 34



Fig. 1. Photograph of subject induction motor.

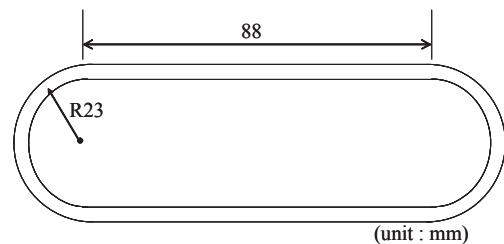


Fig. 2. Schematic diagram of a racetrack coil for stator concentrated windings.

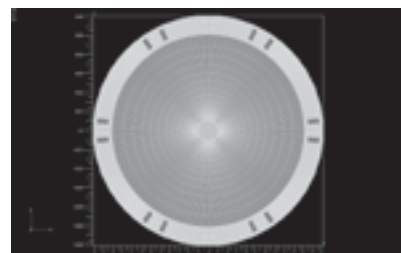


Fig. 3. FEM analysis model for HTS concentrated armature windings (red region denotes the HTS windings).

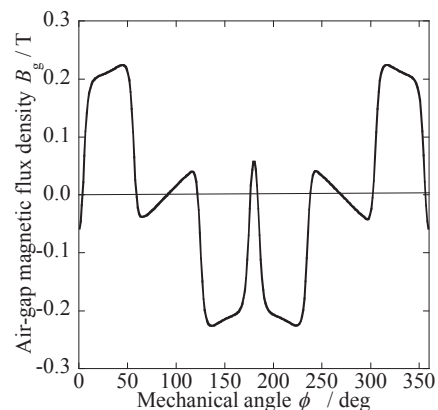


Fig. 4. Typical spatial distribution of magnetic flux density in the air-gap.

DI-BSCCO 線材を適用した高温超電導 かご形誘導／同期モータの高出力化に関する検討

Study on improvement of output power in HTS induction /synchronous motor by use of DI-BSCCO tape

長尾 和昌, 西村 敏治, 中村 武恒, 小蒲 義夫 (京都大学)
岡崎 徹, 綾井 直樹, 尾山 仁, 新里 剛 (住友電工)

NAGAO Kazumasa, NISHIMURA Toshiharu, NAKAMURA Taketsune, OGAMA Yoshio (Kyoto University)
OKAZAKI Toru, AYAI Naoki, OYAMA Hitoshi, SHINZATO Tsuyoshi (Sumitomo Electric Industries, LTD.)
E-mail: k_nagao@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、かご形誘導モータの2次側巻線をすべて高温超電導 (HTS) 線材に置換した、HTS かご形誘導／同期機 (HTS Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) について理論的・実験的検討を行っている¹⁻⁴⁾。本研究では、高性能かつ長尺化が可能な DI-BSCCO[®] 線材を用いて、新たにモータを試作すると共に、ロータバーの臨界電流とモータ出力の関係を検討し、高出力化の目処を得ることに成功したので報告する。

2. HTS-ISM の試作

Fig. 1 に、今回試作した回転子巻線の概略構成図を示す。ロータバーとエンドリングには、それぞれ異なる諸元の DI-BSCCO[®] 線材 (ロータバー: 幅: 2.6 mm, 厚さ: 0.18 mm, $I_c = 63$ A ; エンドリング: 幅: 4.1 mm, 厚さ: 0.21 mm, $I_c = 138$ A) を用い、ロータバーに用いる線材枚数が 1 枚の場合と 3 枚の場合について試験を行った。

まず、絶縁銅帯をスロットに挿入した上で、エンドリングに線材を片側につき 1 ターン 4 並列ずつ巻き、その上で 44 個あるスロットにロータバーとして線材を 1 枚ずつ挿入し、エンドリングとのハンダ付けを行った。この状態で固定子に挿入し、ロータバーに線材を 1 枚入れた場合の試験を行った。

この試験が終わった後に、再び回転子を取り出し、44 個のスロットにさらに 2 枚の線材を挿入し、下側のエンドリングとのハンダ付けを行った上で、エンドリングの電流容量を増やすため、さらにこの上に線材を、片側につき 1 ターン 4 並列ずつ巻きながらハンダ付けした。こうして出来たロータバーが 3 枚のモータについても、同様に試験を行った。

3. 試験方法

試作したモータを液体窒素で浸漬冷却した上で、無負荷試験、拘束試験、負荷試験を行った。Fig. 2 には、試験システムの概略図を示す。クライオスタットのシャフト貫通部分からの液体窒素流出によるフェロシールの凍結を防ぐため、試験中はこの部分より気体窒素を注入した。無負荷試験と拘束試験については、クライオスタット-トルクメータ間の接続を切り離し、軸を開放・拘束した上で行った。負荷試験は、クライオスタット-トルクメータ間を接続した上で、負荷として 2 kW の直流発電機を他励磁で用いた。

4. 試験結果と考察

Fig. 3 に、負荷試験の一例として、3 相、60 Hz、200 V をモータに入力した場合のトルク-速度特性を示す。このように、1 枚の場合の最大同期トルクが 2.5 Nm であるのに対し、3 枚では 9 Nm と約 3 倍のトルクとなっており、ロータバーの臨界電流容量に応じてトルクが上昇することがわかる。また、最大トルクはそれぞれ、8.5 Nm、17.5 Nm であり、特に 3 枚のときのトルクは今まで試作したモータの中でもっとも大きく、DI-BSCCO[®] 線材の優れた特性が反映されたものと考えられる。

この他の特性など、詳細は講演当日に報告する。

参考文献

- 1) G. Morita, et al. : Supercond. Sci. Technol., Vol. 19 (2006) pp.473-478
- 2) T. Nakamura, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No.2 (2006) pp.1469-1472
- 3) T. Nakamura, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No.2 (2007) pp.1615-1618
- 4) T. Nakamura, et al. : Supercond. Sci. Technol., Vol. 20 (2007) pp. 911-918

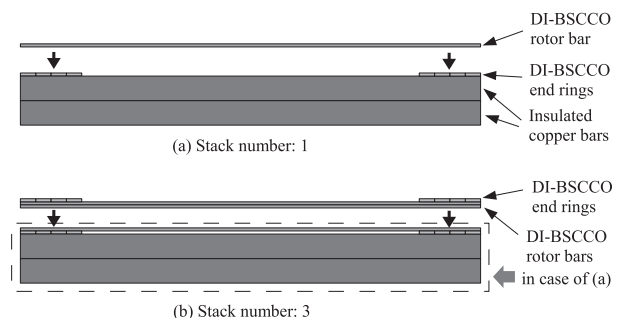


Fig. 1. Schematic diagram of a configuration of rotor windings.

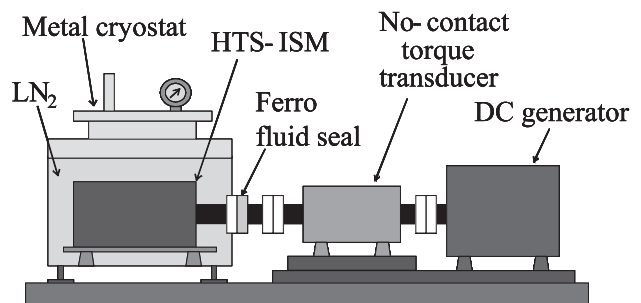


Fig. 2. Schematic diagram of an experimental system.

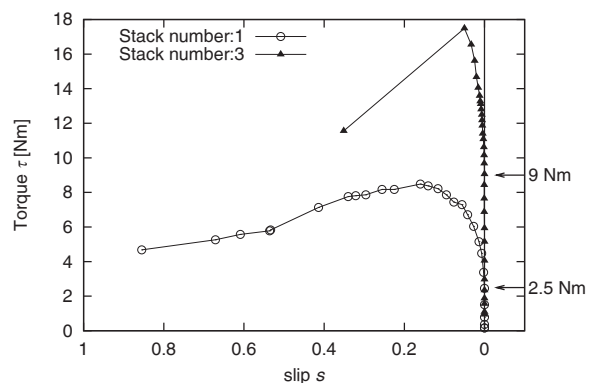


Fig. 3. Load test results at 77 K.

高温超電導かご形誘導/同期発電機の基礎特性評価 Evaluation of fundamental characteristics in HTS induction/synchronous generator

西村 敏治, 長尾 和昌, 松村 一弘, 廣谷 迪, 中村 武恒 (京都大学)
鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力)

Toshiharu Nishimura, Kazumasa Nagao, Kazuhiro Matsumura
Yu Hirotsune, Taketsune Nakamura (Kyoto University)
Naoji Kashima, Shigeo Nagaya (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: nishimura@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1.はじめに 我々は、高温超電導 (HTS) テープ材を二次側かご形巻線に適用した HTS 誘導/同期回転機 (HTS Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) について、理論的・実験的検討を行っている¹⁾²⁾。

本回転機を電動機として使用すると、構造が誘導機そのものであるにもかかわらず同期トルクを有する³⁾。即ち HTS 回転子巻線が磁束を捕捉し、永久磁石回転機のように動作する。一方、このことは外部から回転力を与えれば、同期速度で発電可能であることを示しており、当研究室は予備実験によってこれを確認した⁴⁾。本講演では、新たにロータバーの臨界電流を増やしたかご形 HTS-ISM を試作し、これを発電機として使用した際の同期ならびにすべり運転時における実験結果を報告するとともに、その基礎特性を議論する。

2.HTS-ISM の発電原理 Fig.1 には、トルク-すべり特性の模式図を示す。常伝導誘導機は、同期速度よりも大きな回転速度で回転させることにより発電動作する。これは、回転磁界より回転子の回転速度のほうが大きくなると、誘導電流が流れて減速しようとするからであるが、HTS-ISM を同期速度以上の速さで回転させようとする、電動機として運転した場合と同様に同期速度のまま回転しようとするため、固定子側に逆起電力が発生し、即ち発電動作するようになる。そして回転子巻線に流れる電流が臨界電流を超えると磁束を捕捉できなくなり、従来形の誘導発電機と同じ発電機構で発電するようになる。

3.HTS-ISM の試作 本研究で用いる回転機は、市販されている 3 相 4 極、定格出力 1.5 kW のかご形誘導電動機である。この回転機の固定子はそのまま使用し、かご形回転子巻線のみを Bi-2223/AgHTS テープ材に置き換える。なおロータバーに用いた HTS テープ材は幅 2.0 mm、厚さ 0.2 mm で、臨界電流の平均値は 25 A (@77 K, 自己磁場) である。本回転機のロータバーにはこれを 10 本束ねて使用する。両端をハンダ付けしたバンドル化導体を鉄心の各スロットに挿入するとともに、市販の DI-BSCCO[®] テープ材を用いてエンドリングを製作し、各ロータバーを端絡する。完成した回転子の写真を Fig.2 に示す。

4. 試験方法 本実験には、Fig.3 に示すような試験装置を用いる。HTS テープ材を適用した回転子を冷却するため、HTS-ISM をメタルクライオスタット内部に設置し、液体窒素を使って浸漬冷却する。また、HTS-ISM のシャフトはフェローシールを介してクライオスタットの外部へ取り出し、他励直流電動機との間には非接触形のトルクメータを接続する。液体窒素での冷却中にシャフトの取り出し部分が凍り付いて機械損が増加することを避けるために、シャフト上部より気体の窒素を供給し続ける。

実験は、まず 200 V の電圧を HTS-ISM の固定子巻線に印加して同期引き入れ後、直流電動機の出力を調整して同期回転以上の回転力を与える。このときの固定子側の一次情報を三相パワーメータにより測定し、また非接触光学式のタコメータを使って回転数を測定する。トルクは、非接触形トルクメータにより測定する。なお、固定子電圧の周波数は 60 Hz であり、4 極構造のため同期速度は 1800 rpm である。

試験結果、理論的考察など詳細は講演当日に報告する。

参考文献

1) (for example) G. Morita, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 70 (2004) ,p.17

- 2) (for example) T. Nakamura, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No.2 (2006) ,pp.1469-1472
3) Y. Ogama, et al. : The 2007 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5 (2007) ,p.35
4) T.Nakamura, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) ,p.8

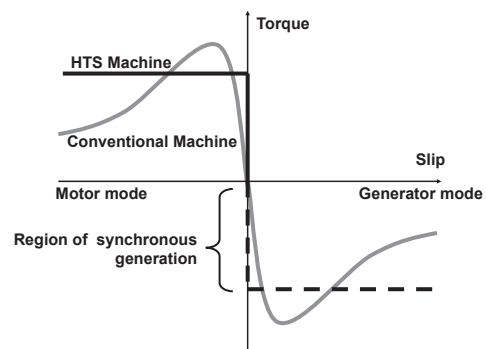


Fig. 1. Schematic diagram of torque characteristics of HTS and conventional induction machine

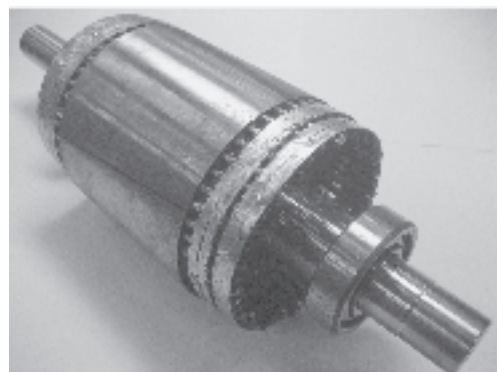


Fig. 2. Photograph of a fabricated rotor

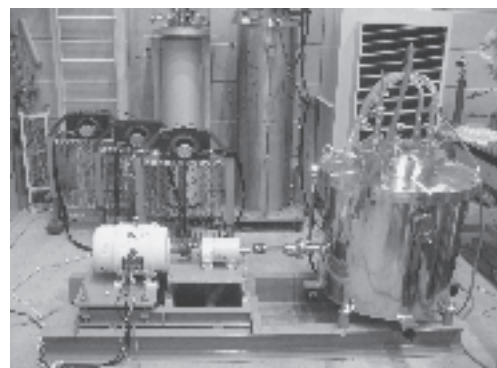


Fig. 3. Photograph of test system

高効率スーパードライブシステムの可能性研究

Feasibility study of high-efficiency super drive system

牧直樹(テクノバ), 和泉充(東京海洋大), 沼野正義(海上技術安全研究所),
合澤清志(川崎重工業), 奥村嘉賀男(テクノバ), 岩田克典(大洋電機)

MAKI Naoki (Technova Inc.), IZUMI Mitsuru (Tokyo University of Marine Science), NUMANO Masayoshi (NMRI), AIZAWA Kiyoshi (Kawasaki Heavy Industries Ltd.), OKUMURA Kagao (Technova Inc.), IWATA Katsunori (Taiyo Electric Co. Ltd.)
E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

1. はじめに

新型の船型と二重反転プロペラの効果並びに電気推進システムの配置自由度を活用した新しいコンセプトをもつ環境対応型の次世代内航船スーパーエコシップが注目されているが、モータ、発電機、インバータ等の電気装置の導入による効率低下の改善が望まれている。そこで、モータと発電機に超電導技術を適用して飛躍的な低損失化を図るとともに、各機器間の出力バランスを常に最適に維持する高効率スーパードライブシステム (HESDS) を提案し、その基本設計検討を行ったので報告する。

2. HESDS の概要

HESDSはFig. 1に示すように低速大トルクを発生するのに最適な高効率回転子とコンパクト電機子を用いた高温超電導 (HTS) モータ、この高効率回転子の超電導界磁巻線に高安定直流電流を供給する集電装置、省スペース化を図った冷凍機システム、高効率の HTS 発電機とこれからコンパクト電機子に電力を調整供給する (コンバータ/インバータ) 装置、並びにこれらの装置を統合して高精度に制御する統合制御装置から構成される。

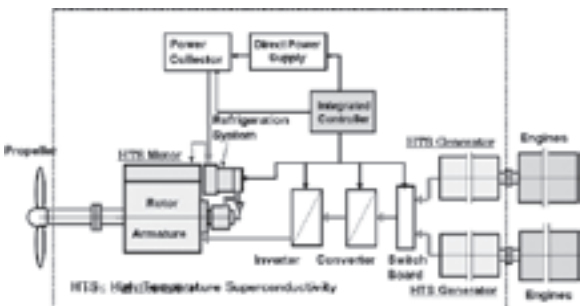


Fig.1 Configuration of HESDS

Fig. 2 は電気推進船のシステム構成と伝達効率を示すものであり、HESDS の総合伝達効率は従来電気推進システムと比較して 83→93[%]と大幅に向上することが分かる。

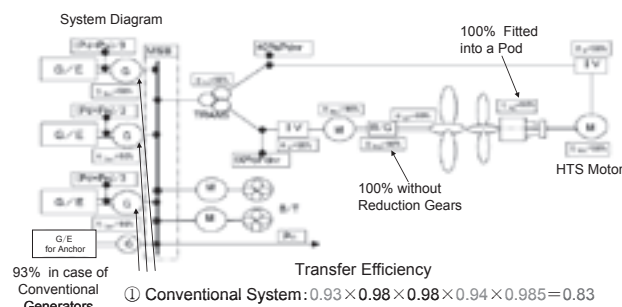


Fig.2 System configuration of an electrically propelled ship

3. HTS モータの基本電気設計

1000kWと660kWポッドモータを対象に、開発した基本電気設計プログラムを用いて設計検討を行った。HTS 导体には高性能で実績のある DI- BISCCO を30K で使用する。

Fig.3 は1000kW 機の基本性能に及ぼす極数の影響を示すものであり、次項から6極機が望ましいことが分かる。

- ・モータ効率は4～10極に亘って98[%]ほぼ一定である。
- ・モータ重量は極数とともに低下し、6極以上で飽和する。
- ・必要な超電導界磁巻線の長さは6極で最小となり、6極から離れるにつれて相当に増大する。

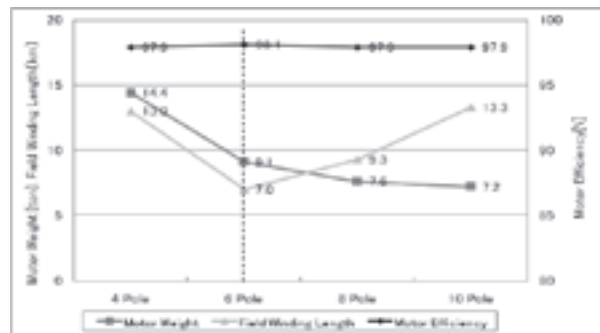


Fig.3 Influence of number of poles on basic performances of 1000 kW HTSM

Table 1 は強磁性ティース付きで磁気飽和 (~2.0[T]) 状態で使用する突極型 SLP 機の基本設計結果を弱磁性ロータ (比透磁率が 5 以下の Ni 鋼を使用) をもつ円筒型 CYL 機と比較して示すものであり、次の特徴をもつ。

- ・同期リアクタンスが 0.57[pu] と約 2 倍大きい。
- ・空冷方式のため電機子電流密度は 3[A/mm²] 付近である。
- ・電気装荷 720[A/cm] は現用機よりも幾分か大きい。
- ・界磁巻線の長さは 1.7[km] と約 1/3 に減少する。
- ・モータ重量は 5.5[トン] と現用誘導モータ並みである。
- ・モータ効率 97.0[%] は現用機よりも 4[%] 高い。

今後、更なる小型軽量化と高効率化を図っていく。本研究は新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) の平成 18 年度 FS 事業の委託により実施したものである。

Table 1 Main design results of 660 kW pod type HTSM (3.3 [kV], 12.7 [Hz], 190 [1/min], 30 [K])

Machine	(C) HTSM	(E) HTSM	(F) HTSM
Number of poles, Rotor shape	6, CYL	6, CYL	6, SLP
Capacity [kW], Current [A]	1000, 183	660, 122	660, 121
Power factor [%]	97.5	98.6	84.2
Synchronous reactance [pu]	0.22	0.26	0.54
Rotor diameter [m]	439	557	560
Motor diameter [m]	854	865	900
Armature iron length [m]	2160	1150	1200
Magnetomotive force of FW [kA/pole]	78	70	31
Current density of FW and AW [A/mm ²]	232	242	330
Current density of AW [A/mm ²]	2.8	2.9	3.1
Electric loading [A/cm]	686	675	720
Total length of FW [km]	9.5	4.8	1.7
Motor weight [ton]	10.0	5.2	5.5
Motor efficiency [%]	97.7	97.9	97.0

HTSM: HTS motor, CYL: cylindrical shape, SLP: salient pole shape, FW: field winding, AW: Armature winding

参考文献

1. N. Maki : JIASC'07, R3-12
2. Naoki Maki, et al.: ICEMS2007

二磁極軸回転体

A rotor model with two gradient static field shafts

尾作仁司 (鉄道総研)

OZAKU Hitoshi (Railway technical research institute)

E-mail: mu@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では電力貯蔵フライホイールの軸受部分に超電導技術を適用することが研究されているが[1]、マクロサイズの発電機、モーター等の回転体を念頭におき、高温超電導バルク体を用いた回転機構の基礎的な研究を進めている。回転体の永久磁石磁場を「Mexican-Hat」型にした二磁極軸の磁場勾配を形成させることにより、さらに、回転体上部に高温超電導バルク体を設置する構造から、安定した高速回転が得られることを確認できたので報告する。

2. 回転体

回転体本体は種々の径の亚克力パイプを組み合わせて、径 70mm、高さ 70mm である。浮上用磁石は、円柱 Nd 磁石 (直径 20mm、高さ 10mm、0.45T) 1 個の回りに、リング Nd 磁石 (外径 50mm、内径 30mm、高さ 5mm、0.33T) 2 個を組み込んだものを 1 組として、回転体の上下にそれぞれ組み込んだ。回転体輪切り中央の位置に配置した発電部は、リング状スポンジ (外径 70mm、内径 40mm、高さ 10mm) の外径から 10mm の位置に薄い板状 Nd 磁石 (20×10mm、厚さ 2mm、0.23T) を 4 極構成するように組み込んである。

3. バルクツインヘッドパルス管冷凍機

バルクツインヘッドパルス管冷凍機を図 1 に示す。回転体を上下から支持するヘッド内にそれぞれ、Dy バルク体 (新日鉄製、直径 50mm、厚さ 10mm) を組み込んである。バルク体表面からヘッド部外表面まで 5mm であり、バルク体と回転体とのギャップは 5+2.5mm である。図 2 に回転体の永久磁石面の「Mexican-Hat」型磁場分布を示す。

4. 実験方法および結果

回転体を 2.5mm のスペーサーを介して、ヘッド間に置いた後、磁場中冷却を行った。設定温度は 60K で設定温度到達まで 10 時間であった。磁場中冷却後、スペーサーを外し、回転体がヘッド間空間に固定されたことを確認した。回転体横にコイル (0.5mm 銅線 300 巻) を設置し、コイルをオシロスコープに接続した。コイル横にステンレス管 (1/4 インチ管、長さ 20mm) を設置し、窒素ガスポンベにシリコンチューブを介して繋いだ。ステンレス管は回転体の外径にガスが吹き付けられるように位置を調整した。窒素ガスポンベから窒素ガスを 0.245MPa から回転を始めた。0.294MPa から 0.588MPa まで 0.1MPa 毎に圧を上げて測定したが、最高約 2000rpm であった。数度の回転実験を行ったが、回転体はヘッド間で安定浮上を維持した。

5. まとめ

回転体の上下に磁気ベアリングを設置する本報告の磁気シャフト構造は安定した回転を得ることを示した。本報告の回転体構造から、この機構はモーターには向かず、むしろ、高温超電導マイクロ発電機や動力伝達の磁気ベアリングに適していると考えている。今後は、磁気回路部を構成し、発電力の確認を行っていく予定である。

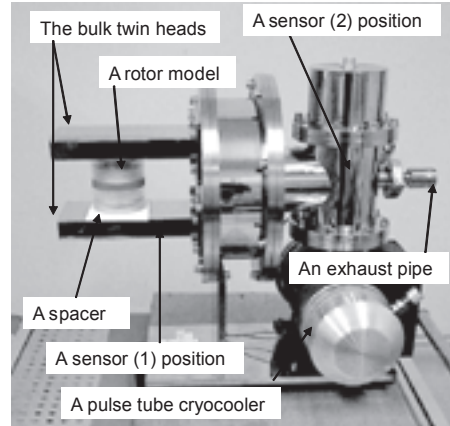


Fig.1 The bulk twinned heads pulse tube cryocooler

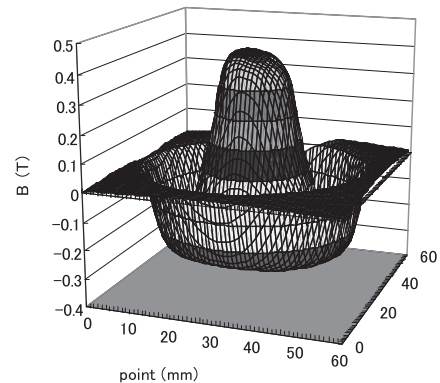
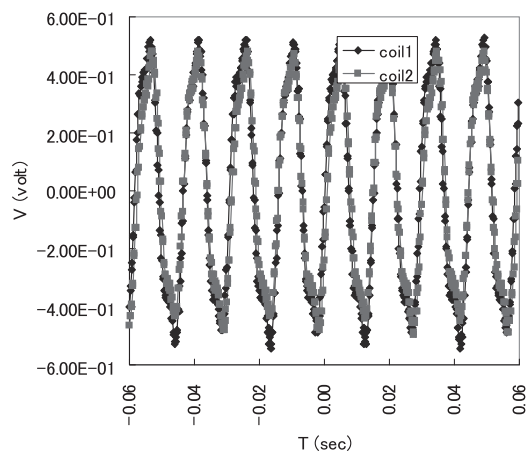


Fig.2 “Mexican-Hat” type field distribution of PM of the rotor

Fig.3 Voltage waveforms at 0.49MPa N₂ gas

参考文献

1. H.Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference Vol.76 (2007), p11

磁気誘導ドラッグデリバリーシステム(MDDS)の検討 Research and Development of Magnetic Drug Delivery System

西嶋 茂宏 (阪大) ; 武田 真一 (磁気制御技術研究会) ; 村垣 善浩, 伊関 洋 (東京女子医大) ; 田畑 泰彦,
山本 雅哉 (京大) ; 佐々木 明, 窪田 純 (日立メディコ) ; 佐保 典英 (日立)

Shigehiro Nishijima, Shin-ichi Takeda, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Yasuhiko Tabata, Masaya Yamamoto, Akira Sasaki,
Kubota Jun, Norihide Saho : E-mail: nishijima@see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

適量の薬品を患部へ正確に搬送するシステム(DDS)を利用すると、従来の投薬手法よりも、投薬量の低減や副作用の軽減が期待できるのみならず、外科的アプローチの困難な部位の治療が可能となり、難治性疾患に対する有効な治療法を実現するものと考えられる。我々は、このDDSに磁気力による粒子運動制御の技術を応用することにした。本手法では強磁性微粒子で磁気種付けした(担磁)薬剤を用い、体外に配置した超伝導磁石の磁気牽引力を利用する。この磁気牽引力により、血管に投入した担磁薬剤を患部まで到達させる、能動的標的指向型磁気標的 DDS(MDDS)を検討している。MDDS では目的患部への高い薬物濃度の実現や、正常組織への薬剤による毒性の軽減が実現の可能性があり、有望なDDSの一つである。本研究ではMDDSの可能性についてシミュレーションにより検討したのでその結果について報告する。

2. 模擬方法

直線血管内にマグネタイト微粒子を入れ、HTS バルク磁石を血管壁から10~50 mmまで離して配置したときの粒子の運動軌跡を求めた。マグネタイト微粒子の粒子径は100nm、体積磁化率は8000とした。また、血管径は2mm、血液粘度は $2.1 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ で平均流速は200mm/secとした。HTS バルク磁石の大きさは、直径90 mm厚さ7.5 mmの円盤状で、臨界電流密度 $J_s=5 \times 10^8 \text{A/m}^2$ で一定とし、バルク磁束密度は磁石表面で4.5 Tである。これは実測値を再現したものである。図1に計算した磁場分布を示した。

強磁性微粒子には磁石からの磁気力 F_M と血液からのドラッグ力 F_D が作用する。 F_D および F_M は式(1)、(2)で示される。液からのドラッグ力 F_D が作用する。 F_D および F_M は式(1)、(2)で示される。

$$F_M = \frac{4}{3} \pi b^3 \mu_0 \frac{9(\chi_p - \chi_f)}{(3 + \chi_f)(3 + \chi_p)} H \text{grad} H \quad (1)$$

$$F_D = 6 \pi \eta b (v_f - v_p) \quad (2)$$

ここで、 b は粒子径、 χ_p および χ_f はそれぞれ粒子、流体の体積磁化率、 H は磁場の強さ、 $\text{grad}H$ は磁場勾配、 η は流体粘度、 v_p および v_f は粒子、流体の速度である。両者の差が粒子に働く力として、運動方程式を立て、時間発展で粒子軌跡を求めた。

3. 計算結果

図1の計算結果を用いて、な強磁性粒子の粒子軌跡、水を懸濁媒質として求めた。その一例を図2に示した。これは、バルク超伝導磁石から40 mm離れた場所における粒子軌跡である。40 mmでも粒子を蓄積できる事が分かる。同様の計算を磁石と血管の距離を変えて計算し、蓄積率を距離に対してプロットしたものが図3である。約50 mmの距離まで蓄積が可能である事が見て取れる。

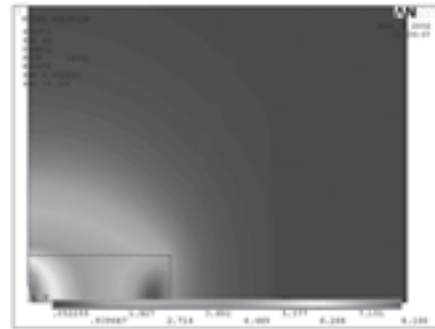


Fig.1 Magnetic field generated by a bulk superconducting magnet

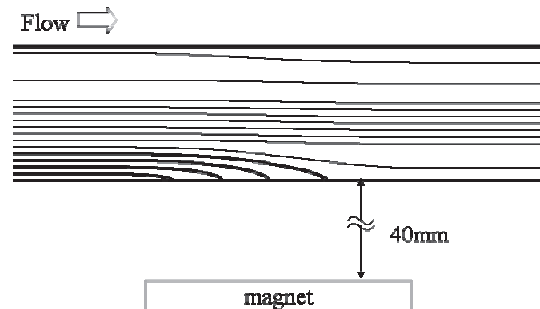


Fig.2 Trajectories of the particle in a blood tube put to the distance of 40mm

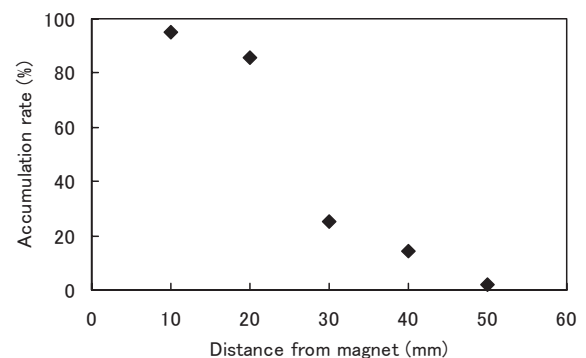


Fig.3 A change of the accumulation rate with the distance.

4. 結論

MDDS のための磁気種付けされた薬剤の血管内における動きを計算した。磁場は HTS バルク磁石を利用して計算した。その結果、50 mm深部まで、誘導あるいは蓄積可能である事が明らかになった。

本研究の一部は、平成18年度NEDO“次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発(F/S)”の一環として実施されたものである。

磁気誘導薬剤配送システムを用いた磁性薬剤の血管内集積に関する研究

Accumulation of Magnetic Drug in Blood Vessel Using Magnetic Drug Delivery System

福井 慎二, 寺田 隆哉, 三島 史人, 西嶋 茂宏(阪大), 宮本明夫(帯広畜産大)
 FUKUI Shinji, TERADA Takaya, MISHIMA Fumihito, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka Univ.),
 MIYAMOTO Akio(Obihiro Univ. of Agri. & Vet. Med.)
 E-mail: shinji-fukui@qb.sec.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

乳牛の繁殖障害は、畜産経営において深刻な問題となっている。高秘乳牛であるほど、体内のホルモンが抑制され無発情となり、繁殖障害として卵巣嚢腫などの卵巣疾患を引き起こす。これに対処する方法として、最近では卵巣疾患に対しさまざまな薬物治療がなされており、中でも膣内留置型プロゲステロン製剤を用いた治療は効果的であることが報告されている。しかしながら、治療率の面から見て十分な治療法とは言えず、検討の余地が残されている。そこで、牛の卵巣疾患に対して効率よく薬物治療が行えるように MDDS(Magnetic Drug Delivery System)の利用可能性について着目した。

乳牛の卵巣疾患を調べるには肛門から直接手や検査器具を挿入し、直腸越しに卵巣に触れて検査するのが一般的である。これを利用して磁石を挿入すれば、卵巣の近辺まで磁石の配置が可能となり、卵巣内の黄体に MDDS を利用するのに有効であると考えられる。

乳牛の直腸壁の厚さは 20-30mm、黄体は全体の大きさが約 20mm、血管径が 5-10 μ m の毛細血管が網目状に張り巡らされた器官である。また毛細血管内部での血流速は約 0.5-1mm/sec である。最終的に、この治療では 20-50mm 程度離れた位置から 5-10 μ m の網目状毛細血管内を 0.5-1mm/sec で流れる磁性薬剤を集積させる技術が求められる。

そこで、牛の直腸内に挿入できる程度にコンパクトで、しかも磁石からの距離が 20-50mm の範囲内でも磁性薬剤が集積できるような磁石の設計を目指している。

今回の実験では、まず、250 μ m、70 μ m、のガラスビーズを充填して用い、最後に 30 μ m のガラスビーズを用いて黄体内の毛細血管径を近似したモデル流路を作成した。次に、その流路内に磁性粒子を流して模擬毛細血管内での磁石による集積の挙動を調べた。

2. 毛細血管モデル実験

黄体内の毛細血管の流路を模擬するため、Fig.1 の右図のような粒径 30 μ m のガラスビーズを用いた。これを立方最密構造で充填することを考えた場合、流路径は最大約 7 μ m となりほぼ毛細血管径を模擬した構造といえる。

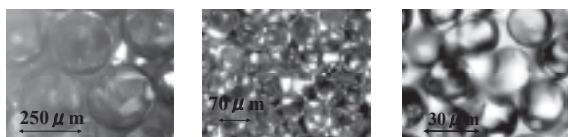


Fig.1 Photomicrographs of the glass beads (Left: 250 μ m, Center: 70 μ m, Right: 30 μ m)

予備実験としてまず左図の 250 μ m のガラスビーズ、中央図の 70 μ m のガラスビーズを充填して用いた実験を行った。同様に流路径をそれぞれ最大約 16 μ m、56 μ m とした。

250, 70, 30 μ m のガラスビーズを充填し、固定するために Fig.2 のような装置を作った。これは 50mg/l に調製した 100nm のマグネタイト懸濁液を濾紙(空隙 1 μ m)、充填した 250,70,30 μ m のガラスビーズ、5 μ m(空隙)ガラスフィルターを通し、回収することを示した図である。この流路系を通すために定量送液ポンプを使用し、懸濁液が充填し

た 250 μ m、70 μ m、30 μ m のガラスビーズを通過する流速をそれぞれ約 0.04mm/sec、0.5mm/sec、0.6mm/sec に制御した。また Fig.2 のように充填したガラスビーズ部分にネオジウム磁石(表面磁束密度 0.3T、10mm ϕ ×5mm)を配置した場合と、配置しない場合について回収実験を行った。それぞれに対して回収したマグネタイトを 6N-HCl で溶かし、ICP-AES(高周波誘導結合プラズマ-原子発光分析)を用いて Fe 濃度を測定した。

回収率の定義として、磁石を使わずに懸濁液を流して回収したサンプルの濃度から磁石を使用して回収したサンプルの濃度を差し引いた値を磁石を使わずに回収したサンプルの比率で評価した。

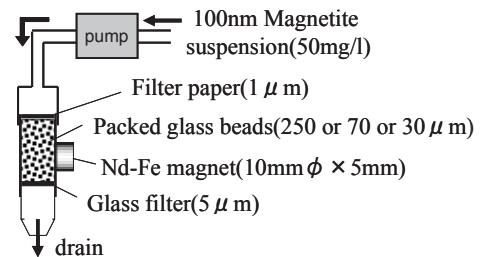
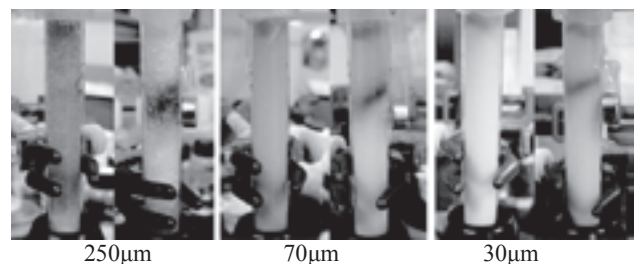


Fig.2 Model capillary

3. 結果と考察

Fig.3 は 250 μ m、70 μ m、30 μ m のガラスビーズを充填してネオジウム磁石をガラス管壁面に配置させた状態と磁石を配置しなかった状態の図で、マグネタイトの懸濁液を流した際に撮った画像である。



Glass particle size(μ m)	250	70	30
Accumulation rate (%)	80	49	59

Fig.3 Accumulation of magnetite using 250 μ m, 70 μ m, 30 μ m glass beads (Left: without magnet, Right: using magnet)

結果からガラス管壁面で磁石を配置すると毛細血管を模擬した流路(5-10 μ m)でも十分に磁性粒子が集積されることが確認できた。次の段階として磁石の距離を離して粒子軌跡シミュレーションを実施し、その蓄積に必要な磁場強度および磁気勾配を求め、実用に寄与し得る磁石の設計に反映させていく予定である。

また、今後の実験としては、直腸壁から黄体までの距離(20-50mm)での回収を可能にできる磁石として、より大きな磁場を発生する超電導バルク磁石を使用した実験を考えている。

携帯型超電導バルク磁石システムの開発 Development of A Portable Superconducting Bulk Magnet System

佐保 典英, 磯上 尚志, 西嶋 規世(日立), 佐々木 明(日立メディコ)
SAHO Norihide ISOGAMI Hisashi, NISHIJIMA Noriyo (Hitachi), SASAKI Akira (HMC)
E-mail: norihide.saho.cc@hitachi.com

1. はじめに

小型軽量で着磁後超電導状態を維持したまま、容易に乘用车で輸送できる携帯型超電導バルク磁石システムを試作した。本磁石システムは、局所に強力な磁気力を発生できる特性を生かし、磁性物質の高速磁気分離[1] [2]、血管内のナノサイズ磁性薬剤の病巣への磁気誘導ドラッグデリバリーシステム(MDDS)、高磁場応用の研究開発分野などでの需要が高まると期待できる。本報告では、試作した携帯型超電導バルク磁石システムの構成と着磁性能を報告する。

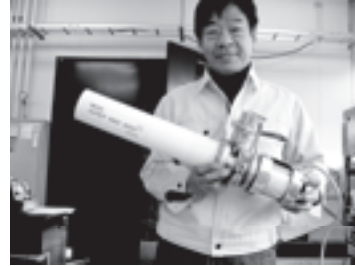


Fig. 1 Portable high Tc superconducting bulk magnet

2. 携帯型超電導バルク磁石の構造

試作した超電導バルク磁石は、磁石本体重量が 9.5kgで図1の概観写真に示すように、容易に1人で持ち運べる携帯性を実現し、磁石本体のサイズは、磁石先端部の真空容器直径が 79 mm で、長さが 640 mm である。磁石部には Gd-Ba-Cu-O 高温バルク超電導体(外径 45 mm, 90 mm 長)を使用し、圧縮機一体型の小型ヘリウム冷凍機で直接冷却する構造とした。

図2に試作した超電導バルク磁石をフィールドクールで着磁する際の全体システム構成を示す。印加用超電導磁石の室温ポア直径は 100 mm である。

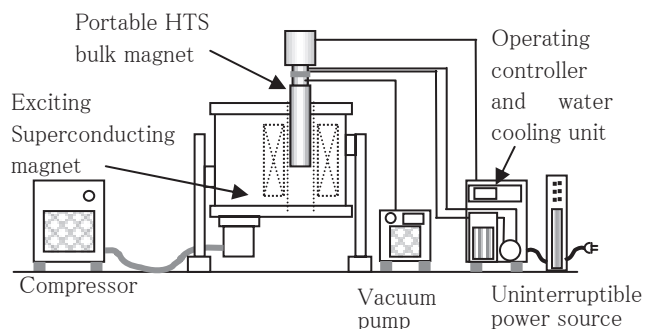


Fig. 2 Magnetization system of bulk superconductors of the portable high Tc superconducting bulk magnet system.

3. 実験結果及び考察

冷凍機による超電導バルク磁石のバルク冷却温度は 38.1 K で、クールダウン時間は6時間30分であった。超電導バルク磁石本体の消費電力は 195 W(水道水冷却の場合)で、冷却水チラーユニットを含めた磁石システムの消費電力は 507 W(冷却水循環方式)で、いずれも少エネルギー化を実現した。

印加磁界強度 6 T において行った着磁実験の結果、真空容器表面での垂直方向(z軸方向)の最大磁束密度は 5.07 T で、磁束密度勾配(磁気勾配)は 430 T/m であった。また、真空容器表面から 50 mm 離れた位置での磁気勾配は 9.5 T/m であった。

本着磁条件における臨界電流値を、ビーンモデル法を用いて実験結果から求め、その値を用いて算出した3次元の磁気力係数 f_m (磁束密度×磁気勾配)ベクトル値の分布図を図3に示す。本図から、バルク超電導体の表面部($X=0$ mm で $Z=8$ mm 以内)に、1000 T²/m 以上の f_m の領域が発生したことが分る。図4に本領域での水道水のモーゼ効果写真を示す。

モービル型超電導磁気分離用バルク磁石システム[2]の輸送はトラックに発電機を車載して輸送したが、今回は冷凍機の消費電力を低減し小型携帯化にすることにより、乘用车内臓の 100 V 電源を使用し、磁石システムを冷却運転しながら 1500 km を輸送した。

4. まとめ

本研究では、試作した携帯型超電導バルク磁石システムの 6 T 着磁時における着磁特性を明らかにし、かつユーザ側で高価な着磁用超電導磁石を所有せず、高磁場超電導バルク磁石をいつでも使用できるサービス実用化の見通しを得た。なお、本開発は平成18年度NEDOの“次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発(F/S)”の一環として実施されたものである。

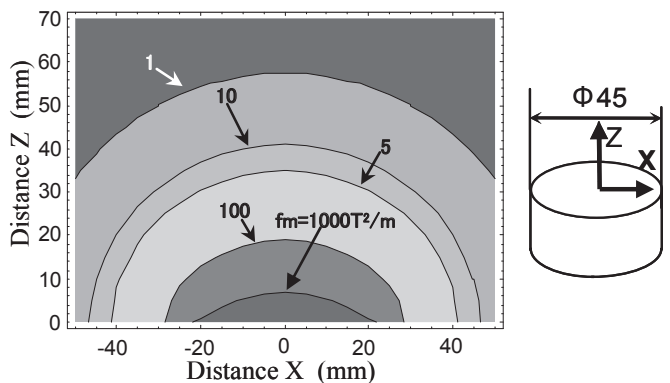


Fig. 3 Magnetic force factor f_m on a surface of the bulk superconductors



Fig. 4 Moses effect of tap water

参考文献

1. 佐保典英 他:低温工学, Vol.37 No.11 (2002) p 623
2. 林 秀美, 佐保典英 他:電気学会電力・エネルギー部門大会、講演論文集分冊B 講演No.320(2002)

超電導バルク磁石を用いた磁気誘導ドラックデリバリーシステム(MDDS)の開発

Development of MDDS with A Superconducting Bulk Magnet

佐保 典英(日立)、伊関 洋、村垣 善浩(東京女子医大)、佐々木 明、窪田 純(日立メディコ)、西嶋 茂宏、武田 真一(阪大)、田畑 泰彦、山本 雅哉(京大)、塚本 晃(日立)

SAHO Norihide (Hitachi), ISEKI Hiroshi, MURAGAKI Yoshihiro (TWM Univ.), SASAKI Akira, KUBOTA Jyun (HMC), NISHIJIMA Shigehiro, TAKEDA Shinichi (Osaka Univ.), TABATA Yasuhiko, YAMAMOTO Masaya (Kyoto Univ.),

TSUKAMOTO Akira (Hitachi)

E-mail: norihide.saho.cc@hitachi.com

1. はじめに

磁気誘導は、磁気という低侵襲な物理力で磁性薬剤をデリバリーできる可能性[1]があり、1970年代より試みられている。しかし、十分な磁場を有し手術室に持ち込める小型・軽量の磁石がなく、また、誘導する粒子がナノサイズであるため、豚等の中動物では十分な生体内集積は得られていない。今回、強力な磁場を発生する携帯型高温超電導バルク磁石を使用して、生体内のナノサイズの磁性粒子を誘導、集積する新磁気誘導 DDS (MDDS)を開発し、豚を用いた誘導、集積実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験結果および考察

図1に試作した MDDS の概観写真を示す。本システムは、真空容器表面に最大磁束密度 5.07 T を有する冷凍機一体型の超電導バルク磁石、冷凍機用冷却水循環ユニットおよび前記磁石を任意の位置、角度にホールドする非磁性のバランススタンドで構成される。磁石重量は 9.5 kg で、真空容器内部に配置した Gd 系バルク超電導体(直径 45 mm、90 mm 長)を前記冷凍機で 38.1 K に冷却した。

全身麻酔下の豚に、血管分岐部と病巣誘導試験を、直径 100nm のマグネタイト粒子(サンプルA)混合液を、それぞれ別の豚の大動脈(粒子重量 39mg)と、門脈末梢(16mg)から注入して行った。注入時には、超電導バルク磁石をそれぞれ腹部大動脈(図2)と肝臓表面に設置し in vivo 実験を行った。

いっぽう、実験後の血液および肝臓組織中の磁性粒子量は、高温超電導 SQUID を使用した磁束量測定装置[2]で計測した。前記磁性微粒子の磁束一重量の関係を図3に示す。血液 1 μ リットルおよび数 mm 立方の肝臓表層組織片中の残留磁性粒子量を計測した結果、非誘導側と比較して磁気誘導側の血管分岐部で 6 倍(図4)、肝臓部分で 28 倍の磁性粒子の集積を確認できた。なお、肝臓部分での集積は、組織学的にも MRI 画像上でも鉄の存在を確認できた。

使用した超電導バルク磁石システムは、着磁後、乗用車で冷却運転を継続して日立市と富士宮市間をトラブル無く輸送した。

3. まとめ

超電導バルク磁石を使用した磁気誘導は有望な DDS であることを、豚を用いた in vivo 実験で明らかにした。また、超電導 SQUID を用いた磁束量計測装置により、極微量の磁性粒子を短時間、高感度で計測できた。本磁束量計測では、九州大学システム情報科学研究所の円福 敬二教授、長崎国際大学薬学部濱崎直孝教授の装置を使用した。ここに、謝意を表します。

なお、本研究の一部は、平成18年度NEDOの“次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発(F/S)”の一環として実施されたものである。

参考文献

1. S. Nishijima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.43
2. Tsukamoto: IEEE.Applied.Supercond.Vol. 15, (2005) p.656

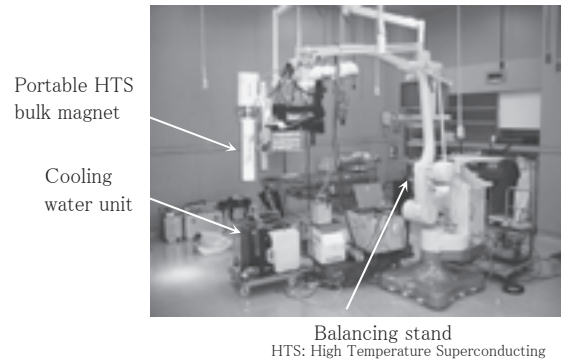


Fig. 1 MDDS with portable HTS bulk magnet

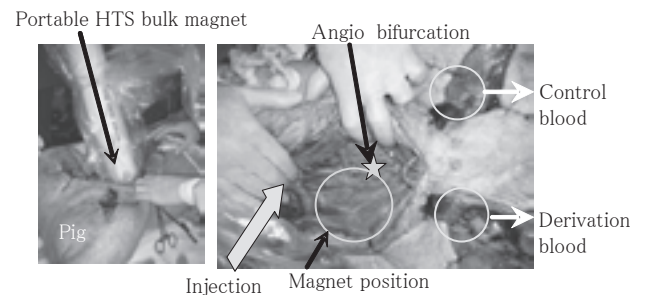


Fig. 2 Photograph of magnetic delivery in vivo

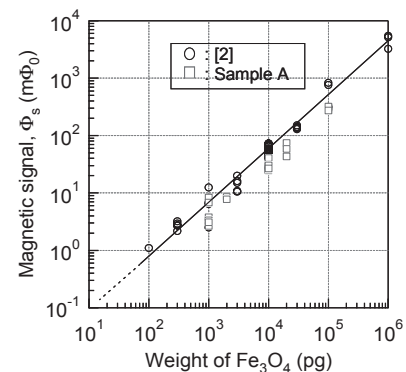


Fig. 3 Calibration curve of magnetic signal vs weigh of Fe_3O_4

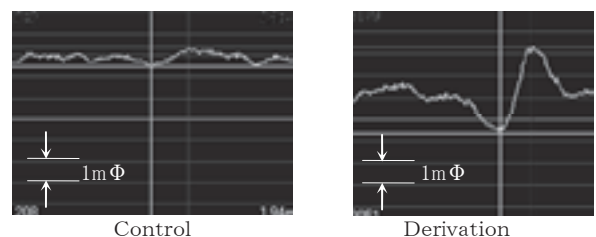


Fig. 4 Magnetic signal of each 1 micro liter of blood

Nb と Ag-Sn-Mg 合金の拡散により生成した Nb₃Sn 線材の超伝導特性

Superconducting Properties of Nb₃Sn Formed through Diffusion Reaction between Nb and Ag-Sn-Mg Alloys

岩谷 雅義, 俊田 一哉, 安徳 祐二, 井上 廉(徳島大学); 竹内 孝夫, 木吉 司(物材機構)
 IWATANI Masayoshi, TOSHITA Kazuya, ANTOKU Yuji, INOUE Kiyoshi (The Univ. of Tokushima);
 TAKEUCHI Takao, KIYOSHI Tsukasa (NIMS)
 E-mail: gangan@ee.tokushima-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、Nb と Ag-Sn 合金の拡散反応において、Ag は Cu のように Nb₃Sn の拡散生成を促進する効果は無いが、特性的にブロンズ法に劣らない Nb₃Sn が生成される事を明らかにしてきた[1]。今回は、Ag-Sn 合金に Mg 添加をした場合 Nb₃Sn 生成や超伝導特性にどのような効果を及ぼすかを検討した。

2. 実験方法

Ag-9at%Sn, Ag-9at%Sn-2at%Mg, Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg 合金を Ar 雰囲気下でタンマン溶解炉を使って溶かし、長さ77mm、直径13mmの円柱状試料に加工した。この Ag-9at%Sn 棒、Ag-9at%Sn-2at%Mg 棒、Ag-9at%Sn-4at%Mg 棒及び Ag-9at%Sn-6at%Mg 棒を、長さ60mm、外径20mm、内径14mmのNbパイプにそれぞれ挿入し、溝ロールとカセットローラーダイスを使って直径0.88mmの単芯線材を作成した。加工途中で、断面減少率による加工率が20%に達するごとに真空中で450℃×1hの中間焼鈍を行い、芯材が硬くなりすぎないように注意した。また、作成した Ag-9at%Sn-2at%Mg, Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg の一部の単芯線材を長さ70mmに切り、180本束ねて、長さ60mm、外径20mm、内径14mmのNbパイプ中に詰込んだ。それを単芯線の時と同様に溝ロールとカセットローラーダイスを使って外径が0.82mmになるまで伸線加工した。これらの Ag-9at%Sn, Ag-9at%Sn-2at%Mg, Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg 単芯線と Ag-9at%Sn-2at%Mg, Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg 180芯線を、それぞれ50mm長に切断し、真空中で600℃～800℃の温度で熱処理をして Nb₃Sn を拡散生成させた。熱処理後、試料は Cu ムッキした後、電圧リードと電流リードをとりつけて I_c と T_c の測定を行った。

3. 結果と考察

Mg 添加を行うことで Fig. 1 及び 2 に示すように Nb₃Sn 拡散生成温度が明瞭に低下した。例えば、Mg を添加していない試料では 600℃の熱処理をした場合 Nb₃Sn の T_c を示さないのに対し、Mg を添加した試料では Nb₃Sn の T_c を示した。特に 600℃～650℃での拡散熱処理では、Mg 濃度が高いほど超伝導特性が向上した。一方、750℃以上の温度での拡散熱処理の場合、Mg 添加効果は不明瞭になり、Mg 添加量が多いほど超伝導特性が悪くなるなどの逆の傾向が見られた。また、これまでの研究で、Ag-Sn 中の Sn 濃度が高くなるにつれて超伝導特性がよくなるということが分かっている。現在、より Sn 濃度を増加させた Ag-11at%Sn-2at%Mg, Ag-11at%Sn-4at%Mg 及び Ag-11at%Sn-6at%Mg を芯材に用いた線材を作成中である。なお、Mg 添加効果が拡散反応促進による Nb₃Sn 層厚の増加によるものか、検討を進めている段階であるが、生成した Nb₃Sn 層厚が薄すぎるため、あまりよくわからない。

参考文献

[1] Gen Matsumoto, Kiyoshi Inoue, Akihiro Kikuchi, Takao Takeuchi, and Tsukasa Kiyoshi, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.17 2007, PP. 2580-2583.

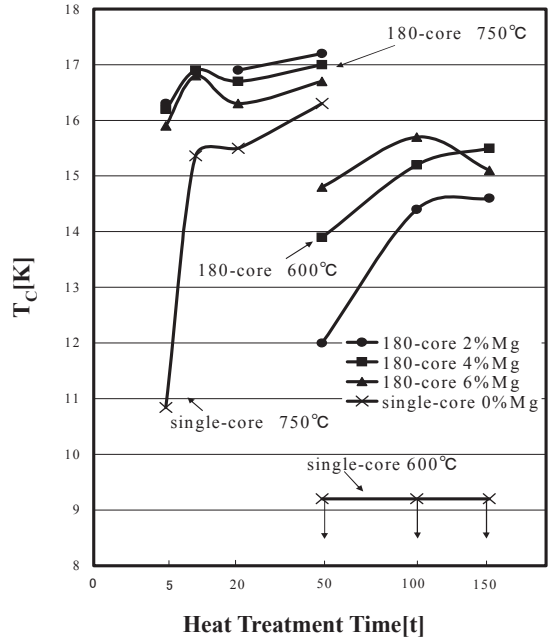


Fig. 1. T_c vs. Heat Treatment Time curves for single-core Ag-9at%Sn/Nb wire, 180-core Ag-9at%Sn-2at%Mg/Nb wires, 180-core Ag-9at%Sn-4at%Mg/Nb wires and 180-core Ag-9at%Sn-6at%Mg/Nb wires. These wires were heat treated at 600°C and 750°C.

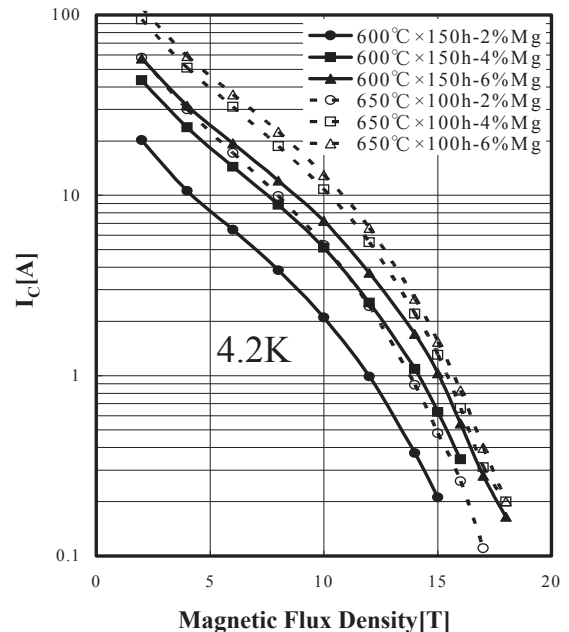


Fig. 2. I_c vs. B curves for 180-core Ag-9at%Sn-2at%Mg/Nb wires, 180-core Ag-9at%Sn-4at%Mg/Nb wires and 180-core Ag-9at%Sn-6at%Mg/Nb wires. These wires were heat treated at 600°C and 650°C.

Sn 基合金シート組成とこれを用いた Nb₃Sn 線材の組織と特性Effects of Sn-based Sheet Composition on the Structure and Performance of Nb₃Sn Wires

太刀川 恭治, 露木 達朗(院), 林 裕貴(院), 中田 光栄(院) (東海大・工); 竹内 孝夫(NIMS)
 K.Tachikawa, T.Tsuyuki, Y.Hayashi, K.Nakata (Faculty of Engr., Tokai Univ.); T.Takeuchi(NIMS)
 E-mail:tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

Sn-Ta 系, Sn-Ti 系合金シートを用いた新しい Nb₃Sn 線材は, ジェリーロール(JR)法によって作製され, 優れた高磁界特性を示す。本研究では Sn-Ta 系, Sn-Ti 系シートを用いた線材のシート組成の影響並びに組織と特性の比較, 検討を行う。

2. 実験方法

種々の組成の Sn-Ta 混合粉末に少量の Ti を置換し, これに Cu を添加した混合粉末を真空炉において ~780°C で溶融拡散し, ボタン状の Sn-Ta 系合金を作製した。これをプレスしてプレート状に加工し, 一方溶融, 鋳造法により作製したインゴットをスライスすることで Sn-Ti 系合金プレートを得た。これらのプレート状合金を圧延して厚さ 90 μm のシートとし, 厚さ 100 μm の市販 Nb シートと重ね, 1.2mm φ の Nb-3.3at%Ta 芯に巻きつけて JR 複合体を作製した。この複合体を外径/内径 10.0/7.3mm の Nb-3.3at%Ta シースに挿入して溝ロール加工後線引きして単芯線を得た。これらの線材は 1.5 × 10⁻³Pa の真空中において 700~775°C で熱処理し, 試料とした。シートと線材断面の組織を EPMA と EDX により分析し, また臨界電流 I_C を垂直磁界下で 4端子法によって 1 μV/cm の基準で測定し, さらに I_C を線材断面積で除して non-Cu J_C をもとめた。

3. 実験結果と考察

3.1 Sn-Ta 系シート線材

Fig.1 にボタン断面の Sn, Ta, Cu 及び Ti の EPMA による元素分布を示した。Sn マトリックス中に Ta 粒子がほぼ均一に分散し, また Cu-Sn 系粒子の存在も認められる。Ti は Sn と結合して Cu-Sn 系粒子に比べて細かく分布しており, Ta 粒子の周りに存在する傾向がある。Ti が Sn と共存して Ta 粒子の周りに存在することが, 少量の Ti 置換により Ta 粒子と Sn マトリックスの結合を良くして, ボタンの凝固がタイトになる原因と考えられる。また, このボタンは Sn の融点より遥かに高い 700°C で加熱しても形状が変化しないユニークな挙動を示す。EDX 分析によると Sn マトリックス中には平均 1.2at% の Ta が含まれており, Sn-Ta 系状態図によると微量の Ta の固溶が Sn の融点を急激に高めると考えられる。

Fig.2 に Sn-Ta 系シート線材断面における Nb₃Sn 層の EPMA による構成元素分析を示した。厚さ約 75 μm の Nb₃Sn 層にわたり Sn は 25at% の化学量論比組成を示す。Ta は約 3at% で均一に分布し, 微量の Cu と Ti が含まれる。Sn-Ta 系シート線材では, 広いシート組成について 4.2K, 22T で 150A/mm², 20T で 250A/mm² の non-Cu J_C がえられる。

3.2 Sn-Ti 系シート線材

Fig.3 に組成と熱処理条件の異なる Sn-Ti 系シート線材の I_C(non-Cu J_C)—磁界曲線を示した。Sn+4wt%Ti+5wt%Cu シート線材は Nb₃Sn 層厚の増大により Sn+2wt%Ti+5wt%Cu シート線材より, かなり大きい I_C がえられ, 750°C で熱処理された線材は 4.2K, 22T で non-Cu J_C ~150A/mm² を示した。725°C で熱処理した線材は, 磁界の低下による J_C の増加が大きくなる。Sn-Ti 系シートへの少量の Zr の添加も Nb₃Sn 結晶の微細化のため J_C が増加し, 4.2K, 20T で non-Cu J_C 250A/mm² の Sn-Ta

系シート線材に近い特性を示した。

終わりに Sn-Ti 系合金を溶製していただいた(株)大阪合金工業所 水田泰次氏, 文珠義之氏に深甚な感謝を示します。

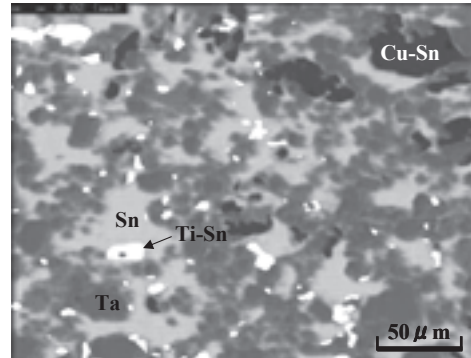


Fig.1 EPMA composition mapping on the cross-section of 4/1(Sn/Ta)-3at%Ti+3wt%Cu button.

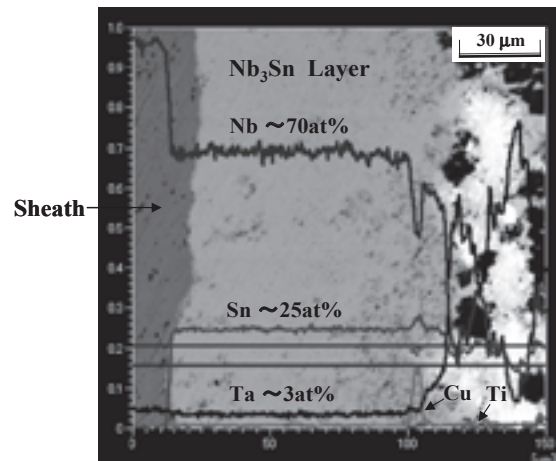


Fig.2 EPMA composition profile of Nb₃Sn layer formed in 4/1(Sn/Ta)-3at%Ti+3wt%Cu sheet wire (750°C × 100h). Right hand side black points are Ta.

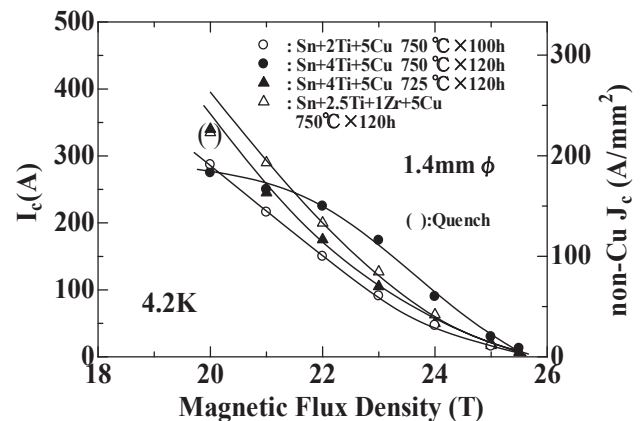


Fig.3 I_C (non-Cu) J_C versus magnetic field curves of different Sn-Ti based sheet wires heat treated at quoted condition.

高 Sn 濃度ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の微視的組織と Jc 特性

Microstructure and Jc property of Nb₃Sn wires using high Sn bronze

田川 浩平, 稲葉 彰司, 宮下 克己(日立電線); 谷口 博康, 朝永 満男(大阪合金)

TAGAWA Kohei, INABA Shoji, MIYASHITA Katsumi (Hitachi Cable); TANIGUCHI Hiroyasu, TOMONAGA Mitsuo (Osaka Alloy)

E-mail: tagawa.kohei@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

ブロンズ法 Nb₃Sn 超電導線材は高磁場マグネット用途として最も適用実績を有する線材であるが、NMR 装置では、分析感度および分解能向上のため、更なる高磁場臨界電流密度 (Jc) の向上が求められている。

ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の Jc 特性は、ブロンズ中の Sn 濃度に大きく影響されることから、高 Sn 濃度化による高 Jc 化の検討が行われており、現在では Sn 濃度 16wt%ブロンズを適用したブロンズ法 Nb₃Sn 線材が実用化されている。[1]

我々は、高磁場中での一層の Jc 特性改善を目的に、より高 Sn 濃度のブロンズを用いた線材開発を行っており[2]、17wt%Sn ブロンズを適用した線材作製に成功している。

今回、本線材の熱処理条件の違いによる Nb₃Sn 生成相の微視的組織と Jc 特性の相関について調査した結果について報告する。

2. 実験方法

作製した 17%Sn 線材の諸元を Table 1 に、断面写真を Figure 1 に示す。

作製した線材は、Figure 2 に示すような 3 通りの条件で熱処理し、微視的組織観察および Jc の評価を行った。

Table 1. Specifications of Nb₃Sn wires

Size (mm)	1.29 x 2.13
Bronze	Cu-17%Sn-0.3%Ti
Filament diameter (μm)	4.0
Fil. number	50,749
Cu ratio	0.27



Figure 1. Cross section of Nb₃Sn wire

3. 結果と考察

熱処理後のフィラメントの SEM 写真を Figure 3 に、nonCu Jc-B 特性を Figure 4 に示す。Figure 3 からは熱処理 pattern 2 および pattern 3 が Nb₃Sn 生成相が厚く、Jc 特性に優れた熱処理であるように思われたが、Figure 4 の Jc-B 特性を見ると、pattern 3 は Jc が高いものの、pattern 2 は pattern 1 よりも低い結果となった。Nb₃Sn 相の平均粒径を比較すると、Jc 特性に優れた熱処理条件ほど粒径が小さいことから、粒径、Nb₃Sn 組成およびその濃度勾配といった Nb₃Sn 相の面積率以外の因子も Jc 特性に大きく寄与していると考えられる。Jc 特性に及ぼすそれらの因子の影響については、当日報告する。

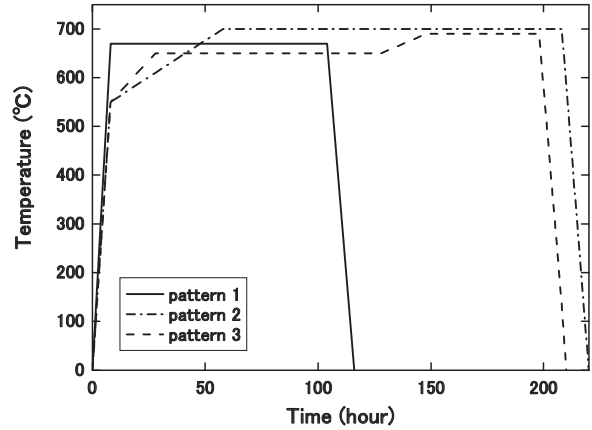


Figure 2. Heat Treatment pattern

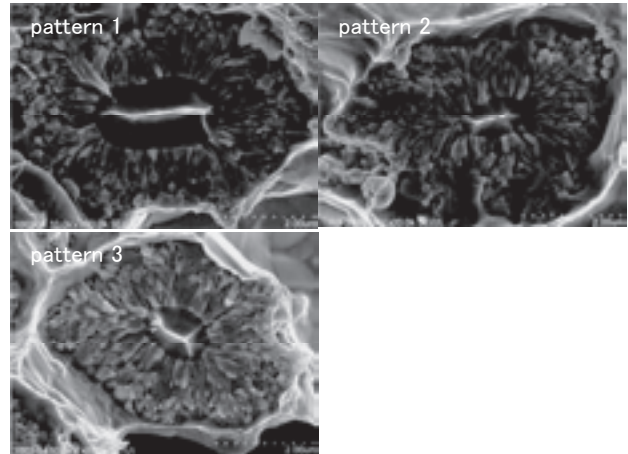


Figure 3. Cross section of Nb₃Sn filaments

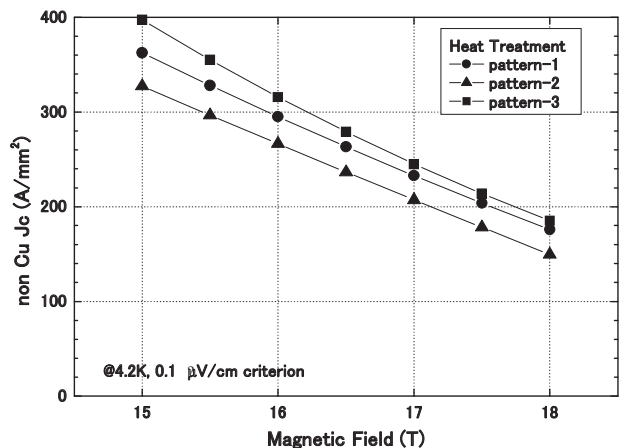


Figure 4. nonCu Jc-B curves of Nb₃Sn wires using 17%Sn-bronze

参考文献

- G. Iwaki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 12, 1042(2002)
- G. Iwaki et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.77

Nb₃Sn線材の超伝導特性に与える偏差歪と等方歪の影響

Influence of deviatoric strain and hydrostatic strain for superconducting properties of Nb₃Sn wires

小黒英俊, 淡路智, 西島元, 渡辺和雄(東北大金研); 片桐一宗(岩手大)

OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen, WATANABE Kazuo (IMR, Tohoku Univ.);
KATAGIRI Kazumune (Iwate Univ.)
E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、事前曲げ処理によって Nb₃Sn 線材の超伝導特性が大幅に向上することを報告してきた[1]。この現象は、Nb₃Sn 線材の残留歪が軸方向に加えて、横方向も緩和されて起こることを、中性子回折実験によって明らかにした[2]。この事実、Nb₃Sn 線材の超伝導特性の歪依存性を正確に把握するためには、Nb₃Sn 線材に加わる歪を3次元歪に拡張して考える必要がある事を示している。

今回は、Nb₃Sn 線材の超伝導特性と3次元歪との関係をより詳しく調べるため、事前曲げ処理に加えて引張り歪を加えた状態の超伝導特性を調べた。そのために、強磁場低温下で線材に引張り歪を印加できる装置を作製した。そして、Nb₃Sn 線材の超伝導特性と歪の関係を、事前曲げ処理と引張り歪印加装置を用いて、3次元的に把握することを試みた。

2. 実験方法

試料は、事前曲げ処理による線材内部の歪の変化を中性子回折実験から調べた[2]、CuNb/Nb₃Sn 線材を用いた。

低温、強磁場下で線材に引張り歪を与えるため、引張り歪印加装置の作製を行った。作製した装置は、長さ15 mmの線材を直接引張ることで、引張り歪を与えることができる。このときに加えた歪は、線材に直接貼付けたひずみゲージで測定した。ひずみゲージは、線材の軸方向と横方向の2方向に対して貼付けて、2方向の歪を測定した。歪を与えた状態で線材の電気抵抗の磁場依存性を測定し、その結果から B_{c2} を求めた。 B_{c2} の歪依存性を様々な温度において測定を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 に、熱処理直後の CuNb/Nb₃Sn に対する B_{c2} の引張り歪依存性を示す。この図から、線材の残留歪が 0.43% であることが分かる。これは、 I_c の引張り歪依存性を調べた結果とよく合う[2]。0.76% まで引張り歪を加えた後に、歪を 0.43% まで戻すと B_{c2} はピークの値まで戻ったことから、不可逆歪は 0.76% 以上であることが分かった。

実験では、軸方向と横方向の歪を測定したため、その結果から、3次元歪を考えることが出来る。このとき、ten Haken らの用いた偏差歪 (Deviatoric strain) ϵ_{dev} を用いて B_{c2} との関係性を Fig. 2 に示した[3]。偏差歪は、

$$\epsilon_{dev} = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2}$$

で表され、体積変化を無視したときの変形量を示す。Fig. 2 から、偏差歪は Nb₃Sn 線材の B_{c2} に大きな影響を与えることが分かる。そして、線材が圧縮されている状態と引張りがかえられている状態で、偏差歪に対する B_{c2} が異なることが分かった。ここで、偏差歪に加えて等方歪の影響を考える。等方歪 (Hydrostatic strain) ϵ_{hyd} は、

$$\epsilon_{hyd} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

と表され、体積変化を示す。等方歪も、測定結果から計算することが出来て、最大で 0.44% という大きな歪が加わっていることが分かった。この結果は、等方歪が Nb₃Sn 線材の超伝導特性に影響を及ぼすほどの大きな歪の量を持つことを示唆している。その詳細は当日報告する。

本研究は科学研究費補助金基盤(B)、科学研究費補助金(特別研究員奨励費)、および新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)平成16年度産業技術研究助成事業の援助を受けました。

参考文献

1. H. Oguro et. al., TEION KOGAKU Vol. 39 (2004) p.422
2. H. Oguro et. al., J. Appl. Phys. Vol. 101 (2007) 103913
3. B. ten Haken et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 5 (1995) p.1909

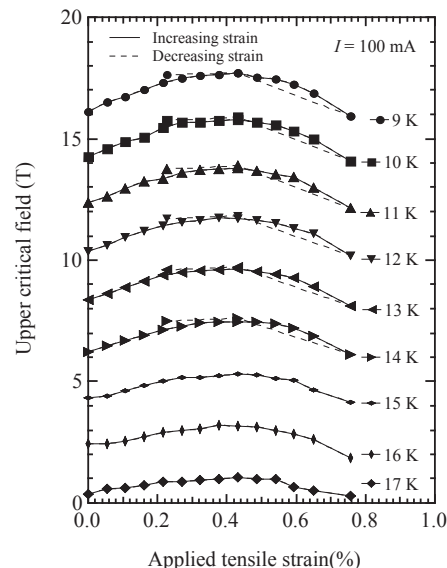


Fig. 1 Upper critical field as a function of the applied tensile strain for CuNb/Nb₃Sn wires at various temperature.

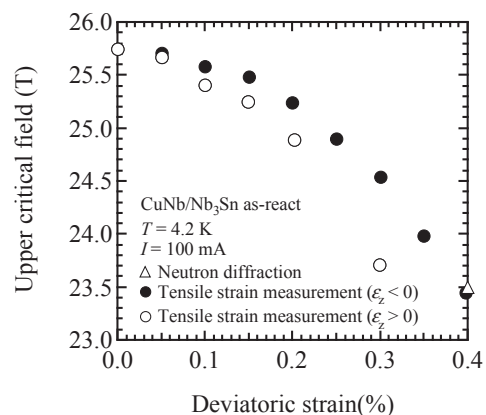


Fig. 2 Deviatoric strain dependence of B_{c2} for CuNb/Nb₃Sn wires. Closed and open circle symbols correspond to the compressive and the tensile strain state, respectively. Triangle symbols are the result of neutron diffraction[2].

Cu-Nb補強構造の異なるNb₃Sn線材の横圧縮応力効果

Transverse compressive stress effect of Nb₃Sn wires with different Cu-Nb reinforcing structure

石川 雄介, 常松 泰孝, 片桐 一宗, 笠場 孝一(岩手大学); 淡路 智, 西島 元, 渡辺 和雄(東北大); 三好 一富(古河電工)
 ISHIKAWA Yusuke, TSUNEMATU Yasutaka, KATAGIRI Kazumune, KASABA Koichi (Iwate University)
 AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen, WATANABE Kazuo (Tohoku University); MIYOSHI Kazutomi (Furukawa Electric, Co. Ltd)

1. 緒言

主な実用超伝導線材としてCu安定化Nb₃Sn超伝導線材がある。最近では大型・高磁界マグネットのための高強度化の線材補強を施した線材が開発されてきている。

本研究ではCuNb補強安定化Nb₃Sn線材について、線材断面における補強材の配置、CuNb中のNb量、CuNbの超伝導部に対する割合などが、線材の臨界電流I_cの横圧縮応力依存性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験

2.1 試料

本研究で用いたNb₃Sn線材は、古河電工で製造されたものであり、CuNb/Nb₃Sn線材は通常のCu安定化Nb₃Sn線材の安定化銅の一部をCu-Nb複合材に置き換えたものである。CuNb複合材は、in-situ法(IS; Cu=20%Nb)およびJelly Roll法(JR; Cu=50%Nb)それぞれによって作製されたものを用いた。Table 1に試料の仕様を示す。

2.2 装置

東北大学金研強磁場超伝導材料研究センターの15Tソレノイド型超伝導マグネットのφ50mmボア中に横圧縮応力評価装置を挿入して4.2K、14.5Tの磁界中で行った。横圧縮装置は本体に取り付けられた2つのCuターミナルにはんだ付けされた試料に対して圧子により圧縮荷重を加える仕組みとなっている。圧子幅は3および6mmで、圧縮応力は圧子幅と線材直径から投影縦断面積を用いて計算した値を用いた。臨界電流は4端子法で測定する。線材の電流端子間距離は26mmであり、電圧端子間距離は5および10mmとした。

3. 結果と考察

Fig. 2に圧子幅3mmの横圧縮試験の結果を示す。内部補強線材は低応力領域から劣化が開始し、100MPaくらいまでは補強のないNRよりも劣化している。外部補強線材は低応力域で劣化が小さいが100MPaを超えるあたりから急に劣化が大きくなりIS線材では175MPa付近で内部補強線材の特性の方が良くなる。JR線材でも250MPa付近で同様の逆転が生じると推測できる。

外部補強線材が低応力領域で劣化が鈍い理由としては線材が圧縮されたときの応力集中は圧子の付近で生じ、補強材が外部にある線材はその応力を補強材が受け持ってくれるためと考えられる。

JR-2とJR-3を比べた場合、補強材の体積分率を35%から50%に増加してもあまり大きな変化は見られなかった。補強材の割合は特性には大きく影響しないことがわかる。JR線材はIS線材に比べてCuNb中のNb量が多い。しかし、内部補強線材においてはIS線材に比べて劣化が早い、外部補強線材においてはそのような違いは認められず、統一的な理解はできない。

圧子が3mmのときと6mmのときのIS線材の結果をFig. 2に示す。内部補強材で圧子が6mmのときには3mmのときのような低応力領域での劣化は見られない。これは圧子の端で応力集中などが生じるとすれば、6mmのときはその影響が相対的に小さいためと考えられる。外部補強材では大きな違いはない。

4. 結論

- ・内部補強線材のI_cは低応力領域から劣化が開始し、圧縮に弱い、高応力領域では、I_c劣化を抑える働きがある。
- ・外部補強線材はすべて約100MPaまでは劣化が小さく、これを超えると劣化が急になる傾向が認められた。
- ・CuNb中のNb量が増すと内部補強材では劣化が大きくなり、外部補強材においては、I_c特性の違いはない。
- ・圧子幅が3mmのときは圧子の端の影響が大きい。

Table.1 Specification of Nb₃Sn wires

	JR-1	JR-2	JR-3	IS-1	IS-2	NR
Wire Dia. (mm)	1.000					
Fil. Dia. (μm)	3.3 (nominal)					
Number of Fil.	9.690	11.457	7.087	9.696	11.457	11.457
Reinforcer	Jelly Roll (Cu:Nb=1:1)			in-situ (Cu:Nb=5:1)		-
Location of Reinforcer	Int.	Ext.		Int.	Ext.	-
Volume Fraction						
Cu	15.8	20.2	20.5	17.3	17.7	52.0
Reinforcer	33.3	31.8	49.0	31.2	35.4	-
SC	50.9	48.0	30.5	51.5	46.9	48.0

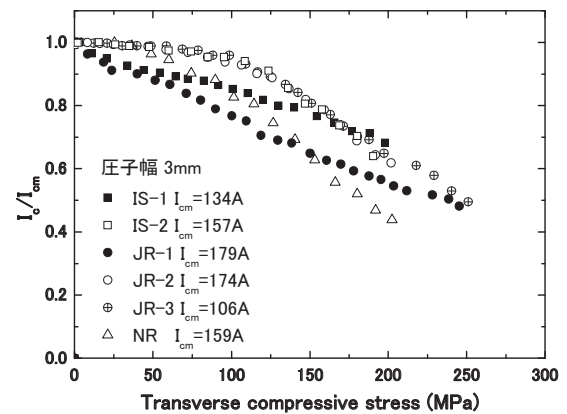


Fig. 1 Transverse compressive stress effect

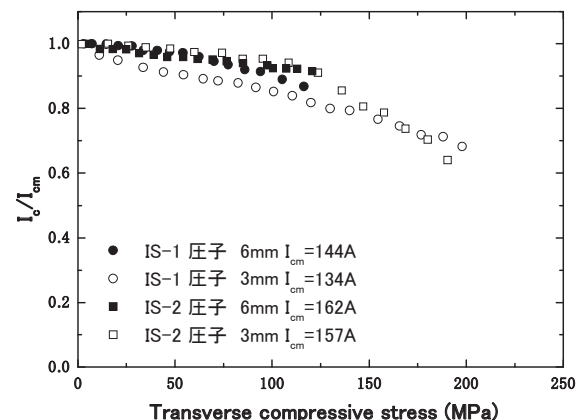


Fig. 2 Effect of indenter width

in-situ 法 Cu-Nb 複合線材の繰返し負荷に対する機械-電気的特性変化

Changes of mechanical and electrical properties of *in-situ* Cu-Nb wires under cyclic stressing

渡辺 充, 片桐 一宗, 笠場 孝一, 中村 竜太(岩手大); 淡路 智(東北大); 斎藤 隆, 後藤 謙次(フジクラ)

WATANABE Mitsuru, KATAGIRI Kazumune, KASABA Koichi, NAKAMURA Ryuta (IWATE Univ.);

AWAJI Satoshi (TOHOKU Univ.); SAITO Takashi, GOTO Kenji (FUJIKURA)

E-mail: kasaba@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

in-situ 法により作製された Cu-Nb 複合線材は、大きなアスペクト比をもつ Nb 繊維が減面加工中に形成され、これが銅の転位の障壁として働くため、複合則によって予想される引張り強さよりもかなり高い強度を示し、低い Nb 重量分率により導電性も保たれている [1]。

本研究では、超伝導線材の補強安定化材として使用される 4.2K および高磁場パルスマグネット導体として使用される 77K の環境において、*in-situ* 法 Cu-Nb 単芯線材の引張り、疲労特性とそれに伴う電気的特性変化を明確にした。

2. 試験片および実験方法

使用した供試材は、カルシウムつぼ溶解法を用いて作製した直径 150 mm の Cu-Nb(10 および 30wt.%)インゴットを鍛造加工して直径 13.4 mm のロッドとし、Cu を被覆した後、途中アニールを数回施しながら伸線加工した線径 0.8 mm、加工ひずみ 4.00 および 2.31 のもので、これらの線材に補強安定化材の受ける 650°C で一時間のアニールを行った。

4.2K および 77K における機械的特性とそれに伴う電気的特性を調べるため、引張試験、その後引き続き疲労試験に移行してヒステリシスループと電気抵抗率を測定した。4.2K 環境は東北大金研で、1 nV 精度の KEITHLEY 2182A NANOVOLTMETER により 4 端子法にて抵抗率測定を行った。Nb が超伝導状態になるので、5 T の磁場を加えている。

高サイクル疲労試験には容量 250 N の島津製電磁式微小材料試験機(マイクロサーボ MMT-250NB-10)を用いた。試験片長さ 60 mm、つかみ間距離 40 mm、荷重制御、応力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})=0.1$ 、繰返し速度 20 Hz の片振りとし、液体窒素中(77K)および室温(273K)で行った。

3. 結果と考察

引張り試験の結果、Nb 量の増加にしたがい強度の増加が見られた。また、4.2K と 77K で引張り特性にほとんど変化は見られなかった。

Fig. 1 に 293K および 77K で得られた高サイクルまでの S-N 曲線を示す。この結果、293K に比べ 77K では疲労強度の大幅な増加がみられた。これは転位の移動を助ける熱振動のエ

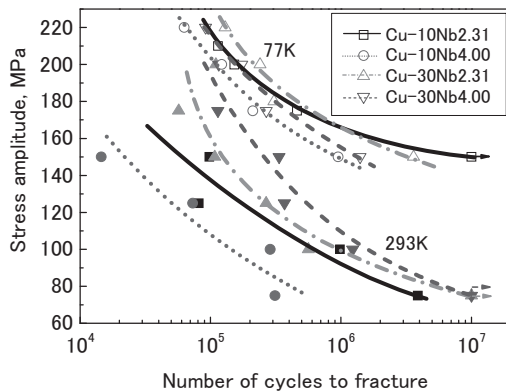


Fig. 1 S-N curves of Cu-Nb composite wires

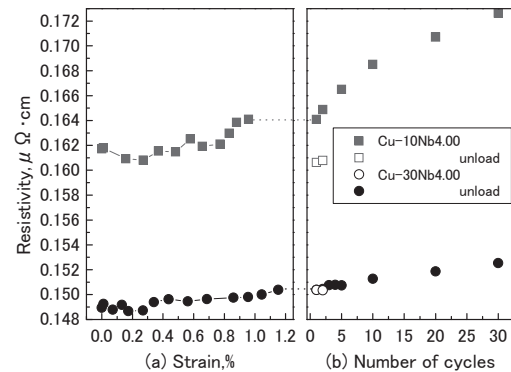


Fig. 2 Changes in resistivity with (a) strain and (b) number of cycles 4.2K

ネルギーが低いためより小さい塑性ひずみの繰返しとなり、き裂発生・成長が遅くなったためと考えられる。また、293K での Cu-30%Nb を除き、伸線加工ひずみが低い方が疲労強度は高くなり、同様に 77K での伸線加工ひずみ 2.31 を除いて、Nb 量が多い方が疲労強度は高かった。

Fig. 2 にひずみと応力繰返しに伴う抵抗率の変化を示す。ひずみにもなる抵抗率は引張りの初期段階でいったん減少し、その後増加する傾向が見られる。これは残留応力の引張りによる緩和と、転位および原子空孔の増加による抵抗率の増加のためと考えられる [2]。両線材とも応力繰返しにともない抵抗率は単調増加した。これは転位や原子空孔の増加に対応するものと考えられる。また、除荷を行うと抵抗率は減少する傾向がみられた。これは弾性変形域で変形していた結晶格子が緩和したためと考えられる [2]。また、77K においてどの線材も高サイクル域でも抵抗率は単調増加し、10⁵ 回程度でおよそ 15% 程度増加した。

応力繰返しとともに塑性ひずみ幅は減少し、10 サイクル程度で飽和した。また、初期の塑性ひずみ幅は Cu-10Nb の方が大きい。

4. 結言

Nb 量の増加にしたがい引張り強度は増加するが、抵抗率も増加する。

293K に比べ 77K では疲労強度が大幅に増加した。また、77K では伸線加工ひずみが低い方が疲労強度は高く、293K では Nb 量が多い方が疲労強度が高かった。

4.2K では引張りに伴う抵抗率はいったん減少し、その後増加する傾向が見られる。負荷回数とともに抵抗率は増加し、除荷すると抵抗率は減少する傾向が見られた。

塑性ひずみ幅は 10 サイクル程度で飽和する。初期の塑性ひずみ幅は Cu-10Nb の方が大きい。

参考文献

1. K. Katagiri, et al.: JCSJ, Vol. 38 NO. 4 (2003) p.159
2. A. Shikov, et al.: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 12 NO. 1(2002) p.1185

Nb₃Al 線材の異常磁化

Magnetization Anomaly of Nb₃Al Conductors

和氣 正芳(KEK); 山田 隆治(Fermilab); 菊池 彰弘(NIMS)
 WAKE Masayoshi(KEK); YAMADA Ryuji(Fermilab); KIKUCHI Akihiro(NIMS)
 E-mail: wake@post.kek.jp

1. はじめに

ニオブを母材とする RHQT-Nb₃Al 線材で磁化測定を行ない、ニオブの臨界磁場をはるかに越える所まで大きな磁化が残り、ニオブの転移に寄るとされる大きなフラックスジャンプが観測された。これは Fermilab での磁場磁場掃引法で観測されたが、NIMS での SQUID 法では観測されなかった。KEK でのサンプル移動法で、この磁化異常はサイズ効果であることが確認された。Twist の効果もサンプルサイズと同じように現れることが解った。春の学会報告「RHQTNb₃Al の磁化測定」では、この異常の原因について、不純物効果などが議論されたが proximity effect に基づいた説明が有力であった。その後の研究で、フィラメントに流れる電流により遮蔽され、内部のニオブが低磁場に保たれるシールド効果によるものと考えられるに至った。これを有限要素シミュレーションで検証できたので結果を報告することにする。

図 1

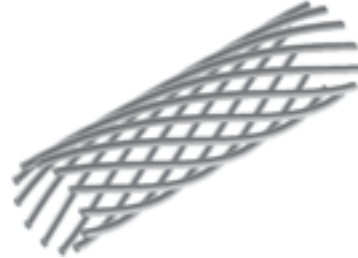


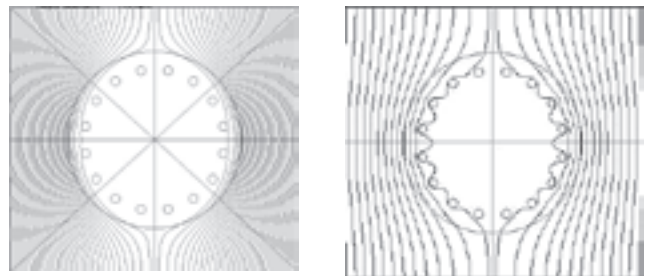
図 2



2. シールド効果

RHQTNb₃Al線材はニオブ母材にNb₃Alフィラメントが埋め込まれており、逆に内部のニオブは図1のようにフィラメントで囲われている。このために内部のニオブが Hc 以上の外部磁場に対しても低磁場保たれるというのが基本的な考え方である。無限長線材に垂直磁場をかけた場合を断面で考えると、磁場が低い場合は図2左のようにフィラメントとニオブに一体となってマイスナー電流が流れて内部は図3左のように遮蔽される。磁場が上がればニオブは電流を流さなくなるが、フィラメントには電流が流れ続ける。ANSYS によりエネルギーミニマムの断面での電流分布を求めると図2右のように Cosθ分布のようになることがわかる。この時も図3右のように内部は磁場が遮蔽されている。

図 3



3. Twist された線材

実際の線材は無限長ではなく、シールド電流を考える場合には必ずループがなければならない。一本のフィラメントに沿って電流を考えると、図2右の様な電流分布は、図4に示す様にフィラメントを流れる電流が変化していることに対応することがわかる。フィラメント本数 N、twist pitch Pl とすれば、n-1 番目から n 番目のフィラメント位置が Pl/N の距離で

$$J = (j_z(n) - j_z(n-1)) / Pl/N$$

の電流が失われることになり、これがマトリックスに放出される電流となる。各断面での電流分布は同等であり、Sinθ 的な分布となる。各位置からの電流を総計すれば、図5の様に磁場平行方向でのほぼ一様な電流となる。すなわち、フィラメントに沿って流れるシールド電流はマトリックスを横切って沁みだすループを形成していることがわかる。

図 4

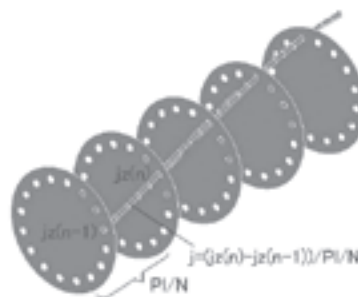
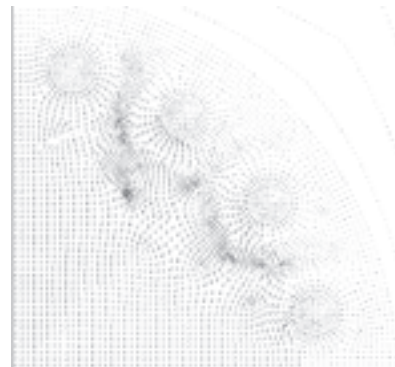


図 5



4. メカニズム

ニオブの臨界磁場を越えても内部の磁界は低くニオブマトリックスを横切ってシールドループは保たれる。しかし、twist pitchと磁場で決まる電流が流れるので、ニオブの臨界電流を越えた所でループは崩れ、フラックスジャンプが起こる。Twist pitchが小さいほど低磁場でジャンプが起こるという観測結果をこのモデルはうまく説明できている。小さなサンプルでは非常に短いtwist pitch と同等のことが起こっていると考えてよい。

RHQT 法 Nb₃Al 超電導線の冷凍機冷却下における常電導遷移特性

Thermal stability in the cryocooler cooling for RHQT processed Nb₃Al superconducting wires

下山 雅弘, 七戸 希, 金 錫範, 村瀬 暁 (岡山大工);
 西島 元, 渡辺 和雄 (東北大金研); 菊池 章弘, 伴野 信哉, 竹内 孝夫(NIMS)
 M. Shimoyama, N. Nanato, S.B.Kim, S. Murase (Okayama University);
 G. Nishijima, K. Watanabe (Institute for Materials Research, Tohoku University);
 A. Kikuchi, N. Banno, T. Takeuchi (National Institute for Materials Science)

1. はじめに

現在, 20 T 超の無冷媒超電導マグネットの開発が計画されており, 使用に適した様々な補強型超電導線の開発が進められている. 現在までに, Cu-Nb, Ta, Nb-Ti-Cu などの補強材を内包した数種類の補強型 Nb₃Sn 線が開発され, それらの熱的安定性が報告されている¹⁾.

一方, Nb₃Al 線は, Nb₃Sn 線に比べて優れた耐歪み特性を有し, 20T 以上の強磁場領域を含む全磁場領域で高い J_c を示している. そこで, 本研究では matrix の異なる 2 種類の外部安定化 Nb₃Al 線の冷凍機冷却条件における熱的安定性に関して実験的に検討したので, その結果について報告する.

2. 試料線材及び実験方法

実験では, RHQT 法で作製された matrix が Ta と Nb の 2 種類の Nb₃Al 線を試料線材として使用した. その諸元を Table 1 に示す. 冷凍機冷却型超電導マグネットに使用されることを想定し, 直径 36 mm の FRP 製サンプルホルダに巻きつけ, これを GM 冷凍機に取り付けて冷凍機冷却下において実験を行った. 試料線材の外側に取り付けたヒータを使用して, ワイヤームーブメントやエポキシクラックなどによって発生するパルスの熱擾乱を模擬した. 線材がクエンチを起こす熱擾乱エネルギーの最小値を最小クエンチエネルギー (MQE; Minimum Quench Energy) とし, 安定化評価の基準として求めた. また, 常電導伝播速度 (v_p), 温度マージン (T_m) についても同様に測定を行った¹⁾.

Table 1 Dimensional data of Nb₃Al wires

Matrix	Nb	Ta
Outer diameter (mm)	1	1
Nb ₃ Al filament diameter	132	66×54
Nb ₃ Al filament diameter (μm)	50	7.57
Volume fraction of Cu stabilizer(%)	50	45.8
Volume fraction of matrix (%)	22	34

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に各条件 14T-8K, 10T-10K における MQE の負荷率依存性を示す. MQE は Ta matrix 線の方が高く, どちらも同図より強磁場になるほど MQE が低いという冷凍機冷却の特徴が示された. Fig.2 に示す MQE-温度マージン依存性では, ほぼ直線性を示し, これも冷凍機冷却で得られている特性と同様である. また, Fig. 3 に常電導伝播速度の通電電流密度依存性を示す. 両線材の v_p は, 良く知られている式(1)で示されるように J_{op} の増加と共に上昇し, ほぼ比例の関係が得られ, Nb matrix 線の方が僅かに高い. また同じ J_{op} で比較した場合, ρ κ 値の差は全体からすると微小なの

で一定と考えると, v_p は線材全体の熱容量 (γC) に依存する. Cu の熱容量は Nb, Ta と比較して小さく, Nb₃Al と matrix を合わせた占積率は Ta matrix 線が 54% と大きいので, Nb matrix に比べて v_p が低下したと考えられる.

$$v_p = \frac{J_{op}}{\gamma C} \sqrt{\frac{\rho \kappa}{T_c - T_{op}}} \dots (1)$$

また MQE 算出式では熱容量に比例するため, Ta matrix の MQE は Nb matrix と比べて高い値を示したのではないかと考える.

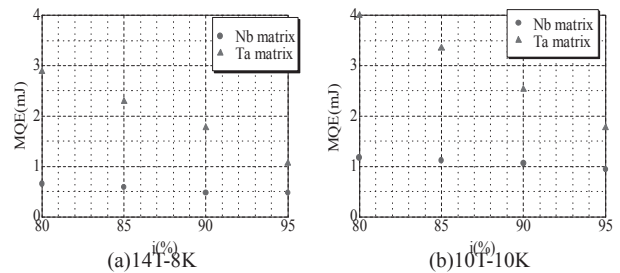


Fig.1 MQE-normalized current characteristics of Nb₃Al wires

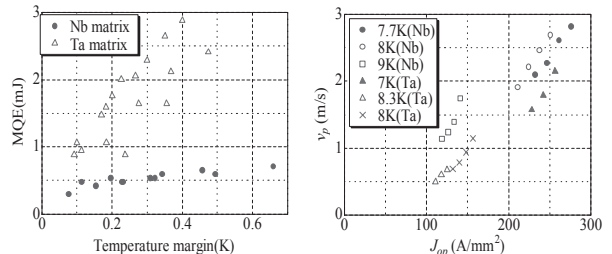


Fig.2 MQE-temperature margin Characteristics of Nb₃Al wires

Fig.3 Relation between normal propagation velocity and transport current density of Nb₃Al wires

4. まとめ

実験結果から, Ta matrix と Nb matrix の matrix が異なる 2 種類の Nb₃Al 線において, 熱容量の差が MQE, v_p に影響を及ぼすことが示唆された.

本研究における磁場中の測定は東北大学金属材料研究所 附属強磁場超電導材料研究センターで行われた. 本研究は独立行政法人物質・材料研究機構学連連携研究の資金も得て行われた.

参考文献

1) K. Watanabe, et.al. "Effects of Cu stabilizer configuration on thermal stability of Nb₃Sn composite superconductors under cryocooling condition" IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15(2005), p.3412.

急熱急冷条件を変化させた RHQT 法 Nb₃Al 超伝導線材RHQT Nb₃Al superconducting wire prepared with rapid heating and quenching conditions

物質・材料研究機構 飯嶋安男、菊池章弘、伴野信哉、竹内孝夫

Y. Iijima, A. Kikuchi, N. Banno and T. Takeuchi

National Institute for Material Science, Japan

E-mail : IIJIMA.Yasuo@nims.go.jp

【1】はじめに

前報において、我々は RIT 法で作製した Nb/Al-5at%Mg 前駆体線材を用いて、急熱急冷処理時の通電電極間隔および線材移動速度(急冷速度)を変化させ急熱急冷法 Nb₃Al 線材の高 J_c化を試みた結果、通電電極間隔を 10 から 30cm へ長くすることで 15T での J_cを約 2 倍に改善することが出来ることを報告した。しかしながら、RIT 法で作製した Al 厚の厚い線材で高 J_c化が出来たことは良い結果ではあるが、RIT 法線材の J_cは JR 法線材と比較してもともと低い値であったものが Al 厚の薄い JR 線材の J_cと同等の値を示したに過ぎなかった。

本報告では Al 厚の薄い JR 法線材でも高 J_c化が図れないか検討するために、JR 法前駆体線材を線材移動速度(急冷速度)と通電電極間隔を独立に設定することで急冷速度と加熱時間をそれぞれ変更し、急熱急冷条件の最適化を行い、超伝導特性に及ぼす影響について検討を行った。また、Nb₃Al への変態熱処理前の急冷線材(過飽和 bcc 固溶体線材)の加工による超伝導特性の向上が報告されているが、本 RIT 法および JR 法両線材においても伸線加工を施し、加工と超伝導特性との関係を調べた。

【2】実験方法

RIT 法前駆体線材は、7 芯からスタートしたダブルスタックニオブチューブ法で作製した、外径 0.73mm、Al 合金芯数 102,487 (7x121x121) 本、Al 合金芯径約 0.6 μm、の Nb/Al-5at%Mg 多芯線材を用い、JR 法前駆体線材は外径 1.35mm、芯数 132 芯、Nb マトリックス比 0.8 の多芯線材を用いた。RIT 法線材は RHQ 処理、変態熱処理を施すと最終的に芯数 121 芯、Nb マトリックス比 3.16 の断面構成になる。

RHQ 処理は、線材移動速度 0.33、0.67、1.00m/s の 3 種類、通電電極間隔 10、20、30cm の 3 種類変化させ、加熱時間と急冷速度の違う組み合わせを RIT 法は 9 条件、JR 法は線材径が太く加熱電源容量の制約から 5 条件行った。到達温度は設定電圧を変化させて行い、直接 A15 相が出来る条件から過飽和 bcc 固溶体領域までの範囲で RHQ 処理を行った。

急冷線材の減面加工は、それぞれの条件で優れた J_c-B 特性が得られた設定電圧(温度)の中から RIT 法線材は 4 種類、JR 法線材は 2 種類を選び、カセットローラーダイスを用いて、RIT 法線材は 0.73mm から 5 条件、JR 法線材は 1.35mm から 6 条件サンプリングしながら最終約 0.5mm まで行った。

A15 相への変態熱処理は一般的な 800°C-10hr の熱処理を 800°C まで 1hr で昇温、10hr 保持、炉冷して実施した。

超伝導特性は 4 端子抵抗法で測定した。T_c は抵抗遷移の midpoint の温度とし、I_c は電圧が 1μV/cm の電流値とした。JR 法線

材の I_c 測定は線材保護のためのシャント抵抗を使用して行った。試料の組織観察には、光学顕微鏡、SEM 等を用いた。

【3】実験結果

超伝導特性に与える減面加工の影響を調べるための伸線加工途中に RIT 法線材の一つの条件で断線が起きた。主な原因は過飽和 bcc 固溶体領域へ入ってすぐの条件のために一部分に A15 化合物が生成されていたためと思われる。断線が起きるほどの A15 化合物の生成箇所はこの1回のみで、その後および他の条件では、無断線で伸線加工することが出来た。RIT 法線材は断面構造の制約から Nb の拡散距離の長いところが有り、RHQ 処理後のフィラメント中に残留 Nb が通電電極間隔 10cm、線材移動速度 1m/s の場合存在する。また、フィラメント間のマトリックスが JR 法線材と比べ厚いため、それらが均一な伸線加工を妨げる原因になる可能性がある。

図に RHQ 処理直後の線材を伸線加工した時の断面減少率と T_c との関係を示す。黒塗りが RIT 法線材で通電電極間隔が 10 と 30cm、白抜きが JR 法線材で通電電極間隔が 20 と 30cm を表している。RIT 法線材は減面加工を施すと T_c が減少する傾向を示した。一方、JR 法線材は T_c にあまり大きな変化が無く、通電電極間隔が 20cm の線材で 50%の加工を加えたときに最高値が得られ、約 1K の T_c 上昇を示した。

J_c-B 特性、組織、その他の詳細は当日報告する。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の産業技術研究助成事業および文部科学省の原子力試験委託費から助成金を受けて実施されたものである。

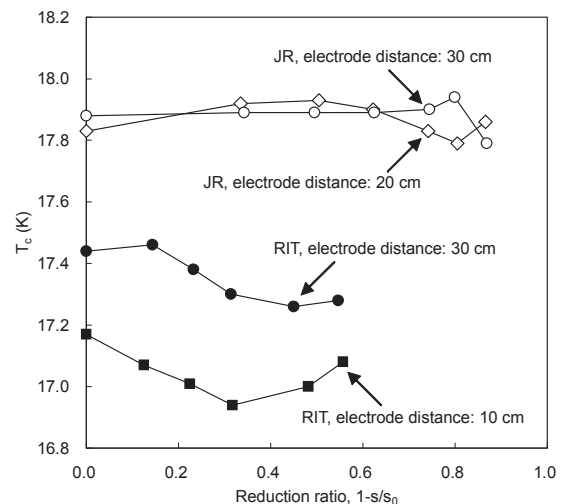


Fig. Dependence of T_c on reduction ratio of cross section.

Nb₃Al 超伝導線材における SC/常伝導マトリクス体積比の改善について

Study on improvement of volume ratio of SC/normal metal matrix for Nb₃Al superconductors

伴野信哉, 竹内孝夫, 飯嶋安男, 菊池章弘 (物質・材料研究機構); 田川浩平 (日立電線)
 BANNO N, TAKEUCHI T, IJIMA Y, KIKUCHI A (NIMS); TAGAWA K (Hitachi Cable, Ltd.)
 E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Nb₃Al 線材の開発において、最近大きな問題になりつつあるのは、変態法 Nb₃Al 線材のコア J_c (化合物あたりの臨界電流密度) が頭打ちになりつつあるのではないかと懸念である[1]。コア J_c の向上には、前駆体である Nb (Al) 過飽和固溶体に塑性加工を施すことが効果的であることが明らかになってきたが、その効果が比例的でなく、ある限界値に収束しているのではないかと懸念である。この問題の背景には、主となる Nb₃Al の磁束ピンニングセンターが何かということが未だはっきりしていないという問題がある。このように Nb₃Al 線材開発にとって、磁束ピンニング機構を明らかにすることは、今後きわめて重要な検討課題である。

しかし一方で、Nb₃Al 線材の優れた耐ひずみ特性を何とか利用したいという要請も高まっている。そのためには、どうしても Overall J_c の向上が急務となる。

そこで本研究では、こうした背景の中で、違ったアプローチとして、線材全体に占める超伝導体積率の改善によって Overall J_c の向上がどこまで可能か検討した。

Nb₃Al 超伝導体積率の増加で問題となることは、常伝導マトリクスの低減による、急熱急冷時における線材の機械的強度の低下、および伸線加工性の低下の2点である。本件はこの2点を中心に検討した。

2. 線材試作[2]

従来の常伝導マトリクス比は、0.8であった。本件では、限界を見極めるために、マトリクス比 0.25 (ほぼ設計の限界値) (Wire A) および 0.5 (Wire B) の2種類の線材の試作を行った。また強度を補償するために、マトリクスを Nb でなく Ta とした。Fig. 1 に、マトリクス比 0.25 の線材の伸線結果をまとめた。Fig. 2 には各線材の断面写真を示す。

3. 結果と考察

まず Wire A であるが、当初の予想に反して、比較的伸線加工性は悪くなかった。ダイス引き途中で断線して、CRD (カセットローラーダイス) に切り替えたが、予定の 1.0 mm まで伸線できた。これは、一つには、マルチビレットの押し出し比が大きく、密着性がある程度確保されたことなどが要因と考えられる。これに対して、Wire B では、マトリクス比を 0.5 に増加させたにもかかわらず、多数の断線が生じ、伸線が極めて困難であった。ビレットサイズを増加し、押し出し比を大きくできなかったことが一つの要因と思われる。最終的には、CRD 伸線を組み合わせて、一部を線径 1.13 mm まで加工した。

急熱急冷処理 (RHQ) について簡潔に結果を述べると、マトリクス比 0.25 の場合には、線材の張力等を調節しても、溶断を避けることができなかった。線材強度が足りな

いと思われる。一方マトリクス比 0.5 の場合では、RHQ 可能であった。ただし、線径が 1.13 mm 以上となると、装置に取り付けられた、線材を支える小さな回転治具の部分で、線材が曲げひずみに耐えられず、断線を生じる。

Fig. 3 に Wire B の Non-Cu J_c を示す。この線材のベストのコア J_c は、従来材 (ME365) と同等であり、従って SC 体積率が向上した分だけ (約 2 割)、Non-Cu J_c の向上が見られた。マトリクス比 0.5 は、伸線の工夫次第で可能な値と思われる。

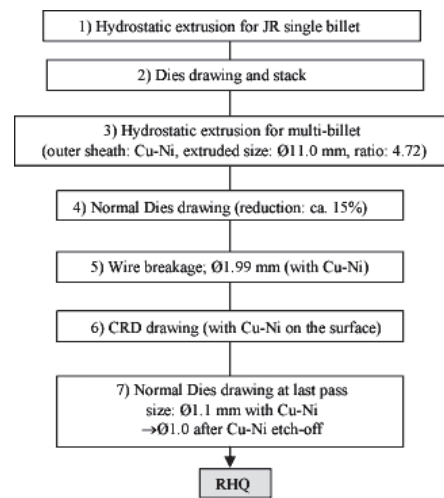


Fig. 1. Result on the drawing process of Wire A (matrix ratio; 0.25, wire diam.; 1.0 mm)

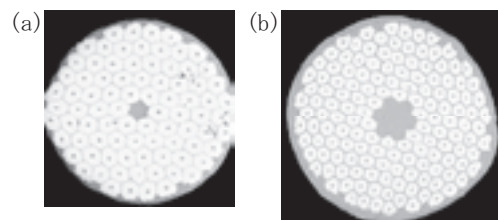


Fig. 2. (a) Wire A: matrix ratio; 0.25, diam.; 1.0 mm (b) Wire B: matrix ratio; 0.5, diam.; 1.13 mm

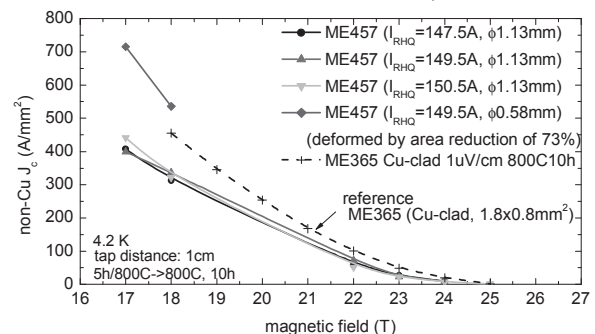


Fig. 3. Non-Cu J_c vs. magnetic field of Wire B (ME457)

[1] N. Banno, T. Takeuchi, et al.: IEEE Appl. Supercond., Vol. 17 (2007)
 [2] N. Banno, T. Takeuchi, et al.: IEEE Appl. Supercond. submitted
 なお本研究の一部は、文部科学省科学技術振興費委託研究、及び文部科学省原子力試験研究の一環として行われた。

長尺銅安定化 Nb₃Al 線材Long length Cu stabilized Nb₃Al strands

菊池章弘 (NIMS); 小林道雄 (ヒキフネ); 田川浩平 (日立電線); 竹内孝夫 (NIMS)

KIKUCHI Akihiro (NIMS); KOBAYASHI Michio (Hikifune); TAGAWA Kohei (Hitachi Cable); TAKEUCHI Takao (NIMS)

E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

我々は急熱急冷変態法 Nb₃Al 丸線材への安定化材の複合方法として、イオンプレーティングと電解めっきにより実施しており、昨年 2 月には 1.2km の線材(F1)の製造に成功し、さらに今年 6 月にも同じく 1km 級の線材(F3)を製造した。今回、それら長尺銅安定化 Nb₃Al 線材の各種特性を比較すると共に、今後の開発計画についても展望する。

2. 線材の諸元

Table 1 に、製造した F1 及び F3 線材の諸元をまとめた。F1 線材におけるマトリックスは全て純 Nb であるのに対し、F3 線材ではフィラメント間のマトリックスを純 Ta としている。銅比、RRR、non Cu J_c のいずれもが両線材でほぼ同等の特性である。

Table 1 Long Cu stabilized Nb₃Al strand specification

Strand ID	F1	F3
Strand Dia. (with Cu)	1.03 mm	1.00 mm
Strand Dia. (without Cu)	0.72 mm	0.70 mm
Number of JR Filament	144	222
Geometric Filament Dia.	50 μm	38 μm
Cu/non-Cu ratio	1.0	1.0
Filament Barrier	Niobium	Tantalum
Central Core of Filament	Niobium	Tantalum
Central Dummy Filament	Niobium	Tantalum
Skin Matrix	Niobium	Niobium
Area Reduction after RHQ	71.6 %	71.6 %
I _c (4.2 K, 12 T)	582.9 A	581.3 A
I _c (4.2 K, 15 T)	351.5 A	343.0 A
non-Cu J _c (4.2 K, 12 T)	1,400 A/mm ²	1,481 A/mm ²
non-Cu J _c (4.2 K, 15 T)	844.2 A/mm ²	873.8 A/mm ²
n value (4.2 K, 12 T)	40.3	49.9
n value (4.2 K, 15 T)	35.5	40.3
RRR (20K/300K)	150-200	80-170

3. めっきの効率

めっき時の電流密度の増加は銅の析出効率の向上に有効であるが、一般的に電流密度が高すぎると表面状態はひどく荒れたものとなり、めっき内部もボイドが多くポーラスな組織となる。1km 長の線材へ実用的な生産効率で安定化銅として使えるめっきが付与できるかが真の実用化を得るための鍵である。Fig. 1 にめっき速度の推移をまとめた。現状の速度は

7m/h で、初期の 7 倍まで高速化できている。現在、さらに継続して超高速めっき技術の開発を精力的に推進している。

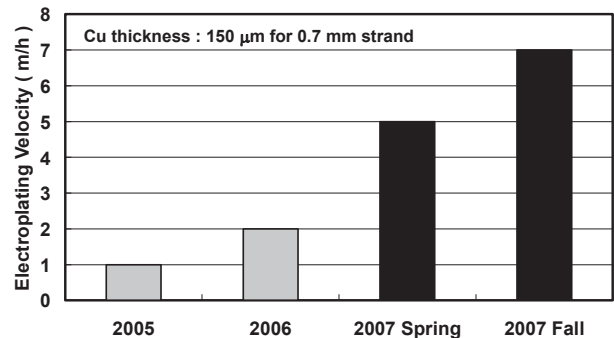


Fig. 1 An achievement history of Cu electroplating velocity

4. めっきの密着性

安定化銅と線材の界面では、電氣的・熱的・機械的に強固な接続性が求められる。F3 線材(外径 1mm)を厚さ 0.6mm まで冷間圧延試験した結果を Fig. 2 に、また同線材を 180 度まで密着曲げ試験した結果を Fig. 3 に示す。いずれの試験でもめっきの剥離は認められず良好な密着性を保有していることを示している。電解めっき前には厚さが約 1μm の銅イオンプレーティング膜を高真空中で高速被覆(120m/h)している。

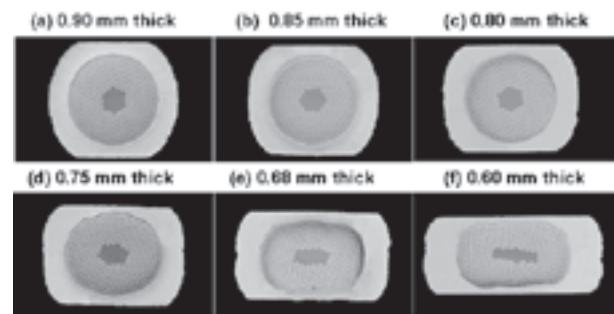


Fig. 2 Rolling deformation test for F3 strand.

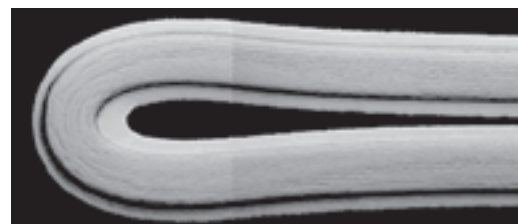


Fig. 3 180 degree bent test for F3 strand.

その他各種超伝導特性については当日報告する。

RHQT-Nb₃Al 線材開発における線径柔軟性について

Wire-diameter variety for RHQT Nb₃Al development

中川 和彦, 田川 浩平, 宮下 克己(日立電線);
 竹内 孝夫, 北口 仁, 伴野 信哉, 飯嶋 安男, 菊池 章弘(NIMS)
 NAKAGAWA Kazuhiko, TAGAWA Kohei, MIYASHITA Katsumi (Hitachi Cable);
 TAKEUCHI Takao, KITAGUCHI Hitoshi, BANNO Nobuya, IJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro(NIMS)
 E-mail: nakagawa.kazuhiko@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

高磁界特性に優れた急熱急冷・変態 (RHQT) 法 Nb₃Al 線材を NMR 用の内層マグネットに適用するには、組合される中層や外層マグネットと一括励磁できることが望ましい。

これまでに急熱急冷処理及びクラッド加工の km 級への長尺化が可能なことを確認しており¹⁾、一括励磁のためには線材寸法で各種サイズに対応できることも重要になる。

本報告では、各種線径における超電導特性と、それらを基にして平角線材加工した場合の線材特性について試作、評価した結果について報告する。

2. 実験方法

安定化銅を複合化した RHQT-Nb₃Al 線材は、これまでに線径 ϕ 1.35mm の Nb/(Nb-Al)過飽和固溶体線材を用いて、クラッド法で 1.81 × 0.8mm 平角線材を作製してきた。過飽和固溶体線材の仕様を表 1 に、平角線材の仕様を表 2 に示す。

安定化銅を複合化するクラッド加工では、過飽和固溶体線材も減面加工され、それに伴い超電導特性も変化することが知られている。

本実験では、線径が ϕ 1.25mm の過飽和固溶体線材を用い、平角線材で 1.6 × 0.7mm サイズへのクラッド加工に伴う加工度と超電導特性について評価した。クラッド加工は複数パスの減面加工により成型複合化されるため、途中段階におけるサンプルについて、磁場中での I_c、及び J_c 特性を評価した。

また、過飽和固溶体線材の作製可能範囲を把握し、さらに拡大する目的で、急熱急冷処理時の各種条件を調整し、線径 ϕ 1.52mm の過飽和固溶体線材作製も行った。各試作線材の仕様は表 1、及び 2 に併せて示す。また、図 1 には ϕ 1.25mm の過飽和固溶体線材の断面写真を示す。

3. 実験結果と考察

線径 ϕ 1.25mm 線材による急熱急冷処理は、特に大きな支障なくこれまでと同様に実施でき、銅複合化のためのクラッド加工を実施した。従来よりも細い線径でのクラッド加工だったが、断線等の異常も発生せず、銅複合化しながらの平角加工が可能であることが確認できた。

また、その際の途中工程における平角線材の I_c 値と加工度との関係を図 2 に示す。クラッド加工により I_c 値は一旦増加し、加工度が約 10%程度で最大値を示した後は減少する傾向であることがわかった。

このことから I_c 値からみた最適加工範囲は約 10%程度であることがわかるが、さらに J_c 特性や銅複合化の点から、最適範囲を把握することが重要であることが予想される。

本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究(新方式 NMR 分析技術の開発)、15 文科振第 332 号、16 文科振第 556 号、17 文科振第 212 号、18 文科振第 457 号及び 19 文科振第 207 号の一環として行われた。

4. 参考文献

- 1 K.Tagawa, et al.: IEEE Trans. on ASC, vol.16, No.2(2006), p.1168

Table 1. Specification of the precursor wire

	A	B	C
Wire diameter (mm)	1.25	1.35	1.52
Nb matrix ratio	0.80	0.80	0.80
Filament diameter (μ m)	82.7	89.3	100.5
Number of filament	132	132	132

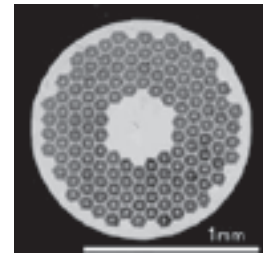


Fig.1 Cross-sectional view of the precursor wire

Table 2. Specification of the rectangular wire

	AR	BR
Diameter of precursor wire (mm)	1.25	1.35
rectangular wire size (mm)	1.61 × 0.70	1.81 × 0.80
Nb matrix ratio	0.8	0.8
Filament diameter (μ m)	67	75
Cu stabilizer ratio	0.4	0.41

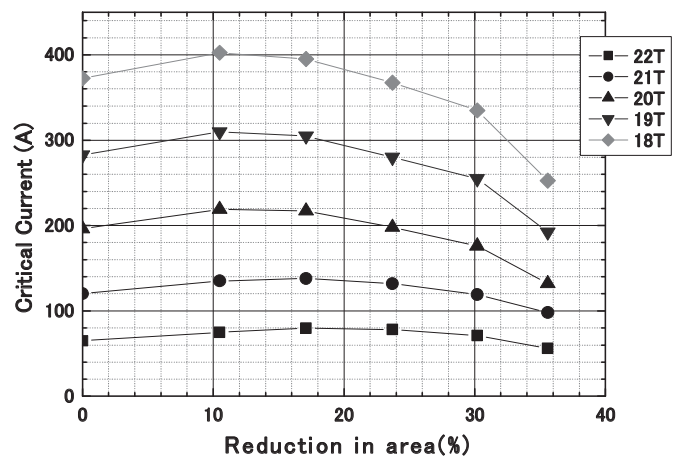


Fig.2 I_c-Reduction curves of the Cu cladding rectangular wire

2007 年度第 10 回低温技術講習夏合宿 —7T 超電導マグネットへの挑戦— 10th summer seminar for cryogenic technology – The challenge to making a 7T superconducting magnet –

戸町恭平(九州大学); 阿部智信(大陽日酸); 上村真也(東芝); 小黒英俊(東北大学); 照沼英之(堀田電機製作所)
TOMACHI Kyohei (Kyushu University); ABE Tomonobu (Taiyo Nippon Sanso Corporation);
UEMURA Shinya (TOSHIBA); OGURO Hidetoshi (Tohoku University);
TERUNUMA Hideyuki (Hotta Electric Machine, Ltd.)
E-mail: tomachi@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

若手の研究者や技術者を対象とし、超伝導および低温技術への理解を深めることを目的として開催されてきた本合宿は今回で 10 回目を迎えた。高エネルギー加速器研究機構にて 2007 年 9 月 3 日から 8 日までの一週間で学んだ内容や、巻線実習の成果を報告する。

2. 座学

本合宿は主に超伝導マグネットについての座学と超伝導マグネットの巻線実習により構成される。座学では超伝導マグネットの設計、計算機による磁場解析の演習、クライオスタット、寒剤の取り扱い方そして励磁用電気回路などについて、巻線実習で必要となる基礎的な講義が行われた。

3. 超電導マグネット巻線実習

有効内直径 44 mm の超伝導コイルで中心磁場 7 T を達成することを目標に巻線実習を行った。使用した線材は線径 0.7 mm の NbTi 線でフォルマル絶縁付きである。また、この線材の 4.2 K における臨界電流値は 5 T で 304 A、8 T で 119 A である。これを、カプトンシートと FRP で絶縁を施したボビン(内径 54 mm、長さ 71 mm)に巻きつけた。このボビンを巻線機にセットし、テンションを約 4.0 kgf に維持しつつ巻線作業を行った。

設計仕様上、各層の端部に隙間ができてしまうため、その度にエポキシ系のグリーンパテを埋めることにより補修した。特にコイルの中心部の巻き方は、後の励磁試験で中心磁場へ影響してくるため、ある程度巻き取りに慣れてきた後も細心の注意を払って作業を行った。

こうして、受講者がグリーンパテによる入念な補修と均一な巻き取りを意識した結果、最外層まで目立った歪みもなく、当初の設計予定通り一層当たり 96 ターン、計 44 層で超伝導コイルを巻き終えることができた (Fig. 1 参照)。巻き取り後はコイルをカプトンシートで絶縁し、補強のため SUS 線を一層巻きつけた後に結線部の処理を施した。

4. 励磁試験結果

完成した超伝導マグネットをクライオスタット内に設置して液体ヘリウムで 4.2 K まで冷却し、励磁試験を実施した。Fig. 2 に励磁試験の実施回数と、クエンチ発生時の中心磁場およびクエンチ電流を示す。一回目のクエンチ電流は 102.6 A、そのときの中心磁場は 5.19 T と、ここ数年の結果に比べると小さい値となったが、トレーニングを重ねて 7 回目の励磁試験でクエンチ電流 138.2 A、中心磁場 7.01 T となり、目標の 7 T を達成することができた。また、直後の 8 回目の試験でも 7.00 T を記録したことから、励磁試験を終了した。

5. おわりに

一週間に渡る本合宿は、目標の 7 T を達成したことで無事に幕を閉じた。本合宿のように、手作りで超伝導マグネットを製作することでその原理を直に体験し、低温工学や超伝導に

についての知識を身につけることができる機会はそう無い。さらに、他の受講者や多くの講師の方々とのつながりができ、受講者が得たものは非常に大きい。今後も是非このような形で合宿が継続されることを望む。

6. 謝辞

高エネルギー加速器研究機構 細山謙二先生、仲井浩孝先生、中西功太先生、小島裕二先生、産業技術総合研究所 我妻洗先生、古瀬充穂先生、大陽日酸 上岡泰晴先生、物質・材料研究機構 佐藤明男先生、九州大学 柁川一弘先生、クライオウェア 藤岡耕治先生、住友重機械 佐藤敏美先生には、座学や巻線実習で超伝導マグネットに関する貴重な知識と技術を与えていただいた他、講習以外の時間でも多大なお世話をしていただきました。また、冷凍部会の光田忍様にも大変お世話になりました。ここで、講師の皆様様に改めて深く感謝申し上げます。

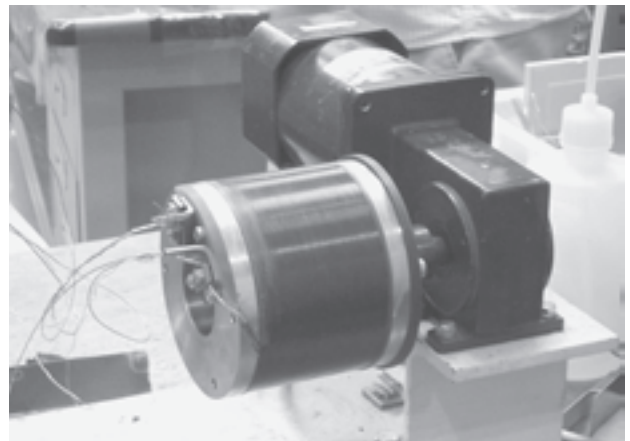


Fig. 1 Photograph of superconducting magnet just after winding.

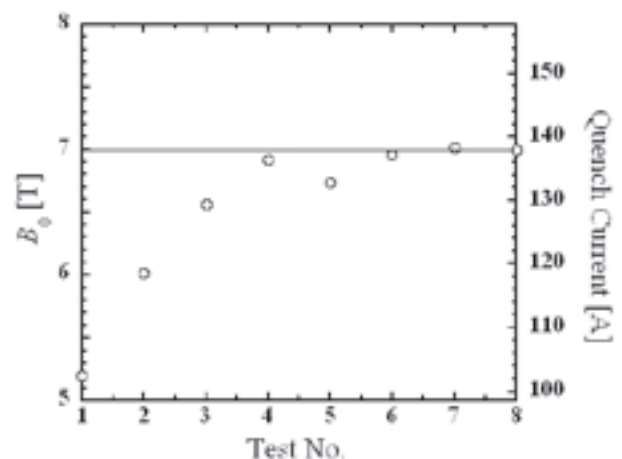


Fig. 2 Experimental results of training effect in fabricated superconducting magnet.

10年目を迎えた低温工学技術講習夏合宿中間総括 Summary Report on the Cryogenics Summer School in these Ten Years

佐藤 明男 (NIMS); 我妻 洸, 古瀬 充穂 (産総研); 柁川 一弘 (九大); 上岡 泰晴 (大陽日酸); 細山 謙二, 小島 裕二, 仲井 浩孝, 中西 功太 (KEK); 藤岡 耕治 (クライオウェア)

SATO Akio (NIMS); AGATSUMA Koh, FURUSE Mitsuho (AIST); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); KAMIOKA Yasuharu (Taiyo Nippon Sanso); HOSOYAMA Kenji, KOJIMA Yuji, NAKAI Hirotaka, NAKANISHI Kota (KEK); FUJIOKA Koji (Cryoware)

1. はじめに

1998年に始まったこの夏合宿の企画は、今年で10回目を迎えた。この10年の累計参加者は80名を超える。毎年、海外からの参加者も含めて4~14名が受講している[1-12]。2004年はKIASCとの共催で韓国で開催した[10]。講師で中国の加速器スクールにも参加している[4]。

2. 参加者の構成

参加者は専門分野も様々である。日本で開催したものに関しては、3割がマグネット技術に関係した人、残りの7割が、冷却、SC線材などマグネットとは直接関係しない人達であった。実際に実験用のマグネットを作ってみようという人、マグネットを通して自分達の技術・研究を見つめ直してみたいという人など、参加の動機はさまざまである。参加者からの評判を聞いて受講する同じ組織からのリピーターが多いのが特徴である。

3. マグネットの性能とその要因

マグネットは、設計仕様としては巻線内径が54 mm、巻線外径が103 mm、長さが67.2 mmのソレノイドである。外径0.7 mmのNbTi線を使っているから一層が96ターン、40層で3840ターンになるはずである(Magnet A)。10年間、同じ寸法の巻棒で同じマグネットをつくってきたが、その性能はさまざまである。最初の8年間の励磁結果をFig. 1に示す。この2年は新しい線に切り替えたが、 I_c 値が少し落ちたので層数を44に変更した(Magnet B, Fig. 2)。

実習生の技量によって一層あたりの巻線数にばらつきが出る。隙間ができるのと下の層に落ち込みも生ずる。特に巻線端部は、巻線角度が変わるから隙間を生じやすい。10年分のデータがまとまったのを機会に、一つの切り口として一層あたりの巻線数のばらつきとトレーニング特性の関係を整理してみた。図中で数字で示したのがその標準偏差である。第1回の1998年と第3回の2000年は、それぞれ6.5 T、5.4 Tと思うような性能が出なかったが、一層あたりの巻線数のばらつきも、それぞれ1.26、0.74と大きい。ばらつきが0.3以下のものは、すべて7 Tを達成し、トレーニング特性も良好である。ばらつきが0.4~0.5のものには、性能のいいものと悪いものが含まれている。総じて、巻線のばらつきとトレーニング特性には緩い相関があることが分かった。

もちろん、クエンチの原因は巻線のばらつきだけではない。特に端部の切り替え部分は何が起こっても不思議のないところである。頭の中だけで考えると得てして独りよがりのマグネット不安定の理論をつくりがちである。受講生の一人ひとりが巻線実習の中で不安定性の要因をそれぞれの手で感じたのがこの技術講習の最大の成果だろう。

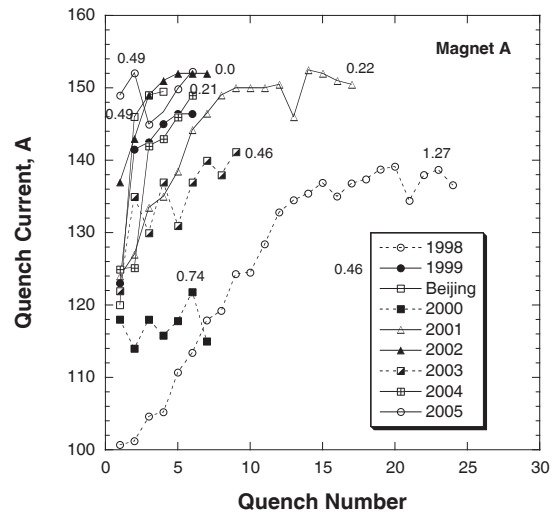


Fig.1 Quench Characteristics (Magnet A)

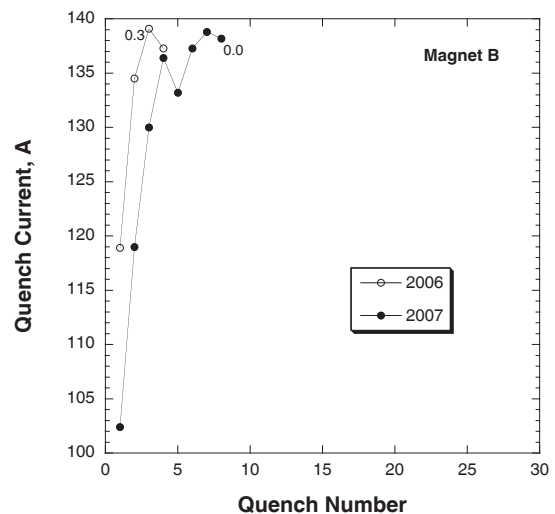


Fig.2 Quench Characteristics (Magnet B)

参考文献

1. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 60 (1999) p.21
2. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 61 (1999) p.258
3. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 61 (1999) p.259
4. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 62 (2000) p.246
5. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 63 (2000) p.281
6. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 65 (2001) p.79
7. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 65 (2001) p.80
8. S. Nomura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 67 (2002) p.292
9. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 67 (2002) p.293
10. K. Hosoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 71 (2004) p.62
11. S. Kasai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.168
12. R. Yokoo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.287

ミニ超伝導磁石の製作実習

Educational Fabrication of Mini-Superconducting Magnets

和氣正芳(KEK);中山悟(KEK)
 WAKE Masayoshi (KEK), NAKAYAMA Satoru (KEK)
 E-mail: wake@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構は連携する総合研究大学院大学への進学を考えている学生のために夏期実習を開催して来た。近年は対象を広げて KEK での研究活動を理解してもらい、研究機関が大学での教育に協力する意味合いで実施されている。今回、学生に超伝導磁石を自身で製作する体験を与える実習を行い良い結果を得たと思えるので報告する。

2. ミニ超伝導磁石

超伝導磁石の製作は、超伝導らしい強度の磁場を発生させようとすれば、一般には費用もかかり、短時日の実習では難しいものではないかと思われて来た。しかし、Maxwell 方程式の geometry scaling から考えれば、内径の小さなコイルを巻けば少量の超伝導線でもかなりの磁場が出せることがわかる。今回のミニ超伝導磁石は内径 14mm 外径 25mm 長さ 30mm のものであり、直径 0.45mm の Nb-Ti 線を約 500 回巻くものである。必要な線材の長さはわずか 30m であるけれども、設計上、図 1 のロードラインに示す様に現行世界最大の加速器テバトロン同等の 4.5T を発生可能だということになる。

3. 実習の実際

学生に超伝導磁石の製作を、身を持って体験することが目的なので、巻線機などは使わず、完全な手巻きを行うことにした。ミニ超伝導磁石なので大体 2 時間半位の緊張した作業が必要であり、これは学生に自分が巻いた磁石であるという思い入れを形成するに適切な努力と考えられる。その反面、学生によってはこのような作業に耐えられない学生もいるので、ある程度意欲を持って参加してもらう必要もある。

測定系もなるべくその場で直感的に理解し易い様に、コンピュータなどを介在させず、図 2 の簡単なものにしたが、磁場測定などに関しては準備が不十分で今回の発生磁場は設計ロードラインからの推定値である。

本当は、巻き線だけでなくボビンの製作である機械加工もやるべきであるが、今回は時間の関係であらかじめボビンを用意した。ガイダンスを兼ねて一応の原理、設計の講義を行い、翌日の朝から巻き線を始め、午後から 2 個を冷却励磁、さらに翌日午前中に 1 個を冷却励磁するスケジュールになった。もっと多くのコイルを励磁できるように今後クライオスタットの操作性なども改善したい。

4. 実験結果

超伝導磁石のパフォーマンスは良く知られているように巻き線の機械的安定性に大きく左右され、ワイヤーモーションがクエンチの原因になることが多い。今回、完全な手巻きで行ったことから、丁寧な巻き線ができたかどうか大きく達成磁場に影響するという大変面白い結果が出た。実際の所、同じボビンを使っても、巻き方によって巻き数に差が出来る位で、2 時間半を丁寧に巻き続けられた学生のコイルは目視でも違いが見え、また実際の達成磁場も高かった。また、小さい磁石でありながらもトレーニング効果も如実に現れ、超伝導磁石としての実習材料としては完璧なものと言える。表 1 に結果の一覧を示す。

5. 今後の実習

来年度もミニ超伝導磁石の製作実習を 6 月に予定している。今年は高エネルギー物理関係の研究室からの参加が主だったけれども、やはり超伝導工学関係の大学からの参加を充実したい。事前の講義・設計演習の充実が内容を豊かにするために必要と考えられるが、超伝導関連の大学との連携ならばこの点で連携を取りやすく、教育効果も上げ易いのではないかと考えられる。巻き線、冷却励磁だけでなく、機械加工まで含めた製作実習にできればさらに充実したものとなるだろう。

図 1 ロードライン

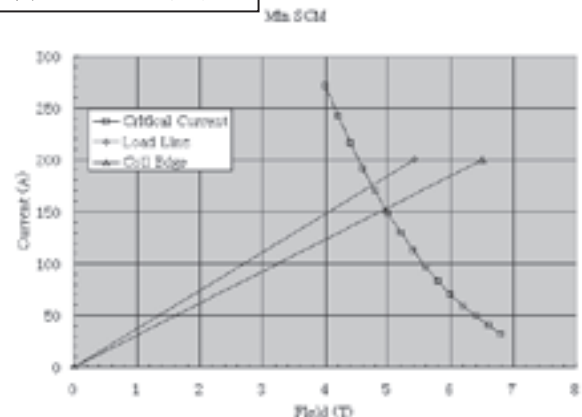


図 2 測定系

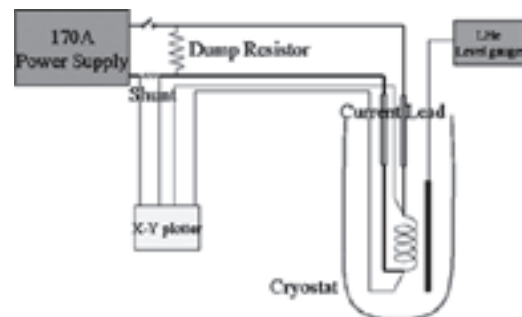


表 1 巻き線・励磁結果

	coil-1	coil-2	coil-3
常温抵抗[Ω]	10	8	9.6
線材長さ[m]	31.5	25.2	30.24
外径[mm]	25.4	23.5	25
内径[mm]	14	14	14
層数	12	10	12
層内巻数	42.4143884	42.7808487	42.13543
総巻数	508.972661	427.808487	493.6252
推定隙間[μm]	10.8	8.7	12.3
Bfac	0.0229	0.0196	0.0223
1st Quench[A]	69	116	137.6
2nd Quench[A]	70	117	144.5
3rd Quench[A]	71	117	145
4st Quench[A]	71	117	145.1
1st Quench[T]	1.5770	2.2792	3.0644
2nd Quench[T]	1.5998	2.2988	3.2181
3rd Quench[T]	1.6227	2.2988	3.2292
4st Quench[T]	1.6227	2.2988	3.2315

日中相互インターンシップ事業を通じた実践的技術者の育成と効果 Effects and Fostering practical young engineers through internship system between Japan and foreign country

重松利信、陳越、川崎仁晴、柳生義人、須田義昭、井上雅弘（佐世保高専）

T. Shigematu, Y. Chen, H. Kawasaki, Y. Yagyū, Y. Suda, M. Inoue (Sasebo Natl. College Tech.)

E-mail : shige@post.cc.sasebo.ac.jp

1. はじめに

実践力が求められる工業系の高等教育機関の教育では、生産工場等における教育（いわゆるインターンシップ事業）が非常に大きな効果を持つ。一方、現在大手の電機メーカー（日立、東芝等）をはじめとする大企業は、その生産拠点を中国に建設している。よって、日本経済にとって中国との関係強化は重要な課題となっている。その一方で、最近の報道にもしばしば現れるように、両国間には依然として国際的問題が存在しており、真の意味での「国際交流」は未だ行われておらず“産熱政冷状態”である。佐世保高専では佐世保市と中国との密接な友好都市関係と、佐世保高専がこれまで行ってきたインターンシップ事業を組み合わせさせた事業を行ってきた。具体的には、日本（佐世保高専）と中国（厦門理工学院）において、実践的若年技術者を育成するための相互交流を行い、相互の国においてインターンシップ事業を行った。本報告ではこれまでに行われたこの事業活動の具体的な内容と、佐世保市で行った本事業に対する評価結果を示す。

2. 取組内容

佐世保高専では、平成 17 年度から中国厦門地区の厦門理工学院と相互インターンシップ事業を行っている。具体的には、以下の事業を行っている。

- ① 佐世保高専の学生を中国厦門地区に派遣し（毎年 10 月下旬～ 11 月上旬）、厦門理工学院において同校学生と共同で講義や実験実習を行う。
- ② 同地区の日本企業の工場（NEC トーキン、FDK 等）においてインターンシップを行う。
- ③ 厦門理工学院の学生を本校に受け入れ（毎年 7 月上旬～ 下旬）、佐世保高専において本校学生と共同で講義や実験実習を行うとともに、佐世保の日本企業の工場（日本理工等）においてインターンシップを行う。

3. 取組の評価

これらの事業の内容と成果を評価するため、交流学生による、本事業に対するアンケート調査も行った。図 1 に、佐世保地区で行った「日本の若年技術者の育成に効果があるか」というアンケートの結果を、図 2 には「中国と日本との交流促進に効果があるか」というアンケートの結果を示す。どちらも全体の 80%以上が、本交流に効果があるという高い評価であった。また、ここには示していないがこれ以外のアンケート結果も、同様に高く評価された。

4. まとめ

佐世保市と中国との密接な友好都市関係と、佐世保高専がこれまで行ってきたインターンシップ事業を組み合わせさせた、実践的若年技術者を育成のための日中相互交流プログラムを考案し、実行した。事業後の評価委員による評価結果は、全体として高評価であった。今後は、平成 17 年度行った事業をレベルアップさせていく予定である。

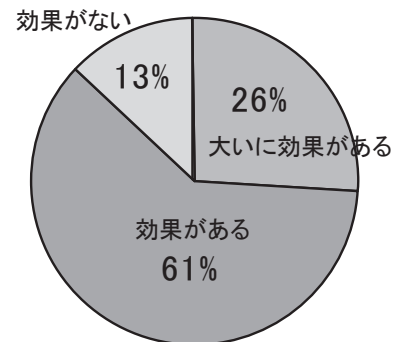


図1 「日本の若年技術者の育成に効果があるか」というアンケートの結果

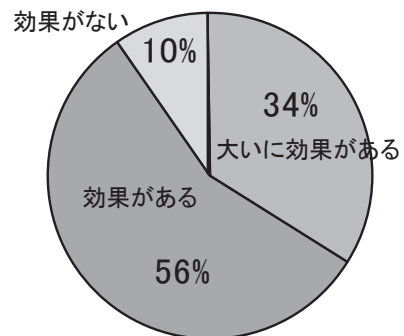


図2 「中国と日本との交流促進に効果があるか」というアンケートの結果

液化水素用超伝導液面計の基礎研究(3)

— 加圧条件下における液面検知特性 —

Fundamental studies of superconducting level gauge for liquid hydrogen (3)

— Level-detected characteristics at pressurized conditions —

松野 優(岩谷瓦斯); 武田 実(神戸大); 熊倉 浩明(物質・材料研)

MATSUNO Yu (Iwatani Industrial Gases); TAKEDA Minoru (Kobe University);

KUMAKURA Hiroaki (National Institute for Materials Science)

E-mail: matsuno@iig.iwatani.co.jp

1. はじめに

我々は液化水素用液面センサーとして有望視されている MgB_2 をベースとした超伝導線材の特性を研究している。これまでの報告^{1),2)}では、大気圧平衡下の液化水素を使用した試験により、サンプルが検知する液面位置のヒーター入力依存性および直線性などのセンサー特性を調べた。

液化水素は圧力の上昇に伴って沸点温度上昇及び密度低下が他の極低温液化ガスと比較して著しく大きい特性を持つ。そのため今回は、加圧条件下におけるセンサーの液面検知特性について調べ、液化水素の圧力とサンプルの常伝導化に必要なヒーター入力値及びセンサー出力電圧値との関係について調べたので報告する。

2. MgB_2 液面センサー

センサーに使用するサンプルは、 $CuNi(7:3)$ をシース材として Powder-in-tube 法をベースにした In-situ 法で作製し、線径、不純物の添加割合、 MgB_2 とシース材の断面積比等の条件を変えた。センサーは、シース材の周りにヒーター線(マンガニン線)を約2mmピッチで巻きつけたもの(外部加熱式)と、ヒーターを使用しないもの(自己加熱式)を各々作製した。Table 1 に作製した MgB_2 センサーの一部を示す。サンプルの抵抗測定には直流4端子法(電流 10mA)を採用し、端子間距離は 200mm とした。

3. 液化水素用実験装置

Fig.1 に実験で使用したガラスデュワーの写真を示す。デュワー本体はパイレックス製の単純真空断熱構造で、内径 70mm、高さ 1,000mm、槽内には熱電対を 3 箇所設置し、内部温度を計測した。輻射による侵入熱を防ぐため、光学用のスリットを除いて内槽表面に銀メッキ処理を施した。センサー及びスケールはデュワー内に挿入したプローブの先端に固定し、これを上下に移動してセンサーの位置を調整した。デュワー内の圧力制御には、任意の圧力に調整可能な背圧弁を用いた。圧力は、ブルドン管式圧力計及びデジタル圧力計により計測した。デュワーの四方にはアクリル板を配置し、内部に窒素ガスを常時導入することで、デュワー外表面の結露を防いだ。また安全対策としてガラス破損時の飛散防止のため、SUS のパンチプレートでそれらを囲った。

4. 実験方法

実験では、デュワー内に充填した液化水素を設定圧力まで昇圧し、温度平衡の状態を保持した。平衡後の液化水素はデュワーへの浸入熱により蒸発し、次第に液面が低下する。そこで任意のヒーター入力量を印加し、目視によりスケール上の液面位置を測定した。 MgB_2 センサーの抵抗値は出力電圧値とセンサーへの印加電流より換算した。なお、実験圧力は 0kPaG (水素の沸点温度; 20.4K)、100kPaG (同; 22.8K)、200kPaG (同; 24.6K) とした。

5. 液面検知特性

外部加熱式センサーを用いて、液化水素の液面位置とセンサーの抵抗値を測定した。液面の降下に伴ってセンサーの液化水素浸漬長が減少すると、ヒーター入力により常伝導化する部分が発生し、抵抗値が増加した。ヒーター入力値を各

圧力条件下で比較すると、再現性良く常伝導化するためにはどのサンプルも 3W 程度の入力が必要であることがわかった。次に、ヒーター入力値を一定にして、圧力増加に対するセンサー出力電圧の挙動を調べた。サンプル D-2 及び E-4 のセンサーでは、デュワー内の圧力変化に対し、液面位置とセンサー抵抗値は良好な直線性(相関係数:0.996 以上)を保ち、その近似直線の傾きは 3.1% (D-2)、2.3%(E-4)の差異を確認した。一方、E-5 のセンサーは、一部に直線性の乱れを確認した。

自己加熱式センサーの液面検知特性を同様に調べ、ヒーターの有効性を吟味した。その結果、自己加熱式センサーでは、液化水素浸漬長が長い状態では常伝導化せず、直線性が保たれないことを確認した。

参考文献

- 1) C. Kazama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.69
- 2) Y. Matsuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.50

Table 1 Some samples of fabricated MgB_2 wires.

Sample	Additive	Diameter [mm]	T _{c,on} [K]	R _{on} [Ω /m]
D-2	None	0.65	35.4	1.27
E-4	10%SiC	0.32	33.0	5.01
E-5	10%SiC	0.32	31.5	4.67

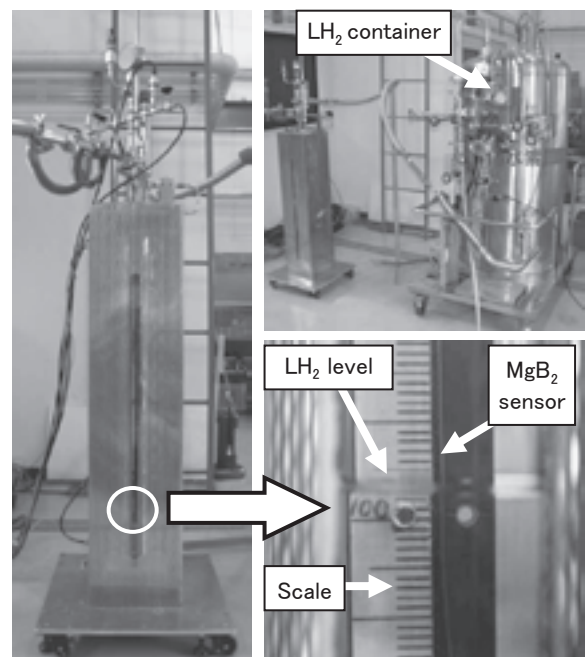


Fig.1 Picture of glass dewar for LH_2 experiments of liquid level sensor.

液体水素用超伝導液面計の研究開発

R&D of MgB2 Sensor for Detecting Level of Liquid Hydrogen

神谷 卓伸, 前村 孝志, 中村 亮, 三原 与周(三菱重工);
岡田 道哉(日立製作所); 大平 勝秀(東北大学)
E-mail: takanobu_kamiya@mhi.co.jp

1. 概要

地球温暖化に対する世界的な環境・エネルギー問題に対し、温室効果ガスを含まない水素エネルギー今後ますます転換または有効利用が期待されているが、その貯蔵形態としては輸送効率の面で有効な液体水素が有力な候補の一つとして上げられている。

液体水素の液面計は従来、静電容量等による方式が主流であるが、安価かつシンプルな計装システムが必要とされてきた。高温超伝導材 MgB₂ の発見により 39K 以下で電気抵抗がゼロとなることから液体水素への利用が可能となり、本研究開発では、この特性を液体水素用液面計に応用した。超伝導液面計で課題とされている直線性、応答性については、シース材をキプロニッケルで構成した MgB₂ 細径線材で液面計を試作することで、液体水素下で実用の範囲の性能を得ることができた。

今後は、本方式による液体水素用 MgB₂ 液面計について、産業用から宇宙用への幅広い用途に対応した実用化を行っていく。

2. 研究の背景

本研究開発では、液体水素用液面計を試作、液面計として重要なポイントである、直線性、応答性について液体水素下のデータを取得し、実用化に繋げる。

3. 研究開発内容

(1) 液体水素用 MgB₂ 液面計の製作

産業用から宇宙用への幅広い用途に対応した実用を目指し、超伝導液面計で課題とされている直線性、応答性について、シース材をキプロニッケルで構成した線径が異なる 2 種類の MgB₂ 細径線材を用いた液面計を製作した。(図 3-1、図 3-2)



Fig. 3-1 MgB₂ Level Sensor

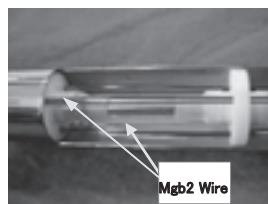


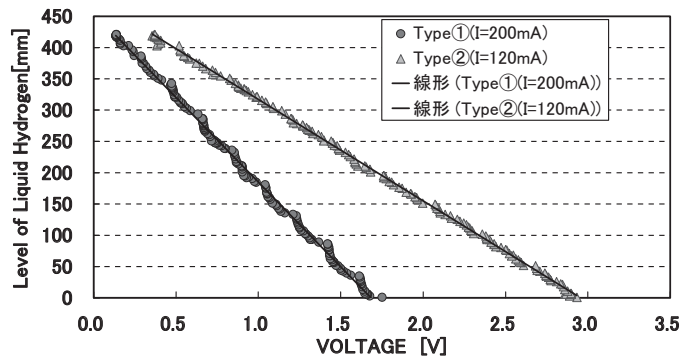
Fig. 3-2 Sensing Part (MgB₂)

(2) 液体での試験検証

(1)に示すセンサ組み立てを用い、センサの直線性、応答性を確認するため、液体水素容器(約 500 リットル)にセンサ組み立てを挿入し、液位を変化させた際のセンサ出力変化データを取得した。

試験結果、センサ抵抗値(電圧)と液位との特性として、線形関係が得られた。代表的なデータを図 3-3 に示す。電流値を変化させることにより、液ガス界面より上方のガス層で確実に常伝導となる(液層で超伝導となる)電流値レベルを確認でき、またその電流値から算出される電圧レベルが実用的なレベル(~5V)であることを確認できた。

また、ガス層の圧力/温度を変化させた場合のデータについても取得し、液位検知が可能な範囲の電流値レベルを確認することができた。



(注)Type1, Type2 は、線材径の違いを意味する。

Fig. 3-3 Test data

また、液体水素の液位を上下方向に変化させた場合に、センサが短時間(1 秒未満)に追従できていることを確認した。(図 3-4)

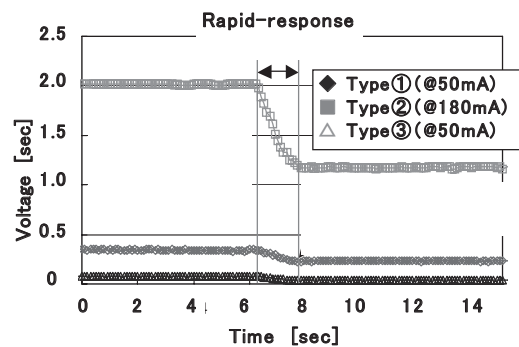


Fig. 3-4 Test data

4. まとめ

39K 以下で電気抵抗がゼロとなる MgB₂ の特性をもとに、安価かつシンプルな計装システムとしての液体水素液面計を製作した。センサ組み立てを液体水素容器に挿入し、液面を上下させることで、抵抗と液位との特性に直線性が得られること、また液面の変化に瞬時に追従(1 秒未満)することを確認した。今後は、本方式による液体水素用 MgB₂ 液面計について、産業用から宇宙用への幅広い用途に対応した実用化を行っていく。

参考文献

- [1] 「MgB₂ パルク試料のトランスポート特性」篠原圭介他, 第 73 回 2005 年秋季低温工学・超電導学会
- [2] “Handbook on materials for superconducting machinery,” Columbus Laboratories, Columbus(1974)

液体水素冷却特性の研究

Study on Heat Transfer Characteristics of Liquid Hydrogen

京大エネ科 白井 康之 塩津 正博
Yasuyuki Shirai

Dept. of Energy Science and Technology, Kyoto University,
E-mail: shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

液体水素冷却特性の理解は、 MgB_2 のような高温超電導マグネット、高温超電導発電機、また、未来形として検討されている水素供給システムを兼ねた高温超電導電力ケーブル等の冷却設計にとって重要である。こうしたデータベースとして、浸漬冷却や強制対流冷却における飽和ならびにサブクール状態における定常・過渡沸騰冷却特性、超臨界圧下の強制対流冷却特性が必要である。しかしながら、筆者らの知る限り現在まで大気圧近傍の浸漬冷却における定常冷却特性の研究がわずかに報告されている[1-4]のみである。筆者等は、こうしたデータベース確立をめざして、これまでに、大学実験室規模での実験装置・実験方法の開発、液体窒素を用いた実証試験、解明すべき問題点の洗い出しと研究計画の策定などを行ってきた。ここでは、その概要を報告する。

2. 実験装置・実験方法の開発

高価な循環ポンプを使用しないで、加圧下の浸漬冷却や強制対流冷却実験が行える Fig. 1 のような2槽式実験システムを採用し、クライオスタットや計測系はそれぞれ可搬式の架台やラックに収容して、液体水素実験時には専用の実験室に運んで実験が可能となるよう配慮した。

クライオスタットは内径 200 mm、高さ 700 mm で耐圧 4.0 MPa であり、受液槽までバルブ付きのトランスファーチューブで連結されている。クライオスタットは、島津製作所製デジタル台ばかり (最大秤量 150 kg、分解能 0.01 kg) に載せ、重量変化から流量を計測している。Fig.2 は液体窒素を用いた実証試験における重量変化の一例で、横軸は時間 (s) である。液体水素の場合は比重が約 1/10 なので、計測条件が厳しいが、もっと長時間の平均をとれば十分可能であると判断している。

試験発熱体は薄肉パイプを用い、直流電流加熱して、その電気抵抗変化から温度を測定する。パイプに系圧力がかからないよう Fig. 3 に示すような FRP ブロックによる外部断熱をしてトランスファーチューブ一端のクライオスタット中に設置した。液体水素温度では、純金属やステンレスの場合電気抵抗温度係数が無視小となるため、マンガンパイプを使用する。

Fig. 4 は、入り口温度 78K、圧力 2.0MPa のサブクール液体窒素を用いた実証試験結果の一例を示す。最大流速 7.0 m/s までの広範囲な流速に対して非沸騰・沸騰熱伝達を求めることができた。

3. 研究計画

現在、研究グループの編成、実験場所の選定などの最終計画を作成中である。研究目標は、大略次の通りである。

- 浸漬冷却実験 マンガン製平板発熱体からの定常・過渡熱伝達特性をサブクール度、圧力、発熱率上昇速度、重力の影響を変化させて測定する。
- 未臨界圧強制対流冷却 限界熱流束と膜沸騰遷移などに注目して、熱伝達特性を圧力、サブクール度、流速、管径等を変えて測定する。
- 超臨界圧強制対流冷却 冷却特性：圧力、液温、流速の影響とそれらを記述する熱伝達表示式を検討する。
- 超伝導線材の液体水素冷却特性

参考文献

- 1) K.J. Coeling and H. Merte JR., *Journal of Engineering for Industry*, **91**, 1969, pp.513-524
- 2) W. G Steward, in *Advances in Cryogenic Engineering* **35**, Plenum Press, New York, 1990, 403-412
- 3) R.W.Graham et al., in *Advances in Cryogenic Engineering* **10**, Plenum Press, New York, 1965, 342-352
- 4) C.R.Class et al., in *Advances in Cryogenic Engng.*, **5**, Plenum Press, New York, 1960, 254-261

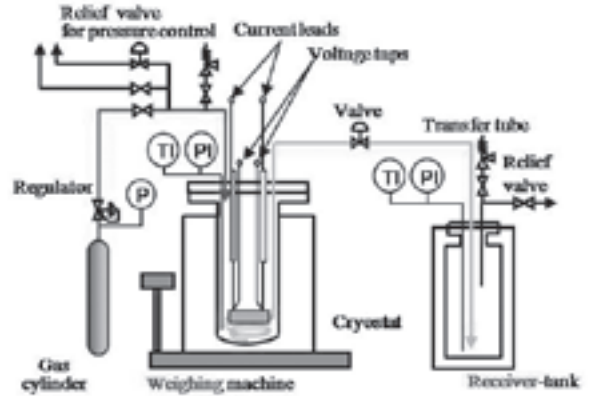


Fig.1 Experimental setup for heat transfer characteristics of liquid gas in pool/forced flow condition.

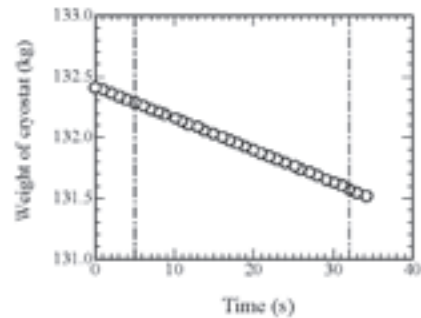
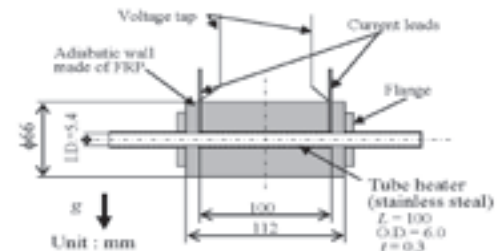


Fig.2 Trend of cryostat weight during the forced flow test using Liq. N2.



N2. Flow rate of the Liq. N2 is calculated from this data.

Fig.3 Example of the test heater for forced convection test of Liq. N2.

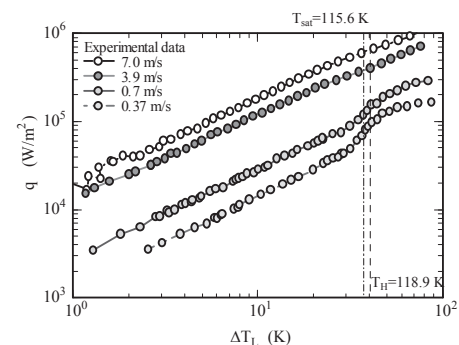


Fig.4 One of the test result of forced convection heat transfer of Liq. N2. (Inlet temperature 78K, pressure 2.0 MPa)

ロボットアームを用いた冷凍機冷却モバイル HTS-SQUID 非破壊検査システム

Nondestructive inspection system with cryocooler-based mobile HTS-SQUID integrated on robot-arm

廿日出 好, 代継 浩平, 田中 三郎(豊橋技科大)
 HATSUKADE Y., YOTSUGI K., TANAKA S. (TUT)
 E-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp

1. はじめに

我々は、実用化・応用範囲の拡大を目指して、環境中を自由に移動しながら対象をスキャンできるモバイル SQUID 非破壊検査システムの開発を行ってきた[1]。これまでに、HTS-SQUID グラジオメータが環境中を移動したときに環境磁場により発生した出力電圧を、SQUID 周辺に設置した補償コイルに電流としてフィードバックしてキャンセル磁場を発生させるアクティブシールド技術を開発した[2]。これにより環境中での SQUID 移動型非破壊検査装置の実現可能性を示したが、本装置は XY ステージにより SQUID を移動させていたため、検査範囲や XY 平面のみ検査可能などの制限があった。

そこで、さらなる実用化・範囲拡張のため、汎用ロボットアーム (Fanuc ロボットアーム LRMate200iB) を導入して、冷凍機冷却した HTS-SQUID グラジオメータを用いたモバイル SQUID 非破壊検査システムの開発を行った。この開発に際して、ロボットアームの動作開始時に $1\mu\text{T}$ 弱のパルス磁場ノイズが発生して、それにより SQUID に磁束トラップが生じ、前述のアクティブシールド技術が正常に動作しないことが判明した。そこで、本研究では、SQUID と比較して 2~3 桁感度が劣るが、数 $10\mu\text{T}$ の磁場中でも正常に動作するフラックスゲート磁気センサを用いた新しいアクティブシールド技術を開発した。この技術の適用により磁束トラップが生じることなくロボットによる SQUID 移動と非破壊検査を実現できたので報告する。

2. 冷凍機冷却モバイル SQUID 非破壊検査システム

本研究では、HTS SQUID グラジオメータをパルス管冷凍機で冷却、これをロボットアームにマウントして SQUID を移動させるモバイル型非破壊検査装置の開発を行った。前述のように、ロボットを移動開始させる際に、SQUID に磁束トラップを生じさせる強度 $1\mu\text{T}$ 弱の磁場ノイズがロボットから発生することがフラックスゲートによるノイズ計測で判明した。そこで、SQUID から約 40mm 離れた場所にフラックスゲートを設置して、環境磁場およびロボットからの磁場ノイズを計測させ、それらによる出力電圧を、SQUID とフラックスゲート両方を囲むように設置した補償コイルにフィードバックしてキャンセル磁場を発生させるシールド技術を開発・適用した (Fig.1)。本技術の特徴は、SQUID 冷却以前からこのシールド技術を動作させておくことにより、SQUID 冷却時にも環境磁場を低減させて磁束トラップによる SQUID 特性劣化を防ぎ、冷却後の移動時にも鎖交磁束がトラップされる前にノイズを低減できる点にある。本技術の適用により、ロボットからの磁場ノイズの強度を SQUID 設置場所約 13 分の 1 に低減できることがわかった。さらに、SQUID で磁束トラップや磁束ジャンプが生じることなく、また SQUID 特性をほとんど劣化させることなく、速度数 10mm/s で環境中で SQUID を移動できることがわかった。移動中の SQUID ノイズを Fig.2 に固定時のノイズとともに示す。移動中の SQUID の磁束ホワイトノイズレベルは、固定の場合の約二倍の $120\mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ となった。

3. 複合材・金属積層材の深部欠陥検出デモンストレーション

本システムによる検査応用の一つとして、高い安全性が要求される水素燃料タンクがあげられる[3]。本タンクは 35MPa の高圧水素を貯蔵するため、万一口内部に微小な亀裂が発生した際に早期検出できるような検査技術が求められている。ロボットアームを用いた本システムはこのタンクのような三

次元構造物の検査に適していると考えられる。そこで、本システムによる欠陥の非破壊検査のデモンストレーションの第一段階として、タンクの炭素繊維複合材 (CFRP)・金属 (Al 合金) 積層構造を模擬したサンプルの内部欠陥検出を行った。

サンプルとなる CFRP・Al 合金はそれぞれ 3mm と 10mm の厚さを持つ平板で、アルミ合金裏面に内部欠陥を模擬した幅 2mm、長さ 10mm、深さ 5mm の切り欠き欠陥を作成した。Al に渦電流を発生させて欠陥を電磁的に検出するため、検査システムの SQUID 両側に集中した励磁磁場を発生させることのできる C 型フェライトコア入り電磁コイルを配置した[3]。コイルから $1\mu\text{T}$ 、70Hz の励磁磁場を発生させサンプルに印加し、Al 層の欠陥による渦電流の乱れに起因する磁気信号を SQUID グラジオメータで測定した。測定の際、SQUID はサンプル表面を二次元スキャンするよう速度 10mm/s で移動させた。測定の結果、表面から 8mm の深さに存在する裏面欠陥に由来する磁気信号を検出することができた。以上の結果からロボット式 HTS-SQUID 非破壊検査の実現可能性を示すことができた。

参考文献

1. 廿日出好他: 第 70 回 2004 年春季低温工学・超電導学会講演概要集, (2004) p.190
2. Y. Hatsukade, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15 (2005) p.723
3. Y. Hatsukade, et al.: Physica C, Vol. 463-464 (2007) p.1043

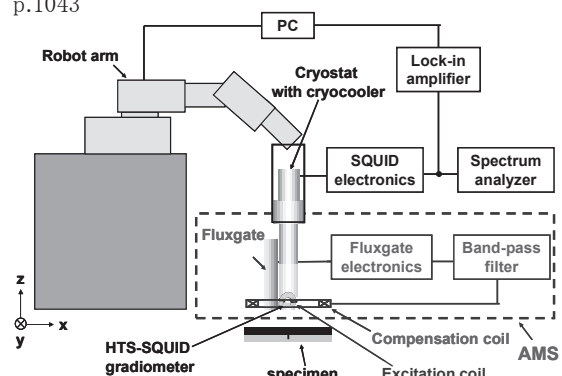


Fig.1 Mobile SQUID-NDI system based on cryocooler, robot-arm and active magnetic shielding (AMS).

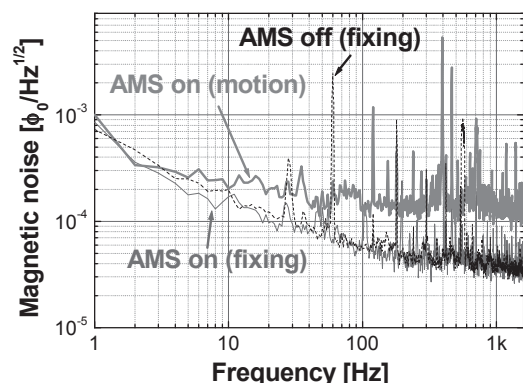


Fig.2 SQUID noise during motion at 10mm/s with active magnetic shielding (AMS) on.

ポインティングベクトル法による HTS コイルの異常監視と診断2 -異常発生場所の推測-

Monitor and diagnosis of unusual conditions in HTS coil by poynting vector method 2
-The supposition of a part with unusual condition-

徳田 将展、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工)
TOKUDA Masanori, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)
bt203051@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、超伝導コイルの異常検出方法として、ポインティングベクトル法を用いた新しい測定方法を提案している。この測定方法は、コイルに直接電圧リードを取り付けなかったために放電事故を誘発しない。電気的測定法のため、感度の高い測定が可能という特長がある。

これまでに、Bi-2223 テープ線材を用いたコイルの周辺電界を測定することによって、超伝導コイルの異常を非接触で検出できることを実証した。今回は、異常発生時に、測定装置に取り付けている各ポテンシャルリード電圧の変化を観測することで、異常発生場所の推定ができるかどうかについて実験的に調べた。

2. 測定方法

本測定方法は、超伝導コイルを円筒状の金属部材で囲み、この金属部材を通過するポインティングベクトルを測定する。ポインティングベクトルは、円筒表面の磁界と電界を測定し、それらの外積を一周期積分して求める。この磁界と電界の測定には、それぞれ磁界検出用のピックアップコイルと電界検出用のポテンシャルリードを用いる。電界は、ポテンシャルリード電圧から誘導成分をハード的にキャンセルし、抵抗性電圧を測定する。ポインティングベクトルは、Fig. 1 に示すようにそれぞれ二方向の成分を測定する(P1, P2)。P1 と P2 の分布から、コイル内の局所的な異常を検出することができる。

3. 測定装置の概略

サンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、高強度銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を 48 ターン (3 層×16 ターン) 巻線したソレノイドコイルである。内径 70mm、高さ 78.5mm である。このコイルを囲むように、直径 130mm、高さ 200mm の円筒ステンレスシートが配置されている。擾乱を発生するためのヒーターにはマンガニンヒーターを用い、コイル最外層に 1 ターン分取り付け付けた。

4. HTS コイルの異常発生場所の推定

サンプルコイルに、200Hz、30Arms の交流電流を通电した状態のまま、ヒーターに直流通電して局所的な擾乱をサンプルコイルに与えた。そして、その時の各ポテンシャルリード電圧の時間的变化を観測することにより、異常発生場所の推定を行った。サンプルコイルの状態をモニターするため、サンプルコイル両端電圧の観測も同時に行った。測定箇所を Fig. 2 に示す。

ヒーターを取り付けた場所から一番近いポテンシャルリード 3 の電圧の時間変化を Fig. 3 に示す。横軸は経過時間、縦軸は、ポテンシャルリード電圧である。サンプルコイルの両端電圧の変化に伴ってポテンシャルリード電圧が変化していることが分かる。

異常発生時の各ポテンシャルリード電圧について観測した測定結果とコイルの位置関係を Fig. 4 に示す。横軸にポテンシャルリードの位置、縦軸にポテンシャルリード電圧の変化を示す。測定結果より、ヒーターを取り付けている場所に近いポテンシャルリード電圧ほど大きく電圧が変化していることが分かる。

5. まとめ

今回、本測定装置に取り付けた各ポテンシャルリードの電圧

の時間変化を観測することにより、異常発生場所の推定を試みた。その結果、本測定方法により、超伝導コイル内で発生した異常の場所が推測可能なことを、実験的に示した。

参考文献

- [1] 西村圭介 他、第 68 回 2003 年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集、p.219
- [1] 徳田将展 他、第 76 回 2007 年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集、p.207

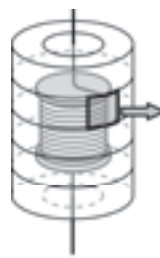


Fig. 1 Schematic diagram of the measuring system

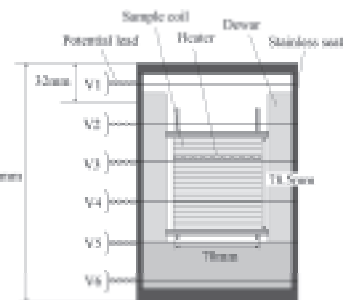


Fig. 2 Experimental setup of the measuring system

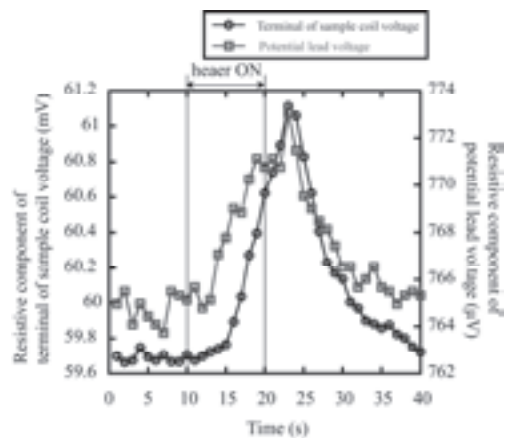


Fig. 3 Measured voltages on the sample coil and potential leads

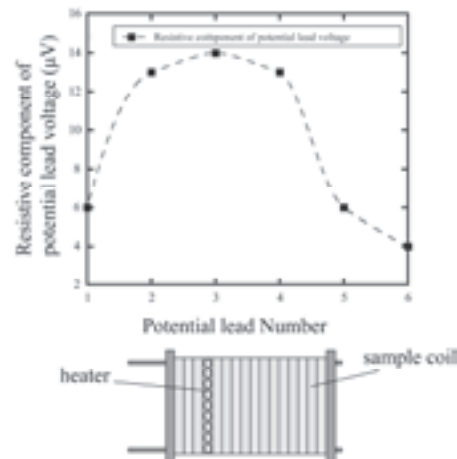


Fig. 4 Profile of change of potential lead voltages

YAGレーザー照射による超電導コイルのクエンチ特性の測定

Measurement of Quench Characteristics in Superconducting Coil by YAG Laser Irradiation

山田 喜美雄、青木 学、松井 祐二(日立・電開研)

YAMADA Kimio, AOKI Manabu, MATSUI Yuji (Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi)

E-mail: kimio.yamada.vr@hitachi.com

1. 緒言

樹脂含浸超電導コイルのクエンチ原因はワイヤーモーションや樹脂クラック等の機械的擾乱と考えられ、超電導コイル設計ではそれらによる発熱量が超電導線の最小クエンチエネルギー(MQE)を超えないように熱的評価が実施される。前回、基準として必要な MQE をレーザークエンチ法で測定し、Dresner の1次元理論式で概算できることを示した¹⁾。今回、同一の手法を用いて超電導線のクエンチ特性を測定し、その電気絶縁皮膜の熱的効果を評価したのでその結果を報告する。

2. 実験装置

図1に示すように試験コイルをバイアス磁場用コイルの中に設置し、それぞれを個別の電源に接続することでコイル電流と経験磁場を独立に変えられるようにした。試験コイルは図2に示すように折り返した直径2mmのNbTi製の超電導線の対を磁場中で電磁力を受けないよう無誘導巻きにして樹脂含浸したもので直径は約10cmである。

YAGレーザー光は試験コイル内側から挿入された光ファイバーを通して1つは超電導線に直接、もう1つはポリイミドフィルム裏面に塗布された黒インク層に照射される。それぞれの吸収エネルギーは超電導線の反射率とフィルム透過率の測定値を補正して求めた。常電導転移で発生する電圧はレーザー照射点の両側に設けた電圧端子で測定した。

MQE はコイルを液体ヘリウムに浸漬し各コイルに所定の電流を通電した状態でレーザー出力を徐々に増加しクエンチを発生させて測定した。

3. 試験結果と検討

超電導線の経験磁場と発熱位置を変えて測定した端子間電圧の吸収エネルギー依存性を図3に示す。直接照射の場合、端子間電圧は吸収エネルギーに比例して増加し、約0.95Vでクエンチに至った。吸収層を入れた場合、超電導線の電気絶縁被覆の断熱効果でクエンチに至らなかった。直線外挿するとクエンチエネルギーは20mJになり、直接照射3.5mJの約6倍に増加することが分かった。

4. 結言

レーザー照射加熱法により超電導線の電気絶縁層の熱的効果が測定でき、熱絶縁性能評価に適用できる可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) K. Yamada, et. al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol.75 (2006) p.168

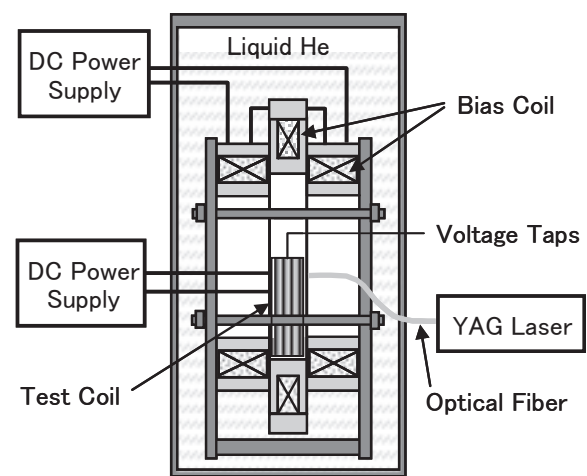


Fig.1 Experimental Set-up

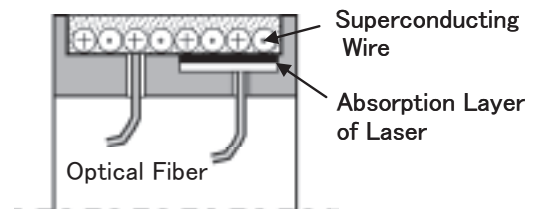


Fig.2 Cross Sectional View of Test Coil

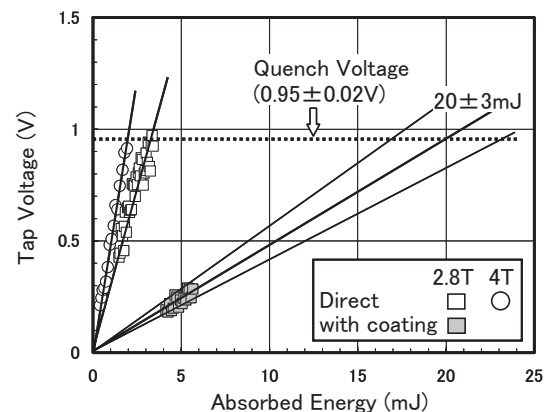


Fig.3 Absorbed Energy Dependence of Tap Voltage

液体水素冷却 SMES 用高温超伝導コイル — 高温超電導コイルの検討 —

HTS SMES coil cooled with LH₂ – Study of HTS coil –

槇田 康博, 平林 洋美(KEK); 野村 新一(東工大); 新富 孝和(日大)

Yasuhiro Makida, Hiromi Hirabayashi (KEK); Shinichi Nomura (Tokyo Tech); Takakazu Shintomi (Nihon Univ.)

E-mail: shintomi-takakazu@arish.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、総合病院やインテリジェントビルなどを想定した非常用電源装置を提案している^{1,2)}。この装置は隔離された場所での利用も可能である。この装置の典型的なものとして、2 MW/10 時間の容量のものを検討している。液体水素の高い貯蔵密度と SMES の早い応答速度の夫々の特長を生かし、長時間の電力供給ができる電源装置になる。今回は、100 kJ/1 kW 級試験機の SMES モデルコイルの検討結果を報告する。

2. 試験機用 SMES モデルコイル

(a) 開発ステップ

実機の場合の SMES 容量は、SMES が停電発生時の最初の 1 分間をカバーし、貯蔵エネルギーの 60% を使うとして、200 MJ/2 MW を考える。開発ステップとして、第一段階では 100 kJ/1 kW 級の試験機、第二段階として 10 MJ/100 kW 級のモジュール、最終段階として 200 MJ/2 MW のものを想定している。第二段階のモジュールを複数個組み合わせることで、負荷に対応した容量のものをフレキシブルに構成できる。

(b) コイル構造

200 MJ 級 SMES コイルの電流と磁界は 10 kA, 5 T とした。導体は、ラザフォードケーブルが最適であり、Bi2212 ラザフォードケーブルを考える³⁾。このケーブルの臨界電流は 20 K, 5 T で 1650 A である。200 MJ 級 SMES コイルには、このケーブル 12 本を用いる。試験機の導体として、このケーブル 1 本を用いる。コイルは、R&W 方式によるダブルパンケーキ巻きとし、8 このダブルパンケーキで構成する。試験機用 Bi2212 ケーブル仕様とコイルのパラメータを表 1 にまとめる。巻線時に導体にかかる歪みは 0.8% であり、この導体に許容できる歪み内である。

試験機に用いる導体の特性とロードラインから、試験機の温度マージンとして ~6 K となる。

ダブルパンケーキの構成を図 1 に示す。冷却を良くするためにダブルパンケーキ間には純アルミを挟み込み、熱はけを良くし、コイルの発熱を取り去る構造にする。純アルミにはスリットを入れ、磁界変化による誘導電流が流れないようにする。温度マージンが十分にあることと純アルミの熱伝導から、本導体の交流損による発熱を除去できると考えられる。

3. 交流損失

履歴損失などの交流損失で最も大きいものは、磁場がラザフォードケーブルの幅広面に直交するときに誘導され

Table 1 Parameters of the cable and the test model coil.

Wire	Strand diameter	0.81 mm
	Matrix ratio	2.8
Cable	Size w/o insulation	13.5 mm × 1.6 mm
	No. of strands	30
	J _c (A/mm ²) @ 20 K, 5 T	400
Coil	Coil size (mm)	220 ^{ID} × 492 ^{OD} × 261 ^h
	No. of double pancakes	8
	No. of turns	1280
	I _{op}	820 A
	Max field (T)	3.3
	Cable length (m)	1400
	Inductance (H)	0.35
	Stored energy (kJ) @ I _{op}	118

る電流による結合損失である。結合損失の大きさは次式で与えられる。

$$Q_{FO} \approx \frac{4w}{3t} L_p B_m \frac{dB}{dt} \frac{N^2}{20R_{Leff}}$$

ここで、 w はケーブル幅、 t はケーブル厚、 L_p はケーブルツイストピッチ、 N は素線数、 B_m はケーブルにかかる最大磁場である。また、 R_{Leff} は素線間の実効接触抵抗である。

磁場がケーブル幅広面に直交するのは、コイル単部の中央部になり、磁場分布を計算すると 1.7 T となる。(図 2) 停電時の最初の立上りが最も磁場変化が大きいと考えられ、 $dB/dt = 1T/s$ と仮定し、また R_{Leff} を 100 Ω とすると、素線間結合損失は最大値として 17 J/m となる。この発熱を純アルミ板で除去すれば良い。概略計算により十分に除熱できると予想される。

4. まとめ

非常電源用 SMES の試験機用コイルの設計検討を行った。試験機はできるだけ実機を模擬できるようにし、導体の特性、コイルの安定性、クエンチ保護、交流損失など実機に必要な諸特性を得るようにする。

参考文献

- 1) 槇田康博 他: 「LH₂ 冷却 SMES, 2 次電池等を組み合わせた燃料電池による即応・安定電源装置」2006 年春季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 73.
- 2) 野村新一 他: 「SMES と燃料電池で構成する非常電源の変換器構成と液体水素冷却超電導コイル」平成 19 年電気学会全国大会, 講演論文集 p. 32.
- 3) T. Hasegawa et al., "12 kA HTS Rutherford Cable," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14 (2004) pp. 1066-1069.

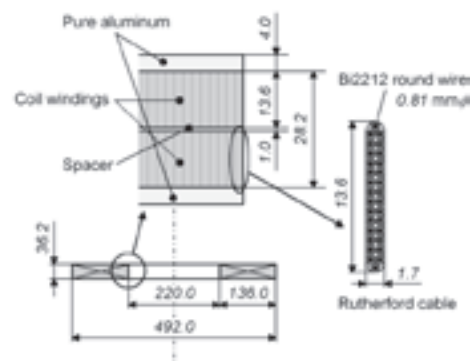


Fig. 1 The Rutherford cable and the coil structure of a double pancake the test model coil.

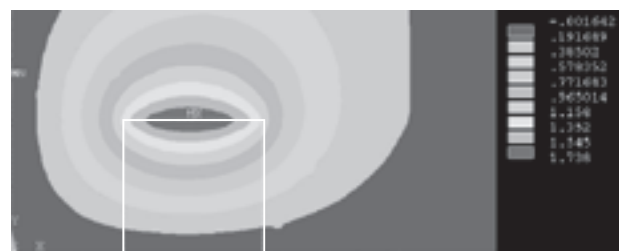


Fig. 2 The field distribution at the horizontal direction of the test model coil.

スリム化 DI-BSCCO の開発

Development of DI-BSCCO Type S

石田友信、綾井 直樹、藤上純、小林 慎一、山崎 浩平、菊地 昌志、山出 哲、
林和彦、佐藤謙一(住友電工)、北口仁、熊倉浩明(NIMS)
長村光造(応用科学研究所)

ISHIDA Tomonobu, AYAI Naoki, FUJIKAMI Jun, KOBAYASHI Shinichi, YAMAZAKI Kohei, KIKUCHI Masashi, YAMADE Satoru,
HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (SEI); KITAGICHI Hitoshi, KUNMAKURA Hiroaki (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS)
E-mail: ishida-tomonobu@sei.co.jp

1. 緒言

加圧焼成法を用いた当社のBi2223 超電導線材(DI-BSCCO[®])は従来のBSCCO線材に比べて飛躍的な性能向上を果たしている⁽¹⁾。当社ではさらに、超電導応用の多様なニーズに対応すべく、低価格化、機械強度の向上、交流損失の低減に取り組んでいる。この一環として、従来の 4mm幅線材(DI-BSCCO[®] Type H)から断面積を半分程度に縮小したスリム線材(DI-BSCCO[®] Type S)及びそれを金属テープで補強した線材(DI-BSCCO[®] Type ST)を開発した。

2. 実験方法

Table.1 に試作線の諸特性を記載した。DI-BSCCO[®] Type Hが当社の標準的線材であり、Type Sは同等の設計で断面積を半分程度に低減したもの、Type HT、STはそれぞれを金属テープで挟んで半田によって接合し、強度を増したものである。なお、表に記載のType HT、STは 20 μm厚のSUSテープ補強のものである。

引張試験では液体窒素中で荷重を加え、負荷をかけたままIcを測定し、同時に歪みゲージを用いて歪みを直接測定した。引張強度については、無負荷Icの95%にIcが低下した点で定義した。曲げ試験は全て室温で double bend 即ち両方向に所定の曲げ変形を加えた後、直状に戻してIcを測定するという方法で行った。許容曲げ径は引張試験同様、95%維持で定義した。

Table.1. Specifications of samples

Sample No.	#1	#2	#3	#4	#5
Type	H	HT	S	ST	S
Ic [A] (77K,s.f.)	186	193	83	94	89
Je[kA/cm ²]	19	15	18	15	20
Width [mm]	4.3	4.4	2.6	2.7	2.6
Thickness [mm]	0.23	0.29	0.18	0.23	0.17
Critical Tensile strength [M Pa] (77 K)	135	300	140	350	-
Critical Tensile strain [%] (77 K)	0.21	0.42	0.25	0.44	-
Critical Double Bend diameter [mm]	60	30	40	25	-

3. 試作結果

Fig.1 は試作線#3、#5の全長Ic測定結果である。両者とも長尺に渡って安定したIcを確保している。

Fig.2 は各線材の曲げ試験結果である。#3では#1と比較して、線材厚みの低減に応じて許容曲げ径が向上している。さらに#4 では補強テープの残留歪みを利用することで、さらに許容曲げ径が向上している。

Fig.3 に#3のJe-B-T特性を示す。Type H線材とほぼ同様の挙動を示しており、200A級線材と同等のJe-B-T特性を有しているといえる。

なお、紙面の制約上、交流損失の測定結果については当日報告する。

4. 結言

今回、我々は当社の加圧焼結線材(DI-BSCCO[®])において、200A級線材と同等のJe-B-T特性を保ちつつ断面積を半分程度に低減することに成功した。さらに、当社の保有する金属テープによる補強技術によって、機械強度の向上にも成功した。

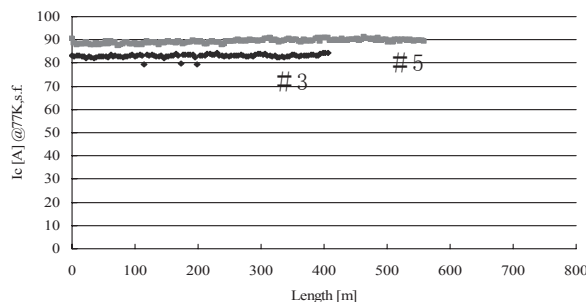


Fig.1 Critical current of DI-BSCCO[®] Type S

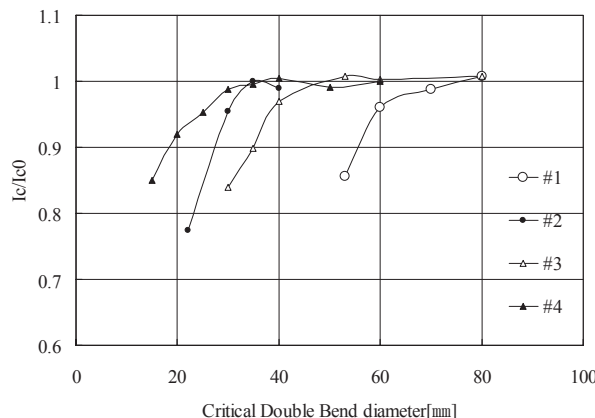


Fig.2 Bending characteristics of DI-BSCCO[®]

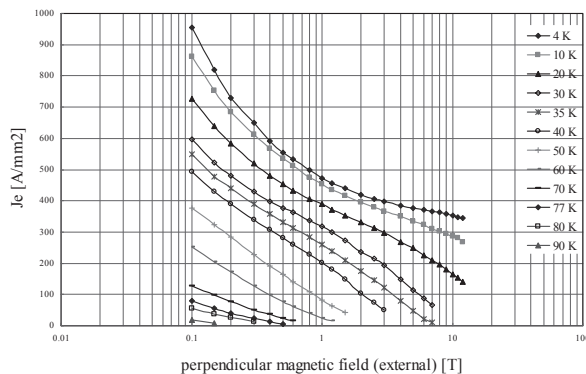


Fig.3 Je-B-T characteristics of Type S (#3)

参考文献

1. M. Kikuchi et al :Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.24

MgB₂ 線材とその特性(第2報)

Superconducting properties of MgB₂ tapes and wires -2nd report-

^A 物材機構 熊倉 浩明^A、松本明善^A、中根茂行^A、藤井宏樹^A、北口 仁^A
^B 東海旅客鉄道(株) 山田秀之^B、五十嵐 基仁^B

Hiroaki Kumakura^A, Akiyoshi Matsumoto^A, Takayuki Nakane^A, Hiroki Fujii^A, Hitoshi Kitaguchi^A,
 Hideyuki Yamada^B, Motohiro Igarashi^B,

^ANational Institute for Materials Science, ^BCentral Japan Railway Company

E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

MgB₂は最高で~40Kの転移温度 T_cを有する金属系超電導体であり、冷凍機冷却あるいは液体水素冷却による 20K 近傍での利用に期待が持たれている。本講演では、昨年度の発表に引き続いて、我々が研究を進めているパウダー・イン・チューブ(PIT)法によるMgB₂テープ線材を中心として、臨界磁界、臨界電流特性などの諸特性の現状と今後の研究課題について述べる。

2. 実験方法

PIT 法では、原料粉末の品質が線材の特性に大きな影響を及ぼす。我々は原料粉末として主として MgH₂ とアモルファス B の混合粉末を用いている。金属管は純鉄である。J_c 特性改善のために SiC や芳香族炭化水素をはじめとする種々の不純物添加を試みている。また、Mg や Mg-Li 合金棒と B 粉末を用いる拡散法によっても線材試作を行っている。熱処理は 600-900°C で行い、超伝導特性の熱処理温度依存性を調べている。上部臨界磁界 B_{c2}、不可逆磁界 B_{irr} ならびに J_c は通常の四端子抵抗法で測定している。微細組織は X 線回折、走査電顕、透過電顕などを用いて解析している。

3. 実験結果と考察

T_cは熱処理温度にかなり敏感に影響され、熱処理温度が上昇すると共に向上して 900°C の熱処理では 37.3K が得られた。これは熱処理温度が上昇すると、得られる MgB₂ の結晶性が向上するためである。

Fig. 1 には、無添加ならびに SiC を添加した in situ PIT 法 MgB₂/Fe 線材の、20K における B_{irr} の熱処理温度依存性を示す。無添加線材では熱処理温度が上がると B_{irr} が低下するが、これは熱処理温度が上がると結晶性が向上してコヒーレンス長が増大するためであると考えられる。一方 10% の SiC を添加した線材では、無添加線材とは反対に B_{irr} は熱処理温度と共に上昇することがわかる。これは、SiC 添加による B サイトの C 置換によって電子の散乱中心が導入されており、熱処理温度を上げてそれほどコヒーレンス長は減少せず、T_c が上昇した分だけ B_{irr}-T 曲線が高温側に移動するためと考えられる。20K における B_{irr}(20K) は ~10T であり、これは、現在最も広く使用されている Nb-Ti 実用線材の 4.2K における B_{c2} に匹敵する値である。

Fig. 2 に MgB₂ 線材ならびに PLD 法による多結晶薄膜の、4.2K ならびに 20K における代表的な J_c-B 特性を示す。磁界はテープ(フィルム)面に平行である。MgB₂ 線材の J_c は 4.2K、10T において 30kA/cm² の程度であり、まだかなり低い、薄

膜では 10⁵A/cm² 以上あることから、線材においても組織の改善によって大幅な J_c の向上が見込めると考えられる。一方 20K では、薄膜の J_c もかなり低い、これは薄膜の T_c が 30K 以下とかなり低いためであり、T_c の改善により J_c の改善も見込めると考えられる。線材では 2T で 10⁵A/cm² を越えているものの、J_c の磁界依存性が大きく、更なる特性の改善が必須の状況にある。PIT 法線材では一般的に MgB₂ コアの充填率が低く、その改善により J_c 特性も大幅に改善すると期待される。実際、高い充填率が期待される拡散法で作製した線材では J_c 特性がかなり改善されている。

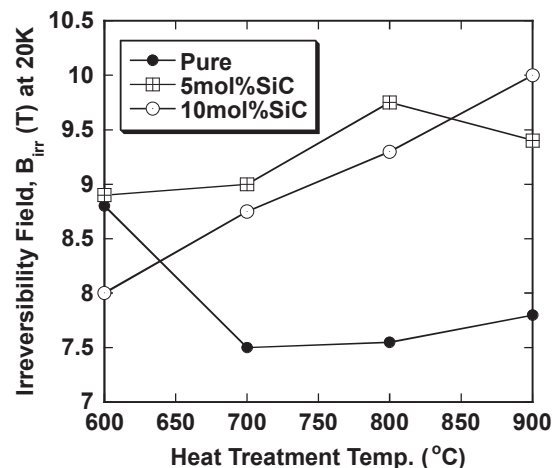


Fig.1 Heat treatment temperature dependence of B_{irr} of pure and SiC doped MgB₂/Fe tapes.

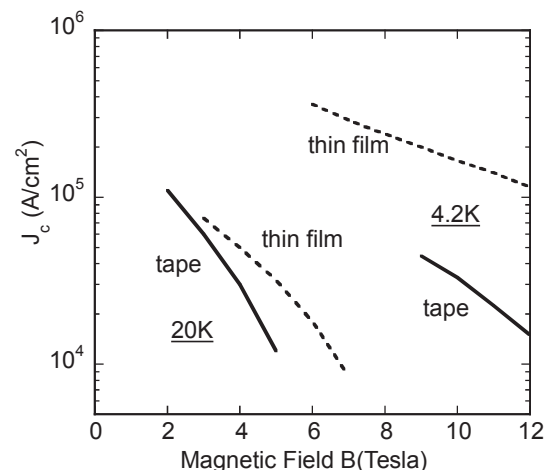


Fig. 2 J_c-B curves at 4.2K and 20K of MgB₂ tape and film.

Nb バリアをもつ Cu シース MgB₂ 多心線の交流損失特性

AC loss properties of Cu-sheathed MgB₂ composites with Nb barriers

船木 和夫, 末吉 貴洋, 柁川 一弘, 岩熊 成卓(九大); 田中 和英, 岡田 道哉(日立); 熊倉 浩明(NIMS); 林 秀美(九州電力)
 FUNAKI Kazuo, SUEYOSHI Takahiro, KAJIKAWA Kazuhiro, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);
 TANAKA Kazuhide, OKADA Michiya (Hitachi Ltd.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS); HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Co., Inc.)
 E-mail: funaki@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 線は、臨界温度が液体水素温度を超えることや比較的簡略な工程で線材化できることから、うまく電流容量の向上ができれば低コストで小回りも利く超伝導応用が期待される。

研究グループでは、液体水素温度までの温度領域において交流環境下で使用できる MgB₂ 線の開発を目指して、多方面からの特性評価[1]を行っている。本稿では、低損失化のために非磁性の MgB₂ 多心線を製作し、その交流損失特性を評価したのでその結果を報告する。

2. 線材製作と諸元

Mg (<45μm)と B (<1μm)パウダーを用いて *in-situ* 法により MgB₂ 線を作製した。パウダー混合体を Cu/Nb 複合管に詰め、これを 1.9mmφまで伸線し、さらに、6本の Cu/Nb シース単心線を Cu 管(8mmφ)に挿入して最終径 0.7mm まで伸線・熱処理(630°C)した。主な諸元を Table 1 に、断面写真を Fig. 1(a) に示す。MgB₂ 比は 13%、ツイストピッチは 10mm である。

3. 実験および結果

MgB₂ 多心線の疎巻コイル状試料の交流損失を標準化されているピックアップコイル法により液体ヘリウム中で測定した。MgB₂ 線は絶縁被覆されていないので、同径の非金属線と FRP 製巻枠に共巻して試料コイルを作製した。試料コイルの形状やピックアップコイルの配置等は国際標準規格[2]に準拠している。交流磁界は試料コイル軸に平行に印加した。測定結果は、周波数領域 0.1-5Hz, 振幅 0.01-1T の範囲で、Fig. 2 にシンボルで示している。単位体積・1周期当たりの交流損失は小振幅側でかなりの周波数依存性を示すが、振幅が大きくなるとほとんど周波数に依存しなくなっている。

4. 検討

測定により得られた MgB₂ 多心線の交流損失を(1)多心線モデルと(2)中空円筒モデルにより解析し、測定結果と比較した。前者のモデルは、超伝導フィラメントが多数本の多心線について適用される解析手法であるが、ここでは、少数のフィラメント構成の試料についても近似的に採用した。主な損失成分は、超伝導フィラメントのヒステリシス損失とフィラメント間の結合損失である。多心線モデルによる解析結果を Fig. 2 に曲線で示している。測定結果との比較より、ヒステリシス損失が主成分となる低周波数領域(例えば、0.1Hz)における損失の磁界振幅依存性、あるいは振幅が大きな領域の周波数依存性について、実験結果をうまく説明できていない。

これに対して、中空円筒モデルは、Fig. 1(b)において破線で示すように、6本の超伝導フィラメントが Nb バリアを介して中空円筒状超伝導体を構成しているとするモデルである。この場合の主要な損失は、中空円筒状超伝導体のヒステリシス損失と外皮の渦電流損失である。中空円筒状超伝導体のヒステリシス損失については、円筒状の超伝導体において横磁界に対する磁束フロントの断面形状を円で近似する手法[3]を使って解析した。このモデルにより、振幅依存性と周波数依存性の両方が定量的に説明できている。

今後、フィラメント間の結合を切り、シース材の高抵抗率化を図ったさらに低損失仕様の線材開発を進める予定である。

Table 1 Characteristics of MgB₂ multifilamentary wire

Wire radius	0.35 mm (r_w)
Volume ratio MgB ₂ /Nb/Cu	0.13/0.18/0.69
Critical current at s.f. and 1 T (4.2 K)	330 A and 60 A
Twisting pitch	10 mm
Estimated filament diameter	0.10 mm (d_f)
Estimated radius of filamentary region	0.17 mm (r_{fr})
Estimated outer radius of hollow cylinder	0.19 mm (r_{holo})
Estimated inner radius of hollow cylinder	0.15 mm (r_{holi})
Adjusted electric conductivity of matrix	3.3×10^9 S/m

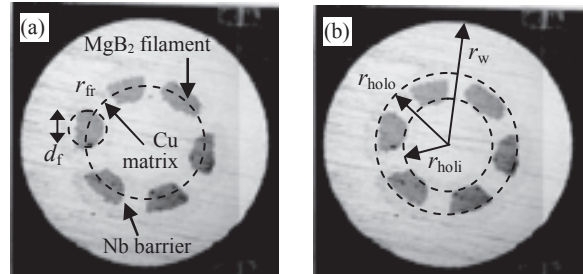


Fig. 1 (a) Cross section of MgB₂ wire, (b) Structure as a hollow cylindrical superconductor model

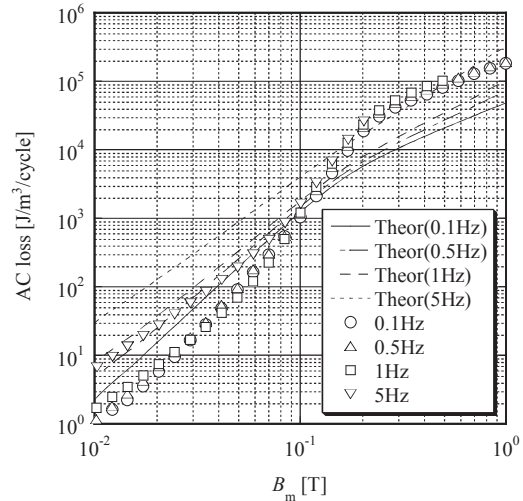


Fig. 2 Comparison of experimental results to theoretical ones by a multifilamentary superconductor model

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(A)「電力装置用導体を目指した MgB₂ 新線材技術開発」(16206032)の支援の下に実施した。

参考文献

1. 前間登 他: 第 74 回春季低温工学・超伝導学会講演概要集 p.65
2. IEC617688-8 Superconductivity-Part 8: AC loss measurement- a pickup coil method, First edition 2003-4
3. Y. Kato, et al.: 1976 *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 15 (1976) p.695

液化水素循環ポンプを指向した MgB₂ 超電導誘導/同期モータの提案 – その 1 (基礎概念と MgB₂ 線材に要求される特性)

Proposal of an MgB₂ superconducting induction/synchronous motor for liquid hydrogen circulation pump. I. Basic concept and property required for MgB₂ wire

梶川 一弘(九州大学); 中村 武恒(京都大学)

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); NAKAMURA Taketsune (Kyoto University)

E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年の情報通信技術の進歩やその利用範囲の急激な増加により、エネルギー需要は年々拡大していくと予想されており、現に米国や欧州ではエネルギー供給の逼迫に起因した経済損失が甚大で深刻な大停電が相次いでいる。また、二酸化炭素の排出に代表される地球温暖化等の環境問題が顕在化し、その改善を目指すポスト京都議定書の策定に向けた議論や政策が世界各国で活発化しており、資本主義社会の大原則である今後の持続的な経済成長のためには、いわゆる「環境にやさしい技術」の確立が急務となっている。このような時代の中で、超電導技術はエネルギー問題・環境問題を解決できる有力な候補の 1 つとして注目されている。一方で、水素は酸化反応によるエネルギー生成時に副産物として水のみしか排出しないため、次世代のグリーンエネルギーとして水素利用社会の実現への期待が高まっている。

本研究は、超電導技術と水素利用社会を効果的に融合することによるエネルギー問題や環境問題の解決へ向けた基礎的研究開発の一環として、将来の水素利用社会において貯蔵密度の観点から有利な形態である液化水素やスラッシュ水素を移送もしくは循環するポンプの駆動部に、超電導モータを適用できないか検討する。

2. 液化水素と MgB₂ の親和性

昨今のエネルギー問題や環境問題を是正する先進技術の 1 つとして、将来の水素利用社会の可能性が検討されている。燃料電池などで水素を酸化しエネルギーを得るためには、水素を安全にかつ安定的に製造、輸送、貯蔵、移送する必要があり、圧縮ガスとしてだけでなく液化ガスとして水素を利用する形態も不可欠である。つまり、体積密度が一般に小さい水素の効率的な貯蔵に関して、現行の水素自動車用ポンプの圧力として設定されている 35 MPa 下における常温の水素の密度は、大気圧下における液化水素の密度よりもかなり小さいため、それぞれに必要な耐圧構造物と断熱真空容器を考慮しても、液化水素の方が貯蔵容積としては小さくて済む。一方、スラッシュ水素は、液体中に固体粒が存在する状態の水素であり、液化水素に比べて約 16% の密度向上を実現できるため、将来的な利用が有望視されている[1]。

2001 年に我が国で発見された新しい金属系超電導体である二ホウ化マグネシウム(MgB₂)は超電導転移温度が 39 K のため[2]、大気圧中の沸点が 20 K の液化水素中で電気抵抗がゼロの超電導状態を維持できる。この MgB₂ 超電導体を利用可能にするには、通常金属との複合導体を形成して長尺な線材に加工する必要がある。しかし、このような MgB₂ 線材に 20 K 程度の温度雰囲気中で数テスラの外部磁界を印加すると、臨界電流密度が著しく減少することから[3]、結果として MgB₂ 線材は低磁界応用に適すると考えられる。つまり、MgB₂ 超電導線材の冷媒として液化水素を使用する場合、低磁界応用が 1 つのキーワードとなる。そこで、筆者の 1 人はこれまでに、MgB₂ 線材を用いた液化水素用超電導式液面計の可能性について実験的に検証してきた[4]。

なお、液化水素と MgB₂ の相性については、そのシナジー効果の観点から既に提案がなされている[5]。

3. 液化水素循環ポンプ用超電導モータの概念設計

水素利用社会において特に、パイプラインにより液化水素を輸送する場合や、タンクローリーから水素供給ステーションの液化水素貯槽へ、または水素供給ステーションから水素利用機器(水素自動車等)へ液化水素を移送する場合、燃料自身である高付加価値を持つ貴重な液化水素を極力気化させないために、輸送や移送に際して発生する熱量を許容値以下に抑制する必要がある。そこで、取り扱いが簡便で小型・高性能の電気式ポンプが望まれるが、未だ実用化されていない。これまでに、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)とそれに続く水素安全利用等基盤技術開発において、水素供給ステーションで使用される液化水素移送ポンプの設計・製作・評価試験が実施された。このポンプ用駆動モータとして、回転子巻線にアルミ、固定子巻線に銅、鉄心にパーマロイを用いたかご型誘導モータを試作し、液化水素中で回転試験を実施したが、定格回転数におけるモータへの入力電力が設計仕様の 2 倍あり、ポンプ動力と同程度以上の損失が余分に消費されることがわかった。

かご型誘導モータは構造が単純なため、安価で保守が容易だが、原理上すべりが必要なために回転子巻線で発生する損失が大きくなる。そこで、循環・移送ポンプのモータを超電導化することで、巻線で発生する損失を大幅に低減する。これまでに、かご型誘導モータの回転子巻線を超電導線材で構成するとすべりのない同期運転が可能となり、回転子巻線で発生する損失を大幅に低減できることが実証されている[6]。幸い、かご型誘導モータにおける回転子や固定子の巻線は共に、鉄心に設けたスロット内に配置されるため、大部分の磁束が鉄心を通過することで超電導巻線に印加される外部磁界は非常に小さくなり、自己磁界が主体となる。つまり、循環もしくは移送すべき液化水素燃料自身が冷媒となり、かつ巻線に印加される磁界は非常に小さいため、MgB₂ 超電導線材に最適な応用対象の 1 つとして期待できる。

液化水素用ポンプの駆動源として概略設計した、MgB₂ 線材を用いたモータの一例を、Table 1 に示す。なお、詳細な設計内容については、引き続き、次の講演[7]で報告する。

Table 1. Outline design of motor for pump with MgB₂ wire.

Item	Value
Phase / Pole number	3 / 4
Nominal voltage	200 V
Synchronous steady state speed	1,800 rpm
Output power @ synchronous mode	5.84 kW
Maximum synchronous torque	15.5 Nm

参考文献

1. K. Ohira: J. Cryo. Soc. Jpn. **41** (2006) 61.
2. J. Nagamatsu, et al.: Nature **410** (2001) 63.
3. M. Tomsic, et al.: Physica C **456** (2007) 203.
4. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1D-a04.
5. T. Hamajima, et al.: Abst. CSJ Conf. **72** (2005) 1B-p05.
6. T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) 911.
7. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **77** (2007) 1D-a12.

液化水素循環ポンプを指向した MgB₂ 超電導誘導/同期モータの提案—その 2 (モータの設計例と基礎特性)

Proposal of an MgB₂ superconducting induction/synchronous motor for liquid hydrogen circulation pump.

II. Design example and fundamental characteristics of the motor

中村 武恒 (京都大学); 梶川 一弘 (九州大学)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、液化水素の移送循環ポンプ用モータとして、高温超電導誘導/同期機 (HTS-ISM) [1-3] を検討している[4]。従来の循環ポンプ用モータとしては、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) とそれに続く水素安全利用等基盤技術開発において、水素供給ステーションで使用される液化水素移送ポンプ用常電導かご型誘導機的设计・製作・評価試験が実施された。上記プロジェクトでは、例えばポンプシステム全体を液化水素パイプライン中に設置して駆動することが想定されている。従って、液化水素 (大気圧沸点: 20 K) と超電導機器の親和性としてしばしば期待される、燃料としての液化水素が冷媒にもなるという議論がそのまま適用可能と考えられる。上記使用形態では、回転子巻線だけでなく、システム全体の損失を少しでも下げるといった観点から、全超電導化が重要と考えられるが、現状では液化水素温度領域かつ鉄心中における MgB₂ 線材の交流損失が明らかで無い。従って、本研究では第一ステップとして、回転子超電導巻線を MgB₂ 超電導線で作成した場合について、ポンプ用 HTS-ISM の概略設計例と基礎特性について報告する。

2. 設計と考察

HTS-ISM においては、回転子巻線が鉄心中に挿入されることから、基本的に自己磁界の他は MgB₂ 巻線が経験しない。つまり、同線材の自己磁界下における通電特性を考慮すれば良い。Fig. 1 には、中村らが (財) 応用科学研究所・長村光造主要研究員 (京都大学名誉教授) とともに開発した鉄シース MgB₂ 線材 (1 mm φ) の臨界電流特性を示す [5, 6]。同線材は、MgB₂ 粉末を使用して PIT 法で作製したものである。同図から、温度 35 K においても 85 A の臨界電流を有していることが分かる。また、臨界温度は 38.4 K (end point) であったが、所謂 n 値が 37.9 K 付近から急激に大きくなっている。なお、本線材の温度 20 K における臨界電流値は、試験システムの電流容量の制約から測定出来なかった。従って、35 K までの測定結果から経験的に 150 A と仮定した。

上記線材特性を適用して HTS-ISM の概略設計を実施した。但し、現状では 20 K における固定子巻線抵抗や鉄損、あるいは機械損の定量評価が出来ていない。つまり、設計の基本となる電気装荷と磁気装荷の正確な分配が困難である。従って、ここでは、我々が既に検討している 3 相、4 極、定格 1.5 kW @ 室温の誘導機 (Fig. 2) を対象として概略設計を実施した。Table 1 には、設計の一例を示す。本モータの最大同期トルクは 15.5 Nm と見積もられる。なお、上記したようにかご型巻線に適用する MgB₂ 線材の 20 K における n 値は極めて大きいため、漏れリアクタンスがある程度小さければ、定トルクすべり特性が実現される。

設計の詳細や基礎特性については、講演当日に報告する。

謝辞

MgB₂ 線材の作製に際しては、(財) 応用科学研究所の長村光造先生 (京都大学名誉教授) の設備を使わせて頂くこと

もに、作製法他でお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1A-a07
2. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1A-a08
3. T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) 911.
4. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. **77** (2007) 1D-a11.
5. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **69** (2003) 1D-a03.
6. S. Balamurugan, T. Nakamura, K. Osamura et al.: Mod. Phys. Lett. B **18-16** (2004) 791.

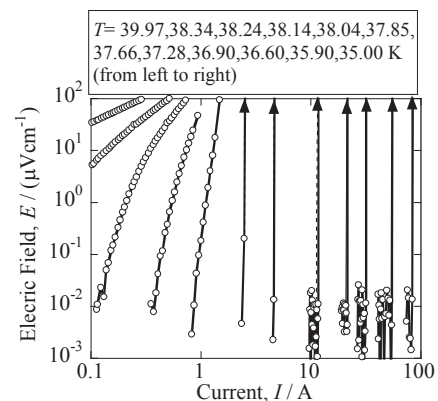


Fig. 1 Temperature dependence of electric field (E) vs. current (I) properties in MgB₂/Fe wire [5].



Fig. 2. Photograph of a squirrel-cage induction motor for outline design.

Table 1 Outline design of motor for pump with MgB₂ wire.

Item	Value
Rotor core size	88 mm ¹ x 100 mm φ
Phase	3
Pole number	4
Nominal voltage	200 V
Steady state rotation speed (synchronous speed)	1,800 rpm
Primary winding resistance	0.19 Ω
Total leakage inductance	9.63 mH
Output power @ synchronous mode	5.84 kW
Maximum synchronous torque	15.5 Nm
Operating temperature	20 K

熱音響冷却システムの小型化に向けた検討 ～ループ管方式による全長と変換効率について～

A study for the miniaturization of thermoacoustic cooling system ～Total length and conversion efficiency of the loop-tube-type～

若田 哲也, 坂本 眞一, 西川 昌宏, 渡辺 好章(同志社大)

WAKATA Tetsuya, SAKAMOTO Shin-ichi, NISHIKAWA Masahiro, WATANABE Yoshiaki (Doshisha University)

E-mail: dtg0183@mail4.doshisha.ac.jp

1. はじめに

我々は、熱と音との間でエネルギー変換が行われる現象である熱音響現象^[1,2]を利用した冷却システムであるループ管^[3,4]の小型化に向けて検討を行っている。熱と音のエネルギー変換は流体とスタックの流路壁との熱交換によって行われる。本報告では、熱交換の効率の評価量としてよく用いられる無次元量パラメーター $\omega\tau$ に注目し、小型ループ管における $\omega\tau$ の有用性について実験的な検討を行った。

2. 実験系

熱交換の効率の評価量として、ループ管内に発生する音波の角周波数 ω と熱緩和時間 τ の積で表現される無次元量パラメーター $\omega\tau$ がよく用いられ、(1)式で表される^[1,3,5]。ただし、 r_0 はスタックの流路半径、 α は温度伝導率である。

$$\omega\tau = \omega \frac{r_0^2}{2\alpha} \quad (1)$$

次に、実験系を Fig. 1 に示す。全長が異なる 3 つのループ管の比較を行った。ループ管の全長はそれぞれ 3200 mm, 2300 mm, 1800 mm である。それぞれのスタックの流路半径は 0.47 mm, 0.39 mm, 0.35 mm であり、スタックの長さは 50 mm, 36 mm, 28 mm である。3 つのループ管の全長に対するスタック長さの比率は 1.6 % で統一した。ループ管の内径はすべて 42.5 mm である。3 つのループ管におけるそれぞれのヒーターに 300 W, 215 W, 150 W の電力を供給し、プライムムーバ上部の温度を 600°C で一定とした。それにより、 $\omega\tau$ の値を一定の条件下に設定した。測定時間はヒーターに電力を供給してから 600 秒間行った。また、ループ管に圧力センサを取り付け、周波数、音圧、2 点間の音圧の位相差を測定した。音響インテンシティの算出には 2 センサパワー法を用いた^[6]。管内の作業流体はアルゴンを用い、管内圧力は 0.20 MPa とした。

3. 実験結果

3 つのループ管における音響インテンシティの分布を Fig. 2 に示す。ただし、ループ管の全長を 1 と規格化して比較を行った。Fig. 2 より、音響インテンシティはループ管内を伝搬するにしたがって減少し、プライムムーバで増幅されていることがわかる。また、比較した 3 つのループ管において、プライムムーバでの音響インテンシティの増幅量はループ管の全長によらず 1000 W/m² であった。

4. 考察

無次元量パラメーター $\omega\tau$ を一致させることにより、ループ管の全長によらずプライムムーバでの音響インテンシティの増幅量も一致するという結果が得られた。つまり、無次元量パラメーター $\omega\tau$ の値は、ループ管の全長によらず、プライムムーバでの音響インテンシティの増幅量を決定する非常に重要なパラメーターであるといえる。この結果から、 $\omega\tau$ の値を一定の条件下にすることで、小型化したループ管の冷却能力は大型ループ管の冷却能力によって予測することが可能となる。

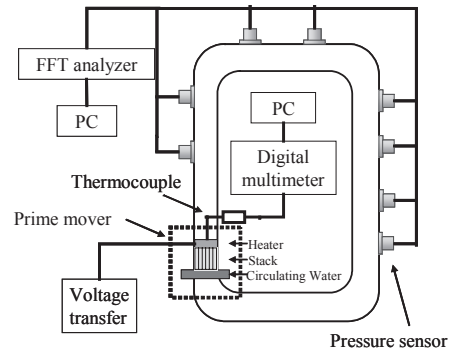


Fig. 1 The experimental system.

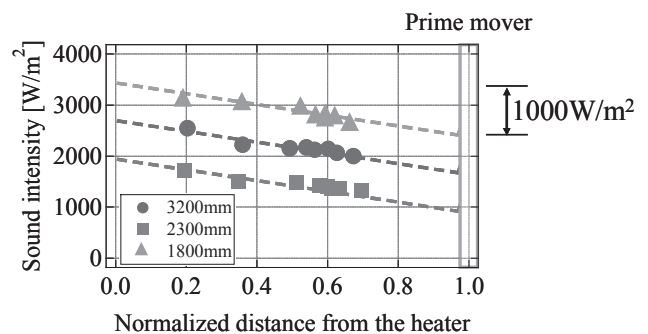


Fig. 2 Comparison of distribution of sound intensity.

5. まとめ

熱交換の効率の評価量としてよく用いられる無次元量パラメーター $\omega\tau$ について議論した。 $\omega\tau$ を一定の条件下でループ管の全長を変化させたところ、プライムムーバでの音響インテンシティの増幅量が一致するという結果が得られた。この結果から、 $\omega\tau$ を一定の条件下にすることで、小型化したループ管の冷却能力は大型ループ管の冷却能力によって予測することが可能となる。結果として、 $\omega\tau$ は小型ループ管の設計において有用かつ重要なパラメーターであることが確認された。

本研究の一部は日本学術振興会科研費、若手研究(B)の補助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

1. 富永昭, “熱音響工学の基礎,” 内田老鶴圃, (1998)
2. S. Backhaus and G. W. Swift, Nature 339 (1999) 335-338.
3. Y. Ueda, T. Biwa, U. Mizutani, and T. Yazaki, J. Acoust. Soc. Am. 115 (2004) 1134-1141
4. S. Sakamoto, Y. Imamura and Y. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 4951-4955
5. 矢崎太一, ながれ 24, pp.395-404, (2005)
6. Andrew M. Fusco et al, J. Acoust. Soc. Am. 91 (4), (1992)

太陽エネルギーを利用した熱音響冷却システムに関する検討 —ループ管の実用化に向けた研究—

Study on thermoacoustic cooling system applying the solar energy
- For the practical use of loop-tube-type thermoacoustic cooling system -

宮 直基, 坂本 眞一, 小宮 慎太郎, 千田 二郎, 渡辺 好章(同志社大学)

MIYA Naoki[†], SAKAMOTO Shin-ichi, KOMIYA Shintaro, SENDA Jiro and WATANABE Yoshiaki[‡] (Doshisha University)

E-mail: dtg0144@mail4.doshisha.ac.jp[†], kwatanab@mail.doshisha.ac.jp[‡]

1. 緒言

近年、エネルギー資源の枯渇が深刻化しており、エネルギーの有効利用が求められている。熱音響現象^[1,2]を利用した冷却システムの一つであるループ管は、入力エネルギーとして熱エネルギーを用いるため、工場廃熱や太陽エネルギーを利用した冷却が可能である。本報告では、特に太陽エネルギーの利用に着目し、フレネルレンズにより集束させた太陽光を熱交換器に照射^[3]することで、太陽の熱エネルギーをループ管の入力エネルギーとして利用した結果について述べる。

2. 測定系、測定方法

測定系をFig. 1に示す。ループ管は全長を3300 mmとし、内径42.5 mmのステンレス管で構成した。スタックAには900 cell/inch²のハニカムセラミックを、スタックBには1200 cell/inch²のハニカムセラミックを用いた。管内圧力は0.1 MPaとし、気体にはHeとArの混合気体(He: 50%)を用いた。高温側熱交換器とスタックB下部にK型熱電対を設置し、熱源部と冷却部の温度を測定した。また、スタックB下部から鉛直下方向100 mmの位置に圧力センサを設置し、管内音圧を測定した。直径0.60 mのフレネルレンズを用いて高温側熱交換器に集束させた太陽光を直接照射し、太陽エネルギーによる冷却特性を測定した。フレネルレンズは手動で操作した。測定は7月下旬の快晴の日に行った。AM 11:30に測定を開始し、温度測定、音圧測定は共に測定開始後4000秒間行った。

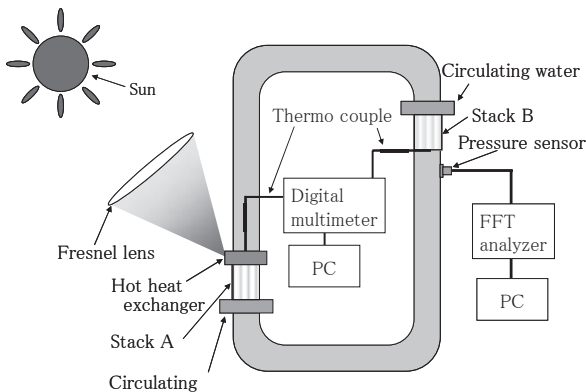


Fig. 1 Measurement system.

3. 結果・検討

太陽エネルギーによりループ管駆動時における高温側熱交換器の温度時間変化の図をFig. 2に、冷却部温度の時間変化の図をFig. 3に示す。フレネルレンズによる集光を手動で操作したことから、レンズの傾きなどによる温度変化が大きく鋭敏であったため、温度変化のグラフは、測定結果を200秒移動平均したものとした。Fig. 2より高温側熱交換器の温度は太陽エネルギーにより29℃から上昇し、測定開始後約2700秒で最高約480℃まで到達したことがわかる。音波は太陽エネルギー入力後70秒で発生し、音波発生時における高温側熱交換器の温度は約250℃であった。Fig. 3よりプラ

イムムバで発生した音波により冷却部温度は実験前温度29℃から低下し、測定開始後約2600秒で最低-4.3℃まで低下したことがわかる。冷却部温度が-4.3℃となった際の音圧は約2300 Paであり、音波の周波数は131 Hzであった。

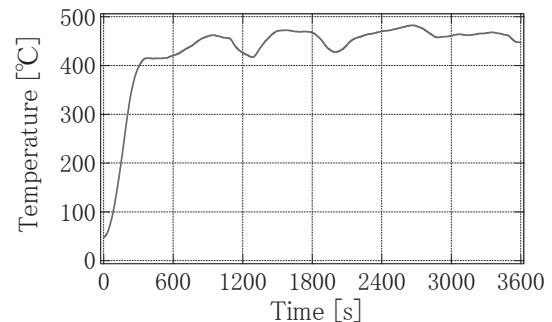


Fig. 2 Time variation of temperature at hot heat exchanger.

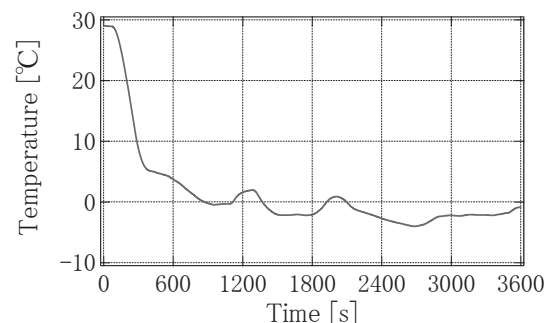


Fig. 3 Time variation of temperature at cooling point.

4. 結言

フレネルレンズを用いて太陽光を集束させ、熱交換器に照射することで、太陽の熱エネルギーをループ管の入力エネルギーとして利用した。プライムムバで発生した音波により、冷却部温度は29℃から最高-4.3℃に低下し、冷却温度33.3℃を得ることに成功した。これらの測定結果より、太陽エネルギーを利用した熱音響冷却システムによる冷却が実現可能である可能性を示せた。今後、より改良を加えることで、電気エネルギーは存在しないが太陽エネルギーが豊富な地域での利用が可能となると考えられる。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構、シーズ発掘試験の補助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

1. S. Backhaus and G. W. Swift: Nature, 339 (1999) p.335-338.
2. S. Sakamoto, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46 7B (2007) p.4951-4955.
3. Jay A. Adeff, et al.: J. Acoust. Soc. Am., Vol. 107 (6) (2000) p.37-42.

ダブルループ型熱音響スターリング冷凍機内の音響流計測

Acoustic streaming measurements in a double-loop thermoacoustic Stirling cooler

琵琶哲志(東北大学)

BIWA Tetsushi, (Tohoku univ.)

E-mail: biwa@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

管内音波と管壁の間の熱的相互作用を通じて多様な熱音響現象が生じる。この現象を利用して、熱から音波へのエネルギー変換を実行する音波エンジンや音波クーラーが次々と開発されている。定在波音波ではなく、進行波音波を使った音波エンジンや音波クーラーはそのエネルギー変換メカニズムがスターリングエンジン、スターリングクーラーと同様なことから、高い効率が期待されている¹⁾。現在では、実用化を目指した応用研究が世界的に行われるようになってきた。

定在波音波エンジンが両端を有する共鳴管内の定在波音波を利用するのに対し、進行波音波エンジンはループ状にした管内を周回する進行波音波を利用する。進行波音波に由来するエネルギー変換効率の高さというメリットの一方で、ループ型の構造に特有の問題点として、ループ管内部を周回する音響流の存在が指摘されている。音響流は音波の非線形効果によって生じる定常的質量流を意味し、その流速 v は次式で与えられる。

$$v = u_m + \frac{\langle \rho_1 u_1 \rangle}{\rho_m}$$

ここで、 u_m はオイラー的時間平均流速、 ρ_1 、 u_1 は密度振動、流速振動であり、 $\langle \rangle$ は時間平均を意味する。音響流流速 v と時間平均密度 ρ_m の積は音響流による単位時間、単位断面積当たりの質量流量を与える。エンジンループ内に定常的質量流である音響流が存在すれば、高温熱交換器を通過する際に熱損失が生じる。端のある定在波音波エンジンでは必然的に断面平均質量流速はゼロとなる点とは異なる。しかしながら、音響流の定量的な計測はこれまで十分に行われてこなかった。本研究では以前作成したステンレスパイプで構成されるダブルループ型熱音響スターリングクーラーのエンジンループの一部をガラス管で置き換え、この場所での流速測定を行った。比較のため、装置内にゴム膜を挿入し、音響流を抑制した状態でも実験を行ったので、それらの結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図1に示す。配管部分は内直径 48 mm のステンレス管で作成し、その一部を同じ内径のガラス管で置き換えた。共鳴管は全長が 2.6 m であり、エンジンループ部分は平均周長が 0.9 m である。原動機蓄熱器には # 60 のステンレスメッシュを 42 mm 積層し、また冷凍機蓄熱器には # 24 のステンレスメッシュを 50 mm 積層した。

原動機の一端的な高温熱交換器(温度 T_H)は電気ヒータにより加熱し、もう一端の熱交換器は冷却水により室温(温度

T_R)に保った。装置内部には全圧 6 気圧の He-Ar 混合ガス(He:Ar=85:15)を充填した。ゴム膜(天然ゴム、膜厚 0.1mm)はエンジンループの低温熱交換器近傍にセットした。 $Q_H=415$ W の状態でレーザードップラー流速計を使って流速測定を行った。

3. 結果

軸方向流速の定常成分 u_m の動径分布を求めた結果を図2に示す。得られた定常流速は、ゴム膜の有無にかかわらずほぼ放物線の分布を示し、軸対称であることが分かった。放物線へフィッティングした結果を用いて断面平均流速を計算したところ、ゴム膜がない場合、+3.1cm/s の値を得た。正の符号は進行波音波と同じ向きの時間平均流速を表している。振動密度 ρ_1 と振動流速 u_1 に由来して生じる定常的質量流を加味すると、合計で 5.2cm/s の時間平均質量流速を持っていることが分かった。これに対して、ゴム膜を挿入した場合、時間平均流速は -3.1cm/s となった。振動密度と振動流速に由来する定常的質量流を加味すると、合計では 0.6cm/s とほぼゼロとなり、ゴム膜は確かに質量流を抑制する働きが有ることを確認している。

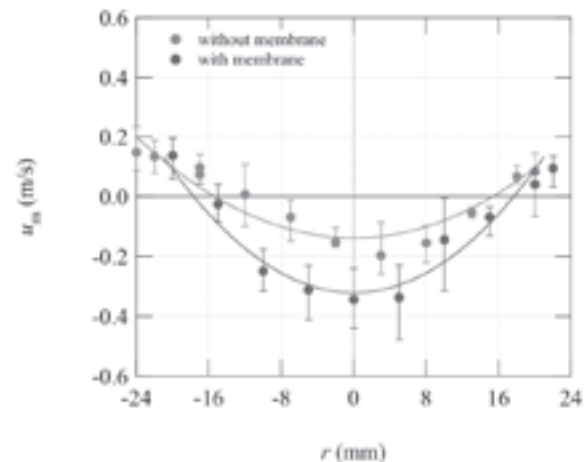


Fig.2 Radial profile of Eulerian average of the axial velocity.

参考文献

- パルス管冷凍機と熱駆動熱音響冷凍機の効率, 上田祐樹, 低温工学, 第41巻2号, 73-80頁.

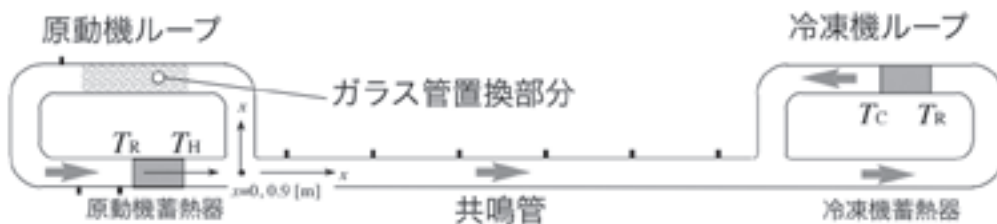


Fig.1 Double-loop thermoacoustic Stirling cooler.

スターリングエンジンの熱音響的理解

Thermoacoustic approach to Stirling engines

琵琶哲志(東北大学), 矢崎太一(愛教大)

BIWA Tetsushi, (Tohoku univ.), YAZAKI Taichi (Aichi Univ. of Education)

E-mail: biwa@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

熱音響エンジンは、音波がエネルギー変換を実行する新しいタイプのエネルギー変換デバイスである。熱音響エンジンは、高い効率で知られるスターリングエンジンと多くの共通点を有する。どちらも熱交換器で挟んだ蓄熱器を必須構成要素として持つ外燃機関であり、装置内部の流体の往復運動を利用する。しかし、異なる点も多い。スターリングエンジンには往復運動するピストンが不可欠であり、しかもピストンの変位の位相差を90度に調整する必要がある。これに対し、熱音響エンジンは蓄熱器と熱交換器を備えた管のみで構成され、一切の可動部品も調整機構もない。加えて、スターリングエンジンでは、蓄熱器を対向流型の熱交換器と見なすことが多いのに対し、熱音響エンジンでは蓄熱器をエネルギー変換を実行するパーツと見なす。このような理解の仕方の相違は次のような事情から生じる。すなわち、熱音響エンジンの場合には、蓄熱器中で音波が輸送する「熱流 Q 」, 「仕事流 I 」というエネルギー流に着目する^{1,2)}のに対し、スターリングエンジンの場合には、蓄熱器の外側にある熱交換器から出入りする「熱」とピストンがする「仕事」に着目する。つまり着目する場所も着目する基本的物理量も異なる。

熱音響エンジンとスターリングエンジンの類似点、相違点を明らかにするために、スターリングエンジンを熱音響の観点から理解し直してみることは有意義だと考えた。本研究では、スターリングエンジンにおけるピストンの90度の位相差と蓄熱器の意味を仕事流の計測から明らかにする。得られた知見に基づいて新しい熱音響スターリングエンジン発電機プロトタイプも提案したい。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1 に本研究で使用するスターリングエンジンプロトタイプを示す。大気圧空気が充填された内半径 19mm, 全長 0.34m のガラス管の両端に、円板でフタをした溶接ベローズを接続し、さらにラウドスピーカを接続した。このラウドスピーカがピストンの代わりを担う。ガラス管部分の気柱の共鳴振動数よりも低い周波数である $f=48\text{Hz}$ でどちらのスピーカも駆動する。この時、加える交流電圧の振幅 ξ_1, ξ_2 と位相 ϕ を独立に変化させることで、スピーカの変位を任意に調節できる。

仕事流 I は

$$I = \langle PU \rangle = \frac{1}{2} p u \cos \theta$$

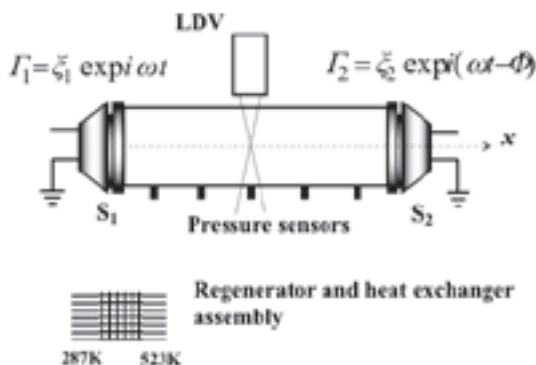


Fig.1 Experimental apparatus.

で与えられる。ここで、 $P=p\exp(i\omega t)$ は音圧、 $U=u\exp(i(\omega t+\theta))$ は断面平均した音響粒子速度を表す。ガラス管部分の圧力と中心軸状の流速をそれぞれ小型の圧力センサーとレーザードップラー流速計を用いて同時計測した。中心軸状の流速から断面平均流速を求めた。スターリングエンジンにおけるピストン位相差 $\phi=90^\circ$ の値を調べるために、始めに蓄熱器を内蔵しないまま、仕事流計測を行った。比較のため、 $\phi=0^\circ$ および 180° でも実験を行った。次に蓄熱器を挿入して実験を行った。

3. 実験結果

$\phi=180^\circ$ の場合にはガラス管内部には中心 $x=0.5$ に流速の節を持つような定在波音波が励起した。結果的に仕事流 I は中心で0となるような分布を示した。また $\phi=0^\circ$ の場合には管内の音圧がほぼゼロとなり、大変に小さな I が得られなかった。位相差 $\phi=90^\circ$ にしたところ、内部には左のスピーカから右のスピーカへ流れ込む I が得られた。 $x=0.5$ では圧力と流速が同位相となる進行波位相が実現するだけでなく、自由空間中の音波のほぼ4倍の音響インピーダンスが得られることが分かった。つまり、位相差 $\phi=90^\circ$ の値は一方方向に流れる仕事流を作ることと、高い音響インピーダンスの進行波音波を作り出すことにある。

Fig.2 は温度勾配のある蓄熱器を挿入した場合の実験結果である。蓄熱器は仕事流の増幅器として動作することが分かる。増幅率は蓄熱器両端の温度比にほぼ等しい結果となった。

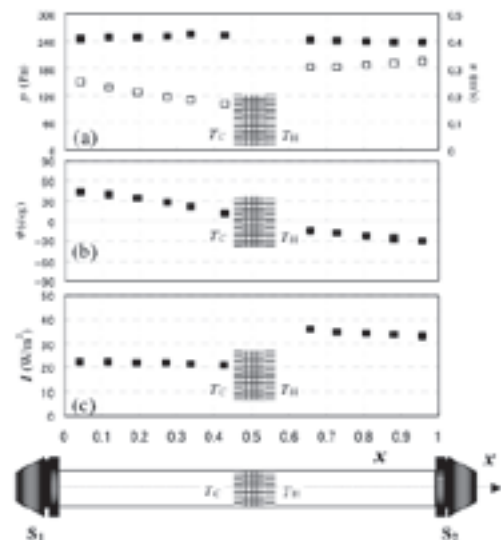


Fig. 2 Acoustic field along the tube having a regenerator-heat exchanger assembly for $\phi=90^\circ$; (a) pressure (\circ) and velocity (\square), (b) phase between P and U , and (c) work flux I .

参考文献

- 熱音響工学の基礎, 富永昭(内田老鶴圃).
- “Thermoacoustic engines”, G. W. Swift, J. Acoust. Soc. Am., **81** (1988) 1145-1180.

低交流損失Bi-2223超電導線の開発(3) —多芯化、高Je化、ツイストピッチ低減の効果—

Development of low AC loss Bi2223 superconducting wire (3)

– Improvement of filamentary structure and engineering current density, and effects of reduction in twisting pitch –

笹重有伺, 末吉貴洋, 岩熊成卓, 船木和夫(九大); 綾井直樹, 石田友信(住友電工) 福本祐介, 上條弘貴(JR 総研)

SASASHIGE Yuji, SUEYOSHI Takahiro, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ.);

AYAI Naoki, ISHIDA Tomonobu(Sumitomo Electric Industries); FUKUMOTO Yusuke, KAMIJO Hiroki(Railway Tech. Res. Institute)

E-mail:sasasige@sc.kyushu-u.ac.jp

1.はじめに

我々のグループは、軽量化のための最適設計、巻線構造や冷却システムの検討などを通して、鉄道車両用主変圧器の超電導化の可能性について検討している。これまでに、Bi-2223 系超電導線を用いた新幹線の架線電圧 25kV に対応する超電導主変圧器モデルの試作とその評価を行い、鉄道車両用主変圧器の超電導化を実現するためには、さらにシステムの軽量化や効率向上が必須であり、その解決方法として、超電導線材の交流損失を低減することが最も重要な課題となることを示している¹⁾。

本報告では、これまでに進めている Bi-2223 系超電導線の低損失化の方法を明らかにするために、さらに、細芯化に加えてツイストピッチが異なる 2 種類の線材を作製し、フィラメントサイズやツイストピッチの低減が交流損失特性に及ぼす影響について評価したので報告する。

2.低交流損失線材の試作

超電導多芯線の損失低減には、フィラメントサイズを小さくする、ツイストピッチを短くする、母材の抵抗率を大きくすることが有効であることが知られている。これまで、Bi-2223 系多芯テープ線材では、フィラメント間の結合が強く単芯線ライクの特性を示すことが多かった。このため、電流量を確保しフィラメント間の結合を極力抑える線材開発を行ってきた¹⁾が、今回はさらに細芯化を行った 2 種類の線材 (AC74-A, AC74-C) を試作した。主な諸元を表 1 に示す。AC74-A, AC74-C のツイストピッチはそれぞれ 7.6mm, 4.7mm である。

3.測定方法

試作した低交流損失線材の垂直磁界損失を、鞍型ピックアップコイル法により液体窒素中で測定した。積層枚数を 6 とし、周波数は 0.1~60Hz の範囲、磁界振幅は 0.25T までの領域で損失測定を行っている。

4.測定結果

AC74-A, AC74-C について、交流損失の測定結果をそれぞれ Fig.1, Fig.2 に示す。

AC74-A については、前回の試作線材¹⁾に比べて、交流損失が 1.15 倍 (0.1Hz, 振幅 0.2 T) に増加しているが、77K, 自己磁界中の平均臨界電流密度 J_c が 1.36 倍増加していることを考慮すると電流量当たりの交流損失は低減している。

また、AC74-C については、前回に比べ J_c が 1.24 倍、交流損失が 0.77 倍 (0.1Hz, 振幅 0.2 T) となり、さらに低損失化が進んでいる。

交流損失の比較においては、臨界電流密度の磁界依存性の効果も考慮する必要があるのでさらに詳細検討をする予定である。また、両者の損失の周波数依存性の比較よりツイストによる結合損失の低減効果も議論する。

本研究の一部は国土交通省の補助を受けて実施している。

Table 1 Parameters of Bi-2223 multifilamentary tapes

Parameter	AC74-A	AC74-C
Width (mm)	2.39	2.32
Thickness (mm)	0.183	0.182
Number of filament	37	37
J_c (kA/m ²) at s.f. and 77K	1.18×10^5	1.08×10^5
Twist pitch (mm)	7.6	4.7

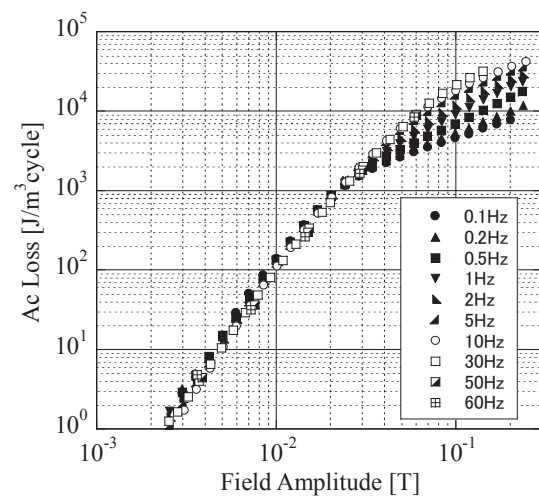


Fig. 1 Frequency dependence of ac losses (AC74-A) (Perpendicular magnetic field, 77K)

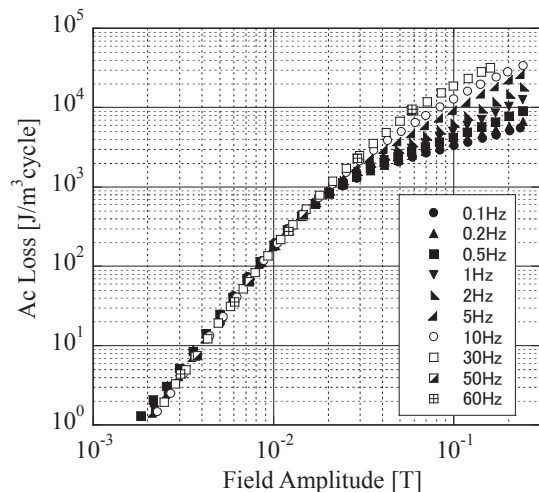


Fig. 2 Frequency dependence of ac losses (AC74-C) (Perpendicular magnetic field, 77K)

参考文献

- (1) 福本祐介 他: 2007 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p. 173.

金属内部酸化法によるAg合金シースバリア線材の作製と評価

Fabrication and properties of Ag-alloy sheathed Bi2223 tapes with high resistive barrier formed by in-situ oxidation method

塩入 稔章, 永岡 篤, 町田 智弘, 稲田 亮史, 中村 雄一, 太田 昭男 (豊橋技科大)

SHIOIRI Toshiaki, NAGAOKA Atsushi, MACHIDA Tomohiro, INADA Ryoji, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT)

E-mail: t-shioiri@super.eee.tut.ac.jp

1. はじめに

送電ケーブルや変圧器などの各種交流電力機器に応用する場合, 交流磁界印加時における線材の交流損失の低減が重要となる. この交流損失低減のためフィラメント間に高抵抗材料をバリア層として介在させた線材の開発が重要となる. その時, 従来広く用いられている酸化物の粉末を塗布する方法では取り扱い上や長尺における安定加工に課題がある. そこでバリア層を加工の容易な金属の状態を導入し, 加工後に酸化させることによりバリア層を形成させる金属内部酸化法は長尺線の加工の観点から有利と考えられる. そこで今回 Ni をバリア層として用いたバリア線材について検討し, その結果について報告する.

2. 実験方法

前駆体は, 平均組成を Bi : Pb : Sr : Ca : Cu = 1.8:0.3:1.87:2.0:2.6 とし, 2212 粉と Ca-Cu-O 粉を混合したものに 2223 粉を 2wt% 添加した 3 粉末法により準備した. PIT 法により Ag-Cu2% 合金をシース材とし, バリア層として Ni を導入した 7 芯 Bi2223 テープを作製した. この際バリア層の厚さが 3-5 μm (barrier A) と 5-8 μm (barrier B) の 2 種類を準備した. その後 1 次焼結を 840°C で 12-70 時間行い, 2 次圧延, 2 次焼結を 840°C で 150 時間行った. 作製したサンプルについてバリア層導入による影響を調べるため組織及び相構成を SEM-EDX および XRD で評価を行った.

3. 結果および考察

Fig. 1 に 1 次焼結時間 24 時間として作製した barrier B の完成サンプルの断面の SEM 像を示す. 図のようにフィラメント間に厚さ約 10 μm で NiO 層が均一に形成されていることが確認できた. EDX 分析より, フィラメント内の不純物相の多くは 14:24 相であり, Ni 化合物やフィラメント中の Ni 元素は確認できなかった.

Fig. 2 に焼結時間と XRD 結果より算出した 2223 相の生成率の関係を示す. 図より, バリア層を導入することにより 2223 相の生成速度の低下が見られ, また, バリア層が厚い barrier B ほど生成速度が遅くなる傾向が見られた.

金属内部酸化法により Ni(O) をバリア層とするバリア線材の作製を行ったところ, 焼結後のバリア層の拡散が小さく, 10 μm 程度の厚みで連続性のある NiO 層を形成することができた. また, Bi2223 相の生成速度は若干低下するものの不純物相の生成などはないことがわかった. そのため Ni(O) は金属内部酸化法のバリア材料として有効であると考えられる.

本研究の一部は, 科学研究費補助金(No.17206026)の援助により行われた.

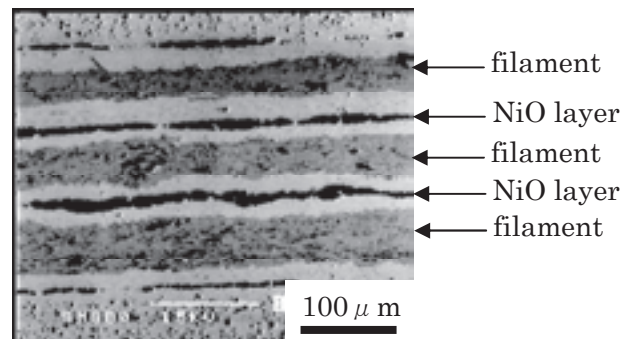


Fig.1 SEM micrograph showing longitudinal cross-section of the tape with barrier B after second sintering.

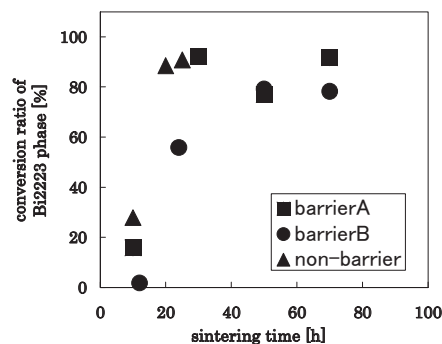


Fig.2 The conversion ratio of Bi2223 from Bi2212 as a function of sintering time.

等温部分溶融法により作製した Bi2212 丸線の臨界電流特性

Critical current characteristics of Bi2212 round wires prepared by isothermal partial melting method

高橋 健一郎, 中根 茂行, 松本 明善, 北口 仁, 熊倉 浩明 (NIMS)

TAKAHASHI Kenichiro, NAKANE Takayuki, MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS);

E-mail : TAKAHASHI.Kenichiro@nims.go.jp

1. はじめに

低温における強磁場発生用の材料として期待されている $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi2212) は、部分溶融-徐冷熱処理を行なうことで良好な配向組織が得られ、 J_c 特性の優れた線材を作製可能である。また、丸線の形状をした線材も作製する事が出来る。部分溶融-徐冷法で作製する Bi2212 線材の J_c 特性は、熱処理時の最高温度に敏感である。特に丸線は最適温度条件を 1 K 以下の精度で精密にコントロールする必要がある事が近年明らかになっている[1]。線材の長尺化やコイルの熱処理を考えた場合、そのような非常に精密な温度コントロールを必要とするプロセスを適用する事は困難であり、容易に高特性な線材を作製可能とする技術が求められている。そこで、我々は熱処理時に制御するパラメータとして、温度よりも容易に制御が可能で大型化にも対応し易い、雰囲気中の酸素分圧に注目した。Bi2212 の融点は雰囲気中の酸素分圧の増加と共に上昇する。この性質を利用し、等温部分溶融法と呼ばれる、一定温度に保持した電気炉中の酸素分圧を熱処理時に増加させる方法により、Bi2212 テープ線材を作製した結果が既に報告されている[3,4]。等温部分溶融法で作製された Bi2212 テープ線材は、一般の部分溶融-徐冷法で作製した線材に匹敵する J_c 特性を示す事が確認されている。また、保持温度を最適化すれば線材内の組織を精密に制御できる可能性がある事も指摘されており、非常に有望なプロセスであると考えられる。しかし、これらの先駆的な研究は、部分溶融-徐冷法より J_c が若干低かったため埋もれてしまっていた。そこで本研究では、この等温部分溶融法による Bi2212 丸線の熱処理について、より詳細な研究を試みた。今回は第一段階として、保持温度と酸素分圧の変化速度が J_c 特性に及ぼす影響について調べたので報告する。

2. 試料の作製

図1に、等温部分溶融法による熱処理の温度パターンと酸素ガス流量の変化を示す。保持時間は24時間とした。熱処理は窒素雰囲気中で開始し、保持温度に達してから30分後に酸素分圧を徐々に増加させた。雰囲気中の酸素分圧は電気炉内に導入するガスの流量は100 cc/min. で一定とし、その中の窒素ガスと酸素ガスの割合をマスフローコントローラで制御することにより変化させた。炉内に導入する酸素ガスの流量は、3, 6, 12時間でリニアに酸素流量を増加させた場合(A~C)と、12時間でよりゆっくりと酸素流量を増加させた場合(D)の4種類の酸素分圧変化パターンについて、保持温度を835 - 875°Cの範囲で種々変化させた線材を作製した。

3. 結果と考察

図2に、4.2 K, 10 Tにおける J_c の熱処理温度依存性を示す。リニアに酸素分圧を上昇させた場合(A~C)、変化速度が遅い方が高い J_c を示した。また、より緩やかに酸素分圧を増加させた試料(D)は、今回作製した試料の中で最も良い J_c 特性を示した。熱処理時に酸素分圧が増加する過程は、部分溶融-徐冷法における徐冷過程に対応する。今後、この過程をより緩

やかにすることにより、更なる特性向上の可能性のある事が分かった。 J_c は保持温度に対し、845°C付近と865°C付近で極大値を示す傾向が見られ、酸素分圧の上昇速度が緩やかになるほどその傾向は顕著になった。この J_c の振る舞いは[3]で報告されたBi2212テープ線材の結果と非常に良く類似している。[3]では保持温度の違いにより、結晶粒の成長過程が変化し結晶粒のサイズと結合性が変化するためにこのような J_c の振る舞いがみられると解釈されており、今回の丸線でも同様な現象が起こっている可能性が考えられる。当日は組織観察の結果も交え、更なる高特性化の指針についても報告する予定である。

参考文献

- [1] A. Matsumoto *et al.*, SuST. **17** (2004) 989.
- [2] T.G. Holesinger *et al.*, APL. **63** (1993) 982.
- [3] R. Funahashi *et al.*, Physica C **311** (1999) 107.

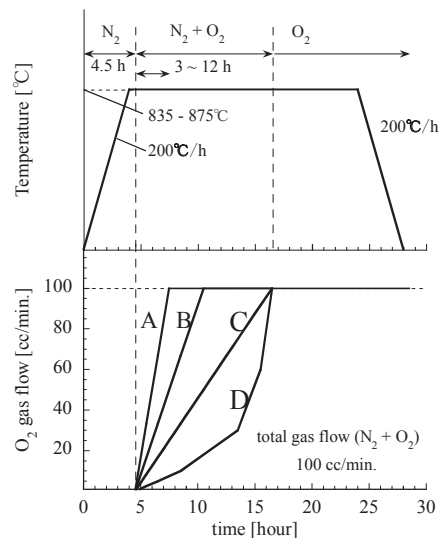


Fig. 1. Heat-treatment schedule and change of O_2 gas flow rate.

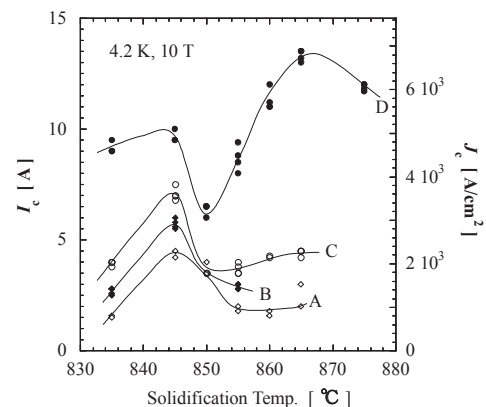


Fig. 2. Magnetic field dependence of J_c at various temperatures.

CT-OP 法により作成された Bi-2223 銀シース多芯テープの 磁界角度異方性の評価

Evaluation of field-angle anisotropy in multifilamentary Bi-2223 silver-sheathed tape prepared by CT-OP processing

高山伸一, 木内勝, 小田部荘司, 松下照男 (九工大); 綾井直樹, 藤上純, 林和彦, 佐藤謙一 (住友電気)
TAKAYAMA Shinichi, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund S, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Institute of Technology);
AYAI Naoki, FUJIKAMI Jun, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: takayama@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 現在、Bi-2223銀シーステープ線材において最終焼結プロセス時に加圧焼結処理を行うことにより、従来の大気圧焼結処理に比べて高い臨界電流が得られることが報告されている¹⁾。当初、77.3 Kにおける自己磁界中での J_c は加圧焼結処理された試料でも150 A程度であったが、加圧焼結法に更なる改良が加えられ、現在では200 Aという高 J_c を実現している。これまでの研究では、最近の高 J_c を示す試料とそれ以前の試料の臨界電流密度や不可逆磁界を比較することにより、どのような点が向上しているかを調べ、臨界電流特性の更なる向上に関して検討を行ってきた²⁾。本研究では、更に印可磁界角度を変えて、 J_c の磁界角度異方性の検討を行った。

実験 測定に用いた試料は PIT 法で作製された Bi-2223銀シース多芯テープで、#1 は従来の大気圧焼結で作製された線材、試料 #2, #3, #4 は2次焼結プロセスにおいて加圧焼結処理がなされた高臨界電流タイプ線材である。自己磁界中での $T = 77.3$ Kにおける臨界電流は 104 A(#1), 126 A(#2), 147 A(#3), 197 A(#4) となっている。測定は試料に直接電流を通電する直流四端子法を用い、広範囲の温度領域において臨界電流特性を評価した。また、磁界は様々な角度から印加した。不可逆磁界は $J_c = 1.0 \times 10^7$ A/m² となる磁界で定義した。

結果及び検討 Fig. 1(a)に、テープ面に対して垂直に磁界を印可した場合の臨界電流密度特性を示す。この磁界方向では、最も J_c の高い #4 が全磁界領域において高い J_c となっている。しかし、高磁界になるにしたがって、次第に他の試料との差が無くなってきていることが分かる。Fig. 1(b)に、テープ面に対して平行に磁界をかけた場合の臨界電流密度特性を示す。こちらの磁界方向においては、全体的に #4 の J_c が最も高くなっている。これらの結果から、#4 は磁界を印可する方向に関わらず、全体的に特性が向上していることが分かる。これらの結果を J_c の分布を考慮した磁束クリープ・フローモデルの解析結果と比較を行った。磁束クリープ・フローモデルによると磁束クリープ下での J_c は磁束クリープが無い仮想的な臨界電流密度 J_{c0} を A , γ , m を用いて用いて以下のように評価することが出来る。ここで J_{c0} を

$$J_{c0} = A \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^m B^{\gamma-1} \left(1 - \frac{B}{B_{c2}} \right)^2 \quad (1)$$

また、 A の分布が

$$f(A) = K \exp \left[- \frac{(\log A - \log A_m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

で与えられるとする。ここで A_m は A の最頻値、 K は規格化条件により決定される定数、 σ^2 は分布幅を表すパラメーターである。これらの式より理論的な E - J 曲線を求め、さらに J_c や B_i の理論値を求めた。得られた解析結果を Fig. 1(a)及び Fig. 1(b)に示す。また、解析に用いたパラメータは、 $m \sim 3.53$, $\gamma \sim 0.51$ であり、特に重要な A_m と σ^2 を Table. 1に示す。この結果から印可磁界方向に関わらず、#4 の A_m が最も大き

く、 σ^2 が最も小さいことが分かる。これらのパラメータより、#4 は超電導体内の不均一さが低減し、ピン力も向上したことが分かる。これは、CT-OP 法の最適化が更に進んだことにより、テープ内結晶自身の凝縮エネルギー密度が向上したためであると考えられる。不可逆磁界や異方性の比較は当日行う。

Table 1: Pinning parameter at 77.3 K in a magnetic field normal and parallel to the tape surface.

	$B \perp$ tape		$B //$ tape	
	A_m	σ^2	A_m	σ^2
#1	3.32×10^9	0.043	5.79×10^9	0.033
#2	3.45×10^9	0.025	6.37×10^9	0.017
#3	3.59×10^9	0.021	7.02×10^9	0.013
#4	3.85×10^9	0.019	8.79×10^9	0.011

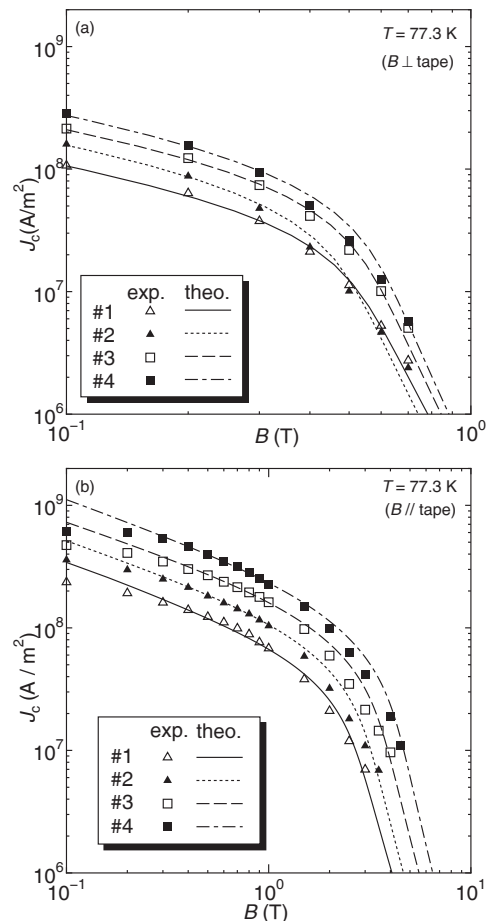


Fig. 1: Critical current density at 77.3 K in a magnetic field (a) normal and (b) parallel to the tape surface.

参考文献

- 1) S. Kobayashi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 2534.
- 2) S. Takayama *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.94

バリア入り Bi2223 多芯線材の作製と交流損失特性

Fabrication and AC loss characteristics in Bi2223 tapes with interfilamentary barriers

稲田 亮史, 光野 克紀, 荘口 和真, 中村 雄一, 太田 昭男 (豊橋技科大); 李 成山, 張 平祥 (西北有色金属研究院)
 INADA Ryoji, MITSUNO Yoshiki, SOGUCHI Kazuma, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT);
 LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)
 E-mail: inada@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 多芯線材に交流磁界が印加された場合、主に母材である銀の抵抗率が低いことに起因して、多芯化されたフィラメントは電磁的に強く結合し、結果として大きな交流損失が発生してしまう。特に、線材幅広面に対して垂直な交流磁界下においてフィラメント間電磁結合を抑制し、交流損失低減を実現するためには、フィラメントのツイスト(撚り)だけではなく、横断抵抗率の向上が必須である。

本研究では、横断抵抗率の向上を目的としてフィラメント間に酸化粉末バリアを導入した Bi2223 多芯ツイスト線材を作製し、交流損失特性の評価を行った。

2. 実験方法

バリア入り Bi2223 多芯線材は通常のパウダー・イン・チューブ法により作製した。フィラメントに接するシース材には Ag, 多芯化の際の OUTER シースには Ag-Mn 合金を使用した。また、線材の超電導特性への影響を考慮して Ca_2CuO_3 を選択し、更に加工性の向上を目的として Bi2212 粉末を質量比で 20~30% 程度混合したものをバリア材として導入した^[1,2]。所定の線径まで細線化した丸線に対してツイスト加工を施した後、テープ化・熱処理を行い試料を得た。バリア入り線材(芯数 19, 幅 3.75 mm, 厚さ 0.25 mm, ツイスト長 $L_t = 15$ mm, $I_c = 26$ A @ 77 K, 0 T) の横断面およびシース部分をエッチングで除去した後の線材幅広面の写真を Fig. 1 および Fig. 2 にそれぞれ示す。両図から明らかなように、バリア層はツイストされたフィラメント間に概ね介在した構造が得られている。交流損失測定は 77 K, 周波数 1~300 Hz, 磁界振幅 0.5~70 mT の条件においてピックアップコイル法により行った^[3]。

3. 結果と考察

Fig. 3 に、バリア入り線材の振幅 $B_0 = 1$ mT の交流横磁界を印加したときの交流損失 Q_m の周波数依存性を示す。印加磁界の方向は線材幅広面に対して平行および垂直とし、各条件下での損失測定値は、測定範囲内において得られた損失最大値 $Q_{m-\max}$ で割った値としてプロットしている。比較のため、バリアを導入していないほぼ同一形状のツイスト線材 ($L_t = 15$ mm) の測定値も合わせて示す。図から明らかなように、損失最大値を示す特性周波数 f_c は平行・垂直磁界下いずれの場合もバリア層の導入に伴い高周波数側へシフトしている。試料形状が等価である場合、 f_c は試料の横断抵抗率 ρ に比例して増大することから、バリア層を導入した効果を確認することができた。フィラメント間結合抑制条件の一つとして、 f_c は運転周波数よりも高いことが要求されるが、垂直磁界下での f_c 値は 25 Hz 程度で商用周波数 (50-60 Hz) よりも依然として低い。垂直磁界下での損失低減に向けて、バリア層の連続性の更なる改善だけではなく、線幅をスリム化および数 mm 程度のツイスト長の実現が必要である。

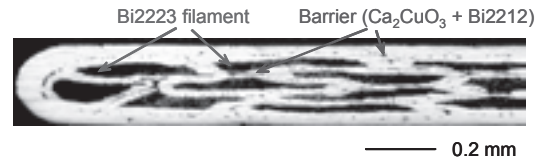


Fig. 1. A transverse cross section of Bi2223 tape with $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ barrier.

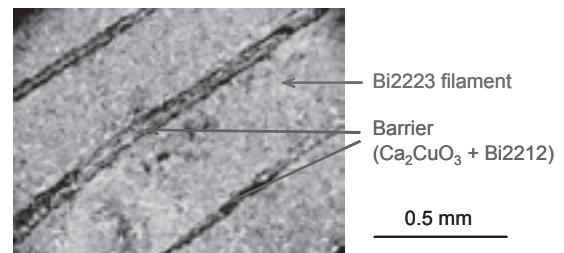


Fig. 2. Broad face of twisted Bi2223 filaments ($L_t = 15$ mm) and $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ barrier after removing sheath part.

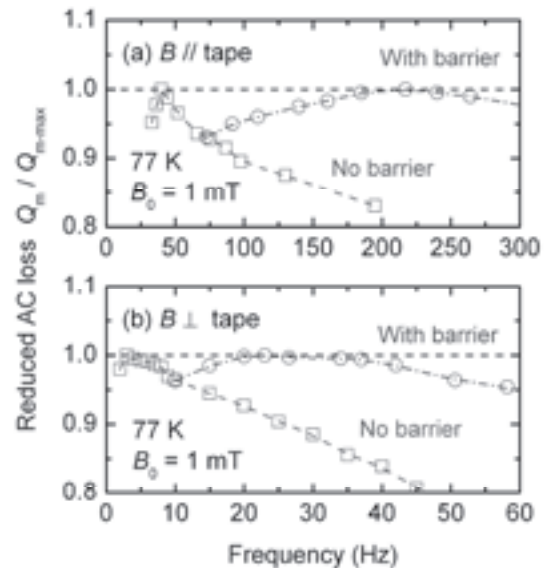


Fig. 3. Frequency dependence of reduced AC losses ($= Q_m / Q_{m-\max}$) under parallel and perpendicular field of twisted tapes ($L_t = 15$ mm) with or without barriers at $B_0 = 1$ mT.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (No.17206026 および No.17760233), (財)東電記念科学技術研究所研究助成および豊橋技術科学大学未来技術流動センター若手研究者プロジェクト助成の支援により実施された。

参考文献

- [1] P.X. Zhang et al.: Physica C **357-360** (2001) 1222.
- [2] R. Inada et al.: Physica C **463-465** (2007) 857.
- [3] R. Inada et al.: Supercond. Sci. Technol., **20** (2007) 138.

Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y 膜における J_c 磁場印加角度依存性に与える BaZrO₃ の影響Effect of BaZrO₃ addition on magnetic field angular dependence of J_c in Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y film

原田 崇弘, 吉田 隆, 一野 祐亮, 尾崎 壽紀(名大工, JST), 高井 吉明(名大工); 松本 要(九大工, JST); 一瀬 中(電中研, JST); 堀井 滋(東大工, JST); 向田 昌志(九大工, JST); 喜多 隆介(静岡大工, JST)

HARADA Takahiro, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, OZAKI Toshinori, (Nagoya Univ., JST)

TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech., JST);

ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo, JST);

MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ., JST); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ., JST)

E-mail: t-harada@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO)高温超伝導線材をコイル等に応用するには、磁場印加角度に依らず、高磁場中で高い臨界電流密度(J_c)を実現する必要があるため、人工ピンの導入が求められる。しかし、REBCOとBaZrO₃(BZO)の混合ターゲットを用いる方法では、BZOがc軸相関ナノロッドになるため、c軸に平行な磁束しか有効にピンニングできないことが報告されている[1,2]。そこで本研究では、あらゆる向きの磁場に対する有効なピン止め点の開発を目的とし、SmBCOとBZOの2つの異なるターゲットを成膜中に交換することで、SmBCO膜内部にBZOナノ粒子を微細に分散させ、J_cの磁場印加角度依存性について検討を行った。

2. 実験方法

SmBCO+BZO(2 vol.%)膜は、PLD法(ArF, λ = 193 nm)を用いて、T_s = 850 °C、pO₂ = 0.4 TorrでMgO(100)単結晶基板上に作製した。薄膜の作製方法として、BZO混合ターゲットを用いる方法と、SmBCOとBZOのターゲットを交換する方法の2種類を検討した。前者は繰り返し周波数を10 Hzで一定とし、後者はSmBCOを10 Hz、BZOを1 Hzの条件で作製した。作製した薄膜の結晶性及び配向性はX線回折法、表面形状は原子間力顕微鏡(AFM)、超伝導特性は四端子法で評価した。また、印加磁場をc軸に対し、-8° ~ 126°変化させ、J_cの磁場印加角度依存性を評価した。

3. 結果及び考察

Fig. 1に、2 vol.% BZOをそれぞれ異なる方法で添加したSmBCO薄膜における、J_cの角度依存性を示す。比較データとして、KangらのBZO(2vol.%)混合YBCOターゲットを用いた薄膜のデータを載せる[2]。混合ターゲットを用いた薄膜は、B//cにおいて高いJ_cを示すが、磁場印加角度の増加に伴いJ_cが大きく低下している。一方、SmBCO及びBZOターゲットの交換で作製した薄膜は、B//abにおいて鋭いピークを持つが、c軸に対して角度θ = 0 ~ 80°の角度領域で、ほぼ一定のJ_c(~0.63 MA/cm²)を示している。この結果より、ターゲット交換により添加したBZO粒子の方が、より等方的に磁束をピンニングしていることがわかる。SmBCO薄膜内部のBZOの形状を断面TEM像で観察した結果、混合ターゲットを用いて作製した薄膜内部では、c軸方向に成長した直径~10 nmのBZOロッドが~30 nm間隔で存在するのが確認される。また、ターゲットを交換して作製した薄膜内部では、高密度に分散した粒径~30 nm、高さ~4 nmのBZOナノ粒子が確認される。断面TEM及びJ_c角度依存性から、混合ターゲットを用いて作製したSmBCO薄膜は、膜内部に成長したBZOロッドがc軸方向に強い異方性を持って成長したため、B//cにおいてのみ強いピンニング力を示したと考えられる。一方、ターゲットを交換して高密度BZOナノ粒子を作製したSmBCO薄膜

は、TEM像で確認されたBZOナノ粒子が有効な3次元ピンとして働いているために、等方的なピンニング力を示したと考えられる。

本研究で得られたようなJ_cの磁場印加角度依存性は、YBCO薄膜においても報告されている[3]。Meleらは、YBCOターゲット表面の一部にY₂O₃を乗せて作製したYBCO+Y₂O₃薄膜において、膜内部に均一に分散したY₂O₃粒子が有効な3次元ピンとして働いているため、磁場中におけるJ_cが、B//abのピークを除いて磁場印加角度によらずほぼ一定になると報告している。本研究も、これらの報告と同様のピンニング機構に起因すると考えられ、SmBCO膜内部に分散したBZOナノ粒子が、有効な3次元ピンとして働いたために、等方的なピンニング力が得られたと考えられる。

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005)の助成を受けて実施されたものである。

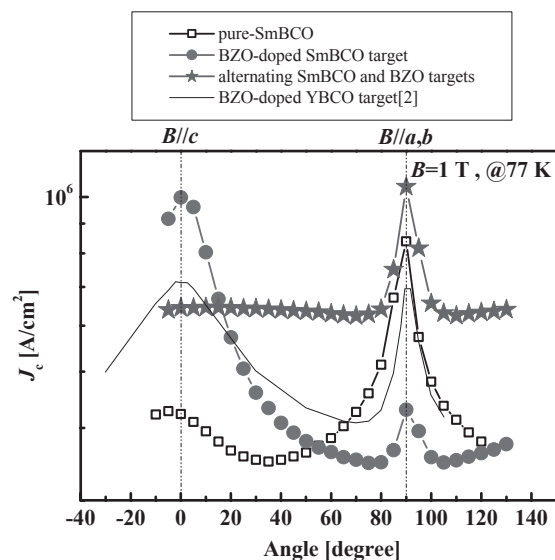


Fig. 1. Magnetic field angular dependence of J_c for various films.

【参考文献】

1. J. L. Macmanus-Driscoll et al., Nature 3 (2004) 439-443.
2. S. Kang et al., Physica C 457 (2007) 41-46.
3. P. Mele et al., Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 616-620.

2次元 APC 導入 Y123 膜の電流輸送特性

The electrical transport properties of Y123 films with 2-dimensional APCs

高村 真琴, 向田 昌志, 寺西 亮, 山田 和広(九大・CREST-JST); 堀井 滋(東大・CREST-JST); 一瀬 中(電中研・CREST-JST); 喜多 隆介(静岡大・CREST-JST); 難波 雅史, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 松本 要(九工大・CREST-JST); 吉田 隆(名大・CREST-JST); 久恒 善美, 森 信幸(九大)

M Takamura, M Mukaida, R Teranishi, K Yamada(Kyushu Univ. and CREST-JST); S Horii(Univ. of Tokyo and CREST-JST); A Ichinose (CRIEPI and CREST-JST); R Kita(Shizuoka Univ. and CREST-JST); M Namba, S Awaji, K Watanabe(Tohoku Univ.); K Matsumoto(Kyushu Inst. of Tech. and CREST-JST); Y Yoshida (Nagoya Univ. and CREST-JST); N Mori, Y Hisatsune(Kyushu Univ.)

E-mail address: takamura06@zaiko10.zaiko.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

人工ピンニングセンター(APC)のREBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE123, RE; 希土類元素)薄膜中への導入は、磁場中における臨界電流密度 J_c を向上させる手法として有効である。さらに近年では、APC の形状や分散状態の制御に関する報告もなされている [1, 2]。しかし形状によりAPCを0, 1, 2, 3次元と分類した場合、2次元 APCに関する報告例は極めて少ない。そこで本研究ではY123膜中への2次元 APCの導入を試み、Y123膜の電流輸送特性を調査した。膜中への2次元 APCの導入は、Y123とAPCとしての非超伝導層を交互に積層させたc軸面内配列a軸配向多層膜を作製することで実現を試みた。

2. 実験

本研究においては非超伝導層として Pr123 を選択し、Y123とPr123のa軸配向多層膜を作製した。(100)SrLaGaO₄基板上に Gd₂CuO₄をバッファ層として用い[3]、PLD法で多層膜の成膜を行った。ターゲットには円形のY123中に矩形のPr123を組み込んだ焼結体を用いた。また、多層膜においてY123層厚の違いが電流輸送特性に及ぼす影響を調査するため、成膜時のターゲット回転速度を0.5rpmと2rpm [4]と変化させ2種類の多層膜を成膜した。

作製した膜の結晶配向性及び面内配向性はXRD測定により評価した。電流輸送特性は J_c 及び臨界温度 T_c を四端子法により測定した。また、膜の断面組織観察をTEM、元素分析をSTEM-EDSにより行った。

3. 結果及び考察

XRD $\theta/2\theta$ 及び ϕ -scan測定により、作製した薄膜はc軸が面内配列したa軸配向膜であることが確認された。図1にTEMによる断面観察結果を示す。それぞれのターゲット回転速度は(a)2rpm、(b)0.5rpmである。基板に平行なc軸方向に見られる白黒のコントラストは、Y(白)及びPr(黒)の元素分布に対応しており、Y123とPr123のa軸配向多層膜であることが確認された。Y123層厚は(a)約6nm、(b)約15nmであった。

Y123層厚による超伝導特性の変化は、 T_{c0} に顕著に現れた。Y123層厚が約15nm(Fig.1b)の場合 T_{c0} は約80Kであったのに対し、約6nm(Fig.1a)の場合約55Kと大きく低下した。それぞれのa軸長がpure Y123膜と比較して長くなっていったことから T_c 低下の1つの要因としてYとPrの置換が考えられる。Y123層厚による T_{c0} の違いは、Y123層厚が大きくなることで、置換していない領域の比率が増加したためと考えられる。

図2に、Y123層厚が約15nm(Fig.1b)の試料における J_c の磁場印加角度依存性をpure a軸配向Y123膜と比較した結果を示す。縦軸は $B//a$ での J_c で規格化した値である。 $B//c$ において J_c のピークが見られることから、Y123とPr123のa軸配向多層膜がc軸相関ピンを有していることが分かる。

参考文献

- [1] S. Kang et al., *Physica C* **457** (2007) 41
- [2] B. Maiorov et al., EUCAS2007 M5-Flux pinning 0442
- [3] M. Mukaida et al., *Appl. Phys. Lett.*, **63** (1993) 999
- [4] M. Takamura et. al., *Physica C.*, **463** (2007) 904

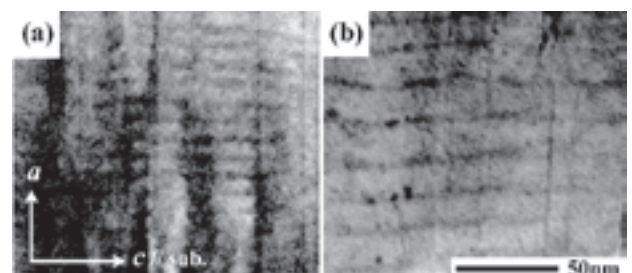


Fig. 1 The cross-sectional TEM images for Y123/Pr123 multilayer films. The target rotation speed was (a)2rpm and (b)0.5rpm

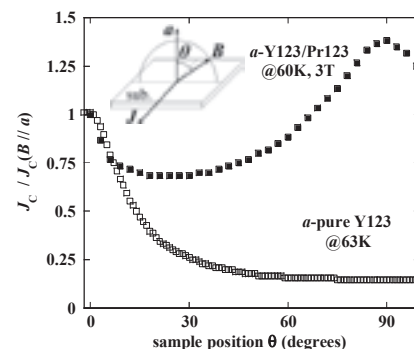


Fig.2 The field angular dependences of J_c for sample (b).

人工ピンニングセンターを導入した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 線材における アニール条件による磁場中特性への影響

The effect of annealing temperature on a characteristic in the magnetic field of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coated conductors with artificial pinning centers.

木下晶雄、山田穰、宮田成紀、衣斐頭 (超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター)

塩原 融 (超電導工学研究所 線材研究開発部)

Kinoshita Akio, Yamada Yutaka, Miyata Seiki, Ibi Akira (Superconductivity Research Laboratory-Nagoya Coated Conductor Center); Shiohara Yuh (Superconductivity Research Laboratory-Division of Superconducting Tapes & Wires)

1. はじめに

高温超電導体の実用化のために高臨界電流 (I_c) が必要とされる。また、磁場中においても超電導膜に対する磁場方向による I_c 異方性が少ないことが望ましい。我々はこれまでに磁場中での I_c 異方性を改善するため、 ZrO_2 混合ターゲット法により GdBCO 膜中に c 軸相関性のピン止め点として有効なバンパー組織を見出した。一方、PLD 法による高温超電導体では、成膜後に酸素雰囲気中でのアニールにより超電導膜に酸素を導入している。アニールの温度により酸素導入量が異なり、 I_c が異なることが知られている。しかし、磁場中特性への影響については報告されていない。今回我々は、 ZrO_2 混合 GdBCO 膜を用いてアニール温度を 200°C ~ 500°C まで調整し、各温度での I_c および磁場中特性等への影響を調査したため報告する。

2. 実験方法

IBAD 基板上に PLD 法により長尺成膜した 5 mol% ZrO_2 混合 GdBCO 膜に保護層である銀をスパッタした後、幅 8mm の短尺サンプルに分割してアニールした。アニールは、設定温度まで 2 時間で昇温し、設定温度で 2 時間保持した後に液体窒素につけてクエンチした。設定温度は 200°C ~ 500°C の範囲で 50°C 間隔で変えた。 I_c および磁場中特性は、液体窒素中 (77K) で磁場を $0\sim 8\text{T}$ 変化させて 4 端子法により臨界電流測定を行った。更に 1T , 3T の磁場中で c 軸に対し印可磁場を $-30^\circ\sim 135^\circ$ 変化させ臨界電流の角度依存特性も調べた。

3. 結果及び考察

Fig.1 に I_c のアニール温度依存特性を示す。各アニール温度での最大 I_c を比較すると、 500°C から 300°C まで温度が低くなるに伴い I_c が増加し、 300°C で最大 I_c (203.7A/cm) を記録した。また、 300°C から 200°C まで温度が低くなるに伴い I_c は低下した。X 線解析から c 軸長は 300°C が最も短かく、最も酸素が導入されていると考えられる。

Fig.2 に 3T の磁場中における I_c の角度依存特性を示す。導入酸素量が多い (c 軸長が短い) ほど、全角度にわたり I_c が向上する傾向が確認でき、c 軸並行磁場 (0°) のピークが顕著に現れ I_c 異方性も改善した。

また、 I_c 測定により、導入酸素量が少ないと I_c ($0\sim 5\text{T}$) も低かった。このため、Vortex 相図も加味した検討が必要であると思われる。

4. まとめ

アニール温度による I_c および磁場中特性の相異を確認した。今後はアニール時間による影響について研究を進める予定である。

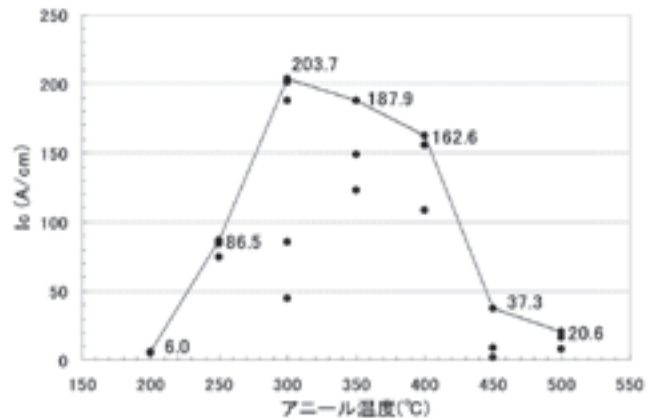


Fig.1 I_c (77K, 0T) as a function of annealing temperature for ZrO_2 doped GdBCO coated conductor on IBAD substrate.

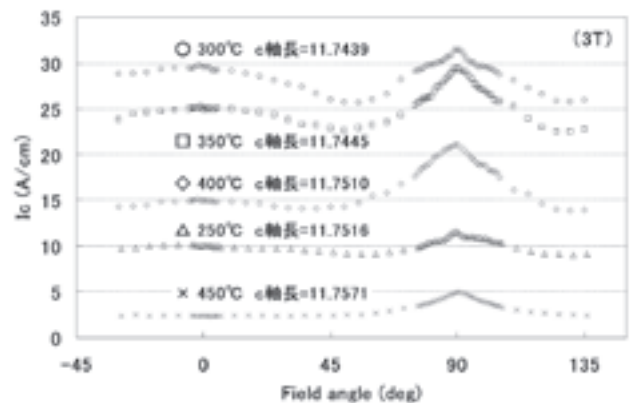


Fig.2 An angular dependence of I_c normalized by I_c at 90° at 3T and 77K for ZrO_2 doped GdBCO coated conductor on IBAD substrate.

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] M. Kogauchi et al., J. Appl. Phys. 28 (1989) L609.
- [2] K. Takita et al., J. Appl. Phys. 27 (1988) L57.

YBa₂Cu₃O₇ 薄膜の O₂ アニール時間による臨界電流密度変化Annealing time dependence of critical current densities of YBa₂Cu₃O₇ thin films

佐藤 信也, 土井 俊哉, 種子田 賢宏, 川原一浩, 徳留 誠, 富安 亮太, 白樂 善則(鹿児島大);
鹿島直二, 長屋重夫(中部電力);

SATO Shinya, DOI Toshiya, TANEDA Takahiro, KAWAHARA Kazuhiro, TOKUDOME Makoto,
TOMIYASU Ryota, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);
KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.);

E-mail: bt202092@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O₇(Y-123)超伝導体は液体窒素冷却(77K)で超伝導状態を維持し, また磁場中においても臨界電流密度(J_c)の低下が少ないことから線材への応用が非常に期待されている。

現在では, 結晶配向性の向上と長尺化が研究の中心となっているが, Y-123 層の特性に大きな影響を及ぼすと考えられる O₂ アニールに関する研究報告例は少ない。そこで我々は O₂ アニールを施す時間が Y-123 薄膜の J_c に与える影響を調べた。

2. 実験及び評価方法

Y-123 薄膜は, 単結晶 SrTiO₃ の(100)面上に PLD(Pulsed Laser Deposition)法により作製した。作製時の酸素分圧は 35Pa, 基板温度は 770°Cとした。作製した薄膜試料は, 酸素気流中 450°Cにて 1~50 時間のアニールを行った。試料の T_c 及び J_c は直流四端子法で測定した。また, Y-123 結晶の c 軸長は X 線回折測定結果の回折ピーク位置から計算した。

3. 結果と考察

Fig.1 に各アニール時間による Y-123 結晶の c 軸長の変化を示す。アニール時間を長くするほど c 軸長が短くなる傾向がみられた。Y-123 結晶の酸素量が 7 に近いほど c 軸長が短くなることから[1], この結果は O₂ アニール時間を長く施すことによって, Y-123 結晶に多くの酸素が導入されたことを示している。

次に, 各アニール時間による J_c の変化を Fig.2 に示す。アニール時間を長くするほど J_c が向上することがわかる。特に 50 時間アニールを施した Y-123 薄膜では 4.9MAcm⁻²と高い J_c を有することが確認できた。

謝辞

YBCO 膜の作製に当たりまして, 装置設計, 作製条件等に関する的確なアドバイスをいただきました九州大学の向田教授に感謝いたします。

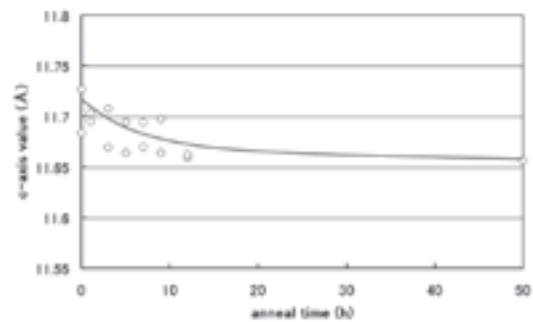


Fig.1 Annealing time dependence of c-axis values of YBCO thin films.

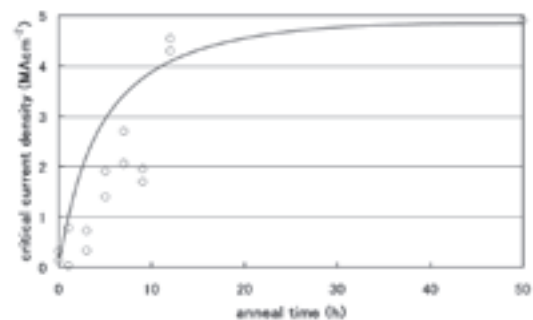


Fig.2 Annealing time dependence of critical current densities of YBCO thin films.

文献

[1] Ken Yukino, Tadao Sato, Shigeki Ooba, Masatsune Ohta, Fujio P. Okamura and Akira Ono, Jpn. J. Appl. Phys Vol. 26, No. 5, May, 1987, pp. L869-L870.

配向 Cu テープ上に形成した 2 軸配向 YBCO 薄膜の J_c -B 特性 J_c -B characteristics of the YBCO film prepared on a textured Cu tape

川原一浩、土井俊哉、富安亮太、徳留誠、種子田賢宏、佐藤信也、白樂善則(鹿児島大学);

嶋邦弘、窪田秀一(田中貴金属工業); 鹿島直二、長屋重夫(中部電力)

KAWAHARA Kazuhiro, DOI Toshiya, TOMIYASU Ryota, TOKUDOME Makoto, TAKAHIRO Taneda, SATO Shinya,

HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

SHIMA Kunihiko, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: bt202022@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

RABiTS 法で作製される線材には Ni もしくは Ni-W 合金が基体テープに用いられるが、Ni や Ni-W 合金は強磁性であるために交流電流通電時に大きな損失が発生してしまう。そこで我々は、非磁性である Cu を基板として RABiTS 法による線材の作製を試みた。Cu テープを基板とした場合の問題である Cu 表面の酸化を防ぐために、酸素透過防止層として Cu テープ上に Ni をスパッタ法で形成し、高い臨界電流密度(J_c)を有する YBCO 膜を作製した例は報告されているが、めっきで Ni 層を Cu テープ上に配向させ、バッファ層および YBCO 層を作製した例は報告されていない。そこで本研究では、Cu テープに Ni 層をめっきで形成し、その Ni 層上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 層を PLD 法でそれぞれ形成した。また、 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 層上に YBCO 膜を PLD 法で形成し、YBCO 膜の J_c の磁場依存性について検討を行った。

2. 試料および実験方法

配向 Cu テープは冷間圧延と熱処理によって作製し、その上にめっきで Ni 層を形成した。この Ni めっき層上に PLD 法を用いて $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 層を形成し、その層上に YBCO 膜を PLD 法で作製した。

CeO_2 、YSZ、YBCO 薄膜の配向性を確認するために $\theta-2\theta$ 法による X 線回折測定(XRD)および極点図測定を行った。また、試料表面については走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。試料の臨界電流密度(J_c)、臨界温度(T_c)は直流四端子通電法で測定した。テープの磁化はテープ面に対して磁場を垂直方向に印加して測定した。

3. 結果と考察

Fig.1 に Ni をめっきで形成した Cu テープの熱処理後の磁化の磁場依存性を純 Ni テープの結果と併せて示す。Ni を $0.5\ \mu\text{m}$ めっきで形成した Ni めっき Cu テープの飽和磁化は $2.48\text{emu}/\text{cm}^2$ で Ni の約 $1/110$ 倍であり、十分に低い飽和磁化を持つテープを作製することができた。Fig.2 に Ni 層をめっきで形成した Cu テープ上に作製した YBCO 膜の(103)の極点図を示す。 $\alpha=45^\circ$ のとき、 β 角が 0° から 90° おきにピークが確認でき、良好な 2 軸配向膜であることが分かった。また、図中央に確認できるピークは CeO_2 の(200)からの回折ピークであり、YBCO の(103)との X 線回折角が非常に近いために検出されるピークである。また、77K

において J_c を測定したところ、自己磁場中において $J_c = 4.5\text{MA}/\text{cm}^2$ と非常に高い値が得られていることが分かった。 J_c の磁場依存性については当日報告する。

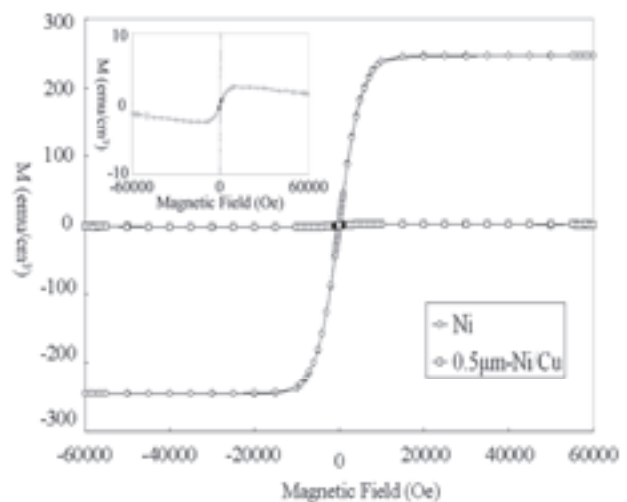


Fig.1 M-H curves for the Ni-electroplated Cu tape, a pure Ni tape and a hastelloy tape. The measurements were performed at 77K and the magnetic fields were applied perpendicular to the tape surfaces.



Fig.2 X-ray (103) pole figure of the YBCO deposited on the $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}$ substrate

配向 Cu テープ上に形成した YBCO 超伝導薄膜特性に与える YSZ バッファ層厚さの影響

Effect of YSZ buffer layer thickness on the superconducting properties of YBCO films prepared
on textured Cu tapes

富安亮太、土井俊哉、徳留誠、川原一浩、種子田賢宏、佐藤信也、白樂善則(鹿児島大学);
嶋邦弘、窪田秀一(田中貴金属工業); 鹿島直二、長屋重夫(中部電力)

TOMIYASU Ryota, DOI Toshiya, TOKUDOME Makoto, KAWAHARA Kazuhiro, TAKAHIRO Taneda, SATO Shinya,
HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);
SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.);
KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)
E-mail: bt203054@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

非磁性体で価格の安い Cu テープは Y 系超伝導線材基板として理想的である。しかし Cu テープは非常に酸化されやすく、Cu テープ上で高特性の YBCO 層の作製に成功した研究例は少ない。そこで我々は、Cu テープに Ni 層をめっきで形成することで Cu テープへの O₂ の透過を防ぐことを試みた。Ni 層の厚さを 500nm、CeO₂、YSZ、CeO₂ の厚さを 270nm、210nm、270nm とすることで臨界電流密度(J_c)が 77K、自己磁界中で 1MA/cm² と良好な値が得られた。

バッファ層は薄いほど生産コストの観点から望ましい。そこで YSZ 層を薄くすることで YBCO の J_c に与える影響の検討を行った。

2. 試料および実験方法

{100}<001>集合組織を有する Cu テープにめっきで Ni 層、PLD 法を用いて CeO₂/YSZ/CeO₂ 層を形成し、その層上に YBCO 層を作製した。また YSZ 層を形成する際、YSZ の厚さが 50nm、100nm、150nm であるサンプルを作製した。

Ni 層、CeO₂ 層、YSZ 層、YBCO 層の配向性を確認するために θ - 2θ 法による X 線回折測定(XRD)および β スキャンを行った。また、試料表面については走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。サンプルの J_c 、臨界温度(T_c)は直流四端子通電法で測定した。

3. 結果と考察

Fig.1 に Ni をめっきで形成した Cu テープ上に CeO₂、YSZ、CeO₂ の厚さを 270nm、50nm、270nm としてバッファ層を形成した試料の XRD パターンを示す。XRD パターンには、Cu と Ni の(200)、YSZ と CeO₂ の(200)と(400)、酸素欠損により低角にシフトしたと思われる CeO₂ の(200)、(400)回折ピークが観測される。

Fig.2、Fig.3 に試料の傾き角 $\alpha = 55$ 度として測定した CeO₂ の(111) β スキャン、YSZ(111) β スキャン測定結果を示す。 $\beta = 0$ 度から 90 度おきに 4 本のピークが確認できる。以上の結果から YSZ が 50nm であっても Cu テープ上に 2 軸配向した CeO₂、YSZ が作製できていることが確認できた。

YSZ 層厚を 50、100、150nm として作製した YBCO 膜の超伝導特性については当日報告する。

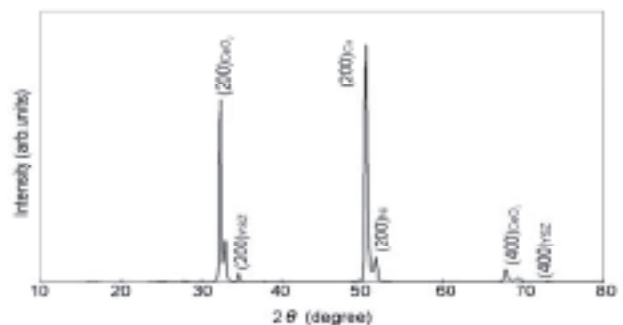


Fig.1 XRD pattern for CeO₂/YSZ/CeO₂/Ni multilayer

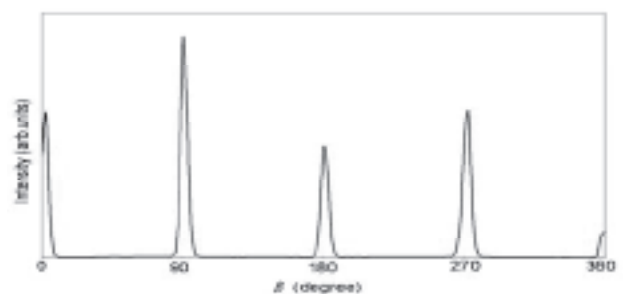


Fig.2 (111) β scan for CeO₂

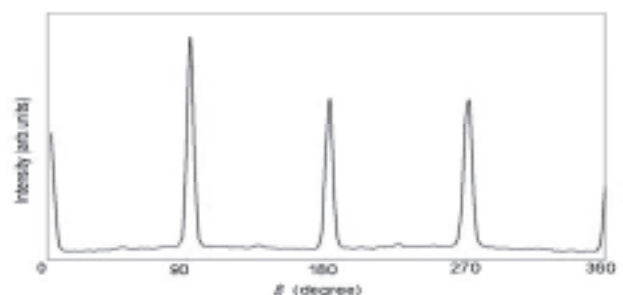


Fig.3 (111) β scan for YSZ

Ni めっき配向 Cu テープ上への YBCO 薄膜の作製

Fabrication of YBCO thin film on Ni-electroplated cube-textured Cu tape

徳留誠、土井俊哉、川原一浩、富安亮太、白樂善則(鹿児島大学);

嶋邦弘、窪田秀一(田中貴金属工業); 鹿島直二、長屋重夫(中部電力)

TOKUDOME Makoto, DOI Toshiya, KAWAHARA Kazuhiro, TOMIYASU Ryota,

HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

SHIMA Kunihiko, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: bt203052@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

現在、RABITs 法で作製した Y 系超伝導線材に用いられている基体テープは Ni もしくは Ni 合金テープである。しかし強磁性体である Ni を用いると、交流電流を流した場合に大きなヒステリシス損失が生じる。そのため非磁性体であり、価格の安い Cu を基体テープに用いることを試みた。しかし Cu は非常に酸化されやすい物質である。そこで本研究では、Cu テープの酸化を防止するために[100]<001>集合組織を有する Cu テープに Ni をめっきし、その上に配向酸化物中間層を介して YBCO 層を形成した。

2. 試料および実験方法

冷間圧延と熱処理により[100]<001>集合組織を有する Cu テープを作製し、その表面にめっきで配向 Ni 層を形成した。次に Ni めっきした配向 Cu テープから YBCO 層への Cu と Ni の拡散を抑制し、Ni めっきした配向 Cu テープ上に YBCO をエピタキシャル成長させるために、中間層として PLD 法によって $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 多層膜を形成し、その上に YBCO 薄膜を作製した。 CeO_2 薄膜、YSZ 薄膜、YBCO 薄膜の配向性を確認するために X 線回折(XRD)測定を行った。また、試料表面については走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。

3. 結果と考察

Fig.1 に Ni めっきした配向 Cu テープ上に作製した YBCO/ CeO_2 /YSZ/ CeO_2 多層膜の XRD パターンを示す。YBCO のピークは YBCO の(00n)のピークだけが観測できた。これより YBCO は c 軸配向していることが分かる。また Fig.2 に YBCO/ CeO_2 /YSZ/ CeO_2 /Ni/Cu テープの YBCO(103)極点図を示す。 $\alpha = 45^\circ$ の時、 $\beta = 0^\circ$ から 90° 間隔で 4 本の強いピークが観測できた。以上の結果から、Ni めっき配向 Cu テープ上に YBCO

を 2 軸配向させることができたことが確認できる。YBCO/ CeO_2 /YSZ/ CeO_2 多層膜の表面状態については当日報告する。

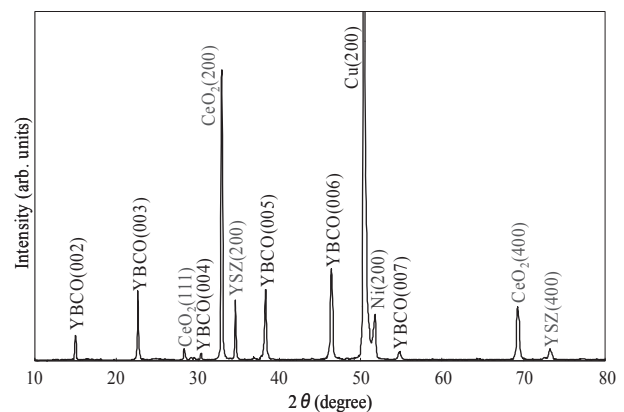


Fig.1 The X-ray diffraction pattern obtained from the YBCO/ CeO_2 /YSZ/ CeO_2 /Ni/Cu-tape.

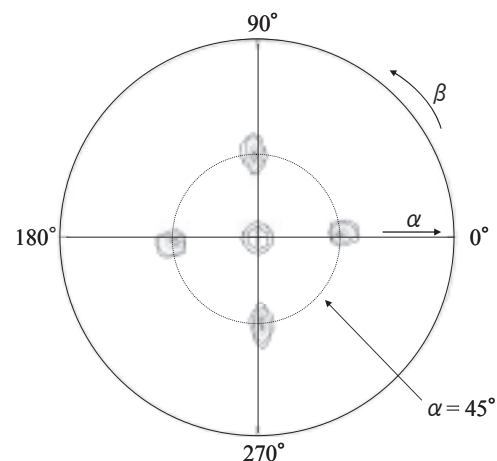


Fig.2 YBCO (103) pole figure for the YBCO/ CeO_2 /YSZ/ CeO_2 /Ni/Cu-tape.

ナフテン酸金属塩とオクチル酸金属塩の混合溶液を用いた MOD 法により 製作した RE123 膜の臨界電流密度特性

Critical current density properties of RE123 films fabricated by MOD process using
mixed solution of metal-naphthenates and metal-octhenate

渡辺 修平, 三浦 大介, 伊藤 大佐(首都大); 喜多 隆介, 中村 達徳(静岡大); 松本 要(九工大);

吉田 隆(名大); 一瀬 中(電中研); 堀井 滋(東大); 向田 昌志(九大)

WATANABE Shuhei, MIURA Osuke, ITO Daisuke (Tokyo Metropolitan Univ.);

KITA Ryusuke, NAKAMURA Tatsunori (Shizuoka Univ.);

MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI);

HORII Shigeru (Univ. of Tokyo); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.)

E-mail: rorrimrepus@yahoo.co.jp

1. はじめに

MOD 法は低コストで真空でのプロセスのない手法として注目されており、REBCO 線材の大量生産に適している。さらに、ナフテン酸金属塩やオクチル酸金属塩を用いた MOD 法は薄膜からフッ素を除去する必要がないので、いっそう簡単なプロセスである。また、これらは市販されており入手が容易、化学的な調整が不要という利点がある。しかし、ナフテン酸金属塩による成膜では滑らかで結合のよい表面性を有する膜が得られるが、熱分解挙動が複雑で再現性が悪いという欠点があり、一方、オクチル酸金属塩による成膜では結晶化しやすく比較的再現性も高いが、網目状の表面を形成しやすく高 J_c 膜を得るためには表面性を改善する必要がある。

本研究では、ナフテン酸金属塩とオクチル酸金属塩の混合溶液を用いた MOD 法により作製した REBCO 薄膜の表面構造や超伝導特性を調べ、最適な作製条件の検討を行った。

2. 実験方法

塗布溶液はオクチル酸ガドリウム、オクチル酸バリウム、ナフテン酸銅を 1:2:3 の割合でトルエンに溶かして混合することで得た。この溶液を LaAlO_3 単結晶基板上に塗布し、マッフル炉で 30 分間仮焼を行うことで前駆体膜を形成した。この膜を管状炉で本焼し、その後室温にまで冷却した。ポストアニールは酸素気流中において 500 °C で 2 時間行った。この際、焼成温度や酸素分圧を変化させ、異なる条件の試料を作製した。

作製した薄膜の結晶構造評価は X 線回折 (XRD)、薄膜表面の評価は走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて行った。 T_c は一般的な四端子法を用いて、電気抵抗率の温度依存性から算出した。また、磁場中の J_c は磁化測定装置 SQUID 磁力計を用いて、磁化曲線から算出した。

3. 実験結果

Fig.1 は仮焼温度 450°C、本焼温度 845°C、酸素分圧 2×10^{-6} atm、加熱速度 5°C/min で作製した GdBCO 薄膜の表面の SEM 画像である。表面は比較的均一で滑らかである。本焼温度が高い場合や加熱速度が速い場合は膜が分解してしまい、分解した膜には XRD のピークが見られなかった。酸素分圧が高いと a 軸配向相、低いと c 軸配向相が成長する傾向があった。また、酸素分圧は膜の分解温度と密接に関連しており、酸素分圧が高いほど分解温度は高くなると思われる。そのため低酸素分圧中での焼成は、c 軸配向相が成長しやすい反面、膜の分解温度が低くなるなどの問題があると考えられる。

Fig.2 は 77.3K で測定した仮焼温度 450°C、本焼温度 835°C、酸素分圧 10^{-7} atm、加熱速度 30°C/min で作製した GdBCO 薄膜の J_c -B 特性を示す。この試料の J_c は自己磁界中で 0.61 MA/cm²、 T_c は 91.2 K だった。

作製条件の個々のパラメータは独立ではなく、互いに影響を及ぼしあっていることがわかった。現時点ではその都度測定結果を吟味し、さらなる高 J_c の試料を作るため作製条件の最適化を行っていく必要がある。

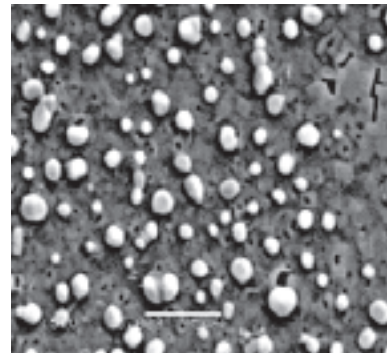


Fig.1. SEM image of GdBCO films fired at 845°C.

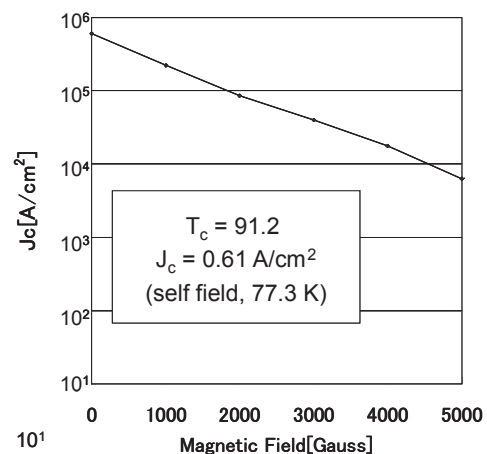


Fig.2. Magnetic field dependence of J_c measured at 77.3 K for the GdBCO film fired at 835°C.

参考文献

[1] T. Nakamura, et al.: Physica C 463-465 (2007) 540-543

DyBCO コート線材の臨界電流密度分布の評価

Estimate of uneven critical current density in DyBCO coated conductors

磯部 現, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大),

Werner Prusseit (THEVA GmbH)

ISOBE Gen, KIUCHI Masaru, OTABE Edmond S., MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.)

PRUSSEIT Werner (THEVA GmbH)

E-mail: isobe@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 現在、高温超伝導線材の実用化に向けて、長尺かつ高い臨界電流を持つ線材が求められている。最近、コート線材における中間層作製技術の進歩により、高い J_c をもつ長尺線材が得られはじめている。また、線材の高性能化とともに、線材の評価法の研究も進んできている。Tapestarでは線材の長さ方向のある位置での J_c を、その線材幅での J_c として測定することができる¹⁾。今回、Tapestarを用いてDyBCO線材の J_c を測定したところ、膜厚の比較的厚い線材の J_c が長手方向で大きくばらついていることが分かった。線材に通電する際は、 J_c が低い部分で臨界電流値が制限されてしまうので、 J_c の低い部分の改善が求められる。本研究では、膜厚の比較的厚いDyBCOコート線材の J_c を線材長さ方向のそれぞれの位置で測定し、どのように特性が劣化しているか調べた。

実験 試料はTHEVA GmbHによって作製されたDyBCOコート線材で、厚さ $90\ \mu\text{m}$ ハステロイC276上に、ISD(Inclined substrate deposition)法で作製されたMgO層配向層 $3.7\ \mu\text{m}$ と基板を傾けずに蒸着したMgOキャップ層 $0.3\ \mu\text{m}$ をもち、共蒸着法を用いてDyBCO層 $2.8\ \mu\text{m}$ が作製されている。長さ10cmの試料から、約3mm角程度のサンプルを切り出し、長手方向の臨界電流密度の分布を調べた。臨界電流密度はテープ面に垂直に磁界を加えて行った直流磁化測定で得られた磁気モーメントのヒステリシスから求めた。試料の臨界温度 T_c は89.4 Kであった。

結果と検討 図1に示すように、試料の中央部分を長手方向に切り出して測定を行った。テープ長手方向に異なる場所から切り出した試料の臨界電流密度を図2に示す。77.3 K、0.1 Tにおいて、 J_c が最も高い部分の J_c は最も低い部分の約3.3倍と大きな差が見られた。臨界電流密度の低い部分を改善することで、 J_c 向上が期待される。また、自己磁界下での J_c の値で規格化した J_c の磁界依存性を図3に示す。 J_c の大きさには大きな違いが見られたのに対し、磁界依存性は線材内ではほぼ同じであることがわかる。したがってピンニングのメカニズムは大きく変化しておらず、臨界電流密度の劣化は、電流の流れない欠陥部分のために、電流の有効断面積が低下しているためであると考えられる。このような欠陥部分の改善できれば、 J_c の向上が期待できる。

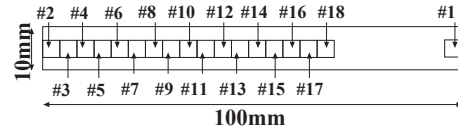


Fig.1 Position of specimen pieces in DyBCO coated conductor of 10cm long.

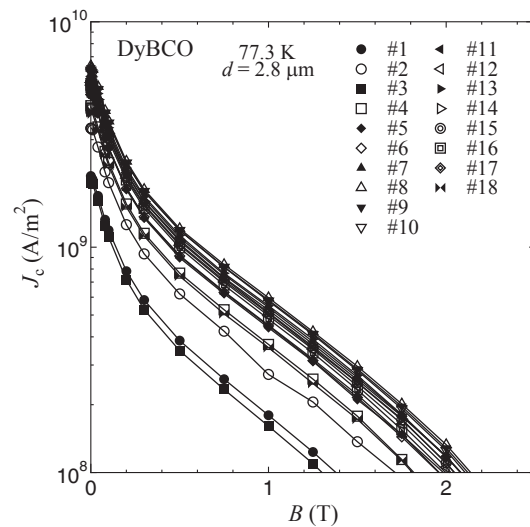


Fig.2 Critical current density in each piece of DyBCO coated conductor.

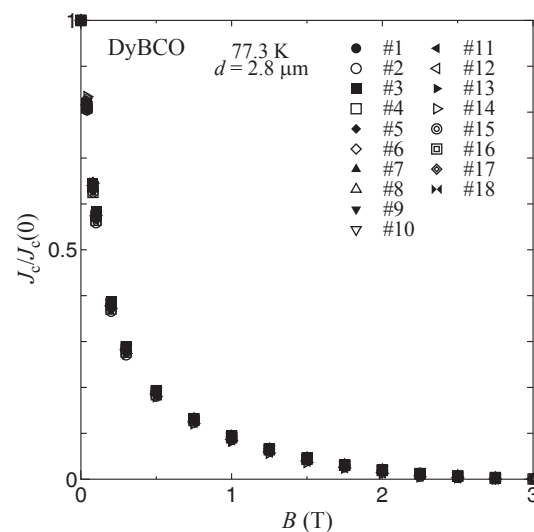


Fig.3 Field dependence of normalized critical current density of DyBCO coated conductor.

参考文献

1) W.Prusseit *et al.*, Physica C 426-431 (2005) 866-871

有限要素法を用いた第三高調波電圧誘導法測定時における電界解析 Analysis of electric field in third harmonic voltage method by finite element method

吉田 貴昭, 岩本 賢太郎, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大); 岡本 洋 (九電)

YOSHIDA Takaaki, IWAMOTO Kentarou, OTABE Edmund Soji,

MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co Inc)

E-mail : yoshida@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 超電導薄膜の直上にコイルを設置し、交流電流 $I_0 \cos \omega t$ を通電した時にコイルに誘導される電圧から第三高調波成分を抽出することで、臨界電流密度 J_c を求める方法を第三高調波電圧誘導法という。この第三高調波電圧誘導法による測定の標準化の検討に伴い、従来のモデル¹⁾より得られる電界の理論値が、実際に超電導体内部で発生している電界の値と合致しているかを調査する必要がある²⁾。しかし、超電導体内部の電界の値を直接測定することは困難であるため、本研究では有限要素法 (FEM) を用いた数値解析によって超電導体内部の電界の様子を明らかにする。

解析 今回の解析に用いたコイル及び超電導薄膜の概要を Fig. 1 に示す。対称性より Fig. 1 中の枠部分をモデル化し解析を行っている。ここで、コイルの巻数は 400 ターン、超電導薄膜の膜厚を 500 nm 及び臨界電流密度 J_c を 2×10^{10} A/m²、超電導-常電導転移の鋭さを示す n 値は 10, 20, 30, 40 とした。このコイルに周波数 1 kHz の交流電流を通電し、波形が安定したところより 1 周期分について解析を行った。

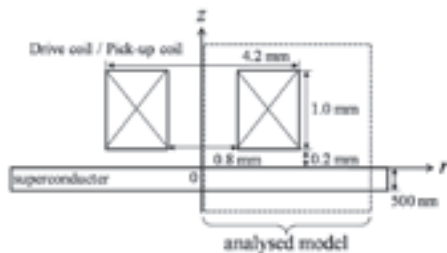


Fig. 1: Simulation model

結果 Fig. 2 に n 値が 30 の場合のコイル巻線部の下部での超電導体内部の電界 E の様子を示す。ここで、図の横軸は超電導層表面からの距離を示している。交流電流の振幅 I_0 が 0.18 A の時、超電導層裏側で若干の電界が発生しているため、磁束が超電導層を突き抜けていると考えられる。また突き抜けた後の $I_0 = 0.19$ A において、電界の値が急激に上昇している。

Fig. 3 に各 n 値の場合に数値解析により得られた V_3 - I_0 特性、及び従来のモデルによる理論値 E_{theory} に対して超電導層内で平均した電界の値 E_{aver} が何倍となっているかの割合を算出した E_{aver} - E_{theory} 特性を示す。まず E_{aver} - E_{theory} 特性を見ると、いずれの n 値においても $I_0 = 0.16$ A 付近までは計算値と理論値はほぼ一致する結果が得られた。しかし、 n 値が 30 の場合では $I_0 = 0.18$ A 付近から計算値が理論値より外れ始め、 $I_0 = 0.20$ A では 3.4×10^{-5} mV/m 程度の理論値に対して計算値は 1.0×10^{-3} mV/m と約 30 倍程度となる。この結果は n によってあまり変化していないため、電界の急増に n 値は関係が無いことが分かる。よって、従来のモデルの理論値を適用出来るのは $I_0 = 0.16$ A 以下であると言える。また V_3 - I_0 特性と合わせて見た場合、閾値電圧を 0.01 mV 以下で取った場合の電界の計算値と理論値の間にずれは殆んど無いが、ノイズの影響などによって 0.02 mV で取った場合は、 $n = 30$ では 3.4×10^{-5} mV/m 程度の理論値に対して約 67 倍もの電界成分が生じていることになり、これは 2.3×10^{-3} mV/m 程度に相当する。このため、従来のモデルに従って J_c を求めるのは大きな誤差を含む可能性があることを示している。

これらの解析結果より、磁束が超電導層を突き抜け始める $I_0 = 0.18$ A より大きな I_0 において超電導体内部の電界が急激に大きくなり、従来のモデルによる理論値から大きく外れることが分かった。原因として、従来のモデルにおいては磁束が超電導層を突き抜けた後の、磁束フローによる影響を考慮していなかったことが挙げられる。また磁束の z 軸成分による影響も考えられたが²⁾、こちらは検証した結果、電界の急激な上昇に直接影響するほどの寄与は無いという結果が得られた。よって、磁束が突き抜けるような高い I_0 においては、力の釣り合いに粘性力を考慮した解析が今後の課題である。

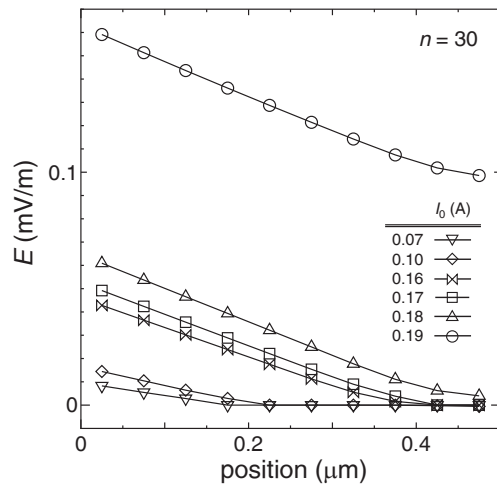


Fig. 2: Electric field in superconducting film.

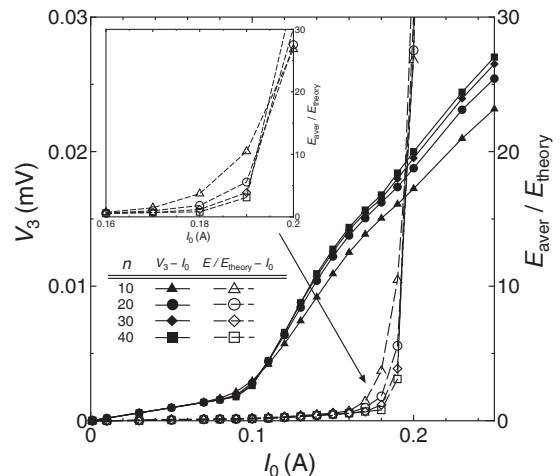


Fig. 3: V_3 - I_0 characteristic and E_{aver} - E_{theory} characteristic.

参考文献

- 1) H. Yamasaki, Y. Mawatari, Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3275.
- 2) Y. Mawatari, R. Clem, Phys. Rev. B 74 (2006) 144523.

YBCO-coated 線材の緩和特性の厚さ依存性

Thickness dependence of relaxation characteristics in a YBCO coated conductor

姫木 携造, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大);

宮田 成紀, 衣斐 顕, 山田 穰, 塩原 融 (超電導工学研究所)

HIMEKI Keizo, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,

MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); MIYATA Seiki, IBI Akira,

YAMADA Yutaka (SRL-nagoya); SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail : himeki@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに Y 系超電導体は低温高磁界で優れた臨界電流特性を示し NMR や SMES 等の永久電流モードでの応用が期待されている。しかしその際には電流の緩和特性を考慮する必要があり、我々は Y 系超電導体の緩和特性についての研究を行ってきた。IBAD/PLD 法で作製された YBCO-coated 線材の場合は臨界電流特性が超電導層の厚さに依存する [1]。そのため緩和特性についても厚さが与える影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、超電導層の厚さの異なる 4 つの YBCO-coated 線材を用いて、SQUID による磁化緩和の測定を行い、その結果について理論結果と比較及び検討を行った。

実験 本研究で使用した試料は、IBAD/PLD 法により作製された膜厚の異なる YBCO-coated 線材である。なお、各試料の超電導層の厚さ d と SQUID により測定した零磁界での臨界電流密度 J_c 及び T_c は Table 1 に示すとおりである。試料 1, 2, 3 は長尺線材で試料 4 は短尺線材となっている。測定は SQUID 磁力計による磁化ヒステリシスとその時間的緩和の測定より J_c - B 特性と磁化緩和率の結果を得た。なお磁化緩和は 1 T で 5 K~70 K の温度範囲で測定を行った。

結果及び検討 Fig. 1 は試料 1 における磁化緩和の実験結果を示している。磁化の値は各測定結果の $t = 100 \sim 1000$ [sec] の時間範囲より $t = 1$ [sec] まで外挿した値 M_0 を用いて規格化し、各温度における緩和率を評価した。

次に見かけ上のピンポテンシャルを U_0^* と磁化緩和率には、 $U_0^* = -k_B T [d(M/M_0)/d \log t]^{-1}$ の関係があり、緩和率から U_0^* が導ける。Fig. 2 は各試料について U_0^* の温度依存性を示している。各試料で U_0^* が異なるピークをもつ結果が得られた。ここで自己磁界中における臨界電流密度は試料 3 を除いて超電導層の厚さ増加に伴い減少しているが、 U_0^* のピークは超電導層の厚い試料ほど高温側に存在しており、緩和特性の観点から比較的高い温度領域において超電導層の厚い試料ほど有効である事が示唆される結果が得られた。なお、緩和特性より E - J 特性及び n 値が求まる。また解析にはピン力の分布を考慮した磁束クリープ・フロー・モデルを用いた。 E - J 特性及び n 値、解析結果についての議論は当日行う。

謝辞 本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて、NEDO からの委託を受けて実施したものである。

Table 1: Specification of specimens.

specimen	thickness d [μm]	J_c [A/m^2] (77.3 K, 0 T)	T_c [K]
#1	0.25	1.50×10^{10}	88.6
#2	0.50	1.53×10^{10}	90.1
#3	1.00	7.06×10^9	86.7
#4	1.50	1.08×10^{10}	87.9

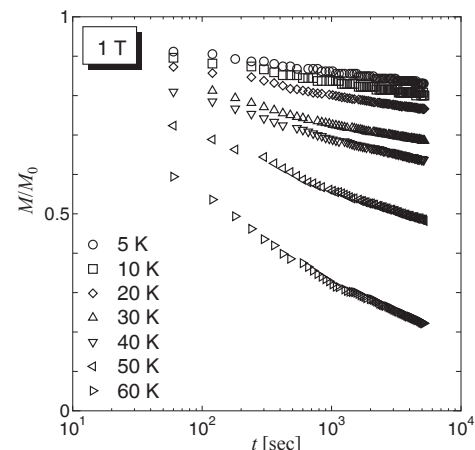


Fig. 1: Temperature dependence of magnetic relaxation in specimen 1 at 1 T in the temperature region of 5–60 K

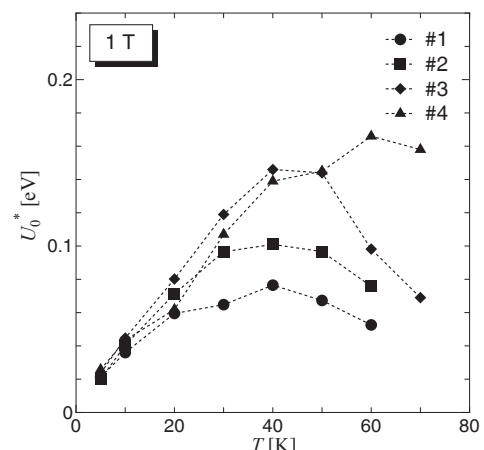


Fig. 2: Temperature dependence of apparent pinning potential at 1 T in the temperature region of 5–70 K.

参考文献 [1] 姫木ら：第 76 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.146.

低磁場でパルス着磁されたバルク磁石の磁場分布の評価

Evaluation of Magnetic Field Distribution of Superconducting Bulk Magnets Magnetized by Pulsed-Field with a Low Magnetic Field

横山 和哉(足利工大);岡 徹雄(新潟大);藤代 博之,能登 宏七(岩手大)

YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.); FUJISHIRO Hiroyuki, NOTO Koshichi (Iwate Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石の実用化を目指す際に、パルス着磁 (PFM) は重要な技術である。従来の PFM による捕捉磁場は磁場中冷却 (FC) のそれに比べて半分程度であったが、IMRA 法[1]や MMPSC 法[2]などの開発により、捕捉磁場の増大が可能となった。本研究は、捕捉磁場の増大を目指した着磁方法の改良や新たな手法の開発を目的として、これまで行ってきた着磁過程におけるバルク体の温度および捕捉磁場の実験データを用いて、数値シミュレーションによる理論的な着磁特性の評価を行っている。これまでに、比較的大きな磁場を印加した場合について検討を行い、バルク体の Growth Sector Boundary (以下、GSB と略す) と GSB に囲まれた領域 (Growth Sector Region; GSR と略す) で超伝導特性が異なる2つの領域に分けた解析モデルを構築し、実験結果と解析結果の比較によりモデルの妥当性を確認した[3]。一方、比較的小さい磁場を印加した場合、捕捉磁場特性の違いが顕著に現れることが実験結果によりわかっている。本文では、先に提案した解析モデルを用いて、小さい磁場を印加した時の捕捉磁場特性を評価する。

2. 着磁実験

Sm123 超伝導バルク体 ($\phi 45 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$; 同和鉱業) を用いてパルス着磁実験を行った。バルク体は上・下面の樹脂含浸を取り除き、GM 冷凍機 (GR301: アイシン精機) のコールドヘッドに接続したステージに取り付けた。着磁方法は、着磁コイルを真空チャンバーの外に取り付け、バルク体を 40 K (ステージ設定温度) に冷却した後、3.10 および 4.64 T (立ち上がり時間: 10 ms) のパルス磁場を印加した。

Fig. 1 に、試料上表面から 3.5 mm 上部の z 方向の磁束密度分布と GSB および GSR 断面における一次磁場分布を示す。3.10 T の PFM では、第1および第4象限の GSR にのみ磁場が捕捉されており、そのピークは 0.7 T 程度である。これは、印加磁場が小さかったため、 J_c の高い GSB に磁束が侵入できず、GSR に磁場が捕捉されたためと考えられる。一方、4.64 T の場合は、ほぼ同心円状の分布となっているが、若干 GSR の磁束密度が高くなっている。

3. シミュレーション解析

バルク体を8つの領域 (GSB と GSR 各4箇所) に分け、それぞれの領域で電流密度を定義し、シミュレーションを行った。GSB, GSR の電流密度 J^{GSB} , J^{GSR} は、各部においてピンモデルを適用し、Fig. 1 の一次元磁場分布を用いて、凸部分の傾きから求めた。その結果、印加磁場 3.10 T の場合 $J^{GSB} = 2.05 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 、印加磁場 4.64 T の場合 $J^{GSB} = 2.72 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 、 $J^{GSR} = 3.26 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ であり、 J^{GSR} の方が 16.9 % 大きい。参考として FC (40 K) の場合、 $J^{GSB} = 3.59 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ であり、 J^{GSR} は J^{GSB} より 2.2 % 小さかった。以上のように評価した電流密度を用いて、各印加磁場における磁場分布を計算した結果を Fig. 2 に示す。なお、印加磁場 3.10 T において、実験結果とあわせるために GSR の第2および第3象限には磁束が捕捉されないものとした。解析結果は実験結果とよく一致しており、小さい印加磁場の場合においても、提案する解析モデルが有効であることが確認できた。

4. まとめ

バルク体をパルス着磁する際、GSB と GSR の J_c 特性の違いにより、印加磁場の大きさで捕捉磁場分布が異なる。本研究は各部の特性の違いを考慮した解析モデルを提案し、その妥当性を検証しており、本文では印加磁場が小さい場合について有効性を確認した。今後は、着磁過程における磁束侵入のシミュレーション解析を行う予定である。なお、本研究の一部は、科学技術振興事業団 岩手県地域結集型共同研究事業「生活・地域への磁気活用技術の開発」で行われた。

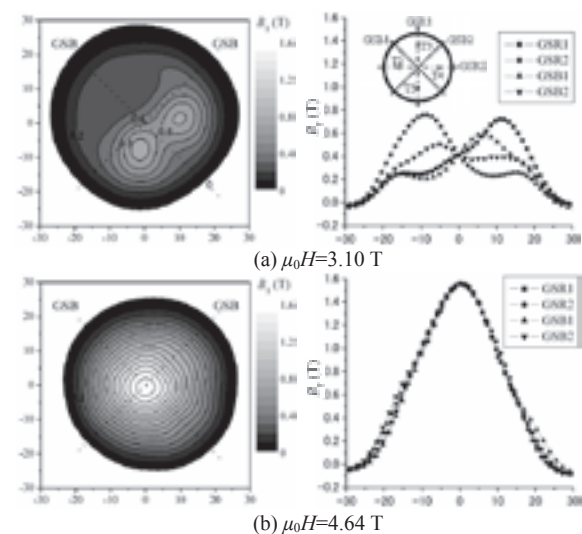


Fig. 1. Two- and one-dimensional distributions of trapped magnetic field (Experimental results)

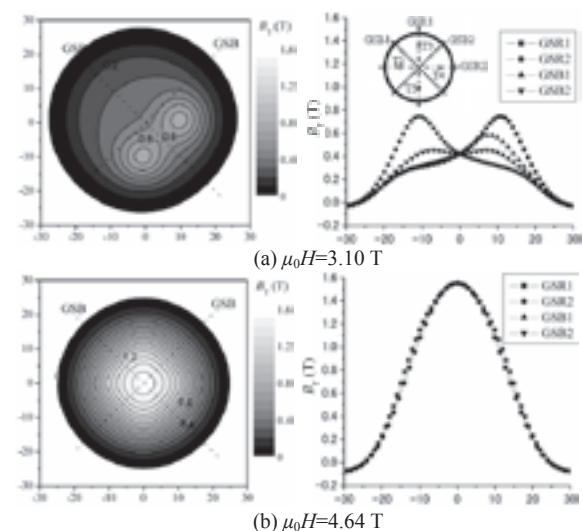


Fig. 2. Two- and one-dimensional distributions of trapped magnetic field (Numerical results)

参考文献

- U. Mizutani, et al., Appl. Supercond. 6 (1998) 235.
- 立岩 他, 2006 年度春季低温工学・超伝導学会 3C-p07
- K. Yokoyama, et al., Physica C, Vol. 463-465, pp.410-414

Y系バルク超伝導体の粒界部における臨界電流特性

Critical current characteristics in grain boundaries of YBCO bulk superconductors

馬渡 芙弓(芝浦工大); 筑本 知子, 中尾 公一, 田沼 聡子(SRL); 飯田 和昌(ケンブリッジ大); 村上 雅人(芝浦工大)

MAWATARI Fuyumi(SIT); CHIKUMOTO Noriko, NAKAO Koichi, TANUMA Satoko(SRL);

IIDA Kazumasa(Univ. of Cambridge); MURAKAMI Masato(SIT)

E-mail: mawatari@istec.or.jp

1. はじめに

超伝導バルク・超伝導線材には粒界が必ず存在し、粒界により臨界電流が低下する場合があることが知られている。臨界電流の向上のためには粒界のふるまいを理解することが必要である。超伝導バルクの実用化には大型化が重要となっている。マルチシード法は短時間で大型のものが作製できるが、粒界の生成を避ける事ができないという欠点もある。

そこで本研究では、マルチシード法にて作製したバルク体の粒界の構造と伝導特性の関係性を調べるため、磁気光学磁束観察を行い、電流分布と臨界電流密度の算出を行った。

2. 実験方法

橋状種結晶を用いたマルチシード法にて作製した YBCO バルク体を c 軸に垂直に厚さ 2mm となるよう、上部から sample1-4 の 4 層に切断した。切断した試料の均一性は、マグネットスキャン法にて確認した。その後、粒界部分を中心として 5mm×5mm に切り出し、磁束の侵入の様子を磁気光学イメージング(MOI)法にて測定した。その画像から電流分布解析を行い、さらに臨界電流密度を算出した。粒界部の組織を調べるため、偏光顕微鏡及び SEM にて観察を行った。

3. 実験結果及び考察

マグネットスキャンの測定においては、どの試料も比較的均一であった。Fig.1 に sample2 と sample3 の 60K, 0.10T での MOI 観察画像を示す。MOI 観察においては外部磁場が高くなるにつれて、試料の周囲から磁束が侵入しており、特に粒界部における磁束の侵入が顕著である。Fig.2 に MOI 結果から計算した sample2 と sample3 の電流分布解析結果を示す。sample3 では sample2 と比べて大きな範囲で磁束が侵入していた。また、sample2 では片側の電流の変化量が大きい。これは、左右の結晶構造が異なることによると考えられる。この粒界部の組織について、偏光顕微鏡にて詳細に観察を行った。Y211 粒子は全体に均一に分散しており、粒界部に堆積していないことから、Y211 の偏析が磁束の侵入の原因では

ないと考えられる。また、微小部 X 線にて配向度を測定したところ、左右による違いが現れた。このことから、配向度が磁束の侵入に関係していると考えられる。詳細は当日報告する。

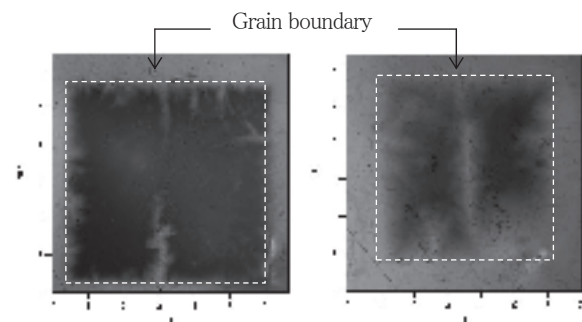


Fig.1 MO picture of sample2 and sample3 at 60K, 0.10T

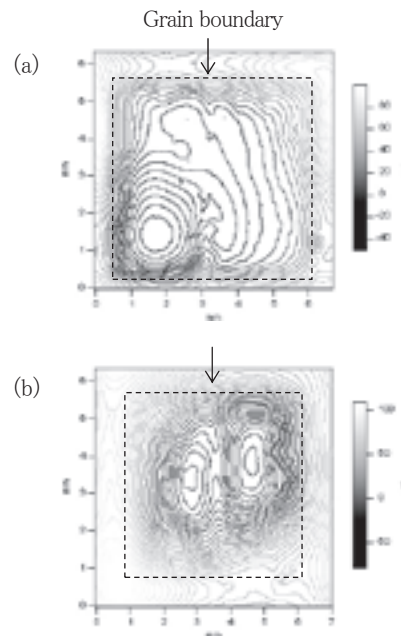


Fig.2 Current distribution of (a) sample2 and (b) sample3

謝辞

本研究は超伝導応用基盤技術開発業務の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施されたものである。

限流器向け線材の開発 Development of wire for fault current limiter

柿本 一臣, 富士 広, 五十嵐 光則, 花田 康, 三浦 貴博, 羽生 智, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (株フジクラ)
KAKIMOTO Kazuomi, FUJI Hiroshi, IGARASHI Mitunori, HANADA Yasushi, MIURA Takahiro, HANYU Satoru, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)
E-mail:kkakimoto@fujikura.co.jp

1. はじめに

限流器用超電導線材において、線材長を節約するためにはノーマル時の抵抗が高抵抗であることが望ましいとされている。そのためフジクラでは、安定化層の Ag を出来るだけ薄くし、高抵抗の NiCr 合金を貼り合せた線材構造を検討している。この場合、 I_c が不均一であると低 I_c 部分でホットスポットが発生し破断・劣化の危険性があるため、 I_c の均一化が必要である。特に遠方で発生した落雷等の事故に対しては、全長 I_c 値程度に事故電流を制限する必要があるため、線材全長にわたって均一な I_c 分布でかつ n 値を高くすることが求められる。今回、フジクラでの限流器用 Y123 線材の開発状況を報告する。

2. 実験方法

大型 IBAD 装置により、ハステロイ基板上 (幅 10mm、厚さ 0.1mm) に $\Delta\Phi \sim 14\text{-}15^\circ$ の GZO 面内二軸配向膜を形成し、さらに大型 PLD 装置により $\Delta\Phi \sim 5\text{-}6^\circ$ の CeO_2 層を IBAD-GZO 層上に形成した。Y123 層は、Hot-wall 加熱方式の大型 PLD 装置により上記の基板上に形成した。その時の基板温度は $700\sim 800^\circ\text{C}$ で、成膜雰囲気は $100\%\text{O}_2$ 数 100mTorr であった。Y123 成膜後、保護層の約 $10\mu\text{m}$ 厚 Ag 層を形成し、電気炉で $100\%\text{O}_2$ 大気圧中、 $500^\circ\text{C} \times 10$ 時間熱処理を行った。完成した線材は、半分の 5mm 幅で裁断した。 I_c 分布測定においては、直流 4 端子法を用いた。その際のクライテリオンは、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ であった。

3. 結果及び考察

図 1 に限流器用 Y123 線材作製に用いた Hot-wall 加熱方式の大型 PLD 装置を示す。この装置の利点は、Hot-wall 加熱方式により長時間にわたる Y123 成膜時の温度環境を一定に保てることである。限流器用超電導線材仕様は、5mm 幅で各部分の $I_c \sim 60\text{-}75\text{A}$ 、 n 値 > 20 、線材長 35m と定められている。図 2 は、作製した 100m 長限流器用 Y123 線材の一例である。裁断後の 2 つの線材は、同様に $I_c \sim 70\text{A}$ の均一な I_c 分布を示している。両端の $I_c \sim 65\text{A}$ の低い値を示している部分で n 値 > 20 、安定している $I_c \sim 70\text{A}$ の値を示している部分では n 値 > 30 であった。図中に I_c の低い部分が点在しているが、この部分は中間層を含めた基板の欠陥によるものである。表 1 は、8 月から 10 月にかけて作製した限流器用 Y123 線材の実績である。現状の歩留としては、約 7 割台を維持している。今後の課題としては、基板の欠陥発生原因を突き止め、その対策を講じて線材の歩留を上げる必要がある。

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発 (II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

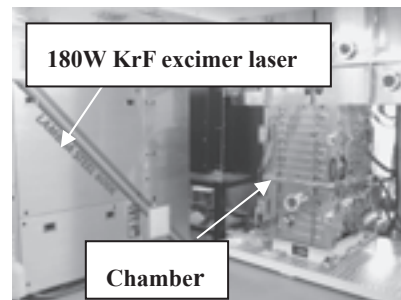


Fig.1 Multi lane type PLD system with hot-wall heater

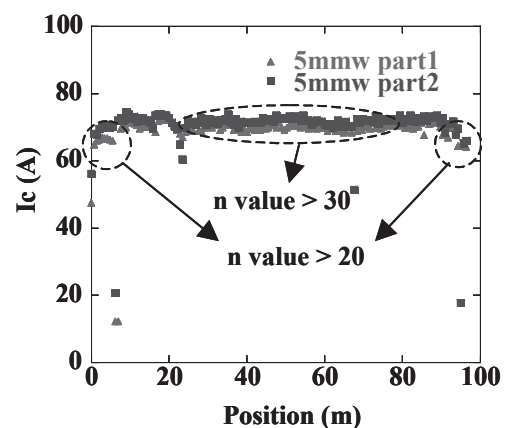


Fig.2 I_c distribution of Y123 tape for fault current limiter

Table 1 Track record of preparation of Y123 tape for fault current limiter from Aug. to Oct.

Lot-no.	Length of prepared SC tape (m)	No. of a unit conforming SC tape	Yield (%)
1	110	2	67
2	110	2	67
3	80	1	50
4	80	2	100
5	50	1	100
6	50	1	100
7	100	1	50
8	100	1	50
9	100	2	100
10	100	1	50
11	70	1	50
12	70	2	100
13	110	3	100
14	110	3	100
Total	14	1240	23 Ave. 77

格子断面形状をもつ高温超伝導コイルの高性能化

Study on performance improvements of a high temperature superconducting coil with a lattice-shape cross section

石栗慎一 岡徹雄 福井聡 小川純 佐藤孝雄 (新潟大学)

Shinichi Ishiguri, Tetsuo Oka, Satoshi Fukui, Jun Ogawa, Takao Sato (Niigata University)

E-mail: kckyg592@ybb.ne.jp

1. はじめに

高温超伝導コイルを高性能化設計するにあたり、より使用線材を少なくし、コイル性能である中心磁界および蓄積エネルギー等を向上させる必要がある。そのためには、当然ながら、コイルの通電性能を改善しなければならない。周知のとおり、Bi 系高温超伝導テープ線材の臨界電流および n 値は、一定温度下では、印加磁界強度および磁界印加角度に依存するため、われわれは、この磁界異方性を考慮にいれて、高温超伝導コイルの通電性能の解析を行ってきた。解析において、コイル断面端部に比較的高い電界が発生する。これは、コイルの磁界分布から、コイル断面端部のテープ線材にかかる磁界強度および磁界印加角度が最も大きくなるためである。

本研究では、この電界強度を小さくさせる格子断面形状をもつ高温超伝導コイルの性能を検討したので報告する。

2. 格子断面形状コイルの解析

上述のとおり、Bi 系テープ線材を用いた矩形コイル断面では、コイル断面端部に、比較的高い電界が発生する。これが、コイルの通電性能向上の妨げになっている。各テープ線材の臨界電流を増加させるには、線材に印加させる磁界強度または磁界印加角度を低減させなければならない。そこで、本研究では、Fabry 係数一定曲線から得られる体積最小コイル矩形断面の中央部分を局所的に分離移動させ、4 つの小型コイルから構成されるコイルを考案した。そのコイル断面を図 1 に示す。

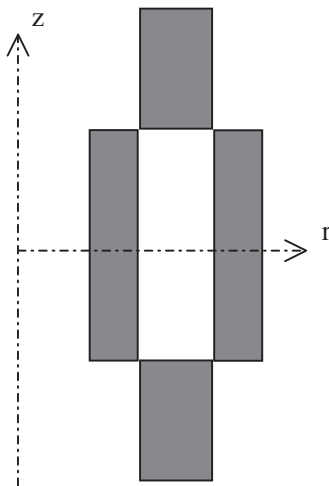


Fig. 1 Design the lattice-shape cross section coil derived from the rectangular cross section coil.

この格子形状コイルにすることで、磁界分布が大きく変化し、それにより、電界強度が低減し、コイル臨界電流の向上を確認することができた。

このコイル断面形状において、最適形状を求めるため、分離移動した小型コイルの大きさを変えて解析をおこなった。ただし、移動したコイルの高さおよび格子断面コイルのトータルの使用線材は一定とした。図 2 にコイル臨界電流と分離移動したコイル断面の幅の関係を示す。幅が 20 mm で最大となっている。これは、上述のとおり、分離によって、磁界強度が下がり、コイル臨界電流が向上する一方で、あまりに分離コイルの幅を大きくしすぎると、分離コイル自体の端部の線材の臨界電流の磁界印加角度依存が大きくなるためである。図 3 に、このコイル臨界電流を通電したときの、蓄積エネルギーを示す。コイル臨界電流の影響を受けて、同様に幅 20 mm で最大となる結果となり、同じ使用線材量の矩形コイルに対して 43%向上することがわかった。

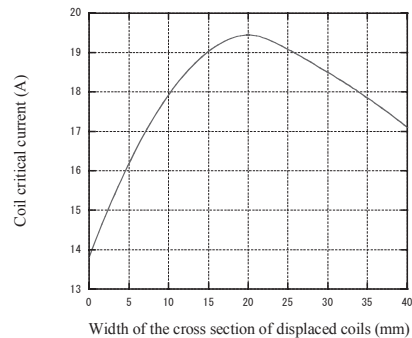


Fig. 2 Relationship between coil critical current and the width of the cross section of displaced coils.

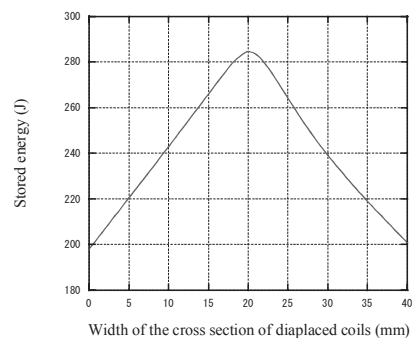


Fig. 3 Relationship between stored energy and the width of the cross section of displaced coils.

交流損失の最小化に基づく高温超伝導コイルの最適化設計の研究

Study on Optimal Design of HTS Coil Based on AC Loss Minimization

大杉 慧, 福井 聡, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 山口 貢(新潟大); 塚本 修巳(横浜国大); 古瀬 充穂(産総研)
 OOSUGI Kei, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo SATO Takao, YAMAGUCHI Mitsugi (Niigata University);
 TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); FURUSE Mitsuho (AIST)
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の製造技術が進歩し、長尺で高臨界電流の線材が安定して製造できるようになりつつある。このような背景から、各種電力機器の巻線への適用が現実的に検討されるようになってきた。これまでの我々の研究で、高温超伝導テープ線材を用いたパンケーキ積層コイルの交流損失を解析する理論モデルを開発し、測定結果を比較的よく説明できることを示してきた[1], [2]。本研究では、この理論モデルを基に、交流損失を最小化するコイル断面形状の最適化設計について検討を行った。

2. 解析方法

まず、コイルの初期形状を決定して、コイル巻線断面内の磁界分布を計算し、巻線各部の線材に加わる磁界の大きさや角度を求める。得られた磁界分布に対応した線材の交流損失を数値解析して、コイル全体で積分し、全損失 $P_{t,coil}$ を算出する[1], [2]。Fig. 1 に示すように、各ダブルパンケーキごとのターン数を変化させながら、交流損失が最小になる断面形状を算出する。コイルの交流損失 $P_{t,coil}$ は、コイル形状に依存するので、下記のように $P_{t,coil}$ を各ダブルパンケーキコイルのターン数(パンケーキコイル i のターン数を $N_{dp,i}$ とする)を変数とした目的関数とし、これを最小化する最適化問題として解く。

$$\text{Minimize : } P_{t,coil} (N_{dp,i}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to : } E = \text{constant}, I_{coil}/I_{c,coil} = \text{constant} \quad (4)$$

本解析では、初期形状を一般的な長方形断面のとし、 $I_{coil}/I_{c,coil}$ (I_{coil} : コイルの運転電流, $I_{c,coil}$: コイルの臨界電流) が一定の状態では、 $N_{dp,i}$ を設計変数として最適化計算を行なう。なお、本解析では Table 1 に示す諸元の線材で巻線されたコイルを想定する。また、短尺線材で測定した電流-電圧特性に基づき、巻線断面内の磁界の強度・角度分布を考慮して各ターンに発生する電圧を計算し、コイル両端間の平均電界が 1.0×10^{-4} V/m の時の電流値をコイルの臨界電流 ($I_{c,coil}$) と定義する。

3. 解析結果

まず、最適化設計のケーススタディを行なうにあたり、一般的な長方形断面形状で、線材量が最小になるコイルを求めた。その諸元・交流損失・臨界電流等の特性を Table 2 に示す (Base coil)。次に、上記方法を用いて、Base coil の各ダブルパンケーキコイルのターン数を最適化したコイル (Optimized coil) の諸元・交流損失・臨界電流等の特性を Table 2 に纏める。Table 2 に示す結果からわかるように、断面形状を最適化

することで、交流損失は約 40% 低減でき、またコイルの臨界電流を約 10% 向上できることが示された。

参考文献

1. S. Fukui, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.15 (2005), p. 1566
2. S. Abe, T. Nishijyo, S. Fukui, et al. : Physica C, Vol.426-431 (2005) p. 1316-1321.

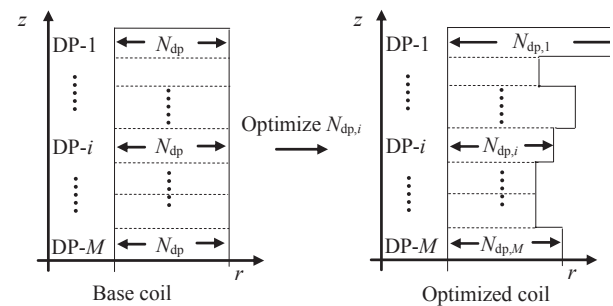


Fig. 1 Model of optimizing method.

Table 1 Specification of HTS Tape.

Width	3.7 [mm]
Thickness	0.24 [mm]
Critical current (at 0T)	46.7 [A]
n-value (at 0T)	23.6

Table 2 Result of Optimal Design

	Base coil		Optimized coil	
	0	1	0	1
2M				
a_1 [mm]	30.0		30.0	
a_2 [mm]	52.5		71.5 (max.)	
2b [mm]	100.0		100.0	
L [mH]	78.6		64.1	
l_{tape} [m]	395		386	
$I_{c,coil}$ [A]	20.5		22.8	
$I_{coil}/I_{c,coil}$	0.65		0.65	
Max. $I_{coil}/I_{c,tape}$	0.86		0.88	
$P_{t,coil}$ [W]	100.3		58.9	

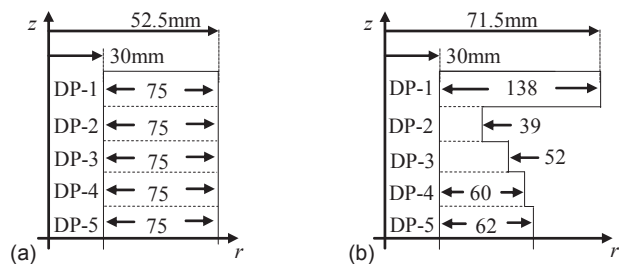


Fig. 2 Comparison of cross sections of base coil and optimized coil.
 (a) Base coil, (b) Optimized coil

YBCO 超伝導小コイルのクエンチ時における分流特性

Current redistribution in a small coil composed of YBCO superconductors during quench process

茂木 拓巳, 雨宮 尚之, 姜 哲男, 山岸 一人(横浜国大・工)
 MOTEKI Takumi, AMEMIYA Naoyuki, JIANG Zhenan, YAMAGISHI Kazuhito
 (Faculty of Engineering, Yokohama National University)
 E-mail: moteki@rain.dnj.ynu.ac.jp

1. はじめに

クエンチ時における、高温超伝導線材内の超伝導層・安定化層間の分流特性、並列接続された線材間の分流特性について知ることは、高温超伝導の安定性並びにクエンチ保護の観点から重要である。今回、2本のYBCO超伝導線を並列に接続し小コイルを製作し、YBCO層・銅安定化層間、並びに2線材間のクエンチ時における分流特性を実験的に調べたので報告する。

2. 実験方法

実験に用いた線材の諸元を Table 1 に示した。2本の線材それぞれの周りに絶縁テープを巻き、直径 50 mm の GFRP 製ポビンに巻きつけて小コイルを作成した(Fig. 1)。この小コイル(並列接続された2線材全体)に流す電流を一定の割合で増加させ(ランプアップ通電)、各線材に発生する電圧を電圧タップで、各線材に流れる電流をホールセンサで測定した。

3. 実験結果

Fig. 2(b) の挿入図は、四端子法を用いて測定した T_c 以上の線材の温度と単位長さ当たりの抵抗(～銅安定化層の抵抗)の関係を示している。この直線を延長することで、 T_c 以下の線材の常伝導抵抗 r_n が求められる。これより、温度 T を仮定する事で YBCO 層、銅安定化層に流れる電流を以下の式から推定することができる。

$$i_{Cu} = v/r_n(T) \quad (1)$$

$$i_{YBCO} = i_{in} \text{ (or } i_{out}) - i_{Cu} \quad (2)$$

Fig. 2 に、コイル全体に通電を行った際の、内側、外側それぞれの線材の電流、電圧、それぞれの線材のYBCO層・銅安定化層に流れる電流を示す。通電開始直後は、各線材接続部の抵抗の差により電流が不均一である(Phase-I) [1-2]。その後、 i_{out} が i_c を越えた時点で ($t = 0.40$ s)、外側の線材から内側の線材へ電流が転流する(Phase-II)。Phase-II では、各線材とも YBCO 層のみに電流が流れている。 i_{in} も i_c を越えた後 ($t = 0.66$ s)、両線材において YBCO 層から銅安定化層に徐々に電流が転流していく(Phase-III)。最終的に、両線材の YBCO 層同士、銅安定化層同士の電流は等しくなる。 i_c を越える電流が YBCO 層に流れるのは、 n 値が小さいためであると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (16360136) の補助により実施したものである。

参考文献

1. A Ishiyama *et al.*: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 17(2007) p.1672
2. T. Moteki *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.71

Table 1 Specifications of YBCO tapes

Samples	Inner & Outer conductors
Length	4 m
Width & thickness	4.35 mm & 0.20 mm
Substrate & stabilizer	NiW & Cu

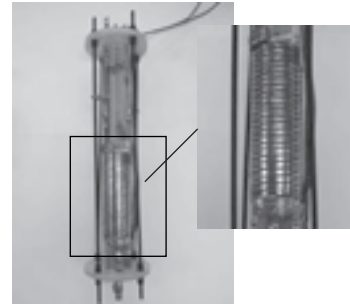


Fig. 1 Entire experimental setup and the coil composed of two coated conductors that are isolated from each other by polyimide tape.

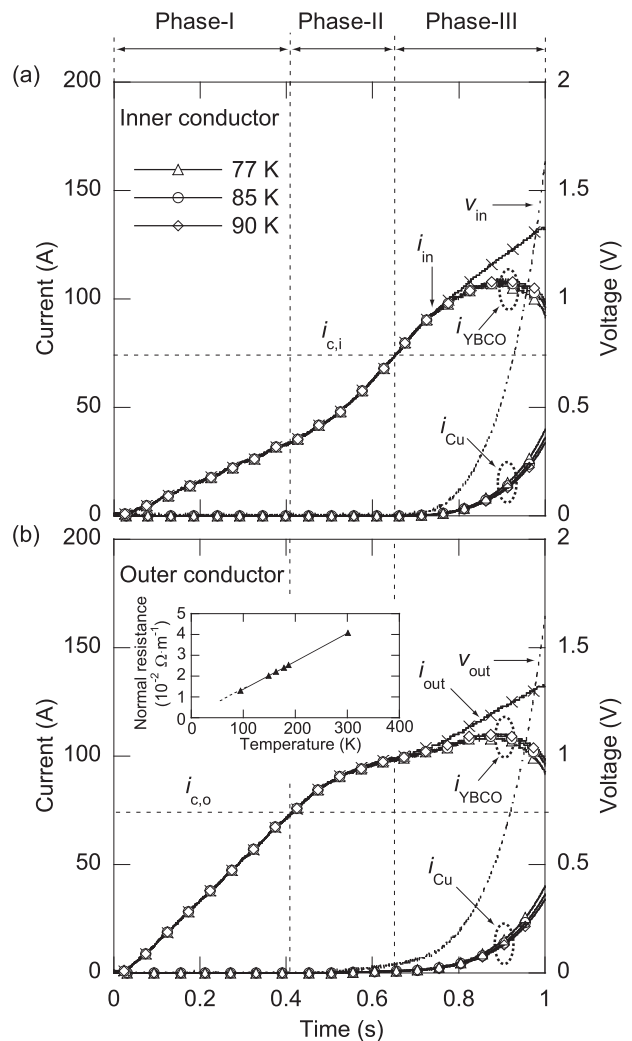


Fig. 2 The current and voltage measured for the entire section and currents in the YBCO layer and copper stabilizer in (a) the inner conductor and (b) outer conductor assuming the temperature to be constant.

熱電素子による 1 テスラ級高温超電導マグネットの励磁

Tesla-class Quasi-persistent-mode HTS Magnet Excited by Thermoelectric Element

小山 尚人, 山田 晃裕, 水野 克俊, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 岡村 哲至(東工大); 栗山 透(東芝)

OYAMA Naoto, YAMADA Akihiro, MIZUNO Katsutoshi, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);

KURIYAMA Toru (TOSHIBA)

E-mail: oyama.n.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

通常高温超電導マグネットの通電には外部電源が用いられている。しかし励磁に必要な大電流を流すには大型の外部電源が不可欠であり、高温超電導マグネットの小型化の妨げになっている。そこで熱電素子を小電流から大電流へ変換する'変流器'として扱うことにより装置の小型化が可能になると考えられる。我々は以前に、コイル状にしていない高温超電導線と熱電素子からなる短絡回路を用いて熱電素子による通電挙動を把握した。

その結果をふまえ本研究では熱電素子を電源として高温超電導コイルに接続し、磁場 1[T]の発生を目標に実験を行った。その励磁の特性について報告する。

2. 実験装置

Fig.1 に熱電素子を用いた高温超電導マグネットのシステム図を示す。構成は高温超電導コイル、真空容器、極低温冷凍機、熱電素子、電流リード、ヒーター用電源からなっている。冷凍機の一段目で熱電素子の下部を冷却し、二段目でコイルを冷却している。熱電素子上部に取り付けられたヒーターによって、熱電素子を加熱し、上部と下部に温度差を与えることにより、起電力を得る。

3. 実験方法

冷凍機で十分にコイルを冷やした後、熱電素子の上部のヒーターに 25[W]で熱入力を行った。磁場が 1[T]に到達した後、1[T]を維持するように熱入力を 16[W]に変更し、最終的にヒーターを off にして消磁した。

4. 結果と考察

ヒーターの熱入力を開始してからの経過時間に対する磁場の変化を Fig.2、熱電素子の温度変化を Fig.3 に示す。ヒーターの熱入力を開始してから約 6.5 時間でコイルに電流が 116[A]流れ、目標としていた磁場 1[T]が達成された。熱電素子の温度の最大は上部が 93[K]で、下部が 53[K]で温度差は 40[K]程度であった。熱電素子の両端電圧において、ヒーターの熱入力開始後の急激な電圧上昇は、熱電素子の両端の温度差によって生じる。その後の熱電素子両端電圧の低下は電圧降下によるものである。

またヒーターを off にすると熱電素子の上部と下部の温度差が急激に小さくなり、起電力がほぼ 0 になる。同時にコイルのインダクタンスにより電流は流れ続けるので、熱電素子の内部の抵抗分だけ電圧降下が生じる。

ヒーターが Off 時の熱電素子の抵抗は $4.1[\mu\Omega]$ 、最大温度時の抵抗は $8.1[\mu\Omega]$ であり、2倍程度異なることがわかる。これは熱電素子の電気抵抗の温度依存性によるものである。

今回の実験では 1[T]に到達した時の熱電素子の起電力は 1.89[mV]で、熱電素子の内部抵抗は $8.1[\mu\Omega]$ で、熱電素子を除く回路とコイルの抵抗は $0.98[\mu\Omega]$ であることが分かった。

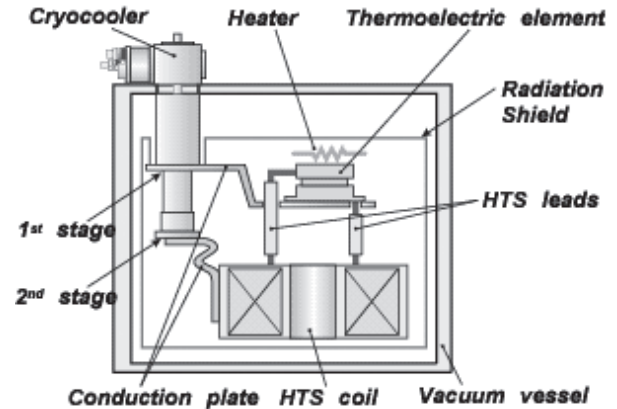


Fig.1 Schematic of an experimental system

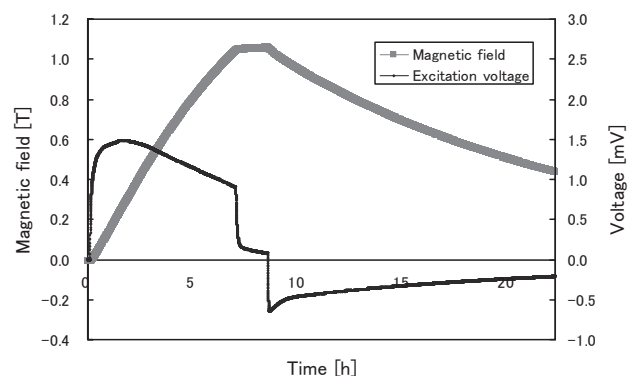


Fig.2 Time traces of the magnetic field at the center and excitation voltage

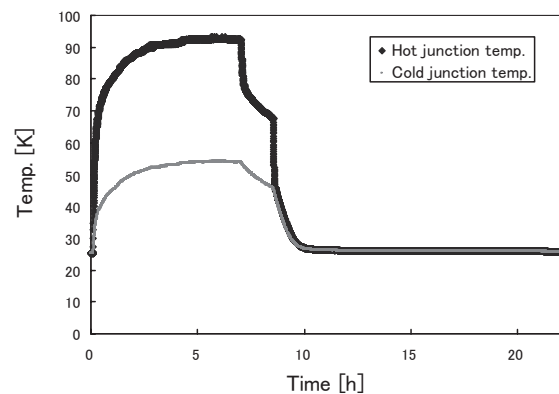


Fig.3 Time traces of the temperature.

謝辞

本研究は、科研費(18360101)の助成を受けたものである。

有効電力法による超電導コイル保護システムの開発

- 相互誘導電圧除去による特性改善 -

Superconducting Coil Protection System by Active Power Method - Characteristic Improvement by Canceling Mutual Inductive Voltage -

竹内和哉, 井上貴裕, 七戸 希, 金 錫範, 村瀬 暁

(岡山大学)

K. Takeuchi, T. Inoue, N. Nanato, S. B. Kim, S. Murase

Okayama University

E-mail: nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

超電導コイルのクエンチ検出法としてクエンチ時にコイルに発生する抵抗性電圧を検出する方法が挙げられるが、コイルには抵抗性電圧だけでなくクエンチには直接関係のない誘導性電圧も発生する可能性がある。また、大型の超電導マグネットなどのように複数の超電導コイルからなるマグネットでは、隣接するコイルからの相互誘導電圧もコイルに生じることがある。よってコイルから抵抗性電圧のみを検出するためには自己誘導電圧、及び相互誘導電圧を除去する必要がある。そこで本研究では、相互誘導電圧の除去法について提案し、小型高温超電導巻線を用いたクエンチ保護試験により、相互誘導を考慮した、有効電力法に基づく超電導コイル保護システムの原理検証を行い、その有効性について検討を行った。

2. 相互誘導を考慮した有効電力法

本稿ではクエンチ時にコイルに発生する抵抗性電圧を瞬時有効電力に変換し、クエンチ検出を行うことを特徴とする、有効電力法を用いたクエンチ保護システムを提案する。Fig.1 の回路において超電導コイル SC1 の両端電圧 v_{SC1} から抵抗性電圧のみを検出するために、コイルに発生する自己誘導電圧及び、超電導コイル SC2 により生じる相互誘導電圧の除去を行う。SC1, SC2 の回路中にはそれぞれ誘導性電圧検出コイルが設置されており、これにより誘導電圧の除去を行う。さらに、得られた抵抗性電圧を瞬時有効電力に変換し、これをフィルタ処理したものをクエンチ信号として取り扱う^[1]。

3. クエンチ保護試験, 考察

提案法を用いたクエンチ保護システムを使用しコイル保護試験を行った。試験コイルとして、Bi-2223/Ag 小型超電導巻線を使用し、液体窒素からの引き上げによるクエンチに対する保護動作を確認する。SC1 に $i_1=70$ A の直流電流を通电して

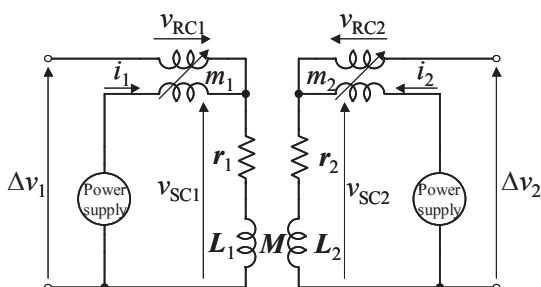


Fig.1 Experimental circuit

いる状態で、SC2 に $i_2=20$ Apeak (20 Hz)の三角波電流を通电し、SC1 に相互誘導を生じさせる。三角波を通电したのは、実際の複数コイルマグネットの励磁と減磁を模擬するためである。この状態でコイルを液体窒素から引き上げ温度を上昇させることでクエンチさせ、保護動作を確認する。クエンチ判定に用いる閾値は 2.5 W に設定した。

試験結果を Fig.2 に示す。同図 $\Delta v_1'$ は自己誘導電圧、及び相互誘導電圧が除去された抵抗性電圧を示している。また、設定した閾値に有効電力 P_1' が達した瞬間に通電電流 i_1 が遮断され保護動作が行われていることがわかる。

これにより、複数コイルを使用した超電導マグネットに対して、本システムが有効である可能性が示された。

本研究の一部は文部科学省(科学研究費補助金・若手 B (19760277))の助成によることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

[1] K. Takeuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.253

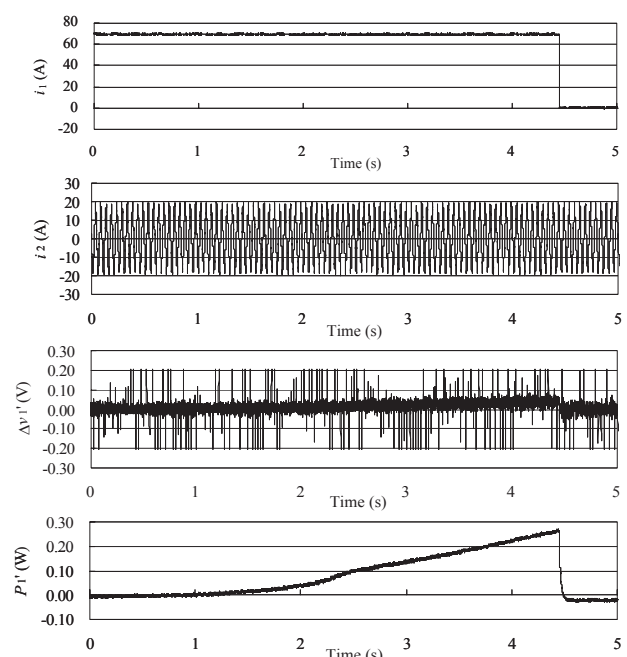


Fig.2 Experimental results for a quench detection test

Bi-2223 ダブルパンケーキコイルのフープストレス試験 Hoop Stress Tests of Bi-2223 Double Pancake Coils

松本 真治, 崔 世鎔, 木吉 司(NIMS); 大塚 昭弘(JASTEC); 伊藤 喜久男, 浅野 稔久(NIMS)
 MATSUMOTO Shinji, CHOI Seyong, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OTSUKA Akihiro (JASTEC);
 ITOH Kikuo, ASANO Toshihisa (NIMS)
 E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

1. はじめに

酸化物高温超伝導線材(HTS)は、1GHz を超える高磁場 NMR マグネットへの応用が期待されており、HTS 内層コイルを備えたマグネットの可能性について検討が行なわれた[1],[2]。外径が約 400 mm の HTS 内層コイルを有する 1.3-GHz (30.5-T) NMR マグネットの場合、HTS に生ずるフープストレスは、200 MPa に達することが予想されている[2]。

本研究は、200 MPa を超えるフープストレスを加えた場合の HTS コイル特性を調べることを目的とする。Bi-2223 線材で試験用ダブルパンケーキコイルを製作し、磁場中において通電することによりフープストレスを加え、液体ヘリウム温度(4.2 K)で臨界電流測定を行なった。コイル試験は、物質・材料研究機構強磁場共用ステーションにおいて、直径 400 mm の室温空間を持つ 14-T 超伝導マグネットを使用して行なった。

2. コイル製作

試験用ダブルパンケーキコイルは、2種類の住友電気工業株式会社製 Bi-2223 線材(DI-BSCCO 高臨界電流タイプおよび高強度タイプ)を使用し製作した。コイル諸元を Table 1 に示す。各線材を、FRP(G10)製のボビンに巻線し、試験用コイルを製作した。各ダブルパンケーキコイルは、歪みゲージを取付けるための場所を残して、エポキシ樹脂で含浸補強を行なった。エポキシパテで壁を設け、エポキシ樹脂が歪みゲージを取付ける部分に流れ込むことを防いだ。よって、エポキシ樹脂含浸は様ではなく、歪みゲージ近傍にはエポキシ樹脂による補強がない構造となっている。

3. 試験結果

各試験用コイル(コイル長設計値:16.5 m)の臨界電流は、両端電圧に 1.65 mV($1 \mu\text{V}/\text{cm} \times 16.5 \text{ m}$)の電圧が発生した電流値とした。フープストレス(rB/l)は、最内層($r=130 \text{ mm}$)の線材において計算した。印加磁場が 14 T、線材の断面積は $4.2 \text{ mm} \times 0.22 \text{ mm}$ である。

高臨界電流タイプ線材で製作した試験用コイルの臨界電流測定結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 は、1回目の通電試験の結果であり、臨界電流は 164 A であった。その後通電試験を繰り返して行なった結果、徐々に臨界電流が低下し、7 回目の通電試験においては、140 A であった。最初の通電試験において、300 MPa を超えるフープストレスが線材に加わっていたため、臨界電流の低下は、大きなフープストレスによりコイルがダメージを受けたことが原因と考える。

高強度タイプ線材で製作した試験用コイルについても、同様に臨界電流測定を行なった。コイルは、98 A まで通電したところで破断した。歪みゲージ取付けのため、エポキシ樹脂で含浸を行っていない部分で破断が生じた。破断した時のフープストレスは、193 MPa と見積もられる。同様に製作した高臨界電流タイプでは、300 MPa を超えるフープストレスが線材に加わっても破断しておらず、全く異なった結果が得られた。高強度タイプが破断した明確な原因は解明できていないが、歪みゲージを取り付けた部分で破断していることから、取付け時にコイルにダメージを与えた可能性が考えられる。

TABLE I PARAMETERS OF THE TEST COILS

Parameters		
conductor	Bi-2223/Ag (DI-BSCCO)	
width of insulated conductor	4.3	mm
(width of bare conductor)	4.2	mm
thickness of insulated conductor	0.28	mm
(thickness of bare conductor)	0.22	mm
inner diameter of winding	260	mm
outer diameter of winding	265.6	mm
height of winding	10	mm
number of layers	10	
number of pancakes	2	
total turns	20	
length of conductor	16.5	m

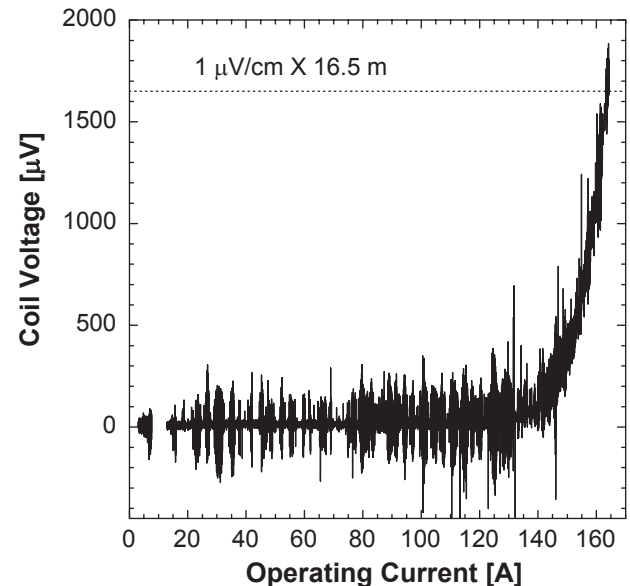


Fig.1 Coil voltage of the high- I_c test coil.

4. まとめ

Bi-2223 線材を用いて試験用コイルを製作し、フープストレスを加えて、コイルの特性を調べた。今回の測定では、2種類の線材で製作したコイルのみの結果であったので、今後、同様の試験を行ない、HTS の、高磁場 NMR マグネットへの応用の可能性について検討する必要がある。

本研究は、「高温超伝導材料を利用した超高磁場 NMR の実用化可能性に関する調査」の一環として、株式会社テクノバを通じて、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により実施した。

参考文献

- W.D. Markiewicz, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16 (2006) p.1523
- A. Otsuka, et al.: TEION KOUGAKU, Vol. 42 (2006) p.196

高温超電導機器用パワーリードの損失測定

Evaluation of losses of current leads made of various metals for HTS power apparatuses

古瀬 充穂, 我妻 洸, 淵野 修一郎 (産総研)

FURUSE Mitsuho, AGATSUMA Koh, FUCHINO Shuichiro (AIST)

E-mail: m.furuse@aist.go.jp

1. はじめに

著者らは、低温端が液体窒素温度の各種金属材料製パワーリードの損失を数値解析により評価し、高温超電導機器用パワーリードの低損失化に関する検討を行ってきた[1]。しかし数値解析に用いた材料の熱伝導率と電気伝導率の文献値は同一試料の測定値ではなく、計算結果の信憑性は高くない。そこで室温から液体窒素温度までのパワーリードの損失を、液体窒素の蒸発量で精密に測定する装置を製作し、種々の金属材料パワーリードの損失の測定を行った。測定の結果から、各種材料の室温～液体窒素温度における平均ローレンツ数を計算し、最適パワーリード設計の検討を行った。

2. パワーリードの損失測定

損失測定装置の概略図を図1に示す。高温側と低温側の試料取り付け治具には温度計とヒータが取り付けられている。低温側は銅ブロックを介して液体窒素リザーバに接触しており、低温端に流入する熱量を窒素の蒸発ガス流量で計測する。リザーバは液体窒素温度のシールドで囲まれ、周囲からの輻射の影響を抑えている。低温端の流入熱量と蒸発ガス流量の関係は、試料を取り付けていない状態で低温端のヒータに入熱して校正した。

まず試料を1本だけ取り付け、上部ヒータで試料上端温度 T_h を室温に保った。これにより大気から試料への熱流入が無くなる。このときの低温端への流入熱量 Q と低温端の温度 T_l を測定する。温度 T_h と T_l の間の試料の平均熱伝導率 k_a は、

$$Q = -k_a S \frac{dT}{dx} = k_a S \frac{T_h - T_l}{l}, \quad \therefore k_a = \frac{l}{S} \frac{Q}{T_h - T_l} \quad (1)$$

で与えられる。ここに l と S はそれぞれ試料の長さおよび断面積で、 $l=0.5\text{m}$, $S=1.96\text{m}^2$ (直径 5mm) である (Ti のみ直径 10mm で $S=7.85\text{m}^2$)。試料と液体窒素リザーバをつなぐ銅ブロックの熱伝導率の影響で、 T_l は液体窒素温度より流入熱量 1W に対して 1.6K 高い。しかし求めた k_a は 300K から 77K の平均値としても誤差は 1.5%以内であることを、熱伝導率の文献値より計算して確認した。

次に試料を2本取り付け、試料上端温度 T_h が室温になるような電流 I_r を通電した。先と同様、大気からの熱流入は無視できる。このときの液体窒素リザーバへの流入熱を、リード2本分であることを考慮して $2Q_c$ とする。

断熱状態の電流リードに通電したときの低温端に流入する

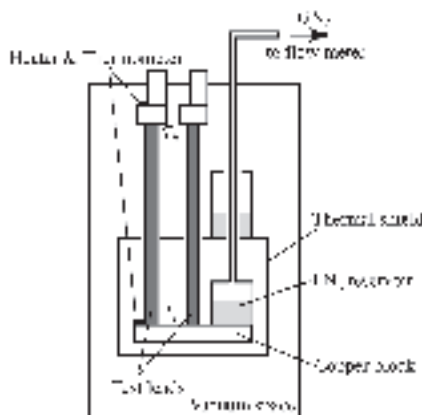


Fig.1 Schematic diagram of measurement system.

熱量 Q_c は、(2)式の一次元熱平衡方程式により長手方向の温度分布を求めた解である(3)式を使って、(4)式で求められる。(3)式導出の過程で、金属材料の抵抗率 $\rho(T)$ が温度 T に正比例する (すなわち $\rho(T)=\alpha T$) と仮定した。これは室温から液体窒素温度の範囲なら良い近似である。

$$\frac{d}{dx} \left(k(T) S \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho(T) I^2}{S} = 0 \quad (2)$$

$$T = \frac{T_l \sin \beta x + T_h \sin \beta(l-x)}{\sin \beta l}, \quad \beta = \frac{l}{S} \sqrt{\frac{\alpha}{k_a}} \quad (3)$$

$$Q_c = I_r \sqrt{L_a} \frac{T_h - T_l \cos \delta}{\sin \delta}, \quad \delta = I_r \frac{\sqrt{L_a}}{k_a} \frac{l}{S} \quad (4)$$

ここに L_a は試料の温度 T_h と T_l の間の平均ローレンツ数で、 $L_a = k_a \alpha$ である。

測定した Q_c , T_h , T_l , k_a , I_r を(4)式に代入し、数値解析により L_a を求めた。結果を表1に示す。先に述べたとおり、 k_a と L_a は 300K から 77K の温度範囲の平均値とみなせる。

Table 1 Measurement results.

Material, purity	k_a ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	L_a ($\text{W}\Omega\text{K}^{-2}$)
Cu Oxygen Free ,4N	436	2.17×10^{-8}
Cu Electric tough pitch ,3N	436	2.30×10^{-8}
Al Low purity, 99.7%	242	2.40×10^{-8}
Al high purity, 4N	261	2.21×10^{-8}
Ag, 4N	481	2.10×10^{-8}
Ti, 99.8%	28	6.94×10^{-8}
Ni, 99.0%	88	2.17×10^{-8}

3. 測定結果とリードの最適設計

(4)式から、両端温度が 300K と 77K で通電電流 I の電流リードの損失が最小になるのは、

$$\frac{l}{S} \Big|_{\text{opt}} = \frac{1}{I} \frac{k_a}{\sqrt{L_a}} \cos^{-1} \frac{77}{300} \quad (5)$$

のときで、このときの最小損失 Q_{\min} は

$$Q_{\min} = I \sqrt{L_a} (300^2 - 77^2) \quad (6)$$

で与えられる。金属材料の熱伝導率と電気伝導率の温度依存性を同時に測定することは難しいが、同一試料から測定した表1の k_a と L_a を使えば、(5),(6)式からその材料の電流リードの最適設計が可能である。(6)式の通り、最適設計した電流リードは、 L_a が小さい材料ほど損失が小さい。

最も L_a が小さいのは銀で、次点の無酸素銅より6%小さい。しかし価格を考えると、無酸素銅が第一選択肢と言える。電線用に広く使われているタフピッチ銅は無酸素銅より劣るが、入手性はよい。ニッケルは無酸素銅に匹敵する L_a が得られた。しかし抵抗率が大きいため、必要な断面積 S は無酸素銅のおよそ 28 倍になる。文献値からの計算で最も L_a が小さいと予想されたアルミニウムは[1], 4N 高純度品でも無酸素銅より大きな値となった。これはアルミ表面の酸化膜による接続抵抗が影響しているものと考えられる。

参考文献

- M. Furuse, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.194

各磁界分布における超電導転位並列導体の交流損失 AC loss in transposed parallel SC conductors with various magnetic field

中村 章, 永吉 広樹, 岩熊 成卓, 船木 和夫 (九州大学)

NAKAMURA Akira, NAGAYOSHI Hiroki, IWAKUMA Masataka, HUNAKI Kazuo (Kyushu University)

E-mail: niinya@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は大電流容量酸化超伝導体の構成法として、素線を用いて巻線を行い、その途中で転位を施す方法を提案している。本研究はこの並列導体に様々な分布を持つ外部磁界を印加した場合に、並列導体に流れる遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない非飽和条件下、達する場合の飽和条件下に分けそれによって発生する付加的交流損失を定量的に明らかにしている。今回はより、一般的に近いかたちの損失式について考察したので報告する。

2. 並列導体の基礎方程式

図 1 は転位が最適転位位置の導体中心から Δl_1 ずれた場合の 2 本並列導体及び、今回想定した磁界分布の図である。最大磁界振幅の導体中心からのずれを Δl_2 としている。このように転位位置、磁界振幅のずれがあると並列導体に磁束が鎖交し、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。その遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない場合の、非飽和条件下の式は次式となる。

$$I = -\frac{w}{k} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1+(\omega \tau)^2}} \frac{\Phi_{B(x)}}{\mu_0 d_s L} \sin(\omega t + \varphi)$$

このときの付加的交流損失は

$$W = \int_0^{2\pi} \frac{2R I^2}{2uwL} dt$$

より求めることができる。

ここで d_s は素線の中心間距離、 w 及び u は線材幅及び厚さ、 $\Phi_{B(x)}$ は鎖交磁束である。

また、飽和条件下における損失の式は次式より求められる。

$$m = \frac{I d_s}{2uw} \left(\frac{2\Delta l}{L} \right) \quad W = \mu_0 \oint H_e dM$$

3. 解析結果

図 2 に $\Delta l_2/L$ を 0.375 に固定して Δl_1 を動かした場合の付加的交流損失の解析結果を示す。この結果は、転位のずれが大きい部分と小さい部分で n に対する特性が変わっているなど、我々がこれまで求めてきた付加的交流損失とは違う特性を示した。そこで、最適転位位置を基準にして書き直してみると、図 3 の様な形になりこれは我々の研究でこれまで行ってきた、 $\Delta l_2=0$ として、 Δl_1 を動かした場合の付加的交流損失と同じような特性を示した。

4. まとめ

本解析によって転位位置と磁界分布の両方がずれている場合でも磁界分布のずれを固定して最適転位位置を基準に考えることで、転位位置のみがずれている場合と同じように考えることができることが分かった。今後は逆に転位位置のずれを固定して磁界分布のずれを動かした場合などの解析も行っていきたい。

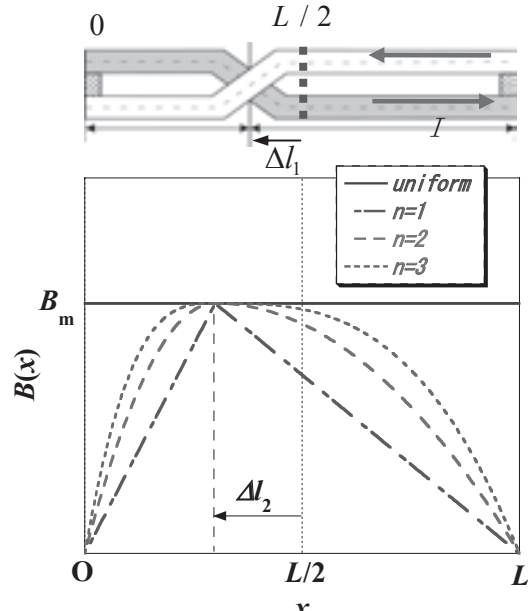


Fig.1 A 2-strand parallel conductors and Magnetic field distribution

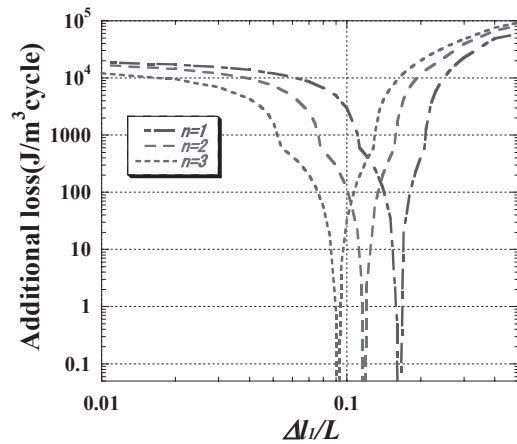


Fig.2 $\Delta l_1/L$ dependences of the Additional loss

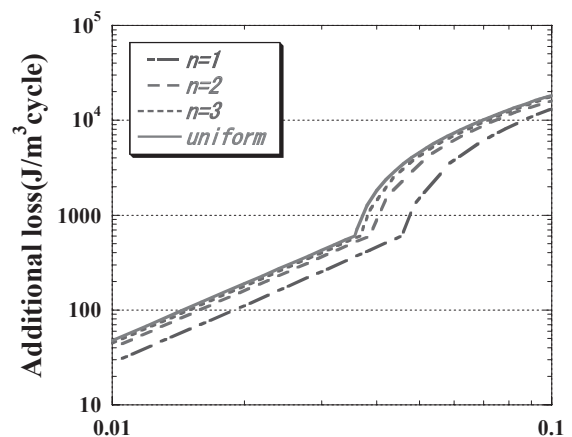


Fig.3 The gap from the best transpose position dependences of the Additional loss

基板のヒステリシス損失を考慮した2層超伝導ケーブルの交流損失の数値解析

Numerical analysis of AC losses in two-layer superconducting power cables considering hysteretic loss in substrates

中畑 匡章, 雨宮 尚之(横浜国大・工)

NAKAHATA Masaaki and AMEMIYA Naoyuki (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

E-mail: naka@rain.dnj.ynu.ac.jp

1. はじめに

超伝導ケーブルの実用化に向けて、製造コスト削減は重要な課題である。RABiTS法で製造された基板は、コストの点で優れているがNi合金で磁性を有する。基板磁性は、磁束分布を大きく変化させ、また基板自身のヒステリシスによって交流損失に影響を与える。以前、我々は基板磁性による磁束分布の変化のみに着目した2層超伝導ケーブルの解析を行い、ケーブルにおける超伝導層のみの交流損失を評価した。そこで本研究では、基板磁性による磁束分布の変化と基板のヒステリシスを考慮した数値電磁界解析を行い、超伝導層の損失及び基板のヒステリシス損失を評価し、基板磁性がケーブル全体の交流損失に与える影響を検討した。

2. 計算結果と考察

超伝導線材及び2層ケーブルの諸元をTable 1に、基板のB-Hカーブ及びヒステリシス損失を得るためのQ-BカーブをFig. 1に、今回用いたtape-on-tapeとalternateと呼ぶ2層ケーブルの2つのモデルの断面図をFig. 2に示す。線材軸が導体軸と平行であると仮定し、導体軸に垂直な2次元断面内で解析を行い、得られた磁束線をFig. 3に、2つのモデルの交流損失の平均を取ったものをFig. 4に示す。Fig. 3(a)と(b)のtape-on-tapeの磁束線を比較すると、(b)において外層の基板に内層が作る磁束が吸い寄せられており、内層の垂直磁界成分は(a)よりも大きくなっていると考えられる。外層が作る磁束は、(b)において外層の線材面に対して平行になっており、(a)よりも線材面に対する垂直磁界成分が小さいと考えられる。これは、外層の磁性基板によって吸い寄せられた内層の磁束と外層の磁束が打ち消しあっているからだと考えられる。Fig. 3(c)と(d)のalternateの磁束線を比較すると、(d)において線材端の磁束が外層の基板に吸い寄せられ、(c)よりも線材面に対する垂直磁界成分が小さくなっていると考えられる。外層の磁束は、tape-on-tapeのときと同様に、(d)では線材面に対して平行になっている。Fig. 4の超伝導層の損失において、非磁性基板を用いた場合は外層の損失が支配的であったが、磁性基板を用いることで内層の損失が支配的となっている。ここに基板のヒステリシス損失を考慮すると、電流が小さいときは、外層の基板によるヒステリシス損失がケーブル全体の損失に対して非常に支配的であり、非磁性の場合よりも損失は大きくなる。しかし、電流が大きくなるとケーブル全体の損失に対するヒステリシス損失の影響は小さくなり、 $I_t/I_c = 0.8$ において、磁性基板を用いた場合の損失は、ほぼ非磁性のときと同じ損失となった。

3. まとめ

磁性基板を用いた次世代線材で構成された高温超伝導ケーブルにおいて、磁性基板の存在は、磁束分布を変化させるので線材の超伝導層で発生する交流損失に影響を与える。また、磁性基板の磁気ヒステリシスそのものも磁化損失の発生に繋がる。これらの両方の効果により、高温超伝導ケーブルの交流損失特性は決定される。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTECを通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

参考文献

- M. Nakahata, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 20 (2007) accepted for publication

Table 1. Specifications of conductors and power cable

Inner diameter of layer 1	19.98 mm
Inner diameter of layer 2	20.93 mm
Conductor number of layer 1 and 2	15
Conductor width	4 mm
YBCO layer thickness	2 μm
Total critical current	2400 A
n value	30

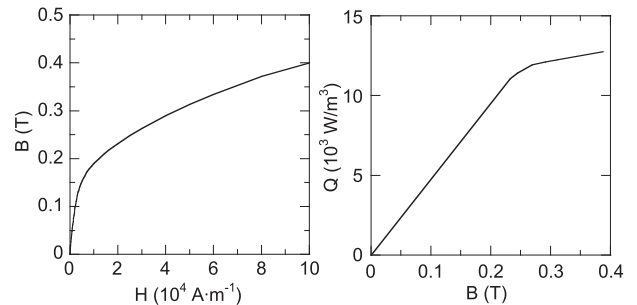


Fig. 1 B-H curve and Q-B curve in substrate.

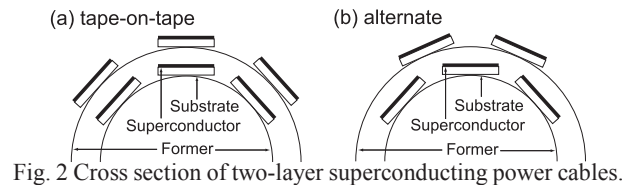


Fig. 2 Cross section of two-layer superconducting power cables.

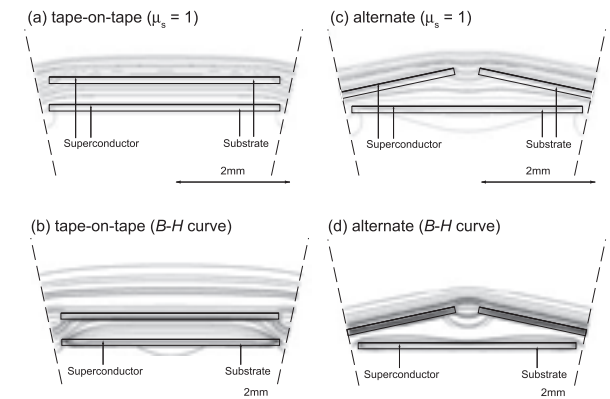


Fig. 3 Magnetic flux lines near coated conductors.

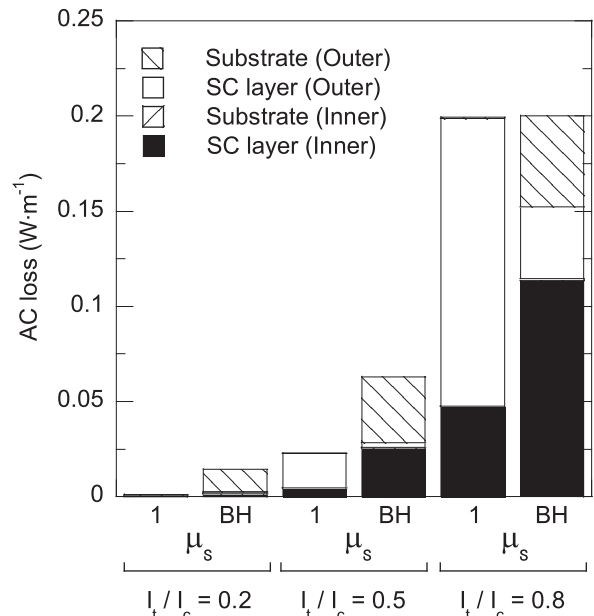


Fig. 4 AC losses in two-layer superconducting power cable

直流超伝導送電ケーブル実験装置における第2期実験 Second Period Experiment of DC Superconducting Power Transmission Cable in Chubu University

浜辺 誠, 山本 勇, 佐々木 淳, ファマキンワ トーシン, 那須 祐児, 秋山 龍一, 山口 作太郎(中部大), ニノ宮 晃(成蹊大), 星野 勉(明星大), 石黒 康英(JFE スチール), 川村 邦明(前川製作所);

HAMABE Makoto, YAMAMOTO Isamu, SASAKI Atsushi, FAMA KINWA Tosin, NASU Yuji, AKIYMA Ryuichi, YAMAGUCHI Satarou, (Chubu Univ.), NINOMIYA Akira(Seikei Univ.), HOSHINO Tsutomu(Meisei Univ.), ISHIGURO Yasuhide(JFE Steel), KAWAMURA Kuniaki(Mayekawa MFG)

hamabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では平成 17 年度より直流超伝導送電システムの実用化を目指した研究を開始し, そのための直流超伝導送電ケーブルの実験装置の建設を平成 18 年 10 月に完成した. 引き続き 12 月まで第 1 期の冷却試験をおこない, 通電実験等をおこなった[1]. その後, 部分的に修理, 改造を加えた後, 平成 19 年 6 月より第 2 期の冷却試験を開始した. 5 日程度で超伝導状態に達した後, 8 月末に昇温するまで, 冷凍循環系の動作試験や, 再冷却後の通電性能の再現性の確認試験などを行なった. ここでは, この第 2 期の冷却試験で得られた結果を報告する.

2. 装置の概要

直流超伝導送電ケーブル実験装置のレイアウトを Fig. 1 に示す. 超伝導ケーブル本体は臨界電流 I_C が 100 A 級 (@77 K) の HTS テープ線材(Bi2223)を内側に 19 本, 外側に 20 本をそれぞれラセン状に配置した 2 層構造となっており, ケーブル長は約 20 m である. この 2 層の HTS テープ線材の層間は絶縁されており, それぞれ異なる電源で通電することができる. 特に内層の 19 本の HTS テープ線材は超伝導状態では互いに電氣的に接触しておらず, また各線材を独立に通電できる配線構造にしているため, 各テープ線材ごとの特性を測定することができる. 各 HTS テープ線材と電源とをつなぐ電流リードについては, 外層 20 本については通常の銅線のみで電流リード, 内層 19 本についてはクライオスタットの断熱真空部の電流リード部にペルチェ素子を挿入したペルチェ電流リード(PCL)を採用している.

第 1 期試験では基本的に大気圧での液体窒素(LN2)浸漬により冷却(77.3 K)していたが, 第 2 期試験では試験期間全体を通して, GM クライオクーラー 2 機を備えた冷媒循環装置(合計冷却能力 440 W @80 K)を用いて, 過冷却 LN2 による冷却を試みた.

3. 実験結果

内層側の HTS テープ線材 19 本 (No.2-1~19) について, それぞれ個別に測定した I_C および n 値の測定結果を第 1 期冷却時と比較したものを Fig. 3 に示す. 第 2 期では過冷却 LN2 を冷媒としているため, 測定時の約 20 m の線材の平均温度は 75.8 K となった. その結果, いずれの HTS テープ線材においても I_C は増加し, 第 1 期では平均 101.6 ± 0.6 A であったものが, 第 2 期では 116.5 ± 0.7 A となった. n 値についても, 第 1 期では平均すると 18.7 ± 0.4 であったものが第 2 期では 20.7 ± 0.3 に増加した. すなわち, 過冷却 LN2 を使用したことにより, 運転温度低下に伴う HTS の性能向上が大きく, それに比べると一度昇温したことによる性能の劣化は無視できるレベルであった. このほか, 全超伝導テープ線材の半数(19 本)を使用して, 1.5 kA, 15 分間の連続通電試験を行なった.

謝辞 本研究は文部科学省の社会連携研究推進事業(平成 17 年度~平成 21 年度)による私学助成を得て行われた.

参考文献

1. S. Yamaguchi et al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) P.178

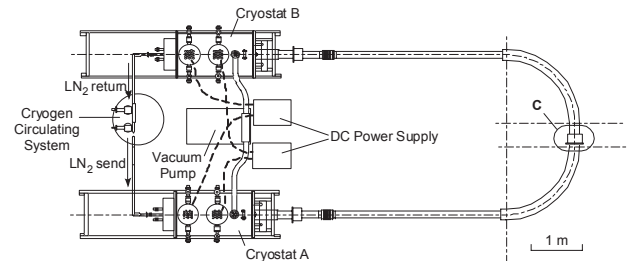


Fig. 1 Layout of DC Superconducting Power Transmission Cable Test Stand.

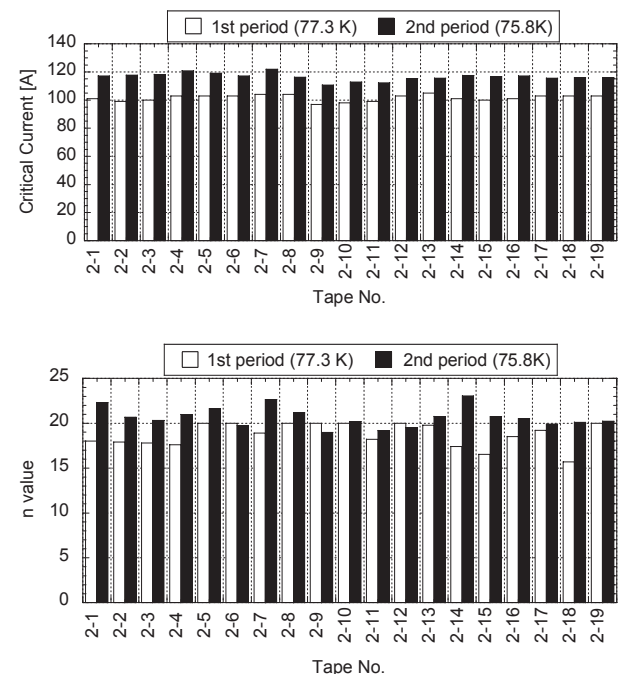


Fig. 3 Distributions of (a) Critical Current I_C and (b) n -value for each HTS tape in a DC Superconducting Power Transmission Cable.

LES による直流超伝導ケーブル用循環冷媒の流体解析

A fluid analysis for circulation coolant of a DC-SC cable by LES

佐々木 淳, 浜辺 誠, 山口 作太郎 (中部大学)
 SASAKI Atsushi, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Sataro (Chubu Univ.)
 E-mail: te04011@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体(HTS)ケーブルを利用する直流超伝導送電システムでは、循環冷媒として液体窒素(LN2)を利用する。これまでの計算では、k-ε 乱流モデルを用いて流れを解析してきた¹。これは、k-ε 乱流モデルが他の乱流モデルと比較して、収束性が良好で、各分野での適用事例が多く、モデルの限界が明確であることから、初期段階の計算としては有用であったためである。しかし、気液二相流といった混相流を解析する場合は、配管の形状変化から大きな渦流が発生する場合には、Large Eddy Simulation(LES)といった別の乱流モデルを適用したほうがより詳細な解析を行える。本研究では、これまでの計算で用いてきたモデルと計算条件を使用し、LES による非定常計算を行った。

2. Large Eddy Simulation (LES)

LES の基礎方程式は非圧縮性流体の運動を支配する Navier-Stokes 運動方程式(1)と、連続の式(2)である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

ここで、 u_i は i 方向の速度成分、 p は圧力を示す。LES では乱流量の空間分布 u_i を空間の粗視化(空間フィルタリング操作)によって、格子スケール以上の成分と格子以下の成分に分けて数値解析を行う。

3. 計算モデル

計算で使用する、配管を模擬したモデルは、入り口から 500 mm までをストレート部、次に 150 mm のベローズ部、そこから出口までの 350 mm をストレート部という構造とした。Fig. 1 にベローズ部の外形を示す。ベローズ部の標準寸法 R83 に準拠させて、内径を 83 mm、外径を 101 mm、ピッチを 6 mm とした。また、ベローズ部に合わせて、ストレート部の内径も 83 mm である。そして、外径 40 mm のケーブルが、配管の中心に設置されているものとした。今回の計算では管圧は考慮していない。冷媒である液体窒素の物性値は 77 K での値を用い、境界条件として、入り口の流速を 0.1 m/s とし、出口圧力をゲージ圧で 0 Pa とした。また、LES は非定常計算であるため、タイムステップを 1 sec とした。本稿では 6 ステップまで計算した結果を示す。

4. 計算結果

Fig. 2 に、ベローズ部とその前後のストレート部の流路方向断面の静圧の分布図を示す。(a)が 6 sec の時の分布で、(b)が 6 sec までの結果を平均した静圧の分布である。(a)(b)いずれの場合も、ベローズ部の入口では圧力が高くなり、出口で急激に下がる結果となった。次に、平均の静圧勾配を Fig. 3 に示す。静圧は管摩擦係数に比例するため、ストレート部よりベローズ部の方が大きくなるはずである。しかし、ベローズ部の勾配の方が小さくなる結果となった。これは、6 ステップしか計算していないためだと考えられる。当日は、ステップ数を増やした計算、コルゲート管を適用した計算、k-ε 乱流モデルとの比較について報告する予定である。

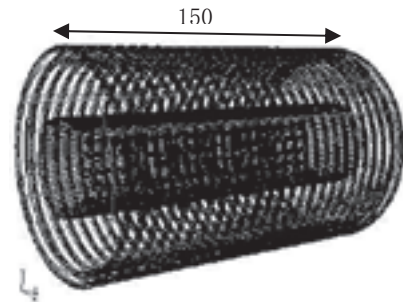


Fig. 1 A outline of 3D geometry of the bellows pipe (150 mm)

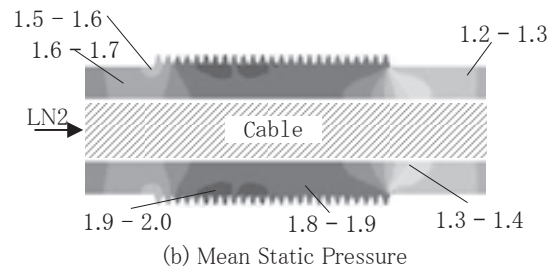
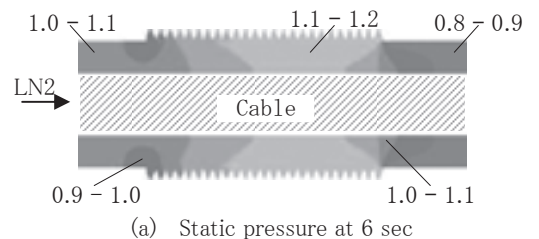


Fig. 2 Counters of the static pressure (unit: Pa)

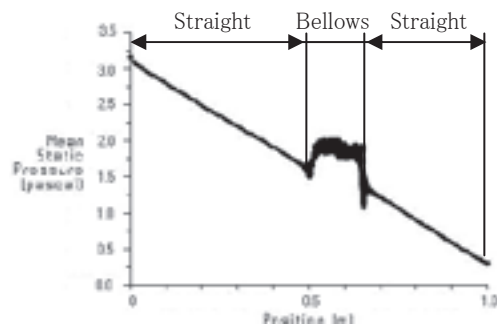


Fig. 3 The gradient of the mean static pressure

謝辞

本研究は文部科学省の社会連携研究推進事業(平成 17 年度～平成 21 年度)による私学助成を得て行われた。

参考文献

1. A. Sasaki, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**, p.1748-1751 (2007)

YBCO 超電導導体の臨界電流・交流損失の温度依存性

Temperature dependence of critical current and AC loss in YBCO conductor

八木 正史, 向山 晋一(古河電工); 長屋 重夫, 鹿島 直二(中部電力); 雨宮 尚之(横浜国大); 塩原 融(ISTEC-SRL),
 YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power);
 AMEMIYA Naoyuki (Yokohama National University); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
 E-mail: m-yagi@ch.furukawa.co.jp

1. はじめに

YBCO 線材に過電流対策のための銅複合と交流損失低減のための細線化を行い、これらの線材を集合化して、1 m の多層化した YBCO 超電導導体を作製した。この導体の臨界電流・交流損失結果および、過冷却時の臨界電流・交流損失の特性を評価したところ、1 kArms の交流損失 (50 Hz) において、0.048 W/m の低損失を確認したので、報告する。

2. 1 m Y 系超電導導体の仕様

1 m Y 系超電導導体の仕様を Table.1 に示す。YBCO 超電導線材の仕様は、Ag 安定化層 約 $20 \mu\text{m}$ / MOCVD-YBCO $0.7 \mu\text{m}$ / PLD-CeO₂ $0.4 \mu\text{m}$ / IBAD-GZO $1.0 \mu\text{m}$ / ハステロイ $100 \mu\text{m}$ 、幅 10 mm であり、臨界電流(Ic)は約 110 A であった。この線材の Ag 安定化層上に幅 10 mm、厚さ $100 \mu\text{m}$ の銅テープを半田で複合させて、過電流対策とした。さらに、YAG レーザにより、5 分割 (幅 2 mm) に細線化し、これを密に巻き付ける事で、交流損失の低減を図った[1]。Fig.1 にスパイラルに巻き付けた導体の様子を示す。

3. 1 m Y 系超電導導体の特性評価

作製した 1 m Y 系超電導導体は、77.3 K の Ic が 1130 A であり 1 kArms の容量を持っていなかった。そこで、導体をクライオ容器に入れて、内部を減圧し、液体窒素を過冷却状態にして、臨界電流と交流損失を評価した。その時の V-I 特性を Fig.2 に示す。過冷却時の Ic は 77.3 K で 1130 A, 70.0 K で 1875 A, 67.5 K で 2177 A, 66.0 K で 2365 A となった。N 値はそれぞれ、11.4 (77.3 K), 11.3 (70.0 K), 10.3 (67.5 K), 10.9 (66.0 K) とほとんど変化は無かった。Y 系超電導線は、Tc (臨界温度) が 90 K と液体窒素温度に近い事から、Ic 変化率は、温度変化に敏感であり、Bi 系超電導 (Tc=110 K) の結果[2] よりも大きい。

過冷却時の 1 kArms の交流損失 (50 Hz) はそれぞれ、70 K で 0.15 W/m (It/Ic=0.78), 67.5 K で 0.067 W/m (It/Ic=0.65), 66.0 K で 0.048 W/m (It/Ic=0.60) となった。過冷却する事で、臨界電流が 1 kArms の容量を持ち、その結果、1 kArms での交流損失は 0.1 W/m 以下になる事を確認した。また、Fig.3 のように、交流損失は It/Ic が 0.6 を超えた付近から、Norris の strip model[3] から乖離して増大しているが、これは細線化した線材の一部の Ic が低下している為と考えられる。今回の超電導導体の N 値が低いのもこれが原因と考えられる。

さらに、Fig.3 のように交流損失の結果を Ic で規格化したところ、各温度の結果はほとんど一致し、臨界電流特性も同様の結果を見せた。そのため、今回の導体の過冷却結果は、単純に導体の Ic を上げた結果と同一に見なす事が出来る。

4. 謝辞

本研究は、「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、ISTEC を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構の再委託により実施したものである。

Table.1 Specification of 1 m YBCO conductor

Former	Cu stranded 200 mm ²
Length	1 m
YBCO tape	IBAD-MOCVD 5strips from 10mm-width original (Ic=110 A) 0.1 mm Cu tape soldered on YBCO
Tape width/ strips	2 mm/ 60strips
Layer/outer diameter	2-layer/ ϕ 20.0mm

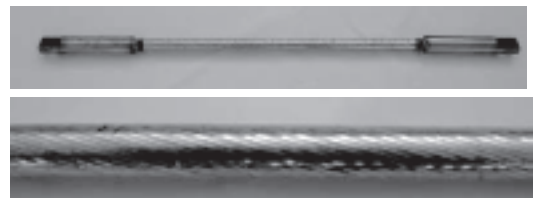


Fig.1 Appearance of 1 m YBCO conductor

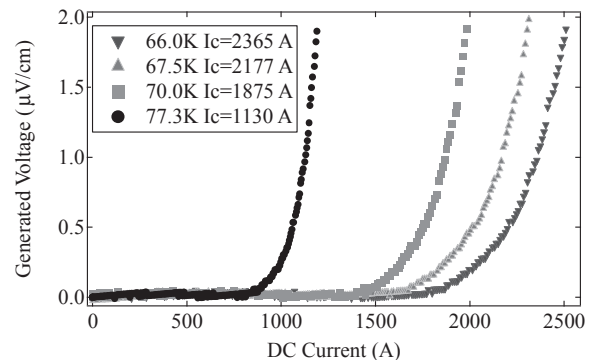


Fig.2 V-I characteristics of 1 m YBCO conductor

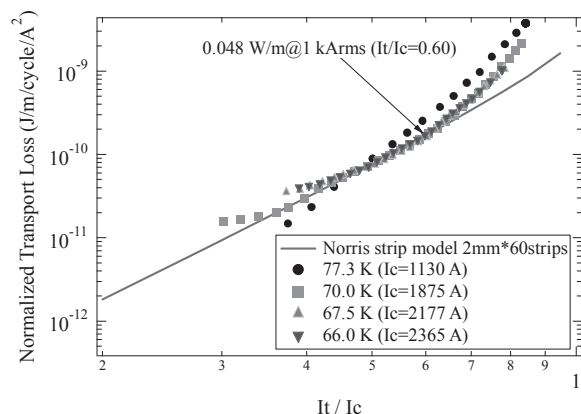


Fig.3 AC loss in 1 m YBCO conductor

参考文献

- [1] N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.298
 [2] 鳥居他: 低温工学 41 巻 1 号 p42-47 2006 年
 [3] Norris, W. T., *J. Phys. D* 3, 489 (1970)

加速器電磁石電源応用への SMES の開発状況 Status of the SMES for the Accelerator Magnet Power Supply

佐藤 皓 (KEK); 新富 孝和 (日本大学); 伊瀬 敏史 (大阪大学);
野村 新一、嶋田 隆一 (東工大)

SATO Hikaru (KEK); SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.); ISE Toshifumi (Osaka Univ.);
NOMURA Shinichi, SHIMADA Ryuichi (Tokyo Tech.)

E-mail: hikaru.sato@kek.jp

1. はじめに

荷電粒子加速器、特にシンクロトロンでは数秒の繰り返しで充放電を繰り返すため、負荷変動による電源変動が問題となる。このため系統内の負荷変動を補償する必要がある。消費電力も周期変動するのでの平滑化は運転経費を軽減する効果をもたらす。放射光や衝突型加速器のような蓄積型加速器では大きな負荷変動はないが、瞬時停電等による運転への影響が多である。これらの負荷変動補償、消費電力平滑化、瞬時停電対策用に超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)が有用であると考えられる。国際的に見ても、稼働中の加速器の電磁石電源の更新においてエネルギー貯蔵装置を用いた負荷変動補償が検討されている。本稿では、筆者等の検討している J-PARC 用 SMES を軸に、これらの事例を概観し加速器電磁石への SMES の応用研究の開発状況を述べる。

2. J-PARC 加速器と電磁石電源

J-PARC (Japan Proton Acceleration Research Complex) の加速器施設は3つの加速器(リニアック、3GeV シンクロトロン(RCS)、50GeV シンクロトロン(50GeV-PS))から構成されており[1]、各加速器において世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成し、物質・生命科学、原子核素粒子、ニュートリノ、核変換の各実験施設に供給し、各種実験に供する。50GeV-PS は RCS からの 3 GeV のビームを入射し、50 GeV まで加速、減磁、を 2.8~3.6 秒で繰り返す。例えば、偏向電磁石のパラメータは、入射電流:202 A、最大電流:3015 A、磁石当たりのインダクタンス:104 mH、抵抗:45 mΩで、これが 96 台あり、6 台の電源で励磁される。有効電力は平均で 19.1 MW であるが、ピーク電力は 72.5 MW と-54.4 MW と大きな変動電力が電力系統との間でやり取りされるため、電力系統に擾乱が加わる。最大容量で運転した際には、許容値以上の擾乱が発生するために、何らかの電力負荷変動補償装置が必要となる。当初設計では可変速フライホイール(FW)装置を搭載することになっている[2]。図1に50GeV 励磁パターンを、図2に他の電磁石電源も含めた総合電力を 40 GeV、30 GeV 運転の場合を合わせて示す。

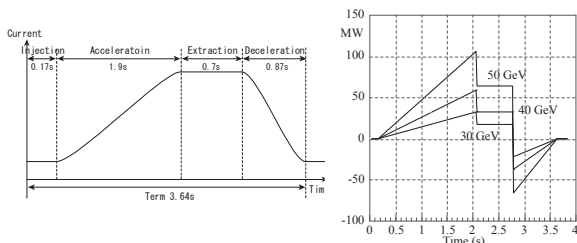


Fig.1 Magnetic field pattern of 50GeV operation.

Fig.2 The typical patterns of the active power

3. J-PARC 用 SMES の検討[3], [4]

40GeV までの運転であれば負荷変動補償装置がなくても電力系統に与える擾乱は許容量以下とされている。従って、負荷変動補償装置の設計にあたっては、50 GeV 運転時の変動電力を 40 GeV 運転時の電力変動分 100MW 以下に抑える

ようにすればよいと考えられる。すなわち 60MW を超える分を補償するとして、補償エネルギー量は約 30 MJ となる。補償装置として SMES を考える時、交流損失を考慮して SMES 容量の 30% を補償用に使うものとして、100 MJ の容量を持つコイルを考えればよい。接続方式としては、FW を置き換えた形での交流側接続と、直流系統に接続する方式が検討された。直流接続方式は、電力変換システムの容量を小さくできる点でメリットがあり、図3のように6つの各電源ユニットに SMES を接続する方式となる。補償対象となるのは偏向電磁石のみであるが、偏向電磁石電源の変動電力を補償すれば総合電力として変動が許容範囲内におさまると考えられる。

コイルとしては、ソレノイドで1ユニット4ポール構成(図4)として全体として6ユニット構成を検討した。1ユニットを 17MJ-10MW とし、6ユニットで 100MJ-55MW とした。

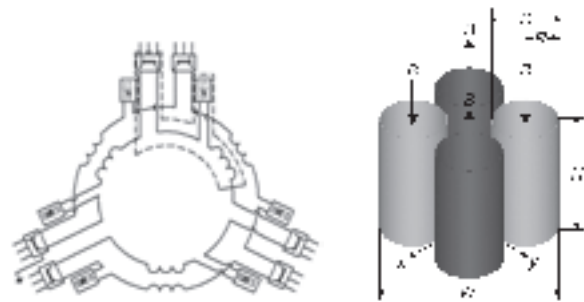


Fig.3 Six SMES configuration.

Fig.4 One unit four pole SMES.

4. 他の研究所、施設の状況

電源変動安定化のために従来の加速器では MG 発電機(BNL-AGS, CERN-PS 等)、あるいは無効電力補償装置(KEK-12GeV-PS, CERN-SPS, FNAL-Tevatron 等)が用いられていたが、これからの加速器ではエネルギー貯蔵装置が目ざされている。CERN-PS、BNL-AGS では老朽化した MG の更新案としてそれぞれ SMES や Capacitor が検討されている。FNAL や GSI の将来計画においても必要となると考えられる。また、小型医療用加速器においては省エネルギー電源の観点からも注目される。蓄積リングや衝突型加速器では瞬時停電補償としても有用であると考えられる。

5. まとめ

他に先駆けて J-PARC-50GeV-PS ではエネルギー貯蔵装置として当初設計の FW に変えて SMES の検討を行ってきた。国プロにおいて SMES の実績も上がってきており、加速器電源への SMES の応用が、負荷変動補償、省エネルギー電源、瞬時停電補償等において現実的に期待されている。

6. 参考文献

1. Accelerator Technical Design Report for J-PARC, KEK Report 2002-13/JAERI-Tech 2003-044/J-PARC 03-01.
2. T. Shintomi et al., IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 16, 2006, pp. 628-631
3. H. Sato et al., to be published in IEEE Transaction on Applied Superconductivity.

超電導バルク体と高磁場勾配超電導磁石間に働く浮上力緩和の測定

Measurements of time relaxation of levitation forces between bulk superconductors and superconducting coils with a high magnetic field gradient

竹内 宏次(芝浦工大); 長嶋 賢, 清野 寛(鉄道総研); 鈴木智之, 荒木 聡史(慶大); 坂井 直道(超電導工研); 村上 雅人(芝浦工大)
 TAKEUCHI Koji (SIT); NASHIMA Ken, SEINO Hiroshi(RTRI); SUZUKI Tomoyuki, ARAKI Satoshi(Keio Univ); SAKAI Naomichi(SRL); MURAKAMI Masato(SIT)
 E-mail: m20015@sic.shibaura-it.ac

1. はじめに

高温超電導体は産業応用への大きな可能性を有しており、バルク高温超電導体の応用の一つとしてフライホイール電力貯蔵装置が考えられている。

従来型の機械式軸受を用いたフライホイールでは回転摩擦によるエネルギー損失のために短時間の貯蔵しかできない。一方、軸受部にバルク超電導体を用いると摩擦がないため、長時間の貯蔵が可能となる。さらに、磁束源として超電導コイルを用いることで大きな載荷力を得ることができる。しかしながら、長時間利用では磁気緩和による載荷力の減少が生じる。よって、緩和メカニズムを解明し、それを抑制させる手法の開発が重要である。本研究では、磁場の強さが浮上力および磁気緩和に与える影響について報告する。

2. 実験方法

実験の概略をFig.1に示す。磁場を2.54Tに固定し、バルク体位置を移動させることにより、磁気力場を変化させた。また磁気力場を-38.1T²/mと固定し磁場を変化させる実験も行った。供試材として直径60mm、厚さ20mmのGd-Ba-Cu-Oバルク体を用いた。実験はバルク体を所定の位置に配置させ、77.3Kに冷却した後、超電導コイルを励磁し、上部に設置したロードセルにて浮上力を測定した。またバルク体表面にホール素子を6mm等間隔で一列に配置し、表面磁場変化の測定も行った。

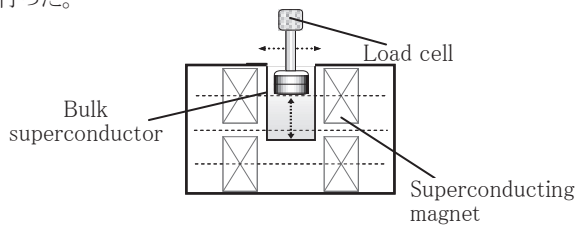


Fig.1 Schematic illustration of a force measurement system.

3. 実験結果

Table1に浮上力とその緩和結果を示す。どの条件下においても浮上力は時間経過に伴って減少している。ただし、条件により緩和率に違いが見られる。この浮上力緩和は磁場変化に大きく依存していることがわかる。

磁場一定下における表面磁場分布をFig.2に、磁気力場一定下における表面磁場分布をFig.3に示す。両条件ともに時間経過による中心部近傍での磁場に変化が見られた。この事は、時間経過によって生じる浮上力変化は磁場侵入によることを示唆している。

Table1

Magnetic force field(T ² /m)	Constant magnetic field (2.54T)			Constant magnetic force field (-38.1T ² /m)		
	Levitation force(N)	Relaxation rate(%)	Magnetic field(T)	Levitation force(N)	Relaxation rate(%)	
-25.4	909.3	16.6	1.77	2266.1	12.8	
-38.15	1488.8	20	2.54	1488.8	20	
-50.85	2093.2	22.5	3.26	965.4	32.7	

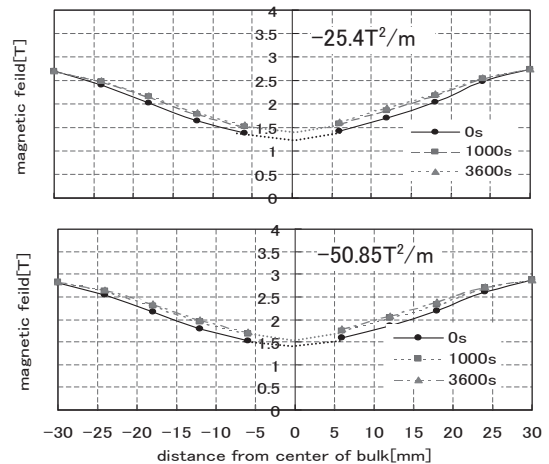


Fig.2 Change of surface magnetic field under constant magnetic field (2.54T).

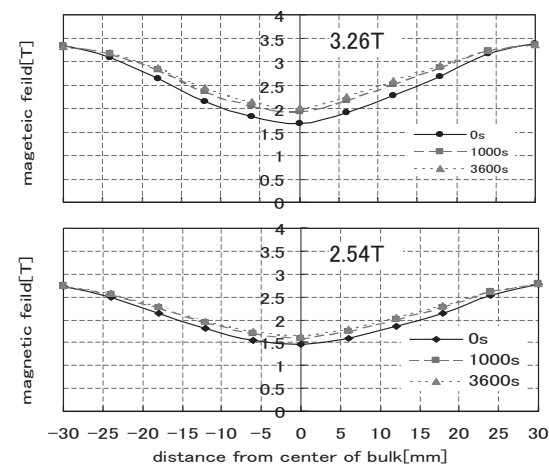


Fig.3 Change of surface magnetic field under constant magnetic force field (-38.1T²/m).

4. 結言

磁場および磁気力場一定という条件下において、浮上力緩和測定を行い、比較実験から以下の知見を得た。

緩和率は磁場に依存して大きくなった。大きな浮上力を得るには磁気力場を大きくする方が効果的であった。バルク体の表面磁場分布変化から磁場侵入が浮上力緩和の原因であることを明らかにした。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

- 長嶋 賢, 清野寛, 宮崎佳樹, 荒井有気, 坂井直道, 村上雅人: “超電導バルク体と超電導コイルを用いた磁気軸受の載荷力密度”, 鉄道総研報告 Vol.21, No.9, Sep(2007)
- 村上雅人: “高温超電導の材料科学”, 内田老鶴圃(1999)

10 フィラメント、20 フィラメント YBCO テープ線材の交流損失の温度スケールリング

Temperature scaling of ac loss in YBCO superconducting tapes with 10 filaments and 20 filaments

柳田 治寛, 末吉 貴洋, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九大);

齊藤 隆, 飯島 康裕(フジクラ);和泉 輝郎, 塩原 融(SRL);山田 穰(SRL 名古屋)

YANAGITA Haruo, SUEYOSHI Takahiro, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu University);

SAITO Takashi, IJIMA Yasuhiro (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuu (SRL); YAMADA Yutaka (SRL-NAGOYA)

E-mail : yanagita@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超電導線材を電力機器応用する場合、超電導巻線部において発生する交流損失は全熱負荷の大半を占めるため、これを見積もることは重要である。我々はこれまで、YBCO テープ線材の交流損失特性を評価し、温度スケールリング則が成立することを確認した。今回、低交流損失化を目指した10mm幅のYBCO テープ線材を10フィラメント及び20フィラメントに分割した試料(基板は10mm幅)について磁界印加角度90°の場合において、温度スケールリング則が成り立つのかどうかを調べた。

2. 実験

IBAD-PLD法により作製された10分割及び20分割YBCO線材と分割していないYBCO線材の試料をそれぞれ3枚積層して、鞍型ピックアップコイルに装着し、冷凍機による伝導冷却で35~77Kの範囲で、磁化及び交流損失を測定した。磁界は試料幅広面に対して垂直に印加した。

3. 測定結果

分割していないYBCO線材と10分割及び20分割YBCO線材の交流損失の測定結果をFig.1に示す。中心到達磁界以上において10分割及び20分割YBCO線材の交流損失は分割していないYBCO線材の交流損失の約1/10、1/20となり、分割による低交流損失化が実現できていることがわかる。中心到達磁界より十分大きな磁界振幅に対して測定した磁化の値は臨界電流 $I_c(B)$ に比例する。よって、 $I_c(B)$ は測定した磁化曲線から算出可能である。これまでに、無分割のYBCO線材の臨界電流特性は、各温度の零磁場の臨界電流(以下、 $I_c(0, T)$)で規格化することにより温度に関してスケールリングされ、また、交流損失も温度に関してスケールリングされることを確認している。そこで、Fig.1に示す10分割及び20分割試料についても交流損失を $I_c(0, T)$ の臨界電流で規格化してみた。結果をFig.2に示す。横軸は $I_c(0, T)$ 、縦軸は $I_c(0, T)$ の2乗値で規格化している。各温度における交流損失曲線が一つのマスターカーブに一致し、分割線材の交流損失が無加工線材と同様に温度でスケールリングされることを確認した。

4. まとめ

YBCO線材について、超伝導層をフィラメントに分割することによって、中心到達磁界より大きな磁界振幅において交流損失が分割数に比例して低減されることを確認した。また、無分割線材と同様に、分割して低交流損失化したYBCO線材についても、臨界電流値 $I_c(0, T)$ で規格化することにより、臨界電流、交流損失ともに温度に関してスケールリングされることを明らかにした。

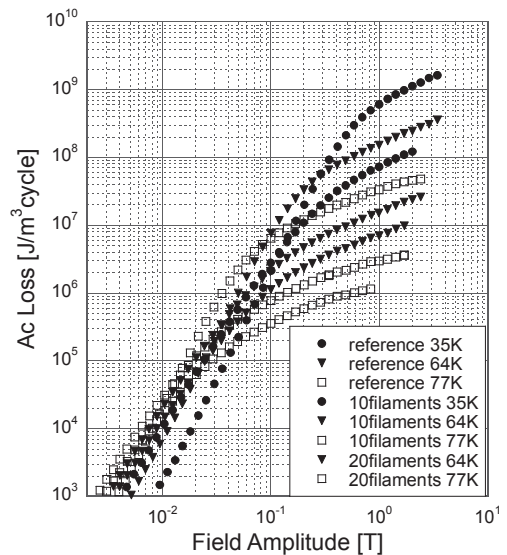


Fig.1 The ac loss of reference YBCO and 10filaments,20filaments YBCO

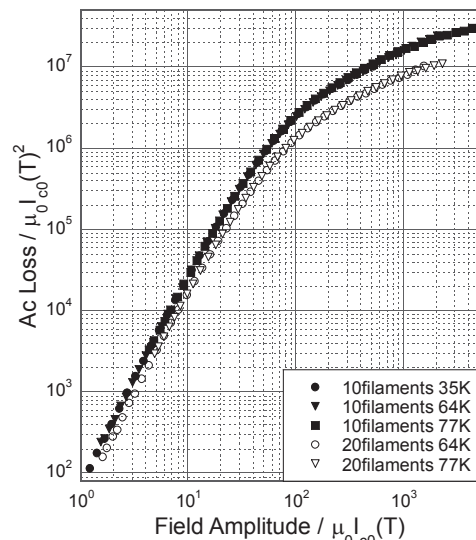


Fig.2 The normalized ac losses by $I_c(0, T)$

液体ヘリウム中での MgB₂ 線材の常伝導部伝播における熱的断熱層の影響

Influence of a thermal insulation on Normal-Zone-Propagation of MgB₂ wires in liquid helium

久保 輝朗, 中尾 彰浩, 松尾政晃, 佐藤誠樹, 柁川一弘, 船木和夫(九大);
田中 和英, 岡田 道哉(日立);熊倉 浩明(NIMS);林 秀美(九州電力)

KUBO Teruaki, NAKAO Akihiro, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ.);
TANAKA Kazuhide, OKADA Michiya (Hitachi Ltd.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS); HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Co., Inc.)
E-mail:kubo@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導機器の巻線がクエンチするような万が一の事故時に機器内の超伝導線の焼損を防ぐにはクエンチに至る機構(常伝導領域の伝播現象など)を詳細に把握することが重要である。MgB₂線材は臨界温度 T_c が 39K と高いため、幅広い温度領域(4.2K~20K 程度)での使用が期待されている。本研究では、これまでに、液体ヘリウム浸漬冷却中における MgB₂ 線材の常伝導部の伝播現象を観測し、液体ヘリウムの過渡的な冷却効果を取り入れた数値解析を行い、有効な冷却効果と伝播現象の関連性についての検討を行っている¹⁾。今回は熱的断熱層が常伝導部の伝播現象に及ぼす影響について、実験と解析の両面から議論する。

2. 常伝導伝播速度の測定

2.1) 試料

試料として直径 0.6mm の疎巻きコイル状線材を用いた。コイル径は 50mm、巻きピッチは 4mm とした。絶縁被覆はなく、Cu/Fe/MgB₂ の 3 層構成になっており、体積比率は 15/52/33 である。断面写真と諸元を Fig. 1 に示す。

2.2) 測定装置

試料には、ヒータ線と電圧リード線を取り付けた(Fig.2)。ヒータ線は 10mm 幅で取り付け、電圧リード線は、伝播現象への影響を抑えるために熱伝導率が小さなコンスタンタン線を用い、MgB₂ 線にはハンダによって接続した。その間隔は 10mm である。試料の中央部にヒータ線を巻き、上方向の巻線部には真空グリースを塗り、下方向には真空グリースは塗らず絶縁被覆がない状態で液体ヘリウムに浸漬冷却した。横磁界を印加し、一定電流を流した状態で、ヒータ(矩形波)により試料の一部を加熱してこの部分を常伝導に移させ、電圧リード線間の電圧信号を測定した(Fig.3)。これらの電圧波形の立ち上がりの時間差を t 、端子間距離を L とし、常伝導部の伝播速度 v を $v = L/t$ として求めた。

2.3) 測定結果

常伝導部の伝播速度の通電電流依存性を Fig.4 に示す。真空グリースを塗った部分の伝播速度(破線)は、そうでない部分の伝播速度(実線)と比べると速くなっている。これは、グリース層によって液体ヘリウムの直接的な冷却が抑えられたと考える。臨界電流値付近での伝播速度は数 10cm/s であり、通常の銅母材 NbTi 線材の伝播速度(数 10m/s)²⁾ と比べると2桁ほど低い値であった。これは、主に、線材の臨界温度の違いによると考えている。

3. まとめ

本研究では、Cu/Fe シースの MgB₂ 線材について常伝導伝播速度を測定した。今後は冷却条件を考慮した数値解析や熱的断熱層(今回はグリース層)が伝播現象に及ぼす影響を考慮した数値解析を行って、伝播機構を明らかにすると共に、簡便な伝播速度の表式についても検討していく。また将来 MgB₂ 線材が使用されると考えられる液体ヘリウム温度から 20K 程度までの幅広い温度領域において、線材の置かれた熱的環境下での常伝導伝播現象の解明も進めていく。

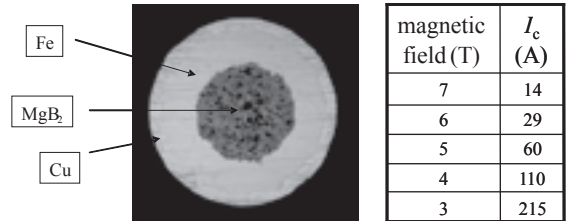


Fig.1 Cu/Fe sheath MgB₂ wire's data

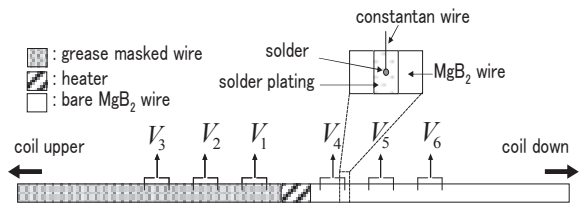


Fig.2 heater and voltage terminal's position

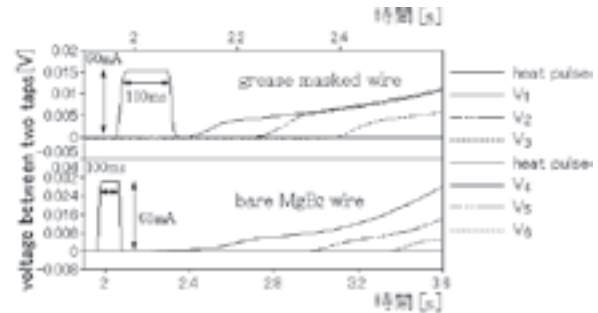


Fig.3 Normal-Zone-Propagation

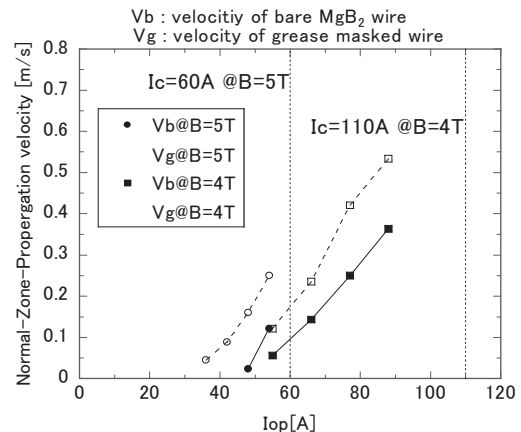


Fig.4 Normal-Zone-Propagation velocity

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(A)「電力装置用導体を目指した MgB₂ 新線材技術開発」(16206032)の支援の下に実施した。

参考文献

- 1) N. Maema et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.74 (2006) 65
- 2) K. Funaki et al.: Cryogenics, Vol.25 (1985) 139

MgB₂バルクの二段階熱処理と臨界電流密度

Two - stage Heat - treatment and Jock of Polycrystalline MgB₂

中山 資啓(日大理工), 前田穂 (Wollongong of University), 川上 隆輝, 久保田 洋二 (日大理工)
 NAKAYAMA Yoshihiro (CSTNU), MAEDA Minoru (UOW), KAWAKAMI Takateru, and KUBOTA Yoji (CSTNU)
 E - mail : yoshiknyoshikn@yahoo.co.jp

1. はじめに

これまでに我々は B 圧粉体と Mg を共に Ta 管に密封する方法で MgB₂ バルク体を作製し、その組織と J_Cの関係を研究してきた。高温と低温を組み合わせた 2 段階の熱処理を行うと、結晶性の異なる MgB₂ が生成され J_Cが向上することを明らかにした。Ta 管の体積と B 圧粉体の質量を一定にした時、MgB₂の化学量論比以上の Mg 量と共に試料密度が増加し、さらに J_Cも増加することが分かった。

今回、Ta 管に封入する際の Mg / B のモル比を一定とし、熱処理条件を変化させて試料 (MgB₂ バルク体) を作製した。これらの試料で J_Cと熱処理条件及び交流帯磁率の関係を系統的に調べたのでその結果を報告する。

2. 実験

用いた試薬は Mg (2~3 mm, 3 N) と B (<1 μm, 3 N) である。試料を作製する時、試薬の Mg には MgO の生成を少なくするため、粉末よりも塊を選択した。

まず、9 ton の加重で B 粉末を短冊状 (20 mm × 4 mm × 0.5 mm) に圧粉成型した。次にモル比が Mg : B = 1 : 1 となるように、この圧粉体と Mg を秤量し、これらを Ta 管に入れ、Ar ガス中で両端を溶接密封した。この Ta 管を石英管に真空封入し、2 段階の反応熱処理を加えた。熱処理条件は、1000 °C ~ 1200 °C - 0.1 時間 (1 段階目) を加えた後に、660 °C - 6 ~ 384 時間 (2 段階目) を行った。その後、余分な Mg を取り除くために、Ta 管を取り出し、それに穴を開け、再び石英管に真空封入し、680 °C - 0.5 時間以上の熱処理を加え、多結晶体を得た。

試料の組成と磁化特性を XRD と SQUID で調べ、J_Cを磁化曲線から Bean モデルを用いて算出した。

3. 実験結果及び考察

XRD パターンより、全ての試料はほぼ単層の MgB₂ であったが、非常に少ない不純物として MgO が観測された。また、Mg の沸点は 1090 °C であり、それより大幅に高い 1200 °C で熱処理した試料では B₄Mg が観測された。

Fig. 1 に交流磁場 1 μT, 直流磁場 0 T, 周波数 76.97 Hz での交流帯磁率対温度の図を示す。Fig. 1 の上図より、1 段階目を 1200 °C で熱処理した試料は、39.4 K 付近で超伝導転移を起こし、他の試料よりも T_Cが高いことが分かる。さらに、この試料では下図の虚数部には鋭い 2 段のピークが観測され、2 種類の MgB₂ 結晶粒が生成されていることを示している。

Fig. 2 に温度 20 K での J_C 対直流磁場の図を示す。Mg の沸点よりわずかに高い熱処理温度 1100 °C の試料は最も高い J_Cを示している。一方、1000 °C の試料の J_Cは上記

の試料よりわずかに低い、1200 °C の試料の約 2 倍も大きくなっている。

実験結果より 1100 °C で熱処理した試料の J_Cは、38.5 K 付近で超伝導転移した MgB₂ 結晶粒が増加したために向上したと考えられる。

当日は実験の詳細な検討を報告する。

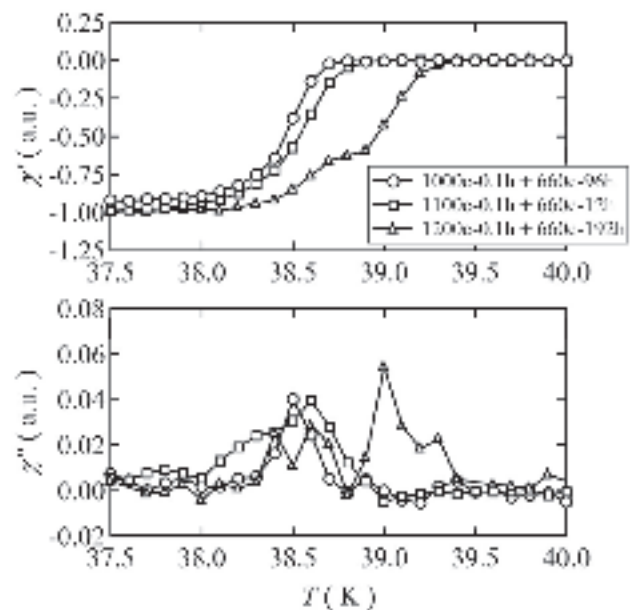


Fig. 1 Imaginary component and real component of ac susceptibility with $f = 76.97\text{Hz}$, $\mu_0 H_{ac} = 1\mu\text{T}$ and $\mu_0 H_{dc} = 0\text{T}$.

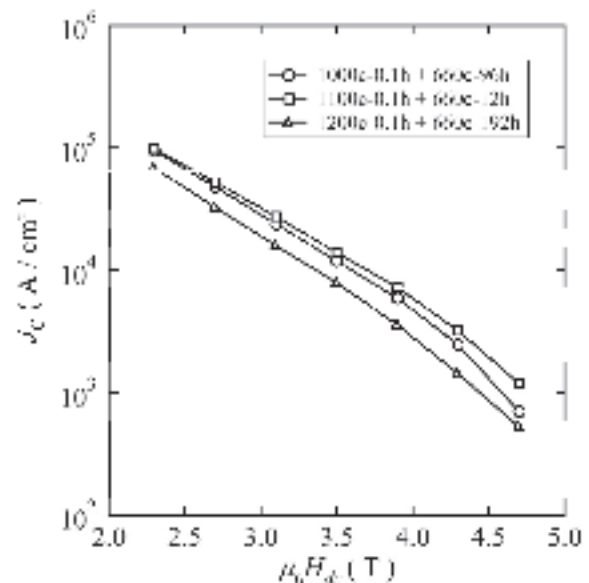


Fig. 2 Critical current densities of MgB₂ samples at 20 K as a function of the applied magnetic field.

Ex-situ 線材用 MgB₂ 粉体の作製指針

Fabrication of MgB₂ powder for establishing the guideline to prepare the starting powder of ex-situ PIT technique

中根 茂行, 高橋 健一郎, 黒田 恒生, 熊倉 浩明 (物質・材料研究機構)

Takayuki Nakane, Kenichiro Takahashi, Tsuneo Kuroda, Hiroaki Kumakura (National Institute of Materials Science)

E-mail: NAKANE.Takayuki@nims.go.jp

1. はじめに

PIT 法で作製する MgB₂ 線材のうち、工業的な面で魅力的な要素が多い ex-situ 線材は、一般に in-situ 線材より J_c が低いと(特に高磁場下で)目されていた。これに対し我々は、両者の比較が、純粋に in-situ 法と ex-situ 法という作製手法の違いを比較したものではなく、in-situ 法で作製する MgB₂ コアと ex-situ 法で作製する MgB₂ 粉の品質の比較を含んでいる点を指摘し、更に、MgB₂ の超伝導特性を同等にして比較した場合、ex-situ 線材と in-situ 線材の高磁場下の J_c - B 特性が同等になることを明らかにした。一連の研究は、高性能 ex-situ 線材の作製が可能であることを実証するものであり、今後の課題は、粉体作製に対する作製指針の確立と、容易に大量生産が可能な粉体作製技術を提案することにある。この課題に対し我々は、まず、高性能な ex-situ 線材を得るための MgB₂ 粉体の作製指針を明らかにすることを目的に研究を行い、前回、MgB₂ 粉体を作製する際には、その原料粉を 2.5 GPa 程度の高圧力で押し固めることが重要である旨を報告した。しかし、その際には、この圧粉効果が何故、ex-situ 線材の J_c - B 特性の向上に有効であるのかが不明だった。

そこで、高圧力で押し固めた原料粉を焼成して得られる MgB₂ を出発原料に使用すると J_c - B 特性の優れた ex-situ 線材が作製できる、その原因について研究を行った。

2. 実験方法

MgB₂ 粉体の原料粉は、MgH₂ とアモルファス B で、これらを 1:2 の割合で混合したものを利用した。まず、混合粉末を Fe 管に圧力を加えて充填し、酸化を極力抑えながら Ar 気流中 600 度 100 時間の条件で熱処理を施して MgB₂ バルク体を得る。次に、このバルク体を粉碎して MgB₂ 粉体にし、それを Fe 管に詰めて PIT 法で伸延、圧延することで ex-situ 線材にした。

線材の J_c - B 特性や粒界結合性を議論するため、直流四端子法で電気抵抗測定を行った。また、試料の組織観察及び断面積の測定には FE-SEM を用いた。その他、SQUID 磁束計による磁化測定や、X 線回折法による構造評価も行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 は、異なる圧力(0.5GPa, 2.5GPa)で押し固めた原料粉から作製した MgB₂ を出発原料とする ex-situ 線材の J_c - B 特性をプロットしたものである。原料粉の充填圧力の増加は、ex-situ 線材の高性能化に有効であることが分かる。次に、2.5 GPa で押し固めた圧粉体から作った MgB₂ 粉体と、0.5 GPa で押し固めた圧粉体から作った MgB₂ 粉体を原料

粉とする ex-situ 線材の超伝導コアの電気抵抗率の温度依存性を Fig. 2 に示す。2.5 GPa の試料の方が、低温側での電気抵抗率の減少が大きいが判る。RRR 値も、0.5 GPa の試料が 1.21、2.5 GPa の試料が 1.36 で、2.5 GPa の試料の方が優れた粒界結合性を有していることを示唆している。これらの結果から、ex-situ 線材の出発原料である MgB₂ の作製時にその原料粉を高圧力で押し固めることは、最終的に得られる線材の粒界結合性の向上に繋がり、これが線材の J_c - B 特性を向上させるということが判った。

本研究は、文科省の科研費(40354302)の助成及び池谷科学技術振興財団助成金(0181130-A)を得ています。

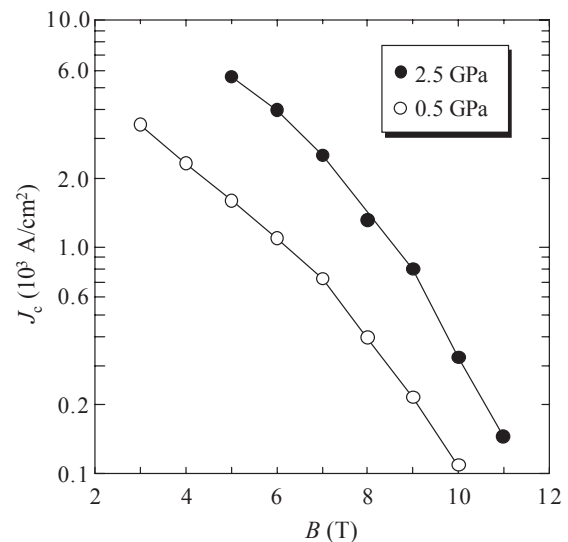


Fig. 1 J_c - B performance of ex-situ MgB₂ tapes fabricated by using the powder of ground bulks. The bulks are sintered pellets pressurized at 0.5 GPa or 2.5 GPa.

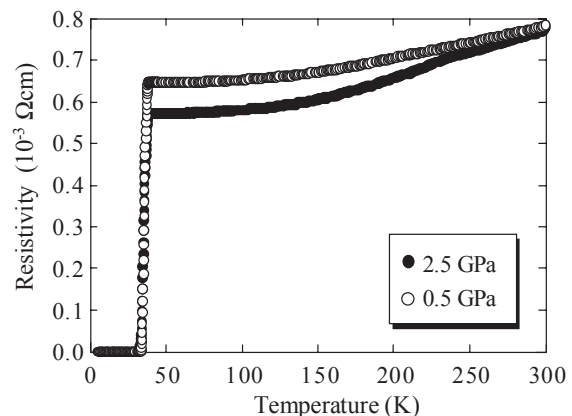


Fig. 2 Temperature dependence of the electrical resistivity for core of ex-situ MgB₂ tapes fabricated by using the powder of ground bulks. The bulks are sintered pellets pressurized at 0.5 GPa or 2.5 GPa.

化学処理した粉を用いて作製した ex-situ 法 MgB₂ 線材の 粒間結合と臨界電流密度

Grain coupling and critical current density in ex-situ processed MgB₂ tapes using chemically treated powder

藤井 宏樹, 戸叶 一正, 熊倉 浩明, 小澤 清 (NIMS)

FUJII Hiroki, TOGANNO Kazumasa, KUMAKURA Hiroaki, OZAWA Kiyoshi (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

1. 序

MgB₂ 線材は原材料費が安価、軽量などの利点があり、Nb-Ti に替わる材料として、あるいは冷凍機冷却下での使用が可能な材料として期待されている。線材の作製法として一般的な powder-in-tube(PIT)法において、ex-situ 法に用いる MgB₂ 粉を予め化学溶液中で含浸処理すると、結晶粒が微細化し、 J_c 特性が向上する。本研究では種々の溶液に含浸した粉を用いて線材作製を行い、その特性を調べた。また、幾つかの処理粉については SiC 添加も行った。

2. 実験

充填粉には市販の MgB₂ 粉を用いた。まず 400mesh の篩に掛け、粗大粒子を取り除いた(A)。これらの粉末を、弱酸の安息香酸ベンゼン溶液(B)及び安息香酸シクロヘキサン溶液(C)、あるいは強酸のサリチル酸アセトニトリル溶液(D)に含浸した。これら 4 種の粉末を Fe 管に詰め、溝ロール及び平ロールでテープ形状に加工した(線材 A-D)。こうして得られた線材試料を Ar ガス気流中 950°C で 1 時間加熱し、評価を行った。また、粉末 A と C にはそれぞれ 10mol% の SiC (粒径 20nm) 添加を行い、同様に線材を作製して評価を行った(E 及び F)。

3. 結果

各線材試料において、MgB₂ の 110XRD ピークプロファイルと比較すると、A に対して、B-F ではピーク位置が高角度側にシフトしており、 a 軸長が減少していた。これらのシフト量は全試料とも $2\theta=0.1^\circ$ 程度であった。MgB₂ 焼結時に、結晶粒表面に残存吸着していた有機溶媒や SiC との反応によって、炭素置換が起こったものと考えられる。

これらの線材の磁化曲線を Fig.1 に示す。線材 A と比較して、B-D では磁化曲線に kink が見られたり、遷移幅が大きくなったりしており、弱結合が示唆された。一方、SiC 添加によって、これらの kink の解消や、遷移幅の減少が見られ、弱結合の改善されたと考えられる。これに対応した結果が交流磁化率の振幅依存性の測定からも得られた。

Fig. 2 に各線材の transport $J_c@4.2K$ を示す。線材 A の 10T での J_c は 400A/cm² 程度であったのに対し、線材 B、C ではそれぞれ 2.2 及び 4.4kA/cm² 程度であった。この J_c 向上は、化学溶液処理による結晶粒の微細化、即ち粒界面積の増加によるピン止め点の増加と、炭素置換による H_{c2} の向上のためであると考えられる。一方、D では $I_c=0A$ であった。また、SiC 添加により、E 及び F で J_c の向上が見られた。

含浸溶液による J_c の差は結晶粒間結合によるものであるが、これは溶媒の安定性に起因するものと考えられる。ベンゼンやアセトニトリルは共役二重結合及び三重結合を有するのに対し、シクロヘキサンは単結合のみで構成されており、分解が速やかに起こるものと考えられる。即ち、残留溶媒の影響を受けにくいものと考えられる。

SiC 添加による J_c の改善は、炭素置換による H_{c2} の向上や粒間結合の改善によるものであるが、粒間結合の改善は、MgB₂ 焼結時に SiC が触媒のような働きをしているためだと思われる。

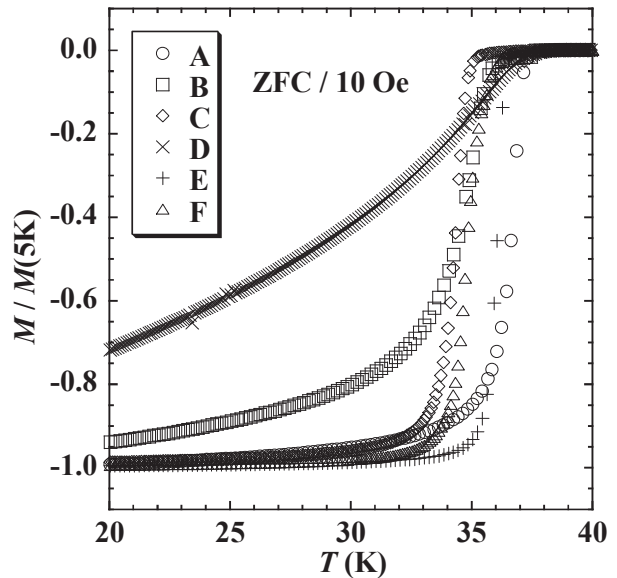


Fig. 1. Temperature dependence of DC magnetization curves of Fe-sheathed MgB₂ tapes. The magnetization M is normalized to that measured at 5 K, $M(5K)$, for each tape. The measurements were carried out in a magnetic field of 10 Oe in the zero-field cooled mode (ZFC).

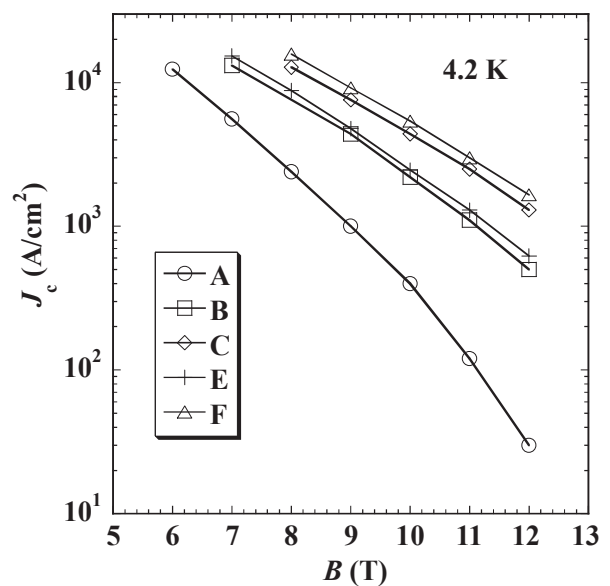


Fig. 2. Transport J_c as a function of magnetic field for the Fe-sheathed MgB₂ tapes. The measurements were carried out at 4.2 K in fields applied parallel to the tape surface.

In-situ PIT 法二段階熱処理により作製したBリッチ MgB₂ テープの SiC 添加による特性向上

Enhanced J_c of B-rich and SiC doped MgB₂ tapes fabricated by a modified in-situ PIT method with two stage heat treatment

寺澤 一, 富岡 寛, 三浦 大介, 伊藤 大佐 (首都大)

TERASAWA Hajime, TOMIOKA Hiroshi, MIURA Osuke, ITO Daisuke (Tokyo Metropolitan University)

E-mail: haz46700@yahoo.co.jp

1. はじめに

MgB₂ は高い臨界温度 39K を持ち、高温におけるピンニングパラメータが大きいので、小型冷凍機や液体水素で冷却可能な 20K 付近での応用に有望な素材である。我々は熱処理と圧延を組み合わせた二段階熱処理法により、高密度な線材が得られることを報告した[1,2]。さらに同線材に SiC 添加や B リッチ組成を使用することにより高 J_c を得ることに成功している。今回、我々は Mg:B の組成比を変化させ、更に SiC を添加した試料を作成してその特性を評価した。またプレ生成熱処理と最終熱処理の温度を変化させて、 J_c -B 特性依存性も調査した。

2. 実験方法

外径 6.00mm, 肉厚 1.00mm の SUS316 チューブに Mg(99.9%, 200mesh) と B(99%, 300mesh) 粉を混合し、その後 SiC を添加し混合する。その混合粉を密に充填し、適当なサイズまで溝ロール圧延をした後、プレ生成熱処理を行った。さらに、それを再度溝ロールと平ロールで圧延し、厚さ 0.5mm 程度のテープ線材に加工した。出来上がったテープ線材に、Ar 雰囲気中で最終熱処理を施し、MgB₂ 線材を作製した。

B リッチ SiC 添加試料は、Mg:B の組成比が 28:72 で SiC を 0, 2.5, 5, 7.5, 10wt% 添加した試料を作成、また Mg:B の組成比が 26:74, 28:72, 31:69, 1:2, 36:64 で SiC を 5wt% 添加した試料を作成した。上記の試料の熱処理はプレ生成熱処理 800 度 5 時間、最終熱処理 800 度 1 時間で作製した。また Mg:B 組成比 26:74, SiC を 5wt% 添加した試料をプレ生成熱処理が 700, 750, 800 度 5 時間、最終熱処理が 600, 700, 750, 800 度 1 時間の計 12 個の試料を作成し、熱処理の最適化を行った。

評価方法は作製したテープ線材を適当な長さに切断し、磁化の磁場依存性を SQUID により作製した。また磁化から臨界電流モデルにより、 J_c を算出した。更に SEM 解析によって結晶の観察を行った。

3. 実験結果

図 1 に 20K での SiC の添加量を変化させた試料の J_c -B 特性を示す。低磁場では SiC2.5wt% の試料が一番高いが、高磁場では SiC5wt% の試料が最大値 3T で $1.8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ だった。低磁場での J_c は少量の SiC 添加した試料でわずかに増加した。一方で高磁場での J_c は SiC 添加によって明らかに増加した。SiC が増え過ぎると非超電導物質の拡大により特性は低下していると考えられる。以上から SiC 添加量は 5wt% が最適であると考えられる。

図 2 に 20K での Mg:B の組成比を変化させた試料の J_c -B 特性を示す。低磁場では組成比 1:2 の試料が 0T で $1.05 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ と高かった。高磁場側では組成比 26:74 の試料と 1:2 の試料がほぼ同程度の値を取っている。B リッチ SiC 添加した試料は逆に J_c が下がってしまったので改善が求められる。

図 3 に 20K での熱処理を変化させた試料の J_c -B 特性を示す。 J_c はプレヒート温度が低いと増加し、最終熱処理温度が高いと増加した。最高の J_c はプレヒート 700°C 5 時間、最終熱処理 800°C 1 時間の試料で 0T で $8.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ となった。

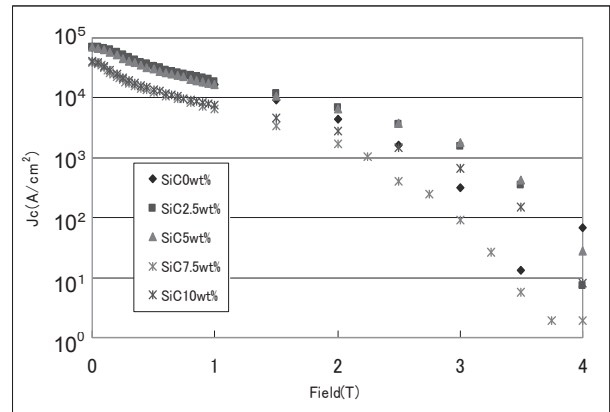


Figure 1. J_c -B properties at 20K for various SiC doped specimens

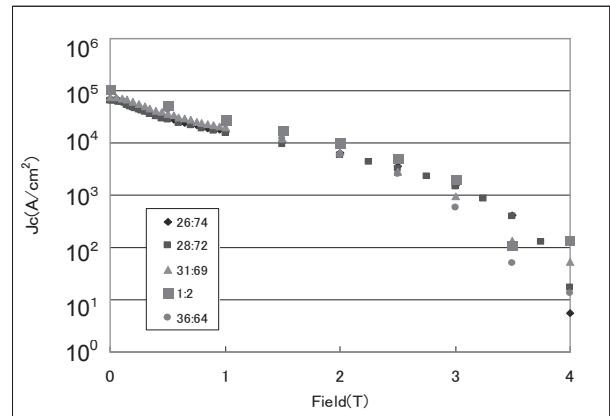


Figure 2. Effect of B composition ratio on J_c -B properties at 20K for 5wt% SiC doped specimens.

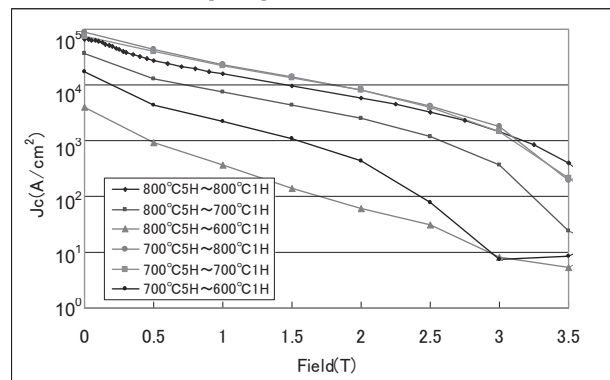


Figure 3. The effect of various heat treatment conditions on J_c -B properties at 20K

参考文献

- [1] 佐伯ほか“Mg フレークを用いた In-situ 法 MgB₂ テープ線材の特性(2)”, 2005 年秋季低温工学・超電導学会 1E-p13
- [2] 佐伯ほか“Mg フレークを用いた In-situ 法 MgB₂ テープ線材の特性(3)”, 2006 年春季低温工学・超電導学会 3P-a22

低温拡散により作製した MgB₂ 超伝導線材の高温における超伝導特性

Superconducting property in high temperature of the MgB₂ superconducting wire synthesized with low temperature diffusion process

菱沼 良光, 山田 修一 (NIFS); 菊池 章弘, 竹内 孝夫 (NIMS)

HISHINUMA Yoshimitsu, YAMADA Shuichi (NIFS); KIKUCHI Akihiro, TAKEUCHI Takao (NIMS)

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

我々は、MgB₂ 超伝導線材を「低放射化超伝導線材」と捉えて将来の核融合炉応用に向けた特性改善を行っている。最近、微量 Mg₂Cu 化合物を添加した 100m 級の MgB₂/Ta/Cu 単芯線材を試作し、さらにそれを用いて小型ソレノイドコイルの試作及び評価を行い、良好な試験結果について報告した [1,2]。

本研究では、MgB₂ の最大の特徴である 20K での応用を考慮し、MgB₂/Ta/Cu 単芯線材における超伝導特性の環境温度及び磁場依存性を検討した。更に、20K で作動する大容量超伝導体への検討項目の 1 つとして高温下での超伝導特性における曲げ歪依存性について調査した。

2. 実験方法

Fig.1 に示す断面構造を持つ MgB₂/Ta/Cu 単芯長尺線材を最適条件であるアルゴン雰囲気中 475°C×200h の熱処理を行った。MgB₂ の熱処理では Mg と銅が著しく反応し特性が劣化するため、拡散バリア材が必要となる。また、MgB₂ は中性子による誘導放射化の影響が少ないとの報告があり [3]、Ta も低誘導放射化材料であるためバリア材として Ta を採用した。同時に高強度材である為、補強材としての狙いもある。

高温下での超伝導特性の評価は、NIMS 強磁場センターの温度可変 VTI 装備の 15T 超伝導スプリットマグネットを用いた。測定は 4.2K から開始し、10K、15K、20K と昇温しながら行い、VTI 内の温度はガス冷却を基本とし、ニードルバルブの開度とヒーターで制御している。次に、曲げ歪依存性については、曲げ加工前 I_c 値 (I_{c0}) を基準とし、曲げ加工後 I_c (I_{cε}) における歪依存性を調査した。線材への曲げ歪は独自作製した曲げ治具に沿わせることで印加した。

3. 実験結果

Fig.2 に各環境温度における I_c 特性の磁場依存性を示す。比較のため、LHe 浸漬の特性も測定した。4.2K での測定において、ガス冷却と LHe 冷却における特性は良く一致しており、VTI による温度制溝は十分であることが示唆された。VTI 温度制御のもと、20K までの I_c 特性を調査した結果、環境温度の上昇に伴って、I_c 値は減少する傾向が見られた。また、10K 以上の環境温度において、低磁場領域で I_c 特性における温度

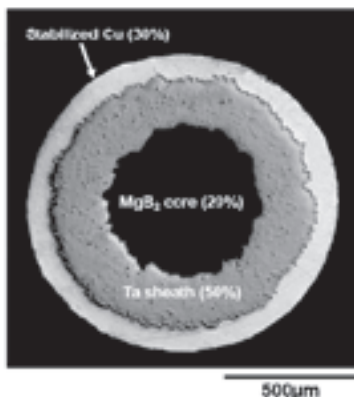


Fig.1 Cross-section of 100 m class MgB₂/Ta/Cu mono-cored-wire

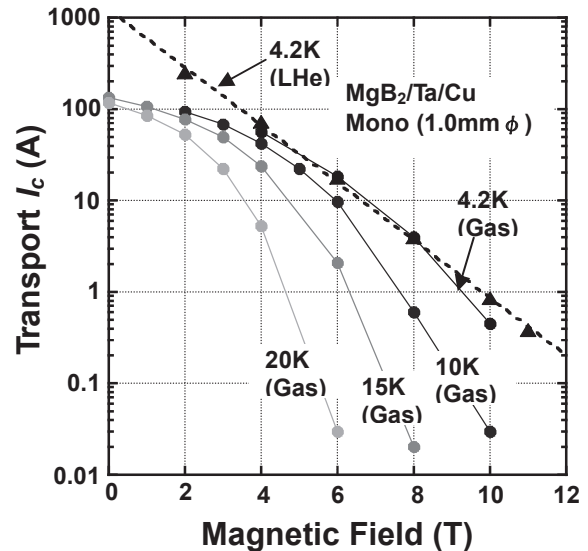


Fig.2 I_c dependence of temperature in the MgB₂/Ta/Cu mono-cored-wire

Table.1 I_c dependence of bending strain (@20K,1T)

Strain ε (%)	I _{c0} (A)	I _{cε} (A)	I _{cε} /I _{c0}
0	76.81	-----	1.000
0.333	-----	80.36	1.046
0.500	-----	70.78	0.921
0.769	-----	20.56	0.268
2.000	-----	16.06	0.209

$$\varepsilon = D_{\text{wire}} / 2R \quad (D: \text{線材直径}(1.00\text{mm}), R: \text{曲げ径})$$

依存性が小さくなる傾向が見られたが、これは I_c の増大に伴って、VTI 内への熱侵入が大きくなり VTI 内の温度が設定より高くなるためと考えている。低磁場領域における特性は Fig.2 に示す特性よりも高いと予想できる。Table.1 に 20K,1T における I_c 特性の曲げ歪依存性を示す。曲げ歪が 0.5%程度まで顕著な I_c 特性の劣化が見られず、少なくとも 0.5%程度まで許容できる線材であることが示唆された。

謝 辞

本研究は NEDO 産業技術研究助成事業(02A25019a)、NIFS 一般共同研究(NIFS06KFRF026、NIFS07KKMF003)、文科省科学研究費補助金(#18760643)及び文科省原子力試験研究費により行われた。

参考文献

1. A. Kikuchi, Y. Hishinuma and T. Takeuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.39.
2. Y. Hishinuma, et al.: Superconductor Science and Technology, Vol. 20 (2007) p.1178-p.1183.
3. T. Noda et al.: Journal of Nuclear Materials, Vol. 329-333, part.2 (2004) p.1590-p.1593.

飽和超流動ヘリウムを用いた直線型粒子加速器の冷却に関する基礎研究

Basic Study on Cooling a Linear Accelerator with Saturated HeII

太田 嘉穂, 岡村 哲至(東工大); 高橋 政彦, 栗山 透(東芝)

OTA Yoshiho, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); TAKAHASHI Masahiko, KURIYAMA Toru (TOSHIBA)

E-mail:m06y_oota@es.titech.ac.jp

1. はじめに

超伝導空洞は冷却温度を2Kまで下げると損失が減少し、高い電界強度を得られる。そのため高エネルギーの直線型粒子加速器では2K冷却超伝導空洞が用いられている。超伝導空洞は非常に長い配管を通して分配される飽和超流動ヘリウムにより冷却される。この長距離配管内部では圧力損失によって液面に高低差ができ、場合によっては液体ヘリウムの流れを阻害する可能性がある。そこで将来の超流動冷却システムを念頭において、長距離超流動ヘリウム冷却管内の圧力分布について数値解析を行った。

2. 解析で用いたモデル

Fig.1 に解析に使用したモデルを示す。加速器の超流動冷却システムは超伝導空洞を冷却するための二相流配管、蒸発したヘリウムガスが通るガス戻り配管、超流動ヘリウムを供給するJT弁により構成される。Fig.1 はユニットと呼ばれる超流動冷却システムにおける最大の構成単位であり、1つのガス戻り配管を共有する。1ユニットは12のストリングと呼ばれる部分で構成され、JT弁と二相流配管はストリング毎に独立して取り付けられている。また1ストリングは12のモジュールで構成され、二相流配管とガス戻り配管はモジュール毎に連結されている。本計算では、まずモジュールについての計算を行い、ストリング、ユニットへと拡張することで、加速器全体の冷却特性を評価した。計算条件としては二相流配管の長さを1728m、内径を76mm、ガス戻り配管の内径を300mmとし、超伝導空洞からの発熱量は一律に1.35W/mとした。

3. 数値解析

数値解析では配管内を二相流状態の飽和超流動ヘリウムとヘリウムガスが流れるものとする。また液相・気相ともに一次元モデルで近似し、定常飽和状態として計算を行った。境界条件としては片側の端に温度を与え、両端は断熱条件とした。液相に関して基礎方程式は以下のようなになる[1][2]。

連続の式

$$\frac{d}{dx}(\rho_l A_l v_l) = -m_{gl}$$

全体の運動量保存の式

$$0 = -\frac{dP}{dx} - \frac{\tau_l S_l}{A_l} + \frac{\tau_g S_g}{A_g} - \frac{m_{gl}(v_g - v_l)}{A_l} - \frac{d}{dx}(\rho_n v_n^2 + \rho_s v_s^2) - \rho_l g \sin \beta - \rho_l g \cos \beta \frac{dH}{dx}$$

超流動成分の運動量保存の式

$$0 = s_l \frac{dT}{dx} - \frac{1}{\rho_l} \frac{dP}{dx} + A_{GM} \rho_n (v_n - v_s)^3 - v_s \frac{dv_s}{dx} + \frac{\rho_n}{\rho_l} (v_n - v_s) \left(\frac{dv_s}{dx} + \frac{dv_n}{dx} \right) - g \sin \beta - g \cos \beta \frac{dH}{dx}$$

エネルギー保存式

$$0 = -A_l \rho_l c_p v_l \frac{dT}{dx} + A_l \frac{d}{dx} \left\{ f(T) \frac{1}{3} \left(\frac{dT}{dx} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} + Q - l m_{gl}$$

気相に関しては連続の式と運動量保存の式を用いた。ここでf(T)はヘリウムの熱輸送関数、Qは超伝導空洞からの発熱量とする。

4. 結果と考察

Fig.2に熱負荷を加えたときの二相流配管内の圧力を示す。配管長さは数キロメートルに及ぶが、圧力損失は約10Paであることがわかる。Fig.3に二相流配管内の液面高さを示す。二相流配管内の圧力損失のために液面差が生じ、1ユニットにおいては最大約2mmの液面差になる。二相流配管の直径が76mmであることを考慮すると、この液面差は小さく、液面差が直接的な原因となって加速器の冷却が不十分になることはないと考えられる。

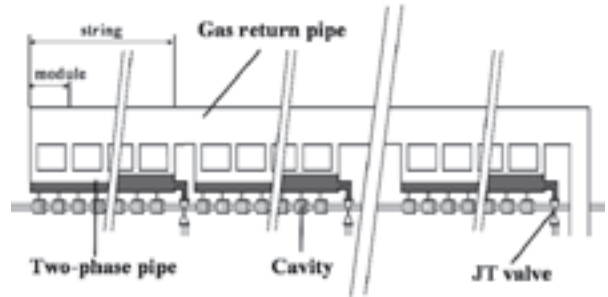


Fig.1 Schematic of one unit

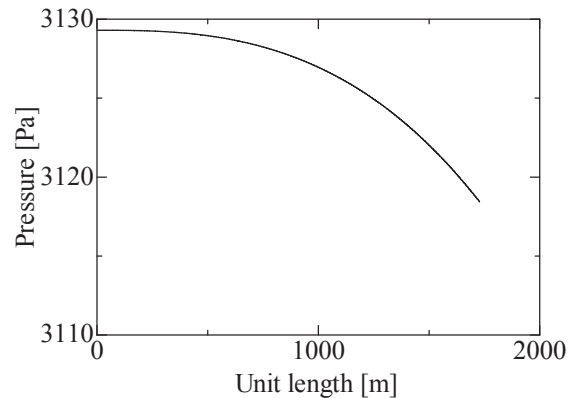


Fig.2 Pressure vs. Unit length

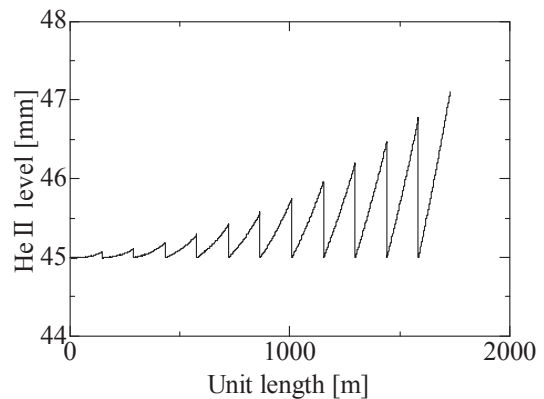


Fig.3 He II level vs. Unit length

参考文献

1. L. Grimaud, et al.: Cryogenics, Vol. 37 (1997) p.739
2. Y. Xiang, et al.: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 45 (2000) p.1001

1K 以下における比熱測定

Specific heat measurements below 1K

大島茉莉子、淀裕行、赤塚智紀、大西孝志、堀 純也、片桐政憲、藤井佳子 (岡山理大)
 OHSHIMA Mariko, YODO Hiroyuki, AKATSUKA Tomonori, OHNISHI Takashi, HORI Jun'ya,
 KATAGIRI Masanori, FUJII Yoshiko (OUS)
 E-mail:s07pm16yh @std.ous.ac.jp

1. はじめに

カルコゲン化合物 $A_xV_6S_8$ は Nb_3Te_4 構造を有し、V-V ジグザグ鎖が c 軸方向に並んだ擬一次元化合物である。A=In, Tl の粉末試料で交流磁化率測定を行ったところ、二段の変化を示し、超伝導に転移した。これらの物質の T_c は約 3K から 1K である。超伝導転移の振る舞いを明らかにするため、熱緩和法により約 0.2K までの測定を行っている。ここでは、小さな熱容量測定における留意点について述べる。

2. 測定セルと熱浴

低温での熱容量測定において、①測定セルにおける試料、温度計、ヒーターの熱接触を良くすると共に、アデンダの熱容量を試料の熱容量に対して 1 桁以上小さくすること②測定セルと熱浴を結ぶ熱抵抗線以外から測定セルへの熱の出入りができるだけ小さくすること③熱浴は十分な熱容量をもつように各部の熱接触を良くすることが重要である。

Fig.1.に全体の構造を示す。Fig.2.には測定セルを示す。温度計には小型の RuO_2 を、ヒーターには歪みゲージ(フィルム状抵抗体)を用いた。試料を 2 枚の銀箔で挟み、室温硬化性の銀ペーストで固定した。下側の銀箔とヒーターの間、そして上側の銀箔と温度計の間は絶縁のためにたばこ紙を挟み、GE ワニスで固定した。温度計およびヒーターのリード線には Nb-Ti 超伝導線を使用し、ヒーター用リード線で測定セルの支持を行った。測定セルと熱浴(希釈冷凍機混合室)とを繋ぐ熱抵抗線には白金線 ($\phi 20 \mu m$ 、純度 99.98%)を使用し、セル側は銅箔を銀ペーストで固定し、熱浴側は薄い銅板を銀ペーストで固定した後ネジ止めを行った。熱浴側の熱抵抗を低減するため、混合室への支柱はできるだけ一体構造とした。

3. 測定結果

Fig.3.に白金線の熱伝導率の温度変化と、アデンダの熱容量の温度変化を示す。学会では、銅の熱容量測定結果を基に、熱容量測定の精度について議論する。

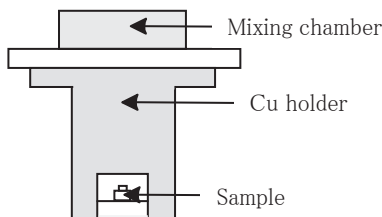


Fig.1 Arrangement of a sample cell.

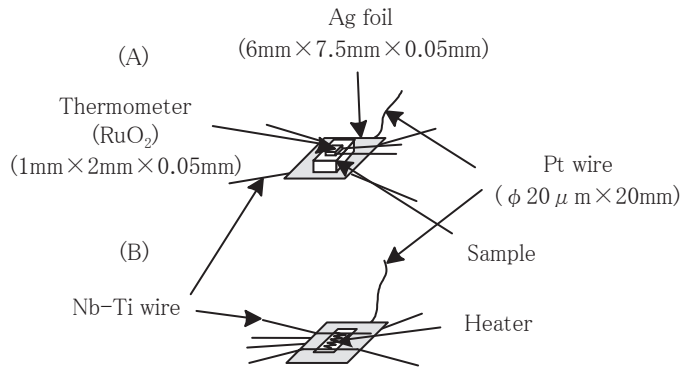


Fig.2 Schematic drawing of a sample cell. (A) Upper side. (B) Under side.

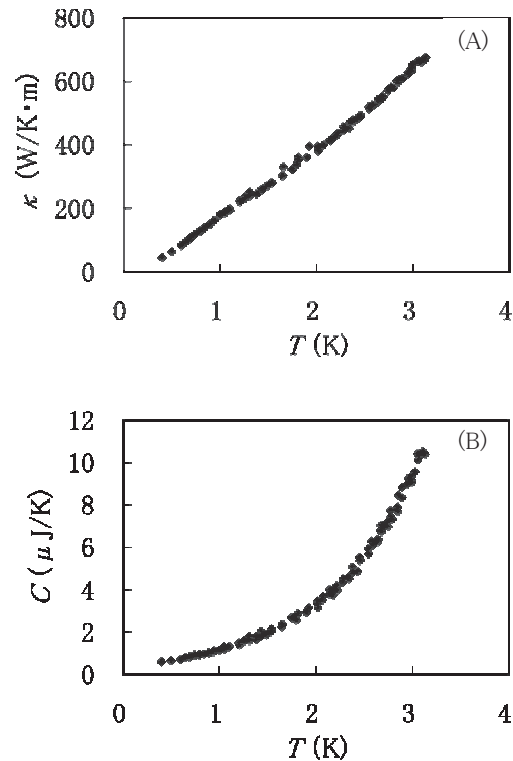


Fig.3 (A) Thermal conductivity κ of a Pt wire. (B) Heat capacity C of an addenda.

水素含有金属のヤング率の温度依存性

Temperature Dependence of Young's Modulus in Metal diffuses hydrogen

重松 利信, 渡辺 謙一郎, 西元 琢郎, 小野 文慈 (佐世保高専), 河江達也, 橋爪健一 (九大)

SHIGEMATSU Toshinobu, WATANABE Kenichirou, NISHIMOTO Takurou, ONO Bunji (Sasebo National College of Technology)

KAWAE Tatuya, HASHIDUME Kenichi (Kyushu University)

1. はじめに

我々は Vibrating-Reed 法と温度を key-word にして、金属の不純物効果の検出検討実験を計画している。昨年、実験装置の概略が完成した。完成当初は測定できていたものの、ここ数ヶ月間は全く測定できない状態であった。この原因は佐世保の地域性が主な原因であった。具体的には、昨年度の来、軍商都市 (U.S. Navy, 陸上自衛隊, 海上自衛隊を有する都市) である佐世保では警戒態勢のレベルが上がり、強力な電磁波が飛び交う状況であった。それが測定ノイズとなり、微小信号の測定ができない状況であった。この度、その対策ができ、測定ができる段階になった。

本講演では、水素を雰囲気中で熱処理を行い、水素が含有した金属について、ヤング率の温度依存性を議論すると共に、微量な水素を含有した場合の水素脆化に言及したい。

2. 実験装置

回路図および実験セルを Fig. 1 および Photo. 2 に示す。薄板状に加工した試料の一端は固定され、Drive 電極から与えられる交流電場によって試料を振動させる。Detect 電極ではその振動に伴う共振周波数および振幅の検出を行なう。これらの測定を室温から 4.2K まで行い、それぞれの温度依存性を議論する。

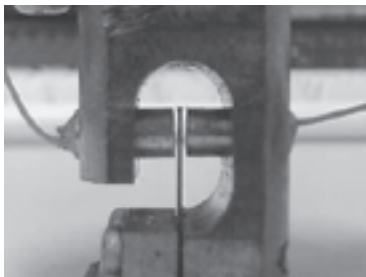


Photo. 1 実験セル

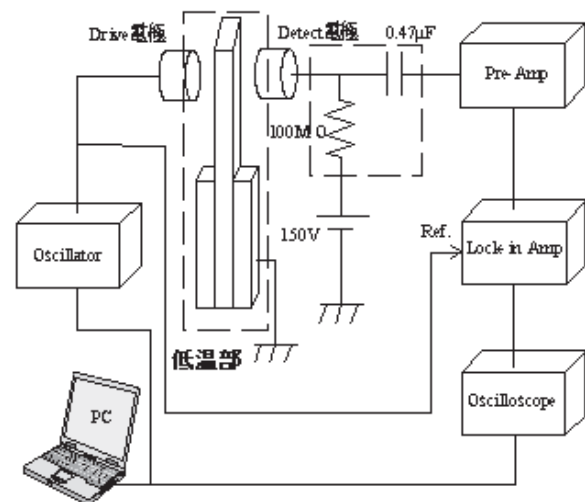


Fig. 1 実験回路

3. 測定試料

今回測定では水素の含有率が違うと思われる以下の 4 タイプの試料について測定を行う予定である。

- ① SUS304 1000°C 30min Anneal
- ② SUS304 1000°C 30min Anneal + 500°C H₂ 500Torr 1h
- ③ SUS304 1000°C 30min Anneal + 700°C H₂ 500Torr 1h
- ④ SUS304 1000°C 30min Anneal + 1000°C H₂ 500Torr 1h

4. 測定

昨年用意した試料を測定したところ、①～④の試料全ての温度係数がほぼ同等であった。これは試料中の水素が抜けたためと考えられ、水素の含有量依存の測定結果はまだ得ていない。

バイブレイティングリード法によるヤング率測定

Young's modulus measurements by vibrating reed method

平松雄太, 伊藤慧太朗, 井関恵太, 水平紳, 堀純也, 片桐政憲, 藤井佳子 (岡山理大)

HIRAMATSU Yuta, ITO Keitarou, ISEKI Keita, MIZUHIRA shin, HORI Jun'ya, KATAGIRI Masanori, FUJII Yoshiko(OUS)

E-mail : s06pm09@physics.dap.ous.ac.jp

1. はじめに

バイブレイティングリード法では, 低温装置内に配置できる程度の小さな試料でもヤング率 E と減衰 Γ の測定ができる。本研究では, バイブレイティングリード法を用いたヤング率および減衰の温度依存性測定法とその精度について検討することを目的として実験を行った。

2. 実験方法

Fig.1.に測定回路の模式図を示す。バイブレイティングリード法では, 試料の一端をホルダーに固定し, 自由端側の両面に電極を配置する。このことにより, 試料と電極の間でコンデンサが形成される。測定では, Drive 電極側からの交流電場により試料を電氣的に振動させ, Detect 電極側の電気容量の時間変化からその共振周波数 f_0 と振幅の検出を行う。今回は, Cu および車のボディなどに使用される Al 合金について測定を行った。Cu は, 幅 3 mm, 長さ 20 mm のものについて, 厚さを 0.1mm~0.5mm まで変化させた。Al 合金は, 幅 3 mm, 長さ 20 mm 厚さ 0.3 mm の溶体化処理前のもので処理後, 焼き入れ, 焼きなましたものについて測定を行った。Al 合金の成分は, (Mg 0.95%, Si 0.62%, Fe 0.03%, Cu<0.01%, Mn<0.01%, Zn<0.01%, Al 98.4%) である。

3. 結果

バイブレイティングリード法において, 共振角振動数 ω_0 ($= 2\pi f_0$)とヤング率 E との関係は(1)式で表される。減衰 Γ は, (2)式で表される。

$$E = \frac{\omega_0^2 \rho \cdot l^4}{d^2} \quad (1) \quad \Gamma = \frac{\Delta\omega}{2} \quad (2)$$

ここで, ρ は密度, l は固定端から上端までの長さ, d は試料の厚さ, $\Delta\omega$ は振幅の半値幅である。(1)より l の値は E に大きく影響するのでセッティングによる E への影響を調べるために, 室温で Cu の 2 種の試料について, それぞれ 30 回セッティングしたところ測定精度は, ともに $\pm(3\sim4)\%$ であった。Fig.2.に Cu と Al 合金のヤング率の温度変化を示す。Cu, Al 合金ともに室温から液体窒素温度に達すると, 10%程度ヤング率が上昇することがわかった。Fig.3.に Cu と Al 合金の減衰の温度変化を示す。Cu はあまり変化がなかったが, Al 合金は温度とともに低下した。

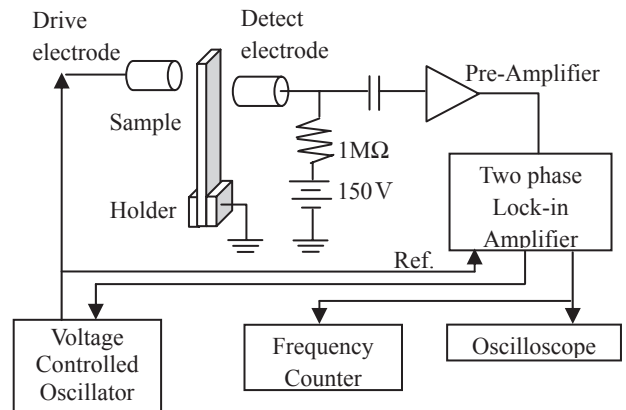


Fig.1.Schematic set-up of vibrating reed and block diagram.

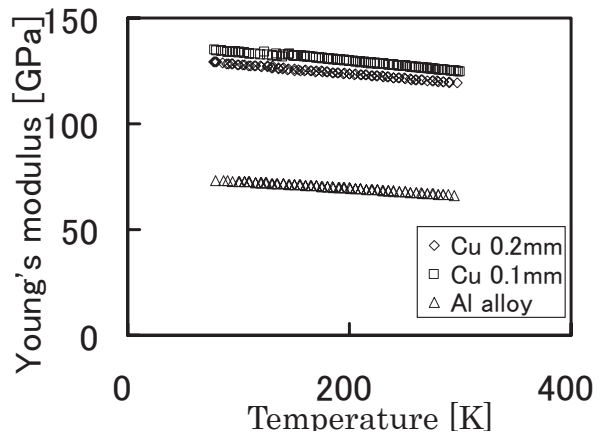


Fig.2.Temperature dependence of Young's modulus.

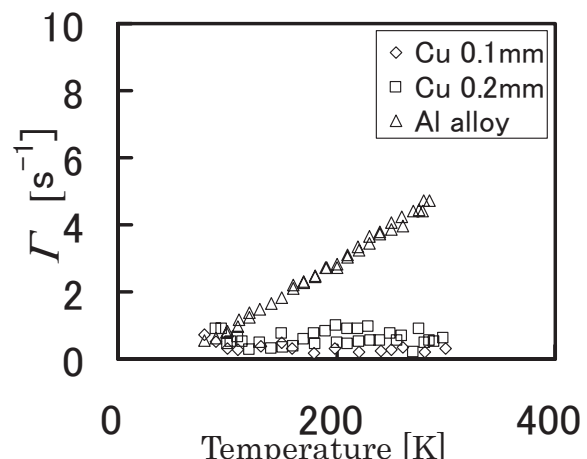


Fig.3.Temperature dependence of damping.

一軸引張・圧縮歪の影響下における IBAD/PLD-YBCO 線材の臨界電流特性

Critical currents in IBAD/PLD-YBCO coated conductors under the influence of axial tensile- and compressive-strain

今村和孝, 井上昌睦, 木須隆暢,(九大);山田穰, 塩原融(SRL)

K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss(Kyushu univ); Y.Yamada, Y.Shiohara(SRL)

e-mail; imamura@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材をコイル等へ応用する際には、電流輸送特性と共に機械歪み特性や応力特性等が重要なパラメータとなる。本研究では、磁界下における一軸引張から圧縮に至る歪みの影響を評価するための装置を開発した。

2. 実験装置

試料は治具と一体で変形するよう固定し、ステッピングモータにより U 字型治具の両端のギャップを変化させ、引張および圧縮歪みを生じさせる。最大±1%の歪みを印加した状態で試料の通電特性の評価が可能である。また、超伝導マグネットを使用した磁場中での測定が可能となっており、詳細な歪み特性の評価が可能となる。

3. 実験

この装置を用いて引張歪の影響下における IBAD/PLD-YBCO 線材の臨界電流特性の評価をおこなった。実験より得られた J_c の歪み依存性を Fig.1 に示す。 J_c が歪み率 0.3%で一旦ピークとなりその後は低下しており、Ekin によるスケールリング則¹⁾とよい一致を示す結果が得られた。次に J_c の磁場依存性を Fig.2 に示す。低磁界に比べ印加磁場が大きくなるにつれて、歪みの影響による J_c の低下率が大きくなっていることがわかる。

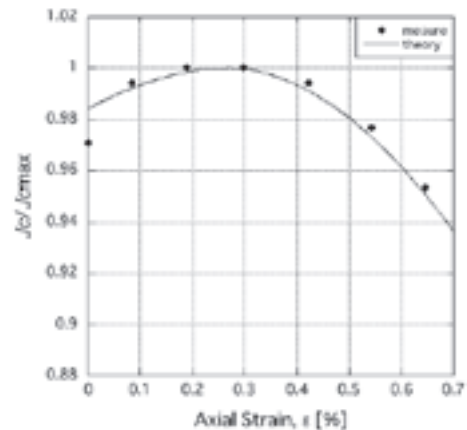
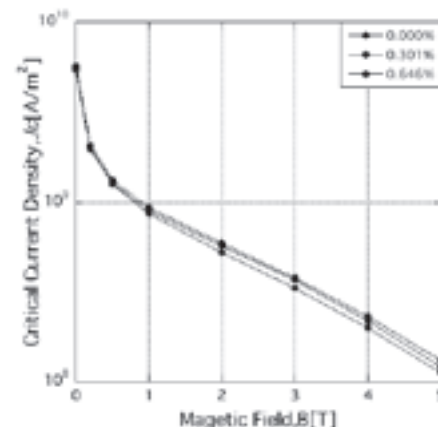
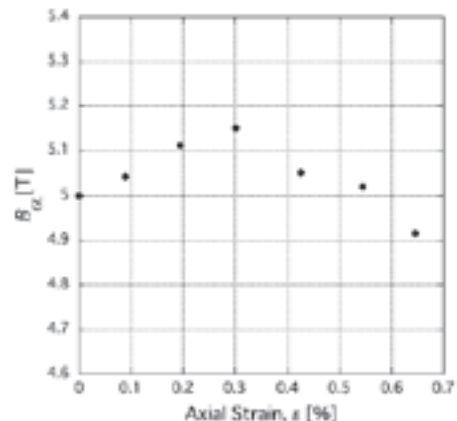
実験で得られた $E-J$ 特性を用いてパーコレーションモデルに基づくピンニング特性解析を行った。各歪み率での磁束ガラス-液体転移磁界 B_{GL} の値を Fig.3 に示す。歪み率 0.3%をピークに変化しており、このことが高磁場側での J_c の歪み依存性の増大の要因と考えられる。ピンニング特性解析結果の詳細については当日報告する。

謝辞

本研究は超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施すると共に、日本学術振興会の科研費 (18360153) の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. J.W.Ekin: “ Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part1: Basic relationship and application to Nb3Sn conductors,” Cryogenics 20 (1980) 611-624

Fig.1 Strain effects on J_c in YBCO coated conductor.Fig.2 Magnetic field dependence of J_c at various axial strains.Fig.3 Strain effects on the vortex glass-liquid transition field, B_{GL} .

YBCO 超電導線材のひずみ特性および疲労特性 Strain and Fatigue properties of YBCO coated conductors

田中 洋輔, 番場 貞徳, 植田 浩史, 石山 敦士 (早大); 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
鹿島 直二, 森 匡見, 渡部 智則, 長屋 重夫 (中部電力); 山田 穰, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

TANAKA Yosuke, BAMBA Sadanori, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
KASHIMA Naoji, MORI Masami, WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co.);
IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura); YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail : atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導線材を用いたコイルなどの設計を行う場合、線材の超電導特性がひずみによってどのような影響を受けるのかを知っておくことは重要である。そこで我々は昨年度から YBCO 超電導線材について、ひずみ- I_c 特性およびひずみの繰り返し印加による疲労特性を実験的に調査してきた。

今回は IBAD/PLD 法・IBAD/MOCVD 法線材のひずみ特性試験結果と、IBAD/PLD 法線材の疲労試験結果を発表する。

2. 実験装置

試料線材の諸元を Table 1 に示す。昨年度使用したのが IBAD/PLD 法 (2006 年) の線材、今年度使用したのが IBAD/PLD 法 (2007 年) および IBAD/MOCVD 法の線材である。また実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。試料線材は stainless steel (SUS304) 製の U 字型の治具底面に半田付けされている。ステッピングモータで a 点を上下に動かすことによって、線材長手方向にひずみが印加される仕組みとなっている。

3. 実験方法

実験は液体窒素浸漬冷却、自己磁場下で行い、ひずみは線材が単体で冷却されたときのひずみを基準とした。

始めに、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 基準で初期 I_c を測定し、これを I_{c0} とした。次に、線材にひずみ ε を印加し、この状態で I_c 測定を行った。そしてこのひずみを除去せずさらに大きくして、再び I_c 測定を行った。この作業を、ひずみを大きくしながら繰り返し行い、ひずみと I_c の関係 ($I_c/I_{c0} - \varepsilon$ 特性) を求めた (ひずみ特性試験)。

そして、ひずみ ε_{max} を線材に対して繰り返し印加し (「 $\varepsilon = 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} \rightarrow \varepsilon = 0$ 」というサイクルを繰り返す)、 $I-V$ 特性の変化を測定・評価した (疲労試験)。

4. 実験結果

Table 1 に示した 3 本の試料線材のひずみ特性試験結果を Fig. 2 に示す。

昨年度行った疲労試験では、0.3%、0.4%、0.5% のひずみを IBAD/PLD 法 (2006 年) の線材に 5000 回印加したものの I_c の劣化は見られなかった⁽¹⁾。昨年度の疲労試験では線材の Ag 面を治具にはんだ付けしていたが、通電電流の治具への分流が発生し、 I_c 測定の精度が低下していることが考えられる。そこで今年度は線材の接着方法を変更し、Hastelloy 面を治具にはんだ付けすることによって分流の低減を図り、IBAD/PLD 法 (2007 年) の線材に 0.5% のひずみを 4000 回繰り返し疲労試験を行ったが、やはり I_c の劣化は見られなかった。

5. まとめ

ひずみ特性試験では製法に関わらず、印加したひずみと冷却による熱ひずみが相殺されて $\varepsilon = 0$ となった時点で I_c がピークを迎え、その後 I_c は単調に低下していく傾向が見られた。

疲労試験では劣化が見られなかったため、今後は 1 万回程度ひずみを印加して IBAD/PLD 法の線材の疲労試験を行い、IBAD/MOCVD 法の線材でも疲労試験を行ってみたい。

Table 1. Specifications of YBCO sample tapes

Manufacturing Process	IBAD/PLD		IBAD/MOCVD	
	2006 年	2007 年		
Length, mm	70			
Width, mm	3.3			
Thickness, μm	Ag	15	10	15
	YBCO	2.5	1.2	0.5
	Buffer	1.4		1.5
	Hastelloy	100		

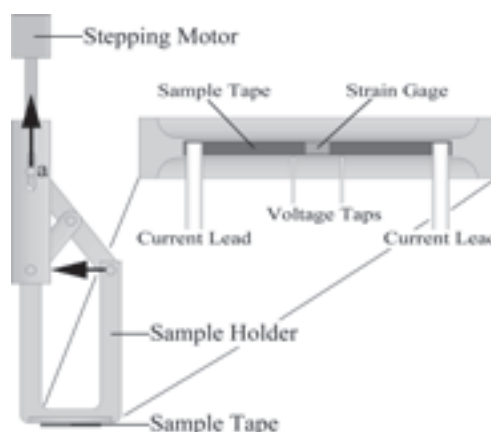


Fig. 1. Experimental apparatus

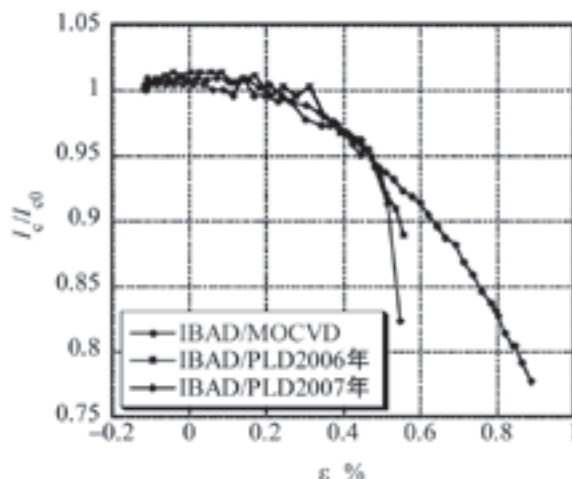


Fig. 2. $I_c/I_{c0} - \varepsilon$ relation

なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

文献

- (1) 石山敦士, 田中洋輔 他: 2007 年 電気学会全国大会講演概要集 [5], p.26

Dy123 バルク緻密材の機械的特性評価

Evaluations on mechanical properties of Dy123 bulk with low pore density

橋本 良太, 村上 明, 宮田 寛(弘前大学); 片桐 一宗(岩手大学)

HASHIMOTO Ryota, MURAKAMI Akira, MIYATA Hiroshi (Hirosaki University); KATAGIRI Kazumune (Iwate University)

E-mail: amura@mech.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物高温超電導単結晶バルク材(以下, バルク)の機械的特性の改善は, バルクの高性能化やバルク応用機器の実用化・高効率化にとって必要不可欠である。大気中で作製した Dy 系バルクを対象に実施したこれまでの研究では, バルク表面付近での気孔率は低く, ヤング率や破壊強度などの機械的特性は高い値を示した[1]。気孔はバルクの作製プロセスにおいて前駆体に取り込まれる空気などに起因するものであるが, 前駆体の熔融を通常の大気中ではなく酸素中で行うことで, 熔融成長時の反応で気孔は消失し緻密質のバルクが得られる[2]。本研究では, このようにして作製した緻密質の Dy 系バルクの機械的特性を評価して, 大気中で作製したバルクのそれと比較・検討した。

2. 実験方法

新日本製鐵製の Dy 系バルク(直径 45 mm, 厚さ 25 mm)を2個用いた。これらのバルクは $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Dy123)と $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ (Dy211)を 100-X : X (X=25) の mol 比で混合し, 0.5 wt.%の Pt を添加して成形した前駆体を, 酸素あるいは大気中で熔融し, Nd123 種結晶を用いて大気中で結晶成長させたものである。以下, 酸素中で熔融したものを緻密材, 大気中で熔融したものを標準材と呼ぶ。各バルクから幅 2.8 mm, 厚さ 2.1 mm, 長さ 24 mm の曲げ試験片を, 試験片の厚さ方向とバルクの厚さ(c 軸)方向とがほぼ一致するように切り出した。これら試験片の半数に, 酸素中でアニール(723 K で 100 時間)を施した。負荷容量 2 kN のインストロン 4464 万能試験機により, 支点間距離 21 mm, クロスヘッド速度 0.1 mm/min で, 試験片の厚さ方向に3点曲げ負荷を大気中で行った。負荷に伴うひずみをゲージ長さ 0.2 mm のひずみゲージを用いて測定した。

3. 結果および考察

試験片側面を光学顕微鏡で観察したところ, 標準材には数十~数百 μm の気孔が確認され, その面積率を基にした気孔率は 15~20 %程度であった。一方, 緻密材では微小な気孔がわずかに存在する程度で, 気孔率は 3 %以下と大幅に低い値を示した。緻密材と標準材の応力-ひずみ曲線の傾きから評価したヤング率を Fig. 1 に, 破壊強度を Fig. 2 に示す。緻密材のヤング率の平均値は, アニールを施したもので 150 GPa, 施していないもので 162 GPa であり, 標準材のそれら(123 および 130 GPa)よりも 22 および 25 %高い値を示した。また, 緻密材の破壊強度の平均値は, アニールを施したもので 75 MPa, 施していないもので 92 MPa であり, 標準材のそれら(69 および 67 MPa)よりも 9 および 37 %高い値を示した。このような緻密化に伴う機械的特性の向上は, 材料の実断面積の増加や, 破壊の起点となり得る大きいサイズの気孔の減少などによるものと考えられる。緻密材, 標準材ともにアニールを施したことにより, ヤング率は低下した。アニールによる相転移やそれに伴うマイクロクラック[3]などが影響していると考えられる。破壊強度については, 標準材ではアニールに伴う著しい変化は見られなかったが, 緻密材ではアニールに伴い低下した。相転移やそれに伴うマイクロクラック[3]などの影響の他に, 緻密材では気孔などの酸素拡散パスが少ないことによ

りアニール時の格子定数の変化に伴い内部応力が発生し, マイクロクラック等の欠陥が導入されることなどが考えられる。アニール条件の最適化を検討することで, 更なる破壊強度特性の改善が予想される。標準材では, 応力の集中する気孔が多数存在すること, アニールを施していない材料のヤング率は施した材料のそれよりも高いことと関連して, 前者の破壊靱性値は低いことなどから, 結果としてアニールに伴う破壊強度の低下が見られなかったことも考えられる。アニールを施していない緻密材の破壊強度のばらつき幅は, 気孔やマイクロクラックなどの欠陥が少ないことと関連して大きい。なお, 本研究で評価したバルク(直径 45 mm)の破壊強度は, 標準材, 緻密材ともに直径 30 mm のバルクのそれ[2]と比較して低い値を示した。今後, その理由について作製プロセスとの関連から検討することで, 破壊強度特性の優れた大型バルクの開発に資することが期待される。

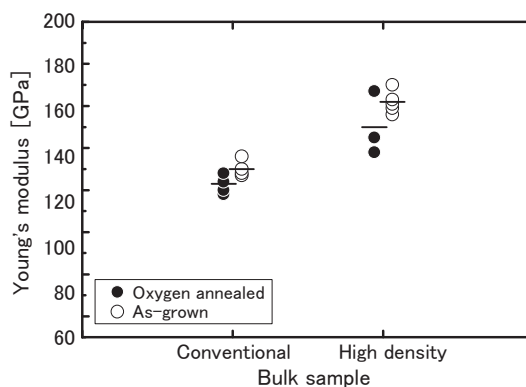


Fig.1 Young's moduli of high density and conventional bulks.

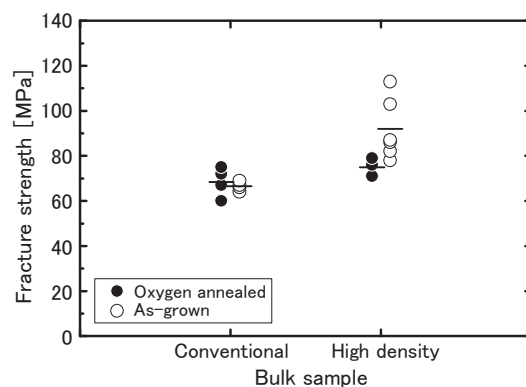


Fig.2 Fracture strengths of high density and conventional bulks.

参考文献

1. A. Murakami, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) pp.3059-3062
2. H. Teshima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) 2P-p13.
3. N. Sakai : TEION KOGAKU, Vol. 37 (2002) pp.601-605.

大気中で作製した Dy123 バルク材の機械的特性 Mechanical properties of Dy123 bulks melt-processed in air

村上 明, 宮田 寛, 橋本 良太(弘前大); 片桐 一宗(岩手大)

MURAKAMI Akira, MIYATA Hiroshi, HASHIMOTO Ryota (Hirotsaki University); KATAGIRI Kazumune (Iwate University)

E-mail: amura@mech.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物高温超電導単結晶バルク材(以下, バルク)は, 強力磁石, 非接触軸受, 大容量電流リードなど, 様々な超電導機器への応用が期待されている。バルクの機械的特性データの蓄積は, バルクの機械的特性の改善や機器の実用化・高効率化にとって必要不可欠であり, Y, Gd, Sm, (Sm,Gd), (Nd,Eu,Gd)系などのバルクから採取した試験片の室温および極低温における引張り, 曲げ, 圧縮, 破壊靱性, 疲労, 硬さ試験に基づく機械的特性データベースが岩手大学により Web 上 (<http://paris.mech.iwate-u.ac.jp/sc-bulk/database.html>) で公開されている。本研究では, 優れた超電導特性と低い熱伝導率を有することから, とくに電流リード用材料として有望な Dy 系バルクの機械的特性に及ぼす影響因子について, Dy211 (Dy₂BaCuO₅) 量や Ag の添加量などの原料組成や大きさの異なるバルクの機械的特性評価[1-4]に基づき検討した。

2. 実験方法

機械的特性評価を実施した新日本製鐵製 Dy 系バルク試料の内訳を機械的特性データとともに Table 1 に示す。100-X:X の mol 比で混合した Dy123 (DyBa₂Cu₃O_x) と Dy211 の粉末に Dy211 粒子微細化のため 0.5 wt% の Pt を添加して成形した前駆体を大気中で 1423 K まで加熱し, 1 時間保持した後, 1313 K まで冷却し, Nd123 種結晶を配置して徐冷することで結晶成長させたバルクである。Ag の添加は機械的特性の改善に効果的であるが, 添加に伴う熱伝導率の上昇は, 電流リード応用にとって不都合であるため, 本研究では添加量を 10 wt.%以下とした。バルクから試験片を切り出した後, 723 K で 100 時間, 酸素中でアニールを施した。試験片の寸法は, 2.8 x 2.1 x 24 mm³ であり, 2.1 mm 方向とバルクの厚さ(c 軸)方向とがほぼ一致するようにした。平滑試験片による破壊強度, ヤング率の評価の他に, 剃刀とダイヤモンドペーストで仕上げた先端の曲率半径が 20 μm 程度の V ノッチを長手方向中央部に有する試験片による破壊靱性評価も実施した。負荷容量 2 kN のインストロン 4464 万能試験機により, 支点間距離 21 mm, クロスヘッド速度 0.1 mm/min で, 3 点曲げ負荷を試験片に対して大気中で行った。破断後, 各試験片の側面をラッピングシートで研磨し, 破断部近傍の気孔および銀粒子の面積率を画像解析により評価して, それらと機械的特性との関係を検討した。さらに, 研磨面に対して押し込み荷重 4.9 N でビッカース硬度試験を実施した。

3. 結果および考察

バルクの破壊強度には, Dy211 量や Ag の添加量の増加に伴い上昇する傾向が見られた。破壊靱性値も上昇したことから, 硬い Dy211 粒子によるき裂の偏向や, Ag 粒子によるブリッジなどにより, き裂進展が抑制されることなどが推測される。ヤング率にも Dy211 量の増加に伴う上昇傾向が見られた。バルクのヤング率は, 後述のように気孔の分布の影響も受けるが, バルクのヤング率と関係すると思われるマトリックスの硬度も Dy211 量の増加に伴い上昇したことから, Dy211 粒子のヤング率が Dy123 マトリックスのそれよりも高いことと関係していると考えられる。Dy123 マトリックスよりもヤング率の低い Ag を添加することで, バルクのヤング率は低下したが, マトリックスの硬度は上昇した。

前駆体の成形時に内部に取り込まれる空気や作製過程で発生する酸素が排出されやすいことなどにより, バルクの表層付近での気孔率は低く, 優れた機械的特性が得られた。特に Ag 無添加材では, 気孔率の上昇に伴う機械的特性の低下が明確に認められた。これは断面に気孔が存在することで実断面積が減少して断面に作用する応力が增大すること, き裂先端近傍に存在する気孔がき裂と合体し, き裂の一部のように振る舞うことなどによると考えられる。データ点を指数関数で近似した結果, 気孔率 0 % での機械的特性は, 平均値に対して 20 %程度高いことが推測された。

直径 45 mm のバルクの破壊強度は, 直径 30 mm のバルクのそれと比較して低い傾向を示した。バルクのサイズと関連して作製プロセスにおける前駆体の成形時, あるいは溶融・結晶成長時に機械的特性を左右する要因が存在すると考えられる。

今後, Dy 系バルクの機械的特性データもデータベースに加えて, 更なる充実を図っていく予定である。

参考文献

1. A. Murakami, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) pp.3059-3062.
2. R. Hashimoto, et al.: Physica C Vol. 463-465 (2007) pp.357-361.
3. A. Murakami, et al.: Physica C Vol. 463-465 (2007) pp.362-366.
4. R. Hashimoto, et al.: J. Physics: Conf. Series, submitted.

Table 1 Mechanical properties of Dy123 bulk samples evaluated by 3-point bending tests of plain or single-edge V-notched specimen. E , σ_f and K_{IC} are the Young's modulus, fracture strength and fracture toughness, respectively.

Bulk sample	Dy211 cont. [mol%]	Ag cont. [wt.%]	Size [mm]	E [GPa]	σ_f [MPa]	K_{IC} [MPa m ^{1/2}]
15 Ag0 φ 30	15	0	φ 30 x 10	116 ^[1]	68 ^[1]	1.24 ^[2]
20 Ag0 φ 30	20	0	φ 30 x 10	124 ^[1]	80 ^[1]	1.21 ^[2]
25 Ag0 φ 30	25	0	φ 30 x 10	133 ^[1]	87 ^[1]	1.47 ^[2]
25 Ag0 φ 45	25	0	φ 45 x 25	123	69	1.41
25 Ag5 φ 45	25	5	φ 45 x 25	136 ^[3]	86 ^[3]	1.34 ^[4]
25 Ag7.5 φ 45	25	7.5	φ 45 x 25	128 ^[3]	89 ^[3]	1.44 ^[4]
25 Ag10 φ 45	25	10	φ 45 x 25	124 ^[3]	91 ^[3]	1.54 ^[4]

圧延ハステロイ基板の電熱特性に対する熱処理の効果

Annealing effect on electrical and thermal conductivity of Hastelloy substrate

加藤 卓弥, 阿部 雄樹, 亀卦川 尚子(一関高専); 村上 義弘, 小林 典男(IMR, 東北大); 塩原 融 (SRL, ISTEK)

KATO Takuya, ABE Yuki, KIKEGAWA Takako (INCT); MURAKAMI Yoshihiro, KOBAYASHI Norio (IMR); SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: kikegawa@ichinoseki.or.jp

1. はじめに

YBCO 線材の基板材として用いられている圧延上がりのハステロイ板(厚さ $100\ \mu\text{m}$)の圧延組織は、熱処理によって変化し、熱伝導度および電気抵抗率に影響を与える。本研究では、 300°C から 1000°C の熱処理温度に対してこれらの特性の依存性を調べると共に、マイクロピッカース法を用いた硬さ測定とSEMおよびTEMによる組織観察を行い、熱処理が圧延ハステロイ基板の電熱特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験方法

測定に用いた試料は、実際の Y 系線材に用いられている厚さ $100\ \mu\text{m}$ 圧延基板である。これを $10\text{mm} \times 3\text{-}5\text{mm}$ の短冊形に切り出し、アルゴンガスフロー雰囲気中で 300°C から 1000°C の間の温度で 30 分間熱処理を行った後、室温まで炉冷して測定試料とした。電気抵抗は直流 4 端子法で、熱伝導度は定常熱流法で測定した。マイクロピッカース法による硬さ測定は、荷重 $0.5\ \text{N}$ で行った。

3. 電気抵抗率とピッカース硬さ

我々は先の低温工学・超電導学会で、熱処理温度が低い場合と高い場合で、硬さと電気抵抗率の相関が異なることを示した。図1に、温度 $20\ \text{K}$ における電気抵抗率と、熱処理前の硬さ(HV_{na})で規格化したピッカース硬さ($\text{HV}/\text{HV}_{\text{na}}$)の値を、熱処理温度に対して示す。図から明らかなように、熱処理温度 500°C 以上では、硬さと電気抵抗率は熱処理温度に対して同様の变化を示す。それに対して 300°C と 400°C では、硬さが増加しているにもかかわらず電気抵抗率は減少する。

熱処理温度が 400°C 以上の場合について詳細に見てみる。熱処理温度 400°C から 600°C では、 $\text{HV}/\text{HV}_{\text{na}}$ と電気抵抗率は、温度の増加と共に増加する。SEM 観察の結果は、熱処理温度が高い試料ほど微細な析出物が顕著に存在することを示している。 400°C から 600°C で観測される試料の硬化と電気抵抗率の増加は、析出物の影響が顕著に現れた結果であると考えられる。一方、熱処理温度 600°C 以上では、析出物が多く観測されるにもかかわらず、硬さと電気抵抗率は共に低下する。この原因としては、析出粒子の粒径増加や圧延組織の回復・再結晶化が考えられるが、SEM 観察では目立った粒子の成長は認められなかった。

4. 熱伝導度の熱処理温度依存性

図 2 に、熱処理前の試料と熱処理温度が 300°C 、 400°C 、 700°C の場合の熱伝導度の温度依存性を示す。測定結果のうち、温度 $110\ \text{K}$ の結果を抜き出して、熱処理温度に対して図3に示す。熱伝導度の熱処理温度依存性は、電気伝導度($\sigma = 1/\rho$)のそれと殆ど同じ傾向を示す。熱伝導度は 300°C 、 400°C の熱処理で増加し、それ以上の温度では、硬さの変化と対応して変化する。熱伝導度は電子とフォノンの寄与から成るが、ハステロイの場合はこちらの寄与も重要である。講演では、電気抵抗、熱伝導度、硬さの結果を組織観察と対応させて、総合的に考察する。

5. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、NEDO の委託によって実施したものである。

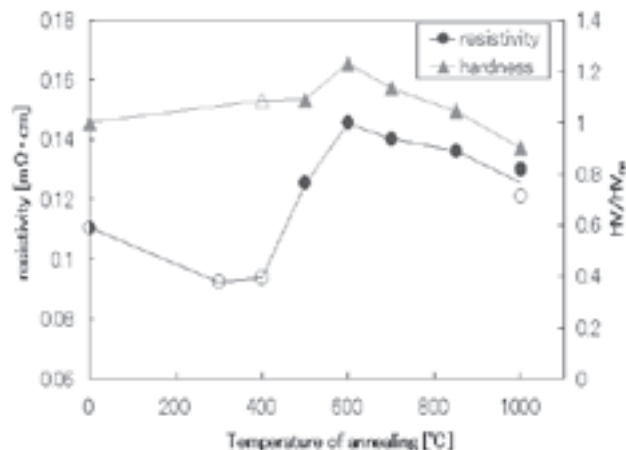


Fig.1 Annealing temperature dependence of electrical resistivity at 20 K and normalized Vickers hardness, $\text{HV}/\text{HV}_{\text{na}}$.

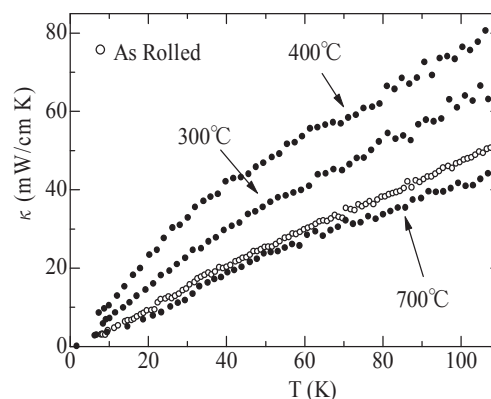


Fig.2 Temperature dependence of thermal conductivities of Hastelloy annealed at 300°C , 400°C and 700°C , respectively.

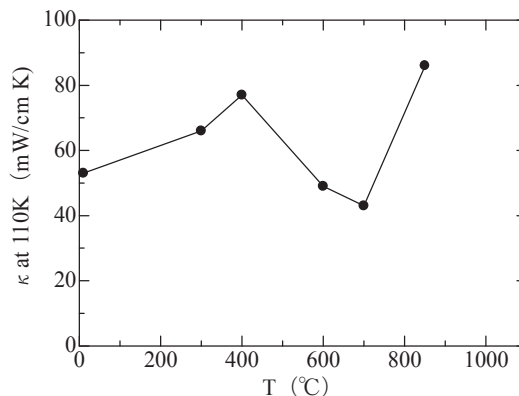


Fig.3 Annealing temperature dependence of thermal conductivity at 110K.

超電導テープ線材の銀拡散接合技術を用いた補修

Repairing of the coated conductor using diffusion joint technique for the Ag layer

加藤 順子, 坂井 直道 (SRL); 鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力);
衣斐 顕, 宮田 成紀, 中尾 公一, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)

KATO Junko, SAKAI Naomichi, (SRL); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.);
IBI Akira, MIYATA Seiki, NAKAO Koichi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: yoshioka@istec.or.jp

1. はじめに

超電導テープ線材の長尺化プロセスに際しては、 I_c が高く安定している長尺の線材が作製されている。しかし現状では、ほんの数ミリにも満たない欠陥などにより、 I_c が低い箇所が発生し、長尺線材の End to end における I_c を低下させてしまう場合がある[1-2]。このような I_c が低い箇所を銀拡散接合技術で補修し、 I_c を復活させることが可能なら、長尺化プロセスにおける歩留まりを改善できる可能性がある。そこで本研究では、 I_c が低くなるように意図的に欠陥を導入し、欠陥の部分に超電導線材の補修ピースを銀拡散接合法[3-4]で接合して I_c を復活させる線材の補修を試みた。

2. 実験方法

幅 10 mm、厚さ 100 μm のハステロイ上に、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO), CeO_2 , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO), Ag の順で積層した線材を実験に供し、60 mm の長さで切り出した試験片を 2 本用意した。このうち 1 本の試験片の I - V 測定を液体窒素中で行い、試験片中央にダイヤモンドブレードを用いて欠陥を導入した後、再び液体窒素中で I - V 測定を行った。もう 1 本の試験片についても I - V 測定を行い、電流および電圧端子を装着していた両端を 10 mm ずつ切り落とし、長さ 40 mm の補修ピースとした。

欠陥を導入した試験片の銀安定化層 (銀層) に、補修ピースの銀層を接して欠陥を覆うようにして重ね、接合用治具で固定した。治具で固定した試験片は管状炉を用いて純酸素気流中で 400°C に加熱し、1 時間保持した後、室温まで冷却した。補修ピースを接合した試験片を接合用治具から取り外し、液体窒素中で I - V 測定を行った。

3. 結果および考察

母材への欠陥導入の前後、補修ピースおよび補修後の試験片の I - V 曲線を、Fig. 1 に示す。欠陥導入前におよそ 160 A あった I_c は、欠陥導入後にはおよそ 50 A に低下した。一方、補修ピースの I_c はおよそ 130 A で、これを用いて欠陥部を覆って補修した試験片は、50 A だった I_c が、ほぼ元通りの 160 A に回復した。よって、部分的に欠陥があり I_c が低下した超電導線材を、超電導線材の補修ピースを用いて銀拡散接合を行うことで、 I_c を回復させることが可能であることが分かった。

次に、補修した箇所が発生する電圧について議論する。補修後の I - V 曲線は、欠陥導入後の I_c (50 A) までは電圧の発生が無く、更に電流を上げると徐々に電圧が発生して補修後の I_c に到達するまで電圧は直線的に上昇し、 I_c に達したところで電圧は急上昇することが分かる。このことから、欠陥を導入した試験片の I_c までは、電流は母材の YBCO 層に流れるが、それより高い電流を流すと銀を通過して補修ピースの YBCO 層に流れ、更にもう一度銀を通過して母材の YBCO 層に流れると考えられる。このように電流が銀を通過するとき、銀は超電導では無いために電圧が発生する。

ここで、NEDO の超電導線材応用基盤プロジェクトでの I_c のクライテリア (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) を基準として考察する。この補修した試験片の I - V 測定の際、電圧端子間距離は 45 mm であったので、この線材の I_c を決定する際のクライテリアは 4.5 μV である。Fig. 1 から、補修により発生

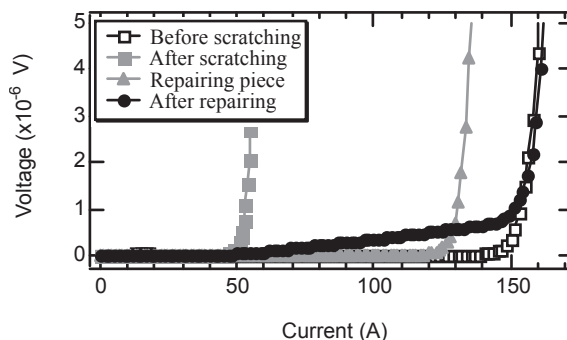


Fig. 1 I - V curves of YBCO coated conductors. One tape had an intentional defect by scratching, and the other (a repairing piece) used to cover the defect on the tape by the Ag diffusion joint processing for repairing of the tape. Decreased I_c by scratching was recovered after repairing.

する電圧は直線的に上昇している部分に相当し、高くてもおよそ 0.8 μV であり、クライテリアの 5 分の 1 以下と十分に低いことが分かる。また、例えば 100 m の超電導線材のクライテリア (1 mV) に、補修により発生する電圧 (1 箇所あたり 0.8 μV) のみで到達するとした場合、何箇所の補修が可能かを考えると、40 mm の補修ピースを使用して 12500 箇所の補修をしても良い計算になる。もっとも、100 m の長さに対して 40 mm の補修ピースを用いて 12500 箇所の補修を行うことは不可能であるが、このことから補修 1 箇所あたりの発生電圧は十分に低いので、100 m の全長に渡って補修を行っても良いということが言える。よってこのように超電導線材を補修ピースとして使い、銀拡散接合で I_c を復活させることは、超電導線材の長尺化の歩留まりを改善する技術として有効であると言える。

4. まとめ

超電導線材に意図的に欠陥を導入し、部分的に I_c の低い超電導線材を作製し、超電導線材補修ピースで欠陥を覆い銀拡散接合を行った。その結果、欠陥により大幅に低下した I_c は元の値に復活し、更に補修部分における発生電圧が十分に低いことを確認した。このようにして超電導線材を補修することは可能で、これは超電導線材の長尺化の歩留まりを改善する有効な技術である。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

参考文献

1. T. Nakanishi, et al.: Physica C (proceedings of ISS '06), vol. 463 (2007) p. 515
2. A. Ibi, et al.: TEION KOUGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.), Vol. 42 No. 2 (2007) p. 42
3. J. Kato, et al.: Physica C (proceedings of ISS '05), vol. 455 (2006) p. 686
4. J. Kato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 74 (2006) p. 199

YBCO 超電導線材の銀拡散接合法における 銀安定化層厚さと接合面積の影響

Effect of the thickness of Ag stabilizing layers and the joint area in
the diffusion joint of YBCO coated conductors

鷲見 智行(芝浦工大);加藤 順子, 坂井 直道, 宮田 成紀, 衣斐 顕, 山田 穰(SRL);鹿島 直二,
長屋 重夫(中部電力);中尾 公一, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL);村上 雅人(芝浦工大)

WASHIMI Tomoyuki(SIT);KATO Junko ,SAKAI Naomichi, MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka (SRL);
KASHIMA Naoji , NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.);NAKAO Koichi, IZUMI Teruo,
SHIOHARA Yuh (SRL); MURAKAMI Masato (SIT)
E-mail: washimi.29@istec.or.jp

1. はじめに

超電導線材の電力ケーブルやコイル用線材への応用には接合技術が不可欠である。近年、接合技術の1つとして、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)超電導線材のYBCO層の上に成膜されている銀安定化層(銀層)を用いた銀拡散接合が報告されている[1]。これは銀層同士を重ね合わせ、加圧と同時に加熱することによって接合する方法であり、はんだ接合に比べ低い抵抗が得られる。しかし、応用に際しては更なる低抵抗化が望まれる。そこで、接合部の抵抗を減少させる事を目的とし、銀安定化層の厚さ、接合部の面積を変化させて銀拡散接合を行い、接合部の抵抗に及ぼす影響について報告する。

2. 実験方法

本研究では、幅 10mm、厚さ $100\mu\text{m}$ のハステロイ基板上に $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GZO)、 CeO_2 、YBCO、Agの順で積層したYBCO超電導テープ線材を使用した。この線材を長さ40mmに切断し、銀層を研磨した。厚みの変化により試料を、研磨なし、 $10\mu\text{m}$ 研磨、 $20\mu\text{m}$ 研磨とした。これらの試料片について液体窒素中で四端子法によるI-V特性及び誘導法による T_c 測定を行った。次にこの試料を長手方向の中央部で切断し、端部を10mm長で重ね接合部固定用治具で固定した。このとき治具上部に取り付けたM5のネジに4Nmのトルクを与えることで接合面に負荷をかけた。この治具で固定した試料を管状炉にて純酸素気流中で 400°C に加熱し、1時間保持後、室温まで冷却した。炉から取り出した試料は治具から取り外し、液体窒素中でI-V特性及び T_c 測定を行った。さらに樹脂に埋め込み接合部の断面を研磨し、光学顕微鏡で観察をした。

また、重ね合わせ長さを10~50mmと変える事によって接合面積を変化させた試料についても前述と同様の実験を行った。

3. 実験結果及び考察

接合前後のI-V特性と T_c 測定の結果、厚さ、面積を変えても I_c 、 T_c の変化はなかった。しかし、 I_c に達するまでにわずかながら電圧が発生した。このI-V曲線の I_c に到達するまでの傾きから抵抗(R)を求め以降の議論を行う。

Fig.1に銀層の厚さと接合部の抵抗の関係を理論値と合わせて示す。ここで Δt は研磨による銀層の変化量であり、理論値とは銀層同士がボイドや空隙などなく完全に接合されたと仮定し、YBCO層と銀層又は銀層同士の接触抵抗を無視して銀の抵抗値のみが存在すると考えた値である。実験値をみると銀層の厚さを減らしても接合部の抵抗は減少せず、あまり変化はない。さらに、実験値は理論値の5~6倍の値である事が分かる。この理由を調べるために試料断面の組織観察を行った。その結果、接合中央部、即ち銀層と銀層の間に空隙がみられた。また、銀層とハステロイの間、即ちGZO、 CeO_2 、YBCO層のいずれか又は層間に剥離による空間が見られた。

つまり、抵抗が理論値に達しない原因の一つとしてこのような空隙や剥離の存在が考えられる。このことによる抵抗値のばらつきは、銀層の厚さによる抵抗値の減少に比べて大きい。よって空隙や剥離などのない完全な接合がされていない現状では、抵抗に対して銀層の厚さの寄与はほとんどないと言える。

次に、Fig.2に接合面積と接合部の抵抗の関係を理論値と合わせて示す。上記の理由により実験値の抵抗は理論値より高い値を示すが、接合面積を大きくする事によって抵抗を下げる事ができた。これは抵抗が面積に反比例しており、金属材料における断面積と抵抗の関係と同じであることが分かった。よって接合部の抵抗は接合面積で制御する事が可能である。

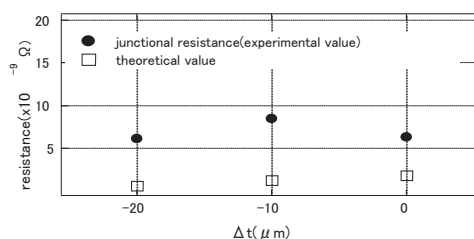


Fig. 1 The relation between the thickness of Ag stabilizing layer and resistance for the Ag diffusion joined sample
 Δt is variation of Ag stabilizing layers

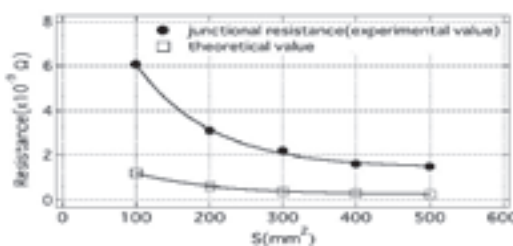


Fig. 2 The joint area dependence of resistance for the diffusion joint of YBCO coated conductors

4. まとめ

YBCO超電導線材の銀層の厚さを変化させて拡散接合を行った結果、抵抗は下がらず、断面観察により、空隙や剥離などがみられた。これらによる抵抗のばらつきが大きいと、銀層の厚さによる抵抗低下はみられなかったと考えられる。

また、接合面積と抵抗は、金属材料と同様に反比例の関係にある事を確認した。

謝辞

本研究は、超電導応用基板技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

1. J Kato et al.: Physica C vol.445 (2006) P.686

レーザースクライビングによるY系線材細線加工

Development of Laser Scribing Process for YBCO Coated Conductors

須藤 泰範, 中西 達尚, 三浦 正志, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 山田 穰, 塩原 融 (SRL),

岩熊 成卓 (九大), 齊藤 隆 (フジクラ)

SUTOH Yasunori, NAKANISHI Tatsunao, MIURA Masashi, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, YAMADA Yutaka,

SHIOHARA Yuh (SRL) ; IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.) ; SAITOH Takashi (Fujikura)

E-mail: ysutoh@istec.or.jp

1. はじめに

Y系線材はBi系線材に比べ、低コスト・高 J_c -B特性を有し、後加工(フィラメント化加工)により交流損失を低減することが可能であることから、将来の機器応用に大いに期待されている。特に交流応用を目指し、スクライビング技術の開発を行い、細線化による損失低減を実現してきた。機器応用においては、過電流による焼損を防ぐために、Ag層以外にCuなどの安定化層をラミネートした複合線材構造が求められている。本研究では、YAGレーザーによりAg安定化層のみの線材について、細線化の分割数を増やし、損失低減効果の確認を行なった。またCu安定化層付き短尺線材を細線加工し、交流損失を低減できることを確認したので報告する。

2. 実験方法

線材の細線加工には、YAGレーザーを用いた。加工した線材は、IBAD-Gd₂Zr₂O₇中間層上に、PLD法によりCeO₂キャップ層、YBCOやGdBCO層を成膜後、保護層としてAgを約20 μ m形成した試料およびAg保護層上に0.1mm厚のCuテープ材を半田接合した複合線材である。保護層がAgのみの線材については、10mm幅の短尺線材において10-20分割した、Cuテープ付き複合線材については3分割した。交流損失の低減効果を比較するために、細線加工なし線材と分割加工線材それぞれについて、鞍型ピックアップ法により交流損失の測定を行なった。

3. 結果及び検討

図1に、Ag安定化層のみの線材について、無加工、10分割および20分割した線材の77Kにおける交流損失を測定した結果を示す。細線加工した線材では、10分割で1/10、20分割で1/20にそれぞれ交流損失が低減できており、短尺において原理検証確認を行なうことができた。

次に、図2にCuテープ材をラミネートした複合線材について、77Kの液体窒素温度において交流損失の測定を行なった結果を示す。無加工線材に対し、3分割加工した線材の交流損失は約1/3に低減されていることがわかる。複合線材でも、レーザースクライブにより、分割数に応じて低交流損失化できることが確認できた。だが、0.4~1Tの磁場において、交流損失の値にふらつきが生じてしまった。全

交流損失から履歴損失を差し引いた結合損失に相当する値の周波数依存性を調べた結果、交流損失に周波数依存性があることが分かった。このことから、フィラメント間の結合損失が存在していると考えられる。Cu層が厚いことにより、レーザーの加熱で溶けた溶融物が、ガスの噴き付けのみでは取り除けず、フィラメント間隙に残ってしまうことが要因と思われる。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

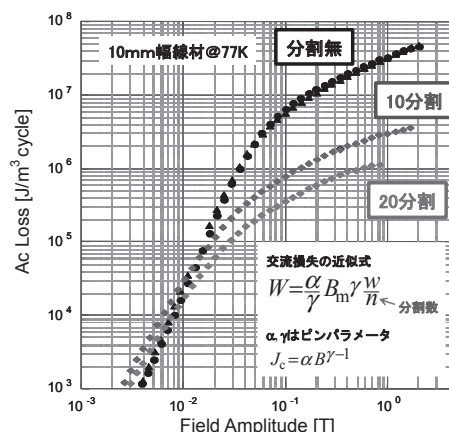


図1. Ag安定化層のみ線材における交流損失測定結果

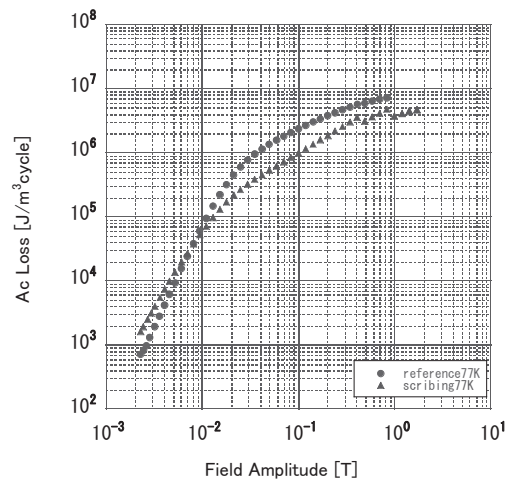


図2. Cu安定化層付き線材における交流損失測定結果(無加工線材と3分割加工線材)

熱音響工学的な視点から見たパルス管冷凍機の理解と効率改善策

Understanding and improvement of pulse tube refrigerator from thermoacoustic point of view

上田 祐樹(東京農工大学)

UEDA Yuki (TUAT)

E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp

1. はじめに

パルス管冷凍機や共鳴管冷凍機を理解するために発展してきた熱音響理論では、流体力学の基礎方程式を線形化し、圧力変動・流速変動をオイラー的に記述する。[1]そして、基礎方程式を軸方向に積分し、「全エネルギー流」、「仕事流」、「熱流」を算出する。これら種々のエネルギー流を用いることで、パルス管冷凍機や共鳴管冷凍機内で起こる局所的な現象を議論できる。

蓄熱器内の圧力と流速の間の位相差を調節するオリフィスやイナータンスチューブ等の機構を設けることで、パルス管冷凍機の冷凍出力は大きくなり、最低到達温度は低下してきた。では、オリフィスやイナータンスチューブ等の機構を用いることでパルス管冷凍機の効率はどこまで改善可能なのか？

本講演では、上で述べたエネルギー流を用いて、図 1(a)に示すオリフィス型パルス管冷凍機としての効率を議論する。その結果から、蓄熱器内でのエネルギー変換が可逆的に行われても、オリフィスでの散逸が原因となってパルス管冷凍機の効率の上限値はカルノー効率を下回ることを指摘する。さらに、エネルギー流の考察を基に、効率の上限値をカルノー効率に等しくするパルス管冷凍機の改良案を示す。この改良案によって、高温端温度 T_R が 300K で低温端温度 T_C が 77K の時、パルス管冷凍機の効率の上限値は 1.3 倍になり、 T_C が 270K の時、上限値は 10 倍になる。[2]

2. オリフィス型パルス管冷凍機の効率

図 1 に示すようにオリフィス型パルス管冷凍機は入力源、入力管、室温(T_R)熱交換器と低温(T_C ($< T_R$))熱交換器に挟まれた蓄熱器、室温熱交換器、オリフィス、バッファタンクで構成されている。以後の議論では以下の 5 つの条件が満たされる理想的な場合を考える：(A)オリフィス以外での散逸は無視できる、(B)熱交換器以外では外界と熱のやり取りが行われない、(C)作動流体は理想気体である、(D)入力管とパルス管では作動流体は断熱可逆的に振動する、(E)蓄熱器では作動流体は常に壁と等しい温度を保ちながら局所等温可逆的に振動する。

Fig.1(a)に示したように x 軸を取った時、前記の 5 つの条件が満たされた装置内のエネルギー流の x 軸に沿った分布は Fig.1(b) のようになる。ここで I は仕事流、 Q は熱流である。エネルギー流の符号はその方向を表す。符合が正の時、エネルギー流は x 軸の正の方向へ向かい、符合が負の時、 x 軸の負の方向へ向かう。

まず、入力管のエネルギー流に注目する。入力管では熱流はゼロであり、仕事流のみが存在する。また、この管では散逸が無いと仮定しているので、仕事流の大きさは x に依存しない。従って、入力源から入力された仕事流 I_m と蓄熱器室温端に流れ込む仕事流 I_R は等しい。つまり

$$I_m = I_R \quad (1)$$

となる。

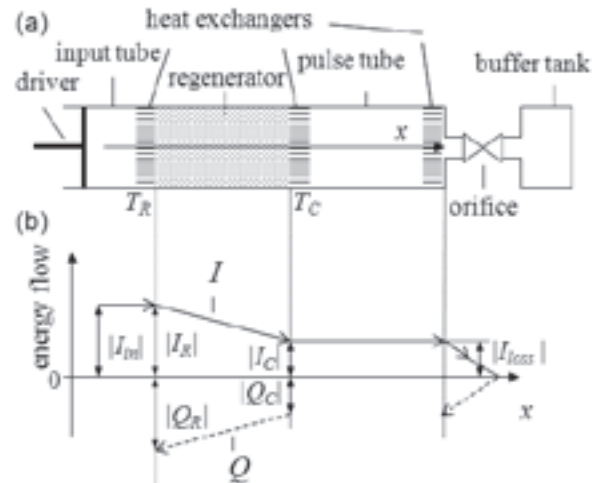


Fig. 1 (a) Schematic illustration of an orifice pulse tube refrigerator. (b) Axial distribution of energy flows in the refrigerator.

次に、蓄熱器室温端での熱流の大きさ $|Q_R|$ と低温端での熱流の大きさ $|Q_C|$ の関係を考える。蓄熱器におけるエントロピー生成量 σ は蓄熱器室温端での温度 T_R と熱流の大きさ $|Q_R|$ 及び低温端での温度 T_C と熱流の大きさ $|Q_C|$ を用いて

$$\sigma = \frac{|Q_R|}{T_R} - \frac{|Q_C|}{T_C} \quad (2)$$

と書け、不可逆過程が無い蓄熱器を考えているので(条件(E))、 σ はゼロになる。従って

$$\frac{|Q_R|}{T_R} = \frac{|Q_C|}{T_C} \quad (3)$$

が成り立つ。

全エネルギー流 E は熱流 Q と仕事流 I の和で与えられ、蓄熱器では $E = 0$ となる；

$$E = Q + I = 0 \quad (4)$$

この関係から分かるように、蓄熱器ではどの位置 x においても仕事流と熱流の向きは反対で、それらの絶対値は等しい。従って、蓄熱器室温端における熱流の大きさ $|Q_R|$ と仕事流の大きさ $|I_R|$ の関係は、

$$|Q_R| = |I_R| \quad (5)$$

となり、蓄熱器低温端における熱流の大きさ $|Q_C|$ と仕事流の大きさ $|I_C|$ の関係は、

$$|Q_C| = |I_C| \quad (6)$$

となる。これら式から明らかのように、熱流の大きさの比 $|Q_R|/|Q_C|$ と同様に仕事流の大きさの比 $|I_m|/|I_C|$ も T_R/T_C に等しい。

最後に、パルス管及びオリフィスでのエネルギー流について考える。パルス管では入力管内と同様に熱流はゼロで仕事流のみが存在する。また、パルス管では散逸が無い。その為、蓄熱器低温端から出力された仕事流はその大きさを保ったままパルス管を通過し、オリフィスに流れ込む。オリフィスの位置からさらに x を増加させた位置では仕事流を減少させる機構

が無い。従って、オリフィスに流れ込んだ仕事流はすべてオリフィスで熱流に変換され、変換された熱流は熱交換器から系外へと出される。

Fig.1(b)から分かるようにオリフィスで散逸される仕事流の大きさ $|I_{loss}|$ と蓄熱器低温端での仕事流の大きさ $|I_d|$ は等しい。得られる冷凍出力は $|Q_d|$ であり、上に式で示したように $|I_d|$ は冷凍出力 $|Q_d|$ に等しい。従って、オリフィス型パルス管冷凍機の冷凍出力 $|Q_d|$ を大きくすると、オリフィスでの散逸 $|I_{loss}|$ も必然的に大きくなる。逆に言うと、オリフィスでの散逸を増やすことで、冷凍出力が大きくなる。この効果が Basic 型に比べてオリフィス型パルス管冷凍機の性能が向上した要因の一つであると考えられる。

装置内のエネルギー流が Fig.1(b)の様に書けるオリフィス型パルス管冷凍機のシステムとしての効率について考える。オリフィス型パルス管冷凍機がシステム全体で消費する仕事流の大きさは Fig.1(b)から分かるように $|I_m|$ である。一方、出力として得られる冷凍出力は Q_C である。そこで、オリフィス型パルス管冷凍機の効率を

$$\eta = \frac{|Q_C|}{|I_m|} \quad (7)$$

と定義する。式(1)に示したように I_m は I_R に等しい。したがって式(7)及び式(5), (3)を用いると、パルス管冷凍機の効率は

$$\eta = \frac{|Q_C|}{|I_R|} = \frac{|Q_C|}{|Q_R|} = \frac{|T_C|}{|T_R|} \quad (8)$$

と書ける。[3]

η をカルノー効率と比べる。温度 T_R と温度 T_C の熱源を持ったカルノー熱機関が冷凍機として稼動した時の効率は

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_C}{T_R - T_C} \quad (9)$$

となる。式(8)と式(9)を比べると、 η は常に η_{Carnot} より小さいことが分かる。これは蓄熱器低温端から出力された仕事流 I_C がエネルギー変換に寄与せず、オリフィスに流れ込み、散逸されるからである。

3. 効率改善策

式(7)と式(9)を比べると明らかなように、 T_C が T_R に比べて十分小さければ η は η_{Carnot} と同じ値になる。しかし、 T_C が T_R と近い値になると、両者の差は大きくなる。この事実から判断して、オリフィス型パルス管冷凍機を用いて室温に近い低温を高効率で得るためには、装置の改良が必要である。また、パルス管冷凍機が実際に用いられることがある $T_R=300\text{K}$, $T_C=77\text{K}$ の時、 $\eta/\eta_{Carnot}=0.74$ となり、 η は η_{Carnot} を大きく下回る。

η を η_{Carnot} と等しくするためには、蓄熱器低温端から出力された仕事流 I_C をスターリング冷凍機の低温側ピストンが行うように蓄熱器の室温側に戻す必要がある。[4] それを実現するには、オリフィスとバッファタンクの変わりに仕事流の再利用を可能にするフィードバックパスを Fig. 2(a)に示すように設ければよい。

Fig. 2(a)に示すように x 軸を取った時の冷凍機内のエネルギー流を Fig. 2(b)に示した。蓄熱器低温端から出力された仕事流 I_C はフィードバックパスを通して図中の A 点に到達する。そしてこの点で、入力源から出力された仕事流 I_m と合流する。従って、式(1)は満足されなくなり、蓄熱器室温端から流入する仕事流の大きさは

$$I_R = I_m + I_C \quad (10)$$

となる。また、式(3), (5), (6), (10)から

$$\begin{aligned} I_m &= I_R - I_C \\ &= \frac{T_R}{T_C} Q_C - Q_C \end{aligned} \quad (11)$$

が得られる。

フィードバックパスが存在しても、冷凍機に投入される仕事流の大きさは I_m であり、今 I_m は式(11)のように書ける。従って、

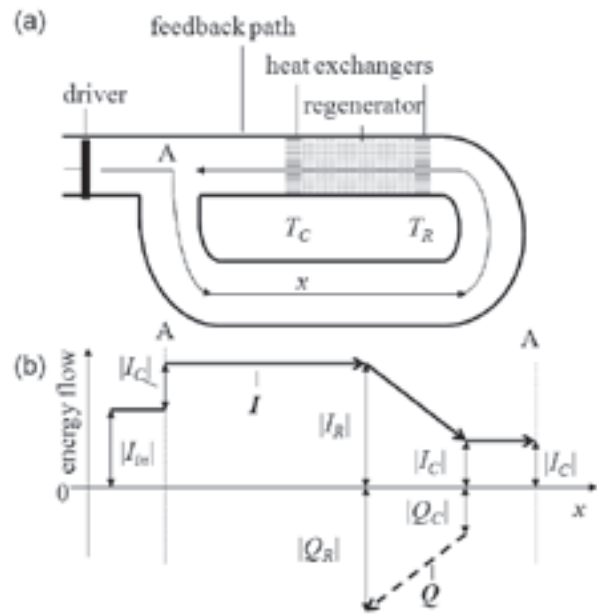


Fig. 2 (a) Schematic illustration of a pulse tube refrigerator having a feedback path. (b) Axial distribution of energy flows in the pulse tube refrigerator.

Fig. 2(a)に示すパルス管冷凍機の効率は式(11)を式(7)に代入することで

$$\eta' = \frac{T_C}{T_R - T_C} \quad (12)$$

となる。これは式(9)のようにかける η_{Carnot} に等しい。(もはやオリフィス型とは呼べなくなるが) 従って、オリフィスとバッファタンクの代わりにフィードバックパスを設けることによって、理想的な条件下で稼動するパルス管冷凍機の効率はカルノー効率まで引き上げられる。

上でも述べたように、オリフィス型パルス管冷凍機では、蓄熱器低温端から出力された仕事流はオリフィスで必然的に散逸される。これに対して、今回示した改良型パルス管冷凍機では蓄熱器低温端から出力された仕事流は再利用され、理想的には散逸は生じない。散逸が生じないので、理想的な条件下での改良型パルス管冷凍機の効率の上限値はオリフィス型の効率の上限値に比べて大きくなる。フィードバックパスによる効率の上限値の引き上げ効果は高温端と低温端の温度差が小さければ小さいほど大きくなる。従って、家庭用冷凍(蔵)庫としてパルス管冷凍機を利用するならば、フィードバックパスの設置が必須である。また、冷凍機の高温端が室温で低温端の温度が窒素温度(77 K)の時でも効率の上限値は 1.3 倍になるので、フィードバックパスを用いると従来の 77 K-パルス管冷凍機の効率が改善されるかもしれない。

参考文献

1. TOMINAGA Akira: "Fundamental Thermoacoustics" Uchida Rokakuho (1998)
2. UEDA Yuki and BIWA Tetsushi: TEION KOGAKU, Vol. 41 (2006) p. 73
3. Peter Kittel: Cryogenics, Vol. 32 (1992) p. 843
4. Swift, et al.: Journal of Acoustical Society of America, Vol. 105 (1998) p. 711

宇宙探査ロボット～極限環境への挑戦～

Robotics for Space Exploration: Challenges to Extreme Environments

吉田 和哉(東北大学)

YOSHIDA Kazuya (Tohoku University)

E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

宇宙探査は極限環境への挑戦である。地球を遠く離れた世界でミッションを行う機械システムは、地上とは異なる環境条件に適合しなければならない。よって人工衛星のような宇宙機や宇宙探査のためのロボットシステムを開発する際には、以下の点に留意する必要がある。

(1)真空環境

地表高度 100km 以上の世界は、高真空環境である(100km で 0.1Pa, 地表大気圧 100 万分の 1 程度)。火星表面は 1/100 気圧以下、金星表面は約 90 気圧であるが、これらの惑星表面を除けば、探査機が活動する場所はほぼ真空の世界であるといつてよい。

(2)高温/低温環境

真空であることは、温度環境に強い影響を与える。地上では空気の対流により熱が移送されるが、真空環境では、熱の移動はふく射と伝導によってのみ起こる。たとえば地球周回軌道上では、太陽に照らされている面では約 1.37kW/m²の熱流入があり、日陰では、-270°C (3K)の宇宙空間へ向けてふく射による熱放射がおこる。地球は平均温度 254K の発熱体であるとモデル化される。宇宙機/探査ロボットの設計の際には、これらの境界条件と機器内部の発熱量との関係から、温度設計、温度制御をしなければならない。

(3)潤滑

真空であることは、機械摺動部の潤滑をも困難にする。大気中では、金属表面に酸化膜が形成されるので凝着はおこりにくい。真空環境で金属同士を擦りあわせると容易に凝着する。液体潤滑剤は真空中ではすぐに気化してしまう。これを防ぐために特殊なシールが必要であり、いずれにしろ長期間のミッションには不向きである。よって、多くの場合固体潤滑が用いられる。

(4)微小重力

地球周回軌道を飛行する宇宙船の内外部は微小重力の世界である。火星表面は地表の 1/3, 月面は 1/6, 小惑星表面は 10 万の 1 程度の重力環境である。したがって、重力が小さい世界で確実に動作する機械を開発しなければならないが、地表(1G)の世界でその動作検証をすることは、意外と難しい。

(5)遠距離

電磁波の速度は有限であるため、遠い世界との無線通信では伝達時間遅れを考慮しなければならない。36,000km 上空の静止軌道衛星との往復には単純計算で約 0.25 秒、月面との往復には約 2.5 秒かかる。火星の場合には地球との位置関係により 8~40 分にもなる。地表高度数 100km を飛行する低軌道衛星は通信遅れとは無縁のように思われるが、地上の 1 点からの可視時間が限られてしまうため、常時交信を保つためには静止衛星と地上局を組み合わせさせた中継網を経由する必要がある。この場合、中継器の伝送遅延も加算され、往復 5 秒程度以上にもなってしまう。よって宇宙機/探査ロボットを遠隔操縦する際にはこれらの遅延を補償する工夫が必要であり、特に火星探査等においては、相応の自律性が必要となる。

(6)未踏の自然地形

月惑星表面を探査するロボットは、未踏の自然地形の上を自在に移動しなければならない。平坦に見える地形でも、月惑星表面はレゴリスと呼ばれる、岩石が砕けた破片であるパウ

ダー状の堆積物で覆われており、その上を安全に踏破する技術が求められる。また、岩石地帯ではさらに高い踏破性能が必要である。

宇宙探査ロボットを開発する際には、以上に述べた環境条件を考慮しなければならない。本講演では、筆者がこれまで経験した(あるいは現在研究開発中の)宇宙開発・宇宙探査プログラムについて、宇宙に特有な極限環境への挑戦という視点から、それぞれ簡単に概要を述べる。

2. 技術試験衛星 VII 型「おりひめ・ひこぼし」

「おりひめ・ひこぼし」と名づけられた技術試験衛星 VII 型 (Fig.1) は、宇宙開発事業団 (NASDA, 現宇宙航空研究開発機構 JAXA) により開発され、1997 年に打ち上げられた。同衛星は、地球周回軌道上で「おりひめ」と「ひこぼし」に分離し、自動制御によるランデブー・ドッキングの技術試験、および「ひこぼし」の上に取り付けられたロボットアームを用いて軌道上ロボット実験を行うことを目的としたものであり、いずれも先端的な検証試験を行った。

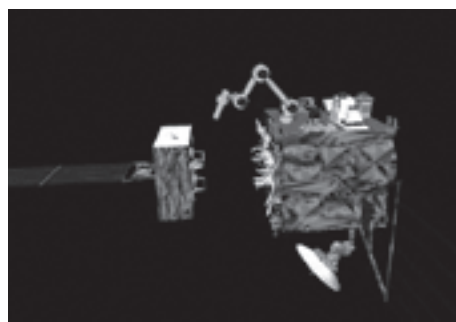


Fig.1 Engineering Test Satellite-VII.
“Hikoboshi”(right) and “Orihime”(left)

同衛星の最大の特徴は、「ひこぼし」上に長さ 2m のロボットアームを搭載していることであり、このアームを用いて ORU (Orbital Replacement Unit) と呼ばれる専用ユニットの交換、構造物の展開・組み立て、子衛星である「おりひめ」のハンドリングなどの基礎実験を行った。これらの技術は、たとえば、軌道上で寿命を迎え、もしくは故障してしまった衛星を捕獲し、バッテリー交換や燃料補給により延命を行うなどの可能性に道を拓くものであり、無人の軌道上宇宙ロボットとして、世界初の技術実証となった[1]。

軌道上の衛星は微小重力環境に浮遊した状態にあるので、衛星上でアームを運動させると、その反動で衛星本体の姿勢が乱れてしまう。しかし、その反動の様子は力学的に一意に定まる。筆者は、反動の力学を考慮したロボットアームの制御法を開発し「おりひめ・ひこぼし」を用いて検証実験を行った[2]。また、中継局を経由した地上の操縦卓から衛星までの往復通信時間がおよそ 7 秒もかかり、時間遅れを補償する遠隔制御方式も開発され実験検証がなされた[3]。

3. 小惑星探査機「はやぶさ」

小惑星探査機「はやぶさ」は、小惑星のひとつを詳細に探査し、その表面から岩石サンプルを採取して、地球へ持ち帰ること(サンプル・リターン)を目指したものである。宇宙科学研

究所 (ISAS, 現宇宙航空研究開発機構 JAXA)により開発され、2003年に打ち上げられた。2005年9月には小惑星「イトカワ」(Fig.2)に到着した。その後上空から詳細な科学探査を行い、11月には表面へのタッチダウン・サンプリングを2回試みた(Fig.3)。小惑星「イトカワ」は、これまで詳しく調べられたことがない、太陽系創成時の物質がそのまま残されているタイプの天体であることがわかり、非常に大きな科学的成果が得られている[4]。

同探査機には、多くの非常にチャレンジングな新規技術が盛り込まれているが、筆者はその表面からサンプルを採集する機構の開発と、タッチダウン時の運動解析に参加した。「イトカワ」はいびつな形をしており、長辺方向でも550m程度の大きさしかない。よって、表面における重力の大きさは地球の10万分の1であり、このような微小重力表面には長時間安定して立っていることはできない。よって、表面に軟着陸シドリルによりコアサンプルを得るような方式は成立せず、上空からある程度の速度を持って降下し、わずかに数秒間表面に触れ、その間に表面を破碎してサンプルを得て、その直後には急上昇するという、“touch-and-go”方式が採用された。

2005年11月25日(世界時)のタッチダウンにおいて、この一連の動作は予定通り実行されたと考えられる。しかしその後姿勢制御系に予期せぬトラブルが発生し、懸命の回復運用がなされた。現在、2010年の地球帰還へ向けて飛行を続けている。

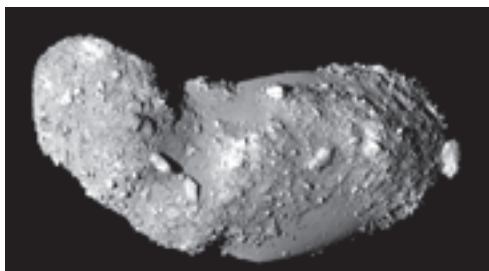


Fig.2 A close-up image of Asteroid "Itokawa"(JAXA)

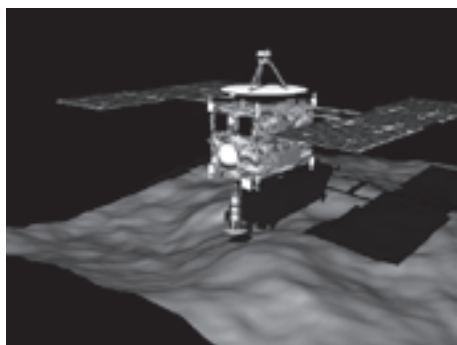


Fig.3 Simulation of Hayabusa touch down

4. 月面探査ローバー

2007年9月14日、JAXAが開発した月周回探査機「かぐや」が打ち上げられた。月周回軌道への投入にも成功し、順調な運用が続けられている。同探査機による観測は、1960-70年代のアポロミッション以来の本格的な月面探査といわれており、月全球の詳細な地形図を作製し、表面の鉱物組成、上空から電波による地下構造の探査などを行うことが予定されている。現在、月面探査は国際的な注目を集めており、「かぐや」による全球調査は、今後表面に軟着陸し、移動探査へと展開していくための重要な一歩となるであろう。

月は、地球の周りを回る公転周期と自転周期が同期しており、約27.3日である。自転周期が約2週間というのはきわめて大きな値であり、月面上ではおよそ1週間の昼間と1週間の夜が繰り返される。月には大気がないため、赤道付近では昼間の加熱が続くと表面温度は110℃にもなり、一方、夜にな

ると冷却が続き-170℃まで下がる。従って、月表面に長期間置かれる機器は、このような激しい温度差に耐えなければならない。ちなみに、米国のアポロ計画では計6回、12人の宇宙飛行士が月面に降り立ったが、着陸地点は赤道に近いエリアであり、月面に滞在したのは昼の時間帯のみであった。-170℃という極低温を乗り越える月面越夜技術は、今後の大きな課題である。地中に潜りこんで断熱するなどのアイデアが議論されている。

月表面の大半はレゴリスと呼ばれるパウダー状の砂で覆われており、その表面を自在に走り回るための技術が、移動ロボット(ローバー)による表面移動探査を展開していくために重要となってくるであろう。筆者の研究グループでは、Fig.4のように車輪1輪と月模擬砂を用いて、レゴリスのような軟弱土壌において、どのように車輪がスリップし、どれだけ駆動力を得ることができるかを明らかにするための基礎研究を行うとともに、Fig.5のような試験モデルを製作してスリップを考慮したナビゲーションの研究を進めている[5]。土壌力学の研究は、今後掘削探査を行うためにも重要な基礎となる。



Fig. 4 Single wheel test with simulated lunar soil



Fig. 5 Field test of a lunar rover

5. あとがき

1994年のクレメンタイン探査機(米国)、1998年のルナ・プロスペクター探査機(米国)の観測により、月の極域で永久日陰を形成しているクレーターの底には H_2O の水が存在する可能性が指摘されている。もしも、採掘可能な水が存在することが確認されれば、今後の月面探査・開発プログラムが大きく加速されることとなるであろう。しかし、月面極域の温度-190℃~-120℃程度であるといわれており、このような極低温環境でクレーターの底を掘削し水を採掘することは、きわめて大きな技術チャレンジである。宇宙探査は極限環境への挑戦であり、それを克服するためには様々な工学技術の融合が求められている。

参考文献

1. M.Oda, et al., "ETS-VII, Space Robot In-Orbit Experiment Satellite", Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 739-744, (1996)
2. K. Yoshida "Engineering Test Satellite VII Flight Experiments For Space Robot Dynamics and Control: Theories on Laboratory Test Beds Ten Years Ago, Now in Orbit," International Journal of Robotics Research, Vol.22, No.5, pp.321-335, (2003)
3. W-K. Yoon, T. Goshozono, H. Kawabe, M. Kinami, Y. Tsumaki, M. Uchiyama, M. Oda and T. Doi, "Model-Based Space Robot Teleoperation of ETS-VII Manipulator," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 3, pp. 602-612, (2004)
4. Hajime Yano, T. Kubota, H. Miyamoto, M. Kinami, D. Scheeres, Y. Takagi, K. Yoshida, M. Abe, S. Abe, O. Barnouin-Jha, A. Fujiwara, S. Hasegawa, T. Hashimoto, M. Ishiguro, M. Kato, J. Kawaguchi, T. Mukai, J. Saito, S. Sasaki, M. Yoshikawa, "Touchdown of the Hayabusa Spacecraft at the Muses Sea on Itokawa", Science, Vol. 312. no. 5778, pp. 1350-1353, (2006)
5. G. Ishigami, A. Miwa, K. Nagatani and K. Yoshida "Terramechanics-Based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil", The Journal of Field Robotics, Volume 24, Issue 3, pp. 233-250, (2007)

CIC 導体内における Nb₃Sn 素線の超電導特性の数値解析・評価

Numerical Simulation of Critical Current Degradation of Nb₃Sn Strand in CIC Conductor

村上 陽之, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 小泉 徳潔, 奥野 清(原子力機構)

MURAKAMI Haruyuki, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); KOIZUMI Norikiyo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
E-mail: murakami@fuji.waseda.jp

1. はじめに

Nb₃Sn/CIC 導体を用いたモデル・コイル試験の結果、電磁力による素線の局所的な曲げ変形が原因と考えられる劣化が観測された。そこで、Nb₃Sn 素線の曲げ変形に対する臨界電流特性を調べるため、分布定数回路を用いた数値解析コードを開発した。解析結果は実験結果とよく一致したことから、本解析コードを用いて、素線の一軸方向の歪特性を用いて、周期的な曲げ変形を受けるような CIC 導体内での素線の臨界特性を評価することができると思われる。

これまでの研究により、ブロンズの抵抗率などの電気的な特性より素線に加わる曲げモーメントを小さくすることや素線の曲げ剛性を高めることなど機械的特性を向上させることで特性劣化を抑えられることがわかっている。そこで、今回は曲げ剛性に着目し、安定化銅の部分にタンタルの補強材を施した場合に、素線の劣化がどの程度抑えられるか評価したので報告する。

2. 解析モデル

CIC 導体内の素線の曲げ変形を模擬するために、素線に 5 mm 周期の曲げ変形を人為的に加えた実験⁽¹⁾および素線に純曲げを加えた時の実験に対して以下の解析を行った。

素線が曲げ変形を受けると、一部のフィラメントは大きな歪を受けて臨界電流値が低下する。その結果、フィラメント間で電流が転流する。この現象を分布定数系回路を用いてモデル化した⁽²⁾。長手方向の超電導フィラメントの抵抗は n 値モデルを用いて計算し、I_c、n 値の歪依存性も考慮した。フィラメントの歪は、曲げによる歪と銅母材との熱収縮差による歪の和として与えた。素線の曲げ歪分布は両端固定梁モデルを仮定し計算した。銅、ブロンズの塑性および Nb₃Sn フィラメントの破断を考慮し Fig. 1、Fig. 2 に示すような非線形の応力歪特性を用いた。また、タンタルについては弾性変形を仮定し、そのヤング率は 180GPa とした。また、断面内のフィラメント間コンダクタンスは有限要素法で導電問題を解き等価的な値を求めた。

実験と解析の結果を Fig.3 に示す。実験と解析は比較的良好に一致している。そこで、素線をタンタルで補強した場合の特性劣化について評価を行った。

3. CIC 導体内での Nb₃Sn 素線の曲げ特性

Fig.4 に安定化銅に、12 本のタンタルの補強材(半径 30μm)を通した時の素線断面の模式図を示す。Fig.5 にタンタルの補強材の半径を変化させ劣化特性に及ぼす影響を評価した結果を示す。

補強材がない場合は、6000N/m 程度の負荷で I_c がほぼ 0 となってしまいが、半径 30μm のタンタルの補強材用いることで、I_c の劣化を半分程度に抑えられることがわかる。

4. まとめ

以上の結果より、素線内に補強材を通し、素線全体の曲げ剛性を高めることで劣化を抑えることが可能であることが示された。

今後は、本解析コードを用いて素線の特性劣化を抑えるような素線構造を設計するとともに、実際の集合導体の場合に、どの程度特性劣化を抑えられる効果があるか評価して必要がある。

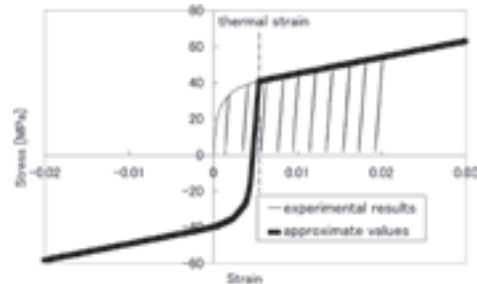


Fig.1 Stress-strain curve of copper.

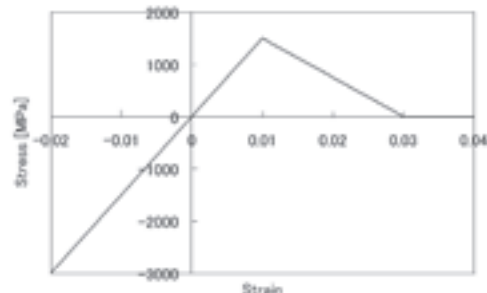
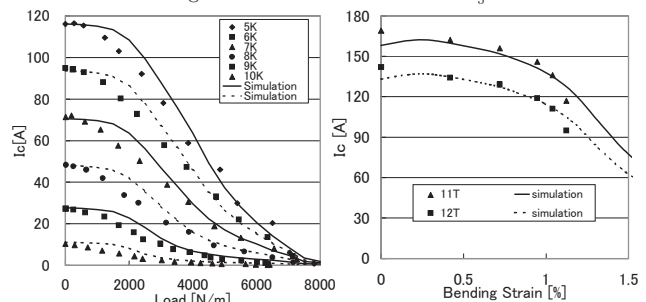


Fig.2 Stress-strain curve of Nb₃Sn.



(a) periodical bending strain (b) uniform bending strain
Fig.3 Comparison between experiments and simulations

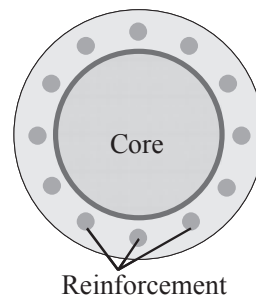


Fig.4 cross-section of Nb₃Sn Strand

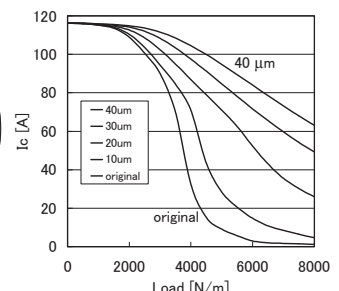


Fig.5 Dependency of critical current on Ta radius.

参考文献

- N. Koizumi, et al.: "Development of large current superconductors using high performance Nb₃Sn strand for ITER," *Physica C*, Volumes 463-465, October 2007, pp. 1319-1326
- H. Murakami, et al.: "Numerical Simulation of Critical Current and n-value in Nb₃Sn strand Subjected to Bending Strain," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no.2, pp. 1394-1397, June 2007. .

JT-60SA 用超伝導コイルの概念設計

Conceptual design of superconducting coils for the JT-60SA

吉田 清、土屋 勝彦、木津 要、松川 誠 (原子力機構)
 YOSHIDA Kiyoshi, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MATSUKAWA Makoto (JAEA)
 E-mail: yoshida.kiyoshi56@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構のJT-60トカマク装置を超伝導化する国内計画が、日本とEU間の共同プロジェクト「サテライトトカマク」共同計画となった。それと並行して日本とEU間で進められてきたサテライトトカマク装置(JT-60SA)の概念設計[1]がほぼ完了し、超伝導導体の製作が今年度から開始される。本発表はJT-60SA用超伝導コイルの概念設計[2]と導体製作の計画を示す。

2. TF コイル

JT-60SA用トロイダル磁場(TF)コイルは、最大磁界が6.4TのためFig. 1(a)に示すようなNbTi導体を採用する。NbTi素線はLHD計画のダイポールで用いたNbTi素線を基に、Ni被服またはCuNi層を素線内に用いる2案を検討している。ジャケット材は厚さ2.2mmのステンレス鋼316LN材を用いたシームレス管を採用する。巻線は5ダブルバンケーキ(9ターン)構成である。

コイル容器は、厚板ステンレス鋼316LNを溶接で組み立てる構造(Fig.2(a))である。18個のTFコイルは中心側でウェッジで向心力を支持し、TFコイルの外側のコイル間支持構造物で、コイルの転倒力を支持する構造で、ITERのTFコイルの支持構造と近い構成となっている。

3. 中心ソレノイド

中心ソレノイド(CS)は、最大磁界が9Tと高いためITERで開発したNb₃Sn素線をそのまま採用する。ジャケット材もITER-CSで用いる高マンガン鋼(JK2LB)を採用する。CS用導体には、交流損失の熱を除去するために中心冷却チャンネルが必要で、Fig. 1(b)に示すようにITER-CS導体と相似な形状をしている。

4個のモジュールはタイプレートによって上下に離反力を抑えている。JK2LBは熱収縮が0.2とステンレス鋼(0.3)より少ないので、絶縁材料大きな収縮(0.7)を考慮しても、初期組立時の加圧を少なく出来る。タイプレートの間には小型なバット接続を採用することにより、発生磁界を低く抑えて磁束を発生を最大に出来る方式はITER-CSの設計方針を踏襲している。

4. EF コイル

平衡磁界(EF)コイルは、2個の最大磁界が6.2Tの小口径コイルと、5個の最大磁界4.8Tの大口径コイルから構成される。NbTi素線はTF用素線と同等にLHDダイポール素線を基に仕様が決された。ただし、交流損失が大きいのでNi被服を採用しなければならない。ジャケット材は厚さ3.1-2.95mmのステンレス鋼316L材を用いたシームレス管を採用した導体をFig. 1(c)(d)に示す。巻線は、大型コイルの3個が導体の長さの制限から2条巻線を採用せざるを得ない。コイルはクランプで支持され、冷却配管などを配置したEF4の巻線と支持構造をFig. 2(c)に示す。

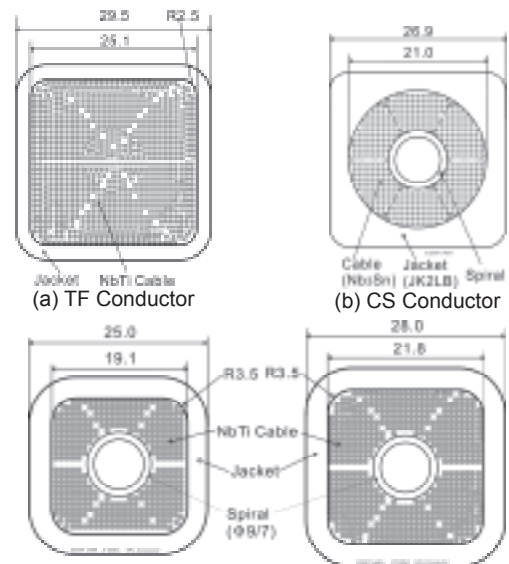
5. 計画

JT-60SA用超伝導コイルの概念設計は完了し、国内外のコメントを得て、概念設計書[1]にまとめられた。この概念設計を基に、CSとEF導体の製作について調達合意書を作成した。各方面のコメントを得て、調達合意書は10月にEU側と合意できたので、今年度内にCSとEF導体の製作を開始することとなった。

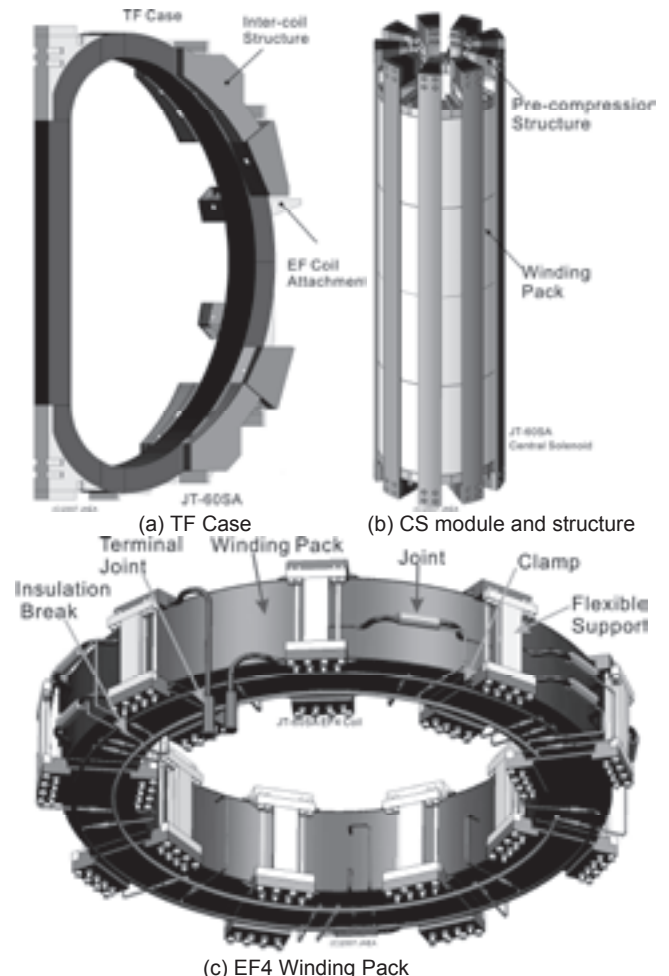
参考文献

- [1]JAEA, "Conceptual Design Report on JT-60SA", unpublished
 [2]K. Yoshida, et al. , "Conceptual Design of Superconducting

Magnet System for JT-60SA", presented at MT-20 (2007)



(c) EF Low Field Conductor (d) EF High Field Conductor
 Fig. 1 CICC conductors for JT-60SA superconducting coils



(c) EF4 Winding Pack
 Fig. 2 Superconducting coils for JT-60SA

JT-60SA 超伝導マグネット用絶縁物の機械強度評価

Evaluation of mechanical strength of the insulation for the superconducting magnets in JT-60SA

土屋勝彦、枝谷 昌博、鈴木 優、木津 要、吉田 清、松川 誠 (原子力機構)

TSUCHIYA Katsuhiko, EDAYA Masahiro, SUZUKI Yutaka, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi, MATSUKAWA Makoto (JAEA)

E-mail: tsuchiya.katsuhiko@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置における超伝導マグネットを構成する、トロイダル磁場 (TF)、平衡磁場 (EF) コイル、セントラルソレノイド (CS) の各コイル系に用いられている絶縁物の機械的強度について評価するため、ターン間絶縁や対地絶縁が受ける、垂直応力とせん断応力の関係と、これに基づく評価基準を導入した。この基準を用いて、現設計における各コイルの絶縁物の機械強度を評価した。

2. 評価基準

本装置の絶縁物の評価として、北村他[1]によって報告された基準 (以下、LHD criteria) を用いる。絶縁体接着面に垂直な応力が「引き剥がし」方向となると、ITER-DDD[2]に掲載されている評価基準では評価不可能であったが、LHD criteria では評価可能である。この LHD criteria の下で本装置を構成するコイル導体の絶縁部についての成立性を評価した。この評価基準は、絶縁物の接着面に垂直な応力 (σ_n) と、その面に沿ったせん断力 (τ_n) が、次の式で表される放物線の範囲内に収まれば、絶縁体は剥離しないと考えるものである。

$$\sigma_n / \sigma_0 + (\tau_n / \tau_0)^2 = 1$$

ここで、 σ_0 、 τ_0 は、本装置で使用する絶縁体と酷似した材料 (GKG) の物性から引用しており、それぞれ 38MPa、27MPa である。

3. トロイダル磁場 (TF) コイル導体の絶縁体

TF コイルは、その主たる支持を担うウェッジ部において、フープ力や向心力など、大きな電磁力を受け、導体ジャケットも複雑な変形を受ける。ここでは、荷重条件として、(1) 室温から 4K までの収縮荷重、(2) 定格運転時の TF コイル自己電磁力を考えた。さらに、(3) クエンチ時の内圧上昇も考慮した。この TF におけるクエンチ時内圧上昇は、最大 8MPa である。

Fig.1 に、(1)~(3) のすべての荷重が加えられた条件における LHD criteria の値を、最も変形の大きい TF 導体ジャケットで評価した結果を示す。

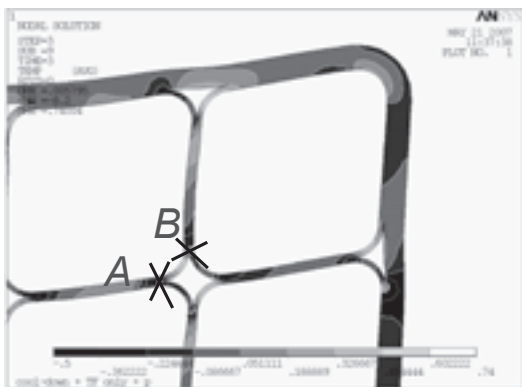


Fig.1 Contour figure of LHD criteria at the insulation on the corner part of TF winding pack.

Fig.2 に Fig.1 で示した評価ライン A と B における垂直応力・せん断応力の関係を、(1)、(1)+(2)、(1)+(2)+(3) のそれぞれの荷重条件で評価したものを示す。この結果、想定している最大荷重条件でも、現設計における TF 導体の絶縁体は十分な強度を持っていることがわかった。

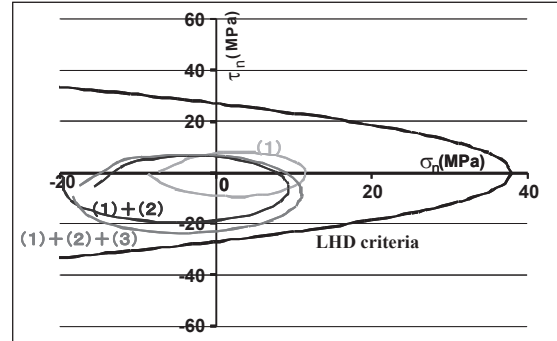


Fig.2 Relation between σ_n and τ_n on the lines A and B in Fig.1 under the various load conditions.

4. ポロイダル磁場 (PF) コイル (CS, EF) の絶縁体

CS の導体は、高電磁力条件下で繰り返し運転をするという特徴から、応力集中の出にくい、丸穴の矩形ジャケットを用いている。また、材料は JK2LB を使用している。Fig.3 に、CS モジュール間の引力が最大となる条件で、最大応力の表れたジャケット部における σ - τ 評価図を示す。この結果より、ジャケット平面部の絶縁体は接着したままだが、コーナー部の一部が剥離する評価となった。

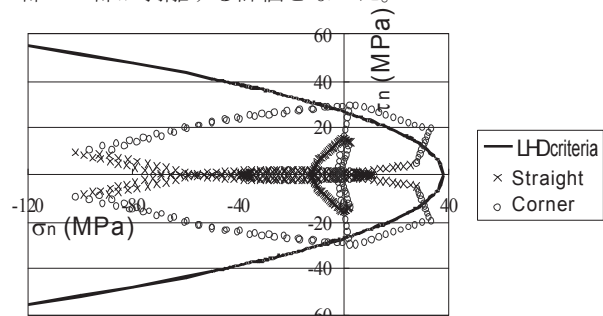


Fig.3 Relation between σ_n and τ_n of the turn insulation on the jacket at the innermost turn of CS module.

また、EF コイルについては、最大サイズを持つ EF6 に関して、その導体ジャケットの絶縁体を実験したところ、CS より範囲は狭いものの、コーナー部の一部で局所的に剥離することがわかった。

5. まとめ

JT-60SA の超伝導コイルの導体ジャケット部の絶縁物について成立性評価を行ったところ、TF コイル導体については問題はなく、PF コイル系導体ジャケットのコーナー部の一部で局所的に剥離評価となった。今後は、機械的試験などを含め、詳細な評価を行う必要がある。

参考文献

1. K. Kitamura, et al.: IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30 (1994) p.1879
2. ITER Design Descriptio Document (DDD) 11 Magnet, Section 2.2 Structural Analysis (2001)

JT-60SA の超伝導コイル導体におけるプラズマディスラプション時の発熱評価 Evaluation of heat generation caused by plasma disruption in superconductor of JT-60SA

木津 要, 吉田 清, 枝谷 昌博, 土屋 勝彦, 松川 誠 (原子力機構); 市毛 寿一 (TOSS)
KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi, EDAYA Masahiro,
TSUCHIYA Katsuhiko, MATSUKAWA Makoto (JAEA); ICHIGE Toshikatsu (TOSS)
E-mail: kizu.kaname@jaea.go.jp

1. はじめに

CS, EF コイルは、パルス運転するコイルであり、通常のプラズマ運転時において、熱負荷として交流損失が大きい。この通常運転状態において、さらにプラズマディスラプションが発生した場合でも分流開始温度に対する温度マージンが 1K 以上であることが要求されている。

ディスラプション時の温度マージンを、プラズマをプラズマ断面程度の矩形導体で模擬し、プラズマ電流の減衰時定数を真空容器(VV)の時定数として評価(集中電流モデル)したところ、外側の EF1 コイルにおいて、1K となり、要求値ぎりぎりとなった[1]。そこで本研究では、プラズマ、VV、バッフル板、常伝導の制御コイル、CS, EF コイルの電流の分布を考慮したより詳細な解析を行った。

2. 導体設計

CS, EF コイル導体の最大経験磁場はそれぞれ、9T, 6.2T であるため、CS 導体は Nb₃Sn, EF コイル導体は NbTi 素線を用いる[1]。CS, EF コイル導体は共に除熱特性を向上させるために導体中心にスパイラルで作られる冷却チャンネルを追加したケーブル・イン・コンジット型の強制冷却導体である。CS 導体(運転電流 20kA)は、応力が高いために、矩形断面のコンジットを用いる。一方、EF コイル導体のコンジットは、円形パイプに撚線を挿入した後、矩形に圧縮する方法を用いる。EF 導体は、その運転磁場・電流に応じて、4.8T-20kA 用の EF1,2,5,6,7 導体と 6.2T-20kA 用の EF3,4 導体の 2 種類の導体を設計した。Table 1 に各導体の設計パラメータを示す。

3. ディスラプション時の発熱評価

ディスラプションによる発熱評価を、以下の手順で行った。

(1)まず、コイルと VV、バッフル板、制御コイルの電流値の時間変化の回路解析をおこなった。VV、バッフル板、制御コイルは、98 個の 1 ターンコイル群として取り扱った。Fig. 1 にそのモデルを示す。また、プラズマは、6 本のフィラメント電流により模擬し、形状を変化させながら 4ms で減衰させた。(2)次に、回路解析により得られた電流値の時間変化を用いて、磁場解析コードにより各コイル導体の経験磁場の時間変化を計算した。(3)最後に、得られた経験磁場の時間変化より、交流損失

Table 1 Conductor Parameters for CS and EF coils.

	CS	EF12567	EF34
Type of Strands	Nb ₃ Sn	NbTi	NbTi
Operating Current (kA)	18.7 / 20	20	20
Nominal Peak Field (T)	9 / 8.5	4.8	6.2
Number of SC Strands	216	216	450
Number of Cu wires	108	108	0
Local Void Fraction (%)	34	34	34
Cable dimensions (mm)	φ21.0	19.1 x 19.1	21.8 x 21.8
Central hole (id x od) (mm)	7 x 9	7 x 9	7 x 9
Conductor external dimensions (mm)	26.9 x 26.9	25 x 25	28 x 28
Jacket material	JK2LB	SS316LN	SS316LN
Max. unit length of conductor (m)	352	637	434

を計算した。

標準運転シナリオにおいて運転条件が厳しい、CS2, EF1, EF4 コイルについて全ターンの交流損失を計算したところ、各コイルとも赤道面に近いパンケーキの発熱が大きくなった。また、コイル全体の交流損失は CS2 が最大で 114kJ となった。これは、集中電流モデルの場合の 2.7 倍であり、VV 内の誘導電流の半分がインボード側の直線部に集中していることに起因している。これにより、CS の外周側のターンでは 3K 温度上昇する。しかしながら、外周側のターンは経験磁場が低く温度マージンが大きいのでコイルがクエンチすることはない。一方、経験磁場が最大となる最内層ターンの交流損失は、EF1 が 19.5 mJ/cc-strand で最大となった。上記の交流損失より、EF1 コイルの最内層ターンの温度上昇を評価すると約 0.5K となり、標準運転シナリオによる発熱をあわせても、1.5K 程度の温度マージンを確保できる見通しを得た。

4. まとめ

JT-60SA の CS2, EF1, EF4 導体のディスラプションによる発熱評価をプラズマ、VV、バッフル板、常伝導の制御コイル、CS, EF コイルの電流の分布を考慮したモデルで行った。最内層の交流損失が最大となる EF1 においても、温度マージンは 1.5K 程度となり、集中電流モデルの結果より 0.5K 温度マージンが増加した。今後、全てのコイル導体について導体温度の解析を進める予定である。

参考文献

1. K. Kizu, et al.: "Conductor Design of CS and EF Coils for JT-60SA", Proc. of MT-20 (2007) to be published.

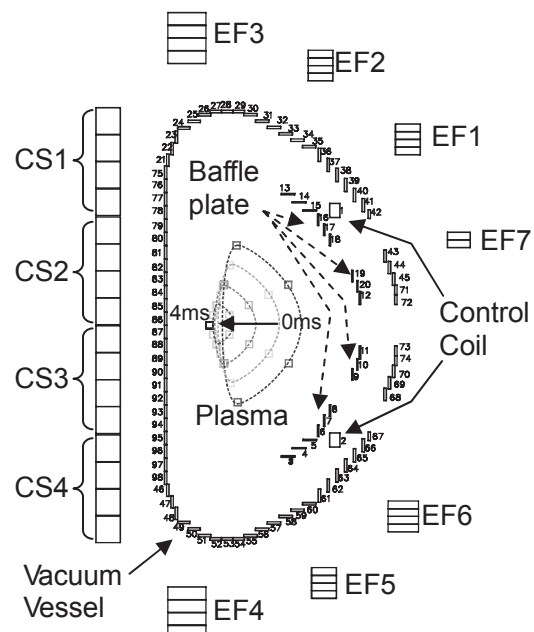


Fig. 1 Model for disruption analysis.

コイル保護に基づく YBCO 線材の安定化層厚の決定—SMES 用コイルを想定して

Determination of Stabilizer Thickness of YBCO coated Conductors Based on Quench Protection supposing SMES Coil Applications

番場 貞徳, 植田 浩史, 石山 敦士(早大)

BAMBA Sadanori, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超電導コイルは低温超電導コイルに比べて熱的安定性が極めて高く、擾乱によるクエンチの発生の可能性はほとんど無いと言ってよい。しかし実運転においては、電源や冷却系の故障などを想定したコイル監視・保護システムは高温超電導コイルにおいても必要不可欠である。筆者らは先に、超電導コイル応用における YBCO 超電導線材の安定化層厚の決定法として、コイルと並列に接続された外部抵抗によるコイル保護を想定したエネルギー回収条件に基づく決定法を提案した^[1]。今回は、SMES 用コイルを想定し、蓄積エネルギーが数百 kJ から数十 MJ 級のコイルについて必要となる安定化層厚の厚みを求めたので報告する。

2. 安定化層厚の決定法

コイル内に発生した常電導領域が断熱的に発熱・昇温すると仮定すると、熱平衡方程式は以下ようになる。

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \rho(T) J(t)^2 \quad (1)$$

ここで、 C は熱容量、 T は温度、 ρ は電気抵抗率、 J は電流密度である。常電導領域の温度が初期温度 T_0 から最大到達温度 T_m まで上昇したと仮定し、式(1)を整理すると、常電導領域の温度を T_m 以下に抑えるためのエネルギー回収条件が次のように求められる。

$$J_{e0} \leq \sqrt{\frac{V_m I_0}{E} \lambda_c^2 F(T_m)} \quad (2)$$

ここで、 E はコイルの蓄積エネルギー、 V_m はコイル両端の最大電圧、 I_0 はエネルギー回収開始時の運転電流、 J_{e0} はその時の線材の over-all 電流密度、 λ_c は安定化層の占積率、 F は F 関数である。最適な安定化層厚を決定するには、式(2)の右辺と $J_{e0} = I_0/SN$ (S : 線材の断面積、 N : 線材の枚数) が等しいとして、安定化層厚 l_{stab} を未知数とする方程式

$$\frac{V_m I_0}{E} \lambda_c^2 F(l_{stab}) - \left(\frac{I_0}{SN} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

をつくり、ここに各パラメータを代入して解けばよい。

3. 安定化層厚の決定

まず 10 MJ の SMES 用コイルを想定して Table 1 に示すようなパラメータが与えられたと仮定し、上で示した方法を用いて安定化層厚 l_{stab} を求めた。なお、安定化層の材料は Cu を想定した。例えば、線材並列枚数を 6、10、15 枚と仮定して計算すると、Table 1 に示した仕様の YBCO コイルの常電導領域における最高到達温度を 300 K に抑えるために必要となる安定化層厚は Table 2 のようになった。また、Table 1 の仮定のもと、コイルの蓄積エネルギー(0.5~50 MJ)、線材 1 枚当たりの運転電流(10~500 A)をパラメータとした時に必要となる安定化層厚を、コイル両端最大電圧 V_m が 1 kV、3 kV の場合について求めた結果を、それぞれ Fig. 1、Fig. 2 に示す。両図より、コイルの蓄積エネルギー、線材 1 枚当たりの運転電流が共に大きいほど、多くの安定化層厚が必要となることがわかる。また、コイル両端最大電圧を大きくすることで、必要となる安定化層厚を減らすことができることがわかる。

Table 1. Assumed parameter.

Stored energy E	10 MJ
Operating current I_0	3 kA
Operating temperature T_0	50 K
Maximum voltage V_m	1 kV, 3 kV
Maximum temperature T_m	300 K
Conductor width d	10 mm
Substrate (Hastelloy) thickness l_{sub}	100 μ m

Table 2. Required stabilizer thickness.

Number of parallel-connected conductors	6	10	15
Operating current for each conductor [A]	500	300	200
Stabilizer thickness [μ m] ($V_m = 1$ kV)	179.1	95.6	55.4
Stabilizer thickness [μ m] ($V_m = 3$ kV)	91.0	45.1	24.2

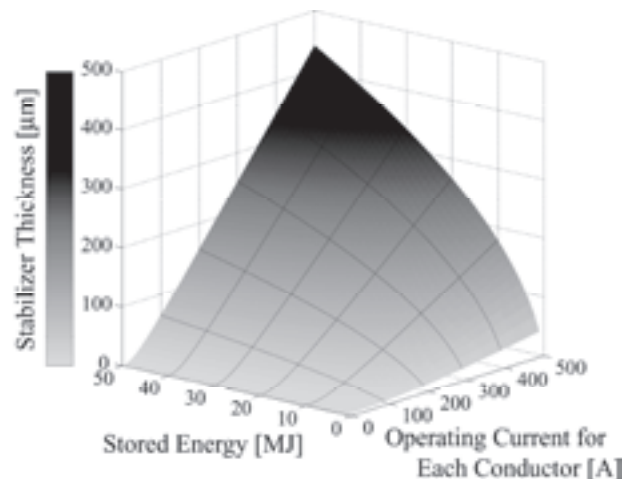


Fig. 1. Required stabilizer thickness ($V_m = 1$ kV).

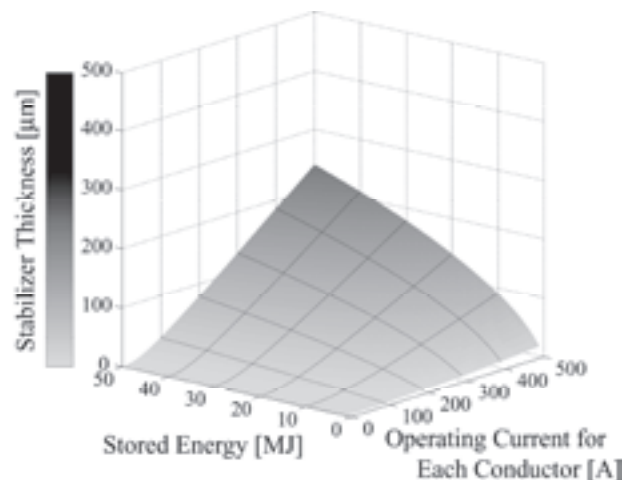


Fig. 2. Required stabilizer thickness ($V_m = 3$ kV).

文献

[1] 石山敦士・安東武利他：2006 年度春季低温工学・超電導学会、講演論文集 p 213, 214.

MOCVD-YBCO バンドル導体の熱損失特性に関する検討

Study on heat loss characteristic of bundled MOCVD-YBCO coated conductors

真鍋 智之, 中村 武恒, 東川 甲平 (京都大学); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫 (中部電力)

MANABE Tomoyuki, NAKAMURA Taketsune, HIGASHIKAWA Kohei (Kyoto Univ.);

SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: manabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

平成 16 年度より実施されている NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として、我々は MOCVD-YBCO 導体を用いた電力系統制御用 SMES を検討している¹⁾。伝導冷却 SMES を指向する場合、熱暴走他による焼損を避けるため、コイル設計段階で抜熱特性を詳細に検討しておく必要がある。本研究では、MOCVD-YBCO 線材を複数枚重ねたバンドル導体表面にヒータ発熱を与え、導体両面の温度変化を測定した。さらに、測定した温度変化に対して数値解析を行い、導体内部における熱拡散率を検討したので報告する。

2. 測定方法

YBCO 導体の諸元を表 1 に示す。バンドル導体は、Ag 面をポリイミドテープで絶縁した YBCO 導体 5 枚の積層構造とし、図 1 のように両端を銅ブロックに熱伝導グリスを用いて固定してある。バンドル後の導体厚みは 0.88 mm であった。また、その上面に長さ 70 mm、幅 10 mm のニクロム線ヒータを取り付け、本実験の熱源とした。ただし、試料中央部に温度センサを取り付けるため、ヒータ中央部には小さく穴が開いている。なお、バンドル導体表面に熱伝導グリスを薄く塗布して、ヒータとの熱接触改善を図っている。

上記試料を真空チャンバ内に設置し、GM 冷凍機による伝導冷却下で初期温度 T_0 (= 77, 64, 50, 37, 20 K) にて安定させた後、ヒータによって 1 分間の発熱を与え、バンドル導体両面の温度変化を測定した。

3. 測定結果および考察

図 2 に測定結果を示す。実線はバンドル導体のヒータ側表面温度、点線は裏面温度をそれぞれ表している。測定開始から 1 分後に約 284 mW のヒータ発熱を与えており、導体厚み方向に温度差が生じていることが分かる。また、 T_0 が下がるに従って、温度上昇が顕著に現れている。

ここで、温度上昇の立ち上がり部分においては、バンドル導体の厚み方向にのみ温度勾配が発生していると考えられる。そこで厚み方向の温度伝播を 1 次元熱伝導現象とし、これを差分法によって解析することで YBCO 線間の熱拡散率を検討した。結果を図 3 に示す。図中 Total と示したプロットがポリイミド絶縁を施した本 YBCO 導体全体の熱拡散率であり、Ag 層および Hastelloy 層のみの場合と比べて非常に小さいことがわかる。また、図中 Others と示したプロットは Ag 層と Hastelloy 層の影響を除いた、ポリイミドテープや熱伝導グリス他による熱拡散率である。 T_0 が低くなるにつれて値が減少していることが分かる。

その他、測定・解析結果の詳細については、講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO 線材は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。

参考文献

1) 東川甲平 他:2007年度秋季低温工学・超電導学会, 1B-a07.

Table 1. Specifications of YBCO Sample tape.

Length	84 mm	
Width	10 mm	
Thickness	Ag	10 μm
	YBCO	1 μm
	CeO ₂	0.4 μm
	GZO	1 μm
	Hastelloy	100 μm

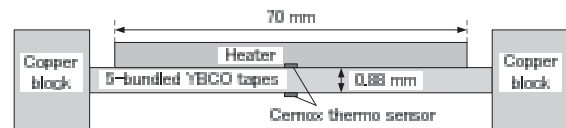


Fig. 1. Schematic of experiment object.

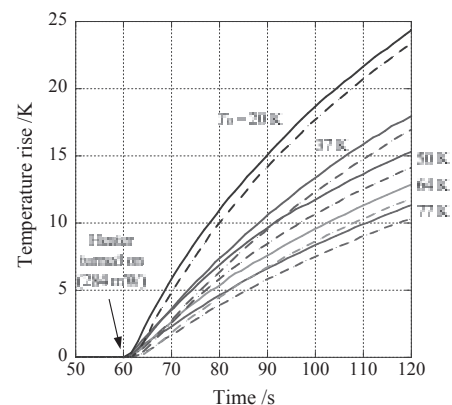


Fig. 2. Temperature traces for different initial temperature.

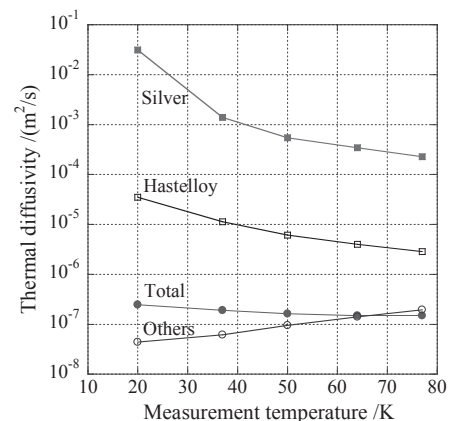


Fig. 3. Change in thermal diffusivity according to temperature.

YBCO インサートを適用した 50T 級ハイブリッドマグネット用 φ400-20T 超伝導マグネットの検討

Study of a 20T-400mm Bore Superconducting Outsert for a 50T-Class Hybrid Magnet by Using YBCO Insert

花井 哲, 小野 通隆, 小柳 圭(東芝); 渡辺 和雄, 濱島 高太郎, 淡路 智, 西島 元(東北大); 木吉 司, 熊倉 浩明(NIMS)

HANAI Satoshi, ONO Michitaka, KOYANAGI Kei (Toshiba); WATANABE Kazuo, HAMAJIMA Takataro,

AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen (Tohoku Univ); KIYOSHI Tsukasa, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: satoshi.hanai@toshiba.co.jp

1. はじめに

東北大学と NIMS では共同で新しい高磁界用マグネットの開発検討を行っている。よりコンパクトな高磁界超伝導マグネットを実現するため、これまで LTS 線と補強線との撚り線構成によりグレーディングした高強度導体を用い、運転温度を 2K とした 50T 級ハイブリッドマグネット用 φ400-20T 超伝導マグネットの設計検討を行ってきた[1]。しかしながら、LTS 線による撚り線導体では単線の場合と比較し、約 20% 占積率が低くなるなどのデメリットもあり、十分な電流密度が確保できなかった。ここでは、近年進歩のめざましい Y 系線材を内層高磁界部に用いた超伝導マグネットの設計検討を行ったので紹介する。

2. 設計検討条件

内層高磁界部に使用する YBCO 線材の臨界電流は、 $245\text{A/cm}^2@77\text{K}$ 、自己磁場とした。その他の設計検討条件は、これまでと同様の条件とした。

- ①コイル構成：YBCO 線材と金属系超伝導導体による多層ソレノイドコイル (コイル間ギャップ 5mm)
- ②定格電流/運転温度：1000A 弱/2K
- ③巻線最内径：φ440
- ④絶縁：素線絶縁 50μm, 層間 50μm

3. 設計検討結果

上記条件にて検討した 50T 級ハイブリッドマグネット用 φ400-20T 超伝導マグネットの設計検討例を Table 1 に示す。マグネットは 3 個の YBCO コイル, 2 個の Nb₃Sn コ

イルと 2 個の NbTi コイル, 計 7 層のコイル構成となっており、巻線部の概略形状は φ1080×1140 である。また、通電電流 903A 時に中心磁場 20.0T を発生し、磁気エネルギー 72MJ, Tcs 4.6K である。

Fig. 1 にコイル赤道面上での磁場分布と新・旧のコイル断面形状を示す。超伝導線材量、磁気エネルギーでの比較では、従来設計の約 50% となっており、内層コイルに YBCO 線材を採用することがコイルコンパクト化に有効であることが確認された。

参考文献

- 1) 花井他, 2006 年度秋季低温工学・超電導学会 1B-p02

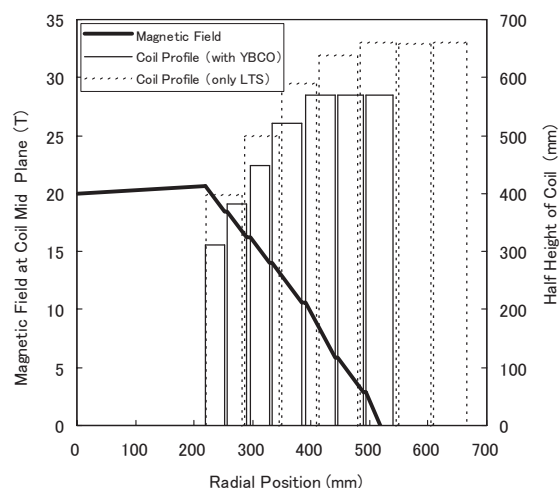


Fig.1 φ400-20T Superconducting Magnet of 50T Class Hybrid Magnet

Table 1 Designed Parameters of the φ400-20T Superconducting Magnet for 50T Class Hybrid Magnet

Coil ID		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Superconductor			YBCO		Cu-CuNb/Nb3Sn+SUS		Cu/NbTi+SUS	
Tape/Strand Size	mm	0.2×7.3	0.2×7.3	0.2×7.3	φ1.07	φ0.91	φ1.26	φ0.96
Construction of conductor	-	1+6	1+6	1+6	(4+5)	(4+5)	(3+4)	(3+4)
Conductor Length	m	2005	2852	3810	7898	13285	9841	18615
Inner radius	mm	220.0	257.8	295.5	333.3	390.0	446.0	494.6
Outer radius	mm	252.8	290.5	328.3	385.0	441.0	489.6	539.9
Coil height	mm	622.5	763.6	896.4	1041.5	1141.0	1138.3	1138.4
Operating current	A	903	903	903	903	903	903	903
Current density of conductor	A/mm ²	88.4	88.4	88.4	94.7	131.0	103.5	178.2
Magnetic field contribution	T	1.96	2.00	2.02	3.14	4.09	2.58	4.23
Maximum field	T	20.69	18.45	16.23	14.01	10.58	8.45	7.53
Operating temperature	K	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Hoop stress	MPa	402	420	424	442	541	272	251

Y系線材を用いた30T超伝導マグネットの設計

Design of a High-Field Insert Coil Wound with YBCO Coated Conductor for a 30 T Superconducting Magnet

小柳 圭, 小野 通隆, 花井 哲(東芝); 渡辺 和雄, 淡路 智, 濱島 高太郎(東北大); 木吉 司, 熊倉 浩明(NIMS)
 KOYANAGI Kei, ONO Michitaka, HANAI Satoshi (Toshiba); WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi,
 HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.); KIYOSHI Tsukasa, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
 E-mail: kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

東北大学とNIMSが導入を検討している新しい高磁界超伝導マグネットについて、設計検討を実施した。超伝導マグネットをコンパクト化するために、内層コイルに高温超伝導線材を採用し、 Nb_3Sn および $NbTi$ の外層コイルとからなる構成で ϕ 80mm に 30T を発生するマグネットを設計した。高温超伝導コイルには、線材長さ、超伝導特性ともに向上が著しく、機械的強度にも優れる Y 系線材の適用を想定した。

2. 設計検討条件

設計検討に際して、以下の項目を条件とした。

(1) コイルの基本構成

Y系, Nb_3Sn , $NbTi$ コイルのハイブリッド構成とした。

(2) 磁場分担

超伝導特性の磁場依存性と、導体コストとを考慮して設計した。今回の検討では、「Y系 12T + LTS 18T」とした。

(3) 内層 YBCO コイル

線材の臨界電流値を $I_c = 245$ A/cm-width (77K 自己磁場中) と想定し、Fig. 1 に示す J_c の磁場依存性[1]を計算により求めて設計に使用した。また、Y系コイルのフープ応力(BJR)の上限を 420MPa とした。

(4) 外層 LTS コイル

事前曲げ処理をしたブロンズ法 Nb_3Sn 線材[2]と $NbTi$ 線材とを使い、補強線との撚り線による高強度導体[3]によるコイルを設計した。

3. 設計検討結果

上記の条件で検討したコイルのパラメータを、Table 1 に示す。マグネットは計 8 層のコイルで構成し、内層コイルは YBCO 線材を使い、電流密度を変えた 3 層コイルとした。YBCO コイルは外径約 360mm、重量 390kg、使用線材長は約 20km になる。中心磁場 30T 発生時の磁場分布の計算結果を Fig. 2 に示す。高磁界での特性に優れ機械的強度の高い YBCO 線材を使用することでマグネットのコンパクト化が可能になる。

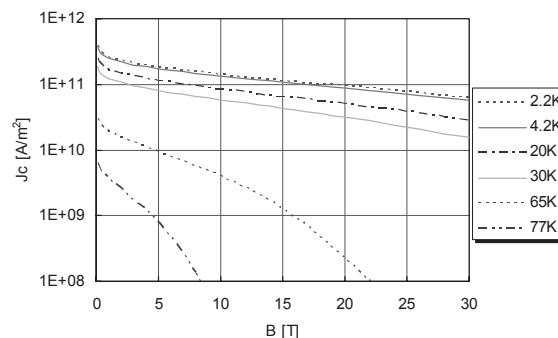


Fig. 1 Critical current density of the YBCO tape (calculated).

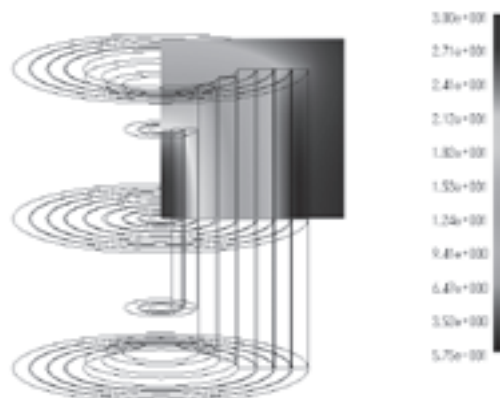


Fig. 2 Calculated results of the magnetic field |B|.

参考文献

- [1] M. Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.25
 [2] G. Nishijima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.44
 [3] S. Hanai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.32

Table 1 Design parameters of the 30 T superconducting magnet with YBCO insert coil.

		Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5	Coil 6	Coil 7	Coil 8
Superconductor	-	YBCO	YBCO	YBCO	Nb_3Sn	Nb_3Sn	Nb_3Sn	$NbTi$	$NbTi$
Operating current	A	243	243	243	919	919	919	919	919
Inner radius	mm	40	75.7	125.4	190.0	252.3	314.7	372.1	429.5
Outer radius	mm	68.7	118.4	179.3	247.3	309.7	367.1	424.5	481.9
Coil height	mm	595	595	892	947.1	997.9	1000	1000	1000
Current density	A/mm ²	115.3	76.9	62.9	48.6	48.6	76.0	76.0	76.0
Magnetic field contribution	T	4.09	3.92	4.03	3.18	3.05	4.14	3.92	3.70
Maximum field	T	30.03	25.95	21.99	18.01	14.84	11.71	8.47	6.91
Conductor section area	mm ²	1.0	1.6	2.0	11.40	11.40	7.02	7.02	7.02
Conductor length	km	2.77	4.91	11.9	23.7	32.0	27.9	32.6	37.2
Operating temperature	K	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Hoop stress	MPa	432	395	392	296	302	482	344	135

MMPSC 法を用いた高温超電導バルク体のパルス着磁に関する有限要素解析

Finite element analysis of pulsed field magnetization in high- T_c bulk superconductor with MMPSC method

横尾 亮佑, 戸町 恭平, 柁川 一弘, 円福 敬二, 船木 和夫(九州大学); 林 秀美(九州電力); 藤代 博之(岩手大学)
 YOKOO Ryosuke, TOMACHI Kyohei, KAJIKAWA Kazuhiro, ENPUKU Keiji, FUNAKI Kazuo (Kyushu University);
 HAYASHI Hidemi (KEPCO); FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate University)
 E-mail: yokoo@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、高温超電導バルク体は臨界電流密度や捕捉磁場などの特性が向上しており、様々な分野への応用が期待されている。この高温超電導バルク体を適用した限流素子について、これまでに有限要素法を用いた電磁場・伝熱・応力の連成解析を行ってきた[1]。一方、超電導バルク体をマグネットとして利用する場合は着磁が必要となるが、その方法として代表的なものに磁場中冷却法とパルス着磁法がある。さらに典型的なパルス着磁法として、単パルス着磁だけではなく、一定の冷却温度で同じ強度のパルス磁場を数回印加する SPA(Successive Pulse Applications)法や、二段階の冷却温度で大きさの異なるパルス磁場を数回印加する MMPSC(Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling)法[2]などが提唱されている。本研究では、パルス着磁法の一つである MMPSC 法の有効性を検証するために、有限要素法による連成解析を行い、単パルス着磁や SPA 法の結果と比較、検討する。

2. モデル化

解析モデルは、実験[3]で使用したディスク状($\phi 45\text{mm} \times 15\text{mm}$)の Gd 系バルク超電導体を対象としているが、簡単のために、ここでは同一半径の無限長円柱で近似する。軸方向の局所磁場を、空間的に均一な外部磁場 B_e と解析領域に流れる電流が作る自己磁場 B に分けると、その支配方程式は Maxwell の方程式より、次式で表される[4]。

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho r \frac{\partial B}{\partial r} \right) = \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial B_e}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 ρ は抵抗率であり、電流電圧特性として n 値モデルを仮定すると次式で与えられる。

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1}, \quad J_c(T) = J_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0} \quad (2)$$

ただし、臨界電流密度 J_c の磁場依存性は考慮せず、その線形的な温度依存性を仮定し、臨界温度 $T_c=93\text{(K)}$ 、 $n=15$ 、電界基準 $E_c=1(\mu\text{V/cm})$ 、基準温度 $T_0=40\text{(K)}$ での臨界電流密度 $J_{c0}=2.0 \times 10^8(\text{A/m}^2)$ とする。

また、伝熱解析における支配方程式は、熱平衡方程式より次式のようになる。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho J^2 \quad (3)$$

ここで、 C は熱容量、 κ は熱伝導率であるが、文献[5]を参考にして温度依存性を考慮した。冷却に関しては、実験ではバルク体の表面温度が冷却温度と同程度になるまで 15~20 分程度の冷凍機冷却を続けているが、今回の解析では捕捉磁場と温度分布の経時変化が安定する 5 秒まで断熱条件で計算した後、全体を初期温度に再設定した。

上記の電磁場解析と伝熱解析の支配方程式は、その類似性を利用して、片方のプログラムコードを用いて他方の解析が可能となる事が分かる。有限要素解析に当たり、空間に関しては Galerkin 法、時間に関しては後退差分法を用いて離散化し、各時間ステップで交互に支配方程式を数値的に解くことにより連成解析した。また、 ρ 、 C 、 κ は未知数に依存し、支配方程式は非線形となるため、過小緩和法を用いて各時間ステップ

で収束計算した。さらに、放電回路により励磁されたパルスコイルの作る外部磁場 B_e を次式で近似した。

$$B_e = 3.24 B_m \left(e^{\frac{t}{0.019}} - e^{\frac{t}{0.008}} \right) \quad (4)$$

ここで、 B_m は外部磁場のピーク値である。

3. 数値計算結果

数値解析の結果より、まず単パルスを着磁した場合、バルク体の冷却温度一定という条件の下で、捕捉磁場が最高となる外場が存在することが分かった。一方、SPA 法に関しても、単パルス着磁時と同様に、捕捉磁場が最高となる外場の範囲が存在することが分かった。また、SPA 法による最高捕捉磁場は単パルス着磁時とくらべてほとんど違いがないことも分かった。

Fig.1 は、初期冷却温度で 2 回パルス着磁した後、冷却温度を下げさらに 3 回パルス着磁した時の MMPSC 法による捕捉磁場と、単パルス着磁時や SPA 法による捕捉磁場を比較したものである。Fig.1 より MMPSC 法が最も大きな捕捉磁場を与えることが分かる。その原因は、バルク体の中心部において SPA 法と比べて MMPSC 法による温度上昇が小さいためである。また、MMPSC 法において、より大きな捕捉磁場を与えるためには、3 回目以降の着磁において、捕捉磁場が最高となる外場の値が存在することが分かった。さらに、3 回目以降の着磁において、同じ強度の外場を数回印加するよりも、外場の値を多少減らしながら印加した方が、捕捉磁場が向上することも分かった。

なお、各着磁法による捕捉磁場分布や温度分布など、詳細な結果については当日発表する。

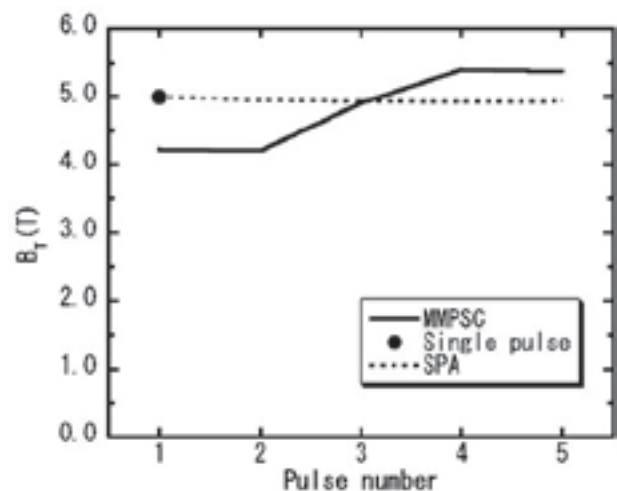


Fig.1 Trapped fields by MMPSC and SPA methods

参考文献

- [1] 高橋他, 第 73 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.103
- [2] 藤代他, 第 76 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.218
- [3] 藤代他, 第 75 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.115
- [4] K. Kajikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 3630
- [5] H. Fujishiro et al., Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 158

強磁性ナノサイズ粒子の磁気分離に関する研究

Study on magnetic separation of nanosized ferromagnetic particles

中尾 良輔, 松尾 陽一郎, 三島 史人, 田口 友彦, 西嶋 茂宏 (阪大)

NAKAO Ryosuke, MATUO Youichirou, MISHIMA Fumihito, TAGUCHI Tomohiko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)

E-mail: ryo-nakao@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、医学・薬学分野において強磁性ナノサイズ粒子を用いた磁気分離技術の需要が高まっている。例えば、細胞を対象とした研究を行うため、直径数 nm~20nm の強磁性粒子を用いた磁気分離が必要とされているが、現状では直径約 50nm の強磁性粒子を用いた磁気分離が供給の限界である。その理由として、粒子径が小さくなるにつれ磁気力が小さくなり、磁気分離が困難になることが挙げられる。

そこで本研究では、分離対象に働く磁気力を大きくするため、微小強磁性粒子を充填した構造のフィルターの設計を試みた。フィルター部については、二次元モデルを作成し、磁場解析と流体解析を行った。これらの結果を元に、フィルター部における 6nm と 15nm の強磁性粒子の粒子軌跡を計算し、磁気分離の可能性について検討した。また、これらのシミュレーション結果の妥当性について検証を行った。また実際に 6nm と 15nm の強磁性粒子を用いて分離実験を行い、作成したフィルターが強磁性ナノサイズ粒子の磁気分離に有効なものであるかどうかを検討した。

2. 実験

2.1. 分離装置の磁場・流体解析

解析ソフトの ANSYS®Ver.10.0(ANSYS, Inc.)を用い、Fig.1 に示すモデルの磁場の様子及び流体の流れのシミュレーションを行った。実験条件を以下に示す。

中央の最大磁束密度 0.5T、2T、試料は粒子径 6nm、15nm、流体は水(粘度 1cp)、流入速度 0.05m/s である。フィルター部は直径 0.3mm の強磁性粒子を均一に配置した構造を模擬した(Fig.1)。

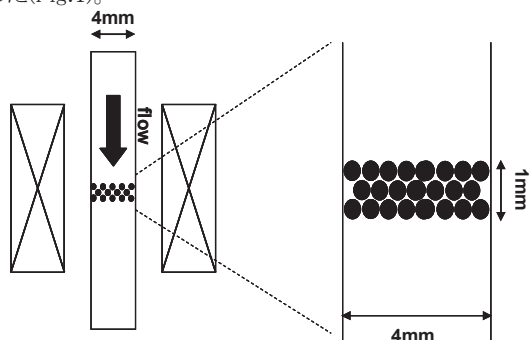


Fig.1 A schematic view of magnetic separation system.

2.2. 分離装置における粒子軌跡の計算

ANSYS による流体解析と磁場解析の各節点での数値解析結果(流速 V と磁場強度 H)、また磁性粒子や流体に関するパラメータを基に、粒子に働く磁気力およびドラッグ力を求めた。それらの力を用いてある節点における運動方程式を解き、加速度を計算し、その加速度を用いて次の節点を求めた。これを繰り返すことにより、粒子の軌跡を求めた。

2.3. 強磁性ナノサイズ粒子の分離実験

外部磁場 0.5T における実験 2.1、2.2 のシミュレーション結果が正確なものであるかどうか確認するため、実際に強磁性粒子を用いた分離実験を行った。作成したフィルターを外部磁場 0.5T に置き、有機溶媒中に分散した FePt(6nm)[1]と Fe_3O_4 (15nm)を通過させることにより分離を試みた。その後、

分離前後の溶媒中に分散している強磁性粒子を ICP 質量分析装置にて計測し、分離の可能性を検証した。

3. 結果・考察

6nm、15nm の強磁性粒子の粒子軌跡を求めたところ、外部磁場 0.5T において、6nm の強磁性粒子はフィルターによる捕獲が確認されなかった。しかし、外部磁場を 2T とすることで、6nm の強磁性粒子はフィルターに捕獲された(Fig.2)。一方、15nm の強磁性粒子は外部磁場 0.5T において、フィルターによる捕獲が可能であるというシミュレーション結果を得た。

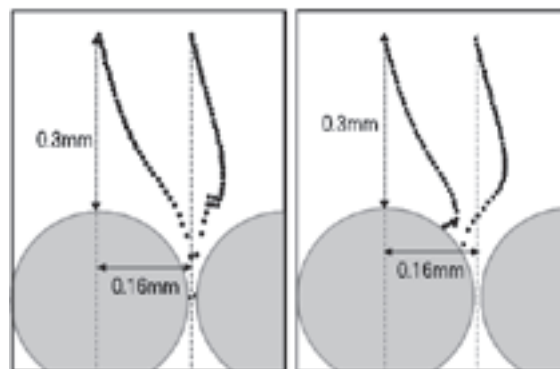


Fig.2 Trajectory of ferromagnetic particle ($\phi = 6nm$).
(Left; 0.5T, Right; 2T)

シミュレーション結果の妥当性を検証するため、有機溶媒中に分散した FePt(6nm)と Fe_3O_4 (15nm)を用いて外部磁場 0.5T における分離実験を行った。シミュレーション結果と一致して、FePt(6nm)の分離は確認できなかった。しかし、 Fe_3O_4 (15nm)は分離できたことが確認された。実験結果より、今回作成した二次元モデルはシミュレーションを行うにあたり、有効なものであることが確認された。

4. まとめ

磁場解析と流体解析による強磁性粒子の粒子軌跡の計算、また実際の分離実験によって、ナノサイズの強磁性粒子の磁気分離の可能性を検討した。

その結果、微小強磁性粒子を敷き詰めた磁気分離フィルターを外部磁場 0.5T 中に配置することにより、シミュレーション、分離実験共に 15nm の強磁性粒子を磁気分離出来ることが確認された。また同条件では分離できないことが確認された 6nm の強磁性粒子は、外部磁場を 2T にすることで分離可能であるという結果を粒子軌跡の計算より得た。

今回用いた 6nm の強磁性粒子の磁気分離を可能にするため、今後は超伝導磁石を用いることにより外部磁場を高め分離実験を試みる。また、シミュレーション結果と実験による磁気分離効率を照合しながら、より分離効率の高い条件を模索する予定である。

謝辞

本研究で用いた強磁性粒子を提供して頂いた日立マクセル株式会社の河野研二氏、満永雅一氏に感謝いたします。

参考文献

1. Shouheng Sun, C. B. Murray, Dieter Weller, Liesl Folks, Andreas Moser Science, vol. 287 (2000) p.1989

ジルコニウム・フェライト吸着剤と磁気分離による排水中のリンの 浄化・回収と再資源化

REMOVAL OF PHOSPHATE FROM WASTE WATER AND RECYCLING WITH ZIRCONIUM FERRITE ADSORBENT USING MAGNETIC SEPARATION

鵜川 将大(都立大), 西村 憲治, 三浦 大介, 伊藤 大佐(首都大)

UKAWA Masahiro, NISHIMURA Kenji MIURA Osuke, ITO Daisuke (Tokyo Metropolitan University)

E-mail: dai@eei.metro-u.ac.jp

1. はじめに

東京湾等の閉鎖水域の富栄養化が深刻な問題になっており、流入する排水中のリンや窒素の浄化が緊急で重要な課題になっている。また、リン資源は米国やモロッコに偏在しており、2030年頃には枯渇すると推定されている。我が国は全面的に輸入に頼っており、リンの回収とその再資源化も重要な課題である。

リンに対し優れた吸着特性を示し、再生処理により繰り返し使用出来る吸着剤として、層状水酸化物ハイドロタルサイトやジルコニウムフェライト $ZrFe_2(OH)_8$ が知られている [1]。これまでは濾過法を中心にリンの浄化が検討されて来たが、これらの吸着剤を用いて磁気分離によりリンの浄化・回収が出来れば、ゼロエミッションでの浄化を高速で行うことが可能になる。ハイドロタルサイト吸着剤は反磁性を示し、その磁化率が水の値に近いため、磁気分離には適していないことが、我々のこれまでの研究で明らかになっている。そこで、ここではリンの磁気分離による浄化・回収に、ジルコニウムフェライト吸着剤を用いた場合について検討する。

高勾配磁気分離技術を排水の浄化に適用すると、濾過法などと比べてリンの浄化・回収の桁違いの高速化が可能になる。そこで、この特長を生かすため、下水浄水場で浄化された大量の放流水中に含まれるリンの浄化・回収を想定して検討する。

2. 目的

東京湾に流入する川沿いには、下水浄水場が存在するが、これらの浄水場で浄化された水中のリンをジルコニウムフェライト吸着剤を用いて磁気分離により高速で浄化・回収することを目的とする。下水は浄水場で一般に、沈砂池 → 第一沈殿池 → 反応槽 → 第二沈殿池 → 塩素接触槽 という過程を経て浄化され、川や海へと放流される。この最後の塩素接触槽でジルコニウムフェライト吸着剤を添加し、リン酸を吸着させることにする。この槽の出口に磁気分離装置を設置し、リンを吸着したジルコニウムフェライト吸着剤を回収する。

3. 実験

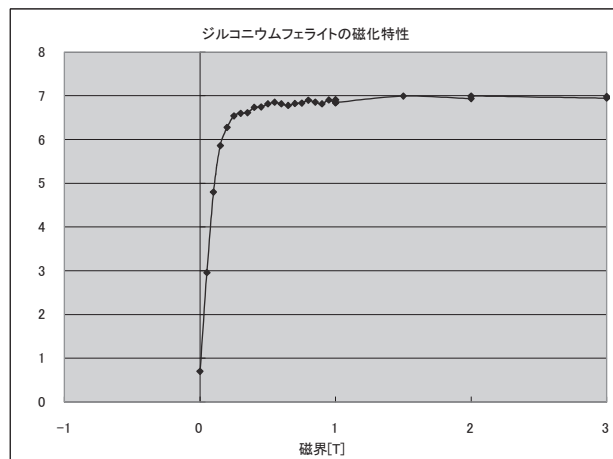
ジルコニウムフェライト吸着剤を高い効率で磁気分離し、回収するためには、その磁気特性を知る必要がある。そこで、市販のジルコニウムフェライト粒子(商品名:セプトール P)を試料とし、その磁化を測定した。磁化の測定には SQUID 磁化測定装置を用いた。吸着剤粒子の平均直径は 0.7mm である。

4. 結果と検討

ジルコニウムフェライト吸着剤の磁化特性を Fig.1 に示す。飽和磁化はマグネタイトなどに比べて小さいが、大きな磁化率 χ を持つ強磁性体(フェライトなのでフェリ磁性)であることが分かる。磁化率 χ が大きいことから、磁気分離の際に作用する磁気力と磁気速度も大きいことが分かる。

磁気力が大きいことから低磁界でも磁気分離が可能になり、大口径の超伝導磁石が利用出来ることになる。

Fig.1 Magnetic characteristics of zirconium ferrite



また、磁気速度が大きいことから、高い流速でこの吸着剤を回収することが可能になる。

したがって、この吸着剤は浄水場排水のような大容量の浄化水中のリンを回収するのに適した材料であることが分かる。

回収した吸着剤は水酸化ナトリウム溶液で再生することが出来、何度でも使用出来る。また、再生時に脱着したリンは資源として再利用できる。再生装置のプロト機が霞ヶ浦の富栄養化防止プロジェクトで製作されている [1]。

5. まとめ

下水浄水場の排水中に含まれるリンの磁気分離による高速浄化・回収に、ジルコニウムフェライト吸着剤の適用可能性の検討を行い、適用可能という結論を得た。

東京湾等の閉鎖水域に流れ込む浄水場の浄化後の水に、ジルコニウムフェライト吸着剤を投入し、川や海に放流する前に磁気分離装置を通過させることにより、リンの浄化・回収が可能になり、富栄養化防止に寄与出来ることを示した。

ここで回収された吸着剤は再利用が可能であり、したがって、ゼロエミッションの浄化が可能である。さらに、回収したリンの資源として再利用が可能になる。

6. 参考文献

[1] 高井智丈 他, 資源環境対策, 37, 157(2001)

医療用抗体たんぱく質(免疫グロブリン)分離・精製用高勾配磁気分離システム その1・基礎実験

Previous Test of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum

我妻 洸, 淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産総研); 植田 浩史(早大); 柁川 一弘(九大); 小泉 達雄(住重)
AGATSUMA Koh, FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuo (AIST); UEDA Hiroshi (Waseda University);
KAJIKAWA Kazuhiro (Kyusyu University); KOIZUMI Tatsuo (Sumitomo heavy industries)
E-mail: koh.agatsuma@aist.go.jp

1. はじめに

近年、バイオ・創薬の分野において、マイクロ/ナノビーズを用いた細胞・分子の分離(スクリーニング)技術が日米欧において大きく進歩し、多くの細胞・分子のタンパク質をビーズを用いて分離可能な技術が出来上がりつつある。我々は、医療用たんぱく質のうち特に血清中に微量存在する抗体(免疫グロブリン)の分離・精製にマイクロ/ナノビーズを応用した超伝導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムを応用する検討を行ってきた[1]。免疫グロブリンは糖を2%含むポリペプチドで、長軸約2500~3000nm、短軸約400nmの形の分子で、端部のL鎖(Light Chain)先端に抗体に特異的に結合する部位をもつ。この部位と特異的に結合する物質を磁性ナノ粒子の表面につけることにより、抗体を磁気分離出来ると考えられる。この表面活性剤は、すでに酸化鉄等に対して開発され、直径数ミクロンの米国製磁性マイクロビーズは市販されている。このたび、我々は抗体(免疫グロブリン)の分離・精製用に、超伝導マグネットを用いた伝導冷却式卓上型小型高勾配磁気分離システムを試作し基礎実験を行ったので報告する。

2. 伝導冷却式卓上型高勾配磁気分離システム

このシステムの原理図をFig. 1に示す。小型冷凍機を採用した伝導冷却式の卓上型小型超伝導電磁石を用いて、最大5Tの磁場を発生させる。電磁石の中心部分には直径約26mmの円筒状の室温の空間を持たせ、この空間に内径20mm 外形24mmのガラス管を通し、この管の中に直径数ミクロン程度の細線のステンレスウールから成るフィルターを挿入する。この直径数ミクロン程度のステンレス細線の周辺に高勾配磁場を作り出し、磁性ナノビーズにより固定した目的物質をこの高勾配磁気力により捕獲・分離しようとするものである。したがって、固定したい目的物質を含む原液に磁性ナノビーズを混合し、この管に流すだけで、大容量を短時間に高効率で微量含有の貴重な目的物質を捕獲・分離出来る装置である。

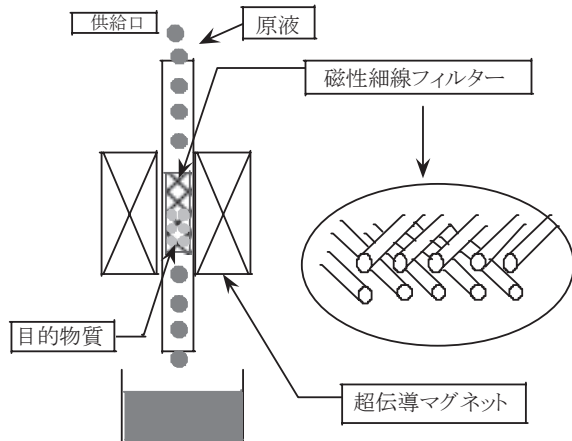


Fig. 1. Schematic diagram of HGMS for Immunoglobulin.

3. 装置とフィルターの諸元

伝導冷却式の卓上型超伝導小型高勾配磁気分離システムの写真を Fig. 2 に示す。卓上に載せられる程度の高さ約665mm 幅約274mmの寸法である。フィルターは8、12、20ミクロン直径のSUS304細線の3種類のウールを長さ約10cm、直径約2cmに成形して用いた。重量はおおよそ1g程度である。



Fig. 2 Photograph of Equipment.

4. 実験方法と結果

4.1 実験方法

1) 約150ccのエタノールに、平均粒径約100nmのナノ磁性微粒子を0.05g加え、良く攪拌した後、磁気分離用のSUS304フィルターとほぼ同一のフィルターで濾過した。2) 次に1)で濾過した磁性微粒子を含むエタノールを、4Tの磁場中にセットしたフィルターの中を約7~25cc/minの速度で流し、それをさらに濾紙で濾過し、濾紙上に磁性微粒子を捕捉した。これを乾燥させ、濾紙上の磁性微粒子の質量を計測した。3) 次に、磁場を4Tから0Tに下げた後、磁性微粒子を含まないエタノール200ccを2)と同様にフィルターに流し、それをさらに濾紙で濾過し、濾紙上に磁性微粒子を捕捉した後、これを乾燥させて、濾紙上の磁性微粒子の質量を計測した。

4.2 実験結果

20ミクロン直径のSUS304細線のフィルターを使用した場合、磁場4T下で約7cc/minの速度で濾過した結果は、質量計測で微粒子は検出できなかった。磁場をゼロにして同様に濾過したところ、0.04gの微粒子が検出された。この実験からこのシステムは効率良く平均粒径約100nmの磁性微粒子を捕捉出来ることがわかった。紙面の都合上、8、12ミクロン直径の実験結果や流速の影響などの詳細は当日報告する。

<参考文献>

H. UEDA, et al, "Design Study on Filter of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007)

医療用抗体たんぱく質(免疫グロブリン)分離・精製用高勾配磁気分離システム その2・フィルターの検討

Design Study on Filter of High Gradient Magnetic Separation System for Trapping Immunoglobulin in Serum

植田 浩史(早大); 柁川 一弘(九大); 我妻 洸, 淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産総研); 小泉 達雄(住重)

UEDA Hiroshi (Waseda University); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyusyu University);

AGATSUMA Koh, FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST); KOIZUMI Tatsuo (Sumitomo heavy industries)

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

近年、バイオ・創薬の分野において、マイクロ/ナノビーズを用いた細胞・分子の分離(スクリーニング)技術が日米欧において大きく進歩し、多くの細胞・分子のタンパク質をビーズを用いて分離可能な技術が出来上がりつつある。現在、日本においては、未だ主として分析や研究のための技術であるが、アメリカにおいては、早くも2ないし4種類のスクリーニングを自動ロボット化した分析装置が市販され始めた。我々は医療用たんぱく質のうち特に血清中に微量存在する抗体(免疫グロブリン)の分離・精製に超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムを応用する検討を行ってきた[1]。磁性ナノ微粒子を磁気分離出来れば、この部位と特異的に結合する物質を磁性ナノ粒子の表面につけることにより、抗体の連続・高速の分離・精製が可能になる。磁性ナノ微粒子を高勾配磁気分離で効率よく分離・精製するには、フィルターの性能が大きく影響する。今回は、超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムの磁性ナノ微粒子用磁性細線フィルターの検討を行ったので報告する。

2. 磁気ビーズとフィルター

抗体の模式構造は Fig. 1(a) に示すように二股になっており、この二股部分の先は抗原結合部位と呼ばれ、ここに磁気ビーズを結合させることになる。ここで、結合部位に径 100 nm の磁気ビーズが結合すると仮定すると、2~8 個の磁気ビーズが結合することになる。捕捉・分離したい抗体の密度(濃度)は極めて小さい。したがって、磁気ビーズと抗体が会合し結合する確率は、同じ質量の磁気ビーズを拡散させるとすると、磁気ビーズの直径が小さいほど、多数のビーズが分散して含まれることになり、結合する確率は高くなって有利である。したがって、可能な限り磁気ビーズの直径は小さいほうが良いと考えられる。しかし、磁気ビーズの直径が小さいと、磁気力が小さくなる。また、フィルターが密過ぎるとフィルターの洗浄が必要になり、またビーズの回収効率が悪くなる。従って、フィルターを構成する磁性細線の断面形状・寸法、配置間隔の検討が必要になる。

3. 磁気力計算と結果

超電導磁石を用いた高磁界・高勾配磁気分離装置により、磁気ビーズが受ける磁気力(magnetic force) F_M は外部磁場が十分大きい場合、次式で表される。

$$F_M = V_p M_s \nabla H \quad (1)$$

ただし、 V_p : 磁気ビーズの体積、 M_s : 磁気ビーズの飽和磁化、 H : 磁気ビーズが置かれている磁場の大きさである。

一方、流体が磁気ビーズを押し流そうとする力(drag force) F_D は、

$$F_D = 6\pi b \eta v_p \quad (2)$$

ここで、 v_p は粒子の速度、 η は流体の粘性率、 b は磁気ビーズの半径である。

今回は基礎検討として、一本の SUS 丸細線の周囲にはたら磁気力を計算した。SUS 細線の直径を 8, 20 μm とし、磁場を 4.0 T として径 100 nm の磁気ビーズ 1 個にはたら磁気力を計算した。ただし、 M_s は 0.1 T、 v_p は 0.5 mm/s、 η は 1.1×10^{-3} Pa s とした。

磁気力分布の計算結果を Fig. 2 に示す。図は細線径方向の磁気力分布で、吸引力は負(白)、反発力は正(黒)である。太線は磁気力(吸引力)とドラッグ力が等しくなる境界線である。実際は、磁気ビーズは流体中を移動するため、磁気ビーズの捕獲領域はこの境界線の形状とは異なるが、磁気力は SUS 細線の直径が 8 μm のとき、直径と 2 倍程度、20 μm のとき直径の 1.5 倍程度まではたらくと考えられる。今回の検討では径 100 nm の磁気ビーズに対して、20 μm の細線でも磁気分離が十分可能であると考えられる。

4. 今後の予定

フィルターを構成する磁性細線の断面形状・寸法、配置間隔をパラメータとしてフィルター周囲の磁場分布を有限要素法や境界要素法による磁場解析によって求め、磁気ビーズにはたら磁気力を評価する。さらに、磁気ビーズの挙動および磁気ビーズの捕獲領域の形状を検討し、分離性能を評価する予定である。

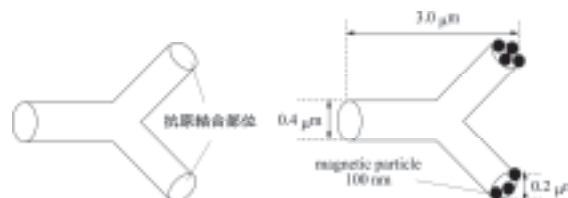
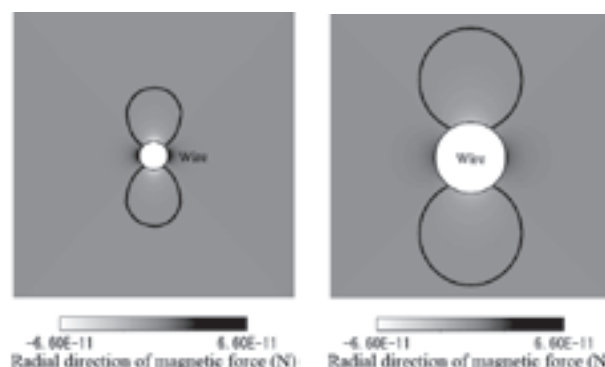


Fig. 1. Schematic drawing of immunoglobulin.



(a) Diameter of wire: 8 μm (b) Diameter of wire: 20 μm
Fig. 2. Numerical result of distribution of magnetic force with magnetic field of 4.0 T.

参考文献

1. K. Agatsuma, et al, "Previous Test of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007).

素線数の異なる大型超電導 CIC 型導体の素線軌跡の比較研究

Investigation of strand locations in different strand number CIC Conductors

奈良 雄樹, 大村 惇, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学); 布谷 嘉彦, 奥野 清(原子力機構); 高畑 一也(NIFS)
 NARA Yuki, OMURA Jun, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.); NUNOYA Yoshihiko,
 OKUNO Kiyoshi (JAEA); TAKAHATA Kazuya (NIFS)
 E-mail: naralist@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

CIC 型導体は、ケーブルのポイド率を低くして導体の電流密度を高めるために、撚り線をコンジットに収納する工程で圧縮される。これによって撚り乱れが発生し、交流損失が増大することが観測された[1]。また、電磁力の増大によって交流損失が増大する現象も観測されている[2]。これは、電磁力によって撚り線が圧縮・変形され、素線間接触抵抗が減少することが原因だと考えられているが、実験に基づく定量的な調査は行われていない。

そこで著者らの研究チームでは、CIC 型導体の素線軌跡を調べるため、素線 81 本導体と素線 486 本導体を切断し、導体内部の素線軌跡を実測により求めた。本講演では、素線数の異なる CIC 型導体内部の素線軌跡の測定結果を比較し、その評価結果について述べる。

2. 導体サンプル

素線軌跡の測定に用いた 81 素線導体及び 486 素線導体の諸元を、表1に示す。81 素線導体は 3rd 撚りのトリプレット構成撚り線導体であり、導体は撚り線加工後にコンジットに収納されていないためほぼ円形である(サンプル長は約 1000mm)。486 素線導体は 3rd×6 撚りの LHD OV コイルで、矩形のコンジットに収納されている(サンプル長は約 180mm)。これまでに筆者らは、これらの導体をエポキシ含浸した後に約 10mm 間隔で切断し、断面毎の素線位置を測定することで各サンプルの素線軌跡のデータを得た。

Table 1. Specifications of 81&486strand CIC conductor

	81strand sample	486strand sample
Strand material	NbTi	NbTi
Strand diameter	0.823mm	0.889mm
External size	9.73mm	27.5×31.8
Void fraction	42.0%	38.0%
twist pitch 1 st	65mm	70mm
2 nd	90mm	120mm
3 rd	150mm	170mm
4 th	270mm	250mm
5 th		400mm

3. 導体の分類

ここで導体の形状の違いより、81 素線導体を円形導体、486 素線導体を矩形導体と呼ぶことにする。これら2つの導体サンプルから得られた素線軌跡データを比較するために、Fig.1 に示すように各サンプルをグループに分類して、素線本数及びサンプル長の条件を近づけて解析を行った。

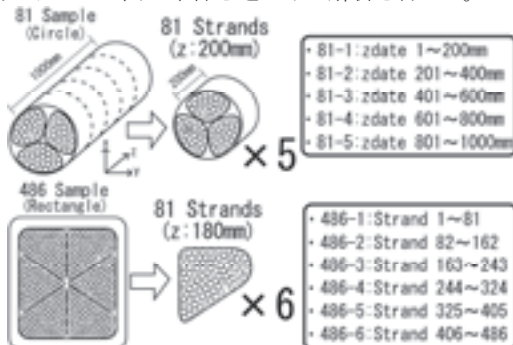


Fig.1 Classification of samples

4. 比較結果

円形導体と矩形導体の各グループ毎に、各次内におけるサブケーブルの重心間距離の平均値及び、その標準偏差を求めた結果を、それぞれ Fig.2, Fig.3 に示す。

Fig.2 を見ると、サブケーブル間距離の平均値は、同じ導体内であれば全てのグループにおいてほぼ一定であることが分かる。また、全ての次数において円形導体の方が矩形導体よりもサブケーブル間距離がやや小さいが、両者に大きな違いは無いことが分かる。

しかし、Fig.3 より円形導体では高次になるほどサブケーブル間距離の標準偏差が小さくなる傾向が見られたが、矩形導体ではその逆の傾向が見られた。また、矩形導体によって標準偏差の値に大きな差があるが、これは矩形コンジットによる変形の程度がグループによって異なっていることが原因だと考えられる。

このように円形導体と矩形導体は、距離の平均に大きな差が無い一方で、標準偏差、すなわちばらつきに明らかな違いが見られる。これはコンジットの形状が大きな要因と考えられるので、今後検討していく予定である。

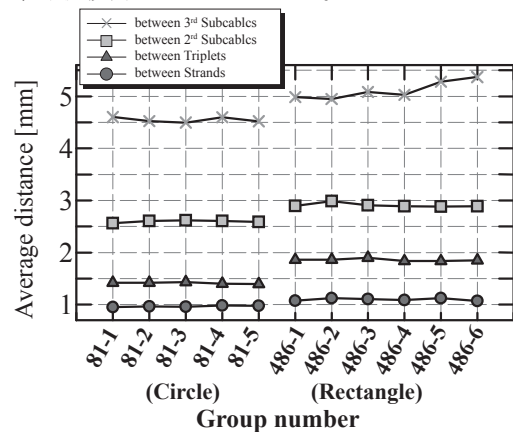


Fig.2 Average distance between centers of subcable

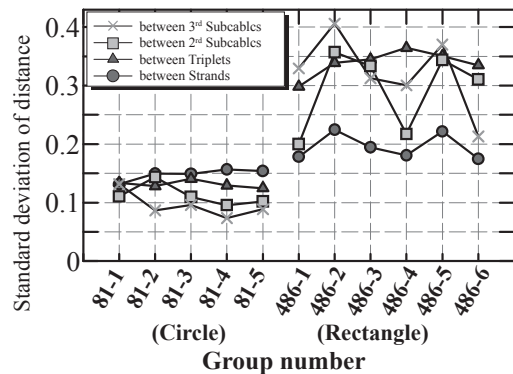


Fig.3 Standard deviation of distance between centers of subcable

参考文献

1. T.hamajima, et al.: IEEE Trans.Appl.Supercond.11, p.1860 (2001)
2. T.hamajima, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond.10, p.812 (2000)

LHDヘリカルコイルの過冷却(サブクール)運転における励磁特性

Excitation properties of the LHD helical coils cooled by subcooled helium.

今川 信作, 尾花 哲浩, 柳 長門, 濱口 真司, 関口 温朗, 三戸 利行 (NIFS); 岡村 哲至 (東工大)
 IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, SEKIGUCHI Haruo,
 MITO Toshiyuki (NIFS), OKAMURA Tetsuji (Tokyo Institute of Technology)
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)ヘリカルコイルでは, 冷却安定性を改善するために冷媒供給温度を3 Kまで低下させる過冷却(サブクール)改造が前年度に実施され, コイル出口温度を3.8 Kに低下させた運転が可能となっている[1]。前年度の励磁試験においては, モデルコイルから推定した値よりも低い11.4 kA付近でヘリカルコイル(4層目と推定)最上部付近からの常伝導伝播と回復が2回観測された。励磁に伴う交流損失によって局所的に温度が上昇していると推測し, 高磁場励磁前に11 kA付近で2時間以上保持するように励磁方法を変更して11.5 kA相当までの励磁を5回行い, 安定に励磁できることを確認した。

2. 励磁方法

サブクール運転においては, 励磁・減磁に伴う交流損失によってヘリカルコイル内部の温度が上昇する。サブクールシステムが定格運転(熱交換器温度が3.0 K, コイル流量が50 g/s)の場合のコイル出口平均温度の時間変化を図1に示す。一旦, 上昇した温度は約2時間の時定数で低下することが分かる。交流損失はコイル内部で生じるため, 励磁中には局所的にコイル出口温度よりも高くなるのが懸念される。また, 励磁時間は短い方が望ましいため, 一旦, 11 kA程度まで通常速度(7 A/s)で励磁して, プラズマ実験を行いながら2時間以上の冷却時間において11 kA以上の励磁を行うようにしている。11 kA以上の励磁速度は交流損失を減らすため, 通常速度の1/5 (1.4 A/s)に制限している。

3. 励磁特性

今サイクルの冷却完了後の健全性確認励磁において, 11.5 kA相当(ヘリカルコイル3ブロックの電流値がH-O/M/I=11.8/11.4/11.4 kA)の励磁を上記の方法で行ったところ, #10セクターの最下部付近からの常伝導伝播と回復が観測された。図2に示すように, 電流方向に片側伝播して外側赤道部付近で停止した。発生位置は3層目と推定され, 飽和ヘリウム冷却において数回の常伝導伝播が同じ場所で観測されており, これらとの比較を図3に示す。常伝導伝播速度が, 飽和ヘリウム中の11.0 kAの場合よりも遅くなっており, サブクールによって冷却安定性が改善されていることを示している。しかしながら, その改善効果はモデルコイルによる実証試験からの予測よりも小さいことになる。

飽和ヘリウム冷却では, 常伝導伝播がコイル最下部付近で始まり最上部付近で停止したことから, コイル下部ではH-Iブロックへの気泡の集積によって局所的に冷却が悪化していると推察されている[2]。この部分の冷却を改善することが改造の目的であるが, サブクール運転においても依然としてコイル下部の冷却状態が悪い, すなわち, 局所的にサブクール度が小さいと推察される。その原因およびモデルコイルとの差異については, 解析モデルの構築を含めて, 現在, 考察中である。

4. 今後の予定

サブクール運転におけるヘリカルコイルIブロックの冷却安定な範囲を把握することができたので, この限度を超えないように, MおよびOブロックの電流値を増やした励磁法による高磁場励磁を計画している。

参考文献

- [1] S. Imagawa, et al., Nuclear Fusion **47** (2007) 353-360.
 [2] S. Imagawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 1388-1393.

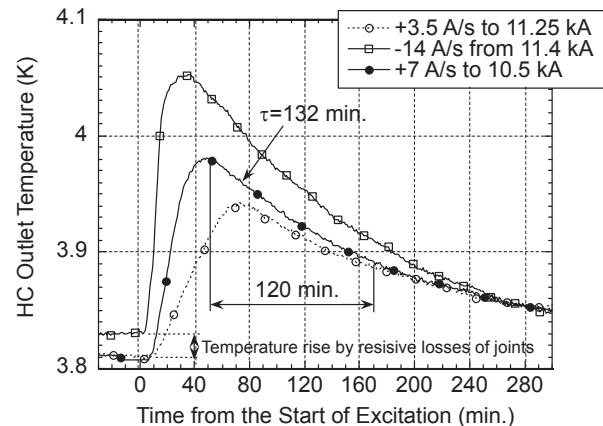


Fig. 1. Temperature rises at the outlet of the helical coil by charging and discharging.

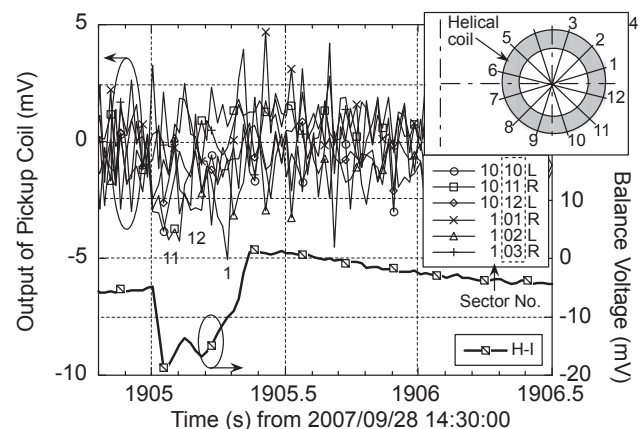


Fig. 2. Balance voltage of the helical coils and output of pickup coils during the 23rd propagation of a normal zone.

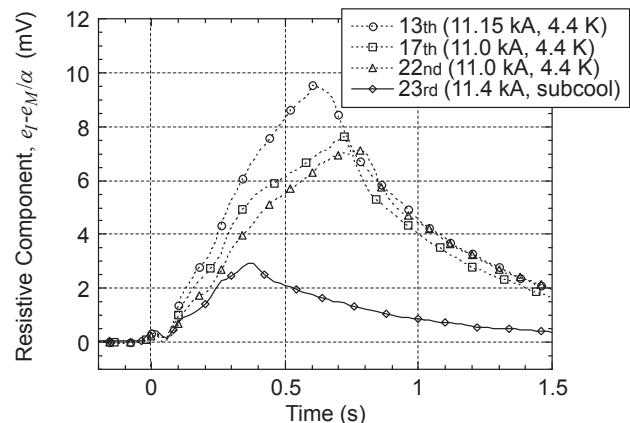


Fig. 3. Propagation of a normal-zone at the bottom of the 10th sector of helical coil cooled by saturated or subcooled helium.

LHD 型核融合炉 FFHR 用超伝導マグネットのクエンチ保護

Quench Protection of superconducting magnets for the LHD-type fusion reactor FFHR

高畑 一也, 三戸 利行, 田村 仁, 今川 信作, 相良 明男 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, TAMURA Hitoshi, IMAGAWA Shinsaku, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: takahata@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)の建設・運転・実験成功を受けて、LHD 型核融合炉である FFHR の設計を進めている [1-3]。その超伝導マグネットは、Fig. 1 に示すように、LHD と同様 2 条のヘリカルコイルと 2 対のポロイダルコイルから構成される。これらのコイルの特徴は、直径の大きな連続巻線となる点である。従って、コイルの蓄積磁気エネルギーも大きくなる。FFHR では総蓄積エネルギーが 120GJ となり、クエンチ保護を安全に行うためには、これまでになかった新しい考えを導入することも必要となる。本研究では、外部保護抵抗を用いた従来のクエンチ保護(外部エネルギー回収法と呼ぶ)の代替として、コイル自身の常伝導抵抗で磁気エネルギーを回収する内部エネルギー回収法について検討を行った。

2. 外部エネルギー回収法の課題

従来からの外部エネルギー回収法を採用した場合の課題を次に列記する。

- (1) 120GJ のエネルギーを外部に回収して、熱に変換した場合、大きな熱吸収材が必要となる。水を熱吸収材として考え、蒸発熱も利用した場合でも、約 50 トンの水が必要となる。
- (2) 100kA の導体を設計し、ホットスポット温度を計算すると、遮断時定数を 20 秒以下にする必要がある。このときのヘリカルコイルの両端電圧は 60kV に達する。ターミナル間の電圧を 10kV に制限した場合、コイルを 6 分割し、6 対のターミナルを用意しなければならない [2]。

3. 内部エネルギー回収法の検討

上記の課題を解決するために、クエンチ検出の後にコイル全体を意図的に常伝導に転移し、コイルの常伝導抵抗で磁気エネルギーを消費する内部エネルギー回収法の検討を行った。このとき磁気エネルギーとコイルの熱容量が釣り合うまで温度が上昇する。構造物を含まない巻線部の熱容量を考えた場合、ヘリカルコイルの温度は 200K まで上昇することが分かった。この温度上昇が許容できるならば、内部エネルギー回収が可能となる。

内部エネルギー回収を行うためには、コイル全体を常伝導にするクエンチバックが必要となる。従来、加速器の分野では、ヒーターを用いる方法、2次回路を用いる方法、交流損失を用いる方法などが検討、採用されている [4]。今回は信頼性の高い2次回路を用いる方法(Fig.2 (a))と内部抵抗を用いる方法(Fig.2 (b))を検討した。2次回路を用いた方法は、共巻きされた銅コイルに電流を転流させ、ジュール損失によって、超伝導コイルをクエンチバックに導く。内部抵抗を用いた方法は、同じく共巻きされた銅コイル(無誘導巻き)に外部抵抗に流れる電流を一部分流させ、ジュール損失によってクエンチバックを導く。いずれも銅コイルを共巻きする点で同じ構造を持ち、電源を必要としない。遮断器を開放した後は受動的にクエンチバックが誘導される点で信頼性が高い。

内部エネルギー回収の最大の利点は、遮断時のターミナル間電圧を大幅に減少できることである。今回検討した回路についても、外部抵抗を外部エネルギー回収の場合の 1/10 以下に設定することができた。これによって瞬時発生電圧も 1/10 以下に抑えることができた。Fig. 2 の両者を比較すると、内部抵抗を使った回路(Fig.2 (b))の方が、より発生電圧を抑えることが可能である。

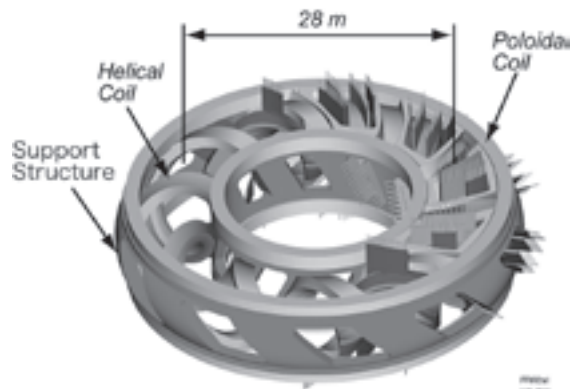


Fig. 1. LHD-type fusion reactor FFHR

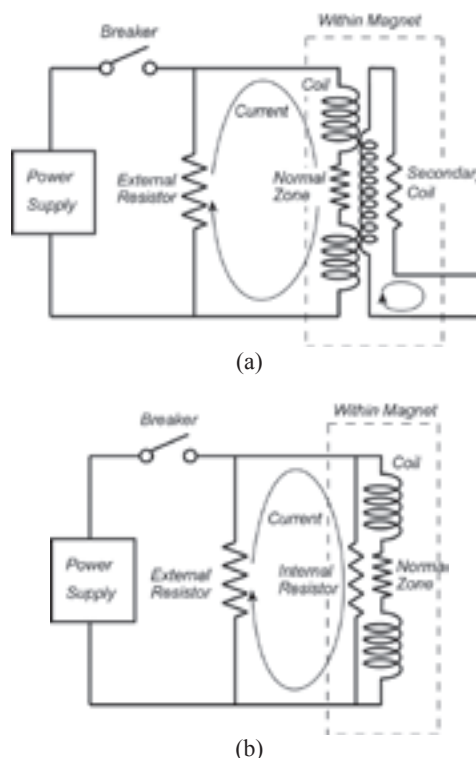


Fig. 2. Quench protection circuits with (a) a secondary coil and (b) an internal resistor.

参考文献

1. K. Takahata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.41.
2. K. Takahata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.146.
3. K. Takahata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.205.
4. M.A. Green: Cryogenics, Vol. 24 (1984) pp.3-10.

LHD 型核融合炉 FFHR 用超伝導マグネットの応力分布解析

Stress analysis for superconducting magnet in LHD-type reactor FFHR

田村 仁, 高畑 一也, 三戸 利行, 今川 信作, 相良 明男(核融合研)

TAMURA Hitoshi, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku, SAGARA Akio (NIFS)

E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

FFHR は発電実証を目指す LHD 型の定常核融合炉であり、現在概念設計が進められている[1-3]。FFHR の超伝導マグネットは1対のヘリカルコイルと2対のポロイダルコイルで構成され、装置の主半径は約 14m、総蓄積エネルギーは 120GJ、最大経験磁場は約 13T である。ヘリカルコイルの超伝導体として、Nb₃Sn ケーブルをアルミ合金ジャケットで囲ったものを用い、冷却パネルによって間接冷却する方法が提案されている。間接冷却方式を考慮したコイル断面構成によって、どのような応力・ひずみ分布が生じるかを評価することは、コイル形状や冷却パネルの構造を検討し、最適化を図る上で大変重要である。本研究では、ヘリカルコイルに生じるフープ力のみならず、転倒力により生じる応力・ひずみ分布を軸対称有限要素モデルにより解析を行い、詳細に検討した。

2. 解析モデル

ヘリカルコイルは複雑な3次元形状をしているが、コイル1ピッチ長さにおける平均半径をもつ円形コイルにモデル化することにより、コイルの機械的挙動を評価することができる。コイル断面の超伝導体と冷却パネル、及びコイルケースの配置は、[4]で提案されている構成を元に、fig.1 に示すようにモデル化した。ヘリカルコイルの平均半径は 5.5m で、432ターンの Nb₃Sn 超伝導体に1ターンあたり 100kA の電流が流れているものとして、各導体位置で働く電磁力を導体1本1本に作用する物体力として与えた。冷却パネルは SUS316 製の厚板構造と仮定し、コイル2層または4層毎に配置し、同じく SUS316 製のコイルケース及び絶縁物を付けた導体とは完全に接触しているものとした。

解析は ANSYS を使用し、軸対称モデルで周方向に周期的に変化する力と変形を考慮することができる harmonic axisymmetric solid element を採用した。フープ力および転倒力はいずれも周方向に対して変化するが、フープ力は1ピッチ内での最大値がモデル化したコイル全体の半径方向の物体力として作用するものとした。また、転倒力については、周方向の変化をフーリエ級数に展開し、得られた正弦波のひとつひとつを物体力として与え、それぞれを重ね合わせることで元の転倒力に対する応力分布を解析した。

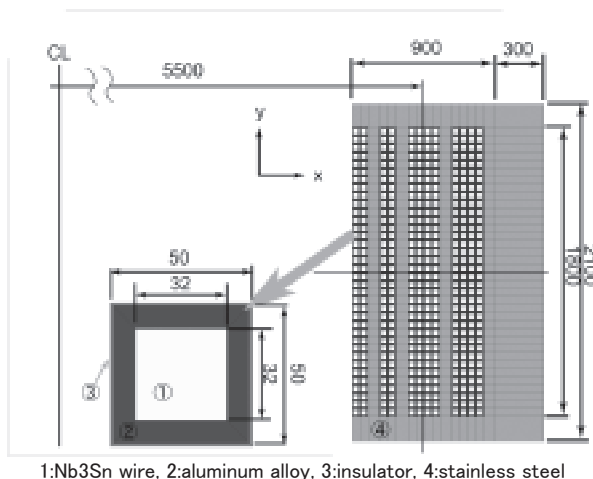


Fig.1 Geometry of the analytic model.

3. 結果

フープ力によりコイルの最内層は約 7.4mm 半径方向に変位し、フープ応力として最大 340MPa が内層側のステンレス製冷却パネル中央部とコイルケースのコイル中心側コーナー部に生じた。超伝導体に作用するフープ力によるひずみは Fig.2 に示すように最内層部中央の導体で約 0.173%であった。転倒力に対しては、電磁力が最大となる周方向角度での分布に注目すると、最内層のコーナー部で約 2.7mm 軸方向に変位し、最内層部の冷却パネル中央部に約 230MPa の圧縮応力が発生した。半径方向および周方向の応力に関しては、コイルケースの側壁に 128MPa の圧縮応力が発生したがそれ以外の場所では応力分布は小さかった。

応力分布はいずれも許容内で、ひずみに関しても超伝導体の性能劣化が生じない範囲値であった。FFHR は Force Free の概念からコイル配置が検討されているため、電磁力の最大値は大きくても断面内の分布によって発生する応力・ひずみはそれほど大きくならないという特徴があり、解析もそれをよく表す結果となり、間接冷却方式のコイル構造も機械的に成立することが示された。

参考文献

1. O. Motojima, et al.: Fusion Eng. Des. 81 (2006) p.2277
2. A. Sagara, et al.: Fusion Eng. Des. 81 (2006) p.2703
3. A. Sagara, et al. Nucl. Fusion 45 (2005) p.258
4. K. Takahata, et al.: Fusion Eng. Des. (2007) in press

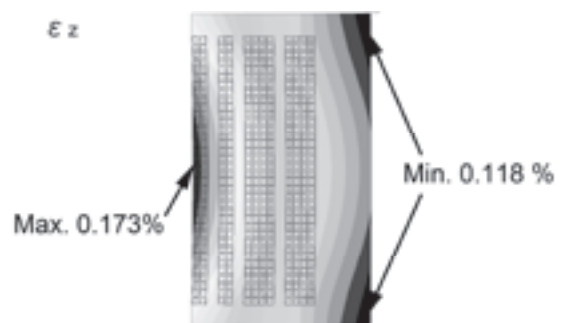


Fig.2 Circumferential strain distribution by hoop electromagnetic force.

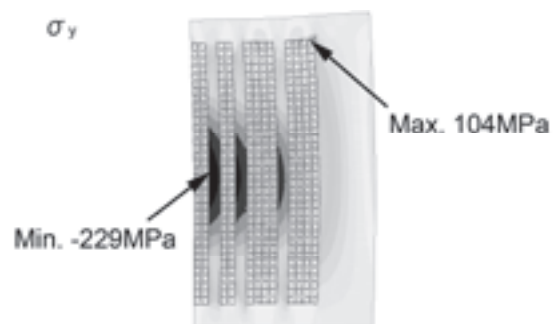


Fig.3 Axial stress distribution by over turning electromagnetic force.

磁気冷凍特性に及ぼす粒径効果

Particle size effect for magnetic refrigerant on magnetic refrigeration characteristics

小林 忠彦, 加治 志織, 齋藤 明子(東芝); 鬼頭 俊輔, 中込 秀樹(千葉大)

KOBAYASHI Tadahiko, KAJI Shiori, SAITO Akiko(Toshiba);

KITO Shunsuke, NAKAGOME Hideki(Chiba University)

E-mail: tadahiko.kobayashi@toshiba.co.jp

1. はじめに

二酸化炭素など温室効果ガスの削減義務が世界レベルで議論されるなど、地球温暖化に対する具体的な取り組みが明らかになっている。このような背景もあり、近年、室温域で動作する磁気冷凍技術の研究開発が日米欧で活発化している。本技術は、磁気冷凍材料としてGd系などの磁性体を用い、AMR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration) サイクル¹⁾を基本動作とする、ノンフロン高効率冷凍技術を目指している。我々は、これまでに縦型構造の磁気冷凍試験機を試作²⁾³⁾し、動作原理実証およびAMR冷凍サイクル周波数の影響を明らかにした。

本報告では、上記した磁気冷凍試験機を用い、球状化した磁気冷凍材料の粒径サイズ効果について検討した結果を述べる。

2. 方法

磁気冷凍材料として用いるGdおよびGd合金を球状化プロセスにより球状試料を作成し、篩いによる分級で500 μm ~1400 μm の各サイズに分けた。この球状試料を、それぞれ磁気冷凍試験機用熱交換容器に一定の充填率となるように充填し、AMRサイクル周波数:0.3Hzの動作パラメータで実験を行い、温度変化が飽和する状態での高温端-低温端間の温度差を評価した。熱交換容器の内容積は、 $\phi 15\text{mm} \times 115\text{mm}$ であり、永久磁石による磁界強度は1Tである。

3. 結果

Fig.1に、球径サイズと圧力損失および熱交換容器に充填した球状試料の全表面積の関係について求めた結果を示す。

尚、圧力損失については、配管内に粒子充填を加味したHaugen-Poiseuille 式にて水冷媒・流速:0.01m/sの条件を用いた。Fig.1より、圧力損失および全表面積は球径を小さくすることで増大し、特に圧力損失は600 μm 程度から急激に大きくなることが判る。熱交換効率の観点より、表面積増大は有効であるが、圧力損失増大のデメリットを十分に考慮する必要がある。

Fig.2に、GdY合金球、500 μm および800 μm 球を用いたAMR冷凍サイクル試験で得られた温度差: ΔT_{span} の測定環境温度依存性を示す。粒径サイズを小さくすることで ΔT_{span} が大きくなり、最大 ΔT_{span} は、40 $^{\circ}\text{C}$ を越えることが新たに判った。この時の、低温端側到達温度は、-10 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで達する。

尚、詳細は講演にて報告する。

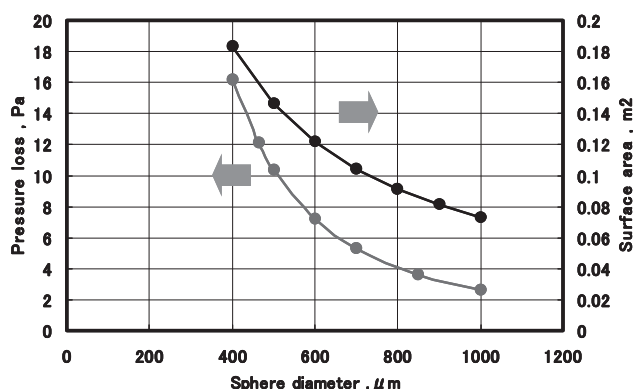


Fig.1 Calculation value of pressure loss and total Surface area

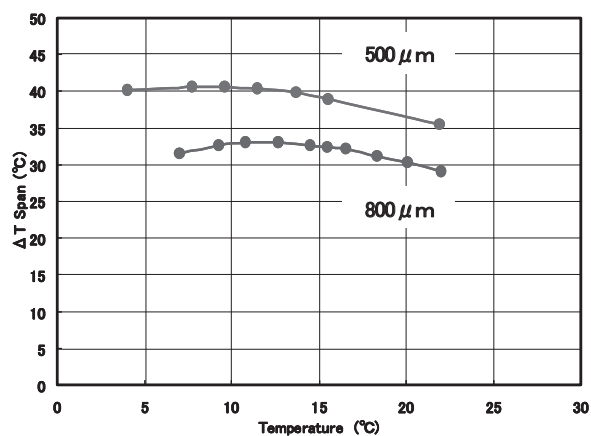


Fig.2 Dependence of ΔT_{span} vs measurement temperature

謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構(JST)から受託した革新技術開発研究事業にかかる研究の一部である。

参考文献

- 1) J.A.Barclay ; NASA Report NASA-CP2287(1983)
- 2) 小林忠彦他, 第75回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 1P-p45, 1P-p46(2006)
- 3) 小林忠彦他, 第76回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2C-a10, 2C-a11(2007)

室温磁気冷凍機の熱流動特性

Thermal-Hydraulics Characteristics of Room Temperature Magnetic Refrigerator

森 裕司、才丸 満、岡村 哲至 (東工大); 平野 直樹、長屋 重夫 (中部電力)

MORI Yuji, SAIMARU Mitsuru, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech.);

HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

1. はじめに

我々は、磁気冷凍機の室温での応用に向け研究を行っている。本発表では、室温磁気冷凍機の COP 向上のために、様々な改良 (圧力損失の低減、磁場の強磁界化など) を行ったので、その結果を発表すると共に更なる性能向上についての検討を行う。

2. 実験装置

本研究で試作した磁気冷凍機システムの概略図を図 1 に示す。本システムは主に AMR bed、ロータリーバルブ、冷却ステージから構成される。AMR bed 内には磁気作業物質として Gd (球径 510~750 μm) を充填している。永久磁石をモーターによって回転させ磁気作業物質の励磁、消磁を行う。その磁気作業物質との熱交換媒体として水を使用しポンプによって循環させる。その磁石の最大回転速度は 30rpm である。Nd 系の永久磁石によって磁気作業物質に印加される磁場の強さは 1.1T である。磁石を回転させるための最大消費電力は 200W、最大トルクは 64Nm である。水を循環させるためのポンプの最大消費電力は 320W、最大圧力ヘッドは 0.6MPa である。冷凍能力は、冷却ステージに取り付けてあるヒータの熱入力量としている。

3. 実験結果

本磁気冷凍機システムの高温端温度を 20°C に保った時の温度差 (=高温端温度-低温端温度) 5°C での各流量における運転性能を図 2 に示す。磁気冷凍機システム内の圧力損失の低減によって流量を 3.0L/min から 12.7L/min に増加することができた。その結果、サイクル時間 2.6sec において冷凍能力 160W が得られた。本磁気冷凍機では、サイクル時間が長いと単位時間当たりの断熱温度量変化の回数が少なくなり、反対にサイクル時間が短すぎると、熱交換時間が十分になされないため冷凍能力がピークとなるサイクル時間が存在する。

図 3 は、温度差 5°C での各流量におけるサイクル別の COP を示す。本実験では、パラメータ範囲を広くするためそれに対応したポンプを使用している。また、様々な流量における性能を調べるためにインバーターをポンプに付加しており効率の悪いところでの運転となっている。そのため、図 3 は、現状で使用しているポンプを最適な条件で使用した場合の消費電力を使い COP を算出した。流量が増加するに従い、最大冷凍能力が増加しているがポンプの消費電力も流量が大きくなるほど増加するため、COP は 8L/min 時の方が 12.7L/min 時よりも大きくなる。

4. まとめ

AMR bed の圧力損失の低減、流量の増加、磁石の強磁界化の改良により、温度差 5°C で COP=1 を得た。今後、更なる COP の向上をしてゆくためには、本磁気冷凍機システム全体での圧力損失の低減、磁石回転トルクの低減などの改善が必要であると考えられる。

本研究は、地球温暖化防止新技術プログラムの一環である「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発」として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

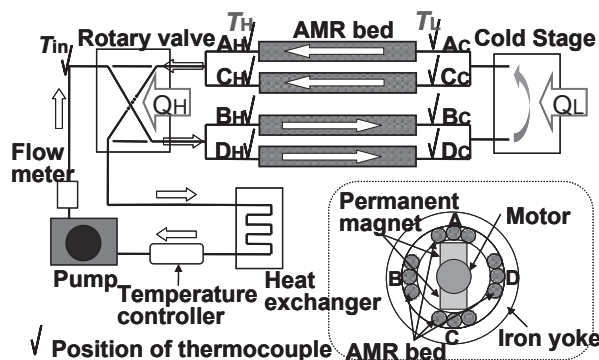


Fig.1 Configuration of Room Temperature Magnetic Refrigerator

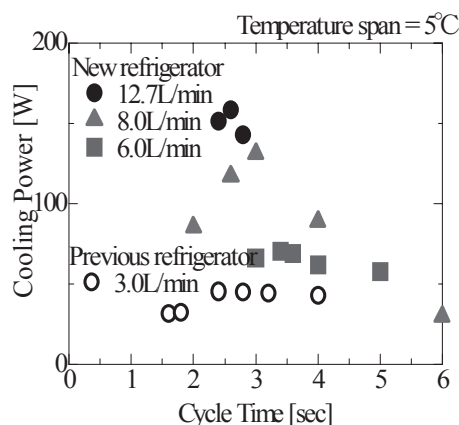


Fig.2 Cooling power vs. Cycle time

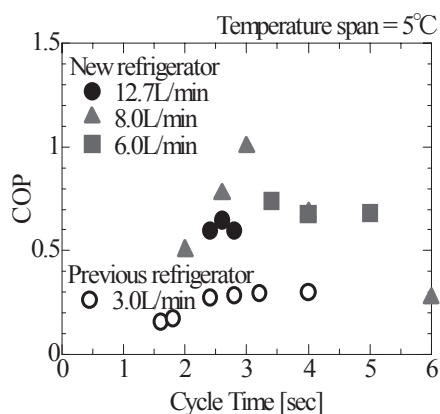


Fig.3 COP vs. Cycle time

参考文献

- [1] C.Zimm et al.: Proceeding of 2nd international Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature,341(2007)
- [2] T.Okamura et al.: Proceeding of 2nd international Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature,377(2007)

宇宙用磁気冷凍機の開発(4)－冷凍試験結果報告－ Continuous ADR System for Space Application (4) –Experimental results–

高橋 健太(千葉大学, 物質・材料研究機構); 神谷 宏治, 沼澤 健則(物質・材料研究機構);
Donald Wegel, Peter Shirron (NASA/GSFC)
TAKAHASHI Kenta (Chiba University, NIMS); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS);
Donald Wegel, Peter Shirron (NASA/GSFC)
E-mail: takahashi.kenta@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

微小重力下でも 100mK 以下の超低温を連続的に発生可能である連続型断熱消磁冷凍機(CADR:Continuous Adiabatic Demagnetization Refrigerator)の開発を進めている[1]。宇宙環境下における使用に向け、クライオスタットは小型化、軽量化、耐震動性を考慮して設計されている。また、CADR の排熱は機械式冷凍機(4K-GM 冷凍機)を用いており、無冷媒システムを実現した。

今後、航空機を用いた微小重力下における CADR の冷凍試験を予定している。航空機実験では 1 回のフライトでおよそ 20 秒間の微小重力状態を数回に渡って発生可能であり、その間 CADR の作動特性を検証する。

現在、航空機実験に向けて地上における冷凍試験を行っており、本講演ではその結果を報告する。

2. CADR の構成

CADR の外観を Fig.1 に示す。CADR は連続的に超低温を維持する第 1 ステージから 4K 熱浴に排熱を行う第 4 ステージまでの 4 つのユニットから構成されている。各ステージは超伝導マグネットと磁性体からなり、それぞれのステージは熱スイッチで接続されている。第 1 ステージと第 2 ステージ間の熱スイッチには超伝導ヒートスイッチを用い、それ以外のステージ間には外部制御が不要である PGGHS(Passive gas-gap heat switch)を用いた。各ステージが作動する温度領域と磁場を Table 1 に示す。第 1～第 3 ステージまでの磁性体は CPA($\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)を使用し、第 4 ステージには従来の GGG に替えて GLF(GdLiF_4)を新しく採用して冷凍能力の増加をはかった。GLF と GGG のエントロピー変化の比較を Fig.2 に示す。GLF は第 4 ステージの作動温度域で GGG よりも大きなエントロピー変化を得ることができ、高い冷凍能力を発揮することが期待できる。

3. 冷凍試験

CADR の Continuous 試験を行う前に各ステージの基本特性を検証するためにシングルショットでの冷凍試験を行った。第 4 ステージの冷凍試験結果を Fig.3 に示す。第 4 ステージのマグネットを 4.3T(3.3A)まで励磁し、0T まで消磁した。励磁するとともに第 4 ステージの温度が上昇し、最大電流まで到達した後、熱浴の温度まで低下した。消磁を開始すると第 4 ステージの温度が低下し続け、最終的には 1.1K 付近まで到達した。一方、熱浴の温度はほぼ一定であったため、PGGHS の作動が良好であることがわかる。なお、今試験では第 2、第 3 ステージのマグネットを励磁した状態で第 4 ステージの消磁を行ったが、実際のサイクルでは他ステージとは独立で消磁を行うため第 4 ステージは 1.3T(1.0A)以上の十分な余力を残して 1K 付近まで到達できる。その他のステージの冷凍試験結果など詳細は当日講演にて報告する。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラム宇宙環境利用公募地上研究(次期宇宙利用研究)により、実施されている。

参考文献

[1] K.Takahashi, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) p139



Fig.1 Picture of a CADR being developed

Table 1 Specifications of each stage

Stage	Refrigerant	Temperature region	Field
1	CPA	60mK	0.1T
2	CPA	55-280mK	0.5T
3	CPA	250mK-1.0K	1.5T
4	GLF	0.9-4.5K	4T

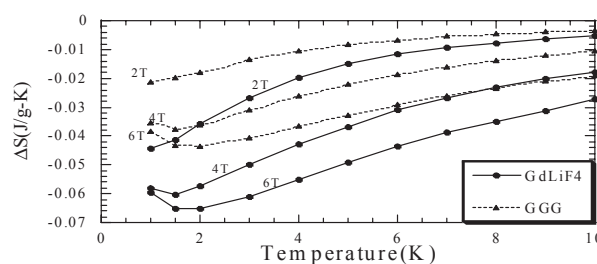


Fig.2 Comparison of the entropy change of polycrystal GLF and singlecrystal GGG

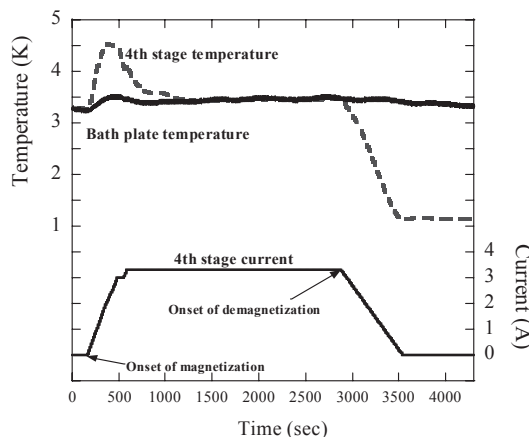


Fig.3 Refrigeration of the 4th stage by the demagnetization

水素用磁気冷凍-AMR サイクルの解析と試験について-

Magnetic refrigeration for hydrogen liquefaction

- AMR cycle analysis and test -

松本 宏一, 池田 正和, 近藤 卓矢 (金沢大); 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)
 MATSUMOTO Koichi, IKEDA Masakazu, KONDO Takuya, (Kanazawa-U); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)
 E-mail : kmatsu@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々は磁気冷凍法による常温や LNG, 液体窒素を排熱温度とする水素液化の研究を行っている。これまでに、水素液化温度(20K)から液体窒素温度(77K)までの温度範囲で磁気相転移を持つ磁性体の研究を行い、その磁気熱量効果について、一次や二次の磁気転移を持つ物質について調べ、その磁化やエントロピー変化、さらにエントロピーを報告してきた。また希土類元素の組成比、de Gennes 因子を変えることによる相転移温度の制御についても報告した。[1]

前回までに、それらの磁性体を用いて Active Magnetic Regenerator(AMR)による蓄冷型磁気冷凍を行った場合の冷凍能力についてシミュレーションにより解析した結果について報告を行った[2]。

我々は、現在、市販の伝導冷却超伝導磁石を用いた AMR 冷凍サイクル試験を進めている。本試験装置における蓄冷サイクルの実現原理や AMR サイクル試験について報告する。

2. AMR 試験装置原理・概要

現在は 77K と 20K 間の温度領域における蓄冷型サイクルの試験を目的としている。蓄冷サイクルとしては広い冷凍温度幅が期待できる AMR (Active Magnetic Regenerator)を使用することにした。磁気熱量効果を生じさせる磁場の発生方法としては、伝導冷却超伝導磁石によって発生した最大 6T の一定磁場を用い、磁場変化は磁石から磁性体を機械駆動により引き抜くことにより行うこととした。使用する磁石は水素液化用カルノー型冷凍機[3]で使用された物を使う。

AMR サイクルは磁性体に与える磁場変化と熱交換流体との流れを巧妙に同期させ、磁性体容器(蓄冷器)の低温端から高温端に熱を輸送することを原理としている。外部の独立した機構により熱交換流体の流れを発生することが最も理想的であるが、本研究で使用した市販のマグネットシステムの構造や、77K 以下の温度領域で利用出来る磁場空間が直径 50mm 程度であることなどから、この機構による熱交換方式は採用出来なかった。そこで、今回は図 1 にあるような、封じ込められたガス中で磁性体蓄冷器を駆動し、駆動と同時に起こるガス流を使って熱交換流体の流れを発生させるという簡素化されたサイクルを採用することにした。このサイクル機構は構造が簡単になる長所を持つが、磁場変化と熱交換流を独立に制御出来ないという短所もある。

図 2 に本研究で用いられた試験装置の全体を示す。今までのカルノー型液化冷凍機の経験を踏まえ、駆動機構に以下のような改良が加えられた。駆動力は駆動精度を上げるために、空圧式からモーター駆動式に変更した。駆動軸からの熱侵入を低減するために駆動軸にベローシールを採用した。本講演にて AMR サイクル試験の詳細について報告する。

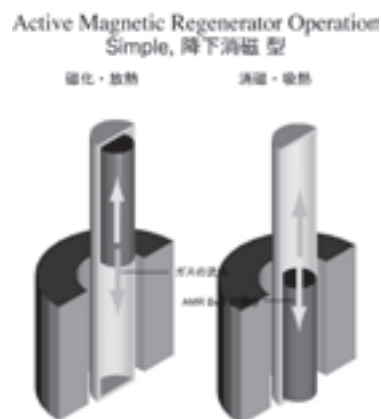


Fig. 1 AMR operation cycle. Simple gas flow type



Fig. 2 AMR test apparatus

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により、水素安全利用基盤技術開発プロジェクトの一環として、財団法人エネルギー総合工学研究所との共同研究により実施されている。

参考文献

1. K. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.33
2. M. Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.125
3. S. Yoshioka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.138

水素と超電導の複合エネルギーシステムの検討

Investigation of energy system combined with hydrogen and superconductivity

佐藤 工, 中山 知紀, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大)

SATO Takumi, NAKAYAMA Tomonori, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

E-mail: takumi.s@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

化石燃料の大量消費により、地球規模での環境問題や資源枯渇が懸念されている。このような背景から、化石燃料の代替資源として水素が注目されている。水素は燃料電池により電力を発生し、それ自体を化学エネルギーとして貯蔵することが可能である。水素の貯蔵は、高エネルギー密度貯蔵が可能な液体状態が適しており、それが持つ低温を利用すれば、エネルギーを高効率に利用可能な超電導の導入が期待される⁽¹⁾。そこで、本研究では、水素と超電導を複合したエネルギーシステムを提案し、制御方法に関する検討およびシミュレーションを行ったので報告する。

2. 水素と超電導複合エネルギーシステム

本研究では、水素と超電導複合エネルギーシステムとして Fig.1 に示すような液体水素(LH₂)-超電導 DC マイクロ・グリッドを提案する⁽²⁾。マイクロ・グリッドは、風力発電などの自然エネルギー発電源、水素生成プラント、水素液化機、LH₂貯蔵タンク、自動車用水素供給ステーション、LH₂ 輸送パイプライン、燃料電池(FC)、および、パイプライン中に敷設した超電導送電線、LH₂ 貯蔵タンク中に浸漬した超電導電力貯蔵装置(SMES)等の超電導応用機器などから構成される。

自然エネルギーによる発電は間欠的で変動の激しい出力であるが、Table.1 に示すような異なる特性を持つ SMES と FC により補償可能である。自然エネルギーによる発電出力が、負荷や水素液化動力の需要電力に対して余剰時は、SMES や水素生成プラント等により電力を吸収し、不足時には SMES からの放電や FC による発電によって対応する。これによって、全時間領域で負荷に高品質な電力を供給することが可能であり、マイクロ・グリッド外部電力系統に対しても悪影響を及ぼさないシステムとして振舞うことができる。生成された LH₂ はパイプライン中を流れ、水素需要地へ輸送される。また、液体水素パイプライン中に敷設された直流超電導ケーブルによって、マイクロ・グリッドの各要素に低損失に電力が輸送される。

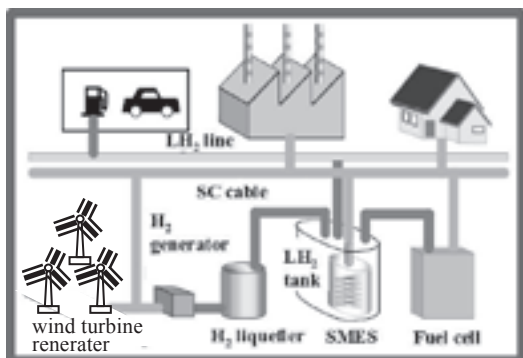


Fig.1 Energy system combined with hydrogen and superconductivity

Table.1 Characteristics of SMES & FC

	SMES	Fuel Cell (FC)
Power	Very large	Low
Access speed	High	Low
Capacity	Low	Very large
Efficiency	High	Low

3. システムの制御方法

液体水素-超電導 DC マイクロ・グリッドを高効率に運転するためには、Fig.1 のマイクロ・グリッドの各要素への電力や LH₂ の入出力を逐次制御することが重要である。

Fig.2 にマイクロ・グリッド内の電力の流れを示す。U は商用電力系統、G は風力発電などの自然エネルギー発電源、L₁ は需要側の負荷、L₃ は水素の液化動力負荷である。G_{FC} は燃料電池による発電源、L₂ は水素製造装置による負荷であり、不足電力に対して FC によって発電を行い、余剰電力に対しては水素製造を行う。S_{SC} は SMES で瞬時の電力の入出力を行う装置、S_{LH2} は液体水素によるエネルギー貯蔵である。自然エネルギーは時間的な変動が激しいので、その出力 P_G が、負荷電力 P_{L1} と計画された一定の需用電力 P_U + P_{L3} の合計より上回ったとき、SMES への入力 P_{SC} を増加させ優先的に電力を貯蔵する。SMES の貯蔵容量が上限値へ達すると、P_{L2} を増加させ、水素を製造・貯蔵する(Fig.2(a))。逆に P_G が需要を賄いきれなくなったとき、P_{SC} や P_{FC} からの出力を増加させ対応する。(Fig.2(b))。

この運用を円滑にするために、各要素の特性に応じた入出力の制御が重要な課題となる。本検討では、上述の制御方法に基づき、実際の動作についてシミュレーションを行う。

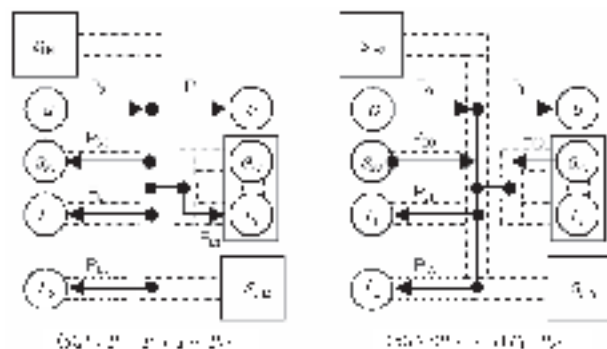


Fig. 2 Combined energy micro grid model

4. 結言

水素と超電導複合エネルギーシステムとして、液体水素-超電導 DC マイクロ・グリッドを提案した。LH₂ は MgB₂ や高温超電導体の冷媒に利用できる。LH₂ と超電導からなる複合エネルギーシステムは環境負荷が小さく省エネルギーの性質を持っているので、持続性社会システムとして構成できる。

本研究では、提案した DC マイクロ・グリッドの電力制御に関して、MATLAB/Simulink によりシミュレーションを行った。シミュレーションで考慮したモデルおよび結果については、当日紹介する。

参考文献

1. T. Hamajima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.57
2. T. Nakayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.12

災害列島におけるクリーン・エネルギー(パラ・液体水素)の備蓄と輸送

Storage and transport of clean energy (para-LH₂) in the disastrous Japan Islands

平林洋美, 槇田康博 (KEK); 新富孝和 (日大)

HIRABAYASHI Hiromi, MAKIDA Yasuhiro (KEK); SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.)

E-mail: hiromihr@mac.com

1. はじめに

地球温暖化防止のため、二酸化炭素 CO₂ の排出削減が提唱されて久しい。すでに近年、異常気象と気温の上昇が指摘されている。地表の草木の炭酸同化作用によって固定される CO₂ の量は少なく、過去の太陽エネルギーである石油、石炭などの化石エネルギーを大量に消費することによって、温室効果ガス CO₂ は大気上層に停留する。

2050 年までに CO₂ 排出を 50%削減すると仮定すると、CO₂ の 20~30%程度の削減では追いつかない。80~90%の削減を目標とすることになり、持続可能性と経済性が課題になる。また、このことは技術的には、エネルギー・サイクルを炭素から水素(水)または核(原子力)に転換せざるを得ないことを意味する。

他方、日本列島は有数の災害列島であるから、地震、津波、台風などに対して備えなければならない。

クリーン・エネルギーの備蓄と輸送の観点から、課題の整理と提言を試みる。

2. 水素の製造

水素の製造には、まず水力、原子力の夜間余剰電力による、アルカリ、固体高分子膜、高温水蒸気電気分解などが王道である。次に、熱化学法として、高温ガス炉 (IS 法) など原子力の高温熱利用がある。さらに、4000℃以上で水を熱分解する方法、光分解する方法も、原理的にはあるが、後二者は技術的目処が立っていない。

化石燃料、例えば、メタンの水蒸気改質、部分酸化法、石炭ガス化法等があるが、改質法は CO₂ を排出するので、それを固定しないと、地球温暖化ぼうしには寄与できない。食塩水の電気分解の際発生する水素は、いまだに工業的に利用されていない。水の電気分解においては、温度にもよるが、10~20%が理論上熱として逸散する。

3. クリーン・エネルギー水素の備蓄

水素は高压ガス、液体水素、高ハイドロ・カーボン、各種吸蔵合金の形で備蓄できるが、体積あたりの備蓄モル数が高く、含有量も高いのは、液体水素である。実に 10 MPa の高压ガスの約 10 倍である。但し、クリーン・エネルギーとして液体水素を備蓄するためには、高度な低温工学上の技術と、水素分子のスピン制御が必要である。熱交換器の各段に触媒を仕込み、エネルギー状態の低い(安定な)スピン平行(パラ)水素を大量に作り、巨大で高級な魔法瓶である大型貯槽に備蓄すると、大気からの熱侵入による、超高純度の水素蒸発は 0.3%/day 以下に納められることが実証されている。何万、何十万 Nm³ の容積のクリーン・エネルギーの備蓄タンクの建設が待たれる。蒸発水素は FC などに供給し、制御電力とする。

4. 水素の輸送

通常水素の輸送には、配管によるもの(比較的短距離)、高压シリンダー・カードルによるトラックまたはトレーラーによる輸送(重い割に、軽い水素はあまり積めない、最も危険な方法)、液体水素コンテナによるトレーラー輸送(低压、コンパクトで大量の高純度水素が運べる)の三つの方法がある。

災害列島である我が国においては、長距離水素パイプラインは未発達である。どこで災害に遭うか予想できないので、外国のように簡単にはいかない。そこでひと工夫がいる。まず、ガスラインは基本的に屋上層配管として高压を避け、1 MPa 未満とすることが一つの指針となろう。次に液体水素の配管であ

るが、ステンレス鋼管・銅管・アルミ管等によりスーパー・インシュレーションによる断熱配管とする。流体の比熱および粘性は極めて小さいので、効果的な液体水素の輸送ができる。但し、長距離の輸送は侵入熱による気化のため、2 層流となる可能性があるので注意を要する。遠距離輸送または不定期な大口需要に対しては、液体水素コンテナによるトレーラー輸送が推奨される。すでに、日米においては、この方式が実用化されている。

4. 特記事項

よく知られているように、水素の基本的性質は次の通りである。

- * かるい(H₂)
- * 沸点が低い(20.3 K)
- * 還元性が強い
- * 爆発限界が広い(4.0~75 vol.% 空气中)
- * 最小着火エネルギーが小さい(0.019 mJ 大気中)
- * 拡散速度が速い
- * 火炎は無色
- * 透過力が極めて大きい

新潟県中越沖地震の際、最後まで復旧しなかったインフラは都市ガスであった。(表 1 参照)

Table 1 Recovery conditions of lifelines in Kashiwazaki city and Nishiyama/Kariba area at Niigata Chuetsu-oki Big Earthquake on July 6, 2007.

Life line	Recovery	Remarks
Gas	Aug. 27	Two months for recovery in case of Niigata Chuetsu Big Earthquake in October 2004.
Electricity	Jul. 18	
Tap water	Aug. 4	
Sewer system	Aug. 14	
Phone	Jul. 16	
NTT Docomo	Jul. 18	

水素ガス配管にあつては、高压水素を引き回さないこと。液体水素にあつては、超伝導ケーブルと同一配管とする場合も、間接冷却とし、単位長を余り長くせず、両端に緊急遮断弁を用意し、配管の最上部に地上に抜ける逆止弁付き破裂板(Rapture Disk)を取り付け、万一の場合に備える等の対策が考えられる。屋外もしくは建物最上部に水素配管を施すことは原則である。(図 1 参照)

また、自動車用燃料として、液体水素を利用すると、今のところ、200 km 程度まで、炭化水素を消費しないで走行することができる。

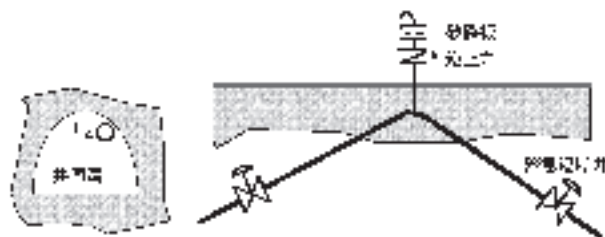


Fig. 1 Arrangement of safety system for H₂ pipe line. A safety valve is arranged on the highest position of the pipe line.

J-PARC 低温水素システム用ヘリウム冷凍機の性能試験

Performance test of a helium refrigerator for the cryogenic hydrogen system at J-PARC

達本 衡輝、麻生 智一、大都 起一、長谷川 勝一、上原 聡明、加藤 崇(原子力機構)、牛島 勇、信時 実(大陽日酸)
 TATSUMOTO Hideki, ASO Tomokazu, OHTSU Kiichi, HASEGAWA Shoichi, UEHARA Toshiaki, KATO Takashi (JAEA),
 USHIJIMA Isamu, NOBUTOKI Minoru (Taiyo Nippon Sanso)
 E-mail: tatsumoto.hideki@jaea.go.jp

1. はじめに

J-PARC の核破砕中性子源では、1MW 級の陽子ビームによる核破砕反応によって発生した高速中性子を超臨界圧水素 (1.5 MPa、20 K) を用いて冷中性子に減速させてビームを供給する。陽子ビーム 1MW 時において、水素モデレータ容器内で発生する核発熱量は約 4 kW であり、この大きな熱負荷を除去するために、大流量の超臨界圧水素を安定に強制循環させる低温水素システムを製作した。現在、来年 5 月の初ビーム受入に向けて試運転を行っている。本システムは、安全性の観点から、水素保有量を少なくするために、低温水素ループをヘリウム冷凍機で冷却する 2 元式冷凍方式を採用した。本講演では、このヘリウム冷凍機の単体性能試験結果について報告する。

2. ヘリウム冷凍システム

低温水素ループ (水素保有量 : 240 L) は、超臨界圧水素 (1.5 MPa、20 K) を強制循環させる 2 台の循環ポンプ (遠心式)、オルソ・パラ変換器、圧力制御用のヒーターと水素ループ内にベローズが内包されたアキュムレータ、および、He-H₂ 熱交換器から構成されている。この熱交換器を介して、低温水素ループは、ヘリウム冷凍機により冷却される。低温水素ループの定格時 (循環流量 : 0.162kg/s) のポンプの熱負荷も含めた全侵入熱量は、866 W と見積もっている。1 MW の陽子ビーム入射時は、モデレータで 3.75kW の核発熱が発生するため、ビーム運転中の水素システム全体の熱負荷は 4.6kW になる。よって、ヘリウム冷凍機の必要な冷凍能力を 6kW@17K とした。Fig.1 にヘリウム冷凍機のフローを示す。圧縮機 (軸動力 : 720 kW) により、1.68 MPa まで圧縮されたヘリウムガスは、コールドボックス内に導かれ、熱交換器 (HX1, HX2) で戻りガスと液体窒素により予冷され、HX3 では、タービンによって膨張された戻りガスにより 17 K 以下に冷却され、ヒーター (8 kW) により水素ループへの供給温度 (17 K) を調節する。低温水素ループからの戻りガスは、膨張タービン (定格回転数 : 2470 rps) によって 0.3 MPa まで断熱膨張するブライトンサイクルを形成している。単体性能試験では、低温水素ループには繋げずに、コールドボックス内のヒーターを用いて液体窒素予冷を行った場合とタービンのみの場合の冷凍能力を測定した。

3. 単体性能試験結果

液体窒素の消費量を軽減するため、冷却の初期段階では、タービンのみの運転とし、HX3 入口温度 T1 が 200K 以下になると、液体窒素による予冷運転を行う。Fig.2 にヘリウム冷凍機単体での冷却曲線を示す。冷凍機に負荷を繋げていないため、HX3 以降では、冷却開始直後の急激な温度降下がみられる。冷却開始から約 80 分程度で 20K レベルまで冷却できる。液体窒素の供給開始により、HX1, HX2 の領域で急激に温度が下がる。ヒーターにより、T2 の温度を 15.5 K 以上に保持した。約 4.5 時間で定格状態まで冷却することができ、HX3 出口温度 (T2) が 15.6K の時、6.453 W の冷凍能力が得られ、設計値を十分満足することを確認した。この時の液体窒素の消費量は 18.63g/s であった。

Fig.3 に液体窒素予冷を行わないタービンのみの運転時における HX3 出口温度 (T2) とヒーター出力の関係を示す。

液体窒素予冷を行わない場合でも、18K 近傍で約 3 kW の冷凍能力を得ることができた。したがって、陽子ビーム出力が 500 kW 以下の運転時では、ヘリウム冷凍機は、タービンのみの運転で対応できると考えられる。

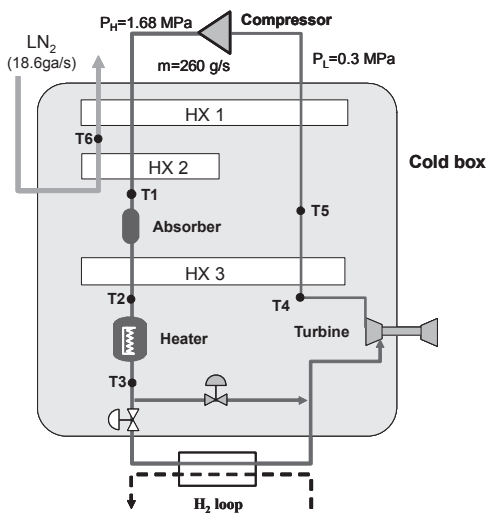


Fig.1 PFD of helium refrigerator

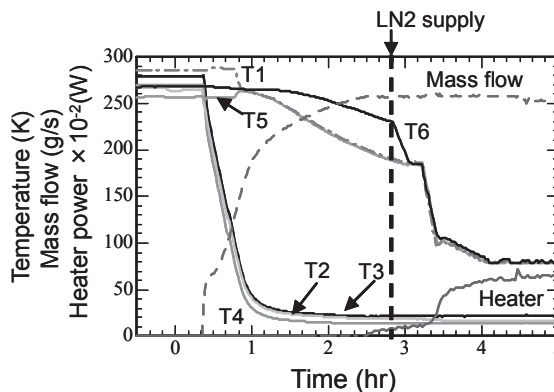


Fig.2 Cool-down curve

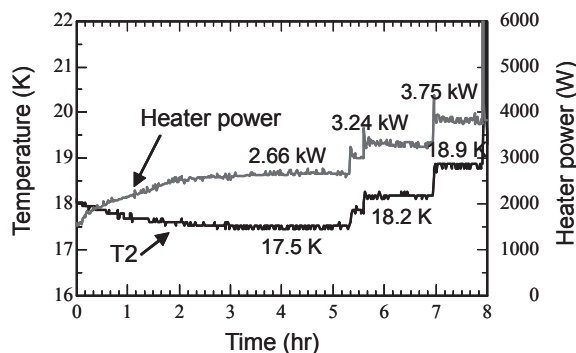


Fig.3 Cooling power without LN₂ pre-cooling

J-PARC 低温水素システムの完成及び試運転計画

Constructive completion of the cryogenic hydrogen system at J-PARC and commissioning plan

麻生 智二, 達本 衡輝, 長谷川 勝一, 大都 起一, 上原 聡明, 川上 善彦, 櫻山 久志, 前川 藤夫, 加藤 崇(原子力機構)
 ASO Tomokazu, TATSUMOTO Hideki, HASEGAWA Shoichi, OHTSU Kiichi, UEHARA Toshiaki, KAWAKAMI Yoshihiko,
 SAKURAYAMA Hisashi, MAEKAWA Fujio, KATO Takashi (JAEA)
 E-mail: aso.tomokazu@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は KEK と共同で大強度陽子加速器計画 (J-PARC)を進め、物質・生命科学研究分野の展開を目的として、MW 級核破砕中性子源実験施設を建設した。その中の低温水素システムは、1 MW 陽子ビームと水銀標的との核破砕反応で発生した高エネルギー中性子を超臨界水素中に通過させることにより、そのエネルギーを低減し、冷中性子ビームとして施設利用者の実験装置へ供給するための冷凍システムである[1]。そのエネルギー交換時、水素への熱負荷は約 4 kW に達する。この熱負荷を中性子源中心部にある水素モデレータ(合計 4 L)で、温度差 3 K 以内という条件で除去するために超臨界水素の強制循環方式とした。システムの設置工事がほぼ終了し(Fig.1)、今後試運転を実施する予定である。

2. 低温水素システムの特徴

本システムの構成を Fig.2 に示す。本システムの特徴は、1)ハザードポテンシャルを抑制するために、ヘリウム冷凍システムと水素循環システムで構成したヘリウムと水素の 2 元冷凍システムとして水素保有量を低減したこと、2)利用者からの要望から、効率よく冷中性子を生成するためにオルソ・パラ水素変換器(水酸化鉄触媒)を設置してパラ水素濃度を高めたこと、3)3 基のモデレータへの供給温度を一定にするために水素供給を並列流路としたことである。さらに、4)低温閉ループにおいて熱負荷による圧力変動の課題を解消するためにヒータとアキュムレータによる圧力調整システムを採用した。

3. 水素循環ポンプの動作確認

水素循環ポンプの動作確認を製作メーカー工場内で実施した。すなわち、ポンプ単体について常用圧力以上の 1.6 MPa の窒素ガスを内部に充圧した状態で、最高回転数(57,000 rpm)まで運転し、実回転数(すべり率)、振動等異常がなく正常に動作することを確認した。本ポンプの仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of the hydrogen pumps

Mass flow rate	0.162 kg/s
Pump head	0.12 MPa
Adiabatic efficiency	more than 50 %
Operation pressure	0.1~1.8 MPa
Operation temperature	300~17 K
Driving	Induction motor with inverter
Bearing	Foil type self acting gas bearing
Revolution	57,000 rpm max.

4. 試運転状況と計画

本システムの試運転は、発注先の大陽日酸㈱によって、既にヘリウム圧縮機の試運転、ヘリウム冷凍機の試運転調整が行われ、冷凍能力 6.45 W (at 15.6 K)を確認し、設計値(6 kW at 17 K)を満足した[2]。今後、まず 12 月末までに負荷となるモデレータを含まない水素循環系単体での試運転を行い、水素ループの性能、設計仕様を確認し、完成検査を受検する。その後、モデレータを含めた全体システムの総合試運転を行い、2008 年 5 月のビーム受け入れに備える。

参考文献

1. T. Kato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.69 (2003) p.64
2. H. Tatsumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) 本会講演予定(2D-a08)

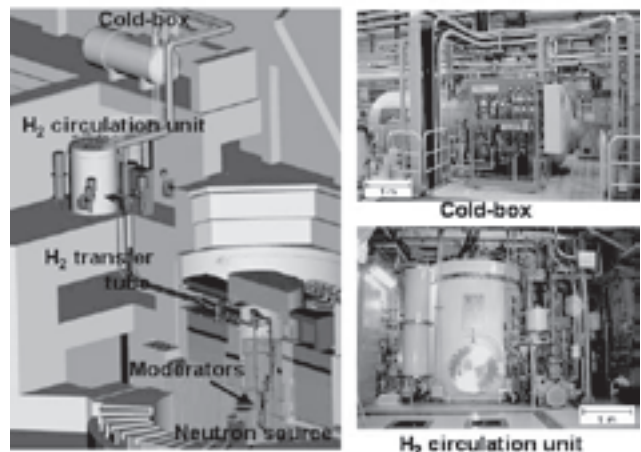


Fig.1 The cryogenic hydrogen system

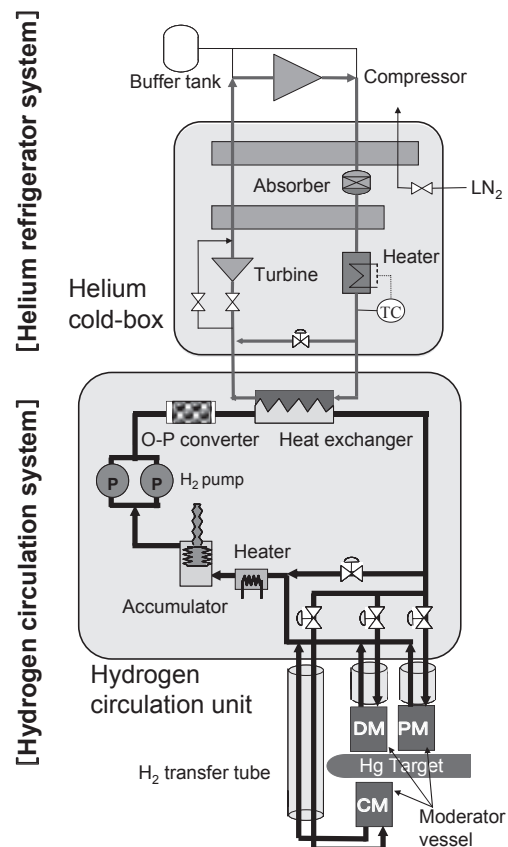


Fig.2 Schematic flow diagram of the cryogenic hydrogen system

フィラメント加工した YBCO テープ線材の磁化損失特性

Magnetization loss Characteristics of YBCO tapes with multifilament

岡元 洋, 林 秀美 (九州電力); 住吉 文夫 (鹿児島大学);

和泉輝郎, 山田穰, 塩原融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);

IZUMI Teruo, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: hiroshi_a_okamoto@kyuden.co.jp

1. はじめに

YBCO 線材を使用した交流応用機器 (変圧器など) の開発において、超電導コイルの低損失化は実用化における重要な要素技術である。その交流損失の低減化法として、線材のフィラメント化がある。また、超電導コイルの交流損失の解析として有限要素法が用いられるが、その基礎データとなるのが線材の磁化損失特性である。今回、YBCO 線材 (ハステロイ基板) をレーザーによって5フィラメント (分割) 加工した線材について、積層数による磁化損失特性を無加工の線材と比較したので報告する。

2. 実験方法

Table 1 には、無加工の YBCO テープ線材諸元を示す。磁化損失は、pick-up coil 法で測定した。液体窒素中で、テープ線材に垂直に最大磁界振幅 70mT、周波数 10~120Hz を印加した。線材の積層数は、最大 8 枚である。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 には、無加工の YBCO 線材における臨界電流 I_c の磁界依存性 (垂直と平行磁界) を示す。 I_c の異方性が大きい。

無加工および5分割線材とも積層化による磁化損の周波数依存性は見られなかった。Fig.2、Fig.3 には、無加工および5分割線材における磁化損の積層数依存性を示す。実線は線材1枚における Brandt らによる理論値であり、線幅と I_c の磁界依存性を考慮している (Fig.1)。測定値と理論値の乖離は、低磁界領域で顕著となるテープエッジの影響が理論式で十分に説明できないためと考えられる。無加工線材は、5分割線材と比べて、低磁界領域の積層による損失の低減が大きい。また、両線材とも高磁界領域では、損失の積層数による依存性はなくなる。今後は定量的な検討を行う。

謝辞

本研究は経済産業省プロジェクト「超電導応用基盤技術開発」の一環として、ISTEC を通じて NEDO 委託により実施した。

Table 1 Specifications of YBCO tape without filament

size (mm)	$5.0^w \times 0.12^t$
I_c^* (A)	~65

*criterion: $1\mu\text{V}/\text{cm}$, 77K, s.f.

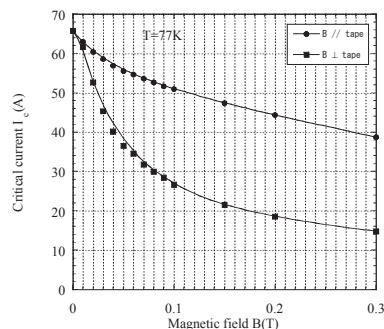


Fig.1 Field dependence of I_c without filament

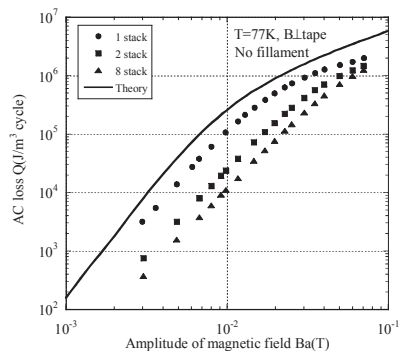


Fig.2 Stack number dependence of magnetization loss in no filament tapes.

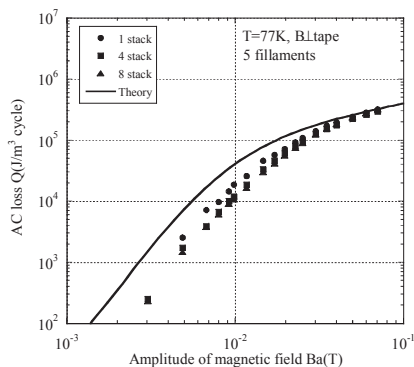


Fig.3 Stack number dependence of magnetization loss in 5 filaments tapes.

高温超伝導 2 層スパイラルケーブルの交流電流損失測定

Measurement of AC transport current loss in 2 layer HTS spiral cable

佐藤 翔, 山田 圭祐, 三倉 勇樹, 長谷部 義和, 西郡 将, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学);
塚本 修己(横浜国立大学); 佐藤 謙一, 加藤 武志(住友電工)

SATO Sho, YAMADA Keisuke, MIKURA Yuki, HASEBE Yoshikazu, NISHIGORI Masaru, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi,
OKA Tetsuo, SATO Takao(Niigata University); TSUKAMOTO Osami(Yokohama National University); SATO Kenichi,

KATO Takeshi(Sumitomo electric)

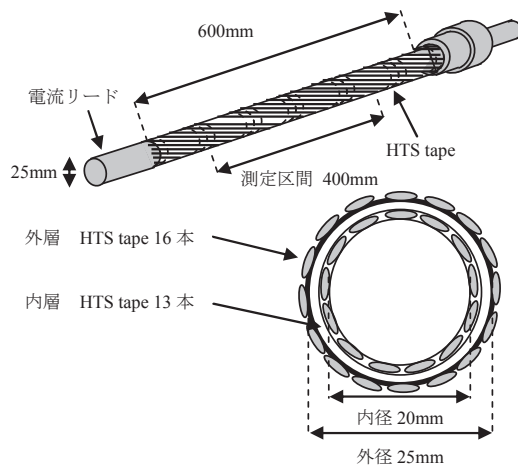
E-mail : ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

大電流を高効率で輸送可能な高温超伝導ケーブルの研究・開発が世界各所で行われている。超伝導ケーブルを実用化するにあたり、電力輸送能力に直結する交流損失を評価・低減することが非常に重要な課題となる。このような背景から、本研究は多層超伝導ケーブルを模擬した高温超伝導二層単相スパイラルケーブルを作成した。このサンプルは、撚りの施された超伝導ケーブルの交流電流損失測定法の確立のために、内層・外層に電圧リードループを3種類配置した。これらから、得られた電圧を基にツイストの施された超伝導ケーブルの交流損失測定法の確立と交流電流損失特性について検討を行った。また、本研究で作成した超伝導ケーブル形状を基に作成した数値解析モデルより得られた交流損失特性との比較を行った。

2. 高温超伝導二層単相スパイラルケーブルの構成

図1に高温超伝導ケーブルの概略を示す。超伝導区間が600mmの二層単相スパイラルケーブルを作成し、内層13本、外層16本の超伝導線を外内層ともにツイストピッチが400mmのz撚りで配置した。ケーブルを構成する各線材は各線材間で絶縁されており、ケーブル端部で外層と内層を銅



全長	865mm	
撚り部分	600mm	
HTS tape	種類	Bi2223/Ag
	臨界電流値(素線)	~77A
	測定区間	400mm
内層	直径	20mm
	撚りピッチ	400mm
	線材本数	13
外層	直径	25mm
	撚りピッチ	400mm
	線材本数	16

Fig. 1 Schematic illustration of HTS cable

ブロックにより一括接続している。内層と外層の電流値を測定するため各層にログスキーコイルが配置してあり、予め常温で較正を行うことにより、各層に流れる電流値を測定することが可能である。この結果、超伝導状態にしたときに外層に電流が集中して流れていることから、外層に偏流が生じていることを確認した。超伝導サンプル全体はワニスにより固定と絶縁することにより、振動による機械的損失がないものとして交流電流損失測定を行った。交流損失測定用電圧リードループは内層の各線材表面中心に沿わせた電圧リードループ、外層の各線材表面中心に沿わせた電圧リードループ、外層の各線材に超伝導ケーブル全体を取り囲むように配置した電圧リードループをそれぞれ配置した。それぞれ電圧リードループより得られた電圧の平均値から導出した損失を Q_{IR} , Q_{OR} , Q_{OS} とした。

3. 実験結果及び検討

図2に各電圧リードループより測定された損失 Q_{IR} , Q_{OR} , Q_{OS} と数値解析より導出したケーブル全体の交流電流損失を示す。このときの数値解析で用いた条件は、各線材の臨界電流値と n 値の平均値($I_c=70.6A, n=7.4$)を用いた。それぞれの電圧リードループより得られた電圧は同条件であってもばらつきを有している。これはケーブル内部での接続抵抗と臨界電流値のばらつきにより、各線材の電流値と損失にばらつきが生じるためである。しかし、ケーブル全体を取り囲むように外層に取り付けた電圧リードループは、それぞれの線材より得られた電圧の平均値を用いることにより、線材間のエネルギーの授受を測定しているため、ケーブル全体の損失を表していると考えられる。これに対し、 Q_{OR} は線材間のエネルギーの授受を測定していないため Q_{OS} より小さい値を示していると考えられる。また Q_{IR} も同様の理由でケーブル全体の損失を測定しているとは言えない。数値解析の結果より交流損失は3乗の傾きを示し、 Q_{OS} に近い値を示すことがわかる。この結果より、多層ケーブルであっても端部が一括である場合には、ケーブル全体を大きな線材とみなすことができ、ケーブル表面の各線材にスパイラル状に電圧リードループを配置し、その電圧の平均値を用いることにより損失を導出することが可能であることを示している。

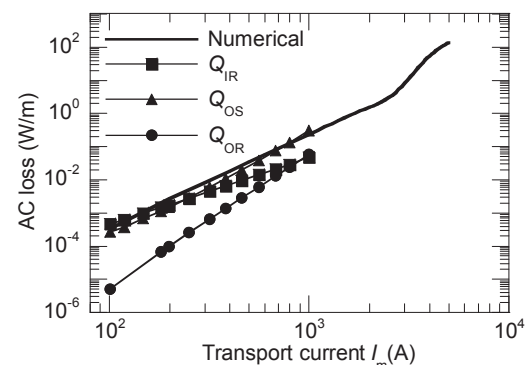


Fig. 2 Transport current losses measured by the different voltage taps and numerically calculated.

高温超伝導コイルの電磁界解析による交流損失評価

AC loss estimation based on electromagnetic field analysis of coils composed of coated conductors

花里 明伸, 雨宮 尚之 (横浜国大・工)

HANASATO Akinobu and AMEMIYA Naoyuki (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

E-mail: hanasato@rain.dnj.ynu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導コイルの交流損失の数値解析が各所で行われているが、その多くは、コイル中の 1 ターンのみを解析対象とし、その際、他の線材が作る磁界を外部磁界として与えるものである。この方法は、正確に他の線材内部の電流分布まで考慮して外部磁界を与えることは本質的に不可能であるという欠点を持つ他、無誘導コイルのように、外部磁界を与えにくい場合には適用が困難である。

本研究では、コイルの全ターンを同時に解析する独自の方法で高温超伝導コイルの電磁界解析を行い、誘導コイルと無誘導コイルの交流損失を計算し、比較、検討した。

2. 解析方法及び解析対象の線材・コイル

本研究では、解析対象のコイルを円環状の超伝導線材の集合としてモデル化した。さらに線材の断面を有限個の要素に分割し、各々の要素には円環電流が流れているものとして、1次元有限要素法を適用して解析を行った。ただし、ファラデーの法則に電流ベクトルポテンシャルを用いて変数変換し、得られた式を支配方程式とした。また、超伝導体のE-J(電界-電流密度)特性にはn値モデルを用いた。

今回用いた線材及びコイルの諸元をTable 1, 2に示す。Fig. 1に示すような20ターン4レイヤの誘導コイルと無誘導コイルの解析を行った。誘導コイルは全てのレイヤの通電方向が同じであり、無誘導コイルは最内・最外レイヤとその間の2レイヤの通電方向が逆である。それぞれのコイルの交流損失と比較するためにシングルターン(1ターン1レイヤのコイル)の解析も行った。

3. 計算結果及び考察

誘導コイル、無誘導コイルの磁束ベクトル図をFig. 2に示す。誘導コイルでは、大局的に見ると各層の電流が作る磁束の流れの向きが等しく、それらが重畳して大きな磁束の流れがコイル中に形成されている。それに対して、無誘導コイルでは、例えば最内層と次の層の電流が作る磁束は互いに打ち消しあうなど、各層の電流が作る磁束が重畳して大きな磁束の流れが形成されるようなことはない。

次に、電磁界解析の結果から計算した無誘導コイル、誘導コイル、シングルターンの交流損失値をTable 3に示す。交流損失は誘導コイルがもっとも大きい。これは、誘導コイルでは各層の電流が作る磁束が重畳し磁束密度が高くなるためである。一方、無誘導コイルの交流損失はシングルターンの交流損失より小さいが、これは、無誘導コイルでは、他の層の電流が作る磁界が重なりあって大きな磁界となつて加わるようなことはないこと、隣接する線材の作る磁界が各線材の端部で打ち消しあうことによるものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

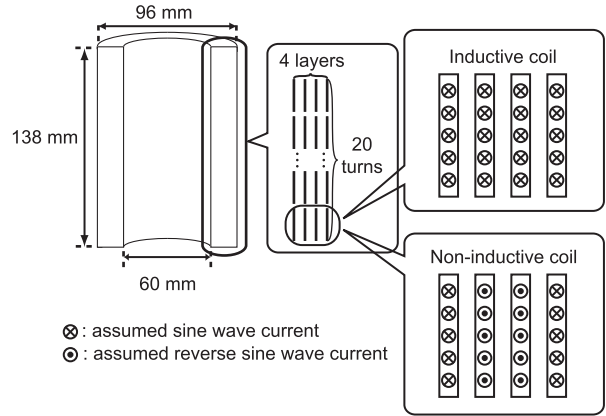


Fig. 1 Schematics of inductive coil and non-inductive coil

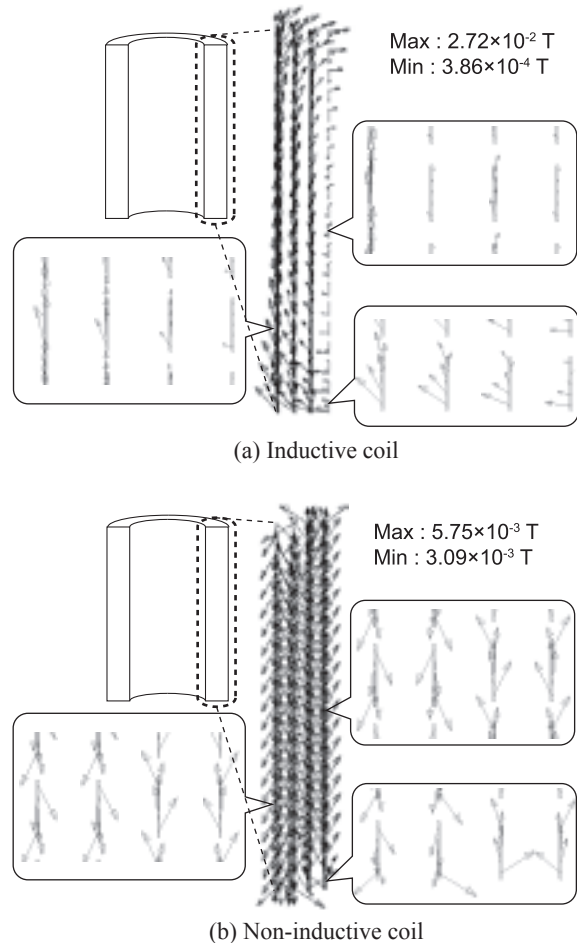


Fig. 2 Magnetic flux distributions

Width of superconducting tape	5 mm
Thickness of superconductor layer	1×10^{-3} mm
Critical current density, J_{c0}	2.0×10^{10} A/m ²
Constant for Kim model, B_c	60 mT
n value	20

Number of turns	20
Number of layers	4
Gap between tape	2 mm
Diameter of the innermost layer	60 mm
Height of the coil	138 mm

Inductive coil	Non-inductive coil	Isolated single conductor
93.5 kJ/m ³ /cycle	5.82 kJ/m ³ /cycle	13.1 kJ/m ³ /cycle

熱電対を用いた薄膜線材単層ケーブルの交流損失測定法の開発

Development of thermo-couple method for measuring AC loss in a mono-layer cable composed of coated conductors

劉鳴, 姜哲男, 雨宮尚之 (横浜国大); 八木正史, 向山晋一 (古河電工); 鹿島直二, 長屋重夫 (中部電力); 塩原融 (SRL)
 LIU Ming, JIANG Zhenan, AMEMIYA Naoyuki (YNU); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co.,Inc); SHIOHARA Yuh (SRL)
 E-mail: leo@rain.dnj.ynu.ac.jp

1. はじめに

我々が現在開発中の熱電対法は従来の測定方法に比べて、熱電対[1]の設置にほとんどスペースを必要としない局所的損失測定法であり、複雑な構造を持つ超伝導ケーブルの各層およびシールド層の交流損失測定への適用が期待される。そこで、本研究では、第一のステップとして YBCO 薄膜超伝導線材を用いて単層導体(ケーブル)を作製し、そのうちの1本の線材に実際に通電し交流損失を熱電対法で測定した。この測定方法の妥当性を検証するため、電気的方法[2]での測定も行った。

2. 試料導体と実験結果

Fig. 1 に示すように、直径 20 mm の FRP 棒の表面に Table 1 に示すような 6 本の線材をそれぞれ平行に撚りなしで配置し、超伝導単層導体を作製した (線材間隔約 0.5 mm)。図に示すように、断熱区間は発泡材を線材の上下から挟み込むようにして設けた。交流損失は断熱区間内の線材の表面に設けた熱電対による線材の温度上昇を測定することにより求める。Fig. 2 は、数十秒間直流または交流電流を流した時に熱電対により測定される温度上昇の曲線である。損失と温度上昇との関係、すなわち、校正曲線は臨界電流 I_c 以上の直流電流を流すことにより求める。Fig. 3 の赤丸群は、このようにして得たジュール発熱と温度上昇の関係であるが、原点を通らない。電流リード部でのジュール発熱が線材に沿って侵入するためと考えられる。そこで、線材に I_c 以下の直流電流を流し、その時の温度上昇と通電電流値との関係を調べることで電流リード部のジュール発熱の侵入による温度上昇部分を算出し、その部分を差し引くことで四角凡例で示す修正された校正曲線を得ることができた。この校正曲線を用いて得られた線材の交流損失値を Fig. 4 に示す。低電流領域では温度上昇が小さかったため、 $0.7I_c$ 以下の熱電対法による測定はできなかった。低通電領域での測定を可能にするためには発泡材の厚みを増やす必要があると考えられる。この図には Norris の Strip の値も重ねて示した。図に示すように電気的方法と熱電対法の測定結果はお互いに良く一致し Norris の Strip の値とも良く一致する。上記の結果により熱電対法での測定結果の妥当性が確認された。

Table 1 Specifications of YBCO conductor

Length of conductor	300 mm
Width of conductor	10 mm
Producing method	MOCVD-PLD
Ag protective layer	About 20 μ m
Critical current I_c	64.4 A
Substrate / thickness of substrate	Hastolly / 0.1 mm

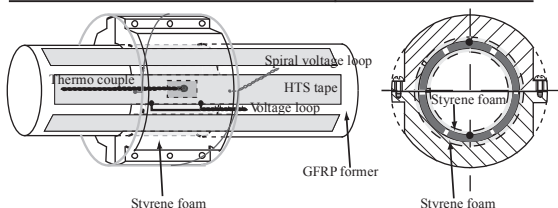


Fig.1 Sample arrangement

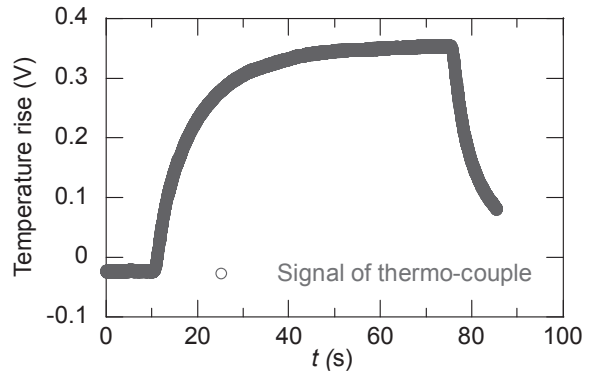


Fig. 2 Curve of the temperature rise

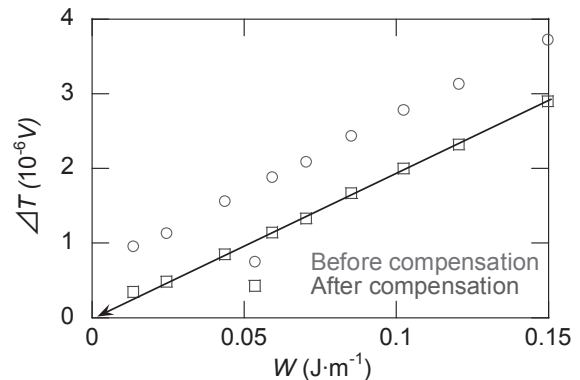


Fig. 3 Calibration curve before and after compensating for the effect of heat generated from the current leads.

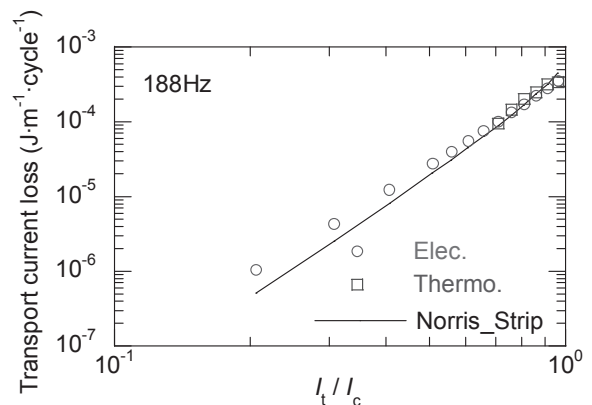


Fig. 4 Transport current loss measured by the Electrical method and the thermo-couple method at frequency of 188 Hz. The loss calculated by Norris's equation for thin strip conductors are also plotted.

謝辞

本研究は、超伝導応用基盤技術研究開発の一環として、NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. S.P.Ashworth, Physica C 315 (1999) 79.
2. D N Nguyen, P V P S Sastry, D C Knoll and J Schwartz, Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 1010-1017.

配向 NiW 基材上に形成したフィラメント状 YBCO 線材の電流輸送特性

Width dependence of current transport properties

in filamentary YBCO coated conductors deposited on textured NiW substrate

本山 皓士, 阿比留 健志, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九州大学大学院システム情報科学研究院);

青木 裕治, 高橋 保夫, 長谷川 隆代(昭和電線); 塩原 融(超電導工学研究所);

MOTOYAMA Koji, ABIRU Kenji, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Grad School of ISEE, Kyushu Univ);

AOKI Yuji, TAKAHASHI Yasuo, HASEGAWA Takayo (SWCC); SHIOHARA Yuh (SRL);

E-mail : k_motoyama@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

YBCO 超伝導線材を用いた応用機器開発においては交流損失の低減を目的とした細線化やフィラメント化が検討されている。しかし、配向 NiW 基材上に形成した YBCO 線材の粒径は数 $10\mu\text{m}$ と比較的大きいことから、同線材の細線化による影響を調べるのが重要であると考えられるが、今のところ十分に明らかとなっていない。本研究では、配向 NiW 基材上に形成した YBCO 線材における臨界電流特性の線材幅依存性について調べたので報告する。

2. 実験

試料は、配向 NiW 基材上に TFA-MOD 法によって超伝導膜を形成した YBCO 線材である。これを、長さ 1mm、線幅 $500\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ の 3 つのマイクロブリッジ形状に加工した後、温度、磁界を系統的に変化させながら電流-電圧特性を測定した。

3. 結果及び考察

Fig.1 に各線幅での 65K、77K における臨界電流密度 J_c の磁場依存性を示す。低、中磁場領域において、線幅 $60\mu\text{m}$ の J_c が比較的低くなっているが、高磁場領域においてはいずれの線幅も J_c がほぼ等しくなっている。

線幅 $60\mu\text{m}$ での J_c の低下について検討するため、電界 E -電流密度 J 特性を調べた。その結果を Fig. 2 に示す。4T 以下の磁界領域において、電界の急峻な立ち上がりを示すショルダ状の構造が見える。さらに、3T~4T の特性では、高電界領域において、上に凸から下に凸に移る up turn が観測される。上述した J_c -B 特性のクロスオーバーと共に E - J 特性の振る舞いは、単一粒界において観測される線形の磁束フロー領域から、電流の増大に伴ってバルク領域の磁束フロー損失が付加的に観測される結果と類似している。

磁束フロー抵抗の磁場依存性の実験結果と単一粒界における Abrikosov-Josephson vortex のフロー損失に関する理論値¹⁾との比較を行った。その結果を Fig.3 に示す。低、中磁場領域において実測値と理論値が良く一致していることから、低、中磁場領域では粒界での磁束フローが支配的であることが分かった。磁界の増大と共に、粒内にピン止めされた磁束線との shearing 相互作用が増大することによって磁束フローチャンネル幅が増大し、やがてバルク領域のフローに達すると考えられる。

謝辞: 本研究は超伝導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施すると共に、科研費(18360153)の助成を得て行ったものである。

参考文献

1) A. Gurevich, Phys. Rev. Lett. 88, 9 (2002)

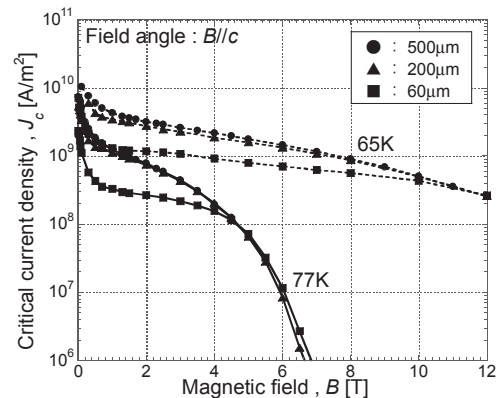


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c in $500\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ wide YBCO filament formed in a coated conductor.

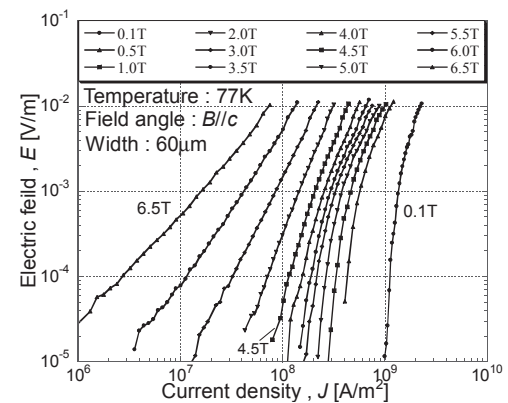


Fig.2 Magnetic field dependent E - J characteristics in $60\mu\text{m}$ bridge.

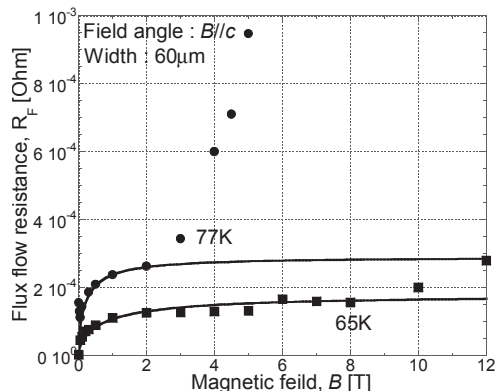


Fig.3 Magnetic field dependence of flux flow resistance of $60\mu\text{m}$ bridge at 77K and 65K. Solid lines are theoretical curves within the framework of Abrikosov-Josephson vortex flow¹⁾.

Y 系線材の機器応用開発

Development of practical YBCO coated conductors designed for power electric applications

花田 康, 三浦 貴博, 五十嵐 光則, 羽生 智, 富士 広, 柿本 一臣, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
 HANADA Yasushi, MIURA Takahiro, IGARASHI Mitunori, HANYU Satoru, FUJI Hiroshi
 KAKIMOTO Kazuomi, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura)
 E-mail: yhanada@fujikura.co.jp

1. はじめに

Y(イットリウム)系次世代高温超電導線材を用いた応用機器の開発が内外で進められており、変圧器や限流器などの静止器のほか、車両や船舶等に用いられるモーターを含む回転機等の開発が進められており、応用機器へ向けた高温超電導線材の提供を行っている。これら機器へ向けては、作製した超電導線材に、安定化・絶縁等の後加工をして提供している。本報告では応用機器へ向けた導体化加工の詳細及び各応用機器へ向けた提供状況について報告する。

2. 後加工工程

Fig.1 に機器応用に向けた超電導線材の導体化工程を示す。加工線材として無配向ハステロイテープ基板(幅 10mm、厚さ 0.1mm)に、大型 IBAD 装置を用いて GZO 層を積層し CeO₂ キャップ層を PLD 装置により成膜している。その後 PLD 装置にて YBCO を成膜している。銀をスパッタ蒸着した後、酸素雰囲気中でアニール処理した物を使用している。本線材をレーザースリッター装置を用いて、5mm 幅に裁断した後、磁化式長尺線材 I_c 評価装置(Tapestar (THEVA)) にて I_c 分布を測定している。Tapestar 装置ではホールセンサーアレイにより、テープ線材の幅方向の磁束密度分布を測定し、臨界電流密度を算出する。高速かつ非破壊に、線材の長手方向の臨界電流密度分布を測定することが可能である。次に、連続 I_c 測定装置を用いて 70cm 毎に通電測定をしている。ラミネート層としては銅と Ni-Cr があり、Table.1 に示すとおり用途によって仕様が違う。モーター・変圧器向けの線材加工には 0.1mm 厚の銅テープ(片面半田 Sn メッキテープ)を使用している。銅でラミネートすることにより銀層を薄膜化でき低コストでの安定化が可能である。また、限流器向けの線材加工の際には、線材長を短長にするために高抵抗である必要がある。高抵抗にする為に、銀層を薄すぎるとき熱的機械的に不安定になる事から高抵抗の Ni-Cr を使用している。ラミネート後はポリイミドテープを 2 層巻きし、耐熱・絶縁処理をしている。絶縁加工まで終えた段階での線材の評価方法としては、無誘導巻きで全長通電試験・磁化式長尺線材 I_c 評価装置がある。

2.1 ラミネート装置(導体化加工装置)

Fig.2 に線材加工写真を示す。本装置は予熱ブロックにより半田熔融温度(230℃)以上に加熱した後、半田熔融温度よりやや低い温度にした加熱ロールにて押し付け、その付近で凝固接着される構成である。Ni-Cr テープ材は銅やハステロイに比べ熱伝導率が悪く、予熱ブロック・加熱ロール部の温度条件が狭い。また、機械強度も強く曲げ歪による超電導線材への負荷が大きくなる。Ni-Cr テープ材の厚さを薄くすると、テープ材張力の微調整により超電導線材の劣化や接合面の剥がれなくラミネートできている。現在は、Ni-Cr テープ材にフラックスを塗った後、挟み込んで加熱溶着することにより、接合面の濡れ性も上がり、線材長は 500m まで対応化とし、100m/h の速度の高速化が可能となっている。これら詳細については当日報告する。

謝辞

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

また、ホール素子式長尺線材 I_c 評価装置、および長尺線材のスリット加工に協力頂いた超電導工学研究所の方々に感謝いたします。

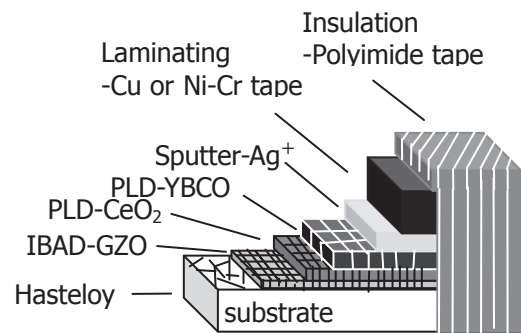


Fig.1 Process of worked Superconductor tape for power electric applications

Table.1 Provision performance of power electric applications

	Motor	FCL	Transformer
Width	5mm	5mm	5mm
Laminating	Cu-tape 0.1mm	NiCr-tape 0.04mm	Cu-tape 0.1mm
Spec	Over 50A	60~75A	Over 50A
Length	3060m	1400m	1100-1200m
Condition	Complete	Complete	2007.11

※FCL・・・Superconducting Fault Current Limiters

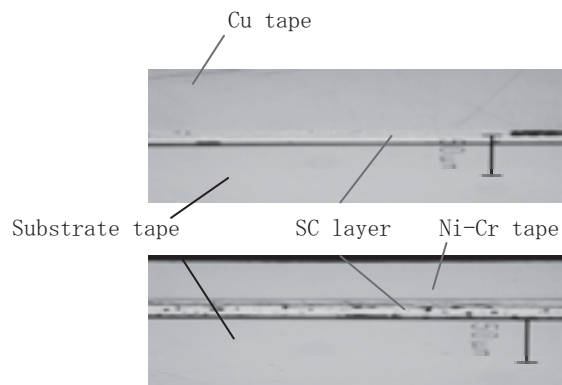


Fig.2 Photograph of Sectional SEM after the laminating

多層コイルに巻かれた超電導並列導体の電流分流特性

Current branch characteristic of superconducting parallel conductor rolled in multilayer coil

香月 良太, 永野 正樹, 岩熊 成卓, 船木 和夫 (九州大学)

KATSUKI Ryota, NAGANO Masaki, IWAKUMA Ma sataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ.)

E-mail:katsuki@sc.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

酸化物超電導線材を電力機器の巻線や大型超電導マグネットに適用するためには大電流容量化が必要となる。現在の酸化物超電導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、その大電流容量化の具体的な手法は並列導体の構成である。しかし単に積層しただけでは自己磁界効果により電流偏流が生じてしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施して電流分流を均等にする必要がある。そこで我々は、並列導体をソレノイドコイルに適用する際に、図1に示すような各層間において転位を行う層間転位を提案し、各素線の電流分流比を均等にする転位方法について検討してきた。しかし、設計上の寸法などの制約がある場合は、最適転位に必要な層数から増減させざるを得ず、その場合の電流分流比は均等とならない。その対策として最外層において層内転位を行うなどの方法をとってきたが、これには決まった法則性がなく、層数によっては補正方法を見つけるのが困難であった。そこで、層間に加えて層内でも転位を施すことにより、層数や素線数に依らず電流分流を均等にしよう最適転位方法について検討を行った。これまでの研究では素線数が2~4本の場合について検討したが、今回はさらに素線数を6本にした場合まで拡張して検討を進めた。

2 電流分流比の計算

超電導状態では、抵抗が無視できるので、電流分流比はインダクタンスバランスのみで決まる。ここでは、各素線1ターンを1つのインダクタンスとして、各ターン間の自己インダクタンス及び相互インダクタンスを算出し、回路方程式より電流分流比を計算した。

3 コイル形状変化及びずれ幅に対する依存性

今回の解析はコイルがすべて密巻であると仮定して計算したものであるが、実際に層内で転位した場合は巻線の位置にずれが生じることも想定される。そこで、転位位置で素線の位置にずれが生じた場合の、電流分流比への影響についても検討を行った。

4 考察

これまでの研究により、転位並列導体をソレノイド状に巻く場合に、層間転位を用いて電流分流比を均等にするには層数が素線数の4倍必要であることが分かっており、この層数を最適転位層数という。最適転位層数以上の層数においては図2に示すように、層間だけでなく、層内においても中央で1度転位を施すことにより最適転位層数以上の層数においても電流分流比を均等にする事ができることを見出し、様々な層数において補正方法のパターン化を可能にした。さらに今回素線数が6本の場合においても、上記の手法が有効であることを確認した。また、コイル形状の変化及び、転位位置のずれ幅依存性についても考察したが、電流分流のずれは小さく、本手法の実環境下における有効性が確認できた。

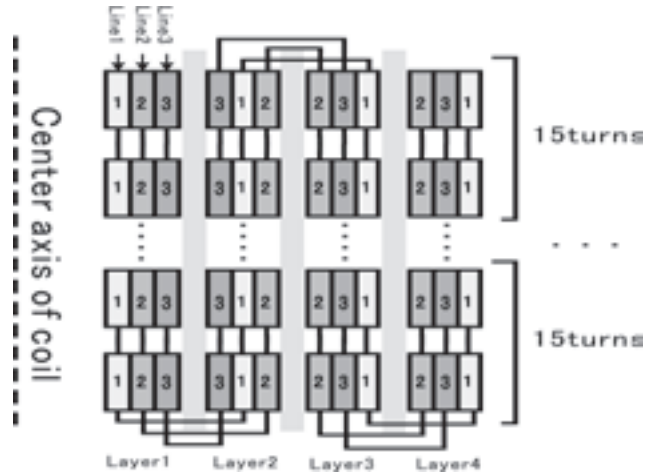


Fig.1 Move between layers of the three

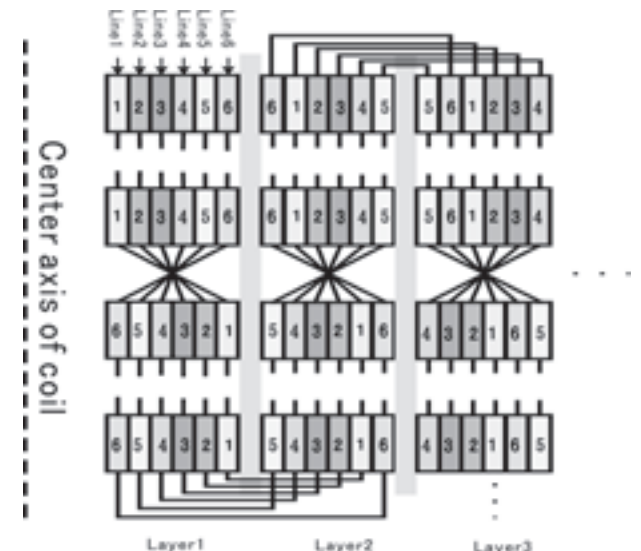


Fig.2 Transportation method to compensate the current distribution of the case of six

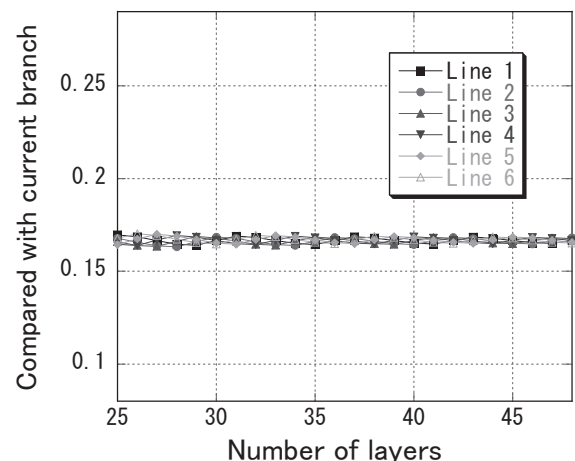


Fig.3 .The current distribution with compensation of the six

超電導テープ分割線材の銀拡散接合

Diffusion joint of the Ag layer for the multi-filamental coated conductors

加藤 順子, 坂井 直道, 衣斐 顕, 宮田 成紀, 須藤 泰範, 中尾 公一, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)

KATO Junko, SAKAI Naomichi, IBI Akira, MIYATA Seiki, SUTO Yasuonri, NAKAO Koichi, IZUMI Teruo, SIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: yoshioka@istec.or.jp

1. はじめに

超電導線材の交流応用に際しては、どのような材料の線材を用いたとしても交流損失の低減が課題であり、NbTi や Bi 系超電導線材ではマルチフィラメント撚り線導体の開発などで対応してきた。YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 超電導テープ線材についても、交流損失の低減は解決するべき課題の1つであり、解決策として超電導テープ線材を分割し細線化する技術の研究開発が進んでいる[1]。しかし、長尺の超電導テープ分割線材の作製は歩留まりの問題から容易ではなく、これを改善する対策の1つとして短尺の分割線材を接合して長尺化する方法が考えられる。また、機器作製の過程での接合技術も不可欠である。一方で、分割線材の機器応用では、接合部も含めて高いフィラメント間横断抵抗が要求される機器もある[2]が、接合部でそれが確保できるかは全く不明である。それにもかかわらず、超電導テープ分割線材の接合技術に関する報告例は無い。

そこで本研究では、これまでに報告されている銀拡散接合[3-4]を、超電導テープ分割線材の接合に応用して接合実験を行い、接合前後の I_c とフィラメント間横断抵抗、および接合部の抵抗を調べた。

2. 実験方法

供試材には、YBCO 超電導テープ線材の5分割線材[1]を用いた。この線材は、厚さ 100 μm のハステロイ上に、Gd₂Zr₂O₇, CeO₂, YBCO, Ag の順に積層した 10 mm 幅の線材の両端を切り落として 5 mm 幅とし、基板のハステロイは切り離さずに、銀安定化層(銀層)や YBCO 層を 1 mm 幅のフィラメントに 5 分割したものである。細線化には、レーザースクライビング加工とエッチングを併用した。

この分割線材を長さ 50 mm に切断し、NH₃:H₂O₂=1:1 とした溶液中で両端の銀層を端部から 0.5 mm 程度、エッチングして除去した。この試験片の各フィラメントに独立した電流・電圧端子をそれぞれ取り付け、液体窒素中で I - V 測定を行い、 I_c およびフィラメント間横断抵抗を調べた。

この試験片を長手方向の中央で半分に切って 2 本にし、端部から 0.5 mm 程度の銀層の除去をエッチングで行った。この 2 本の試験片の端部の銀層を対向させ、長さ 10 mm にわたり重ね合わせ、接合用治具で固定した。これを管状炉を用いて、純酸素気流中で 400°C に加熱し 1 時間保持した後、室温まで冷却した。接合した試験片は治具から取り外し、接合前と同様、各フィラメントに電流・電圧端子を取り付け、液体窒素中で I - V 測定を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に YBCO 超電導分割線材の接合前後の I - V 曲線を示す。接合後の電圧は、これまでに報告されている銀拡散接合同様に、電流の上昇と共に直線的に上昇し、 I_c に達するとさらに急上昇した。接合前後の I - V 曲線を比較すると、接合後に I_c が低下したフィラメントは無いことが明らかである。 I_c に達するまでに発生する電圧は、接合部で電流が銀を通ることに起因しており、この傾きから求めた接合部の抵抗は、Table 1 に示すようにばらつきがほとんどなく、安定して接合がされていることが分かる。

次に隣り合うフィラメント間に通電を試みたところ、Table 1 に示すように #3-#4 間を除いて全て接合後に通電が出来なくなった。#3-#4 間については横断抵抗は接合前にも低かったため、接合プロセスによる低下とは考えにくい。その他のフィラメント間で接合後に通電が出来なかつ

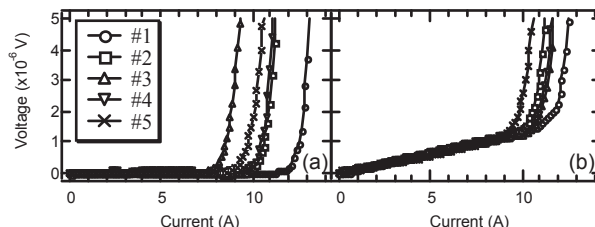


Fig.1 I - V curves (a) before and (b) after joint for the YBCO multi-filamental coated conductor. The number of #1-#5 indicates the filament number of five slitting filaments.

Table 1 Resistance of the joint and between the two filaments before and after joint for five slitting filaments on the YBCO multi-filamental coated conductor. (NCP: No current pass)

Filament number	Resistance of the joint	Resistance between two filaments		
		Filament number	Before joint	After joint
#1	$1.40 \times 10^{-7} \Omega$			
#2	$1.31 \times 10^{-7} \Omega$			
#3	$1.26 \times 10^{-7} \Omega$	#1-#2	NCP	NCP
#4	$1.36 \times 10^{-7} \Omega$	#2-#3	0.3 Ω	NCP
#5	$1.29 \times 10^{-7} \Omega$	#3-#4	0.7 Ω	0.5 Ω
		#4-#5	0.9 Ω	NCP

た理由は、接合の際に 2 本に切断した箇所には銀層などがわずかにつながっていた等の理由で電流のリークがあり、接合実験に際してそこを切り離したために通電ができなくなったとか、フィラメント間に残留していた導電性の切削粉などのドロスが接合熱処理の際に酸化したなどが考えられる。

以上のことから、銀拡散接合法を用いて超電導テープ分割線材の接合を行うと、 I_c を低下させず、高いフィラメント間横断抵抗を確保できる。よってこれは、超電導分割線材の交流応用に有効であるといえる。

4. まとめ

本研究では超電導テープ分割線材の銀拡散接合に成功し、接合後に I_c の劣化が無いこと、接合部の各フィラメントの抵抗にばらつきが無いこと、接合部において隣り合うフィラメント間で通電が出来ないことを確認した。このような分割線材の接合の実現は、YBCO 超電導線材の交流機器への応用の幅を大きく広げたとと言える。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

また、分割線材材料を提供していただいた鈴木賢次氏 (現 (財) 鉄道総合技術研究所) に御礼を申し上げます。

参考文献

1. K. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) p.153
2. M. Iwakuma, et al. "Proof-of-principle experiments for the reduction of ac losses in YBa₂Cu₃O₇ coated conductor coils": Supercond. Sci. Technol, (submitted)
3. J. Kato, et. al.: Physica C (proceedings of ISS '05), vol.455 (2006) p.686
4. J. Kato, et. al.: Abstracts of CSJ conference, vol.74 (2006) p.199

Hg 系超電導体の交流帯磁率特性

AC susceptibility characteristics in Hg-based superconductors

福田 有史, 阿久根 忠博, 坂本 進洋 (九産大工); 松本 泰國 (福大工); K. Lueders (FU Berlin); H. R. Khan (Inst. IBVT)
 FUKUDA Yushi, AKUNE Tadahiro, SAKAMOTO Nobuyoshi (Kyushu Sangyo Univ.);
 MATSUMOTO Yasukuni (Fukuoka Univ.); KLAUS Lueders (Freie Universitat Berlin);
 Hamid R. KHAN (Institut von Ionenstrahl und Vakuum Technologie)
 E-mail: k06gte06@te.kyusan-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物超電導体の帯磁率特性は、結晶粒、粒界などにより複雑な形状を示す。例えば、虚部 χ'' のダブルピークは、粒と粒界の超電導特性の違いによるとして定性的に説明されている。ここでは、弱い超電導母材中に超電導グレインが存在する系と考え、磁束分布から交流帯磁率を数値計算する(グレインビーンモデル¹⁾)。Hg系超電導体の磁化を SQUID と PPMS を用いて測定し、その実測結果と比較・検討する。

2. グレインビーンモデル

酸化物超電導体は超電導粒(グレイン)と弱い超電導母材(リンク)から構成されている。磁束分布をビーンモデルを用いて計算する。Fig. 1 に示すように磁束はリンク領域を通過し、図中の点線で示す滑らかな分布を与える。この分布を決める中心到達磁界を $B_{p\ell}$ とする。その中に実線で示すような中心到達磁界 B_{pg} の大きい急傾斜の粒内磁束形状が分布することになる。磁化のフーリエ数値積分から交流帯磁率を求める。

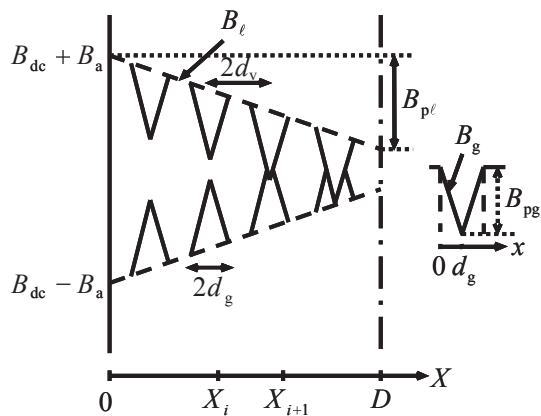


Fig. 1 Field distribution B_ℓ outside the grain and distribution B_g inside the grain. Pinning penetration fields are $B_{p\ell}$ and B_{pg} for matrix and grain, respectively.

3. 結果と考察

Fig. 2 にAgを添加したHg-1223焼結体試料の交流帯磁率特性を示す。横軸は温度で、各々の印加直流磁界 B_{dc} (0.2~1.0 T)における臨界温度で規格化している。虚部 χ'' は磁界が増大するにつれ、高温側の第1ピークが減少し、低温側の第2ピークが増大する。Fig. 3にグレインビーンモデルによる数値計算結果を示す。Fig. 2の実測結果をうまく再現できた。使用パラメータについては当日報告する。

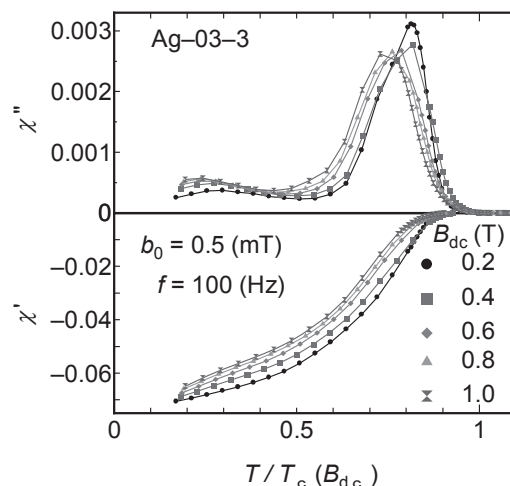


Fig. 2 AC susceptibilities at fields of 0.2~1.0 T as a function of temperature T reduced by the T_c at each dc field for $\text{Ag}_{0.3}(\text{HgBa}_{1.9}\text{Bi}_{0.1}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta})$ sample.

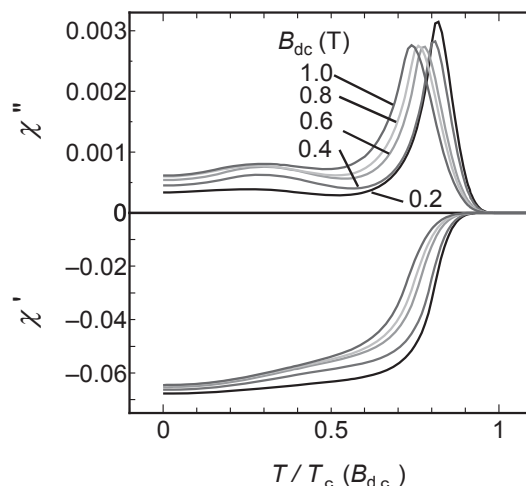


Fig. 3 Numerically computed AC susceptibilities as a function of $T/T_c(B_{dc})$.

参考文献

- 湯元他: 超伝導システム科学研究センター報告, 4 (2007) 86.

配向 Ni-W 合金基板の熱伝導度

Thermal conductivity of Ni-W substrate

阿部 雄樹, 加藤 卓弥, 亀卦川 尚子(一関高専); 青木 裕治, 高橋 保夫(昭和電線); 塩原 融(SRL, ISTEK)
 ABE Yuki, KATO Takuya, KIKEGAWA Takako (INCT); AOKI Yuji, TAKAHASHI Yasuo (SWCC); SHIOHARA Yuh (SRL, ISTEK)
 E-mail: kikegawa@ichinoseki.or.jp

1. はじめに

Y系超電導線材は、長尺、高臨界電流密度の高性能線材の他に、低コスト長尺線材の開発が進められている。低コスト線材では、ハステロイ基板に換えて、主に、配向 Ni-W 合金基板が用いられている。W の濃度によって、磁性、機械的強度が変化することは既に知られているが、熱伝導度、電気抵抗等の輸送特性が W 濃度に対してどのような依存性を示すかを明らかにすることは、用途に応じた最適の線材設計を行う上で、極めて重要である。本研究では、Y系超電導線材に用いられる基板材料の電熱特性のデータベースの構築を目的に、配向 Ni-W 合金基板の熱伝導度と電気抵抗を測定し、ハステロイ基板との比較検討を行った、

2. 実験方法

熱伝導度は定常熱流法で 5 K から 300 K の温度範囲で、電気抵抗は直流 4 端子法を用いて 20 K から 300 K の温度範囲で測定された。測定に用いられた試料は、厚さ $70 \mu\text{m}$ の配向 Ni-W 合金基板、W 濃度 3 at%、5 at%(昭和電線)の 2 種類である。

3. 熱伝導度

図 1 に W 濃度 3at% の基板材の熱伝導度を示す。図 2 に示したハステロイの熱伝導度と比較すると、ほぼ 3 倍の大きさになっていることが分かる。ハステロイは多元合金であり、加えて基板に使われている材料は圧延上がりである。そのため、加工歪や結晶の乱れが存在する。これに対して Ni-W 合金は、強圧延加工の後、配向熱処理が施されており、 $\Delta\phi \sim 8^\circ$ 程度の高い面内配向性を有している。その結果、Ni-3at%W の熱伝導度は、室温で 400 mW/cmK にも達する大きなものになっている。この大きさは、安定化層として Ag を $21 \mu\text{m}$ 成膜した YBCO 線材{各層の厚さ=ハステロイ基板: $100 \mu\text{m}$ 、中間層 (GZO : $0.81 \mu\text{m}$ 、 CeO_2 : $1.15 \mu\text{m}$)、YBCO 超電導層 : $1.4 \mu\text{m}$ } の熱伝導度 (図 2) と同程度である。W 濃度を 5 at% に増加すると、熱伝導度は減少する。

4. 電気抵抗

図 3 に Ni-3at%W と Ni-5at%W の電気抵抗率を示す。ニッケル単体の電気抵抗率は室温で $14 \mu\Omega\text{cm}$ の程度であるが、W を添加した配向試料では、W 濃度 3 at% で約 $25 \mu\Omega\text{cm}$ 、5 at% で $42 \mu\Omega\text{cm}$ まで増加する。20 K の値との RR は、それぞれ、1.69 と 1.29 である。しかし、我々が既に求めたハステロイ圧延基板の電気抵抗率(室温で $118 \mu\Omega\text{cm}$ 、RR=1.02)に比べると、格段に小さく、20 K の抵抗値の比較では、Ni-3at%W の値はハステロイ圧延板の約 13% しかない。

5. まとめ

配向 Ni-W 合金基板の熱伝導度および電気伝導度は、ハステロイ圧延基板に比べて数倍高く、ハステロイ圧延基板よりも熱安定性への寄与が大きいと期待される。線材の評価のためには、さらに、比熱測定を行うとともに、W 濃度および熱処理、圧延率依存性(面内配向性依存性)を系統的に調べる必要がある。

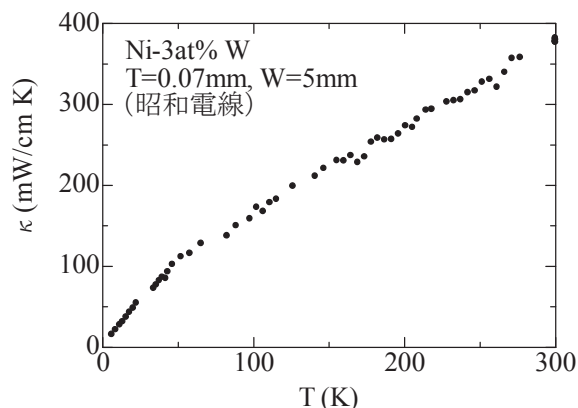


Fig. 1 Thermal conductivity of Ni-3at% W substrate

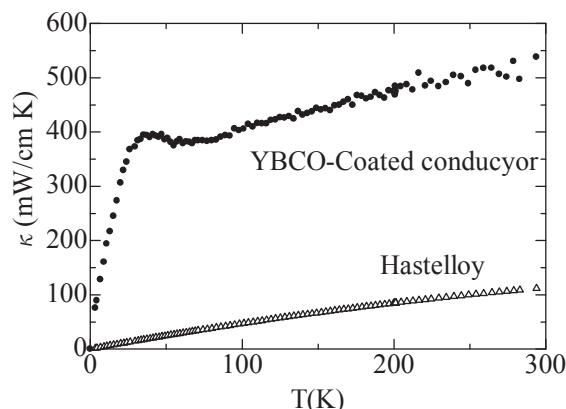


Fig. 2 Thermal conductivity of Hastelloy (Δ) and YBCO coated conductor (Hastelloy substrate: $100 \mu\text{m}$ + GZO: $0.81 \mu\text{m}$, CeO_2 : $1.15 \mu\text{m}$ + YBCO: $1.4 \mu\text{m}$ + Ag: $21 \mu\text{m}$) (\bullet)

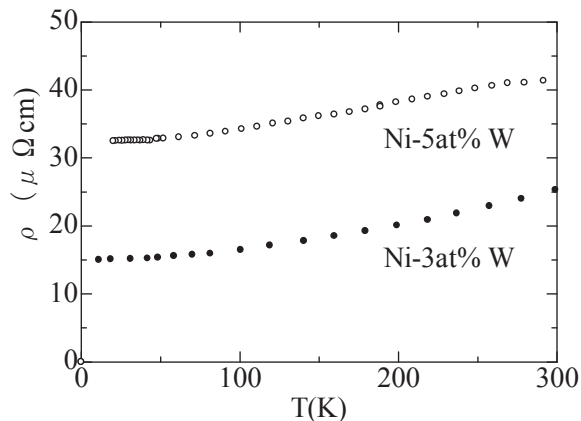


Fig. 3 Electrical resistivity of Ni-3at% W (\bullet) and Ni-5at% W (\circ)

Er-Ba-Cu-O 超伝導バルク体の熱伝導率

Thermal conductivity in Er-Ba-Cu-O bulk superconductors

内藤 智之, 藤代 博之(岩手大); 飯田 和昌(ケンブリッジ大); 村上 雅人(芝浦工大)

NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);

IIDA Kazumasa (Univ. of Cambridge); MURAKAMI Masato (Shibaura Inst. Tech.)

E-mail: tnaito@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで RE-Ba-Cu-O 超伝導バルク (RE:希土類元素および Y) の熱物性値 (熱伝導率, 熱拡散率) 測定を行ってきた[1]. RE=Sm の場合, 常伝導状態における熱伝導率は温度の低下とともに緩やかに減少し, 超伝導転移温度 (T_c) 以下で大きなピークを示す. RE=Gd, Y の場合, 熱伝導率は温度の低下とともに増大し, T_c 以下では RE=Sm と同様に大きなピークを示す. ところが, RE=Dy の熱伝導率は異常な振る舞いを示す[2]. 常伝導状態では比較的急な勾配をもって温度とともに減少し, T_c 以下のピークも非常に小さい. また, 熱伝導率の絶対値も他の RE-Ba-Cu-O バルクに比べて小さい (例えば, 100 K における Y-Ba-Cu-O バルクの熱伝導率が約 110 mW/cmK であるのに対して, Dy-Ba-Cu-O は約 55 mW/cmK と半分程度). この低い熱伝導率の起源として, RE のイオン半径や質量の変化がフォノンの散乱機構に影響していると考えられるが, イオン半径が近い RE=Y とは大きく振る舞いが異なっている. そこで, 本研究では Dy よりもさらに重い希土類元素 Er および Ho を用いたバルクの熱伝導率を測定し, RE 質量と熱伝導率の相関への知見を得ることを目的とする. また, これまで報告例がほとんどない Er-Ba-Cu-O バルクのデータ集録も目的の一つである.

2. 実験方法

Er-Ba-Cu-O および Ho-Ba-Cu-O バルクは, それぞれ $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y(\text{Er}123)$: $\text{Er}_2\text{BaCuO}_5(\text{Er}211)=1:0.3$ および $\text{Ho}123:\text{Ho}211=1:0.4$ に 0.5wt% の Pt を添加した前駆体から半溶融法で作製された. Er-Ba-Cu-O バルクについては, Er211 をポールミル (BM) で粉砕したものも作製した. 測定には, as-grown バルクを短冊状に成形し, 400-450°C で 1 週間, 1 気圧の酸素気流中で熱処理したものを用いた. 熱伝導率は定常熱流法で 6-250 K の温度範囲で測定した.

3. 実験結果と考察

Fig.1 に RE-Ba-Cu-O (RE=Er, Ho, Dy) バルクの熱伝導率の温度依存性を示す. 熱伝導率の絶対値は RE が重くなる

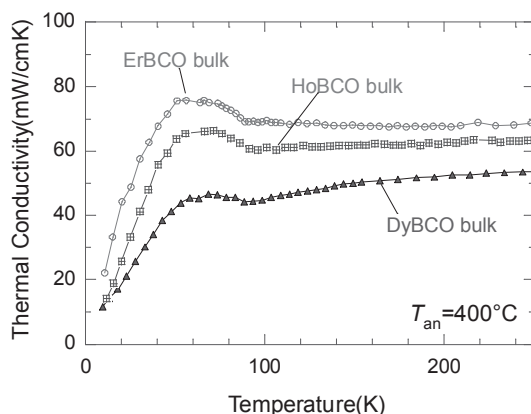


Fig.1 The temperature dependence of the in-plane thermal conductivity of RE-Ba-Cu-O (RE=Er, Ho, Dy) bulk superconductors.

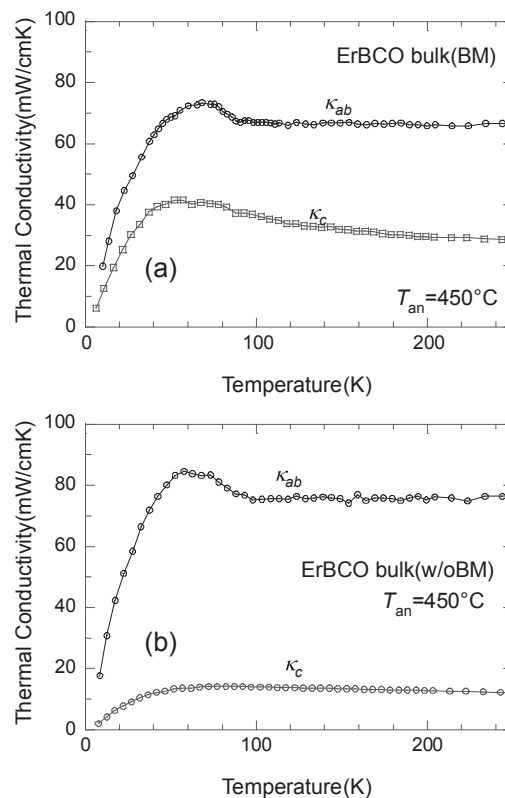


Fig.2 The temperature dependence of the *ab*-plane and *c*-axis thermal conductivity of Er-Ba-Cu-O bulk superconductors; (a) Er211-BM, (b) Er211-nonBM.

とともに大きくなっている. ただし, RE=Er, Ho の場合も軽 RE の場合に比べると 30% ほど小さい. また, T_c 以下のピークは明瞭になる. 従って, 定性的には重 RE バルクの熱伝導率は小さい傾向にあると言えるが, Dy-Ba-Cu-O の極端な低熱伝導率は Dy に本質的な要因があり, RE 質量には関係ないことが明らかとなった.

Fig.2(a) および (b) に, Er-Ba-Cu-O バルクの *ab* 面および *c* 軸方向の熱伝導率の温度依存性を示す. Fig.2(a) は Er211 を BM 粉砕したサンプル, Fig.2 (b) は Er211 の BM 粉砕無しのサンプルの結果である. Er211 の BM 有サンプルの熱伝導率が BM 無しサンプルより小さい. これは, 非超伝導相 Er211 の表面積が前者の方が大きく, フォノンの散乱確率が増大したことに起因すると考えられる. *c* 軸方向の熱伝導率の振る舞いは, Er211 粒子の影響よりもバルク結晶の劈開性によるものが大きいと考えられる.

参考文献

1. <http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/database.html>
2. H. Fujishiro *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) S447.

パルス着磁法における超伝導バルク内部の温度測定

Internal temperature measurements for HTSC bulks in pulse field magnetizing

欠端 浩介, 日山 拓也, 内藤 智之, 藤代 博之, 川井 研一 (岩手大工学部)

KAKEHATA Kosuke, HIYAMA Takuya, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki, and KAWAI Ken-ichi (Iwate Univ.)

(E-mail: marlboro-soft@m7.gyao.ne.jp, fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

本研究グループは、これまでパルス着磁法による超伝導バルクの着磁実験を行い、バルク表面での温度測定を用いた着磁メカニズムや磁束運動の解明から、新しいパルス着磁法の提案などによる捕捉磁場の向上を目指してきた[1]。複数点のバルク表面での温度変化の測定結果を用いて、バルク全体の発熱分布や伝熱現象をシミュレーションにより推定した結果、パルス磁場印加直後に発熱量 Q が冷凍能力を大きく上回るため、バルクの温度は断熱的に上昇し、その結果バルクの厚さ方向には温度差が生じないことが推定された[2]。このシミュレーション結果の妥当性を検証するには、バルク内部の温度を実験的に測定する必要がある。そこで本研究では、超伝導バルク内部に複数の細孔を開け、バルク内部、底面の温度測定を行い、表面の温度との比較を行った。

実験と検討

本研究では直径 45 mm 厚さ 15 mm の SmBaCuO バルクを使用した。図 1 の挿入図に示すように、バルク内部に直径 1 mm、深さ 10 mm の穴を 4 か所に開け、クロメル・コンスタンタン熱電対を用いて表面 ($T1, T2$) とバルク内部 ($T3 \sim T6$) の温度測定を行った。 $T1, T3$ はバルク中心、 $T4, T5$ は中心から 9 mm 地点、 $T2, T6$ はバルク周辺の中心から 18 mm 地点である。冷凍機を用いて $T_s = 40$ K, 20 K 付近まで伝導冷却し、その後パルス磁場を印加した。

図 1 (a), (b) に $T_s = 40$ K における低磁場 ($B_{ex} = 3.83$ T) 及び、高磁場 ($B_{ex} = 6.04$ T) を印加した時の各地点の温度の時間依存性をそれぞれ示す。図 1 (a) において、パルス磁場印加後、約 0.2 秒でバルクの端部の温度 ($T2, T6$) は急峻なピークを示し、続いて中間部、中心部で順次温度上昇が起こり、約 2 秒後に最大値となった。これは磁束侵入による発熱が周辺部で起こったことを示している。バルク端部ではバルクの表面 ($T2$) と内部 ($T6$) の温度上昇はほとんど等しいが、バルク中心部では、表面 ($T1$) より内部 ($T3$) が早く温度が立ち上がることが分かる。図 1 (b) に示す高磁場印加の場合、バルクの温度上昇は低磁場印加時より大きく、全ての測定位置でほぼ同時に温度は上昇した。端部では表面と内部の差はほとんどないが、中心部では、内部 ($T3$) の方が表面 ($T1$) より早く温度が上昇した。

図 2 (a), (b) に、図 1 (b) の結果を詳細に調べるため、 $T_s = 40$ K, $B_{ex} = 6.04$ T の時のバルクの端部と中心部におけるバルクの厚さ方向の温度分布の時間依存性をそれぞれ示す。図の横軸はバルク底面 ($z=0$) を基準にした厚さ方向の距離である。バルク端部においては、0.2 秒後には最高温度まで上昇し、表面、内部いずれもほぼ同一温度となり次第に時間とともに低下していくことが分かる。一方、バルクの中心部においては、磁場を印加後 1 秒までは表面よりも内部の温度上昇が大きく、約 3 秒後にそれぞれ同じ温度になり次第に低下していくことが分かる。現在、バルク底面の温度測定を行っており、今後実験結果を考慮した伝熱シミュレーションを行い、発熱分布について考察する予定である。

参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1221.
[2] H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) S540.

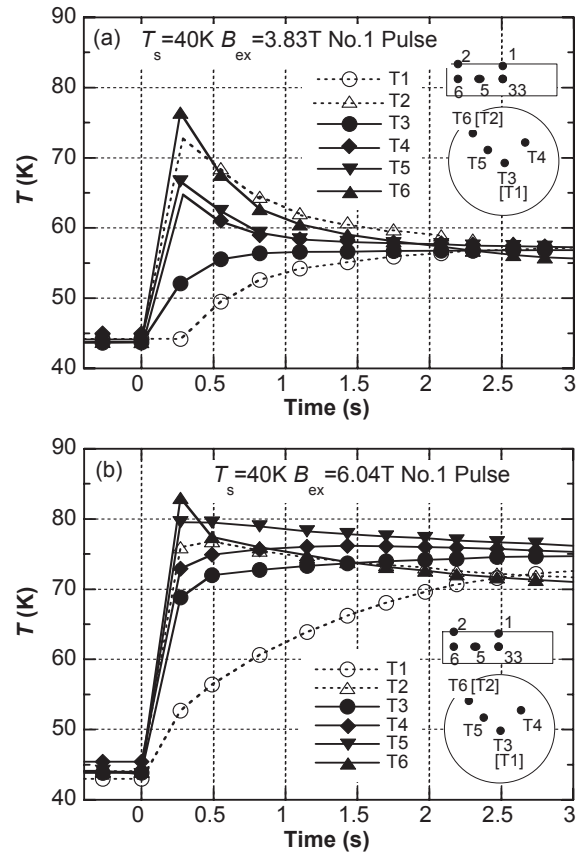


Fig. 1. The time evolution of temperature $T(t)$ for respective positions on the SmBaCuO bulk after applying the pulse field of (a) $B_{ex} = 3.83$ T and (b) 6.04 T at $T_s = 40$ K.

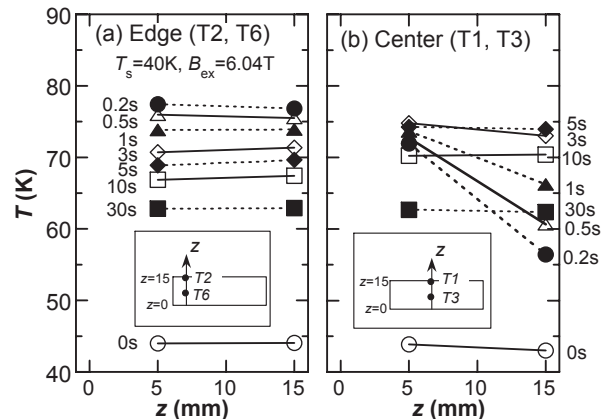


Fig. 2. The temperature distribution at (a) the edge and (b) the center of the bulk along the z -direction after applying the pulse field of $B_{ex} = 6.04$ T at 40 K.

低いボイド密度を有する高性能溶融バルク材の作製および特性評価

Preparation and Properties of High-Quality Melt Growth Bulks with Low Void Density

手嶋 英一、森田 充(新日鐵);村上 明(弘前大);藤代 博之、片桐一宗(岩手大)

TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.); MURAKAMI Akira (Hirosaki Univ.); FUJISHIRO Hiroyuki, KATAGIRI Kazumune (Iwate Univ.)
E-mail: teshima.hidekazu@nsc.co.jp

1. はじめに

RE 系(RE は Y または希土類元素)高温超電導バルク材は、磁場中でのピン止め力が強い、MDDS や NMR 用の強力磁石、医薬品攪拌用や半導体処理用のクリーンな非接触軸受、He フリー式超電導マグネット用の電流リードなど様々な応用が提案され、開発されている。通常、RE 系バルク材は大気中での溶融法で作製される[1]が、プロセスに由来して試料内部にボイドが分散した組織になる。ボイドはクラック起点になる可能性があり、機械的強度改善のためにはボイド密度低減が望まれる。従来、Sm 系において、酸素中溶融によってボイド密度を減少させることで、機械的強度が改善することが報告されている[2,3]が、Sm 系では Sm/Ba 置換が起こりやすく超電導特性が大幅に低下する。そこで、本研究では、Ba 置換が起こりにくい Dy 系において、ボイド密度が低い試料を作製し、その特性を評価した。

2. 実験

本研究で用いた Dy 系バルク材は、Dy123 相:Dy211 相=1:3 の組成比に 0.5wt% の Pt を添加した原料粉を用い、試料内部のボイド密度を低減させるため酸素中で溶融させた後、大気中で結晶成長させるという 2 段階雰囲気調整熱処理法にて作製した。ここでは、2 段階雰囲気調整熱処理法にて作製したものを緻密材、比較のため全て大気中で作製したものを標準材と呼ぶ。機械的特性は、 $2.1 \times 2.8 \times 24 \text{ mm}^3$ の試験片を用いて室温にて 3 点曲げ試験で評価した。超電導特性は、捕捉磁場分布と SQUID により評価した。熱伝導率は、 $3 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ の試験片を用いて定常熱流法で測定した。

3. 結果

Fig.1 に、バルク材内部の微細組織を示す。標準材では数十 μm 程度のボイドが多数存在する(気孔率 15~20%)が、緻密材ではボイドがほとんど存在しない(気孔率 3%以下)ことが分かる。Fig.2 に、室温での曲げ強度試験結果を示す。曲げ強度の平均値は、標準材で 77MPa、緻密材で 92MPa であり、1.2 倍向上した。機械的強度が改善した理由として、ボイド密度が低減し、試料が緻密になったためと考えられる。さらに、緻密材の超電導特性は、77K、1T で J_c が 10000 A/cm^2 以上あり、酸素中で溶融させたにもかかわらず標準材と同程度であった。以上の結果から、Dy 系では、ボイド密度低減による機械的特性の改善と高い超電導特性の維持が両立することが明らかになった。

また、熱伝導率は、ボイド密度が低減し実質的な断面積が増大した分、緻密材の方が若干大きくなった。Dy 系バルク材は、RE 系の中でも熱伝導率が低く、電流リードに適した材料であるが、実際の電流リード構造では補強材の FRP カバーを伝導する侵入熱の寄与分も大きいので、緻密材で電流リードを作製しても、熱侵入量の増大分は比較的小さいと予想される。さらに、緻密材で電流リードを試作し、液体窒素への急冷試験を実施したが、100 回程度の急冷では通電特性に変化は見られなかった。

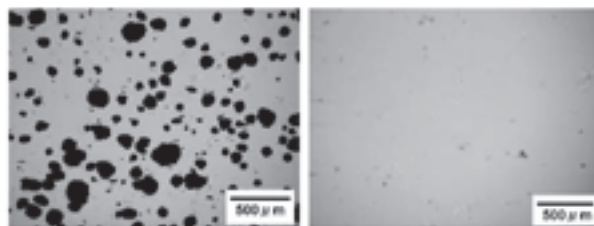


Fig.1 Optical micrographs of Standard bulks (left) and High-Quality Melt Growth (H-QMG) bulks (right).

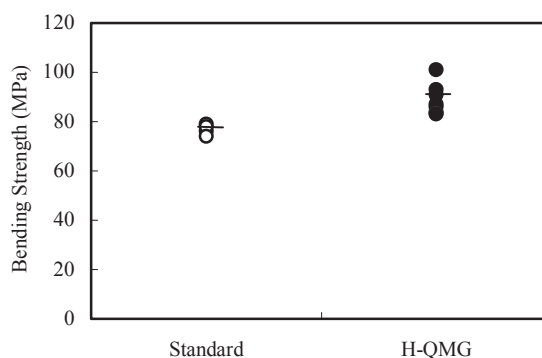


Fig.2 Bending strength of Standard bulks and High-Quality Melt Growth (H-QMG) bulks.

参考文献

1. M.Morita et al., Physica C **235-240** (1994) 209
2. H.Ikuta et al., Adv. Supercond. **11** (1999) 657
3. N.Sakai et al., Supercond. Sci. Technol. **15** (2000) 770

低酸素中で結晶成長した Pt 線を複合化した Dy-123 系超伝導溶融体の超伝導特性

Superconductivity of Dy-123 system superconductor composed with Pt wire in low oxygen content

島田 浩典, 吉澤 秀二(明星大); 藤本 浩之(鉄道総研)

Shimada Hironori, Yoshizawa shuji (Meisei Univ.); Fujimoto Hiroyuki (Railway Technical Research Institute)

E-mail: shimada.00s3059@jcom.home.ne.jp

1. はじめに

希土類 (RE) 系超伝導溶融体は、非超伝導相である Dy-211 の微細分散により、より高い磁場の捕捉が可能である。しかし、高磁場中で冷却を行うと、誘起電流により熱が生じ、マイクロクラックが形成・密集し、最終的には破断に至ることが報告されている。これまで、我々は発熱を直接金属線で外部に逃がすことを目的として、成型する前に Pt 線を複合化した Dy-123 系超伝導溶融体の作製を試みた。その結果、大気中の結晶成長では、Pt 線の溶融が認められた。本研究では、溶融温度を下げるために、低酸素中での溶融体の作製を試みた。

2. 作製方法

出発原料として、仮焼粉である Dy-123 と Dy-211 を準備した。これらの仮焼粉を最適なモル比である 1:0.3 に秤量し、有機溶媒中で湿式混合した。さらに、融点降下と機械的強度の向上を目的に Ag_2O を 30 wt% を添加した。混合した粉末を直径 20 mm、高さ 10 mm の円盤状のバルク体にプレス機で成型した。成型する際に、Pt 線を複合化した。複合化した Pt 線は、直径 0.4 mm、長さ 8 mm を用いた。成型したバルク体の下に、バルク体と同様の混合モル比で Dy-123 と Dy-211 を有機溶媒中で湿式混合して、プレス機で成型した敷きバルクを置き、その下にアルミナ基盤を置いた。

温度勾配と雰囲気制御を有する雰囲気炉を用いて、溶融凝固後、種付けを行い、単一ドメインの結晶を生成させた。種結晶として、Nd-123 の単結晶を用いた。

作製した溶融体の超伝導評価として、捕捉磁場・臨界温度 (T_c)・臨界電流密度 (J_c) を調べた。捕捉磁場は、印加磁場 1.8 T とし、磁場下冷却法を用いて液体窒素中にて行なった。

3. 結果と考察

Fig.1 に作製した溶融体の外観写真、成長したドメインと Pt 線の複合状態の立体簡略図を示す。作製した 18mm Φ の Dy-123 系超伝導溶融体は、種結晶を中心として、ファセットラインが形成されていて、Pt 線が結晶内に複合化されている事がわかった。しかし、ファセットラインの一部では、完全に端まで至っていない事から、部分的に単一ドメインが成長している事がわかった。

複合化した Pt 線近傍の存在状態について説明する為に、Fig.2 に SEM 写真を示す。SEM 写真の中央にある灰色の Pt 線の周囲には、三つの層が花のように形成されていることがわかった。この3層は、薄い2層が厚い中間相を囲む形で形成している事がわかる。また、Pt 線側の薄い相はほとんど Pt 線を一体化している事から、Pt 線が溶けて一部違う元素が混合している事が考えられる。

作製した超伝導体の T_c は約 90K (Off-set)、 J_c は 4.0 kA/cm² であった。

Fig.3 に溶融体の捕捉磁場の測定結果を示す。1.8 T の印加磁場に対して、0.095 T の磁場を捕捉した。磁場の分布は至ってシャープであり、表面において単一ドメインが形成された範囲では、単一ドメインが内部まで成長している事が考えられる。

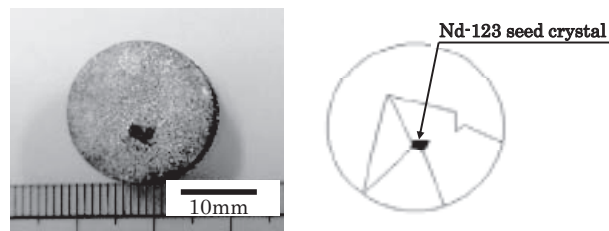


Fig.1 Optical micrographs of Sample

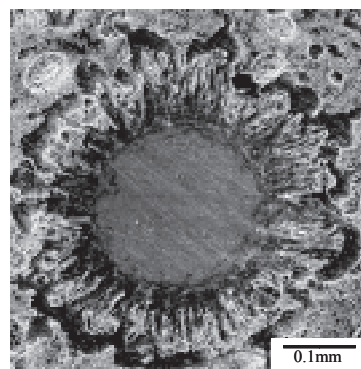


Fig.2 SEM photographs of Pt wire neighborhood

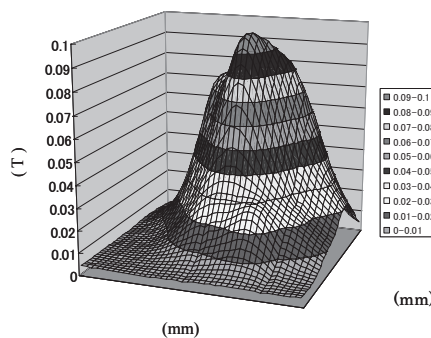


Fig.3 Trapped field distribution of Sample

参考文献

- (1) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Physica C*, **357**(2001)S814.
- (2) Nariki S and Murakami M, *Supercond. Sci. Technol.*, **15**(2002)S86.
- (3) Inoue K, Nariki S and Murakami M, *Physica C*, **378**(2002)S755.
- (4) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Physica C*, **378**(2002)S759.
- (5) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Advances in Cryogenic Engineering*, **48** (2002)S686.
- (6) Tomita M and Murakami M, *Nature*, 30(2003)S517.

Y123 系バルク超電導体の超電導特性に及ぼす各種元素の微量添加効果

Effects of small addition of several elements on superconducting properties of Y123 bulk superconductor

宮崎 太郎, 村上 雅人 (芝浦工大); 成木 紳也, 坂井 直道, 平林 泉 (SRL)

MIYAZAKI Taro, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology);

NARIKI Shinya, SAKAI Naomithi, HIRABAYASI Izumi (SRL)

E-mail: taro.miya@istec.or.jp

1. はじめに

Y123 系をはじめとする RE123 系バルク超電導体では, RE211 などのピンニングセンターの導入などにより, 様々な高 J_c 化に向けた方法が試みられている. また, RE123 系バルク超電導体に Zn や Coなどを微量添加すると, J_c -B 特性にピーク効果が現れ, 中磁場領域における J_c が改善される事が知られている¹⁾. これは, Cu サイトへの M イオンの置換領域が磁場誘起型ピンニングセンターとして作用するためと考えられており, これまであまり報告が無かった Al や Mn などの元素を添加した場合でも同様の現象が発現することが期待される. 本研究では, Y123 系バルク超電導体に, 様々な元素 (Zn, Ni, Co, Fe, Al, Mn など) を微量添加し, 超電導特性を検討した.

2. 実験方法

Y_2O_3 , BaO_2 , CuO に ZnO , NiO , Co_3O_4 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , $MnCO_3$ などを添加後, 混合, 仮焼することにより $YBa_2Cu_{2.97}M_{0.03}O_y$ (M = Zn, Ni, Co, Fe, Al, Mn など) 組成の粉末を作製した. これらと Y211 を 10:4 のモル比で混合し, Pt を 0.5wt% 添加した. これらを一軸プレスにて予備成形後, 冷間等方静水圧プレス (CIP) を用いて 200MPa の圧力で加圧し $\phi 20mm \times 10mm$ のペレットに成形した. これを前駆体として用い, Nd123 を種結晶とした Cold-Seeding 法により大気中で溶融バルク材料を作製した.

得られた試料の微細組織を SEM により観察し, また, 試料を酸素気流中, $400^\circ C$ で 100h アニールを行った後, SQUID を用いて超電導特性 (T_c , J_c) を検討した.

3. 実験結果

いずれの試料においても, 種結晶から結晶成長が起こり, シングルドメインから成るバルクを作製する事ができた. Fig.1 に, Al, Ni, Co, Mn を微量添加した試料の磁化率の温度依存性を示す. Ni を添加した試料では, T_c が大きく低下しているが, これは Ni が CuO_2 面の Cu サイトを置換するためと考えられる. Fig.2 に, Al, Ni, Co を微量添加した試料の 77K における J_c の磁場依存性を示す. 何も添加していない試料と比較すると, 何れの試料においても, 中磁場領域においていずれも第2ピークが見られた. これ

は, 各添加元素の Cu サイトへの置換領域が磁場誘起型ピンニングセンターとしてはたらく, J_c が向上したと思われる.

当日は, 他の添加元素を添加した試料の超電導特性についても報告する.

参考文献

- 1) 石井 悠衣ほか, 低温工学 Vol. 42 No.8 (2007) p270.

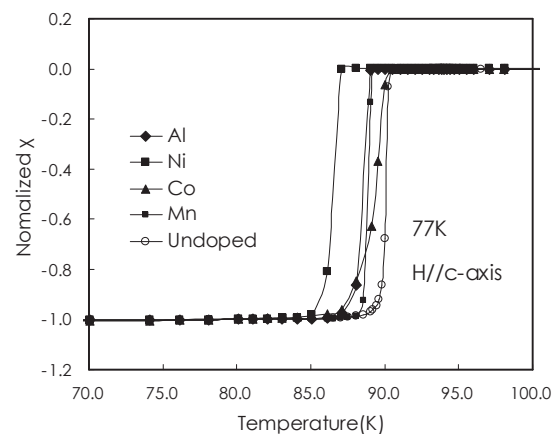


Fig.1 The temperature dependence of magnetization for the bulk samples with the composition of $YBa_2Cu_{2.97}M_{0.03}O_y$: Y211 = 100 : 40

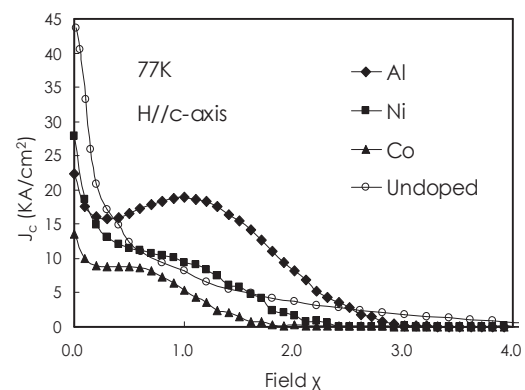


Fig.2 J_c -B curves of at 77K for the bulk samples

ステップ法による予備収縮させた高温超電導バルク体の結晶成長

By step heat pattern synthesizing a large single domain of melt-processed superconductor with preliminary contraction

尾作仁司(鉄道総研)

OZAKU Hitoshi (Railway technical research institute)

E-mail: mu@rtri.or.jp

1. はじめに

高温超電導バルク体の結晶成長を、Nd 薄膜、cold-seeding、大気中条件、で研究してきた[1][2][3]。結晶開始温度から一定保持と 2°C 降下を階段状に温度降下させながら、結晶成長させる手法を開発し“ステップ法”とした。銀添加バルク体の場合、 T_{top} 温度を結晶開始温度未満で階段状のヒートパターンを構成して、適用すると中間生成物状態のまま収縮し、その中間生成バルク体に Nd 薄膜の種結晶を載せて階段状ヒートパターンを与えると、均一な結晶成長が得られた。

2. 実験方法

原料粉 Sm_2O_3 、 $BaCO_3$ 、 CuO を、Sm123 と Sm211 の理論組成値が 1.7 (Sm1.7 と示す) で、Sm123 が 100mol に対して Sm211 を 35mol になるように原料試薬から混合した。2 度の仮焼き後に酸化銀および白金黒を成型前に混合し、混合試料 40g と 10g を秤量し、それぞれハンドプレスで成型直径 30mm に成型し、アルミナ板の上に載せた YSZ 板に別々に載せ、予備焼きを行った。予備焼き後、室温まで自然冷却した後に炉から取り出し、10g のバルク体(下敷きバルク体)に 40g のバルク体を載せて、YSZ 板の中央に位置させた後に Fig.2(a) のヒートパターンで予備収縮処理を行った。予備収縮後、室温まで自然冷却した後に炉から取り出し、Nd 薄膜をバルク体中央に載せ、Fig.2(b) のヒートパターンで結晶成長させた。

3. 結果および考察

直径 30mm で成型後予備焼きされたバルク体は径の収縮は起こっていない (Fig.3(a)) が、予備収縮のヒートパターン (Fig.2(a)) を与えた後は、元の径の約 80% に収縮した。バルク体表面は多結晶状態に見えた。さらに、Nd 種結晶を載せて結晶成長のヒートパターン (Fig.2(b)) を与えると、きれいなシングルドメインとなった。径の収縮は起こらなかった。酸素アニールを 300°C 100 時間行い、0.5T 磁場中冷却した捕捉磁場分布は 0.27T を示した。 T_c は 95.1K、 J_c は $13kAcm^{-2}$ (at 2T) であった。これは別途 Fig.1 のヒートパターンで作製した銀無添加のバルク体における、 T_c 93.2K、 J_c $13kA cm^{-2}$ (at 1T) と比較して性能が向上していることを確認した。

ステップ法の結晶成長の駆動力は過冷却を故意に起こさせることによると考えられるが、Fig.1 のヒートパターンを銀添加したバルク体に適用しても結晶成長長さは約半分であった。このことから、銀の添加が結晶成長に影響を与えていることは確実であった。予備的収縮をさせることにより、空間的な結晶成長因子は有利となる。予備的収縮により、多結晶的な部分が核成長の種にならなかったことは、予備的収縮時の生成物質が中間生成体であることを意味していると考えられる。

4. まとめ

予備的収縮を導入することにより、銀添加のバルク体の結晶成長ができることを確認した。今後は、さらなる大型バルク体への適用性の確認を行っていく予定である。

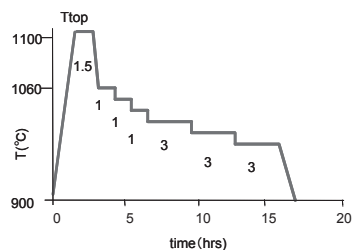


Fig.1 “Step method” Heat pattern for Ag free

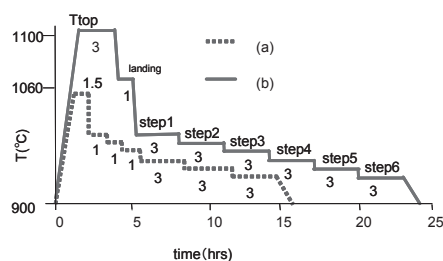
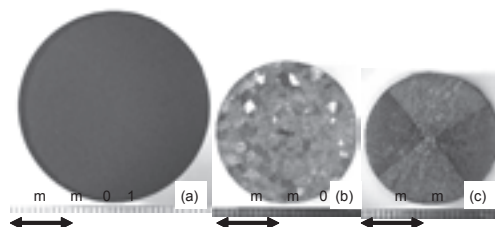


Fig.2 Heat patterns for (a) preliminary and (b) synthesizing

Fig.3 View of surfaces of bulk
(a) precursor, (b) preliminary, (c) synthesizing

参考文献

- [1] H. Ozaku, et al, Extended Abstracts (The 52nd Spring Meeting); the Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 30p-ZA-11, (2005), 297
- [2] H. Ozaku, et al, Extended Abstracts (The 66nd Autumn Meeting); the Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 9a-ZM-2, (2005), 196
- [3] H. Ozaku, et al, Extended Abstracts (The 53nd Spring Meeting); the Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 24p-K-13, (2006), 282

Nd:YAG レーザを用いた (Y,Ho)Ba₂Cu₃O_z 薄膜の作製

Preparation of (Y,Ho)Ba₂Cu₃O_z films by pulsed laser deposition method using Nd:YAG laser

前田 敏彦, ダ・シルバ インディカ, 香川 裕亮 (高知工科大)
 MAEDA Toshihiko, DE SILVA Indika, Y. Kagawa (Kochi Univ. Tech.)
 E-mail: maeda.toshihiko@kochi-tech.ac.jp

1. はじめに

Nd:YAG レーザは、エキシマレーザに比べコンパクト、比較的安価、安全といった利点を有するが、パルスエネルギーがやや小さいとされ、高温超伝導酸化物のパルスレーザ蒸着 (PLD) 法による成膜への適用例はこれまで比較的少なかった。今回我々は高パルスエネルギータイプの Nd:YAG レーザを導入し、これを用いて (Y,Ho)Ba₂Cu₃O_z 薄膜の作製を試みた。Y³⁺ と Ho³⁺ のイオン半径は互いにほぼ等しく、Shannon [1] によれば 8 配位の場合それぞれ 0.1019 nm, 0.1015 nm である。このため、両者の混晶系においては導入される格子歪みは小さいと期待される。したがって本系では、random な potential のみが導入された薄膜の作製が可能と考えられる。本研究の目的は、このような薄膜における輸送特性、特に磁場中での臨界電流特性の検討にあるが、今回はその第一段階として、Nd:YAG レーザによる酸化物超伝導体薄膜作製条件を検討した結果について報告する。

2. 実験方法

Nd:YAG レーザの基本的な仕様は、4 倍波 (波長: 266 nm) でパルスエネルギー 120 mJ, パルス幅 16~18 ns である。基板として (100) MgO 単結晶を用い、ターゲットは固相反応法 (950°C で 10 時間、空気気流中で焼成後徐冷) により作製した。 (Y_{1-x}Ho_x)Ba₂Cu₃O_z (x=0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0) の成膜条件は、基板温度 680~780°C, 酸素ガス圧 16~24 Pa, ターゲット/基板間距離 35~50 mm, レーザパルスの繰り返し周波数 10 Hz, 成膜時間 900~2700 s, ターゲット表面でのレーザエネルギー密度 1~2 J/cm² とした。

得られた薄膜は、X 線回折法 (θ 2 θ 法, 極点図測定), 走査型電子顕微鏡 (SEM), 電気抵抗測定 (室温~20 K) 等により評価した。

3. 結果と考察

図 1 に、粉末 X 線回折測定の結果より算出した (Y,Ho)Ba₂Cu₃O_z (ターゲット) の格子定数の x 依存性を示す。酸素量 z の正確な値が不明であるため詳細な議論をすることはできないが、いずれの組成でも結晶構造は斜方晶であり、軸長 a, b, c いずれにおいても組成 x による顕著な変化は見られなかった。これより、(Y_{1-x}Ho_x)Ba₂Cu₃O_z の薄膜についても、格子定数は x によって大きく変化しないものと判断した。

SEM 観察によれば、膜表面には PLD 法に特徴的な droplet の存在が確認された。この原因については、YAG レーザの使用にあるのではなく、今回用いたターゲットの嵩密度が理論密度の 60% 程度とかなり低かったという点にあるものと考えている。

(Y_{1-x}Ho_x)Ba₂Cu₃O_z 薄膜は、成膜条件の最適化により、いずれの x でも良好な c 軸配向及び面内配向 (cube-on-cube 成長) を示した。図 2 に $x=0.5$ の膜の β スキャンの結果を示す。(103) 反射において良好な 4 回対称性が確認された。最適基板温度は $x=0$ の 765°C から $x=1$ の 780°C まで変化し、 x の値が大きいほど高くなる傾向を示した。

以上より、Nd:YAG レーザを用いた場合においても、高配向性を有する酸化物超伝導体薄膜が得られることが分かった。

REBa₂Cu₃O_z (RE: Y あるいは希土類元素) の特性は、例え

ば臨界温度 (T_c) のように RE³⁺ イオンのイオン半径で整理できる例が知られている。超伝導線材の開発においては、RE と Ba の固溶に基づく組成変調などが磁場中での臨界電流密度 (J_c) を向上させる可能性が示唆されており [2], 今後本研究で得られた薄膜を用い、輸送特性の評価を進めていく予定である。

謝辞

SEM 観察及び X 線回折実験でご協力いただいた、高知工科大学 谷脇雅文教授に感謝いたします。

参考文献

1. R. D. Shannon, Acta Crystallogr. A32, 751 (1976).
2. Y. Yoshida *et al.*, Physica C426-431, 2005 (1043).

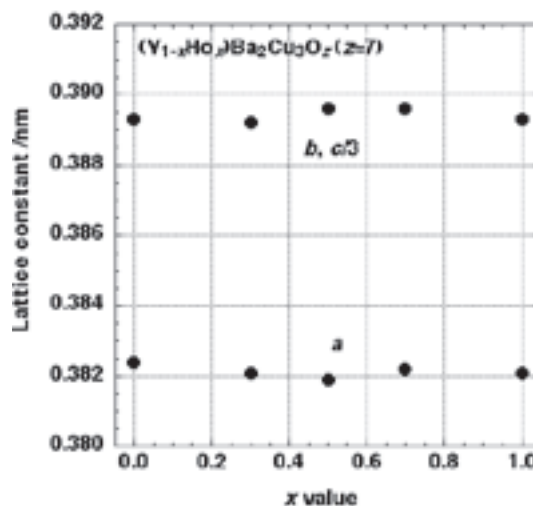


Fig. 1. Lattice constants of sintered (Y,Ho)Ba₂Cu₃O_z target.

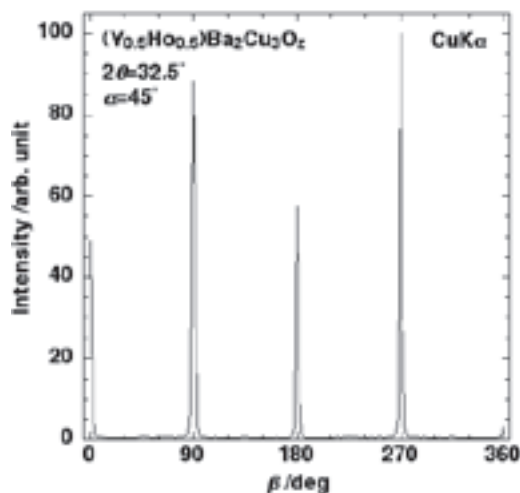


Fig. 2. β -scanning profile of (Y_{0.5}Ho_{0.5})Ba₂Cu₃O_z film.

LHD型核融合エネルギー炉FFHRを想定した大電流高温超伝導導体の開発

Development of large-current HTS conductors aimed at LHD-type fusion reactor FFHR

柳 長門, 高畑 一也, 三戸 利行 (NIFS); バンサル ゴーラブ (総研大); 辺見 努 (原子力機構)

YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki (NIFS); BANS AL Gourab (SOKENDAI); HEMMI Tsutomu (JAEA)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究の背景と目的

LHD(ヘリカル)型核融合エネルギー炉 FFHR の設計が物理および工学の両面から鋭意進められている。適切な大きさや最適化した磁場配位に関して引き続き検討が行われているが、現在の基本設計である FFHR-2m1 では、ヘリカルコイルの大半径を 14 m、小半径を 3.22 m と設定している [1]。この装置では、巨大で複雑な形状のヘリカルコイルにどのような超伝導材料を選択し、また線材とそれを集合した導体をどのように構成すべきかが極めて重要な工学設計となる。現在の基本案としては、 Nb_3Sn 線材あるいは Nb_3Al 線材を用いて 100 kA 級のケーブル・イン・コンジット導体(CICC)を構成し、強制冷却コイルとすることが第一オプションとなっている。ここで、ヘリカルコイルはソレノイド巻きとなるため、1本あたりの導体の冷却長を 500 m 程度に制限するためには巻線を5条持ちとして分割することが必要となり、冷却配管の取り出しや接続などに複雑な構造が要求される。そこで、ソリッド導体を用いた間接冷却方式も有力な選択肢と考えられ、検討を進めている。このために現在、 Nb_3Sn 線材の平角撚線を転移させた構造の導体が開発されている(第2オプション)[2]。一方、FFHR を実際に建設する時期が今から 10 年以上先であることを考えると、高温超伝導コイルを採用することも選択肢のひとつとして想定できる。そこでこれを第3オプションと位置付け、技術課題の抽出や導体開発のための研究を立ち上げている [3]。

2. 高温超伝導コイルオプション

FFHR のヘリカルコイルは、最大経験磁場が 13 T 程度であり、高温超伝導オプションとしては運転温度を 20-30 K として、イットリウム系線材を用いることを想定している。Fig.1(a)に、現在検討している導体の基本構成を示す。アルミニウム合金(あるいはステンレス)のジャケットの中に YBCO テープ線材を積み上げるとともに、必要があればこれらに転移構造を施し、長尺導体として完成させることが要求される。電流量は低温超伝導オプションと同様に 100 kA を想定している。ここで、高温超伝導導体を用いることのメリットとしては主に次の3点が考えられる。1点目は動作温度を高くすることで運転に必要な冷却パワーを低減し経済的に優れた核融合炉にできることであり、2点目は高い動作温度における大きな熱容量によって導体の安定性が格段に高まることである。特に、間接冷却による限られた冷却のもとでは、熱容量による通電安定性の確保は極めて重要な課題となる。3点目は高温超伝導導体を用いると、ヘリカルコイルを半ピッチずつに分割して製作し現地で接続して組み立てるというオプションも想定可能になることである [4]。

3. 10 kA 級高温超伝導導体サンプルの試作と通電実験

大電流量の高温超伝導導体の開発を始めるにあたり、まずは 10 kA 級導体の試作を行った。これには、銀シース Bi-2223 テープ線材を 34 本単純にスタックし、銅ジャケット(7.5 mm×12 mm)に収めた構造を採用した(Fig.1(b))。約 1 m 長さの導体を2本製作し、これを外部磁場 8 T のスプリットコイルに装着して通電試験を行った。導体の周囲はFRPを用いて熱絶縁するとともに、ヒータを用いて導体温度を制御した(4.2-30 K)。Fig.2 に温度を変えて臨界電流を測定した結果を示す。得られた電流値は、線材1本あたりの臨界電流から磁場分布

を評価して積算した値に近い。また、導体表面に装着したステンレス製ヒータを用いて安定性実験を行ったところ、同規模のヘリウム冷却された低温超伝導導体をクエンチさせるエネルギーの数十倍を投入しても温度暴走することなく、極めて安定に通電できることを確かめた(Fig.3)。現在は、YBCO 線材を用いた導体試験も計画している。併せて、導体の長尺化やコイル化するための課題の抽出等について検討を行っている。

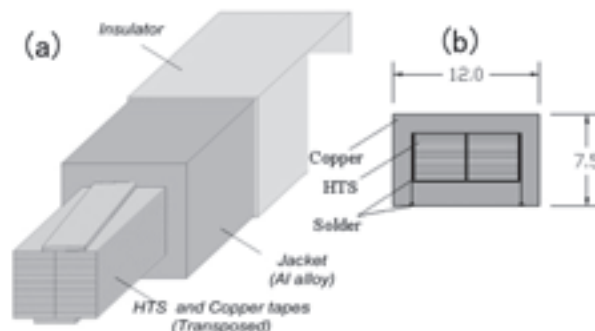


Fig. 1 (a) Conceptual design of 100 kA-class YBCO conductor for FFHR and (b) 10 kA-class conductor with Bi-2223 tapes.

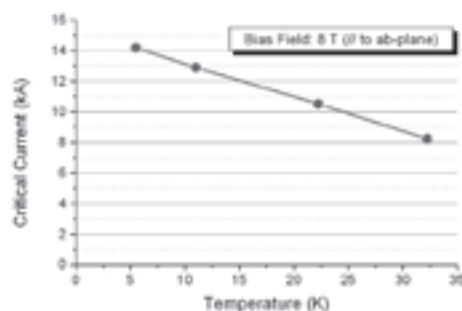


Fig. 2 Measured critical current vs. the conductor temperature.

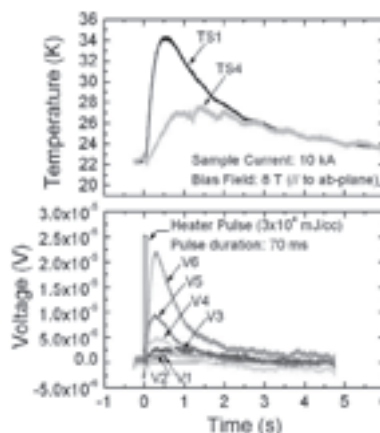


Fig.3 Voltage and temperature waveforms in a stability test.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **81** (2006) 2703.
- [2] K. Takahata et al., Fusion Eng. Des. **82** (2007) 1487.
- [3] T. Hemmi et al., NIFS Annual Report (2007).
- [4] H. Hashizume et al., J. Plasma Fusion Res. **5** (2001) 532.

液体窒素と金属多孔質体を用いた冷却技術の検討

Research of cooling technique using liquid nitrogen and metal porous media

茂庭 圭介, 伊藤 悟, 結城 和久, 橋爪 秀利(東北大)

MONIWA Keisuke, ITO Satoshi, YUKI Kazuhisa, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku University)

E-mail: kmoni@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在、次世代の発電方法として研究が行われているトーラス型核融合炉には超伝導マグネットが利用される。しかしながら、巨大な超伝導マグネットの製造コストは他の核融合炉機器の製造コストと比べ著しく大きい。また、超伝導マグネットは完成後の取り外しや移動が極めて難しいため、核融合炉のメンテナンスを行う場合、炉内へのアクセス性が低下する。そこで、こうした問題点を解決するために分割型超伝導マグネットの採用が提案されている。

分割型超伝導マグネットとは、超伝導マグネットを2つ以上に分割して製造し、使用時にマグネットの自己磁場による応力により機械的に接合するというものである。これにより、製造コストの低減、炉内へのアクセスの簡略化といったメリットがある。これまでも分割型超伝導マグネットに関する研究が行われてきたが、試験部全体を液体窒素に浸す浸漬冷却が必要であった。また、現在核融合科学研究所で概念設計が行われているFFHRにおける超伝導マグネットを分割した場合、接合部から $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ の熱流束が発生する可能性がある。したがって、分割型超伝導マグネットの実用化へ向け、超伝導マグネットと一体の効果的な局所除熱システムの開発が不可欠である。そこで、金属多孔質体を流路に設置することを提案する。

本研究では、金属粒子を焼結した金属多孔質体を使用した。金属多孔質体は多孔性に富み、気孔の大きさや形状および分布などを比較的自由に調節できる。また、その高熱伝導率により多孔質体全体での除熱が可能であり、多孔性により冷媒の接触面積が飛躍的に増大し、毛細管作用によりバーンアウトを防止できるなど、効率のよい潜熱輸送を実現できることなどがメリットとして挙げられる。過去の研究において、冷媒として水を用いた実験では最大で $66.0\text{MW}/\text{m}^2$ の入射熱流束の除去に成功している[1]。

本研究では、液体窒素と金属多孔質体を用いた分割型超伝導マグネット接合部の冷却技術確立に向け、まず、金属多孔質体を設置した液体窒素流路の除熱性能を評価するための実験装置を製作した。そして金属多孔質体を用いた流路における液体窒素の圧力損失－流量特性の評価を行った。

2. 実験内容

実験装置は液体窒素供給部、試験部、排出部からなる。液体窒素供給部には 100L 液体窒素タンクを設置し、内圧調整により、金属多孔質体における圧力損失値を調節した。試験部の概要を Fig.1 に示す。試験部中央に多孔質体を設置してある。多孔質体の上下流に設置したひずみゲージ式圧力計により多孔質体における圧力損失を、熱電対により温度を計測した。

3. 実験結果

金属多孔質体として空孔径 $20\ \mu\text{m}$ 、SUS316 球形粒子の焼結体を用いた流動特性評価実験の結果を Fig.2 に示す。ここで、計算値の算出には Ergun の式を採用した。各流量における圧力損失の実験値が計算値を下回っているのは、多孔質体と流路壁の間に隙間があり、液体窒素がバイパスしたためと考えられる。また、多孔質体における圧力損失が小さい場合、圧力損失および流量値の周期的変動が確認された。これは、液体窒素中に存在する窒素気泡が多孔質体上流に溜

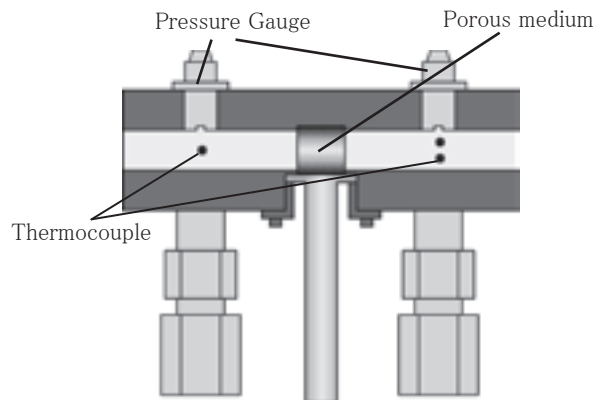


Fig.1 Test Section

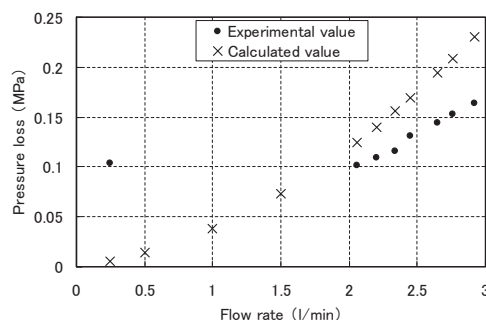


Fig.2 Experimental result (SUS316, $20\ \mu\text{m}$, Sphere)

まることにより発生したと考えられる。

4. 今後の展望

今後はさまざまな金属多孔質体を用いて流動特性を評価するとともに、ヒーターを用いて多孔質体に入熱することで、本冷却システムで除去可能な熱流束値を確認し、除熱特性の評価を行う。

除熱特性評価により分割型超伝導マグネット接合部の冷却が可能と判断された場合、分割型超伝導マグネットと一体の冷却システムを試作して実験を行い、本冷却システムおよび分割型超伝導マグネットの実用化を目指す。

参考文献

1. K. Yuki, et al.: Journal of Thermal Science, Vol. 14, no.3 (2005) p.272

分割型高温超伝導マグネットのためのセルフジョイント法の提案

Proposal of self-jointing method for remountable high temperature superconducting magnet

伊藤 悟, 山本 裕子, 橋爪 秀利, 西島 元 (東北大)

ITO Satoshi, YAMAMOTO Yuko, HASHIZUME Hidetoshi, NISHIJIMA Gen (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. 序論

核融合炉の製造コスト、メンテナンスコストの削減のためにマグネットを分割し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている。Fig.1 に分割型高温超伝導マグネットの概念図を示す。マグネット同士の着脱を可能とするため、マグネット材料としては、比較的高温超伝導体を使用している。分割型高温超伝導マグネットの採用により、マグネット製造の簡易化による製造コストの削減、炉内構造物へのアクセス性の向上によるメンテナンスコストの削減、および稼働率の向上を図ることが可能である。

分割型高温超伝導マグネットを実現するために、これまで基礎研究として BSCCO 2223 ケーブルの機械的接合法の研究が行われてきた[1]。接合法としては、接合面をケーブルの長さ方向に対して 45 度傾けた BSCCO 2223 ケーブルを機械的に接触させ、ケーブルの垂直方向から SUS304 製ロッドで圧縮応力を加えて機械的に接合するという方法を採用している。これまでの接合試験では、接合装置外部にとりつけたハンドルによって圧縮応力を制御してきたが、接合力を与える機器のサイズが大きくなってしまったため、実際の設計には適さない。そこで Fig.2 に示すようなセルフジョイントシステムを提案し、接合機器のサイズのコンパクト化を目指す。接合力としては温度が低下すると膨張する負膨張特性を持つ DFRP による接合部への圧縮力、自己磁場によって発生する電磁力を利用する。

本研究では、セルフジョイントシステム研究の第一段階として、DFRP を組み込んだ接合試験機を用いて接合された BSCCO 2223 ケーブルの温度-接合抵抗特性を取得し、DFRP を用いた接合法の有効性を検証することを目的とする。



Fig.1 Schematic View of Remountable HTS Magnet

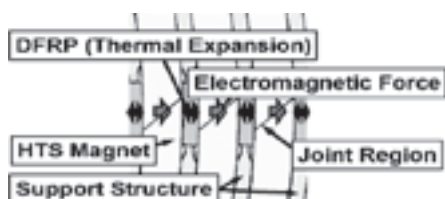


Fig.2 Self-Jointing System

2. 実験方法

本実験で用いた試験用ケーブルは、BSCCO 2223 テープを 10 層積層し、低温はんだで束ねたもので、その臨界電流値は 77K、自己磁場下で 467A である。Fig.3 に実際に用いた実験体系を示す。DFRP は SUS304 製ロッドと上部銅ブロック

で挟まれており、温度が低下すると DFRP が膨張して接合部に圧縮応力が増加する。

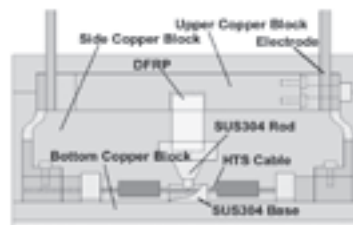


Fig.3 Experimental Set-up

3. 結果と考察

本実験で得られた温度-接合抵抗特性を Fig.4 に示す。Fig.4 より、温度が低下するほど接合抵抗が減少することが確認できる。この結果が得られた理由としては、温度低下にともなって DFRP が膨張し、接合部へ作用する圧縮応力が増加したこと、温度低下にともなってケーブルの臨界電流値が上昇し、接合部抵抗の上昇が抑えられたことの 2 つが挙げられる。この 2 つの効果の度合いをより詳細に考察するためには、DFRP を用いない体系で、温度を変化させながら接合試験を行い、まず、臨界電流の効果を確認する必要がある。また、本実験で得られた接合抵抗は、従来の実験体系を用いて得られた最小抵抗値(数百 nΩ)に比べると著しく高い。これは、接合試験機の複雑さによるセッティングエラーが影響していると考えられる。より簡易な接合装置を製作し、DFRP を用いた実験体系においても、従来のもと同様の接合性能を達成できるようにすることも今後の課題の 1 つであると考えられる。

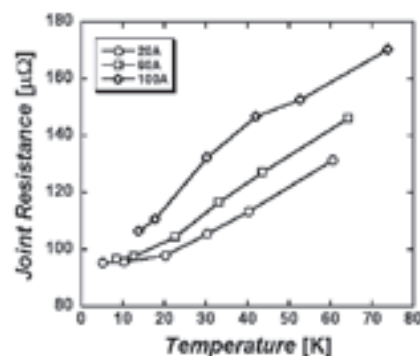


Fig.4 Temperature-Resistance Characteristic

4. 結論

本研究では、分割型高温超伝導マグネットのための新しい接合法として DFRP の負膨張特性と電磁力を用いたセルフジョイントを提案した。まず、DFRP の負膨張特性を利用した接合試験機を製作し、伝導冷却体系において接合試験を行った。本実験により、DFRP によって接合力が得られること、温度低下による臨界電流の上昇によって接合性能が上昇することを確認した。今後は装置をより簡易化して、接合性能を向上させることや、電磁力による接合を実験的、数値解析的に進めていくことがセルフジョイントの実現のために必要である。

参考文献

1. S. Ito, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 81 (2006) p.2527

高温超伝導ケーブルのバットジョイント法における高強度化と接合面の改善

Reinforcement of cable structure and improvement of joint surface condition in butt joint of High Temperature Superconducting cable

加藤 喬之, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大学)

Takayuki Kato, Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume (Tohoku University)

E-mail:tkato@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. 背景

商用核融合炉の実現のためにコスト削減、メンテナンスの簡易化を可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている。分割型高温超伝導マグネット実現のために基礎研究として、当研究室では高温超伝導体の機械的接合に関する研究を行っている。

過去の研究において、接合用試料としては Bi-2223 高温超伝導テープを 10 枚積層し、接合面の角度を試料の長さ方向に対して 45 度としたものを用いた。試料は断面同士を機械的に接合するバットジョイント法で接合し、接合面には圧縮応力を負荷した。これらの研究のなかで、接合面処理に銀めっきを施した試料での接合抵抗は、接合面処理を研磨のみとした試料でのその約 2 分の 1 に改善されることがわかった[1]。しかしながら、過去の研究では、層間すべりがめっき層の剥がれる原因となることも確認された。さらに、有限要素法を用いた構造解析により、ケーブルに対して垂直に外向きの力が作用した場合、座屈が生じる危険性があることがわかった[2]。

これらの問題を解決するためには、高温超伝導ケーブルをコンジット型にすることが考えられる。接合面形状の保持、ケーブルの高強度化を達成できるようにすればよい。コンジット型ケーブルではテープ層間を拘束して接合面形状を保持すると同時にケーブルに作用する外向きの力も拘束して座屈を防止できると予想される。また、接合面処理が容易になることも期待でき接合面処理によって接合抵抗の低減を図ることも可能であると考えられる。

本研究では、コンジット型ケーブルのバットジョイント試験を実施し、接合面に働く応力と接合部の抵抗値の関係を調べることを目的とする。

2. 実験方法

Fig.1 に使用したコンジット型高温超伝導ケーブルの概略図を示す。このケーブルは、銅棒上に Bi-2223 高温超伝導テープを 10 枚積層し、その上に銅角棒を置き、隙間を銀入りはんだで固定して製作する。Bi-2223 高温超伝導テープの物性値は、幅 4.2mm、厚さ 0.2mm、銀比 2.1、臨界電流値 110A である。ケーブルは機械的に接合され、ケーブルの垂直方向から SUS304 製ロッドで圧縮応力を負荷する。本実験では、コンジット型超伝導ケーブルのバットジョイント法における応力-抵抗特性を評価した結果を示す。

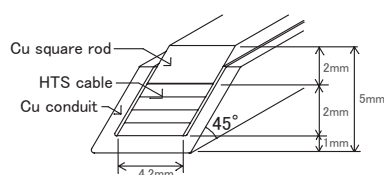


Fig.1 cable in conduit

3. 実験結果および考察

Fig.2に得られた応力-抵抗特性を示す。また、比較のためにコンジット型ではない従来のケーブルを用いた場合の500Aにおける結果を破線で示している。Fig.2より本実験において抵抗値は応力がおよそ80MPaの時に極小となることがわかる。抵抗の極小値が存在する理由は、応力増加にともなって接触抵抗が減少する一方で、超伝導体の結晶構造の劣化によって臨界電流密度が低下するためである。極小値はコンジット型ではない従来のケーブルの極小値より応力が高い方にシフトすると予想されていた。しかしながら、実際では極小値は応力の低い方にシフトした。超伝導テープ部の接合面の真上を応力負荷の中心としたが、コンジット型ケーブルは上下非対称であるため、応力負荷部がケーブルの中心の位置からずれてしまう。これにより、接合面が滑り座屈が生じFig.2のような結果が得られたと考えられる。また、コンジット型ケーブルの製作段階で、銅角棒が水平に置かれていないために応力負荷が不均一になり接合面で滑りが生じたと可能性もある。Fig.2より低い応力ではコンジット型ケーブルの接合抵抗は、コンジット型でない従来のケーブルの接合抵抗より低い。したがって、コンジット型ケーブルの接合面での滑りを改善することにより、さらに低い接合抵抗が得られることが期待できる。

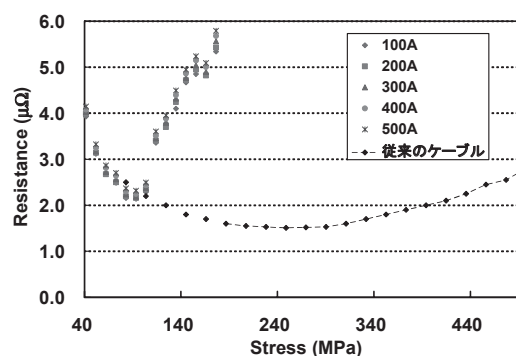


Fig.2 Stress-resistance characteristic

4. 結論

本研究では、コンジット型高温超伝導ケーブルのバットジョイント法における応力-抵抗特性を評価した。コンジット型ケーブルの超伝導体が早く劣化した原因は、接合面による滑りであると考えられる。今後、コンジット型ケーブルの接合面による滑りを防止することにより、さらに良い結果が期待できる。

参考文献

1. S. Ito, et al.: Fusion Engineering and Design, 81, (2006) 2527-2533.
2. S. Ito, et al.: Fusion Science and Technology

サブクール液体ヘリウム中における LHD ヘリカルコイルの温度評価

Evaluation of the temperature of the LHD helical coil in subcooled helium

尾花哲浩、今川信作、濱口真司、柳長門、三戸利行、森内貞智、関口温朗、大場恒揮(核融合研)

OBANA Tetsuhiro, IMAGAWA Shinsaku, HAMAGUCHI Shinji, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki,
MORIUCHI Sadatomo, SEKIGUCHI Haruo, OHBA Kouki (NIFS)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)では、ヘリカルコイルの冷却安定性を改善するために、温度 3.0 K、流量 50 g/s のサブクール液体ヘリウムをヘリカルコイルに供給している。サブクール液体ヘリウムで冷却されたヘリカルコイルの巻線部には、電気絶縁の観点から温度計が設置されていないため、コイル巻線部の温度を実測することができない。そこで、ヘリカルコイル形状を簡略化した計算モデルを用いて数値計算により、ヘリカルコイル巻線部の温度評価を行っている。本発表では、サブクール液体ヘリウム中におけるヘリカルコイルへの外部からの定常熱侵入時、及び励磁時のコイル巻線部温度の計算結果について報告する。

2. ヘリカルコイルの温度評価用計算コード

LHD ヘリカルコイルは、複雑な 3 次元形状を有する浸漬冷却型超伝導コイルである。Fig.1 に、ヘリカルコイル断面、コイル巻線部の一部、使用した導体断面形状の概略図を示す。コイル巻線部では、コイル長手方向に沿って、GFRPスペーサが等間隔に設置され、また冷媒であるサブクール液体ヘリウムが流れる。本計算では、ヘリカルコイル形状を簡略化した 3 つの部分(コイル、コイル容器、サブクール液体ヘリウム)から成る準 1 次元モデルを用いて、ヘリカルコイルの半ピッチ分(長さ 3.92 m)におけるコイル温度を評価する。Fig.2 に、簡略化した計算モデルの概略図と計算時の境界条件を示す。計算時には、ヘリウムの入口側の温度を固定し、コイル容器側面に対して外部からの定常熱侵入量を想定した 90W を加える。その他の境界は、断熱条件とした。計算時に用いる基礎方程式に関しては、各部分に対して熱伝導方程式を使用した[1]。ただし、サブクール液体ヘリウム部分では、流量の項を含めた熱伝導方程式を用いた。また、コイルとヘリウム間、及びコイル容器とヘリウム間では、界面の熱抵抗を考慮している。その際、界面での熱伝達率には、液体ヘリウムの非沸騰自然対流領域における関係式 $h = c \cdot \Delta T^{1/3}$ を用いた[2]。ただし、 c は定数、 ΔT は界面での温度差である。

3. 計算結果

コイル無通電時において、外部からコイル容器への定常熱侵入による各部分の温度への影響を、数値計算によって検証した。コイル出口温度の実験結果と計算結果を Fig.3 に示す。コイル入口温度、及びヘリカルコイルへの供給流量を変えた場合において、計算結果と実験結果がほぼ一致していることがわかる。また、コイル容器(赤道面)においても、実験結果に対して、妥当な計算結果を得た。従って、複雑な 3 次元形状を有するヘリカルコイルを簡略化した計算モデルを用いる数値計算により、外部からの熱侵入に対して、実測可能な部分(コイル出口、コイル容器)での温度を再現することができた。現在、上記の計算モデルを使用して、コイル励磁時のコイル巻線部とコイル容器での交流損失による各部分の温度変化を数値計算によって検証している。その計算結果は、当日報告する。

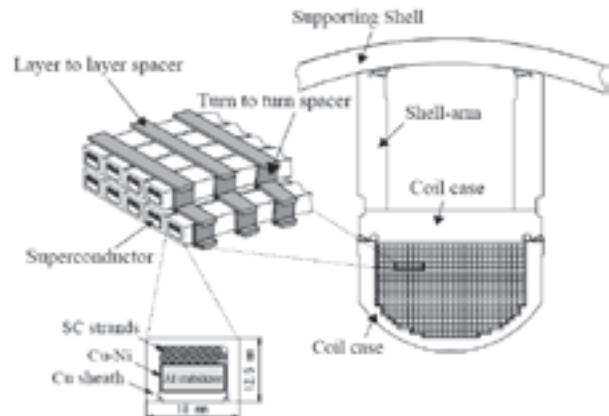


Fig.1 Schematic views of the cross-section of the helical coil, a piece of the coil winding and the cross-section of the Aluminum stabilized superconductor.

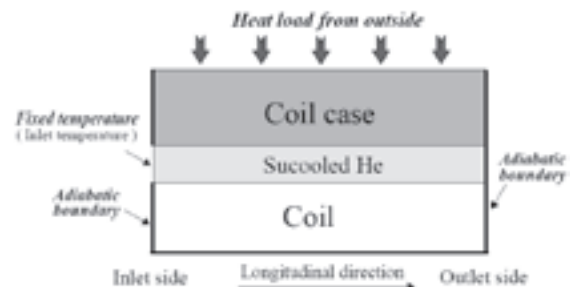


Fig.2 Schematic view of the numerical calculation model simplifying the helical coil.

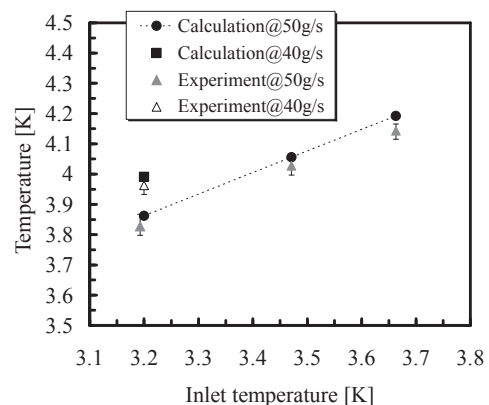


Fig.3 Temperatures obtained from the experiment and calculation at the coil outlet.

参考文献

1. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.144
2. S. Sato, et al.: TEION KOGAKU, Journal of CSJ, Vol. 12 (1977) pp.2-18

リング状バルク材の均一磁場中着磁の数値解析

Numerical analysis of uniform field cooled magnetization of ring HTS

槌本 昌則, 橋本 力哉 (道工大)

TSUCHIMOTO Masanori, HASHIMOTO Rikiya (HIT)

E-mail: tsuchi@hit.ac.jp

1. はじめに

バルク材の分析用 NMR 装置への応用が注目を集めている [1, 2]。冷凍機で冷却したリングバルク超電導体に捕捉させた磁場を発生源として用いるもので、コンパクトで冷媒の補充が不要という特徴を持った高感度・高分解能を目指したものである。臨界状態モデルに基づく巨視的な数値解析シミュレーションコードによる磁場中冷却着磁でリング状バルク材に捕捉される均一磁場と均一性の改善方法についての数値解析結果を報告する。

2. 定式化

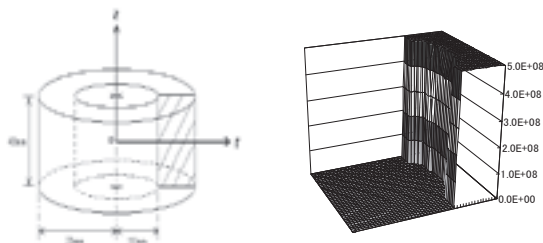
超電導体中での巨視的な電磁現象はマックスウェルの方程式で記述される。外部磁場の時間変化が十分緩やかな準静的な電磁界変化に対して、第 2 種超電導体での電界と遮蔽電流は標準的な臨界状態モデルで表される。

$$J_{SC} = J_c \left(\frac{B}{E} \right) \quad \text{if } |E| \neq 0, \quad \frac{\partial J_{SC}}{\partial t} = 0 \quad \text{if } |E| = 0. \quad (1)$$

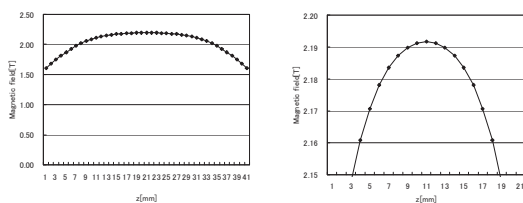
上式が通常の導体でのオームの法則に代わる電界と遮蔽電流間の構成関係式であり、超電導の特性を表す。本解析では基本的な特性を評価するために遮蔽電流密度一定のビーンモデルを用い、各時間ステップで非線形な(1)式を満足する遮蔽電流分布を反復計算により求める。

3. 解析結果と考察

Fig. 1(a)の外半径 23.0mm, 内半径 16.0mm, 高さ 40.0mm のリング状バルク材に 3.0T の一様磁場を与え、磁場中冷却着磁で磁場を捕捉させる。遮蔽電流密度 5.0×10^8 A/m² での円柱試料での結果が (b), (c), (d) で、それぞれ着磁終了後の試料断面の電流分布・中心軸上の磁場分布と中央部分の拡大図である。着磁過程で遮蔽電流が上下端隅から進入して軸上に一様磁場が捕捉される。内径が大きい場合は本来内半径より内側部分に流れる電流が別の部分に流れるが、円柱モデルより磁場均一性は悪くなる場合がある。



(a) Ring bulk model (b) Shielding currents



(c) center trapped field (d) expansion

Fig.1 Numerical results of ring bulk model

4. 磁場均一性の改善方法

NMR にバルク材を用いるためには、数テスラの強磁場・ppm オーダーの磁場の空間一様性・長時間の磁場安定性等が要求される。磁場均一性の改善には MIT の NMR 用バルク磁石の設計報告にある上下端の試料の外径を大きくする方法 [1] や、理研・イムラ材研が進めている上下端に遮蔽電流密度が大きい試料を使用する方法 [2] がある。

Fig. 1(a)の上下端の試料 10mm 部分の外径を 25.0mm に大きくしたモデルの解析結果が Fig. 2 になる。上下端部分に多く遮蔽電流が流れ、磁場均一性が改善されていることが分かる。また、上下端の試料 10mm の遮蔽電流密度を 6.0×10^8 A/m² にした場合の解析結果が Fig. 3 になる。磁場均一性が少し改善されていることが分かる。一方、両端の電流密度を 6.5×10^8 A/m² にすると Fig. 4 になり、捕捉磁場は大幅に低くなるが均一性は大幅に改善する結果が得られた。遮蔽電流密度が大きい両端がヘルムホルツコイルの位置か否かにも依存すると考えられる。

5. まとめ

リング状バルク材に捕捉される均一磁場について報告し、均一性を改善する 2 つの方法について数値解析結果から検討を行い、いくつかの場合があることを示した。

参考文献

1. Y. Iwasa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, (2005), pp. 2352-2355
2. M. Yoshikawa, et al.: Proc. ISS, (2006)

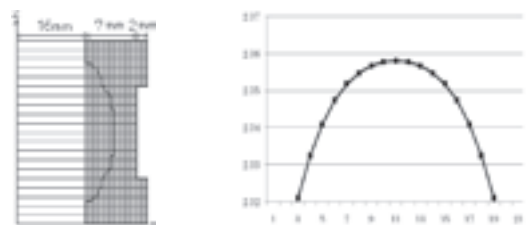


Fig.2 Numerical results with wide edge model

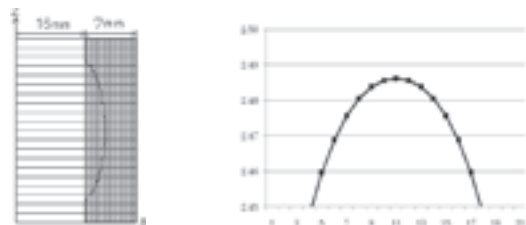


Fig.3 Numerical results with high Jc edge model

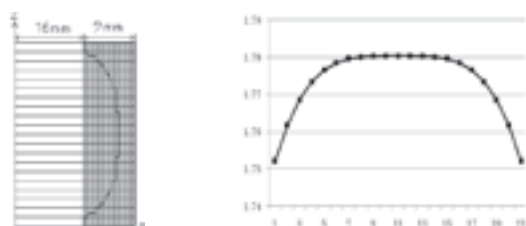


Fig.4 Numerical results with higher Jc edge model

新方式 NMR 用低温プローブの冷却特性

Cooling Characteristics of Cryogenic Probe System for Advanced NMR Spectrometer

田中 弘之, 福田 祐三, 川崎 健司, 岡田 道哉, 佐保 典英(日立); 北口 仁(NIMS)
 TANAKA Hiroyuki, FUKUDA Yuzo, KAWASAKI Kenji, OKADA Michiya, SAHO Norihide (HITACHI);
 KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-mail: hiroyuki.tanaka.wv@hitachi.com

1. はじめに

核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance : NMR)を利用した分光計は、タンパク質の構造・機能を解析するために必要不可欠な機器として、更なる高分解能化・高感度化が期待されている。特にタンパク質の動的挙動を確認するためには、高感度化による計測時間の短縮が必要である。日立では、水平方向磁場を発生するスプリット型マグネットとソレノイド型受信アンテナコイルを装備した低温プローブを組み合わせた新方式NMRを提案し、世界最高感度の取得に向けた開発を実施している[1,2]。本発表では、低温プローブの冷却構造および冷却特性について報告する。

2. 新方式 NMR 用低温プローブ

高感度化を実現するためには、プローブにおけるアンテナコイルおよびプリアンプの動作温度を下げ、熱雑音を低下するとともに、アンテナコイルの電気抵抗を小さくして共振回路の Q 値を高める事が有効である。アンテナコイルを 20K、プリアンプを 77K に冷却した低温プローブは室温動作時の 3~4 倍の感度向上を実現している。原理的には、アンテナコイルおよびプリアンプの動作温度を低温化することにより、更なる感度の向上が可能である。動作温度低温化のため、熱負荷能力の高い GM/JT 冷凍機を使用した研究では、アンテナコイル冷却用熱交換器を 4.5K に冷却している。このシステムでは、GM/JT 冷凍機はアンテナコイルとプリアンプの両方を冷却することができないため、プリアンプおよび熱シールド冷却用にもう一台の GM 冷凍機を搭載している[3]。

4K-GM 冷凍機単体の冷却性能では、アンテナコイルおよびプリアンプ動作温度を、GM/JT 冷凍機使用時まで低温化することは困難である。そこで、4K-GM 冷凍機 2 台を搭載した低温プローブシステムを開発した。4K-GM 冷凍機のみを使用する利点としては、MRI やクライオポンプへの適用例が多く、高い信頼性を有することや、スイッチボタンの操作のみで極低温まで冷却することができる点が挙げられる。図1に本研究で開発した低温プローブシステムの構造を示す。低温プローブは、ソレノイド型受信アンテナとプリアンプを内蔵したプローブユニット、4K-GM 冷凍機 2 台を搭載した冷却ユニット、プローブユニットと冷却ユニットを連結するトランスファーユニットによ

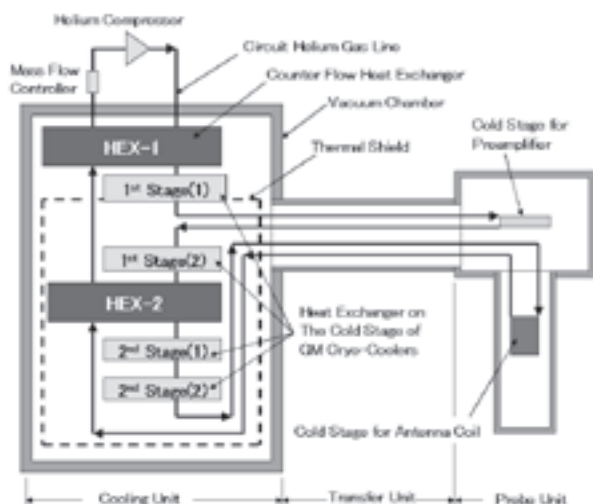


Fig.1 Schematic of Cryogenic Probe System

り構成されている。

ヘリウム(He)コンプレッサーで加圧された He ガスは、向流熱交換器および冷凍機冷却ステージに設置された熱交換器を通過する過程で段階的に冷却される。所定の温度に冷却された He ガスは、冷却ユニットからトランスファーユニットを介してプローブユニットに送られ、プローブユニット内に設置されたアンテナ冷却用ステージおよびプリアンプ冷却用ステージをそれぞれ冷却する。アンテナ冷却用ステージを通過した高圧 He ガスは、再び冷却ユニットに帰還し、各向流熱交換器の低温側熱源として活用された後、He コンプレッサーに戻されるクローズドサイクルを形成している。

3. 実験結果および検討

初期冷却では、高圧 He ガスの充填圧力を 1.0[MPa]、マスフローコントローラーによる循環流量を 0.3[g/s]に設定した状態で 4K-GM 冷凍機 2 台を同時に起動した。図 2 に室温から定常状態に至るまでの初期冷却過程の温度履歴を示す。プリアンプ冷却用ステージは冷却開始後 12 時間で 40K まで冷却されていることが分かる。一方、アンテナ冷却用ステージは冷却開始後 12 時間で約 5.3K まで冷却されている。この時、高圧 He ガスの圧力は、冷却に伴う He ガス体積の収縮によって 0.7[MPa]まで低下した。定常状態におけるアンテナ用冷却ステージでの熱負荷は 1.5[W]、プリアンプ用冷却ステージでの熱負荷は 7.1[W]であった。

4. 結論

4K-GM 冷凍機 2 台を使用した冷却ユニットを持つ独自の低温プローブを開発し、アンテナコイル用冷却ステージを 5.3K、プリアンプ用冷却ステージを 40K に冷却できることを示した。

参考文献

1. T. Shino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.161
2. Y. Fukuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.163
3. H. Yokota et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 69 (2003) p.62

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興費委託金(17 文科振 260 号)の一環として行われた。

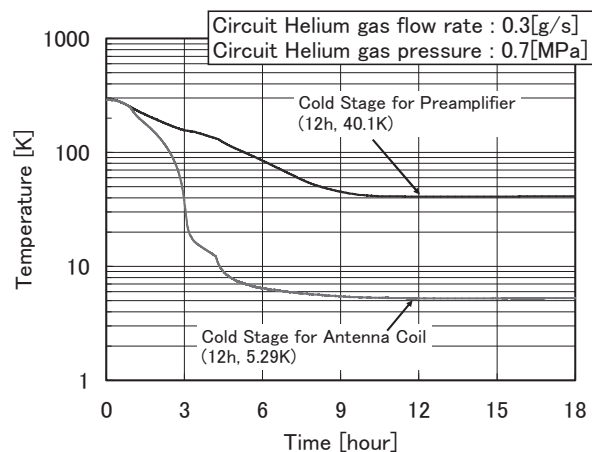


Fig.2 Temperature History for Initial Cooling Process

新方式 NMR 用シムシステムの開発

Development of Shimming System for Advanced NMR Spectrometer

土屋 貢俊, 牧 晃司, 和久田 毅, 椎野 俊之, 木戸 修一, 塚本 英雄, 竹内 一浩, 岡田 道哉 (日立); 北口 仁 (NIMS)
 TSUCHIYA Mitsuyoshi, MAKI Koji, WAKUDA Tsuyoshi, SHIINO Toshiyuki, KIDO Shuichi, TSUKAMOTO Hideo,
 TAKEUCHI Kazuhiro, OKADA Michiya (HITACHI); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-Mail : mitsuyoshi.tsuchiya.dh@hitachi.com

1. はじめに

現在、我々はスプリット型超電導磁石とソレノイド型検出コイルを用いた新方式 NMR 装置の開発を進めている[1]。超電導磁石に関しては、今までに、原理実証機を含めて 300MHz 機を 2 台、600MHz 機を 1 台製作しており、いずれも NMR 計測に必要な性能を十分に満たしている[2][3]。本報告では、これら新方式 NMR 装置に適用した超電導シムシステムに関して、その概要ならびに実機によるシミング結果について述べる。

2. 新方式 NMR 用超電導シムコイル

新方式 NMR 装置の特徴でもあるスプリット型超電導磁石は、従来のソレノイド型超電導磁石と比べて、製作公差や電磁力による歪みなどによって生じる誤差磁場が 1 桁から 2 桁程度大きいという問題がある。これは、スプリットギャップに面したコイル端部が計測空間に近く、その端部位置の変動が磁場に大きく影響するためである。この大きい誤差磁場を補正するために、新方式 NMR では超電導シムコイルのシミング能力を増強する必要がある。

一般的に、コイルが発生する磁場を強くするには、(1)コイルを近づける、(2)電流密度を大きくする、(3)コイル断面積を増やす、という方法が挙げられる。しかし、従来の NMR 装置と同様の超電導シムコイルでは、(1)メインコイルの外側に設置されるため近づけることはできない、(2)超電導材料特性の点から電流密度を大きくすることには限界がある、(3)スプリットギャップのためにシムコイル自体の能力が低くなり設置可能領域も限られる、といった理由から、これらの改善策を実現することはできず、十分なシミング能力を得ることはできない。

そこで、この問題を解決するために、新方式 NMR 用超電導シムコイルでは以下の新技术を採用した。まず、Fig.1 に示すように、メインコイルの内側にも超電導シムコイルを配置した。次に、補正能力の高い非軸対称超電導シムコイルとして、Fig.2 に示すような波打型コイルを適用した。さらに、必要コイル数を減らすために、複数のコイルで複数のモードを補正するマトリックスシムの考え方を超電導シムコイルに導入した。これら 3 つの方法を用いることで、省スペースかつ高補正能力の超電導シムシステムの実現を図った。

3. 超電導シミング結果

前述の超電導シムシステムのシミング性能を検証するために、300MHz 原理実証機において超電導シミング前後の磁場分布を計測した。その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より、超電導シムシステムによるシミングを行うことで、直径 20mm 球 (20mmDSV) 内の誤差磁場を約 20ppm から 0.1ppm 以下にまで低減できたことが分かる。このことから、本報告の超電導シムシステムが新方式 NMR のスプリット型超電導磁石に対して十分な補正能力を備えていることを実証することができた。

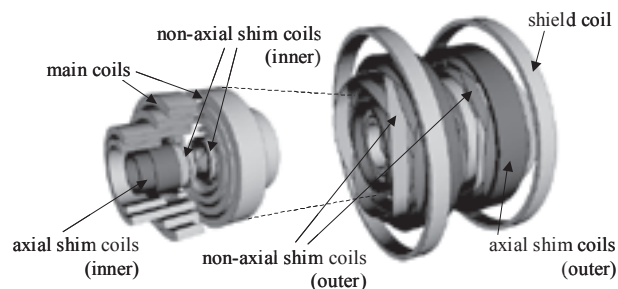


Fig. 1 Bird's-eye views of 300MHz split magnet.

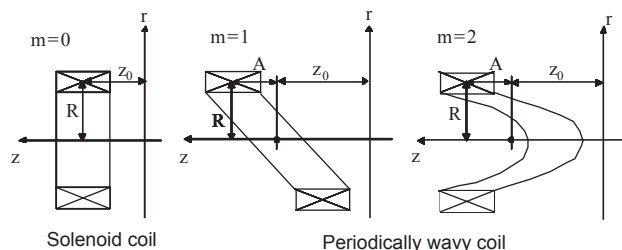


Fig.2 Cross sectional view of a solenoid coil (for axial shim coils) and periodically wavy coils (for non-axial shim coils).

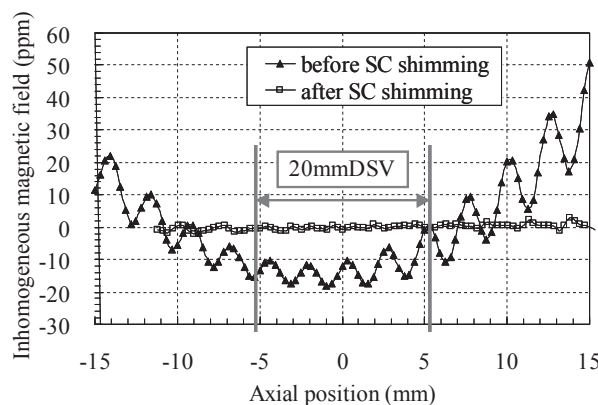


Fig. 3 Magnetic field homogeneity of 300MHz split magnet.

なお、本研究の一部は、文部科学省科学技術振興費委託研究(17 文科振 260 号、18 文科振 489 号)の一環として行われた。

参考文献

1. M. Okada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.15
2. T. Shiino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.161
3. M. Tsuchiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.162

新方式 NMR 用 300MHz 超電導磁石の長期運転

Long-term Operation of 300MHz Superconducting Magnet for advanced NMR Spectrometer

田中秀樹, 土屋 貢俊, 和久田 毅, 牧 晃司, 椎野 俊之, 田中 弘之, 佐保 典英, 塚本 英雄, 竹内 一浩, 岡田 道哉(日立);
北口 仁(NIMS)

TANAKA Hideki, TSUCHIYA Mitsuyoshi, WAKUDA Tsuyoshi, MAKI Koji, SHIINO Toshiyuki, TANAKA Hiroyuki,
SAHO Norihide, TSUKAMOTO Hideo, TAKEUCHI Kazuhiro, OKADA Michiya (HITACHI);

KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail : hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

現在, 我々はスプリット型超電導磁石とソレノイド型検出コイルを用いた新方式 NMR 装置の開発を進めている[1-3]。NMR 測定の高感度化を目指し, 超電導磁石の高磁場化と検出コイルの極低温化が進められているが, 新方式 NMR はソレノイド型検出コイルを用いて, より高い測定感度を目指している。本報告では, 2006 年 10 月に定常運転を開始した, アプリケーション開発機の 300MHz NMR 用超電導磁石について, その長期運転結果を示す。

2. 磁場均一度

スプリット型超電導磁石の主な仕様を Table1 に示す。本プロジェクトで開発した磁石は, 主コイルの内側にも超電導シムコイルを配置していることが特徴である。Fig.1 に超電導シム電流調整後の磁場均一度測定結果を示す。この測定は, 主磁場方向ボア内を半径 8.5mm のらせん状に進みながら行った。まず, コイル中心の直径 20mm 球(20mm DSV)内において磁場均一度が 0.1ppm 以内となるよう初期調整を行った。その後, 永久電流運転を行い, 45 日後と 175 日後に磁場均一度の測定を行った。この結果も Fig.1 に示すように 0.1ppm 以内を維持しており, 超電導接続の健全性を確認できた。

さらに, 超電導磁石のボアに常伝導室温シムコイルとプローブを組み込み, 標準試料(クロロホルム)を装填した状態で室温シムコイルの電流調整を行った。NMR スペクトル半値幅から評価した磁場均一度は 1ppb(0.3Hz)であり, NMR 信号取得に十分な磁場均一度を達成した。Fig.2 に開発したシステムで取得したスペクトル形状を示す。スペクトル裾野の幅(0.55%高さ幅)も従来の NMR システムと同程度まで狭くなっており, システム全体としての磁場均一度は良好であるといえる。

3. 磁場安定度

一般的に NMR 用超電導磁石には, 1Hz/h 以下の磁場安定度が必要とされる。また, 数時間に亘る測定において, 試料原子核の共鳴周波数を一定に保つため, NMR システムにはロック機能が含まれる。ロック機能では, 検出した磁場減衰に比例する電流をロック用コイルに通電することで, 減衰分の磁場強度を補償している。Fig.3 に定常運転開始一ヶ月後に測定した磁場安定度を示す。縦軸は, ロック機能を用いて補償した水素原子核の共鳴周波数である。磁場減衰の値は 0.24Hz/h であり, NMR 用磁石として十分小さいことが分かる。

Table1 Specifications of superconducting split magnets.

Number of SC coils	10 (main), 2(shield)
Number of SC shim coils	14 (inner), 20 (outer)
Operating Current	205.1 A
Stored Energy	0.7 MJ
Superconducting Joints	15 (main), 72 (shim)
Cryostat Size	1.7m x 1.1m x 1.3m
Horizontal bore diameter	77.2 mm
Weight	4.3 ton

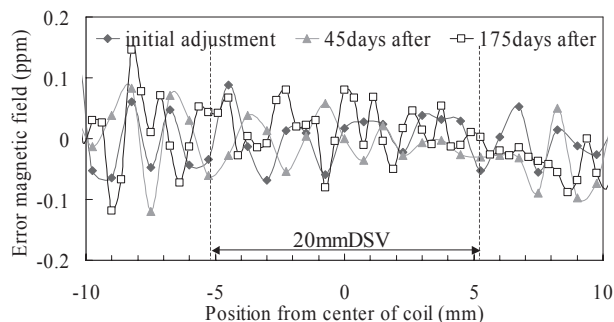


Fig.1 Homogeneity of magnetic field

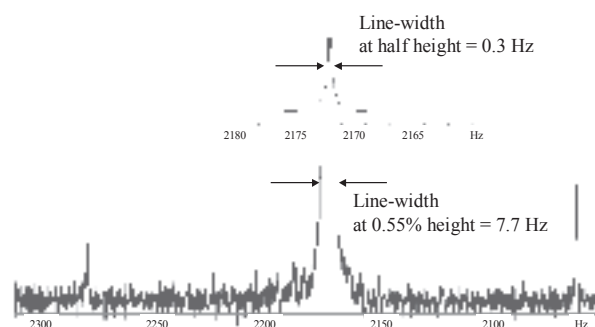


Fig.2 Line Shape test results (non-spin)

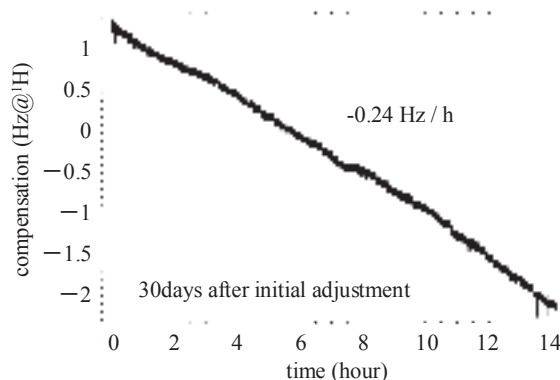


Fig.3 Magnetic field decay

なお, 本研究の一部は, 文部科学省科学技術振興費委託研究(18文科振489号)の一環として行われた。

参考文献

1. M. Okada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.33
2. M. Okada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.15
3. M. Tsuchiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.162

高温超電導を用いた超 1GHz NMR における磁場安定化手法

Magnetic field stabilization method for beyond 1GHz NMR using HTS coil

柳澤 吉紀^{B,A}, 中込 秀樹^B; 細野 政美^D; 濱田 衛^E; 木吉 司^F; 保母 史郎^{C,A}, 高橋 雅人^A, 山崎 俊夫^A, 前田 秀明^{A,C}

^A 理研 GSC, ^B 千葉大, ^C 横浜市大院, ^D 日本電子(株), ^E(株)神戸製鋼, ^F 物質・材料研究機構

YANAGISAWA Yoshinori^{B,A}, NAKAGOME Hideki^B; HOSONO Masami^D; HAMADA Mamoru^E

KIYOSHI Tsukasa^F; YAMAZAKI Toshio^A HOBO Fumio^C TAKAHASHI Masato^A MAEDA Hideaki^A

^ARIKEN, ^BChiba Univ, ^CYokohama City Univ., ^DJEOL Ltd., ^EKobe Steel, Ltd., ^FNIMS

E-mail:maeda@jota.gsc.riken.jp

1. はじめに

NMR では感度と分解能の観点から高磁場化が期待されている。筆者らは、高温超電導を用いた超 1GHz (>23.48T) NMR の開発を開始した。高温超電導線はn値が低いので、NMR に要求される永久電流 (<10⁻⁸/h) を実現できない。そのため、外部電源で磁石を常時通電する必要があるが、電源リップルで磁場が変動するので、そのままでは良質なNMR信号を取得できない。著者らは磁石通電時の磁場安定化手法として既存の NMR に組み込まれている磁場-周波数ロック機構(重水素ロック核)が適用可能である事をモデル試験により示した[1]。本報では、実際に 500MHz(11.75T) NMR 磁石を高安定化電源で通電した状態で、上記の磁場安定化手法を用いて NMR 信号を取得したので報告する。

2. 実験方法

500MHz (11.75T)NMR 磁石に、特別に製作した高安定化電源(物質・材料研究機構所有)を接続した。最初に定格電流で永久電流スイッチ(PCS)を用いて永久電流モードで運転し、この状態で磁場の均一度補正を行った。次に、電源電流を定格まで上げ、PCSをオフにして電源通電モードに設定し、NMR 信号の形状測定の標準試料(※)について NMR 計測を行った。

(※) 1%クロロホルムを重水素化アセトン溶媒に溶かした試料

3. 実験結果

3-1. 通電開始直後の NMR 磁石の磁場変動

PCS により永久電流モードから通電モードに切り替えた直後の NMR ピーク周波数(磁場の値に対応)の経時変化を Fig.1 に示す。電源電流とコイル電流にわずかな差があるため、PCS をオフにした直後に磁場が変動するが、徐々に変動は小さくなり、30 分程度で、磁場-周波数ロックにより安定化可能な変動幅(±2ppm 程度)に収まっている。

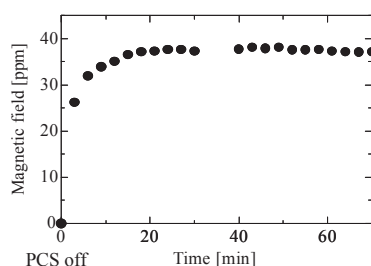


Fig.1. Field fluctuations

3-2. 磁場-周波数ロックによる磁場安定化

磁場が比較的安定になった時点で取得した NMR 信号の経時的な変化を Fig.2 に示す。Fig.2 (a)は磁場-周波数ロックが off の状態の NMR 信号であるが、電源電流の変動によりピーク周波数(横軸)が顕著に変動している。NMR 信号には磁場変動に起因する周波数変調によるウイグル(振動)が現れる。Fig.2(b)は磁場-周波数ロックを on にした状態で計測した NMR 信号であるが、ピーク周波数がまったく変動していない。また、NMR 信号の形状も一定に保持されている。即ち、磁場の絶対値および磁場均一度は、高いレベルで安定化されている。電源変動には Fig.2 (a)にみえる低周波成分のほか、2Hz と 50Hz など特徴的なピークが存在する[1]。これらの周波数に対応してアーチファクト(擬似信号のサイドバンド)が生じた。この内 2Hz 成分はロックの制御パラメータの選択で除去できた。50Hz 成分はパラメータ選択による制御は不可能であったが、十分小さいので NMR 計測に影響はない。なお、電源電流の長時間変動があるので、ロック保持時間は現時点では 90 分程度である。

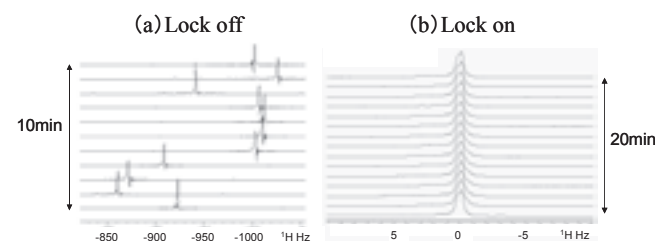


Fig.2. Field stabilization effect by a field-frequency lock system

4. まとめ

電源通電モードにおいて磁場-周波数ロック(重水素ロック核)を用いれば、溶液 NMR 計測が可能である事を実証した。長時間(数十時間)にわたる NMR 計測を実現するためには、更なる電源の安定化が必要である。

参考文献

[1] 柳澤 他, 2007 年度春季低温工学・超電導学会, p164.

本開発は、独立行政法人科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業による助成を受けている。

NMR 用高温超伝導コイルにおける磁化電流に起因する誤差磁場

Field error due to magnetization current in HTS coils for NMR magnets

赤地 健, 雨宮 尚之(横浜国大・工)

AKACHI Ken and AMEMIYA Naoyuki (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

E-mail: ken@rain.dnj.ynu.ac.jp

1. はじめに

現在、様々な研究機関において1 GHzを超えるNMRの為に30 T級の高磁界を発生するマグネットの開発が行われており、そこには高磁界下において高い臨界電流密度を示す高温超伝導テープがインサートコイルに用いられている。しかし、高温超伝導コイルに電流を通電すると、Fig. 1に示すように線材内において外部磁界と自己磁界に対する遮蔽電流(磁化電流)が誘起され、線材内の電流密度分布の異質性が失われる事に起因して誤差磁場が発生する。このようにして発生した誤差磁場によって、NMRに必要な磁場精度が損なわれると考えられる。

本研究では2種類の小コイルにおける誤差磁場の詳細な解析を行い、計算負荷が小さく、且つ精度の高い解析方法を提案した。さらにその解析方法を用いて、1.3 GHz NMR用高温超伝導コイルにおける誤差磁場について検討した。

2. 解析モデル

本研究では、コイルをFig. 2(a)に示すように円環状の超伝導線材の集合としてモデル化した。さらに線材の断面を有限個の要素に分割し、各要素には円環電流が流れているものとして、1次元FEMを適用して解析を行った。ただし、ファラデーの法則に電流ベクトルポテンシャルを用いて変数変換し、得られた(1)式を支配方程式とした。又、超伝導体のE-J特性にはn値モデルを用いた。

$$-\frac{\partial}{\partial y} \rho \frac{\partial T_m}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \sum_{m' \in \text{Turn}} \left(\mathbf{B}_0(m, m') \cdot \mathbf{n} \frac{\partial T_m}{\partial y} t_s \Delta y \right) \right\} + \frac{\partial \mathbf{B}_e \cdot \mathbf{n}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、mは磁界計算点の要素番号、m'は電流点の要素番号を示す。又、B₀は電流点の円環電流によって磁界計算点に発生する磁束密度で、t_sは超伝導線材の厚みである。

解析には3つのモデルを用いた。1つ目はコイルの全ターンの電磁界解析を行うコイルモデルで、最も正確な解析モデルである。2つ目はレイヤモデルと呼ばれ、任意の1つのレイヤ内におけるターンのみ電磁界解析を行い、他のレイヤは解析を行ったレイヤに磁界を発生させる強制一様電流が通電していると仮定したモデルである。3つ目はパンケーキモデルと呼ばれ、任意の1つのパンケーキ内におけるターンのみ電磁界解析を行い、他のパンケーキには強制一様電流が通電していると仮定したモデルである。

3. 解析結果及び考察

まず、小コイルにおける誤差磁場の解析を3つの解析モデルを用いて行った。その結果、レイヤモデルにおいて、少ない計算時間と消費メモリ量での解析が可能で、且つ高精度な解析が可能である事がわかった。

次にTable 1に諸元、Fig. 2(b)に概念図を示す1.3 GHz NMR用インサートコイルにおける誤差磁場の解析を、レイヤモデルを用い、コイルを構成する全レイヤから均等に選択した10のレイヤについて行った。Fig. 3(a), (b)に1stレイヤと200thレイヤにおける4つのターンの線材内の電流分布を示す。コイル中央面に近い70thターンには自己磁界に対する遮蔽電流の影響が、他のターンには外部磁界(他線材が作る磁界)に対する磁化電流の影響が強く現れている。Fig. 3(c), (d)には各ターンの線材の電流が発生するコイル中心における誤差磁場を示す。ここで、誤差磁場とは線材に均一な電流が流れていた場合に発生する磁場と解析の結果得られた磁場との差である。1stターンの線材には磁化電流により極めて不均一な電流が流れているにも関わらず発生する誤差磁場が小さいのは、このターンが誤差磁場を評価したコイル中心から遠い為であると考えられる。

4. まとめ

1.3 GHz NMR用インサートコイルの解析結果では、10レイヤの作る誤差磁場の合計は、1.22×10⁻³ Tとなる。この値を455/10倍してコイル全体が発生させる誤差磁場を概算すると5.55×10⁻² TとNMRマグネットとしては非常に大きな値となる。従って、今後は、遮蔽電流(磁化電流)の時間変化に伴う誤

差磁場の時間変動を明らかにし、その抑制策について検討する必要があると考えられる。

Table 1. Specifications of insert coil of 1.3 GHz NMR magnet

Number of turns	140
Number of layers	455
Gap between tapes	0.5 mm
Layer separation	0.38 mm
Coil height	699.5 mm
Diameter of innermost layer ^a	80 mm
Diameter of outermost layer ^b	424.6 mm

^a Measured at the inner surface of the innermost tapes

^b Measured at the inner surface of the outermost tapes

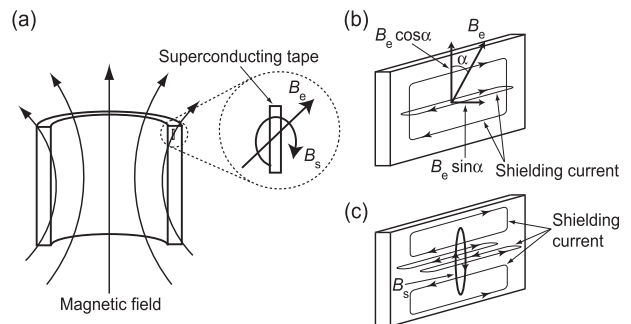


Fig. 1 Magnetic fields and shielding currents: (a) external magnetic field B_e and self magnetic field B_s, (b) shielding current against B_e, and (c) shielding current against B_s

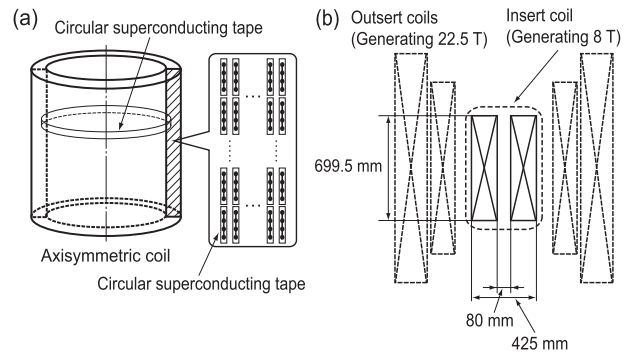


Fig. 2 Axisymmetric coil and analyzed coil: (a) axisymmetric coil, (b) cross section of insert coil of a 1.3 GHz NMR magnet

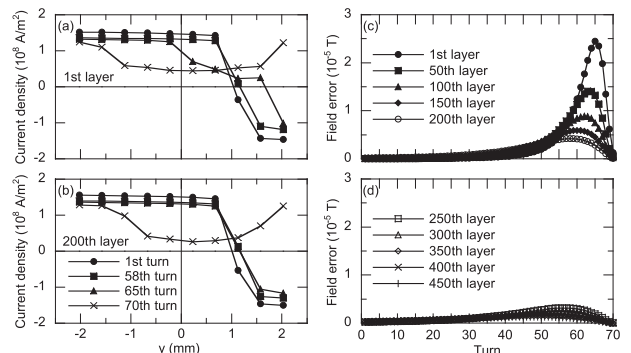


Fig. 3 Current distribution and field error of insert coil of 1.3 GHz NMR magnet: (a) current distribution of tapes in 1st layer, (b) current distribution of tapes in 200th layer, and (c), (d) field errors produced by current in each turn of selected 10 layers

高温超電導バルク体と鉄レール間のピンニング力を用いた磁気浮上装置の試作

Manufacture of Magnetic Levitation System using Pinning Force between HTS Bulk and Iron rail

樋口 涼馬, ニノ宮 晃, 石郷岡 猛(成蹊大)

Ryoma Higuchi, Akira Ninomiya, Takeshi Ishigoka (Seikei University)

1. はじめに

高温超電導バルク体 (HTSバルク体) と鉄レールの間のピンニング力を利用して、鉄と HTS バルク体の間に復元力を持たせることが可能であると考えられる(1)。これにより HTS を車両部とし、鉄レールに近接させて配置すると非接触で浮上力、および案内力が得られると期待される。本稿では、バルク体と鉄レールの間に働く浮上力、および案内力の測定を行ったので、その結果についての報告をする。

2. 実験装置および測定方法

図 1 に測定時の様子を、表 1 に使用した実験材料の詳細を示す。図 1 は、着磁に使用した銅鉄電磁石の磁極の両端 (磁極間ギャップ: 68.5mm) に冷却容器に入れたバルク体を置き、磁極間の中央に断面が 10×10mm の鉄レールを配置させた様子を示している。

鉄レールをアルミ板を介してロードセルに固定し、図 1 の状態でコイルに電流を流してバルク体を冷却しなかった場合と、フィールドクール (FC) 法で着磁後コイルに電流を流したままの状態にした場合と、FC 法で着磁後コイルの電流をなくした状態にした場合の 3 種類の状態で力の測定を行った。

コイルに電流を流すと図 1 の X 軸方向に磁界がかかり、磁界の大きさは磁極間が空気のととき、その中央で約 350[G/A] である。

3. 実験結果

コイルに 4A の電流を流したときに鉄レールに働く X 軸方向の力 (案内力) の測定結果を図 2 に、Z 軸方向の力 (浮上力) の測定結果を図 3 に示す。実験装置の関係上測定範囲が限られてしまったが、図 2、図 3、共に原点 (磁極間の中央; 初期位置) 対称な特性になっていることが分かる。

図 3 より浮上力はコイルの磁界のみでも得られ、FC 後にコイルへの通電を止めても浮上力が働くという特性になった。また、図 2 の案内力の方は、FC 後通電を止めると、コイルの磁界のみで力を測定したグラフを軸として反転し案内力が働かないという特性になった。

4. まとめ

バルク体と鉄レールの間に働く浮上力、および案内力の測定を行った結果、今回行った FC 法による着磁ではコイルへの通電を止めると、浮上力は得られても案内力は得られなかった。

今後は着磁後、いかにしてコイルの磁界を取り除き、バルク体に着磁された磁束だけで案内力を得るかということが課題である。

5. 参考文献

- (1) H.Ohsaki, K.Kanaya, Y.Fukasawa, E.Masada: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 58 (1998) p.109

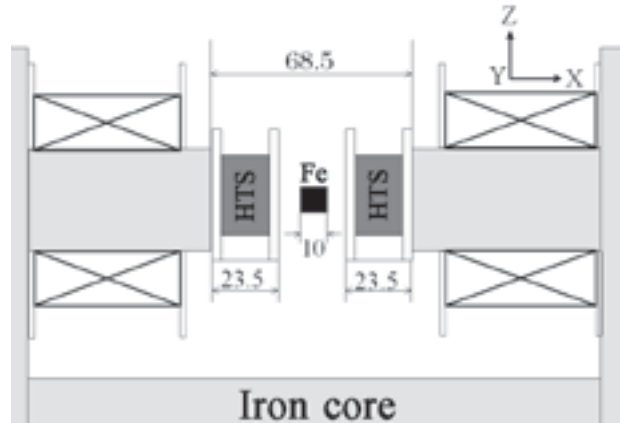


Fig.1 Measurement of guidance force and levitation force between HTS bulk and Iron rail.

Table.1 details of materials.

material	size [mm]	weight [g]
HTS bulk	66 Φ × 20	488
Iron rail	10 × 10 × 66	51

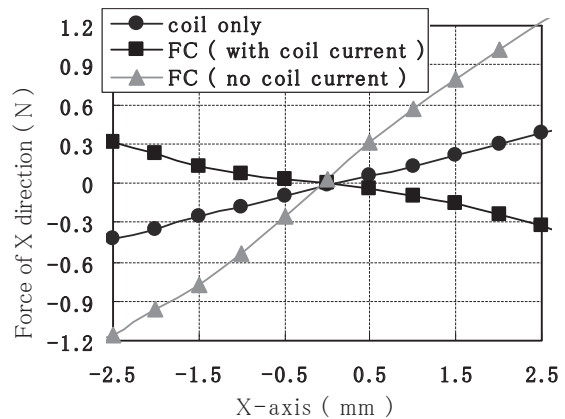


Fig.2 Measurement of guidance force.

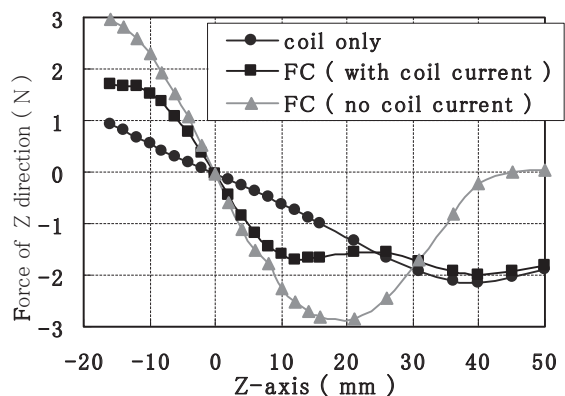


Fig.3 Measurement of levitation force.

球状バルク超電導体のアクティブ磁気浮上における安定・位置制御

Position control of active magnetic levitation using sphere-shaped HTS bulk

菅 兼治, 陸 旭棟, 植田 浩史, 我妻 洸, 石山 敦士(早稲田大学)
 SUGA Kenji, RIKU Kyokutoh, UEDA Hiroshi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University)
 E-mail: puchimomonja8.29@asagi.waseda.jp

1. はじめに

電磁石(以下、コイル)を用いて酸化物バルク超電導体(以下、バルク体)をアクティブ磁気浮上させるシステムは、コイルの通電電流量を変化させることでバルク体の浮上高度の制御が可能となる。さらに無制御で浮上安定性を確保できるため、鉛直方向の磁気浮上装置への応用が期待される。そこで本研究では、磁気浮上装置を慣性核融合に応用することを考えた。慣性核融合では核融合燃料に周囲からジャイアントレーザーを照射し爆縮させることで核融合反応を起こすが、如何にして燃料を非接触で目的の位置に精度良く移動・静止させるかが課題の一つになっている。そこで我々は、燃料を充填した球殻状の超電導カプセルを、銅線コイルを用いたアクティブ磁気浮上によって位置制御することを考えた⁽¹⁾。今回は回転対称有限要素・境界要素併用法に基づいた数値シミュレーションを用いて、バルク体が磁気浮上中に水平方向に安定するようにコイル配置を決定した。そして空気中において径 5 mm の球状バルク体の位置制御を行ったので報告する。

2. 実験装置

これまで我々は径 5 mm の球状バルク体の位置制御を行ってきた⁽²⁾。しかし従来のシステム(Fig. 1(a))では、バルク体の中心がコイルの中心から少しでもずれるとバルク体が外に弾き出されてしまうため、水平方向に不安定であった(Fig. 2(a))。そこでその安定性を得るために Coil 2 の上方に Coil 3 を設置し、Coil 3 に Coil 2 とは逆の電流を通電し、Coil 2,3 の間でバルク体を位置制御した(Fig. 2(b))。また、慣性核融合へ応用する際、バルク体を液体窒素から出した状態で爆縮させることを想定している。そこで今回はバルク体の目標浮上高度付近を空気とし、Coil 3 に電流を通電した際の発熱を吸収するために Coil 3 を囲むように容器を設置して液体窒素を入れた。実験装置概略図を Fig. 1(b) に示す。諸元を Table 1 に示す。

3. 位置制御試験結果

Fig. 1(b) のシステムを用いてバルク体の位置制御試験を行った。制御位置はバルク体の初期位置からの浮上高度が 18 mm となる位置である。まず、Coil 1 に直流電流 5 A を通電してバルク体を Field cooling により着磁する。次に Coil 3 に Coil 1,2 とは逆向きの直流電流 15 A を通電する。そして Coil 1 に 15 A を通電し、Coil 2 の電流を変化させることでバルク体の位置制御をした(二自由度制御)。実験結果を Fig. 3 に示す。ここでグラフの横軸は制御開始からの時間、縦軸はバルク体の初期位置からの浮上高度である。また、目標浮上高度からの誤差を Fig. 4 に示す。ここで縦軸は目標浮上高度からの誤差である。これから本システムで目標浮上高度を正確に維持できたことがわかる。なお、現システム(Fig. 1(b))の実験においてバルク体位置制御時の浮上高度の標準偏差は 20.84 μm であった。旧システム(Fig. 1(a))の標準偏差が 28.10 μm であったことから、位置制御の精度が改善されたと言える。これは、今回のシステムは制御空間の上方にコイルを設置し、逆向きの電流を流すことにより、水平安定性が増したことが考えられる。

4. まとめ

以上から、コイルを用いたアクティブ磁気浮上システムにおいて、制御の精度を大きく向上することが出来た。しかし慣性核融合への応用を考えると浮上高度の標準偏差を 5 μm 以下、バルク体を径 2 mm 以下の球殻状にしなければならない。今後はより応用に近い形で位置制御を行う予定である。

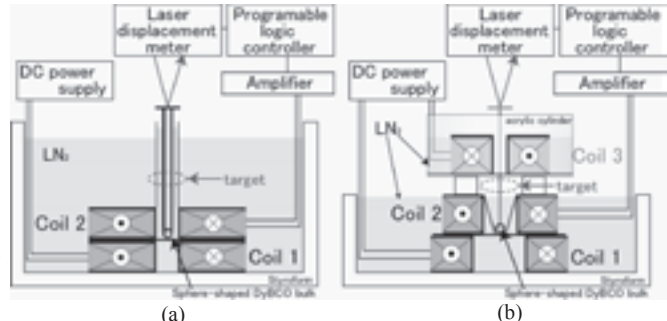


Fig. 1 Schematic drawing of experimental system. (a) Previous system, (b) Present system.

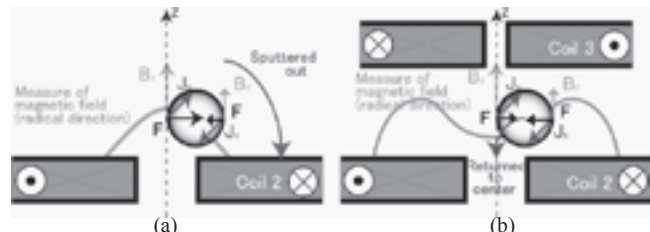


Fig. 2 Principle of stability of horizontal direction. (a) Previous system, (b) Present system.

Table 1. Specifications of HTS bulk and coils.

HTS bulk		Coil 1	Coil 2	Coil 3	
Shape	Sphere	Inner diameter	27 mm	18 mm	8 mm
Material	DyBCO	Outer diameter	65 mm	56 mm	46 mm
Diameter	5 mm	Thickness	16 mm	16 mm	21 mm
Weight	4×10^{-4} kg	Number of turns	250	250	250

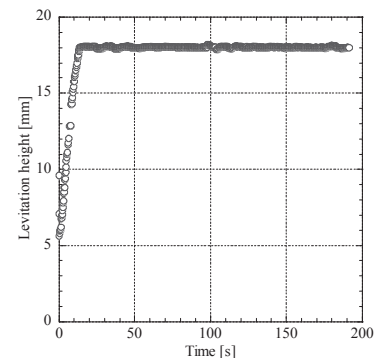


Fig.3 Experimental result of position control (target height: 18 mm).

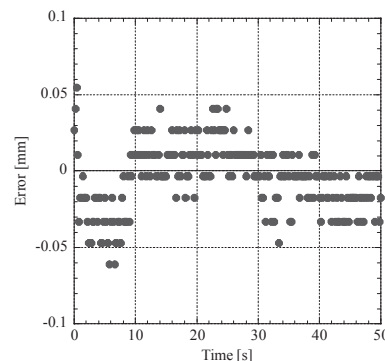


Fig. 4 Error of position control.

参考文献

- (1) H. Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.118
- (2) K. Suga, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.98

RE 系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討(2)

-超電導磁石の重量見積り-

Study of HTS magnet for maglev using RE-Ba-Cu-O wire

-Weight estimate of superconducting magnet-

長嶋 賢, 宮崎佳樹, 小方正文, 笹川卓, 岩松勝 (鉄道総研)

NAGASHIMA Ken, MIYAZAKI Yoshiki, OGATA Masafumi, SASAKAWA Takashi, IWAMATSU Masaru(RTRI)

E-mail: ken@rtri.or.jp

1. はじめに

RE 系線材 (RE-Ba-Cu-O 材料を使用した高温超電導テープ線材, RE は希土類元素) の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用について検討している[1]。高温超電導線材の導入で期待できる効果は、磁石重量の低減や車載冷凍システムの省エネルギー化である。そこで今回は文献データから超電導磁石重量見積りを行い、そのコイル温度依存性を求めた。超電導磁石の重量でコイル温度に依存するのは、主に超電導コイル巻線と冷凍システムである。そこで今回は特にこの 2 点に注目して計算を行った。

2. 超電導コイルの重量見積り

RE 系線材は人工ピンの導入により臨界電流密度(J_c)が向上する事が報告されている[2]。そこでその際の J_c の磁場・温度依存性から、浮上式鉄道用超電導コイルの重量を推算した。この際、磁場の角度依存性は重要であるが、人工ピンの導入により角度依存性は少なくなるので、今回の計算では簡単のためそれを考慮に入れず、テープ材の c 軸と平行に磁場を印加した場合の磁場依存性データを用いた。また山梨実験線で使用している NbTi コイルと同一の中心線形状を有するレーストラックコイルについて、起磁力 850kA、線材の負荷率 80%、4.4mm 幅のテープ材で 6 つのバンケーキコイルを積層する等の条件を課して、それぞれの温度について最大経験磁場からコイルの電流密度、巻線断面積を求めて最終的にコイル重量を算出した。計算の結果を図 1 に示す。超電導コイルは一つの磁石の中に 4 個入っており、その重量を縦軸にしている。重量は温度の上昇とともに急速に増加している様子がわかる。線材の特性によってこの結果は変化するので、鉄道総研では実際に市販の線材を入手して、臨界電流(I_c)の温度、磁場、歪みの依存性についても評価を行っている。

3. 冷凍システムの重量と消費電力の見積り

一般に同じ冷凍能力であれば、冷凍システムは温度が上昇するにつれて重量が増加し、また重量と消費電力は比例関係にあると言われている。これについて、多くの市販冷凍機の実例を調べ、冷却温度と冷凍能力が決まれば冷凍機の消費電力と重量を定量的に近似できるようにデータを整理した報告がある[3]。そこで、このデータと、従来の NbTi 超電導磁石の熱侵入値からコイル温度が変化した場合の熱侵入量を推定して冷凍システムの重量および消費電力を計算した。磁石構造の簡素化のため、輻射熱シールド板を省略した場合と、従来通り輻射熱シールドがある場合について検討した。図 2 が計算結果である。消費電力と重量は完全に比例するため、左軸に重量、右軸に消費電力を示している。その結果、コイル温度 50K 以上ではシールド板の有無で顕著な違いは無いが、それ以下では温度が下がるにつれてシールド板の効果が顕著になっている。

4. 結言

上で求めたコイルと冷凍機の重量を加算したものが図 3 である。シールド板を省略したケースでは全重量は 50K で最小値をとり、シールド板を残したケースでは 30K 程度で最小値をとる。この最小値は前者の最小値より 200kg 程度軽量化されることがわかる。設計に当たっては、重量、消費電力、磁

石構造を総合的に考慮する必要がある。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

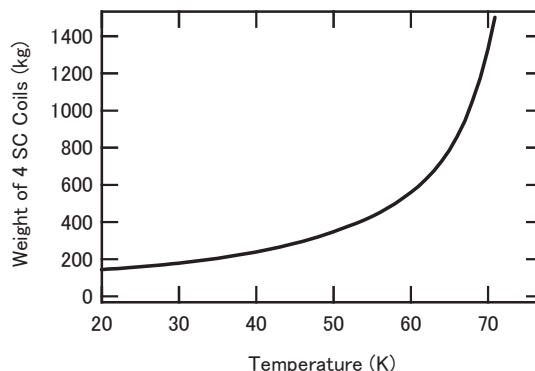


Fig.1 Estimated weight of Superconducting Coils

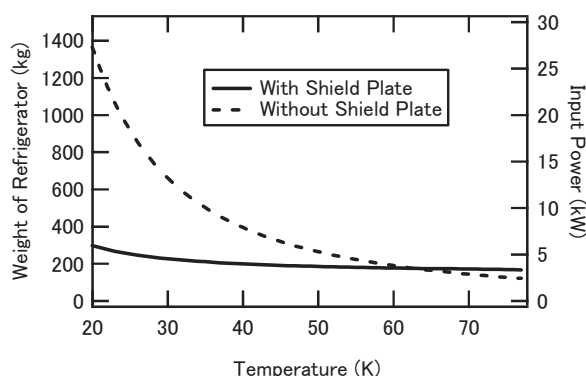


Fig.2 Estimated weight and Input Power of Refrigerator

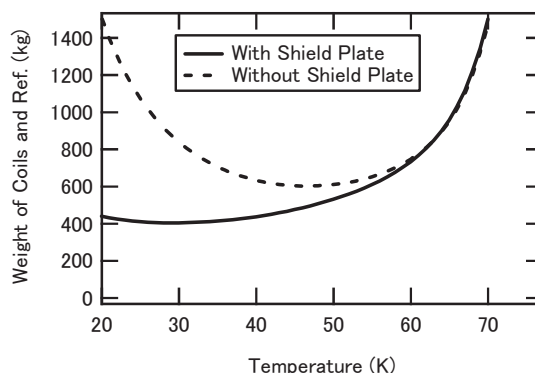


Fig.3 Estimated weight of SC Coils and Refrigerator

参考文献

1. K. Nagashima, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.76 (2007) p.84
2. M. Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.76 (2007) p. 253
3. M. Nisenoff: Proceedings of International Workshop on Superconductivity, (1999) p.2

シュベルトマナイト吸着剤を用いた高勾配磁気分離による ウラン汚染水の浄化

Removal of uranium ions from solution by superconducting high-gradient magnetic separation with schwertmannite adsorbent

西村 憲治, 三浦 大介, 伊藤 大佐(首都大);和田幸男(原子力安全技術センター)

NISHIMURA Kenji, MIURA Osuke, ITO Daisuke (Tokyo Metropolitan Univ.); WADA Yukio (Nuclear Safety Technology Center)

E-mail: qr_master@yahoo.co.jp

1. はじめに

我々はシュベルトマナイトと呼ばれる鉱物が重金属イオンを吸着する特性に着目し吸着剤として利用し、ウランの高勾配磁気分離による除去に有効であることを明らかにしてきた[1,2]。本研究ではシュベルトマナイトのウランとラジウムに対する吸着特性を調べ、放射性重金属の浄化への高勾配磁気分離の応用可能性を検討した。また、吸着のpH依存性や吸着時間特性についても調査した。

2. シュベルトマナイト

シュベルトマナイトは自然界中に存在する比較的近年になって発見された鉱物である[3]。その理想的な化学式を(1)式に示す。



吸着に寄与する部分の模式図を Fig.1 に示す。なおこの構造はまだ確定されていない。重金属イオンの吸着は、シュベルトマナイトの鉄と酸素からなるリング状の構造に囲まれた硫酸イオンが分散媒中で重金属イオンと置換することで行われると考えられている[4]。

3. 実験方法

ウラン含有水 100ml(Table1)にシュベルトマナイトを 100ppm 投入して攪拌し、イオンを吸着させた後、高勾配磁気分離を行った。シュベルトマナイトの平均粒径は約 $1\mu m$ であり、 $\mu_0 H_0 = 10 [T]$ として磁化率[2]から求めた捕捉できる限界粒径は $3.56 \times 10^{-7} m$ であることが計算により分かっているの、そのほとんどが磁気分離可能であることになる。

高勾配磁気分離は超伝導マグネットの磁束密度が $10[T]$ になる位置に線径 $100\mu m$ のステンレス鋼細線 (SUS430) を巻いたフィルタを装填し、 $33ml/sec$ の流速で通過させた。

吸着時間依存特性を調べるため吸着(攪拌)時間を 15 分、30 分、60 分、180 分、360 分に変化させた。

pH 依存特性については pH=3 と pH=7 について調査した。ウラン濃度の測定は ICP-MS(SII SPQ9200)で行った。

4. 結果と考察

Fig.2 は磁気分離結果を示している。pH=7 においては吸着時間が 15 分で 95% 近くの除去率を示し、それ以上攪拌しても結果は横ばいに推移しているのに対し、pH=3 では 15 分で 60% 程度の除去率を示したが 30 分以降では 10% 付近まで低下した。この pH=7 で比較的短時間で吸着がほぼ完了してしまうのは、シュベルトマナイト粒子の表面近傍のサイトが吸着機構に主として寄与していることを示唆している。

Table 1 Initial concentration of uranium ions

URANIUM pH=7 [mg/l]	URANIUM pH=3 [mg/l]
4.65×10^{-3}	6.02×10^{-3}

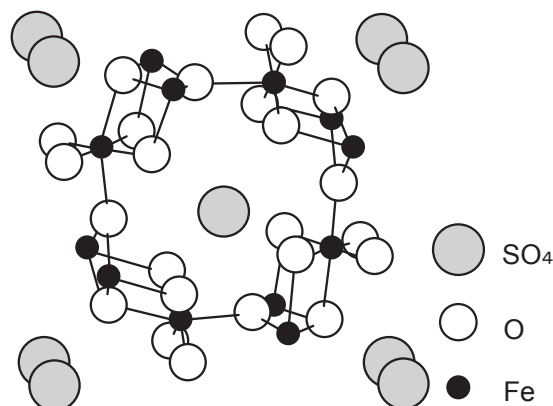


Fig.1 Schematic structure of schwertmannite

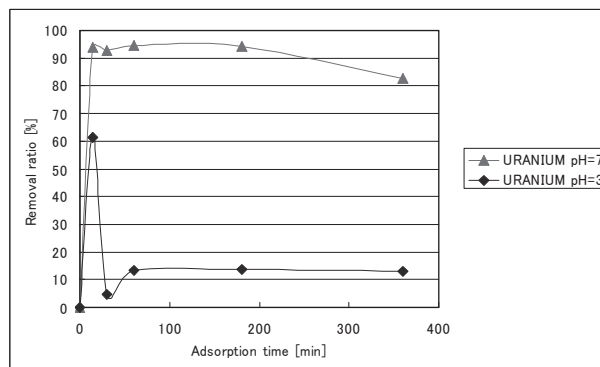


Fig.2 Adsorption time dependence of removal ratio for uranium ions

5. まとめ

シュベルトマナイトが高勾配磁気分離によりウランを浄化する優れた吸着剤として利用できることが明らかになった。吸着特性は pH 値に依存し、pH 値が低くなると吸着能力が低下することから、pH 値の制御により吸脱着をコントロールできる可能性を示唆する結果が得られた。

本研究を行うにあたって貴重なアドバイスを頂いた見目善弘氏、およびシュベルトマナイトの試料を提供して頂いた(株)ソフィアの伊藤健一氏に深く感謝します。

6. 参考文献

- [1] S. Kato et al., Abstracts of CSJ Conference 74th Spring meeting p34 (2006)
- [2] S. Kato et al., Abstracts of the Magneto-Science Society of Japan 1st Annual meeting pp. 49-50 (2006)
- [3] J. M. Bigham et al., Geochimica et Cosmochimica Acta, **60**, 12, pp. 2111-2121 (1996)
- [4] M. Walter et al., Environ. Sci. Technol. **37**, pp. 2898-2904 (2003)

超伝導バルク磁石を使った磁気分離による廃水浄化

Waste Water Purification by Magnetic Separation Experiments Using HTS Bulk Magnets

岡 徹雄, 金山 隼人, 広瀬 豊, 菊地 北斗, 小林 遼, 田中 克昌, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄,
山口 貢, 大泉 学(新潟大), 寺澤俊久, 伊藤佳孝(イムラ材研)

OKA Tetsuo, KANAYANA Hayato, HIROSE Yutaka, KIKUCHI Hokuto, KOBAYASHI Ryo, TANAKA Katsuyoshi, OGAWA Jun,
FUKUI Satoshi, SATO Takao, YAMAGUCHI Mitsugi, OOIZUMI Manabu, TERASAWA Toshihisa and ITOH Yoshitaka
E-mail : okat@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導バルク磁石の産業上の守備範囲は、Fig.1 に示すようにそのコンパクトに強磁場を発生する点にあり、静磁場着磁によって超伝導ソレノイドに匹敵する均質な強磁場空間が得られるものの、なるべく均一な強磁場を室温空間に発生しようとする超伝導ソレノイドとは性格を異にしている[1]。むしろ不均一な磁場空間は急峻な磁場勾配を特徴とし、磁気力場という観点から、磁気分離や磁気分析などへの応用が産業分野から見ても魅力的である。バルク磁石の磁場分布は他の方法と異なり、磁極中心に偏在すること、もれ磁場が少ないことなどが挙げられ[2]、この点からも従来のソレノイドや永久磁石とは異なる使われ方が必要であろう。強磁場という特徴が産業応用に対して有効であるためには、強磁場機器として実際に利用できる分野や個々の適用対象への経済性を含めた綿密な検討が大切である。今回の発表では大学の実験室から排出される実験廃液を例にとり、その磁気分離性能を超伝導ソレノイド磁石や電磁石との比較を通して報告する。

2. 実験

高温超伝導バルク磁石 (Sm123系、φ65mm×15mm) を対向配置して搭載したバルク磁極 (アイシン精機製作、Fig.2) をもちい、これを60mFのパルス電源 (日本電磁測器) からの電流で励磁し、各バルク表面に3.1T、2.8T、15mmギャップの磁極間中央に1.8Tの磁場を得た。バルク磁石の温度は43-46Kであった。この磁場空間に、硫酸第二鉄沈殿法により凝集させたFeやMnを含む実験廃液を通して、磁場による吸着性能を、その流量に対して測定した。比較対象としては、最大磁場1Tの電磁石、5Tの超伝導ソレノイド磁石 (JASTEC製) を使って性能を評価した。実験は金網 (SUS430、直径0.1mm、体積密度8.1%) を用いた高勾配磁気分離 (HGMS) と、金網のない開放勾配磁気分離 (OGMS) による。分離率は磁場暴露後の25mlのサンプル液についてICP分析により測定した。

3. 結果および検討

Fig. 3 に超伝導バルク磁石、電磁石、超伝導ソレノイド磁石の3種類の磁場発生機による結果としてFeの分離率を示す。廃液は主にMnなどの重金属を含み、これをFeによって共沈させるので、分離性能を示す物質として、廃液中にもっとも多量に含まれるFeの含有量を測定して分離率としてある。OGMSでは磁場空間の体積や暴露距離、時間などが大きく異なるため総合的な評価となるが、Fig. 3によれば、磁場空間の大小に関わらず、1~3リットル/minでの分離性能がバルク磁石と超伝導ソレノイドで同様である点が注目される。これは磁場勾配の急峻さに優れるためと考えられる。

参考文献

- [1] T. Oka et al., Physica C, Vol. 463-465, (2007) pp. 7-13.
- [2] 岡徹雄他, 低温工学 Vol. 37 No. 11 (2002) 689-696.

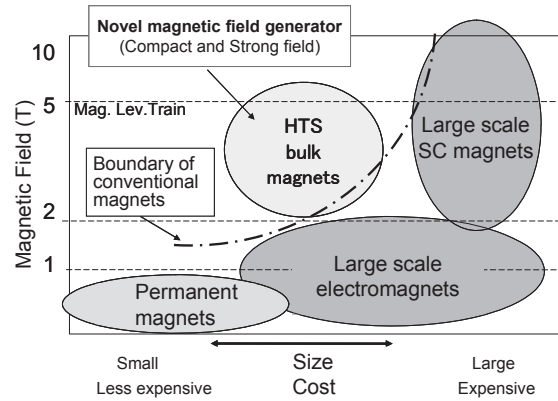


Fig. 1. An industrial positions of strong magnetic field generators among HTS bulk magnet.

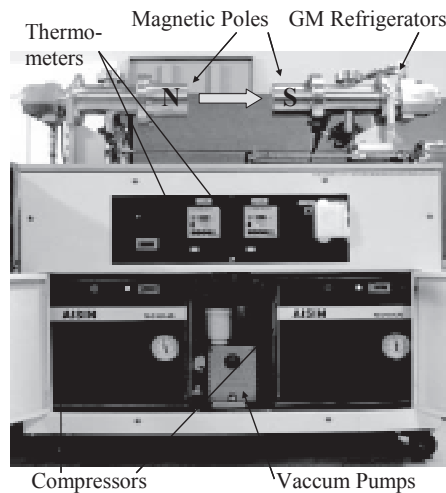


Fig. 2. A view of face-to-face type HTS bulk magnet system, activated to 3 T by pulsed magnetic field.

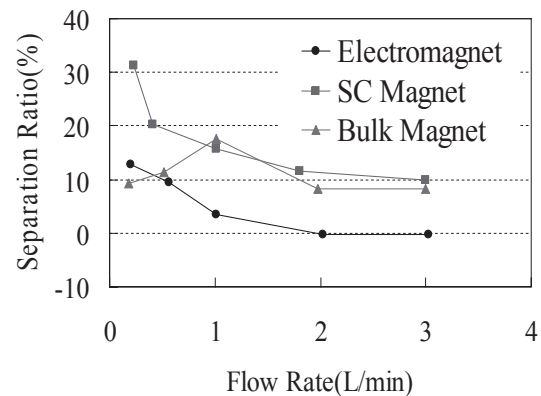


Fig. 3. Separation ratios vs. flowing rates of waste water for various field generators by OGMS.

高温超伝導バルクを用いた非接触スピンの研究開発 (4) - 浮上力・浮上高向上のための磁気回路の検討 -

Development of Magnetic Levitated Spin Coater Using HTS Bulk (4)

- Investigation of Permanent Magnet Array to Gain Levitation Force and Height -

福井 聡, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 山口 貢 (新潟大); 宮崎 紳介 (MTC); 西脇 俊郎 (新潟 TLO)

FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao, YAMAGUCHI Mitsugi (Niigata University);

MIYAZAKI Shinsuke (MTC); NISHIWAKI Shunro (Niigata TLO)

E-mail : fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

半導体素子の量産製造のためのマスター原版である半導体フォトマスクなど半導体関連の製造プロセス (ウェットプロセス) ではスピン処理装置 (スピナーや洗浄装置など) を用いる。このスピン処理装置の回転軸受から微粒子状ダストの放出が起り、フォトマスク等対象物周囲のクリーン度が低下する。その結果、微粒子ダストがパターン間に混入して、パターン形成不良を引き起こし、製品の低品質化或いは生産歩留まり低下の原因となっており、この問題の解決が切望されている。この問題を解決するためには、スピン処理装置のターンテーブル部分をクリーンベンチ内に完全隔離できる非接触スピン処理装置の開発が必要不可欠である。本グループでは、上記問題点を解決する方法として、高温超伝導バルクを用いた磁気浮上に着眼し、これをスピン処理装置に適用するための共同研究開発を行っている[1]。本稿では、現在製作中の冷凍機直接冷却で 30K 運転を目標にした要素試験装置による試験結果及び浮上高を向上するための方策について報告する。

2. 要素試験装置の試験結果

半導体関連製造プロセス用非接触スピン処理装置への要求仕様を表 1 にまとめる。表 1 に示す要求仕様は、フォトマスクやウェハなどを超純水などで洗浄するために用いるスピン装置に対応するものであり、半導体関連製造プロセスに用いるスピン処理装置としては低回転型のもので、これを本研究の第一ターゲットとする。Fig. 1 に試作中の要素試験装置の概略図を示す。中空同心円筒型のステンレス製チャンバ内に銅製冷却板を設置し、冷却板に HTS バルク (Gd 系 直径 30mm × 厚さ 10mm) 8 個を埋め込む。冷却板の一端に一段 GM 冷凍機を接続し、30K 付近まで冷却して運転する。直径 210mm のアルミ製ターンテーブルに直径 200mm のリング型ネオジウム永久磁石を埋め込み、HTS バルクと対向させて磁気浮上系を構成する。ターンテーブル中央部分及びクライオスタット架台に固定した DC サーボモータ (30W, 最高 3000rpm) に連結した回転フランジのそれぞれに、直径 10mm のネオジウム永久磁石を 12 個取り付け、磁気カップリングにより回転を伝達する。本装置を用いて試験を行なった結果、浮上高 5mm, 回転数 2500rpm での安定浮上・定常回転を確認した。

3. 浮上高向上のための永久磁石磁気回路の改良

要素試験装置では安定浮上と定常回転を確認できたものの、浮上高と加減速速度については要求仕様を満足できていない。加減速速度はターンテーブルの質量に大きく依存するため、磁気浮上用の永久磁石の重量が決定されない

と設計できない。よって、浮上高を向上するための改良を施すことにした。浮上高を向上するために、Fig. 2 に概略図を示すような磁気回路を製作した。これを Fig.1 の要素試験装置のターンテーブルと交換して浮上試験を行なったところ、浮上高 14mm を確認した。

参考文献

1. S. Fukui, et al., : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.252.

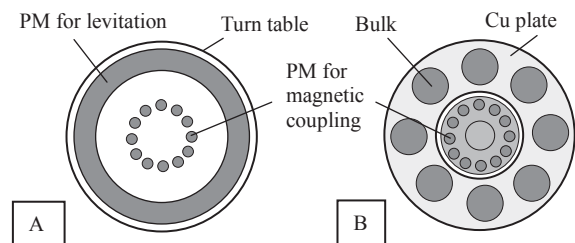
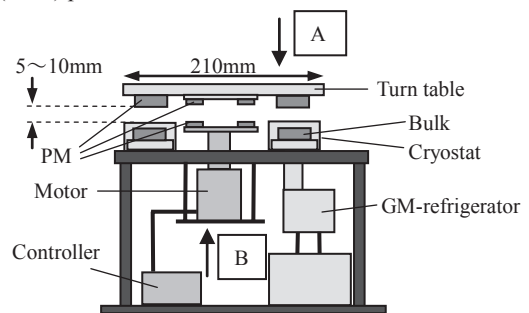


Fig. 1 Schematic illustration of test spinner.

Table 1. Summary of required specification of spin processor and rotation test result of test spinner.

	実用装置	要素試験装置
回転数	2000 rpm	2500 rpm
加減速範囲	200-500 rpm/s	50 rpm/s
ターンテーブル直径	300 mm 以上	210 mm
浮上高	10 mm 以上	5 mm
追加重	1-2kg	なし
許容振動	外周上で±0.2mm 以下	—
運転温度	制約なし	30K

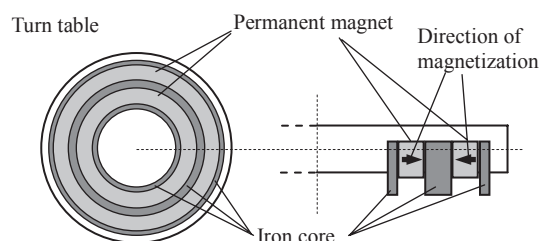


Fig. 2 Schematic illustration of permanent magnet array.

組成を変化させて作製したMgB_{2+x}薄膜の超伝導特性Superconducting properties of MgB_{2+x} thin films prepared with various compositions

東野 豊、土井 俊哉、山下 裕生、日高 佑貴、白樂 善則(鹿児島大学);
北口 仁(物質・材料研究機構);
ハリニ ソシアティ、波多 聡、池田 賢一、中島 英治(九州大学)

TSUKANO Yutaka, DOI Toshiya, YAMASHITA Hiroki, HIDAKA Yuki, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima university);
KITAGUCHI Hitoshi (National Institute for Material Science);
SOSIATI Harini, HATA Satoshi, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyusyu University)
E-mail: bt203048@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導MgB₂は臨界温度T_cが金属系超伝導物質の中で最も高く、世界中で高J_c化に向けての研究が行われている。しかし、MgB₂の組成が及ぼす超伝導特性への影響は明らかにされていない。本研究では組成を変化させて作製したMgB_{2+x}薄膜の超伝導特性について検討した。

2. 実験方法

MgB_{2+x}薄膜は、250°Cに加熱したSi単結晶基板上に電子ビーム蒸着法を用いて作製した。このように基板温度が低い場合には、電子ビームを照射して高温になった原料からの熱輻射による基板温度の上昇(変化)を引き起こす可能性がある。そこで本研究ではMgB_{2+x}膜を連続的に堆積せずに、1回あたりのMgB_{2+x}層堆積量を15nmとし、これを間欠的に20回繰り返して行うことで、成膜中の基板温度の変動を抑制した。また、原料であるMgとBの蒸着速度を独立にコントロールすることで所望の組成を有するMgB_{2+x}薄膜を作製した。作製した薄膜試料の組成は硝酸水溶液に溶解した後、誘導結合プラズマ分光分析(ICP)装置により溶液組成を測定することで決定した。

3. 結果と考察

MgB_{2+x}薄膜のX線回折測定を行ったところ、基板に使用したSiからの回折ピーク以外にはMgB₂の(0001)、(0002)面からの回折ピークのみが観察され、単相のc軸配向したMgB₂薄膜が得られていることが確認できた。Fig.1に、2θ値が49°~55°の部分のX線回折パターンを示す。MgB₂の組成がBリッチになるに従って(0002)回折ピークが低角側にシフトし、MgB₂結晶のc軸長が伸びる傾向が確認された。また、直流四端子法により抵抗率の温度依存性を測定したところ、MgB₂の組成がBリッチになるに従って、T_cが低下し、常伝導状態における抵抗率が高くなる傾向が確認された。これらの結果は、Bリッチ組成のMgB₂結晶中にはMg欠損もしくはMgサイトへのB置換が存在していることを示していると考えられる。

Fig.2に、作製した薄膜の4.2Kにおける磁化ヒステリシス曲線を示す。ほぼ化学量論組成のMgB₂薄膜(Mg:B=1:1.98)が4T以上において磁化ヒステリシスを示していないことに対して、ややBリッチ組成のMgB₂薄膜(Mg:B=1:2.38, 1:2.64)は6Tにおいても磁化ヒステリシスを示している。以上の結果は、Bリッチ組成のMgB₂結晶中にはMg欠損もしくはMgサイトへのB置換が存在し、T_cの低下をもたらすが、それらの欠陥はピンニングセンターとして有効に働くことを示唆していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、財団法人岩谷直治記念財団科学技術

助成金、科学研究費補助金基盤研究(C)No.18560647および文部科学省「九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク事業」の支援により実施されたものである。

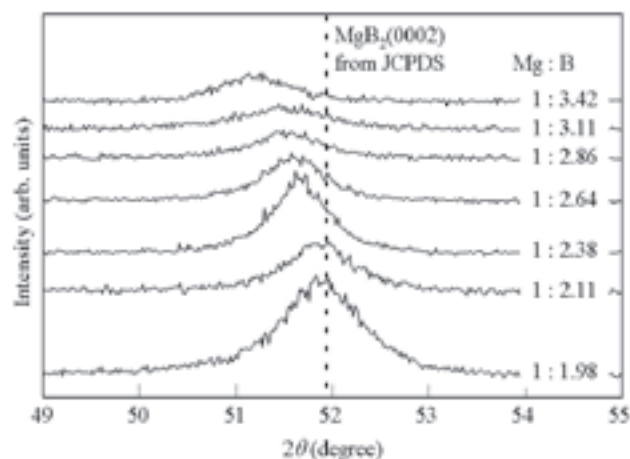


Fig.1 XRD patterns of the MgB_{2+x} thin films prepared with various compositions.

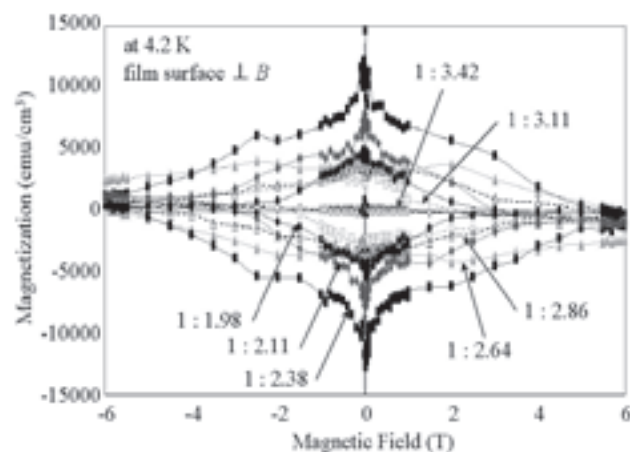


Fig.2 Magnetization hysteresis loops measured at 4.2 K for the MgB_{2+x} thin films prepared with various compositions. The magnetic field was applied perpendicular to the film surface.

MgB₂/B 多層膜の J_c の磁場依存性Magnetic field dependences of J_c of MgB₂/B multilayered thin films

山下 裕生、土井 俊哉、東野 豊、日高 佑貴、白樂 善則(鹿児島大);

北口 仁、高橋 健一郎(物質・材料研究機構);

ハリニ ソシアティ、波多 聡、池田 賢一、中島 英治(九州大学)

YAMASHITA Hiroki, DOI Toshiya, TUKANO Yutaka, HIDAKA Yuki, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

KITAGUCHI Hitoshi, TAKAHASHI Kenichiro, (National Institute for Material Science);

SOSIATI Harini, HATA Satoshi, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University)

E-mail : bt203079@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまでに MgB₂ 薄膜の J_c を向上させるために様々なピンニングセンタの導入を試みてきた。今回、MgB₂ 層と、半導体でありかつ MgB₂ の構成元素である B 層を交互に積層させた MgB₂/B 多層膜を作製し、薄膜表面に平行な磁場を印加したときの J_c の向上について検討した。

2. 実験方法

基板には Si 単結晶を使用し、EB 蒸着法により 15nm の MgB₂ 層と 5nm の B を交互に堆積することで MgB₂/B 多層膜を作製した。また、積層回数を 4、6、34 と変化させて、トータル膜厚の異なる 3 つの試料を作製した。比較のために、15nm の MgB₂ 層を 20 回繰り返して堆積した MgB₂ 薄膜も作製した。作製した薄膜の J_c は、直流四端子法により測定した。

3. 結果と考察

X 線回折測定を行ったところ、基板の Si からの回折ピーク以外には MgB₂ の (0001) 面と (0002) 面からの回折ピークしか観測されなかった。また、試料の断面 TEM 観察を実施したところ、MgB₂ 層と B 層の多層構造が得られていることが確認できた。これらの結果から、MgB₂/B 多層構造を有する薄膜が得られていることが確認できた。

Fig.1 に積層回数を 4 回として作製した MgB₂/B 多層膜の、4.2K における J_c の磁場依存性を示す。薄膜表面に対して平行に磁場を印加した場合、1T~12T の範囲で MgB₂/B 多層膜の J_c の方が MgB₂ 薄膜の J_c より高いことが分かる。このことから、MgB₂ 膜中に挿入した B 層が有効なピンニングセンタとして働いているものと考えられる。

Fig.2 には、4.2K における体積ピン力 (F_p) の磁場依存性を示す。薄膜表面に対して平行に磁場を印加した場合、1T~12T の範囲で MgB₂/B 多層膜の F_p の方が MgB₂ 単層膜の F_p より高いことが分かる。また、MgB₂/B 多層膜の F_p は、印加磁場が 4T の時に最も高い値となっている。4T の磁場を多層膜の表面に平行に印加した場合、計算上、量子化磁束線は膜厚方向に 21nm の間隔で侵入している。即ち、量子化磁束線の侵入間隔と B 層の中心の間隔が一致したときに F_p が最大値となっていることが分かる。この結果は、MgB₂ 膜中に挿入した B 層が有効なピンニングセンタとして働いていることを明確に示しているものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究、19 文科振第 174 号の一環として実施された。また TEM 観察は文部科学省「九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク事業」において行われた。

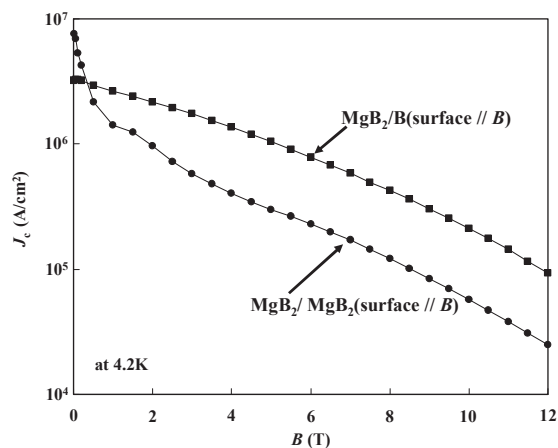


Fig.1. The magnetic field dependences of the J_c s of the MgB₂/B multilayered and the MgB₂ thin films.

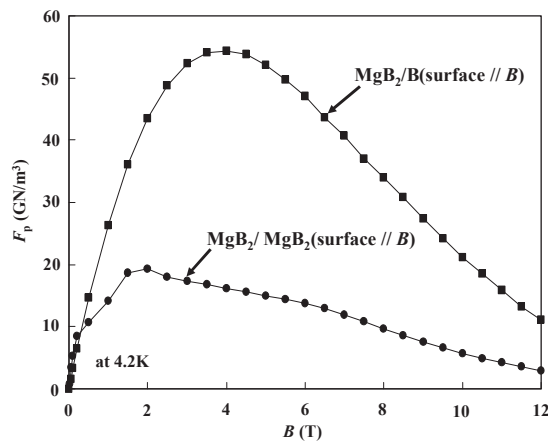


Fig.2. The magnetic field dependences of the F_p s of the MgB₂/B multilayered and the MgB₂ thin films.

電子ビーム蒸着法により作製した MgB₂/Ni 多層薄膜の磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of multilayered MgB₂/Ni thin films prepared by EBE method

梶田 龍, 藤吉 孝則, 米倉 健志, 末吉 哲郎 (熊本大学);

土井 俊哉 (鹿児島大学); 北口 仁 (NIMS); 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大学);

KAJITA Ryu, FUJIYOSHI Takanori, YONEKURA Kenji, SUEYOSHI Tetsuro (Kumamoto Univ.);

DOI Toshiya (Kagoshima Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: kajita@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

電子ビーム法で蒸着された MgB₂ 超伝導薄膜は、柱状結晶成長するため結晶粒界がピンニングとして働き、膜面に垂直な方向の磁場に対して、高い臨界電流密度 J_c を示す。しかしデバイス応用のためには膜面に対して平行に磁場を印加したときの J_c の向上も望まれる。

本研究では膜面に平行に磁場を印加した場合の J_c を向上するために、MgB₂/Ni 積層薄膜を電子ビーム蒸着法で Si 基板上に作製した。その結果、膜面に平行に磁場を印加した場合、量子化磁束の格子間隔と Ni 層の間隔が一致するマッチング磁場付近において J_c が向上した。

2. 実験

電子ビーム蒸着法^[1]を用いて MgB₂/Ni 薄膜を Si 基板上に作製した。また Ni 層は coaxial vacuum arc 蒸着法を用いて堆積させた。作製前の背圧は 5×10^{-7} Pa であり、基板は 250°C に加熱して成膜を行った。成膜レートは Mg:B=2:0.7(nm/s)とし、膜面に平行な磁場に対するピンニングセンターとして導入した Ni 層は 0.01nm/pulse とした。Si 基板上に MgB₂ 層を 24.4nm, Ni を 0.3nm, 13 サイクル積層させたものを試料 S1 ($B_\phi=3$ T), 同様に MgB₂ 層を 42.3nm, Ni 層を 0.3nm, 8 サイクル積層させたものを試料 S2 ($B_\phi=1$ T) とした。なお B_ϕ は Ni 層の間隔から見積もったマッチング磁場である。S1, S2 の合計の膜厚はそれぞれ 280nm, 350nm であった。

製膜後のサンプルはフォトリソグラフィにより幅 50 μ m, 長さ 1 mm のマイクロブリッジ状にパターンニングした。四端子法により電流-電圧特性の測定をし、電界基準を 10 μ V/cm として J_c を定義した。 J_c の磁場依存性、および J_c の磁場角度依存性を測定した。

3. 結果および考察

作製した S1 ($B_\phi=3$ T) および S2 ($B_\phi=1$ T) の転移温度 T_c は、それぞれ、23.0K および 20.7K であった。Fig.1 に J_c の磁場依存性を示す。両試料ともにマッチング磁場付近でのピークが見られる。Fig.2 に J_c の磁場角度依存性を示す。ただし、 $\theta=90^\circ$ は膜面に平行に磁場を印加した場合であり、この印加磁場角度で J_c の著しいピークが見られる。

以上の結果から、積層した Ni は膜面に対して平行に磁場を

印加した場合に有効なピンニングセンターとして働くことが分かった。これより Ni 層の間隔を変化させることで最大の巨視的ピン止め力を得られる磁場を変えることができる。

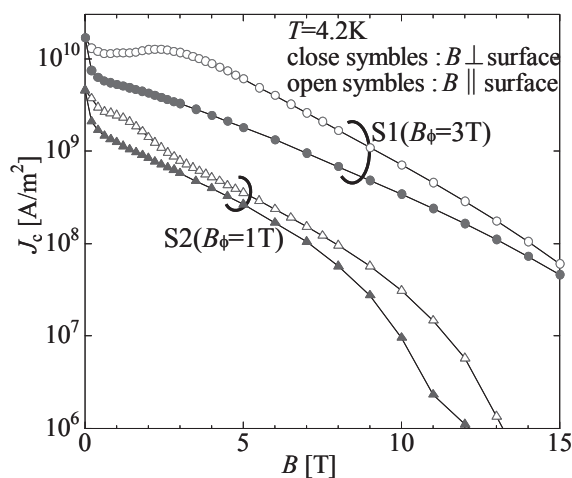


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c

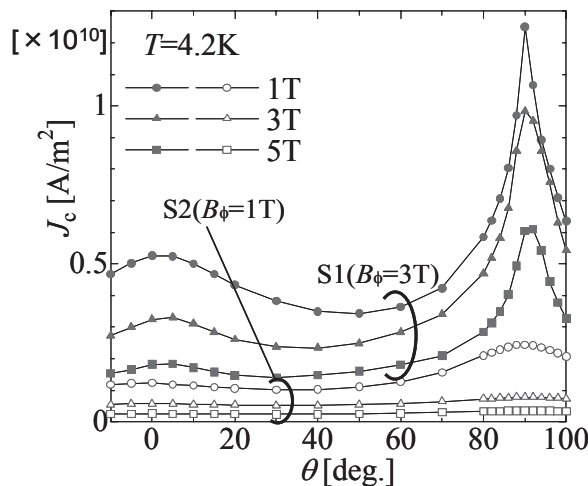


Fig.2 Angular dependence of J_c

謝辞

本研究に用いた MgB₂ 薄膜の作製は、文部科学省科学技術振興費委託研究、18 文科振第 191 号の一環として行われた。

参考文献

[1] M.Okuzono, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3253.

Campbell 法による MgB₂ 多結晶バルクの電流パスの評価

Estimation of Current Path in Polycrystalline MgB₂ Bulk Using Campbell's Method

森田 泰弘, 倪 宝荣 (福岡工大); 姫木 携造, 小田部 荘司, 木内 勝, 松下 照男 (九工大)
 MORITA Yoshihiro, NI Baorong (Fukuoka Inst. Tech.); HIMEKI Keizo, OTABE Edmund Soji, KIUCHI Masaru,
 MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. Tech.)
 E-mail: mbm07005@ws.ipc.fit.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は金属系超伝導で最も高い臨界温度(39K)を持ち、酸化物超伝導体に比べ異方性が小さいなど有望な材料であるが、臨界電流特性が低い等の問題がある。それには粒間の接合度が大きく影響すると指摘されている¹⁾。しかし、これまでの研究では、超伝導体の実際の電流パスと臨界電流密度との対応関係は定量的に明らかにされていない。

一方、従来の研究などにより、複雑な電流経路を持つ超伝導体の臨界電流特性の評価に、微小交流磁界重畳法(Campbell法)が有効であることが分かっている。

そこで、本研究において、Campbell法を利用することにより、MgB₂バルクの結晶間電気結合性や電流パスについて考察を行うことを目的とする。

2. 実験

MgB₂試料は改良 PIT (Powder-In-Tube) 法により作製された。出発原料には Mg (99.99% 125-300 μ m)、B (99.99% 300mesh)及び市販の MgB₂粉末を使用した。原料粉の配合比は 1.2:2:0.5 (Mg:B:MgB₂)のモル比に設定した。MgB₂粉を出発原料に使用しているのは、焼成時間を短縮させるためである。熱処理温度は 900 $^{\circ}$ Cに固定し、異なる平均粒径や粒界面性質を有する試料を作製するために、熱処理時間を 12h から 300h まで変化させ、計 6 種の試料を用意した。得られた試料について、粉末 X 線回折により構成相の同定を行い、SEM による微細組織の観察を行った。

試料の臨界温度 T_c は SQUID 磁束計、臨界電流密度 J_c は SQUID 磁束計及び Campbell 法により評価を行った。Campbell 法の測定条件として、温度を 30K に固定し、0 - 0.4T の直流磁界に、振幅が 0.1 - 7mT、周波数が 37 - 797Hz の交流磁界を重畳した。Campbell 法の交流磁界(b_{ac}) vs. 交流磁束侵入距離(λ')特性により J_c を計算する際、拡張 Bean-London モデルを使用した。また、交流磁界に対応した交流磁束の試料内への侵入について、SQUID による J_c を考慮に入れ、コンピュータによる数値計算を行った。

3. 結果及び考察

粉末 X 線回折の結果、作製された試料は、MgO 等の不純物が少なく、比較的ピュアな MgB₂ になっていることが分かった。またアルキメデス法により試料の密度を測定したところ、理論値の 90%前後であることが確認された。SQUID 磁束計による測定では、全ての試料において T_c はおよそ 38k 付近であり、ばらつきが小さい事が確認された。

温度が 20K のときの SQUID 及び Campbell 法で得られた J_c を Fig.1 に示す。試料は、熱処理時間が 12 時間のものである。 J_c を決める電界基準等の要素を考えると、通常 Campbell 法は臨界電流特性を過大評価する傾向がある。しかし、実験結果では、SQUID 法による値よりも Campbell 法による J_c は小さくなっている。これは、Campbell 法では、試料のローカルな臨界電流特性とは別に、グローバルな J_c を評価したことによるものである。つまり、試料の中に存在する空隙や酸化膜、不純物等の欠陥が、電流

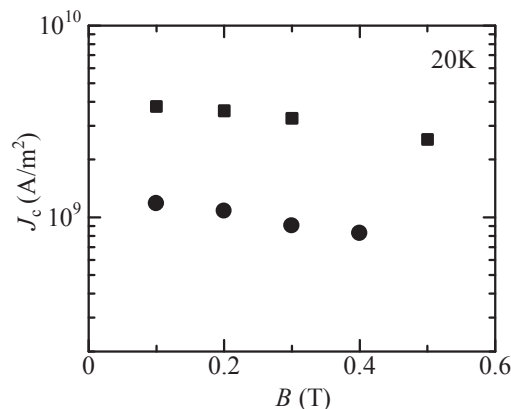


Fig. 1 Comparison of the critical current densities from SQUID (rectangle symbols) and Campbell method (circle symbols), respectively.

パスを阻害する要素として、有効断面積を低下させ、グローバルな J_c を減少させていると考えられる。

そこで、MgB₂多結晶バルクに酸化膜により隔離された結晶粒がそれぞれ 0%、30%及び 75%の割合でランダムに存在することを仮定し、Campbell 法と同じような b_{ac} vs. λ' 特性を、コンピュータによるシミュレーションにより計算した。その結果を Fig.2 に示す。Campbell 法では、これらの傾きから J_c が求められるが、欠陥が 0%のバルクの J_c 値を 1 としたときに、30%と 75%のものはそれぞれ 0.55 と 0.17 となった。このように、電流パスが各種欠陥により阻害され、 J_c が低下する現象が確認された。

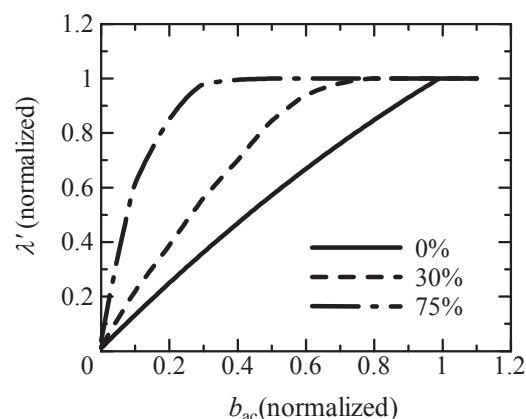


Fig. 2 Theoretical calculations of b_{ac} vs λ' characteristic in MgB₂ bulks with oxidized grains on their surface exist randomly.

参考文献

- 1) T. Matsushita et al.: "MgB₂多結晶体における電気結合度と臨界電流密度の制限機構の評価", Abstract of CSJ Conference, Vol.76 (2007), p.35.

人工ピンを導入した Nb-Ti 極細多芯線の低磁界での J_c の異常ピーク効果Anomalous peak effect in J_c on low magnetic field in Nb-Ti multifilamentary composites with artificial pins

近藤 慶, 三浦 大介, 伊藤 大佐(首都大)

KONDO Kei, MIURA Osuke, ITO Daisuke (Tokyo Met. Univ.)

E-mail: kondokay8802_teq@yahoo.co.jp

1. はじめに

ある種の超伝導材料においては、臨界電流密度 J_c がある特定の磁場において極大を持つ、ピーク効果の存在が知られている。その原因として、ピンと磁束線の間に働く相互作用が挙げられる。今回我々は、斥力的なピンニングポテンシャルを有する Nb を人工ピンニングセンターとして導入した Nb-Ti 極細多芯線において、初めて低磁場における J_c のピーク効果を観測した。その報告をここで行う。

2. 実験

測定に用いた Nb-Ti 極細多芯線の諸元を Table 1 に示す。線材はダブル・スタッキング法を用いて製造した。各 Nb-Ti フィラメントごとに、19 本の Nb 人工ピン(体積率約 17%)を導入してある。Fig.1 は多芯線φ299 のフィラメント断面の高分解 SEM 画像である。Nb ピンがリボン状に変形しているのがわかる。

Table 1 Specification of Nb-Ti specimens

Name	Wire Diameter D[mm]	Filament Diameter [μm]	Pin Diameter [nm]
Nb203	0.203	0.395	37.7
Nb299	0.299	0.583	55.6
Nb453	0.453	0.884	84.3

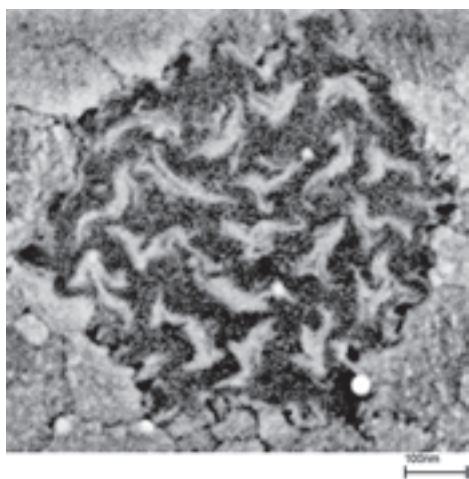


Fig.1 SEM image of the filament of Nb299

長さ3cm程の各線材を、複数本まとめて非磁性の樹脂の中で固めたものの両端を表面研磨し、測定サンプルとした。

QuantumDesign 社製磁気特性測定装置 MPMS-7 を用いて、サンプルの長手方向に対して垂直に磁場を印加した場合の磁化曲線を測定し、臨界状態モデルから臨界電流密度 J_c を算出した。

3. 結果

測定された磁化曲線、及びそれから算出された臨界電流密度を、それぞれ Fig.2、Fig.3、Fig.4 に示す。

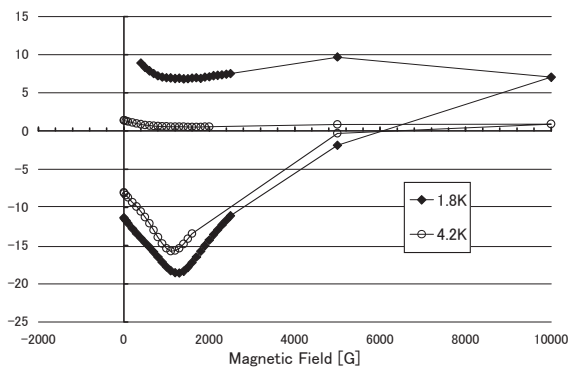
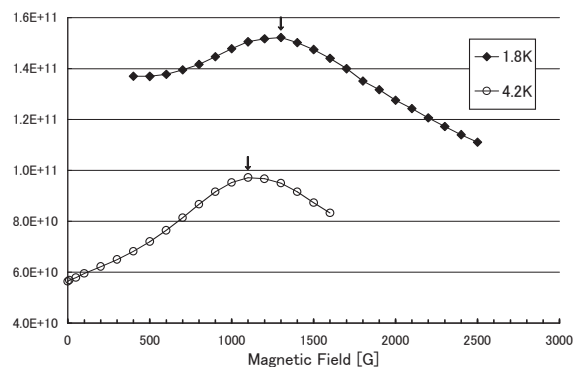
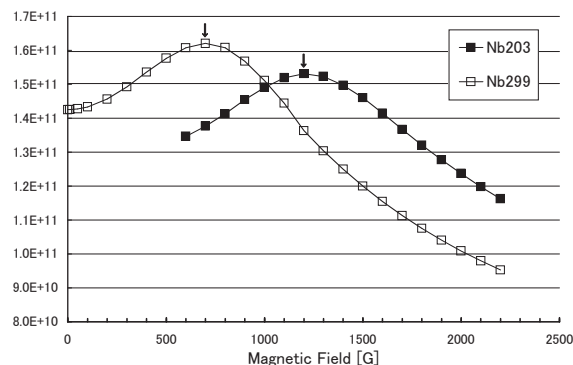


Fig.2 Temperature dependences of Magnetization for Nb203

Fig.3 Temperature and magnetic field dependences of J_c for Nb203Fig.4 Wire diameter dependences of J_c at 3K for Nb203, Nb299

比較的小さい磁場(1000G程度)において、J_c のピーク効果が現れていることがわかる。このピーク効果は温度依存性を持っており、温度が低いほど高磁場でピークを迎える。また、線材のフィラメント径にも依存しており、フィラメント径の大きい線材ほど、低磁場でピークが起り、ピークの値が大きいことが確認された。

押し出しを利用した Cu 安定化 V-Ti 合金線材の試作

Trial manufacture of Cu stabilized V-Ti alloy wire with extrusion process

中川 正規(徳島大,NIMS); 竹内 孝夫, 瀧川 博幸, 吉田 勇二, 伴野 信哉(NIMS); 井上 廉(徳島大); 田川 浩平(日立電線)
 NAKAGAWA Masami(Tokushima Univ., NIMS); TAKEUCHI Takao, TAKIGAWA Hiroyuki, YOSHIDA Yuji, BANNO Nobuya
 (NIMS); INOUE Kiyoshi (Tokushima Univ.); TAGAWA Kohei(Hitachi Cable)
 E-Mail: NAKAGAWA.Masami@nims.go.jp

1. はじめに

将来の実用段階の核融合炉を考えると、Nb と比べて半減期が遙かに短い低放射化核種の V を構成元素とする V-Ti 合金は Nb-Ti 合金の代替合金材料となる可能性を有する。最近、溶解鑄造工程を省略して、V と Ti の複合多芯線から直接拡散反応により V-Ti 合金多芯線を製造する方法を提案したが、試作した V-Ti 合金多芯線を最終線径で合金化熱処理する限り、大きな輸送電流特性を得ることができなかった。また、前回、合金化のための拡散の熱処理後に加工と Ti の析出熱処理を行って輸送電流特性を改善を試みたが、期待していた成果は必ずしも十分には得られなかった。V 線と Ti 線の配置が不均一であった (Fig.1) ために拡散反応によってできる V-Ti 合金の組成が不均質となったことがその一因であると考えられる。今回は、Ti/V 単芯線を束ねて押し出し加工を実施し配置の規則化を図った。また、Cu 管をシース材とすることにより Cu 安定化材の複合を検討した。さらに、V と Ti の合金化熱処理と析出熱処理の最適熱処理時間を導出し、超伝導特性の向上も図った。

2. 実験方法

15mm φ の Ti 棒に 10mm φ の穴をあけ 10mm φ の V 棒を挿入し、Ti のみが焼鈍される 600°C × 1h の条件で硬さ調整・中間焼鈍を 50%RA ごとに加えながら、1.38mm φ まで伸線加工し、引き続き、カセットローラーダイスで六角に成形した。次いで、この Ti/V 単芯線を 77mm ごとに切断し、139 本を Cu/V 管に詰めてシングルスタックピレットとした。これを温間押し出し加工で複合一体化させた後は、1.38mm φ まで、中間焼鈍なしで伸線加工できた。V と Ti の配置は従来 (Fig.1) と比べて格段に均一である (Fig.2(a))。現在、このシングルスタック六角線 121 本を再び束ねたマルチピレットを作製して押し出し加工を準備している。今回は、このシングルスタック丸線について合金化熱処理、Ti 析出のための熱処理を行い、それらの微視的組織、超伝導特性を評価する。合金化熱処理は 700°C × 0.25h, 1h, 5h, 24h, 100h, 900°C × 0.25h, 1h, 5h, 24h, 100h である。拡散反応組織は光学顕微鏡、SEM、EDX により調べた。

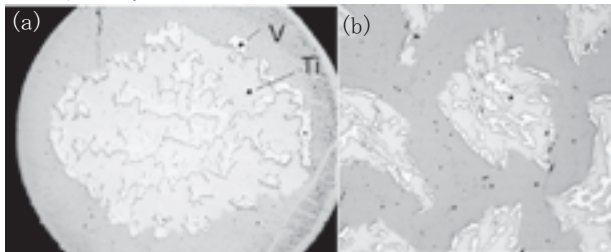


Fig.1 Ta/V-Ti composite: (a) single stuck, (b) multi stuck.

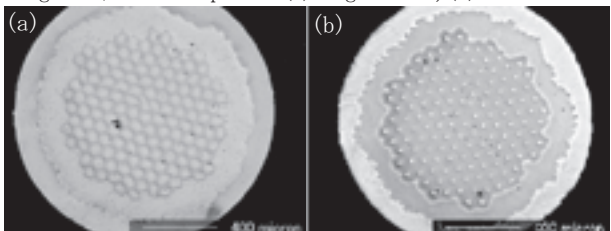


Fig.2 Cu/V/V-Ti alloy composite: (a) as drawn, (b) 900°C × 24h.

3. 結果

Fig.2(b) は 900°C × 24h の断面写真であり、Fig.3 はその EDX による組成画像である。拡散反応により V と Ti の合金化 (V : 37at% Ti : 63at%) が生じているが、未反応 V が残っている。900°C × 100h ではこの V 芯は消失する。また、700°C × 100h と 900°C × 0.25h の試料において合金化の程度はほぼ同程度であった。臨界温度 T_c は、温度制御した He ガスを試料に吹き付けて 4 端子法 (試料電流 50mA, 500mA, 2000mA) により測定した。Fig.4 と Fig.5 に遷移温度の midpoint で定義した T_c と残留抵抗をそれぞれ示す。残留抵抗の値は熱処理時間と深い相関関係が見られる。

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

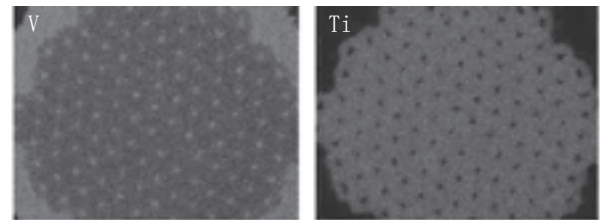


Fig.3 EDX image of Cu/V/V-Ti alloy filaments.

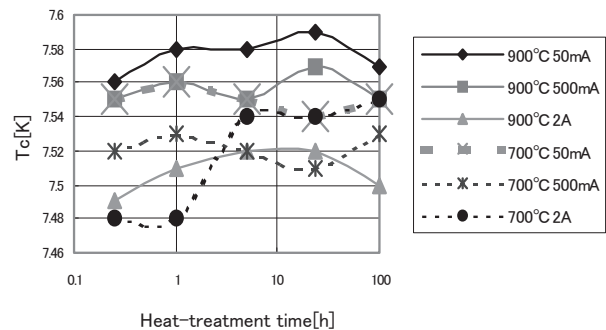


Fig.4 Measurement result of T_c.

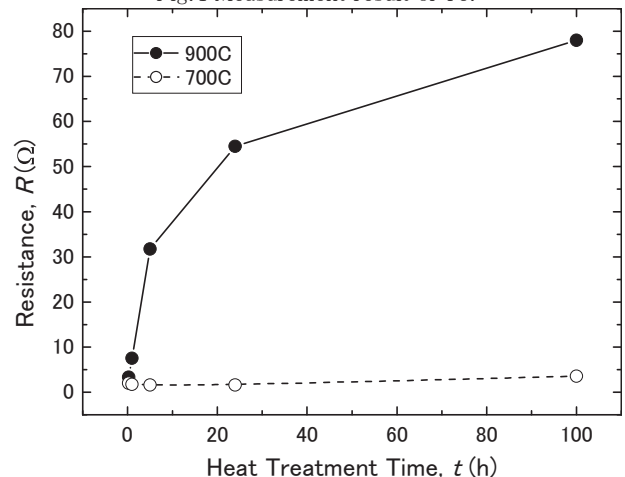


Fig.5 Heat-treatment time dependence of residual resistance (sample current : 2 A).

クラッド圧延材を用いた新しい合金超伝導線材作製プロセス

A New Fabrication Process of Superconducting Alloy Wires with Using Clad-Rolled Sheets

齋藤 栄, 山崎 貴雄(足利工大 AIT); 竹内 孝夫, 伴野 信哉(NIMS)

SAITO Sakae, YAMAZAKI Takao(AIT); TAKEUCHI Takao, BANNO Nobuya(NIMS)

1. はじめに

クラッドチップ押し出し法¹⁾(CCE 法)は、A15 型金属間化合物超伝導材料の線材化方法として開発され、Nb₃Al と Nb₃Sn 化合物の線材化に適用されてきた。この方法は、クラッド圧延した異種金属複合体薄板を出発材料とする塑性加工プロセスであり、化合物のみならず合金線材の作製プロセスとしても有効と考えられる。そこで、本研究では CCE 法による合金超伝導材の線材化を検討することとした。対象とした合金は、Nb-Ti と V-Ti の2合金である。本研究では新規な線材化方法の開発研究という側面と同時に従来の合金線材作製方法(溶解鑄造→塑性加工)とは異なるプロセッシング(均一微細構造を有する異種金属複合体線材を固体拡散により合金化する方法)を検討することにより超伝導特性改善に対する新発見の可能性を期待するという側面もある。

2. 実験方法

実験工程の概略図を Fig.1 に示す。以下では図の工程順に具体的な実験方法を述べるが、2 種類の合金線材の作製プロセスは、材料が異なる以外は同一である。

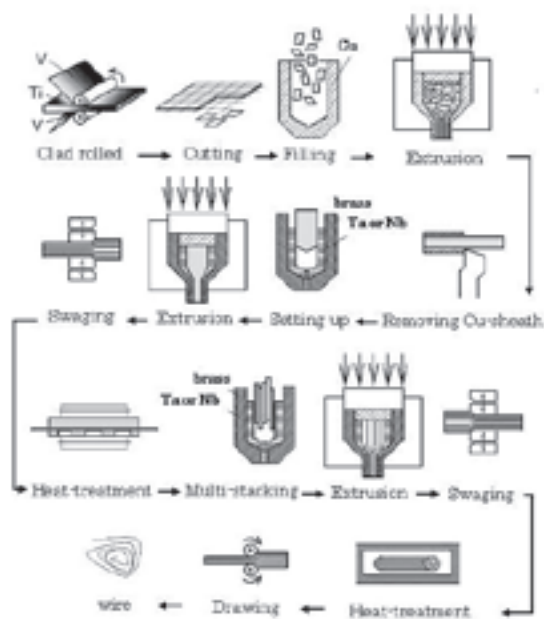


Fig.1 Experimental procedure

V-Ti 合金用には、厚さ 0.8 と 1.1 mm の V の薄板と厚さ 0.8 と 1.0 mm の Nb の薄板を、また、Nb-Ti 合金用には、厚さ 1.0 mm の Ti 板と厚さ 0.7 と 0.8 mm の Nb 板を用いてクラッド圧延を行い、Nb/Ti/Nb、V/Ti/V (どちらも最終的な厚さ約 0.3 mm) の三層積層薄板材を作製した。作製した薄板材を約 4~7mm 角に細片化し、それぞれ純銅容器に充填し押し出し比 2.5 で冷間押し出し加工を行った。押し出し後の複合体棒をそれぞれ Nb/Ti は 1073K、V/Ti は 1163K で焼鈍し、被覆材の純銅を旋盤で除去し、V-Ti は Ta 管、Nb-Ti は Nb 容器に挿入し、さらに丹銅容器に充填し押し出し比 5 で冷間押し出し加工を行った。得られた複合体棒をロータリースエージングマシンで φ3mm まで加工した。得られた複合体線の被覆部を濃硝酸で除去し、長さ

30mm 程度に切り揃え、V-Ti は Ta 管、Nb-Ti は Nb 容器にそれぞれ束ねて充填し、さらに丹銅容器に充填し押し出し比 5 で冷間押し出し加工を行った。得られた押し出し棒をロータリースエージングマシン、カセットローラーダイスで φ1mm 程度まで加工し、線材化した。なお、各工程途中で加工性改善のため、適宜、焼鈍処理(850℃で 1 時間)を行った。最終的に得られた線材の被覆丹銅を濃硝酸で除去し、真空中で合金化拡散熱処理を行い、T_c、I_c 特性を測定した。

3. 結果と考察

本研究の作製方法により直径 1mm で長さ 20m 程度の Nb-Ti 線材と V-Ti 線材を作製することが出来た。各線材の輪切り面を Fig.2 に示す。作製した線材の J_c-B 曲線を Fig.3、T_c 特性を Table 1 に示す。各値は従来の手法による線材に比べて低い、これは熱処理条件を最適化していないためである。本研究により溶解鑄造過程を経ない方法で線材化が可能であることが分かったので、今後、化学組成の最適化や熱処理条件の最適化を課題として検討を行う予定である。

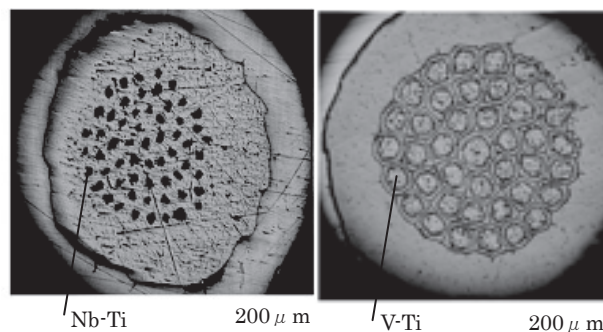


Fig.2 Cross section of V-Ti and Nb-Ti multifilamentary wires

Table 1 Critical temperature (T_c) of the wires

V-32.5at%Ti	V-34.4at%Ti	V-45.9at%Ti	Nb-39.1at%Ti	Nb-42.3at%Ti
7.78K	7.82K	7.62K	10.02K	9.95K

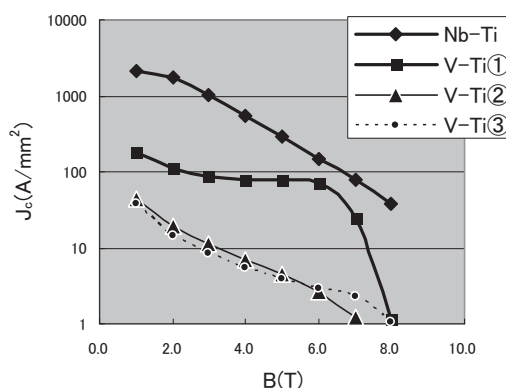


Fig.3 J_c vs. B curves for V-Ti and Nb-Ti wires

参考文献

1) 齋藤 栄, 他:「クラッド・チップ押し出し法による Nb₃Al の線材化とその超伝導特性」日本金属学会誌, 53 巻 4 号(1989) pp.458-463.

4K-GM 冷凍機の蓄冷器に関する実験的研究 Experimental Study on Regenerator of 4K GM Cryocooler

立花 浩史, 岡村 哲至(東工大); 栗山 透(東芝)

TACHIBANA Hiroshi, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech.); KURIYAMA Toru (Toshiba Co.)

E-mail: m06tachibana@es.titech.ac.jp

1. はじめに

4K-GM冷凍機内の2段蓄冷器に充填している球状の蓄冷材について、物質は同一であるが球の直径が異なるものを混ぜ合わせることで、蓄冷器内の空隙率を変化させて4K付近での冷凍能力の高出力化を図った。まず鉛のみを用いて空隙率の異なる蓄冷器を3種類作製し冷凍能力の比較を行ない、次に鉛と磁性蓄冷材 HoCu_2 を用いて空隙率の異なる2種類の2層蓄冷器を作製し、冷凍能力の比較を行なった。

2. 実験方法

本実験ではシリンダ内径が1段 70mm、2段 32mm の2段コールドヘッドを用い、圧縮機は5kW入力のものを使用した。ストロークは 20mm で運転した。また全ての実験において同じ1段蓄冷器を用い、等しい充填圧力で測定を行なった。まず、鉛のみを用いて作製した蓄冷器の詳細を Table.1 及び Fig.1 に示す。Aには1種類の鉛をのみを充填した。Bには高温側にAと同じ大きさの鉛を、低温側に径の異なる2種類の鉛を混合して高温側と比べて空隙率を小さくしたものを充填した。CはBと同様に充填したが、充填する鉛の質量をAと同程度にするために、空隙率を小さくした鉛の充填量を減らし、空いた空間を埋めるために蓄冷器高温側に SUS メッシュ入れた。次に鉛と HoCu_2 を用いて作製した蓄冷器の詳細を Table.2 及び Fig.1 に示す。Dには高温側に鉛を、低温側に HoCu_2 をそれぞれ1種類のみを充填した。Eには高温側にDと同じ大きさの鉛を、低温側に径の異なる2種類の HoCu_2 を混合してDの HoCu_2 の層に比べて空隙率を小さくしたものを充填した。

3. 実験結果

Fig.2 に蓄冷器A, B, Cを用いて2段冷凍能力の測定を行なった結果を示す。全ての場合において1段ステージを 35K に保ち、冷凍機は 53rpm で作動させた。Aと比べて空隙率を小さくさせたBとCのほうが高い冷凍能力が得られ最低到達温度も低くなった。またCはBに比べて空隙率の小さくした鉛の充填量が少なくにもかかわらず、Bとほぼ同程度の冷凍能力が得られることがわかった。次に Fig.3 に蓄冷器D, Eを用いて2段冷凍能力の測定を行なった結果を示す。どちらの場合においても1段ステージを 37K に保ち、冷凍機は 53rpm で作動させた。この場合も鉛のみを用いた場合と同様に空隙率を小さくさせた場合のほうが高い冷凍能力が得られ、最低到達温度も低くなった。Dを用いた場合に 0.59W@4.2Kの冷凍能力が得られたのに対して、Eを用いた場合には 0.67W@4.2Kの冷凍能力が得られ、Dと比べて約 14%冷凍能力が向上することが確認された。

4. まとめ

4K-GM冷凍機の2段蓄冷器において、鉛のみを用いた蓄冷器と、鉛と HoCu_2 を用いた蓄冷器のそれぞれについて空隙率が異なる蓄冷器を作製し、冷凍能力の変化を測定した。まず鉛のみを充填した蓄冷器を用いた結果について、Aに対してBの冷凍能力が向上したのは、鉛の充填量が増えたことが原因ではなく、Cも含めた結果から空隙率を小さくしたことが大きな原因であることが示唆された。また磁性蓄冷材を用いた場合でも同様のことがいえ、4K付近においても空隙率を小さくした場合に冷凍能力が向上することがわかった。

Table.1 Detail of regenerator with lead

	Diameter(mm)	Mass(g)	Total mass(g)	Porosity(%)
A	0.250~0.355	695.5	695.5	37
B	0.250~0.355	360	730.5	37
	0.250~0.355	370.5		28
C	1.000~1.400	(1:1)	680.0	37
	0.250~0.355	358.5		
	0.250~0.355	321.5		
	1.000~1.400	(1:1)		28

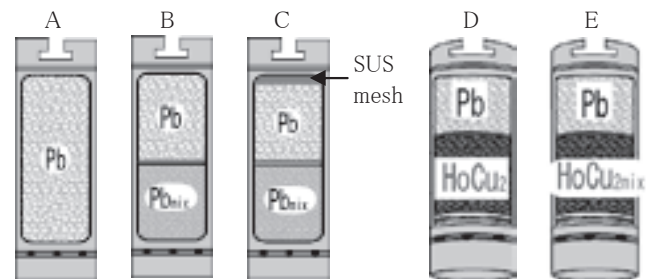


Fig.1 Schematic of regenerators

Table.2 Detail of regenerator with lead and HoCu_2

		Diameter(mm)	Mass(g)	Porosity(%)
D	Pb	0.250~0.355	392.5	37
	HoCu_2	0.149~0.210	230.5	34
E	Pb	0.250~0.355	392.5	37
		0.062~0.106	253.5	27
	HoCu_2	0.250~0.355	(1:1)	

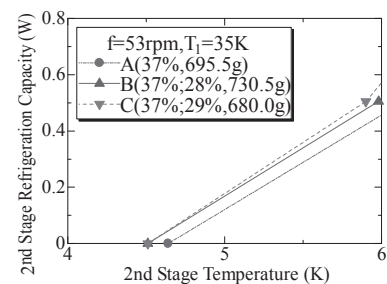


Fig.2 Refrigeration capacity with regenerator packed lead

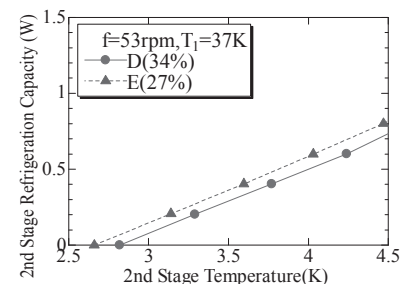


Fig.3 Refrigeration capacity with regenerator packed lead and HoCu_2

宇宙用スターリング冷凍機の開発 Development of a space borne Stirling cryocooler

金尾憲一, 大塚清見, 恒松正二, 榑崎勝弘(住友重機械工業)
満田和久(宇宙航空研究開発機構); 藤本龍一(金沢大学)

Ken-ichi KANAOKI, Kiyomi OTSUKA, Shoji TSUNEMATSU, Katsuhiko NARASAKI (SHI),
Kazuhisa MITSUDA (JAXA), Ryuichi FUJIMOTO (Kanazawa University)
E-mail: knc_kanao@shi.co.jp

1. はじめに

光や電磁波を高感度に観測したい場合、検出器を冷却することは有効な手段である。これは天体観測や地球観測においても同様で、人工衛星に搭載される検出器も必要に応じて冷却される。本報では、宇宙用に開発された1段スターリング冷凍機について述べる。

2. 冷凍機の概要

図1は、冷凍機の模式図である。この冷凍機は、分離型スターリング冷凍機で、可動部はFlexure springで支持してピストンとシリンダーを一定の関係に保ち、磨耗を排除している。コールドヘッドでも、ディスプレイサーを同様の機構で支持している[1]。

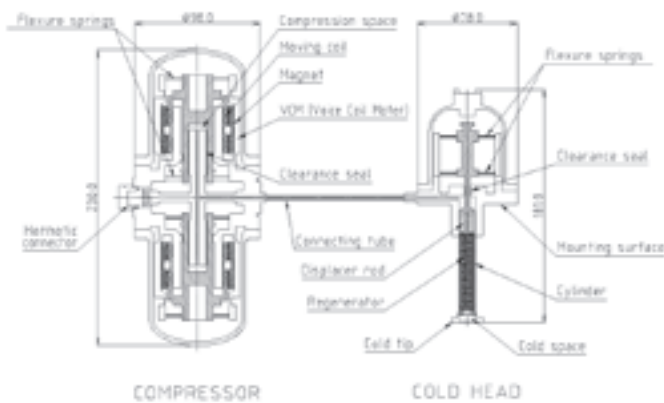


Fig. 1 Schematic drawing of single-stage Stirling cryocooler

3. 寿命評価試験

図2は2007年10月13日までの寿命評価試験の経過である。一定の熱負荷を与えた状態で連続運転している。この時点で積算運転時間は64,776時間である。図中の線が途切れているのは、工場の設備保守時や長期休暇時には運転を止めているためである。今のところ劇的な変化は見られない。今後も性能劣化が激しくなるまで継続し、どのような壊れ方をするか見極める予定である。

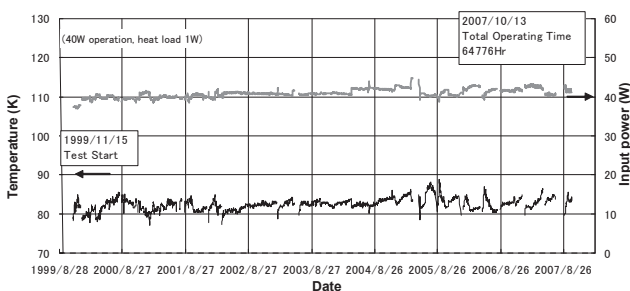


Fig. 2 Temperature and power in the lifetime test

4. 「すざく」搭載機の経過

同型の冷凍機が、X線天文衛星「すざく」に搭載されて、2006年7月10日に打ち上げられた[2]。2.2年経過した現在も順調に稼働中である。図3は、デュワの断面図である。冷凍機は3枚ある輻射シールドのうち、最外層(OVCS)を冷却して熱侵入を抑制している。図4は、3枚の輻射シールドの温度と冷凍機の消費電力の推移を示したものである。打ち上げ後647日めにネオンタンクの固体ネオンが枯渇して、温度が大きく変動しているのがわかる。寒剤は枯渇したが、冷凍機は運転を続け、引き続き軌道上での性能評価を行なう予定である。

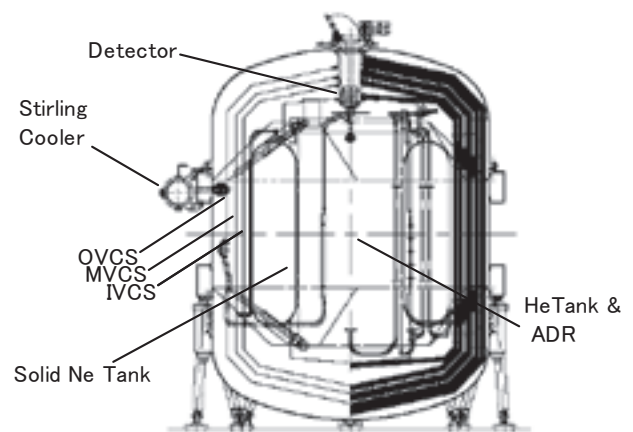


Fig. 3 Cross sectional view of Suzaku/XRS dewar

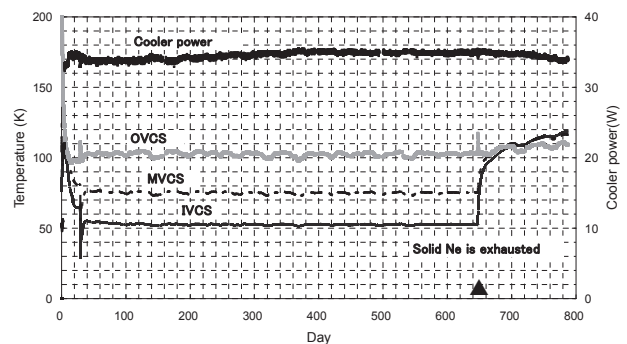


Fig. 4 Temperatures and power in orbit

5. まとめ

宇宙用1段スターリング冷凍機を開発し、50,000時間の寿命を含めて当初の目標に到達した。「すざく」同型機は、月探査機「かぐや」にも搭載され現在月周回軌道上で打ち上げ作業中である。また、2010年には金星探査機に搭載され打ち上げられる予定である。

参考文献

- N. Watanabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 63 (2000) p.166
- R. Kelley et al.: Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 59 (2007) p.S77

AMR サイクルの高周波数化と冷媒移動条件

High Frequency for AMR Cycle and Heat Transfer Fluid Condition

鬼頭 俊輔, 内本 真司, 中込 秀樹(千葉大); 小林 忠彦, 加治 志織, 齋藤 明子(東芝)

KITO Shunsuke, UCHIMOTO Shinji, NAKAGOME Hideki(Chiba University);

KAJI Shiori, SAITO Akiko, KOBAYASHI Tadahiko(Toshiba)

E-mail: kito-shunsuke@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

フロンガスの大幅削減が予測される中、ノンフロン冷凍が可能な室温磁気冷凍技術に関する研究が注目されている。室温磁気冷凍技術は、磁性体と冷媒を用い、AMR (Active Magnetic Regenerative Refrigeration) サイクルを利用して冷凍を行なう。我々は、これまでに縦型室温磁気冷凍試験機 (06model) を試作し、実験結果、数値解析結果より、熱交換容器両端の温度差: ΔT_{span} を拡大させるために、AMR サイクル周波数: f_{AMR} を高周波数化することが有効であるという見解を得た¹⁾。

本講演では、試験機の改造 (07model) を行ない、AMR サイクルの高周波数化実験、および冷媒移動条件を可変させて行なった実験について解析検証した結果を報告する。

2. 実験方法

Gd 球 (200-1500 μ m) を熱交換容器 (充填部: 15mm ϕ \times 115mm) に充填し、冷媒に純水を用い、AMR サイクルを動作させた。ここで、 f_{AMR} は、磁界 ON-OFF 制御と冷媒移動に要する時間によって決定される。 f_{AMR} を高周波数化するためには、磁界 ON-OFF 制御、冷媒移動に要する時間を短縮化する必要がある²⁾。磁界 ON-OFF 制御時間を短縮化するため、試験機の改造を行ない、試験機改造前後の ΔT_{span} を評価した。また、冷媒移動量、冷媒移動速度を可変させて実験を行ない、冷媒移動時間の短縮化による f_{AMR} の高周波数化が ΔT_{span} へ及ぼす影響について調べた。

3. 実験結果

冷媒移動時間を一定にして、磁界 ON-OFF 制御時間を可変させた時の ΔT_{span} の f_{AMR} 依存性を Fig.1 に示す。試験機の改造により f_{AMR} は、0.18Hz (06model) から 0.32Hz (07model) まで高周波数化することが可能となった。06model と 07model の結果は連続しており、 f_{AMR} の高周波数化により ΔT_{span} は 25.6°C から 30.4°C まで拡大した。

次に、冷媒移動量をパラメータ (0.88mL, 1.77mL, 2.65mL) とし、 ΔT_{span} の冷媒移動速度依存性を Fig.2 に示す。冷媒移動速度を上げることで、 f_{AMR} は高周波数化される。各冷媒移動量において ΔT_{span} に差はあるものの、 ΔT_{span} は冷媒移動速度: 5~7mm/sec でピークを示すことが確認できる。

これらの結果から、磁界 ON-OFF 制御時間の短縮化により f_{AMR} を高周波数化することで、 ΔT_{span} を拡大させることが可能であることがわかった。しかし、冷媒移動時間の短縮化により f_{AMR} を高周波数化した場合、 ΔT_{span} は最適な f_{AMR} を有すると考

えられる。これは、磁性体と冷媒との熱交換に必要な時間などの要因により、最適な冷媒移動条件があることを示している。本試験機の場合、最適冷媒移動速度は冷媒移動量に依らず、5~7mm/sec であると推測できる。

詳細は本講演にて報告する。

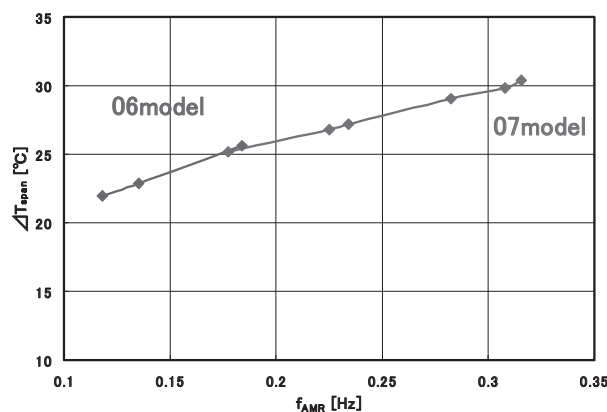


Fig.1 f_{AMR} dependence of ΔT_{span}

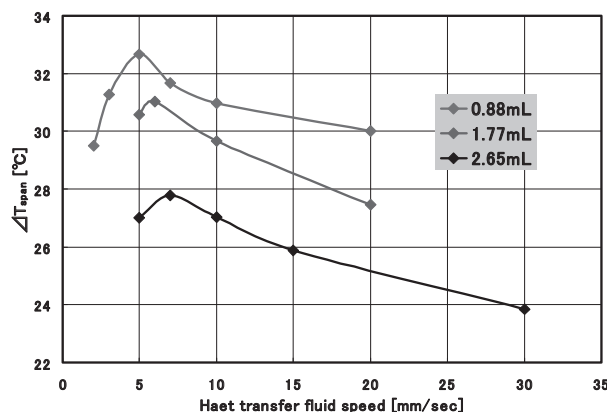


Fig.2 Heat transfer fluid speed dependence of ΔT_{span}

謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) から受託した革新技術開発研究事業にかかる研究の一部である。また、数値解析については、NIMS 沼澤氏、神谷氏に御協力いただいた。

参考文献

1. 鬼頭俊輔他, 第 75 回秋季低温工学・超伝導学会講演概要集, 1P-p46(2006)
2. 小林忠彦他, 第 76 回春季低温工学・超伝導学会講演概要集, 2C-a10(2007)

C-PREST(ダイナミックシミュレータ)による冷却プロセスの検討

Refrigeration Process Analyses Utilizing Cryogenic-Process REal-time SimulaTOR

前川 龍司, 大場 恒揮, 鷹見 重幸(NIFS); 信時 実(大陽日酸); 三戸利行(NIFS)

MAEKAWA Ryuji, OBA Kouki, TAKAMI Shigeyuki(NIFS); NOBUTOKI Minoru(TAIYO-NISSAN), MITO Toshiyuki(NIFS)
E-mail: maekawa.ryuji@lhd.nifs.ac.jp

1. はじめに

C-PREST は大型低温システムのダイナミックな挙動を把握し、運転方法最適化、緊急時におけるシーケンスプログラムの検証などのために開発された。これまで、10kWクラスのヘリウム液化冷凍機のダイナミックシミュレーションをおこない、実機との比較から実行速度及び精度に関しては検証済みである[1]。今回は前モデルを更に発展させ、LHD低温制御システム全体をモデル化し、室温からの液体ヘリウム温度までの冷却過程を模擬した。さらに、ダイナミックシミュレータをMATLABとリンクさせ、中型ヘリウム液化機モデルを利用した制御方式(PID, Feed Forward 等)について検証したので報告する。

2. C-PREST

C-PRESTはFig. 1に示すように、VMEボードとプログラミング用PC、そしてダイナミックプロセス計算用PCから構成されている。先進的な制御方法について検討するために、ヘリウム液化冷凍機用PCにMATLABの機能をリンクさせ、プロセス計算用PCでの冷凍機を制御することが可能になっている。また、今回モデル化したLHD低温システムの概略のフロー図をFig. 2に示す。モデル化は超伝導コイルシステムと電磁力支持構造物及び熱輻射シールドについておこない、予冷時に負荷の少ない超伝導バスラインシステムは省略してある。このモデルについて室温からの冷却及びヘリウム液体貯槽へおよそ3kWの熱をパルス的に入れた場合の挙動について検討をおこなった。

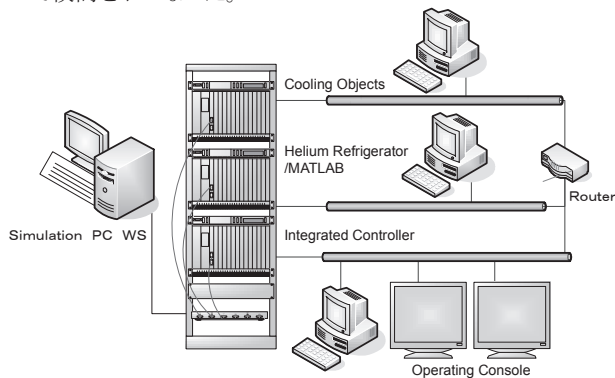


Fig.1 Illustration of C-PREST

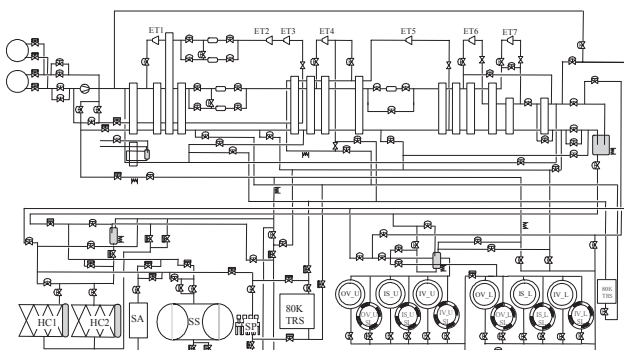


Fig.2 P&ID of LHD cryogenic system

3. 中型ヘリウム液化機を利用したプロセス解析

Fig.3 は中型ヘリウム液化機のモデルである。ダイナミックな挙動を把握するために、液体ヘリウム貯槽にヒートパルス、約280W、10秒を加えた。Fig. 4上部のグラフはPID制御によるシステムの挙動であり、上記の様な擾乱を想定していないために、圧力振動をうまく抑制することができない。そこで、FF制御を利用し圧縮機側の調節弁で、システムの安定性向上を確認した結果が、Fig. 4の下部のグラフである。貯槽への熱入力に速やかに反応し、システムの圧力振動を抑制していることが分かる。

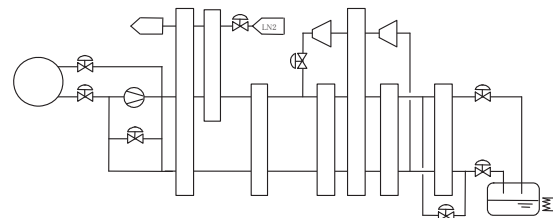


Fig. 3 P&ID of 300W class helium liquefier

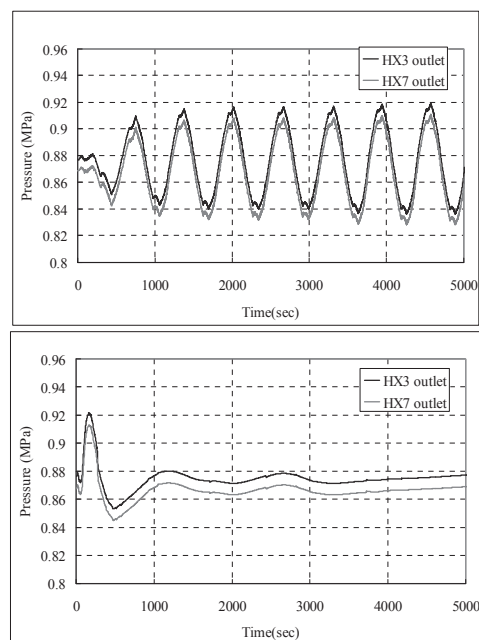


Fig. 4 View graphs compare the pressure change after the 280W, 10sec heat pulse input to the liquid helium reservoir.

各ダイナミックシミュレーションの詳細については、当日報告する。

参考文献

1. R. Maekawa, et al.: Cryogenics, Vol. 45 (2005) p.199

MEG用ヘリウム循環装置における熱放射シールドによる侵入熱除去の推定

Estimation of the heat removal of immersion through the thermal radiation shield in a helium circulation system for MEG

厚田和宏, 岡本雅美, 武田常広 (東大院・新領域)

ATSUDA Kazuhiro, OKAMOTO Masayoshi, TAKEDA Tsunehiro (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

E-mail: atsuda@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脳磁計(MEG)装置はSQUIDセンサを超電導状態で利用するために液体ヘリウム(LHe)を要するが、その使用量および頻繁な移送作業などといったランニングコスト面での課題が多かった。これらの課題を克服すべく、我々は蒸発ヘリウムガスを低温のまま回収・再凝縮させるというアイデアのもと、ヘリウム循環システム(HCS)を開発し改良を行った[1]。

今回は、HCSにおけるトランスファーチューブ(TT)の熱放射シールドによる侵入熱の除去の効果について、熱流体解析ソフトウェアFLUENTを用いて評価した結果を報告する。

2. 概要

HCSにおけるTTは多重構造であるが、今回扱う、最外管(ステンレス鋼, SUS304)、熱ふく射シールド(無酸素銅, OFC)および空間保持スペーサ(EGL-10)の概観を図1に示す。管間の伝熱に関しては、スペーサを介した熱伝導に加え、空間が高真空($P_0 \sim 10e-5Pa$)に保たれていることから、気体熱伝導の影響は小さく、ふく射の影響が無視できないものとなる[2]。

最外管外表面は常温(300K)に、熱ふく射シールドは一端が冷凍機の1st.Stageに接続され一定温度(40K)にそれぞれ保たれている条件下において、管表面の射出率[3]、管および空間保持スペーサの熱伝導率により伝熱量および管の温度がどのように変化するかについて計算を行った。

3. 結果

スペーサを挿入しない条件におけるふく射のみの伝熱量は、SUS304およびOFC(Ni蒸着)の表面の射出率を0.02とした場合で1.75Wであった。そこにEGL-10(表面射出率0.08, 熱伝導率 $\lambda_0(T)$)を挿入したときの結果を基準として最大10倍の熱伝導率を与えたときのふく射伝熱量 Q_{rad} 、総伝熱量 Q_{total} 、および管の両端の温度差 ΔT をそれぞれ図2に示す。この結果は熱伝導率が $10\lambda_0(T)$ 程度(G-10相当)であっても管の両端の温度差が4.5K程度に過ぎないことを示しており、現在稼働中の装置による実験データ($\Delta T \sim 13K$)を説明できない。この値はSUS304の射出率を0.1, OFCのそれを0.06にして計算した値に近いことから、管壁表面の粗さなどに起因する射出率(吸収率)の増大が原因とも考えられるが、十分に検証されていないのが現状である。その他の可能性としては、上で扱った領域外部からの熱侵入の影響が無視できないこと、および真空度の低下による分子熱伝導の影響などが考えられるが、後者の可能性に対しては、SUS304とOFCの射出率をそれぞれ0.06および0.04と設定して計算を行ったが、管両端の温度差 ΔT の変化は実験データより小さく見積もられた(図3)。

これらも含め、より詳細なアプローチ、結果および考察については、当日報告する予定である。

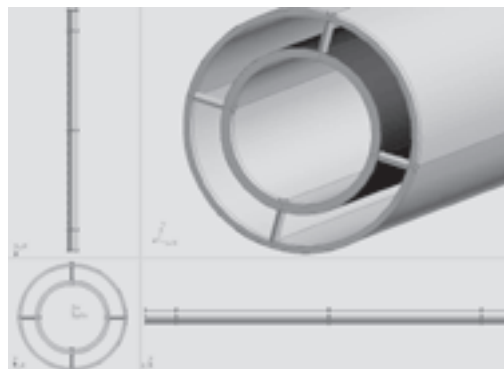


Fig.1 Schematics of the Transfer Tube.

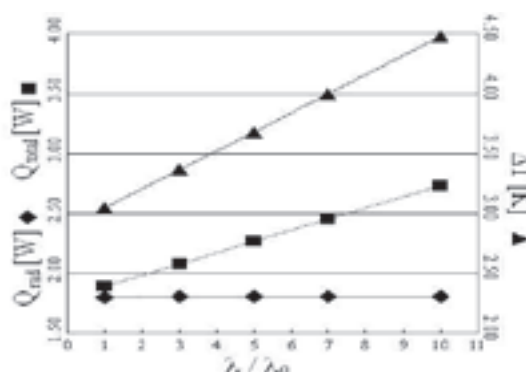


Fig.2 Thermal Conductivity Dependencies of the Spacer.

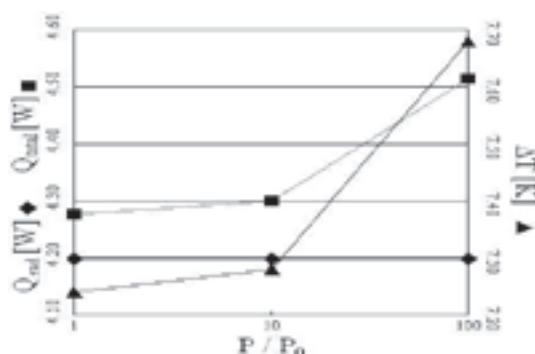


Fig.3 Vacuum Condition Dependencies.

参考文献

1. T. Takeda, et al.: International Congress Series 1300 (2007) pp.599-602.
2. R.G. Scurlock, et al.: Cryogenics 5 (1979) p.304.
3. T. Amano, et al.: Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, Vol.56 (1990) pp.146-154.

ヘリウム循環装置の閉塞解除 Cleaning of a clogged refiner in a Helium Circulation System

岡本 雅美, 厚田 和宏, 武田 常広 (東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻)

OKAMOTO Masayoshi, ATSUDA Kazuhiro, TAKEDA Tsunehiro

Dept. of Complexity Science and Engineering, Graduate School of Frontier Sciences, The Univ. of Tokyo

E-mail: okamoto@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

MEG (脳磁計) の液体ヘリウムのランニングコスト低減のため、我々の研究室ではヘリウム循環装置 (HCS) を開発した。HCS は 1 年以上の連続運転が要求されており、不純ガスによる配管の閉塞への対策が必要である。本装置では、精製器にてヘリウムガス中に混入した不純物を除去している。また、精製器に溜まった不純物を自動的にガス化し排出する閉塞解除システムを開発した。本発表では、閉塞発生の様態と閉塞解除について報告する。

2. 精製器と閉塞解除

精製器は、円筒の中に金属板を積層させた構造になっている。低温にした精製器にガスを通し、不純物をトラップする。精製器の出口には逆止弁を設置し、加熱吸引して不純物を取り除く際、不純物が逆止弁の先に行かないようにしている。¹⁾

Fig.1 に HCS のシステム図を示す。精製器に不純物が溜まると、ガスの流れが悪くなり、40K ガスのライン圧力が上昇する。その場合、閉塞解除を行い精製器から不純物を取り除くことが必要となる。はじめに、冷凍機を停止しヒータにて精製器を加熱する。不純物が気化するので精製器の入口側からポンプで排気を行う。十分排出した後、ヒータを切り冷凍機を稼働させ精製器を冷却する。精製器が 50K 程度まで冷却されたなら、ヘリウムポンプから清純なガスを少量流し、チャンバー内の配管、トランスファーチューブを冷却していく。精製器が 40K 程度まで冷却されたところで、通常の循環モードでガスを流す。

3. 実証試験

試験デュウに HCS を設置したシステムにて、空気を注入し強制的に閉塞を発生させ、その後、閉塞解除を行った。

20L (100kPa) の空気注入では、40K ラインの圧力が僅かに上昇しただけで閉塞までは至らなかった。30L の空気注入では、閉塞の兆候が見られた。その時の様態を Fig.1 に示す。

40K ライン圧力は一度上昇した後、急激に圧力が下がったが、その後は緩やかに圧力が上昇した。なお、空気の注入は 3 回に分けて行ったので、ガス成分比の時間変動には 3 つのピークがみられる。

空気注入開始後 22hr 経過した時点で、閉塞解除を実施した。T1 は 40K ガスの配管の温度であるが、ほぼ精製器の温度と等しいと考えられる。精製器は 280K まで昇温し、排気時の 40K ライン圧は -94kPa であった。その後、チャンバー、トランスファーチューブを冷却した。40K ライン圧力、ガス濃度とも元に戻り、閉塞解除は成功した。

後日、10L の空気を注入した時の 40K ライン圧力を Fig. 3 に示す。空気注入直後に小さなピークが現れた後、1 日後に大きな圧力のピークがあり、2 日後に圧力変動が落ち着いた。閉塞時の圧力変動には、複数のパターンがあることがわかった。

4. まとめ

今回の実験より、精製器が十分動作していること、閉塞解除がうまく作動することを確認した。なお、本研究室の MEG 装置に HCS を設置し 5 ヶ月間連続運転しているが、閉塞は発生していない。精製器の能力が十分であることが実証された。

参考文献

1) 武田常広他: 第 19 回日本生体磁気学会, 202-203, 2004

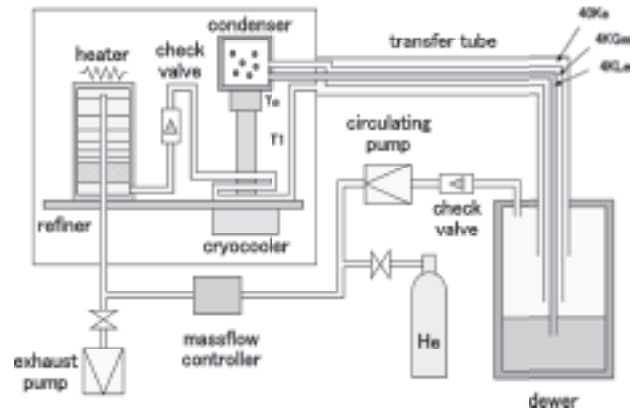


Fig.1 Helium circulation system.

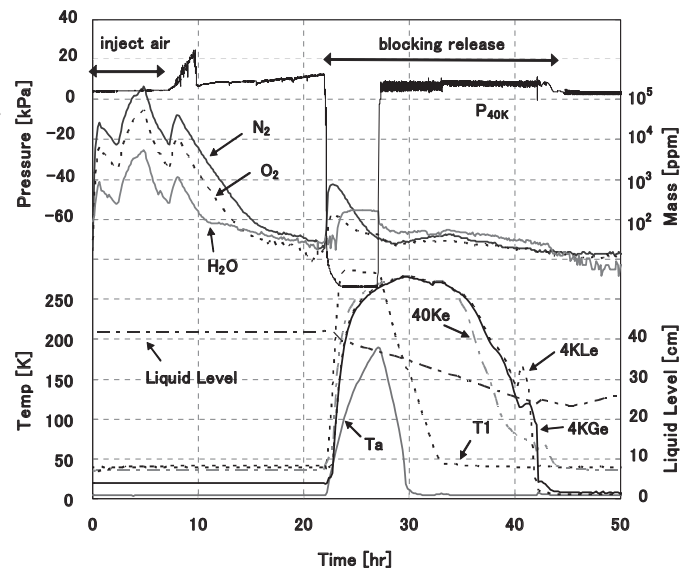


Fig.2 HCS blocking and release.

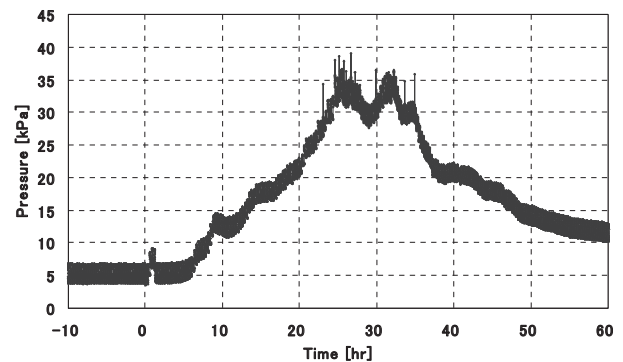


Fig.3 Change of 40K line pressure by 10L air injection.

非対称な人工ピンニングセンターを導入した超伝導膜の MO 観察

Magneto-optical observation of superconducting films with asymmetric artificial pinning centers

何 継方, 原田 直幸, 内藤 裕志, 浅田 裕法 (山口大); 石橋 隆幸 (長岡技科大)

HE Jifang, HARADA Naoyuki, NAITOU Hiroshi, ASADA Hironori (Yamaguchi Univ.); ISHIBASHI Takayuki (Nagaoka Univ. of Tech.)

E-mail: h007hm@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

微細加工により人工ピンニングセンター(APC)を導入する方法を用いて、超伝導膜の臨界電流密度を変化させることが可能である。これまで、電流の流れる方向に対して垂直な断面の形状がランブ状やステップ状となる非対称人工ピンを導入することにより、電流の通電方向に対して非対称となる臨界電流密度特性を持つ素子の実現の可能性を示し^{[1][2]}、フォトマスクのパターンの寸法を変化させて、微細加工の繰り返すことにより超伝導Nb膜に形状が非対称となるステップ状人工ピンを導入した^[3]。

本報告では、MO (Magneto-optical) イメージング法を用いて非対称なステップ状人工ピンを導入した超伝導 Nb 膜における磁束密度の分布の観察を行った。また、対称人工ピンを導入した場合の結果と比較しながら、磁束密度の分布の非対称性を評価した。

2. 実験方法

フォトリソグラフィ技術を用いて、厚さが $0.5\mu\text{m}$ のNb膜の $0.5\text{mm}\times 1.0\text{mm}$ 領域に $5.0\mu\text{m}$ の加工周期で人工ピンを導入した。Fig.1、Fig.2はそれぞれ対称な溝状人工ピン、非対称なステップ状人工ピンを導入した Nb 膜の表面中央部分のSEM 写真である。ここで、人工ピンのパターン寸法をSEM 写真から求めた。a、b、cはそれぞれ加工されていないNb膜、1回加工により得られた溝状パターン、2回加工により得られたより深い溝状パターンを示す。bとcで示す部分は2段のステップ状人工ピンを構成する。

人工ピンを導入したNb膜における磁束密度の分布を直接観察するために、MOイメージング法を用いた。観察はPt反射膜を蒸着した厚さ $0.8\mu\text{m}$ の $\text{Y}_2\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ ガーネット膜をNb膜の上に密着させた後、低温磁気光学顕微鏡を用いて行った。ガーネット膜の磁区の明暗領域における変化より試料表面の磁束密度分布をその場で観察した。ここでは、ゼロ磁場において 3.6K まで冷却後(ZFC:zero-field-cooled)にNb膜の表面に垂直に磁場を印加して増加させた後、減少させた。

3. 実験結果と考察

Fig.3はFig.1に示す対称な人工ピンを導入した試料のMO観察結果を示す。左右が長さ方向、上下が幅方向となる。明るい部分ほど磁束密度が高いことに対応している。印加磁場が増加するにしたがって、磁束が溝に垂直に、また上下対称にNb膜内部に侵入し、磁場が減少する場合、試料の周辺から磁束が先に外に出ていくことを確認した。430eのMO像における右側磁束の侵入が多いのは、微細加工の際にNb膜の表面に生じた傷に原因があると考えられる。また、1100eのMO像に黒い矢印Aで示す磁束密度が最も低い部分は、200eのMO像に白い矢印Bで示す磁束密度が最も高い部分と一致し、試料のほぼ中央に位置することが分かった。このように、対称な人工ピンを導入した試料における磁束の侵入は対称的になることを確認した。

Fig.4はFig.2に示す非対称な人工ピンを導入した試料のMO観察結果を示す。磁場を増加させ、Fig.2に示す対称の場合と同様に、磁束が試料の内部に侵入する。ところが、磁場を4510eから減少させる場合、従来の対称な磁束の変化と異なる現象が見られた。3360eのMO像に黒い矢印Cで示す磁束密度が最も低い部分の位置に対して、2200eのMO像に白

い矢印Dで示す磁束密度が最も高い部分の位置は上にシフトして、一致しないことが分かった。このことはNb膜に導入した非対称な人工ピンにより磁束の侵入が非対称になったものだと考えられる。

今後は、超伝導Nb膜にループ状非対称なステップ人工ピンを導入し、SQUID磁力計またはMOイメージング法による試料の電流分布の非対称性を定量的に評価する予定である。

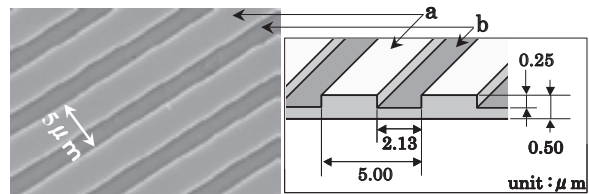


Fig.1 SEM image of the surface of Nb film with symmetric groove-type APC.

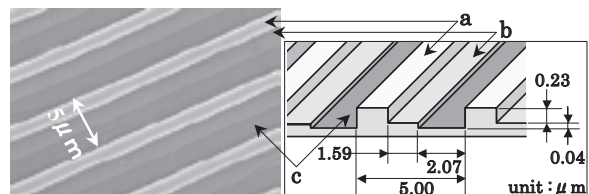


Fig.2 SEM image of the surface of Nb film with asymmetric step-type APC.

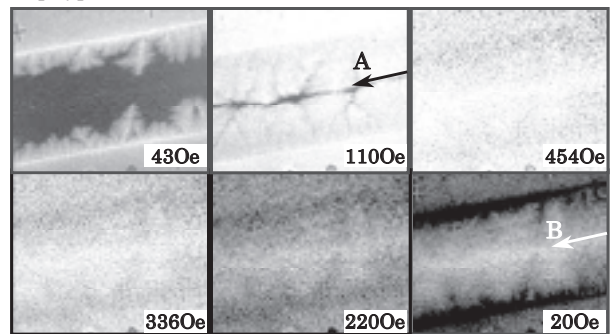


Fig.3 Magneto-optical images of the specimen with symmetric groove-type APC at $T = 3.6\text{K}$.

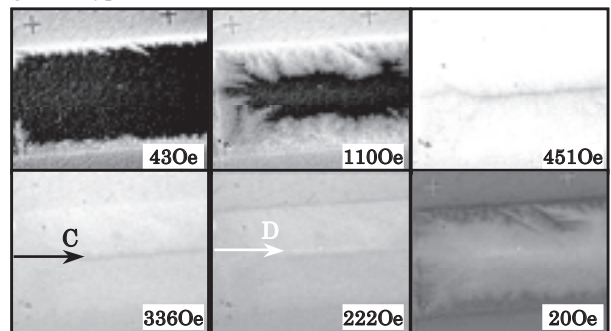


Fig.4 Magneto-optical images of the specimen with asymmetric step-type APC at $T = 3.6\text{K}$.

参考文献

- [1] J. He, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.184
- [2] J. He, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.72
- [3] J. He, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.82

PLD-YBCO 線材の超電導特性に対する重イオン照射の影響 および照射後アニール効果

Effect of heavy-ion irradiation and post-annealing on the pinning properties of YBCO tapes prepared by PLD

中島 一雄 (SRL、東大) ; 筑本 知子, 衣斐 顕, 宮田 成紀, 山田 穰 (SRL) ; 寺井 隆幸 (東大)
NAKASHIMA Kazuo (SRL, Univ. of Tokyo); CHIKUMOTO Noriko, IBI Akira, MIYATA Seiki, YAMADA Yutaka (SRL);
TERAI Takayuki (Univ. of Tokyo)
E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

YBCO 系のテープ線材において高い臨界電流密度 (J_c) を実現することのできる効果的な導入方法の開発が進められている。量子線照射は、成膜過程によらず、照射条件を変化させることで超電導層内のピンニングセンターの形状・密度を制御できる利点がある。そこで本研究においては、重イオンビーム照射を用い、優れた J_c 特性が報告されている Pulsed laser deposition 法 (PLD 法) により作成された YBCO 線材 (Y 系 PLD 線材) へ照射欠陥を導入し、 J_c などの超電導特性の変化を調べた。一般的に重イオン照射では円柱状にアモルファス化した欠陥が導入されるが、その際、電子的阻止能 S_e [KeV/Å] が大きいほど、欠陥の直径が大きくなる [1]。また、高フルエンス照射では欠陥が重なりあうために超電導特性は低下するが、適当な熱アニール処理により特性が回復するという報告もある [2]。以上のことから、本研究では Y 系線材に照射フルエンス、イオン種を変えた重イオンを照射し、照射前後の超電導特性の変化を調べると共に、照射後アニールを行い、アニールによる超電導特性および結晶構造の変化を評価し、試料の特性向上条件を調べた。

2. 実験方法

照射用試料として Y 系超電導線材 (CeO₂/GZO/ハステロイ基板) を 2 mm × 2 mm 程度に切り出したものを用いた。高エネルギー重イオン照射には、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の AVF サイクロトロンを用いた。照射は保護層である Ag 層 (5 μm) 側から YBCO 層 (0.5 μm) に垂直に照射した。照射イオン種は YBCO 層を貫通する条件として、400 MeV の Kr¹⁸⁺、450 MeV の Xe²³⁺、500 MeV の Au³¹⁺ を選択し、照射フルエンスは 1 × 10¹⁰ ~ 1.5 × 10¹² [ions/cm²] の範囲とした。また 500 MeV の Au³¹⁺ イオン照射については、保護層である Ag 層をケミカルエッチングにより除去した試料に対しても照射を行った。PPMS (Quantum Design 社製) を用いた磁化測定により、転移温度 (T_c)、臨界電流密度 (J_c) 等の評価を照射前後で行った。照射後アニールは、照射試料を酸素雰囲気中で目的の温度、時間で保持した後に銅板上で急冷しその影響を調べた。

3. 実験結果

Fig. 1 に Xe イオンを 5 × 10¹¹ [ions/cm²] 照射した際の 0.2T 及び 2T における照射前後の J_c 変化率の温度依存性を示すが、高温 (77K) および高磁場 (2T) において顕著な J_c の向上がみられている。これは低温では酸素欠損等の既存の欠陥が効果的なピンニング効果を与えるが、77K では既存のピンニングセンターが有効に働かない一方で、照射により導入される円柱状欠陥は有効に作用することを示唆している。Fig. 2 に各イオン種について、77K、2T での J_c の照射フルエンス依存性を示す。いずれも 5 × 10¹¹ [ions/cm²] 程度のフルエンスで最も J_c が向上し、Xe イオン照射によって最も大きく向上した。照射後アニール実験は過剰照射試料について 473K および 673K について 2 時間行い、 T_c 、 J_c が有る程度回復することを確

認した。XRD やラマン分光測定の結果から、473 K のアニールにおいては、照射によって生じた酸素欠陥の減少が確認された。また、673 K では格子間原子が回復することが示唆される結果が得られた。

4. 謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術開発業務の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施されたものである。

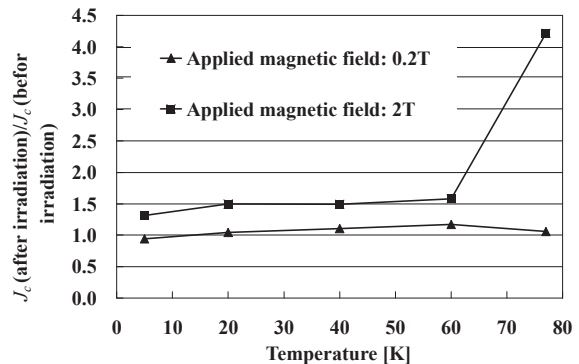


Fig. 1 Temperature dependence of J_c at B=0.2T and 2T before and after Xe-ion irradiation (fluence: 5 × 10¹¹ ions/cm²)

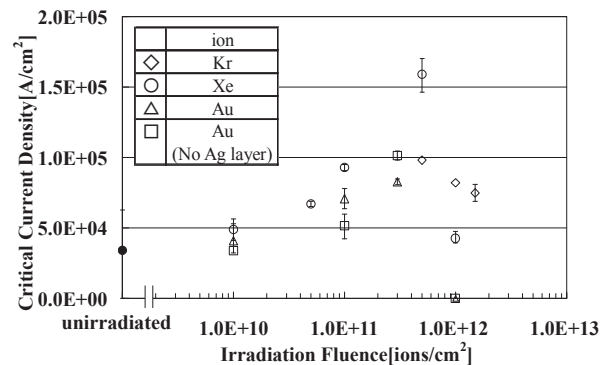


Fig. 2 Fluence dependence of J_c at 77K and 2T.

参考文献

[1] Y. Zhu *et al.*, Phys. Rev. B **48**, 6436 (1993).
[2] T. Teraï *et al.*, Physica C **282-287**, 2285 (1997).

人工ピンを導入した REBCO 薄膜の磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of REBCO thin films with artificial pinning centers

藤吉 孝則, 末吉 哲郎, 梶田 龍, 米倉 健志, 渡邊 昌貴(熊本大); 向田 昌志, 寺西 亮, 甲斐 英樹(九大);
松本 要(九工大); 吉田 隆(名大); 一瀬 中(電中研); 堀井 滋(東大); 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大)

FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro, KAJITA Ryu, YONEKURA Kenji, WATANABE Masaki (Kumamoto Univ.);
MUKAIDA Masashi, TERANISHI Ryo, KAI Hideki (Kyushu Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. of Tech.);
YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo);
AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: fuji@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO は、次世代高温超伝導線材材料として期待されている。この薄膜の磁場中における臨界電流密度 J_c の向上のために、結晶構造の組織制御によって薄膜中に人工的にデザインされたピンニングセンターの導入を行うことが盛んに行われている[1,2]。本研究では、REBCO 薄膜の高磁場における高特性化を目指して、ナノパーティクルとして $BaZrO_3$ や $BaNb_3O_6$ を導入した $ErBa_2Cu_3O_7$ 薄膜および $BaZrO_3$ を導入した $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の J_c の磁場依存性や印加磁場角度依存性および電界-電流密度特性を測定した。これらの結果から得られたピンニングパラメータを調べることで、これらの薄膜における人工ピンの磁束ピンニング特性について検討を行った。

2. 実験

PLD 法により、 $BaZrO_3$ 、 $BaNb_3O_6$ を導入した $ErBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 ($Er(BZO)$, $Er(BNO)$) を $SrTiO_3$ 基板上にそれぞれ作成した。ターゲットは、1.5wt% の $BaZrO_3$ 、 $BaNb_3O_6$ をそれぞれドーブした $ErBa_2Cu_3O_7$ バルクである。薄膜堆積時の基板温度は 750°C である。また、1.5wt% の $BaZrO_3$ をドーブしたターゲットにより $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 ($Y(BZO)$) も同様に $SrTiO_3$ 基板上に作製した。薄膜堆積時の基板温度は、 715°C である。

それぞれの薄膜をブリッジ状に成形し、通電特性より電界基準を $10\mu\text{V}/\text{cm}$ として J_c を評価した。また、 J_c の印加磁場角度依存性も測定した。なお、電流方向と磁場方向は常に垂直である。さらに、電界-電流密度 (E - J) 特性を測定して、磁束グラス-液体転移温度 T_g や $T=T_g$ における E - J 特性の傾きに相当するピンニングパラメータ m を評価した。

3. 結果および考察

Fig.1 に 77.3K および 84.0K における $Er(BZO)$ 、 $Er(BNO)$ 、 $Y(BZO)$ 薄膜の J_c の磁場依存性を示す。磁場は c 軸方向に平行である。 $Er(BZO)$ の J_c は、他の薄膜に比べ高い値を示している。また、 $Er(BZO)$ と $Y(BZO)$ は、 STO 基板上に作製した人工ピンを導入していない $YBCO$ 薄膜に比べ、それぞれ 3T 、 6T 以上で高い J_c を示した。

Fig.2 に $Er(BZO)$ および $Er(BNO)$ の J_c の印加磁場角度依存性を示す。角度が $\theta=0^\circ(B\parallel c)$ と $\theta=90^\circ(B\parallel ab)$ の両方向で、両試料ともピークを示す。 $\theta=0^\circ$ における幅広いピークは、 BZO および BNO ナノロッドによる 1 次元なピンニングに起因する。また、同様な $\theta=0^\circ$ におけるピークは、 $Y(BZO)$ 薄膜においても観測された。

Fig.3 に $Er(BZO)$ と $Y(BZO)$ における E - J 特性から得られたピンニングパラメータ m の磁場依存性を示す。 $Er(BZO)$ と $Y(BZO)$ において、それぞれ $B=0.8\text{T}$ 程度の磁場において m のピークが見られる。 m は局所的ピン力分布を特徴づけるパラメータであり、 m の値が大きくなると、局所的ピン力分布が揃っていることを示している[3]。このピークは、 BZO ナノロッドの面密度と磁束密度とのマッチングによるものと考えられる。

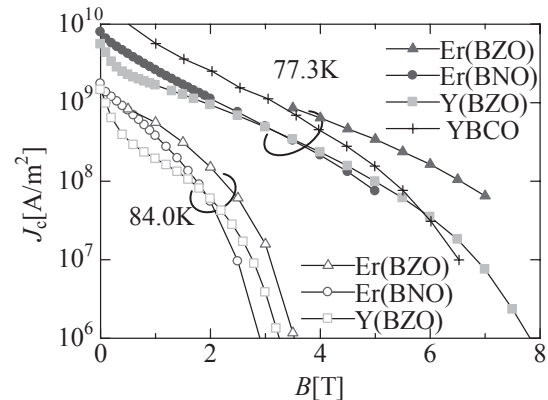


Fig.1 Magnetic field dependences of J_c for $Er(BZO)$, $Er(BNO)$ and $Y(BZO)$ thin films at 77.3K and 84.0K .

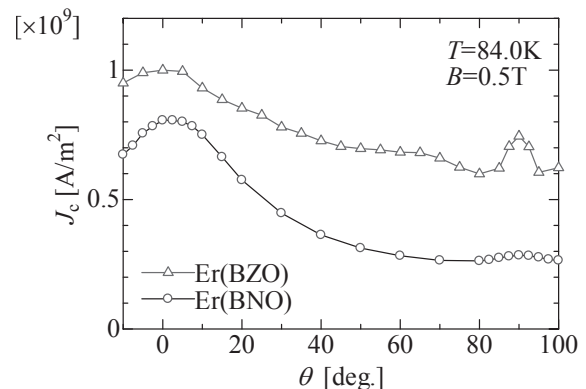


Fig.2 Angular dependences of J_c in $Er(BZO)$ and $Er(BNO)$ thin films in $B=0.5\text{T}$.

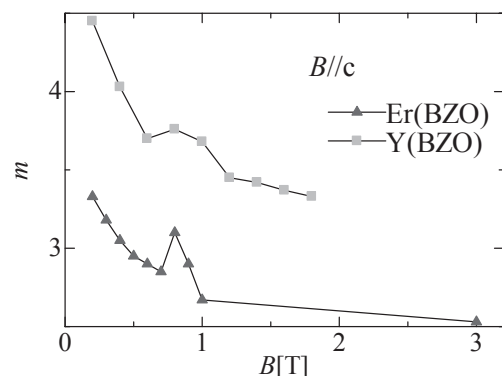


Fig.3 Magnetic field dependences of m in $Er(BZO)$ and $Y(BZO)$ thin films.

参考文献

1. K. Matsumoto et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L246.
2. M. Haruta, et al.: Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 803.
3. K. Yamafuji, et al.: Physica C 397 (2003) 132

化学組成制御による PLD-GdBCO 線材の高 I_c 化検討

Improvement of I_c properties of PLD-GdBCO by optimizing chemical composition

筑本 知子, セルゲイ・リー, 横山 崇広, 中尾 公一(超電導工学研究所)
 CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey YOKOYAMA Takahiro, NAKAO (ISTEC-SRL)
 E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

最近 REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) テープ線材開発の進展が著しく、なかでも RE=Gd の場合、高磁場特性に優れた線材が得られることから注目を浴びている。さて、線材応用を目指した高 I_c 化のためには、厚膜化が重要であるが、従来 PLD 法では、膜厚が増大すると I_c が低下し、高 I_c が得られないことが問題であった。本研究においては、化学組成制御およびレーザー条件最適化により、77K、0.1T での $I_c > 500A/cm$ 幅の高 I_c 試料を得たので、その結果について報告する。

2. 実験方法

Gd:Ba:Cu 比を変化させた Gd-Ba-Cu-O ターゲット材を用い、PLD 法 (KrF:248nm, パルス周波数:40Hz) により 2cm 長の PLD-CeO₂/IBAD-Gd₂Zr₂O₇/ハステロイ金属基板上に成膜を行った。作製した試料の結晶性及び配向性は XRD により評価した。また試料の均一性は磁気光学イメージング法によって確認した。

臨界電流評価は通電法及び磁化ヒステリシス測定から求めた。また、試料の T_c 及び不可逆磁場は交流磁化測定から求めた。

3. 実験結果

厚膜試料を得るためには、成膜速度をあげる必要がある。Fig.1 は基板-ターゲット間距離 (S-T 間隔) と成膜速度の関係であるが、S-T 間隔が小さい程、成膜速度が二次関数的に上昇することがわかる。一方、S-T 間隔を小さくしすぎると、ドロップレット等が附着し、膜特性を悪化させる可能性がある。そこで、本実験では S-T 間隔=5cm を採用した。

一方、化学量論組成のターゲットを用いた時の膜組成の S-T 間隔依存性を Fig.2 に示すが、それぞれの元素の組成比は一定ではなく、S-T 間隔に大きく依存する。すなわち、必ずしもターゲット組成がそのまま膜組成に転写されるわけではない。Table 1 にターゲット組成と膜組成の関係をまとめるが、Ba:Cu はターゲット材の組成比とほぼ同じであるのに対し、2Gd/Ba はいずれも 20% 増しとなっている。膜組成最適化の結果、膜組成が化学量論組成より、Ba 欠乏となる時に高い I_c 値が得られることが明らかとなった。Table 1 に代表的な組成について磁場 3T 印加時の I_c 値を示すが、Gd_{0.9}Ba₂Cu_{3.3}O_y ターゲット材料を用いた時に、一番高い I_c が得られている。Ic 値は人工ピン BaZrO₃ の添加でさらに向上し、0.1T で > 500A/cm 幅、3T で 135A/cm 幅 (B_0/c) が得られた (Fig.3)。

4. 謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術開発業務の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施されたものである。なお、本研究で用いた PLD-CeO₂/IBAD-Gd₂Zr₂O₇/ハステロイ基板は SRL 名古屋の衣斐、宮田、山田の各氏から提供いただきました。ここに深く感謝致します。

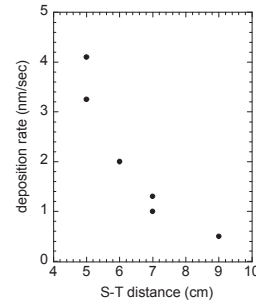


Fig.1 Dependence of deposition rate on substrate-to-target distance.

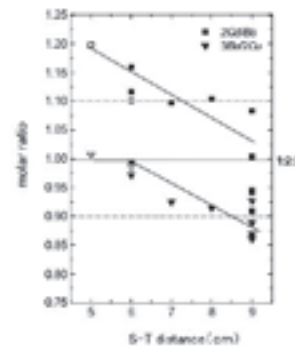


Fig.2 Dependence of film composition on S-T distance for GdBa₂Cu₃O_y target composition.

Table.1 Relationship between target and film composition.

Target composition	2Gd/Ba		3Ba/2Cu		I_c (3T) (A/cm)
	target	film	target	film	
GdBa ₂ Cu ₃ O _y Gd-123	1.00	1.20	1.00	1.01	28A
GdBa ₂ Cu ₃ O _y Ba-poor	1.05	1.25	0.95	0.95	48A
Gd _{0.9} Ba ₂ Cu _{3.3} O _y Gd-poor+Cu-rich	0.9	1.1	0.91	0.91	58A

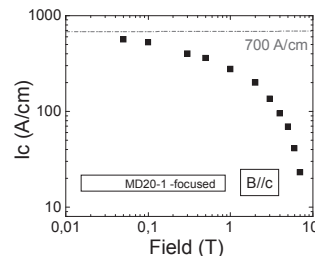


Fig.3 I_c -B at 77 K for 5mol% BaZrO₃+Gd123 film

Al 置換した MgB₂ 単結晶における層状ピンニングの増大 Enhancement of layer pinning by Al substitution in MgB₂ single crystals

野島 勉, 永野 広志, 高橋 一真 (東北大金研); KANG Byeongwon, LEE Sung-Ik (Pohang 理工大)
NOJIMA Tsutomu, NAGANO Hiroshi, TAKAHASHI Kazuma (IMR, Tohoku Univ.);
KANG Byeongwon, LEE Sung-Ik (Pohang Univ. Sci. Tech.)
E-mail: nojima@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超伝導体の磁場中特性を向上させる手段の一つとして元素置換があるが、MgB₂ では置換する原子サイトにより効果が異なることが知られる。代表的な置換元素として C (B 位置) や Al (Mg 位置) を用いた上部臨界磁場 H_{c2} の報告例があり、C は H_{c2} を上昇させるが、Al は減少させることで知られる [1]。本研究では、 H_{c2} に加え、元素置換のピンニング特性に対する効果を調べるため、Mg_{1-x}Al_xB₂ ($x = 0, 0.12, 0.21$) 単結晶の混合状態における磁気トルク τ ($=\mathbf{M} \times \mathbf{H}$) を測定した。

2. 実験方法

測定に用いた試料は 3 GPa の高压下で合成された、サイズ 50-100 μm の単結晶である。AFM 用カンチレバーを用いた測定法[2]を用い、試料のトルク曲線(磁場 H 依存性と角度 θ 依存性)を測定した。これはカンチレバーの先に試料を貼り付け、 c 軸を磁場方向から θ の角度傾けた時に発生するトルク τ を、カンチレバーの曲がりを検知するピエゾ抵抗の変化により検出するという方法である。

3. 結果と考察

測定より得られた Al 置換した試料の H_{c2} はすべての磁場方向で純粋な MgB₂ に比べ小さい ($\theta \gg 0^\circ$) か同等 ($\theta \sim 0^\circ$) の値を示した。MgB₂ は π , σ バンドから発生する 2 つの超伝導ギャップを有し、高磁場では σ バンドからの超伝導への寄与が主となる。この H_{c2} の結果は Al 置換が H_{c2} を決定する σ バンドの超伝導キャリアに対して少なくとも散乱体としての効果を及ぼさないことを意味している。

しかし混合状態でのピンニング特性には大きな変化が見られた。Fig.1 に MgB₂, Mg_{1-x}Al_xB₂ ($x=0.12$) の $T = 4.2$ K, $H = 1.2$ T における τ の θ 依存性をそれぞれ示す(縦軸は熱平衡のトルク $\tau_{\text{eq}} = (\tau_{\text{up}} + \tau_{\text{down}})/2$ の最大値 $\tau_{\text{eq}}^{\text{max}}$ で規格化した)。Al 置換しない試料ではすべての θ で τ のヒステリシスが小さい(ほぼ熱平衡の $\tau_{\text{eq}}(\theta)$ に近い)。これに対し Al 置換した試料では c 軸に近い磁場方向ではトルクのヒステリシスは同様に小さいが、垂直方向に近づくにつれて急激に増大し、 $\theta = 90^\circ$ で鋭いピークを示す。 $x = 0.21$ の試料に関しても同様な結果が得られた。これらの結果は Al 置換が c 軸垂直方向のピンニング現象にのみ効果を表すことを示している。実際、 θ を固定して測定した $\tau(H)$ 曲線より磁化ヒステリシス ΔM を見積ると、Fig.2 に示すよう、 c 軸にほぼ垂直方向 ($\theta = 88^\circ$) の磁場中では、ほぼ平行方向 ($\theta = 10^\circ$) なものに比べかなり大きく、磁場依存性も弱い。B サイトを C 置換した試料ではこのようなピンニング現象は報告されておらず[3]、得られた結果は Mg サイトを置換した試料ならではの特性と考えられる。

本結果は一見、MgB₂ の持つ層状結晶構造に起因するピンニング機構と関連しているように見える。しかし測定された電子異方性は小さく、コヒーレンス長も長いことから、詳しいピンニング機構についてはまだ不明である。

参考文献

- [1] M. Angst et al. Phys. Rev. B **71** (2005) 144512.
- [2] E. Ohmichi, T. Osada, Rev. Sci. Instr. **73** (2002) 3022.
- [3] E. Ohmichi et al., J. Phys. Soc. Jpn **73** (2004) 2065.

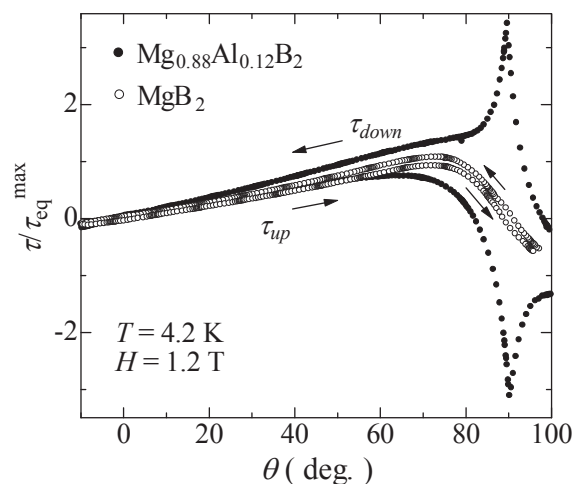


Fig.1 Angular dependence of magnetic torque for MgB₂ and Mg_{0.88}Al_{0.12}B₂ single crystals at $T = 4.2$ K and $H = 1.2$ T.

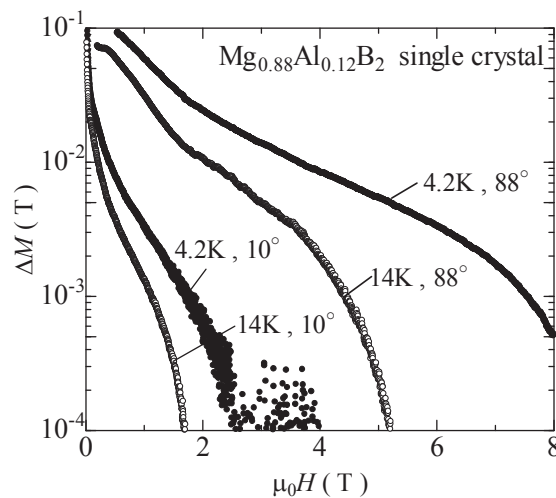


Fig.2 Field dependence of magnetization hysteresis ΔM in Mg_{0.88}Al_{0.12}B₂ for $\theta = 10^\circ$ and 88° .

500m 級 GdBCO 線材の開発

Preparation of 500m-class GdBCO coated conductor

富士 広, 五十嵐 光則, 花田 康, 三浦 貴博, 羽生 智, 柿本 一臣, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)

FUJI Hiroshi, IGARASHI Mitunori, HANADA Yasushi, MIURA Takahiro, HANYU Satoru,

KAKIMOTO Kazuomi, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura)

E-mail: hfuji@fujikura.co.jp

1. はじめに

Y 系超電導線材は磁場中特性に優れていることから、限流器、変圧器、モータといった様々な機器への応用が検討されている。応用機器開発の実現のためには、線材の長尺化、高特性化、低コスト等が必要となる。フジクラではこれまで IBAD-PLD プロセスを用いた超電導線材の開発を行ってきている。IBAD プロセスでは GZO 中間層成膜において 500m クラスの長尺化に成功しており、半値幅も 15° 以下の良好なものも得られている。また、PLD 法では、マルチターン、レーザスキャン等のプロセス開発を行うことで長尺化、高特性化を図り、今年 1 月に、200m 長、300A 級の線材の作製に成功した。

今回、500m の IBAD-GZO 中間層上に、磁場特性が良好とされる GdBCO を PLD 法で成膜して、 I_c が 300A クラスの長尺、高特性の線材が得られたので結果を報告する。

これら開発により、超電導線材の機器開発応用への展望が開けた。

2. 実験方法

無配向 Ni 基金属テープ基板(幅 10mm、厚さ 0.1mm)に、大型 IBAD 装置を用いて高配向 GZO 層を積層した。作製した IBAD500m 長中間層上に多ターン型 PLD 装置を用いて CeO_2 キャップ層および GdBCO を成膜した。PLD 法による 500m 級の長尺成膜の場合、レーザ発振器の連続駆動時間が問題となる。今回、GdBCO 層は、ターン数を 2 ターンとすることで高速化を図り、実行速度 6.7m/h で成膜した。短尺実験ではさらに高 I_c 化を図るため多層成膜を行ない厚膜化した。500m 長の線材の概観写真を Fig.1 に示す。500m 線材は連続臨界電流測定装置により長手方向の臨界電流の分布測定を行い、短尺サンプルでは磁界中での通電特性を測定した。

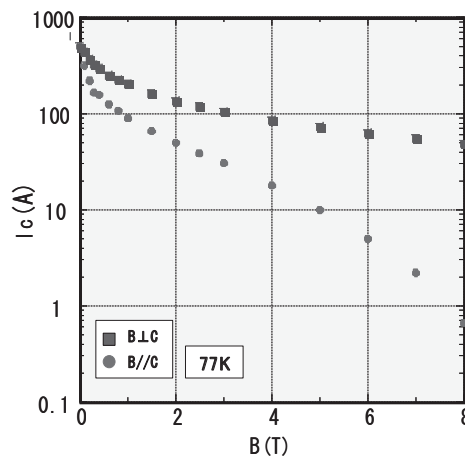
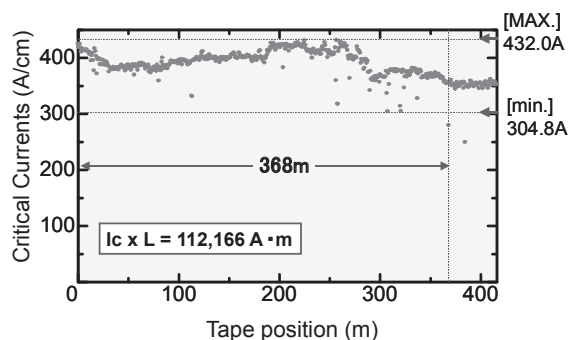
さらにモータや変圧器などの機器応用に線材を供給するために導体化を行った。線材を必要長に切断し、レーザ切断装置により幅方向 5mm 幅に切断した。これに安定化層として Cu テープ(0.1mm 厚)を半田により複合化後、カプトンテープで絶縁を施し供給を行っている。

3. 実験結果

XRD 装置を用いて IBAD-GZO の正極点(222)を測定した。500m 長線材の半値幅は $12\sim 15^\circ$ と良好であった。GZO 厚みは約 $1\mu\text{m}$ 程度である。PLD 装置により CeO_2 キャップ層を約 $1\mu\text{m}$ 成膜した結果、 CeO_2 層の(220)の半値幅は $3.1\sim 4.4^\circ$ と良好であった。高 I_c 化を目指した短尺サンプルの I_c -B 特性を Fig.2 に示す。0T では 500A を超える良好な通電特性を示した。また 3T の磁界中においても c 軸が磁場に垂直な場合は、100A を超え、c 軸に平行な場合でも 30A の良好な通電を確認した。また 3T の磁界中では、 I_c の最も低い角度は 25° 付近となった。超電導層にピン導入を行うことで、さらなる I_c -B 特性の向上が見込まれる。測定した長尺線材の臨界電流の分布を Fig.3 に示す。成膜した全長の大部分で 300A を超える良好な通電特性を示した。電流値の最大は 432A であった。また 368m 長に渡って 300A 以下の部分はなく、その結果、 $I_c \times L$ で $112,166\text{A}\cdot\text{m}$ の世界記録を達成した。今後は、基板からの測定までの工程を見直し、さらに、均一安定な長尺線材の作製を目指す。



Fig.1 Appearance of 500m-GdBCO tape

Fig.2 I_c -B properties at 77KFig.3 I_c distribution of long GdBCO tape

謝辞

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

積層 IBAD 中間層基板の開発

The development of multi-IBAD buffer layer for ReBCO coated conductor

羽生智, 三浦貴博, 飯島康裕, 五十嵐光則, 花田康, 富士広, 柿本一臣(フジクラ); 加藤丈晴, 平山司(JFCC); 齊藤隆(フジクラ)

HANYU Satoru, MIURA Takahiro, IIJIMA Yasuhiro, IGARASHI Mitsunori, HANADA Yasushi, FUJI Hiroshi, KAKIMOTO Kazuomi(Fujikura Ltd.); KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC); SAITOH Takashi(Fujikura Ltd.)

E-mail:s_hanyu@fujikura.co.jp

1.はじめに

RE系超電導体は磁場中特性に優れていることから、線材応用として、限流器、変圧器、モーター等が検討されている。現在、我々は高特性化として世界記録となる長尺線材の作製にも成功しており、応用機器開発向けとしての線材提供も開始している。超電導線材の構造は、IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下GZO)、PLD-CeO₂の中間層、PLD-YBCO超電導層そして銀保護層という構造である。GZOは成膜条件も比較的広くPLD-CeO₂との相性も良いが、製造速度が現状では5m/h程度となっている。国内外の研究機関でIBAD-MgO(100)の研究がなされているが、高速化が可能なものの成膜条件が非常に狭い。我々は比較的安定に得られるIBAD-MgO(111)を基板としてIBAD-GZOの高速化が可能であることを示した。本研究では、MgO(111)上のIBAD-GZOについて得られている結果を報告する

2.実験方法

無配向金属テープ基板上にIBAD-GZOを積層する際に、バッファ層としてAl₂O₃およびY₂O₃層とMgO層を積層したものを用いた。Y₂O₃はスパッタで、MgO層はIBAD法によりそれぞれ作製した。IBAD-MgO層の配向性の評価については、300℃にてMgOのエピタキシャル成膜を行ったのちXRDによりその配向性を調べた。IBAD-GZOではアシストビームを基板法線方向から55°で照射し、ターゲット組成はGd₂O₃:ZrO₂=1:2とした。イオンビームのガスはアシスト、スパッタ共にArを用いた。超電導層の評価は従来どおり、IBAD-GZO上にPLD-CeO₂、その後PLD-GdBCOを積層した。なお一部のIBAD-MgO基板に関して、PLDにてGZOを積層することによりMgO(111)上のGZOはどの方位に優先配向されるかの確認を行った。

3.結果及び考察

これまでIBAD-MgO成膜後、エピMgO層を成膜した基板についてMgO(220)の正極点を測定し、基板法線方向にMgO(111)が向いた3回対称の膜が得られていることがわかっている。その上にIBADによりGZOを積層するとGZO(100)が基板法線方向に向いた線材の作製ができる。Fig.1に実際に作製したMgO(111)上のIBAD-GZOのTEM(Transmission Electron Microscopy)像を示す。界面を観

察すると、MgO直上のGZOが(111)方向を向いていることが分かる。示唆される結果となっている。そこで今回、MgO(111)上にPLDによりGZOを積層することにより、GZOがどのような配向を示すのかを確認した。

結果、MgO(111)上のGZOからはGZO(222)のピークが得られた。これは、TEM写真の結果とも一致する結果である。次にMgO(111)上のPLD-GZOによって得られたGZO(111)配向膜を基板としてIBAD-GZOの成膜を行った。その結果、基板がGZO(111)にも関わらずGZO(100)が基板法線方向に向いた線材が作製された。つまり、MgO(111)上のIBAD-GZOは成膜初期にGZO(111)が配向し、その後イオンビームの影響によりGZO(111)からGZO(100)に向くと考えられる。

現在、IBAD-GZO/IBAD-MgO上のPLD-GdBCOでは最大I_c=200A/cm程度の特性が得られており、今後最適化をしていく予定である。

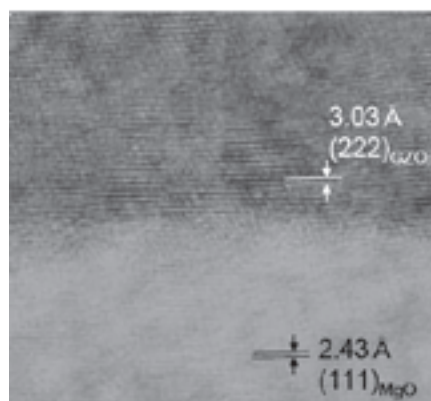


Fig.1 HRTEM image of the interface between IBAD-MgO and IBAD-GZO. It is suggested that GZO(111) is oriented to the substrate normal at the interface, though surface of the IBAD-GZO is oriented to the GZO(100).

4.謝辞

本研究は経済産業省のプロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)」からの受託により実施された。

Gd₂Zr₂O₇ 及び MgO-IBAD 基板をベースにした REBCO 線材プロセスの比較

Gd₂Zr₂O₇ and MgO-IBAD-Based Coated Conductor Processes

宮田 成紀, 福島 弘之, 栗木 礼二, 石田 暁, 衣斐 顕, 木下 晶雄, 山田 穰 (SRL 名古屋); 塩原 融 (SRL 東京); 加藤 丈晴, 平山 司 (ファインセラミックスセンター)

MIYATA Seiki, FUKUSHIMA Hiroyuki, KURIKI Reiji, ISHIDA Satoru, IBI Akira, KINOSHITA Akio, YAMADA Yutaka (SRL-Nagoya); SHIOHARA Yuh (SRL-Tokyo); KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC)
E-mail: miyata@istec.or.jp

前回に引き続き、IBAD-MgO 基板を用いた線材プロセスの開発状況について報告する。

これまで我々のグループでは Gd₂Zr₂O₇ (GZO)を用いた IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition) 基板をベースに、キャップ層、超電導層には PLD (Pulsed Laser Deposition) 法を採用した線材開発を行い、数百メートル×数百アンペアの高性能線材が安定して作製可能であることを示してきた。しかし産業化を視野に入れた場合には数 m/h という IBAD プロセスの製造速度が十分ではないことから、高速化が見込まれる IBAD-MgO 基板をベースにした線材プロセスの開発を検討している。前回までに、基板においては 12°の面内配向度 (構造は Epi-MgO/IBAD-MgO/Y₂O₃/Hastelloy) や Reel-to-Reel 成膜による 1m 基板 (Δφ=30°) の作製など、また超電導特性としては金属基板からの元素拡散により J_c ~ 10⁴ A/cm² 程度に留まっている状況などを報告した。その後、優先課題としてまず配向度の改善と拡散防止に注目し、各層における成膜条件の最適化、および層構造の検討などを行った。拡散防止の目的は主に Ni や Cr など遷移金属元素の侵入による超電導特性の劣化を抑制することにあるが、それだけでなく MgO 層の膜構造の破壊や上層の剥離などに関係していることがわかっている。Fig.1 は超電導層成膜と同じ酸素雰囲気中で 800°C まで昇温することにより、IBAD-MgO/Y₂O₃/Hastelloy の構造において IBAD-MgO 層表面にクラックが入った様子を写した SEM 写真である。この現象を抑えるため層構造に拡散防止バリアとして実績のある Al₂O₃ 層を追加し、層厚 160nm でクラックの発生を抑えられることを確認した。

配向度の改善に関しては、IBAD-GZO プロセスと同様 IBAD-MgO をベースにした基板においても PLD-CeO₂ 成膜により大幅に向上することが確認され、IBAD 層上のエピ成膜においてスパッタ法のみ用いた場合には 15°前後に留まっていた面内配向度は PLD-CeO₂ 層を重ねることにより 7-8°程度まで改善した。加えて金属基板として R_a=5nm 程度のものでさらに Δφ=4°まで改善されることが確認された (Fig.2)。これらの結果を踏まえ現在採用している基板構造は PLD-CeO₂ (500nm) / LaMnO₃ (28nm) / IBAD-MgO (<10nm) / Y₂O₃ (10nm) / Al₂O₃ (160nm) / Hastelloy となっており (括弧内はいずれも予想膜厚)、得られている配向度は短尺で Δω=1.8° / Δφ=3.7° (Fig.2 参照)、また 1.2m 試料においても Δω=2.0-2.4° / Δφ=5.4-6.8° などの値が得られている。

これらの基板上に超電導層の成膜を行った結果、剥離などの現象はなく、T_c の劣化も抑制されていることを確認し、電流特性においても短尺静止基板上で I_c=377A/cm (1.6 μm) の値を達成した。これは、これまで我々のグループで採用してきた IBAD-GZO ベースの基板と同等の特性である。さらに全層 RTR 成膜によって作製した 1.1m 長試料においても End-to-End で I_c=196A の値を達成した (Fig.3)。

今後は、製造速度の向上とともに (IBAD を除く最低速プロセスは Al₂O₃ 層の 3.8m/h)、IBAD-GZO ベース基板のような簡潔な構造を目指し、物質の選定や成膜方法の検討などを続けていく予定である。

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

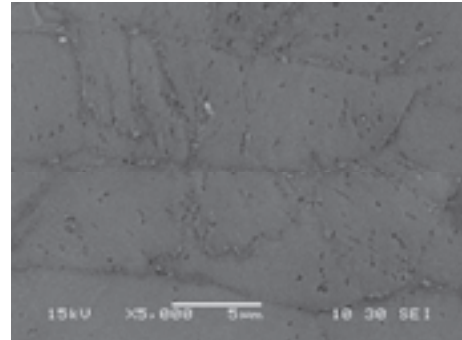


Fig. 1: SEM image of the surface of the IBAD-MgO film after heat treatment of 800°C in case of the structure of IBAD-MgO / Y₂O₃ / Hastelloy (without Al₂O₃). Cracks were observed.

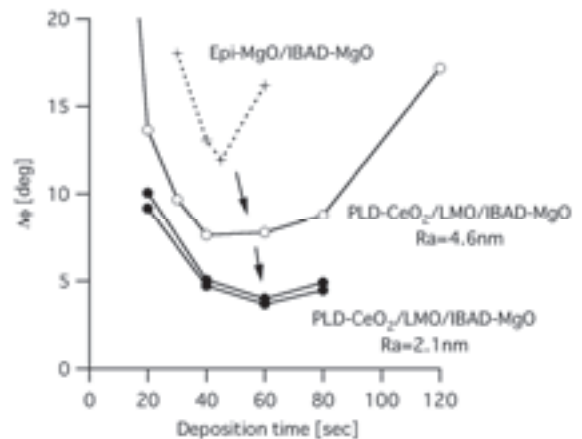


Fig. 2: In-plane grain alignment (Δφ) vs. deposition time of the IBAD layer. Δφ was improved by PLD-CeO₂ layer depositions and metallic substrates with smooth surfaces.

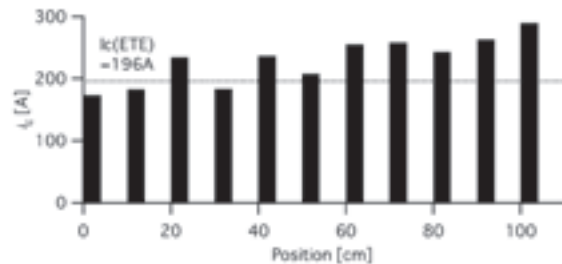


Fig. 3: I_c distribution of every 10cm-period for a 1.1m-piece sample with a structure of GdBCO / CeO₂ / LMO / MgO / Y₂O₃ / Al₂O₃ / Hastelloy. End-to-end-I_c of this sample was 196A.

PLD-Gd₁Ba₂Cu₃O_y線材の高速成膜及び高 J_c化技術

Increase of deposition rate and enhancement of J_c for PLD-Gd₁Ba₂Cu₃O_y coated conductors

三浦正志, 須藤泰範, 吉積正晃, 和泉輝郎, 塩原融 (超電導工学研究所)

Masashi MIURA, Yasunori SUTOH, Masateru YOSHIZUMI, Teruo IZUMI, Yuh SHIOHARA

E-mail: m_miura@istec.or.jp

1. はじめに

近年、YBCO 線材を用いた産業用及び船舶用モータ、ソレノイドコイルが作製され、実用化・事業化に向けた研究開発が世界中で着実に行われている。REBCO 線材の作製方法の一つに Pulsed laser deposition(PLD)法がある。この PLD 法を用いて、(株)フジクラでは 368 m 長、304.8A の J_c を示す PLD-GdBa₂Cu₃O_y(GdBCO)線材に成功し、線材作製手法の一つとして期待されている[1]。しかし、PLD 線材を電力応用するためには低コスト化が課題である。このためには、材料高収率化、高速成膜化、高 J_c 化が必要である。そこで本研究では、超電導層の高速成膜化、高 J_c 化を目的としてターゲット-基板間距離の制御、組成の異なる種々のターゲットを用いて、PLD-GdBCO 線材を作製し、その効果を検討した。

2. 実験方法

80W-KrFエキシマレーザー(Lambda physik製, LPX200)を用いて、IBAD-Gd₂Zr₂O₇ (Δφ=14 deg.)/Hastelloy C276基板上にPLD法を用いてCeO₂(Δφ=4.6 deg.)を作製した。この基板上に組成の異なるターゲットを用い、シングルターン、4プルーム(成膜エリア:6.5 cm²), レーザーエネルギー密度300 mJ, 周波数120 Hzの条件でGdBCO線材の作製を行った。ターゲット-基板間距離、酸素分圧を変化させ作製した。

作製した GdBCO 薄膜は、結晶構造評価を X 線回折(XRD)法、薄膜表面の評価をダイナミックフォース顕微鏡(DFM)、組成を誘導結合プラズマ発光分析法(ICP)を用いて評価した。T_c、J_cは四端子法を用いて、電気抵抗率の温度依存性および電流-電圧特性(閾値 1 μV/cm)から算出した。

3. 結果及び考察

超電導層の高速成膜化を行うためにターゲット-基板間距離(d_{T-S})を変え、成膜レートを調べた結果をFig.1に示す。Fig.1より d_{T-S}が小さいほど、成膜レートが速くなり、従来の d_{T-S}=7 cm に比べ、d_{T-S}=5.5 cm にすることで成膜レートを2倍にすることが可能であることが確認された。

Fig.2 には異なる組成ターゲット組成を用いた場合の線材の組成酸素分圧依存性を示す。図より、化学量論組成(123)のターゲットで成膜した線材の組成は、酸素分圧が高いほど、化学量論組成に近づくが、Ba-poor, Cu-poor であることが分かる。そこで線材の組成を化学量論組成に近づけるために、ターゲット組成を Cu-rich とし、線材を作製した結果、Gd₁Ba₂Cu_{3.4}O_yターゲット, 0.4 Torr で最も化学量論組成に近い線材を得た。このことより、ターゲット組成、酸素分圧を制御することで線材の組成を制御することが可能であることが確認できた。

Fig.3 にターゲット組成や酸素分圧の異なる線材の J_c を示す。図より、線材の組成が化学量論組成に近い条件(Gd₁Ba₂Cu_{3.4}O_y ターゲット, 0.4 Torr)で成膜した線材(Gd:Ba:Cu=1:1.83:2.88)で高い J_c を示し、膜厚 1.2 μm で 312 A/cm-w (J_c=2.6 MA/cm²)を示した。一方、低酸素分圧下で作製した線材は、XRD の結果より GdBCO(103)、

BaCeO₃(200)からのピークが観測され、組成だけでなく、これらも低 J_c の原因の一つであると考えられる。

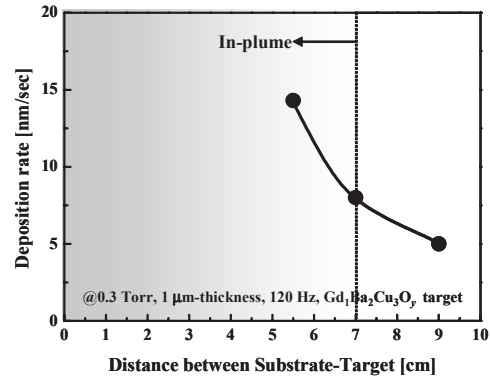


Fig.1 Deposition rate as a function of d_{T-S} for various GdBCO-CC.

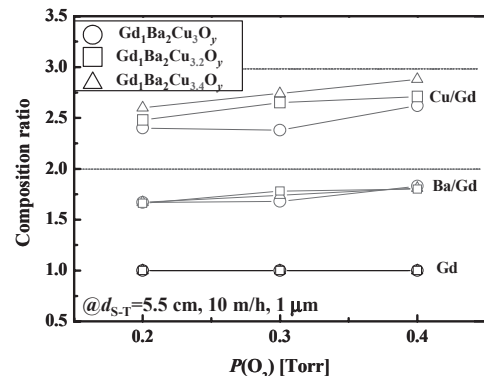


Fig.2 Composition of CC as a function of p(O₂) for various GdBCO-CC.

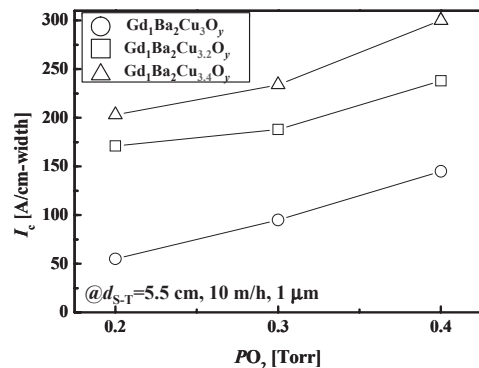


Fig.3 J_c as a function of p(O₂) for various GdBCO-CC.

4. 謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。また、本研究の一部は、(独)日本学術振興会の特別研究員奨励費(18・6513)の助成を得たものである。

【参考文献】

[1] 電気新聞, 2007年9月4日, (株)フジクラ

TFA-MOD 法により作製した YBCO 線材の磁界特性とソレノイドコイルの試作

Magnetic properties of YBCO coated conductor by TFA-MOD process and fabrication of the solenoid coil.

引地 康雄, 小泉 勉, 西岡 淳一, 青木 裕治, 長谷川 隆代(昭和電線); 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ); 中西 達尚, 和泉 輝郎, 宮田 成紀, 山田 穰, 塩原 融(SRL)

HIKICHI Yasuo, KOIZUMI Tsutomu, NISHIOKA Junichi, AOKI Yuji, HASEGAWA Takayo (SWCC); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura); NAKANISHI Tatsuhisa, IZUMI Teruo, MIYATA Seiki, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: y.hikichi367@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

低コスト化が期待できる TFA-MOD 法において、高 I_c 化、長尺化および低コスト化を目標とした本焼プロセスにバッチ式焼成法を適用した YBCO 超電導線材の開発を行っている。これまでに、線材長 200m の全長において、201A/cm-width の特性を達成した。今回、この線材を用いた機器応用開発の知見を得るため、テストコイルを試作して評価を行った。

本報では、この線材の磁界特性と多層ソレノイドコイルを試作、評価した結果について報告する。

2. 実験方法

線材の磁界特性はガス冷却により温度を変え、さらにスプリットマグネット中でサンプルの向きを変えながら測定を行い、磁界依存性、温度依存性および印加磁界角度依存性について評価を行った。なお、臨界電流値 (I_c) は $1 \mu V/cm$ の電圧基準を用いて定義した。その後、この線材を用いて 3 層ソレノイドコイルを試作した。コイル諸元を Table 1 に示す。コイルは液体窒素中にて通電試験を行い、中心磁界はホール素子にて測定した。コイルの電圧は、所定の電流値で 1 分間保持してサンプルリング (1 点/秒) を行い、発生電圧が I_c に達した時点で通電を終了した。

Table 1 Specification of the YBCO solenoid coil

Wire	TFA-MOD YBCO/IBAD
Wire I_c	>90A
Ag layer	20 μm
Wire size	0.12mmt x 4.5mmw
Wire length	8.7m
Insulator	polyimide film
Inner diameter	ϕ 60.0mm
Outer diameter	ϕ 61.2mm
Height	73.0mm
Layers	3
Turns	45.5

3. 実験結果

3 層ソレノイドコイルは 77K、自己磁界中において通電を行った。試験結果を Fig.1 に示す。通電電流が 70A を超えたとき、コイルの最内層から電圧が発生し始め、82A で I_c に達した。コイルの磁界分布を計算した結果、線材に最も厳しい環境は、コイル最内層の端部で発生しており、その磁界および磁界印加角度はそれぞれ 0.05T, 60deg. (82A 通電時) であった。77K における線材の印加磁界角度依存性 (Fig.2) より、このときの I_c は 85% に低下することが分かる。コイルの I_c 値を、外部磁界 0T の値に換算すると、 $I_c=82/0.85=96A$ となり、巻線前の線材 I_c と同等の値となることから、この YBCO(TFA-MOD)/IBAD 線材はソレノイド状に巻いても特性の劣化が無いと推察される。また、コイル中心発生磁界は設計通りであったことから、線材間の短絡等は無く、ポリイミドテープ巻きによる絶縁に問題は無いと考えられる。

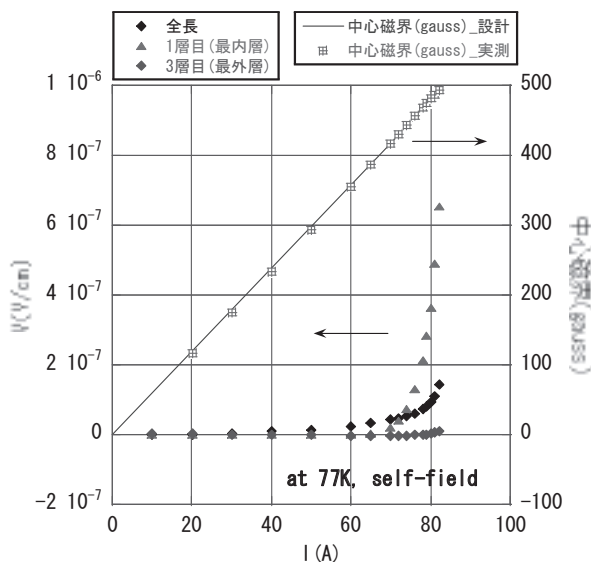


Fig.1 Transport characteristics of the YBCO solenoid coil

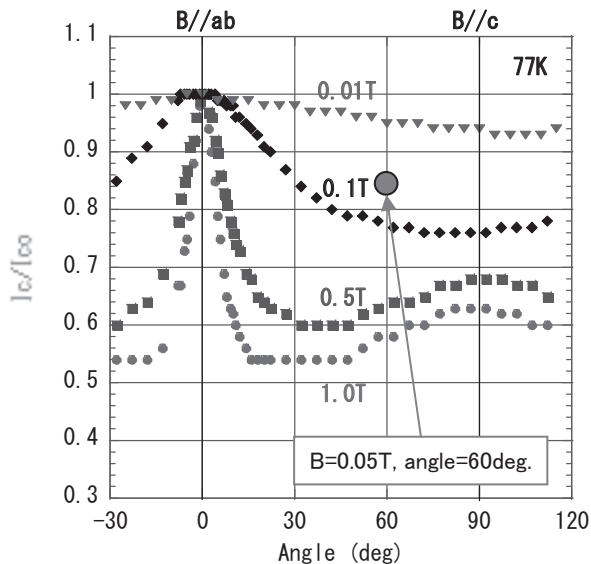


Fig.2 Angler dependence of I_c/I_{c0} in various magnetic fields at 77K

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を通じ、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

1. T. Koizumi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.28

CVD-YBCO コート線材のフープ力試験 Hoop Stress Test for CVD-YBCO Coated Conductor

西島 元, 小黑 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大学); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫 (中部電力)
 NISHIJIMA Gen, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WA TANABE Kazuo (Tohoku University);
 SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric)
 E-mail: gen@imr.edu

1. はじめに

Coated conductor (コート線材) はその高い超伝導特性だけでなく, NiW や Hastelloy などの高強度材料を基板として用いていることによる高い機械特性[1]が SMES など強磁場マグネット材料として魅力的である。

今, マグネットの応力を magnetic pressure $p_m=B^2/(2\mu_0)$ で見積もると[2], 20 T では 159 MPa, 30 T では 358 MPa である。このことは, 30 T 超伝導マグネット開発のためには 400 MPa 程度以上の応力でも使える超伝導材料が必要であることを意味する。コート線材は弾性限が 1 GPa 程度なので[3], 30 T 相当の応力なら十分なマージンがある。これは SMES 大容量化, マグネット高磁場化の観点からも重要である。

本研究では YBCO コート線材について液体ヘリウム中でフープ力試験を行い, 機械特性を調べた[4]。

2. 線材および試料コイル諸元

試料線材には多段 MOCVD 法によって製作された長尺 YBCO 線材を用いた。Fig. 1 に線材構造を示す。この線材をポリイミドテープで絶縁し, PTFE シートで絶縁した SUS 製巻枠に Hastelloy 外側 (Coil A), Hastelloy 内側 (Coil B) の 2 通りの方法で巻き, 試料コイルを製作した。Fig. 2 に写真を示す。

両コイルとも, 液体窒素中 (77 K, 0 T) での予備通電を行い, 巻線による劣化の有無を調べた後に液体ヘリウム中 (77 K, 11 T) で通電し, 電磁力によるフープ力印加試験を行った。

3. フープ力試験結果

Fig. 3 に Coil A の 4.2 K, 11 T における V-I 曲線を示す。コイルの電圧が急激に立ち上がる電流値をクエンチ電流とすると $I_q=894$ A であり, この時のフープ応力は 1007 MPa と見積もられる。

Fig. 4 は coil B の 4.2 K, 11 T における V-I 曲線である。Coil B の最大 $I_q=676$ A であり, このときのフープ応力は 777 MPa であった。

Coil A, B ともにクエンチは電極近傍から発生しており, ローレンツ力による歪が電極近傍に集中したことによる劣化が原因と考えられる。 I_q の違いは Coil A は外側の厚い Hastelloy が機械支持として機能するのに対し, B の場合は支持機能が小さかったために超伝導層の歪が大きかったと考えることができる。

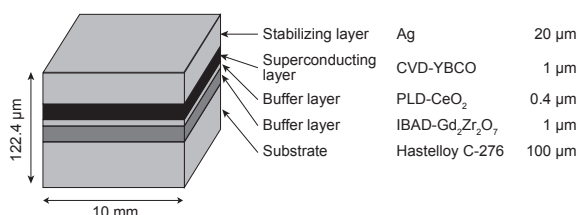


Fig. 1 Schematic architecture of CVD-YBCO coated conductor.

謝辞

本研究は NEDO の委託事業「超伝導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお, 本研究に用いた YBCO 線材は, 超伝導応用基盤技術研究開発業務の一環として, ISTEK を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。

参考文献

- [1] M. Sugano, Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) S344.
- [2] Y. Iwasa, Case studies in superconducting magnets, Plenum Press, 1994, Ch. 3.
- [3] M. Sugano, unpublished (2007)
- [4] G. Nishijima, et al., presented at MT-20

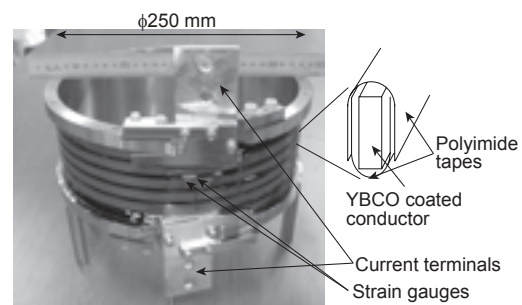


Fig. 2 Photograph of YBCO coil.

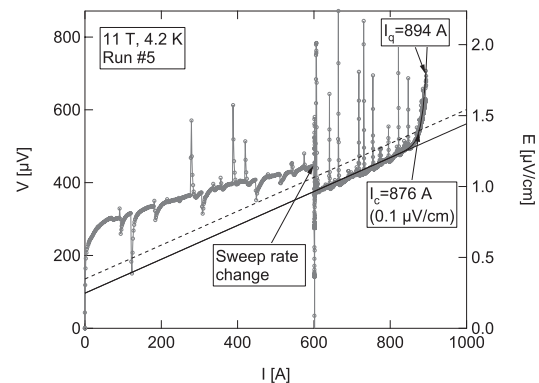


Fig. 3 V-I characteristic of the coil A at 11 T, 4.2 K.

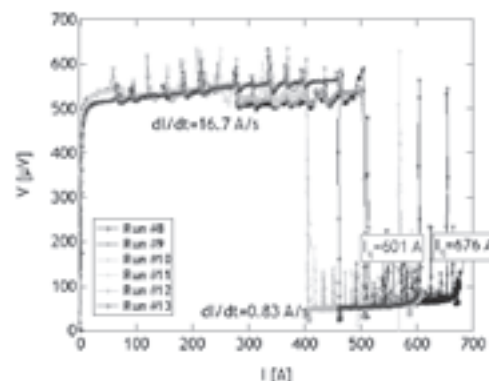


Fig. 4 V-I characteristics of the coil B at 11 T, 4.2 K.

強磁界下における REBCO コイル試験 – GdBCO 29.3 T コイル – The REBCO coil test in high magnetic field.

福島 弘之, 衣斐 顕, 栗木 礼二, 宮田 成紀,

山田 穰 (超電導工学研究所 名古屋高温超電導線材開発センター); 塩原 融 (超電導工学研究所 線材研究開発部);
木吉 司, 小菅 通雄 (物質・材料研究機構)

Hiroyuki Fukushima, Akira Ibi, Reiji Kuriki, Seiki Miyata,

Yutaka Yamada (SRL Nagoya Coated Conductor Center); Yuh Shiohara (SRL Division of Superconducting Tapes and Wires);
Tsukasa Kiyoshi, Michio Kosuge (National Institute for Materials Science);

E-mail: h-fukushima@istec.or.jp

1. はじめに

我々は REBCO 長尺線材からなるコイルの強磁界下におけるコイル励磁試験を実施した。138.5 m, YBCO 長尺線材を用いて、5 ターン x 125 層のソレノイドタイプ YBCO コイルを作製した。4.2 K, 14.1 T の外部磁界下で通電試験を行い、20.1 T の中心磁場を得ることが出来た。また、更なる高磁界下での試験を行うため、13.7 m, GdBCO 長尺線材を用いて、8 ターン x 17 層のソレノイドタイプ GdBCO コイルを作製。4.2 K, 28.3 T の磁界下で通電試験を行い、29.3 T の中心磁場を得ることが出来た。これら詳細を報告する。

2. 実験

End-to-end I_c 245 A の 213 m YBCO 長尺線材[1] から 138.1 m 切り出し YBCO コイルを作製し、End-to-end I_c 183 A の 60 m GdBCO 長尺線材[2] から 13.7 m 切り出し GdBCO コイルを作製した。各コイルの設計諸元を Table 1, 2 に示す。液体ヘリウムで浸漬冷却して、それぞれのコイルを 14.1 T, 28.3 T の外部磁界下にて通電試験を実施した。電流電圧特性測定用電圧端子はコイルの両端部に取り付けた。コイル I_c は 0.75 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

3. 結果

4.2 K, 14.1 T 外部磁界下における YBCO コイルには 700 A の電流を通電出来、6.0 T の磁界を発生させて、20.1 T の中心磁場を得ることが出来た。磁界計算よりコイル最外層端部では 424 MPa もの大きなフープ応力が加わっていたことが明らかとなった。

4.2 K, 28.3 T 外部磁界下における GdBCO コイルには 512 A の電流を通電出来、1.0 T の追加磁界を発生させることが出来た。合わせて 29.3 T の中心磁場を得られた。この時、コイル最外層端部のフープ応力は 211 MPa と見積もられる。

YBCO 長尺線材では 4.2 K, 30 T 強磁場下において、 $B//c$ で 580A/cm を、 $B\perp c$ で 2000A/cm を超える結果を得ており、線材特性を最大限に活用することが出来れば、更なる高磁界発生が期待される。

4. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

5. 参考文献

- [1] A. Ibi *et al*, Physica C, vol. 445-448, pp. 525-528, 2006.
[2] A. Ibi *et al*, Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 1229.

Table 1 Specification of YBCO coil

	YBCO coil
Length of YBCO coated conductor	138.1 m
Number of Layers	125
Number of whole turns	623
Height of coil	56.3 mm
Inner diameter	$\phi 30.0$ mm
Outer diameter	$\phi 111.0$ mm
Bore diameter	$\phi 28.0$ mm
Thickness of Kapton tape	70 μm (35 μm x 2)

Table 2 Specification of GdBCO coil

	GdBCO coil
Length of YBCO coated conductor	13.7 m
Number of Layers	17
Number of whole turns	140.5
Height of coil	84.3 mm
Inner diameter	$\phi 26.0$ mm
Outer diameter	$\phi 35.7$ mm
Bore diameter	$\phi 18.0$ mm
Thickness of UPILEX tape	12.5 μm (Half wrapping)

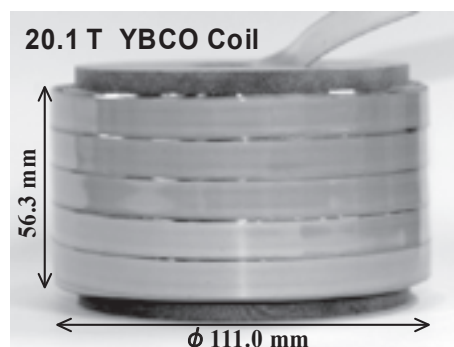


Fig. 1 5 turn - 125 layered YBCO solenoid coil

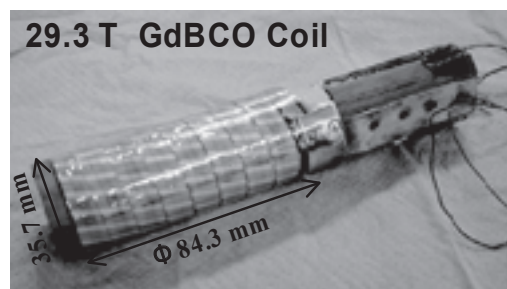


Fig. 2 8 turn - 17 layered GdBCO solenoid coil

配向金属基板を用いたY系超電導線材の開発—中間層の検討—

Development of coated conductors with textured substrate —buffer layers—

坂本 久樹, 長洲 義則, 大橋 泰和, 中崎 竜介, 笠原 正靖, 松井 正和, 山本 潔, 井上 至(古河電気)
渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)
中井 昭暢(超電導工学研究所)

SAKAMOTO Hisaki, NAGASU Yoshinori, OHASHI Yoshikazu, NAKASAKI Ryusuke, MASAYASU Kasahara, MATSUI Masakazu,
YAMAMOTO Kiyoshi, ITARU Inoue(Furukawa Electric)
WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoki, NAGAYA Shigeo(CEPCO)
NAKAI Akinobu(SRL)
E-mail: sakamoto@nikko.furukawa.co.jp

1. はじめに

Y系超電導線材の低コスト化には配向基板の使用が不可欠と考えている。実用的な基板には弱磁性化や高強度化が要求されており、我々は高W濃度のNi-W合金やクラッド材を検討している[1]。これまで、配向基板の評価の一環として短尺試料によりCeO₂中間層を成膜し評価してきたが、中間層の長尺化も実用化には不可欠である。本報では、配向基板上の中間層長尺化についての検討を開始したので報告する。

2. 実験方法

基板としては、原料ロッドを強圧延加工して得たテープに、配向熱処理を施したNi-W合金系配向基板を用いた。この配向基板上に、基板移動型の装置によりCeO₂シード層/YSZバリアー層/CeO₂キャップ層の3層構造の中間層を気相法で成膜した。

超電導層は、MOCVD法およびMOD法により成膜した。通電特性は液体窒素中で直流四端子法で行い、1.0 mV/cmを臨界電流(I_c)の定義とした。長尺の線材については1mごとにI_cを測定した。

基板、および各層については、SEMおよびAFMにより表面状態を、XRD(θ-2θ測定、極点図測定)により結晶配向性を評価した。

3. 結果

Fig. 1に、Ni-5at%W合金基板上に作製したCeO₂シード層の(111)極点図を示す。Δφは5.8°と良好な値であった。このCeO₂シード層上に、YSZバリアー層/CeO₂キャップ層を成膜し、さらに、MOD法により超電導層(厚さ2.0 μm)を成膜した1m長の線材において、I_c=221A/cm幅(J_c=1.1MA/cm²)を達成した。

長尺化に関しては、MOCVD法により0.9 μm厚の超電導層を成膜した10m長の線材のうち、Fig. 2に示すように、7mの部分でI_c ≥ 72A/cm幅(J_c ≥ 0.8MA/cm²)、1mの部分でI_c=90A/cm幅(J_c=1.0MA/cm²)を達成した。また50m級の中間層成膜を行い、Fig. 3に示すように、CeO₂キャップ層の両端のΔφが6°と、長尺においても安定していることを確認した。

参考文献

1. M. Mimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.226



Fig.1 (111) pole figure for first CeO₂ layer deposited on Ni-5at%W substrate (Δφ=5.8°).

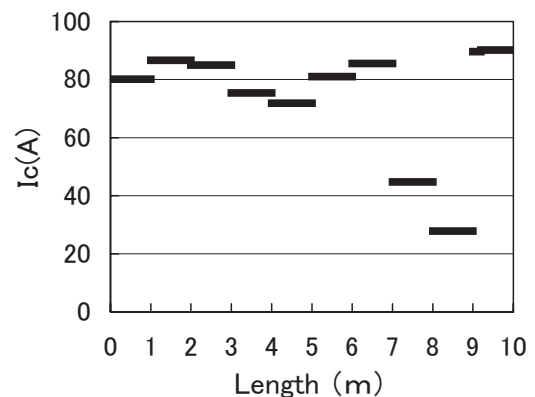


Fig.2 Longitudinal I_c distribution of 10m long YBCO coated conductor.

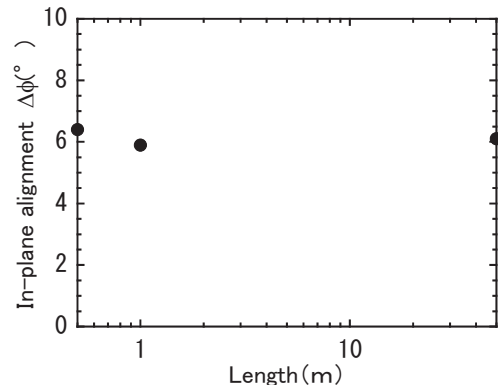


Fig.3 In-plane alignment (Δφ) for 50m-class buffered substrate.

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて実施したものである。

配向金属基板を用いたホルミウム系薄膜超電導線

HBCO coated conductors with textured metal substrates

加藤 武志, 上山 宗譜, 母倉 修司, 長谷川 勝哉, 小西 昌也, 新海 優樹(住友電工)

KATO Takeshi, UHEYAMA Munetsugu, HAHAKURA Shuji, HASEGAWA Katsuya, KONISHI Masaya, SHINGAI Yuki (SEI)

E-mail: kato-takeshi@sei.co.jp

1. はじめに

電力機器等への適用を目指し、Ni合金配向金属基板およびPLDによるHoBaCuO超電導成膜の開発を行っている。本製法においては、短尺材で300A/cm級が、数10mでは200A/cm級の臨界電流が液体窒素温度で得られるようになってきている。

今回、更なる長尺化を目指して、長尺成膜におけるPLDプラズマ安定化を進めて、高Ic、長尺化を進めた結果、及び配向金属基板をクラッド化により低磁性化の開発を進めた結果について報告する。

2. 方法

長尺成膜には、Ni合金配向金属基板を用い、その上にエピタキシャル成長する中間層構造である、CeO₂/YSZ/CeO₂の3層構造を用いた。中間層は、気相蒸着法(スパッタリング等)を用いた。成膜したCeO₂第3中間層の面内配向度($\Delta\Phi$)及び表面粗さ(Ra)は、それぞれ6~7°、10nm程度であった。この中間層上に、PLD法を用いてHo123超電導層を成膜し、銀をスパッタにより成膜することで安定化層とした。

3. 結果及び考察

今回、更なる長尺化を目指して、長尺成膜におけるPLDプラズマ安定化を進めた。我々の装置では長時間成膜を行うとターゲット到達のレーザーエネルギーが低くなる問題があったが、各種改善を進めたことにより、200m成膜においては数%~10%以下の変動に抑えることに成功した。また、中間層の製造条件の改善を含め高Ic化を進めた結果、短尺材では316A/cmを確認した。これらの改良後、長尺化を進めた結果、200m、205A/cmの特性を確認出来た(図1)。

本製法に用いているNi合金配向金属基板は、磁化損失および透磁率が大きく、超電導ケーブルなどの交流応用の際には、Ni合金配向金属基板自体のヒステリシス損失と高透磁率による線材幅方向端部への磁界集中による超電導膜のヒステリシス損失増大の問題がある。また、機械強度についても更に強度アップが望ましいレベルにある。

これらを解決する手段の一つとして、配向金属基板をクラッド化による低磁性化の開発を進めた。クラッド化することで、磁化損失発生原因となるNi合金の含有量低下が出来ること、強度メンバーとなる材料と組み合わせることが可能となる。

このクラッド化基板の磁化損失の測定結果を図2に示す。従来材は大きな飽和磁界および高透磁率を有しているが、クラッド基板は従来材と比較してこれらの値が非常に小さい。ヒステリシス損失量は、従来材1300J/m³に対してクラッド材は52J/m³となっており、1/25への減少が得られている。また、クラッド基板を用いた線材の通電損失を評価したところ、非磁性

基板と同程度の交流損失を確認でき、低交流損失化の原理検証を確認できた。臨界電流は、約160A/cmまでを短尺材で確認している。

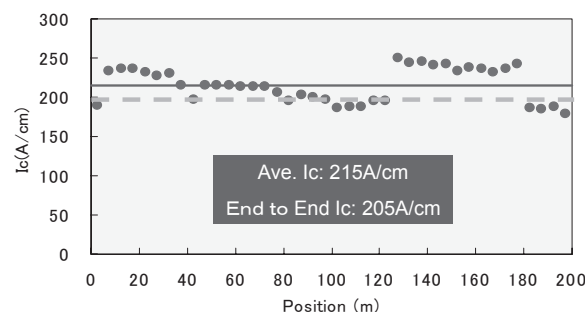


Fig.1 Ic distribution of Ho123 coated conductor

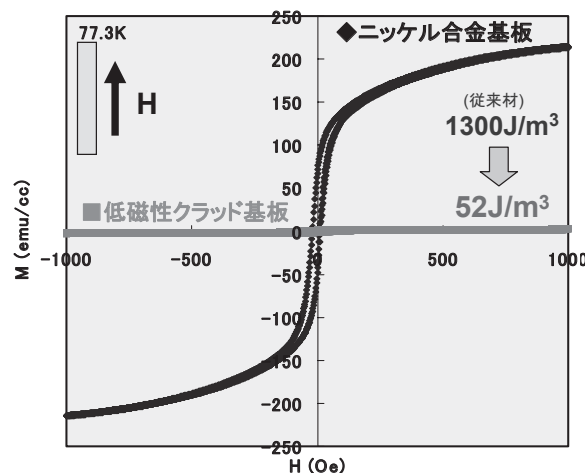


Fig.2 Comparison of magnetization losses

謝辞

本研究の一部は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

参考文献

- M. Ueyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.225

TFA-MOD 法による低コスト YBCO 線材の開発 (6)

- 長尺線材における臨界電流向上 -

Development of the low cost YBCO coated conductor using TFA-MOD process (6)
 - Improvement of I_c in long YBCO coated conductor using TFA-MOD process -

小泉勉, 高橋保夫, 兼子敦, 青木裕治, 長谷川隆代 (昭和電線ケーブルシステム)
 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
 中西達尚, 和泉輝郎, 宮田成紀, 山田穰, 塩原融 (超電導工学研究所)

Tsutomu Koizumi, Yasuo Takahashi, Atsushi Kaneko, Yuji Aoki, Takayo Hasegawa (SWCC-CS)
 Yasuhiro Iijima, Takashi Saitoh (Fujikura)
 Tatsuhisa Nakanishi, Teruo Izumi, Seiki Miyata, Yutaka Yamada, Yuh Shiohara (SRL)

E-mail: k910576@sntl.swcc.co.jp

1. はじめに

我々は、応用基盤プロジェクトにおいて低コスト超電導線材の開発を行っている。開発課題として、高 I_c 化、長尺化、製造速度の高速化等が挙げられる。線材作製プロセスとして採用した有機金属塩熱分解法 (TFA-MOD) は、原料溶液を連続的に基板に塗布・仮焼する作製方法を採用するため、比較的簡便な装置により高速且つ安価に製造することができる。更に本焼プロセスに一括処理が可能なバッチ焼成法を採用することにより、更なる製造速度の高速化及び再現性の向上が見込まれる。

本報では、長尺線材における臨界電流の向上について検討を行った結果について報告する。

2. 実験方法

トリフルオロ酢酸塩(Y-, Ba-)及びナフテン酸塩(Cu-)を混合した原料溶液を、HastelloyC-276/Gd₂Zr₂O₇(IBAD)/CeO₂ (PLD) で構成される金属基板上に Dip-coating 法を用いて、連続塗布を行い、水蒸気を含む酸素気流中、最高到達温度 450°C の条件下において仮焼を行った。この塗布・仮焼工程を数回繰り返す多層コート法により所定の膜厚の YBCO 前駆体膜を形成し、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中、最高到達温度 750°C の条件下において本焼成を行った。その後、Ag 安定化層を形成し、酸素気流中においてポストアニールにより酸素ドーピングを行い、試料とした。

臨界電流は、直流四端子法により液体窒素・自己磁場中にて測定を行った。尚、臨界電流値は電圧基準 1 μ V/cm で定義した。

3. 実験結果

Fig.1 に、これまで我々が作製した長尺の TFA-MOD YBCO 線材における長さに関する進捗の結果を示す。図から、2006 年 12 月を境に線材の特性が向上したことが判る。これは、焼成温度範囲が広くとることが可能な原料溶液を新たに開発し適用したことに加え、ガス流シミュレーションを用い、雰囲気ガスの導入方法及び反応ガスの排気方法の最適化を行ったことで特性向上が実現できたと考えられる。更には、得られた焼成条件を適用し、長尺線材の作製を行ったところ、再現性も向上していることが判った。ここで得られた結果から、バッチ式焼成法は、作製条件の最適化を行うことで、高い再現性が得られることが示唆される。

現在我々は、大型本焼装置の導入を行い、更なる長尺化の検討を行っている。導入した大型バッチ式焼成炉は、これまで線材作製に用いてきた炉を相似形で拡大大型化したものであり、これまで得られた知見をフィードバックして設計したものになっている。Fig.2 に新規に導入した大型のバッチ式焼成炉に短尺試料を各位置に取り付けて焼成を行った結果を示す。図から、各位置において、同様な特性が得られたことが判る。

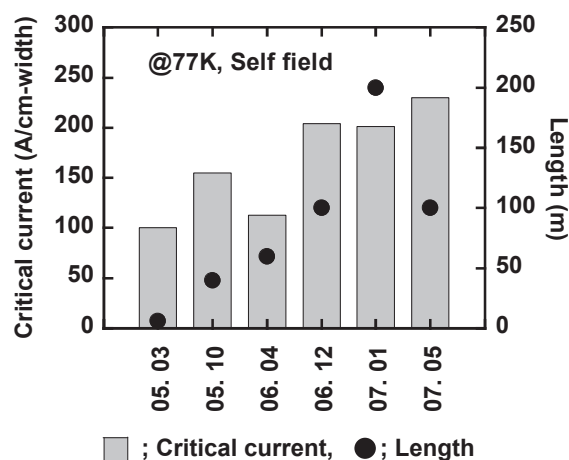


Fig. 1 Significant progress in TFA-MOD wire with batch type heat-treatment process scale-up over the last 3 years..

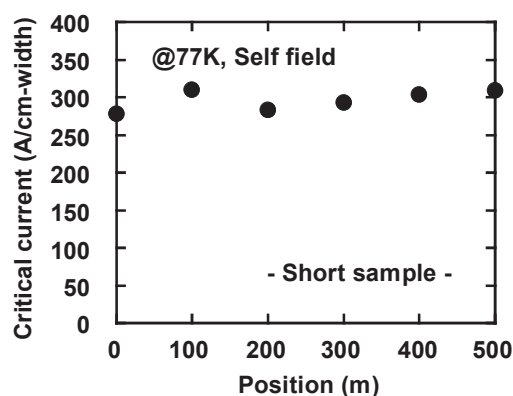


Fig. 2 Distribution of the critical current in 500m-class batch-type furnace.

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)を通じて、新エネルギー総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

Batch 式焼成プロセスによる Ni-W 基板上 YBCO 線材の長尺線材の作製 Preparation of the YBCO long tapes on Ni-W substrates using a batch-type furnace.

兼子敦、高橋保夫、小泉勉、青木裕治、長谷川隆代（昭和電線）；
中西達尚、和泉輝郎、塩原融（SRL）

KANEKO Atsushi, TAKAHASHI Yasuo, KOIZUMI Tsutomu, AOKI Yuji, HASEGAWA Takayo (SWCC) ；
NAKANISHI Tatsuhisa, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: a.kaneko015@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

YBCO 線材の作製プロセスとして有機金属塩熱分解法 (MOD 法: Metal Organic Deposition Process) が製造コストの低減を期待できる点に注目し、開発を進めている。我々が開発を行っている作製方法は、本焼工程に Batch 式焼成法を採用している事が大きな特徴となっている。これまで Ion-Beam Assisted Deposition Process (IBAD)法により中間層を形成した IBAD 基板上で長尺化の検討を進めて来たが、最近に至り、Ni-3at%W の配向 Ni 金属基板においても基板の面内配向性や表面粗さの改善が進み、短尺試料において $J_c > 1\text{MA}/\text{cm}^2$ の特性が得られている。短尺試料で最適化を行った熱処理条件を用いて、Ni-3at%W 基板上での長尺化の検討を行っている。

本報告では、Batch 式焼成法を適用して Ni-3at%W 基板上の YBCO 線材の長尺化の検討を実施した結果について報告する。

2. 実験方法

Ni-3at%W 配向金属基板上に MOD 法により $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ を第一中間層として形成し、その上に Sputtering 法により CeO_2 を第二中間層として成膜したものを基板として使用した。この基板上に Y, Ba 及び Cu の元素で構成される前駆体膜を Dip-coating 法により複数回の塗布・仮焼を行う事により作製した。塗布に用いた溶液は、Y と Ba がトリフルオロ酢酸 (TFA) 塩であり、Cu はナフテン酸塩の有機金属塩を Y:Ba:Cu=1:1.5:3 で混合したものを使用した。本焼は線材をドラムに螺旋状に巻き付け、50 Torr の減圧雰囲気下で Batch 式熱処理を行うことにより YBCO 膜の結晶化を行った。本焼後の YBCO 膜の膜厚は約 $1.5\ \mu\text{m}$ であり、Ag の安定化層を形成した後、 O_2 雰囲気中でポストアニール処理を行った。作製した YBCO 線材の評価は、X線回折 (XRD) により面内配向性を、表面形態の観察は走査型電子顕微鏡 (SEM) を各々用いて行った。臨界電流値 (J_c) は直流 4 端子法を用いて 77K、自己磁界中で評価を行い、 J_c 値の規定は $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧基準で定義した。

3. 結果及び考察

Fig1 において、膜厚の異なる三つの短尺試料を用いた本焼時の最高到達温度 730°C における焼成時間と J_c 値の関係を示す。 J_c の増加が飽和した後の保持時間は、5 時間以内であれば J_c の劣化が生じないことを示している。この結果より、長尺線材を本焼した際に、 BaF_2 が残留しないようにするために、完全に仮焼膜を反応させることを目的として 5 時間の保持時間を採用した。TFA-MOD 法における Batch 式本焼では、反応過程で発生する HF ガスの発生と排出を制御する事は均一な焼成を行う上で重要な要因となっており、総長 50m の長尺線材の本焼熱処理を模擬した焼成試

験を行った。模擬に使用した長尺線材は、10m ごとに短尺の試料と仮焼膜を塗布したダミー線を接続したパッチ線材を試料として使用した。Fig2 にパッチ焼成による J_c 値の分布を示す。100A/cm-width 以上の特性が均一に得られており、50m × 100A 級の線材を焼成できる事が示唆されたので、同条件で総長 40m の Ni-3%W 基板上 YBCO 線材の焼成を行った。両端から 5cm 切出した試料の J_c 値は各々、115A/cm-width と 128A/cm-width であった。全長試験の結果に関する詳細は、当日報告する。

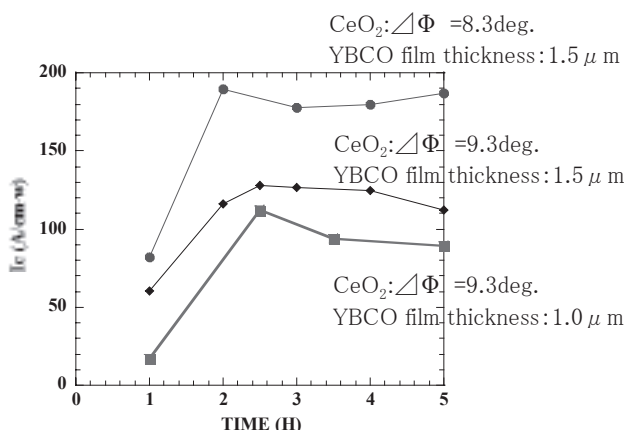


Fig1. Critical current density vs. Hold time for YBCO films on Ni-3at%W substrates.

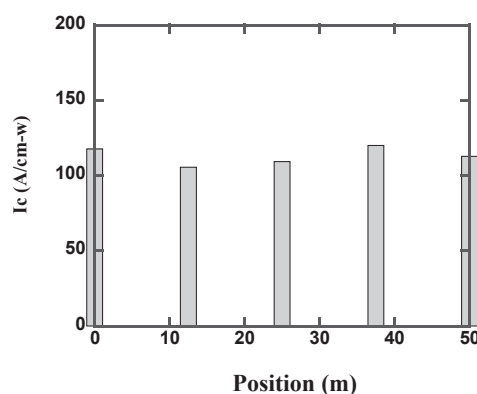


Fig2. Distributions of critical current density on 50m patch work YBCO tapes.

謝辞

本研究は、「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として (財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

TFA-MODによるY系線材高Ic化のための中間層特性向上の検討

Preparation of buffer layer on metallic substrate for the high Ic YBCO coated conductor by using TFA-MOD process

高橋保夫, 小泉勉, 兼子敦, 青木裕治, 長谷川隆代 (昭和電線ケーブルシステム(株)),
飯島康弘(フジクラ)、宮田成紀、山田穰、塩原融 (超工研)

Y.Takahashi, T.Koizumi, T.Nakanishi, T.Hasegawa (SWCC Showa Cable System Co. Ltd).

Y.Iijima (Fujikura LTD.), S.Miyata, Y.Yamada, Y.Shiohara (ISTEC-SRL)

e-mail: k920112@snt1.swcc.co.jp.

はじめに： Y系次世代線材の作製にはIBAD中間層を用いるタイプと配向Ni合金を用いるタイプの基板が検討されている。TFA-MOD法により作製するYBCO線材の場合は、YBCO膜の面内配向制御及び基板との反応抑止層として最表面にCeO₂中間層を配置した中間層が一般的に用いられている。前回の報告では、RTR式による連続熱処理プロセスにより作製した500m長Ni-W基板の面内配向性が全長に亘り6.5-7.0deg.程度の値を得ることができ、中間層についてはCe-Zr-O(CZO: MOD法)、その上のCeO₂-CAP層(RFスパッタ法)は200m級の長尺成膜を各々行った結果、比較的均一な面内配向膜が得られることを報告した。

本研究ではTFA-MOD法を用いたYBCO線材の特性向上検討の一環として、CeO₂中間層の高特性化及び高速化の検討結果について報告すると共に、RFスパッタを用いたPLD-CeO₂/GZO-IBAD基板上へのCeO₂ CAP層の検討結果についても報告する。

実験方法： 配向Ni-3at%Wテープ上の中間層はMOD法で成膜したCZOバリア層とRFスパッタ法で作製したCeO₂キャップ層の2層構造(CeO₂/CZO/NiW)を採用した。CZO膜の焼成及びCeO₂膜の成膜はRTR式の連続処理で行った。CZO層厚は150nmとし、CeO₂厚は75-200nmとした。また、表面平坦性の向上の検討に当ってはPLD-CeO₂/GZO-IBAD上へRFスパッタ法を用いてCeO₂膜を成膜したものを用意した。YBCO膜の作製はTFA-MOD法で行い、TFA溶液の組成はY:Ba:Cu=1:1.5:3とした。YBCO膜の焼成は50-150 Torrの減圧した710-740℃のAr-O₂にH₂O加湿した雰囲気中で行った。中間層およびYBCO膜の評価は表面観察をSEM及びAFM、結晶構造の評価はXRD(θ/2θ、極点図)で行い、輸送電流特性(J_c)の測定は77K、自己磁界中で直流四端子法を用いて行い、1μV/cmの電圧基準で定義した。

結果： Fig. 1にCeO₂の膜厚を変化させたCeO₂/CZO/Ni-W基板上にTFA-MODで成膜したYBCO

のI_cを示す。Fig.1よりYBCO膜の膜厚によらず、CeO₂中間層の膜厚が100nm以上の領域において比較的高いI_cが得られることがわかった。従来の検討から150nm厚のCZOではNi,WのYBCO中への拡散が見られないと考えられる。TFA-MODによるYBCOの焼成は700℃以上で数時間必要であることからCeO₂層とYBCO層の反応が生じ、CeO₂厚が薄い場合にはI_cの低下が生じたと考えられる。

PLD-CeO₂/GZO-IBADにRFスパッタ法でCeO₂CAP層を約150nm成膜後YBCO膜をTFA-MODで成膜した。YBCO膜のI_cは1.5μm厚で約10%程度向上し、約2μm厚のYBCO膜でI_c=526A/cm-wが得られている。詳細については当日報告する。

謝辞： 本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、ISTECを通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである

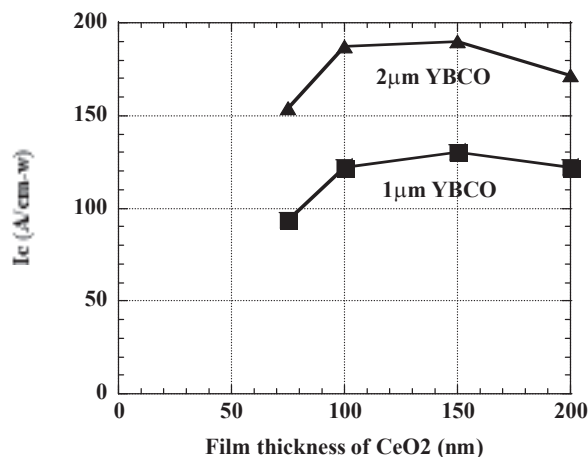


Fig1. Ic mesurment results of YBCO/CeO₂/CZO/NiW tapes on various films thickness of CeO₂ layer.

強磁場 CVD 法による $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の作製と超伝導特性

Preparation and superconducting properties of $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films by in-field CVD

松尾 浩幸, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大)

MATSUO Hiroyuki, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: hmatsu@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123) は結晶構造に起因した磁化率の異方性から強磁場中で作製することにより結晶配向性及び超伝導特性が向上することが磁場効果として報告されている[1]。一方、 $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Ho123) は Ho イオンが大きな磁気モーメントを持つために Y123 と比較して顕著な磁場効果が生じる可能性がある。今回我々は化学気相法 (CVD) を用いて強磁場中で Ho123 薄膜を作製し、結晶性及び電流輸送特性を評価した。

2. 実験方法

試料は強磁場 CVD 法により SrTiO_3 (STO) 基板上に成膜磁場 (B_{CVD}) 0 T および 8 T 中で成膜した Ho rich (Ho-0T, Ho-8T) および Cu rich (Cu-0T, Cu-8T) の組成比を持つ 4 種類の Ho123 薄膜である。作製した試料は XRD, EDS, SEM, TEM により評価した。また直流 4 端子法により最大 17 T までの強磁場中で電気抵抗率および臨界電流密度 (J_c) の磁場、温度、角度依存性を測定した。磁場印加角度依存性では $B//c$ を $\theta=0^\circ$ としている。

3. 結果

Table.1 に全ての試料に対する XRD, EDS、電気抵抗測定および臨界電流密度測定から得られた諸特性を示す。これらの結果より従来報告されている強磁場中の成膜による結晶配向性及び超伝導特性の向上は見られない。したがって、強磁場中で STO 基板上に Ho123 を作製した場合は顕著な磁場効果が現れないことが分かった。

Fig.1 に Cu-0T 試料の 70 K の J_c の磁場印加角度依存性を示す。3 T の低磁場領域および 8 T 以上の高磁場領域において $\theta=0^\circ$ にピークが見られるが、5 T~7 T では逆にディップが現れている。 $B//c$ のピークはこれまでの報告から刃状転位による c 軸相関ピンと考えられる。Fig.2 に 5 T における J_c および n 値の磁場印加角度依存性を示す。 J_c および n 値は共に $\theta=30^\circ$ のところにブロードなピークが現れ、これが $B//c$ にディップのように見える原因となっていると考えられる。この様な振る舞い

は他の試料でも見られている。Fig.2 に示すように、 n 値も J_c とよく類似した振る舞いが見られているが、 $\theta=30^\circ$ のピークは J_c よりも n 値の方が顕著に現れている。特に Ho-0T 試料では J_c ではほとんど見えない $\theta=30^\circ$ のブロードなピークは n 値では明らかに観測されている。

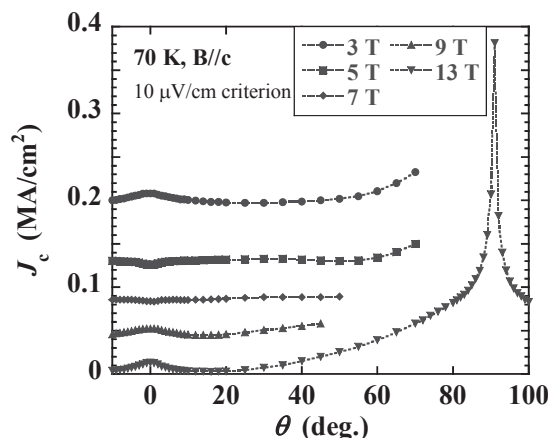


Fig. 1 Angular dependence of J_c at 70 K in various magnetic fields for Cu-0T sample.

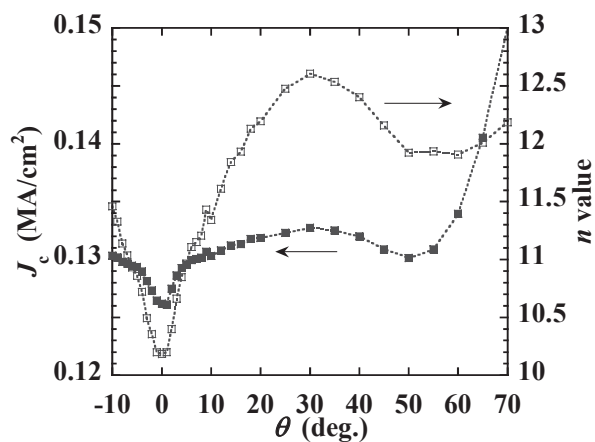


Fig.2 Details of angular dependence of J_c and n -value at 70 K in 5 T for Cu-0T sample.

参考文献

[1] Y. Ma et al, Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 726

Table1. Specifications of samples

試料	Ho-0T	Ho-8T	Cu-0T	Cu-8T	
B_{CVD}	0 T	8 T	0 T	8 T	
Ho : Ba : Cu	1.0:1.2:0.9	1.0:1.1:1.0	1.0:2.5:4.5	1.0:2.3:4.3	
T_c (K)	90.6	90.6	91.0	90.8	
(005) $\Delta\omega$ (deg.)	0.31	0.29	0.19	0.24	
(103) $\Delta\phi$ (deg.)	0.70	0.70	0.60	0.70	
B_{irr} (T)	9.47	9.27	9.78	9.21	$10^{-1} \mu\Omega\text{cm}$ criterion
J_c (1 T) $B//c$ (MA/cm ²)	0.18	0.18	0.23	0.16	10 $\mu\text{V/cm}$ criterion

MOD-YBa₂Cu₃O_{7-δ} バイクリスタル薄膜の(001)小傾角粒界における磁界中磁束フロー損失 In-field flux flow dissipation at (001) tilt low angle grain boundaries in MOD-YBa₂Cu₃O_{7-δ} bicrystalline films

木須 隆暢, MATSEKH Arkadiy, 井上昌睦(九大シス情); 吉積 正晃, 鬼頭 豊, 須藤 泰範, 和泉 輝郎, 塩原 融(超電導工研)
KISS Takanobu, MATSEKH Arkadiy, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.); YOSHIKUMI Masateru, KITO Yutaka, SUTOH
Yasunori, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

前回の報告¹⁾で、PLD 法による YBCO バイクリスタル薄膜を用い、四端子法によって粒間 J_c 、粒内 J_c の外部磁界依存性を調べると共に、高磁界型低温レーザ走査顕微鏡 (HF-LTLSM) を用い、磁界下における損失分布の空間変化を可視化することに成功した事を述べた。今回は MOD 法による YBa₂Cu₃O_{7-δ} バイクリスタル薄膜における磁界下の局所損失分布を観測すると共に、磁束フロー抵抗の磁界依存性に着目し、小傾角粒界におけるボルテックスダイナミクスについて考察した。

2. 実験

(001)-tilt 6° 傾角を有する SrTiO₃ バイクリスタル基板の上に MOD 法によりエピタキシャル成長した YBCO 膜を形成した。YBCO の膜厚は 150nm である。粒界を垂直に横切る形に、マイクロブリッジをエッチングにより作製し測定試料とした。粒間と粒内の特性を得るためにそれぞれ電圧端子を設け、四端子法により通電特性の評価を行った。

HF-LTLSM により、5T までの垂直磁界下において粒界の局所電界分布を計測した。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に四端子法によって得られた電流-電圧特性の磁界依存性と、その結果より評価した微分抵抗の磁界依存性を示す。同図に実線で示したのは、Abrikosov-Josephson vortex がシングルチャネルとしてフローするとした理論曲線²⁾：

$R(B) = R_0 \sqrt{B/(B+B_0)}$ である。低磁界中において理論と実測結果とは良い一致を示すことが分かる。磁界の増大に伴って、膜中にトラップされた磁束と粒界をフローする磁束との shearing による相互作用が増大し、やがてフロー領域の両側を drag するマルチチャネルフロー状態を経て、shearing による相互作用とバルクピン止めによる相互作用とが等しくなることにより全体がフローするクロスオーバー領域に至ると考えられる。これは前回既に報告している高磁界中での均一な損失分布と consistent な結果である。

また、高磁界中の粒界部分の損失を高分解能のイメージングを行うことによって、粒界内部の損失分布に関する構造を可視化できることが明らかとなった。Fig. 2 に示すとおり、損失の分布パターンは広い磁界領域に亘って同様であることから、粒界の結晶組織の不均一性に起因すると考えられる。

4. まとめ

外部磁界の上昇に伴って、Abrikosov-Josephson vortex が粒界部分をシングルチャネルとしてフローする領域から、マルチチャネルフローを経て、バルク全体で磁束フローが発生するクロスオーバー過程を、粒界の微分抵抗の磁界依存性、ならびに HF-LTLSM による損失可視化像との対応より明らかとした。さらに、粒界部分での損失発生は、粒界に沿って不均一に局在する事を明らかとした。損失の局在パターンは高磁界下においても変化しないことから、結晶組織の不均一性に起因すると考えられる。高分解能ゼーベック観測による結晶組織の評価結果は、磁束フロー損失分布と良い相関を示し、このことを支持している。

謝辞：本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環とし

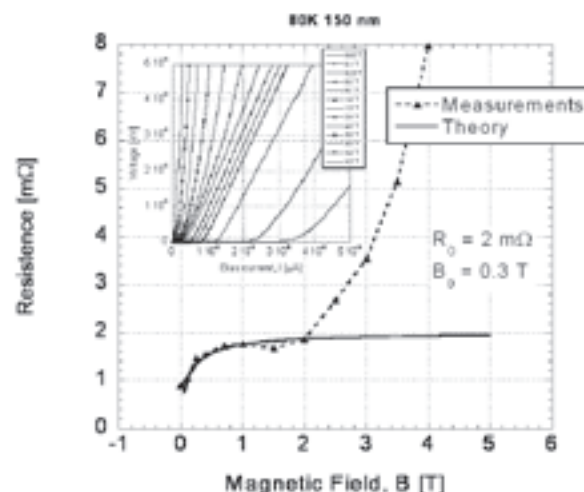


Fig. 1 Dynamic resistance of the grain boundary as a function of external field, the solid line indicates theoretical curve by the framework of Abrikosov-Josephson vortex flow²⁾. Inset shows transport I - V characteristics measured by the four-probe method.

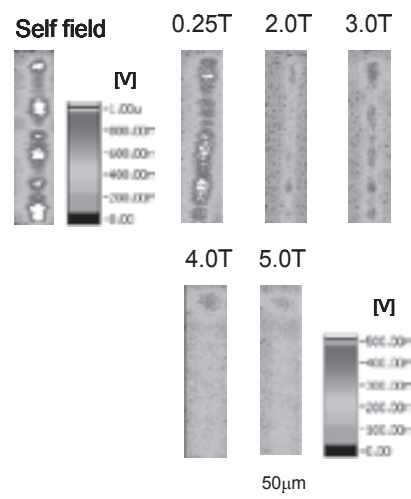


Fig. 2 Visualization of local dissipation at the grain boundary as a function of external magnetic field. Dissipation is not uniform along the grain boundary and its patterns look similar even under high magnetic field close to the crossover field.

て、ISTEC を通じて、NEDO からの委託を受けて実施するとともに日本学術振興会の科研費 (18360153) の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. 木須ほか、第 76 回春季低温工学・超電導学会、pp. 137.
2. A. Gurevich et al., PRL 88, 097001 (2002).

放射光を用いた coated conductor 中の超伝導膜の内部ひずみ直接測定

Direct measurement of internal strain of superconducting film in coated conductor using synchrotron radiation

菅野未知央, 足立大樹(京大); 町屋修太郎 (原子力機構), 長村光造 (応研)

Werner Prusseit (THEVA), 佐藤正直 (Spring-8)

SUGANO Michinaka, ADACHI Hiroki (Kyoto Univ.), MACHIYA Shutaro (JAEA), OSAMURA Kozo (RIAS);

Werner PRUSSEIT (THEVA), SATO Masugu (Spring-8)

E-mail : sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

RE-123 coated conductor は Hastelloy 基板を使用することにより、高い応力、ひずみ耐性を有することから強磁場マグネットなど、大電磁力下での応用に期待が持たれている。一方、臨界電流 (I_c) と一軸ひずみとの関係では、超伝導膜の破壊開始よりも低いひずみにおいても、 I_c が可逆的に変化する真性ひずみ効果が見出されている。

Coated conductor の許容ひずみ値は超伝導膜自体の破断ひずみおよび残留ひずみにより決定される。Coated conductor では、構成要素の線膨張率により発生する熱ひずみ以外に、成膜段階で蓄積されるひずみを考慮する必要があるため、複合則による残留ひずみの推定だけでなく、実測による評価が不可欠である。また、超伝導膜自体の破断ひずみ評価については、free-standing な二軸配向膜を得ることは非常に困難であるため、複合材料である coated conductor 中の膜の内部ひずみを測定する手法が必要になる。超伝導膜の内部ひずみ状態は前述のように、破断以前の超伝導特性にも影響を及ぼすため、その定量評価は I_c -ひずみ特性の統一的理解のためにも非常に重要である。

本研究では、放射光を用いてひずみ負荷状態で coated conductor 中の RE-123 膜の格子定数を測定し、内部ひずみの直接測定を行った結果について報告する。

2. 実験方法

本研究で用いた線材の構造は、Ag/YBCO or DyBCO/MgO/Hastelloy C-276 となっている。線材は THEVA 社から提供されたものである。DyBCO 線材については、保護層である Ag の厚さが異なる 2 種類について測定を実施した。

超伝導膜のひずみを評価するためには、基準となるゼロひずみ状態での格子定数 (d_0) が必要になる。ここでは、Ag をケミカルエッチングにより除去した線材から RE-123/MgO の複合膜を機械的にはく離、粉碎し、粉末の X 線回折を同じ回折計で測定して、近似的に RE-123 膜の d_0 とした。また、Fig. 1 に示すような手動式の引張試験器具を大型放射光施設 (Spring-8) の 46XU のビームラインの多軸回折計にマウントして、無負荷およびひずみ負荷状態での格子定数の変化を測定した。負荷した荷重およびひずみは、ロードセルと対称型の伸び計 (ゲージ長: 15 mm) によりモニターした。また、段階的に変化させた各負荷ひずみ状態で RE-123 膜の格子定数を測定した。使用したビームのエネルギーは 19.5 keV であり、透過配置を採用した。これにより、散乱ベクトルは試料軸方向になり、ひずみ負荷方向に垂直な格子面の格子定数変化が測定可能になる。

Coated conductor の 77 K での I_c -ひずみ特性を測定した。ひずみは同様に伸び計により測定し、負荷、除荷を繰り返すことにより、 I_c の不可逆劣化の開始ひずみを評価した。

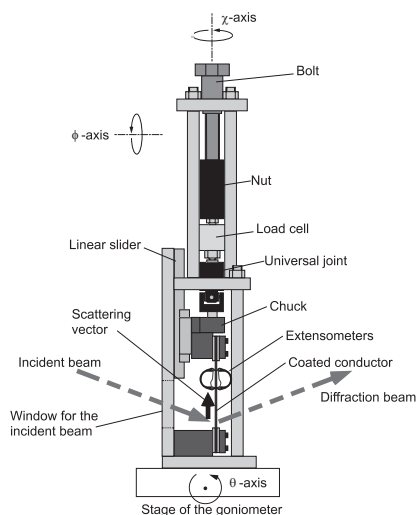


Fig. 1 Tensile testing apparatus mounted on the goniometer and the configuration of X-ray diffraction measurement.

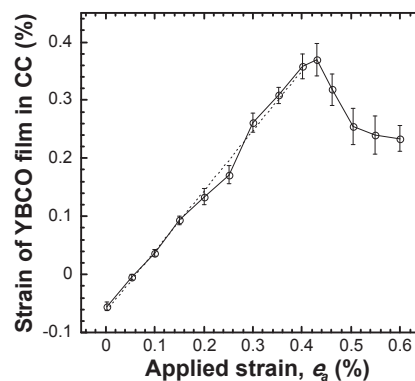


Fig. 2 Variation of strain of YBCO film with increase of applied strain.

3. 実験結果

Fig. 2 に YBCO 線材の負荷ひずみと格子定数変化から評価した膜のひずみの関係を示す。ここで、負荷ひずみは伸び計で測定した値である。点線は、両者の線形部分を最小二乗法で近似した直線を示しており、この y 切片から負荷ひずみゼロでの YBCO 膜のひずみ、すなわち室温での残留ひずみを評価したところ、-0.061% であった。このことから、成膜時に YBCO 層には圧縮の残留ひずみが発生していることが明らかになった。当日の発表では、膜の破断ひずみ評価、その他の線材の結果及び I_c -ひずみ特性との関係についても報告する。

本研究は科研費(808070900031)の助成を受けて実施したものである。

MOCVD-YBCO 導体の I_c -ひずみ特性における磁場効果

Effect of magnetic field on I_c -strain characteristic for MOCVD-YBCO coated conductor

菅野未知央, 中村武恒, 真鍋智之 (京大), 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫 (中部電力)

SUGANO Michinaka, NAKAMURA Taketsune, MANABE Tomoyuki (Kyoto Univ.);

SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail : sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として、YBCO coated conductor を超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 用コイルに応用するための基礎特性評価を実施している。Y 系線材を用いた SMES コイル利点の一つは、高い J_c - B 特性を活かした高磁場設計を採用することにより、既存の Nb-Ti 線材を用いたコイルと比較してサイズのコンパクト化が可能であることである。一方、高磁場、大電流下での運転では、線材長さ方向に強大なフープ応力が発生するため、線材のひずみ特性の評価が不可欠である。これまで、我々のグループでは自己磁場下での I_c -ひずみ特性について報告を行ってきたが、コイル応用を考えると、外部磁場印加状態での特性評価がより重要である。今回、磁場、温度可変環境で線材の長さ方向に引張ひずみを負荷した状態で I_c を測定するシステムを立ち上げ、MOCVD-YBCO 線材の磁場中での I_c -ひずみ特性を評価したので、その結果について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に装置の測定サンプル周辺部分の概略図を示す。プローブの上部に設置されたステッピングモーターによりプルロッドに与えられた上下方向の運動を二つのカムの回転を介して水平方向の運動に変換する。電流電極は片方が固定、もう一方が可動式になっており、線材は両電極間にハンダ付けにより固定されている。可動電極は、カム 2 の先端に接しており、カムの回転とともに図の左側に移動し、線材長さ方向に引張の荷重を負荷する機構になっている。可動電極はピンで支持されていることから、水平方向の運動が保証されるとともに、冷却中に線材に対して予荷重が負荷されない仕組みになっている。 I_c は 4 端子法により測定し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の基準で決定した。電極間距離は約 30 mm、電圧端子間距離は 18 mm である。また、線材のひずみは、対称型の伸び計を用いて測定した。測定プローブは、ヘリウムガスフロー式の温度可変クライオスタットに挿入して使用した。今回の測定では、温度の安定性を重視して、クライオスタットに液体窒素を充填し、浸漬冷却で測定を行った。クライオスタットおよび測定プローブは、伝導冷却式のマグネットの室温ボア内に挿入し、印加磁場を 0~10 T の範囲で変化させて、 I_c -ひずみ特性を測定した。測定サンプルの構造は、Ag(10 μm)/YBCO(1 μm)/CeO₂(0.4 μm)/GZO(1 μm)/Hastelloy C-276(100 μm) である。ここで、YBCO 層は MOCVD 法により成膜されている。

3. 実験結果

Fig. 2 に ab 面に平行に印加した磁場による I_c -ひずみ特性の変化を示した。図の縦軸は、各磁場で無負荷の状態に測定した $I_c(I_{c0}(B))$ で規格化した I_c 値を取っている。 $B=1.2$ T 以下では、磁場の増大とともに I_c の低下が緩やかになるのに対して、それ以上の磁場では高磁場ほど同じひずみ値での I_c の低下が大きくなるという特徴が観察された。このような外部磁場による I_c -ひずみ特性の変化は、Ekin らのグループからも報告されている[1]。また、 I_c の可逆性についても調べたところ、一例とし

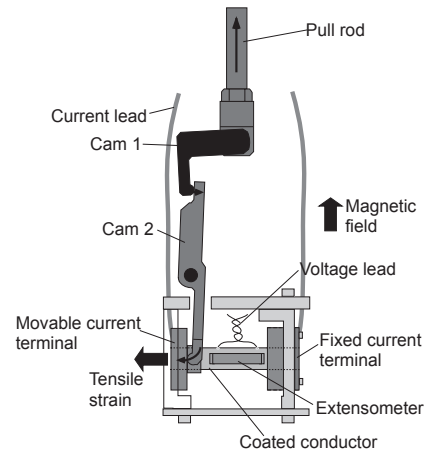


Fig. 1 Schematic drawing of the apparatus for I_c -strain measurement under magnetic field.

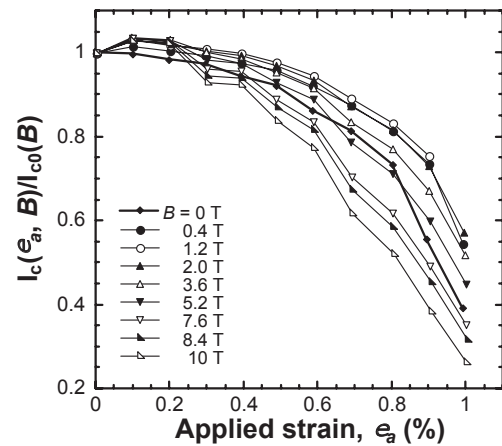


Fig. 2 I_c -strain characteristics at 77 K under the magnetic fields up to 10 T.

て $B=10$ T で 0.7% のひずみ負荷により I_c は初期値の約 60% まで低下するものの、除荷後はほぼ初期値まで回復するという大きな I_c の可逆変化が確認された。

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO 線材は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。

[1] Cheggour et al, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15 (2005) 3577.

低 Ba 溶液を用いた TFA-MOD 法により作製された YBCO 線材の臨界電流特性 Critical current properties in YBCO coated conductor fabricated by the TFA-MOD process using Ba-poor solutions

井上 昌睦, 木須 隆暢, 本山 皓士(九大); 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 中岡 晃一, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)
INOUE Masayoshi, KISS Takano, MOTOYAMA Koji (Kyushu Univ.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
NAKAOKA Koichi, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: inoue@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

低コスト化が図れる YBCO 線材作製プロセスとして研究開発が進められている TFA-MOD プロセスにおいては、塗布原料の Ba 組成を低くすることにより、高い臨界電流(J_c)特性が得られることが明らかとなっている。本研究では、同手法により作製された YBCO 線材の臨界電流特性を広範な温度(T)、磁場(B)、磁場印加角度(θ)に亘り実験により明らかとするとともに、パーコレーションモデルを用いたピンニング解析を行い、 J_c - B - T 特性の定式化について検討したので報告する。

2. 実験

Y, Ba, Cu の原料組成比を 1:1.5:3 として作製された 1cm 幅の YBCO 線材を、幅 85 μm 、長さ 500 μm のマイクロブリッジ形状に加工したものを電流輸送特性評価用の試料として用いた。YBCO 層の膜厚は 1.2 μm である。本試料の電流電圧特性を、温度、磁場、磁場印加角度を系統的に変化させながら、直流 4 端子法にて測定した。温度及び磁場の測定範囲は、それぞれ、4.2K~83K、及び自己磁場~17T である。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、実験により得られた J_c - B - T 特性を示す。自己磁場中の J_c 値は、77K にて 3.8MA/cm² となっており、これは 450A/cm-width の I_c 値に相当する。また、65K では約 8MA/cm² (\cong 960A/cm-width) の J_c が、40K では 16.3MA/cm² (\cong 2800A/cm-width) の J_c が得られており、同線材の臨界電流特性のポテンシャルの高さが分かる。一方、磁場中の J_c 特性を見てみると、 c 軸に平行な磁場中では、77K の 1T 及び 3T にて、それぞれ 0.37MA/cm²、76kA/cm² となっており、磁場に対する依存性が大きいことが分かる。自己磁場中では高 J_c 特性が得られていることから、今後は磁場中の J_c 特性を向上させるためのピンニングの導入等が重要になると思われる。

実験で得られた E - J 特性を用いてパーコレーションモデルに基づくピンニング解析を行った。解析により得られたピンニングパラメータを用いて J_c - B - T 特性の解析解を求めた結果を Fig.1 中に実線で示している。実験結果と定量的に良い一致をしていることが分かる。この解析解から 30T 近傍における J_c 特性を推定してみたところ、4.2K では 30T の磁場中でも 1MA/cm² (\cong 120A/cm-width) の J_c が得られることが予想される。

Fig.2 に 70K、5T における J_c の統計分布を示す。同図にて破線で示した開発当初の TFA-MOD 線材¹⁾に比べると、分布の最小値が向上するとともに、分布そのものがシャープになっていることが分かる。ピンニング特性解析及び J_c の角度依存性等の詳細については当日報告する。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTECを通じて、NEDOからの委託を受けて実施するとともに日本学術振興会の科研費(18360153)の助成を得て行ったものである。

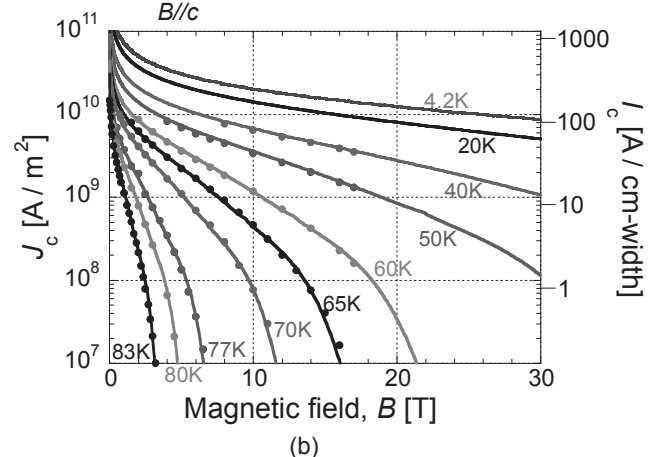
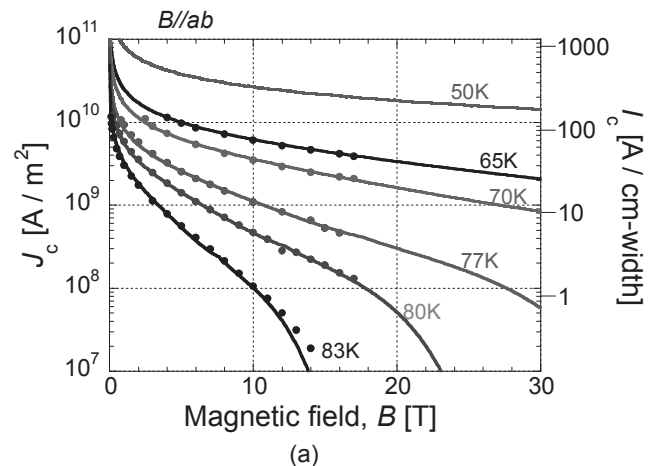


Fig.1 $J_c(I_c)$ - B - T characteristics in (a) $B//ab$ -plane and (b) $B//c$ -axis. Symbols and solid lines are experimental data and analytical expressions, respectively.

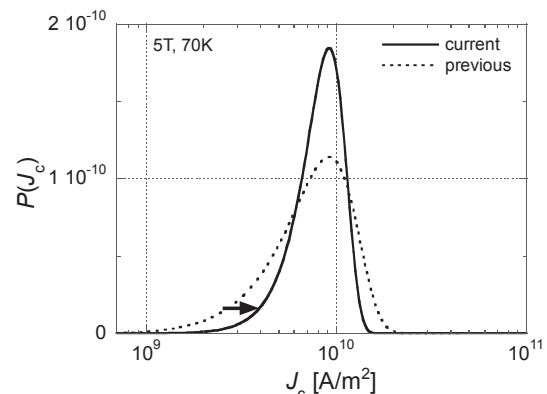


Fig.2 Statistical distribution of J_c at 70K, 5T. Dashed line is that of previous TFA-MOD YBCO tape.

参考文献

1. M. Inoue, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 69 (2003) p.17

数値解析を用いた交流電流損失非接触測定用ピックアップループの検討

Numerical analysis of AC transport current loss measurements using a pick-up loop

濱田 貴子, 田中 寛, 丸子 敦, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄, 岡 徹雄, (新潟大学)
 HAMADA Takako, TANAKA Hiroshi, MARUKO Atsushi, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi,
 SATO Takao, OKA Tetsuo (Niigata University)
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の特性向上に伴い交流電力機器への応用が期待されており, 実用上最も問題となる交流損失を線材の特性を変えなく評価することが重要である. 交流損失には, 通電することにより生じる通電損失と磁界を印加することにより生じる磁化損失がある. 一般的に, 前者は四端子法により測定されており, 後者は磁化法により測定が行われている. 磁化法の場合には外部磁界を印加しピックアップコイルを用いて磁化を測定しているため, 超伝導線材に対して電気的な接触がない. これに対し, 四端子法による測定の場合, はんだ接合による電気的接続があるため連続的に測定を行うことが困難である. また, はんだの残留により超伝導線材の品質を低下させることとなる.

このような背景から, 超伝導線材の交流電流損失を非接触で測定する方法が提案されている^[1,2]. 超伝導線材の交流電流損失はヒステリシス損失が支配的であることに着目し, ピックアップループを用い交流電流損失による線材周囲の磁界変化を測定し損失の導出を行う. ピックアップループを用いた方法では, 高温超伝導線材の断面形状とピックアップループ形状で決定される磁界の捕捉率をあらかじめ調べ, これを補正係数として交流電流損失を非接触で測定する. これまでの研究により, Bi2223/Ag 線材における交流電流損失非接触測定の実験と解析によって得られた数値はほぼ一致することが報告されている^[1]. よって本研究は数値解析により様々な形状に対応したピックアップループの最適設計法を以下に示す条件を基に検討を行った.

- ① 補正係数が電流値に依存しない.
- ② 補正係数がピックアップループの位置に依存しない.
- ③ 補正係数が小さい.

2. ピックアップループ形状に関する検討

はじめに矩形ピックアップループとスパイラルピックアップループに関して数値解析を行い, 矩形ピックアップループは線材表面中心軸とピックアップループの位置に依存するのに対し, スパイラルピックアップループはピックアップループ内であれば位置に依存しないことからスパイラルピックアップループに関して検討を行う. また, 補正係数はスパイラルピックアップループの半径の大きさにも依存しないことも確認した.

Fig.1 にスパイラルピックアップループの数値解析モデルを示す. 図中の X はピックアップループの中心位置と線材中心位置の距離, Y はピックアップループのリターンの線材表面からの距離を示している. Fig.2 に $X=0\text{mm}$, $Y=0.5\text{mm}$ の条件で, 電流値を変化させたときの様々な形状に対応した補正係数 K を示す. 線材形状は, Bi2223/Ag 線材は臨界電流値が 60A, 線幅 3.7mm, 厚さ 0.26mm, YBCO 線材の線幅は 3, 5, 10mm で臨界電流値が 30, 50, 100A, 厚さ $1\mu\text{m}$ の YBCO 薄膜に $100\mu\text{m}$ の銀が積層されているとした. Fig.2 より YBCO 線材幅が増加するに従って補正係数が減少し, Bi2223/Ag 線材と線材幅に近い YBCO 線材の線材幅 3mm を比較すると近い値を示すことがわかる. また, すべての線材形状において電流値の増加に伴い補正係数が増加しており, 補正係数は電流値に依存する. この特性を明確にするために, Fig.3 に $Y=0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5$ として, 線材幅が 10mm の YBCO 線材に対し 50A

通電した時の補正係数で規格化したそれぞれの電流値の補正係数を示す. Fig.3 より, 補正係数は Y の値が小さいほど 1 に近い値を示していることがわかる. このことから, 最適設計の条件①を満たすためには線材表面から可能な限りリターンの位置を近づけるほうがよいことが示された. 次に補正係数の電流値の依存性について具体例を示すと, Fig.3 の条件で $Y=0.5\text{mm}$, 50A を通電時に臨界電流値が $\pm 10\%$ した時の補正係数の変化は $-0.26 \sim 0.36\%$ であった. このことから, 測定精度は十分であるといえる.

以上のことより, 最適設計法はスパイラルピックアップループを用いることにより線材位置に依存しない形状を採用し, リターンの位置が線材表面から可能な限り近いことを満たすように設計する必要が結論を得た.

参考文献

1. J. Ogawa, et al., *Physica C*, vol. 463-465(2007)pp. 1159-1162
2. J. Ogawa, et al., "Numerical analysis of AC transport current loss measurements using a pick-up loop", presented at MT2007, Aug. 2007, Philadelphia, USA

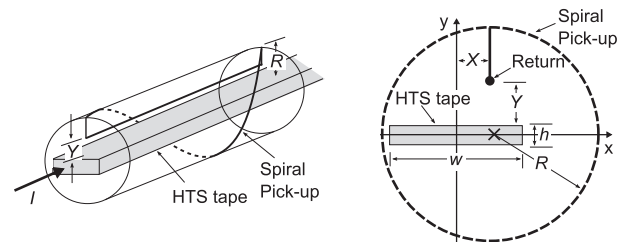


Fig. 1 Numerical analysis model of Spiral pick-up loop

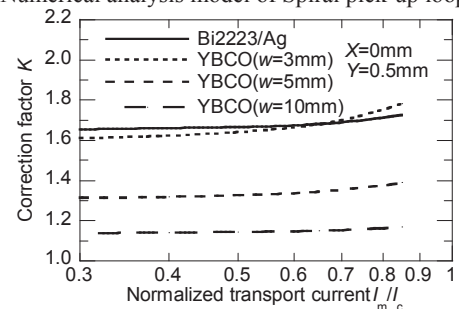


Fig. 2 The correction factor of spiral pick-up loop vs. transport for the different cross section of HTS tapes.

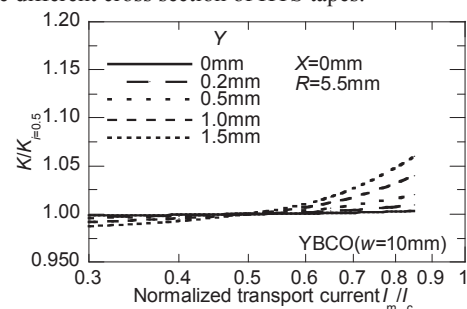


Fig. 3 The ratio of the correction factor K to $K_{I=0.5}$; the correction factor of $0.5I_c$ transport normalized transport current, plotted against normalized transport current for different Y .

高温超伝導集合導体の線材配置と通電方向による交流通電損失特性

AC transport current loss characteristics of HTS assembled conductor for arrangement and direction of transport current

新海 一也, 久米 宗太, 高橋 謙太郎, 八代 保, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄 (新潟大学)
 SHINKAI Kazuya, KUME Sota, TAKAHASHI Kentaro, YASHIRO Tamotsu, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo,
 SATO Takao (Niigata University)
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の性能向上に伴い, ケーブル, 限流器, 変圧器などの交流電力機器への応用が期待されている。超伝導素線では, 電流量が不足するため複数本の超伝導素線を束ねた集合導体化が不可欠となる。このような条件下では, 自身の作る磁界(自己磁界)と隣接する線材が作る磁界により磁界分布と電流分布が決定され, この磁束侵入過程で高温超伝導線の交流損失がヒステリシス的に生じる。この高温超伝導集合導体の交流損失特性を定量的に評価するため, 3本の高温超伝導線材を平面配置と縦積み配置したときの交流通電損失に関して実験と数値解析を行った。また, 単独・同方向・交互通電と通電方法を変えた条件における損失評価を行い, 各電磁条件における交流通電損失特性を示した。

2. 実験・数値解析条件

本研究では, 臨界電流値が 59.2~62.3A の Bi2223/Ag 線材を用い, 平面配置と縦積み配置で測定と数値解析を行った。通電方法は直列接続により通電を行い, 各線材に通電されている電流値は均流化されているとした。実験方法は熱的測定法を用い各電磁条件で各線材に生じる交流損失の測定を行った。また, 数値解析法はベクトルポテンシャルを基に各線材内の電流分布を求め, n 値モデルを用い電流-電圧の関係から各線材の交流損失を導出した。

3. 実験結果および検討

Fig.1 に数値解析より導出した通電電流が $I_m/I_c = 0.5$ 通電時の交流通電損失と線材間距離の関係を示す。Fig.1 中で線材配置は平面配置(a)(b)と縦積み配置(c)(d), 通電条件は同方向通電(a)(c)と交互通電(b)(d)を示している。これらのグラフより, すべての条件において線材間距離が 10mm 以下で影響を受けていることがわかる。平面配置において, 同方向通電時に中央の線材で交流通電損失が減少し, 外側の線材で交流損失が増加している。これに対し交互通電時には中央と外側の線材の両方で損失が増加している。また, 縦積み配置では, 中央と外側の線材で共に, 同方向通電時に損失が増加し, 交互通電時に減少していることがわかる。これらは, 実験結果でも同様の特性を示した。この要因として, Fig.2 に示すように平面配置, 同方向通電の条件(a)では, 中央の線材の線材表面方向からの磁界侵入成分が増加することにより磁束の侵入長が減少し損失を低減させている。外側の線材は通電領域が外側に寄り磁束の侵入長が増加することにより損失が増加したと考えられる。平面配置, 交互通電の条件(b)では, すべての線材で線材幅広面からの磁束の侵入が増加し損失を増加させている。また, 縦積み配置, 同方向通電の条件(c)も(b)と同様の理由で損失を増加させている。これに対し縦積み配置, 交互通電の条件(d)では線材幅広面の磁界を強め合っていることから, 磁束の侵入長が減少し損失が低減されたと考えられる。これらのことから, 通電方法と線材配置を工夫することにより集合導体全体の交流損失を低減することが可能であるといえる。具体的には, 線材を縦積み配置で交互通電の場合に最も交流損失を低減する効果があるといえる。

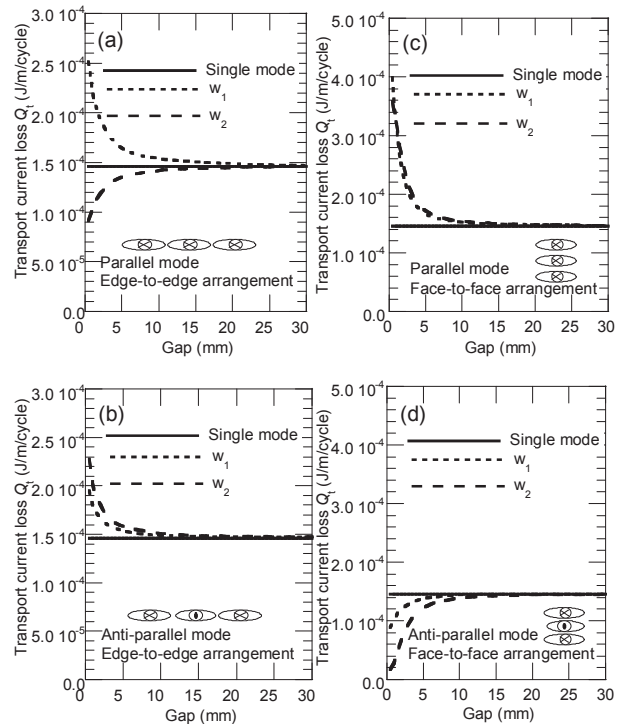


Fig. 1 The transport current losses dependence on the gap when positioned edge-to-edge and face-to-face arrangement. The transport current losses in parallel mode and anti-parallel mode in w_1 and w_2 , are plotted against the gap between the tapes for $I_m/I_c = 0.5$.

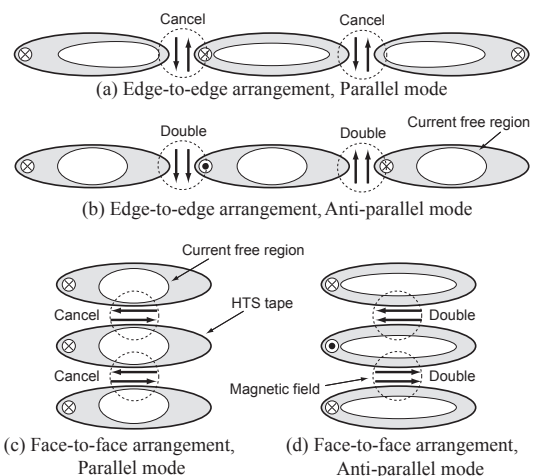


Fig. 2 Schematic illustration of the current distribution in face-to-face and edge-to-edge arrangements with parallel and anti-parallel transport currents.

参考文献

1. M. Majoros, et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol.17, No.2 (2007) pp.1803-1806
2. J. Ogawa, et al., *Physica C*, vol.445-448, (2006) pp.1083-1087

ITER-TF コイル用 Nb₃Sn 素線の軸方向歪印加時における臨界電流特性の評価Performance evaluation of critical current characteristics in Nb₃Sn strands subjected to axial-strain for ITER TF coil

辺見 努, 布谷 嘉彦, 磯野 高明, 小泉 徳潔, 濱田 一弥, 松井 邦浩, 名原 啓博, 高橋 良和,
奥井 良夫, 宇野 康弘, 関 秀一, 押切 雅幸, 奥野 清(原子力機構)

HEMMI Tsutomu, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, KOIZUMI Norikiyo, HAMADA Kazuya, MATSUI Kunihiro, NABARA Yoshihiro, TAKAHASHI Yoshikazu, OKUI Yoshio, UNO Yasuhiro, SEKI Syuichi, OSHIKIRI Masayuki, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)のトロイダル磁場(TF)コイルには、Nb₃Sn 超伝導線材を用いたケーブル・イン・コンジジット型超伝導導体を使用される。TF コイル用超伝導導体には、超伝導撚線とコンジジットの熱収縮率の違いによる熱歪や励磁時の電磁力により超伝導素線に歪が加わる。そこで、TF コイル用超伝導導体の性能予測の基礎データとして使用するために、Nb₃Sn 素線の軸方向歪の印加時における性能評価を実施している。これらの試験に使用している装置の概要及び試験結果について報告する。

2. 試験装置

超伝導素線の軸方向歪に対する特性を評価するために、軸方向歪、温度及び磁場を変化させて臨界電流値を評価する試験装置を開発した[1]。本試験装置では、Fig. 1 に示すベリリウム銅製の馬蹄形治具に超伝導素線を半田付けして固定し、この開口部を開閉させることにより、超伝導素線に対して-0.8%から0.5%の圧縮及び引張の軸方向歪を印加することができる。治具は、外側を液体ヘリウムで囲まれた真空容器内に設置され、治具表面に取り付けたヒータにより4.2 Kから15 Kの範囲で温度を可変でき、磁場は冷凍機冷却式の超伝導マグネットにより、15 Tまで加えることができる。

3. 試験結果

本装置を用いて、ITER-TF コイル用に開発されたブロンズ法 3 種類及び内部拡散法 1 種類の Nb₃Sn 素線の軸方向歪印加時における臨界電流特性を測定した。その一例として、ブロンズ法の素線のうち 1 種類の測定結果を Fig. 2 に示す。実線は、測定結果を模擬する上で比較的良い近似が得られた Durham 大学により提案された評価式に基づいて求められたものである[1]。この評価式を用いて ITER-TF コイルの最大磁場に配置される導体の平均的な磁場である 11.3 T、分流開始温度 T_{C5} の設計値である 5.7 K における 4 種類の Nb₃Sn 素線の特性を Fig. 3 に示す。この結果より、ブロンズ法の素線は歪に対して比較的強く、内部拡散法の素線は臨界電流値のピークが大きいものの、歪に対する感度が高いことがわかる。最大磁場が発生する場所の導体の運転条件では、-0.75%程度の歪条件が想定されており、この領域における臨界電流の歪特性が重要である。より大きな裕度を確保するため、熱処理条件等の最適化を実施している。

4. まとめ

超伝導素線の軸方向歪印加時における臨界電流特性を評価するための試験装置を用いて、ITER-TF コイル用 Nb₃Sn 素線の性能評価及び評価式の導出を行った。これらのデータは実機 TF コイルの性能評価及びスイスの SULTAN 試験装置を用いて行われる実寸導体試験の実験結果の解析に使用される。

参考文献

[1] Y. Nunoya, et al., "Characterization of ITER Nb₃Sn strands under strain-applied conditions" presented at MT-20, 3J06.

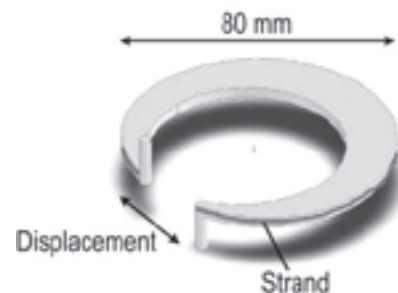


Fig. 1 Schematics and FEM result of the sample holder.

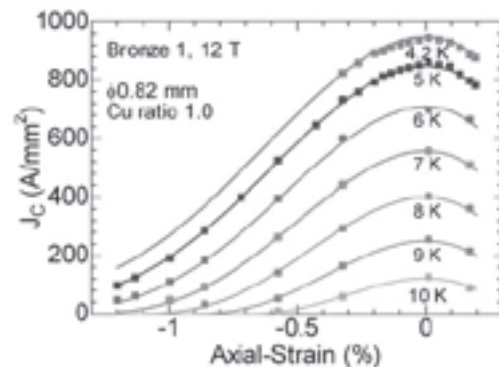


Fig. 2 Measured results of J_c vs. axial-strain characteristics in the Nb₃Sn strand (Bronze 1) at 12 T. Solid line is fitting curve whose formula was developed at Durham University.

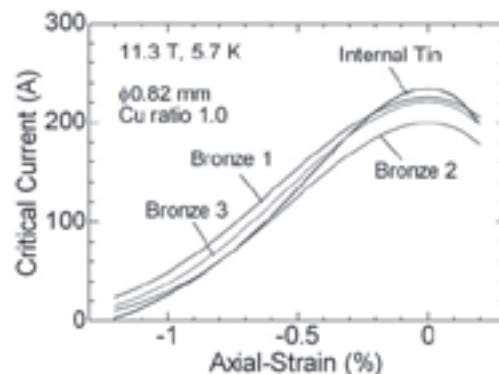


Fig. 3 Critical current vs. axial-strain characteristics in Nb₃Sn strands for ITER TF coils at field of 11.3 T and designed T_{C5} temperature of 5.7 K. Solid lines are scaled from formula which is obtained by best-fitting to the measurement.

ITER-TFコイル製作に向けた試作及び実証試験結果

Results of R&D study to demonstrate ITER TF coil fabrication technique

松井 邦浩, 小泉 徳潔, 辺見 努, 磯野 高明, 高橋 良和, 中嶋 秀夫, 奥野 清 (原子力機構)
 MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, HEMMI Tsutomu, ISONO Takaaki,
 TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: matsui.kunihiro@jaea.go.jp

1. まえがき

原子力機構ではITER TFコイルの調達準備活動を進めている。ITERの工学設計活動の一環として実施したTFモデル・コイル(TFMC)計画において、TFコイル製作の基礎的技術を実証したが、TFコイルはTFMCの約3倍の大きさとなることから、製作時のリスクをなくし工程に従い製作するためには、新たな技術課題を解決する必要がある。原子力機構では、これらの技術課題を解決するための試作及び実証試験(高精度巻線の試作, 含浸手法確立の試験, カバープレート溶接技術の実証, 等)を行い、これまでにそれらの結果を報告してきた¹⁾。本講演では、その一環としてTFコイル用に新たに開発したジョイントの試作及び実証試験結果について報告する。

2. 新構造のジョイントの開発

TFコイルには、Nb₃Sn 超伝導素線とステンレス製ジャケットを用いたケーブル・イン・コンジット導体を使用される。このような導体では熱処理中に素材の熱膨張率に起因した歪が発生し、この歪による熱応力はジャケット及びジョイントのスリーブに作用するため、それらの継手の強度が問題となる。これを解決するために、ジョイントは熱処理中に熱応力を拘束できる構造とする必要がある。その一方で、TFコイルの製作を簡素化し、さらにコイル製作の工程を短縮するために、より簡単な構造をしたジョイントの開発が必要である。

そこで、Fig. 1 に示す新たな構造のジョイントを開発した。本ジョイントは、撚線の周囲に銅製サドルを、その外側にステンレス製ボックスを取り付ける構造をしており、ステンレス製ボックスとジャケットをステンレス製スリーブで接続することで継手の強度を確保する。また、熱処理時にはジョイント外側の導体に取り付けた端部拘束治具により、熱処理後には撚線と銅ブロックの融着により熱応力の拘束が可能となる。更に、前述のとおり構造が簡単であるため、製作が容易である。

3. 新構造のジョイントの実証試験結果

新構造のジョイントで熱応力を拘束できるかを実証するために、Fig. 2 に示すサンプルを試作した。熱処理後、Fig. 2 に示す位置に歪ゲージを取り付け、記号Cで示す位置のジャケットを切断して、ジャケット内に残留している歪の変化を測定した。残留歪の測定結果をFig. 3 に示す。端部拘束治具を取り外し記号 C1 の位置のジャケットを切断した際には歪はほとんど変化せず、記号 C2 の位置のジャケットを切断した際に、約 650ppm の残留歪が測定され、TFコイル用導体に残留していた歪²⁾とほぼ一致した。この結果により、新構造のジョイントで熱応力を拘束できることが確認できた。

また、ジョイントの接続抵抗を測定するために、TFコイル用導体の超伝導特性を評価するサンプル³⁾に本ジョイントを採用した。サンプルは2本の導体で構成され、導体はサンプル下部のジョイントで接続される。サンプルの通電試験において測定したジョイントの抵抗をFig. 4 に示す。測定された抵抗値は、4.5k, 0T, 68Aにおいて約 0.5nΩであり、TFコイルで要求されている1.5nΩ以下を十分に満たす値であった。

4. まとめ

TFコイル用として新たな構造のジョイントを開発し、熱応力を拘束できることの実証試験及び抵抗測定を行った。その結果、TFコイル用として十分な性能を有することが確認できた。

参考文献

- 1) 小泉徳潔ら:2007年度春季低温工学・超電導学会, 2A-a06
- 2) 松井邦浩ら:低温工学 42 (2007) 311
- 3) 高橋良和ら:2007年度秋季低温工学・超電導学会, 3A-a03

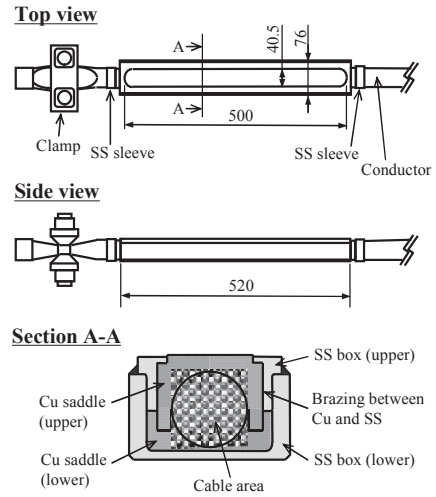


Fig. 1 Structure of new joint

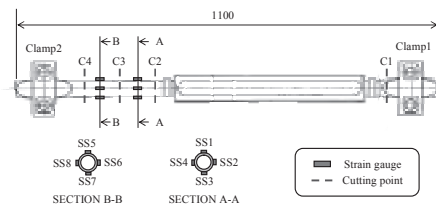


Fig. 2 Location where strain gauges were attached and jacket was cut to measure residual strain of conductor with new joint.

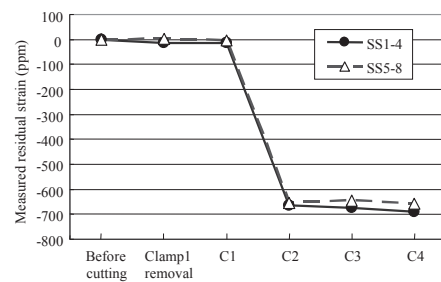


Fig. 3 Measured residual strain of conductor with new joint.

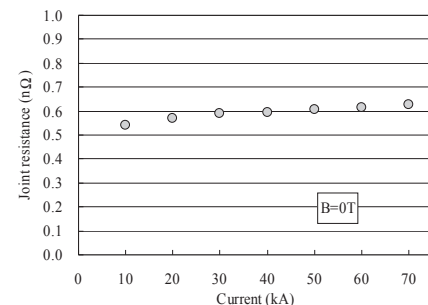


Fig. 4 Measured joint resistance of new joint.

ITER トロイダル磁場コイル用 68kA-Nb₃Sn 導体の超伝導特性 Performance of 68kA-Nb₃Sn conductors for ITER Toroidal Field Coils

高橋 良和、磯野 高明、小泉 徳潔、松井 邦浩、濱田 一弥、布谷 嘉彦、
名原 啓博、押切 雅幸、辺見 努、中嶋 秀夫、奥野 清 (原子力機構)
TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki, KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiro,
HAMADA Kazuya, NUNOYA Yoshihiko, NABARA Yoshihiro, OSHIKIRI Masayuki,
HEMMI Tsutomu, NAKAJIMA Hideo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER計画において、日本はトロイダル磁場(TF)コイル用導体の25%、及びCS用導体の全量の調達を担当する。TFコイルは、運転電流値は68 kA、最大磁場は11.8 T、全蓄積エネルギーは約41 GJである。導体はNb₃Snのケーブル・イン・コンジット(CIC)型で、圧力損失を低減するための中心スパイラル管を有する[1]。本導体の主要諸元をTable 1に示す。TFコイル用導体の調達準備活動として、実寸導体の評価試験をスイスのSULTAN試験装置において行ったので、その結果を報告する。

2. 実寸導体の性能評価試験結果

性能評価試験用サンプルはFig.1に示すように、長さ約3.6mの実寸導体を2本組合せ、左端では2本の導体を電氣的に接続し、右端から2本の導体に直列に電流を通電する構造である。冷媒は左端から2本の導体に並列に供給され、右端の出口に向かって、紙面の左から右へと流れる。右端から2555mmの位置が外部磁場の中心であり、外部磁場は紙面に垂直に印可され、直径450mmの範囲において磁場の均一度は2.5%程度である。サンプルに磁場を印可し、一定の値の電流を通電し、供給する冷媒の温度を階段状にゆっくり上昇させて、分流開始温度 Tcs を測定した。Fig.1に示すように、電圧タップと温度計が導体に取り付けられ、電圧は磁場均一度のよい範囲にある電圧タップ(V3-V9, V4-V10)で測定し、導体の温度は高磁場部の下流の温度計(T5, T6)で測定した。

定格運転電流値 68 kA において、外部磁場 10.78T を印可したときの Tcs 測定結果の一例を Fig.2 に示す。このとき、導体の自己磁場を考慮すると、最大磁場 11.8T となり、コイル内の導体とほぼ同じ磁場分布になる。温度を階段状に上昇させ、一定の温度における電場の測定値を丸印で示している。実線は下記の式から求めた電場 E である。

$$E = E_c \left(\frac{I_{op}}{I_c(B, T, \epsilon)} \right)^n$$

ただし、 $I_c(B, T, \epsilon)$ は素線の臨界電流値の測定結果より求められたスケーリング則 [2]で、評価式は Durham 大学タイプを用いた。 E_c は I_c の判定基準電場(=0.1μV/cm)、 I_{op} は通電電流値である。スケーリング則の B, T, ϵ はそれぞれ磁場、温度、素線軸方向の歪である。 n と ϵ をパラメータとして、測定点に最も近いものを選ぶと、それぞれ、 $n=5$ 、 $\epsilon=-0.75\%$ となる。これらの値はこれまで測定された同様な導体の値とほぼ同じレベルである。図より、Tcsの測定値は約6.3Kであり、設計基準の5.7K以上を満足している。

3. まとめ

素線からジャケット加工までのTF導体製作過程を模擬した導体約3.6mのサンプルを用いて、コイルの運転条件における導体の性能が設計基準を満足していることを確認した。これにより、TFコイル用導体の調達活動を前進させることができた。

参考文献

- [1] 高橋良和ら: 2007年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-a05、p.94
- [2] Y. Nunoya, et al., "Characterization of ITER Nb₃Sn strands under strain-applied conditions", presented at MT-20, 3J06

Table 1 Major parameters of conductor for TF coils

Superconducting material	Nb ₃ Sn
Strand diameter	0.82 mm
Cu/non-Cu in Nb ₃ Sn strand	1
Thickness of Cr plating	2 μm
Cabling pattern	((2SC+1Cu)x3x5x5+core)x6 Cu core: 3x4
Number of Nb ₃ Sn strands	900
Number of Cu strands	522
Local void fraction	29-33%
Inner diameter of jacket	40.5 mm
Thickness of jacket	1.6 mm
Central spiral tube	7 mm x 9 mm (O.D. x I.D.)
Jacket material	316LN

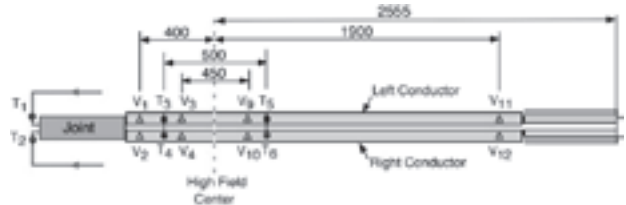


Fig. 1 Location of voltage taps and temperature sensors on the sample for SULTAN facility. Coolant is supplied from joint side.

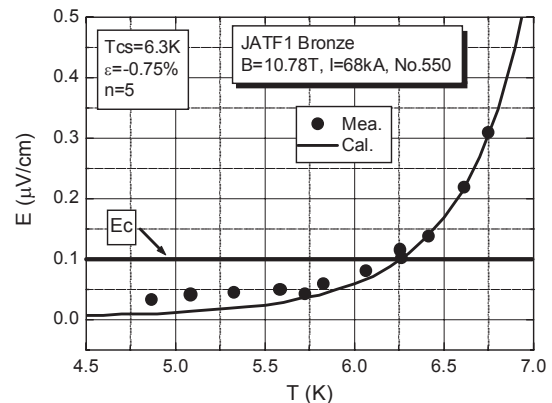


Fig. 2 Electric field vs. Temperature in sample conductor at 68 kA in SULTAN field of 10.78 T. Solid line is fitting curve using strand scaling. Estimated Tcs, strain ε and n-value are 6.3K, -0.75% and 5, respectively.

ITER 用超伝導素線の波状変形特性に関する物理機構の検討

Examination on wave-shaped deformation characteristics of ITER superconducting strand

名原 啓博, 布谷 嘉彦, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 磯野 高明, 宇野 康弘, 関 秀一, 押切 雅幸, 辺見 努, 高橋 良和 (原子力機構)
 NABARA Yoshihiro, NUNOYA Yoshihiko, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, ISONO Takaaki, UNO Yasuhiro, SEKI Syuichi,
 OSHIKIRI Masayuki, HEMMI Tsutomu, TAKAHASHI Yoshikazu (JAEA)
 E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER-TF コイル用 Nb₃Sn 超伝導素線の開発が終わり、実規模のケーブルインコンジット(CIC)導体による試験が行われている。この試験の目的は、電磁力に対する臨界電流などの性能の低下度合いを予測することである。この導体性能の低下は、撓られた素線に電磁力が加わると、素線が波状に曲げ変形を受けることが原因と考えられている。そこで、素線一本を用いた実験結果から CIC 導体での性能低下の度合いを予測するための実験を著者らは近年行っている[1]。本研究では、TFコイル用に開発された3つのブロンズ法素線の実験を行った結果、波状変形に対する性能の低下度合いに明らかな違いが見られたため、その原因について検討を行った。

2. 実験結果からの検討

ブロンズ法で製作された3つのサンプルの5Kでの負荷に対する規格化臨界電流を Fig.1 に示す。Fig.1 中の破線は低抵抗モデル(LRM)、一点鎖線は高抵抗モデル(HRM)の計算値であり、LRM はフィラメント間電気抵抗をゼロ、HRM は無限大と仮定し、 I_c の磁場、温度、歪特性を用いて計算した[1,2]。この図から、サンプル A に比べてサンプル B,C にはフィラメント間電気抵抗を高める何らかの要因があると推測される。

まず、熱処理後の素線断面を SEM 写真で調べたところ、サンプル B には Kirkendall ボイドが散在していたのに対し、サンプル A,C にはあまり見られなかった。これは、サンプル A のフィラメント内の第三元素が Nb の拡散を促すことにより、Sn と Nb の拡散速度差を小さくし、ボイドの発生が抑制された可能性がある。またサンプル C は第三元素の添加量が最も少なく I_c も低めだったことから、熱処理後のブロンズ中残存 Sn 濃度がサンプル A, B に比べて高めであることが予想される(熱処理前 Sn 濃度も最も高い)。以上の考察から、サンプル B は Kirkendall ボイドによって、サンプル C は残存 Sn によってフィラメント間電気抵抗が高くなったと考えられ、これを検証するためにシミュレーションを行った。

3. 数値シミュレーションからの検討

Fig.2 に示すようにフィラメントを 96 本としてモデル化し、素線断面内にボイドが無い場合(サンプル A; 図(a))と有る場合(サンプル B; 図(b))、Sn 濃度を高めてブロンズの電気抵抗を上げた場合(サンプル C; 図(a))の 3 ケースについて、Fig.3 に示す電気回路(分布定数回路)の方程式を解くシミュレーションを行った。このとき、各フィラメントは他の全てのフィラメントとコンダクタンス G_{ij} ($i,j=1,2,\dots,96; i \neq j$) で繋がっている。また G_{ij} の値は、Fig.2 の断面形状をそれぞれ ANSYS に与え、電位計算から算出した。Fig.4 にシミュレーションの結果を示す。全体的に、計算結果は実験データによく一致している。このとき、サンプル B のボイドは素線の断面写真と同様に与え、サンプル C の Sn 濃度は 0.75wt.% だけ高めている。また、印加負荷が高くなると実験データとの差が大きくなるのは、実験では塑性変形による曲げ剛性の低下が見られたのに対し、本計算では弾性を仮定して曲げ剛性を一定にしていることが原因と考えられる。本計算結果から、Kirkendall ボイドやブロンズ中残存 Sn がサンプル B,C のフィラメント間電気抵抗を高めている可能性が示された。

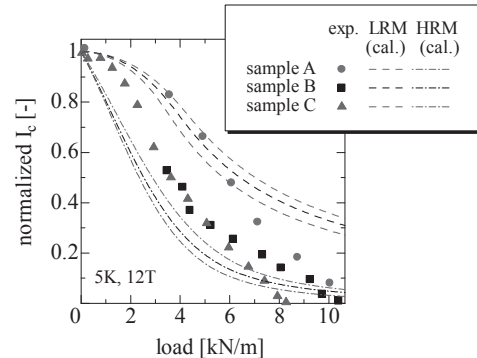


Fig.1 Normalized critical current against load. Experimental data and theoretical calculation.

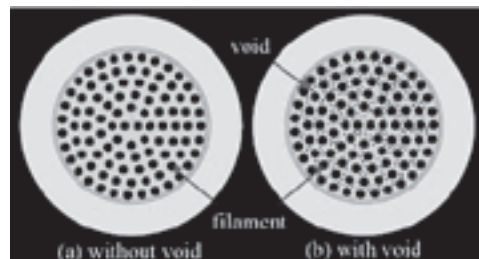


Fig.2 Strand cross-section models in numerical simulation.

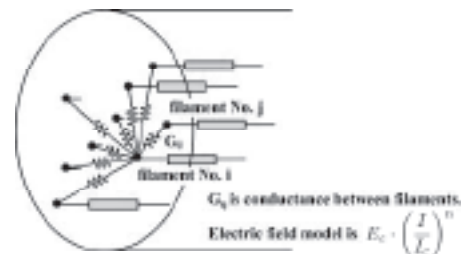


Fig.3 Distributed constant circuit model in a strand.

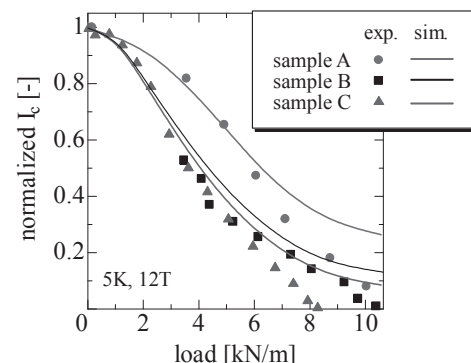


Fig.4 Normalized critical current against load. Experimental data and numerical simulation.

参考文献

1. Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.99
2. Y. Nunoya, et al.: "Characterization of ITER Nb₃Sn strands under strain-applied conditions," MT20 (2007)

核融合炉用超伝導マグネット開発のための 大型超伝導導体開発戦略

Strategy of Large Scale Superconductor Development for Fusion Magnet

西村 新 (核融合研); 西嶋 茂宏 (阪大院); 竹内 孝夫 (物材機構)

NISHIMURA Arata (NIFS); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ); TAKEUCHI Takao (NIMS)

E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. ITER 用マグネットの状況

著者の一人が ITER TF コイル調達の外部評価委員に選任され、10月9日-11日に第1回会合が Cadarache 近郊で開催された。導体は 11.8 T で 68 kA の性能を有するもので、2008 年中に入札が行われる。TF コイルはこの導体製造と連動して発注され、巻き線機の製造、巻き線作業、導体熱処理、Radial plate (RP) 製造、Double pancake (DP) 製造、7DP の一体化 (Winding pack, WP)、コイル容器への挿入、溶接、絶縁処理 (Impregnation) などの工程から構成される予定である。

ITER は 2016 年の First Plasma を目指して建設されている。この ITER の設計、建設活動を通じて、核融合炉用大型導体に対して幾つかの問題が提起されている。本報告ではそれらを整理し、今後の研究開発計画の参考にしていただきたいと期待する。また、著者らが研究会を実施してきており、その研究会への参加をお願いしたいと考えている。

2. 核融合炉用大型超伝導導体の特徴

特徴は高磁場用大電流導体である。プラズマ実験装置の大型化によって、さらに高い磁場中で、より大きな電流を流すことが期待されている。ITER TF コイルの電磁力は 1 m あたり最大約 80 トンである。「高電磁力マグネット」と言うことができる。もう一つの特徴は中性子やガンマ線などの放射線環境下で使用されることである。重水素と三重水素の反応によって、14MeV のエネルギーを持つ中性子が発生する。中性子を遮蔽し、燃料の三重水素を製造するため、プラズマを覆うようにブランケットが設置されるが、ブランケット脱着のための隙間、プラズマ加熱用のポートなどから高エネルギーの中性子が漏洩する。また、若干量の中性子はブランケットそのものを透過する。中性子が特定の元素に取り込まれると放射化が起こり、ガンマ線などを放出する。中性子照射によって超伝導特性や絶縁特性などが変化し、放射化が進むと人は装置や機器に近づくことが難しくなる。

3. 核融合炉用大型超伝導導体の幾つかの課題

3.1 超伝導材料の中性子照射効果

超伝導線材は、超伝導材料を生成するための材料、超伝導材料および安定化材である純銅や純アルミニウムによって構成される。超伝導材料は高速中性子による弾き出し効果のため、A15 構造の Ordering が乱され、 I_c や T_c が変化する。これまでの結果によれば、 10^{22} 個/ m^2 程度の中性子照射によって I_c は増加し、 T_c はわずかに低下することが分かる。それ以上の照射を行うと I_c 、 T_c ともに低下するようになり、 10^{24} 個/ m^2 程度の照射で I_c はほとんどゼロになり、 T_c は 4 K 以下になる。(Fig.1) 上記の照射量は 0.1MeV 以上の中性子の個数であり、どのエネルギーレベルの中性子が Ordering を乱しやすいかは明確でなく、検討課題である。

安定化材料は、中性子の照射により原子空孔が導入され、電気抵抗値が増加する。設計時には磁気抵抗による電気抵抗の増加と照射による増加の両方を考慮する必要がある。超伝導特性と同様、抵抗値増加に及ぼす中性子スペクトルの影響は明確でない。照射後、試料温度を室温まで上げると原子空孔が移動し、電気抵抗は約 7 割程度低下 (回復) する。従って、極低温下での照射と、同じ温度での連続した照射後試験

が必要であり、4.5 K で 14MeV 中性子の照射が可能な実験システムが構築されてきている。

半減期の短い元素で超伝導線材を構成することができれば照射後の誘導放射能低下が早く、人が近づくことができる。このような超伝導線材を低放射化超伝導線材と呼ぶ。定期点検やメンテナンスのことを考えると低放射化線材は有用である。 V_3Si や V_3Ga は Cu より半減期が短く、低放射化超伝導材料としてその性能向上を目指す試みが続けられている。

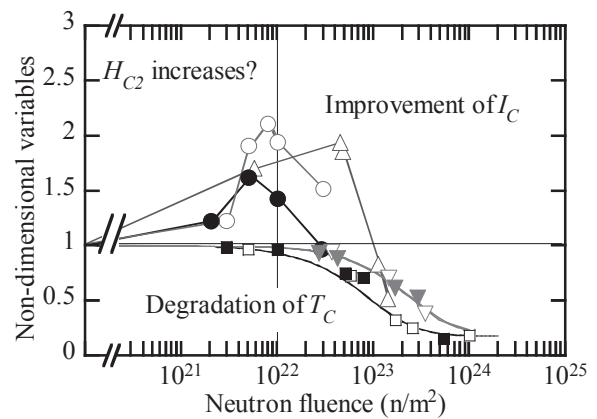


Fig. 1 Change in I_c and T_c against neutron fluence.

3.2 電気絶縁材料

極低温下で使用される電気絶縁材料としてはボロン無添加の S ガラスクロスとエポキシ樹脂の FRP が用いられてきた。近年、シアネートエステルが耐放射線性に優れていることが示され、エポキシ対エステルを 6 対 4 の割合で混合した樹脂も、77 K での疲労強度は原子炉照射 (10^{22} 個/ m^2 程度) によってほとんど低下しない。ただ、硬化までの時間が最長 24 時間程度で、大型超伝導コイルの真空含浸に適用するにはまだまだ検討の余地があり、最適化されているとは言い難い状況にある。

有機物系の絶縁材料の他に無機物系の絶縁材料があり、耐放射線性に優れている。ガス放出もほとんどない。放射線環境下での極低温への応用が期待される。

3.3 導体構造

大きな電磁力のためにケーブルインコンジット (CIC) 導体内の素線が損傷を受け、臨界電流値や分流開始温度の低下が認められている。これは素線同士が電磁力によって圧縮され、局部的に曲げなどの機械的変形を生じるためである。素線の受ける電磁力を比較的均一に、連続的にコンジットに伝達するために、コンジット内に半田や氷などを充填する構造が提案されている。このような高電磁力導体の構造設計をさらに進める必要がある。

電磁力が大きくなるにつれて、コイル断面に占める構造材料の割合はどんどん大きくなる。これはオーステナイト系ステンレス鋼に代表される極低温用構造材料の強度特性が向上していないためである。結果として、超伝導材料の占める割合は小さくなり、線材に対して高い I_c が要求されることになる。より高強度の材料が囑望される。

長いヘリカル導体のインダクタンスの近似式とその応用

Approximate expressions for inductances of long helical conductors and its applications

冨中利治 (文科省, 理研, KEK)

TOMINAKA Toshiharu (MEXT, RIKEN, KEK)

E-mail: tominaka@mext.go.jp

1. はじめに

超伝導複合多芯線内の超伝導フィラメントなどの長いヘリカル形状の導体の自己および相互インダクタンスの近似式を求めることは, Fig.1(a)に示すような撚られた一般的な超伝導線の電磁的な解析に有用と考えられる. ここでは, 近似式の導出とその応用について報告する.

2. ヘリカル導体のインダクタンス表式

これまで, 無限長ヘリカル形状の導体のベクトルポテンシャルから長いヘリカル導体の相互インダクタンスの解析式について主要な項は求めていたが不明確な項があり, また自己インダクタンスの近似式は求められていなかった[1]. 本研究では, 相互インダクタンスの再検討を行い, ノイマンの公式から長さ l で, 各々 $z=0$ で円筒座標の (r_1, ϕ_1) を通り, 撚りピッチ長 $l_1 (= 2\pi/k_1)$, 及び (r_2, ϕ_2) , $l_2 (= 2\pi/k_2)$ の2本の同軸の細いヘリカル導体間の相互インダクタンス M_{12} の解析式として次式を導出した[2].

$$M_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_2} - 1 \right) + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k_1 k_2 r_1^2 + \delta(k_1, k_2) \frac{\mu_0 l}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} I_n(nkr_1) K_n(nkr_2) \cos[n(\phi_2 - \phi_1)] + \delta(k_1, k_2) \frac{\mu_0 l}{2\pi} k^2 r_1 r_2 \times \sum_{n=1}^{\infty} \{ I_{n+1}(nkr_1) K_{n+1}(nkr_2) + I_{n-1}(nkr_1) K_{n-1}(nkr_2) \} \cos[n(\phi_2 - \phi_1)]$$

ここで, $k=(k_1+k_2)/2$, $\delta(k_1, k_2) = 1$, (for $k_1=k_2$), ≈ 0 , (for $k_1 \neq k_2$). 更に, 長さ l , 巻き半径 r , 導体半径 a の細いヘリカル導体の自己インダクタンス L について, 相互インダクタンスの上式を利用して外部インダクタンスを求め, 内部インダクタンスとの合計として近似的に次式を求めた [2].

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{r(r+a)}} - 1 \right) + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \{ K_n(nkr) I_n(nk(r-a)) + K_n(nk(r+a)) I_n(nkr) \} + \frac{\mu_0 l}{8\pi} k^2 \{ (r-a)^2 + r^2 \} + \frac{\mu_0 l}{8\pi} \sqrt{1+k^2 r^2} + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k^2 r (r-a) \sum_{n=1}^{\infty} \{ K_{n+1}(nkr) I_{n+1}(nk(r-a)) + K_{n-1}(nkr) I_{n-1}(nk(r-a)) \} + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k^2 r (r+a) \sum_{n=1}^{\infty} \{ K_{n+1}(nk(r+a)) I_{n+1}(nkr) + K_{n-1}(nk(r+a)) I_{n-1}(nkr) \}$$

また, 上式は撚りピッチ長がゼロ及び無限大の両極限で, 密巻きソレノイド及び直線導体の良く知られた従来のインダクタンス表式になり, 更に自己インダクタンスの数値計算とも一致して, ある程度太いヘリカル導体にも有効な近似式であることを確認した [2]. Fig.2 に折れ線近似で求めた2本のヘリカル導体及び直線導体のインダクタンスの長さ依存性を示す. ここで, L_1/l , L_2/l , M_{12}/l の長さ l について対数依存性を持った漸近線を上式より求めている.

3. 超伝導複合多芯線内の電流分布の計算

Fig.1(a)に示すように, 超伝導複合多芯線を超伝導フィラメントの並列回路と考えて, 上式からインダクタンス行列を求め, 回路方程式を解いて, 通電時の電流分布を計算できる[3]. 更に, Fig.1(b)に示すように, 外部コイルによって各超伝導フィラメントに誘起される電圧を求め, 回路方程式を解いて Fig.3 に示すように, 平行磁場中の多芯線内のシールド電流の分布を計算できる.

4. まとめ

長くて細いヘリカル導体間の相互インダクタンスの解析式を求め, 更にそれから自己インダクタンスの近似式を求めた. インダクタンス行列, 誘導電圧を含む回路方程式を解いて, フィラメント配置を反映した, 通電時及び外場中の電流分布を求めた.

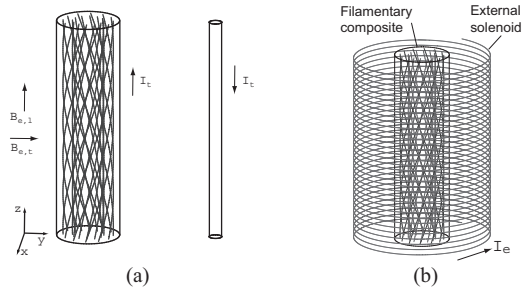


Fig.1. Conceptual circuit used to calculate the transport current distribution within a filamentary composite (a), conceptual layout used to calculate the induced current within a filamentary composite in an external longitudinal field (b).

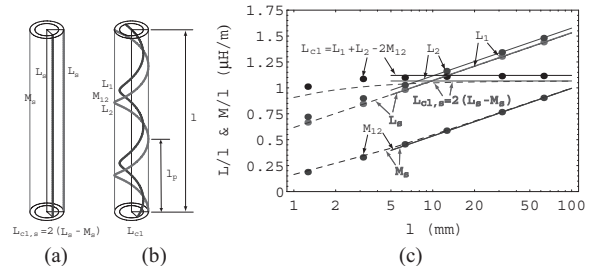


Fig.2. The length dependence of inductances divided by the length of two coaxial helical filaments of (b), passing through $(r_1=0.11 \text{ mm}, \phi_1=\pi \text{ rad}, z=0)$ and $(r_2=0.40 \text{ mm}, \phi_2=0.24 \text{ rad}, z=0)$, the filament radius, $a=45 \mu\text{m}$, and the twist pitch length $l_p=2\pi \text{ mm}$, together with L_s/l , M_s/l , and $L_{cl,s}/l$ of two straight conductors of (a). The circular points of L_1/l , L_2/l , M_{12}/l and L_{cl}/l are the numerically calculated results due to the polygonal curve approximation. The asymptotic lines are obtained by the analytical expressions.

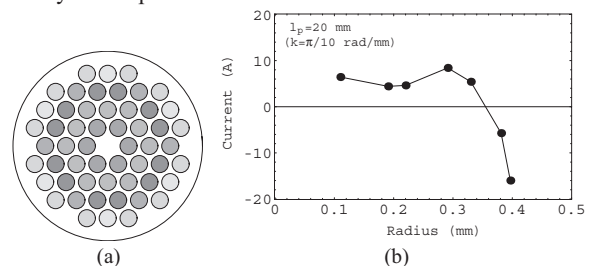


Fig.3. Current distribution among each filament within a composite of conductor diameter 1.0 mm, filament diameter $90 \mu\text{m}$, 7 layers with 54 filaments and the twist pitch of $l_p=20 \text{ mm}$, under the external longitudinal field of $B_{e,l}=1 \text{ T}$.

参考文献

[1] T. Tominaka, Supercond. Sci. Technol., vol. 18, pp.214-222 (2005). [2] T. Tominaka, "Self- and mutual inductances of long coaxial helical conductors", Supercond. Sci. Technol., to be published. [3] T. Tominaka, Supercond. Sci. Technol., vol. 18, pp.634-643 (2005).

新しい超伝導マグネット作製技術の開発 -Nb₃Al への適用-

Development of a novel approach to superconducting magnet fabrication -Application to Nb₃Al-

安藤 努, 豊谷 和晃*, 宮副 照久, 和田 仁 (東大院新領域); 廣田 憲之, 塚本 進, 木吉 司 (NIMS); 尾崎 修 (神戸製鋼)

ANDO Tsutomu, TATAMIDANI Kazuaki, MIYAZOE Akihisa, WADA Hitoshi (Univ. of Tokyo);

HIROTA Noriyuki, TSUKAMOTO Susumu, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OZAKI Osamu (KOBELCO)

E-mail: tando@k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

1911年、水銀の超伝導の発見以来、今日まで、非常に多くの超伝導体が発見され、現在では、150 Kを超える臨界温度を持つ酸化物超伝導体まで報告されている。しかし、最近まで実際にマグネットに工業化された超伝導体は、長尺の線材を製造するため、線引き、押し出し、圧延などの技術が適用できるNbTi合金とNb₃Sn化合物に限られていた。多くの超伝導体では、同様の技術を適用して長い線材を得ることは困難であり、多大な投資にもかかわらず苦戦している。そこで、我々は現在行われている冶金学的な線材製造技術に頼らず、全く新しい視点から超伝導マグネットを製造する技術を提案し、開発を行っている。この技術が完成すると、これまでは利用できなかった優れた特性を有する超伝導体を用いた強磁場発生用マグネットが可能となる。

今回、具体的な超伝導物質としては、歪に対して超伝導特性が安定で、核融合炉のような大型超伝導機器への利用が有望視されているNb₃Alを対象とした。また、製造においては、従来の重厚大型冶金学的手法ではなく、コールドスプレーと電子ビーム技術を組み合わせ用いた。これにより、線材化を要しない超伝導マグネット製造技術の可能性を検討した。

2. 原理

超伝導マグネット製造の新しい方法として、我々は、直径 D の薄膜円筒基板上に超伝導体をヘリカルな線状に形成することにより、一層分のソレノイドコイルを得る方法を考案した。超伝導マグネットは、この円筒コイルを同心円状に多層化することにより構築する。この方法では、マグネットを製造するために必要な超伝導体形成技術は、 πD 、すなわち、通常は数m以下程度の長さに対する技術で十分となる。今回、Nb₃Al超伝導コイル製作で採用した作製技術の概念をFig.1に示す。一層の超伝導ソレノイドコイルを、円筒基板上へのNbとAl粒子の薄膜層のコールドスプレーによる付着と、その薄膜層への電子ビーム照射の2つの工程により製作する。

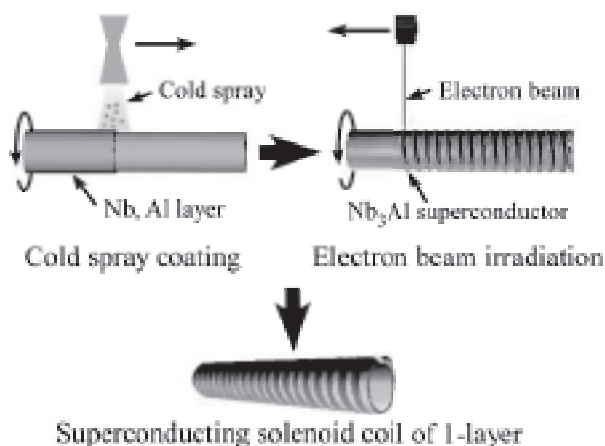


Fig.1 Concept of a novel approach to superconducting magnet fabrication of Nb₃Al.

* 現在、住友電工

3. Nb₃Al への適用

(1) コールドスプレー・コーティング

NbとAlの薄膜層の形成にはコールドスプレーを採用した。これは、対象とする金属粒子を高圧の導入ガスと共に基板に衝突させ、塑性変形によって付着させる技術で、一般の溶射と異なり溶融による反応および酸化が極めて少ない。

今回、NbとAl粒子の混合比を化学量論比の3:1と1:1および3:1にAl中間層を入れた3種類とした。

(2) 電子ビーム照射

電子ビーム照射を行う前に3次元非定常熱伝導解析を行った。投入熱量等をパラメータにして得られた到達温度を比較し、Nb₃Alの生成範囲を考察した。Fig.2に数値解析モデルを示す。電子ビーム掃引方向に対して熱の拡散は左右対称であるため、数値解析上は図のように基板の幅の半分の領域で計算を行った。この解析結果をもとに、電子ビームの照射条件を設定した。

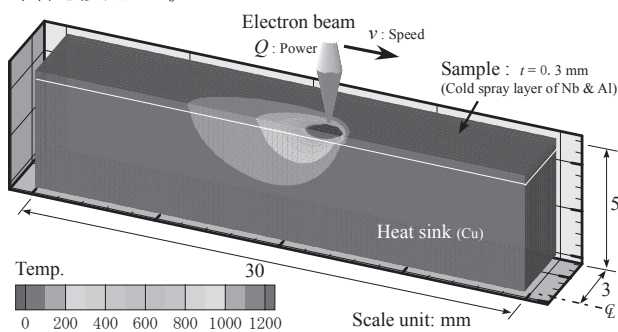


Fig.2 Numerical model of thermal conduction by electron beam irradiation and temperature distribution.

(3) 試料作製

銅板上にコールドスプレーを施した基板に電子ビーム照射を行った。電子ビーム照射後の短尺試料をFig.3に示す。ここで、コールドスプレー条件は混合比(Nb:Al=3:1)、電子ビーム送り速度 $v = 3$ m/min、投入熱量 $Q = 400 \sim 1200$ Wである。投入熱量が小さい値ではビード痕(電子ビームによる溶融部)は確認できないが、投入熱量の増加に伴い白い線状のビード痕が確認された。これら試料の臨界電流特性結果をもとに、円筒試料を作製した。詳細は講演において報告する。

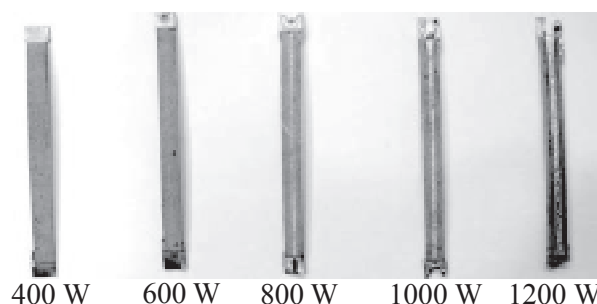


Fig.3 Electric beam irradiated short samples. Cold spray sprayed for Nb:Al=3:1, electron beam irradiated at $v=3$ m/min and $Q=400-1200$ W.

新しい超伝導マグネット作製技術の開発 —MgB₂への適用—

Development of a novel approach to superconducting magnet fabrication -Application to MgB₂-

宮副 照久, 安藤 努, 和田 仁 (東京大学); 阿部 英樹, 廣田 憲之, 木吉 司 (物質・材料研究機構)

MIYAZOE Akihisa, ANDO Tsutomu, WADA Hitoshi (University of Tokyo);

ABE Hideki, HIROTA Noriyuki, KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

E-mail: kk66149@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

NMR (Nuclear magnetic resonance) や MRI (Magnetic resonance imaging) などの超伝導マグネットを利用した多くの応用において、マグネットのさらなる強磁場化は必要不可欠になってきている。さらに、それらのマグネットはコストや安全管理の観点から、より高い温度で運転できることが望ましい。現在の実用超伝導マグネットはキロメートル長の超伝導線を巻くことによって作製されている。一方、期待される高い要求を満たすためには従来のマグネット構成材料である NbTi、Nb₃Sn よりも超伝導特性の優れた材料を用いる必要がある。しかしながら、優れた材料の多くはキロメートル長の線にすることが難しい。そこで、我々は従来の純冶金学的製法から踏み出て、長尺線材作製工程を必要としない超伝導マグネットの製造方法を開発することを試みた。

本研究ではその試みとして金属系超伝導体の中で最も高い超伝導転移温度(*T*)を持つ MgB₂ のマグネット作製法に関して検討した。Figure 1 にその概念図を示す。まずヘリカル状にパターンニングした円筒基板に熔融塩電気めっき法[1]により MgB₂ 膜を製膜し、単層 MgB₂ コイルを作製する。単層 MgB₂ コイルを同軸状に積層することにより、多層 MgB₂ コイルを作製する。本発表ではこれまで作製してきた MgB₂ めっき膜の超伝導特性評価と、MgB₂ めっき膜を用いたマグネットの性能に関する検討結果について報告する。

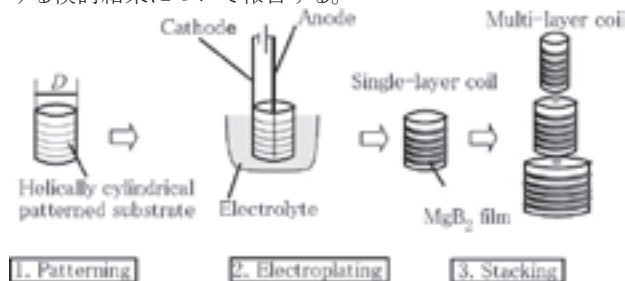


Figure 1. Schematic diagram of the novel method for making MgB₂-based superconducting magnets

2. 実験方法

熔融塩電気めっき法による純鉄基板上への MgB₂ 膜の作製を試みた。MgCl₂、KCl、NaCl、MgB₂O₄ を高純度 Ar 雰囲気のもとで混合し、混合塩を作った。熔融塩の組成比はモル比において MgCl₂: NaCl: KCl: MgB₂O₄ = 10: 5: 5: 0.1-0.2 とし、MgB₂O₄ は事前に 200°C で 160 h 乾燥させたものを使用した。高純度 Ar ガスを 2 l/min で流しながら混合塩を 600°C に昇温し、電気めっきを行った。

サイクリックボルタンメトリー(CV)測定による電気めっき条件の最適化を行った。参照電極(RE)には白金、対極電極(CE)にはグラファイト、作用電極(WE)には純鉄を用いた。CV 測定後、RE に対して WE の電圧を -1.56 V、-0.7 V とし 10 分間めっきした WE 上の膜に対して X 線回折(XRD)測定を行った。

CV の測定結果をもとに MgB₂ の製膜を行った。アノード(グラファイト)、カソード(純鉄板)間の電圧は 4.0 V とし、めっき時間は 10 分とした。めっき膜に関して、0 T-4.5 T の磁場下で臨界電流(*I*_c)測定を行い、それらの結果をもとに、MgB₂ めっき膜を用いたマグネットの発生可能磁場を評価した。

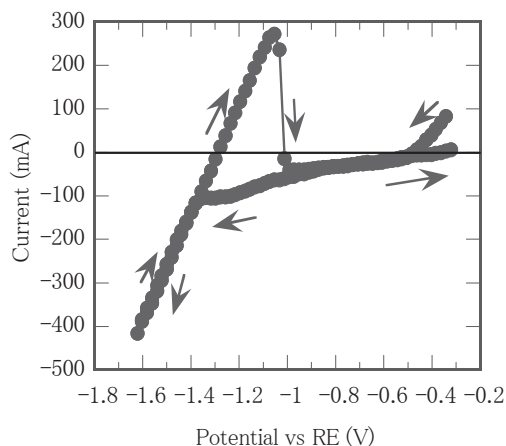


Figure 2. CV profile in the molten electrolyte. The arrows show the scan directions of the potential of the working electrode.

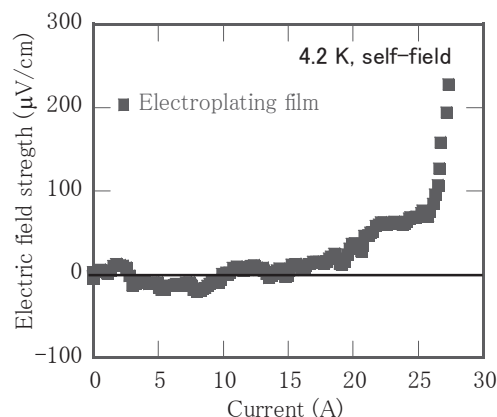


Figure 3. *I-E* curve for an MgB₂ film electroplated onto an iron plate

3. 結果と考察

Figure 1 に CV の測定結果を示す。RE に対する WE の電圧を -0.3 V から減少させると、-1.36 V において急激に電流の絶対値が増加した。これは -1.36 V 以下の電圧において WE 上で何らかの還元反応が起こっていることを示している。XRD の結果から、-1.36 V 以下において MgB₂ を含む膜の生成が確認されたことから -1.36 V が MgB₂ の生成電圧であると考えられる。

Figure 2 は 0 T、self-field での鉄基板上におけるめっき膜の電場-電流曲線を示す。電流を増加させていくと、15 A まで超伝導状態が保たれた。また、磁場下での *I*_c 測定に基づくモデル計算から、めっき膜により構成されるマグネットでは 0.57 T の発生磁場を得られることが確認された。詳細は発表において報告する。

参考文献

1. Abe H, Yoshii K, Nishida K, Imai M and Kitazawa H 2005 *J. Phys. Chem. Solids* **66** 406

液体窒素中で動作する Bi-2223 超電導マグネット

Bi-2223 superconducting magnet working in liquid nitrogen

小田部 荘司, 木内 勝, 松下照男, (九工大);
藤野 剛三, 大松一也 (住友電工); 倪宝荣 (福工大)

OTABE Edmund Soji, KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
FUJINO Kousou, OHMATSU Kazuya (Sumitomo Electric Ind.); NI Baorong (Fukuoka Inst. of Tech.)

E-mail: otabe@cse.kyutech.ac.jp

はじめに CT-OP(ConTrolled Over Pressure)法を導入することにより、Bi-2223銀シーステープの臨界電流は格段に改善されてきた¹⁾。77.3 K 自己磁場での臨界電流は 200 A を越えており、さらなる改善が期待されている。このテープを利用した応用例として、トランス、電力ケーブル、超電導モーターなどが報告されている。ここでは、Bi-2223超電導マグネットを設計、製作したので報告する。中心に置ける最大磁界は 77.3 K において 0.5 T であり、その時の通電電流は 50 A である。

設計 ここで用いられた Bi-2223 超電導テープの臨界電流は 77.3 K 自己磁場において 147 A であった。コイルの磁界分布計算は有限要素法を用いて行なった。コイルの内径と外径は 70 mm と 100 mm であり、高さは 124 mm であり、巻き数は 1040 であった。1 A を通電した際のコイルの中心の磁界は 9.9 mT であり、テープに印加される最大の水平と垂直の磁界はそれぞれ 10.1 mT と 3.2 mT であった。したがって、ロードラインは次のようにして決定される。酸化物超電伝導テープの使用限度は垂直磁界の中の臨界電流によって決定されることがよく知られている。Fig. 1 に垂直磁界中のテープの臨界電流特性とコイルのロードラインを示している。ロードラインは 3.2 mT/A であり、通電電流が 48 A になると、テープに 0.15 T が垂直に印加されて臨界電流に達する。このときに、コイルの中心では 0.47 T が発生している。

結果及び検討 Table 1 に製作した酸化物超電導マグネットの仕様をまとめる。マグネットは 20 個のパンケーキコイルにより作られている。それぞれのパンケーキコイルは銅製の端子をビスで留めて接続している。10⁻⁴ V/m の電界基準で測定したマグネット全体の臨界電流は 45.2 A であり、これは設計値の 48 A に近い。さらに 50 A を通電して 0.5 T を安定して発生できることを確認した。テープに垂直に磁場を印加した際の不可逆磁界は 0.7 T である。しかし、その際に中心に置ける磁場はコイルにより違うが 2 から 3 倍ほど大きいので、現在の 0.5 T より大きな超電導磁石を実現することが可能と考えられる。また、さらに臨界電流特性のよいテープを用いれば小型化できる。発表当日には交流通電の結果も報告する。

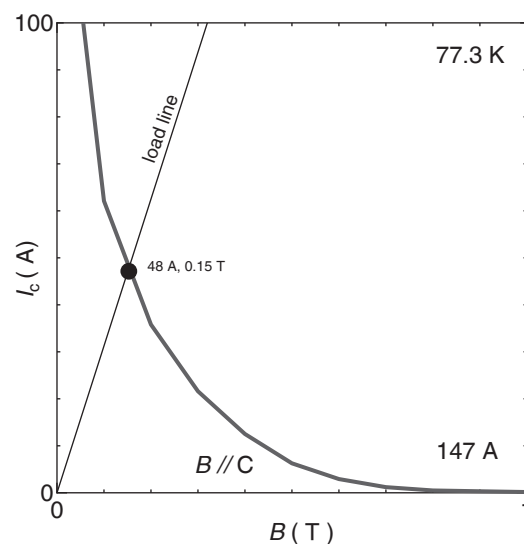


Fig. 1: Load line of the Bi-2223 tape. The maximum magnetic field normal to the tape surface is 0.15 T at 48 A, and the magnetic field at the center is 0.47 T.

Table 1: Specification of superconducting magnet.

magnet outer diameter (flange diameter)	122 mm
magnet inner diameter (bore diameter)	54 mm
pancake coil outer diameter	98 mm
pancake coil inner diameter	70 mm
height of magnet	124 mm
weight of magnet	~ 3 kg
turn of coil	1040
total length of tape	~ 270 m
number of pancake	20
maximum magnetic field at center	0.5 T
coil constant	0.010 T/A
critical current (77K s.f.)	147 A
width of tape	4.4 mm
thickness of tape	0.22 mm

参考文献 1) M. Kiuchi, S. Takayama, E.S. Otabe, T. Matsushita, J. Fujikami, K. Hayashi, K. Sato, Physica C 463-465 (2007) 825-828.

新方式 NMR 用スプリット型超電導磁石の開発(III)

— 永久電流モードによる長期運転実績 —

Development of superconducting split magnet for advanced NMR spectrometer (III)

岡田 道哉、塚本 英雄、木戸 修一、竹内 一浩、和久田 毅、土屋 貢俊、椎野 俊之、牧 晃司(日立)、北口 仁(NIMS)
 OKADA Michiya, TSUKAMOTO Hideo, KIDO Shuichi, TAKEUCHI Kazuhiro, WAKUDA Tsuyoshi, TSUCHIYA Mitsutoshi,
 SHIINO Toshiyuki, MAKI Kohji (HITACHI), and KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-mail : michiya.okada.qr@hitachi.com

1. はじめに

核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance 以下 NMR と略す)分光法は、タンパク質の機能・構造解析に有効なツールとして注目され、その機能向上が進められている。我々は、2003年度より5ヶ年計画で、従来のNMRシステムの基本構成を見直し、NMR感度の大幅な向上を目指す「新方式NMRの開発」に着手した。前報までに、開発計画の概要と1号機超電導磁石(300MHz)の試験結果⁽¹⁾、及び、600MHz、300MHz#2機の製作と初期運転特性について報告した。^{(2) - (5)}本報では、運転開始から一年以上を経過した600MHz機及び300MHz#2機超電導磁石の運転状況を総括するとともに、世界初となるスプリット方式超電導NMRシステムの試験状況について報告する。

2. 新方式 NMR システムの概要

従来の溶液NMRシステムでは、鉛直方向の1軸室温ボアを有する多層空芯ソレノイド方式超電導マグネットを用い、NMR信号の検出にサドル型の検出コイルを用いる。我々は、このNMR信号検出コイルの形状と超電導磁石の關係に着目し、超電導磁石をスプリット方式とすることで、検出コイルの形状をサドル型に比較して検知能力に優れたソレノイド型とした「新方式NMR」を提案した。この方式の構造的特徴は、二つある。第1の特徴は、磁石本体を左右に分割されたスプリット方式とし、十字構造の常温ボアを持たせたことにあり、これにより、ユーザは溶液試料を上方から挿入可能であるほか、サンプルへのアクセスは、上下左右の四方向から可能になり、NMR以外の分析手段との組合せなど、従来にない応用が期待できる。第2の特徴は、ソレノイド方式による検出コイルにあり、この方式によって試料単位体積あたりのNMR検出感度を大幅に向上できる可能性が期待される。

(1)新方式 NMR 用 600MHz 超電導磁石

NMR用超電導磁石は、一般に0.5Hz/20mmDSV程度の磁場均一度と数Hz/h程度の時間安定度が必要であり、これらを同時に満足する必要がある。中心磁場は14.1Tであり、特に製作精度と磁場減衰の点で難易度が極めて高い、「内側超電導シム」⁽²⁾の成立が技術開発上のポイントであった。運転開始以後、これまでのテストデータから、当初の磁場均一度に関する懸念事項は、十分克服可能であることが技術的に示された。一方、磁場の時間安定性については、15ヶ月以上の連続運転を継続しながら、NMRスペクトル半値幅、共鳴周波数変化、

磁場分布の経時変化を観測しているが、いずれも計測誤差範囲内であることが分かった。本システムは、現在、極低温冷却プローブと組み合わせて性能試験を行っている。

(2)アプリケーション開発用 300MHz#2 超電導磁石

前報で、新方式NMRの特徴である水平ボア、垂直ボアへのアクセス性を改善した新しいクライオを有するアプリケーション用デモ機について報告した。本機は06年10月から運転を開始し、大きなトラブルなく順調に運転中である。磁場均一度、時間減衰については要求仕様値を大幅に上回る好結果を得ている。



Fig.1 A 14T Superconducting split magnet in operation with a cryogenic probe for 600MHz NMR spectrometer

なお本研究の一部は、文部科学省科学技術振興費委託研究、18文科振489号)の一環として行われた。

3. 参考文献

- (1) 岡田他 第75回2006年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集、p33(2006)
- (2) 岡田他 第76回2007年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、p15(2007)
- (3) 椎野他 第76回2007年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、p161(2007)
- (4) 土屋他 第76回2007年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、p162(2007)
- (5) 福田他 第76回2007年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、p163(2007)

HTS 磁気ダンパーによる変動磁場の低減

HTS magnetic field damper for short-term field fluctuations in the driven-mode

大塚 昭弘, 木吉 司, 松本 真治(物質・材料研究機構)

OTSUKA Akihiro, KIYOSHI Tsukasa, MATSUMOTO Shinji (NIMS)

E-mail: OTSUKA.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

1GHz を超えるNMRマグネットにはHTSが必要とされているが、永久電流モードではその特性上NMRとして使用可能なレベルの磁場安定度の達成は困難と考えられている。そこで、ドリブンモードにおける磁場安定度の評価を行い、 z^0 シムコイルの電流を制御することで磁場変動を補償する試験を行った。この試験で長期的な磁場安定度は達成できたが、短期的な磁場変動が残るという問題が明らかになった^[1]。これに対処するため、HTSを使った磁気ダンパーコイルを製作し、磁場変動の低減効果を測定した。

2. 実験方法

磁気ダンパーコイルはNMRマグネット用クライオスタットの熱シールド板($T=30\sim 40\text{K}$)に取り付けることを想定しており、できるだけ薄いコイルにする必要がある。そこで Bi-2223 テープ線材(住友電気工業製)を銅パイプの上に 2 層 \times 49 ターン巻線し、全体をハンダ付けして製作した。このコイルをドリブンモードで運転する 14 T NMRマグネットの磁場中に設置し、冷凍機を使って冷却した。使用したクライオスタットの内部構造を Fig.1 に示す。断熱真空槽に設置されたダンパーコイルは銅ロッドを介して冷凍機の冷ドステージにつながっている。冷凍機は住友重機械工業製の1段式冷凍機(冷凍能力:54/70 W (50/60 Hz) at 40 K、最低到達温度:25 K 以下)を使用した。ダンパーコイルの内側はNMRテスラメーターのプローブを設置できるように室温空間を有している。実際に冷却した結果、ダンパーコイルの上端は 19 K、下端は 23 K であった。

3. 実験結果

ダンパーコイルの冷却前後で磁場変動の挙動を観測した。冷却前には約 1.2 ppm-pp の短期変動が見られたが、冷却後は約 0.07 ppm-pp まで小さくなった。この値は測定精度の限界に近く、変動磁場低減効果を数値的に評価できない。そこで、 z^0 シムコイルを使って外部磁場を変化させ、ダンパー効果を測定した。ダンパー冷却前の磁場変化の測定結果を Fig.2 に示す。 z^0 シムに 1 A 通電すると磁場は 59 ppm 変化した。これに対してダンパーを冷却した状態では Fig.3 に示すように 1.1 ppm の変化にとどまっている。これにより今回製作したダンパーコイルによる変動磁場低減効果は約 1/50 であることが判った。

また、外部磁場を変化させた時のダンパー効果の時間応答を測定した結果、ダンパーコイルに流れている遮蔽電流は約 20 時間の時定数で減衰することが判った。

本研究は、先端計測分析技術・機器開発事業「超 1GHz NMRシステムの開発」の一環として、科学技術振興機構(JS T)の委託により実施したものである。

参考文献

[1]大塚 他:2006 年度秋季低温工学・超電導学会, 1B-p04.

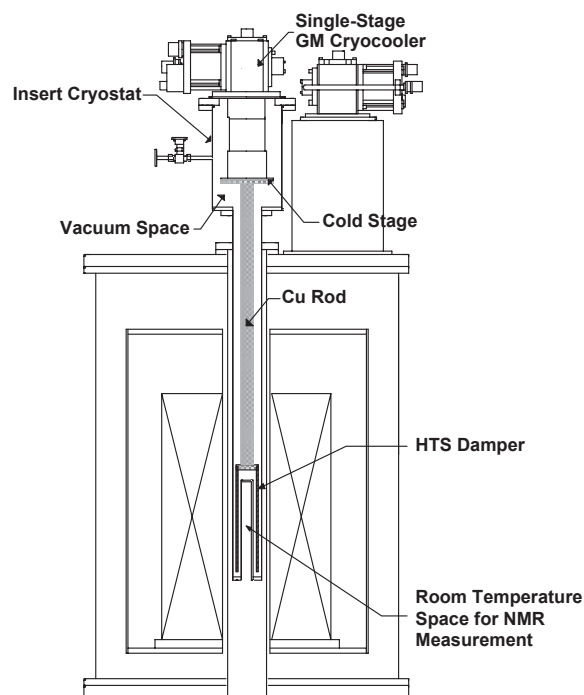


Fig.1 Cross-sectional view of the insert cryostat.

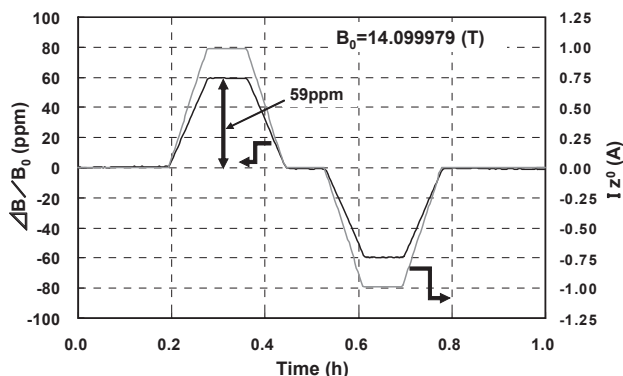


Fig.2 Magnetic field change induced by the z^0 shim current when the HTS damper coil was not effective.

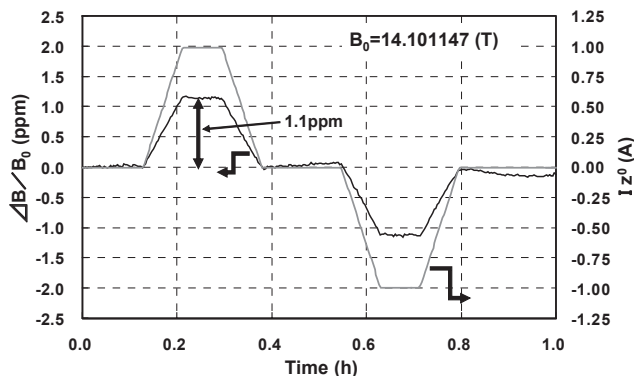


Fig.3 Magnetic field change induced by the z^0 shim current when the HTS damper coil was effective.

1.3GHz 用低温 NMR 検出コイルの設計

Design of low temperature pick up coil for 1.3GHz NMR

酒井 重人, 齊藤 敦, 大嶋 重利 (山形大学); 高橋 雅人, 前田 秀明 (理化学研究所)
 SAKAI Shigeto, SAITO Atsushi, OSHIMA Shigetoshi(Yamagata UNIV);
 TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki(RIKEN)
 E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

NMR 用の磁石は、発生する磁場が大きいほど、より微弱な NMR 信号を観測する事が可能となるので、「マテリアルサイエンス」「ライフサイエンス」等の様々な分野で高磁場化が期待されている。しかし現在普及している低温超伝導線材を用いた NMR は、線材の高磁場特性に制限されるため、実用レベルでは 950MHz(22.3T)が限度である。高磁場特性に優れた高温超伝導マグネットを用いれば、1.3GHz (30T) NMR の実現が可能である[1]。本研究では 1.3GHz NMR の検出コイルの形状とインダクタンス L について検討を行ったので報告する。

2. 検出コイル

NMR の検出コイル (銅を用いて低温で使用) にはサドル型コイル (溶液 NMR 用) とソレノイド型 (固体 NMR 用) がある。実際に制御可能なレベル (>1pF) の高周波用コンデンサを用いて 1.3GHz 共振回路に組み込む為には、コイルのインダクタンス L を 10nH 以下にする必要がある。本研究では、①ソレノイドコイル、②サドルコイル、③スクロールコイルの 3 種類の検出コイルについて反射特性から L を見積もり、各形状と L の実現範囲を比較した。

3. シミュレーション

3次元電磁界シミュレータ MW-studio を用いてコイルの電磁界解析と設計を行った。MW-studio の解析原理は有限積分法及び完全境界近似法を用いている。Fig. 1 に設計した 3 種類のコイルの概観を示す。ソレノイドコイルは巻き数、銅線の径、長さを変化させた。サドルコイルは窓部分の形状、足の長さ、コイルの厚さを変化させた。また、スクロールコイルは巻き数を変化させた。想定した NMR サンプル管の形状 (溶液 NMR で 3mm φ、固体 NMR で 3.2mm φ) を考慮して、コイルの内径を 4mm で固定した。コイルの形状を変化させながら、インダクタンス L の変化を求め、それをもとに、回路解析シミュレータ S-Nap を用いて仮想的に共振回路を組み周波数特性を求めた。



(i)ソレノイド (ii)サドル (iii)スクロール

Fig. 1 各種検出コイルの概観図

4. 結果及び考察

Fig. 2 に各コイルの L の変化域を示す。コンデンサの容量の制御限界 (1pF) を考慮すれば、1.3GHz で共振させるためには、L が 10nH 以下であることが望ましい。Fig. 2 より 1.3GHz の検出コイルには、L が小さいサドルコイル (溶液 NMR) とスクロールコイル (固体 NMR) が適している。Fig. 3 の共振回路を用いて回路解析シミュレーション

を行った。R 及び C_0 はコイルの等価的な負荷である。各コイルの回路の素子値を Table. 1 に示す。Table. 1 に示す素子値から Fig. 4 の周波数特性が得られた。Fig. 4 より、溶液 NMR に用いるサドルコイル、固体 NMR に用いるスクロールコイルの両者について 1.3GHz で共振させる検出回路を構築できるという知見を得た。

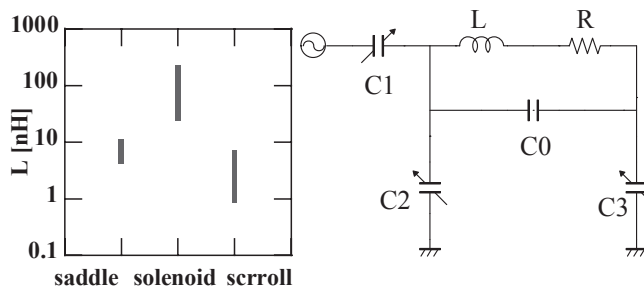


Fig. 2 各コイルにおける L の変化域

Fig. 3 共振回路

Table. 1 各素子値

	saddle	solenoid	scroll
C_0 [pF]	1	0.07	3
C_1 [pF]	2	1	2.5
C_2 [pF]	3.8	1	24.5
C_3 [pF]	3.6	1	24.1
L[nH]	4.6	26	0.95
R[mΩ]	3	1.3	3

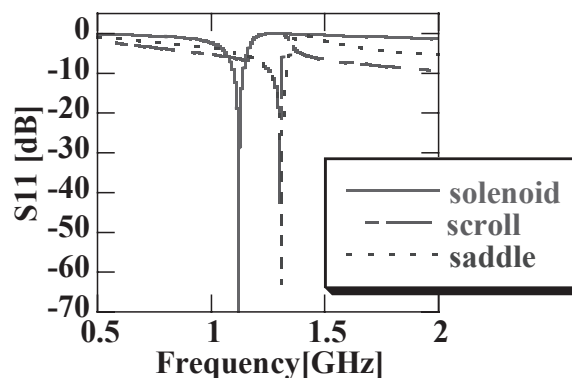


Fig. 4 各コイルの周波数特性

5. 結論

溶液 NMR、固体 NMR ともに、1.3GHz NMR の検出回路の構築がサドルコイル、スクロールコイルを用いて可能である事を明らかにした。

参考文献

[1]NEDO 平成 18 年度～平成 19 年度調査委託成果報告書、[高温超伝導を利用した超高磁場 NMR の実現化可能性に関する調査]

本研究の一部は NEDO 平成 18 年度～平成 19 年度調査委託成果報告書、[高温超伝導を利用した超高磁場 NMR の実現化可能性に関する調査]によるものである

YBCO 超電導ケーブル導体の過電流特性解析

Numerical Simulation on Overcurrent Characteristics of Superconducting Cable using YBCO Coated Conductors

石山 敦士, 王 旭東, 西尾 幸恭, 植田 浩史(早大); 八木 正史, 向山 晋一(古河電工);
鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力); 塩原 融 (ISTEC-SRL)

ISHIYAMA Atsushi, WANG Xudong, NISHIO Yukiyasu, UEDA Hiroshi (Waseda Univ.); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Company); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在開発中の YBCO 超電導線材を用いた送電ケーブルは、複数の YBCO 超電導線材と銅フォーマが並列に接続される構成となっている。実系統応用では、これらの複合導体に運転電流の 10~30 倍程度の突発的な短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、短絡事故電流により線材が劣化・焼損してしまわないよう、銅安定化層や銅フォーマを設計することが必要となる。そこで我々は、耐過電流導体構成技術の確立を目指して、YBCO 超電導ケーブルの設計最適化に向けた検討を行っている。今回は、31.5 kA、2.0 s(66 kV 系統、JEC 基準)の過電流に対する YBCO 超電導ケーブル内の電流・温度分布を開発した数値シミュレーションにより評価したので報告する。なお、同シミュレーション用プログラムの妥当性は、昨年度行った 1 m YBCO ケーブルの試験結果との比較により検証済みである^[1]。

2. 数値シミュレーションモデル

3次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布解析・熱解析連成シミュレータを開発し、数値シミュレーションを行った。解析モデルを Fig.1 に示す。YBCO 超電導線材は 3次元有限要素法を用いてモデル化し、 I - V 特性は n 値モデルにより表現した。電流分布解析は式(1)(2)、熱解析は式(3)を用いて定式化した。インダクタンス L および M は超電導線材の幅/長手方向に分布しないと仮定し、接触抵抗 R とともに集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cond}} & 0 \\ 0 & R_{\text{shield}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{cond}} & M \\ M & L_{\text{shield}} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{\text{cond}} \\ V_{\text{shield}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{\text{cond}} \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (3)$$

式(1)の ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2)の I は電流、 V は式(1)の場の解析より求まる YBCO 超電導線材の抵抗発生による電圧降下、 E は両端電圧である。添え字の cond は導体層および銅フォーマ、shield はシールド層を意味する。式(3)の T は温度、 C は熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱である。冷却条件は、モデルケーブルの最外層である PPLP 絶縁層の表面が液体窒素に触れているとして、液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。

3. 結果

31.5 kA、2.0 s の過電流通電に対する銅フォーマの断面積と最高到達温度(導体層の超電導線材および銅フォーマ)との関係について、数値シミュレーションより求めた結果を Fig. 2 に示す。銅フォーマの設計最適化において、YBCO 超電導線材の最高到達温度を低く抑えた上で断面積を小さくする必要性がある。その観点から Fig. 2 を見ると、YBCO 超電導線材を 10 枚用いた場合、銅フォーマの断面積が 200 mm² で 100 K まで、250 mm² で 90 K(T_c)以下に抑えることができるという結果が得られた。さらに、YBCO 超電導線材の枚数を増やせば、より最高到達温度を低く抑えることができる。これは、銅のみで断熱的に計算した結果よりも小さい断面積で実現できる。また、シールド層に関しては、保護銅テープの厚みを 0.8 mm 以上にすれば、YBCO 超電導線材の劣化開始温度である約 600 K^[2]まで抑えることができるという結果も得られた。

4. まとめ

3次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布解析・熱解析連成シミュレータを開発し、銅フォーマとシールド層保護銅テープの設計を試みた。このシミュレータは YBCO 超電導ケーブルの設計最適化を行う上で、有力なツールとなりうる。また今年度に予定している 20 m YBCO ケーブルの過電流試験の評価にも本計算機シミュレータを適用する予定である。

なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の一部として NEDO の委託により実施したものである。

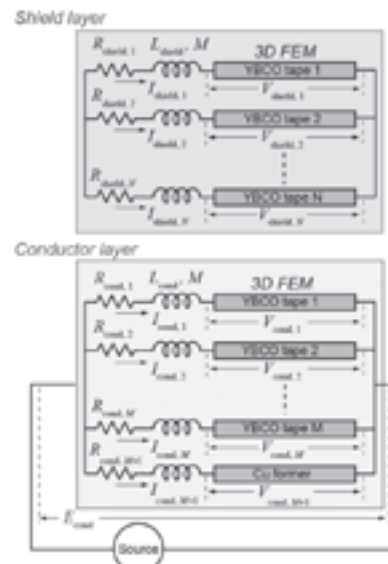


Fig. 1 Numerical model

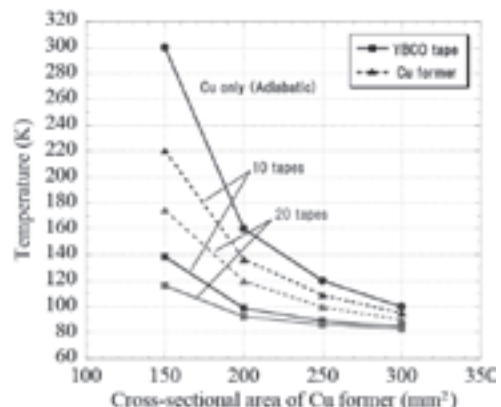


Fig. 2 Cross-sectional area of Cu former vs. maximum temperature

文献

- [1] H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.177
- [2] A. Ishiyama, Y. Tanaka, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17 (2007) pp. 3509-3512

三相同一軸高温超電導ケーブルの特性試験 Experimental Results of Tri-axial HTS Cable

下山 和貴, 添田 誠司, オズジバン・ヌリ, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大)

SHIMOYAMA Kazuki, SOEDA Seiji, OZCIVAN Nuri, YAGAI Tsuyoshi, TUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ.);
kazulist@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

三相同一軸超電導ケーブルは、三相一括型に対して超電導線材を大幅に減少でき、かつ正常時に漏洩磁界が少ないという大きな利点を有する。しかし、相半径が異なるため、本質的に三相不平衡になってしまうという問題があった。

筆者らはこれまでに、全長を 2 分割したモデルを提案し、適切な撚りピッチを選択することで三相平衡が実現できることを解析的に示した^{1),2)}。今回は、得られた撚りピッチで 1m のサンプルケーブルを製作し、特性試験を行ったので報告する。

2. 三相平衡撚りピッチの導出

本研究では、ケーブルを長手方向に 2 分割したモデルを採用し、各セクションの撚りピッチを調整することで各相の電流を平衡させる。電圧降下はケーブルが超電導状態である限り殆んどリアクタンスによるものである。他の相からの磁束の影響も考慮すると、第 k 番目の層での交流定常状態の電圧降下は次式となる。

$$V_k = j\omega l_s \times \sum_{i=1}^{3n} (M_{k,i,1} + M_{k,i,2}) I_i \dots\dots\dots(1)$$

$$M_{k,i,j} = M_{i,k,j} = \frac{\mu_0 \ln \frac{1}{r_k}}{2\pi} + \mu_0 \pi r_k^2 \left(\frac{1}{l_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{l_{k,j}} \right) \text{ For } r_k > r_i$$

$$M_{k,k,j} = L_{k,j} = \frac{\mu_0 \ln \frac{1}{r_k}}{2\pi} + \mu_0 \pi r_k^2 \left(\frac{1}{l_{k,j}} \right)^2 \quad (j=1,2) \dots\dots(2)$$

$M_{k,i,j}$: k 層と i 層の相互インダクタンス
 ω : 各周波数, μ_0 : 真空での透磁率, r_k : k 層の半径
 l_s : ケーブルの半分の長さ, I_i : i 番目の層電流
 $l_{k,j}$: k 層の撚りピッチ

上式に三相平衡条件を代入すると、4 個の連立方程式が導かれる。未知数である撚りピッチは 6 個あるので、2 つの自由度で解を求めることができる。

今回は、製作の簡便さを考慮して、a 相, b 相の各セクションの撚りピッチが等しくなるよう解を求めた。全撚りピッチは内側から、{a: 236,236/ b: -184,-184/ c: -180,180} とした。ここで、マイナスとは撚り方向が逆であることを意味している。ケーブルの諸元を Table 1 に示す。

3. 三相同一軸ケーブルの特性試験

製作方法としては、予め超電導線をシート状に貼り付け、それらを円筒状のフォーマーに巻きつけて構成した。撚りピッチのずれは、最大で 4mm 程度であった。ケーブルの写真を Fig.1 に示す。

まず、各相について通電試験を行った。通電電流はシャント抵抗を用い、ケーブル電圧については 4 端子法で測定した。交流電流は所有電源設備の許す範囲で行い、周波数 50~500Hz, 電流 10~25A で試験した。

500Hz, 25A 通電時の a 相の測定結果を Fig.2 に示す。Fig.2 より、計算値と測定値がよく一致していることがわかる。b 相, c 相についても同様の試験をし、良好な結果が得られた。

4. まとめと今後の予定

ケーブルの支配方程式を導出し、三相平衡を実現する撚りピッチを求めた。その際、製作の簡便さを考慮して、a 相, b 相の各セクションの撚りピッチが等しくなるような解を選択した。得られた撚りピッチを用いて、実際に超電導ケーブルを製作し、各相ごとに通電試験を行った。結果、計算値とほぼ一致した良好な結果が得られた。三相通電試験については今後行い、結果については当日発表する予定である。

Table 1 Parameters fo Tri-axial Cable

	Phase-a	Phase-b	Phase-c
Radius[mm]	20	25	30
Twist pitch[mm]	236,236	-184,-184	-180,180
The number of tapes	25	27	41
HTS tape	4.0×0.25mm ² (90A)		3.2×0.25mm ² (57A)

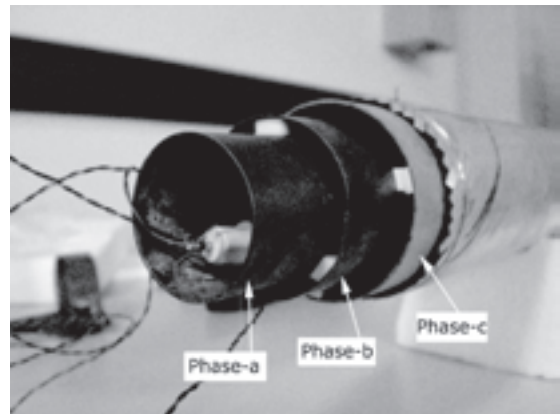


Fig. 1 Photograph of Tri-axial Cable

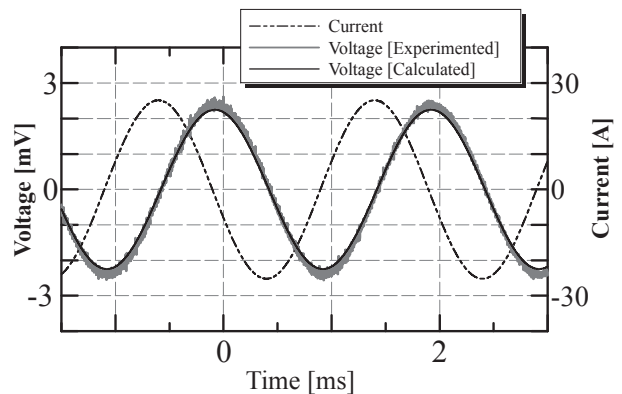


Fig. 2 The waveform of the measured cable voltage

参考文献

- 1) 濱島高太郎他: 低温工学 第40巻 第10号 2005年 p425
- 2) K.Shimoyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.36

輸送電流と位相の異なる交流磁界印加時の高温超電導体の交流損失特性

AC losses in HTS conductor exposed to external magnetic field out of phase with transport current

青柳 和弘, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大学)

AOYAGI Kazuhiro, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

E-mail: aoyagi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

将来的に実用化が期待されている超電導ケーブルは、冷却コストや大電流量化の観点から交流損失の低減が必要不可欠となる。現在は主として三心一括ケーブルが取り扱われているが、更なる交流損失の抑制が必要となることから、最近では三相同一軸ケーブルが注目されている。しかし、電流と位相の異なる交流磁界が印加される三相同一軸ケーブルにおける交流損失の評価はほとんど実施されていない。そこで本研究では、電流と位相の異なる交流磁界印加時の交流損失の理論的評価方法について検討したので報告する。

2. 解析方法

高温超電導テープ線材は薄いので、外部磁界がテープ線の表面にはほぼ一様に加わるとみなすことができ、テープ線をスラブ体で近似できる。幅 $2d$ を持つ超電導スラブの片方が $x=0$ に置かれ、 y 方向に電流が流れ、 z 方向に外部磁界が加わっている状態の磁界分布を Fig.1 に示す。三相同一軸ケーブルでは、超電導スラブ表面に印加される交流磁界の位相が輸送電流と異なるため、今回は輸送電流を基準として位相が ϕ 異なる場合の交流損失を検討した。

外部磁界の波高値を B_e 、輸送電流による自己磁界の波高値を B_0 とすると、超電導スラブの左右それぞれの表面磁界 B_s 、 B'_s を次式で記述できる。

$$B_s = B_e \sin(\omega t + \phi) + B_0 \sin \omega t = B_m \sin(\omega t + \phi_1)$$

$$B'_s = B_e \sin(\omega t + \phi) + B_0 \sin \omega t = B_m \sin(\omega t + \phi_2)$$

ここで、 $\phi_0 = -(\phi_2 - \phi_1)$ とおくことによって左側の磁界を基準時刻にとり、右側の磁界の位相が ϕ_0 異なると考え、解析を行った。

3. 解析結果

これまでに、外部磁界の振幅が小さい場合のヒステリシス損失の理論式の導出を行っている。よって、Fig.1 に示すように外部磁界の振幅が大きく、磁界分布が超電導スラブ全域に渡る場合を取り扱う。連続運転を想定し、 $\omega t = -\pi/2$ となる時刻を①として実線で示し、以降⑤まで変化する様子を破線で示した。特に磁界分布が急激な変化を示す③の時刻を t_1 とする。

磁界分布の特徴に合わせて、①～②、②～③、③～⑤の3つの状態に分離して検討することにより、1 サイクルで単位体積当たりのヒステリシス損失 Q を次式で表すことができる。

$$Q = \frac{B_p^2}{24\mu_0} [b_m^3 (5 - 3 \cos 2\omega t_1) + b_m^3 \{5 - 3 \cos 2(\omega t_1 - \phi_0)\} + b_m^2 b'_m \{-4 \cos \phi_0 + 3 \sin(\omega t_1 + \phi_0) - \sin(3\omega t_1 - \phi_0)\} + b_m b_m^2 \{-3 - \cos 2\phi_0 + 3 \sin(\omega t_1 - 2\phi_0) - \sin(3\omega t_1 - \phi_0)\} + b_m^2 (6 + 6 \cos 2\omega t_1) + b_m^2 \{6 + 6 \cos 2(\omega t_1 - \phi_0)\}]$$

ここで、 b_m と b'_m は中心到達磁界 B_p で規格化した左右それぞれの表面磁界である。上式から得られるヒステリシス損失の位相依存性について検討した。その結果を Fig.2 に示す。ここでは、損失を $B_p^2/24\mu_0$ で規格化し、 $B_e/B_p = 1.5$ 、 $B_0/B_p = 0.5$ を用いた。図から、輸送電流と外部磁界の位相差 ϕ が20度お

よび 200 度で損失が最大となり、110 度および 290 度で損失が最小となることが分かる。

参考文献

1. T. Hamajima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 40 (2005) p.425-432
2. The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, ASC-06-16 (2006) p.25-28

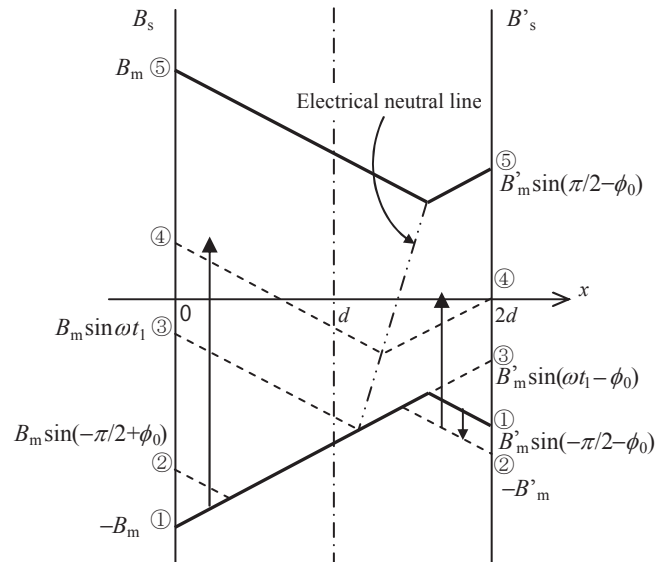


Fig.1 Magnetic field distributions in superconducting slab model.

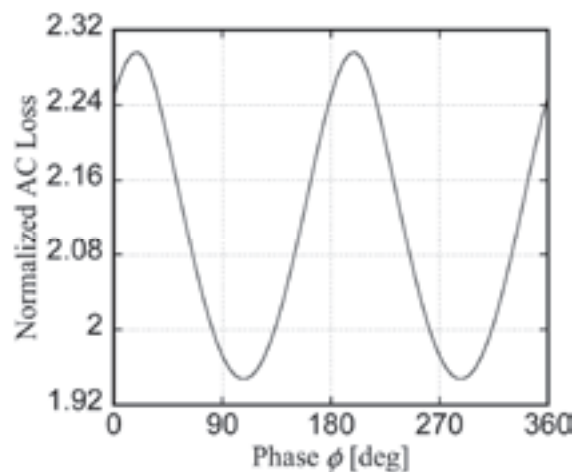


Fig. 2 Normalized AC loss of an HTS tape exposed to external AC magnetic field out-of-phase with transport current.

1GW 級の電力と水素燃料の同時輸送システムの研究

Study on 1 GW Class Hybrid Energy Transfer Line of Hydrogen and Electricity

山田修一, 菱沼良光 (NIFS), 上出俊夫(K&T), K.シップル(Nexans)

YAMADA Shuichi, HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS), UEDE Toshio (K&T), SCHIPPL Klaus (Nexans)

E-mail : yamadas@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

我々は、核融合パワープラント(FFHR)で得られる発電出力の全量または一部を高温水蒸気電気分解に投入し、水素燃料を製造する運送方法について検討してきた。発電出力 1 GW 全てを水素製造に用いた場合、574 トン/日の液化水素が製造される。また、オフピーク時の電力で水素を製造する場合には、824 MW の電力と、100 トン/日の液化水素が得られる[1]。電力と水素燃料をエンドユーザへ同時輸送するライン、Hybrid Energy Transfer Line (HETL) をとりあげ、圧力損失、侵入熱、冷凍機の動力、等について検討を行った。

2. HETL 用超伝導ケーブル

HETLの目標距離は 1000 kmとし、10 km毎に水素再冷却ステーションを置く。直流送電方式とし、超伝導ケーブルの往路と復路は独立の管路に設置することにより、耐電圧の向上と水素輸送能力の向上を図る。運転電圧及び電流はそれぞれ 100 kV、10 kAとした。超伝導線材として、1)原料、製造コストの低廉化が期待できる線材、2)限られた断面で、20~24 Kの運転ができる線材、3)大電流化、加工性に優れた線材、等が要求される。ここでは、製造工程の単純化、低廉化が期待できるMgB₂を候補とし[2, 3]、10 kA級超伝導ケーブルの概念設計を行った。10 kA級MgB₂ケーブルの主要パラメータを Table 1 に示す。MgB₂素線の直径は 1.3 mmで、20 Kでの運転電流は 20 Aとした。約5倍のマージンを有する事が確認された[3]。この素線を 500 本以上束ねて、10 kA級ケーブルを設計した。

3. トランスファーチューブ

100トン/日の液体水素(1管路当たり 0.58 kg/s)の液体水素を流したときの管路の圧力損失を調べた。管路として、ここでは、有効直径 D を 100 mmとし、内面が平坦な直管を仮定する。管路の圧力損失を ΔP は、

$$\Delta P = 4\lambda \frac{v^2 L}{2 D} \quad (1)$$

で表される。 λ は管路摩擦係数で、Nikuradse の式を用いて λ を評価した。管路長 L が 10 km の時の加圧液化水素の温度依存性を Fig 1 に示す。液体水素の圧力を高くすれば、沸点も高くなる。高い圧力での送液は、超伝導ケーブルの温度マージンの上昇、敷設ルートのヘッド損失にも対応可能となるので、有効である。

トランスファーチューブへの侵入熱の低減は重要な課題である。断熱真空層においては、熱伝導の小さなスペーサの採用、高真空の実現、SIの層数の増加によって、侵入熱の低減は可能である。送液温度を 17 Kとし、侵入熱をパラメータとして、10 km先の出口温度を調べた。結果をTable 2 に示す。侵

Table 1. Design parameters of 10 kA class cable.

Items	Value
Operation Temperature	17 - 24 K
Material of the SC strand	MgB ₂
Diameter of SC strand (and MgB ₂)	1.3 (0.5) mm
Operation current of a strand	20 A
Number of the SC strand	> 500

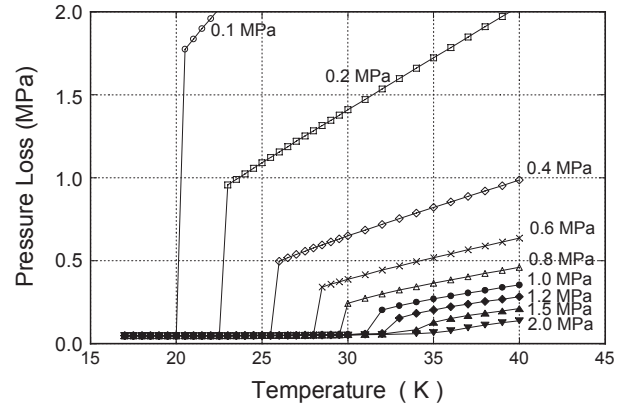


Fig. 1. Pressure loss of 10 km long HETL as a function of temperature of pressurized hydrogen.

入熱が 1 W/m(目標値)の場合、出口では2度程度しか上昇しない。2 W/mであっても、送液温度が 20 K以下であれば、MgB₂ケーブルは 24 K以下の液体水素に浸っており、通電可能な状態になっていることが確認できた。

4. 冷凍機の動力

侵入熱が 1 W/mの場合、10 km毎に設置する冷凍機は 20 kW (@ 17 K)の冷凍能力が必要となる。この冷凍機の動力の評価方法として、カルノー関数を用いて次式のように表すことができる。

$$P = W_L \frac{T_H - T_L}{T_L} \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

ここで、冷凍機は、温度 T_H と T_L の間で運転される。 η はカルノーサイクルでの効率で、ここでは 0.25 と仮定する。目標 1000 kmのエネルギー輸送では 100 台の冷凍機が必要となり、その総動力は 132 MWとなる。一方、同一距離の 275 kVの送電路を用いると、抵抗損失は 230 MW程度と試算される。本HTMLシステムの長距離輸送によるメリットが確認できた。

Table 2. Calculation results of outlet temperatures for typical heat load cases.

Temperature at inlet (K)	Temperature at outlet for each heat load (K)			
	0.5 W/m	1.0 W/m	1.5 W/m	2.0 W/m
17.0	18.1	19.1	20.0	20.9
18.0	19.0	20.0	20.9	21.7
19.0	19.9	20.8	21.7	22.5
20.0	20.9	21.8	22.6	23.4
21.0	21.9	22.7	23.4	24.2

参考文献

- S. Yamada et al.: Fusion Engineering and Design 82 (2007) pp.2817-2823.
- A. Kikuchi, Y. Hishinuma et al.: Abstract of CJS Conference, Vol. 76 (2007) p.39.
- 菱沼、他: 2007 年秋季低温工学・超伝導学会、1P-p41.

直流超伝導実送電の保護システム

Protection System for DC Superconducting Power Transmission Line

山口 作太郎, 浜辺 誠, ファマキンワ トーシン, 山本 勇, 佐々木 淳, 福田 真治, 飯吉 厚夫(中部大学)
 YAMAGUCHI Satarou, HAMABE Makoto, FAMA KINWA Tosin, YAMAMOTO Isamu, SASAKI Atsushi, FUKUDA Shinji,
 IIYOSHI Atsuo (Chubu Univ.)
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では平成 17 年度より直流超伝導送電システムの研究を開始し、低温系が完成し、各種のデータが得られている。次の課題として保護システムがあり、電力変換器の事故時の運転方法や、その性能及びスイッチギアを利用した直流遮断機を検討する。特に、従来の直流送電と比較すると低電圧・大電流の運転提案に応じた直流遮断が必要になる。ここではトカマク型核融合プラズマ実験装置向けに開発された直流遮断器の紹介と利用可能性について議論を行う。

2. 基本回路及び運転方法

Fig. 1 に直流超伝導送電を行う基本回路の一例を示す。これは直流電源(DC-PS1, DC-DC コンバータや整流回路などを含んだ電源)に直流遮断器(DCCB1)を接続し、その後超伝導ケーブルに接続する。同時に超伝導ケーブルが持っている磁気エネルギーを吸収するための抵抗(R)を ON スwitch (SW1)と接続する。

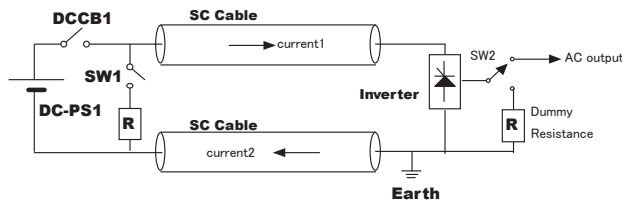


Fig.1 Basic Circuit of DC Superconducting Power Transmission Line

受電端にはインバータ(Inverter)が接続され、スイッチ(SW2)を通じて通常は交流出力を行っている。交流系の部分で短絡事故などが生じたときには、インバータ運転を変更して出力をしないか、ダミー抵抗に電流を流すようにする。また、必要に応じて直流電源からの電力通電を止める。この場合、回路には電流が流れたままにする運転もあり得る。

また、直流系で事故が発生した時には、超伝導ケーブルの電流を下げる必要があるが、一つの方法は、インバータからの出力をダミー抵抗にすることによって、回路の持っている電力エネルギーを消費させる。このように、インバータによって電流遮断を行うことは、IGBT や Power MOSFET を利用したインバータが数 kHz 以上でスイッチングしているため、これを利用して遮断するのは自然な運転であり、早い遮断ができるので理想的である。

もし、インバータも同時に故障したときには、直流遮断器システムを動作させる。最初に SW1 を ON にして、次ぎに DCCB1 を OFF にする。これによって、回路が保持している磁気エネルギーを吸収する。

3. 直流遮断器について

中部大学の直流超伝導送電の提案は、従来の銅ケーブルを利用した直流送電に比べて、低い電圧(数 kV から 30kV まで)、大きな電流(50kA 程度)を用いることを基本としている。

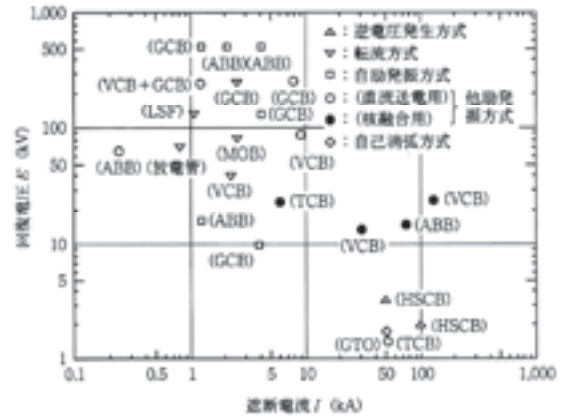


Fig.2 Currents and Voltages of DC Circuit Breakers

したがって、直流遮断器はこれに応じた装置でなければならない。直流遮断器は色々なタイプがあり、真空遮断器(VCB)、ガス遮断器(GCB)、空気遮断器(ABB)などがあり、遮断回路も色々な方式がある。これらの仕様¹⁾を Fig. 2 に示す。これに見られるように、他励式の直流遮断器は大電流を切ることができる。特に、1980 年代に世界中で開発が進んだプラズマ核融合実験を行うトカマク装置では、ポロイダルコイルに流れている直流電流を高い電圧で遮断することによってプラズマ電流を誘起した。例えば、日本原子力研究所の JT-60 と呼ばれるトカマクの場合には、25kV/92 kA の遮断器²⁾が開発された。この VCB は遮断能力を上げるため磁場を利用して、現在も同じタイプの VCB は生産されている。更に、北海道と本州を結ぶ銅ケーブルを利用した 250kV の直流送電の遮断器にも利用された。

また、ほとんどの遮断器は電極間にアーク・プラズマを発生しながら高電圧を遮断する。しかし、電極間にアーク・プラズマを発生しない方式は原理的に優位性がある。このアイデアによって開発された直流遮断器³⁾があり、装置全体が小型になるため、ITER などの核融合実験装置の超伝導マグネットのクエンチ時での利用も検討⁴⁾された。

直流送電システムでの遮断器の利用については、東工大・嶋田隆一先生から情報を頂きました。お礼申し上げます。

参考文献

1. 電気学会編「電気工学ハンドブック」p. 755, オーム社, 2001.
2. 金井康晴, 「トカマク用電源技術 プラズマ立ち上げ用直流遮断器」プラズマ・核融合学会誌 vol. 73, No. 4, pp. 434-438, 1997.
3. S. Yamaguchi et al, "Mechanical arcless dc circuit breaker by current zero operation", RSI Vol. 63, pp. 3993-3999, 1992.
4. S. Yamaguchi et al, "A mechanical arcless dc circuit breaker for a superconducting magnet system", Nucl. Eng. Design, Vol. 20pp. 415-419, 1993.

亜鉛メッキした直流超伝導送電用断熱二重管の熱輻射シールド効果

Heat Radiation Shield Effect of Zinc-Coated Thermally-Insulated Double Pipe for DC Superconducting Power Transmission

那須 祐児, 伊藤 浩平, 近藤 宏昭, 浜辺 誠, 山口 作太郎(中部大学);
石黒 康英(JFE スチール)

NASU Yuji, ITO Kohei, KONDO Hiroaki, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);
ISIGURO Yasuhide (JFE Steel)

E-mail: te07013@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

我々のグループは、直流超伝導送電システムの実用化を目指し、送電システムのケーブル部分を模擬する高温超伝導線材を用いた直流超伝導送電ケーブルを建設し、その特性試験を行っている。この装置には断熱二重管を使用しており、内管外壁に熱輻射シールドとして多層断熱材(multi-layer insulator;MLI)が巻いてある。MLIは、低温機器の熱輻射シールドとしては一般的に使用されている。しかしMLIの使用は真空内の表面積の増大を招き、アウトガスの発生源となる。超伝導送電では長距離の断熱二重管を使用するため、排気コンダクタンスが悪く、アウトガスの増大は好ましくない。そこで本研究では、ステンレス製の断熱二重管において種々の表面処理を施し、管の反射率を向上させることで液体窒素(LN2)環境への熱輻射量を測定、比較している。これまでの実験により、管の表面処理によって内管内への輻射熱を低減できることが確認できた[1]。今回は、工業的に技術が確立されており、また安価である亜鉛メッキ管を内管として使用し、熱侵入量の低減を目指した。そして亜鉛メッキ管とMLIを同時に使用することで、MLIの巻き数を減らし、MLIのみを使用するよりも高い排気速度で十分な熱輻射シールドを行うことも目的とした。

2. 実験装置

実験装置の概略図をFig.1に示す。外管(外径165mm)、内管(外径89mm)はステンレス管であり、両管間は真空断熱している。これらは、中部大学で建設した直流超伝導ケーブルと同じ径である。この装置において、内管内に液体窒素を入れ、蒸発による液面の単位時間当たりの変化量から、内管内部への熱侵入量を求めた。また、被測定内管を取り付けたときの熱侵入量から、被測定内管を取り付けていないときの熱侵入量の差を取り、被測定内管への輻射熱を求めた。被測定管として、外管には酸洗管(AP)、電解研磨管(EP)の2種類を用意し、内管にはAP管、AP管表面にMLIを10層巻いた管(AP+MLI)、亜鉛メッキ管(Zn)、Zn管表面にMLIを10層巻いた管(Zn+MLI)の4種類を用意した。

3. 実験結果

実験結果をTable 1に示す。ここで q_r は単位長さ当たりの輻射熱であり、外管温度を300K、内管温度を77.4Kとしたときのものである。内管にZn管を使用することで、AP管と比較し輻射熱は1/3以下に低減した。真空度が 10^{-2} Pa以下になる真空排気時間は、AP管と比較してZn管では大幅な変化は見られなかったが、MLIを巻くことで約9倍の時間がかかった。これらの結果により、断熱二重管の内管に亜鉛メッキを施すことで、真空中でのアウトガスの大幅な増大を招くことなく、輻射熱を低減できることがわかった。今のところ、MLIを巻いたときの1W/m以下の熱侵入量の測定については値のばらつきが大きく、さらに精度のよい測定をするための測定方法の改善が必要である。講演ではZn管に巻くMLIの層数の効果についても述べる予定である。

謝辞

本研究は「文部科学省産学連携研究推進事業(平成17年度～平成21年度)」による私学助成を得て行われた。

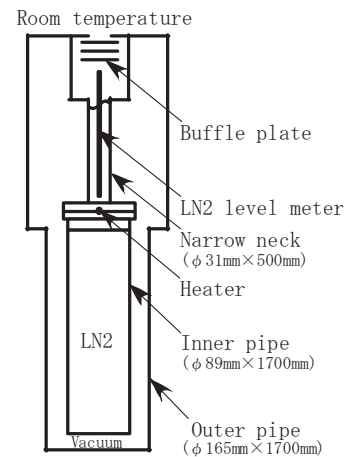


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Estimated radiation heat on Thermally-Insulated Double Pipes

Outer pipe	Inner pipe	q_r at $T_H=300K$ [W/m]
EP	AP	9.6
	AP + MLI	0.2
	Zn	3.0
	Zn+MLI	0.5

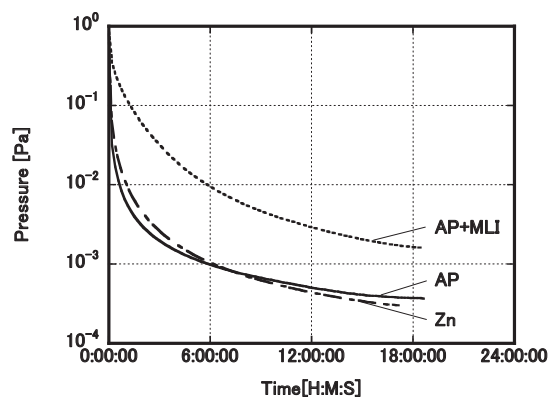


Fig.2 Evacuation Curve of Thermally-Insulated Double Pipes with Various Surfaces

参考文献

1. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.297

高密度MgB₂バルクのTEM観察

TEM observation of high-density MgB₂ bulk

波多 聡, 杠 直哉, 吉留 健, ハリニ ソシアティ, 桑野 範之 (九州大学);
山本 明保, 下山 淳一, 堀井 滋, 岸尾 光二 (東京大学)

HATA Satoshi, YUZURIHA Naoya, YOSHIDOME Takeshi, SOSIATI Harini, KUWANO Noriyuki (Kyushu University);
YAMAMOTO Akiyasu, SHIMOYAMA Jun-ichi, HORII Shigeru, KISHIO Kozo (The University of Tokyo)
E-mail: hata@mm.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

講演者ら(東京大学)のグループは、BとMgB₂の混合粉末にMgを拡散反応させる方法¹⁾により、ボイドやクラックのない高充填率のMgB₂バルク材を得ることに成功し、同バルク材の優れた超電導特性を報告してきた。本講演では、同バルク材の透過電子顕微鏡(TEM)観察結果を報告する。

2. 試料および実験方法

無添加MgB₂バルク材、およびSiCとナフタレン(C₁₀H₈)の共添加MgB₂バルク材を作製した。無添加材の作製では、MgB₂(粒径約1 μm)とアモルファスB(0.3 μm)を混合した粉末と、Mg(150 μm)粉末を、Nb管(3.0/2.6mm φ)内で隣り合うように充填した。各粉末の量はモル比でMg:B:MgB₂=1.2:2:0.5とした。Nb管の両端を一軸プレスで封じた後、石英間に真空封入し、800°Cで180時間の熱処理を施してMgB₂バルク体を得た。SiC+C₁₀H₈共添加材の作製では、MgB₂+B混合粉末にSiC粉末を加え、Mg粉末、ナフタレンと共にNb管に充填、封入した。各原料の量比はMg:B:MgB₂:SiC:C₁₀H₈=1.2:1.9:0.5:0.05:0.005、熱処理条件は800°Cで72時間とした。集束イオンビーム(FIB)マイクロサンプリング法により、MgB₂バルク材の断面から薄膜試料を作製した。TEM観察の直前に、薄膜試料表面の炭化水素等の汚染物除去を目的としたプラズマクリーニング処理を行った。通常の組織観察に加えて、エネルギー分散X線分光(EDX)による元素マッピングを行った。

3. 結果

TEMで観た典型的なバルク材組織をFig.1に示す。超電導特性に強く関係すると思われる組織の特徴を以下にまとめる。
(a) 緻密性: 無添加材, SiC+C₁₀H₈共添加材ともに、*in situ*

PIT法で作製された一般的なMgB₂線材²⁾に比べて、空隙が少なく緻密であった。これは、Nb管内でMg粉末とB+MgB₂粉末を混合しない配置にしたことで、Mgの拡散に伴うMg粉末領域の空洞化の影響を避けられたためと解釈される。

(b) 非晶質領域: 上記の空隙の周囲に分布する傾向が認められたが、*in situ* MgB₂線材²⁾に比べるとその量は少ない。この非晶質領域では、Bと高濃度の酸素が検出されたことから、未反応B粉末の領域と考えられる。

(c) MgB₂結晶粒径: 高温で長時間の熱処理にもかかわらず、MgB₂結晶粒成長は著しくなく、大まかに2種類の粒径のものに区別された。1つは熱処理前から存在していたと思われる500~1000nmの粗大なMgB₂結晶、もう1つは熱処理中に反応生成したと思われる50~200nmの微細なMgB₂結晶である。

(d) MgB₂領域中の酸素: 上述の粗大MgB₂結晶の周りに特に高濃度化していた。具体的には、粗大MgB₂結晶の粒界に沿って大きさ20nm程度のMgOナノ粒子が生成していた。

(e) SiC+C₁₀H₈共添加材中の炭素: MgB₂母相全体に分布するが、粗大MgB₂結晶領域の炭素濃度は微細MgB₂結晶領域よりも低くなっており、炭素置換には*in situ*法が有効といえる。

(f) SiC+C₁₀H₈共添加材中のSi: 非晶質領域に高濃度化するSiと、5~20nmのナノ粒子(多くはMg₂Si)として微細分散するSiが観察された。

以上の結果より、原料のMgB₂粉末粒径を小さくすれば、本バルク材の臨界電流密度特性は更に向上すると予想される。

参考文献

- 1) I. Iwayama *et al.*: Physica C **460-462** (2007) 581.
- 2) S. Hata *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 161.

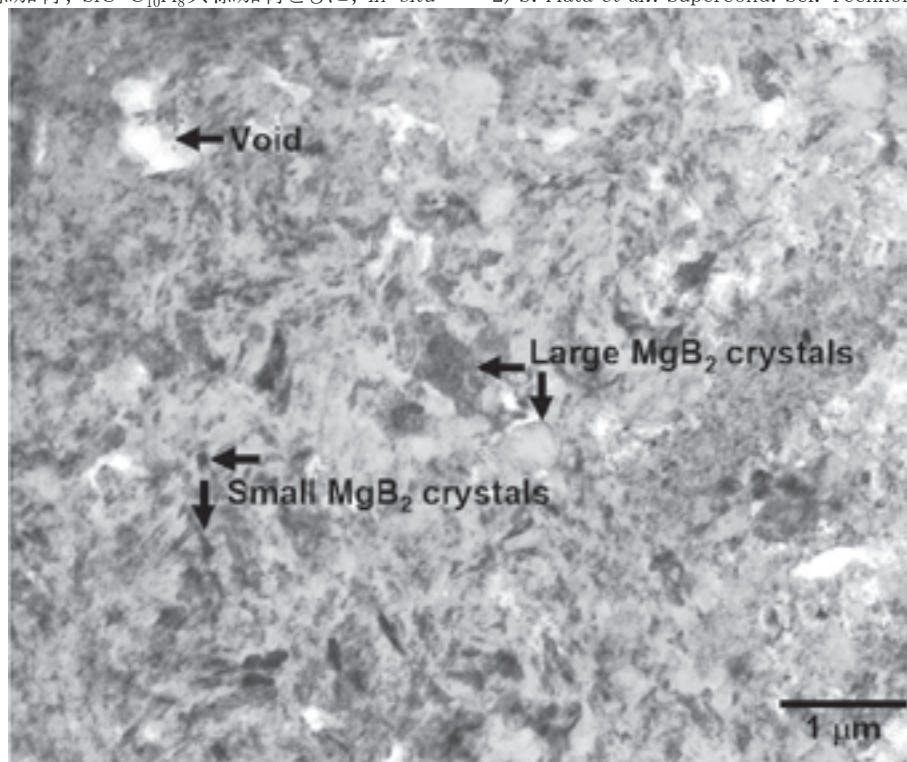


Fig. 1. TEM bright-field image of a high-density MgB₂ bulk doped with SiC and C₁₀H₈.

内部 Mg 拡散法による MgB₂ 線材の作製 Fabrication of MgB₂ wires by an internal Mg diffusion process

○J. M. Hur^{a)b)}, K. Togano^{a)}, A. Matsumoto^{a)}, H. Kumakura^{a)}
H. Wada^{b)}, K. Kimura^{b)}

^{a)}Superconducting Materials Center, National Institute for Materials Science

^{b)}Department of Advanced Materials Science, The University of Tokyo

E-mail: jahmahn@phys.mm.t.u-tokyo.ac.jp, HUR.Jahmahn@nims.go.jp

1. Introduction

The powder-in-tube (PIT) process is now most widely used to fabricate MgB₂ tapes and wires. The PIT process is based on powder sintering, therefore, it is difficult to achieve high density MgB₂. Thus, PIT processed tapes and wires usually show relatively low critical current density J_c . A diffusion process, on the other hand, is effective in achieving higher density MgB₂. Giunchi et al reported a successful result of MgB₂ wire production using a composite billet composed of a steel pipe internally lined with Nb tube filled with a coaxial internal pure Mg rod and B powder¹⁾. In this paper we tried nano-scale SiC doping to this diffusion processed MgB₂ wire.

2. Sample preparation

A pure Mg rod with 2 mm diameter was placed at the center of Fe tube with 4 mm inner diameter and 6 mm outer diameter, and the space between Mg and Fe tube was filled with the powder mixture of B and 5 mol% SiC. The composite was initially groove-rolled into a rod shape with 2.3 x 2.3 mm² and then drawn into a wire of 1.2 mm in diameter. The wire was cut into short pieces of 38 mm in length, and they were heat treated at 700 and 800 °C for 1 hr under Ar gas atmosphere.

3. Results and discussion

Figure 1 shows the optical micrograph of transverse cross section of the wire heat treated at 700 °C. The cross section shows uniform deformation of the composite. Reacted layer is observed between Mg rod and Fe sheath.

Figure 2 shows X-ray diffraction pattern of the reacted layers scraped off from the longitudinal cross section of the wire. Almost all the peaks are identified as MgB₂ phase. However, some peaks of impurities such as MgO, Mg₂Si and Fe were observed.

Figure 3 shows transport J_c vs. field curves at 4.2 K of the wires fabricated in this experiment. The data of 5 mol% SiC doped tape fabricated by the PIT method are also shown for comparison. The diffusion processed wire heat treated at 700 °C shows J_c above 10⁵ A/cm² in 7T. This value is much higher than that of the PIT processed tape. The higher J_c values of the wires are presumably due to the higher MgB₂ density obtained by the diffusion process.

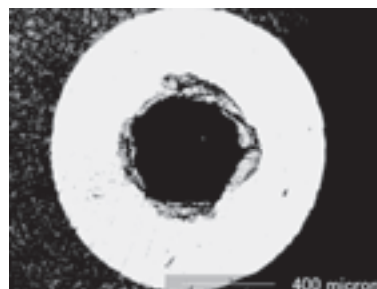


Fig. 1 Optical micrograph of transverse cross section of the wire after heat treatment at 700 °C for 1 h.

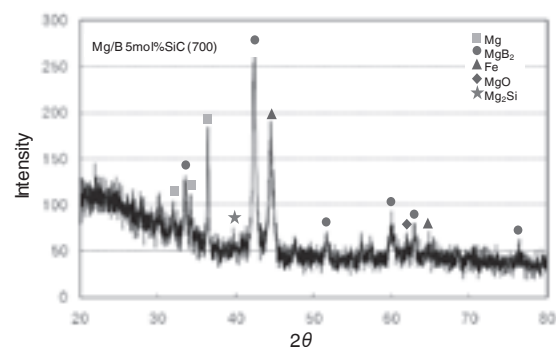


Fig. 2 XRD pattern taken for the reacted layer in the 5 mol% SiC doped wire heat treated at 700 °C for 1 h. Fe was included during scraping off the layer from the Fe sheath

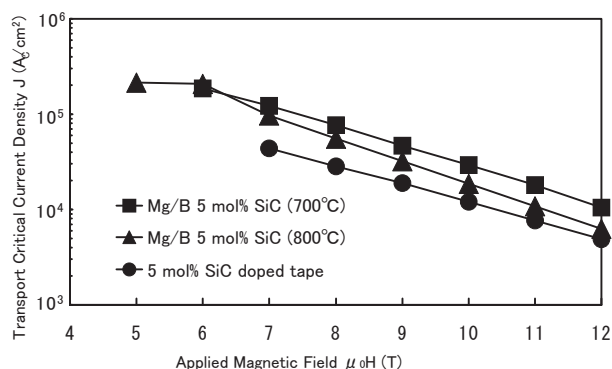


Fig. 3 Field-dependence of transport critical current density J_c at 4.2 K for the wires. The J_c for the PIT processed wire is also shown for comparison. J_c was calculated for the MgB₂ layer.

1) Giunchi, et al., Supercond. Sci. Technol 16(2003)285.

ホットプレス法により作製した MgB₂ 超電導テープ線材の特性に及ぼす Mg 量の影響

Effects of Mg content on superconducting properties of MgB₂ tapes prepared by a hot pressing

大木 茂人、新田 晃央、山田 豊、太刀川 恭治(東海大); 熊倉 浩明(物質・材料研究機構)

Shigehito OHKI, Akio NITTA, Yutaka YAMADA, Kyoji TACHIKAWA (Tokai University);

Hiroaki KUMAKURA (National Institute for Materials Science)

E-mail:yyamaday@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

In-situ PIT 法を用いた炭素鋼シース MgB₂ テープ線材をホットプレス法により作製した。その際出発原料である MgH₂ 粉末を 0.90~1.10 mol の範囲で増減するとともに、ナノサイズの SiC 粉末を MgB₂ コア中に添加した。本報では、ホットプレス法で作製した SiC ナノ粉末添加 MgB₂ テープ線材の臨界電流特性および組織に与える Mg 量の影響について報告する。

2. 実験方法

MgH₂ 粉末及びアモルファス B 粉末を外径/内径:8/4.5mm の炭素鋼管に充填後、溝ロールおよび平ロールを用いて幅約 4 mm、厚さ 0.5 mm の単芯テープ線材を作製した。その際粒径 30 nm の SiC 粉末を 5 mass% 添加した。ホットプレスは、100 MPa の一軸応力を加えながら 630°C, 10 h, Ar 雰囲気中で行った。また、一部の試料については比較のため同様の条件で熱処理のみを施した。これらの試料について光学顕微鏡 OM、走査型電子顕微鏡 SEM および X 線回折により組織を調べた。4.2 K における臨界電流 I_c の磁場依存性については物質・材料研究機構の超電導マグネットを用いて測定した。

3. 実験結果および考察

MgH₂ 粉末の mol 比を化学量論比 1.00 に対し、±0.10 mol% 増減した SiC 添加 MgB₂ テープ線材コアの粉末 X 線回折結果を Fig. 2 に示す。Mg 比の増加とともに Mg₂Si の生成量の増加あるいは未反応の Mg の残留量の増加が見られるが、化学量論組成より ±0.10 mol% 増減した全ての範囲で MgB₂ の生成が認められた。また、X 線回折で見限り不純物の生成に大きな差は見られなかった。一方、SiC 無添加の試料においては、Mg₂Si の生成は見られないものの、SiC 添加試料と同様に ±0.10 mol% 全ての範囲で MgB₂ の生成が認められた。

Fig. 3 に 630°C, 10 h, Ar ガス雰囲気中で 100 MPa の一軸応力を加えながらホットプレスした 5 mass% SiC 添加 MgB₂ テープ線材の 4.2 K における I_c の磁場依存性に及ぼす Mg 量の影響を示す。I_c 値は 7 T では 1.00 mol% Mg で最も高く 162 A で、J_c 値はおよそ 460 A/mm² になる。Mg の化学量論比からずれた組成では、±いずれの場合も I_c は下がるが、Mg poor の方が I_c の低下はやや少ない。一方、外部磁場が 10~12 T になると、1.05 mol% Mg 組成の方が 1.00 Mg よりも I_c は高くなった。Mg 量が化学量論組成よりも若干 rich になることで Mg₂Si 等の生成が増し、高磁場における I_c の低下が抑制されたものと思われるが、詳細は明ら

かではない。1.10 mol% Mg では 10~12 T における I_c は低く、未反応の Mg の残留が多いことから Mg 量は過剰となるものと思われる。

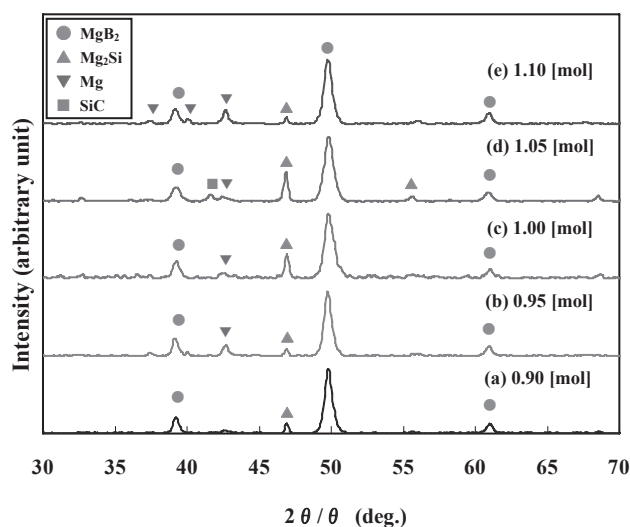


Fig. 1 XRD patterns of the MgB₂ core powder for the tapes with 0.90-1.10 mol Mg content hot-pressed at 630°C and 100 MPa.

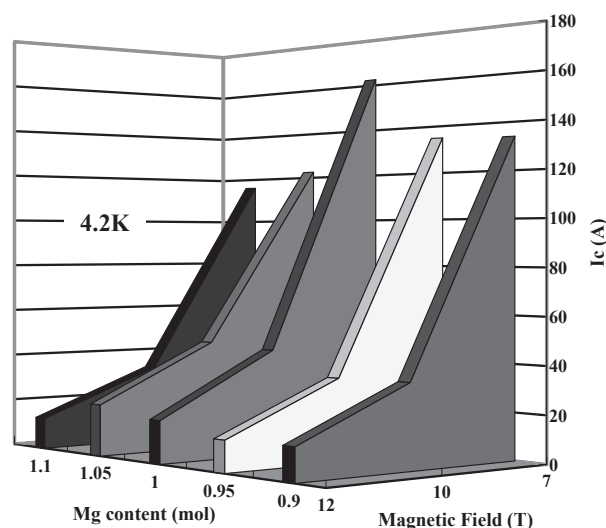


Fig. 2 Magnetic field and Mg content versus I_c for the MgB₂ tapes hot-pressed at 630°C for 10 h under 100 MPa.

参考文献

1. A. Nitta, et al.; Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.46.

MgB₂ 超伝導体における残留磁化とコネクティビティ Remanent magnetization and connectivity in superconductor MgB₂

山本 明保, 下山 淳一, 花房 慶, 堀井 滋, 岸尾 光二(東大); Anatolii A. Polyanskii, David C. Larbalestier (フロリダ州立大)
YAMAMOTO Akiyasu, SHIMOYAMA Jun-ichi, HANAFUSA Kei, HORII Shigeru, KISHIO Kohji (University of Tokyo);
POLYANSKII Anatolii A., LARBALESTIER David C. (Applied Superconductivity Center, NHMFL, Florida State University)
E-mail: tt57140@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (A. Yamamoto)

1. はじめに

金属系超伝導体で最も高い臨界温度($T_c \sim 40$ K)を持つ MgB₂ は、液体ヘリウムフリーの 20 K 近傍での応用に向けて積極的に材料化研究が進められている。MgB₂ は低い電気的磁気異方性と長い超伝導コヒーレンス長に由来して、多結晶体においても銅酸化物超伝導体のような粒間の弱結合の問題がなく^[1]、輸送電流は容易に流れると考えられてきた。しかし、近年の輸送特性の研究から MgB₂ 多結晶体のコネクティビティ(電気的結合度)は著しく制限されていることが明らかとなっており^[2]、常伝導状態における輸送電流の抑制は空隙と粒界の絶縁酸化膜によるパーコレーション問題に起因することが示唆されている^[3,4]。

一方、我々は残留磁化法によるコネクティビティの制限因子解明と定量的評価の研究をフロリダ州立大学と共同で進めている。輸送特性評価による Rowell の解析^[2]が常伝導状態のコネクティビティを与えるのに対し、残留磁化法は臨界電流に由来する磁化を解析するため、超伝導状態のコネクティビティを直接評価することが可能である。本研究においては、残留磁化法により MgB₂ 粒内の粒内臨界電流密度とマクロな粒間臨界電流密度を独立に評価し、多結晶 MgB₂ 試料におけるコネクティビティを定量的に見積もることを試みた。

2. 実験方法

試料として粉末試料と多結晶試料の 2 種類を検討した。粉末試料には Alfa Aesar 社製の市販 MgB₂ 粉末(99.9%, 300 mesh)を用いた。多結晶 MgB₂ バルク体試料は、Mg, B の混合粉末を SUS316 管に充填してテープ状に加圧成型後、両端を封じ、真空封入した石英管中で焼成する PICT 法により作製した。MgB₂ 粉末試料、及び多結晶 MgB₂ バルク体試料について、SQUID 磁束計による磁化測定から超伝導特性、臨界電流特性、残留磁気モーメントの評価を、SEM により微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

市販の MgB₂ 粉末試料に所定の外部磁場を印加後、ゼロ磁場に戻し、ピンニング効果により試料に残留した磁気モーメントの印加磁場依存性を測定した結果を Fig. 1 に示す。印加磁場が下部臨界磁場を超えると、外部磁場を取り除いた後にも粒内に磁束が残留する。印加磁場がさらに高くなると粒内部にまで磁束が侵入し、粒中心に到達後、粒内の磁束密度が十分に大きくなると残留磁気モーメントは飽和した。この残留磁気モーメントの印加磁場依存性は、個々の粒の形状を球体とし、臨界状態モデルを仮定して計算した理論値(Fig. 1 実線)とよく一致した。Fig. 2 に残留磁気モーメントが飽和する飽和印加磁場から算出した粒内臨界電流密度 J_c^G の温度依存性を示す。なお、MgB₂ 粒の粒径としては電子顕微鏡観察より 10 μm を仮定し、参考として SEM で観察された MgB₂ 粉末の最も小さい粒径(2 μm)と最も大きな粒径(40 μm)を MgB₂ 粒の粒径と仮定したときに得られる J_c^G をそれぞれ上限値、下限値としてエラーバーで示した。Fig. 2 より、低温に

おいては MgB₂ 粒内を $J_c \sim 10^7$ [A/cm²] 程度の非常に高い臨界電流が流れていることが示唆された。一方、多結晶バルク体試料の残留磁気モーメントの印加磁場依存性からは粒界への磁束侵入と粒内への磁束侵入に由来する 2 段階転移が観察された。

参考文献

- [1] D.C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [2] J.M. Rowell, *Supercond. Sci. Technol.* **16**, R17 (2003).
- [3] T. Matsushita *et al.*, 第 54 回応用物理学関係連合講演会(28p-L-13).
- [4] A. Yamamoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, 658 (2007).

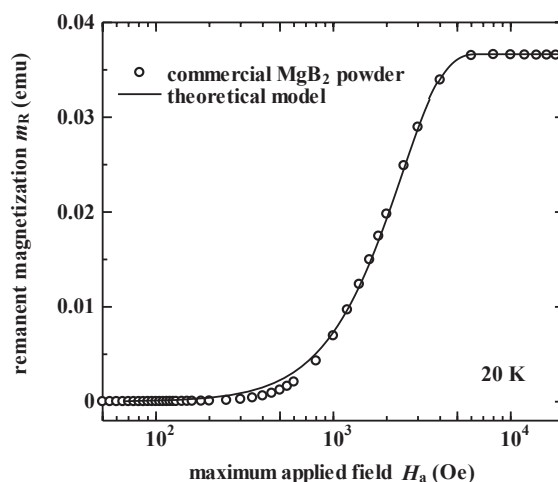


Fig. 1. Maximum applied field dependence of remanent magnetization at 20 K for the commercial MgB₂ powder sample. Fitting curve based on the theoretical model is shown as solid line.

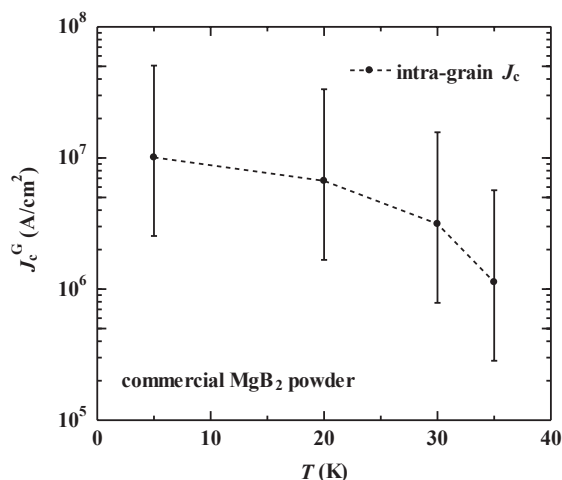


Fig. 2. Temperature dependence of intra-grain J_c for the commercial MgB₂ powder sample estimated from remanent magnetization analysis.

エチルトルエン及び SiC 粉末を同時添加した in situ PIT 法 MgB₂ テープの超電導特性(第二報) — 長尺線作製のための事前熱処理の適用 —

Superconducting properties of in situ powder-in-tube-processed MgB₂ tapes
with both ethyltoluene and SiC powder added (Secondary report)
- applying a pre-heat treatment for fabrication of long wires -

山田 秀之, 五十嵐 基仁 (東海旅客鉄道株式会社);

熊倉 浩明, 北口 仁, 松本 明善 (物質・材料研究機構)

Hideyuki Yamada, Motohiro Igarashi (Central Japan Railway Company);

Hiroaki Kumakura, Hitoshi Kitaguchi, Akiyoshi Matsumoto (National Institute for Materials Science)

E-mail: h.yamada@jr-central.co.jp

1. はじめに

前回の研究では、in situ PIT 法において、芳香族炭化水素添加のうち、SiC 粉末添加とは特性の異なるエチルトルエンと SiC 粉末を同時添加した MgB₂ 線材の作製を行って、高 J_c のデータを得たため、今年度の春季低温工学・超電導学会で報告した。その後、この方法を長尺線作製に適用する場合、熱処理によって発生する水素ガス及び残留しているエチルトルエンの蒸発したガスにより、シースのふくれもしくは破裂が発生することが考えられるため、伸線加工前に熱処理をすることにより水素ガス等を事前に排出した線材を作製したところ、事前熱処理をしない場合とほぼ同じ J_c が得られたので報告する。

2. 実験方法

MgB₂ 線材は市販の MgH₂ 粉末と市販のアモルファス B 粉末、10mol%のエチルトルエン、10mol%の SiC 粉末の混合粉末を使用して作製した。添加したエチルトルエンが蒸発しないように、ボールミルを用いて1時間の粉末混合を行った。作製した混合粉末を外径6mm、内径3.5mmの純鉄管に充填した後、シー스에充填した状態で、アルゴンガスを流して540℃で1時間事前熱処理した。その後、溝ロール加工と平ロール加工を用いて幅4mm、厚さ0.5mmのテープに伸線加工した。なお、粉末の混合と混合粉末の鉄管への充填は、粉末の酸化を避けるため、グローブボックスを用いて、高純度アルゴンガス雰囲気下で実施した。伸線加工後の熱処理は、アルゴンガスを流して600℃で1時間実施した。

臨界電流 I_c は通常4端子抵抗法により12T以下の磁界中で測定した。磁場はテープの面に平行に印加した。I_c は1 μV/cmの電圧が発生する電流と定義した。

3. 結果

Fig.1 にエチルトルエン及び SiC 粉末を同時添加した線材の4.2Kでの臨界電流密度 J_c の磁場依存性の測定結果を示す。なお、事前熱処理を実施した場合と実施しない場合の J_c の値はほぼ同じであるため、ほぼ重なっている。比較として、無添加、10mol%エチルトルエン添加、10mol%SiC 粉末添加の線材の測定結果も示す。

事前熱処理を実施した線材は実施しない線材とほぼ同じ、

4.2K,10T で J_c=330A/mm² の値が得られた。今後、この手法を長尺線作製に適用する計画である。

Fig.2 に事前熱処理を行う前と行った後の混合粉末のX線回折の結果を示す。事前熱処理を行う前には MgH₂ のピークがあるが、行った後は MgH₂ のピークがなくなり、Mg のピークになっていることがわかる。つまり、事前熱処理により MgH₂ が分解し、Mg になっている。また、若干であるが、MgB₂ のピークがあり、混合粉末の一部が事前熱処理により反応して MgB₂ が生成されたと考えられる。なお、ボールミルにはタングステンカーバイド(WC)製のポット及びボールを用いているため、WCのピークが出ている。エチルトルエンについては、事前熱処理により生成した MgB₂ において一部は反応が起こって J_c が向上し、残りは、沸点が約160℃であるため、蒸発していると考えられる。

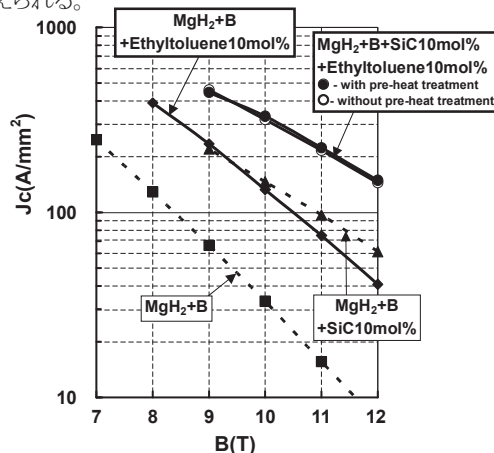


Fig. 1. J_c-B curves at 4.2K of MgB₂/Fe tapes.

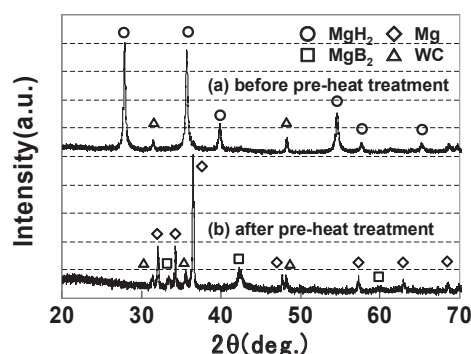


Fig.2. X-ray diffraction patterns of the mixed powder.

高い断面アスペクト比の MgB₂ 多芯テープ線材の開発 2 —結合損失特性—

Development of MgB₂ multifilamentary tape with high aspect-ratio cross-sections - Coupling loss properties -

福島 大和, 川越 明史, 住吉 文夫(鹿児島大);高橋 雅也, 岡田 道哉(日立);
柳 長門, 三戸 利行(核融合研)

FUKUSHIMA Yamato, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);
TAKAHASHI Masaya, OKADA Michiya (HITATI);
YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS)
E-mail: bt203090@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導電力貯蔵装置用のコイルには、低損失化と高安定化の両立、および低コスト化が必要である。そこで我々は、20K 付近で使用可能な MgB₂ 線材を用いて、低損失化と高安定化の両立を目指すために、高い断面アスペクト比をもつ MgB₂ 多芯テープ線材の開発を行っている。本線材は、MgB₂/Nb/CuNi 多芯丸線材を従来にならぬほど極めて高い断面アスペクト比まで圧延したものである。導体幅広面に平行に磁界を印加した時に、臨界電流の向上と交流損失の低減が期待できる。さらに、MgB₂ を用いることで、低コスト化も期待できる。今回は、試作した線材の結合損失の測定を行った。

2. 試作線材と測定方法

本線材に期待される特長は次の点である。①MgB₂ フィラメントを圧延することによって、幅広面に平行な横磁界中での臨界電流が向上する。②高い断面アスペクト比にすることによって、幅広面に平行な変動横磁界中の損失を低減できる。③テープ形状であるために面冷却が可能であることから高安定性が期待できる。④安価な MgB₂/Nb/CuNi 多芯線材を用いることで、線材の低コスト化が期待できる。今回は②の点について実験的に検証した。

今回試作した圧延線材のパラメータを Table 1 に示す。元になる丸線材を Wire とし、その線材をアスペクト比 3.3 まで圧延した線材を Tape3、アスペクト比 6.6 まで圧延した線材を Tape7 としている。サンプルは、長さ 200mm の短尺直線状ケーブル 10 本をそれぞれ絶縁して積層したものである。このサンプルを、NbTi 多芯線で巻線されたスプリット型レーストラックマグネットの一樣磁界空間にセットし、液体ヘリウム中でピックアップコイル法により測定した。サンプルに印加する横磁界は、直流バイアス磁界に微小振幅交流磁界を重畳したものである。今回の測定では、直流バイアス磁界 0.5T、微小振幅交流磁界 0.1~1.6mT、周波数 1~318Hz と変化させた。また、横磁界の印加方向は線材幅広面に対して垂直(FO 方向)と平行(EO 方向)の 2 方向とした。

3. 結果および検討

得られた結合損失の周波数特性を Fig.2 に示す。縦軸は測定された交流損失を、印加磁界振幅の 2 乗で規格化した規格化損失である。EO 方向磁界中では、アスペクト比が高くなるに従い、結合損失特性が高周波側にシフトしており、損失が低減していることがわかる。この周波数特性より求めた結合時定数とその理論値を Table 2 にまとめる。Wire に比べて、Tape3EO、Tape7EO の結合損失が低減しており、特に Tape7EO は Wire の約 1/10 倍と大きく低減していることがわかる。

4. まとめ

MgB₂/Nb/CuNi 多芯丸線材を圧延して、高い断面アスペクト比の MgB₂ 多芯テープ線材を作製し、その結合損失の測定を行った。その結果、EO 方向磁界中では、圧延前の丸線に比べて、結合損失が約 1/10 倍と大きく低減している結果が得られ、本線材の低交流損失性能を実証した。

参考文献

[1]福島大和 他, 第 76 回 2007 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, p.41.

Table1 Parameters of test conductors

Sample	Wire	Tape3	Tape7
Stand			
Dimension	Φ1.02mm	0.497mm× 1.64mm	0.342mm× 2.25mm
Filament diameter	130μm	-	-
Aspect ratio	1.0	3.3	6.6
Twist pitch	50mm	-	-
Cable			
Width	7.0mm	6.7mm	8.7mm
Thickness	13mm	6.8mm	4.2mm
Length	200mm	200mm	200mm
Number of Stands	10	10	9

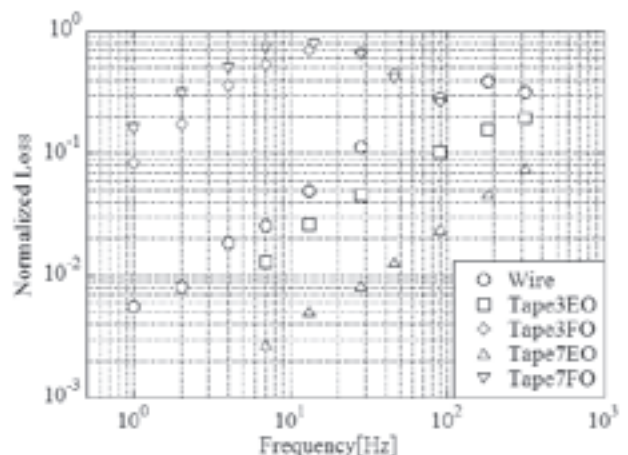


Fig. 2 Frequency dependencies of normalized losses in each sample under the transverse magnetic field

Table 2 Coupling time-constants

Sample	Wire	Tape3		Tape7	
		EO	FO	EO	FO
Experiment	0.2	0.09	4.7	0.02	7.6
Theory	0.15	0.016	1.6	0.007	7.6

77KでのGFRPの破壊挙動と層間せん断破壊に及ぼす ショートビーム試験ジグの曲率半径の影響

Effect of Test Fixture Radius in Short Beam Test on Fracture Mode and Interlaminar Shear Strength of GFRP at 77 K

西村 新 (核融合研); 野上 修平 (東北大学)
NISHIMURA Arata (NIFS); NOGAMI Shuhei (Tohoku Univ)
E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

前報[1]において、Short Beam 試験に用いる負荷ジグと支持ジグの曲率半径が大きいと、層間せん断破壊 (Interlaminar Shear) が生じやすくなり、層間せん断強度を評価することが可能となることを明らかにした。同時に、供試材料やγ線照射条件に依存して、材料や負荷点と支持点を結ぶ面上での積層を横切るせん断破壊 (Translaminar Shear, TLS) や曲げ破壊 (Bending) が認められた。

Fig.1 に示すように Short Beam 試験は 3 点曲げであり、支持点間距離を L、試験片板厚を h、試験片幅を B、荷重を P とすると、試験片板厚中央でのせん断応力 S_H 、曲げ応力 σ_B はそれぞれ次式で示される。

$$S_H = 3P/4Bh \dots (1), \quad \sigma_B = 3PL/2Bh^2 \dots (2)$$

$$(1), (2) \text{より次式が導かれる。} \sigma_B/S_H = 2L/h \dots (3)$$

σ_B と h が一定であるとすれば、L を小さくすることによって S_H を大きくすることができる。すなわち、層間せん断破壊が起こり易くなる。曲率半径の大きいジグを用いると、変形に伴って L が小さくなり、層間せん断破壊を生じさせるためには有利である。層間せん断破壊を生じた時の S_H が層間せん断破壊強度 (ILSS) と定義され、積層構造を有する GFRP の重要な機械的特性の一つである。

このような曲率の違いによる試験片内の応力分布を検討するため、有限要素法解析を行った。

2. 解析モデルと解析方法

曲率半径の大きなジグを用いると荷重が接触面で分布し、中立面上で S_H が一定となるかどうか不明である。応力分布を検討するため、弾性有限要素法解析を行った。解析モデルを Fig.2 に示す。解析には ANSYS v10.0 を用いた。接触点では摩擦接点を用い、摩擦係数を 0.2 とした。負荷点、支持点のピンの直径を 1 mm と 6 mm とし、負荷点のピン中央が 1.0 mm 変位するまで解析を行った。ピン、試験片ともに等方弾性要素を用い、ヤング率をそれぞれ 200 GPa、20 GPa とした。

3. 解析結果

Fig.3 に変位 1.0 mm での解析結果の一例を示す。 τ_{ab} は Fig.2 の負荷点と支持点を結ぶ面上でのせん断応力である。ジグの曲率半径が大きいと負荷点や支持点の接触点付近の応力集中が小さく、また、支持点が負荷点側に移動することが分かる。中立面上での S_H はほぼ一定値を保っており、曲率半径が大きく、接触点付近に応

力分布があっても、Short Beam 試験によって ILSS を評価することが可能であることが分かる。

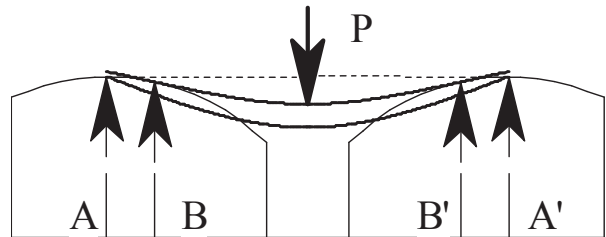


Fig. 1 Deflection image of larger radius supports.

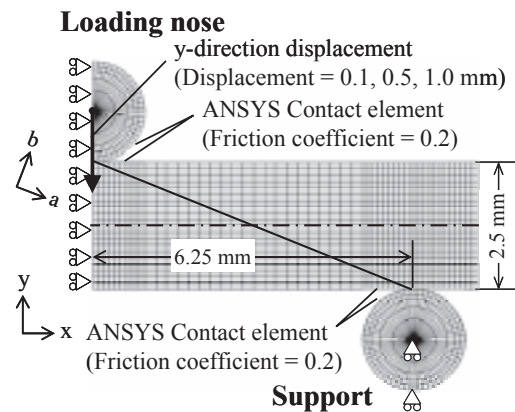


Fig.2 FEM analysis model. Contact element was arranged around the loading nose and supports.

Table 1 Summary of stress distribution diagrams. The load in parentheses is the required load to deflect the specimen 1 mm.

Radius (mm)	σ_x distribution	τ_{xy} distribution	τ_{ab} distribution
1.0/ 1.0 (6.092 kN)			
6.0/ 1.0 (6.268 kN)			
1.0/ 6.0 (8.918 kN)			
6.0/ 6.0 (9.662 kN)			

極低温における織物 GFRP 積層材料の混合モード層間破壊・損傷

Mixed-Mode Interlaminar Fracture and Damage of Woven GFRP Laminates at Cryogenic Temperatures

進藤 裕英, 高橋 進, 成田 史生(東北大工)

SHINDO Yasuhide, TAKAHASHI Susumu, NARITA Fumio (Tohoku University)

E-mail : shindo@material.tohoku.ac.jp

1. Introduction

One of the important applications of technological progress to modern cryogenic devices is the use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) woven laminates in their construction. Molded into an epoxy resin matrix, they have produced extremely tough and stable materials. However, propagation of delamination may reduce the capability of such cryogenic devices. Also, GFRP woven laminates have a tendency to develop damage at cryogenic temperature. In this study, a three-dimensional finite element analysis (FEA) is developed to characterize the cryogenic interlaminar fracture and damage of GFRP woven laminates under mixed-mode loading.

2. Material properties

GFRP woven laminates discussed in this paper are SL-EC (Nitto Shinko Co. Ltd., Japan)¹⁾ and G-11 (Arisawa Mfg. Co. Ltd., Japan)²⁾. The basis for SL-EC and G-11 is the plain weave fabric of E-glass and the epoxy resin is a bisphenol-A. The E-glass plain weave is produced by interlacing warp fiber bundles (43-44 per 25.4mm) and fill fiber bundles (32-33 per 25.4mm). The laminates SL-EC and G-11 can have different width, thickness and wavelength of the fiber bundles, and the woven composite overall fiber volume fractions of SL-EC and G-11 are about 56 and 47%, respectively.

3. Finite element analysis

The ANSYS finite element software was used in this investigation. A three-dimensional finite element model was necessary to accurately characterize the interlaminar fracture and damage of GFRP woven laminates at RT, 77K and 4 K. The geometry of the computational model was defined by the geometry of specimen and jig used in experiments (Fig. 1). The specimen width is denoted by B , length by l , thickness by $2H$, half span length by L , loading lever width by b , load position by c , load point height by d and crack length by a . A rectangular Cartesian coordinate system (x, y, z) is used with the x -axis coinciding with the longitudinal direction of the specimen. The fabric warp direction was parallel to the specimen longitudinal direction.

The micromechanics model³⁾ based on the assumption of uniform strain inside the unit cell of the plain weave fabric laminates was used to calculate elastic properties, i.e. Young's moduli E_x, E_y, E_z , Poisson's ratios $\nu_{xy} = (E_x/E_y)\nu_{yx}$, $\nu_{yz} = (E_y/E_z)\nu_{zy}$, $\nu_{zx} = (E_z/E_x)\nu_{xz}$, and shear moduli G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} of SL-EC and G-11 at RT (295 K), 77 K and 4 K. The x and y axes are, respectively, aligned with the warp and fill directions, and the z axis is in the thickness direction.

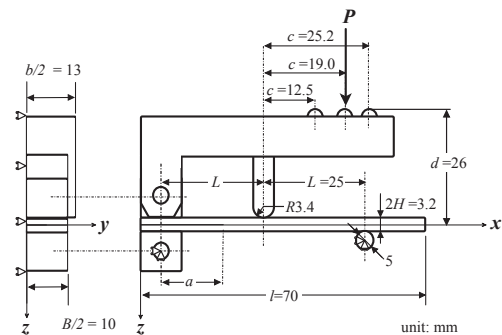


Fig. 1 Geometry and boundary conditions assumed for finite element calculations (MMB test)

During the MMB test, load P and displacement of the crosshead were monitored and the compliance C was measured¹⁾. Here, the instantaneous crack length a corresponding to critical load P_c is determined by using the measured C of the damage states to calculate the critical total strain energy release rate (Mixed-mode interlaminar fracture toughness) G_T . A uniformly distributed load p was applied, and calculations were made for the load $P = pB$. The path-independent integral in the mid-width was used to calculate the G_T .

4. Results and discussion

Fig. 2 illustrates the predicted damage zone at $y = 0$ mm plane of the G-11 MMB specimen ($a = 13.3$ mm) with $c = 19.0$ mm ($c/L = 0.76$) under $P = 485$ N at 4 K. The values of G_T are 2.65 and 2.38 for the same specimen and conditions, obtained from FEA with and without damage, respectively. Damage can cause an increase in G_T . Similar phenomena were observed at 77 K.

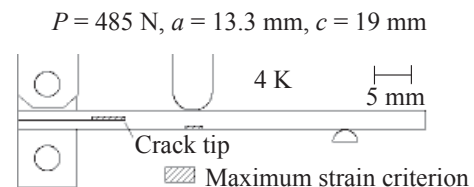


Fig.2 Predicted damage growth pattern for G-11 MMB specimen at 4K.

References

1. Y. Shindo, D. Shinohe, S. Kumagai and K. Horiguchi: ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 127 (2005) p.468
2. Y. Shindo, F. Narita and T. Sato: Acta Mechanica, Vol. 187 (2006) p.231

300系ステンレス鋼の液体水素中におけるセレーシヨンの計算機シミュレーション

Computer simulation for serration of 300 series stainless steels in liquid hydrogen

柴田 浩司, 緒形 俊夫, 由利 哲美 (NIMS); 藤井 秀樹, 大宮 慎一 (新日鐵)
 SHIBATA Koji, OGATA Toshio, YURI Tetsumi (NIMS); FUJII Hideki, OMIYA Shinichi (NSC)
 E-mail: SHIBATA.koji@nims.go.jp

1. はじめに

これまで、304L, 316L, 310S 鋼を極低温で引張変形したときに生じるセレーシヨンを、計算機シミュレーションで現わそうとした場合、液体ヘリウム中の変形では比較的うまくいくのに対して、液体水素中の変形ではうまくいかなかった。そこで本研究では、試験片表面での沸騰挙動の様子(試験片表面と液体水素との温度差に対する試験片表面から液体水素への熱流束の変化の様子)を模擬的に変化させ、計算によってセレーシヨンの現れるかどうかを検討した。

2. 方法

引張試験は、平行部の長さ 35mm、直径 7mm の丸棒試験片を用いて、伸びが 1.2%までは平均ひずみ速度が $5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、それ以降は $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ となるようなクロスヘッド速度一定条件下で行った。計算機シミュレーションの方法は、著者らのこれまでの方法と同様である。計算時間短縮のため、ほとんどのシミュレーションは平均ひずみ速度がほぼ $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ となるようなクロスヘッド速度一定条件下で行い、必要に応じて、それより遅いクロスヘッド速度においても計算した。本研究では、試験片と冷媒の温度差と熱流束との間の関係を Fig.1 に示すように、様々変化させた。(1)は Brentari ら[1]の文献に従ったもので、これまでのシミュレーションにおいて用いてきたものである。20%を越えるような伸び変形まで著者らのシミュレーション方法をそのまま適用することは躊躇される。そこで、最大荷重点付近における応力-伸び曲線は、予め最大荷重点付近まで変形した材料(304L 鋼ではほとんど α' 相に変態しているが、310S 鋼では変態はまったく生じず、加工硬化している)を仮想して、あらためて引張ったときの変形挙動をシミュレートした。

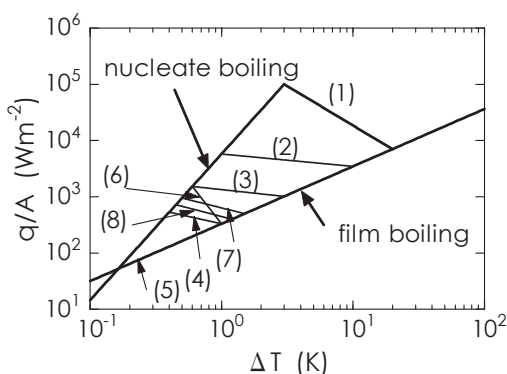


Fig.1 Various assumed curves of the transition from nucleate to film boiling on the specimen surface in liquid hydrogen. Curve (1) is after Brentari and Smith[1].

3. 結果および考察

液体水素中で、304L, 316L, 310S 鋼を引張変形すると、Fig.2 に示すように、最大荷重点近くまではセレーシヨンを示さず、最大荷重点近くから大きなセレーシヨンの見られるようになる。

Fig.1 に示すように核沸騰から膜沸騰への遷移の様子を変

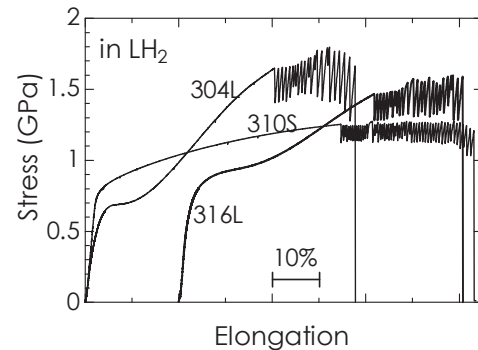


Fig.2 Stress-elongation curves in liquid hydrogen obtained by practical tensile tests.

えて計算したところ、(4)と(5)の場合、304L 鋼、310S 鋼の最高荷重点付近で観察されるような大きなセレーシヨンの現れた。(8)では 304L 鋼で現れたが、310S 鋼では現れなかった。他の核沸騰・膜沸騰遷移の場合は、比熱、熱伝導度、転位の運動の熱活性化式の定数などいろいろ変化させても、実際の引張試験で観察されるような液体水素中でのセレーシヨンの挙動を計算で現すことはできなかった。以上の結果は、液体水素中における試験片表面での沸騰挙動と熱流束に関するデータを見直す必要があることを示唆するものとも考えられる。しかし、300系ステンレス鋼は、低温で変形中に双晶が生じる可能性がある[2]。双晶が生じるとセレーシヨンの発生挙動にも影響を及ぼすことが考えられるが、300系ステンレス鋼における双晶発生の詳細に関しては十分には調べられておらず、シミュレーションに双晶の影響を考慮することも今後検討しなければならないと考えられる。

なお、304L 鋼の場合、予め加工しない場合でも計算結果に変形初期からセレーシヨンの現れ始める傾向が現れる。310S 鋼の場合は、予め加工しないと計算結果にセレーシヨンの認められず、実際の引張試験結果と合致する。予め加工しない 304L 鋼の場合、 γ 相がマルテンサイトに変態するときの発生熱がセレーシヨンの発生に大きな影響を及ぼす。この発生熱を従来[3]見積もっていた値の 1/2 にすると、セレーシヨンの認められなくなる。そのようにしても、液体ヘリウム中の 304L 鋼のセレーシヨンの発生挙動は、計算によって比較的良く現わすことができる。

4. まとめ

液体水素中におけるセレーシヨンの計算機シミュレーションで生じる条件を、液体水素の沸騰挙動を中心に検討した。試験片表面での沸騰挙動、熱流束に関するデータの信頼性の確認、変形双晶の効果の検討が今後の課題である。

参考文献

1. E. G. Brentari and R. V. Smith, *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, Plenum, New York, 10(1965) pp.325-341
2. M. Hatano et al.; *CAMP-ISIJ*, 20(2007)pp.1068-1071.
3. K. Shiabta et al.; *J. of CSJ*, 42(2007)pp.34-41.

Ni 基超合金の極低温高サイクル疲労特性に及ぼす残留応力の影響

Effect of Residual Stress on High-cycle Fatigue Properties of Ni-base Superalloy at Cryogenic Temperature

由利 哲美、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構)

Tetsumi Yuri, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS)

E-mail: YURI. Tetumi@nims.go.jp

【緒言】 Ni 基超合金では、ショットピーニング処理により圧縮残留応力を付与した試験片で液体窒素温度において疲労試験を行うと、疲労強度が上昇すること等が報告されている¹⁾。試験片加工時やエメリー研磨によっても試験片表面近傍に圧縮残留応力が付与されることが知られているが、極低温疲労特性に及ぼす影響について調べた報告は少ない。そこで本研究では、Ni 基超合金の通常仕上材および電解研磨材を用いて液体窒素温度で高サイクル疲労試験を行い、疲労特性および疲労き裂発生位置に及ぼす残留応力の影響について調べた。

【実験方法】 供試材は、Ni 基超合金(以後、Alloy 718 と記す)を用いた。砂時計型試験片に加工後、試験片表面をエメリー紙 600 番で仕上げた試験片(EF 材)および EF 材に電解研磨を施した試験片(CP 材)を用いた。試験温度は、液体窒素温度(77 K)および室温(293 K)である。疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い応力比を $R=0.01$ とした。試験周波数は 10^5 回まで 10Hz で行い破断しなかった試験片については、その後 15~20Hz に加速して試験を行った。また、 10^7 回以上で破断しなかった試験片はさらに荷重を増し破断するまで行うステップワイズ試験²⁾を実施した。疲労試験後の破面観察は、SEM を用いて疲労き裂発生箇所を中心に調べた。また、試験片表面から試験片深さ方向に X 線による残留応力測定および硬さ測定も実施した。

【結果および考察】 Alloy 718 の EF 材および CP 材の残留応力と試験片表面からの深さの関係を Fig.1 に示す。両者とも試験片表面で圧縮残留応力が最大値を示し、EF 材で約-600MPa、CP 材で約-270MPa の圧縮残留応力が存在している。Fig.2 に Alloy 718 の EF 材および CP 材の 77 および 293 K における S-N 曲線を示す。293 K の短寿命側においては両者の疲労強度に差は見られないが、長寿命側で EF 材の方が CP 材に比較し高くなっている。また、図中に疲労き裂発生位置(試験片表面または内部)も示してある。疲労き裂発生位置は、CP 材ではすべて表面破壊(複数の起点)、EF 材では短寿命側で炭化物を起点とした表面破壊であるが長寿命側で 1 点、複数のファセットを起点とした内部破壊が観察された。この破壊形態の相違が、両者の疲労強度に影響しているものと考えられる。一方、77 K においては両者の疲労強度には明瞭な差は見られない。また、両者の疲労き裂発生位置は短寿命側で炭化物を起点とした表面破壊、長寿命側(約 4×10^6 回以上)では複数のファセットあるいは炭化物と複数のファセットから成る内部破壊

が観察された。77 K においては EF 材および CP 材の破壊形態に大差はなく、そのため疲労強度に影響が見られなかったものと考えられる。以上より、293 K では試験片加工時等に付与された圧縮残留応力により、長寿命側での疲労特性および疲労き裂発生位置に影響が見られたが、77 K においては影響は見られなかった。

【参考文献】

- (1) Y.Ono, et al. : Proceedings of ICMC'06, 2 (2006) 69
- (2) Y.Murakami, et al. : Trans. JSME (A), 55 (1989) 213

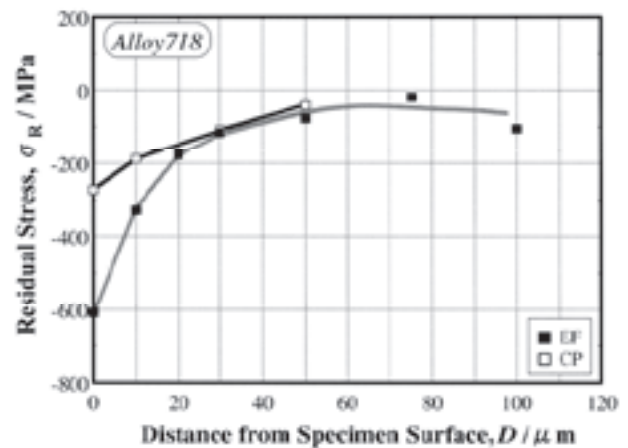


Fig.1 Relationship between residual stress and depth from specimen surface. EF:Emery-finished specimen, CP: Chemical-polished specimen.

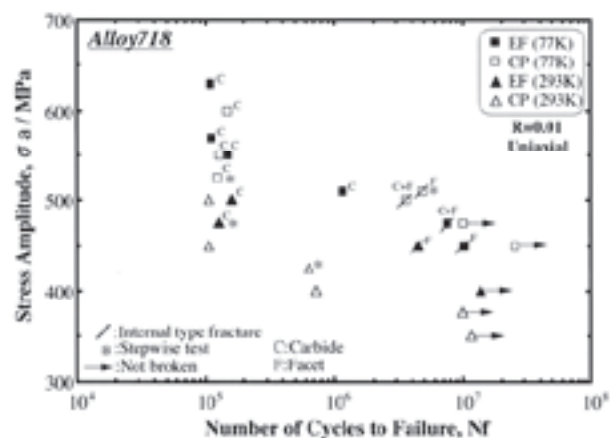


Fig.2 S-N curves of EF and CP specimens of Alloy 718 at 77 and 293 K.

簡便な高圧水素環境中材料試験法による構造材料の低温特性

Effects of hydrogen environment on mechanical properties of structural materials at low temperatures

緒形 俊夫 (NIMS)

OGATA, Toshio (NIMS)

E-mail: OGATA.Toshio@nims.go.jp

1. はじめに

高圧水素環境下で使用される材料の水素脆化感受性を簡便に評価する方法として考案した、試験片内の微小空隙に極限環境を設定する方法¹⁾を用い、オーステナイト系ステンレス鋼について、室温から低温にかけて高圧水素環境下の引張試験を行い、従来の報告²⁾と比較することで、簡便な材料試験法の有効性を確認するとともに、低温下での15MPa高圧水素環境中の高圧水素の引張特性への影響を調べた²⁾³⁾。本報告では、燃料電池車の構造用部品として検討されているオーステナイト系ステンレス鋼以外の材料についても、本試験法を適用した試験を低温下で行い、高圧水素の引張特性への影響を調べるとともに、さらに高圧中での水素の影響についても検討した。

2. 試験方法

簡便な高圧水素下材料試験法として試験片内の微小空隙に高圧水素環境を設定する方法(特願 2006-320281:「材料試験装置と材料試験片」、関連特許:特願 2006-060027「材料試験片及びその製造方法」)を用いた。概略図を Fig.1 に示す。供試材は市販の SUS630, SUH660 及び Alloy 718 である。それぞれ熱処理を企画に基づいて行った。引張試験片の平行部直径は 6.25 mm で、微小空隙の内径は 2 mm である。試験片内の微小空隙に水素あるいは参照ガスとしてヘリウムガスをボンベから封入した。ガス圧はボンベ圧の 11~15MPa で、およそ 10 MPa 級と称する。

試験温度は、市販の低温冷凍機により温度制御したアルクール中と液体窒素の噴霧冷却により温度制御し、所定の温度で行った。引張試験のクロスヘッド速度は 3.6 mm/h ($2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)で行った。

3. 試験結果

Fig. 2 に 630 の室温から 77K にかけての高圧水素中とヘリウム中の荷重-伸び曲線を示す。300番台のオーステナイト系ステンレス鋼とは異なり、室温から 200K 付近までは水素による環境脆化が著しく、引張試験の初期の段階で破断した。Fig. 3 に各供試材の引張試験を室温から低温にかけて行い、約 10 MPa (約 100 気圧)の水素中で得られた絞りを同じ He 中の絞りで除して評価した水素環境脆性の温度による変化を示す。77K に向けて水素感受性が減少するが、これは温度の低下に伴い水素の拡散も減少するためと考えられている。660 は、水素環境脆化がほとんど見られなかった。水素環境脆化は、水素圧が高くなると大きくなる傾向が見られた。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「水素社会構築共通基盤整備事業」プロジェクトにおいて実施した。

参考文献

- Ogata: Collected Abstracts of the 2006 Spring Meeting of JIM (2006), p.230
- D.Sun, et al.: Materials Science and Technology, Vol.17, 302-308, (2001)
- Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.275
- Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.197

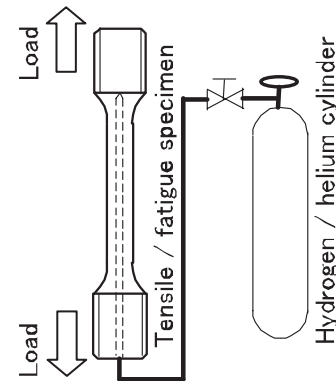


Fig.1 Illustration of testing method.

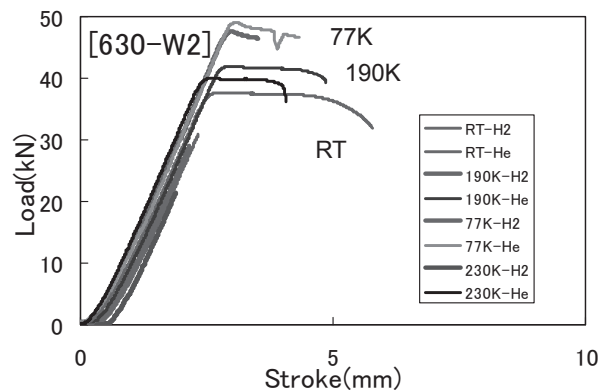


Fig. 2 Load-displacement curves for 630 in 13MPa H₂ and 11MPa He at RT, 230K, 190K, and 77K.

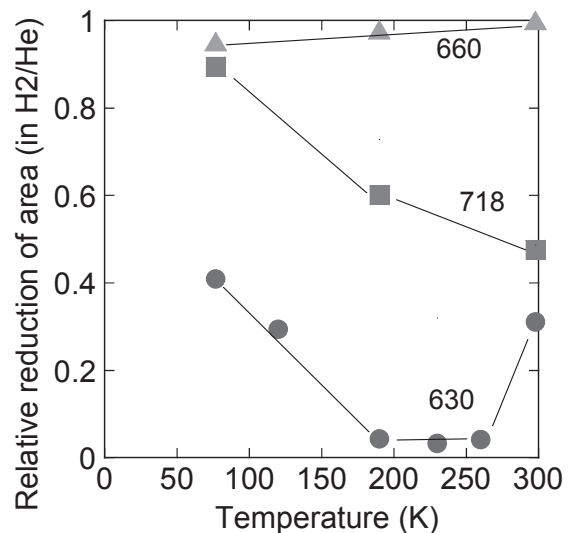


Fig. 3 Effect of temperature on reduction of area of 660, 718 and 630 in 10MPa hydrogen and helium.

強いピン止め力を有する Gd 系バルクに対するパルス着磁法(MMPSC 法)の適用

Pulse field magnetization for Gd-Ba-Cu-O bulk with strong pinning force.

日山 拓也、欠端 浩介、藤代 博之、内藤 智之、川井 研一 (岩手大工学部)、成木 紳也、平林 泉 (SRL);

HIYAMA Takuya, KAKEHATA Kosuke, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki, KAWAI Ken-ichi (Iwate University.);

NARIKI Shinya, HIRABAYASHI Izumi (SRL);

E-mail: neualtdanzig@yahoo.co.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石を実現するための着磁法として、パルス磁場着磁(PFM)が盛んに研究されている。PFMは磁場中冷却着磁(FCM)と比べ、磁束線の運動のため発熱が大きく捕捉磁場 B_T が小さい。そこで我々は発熱を抑制し B_T の向上に有効な着磁法として、二段階の着磁法である Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling (MMPSC)法を提案した [1]。前回の学会では、MMPSC 法の第一段階での”M 字型”の捕捉磁場分布の形状が、第二段階での捕捉磁場の向上に影響することを、バルク上 0.5mm の 2 次元分布を測定して明らかにした [2]。本研究では、これまでに用いてきたバルクよりもさらに強いピン止め力を有する直径 45mm の Gd 系バルクに対し、これまで明らかにしてきた研究結果を適用し、6 T を越える捕捉磁場を目指した検討結果について報告する。

2. 実験方法

実験では ISTEK で作製された直径 45 mm、厚さ 19.5 mm の Gd 系バルク($B_T(\text{FCM})=1.8$ T at 77 K)を使用した。Fig. 1 の挿入図に示すように、Hall sensor を 3 箇所(C, GSR, GSB)、熱電対(T1~T3)をバルク表面に貼り付け、パルス磁場印加後の温度変化と磁束運動をモニタした。バルクの初期温度 T_s はバルク表面で $T_s=40$ K、20 K になるように設定し、印加磁場 B_{ex} は 4.0~8.0 T の範囲で、同一パルス着磁法(SPA)では 3 回、MMPSC 法では 4 回のパルス磁場を印加した。着磁には内径 83 mm、外径 114 mm のコイル A と内径 99 mm、外径 121 mm のコイル B の二つの着磁コイルを用いた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に SPA の No. 1 pulse のバルク中心での捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。本研究で用いたバルクを Gd-A、比較のために 5.2 T の捕捉磁場を得たバルク[1]を Gd-B ($B_T(\text{FCM})=1.7$ T at 77 K; 新日鐵)として示す。Gd-A と Gd-B を比較すると、ピン止め力の強い Gd-A の方がバルクの中心部まで磁束を侵入させるのに高磁場が必要であることがわかる。また、 $B_{ex}=7$ T 以上での PFM では発熱が大きく、両方のバルクで捕捉磁場の減少が見られた。しかし、Gd-A では高磁場

での捕捉磁場減少が少なく、MMPSC 法を適用し発熱を抑制することで $B_T^c=5.2$ T 以上の捕捉磁場の達成が期待できる。

Fig. 2 に Gd-A バルクに対して、コイル A、コイル B を用いて着磁した場合のバルク中心での捕捉磁場 B_T^c の印加磁場依存性を示す。同じ温度で同一強度の磁場印加での PFM では、径の小さいコイル A による PFM でより中心に磁束を捕捉できることがわかった。また、コイル B での $T_s=40$ K での捕捉磁場とコイル A での捕捉磁場は同じ値を示し、コイル A を用いることでピン止め力が強い低温で高い捕捉磁場が期待できる。当日は、MMPSC 法を用いた PFM の検討結果について報告する。

参考文献

[1] H. Fujishiro, M. Kaneyama, T. Tateiwa and T. Oka, Jpn. J. Appl. Phys **44** (2005) L1221.

[2] 日山ほか、2007 年度春季 低温工学・超伝導学会講演概要集 [2A-a02]

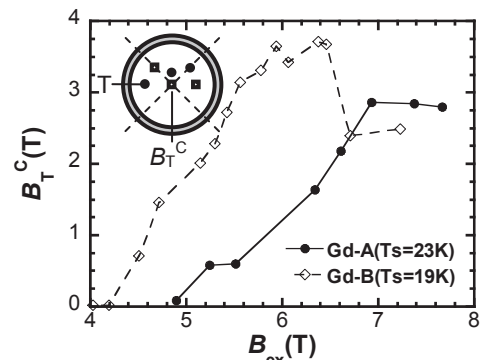


Fig.1 The Applied field B_{ex} dependence of the trapped fields at the bulk center for Gd-A and Gd-B.

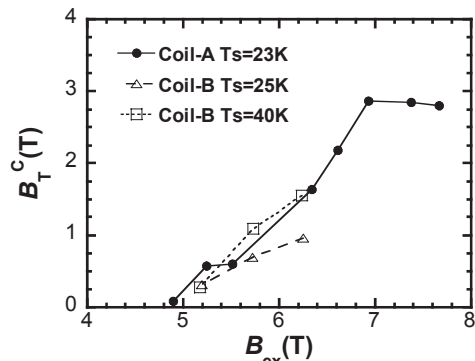


Fig.2 The Applied field B_{ex} dependence of the trapped fields at the bulk center for coil-A at 23K and coil-B at 25K and 40K.

MMPSC 法による捕捉磁場向上のメカニズム

Mechanism of Trapped Field Enhancement on Superconducting Bulk Magnetized by MMPSC Method

藤代博之, 日山拓也, 欠端浩介, 内藤智之 (岩手大工), 柳 陽介 (イムラ材研)

FUJISHIRO Hiroyuki, HIYAMA Takuya, KAKEHATA Kosuke, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.), YANAGI Yosuke (IMRA Material)
(E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

超伝導バルクのパルス着磁法の1つである Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling (MMPSC) 法は、2段階に温度を設定し ($T1, T2$)、各段階で最適なパルス磁場 ($B1, B2$) を複数回印加する方法であり、バルク中心の捕捉磁場 B_p を向上させる有効な方法であることが実験的に明らかにされている [1, 2]。第1段階において磁場分布を凹型 (いわゆる "M字型") に捕捉させることが重要な条件であることが実験的に示されているが、なぜ M 字型の捕捉磁場分布が必要なのか、その理由については明確な説明が示されていない。本研究では、第1段階 (1st stage) において種々の形状の捕捉磁場分布を準備し、各磁場分布に対して第2段階 (2nd stage) で一定の磁場 $B2$ を印加した場合の局所磁場の時間依存性をホール素子を用いて測定した。捕捉磁場が増大する場合と増大しない場合の磁束運動を比較し、第1段階における M 字型分布の果たす役割と捕捉磁場向上のメカニズムについて考察した。

実験と検討

使用したバルクは $\phi 45$ mm GdBaCuO バルク (新日鐵製) である。MMPSC 法の条件は、1st stage でバルクを $T1=70$ K 又は 30 K に冷却し、立ち上がり時間 12 ms、磁場強度 $B1=3.2 \sim 6.2$ T のパルス磁場を2発印加し (No. 1, 2 pulse)、Case A (optimum M)、Case B (large M)、Case C (trapezoid) の捕捉磁場分布を形成した。その後 2nd stage でバルクを $T2=30$ K に冷却し、 $B2=6.3$ T のパルス磁場を2発印加し (No. 3, 4 pulse)、バルク表面の3点の局所磁場を測定した。図 1 (a) に Case A の場合の No. 3 パルスにおける印加磁場 $\mu_0 H_a$ と3点 (#1, #2, #3) での局所磁場 B_L の時間依存性を示す。 B_L (#1), B_L (#3) は $t=6$ ms から遅れて立ち上がり、バルク中心の B_L (#2) は印加磁場がピークに達した直後の $t=13$ ms から急激に立ち上がる。図 2 (b), (c) に、図 2 (a) の結果を用いて推定した増磁過程 ($t \leq 12$ ms) と減磁過程 ($t \geq 12$ ms) のバルク内部の磁束分布の時間依存性をそれぞれ示す。図 2 (b) 中の $t=0$ ms の太い点線が No. 2 pulse で形成された M 字型の初期磁場分布である。バルク周辺部の B_L (#1), B_L (#3) は $t \leq 6$ ms ではほとんど変化せず #1, #3 に kink が生じる。この結果は粘性力 F_v が増磁過程初期には支配的であることを示唆する。 $t \geq 6$ ms では B_L (#2) はほとんど増加しないが、 B_L (#1), B_L (#3) は徐々に増加し、磁場分布は直線的になる。減磁過程直後 ($t=15$ ms) に B_L (#2) が急激に増加し、その後 B_L (#1), B_L (#3) が徐々に減少して最終的に最大 B_L (#2)=4 T の円錐型分布が実現する。

図 3 (a), (b) には Case B (large M) の場合の増磁過程 ($t \leq 12$ ms) と減磁過程 ($t \geq 12$ ms) のバルク内部の磁束運動の時間依存性をそれぞれ示す。 B_L (#1), B_L (#3) は印加磁場とともに増減するが、 B_L (#2) はほとんど変化せず、最終的な磁場分布はほとんど変化しない。Case A, B の2つのケースを比較すると、増磁過程終了時 ($t=12$ ms) のバルク内の磁場勾配 (dB/dx) の違いが顕著である。すなわち、バルク内の磁場勾配は Bean model では臨界電流密度 J_c を示すが、Case A では粘性力が大きい J_c 以上の磁場勾配が実現する。外部磁場速度 v がほとんどゼロとなる $t=12$ ms 付近で粘性力が減少し (F_v は v に比例する)、周辺部に

留まっている多くの磁束が中心部へフローすると考えられる。一方、Case B では $t=12$ ms の磁場勾配が J_c よりも小さく、バルク周辺部の磁束はバルク中心部ではなく外部に排除される。このように、1st stage の M 字型磁束分布の中心部の凹みが磁場勾配 (dB/dx) の大きさを決定する主な要因であると結論することができるが、2nd stage の条件 ($T2, B2$) や温度上昇の大きさなども関連している。

参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1221.
[2] 藤代他, 第76回 2007年度春季低温工学超電導学会 [3D-a09]

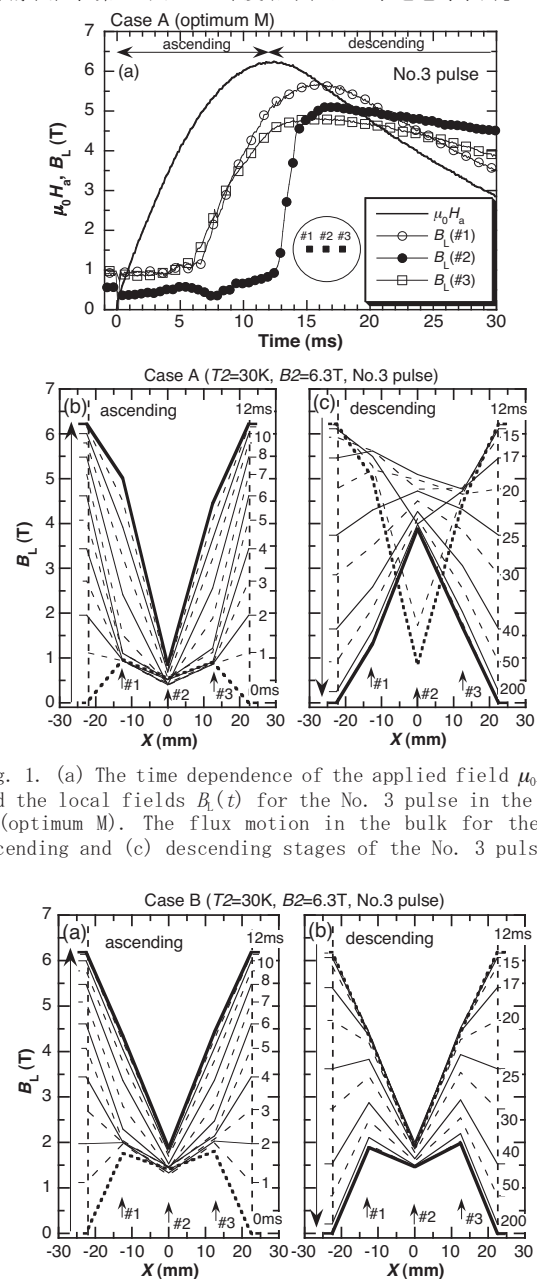


Fig. 1. (a) The time dependence of the applied field $\mu_0 H_a(t)$ and the local fields $B_L(t)$ for the No. 3 pulse in the Case A (optimum M). The flux motion in the bulk for the (b) ascending and (c) descending stages of the No. 3 pulse.

Fig. 2. The time dependence of the flux motion in the bulk for the (a) ascending and (b) descending stages of the No. 3 pulse in the Case B (large M).

拡散法で作製した Bi2212 バルク導体の通電および熱伝導特性

Thermal and transport performance of Bi2212 tubular conductor prepared by the diffusion process

堀 貴之, 下廣 拓哉, 山田 豊, 太刀川 恭治(東海大); 小方 正文, 岩松 勝(鉄道総研)

Takayuki HORI, Takuya SHIMOHIRO, Yutaka YAMADA, Ky oji TACHIKAWA (Tokai University);

Masafumi OGATA, Masaru IWAMATSU (Railway Technical Research Institute)

E-mail:yyamaday@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

Bi2212 酸化物超電導体は熱伝導率が低いため、熱侵入量の低減が期待され、電流リード用材料として魅力的である。本報では、Bi 2212 バルク導体を拡散法により作製し、GM 冷凍機を用いた伝導冷却環境下で通電特性および熱伝導特性を測定し、導体の熱侵入量を評価した。

2. 実験方法

Fig. 1 に、高融点酸化物基盤と低融点被覆材との相互拡散反応により作製した中空円錐状 Bi 2212 バルク導体の外観を示す。太径側の外/内径：34/29 mm、細径側の外/内径：24/19 mm、長さ 100 mm で、両端 20 mm には通電用の銀電極を形成した。本試料を Cu 電極にハンダ付けし、HTS 部および Cu 電極部に電圧端子(V1~V4)を取り付けた。通電試験は小型 GM 冷凍機を 2 台用いて真空容器中で伝導冷却し、Cu リードに取り付けたヒータを制御して通電電流の温度依存性や電極部の接続抵抗を測定した[1][2]。さらに、同通電試験装置の一部を改造し、Fig. 2 に示すように熱流束計を設置して同試料を伝導する熱を測定した。Bi2212 試料の高温端側は 1 段冷凍機により、低温端側は熱流束計を経由して 2 段冷凍機により冷却し、それぞれに取り付けたヒータにより温度制御して熱流束計の高温端： T_H と低温端： T_L の温度差から定常熱流法に従って Bi2212 バルク試料を伝導する熱を算出した。なお、通電試験および熱流束測定試験は鉄道技術総合研究所で実施した。

3. 実験結果および考察

Fig. 3 に上述した熱流束測定装置を用いて測定した実測値： Q_{mea} と試料のバルク基盤および拡散反応後表面に析出する Ag の熱伝導率から計算した値($Q_{cal}(subs)$ と $Q_{cal}(Ag)$)を示す。試料の高温端温度を 40 K から 60 K まで昇温し、低温端温度は 20 K 一定とした。これによれば、Bi2212 バルク試料の伝導熱は、高温端の温度上昇とともに増加し、50 K では 1.24 W であった。計算値は実測値とほぼ一致し、試料を伝導する熱の約 60% は、試料表面に析出した厚さ約 40 μm の Ag によるものと思われる。また、通電試験結果によれば、1,000 A 通電時の低温端電極部の電圧(V1-V2)は 20 K で約 30 μV であるので、ジュール発熱は 30 mW と伝導熱に比べ極めて小さい。従って、今後総侵入熱の低減には以前作製した 200 mm 長(熱伝導長 150 mm)バルク試料のように熱伝導部分を長く取ることが有効である。

参考文献

[1] M. Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conf. , 74(2006) p154.

[2] T. Shimohiro, et al.: Abstracts of CSJ Conf. , 76(2007) p181.

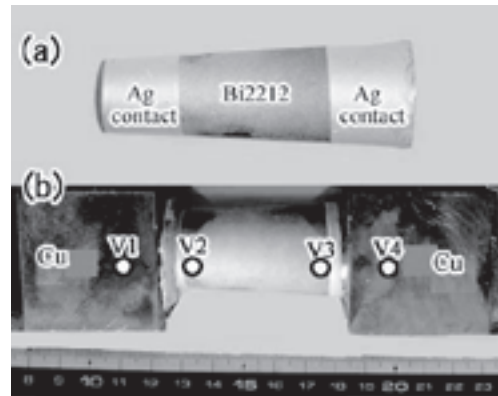


Fig. 1 Bi 2212 HTS sample (a) as diffused, (b) connected to Cu caps.

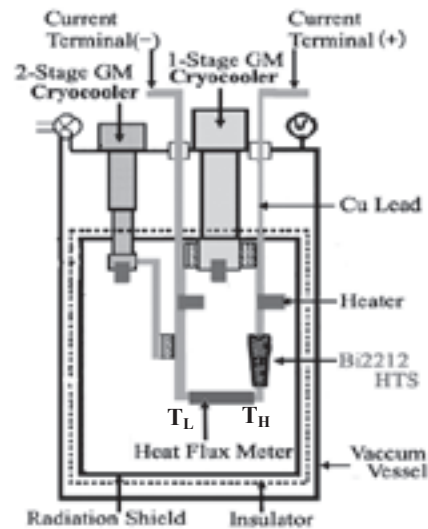


Fig. 2 Measuring system for heat leakage using heat flux meter.

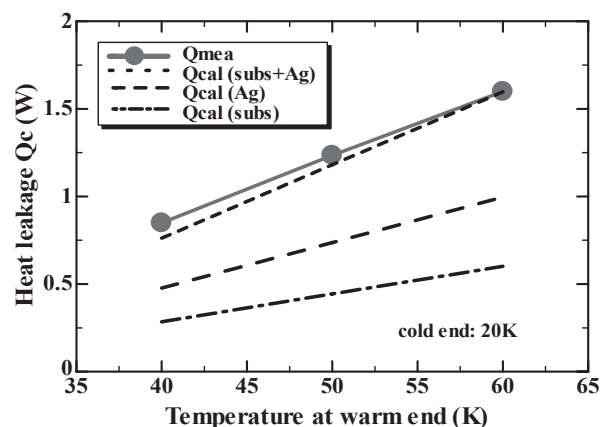


Fig. 3 Heat leakage conducted through the Bi2212 specimen versus temperature at warm end.

超伝導マグネトロンスパッタ装置による Mo/Si 多層膜の製作とその特性

Growth of Mo/Si Multi-layered Thin Films by Superconducting Magnetron Sputtering System and its Characteristics

菊地 北斗, 長浜 大作, 清水 英彦, 岡 徹雄 (新潟大学); 山口 隆 (科学技術振興機構); 生田 博志 (名古屋大学); 柳 陽介, 伊藤 佳孝 (イムラ材研); 友藤 哲也 (ニコン); 水谷 宇一郎 (豊田理化学研究所); 松田 隆 (イーアンドエクスレイ)
 KIKUCHI Hokuto, NAGAHAMA Daisaku, SHIMIZU Hidehiko, OKA Tetsuo (Niigata University);
 YAMAGUCHI Takashi (Japan Science and Technology Agency); IKUTA Hiroshi (Nagoya University);
 YANAGI Yousuke, ITOH Yoshitaka (IMRA Material R&D Co., Ltd.); TOMOFUJI Tetsuya (Nikon Corp.);
 MIZUTANI Uichiro (Toyota Physical and Chemical Research Institute); MATSUDA Takashi (E and X-ray Co.)
 E-mail: F07E058H@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

極端紫外線露光装置(EUVL)の光学系に使用される Mo/Si 多層膜ミラーの高反射率を達成するために超伝導マグネトロンスパッタ装置での研究が進められている。この装置ではターゲットの裏に RE123 系超伝導バルク磁極を配置し、プラズマをターゲット表面近傍に集中させる。これにより高真空中でも成膜することが可能となり、ターゲット-基板間距離(Dst)が大きい状態で成膜することができるのでプラズマダメージが少ない膜が得られる。

2. 実験

Figure 1 に示す超伝導マグネトロンスパッタ装置と、磁極に永久磁石を使った従来型のマグネトロンスパッタ装置で Mo/Si 二層膜の成膜を行い、X 線反射率法(GIXR; Grazing Incident X-ray Reflectivity)で膜構造の解析、X 線回折法で結晶解析、原子間力顕微鏡で表面粗さ測定を行い 2 つのスパッタ装置で成膜された Mo/Si 二層膜の特性の違いを評価した。超伝導マグネトロンスパッタ装置は、Mo と Si の 2 つのターゲットを配置しており、0.04 Pa の Xe 雰囲気中で成膜を行っている。また、Dst は 450mm で、永久磁石型スパッタ装置の Dst (60mm) の 7.5 倍の距離である。

3. 結果と検討

GIXR法による膜構造の解析結果をFigure 2に示す。実線は反射強度の測定値、破線は理論式から導かれる反射強度を示している。このように理論式から導かれる値を実験値にフィッティングする事により、各層の密度、粗さ、膜厚の情報を得ることができる。同図(A)右に示すように、永久磁石型スパッタ装置で成膜された試料NSD8では、Si層にわずかな密度勾配を仮定したモデルでフィッティングしたところ実験値とよくフィットした。この密度勾配は深さ方向に $-18.23(\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot \text{nm})$ で、このような密度勾配は超伝導型スパッタ装置による試料X11では見られない。Mo/Si多層膜ミラーを成膜する上で、Si層に密度分布があるとすれば、ミラーの反射率は低いと考えられる。更に、永久磁石型スパッタ装置による試料NSD8では3度以上の入射角度の反射率強度の振動が、超伝導スパッタ装置の試料X11のそれよりも小さいが、これはNSD8において表面粗さが大きいことに起因するものと考えられる。

また、NSD8と同じ条件でSi層上にMo層を成膜する際に5.5時間の間隔において成膜した試料のGIXR特性は、NSD8のそれと非常に異なるパターンを示した。フィッティングは行っていないが、各層の成膜に時間的間隔を置いた事により界面の状態がNSD8と異なっていると考えられる。更に、多層膜の断面TEM像及び、X線回折測定結果からMo層は多結晶質、Si層は一様な非結晶である事が分った。このMo層の結晶性については成膜圧力に依存関係が見られた。講演では、その他の特性及び超伝導スパッタ装置構成について報告する。

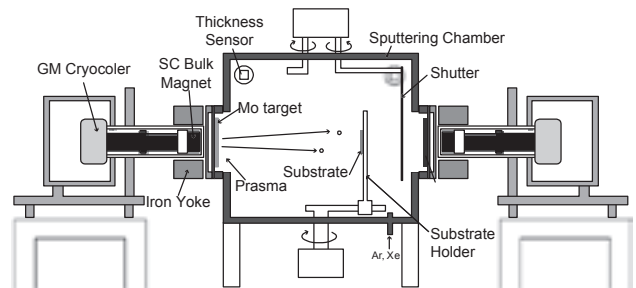


Figure 1: Schematic illustration of two-cathode superconducting magnetron sputtering system

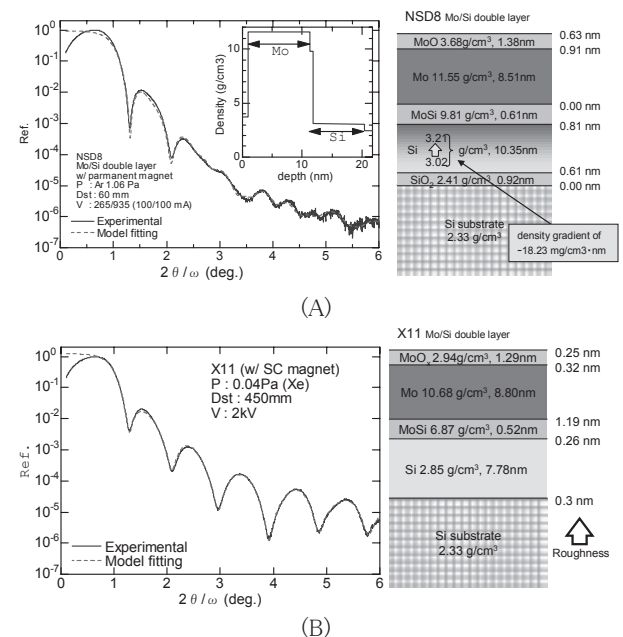


Figure 2: GIXR (Grazing Incident X-ray Reflectivity) oscillations of Mo/Si bi-layer film by (A) conventional magnetron sputtering system with permanent magnets and (B) superconducting magnetron sputtering system.

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構の助成の下行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

U. Mizutani et al.: Construction of Superconducting Magnetron Sputtering Apparatus for Fabrication of Highly Reflective Optical Mirrors, Proc. PASREG, 2007

MOD 法による MgO 基板上 STO バッファ層の最適化

Optimization of STO buffer layers on MgO substrates by the MOD method

内山 哲治(宮城教育大); 渡邊 省司, 立木 隆, 内田 貴司(防衛大)

UCHIYAMA Tetsuji (MUE); WATANABE Shoji, TACHIKI Takashi, UCHIDA Takashi (NDA)

E-mail: tetsu-u@staff.miyakyo-u.ac.jp

1. はじめに

われわれは、酸化物高温超伝導体のエレクトロニクス応用には有機金属分解(MOD)法による成膜技術の確立が重要であると考えている。それは、MOD 法の特長として、低コスト・大面積成膜などが挙げられるからである。われわれは、酸化物高温超伝導体の高周波応用をめざし、誘電率の低い MgO 基板を用いることを考えているが、酸化物高温超伝導体である YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) や Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8-y} (Bi-2212) などと MgO とは格子整合性が悪い。その結果、この組み合わせでは、面内配向において単相でない場合や面内配向角の半値幅(FWHM) ($\Delta\omega$) が大きいことが報告されている。

そこで、われわれは、YBCO や Bi-2212 と格子整合性のよい SrTiO₃ (STO) をバッファ層として MgO 基板上に MOD 法で作製している。今回、STO 薄膜焼結前のプリカーサ作製条件が STO 焼結後の薄膜の結晶 FWHM に大きく影響を与えるという知見を得たので報告する。

2. 実験方法

MOD 溶液は、高純度化学研究所製の STO 原料溶液 (ST-06) を使用した。まず、MgO (100) 基板上に STO 溶液を塗布し、約 2000rpm でスピコートした後、ホットプレートで 120°C・2 分のベーキングを行った。次に電気管状炉で酸素雰囲気中、15 分間の焼成によりプリカーサを作製した。この焼成は、先に管状炉をプリカーサ作製温度 (T_{prec}) に固定した状態にしておき、その中に室温のベーキング薄膜を導入するという急速加熱で行った。なお、 T_{prec} (焼成は温度一定) は、350–500°C の間で温度条件を変化させ、異なる T_{prec} のプリカーサ薄膜を作製した。続いて、 T_{prec} から 7°C/min の昇温レートにより 875°C まで加熱し、2 時間保持した後、7°C/min の降温レートで室温まで冷却し、本焼成を行った。

試料の評価は、通常の $2\theta/\theta$ スキャンによる X-線回折 (XRD) 測定と、基板面内配向性を評価するために ϕ -スキャン測定を行った。また、STO 薄膜の組成分析のために、X-線光電子分光測定を行った。STO 薄膜の表面形状を調べるために、原子間力顕微鏡 (AFM) による観測を行った。

3. 実験結果

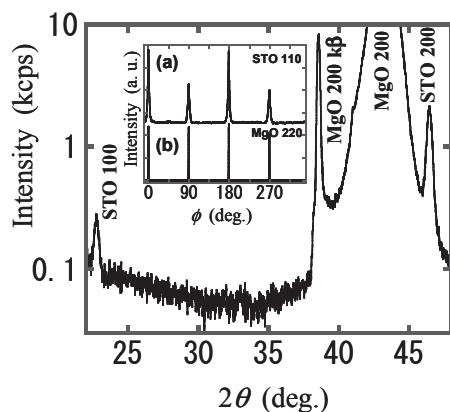


Fig.1 A typical X-ray diffraction pattern of STO films on MgO substrates. The inset shows a typical X-ray ϕ -scan diffraction patterns.

この作製方法で得られた薄膜の膜厚は、約 40nm であった。MgO (100) 基板上に作製した STO 薄膜の典型的な XRD 測定結果を図 1 に示す。挿入図は、STO<110>と MgO<220>の ϕ -スキャン結果である。これらから、基板面に垂直な方向には STO ($h00$) のみが観測される a -軸配向薄膜であり、基板面内では、MgO に対して cube-on-cube 成長していることが分かる。これは、 T_{prec} の変化によって強度・FWHM などに変化が見られたが、全てにおいて cube-on-cube 成長した a -軸配向 STO 薄膜が得られた。しかし、STO200 のロッキングカーブ測定による FWHM ($\Delta\omega$) と STO<110>の FWHM ($\Delta\phi$) を調べた結果、 T_{prec} に最適領域があり、410–475°C の領域でのみ、 $\Delta\omega$ と $\Delta\phi$ が共に最小値を示した。図 2 に $\Delta\omega$ の T_{prec} 依存性を示す。

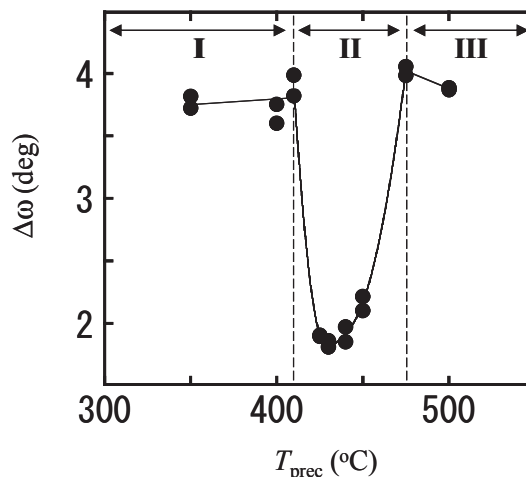


Fig.2 Precursor temperature dependence of FWHM of STO 200 XRD peak for fired STO thin films. Domain I & III: little change in FWHM in low and high T_{prec} ranges. Domain II: marked change in FWHM in middle T_{prec} range.

XPS による組成分析を行った結果、図 2 の領域 I でのみ 291eV 近傍にピークが観測された。これは金属有機溶媒中の炭酸塩であることがわかった。つまり、領域 I では、STO 薄膜中に有機金属が残っていたために、 $\Delta\omega$ が大きかったことがわかる。さらに、プリカーサ薄膜に対して、AFM による表面観測を行ったところ、領域 III の温度領域でプリカーサ中に核生成が確認された。したがって、領域 III では、プリカーサ作製時に生じた核が本焼成によって成長し、 $\Delta\omega$ を大きくしたと考えられる。

4. まとめ

MOD 法による STO 成膜では、STO 薄膜の結晶性がプリカーサ温度に強く依存することがわかった。つまり、最適なプリカーサ温度が存在し、核生成を起こさず、かつ、有機金属が膜中に残留しない温度領域である。この結果が STO 意外にも有効だとすると、MOD 成膜法における有機金属塩を選択する場合の指針になると考えられる。

超伝導フィルタの耐電力特性と共振器形状

Study of resonator shapes and power handling capability of superconducting filters

木野内 大樹, 小野 哲, 谷口 洋平, 李 宰勲, 齊藤 敦, 大嶋 重利 (山形大); 赤瀬川 章彦 (富士通)

KINOUCHI Haruki, ONO Satoshi, TANIGUCHI Yohei, LEE Jae-Hun, SAITO Atsushi, OSHIMA Shigetoshi (Yamagata UNIV.); AKASEGAWA Akihiko (Fujitsu)

E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

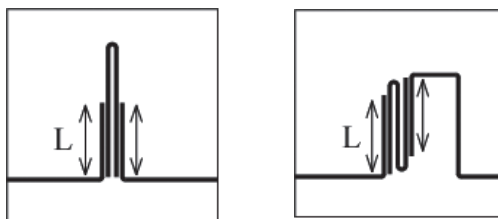
1. はじめに

移動体通信基地局への応用を目的とした送信用超伝導フィルタの研究を行っている。送信用フィルタとして動作させるためには耐電力の改善が必要である^[1]。フィルタの耐電力は薄膜品質やプロセス、周波数特性、共振器形状によって変化する^[2-3]。本研究では今回、共振器形状に着目し半波長共振器において電流最大箇所と屈曲部が一致するヘアピン型共振器と、一致しない S 型共振器の比較を行い、共振器形状を変えることによる耐電力の改善について検討を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 シミュレーションによる表面電流密度の比較

耐電力は共振器に流れる電流の大きさに依存するため、表面電流密度の解析より耐電力の検討を行った。ヘアピン型共振器および S 型共振器のシミュレーションモデルを図 1 に示す。S 型、ヘアピン型ともに基板は $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 、厚さ 0.5 mm の $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ を想定し $\epsilon_r = 9.85$ として、電磁界シミュレータ Sonnet を用いて解析し、中心周波数 1.93 GHz の共振器の設計を行った。また表面電流は負荷 $Q (Q_L)$ に依存するため、 Q_L が等しい状態で比較する必要がある。そこで給電線の長さ L を調節し、 Q_L を変化させた場合の表面電流密度の比較を行った。ヘアピン型、S 型ともに共振時に表面電流密度が最も高くなる屈曲部で比較した。図 2 に Q_L に対する屈曲部の表面電流密度を示す。結果、S 型共振器の方がヘアピン型共振器より表面電流密度が約 20% 低い事がわかった。この結果から予測できる耐電力の改善は 2 dB 程度である。電流最大箇所と屈曲部が一致するヘアピン型共振器に比べ、一致しない S 型共振器では電流集中を緩和する効果がある事をシミュレーションより確認した。



ヘアピン型 S 型
図 1 シミュレーションモデル

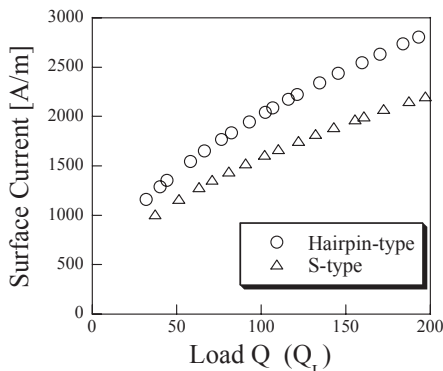


図 2 Q_L に対する屈曲部の表面電流密度

2.2 1 段フィルタの試作および耐電力特性の測定

薄膜はスパッタリング装置を用い、 $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板上に CeO_2 薄膜および YBCO 薄膜を片面に成膜した。フィルタはフォトリソグラフィおよびドライエッチングによりパターンニングし、給電部およびグランド面に Au を蒸着した。試作したフィルタを銅キャビティにセットしグランドおよびコネクタと給電部の間に In を挿入した。銅キャビティをチャンバー内にセットし真空引きした後、冷凍機で冷却しベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータ特性を測定した。測定した 1 段フィルタの中心周波数 f_0 に信号を入力し、出力信号の線形性を測定した。線形直線から 0.5 dB 低下したときの入力信号の値を耐電力値とした。またパッケージングしたフィルタおよびケーブルを含むチャンバー内を被測定物 (DUT) とした。測定後、リン酸 (H_3PO_4) を用いて、給電線をエッチングし Q_L を変えて再度、測定を行った。図 3 に Q_L に対する各共振器の耐電力を示す。 Q_L が 40 のとき S 型共振器ではヘアピン型共振器より約 10 dB 耐電力が向上した。シミュレーションによる表面電流の比較より予測した改善は 2 dB 程度であり、実験で得られた大きな改善の原因が膜質の違いによるか電流密度以外の効果による本質的なものかについては講演の際に報告する。

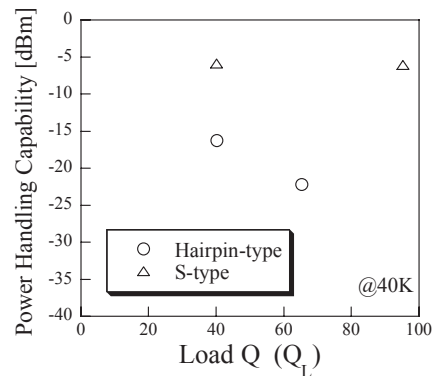


図 3 Q_L に対する各共振器の耐電力

3. まとめ

電磁界シミュレーションを用いてヘアピン型フィルタと S 型フィルタの最大表面電流密度の比較を行った結果、S 型共振器の方がヘアピン型共振器より約 20% 低い事がわかった。シミュレーションより予測できる耐電力の改善は 2dB 程度である。また 1 段フィルタを試作し耐電力の比較を行った。 Q_L が 40 のとき S 型共振器はヘアピン型共振器より約 10 dB 高い耐電力を示した。

[謝辞] 本研究の一部は総務省プロジェクト「電波資源拡大のための研究開発」により実施された。

参考文献

1. A. Akasegawa, K. Yamanaka, T. Nakanishi, M. Kai: Physic C 445-448 (2006) p.990.
2. H. Sato, J. Kurian: Physic C 426-431 (2005) p. 1616.
3. A. Andreone, et al.: IEEE Trans.Appl.supercond. Vol. 15 (2005) p. 3612.

小型超伝導フィルタの設計・試作・評価

Fabrication and Measurement of a Miniaturized Superconducting Filter.

○加藤 卓也, 小野 哲, 齊藤 敦, 李 宰勲, 大嶋 重利

KATO Takuya, ONO Satoshi, SAITO Atsushi, Lee Jae-Hun, OSHIMA Shigetoshi

山形大学工学部, 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導フィルタは低い表面抵抗を有するため、誘電体フィルタなどと比較して低損失で急峻なスカート特性を持つフィルタが実現可能である。また我々は同一冷凍機上に送受信フィルタを搭載できるような次世代携帯電話フロントエンドシステムを想定しており、冷凍機の冷却効率上フィルタの小型化が必要不可欠である。

今回、共振器自体の小型化に有効である G-Spiral 共振器を用いてフィルタの設計を行い、共振器を小型化した際デメリットとなるフィルタの Q 値の低下とインサージョンロスの増加について調べた。また G-spiral 共振器を用いて、低インサージョンロスかつ、急峻なスカート特性を持つフィルタの設計、試作を行った。

2. フィルタ設計

回路シミュレータ S-NAP と電磁界解析シミュレータ Sonnet を用い G-Spiral 共振器の線幅、段数とインサージョンロスとの関係を調査した。シミュレーション結果を図 1 に示す。段数が増加、もしくは線幅が細くなるとインサージョンロスが増大することがわかる。今回はインサージョンロスを 1 dB 以内に抑え、 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の基板上にフィルタを実現するため、線幅 $10 \mu\text{m}$ で 10 段のフィルタを設計した。

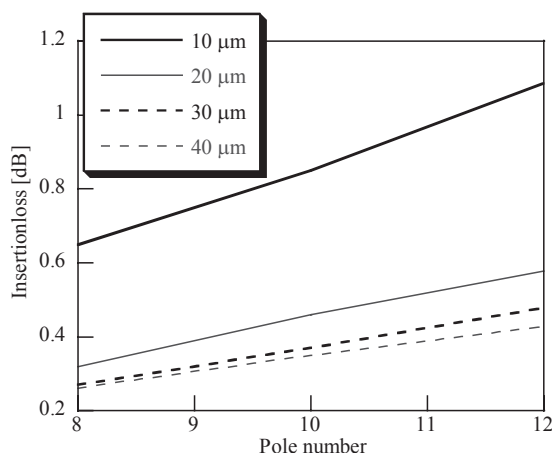


図 1 段数とインサージョンロスとの関係

3. フィルタ試作及び周波数特性評価法

MgO 基板上に DC マグネトロンスパッタリング装置を用いて NbN 薄膜の作製を行った。次に作製した NbN 薄膜

をフォトリソグラフィ技術によりパターニングを行った。その後 ECR ドライエッチング装置を用いてエッチングを行った。銅キャビティにセットした後、冷却器で約 4 K まで冷却し、ベクトルネットワークアナライザで周波数特性を測定した。

4. 実験結果及び考察

図 2 に設計したフィルタのシミュレーション結果と試作したフィルタの測定結果を示す。バンドパス特性が確認でき、シミュレーションとほぼ一致していることが確認できた。リターンロスやリップルが大きくなっている点はシミュレーションの際に給電線の長さや給電部の反射を十分に考慮していなかったためと思われる。今回の結果をフィードバックすることにより改善は可能と思われる。

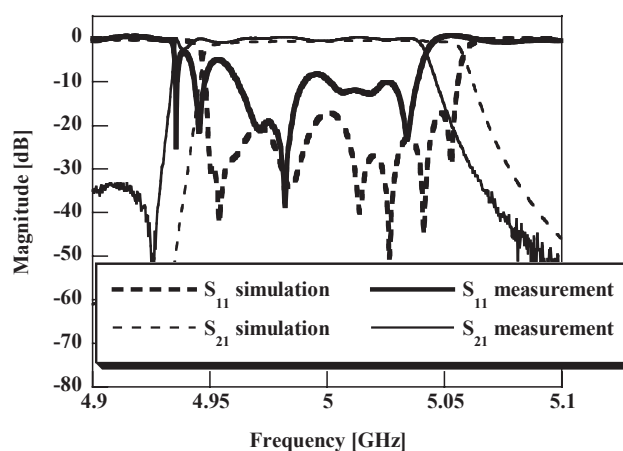


図 2 フィルタの実測値及びシミュレーション結果

5. まとめ

$10 \times 10 \text{ mm}^2$ 基板上に 10 段の G-spiral フィルタが設計できた。測定ではバンドパス特性を確認でき、シミュレーションとほぼ同等の結果を得ることができた。

参考文献

- [1] 東出 祐樹, 馬 哲旺, 小林 禧夫 “小型マイクロストリップフィルタの設計” 信学技報, MW-2002-163, pp. 39-44, 2003-1
- [2] 馬 哲旺, 河口 民雄, 小林 禧夫 “6 種類のマイクロストリップスパイラル共振器の特性の比較研究” 信学技報, MW-2002-70, 2002-9

Y123 の超伝導特性に対する本質的な銀添加効果 (2) - 銀置換量とその分布に関する考察 -

Essential Effects of Silver-Addition on Superconducting Properties of Y123 (2) - Discussions on the substitution levels and distribution of Ag -

中島 隆芳, 下山 淳一, 石井 悠衣, 山崎 裕也, 荻野 拓, 堀井 滋, 岸尾 光二 (東大院工)

NAKASHIMA Takayoshi, Shimoyama Jun-ichi, Ishii Yui, Yamazaki Yuhya,

Ogino Hiraku, Horii Shigeru, Kishio Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail : tt57132@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (T. Nakashima)

【緒言】

脆性材料である RE123 熔融凝固バルクの捕捉磁場特性は J_c または機械的強度で制限される。機械的強度の改善手法として簡便かつ最も普及しているのは銀添加である。前回我々は 10wt.% Ag_2O を添加した Y123 熔融凝固バルクにおいて銀が Y123 中に固溶し、 T_c や J_c に大きく影響を及ぼすことを報告した。今回は、銀添加量を変えた Y123 熔融凝固バルクについて、微細組織や T_c や J_c 、格子定数の変化を系統的に評価し、結晶成長機構と RE123 への銀置換量について銀添加の本質的な効果について検討した。

【実験】

あらかじめ調製した Y123 と Y211 粉末を 7:3 のモル比で混合し、Pt を 0.5wt%、0 から 15wt.% の Ag_2O 粉末を添加・混合後、一軸加圧 ($1t/cm^2$) により 20 mm ϕ x 10 mm のペレットに成型し、Nd123 単結晶を種結晶とした cold seeding 法により熔融凝固バルクを作製した。なお、Y211 は空气中、800°C で焼成した微細な粉末である。得られた熔融凝固バルクに対しては、350°C から 550°C において酸素気流中でポストアニールを行った。銀の析出は酸素拡散に影響するため、各アニール条件で平衡酸素量に達していることを確認した。電気抵抗率は四端子法により、 T_c および J_c は SQUID 磁束計で、組織は偏光顕微鏡、SEM で、結晶構造と格子定数は粉末 XRD によって評価した。

【結果と考察】

育成した Y123 熔融凝固体は銀添加・無添加試料ともにバルク全体に渡りシングルドメイン化しており、7 wt.% 以上の Ag_2O を添加した試料では前回の報告同様、数 10 μm 程度の球形の銀粒子が組織中にほぼ均一に分散していることを確認した。一方で、銀添加量の少ない 6 wt.% 以下の添加量では種結晶の周囲に銀粒子がまったく析出していない領域が見られた (Fig. 1)。写真の分散している白い粒子が銀であり、試料底部に見られるのは結晶成長界面から押し出されて蓄積した Y211 粒子の層である。銀粒子が析出していない領域と析出している領域との間には結晶成長方向と垂直に明確な界面が存在し、このような界面は等温過冷凝固により育成した試料でも確認されている [3]。さらに、 Ag_2O 添加量が 6 wt.% 以下の試料では析出した銀は結晶成長方向に平行に伸びた形状をしており、共晶系合金に特徴的な組織を形成していた。

Fig. 2 に 5 wt.% Ag_2O 添加試料の様々な位置における T_c のアニール温度依存性を示す。図中に記した長さは種結晶

から c 軸方向 (鉛直方向) に測った距離である。種結晶から遠ざかるにつれてキャリアの最適ドーピング状態における T_c は低下し、その時のアニール温度も低温側へシフトしたことから、Y123 熔融凝固バルクにおいては結晶成長の進行に伴い銀置換量が増加することが示唆された。また、銀粒子が析出した位置ではどの箇所でも T_c のアニール温度依存性は一致することを確認している。講演当日には組織形成と超伝導特性の詳細を考察し、銀置換効果の特徴を他の置換元素と比較して議論する。

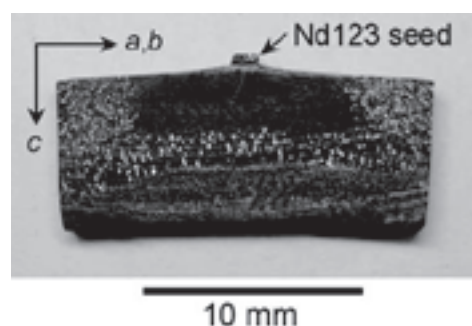


Fig. 1. Polished cross section of 5 wt.% Ag_2O -added Y123 melt-solidified bulk.

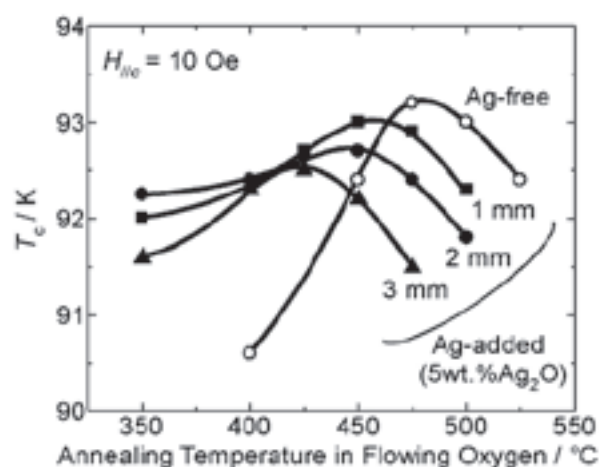


Fig. 2. Oxygen annealing temperature dependence of T_c for Y123 melt-solidified bulks.

【参考文献】

- [1] 中島隆芳 他, 2007年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 [3D-a02].
- [2] Y. Nakamura *et al.*, *Physica C* **306** (1998) 259-270.

Y123 の超伝導特性に対する本質的な銀添加効果 (3) - RE/Ba 固溶に及ぼす影響に関する考察 -

Essential Effects of Silver-Addition on Superconducting Properties of Y123 (3) - Discussions of the Effects on the RE/Ba Substitution -

中島 隆芳, 下山 淳一, 石井 悠衣, 山崎 裕也, 荻野 拓, 堀井 滋, 岸尾 光二 (東大院工);

内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大工)

NAKASHIMA Takayoshi, Shimoyama Jun-ichi, Ishii Yui, Yamazaki Yuhya,

Ogino Hiraku, Horii Shigeru, Kishio Kohji (Univ. of Tokyo); Naito Tomoyuki, Fujishiro Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail : tt57132@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (T. Nakashima)

【緒言】

Sm や Gd などイオン半径が Ba と近い軽希土類系の RE123 では RE の Ba サイトへの固溶により T_c の低下が起こるが、銀を添加した熔融凝固試料では T_c の低下が抑えられることが報告されている[1]。このことから添加された銀が Cu-O 鎖の Cu サイトを置換し、隣接する Ba サイトへの RE の侵入に影響を与えている可能性がある。本研究では、Y123 に加えて Gd123, Dy123, Ho123 の銀添加量を変えた熔融凝固バルクについて、酸素アニール温度と T_c や J_c 、格子定数の変化を系統的に評価し、銀添加が RE/Ba 固溶に与える影響について検討した。

【実験】

あらかじめ調製した RE123 と RE211 粉末(RE = Gd, Dy, Ho, Y) を 7:3 のモル比で混合し、Pt を 0.5wt%、0 から 10 wt.% の Ag_2O 粉末を添加・混合後、一軸加圧(1t/cm²)により 20 mmφ x 10 mm のペレットに成型し、Nd123 単結晶を種結晶とした cold seeding 法で大気中において熔融凝固バルクを作製した。RE211 は全て大気中、800°C で焼成した微細な粉末である。得られた熔融凝固バルクに対しては酸素気流中、250~550°C において、銀の析出による酸素拡散への影響を考慮し、平衡酸素量に達していることが確認できるまでアニールを施した。熱伝導率は定常熱流法により、 T_c および J_c は SQUID 磁束計で、組織は偏光顕微鏡、結晶構造と格子定数は粉末 X 線回折法によって評価した。

【結果と考察】

育成した RE123 熔融凝固体は全てシングルドメイン化しており、銀添加量によって現われる微細組織の変化は Y123 の場合と同じであった。Fig. 1 に Gd123 熔融凝固バルクにおける T_c のアニール温度依存性を示した。銀添加試料 (10 wt.% Ag_2O) では 0.5°C/h、銀無添加試料については 0.5, 0.8°C/h の徐冷速度で結晶成長させたものである。Gd123 は高過冷度の下で結晶育成した場合、単位時間当たりに結晶成長界面へ供給される Gd イオンが減少するため Gd/Ba 固溶が抑制されることが知られている[2]。0.8°C/h の徐冷速度で作製した銀無添加試料と比べ、0.5°C/h の徐冷速度で作製した試料で T_c が全体的に低下しているのは Gd/Ba 固溶量が増加していることを意味している。同じ 0.5°C/h の徐冷速度で育成した試料では銀添加によって Y123 熔融凝固バルクの場合と同様に高 T_c となるアニール温度が低温側にシフトした。このことから Gd123 熔融凝固バルクにおいても

添加した銀は Gd123 結晶内の Cu サイトを置換していることが示唆された。一方、0.5°C/h の徐冷速度で育成した試料の最も高い T_c を比べると銀添加試料のほうが 0.3 K ほど高く、銀添加によって 1 K 近く T_c が低下した Y123 とは対照的な結果となった[3]。銀置換は本質的には RE に関係なく T_c の低下をもたらすと考えられるため、Gd123 熔融凝固バルクに見られた T_c の上昇は銀置換による RE/Ba 固溶の抑制に起因するものと推測できる。銀置換により Gd/Ba 固溶が抑制されるのは、Cu-O 鎖内に入った銀は 2 配位であるため、その周囲では b 軸方向に酸素イオンが存在せず、高価数の Gd が低価数の Ba を置換するのに不利な状況が生じていることによるものと考えられる。講演では Gd123 熔融凝固バルクについての詳細と重希土類である Dy123 や Ho123 熔融凝固バルクにおける RE/Ba 固溶の可能性について熱伝導率のデータを含めて検討する。

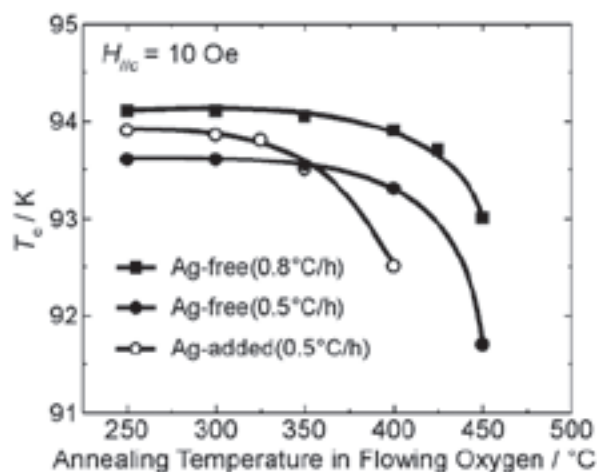


Fig. 1. Oxygen annealing temperature dependence of T_c for Ag-free and Ag-added (10wt.% Ag_2O) Gd123 melt-solidified bulks.

【参考文献】

- [1] 中村雄一 他, 2006年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 [2A-a04].
- [2] Y. Shi *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 2984.
- [3] 中島隆芳 他, 2007年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 [3D-a02].

Pt-Rh 線を複合化した Dy-123 系超伝導溶融体の作製

Preparation of Dy-123 system superconductor composed with Pt-Rh wire

島田 浩典, 吉澤 秀二(明星大); 藤本 浩之(鉄道総研)

Shimada Hironori, Yoshizawa shuji (Meisei Univ.); Fujimoto Hiroyuki (Railway Technical Research Institute)

E-mail: shimada.00s3059@jcom.home.ne.jp

1. はじめに

希土類 (RE) 系超伝導溶融体は、非超伝導相である Dy-211 の微細分散により、より高い磁場の捕捉が可能である。しかし、高磁場中で冷却を行うと、誘起電流により熱が生じ、マイクロクラックが形成・密集し、最終的には破断に至ることが報告されている。これまで、我々は発熱を直接金属線と外部に逃がすことを目的として、成型する前に Pt 線を複合化して Dy-123 系超伝導溶融体の作製を試みてきた。その結果、大気中では Pt 線が溶融してしまい、大気中において Pt 線は不適切である事が認められた。そこで、Pt の合金であり、Pt 線より融点の高い、Pt-Rh 線を複合化した溶融体の作製を試みた。

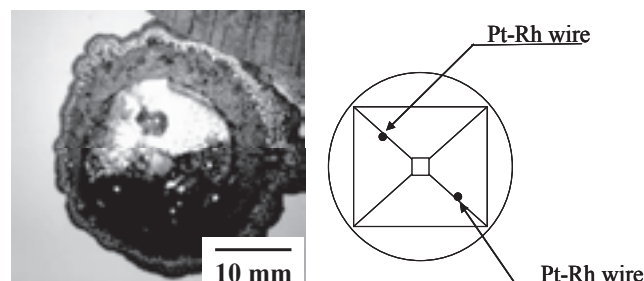


Fig.1 Optical micrographs of Sample

2. 作製方法

出発原料として、仮焼粉である Dy-123 と Dy-211 を準備した。これらの仮焼粉を最適なモル比である 1:0.3 に秤量し、有機溶媒中で湿式混合した。さらに、融点降下と機械的強度の向上を目的に Ag_2O を 30 wt% を添加した。混合した粉末を直径 20 mm、高さ 20 mm の円盤状のバルク体にプレス機で成型した。成型する際に、Pt-Rh 線 (Pt:Rh=87:13) を複合化した。複合化した Pt 線は、直径 0.4 mm、長さ 15 mm を用いた。成型したバルク体の下に、バルク体と同様の混合モル比で Dy-123 と Dy-211 を有機溶媒中で湿式混合して、プレス機で成型した敷きバルクを置き、その下にアルミナ基盤を置いた。

温度勾配を有する雰囲気炉を用いて、溶融凝固後、種付けを行い、単一ドメインの結晶を生成させた。種結晶として、Nd-123 の単結晶体を用いた。結晶の成長時間は、170 時間とした。

作製した溶融体の超伝導評価として捕捉磁場測定、Pt-Rh 線近傍の評価として SEM 観察を行なった。捕捉磁場は、印加磁場 2 T とし、磁場下冷却法を用いて液体窒素中にて行なった。

3. 結果と考察

Fig.1 に Pt-Rh 線を複合化した溶融体の外観写真を示す。ファセットラインが種結晶を中心に形成していることから、表面において単一ドメインの成長が確認できた。また、Sample B に複合化している、Pt-Rh 線がドメイン内に複合化していることも確認できた。これは、結晶成長の際、Pt-Rh 線による結晶化速度への影響が小さいと判断できる。

作製した超伝導体の T_c は約 90K (off-set)、 J_c は 4.5 kA/cm² であった。

Fig.2 に Sample A および Sample B の捕捉磁場の測定結果を示す。印加磁場 2 T に対して、Sample A は 0.13 T、Sample B は 0.11 T の磁場を捕捉した。Sample A および Sample B の磁場は、単一なピークを示している。これは、Pt-Rh 線による超伝導体への影響は小さいものと考えられる。(a) と (b) の結果を比べると、(a) の磁場の分布領域が (b) に比べて小さいことがわかった。これは、(a) のドメインの領域が (b) の領域よりも小さいことを示していて、熱処理条件を長くすることにより、さらに磁場を捕捉できることが考えられる。

Pt-Rh 線近傍の SEM 観察を行なったところ、Pt 線を複合化した溶融体と同様に、中央にある灰色の Pt-Rh 線の周囲に 3 つの層が花のように形成されていることがわかった。このことか

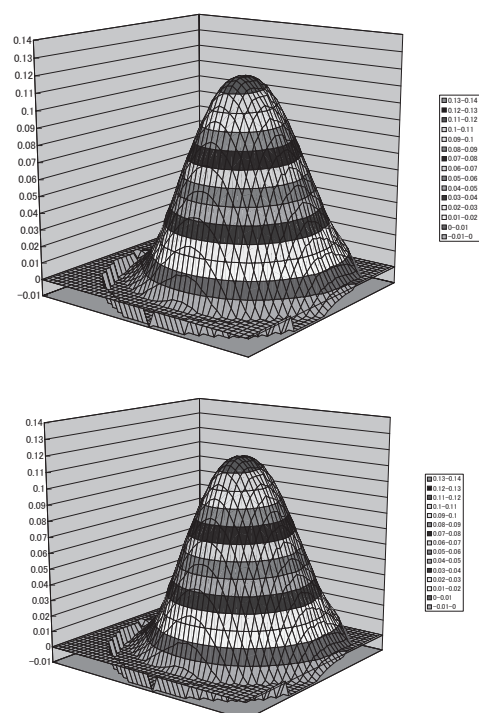


Fig.2 Trapped field distribution of Sample
(a) : with Pt-Rh wire (b) : without Pt-Rh wire

ら、Pt-Rh 線に含まれる一部の Pt が溶融して、違う元素が混合している事が考えられる。また、Pt 線とは異なり、大気中にて Pt-Rh 線が完全に溶融することはなかった。

参考文献

- (1) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Physica C*, **357**(2001)S814.
- (2) Nariki S and Murakami M, *Supercond. Sci. Technol.*, **15**(2002)S86.
- (3) Inoue K, Nariki S and Murakami M, *Physica C*, **378**(2002)S755.
- (4) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Physica C*, **378**(2002)S759.
- (5) Nariki S, Sakai N and Murakami M, *Advances in Cryogenic Engineering*, **48** (2002)S686.
- (6) Tomita M and Murakami M, *Nature*, **30**(2003)S517.

微量元素置換による RE123 溶融凝固バルクの J_c 改善機構

Mechanism of Improved J_c Properties for RE123 Melt-Solidified Bulks by Dilute Impurity Doping
石井悠衣, 中島隆芳, 山崎裕也, 荻野拓, 堀井滋, 下山淳一, 岸尾光二 (東大院工)

Y. Ishii, T. Nakashima, Y. Yamazaki, H. Ogino, S. Horii, J. Shimoyama and K. Kishio (The Univ. of Tokyo)
E-mail: tt077126@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (Y. Ishii)

【はじめに】 RE123 溶融凝固バルク体の高 J_c 化に向けての研究では従来、微細な常伝導物質の添加といった組織制御に主眼がおかれてきた。一方、RE123 の各金属サイトへの微量の不純物元素置換によって、磁場下における J_c が大きく向上することが、最近明らかになってきた[1]。この微量不純物置換 RE123 では、置換領域周辺がピンとして働いていると考えられている。

また、臨界電流特性の点で Y123 よりも優れる Dy123 では、イオン半径が La, Nd, Gd などに比べ小さいにもかかわらず Dy が Ba サイトへ微量に置換することが指摘されている[2]。前回の報告では CuO 鎖面に置換した Co などの不純物原子は、こうした Dy/Ba 置換量が少ないほうが大きく J_c を向上させることを示したが[3]、他の不純物元素置換を含めこれらが Dy123 の磁束ピンニングに与える効果の詳細は明らかにされていない。

そこで本研究では、Dy123 溶融凝固バルクの J_c 改善指針の確立を目的とし、Y123 単結晶を用いて Sr および Co の置換効果を調べ、Dy/Ba 置換が起きている Dy123 溶融凝固バルクについても同様に不純物置換効果を調べた。

【実験方法】 BaZrO₃ 坩堝を用いた self-flux 法により、Sr および Co を微量に加えた Y123 単結晶を育成した。得られた単結晶を 300~500°C、酸素気流中でアニールした。また、Sr および Co を微量に加えた Dy123 溶融凝固バルクは以下の方法で作製した。出発組成 Dy(Ba_{1-x}Sr_x)₂Cu_{3-y}Co_yO_z (x=0, 0.003; y=0, 0.02) と Dy211 の仮焼粉末を 7:3 のモル比で混合し、このとき Pt を 0.5 wt% 添加した。一軸プレスによって 20 mm φ × 10 mm のペレットに成型後、Nd123 単結晶を用いた cold seeding 法により空气中、0.6°C/h の徐冷速度のもとで溶融凝固を行った。得られたバルク体の種結晶直下 1mm の部分から測定試料を切り出し、単結晶と同様の方法で酸素アニールした。超伝導特性は SQUID 磁束計により評価し、磁化ヒステリシスの幅から J_c を計算した。また SQUID 磁束計による磁化緩和測定も行った。

【結果と考察】 Sr および Co を仕込組成でそれぞれ 2%, 0.5% 加えた Y123 単結晶の育成に成功した。450°C で酸素アニールした試料の T_c はそれぞれ 90.4 K, 92.1 K であった。これらの試料の M - H 曲線から、Fig. 1 の inset に示した磁場 H^* を、 T_c で規格化した温度についてプロットしたところ、Fig. 1 に示したようにキャリアの最適ドープ状態付近において、Co 置換した Y123 単結晶では、Sr 置換した試料よりも明らかに H^* が低磁場側に位置していることが分かった。このことから、Sr より Co を置換した試料の方が磁束線と強く相互作用することが示唆された。

Co 置換、Sr 置換した Dy123 溶融凝固バルクはいずれも種結晶よりファセットが広がったシングルドメインから成るものであった。400°C で酸素アニールした試料の 60 K, 77 K における J_c - H 特性を Fig. 2 に示した。ノンドープ試料に見られるピーク効果は酸素欠損に加え、Dy/Ba 置換にも起因するものと考えられる。60 K におけるそれぞれの試料の磁化の減衰を $\Delta M(t) / \Delta M(t = 22 \text{ sec}) = t^{-\alpha}$ でスケールし、そのべき指数 α の磁場依存性を Fig. 3 に示した。Fig. 2 で J_c が増加し始める 10 kOe においては、それぞれの試料の J_c がほぼ同程度であるにもかかわらず、Sr 置換した試料では明らかに遅い緩和が観測された。一方、Sr とは置換サイトの異なる Co では、10 kOe における α に有意な差は見られなかった。このことから Dy/Ba および Sr/Ba 置換は、互いがピンポテンシャルの増大に寄与していることが示唆された。講演では Dy/Ba 置換量を減少させた試料に

おける不純物置換効果についても併せて議論する。

【参考文献】

- [1] 例えば J. Shimoyama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 3778 (2005) [2] T. Nakashima *et al.*, *proc. of ICMC'06* [3] 石井ほか、2007 年度春季低温工学・超電導学会

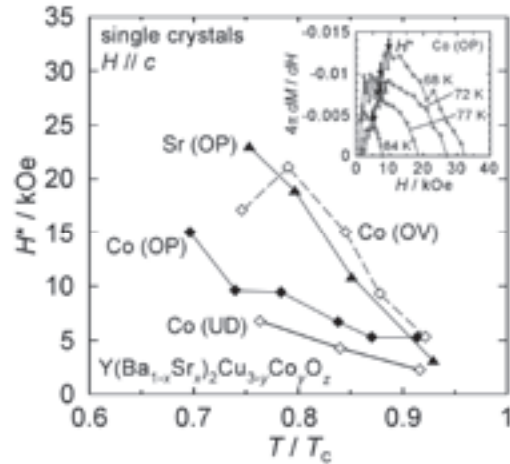


Fig. 1 Characteristic field H^* defined by the peak field of dM/dH vs H plot (inset) for the Sr or Co doped Y123 single crystals with various carrier doping levels.

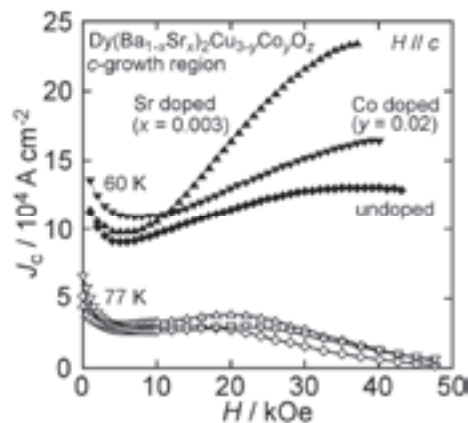


Fig. 2 J_c - H curves at 60 K and 77 K for Sr- or Co-doped Dy123 melt-solidified bulks annealed in oxygen at 400°C for 120 h.

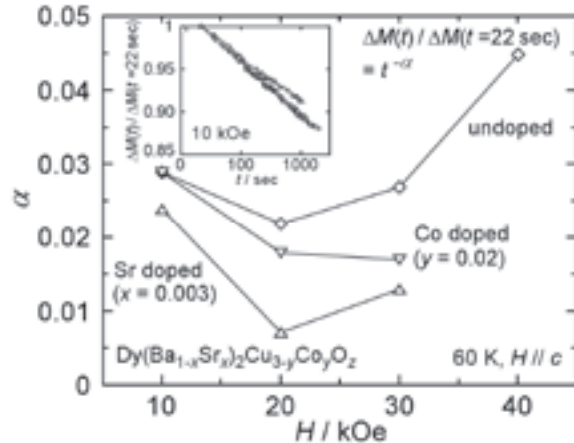


Fig. 3 Magnetic field dependence of α and the magnetic relaxation curves (inset) at 60 K in 10 kOe for Sr- or Co-doped Dy123 melt-solidified bulks.

磁気カップリングを強めた鉄含有バルク超伝導体

Iron embedded bulk superconductors for enhanced magnetic coupling

村上 雅人, 竹内 宏次, 宮崎 太郎(芝浦工大); 秋山 慎一(マグネオ技研)
 MURAKAMI Masato, TAKEUCHI Koji, MIYAZAKI Taro (SIT); AKIYAMA Shinichi (Maguneo-Giken)
 E-mail: masatomu@sic.shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

永久磁石とバルク超伝導体を組み合わせると、非接触で回転トルクを伝達できる[1]。この現象を利用して、Fig. 1 に示すような超伝導ミキサーの開発が行われている。超伝導ミキサーは、医療やバイオなど高潔浄環境が要求される分野での要望が大きい。実用機においては、クライオスタットの設置などがあるため、永久磁石とバルク超伝導体間の距離が大きいことが望ましいが、両者の磁気相互作用は距離とともに急激に低下してしまう。

その一因は、永久磁石から発生する磁場が距離とともに急激に減衰するためである。通常の磁気回路では、ヨークなどにより磁場分布を調整している。超伝導ミキサーにおいても同様の工夫が可能であるが、超伝導体を複合化することにより、磁気相互作用を高めることが可能である。

そこで、本研究では、超伝導体と強磁性体である鉄を複合化することにより、磁気カップリング力を高めたので報告する。

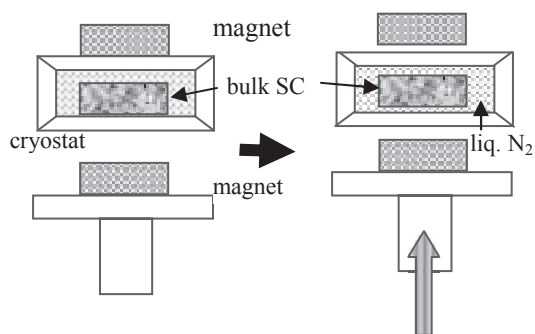


Fig. 1 Schematic illustration of non-contact levitation for a superconducting mixer.

2. 実験方法

超伝導体として、種結晶熔融法により作製した直径 28mm 高さ 15mm の Y-Ba-Cu-O を用いた。超伝導体に直径 1mm の人工孔を中心に 1 個と、中心から 10mm 離れた位置に同心円状かつ等間隔に 8 個設けた。その後、直径 0.9mm の鉄製の棒を挿入し、U-alloy(Bi-Sn-Cd 合金)を 200°C で溶融し、試料を融液に浸したうえで、真空脱気することにより含浸した。また、比較材として非磁性体のアルミニウム棒を挿入した試料も準備した。Fig. 2 に加工後の試料および、鉄棒を複合化した試料の写真を示す。

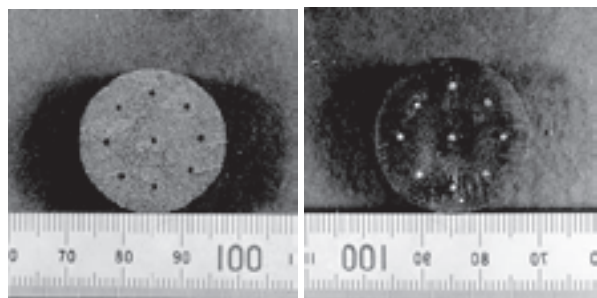


Fig. 2 Photographs of Y-Ba-Cu-O with nine holes drilled (left) and iron bar embedded sample (right).

複合材料の超伝導特性は、直径 20mm の Fe-Nd-B 磁石を用いて、ゼロ磁場冷却および磁場中冷却での反発力を評価することにより行った。また、超伝導体と磁石のギャップを磁場中冷却を行い、回転式トルクメータを用いて最大静止トルク測定を行った。

3. 結果および考察

Fig. 3 に鉄含有バルク超伝導体の 77K における捕捉磁場特性を示す。対称性の高い単一ピークがえられており、機械加工および、その後の鉄心を U-alloy によって真空含浸処理によってクラックなどの欠陥が導入されなかったことが分かる。

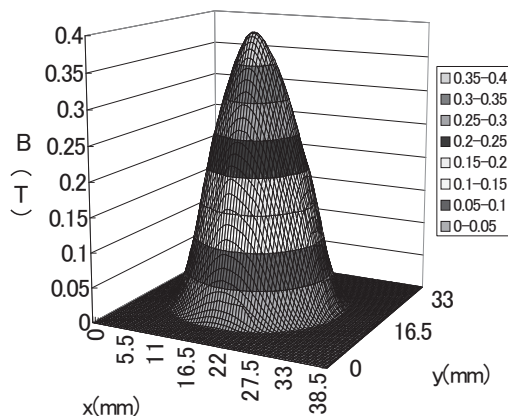


Fig. 3 Trapped field distribution at 77K for iron-embedded Y-Ba-Cu-O 28 mm in diameter.

ゼロ磁場冷却後の反発力では、鉄含有試料とアルミニウム含有試料では、差異は認められなかった。これは、ゼロ磁場冷却の場合には、超伝導特性が支配的であることを示している。一方、あらかじめ、磁石と超伝導体にギャップを設けて冷却した場合には、鉄含有試料では反発力が小さく、吸引力が大きいという結果が得られた。これは、鉄の複合化が磁気カップリングの向上に有効であることを示している。

つぎに、ギャップ 5mm と 10mm で、NS2 極磁石を用いてトルクを測定したところ、5mm ギャップでは、Fe 含有試料が 5.02Ncm, Al 含有試料が 3.8Ncm のトルクを、また、10mm ギャップでは、Fe 含有試料が 1.07Ncm, Al 含有試料が 0.6Ncm のトルクを示した。以上の結果は、Fe 含有によって、磁気カップリング力が向上することを示している。

4. まとめ

超伝導体に機械加工により人工孔を設け、鉄芯を挿入後 U-alloy で真空含浸したところ、欠陥のない超伝導体を得ることができた。さらに、これら複合体の磁気カップリングを測定したところ、鉄の複合化によって相互作用力が向上することが確認できた。

参考文献

1. F. Koyama, S. Akiyama, M. Murakami: Supercond. Sci. & Technol., vol. 19, No. 7, pp. s572-574 (2006).

RE123 溶融凝固バルクの *c*-growth 領域の捕捉磁場特性 Field Trapping Properties of *c*-Growth Region in RE123 Melt-Solidified Bulks

山崎裕也, 石井悠衣, 中島 隆芳, 荻野拓, 下山 淳一, 堀井 滋, 岸尾 光二 (東大院工)

Y. Yamazaki, Y. Ishii, T. Nakashima, H. Ogino, J. Shimoyama, S. Horii, and K. Kishio (Univ. of Tokyo)

E-mail : tt076706@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (Y. Yamazaki)

【緒言】

RE123($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$)溶融凝固バルクは様々な応用が考えられるが実用には高い捕捉磁場特性を持つことが望ましい。従来、*a*-growth 領域は *c*-growth 領域よりも臨界電流特性に優れるとされ、実用バルクには *a*-growth 領域主体のバルクが用いられている。しかし、我々の研究によって、*c*-growth 領域は酸素量を適切に調節することによって *a*-growth 領域よりも優れた臨界電流特性を示すことがわかってきた[1]。本研究では *c*-growth 領域の臨界電流特性および捕捉磁場特性を *a*-growth 領域と比較しながら調べるとともに 2 つの領域で違いが生じる原因についても検討した。

【実験】

Dy123 溶融凝固試料は以下のように作製した。Dy123 粉末を作製し、RE123 : RE211 = 7 : 3 のモル比になるように混合後、一軸加圧(1 t/cm^2)で $25\text{mm}\phi \times 30\text{mm}$ のペレットに成型した。このとき Pt 0.5wt%を加えた。さらに Nd123 単結晶を種結晶として空气中で溶融凝固を行ったのち、酸素気流中 450°C でポストアニールを施した。溶融凝固バルクの *a*-growth region および *c*-growth region から切り出した $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1\text{mm}^3$ の試料に対し、磁場下で磁気光学像を観察し、SQUID による磁化測定から超伝導特性の評価を行った。さらに磁気光学法および走査型ホールプローブによって溶融凝固バルクの捕捉磁場特性を評価した。

【結果と考察】

a-growth および *c*-growth 領域から切り出した試料の *ab* 面(研磨面)の偏光顕微鏡像を Fig.1(a),(b)に示す。*c*-growth 領域には多数のボイドが認められたものの、どちらの試料表面にも目立ったクラックは見られなかった。

Fig.1(c),(d)には同じ試料に 80 K において外部磁場 1500 Oe($\parallel c$)を印加した時の磁気光学像を示した。*c*-growth 領域の試料では単結晶試料で観察されるのと同様の等方的な磁場の侵入が確認でき、欠陥のない単一ドメインで構成されていることが分かった。一方、*a*-growth 領域の試料では磁場の侵入が異方的であり、明らかに欠陥が存在していることが分かる。偏光顕微鏡像ではクラックを確認できず、低温低磁場では完全に磁場は遮蔽されていたことから、観察された異方的な磁場の侵入はクラックに起因したものではないと考えられる。溶融凝固バルクでは *a*-growth 領域でのみ結晶成長方向に平行な subgrain 構造が発達し、subgrain boundary が弱超伝導相となることが報告されている[2]。磁気光学像でみられた *a*-growth 領域における磁場の優先侵入方向も結晶成長方向と平行であり、磁場が侵入したドメインの間隔も報告されている subgrain のサイズと同程度となっていたことから、*a*-growth 領域では subgrain boundary から磁場が侵入していることが示唆された。*a*-growth 領域で subgrain 構造が発達しやすい原因の一つとしては Fig.1(e),(f)に示した二次電子像に見られるよう

に *c*-growth 領域と比べて多数の Dy211 粒子が析出していることが挙げられる。*c*-growth 領域では *a*-growth 領域において磁場が内部に侵入し始める温度・磁場においても磁場は遮蔽されており、このことは *c*-growth 領域が高い捕捉磁場特性を有することを示唆している。講演では、実際に *a*-growth 領域と *c*-growth 領域の捕捉磁場特性を比較し、その詳細について報告する。

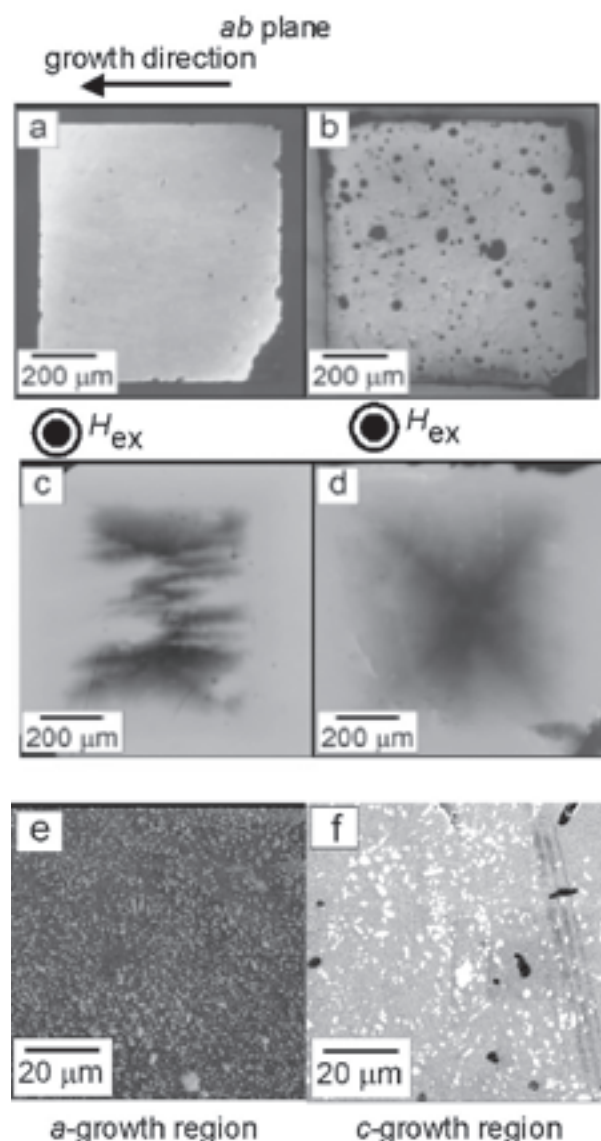


Fig.1 Polarized microscope images of polished *ab*-planes (a)(b), corresponding magneto-optical images (80 K, 1500 Oe) (c)(d), and secondary electron images (e)(f) for the *a*-growth region (left) and *c*-growth region (right) of a Dy123 melt-solidified bulk.

[1] T. Nakashima, *et al.*, *Physica C* **463** (2007) 325

[2] 中島ら: 2007 秋季応用物理学学会 7a-ZH-9

高抵抗率の金銀合金を分流保護層とする超電導薄膜限流素子(7) -大容量化のための並列接続技術及び薄膜保護技術

Superconducting thin film fault-current-limiting elements using high-resistivity Au-Ag alloy shunt layers (7) – Methods to increase the current capacity with parallel connections and film protection

新井 和昭, 山崎 裕文, 海保 勝之, 中川 愛彦, 相馬 貢, 近藤 和吉, 山口 巖, 熊谷 俊弥(産総研)
 ARAI Kazuaki, YAMASAKI Hirofumi, KAIHO Katsuyuki, NAKAGAWA Yoshihiko, SOHMA Mitsugu, KONDO Wakichi,
 YAMAGUCHI Iwao, KUMAGAI Toshiya (AIST)
 E-mail: kazuaki-arai@aist.go.jp

1. はじめに

産総研では、合金分流保護層を用いて $40V_{\text{peak}}/\text{cm}$ 以上の非常に高い耐電界強度を持つ YBCO 超電導薄膜限流素子を実現し、低コストの薄膜型超電導限流器を開発するための研究を行っている[1], [2]。本報告では、素子の臨界電流にばらつきがあっても並列接続した場合に個々の薄膜の臨界電流を有効に活用できる接続技術、及び、クエンチの瞬間に超電導薄膜に発生する急激な電圧の上昇を軽減することにより超電導薄膜を保護する技術について述べる。

2. 超電導薄膜の並列接続

2枚のサファイアを基板とする YBCO 超電導薄膜(YBCO の膜厚は 300nm , $J_c \sim 3.2\text{MA}/\text{cm}^2$)、幅 $20\text{mm} \times$ 有効長 50mm , $I_c = 192\text{A}$ の Film1 と幅 $10\text{mm} \times$ 有効長 50mm , $I_c = 96\text{A}$ の Film2 をインジウム線と銅線により並列接続し、液体窒素中で 50Hz , 5 サイクルの過電流通電試験を行った結果を Fig.1 に示す (I_1 , V_1 : Film1 の電流と電圧, I_2 , V_2 : Film2 の電流と電圧)。並列接続した薄膜には、並列に 0.33Ω の抵抗と $50\mu\text{F}$ のコンデンサーが接続されている。時刻 120ms より 5 周期の過電流状態となっているが、時刻 145ms において I_c の低い Film2 だけがクエンチしている。クエンチ直前の2枚の薄膜の超電導電流の和 $I_1 + I_2 = 253.5\text{A}$ は、臨界電流の和 288A に達していない。臨界電流の和以上の電流を流すには、2枚の薄膜が同時にクエンチすることが重要でこれを実現するには Film1, Film2 のそれぞれの接続抵抗値 R_{c1} , R_{c2} の比 R_{c2}/R_{c1} が臨界電流の比 2 であればよいが、本実験ではそのような接続抵抗の調整は行っていないため Film2 が先にクエンチしている。薄膜型限流器を構成する実際の場面では、臨界電流のばらつきがあるためそのたびに接続抵抗値を規定する方法は、現実的でないが、超電導接続は、この問題を解消することが期待できる。そこで Fig.1 と同じ仕様の薄膜 Film1 と Film2 をビスマス超電導テープにより並列接続して通電試験を行い、結果を Fig.2 に示した。同図において、時刻 120ms から 5 周期の過電流の期間、両薄膜はクエンチせず、両薄膜の通電電流の合計値は臨界電流の和 288A の 1.25 倍程度の約 360A 以上のピーク値をとっているがクエンチは生じていない。これは、薄膜とビスマステープ線材間に接触抵抗による電圧が生じたとしても、薄膜に生ずるフラックスフロー電圧により電流がバランスして、より多くの超電導電流が流れることができるためである。

3. クエンチ直後の急激な電圧上昇に対する薄膜の保護

Fig. 3(a)に上記と同様の仕様の幅 20mm 有効長 50mm の薄膜に正弦波の過電流を加えた際のクエンチした瞬間の有効長にかかる電圧 V と薄膜に流れる電流 I を示す。(a)では超電導薄膜には、並列に抵抗 0.5Ω を並列に接続している。同図(b)は、同等の試料に抵抗 0.5Ω とコンデンサー $50\mu\text{F}$ を並列に接続した場合の試験結果である。(b)の電源電圧の設定値が高いにもかかわらずコンデンサーによって高い周波数成分の電圧がバイパスされることにより dV/dt が緩和されていることがわかる。(a)は、クエンチ後に焼損し、時刻 127.6ms には

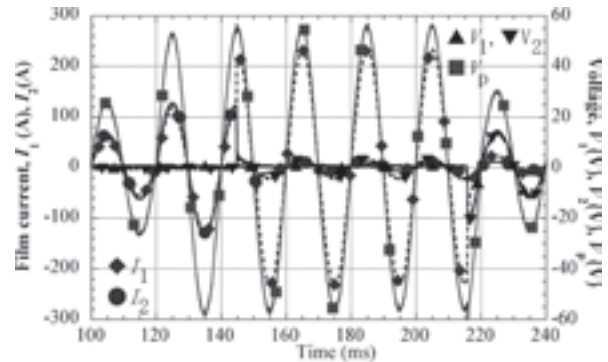


Fig. 1 Test result in the case that two superconducting films were connected in parallel using Indium and copper wires.

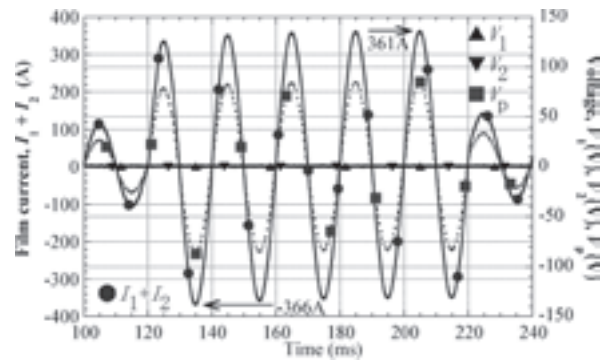


Fig. 2 Test result when two superconducting films were connected in parallel with Bismuth superconducting tapes.

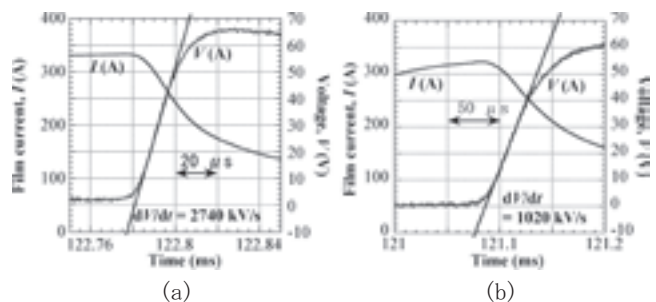


Fig. 3 Effect of capacitor to reduce increase of voltage at quenching. (a) without capacitor and (b) with a parallel-connected capacitor, showing lower dV/dt .

電流が流れなくなった。(b)の場合は、劣化は見られず過電圧区間内で、 $46V_{\text{peak}}/\text{cm}$ の耐電界強度を示した。

参考文献

- H. Yamasaki, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 85 (2004) pp. 4427-4429.
- K. Arai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) pp. 1843-1846.

抵抗と ZnO 素子を並列したインダクタンス形超電導限流器による電力系統安定度向上効果

Power system transient stability improvement by use of Inductive SCFCL with resistor and ZnO device

白井康之、正野由美、新居辰彦 (京大)
 SHIRAI Yasuyuki, SHOUNO Yumi, NII Tatsuhiko (Kyoto Univ.)
 E-mail: shirai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 緒言 超電導限流器には、電力系統の事故電流を既定値以下に限流することが期待されるが、派生的な効果として、事故中の電圧低下の抑制や系統安定度の向上に寄与することがあげられる。筆者らは、インダクタンス形超電導限流器に ZnO 素子と抵抗を並列した限流器ユニット (Fig.1) を提案し、超電導材の S/N 転移による限流開始、インダクタ成分による事故電流抑制を行わせるとともに、並列回路の抵抗において事故中の系統の余剰エネルギーを消費させることで、電力系統の安定度向上が図れることをシミュレーションにより示した。

2. 解析モデル シミュレーションは、EMTP を用いて行った。対象モデルは、基礎実験に用いた一機2回線送電の模擬送電系統とし、試作限流器の単体試験結果から作成した限流器モデルを導入した (Fig.2)。平常時は L 形 SCFCL に線電流が無損失で流れているが、事故時には事故電流による S/N 転移の結果、これにインダクタンスが表れ限流される。この時 SCFCL 両端に現れる電圧の一周期の間にその大きさが、並列された ZnO のバリスタ電圧を上回る期間は、抵抗に電流が分流し、これによって電力系統内発電機の加速エネルギーの一部が消費される。一方、事故電流がピーク値をとる位相では、電圧はバリスタ電圧を下回るので抵抗への分流は無くなり、故障電流は SCFCL のインダクタンスによって限流される。

3. 解析方法と結果 Fig.2 に示すスイッチ SW3 を用いて下側送電線で3相地絡事故を模擬し、一定時間後 SW1,2 を開放して事故回線を除去する。この時間を故障継続時間と呼ぶ。Sw3 をリセットした後 Sw1,2 は再閉路される。再閉路時間は 1s に固定した。シミュレーション結果の一例を Fig.3 に示す。上から事故回線、健全回線電流、発電機電圧、出力、相角、角速度偏差である。この時、再閉路後系統の安定度が保持出来る限界の故障継続時間 (臨界故障除去時間: Critical Clearing Time) を (1)限流器無し、(2)超伝導限流器のみ、(3)提案限流器ユニットの3ケースについて、発電機出力に対して求めプロットしたのが Fig.4 である。

4. 検討 各発電機出力に対して、限流器無し、SCFCL のみ、FCL ユニットの順に安定度の領域が大きくなっていることが分かる。事故中の発電機側母線電圧 V_b は、限流器が無い場合はほとんどゼロとなり、上側健全回線を介して無限大母線に送られる電力はほぼゼロとなる。これに対して、SCFCL 或いは FCL ユニットを入れた場合、この電圧は限流インピーダンスによってある程度維持され、送電は継続されるので発電機の加速エネルギーは低減され、臨界故障除去時間も長くなる。さらに提案 FCL ユニットでは、限流中に並列抵抗でのエネルギー消費が加わるため、さらに加速エネルギーは低減されるため、安定度の大幅な向上につながっている。

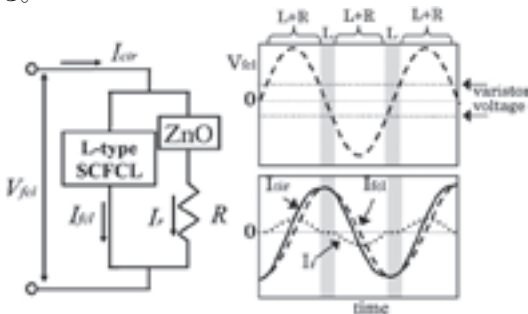


Fig.1 Proposed FCL unit and principle of the current limiting operation.

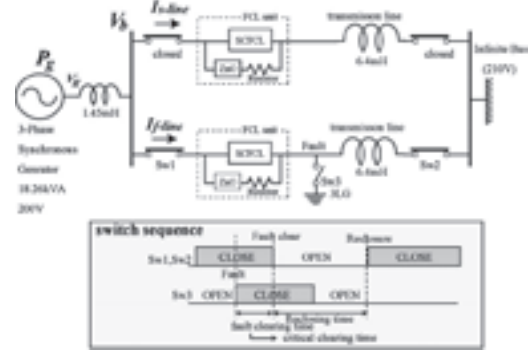


Fig.2 Model transmission system with model FCL unit and switching sequence for simulated 3LG fault.

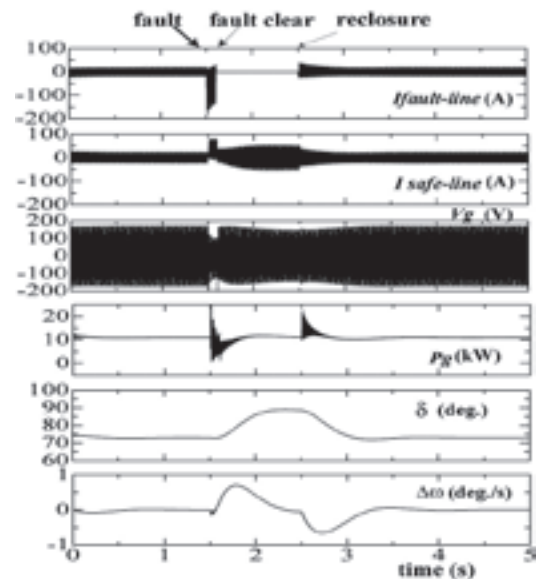


Fig.3 Example of simulation result (fault time=100ms, output=11kW)

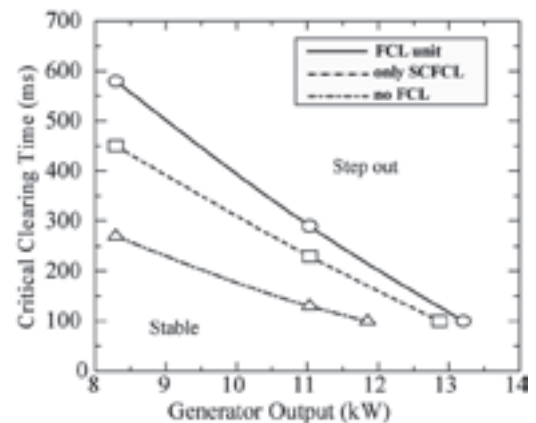


Fig.4 Critical Clearing Time with respect to generator output for each case.

YBCO 薄膜の磁界動作型スイッチングの特性 Magnetic response of a switch composed of YBCO thin Film

宮田 佳昭, 佐々木 将之, 飯沼 直弥, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大);
古瀬 充穂, 山崎 裕文 (産総研)

MIYATA Yoshiaki, SASAKI Masayuki, IINUMA Naoya, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku.U);
FURUSE Mitsuho, YAMASAKI Hirofumi (AIST)
E-mail: miyata@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在, 分散型電源の普及により交流と直流の連系が重要視されている。ところが, 現在交流直流変換器で使用されている自励式のスイッチ素子には, IGBT など, 高周波で利用可能なスイッチがあるものの, これらのスイッチは高効率化が課題となっている。そこで, 我々は, この交直変換器に超電導スイッチを適用することによる変換器の, 小型化, 大容量化, 高効率化について検討を行なっている。[1]。

本研究では, YBCO 超電導薄膜に着目し, 磁界を印加することで動作させる磁界動作型スイッチの, 交直変換器用自励式スイッチとしての有用性を検討したので報告する。

2. 超電導スイッチと印加磁場のモデル

Fig.1 に超電導スイッチの回路モデルを示す。スイッチ動作は, 超電導体にコイルで発生する磁場を加え, 超電導—常電導間の転移を制御することにより行う。解析に用いた超電導体は, YBCO 薄膜を想定し, 厚さ 200 nm, 幅 5 cm, 長さ 10 cm とした。この大きさは, 通電電流に対して適切にスイッチ動作する大きさである。また, 臨界電流密度は 4×10^6 A/cm², n 値を 35 とした。YBCO 薄膜の Je-B 特性は, 990 mT での臨界電流がゼロ磁場時の 1% であるとした。また, 超電導体と超電導体への磁場印加用コイル, コイル用鉄心, コイル用電流リードは液体窒素に浸すものとする。熱浸入による損失は, 輻射熱シールドの大きさに依存するが, ペナルティ係数を考慮して 300 W と仮定した。また, パルス磁場立ち上がり時の時定数は 50 ns とした。

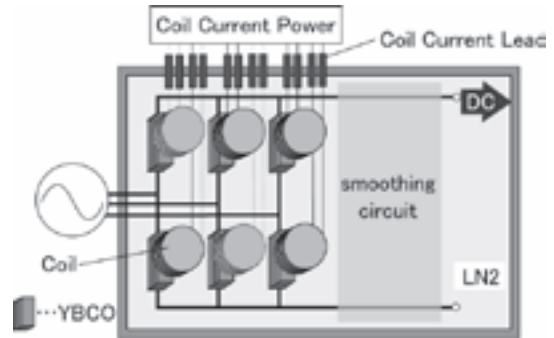


Fig.1 YBCO Switching circuit model

Table.1 Calculated power loss in YBCO switching device (400 A, 1 kV)

Power Loss	loss [kW]	ratio [%]
Coil Current Loss	10.9	54.9
Hysteresis Loss in Iron Core	0.14	0.7
Eddy-Current Loss in Iron Core	1.04	5.3
Heat Leakage of Coil Current Lead	0.51	2.6
Radiant Heat	0.30	1.5
YBCO Switching Loss	6.9	35.0
Total Loss	19.8	100

2. 解析結果

Table.1 に 400 A 通電時の交直変換器の損失を, Fig.2 に運転電流に対するスイッチの各損失を示す。コイルの銅損, 鉄損, コイル電流リードの熱損失は, 液体窒素温度での熱負荷を常温動力に換算するペナルティ係数 15 を考慮している。YBCO 薄膜のスイッチ時には臨界電流の 1% 分の電流が残存するため, 本解析ではこれを 1% の変換ロスとみなした。Fig.2 より, YBCO スwitch以外の損失は, 電流が増加しても, 急激な上昇は見られないことが分かる。

また, Fig.3 に各電圧階級での運転電流に対する交直変換器の損失を示す。現在 IGBT による損失は 5% 程度であるので, それとの比較も行った。Fig.3 より, 66 kV 以上の電圧階級では電流の大きさによらず 5% 以下の低損失化が見込める。また, 1 kV で交直変換を行う場合は, 運転電流が 200 A 以上でなければ現用素子に対して低損失化が見込めないことが分かる。

2. まとめ

電力用交直変換器の自励式スイッチとしての磁界動作型超電導スイッチの有用性について検討した。その結果, 変換器の容量が大きいくほど, 低損失化できる可能性があることが分かった。

参考文献

1. 佐々木 他: 2006年度秋季低温工学・超電導学会 1P-p36

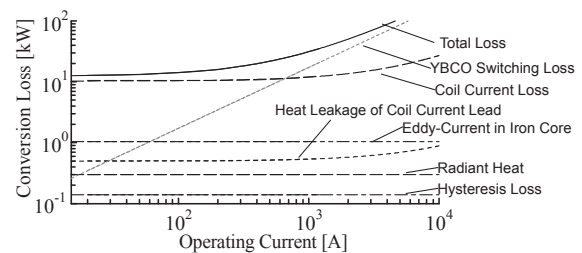


Fig.2 Conversion loss in YBCO switching device as a function of operating current (1 kV)

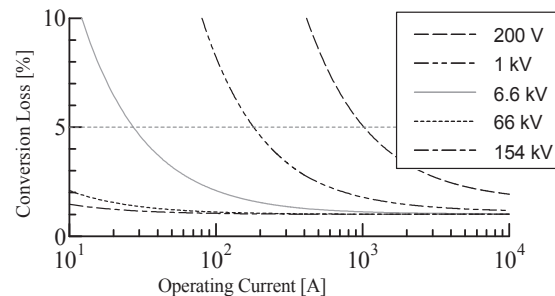


Fig.3 Conversion loss in YBCO switching device vs. operating current as a function of line voltage

超電導コイルと超電導バルク体を用いた磁気軸受の開発(2)

— 静的クリープと回転損失の把握および実負荷静荷重試験結果 —

Development of superconducting magnetic bearing using superconducting coil and bulk superconductor

— Evaluation of losses caused by static flux penetration and rotation, Results of static load test in substantial use —

清野 寛, 長嶋 賢 (鉄道総研)

SEINO Hiroshi, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: seino@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導体バルク体と超電導コイルを組み合わせた磁気軸受の開発を行っている^[1]。超電導同士を組み合わせることで、軸受の負荷容量を大きくすることが可能となる。適用先としては、フライホイールの回転体支持を想定しており、超電導磁気軸受の適用によって、軸受部分の保守に関する問題や、軸受部分の摩擦損失による運転効率の低下を改善することを目指している。

今回は、超電導同士で構成した超電導磁気軸受の静的クリープと回転損失の把握に関する実験結果と、荷重容量を確認するために実施した実負荷静荷重試験について報告する。

2. 超電導同士で構成した磁気軸受

Table 1 に実験に供した超電導磁気軸受の諸元を示す。

Table 1 Specification of superconducting magnetic bearing

HTS bulk (Rotor)		Superconducting coil (Stator)	
Material	Gd-Ba-Cu-O	Material	Nb-Ti
Shape	Disk shape, φ60mm×120mm	Properties	RT bore φ120mm, Cusp field, 5T (Max)
Cooling method	Liquid nitrogen (77K)	Cooling method	Cryocooler direct (4K)

3. 超電導同士で構成した磁気軸受の静的クリープの把握

超電導バルク体位置の磁場を 2.5T に固定し、超電導バルク体の発生する電磁力(=浮上力)を変化させた時の磁束侵入による電磁力のクリープを測定した。超電導バルク体は液体窒素で冷却し、磁場は冷却後に印加した。その結果、発生電磁力=初期荷重が大きくなればなるほど、電磁力のクリープが大きくなる傾向があった。また、同じ電磁力であっても、それを負担する超電導バルク体の数を増やすことで電磁力クリープが減少することが確認できた。

4. 超電導同士で構成した磁気軸受の回転損失特性

クリープの把握実験と同様に、バルク体の回転軸と、超電導コイルの中心軸の変位=偏心量を与えて、10 分間回転させた時の超電導バルク体の発生電磁力(=浮上力)の低下を測定した。なお、回転速度は1000rpmとした。その結果、超電導バルク体の発生電磁力が大きくなると、同じ偏心量でも回転による発生電磁力の低下が大きくなる傾向にあった。回転損失についても、超電導バルク体の数を増やすことで、偏心時の電磁力劣化が抑制できることが確認できた。

5. 超電導同士で構成した磁気軸受の実負荷静荷重試験結果

超電導バルク体と超電導コイル間に働く電磁力の静的クリープおよび回転損失特性の把握から、使用する超電導バルク体を 2 個として、超電導同士の磁気軸受を構成した。この超電導磁気軸受の静荷重試験結果の一例を Fig.1 に示す。実験においては、

超電導コイルの耐荷重限度である 10000N まで発生浮上力を確認することができた。さらに、超電導磁気軸受で質量 460kg のウエイトを浮上保持する実験を行った。その結果の一例を Fig.2 に示す。実験においては、顕著な位置変化も見られず、安定した荷重保持ができることが確認できた。

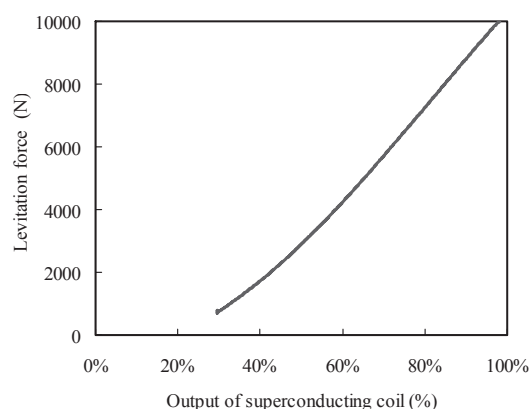


Fig.1 Example of the results of static load test

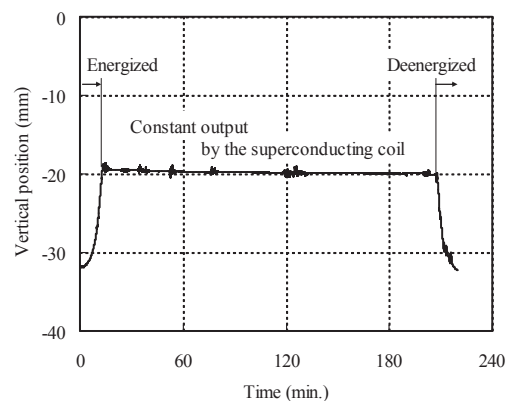


Fig.2 Static levitation result supporting with a 460kg-weight

6. まとめ

超電導バルク体と超電導コイルで構成する磁気軸受の電磁力クリープおよび回転損失特性を把握し、静荷重試験において、10000N までの浮上力と安定した荷重保持特性を確認した。

今後は、この超電導磁気軸受で 500kg 程度の回転体を支持して、高速回転させる実験を行う予定である。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. 清野寛ほか: 第 76 回 2007 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 1A-a11 (2007) p.11

磁気浮上型超電導免震システムの浮上力改善手法の検討

Improvement of Levitation Force in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation System

川崎 健志, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大学)

KAWASAKI Takeshi, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

E-mail: takeshi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

高温超電導バルク体(バルク体)と永久磁石(PM)を用いた磁気浮上システムは、無制御での安定浮上が可能である。これを利用した磁気浮上型超電導免震装置は、振動の完全除去が原理的に可能であることが明らかになっている[1]。しかし、現在の浮上特性では、ビルなどの大規模な建築物に適用するには浮上力が不十分である。また、バルク体は非常に高価であるという欠点もある。そこで、これらを改善するために、従来の HTS-PM システムに、PM の反発力を利用した浮上システム(PM-PMシステム)を付加したハイブリッド磁気浮上システムに着目した。しかし、ハイブリッドシステムは、従来の HTS-PM システムと比べて超電導体の使用量を軽減しつつ浮上力を上げることができるが、PM同士の高い反発力により安定浮上性を損ない、振動伝達特性に悪影響を及ぼす恐れがある。本研究では、振動伝達特性を損なうことなく、浮上力密度を効率的に改善できる方法について検討した。

2. 実験

2.1 浮上力測定

実験に使用したハイブリッドシステムの概要図を Fig.1 に示す。本浮上システムは、第1層、第2層の端部のバルク体・PM で構成される HTS-PM システムと、第1層・第2層の中央部の PM および PM レールで構成される PM-PM システムとで構成されている。まず第1層と第2層を、高さ(初期ギャップ)を調整できるスペーサを介して配置し、バルク体を T_c 以下まで冷却した。次にスペーサを取り外し、先端にロードセルを取り付けた XYZ ステージを第2層上部より押し下げることで、両層間のギャップを変化させ、その時の反発力(浮上力)を記録した。同様の実験を、初期ギャップや中央に対向させた PM の数を変化させて繰り返し行った。なお、今回使用した PM は $9 \times 9 \times 3$ mm の角型 NdFeB 磁石であり、バルク体は直径 30mm、高さ 10mm の円柱型 QMG-YBCO バルク体である。

実験結果の一例として、初期ギャップ 2mm、第2層中央部の PM 数を1個とし、第1層中央部の PM 数を PM レール幅方向に変化させた時の浮上力密度特性を Fig.2 に示す。縦軸は Fig.1 の HTS-PM システム部の浮上力密度に対する、ハイブリッドシステムの浮上力密度の比を表す。なお、 F_{Hybrid} は浮上力をバルク体 2 個と PM1 個の面積で割った値とし、 F_{HTS-PM} は HTS-PM システムの浮上力をバルク体 2 個の面積で割った値である。この結果から、本システムにおいて浮上力を効率よく改善させるためには適切な PM 個数が存在することがわかる。

2.2 振動試験

上記の結果から、第1層側PM数1個の場合において最も大きな浮上力密度の改善が確認できたので、次に Fig.1 の第1層を加振台に取り付け、PM レール幅方向に振動させた場合の振動伝達特性の比較を行った。第1層を振動させると、バルク体のピン止め効果によって、第2層も第1層に追従する。この時の両層の相対変位をレーザ変位計により測定した。実験結果の一例として、初期ギャップ2mm、振幅17mm、振動周波数を5Hz程度まで順次増加させた際の結果を Fig.3 に示す。HTS-PMシステムの試験結果と比べて、それほど大きな差は見られなかった。これは、ハイブリッドシステムにおいても HTS-PMシステムと同様な免震効果が得られることを示唆している。以上より、ハイブリッドシステムを採用することで、振動

伝達特性に悪影響を及ぼすことなく浮上力を改善できることがわかった。

参考文献

1. M. Tsuda, et al.: Abstract of IEE Japan Meeting, ASC-07-22, (2007) p.21-26

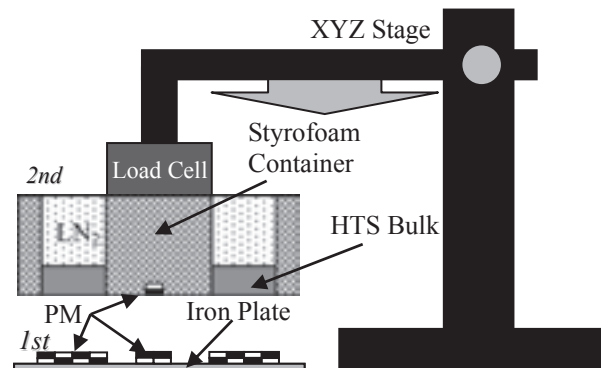


Fig.1 Sketch of Experimental Setup for Levitation Measurement

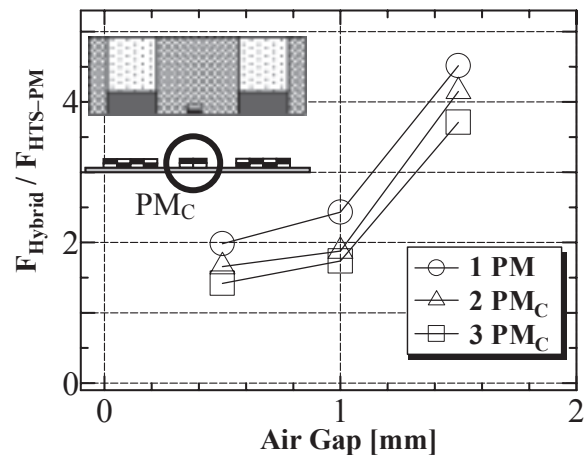


Fig.2 Levitation Force Density of Hybrid-Levitation System Standardized by that of HTS-PM Levitation System

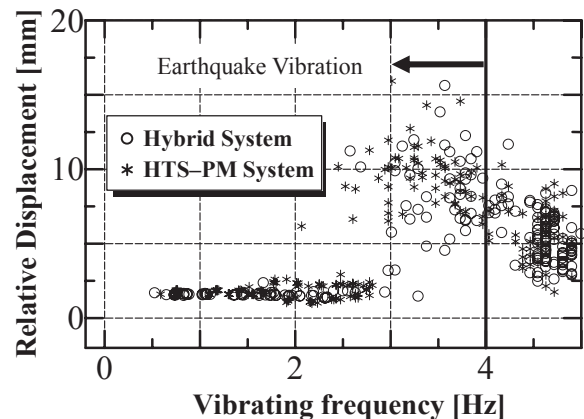


Fig.3 Relative Displacement in Hybrid and HTS-PM Systems as a Function of Vibrating Frequency

交流超電導マグネットによる溶融ガリウムの電磁攪拌

Electromagnetic Stirring of Molten Gallium by AC Superconducting Magnet

笠原 奉文(電中研); 谷口 尚司, 上野 和之, 嶋崎 真一(東北大); 宮下 克己(日立電線)

KASAHARA Hirofumi(CRIEPI); TANIGUCHI Shoji, UENO Kazuyuki, SHIMASAKI Shin-ichi(Tohoku Univ.); MIYASHITA Katsumi(Hitachi Cable)

E-mail: kasa@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

超電導の産業応用として、電磁攪拌への適用を目指した研究を行っている。これまでに、マグネット構成法¹⁾や断熱方法²⁾を検討してきた。

合金製造における溶融金属の攪拌は、結晶の均一化、成分濃度・温度の均一化、介在物の分離促進など非常に多くのメリットがある。電磁攪拌は、制御性の良さや、非接触であるため汚染・摩耗・耐熱性などの問題が生じない利点がある。しかし通常の銅マグネットを用いた電磁攪拌では、印加できる磁界に制限があり、また運転に大電力を必要とすることもあり大規模な実用化には至っていない。この磁界印加マグネットを超電導化することにより、強磁界による強力な攪拌が行なえ、従来では製造できないような高濃度合金が製造できる可能性があるなど大きな期待を集めている。

今回、実際に交流超電導線を用いた超電導電磁攪拌装置を試作し、溶融ガリウムを対象とした攪拌実験を行ったので報告する。

2. 超電導電磁攪拌装置

Fig.1 に試作した超電導電磁攪拌装置を示す。マグネットに使用した線材は、日立電線(株)製の交流用 Nb-Ti 線材で、フィラメント径 0.1 μm 、フィラメント間隔 0.07 μm 、フィラメント本数はファーストバンドル 1,369 本、セカンドバンドル 1,152 本の合計 1,577,088 本である。フィラメント周りに Cu-30%Ni-1.34%Mn 母材を使用し、外皮は Cu-10%Ni-0.9%Mn 母材を使用している。素線外径は 0.25mm である。この素線を Cu-10%Ni 線の周りに 6 本配置し、1+6 撚り線としてマグネットを巻き線した。この導体の履歴損失は、0.5 T の振幅で約 1.3 kJ/m^3 だと予想される。今回の通電は電源の関係で 50 Apeak までの通電しかできなかったため、最大能力の 1/6 までしか通電しなかったことになる。

マグネットは 6 個のレーストラックマグネットを組み合わせ構成した。組み合わせたマグネットの外径は 328 mm、クリアポア 78 mm、高さ 410 mm である。このマグネットの発生磁界をホール素子により測定した。50 Apeak 通電時にクライオスタット室温空間部壁面で 0.06 Tpeak の回転磁界を発生した。

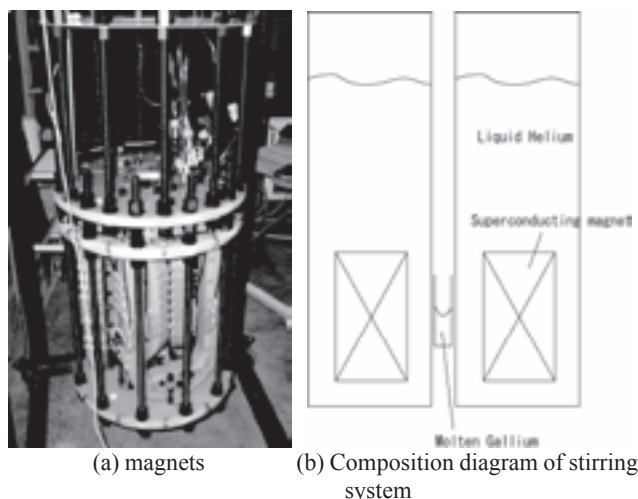


Fig.1. Electromagnetic stirring system.

マグネットへの通電は、3相 200 V、50 Hz の壁面分電盤より、スライダックを通して、最大 240V までの定電圧通電により行った。

クライオスタットは、外径 572 mm、高さ 1600 mm で、中心部に直径 60 mm の室温クリアポアを持つドーナツ形状のクライオスタットである。

3. 溶融ガリウムによる攪拌実験

攪拌する金属として金属ガリウム(融点 29.78°C)を選択した。ガリウム容器は内径 55 mm、高さ 200 mm の耐熱ガラス容器である。1 回の実験には 500 g のガリウムを使用し、容器の半分くらいまで 50°C に保温した溶融ガリウムを注入した。

攪拌時の液面形状を観察したものを Fig.2 に示す。静止画ではわかりにくいですが、Fig.2(a)は回転磁界印加前のもの、Fig.2(b)は約 20 Apeak 通電したときのもので、遠心力により液面が V 字形状になっている。Fig.2(c)はさらに電流を増加し約 40 Apeak の通電をしたものである。このとき、ガリウム容器中心部に容器底部の露出が上方より観察された。Fig.2(d)はさらに電流を増加し、最大電流 50 Apeak を通電したものである。ガリウムが完全にガリウム容器壁面にへばりつき、ガリウム容器底部が大きく現れている。

4. まとめ

超電導技術の産業応用の一つとして、超電導電磁攪拌装置を試作し、世界初の溶融金属の電磁攪拌実験を行った。その結果、ガリウムが坩堝壁面にへばりつくほどの非常に強力な攪拌力が得られた。なお、電磁攪拌用超電導マグネットの交流損失は、通常の運転に支障のないレベルであり、運転中にクエンチ等の問題は生じない程度のものであった。

参考文献

1. H. Kasahara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.253
2. H. Kasahara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.296

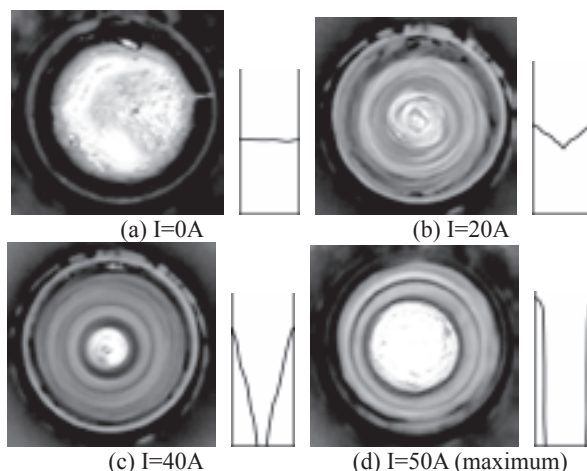


Fig. 2 Photographs of free surface of liquid gallium.

蓄冷材開発に向けたペロブスカイト酸化物試料の比熱測定

Specific heat measurement of perovskite oxide samples for development of regenerator

松原 隆博, 池田 博 (筑波大)

MATSUBARA Takahiro, IKEDA Hiroshi (University of Tsukuba)

E-mail: s0720683@ipe.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

GM 冷凍機等の小型冷凍機では冷凍能力の要の一つとして蓄冷材が挙げられる。我々は作成が容易で、よく知られている RMO_3 (R: 希土類元素, M: 金属元素) のペロブスカイト型酸化物に注目し、蓄冷材の開発を目指してきた。前回我々は HoMnO_3 を始めとする幾つかの物質が 10K 以下の温度領域で比熱が異常増大することを報告した¹⁾。今回は前回の結果を踏まえ、新たに R 及び M を系統的に換えた試料を作成した。試料評価として比熱測定と磁化率測定を行い、比熱の振る舞いを Pb と比較して比較検討を行ったので報告する。

2. 試料作製

今回作成した試料は R を Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er と固定し、M を Mn, Co, Ti, V と換えて作成を試みた。高純度(99.99%以上)の原料粉を秤量し、乳鉢で攪拌した。この試料を電気炉で仮焼きし、さらに乳鉢で攪拌した。原料粉を 20mm ϕ の成型器で圧をかけ円柱状のペレットにした。このペレットをアルミナの燃焼ボートにのせ、管状電気炉で 1250 から 1500°C 範囲の空気雰囲気中で焼成した。

3. 試料評価

焼成したペレット状の試料は、ダイヤモンドカッターを用いてそれぞれ 100mg、5mg 程度に加工した。磁化測定に関しては Quantum Design 社製 SQUID 磁束計の MPMS で室温(280K)から 5K までを行い、比熱測定に関しては Quantum Design の PPMS で 200K から 5K まで 1K 間隔で行った。

4. 結果と考察

5K から 50K までの DyMnO_3 , HoMnO_3 , TbMnO_3 及び GdMnO_3 磁化測定の結果を Fig.1 に示す。 GdMnO_3 に関しては 30K 付近からはっきりとした磁化のヒステリシスが見取れ、また DyMnO_3 と TbMnO_3 に関しては 10K 付近でなだらかなピークを持つことがわかる。これは反強磁性に相転移していると考えられる。

また、5K から 50K までの DyMnO_3 , HoMnO_3 , TbMnO_3 及び GdMnO_3 比熱測定の結果を体積あたりで Pb と Cu と比較したものを Fig.2 に示す。40K 付近および 25K、10K、8K 付近に幾つかの試料で比熱のピークが見られる。その大きさに注目すると 30K 付近からは明らかに Cu よりも比熱は大きくなり、10K 以下の温度では GdMnO_3 及び HoMnO_3 は Pb よりも比熱が大きいことがわかる。どの試料も、5K 付近では Pb や Cu などの金属に比べ、有限の値を持つことがわかった。

また、磁化測定と比熱測定の結果を特に変化があった温度において比較してみる。 GdMnO_3 , TbMnO_3 , DyMnO_3 について 40K 付近で比熱のピークを持つことがわかる。磁化測定の結果に目立った特長はこの温度域では見られないので、この比熱の増大は磁化の変化とは関係ないことが見て取れる。また、 TbMnO_3 に見られる 25K 付近の比熱のピークに関しても磁化測定の結果では特に変化は見られない。 TbMnO_3 , DyMnO_3 に関して 8K 付近で比熱のピークがあり、磁化測定の結果でもこの温度で値が急激に変化していることからこの比熱は磁性の反強磁性転移によるものと思われる。一方、 DyMnO_3 や HoMnO_3 については磁性に変化は見られないので、他の影響が寄与していると思

われる。その他の試料に関するデータや考察は当日会場にて紹介する。

5. まとめ

今回は希土類、金属元素を系統的に変化させ試料作製を行い、磁化測定と比熱測定を行った。幾つかの元素は低温で Pb より大きな比熱を持つことがわかった。今後はさらに様々な試料で測定をし、より、系統性を出していくことが課題である。

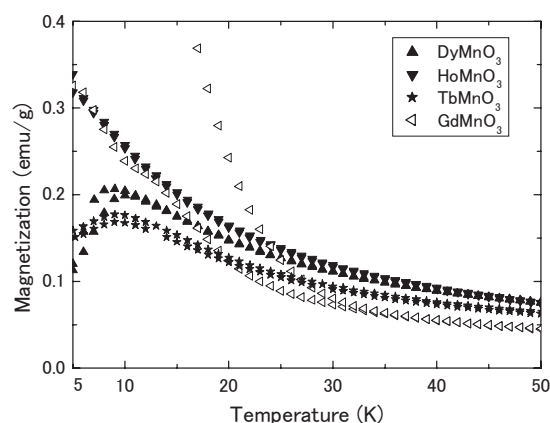


Fig.1 Magnetization of DyMnO_3 , HoMnO_3 , TbMnO_3 and GdMnO_3 from 5K to 50K

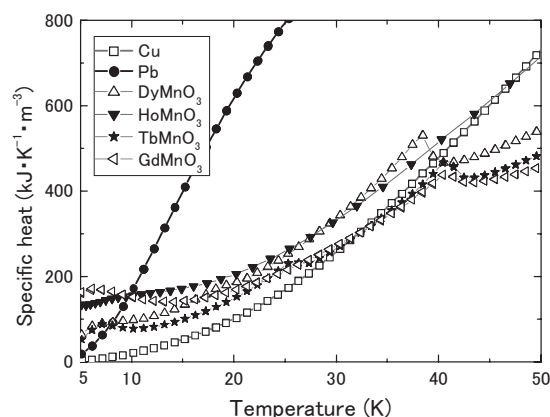


Fig.2 Specific heat of DyMnO_3 , HoMnO_3 , TbMnO_3 and GdMnO_3 compared with Pb and Cu from 5K to 50K

参考文献

- 1) 池田 他、2007 年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集, P.116

酸化物 SMES 向け能力可変 GM 冷凍機の冷却特性

Cooling performance of GM cryocooler with controllable cooling power for HTS-SMES

濱崎 純也, 鈴木 雄一郎, 浅見 宏, 佐藤 敏美(住友重機械工業(株)); 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力(株))

HAMASAKI Junya, SUZUKI Yuichiro, ASAMI Hiroshi, SATOH Toshimi (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);

HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: Jny_Hamasaki@shi.co.jp

1. はじめに

酸化物超電導 SMES (HTS-SMES) は従来の超電導 SMES と異なり、高温超電導線材を利用するために、20K 付近の温度域において大きな冷凍能力を有する冷凍機が必要である。また、SMES 向け冷凍機に求められる性能として、負荷に応じた動力で運転することによる省エネ化が期待されている。そこで、20K において 50W の冷凍能力を持つとともに、冷凍機及び圧縮機のインバータ駆動により能力可変を可能にした単段 GM 冷凍機を試作した。

2. 試作機仕様

試作機は、冷凍機のコールドヘッドにインバータ対応モータを使用し、インバータ圧縮機と組み合わせることによって冷凍能力を変化させることのできる構成とした。仕様を示す (Table 1)。冷凍機ユニットの概観写真を示す (Fig. 1)。

試作機は冷凍機ユニット、圧縮機ユニット、フレキシブルホースから構成される。冷凍機ユニットにはインバータ対応モータが搭載されているため、駆動周波数を 40Hz~60Hz の範囲で駆動する事が可能である。また、圧縮機は 30Hz~60Hz の範囲で運転する事が可能である。

Table 1 Specification of GM cryocooler

	Prototype system
Cooling Power	50W max at 20K
Power Consumption	7.5kW(60Hz)max 3.5kW(30Hz)min
Input Voltage	200V(50/60Hz)
Operating Frequency	Compressor 30~60Hz Refrigerator 40~60Hz
Temperature Control	PID(Compressor Freq.)



Fig. 1 GM cryocooler

3. 試作機の冷却特性評価

試作機の能力評価は、真空容器に冷凍機を設置し、冷凍機冷却部に取り付けた白金コバルト温度センサーとヒータにより測定した。性能試験の結果を示す (Fig. 2)。性能試験をする際には、冷凍機ユニットと圧縮機ユニットの運転周波数をそれ

ぞれ最大周波数、最小周波数に固定した状態において冷凍能力を取得した。また、試作機の運転中に測定した消費電力を示す (Table 2, Table 3)。

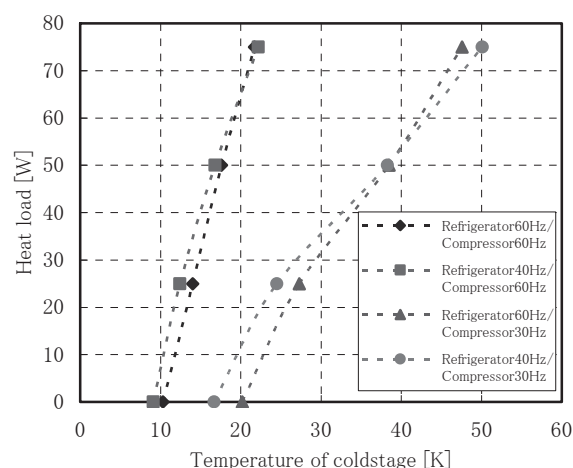


Fig. 2 Cooling performance of GM cryocooler

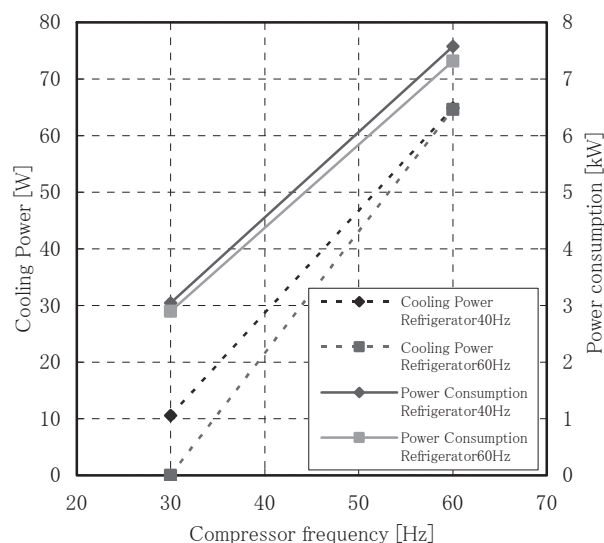


Fig. 3 Cooling power and power consumption at 20K

試作機の性能試験より、今回設定した運転周波数において 20K における能力可変範囲は 0~65W であった。消費電力は運転周波数を変更することにより、約 4.5kW の範囲での可変となった。

謝辞

本研究は、NEDO受託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。

参考文献

1.Y.Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) p.115

ディスプレイサーを持つパルス管型スターリング機関 Pulse Tube Type Stirling Machine with Displacer

朱 紹偉 野川 正文 井上 龍夫(アイシン精機(株))
Shaowei Zhu Masafumi Nogawa Tatsuo Inoue(AISIN SEIKI CO., LTD.)
Email: swzhu@rd.aisin.co.jp

Introduction

A pulse tube type Stirling machine has the same theoretical efficiency with Carnot cycle, and all of the moving parts can be put in room temperature range. It has the advantage of both Stirling machine and pulse tube machine. In this paper, a pulse tube type Stirling machine is discussed by numerical simulation when it is used as a cryogenic refrigerator, an engine and a room temperature refrigerator.

Structure

Figure 1 shows the structure of the pulse tube type Stirling machine with a displacer as a phase shifter. The displacer with a rod is suspended by springs. It oscillates due to pressure change in working spaces and buffer.

Cryogenic refrigerator

As cryogenic refrigerator, this type of machine can recover the expansion work by the displacer. Its efficiency is higher than ordinary inrtance-tube pulse tube refrigerator. The higher efficiency means downsizing of compressor and lower running cost. Figure 2 shows the input work, heat load and COP vs. the phase angle between compressor and displacer under the conditions of compressor swept volume 500 cm³, displacer swept volume 275 cm³, room temperature 300 K, refrigeration temperature 77 K, frequency 50 Hz and helium charge pressure 2.5 MPa.

Engine

Compared to Stirling engine, the advantage of this type machine is that there is no moving part at high temperature range, and the moving parts can be separated from the fixed parts. This is very convenient for some applications compared to Stirling engine. Figure 3 shows the output work, input heat and efficiency vs. the phase angle between compressor and displacer under the conditions of compressor swept volume 20 cm³, displacer swept volume 40 cm³, room temperature 300 K, high temperature 900 K, frequency 100 Hz and helium charge pressure 3 MPa.

Room temperature refrigerator

This type of machine is one of the non-Freon refrigerators. Figure 4 shows the input work, head load and COP vs. refrigeration temperature under the conditions of compressor

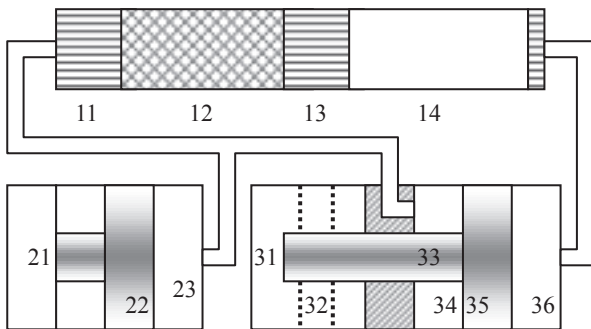


Figure 1. Schematic drawing of the machine
11. Cooler 12. Regenerator 13. Heater 14. Pulse tube
21. Compressor driving unit 22. Piston
23. Compression space 31. Buffer 32. Spring 33. Rod
34. Back space 35. Displacer 36. Expansion space

swept volume 15 cm³, displacer swept volume 15 cm³, room temperature 60°C, frequency 50 Hz and helium charge pressure 3 MPa.

Conclusion

The results of numerical simulation shows that pulse tube type Stirling machine with displacer has some potential as cryogenic refrigerator, heat pump and engine.

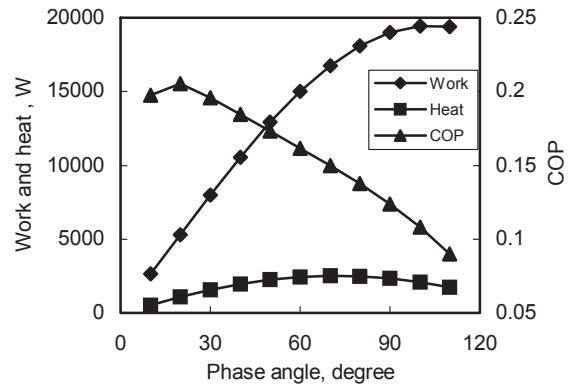


Figure 2. Phase angle effect to cryogenic refrigerator

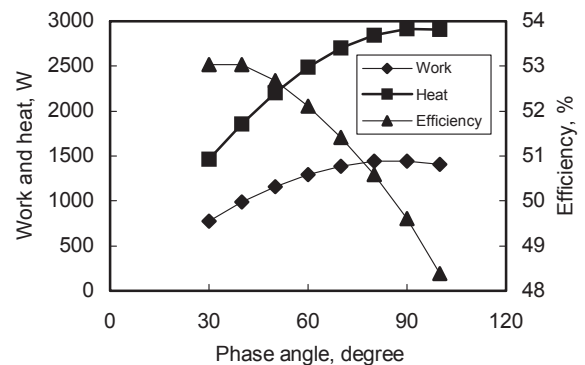


Figure 3. Phase angle effect to engine

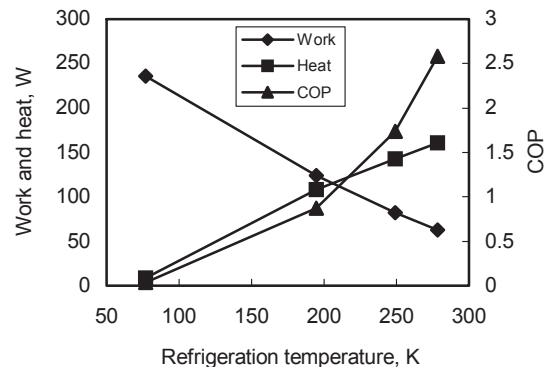


Figure 4. Room temperature refrigerator performance

粒子検出用液体 Xenon システムの研究(15)

～動き出した MEG 実験と液体キセノンシステムのコミッショニング～

Study on LXe system for particle detector (15)

- Commissioning of LXe system and starting up of the MEG experiment-

春山富義, 笠見勝祐, 真木晶弘(KEK); 三原 智, 大谷 航, 岩本敏幸, 澤田 龍, 森 俊則(東大);
MEG コラボレーション (PSI)

HARUYAMA Tomiyoshi, KASAMI Katsuyu, MAKI Akihiro (KEK); MIHARA Satoshi, OTANI Wataru, IWAMOTO Toshiyuki,
SAWADA Ryu, MORI Toshinori (Tokyo University), MEG Collaboration (PSI),
E-mail: haruyama@post.kek.jp

1. はじめに

μ 粒子の稀崩壊現象を探索する MEG ($\mu \rightarrow e\gamma$) プロジェクトがスイスの PSI (ポールシェラー) 研究所で始まった。900L の液体キセノン中に直接浸漬された 860 台の光電子増倍管 (PMT) によって γ 線を高感度検出する実験開始に先立ち、実機への 900L の液体キセノン移送、冷凍機のみによる低温保持、液体ポンプによる循環精製の実証テストに成功したので報告する [1]。

2. 液体キセノンの移送と冷凍機による低温保持

実験を構成する低温設備は、内容量 900L の液体キセノンカロリメータ、高冷凍能力パルス管冷凍機、液相循環精製用ポンプ、1000L 液体キセノン容器などである。今回行った試験内容は以下の通りである。

- ・ PMT860 台を含む液体キセノンカロリメータの予冷
- ・ 900L 液体キセノンのカロリメータへの移送
- ・ 冷凍機による 900L 液体キセノンの温度圧力安定制御
- ・ 液体ポンプを用いた液相循環精製
- ・ 緊急時の液回収 (液体ポンプにより 1000L 容器へ)

まずカロリメータを冷凍機と液体窒素により約 5 日間かけて予冷した。その後、予め 1000L の低温容器に液化した約 900L の液体キセノンを加圧し、全長 5m 程度の真空断熱配管を通してカロリメータに移送した。Fig.1 (左) に見るようにカロリメータ内には PMT が詰まっており、熱的ショックを避けるため慎重に予冷および液送冷却を行った。液面は静電容量型液面計とそれに沿って取り付けられた Pt 温度計によって、温度とともにモニターした (Fig.1 右、下)。

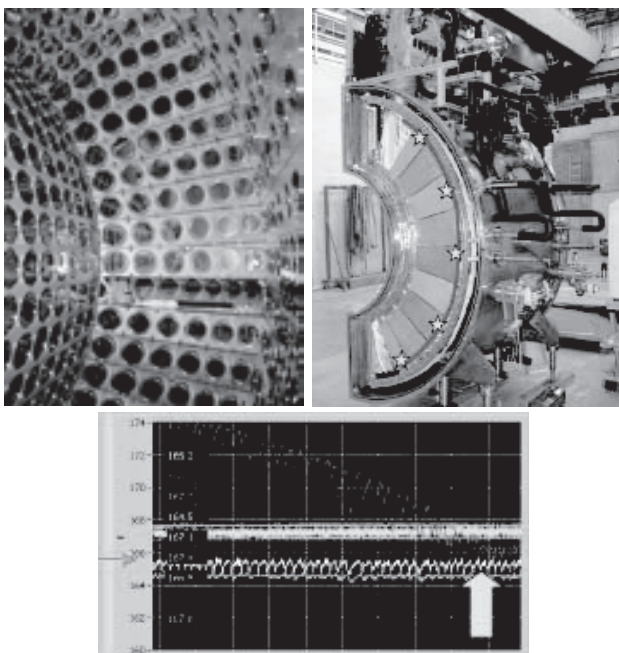


Fig.1.(Left):Photo multipliers, (right): Level meter and Pt sensors, (Down) Temperature profile at transfer completed.

カロリメータ内の液体キセノンは上部にある 3 本のチムニーの一つに取り付けられた 200W@165K の冷凍能力を持つパルス管冷凍機で冷却が保持される。PMT を動作させると約 40W の発熱があり直接液体中に放出されるが、冷凍機のみで液体キセノンの圧力、温度を安定に保持できることを確認した。

3. 遠心低温液体ポンプを用いた液相循環精製

液体ポンプによるキセノンの液相循環精製は MEG 実験の成否を握る重要な技術である [2]。 γ 線を受けてキセノンが発する波長 174nm の光は、残留する微量水分によって簡単に吸収されてしまうため、ppb のレベルまで水分を除去する必要がある。PMT の高温ベークンができないため PMT から液体キセノン中に滲みだした水分を除去するが、気相精製の場合 1L/h 程度の精製速度にしかならない。一方、Barber-Nichols 製遠心型ポンプを用いると液体で 100L/h の能力を持つため、精製時間が大幅に短縮できる。仕様は 3000rpm で、吐出圧力は 0.2MPa 以下である。吐出側に 500cc の容器に充填したモレキュラーシーブス (MS-13A) を取付けてある。精製温度は 165K である。

液体キセノンカロリメータ、ポンプユニット、1000L 低温容器を含むシステムを Fig.2 に示す。バイパスにより MS 容器を十分に冷却後、ポンプ吐出液をカロリメータに戻し、カロリメータの底から循環液体量を吸出すことで、100L/h の液体定常循環を確認した。さらに緊急回収モードとしてカロリメータから 900L の液体をポンプにより短時間で 1000L 容器へ移送することにも成功した。

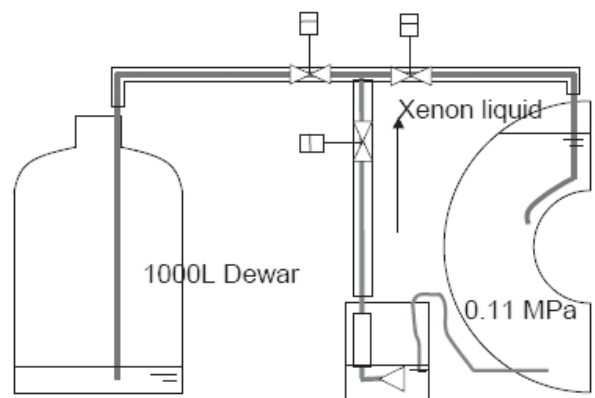


Fig.2. LXe liquid-phase purification scheme. Calorimeter is shown as "C" shape dewar.

参考文献

1. 春山富義他「粒子検出用液体 Xenon システムの研究 (13) -まもなく始まる MEG 実験用 LXe システムの現状-」第 74 回低温工学・超電導学会 (2006 春季) 96
2. 三原智他「低温液体遠心ポンプを使用した液体キセノンの超高純度純化方法の開発」低温工学 40 (2005) 571-577

瞬低補償 SMES 用能力可変 GMJT 冷凍機の冷却特性

Cooling performance of GMJT cryocooler with changeable cooling power for SMES

鈴木 雄一郎, 濱崎 純也, 佐藤 敏美(住友重機械工業(株)); 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力(株))
 SUZUKI Yuichiro, HAMASAKI Junya, SATOH Toshimi (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);
 HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
 E-mail: yuo_suzuki@shi.co.jp

1. はじめに

半導体工場などでは供給電源電圧の瞬時低下(瞬低)が発生すると生産設備の停止、品質の低下につながり、大きな被害が発生する恐れがある。このため、瞬低補償用 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage 超電導電力貯蔵システム)の開発が進められている。超電導マグネット冷却用液体ヘリウムを再凝縮する GMJT 冷凍機と、シールド冷却・電流リード冷却用の単段 GM 冷凍機が搭載されており、これらの冷凍能力、消費電力を装置に必要な負荷に合わせて変化させることで、待機時の電力を低減させ、装置の省エネ化が期待できる。インバータ制御により冷凍能力、消費電力を可変とする瞬低補償 SMES 用 GMJT 冷凍機を試作し、その特性を評価したので報告する。

2. 試作機仕様・構成

従来機は商用電源周波数で運転を行う再凝縮器付き冷凍機であり、能力一定運転である。これに対し試作機は従来機と同等の性能を最大能力とし運転条件の切替により能力低減切替を可能な構成とした。予冷機はインバータ対応モーターを使用した GM 冷凍機、圧縮機はインバータ対応圧縮機を使用し、予冷機用 JT 系用各 1 台の 2 元式の構成とした。

JT(H)圧力設定を切り替えることで JT 流量が変わり、それに応じて冷凍能力が変化する。JT 弁開度は固定とし、JT 系用圧縮機は JT(L)圧力を一定とする制御運転をするようにした。冷却部温度は設定した JT(L)圧力により決まる。JT(H)の設定は外部入力信号により切替を行う。JT 流量に応じて能力を変化させるため、予冷機用圧縮機は予冷機 2 段温度を一定とする制御運転とした。冷却に伴うガス量の調整は JT(H)圧力に対してバッファタンクの入口及び出口弁の開閉を行い調整するようにした。

従来機、試作機の仕様を示す(Table 1)。

Table 1 Specification of GMJT cryocooler

	Previous system	Modified system
Cooling Power	4.3 at 4.3K(60Hz)	4.3W at 4.3K(mode1) 3.0W at 4.3K(mode2)
Power Consumption	6.4kW(60Hz)	8.0kW(mode1) 5.6kW(mode2)
Input Voltage	200V(60Hz)	200V(50/60Hz)
Operating Frequency	60Hz	Compressor 30~60Hz Refrigerator 30~60Hz
Operating Mode	-	JT(H) Pressure mode1:1.8MPa mode2:1.2MPa

3. 試作機の冷却特性評価

試作機の能力評価は、真空容器内に冷凍機を設置し、挿入管再凝縮部に取り付けたヒータ負荷と戻りラインの温度を測定している He 蒸気圧温度計の指示にて測定した。試験装置、及び圧縮機の概観を示す(Fig 1)。能力切替による性能の違

いを調べるため、JT(H)の設定値を 1.8MPa(mode1)、1.5MPa、1.2MPa(mode2)に変えて試験を行った。それぞれの設定条件におけるヒータ負荷と測定温度の測定結果を示す(Fig 2)。試験結果から得られた JT(H)圧力に対する冷凍能力と消費電力の関係を示す(Fig 3)。

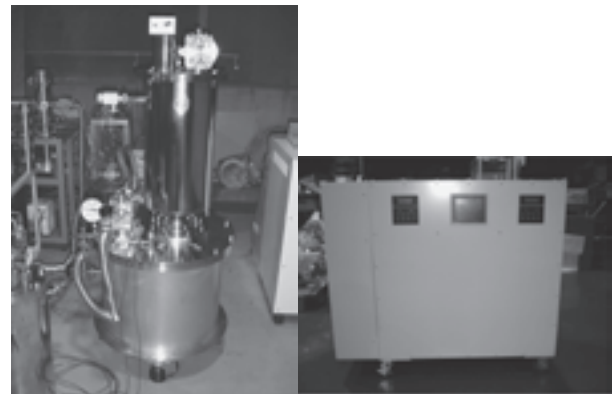


Fig.1 Modified GMJT cryocooler

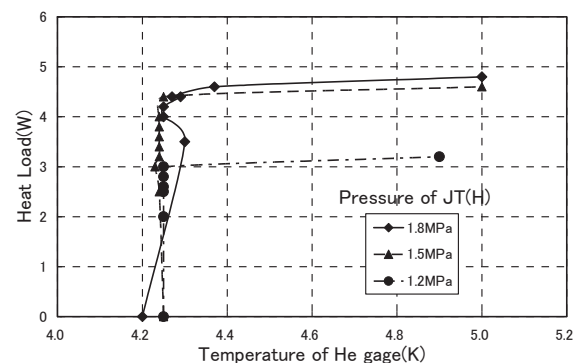


Fig.2 Cooling performance by changing JT(H) pressure

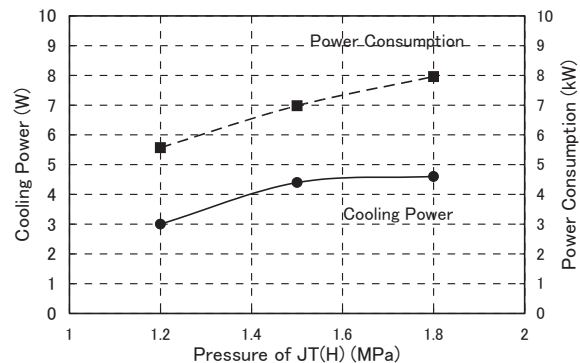


Fig.3 Cooling power and power consumption by changing JT(H) pressure

参考文献

1. N. Hirano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.71 (2004) p.71

可視化による液体 ³He 沸騰熱伝達の測定

Observation of Pool Boiling Heat Transfer in Liq. ³He by Visualization

片桐 政憲, 川田 草平, 大浜 佳一郎, 比嘉 剛己, 堀 純也, 藤井 佳子, 畑中 啓作 (岡山理大)
 KATAGIRI Masanori, KAWADA Sohei, OHAMA Keiichiro, HIGA Masaki, HORI Jun'ya, FUJII Yoshiko, HATANAKA Keisaku (OUs)
 E-mail: m_kata@d1.dion.ne.jp

1. はじめに

固体表面から液体への熱伝達は、沸騰熱伝達と呼ばれ、液体の状態によってその特性は大きく異なる。中でも、液体の核沸騰状態は他の状態に比べて良好な熱伝達特性をもっていることが知られているが、この状態における気泡の振る舞いは複雑であり、その伝熱機構について決定的な説明がなされていない。そこで核沸騰状態の伝熱機構を明らかにするために、上向き平面の伝熱面における液体 ³He の核沸騰状態をシャドウグラフ法を用いて詳細に観測し、撮影した画像から気泡径、発生頻度と熱伝達係数の関係について解析を行った。

2. 実験装置・方法

Fig. 1. に可視化セルを示す。伝熱体はヒーター線（線径:0.05 mm, 抵抗率:659.3 Ω/m）を 80 cm 巻きつけた直径 7 mm の無酸素銅製の円柱を用い、円柱の上部平面を伝熱面とした。伝熱面は粒度 0.3 μm のラッピングフィルムで研磨した後にリン酸で電解研磨を行いなめらかな面に仕上げ、測定セル底部に取り付けた。

実験は、核沸騰状態において伝熱面から熱流束を印加し、液体温度 T_L を変えながら、 T_L と伝熱面温度 T_w を測定し、そのときの伝熱面から発生・成長・離脱する気泡の様子を高速カメラを使用して撮影した。伝熱面から印加した熱流束 \dot{q} の値は、段階的に熱流速を増加させ液体温度 0.7 K において核沸騰を開始した熱流束値である $\dot{q} = 2.51 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ とした。

3. 測定結果

観測される気泡の径は 0.5 K 付近で平均 0.3 mm、1 K 付近で 0.15 mm であり、温度の上昇とともに平均的に小さくなっていった。また、熱伝達係数は温度の上昇とともに大きくなっていった。Fig. 2. は液体温度 T_L と気泡発生点数の関係である。気泡発生点数は、液体温度を上昇させると増加し、液体温度を下げていくと、発生点数は減少しないで増加する傾向が見られ約 0.7 K 以下になると急激に減少していた。

Fig. 3. に気泡直径と気泡発生頻度の関係を示す。図中に示している実線と破線はそれぞれ液体窒素、水の結果[1]である。核沸騰時の気泡発生に関しては、気泡発生頻度 f と離脱気泡直径 D に関係付けて平均的に次式で整理されている。

$$f \cdot D^n = C$$

ここで、 C は液体による定数、乗数 n は離脱気泡径 $D < 0.5 \text{ mm}$ の領域では $n = 2$ が妥当と Ivey [1] は結論付けている。液体 ³He の気泡発生頻度は、180 ~ 500 (sec⁻¹) に分布しており、気泡径が大きくなるとともに発生頻度は減少していた。同じ気泡径で液体窒素と比較すると、気泡発生頻度は液体 ³He のほうが大きくなった。また、図中に示した液体窒素や水の結果に比べ傾きが小さく、液体 ³He では乗数 n は 0.9 となった。

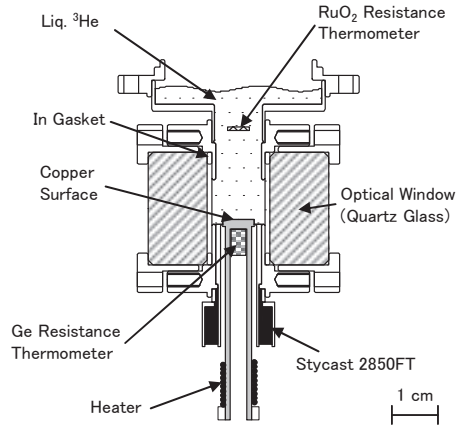


Fig. 1. Visualization cell

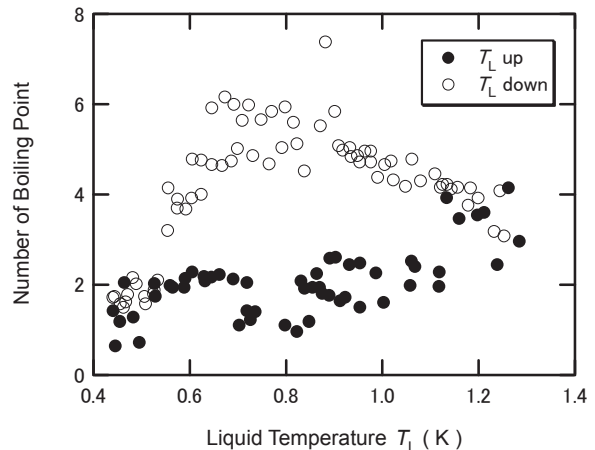


Fig. 2. Relation of boiling point and liquid temperature

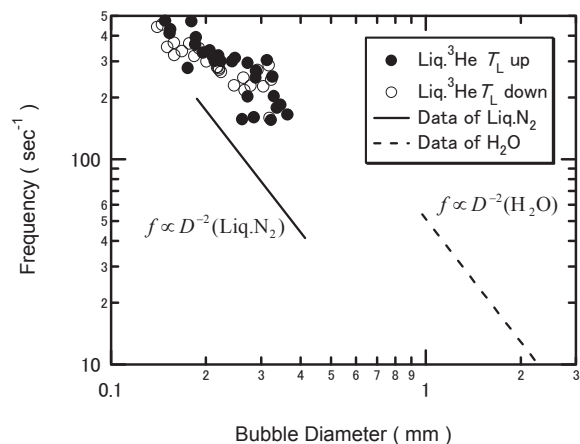


Fig. 3. Relation of bubble formation frequency and bubble diameter. Solid line is Liq.N₂. Broken line is H₂O.[1]

参考文献

1. Ivey, H.J.: Int. J. Heat Mass Transfer, 10 - 8 (1967) p.1023

狭小二次元流路中の He II 膜沸騰現象における蒸気泡挙動の変化

Variation of vapor behavior in He II film boiling in narrow two-dimensional channel

高田 卓, 村上 正秀 (筑波大学), 木村 誠宏 (KEK), 小林 久恭 (日大)

Suguru Takada, Masahide Murakami (Univ. of Tsukuba), Nobuhiro Kimura (KEK), Hisayasu Kobayashi (Nihon Univ.)

E-mail: s-takada@edu.esys.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで研究で狭小2次元流路中と開放3次元空間中における He II 膜沸騰の差異に注目し、その沸騰開始期における相変化界面の伝播について報告してきた。[1,2]

本発表では、定常状態における蒸気泡の挙動が圧力・温度に関係して変化する可視化結果について報告する。

2. 実験方法

Fig.1 のように、透明薄膜ヒータ (25 × 25 mm) を石英ガラスで覆った 2 次元流路を鉛直に設置した。両者間にはスペーサとして約 155 μm (室温) のカプトンテープを使用した。この流路を高速ビデオカメラによりシャドウグラフ法を採用して撮影した。また、微かな画像変化を鮮明に捉えるため画像処理によってバックグラウンドノイズ除去も併せて行った。ヒータへは高速アンプを用いて時間に対して方形波状に変化する電流を印加して 0.8 sec 加熱を行っている。

3. 実験結果

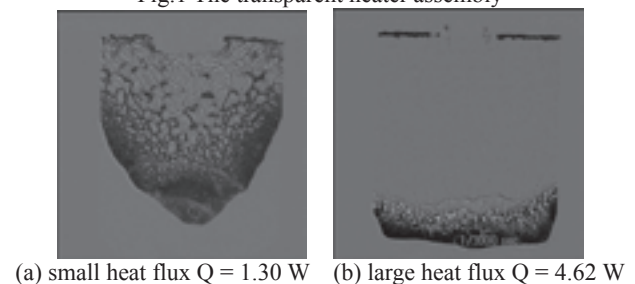
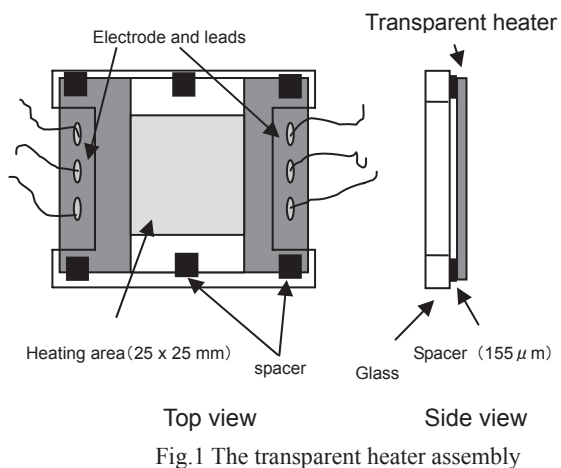
大気圧～飽和蒸気圧における様々な熱流束を印加した際の蒸気膜挙動を観測し、その挙動が大きく変化していくことを見出した。

Fig.2 a,b に大気圧下での典型的な沸騰様相を示す。下方に蒸気泡と液体の混合状態があり上方はドライアウトした蒸気の状態となる。熱流束を増やすと、ドライアウトする領域が広がり気液の混合状態の範囲は狭まる。これは、過去の加圧 He II の流路中における沸騰中の温度履歴の報告[3,4]とも符合している。

しかし、圧力を下げていくとこれまで温度計測などでは指摘されてこなかった現象が見られるようになる。大気圧下に典型的に現れる沸騰モードは圧力・熱流束を低くすると共に収縮・膨張運動を大きく繰り返すように変化していくが、9 kPa 程度以下の圧力では蒸気泡が生成してもすぐに崩壊して蒸気が完全に無くなるというサイクルを～10Hzで繰り返すようになる。飽和 He II 中では λ 温度に近い場合に過熱 He II-He I 界面を伴って沸騰を開始する。その際の蒸気泡挙動は 5 kPa 以上に見られる蒸気泡生成・崩壊のサイクルと同様がある。しかし、過熱 He II-He I 界面を伴わない通常の飽和 He II 沸騰の場合には沸騰開始後、蒸気泡が完全に崩壊してしまうことは無い。

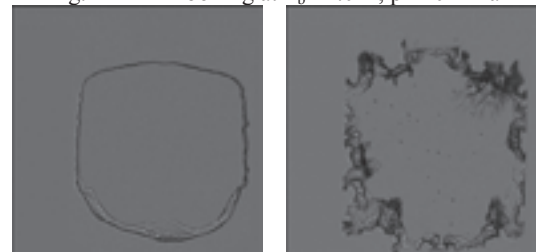
比較的高熱流束を印加した場合の様相も 13kPa 程度では、大気圧下でのそれと大きく違ってくる。下方に展開していた蒸気泡と液体の混合領域は姿を消し、全面にドライアウトするようになり、その界面は規則的に波打ち安定している。この安定

な蒸気膜は圧力を更に λ 圧力に近づけると、界面が激しく乱れ液が蒸気泡に侵入する様相を間欠的に見せるようになる (Fig. 3a,b)。これは膜沸騰が安定領域から不安定領域に移移する瞬間を捉えていると考えられる。このようなモード変化は飽和 He II 中でサイレント膜沸騰のような安定な沸騰状態は現れてこないなど、必ずしも開放空間の知見とは一致しない。これは流路の 2 次元性が蒸気膜の安定性に極めて大きな影響を及ぼしていると考えられる。



(a) small heat flux $Q = 1.30$ W (b) large heat flux $Q = 4.62$ W

Fig.2 Film boiling at $T_b = 2.0$ K, $p = 101$ kPa



(a) Stable film boiling (b) Unstable film boiling
Fig. 3 Film boiling at $T_b = 2.0$ K, $p = 5.6$ kPa, $Q = 2.41$ W

参考文献

1. 高田 他、2006 秋季低温工学・超伝導学会 2D-a02
2. 高田 他、2007 春季低温工学・超伝導学会 1D-a09
3. Z. Chen and S. W. Van Sciver, Cryogenics 27(1987)
4. T. Okamura et. al, Cryogenics 34 (1994)

超臨界圧強制対流ヘリウムの熱伝達 Forced Convection Heat Transfer of He I at Supercritical Pressure

京都大学 塩津 正博、土肥 大祐、白井 康之、濱 勝彦、
SHIOTSU Masahiro, DOI Daisuke, SHIRAI Yasuyuki, HAMA Katsuhiko (Kyoto Univ.)
E-mail: shiotsu@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

筆者等は、2007年春の本学会において、長方形断面(6 x 5 mm²)ダクト内面の向かい合う2面に貼り付けた平板発熱体における強制対流熱伝達を超臨界圧下(2.8 atm)で系統的に求め、実験結果を記述する表示式を提示した[1]。本研究では、これらのヘリウムの実験結果を水や炭酸ガスなどの実験結果に基づいた従来の表示式と比較した結果を報告する。

2. 実験装置・方法

実験装置や方法については、前報で説明したので省略する。

3. 従来の表示式

Bishop らの式 [2]、(H₂O, P=22.6-27.5 MPa, L/D=30-565)

$$Nu_B = 0.0069 \cdot Re_B^{0.90} \cdot Pr_B^{0.66} \cdot (\rho_w / \rho_B)^{0.43} \cdot (1 + 2.4D/L) \quad (1)$$

Krasnoshchekov らの式 [3]、(CO₂, P/Pr=1.06-1.33, L/D=30-50)

$$Nu_B = Nu_{0,B} \cdot (\rho_w / \rho_B)^{0.3} \cdot (\bar{C}_p / C_{p,B})^n \quad (2)$$

Swenson らの式 [4]、(H₂O, P=22.7-41.3 MPa, L/D=195)

$$Nu_w = 0.00459 \cdot (Re_w)^{0.923} \cdot Pr_w^{0.613} \cdot (\rho_w / \rho_B)^{0.231} \quad (3)$$

Yamagata らの式 [5]、(H₂O, P=22.6-29.4 MPa)

$$Nu_B = 0.0135 \cdot Re_B^{0.85} \cdot Pr_B^{0.8} \cdot F_c \quad (4)$$

Griem の式 [6]、(H₂O, P=22.0-27.0 MPa)

$$Nu_x = 0.0169 \cdot Re_x^{0.8356} \cdot Pr_x^{0.432} \cdot (\rho_w / \rho_B)^{0.231} \cdot \omega \quad (5)$$

ここで、添え字 B は、入り口温度、w は発熱体表面温度、x は混合温度 (T_B+T_w)/2 における値を示す。Nu_{0,B} は、Re と Pr の関数、 $\bar{C}_p = (h_w - h_B)/(T_w - T_B)$ 、 $Pr_w = \overline{C_p} \mu_w / \lambda_w$ 、 $Pr_B = \overline{C_p} \mu_B / \lambda_B$ 、

F_c と ω は修正係数を示す。

4. 筆者等の実験結果との比較

Fig. 1~Fig. 5 は、長さ 20 mm および 80 mm の発熱体における筆者等の実験結果 (P=2.8 atm, ΔT=8~100K) をそれぞれ(1)~(5)式の直線と比較して示す。Bishop らの式(1)は、唯一 L/D の項を含んでおり、比較的短い試験部における実験結果をこの中では一番よく記述している。Krasnoshchekov らの式(2)は、実験結果より低い、L/D がもっと大きければ近い値を示すのではないかと推測される。以後、やや特殊な長さ 20 mm の結果(L/D=3.7)を置いて、長さ 80 mm の結果(L/D=14.8)を中心に見ると、Swenson らの式(3)と Griem の式(5)は、ΔT=8K の結果に近いが ΔT が大きくなるに従い実験結果より大きくなり、ΔT=100K ではそれぞれ 40% および 50% 程度大きい値となっている。これは、従来の式が水のような比較的 ΔT/T_c が小さい実験結果に基づいているのに対し、ここで取り扱った液体ヘリウムの場合、はるかに広範囲となっていることが原因ではないかと考えられる。山県らの式(4)は、臨界液温近傍で実験結果よりはるかに低い値となり問題がある。Fig. 6 に先に報告した筆者等の表示式と実験結果の比較 [1] を示す。実験結果を良く記述しており、有効性が確かめられた。

参考文献

- 1) Doi et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol.76, p.52, p.53 (2007)
- 2) A.A. Bishop et al., WCAP-2056-P, Part-III-B, February (1964).
- 3) E.A. Krasnoshchekov et al., Teplofizika Vysokikh Temperatur, 4, 389-398 (1966).
- 4) H.S. Swenson et al., Journal of Heat Transfer, 87, 477-484 (1965).
- 5) K. Yamagata et al., Int. Journal of Heat & Mass transf., 15, 2575-2593 (1972).
- 6) H. Griem, Dissertation an der Technischen Universitate Munchen (1995)

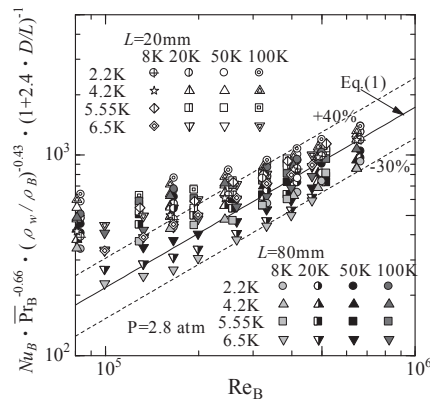


Fig.1 Comparison with Bishop's equation.

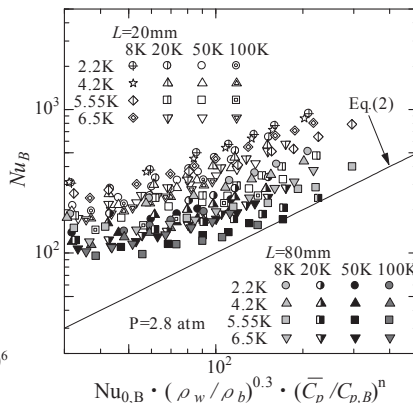


Fig.2 Comparison with Krasnoshchekov's equation.

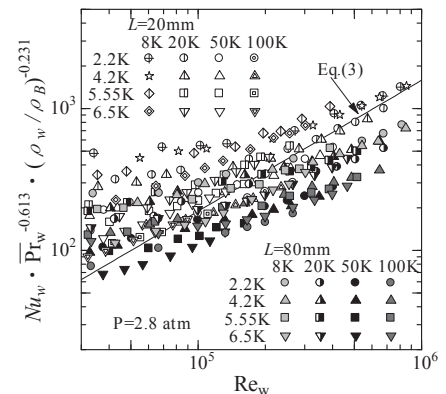


Fig.3 Comparison with Swenson's equation.

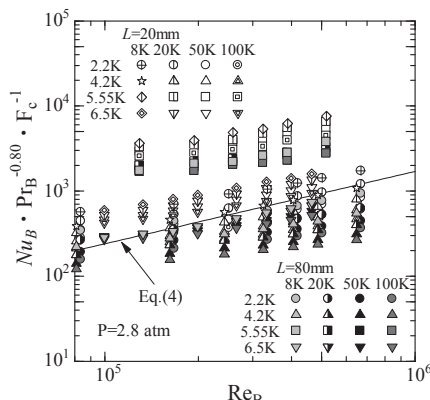


Fig.4 Comparison with Yamagata's equation.

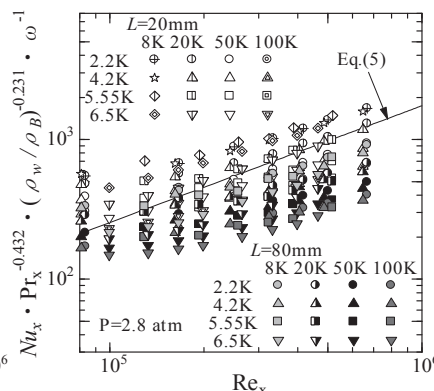


Fig.5 Comparison with Griem's equation.

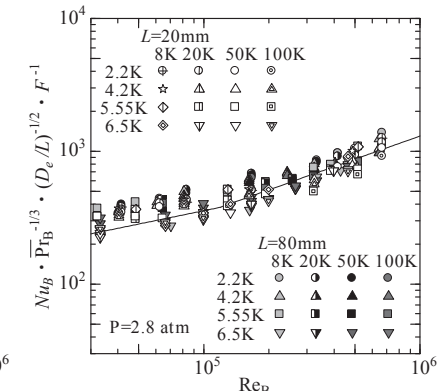


Fig.6 Comparison with author's equation.

超流動ヘリウムの狭路付きダクト一端の平板からの熱伝達3次元数値解析 — 狭路形状の影響 —

3-D Numerical Analysis of Heat Transfer from a Flat Plate in a Duct
with Contraction of Various Shape filled with He II

土肥 大祐, 白井康之, 塩津正博(京大)
DOI Daisuke, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.)
E-mail: shirai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 緒言

He II 冷却超伝導マグネットの設計に際しては、He II の熱伝達に対する正確な理解が求められる。筆者等は、2次元数値解析コードSUPER-2D¹⁾を開発し、実験との比較検討によってその有効性を確かめると共に、3次元化を進め、十分に安定なコードSUPER-3D²⁾を開発した。本研究では、この解析コードを用いてHe II 流路に狭路(Contraction)を1箇所設定した片側開放断熱長方形ダクトの一端に位置する平板発熱体における定常臨界熱流束をSUPER-3Dで解析し、狭路形状(開口面積は一定)を変えて3次元的效果が臨界熱流束に与える影響について検討した

2. 解析モデル

モデルはFig. 1に示す全長 100 mm の他端開放長方形ダクト(ダクト断面 32x10 mm)であり、一端に片側断熱平板発熱体が設けられている。中心軸対称性を考慮して、図中にシェーディングを施した1/4部分について計算をおこなった。ダクト中央($L_1=L_2=48$ mm)に狭路(Contraction)を設け、その面積を 80mm^2 一定として形状をFig.2に示すように4種設定して解析を行った。ケース(1)は、以前Super2Dで2次元解析したオリフィス(Orifice)と同様となる¹⁾。超流動ヘリウムのバルク液温は 2.0K、大気圧 101.3kPaとした。

3. 数値解析

大気圧下の超流動ヘリウムを対象とし、計算には二流体モデル(Khalatnikov理論に基づく二流体モデル基礎式)に基づく三次元熱流動数値解析コードSUPER-3Dを用いた²⁾。

数値解析では、上述の基礎方程式を有限差分法により陽的に解いた。空間刻みはx,y,z方向すべて 0.5mmの等間隔スタガード格子で、時間刻みは 2.0×10^{-6} secとした。平板発熱体から入力する初期熱流束として臨界熱流束よりも低い値を与え、発熱体表面付近の液温の上昇率が十分に小さくなれば系が定常状態に達したとみなして、入力熱流束を僅かずつ上昇させ、発熱体表面に接しているHe II の温度が λ 温度に達した時の熱流束を臨界熱流束とした。

4. 解析結果

Fig. 3 に解析結果の一例として、狭路形状(2)(10x8mm)の臨界熱流束となったときのダクト内熱流束ベクトルとそのストリームラインを示す。ベクトルは所々で渦を形成し、3次元的に複雑な分布を示していることがわかる。

各狭路形状に対して求めた臨界熱流束の結果を、狭路形状に対応した等価直径³⁾に相当する $w_2 h_2 / (w_2 + h_2)$ に対してプロットした図をFig.4に示す。狭路の開口面積は一定にもかかわらず、等価直径が大きくなるほど臨界熱流束は小さくなる事が分かる。このことは、3次元解析によって初めて示される結果である。また、この結果は、以前報告した超流動ヘリウム内においた、面積が同一な平板発熱体の形状による臨界熱流束が、等価直径が大きくなると小さくなると

いう実験結果に対応する。

参考文献

- 1) H. Tatsumoto et al., Cryogenics, 42 (2002), 9
- 2) D.DoI et al., abst of CSJ Conference, Vol.76, 1D-a06 (2007)
- 3) H.Tatsumoto et al, ICEC17, 683-690 (1998)

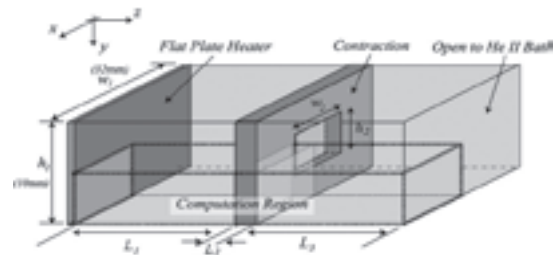


Fig.1 Schematic of the Duct with a Flat Plate Heater and a Contraction

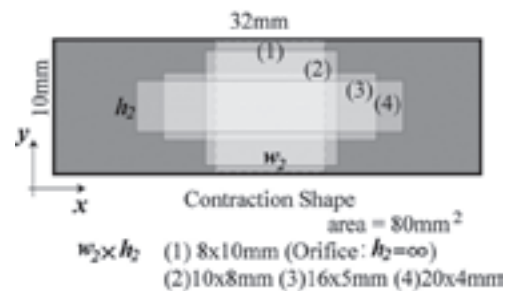


Fig.2 Cross-sectional view of Duct (Contraction shape)



Fig.3 Example of simulation result. (Heat flux vector and its stream-line in case(2))

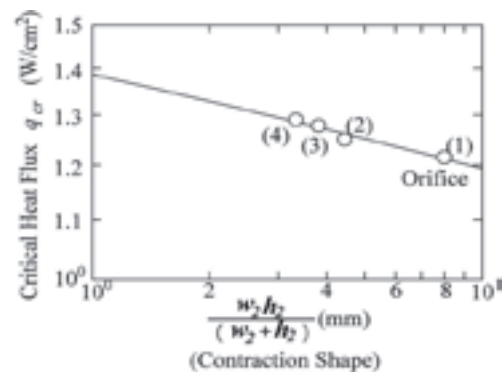


Fig.4 Critical Heat Flux with respect to contraction shape (equivalent radius).

He II 二次元流路における熱伝達特性
 - λ 点圧力以下の混合状態 -

Heat transfer characteristics in two-dimensional channel filled with He II.
 - Mixed state below the λ -point pressure -

高橋光男、芦森文明、栗村紀明、田中俊男、小林久恭(日大理工)

TAKAHASHI Mitsuo, ASHIMORI Takeaki, KURIMURA Noriaki, TANAKA Toshio, KOBAYASHI Hisayasu (Nihon-U,CST)

E-mail: t3203203202000@yahoo.co.jp

1. はじめに

これまでに、He II 二次元流路における熱伝達特性は、液槽圧力により大きく異なり一般的に λ 点圧力 P_λ 以下の方が良いことを報告してきた¹⁾。本研究においては、 λ 転移後に現れる混合状態に注目し P_λ 以下における熱伝達特性の機構を調べた。その結果、過熱 He II、さらには過熱 He I も過渡的に発生し、混合状態に影響していることが分かった。

2. 実験装置

熱伝達特性の測定は、銅円盤(半径 10 mm、厚さ 5 mm)の側面下方に巻いたサーモfoilから供給された熱流束 Q が、加熱面を通して流路に放出された後、流路周端で液槽に解放される構造の円形流路を用いて行われた。銅円盤は真空断熱されている(Fig.1)。円形流路は間隙 $g = 0.05 \sim 0.5$ mm を隔てた絶縁盤(半径 11 mm)の間に形成される。銅加熱体温度 (T_{C1}, T_{C2}) と流路内 He 温度の測定にはセルノックス温度計と RuO₂ チップを用いた。装置は加熱面が上向きになるように加圧 He II 生成用の二槽式容器に固定し、異なる液槽圧力 P_b および、液相温度 T_b の He で冷却した。また、He の圧力 P_b および流路内圧力 P_c を測るために、In-Situ 圧力計を取り付けた。

3. 実験結果と検討

Fig.2に T_{C1} の Q に対する変化を示す。沸騰の始まる熱流束 Q_N までの熱伝達特性は液槽圧力によって変わらないことを確認した。これは流路に過熱 He II と過熱 He I が現れることによる^{1, 2)}。 Q_N から膜沸騰の始まる熱流束 Q_F の範囲にある混合状態が示すように、熱伝達特性は P_λ 以下(実線)の方が P_λ 以上(点線)に比べ極めて良いことが分かる。

Fig.3 には、混合状態の詳細を調べるため、 Q をある値に固定し、 T_{C1} と P_c の時間変化を観測した結果の一例を示した。 T_{C1} は、過熱 He II と過熱 He I から成る中間状態³⁾の温度 $T_{C1}^{High}(T_{C1}^H)$ と、 T_{C1}^H から約 0.25 度低い温度 $T_{C1}^{Low}(T_{C1}^L)$ との間を往復している。このとき P_c は、 T_{C1} とは逆位相になっている。これらの振る舞いから、沸騰による圧力上昇時に加熱体は冷却され、続いて再生される過熱が加熱体の過渡的な温度上昇をもたらしていることが分かる。この過熱が生成崩壊される過程で過熱 He I も現れることにより、一種のポンピング効果が働き、冷却は促進されていると考えられる。

4. 参考文献

- 1) M. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.173
- 2) H. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.35
- 3) H. Kobayashi, et al.: Proc. of ICEC 21 (2006) 389

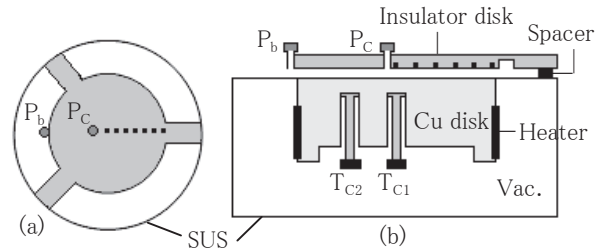


Fig.1 Two-dimensional channel with radial heat flow.

(a) Top view.: Pressure gauge P_c is buried in an insulator.

(b) The view cut along the diameter.: The heater side is insulated with vacuum.

Marks (●) indicate positions of thermometers.

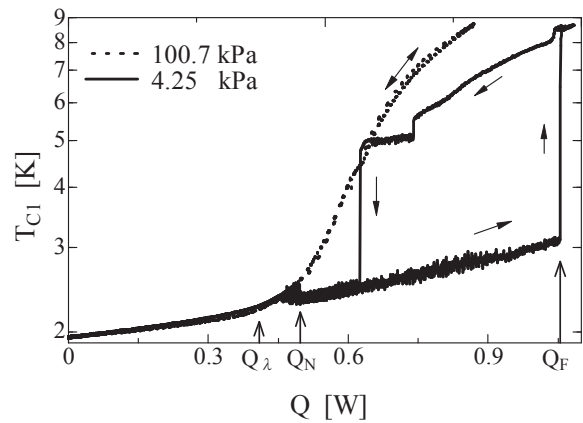


Fig.2 Heat transfer characteristics, Q vs. T_{C1} .

The scale of the vertical axis is logarithmic.

Q : The heat flux supplied from the side of the disk.

Gap distance of 2D-channel $g = 0.05$ mm.

The bath temperature $T_b = 1.95$ K.

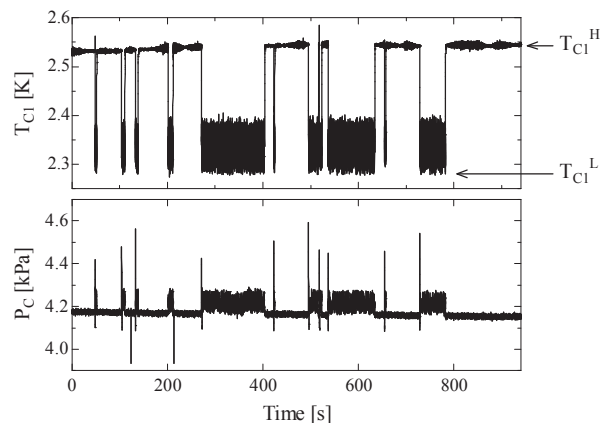


Fig.3 Behaviors of T_{C1} and P_c in the mixed state.

$Q = 0.5$ W, $g = 0.05$ mm, $T_b = 1.95$ K.

He II 二次元流路における熱伝達特性 —He I相の影響—

Heat transfer characteristics in two-dimensional channels filled with He II - The influence of He I phase -

芦森文明, 高橋光男, 栗村紀明, 小林久恭 (日大理工) 高田卓, 村上正秀 (筑波大学), 木村誠宏 (KEK)
 ASHIMORI Takeaki, TAKAHASHI Mitsuo, KURIMURA Noriaki, KOBAYASHI Hisayasu (Nihon-U, CST), TAKADA Suguru,
 MURAKAMI Masahide (Univ. of Tsukuba), KIMURA Nobuhiro (KEK)
 E-mail:takeaki_a@yahoo.co.jp

1. はじめに

これまでに、我々は加熱体に良導体を用いたHe II二次元流路の熱伝達特性を測定してきた。加圧He II (He II_p) 中の熱伝達特性において、熱流束 Q を増加していくと中心部の温度が λ 点温度に達するとHe Iが発生する(この Q を Q_λ とした)。このように二次元流路には温度勾配が生じ、同心円状に異なる相が存在することになる。この状態を中間状態とした。さらに Q を増加させると加熱面中心で沸騰が起きる(この Q を Q_N とした)。またsubcool He Iが存在しない λ 点圧力以下のHe II (He II_s) では、superheat He IIおよびsuperheat He IIによって中間状態が生じている¹⁾。

本研究では異なるギャップの流路において He I および superheat He I が熱伝達特性に及ぼす影響について調べた。

2. 実験装置

熱伝達特性の測定は、Fig.1 に示した銅円盤(半径 $r = 10$ mm、厚さ $d = 5$ mm) の側面下方に巻き付けたサーモオイルから供給された Q が、加熱面を通して放射状に放出された後、流路周端で液槽に解放されるディスク状の二次元流路を用いて行なった。流路はギャップ ($g = 0.05 \sim 0.50$ mm) を隔てた絶縁盤(半径 $R = 11$ mm) の間に形成される。温度計は絶縁盤表面に中心から外側へ配置し、各位置の温度を $T_1 \sim T_6$ とした。

3. 実験結果と検討

Fig.2 にHe II_pとHe II_sの Q に対する T_1 の変化を示す。 T_1 は Q の増加と共に上昇するが、 Q_λ に達すると流路中心部にHe I相が発生し、 T_1 の上昇率が変化する変曲点が現れる。 $g = 0.20$ mm以上の流路では Q_λ 以上で Q の増加に対しても T_1 が変化しないplateau領域が現れるのに対し、 $g = 0.20$ mm以下の狭い流路では Q_λ で T_1 に変曲点を持つが、plateauは現れない。plateauは、熱伝導の悪いHe Iが加熱面上に薄く発生し、 T_1 に熱が伝わりにくくなることに起因して起きる。

またHe II_sの場合にも、He II_pと同様に Q_λ で変曲点を持つことからsuperheat He IIによる部分的な熱絶縁が起きていることになる。 $g = 0.50$ mmの結果は、規模の大きなギャップにおいても過熱相が形成され、熱伝達に影響する可能性を示唆している。He I層に発泡が起きるとsuperheat He I相が崩壊し、流路内の温度は飽和蒸気圧線温度まで下がる。

Q_λ の変曲点やplateauは、加熱面上にHe I相が薄く広がることによると考えられ、その広がり熱伝達への影響を調べることができる。Fig.3 に Q_λ で規格化した Q に対するHe I相およびsuperheat He I相の半径 r_λ を示す。なお、 r_λ は $T_1 \sim T_6$ の位置における変曲点から、および、可視化映像から直接求めた。また図中の点線と実線はGorter-Mellinkの式をディスク状二次元流路に適用した Q/Q_λ の関数として表した r_λ の近似式である。詳細は当日説明する。

4. 参考文献

- 1) H.Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.72 (2005) p.35

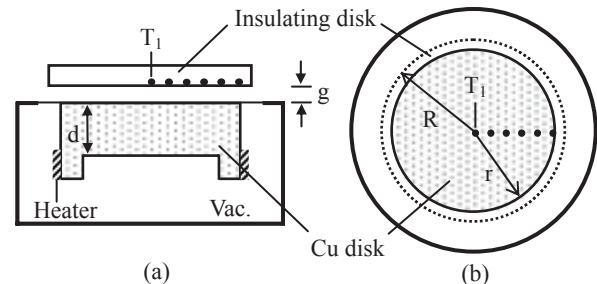


Fig.1 Two-dimensional channel with radial heat flow. (a) The cut view: The heater side of the copper disk is insulated with vacuum. (b) Top view: Flat copper surface. Marks (•) indicate positions of thermometers. Q: the total heat flux supplied from the side of the disk.

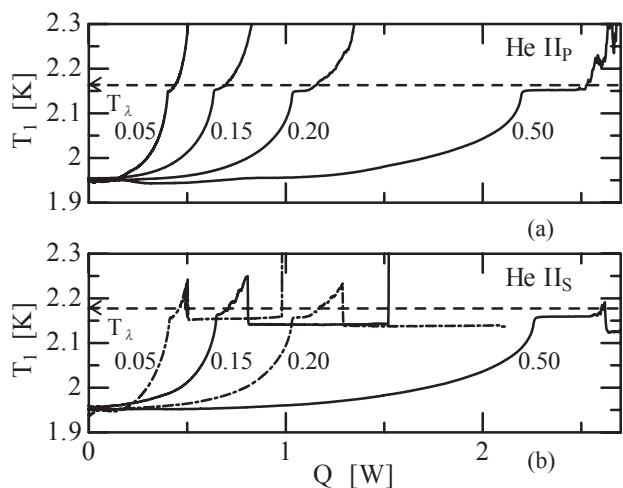


Fig.2 Heat transfer characteristics Q vs. T_1 . Bath pressure is at 101.3 kPa in He II_p (a) and is ranging from 4.39 to 4.49 kPa in He II_s (b). Numbers in figures show the gap distance in mm.

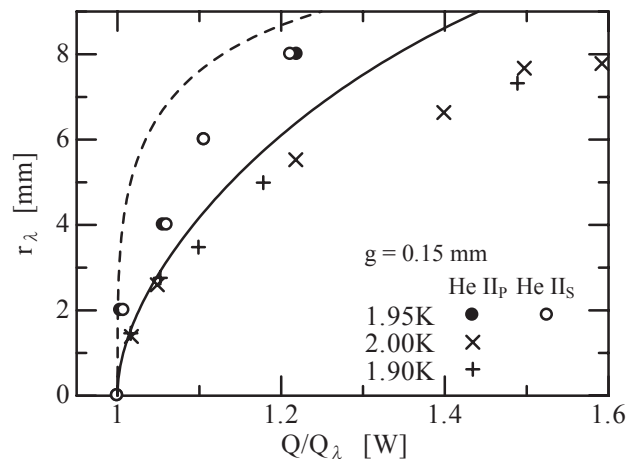


Fig.3 The size of λ -ring as a function of Q . Q is normalized with Q_λ . Data shown with marks \times and $+$ are obtained by means of the visualization technique.

良導体から成る He II 二次元流路における過熱相の安定性

The stability of superheat phases of He II and He I in two-dimensional channels composed of a good conductor

栗村 紀明, 高橋 光男, 芦森 丈明, 田中 俊男, 小林 久恭(日大理工)

KURIMURA Noriaki, TAKAHASHI Mitsuo, ASHIMORI Takeaki, TANAKA Toshio, KOBAYASHI Hisayasu (Nihon-U, CST).

E-mail: chronomagiusnk@yahoo.co.jp

1. はじめに

われわれは、 λ 点圧力より低い He II における二次元流路の定常的な熱伝達特性を報告してきた。これまでの報告で膜沸騰が起きる臨界熱流束 Q_f 以下の熱伝達特性を「Kapitza 状態」、「過熱状態」、「中間状態」、「混合状態」の領域に分類した¹⁾。ここで「Kapitza 状態」から「過熱状態」に移る熱流束を Q_s 、「過熱状態」から「中間状態」に移る熱流束を Q_λ 、「中間状態」から「混合状態」に移る熱流束を Q_n とする。またわれわれは良導体から成る二次元流路において、 λ 点圧力以下の He II における熱伝達に過熱相が見かけ上安定化されて介在する特性を見出している¹⁾。本研究では、「過熱状態」及び「中間状態」が準安定な過熱相から形成されていることを証明するために、人為的に加えた擾乱に対する各状態の安定性を調べた。

2. 実験装置

熱伝達特性の測定は、銅円盤 ($r = 10 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ mm}$) の側面下方から一様に供給された熱流束 Q が、過熱面を通して流路に放出された後、周端で液槽に解放される構造の円形流路を用いて行われた。また、銅円盤は真空断熱されている (Fig.1)。二次元流路は間隙 $g = 0.15 \text{ mm}$ を隔てた絶縁盤 ($R = 11 \text{ mm}$) の間に形成される。銅加熱体温度 (T_{c1} , T_{c2}) と流路内の温度の測定にはセルノックス温度計と RuO_2 チップを用いた。装置は加熱面が上向きに加圧 He II (He II_p) 生成用の二槽式容器に固定し、異なる液槽圧力 P_b および、液相温度 T_b の He で冷却した。また、He の圧力 P_b 及び流路内圧 P_c を測るために、In-Situ 圧力計を取り付けた。なお、機械的擾乱を加える実験も並行して行いクライオスタットに金属片を当て、過熱相が崩壊するのに必要なポテンシャルエネルギーをパラメータとし安定性を評価した。

3. 実験結果と検討

階段状に Q を印加したとき (Fig.2(b)) の T_{c1} の時間変化を Fig.2(a) に示す。印加とともに T_{c1} は急上昇した後一定になる。この T_{c1} の一定値は中間状態の温度に相当する。すなわち中間状態は過熱相から成っているのでこの一定値は過熱相から形成されていることになる。ある時間が経過すると過熱相は崩壊し混合状態へと移る。この混合状態に移るまでの時間 (Lifetime) を t_l とする。

Fig.3 に Q と t_l の関係を示す。 Q は Q_f で規格化している。ここで、 Q_f は定常的な熱伝達特性において混合状態への転移後、 Q の減少時に再び中間状態に戻る熱流束である。ただし Q_f は $Q_\lambda < Q_f < Q_n$ の領域にある。 $Q (> Q_n)$ が大きいところから Q_f に近づくにつれ t_l は長くなる。 Q_f 以下においては測定時間内に過熱相は壊れなかった。(Fig.3 中の矢印)

このように Q_f 以下 ($Q_s < Q < Q_f$) における過熱相は熱的擾乱では壊れないので機械的擾乱を加えて安定性を評価した。その結果、 Q_f 以下では擾乱後過熱相は一旦は壊れるが速やかに回復することを見出した。

これらの事実は、「過熱状態」及び「中間状態」には準安定な過熱相が関わること、及び、良導体から成る二次元流路において過熱相が見かけ上安定化されていることを意味する。なお機械的擾乱に関する詳細は当日報告する。

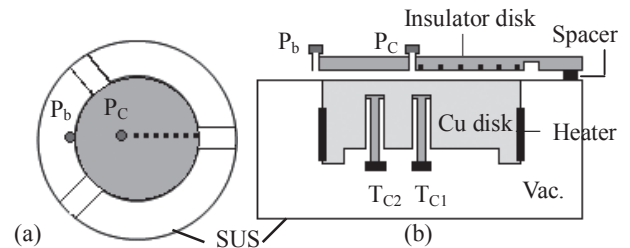


Fig.1 Two-dimensional channel with radial heat flow. (a) Top view, (b) The view cut along the diameter : The heater side is insulated with vacuum. P_c , P_b : In-Situ pressure gages. Q : The heat flux supplied from the side of the disk.

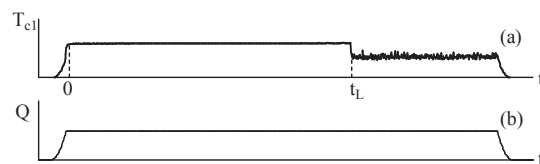


Fig.2 Temperature change in T_{c1} after the step-wise heat input. (a) T_{c1} as a function of time t , (b) Q vs. t .

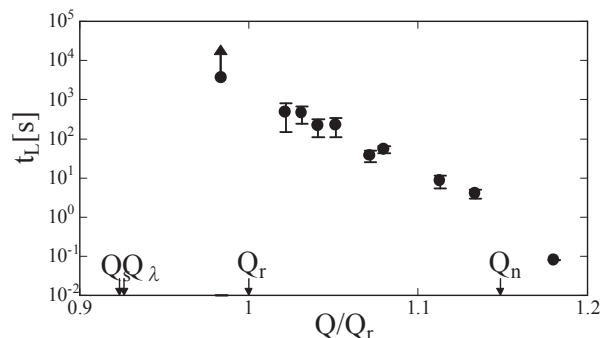


Fig.3 Lifetime of the superheat state as a function of Q . Q vs. t_l . Q is normalized with Q_f . T_b : The bath temperature 1.95 K. P_b : The bath pressure 4.25 kPa. Marks (●) indicate mean values. The ranges shown with bars express the standard error.

4. 参考文献

1) H. Kobayashi, et al. : Proc. of ICEC 21 (2006)389

車載を想定した高断熱性能 LH2 タンの研究開発 R&D of the High Insulated LH2 Tank for Mobile Use

神谷 卓伸, 前村 孝志, 中村 亮, 仲西 俊之 (MHI)

E-mail: ryo1_nakamura@mhi.co.jp

1. 概要

温暖化現象を例とした世界的な環境・エネルギー問題に対し、水素エネルギーは、CO₂ や NO_x の排出がなくクリーンなエネルギーであるため、今後ますます有効利用が期待される。実際に水素エネルギーを利用する上では、水素をどう貯蔵するかがポイントである。水素の貯蔵方式としては、一般的に3方式(高压ガス貯蔵タンク、液体水素貯蔵タンク、水素吸蔵合金)にわけられるが、いずれも一長一短があり、水素貯蔵技術に関しては、世界的に見ても、高性能、軽量、形状のフレキシビリティを追求した技術開発段階と考えられる。

このうち、輸送効率の面で有効な液体水素貯蔵に着目し、課題である蒸発ガス(BOG)を低減させるため、タンク構造、断熱方法を向上させた小型タンク(車載を想定した 100 リットルクラスタンク)を製作し、液体窒素、液体水素での試験検証を実施した。試験結果、車載用小型タンクとしては、欧州メーカーレベルと同等以上の性能(蒸発ガス発生率で評価する)を実現した。

なお、本研究開発は、NEDO(新エネルギー・産業技術開発機構)からの委託研究である。

2. 研究の背景

液体水素貯蔵の課題である蒸発水素ガス、これを低減させるタンクを研究開発し、液体水素貯蔵技術の有効性、今後の利用向上に繋げる。

3. 研究開発内容

(1) 液体水素貯蔵タンクの製作

車載用タンクとしては、ヨーロッパ EIHP (European Integrated Hydrogen Project)においてドラフトが示されており、この条件(衝撃加速度等)を満足させることを前提として、液体水素搭載容積100リットルクラスのタンク(真空2重構造タンク)を製作した。性能上、特に重視した点は、タンク断熱性能である。タンクへの入熱要因としては、熱伝導と輻射熱が挙げられ、これらを如何に低減させるかによりタンク性能が定まる。(開発目標を図 3-1 に示す)

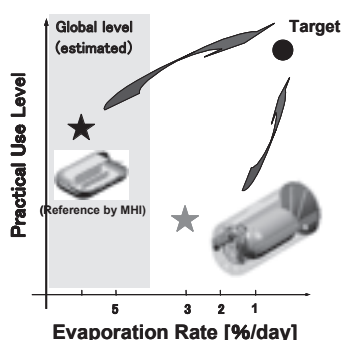


Fig. 3-1 Target of Evaporation Rate

工夫した点は、内槽タンク(液体水素を貯蔵するタンク)を熱伝導率の低い材料(CFRP)を用いたロッド(サポートロッド)で支える方式としたこと、及び内槽タンクと外槽タンクとの間に挿入する多層断熱(MLI)の装着方法である。(図 3-2、図 3-3)



Fig. 3-2 3D Model



Fig. 3-3 High Insulated Tank

(2) 液体水素貯蔵タンクの試験検証

タンクの断熱性能を検証するために、外槽パネル溶接前に、タンクを真空チャンバへ挿入し、内槽タンクへ液体窒素を充填した条件で BOG 発生率の計測、タンク各部の温度計測により、タンクへの入熱量と経路を明確にした。試験結果、サポートロッドからの入熱量は 0.3W(計算値 0.3W)と非常に低いレベルを達成でき、熱伝導による入熱を押さえることが可能となった。

この試験の後、外槽パネルを溶接し、タンクの製作を完成させ、内槽タンクへ液体水素を充填し、液体水素環境下でタンクからの蒸発ガス量の計測を実施した。試験結果、タンク性能(BOG 発生率)として、欧州メーカーレベルと同等以上の性能まで、タンクへの入熱量を低減できていることを実証確認できた。(図 3-4)

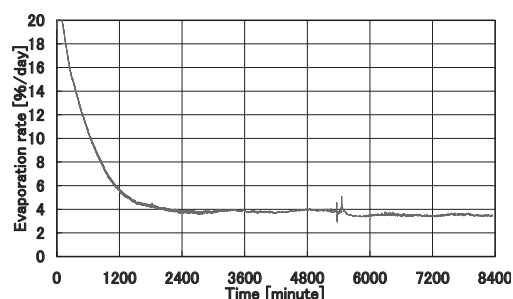


Fig. 3-4 Evaporation Rate Profile

4. まとめ

車載用(100リットルクラス)液体水素貯蔵タンクの課題である蒸発ガス発生率を低減させることを目的として、高断熱性能タンクを製作した。液体窒素、液体水素を用いた試験により、タンクへの入熱経路、入熱量配分を明確化するとともに、最終的に、液体水素を充填した試験により、欧州メーカーレベルと同等以上の性能(蒸発ガス発生率で評価する)を実現した。

今後は、車載用として求められる軽量化や形状フレキシビリティを実現させるタンクの開発、車載用タンクの実用化に向けた取組みに繋げていく。

参考文献

1. EIHP II Final Technical Report
2. Friedel Michel, et al: Liquid Hydrogen Technologies for Mobile Use, WHTC 2006

ボイルオフガス低減に向けたスラッシュ水素製造、輸送、貯蔵技術の研究開発

R&D of Advanced Boil-off Reduction Technologies with Slush Hydrogen

前村 孝志, 神谷 卓伸, 中村 亮, 中道 憲治 (MHI)

E-mail: takashi_maemura@mhi.co.jp

1. 概要

2012 年までの国際的な温室効果ガス削減目標を定めた「京都議定書」の目標達成に向け、また、日本と欧州連合によるベルリンでの首脳協議結果(地球環境を害する温暖化ガスを 2050 年に少なくとも半減する)に向け、全世界的な取組みを行うことが重要である。これら地球規模での環境・エネルギー問題に対して、今後、温室効果ガスを含まないエネルギーである水素へエネルギー需要が変化していくことはかけがえない地球を守る点からも必要と考えられる。

実際に水素エネルギーを利用する上では、水素をどう貯蔵するかがポイントであり、水素の貯蔵方式(一般的に 3 方式 : 高压ガス貯蔵タンク、液体水素貯蔵タンク、水素吸蔵合金)の中でも、輸送効率の面で有効な液体水素貯蔵に着目し、課題である「蒸発ガス(BOG)ロス」、これを飛躍的に低減させること、また蒸発ガスの発生をゼロにする期間を確保することを目的として、スラッシュ水素(固液混合水素, SLH2)を利用した技術開発をおこなった。スラッシュ水素の製造、輸送、貯蔵に関し、世界的にも例のない技術データを取得した。今後、スラッシュ水素の製造、輸送、貯蔵をモデル化した装置により、車載を想定した小型タンク(100 リットルクラス)へスラッシュ水素を充填する試験を実施する。

なお、本研究開発は、NEDO(新エネルギー・産業技術開発機構)からの委託研究である。

2. 研究の背景

液体水素貯蔵の課題である蒸発水素ガス、これを低減させる観点でスラッシュ水素を活用することに着目し、スラッシュ水素に関わる技術開発を行うことにより、今後のスラッシュ水素利用向上に繋げる。

3. 研究開発内容

(1) スラッシュ水素の製造

製造方法としては、一般的なオーガ法(液体水素(LH2)と熱交換することにより固体水素を生成し、この固体水素を切削することでパウダー状の固体粒子を製造する)(図 3-1)を用いた。ここで、液体水素中の固体粒子の密度(重量固化率)を向上させるために固体粒子径を数十 μm 迄コントロールする技術により、重量固化率を 50~60% 迄向上させることができた。(図 3-2)

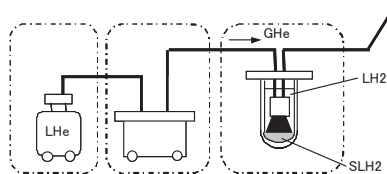


Fig. 3-1 Test Configuration

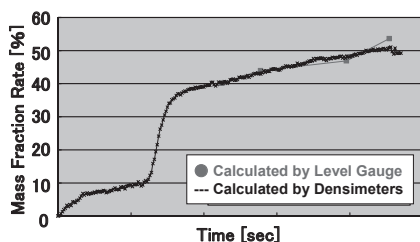


Fig. 3-2 Test Data

(2) スラッシュ水素の輸送/貯蔵

スラッシュ水素を移送、貯蔵させるためには、貯蔵側の容器内を 3 重点(13.8K, 53Torr)にするか、容器内の圧力から定まる飽和温度を維持した状態でスラッシュ水素を移送する必要があり、この点については、試験データ取得中である。

スラッシュ水素の貯蔵については、大気圧下の液体水素(20.3K)に比べ、蒸発ガス(BOG)発生率を 4 割近く低減できることを実証確認した。(図 3-3) また、貯蔵容器内を一樣な過冷却状態にすることで BOG 発生率をゼロとすることができるとも実証できた。(図 3-4) 今後、車載を想定した小型タンクへスラッシュ水素を充填する試験を実施する。

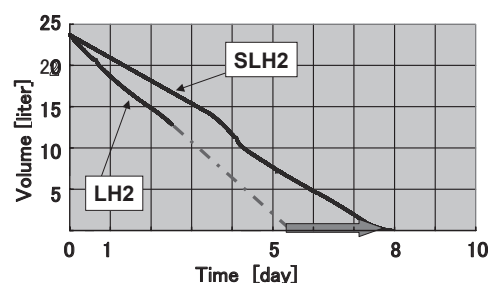


Fig. 3-3 Test Data

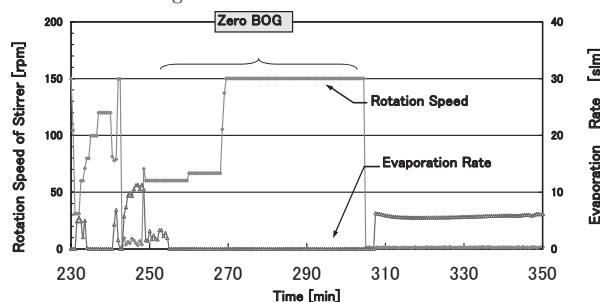


Fig. 3-4 Test Data

4. まとめ

スラッシュ水素の製造、輸送、貯蔵に関し、重量固化率 50~60%の製造、スラッシュ水素による BOG 低減効果、及び BOG ゼロ化技術の実証を行うことができた。スラッシュ水素製造、輸送、貯蔵をモデル化した装置システムにより、今後は、貯蔵先である車載を想定した小型タンク(100リットルクラス)へスラッシュ水素を充填することでスラッシュ水素による BOG 低減効果を確認する。

参考文献

1. D.E Daney, et al: Hydrogen slush production with a large auger, Advanced in Cryogenic Engineering, vol. 35
2. D.E. Daney, et al: Slush hydrogen pumping characteristics using a centrifugal-type pump, Advanced in Cryogenic Engineering, vol. 14
3. D.B. Mann, et al : Liquid-Solid Mixtures of Hydrogen near the Triple Point, Advanced in Cryogenic Engineering, vol. 11
4. Hiroshi Fujiwara ,et al: Experiment on slush hydrogen production with the auger method

赤外線天文衛星「あかり」冷却系の開発(2) ～軌道上での実績～ Development of cryogenic system for infrared astronomical satellite AKARI (2) ～Flight cooling performance～

吉田 誠至, 榑崎 勝弘, 平林 誠之, 恒松 正二(住友重機械);

村上 浩, 中川 貴雄, 大西 晃, 松本 敏雄, 金田 英宏, 塩谷 圭吾(JAXA); 村上 正秀(筑波大)

YOSHIDA Seiji, NARASAKI Katsushi, HIRABAYASHI Masayuki, TSUNEMATSU Shoji (SHI);

MURAKAMI Hiroshi, NAKAGAWA Takao, OHNISHI Akira, MATSUMOTO Toshio, KANEDA Hidehiro, ENYA Keigo (JAXA);

MURAKAMI Masahide(University of Tsukuba)

E-mail: sij_yoshida@shi.co.jp

1. はじめに

「あかり」は宇宙航空研究開発機構が中心となって開発し、2006年2月22日に打上げられたわが国初の赤外線天文衛星である。「あかり」のミッション部には望遠鏡と赤外線検出器が搭載され、これらの機器は超流動ヘリウムにより7K以下に冷却される。また、「あかり」は液体ヘリウムの保持寿命を延ばすために2段スターリング冷凍機を2台搭載したハイブリッドな冷却方式を採用している[1] [2]。

前回の講演[3]では、冷却系の設計、地上試験結果及び打上げ後半年までの軌道上実績について述べた。本講演では、その後の「あかり」冷却システムの軌道上での実績について述べる。

2. 軌道上での実績

軌道上での冷却系の温度プロファイルを Fig.1 に示す。

液体ヘリウムは 2007 年 8 月 26 日まで保持され、当初目標の 1 年を大きく上回り 1.5 年の観測を実現し、この間、望遠鏡及び赤外線観測装置(SIA: Scientific Instrument Assembly)を 7K 以下に冷却することができた。ヘリウム保持期間中の各部の温度を Table 1 にまとめた。各部の温度は解析予測とよく一致し、軌道上での熱設計の妥当性が確認できた。ヘリウムの保持期間についても、解析予測とよく一致した。2 段スターリング冷凍機の冷却温度の変動は 2K 以下で安定しており、駆動時間 13,000 時間を超え現在も駆動中である。

冷却系の外壁温度を Fig.2 に示す。冷却系の外壁温度は、季節による軌道熱環境の変化及び軌道周回中の地球に対する衛星の相対位置変化により変動している。夏至では、地球からの熱入力が大きく変化することにより、冷却系外壁の温度変動が大きくなっている。逆に、春分、秋分及び冬至では、地球からの熱入力変化が小さくなるため、温度変動が小さくなっている。この温度変動は、解析予測とよく一致することを確認した。

3. おわりに

「あかり」は打上げ後 1.5 年間ヘリウムを保持し、順調に観測が行われた。今後は、2 段スターリング冷凍機のみを用いて観測装置を冷却し、観測可能な赤外波長について観測を続ける予定である。

参考文献

1. T. Nakagawa, et al. : Flight Performance of the AKARI Cryogenic System, Pub. of Astronomical Soc. of Japan, 2007, 59:S377-387

2. M. Hirabayashi, et al. : Thermal design and its on-orbit performance of the AKARI cryostat, Cryogenics submitted, 2007
3. S. Yoshida, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.65

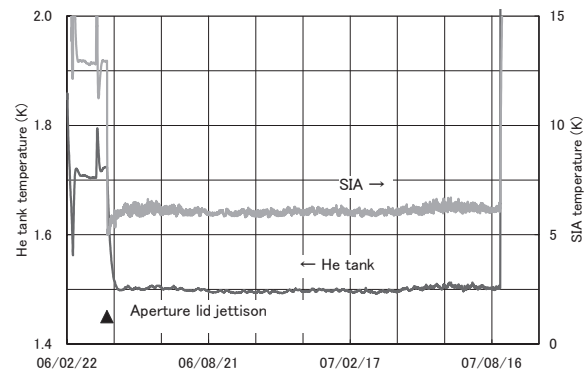


Fig.1 Temperature profile on orbit

Table 1 Equilibrium temperature in orbit
at Summer Solstice

Item	Measured	Math model
He tank (K)	1.502	1.60
Telescope (K)	6.18	5.60
Cold tip of the cooler (K)	24.9	23.9
IVCS (K)	32.4	24.6
OVCS (K)	110.6	102.0
Outer shell near cooler (K)	243.0	238.9
Compressor (K)	247.3	240.2
Cooler power (W)	99.8	100

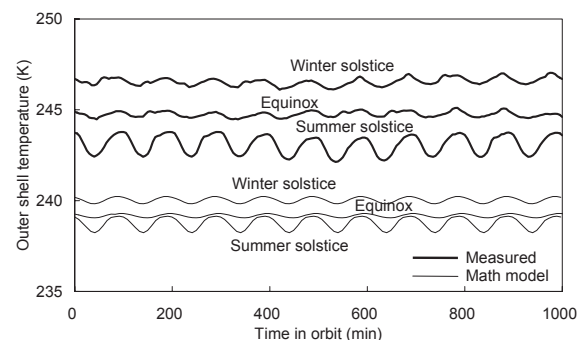


Fig.2 Temperature variations in orbit

熱輻射の伝搬によるクライオスタットの熱負荷の増加 Increase of heat load of a cryostat by thermal radiation conduction

都丸 隆行(KEK), 徳成 正雄(東大), 黒田 和明(東大), 内山 隆(東大), 大橋 正健(東大), 新富 孝和(日大), 鈴木 敏一(KEK), 春山 富義(KEK), 三代木 伸二(東大), 山元 一広(天文台), 山本 明(KEK)

TOMARU Takayuki(KEK), TOKUNARI Masao(ICRR), KURODA Kazuaki(ICRR), UCHIYAMA Takashi(ICRR), OHASHI Masatake(ICRR), SHINTOMI Takakazu(Nihon U.), SUZUKI Toshikazu(KEK), HARUYAMA Tomiyoshi(KEK), MIYOKI Shinji(ICRR), YAMAMOTO Kazuhiro(NAO), YAMAMOTO Akira(KEK)

E-mail: tomaru@post.kek.jp

1. はじめに

低温干渉計型重力波望遠鏡のプロトタイプ・CLIO 用クライオスタット(図1)の冷却テストで、設計を遥かに上回る3Wもの熱侵入が観測された。このクライオスタットの特徴であるレーザービーム用の大きな開口部(Φ300mm)を塞いだ場合には設計温度へ到達するため、この大きな熱侵入量は熱輻射に関係したものであると推定された。

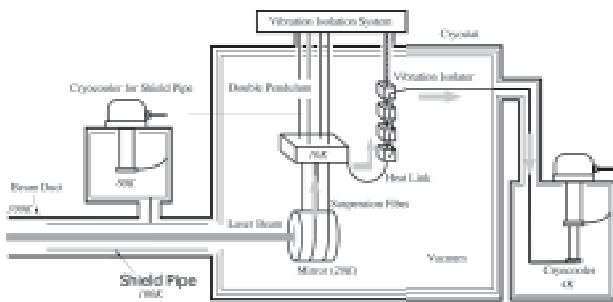


Fig.1 Outline of the CLIO cryostat

一般に、クライオスタットを設計する際の熱輻射量の推定はステファン-ボルツマン則

$$P = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \sigma (T_2^4 - T_1^4) A \frac{\Omega}{2\pi} \quad (1)$$

に基づいて計算される。ここで ϵ は物体の輻射率、 σ はステファン-ボルツマン定数、 T は温度、 A は面積、 Ω は立体角を表す。この式の意味するところは、熱は2つの相対する物体の表面間でやりとりされるというものであり、2つの面を見込む立体角を小さくすれば、熱輻射の流入量を小さくすることができる。CLIO においても熱輻射の設計はステファン-ボルツマン則を用いて行われ、立体角を小さくするために直径 300mm、長さ 5m、温度 100K のアルミ製輻射シールドパイプをビームダクト内に設置してある。

一方黒体輻射の観点から考えると、300K の熱輻射は波長 $20 \mu\text{m}$ にピークを持つ赤外線によって構成されている。この波長領域のアルミの反射率は90%以上あり、輻射シールドパイプ内を伝搬して熱侵入するような現象が考えられる。

本研究では、このような輻射の伝搬による熱侵入現象について、シミュレーションおよび実験を行った。

2. シールドパイプ内の輻射伝搬のシミュレーション

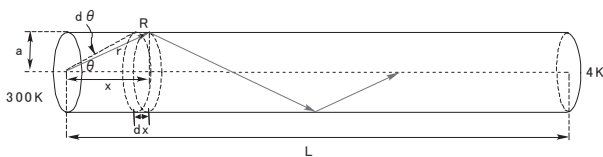


Fig. 2 Ray-Trace model of conduction of thermal radiation in shield pipe.

輻射シールドパイプ内の熱輻射の伝搬量を推定するため、図2のようなRay-Traceモデルを用いて計算を行った。300Kからの全輻射パワーを P_0 、パイプ内面の赤外線反射率を R 、パイプの半径を a 、長さを L とすると、300K から 4K の領域へ入射する全パワーは

$$P = P_0 \left[\frac{a^2}{2L^2} + \int_0^L R^{N(x)} \frac{a^2}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dx \right] \quad (2)$$

で与えられる。ここで $N(x)$ は、位置 x へ入射する赤外線の反射回数である。この式を用いてCLIOの場合を計算すると、ステファン-ボルツマン則による見積りに比べおよそ1000倍弱の入熱となることが分かった。

3. 実験的検証

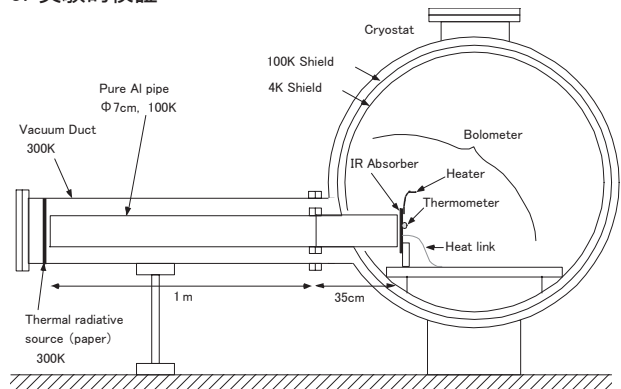


Fig. 3 Experimental setup in the CLIK

CLIO とほぼ同じクライオスタット構成を持つ初期のプロトタイプ低温干渉計CLIKを用いて、輻射伝搬モデルの検証実験を行った。測定手法はカロリメリー法で、300K側の輻射源から4K領域へ入射する熱パワーをボロメータで測定するものである。この実験によりステファン-ボルツマン則での推定値より740倍大きな入熱が観測された。この結果と式(2)を用いて、シールドパイプ内壁の赤外線反射率を求めると、95%という結果が得られた。

さらにこの結果を検証するため、東理大赤外FELセンターの光源を利用してシールドパイプの赤外反射率を実測した。この計測で、波長 $8.33 \mu\text{m}$ において反射率98%の結果が得られ、CLIKによる実験結果とコンシステントであることが明らかとなった。

4. まとめ

以上により、本研究の結果、輻射シールドパイプ内を熱輻射が伝搬侵入する現象が実証された。

脳磁計(MEG)用ヘリウム循環装置の特性

Performance of a Helium Circulation System for MEG

武田 常広、岡本 雅美、厚田 和宏、大脇 崇史、片桐 啓志(東京大学)

Tsunehiro Takeda, Masayoshi Okamoto, Kazuhiro Atsuda, Takashi Owaki and Keishi Katagiri(The Univ. of Tokyo)

E-mail: takeda@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脳磁計(MEG)は脳の動的な活動を計測するためには欠かせない装置となってきたが、年間数千リットルにもなる大量の液体ヘリウム使用と、頻繁に行わなくてはならない移送作業が、MEGを使用する上で大きな障害になっている。我々は、蒸発熱は極めて小さいが、顕熱は液体窒素にも匹敵するほど大きいという、液体ヘリウムの特性に着目した、新しい発想のヘリウム循環システム(HCS)を開発してきた。H19年6月より、実際の脳磁計に装着した状態で問題なくMEG計測が行なえているので、HCSの基本特性について報告する。

2. 開発のコンセプト

MEGシステムに使用されているSQUIDは、超伝導状態にあるためその発生する熱は極めて小さい。従って、蒸発したヘリウムガスの冷却能力は、ほとんどデュワの壁からくる輻射熱と、上部から侵入する伝導熱を奪うために使われている。他方、ヘリウムガスから液体ヘリウムを生成する過程では、常温ヘリウムから数十Kのヘリウムガスを作ることは比較的容易だが、その低温ガスを更に冷やして、液体ヘリウムを作るために大量のエネルギーが必要になる。そこで、生成が容易な低温ヘリウムガスをデュワのネックチューブ部に大量に流し侵入熱を奪うことにより、デュワの液体ヘリウム部に侵入する熱を少なくし、結果的に液体ヘリウムの蒸発量を抑えて、システム全体の熱効率を大幅に改善できるシステムを開発した。冷凍器は信頼性の高い4K1.5WGM冷凍機2台を用い、循環装置とMEGは7重管トランスファーチューブ(TT)で結合した。循環装置内に混入する不純物を精製し、精製器が不純物で閉塞した場合、電磁弁、流量制御器、ヒータなどをLabVIEWで制御して、自動運転で不純物を気化して循環装置内から外気に排出し、閉塞を解除できる精製器を開発した。

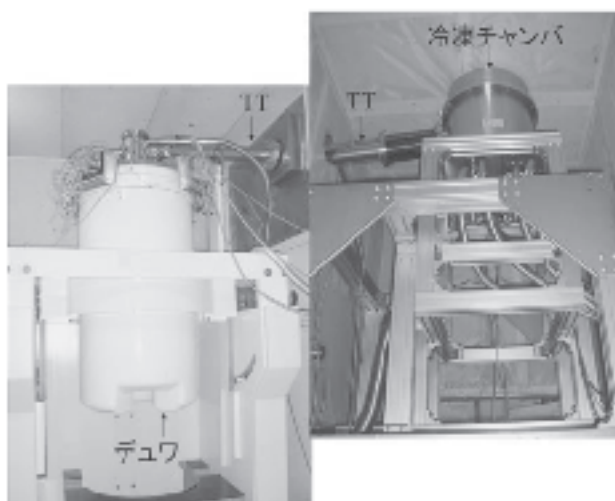


Fig.1 Helium circulation system (right) attached to a 440CH MEG (left).

3. 装置および特性

Fig1は、東京大学柏キャンパスにある、440CH ベクトル型MEG 装置に装着されて運転中の HCS の外観を示す。MEGは3層パーマロイの磁気シールドルーム(MSR)の中に設置されており、HCSは1層パーマロイMSRの中に設置されている。太さ76mm、長さ2mの7重管トランスファーチューブが、2つのMSRの壁を貫通して両者を結合している。

Fig.2は、下から、デュワ内の液体ヘリウムの液面高、40Kガスの流量変化、システム内各所の圧力変化を示している。横軸は時間で、8日分の変化を表示している。40Kガスの流量が6 $\mu\text{g}/\text{m}$ 以下だと液面は減少し、十分な液化量が確保されないこと、10 $\mu\text{g}/\text{m}$ 以上なら確実に液面が上昇し、2.2 $\mu\text{g}/\text{D}$ の液体ヘリウムが作られることを示している。

通常の運転では、デュワ内の圧力をモニタして、圧力が設定値以下になったら冷凍器第2ステージに取り付けられた、小さなヒータに通電して液化量を抑えることにより、一定レベルの液面を保持する制御を行って、1年間以上ヘリウムを追加することなく運転できるようになっている。現在、約5ヶ月の安定した運転を実現している。

参考文献

1. T. Takeda, et al.: Improvement of a Helium Circulation System for MEG, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75(2006)p.284.

070628-070705

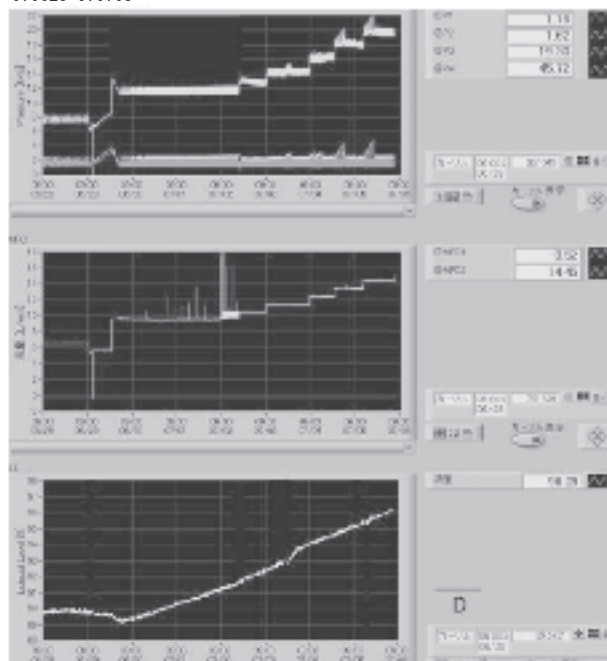


Fig.2 Increase of liquid helium level (LL) (bottom), change of 40K helium gas (middle) and change of pressure in a dewar (top).

ヘリウム液化機のトラブルとその対処

Report on the Helium Liquefier malfunction, our counteraction and current situation

土屋 光, 鷺山 玲子, 阿部 美玲 (東大物性研究所)
 Tsuchiya Hikaru, Sagiyama Reiko, Abe Mirei (ISSP, University of Tokyo)
 E-mail: tsuchiya@issp.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

2006年8月のある日、液化率が低下するというトラブルが発生した。しばらくは通常運転で様子を見ていたが、一向に元に戻らなかったため、週明けに真空引きによる液化機内の不純物除去を行った。これにより通常の液化率に戻ったのだが、すぐに悪化してしまったため本格的なWarmUpを行った。しかし、WarmUp後も同じような症状に悩まされた。

結局のところ直ぐには原因調査を開始することができず、8月、9月は、液化・WarmUp・真空引きのサイクルで運転をし、供給量を確保することになった。また10月からは、供給制限を行い、液化運転を最小限にして液化率低下の原因を探っていた。

[原因調査のチェック項目]

- 1)各種センサーの点検(温度センサー、液面計等)
- 2)タービンの開放点検(T1,T2)
- 3)タービン周りの点検
- 4)バルブ等の点検(CV110等)
- 5)各ライン、第一熱交換器の漏れ検査(気密試験等)
- 6)系内ガスの分析(業者に依頼)

一月程、考えられる部分のチェックをしてきたが、原因が掴めず、最終的にLindeの技術者がガス分析計持参でやって来た。その結果、第一熱交換器のLPとLN2ラインに漏れがあることが判明した。

2. トラブルの対処

液化機の不調と時を同じくして、アメリカのヘリウムソースでトラブルが発生し、液体ヘリウムが日本に入っていない事態が起こっていた。当然、液化機が問題なく動いていれば考えなかったこと[1]であるが、正に泣き面に蜂で、物性研は大幅に液体ヘリウムの供給を制限し、そして大幅に液体ヘリウムの供給価格を上げざるを得なくなった。

今回のトラブルは、熱交換器の漏れによるものなので、修理には熱交換器の取替が必要である。従って、完全復旧までには1年程度の時間を要することになり、当面の液体ヘリウム確保の対策として以下の4つの事を行った。

[液体ヘリウム確保の対策]

- 1)液体ヘリウムの購入(週500L程度)
- 2)他機関からの液体ヘリウムの借用(週500L×2機関)
- 3)窒素予冷なしによる終夜運転(12月～5月)
- 4)液化機の移設(本郷の低温センターから)

3. 液体の運搬(他機関の協力)

例年物性研は、非常に多くの液体ヘリウムを供給しており、2005年度には年間22万リットル[2]の液体ヘリウムが研究室に供給された。そんな状況で、“通常通り液化出来ません”、“週500Lしか買えません”では、最低限の研究すら出来なくなってしまう。

そこで、近場の機関(東大教養学部と機関A)から液体ヘリウムを借用することにした。

どちらの機関もこの無謀なお願いを快く引き受けて下さり、各々から週500Lの液体ヘリウムを借用することが出来た。

これにより11月は、機関Aから500L、教養から500L、購入分500Lの計1,500L/週の液体ヘリウムを確保でき、液化分と併せて、週2,000～2,500L程度の供給が可能となった。

4. 窒素予冷なしによる終夜運転

リークのある第一熱交換器の窒素ライン内をヘリウムガスで加圧し、液化機の運転を行った。通常の液化率は200L/h程度であるが、窒素予冷なしでは約1/3の60L/h程度になってしまう。そこで、終夜運転をして液化量を確保することにした。

終夜運転をすることで、通常時に近い量の液体ヘリウムを確保できたが、大幅に運転時間が伸びたために液化機や液化用圧縮機には大きな負担となってしまった。また、人件費等の問題で、いつまでも終夜運転を続けるわけにはいかない為、他に何らかの手だてが必要であった。

5. 液化機の移設

液化機不調の原因が特定できた頃、液化機の修理と液体ヘリウムの確保について検討していた。偶然にも2006年度に本郷の低温センターで液化機の更新があり、その古い液化機を移設して再利用することになった。

液化機の移設費が掛かるが、修理中の液体ヘリウムの確保には必要であり、また修理後にはバックアップとして使えるというメリットがある。そこで早急に液化機の移設を進め、2007年6月から移設機による運転を開始した。

古いからなのか、現設備とのマッチングの問題なのかは分からないが、調子に波があるのがちょっと気になったが、当面の液体ヘリウムの確保は出来た。液化率は、120～150L/h程度であった。

6. 液化機の修理

問題の熱交換器の修理は2007年7月から開始し、当初の予定より一ヶ月程遅れた10月初旬に、問題なく修理を終えた。修理後の液化能力は、スペック通りの200L/h程度である。

7. 対処時の状況と現在の状況

原因調査中の供給量は、あまり液化ができず月7,000L弱だったが、液体ヘリウムの借用を始めると一月の供給量が9,000L弱(11月)、13,000L弱(12月)と増え、終夜運転時には通常に近い量である16,000～17,000L/月を供給していた。

さらに液化機移設後は、20,000L前後と例年より多くの液体ヘリウムを供給した。この調子でいくと、2007年度の供給量は、最高記録を更新しそうである。

8. 今後の課題

近場の機関との協力体制を構築し、非常時にはお互いに助け合えるようにしていきたい。

今回手助けしていただいた機関の方々に改めて感謝いたします。

[1] 5年程前に、港湾ストにより液体ヘリウムが入っていない時期があったが、その時には液化機は快調だったので、供給に支障は出なかった。

[2] 22万リットルは、供給量(使用量)であり、生産量(液化量)は、およそ30万リットルとなる。

スラッシュ窒素管内流動時の圧力損失特性と固体粒子挙動

Pressure Drop Characteristic and Solid Particle Behavior in Slush Nitrogen Pipe Flow

野澤正和, 大平勝秀, 石本淳, 岡崎直人, 高橋幸一(東北大 流体研), 神谷卓伸(三菱重工業(株) 名航)
 NOZAWA Masakazu, OHIRA Katsuhide, ISHIMOTO Jun, OKAZAKI Naoto, TAKAHASHI Koichi (IFS, Tohoku Univ.);
 KAMIYA Takanobu (Nagoya Aerospace Systems, MHI)
 E-mail: nozawa@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

極低温流体中に固体粒子が混在するスラッシュ(単成分固液二相)流体は単成分の極低温液体に比べ、密度、寒冷保有量が増加するため、その応用が期待されている。スラッシュ水素を用いることで、ロケットの燃料タンクの小型化が図られる。また、高温超電導体の冷却にはスラッシュ窒素の利用が検討されている。スラッシュ窒素の管内流動特性に関して、これまでに特定の流速と固相率の条件において、液体単相の場合と比較して圧力損失が低減することが報告されている[1]。本研究では、この圧力損失低減効果を解明するために、スラッシュ流動時の固体粒子の挙動に着目し、ガラス製の流動管を用いて、スラッシュ流動状態の可視化観測を行い、流動状態と圧力損失特性の関連性について考察する。

2. 実験装置

スラッシュ流動試験は、以前に報告したスラッシュ流動試験装置[2]を用いた。テストセクションでは、上流側にステンレス鋼製水平配管(内径 15 mm, 長さ 800 mm)を取り付けて、圧力損失の測定を行った。一方、下流側にはガラス製の可視化用配管(内径 15 mm, 長さ 200 mm)を取り付けて可視化観測を行った。可視化用ガラス配管は、直管とオリフィス型の 2 種類を用いた。

3. 実験結果

Fig.1 にオリフィス形状のガラス管におけるスラッシュ窒素流動時の可視化観測結果の一例を示す。この画像は、拡散光により明視撮影を行ったものである。固体粒子の挙動が可視化画像の濃淡の変化で確認できる。可視化画像の縮流部分より上流側の速度を計算した結果を Fig.2 に示す。固相率は約 15 % である。縦軸は流動管の鉛直方向の位置、横軸は各位置の固体粒子の速度を管内平均速度で無次元化したものである。結果より、速度が 4.19 m/s の場合では、他の 3 つの場合の流速分布と比較して管中央部での速度が比較的大きいことが分かる。他の 3 つの条件に関してはほぼ同様の速度分布となった。

Fig.3 に圧力損失測定結果を示す。実線で示す曲線は、63 K でのサブクール液体窒素の理論圧力損失曲線である。固相率が約 15 % の場合、速度が 3.8~4.5 m/s でスラッシュ窒素の圧力損失が液体単相のものと比較して減少しているのが分かる。この結果と速度分布結果を比較すると、管中央部での流速が比較的大きい条件が圧力損失の低減する領域に対応しているのが分かる。従って、スラッシュ窒素流動における圧力損失減少効果は固体粒子挙動及び速度分布と関連性があることが示唆される。

謝辞

本研究は、「水素安全利用等基盤技術開発」の一環として、NEDO の委託及び科学研究費補助金(基盤(B) 18360096)により実施した。

参考文献

1. K. Ohira, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.167

2. K. Ohira, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.124

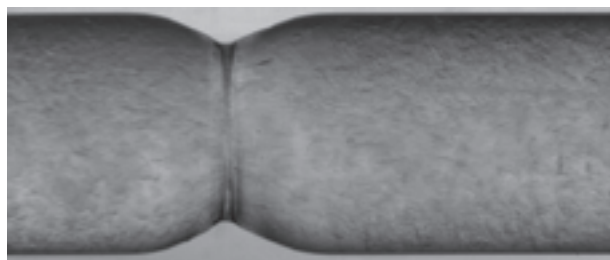


Fig.1 Visualization photograph of slush nitrogen pipe flow.

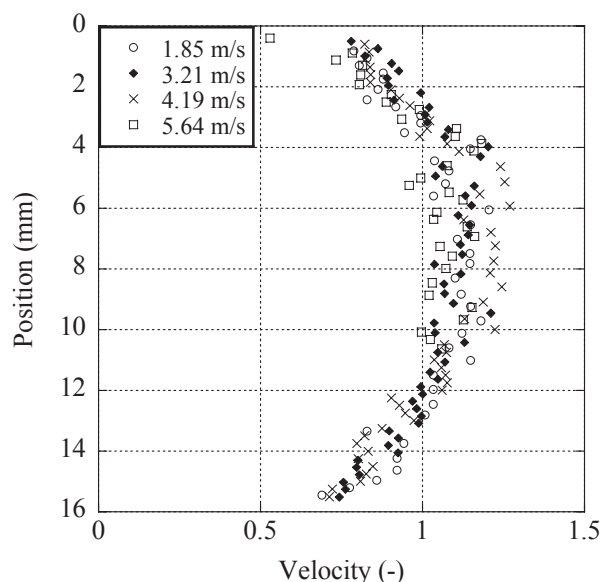


Fig.2 Velocity profile of slush nitrogen pipe flow

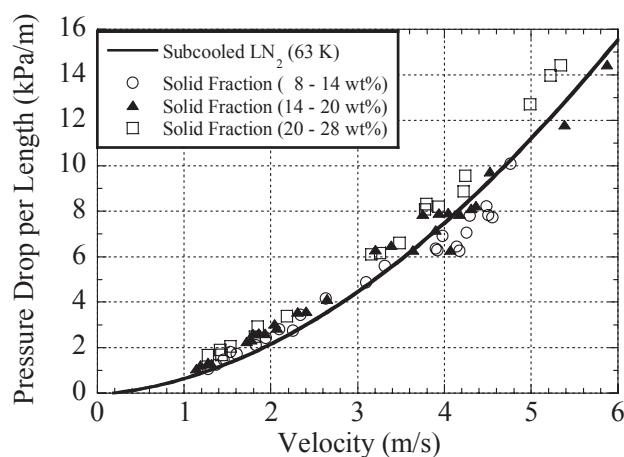


Fig.3 Mean velocity and pressure drop per length for slush nitrogen.

スラッシュ窒素の管内流動特性に関する数値解析 Numerical Study of Slush Nitrogen Pipe Flow Characteristics

向井 康晃(東北大院), 大平 勝秀(東北大流体研), 石本 淳(東北大流体研), 野澤 正和(東北大流体研)
前村 孝志(三菱重工), 神谷 卓伸(三菱重工)

MUKAI Yasuaki (Tohoku University); OHIRA Katuhide, ISHIMOTO Jun, NOZAWA Masakazu (IFS, Tohoku University);
MAEMURA Takashi, KAMIYA Takanobu (MHI)
E-mail: mukai@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年、極低温流体に新たな機能を付加した利用法として、液体中に固体粒子が混在する固液(スラッシュ)二相流の実用化が注目されている。高温超伝導体の冷媒としてスラッシュ窒素の利用が、また現在計画中のスペースプレーンの推進剤としてスラッシュ水素の利用が期待されている[1]。スラッシュ二相流の利点としては、液体单相の場合と比較して密度や寒冷保有量が増大することが挙げられる。また、配管中のスラッシュ流動においてレイノルズ数が比較的高い条件下では圧力損失の低減が得られることが報告されている[2]。しかしながら、極低温スラッシュ二相流の管内流動特性の解析は十分に行われていない。

本研究では、極低温スラッシュ二相流の管内流動特性を解明するための基礎研究として、熱非平衡二流体モデルに基づくスラッシュ窒素管内二相流の三次元 CFD 予測を行った。

2. 計算方法

支配方程式は相変化および相間の相互作用を考慮したものを用い、温度場の補正には簡単な温度回復法を用いた。乱流モデルは壁関数を用いた標準的な $k-\epsilon$ モデルを用いている。また、圧力解法には PISO による繰り返し解法を用いる。

本計算では、固相および液相を非圧縮性の連続体とみなし、各々ニュートン流体を仮定している。ただし、固相には擬似固体の性質をもたせている。この擬似固体の形状は球形である。また、各相の物性値に関しては三重点温度付近の値を用い、温度によらず一定としている。

3. 計算条件

配管モデル(管直径 $D = 15$ mm、管路長 $L = 400$ mm)を Fig.1 に示す。入口条件は固相体積分率(固相率)を 0.15、粒子径を 0.5 mm、また固相及び液相の温度を各々 63.1, 63.2 K と設定した。この入口条件のもと、固相・液相ともに入口流速を 5.0 m/s, 3.0 m/s, 1.5 m/s として入口条件の変化による流動構造の変化を CFD 予測により捉える。

4. 結果および結論

以下では流路入口から 350 mm 下流の位置における流路中心軸上の計算結果を示す。Fig.2 に入口流速を変化させた場合の固相率分布を示す。また、Fig.3、Fig.4 に流速が約 1.5, 5 m/s の場合の固相の流速分布の計算結果と PIV 解析結果の比較図を示す。PIV 解析では固体窒素粒子をトレーサーに用いている。

以上のようにスラッシュ窒素の流動構造は入口流速依存性が高く入口流速に伴い流動構造は変化する。入口流速が小さいほど流路底部で固相率が大きく、この結果、固相の流速は底部ほど小さくなる傾向がある。いずれの初期流速の場合も流路壁面近傍で固相率は小さく、壁乱流が固相の分布に影響を与えているものと推測される。

5. 謝辞

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託「水素安全利用等基盤技術開発」および科学研究費補助金(基盤 B 18360096)にて実施した。

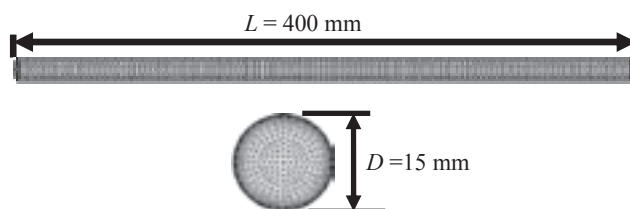


Fig.1 : Computational grid used for numerical analysis, overall view (upper), and cross-sectional (lower)

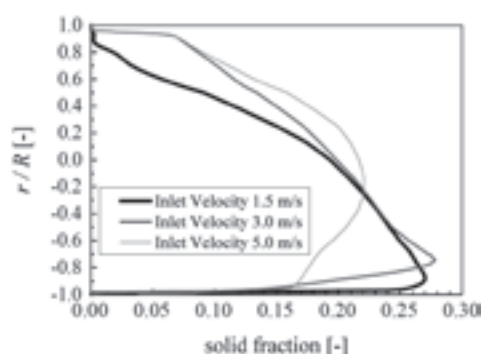


Fig.2 : Profile of solid-phase volume fraction along vertical axis

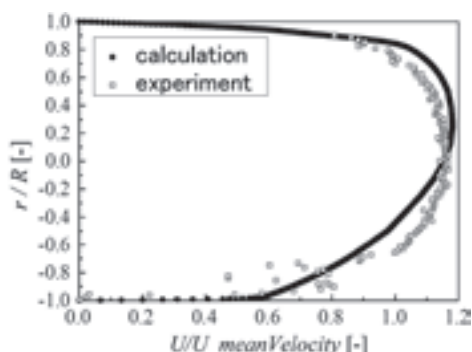


Fig.3 : Comparison of velocity distribution between numerical and experimental result (Low inlet velocity)

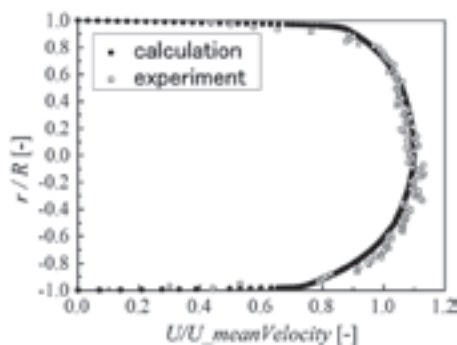


Fig.4 : Comparison of velocity distribution between numerical and experimental result (High inlet velocity)

6. 参考文献

- [1] K.Ohira, TEION KOUGAKU, Vol.41, pp.61-72 (2006)
- [2] K.Ohira, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.167

水平管内を流動するスラッシュ窒素の熱伝達特性

Heat Transfer Characteristics of Slush Nitrogen in Horizontal Straight Pipe

高橋 則史, 熊谷 典昭, 大平 勝秀, 石本 淳, 野澤 正和(東北大流体研)

Norifumi TAKAHASHI, Noriaki KUMAGAI, Katsuhide OHIRA, Jun ISHIMOTO and Masakazu NOZAWA(IFS Tohoku Univ.)

E-mail : takahashi@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

スラッシュ流体は、液体中に固体粒子が混在した極低温環境下における同成分固・液二相流体であり、単相流体よりも密度、寒冷エンタルピーが増加する利点がある。これらの優れた特性から宇宙工学や超電導工学などの様々な工学分野への応用が期待されている。しかし、スラッシュ流体の熱・流動特性に関する研究例は少なく、実用化のための詳細な知見が求められている。本研究では、スラッシュ窒素の固相率、流速、熱流束を変化させ、水平管内を流動するスラッシュ窒素の強制対流熱伝達特性に及ぼす影響を実験的に調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は既報^[1]と同様であり、本実験で用いた伝熱試験部の概略図を Fig.1 に示す。伝熱管は内径 15 mm, 外径 17 mm, 流路長 410 mm の銅製水平円管を用いた。ヒーターはニクロム線を無誘導巻きし、熱流束一定の条件で加熱することができる。伝熱管内の局所熱伝達率を測定するために、管外壁面の上下方向に 2 ヶ所、流れ方向に 3 ヶ所、管内部の入口・出口の合計 8 ヶ所にシリコンダイオード温度計を設置した。また伝熱試験部入口・出口に圧力取り出し口を設け、伝熱区間における圧力損失も測定することができる。本実験では熱流束 $q = 9.0 \sim 17.4 \text{ kW/m}^2$, 固相率 $x = 5.0 \sim 29.2 \text{ wt}\%$, 流速 $v = 1.1 \sim 6.8 \text{ m/s}$ の範囲でパラメータを変化させ、局所熱伝達率に及ぼす影響を調べた。局所熱伝達率 h は壁面温度 T_{wall} とバルク温度 T_{bulk} の差および熱流束 q に基づき、次式(1)により算出している。

$$h = q / (T_{wall} - T_{bulk}) \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

Fig.2, 3 に加熱開始点からの距離 305 mm の上面温度計に対する局所熱伝達特性を示す。Fig.2 は Sieder-Tate の式

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu_{bulk} / \mu_{wall})^{0.14} \quad (2)$$

を用いて、サブクール窒素の熱伝達試験の結果と比較したものである。式(2)と±20%以内で一致している。Fig.3 にスラッシュ窒素の局所熱伝達率 h に及ぼす流速 v の影響を固相率 x ごとに示す。流速が 3 m/s 以下において、スラッシュ窒素とサブクール窒素の熱伝達率はほぼ同様の値を示す。しかし 3 m/s 以上かつ、固相率が 0~20 wt%において、スラッシュ窒素の熱伝達率はサブクール窒素時より低下する傾向を得た。既報^[2]の非加熱時のスラッシュ窒素の圧力損失が、サブクール窒素時より低下する傾向と、本研究の熱伝達率が低下する傾向が類似していることから、スラッシュ窒素の熱伝達率と圧力損失の関連性について、今後研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 B 18360096)にて実施したものである。

参考文献

- [1] K. Ohira, et al.: Abst. CSJ Conference, Vol.74(2006) p.124
- [2] K. Ohira, et al.: Adv. Cry. Eng., 53(2008) (to be published)

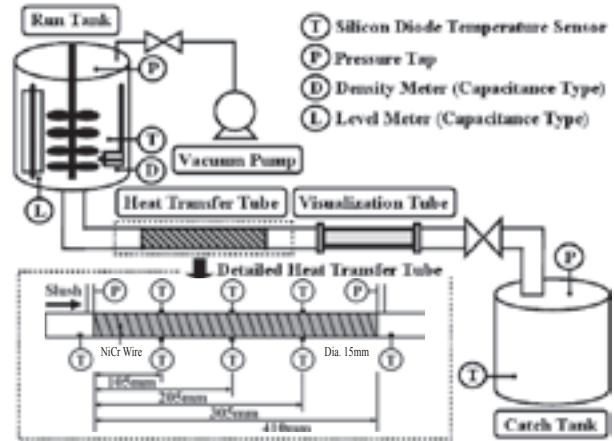


Fig.1 Test apparatus for the slush nitrogen heat transfer test

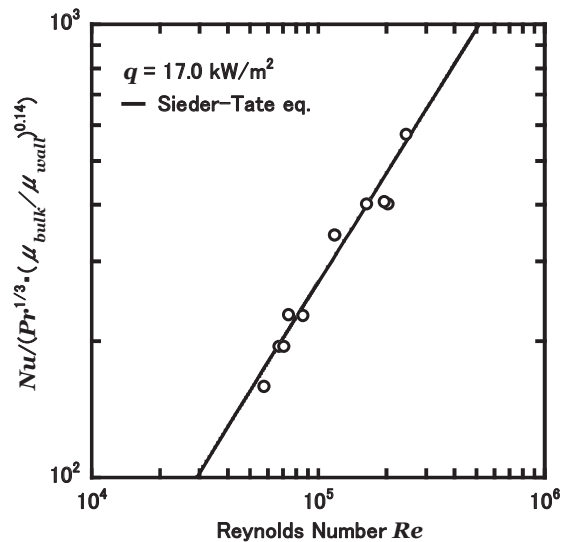


Fig.2 Test results for subcooled liquid nitrogen

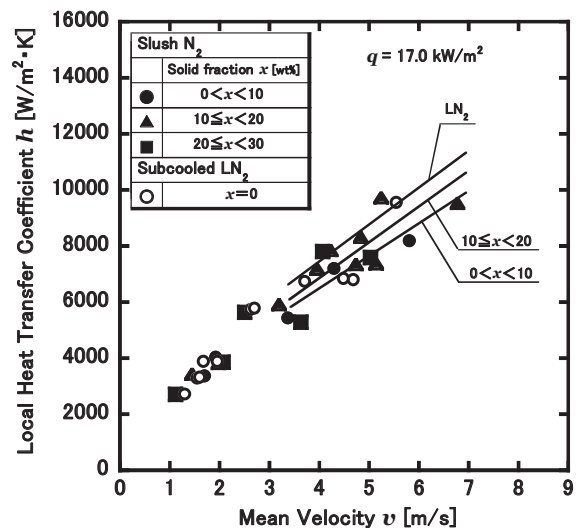


Fig.3 Local heat transfer coefficient for slush nitrogen

液体窒素中における固体粒子の流動様式の検討

Fundamental research on flow regime of fine particles in liquid Nitrogen

池内 正充, 大野 隆介, 町田 明登(前川)

IKEUCHI Masamitsu, ONO Ryusuke, MACHIDA Akito (Mayekawa)

E-mail: masamitsu-ikeuchi@mayekawa.co.jp

1. 緒言

一般に、高温超電導ケーブル用冷媒には過冷却液体窒素が使用されているが、熱負荷を吸収すると出口においては冷媒温度が10K程度上昇し超電導ケーブルの能力が十分に発揮できない可能性がある。そこで我々は空調用に用いられている氷搬送に着目し、固体の融解潜熱の利用を可能とするスラッシュ窒素冷媒の研究を行っている。これまでスラッシュ窒素は真空引きにて生成してきたが、この方法では粒径制御ができないのみならず平均粒径 1.4mm 程度と比較的大きく、搬送したときに低レイノルズ数領域で圧力損失の増大あるいは固液分離[1]が生じてしまう。そこで流動特性を改善すべく固体粒子の微細化に着目し検討を行った。

2. 解析

前回は直管でのシミュレーションであったが[2]、今回は具体的に超電導ケーブルを模した Fig.1 のような解析モデルを作成した[3]。解析モデルは配管内径 82mm、配管長 374mm のコルゲート管(ピッチ 18.7mm×20)として3次元非定常解析を実施した。流路入口に流速条件を流路出口は大気圧とし、粒子の粒径をパラメータとした[4,5]。

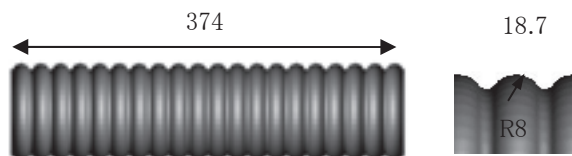


Fig.1 Model of flow analysis

Fig.2 に 63K、0.3m/sec の液体窒素が流れているとき左端から管内に①粒径 50 μ m、②粒径 1mm の粒子を流したときの流れのシミュレーション結果を示す。図は管内に固体粒子を流してから 1.0sec 後の様子である。粒子は球形を仮定し粒子同士の相互作用による粒径の変化はないものとした。このときのレイノルズ数は三重重点の液体窒素で 40000 付近の乱流域

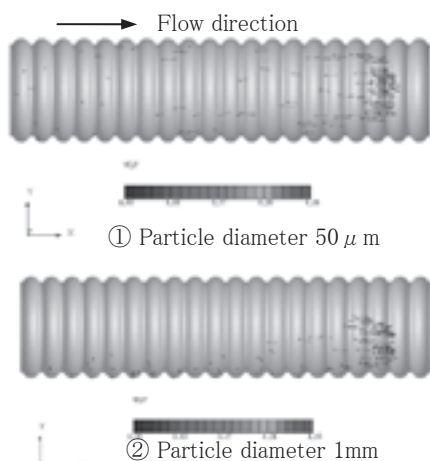


Fig.2 Velocity profiles

である。粒径 1mm の場合、重力の影響から粒子は徐々に沈殿していき、液体窒素の粘性により引きずられつつ最終的には下部壁面に付着する。これに対し粒径 50 μ m では、重力の影響よりも粒子の慣性が支配的となり沈殿せずに液体窒素中を流れるものと考えられる。

またベローズ管と、同様の内径、配管長の平滑管の二つを解析モデルとし、粒径 50 μ m、流速 0.3m/sec にて同条件で解析を実施した。Fig.3 に断面の流速コンター図を示す。平滑管と比較するとベローズ管の場合、壁面近傍では流速変化が激しく、壁面から離れるにつれて旋回流を生じ、初期段階から層流境界膜を取り除き乱流効果を大きくしている。そのため比較的長い間渦は消失せず粒子は沈殿しにくく流れの促進に寄与している。

今後さらにシミュレーションを重ね、配管形状による圧力損失への影響等を探る必要がある。

本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所との共同研究により実施したものである。また筑波大学機能工学系、村上正秀教授には文献調査、データ整理等に関して貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

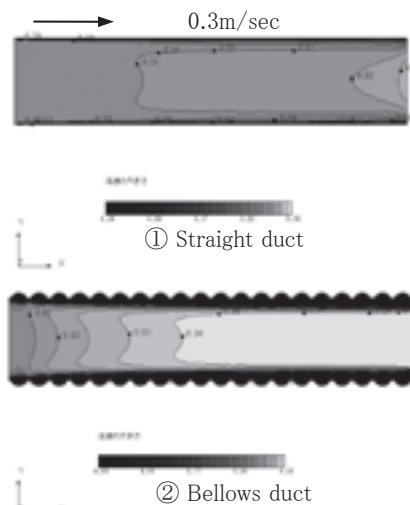


Fig.3 Velocity contour

参考文献

1. K. Matsuo, et al.: "Fundamental Study of the Pipe Flow Characteristics of Slush Nitrogen", TEION KOGAKU **39** (2004) p.475-482
2. M. Ikeuchi, et al: Abstract of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.60
3. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): "Research and Development of Fundamental Technologies for Superconducting AC Power Equipments", Annual Report 2003 (in Japanese), p.201
4. RF. Barron Cryogenic Heat Transfer. Philadelphia: Taylor & Francis; 1999. p.143-213.
5. J. Ishimoto, R. Ono. Numerical study of the two-phase flow characteristics of slush nitrogen. Cryogenics 2005, **45**, p.304-316.

スラッシュ水素実用化のための熱・流動現象の研究

Basic study of heat transfer and flow characteristics for practical applications of slush hydrogen

大平 勝秀、石本 淳、野澤 正和 (東北大学 流体研)

OHIRA Katsuhide, ISHIMOTO Jun, NOZAWA Masakazu (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

E-mail: ohira@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

液体水素中に固体水素粒子が混在する極低温固液二相スラッシュ水素は、高密度流体、冷媒、燃料として優れた特性を持っている。燃料電池の飛躍的な普及、情報技術による電力需要の増加に伴い、水素をスラッシュ水素の形態で長距離輸送（パイプライン）する際、 MgB_2 を利用した超伝導機器と組み合わせると、燃料と電力の同時輸送と貯蔵が可能となる（シナジー効果）。発表者は図1に示す次世代エネルギーシステムを提案しており、これまでにスラッシュ水素製造法（オーガ法）、高精度密度計・流量計、核沸騰熱伝達特性について研究・開発[1]を実施してきた。

現在、スラッシュ状極低温流体が流動する際の流動特性、伝熱特性および熱・流動特性に影響を及ぼす固体粒子挙動について研究を実施中である。本発表では、スラッシュ窒素が管内を流動する際の固体粒子挙動を高速カメラ、PIVで測定したので、その流動現象について報告する。

2. PIV測定結果と考察

流動試験装置および可視化方法については既報[2]を参照されたい。スラッシュ窒素が配管内（内径15mm）を流動する場合、流速が約3.5m/s($Re > 10^5$)以上で管摩擦係数（圧力損失）が液体より減少する圧力損失低減効果が、特に低固相率で認められた[3]。流速が約1.5m/s（非均質流）、流速が約4.3m/s（均質流）において、管中心鉛直断面での固体粒子のPIV測定結果を図2に示す。横軸は固体粒子の平均速度との比である。 V はランタンクで測定した固液二相の流速である。低流速時は固体粒子の速度分布は重力の影響により上下非対称となり、配管下部での固体粒子同士の干渉、管壁との干渉が高流速時よりも卓越し、固相率が大きくなるにつれ、この傾向は顕著となる。高流速時は固体粒子の速度分布はほぼ上下対称となり、低固相率の場合は圧力損失低減効果が卓越し、液体の管摩擦係数より小さくなる。一方、高固相率では固体粒子の干渉による圧力損失が卓越して管摩擦係数は液体と同程度、もしくは大きくなっている。高速カメラでの流動状況観察結果では、流速が3.5m/s付近で非均質流から均質流へ流動形態が変化していることが認められ、圧力損失低減効果は均質流で発生すると考えられる。圧力損失低減効果は固体粒子が管軸方向に移動することにより管中央部に固体粒子が集まる（プラグ流に似た流動）結果、管壁近傍の固体粒子の少ない薄い液体層での乱流発生を抑制しているためと考えられるが、今後実験等で確認する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託「水素安全利用等基盤技術開発」および科学研究費補助金（基盤B18360096）により実施した。

参考文献

- [1] K. Ohira: J.Cryo. Soc. Jpn, Vo. 41(2006) pp. 61-72.
 [2] K. Ohira, et al.: Abst. CSJ Conference, Vol. 74(2006) p.124.
 [3] K. Ohira, et al.: Adv. Cryo. Eng. 53(2008) (to be published)

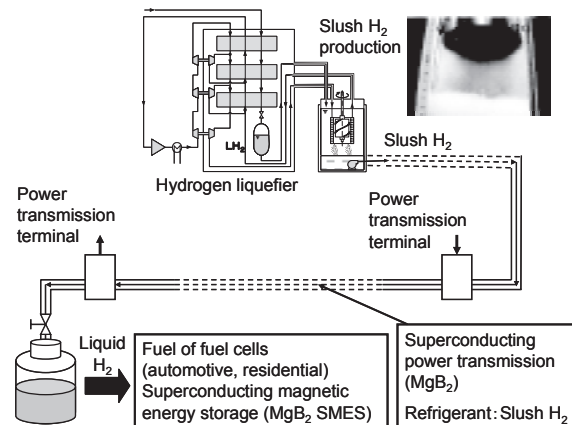


Fig.1 Synergetic effect of combination for slush hydrogen and superconducting equipments.

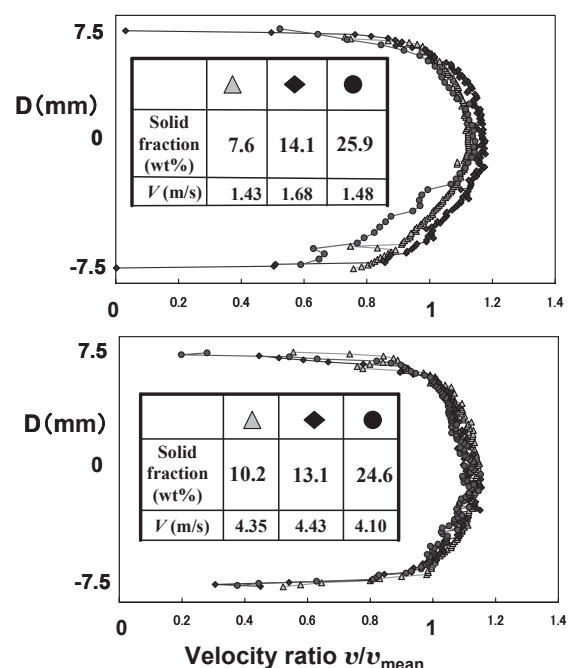


Fig.2 Velocity distribution of solid N_2 by PIV.

横振動下における極低温液体表面の観測

Observation of cryogenic liquid surface under transversal vibration conditions

八木 翔, 武田 実 (神戸大学海事科学部)

YAGI Sho, TAKEDA Minoru (Faculty of Maritime Sciences, Kobe University)

E-mail: 064w312n@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

近年、資源の節減、地球温暖化等の環境面の問題から、これまで頼ってきた化石燃料に代わる環境にやさしい新たなエネルギー源として水素が注目されている。水素を大量輸送・貯蔵するには液体水素が有利であるが、振動に伴って発生する蒸発損失を軽減するとともに液量を正確に把握することは、安全面や経済面において非常に重要である。

そこで我々は、高精度な液体水素用超伝導液面計の開発等[1, 2]を目指して研究を進めている。本研究では液面計の動的特性を調べるための予備的実験として、光学観測可能な横振動試験装置を用いて、極低温液体(窒素、ヘリウム、水素)を含む種々の液体の振動時における表面を光学的に観測し、その振動状態の違いについて調べた結果を報告する。

2. 実験装置

使用した液体水素用実験装置は横振動試験装置[1]と光学クライオスタットから構成されている。横振動試験装置はサーボモータの最大回転速度、加速時間、減速時間、移動距離等のパラメータを設定することによって最大加速度±0.1G、最大振幅±100 mmまで制御可能である。光学クライオスタットには下部に光学観測窓が設けられており、ここにデジタルカメラを設置して観測した。クライオスタット内部は同心円状に外側から液体窒素槽(10.0L)、液体水素槽(13.6L)、サンプル槽(3.8L)の3槽構造になっており、各槽間ならびに外面との間には断熱真空槽が設けられている。

3. 実験結果

今回は各液体(H₂O, LN₂, LHe)の振動状態の違いを観測するために、静止時から各液体に加速度0.1Gを0.2秒間与えた後に液面を自由振動させた。約1.5秒間の液面振動の様子を撮影間隔が1/30秒のデジタルカメラを用いて観測し、液面角度 θ の時間変化を調べた。静止時の液面角度を0度とし、液面が右上がりの状態を正にとった。一例として、Fig.1に1気圧におけるLN₂の液面振動の様子を示す。

各液体とも加速度を与えた後、最大液面角度 θ_{max} を示し、その後、時間とともに液面角度は減衰していった。Fig.2に1気圧におけるLHeの液面角度の時間経過を示す。図中の実線は、減衰振動モデルによる近似曲線である。観測の結果、各液体の減衰過程での周期 T 、減衰係数 γ において違いが見られた。これらの違いをTable1にまとめる。各液体の物性値

と照らし合わせ、振動状態の違いについて考察した結果の詳細は講演で報告する。

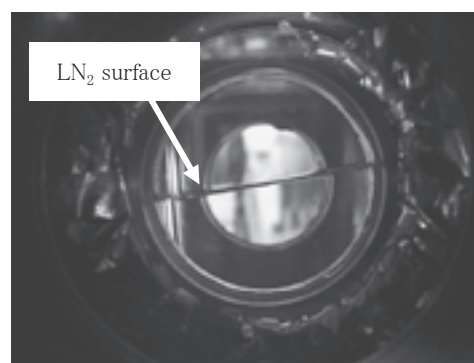


Fig. 1 Photograph of LN₂ surface under observation through optical window.

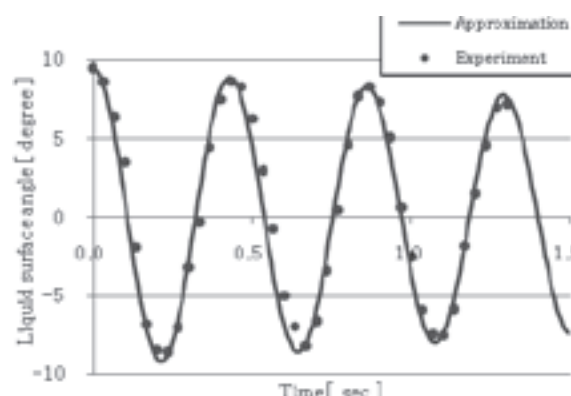


Fig. 2 Time chart of LHe surface angle.

Table1 Experimental results of some liquids.

Subject	θ_{max} (deg.)	T (sec)	γ
H ₂ O	9.5	0.35	0.45
LN ₂	9.5	0.38	0.18
LHe	9.5	0.43	0.16

謝辞

本研究の一部に対して、岩谷瓦斯(株)からの援助を受けました。ここに謝意を示します。

参考文献

1. M. Maekawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.73
2. Y. Matsuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.50