

DI-BSCCO®線材の高 I_c 化開発

Development of DI-BSCCO® for higher critical current

菊地 昌志, 綾井 直樹, 藤上 純, 長部 吾郎, 鍵山 知宏, 置谷 和晃, 中島 隆芳, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工);
木須 隆暢(九大);北口 仁(NIMS);下山 淳一(東大)

KIKUCHI Masashi, AYAI Naoki, FUJIKAMI Jun, OSABE Goro, KAGIYAMA Tomohiro, TATAMIDANI Kazuaki,
NAKASHIMA Takayoshi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (Sumitomo Electric);
KISS Takanobu (Kyushu Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); SHIMOYAMA Jun-ichi (Tokyo Univ.)

E-mail: kikuchi-masashi@sei.co.jp

1. はじめに

住友電工は、材料発見当初から銀シーズ Bi2223 超電導線材の技術開発を進めてきた。現在では、幅広い用途に適用できるよう、多種に亘る DI-BSCCO®(革新的 Bi 系超電導線)を提供している[1]。Type H は、断面積が約 1mm² で $I_c=180$ A までの性能を有することを特徴としている。しかしながら、DI-BSCCO を適用した機器で技術的もしくは経済的な優位性を高めるためには、さらに高い I_c が必要とされている。線材内の詳細な電流密度分布は、 I_c 向上の指針を含む情報として期待される。

線材幅方向の電流密度分布を走査型ホール素子磁気顕微鏡を用いて解析した結果として、 $I_c=200$ A(平均 $J_c=600$ A/mm²)を有する試料において、 I_c は線材の幅中心で最も高く、77K、自己磁場下で全体平均の 1.5 倍に相当する 900A/mm² を有していることが報告されている。線材断面積 1mm²、Fill factor=0.38 を有する線材全体に亘って均一な J_c が得られた場合の I_c 値は、自己磁場分布の影響を考慮に入れておよそ 285A となるとしている。著者らは、この解析結果を別の方法で検証した[2-3]。

2. 検証試験方法と結果

検証試験には、Table. A に示したサンプル A(上記磁気的手法で見積もられる I_c 値は 277A)を用いた。試料を切りし中央を含む 2mm 幅程度とそれ以外のエッジを含む 2 枚に分割した後、中央 2mm 幅試料片 2 枚を再度 edge to edge で突き合わせ、直流 4 端子法で I_c を測定した。測定 I_c 値と磁気的手法により見積もられる I_c 値とを比較並びに検討するためには、試料切断時の I_c 低下割合を考慮に入れる必要があるため、中央 2mm 幅試料片 1 枚とエッジを含むそれ以外の 2 枚を edge to edge で突き合わせて I_c を測定し、試料切断前の I_c 値(197A)からの低下割合を算出した。試料切断時の I_c 低下がないと仮定して見積もられる中央 2mm 幅試料片 2 枚の I_c 値を、磁気的手法で見積もられる I_c 値とを比較することで、解析結果の妥当性を検証した[3]。

試料の幅中央を含む 2mm 幅の試料片 2 枚を edge to edge で突き合わせた後に測定した I_c は、上記磁気的手法で見積もられる I_c 値(277A)の 83%に相当する 230A となった。中央 2mm 幅とそれ以外のエッジを含む 2 枚との合計 3 枚に分割し、これら試料片を再度 edge on edge で突き合わせた後に測定した I_c は 161A となり、試料切断前と比較して 18%の I_c 低下が認められたため、試料切断時による I_c 低下割合は 18%と見積もることができる。したがって、中央 2mm 幅 2 枚の突き合わせ試料の I_c は、試料切断時の I_c 低下がないと仮定した場合には 280A と見積もられるため、磁気的解析結果とよく一致する結果が得られた。

3. I_c 、 J_c 向上の成果

線材作製条件を検討する中で、幅方向の J_c 分布の改善に努めた結果、サンプル B において J_c は 630A/mm² から 663A/mm² に改善された。また、サンプル C は線材設計改良により銀比を低減した試作線材であり、 I_c は 218A から大きく向

上し、77K、自己磁場下で過去最高となる 236A(548A/cm-w)に達した。短尺 I_c は Fig. 1 に示したように着実に向上し続けており、DI-BSCCO Type H の性能(I_c)もこれに追従して向上してきているが、今後サンプル B の J_c を維持しつつ銀比をサンプル C 並みにまで下げ、かつ圧延加工方法の改良等により線材エッジ部付近 J_c をさらに改善することで、さらなる I_c 向上が見込まれる。

Table. 1 Specifications

Specimen	Size mm	I_c A	J_c A/mm ²	Silver ratio
SAMPLE A	4.30 ^w	197	521	1.7
	0.250 ^t			
SAMPLE B	4.08 ^w	215	663	1.9
	0.257 ^t			
SAMPLE C	4.31 ^w	236	600	1.5
	0.257 ^t			

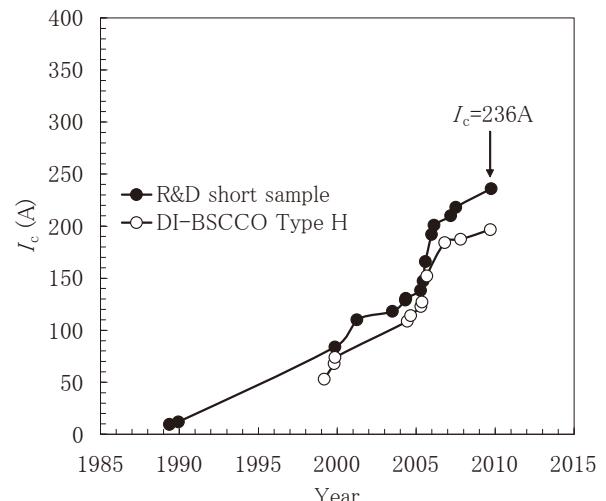


Fig. 1 Progress in I_c of Bi2223 wire

参考文献

1. <http://www.sei.co.jp/super/hts/index.html>
2. Y. Honda, et al.: presented at this conference, 1P-p15
3. N. Ayai, et al.: EUCAS (2009)

異なる組成の仮焼粉で作製した Bi2212 丸線材の超伝導特性とその組織

The microstructures and superconducting properties of Bi2212 round wires

松本 明善、北口 仁、熊倉 浩明(NIMS)、引地 康雄、仲津 照人、長谷川 隆代(SWCC)
MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS),
HIKICHI Yasuo, NAKATSU Teruhito, HASEGAWA Takayo(SWCC)
E-mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp

1. 緒言

Bi2212 線材は低温高磁界下で高い臨界電流密度特性が得られるため、高磁場マグネット等の内挿コイル向け線材として有望である[1,2]。また、高磁界下で高い特性を示す他の Bi2223 線材や RE123 線材と異なり、丸線形状の多芯線材が作製できる酸化物超伝導体であり、その応用範囲は広い。しかしながら、その特性は熱処理等によって大きく影響を受けるために実用化にとってネックとなっている。本研究では熱処理に影響を受けにくい線材、さらには高特性が得られる線材作製を目指して仮焼粉組成の異なる線材の作製を始めた。今回は異なる組成で作製した線材の熱処理依存性および組織変化について報告する。

2. 実験方法

組成が異なる 4 つの仮焼粉末を用意した。仮焼粉組成は Table 1 に示すように Bi が 2.05 から Bi リッチの 2.30 まで用意した。これらの仮焼粉末を銀パイプに詰め込み多芯化を行い、 61×7 構造の多芯丸線材の作製を行った。このとき、銀比は 3 である。各組成を持った線材を短尺状に切断し、部分溶融-徐冷工程によって熱処理を行う。Fig.1 にその典型的なパターンを示す。この線材について、 J_c 測定 (4.2 K)、光学顕微鏡観察 SEM 観察を行った。また、Fig.1 に示したように熱処理途中で急冷を行い、それぞれの時間における組織変化についても観察を行った。

3. 結果

Table 1 には DTA から得られたそれぞれの線材の融点を示した。#A から #C までは Bi の組成だけを変化させた線材である。Bi 量が増えるに従い、融点が低下していることがわかる。Fig.2 に各線材の臨界電流密度の最高到達温度 T_{max} 依存性の結果を示す。この結果からわかるように、#A および #D では 881°C 近傍で、 J_c の最大値が得られている。それ以上の熱処理温度では急激に減少して、半分程度の値となる。これらの結果は以前に得られたものと同様の傾向を示し、Bi2212 線材の熱処理の困難さを示した結果である[3]。一方、#B や #C では #A や #D で半分程度まで落ちた J_c に比べても低い値しか得られないのがわかる。

それぞれの線材について光学顕微鏡および SEM によって組織観察を行った結果、それぞれの線材において特徴的な組織が得られた。線材 #A や #B では 881°C や 884°C 付近の温度での組織は均一な大きさのフィラメントがあることがわかった。これに対して、#C および #D では熱処理前のフィラメントサイズとは全く異なり、つぶれたフィラメント、あるいは隣接したフィラメントが連結し粗大化したフィラメントがあることがわかった。さらに、線材 #B や #C では線材の長手方向を見た場合、フィラメントが途切れていることが確認された。これらの観察の結果から、線材長手方向につながっているフィラメント数が大幅に減少していることが示唆される。この結果、#B, #C では臨界電流密度が減少したと考えられる。

Table 1 Nominal compositions of starting powder and melting points of each filament

wire	Composition				T_m (DTA) (°C)
	Bi	Sr	Ca	Cu	
#A	2.05	1.95	0.90	2.00	884.1
#B	2.15	1.95	0.90	2.00	882.5
#C	2.25	1.95	0.90	2.00	879.8
#D	2.25	1.95	0.90	2.10	880.3

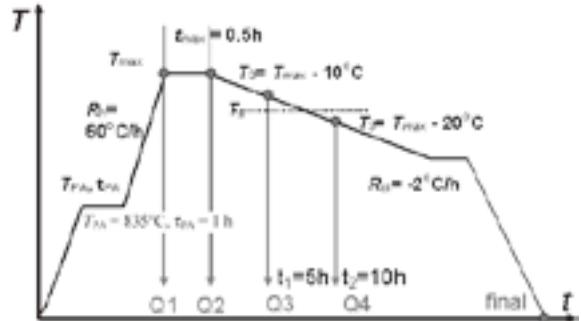


Fig.1 Schematic graph of the heat-treatment schedule of partial melting and slow cooling. We carried out quenching

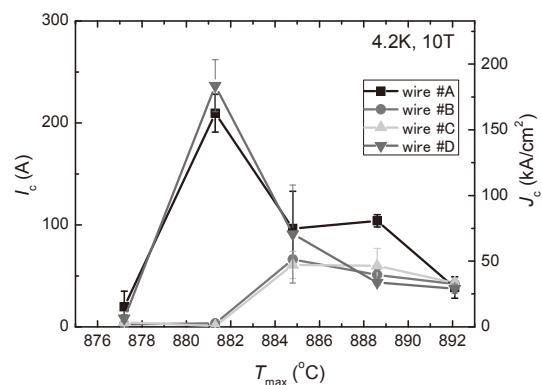


Fig.2 I_c and J_c properties of each wire as a function of T_{max} . The data shows average values from obtained data.

本講演ではこれらの線材の急冷実験の結果も示し、不純物相と臨界電流密度特性について詳細に報告を行う。

参考文献

- [1] T. Hasegawa, T. Koizumi, Y. Hikichi, H. Hirano, S. Nagaya, 2001 IEEE Transaction Appl. Supercond. **11** 3034.
- [2] H. Kumakura., 2000 Supercond. Sci. Technol. **13** 34.
- [3] A. Matsumoto, H. Kitaguchi, H. Kumakura, J. Nishiok., T. asegawa, 2004 Supercond. Sci. Technol. **17** 989.

定比組成 Bi(Pb)2223 線材の高 T_c 化

Enhancement of T_c for cation stoichiometric Bi(Pb)2223 tapes

渡辺 雅彦, 下山 淳一, 萩野 拓, 岸尾 光二 (東大院工)

豊谷 和晃, 綾井 直樹, 林 和彦 (住友電工)

WATANABE Masahiko, SHIMOYAMA Jun-ichi, OGINO Hiraku and KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

TATAMIDANI Kazuaki, AYAI Naoki, HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: tt096686@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (M. Watanabe)

1. はじめに

$\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ [Bi(Pb)2223]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が始められている。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り 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。また、それらの試料では T_c の向上と共に c 軸が伸長しており、金属組成が定比に近づいたことが示唆されていた[1,2]。しかし、これらのポストアニール条件では不純物相として Pb3221 相が生成するため、 J_c の低下を伴い実用的ではない。そこで、本研究ではこれまでに得られた知見をもとに定比仕込組成の単芯線材を作製し、加圧焼成を行った後、様々な酸素分圧・温度でのポストアニールにより、不純物の生成なく T_c を向上させる条件の探索を試みた。さらに、住友電工社製の多芯線材についてもポストアニールを行い、その効果を単芯線材と比較した。

2. 実験方法

Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO を定比組成に近い $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の比になるように混合後、空気中 780~810°C で仮焼した。得られた仮焼粉末を内径 3 mm、外径 5 mm の Ag 管に充填し、細線化・圧延によって厚さ~0.33 mm、幅~3 mm のテープに加工した。これに対して 5% O_2 気流中 828~834°C で 36 時間の一次焼成を行った後、加圧焼成(300 MPa)を行い、Bi(Pb)2223 の単芯線材を得た。また、多芯線材については空気中 847°C で 216 時間の追加焼成を行った。得られた試料に対し 0.1~1% O_2 気流中 700~775°C で 100 時間アニールを行った。試料の構成相の同定及び格子定数の評価は X 線回折測定、微細組織観察は SEM により行い、磁化特性は SQUID 磁束計を用いて調べた。

3. 結果と考察

Fig. 1 に 830°C で一次焼成後に加圧焼成を行った試料(as-sintered 試料)と、さらに 0.5% O_2 気流中 700°C, 775°C でポストアニールを行った試料の XRD パターンを示した。as-sintered 試料がほぼ単相であったのに対し、0.5% O_2 気流中ポストアニールを 700°C で行った場合には Pb3221 相が生成し、775°C の場合にはこれが抑制できることがわかった。この傾向は酸素濃度 0.1%~1% いずれにおいても認められ、高温・低酸素分圧でのポストアニールほど Pb3221 の生成が抑えられていた。また、ポストアニール後の T_c は最高で 116.2 K にまで達したが、アニール温度を高温にする程、試料の T_c の向上が抑制される傾向が認められた。

Fig. 2 には定比仕込組成の単芯線材におけるポストアニ

ール前後の c 軸と T_c の関係を示した。空気中で長時間ポストアニールした場合[2]と同様に、 T_c の向上と共に c 軸が伸長する傾向が見られ、還元雰囲気下でのポストアニールにおいても Sr サイトへの Bi, Ca の置換量が低減し、定比金属組成に近づくことが示唆された。

当日は、住友電工社製多芯線材におけるポストアニールの効果についても、併せて報告する。

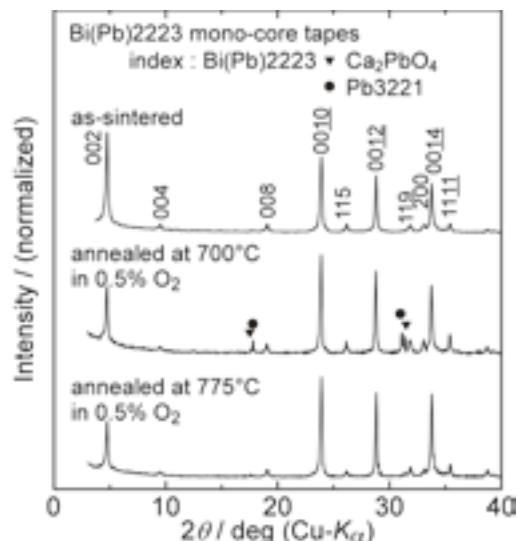


Fig. 1. XRD patterns for as-sintered and post-annealed Bi(Pb)2223 mono-core tapes.

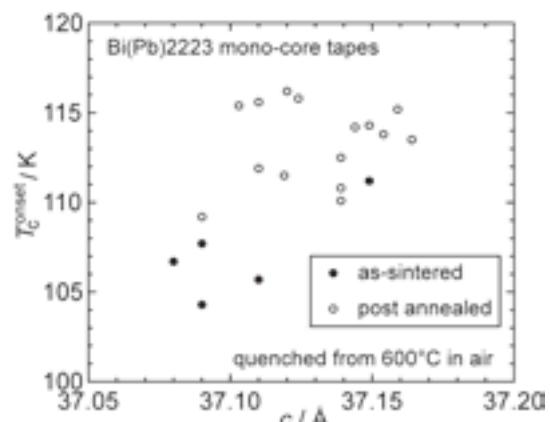


Fig. 2. Relationship between T_c^{onset} and c -axis length of as-sintered and post-annealed Bi(Pb)2223 mono-core tapes.

[参考文献]

[1] A. Tanimoto *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012146.

[2] J. Shimoyama *et al.*, *Physica C* **463-465** (2007) 802-806.

高抵抗銀合金シース Bi2223 線材の交流垂直磁界下における フィラメント間結合特性

Interfilamentary coupling properties of Bi2223 tapes with resistive silver-alloy sheath in AC perpendicular magnetic field

稻田亮史, 田中洋介, 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, TANAKA Yosuke, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT); LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)
E-mail: inada@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 線材の幅広面に垂直な交流横磁界下において交流損失 (磁化損失) を低減するには、超電導フィラメントのツイストだけでなく、母材の高抵抗化が必須となる。我々は、フィラメント間に酸化物バリアを導入した線材の損失特性評価を進めているが、ツイスト長を低減した際の J_c 低下やバリア層の破損、フィラメント間ブリッジング等の問題があり、垂直磁界損失の低減については十分な実証ができていない^[1]。別手段として、母材に高抵抗銀合金を用いる場合、高抵抗化と合わせて Bi2223 フィラメントの超電導特性への影響が極力少ない合金を使用する必要がある。本条件を満足するのは、Ag-Au 等の高価な合金に限定されてしまうため実用的ではないが、合金シース線材はバリア線材と比較して加工性が良いため、損失低減に向けた線材構造 (線幅、芯数、ツイスト長、等) に関する原理検証は行いやすいと言える。

本研究では、Ag-8wt%合金を母材とする Bi2223 線材を試作し、垂直磁界損失特性を測定した。ツイスト長および母材抵抗率が垂直磁界下・商用周波数近傍でのフィラメント間結合特性におよぼす影響を評価した。

2. 実験および結果

Powder-in-tube 法により Ag-8wt%Au 合金を母材とする 19 芯線材 (ツイスト長 $L_t = 4$ mm) を作製した。Ag-8wt%Au 合金の 77 K における抵抗率は $2.1 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ であり、純銀 ($= 0.27 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$) に対して約 8 倍高抵抗化されている。試料諸元を Table 1 に示す。77K、垂直磁界下における磁化損失 Q_m は、ピックアップコイル法により測定した。

Fig. 1 に、垂直磁界下での損失ファクタ $\Gamma (= \mu_0 Q_m / 2B_0^2)$ を示す。比較のため、楕円モデルを適用して求めたフィラメント間に完全に結合している場合のヒステリシス損失 Q_h に対する Γ を図中に示す^[2]。別途評価した本試料の結合周波数 f_c が 160 Hz であることを反映して^[3]、80 Hz 以下の Γ は 3 mT 以上の範囲において結合時の Γ より低減されている。 Γ が極大となる磁界振幅 B_0 は測定周波数に対する中心到達磁界 B_p にほぼ一致するが、65 Hz 以下ではその値が周波数によらずほぼ一定であることが分かる。これより、65 Hz 以下でのヒステリシス損失成分 Q_h は周波数に依存せず、周波数増加による Γ の増大は結合損失 Q_c の寄与であると推測される。各損失の周波数特性を考慮して 65Hz 以下の損失測定値に対して、(1)式でのフィッティングを行い、各 B_0 に対する Q_h の算出を試みた。

$$Q_m = Q_h + Q_c = Q_h + q_c \frac{f/f_c}{1 + (f/f_c)^2} \quad (1)$$

算出したヒステリシス損失 Q_h と 45 Hz における磁化損失 Q_m の比較を Fig. 2 に示す。 $B_0 > 5$ mT において、 Q_h は完全結合時 (実線) の値と比較して 1/3 程度に低減されているが、商用周波数域での Q_c の寄与が大きいため、磁化損失全体としての低減効果は小さくなっていることが分かる。今後、 J_c および f_c を更に向上させた試料において、 Q_c および Q_m の低減効果を更に検証する必要がある。

Table 1. Specification of twisted Bi2223 tape with Ag-8wt%Au alloy sheath.

Number of filaments	19
Twist pitch L_t	4 mm
Tape cross section	2.50 mm × 0.25 mm
Filamentary region	2.20 mm × 0.18 mm
Averaged filament size	0.37 mm × 0.017 mm
J_c at 77 K and 0 T	11 kA/cm ²
Fraction of Bi2223 filaments	23%

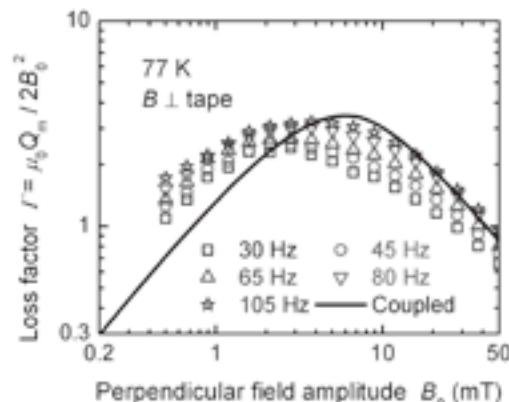


Fig. 1. Loss factor $\Gamma = \mu_0 Q_m / 2B_0^2 S_{\text{tape}}$ at various fixed frequencies of twisted tape with Ag-Au alloy matrix plotted against perpendicular field amplitude B_0 .

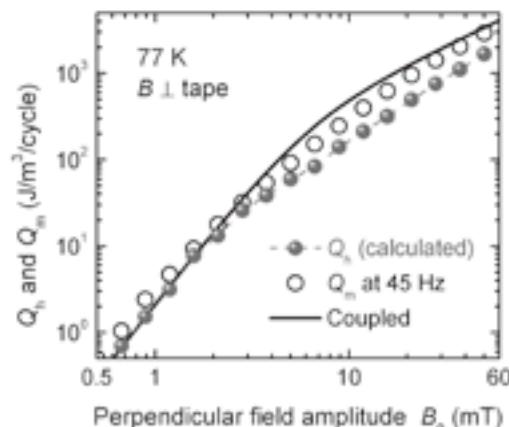


Fig. 2. Comparison of estimated hysteresis loss component Q_h and total magnetization loss Q_m at 45 Hz.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (No. 20686020)、(財)東電記念科学技術研究所研究助成、(財)中部電力基礎技術研究所研究助成 (R-20302) および豊橋技科大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] R. Inada, et al.: Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 085014.
- [2] B. ten Haken, et al.: Physica C **377** (2002) 155.
- [3] R. Inada, et al.: Abstracts of CSJ Conference Vol.80 (2009) 85.

低交流損失 Bi-2223 超電導線の開発(5)

－交流損失のツイストピッチ依存性－

Development of low AC loss Bi-2223 superconducting wires (5)

- Effects of twisting on AC losses -

野上 広司, 山崎 恵士, 船木 和夫, 岩熊 成卓(九大); 綾井 直樹(住友電工); 福本 祐介, 上條 弘貴(鉄道総研)
 NOGAMI Koji, YAMASAKI Satoshi, FUNAKI Kazuo, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);
 AYAI Naoki, (Sumitomo Electric Industries); FUKUMOTO Yusuke, KAMIJO Hiroki (Railway Tech. Res. Institute)
 E-mail:nogami@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 Bi-2223 系超電導線による超電導化の可能性について検討しており、実現のための課題となる超電導線材の交流損失の低減を検討してきた。

本報告では、前回の試作線材[1]に比べ、芯数を増やしたツイストピッチの異なる線材の交流損失特性を計測し、交流損失特性の評価を行う。特に、ツイストが交流損失特性(ヒステリシス損失や結合損失)に及ぼす影響について詳細に議論する。

2. 低交流損失線材の試作

低損失化のために細芯化した、ツイストピッチの異なる 55 芯線材線材 (AC90-S1000, AC90-S2000) を試作した。主な諸元を Table 1 に示す。

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

AC90-S1000 における垂直磁界損失を Fig. 1 に示す。大磁界振幅領域において交流損失の周波数依存性が見られ、フィラメント間の電磁気的結合が顕著に現れている結果と解釈できる。

2 つの試料の交流損失の周波数依存性からテープ状多芯線の結合時定数を算出した。その結果を Table 1 に示す。AC90-S1000 を基準とした結合時定数比は 1:0.16 となり、ツイストピッチの 2 乗比 1:0.11 にほぼ等しく、損失の周波数依存性は以前測定を行った 37 芯線材[1]と同様に多芯線の結合損失理論によりほぼ説明できた。

また、交流損失の低周波数極限として見積もったヒステリシス損失にもツイストピッチ依存性が見られた。これと同様な現象が *in-situ* 法により作成された Nb₃Sn 多芯線においても観測されている(ここでは、ツイスト効果と

呼ぶ)[2]。磁界振幅が中心到達磁界より十分大きい領域では、ヒステリシス損失と線材断面に対する等価的臨界電流密度は比例関係にある。AC90-S1000 を基準として、見積もったヒステリシス損失の比と理論的考察から得られた等価的臨界電流密度の比をとるとそれぞれ 1:0.55、1:0.48 となり、ほぼ一致している。このことから、ヒステリシス損失のツイストピッチ依存性は *in-situ* Nb₃Sn 多芯線において観測されたツイスト効果を用いて説明できることが分かった。

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。

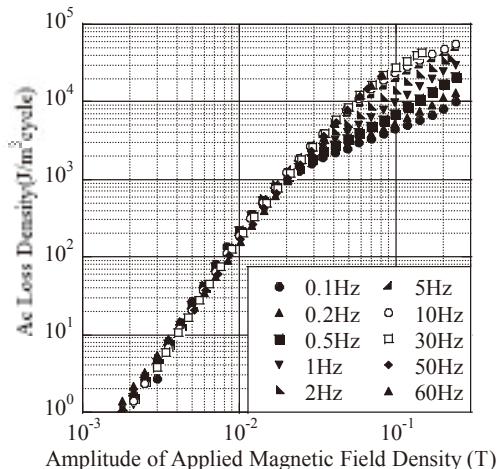


Fig. 1 Field amplitude dependence of ac losses(AC90-S1000)

参考文献

1. Y. Sasashige et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.78 (2008) p. 71.
2. A. Braginski et al.: IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-17 (1981) p. 243

Table 1 Parameters of Bi-2223 multifilamentary tapes

* Twist pitches were measured by an advanced method with uncertainty of 0.2 mm.

Parameter	AC90-S1000	AC90-S2000
Width (mm)	2.5	2.5
Thickness (mm)	0.18	0.18
Number of filament	55	55
J_e (kA/m ²) at s.f. and 77K	1.33×10^5	0.889×10^5
Twist pitch (mm)	9	3
Coupling time constant (s)	1.73×10^{-4}	2.83×10^{-5}
Twist pitch ratio	1	0.11
Coupling time constant ratio	1	0.16

ピックアップコイル群によるマルチフィラメント HTS 線材の電流分布測定

Measurement of AC current distributions in multifilamentary HTS tapes by a pickup coil array

宮原 和矢, 川畑 秋馬, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大・工); 和泉輝郎, 塩原 融 (SRL-ISTEC)

MIYAHARA Kazuya, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi,

SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)

E-mail:k2590086@kadaid.jp

1. はじめに

交流用高温超伝導機器の実用化のために、低損失加工されたマルチフィラメント HTS テープ線材の開発が精力的に行われている。このテープ線材内の電流分布特性を定量的に把握することは重要であるが、その特性評価法は未だ確立されていない。そこで本研究では、低損失加工された高温超伝導テープ線材内の電流分布を定量的に非接触で評価できる測定法を確立することを目的としている。本測定法では、極小サイズのピックアップコイル群を試料線材に直接貼り付けて試料線材表面付近の磁場分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を間接的に求める¹⁾。今回はピックアップコイル群の製作精度の改善やコイル群の設置精度の改善、ならびに電流算出プログラムの改良によって電流分布算出精度の向上を試みたので、その結果について報告する。

2. 測定用極小ピックアップコイル群

本研究で用いるピックアップコイル群は 30 個の極小サイズのコイルで構成されており、試料線材の自己磁場の周方向成分を測定できるように配置する。各コイルは $\phi 40 \mu m$ の極細 Cu 線で紙製のボビンに巻線されている。その断面積は $4.46mm \times 0.33mm$ 、コイル長は $0.25mm$ 、層数は 3、ターン数は 17 である。ピックアップコイル群は形状の変形を避けるために接着剤で固めたあと、 $100 \mu m$ 厚のマイラフィルムで上下から挟んだ構造にしている。

3. 測定精度の評価方法

測定精度の評価は、既知の電流を試験導体に通電したときの導体表面付近の磁場分布を測定し、その測定結果から数値計算により求めた電流分布と実際の通電電流とを比較することによって行った。試験導体には、スクライビング加工による低損失加工線材を模擬したものを用いた。この導体は、幅 $1.1mm$ の絶縁 Cu テープ線 5 本を横一列に並べたものである。各 Cu テープ線の通電電流値はシャント抵抗を用いて測定した。この他に、試験導体として、 $2mm$ 幅の GdBCO 線材を 5 本並べた模擬導体についても同様に測定した。

電流分布は以下に示す手順で、測定した磁場分布を使って数値計算により求めた。まず、テープ線材断面を幅方向に分割し、次に、分割したこれらの線材に電流分布を与え、それぞれの電流分布パターンに対する磁場分布を計算する。計算した磁場分布と測定した磁場分布とを最小二乗法を用いて比較して、最終的に電流分布を求める。電流算出プログラムにおいて、前回までは、幅方向に分割した各テープ線材の中心に線電流を配置して計算を行っていたが、今回は線電流の代わりに矩形断面電流を配置することで、電流算出精度の向上を図った。

4. 計算結果および測定結果

Cu テープ線 5 本から成る試験導体の磁場分布を誤差なしで測定できたと仮定したときの電流算出結果を Fig.1 に示す。横軸は電流値分割数であり、分割数が大きいほど発生させる

電流分布を細かく表現できることに対応している。縦軸は数値計算により算出した各 Cu テープ線の電流値と実際の通電電流との誤差であり、試験導体への 4 つの通電パターンに対する算出結果がプロットの種類を変えて示してある。電流算出計算に線電流を使用した場合には、電流算出誤差が電流パターンによっては数 10% になる場合があったが、今回の矩形断面電流の使用により、電流値分割数 N が 30 のとき電流算出誤差は 1% 未満となる結果が得られた。

Fig.2 は、Cu テープ 5 本から成る試験導体に実際に通電したときの測定磁場分布の結果を用いて算出した電流分布を表したものである。縦軸は電流値で、棒グラフは導体を構成する 5 本の各 Cu テープ 線の算出電流値、プロット点はシャント抵抗でモニタした電流値を示している。Cu テープの 5 本の場合、10% 未満の誤差で電流値が測定できることがわかった。Cu テープの本数を 10 本や 15 本に増やして、より細分化した導体の場合の算出精度の向上も図っている。5 本並列の HTS 模擬導体の測定結果は当日報告する。

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」事業の一環として、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) 宮原 他, 2009 年度春季低温工学・超電導学会講概要集, 1A-a05

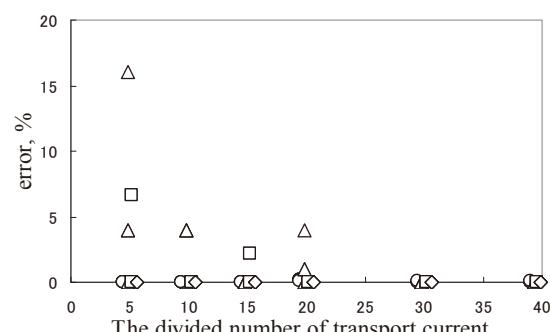


Fig. 1 Calculated results of current distributions.

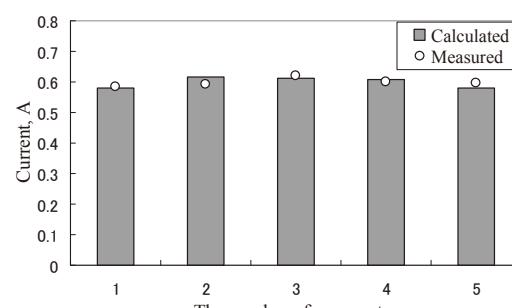


Fig. 2 Comparison between measured data and calculated ones.

磁気顕微法と有限要素法による RE-123 線材銀拡散接合部の 準 3 次元電流分布評価

Quasi-3D Current Distribution at Silver Diffusion Joints of RE-123 Coated Conductors Based on Magnetic Microscopy and Finite Element Method

東川 甲平, 本田 貴裕, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九大); 筑本 知子, 坂井 直道, 和泉 輝郎 (ISTEC)

HIGASHIKAWA Kohei, HONDA Yoshihiro, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
CHIKUMOTO Noriko, SAKAI Naomichi, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材の歩留まり向上ならびに応用機器への適用に際しては、同線材の補修・接続技術の確立が不可欠であり、同技術としては銀拡散接合法が提案されている^[1]。一方、更なる接続抵抗の低減や応用機器への影響を検討するためには、同接合部における電磁現象を詳細に把握する必要がある。そこで本研究では、銀拡散接合部を有する YBCO 線材を対象に、実験と数値解析の両面から同接合部の電流分布を評価した。具体的には、走査型ホール素子顕微鏡によって同電流分布をシート電流密度として評価し、3 次元有限要素法によって同電流分布を考察した。

2. 試料

実験・解析対象とした試料の写真を Fig. 1 に示す。同試料は、10 mm 幅の YBCO 線材に 7.5 mm の人工欠陥を導入し(以下、欠陥線材)，健全な線材(以下、補修用線材)を用いて銀拡散接合法による補修を施した構成となっている^[2]。

3. 走査型ホール素子顕微鏡による電流分布評価

電流分布の評価原理や本試料の測定結果に関しては既に報告しており、Fig. 2 に結果の一部を抜粋する^[2]。同図に示すように、電流分布はシート電流密度として 200 μm 程度の空間分解能で可視化され、これは欠陥線材と補修用線材の電流分布の重ね合わせに対応する。特に欠陥線材の臨界電流(20 A)以下の通電電流では欠陥が消失したかのように見え、それ以上の通電電流では欠陥付近に不均一な電流分布が見られる。

4. 3 次元有限要素法による電流分布評価

構成方程式としてパーコレーション遷移モデル^[3]を採用し、有限要素法(PHOTO-Series EDDY)によって得られた電流分布を Fig. 3 に示す。欠陥線材と補修用線材の電流分布の重ね合わせが実験結果の特徴を良く表現していることがわかる。また、欠陥線材における電流の回り込み(時計回り)を打ち消すような電流(反時計周り)が補修用線材に重畳されていることが示されている。さらに、上下両テープ線材の電流を分離できることから、欠陥線材から補修用線材への電流の移り変わりに関する定量的評価が可能となった。

5. まとめ・今後の展開

接合線材中の電流分布を実験と数値解析の両面から議論することが可能となり、今後は更なる接続抵抗の低減や交流環境下での電磁現象に関する知見も得られると期待される。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として 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(20360143, 20·01945)の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] J. Kato et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p. 241.
- [2] Y. Honda et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p. 174.
- [3] K. Yamafuji and T. Kiss: Physica C, Vol. 290 (1997) pp. 9-22.

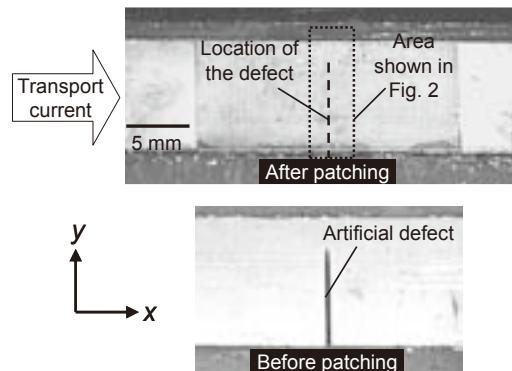


Fig. 1. Optical micrograph of the sample.

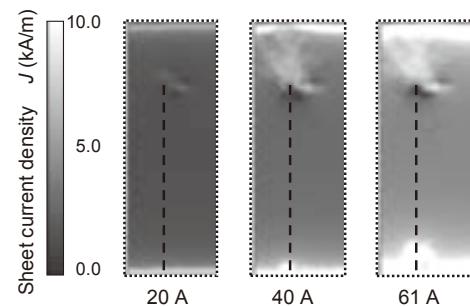


Fig. 2. Current distribution around the artificial defect obtained by the scanning Hall probe microscopy.

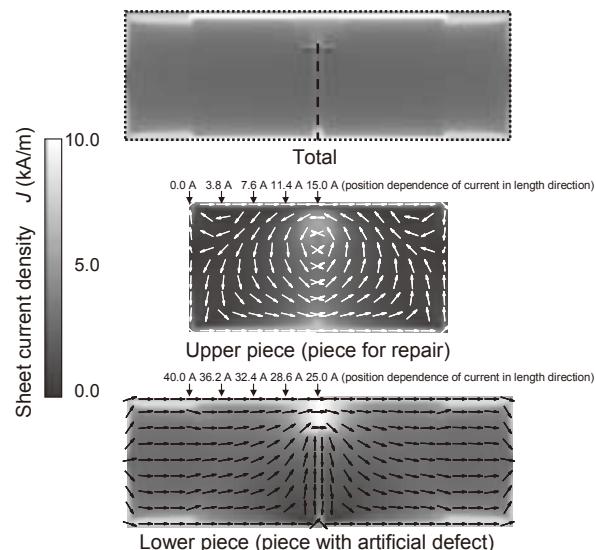


Fig. 3. Current distribution calculated by finite element method at the transport current of 40 A.

均一磁場空間生成のためのバルク超電導体の配置

Arrangement of Bulk Superconductors for Generating Homogeneous Magnetic Fields

安田 齊史, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)

YASUDA Hitoshi, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: yasuda@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

MRI や NMR は、バルク超電導体の応用が期待されている機器のひとつである。バルク超電導体は、直径数十 mm 程度の大きさながら、着磁条件によっては 17T もの強磁場を発生できる。バルク超電導体を小動物用 MRI の主磁場発生源として用いれば、MRI 装置の高分解能とコンパクト性を両立でき、医薬品の体内動態の基礎評価などに有用な装置となる。

MRI の主磁場発生用磁石には、歪みの無い画像を得るために、中心部に高い均一度を持つ磁場空間が必要である。本研究では、二つのリング形バルク超電導体を対向させる配置を基本として、バルク超電導体間のギャップと、着磁の際に印加する外部磁場強度とが、磁場均一度に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

Fig.1(a)に示すように、外径 46mm、内径 16mm、高さ 15mm のリング形バルク 2 個を対向させる配置で、解析モデルを作成した。超電導特性はビーンモデルで近似して、臨界電流密度は $1.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ とした。リング形バルクの軸方向に外部磁場を加えて、磁場中冷却法で着磁を行う場合を考えた。対向させたバルク間のギャップと、外部磁場の強度を、解析のパラメータとする。モデルの軸対称性を考慮して、r-z 平面での 2 次元解析を行った。超電導体内部の電流は、各要素の中心に電流を置いて、その要素における電流を代表させることとし、その分割は、 20×40 個とした。また、解析領域は、対称性を考慮して下半分のみとした。Fig. 1(b) に、外部磁場を 1T、ギャップを 5mm としたときの、バルク内部の電流分布を、(c) に、2 つのバルクの中間を通る面での z 方向磁場の分布を示す。

3. 結果

バルクの断面全体に電流が生じる 1.7T の外部磁場のもと、対向させた 2 個のバルクのギャップを変えながら解析を行った。ギャップは 2.5mm から 6.5mm まで、0.5mm ずつ変化させた。磁場分布の均一度を評価するために、中心から r 方向に 5.18mm 離れた点での磁場 B_1 と、中心の磁場 B_0 との差を、 B_0 で割った値を磁場変動と定義した。Fig. 2 に、中心磁場及び磁場変動とギャップとの関係を示す。これより、ギャップ 4.5mm 付近で磁場変動の値が 0 となり、もっとも均一な分布が得られることがわかった。これについて、定性的には次のような理由が考えられる。円環電流が発生する磁場は一般に、電流源近くでは円環形状を反映して中央が凹の分布になり、遠く離れると中央が凸になる。凹から凸に変わる高さで分布は最も平坦となり、今回のモデルでは、ギャップ 4.5mm の対向バルク中間面が、ほぼその高さであったと理解できる。

統いて、着磁の際に印加する外部磁場を変えて、解析を行った。外部磁場は、0.8T から、バルクの断面全体に電流が生じる 1.7T まで、0.1T ずつ変えて解析を行った。外部磁場強度と、その条件下で最も小さい磁場変動となるギャップとの関係を、Fig. 3 に示す。これより、外部磁場を強くすると、均一磁場の得られるギャップは短くなることがわかった。外部磁場を強くすると電流がバルク

中心深くまで侵入するため、上記のように円環電流とみなした時の実効的な直径が小さくなつたと考えられる。

4. 結論と今後の課題

リング形バルクの対向モデルについて二次元磁場解析を行った。それより、対向バルクのギャップ及び外部磁場と、磁場均一度との関係を明らかにした。今後、同サイズのバルク超電導体を使って実験を行い解析結果と比較する予定である。

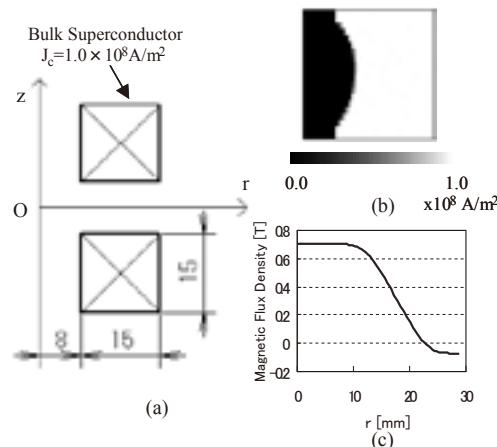


Fig.1 (a) Arrangement of bulk superconductors. (b) Current distribution in r-z section of bulk superconductor, (c) Magnetic field distribution on $z = 0$ plane.

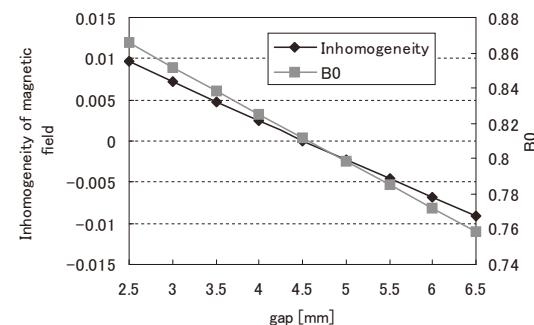


Fig.2 Dependence of magnetic field inhomogeneity and gap between bulk superconductors.

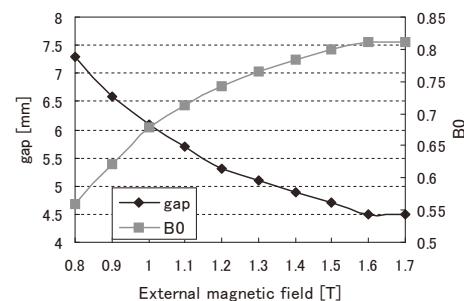


Fig.3 Trapped magnetic field intensity and the gap giving the minimum inhomogeneity for external magnetic fields ranging from 0.8 to 1.7 T.

準静的磁場により励磁する高温超伝導バルク磁石の温度と磁化挙動

Temperature and Magnetic behaviors of HTS Melt-Processed Bulk Magnet Activated by Quasi Static Magnetic Field

岡 徹雄 (新潟大学); 横山 和哉 (足利工大); 藤代 博之, 能登 宏七 (岩手大)
 OKA Tetsuo (Niigata University); YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Institute of Technology);
 FUJISHIRO Hiroyuki, NOTO Koshichi (Iwate University)
 E-mail: okat@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

溶融法で製造されるRE123系酸化物高温超伝導化合物の粗大な結晶は超伝導バルク磁石とも呼ばれる。その励磁方法にパルス着磁法(Pulsed field magnetization, PFM法)があるが、磁束の激しい運動によって大きな発熱が観測され、捕捉磁場性能は強く制限される。バルク磁石を磁場中で超伝導状態に冷却し(磁場中冷却法, Field cooling, FC法と略す)、かつ準静的な磁場を用いても、磁束の運動による発熱は無視できない[1]。一方、ゼロ磁場冷却法(Zero field cooling, ZFC法)はPFM法を準静的な磁場で行った場合に相当する方法である。本研究では、準静的な磁場による励磁過程での発熱と温度上昇を、小型冷凍機を用いた極低温で磁場の侵入挙動を通じて実験的に評価する。

2. 実験方法

溶融法で作成された磁気的に单一なSm系バルク磁石が、以下に示すFC法とZFC法による励磁実験に用いられた。寸法は直径45mm、厚さ15mmである。試料表面の温度はバルク磁石表面に貼付された5本の熱電対で、磁場はその表面の中心近傍に貼付したホールセンサ(F.W.Bell, BHT-921)で測定した。FC法では、バルク磁石は超伝導ソレノイド磁石のボア内部に挿入され、その常伝導状態で5Tの磁場を印加したまま、 T_c 以下の所定の温度まで冷却された。こののちそれぞれの磁場変化速度で磁場をゼロまで減衰した。ZFC法の場合、すでに超伝導状態にあって着磁されていないバルク磁石に対し、準静的な磁場を印加し、最大5Tの磁場に保ったのち、同一の磁場変化速度でゼロ磁場まで減磁した。励磁過程中の磁場変化速度は2.53mT/s、5.06mT/s、11.3mT/sの中から選ばれた。FC法とZFC法それぞれの場合、励磁開始の温度は45~68Kであった。

3. 実験結果と考察

3.1 磁場中冷却(FC)法での温度と磁場の変化

FC法での表面温度は磁場の減少に呼応して上昇し、減磁開始と同時にバルクの端面から磁束は流出しだす。発熱はバルク磁石の周辺部から始まる。Fig. 1に、FC法での位置平均の温度変化の最大値とFC後の捕捉磁場を、その初期平均温度と磁場変化速度に対して示す。平均温度の変化は初期温度によく依存し、低温ほど低い比熱と強いピン止め力のため大きな温度上昇を示す。2.56mT/sの低速での励磁でも47.6Kで2.23Kの温度上昇があり、準静的磁場による励磁でも温度上昇は無視できない。捕捉磁場性能は、低温領域では磁場変化速度による差異が少ないが、60K以上では明確に影響してくることが分かった。

3.2 ゼロ磁場冷却(ZFC)法での温度と磁場の変化

同じ試料によるZFC法での表面の平均温度と磁束密度の時間変化をFig. 2に示す。5Tの磁場を印加した後、一旦止まった温度上昇はピーク後に再び増加した。5Tの磁場に曝されたながらも中央付近は約2Tであるため、試料内部への磁束侵入は継続的に起こり続ける。磁束はクリープ現象を呈して試料内部に侵入する。より速い磁場の印加はより大きな発熱を生むが、遅い場合には加熱時間が長いため、両者の温度上昇は同程度となる。温度変化は発熱と冷却のバランスにより決まり、その発熱は試料内で不均質に起こることが分かった。また60Kからの励磁では、磁束の侵入と流出の過程で温度変化は大きな相違を見せ、これらの過程で磁束の運動や発熱の挙動が大きく異なることが示唆された。

参考文献

1. T. Oka, K. Yokoyama, M. Kaneyama, H. Fujishiro and K. Noto, *Physica C*, **426-431** (2005) 794-799.

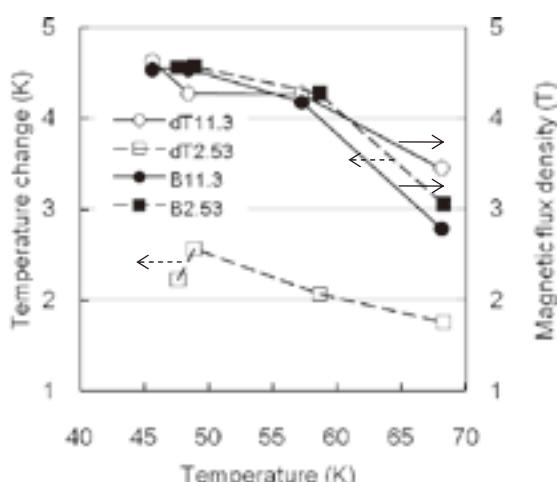


Fig. 1 The maximum values of temperature changes and the trapped magnetic flux densities during FC magnetizing process as a function of the sweep rates.

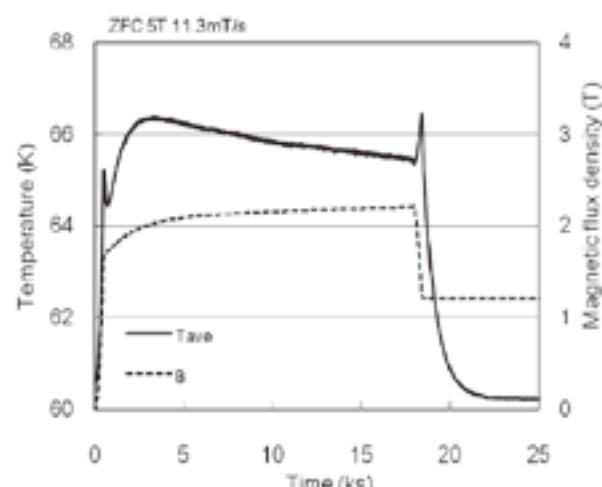


Fig. 2 Time evolution of the averaged temperature and the magnetic flux density measured on the bulk surface by a Hall sensor during the ZFC process.

Premix-PICT 拡散法で作製した MgB_2 バルク体の J_c 特性と微細組織

J_c property and microstructure in MgB_2 superconducting bulks fabricated by a Premix-PICT diffusion method

鳴田 雄介, 大橋 徹也, 波多 聰, 池田 賢一, 中島 英治(九州大学); 望月 利彦, 下山 淳一(東京大学)
SHIMADA Yusuke, OHASHI Tetsuya, HATA Satoshi, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu university);
 MOCHIZUKI Toshihiko, SHIMOYAMA Jun-ichi (University of Tokyo)
 E-mail: nk-y-shimada@mms.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 超伝導体には、臨界電流密度 (J_c) が低いという問題点がある。これは、通常の粉末焼結による作製方法では充填率が約 50%と低いことやピン止め効果が小さいことが原因とされている。最近開発された Premix-PICT (powder-in-closed-tube) 拡散法では、高密度で高い J_c 特性を示す MgB_2 バルク体が作製可能である[1]。本研究ではさらに高い J_c 特性を示す MgB_2 バルク体の作製指針を得ることを目的とし、作製条件の異なる Premix-PICT MgB_2 バルク体の微細組織観察を行い、 J_c 特性との関係を調査した。

2. 試料作製および実験方法

MgB_2 粉末(粒径 150 μm 、純度 99.9%)および非晶質または結晶の B 粉末(粒径 0.3 μm 、純度 99.95%)を混合し、Mg 粉末(粒径 1 μm 、純度 99%)と互いに隣り合うように Nb 管内に充填し、両端を一軸プレス後、真空中で Table 1 に示す種々の条件で熱処理を行い、 MgB_2 バルク体を得た。

各 MgB_2 バルク体について、20 K での J_c の磁場依存性を超伝導量子干渉素子(SQUID) 磁束計で測定した。

バルク体構成相の同定を X 線回折測定(XRD)により行った。また、反射電子(BSE: Backscattering Electron)検出器を備えた走査電子顕微鏡(SEM)を用いてマクロ組織を観察した。SEM 観察では他に、後方散乱電子回折(EBSD: Electron Backscatter Diffraction)法を用いた結晶粒径測定およびエネルギー分散 X 線分光法(EDS)による元素マッピングを行った。さらに、透過電子顕微鏡(TEM)を用いてナノ組織観察を行ったほか、走査透過電子顕微鏡(STEM)で、環状暗視野(ADF: Annular Dark-Field) STEM 法および EDS 組成マッピングを行った。

3. 結果および考察

Fig.1 に各試料の J_c の磁場依存性を示す。結晶 B を用いて作製した Sample C-900/25 では他の試料に比べて J_c が低下している。また、低温で短時間の熱処理により作製した Sample A-750/48 が最も高い J_c を示している。さらに、二段階熱処理を行った Sample A-750/48+800/100 では、一段熱処理材 A-750/240 に比べて、3T 以上で J_c での低下が著しい。

Fig.2 に Sample A-900/24 (a) および Sample C-900/25 (b) の SEM-BSE 像を示す。像コントラストからわかるように、非晶質 B から作製した試料 (a) に比べて、結晶 B から作製した試料 (b) では未反応 B 領域と MgO 領域が多い。これは、非晶質 B よりも反応性の低い結晶 B が未反応のまま残り、B と反応しなかった Mg が酸化して MgO を形成したものと考えられる。すなわち、結晶 B の使用は MgB_2 の生成量を減少させ、その結果、 J_c が全磁場域で低下する。

次に、熱処理条件の J_c 特性への影響について述べる。Sample A-750/48、A-750/240、A-900/24 について組織観察を行った結果、全ての試料において MgO が観察された。中でも、低磁場で J_c が低い Sample A-750/240、A-900/24 では、20 μm を越える大きさで MgB_2 の周りを球状に囲む MgO 多結晶領域が見られた。一方、一段階熱処理材では、大きさ約 10 nm で

約 30~50 nm の間隔で分散している MgO が多く存在するとともに、 MgB_2 の結晶粒径も小さく、二段階熱処理材よりも磁束ピンニング点が多い組織であることがわかった。

Table 1 Conditions of initial B powders and heat treatments.

Sample	Type of B powder	Heat treatment conditions
A-750/48	Amorphous	750°C-48 h
A-750/240		750°C-240 h
A-900/24		900°C-24 h
A-750/48 -800/100		750°C-48 h+ 800°C-100 h
C-900/25	Crystalline	900°C-25 h

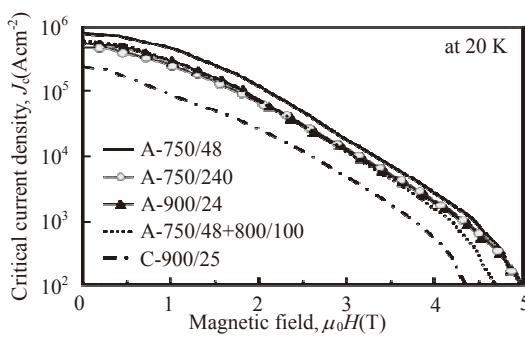


Fig. 1 J_c - H properties of MgB_2 bulks at 20 K.

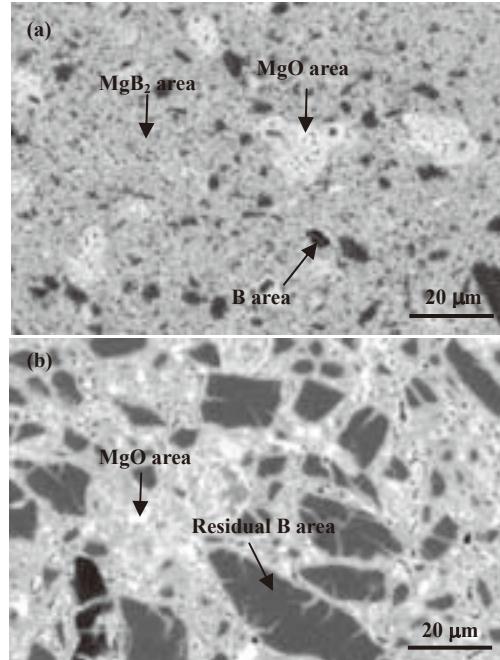


Fig. 2 SEM-BSE micrographs of sample A-900/24 (a) and sample C-900/25 (b).

参考文献

- I. Iwayama et al.: Physica C 460-462 (2007) 581-582.

高温超伝導体の低温における臨界電流特性の比較

Comparison of critical current properties of high- T_c compounds at low temperatures

下山淳一, 赤坂友幸, 石井悠衣, 望月利彦, 萩野拓, 岸尾光二(東大院工); 細井直樹, 林和彦(住友電工);

石角元志、社本真一(原子力機構); 伊豫彰、永崎洋(産総研)

SHIMOYAMA J., Akasaka T., Ishii Y., Mochizuki T., OGINO H., KISHIO K. (Univ. of Tokyo);

Ayai N., Hayashi K. (Sumitomo Electric Industries); Ishikado M., Shamoto S. (JAEA); Iyo A., Eisaki H. (AIST)

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

【はじめに】 冷凍機や液体水素などで比較的簡便に到達できる20 K近傍において稼働する超伝導設備・機器の開発は、将来のヘリウム供給の不安を考慮すると重要な課題である。一方、JIS規格で“高温超電導体”と定義される T_c が約25 Kを超える超伝導物質は数多くあり、材料化が進められている、または期待されているものとして、層状銅酸化物、MgB₂、層状鉄ニクタイドがある。MgB₂については発見当初より液体ヘリウムを用いずに実用できる金属系新超伝導材料候補として期待されたことから20 K近傍の物性が詳細に調べられてきた。しかし、層状銅酸化物材料については主に液体窒素温度近傍の物性が研究されており、また、昨年発見されたばかりの層状鉄ニクタイドは臨界電流特性の評価例は多くなく、特に T_c が高い1111相の大型単結晶を用いた研究例は極めて少ない。

以上の背景のもと、本研究では、これら高温超伝導物質の20 K近傍での臨界電流特性を評価・比較することによって、それぞれの特徴を明らかにすることを目指している。

【実験】 層状銅酸化物については材料化が活発に進められているBi系およびRE123系を取り上げ、前者では銀シースBi(Pb)2223線材($T_c = 112$ K)およびBi(Pb)2212単結晶($T_c = 91$ K)を、後者でY123溶融凝固バルク($T_c = 92$ K)に対して評価を行った。MgB₂については、最近我々が開発した高密度 c 軸配向多結晶体(ex-situ法: $T_c = 38$ K)を、また、層状鉄ニクタイドについては最近、産総研-原研が共同で高圧法による大型結晶育成に成功した酸素欠損PrFeAsO_{0.7}単結晶($T_c = 45$ K: $1.05 \times 0.65 \times 0.023$ mm³)を試料とした。これらの $H \parallel c$ における臨界電流特性の評価をSQUID磁束計を用いた磁化測定により行い、 J_c は磁化ヒステリシスの幅から拡張Beanモデルにより計算した。なお、Bi(Pb)2223線材についてはフィラメントの形状をもとに計算を行った。

【結果と考察】 Bi(Pb)2212単結晶、Bi(Pb)2223線材、Y123溶融凝固バルク、 c 軸配向MgB₂バルク、PrFeAsO_{0.7}単結晶の1 kOeにおける J_c の温度依存性をFig. 1に示した。PrFeAsO_{0.7}単結晶の J_c は15 K以下の低温で温度の低下とともに急激に上昇する傾向を示したが、20 K以上では多結晶MgB₂とほぼ同様な振る舞いであった。また、調べた試料全てが20 K、低磁場でおよそ 10^6 A cm⁻²の J_c を示した。これは超伝導発現機構、各種超伝導パラメータや結晶構造がそれぞれ大きく異なることを考えると、偶然の結果と見ることもできる。しかし、バルクと見なせる形状の試料間でかつ磁束線はBragg Glassの状態にあるときの一一致であることは興味深い。磁化緩和測定を行ったところ、磁化の大きさの時間変化はべき乗則の $J(t) = J_0 t^{-\alpha}$ で近似できることができた。Fig. 2には10 kOeにおける磁化緩和のべき指数 α の温度依存性を示した。銅酸化物やPrFeAsO_{0.7}と比べてMgB₂は25 K以下の低温で非常に小さい α を示し、これは永久電流応用への優位性を意味する。また、Y123溶融凝固バルク、Bi(Pb)2223線材、PrFeAsO_{0.7}単結晶

の α は25 K以下ではほぼ同程度であった。これらの試料間で J_c が大きく異なることから、ピンボテンシャルが同程度であることが推測できる。言い換えると、層状鉄ニクタイド超伝導体と銅酸化物超伝導体の低温におけるピン止め機構が結果的に類似していると考えられる。

講演では様々な温度、磁場下における J_c や α を示し、これら高温超伝導体の20 K近傍における材料応用の可能性を議論したい。

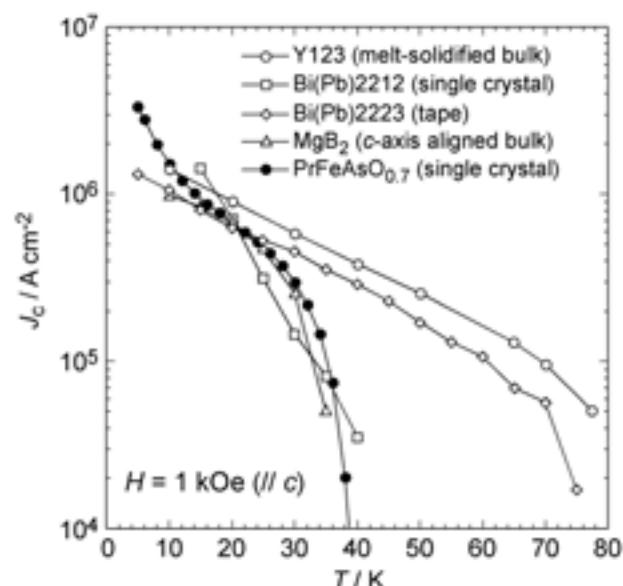


Fig. 1 Temperature dependence of J_c for various high- T_c materials under 1 kOe applied parallel to their c -axes.

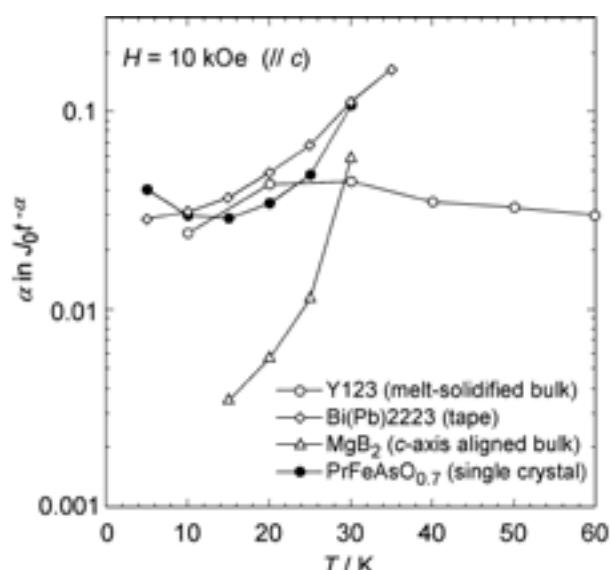


Fig. 2 Temperature dependence of the power index α of magnetic relaxation for various high- T_c materials under 10 kOe applied parallel to their c -axes.

IBAD-MgO 基板上に作製した PLD-GdBCO 線材の電流輸送特性の温度、磁場、角度依存性

Temperature, magnetic field and field angle dependence of current transport property in PLD-GdBCO/IBAD-MgO coated conductor

井上 昌睦, 東川 甲平, フーガ レネ, 木須 隆暢(九大); 淡路 智, 難波 雅史, 渡辺 和雄(東北大);

宮田 成紀, 衣斐 順, 山田 穂, 和泉 輝郎(ISTEC)

INOUE Masayoshi, HIGASHIKAWA Kohei, FUGER Rene, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

AWAJI Satoshi, NAMBA Masafumi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: inoue@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材の作製プロセスを高速化するため、極薄膜にて配向が得られるIBAD-MgOを中間層として採用する線材開発が進められている。本研究では、同中間層を用いた基板上に作製したGdBCO線材のE-J特性を広範な温度、磁場、角度領域に亘って調べるとともに、昨年の本学会にて報告したIBAD-GZO基板上に作製された高特性GdBCO線材[1]との特性比較について報告する。また、 J_c 値やn値だけではなく、E-J特性そのものを含めた電流輸送特性の温度、磁場、角度依存性の詳細についても報告する。

2. 実験

試料は、CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/Gd₂Zr₂O₇/Hastelloy基板上に、PLD法によりGdBCO膜を作製したもので、超伝導層の膜厚は1.2μmである。1cm幅の状態で400Aの J_c を有する線材を、幅100μm×長さ500μmのマイクロブリッジ形状に加工して直流四端子法による電流電圧測定を行った。77K、自己磁場の臨界電流密度 J_c は $3.5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ であった。なお、磁場の印加角度は基板面に対して平行方向($B//ab$)を0°、垂直方向($B//c$)を90°と定義している。

3. 実験結果及び考察

電界基準1μV/cmにて求めた J_c の温度、磁場依存性をFig.1に示す。いくつか典型的な温度、磁場下における J_c 値を見てみると、垂直磁場中にて $J_c(77K, 0.1T) = 2.4 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 、 $J_c(65K, 0.1T) = 5.6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 、 $J_c(65K, 3T) = 0.9 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 、 $J_c(20K, 10T) = 2.9 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ が得られている。これらは昨年度の本学会にて報告したIBAD-GZO基板上に作製された高特性GdBCO線材[1]に比べる2割程度低いものの、温度、磁場依存性そのものは良く一致しており、IBAD-MgO基板を用いて同程度の J_c - B - T 特性を有するGdBCO線材が得られるに至っていることが明らかとなった。 J_c の角度依存性についても同様に良好な再現されていることが確認できている。

Intrinsic pinが支配的となる平行磁場近傍においては、 J_c 値が高いにも関わらず、n値が低下することが知られているが、本線材においても同様の振る舞いが得られている。Fig.2に示した65Kにおける J_c 及びn値の角度依存性を見てみると、 J_c が 10^{10} A/m^2 前後であるにも関わらず、n値は12前後となっている。n値の低下は低電界領域における損失発生を懸念する指標となるが、平行磁場近傍におけるE-J特性べき乗則近似が成り立つかについては検証が必要である。E-J特性そのものを含めた詳細な議論については当日行う。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発(M-PACC)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(20360143)の助成を得て行ったものである。

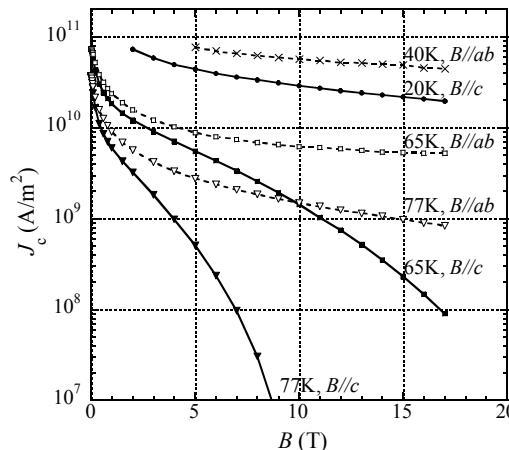


Fig.1 J_c - B characteristics at $B//ab$ (broken line) and $B//c$ (solid line).

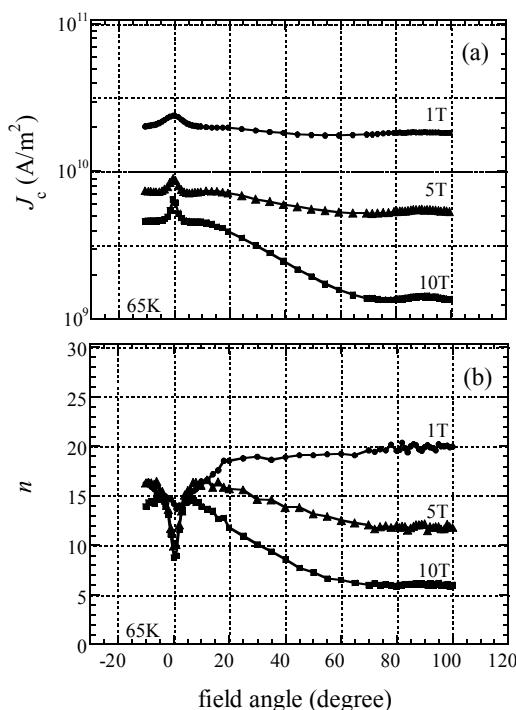


Fig.2 Field angle dependence of (a) and (b) n-value at 65K

参考文献

- [1] M. Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.172

Y 系薄膜線材の長手方向巨視的臨界電流密度分布と その通電特性への影響に関する統計学的検討

Statistical study on macroscopic critical current density distribution along the longitudinal direction and its effect upon the current transport property in Y-system coated conductors

中村 武恒, 竹内 活徳, 高村 豊, 岡田 奈々, 雨宮 尚之 (京大); 中尾 公一, 和泉 輝郎 (ISTEC-SRL)

NAKAMURA Taketsune, TAKEUCHI Katsutoku, TAKAMURA Yutaka, OKADA Nana, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

NAKAO Koichi, IZUMI Teruo (ISTEC-SRL)

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

1. はじめに 我々は、Y 系高温超電導線材の飛躍的性能向上を鑑み、同線材を適用した電力機器開発加速を指向して、線材特性と電力機器特性の両面から要求される仕様を明確化すべく包括的検討を実施している。本報告では、上記検討の第一ステップとして、線材の長手方向における巨視的臨界電流密度分布と、それが通電特性に与える影響を検討し、統計学的議論に耐えるバラツキとそれ以外の偶発故障的なバラツキに分離することに成功したので報告する。

2. 試料と Tapestar™ の結果 検討対象とした試料は、ISTEC-SRL において IBAD/PLD 法によって作製された。ハスティロイ基板(幅 10 mm)上に成膜後、レーザを使用して半分の幅に切断して試料とした。同試料の全長 2400 mm に亘り、Tapestar™ によって臨界電流密度分布を測定した。温度 77 K における測定結果を Fig. 1 に示す。同図から明らかなように、試料は 110 A 程度の高い平均臨界電流を有しているものの、その分布は特長的に大きな揺らぎを有しており、またスパイク状の局所的特性劣化を有している。後者については、この後議論するように、統計的議論に耐える劣化領域と偶発的故障部(d1 ならびに d2 部)に分離される。

3. Tapestar™による通電特性評価法 Tapestar™の測定結果を統計的に検討すべく、まず次のような加算を行った。即ち、試料内の区間 $[x_i, x_i + \Delta x_i]$ において、Tapestar™によって測定した臨界電流密度を $J_c(x_i)$ とする。ここで、 Δx_i は上記測定の空間的測定間隔であり、測定位置によって若干変化することから添字 “i” を付している。さらに、位置 x_i において発生する電圧 ΔV を次式で仮定する^[1]。

$$\Delta V(I, x_i) = K (I - J_c(x_i) \cdot \alpha)^{ni} \cdot \Delta x_i \quad (1)$$

ここで、 I 、 K 、および α は、それぞれ通電電流、係数、および超電導層断面積である。また、 ni は区間 $[x_i, x_i + \Delta x_i]$ において電圧発生を規定する “べき” 指数である。式(1)を、4 端子測定を実施する線材区間 $[l_1, l_2]$ に亘って加算すれば、同区間における V - I 特性を式(2)のように Tapestar™の結果から得ることができる。

$$V(I) = \sum_{x_i=l_1}^{l_2} \Delta V(I, x_i) = K \sum_{x_i=l_1}^{l_2} (I - J_c(x_i) \cdot \alpha)^{ni} \cdot \Delta x_i \quad (2)$$

なお、Tapestar™で評価される臨界電流密度 $J_c(x_i)$ は、IEC 規格で適用される一般的電界基準 ($100 \mu\text{Vm}^{-1}$) よりも 2 衍程度小さな電界で評価されており、つまり上記一般的電界付近における損失発生の様相を議論する上で、式(1)、(2)を使用する妥当性が保証されている。

4. 4 端子法による通電特性との比較検討 Fig. 3 には、タップ①-②間に4端子法で測定した通電特性(実線)を示す。さらに、Tapestar™の結果をもとに式(1)、(2)を適用して得られた E - I 特性(○印)を重ねてプロットしているが、両者は良く一致している。この一致は、異なるスケールの端子間(①-③, ①-④)についても同様に得られた。しかしながら、同様の比較を端子間(①-⑧)について実施したところ、両者には大きな乖離が見られた。このことは、Fig. 1 の欠陥 d1 ならびに d2 における損

失発生のメカニズムが、他の特性劣化部と明らかに異なり、つまり統計的議論に耐えない偶発故障的な特性劣化であることを示している。なお、上記議論では全ての区間について ni を固定($ni=8$)しており、その物理的意味に関する考察は講演当日に報告する。

謝辞 本研究は、イットリウム系超電導電力機器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の委託のもと、国際超電導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

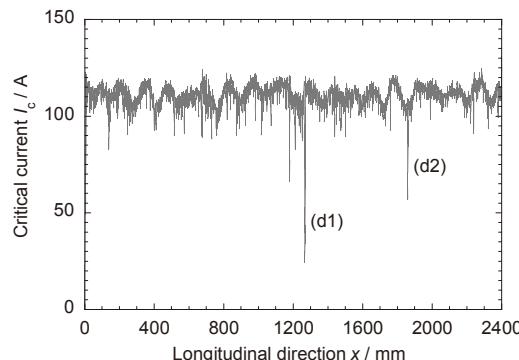


Fig. 1 Longitudinal distribution of critical current obtained from Tapestar™ at 77 K (Tape width: 5 mm).

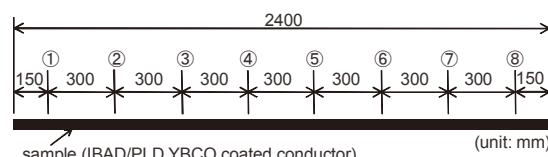


Fig. 2 Potential taps configuration of the tape.

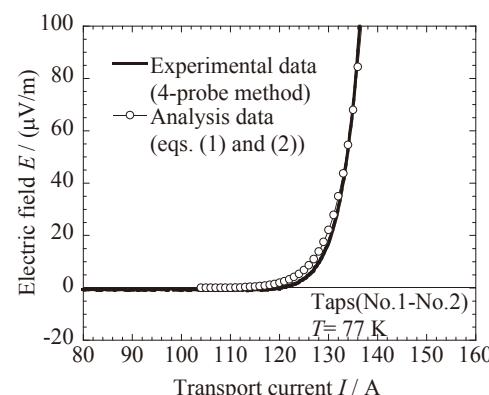


Fig. 3 Comparison of E - I curves between 4-probe method and tapestar™ (eqs. (1) and (2)) at 77 K (Taps: No. 1-No. 2).

参考文献

- [1] 和久田毅:九州大学博士論文 (1997)

In-plume PLD 法で reel-to-reel 成膜した GdBCO 線材の磁場中 I_c 特性

In-field I_c characteristics of GdBCO coated conductors prepared by reel-to-reel in-plume PLD method

筑本 知子, セルゲイ・リー (ISTEC); 加藤 丈晴, 平山 司 (JFCC); 田辺 圭一 (ISTEC)
CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey (ISTEC), KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC); TANABE Keiichi (ISTEC)
E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

我々のグループでは、イットリウム系テープ線材の超電導層の製造法として、基板-プルーム間距離を短くして成膜する in-plume PLD 法の開発を行っており [1]、GdBCO 系において I_c 値が 300A/cm 以上の長尺線材を 30m/h の製造速度で再現性良好得られるまでになっている。

一方、SMES や超電導磁石等の機器応用においては、 I_c の磁場強度及び磁界角度依存性が重要なパラメーターとなってくる。そこで、本研究では、in-plume PLD 法により IBAD-MgO 基板上に reel-to-reel(RTR) 成膜した GdBCO 線材の 77K における I_c の磁場強度及び磁界角度依存性を測定し、成膜時の搬送速度や成膜回数の影響(厚さの影響)等について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

成膜には CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板) ($\Delta\phi = 4\text{--}5^\circ$) を用いた。GdBCO 層は XeCl エキシマレーザ(レーザーパワー: 650mJ、発振周波数: 280Hz)を用いて、TS 間隔 6cm で RTR 成膜を行い、酸素分圧、温度は一定とし、基板の搬送速度(線速)を 20~60m/h の範囲で変化させた。なお、用いたターゲット組成は GdBa_{1.8}Cu₃O_y で得られた膜の Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) 法による分析組成は線速によらず、ほぼ Gd_{1.1}Ba_{1.9}Cu₃O_y であった。作製したテープは Ag を 10 μm 程度スパッタ蒸着後、酸素気流中で酸素アニール処理を行った。 I_c 測定は液体窒素中四端子法で行い、1 μV/cm の電圧基準で I_c 値を決定した。

3. 実験結果

Fig. 1 に線材の製造速度と自己磁場中の I_c の関係を示す。ここで、線速を成膜回数で除したものを製造速度とした。製造速度が速くなるにつれ、 I_c 値はほぼ直線的に低下していることがわかる。ICP-AES 分析より計算で見積もった膜厚は 30m/h では約 1μm、15m/h では約 2μm とほぼ製造速度に比例して増加していることから、2μm の膜厚まで、 I_c の大きな低下がないということを示唆する。

Fig. 2 に製造速度が 15m/h (30m/h ÷ 2 パス) と 20m/h (20m/h ÷ 1 パス) の時の I_c -B 曲線の比較を示す。磁場印加方向が $\theta = 90^\circ$ ($B//ab$)、 $\theta = 180^\circ$ ($B//c$) とともに、低磁場では、15m/h の製造速度の方が大きな I_c 値が得られており、厚膜化が有利なことがわかる。しかしながら、3 T を超える高磁場では両者の差が殆どなくなる結果となつた。

そこで、これらの試料の 3T における磁場印加方向依存性 (I_c -θ 曲線) の比較を行ったところ、Fig. 3 に示すように、90° と 180° の I_c 値はほぼ一致するものの、15m/h の試料においては、 $\theta = 90^\circ \pm 20^\circ$ 付近にサイドピークが現れ、それによって I_c が向上していることがわかる。このピークについて、さらに詳細に調べた結果、膜厚(製造速度)よりも線速に大きく影響を受けることがわかった。当日は TEM 觀察の結果等も示しながら、ピークの起源について考察を行う。

4. 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。なお、本研究で用いた IBAD-MgO 基板の提供いただきました、ISTEC の吉積氏他線材研究開発部の皆様に感謝致します。

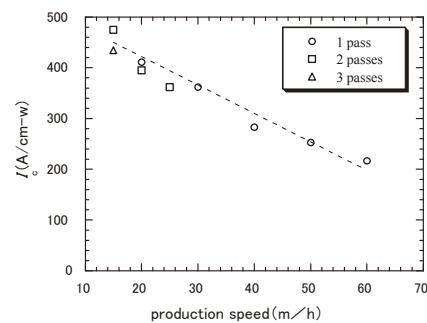


Fig.1 Relationship between I_c and production speed.

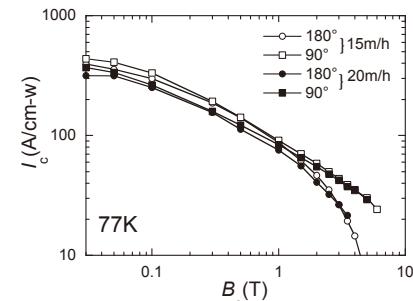


Fig.2 Comparison of I_c -B curves of $B//ab$ ($\theta = 90^\circ$) and $B//c$ ($\theta = 180^\circ$) for the tapes produced at different production rates, 15m/h and 20m/h.

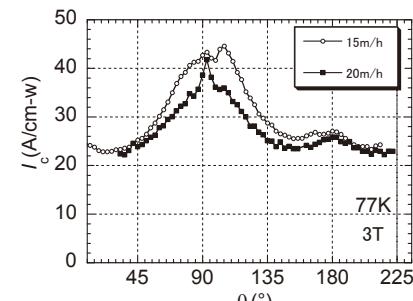


Fig.3 Comparison of I_c -θ curves for the tapes produced at different production rates, 15m/h and 20m/h.

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.116

ナノ粒子分散 TFA-MOD YGdBCO 線材の不可逆磁場特性

Irreversibility line up to 65 T in nanoparticles dispersed

TFA-MOD YGdBCO coated conductors

三浦正志(LANL, JSPS, 超工研), Scott A. Baily, Boris Majorov, Leonardo Civale, Jeffrey O. Willis (LANL),

和泉輝郎, 田辺圭一, 塩原融(超工研)

MIURA Masashi (LANL, JSPS, SRL), Scott A. Baily, Boris Majorov, Leonardo Civale, Jeffrey O. Willis (LANL),

IZUMI Tetsuo, TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: m_miura@istec.or.jp

1. はじめに

(財)国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所は、高温超電導体の高不可逆磁場に関する米国ロスアラモス国立研究所と共同研究を行っている。不可逆磁場(H_{irr})は、臨界電流密度(J_c) $\neq 0$ の領域を示し、実用上の臨界磁場となる。REBa₂Cu₃O_y(RE123, RE = rare earth)超電導線材の超高磁場における H_{irr} を向上させることは、更なる超電導線材の応用を広げると考えられる。 H_{irr} は、磁束相互作用、ピンニング、熱的エネルギーによって決まる。

これまで REBCO 線材の磁場応用を念頭に、TFA-MOD (Trifluoroacetates Metal Organic Deposition) REBCO 線材に人工的に磁束ピンニング点を導入し、磁場中特性の向上に努めてきた。その結果、得られた 3 次元 BaZrO₃(BZO) ナノ粒子と高密度な 2 次元双晶欠陥を有する (Y_{0.77}Gd_{0.23})Ba₂Cu₃O_y+BZO 線材は YBCO 線材に比べて、磁場中 J_c の改善がみられ、さらに非常に等方的な J_c - B - θ 特性を得ることに成功した[1]。

従来、ほとんどの不可逆磁場やグラス-液体転移に関する報告は、1種類の磁束ピンニング点を有する単結晶または単結晶基板上の薄膜であり、20 T 以下の磁場における評価であった。本研究では、米国ロスアラモス国立研究所(LANL, NHMFL)の 65T パルスマグネットを用いて、2種類(3次元 BZO+高密度な2次元双晶欠陥)の磁束ピンニング点を有する YGdBCO+BZO 線材の超高磁場における不可逆磁場の測定を行いボルテックス相の起源の検討を行った。

2. 実験方法

IBAD 中間層付金属基板上に YGdBCO+BZO 及び YBCO 線材を作製し、LANL, NHMFL の 65T パルスマグネットを用いて超高磁場特性を調べた。65T パルスマグネットを用いた金属基板上の線材特性評価では、パルスマグネット中における金属基板からの発熱の問題が懸念されていた。そこで本研究では、金属基板からの発熱を抑制するために、サンプルサイズを 3.0mm×3.5mm、超電導層のブリッジ幅を 200 μ m まで減らし、測定を行った。

作製した線材は、結晶構造評価を X 線回折(XRD)法、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-電圧特性から算出した。また、微細構造観察を透過型電子顕微鏡(TEM)により行った。

3. 結果と議論

金属基板の発熱の影響を調べるために、DC マグネットの ρ/ρ_N - T 特性とパルスマグネットの ρ/ρ_N - H 特性を調べたところ、ほぼ一致していることが確認され、金属基板上の REBCO 線材でもパルスマグネットでの測定が可能であることを確認した。

次に2種類(3次元 BZO+高密度な2次元双晶欠陥)の磁束ピンニング点が YGdBCO+BZO 線材の $H//ab$, $H//45^\circ$, $H//c$ の不可逆磁場に及ぼす影響を調べた。その結果、 $H//ab$ においては、YBCO とほぼ同程度の H_{irr} を示すことが確認された。これは、BZO よりも ab 面相關ピンである積層欠陥や固有ピンが支配的であると考えられる。 $H//c$ においては、YGdBCO+BZO 線材は、YBCO に比べて 60T の超高磁場まで高い H_{irr} を示すことが確認された。これは、 $B < B_\phi$ (マッティング磁場)では、YBCO に比べて高密度に存在する $H//c$ に相關した双晶欠陥が支配的であり、 $B > B_\phi$ においては、徐々にランダムピンの影響が出てくるため、2種類(3次元 BZO+高密度な2次元双晶欠陥)の磁束ピンニング点が有効的に働いていると考えられる。一方、 $H//45^\circ$ においては、YBCO に比べて 60T の超高磁場まで大幅な H_{irr} の向上が確認された。これは、特に 3 次元 BZO の影響が強いと考えられるが、2種類(3次元 BZO+高密度な2次元双晶欠陥)両方の磁束ピンニング点が有効的に働いているとも考えられる。当日は、 ρ/ρ_N - H 特性を用いてグラス-液体転移に関する議論する。

謝辞

本研究の一部は、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。本研究の一部は、(独)日本学術振興会の特別研究員奨励費(20・4011)の助成を得たものである。

また、米国ロスアラモス国立研究所における研究は、US DOE, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, NHMFL-UCGP と US NSF の支援を受けたものである。

参考文献

[1] M. Miura et al., Appl. Phys. Express 2 (2009) 023002

ナノロッドを導入したYBCO超電導薄膜の磁場中特性 In-field superconducting properties of nanorod doped YBCO films

松本 要, メレパオロ(九工大); 一瀬 中(電中研); 吉田 隆(名大); 向田昌志(九大); 喜多隆介(静大)
MATSUMOTO Kaname, MELE Paolo (KIT); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ)
 MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ)
 E-mail: matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. はじめに

磁場中特性に優れたYBCOコーテッドコンダクターの開発が進んでおり、YBCO層のさらなる特性向上が期待されている。BaZrO₃(BZO)やBaSnO₃(BSO)などのナノロッドを導入したYBCO薄膜は、*c*軸に平行に磁場が印加された場合に *J_c* の大幅な向上が起こり、この方向に *J_c(B//c)* のピークが現れることが知られている。一般にBZOナノロッドとBSOナノロッドを比較した場合、BSOの方がナノロッド導入による *T_c* 低下の影響は小さく、また同等の基板温度で成膜した場合、BSOナノロッドの方が太く、薄膜中でまっすぐに成長する傾向がある。このため、BSOナノロッドは、ローレンツ力による量子化磁束の運動に拮抗して強いピン止め力を及ぼすものと期待され、実際に、77K、*B//c*においてBSOナノロッドはBZOナノロッドの約2倍の要素的ピン止め力を有していることが明らかになっている。この理由としては、BSOの方がBZOに比べてYBCOとの格子整合性において優れていることが関係している。その結果として、①格子不整合に起因する *T_c* の低下が小さい、②成膜時のアドアトムの表面拡散係数も大きく同一供給量・成膜温度の場合には、BSOの方が太いナノロッドに成長していく、等々が予想される。ナノロッド物質に関しては、これ以外に、パイロクロア型タンタレート相(Re₃TaO₇)やダブルペロブスカイト相なども提案されており研究が進んでいる。

しかし、ナノロッドにおけるピン止め機構や *J_c* 特性を定量的に評価・理解することには必ずしも成功しているとは言えない。そこで本研究では、ピン止め相互作用とともに、量子化磁束の自己形成エネルギーにも着目し、ナノロッドによるピン止め力を定量的に解析することを目的とした。

2. 方法

解析にはPLD法でSrTiO₃(100)単結晶基板上に成膜したYBCO薄膜を用いて行った。ここでYBCO薄膜には人工ピン止め点としてBaZrO₃ナノロッドおよびBaSnO₃ナノロッドを3~5wt%程度導入したものを用いた。なおナノロッドの導入にはBaZrO₃あるいはBaSnO₃を所望量添加した混合ターゲットを用いた。得られた薄膜試料はパターニングによって線幅100μmとし、電圧タップ間距離は2mmとした。薄膜試料の *T_c* と磁場中 *J_c* およびその磁場印加角度依存性はPPMS(物理特性測定装置)を用いて測定した。またナノロッドの微細組織には透過型電子顕微鏡を用いてその断面構造を評価した。一方、超伝導特性の解析には、基本的には次のBlatterのスケーリングパラメータの式

$$\varepsilon(\theta) = (\cos^2\theta + \gamma^{-2} \sin^2\theta)^{1/2} \quad (1)$$

を用いた。ここで θ は *c* 軸方向と磁場方向のなす角度、 γ は異方性パラメータである。またナノロッドのピン止めエネルギーは

$$U_0 = (1/2)\varepsilon_0 \ln(1 + c_0^2 / 2\xi_{ab}^2) \quad (2)$$

に異方性による補正を加えて計算を行った。これらを用いてナノロッドの *J_c* の磁場印加角度依存性などを解析した。

3. 結果と考察

Fig.1(a), (b)に解析に用いたBZOおよびBSOナノロッドの断面TEM写真の例を示す。どちらも組成は4wt%である。試料は同じ基板温度800°Cで作製された。このとき、BZOナノロッドの直径は3.3nm、BSOナノロッドは6.8nmであり、かつマッチング磁場 $B\phi = n\phi$ はそれぞれ11.2Tおよび2.3Tであった。また同様にFig.1(c), (d)には同じ試料の77Kにおける磁場印加角度依存性を示した。BSOナノロッドの方が、*B//c*における *J_c* の増大が顕著であり、BSOナノロッドのピン止め力が大きいことがこれからも明らかである。

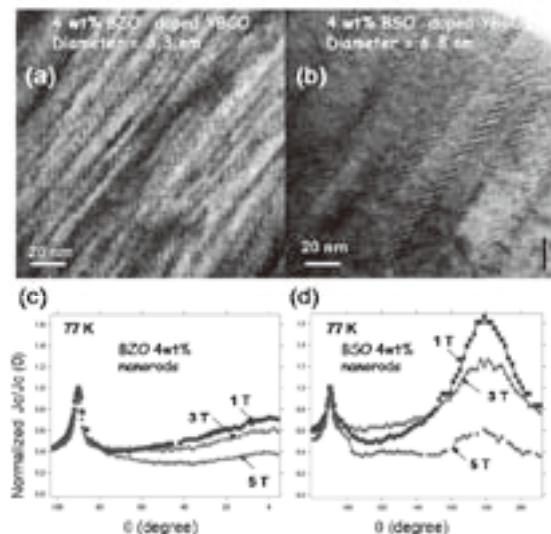


Fig.1 TEM cross sections of BZO and BSO nanotods in YBCO films (a) and (b). Field angular dependences of *J_c* for BZO and BSO nanorods in YBCO films.

しかしながら、BZOとBSOナノロッドの物質の違いによつてこれら *J_c* の角度依存性等の違いは必ずしも明らかではない。そこでここでは、Fig.2に示す階段状のピン止めモデルを用いてピン止めの解析を行つた。このモデルを用いるとBZOとBSOナノロッドのピン止め力の違いがうまく説明できる。詳細については当日報告する。

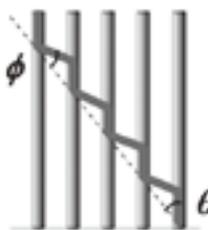


Fig.2 Vortex pinning model for vortex staircase with columnar defect

参考文献

参考文献
 K. Matsumoto, T. Horide, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, R. Kita, S. Horii, "Ultra-high flux pinning properties of BaMnO₃-doped YBa₂Cu₃O₇ thin films (M=Zr, Sn)", Supercond. Sci. Technol. **21**, pp. 032002, 2008.

交差した柱状欠陥を導入した YBCO 薄膜の臨界電流密度の磁場角度依存性

Angular dependences of critical current density in YBCO thin films
with crossed columnar defects

末吉哲郎, 十河雄大, 米倉健志, 足立明隆, 藤吉孝則, 光木文秋, 池上知顯(熊本大);
石川法人(原子力機構); 淡路智, 渡辺和雄(東北大)

SUEYOSHI Tetsuro, SOGO Takehiro, YONEKURA Kenji, ADACHI Akitaka, FUJIYOSHI Takanori, MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.); ISHIKAWA Norito (JAEA); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導体 REBCO の高磁場特性の改善のために、様々な人工ピンの導入が試みられている。この中でもナノロッドのような 1 次元ピンは、その方向に顕著な臨界電流密度 J_c の向上を示すために、 J_c の異方性の改善に対しても有効である[1]。このナノロッドは、これを形成する Ba を含む酸化物の種類によりその成長方向に分散が生じ、ピンニング特性に大きく影響を与えることが報告されている[2]。本研究では、容易に 1 次ピンの方向を制御できる重イオン照射により、二方向の平行な柱状欠陥を交差して YBCO 薄膜内に導入し、臨界電流密度の磁場角度依存性に対する柱状欠陥の交差角の影響について調べた。

2. 実験方法

KrF エキシマレーザーを用いた PLD 法により、SrTiO₃ 基板上に YBCO 薄膜を作製した。作製した薄膜は、フォトリソグラフィーにより幅約 40 μm、長さ 1 mm のブリッジ状に加工した。試料の膜厚は約 300 nm である。柱状欠陥を導入するための重イオン照射は、原子力機構のタンデム加速器にて 200 MeV の Xe イオンを用いて行った。柱状欠陥を交差させるために、 c 軸に対して 2 方向より照射を行った。照射の交差角が ±10°, ±25°, ±45° の試料をそれぞれ sp10, sp25, sp45 とする。参照試料として、 c 軸に対して -6° の角度で 1 方向の平行な柱状欠陥を導入した pa06 を用意した。照射方向は試料のブリッジ方向に対して常に垂直に行っている。また、全ての試料で柱状欠陥のトータルの密度がマッチング磁場 $B_\phi = 2$ T になるように照射を行った。臨界電流密度 J_c は、四端子法を用いた通電特性から電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m で定義した。 J_c の磁場依存性の測定においては、磁場は常に試料の c 軸に平行に印加した。また、 J_c の磁場角度依存性では、電流と常に直交するように磁場を印加し、磁場と c 軸のなす角度 θ とした。

3. 結果および検討

Fig.1 に、磁場を c 軸方向に印加したときの $T = 77.3$ K での自己磁場の臨界電流密度 J_{c0} で規格化した J_c の磁場依存性について示す。未照射の YBCO 薄膜(pure YBCO)より照射試料の J_c が、低磁場で特に高い。高磁場では、交差角が大きい試料で、磁場に対する J_c の減少が顕著になっている。高磁場では、柱状欠陥の方向の分散領域に対して磁束線格子間隔が小さくなるために、柱状欠陥が相関ピンとして作用し難くなると考えられる[3]。

Fig.2(a), (b) に、マッチング磁場 $B_\phi = 2$ T 付近の sp10 と sp45 の J_c の磁場角度依存性について示す。両試料において、 $\theta = 90^\circ$ でピークが見られる。これは、固有ピンニングによるものである。これに対して、 $\theta = 0^\circ$ 付近での J_c の磁場角度依存性に現れるピークの振る舞いは大きく異なる。sp10 では、 $\theta = 0^\circ$ 付近の一つのピークが現れ、磁場増加とともに小さくなっていく。pa06, sp25 においても、sp10 と同様の振る舞いを示す。一方 sp45 では、低磁場では $\theta = 0^\circ$ 付近でほぼ平らで幅広い単一のピークを示すが、マッチング磁場と等しい 2 T 付近では、 $\theta = 0^\circ$ 付近での J_c が減少し、代

わってその両側に二つのピークが現れる。更に磁場が増加すると、この二つのピークは消失し、 $J_c(\theta)$ は $\theta = 0^\circ$ 付近で急勾配にくぼんだ形となる。交差角の小さい場合には、磁束線は柱状欠陥に絡んだ状態でピンニング、いわゆるスプレーグラス状態となり[4]、このため c 軸方向に鋭いピークが現れる。交差角が大きい場合、 $B \parallel c$ の高磁場では磁束線間の相互作用が強くなるために、磁束線は柱状欠陥に捕捉され難くなる。このため、 $B \parallel c$ において J_c が急激に低下し、柱状欠陥の二方向でピークが生じると考えられる。

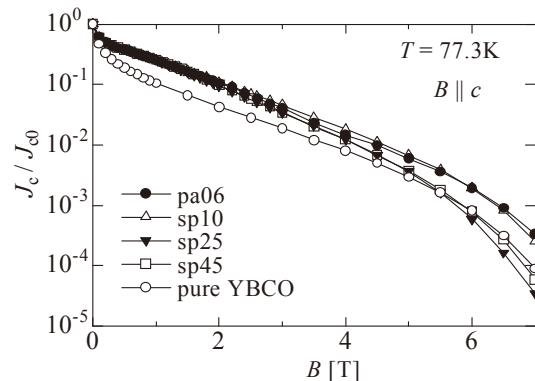


Fig.1 Magnetic field dependences of critical current density in YBCO films with various crossed columnar defects.

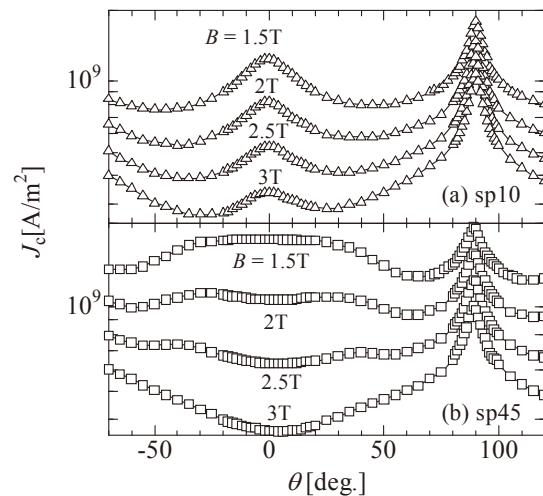


Fig.2 Angular dependences of J_c at 77.3 K for various magnetic fields near $B_\phi = 2$ T in sp10 (a) and sp45 (b).

参考文献

1. S. Kang, et al.: Physica C 457 (2007) 41.
2. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 032002.
3. S. Awaji, et al.: J. Phys. 97 (2008) 012328.
4. T. Hwa, et al.: Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3545.

IBAD-MgO上に製膜したREBCO線材のc軸相関ピン c-axis correlated pinning in YBCO coated conductor on IBAD-MgO

吉田 隆、鈴木博之、一野祐亮、高井吉明(名古屋大学)、

吉積正晃、和泉輝郎、塩原融(ISTEC-SRL)、加藤 丈晴(JFCC)

YOSHIDA Yutaka, SUZUKI Hiroyuki, ICHINO Yusuke, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL); KATO Takeharu (JFCC)
E-mail: yoshida@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物系超伝導線材の強磁場応用には、磁場中の高特化が重要な課題である。最近、酸化物系超伝導薄膜や線材にも多くの人工ピン導入技術が報告されている。特に、BaZrO₃(BZO)やBaSnO₃(BSO)を添加したREBCO薄膜や線材は人工ピンがc軸方向にロッド状に自己組織化し、強力な磁束ピンニング特性を示すことが確認されている。さらにRE-rich相やRE₂O₃など様々な方向の磁場に対して有効な磁束ピンニング点が導入されることが報告されている。

我々は、IBAD-MgOテープ上に成長したREBCO膜の特性向上を目的としてYBCO線材の微細構造と磁束ピンニング特性を、これまで得られた単結晶基板上と比較検討してきた。本報告では、IBAD-MgO上に製膜したREBCO線材のc軸相関ピンという観点から磁場中角度依存性や微細組織を評価検討した。

2. 実験方法

YBCO薄膜はPLD法(KrFエキシマレーザ:λ=248 nm)を用いて、CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/Hastelloy基板上に基板温度(T_s)875°Cで作製した。YBCO層の全膜厚を200 nm~1 μmとした。作製した薄膜は、原子間力顕微鏡(AFM)により表面構造を、透過型電子顕微鏡(TEM)により断面微細構造を観察した。超伝導特性は直流四端子法を用い、磁場(B)=0~7Tで測定を行なった。 J_c の磁場印加角度依存性の測定は、基板面法線に対する磁場印加角度 θ を $\theta=-7^\circ$ ~ 127° で変化させて測定を行なった。

3. 結果及び考察

図1にIBAD-MgO及上のYBCO線材(膜厚約500 nm)の磁場中 J_c の角度依存性を示す。また、比較でLMO/IBAD上YBCO線材⁽¹⁾を示す。B=1 Tにおいては、c軸方向に向かって強いピンニング力が確認される。B=1 Tに

おける J_c は0.5 MA/cm² ($B//c$)と、これまで報告されている析出物を導入したRE123薄膜や線材と比較しても遜色のない高い特性を有していることが確認された。

断面TEM観察から超伝導層は、らせん転位(膜厚方向)と積層欠陥(膜断面方向)が多く存在していることが観察された。しかし微細構造は、報告されているc軸相関ピンの少ない線材と比較してあまり大きな違いは確認されない。また、TEM-EDX分析から、微細な析出物による組成の不均質などは確認されていない。現在、平面TEMによるツイン密度やSTO単結晶上YBCO薄膜の実験結果などと比較検討している。

4. 謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、(独)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するとともに、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) S. H. Wee et al. Appl. Phys. Express 2 (2009) 063008.

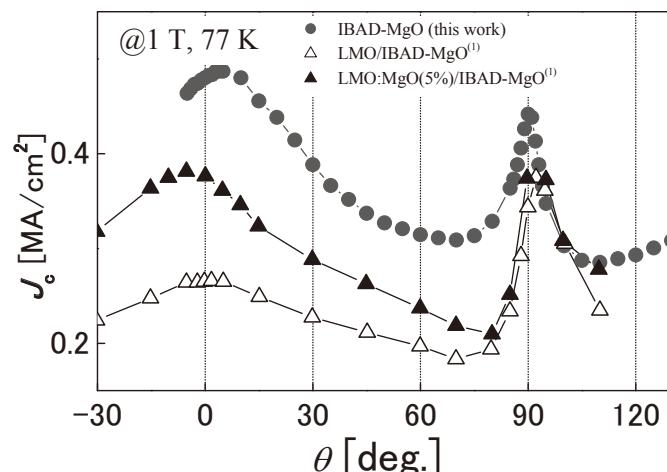


Fig.1 Magnetic field angular dependence of J_c in PLD-YBCO on IBAD-MgO.

Nd:YA-PLD 法を用いて金属基板上に作製した Y123 薄膜の超伝導特性

Superconducting properties of Y123 films prepared by Nd:YAG-PLD method on metal substrate

一野 祐亮, 吉田 隆, 吉村 拓也, 高井 吉明(名大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)
ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka, YOSHIMURA Takuya, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);
 YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)
 E-mail: ichino@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123, RE=Y, Nd, Sm, Gd など)を用いたコーテッドコンダクターの実用化に向けて、低コスト線材作製プロセスの開発が重要である。4倍波 Nd:YAG レーザーは小型で、電気以外のユーティリティーを必要とせず、装置・ランニングコストが安価である。また、エキシマレーザーのように高価な希ガスや有毒なハロゲンガスを用いないため、安全・安心かつ低コストなプロセスの構築が可能である。我々はこれまで、Nd:YAG-PLD 法を用いて MgO 単結晶基板上に Y123 薄膜を作製し、 $T_c \sim 90$ K, $J_c > 1$ MA/cm² @ 77 K と、エキシマ-PLD 法と遜色ない超伝導薄膜が作製可能であることを報告した[1,2]。

本発表では RE123 コーテッドコンダクターを念頭に、Nd:YAG レーザーを用いた金属基板上への Y123 エピタキシャル薄膜の作製、および、高 I_c を目指して厚膜を作製し、超伝導特性を評価した。

2. 実験方法

4 倍波 Nd:YAG レーザー(波長 266 nm)を用いて、CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/Gd₂Zr₂O₇/Hastelloy (IBAD-MgO) 上に Y123 薄膜を作製した。基板温度(T_s) 700~900°C、酸素圧力(pO_2) 0.1~0.5 Torr、基板-ターゲット間距離(d_{T-S}) 45 mm、レーザーエネルギー密度(D_L) 1.8 J/cm²、繰り返し周波数(f_L) 1 Hz で成膜を行った。作製した薄膜の配向性・結晶性は X 線回折法そして超伝導特性は磁場中直流四端子法を用いて評価した。

3. 実験結果および考察

MgO 基板上では、 $T_s=750$ °C, $pO_2=0.3$ Torr の条件下で、Y123 (001)[100] // MgO (001)[100] のエピタキシャル成長を示し、膜厚約 0.4 μm の試料では $T_c=88.3$ K そして 77 K の自己磁場下で $J_c=1.5$ MA/cm² であった。これに対し、IBAD-MgO 基板では、MgO 基板上よりも 50°C ほど高い、 $T_s=800$ °C で c 軸配向及び面内 4 回対称のエピタキシャル薄膜が得られた。Fig. 1 に IBAD-MgO 基板上に成膜した Y123 薄膜の典型的な X 線回折パターンを示す。Y123 薄膜の 00l ピークのみが見られ、また、103 面を用いた ϕ スキャンでは 90° おきにピークが確認された。超伝導特性は、 $T_c=89.8$ K, $J_c(77$ K, self-field)=1.7 MA/cm² であった。

次に、高 I_c を目指して MgO, IBAD-MgO 両基板上に Y123 薄膜を作製した。Fig. 2 に膜厚に対する 1 cm 幅あたりの I_c (I_c^*) を示す。MgO 基板上では、膜厚 1 μm 以上で $I_c^* \sim 100$ A/cm-width に飽和する傾向があるが、IBAD-MgO 基板上では 2 μm まで I_c^* は単調に増加し、最高で $I_c^*=186$ A/cm-width を示した。一方、 J_c は両基板ともに膜厚増加に対して単調に低下しており、エキシマ-PLD 法と同様の傾向であった[3]。

エキシマ-PLD 法では膜厚増加に伴って a 軸配向粒の増加や配向の乱れが生じるために J_c が低下することが明らかになっているが、Nd:YAG-PLD 法の場合、両基板上ともに、約 2 μm 厚まで a 軸配向粒の混在は認められなかった。ただし、MgO 基板上では膜厚増加に伴って 45° 回転粒が増加したが、IBAD-MgO 基板上では少なくとも 2 μm 厚まで 45° 回転粒は混在しなかった。従って、MgO 基板上における I_c^* の飽和は、

膜厚増加に伴って 45° 回転粒を含む層が増加したためと考えられる。

45° 回転粒が混在するメカニズムを明らかにするため、MgO 基板上に 1.8 μm の厚膜を作製する際に、基板温度を徐々に変化させる実験を行った。その結果、基板温度を増加させると 45° 回転粒が増加したが、温度を低下させると 45° 回転粒の量は変化しなかった。以上から、表面温度が高い場合に 45° 回転粒が生じると考えられる。従って、基板材料や表面形態の違いなどから生じた表面温度の違いが 45° 回転粒の混在に影響を与えたと考えられる。

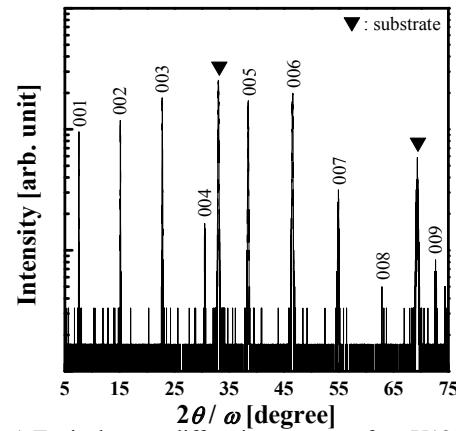


Fig. 1 Typical x-ray diffraction pattern of an Y123 film on IBAD-MgO substrate.

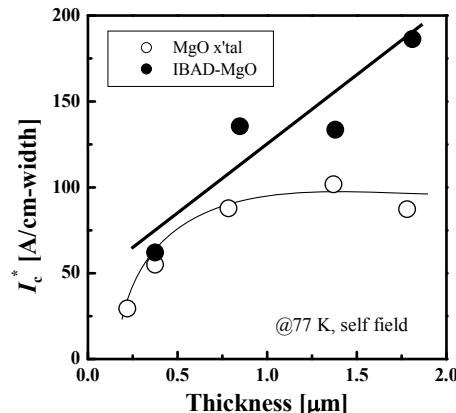


Fig. 2 I_c per 1 cm width (I_c^*) of Y123 films on IBAD-MgO substrate as a function of film thickness.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20686065, 19676005)の助成と、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、(独)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。

参考文献

1. Y. Ichino, et al.: M²X-IX, Tokyo, Japan (2009) PS-I-720
2. Y. Ichino, et al.: EUCAS2009, Dresden, Germany (2009) P-266
3. S. R. Foltyn et al. : Appl. Phys. Lett. 75 (1999) p. 3692

データセンターにおける直流配電の超電導化の基礎検討

Basic investigation of superconducting DC distribution for data center

大友 勝志, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学)
 OTOMO Katsushi, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)
 E-mail: kats-scd@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, ブロードバンドの普及や IT 機器の高度化・設置台数が急激に増加している。これに伴い, データセンターの電力消費に関するさまざまな問題が生じている。現在, 電力会社から交流で給電し, 無停電電源装置(UPS)を使用し, 最終的に直流に変換されて IT 機器内に送られている。この方法では, 受電から IT 機器内に至るまで 4 回の変換を実施しており, 変換ごとに電力損失が発生している。そこで, 2 回の変換ロスを削減できる通信システムがすでに広く採用され, -48 V の直流給電システムとして実用化されつつある。その結果, 交流から直流に換えることにより 10~20 %効率が良くなる[1]。

一方, 急激な情報量増加に伴い, IT 装置の処理性能の向上にも拘らず消費電力も 2000 年からの 6 年間で 4 倍以上に達している[2]。その結果, -48 V の直流給電では電力ケーブルが太くなり, 作業性やケーブルスペースの問題や, 電圧が低いために給電時の抵抗損失が大きくなるという問題が生じている。そこで, 低電圧・大電流・コンパクト化が可能である直流超電導ケーブルを用いた直流配電システムを検討する。

2. データセンターのモデル化

単位面積あたりの消費電力密度は, 通常のオフィスが約 50 W/m² であるのに対してデータセンターでは 1000 W/m² 以上である。したがって, サーバー設置面積 1000 m² のフロアに上述のように約 50 V の電圧で給電する場合, フロアごとに 20 kA の直流電流を送るためのケーブルが必要となる。今回, 比較対象とした常温ケーブルは抵抗率 0.02 $\mu\Omega \cdot m$ の 325 mm² CV ケーブルである。超電導ケーブルの冷却方法は液体窒素冷却とする。常温ケーブルの損失は抵抗損とし, 超電導ケーブルではケーブル側面から侵入する熱(約 1 W/m)と端部から侵入する熱(200 W/kA/条)を取り除くための冷凍機動力(冷凍機効率 1/15)を主な損失と定義した。

3. 結果

Fig. 1 に電流密度を 1 A/mm²としたとき CV ケーブルと超電導ケーブルの損失比較を示す。敷設する超電導ケーブルが長いほどメリットが生じる。また, そのときのケーブル断面積を比較すると超電導ケーブルは CV ケーブルの約 1/5 となる。

ケーブルスペースの問題に伴い既存の CV ケーブルの電流密度も 1~3 A/mm² と高くせざるを得ない。Fig. 2 に電流密度増加に伴って, CV ケーブルと超電導ケーブルの損失が等しくなる距離が変化する様子を示す。高電流密度で使用されていた場合, 短い距離でも超電導化によるメリットが生じる。

以上の結果を元に, 4 MW 級データセンターのモデルを Fig. 3 に示す。1 階を受電部分として, 1 階から各階に 1 MW を配電している。CV ケーブルの電流密度が 1.7 A/mm² 程度の場合, このモデルにおいて, 超電導化により消費電力を 20 %削減でき, ケーブル断面積は約 1/4 となる。電力容量が大きくなれば, さらに消費電力やスペースを削減できる。

4. まとめ

データセンターにおける直流配電の超電導化を実現するための条件を定量的に検討した。短尺の超電導ケーブルの場合, 端部の熱侵入が不利な条件となるが, 消費電力密度やスペースに制約のあるデータセンターでは超電導化による

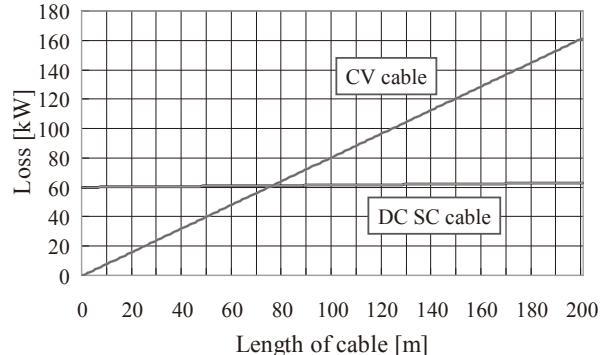


Fig. 1 Loss comparison between DC SC cable and CV cable as a function of cable length.

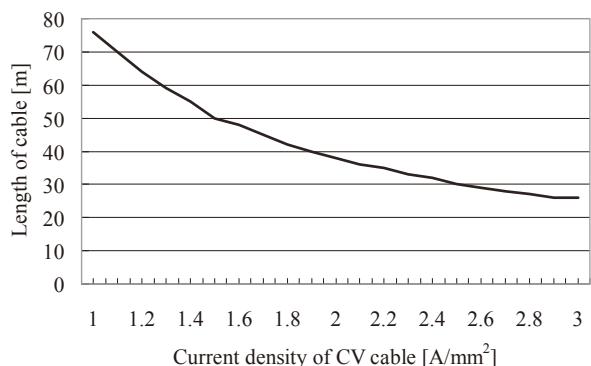


Fig. 2 Cable length corresponding to crossing points between above two loss curves as a function of current density of CV cable.

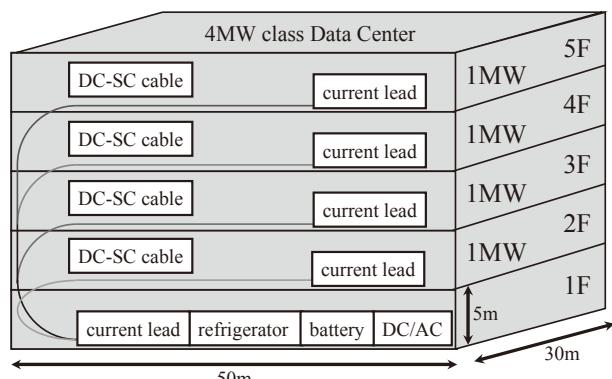


Fig. 3 Power cables distributed in Data Center.

効果が期待できる。

参考文献

1. T. Aoki : “Energy Consumption Trend of IT Facilities and Energy Reduction Achieved by IT Services” IEICE 90(3) 2007.3 pp. 170-175
2. Y. Nozaki : “High-voltage DC distribution system for data centers” NTT Technical Review 2009.8 pp. 18-22

鉄道の直流き電用超電導ケーブルの開発

Development of Prototype DC Superconducting Cable for Railway System

富田 優, 福本 祐介, 鈴木 賢次, 石原 篤, ミララ ムラリダ (鉄道総研)
 TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji, ISHIHARA Atsushi, MIRYALA Muralidhar
 (Railway Technical Research Institute); E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

一般的に在来線の直流電化区間の電圧は 1500V であり、現状のき電システムでは、変電所間隔が 2~3km 程度を超えると送電ロスが顕在化する。一方、超電導材料は直流で高い定格電流値が得られるため、鉄道用の送電ケーブルとした場合、電圧降下を防ぎ、変電所数の削減に期待できる。また、超電導ケーブルによって、大きな送電容量が期待できるが、電流が大きくなると沿線磁場への影響も考慮しなければならない。前回、直流き電システムへの応用を想定し、通常時に連続運転で使用できる 1500V、5kA 級を目標とした 1.5kA 級の超電導ケーブルを試作した¹⁾。今回、実験用に製作した超電導ケーブル装置で通電実験を行い、ケーブルの送電に伴う周辺への影響磁場を計測した。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験用に製作した超電導ケーブル装置及び磁場測定試験装置の外観写真を示す。磁場測定装置は、ガウスマーターまたはホール素子による x , y , z の 3 方向に加え、角度依存性も測れるように制御台と組み合わせた。

超電導ケーブル(巻き線)を装置に組み入れ、まず直流 400A の電流を超電導ケーブルのシールド層(ϕ 23mm)に通電し、超電導ケーブルの中心から下方向に 58mm(外径から 15mm)の部分で漏れ磁場の角度依存性を調べ、最大となる漏れ磁場方向を決定した。次に、超電導ケーブルの導体層(ϕ 17mm)とシールド層のそれぞれに通電し、得られた電流-電圧特性から I_c (臨界電流)、並びに n 値を決定し、同時に最大漏れ磁場の電流依存性を調べた。最後に、電流値を固定し、漏れ磁場の角度依存性についても調べた。なお、全ての実験は超電導ケーブル装置に液体窒素を充填後、内部の温度が安定したことを確認してから進めた。

3. 結果

Fig. 2 に 400A の電流をシールド層に通電した際の漏れ磁場の角度依存性の結果を示す。角度はホール素子の面と電流方向との成す角を表している。漏れ磁場は角度が 0° の時最大を示し、角度が大きくなるにつれ段々と小さくなり、90° 前後で 0 になる。このことから、ケーブル管路方向に垂直な平面内で同心円状の磁場が発生していることが分かった。

Fig. 3 に導体層とシールド層の電流-電圧特性を示す。導体層は 1.72kA、シールド層では 2.43kA の許容通電電流を確認した。



Fig. 1 Prototype DC superconducting cable for railway

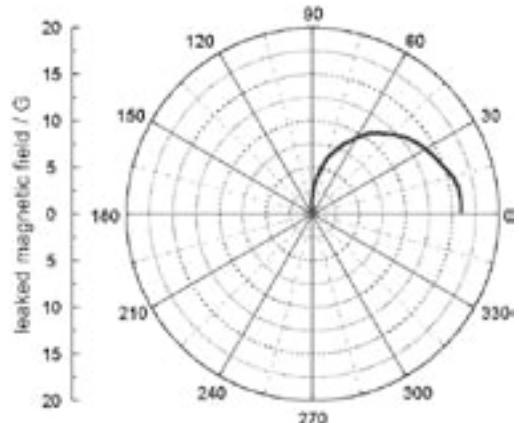


Fig. 2 Angle dependence of leaked magnetic field

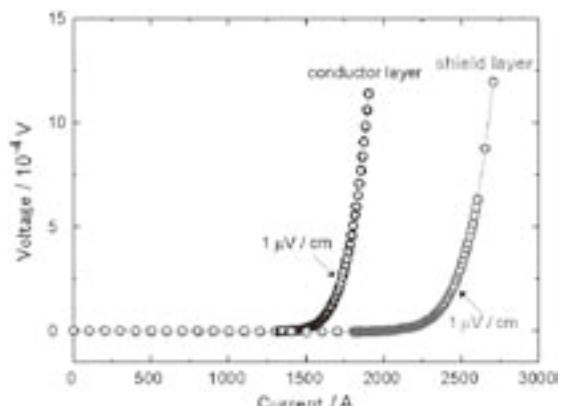


Fig. 3 Current-voltage curve of superconducting cable

参考文献

1. M. Tomita, Y. Fukumoto, K. Suzuki: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.181

直流超伝導送電とスマートグリッド

DC Superconducting Transmission Line for Smart Grid

山口作太郎, 河原敏男, 渡邊裕文、浜辺誠, ユーリー・イワノフ 孫建, 高橋道郎, 服部敦(中部大学)
 YAMAGUCHI Satarou, KAWAHARA Toshio, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, IVANOV Yury, SUN Jian,
 TAKAHASHI Michiro, HATTORI Atsushi (Chubu Univ.)
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

2009年1月に米国でオバマ政権がスタートしてから、スマートグリッドと言われる技術がマスコミなどで広く報道されるようになった。この技術の定義は明確ではないが、太陽電池や風力発電などの再生可能エネルギーを最大限利用するために二次電池を電力網に同時に導入し、直流も積極的に利用して安定な電力網を構築する技術と理解されている。これによって出力が不安定な再生可能エネルギーを従来の発電システムと共に、安定供給を目指している。現在は新しいアイデアが次々に提案されている状況であるが、基本アイデアの一つは電力網をより広くし、出力が時間的に変動する再生可能エネルギーを複数加え合わせることによって平滑化しようとするのである。このためには、直流を持ち込むことが必要であり、スマートグリッドに直流超伝導送電システムを持ち込むことは自然である。

2. 炭酸ガス削減と再生可能エネルギー

2009年9月に民主党政権が誕生してから2020年に1990年比炭酸ガス削減25%の目標が言われるようになった。これを達成するには再生可能エネルギーの大量導入が必要になるが、日本は中緯度帯に存在するため風力エネルギーは本州以南ではあまり期待できない。このため、太陽光発電の大量導入が必要となる。前政権で検討された炭酸ガス削減10%では53GWの太陽電池の導入が必要とされ、それに応じた電力網の整備が必要とされた。しかし、現在の目標では2倍以上の導入が必要になりうる。Fig. 1には日本の夏季のもつとも消費電力が大きな日の消費電力の時間変化を示し、今までの最大ピーク電力は182GWであった。春秋などではピーク電力は140GW程度まで下がり、土日では更に下がる。原発出力は50GW程度であるため、もし太陽光発電だけで100GWを越せば、日本中が晴れると夏紀でさえ十分に賄えることになり、春秋期には余剰電力が昼間に発生する可能性がある。更に、これは天候に強く依存する。

3. 長距離送電の必要性

日本列島では天気は西から東に変化が移ることが基本であり、平均的に40%強の地域が雨・曇りである。このため電力需要が高い昼間には晴れた地域から曇った地域に電力輸送を行うと、国内に導入できる太陽光発電を最大化できる。これは、現在の9電力会社間での電力融通量を大きくすることを意味し、日本列島全体を通した基幹電力網の整備が必要になる。Fig. 2には現在の日本の基幹電力網を示している。西側は60Hzであり、東側は50Hzである。このため、超高压(UHV)直流を用いて両者を接続している。また、本州と北海道及び四国にはUHV直流送電線が布設されている。したがって、日本列島を南から北まで直流超伝導送電システムで基幹を作り、これに原発、火力(揚水発電所を含む)、水力、風力、太陽光発電、二次電池と需要家を結べば、周波数に関係なく、交流のような高精度の制御を必要とすることなく、電力融通を行うことが可能になろう。幸い、直流超伝導送電の損失は1%/1000kmであり、長さが2000km程度であるため、二次電池などへの充放電による損失(15%)や現在の送電網の損失(6%)よりかなり低いので、全体として省エネになろう。

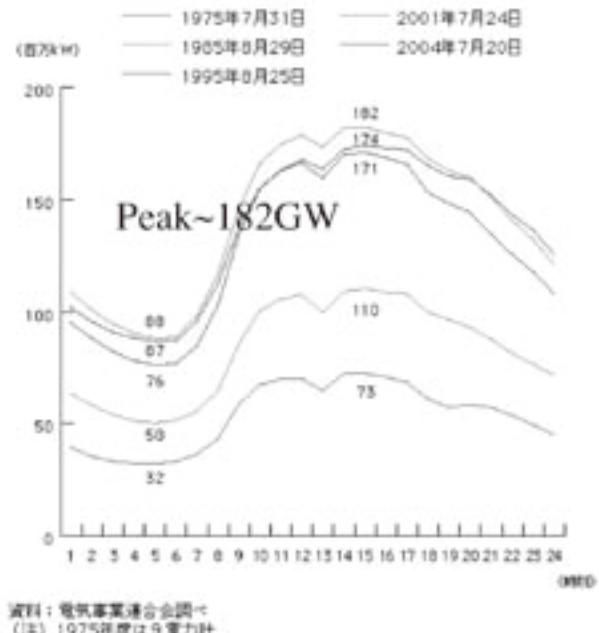


Fig. 1 Time dependence of electric power consumption in a summer day from 1975, 1985, 1995, 2001, 2004.



Fig. 2 The present main power grid of Japan. Left-hand side is 60Hz, and right-hand side is 50 Hz, and UHV DC is used at the connection part.

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)による私学助成等を得て行われた。

参考文献

- 電気事業連合会編、「図表で語るエネルギーの基礎 2007-2008」2008年2月

直流超電導ケーブルを構成するテープ線材の臨界電流測定

Critical Current Measurement of HTS Tapes in a DC Superconducting Cable

浜辺誠, 杉野慎, 渡邊裕文, 河原敏男, 山口作太郎(中部大学); 石黒康英(JFE スチール); 川村邦明(前川製作所);
HAMABE Makoto, SUGINO Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);
 ISHIGURO Yasuhide (JFE Steel); KAWAMURA Kuniaki (Mayekawa MFG.)
 E-mail: hamabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では平成 17 年度より直流超電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が平成 18 年 10 月に完成して以降、これまで 3 度の冷却・通電試験を行い、その結果について報告してきた[1]。ここで使用している 20m 級直流超電導送電ケーブル試験装置の特徴の一つに、2 層の超電導体層のうち、内側の 1 層を形成する 19 本の Bi2223 テープ線材の一本のみに通電できるという点が挙げられる[2]。そこで、平成 21 年 5 月から行った第 4 サイクルの冷却・通電試験では、この特徴を利用して、ケーブルへの通電により生じる磁場中での一本のテープ線材の臨界電流を、自己磁場のみの場合と実験的に比較した。

2. 超電導ケーブルの概要

試験装置に使用している超電導送電ケーブルの構造を図 1 に示す。超電導線材として Bi2223 テープ線材 ($I_c = 107$ A @ 77 K) を使用している。ケーブルのコンパクト化のためにテープ線材は 2 層構造にしてあるが、内層の 19 本に関してはテープ線材どうしが機械的に非接触であるために、1 本ごとに独立した通電が可能である。そこでケーブルとして構成されたテープ線材の特性を実験的に検証するために、図 2 の Type B, C のように近辺のテープ線材に連続的に通電したときの磁場中で、1 本のテープ線材の臨界電流 I_c を測定し、自己磁場のみが発生している場合の臨界電流と比較した。

3. 結果

図 3 に電流-電圧特性の一例を示す。このときの冷媒温度は 79.1 K であった。とくに I_c は冷却に使用している液体窒素温度に対する依存性が大きい[1]ため、再現性が確保できるよう、同じ冷媒温度で、自己磁場のみと周囲の通電磁場下での測定を連続して行った。

その結果、図 2 の Type B のように同じ層の 18 本に通電し、合計が 600 A のときは 2%、合計 1200 A のときは 4% 程度の I_c の向上が得られ、n 値も増加した。図 2 の Type C のように 16 本に通電した場合でも合計 1200 A に対して 2% 程度の I_c の向上がみられた。これらは周囲のテープ線材への通電により発生する磁場が、1 本のテープ線材の自己磁場を打ち消すことによるものである。本講演では、このような通電条件に対する磁場を計算した結果と比較した評価を行う予定である。

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. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.56
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.93

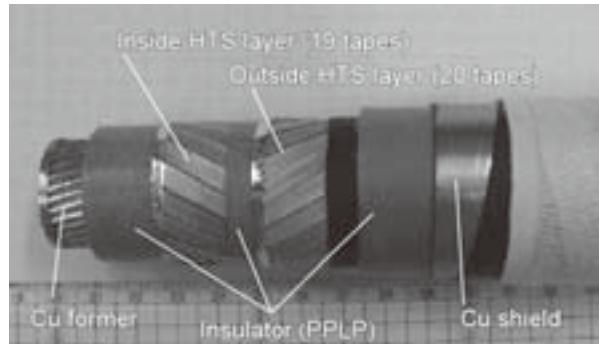


Fig.1 Cut-out model of DC superconducting power transmission cable.

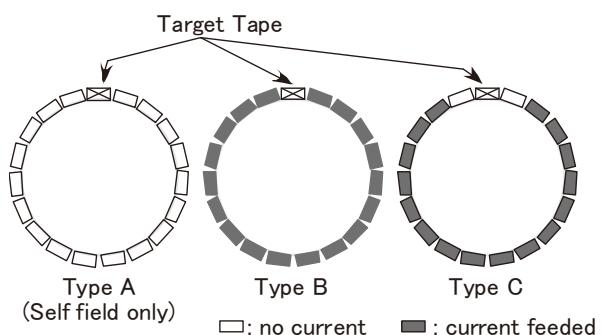


Fig.2 Position of HTS tapes for critical current measurement.

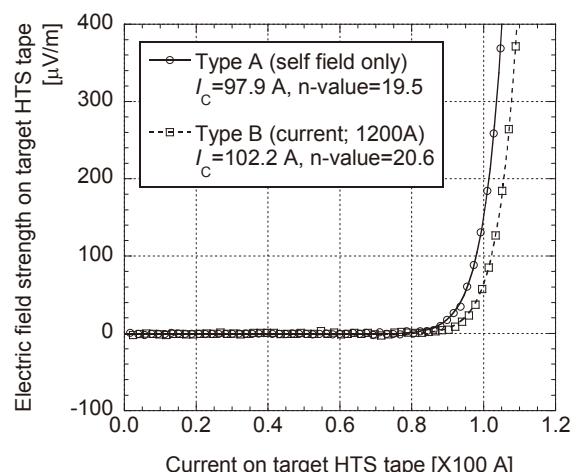


Fig.3 Comparison of I-V characteristics of a HTS tape at 79.1 K for Type A (self field only) and Type B (1200 A/18 tapes except for the target tape).

1GW 級の電力と水素燃料の同時輸送システムの概念設計(1)

- MgB₂ 線材及びケーブルの機械的特性の向上 -

Conceptual Design of 1 GW Class Hybrid Energy Transfer Line of Hydrogen and Electricity (1)

- Improvement of mechanical properties of MgB₂ wire and cable -

山田 修一, 菱沼 良光(NIFS); 上出 俊夫(K&T)

YAMADA Shuichi, HISHIUMA Yoshimitsu (NIFS); UEDE Toshio (K&T)

E-mail: yamadas@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

1GW 級の電力と1日当たり100トンの液体水素を同時輸送する Hybrid Energy Transfer Line の概念検討を行ってきた[1]。エネルギー輸送の目標距離は100 km とし、10 km 毎に水素再冷却ステーションを置く。超伝導ケーブルの運転電圧及び電流はそれぞれ 100 kV、10kA とし、超伝導線材には MgB₂ を用いた。本報告では、MgB₂ 線材の機械的特性劣化の確認、大口径ケーブルの機械的特性劣化の抑制、等について検討を行った。

2. MgB₂ 素線の曲げ特性

同一素線径の単芯 MgB₂ 線と 19 芯 MgB₂ 線を製作し、曲げに対する臨界電流の劣化特性を調べた。試作した MgB₂ 素線の主要パラメータを Table 1 に、試験結果を Fig. 1 に示す。ここで、曲げひずみ ε は、

$$\varepsilon = d/D \times 100 \quad (1)$$

で定義する。 d は線材の直径、 D は曲げ部の直径である。Fig. 1 から明らかなように、単芯の MgB₂ 素線と 19 芯の MgB₂ 素線はともに、曲げに対して臨界電流の劣化が観測される。単芯線の臨界電流は、印加した曲げ歪が 0.8% で、既に 30% 以下に劣化した。これに対し、19 芯の MgB₂ 線は 2% の大きな歪の印加に対して、臨界電流値は 50% 程度残存することが確認された。

多芯構造のでは、外周付近に位置するフィラメントが機械的ダメージを受けても、内側に位相心付近に位置するフィラメントは、印加される ε が相対的に小さいために、殆どダメージを受けず、健全であるものと推察できる。

Table 1 Parameters of MgB₂ wires.

Parameters	Mono-core wire	19-filamented wire
Diameter (mm)	1.04	1.04
Area of MgB ₂ (%)	4.57 %	5.08
Area of Ta (%)	27.33 %	34.47
Area of Cu (%)	68.10 %	57.45
I _{c0} @20K 1 T (A)	76.81 A	61.56
I _{c0} @20K 2 T (A)	-	34.31

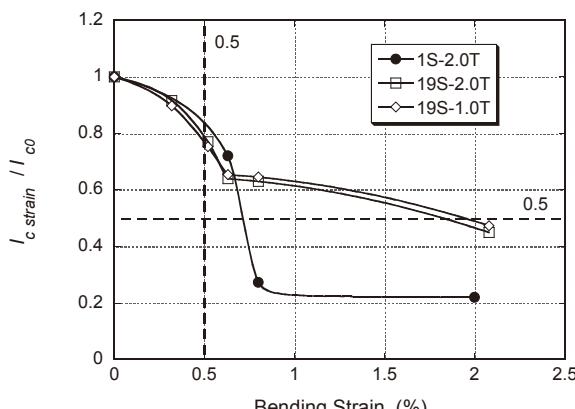


Fig. 1. Relationship between d Ic and bending strain for MgB₂ mono-core wire and multi-filamentary wire.

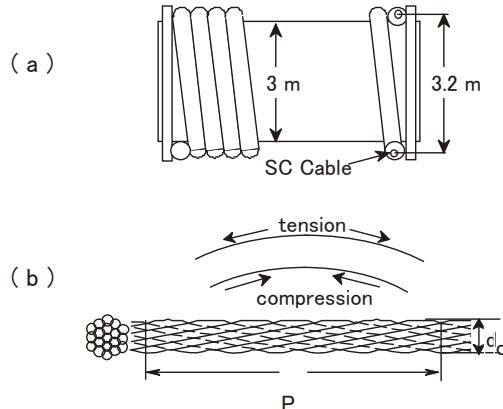


Fig. 2. Cable drum (a) and coaxial twisted MgB₂ cable (b).

3. 10 kA 級 MgB₂ ケーブル

ケーブルの製造過程では、MgB₂ 素線に対して、曲げと伸長が繰り返される。また、最終ケーブルにおいても、輸送用ケーブルドラムへの巻き取り、現地敷設時には、曲げと伸長が行われる。これらの工程で、MgB₂ 素線及び最終ケーブルが劣化しないような製造、敷設方法を採用する必要がある。

Fig. 2 (a) はケーブルドラムの模式図を表す。ケーブルドラムの直径は輸送時の制限を考慮すれば、3m 程度となる。我々は、浸漬冷却型及び冷却管路上に配置した 10 kA 級の MgB₂ ケーブルを検討してきた[1]。浸漬冷却型のケーブルでは、絶縁部を除くケーブル直徑は 36.8 mm になった。

大口径のケーブルでは、曲げの内側には圧縮力が働き、曲げの外側では張力が発生する。CIC 導体のように多段に拡張構造のケーブルは、密に拡張されるため、素線間のすべりは殆ど期待できない。このようなケーブルでは、印加される歪は (1) 式で概ね判断できる。

直径 36.8 mm のケーブルを 3.2m のドラムに巻いた場合、曲げ歪 ε は 1.15 となり、ケーブルの設計が困難になる。一方、電力用可とう拡張線に用いられる同心拡張構造のケーブルは、ケーブルを曲げる際に素線間のすべりが発生するため、ケーブル自身が柔軟になる。換言すれば、曲げ部の内側の圧縮力と曲げ部外側の張力が相殺されるため、素線に印加される歪は大幅な軽減が期待できる。この構造を用いれば、ケーブルの製造工程、最終ドラムへの巻き取り工程、敷設時の伸長工程における、超電導特性の劣化は軽減できる。

4. おわりに

本報告では、単芯 MgB₂ 線と 19 芯 MgB₂ 線を製作し、曲げに対する臨界電流の劣化の抑制について検討した。また、ケーブルの大容量化に際しては、同心拡張構造のケーブル製造方法を有効性を提案した。また、報告では、熱収縮に対する張力の緩和、などの詳細は、講演時に報告する。

参考文献

1. S. Yamada, et al.: TEION KOGAKU 43 (2008) 430-436.
2. S. Yamada, et al. Submitted to 9th EUCAS, Sept. 2009.

テープ導体の同軸多層らせんケーブルの電流分布の計算

Current distributions of a coaxial multi-layer helical cable with tape conductors

富中利治 (文科省,理研)
TOMINAKA Toshiharu (MEXT, RIKEN)
 E-mail: tominaka@mext.go.jp

1. はじめに

テープ導体を同軸多層らせん状に束ねたケーブルの電流分布について、主に、各層を隙間のない薄い円筒導体とした近似で議論されてきたが、ここでは、らせん状のテープ導体幅、隙間を考慮して、現実的な円筒状にテープ導体を離散的に配置されたケーブルについての計算手法を検討した。

2. らせん薄肉円筒導体

ツイストされた多芯超伝導導体、撲線等の電流分布などの計算において、これまで主に用いられた、ツイストパラメーター k_1 ($= \pm 2\pi/l_1$), k_2 ($= \pm 2\pi/l_2$), 軸長 $l \gg r_2 > r_1$ の2つの隙間のない、らせん円筒導体の相互インダクタンスは次式のように表せる。ここで、ピッチ $l_{1,2}$ は一般に実数なので、軸長 l がピッチ $l_{1,2}$ の最小公倍数の長さではなく、単に $l > l_{1,2}$ の条件で考えている。

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_2} - 1 \right) + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k_1 k_2 r_1^2, \quad r_1 < r_2$$

更に、自己インダクタンスは $r_2 = r_1$, $k_1 = k_2$ として求められる。更に、総数 N の同軸らせん薄肉円筒導体での円筒導体 j の磁束とインダクタンスの関係は次式で表せる[1]。

$$\Phi_j = L_{j,1} I_1 + L_{j,2} I_2 + \cdots + L_{j,N} I_N = \sum_{i=1}^N L_{j,i} I_i$$

電流分布の計算手法の1つとして、次式に示すように、この磁束の時間変化が全ての並列導体で同じとして回路方程式から計算する方法がある。

$$\frac{d\Phi_j}{dt} = \sum_{i=1}^N L_{j,i} \frac{dI_i}{dt} = V (= \text{const}), \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

他方、各電流の和が全通電流になり、層間の磁束ゼロの条件から計算する等価な方法がある。

$$\Phi_{j,j+1} = \Phi_j - \Phi_{j+1} = \sum_{i=1}^N (L_{j,i} - L_{j+1,i}) I_i = 0, \quad (j=1, 2, \dots, N-1)$$

ここでの議論は、超伝導体を単に抵抗ゼロとして扱い、古典電磁気学を適用している。通常、超伝導体の場合、電気中性線 (electric center line) で囲まれた磁束として扱われているが、ここでの薄肉円筒導体においては導体内で一様な電流分布を考えており電気中性線はない。

3. らせん薄肉円弧形状導体

実際には、あるテープ幅の決まったらせん薄肉円弧形状のテープ導体を完全に隙間なく円筒状に巻くことは、撲りの関係などから不可能で、隙間の影響を考慮することが必要になる[2]。そのために、ここでは、上記の薄肉円筒導体の自己、相互インダクタンスを薄肉円弧形状導体のものに置き換えて同様な計算をしている。既に報告したように[3]、らせん薄肉円弧形状導体のインダクタンスの解析式は、変形ベッセル関数を用いた無限級数の形式で複雑になり、計算時間もかかるが、有効な方法である。ここでは、らせん薄肉円筒導体での計算結果などを比較した。

4. 計算結果

Fig.1(b)に示すように、1層のケーブルにおいて隙間が均一でない場合、形状の対称性がくずれて、通電時の各テープ導体の電流が均一でなくなる。通電時の電流分布を求めるには、Fig.2に示すように、導体間のインダクタンス行列を求めて回路方程式から計算できる。通常ケーブルの巻き半径に比べて巻線ピッチは長いので、撲りを無視して直線状導体として扱っても同様な計算結果が得られる。また、同軸多層ケーブルについて、薄い円筒導体とした近似と、らせん薄肉円弧形状テ

ープ導体を一様な隙間を持って周期的に配置した形状の2つの計算の比較を行った。Fig.3に示すように、自己インダクタンスが少し違うために、2つの計算で電流分布も少し異なった計算結果を得た。

5. まとめ

超伝導の複合多芯線、送電ケーブル内部の通電時の電流分布は抵抗ゼロとして、インダクタンスの公式を利用して計算でき、テープ導体間の隙間が不均一な影響などを評価できる。

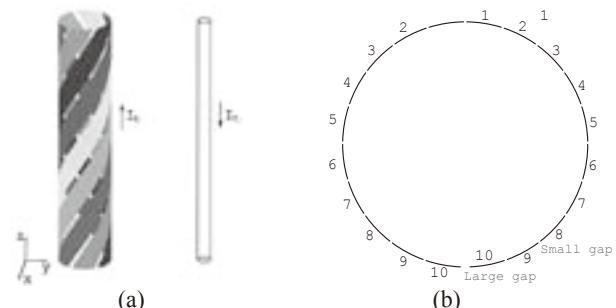


Fig.1. (a) Schematic view of an excitation circuit for a superconducting power transmission cable, together with a return conductor ($l \gg a$). (b) Cross section of a one-layer cable composed of helical thin tape conductors with non-uniform gaps.

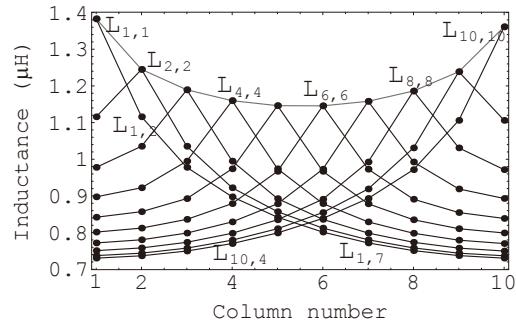


Fig.2. Elements of the inductance matrix of a one-layer cable composed of 10 helical thin tape conductors with non-uniform gaps of $l=1$ m, shown in Fig.1(b).

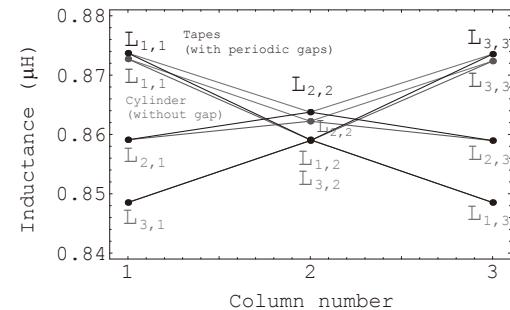


Fig.3. Comparison between the inductance matrix of a three-layer cable composed of coaxial helical thin tapes with uniform gaps and gap-less cylindrical conductors of $l=1$ m.

参考文献

- [1] 濱島高太郎ほか, 低温工学, Vol.135, 176 (2000).
- [2] M. Yagi, et al, Supercond. Sci. Technol., vol. 22, 085003 (2009).
- [3] T. Tominaka, Supercond. Sci. Technol., vol. 22, 125025 (2009).

275kV 系統 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性解析

Numerical Simulation on Over-current Characteristics in 275 kV YBCO Power Cable

王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大);八木 正史(古河電工);藤原 昇(ISTEC-SRL)

WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

YAGI Masashi (Furukawa Electric); FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

超電導ケーブルはケーブル中心から銅フォーマ、HTS 導体層、絶縁層、HTS シールド層、銅シールド層で構成されている。HTS 導体層とHTS シールド層には、それぞれ複数のYBCO 超電導線材が並列に接続されており、275 kV/3 kA_{rms} 級超電導ケーブルには最大で 63 kA_{rms}、0.6 s の短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、短絡事故電流による突発的な温度上昇により超電導線材が劣化・焼損してしまわないよう、超電導保護層としての線材安定化層、銅フォーマや銅シールド層を設計することが必要となる。これまでに YBCO 超電導線材や YBCO 超電導ケーブルの過電流通電試験を行うとともに、これらの実験と併せて計算機シミュレータの開発を行ってきた。そして実験結果と比較することで、計算機シミュレータの妥当性の検証も行ってきた[1][2]。今回は 275 kV/3 kA 級超電導ケーブルの耐過電流設計を行うために、線材安定化層の厚さと銅シールド層の断面積と温度上昇の関係について、開発した計算機シミュレータを用いて解析評価したので報告する。

2. シミュレーションモデル

超電導ケーブルの耐過電流導体構成評価および設計用に、3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布-熱伝導連成解析用計算機シミュレータを開発した。

電流分布解析は式(1)(2)を用いて、熱解析は式(3)を用いて定式化した。超電導線材は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、 $I-V$ 特性には n 値モデルを採用した。境界条件として、超電導線材や銅フォーマは端部のみで電気的に接触し、ケーブルの最外層の保護層の表面が液体窒素に触れているとして、飽和液体窒素(77.3 K)の非線形熱伝達特性を考慮した。インダクタンス L と M は超電導線材の幅・長手方向依存性を無視し、幾何学的配置のみで決まると仮定した。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cond}} & 0 \\ 0 & R_{\text{shield}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{cond}} & M \\ M & L_{\text{shield}} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{\text{cond}} \\ V_{\text{shield}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{\text{cond}} \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (3)$$

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超電導線材における電圧降下、 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、 ρ は密度、 c は比熱容量、 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、 Q_q は液体窒素冷却を表す。

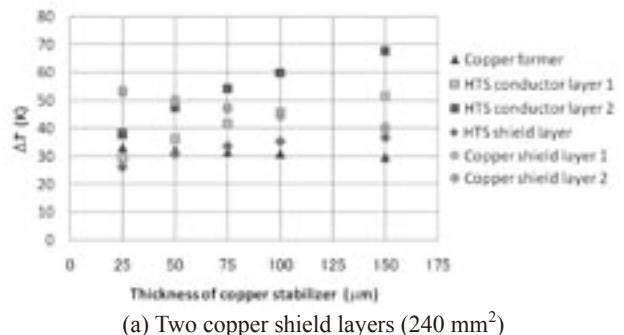
3. 結果

HTS 導体層の耐短絡電流保護として、銅フォーマと線材安定化層が設けられている。今回は、銅フォーマの断面積を 325 mm² と設定し、線材安定化層の厚みと銅シールド層をパラメータとして、275 kV/3 kA_{rms} 級超電導ケーブルで想定される最大の短絡電流 63 kA_{rms}、0.6 s によるケーブル内の温度上昇(ΔT)について解析評価した。線材安定化層の厚みおよび銅シールド層と ΔT の関係を Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、線材安定化層の増加に伴い、銅シールド 2 層および 3 層において HTS 層(HTS 導体層と HTS シールド層)の温度上昇は増加した。一方で、銅フォーマと銅シールド層の温度上昇は低下した。この要

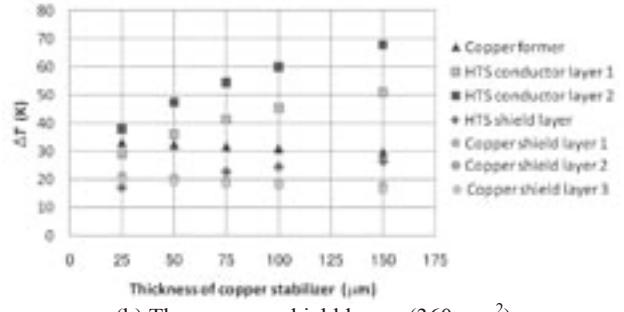
因として、線材安定化層の増加による HTS 層の抵抗減少と、短絡電流値が非常に大きいことが考えられる。銅フォーマと銅シールド層は断面積が大きく、熱容量も大きいことから、大電流が流れたにもかかわらず温度上昇は大きくなかった。銅シールド層が 2 層から 3 層に増加したことで、シールド層全体(HTS シールド層と銅シールド層)の温度上昇は低下した。一方、導体層全体(銅フォーマと HTS 導体層)の温度上昇にはほとんど影響を及ぼさなかった。

4. まとめ

今回は、275 kV/3 kA_{rms} 級超電導ケーブルの耐過電流設計を行うために、線材安定化層と銅シールド層について検討した。この解析結果をもとに、線材安定化層を 50 μm 、銅シールド層を 3 層とする超電導モデルケーブルを作製して、短絡試験を行い、数値解析との比較を行っていく予定である。



(a) Two copper shield layers (240 mm^2)



(b) Three copper shield layers (360 mm^2)

Fig. 1 ΔT vs. thickness of copper stabilizer

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. A. Ishiyama, T. Iwata, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17 (2007), no. 2, pp.1672–1675
2. A. Ishiyama, X. Wang, H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18 (2008), no. 2, pp. 1228–1231

高温超伝導薄膜テープ線材を用いた単層及び多層集合導体の交流損失特性

AC Loss Characteristics of Multi-layer Conductor Assembled by HTS Coated Tape Wire

福井 聰, 鈴木 喜也, 小川 純, 丸子 敦, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学); 塚本 修巳(横浜国立大学)

FUKUI Satoshi, SUZUKI Nobuya, MARUKO Atsushi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University); TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University)

E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系線材を用いた高温超伝導送電ケーブルを考える場合, Y 系線材は超伝導層の厚さが極めて小さいので, 完全に円形断面のケーブルにすることはできれば, 交流損失は非常に小さくできる。しかしながら, YBCO 線材を多層スパイラルケーブルにした場合, 断面が円形より多角形に近くなり, 隣接線材間の僅かな空隙に自己磁界が回りこんでしまい, 線材面に垂直な磁界がキャンセルされず, それにより交流損失が期待通りに低減されないことが懸念される。このような電磁現象は隣接線材間のギャップと線材幅に大きく依存する。従って, ケーブル設計・製作においては, これらの導体構成パラメータをどの程度厳密にコントロールする必要があるかという問題に対する知見及び指針が必要になる。本研究では, テープ線材を多角形・多層に配置した集合導体について, 線材幅・線材間ギャップに対する交流損失の依存性を定量的に評価する。

2. 解析モデル

図 1 にテープ線材を多角形に配置した場合の交流損失解析モデルを示す。導体構成パラメータは幾何学的に以下の関係を満たす。

$$\left(R_i + d_1 + \frac{d_2}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{N_i} \right) = \frac{g_i}{2 \cos \left(\frac{\pi}{N_i} \right)} + \frac{W}{2} \quad (1)$$

ここで, N_i は線材本数, W は線材幅, g_i は第 i 層の線材間ギャップ, R_i は第 i 層の内接半径, d_1 , d_2 は線材の基盤及び超伝導層の厚さである。ケーブル内部の電流密度・電界の分布を数値解析により求め, ケーブルの交流損失を計算する。解析モデルの詳細は[1]に示されている。

3. 解析結果

2 層導体においては, 外層の臨界電流を一定して, 線材幅と交流損失の関係を評価することにする。解析に用いたパラメータを Tab.1 に示す。2 層導体の場合, 内層と外層の線材幅と線材間ギャップを同一にして, 線材本数の差を 2(つまり, $N_2 - N_1 = 2$) とする。その上で, (1) 式を満たすように内層と外層の内接半径を決める。外層の臨界電流は一定になるが, 内層の臨界電流は線材幅の減少に伴い増加する。このようなパラメータの相互依存性を踏まえた上で結果を考察する。Fig.2 に, 交流損失の解析結果を示す。線材間ギャップが 0.2mm 及び 0.5mm の場合ともに, 線材幅が小さくなると交流損失は減少

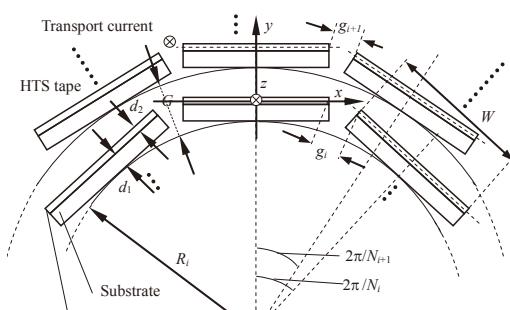


Fig.1 Analytical model

Tab.1 Parameters for analysis

Inscribed radius of inner layer R_1	Varied
Inscribed radius of outer layer R_2	Varied
Tape width W	Varied
Tape number per layer N	Varied
Tape-to-tape gap of inner layer g_1	0.2 mm, 0.5mm
Tape-to-tape gap of outer layer g_2	0.2 mm, 0.5mm
Layer-to-layer gap G	Varied
Cable critical current I_c	Varied
Transport current I_t	2000 Apeak
Thickness of substrate d_1	0.125 mm
Thickness of superconductor d_2	1 μm
Critical current per tape width j_c	27.5 A/mm
n	50

する。一般に多層導体の場合, 外層の方が自己磁界は大きくなるので, 外層の交流損失がかなり大きくなる。従って, 線材幅を減少させて垂直磁界を低減する効果も外層で顕著になるとを考えられる。また, 内層の臨界電流が増加するので, 内層では垂直磁界の低減と負荷率の減少が交流損失低減に相乘して寄与する。しかしながら, ケーブルの外径が大きくなるので, 設計上の問題となる可能性がある。例えば, 線材間ギャップ 0.5mm の場合, 線材幅を 4mm から 2mm にしたとき半径が 1mm 程度変化してしまう。よって, 線材間ギャップが大きい場合には, 特に注意が必要である。当時は, 1 層及び 2 層ケーブルの交流損失特性と線材幅・線材間ギャップとの関係について系統的に纏めて報告する。なお, 本研究の一部は科学研究費補助金(20560261)による。

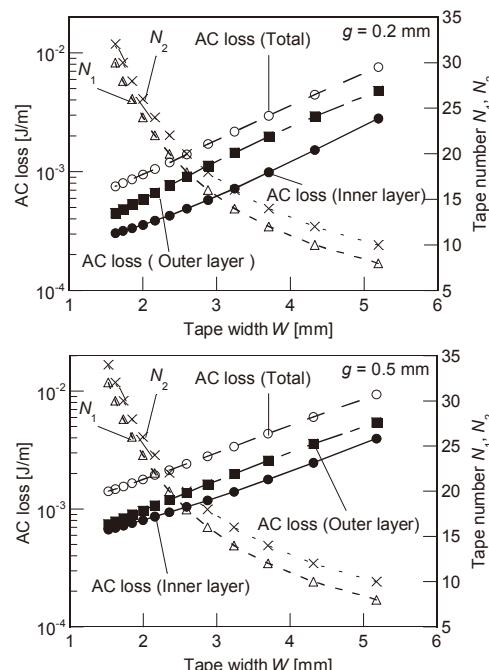


Fig.2 AC loss dependence on tape width

参考文献

1. S. Fukui, et al.: Presented at ASC2008, To be published in IEEE Trans. Appl. Supercond.

275 kV-3 kA YBCO 高温超電導ケーブルの開発

Development of a 3kA 275 kV YBCO HTS Cable

八木 正史, 向山 晋一, 米村 徳偉, 野村 朋哉(古河電工); 青木 裕治(昭和電線); 斎藤 隆(フジクラ);
市川 裕士, 藤原 昇(国際超電導産業技術研究センター)

YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi, YONEMURA Tokui, NOMURA Tomoya (Furukawa Electric); AOKI Yuji (SWCC);
SAITO Takashi (Fujikura); ICHIKAWA Hiroshi, FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)

E-mail: m-yagi@ch.furukawa.co.jp

1. はじめに

現在、YBCO 線材を用いた高温超電導ケーブルの開発を進めている。66/77 kV-1 kA 級の超電導ケーブルの開発[1]から、さらに、高電圧化・大容量化を指向し、275 kV-3 kA 級の超電導ケーブルの開発に着手している。このなかで、低損失化(交流損失と誘電損失を合わせて 0.8 W/m 以下)、コンパクト化(外径で 150 mm 以下)、過電流事故の耐性(63.0 kA-0.6 s)を目標として設定した。今回の報告では超電導導体の低損失化、ケーブルの設計について報告する。

2. 3 kA 超電導導体の低損失化

使用した YBCO 超電導線材の仕様は Ag 安定化層 20 μm / TFAMOD-YBCO 1.5 μm / PLD-CeO₂ 1 μm / IBAD-GZO 1 μm / ハステロイ 100 μm 、幅 4.5 mm であり、臨界電流(I_c)は約 150 A であった。この線材の Ag 安定化層上に幅 4.5 mm、厚さ 100 μm 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、光ファイバーレーザにより、2 分割(幅 2.25 mm)に細線化した。これらの超電導線材を集合化して、1 m の超電導導体を作製したところ、77K で 4612 A の I_c を確認した。この超電導導体の仕様を Table 1 に示す。

3 kA の交流損失を評価するために、液体窒素を冷やして、72 K で評価したところ、導体の I_c は 7047 A となり、このときの交流損失は 0.49 W/m であった。Fig.1 には、 I_c で規格化したときの交流損失を示した。細線化に伴う I_c の低下が予想よりも大きく、使用した線材の I_c のバラツキも大きいため、さらなる低損失化の余地は残されている。今後、コンパクト化の要請から超電導導体の外径を小さくする必要があるため、導体形状の最適化を図りつつ、さらなる低交流損失化を考えている。

3. 超電導ケーブルの設計

超電導ケーブルの設計を Table 2 に示す。導体のフォーマには 325 mm² の銅撚り線を使用する。絶縁厚が 20-30 mm と厚くなるため、定常状態で熱的に成立するかの懸念があつたが、ケーブルの低損失化により、超電導導体部の温度上昇は 0.35 K 以下で安定することが、実験と数値計算で確認された。また、この実験結果から、液体窒素に浸漬した半合成紙の熱伝導率は、0.20-0.30 W/m-K となった[2]。

さらに、325 mm² の銅撚り線に超電導線を巻き付け、絶縁厚 26 mm にして、ケーブル曲げ試験を実施した(Fig.2)。この結果、曲げ直径 2.5 m まで、超電導性能の低下と絶縁紙への変形(破れ、皺)が無い事分かり、325 mm² の銅撚り線は、275 kV の超電導ケーブルのフォーマとして、適用可能である。

Table 2 から、絶縁厚は、現在、20-30 mm を想定しているが、325 mm² のフォーマを使う事で、コンパクト性を保つ事が出来る。今後、絶縁材料は低誘電性能を有するものを選定し、その絶縁厚は、部分放電の発生電圧および、長期課電試験、インパルス破壊試験により決定する予定である。

4. 謝辞

本研究は、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。

Table 1 Specification of the HTS conductor for 3 kA

YBCO tape	TFAMOD-YBCO 1.5 μm 4.5 mm width Copper lamination (0.1 mm) Laser slitting (4.5 mmw → 2.25 mmw × 2) I_c : 249-330 A cm ⁻¹
HTS conductor	2-layer Total tapes of 2.25 mmw: 74 outer diameter: 31.5 mm

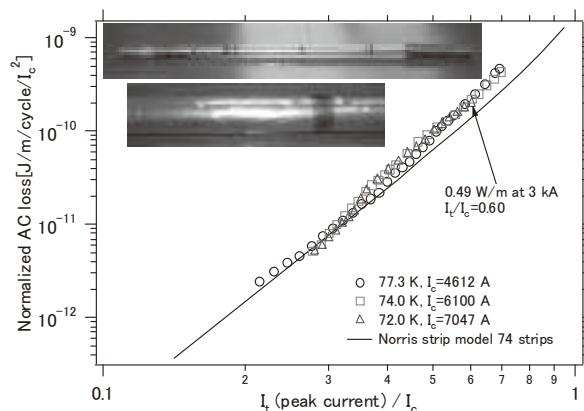


Fig.1 AC loss of the HTS conductor

Table 2 Design of 275 kV-3 kA HTS Cable

Structure	Specification	Diameter[mm]
Former	325 mm ² copper stranded	21.7
HTS conductor	2-layer conductor	26.9
Insulation	thickness: 20-30 mm	70-80
HTS Shield	1-layer Shield	
Cu protection	200-300 mm ² copper tape	
Cryostat pipe	thermal insulation	
PVC sheath	thickness: 4-5 mm	150

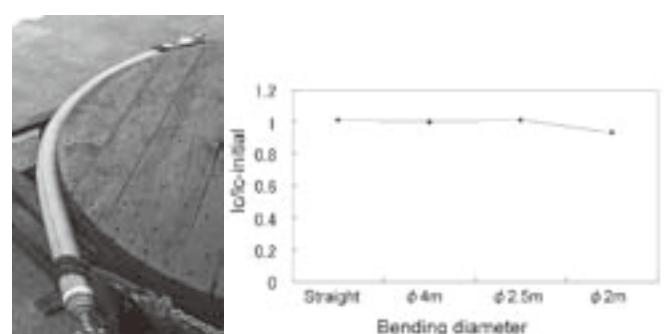


Fig.2 Bending test of the HTS cable with insulation thickness

参考文献

1. Yagi M et al 2009 *Supercond. Sci. Technol.* 22 085003
2. Sato S et al presented at SAP-2, ISS 2009

有限要素法による同軸多層高温超電導ケーブルの熱伝導解析

Thermal Analysis of Co-axial Multi-layered HTS Power Cable using FEM

高田直紀, 宮城大輔, 高橋則雄(岡山大学)
TAKATA Naoki, MIYAGI Daisuke, TAKAHASHI Norio(Okayama University)
E-mail: takata@3dlab.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

超電導ケーブルの設計において、交流通電時の損失計算とともに、超電導状態を維持するための冷却をどのように行うかという冷却設計も必要となる。その上で、交流電流通電時のケーブル内の温度分布を把握できれば、超電導ケーブルの設計を効率的に行うことができると考えられる。本研究では、E-J特性を考慮した三次元有限要素法を用いた同軸多層高温超電導ケーブルの交流損失解析と、ケーブル内部の熱伝導の連成解析を行うことで、交流損失がケーブル内部の温度上昇に与える影響を検討した。

2. 解析条件

通電層2層、シールド層1層を有する同軸多層高温超電導ケーブルを解析対象とした。表1にケーブル諸元を、図1に解析モデルを示す。周期境界条件を用いることによって解析領域を狭くした^[1]。解析モデルは中心角1度の1/360領域とし、z方向(ケーブル長手方向)には長さ0.1mmの一層積の要素分割とした。ケーブルの各層の撲りは導電率の異方性を用いることにより考慮した^[1]。通電電流値 I_p はケーブル初期温度の77K時における臨界電流値 I_c の約50%とした。電磁界解析と熱解析の連成解析を行い、1時間後までのケーブル内部の温度分布を求めた。ケーブル全体の初期温度および液体窒素温度を77Kとし、熱伝達率に関しては液体窒素が層流である場合を想定した $\alpha=100[W/(m^2\cdot K)]$ と、乱流を想定した $\alpha=5000[W/(m^2\cdot K)]$ の2種類の場合の解析を行った^[2]。

3. 解析結果及び考察

図2、3に、ケーブル温度が初期温度の77K時の電流波形(1周期分)と交流損失の半径方向の分布を示す。このモデルではほぼ均流化されていることが分かる。図4に熱伝達率を100、5000とした時のケーブル内の温度分布を示す。交流損失発生から約1時間で温度分布はほぼ一定となっている。

図4から分かるように、PPLP層を挟んで両側で温度差(約0.296K)があり、通電層側の温度上昇が大きいことが分かる。また、図4(b)のように、熱伝達率 α を大きく設定し、冷却を促した場合ではシールド層付近では液体窒素温度(77K)にほぼ冷却されてはいるが、図4(a)と同じような勾配でPPLP層の両端で温度差(約0.295K)が生じていることが分かる。これは、電気絶縁層として働くPPLP層が超電導体やフォーマー、銅シールド層に比べ熱伝導率が小さく、熱が伝わりにくいためである。このことから、ケーブルコア外部からのみの冷却方法では、ケーブル内部までの冷却が難しいといえる。

参考文献

- [1] D.Miyagi, etc., "3-D finite element analysis of current distribution in HTS power cable taking account of E-J power law characteristic", *IEEE Trans. Mag.*, vol.40, no.2, pp.908-911, March 2004
- [2] 日本機械学会編, 「伝熱工学資料(改訂第4版)」, pp.50-58, (1986), 日本機械学会

Table.1 Specifications of HTS cable model at 77K.

Critical current	Critical current density J_c [A/m ²]	9.2×10 ⁷
	conductor layer 1 I_{cz} [A]	1278
	conductor layer 2 I_{cz} [A]	1322
	conductor layer I_{cz} [A]	2601
	shield layer I_{cz} [A]	1951
n value		8.0
Frequency [Hz]		60

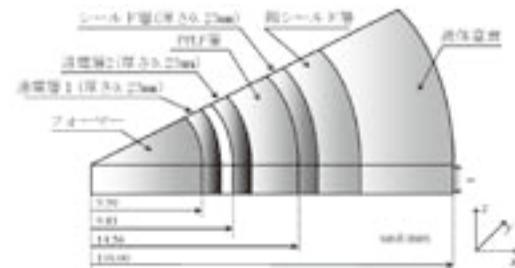


Fig.1 Analyzed model.

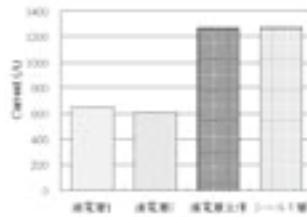


Fig.2 The current value of each

layer when I_p becomes maximum at 77K.

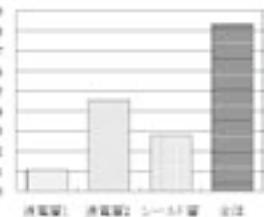
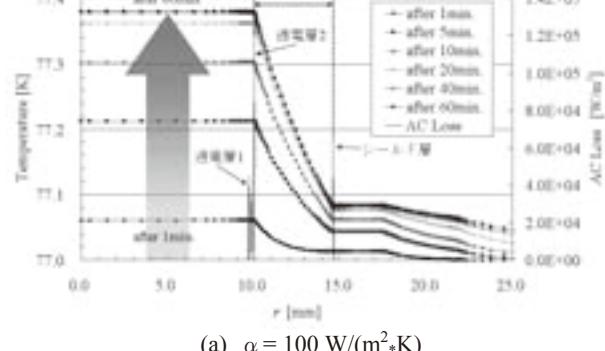
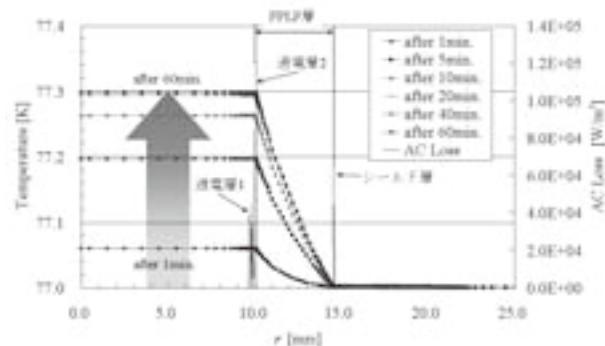


Fig.3 AC loss at 77K.

layer when I_p becomes maximum at 77K.



(a) $\alpha = 100 W/(m^2\cdot K)$



(b) $\alpha = 5000 W/(m^2\cdot K)$

Fig.4 Change of temperature in the cable (r-direction).

ヘリウム雰囲気中における4K パルスチューブ冷凍機の能力評価

Performance Evaluation of 4K Pulse Tube Cryocooler in Helium Atmosphere

中野 恒介, 高山 寛和, 許 名堯(住重)

NAKANO Kyosuke, TAKAYAMA Hirokazu, XU Mingyao (SHI)

E-mail: Kys_nakano@shi.co.jp

1. はじめに

これまで、極低温冷凍機は超電導現象を発生させるためのマグネット用冷却装置として発展してきた。その中でも、医療用 MRI 市場においては当社の4KGM 冷凍機が広く普及し、強磁場の発生を目的とした超伝導マグネットの冷却に使用されている。しかし、近年では次世代医療用 MRI として、より精度の高い磁気計測を行う為に冷凍機本体の低振動化やメンテナンスインターバルの延長等が望まれている。そこで、従来の4KGM 冷凍機の代替として、低振動かつ長寿命という利点を持つ4K パルスチューブ冷凍機の登場に期待が寄せられている。^[1]

多くの場合で極低温冷凍機は、真空環境下においてコールドヘッドステージの熱接触によってマグネット本体等の冷却を行っていた。しかしながらシステムの簡素化・冷却効率の向上の為、コールドヘッドを、クライオスタットの内部に冷却用として注入されているヘリウム雰囲気中で運転し、直接凝縮を行うことが要求されている。そこで本文では、当社で開発された4K パルスチューブ冷凍機のヘリウム雰囲気中における能力評価結果を報告する。

2. ヘリウム雰囲気試験

今回、Fig.1 に示す疑似ヘリウム凝縮試験装置(以下、スリーブ試験装置)を使用し、ヘリウム雰囲気中での冷凍機の能力評価試験を行った。

試験した冷凍機は、当社から市販している、(A) 1W4KGM 冷凍機、(B) 現在開発中のプロトタイプ1W4K パルスチューブ冷凍機、(C) ヘリウム雰囲気中での能力改善を図った1W4K パルスチューブ冷凍機の三種で、使用した圧縮機は当社の標準量産品である。スリーブ試験装置ではスリーブ内部にコールドヘッドが設置され、実際のクライオスタットと近い環境になるようバッファタンクを繋ぎ容量を増やすようになっている、また、1段ステージはスリーブと物理的に熱接触させており環境温度からの約13W の侵入熱があるように設計されている。スリーブ外部は SI と輻射シールドを装着させ、真空を引き断熱されている。

試験方法はコールドヘッド1段ステージに30W~40W、2段ステージに1.0W のヒーターによる熱負荷を与え、1段には PtCo センサー、2段には RuO センサーにて温度を計測し、冷凍能力評価を行う。スリーブ内部を真空状態にした条件と、300K 時1kPa のヘリウムを封入させた状態の二条件で試験を行った。

3. 試験結果

試験結果を Table 1. に示す。

Table 1. Experiment Results

Cold Head	Stage	Heater Load [W]	Temperature [K]	
			In Vacuum	In Helium
A (4KGM)	1 st	40	42.7	44.7
	2 nd	1.0	3.68	3.91
B (4KPT)	1 st	30	42.7	45.9
	2 nd	1.0	3.97	4.35
C (4KPT)	1 st	30	46.7	51.3
	2 nd	1.0	4.02	4.26

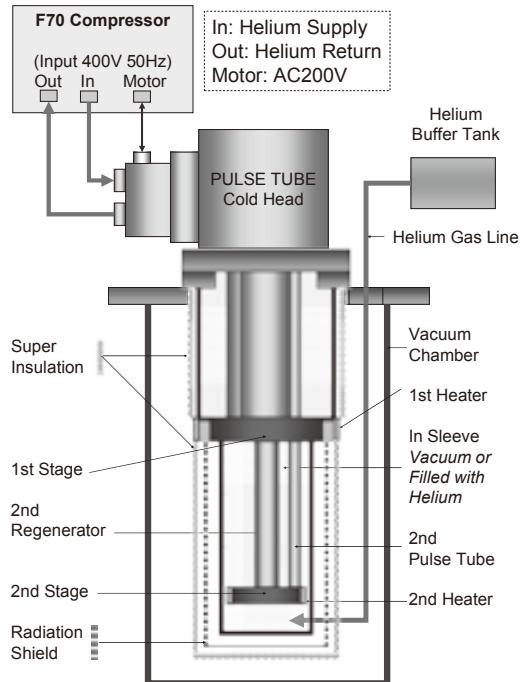


Fig.1 Helium Atmosphere Test System

MRI クライオスタット内でのヘリウムの凝縮能力に直接影響している2段のステージの冷凍能力を比較してみると、(A) 1W4KGM 冷凍機はヘリウム雰囲気中では約 0.2W の低下がみられる事が分かった。(B) 4K パルスチューブ冷凍機では2段能力約 0.4W の低下がみられた。これは、ヘリウム雰囲気中ではパルスチューブ冷凍機の蓄冷管とパルス管の両管壁温度プロファイルが異なるために対流が発生し、それにより真空環境下で最適化された両管の温度プロファイルが変化し、能力の低下が引き起こされる事が知られている^[2]。そこでヘリウム雰囲気中の対流による能力低下の低減を図った(C) 1W4K パルスチューブ冷凍機の評価試験を行い、2段能力約 0.2W の低下と(A) 1W4KGM 冷凍機とほぼ同等の結果となった。

4. まとめ

今回、3台の極低温冷凍機のヘリウム雰囲気中における能力評価を行った。従来のパルスチューブ冷凍機は GM 冷凍機と比べ、ヘリウム雰囲気中での2段ステージの能力低下が大きく、その原因是ヘリウム対流によるものであると考えられる。そこでヘリウム対流による能力低下改善を図ったパルスチューブ冷凍機の評価を行い、ほぼ GM 冷凍機と同じ能力低下まで低減させる事ができた。今後更にヘリウム雰囲気中でのパルス管と蓄冷管の対流による影響を調査し冷凍能力の向上を目指したい。

参考文献

1. M.Y. Xu, et al.: Advances in Cryogenics Engineering, Vol. 51 (2006) p.837
2. M.Y. Xu, et al.: 特開 2006-214717 (P2006-214717A)

液体キセノン検出器用同軸型パルス管冷凍機の性能改善

Study on cooling performance of a coaxial pulse tube cryocooler for a liquid xenon detector

春山富義, 笠見勝祐, (KEK); 西谷富雄(岩谷瓦斯)

HARUYAMA Tomiyoshi, KASAMI Katsuyu, (KEK); NISHITANI Tomio (IIGC)

E-mail: haruyama@post.kek.jp

1. はじめに

粒子検出媒体として大量の液体キセノンを用いる実験が世界各地で成功裡に進められている。キセノンは沸点が165K (0.1MPa) であるため、この温度付近で大きな冷凍能力を持つパルス管冷凍機が開発され、広く使用されている。この冷凍機は設置スペースの制限から同軸型と、また製作上の簡易さから円筒状蓄冷器を中心に置き、円周空間をパルス管とする構造している。今後、検出器としての精度を高めるため、液体キセノン中に設置する光電子増倍管の数や信号線の増加が検討されており、冷凍機の熱負荷が増える可能性がある。

本パルス管冷凍機の蓄冷器の構造を変えたり、高温端ガス排出口を1ヶ所から対称的な2ヶ所に変えるなどして、冷凍性能に及ぼす影響を実験的に調べた結果について報告する。

2. 液体キセノン用同軸型パルス管冷凍機

Fig.1 にパルス管冷凍機の概略を示す。蓄冷器を囲む外周

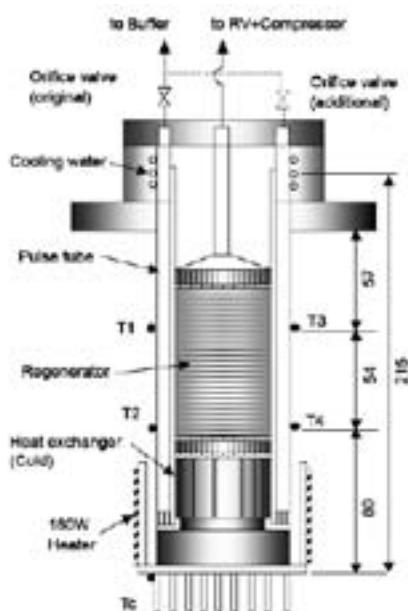


Fig.1. Conceptual drawing of the coaxial PTC for LXe.

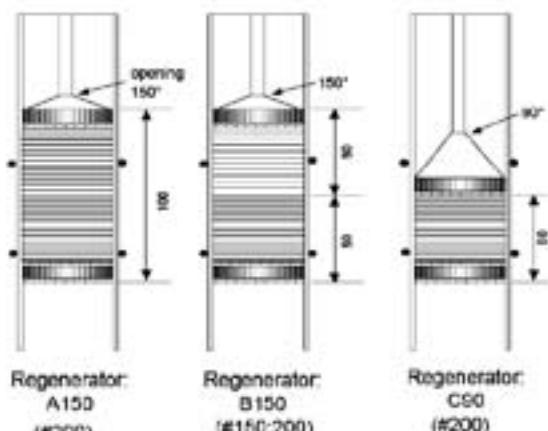


Fig.2. Tested regenerators in this experiment.

がパルス管となっている。移相は単純オリフィスとバッファによる。大きな熱負荷に対応するため、低温端熱交換器は広い表面積を確保している。蓄冷材はリン青銅メッシュを用いている。高温端のガスは従来1ヶ所からオリフィス抜ける構造である。

3. 冷凍性能改善のための試験と結果

165K という比較的高温での冷凍能力が求められているため、今回の試験では蓄冷器の構造と、高温端でのガス抜きについて考慮した。まず、蓄冷器に関し、メッシュサイズや多層化、蓄冷器長さを変えたときに性能に及ぼす変化を見た。

Fig.2 に3種類の蓄冷器を示す。A は従来使用してきたものでメッシュは#200である。B は長さは同じで、メッシュを#200と#150とで二層化したものである。ガス導入部の開口角度はともに150° である。C は長さを1/2にし、導入部開口角を90° とした。他の条件は同一とした。試験運転では最適なオリフィス開度は、従来の開度と変わらなかった。

高温端でオリフィス-バッファにガスを抜く穴が従来は1ヶ所であった。円周パルス管内での流れの不均一が起り、壁の温度分布、冷凍性能に影響があるかどうか調べるために、上部フランジにある従来のガス抜き穴の反対側にもガス抜き穴を施工した。管外壁には Pt100 温度素子を対面の位置に取り付け、管壁の温度をモニターした。Fig.3 に蓄冷器の影響と、ガス抜き穴の効果について冷凍能力の比較した結果の例を示す。短い蓄冷器では最低到達温度が高くなつたが、温度-冷凍能力性能の傾きが大きくなつたこと、冷凍能力がガス抜きの位置や数によって影響があることなどが明らかになった。

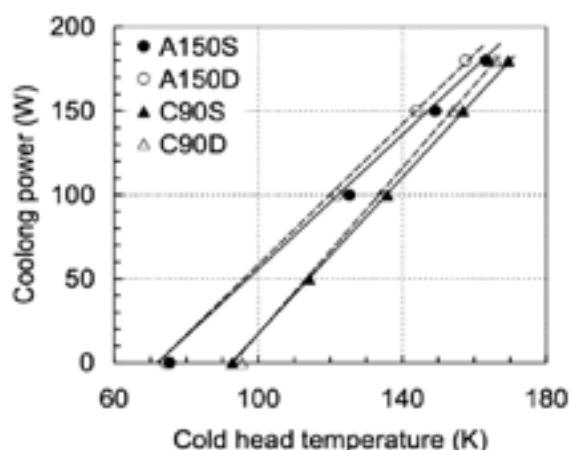


Fig.3. Measured cooling power of different regenerators and gas flow configuration.

謝辞

この研究は科研費(20025009)の補助を受けて行なわれたものである。

参考文献

T. Haruyama, et.al., "Experimental study on cooling performance of a coaxial pulse tube cryocooler for a liquid xenon detector" to be published in Adv. Cryo. Eng. Vol 55.

Pulse Tube/JT 冷凍機を用いた温度計比較校正装置の動作特性

Basic characteristics of a calibration apparatus for resistance thermometers with a Pulse Tube/JT cryocooler

島崎 肇, 豊田 恵嗣, 野里 英明, 大田 明博(産総研 計測標準研究部門)

SHIMAZAKI Takeshi, TOYODA Keishi, NOZATO Hideaki, OOTA Akihiro

National Metrology Institute of Japan, AIST

Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan

E-mail: t.shimazaki@aist.go.jp

1. はじめに

我々は、4 K パルス管冷凍機に循環式の ^3He のジュール・トムソン (JT) 膨張冷却回路を組み合わせた Pulse Tube/JT 冷凍機を用いて、極低温温度計用の校正装置の開発を行っている [1-3]。校正温度範囲は、1990 年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990, ITS-90) に基づき、その定義下限温度である 0.65 K から 24.5561 K (Ne の三重点) を想定している。試作した温度計校正装置の温度制御特性と機械式冷凍機を応用した装置でしばしば議題に挙がる機械振動レベルなどについて評価を行った。

2. 温度計校正装置

Fig. 1 に温度計校正装置の模式図を示す。市販の 4 K パルス管冷凍機(第一段冷却能力: 10 W at 45 K, 第二段冷却能力: 0.5 W at 4.2 K)を ^3He の JT 回路の予冷段として使用している。JT 回路のガスハンドリングシステム(GHS)は、高気密ポンプ、圧縮機、液体窒素トラップなどで構成される。温度計を校正する際に基準となる温度計と、校正対象となる温度計は共に、装置内に糸で懸架された無酸素銅製の温度計比較ブロックに装着される。比較ブロックは、 ^3He ポットと若干の熱抵抗としても機能する熱リンクを介して繋がれている。

3. 評価結果

^3He ポットと比較ブロックは、各々温度制御機構(ヒータ等)を備え制御されるが、比較ブロックの温度は常に ^3He ポットよりも僅かに高く設定される。Fig. 2 に制御時の比較ブロック温度のばらつきを例示した。概して良好な結果が得られたが、2 K で特にばらつきが大きくなかった。これはこの温度近傍で、循環する ^3He の状態が ^3He ポット内でやや不安定になり、 ^3He ポットの温度制御が乱れるという現状における本 JT 回路の特性に因るものと考えている。

Fig. 3 では、比較ブロックにおける振動加速度を示した。パルス管冷凍機を停止して測定したバックグラウンドレベルと、動作させた状態で測定した結果を重ねた。パルス管冷凍機の動作周波数は 1 Hz である。振動レベルの測定は、真空ジャケットとラディエーションシールドを外した状態で、レーザー振動計を用い実施した。つまり、大気圧下かつ、ほぼ室温での測定結果である。得られた振動レベルは、温度計の校正を行う上では問題にならないレベルであった。

参考文献

1. T. Shimazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.208
2. T. Shimazaki, et al.: Int. J. Thermophys. Vol. 29 (2008) p.42-50
3. T. Shimazaki, et al.: Rev. Sci. Instrum. Vol. 77 (2006) 034902

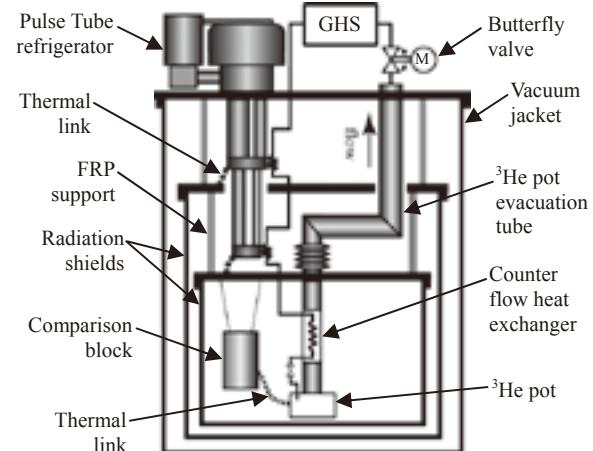


Fig. 1 Schematic of the apparatus

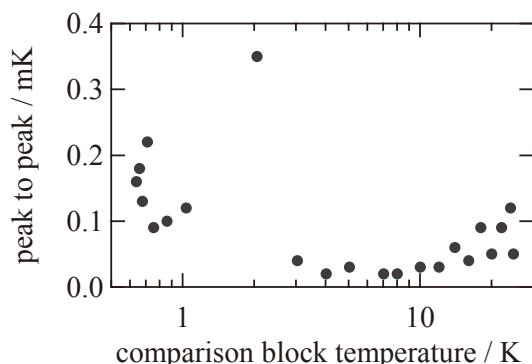


Fig. 2 Peak-to-peak temperature variations at a comparison block during its temperature control

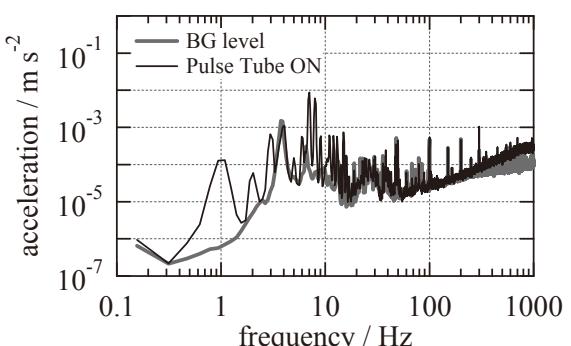


Fig. 3 Horizontal rms acceleration at a comparison block

寒剤を用いない希釈冷凍機

Development of Refrigerator without use of cryogen

半田梓, 研谷昌一郎, 西谷富雄(岩谷瓦斯); 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑 徹(大阪市大)
HANDA Azusa, TOGITANI Shoichiro, NISHITANI Tomio(IWATANI INDUSTRIAL GASES Co.);
OBARA Ken, YANO Hideo, ISHIKAWA Osamu, HATA Tohru (OSAKA CITY Univ.)

1.はじめに

従来の希釈冷凍機は液化ヘリウム貯槽が必要なため大型で、操作も複雑かつ一定時間毎に寒剤の補給が必要である等、運転維持も面倒なものであった。今回、我々はパルス管冷凍機を用いることにより、寒剤を不要とする希釈冷凍機を開発した。また、複雑なバルブ操作を自動化したことにより、必要な操作はスイッチのオン・オフのみで、誰にでも扱うことができる。

本発表では、熱交換器の増設、循環ポンプの強力化した運転結果について報告する。

2.希釈冷凍の動作原理(寒剤仕様と冷凍機仕様)

希釈冷凍の原理は、絶対零度においてもヘリウム 3 がヘリウム 4 中に約 6%溶け込むことができるという点に立脚している。ヘリウム 3 と 4 の混合ガスを数 K 以下の温度に冷却すると、ヘリウム 3 分子間、ヘリウム 4 分子間、ヘリウム 3-4 分子間の結合力の違いにより、ヘリウム 3 とヘリウム 4 の二つの液体相に分離する。地上では重力のため軽いヘリウム 3 液体がヘリウム 4 液体の上に浮く。絶対零度に近づくにつれ、ヘリウム 3 の相は 100%ヘリウム 3 となるが、ヘリウム 3-4 分子間力がヘリウム 3 分子間力よりも大きいため、ヘリウム 4 の相には 6%のヘリウム 3 が溶け込んで平衡状態となる。このヘリウム 4 中にあるヘリウム 3 の濃度を外部より強制的に減らそうとすると濃度を一定に保とうとして、上部のヘリウム 3 がこのヘリウム 4 相に溶け込む。このとき、両相のエンタルピー差により冷却が起こる。これが希釈冷凍の動作原理である。Fig.1 に蒸発冷却と比較した希釈冷凍の動作原理を示す。蒸発冷却も希釈冷凍も、ヘリウム 3 ガスを液化するプロセスが初期条件として必要となる。この約 1K の温度を作り出すために、通常は減圧液化ヘリウムを寒剤として使用するが、冷凍機ではこの温度に到達できないため、ヘリウム 3 ガスのジュール・トムソン(JT)膨張冷却を利用する。そのため、JT 膨張弁が必要となる。一方、混合室(Mixing Chamber)内でヘリウム 3 をヘリウム 4 に強制的に溶け込ませるために、分留室(Still)においてヘリウム 3 を選択的に蒸発させてヘリウム 3 濃度を減少させる。するとヘリウム 3 は浸透圧によって混合室からドライブされる。

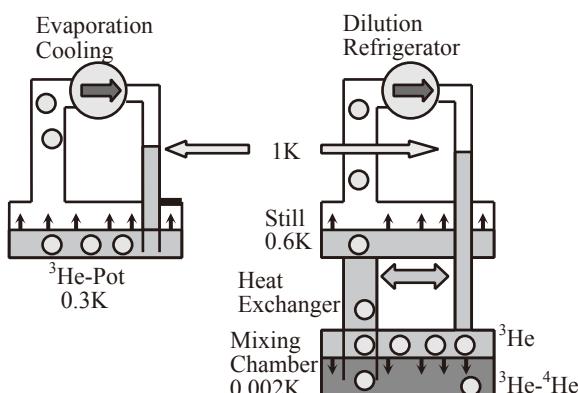


Fig.1. Principle of evaporation cooling and dilution refrigerator

3.今回の改良点

今回改良した内容は以下のとおりである。

- 循環ポンプを大容量化
- 予備冷却用バイパスラインのインピーダンス最適化
- 不純物除去トラップを内蔵

4.運転結果

冷凍能力と循環量の関係を Fig.2 に、最低到達温度と循環量の関係を Fig.3 に示す。循環ポンプの大容量化により、最低温度 9mK、冷凍能力 400μW@100mK を実現した。室温から最低到達温度までの冷却時間は、予備冷却用バイパスラインのインピーダンス最適化により約 22 時間となった。また、不純物除去トラップを内蔵することにより、寒剤を全く使用しないメンテナンスフリーを実現した。今後は、パルス管冷凍機との熱コントラクトの改良による冷却時間の更なる短縮、システムの小型化を予定している。

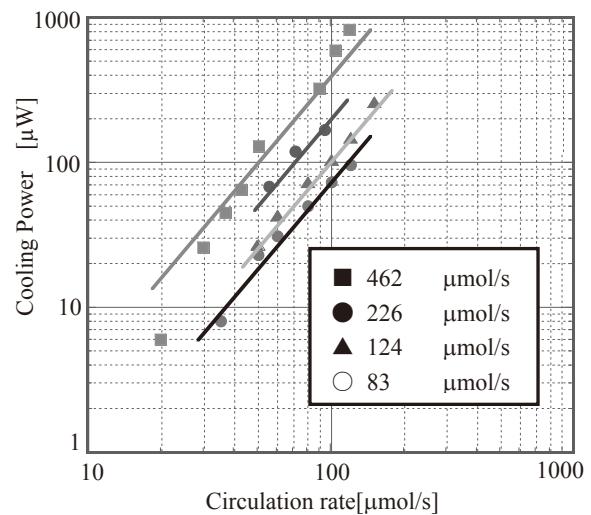


Fig.2. Cooling Power as a function of circulation rate

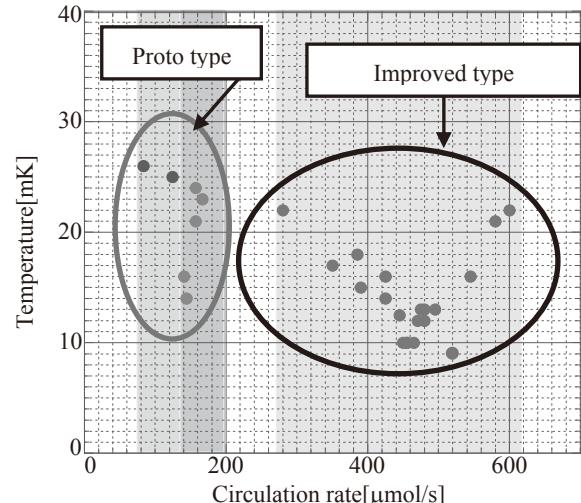


Fig.3. Lowest temperatures as a function of circulation rate

小型汎用ヘリウム循環装置用の開発

Development of a general purpose helium circulation system with small GM cryocooler

武田 常広、岡本 雅美、片桐 啓志(東京大学)

Tsunehiro Takeda, Masayoshi Okamoto and Keishi Katagiri (The Univ. of Tokyo)

E-mail: takeda@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

我々はMEG(脳磁計)用ヘリウム循環装置(HCS)を開発し、そのHCSを東京大学の440チャンネルMEGに搭載して、HCSを運転中にMEG計測が可能であること、ランニングコストを1/10以下に出来ることなどを実証してきた。しかしながら、当該HCSはトランスファーチューブ(TT)の挿入管が3/2インチであったため、一般的なMEG装置に利用するにはMEGの改造を必要としていた。挿入管の受入れポートの径を3倍にするだけであるが、結果的にはMEGデュウ全体を改造しなくてはならないため、利用が困難であった。そこで、挿入管径を標準の1/2インチにし、利用機器のTT挿入口に挿入するだけで、一般的な超伝導利用測定機器に利用可能なHCSを開発したので報告する。

2. HCSのコンセプト

精密計測機に用いられているSQUIDは、超伝導状態にあるため、それが発生する熱は極めて小さい。また、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ウのネックチューブ部に大量に流しデュウへの侵入熱を奪うことにより、デュウの液体ヘリウム部に侵入する熱を少なくし、液体ヘリウムは出来るだけ蒸発直後に回収してすぐに液化して戻す方式のヘリウム循環システムを開発してきた。冷凍機は信頼性の高い4K1.5WGM冷凍機を用い、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自動運転で閉塞を解除できるシステムを開発してきた。

今回は、TT挿入管の太さを3/2インチから1/2インチとして、一般的な機器に機器の改造無く利用可能とすると共に、冷凍機を1台として、装置全体を小型にすることを試みた。

3. 開発装置

Fig.1は、東京大学の440チャンネルベクトル型MEG装置に搭載されて、1.5年以上実証試験を続けているHCSの外観を示す。1.5W4KGM冷凍機を2台用いて、14%/日以上の液体ヘリウム循環を達成し、HCSを運転中でも通常のMEG計測に支障が無いことが確認されている[1,2]。

Fig.2は、今回開発しているHCSを試験デュウで試験運転する概念図を示す。本HCSは、1.5W4KGM冷凍機を1台用いるので、冷凍チャンバが大幅に小さくなっている。一般の超伝導機器の隣に置き、液体ヘリウムを8%/日以上の循環させることを目標としている。従来のHCSのTT挿入管は、液体ヘリウム、蒸発直後のヘリウムガス(温度約6K)およびデュウを冷却するための約40Kのヘリウムガスを同軸多重管で流すために、太さが3/2インチになっていた。特に、凝縮器における液化によるヘリウムガスの自然吸引による循環を容易にするために、低温ヘリウムガスの帰還路を広めに用意していた。しかしながら、ガスが低温なので流れるガスの量が少ないと、粘性抵抗も小さいことなどから、大きな流路は必要ないと考え大幅に流路を狭くした。すなわち、TT挿入管の太さを標準の1/2インチにするため、蒸発直後のヘリウムガスを凝縮器に導入するための流路を1/20以下にした。

また、MEG用HCSでは、3つの流体を真空層で分離した多重同心管の中を流し、大気の熱が一番大切な液体ヘリウムに侵入しないようにした。それぞれの流路を熱的に分離する必要があるため、どうしても挿入管の径が太くなつた。今回は、相互にSIで熱分離した3つのパイプを、まとめてシールド管で熱シールドすることによって、挿入管の太さを抑えることと、熱侵入量を抑えることの両立を図つた。実証実験の結果、上記目標はほぼ満足出来る程度に達成された。

参考文献

1. T Takeda, et al.:Cryogenics, Vol. 48, (2008) p.6-11
2. T Takeda, et al.:Cryogenics, Vol. 49, (2009) p.144-150

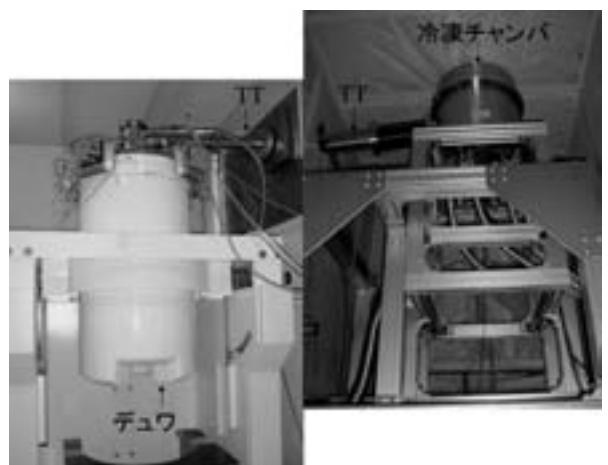


Fig.1 HCS with 3/2 inch insert tube for a MEG.



Fig.2 HCS with 1/2 inch insert tube for general superconductive apparatuses.

高温超電導かご型誘導 / 同期モータの可変速駆動を指向した効率マップに関する検討

Study on efficiency map of HTS induction / synchronous motor for the variable speed control

西村敏治, 松村一弘, 中村武恒, 浅井力矢, 関口大輔, 雨宮尚之(京大), 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久(イムラ材研)

NISHIMURA Toshiharu, MATSUMURA Kazuhiro, NAKAMURA Taketsune

ASAII Rikiya, SEKIGUCHI Daisuke, AMEMIYA Naoyuki (KyotoUniv.)

ITO Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki, TERAZAWA Toshihisa (IMRA)

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

1.はじめに

我々は、高温超電導(HTS)線材をかご型巻線に適用したHTS誘導/同期モータ(HTS Induction/Synchronous Motor:HTS-ISM)を車載応用するための検討を行っている[1]。車載応用されるモータには、(1)高出力(トルク)密度であること、(2)広範な速度範囲ならびにトルク範囲において高効率であることなどが要求される。前者の課題に関しては、かご型巻線のロータバー臨界電流を大きく設計したHTS-ISMにおいて、既存の誘導機の定格トルクに比較して一桁以上のトルク密度向上を理論的・実験的に示した。

一方、課題(2)に関する研究として、1次銅損の低減による高効率化を目指した全超電導HTS-ISMを検討中である[2]。同検討は、全速度およびトルク領域におけるモータ効率の向上を目指すものである。そこで本研究では、課題(2)に関して広範な速度範囲ならびにトルク範囲のモータ特性を評価することを目的とする。そのために、自動車用モータの評価に用いられている効率マップをHTS-ISMに関して解析的ならびに実験的に検討したので報告する。

2.効率マップの計算方法

効率マップは、横軸が回転数、縦軸がトルクの座標平面上に、さまざまな運転状態におけるモータの効率をプロットしたものである。本研究では、回転数および負荷トルクの異なる多数の運転状態を想定し、それぞれモータ効率を計算した。そして、その効率を領域分けして平面上に表示した。

本研究では、最大出力50 kWのHTS-ISMを対象とし、モータ効率を評価する際に従来型誘導機の等価回路を用いた。Fig.1には、全超電導HTS-ISMのT型等価回路図を示す。同回路を使用する妥当性は、HTS-ISMが従来型かご型誘導機と同一の構造を有すること、そして極めて微小なすべりを伴いながら回転していることが報告されたことなどによる[3]。

Fig.2には、HTS-ISMの特性を求める際に用いるフェーザ図を示す。同図に示す1次抵抗ならびに2次抵抗として、超電導材料特有の電流輸送特性が与えられている。すなわち、回転子巻線に加えて固定子巻線をも超電導化した全超電導HTS-ISMの解析を行う。さらに、同フェーザ図は本回転機の2次側かご型巻線を試作する際に生じる接触抵抗をも考慮可能なモデルとなっている。また、実機を用いた試験を実施して効率マップを描いた。その際には、入力電力、回転数、トルクの実測値を用いて効率を算出した。同試験に使用したHTS-ISMの詳細は文献[4]に譲る。

3.HTS-ISMの効率マップ

Fig.3には、解析によって求めたHTS-ISMの効率マップの一例を示す。本解析では、回転子のロータバー1本あたりの臨界電流を3360 A、固定子巻線に適用する超電導材料の臨界電流は240 Aとした。また、すべりを 10^{-4} (準同期)で一定とした。そして、本解析を実施する際には、ギャップにおける捕捉磁束の最大値を1:1 Tとした。Fig.3は、HTS-ISMがさまざまな運転状態に関して高効率であり、車載用のモータとして十分な特性を有することを示している。

計算手法、試験結果、理論的考察など詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No.20560268)の援助を受けて実施しました。

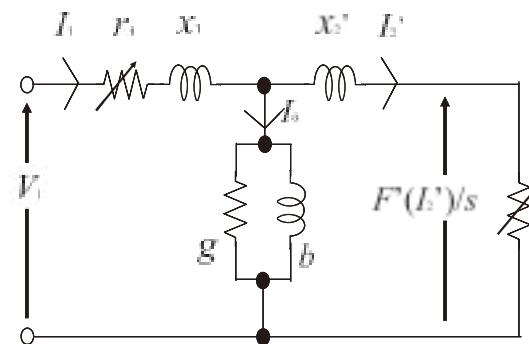


Fig. 1. Schematic diagram of equivalent circuit of the fully superconducting HTS-ISM

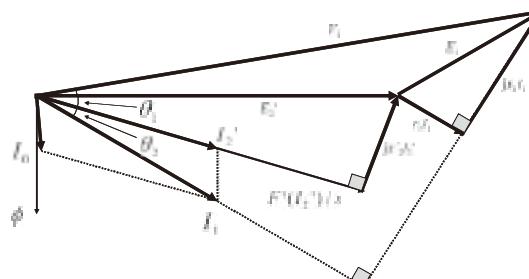


Fig. 2. Phasor diagram of the HTS-ISM

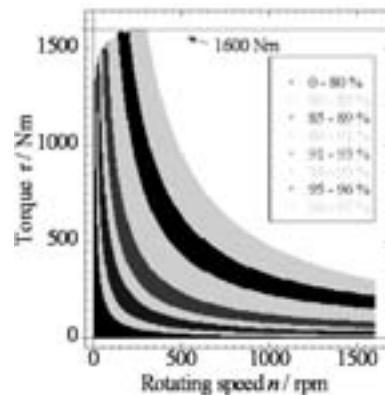


Fig. 3. Analysis result of the efficiency map of HTS-ISM

参考文献

1. T.Nakamura, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol.80 (2009), p42
2. T.Nishimura, et al.: The 2009 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5. p193 (2009)
3. K.Nagao, et al.: The 2009 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5. p191 (2009)
4. K.Nagao, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21, No. 8, (2008), p.085006(5pp)

高温超伝導誘導 / 同期回転機の解析モデルによる負荷特性の評価

Load characteristic evaluation by means of analysis model of HTS induction / synchronous machine

松村一弘, 中村武恒, 西村敏治, 浅井力矢, 関口大輔, 雨宮尚之(京大)
 MATSUMURA Kazuhiro, NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Toshiharu
 ASAII Rikiya, SEKIGUCHI Daisuke, AMEMIYA Naoyuki (KyotoUniv.)
 E-mail: matsumura@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1.はじめに

我々の研究グループは、かご形誘導機の2次巻線を高温超伝導化した高温超伝導誘導/同期回転機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine:HTS-ISM)の研究開発を行っている[1]。これまで、HTS-ISMが従来の誘導機と比べて高トルク密度を持つことや、微小すべりを有する[2]といった特長を明らかにしてきた。また、2次巻線を超伝導体と常伝導体のハイブリッド構造にすることにより、冷却ストレスに関する課題解決法を見い出したり[3]、高トルク密度化による1次電流の増加問題に対して、1次巻線も超伝導化する全超伝導モータの提案をしてきた[4]。

一方、このモータの実応用を達成する上で、上記HTS-ISM特有の特性を考慮した同モータならではの制御方法が必要となってくる。HTS-ISMの特性を最大限生かし、可変速駆動することで、高効率運転が可能となる。よって、本研究では、モータ制御でよく用いられているMATLAB®/Simulink®を用いて可変速制御することを目的とし、その第一段階として、Simulink®上でHTS-ISMモデルの開発を行ったので、その現状について報告する。

2.試験方法

今回、解析結果と比較を行う為、まず実機を用いた負荷試験を実施した。対象としたモータでは、臨界電流59A(@77K)のビスマス線材を3本束ねて1本のロータバーとした。即ち、ロータバー1本あたりの臨界電流は177A(59A×3本)である。Fig.1に実験装置の概略図を示す。HTS-ISMはメタルクライオスタットの中に設置されており、シャフトを介して、トルクメータ、負荷用同期機と連結されている。負荷試験に際しては、入力電圧を150V、一次周波数を60Hzとして測定した。試験結果をFig.4の赤いプロットに示す。

3.解析方法

上記したように、HTS-ISMのモデル作成にMATLAB®/Simulink®を利用した。Fig.2に、実際に作成した解析プログラムを示す。本研究では、誘導機の2次側抵抗に超伝導体の電界(E)-電流密度(J)特性を与えることで、HTS-ISMのモデルを作成している。なお、ロータバーの E - J 特性をモデルに適用する際に、銀シースに流れる分流を考慮したり、モータ作製の際に発生するハンダ接触抵抗を考慮するなど、実機により近いモデルの作成を行った。Fig.3には、超伝導体の n 値モデルにより2次側非線形抵抗を計算するMATLAB®/Simulink®プログラムを示す。

4.解析結果

Fig.4の青いプロットに負荷特性(すべり-トルク特性)の解析結果の一例を示す。試験結果において、すべりの小さい領域までしかプロットが無いのは、それ以上のトルクを要求すると回転数が急激に落ちた為である。解析結果から、負荷の小さい領域では、同期速度近傍を保しながら回転している点や、負荷を一定以上に大きくすると大きくすべり出す傾向など、試験結果の再現に関してある程度の一致が見られた。しかしながら、両者の値はすべり領域においてズれており、その一因としては、接触抵抗の評価値に誤差を伴っていることが考えられる。より詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No.20560268)の援助を受けて実施しました。

解析コード開発に関して、ディエスピーテクノロジ(株)様にご協力いただきました。ここに記して、御礼申し上げます。

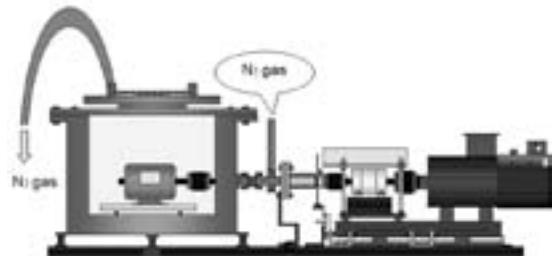


Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

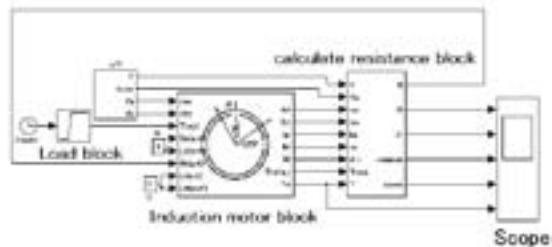


Fig. 2 Analysis code of HTS-ISM with MATLAB®/Simulink®

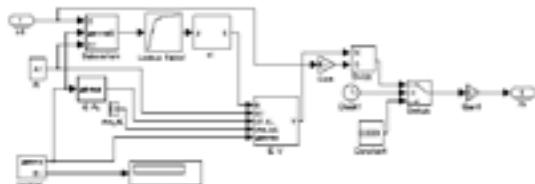


Fig. 3 Analysis code of secondary winding resistance with MATLAB®/Simulink®

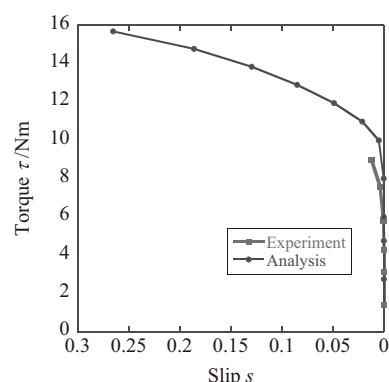


Fig. 4 Analysis and experiment results of HTS-ISM

参考文献

1. (forexample) T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol., 20, 911-918 (2007)
2. K. Nagao, et al.: The 2009 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5. p191 (2009)
3. T. Nishimura, et al.: The 2007 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5. p174 (2008)
4. T. Nishimura, et al.: The 2009 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5. p193 (2009)

モータ用鉄心スロット中におけるビスマス系高温超電導 テープ材ならびにレーストラックコイルの通電特性

Current transport property of Bi-based HTS tape and its racetrack coil
in iron slots prepared for motor

中村 武恒, 西村 敏治, 松村 一弘, 関口 大輔, 浅井 力矢, 雨宮 尚之 (京大)

NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Toshiharu, MATSUMURA Kazuhiro, SEKIGUCHI Daisuke, ASAII Rikiya, AMEMIYA Naoyuki

(Kyoto Univ.)

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

1. はじめに 我々は、これまで高温超電導誘導／同期機 (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) について、その駆動原理や基礎特性を理論的かつ実験的に明確化してきた^[1]。現在は、さらに独自の視点から固定子巻線についても高温超電導化を検討しており、レーストラック形状のダブルパンケーキコイルをベースとした巻線の特性を検討している^[2,3]。一方、上記巻線は鉄心スロット中に収められることから、同スロット内における通電特性を評価することは、HTS-ISM の性能を検討する上で不可欠である。

本報告では、まず HTS 短尺線材の鉄心中における直流通電特性を検討した。また、同線材を適用したレーストラック形状のダブルパンケーキコイルを試作し、鉄心挿入時における特性評価を実施したので報告する。

2. 短尺試料による測定方法 検討対象とした試料は、DI-BSCCO[®](Type ACT) である。同線材を、モータ用固定子鉄心のスロット内に異なる配置で設置し、4 端子法で直流通電特性を測定した。また、上記線材を使用してレーストラックダブルパンケーキを試作し、同コイルについても同様の測定を実施した。Fig. 1 には、試料を固定子スロット内に挿入した様子を示す。この固定子を、液体窒素中に浸漬し、定常状態に到達後に通電特性を実施した。

3. 短尺試料の測定結果 Table 1 には、短尺試料における通電特性(臨界電流: I_c , n 値: n)の測定結果を示す。一つの試料につき、測定を 2 度(First ならびに Second)実施し、その平均値(Average)を計算した。測定手順としては、まず、空芯(鉄心外)で測定し(上段の Outside の結果)，次に鉄心内で測定を実施する(Inside の結果)。そして、再現性を確認するために再度空芯で測定した(下段の Outside の結果)。さらに、鉄心内の測定に際しては、テープ幅広面を軸中心に向けた配置(Horizontal)と周方向に向けた配置(Vertical)の 2 種類について計測を実施した。Table 1 から明らかなように、2 種類の配置について比較すると、配置(Horizontal)については、その通電特性が空芯中と殆ど変わらないのに対して、配置(Vertical)では I_c ならびに n 値とも有意に低下している。この原因是、鉄心内における鏡像効果と考えられる。即ち、配置(Horizontal)では、試料端における垂直磁場成分が小さくなるのに対し、配置(Vertical)では大きくなっている、このことは電磁界解析によても確認している。ただし、配置(Horizontal)でコイルを作製するためには、所謂エッジワイヤス巻線とする必要があるが、テープ材の構造から現実的で無い。従って、実際にはフラットワイヤス巻線とするため、配置(Vertical)とせざるを得ず、コイル設計の際には上記通電特性を考慮する必要がある。

4. レーストラックダブルパンケーキの試作 Fig. 2 には、配置(Vertical)の構成で作製したレーストラックダブルパンケーキコイルの外観写真を示す。同コイルの測定結果等、詳細は講演当日に報告する。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(No. 20560268)の援助を受けて実施した。



Fig. 1 Photograph of DI-BSCCO[®] (Type ACT) short sample in a slot of stator core.

Table 1 Experimental results of current transport property of DI-BSCCO[®] (Type ACT) short sample at 77 K.

		First		Second		Average	
		n	I_c	n	I_c	n	I_c
Outside			14.1	64.7	13.2	64.4	13.7
Inside	Horizontal	13.3	65.1	12.8	64.9	13.1	65.0
	Vertical	11.0	61.8	11.0	61.6	11.0	61.7
Outside		15.7	65.4	14.0	64.9	14.8	65.1



Fig. 2 Photograph of racetrack double-pancake coil made of DI-BSCCO[®] (Type ACT).

参考文献

- [1] (for example) T. Nakamura, et al. : Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, pp. 911-918 (2007).
- [2] T. Nakamura, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77, p. 24 (2007).
- [3] T. Nishimura, et al. : The 2009 Annual Meeting Record I.E.E.Japan, Vol. 5, p. 193 (2009).

風力発電用横方向磁束強化形超電導発電機の設計と特性解析

Design and characteristic analysis of transverse flux enhanced type superconducting wind turbine generators

大崎 博之, 寺尾 悠(東大);長屋 重夫, 鹿島 直二(中部電力)

OHSAKI Hiroyuki, TERAO Yutaka (Univ. of Tokyo); NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naohi (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: ohsaki@k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

風力発電は、地球環境・エネルギー問題の解決に大いに貢献しうる自然エネルギー利用発電の一つとして、世界中で注目を集め、導入が進んでいる[1]。最近は風力発電に用いる風車の直径と発電出力が年々大型化し、さらにダイレクトドライブ化により発電機のサイズと重量も増大してきている。しかし、発電機の重量増加は問題であり、発電機を高トルク密度化し、コンパクト・軽量化することが必要で、そのために超電導化の研究開発が行われている[2]。

本研究では、横方向磁束を強化した超電導同期回転機の風力発電機としての可能性を検討し、高温超電導線材を用いた10 MW級風力発電機の電磁設計と特性解析を実施した。

2. 超電導界磁コイル系の構成

設計および特性解析を行った空心形風力発電機の超電導界磁コイル系の基本構成を、20極の場合を例にFig.1に示す。3個のコイルで界磁1極分を構成し、3つのコイルを順に磁束が通過する方向にコイル電流を流して、回転方向に対して垂直な横方向磁束を強化した磁界分布になっている。つまり、Fig.2のような磁極分布のとき、Coil 1に着目すると。それに通過する主磁束は ϕ_1 , ϕ_{2A} , ϕ_{2B} から成り、 ϕ_1 成分が横方向磁束である。横方向磁束の割合は界磁コイル設計に依存する。Fig.1とFig.2では全ての界磁コイルが同じ大きさのコイルであると仮定している。

電機子コイルは、Fig.3に示すように、3個の界磁コイルに挟まれた空間に、それぞれ2個のコイル、合計4個の電機子コイルが配置される構成である。

3. 設計例と考察

10 MW機では風車直径が150~160 mになり、風車回転数を10 rpmとした。界磁コイル系の最外径は現状の5MW機相当を目標とし、3次元静磁界有限要素法解析を行った。各界磁コイルは外径500 mm、内径300 mm、高さ100 mmを仮定した。超電導界磁コイルが発生する磁界の磁束密度分布をFig.3に示し、設計例をTable 1に示す。

Design Aでは、界磁超電導コイルの電流密度を168 A/mm²とし、最大磁束密度は14 Tに達している。20極の場合に必要な超電導線材の長さは、断面が4 mm×0.25 mmの線材で約2000 kmと見積もっている。

Design Bでは、界磁コイル系全体の外径を6.6 m、極数を24、界磁コイルの電流密度を1.40 A/mm²とした。超電導コイルでの磁束密度最大値は約11.7 Tで、電機子コイル付近での最大磁束密度は3.6~4Tである。また、超電導界磁コイルの線材テープ面に垂直加わる磁束密度は最大で4.8 T程度である。1ターン誘導起電力は2.93 Vが得られた。

界磁コイル形状や構成をさらに検討、改善することにより、最大磁束密度を抑えつつ、いっそうコンパクト化することが可能と考えられる。

参考文献

1. US DOE EERE: DOE/GO-102008-2567, 2008
2. C. Lewis, J. Muller: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp.1~8

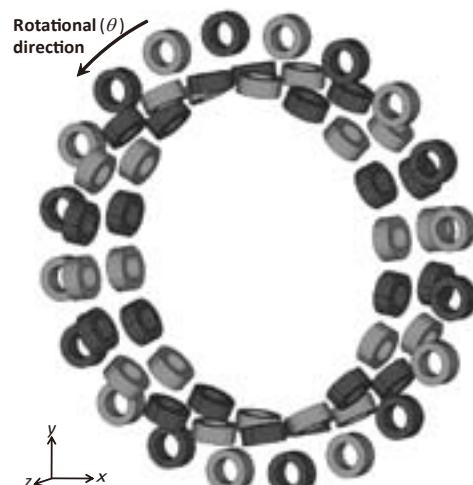


Fig.1 Fundamental configuration of field coils

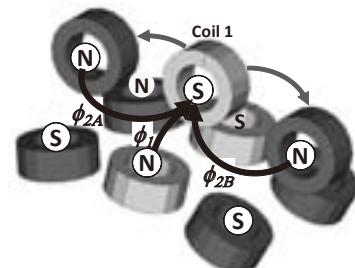


Fig.2 Magnetic poles generated by field coils and main magnetic flux paths linking to coil 1

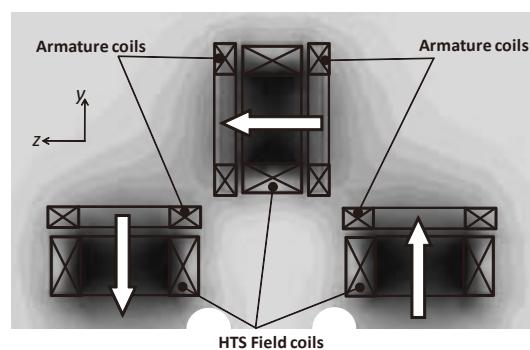


Fig.3 Magnetic fields generated by field coils (contours) and locations of armature coils

Table 1 Design examples

	Design A	Design B
Rotational speed	10 rpm	10 rpm
Number of poles	20	24
HTS field coil system		
Diameter	5.5 m	6.6 m
Axial length	1.5 m	1.5 m
Current density	1.68×10^8 A/m ²	1.40×10^8 A/m ²
Max. flux density	14.0 T	11.7 T
One-turn induced voltage	2.93 Vrms	2.93 Vrms

ILC 開発用 STF-6m クライオモジュール低温要素試験(2)

Performance of 5K thermal radiation shield

大内徳人, 小島裕二, 近藤良也, 土屋清澄, 寺島昭男, 仲井浩孝, 早野仁司, 原和文, 東憲男, 久松広美,
細山謙二, 山本明, 増澤美佳, 宗古国 (高エネルギー加速器研究機構)

OHUCHI Norihito, KOJIMA Yuuji, KONDO Yoshinari, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio, NAKAI Hirotaka,
HAYANO Hitoshi, HARA Kazufumi, HIGASHI Norio, HISAMATSU Hiromi, HOSOYAMA Kenji,
YAMAMOTO Akira, MASUZAWA Mika, Zong Zhanguo (KEK)

E-mail: ohuchi@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構は、アジアに於ける線形衝突型加速器用 (International Linear Collider : ILC) 超伝導加速空洞システム開発のセンター設立を目指して、超伝導加速空洞試験設備 (STF) の建設と 9 セル空洞 4 台を組み込んだ 6m 長のクライオモジュールを開発してきた [1]。2008 年後半からは冷却試験を行い、クライオモジュールの熱的・機械的特性を測定した [2]。

この試験結果及びこれまでの設計検討から、ILC 用クライオモジュール設計の最適化を行う為には次に示す熱パラメータ及び低温技術の確立が必要であることが明らかとなつた。

- (1) 5K 熱輻射シールド板の必要性
- (2) RF ケーブルの温度アンカーの最適設計
- (3) 超伝導空洞冷却時の変位
- (4) 真空中及び減圧ヘリウムガス中での温度測定
- (5) 低温における超伝導空洞磁気シールドの性能

高エネ研では、STF クライオモジュールに模擬空洞容器を組込み冷却試験を行い、上記課題を検討している。今回の学会では、5K 熱輻射シールド板のクライオモジュールへの熱負荷の影響について報告を行う。

2. 5K 熱輻射シールド板熱性能試験

ILC 用クライオモジュールは、ドイツ DESY で開発された TTF-III を基本として設計を進めている。TTF-III では輻射断熱シールド板は 70K と 5K の 2 層構造を持つが、ILC 用クライオモジュールでは建設コストも含めた最適化を行うために 5K シールド板の必要性を検討している。この為、STF クライオモジュールを用い 5K シールド板 (下部) がある場合と無い場合の熱負荷を測定した。STF クライオモジュールのパラメータを表 1 に示してある。又、STF クライオモジュールは 4 台の超伝導空洞を組み込んだ時、2K 領域に 5.4W の侵入熱をもつ。

Table 1 Design Parameters of STF Cryomodule

	With 5K shield	W/o 5K shield
Vacuum vessel length (SS400)	6882 mm	
Vac. vessel outer diameter	965.2 mm	
Gas return pipe length (SUS316L)	5832 mm	
Cavity vessel length	1072.6 mm	
Cavity vessel diameter	240 mm	
Dummy cavity vessel length (SUS316L)	1057 mm	
Dummy cavity vessel diameter	236 mm	
Cold mass, kg		
4 cavities	410	
4 dummy vessels	94	
Gas return pipe	515	
5 K shield (A1050)	185	
80 K shield (A1050)	210	
Helium supply pipe (SUS316L)	50	

図 1 に、超伝導空洞とほぼ同じ寸法を持つ模擬空洞容器 (外径 236mm、長さ 1057mm) を蒸発ガス回収配管下に組込み、5K シールド板 (下部) がある場合と無い場合の断面形状を示した。図 2 にはクライオモジュールの長手方向に模擬空洞容器が組込まれた写真を示した。

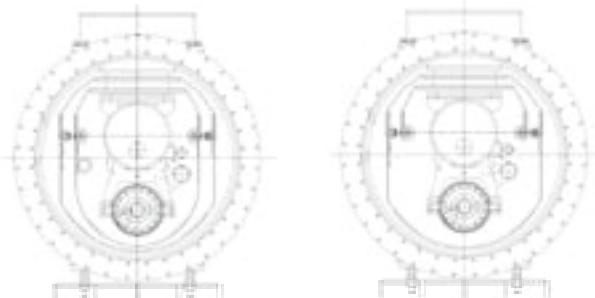


Fig. 1 Test cryomodules with or without 5K shield



Fig. 2 4 dummy vessels under the gas return pipe

3. 2K への侵入熱測定

2K 領域への侵入熱は、2K 液体ヘリウムの蒸発量とその時の液体ヘリウム圧力・温度から求められる蒸発潜熱から計算した。蒸発ヘリウムガス流量は減圧ポンプ排気側 (大気圧) で体積流量計により測定した。表 2 に 5K シールドありと 5K シールド下部無しの測定結果を示した。5K 下部シールド板がない熱負荷測定時、上部シールド板の冷却は行われ、その温度は 4.5K であった。試験結果より長さが 6.9m の真空容器に対して、80K シールド板の温度が 84K に対して、下部 5K シールドがある場合と無い場合で約 1W 程度の差があることが分かった。

Table 2 Measured Heat Loads at 2K

	With 5K shield	W/o 5K shield
Temp. 5K shield	4.82 K	4.51 K
Temp. 80K shield	84.3 K	84.2 K
Pressure, kPa	2.87 kPa	2.86 kPa
Evaporation rate	0.132 g/s	0.167 g/s
Heat load	3.0 W	3.9 W

4. まとめ

ILC 用クライオモジュールの最適設計を行うために、5K 熱輻射シールド板の熱負荷への影響を STF クライオモジュールにより測定した。測定結果から 5K シールド板により 2K への侵入熱を約 1W 程度低減していることが分かった。この結果を基に、クライオモジュール内の温度分布及びシールド板の構成を再検討する。

参考文献

- [1] K. Tsuchiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008), 2B-a01, p.123.
- [2] 大内, 他, 「超伝導加速空洞試験設備(STF)におけるクライオモジュール冷却試験」, 加速器, 5(4), pp.292-297 (2008).

J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム(20)

– メンテナンスおよびシステムの運転状況 –

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiment (20)

– Commissioning Results of the Superconducting Magnets System –

佐々木 憲一, 岡村 崇弘, 木村 誠宏, 中本 建志, 大畠 洋克, 横田 康博, 萩津 透,
荒岡 修, 飯田 真久, 菅原 繁勝, 鈴木祥仁, 田中 賢一, 都丸 隆行, 山本 明 (KEK);

SASAKI Ken-ichi, OKAMURA Takahiro, KIMURA Nobuhiro, NAKAMOTO Tatsushi, OHHATA Hirokatsu, MAKIDA Yasuhiro, OGITSU Toru, ARAOKA Osamu, IIDA Masahisa, KASAMI Katsuyuu, SUGAWARA Shigekatsu, SUZUKI Shoji, TANAKA Ken-ichi, TOMARU Takayuki, YAMAMOTO Akira (KEK);
E-mail: ken-ichi.sasaki@kek.jp

1. はじめに

我々のグループでは、大強度陽子加速器 J-PARC の陽子ビームを利用した次期ニュートリノ振動実験計画において、岐阜県神岡にあるスーパーカミオカンデへ向けて陽子ビームを約90度曲げるための超伝導電磁石ビームラインの建設を行ってきた[1]。このビームラインでは 2.6T の2極磁場と 19T/m の4極磁場を同時に発生するコンバインドアンクション型超伝導電磁石が 28 台並べられ、すべてが電気的、冷却フロー的に直列に接続される。

2009 年 1 月から 3 月までの超伝導システム試運転に続いて、最初のビーム試運転が 5 月末まで行われ、陽子ビームが磁石システムを問題なく通過できる事を確認しており、前回 2009 年度春期の本学会において報告を行っている[2]。その後、ビームチューニングおよびビームによる磁石クエンチ試験を行い、ビーム運転停止中に行うメンテナンスのために昇温した。本報告では、ビーム試験の結果とメンテナンス状況および 2009 年 10 月から始まる 2 度目の冷却試験結果、その他運転状況について報告する

2. ビーム試験(2009 年 4 月～5 月)

2009 年 4 月 23 日 19:09 の最初のビーム受入れに成功した後、主超伝導磁石の電流値をかえてビームチューニングを行い、4360 A にてほぼビーム軌道が磁石中心と一致した。その後、主超伝導磁石の電流値を意図的に下げて、磁石内部でのビームによるクエンチを発生させる試験を行った。40 A ステップで下げていき、4160 A で SCR03F にてクエンチが発生した。そのときの SCR03F および、クエンチしていない磁石 SCR02F の磁石電圧信号を Fig. 1 に示す。t = -10 ms 付近でビーム通過による電圧振動が出ているが、SCR03F では約 1V の電圧が発生しており、クエンチが発生しているのが分かる。その後保護ヒータが炊かれ、コールドダイオードへ電流がバイパスされ、磁石保護がなされている。この後、4400 A での遮断試験を行ったが、システムは健全であった。以上のことから実際のビームオペレーション中のクエンチにおいても、磁石保護システムは有効である事が確認された。

3. メンテナンス(2009 年 6 月～9 月)

夏のシャットダウン中に、メンテナンスおよびいくつかの改修作業を行った。2009 年始めの試験中に明らかになった、補正磁石(定格電流 41 A)が 13 A 程度までしか通電できなかつた問題について、いくつかの改修を行った。試験終了時点で考えられた要因の一つとして、熱リンクの不足による冷却不足が有り、磁石冷却状態が改善されるようにサーマルアンカーを追加し、状態を把握するために温度計も追加した。その他、真空断熱層の安全弁・破裂弁の追加などを行った。2009 年 10 月より再冷却を行い、再度通電試験などを行う予定である。

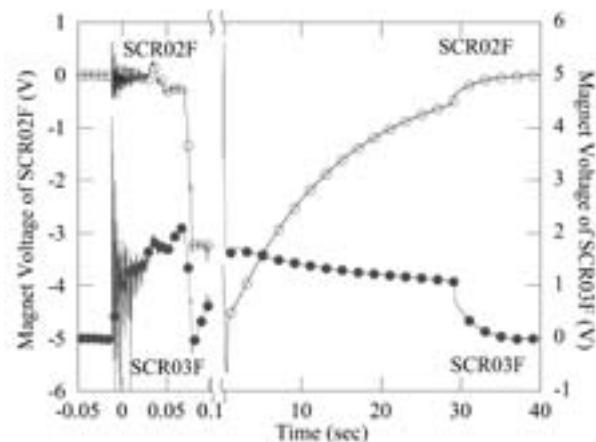


Fig.1 Magnet Voltages in the Full Quench Test

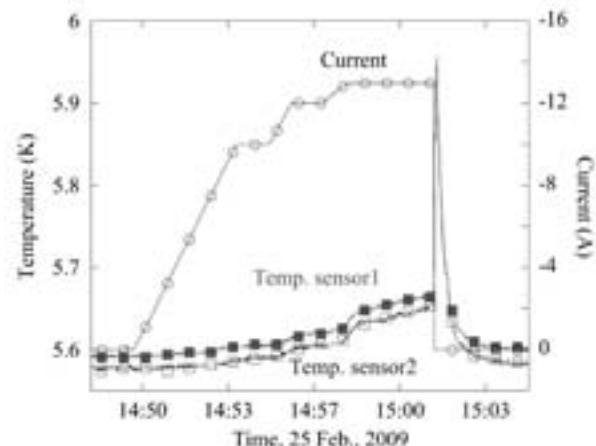


Fig.2 Typical quench signals of corrector coil

4. まとめ・今後の予定

ニュートリノビームライン用超伝導磁石システムのビーム試運転を行った。ビームを意図的にコイルへ当ててクエンチさせる試験を行い、実際のビーム運転においても保護システムが問題なく動作する事を確認した。補正磁石について、2009 年 6 月～9 月の間に冷却パスの増強を行った。同時に、断熱真空系の安全弁などの追加を行った。増強後の試験を 10 月に行う予定であり、結果は当日報告する。

参考文献

1. K. Sasaki, et al.: IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 19 (2009), issue 3 p.1081-1086
2. K. Sasaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.37

J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム(21) -冷凍機節電運転モードの構築-

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiment(21)
- Development of a power-saving mode for the cryogenic system -

大畠 洋克, 槙田 康博, 鈴木 祥仁, 飯田 真久, 萩津 透, 岡村 崇弘,

木村 誠宏, 荒岡 修, 佐々木 憲一, 中本 建志(KEK);

OHHATA Hirokatsu, MAKIDA Yasuhiro, SUZUKI Shoji, IIDA Masahisa, OGITSU Toru, OKAMURA Takahiro,

KIMURA Nobuhiro, ARAOKA Osamu, SASAKI Ken-ich, NAKAMOTO Tatsushi (KEK)

E-mail: ohhata@post.kek.jp

1. はじめに

大強度陽子加速器(J-PARC)のメインリングより入射された陽子ビームは、150mに渡る超伝導磁石列によってニュートリノを生成するターゲットステーションへと導かれる。この超伝導磁石列を冷却するヘリウム低温設備は、4.5 K、0.4 MPa、300 g/s、の超臨界ヘリウム(SHE)を遠心式ポンプによって循環する。超伝導磁石部の熱負荷は 220 W の熱侵入[1]と電流リード 0.53 g/s @4400 A (約 50 W 相当)で、これにビームロス最大 150 W が将来加算される。冷凍機の負荷としては、さらに SHE ポンプの 350 W が加わり、最大 770 W となる。一方、冷凍機の性能は、1500 W が単独試験で確認されており[2]、寒冷の余剰分は LHe 液面制御ヒーターによって消費されている。

この冷凍機の稼動電力は 570 kW で年間 4000 時間を越える運転の積算では、相当なコストとなる。余剰寒冷のために消費される電力の節約を目的に、冷凍能力そして圧縮機動力を下げる制御モードを構築したので報告する。

2. 低温設備の通常モードの運転状態

低温設備の概略フローを Fig. 1 に示す。低温設備はクロードサイクル冷凍機と SHE ポンプ循環による二元冷凍の形態をとっている。前川製作所製のスクリュー式 2 段圧縮機から供給される 1.4 MPa、150 g/s の圧縮ヘリウムガスは、膨張タービン 3 基を有するリンド製コールドボックスとサブクーラー内の JT 膨張によって 1500 W の寒冷を発生する。この寒冷によって冷却された SHE が遠心ポンプによって超伝導磁石列へと送り出される。

3. 節電運転モードの構築

低温設備は、CompactPCIベースの処理装置(大陽日酸製 MPICS)によって、集中制御されている。節電運転モードは、この制御系に新たにシーケンスを追加して実行している。

シーケンスの流れは下記のようになる。

① 節電運転モードをオペレーターが起動させると、まず膨張タービン T1, T2 が定常状態(入口弁 CV-8 が固定)であること、

SHE タービン T3 が稼動中であること、クエンチ処理が実行中で無いことを確認し、CV-2(アンロード弁)を用いて 1.4 MPa に制御していた高圧側圧力を 1.2 MPa まで 1000 秒で下げる。冷凍機への流量も下がり始め、冷凍能力は下がってゆく。

② ①の状態では単に冷凍機に流れていたガスがバッファータンク側に切り替わるだけなので、スクリュー圧縮機動力は低下していない。30 秒おきに吸入圧が十分下がっていることを確認して、CV-2 が所定開度に絞られるまで低段アンローダーを所定の幅で下げていく。

③ 一方、低段アンローダーを下げすぎた時は、吸い込み流量不足で吸入圧力が上昇してくる。30 秒ごとにロード弁 CV-1 が十分絞られているにもかかわらず吸入圧力が閾値より高い場合は所定の幅で低段アンローダーを上げていく。

4. 節電運転モード時の状態

上記シーケンスにより、状態は Table 1 にまとめるように変化した。冷凍機のバランスを崩すことなく、圧縮機の動力を 570 kW から 460 kW に下げる事ができた。

Table 1. Typical parameters which are changed by the power saving sequence.

	before	after
1 st stage unloader	%	100 95
Refrigerator flow	g/s	150 125
LHe level control heater power	W	850 400
Compressor input	kW	570 460
SHE flow (just for information)	g/s	300 300

参考文献

1. T. Okamura, N. Kimura, H. Ohhata et al.: to be published in Advanced in Cryogenic Engineering, Vol.54A.
2. Y. Makida, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80(2009) p.38.

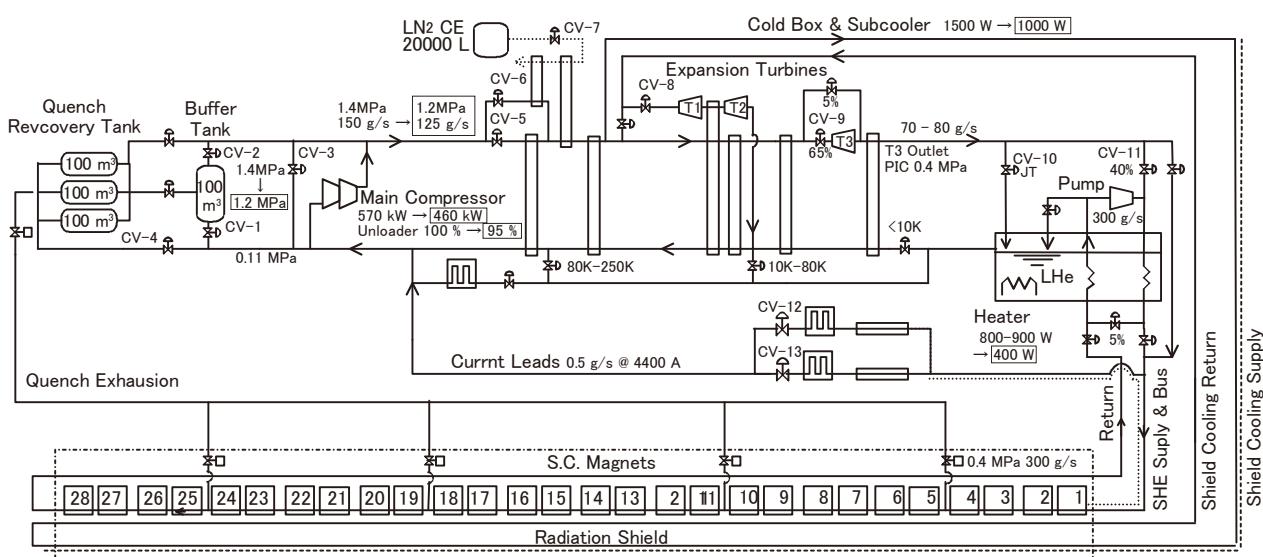


Fig. 1 A conceptual diagram of the neutrino cryogenic system shows the main flows and their conditions.

鉄を使わない大型検出器磁石

Large Detector Magnet without Iron Yoke

和気正芳(高エネルギー研); 山田隆治(フェルミ研)

WAKE Masayoshi (KEK); YAMADA Ryuji (Fermilab)

E-mail: wake@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー実験のディテクター磁石は鉄ヨークと超伝導ソレノイドの組み合わせが定番であり、様々な実験でそのような磁石が用いられて来た。しかし、検出器を移動するために重量が制限され、かつ鉄が飽和するような高い磁場が必要である場合には空芯磁石の使用を考えねばならない。ILC の 4th detector[1]では直径 6m で 3.5T の鉄なしのディテクターソレノイドを設計することになった。

2. 漏れ磁場の閉じ込め

高磁界磁石を空芯で作る場合、漏れ磁場をどうするかがまず問題になる。磁石が大型の場合、(a)あまりにも影響範囲が広いのでもちろん放置するわけにはいかない。しかし、(b)径の違うソレノイドで磁場をキャンセルすれば遠くの磁場を急速に減らせる。さらに、(c)軸方向にも同心円状のコイルで壁を作れば磁場はほぼ完全に閉じ込めることができる。このようなことで 4th detector の構想が始まった。

3. 磁場閉じ込め磁石の問題点

磁場閉じ込め磁石では磁力線が外コイルにより急激に曲げられ U ターンさせられる形になるので、内コイルの端部で極端な磁場の集中が起こる。Wans[2]による初期の計算では 14T にもなり、Nb₃Sn か YBCO の使用が検討された。

磁場の均一性も問題になる。鉄磁石の場合ポールピースの精度で均一性が決まり、0.1%の均一性がほぼ自動的に保証されたが、空芯の場合大きな開口に向かっての磁場の減衰はさけられない。

4. 問題の解決策

単なるソレノイドではなく、電流密度に分布をつければ磁場の均一性を上げることはできる。Mikhailichenko[3]は鉄なしでも 2mφx3m の空間に 0.1% の磁場均一性が確保でき、最高磁場も 8T まで下げられる事を示した。しかしながら、この磁場での電流密度からはやはり Nb₃Sn の使用は必要であるとの結果になった。

5. 新しいコイル配置

我々は電流密度を一定にして、端部の巻き線厚みを増やして磁束の曲がりを緩やかにし、コイルをセグメント化することで磁場生成の自由度を作り、微調整で 0.1% 均一磁場の空間を広げていく設計を行った。その結果、2 図に見られるように、磁場の均一性がありしかも最高磁場が 5T の配置を見出すことができた。これは十分に Nb₃Ti で製作できる。均一磁場領域とディテクター設置の開口を確保するため寸法は大きく、リターンパスにも磁場があるので蓄積エネルギーも 5.1GJ とかなり大きくなる。

6. 三層ソレノイド

磁場の端部集中を避けて均一性を作るには開口部に電流を配置すればよい。三層ソレノイドにすればこれは満たされ 3 図のような配置で最高磁場は 3.8T にまで下がる。ディテクターの補修には 3 層目のコイルを引き出さねばならないが、これで蓄積エネルギーも 2.5GJ となり、すべて CMS で経験された技術の僅かな延長となる。

7. 結論

以上の磁場設計により、ディテクター自体の優れた分解能とあいまって、4th detector は、現実味を帯びた提案となった。しかしながら製作には詳細な力学的検討が必要である。

参考文献

1. "Letter of Intent from the Fourth Detector ("4th") Collaboration at the International Linear Collider," 140 authors, 31 March 2009, www.4thconcept.org/4LoI.pdf.
2. R. Wands, "Magnets and Support", 4th Detector at Fermilab meeting 19–20 October 2006
3. A. Mikhailichenko, "Do Detectors Need Yoke", CBN-01-20, Cornell University, (2001)

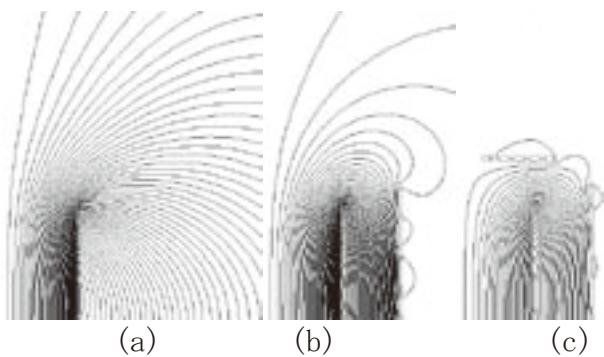


Fig. 1 Confinement of the Magnetic Flux.
Solenoid field, (a), can be confined by the return path outer coil, (b), and shield coil at the aperture, (c).

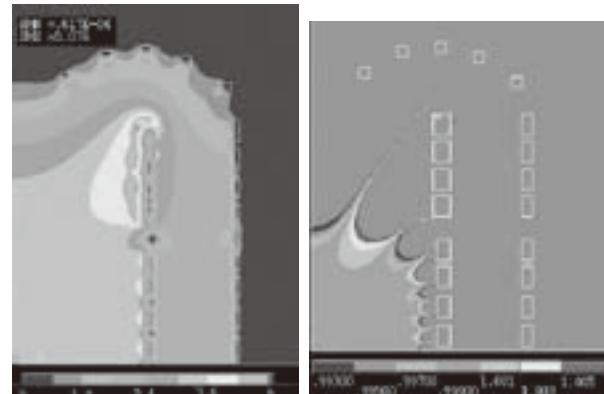


Fig. 2 Sectioned Solenoid with notches
By sectioning the solenoid coil, the fine adjustment of the magnetic field can achieve a large $\pm 0.1\%$ good field region without increasing the peak field. Left shows the peak field. Right is the contour map at every 0.2% field.

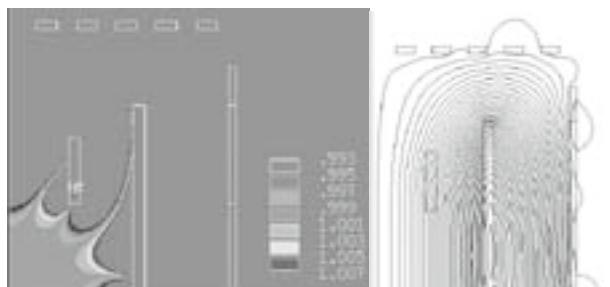


Fig. 3 Two Block Double Helmholtz Coil Design.
Top is the field distribution. The bottom left is the field map to show the good field region by the contours at every 0.2%. The bottom right is the flux pattern of the magnet.

高温超伝導ダイポールマグネットにおける多極磁界成分の解析

Numerical analysis of multi-pole components of magnetic field in HTS dipole magnet

雨宮 尚之, 岡田 奈々, 高橋 慶多, 中村 武恒(京大・工); 荻津 透, 佐々木 憲一(KEK);
 来栖 努, 小野 通隆, 小平 政宣, 折笠 朝文(東芝); 野田 耕司(放研)
 AMEMIYA Naoyuki, OKADA Nana, TAKAHASHI Keita, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);
 OGITSU Toru, SASAKI Kenichi (KEK); KURUSU Tsutomu, ONO Michitaka, KODAIRA Masanobu, ORIKASA Tomofumi
 (Toshiba); NODA Koji (NIRS)
 E-mail: amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

実用的な高温超伝導線のほとんどはテープ形状をしており、3次元的巻き線への適用性に対する懸念、テープ面内の磁化電流の磁界精度への影響に対する懸念などから、加速器マグネットへの応用は敬遠されてきた。本稿では、3次元巻き線の可能性を検証するための臨界電流測定、2次元磁界解析による高温超伝導加速器マグネットの概念設計と多極磁界成分の評価について報告する。

2. 臨界電流測定による3次元巻き線の可能性の検証

Fig. 1のような4極マグネットのエンドスペーサにY系線材を巻きつけて臨界電流を測定した。線材には面方向の曲げとねじりが加わる。巻きつけ前の直線状態の臨界電流は211.2 A、巻きつけた状態の臨界電流は215.5 Aであり、臨界電流の低下は観測されなかった。この実験結果は、エンド部における3次元巻き線が不可能ではないことを示唆するものである。

3. 2次元磁界解析による高温超伝導加速器マグネットの概念設計

Table Iに仕様を示したよう高温超伝導マグネットの概念設計を2次元静磁界解析によって行った。

Fig. 2に設計したマグネット断面と磁束分布を示す。Table IIに示すようにふたつのマグネットのターン数はそれぞれ2520ターン、2680ターンである。Magnet Aは、通常のラザフォードケーブルによるコサインシータ巻きコイルにおいて、ラザフォードコイルをテープ線材で置き換えたようなマグネット(赤道面でテープ面は図中で水平)、Magnet Bはレーストラックコイルを積み重ねたようなマグネット(テープ面は図中で全て垂直)である。ただし、Magnet Bにおいてもコイルエンドでは巻き線を上下に曲げて開口部を設ける必要がある。Fig. 3に示すように、いずれのマグネットにおいても、仕様値(目標値)とした相対値 10^{-3} 以下に高次の多極成分を抑えることができている。

解析した断面において、Magnet Bではテープ面に磁界がより平行になっていることが特徴的である。Table IIに示すように線材経験磁界の絶対値はふたつのマグネットでそれほどかわらないのに対し、線材面に垂直な磁界成分はMagnet Bにおいてずっと小さくなっている。

4. まとめ

高温超伝導テープ線材を用いて3次元的な加速器マグネットを巻くことは可能であると考えられる。マグネット設計においてはテープ線材の臨界電流の外部磁界に対する異方性の考慮が必要であろう。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共同シーズイノベーション化事業ならびに科学研究費補助金(21360132)の助成を受けたものである。

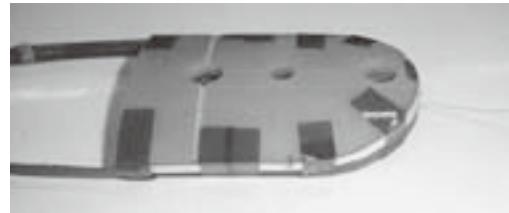


Fig. 1 Coated conductor wound on end former of quadrupole coil.

Table I. Specifications of magnet

Dipole component	3 T
Higher multi-pole component / dipole component	$< 10^{-3}$
Reference radius	30 mm
Radius of magnet bore	60 mm
Inner radius of iron return yoke	120 mm
Permeability of iron for return yoke	Infinite

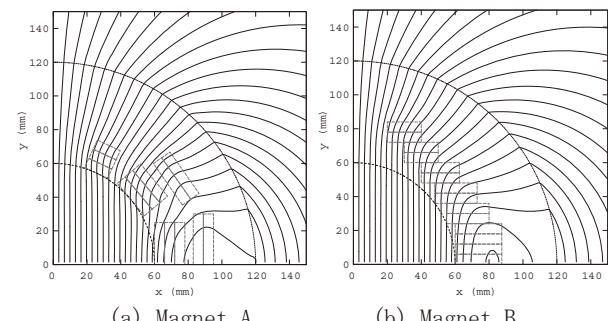


Fig. 2 Two designed magnets and magnetic flux distributions.

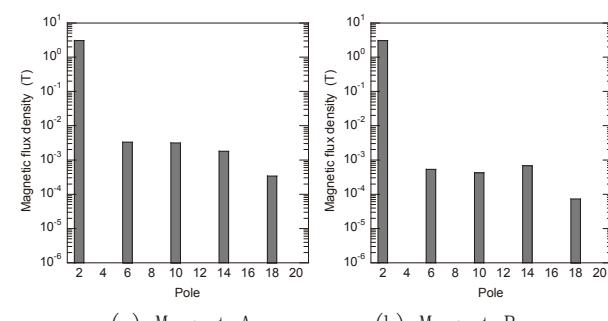


Fig. 3 Multi-pole components of magnetic field.

Table II. Outlines of designed magnets

	Magnet A	Magnet B
Number of turns	2520	2680
Maximum magnetic fields at tape	3.41 T	3.35 T
Maximum normal magnetic field component to tape	2.84 T	1.42 T

LHD ポロイダルコイルの交流損失に対する最大電流依存性

Effect of maximum currents on AC Losses in poloidal coils of the Large Helical Device (LHD)

高畠 一也, 力石浩孝, 三戸利行, 今川信作 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, CHIKARAISHI Hirotaka, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: takahata@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) の超伝導ポロイダルコイルは、NbTi ケーブル・イン・コンジット導体を使用した大型超伝導コイルである。ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置である LHD は、定常運転を基本とし、これまで磁場を急速に変化させることはなかった。しかし、2008 年度から、プラズマの位置を実時間 (数秒間のオーダー) で制御し、プラズマ閉じ込め性能を向上させる実験が開始された。そのために用意されたのが、2 種類のポロイダルコイル (IV コイルおよび IS コイル) 用の新規パルス電源である。従来の電圧出力 33 V の直流電源に、180 V のパルス電源を直列に挿入し、合計 213 V の電圧を発生することができる。この増強により、ポロイダルコイルの掃印速度を約 6 倍にすることができ、1.5 秒間にプラズマの位置を 10 cm 移動させることができた。このときのコイル上での最大磁場変化速度は 0.06 T/s である。本研究では、この新規パルス電源を活用し、ポロイダルコイルの交流損失を測定した。そして導体の結合損失時定数、ヒステリシス損失に対する最大電流依存性を調べた。

2. 交流損失の測定方法と測定結果

コイル内で発生する損失は、冷媒の温度上昇を観測する熱的な方法で測定した。熱負荷と同じく入口・出口冷媒のエンタルピー差 ΔH と流量 m の積で観測する。パルス通電後の $m\Delta H$ の時間変化の積分が、その通電に対する交流損失として測定される。今回は IV コイル (上側、下側コイルの 1 対) を単独で通電した。通電波形はフラットトップが 10 秒で立ち上げ/立ち下げ時間が τ_0 の台形波である。

図 1 は、最大通電電流が 2 kA, 4 kA, 5 kA の 3 通りの場合の、1 回の台形波通電当たりの交流損失の $1/\tau_0$ 依存性である。IV-L と IV-U は 2 個ある IV コイルの下側コイルと上側コイルを示している。損失の $1/\tau_0$ 依存性は直線近似が可能であり (実線が IV-L, 破線が IV-U), $1/\tau_0$ がゼロの極限をヒステリシス損失として見積もることができる。そして測定した損失からヒステリシス損失を差し引いた損失を結合損失と見積もった。

3. 結合損失時定数の評価

通電波形、コイル内部の磁場分布を考慮し、測定した結合損失 Q_c を次の表式で規格化した [1]。 Q^* を規格化損失と呼ぶ。

$$Q^* = (\mu_0 / A^* B_m^2 V_m) Q_c \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 A^* は導体形状と磁場方向に関する因子、 B_m は最大印加磁場、 V_m は素線の体積である。図 1 のすべてのデータから結合損失を抽出し、それを式(1)を用いて、導体全長にわたり規格化した。その結果を図 2 に示す。規格化したことにより、最大通電電流の依存性がなくなった。これにより、コイル内に磁場分布があつても、最大電流について規格化できることが確認された。ここで結合損失時定数、つまり結合電流の減衰時定数を τ とすると、 τ / τ_0 が 1 より十分小さい (0.1 以下) の場合は次の関係が近似的に与えられる。

$$Q^* = 2\tau / \tau_0 \quad (2)$$

この式は、図 2 における直線近似の傾きから τ を求めることができることを示している。評価した 2 個の IV コイルの結合損失時定数は、IV-L コイルが 85 ms, IV-U コイルが 200 ms であった。2 個のコイルは全く同じ設計で作られたにもかかわらず時定数で 2.4 倍の差が現れた。コイルに使用されている素線の表面は何もコーティングを施していない銅の裸面であり、自然酸化被膜が素線間接触抵抗に影響を与えた可能性がある。

ヒステリシス損失の最大電流依存性について、理論式との比較を行ったが、図 1 の外挿による評価値の方が大きくなつた。その原因についても検討を行つた。

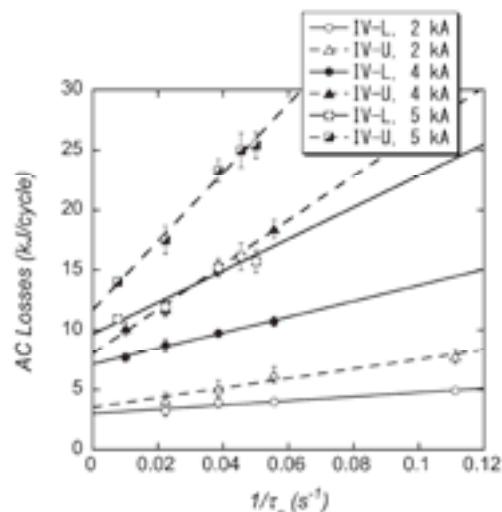


Fig.1 Measured AC losses

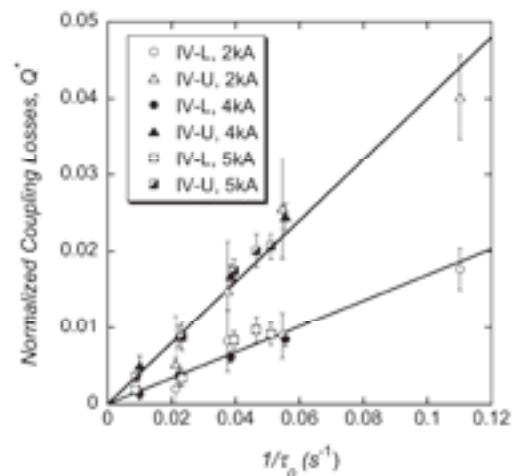


Fig. 2 Normalized coupling losses

参考文献

- [1] V.B. Zenkevitch and A.S. Romaniuk, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-13, No. 1, pp. 567-570, 1977.

LHD型核融合エネルギー炉の高温超伝導オプション設計 (電磁力と巻線歪みの検討)

Design studies on the LHD-type fusion energy reactor with HTS option

柳 長門, 田村 仁, 高畠 一也, 三戸 利行, 相良 明男, 今川 信作 (NIFS);
シャンペイエ ローマン (INSTN); バンサル ゴーラブ (IPR)

YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio, IMAGAWA Shinsaku (NIFS);
CHAMPAILLER Romain (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires); BANSAL Gourab (Institute for Plasma Research)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究の背景と目的

大型ヘリカル装置 LHD における優れたプラズマ閉じこめ性能の実証を受けて、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[1]。この装置の巨大なヘリカルコイル(大半径 15-17 m)には、100 kA 級の超伝導導体が必要であり、現在、Nb₃Al 線材を用いたケーブルインコンジット導体(CICC)を基本オプションと想定し、ITER で開発された技術の延長として検討している[2]。ただし、複雑な巻線および冷却配管構造が要求されるため、ソリッド導体を用いた間接冷却コイルも別オプションとして考えられる。そこで、Nb₃Sn 平角撲線を転位させてアルミ合金ジャケットに収めた導体の開発を進めているが[3]、一方で、近年の急速な技術進展により高温超伝導(HTS)導体を採用することも想定可能となっている。HTS 導体を用いると、間接冷却による限られた冷却条件においても極めて安定なコイルを実現できると期待される。

2. 巒線構造と電磁力評価

Fig. 1 に、HTS オプションを採用した場合のコイル構造案を示す。HTS 導体を用いると、ヘリカルコイルの半ピッチごとに導体およびコイルを接続して分割組立すること(Fig. 1(a))が原理的に可能となると考え、検討を進めている[4]。また、この製作方式を採用する場合、コイル巻線をダブルパンケーキ構造としても可能と考えられ(Fig. 1(b))、連続巻きの場合のレイアーコイルと比べて、コイルリード部の取り出しに優れた構造が期待できる。現在提案している 100 kA 級 HTS 導体の設計例 (Fig. 1(c)) では、Y 系テープ線材を単純に積層してステンレス製ジャケットに収めた構造としており、ひとつのヘリカルコイルあたり 400 本の導体を 10 ダブルパンケーキに並べ、パンケーキ間には冷却チャンネルを設ける。この構造における巻線部の電磁応力を解析するために、まずは等価的なソレノイドコイルで代用したモデルを構築し、有限要素法を用いた計算を行った。その結果、最大応力としては 500 MPa 以下となり (Fig. 1(d))、許容範囲内と評価している。

3. 模擬導体を用いた巻線歪みの評価

現在の導体設計例 (Fig. 1(c)) では、HTS 線材を導体中心に薄く配置することを考えているが、これはヘリカル巻線に伴う歪みを小さく抑えるためである。このことの有効性を確かめるために、縮小導体を製作して模擬的な試験を行った。具体的には、YBCO テープ線材 4 本を銅ジャケットに収め、室温中で順次曲げながら、液体窒素中において臨界電流測定を行った。縮小導体のうち、YBCO 線材を中心に集中して配置したものでは、実質的に線材にかかる歪みが小さいため、巻線歪みに対して十分な効度があることが実証できた。また、この結果を検証するために、線材 1 本を同様に銅ジャケットに収めたサンプルについても曲げ試験も行い、線材 4 本の場合をほぼ再現できることを確かめた。ただし、YBCO 線材と銅ジャケットを接合する際に半田付けを行っているが、両者の熱収縮率の違

いに伴って余分な歪みが生じている可能性が考えられ、現在、実験データの詳しい吟味を行っている。

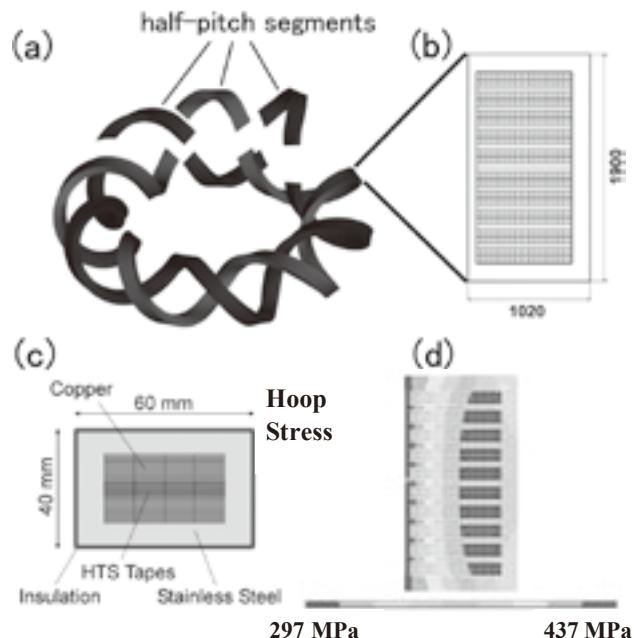


Fig. 1 Conceptual images of (a) segmented-type fabrication, (b) the coil pack and (c) a 100 kA HTS conductor for the FFHR helical coils. The electromagnetic hoop stress calculated (using ANSYS) for an equivalent solenoid coil is shown in (d).

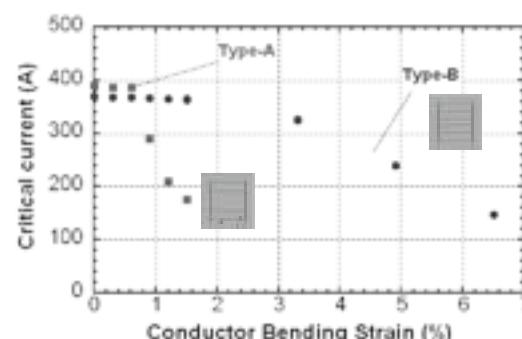


Fig. 2 Measured critical currents as a function of the “conductor bending strain” for two types of reduced-scale conductors.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **81** (2006) 2703.
- [2] S. Imagawa et al., Plasma and Fusion Res. **3** (2008) S1050.
- [3] K. Takahata et al., Fusion Eng. Des. **82** (2007) 1487.
- [4] G. Bansal et al., Plasma and Fusion Res. **3** (2008) S1049.

LHDヘリカルコイルの常伝導伝播速度の考察

Study on the propagation velocity of the LHD helical coil.

今川 信作
 IMAGAWA Shinsaku (NIFS)
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) のヘリカルコイルでは、コイル入口に減圧熱交換器が追加され、コイル入口温度を 4.4 K 飽和から 3.2 K まで下げた運転が可能となっている[1]。この改造により、これまで 11.0 kA に制限されてきた運転電流を 11.4 kA まで上昇させることに成功しているものの、モデルコイルの安定性試験から予測されたほどの改善効果は得られていない。伝播速度を評価してその原因について考察する。

2. 常伝導伝播速度の比較

モデルコイルにおいては、図 1 に示すように、導体とスペーサー間に挿入された長さ 10 mm 程度のテープヒータを用いて、短い常伝導部を生成し、それが拡大伝播するか否かを調べて、最小伝播電流を求めた。その際の伝播速度を図 2 に示す。冷媒温度が低下するほど、同じ電流値における伝播速度は遅くなるだけでなく、最小の伝播速度が速くなっている。このことが、最小伝播電流の上昇に寄与している。冷媒の潜熱を無視できる場合の伝播速度は次の式で与えられる[2]。

$$v_g = \sqrt{phk/A} \cdot (\Gamma - 2) / (F \cdot c \sqrt{\Gamma - 1}) \quad (1)$$

$$\Gamma = \rho I^2 / A ph ((T_c + T_s) / 2 - T_b)$$

ここで、 p 、 A 、 h 、 k 、 r 、 c 、 I 、 T_c 、 T_s 、 T_b 、 F は、ペリメータ、断面積、等価熱伝達率、熱伝導率、抵抗率、比熱、導体電流値、臨界温度、分流開始温度、冷媒温度、熱容量の補正係数である。図 3 に常伝導伝播時の電圧タップの時間変化を示すが、上式の抵抗率には最大電圧に対応する値を用いた。実験値と勾配が一致するような熱容量の補正は 0.6 度である。これは、過渡的に導体断面内で無視できない温度勾配が生じていることを示唆している。

LHD ヘリカルコイルでの伝播速度は、長手方向にポロイダル 30 度ピッチで取り付けたピックアップコイルの信号から求めることができる。経験磁界が高いところの伝播速度が速くなっている。その範囲を図 2 に示す。式(1)を用いて等価熱伝達率を求めてみると、ヘリカルコイルの 4.4 K 飽和ヘリウム冷却時の冷却状態はモデルコイルの最も悪い状態に近いと推測される。一方、サブクール運転時のヘリカルコイルは、サブクール経験後の飽和ヘリウム中のモデルコイルと同等の冷却状態と推定される。

3. 伝播速度の解析

図 2 に示すように、モデルコイルの実験で得られた伝播速度の最小値は飽和ヘリウム中の 6 m/s であり、これよりも遅い伝播速度では 1 ターンを超えて伝播することはなかった。これよりも遅い伝播が生じない理由は、ヘリカルコイルは一定ピッチでスペーサーで囲われており冷却条件が長手方向に一様では無いためである。モデルコイルの実験では、冷媒のサブクール度が大きくなると最小伝播電流が高くなるだけでなく、伝播速度の最小値も上昇して、3.5 K のヘリウム中では 8 m/s にまで上昇したが、これが真の最小値であるかどうかは明確でない。そこで、初期常伝導部長さの影響を評価するため、数値解析を試みている。常伝導転移後の発熱の時間変化には図 3 を、熱伝達率には導体試料での実測値を用いている。導体断面を超伝導撲線、Al 安定化材、銅シールの 3 つに分割し、Cu-2%Ni の熱抵抗の 10 倍くらいの接触抵抗を導入すると、11 kA あたりで回復しながら伝播する様子を再現できるが、伝播速度が実測値よりも遅いこ

とから、さらに計算モデルの改良を行っている。これらの計算結果については講演にて報告する。

参考文献

- [1] S. Imagawa, et al., Nuclear Fusion **47** (2007) 353-360.
- [2] M. N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Oxford University Press, 1983, Sec.9.3.

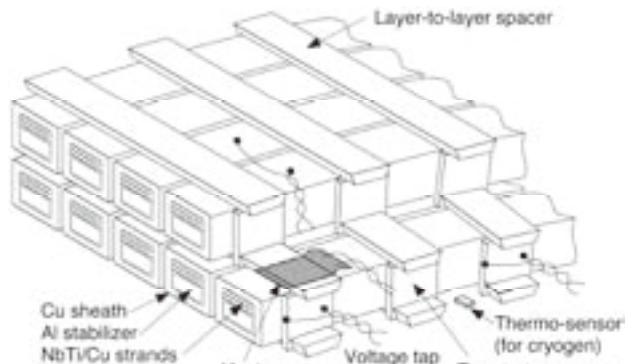


Fig. 1. Schematic drawing of the winding and sensors of the model coil.

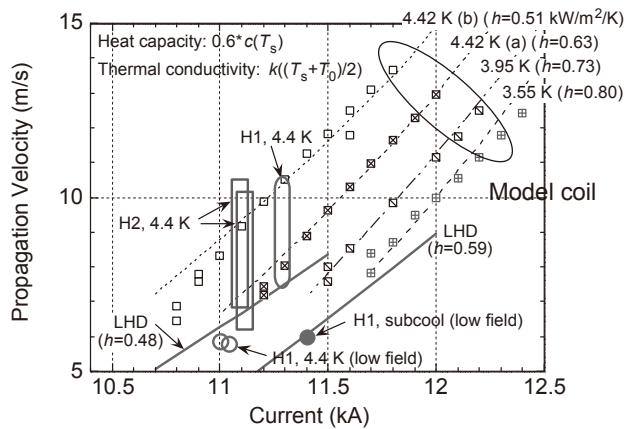


Fig. 2. Estimated heat transfer of the model coil and the helical coil. The symbols are measured propagation velocities.

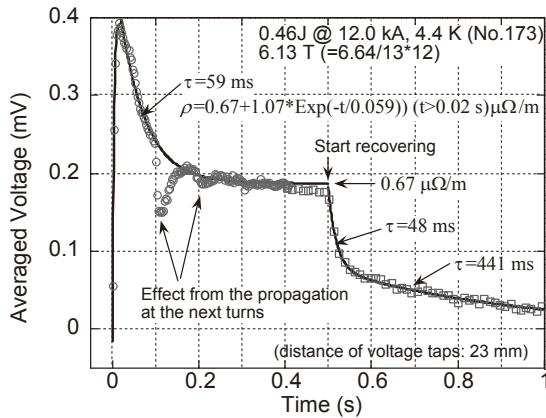


Fig. 3. Typical voltage of the helical coil conductor during a normal-zone propagation.

Nb₃Sn 線材の超伝導特性に及ぼす中性子照射効果

Neutron Irradiation Effect of Nb₃Sn Strand on Superconducting Properties

西村 新(核融合研);竹内 孝夫(物材機構);西嶋 茂宏(阪大);西島 元(東北大);
渡辺 和雄(東北大);四竜 樹男(東北大);落合謙太郎(原子力機構)

NISHIMURA Arata (NIFS); TAKEUCHI Takao (NIMS); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.); NISHIJIMA Gen (Tohoku Univ.);
WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); SHIKAMA Tatsuo (Tohoku Univ.); OCHIAI Kentaro (JAEA)
E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

ITER や核融合発電を目指した DEMO 炉への応用を想定した大型超伝導マグネット開発においては、巨大な電磁力に耐える大電磁力導体と D-T 反応によって生じる中性子照射に耐えるマグネット材料の開発が必要である。これまで、著者らは超伝導材料の中性子照射研究体制を構築し、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の核融合中性子源施設 (FNS) や 3 号原子炉 (JRR-3) での中性子照射を行い、照射後試験方法の確立を目指して研究活動を行ってきた。その結果、 10^{21} n/m^2 程度の 14 MeV 中性子照射を実施するとともに、照射後の I_c 測定、 B_{c2} 測定、 T_c 測定を行い、中性子照射による超伝導特性変化の基本的な実験結果を得ることができるようにになった。

本研究では、これまで得られた中性子照射後の超伝導特性の実験結果を示し、Nb₃Sn 線材に注目して中性子照射効果について考察した結果を示す。

2. 中性子照射試験と照射後試験

14 MeV 中性子照射試験は JAEA の FNS で実施した。GM 冷凍機で 4.5K に保持された試料には $3.52 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ 、室温に保持された試料には $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の照射を行った。照射後試験の残留放射能が基準以下であることを確認し、東北大学金属材料研究所片平キャンパスに試料を移送した。そして強磁場超伝導材料研究センターの 28T ハイブリッドマグネットを用いて I_c 測定、 B_{c2} 測定を行った。また、FNS に設置している GM 冷凍機を用いて T_c 測定を行った。

3. 超伝導特性試験結果

I_c 測定結果を Fig. 1 に示す。Nb₃Sn の結果とともに NbTi や Nb₃Al の結果も同時に示す。Nb₃Sn では、 $3.52 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ の照射でわずかに I_c は増加し、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の照射で I_c の増加が明らかとなる。ただ、 I_c は 20T 付近以上では増加していない。

Nb₃Sn の B_{c2} の測定結果を Fig. 2 に示す。100 mA の電流を流した状態で磁場を 3.2 T/min の速度で変化させ、4 端子法で電圧を計測した。照射後の結果はいずれも 25.3T 付近の値で、照射前の 25.4T とほとんど変化が認められない。実験の測定精度から 0.1T 程度は誤差と考えられ、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の照射では B_{c2} は変化しないことが分かる。

Nb₃Sn の T_c の測定結果を Fig. 3 に示す。クライオスタットの第 2 ステージの温度を 0.1K/min で変化させ、4 端子法で抵抗測定を行った結果である。照射前、 $3.52 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ の照射後、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の照射後、ともに T_c は約 17.8K である。

4. 照射効果に関する考察

これまでの Nb₃Sn の結果を要約すると、 $1.78 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ の照射によって、20T 以下の領域では明らかに I_c が増加するが、 B_{c2} 、 T_c は変化しない、ということである。

I_c 、 B_{c2} 、 T_c によって規定される超伝導曲面は超伝導材料への元素添加や熱処理によって決定され、 I_c は粒界や介在物に留められたピンによって制限される。このようなピンを冶金的ピンと呼ぶとする。一方、中性子照射によって原子のはじき出しが起こり、格子間原子や原子空孔のクラスターがピン留め点となる。これらのピンを照射誘起ピンと呼ぶとすれば、治

金的ピンと照射誘起ピンの和が I_c を決定することとなる。照射誘起ピンが照射量に対応して変化するすれば、照射誘起超伝導曲面が冶金的超伝導曲面とは独立して存在することとなり、この二つの曲面の和が実験上計測される。即ち、ある磁場領域で I_c のみが増加し、 B_{c2} 、 T_c は変化しない場合がある。

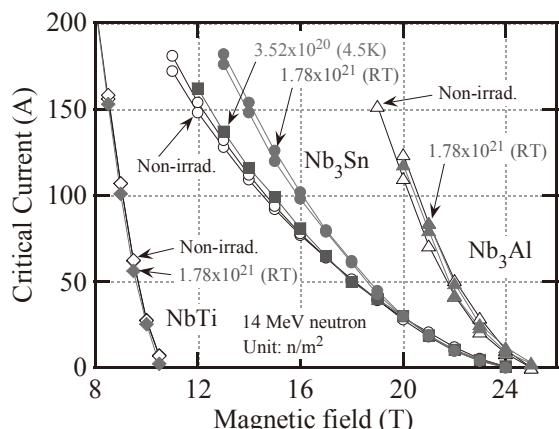


Fig. 1 Change in critical current against magnetic field.

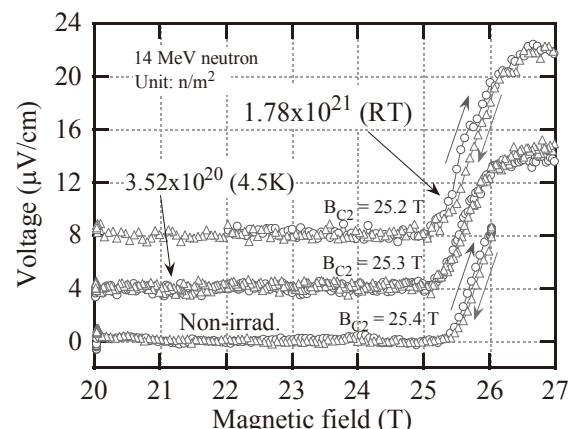


Fig. 2 Results of critical magnetic field measurements of Nb₃Sn wire.

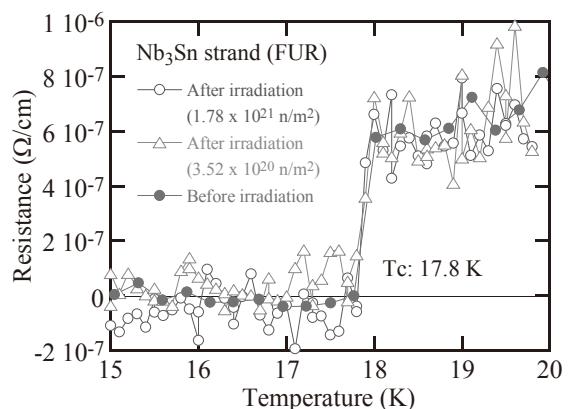


Fig. 3 Results of critical temperature measurements of Nb₃Sn wire.

電気絶縁材料の層間せん断強度に及ぼす中性子照射効果

Neutron Irradiation Effect of Electric Insulation Material on Interlaminar Shear Strength

西村 新(核融合研);竹内 孝夫(物材機構);泉 佳伸(福井大学);西嶋 茂宏(阪大);

渡辺 和雄(東北大);四竜 樹男(東北大);辺見 務(原子力機構);小泉 徳潔(原子力機構)

NISHIMURA Arata (NIFS); TAKEUCHI Takao (NIMS); IZUMI Yoshinobu (Univ. of Fukui); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.); WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); SHIKAMA Tatsuo (Tohoku Univ.); HEMMI Tsutomu (JAEA); KOIZUMI Norikiyo (JAEA)

E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

ITER や JT-60SA では 14MeV もしくは 2.45MeV のエネルギーを持つ中性子を発生させる。これらの発生中性子のいくらかはプラズマ加熱用のポートなどから漏えいし、また、ブランケットや二重壁構造のプラズマ真空容器を透過し、超伝導マグネットに到達する。そのため、中性子照射に優れた有機電気絶縁材料の開発研究が進められている。これまでの研究では、シアネットエスチルが耐中性子線性に優れた特性を示すこと、また、シアネットエスチルとエポキシの混合樹脂も中性子照射に対して抵抗があることが示されている。

そこで本研究では、シアネットエスチルをマトリックス樹脂とし、カプトンフィルムとガラスクロスを積層した GFRP を試作するとともに、試作した GFRP を原子炉照射し、中性子照射量と層間せん断強度 (Interlaminar Shear Strength, ILSS) の関係を検討した。

2. GFRP の試作

GFRP の試作は NIFS および Toshiba で行った。試作に用いたシアネットエスチルは CTD 社製の CTD403 ならびにハンツマン製の AroCyl-10 である。AroCyl-10 の場合には、同じハンツマン製のエポキシ PY306 と 3:7 の重量割合で混合して用いた。モールドジグ内にコロナ処理したカプトンフィルム 10 層と S ガラス製のガラスクロス 11 層を交互に積層し、その後真空含浸を行った。NIFS で作製した真空含浸装置を Fig. 1 に示す。樹脂タンクの容量は約 500ml で樹脂を 50°C に保持した。真空チャンバー内にモールドを設置し、温度を約 50°C に保持し、少しづつ樹脂をモールドに送り、脱泡しながら真空含浸を行った。真空含浸後、キュア熱処理を行い硬化させ、硬化後 10mm x 15mm x 2.5mm (元板厚) の試料を作製し、原子炉 (JRR-3) で 10^{21} ならびに 10^{22} n/m² (>0.1 MeV) まで中性子を照射した。照射後、室温および 77 K で ILSS 試験を実施した。ILSS は (3 x 最大荷重) / (4 x 試料幅 x 試料厚さ) によって求めた。支持点間距離と板厚の比は 5 で、ストローク移動速度は 0.75 mm/min である。

3. ILSS 試験結果

ILSS 試験で得られた荷重-時間曲線の一例を Fig. 2 に示す。これらの結果は 77 K の結果である。最大荷重までほぼ線形に増加し、突然急激な荷重低下を示す。この荷重低下時に層間破壊が生じており、層間破壊の更なる拡大を阻止するために、ストローク移動を停止させるとともに直ちに除荷を行った。未照射材、 10^{21} n/m² 照射材の室温での ILSS 試験では、最大荷重付近で塑性変形のような挙動が認められ、引張曲げ応力側の試料表面付近で曲げによる損傷が認められた。 10^{22} n/m² 照射材では、室温においても Fig. 2 と同様な挙動が認められた。

ILSS と中性子照射量との関係を Fig. 3 に示す。NIFS CTD403 の結果は分散が小さく、再現性の良い結果が得られている。 10^{21} n/m² 照射では AroCyl-10/PY306 が高い ILSS を示した。 10^{22} n/m² 照射では CTD403 の実験点一つが 40 MPa 以下であったが、そのほかの実験結果はすべて 40 MPa 以上の ILSS を示した。 10^{21} n/m² 照射材で ILSS が高くなるのは、中性子照射によって樹脂が硬化するためであろうと考えられ、

10^{21} n/m² 照射で ILSS が低下するのは、カプトンフィルムとマトリックス樹脂との界面強度が照射によって低下するためであろうと考えられる。AroCyl-10/PY306 GFRP の ILSS がなぜ高くなるのか、シアネットエスチルの場合になぜ耐中性子線性が良好であるかなど、今後の検討が必要である。

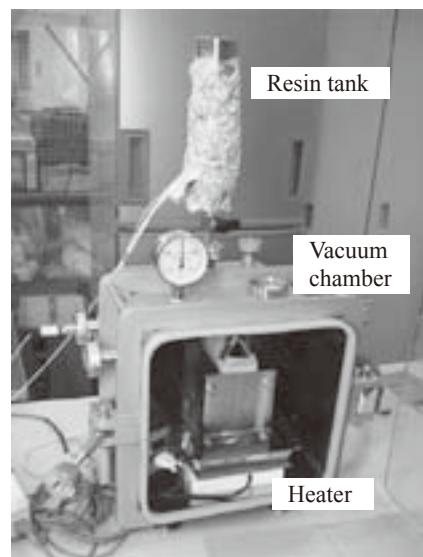


Fig. 1 Equipment for vacuum impregnation.

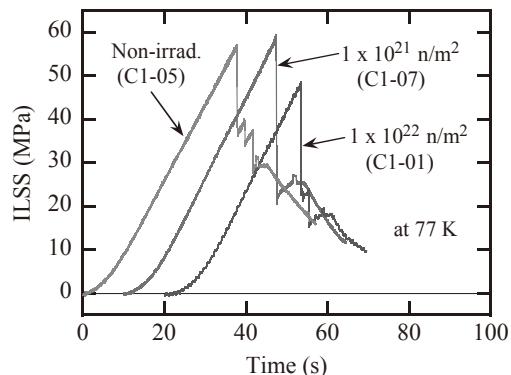


Fig. 2 ILSS against time diagram tested at 77 K.

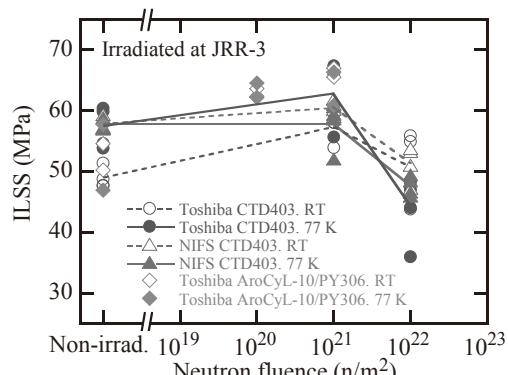


Fig. 3 ILSS against neutron fluence.

ITER 用超伝導導体調達作業の現状

Status of Procurement for ITER Superconductors

高橋 良和、磯野 高明、濱田 一弥、布谷 嘉彦、名原 啓博、松井 邦浩、辺見 努、
小泉 徳潔、河野 勝己、押切 雅幸、吉川 正敏、中嶋 秀夫、奥野 清 (原子力機構)

TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki, HAMADA Kazuya, NUNOYA Yoshihiko,
NABARA Yoshihiro, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KOIZUMI Norikiyo, KAWANO Katsumi,
OSHIKIRI Masayuki, YOSHIKAWA Masatoshi, NAKAJIMA Hideo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER 計画において、2007 年 11 月に ITER 機構と日本原子力研究開発機構 (JAEA) との間で締結された「トロイダル磁場 (TF) コイル用超伝導導体の調達取決め」では、着々と導体製作作業が進んでいる。TF コイル用導体は CIC 型導体で、直径 0.82mm の Cr メッキ付き Nb₃Sn 素線を 900 本と銅線 522 本を撚線し、ステンレス(316LN)製の円型ジャケットの中に挿入し、所定の外径まで圧縮成型したものである[1]。

2008 年 3 月には国内のメーカー (日立電線、JASTEC、新日鉄エンジニアリング) との契約を結び、日本における導体の製作を本格的に開始した。その内の 2 社において、日本で製作される Nb₃Sn 素線の約 15% が完成した。撚線は 760m の銅ダミー撚線が完成した。また、撚線の製作及び導体化 (ジャケット加工) 作業を行う建屋及び装置が完成し、調整運転を開始した。これらの状況を報告する。

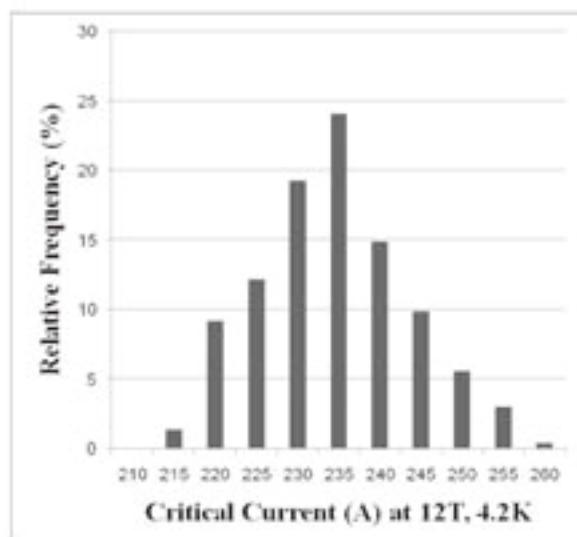


Fig. 1 Critical current histogram of fabricated strand for ITER TF coil.

2. 製作された Nb₃Sn 素線の性能

これまでに国内の線材メーカー 2 社において、Nb₃Sn 素線は、約 15 トン製作された。因みに、日本の分担は TF コイル用素線の 25% である約 100 トンであり、これまでにない大量である。線材メーカー 1 社において、製作された素線の臨界電流値の結果を Fig. 1 に示す。これらはすべて仕様値 (臨界電流値: 190A 以上) を満たしている。その平均値は 230A で、標準偏差は 6.8A である。

3. 完成したジャケット加工工場

TF コイル用導体の単長は 760m であるので、Fig. 2 に示すような長さ 1km のジャケット加工工場を建設した。メインの建屋から 1km の細長い加工ラインが伸びている。メインの建屋には、単長 13m の円形パイプであるジャケット材を突き合わせ溶接を行う自動溶接機、溶接部の X 線検査装置、撚線を挿入したジャケットを所定の外径に圧縮成形するコンパクション装置、直径 4m に巻く巻き取り装置、ヘリウムリーク試験を行う直径 5m の真空容器などが設置されている。現在、100m の銅ダミー撚線を使って、装置全体の調整運転を行っている。12 月には、760m の銅ダミー導体を製作し、装置全体の性能を確認する予定である。

4. まとめ

仕様を満足する Nb₃Sn 素線は、これまでに、仕様を満足する日本分担分の約 15% が完成し、順調に製作が進んでいる。

TF コイル 2 個分の Nb₃Sn 素線 (約 9660km、約 44 トン) は来年の 3 月までに完成する予定である。それに続いて、撚線の製作し、上記加工工場において導体化 (ジャケット加工) 作業を行う。

参考文献

1. Y. Takahashi, et al., "Performance of Japanese Nb₃Sn Conductors for ITER Toroidal Field Coils", *IEEE Appl. Supercond.*, vol. 18, No. 2, pp. 471-474, 2008.



Fig. 2 1-km jacketing facility for ITER conductors.

ITER 用超伝導導体のジャケッティング装置

Jacketing facility for ITER superconducting conductor

松井 邦浩, 濱田 一弥, 河野 勝己, 小泉 徳潔, 高橋 良和, 中嶋 秀夫, 奥野 清(原子力機構)
 MATSUI Kunihiro, HAMADA Kazuya, KAWANO Katsumi, KOIZUMI Norikiyo,
 TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: matsui.kunihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、ITER の国内機関として、ITER トロイダル磁場(TF)コイル用の超伝導導体[1]の調達活動を進めており、33 本の TF コイル用超伝導導体の製作を行う。導体製作においては、素線及び撚線の製作後に、長さ 760m のステンレス(SUS316LN)製の金属管(ジャケット)に撚線を挿入するため、長さが 800m の直線の組立て装置が必要である。この導体化を行うジャケッティング装置を建設し、現在、全て銅線の模擬撚線を用いた導体の試作を行っている。本講演では、ジャケッティング装置の概略と導体製作の状況について紹介する。

2. ジャケッティング作業の流れ

ジャケッティング作業の流れを Fig. 1 に示す。まず、13m の長さのジャケットを突き合せ溶接し、長さが 760m のジャケットを製作する。そのジャケット内に撚線を引き込み、ジャケット外径を 48.0mm から 43.7mm に圧縮成形する。その後、2m の半径で導体を巻き取る。これらの中で特に重要な課題は、最大 3 トンの引込み力が発生すると想定している撚線の引込みが可能であることの確認、及び、巻取り径を均一とし巻き取ることである。

3. ジャケッティング装置の構成

ジャケッティング工場の全景を Fig. 2 に示す。工場は、ジャケット溶接とその検査、撚線の引き込みを行う「製造棟」、撚線のドラムを設置する「超伝導室」、圧縮成形と巻取り及び最終試験検査を行う「製品棟」及び「メインライン」で構成される。製造棟から超伝導室までの距離は、CS 導体の製作にも対応できるように約 900m としている。

製造棟では、ジャケットの開先加工と溶接、溶接部の内外面の目視検査、He リーク試験、放射線透過試験、浸透探傷試験(PT)を行う。これらの試験に合格した後に、超伝導室に設置した撚線をジャケット内へ引き込む。メインラインは 2 本あり、ライン上にはジャケットを搬送するためのピンチローラを約 180m 毎に設置している。

製品棟では、撚線を引き込んだジャケットの圧縮成形、巻取り、最終の試験検査を行う。Fig. 3 に示す圧縮成形装置の最大圧縮能力は 500kN で、4 個のローラが 4 方向から 1 度でジャケットを 43.7mm の外径まで圧縮し成形する。ベンダーは 1 次及び 2 次の 2 種類があり、2 次ベンダーで巻取り半径である 2m まで曲げ、巻取り装置で導体を巻き取る。その後、真空容器内に導体を設置し、導体全体の He リーク試験を実施する。最後に PT を行い、健全性を確認して出荷する。

4. 今後の作業

現在、ジャケッティング装置の試運転を行うとともに、模擬導体の試作を行っている。これらの試運転及び試作において特に重要な確認項目は、①引込み力の確認、②巻取り径の均一化である。これらの確認の後に、導体の製造要領書を作成する。さらに、この要領書を用いて 760m の模擬導体の製作を行い、ITER の仕様を満足することを実証し、導体の製作方法を確立する。この確立した製作方法により、超伝導線を用いた導体の製作を実施する。

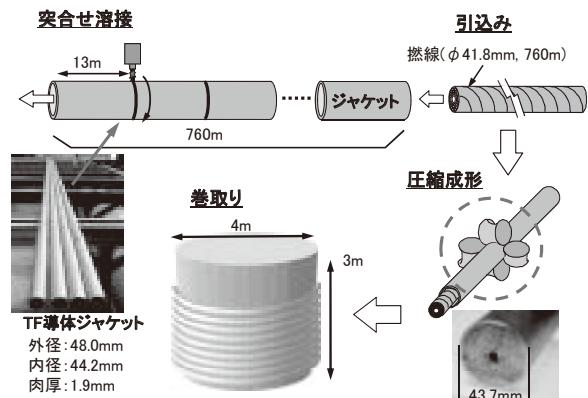


Fig. 1 Fabrication flow of the ITER TF conductor

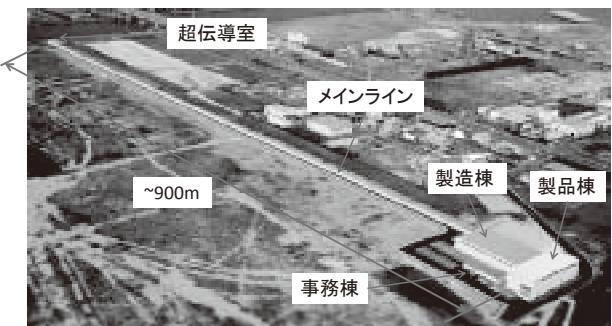


Fig. 2 Bird view of jacketing facility

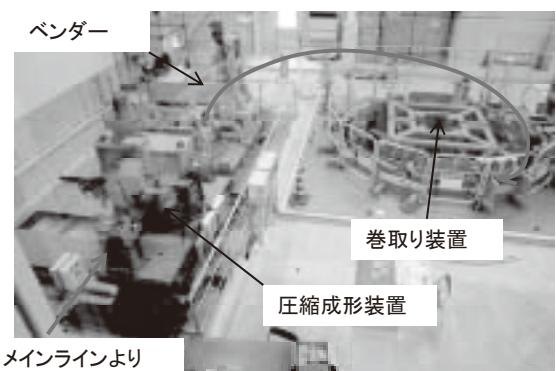


Fig. 3 Jacketing machines in the conductor factory building (compaction machine, benders and spooling machine)

謝辞

ジャケッティング装置の製作及び運転においては、新日鐵エンジニアリング(株)のご協力を頂いております。心から御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Takahashi, et al., "Performance of Japanese Nb₃Sn Conductors for ITER Troidal Field Coils", *IEEE Appl. Supercond.*, vol. 18, No. 2, pp. 471-474, 2008.

ITER・TF コイル構造物の溶接技術検証

Validation of welding technology for ITER TF coil structures

中嶋秀夫, 千田豊, 高野克敏, 堀史明, 奥野清 (原子力機構); 新見健一郎 (川崎重工); 仙田郁夫 (東芝)

NAKAJIMA Hideo, CHIDA Yutaka, TAKANO Katsutoshi, TSUTSUMI Fumiaki, OKUNO Kiyoshi (JAEA);
NIIMI Kenichiro (KHI); SENDA Ikuo (Toshiba)
E-mail: nakajima.hideo@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、国際熱核融合実験炉(ITER)の建設において、トロイダル磁場(TF)コイルの構造物(以下、「TF構造物」という)を製作分担する。このため、原子力機構はTF構造物の詳細製作設計と実規模試作(Phase II)を開始した。Phase IIの活動計画については、2009年春の講演(2B-03)で報告したが、現在、一次製作設計、材料品質確認、及び溶接に関する要素技術の検証と小規模試作を進めている。TF構造物の製作での主要課題は溶接技術の確立と実証である。これまで、原子力機構はPhase II開始の準備作業として、溶接材料にFMYJJ1を使用した狭開先TIG溶接部について、液体ヘリウム温度での強度実証を進めてきた。さらに、実機溶接では溶接変形を把握することが非常に重要であることから、実機大インボーデ容器の溶接試作を実施した。本講演では、これらの試作及び試験で得られた結果について報告する。

2. 狹開先 TIG 溶接部の引張特性

狭開先TIG溶接部の引張特性評価のための試験体は、FMYJJ1の溶接ワイヤを用いた狭開先TIG溶接で、FMJJ1同士、FMJJ1とFM316LNH、及びFM316LNH同士を溶接することで製作した。板厚は40mm、100mmの二種類で、40mmでは、下向き、立向き上進、横向き等の姿勢の影響も調査した。さらに、溶接条件の4Kにおける強度に及ぼす影響を調査するため、異なる条件で溶接した溶接部から、溶接線に沿って溶接金属の試験片を1本切り出し試験に供した。狭開先TIG溶接部の引張特性評価のために試作した溶接継手は全部で20種類であり、継手試験片を40mm溶接で厚さ方向に2箇所、100mm溶接で5箇所から切り出して試験に供した。

Fig.1に下向き、立向き上進、横向きの三姿勢で溶接した40mm厚の溶接部の0.2%耐力と引張強さの温度依存性を示す。溶接姿勢による差異は認められず、4Kの特性も下向き溶接の施工法確認で十分であることが確認できた。溶接金属試験片で調査した溶接条件の影響では、入熱が大きくなると強度がわずかに低下する傾向が見られたが、問題となる低下ではないことが確認された。4Kにおいて試験した98本の試験片で測定された0.2%耐力の平均値は1,115MPa、標準偏差は45MPaであり、FMJJ1の母材の値とほぼ同じであった。また、最低値は1,024MPaであり、すべてのデータがITER要求(1,000MPa以上)を満足していることを確認した。

3. 実機大インボーデ容器の試作

溶接施工性及び溶接変形を確認する目的で、実機と同じ断面形状を有する1m長のコイル容器直線部の試作を行った。試作体は板厚270mmの外板と板厚90mmの2枚の側板とで構成され、Fig.2に示すように、外板と側板の2か所の溶接継手部(溶接厚さ70mm)について、片側から下向き姿勢で自動TIG溶接を行った。

本試作では、外板と側板との角変形挙動の把握と抑制方法の確立を行うことが主要目的の一つであるため、拘束治具を試験体に直接溶接するのではなく、くさびで固定する拘束治具を採用し、左右二つの継手に対して変形の程度を均等

化するような溶接順序で施工した。溶接は1層1パスで最終層まで積層でき(溶接層数は26及び28層)、4~23層では、18g/minの溶着量で安定した溶接施工が実現できた。

100mmの厚さに対して、底部半径5mm、開先角度4°の狭開先を採用したが、全厚さにわたり、1層1パスで施工が可能であり、溶接による開先幅の減少に伴う溶接トーチと母材との干渉も問題とならず、開先形状の妥当性が実証された。溶接後の変形測定では、溶接線から650mm離れた位置での目標精度±3mm以内に対して、二つの継手の平均で4.8mmの測定結果を得ることができ、逆歪みを設けることで、目標精度を十分達成できる見通しを得た。

4. まとめ

狭開先TIG溶接によりITERの要求を満足する溶接部を実現できることを実証した。また、実機大の試作により溶接変形を把握することで、実機TF構造物製作の見通しを得るとともに、製作設計に必要なデータを取得した。現在進めているPhase IIの活動では、これらのデータを活用して、さらなる溶接技術の検証を進める予定である。

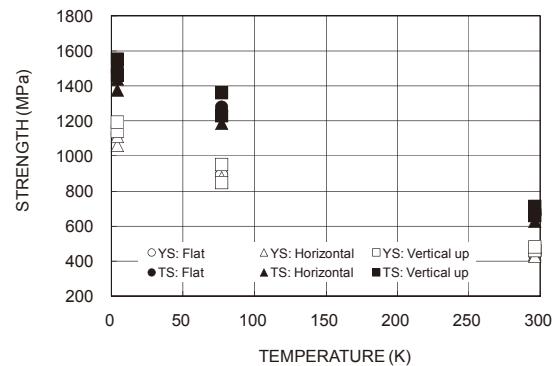


Fig.1 Relation between strength (YS: yield strength and TS: tensile strength) and temperature.

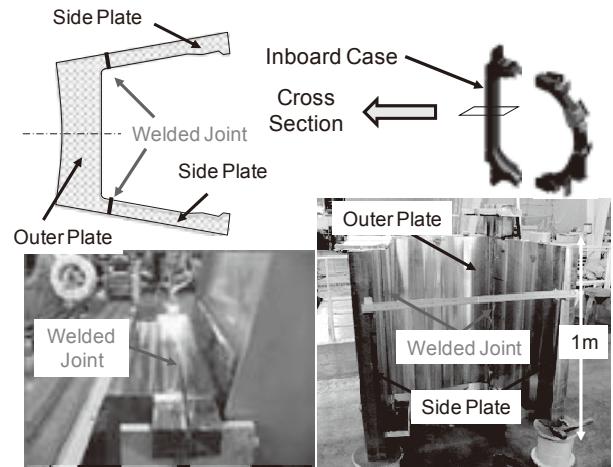


Fig.2 Trial manufacture of inboard coil case with narrow gap TIG welding.

数値シミュレーションによる TF コイル用 CIC 導体内の電流分布解析

Numerical Simulation of Current Distribution in CICC for ITER TF Coil

梶谷 秀樹, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 村上 陽之, 小泉 徳潔, 奥野 清(原子力機構)

KAJITANI Hideki, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); MURAKAMI Haruyuki, KOIZUMI Norikiyo, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: sua.taniki.1522@akane.waseda.jp

1. はじめに

スイスの SULTAN 試験設備を用いて、ITER・トロイダル磁場(TF)コイル用 CIC 導体の性能試験が行われた。その結果、導体の超電導特性が素線単体の性能に基づく予測に比べ低下していることが確認された。その一つの大きな要因として、ジョイント部の影響を強く受けることにより生じる導体内の電流分布が不均一であることが考えられる。そこで、導体内の電流分布状況を調べるために、集中定数回路を用いた数値解析コードを開発した。

今回は本解析コードの有用性を評価するとともに導体内の電流分布を計算したので報告する。

2. 解析モデル

Fig.1 は CIC サンプル導体の性能試験の概略構成を示す。実験では、導体の長手方向に沿って変化する外部磁場が印加され、電流はジョイント部を経由して白い矢印の方向に流れる。電圧タップは導体のコンジット上に設置されている。ジョイント部の素線は、撲線がボイド(空隙)率 20%まで縮径され、かつジョイント部の鞍型銅を介して低電気抵抗で接触している。これに対して、通常部の導体では素線表面がクロムメッキされ、かつボイド率が 33%と比較的高いため、素線間の電流転流は十分に小さく、無視することができる。以上より、導体及びジョイント部の電流分布を、集中定数回路を用いてモデル化した⁽¹⁾。導体の長手方向の素線の抵抗は n 値モデルを用いて計算した。ジョイント部及びターミナル部での素線の抵抗は、素線と鞍型銅との接触抵抗と鞍型銅の抵抗を仮定し、接触回数を考慮して計算した。素線間のインダクタンスは直状の丸線モデルを仮定し計算した。

実験結果と解析結果を比較するためにはコンジットの電位を求める必要がある。上記の集中定数回路モデルでは素線とコンジットは絶縁されていると仮定したが、コンジットの電位を計算するために、素線からコンジットへの漏れ電流を考慮し、静電界方程式を解くことでコンジットの電位を計算した。

3. 解析結果

今回は、本来導体内に 900 本ある Nb_3Sn 素線を 150 本の素線束と仮定し解析を行った。これは最終撲りピッチから 3 次撲りピッチ($6 \times 5 \times 5$)に一致する。Table.1 に導体及び素線の諸元を示す。Fig.2 に外部磁場 10.78T の状況下で導体の通電電流が 68kA に達した時の各素線束への電流分布を縦の棒グラフとして示す。横軸が素線束番号(1-150)、縦軸が各素線束の電流値である。電流分布が不均一であることがわかる。これは外部磁場やジョイント部の素線と鞍型銅の接触による影響であると考えられる。このように電流分布が不均一であると、一部の素線束が他のものに比べ早く常電導状態に転移してしまう可能性があり、また導体の超電導特性の評価も難しくなると考える。他の結果については発表時に報告する。

Table .1 Major parameters of the TF conductor

Strand	
Diameter (mm)	0.82
Cu/non-Cu ratio	1
Cr plating thickness (μm)	2
RRR of copper	140
Conductor	
Cabling layout	$(3^1 \times 3 \times 5 \times 5 + \text{core}^2) \times 6$
Twist pitch	
1st (mm)	45
2nd (mm)	85
3rd (mm)	130
4th (mm)	250
Final (mm)	450
Cable diameter (mm)	40.5
Conductor outer dimension (mm)	43.7
Outer diameter of central channel (mm)	9
Inner diameter of central channel (mm)	7
Void fraction(%)	33

*1)Two in triplet are Nb_3Sn strands and a third one is CU wire

*2)Core consist of 3×4 Cu wires

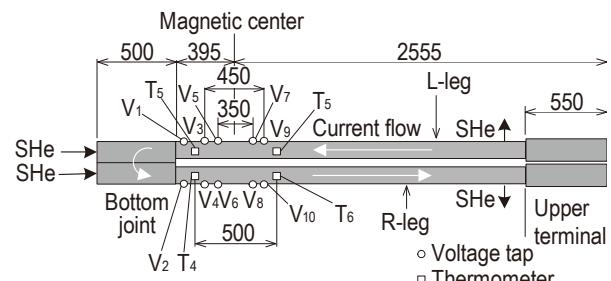


Fig.1 Sample tested in SULTAN

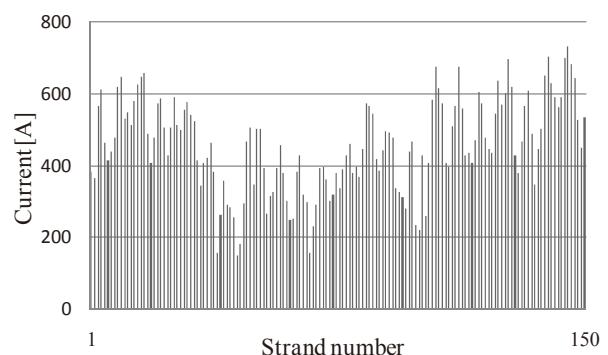


Fig.2 Current distribution of each bundle (1-150) when transport current reaches at 68kA and external magnetic field of 10.78T is applied.

参考文献

1. N. Koizumi, et al.: Critical current test result of 13T-46kA Nb_3Al cable in conduit conductor. Cryogenics 42(2002), p675-690

核融合用大型同軸多層型ケーブル・イン・コンジット導体の検討

Coaxial Multi-layer Type CIC Conductor for Superconducting Fusion Coil

濱島 高太郎, 津田 理, 谷貝 剛(東北大); 高畠 一也, 今川 信作(総研大)

HAMAJIMA Takataro, TSUDA Makoto, YAGAI Tsuyoshi (TOHOKU University);

TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: hamajima@eeci.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合などの大型超電導コイル用導体には、高安定性、低交流損失、高機械強度が要求されるので、図1(a)のように、素線(SC素線+Cu素線)のトリプレットを単位として多数本摺り合わせたトリプレット型ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体が用いられている。しかし、このケーブルは、コンジットに納める際にボイド率を約40%以下に圧縮するために、素線に摺り乱れが生じ、各素線のインダクタンスに僅かなずれが発生し、導体内的電流分布は不均一となって、偏流現象が発生し、Ramp Rate Limitation、交流損失の増大などを引き起こす場合がある。そこで、図1(b)のように素線を固定できる同軸多層型CIC導体を提案し、各SC線の電流偏流を抑制できることを示した[1,2]。本報告では、現在進められているヘリカル型核融合炉(Force Free Helical-type Fusion Reactor; FFHR)[3]に用いるCIC導体に適用した結果を報告する。

2. 基礎方程式

各SC素線の電流値を同じにするためには、各層のSC素線数に比例した電流による電圧降下を等しくすることにより、次式の各層の電流と摺りピッチの関係が得られる[1,2]。

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{r_{k+1}}{r_k} \right) \sum_{i=1}^k I_i + \mu_0 \left(\frac{1}{p_k} - \frac{1}{p_{k+1}} \right) \sum_{i=1}^k \pi r_i^2 \frac{I_i}{p_i} + \mu_0 \left(\frac{\pi r_k^2}{p_k} - \frac{\pi r_{k+1}^2}{p_{k+1}} \right) \sum_{i=k+1}^n \frac{I_i}{p_i} = 0 \quad (k = 1, \dots, n-1) \quad (1)$$

ただし、 I_i は第*i*層の電流、 μ_0 は真空の透磁率、 r_k は第*k*層の半径、 p_k は第*k*層の摺りピッチである。また、摺りピッチの方向ピッチの正負で表示する。

3. 種々の導体配列

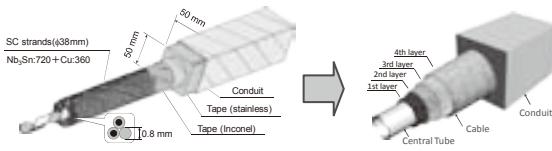
ヘリカル型FFHR装置のケーブルは、表1に示すように、SCとCu素線を2:1の比で構成される。これらの素線を多層同軸型CICに配置する方法は多くあるが、各SC素線に流す電流を同じにするように、各層のSC素線に比例した層電流を一様電流分布の式(1)に代入して各層のピッチを解析した後、各層のSC素線数と層電流と一致するまで繰り返してSC素線の配置を求める。ただし、ピッチの最大は約500mmとした。

各層のSCとCu素線の比が2:1になるように配置(SC:Cu=2:1配置)したときの各層に配列できる素線数の結果を構成図と共に図2に、また、各層のピッチを図4に示す。図の横軸は同軸の内側から番号付けした層番号を示し、縦軸は各層に配列できる素線数を示す。図から、層数が12層であり、各層の素線数が層数の増加と共に次第に多くなるが、8層目で最大値をとり、その後の層では少なくなる。これは、内側から8層目まで外側の層ほど半径が大きくなっているためである。

また、SC素線を外層から内側に順次に集中させた配置(SCとCu素線の層分離配置)の各層の素線数を図3に示す。図から、各層に配列できる素線数が(2:1)の配置より多く、層数も10と少なくなる。これは、図4のピッチから分かるように、(2:1)の場合のピッチより長くなり、1層に多くのSC素線を配列できるためである。

Table 1 Main parameters of CIC for FFHR.

SC & Cu strand diameter [mm]	0.8
SC strand number	720
Copper number	360
Cable diameter [mm]	38.0
Conductor outer dimension [mm]	50×50



(a) Triplet-Type (b) Coaxial Multilayer -Type

Fig. 1 Triplet & coaxial multi-layer type CICs

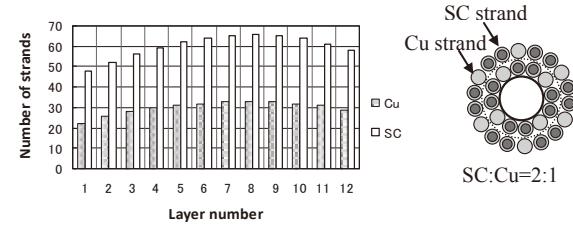


Fig. 2 Number of strands in case of SC:Cu=2:1 arrangement

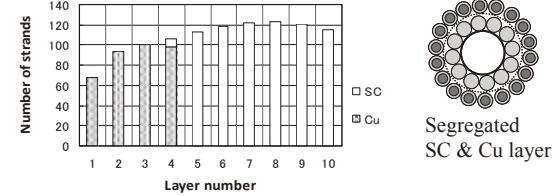


Fig. 3 Number of strands in case of segregated SC arrangement

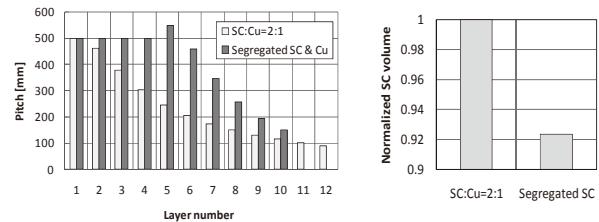


Fig. 4 Twist pitch in case of two arrangements

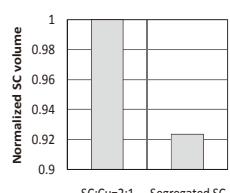


Fig. 5 Normalized SC volume

4. SC素線の最適化

一般にSC素線の体積がコストに大きな影響を与えるので、提案した2種類の素線配置でのSC素線体積を評価する。結果を図5に示す。図から、(SC:Cu=2:1配置)のSC素線体積と比較すると、(SCとCu素線の層分離配置)のSC素線の体積は約8%程度低減できることが分かる。

参考文献

- [1] 濱島, 他: 低温工学, Vol.35, No.4, pp.176-183, 2000
- [2] 手島, 他: 電気学会研究会, ASC-09-21, pp.5-10, 2009
- [3] S. Imagawa, et al.: Plasma and Fusion Research, Vol. 3, pp.S1050-1-5, 2008

JT-60SA 用超伝導マグネット・システムの詳細設計と製作

Detailed design and fabrication of superconducting magnet system and for the JT-60SA

吉田 清, 土屋 勝彦, 木津 要, 村上 陽之, 神谷 宏治 (原子力機構)
YOSHIDA Kiyoshi, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, KAMIYA Koji (JAEA),
 E-mail: yoshida.kiyoshi56@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構の JT-60 のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60SA)」として推進されている。日本担当の中心ソレノイド(CS)と平衡磁界(EF)コイル用導体の製作治具の準備が完了して、試作が開始され、ジャケットの最終形状が決定された。CS と EF コイルの詳細設計[1]は完了して、製作が開始され、製造治具設計と材料選定を開始した。一方、EU の担当する TF コイルの詳細設計[2]が完了して、調達が開始される。また、ヘリウム冷凍機、高温超伝導リードについて示す。

2. 詳細設計

TF コイルの巻線は D 型のダブルパンケーキが 6 個で構成され、合計 72 ターンである。真空含浸された巻線は、2 個の C 型の容器(ステンレス鋼 SUS316L)へ組み込み、2 個の C 型の容器は突き合せ溶接して D 形状にする。その後、ボア一側に内板を組み込んで、ボア一側から溶接で容器を閉じる。TF 容器は、コイル系の支持構造の骨格で、CS や EF コイルの支持は TF 容器に取付けている。Fig.1 に示すように D 型コイル容器に、TF コイル間の支持構造物、CS や EF コイルの支持構造物が取付く。マグネットの重量は、V 字型したリンク機構で支持される。

EF コイルのクランプに TF コイルにフレキシブル板で結合する。TF コイルの変形が大きくなつたため、各コイル支持部品を再評価し、設計変更をした。クランプと TF コイル間に角などに干渉があるので、詳細な形状 EU 側と調整中である。

CS は、4 個の巻線を予備圧縮するタイプレートと上下にキーブロックで支持されている。TF コイルと下部で結合する。詳細設計を実施して、TF コイルとの取合について合意できた。

3. 製作

CS 素線は ITER-TF 素線と同一仕様の素線を採用しているので、製造は順調に開始された。製作実績の多い NbTi 素線も量産を開始して、素線は順調に製作されている。撚線の量産が開始され、CS と EF-H, EF-L の 3 種類の 200m 銅ダミー導体と 30m の超伝導撚線が完成した。CS(7m 長)と EF(13m 長)用ジャケットは納入が開始した。導体複合化施設は、那珂核融合研究所に建家と長さ 630m の製造ラインの建設が Fig. 2 に示すように完成した。

導体複合化機器の動作試験として、3 種類の導体の試作を行つた。厚みの違う 3 種類のジャケットを用いて、ボイド率の調整を行い、量産するジャケットの最終形状を決定した。さらに、臨界電流測定用に 3 種類の超伝導導体を作成した。CS 導体断面を Fig.3 に示す。

EU 側では、TF コイルの詳細設計が承認されたので、TF 用導体の購入手続きが開始された。TF 導体は NbTi 素線を約 40 トン使用するが、技術仕様は EF 用素線と同等であるので、製作は容易と思われる。TF コイルについては、調達合意の調整を行つてある。特に、TF コイルが高圧ガス保安法の冷凍則の適応を受けるための調整を行つてある。TF コイルはフランス(CEA)とイタリア (ENEA)が製作を分担する。

フランス(CEA)が調達するヘリウム冷凍機については、要求冷凍能力が決定され、機器の詳細設計が完了した。

那珂サイトでの設備(建家、電気、冷却水など)について、日本側の受入条件との調整を行つてある。また、ドイツ(KIT)が調達する高温超伝導電流リードは BSCCO 2223 と金入り銀の安定化材の HTS 部とディスク型の常伝導部から構成される。CS と EF 用にパルス運転モードでの電流リードの特性の解析が完了し設計が終了した。取合条件が決定されたので、製作が開始される予定である。

参考論文

- [1] 吉田 清、低温工学、44, 8 (2009) 346-352
- [2] V. Tomarchio, et al., "Design of the JT-60SA superconducting toroidal field magnet", MT-21, 2009, China

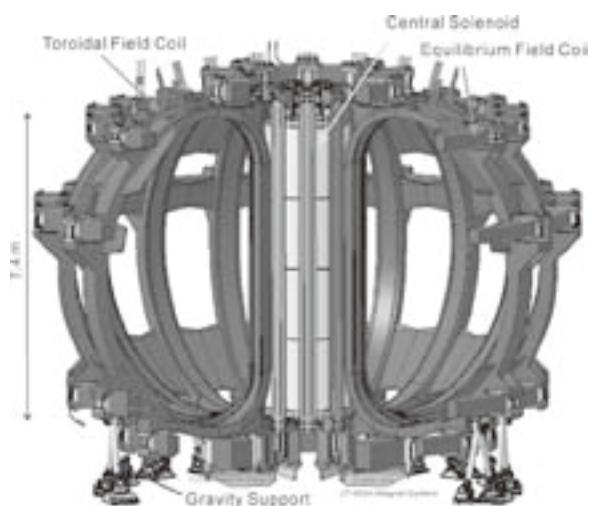


Fig. 1 The JT-60SA Magnet System

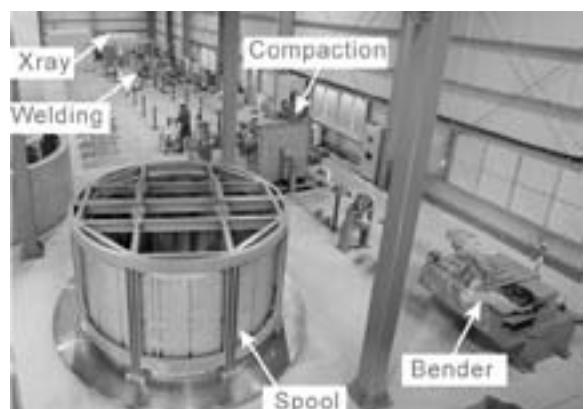


Fig. 2 Manufacturing Tools for Conductor Assembly

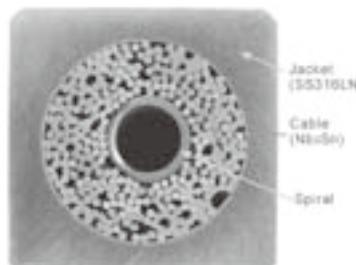


Fig. 3 CS Conductor

JT-60SA 平衡磁場コイル用プロトタイプジョイントの発熱特性評価

Estimation of heat generation in prototype joint of JT-60SA equilibrium field coil

村上 陽之, 松井 邦浩, 木津 要, 土屋 勝彦, 吉田 清, 奥野 清(原子力機構)

尾花 哲浩, 高畠 一也, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS), 増田 知昭, 三井 聖, 中村 一也, 高尾 智明(上智大学)

MURAKAMI Haruyuki, MATSUI Kunihiro, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)

MASUDA Tomoaki, MITSUI Satoshi, NAKAMURA Kazuya, TAKAO Tomoaki (Sophia University)

E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置は 6 つの平衡磁場(EF)コイルを持ち、それぞれダブルパンケーキあるいはシングルパンケーキを重ねた構造である。パンケーキ間の接続にはシェイクハンド型のラップジョイントを使用する計画である。そこで、コイル本体の製造が開始される前に、EF ジョイントの製作性および性能評価を行うためプロトタイプジョイントを製作した。

プロトタイプジョイントの製作は、最初に導体のセンタースペイラーを SUS 管に付け替え、素線表面の Ni メッキを除去する。次にボイド率が 20% 程度になるまで縮径し、導体の周囲をはんだでラップする。導体間に鞍型銅を挟み、SUS のクランプで加圧した状態で加熱し、導体と鞍型銅をはんだ接続する。最後に加圧した状態の両クランプを溶接しジョイント部分を固定する。Fig. 1 にプロトタイプジョイントの構造を示す。

今回は、ジョイント部の発熱特性を調べるため、本サンプルについて接続抵抗測定試験および交流損失測定試験を実施した。本講演ではこれらの結果について報告するとともに、実機運転中におけるジョイントの温度上昇について解析を行ったので、合わせて報告する。

2. 接続抵抗測定試験および交流損失測定試験

ジョイントサンプルの接続抵抗測定試験は、核融合科学研究所と共同で、液体ヘリウム冷却、外部磁場 0 T および 3 T、通電電流 5, 10, 15, 20 kA の条件で行った。その結果、外部磁場および通電電流が大きくなるにつれて、接続抵抗は大きくなり、外部磁場 3 T および通電電流 20 kA の条件で接続抵抗は約 2.8 nΩ となった。EF コイルにおける接続抵抗の仕様値は 5 nΩ であり、今回用いたジョイント製作方法が EF コイル実機にも適用可能であることが確認された。

交流損失測定試験[1]は、液体ヘリウム中で台形波状の外部磁場を加え、ヘリウムの蒸発量から交流損失を測定した。最大磁場 ΔB は 0.24 T から 0.87 T、磁場変化率 $\Delta B/\tau_p$ は 0.01 T/s から 0.31 T/s、最大磁場保持時間 τ_f は 4 s から 6 s、磁場印加方向は Fig. 1 に示す B_0 および B_{90} の二方向の条件で行った。交流損失 Q_c を以下の式と比較した結果、EF ジョイントの結合時定数 τ_f は 2.5 s 程度であることが分かった。

$$Q_c = \frac{2 \cdot \Delta B^2 \cdot V}{\mu_0} \cdot q_c$$

$$q_c = \frac{1}{\eta} \cdot \left(2 + \frac{1}{\eta} \cdot (1 - \exp(-\eta)) \cdot (\exp(-(\eta + \xi)) - \exp(-\xi) - 2) \right)$$

$$\eta = \frac{\tau_p}{\tau_c}, \quad \xi = \frac{\tau_f}{\tau_c}, \quad V = D \cdot D \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l$$

ここで、D, l はそれぞれ、印加磁場方向に直交する導体および鞍形銅部の幅と長さである。

3. 実機運転中におけるジョイントの温度上昇

ジョイントはコイル導体部分に比べ運転中における発熱および温度上昇が大きいため、ジョイントからクエンチが生じてしまう可能性がある。そこで、上智大学と共同で EF ジョイントの発熱および温度上昇について解析を行った[2]。EF ジョイント

の結合時定数を 2.5 s、接続抵抗を 5 nΩ としたとき、運転中ににおける EF ジョイントの発熱の時間変化は Fig. 2 となる。

一方、運転中のジョイント内部の温度上昇は熱伝導解析を行い評価した。解析領域は SUS 管を含むジョイント導体部とし、境界条件は SUS 管内部を 6 K 固定境界、他の部分は断熱境界とした。発熱はジョイント導体部で均一に生じると仮定した。熱伝導率は接触熱抵抗やボイドの影響を考慮し、銅の熱伝導率に対し 0.1~1 倍の範囲で変化させ解析を行った。

解析の結果、Fig. 3 に示すように熱伝導率が温度上昇におよぼす影響はほとんどなく、また運転中における最大の温度上昇は約 1 K であることが分かった。一方、ジョイントはコイル導体部分に比べ運転中に受ける磁場が小さいため、分流開始温度が約 1.5 K 高い。以上の結果より、EF ジョイントは十分な温度マージンを確保して運転できることが確認された。

参考文献

1. K. Matsui, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 36 No. 6 (2001) pp.59-65
2. T. Takao, et al.: 21th International Conference of Magnet Technology, 4BP-08, Hefei, China, 22 October 2009

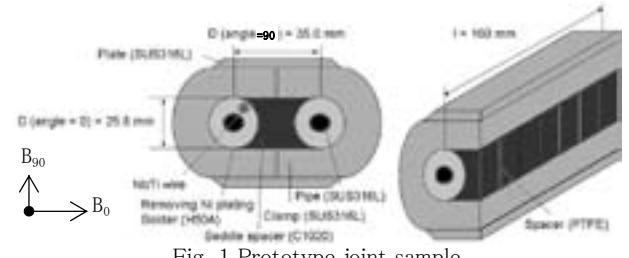


Fig. 1 Prototype joint sample

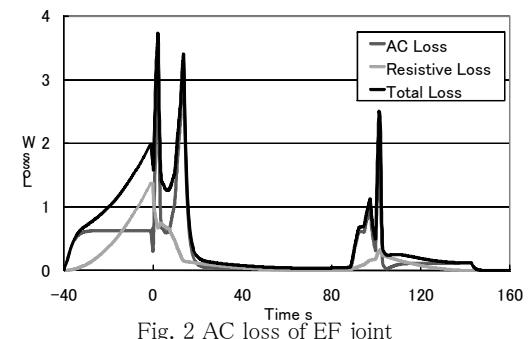


Fig. 2 AC loss of EF joint

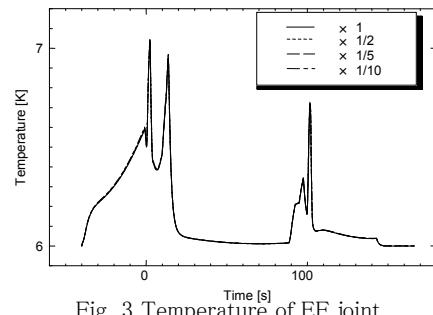


Fig. 3 Temperature of EF joint

JT-60SA マグネット用ヘリウム分配システムの設計

Design of helium distribution system for the JT-60SA magnet

米田 昌生, 神谷宏治, 本田 敦, 竹ノ内 忠, 吉田 清 (原子力機構)
KOMEDA Masao, KAMIYA Koji, HONDA Atsushi, TAKENOUCHI Tadashi, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
E-mail: komeda.masao47@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構の JT-60U のトカマク本体コイルを超伝導化する計画が日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトカマク(JT-60SA)」として進められている。JT-60SA に用いられる超伝導コイル及び高温超伝導電流(HTS)リード、サーマルシールド、クライオポンプは、ヘリウム冷凍設備(ヘリウム冷凍機、循環ポンプ)から冷却される。ヘリウム分配システムは冷凍設備から供給されるヘリウムを各負荷に分配するシステムで、配管および弁、コイル端子箱(Coil Terminal Box : CTB)、バルブボックスから構成される。現在検討した熱負荷は約10KWになった。既存設備との関係に満足するようヘリウム分配システムの設計を行った。

2. 構成機器と装置レイアウト

クライオポンプ、超伝導コイルやその支持構造物は、低温循環ポンプを用いて3.7K、4.5K ヘリウムを循環させている。ヘリウム循環ポンプの熱負荷は、流量と圧損が大きいほど大きくなる。電流リードおよびサーマルシールドは、ヘリウムガスをコールドボックスから直接供給する。電流リードへは 50K で供給され、300 K で冷凍機へ戻る。サーマルシールドは 80K で供給され、通常、戻り温度は 100K であるが真空容器のベーキング時には戻り温度は 140 K まで上昇するため、流量の調整が必要である。そのため、各機器へヘリウムの分配を行うCTB およびバルブボックスを配置している。各機器との関係を Fig. 1 に示す。コールドボックスで作られたヘリウムは低温循環ポンプが内蔵された Auxiliary Cold Box(以下 ACB)へ送られる。各機器へはバルブボックスやCTBを通って分配される。

3. 装置配置

JT60本体室における極低温機器配置計画を Fig.2 に示す。バルブボックスおよび CTB はクライオスタット周囲に配置した。機器の冷却に使用するヘリウムは隣の冷凍機室から本体室へ移送する断熱集合配管(以下クライオライン)を通ってつながっている。

バルブボックスは上部に9個、下部に3個設けた。プラズマ側のポートアクセスを良くさせるため、特に上部は小型化した。そのモデルを Fig.3 に示す。ヘリウム分配バランスも考慮したためクライオスタット上部9個となった。形状に関しても合理化するため、規格化した。

クライオスタット内部にあるトロイダル磁場(TF)コイル、平衡磁場(EF)コイル、中心ソレノイド(CS)から出る電流フィーダは CTB に連絡する。クライオスタット内は、主に上部にコイルのターミナルが集まっているため、3個の CTB を配置し、下部に2個の CTB を配置した。CTB の中に配置されている高温超伝導電流リードの漏れ磁場(30 mT)による影響を少なくするために、CTB は中心から 12m の位置に保った。

クライオラインはバルブボックスや CTB への分配をクライオスタット内部で行うことにより 140m から 45m に短くし最適化した。

4. まとめ

クライオスタット内の詳細設計に入ったが、JT-60U 既存設備との制約があり設計変更が必要であった。そのため、バルブボックスの小型化やCTBを含めた機器の大きさの規格化やクライオラインを 1 本に集約させるなどして最適化を図った。

この結果をもとに、ヘリウム冷凍設備の製作を担当する EU 側の担当と協議を行う。

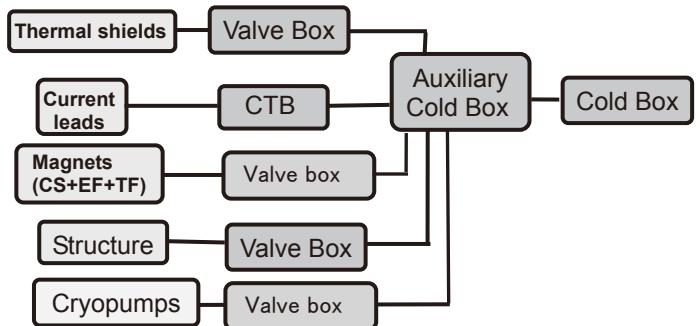


Fig 1 Block diagram of helium distribution system

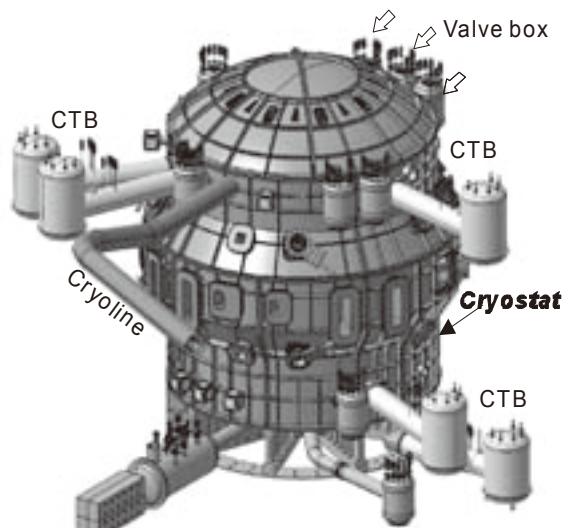


Fig. 2 Layout of CTB and valve box around cryostat



Fig.3 Overview of valve box

JT-60SA サーマルシールドの設計と熱解析

Design and thermal analysis of JT-60SA thermal shield

神谷 宏治, 竹之内 忠, 市毛 寿一, 吉田 清 (原子力機構)
KAMIYA Koji, TAKENOUCHI Tadashi, ICHIGE Toshikatsu, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
E-mail: kamiya.koji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60 のプラズマ閉じ込め用コイルを全て超伝導に置き換える JT-60SA は、超伝導マグネットなど 4K 設備への室温からの放射を低減するため、80K に冷却したサーマルシールドで超伝導マグネットを包囲する[1]。このためサーマルシールドの形状は超伝導マグネットの形状に強く依存する。今年ようやく、トロイダルフィールドコイル (TFC) の仕様や形状が収束しつつあり、超伝導マグネットとプラズマ真空容器間のクリアランスを 110mm 確保できる見通しが立った。この内でサーマルシールドを設計し、モデルの一部について熱解析を行った。

2. サーマルシールドの構成

サーマルシールドは、超伝導マグネットに対し、プラズマ真空容器との間に真空容器サーマルシールド (VVTS、図1)、クライオスタットとの間に位置するクライオスタットサーマルシールド (CTS)、そして VVTS と CTS を接続する PTS で構成される。図 2 にトロイダル方向 20 度分の全サーマルシールドを示す。VVTS と PTS の放射率は機械研磨によりともに 0.15 である。CTS はステンレスパネル 1 枚を冷媒配管で冷却し、室温側からの放射は MLI で低減する。

3. VVTS の構造

VVTS は渦電流を抑えるため、トロイダル方向に 18 箇所、プロイダル方向に 2 箇所電気絶縁されており、組立時はトロイダル方向に 18 分割された VVTS を機械締結して組上げる。VVTS の代表断面図を図 3 に示す。2 枚の 3mm ステンレスパネル間を冷媒配管が通る。2 枚のパネル端部には断面寸法 6mm × 27.7mm の平板が溶接され、強度を確保している。図 3 にあるように、VVTS はプラズマ真空容器側を能動的に冷却するため、冷媒配管側面とパネルを 3mm 厚板で接続し、伝熱経路を確保する。また冷媒配管の間隔はパネルの場所により、50mm から 150mm の範囲で変化する。

4. 2 次元熱解析

熱解析は 2 次元で行い、解析モデルは図 3 に等しい。計算条件は、通常運転 (POS) において、冷媒配管の間隔 50mm と 150mm の 2 種類で計算を行った。ただし、冷媒配管からの伝熱経路はプラズマ真空容器側に加え、上部マグネット側パネルとも接触幅 0.3mm を追加した。その結果、冷媒配管間隔 50mm と 150mm の場合において、プラズマ真空容器側パネルの平均温度はそれぞれ 84.2K と 90.6K に達するが、図 4 に示すように、マグネット側のパネル平均温度は 80.9K と 81.4K に留まった。上部マグネット側パネルに幅 0.3mm の伝熱経路がない場合、マグネット側パネル平均温度は冷媒配管間隔 50mm のとき、84.1K まで上昇してしまうことも明らかになった。

5. まとめ

サーマルシールドの形状や構造などの基本設計がほぼ決定し、これを基にした 2 次元熱解析により 2 次元温度分布が明らかになった。

参考文献

1. K. Yoshida, et al.: Design and Construction of JT-60SA Superconducting Magnet System, APFA, P27 (2009) p.2.



Fig.1 Vacuum Vessel Thermal Shield (VVTS)



Fig.2 Overall 20 degree thermal shield

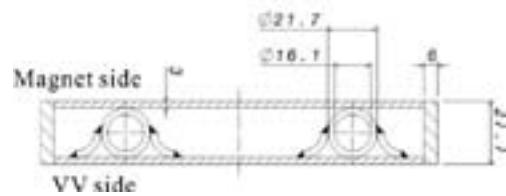


Fig.3 Cross section of VVTS

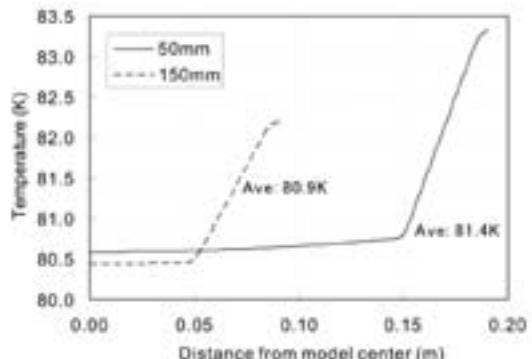


Fig.4 Temperature distributions of thermal shield panel

融解を考慮した固液二相流の熱伝達率計測方法の検討

Study of measurement method for heat transfer coefficient in solid-liquid two-phase flow

池内 正充, 矢口 広晴, 大野 隆介, 仲村 直子(前川); 武田 実(神戸大学); 淵野 修一郎(産総研)

IKEUCHI Masamitsu, YAGUCHI Hiroharu, ONO Ryusuke, NAKAMURA Naoko, (Mayekawa);

TAKEDA Minoru (Kobe University); FUCHINO Shuichiro(AIST)

E-mail: masamitsu-ikeuchi@mayekawa.co.jp

1. はじめに

固液二相流であるスラッシュ窒素(以下 SN_2)は融解温度で潜熱保有していることから過冷却液体窒素(以下 LN_2)に比べ、より低温でしかもその温度が保持できる特徴を有する。従って超電導機器の冷却用冷媒として SN_2 を用いることが可能となればその性能向上に資することが可能となる。

これまで、 SN_2 の冷却特性把握のため管内熱伝達率の計測を行ってきた。しかし、加熱区間が 1[m]しかなく、流体の接触時間が 1~0.3[sec]程度と短時間のため、液体の温度上昇は確認したもののその熱により固体が融解し、冷却に十分寄与しているか疑問であった。

現在加熱配管を延長した試験を準備中であるが、その前に予備的な試験を行つた、その計測方法の検討を行つた。

2. これまでの試験結果と課題

前述のとおり、加熱区間 1[m]の試験装置を製作し、 SN_2 および LN_2 を用いて管内熱伝達率の計測を行つてある[1]。その結果、 SN_2 は低レイノルズ領域において LN_2 より高い冷却特性を示したもののが高レイノルズに推移していくに従つて LN_2 に漸近する結果を得た(Fig.1)。

搬送試験においても高レイノルズ領域で SN_2 の損失係数が LN_2 のそれに漸近する結果が得られている[2]。これは固体粒子が流体中の渦損失を抑制している効果ではないかと考えており、同傾向を示す冷却特性に関しても流れの影響が強く出ていると考えられ、融解潜熱が十分に利用されていない可能性がある。

3. 想定する熱移動

乱流流れの存在する加熱面の冷却を考えると、熱は最初に速度境界層、温度境界層内側に伝わる。ここでは主に分子運動により流体内に熱が拡散する。従つてこの領域では熱伝導の寄与が大きく、熱の伝達量は小さい。

速度境界層外側の主流においては流線を横切る形で無数の渦が存在し、流れ場中の分子が積極的に混合することから熱伝達は著しく助長される。さらに主流中に固体粒子が存在すると、上記と逆のメカニズムで流体から固体に熱が伝わっていくが、固体と流体の相対速度、固体の回転の有無、融解

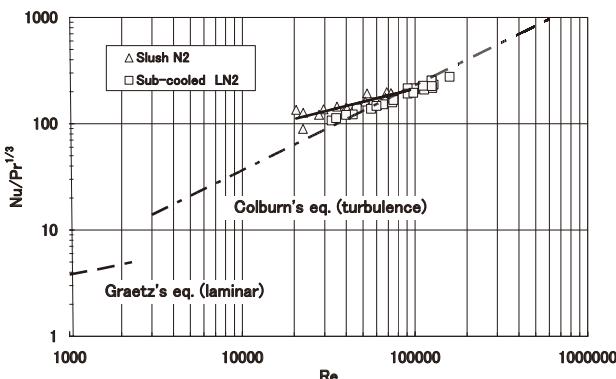


Fig.1 Heat transfer characteristics of slush and liquid nitrogen
 ○: liquid others: slush

現象などが影響を及ぼすことが予想される。

上記現象に関し、いずれの場合も温度・速度境界層の厚さや流れ場の状態が深く関わるため、熱伝達量を示すヌセルト数はレイノルズ数とプラントル数の関数で示されることになる。流体への熱伝達に関しては強制管内乱流熱伝達率の整理式が、固体球面の熱伝達に関して同様の複数の式が存在する。数値的にはこれらを解けばよいが、固体と流体の相対速度や融解の影響なども考慮する必要がある。

今回、我々は現象解明に向け、共同研究を行うこととし、シミュレーションに関しては産総研、融解の影響を考慮した実験に関しては神戸大学のサポートを得て前川が実施することとした。

4. 試験装置の検討

前述のとおり加熱源と流体の接触時間が短く、このため融解潜熱が熱伝達に寄与する割合が少なくなった可能性がある。そこで接触時間を長くとれる試験装置の検討を行つた。検討に際してはジャケット式熱交換器の設計を参考に Fig.2 に示す試験装置を検討中である。文献[3]に従い、代表長さは流体を攪拌するブレード長、代表速度は同ブレードの回転速度としてレイノルズ数を求め、実験データを整理する考えである。ジャケット式

熱交換器は本来であれば外周部で熱交換を行うが、今回はガラスデュウを使用するため内部に加熱源を設けることとした。温度計は Cr-AuFe 熱電対を使用し、加熱部壁面内に 3箇所、流体中に 3箇所の設置を検討している。試験は LN_2 、 SN_2 とも攪拌中の熱伝達率を計測し、レイノルズ数でまとめ、比較を行う予定である。

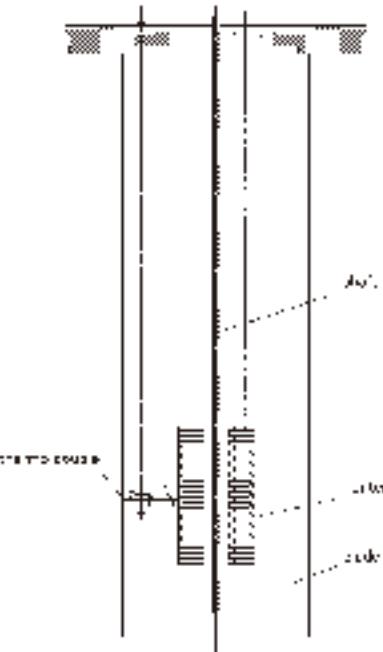


Fig.2 Test equipment for measurement of heat transfer

参考文献

1. M. Ikeuchi, et al.: "TEION KOGAKU", 42 (2007) 96-101 (in Japanese)
2. K. Matsuo, et al.: "TEION KOGAKU", 39 (2004) 475-482 (in Japanese)
3. 尾花, 熱交換器設計ハンドブック, (1974) 858

スラッシュ流体の固液二相管内流動特性に関する数値解析

Numerical study of cryogenic slush fluid flowing in a pipe

大平 勝秀 (東北大 流体研)、向井 康晃 (旭硝子)

OHIRA Katsuhide (I FS, Tohoku University); MUKAI Yasuaki (Asahi Glass Company)

E-mail: ohira@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

極低温液体中に液体の固体粒子が混在する固液二相スラッシュ流体は、固体粒子による高密度流体、融解熱を利用する機能性熱流体として優れた特性を持っており、発表者は、スラッシュ水素を利用した高効率水素エネルギー・システムを提案して技術開発を行っている[1,2]。スラッシュ窒素固体粒子の平均径は 1.36mm である[2]。スラッシュ流体の管内流動特性を解明するため、固相と液相間の運動量交換とエネルギー交換を考慮した熱非平衡二流体モデルに基づく三次元流動解析コードを開発し、スラッシュ窒素、スラッシュ水素の管内流動特性について解析を行った。

2. 解析方法および計算条件

解析方法については前報[3]を参照されたい。スラッシュ流体の圧力損失低減現象[1]については考慮していない。水平円管モデル(管内径 $D = 15\text{ mm}$ 、管路長 $L = 500\text{ mm}$)を図 1 に示す。入口条件は固液の平均流速 1.5~5.0m/s、体積固相率 0.05~0.25、粒子径は 0.5 と 1.3mm の 2 種類とした。

3. 解析結果および考察

流路入口から 400mm 下流位置における定常状態での計算結果について考察した。図 2 はスラッシュ窒素(温度 63K)の入口流速を変化させた場合の固体相と液体相平均速度の速度比である。流速 3.0m/s 程度を境にして、低流速で非均質流、高流速において上下対称な擬均質流となり、PIV 測定、高速度カメラの観察結果[2,3]と良く一致している。図 3 はスラッシュ窒素の圧力損失計算結果である。固相率が増加するにつれて圧力損失が増加しており、粒子径 0.5 mm の場合が 1.3mm より同一流速、同一固相率では圧力損失が増加する結果を得た。図 4 はスラッシュ水素(温度 14K)とスラッシュ窒素の管断面での固相率分布を示す(1.3mm、入口 13 vol.%)。スラッシュ水素の場合、比較的の低流速でも流路底部に固相が集中しにくくなり、高流速ではより同心円状に固相が分布する。固液の密度比がスラッシュ水素の方が小さく、また、液体水素の粘性も小さいため、スラッシュ窒素と比較して低流速で擬均質流となり易い。発表者は圧力損失低減効果が擬均質流で現われる実験結果を報告している[2]。スラッシュ水素の圧力損失低減効果がより低速で出現する実験結果[4]と併せ、圧力損失低減効果が擬均質流で出現することを支持する計算結果と考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤 B 21360091)により実施した。

参考文献

[1] K. Ohira: J.Cryo. Soc. Jpn, Vol. 41(2006) pp. 61-72.

- [2] K. Ohira, et al.: Adv. Cryo. Eng. Vol. 53A(2008) pp. 67-74.
- [3] Y. Mukai, et al.: Abstract of CSJ Conf., Vol.77(2007) p. 284.
- [4] C.F. Sintt, et al.: Adv. Cryo. Eng. Vol. 15(1970) pp. 382-390.

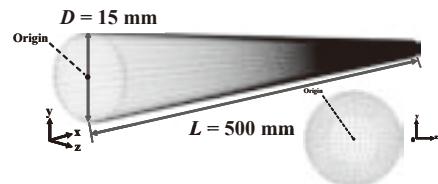


Fig. 1 Computational model for numerical analysis.

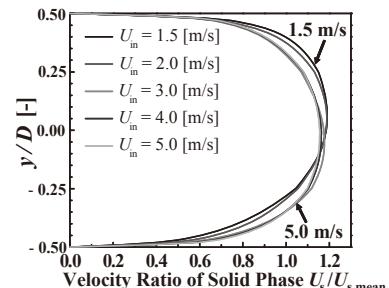


Fig. 2 Velocity profiles of solid N₂ phase (1.3mm).

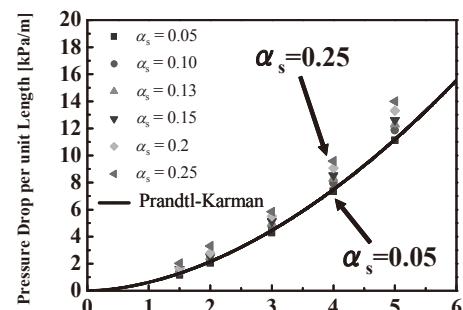


Fig. 3 Pressure drops of slush N₂ (1.3mm).

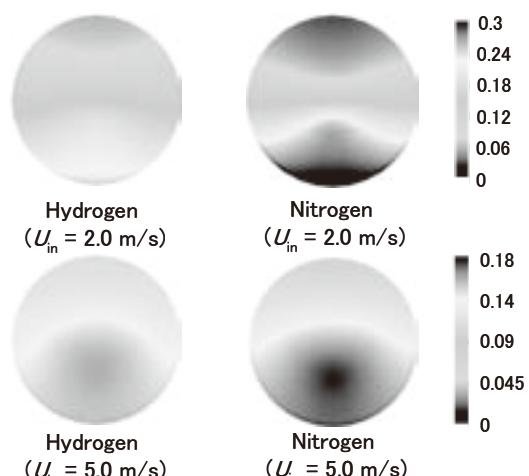


Fig. 4 Solid volume fractions for slush H₂ and slush N₂.

液体窒素の水平管内流動時の気液二相圧力損失と熱伝達特性

Pressure Drop and Heat Transfer for Boiling Liquid Nitrogen Flowing in a Pipe

清水 領, 大平 勝秀, 高橋 幸一(東北大学); 小林 弘明, 田口 秀之 (JAXA)

SHIMIZU Ryo, OHIRA Katsuhide, TAKAHASHI Koichi (Tohoku University);

KOBAYASHI Hiroaki, TAGUCHI Hideyuki (JAXA)

E-mail:shimizu@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

JAXA では液体水素を燃料とするマッハ 5 の極超音速機技術を実証するために、極超音速予冷ターボジェットエンジンの技術開発を実施中である。液体水素の寒冷を空気冷却の冷媒として使用するため、液体水素の気液二相流動・伝熱特性の解明が必要となっている。

本研究では液体水素の代わりに液体窒素を用いて実験を行い、液体窒素の質量流量と熱流束を変化させ、加熱された水平円管内を流動する液体窒素の気液二相圧力損失と熱伝達特性を取得した。また、気液二相流の流動様式を加熱部下流で高速度カメラを用いて観察し、流動様式の変化による圧力損失と熱伝達特性について検討した。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。実験装置は液体窒素を貯蔵するランタンクとテストセクション、キャッチタンクから構成され、真空断熱が施工されている。また、テストセクションは液体窒素を加熱し、沸騰気液二相流にする熱伝達部と気液二相流の流動様式を高速度カメラで観察できる可視化部からなる。熱伝達部の詳細を図 2 に示す。内径 15 mm の円管の両端に設置した温度計により液体のバルク温度を測定し、加熱部下流 700 mm の管上下部に設置した温度計により壁面温度を測定する。また、加熱部距離 550 mm の圧力損失を測定する。

3. 実験結果及び考察

熱流束が $10[\text{kW}/\text{m}^2]$ のときの流速と圧力損失、局所熱伝達率の関係を図 3 に示す。圧力損失に対応する流動様式も示す。図 3 から、圧力損失は液単相流やボイド率が小さい気泡流では Prandtl-Karman の式に近い値を示すが、プラグ流、スラグ流、波状流では気泡の変動の影響が強くなるため圧力損失は大きくなる。局所熱伝達率も液単相流や気泡流に比べて、スラグ流、プラグ流、波状流では熱伝達率が大きくなり、管下部の方が大きくなる。これは気相が管上部に集まるためである。また、局所熱伝達率が急上昇しているが、これは気相と液相が乱流による攪拌により熱伝達特性が上昇していると考えられる。

図 4 に Sieder-Tate の式を用いた無次元数による比較を示す。図 4 から、液単相流や気泡流では Sieder-Tate の式に $\pm 20\%$ 以内でほぼ一致するが、ボイド率が高くなり流動様式がプラグ流からスラグ流、波状流になるにつれて Sieder-Tate の式より大きな値となる。液体窒素の気液二相流はボイド率が低い時は液単相流に近い特徴を示すが、ボイド率が高くなると圧力損失や熱伝達特性が大きくなる特性を示す。また、高速度カメラで観察した流動様式については Baker 線図と比較した。

謝辞

本研究の一部は、東北大学流体科学研究所による公募共同研究および JAXA-東北大学流体科学研究所共同研究により実施した。

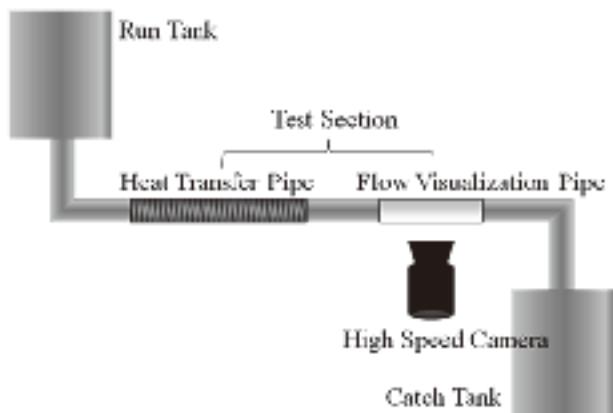


Fig.1 Schematic illustration of the experimental apparatus for boiling liquid nitrogen pipe flows.

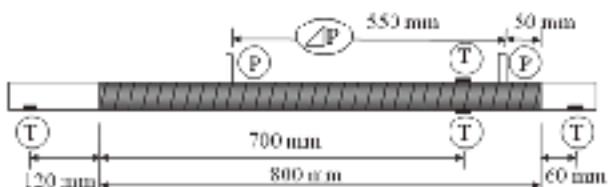


Fig.2 Details of the heat transfer pipe.

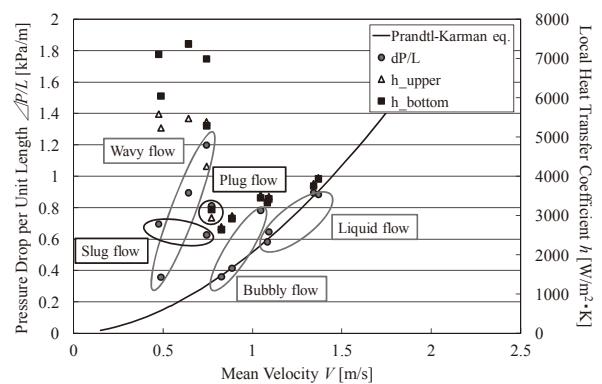


Fig.3 Pressure drop per unit length and local heat transfer coefficient for boiling liquid nitrogen.

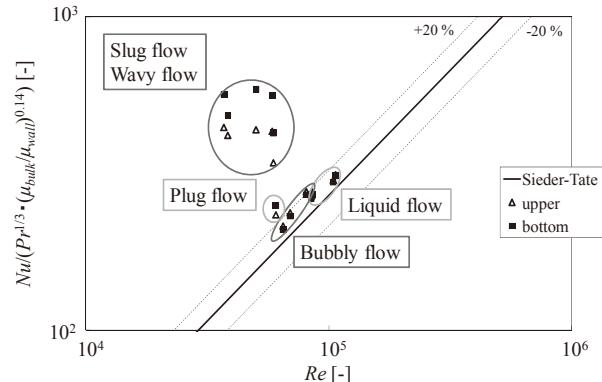


Fig.4 Comparison between experimental value and the Sieder-Tate equation.

狭隘流路内の He II 膜沸騰における熱伝達率が増大する 圧力条件についての研究

Condition of enhancing heat transfer in He II film boiling in a narrow channel

高田 阜, 村上 正秀 (筑波大学)、小林 久恭(日大)、木村 誠宏 (KEK)

Suguru Takada, Masahide Murakami (Univ. of Tsukuba), Hisayasu Kobayashi (Nihon Univ.), Nobuhiro Kimura (KEK)

E-mail: s-takada@edu.esys.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

狭隘流路空間において He II 膜沸騰は、開放空間中のそれとは異なる特徴を持っている¹⁻³⁾。狭隘流路空間に特有な過熱 He II および過熱 He I 相が容易に出現するという事実について、これまでにも可視化、伝熱実験の双方から報告してきた。本研究では、これまでの結果を踏まえ、狭隘流路内で He II 冷却において最も効率的に運用できる圧力条件を調査することを目的に行った。可視化による狭隘流路内の沸騰様相変化と、狭隘流路中の伝熱面の温度測定結果を比較することで解説した。

2. 実験方法

可視化用流路には、Fig. 1 のようにガラス基板に酸化インジウムを蒸着した透明なヒータとガラス板を平行に並べた、平行平板流路を用いた¹⁾。そして、この比較として Fig. 2 に示すような流路を用いて温度測定実験で得られたデータを用いた³⁾。

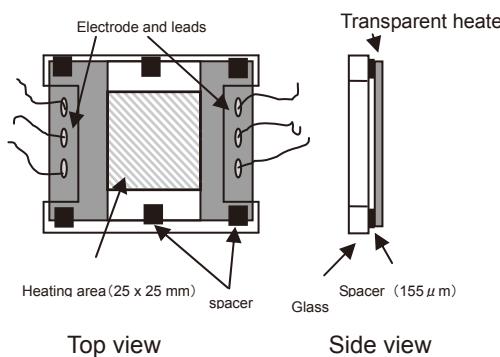


Fig.1 The narrow channel assembly for visualization

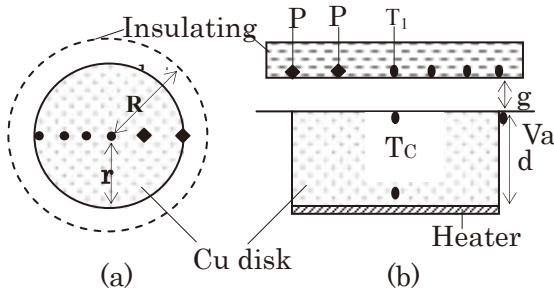


Fig.2 The heated copper disk and two-dimensional channel with radial heat flow in the gap g . (a) Top view: Flat copper surface. (b) The cut view: The heater side is insulated with vacuum. ●: Positions of thermometers. ♦: Positions of pressure-gauges.

3. 実験結果

可視化流路を用いた系統的実験により、狭隘流路内の沸騰モードマップを完成した。Fig.3は、1.9 Kにおけるp-q 線図上のモードマップであり、 λ 圧力近傍で強い不安定モードであるノイジー膜沸騰へと遷移することが分かる。ノイジー膜沸騰モードへの遷移領域は、開放空間中の平板上の膜沸騰熱伝達の知見から、最も高い熱伝達率を示す⁴⁾事が分かっている。そして、狭隘流路内特有に見られる気泡の生成消滅のサイクルを示すモードが、比較的熱流束の低い領域で、 λ 圧力近傍から飽和蒸気圧にかけて広がっている。

一方で、Fig.2 で示した流路を用いて行われた伝熱面の温度測定結果(T_c)を用いて、熱伝達率の圧力依存性調べると、 λ 圧力近傍において非常に特徴的な振る舞いを示す。そして、熱流束によらず、 λ 圧力が最も膜沸騰熱伝達率を増大させる条件であると結論できる。

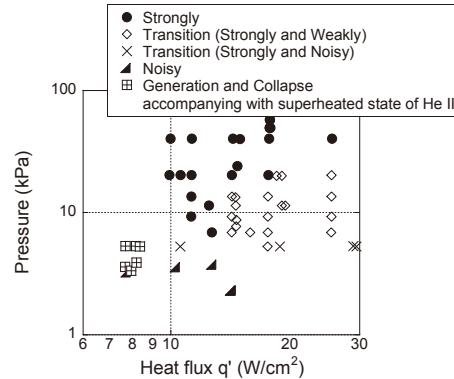


Fig.3 Boiling mode map drawn on the p - q diagram in the case of the narrow channel with the gap thickness of 0.155 mm at 1.9 K

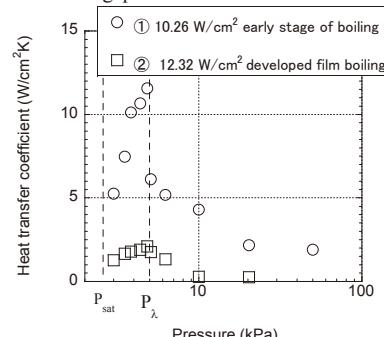


Fig.4 Dependence of the heat transfer coefficient on the pressure in the narrow channel at 1.95 K

参考文献

- 1) S. Takada, et. al, Adv. Cryo. Eng. vol.53 (2008) pp. 199-206
- 2) S. Takada, et al, Cryogenics in press
- 3) H. Kobayashi et. al., Proc. ICEC22(2008), pp. 341-346
- 4) 高田 阜、他, 低温工学 41-6 (2006) pp. 252-257

PIV を応用した熱対向流ジェットの超流動乱流解析

Superfluid turbulent analysis of thermal counterflow jet applied with Particle Image Velocimetry

横田 尚也, 村上 正秀, 前田 素規, 高越 威, 塚原 亮(筑波大学)

YOKOTA Naoya, MURAKAMI Masahide, MAEDA Motoki, TAKAKOSHI Takeshi, TSUKAHARA Ryou (Univ. of Tsukuba)

E-mail: e0411386@edu.esys.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

超流動ヘリウム (He II) の流速計測として、トレーサー粒子を用いた PIV (Particle Image Velocimetry) 計測法が注目されている。本研究では、超流動ヘリウムの優れた熱輸送特性を生み出す熱対向流のジェットに対して、この PIV 計測を応用した。

2. 実験方法

Fig.1 で実験装置について示す。実験は、0 度、90 度及び 180 度の方向に光学可視化窓を持つクライオスタット内で行った。実験槽内には、ヒーターを内蔵したガラスチャンバーが設置されている。ヒーターを加熱することで、HeII の常流動成分がチャンバーから放出される。このとき生じるジェット流れに対して、PIV 計測を行った。光源には連続光 YAG レーザーを用いて、シート状にした光をトレーサー粒子に照射し、高速ビデオカメラで可視化撮影を行った。粘性や密度の小さい液体ヘリウム中において中立安定状態を実現するために、トレーサー粒子として、水素と重水素の混合固体微粒子を使用した。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 は、PIV 計測の測定結果から得られたスナップショット (瞬時値) である。(a) が速度ベクトル分布であり、(b) が x 方向流速の空間分布速度分布である。図中の理論流速は、以下の式で求められる。

$$U_{n,\text{theo}} = q / \rho S T$$

熱流束 q [W/m²] は、ヒーターの加熱量 Q [W] をノズルの断面積で割って求める。S および T は、He II のエントロピーおよび温度である。

Fig. 2 で示すように、PIV を使用することで二次元の速度ベクトル分布を求められるので、幅広い領域における熱対向流ジェットの乱流特性を調べることができる。こうして得た約 800 枚のスナップショットを平均化した結果から、これまでに中心軸に沿う平均速度の減衰や x 方向流速の空間分布などを求めてきた [1-2]。

トレーサー粒子は、常流動成分の流れに追随して流れると考えられるので、x 軸の正方向に動く。Fig. 2 では、x 方向流速は全て正であることを示している。それに対して、熱対向流時には、常流動成分とは逆の方向に超流動成分がチャンバー内に流れ込む。固体水素のトレーサーを使い、粒子 1 つ 1 つの挙動を追った PTV 計測実験では、正 (常流動成分に追随) と負 (量子化渦にトラップされた) の両方向の速度成分が確認されている [3]。

そこで、Fig. 2 の x 軸の領域を $0 < x/d < 2.2$ の範囲に限定し、チャンバーのノズル出口近傍でのトレーサー粒子の負方向成分を探索した。Fig. 3 は、その結果得られた速度ベクトル分布図である。速度ベクトルが、ノズル出口近傍に向かっており、負方向の速度ベクトルを PIV 計測においても確認することができた。また、負の x 軸方向速度は、ほとんどが 0.25mm/s 以下であり、正方向の流速と比べて非常に小さかった。今後、PIV 計測を用いて、負方向のベクトルに対するさらに詳細な解析をしていく予定である。当日はこの点を中心に報告する。

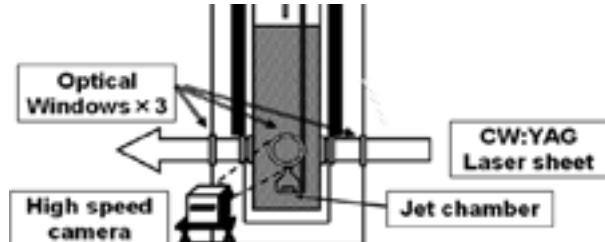


Fig.1 The experimental setup.

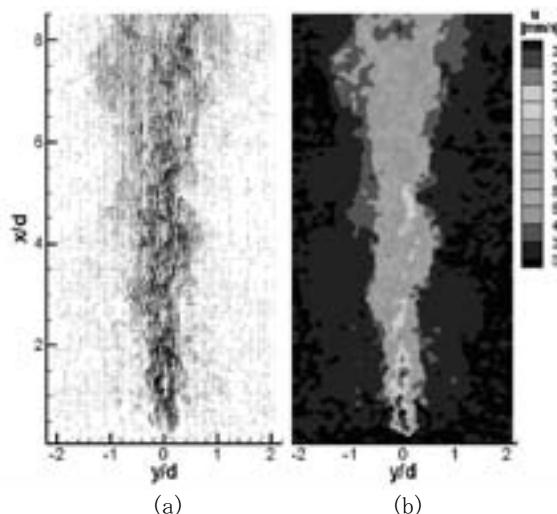


Fig. 2 (a) Snapshot of two-dimensional velocity vector diagram, (b) velocity contour for $T=2.0\text{K}$, $U_{n,\text{theo}}=29.1\text{[mm/s]}$.

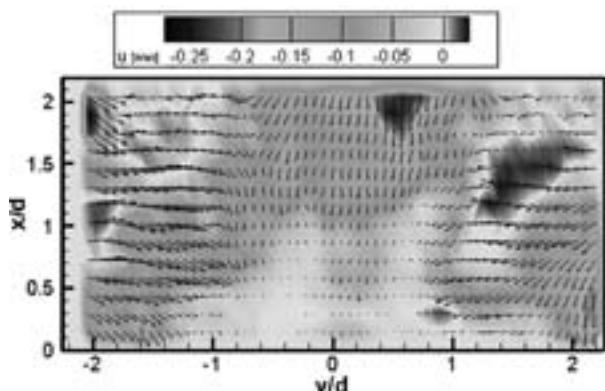


Fig.3 The velocity vector diagram and velocity contour $T=2.0\text{K}$, $U_{n,\text{theo}}=31.8\text{[mm/s]}$.

参考文献

1. M. Murakami, et al.: *Adv. Cryo. Eng.* 53A(2007) pp.183-190
2. M. Murakami, et al.: *Adv. Cryo. Eng.* in press
3. M. S Paoletti, et al.: *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol. 77(2008), 111007

窒素ヒートパイプのフラッディング限界評価 Evaluation of Flooding Limit in Nitrogen Heat Pipe

山田 航司, 岡村 哲至(東工大)
YAMADA Koji, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)
E-mail: yamada.k.at@m.titech.ac.jp

1. はじめに

液体窒素冷却が可能な高温超電導体の応用範囲は今後ますます広がっていくことが予想される。ヒートパイプは管内部に密閉した作動流体の蒸発、凝縮という強力な熱伝達特性を利用して大量の熱輸送を行うことができる伝熱素子である。この特徴を生かして、ヒートパイプの液溜部に液体窒素を蓄え、高温超電導体の発熱を液体窒素浸漬冷却で取り除き、蒸発した窒素を再凝縮して液量を一定に保つ方法や、システムの都合上、冷凍機と被冷却体の距離を離さなければならない場合の伝導冷却を促進する目的で利用する方法などが考えられる。本研究グループでは過去にヘリウムを作動流体とした極低温ヒートパイプの熱輸送限界の原因となるフラッディング限界特性について研究を行ってきた⁽¹⁾。今回は窒素を作動流体としたサーモサイフォン式ヒートパイプの管径、管長、温度を変化させた場合のフラッディング限界熱輸送量(以下CFH)変化特性と、非フラッディング時の熱抵抗、実効的な熱伝導率を調べた。

2. 実験方法

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。実験には、(管径、管長)が(3mm,100mm)、(3mm,300mm)、(4mm,300mm)の3種類のヒートパイプを用い、凝縮部の温度は窒素の沸点である 77K に設定した。管径 3mm、管長 300mm のヒートパイプについては、凝縮部の設定温度を 70K, 77K, 84K と変化させた。実験手順を以下に示す。GM 冷凍機の 1st ステージから中空の伝熱板(Cu)を介してヒートパイプの凝縮部(Cu)、細管部(SUS)、液溜部(SUS)を順に伝導冷却する。このとき、温調器を用いて凝縮器を設定温度に制御する。設定温度に達したら、窒素ガスボンベとヒートパイプの凝縮器を繋ぐ供給管より窒素ガスを注入する。系内は制御された温度に応じた飽和圧力となり、液溜部に液体窒素が溜まっていく。液体窒素が十分溜まると、液溜部底面に設置したヒーターに一定の熱入力をを行い、しばらく待つ。入力した熱量が CFH よりも大きい場合は、しばらくすると液溜部の温度が急上昇する。これは、細管部でフラッディング現象が生じたため、凝縮器で液化された液体窒素が蒸発する窒素ガスに吹き上げられ、液溜部に還流しなくなつたため、それまでヒーターから供給されていた熱量を蒸発潜熱によって奪っていた液体窒素がなくなつたためだと思われる。このように、液溜部の温度が急上昇したとき、フラッディング現象が起つたと判断した。液溜部に投入するヒーター熱量を小さくしていくば、ある熱量を境に上記の現象が起らなくなる。この熱量を CFH とする。

3. 実験結果

Fig.2(左)に凝縮部温度が 77K における窒素を作動流体としたヒートパイプの管径、管長の違いによる CFH の変化を示す。管長 300mm の場合、管径比が 1.3 で CFH 比は 1.4 となり、管径 3mm の場合、管長比が 3.0 で CFH 比は 1.1 となった。管長の変化よりも管径の変化のほうが CFH に大きな影響を及ぼすことがわかった。Fig.2(右)のように、ヘリウムを作動流体としたヒートパイプでもこの傾向は定性的に見られる。Fig.3(左)に管径 3mm、管長 300mm のヒートパイプにおける CFH と温度の関係を示す。この結果より、70K における CFH は 77K、84K における CFH よりも小さいことがわかった。この傾向は、

Fig.3(右)に見られるように、ヘリウムを作動流体としたヒートパイプとは異なる。また、管径3mm、管長300mm、設定温度77Kのヒートパイプにおいて、CFHより小さい熱量である9.6Wの熱量を投入したとき(つまり非フラッディング時)、加熱定常状態時の液溜部と凝縮部の平均温度差は0.4Kであった。このときの熱抵抗Rと実効的な熱伝導率 λ はそれぞれ、

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = 4.2 \times 10^{-2} [W/K]$$

$$\lambda = -\frac{Ql}{4\Delta T} = 1.0 \times 10^6 [W/m \cdot K]$$

AD

発表ではこれらの考察について報告する予定である。

参考文献

1. K. Yamada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.152

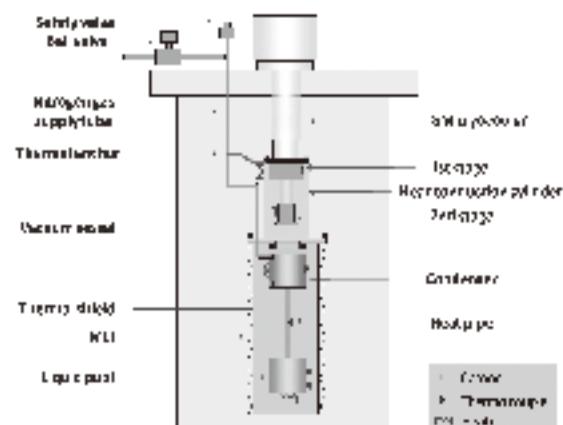


Fig.1 Experimental apparatus

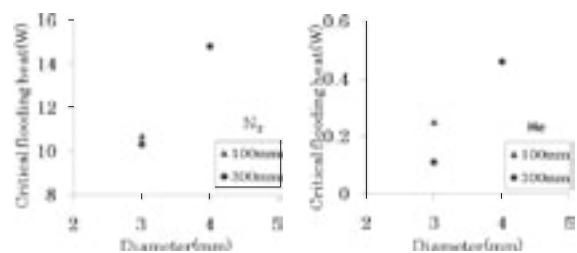


Fig.2 Effect of the diameter and length on critical flooding heat

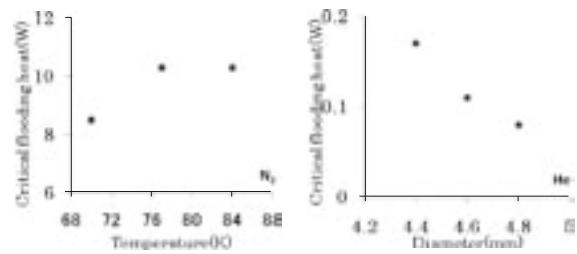


Fig.3 Dependence of temperature and critical flooding heat
(Diameter:3mm,Length:300mm)

高温超電導材冷却を目的とした液体水素熱流動特性試験装置

—概要—

Thermal-hydraulics experimental system of liquid hydrogen for HTc superconductors.
— overview —

白井 康之, 塩津 正博, 畠 幸一(京大); 達本 衡輝(原子力機構); 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文(JAXA)
SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, HATA Koichi (Kyoto Univ.); TATSUMOTO Hideki (JAEA);
KOBAYASHI Hiroaki NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi (JAXA)
E-mail: shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

カーボンフリーエネルギーシステムが重要課題となる中、液体水素の民生応用を目指した熱伝達基礎特性は、種々の機器・システム設計に不可欠である。特に今後開発が期待される超伝導応用機器設計では、広範囲の圧力条件下でのサブクール液体水素の浸漬冷却および強制対流冷却特性に関する基礎データが必要であるが、その熱伝達特性はまだ十分に解明されてはいない。

本研究は、これまで十分に行われていない液体水素の熱伝達特性に関する物理現象の解明と超伝導応用機器への冷却設計指針を与えることを目的として、浸漬冷却・強制対流冷却特性実験を可能とする試験装置を設計・製作した。本装置は JAXA 能代多目的実験場に設置し調整試験の後、浸漬冷却および強制対流下での液体水素熱流動特性試験を実施したので概要を報告する。

2. 液体水素熱流動特性試験装置

Fig. 1 に液体水素熱流動特性試験装置の概略図を示す。試験装置は試験体を設置する実験槽(クライオスタット)、サブタンク(レシーバータンク)、これらをつなぐ流量調整弁付断熱輸送配管(トランスマーライン)、水素圧力供給用のガスライン、ガス放出用ベントラインからなる。各クライオスタットの仕様は Table I に示す。実験装置に液体水素を供給する LH2 コンテナ、H2 ガスカーボル、ベントスタックは実験装置室外に設置した。

実験槽圧力は純水素ガスカーボルからドーム型減圧弁で制御される。一方、サブタンクは放出ラインを開放することで常に大気圧に保持する。この圧力差によって実験槽からサブタンクへの強制流動を作り出し、輸送配管に設けられた流量調整弁の開度調整によって流量を制御する。流動実験中の実験槽圧力はドーム型減圧弁により一定に保たれる。

液体水素の流量は、実験槽を載せた重量計(Mettler Toledo WMHC 300s; 分解能 0.002kg)およびタービン流量計を用い、重量時間変化と加圧用に供給されたガス量により算出する。

液体水素液温は実験槽の底部に設置したシースヒータ(最大出力: 500W)によって、さまざまな圧力条件下で所定のサブクール度に設定できる。

実験槽への電流導入端子(供給電流値 400Amax)を 4 個設けている。1 個を共通端子とすることで 3 つの試験体を設置することができる。今回の実験では、浸漬冷却試験用平板発熱体一つ、強制対流試験用円管発熱体二つを設置して実験を実施した。安全性確保のため、電源ケーブルとシースヒータ用のケーブルは窒素ガス圧封入したブランケット内を通して隣室の電源に接続した。

試験体への供給電源の制御、バルブ操作、インターロックを含むモニター・計測・制御は、安全距離をとった制御室にて全て遠隔で操作可能とするシステムを構築した。圧力異常、および、漏洩等の異常時には、(1)供給電源遮断、(2)系内水素圧力開放、(3)液体水素の移送中断のインターロックを構築した。

3. 機能検証試験

実験全系を GH2 ページした後、まず LH2 コンテナからサブタンクに液送し、さらにサブタンクから実験槽に逆移送することで約 30 分で貯液が完了し、バルブ遠隔操作の健全性を確認した。あわせてインターロックも正常に働くことを確認した。

また、重量計による実験槽液量測定および強制対流時の流速計測も所望の精度が得られた。

大気圧から超臨界圧(1.4MPa)までの圧力で、液温を 20K から飽和温度までの実験条件を、強制対流実験においても安定に設定できることを確認した。試験装置の設計、試験方法と機能検証試験の詳細は本報 1D-a8 で報告する。

4. 热流動試験

今回の実験では、浸漬冷却試験用平板発熱体とトランスファーチューブ入口に直列連結し円管内を LH2 強制流が流れるようにした二つの強制対流試験用円管発熱体を用いた。

それぞれの試験発熱体の発熱率が指数関数($Q=Q_0 e^{\tau t}$, $\tau=10.0\text{s}$) となるように直流電流源の電流を、遠隔制御で準定的に最大 400A まで上昇させた。このときの浸漬冷却および強制対流熱伝達を測定した。その実験結果の詳細については、本報 1D-a9, 1D-a10 で報告する。

謝辞 実験装置の製作にご尽力いただいたジェック東理社、実験遂行においてご援助いただいた JAXA の技術スタッフの皆様に感謝申し上げます。この研究の一部は、文科省科研費(2036027, 20760141)の補助を受けた。

Table I Specification of cryostats.

実験槽	設計圧力(常用圧力)	2.0MPa(1.8MPa)
	寸法	406 φ × 1495h
サブタンク	LH2 充填量(内容積)	50L(100L)
サブタンク	設計圧力(常用圧力)	2.0MPa(1.8MPa)
	寸法	406 φ × 1578h
	LH2 充填量(内容積)	59L(80L)

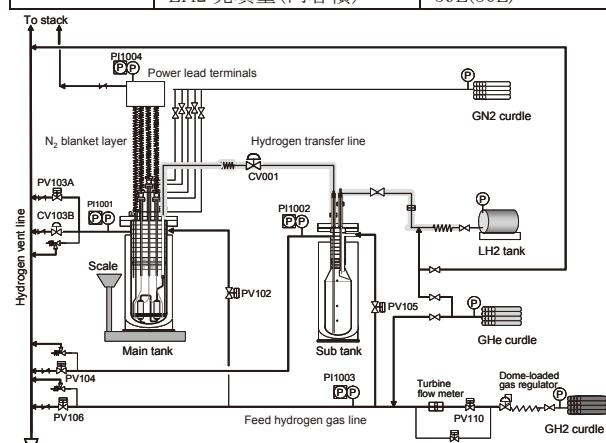


Fig.1 Overview of the thermal-hydraulics experimental system for liquid hydrogen.

高温超電導材冷却を目的とした液体水素熱流動特性試験装置

—設計・試験方法—

Thermal-hydraulics experimental system of liquid hydrogen for HTC superconductors.
- design and test procedure -

達本 衡輝(原子力機構);白井 康之、塙津 正博、畠 幸一(京大);小林 弘明、成尾 芳博、稻谷 芳文(JAXA)
TATSUMOTO Hideki (JAEA); SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro, HATA Koichi (Kyoto Univ.);
KOBAYASHI Hiroaki NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi (JAXA)
E-mail: tatsumoto.hideki@jaea.go.jp

1. はじめに

超伝導機器の冷却設計指針を与える液体水素の熱伝達特性の解明を目的として、浸漬冷却・強制対流冷却特性実験を可能とする試験装置を設計、製作した。本報告では、主に実験装置の冷却特性、監視制御システム、実験条件の設定方法、さらに今回の実験で用いた試験発熱体について紹介する。

2. 液体水素熱流動特性試験装置

液体水素熱流動特性試験装置は、主に、実験槽、サブタンク、および、実験槽とサブタンクを連結する流調弁付断熱液体水素輸送配管により連結されている。

2.1 実験槽 実験槽(設計圧力 2.0MPaG)は、直径 406mm、高さ 1495mm、液体水素の充填容積は 50L であり、断熱真空層内には、20 層のスーパーインシュレーションを施した。実験槽の液量は、重量計の変化で計測する。加圧系から常温の水素ガスと超臨界水素との直接的な混合を避けるため、実験槽上部には、11 層の対流防止盤を設けた。実験槽には、放出弁として、圧力調整用の流調弁と水素を放出用の ON/OFF 弁を設置した。液体水素の温度は、Cernox 温度センサーにより、計測し、液体水素の温度は、シーズヒータ(最大出力: 500W)により調整した。実験槽には、最大で 3 つの試験発熱体を設置できるように、電流導入端子(最大で 400A)を 4 本挿入した。電力リード線とシーズヒータ用ケーブルは、不活性ガスである窒素ガスで覆われたブランケット構造内に封入し、ブランケット圧力は常時 5kPaG に保持されている。

2.2 サブタンク サブタンク内の液体水素容量は、実験槽より大きい 60L とし、その液位は、高さ方向に設置した 3 つの温度計(T型熱電対)により、計測した。

2.3 制御システム 制御システムは、安全距離が十分な制御室に全て遠隔で操作可能なシステムを構築した。制御システムは、PLC により構築し、データ収集、および、バルブ操作は Labview 上で行う。圧力異常、および、漏洩等の異常時には、(1)供給電源遮断、(2)系内水素の放出、(3)液体水素の移送が中断するインターロックも構築した。

2.4 試験発熱体流路 Fig.1 に試験発熱体の概要図を示す。内径が 6.0mm、長さ 100mm、厚み 0.2mm のステンレス製円管を試験発熱体として用い、その外側には FRP ブロックで断熱した片側円管発熱体を製作した。円管発熱体の両端では、ステンレス製円管の内径と同径で 20mm の FRP ブロック流路により、液体水素輸送配管との電気的な絶縁処理を施した。また、流路の中心部には、長さ方向に沿って 20mm の間隔で、RuO₂ 温度センサーをとりつけた。

3. 実験装置の冷却特性

実験システムに液体水素を供給する前には、真空排気とヘリウムガスバージを繰り返し行い、サブタンクに液体水素を 60L 充填した。また、その時の蒸発ガスは実験槽の予冷に使用した。その後、サブタンクから実験槽へ液体水素 50L(3.45 kg@大気圧)を移送した。Fig.2 に示すように、初期冷却は約 30 分で完了し、この時の液体水素消費量は約 200L であった。定常状態の熱侵入量は 11.5W で、設計値とほぼ一致した。

4. 実験条件設定方法

実験槽の液体水素は、ドーム型減圧弁により減圧した水素ガス(純度 99.999 %)により加圧した。サブタンクは、常時大気圧に保持した。実験槽圧力の微調整は流調弁で行った後、液体水素輸送配管の流調弁の開度を調整し、試験流路内に強制対流を発生させた。Fig.3 に、0.7MPa、21.2K の流動試験結果の一例を示す。圧力はドーム型減圧弁により一定に制御され、実験槽の重量変化を一定に保持できた(31 秒間で 0.48kg 減少)。また、供給水素ガス流量も 0.422g/s と一定で、安定な強制対流を発生させることができた。採用した原理により、質量流量を計測できることがわかった。

謝辞 この研究の一部は、文科省科研費(2036027, 20760141)の補助を受けた。

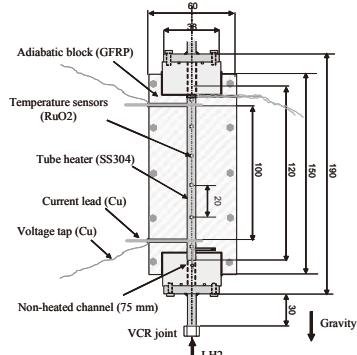


Fig.1 Schematic of a tube heater.

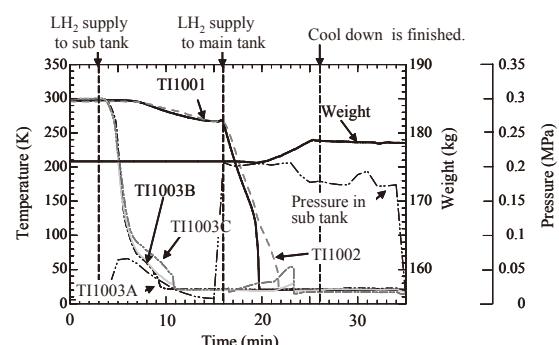


Fig.2 Cool down process of the experimental system.

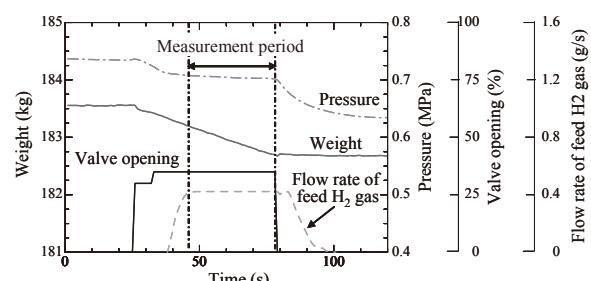


Fig.3 Flow property test result.

液体水素のプール冷却における熱伝達

Boiling heat transfer from a horizontal flat plate in a pool of liquid hydrogen

吉川 浩太郎, 小林 啓人, 白井 康之, 畑 幸一, 塩津 正博(京大)
達本 衡輝(原子力機構); 小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文(JAXA)

YOSHIKAWA Kotaro, KOBAYASHI Hiroto, SHIRAI Yasuyuki, HATA Koichi, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.)
TATSUMOTO Hideki (JAEA); KOBAYASHI Hiroaki, NARUO Yoshihiro, INATANI Hirohumi(JAXA)

E-mail: yoshikawa@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

筆者等は、液体水素冷却超電導システム設計に必要なデータベース確立をめざして、液体水素熱伝達の実験的研究を行っている。本稿では水平上向きに設置された平板発熱体における液体水素の浸漬冷却熱伝達試験の結果を報告する。

2. 試験発熱体

Fig.1 に本試験で用いた幅 10 mm, 厚さ 0.1 mm, 長さ 100 mm のマンガニン製平板発熱体を示す。実験では、発熱面は上向き水平に設置され、反対側はFRP ブロックにより断熱してある。この試験体を直流電流加熱して、電気抵抗変化から発熱体平均温度を測定した。発熱体表面温度は、測定した平均温度と熱流束から厚さ方向の熱伝導式を解いて求めた。

実験装置の全容、条件設定・試験方法は本セッション内すでに説明済みのため、本稿では省略する。

3. 実験結果と考察

実験は系の大気圧から 1.1MPa までの圧力下、飽和条件で行った。発熱体への通電をゆっくりと連続的に上昇させることにより、液体水素の臨界熱流束までの定常熱伝達特性を調べた。

Fig.2 に種々の圧力下における熱伝達曲線を示す。縦軸は熱流束、横軸は発熱体表面の飽和温度からの温度上昇分である。熱流束が上昇すると発熱体温度も上昇し、臨界熱流束(CHF)に達すると表面温度は急上昇する。低熱流束域では勾配が大きいが、 10^4 W/m^2 程度以上になると各圧力とも勾配がほぼ3のいわゆる発達した核沸騰状態となり、以後ほぼ直線状に臨界熱流束まで上昇する。この発達した核沸騰熱伝達は、圧力上昇とともに向上することがわかる。しかし 899.3kPa の CHF は小さくなっている。

そこで CHF と圧力の関係を Fig.3 に示す。CHF は、300kPa まで圧力とともに大きくなるが、以後減少して 1100kPa 付近ではピーク値の 25% にまで減少している。この結果をよく知られた Kutateladze の式で係数を 0.16 としたものと比較すると、圧力依存性の傾向は類似であるが、500kPa 以下の圧力では、最大 15% 程度同式よりも大きく、それ以上の圧力では最大 40% 程度低くなつた。

この原因を考察するため、臨界熱流束に到達した時の発熱体表面温度と圧力の関係をプロットしてみると、Fig.4 に示すようになつた。臨界熱流束点での発熱体表面温度は、600 kPa 程度までは圧力上昇とともに上昇するが、より高い圧力では水素の臨界温度 T_{cr} で一定になつてることが分かる。この T_{cr} で抑えられる圧力領域では、水力的不安定性による臨界状態となる前に、発熱体表面温度が水素の臨界温度に到達し、発熱体全面が蒸気で覆われることによって膜沸騰へ遷移すると推測される。一方、核沸騰熱伝達は、発熱体表面状態やキャビティ分布に依存するので、臨界熱流束到達時の発熱体表面温度が T_{cr} に到達するかはこうしたファクターの影響を受けると考えられる。

謝辞 この研究の一部は、文科省科研費(2036027, 20760141)の補助を受けた。

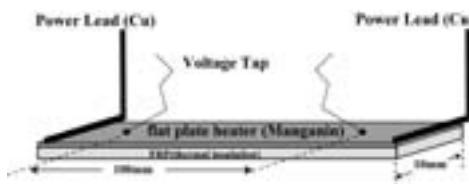


Fig.1 Test Section for the Pool Cooling Test

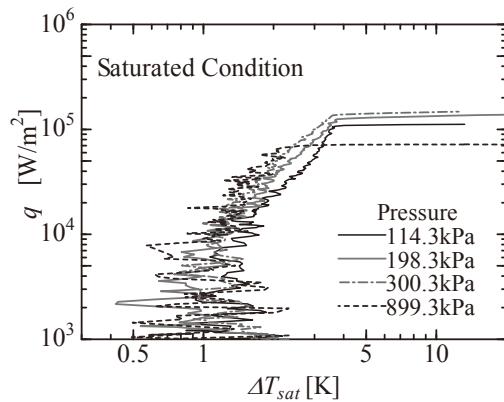


Fig.2 Boiling Curve for Various Pressures at Saturated Condition

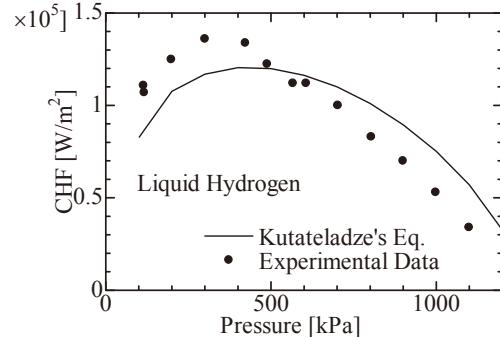


Fig.3 Critical Heat Flux vs. Pressure Compared with Kutateladze's Eq.

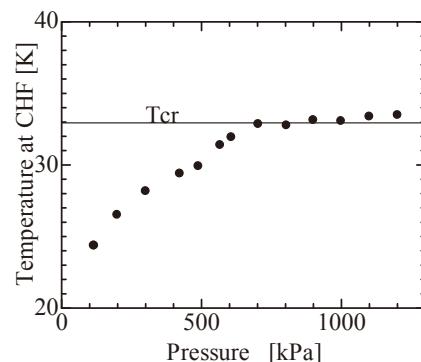


Fig.4 Heater Surface Temperature at CHF.

液体水素の強制対流沸騰熱伝達

Forced Flow Boiling Heat Transfer of Liquid Hydrogen

塩津 正博、吉川 浩太郎、小林 啓人、白井 康之、畠 幸一 (京大) ; 達本 衡輝 (原子力機構) ;
小林 弘明、成尾 芳博、稻谷 芳文 (JAXA) ; 木下 勝弘 (関電)

SHIOTSU Masahiro, YOSHIKAWA Kotaro, KOBAYASHI Hiroto, SHIRAI Yasuyuki, HATA Koichi (Kyoto Univ.) ; TATSUMOTO Hideki (JAERI) ;
KOBAYASHI Hiroaki, NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi (JAXA) ; KINOSHITA Katsuhiro (KEPCO)

E-mail: shirai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

筆者等は、液体水素冷却超電導システム設計に必要なデータベース確立をめざし液体水素熱伝達の実験研究を行っている。本報では、前報の浸漬冷却に続いて強制対流熱伝達の結果を報告する。

2. 試験発熱体

循環ポンプを使用しないで強制対流冷却実験が行える2槽式実験システムを使用した。装置や実験方法の詳細は本セッションで報告したので省略する。Fig. 1に示すように外側をFRPブロックで断熱した内径5.95mm、厚さ0.2mm、長さ100mmのSUS316製薄肉パイプを実験槽内トランスマルチチューブ一端に垂直に支持した。この試験発熱体を直流電流加熱し、その電気抵抗変化から発熱体平均温度を測定した。発熱体表面温度は、平均温度の垂直軸方向分布を無視し、測定平均温度と熱流束から厚さ方向の熱伝導式を解いて求めた。

3. 実験結果

実験は、系圧力を700 kPaに保ち、種々の液温、流速下で、加熱電流を連続的にゆっくり上昇させて臨界熱流束にいたる熱伝達特性を求めた。

Fig.2は、サブクール度(ΔT_{sub})が5 Kの場合の種々の流速に対する熱伝達曲線を示す。縦軸は熱流束、横軸は発熱体表面温度の入口液温からの上昇分である。飽和温度近傍までの過程は非沸騰熱伝達で、流速が大きいほど熱伝達係数も大きく、Dittus Boelter式の値とほぼ一致している。発熱体表面温度が飽和温度近傍にいたると沸騰が開始し、熱伝達が良くなるため各流速の曲線とも勾配が大きくなる。低流速では飽和温度に達する前に沸騰が開始しているように見えるが、これは上述のように軸方向温度分布を無視したためで、出口付近は先に飽和温度以上になっていると考えられる。熱流束が臨界熱流束(CHF)に到達すると発熱体温度が急上昇し膜沸騰状態に遷移する。ここでは、その途中で加熱電流を遮断している。核沸騰熱伝達並びに臨界熱流束は流速に依存し、流速が大きいほど大きくなる。

Fig.3は、CHFと流速の関係を、サブクール度をパラメータとして示す。CHFは、流速およびサブクール度が大きいほど大きくなる。液体水素の強制対流熱伝達、臨界熱流束の実験結果および臨界熱流束表示式も著者の知る限り報告されていない。畠ら[1]は、水のサブクール強制対流臨界熱流束表示式として次式を提示している。比較のためこれを図中に示す。

$$Bo = 0.082 Fc^{-0.1} We^{-0.3} Sc^{0.7} \exp(-(L/D)/(0.53 Re^{0.4})) \quad (1)$$

ここで、 $B_o = q_{cr} / (Gh_{fg})$, $F_c = (D/L) / \sqrt{\sigma / (g(\rho_l - \rho_v))}$
 $W_e = G^2 D / (\rho_l \sigma)$, $s_c = c_{pl} \Delta T_{sub} / h_{fg}$, $Re = GD / \mu_l$

今回の実験結果ではサブクール度が0Kと2Kあまり変化していないが、(1)式は、高密度除熱を目的とした高サブクール水を対象としているため、サブクール度ゼロでCHFをゼロとしている。この点を除けば、流速依存性及びサブクール依存性の傾向は類似である。今後、広範囲な圧力、流速、サブクール度に対して実験を行いデータベースを確立し、実験結果を記述する表示式を提示したい。

参考文献

1) Hata K. et al. JSME Int. J. Series B, 47 No.2 306-315 (2004)

謝辞 この研究の一部は、文科省科研費(2036027,20760141)の補助を受けた。

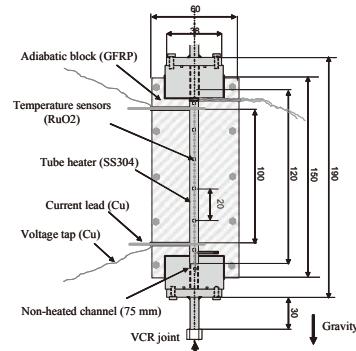


Fig. 1 Test heater block.

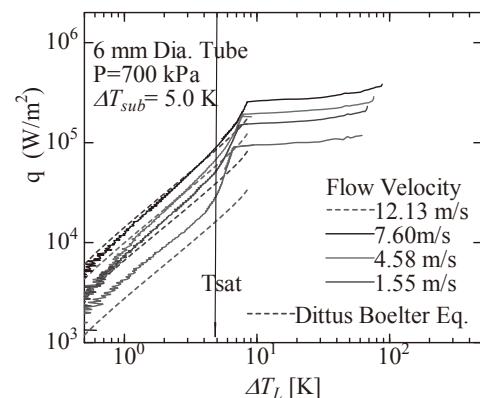


Fig. 2 Heat transfer curves for various flow velocities.

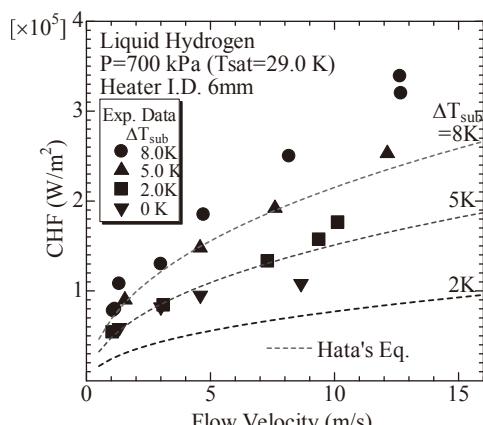


Fig. 3 Critical heat flux vs. flow velocity with subcooling as a parameter

SmFeAsOF 多結晶超電導バルクの臨界電流特性及びその履歴効果

Critical current characteristics and history dependence in polycrystalline SmFeAsOF superconductor

倪宝荣, 葛君(福岡工大);木内勝, 小田部莊司(九工大);高召順, 王雷, 斎彦鵬, 張現平, 馬衍偉(中国科学院)

NI Baorong, GE Jun (Fukuoka Inst. Tech.); KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji (Kyushu Inst. Tech.); GAO Zhaoshun, WANG Lei, QI Yanpeng, ZHANG Xianping, MA Yanwei (Chinese Academy of Sciences)

E-mail: nee@fit.ac.jp

1. はじめに

鉄系新型超伝導体の工学的応用において、最も重要な要素の1つとされる臨界電流特性に対する正確な評価が必要不可欠である。これまでの研究では、この種の物質の多結晶バルク等において、結晶粒間の弱結合や不純物などの存在により、結晶粒内等のローカルな領域には比較的大きな臨界電流密度を有しているが、試料全体等のグローバルな領域に流れる臨界電流密度は極めて低いレベルにとどまっていることが観測されている[1]。本研究は、1111系鉄系超伝導バルクの臨界電流特性を詳細に調べ、超伝導体内に存在する複雑な電流経路及び弱結合を評価することを目的とする。

2. 実験

試料には、通常の PIT (powder-in-tube) 法で作製された[2] $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($x=0.2$) を使用した。測定時は、tube 材として使用した超伝導体外側の Ta をすべて剥離した。スラブに整形したバルクの典型的なサイズは、 $3.0\text{mm}^{(w)} \times 0.5\text{mm}^{(t)} \times 15.0\text{mm}^{(l)}$ であった。抵抗法による臨界温度は約 52K である。

測定は、抵抗法(4 端子法)の他に、各温度および磁界領域での Campbell 法を用いた。Campbell 法は、超伝導体に印加された直流磁界の上に微少な交流磁界を重畠し、その振幅と試料に入り出す交流磁束量との関係から、臨界状態モデルなどに基づき遮蔽電流密度(臨界電流密度)を評価する方法で、試料全体の遮蔽電流のみならず、ローカルな領域に流れる遮蔽電流も評価でき、すなわち、グローバルとローカルの双方の臨界電流密度を同時に評価することが可能であるという特徴をもつ。本研究では、Campbell 法の交流磁界振幅を 0 - 10mT、周波数を 97Hz とした。

3. 結果および考察

Campbell 法による $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ 多結晶バルクのローカルな(結晶粒内の)臨界電流密度(J_c^{local})の磁界依存性を Fig. 1 に示す。試料に対する SEM 観察結果から、結晶粒の平均粒径を $5.0\mu\text{m}$ とし、 J_c^{local} の評価に用いた。低磁界での J_c^{local} の値は、30K を超える温度領域においても 10^9 A/m^2 以上のレベルを維持しており、これは、この材料の臨界電流特性における潜在的なポテンシャルを表すものであると考えられる。また、Campbell 法によるこの結果は、ゼロ磁界において、SQUID による直流磁化測定からの結果に基づき、結晶粒径の要素を考慮して評価した臨界電流密度[1] とほぼ一致する。一方、30K を超える温度領域において、直流磁界が高くなるにつれ、 J_c^{local} の値は明らかに低下していく。これは、比較的高温領域において、不可逆磁界が低下している可能性があることを示唆するものである。

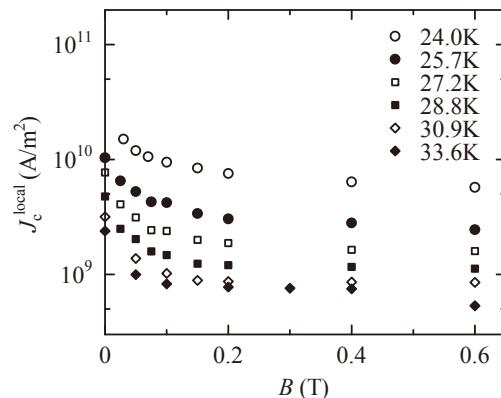


Fig. 1 Magnetic field dependence of the local critical current densities J_c^{local} .

Fig. 2 は4端子法によって得られた、グローバルな(結晶粒間の)臨界電流密度(J_c^{global})の磁界依存性である。Campbell 法によつてもほぼ同じ結果が得られている。印加する直流磁界の増磁過程と減磁過程とでは、 J_c^{global} の値が明らかに異なるという履歴効果が観測された。この現象は、弱結合が存在する銅酸化物高温超伝導体にも観測されており、また、その場合の履歴効果と弱結合との関係が解明されている[3] ことから、本研究で用いられた鉄系超伝導体においても、深刻な弱結合問題が存在していることを裏付けるものと考えられる。

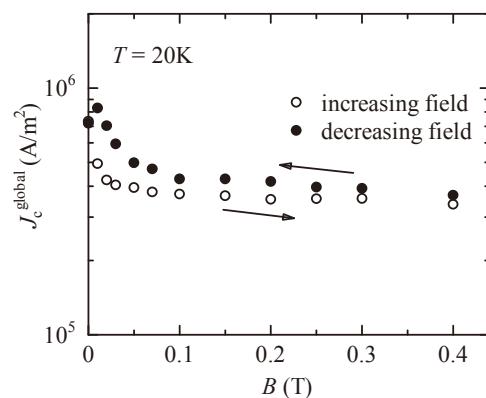


Fig. 2 Magnetic field dependence of the global critical current density J_c^{global} and its history effect obtained by a resistive method.

参考文献

1. E. S. Otabe *et al.*: *Physica C* 469 (2009) p.1940.
2. Z. Gao *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 112001.
3. K. Watanabe *et al.*: *Cryogenics* 29 (1989) 263.

Dy 系バルク超伝導体における捕捉磁場特性とアスペクト比の関係

The relation between the trapped field and the aspect ratio in Dy-Ba-Cu-O bulk superconductors

鈴木 紗子, Atikorn Wongsatanawarid, 関 宏範, 村上 雅人 (芝浦工業大学)

SUZUKI Ayako, Atikorn Wongsatanawarid, SEKI Hironori, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)

E-mail: m208014@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

RE-Ba-Cu-O 系バルク超伝導体 (RE:希土類元素) は高い磁場を捕捉できることから、強磁場源としての応用が期待されている。バルク超伝導体のアスペクト比を大きくすると捕捉磁場特性の向上が期待されるが、溶融法ではバルク体の高さ方向の成長に限界がある。そこで、本実験では複数の Dy-Ba-Cu-O 系バルク超伝導体を用いて捕捉磁場特性に及ぼす重ね合わせ効果について検討した。

2. 実験方法

仮焼粉の $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ と $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ をモル比 10:3 で秤量し、機械的特性の向上および融点降下を目的として Ag_2O を 10wt%、ピニングセンターである $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ 粒子の微細分散を目的として Pt を 0.5wt% 添加し混合した。その後、 $\phi 20\text{mm}$ のペレットに成型した。大気中で $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶を種結晶として用いて 200 時間溶融成長させ、單一ドメインの結晶を得た。その後、酸素雰囲気中 400°C でアニールを行った。得られた試料の直径はすべて 16 mm であった。また、高さ 9 mm のバルク試料を用いて、液体窒素中(77 K)で磁場中冷却し、捕捉磁場に及ぼす重ね合わせの効果を測定した。

3. 結果および考察

Table 1 に各試料の最大捕捉磁場を示す。ここでは、捕捉磁場の大きい試料を a、また小さい試料を b とした。いずれの試料においても、重ね合わせることで捕捉磁場の値が向上している。ただし、捕捉磁場特性が異なる場合、重ね合わせの効果はそれほど大きくないことが分かる。また、上部に置いた試料の特性が支配的であることも分かる。

Fig.1 に捕捉磁場の距離依存性を示す。アスペクト比が大きくなることでより遠方まで磁場が届くことが確認できた。

Table 2 にそれぞれの試料を磁化した後に重ね合わせた場合の捕捉磁場を示す。磁化したバルク体を重ね合わせた

場合、捕捉磁場は逆に低下している。これは、重ね合わせの際に、レンツの法則により超伝導体内に逆向きの電流が誘導された結果と考えられる。

Table 1 The values of trapped fields for samples a and b, and stacked bulks. The field was applied after stacking two samples.

sample	a	b	a (upside) +b	b (upside) +a
trapped field (G)	2580	1370	2730	1500

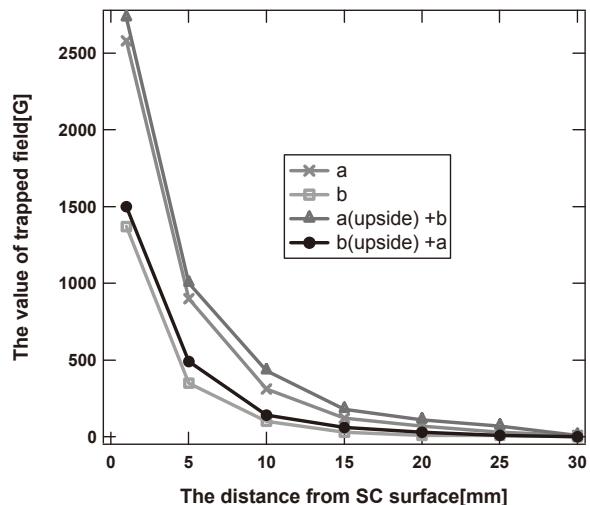


Fig.1 The trapped field as a function of the gap distance.

Table 2 The value of trapped field. The field was applied before stacking the bulks.

sample	a'	b'	a' (upside) +b'	b' (upside) +a'
trapped field (G)	2160	1120	1770	1220

還元雰囲気下で育成した Y123 溶融凝固バルクの超伝導特性

Superconducting Properties of Y123 Bulks Melt-Solidified under Reducing Atmospheres

赤坂友幸, 石井悠衣, 萩野拓, 下山淳一, 岸尾光二 (東大院工)

T. Akasaka, Y. Ishii, H. Ogino, J. Shimoyama, and K. Kishio (Univ. of Tokyo)

E-mail : tt096638@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (T. Akasaka)

【緒言】

RE が重希土類元素である $REBa_2Cu_3O_y$ (RE123) 溶融凝固バルクにおいては、種結晶から離れるほど T_c 、 J_c など超伝導特性が劣化する場合が多く、基板などからの不純物混入量の増加や結晶性の低下がその原因と考えられてきた。我々はこの特性低下の一因として Dy123 溶融凝固バルクの研究を通じて、Dy の Ba サイト置換を指し、さらに Y123 焼結体においても Y の Ba サイト置換を報告してきた[1]。そこで、本研究では、軽希土類 123 溶融凝固バルクにおいて RE の Ba サイト置換を抑制することが知られている還元雰囲気下での結晶育成を、Y123 溶融凝固バルク作製に適用し、種結晶から離れた部分の T_c 、 J_c の劣化の抑制を図り、バルク全体の特性改善を目指した。

【実験方法】

Y123 溶融凝固バルクは以下のように作製した。固相反応法によって作製した Y123 と Y211 の粉末を 7:3 のモル比となるように秤取し 0.5 wt% の Pt を加え混合した。微量不純物置換効果を評価するため、Co (Cu 比 0~1.5%) をあらかじめドープした Y123 粉末を用いた試料も作製した。これを一軸プレス (1 t/cm²) によって 20 mm² × 10 mm¹ のペレットに成型し、種結晶として Nd123 単結晶をペレット表面中央に置いた。溶融凝固は空気中または酸素分圧 0.01 atm 下で行った。溶融凝固バルクの α -growth および σ -growth 領域から切り出した 2 mm × 2 mm × 1 mm¹ の試料に対し、酸素気流中 450°C でポストアニールを施した。これらの試料の代表的な部位について、粉末 XRD パターンの解析から格子定数を、SQUID 磁束計による磁化測定から超伝導特性を評価した。

【結果と考察】

空気中および酸素分圧 0.01 atm 下いずれの育成においても、表面全体にファセットが入ったシングルドメインの Y123 溶融凝固バルクが得られた。

Fig. 1 に動径方向に成長した α -growth 領域の種結晶から 2, 4, 6 mm 離れた部分を切り出した試料の T_c を示す。空気中で溶融凝固を行った試料は、種結晶から離れた位置ほど系統的に T_c が低下している。これは種結晶から遠くなるにつれ、取り込まれる Y イオンの供給源である Y211 の量が多くなるため、結晶成長過程において Y の Ba サイト置換が促進されたためと考えられる。一方で、還元雰囲気下で溶融凝固を行った試料では、種結晶から離れても T_c の低下は見られなかった。空気中および酸素分圧 0.01 atm 下で育成したバルクの格子定数を調べたところ、後者のほうが、 a 軸が短く、 c 軸が長いことから、空気中育成では Y の Ba サイト置換が起こり、還元雰囲気下での育成ではこれが抑制できたことが示唆された。

Fig. 2 に作製したバルク試料の 77 K における J_c の磁場依存性を示す。還元雰囲気下で作製した試料では、種結晶から離れた位置においても、 J_c は低下することなく高い値を維持した。これは Y の Ba サイト置換の抑制を反映したものと解釈できる。種結晶下方に成長した部分においても同様の傾向が確認できた。よって還元雰囲気下で育成した Y123 バルクでは全体にわたって J_c 特性の場所依存性が小さいことがわかった。また低温 (~30 K) において J_c の磁場依存性を測定したところ、77 K 同様に種結晶から離れた位置においても J_c の劣化がなく、

還元雰囲気下での結晶育成法が低温応用を想定した Y123 バルク材料の作製にも有効であることが示唆された。

講演では、還元雰囲気下で育成した Y123 溶融凝固バルクの超伝導特性を総合的に議論するとともに、微量不純物置換効果についても報告する。

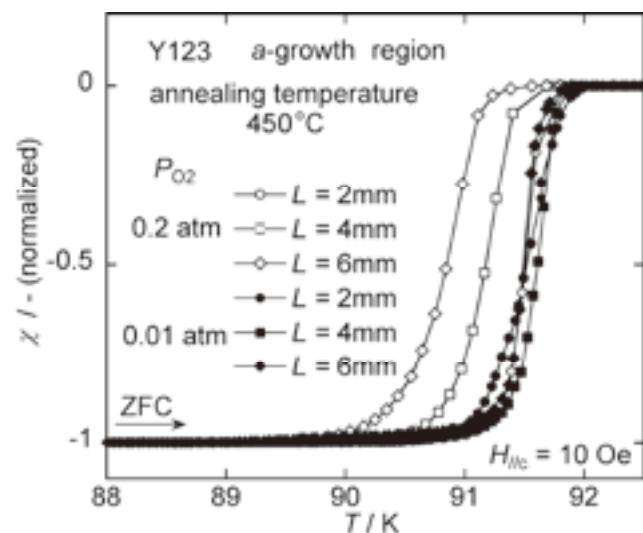


Fig. 1 ZFC magnetization curves for Y123 bulks melt-solidified in air or 1%O₂/Ar gas.

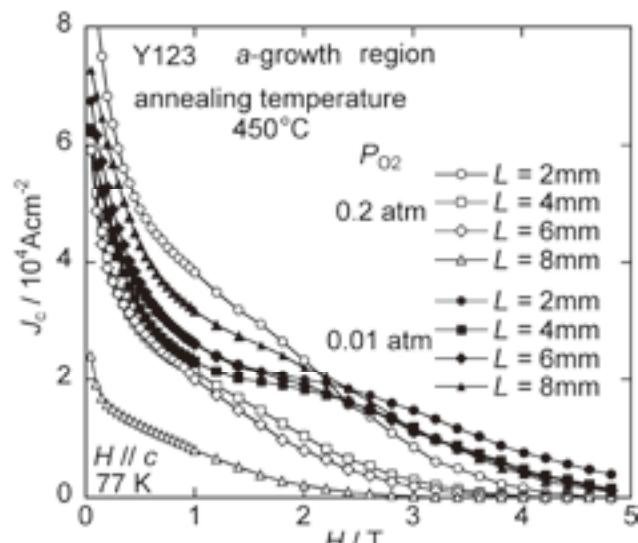


Fig. 2 J_c - H curves at 77 K for Y123 bulks melt-solidified in air or 1%O₂/Ar gas

[1] 下山他, 第 56 回応用物理学会 1a-ZB-4 (2009).

エピタキシャル Fe-Te-S 系超電導薄膜の作製

Fabrication of Fe-Te-S epitaxial superconducting films

松本 要, 春山康則, メレパオロ(九大工大, JST-TRIP); 一瀬 中(電中研, JST-TRIP); 向田昌志(九大, JST-TRIP); 吉田 隆(名大, JST-TRIP); 木須隆暢(九大, JST-TRIP)

MATSUMOTO Kaname, HARUYAMA Yasunori, MELE Paolo (KIT, JST-TRIP); ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-TRIP); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ, JST-TRIP); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ, JST-TRIP); KISU Takanobu (Kyushu Univ, JST-TRIP)
E-mail: matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. はじめに

超電導臨界温度 $T_c=26$ K を持つ層状鉄ヒ化物超電導体 $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ の発見は、科学コミュニティーに大きな衝撃と興奮を与えた¹⁾。この物質は化学式 $\text{LnO}(\text{F})\text{MPn}$ ($\text{Ln}=\text{La, Pr, Ce, Sm, Nd, Gd}$ など; $\text{M}=\text{Mn, Fe, Co, Ni}$ など; $\text{Pn}=\text{P, As}$ など) からなるもので、1111系と呼ばれる超電導体である。今までのところ La を Sm に変えた $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ が最高の $T_c=55$ K を持つ²⁾。これ以外にも、 $\text{LiFe}_{1-x}\text{As}$ からなる $T_c=18$ K の 111 系³⁾、 T_c が 38 K になる AFe_2As_2 ($\text{A}=\text{Ba, Sr, Ca}$ あるいはペロブスカイト層など) の 122 系⁴⁾、そして T_c は低いが、構造が最も簡単な FeCh ($\text{Ch}=\text{Se, Te}$) からなる 11 系がある⁵⁾。これらすべての系は結晶構造の中に FeAs 層あるいはその類似層を有しており、銅酸化物高温超電導体の超電導発現の舞台が CuO_2 層であるのと同様に、この FeAs 層等が超電導発現に深く関わっていると考えられている。

11 系においては化学式 FeCh においてわずかな量の Ch の欠損によって超電導が現れる。 $\text{Ch}=\text{Se}$ (FeSe) の場合には、高圧を印加することで、その T_c は 8 K から 27 K まで上昇する。一方、 $\text{Ch}=\text{Te}$ (FeTe) の場合にはこのままでは超電導を示さないが、Te サイトを S で置換することで超電導遷移を引き起こすことが可能であり、 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ では $T_c=10$ K が報告されている⁶⁾。この 11 系の T_c は大変低いが、結晶構造に毒性の高い As を含んでいないことから、作製が簡便であることが最大の長所である。この物質の基本的物性を明らかにし、より広範な応用展開を行うにはエピタキシャル薄膜の実現が欠かせない。鉄系超伝導体のエピタキシャル薄膜の報告例は、これまで大変少なかったが最近になってようやく現れつつある。

この報告では、私たちが行っている Fe-Te-S 系超電導体のエピタキシャル薄膜化⁷⁾とその特性について述べる。

2. 実験方法

Fe-Te-S 系超電導薄膜は、 $\text{MgO}(100)$ および $\text{SrTiO}_3(100)$ 単結晶基板上に PLD 法(エキシマレーザー、波長=248 nm)を用いて成膜した。PLD 法に用いるターゲットは固相反応法により作製した。Mizuguchiら⁶⁾の報告のように、所望の比率の Fe, Te, S 粉末を石英ガラス管に真空封入し、600°C × 12 時間で反応させ $\text{FeTe}_{1-x}\text{S}_x$ ($x=0.2, 0.3, 0.4$) 粉末を作製した。これを直径 13mm、厚さ 7mm のペレットとしたのち、石英ガラス管に真空封入して 800°C × 12 時間で焼結した。このペレットを用い、 10^{-5} Pa の真空中において PLD を行うことで単結晶基板上に薄膜を成膜した。ここで基板温度は 200~600°C、レーザーエネルギーは 350 mJ/ショットとした。薄膜の結晶構造解析は X 線回折、表面観察は SEM、特性評価は PPMS(物理特性測定装置)を用いて行った。

3. 実験結果および考察

Fig.1 に実験に用いた Fe-Te-S 焼結ターゲットの焼結時と、PLD 成膜後の外観写真示す。このときの仕込み組成は $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ であった。Fig. 2 には基板温度 400°C にて $\text{STO}(100)$ 基板および $\text{MgO}(100)$ 基板上に成膜した Fe-Te-S 薄膜の θ -2θ X 線回折結果を示した。これより膜は強く c 軸配

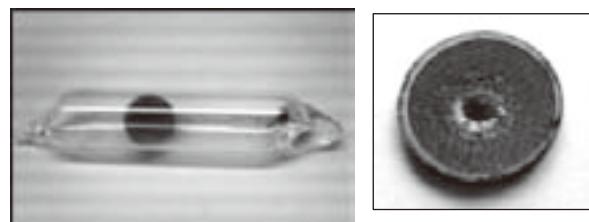


Fig.1 Photographs of Fe-Te-S sintered target during sintering process (left) and after PLD.

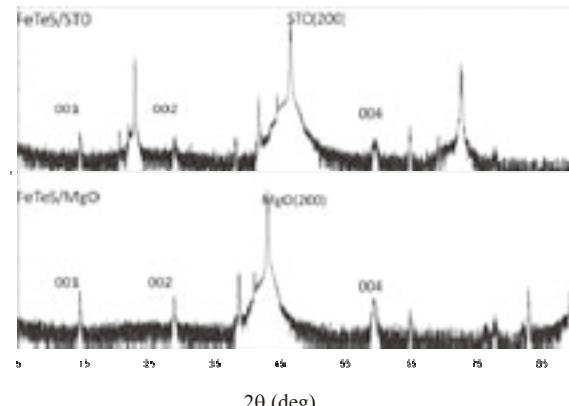


Fig.2 θ -2θ x-ray diffraction patterns for Fe-Te-S thin films on $\text{STO}(100)$ and $\text{MgO}(100)$ single crystal substrates.

向しているのがわかる。また ϕ スキヤンの結果から膜は基板に対してエピタキシャル成長していることが確認された。抵抗-温度曲線の測定からはこの膜は $T_c=5.5$ K であることも明らかになった。一方、磁場に対する T_c 変化は大変小さく、この膜の B_{c2} は 60 T を超えているものと予想された。 B_{c2} がこのように高いということは、Fe-Te-S 系においても、FeAs 層を有する超電導体と同様にコヒーレンス長がきわめて短く、Fe 系超電導体特有の超電導発現機構に起因していることが予想される。詳細なデータに関しては当日報告する。

謝辞: 本研究は JST-CREST のプロジェクトにおいて行われたものである。

参考文献

- Y. Kamihara et al., J. Am. Chem. Soc. 130 (2008) 3296.
- X. H. Chen et al., Nature 453 (2008) 761.
- X. C. Wang et al., Solid State Commun. 148 (2008) 538.
- M. Rotter et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 107006.
- F. C. Hsuet al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 105 (2008) 14262.
- Y. Mizuguchi et al., Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 012503.
- P. Mele et al., Appl. Phys. Express 1 (2009) 073002.

分割型マイクロストリップライン共振器の高耐電力化の検討 (2)

— 線幅と耐電力との関係 —

Examination of power handling capability of a sliced microstrip line resonator (2)

— Relationship between line width and power handling capability —

宇野 正紘, 小野 哲, 遠藤 之正, 齊藤 剛司, 紺野 槟子, 龍口 司, 齊藤 敦, 大嶋 重利 (山形大学); 李 宰勲(SuNAM)
 UNO Masahiro, ONO Satoshi, ENDO Yukimasa, SAITO Takashi, KONNO Makiko, TATUNOKUCHI Tukasa, SAITO Atsushi,
 OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University); LEE Jae Hun (SuNAM)
 E-mail: tad88091@st.yamagata-u.ac.jp

1. 背景

超伝導フィルタは、共振器を多段に配列しても損失が極めて少なく、低損失で急峻なスカート特性を同時に実現できる。その特性を生かし、移動体通信基地局用受信用フィルタが実用化されている[1]。近年、送信用超伝導フィルタの実用化に向け高耐電力化が課題となっている。耐電力が大きい送信用超伝導フィルタを開発するためには、超伝導材料の厚膜化による材料的アプローチと共振器及びフィルタ形状の改良による構造的アプローチがともに重要である[2]。共振器形状として最も一般的な $\lambda_g/2$ 長マイクロストリップライン共振器(MSLR)フィルタは共振器の線路端に電流が集中する。したがって線路端の臨界電流値がフィルタの耐電力特性に強く依存する。これまで我々は、マイクロストリップライン(MSL)を幅方向に均等に分割した分割型 MSL(Sliced MSL)を提案してきた[3]。これは、線路端に集中する電流を線路内部へ分散することにより耐電力を向上させるものである。前回、電流集中をより効率的に緩和させるため、共振器中央部の線路を広くするように分割した MSL(Different interval sliced MSL(DisMSL))を用いる分割法を検討し、シミュレーションを用いてこの有効性を示した[4]。今回は最小線幅 $30 \mu\text{m}$ 、スリット幅 $10 \mu\text{m}$ の DisMSL を用いた 3 段フィルタの設計、試作、評価を行い、MSL を用いた 3 段フィルタとの違いを報告する。

2. 結果及び検討

Fig.1(a), (b)に示すような $\lambda_g/2$ 長 MSL, DisMSL 共振器を用いて Fig.1(c)ののような 3 段フィルタをそれぞれ設計した。MSL にはスリットはなく、DisMSL は線路端から $30 \mu\text{m}$ の部分に $10 \mu\text{m}$ のスリットが入っている。設計仕様は中心周波数 5 GHz 、帯域幅 100 MHz 、挿入損失 $\leq 0.01 \text{ dB}$ 、リップル 0.01 dB とした。それぞれの 3 段フィルタの共振器端部に流れる電流を電磁界シミュレーションにより解析した。基板部は $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 、厚さ 0.5 mm 、 $\epsilon_r = 9.85$ 、 $\tan \delta = 0$ と想定した。共振器、及びグランド面の導体は完全導体を想定した。Table.1 に解析結果を示す。MSL, DisMSL それぞれの最大電流密度 J_{\max} は 831 A/m , 560 A/m となった。この結果より MSL に対して DisMSL は 3.6 dB 耐電力が上昇すると想定される。

フィルタを試作するために、MgO(100)基板($20 \times 20 \text{ mm}^2$ 、基板厚 0.5 mm)上に NbN 薄膜(膜厚 $\sim 300 \text{ nm}$)を DC スパッタリング装置を用いて成膜した。その薄膜を RIE(reactive ion etching)を用いてフィルタ形状に加工した。Fig.2 に 3 段 MSLR フィルタの周波数特性の設計結果と測定結果を示す。点線は設計結果、実線は測定結果を示す。設計仕様をほぼ満たす結果が得られた。Fig.3 に MSL フィルタの耐電力特性の測定結果を示す。MSL フィルタの耐電力特性は 23.6 dBm (229 mW)であった。DisMSL フィルタの結果に関しては、当日報告する予定である。

3.まとめ

送信用超伝導フィルタを試作するために、我々は分割型 MSLR フィルタを提案した。線路を分割することにより、耐電力

が向上することをシミュレーション結果より明らかにした。今後、DisMSL フィルタを試作し、その有効性を検証する。

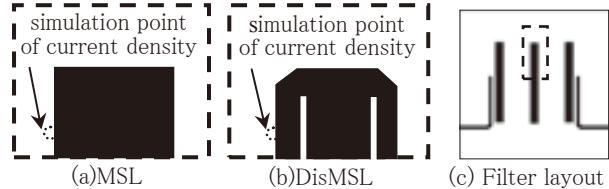


Fig. 1 Filter layout and resonator shape

Table. 1 Current density of MSLR and DisMSLR filters

	$J_{\max} [\text{A/m}]$	J_{\max} ratio	$P_{\max} [\text{dB}]$
MSL	831	1	0
DisMSL	560	0.67	3.6

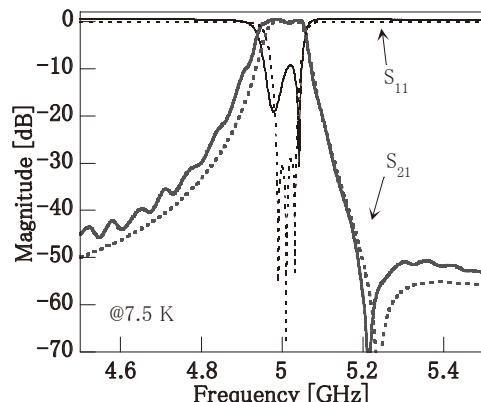


Fig. 2 Frequency responses of MSLR filter

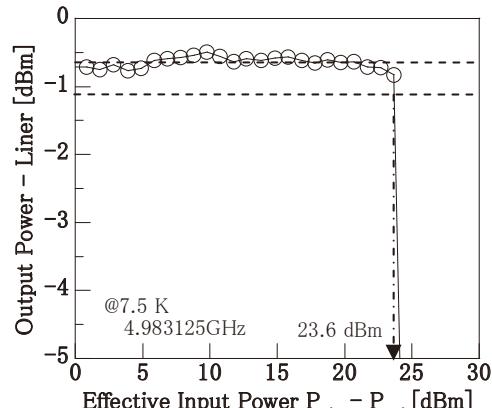


Fig. 3 Power handling capability of MSLR filter

参考文献

1. R. W. Simon, et al., IEEE, 92(2004) 1585.
2. A. Saito, et al., Physic C, 463(2007) 1064.
3. S. Takeuchi, et al., Physic C, 468(2008) 1954.
4. 宇野 正紘 他, 第 80 回低温工学・超電導学会講演概要集, 2C-a09(2009).

アクティブ型熱音響機器における仕事流の増幅特性評価

Work flow analyses for the active type thermoacoustic device

加藤 直樹(名大); 前川 龍司(NIFS,名大); 鷹見 重幸(NIFS)

KATO Naoki (Nagoya Univ.); MAEKAWA Ryuji (NIFS, Nagoya Univ.); TAKAMI Shigeyuki (NIFS)

E-mail:kato.naoki@lhd.nifs.ac.jp

1. はじめに

近年、環境・エネルギー問題と関連して、熱音響現象[1]を利用したエンジンが研究されており、主なものとして自励振動型が挙げられる。それに対して、機器内の音場を能動的に制御するアクティブ型は、共振条件に影響される自励振動型よりも広い駆動範囲を持つことができるため、実用性に優れている。そこで、アクティブ型熱音響エンジンの実用化に向けて、プロトタイプを用いた基礎試験をおこなった。本研究では、エネルギー変換・輸送に深く関わる仕事流に注目した。評価試験より得られた圧力変動データをシミュレートし、機器内におけるエネルギー流の分布について検討したので報告する。

2. アクティブ型熱音響機器

図1にプロトタイプの概略図を示す。オリフィスパルス管冷凍機と同様な構成になっており、オリフィスを介して仕事輸送管とバッファータンクが接続されている。また、PWG(音響エネルギー発生装置)として、CFIC 社のリニアコンプレッサーを用いている。高温熱交換器の温度は、ヒータの入熱量を調節することで一定に保っており、低温部の温度(30°C)との温度差 ΔT を維持している。再生器には、メッシュ数 150 のステンレスメッシュを 28mm 積層した。仕事輸送管(ステンレス製)は、内径 40mm、長さ 28mm である。熱交換器(銅製)は、直徑 53.5mm、長さ 24mm で、表面には放射状のスリットがあり、中心にはプラグを挿入している。管内には、気体ヘリウムを約 2.25MPa 封入している。

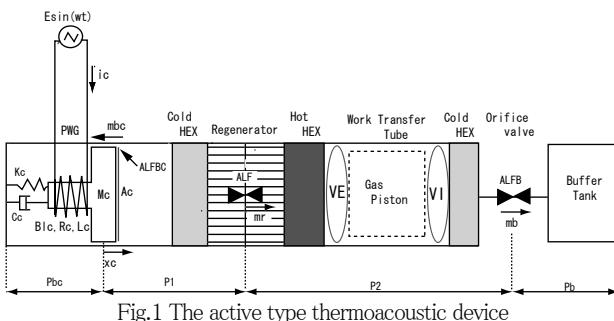


Fig.1 The active type thermoacoustic device

図1の解析モデル[2]は、各四つのセクション(PWG の背圧部分、圧縮ピストンおよび再生器低温側、再生器高温側および仕事輸送管部分、バッファータンク部分)の圧流バランスを考慮して組み立てており、基本となる微分方程式は、以下に示す通りである。

PWG 側において、

$$L_c \frac{di_c}{dt} + R_c \times i_c + Bl_c \frac{dx_c}{dt} = E \sin(\omega t)$$

$$M_c \frac{d^2x_c}{dt^2} + C_c \frac{dx_c}{dt} + K_c \times x_c + A_c (P_1 - P_{bc}) = Bl_c \times i_c$$

再生器およびオリフィスを通過する質量流量、PWG でのバックボリュームへのガスの漏れは、次式で表せる。

$$\frac{dm_r}{dt} = ALF (P_1 - P_2), \frac{dm_b}{dt} = ALF_b (P_2 - P_b),$$

$$\frac{dm_{bc}}{dt} = ALF_{bc} (P_1 - P_{bc})$$

ここで、Mc:ピストン重量、Cc:ダンピング係数、Kc:バネ係数、Blc:誘起電圧定数、m:質量流量、ALF:流路抵抗である。また、サブスクリプトの c は PWG 側、r は再生器、b はバッファータンク側、bc は PWG のバックボリュームを表している。

3. 評価試験

PWG への印加電圧を 40~60V と変化させ、運転周波数を 60Hz、再生器両端の温度差を一定に保った状態で、オリフィス開度を調節して、Cv 値および温度差の違いが及ぼす仕事流への影響を調べた。高・低温熱交換器の温度差 ΔT は、220°C および 320°C の二通りに設定し、比較した。さらに、運転周波数を 40~70Hz と変化させた場合の周波数依存性も調べた。試験より得られた機器の各セクションの圧力変動データを基にモデル解析を行うことで、機器内のエネルギー流およびガスピストン両端の体積変動データを評価している。

4. 試験結果

機器内の仕事を PV 線図でプロットしたものが Fig.2 である。PVc は PWG の圧縮ピストンによる仕事、PVE、PVI はともに仕事輸送管での PV 仕事を表している。仕事流が再生器を通じて増幅されている事が確認された。

Fig.3 に PWG の運転周波数を 60Hz とした時の、仕事流増幅率 Wa の Cv 値依存性を示した。結果から Cv 値の増加とともに Wa が増加することが分かる。Cv 値が約 0.035 を超えてからは、Wa は一定値となった。高・低温熱交換器の温度差によらず、同じ傾向がみられる。 $\Delta T=320^\circ\text{C}$ では最大 1.38 倍程度、 $\Delta T=220^\circ\text{C}$ でも最大 1.29 倍程度の仕事流の増幅率が得られた。(ただし、高温熱交換器よりも、それに接する内部ヘリウムガスは低温であると考えられるため、その点を考慮してシミュレートしている。)

今回の結果より、エネルギー変換・輸送するのに最適な Cv 値があることが分かった。周波数依存性および再生器のメッシュ数の違いによる仕事流への影響も踏まえ、詳細を当日報告する。

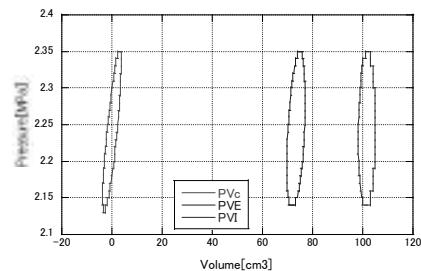


Fig.2 Pressure volume works in the active type thermoacoustic device (V=40V, Frequency=60Hz, $\Delta T=320\text{K}$, orifice opening=8rot.)

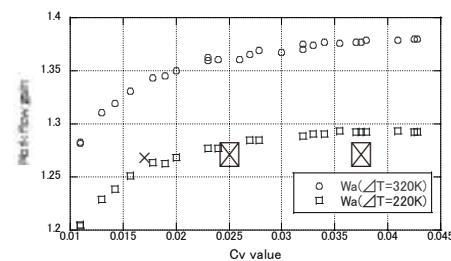


Fig.3 Cv value dependence of Work flow gain

参考文献

- [1]G. W. Swift, "Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators", Acoustical Society of America (2002)
- [2]R. Maekawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.152

GM 冷凍機の 2 段目蓄冷材による冷凍性能評価 (3) – 蓄冷材の最適分量 –

Cooling performance of a GM cryocooler altering 2nd-stage regenerator materials (3)

- Optimum quantity of regenerator materials -

福田 祐介, 今津 卓也, 増山 新二(大島商船高専); 沼澤 健則(NIMS)

FUKUDA Yusuke, IMAZU Takuya, MASUYAMA Shinji(Oshima National College); NUMAZAWA Takenori(NIMS)
E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

小型冷凍機は、宇宙開発や衛星通信、赤外線センサや超電導体の冷却などの分野で利用されており、冷凍機の冷却性能向上は必要とされている。小型冷凍機の性能向上に大きく影響を与える部分として、蓄冷材が挙げられ、特にその比熱が大切である。Er₃Ni や HoCu₂などの磁性体蓄冷材の開発により、2 段小型冷凍機での 4K レベルの冷却が可能になっている。また、次世代の蓄冷材として Gd₂O₂S(GOS)、GdAlO₃(GAP)などのセラミックス蓄冷材にも期待されている。

本研究では、4.2K における冷凍能力の向上を目的とし、2 段 GM 冷凍機の 2 段目蓄冷材に Pb, HoCu₂, GOS を充填させ冷凍性能評価を行なっている[1,2]。

2. 実験装置

本研究で使用した 2 段 GM 冷凍機は、SHI 製で 0.1W@4.2K の仕様となっている。この冷凍機は、100V 単相電源で動作する空冷コンプレッサ(消費電力 1.3kW@60Hz)を使用しているため、実験・計測が手軽に行なえる冷凍機の一つである。実験では、冷凍機を上下反対(コールドヘッドが上向き)で使用している。

3. 実験方法

Fig.1 に 2 段目蓄冷材の概略図を示す。長さ 100mm、内径 15mm の円筒空間内に蓄冷材を充填させる。今回は、高温端から 40mm まで Pb 球(直径 0.4mm)を入れ、一定とした。残りの 60mm に HoCu₂ 球(直径 0.2mm)を充填している。その後、GOS 球(直径 0.25mm)も使用して、それらの割合を変化させながら性能試験を行なった。また、Fig.1 で示すように x を GOS の割合とする。つまり、x=0 で GOS:0%, HoCu₂=100%, x=1 で GOS:100%, HoCu₂=0%となる。

4. 蓄冷器解析ソフト REGEN3.3 による計算結果

NIST が開発している蓄冷器解析ソフト REGEN は、2008 年 4 月にバージョン 3.3 が発表された[3]。

計算は、2 段目蓄冷器のみ行なった。計算条件をいくつか抜粋すると、蓄冷材を 150 分割、高温端・低温端温度をそれぞれ 35K, 4.2K とした。また、圧力は、高圧 2.1MPa、低圧 0.8MPa とした。その他の条件は、Fig.1 の x=0 の時に実験から得られた冷凍能力(0.15W@4.2K)に合うように設定した。

REGEN3.3 を使用して、4.2K での Pb, HoCu₂, GOS の最適割合計算結果を Table.1 に示す。この結果から、GOS は 25~30%, Pb は 10~60%程度充填させることが最適であることが分かる。

5. 実験結果

Fig.2 は、4.2K における冷凍能力の実験結果、および数値解析結果を示す。本実験では Pb を 40% 使用した。今回の実験では、x=0.42 の時に冷凍能力が最大となり、0.22W の値であった。この時の蓄冷材の体積比は Pb:HoCu₂:GOS=40:35:25 であり、GOS を使用することにより約 45% 冷凍能力が向上した。

6. まとめ

2 段 GM 冷凍機の 2 段目蓄冷材に Pb, HoCu₂, GOS を充填させ、割合を変化させた時の冷凍性能評価を行なった。低温端に GOS を 25% 加えることにより、研究目的である 4.2K での冷凍能力が約 45% 向上することが実験的に確認できた。今後の課題として、HoCu₂, GOS だけでなく、Pb の割合も変化させて、コスト面も考慮して冷凍性能評価を行う考えである。

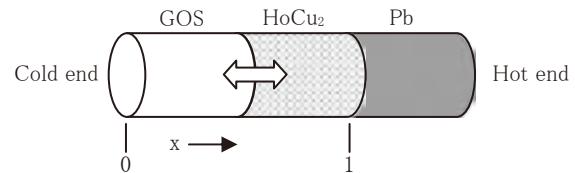


Fig.1 A schematic of three-layer regenerator materials

Table.1 Numerical results of the volumetric ratio and cooling power at 4.2K

GOS [%]	HoCu2 [%]	Pb [%]	Power [W]
30	60	10	0.21
30	50	20	0.21
25	45	30	0.21
25	35	40	0.21
25	25	50	0.21
25	15	60	0.21
15	15	70	0.20
10	10	80	0.17
0	10	90	0.064

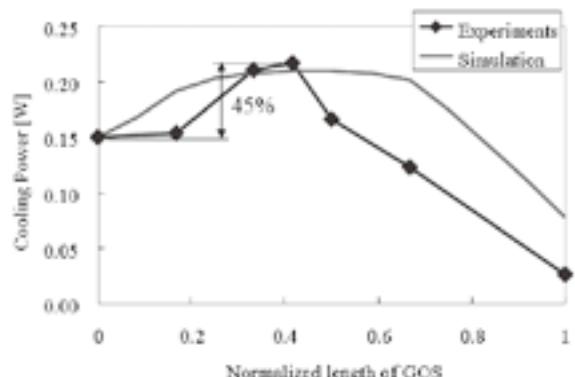


Fig.2 Cooling power of the 2nd-stage at 4.2K

参考文献

1. T.Imazu, S.Masuyama, T.Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) P.156
2. T.Imazu, Y.Fukuda, S.Masuyama, T.Numazawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) P.79
3. <http://math.nist.gov/~AOGallagher/auxfiles/regenstart.html>

並列スターリング型パルス管冷凍機の冷却特性

Study of Stirling-Type Pulse-Tube Refrigerator Arranged in Parallel

池田 和也, 長嶋 賢, 清野 寛(鉄道総研);
IKEDA Kazuya, NAGASHIMA Ken, SEINO Hiroshi(RTRI);
E-mail: k-ikeda@rtri.or.jp

1. はじめに

圧縮機, 位相制御機構を共通化した, 複数のパルス管冷凍機により冷却する方式の有用性を検討している。

冷却特性を確認する目的で, 作動ガスとして大気圧空気を使用した, イナータンクタイプのパルス管冷凍機¹⁾の模型(アクリル管により製作)を3個並列に接続して, ひとつの圧縮機により, スターリングサイクルで動作させた場合の, 冷凍機間における到達温度, パルス管内の圧力変動

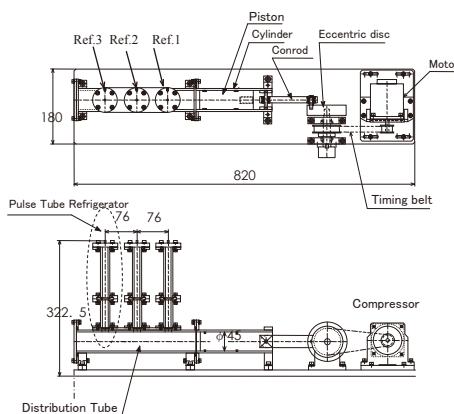


Fig.1 Pulse tube refrigerator arranged in parallel

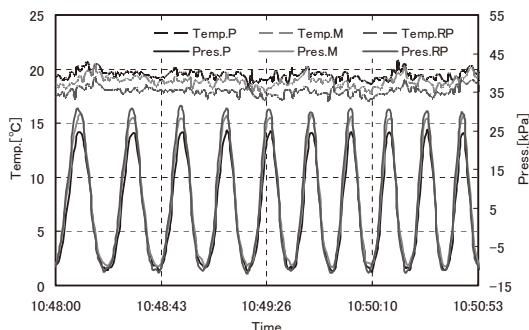


Fig.2 Temperature and pressure tendency

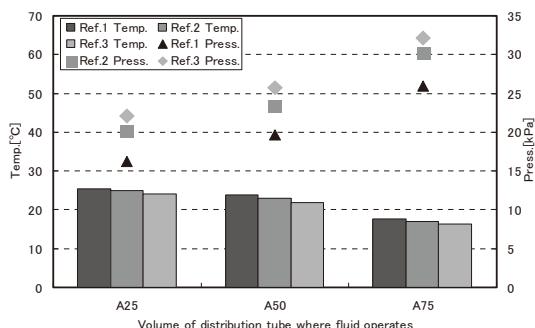


Fig.3 Temperature and pressure for different volumes of distribution tube

について実験をおこなった。

今回は, 作動流体分配管の容積, 圧縮機ピストン周波数を変化させることによって, パルス管内の冷端部温度, 圧力振幅にどのような特性があるかを確認した。

2. 実験装置

実験装置をFig.1に示す。この装置は圧縮機, 作動流体分配管, 3個の蓄冷器, 3個のパルス管, 3本のイナータンクチューブによって構成される。圧縮機はクランク機構による往復動タイプで, 可変速電動機によってタイミングベルトを介して運転する。ピストン寸法は直径45mmとし, ストロークは14mm, 44mm, 74mmに変更できる構造とした。蓄冷器内の蓄冷材には脱脂綿を使用した。ハウジングはアクリルのパイプで各部の寸法は図のとおりである。イナータンクチューブは内径2mm, 長さ2mのシリコンチューブを使用し, 先端は大気に開放した。

3. 実験結果

Fig.2に定常運転中の温度, 圧力を示す。運転時における電動機の回転数は300rpm一定とした。なお, 電動機ブーリーとピストン回転軸ブーリーの直径比率は25/64であるため, ピストン周波数は約2Hzとなる。パルス管内の圧力振動周波数は, 詰めものに関係なく約0.09Hzとなつた。また電動機回転数を240, 360rpmと変化させた場合でも, パルス管内の「圧力振動周波数/ピストン周波数」比は0.045と一定になった。

Fig.3に作動流体分配管の容積違いによる, 冷凍機冷端部温度, パルス管内上限圧力を示す。図中のAはアルミニウムを, それに続く数字は分配管を塞いだ容積%を表す。

上限圧力が大きいほど(圧力振幅が大きいほど), そしてピストンから遠い位置の冷凍機ほど, 冷端部温度は低くなつた。さらに作動流体分配管内の容積が小さくなるほど, パルス管圧力変動は大きくなり, 温度は低くなつた。

本実験は国土交通省の国庫補助金を受けて行ったものである。

参考文献

1. Kazuhiro Hamaguchi, Yoshikatsu Hiratsuka, Takeshi Hoshino, Performance Characteristics of an Atmospheric Pulse Tube Refrigerator, Proceedings of 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA2004-5633, 2004.

GM-冷凍機を用いた水素液化装置の開発

Development of hydrogen liquefier using GM-refrigerator

中納 晓洋, 前田 哲彦, 児玉 廣之, 伊藤 博 (産総研);

増田 正夫, 川上 理亮, 加藤 敦史 (高砂熱学工業); 松尾 正宏 (ジェック東理社)

NAKANO Akihiro, MAEDA Tetsuhiko, KODAMA Hiroyuki, Ito Hiroshi (AIST); MASUDA Masao, KAWAKAMI Yoshiaki,

KATO Atsushi (Takasago Thermal Engineering Co.,Ltd.); MATSUO Masahiro (JECC Torisha Co.,Ltd.)

E-mail : a.nakano@aist.go.jp

1. はじめに

現在、水素エネルギーを業務用建築設備に導入するための建築設備用水素利用システムに関する研究開発を進めている。夜間電力を利用して水電解を行い水素ガスを製造し、それを水素吸蔵合金タンクに貯蔵する。貯蔵した水素を使用して燃料電池を運転し、昼間、建築物に電力供給を行うのがこのシステムの基本コンセプトである。なお、非常時対応として液体水素由来の水素ガスを吸蔵合金タンクに貯蔵するケースも考慮している。この場合、水素ガスの主成分であるパラ水素に対する貯蔵特性を把握する必要がある。我々はパラ水素を水素吸蔵合金タンクに供給するために必要な水素中間保持容器と称するGM冷凍機を使用した小型水素液化装置の設計・製作を行った。

2. 水素液化装置

Fig. 1に製作した液化装置の概略を示す。高真空断熱槽内の輻射シールド内側に納めた液体水素容器の容量は約30 lで、容器内上部に見える凝縮板を2段式10K-GM冷凍機(住友重機械: RDK-408S)で冷却することにより水素ガスを凝縮・液化させる。凝縮板上で液化した水素は自重で流下し容器底部に蓄積される。凝縮板表面にはオルソ-パラ変換を促進させる目的で酸化鉄を塗布している。温度計測のため容器内には上下方向3ヶ所にCernox抵抗温度計(Lake Shore: CX-1050-SD-4D)を配置すると共に、容器内圧力は図中に示す圧力トランസデューサ(長野計器: KJ16)を用いて計測した。また、液量計測のため液位計

(American Magnetics: MODEL186 AMI)を容器内に設置すると共に、供給する水素ガス量をマスフローコントローラ(Koflok: MODEL3660)で測定し、積算流量値から正確な液量を求めた。

3. 実験結果

室温にて0.15 MPaほど水素ガスを封入した後、冷凍機を運転し容器内の温度が十分下がるのを待ってから液化を開始した。液化開始から7m³の水素ガスを液化するまでの運転結果をFig. 2に示す。Fig. 2aは内部温度、Fig. 2bは内

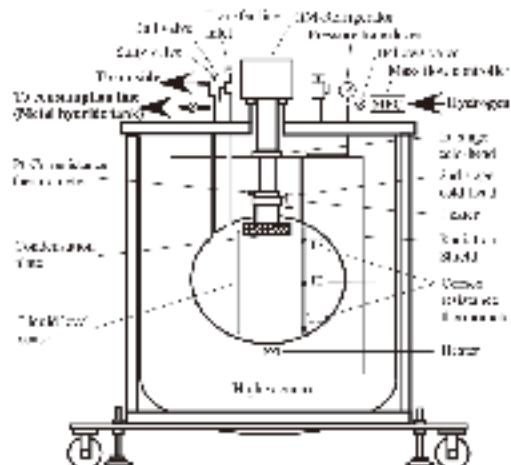


Fig. 1 Schematic of hydrogen liquefier.

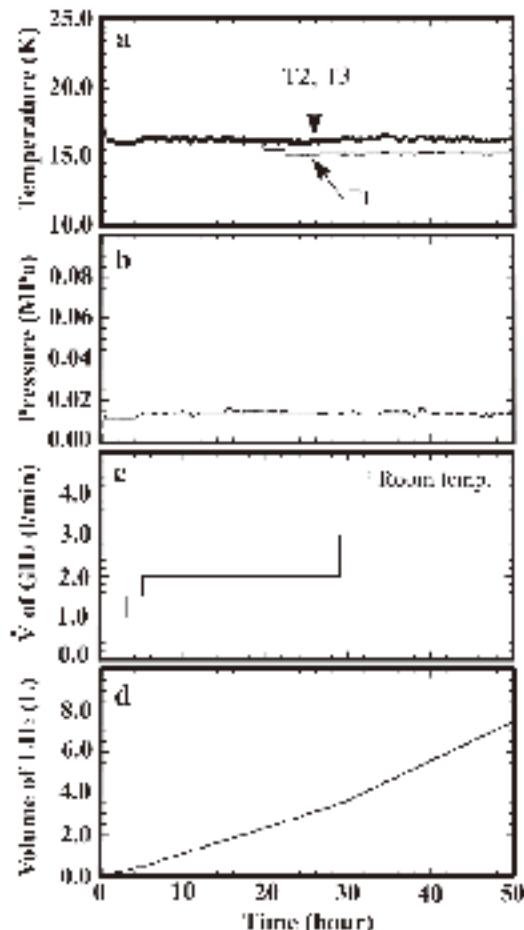


Fig. 2 Operating history.

部圧力、Fig. 2c は導入した水素ガスの体積流量、Fig. 2d は液体水素量の時間変化を表す。Fig. 2c に示すよう導入する水素ガス量は段階的に 3.0 l/min まで引き上げた。この場合、7 m³ の水素ガスを液化するのに 50 時間を要しているが、3.0 l/min 液化時でまだ冷凍機に約 6.7 W の熱負荷が掛かっていたことから更に液化速度を早めることは可能であると思われる。なお、液化開始後約 20 時間で T1 の温度が若干低下しているが、これは液体が温度計 T1 の位置に到達したことによる。

4. まとめ

GM冷凍機を用いた小型水素液化装置の開発に成功した。今後これを用いてパラ水素に対する水素吸蔵合金の貯蔵特性を調査する予定である。

謝辞

本研究成果は経済産業省の交付金を原資として(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の委託契約に基づいた「水素貯蔵装置及び水電解・燃料電池一体型セルの研究開発(平成19~21年度)」による支援を受けて得たものである。

ヘリウム循環装置における戻りガスの最適化

Optimization of return gas in a Helium Circulation System

岡本 雅美, 武田 常広(東大)
 OKAMOTO Masayoshi, TAKEDA Tsunehiro (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GM冷凍機を用いたMEG用ヘリウム循環装置(HCS)を開発した[1,2]。液化効率を上げるためにデュワへの熱侵入を低減が必要である。主な熱侵入の経路はデュワ側壁と約3500本のMEGセンサケーブル、そして、HCSのトランスマーチューブと考えられる。HCSでは熱シールドのために約40Kのヘリウムガスをデュワ中央部に送り込み、そのガスを使ってデュワ内側壁まわり(ネックチューブ)とトランスマーチューブの垂直管を冷却している。

戻りガスはデュワ上面の側壁寄りの側壁ポートとトランスマーチューブ垂直管の側にある中央ポートから2箇所から取り出される。実験の結果、戻りガスはある割合で両方のポートから戻した時に液化効率が最大となることが確認できた。

2. ヘリウム循環装置でのガスの流れ

Fig.1にHCSのシステム図を示す。デュワで蒸発したヘリウムガスは低温を保ったまま4KGラインを通り凝縮器に吸引される。ヘリウムは凝縮器で液化され重力により4KLラインを通ってデュワに戻る。また、デュワ上部から循環ポンプにより吸引されたヘリウムガスは40Kステージにて冷却され、4KGラインを熱シールドしながらデュワ中央部に供給される。供給されたガスは一部がネックチューブを通ってデュワ側壁やセンサケーブル等を冷却した後に側部ポートから戻り管に流れる。他のガスは、トランスマーチューブの垂直管を冷却した後に中央ポートから戻り管に流れる。

Fig.2はデュワの内容物を模式的に示している。センサケーブルはデュワインサートに這わせてあり、デュワ上部より外部に引き出されている。デュワインサートは内部が真空となった断熱部材である。トランスマーチューブはデュワの中心に挿入されている。

3. 戻りガスの流路の最適条件

中央バルブの開度を変え戻りガスの二つの流路の流量割合を変えた時の液化速度を調べた。Fig.3に3回繰り返し測定した結果を示す。全開では液面が下降し、開度0.25あたりで液面上昇が最大になった。全閉では多少の液面上昇となった。バルブ全開で開度は1である。この結果より、デュワへの熱侵入はトランスマーチューブの垂直管よりもデュワ側壁・センサケーブルの方が大きいと考えられる。

また、以前に行った試験用小型DWを使用したHCS評価試験において、戻りガスは全量をトランスマーチューブ側に流すと液化効率が高かった。試験用小型DWにMEGのセンサケーブルは無いので、トランスマーチューブからの熱侵入が大きく効いていたと推測できる。

4.まとめ

このMEGシステムにおいては、戻りガスはデュワ内側壁まわりとトランスマーチューブの垂直管まわりの両方に流すと液化効率が良いことがわかった。ただし、最適な条件はセンサケーブルの有無などのシステム構成により異なると考えられる。

参考文献

1. T. Takeda, et. al.: An efficient helium circulation system with small GM cryocoolers, Cryogenics, Vol. 48 (2008) p. 6-11
2. T. Takeda, et. al: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 43 (2008) p.174-179

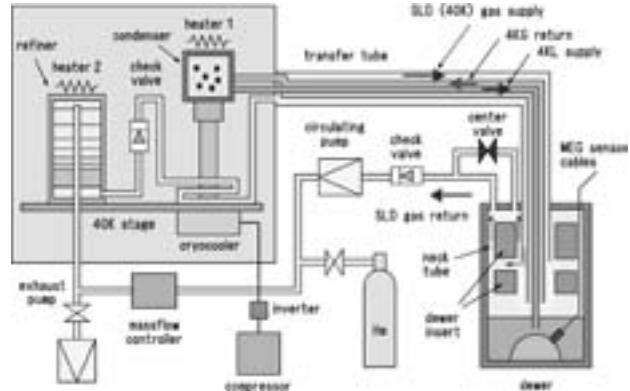


Fig.1 Helium circulation system.

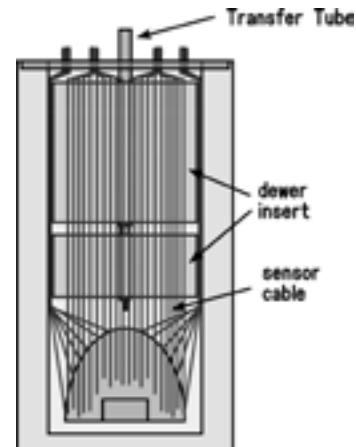


Fig.2 Sensor cables in the dewer

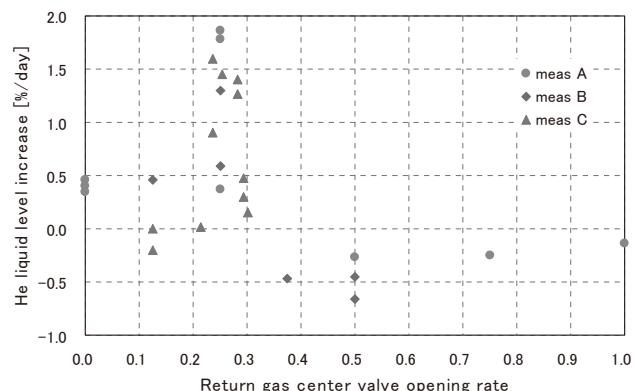


Fig.3 Change of helium liquid level increase by the SLD return gas center valve opening rate.

RF-Sputter 法による Re-123 系線材用 CeO_2 中間層の開発 (3)

—IBAD-MgO 基板上の CeO_2 中間層の成膜—

Development of CeO_2 buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering (3)
– Deposition of CeO_2 buffer on IBAD-MgO substrate –

中西 達尚, 小泉 勉, 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, 斎藤 隆 (フジクラ)

吉積 正晃, 高橋 保夫, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)

NAKANISHI Tatsuhisa, KOIZUMI Tsutomu, AOKI Yuji, HASEGAWA Takayo (SWCC-CS)

IIJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura)

YOSHIZUMI Masaaki, TAKAHASHI Yasuo, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail:t.nakanishi508@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

前回、IBAD-GZO / HastelloyTM 中間層付基板に RF-Sputter 法で CeO_2 中間層を形成する成膜条件を確立し、連続成膜の量産試作においても配向性の再現性と長尺安定性を実現したことを報告した[1]。今回は、IBAD-GZO よりも更に高速成膜が可能な LaMnO_4 (LMO)/IBAD-MgO 基板上で CeO_2 中間層の成膜を行った。その結果、100m の長尺模擬成膜において結晶性および表面平滑性ともに良好な特性が得られた。

2. 実験方法

CeO_2 中間層は Reel-to-reel(RTR)式連続成膜機構を持つ RF-Sputter 装置で行った。基板は、(株)フジクラ殿と超電導工学研究所殿より供給頂いた IBAD-MgO 基板を使用し、いずれも MgO 層の上に LaMnO_4 をキャップ層として形成したものを使用した。成膜時の設定温度は 600~800°C、RF 投入電力は 450W、ガス圧力は、1~30mTorr、線材移動速度は~1m/h とした。また、長尺模擬試験は、20cm 長の IBAD-MgO 付き基板を 20m 間隔で Hastelloy テープに接続し全長 100m とし、連続成膜を行った。 CeO_2 中間層の膜厚は 0.5~1 μm である。 CeO_2 膜の結晶性評価は X 線回折(XRD)法、表面形状評価は AFM と SEM 観察により行った。

3. 実験結果

Fig.1 に、100m 長尺模擬試験(Fujikura 製基板を使用)における各ポイントの CeO_2 の面内配向性($\Delta\phi$)を示す。 CeO_2 膜の $\Delta\phi$ は、全長にわたり 2.5~2.7° に分布しており、きわめて良好な面内配向性が得られた。また表面平滑性は、Fig.2 の AFM 観察の結果のように、良好な表面平滑性を示した。以上のように、MgO 中間層上の Sputter- CeO_2 成膜においても、GZO 中間層上と同等以上の面内配向性が得られ、長尺成膜の安定性も確認できた。詳細については当日報告する。

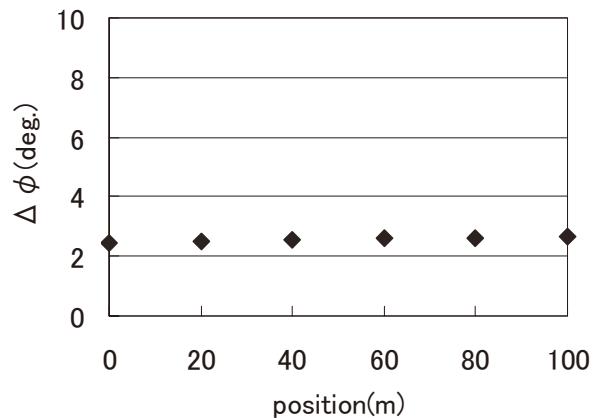


Fig.1 Longitudinal $\Delta\phi$ distribution of CeO_2 buffer layer on LMO/IBAD-MgO .

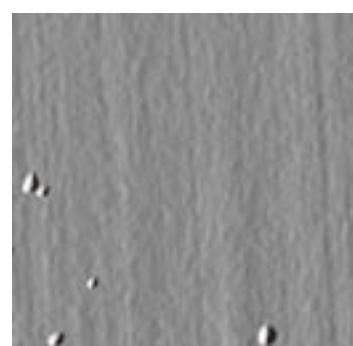


Fig.2 5x5 μm AFM image of CeO_2 surface.

参考文献

[1] T. Nakanishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.188

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器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)の委託により実施したものである。

Coated Conductor の事前曲げ効果の有限要素法による3次元歪解析 — 3-D FEM analysis of the pre-bending strain for the YBCO coated conductor —

中島 康希, 村瀬 晓, 七戸 希 (岡山大), 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大)
NAKASHIMA Kouki, MURASE Satoru, NANATO Nozomu(Okayama University), AWAJI
Satoshi, WATANABE Kazuo(Tohoku University)
E-mail: kouki@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

これまでに, Cu-Nb 補強型 Nb_3Sn 線材などで事前曲げ歪処理 (prebending; 室温で曲げ歪を繰り返し印加する処理) を施すと, 施さない場合に比べて I_c -応力依存性や最大臨界電流 $I_{c\text{m}}$ が向上するということが分かっている⁽¹⁾. この事前曲げ歪処理を R&W 法のコイル巻線時に応用することにより, 従来より更に臨界電流特性の優れた超電導コイルの作製が可能となる. しかし, 高温超電導線の YBCO 線材に事前曲げ歪処理を施した場合の効果については知られていない. そこで, YBCO 線材に有限要素法を用いて事前曲げ加え, 超電導部に発生する 3 次元 (von Mises) 残留歪について解析し, 実験結果と比較し考察した.

2. 解析モデルと解析方法

今回, 解析に使用した超電導線材モデルは Fig.1 に示すように金属基板 Hastelloy, 中間層 Y_2O_3 , YSZ, CeO_2 , 超電導層 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO), 安定化層 Cu である.

解析の順序を次に示す. まず線材を線材の熱処理温度 973K から室温 300K まで冷やす. そして線材の上面にスプールがあるとして線材に曲げを加え, 次に線材の下面にスプールがあるとして曲げを加える. その後線材の巻線時にかかる引っ張りとして, 線材の長手方向に 20 MPa の引っ張りを加え, 線材の使用温度 77 K まで冷やす. さらに, 運転時の電磁力として z 方向に引張応力を加えていった時の超電導層の残留歪を FEM により解析する.

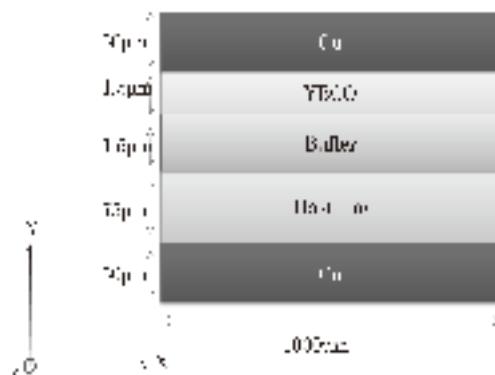


Fig.1 Model of the YBCO Coated Conductor

3. 実験方法

臨界電流 I_c の測定回路図を Fig.2 に示す. 試料線材に直流電流を流し, 回路の電流はシャント抵抗間電圧を測定することにより求め, 線材のタップ間 (1cm) の電圧を Digital Oscilloscope で測定した. 臨界電流は $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準である. カットオフ周波数は 1 Hz とした.

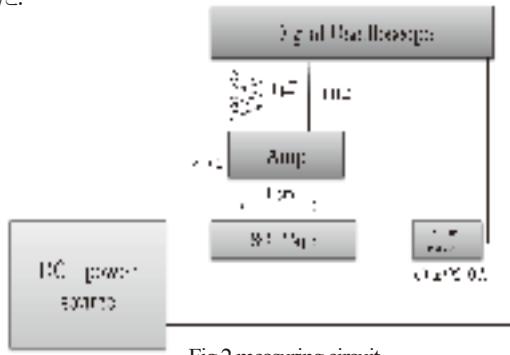


Fig.2 measuring circuit

4. 結果及び考察

Fig.3 に事前曲げ歪と規格化した I_c の関係の実験結果と, Fig.4 に事前曲げ歪と 3 次元歪との関係の解析結果を示す. 0.1%近傍で I_c の増加と 3 次元歪の減少があり, 3 次元歪が I_c に影響しているということがわかる. 曲げ歪 0.1%付近までは Cu 層による圧縮歪が緩和されていると考えられる. その後 Cu 層による圧縮歪の緩和の限界に達し, 歪の増加による I_c が減少していると考えられる. Fig.3 より, 今回使用したモデルでは曲げ歪 0.1%付近で事前曲げ歪処理をしない場合より歪が緩和されており, 曲げ歪 0.3%付近で事前曲げ歪処理をしない場合より歪が増加した. Fig.4 より曲げ歪 0.1%付近で最も I_c が向上し, 曲げ歪 0.3%付近で I_c が減少した.

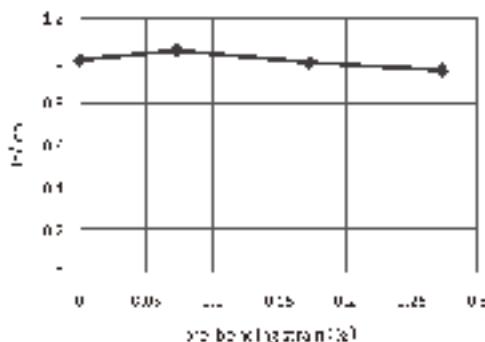


Fig.3 Normalized I_c vs. prebending strain for experiment results

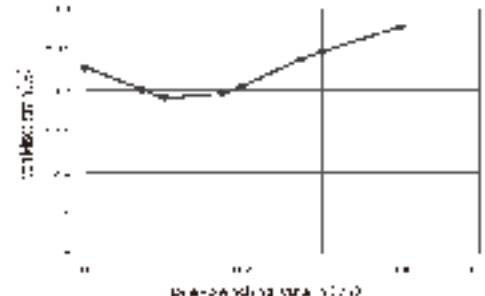


Fig.4 3-D strain vs. prebending strain for analysis results

5. まとめ

Nb_3Sn に比べ, 事前曲げ歪処理による効果は小さいが, YBCO 線材に事前曲げ歪処理による I_c の向上がみられた.

謝辞

本研究を遂行するにあたり東北大学金属材料研究所計算材料科学センターの SR11000 スーパーコンピューティングシステムを利用しました. 深く感謝申し上げます.

参考文献

- (1) S. Awaji, K. Watanabe, H. Oguro, G. Nishijima, H. Tsubouchi, K. Miyoshi, S. Meguro : Application of prebending effect to high strength Nb_3Sn strands, Fusion Engineering and Design 81 (2006) 2473-2478

高温超電導テープ線材の積層配置の通電交流損失に及ぼす影響

Effects of the stacked structure for HTS tapes on transport current AC loss

森本 裕二, 七戸 希, 村瀬 晓(岡山大); 山田 豊(東海大)

MORIMOTO Yuji, NANATO Nozomu, MURASE Satoru (Okayama University); YAMADA Yutaka (Toukai University)

E-mail: yuji_morimoto@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

超電導体は無損失で直流電流を通電できる反面、交流電流を通電すると損失が発生するという問題がある。したがって、超電導を電気機器等に応用するためには交流損失の対策が必要となり、実際の環境に近い条件での特性を把握する必要がある。実際に用いられる超電導コイルには通電電流を増やすために超電導巻線が多層に積層されて使われる。

YBCO テープ線材では磁性体基板が使われており、これらの積層パターンの違いによって発生する通電交流損失が変化した。この損失に影響を及ぼす諸要因を調査・検討するため、通電電流、周波数、試料の積層パターンを変化させて交流損失測定の実験を行い、測定結果の検討・考察を行った。

2. 実験方法

Table1 に示す諸元の YBCO 線材を用いた積層試料を作製する。積層パターンは、Fig.1 のように YBCO 線材の金属基板側同士を貼り付け積層させた model A、金属基板側と YBCO 層側を貼り付け積層させた model B、YBCO 層側同士を貼り付けた model C の 3 種類とした。

通電交流損失測定はロックインアンプを用いた位相調整法により行った。試料に接続する電圧タップの接続方法は矩形ループ電圧タップ法を採用した。通電電流の負荷率を 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 通電周波数を 50, 100, 200, 500 Hz とし、液体窒素浸漬冷却によって実験を行った。

Table1 Specifications of the YBCO tape

Manufacture	AMSC
Substrate	Ni-5%W
Stabilizer	Cu
Surface coating	Ag sputter
Average thickness	0.18 – 0.22 mm
Minimum width	4.27 mm
Maximum width	4.55 mm
Minimum amperage I_c	90 A
Average engineering current density J_e	10,200 A/cm ²

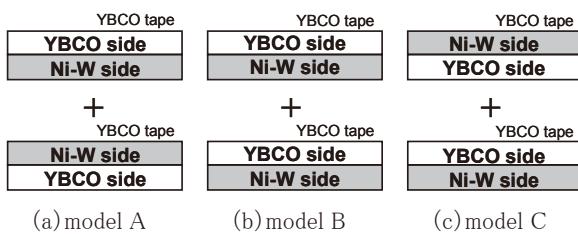


Fig.1 Three models of the stacked YBCO tapes

3. 実験結果及び考察

モデル A, モデル B, モデル C の交流損失測定結果をそれぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4 に示す。これらの測定結果より、損失値は model A の場合が最も高く、model C の場合が最も低く、そして model C の場合がそれらの中間的な値となることが分かった。この原因としては、通電によって YBCO 線材に発生する自己磁場が、線材の積層配置により、強磁性体である金属基板中で強め合う、または弱め合う作用を引き起こしているためだと考えられる。

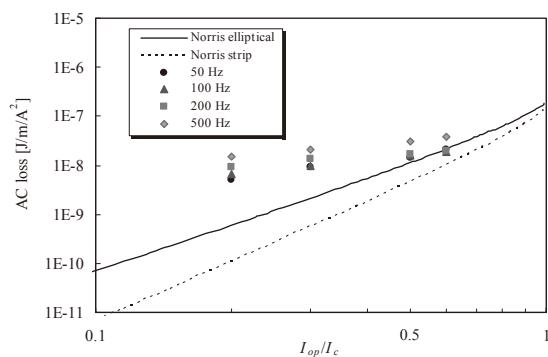


Fig.2 Characteristics of transport current AC loss and loaded current (model A)

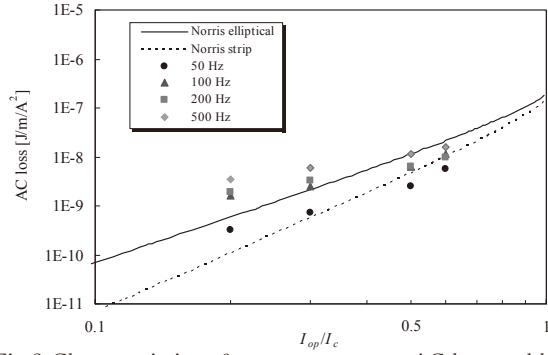


Fig.3 Characteristics of transport current AC loss and loaded current (model B)

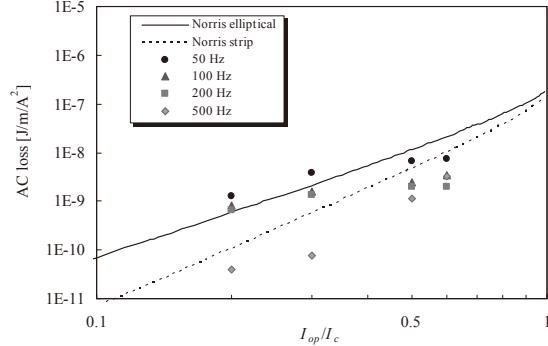


Fig.4 Characteristics of transport current AC loss and loaded current (model C)

ハステロイ基板のビッカース硬さと電気抵抗

Vickers hardness and electrical resistivity of Hastelloy substrate

阿部 雄樹, 龜ヶ川 尚子 (一関高専), 塩原 融 (ISTEC)

ABE Yuki, KIKEGAWA Takako (Ichinoseki National College of Technology); SHIOHARA Yuh (ISTEC)
E-mail: kikegawa@ichinoseki.ac.jp

1. はじめに

超電導線材を用いた機器設計においては、線材の超電導特性および機械的特性とともに熱伝導度、比熱、電気抵抗などの輸送特性を正しく評価することが重要である。線材基板は線材製造工程において最高 800°C 程度までの加熱下に置かれる。これによる圧延組織の変化が、基板の硬さや熱伝導度、電気抵抗に影響を与えることは、既に報告した。歪の解放や再結晶化、金属間化合物粒子の析出などの圧延材料において熱処理によって引き起こされる現象は、基板の初期状態、即ち基板材料として出荷される前に施された圧延や歪除去熱処理の程度に依存する。これらの工程は一様に定められてはいない。そこで本研究では、2 つの系列のハステロイ基板と、同じ Ni 合金基板である Ni-3at%W 配向基板(系列3)について、電気抵抗とビッカース硬さの測定を行い、これらの間の相関を調べた。

2. 実験方法

ハステロイテープから切り出された各試料片は、300、400、500、600、700、850 または 800、1000°C のいずれかの温度で熱処理された。熱処理は全て Ar ガスフロー状態で行なわれた。熱処理時間は 30 分である。電気抵抗とビッカース硬さの測定は、同一の試料片について行われた。マイクロビッカース法による薄板の硬さ測定の精度は、試料面の平坦さに大きく影響される。そこで、試料片の表面を電解研磨したのち、極少量の GE ワニスをアルコールで溶いたものを用いてガラス板の上に貼り付けて測定に用いた。これによってハステロイテープの僅かな反りの影響も避けることができる。測定は一つの試料片につき 3 箇所以上で行い、平均を取った。

電気抵抗の測定は、冷凍機を用いて、直流 4 端子法を行った。また、SEM を用いて、析出粒子の観察を行った。

3. 実験結果

熱処理を施す前の状態(これを初期状態と呼ぶ)で顕著に電気抵抗が高かったテープは、ビッカース硬さも高い値を示した。これを 850°C で熱処理すると、硬さは約 16% 減少した。(表 I) これは、抵抗の低い試料に比べて明らかに大きい。抵抗の高さは圧延度の大きさを示している。圧延度が高い状態では熱処理による歪のエネルギーが大きく、それが解放されると容易に再結晶化が起り、その結果硬さが低下したと考えられる。また、600°C で 30 分の熱処理を行なったのち、そのまま 850°C に上げて続けて加熱した場合には、同じ高抵抗の試料でも、硬さや抵抗の減少は起こらない。これは 600°C 近傍で始まる第二相粒子の析出に関係していると考えられる。

測定した結果をまとめて、硬さに対する電気抵抗率のグラフとして図 1 に示す。初期状態の違いがあるにもかかわらず、系列 1 と系列 2 は、同じような分布を示した。ばらつきはあるが、硬さが増加すると電気抵抗も大きくなる傾向を読み取ることが出来る。

同じ Ni 基合金である Ni-3at%W 配向基板の測定結果を図に△で示す(系列 3)。溶融化熱処理が施されていること、合金濃度が低い 2 元合金であることから、電気抵抗も硬さもハステロイ圧延材に比べてきわめて低いが、ハステロイの結果と合わせて見ると、統一して理解できるように見える。

4. まとめ

熱処理によって圧延組織が影響を受けるハステロイ基板の電気抵抗とビッカース硬さを測定し、両者の間に緩やかな相関があることを見出した。電子の散乱中心としては、結晶粒界や析出物が考えられ、熱処理によって再結晶化が起これば、粒界による散乱は減少して抵抗は低下し、同時に硬さも低下する。しかし、ハステロイでは同時に第二相粒子の析出が起り、これは抵抗と硬さを増加させるため、電気抵抗や硬さは、熱処理条件で単純にスケールすることはできない。

Table I. Vickers hardness of a Hastelloy substrate with high resistivity.

Annealing Temperature	HV/HV _{na}
No anneal	1
850	0.842654519
600-850	1.115208614

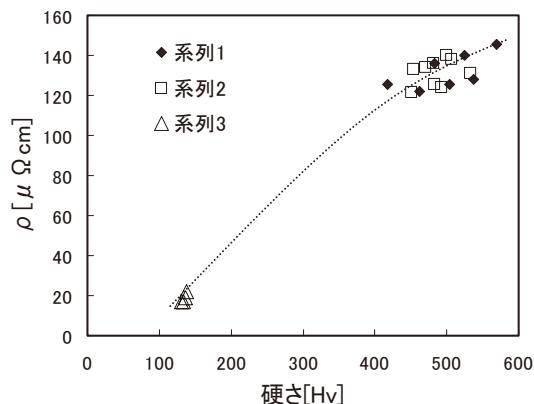


Fig. 1 Relationship of electrical resistivity and Vickers hardness.

スライスした超伝導バルク板のパルス着磁特性と厚さ方向の捕捉磁場分布

Trapped field profiles on the sliced superconducting bulks magnetized by pulsed field

三浦 崇, 古田 大樹, 藤代 博之, 内藤 智之 (岩手大工)、柳 陽介, 伊藤 佳孝 (イムラ材研)

MIURA Takashi, FURUTA Daiki, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)

YANAGI Yosuke, and ITO Yoshitaka (IMRA Material Co.Ltd.)

(E-mail:fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

一定温度で行う超伝導バルクの磁場中冷却着磁(FCM)においては、超伝導バルク内のピン止め力 F_p (又は臨界電流密度 J_c)の増加により捕捉磁場 B_t の向上が期待される。同様の効果はパルス着磁(PFM)においても期待できるが、ピン止め力の強いバルクでは、ピン止め損失による大きな発熱も考えられ、大きな温度上昇を伴うPFMではピン止め力と捕捉磁場の関係には不明な点が多い。これまで我々は、強いピン止め力を有する超伝導バルクを用いて PFMによる捕捉磁場の向上を検討してきたが、FCM により高い捕捉磁場を示すバルクにおいても、ピン止め力分布が不均一のため PFMでは必ずしも捕捉磁場が向上しないという結果を報告した[1]。ピン止め力の不均一は、面内では成長領域(GSR)と成長境界領域(GSB)の違いとして現れるが、厚さ方向のピン止め力の不均一は、微小試料を切り出して磁化測定を行う以外、捕捉磁場特性としてはこれまで調べられていないかった。本研究では、直径 45mm、厚さ 15mm の Gd 系超伝導バルクを厚さ方向に 3 枚にスライスし、厚さ 5mm の各スライス板のパルス着磁特性を調べた。面内の捕捉磁場分布特性が厚さ方向にどのように変化しているか、実験結果を報告する。

実験と検討

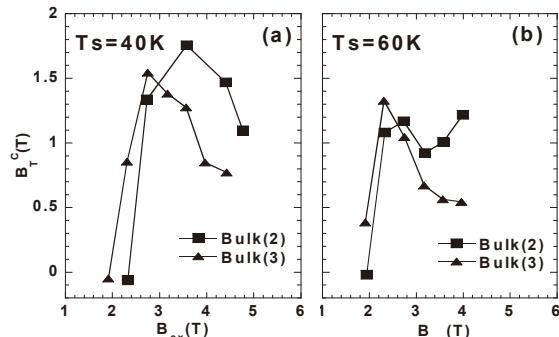
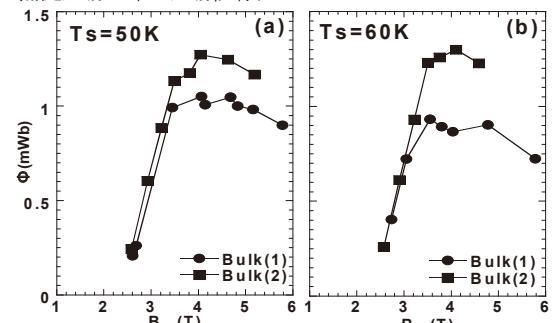
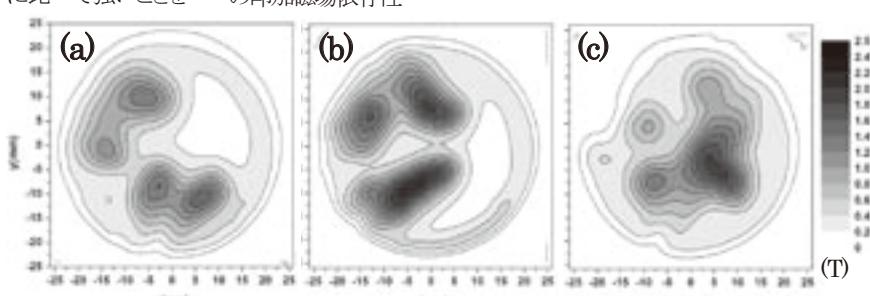
ISTEC で作製した直径 45mm、厚さ 15mm の Gd 系超伝導バルク $B_{T^c}^{FC}=1.8T$ (at 77K)を厚さ方向に 3 枚にスライスし、厚さ 5mm の板状バルクを上部から Bulk-1、Bulk-2、Bulk-3 とする。各板状バルクは、 $T_s=40\sim60K$ に冷却し、ソレノイド型パルスコイルを用いて、单一又は複数回の同一パルス磁場($B_{ex}=2.0\sim6.0$ T)を印加して着磁を行った。着磁後、バルク表面から 1 mm 上方の磁場分布を測定した。また、バルク表面中心の捕捉磁場をホールセンサにより、バルク表面での温度変化を熱電対により測定した。

図1に Bulk-2、Bulk-3 の中心での捕捉磁場の印加磁場依存性を初期温度 40K、及び 60K の場合について示す。いずれの温度においても、Bulk-2 の捕捉磁場の最大値が Bulk-3 より大きく、最大値を示す印加磁場が高磁場側にシフトしていることが分かる。これは、種結晶に近い Bulk-2 のピン止め力が、Bulk-3 に比べて強いことを示している。図2に Bulk-1、Bulk-2 の総磁束量の印加磁場依存性を初期温度 50K、及び 60K の場合について示す。総磁束量のピークは、Bulk-1、Bulk-2 ともに印加磁場 $B_{ex}=4T$ のときである。また、Bulk-1 よりも Bulk-2 での総磁束量が大きな値を示した。この結果からピン止め力は種結晶に近い Bulk-1 よりも Bulk-2 の方が強いと言える。図3に $T_s=60K$ における Bulk-1、

Bulk-2、Bulk-3 に比較的弱いパルス磁場 $B_{ex}=3.1$ Tを印加した時の、バルク表面から 1mm 上部での捕捉磁場分布をそれぞれ示す。Bulk-1 において磁束が捕捉された領域は、Bulk-2 においてもほぼ同様に捕捉されており、c 軸方向にピン止め点がつながっていることが分かる。しかし、Bulk-3 は全く異なる磁場分布を示している。Bulk-3 のほとんどが c-growth 領域と考えられ、ピン止め力が強い GSB が消失したためと考えている。当日は、低磁場、中磁場、高磁場を印加した時の捕捉磁場分布と c 軸方向におけるピン止め力の関係を含めて報告する。

参考文献

[1] 三浦他 第 80 回 2009 年度春季低温工学超電導学会[1A-p07]

図1 (a) $T_s=40K$, (b) $T_s=60K$ における Bulk-2、Bulk-3 の中心での捕捉磁場の印加磁場依存性図2 (a) $T_s=50K$, (b) $60K$ における Bulk-1, Bulk-2 の総磁束量の印加磁場依存性図3 $T_s=60K$, $B_{ex}=3.1T$ の時の (a) Bulk-1, (b) Bulk-2, (c) Bulk-3 の捕捉磁場分布

パルス着磁における超伝導バルク細孔内部の温度測定

Temperature measurements in small holes drilled in superconducting bulk during pulsed field magnetization

藤代博之, 古田大樹, 内藤智之 (岩手大工)
FUJISHIRO Hiroyuki, FURUTA Daiki, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.)
 (E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

強力な超伝導バルク磁石を実現する1つの方法がパルス着磁(PFM)法であるが、磁束線の急激な運動による大きな温度上昇のため、捕捉磁場が磁場中冷却(FCM)法に比べて小さいという欠点がある。そのため PFM の着磁メカニズムを解明し捕捉磁場を向上させるには、バルクの温度測定と解析が不可欠である。我々はこれまで、PFM 中のバルク表面の温度計測を行い、発熱量の推定や磁束の侵入に対応する局所的な温度上昇の解析を行ってきた。さらに3次元の熱伝導方程式を解いて、PFM 中のバルク全体の温度変化を推定した。図1に一例として初期温度40 KのYBCOバルクに3.83 Tのパルス磁場を印加した場合の、バルクの厚さ(z)方向の温度変化 $T(z, t)$ のシミュレーション結果を示す[1]。(a)はバルクと冷凍機冷却ステージの間に接触熱抵抗 R_c が存在しない場合、(b)は実験的に測定した表面温度の時間依存性を満足するように R_c を仮定した場合の結果である。(b)の結果から、パルス磁場印加でバルクの温度は断熱的に上昇していると推定されるが、バルク内部の z 方向の温度変化 $T(z, t)$ を測定していないため、類推の域を出なかった。本研究では、バルクに直径1 mmの細孔を複数箇所に開け、 $T(z, t)$ を測定したので報告する。

実験と検討

直径45 mm、厚さ15 mmのSm系超伝導バルクの周辺部及び中心に直径1 mmの貫通孔を開け、直径76 μ mのクロメル・コンスタンタン熱電対を接触させた。40 Kに冷却したバルクにパルス磁場を印加し、"set A"では周辺部の細孔内の z 方向で表面(T_1)、中央(T_2)、底面(T_3)の温度を、一方、"set B"ではバルク中心の細孔内の z 方向で表面(T_6)、中央(T_7)、底面(T_8)の温度の時間依存性を測定し、発熱現象と伝熱現象を考察した。

図2(a), (b)に、"set A"において4.8 Tのパルス磁場を1回(No.1)及び3回(No.3)印加した後の $T(z, t)$ の結果の z 依存性を示す。(a)において、 $t < 0.3$ sにおいて表面温度(T_1)がより高くなるため z 方向に温度勾配が生じるが、時間の経過と共に温度勾配が無くなることが分かる。(b)のNo.3パルスにおいても、温度上昇は小さいが、温度勾配が生じる傾向は同じであった。これらの結果は、パルス磁場印加直後に磁束がバルク周辺部からのみならず、バルク表面からも侵入するためと理解できる。

図3(a)に、"set B"において図2と同じ4.8 Tのパルス磁場を1回(No.1)印加した後の $T(z, t)$ の z 依存性を示す。図2(a)の周辺部の結果とは大きく異なり、中心の $T(z, t)$ は温度上昇が小さく、ほぼ断熱的に温度変化する。図3(b)には半径(r)方向の温度変化を示すが、パルス磁場印加直後($t < 1$ s)に磁束がバルク周辺部から侵入することで温度上昇が大きいが、 ab 面内の熱拡散率が c 軸方向よりも大きいため、急激に温度は低下することが分かる。このように、1 s以下のパルス磁場印加直後にはバルク表面からの磁束の侵入が大きいことが明らかになった。

参考文献

- [1] H. Fujishiro *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) S540.

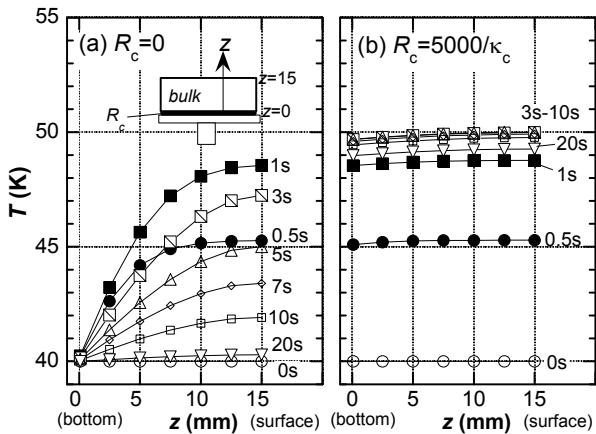


Fig. 1. Calculated $T(z, t)$ as a function of the distance z from the bottom of the YBCO bulk after the pulse field application [1]. (a) is for the case without contact thermal resistance $R_c=0$ and (b) is for the case with $R_c=5000/\kappa_c$ (optimum condition).

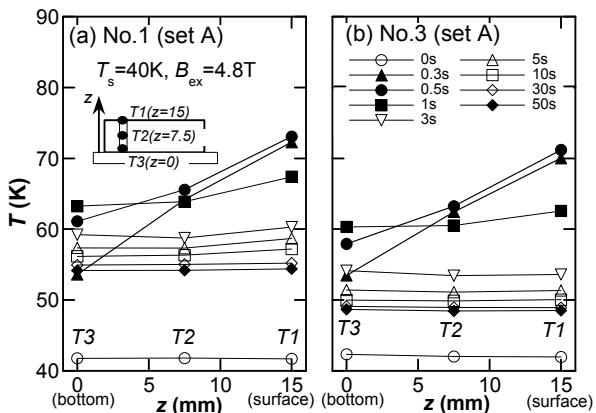


Fig. 2. Time evolution of temperatures ($T_1(t) - T_3(t)$) for "set A" as a function of the distance z after applying pulsed field of $B_{ex}=4.8$ T of the (a) No. 1 and (b) No. 3 pulse.

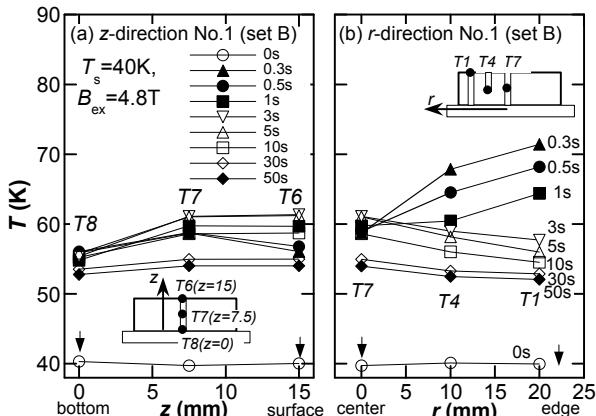


Fig. 3. Time evolution of temperatures for "set B" after applying pulsed field of $B_{ex}=4.8$ T of the No. 1 pulse along the (a) z direction using $T_6(t) - T_8(t)$ and (b) r direction using $T_1(t) - T_7(t)$.

DI-BSCCO 線材を用いて作製されたダブルパンケーキコイルの異方的熱輸送特性

Anisotropic thermal transport in double-pancake coil wound with DI-BSCCO tapes

内藤 智之, 藤代 博之(岩手大); 山田 雄一(住友電工)

NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.); YAMADA Yuichi (SEI)

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

1. はじめに

DI-BSCCOテープ(銀合金シースBi2223超伝導テープ)は、77 K、自己磁場下で200Aを超える臨界電流を有するなど従来のBi2223超伝導テープに比べて高い性能を持つことが知られている[1]。一般に超伝導線材をコイルや電流リードとして用いる場合、熱伝導率から熱侵入量を見積もることが設計段階で不可欠である。そこで、我々は種々のDI-BSCCOテープ単体や複数枚のDI-BSCCOテープをはんだでバンドルしたサンプルの熱伝導率を測定してきた[2]。バンドルサンプルの熱伝導率が各構成部材の熱伝導率を用いた熱等価回路から見積もることが可能であることを明らかにした。今回は、DI-BSCCOテープを用いて製作されたダブルパンケーキコイルの異方的熱輸送特性を測定した結果について報告する。

2. 実験方法

ダブルパンケーキコイルはDI-BSCCOテープのタイプH(標準タイプ)を用いて製作された。Fig.1に示すように、半径方向(*r*-sample)および積層方向(*z*-sample)に沿ってそれぞれ直方体形状に切り出し、測定サンプルとした。熱伝導率は定常熱流法により6-250 Kの温度範囲で測定した。セッティングの概略図をFig.1に示す。*r*-sampleはDI-BSCCOテープと絶縁層(カプトンテープ)が交互に積層した構造を有し、熱流はDI-BSCCOテープの厚さ方向(Bi2223の*c*軸方向)に印加された。一方、*z*-sampleはカプトンテープで絶縁されたDI-BSCCOテープのバンドルがエポキシ樹脂を介して2つ積層された構造を有する。バンドル部分の熱流はテープ面、すなわちBi2223の*ab*面に対して平行に印加された。

3. 実験結果および考察

Fig.2に*r*-sampleと*z*-sampleの熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。両者の $\kappa(T)$ は温度の低下とともに単調に減少した。絶対値は、タイプHテープ面(Bi2223の*ab*面)に熱流を印加したときの熱伝導率[2]に比べて両者ともに2~3桁程度小さい。77 Kでの絶対値は、タイプHテープは230 Wm⁻¹K⁻¹、*r*-sampleは0.6 Wm⁻¹K⁻¹、*z*-sampleは2 Wm⁻¹K⁻¹程度であった。カプトンテープやエポキシ樹脂の熱伝導率の絶対値は、今回測定したサンプルと同程度(77 Kで0.2~0.6 Wm⁻¹K⁻¹)である[3]。従って、これら低熱伝導率の絶縁材料によってコイルサンプルの熱伝導率が抑えられていることは明らかである。講演では、各構成部材の熱伝導率を用いた熱等価回路からコイルサンプルの熱伝導機構を議論する予定である。

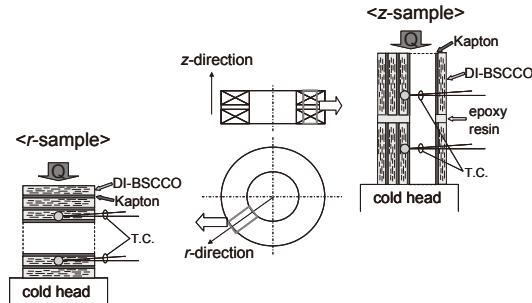


Fig.1 (Center) Schematic view of the double-pancake coil. (Left and right) Experimental setup for the thermal conductivity measurement along the *r*- and *z*-direction.

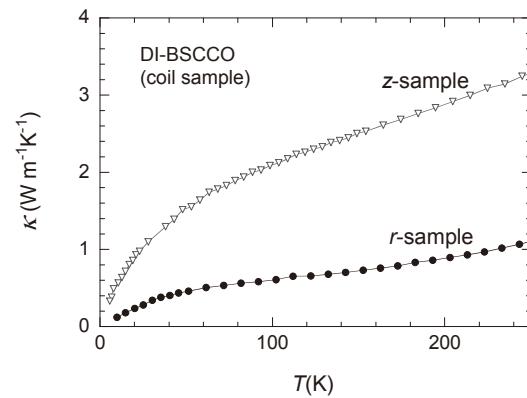


Fig.2 Temperature dependence of the thermal conductivity for the *r*- and *z*-samples.

参考文献

1. N. Ayai *et al.*: Physica C 468 (2008) 1747.
2. T. Naito *et al.*: Cryogenics 49 (2009) 429.; IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 3034.
3. Y. Iwasa: *Case Studies in Superconducting Magnets* (2nd Ed.) (Springer Science+Business Media, LLC) (2009) 633.

フィラメントツイストが Bi2223 線材の特性に及ぼす影響

Effect of filament twisting on the properties of Bi2223 tapes

中村 雄一, 藤原 吉一, 稲田 亮史, 太田 昭男(豊橋技科大)
 NAKAMURA Yuichi, FUJIWARA Yoshikazu, INADA Ryoji, Oota Akio (Toyohashi University of Technology)
 E-mail: nakamura@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 超電導テープを交流機器へ応用する際に、線材内で発生する交流損失の大幅な低減が求められている。外部変動磁界による磁化損失低減にはフィラメント間の電磁結合の抑制が必要であり、その方法としてフィラメントツイストの導入がある。しかしフィラメントにツイスト加工を施すことにより、 J_c 低下が生じやすいことが課題である。本実験では、ツイスト時の J_c 低下の要因を探るため、種々の直径の線材にツイストを施し、ツイストが線材の特性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験方法

本実験ではシース材としてAg-Cu合金を用いてPIT法によりテープ線材を作製した。この際、ツイスト時の線径の影響を見るため、直径が 2.14, 1.63, 1.15mm である3種類の各丸線に対し、圧延前のツイストピッチが 2, 5, 10mm となるようにツイストしたものとツイストしていないものをそれぞれ作製した。ツイストした線材は最終テープ厚が約 0.25mm となるように圧延、熱処理を施した。完成したテープの臨界電流 I_c は直流 4 端子法、77K、電界基準 1 μ V/cm にて測定した。

3. 結果及び考察

まず完成テープのツイストピッチは、初期ピッチの 2~2.5 倍であり、初期直径が大きいほど長くなる傾向にあった。Fig.1 に得られた線材のツイストピッチと J_c の関係を示す。図のようにツイストしない線では 2×10^4 (A/cm²) 程度あった J_c は、ツイストピッチが 20mm 程度まではほとんど低下は見られなかつたものの、それよりツイストピッチが短くなり 15mm 以下で低下が激しくなり、今回作製した一番短いツイストピッチが約 5mm において、 J_c 値はツイスト無しに比べ約 6~7 割となつた。一方、 J_c の低下の仕方にツイスト時の線径はほとんど依存しなかつた。

この J_c 低下の要因を調べるため、シース材をエッチングにより除去し、テープ幅広面における長手方向に対するフィラメントの角度(θ)を評価した。得られた角度に対するツイストなし線材の J_c ($= J_{c0}$) で規格化した各線材の J_c の様子を Fig. 2 に示す。図のように、角度が大きくなるにつれ、 J_c の低下率が徐々に大きくなることがわかる。ここでツイスト線ではフィラメントが長手方向に対し角度を有し螺旋状に存在するため、実際にフィラメントを流れる電流も螺旋状に流れる。一方、線材の J_c 評価の際には、測定した I_c を長手方向に垂直な断面積 S で割つてある。いま Fig.3 のように各フィラメントに沿った臨界電流密度を J_c' とすれば、それに垂直な断面積 S' は $S' = S \cdot \cos \theta$ となり、 $I_c = J_c' S' = J_c' S \cdot \cos \theta$ となる。その結果、実際にフィラメントの方向に流れている J_c' が一定でも、テープ長手方向の J_c は $J_c = I_c / S = J_c' \cos \theta$ となり、 $\cos \theta$ に比例して低下する。実際、Fig.2 に示したように、得られた J_c の角度依存性は $\cos \theta$ の線が最大と

なるような低下を示している。このことからツイスト線においては、フィラメントがテープ長手方向に対し角度を有することが J_c 低下の重要な要因の 1 つであると考えられる。

4. まとめ

ツイスト線における J_c 低下の要因を調べるため、種々の直径の丸線にツイストを施し、得られたテープ線の特性を評価した。その結果、フィラメントがテープ長手方向に対し幾何学的に角度を有することが、 J_c 低下の原因となっている可能性があることがわかつた。

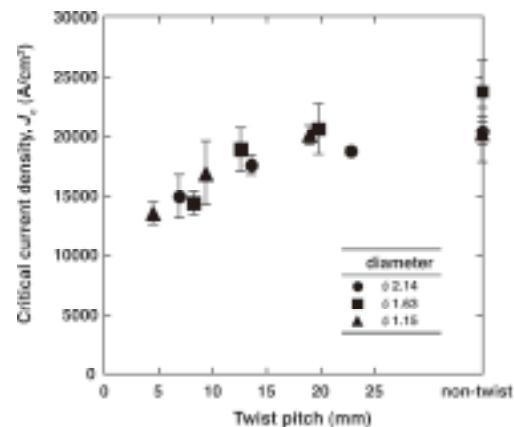


Fig.1 Effects of twist pitch and size of wire on the J_c value.

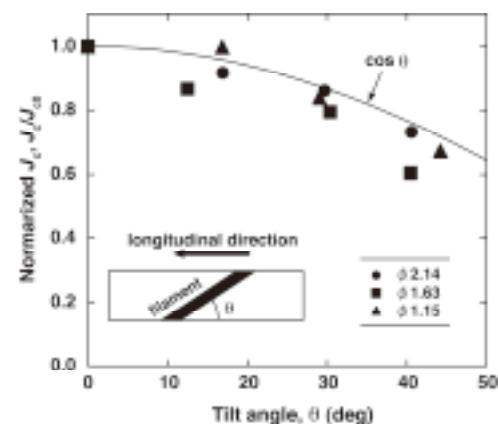


Fig.2 Effect of tilt angle of filament on the reduction of J_c .

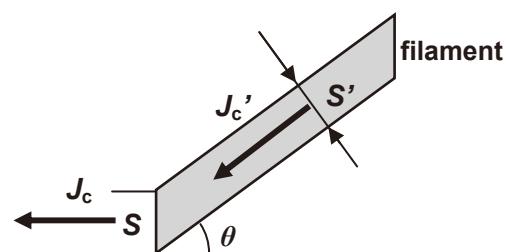


Fig.3 Schematic image of relation about filament angle and J_c

ホール素子磁気顕微鏡による Ca_2CuO_3 バリア導入 Bi2223 線材の残留磁界分布測定

Measurements of remanent field distributions for Bi2223 tapes with Ca_2CuO_3 barriers using scanning Hall-probe magnetic microscopy

馬場 翔平, 稲田 亮史, 中村 雄一, 太田 昭男(豊橋技術科学大学); 坂元 周作(木更津工業高等専門学校); 李 成山, 張 平祥(西北有色金属研究院)

BABA Shohei, INADA Ryoji, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT); SAKAMOTO Shusaku (KNCT);

LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)

E-mail: s-baba@super.eee.tut.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 線材の低交流損失化には、フィラメント間への高抵抗バリア材の導入が必要となる⁽¹⁾。バリア線材は極めて複雑な構造を有するため、線材長手方向の通電特性および線材構造の均質性の低下が懸念される。したがって、これらの特性を非破壊かつ簡便な方法で評価することが、品質保証および更なる特性向上に向けて重要である。本研究では、バリア線材幅広面上の残留磁界分布を走査ホール素子顕微(Scanning Hall-probe Microscopy, SHM)⁽²⁾により測定し、通電特性の分布状況との比較によりバリア線材の均質性の評価を試みた。

2. 実験方法

SHM は、試料表面上で 2 次元的にホール素子を走査させながら磁界測定を行うことで、試料表面の磁界分布を可視化することができる⁽²⁾。装置に使用したホール素子の感磁面積は $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 、測定時の試料とホール素子の間隔(リフトオフ)は約 0.5mm で、試料面に対して法線方向の磁界成分を検出する。

フィラメント間に導入するバリア材には、 Ca_2CuO_3 (加工性改善のため Bi2212 粉末を少量混合)を用い、19 芯線材(非ツイスト)を Powder-in-tube (PIT) 法により作製した。比較のために、非バリア 19 芯線材も同じ方法で作製した。各試料の諸元を Table 1 に示す。試料をゼロ磁界下で 77K に冷却した後、移動型磁石を用いて試料全域に 0.1T の垂直磁界を印加した。磁界除去後、試料面上の残留磁界分布を SHM により測定した。更に、試料長手方向の臨界電流 I_c 分布を 10mm 間隔で接触型電圧端子を用いて測定し、残留磁界分布との比較を行った。

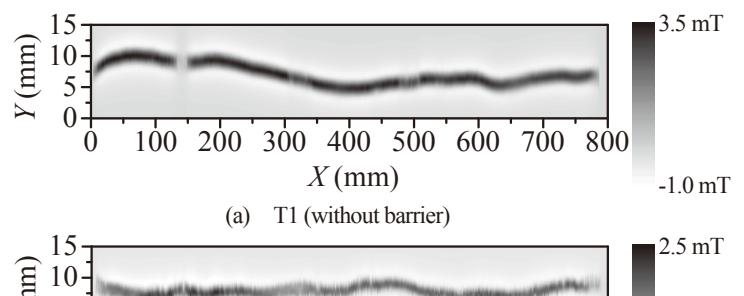
3. 結果と考察

Fig. 1 に、SHM で測定した残留磁界(B_{rz})の 2 次元分布を示す。図において、 X 方向は線材長手方向、 Y 方向は線材幅方向に各々対応している(Y 軸のスケールは実際の 10 倍に拡大)。 Y 方向で見た場合、 B_{rz} は試料中心部近傍で最大値を示し、試料端部付近で最少となる特徴的な振る舞いが、非バリア線材 T1 では線材長手方向の大部分に渡って得られたが、焼結時にシース材に膨らみが生じた箇所において B_{rz} が大きく低下していることが確認された。一方、バリア線材 T2 では線材長手方向における B_{rz} の変動が大きく、 B_{rz} の大きさも T1 の良好な特性を示す区間と比べて 4~5 割程度低下しており、T1 に比べ通電特性(I_c)が低下している可能性が示唆される。

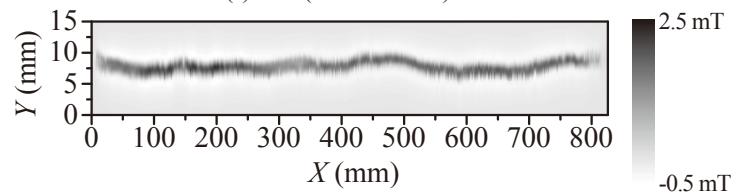
Fig. 2 は、線材幅(X)方向における残留磁界 B_{rz} の最大値 $B_{rz\text{-max}}$ と 10mm 間隔で測定した I_c の線材長手方向における分布状況を比較したものである。非バリア線材 T1 では、均一な B_{rz} が得られた区間で I_c もほぼ均一な値を示した。しかし、焼結時に膨らみが生じた箇所では $B_{rz\text{-max}}$ と I_c 値が大きく低下していることが確認された。一方、バリア線材 T2 は $B_{rz\text{-max}}$ の分布と同様に、線材長手方向における I_c 値の変動が T1 よりも顕著であった。更に、 I_c 値そのものも T1 に比べて 4 割程度低いことが確認された。バリア導入により加工性が低下したことによることが起因して、T2 のエッジ近傍の外層シースにおいて、微小な亀裂が $5\sim10\text{ mm}$ 間隔で断続的に発生していることを確認しており、これが通電特性およびその均質性の低下を引き起こした一因であると推測される。

Table 1. Specification of Bi2223 tapes with or without barriers.

Sample name	T1	T2
Barriers	None	$\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi}2212$
Tape length	790mm	810mm
No. of filaments	19	19
Tape cross section	$3.60 \times 0.25\text{mm}^2$	$3.76 \times 0.24\text{ mm}^2$
Fraction of filaments	23%	24 %

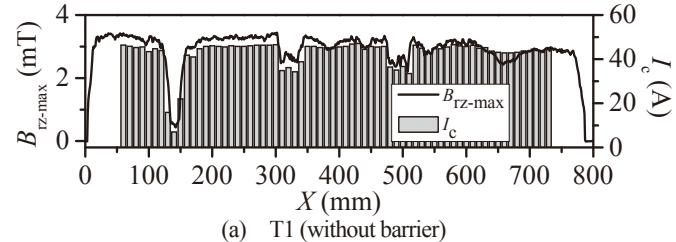


(a) T1 (without barrier)

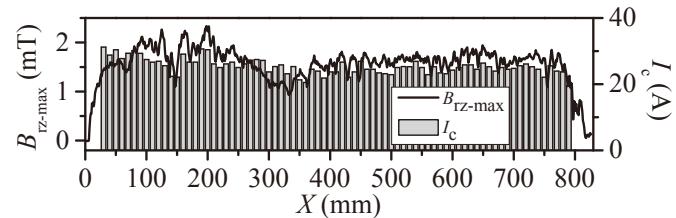


(b) T2 (with $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi}2212$ barrier)

Fig. 1. 2D contour maps of remanent magnetic field B_{rz} on the broad face of tapes with or without barriers.



(a) T1 (without barrier)



(b) T2 (with $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi}2212$ barrier)

Fig. 2. Longitudinal distributions of both I_c and $B_{rz\text{-max}}$ values for tapes with or without barriers.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No. 20686020)、(財)東電記念科学技術研究所研究助成、(財)中部電力基礎技術研究所研究助成(R-20302)および豊橋技科大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) R. Inada, et al.: TEION KOGAKU 43 (2008) pp.252-259.
- (2) A. Oota, et al.: Rev. Sci. Instrum. Vol. 70 (1999) 184-186.

加圧焼成法によって作製された 200A 級 Bi-2223 線材の更なる高臨界電流密度化に向けた検討: 線材内電流分布と超伝導フィラメントの電流輸送についての考察

Consideration on the further increase of critical current in the 200A class Bi-2223 tape fabricated by the controlled over pressure process: Analysis of the internal current distribution in the tape

本田 貴裕, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九州大学); 綾井 直樹, 菊地 昌志, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工)

HONDA Yoshihiro, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

AYAI Naoki, KIKUCHI Masashi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (SEI)

E-mail: y_honda@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

現在、加圧焼成法により作製された Bi-2223 線材の臨界電流値は 200 A を超えるレベルに達している[1]。しかし、その電流制限因子については未だ充分に解明されていない。

本研究では、更なる臨界電流値向上の指針を明らかとするとため、走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いて、加圧焼成法により作製された Bi-2223 線材の電流分布を可視化し、線材内の超伝導フィラメントにおける電流輸送特性との関係について調べた。

2. 実験

伝導冷却によって試料を冷却し、一定電流を印加した状態で、試料近傍の自己磁界分布を微小ホール素子を走査する事によって、磁気像を測定する。その結果を基に、ビオ・サバールの逆変換によって、試料面上のシート電流密度を得た。また、試料電流-電圧を四端子法によってモニタし、測定条件下における臨界電流値 J_c を評価した。

本実験では、幅 4.16 mm、厚さ 0.234 mm を有する加圧焼成法により作製された Bi-2223 線材の電流分布について調べた。また、この Bi-2223 線材は 77 K 自己磁界中で 199.3 A の臨界電流値を有している。

3. 結果と考察

測定試料に 10, 50, 100 A の電流を印加した際のシート電流分布を可視化した。100 A 印加時に丁度臨界電流値に達しており、別に行つた J_c の温度依存性の結果から、磁気顕微鏡測定時の温度は 87 K 程度と考えられる。

10, 50, 100 A 通電時における自己磁界分布の一次元分布を Fig. 1 (a) に、シート電流分布の一次元分布を Fig. 1 (b) に示す。Fig. 1 (b) より、10, 50, 100 A の一次元分布を比較すると、100 A の電流分布の端部の輪郭と 10, 50 A の電流分布の端部の輪郭が一致している。これは端部の臨界電流値は、電流増加時の自己磁界分布の影響はあまり受けていないことを示している。また、線材中央部において 40 kA/m~45 kA/m の電流が流れている。これは、77 K 換算すると、80 kA/m~90 kA/m の電流値となる。すなわち、線材中央部では平均の電流密度に比べ 50 % 程度高い J_c 値が実現できている事が分かる。100 A 通電時の線材長手方向の電流分布を Fig. 2 に示す。線材長手方向に対し、均一に電流が流れていることがわかる。線材幅方向の J_c 分布の均一性が改善出来れば、更なる高 J_c 化が可能になると考えられる。

J_c 分布とフィラメント分布の関係、自己磁界の影響等についてでは当日報告する。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会の科研費(20360143)の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. N. Ayai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) pp.3075-3078
2. Kikuchi et al.: presented at this conference, 1A-a01

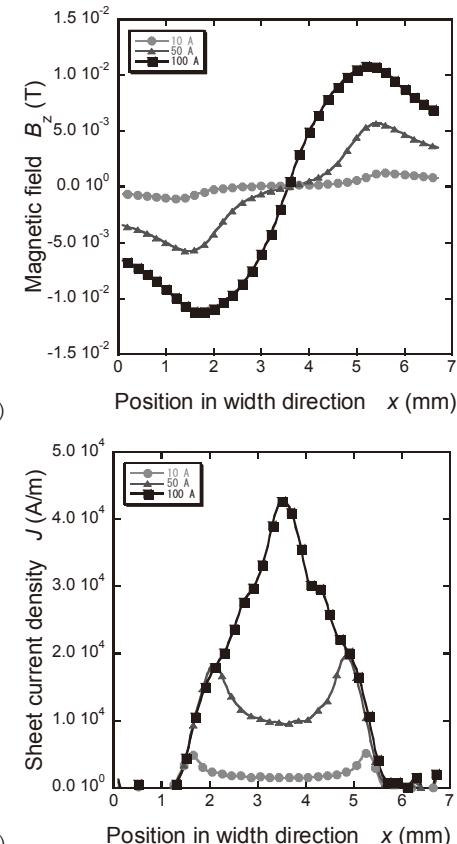


Fig. 1 (a) 1D magnetic field distributions and (b) sheet current distributions with bias current of 10, 50 and 100 A.

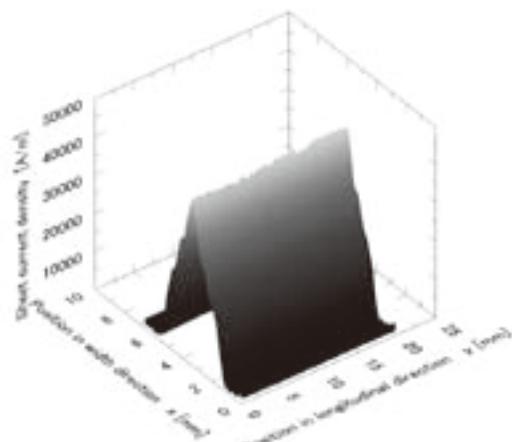


Fig. 2 2D sheet current distribution in a Bi-2223 tape fabricated by the controlled over pressure process with bias current of 100 A.

第三高調波電圧誘導法を用いた高温超伝導体の臨界電流密度の非破壊測定

Nondestructive estimation of critical current density of high- T_c superconductors by the third harmonic voltage method

足立 明隆, 沖田 健佑, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎(熊本大学); 土井 俊哉(鹿児島大学)
ADACHI Akitaka, OKITA Kensuke, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro(Kumamoto Univ.) ;
 DOI Toshiya (Kagoshima Univ.)
 E-mail: adachi@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導薄膜の臨界電流密度 J_c を測定する方法として、第三高調波電圧誘導法がある。この方法は微小なコイルに交流電流を流すことで局所的な測定が可能である。また、試料の加工や電極の取り付けが不要であること、誘導電圧から評価するため非破壊かつ非接触で測定ができるといった利点がある。さらに、周波数を変えることで、測定する電界領域を変更できるという特徴もある。

本報告では、第三高調波電圧誘導法による J_c の測定値と四端子法による測定値を比較した結果を述べ、永久磁石による 0.5T 程度までの磁場を印加した場合の測定について報告する。

2. 実験

Fig. 1 に今回用いた測定回路を示す。信号発生器から交流電流を流し、駆動・ピックアップコイルから誘導される第三高調波電圧をロックインアンプで測定した。コイルに流れる電流をモニタするために、シャント抵抗にかかる電圧をデジタルマルチメータで測定した。実験に使用した駆動・ピックアップコイルは、線径 50 μm のエナメル導線を 400 回巻いたものであり、内径 1mm、外径 3.68mm、高さ 1mm である。電流密度と電解を算出する際に用いたコイル定数は 126 mm^{-1} であった。

測定した試料は、KrF エキシマレーザを用いた PLD 法により SrTiO₃(100)基板上に作製した YBCO 薄膜である。膜厚は 245nm であった。YBCO 薄膜を取り付けたサンプルホルダーを固定し、試料とコイルが直接触れないように、かつ薄膜とコイル間の距離が一定になるよう YBCO 薄膜の上に 50 μm の厚さのカプトンシートを置いた。また、試料の下に永久磁石を置き、その距離を変化させることにより、磁場を変化させた。

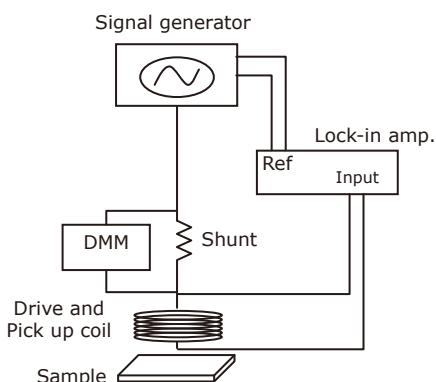


Fig. 1 Electrical circuit of the third harmonic voltage method.

3. 実験結果

Fig. 2 に、磁場を印加しない場合の 200Hz~10kHz の 6 種類の周波数で測定した測定結果を示す。横軸はコイルに流した電流の実効値を、縦軸は第三高調波電圧を周波数と電流で割った値を示している。周波数を増加するにつれて、立ち上がるコイル電流が増加していることがわかる。

ノイズレベルを考慮した閾値インダクタンス L_{th} を 5 μH とし、理論式[1]から電界 E と電流密度 J を算出した E - J 特性を得た。また、測定した部位をフォトリソグラフィ技術によってブリッジ状に加工し、四端子法により E - J 特性を測定した。その結果を Fig. 3 に示す。それぞれの測定において電界領域は違うものの、両方の E - J 特性は、なめらかにつながっている。このように第三高調波電圧誘導法を用いて、四端子法より低い電界領域の E - J 特性が測定できることがわかる。

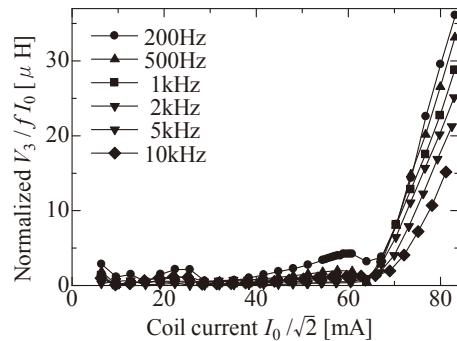


Fig. 3 Third harmonic inductance V_3/fI_0 vs. coil current $I_0/\sqrt{2}$ curves.

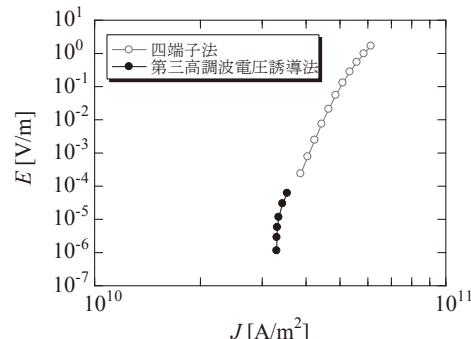


Fig. 4 Electrical field E vs. current density J curves by the third harmonic voltage method and the four probe method.

4. まとめ

本研究では、第三高調波電圧誘導法による J_c の評価を行った。その結果、四端子法による測定結果と同様の結果が得られた。当日は、本測定系による磁場中の臨界電流密度の測定について検討した結果を報告する。

謝辞

駆動・ピックアップコイルをご提供して頂いた、独立行政法人産業技術総合研究所の山崎裕文博士に心より御礼申し上げます。

参考文献

1. H. Yamasaki, et al. : Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3275.

TFA-MOD 法による YGdBCO 線材の臨界電流特性におけるナノ粒子の影響 (2) - 磁界角度依存性の評価 -

Influence of nanoparticles for critical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor(2) -Evaluation of field angle dependence-

松谷文也, 高橋祐治, 木内勝, 小田部莊司, 松下照男(九工大);
三浦正志, 和泉輝郎, 塩原 融(国際超電導産業技術研究センター)
MATSUTANI Fumiya, TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
MIURA Masashi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail: matutani@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO線材(RE:希土類)は、高温度、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから応用機器への利用が有望視されている。実用化に向けての臨界電流密度 J_c の更なる特性改善が求められており、特に、臨界電流密度が高く、磁界角度に対する異方性の小さな線材が要求される。これまでの研究で、人工ピン(APC)であるBZOナノ粒子が導入されたYGdBCO線材について臨界電流特性の評価を行い、低・中磁界領域での J_c 特性向上にBZOナノ粒子が有効であることが明らかとなった[1]。本研究では、ナノ粒子が導入される前と後のコート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性を直流四端子法により測定を行い、このナノ粒子の臨界電流密度の異方性への影響を詳細に調べた。

2. 実験

測定した試料は、超電導膜厚 $0.5\mu\text{m}$ のTFA-MOD法によって作製されたBZOナノ粒子あり(#1)となし(#2)の2つのYGdBCO(Y:Gd=0.77:0.23)線材である。Table1にそれらの諸元を示す。直流四端子法による電流電圧測定を行うために、線材を幅 $w=50\mu\text{m}$ 、長さ $l=0.8\text{mm}$ のマイクロブリッジ形状に加工した。磁界は0-3Tの範囲で印加し、 c 軸方向からの角度を θ とした。 J_c は $E_c=4.5 \times 10^{-3} \text{ V/m}$ の電界基準で決定した。尚、温度誤差は $\pm 0.3 \text{ K}$ であった。

3. 結果及び検討

Fig.1に77Kの J_c - θ 特性を示す。 ab 面磁界方向で一般的な異方性に伴うピークが見られるが、BZOナノ粒子の導入により J_c 値が全体的に向上しており、1Tにおいてはかなりフラットな特性になって異方性が改善されている。これは等方的なピンであるナノ粒子の導入によるもので、 $\theta=90^\circ$ 近傍以外の角度領域では、このナノ粒子が有効に作用することがわかる。ピンが導入されていない試料は $\theta=90^\circ$ において、 ab 面に平行な積層欠陥がピンとして効いていると考えられるが、#1における J_c の劣化は、積層欠陥成長がBZOナノ粒子導入によって抑制されていることが原因として考えられる。次にFig.2に、77Kの E - J 特性の $E=10^{-3} - 10^{-2} \text{ V/m}$ より評価した、 n 値の磁界依存性について示す。 $\theta=0^\circ$ において、試料間において大きな差は見られないが、 $\theta=90^\circ$ 方向において#2の方が n 値が2倍近く高い値を示している。これも同様に、BZOナノ粒子導入における積層欠陥の影響によるものであると考えられる。これらの結果を磁束クリープ・フローモデルを用いた解析結果と比較し、その影響を調べた。詳細な議論は当日行う。

Table 1: Specification of specimens

specimen	thickness d (μm)	T_c (K)	process
#1	0.5	90.2	MOD+BZO
#2	0.5	90.0	MOD

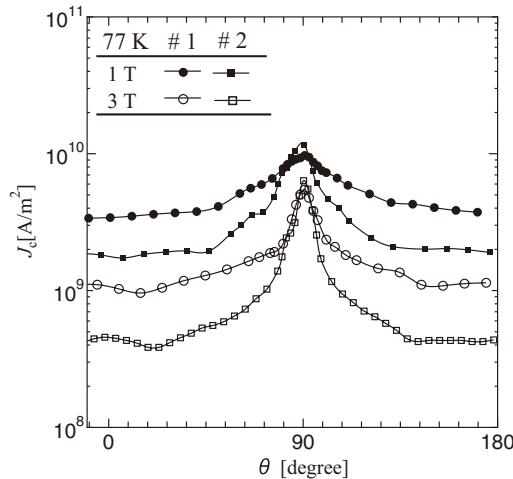


Fig.1: J_c - θ properties at 77 K for specimens #1 and #2. The lines are guide for eye.

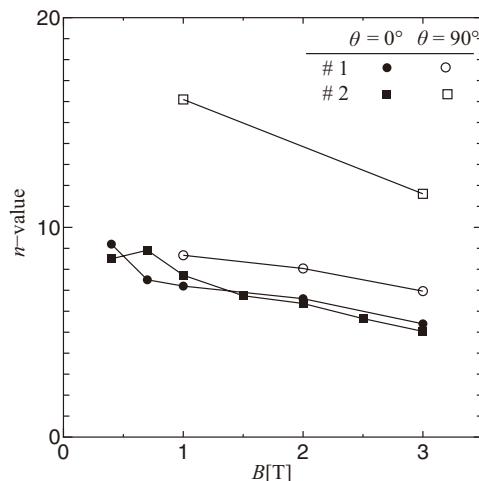


Fig.2: Magnetic field dependence of the n -value for $\theta=0^\circ$ and $\theta=90^\circ$ at 77 K. The lines are guide for eye.

謝辞 本研究は、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

4. 参考文献

- [1] 松谷ら:2009年度春季低温工学超電導学会予稿集1P-p13

CVD 法による YGdBCO 線材の臨界電流特性の超電導層厚依存性

Superconducting layer thickness dependence of critical current property
in CVD proccesed YGdBCO coated conductors.

高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大);

式町 浩二, 渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力);

TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. Tech.);

SHIKIMACHI Koji, WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CEPCO);

E-mail: takahasi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

YBCO 線材は高磁界中で優れた臨界電流密度(J_c)特性を示す事から、SMES など様々な応用が期待されている。これまで特に優れた特性を示す線材の作製法として IBAD/PLD 法が用いられたが、実用化の観点から他の作製法が試みられている。その中でも IBAD/CVD 法は製造コストが安価であり、最近の特性向上から有望視されている。また、近年の研究から、Y の一部を Gd で置換することで臨界温度(T_c)が高くなることから、YGdBCO コート線材の開発が進められており[1]、YBCO コート線材よりも高い J_c を得られることが期待されている。以前の我々の研究で、IBAD/CVD 法で作製された線材において、超電導層厚(d)に依存して臨界電流特性が異なることを明らかにしてきた[2]。しかし、以前の評価してきた線材では、 d が大きくなると J_c が減少しており、超電導層厚が臨界電流特性に与える影響の評価は容易ではなかった。

そこで、本研究では厚膜化による J_c 劣化の小さな試料を用いることで、超電導層厚と臨界電流特性の関係を今まで以上に明らかにする。

2. 実験

試料は IBAD/CVD 法により作製された $Y_{0.7}Gd_{0.3}BCO$ 線材であり、超電導層厚が $0.33 - 1.43 \mu m$ の長尺線材から切り出したもので、それぞれ#1 - #6 とした。試料の d 及び T_c を Table 1 に示す。

測定は SQUID 磁力計を用いた直流磁化測定から J_c - B 特性を、磁化緩和率測定から E - J 特性を評価した。また、不可逆磁界 B_i は $J_c=1 \times 10^8 A/m^2$ となる磁界で定義した。なお、磁界はテープの広い面に対して垂直に加えた。

Table. 1 Specification of specimens.

specimen	#1	#2	#3	#4	#5	#6
d (μm)	0.33	0.55	0.77	0.99	1.21	1.43
T_c (K)	89.3	89.6	90.9	91.3	90.7	89.7

3. 結果及び検討

Fig. 1 に $20 - 77.3$ K の温度領域における 0.1 T での J_c の超電導層厚依存性を示す。従来の YBCO 線材では、 d が大きくなると超電導組織の劣化が原因で J_c が減少していた[2]。一方、YGdBCO 線材では、 d が増加しても J_c は減少しておらず、逆に d が大きくなると若干ではあるが、 J_c が大きな値を示している。以上のことより、超電導組織の劣化を伴わずに超電導層の厚膜化が実現できていると思われる。

Fig. 2 に 77.3 K における J_c の磁界依存性を示す。 d が小さな試料において低磁場から J_c が大きく減少しており、 d の大きな試料ほど高磁界まで大きな J_c を示す結果となった。従来の YBCO 線材において、低温や低磁場領域では d が小さな試料ほど高い J_c を示し、高温や高磁場では磁束クリープの影響が顕著となることから d の大きな試料が高い J_c を示していた。しかし、 77.3 K における不可逆磁界 B_i は d に依存せず 1.5 T 付近のほぼ同じ値を示していた[2]。一方 YGdBCO 線材では、低温や低磁場領域から d の大きな試料が若干ではあるが大きな J_c を示し、高温や高磁場領域で d の増加によって J_c が顕著に大きくなる結果となった。また、 77.3 K での B_i は d が大きい

試料ほど大きい値を示しており、その値も 3 T 付近と従来の YBCO 線材と比較して大きいものであり、この結果からも超電導組織の劣化無しで厚膜化できていることが確認できる。

超伝導磁束クリープ・フローモデルを用いた解析、及び詳細な議論は当日行う。

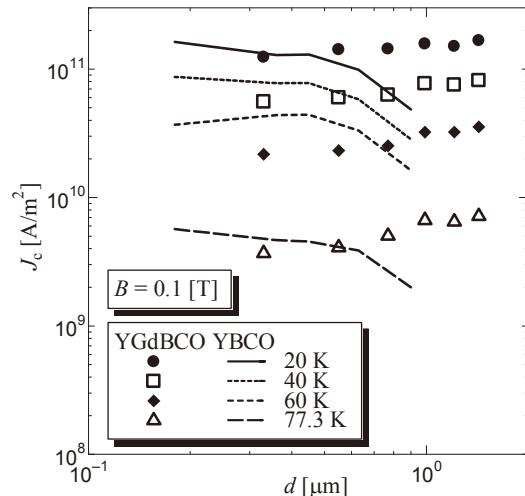


Fig. 1: Magnetization critical current density at 0.1 T vs. superconducting layer thickness in the temperature region of $20 - 77.3$ K. The lines show CVD processed YBCO tape²⁾.

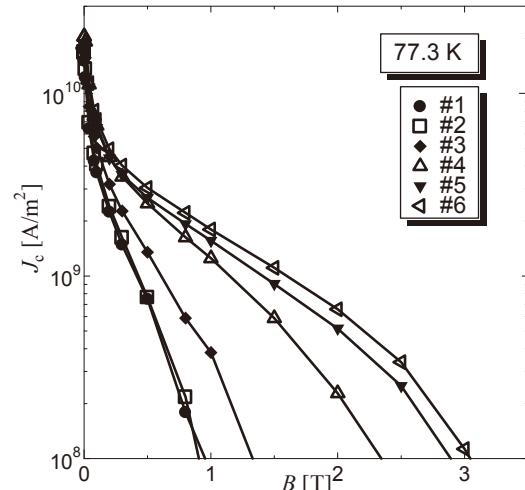


Fig. 2: Magnetic field dependence of Magnetization critical current density at 77.3 K. The lines are guide for eye.

謝辞 本研究は、NEDOの委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

1. A. Kaneko *et al.*, Physica C 426-431.949-953(2005)
2. 高橋ら: 第 80 回低温工学・超電導学会講演概要集
1P-p14 (2009)

YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験

Degradation of YBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive

新井 道生, 百足 弘史, 河野 秀太郎, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士 (早稲田大学);
斎藤 隆 (フジクラ); 青木 祐治 (昭和電線); 八木 正史 (古河電工); 藤原 昇 (ISTEC-SRL)

ARAI Michio, MOMOTARI Hiroshi, KONO Hidetaro, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
SAITO Takashi (Fujikura); AOKI Yuji (SWCC Showa Holdings); YAGI Masashi (Furukawa Electric); FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導線材の電力応用において、突発的な短絡電流の流入により温度が急上昇し、線材の特性が劣化することが考えられる。そのため線材の特性劣化や焼損しない限界の温度を設計の指標・基準の1つとして考える必要がある。そこで我々は劣化開始時の最高到達温度に注目し、過電流パルス通電による特性劣化試験を行ってきた[1][2][3]。

今回は、NEDO の「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」で計画されている 275kV 級の YBCO 超電導モデルケーブルに用いられる予定の IBAD/TFA-MOD 線材で、安定化層の銅層が銅メッキされている線材を用いて過電流パルス通電による特性劣化試験を行い、劣化開始時の最高到達温度を測定したので報告する。

2. 実験方法

実験に用いた線材と配線図を Fig.1 に示し、線材の諸元を Table.1 に示す(線材は2本用意した。Sample 1,2)。実験で用いた線材は IBAD/TFA-MOD 法で作製されたもので、安定化層として銀層と両面に銅メッキされている。

実験は GM 冷凍機による伝導冷却方式を採用し、線材両端から冷却し、運転温度は 77 K で行った。線材において、電圧タップにより分けられた区間を左(+側)から V_{12} 、 V_{23} 、 \cdots V_{910} とした。実験手順は以下の通りである。

(i) 各区間の臨界電流値 I_c (1 μ V/cm 基準) を測定

(ii) I_c 以上の過電流パルスを 1 秒間通電し、

銀層の抵抗-温度依存性より最高到達温度を算出

(iii) 再び I_c を測定し、劣化の有無を確認

今回の実験では、 I_c 測定時に ± 2 A 程度の誤差が含まれるため、2 A 以上の I_c の低下かつ継続して I_c が低下することを劣化と定義し、劣化開始時の最高到達温度を測定した。 I_c の劣化が観測されるまで過電流パルスの最大値 I_{peak} を上げながら(ii)、(iii)の手順を繰り返し、劣化開始時の最高到達温度 T_{max} を求めた。

3. 実験結果

Sample1 の実験結果を Fig.2 に示す。Fig.2 において横軸は区間を示し、第 1 縦軸と棒グラフ(左から順に $I_{peak}=183, 186, 189, 192$ A)が I_c を示し、 I_c 測定の誤差範囲をエラーバーで表している。第 2 縦軸と折れ線(下から順に $I_{peak}=183, 186, 189, 192$ A)が T_{max} を示している。実験結果から $I_{peak}=186$ A の過電流パルスの通電により V_{23} 等、多くの区間で劣化し、劣化開始温度は約 480 K となった。Sample 2 も同様の結果が得られ、約 480 K となった。

4. まとめと今後について

今回は 275kV 級の YBCO 超電導モデルケーブルに用いられる IBAD/TFA-MOD 線材で、銅メッキされている線材について劣化開始時の最高到達温度を測定した。今後は Sample 数を増やすとともに、MO、SEM、TEM 等を実施し、劣化原因について詳しく調査する予定である。

Table.1 Specifications of YBCO sample tape

Manufacturing Method	Sample 1,2	
	IBAD/TFA-MOD	
Length, mm	70	
Width, mm	5.0	
Cu Thickness, μ m	50	
Ag Thickness, μ m	15	
YBCO Thickness, μ m	1.5	
Ce ₂ Zr ₂ O ₇ Thickness, μ m	1	
Gd ₂ Zr ₂ O ₇ Thickness, μ m	1	
Hastelloy Thickness, μ m	100	
Operating Temperature, K	77	

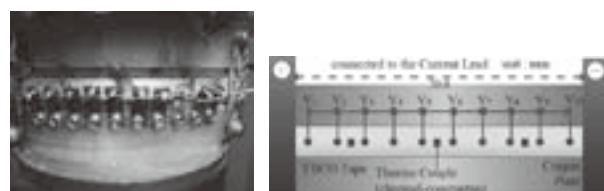


Fig.1 Arrangement of voltage taps and thermo couple

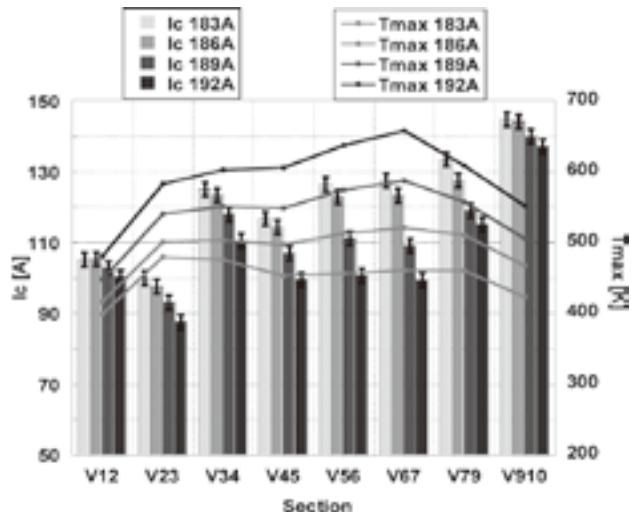


Fig.2 Distributions of I_c and T_{max}

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. A.Ishiyama, Y.Nishio, H.Ueda, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19(2009), no.3, pp.3483-3486
2. A.Ishiyama, M.Arai, H.Ueda, et al.:Abstracts of CSJ Conference, vol80(2009)p88
3. A.Ishiyama, H.Kono, H.Ueda, et al.:Abstracts of CSJ Conference, vol79(2008)p176

高温超電導線材の中性子照射実験

Experiments on neutron radiation effect of HTS conductors

青木 徹, 陸 旭棟, 植田 浩史, 石山 敦士(早大);鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力);宮原 信幸(放医研)

AOKI Toru, RIKU Kyokutoh, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi(Waseda University);
KASHIMA Naohi, NAGAYA Shigeo(Chubu Electric Power Company); MIYAHARA Nobuyuki(NIRS)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. 研究背景と目的

近年, 高温超電導線材の高性能化が進み, SMES(超電導磁気エネルギー貯蔵)や Si 単結晶引き上げ装置に応用されており, 将来的には核融合や加速器への応用も期待されている。しかし, これらの応用の際には放射線環境下での利用がありうることも考慮しなければならない。このような環境の下で放射線により機器が放射化することは, メンテナンス時の装置運用や被曝管理, 機器廃棄時の処理といった点で好ましくないため, 応用に向けては超電導体の耐放射線性を明らかにしていく必要がある。

以上の観点から, 基礎実験として高温超電導線材に中性子線を照射した際の, 照射前後の超電導特性を評価したので報告する。

2. 実験

実験には Bi-2223 線材(住友電工製)と YBCO 線材(AMSC 製)の2つの超電導線材(諸元は Table 1 に示す)を用いた。また, Fig. 1 は中性子線照射の様子を表した図で, この方法で 14MeV のエネルギーを持つ中性子線を室温の下で線材に照射した。なお, 線量としては、毎分 189Gy、総量として 7.7kGy を照射した。

また, 中性子線照射前後の線材について液体窒素冷却下(77K)で I_c 測定を行うことにより, 超電導特性を評価した。測定の方法としては, 線材を 3cm ごとの 4 区間に分け, それぞれの区間にについて照射前と照射後の I_c 測定を行った。

Table 1 Specifications of HTS samples

	sample 1	sample 2
material	Bi-2223	YBCO
manufacturer	Sumitomo, DI-BSCCO(Type H)	AMSC, 344 Superconductors
process	CT-OP	RABiTS/MOD
width	4.4 mm	4.4 mm
length	120 mm	120 mm
thickness	0.22 mm	0.22 mm
I_c (nominal)	140 A	Min 70 A

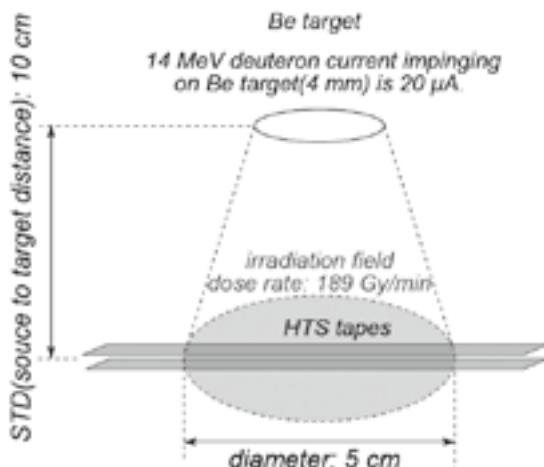


Fig. 1 Radiation test at NIRS

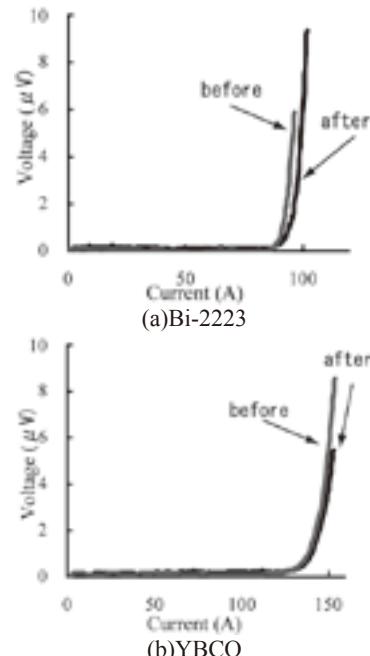


Fig.2 Example of I-V measurement (Section 1)

Table 2 I_c and n -value of samples
(a) Bi-2223

Section	Before Irradiation		After Irradiation	
	I_c	n -value	I_c	n -value
1	146.9	17	150.0	23
2	145.4	15	150.0	16
3	146.7	14	150.5	17
4	145.9	17	147.5	16

(b) YBCO

Section	Before Irradiation		After Irradiation	
	I_c	n -value	I_c	n -value
1	89.9	27	92.0	26
2	89.1	25	91.5	24
3	90.3	26	93.5	40
4	90.0	28	93.0	29

3. 結果

測定した I-V 曲線(Section1)を Fig.2 に, I-V 曲線から得られた I_c (1 μ V/cm 基準)と n 値を Table 2 に示す。図より、照射前後で I_c , n 値ともに大きく変化していない。

本実験では液体窒素中で I_c 測定をした後, 室温で中性子を照射し, 再び液体窒素中で I_c 測定を行った。今後はこのような Thermal cycle をなくし, より実際の運転環境に近づけるために, 冷凍機伝導冷却下で中性子を照射する実験を行う予定している。また, 今回は超電導特性として I-V 特性を調べたが, 磁場をかけた状態での I_c 測定を行う必要がある。

4. 参考文献

- [1] Hiroshi Ueda, Atsushi Ishiyama, Nobuyuki Miyahara, Naohi Kashima, and Shigeo Nagaya, "Estimation of Radiation damage in High- temperature Superconductors," ASC

$\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 多結晶超電導体の臨界電流密度特性 - 磁界角度依存性の評価 -

Critical current density properties in polycrystalline $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ superconductor

吉田 信之*, 木内 勝*, 小田部 莊司*, 松下 照男 (九工大); 葛君, 倪宝荣* (福工大);
王雷, 斉彦鵬, 張現平, 高召順, 馬衍偉* (中国科学院) (*JST-TRIP)

YOSHIDA Nobuyuki, KIUCHI Masaru*, OTABE Edmund Soji*, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

GE Jun, NI Baorong* (Fukuoka Inst. of Tech.);

WANG Lei, QI Yanpeng, ZHANG Xianping, GAO Zhaoshu, MA Yanwai* (Chinese Academy of Science) (*JST-TRIP)

E-mail: nobuyuki@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

近年、超電導体としては新しい系統となる鉄を含む化合物が超電導特性を示すことが発見されており、 FeAs を含む超電導体の中で REFeAsO と AFe_2As_2 の組成 (RE:希土類, A:アルカリ) を持つものが含まれている。これまでの研究で多結晶の REFeAsO では界面の弱結合により全体を流れる粒間の電流密度に加えて粒内を流れる電流密度が存在し、これらの電流密度を残留磁化測定により分離することができたが、5 Kにおける粒間の J_c は粒内に比べて 10^3 倍低くなっていた²⁾。本研究では粒間の弱結合を改善するために多結晶の $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ に銀を20 wt %添加した試料を作製し、SQUID磁力計を用いて J_c を評価し、銀添加の影響を調査した。また、残留磁化測定の結果を用いて磁化測定による J_c の値を理論的に評価した。

2. 試料および実験

今回使用した試料は、 $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ に銀を添加していないものと20 wt %添加したものの2つである。各試料の諸元をTable 1に示す。各試料とも一段固相反応で作製した試料である。残留磁化測定の結果から2つのタイプの遮蔽電流の存在が確認され、粒間の臨界電流密度 J_c^{global} と粒内の臨界電流密度 J_c^{local} に分離した。 J_c^{global} は残留磁化測定の結果より得られた試料全体の中心到達磁場と試料のサイズより評価し、 J_c^{local} は結晶粒の中心到達磁場と粒径より評価した。また、通常の磁化測定から得られたヒステリシスの幅より J_c^{mag} の値を評価した。

3. 結果及び検討

磁気モーメントから求めた T_c は2つの試料で34 K付近であり、銀添加による T_c への影響はほとんど見られなかった。Fig. 1に残留磁化の変化率より得られた J_c^{local} 、 J_c^{global} と磁化の値により得られたゼロ磁場での J_c^{mag} の温度依存性を示す。銀添加により J_c^{local} が減少していたが、無添加の試料には見られなかった J_c^{global} が銀添加した試料では確認された。5 Kにおける J_c^{global} 、 J_c^{local} は各々 10^7 A/m^2 と 10^{11} A/m^2 のオーダーである。銀添加により J_c^{global} が評価できる値まで増加したのは、粒間のアモルファス層が取り除かれ、粒間の結合が改善されたためと考えられている²⁾。

試料の結晶構造を調査するため、残留磁化測定の結果を用いて、通常の磁化測定による J_c^{mag} の値を理論的に評価した。粒間、粒内の磁気モーメントのヒステリシスの幅

$$\Delta m_g = \frac{(3l - w)w^2 t}{6} J_c^{\text{global}} \quad (1)$$

$$\Delta m_l = \frac{\pi^2 a^4}{4} J_c^{\text{local}} \quad (2)$$

を残留磁化測定による結果から求めた。 w 、 l 、 t は試料のサイズ、 a は結晶粒を球体と仮定した時の半径であり、試料の広い面($w \cdot l$ 面)に垂直に磁場をかけている。 $2a$ の値は文献2)のSEMで撮影した写真より、無添加のもので $0.50 \mu\text{m}$ 、銀添加のもので $2.0 \mu\text{m}$ として計算している。磁化測定による磁気モーメントのヒステリシスの幅 Δm_m は

$$\Delta m_m = \Delta m_l N_l + \Delta m_g \quad (3)$$

で表される。ここで N_l は結晶粒の数であり、

$$\Delta N_l = \frac{V_g}{V_l} f \quad (4)$$

で表される。 f は充填率であり、(3)、(4)式を用いてそれぞれの試料の f を求めたところ、銀添加は0.33、無添加は0.17となった。 f の値を用いて、 J_c^{mag} の理論値を求めたものを破線で示す。 J_c^{mag} の理論値と実測値は程良く一致しており、この f の値は正しいと思われる。

Table 1: Specifications of $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ specimens.

specimen	w [mm]	l [mm]	t [mm]
pure	1.12	1.73	0.75
Ag add	1.91	2.77	0.95

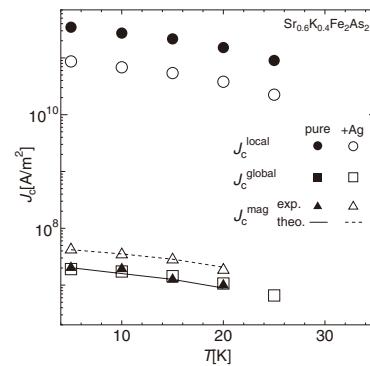


Fig.1: Symbols are experimental critical current densities estimated by remanent magnetization method and magnetization method. Lines are theoretical critical current density estimated by magnetization method.

【参考文献】

- 1) E. S. Otabe *et. al.*: Physica C (2009) in print.
- 2) L. Wang *et. al.*: Cond-mat arXiv 0904.3145 (2009).

MgH₂を用い作製した MgB₂ バルクの超伝導特性

Superconducting properties of MgB₂ bulks prepared from MgH₂

松岡 宏明, 渡辺 喜史(日大理工), 前田 穂(UOW), 久保田 洋二(日大理工)

MATSUOKA Hiroaki, WATANABE Yoshifumi (Nihon University), MAEDA Minoru (University of Wollongong),

KUBOTA Yoji (Nihon University)

E-mail:matsu_cst@yahoo.co.jp

1. はじめに

金属系超伝導体の中で最も高い超伝導転移温度を持つ MgB₂ は、 J_c を上げるための様々な研究が行われてきた。 J_c の改善には MgB₂ バルクの密度を高めることが有効であり、一方 MgB₂ の製作過程で最も生成されやすい MgO 不純物は絶縁体であるため、その抑制は重要である。

今回、MgO の生成量減少を期待し、B、Mg と MgH₂ 粉末を用い作製した試料を用いて、超伝導特性を調べたので報告する。

2. 試料と実験

試薬は粒径 1 μm 以下、純度 99% の B 粉末、粒径 134 μm 、純度 99.9% の Mg 粉末と MgH₂ 粉末を用いた。試料の作製は、まず、Ta 管に B 壓粉体と共に Mg 粉末、MgH₂ 粉末を封管した。そして、この Ta 管を石英管に封管し 1100[±]5 分、660°C で 24 時間の焼成を行った。次に、余剰な Mg を除くために、この Ta 管に穴をあけて再度石英管に封管し 660 度で熱処理を加えた。

作製した試料の試料名と封管時の、B:Mg:MgH₂ のモル比を Table. 1 に示す。

各試料は XRD と SQUID を使用し、組成分析と磁化曲線から Bean モデルを用いて J_c を算出した。

3. 実験結果

図 1 に、各試料の直流印加磁場 0T での交流帶磁率の実数部分を示す。各試料の T_c は、S1 が 38.7K、S2 が 38.8K、S3 が 39.2K、S4 が 39.0K となった。MgH₂ の添加量を増やすことにより、 T_c も上昇する傾向が見られた。図 2 に、各試料の J_c の磁場依存性を示す。0.5T の J_c は S1 が $5.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 、S2 が $5.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 、S3 が $3.8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 、S4 が $2.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ となり、S1 が最も大きくなかった。0.5T 以上の高い磁場での J_c は S2 が最も高くなかった。磁場依存性は S1 よりも S2 の方が弱くなっている。S3 と S4 に関しては S1 より強くなっている。少量の MgH₂ の添加は J_c が改善されたが、多量の添加は磁場依存性が高くなり、 J_c は低下している。

XRD の結果を含めた、さらに詳細な検討は当日報告する。

Table 1 Specification of samples

Sample	B:Mg: MgH ₂ (mole ratio)
S1	1:1:0
S2	1:0.95:0.05
S3	1:0.8:0.2
S4	1:0.7:0.3

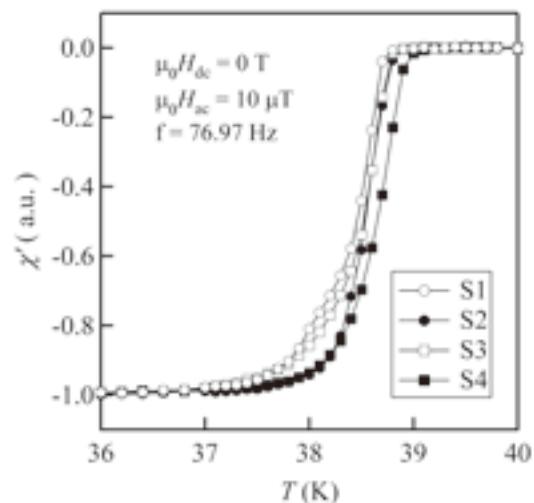


Fig. 1 The real component of ac susceptibility with $f=76.97 \text{ Hz}$ and $\mu_0 H_{ac} = 10 \mu\text{T}$ at $\mu_0 H_{dc} = 0 \text{ T}$ for all samples

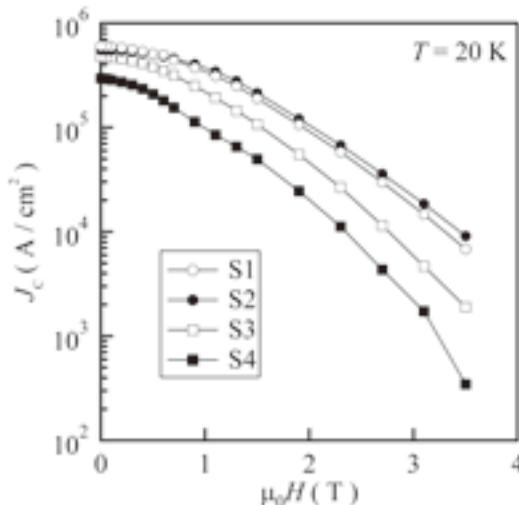


Fig. 2 J_c vs B cureves for all samples

リング形状樹脂含浸バルク体の発生磁場特性

Magnetic field of resin-impregnated bulk superconductor annuli

富田 優, 福本 祐介, 鈴木 賢次, 石原 篤(鉄道総研)

TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji, ISHIHARA Atsushi (Railway Technical Research Institute);
E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

これまで、バルク等の高温超電導材を積層して使用するNMRシステムの応用についての検討を進めてきた¹⁾。一方で大型の超電導バルク材を使用し、幅広い分野で活用できる簡易型超電導マグネットの実現を目指した研究を進めている。超電導マグネットのユーザーは出来る限り、サンプル空間の大容積化を望んでいるが、穴の径が大きくなるに従って加工面積も増えてしまうため、表面の加工損傷箇所も多くなる。そのため、樹脂含浸を施し磁場の安定化を図った。

実験では液体窒素冷却下で発生磁場 2.02 テスラを実証できた。超電導バルク磁石によるボア径 40mm を超える発生磁場 2 テスラの小口径の簡易型超電導マグネットの実現が可能となった。

2. 試料および測定方法

超電導バルク材を直径 80mm、内径 45mm のリング状に加工し、表面とリング内部の発生磁場分布を測定した。穴開け等の加工をした場合、冷却や捕捉磁場の電磁力等によって、使用初期にバルク材の特性劣化が進行する恐れがあることから、加工直後に樹脂含浸による補強を施し²⁾、材料マトリックスの高強度化を図った。

実験に使用した超電導バルク磁石の形状を図 1 に示す。バルク材の形状と積層数は、着磁の際に必要となるマグネット装置のボア径を 10cm、高さ(磁場)方向の許容範囲を 10cm と仮定して決定した。リング状に加工した直径 87mm、内径 47mm、厚さ 22mm の樹脂含浸を施したバルク材を 4 個製作し、1 個から 4 個まで積層した場合のそれぞれの内部の発生磁場分布をホール素子で上下させることにより測定した。

3. 測定結果

図 2 にボア内の半径方向の磁場分布を、図3に高さ方向の磁場分布を示す。リング内部は単体においては 0.75T であったが、リング形状バルク材を 4 個まで積層させることにより 2.02T にまで磁場値が向上することがわかった。

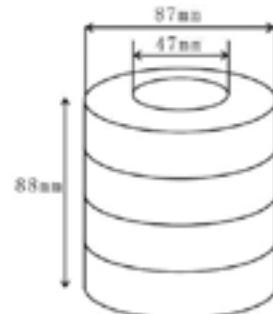


Fig. 1 Bulk superconductor annuli

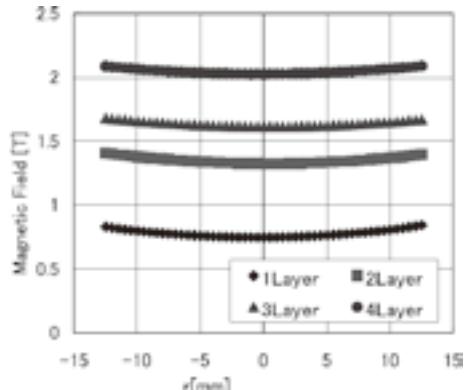


Fig.2 Magnetic field in direction of radial

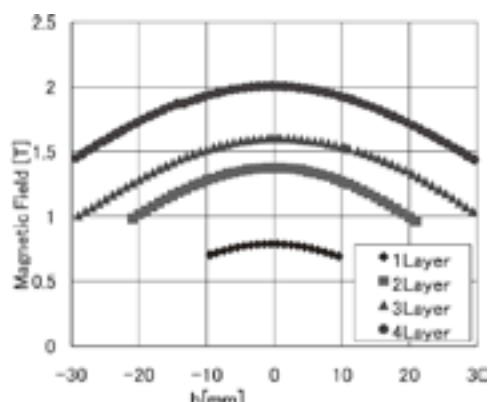


Fig.3 Magnetic field in direction of height

Table.1 Center magnetic field of bulk annuli

Single bulk	0.75 T
Two bulks	1.32 T
Three bulks	1.62 T
Four bulks	2.02T

参考文献

1. Y. Iwasa, S. Hahn, M. Tomita, H. Lee and J. Bascunan: IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 2352-2355 (2005)
2. M. Tomita, M. Murakami: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 60 (1999) p.216

スパッタ法による Mg-B 超伝導薄膜の作製(3) — B 材純度の効果 —

Preparation of superconducting Mg-B film by sputtering (3) – The effects of B purity on Mg-B film –

鈴木光政, 佐久間 大, 名雪勝信, 千葉 優, 柏倉隆之(宇都宮大学)

SUZUKI Mitsumasa, SAKUMA Hiroshi, NAYUKI Katsunobu, KASHIWAKURA Takayuki(Utsunomiya Univ.)

E-mail: msuzuki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

スパッタ法により, Mg-B 超伝導薄膜の作製を検討している。Mg ターゲットの上に B チップを配置したシングルターゲットを構成した。液体窒素によるゲッター作用効果に着目し, Ar ガス中での RF マグネットロンスパッタ法により, Si(111)基板上へ製膜した。チャンバー内には, 液体窒素シラウドを基板ホルダーを囲むように配置し, 不純ガスが薄膜内に混入するのを防ぐ対策を施している。これまで, Ar ガス圧や B チップの枚数を調整し, 臨界温度が 23K に達する as-grown 超伝導薄膜を作製した。今回は, Ar ガスの流量やターゲット B 材の純度の効果を検討したので, その結果について報告する。

2. 実験方法

これまで, ターゲットには純度 99.9% の円板状 Mg (50 ϕ , 5t) と純度 99% の B チップ (10 \times 10 \times 1t) を使用してきた。最初に, Ar ガス流量の効果を探るため, Ar 流量をパラメータとして, Mg の薄膜を作製した。生成相による検討から適切な Ar 流量を決定した後, Mg-B 薄膜を作製した。さらに, B 材純度の影響を探るため, B チップ数個を純度 99.8% の B ランプ (サイズ: 約 20mm³) で置き換える, Mg-B 薄膜を作製した。4 端子法にて, 電気抵抗率を測定し, 試料の臨界温度を求めた。また, X 線回折法により, 生成相を検討した。

3. 実験結果及び考察

図1は, Mg-B 薄膜と同一スパッタ条件(基板温度 230°C, Ar ガス圧 2Pa, 放電電力 80W)で Ar 流量を変えてパイレックスガラス基板上に製作した Mg 薄膜の電気抵抗率の温度依存性である。高 Ar 流量(8ccm)で製作した Mg 薄膜は, 低い残留抵抗率を示し, 300K と 40K の抵抗比は 9.98 に達する。X 線回折結果から, 低 Ar 流量で作製した薄膜では MgO 相が認められ, 酸化を防ぐには 8ccm 以上の Ar 流量が必要である。

12ccm の Ar 流量で製作した Mg-B 薄膜の電気抵抗率の温度依存性を図2に示す。ターゲットの B 材は, B チップのみ (16 枚) の場合と B チップ (16 枚か 12 枚) に B ランプを数個加えた場合である。B ランプがない場合の $T_{c, on}$ の最高値は, 25K であった。B ランプを加えると明らかに 25K を越え, 約 27K に達する。放電電力を調整することにより, $T_{c, end}$ も 26K を越えた。図3は, 実験で製作した多くの Mg-B 薄膜の 40K での電気抵抗率と $T_{c, mid}$ の関係を示す。Ar 流量及び B 材により, 測定データが分類され, 高 Ar 流量 (12ccm) で B ランプを含むターゲットからの薄膜は低抵抗率で, 高い $T_{c, mid}$ を示すことが分かる。抵抗率を 0 に外挿すると, $T_{c, mid}$ の推定値は 28K を越える。

参考文献

1. M. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.94
2. M. Suzuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.82

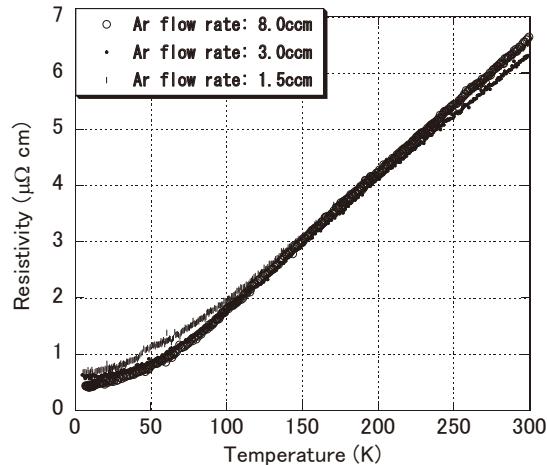


Fig.1 Resistivity vs. temperature curves on Mg films.

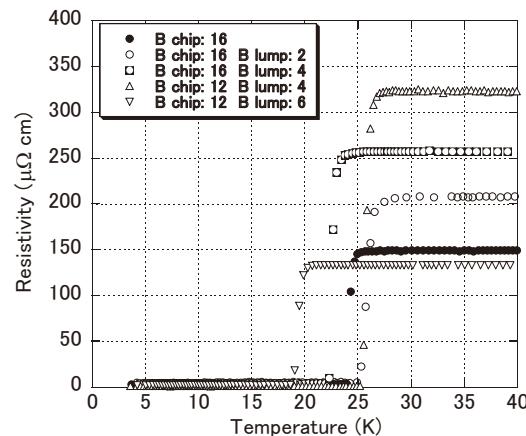


Fig.2 Resistivity vs. temperature curves.

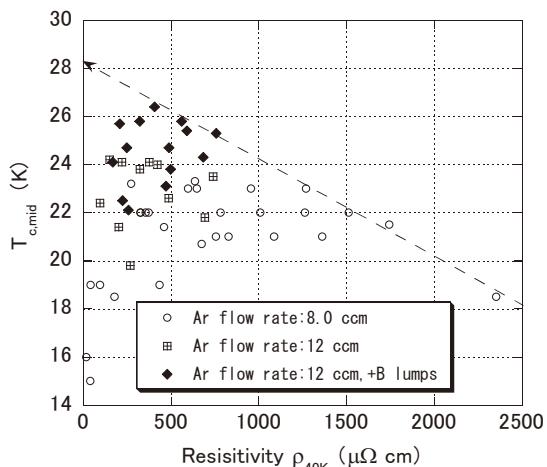


Fig.3 Relationship between $T_{c, mid}$ and resistivity.

PIT法によるFe(Te, S)の作製

Fabrication of Fe(Te, S) by powder-in-tube method

柴岡 俊輝、八嶋 崇志、亀卦川 尚子(一関高専)
 SHIBAOKA Shunki, YASHIMA Takashi, KIKEGAWA Takako
 (Ichinoseki National College of Technology)
 E-mail: kikegawa@ichinoseki.ac.jp

1. はじめに

2008年に細野ら[1]によって発見された鉄系超電導体は、その後の活発な研究によって、超伝導転移温度 T_c は大幅に増加した。しかし、優れた超電導特性を示すものは、殆んど毒性の強い砒素を含む化合物である。本研究では毒性が少ない FeTe の Te を S で置換した Fe(Te, S) を選び、将来の線材化を見越して、これを PIT 法で作製することを試みた。Te よりもイオン半径の小さい S での置換は、化学的圧力を増加させ、AFM 転移を抑えて、超電導の出現に有利に働くという報告がある。[2]

2. 実験結果と考察

試料の作成には、Powder-In-Tube (PIT) 法を使用した。Fe (99%) と Te (99.9%)、S (99.99%) を $FeTe_{1-x}S_x$ ($x = 0.1, 0.2$) の組成比で混合し、試料を SUS316 管に入れ、 $600\text{kg}\cdot\text{f}/\text{m}^2$ で加圧した。混合した試料と SUS 管の反応を防ぐため、Mo シートを試料と SUS 管の間に入れた。もう 1 つの試料は、Fe を除いたほかの原材料 Te (99.9%)、S (99.99%) を $Te_{0.9}S_{0.1}$ の組成比で混合し、試料を Fe 管に入れ、 $600\text{kg}\cdot\text{f}/\text{m}^2$ で加圧した。この方法では、鉄管から鉄が拡散して反応することを期待している。これらを石英管の中に入れて真空封入し、1 時間で 400°C まで上昇させ、 400°C で 12 時間加熱し、その後、1 時間で 600°C まで上昇させ、 600°C で 24 時間保った後、炉冷した。

低温の電気抵抗測定は冷凍機 (CSW-71) を用いて、直流 4 端子法で行なった。温度は金 + 0.07% 鉄-クロメル熱電対を用いて測定した。作製した試料の構造観察は、XRD で行なつた。

3. 実験結果

SUS316 管を使用した試料の電気抵抗の温度依存性を図 1、2 に示す。S で 10% 置換 (仕込み量) した試料では、電気抵抗は温度の低下と共に 60K 近傍まで増加したのち緩やかに減少し、 20K 以下で再び僅かに増加したのち、 10K で急激に低下する。Te の S 置換量を 20% まで増やすと、 60K 付近での山は消え、抵抗は 10K 近傍まで単調に増加して、それより低温で急激に減少する。どちらの試料でも、測定した最低温度 4K まで、抵抗は完全にゼロにはならなかった。一方、鉄管に封入し、反応させた試料は、図 2 に示すように、 $70\sim80\text{K}$ のあたりにハングを示すが、測定した 4K までの温度で、抵抗の急激な減少は観測されなかった。20% S 置換の試料の XRD の結果を図 3 に示す。主なピークは、正方晶 $P4/nmm$ で指数付けできる。これに対して 10% 置換した試料の XRD パターンには、指数付けができないピークが含まれていた。

FeTe 系では、 80K 近傍で反強磁性転移が観測されることが既に報告されているが、S 置換 20% と Fe 管封入の試料で観測されたハングは、これに対応するものと考えられる。SUS 管に封入した試料は、S 置換 10, 20% とも 10K 付近で抵抗の急激な減少を示すが、この温度は、これまでに Fe(Te-S) 系で報告された超電導転移の onset 温度に対応している。S 置換 10% の方が 20% よりも 4K での電気抵抗率が高いのは、XRD の結果から、含まれる不純物が多いことに起因していると考えられる。Fe 管を用いた方法では、Fe の拡散を助けるための十分な反応時間と圧延の工夫が必要である。

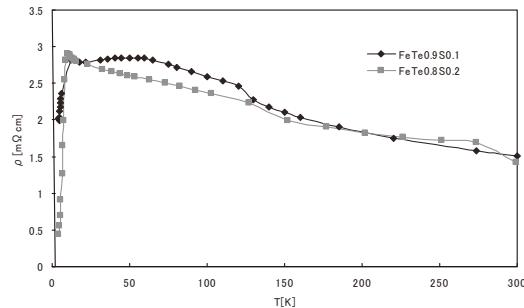


Fig.1 Temperature dependence of electrical resistivity of $Fe(Te_{0.9}S_{0.1})$ and $Fe(Te_{0.8}S_{0.2})$ made by using SUS sheath.

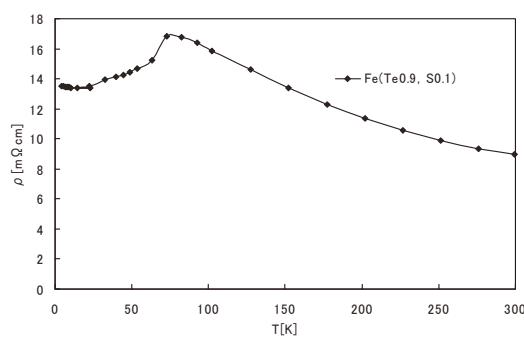


Fig.2 Temperature dependence of electrical resistivity of $Fe(Te_{0.9}S_{0.1})$ made by using Fe sheath.

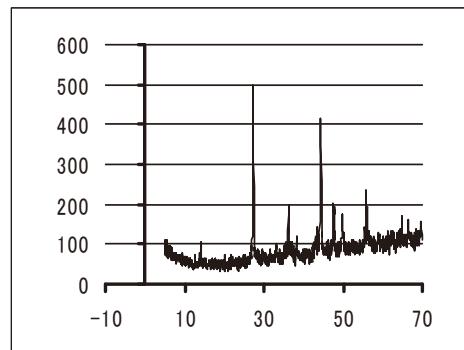


Fig.3 X-ray diffraction pattern of $Fe(Te_{0.8}S_{0.2})$ made by using SUS sheath.

参考文献

- [1] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, H. Hosono: J. Am. Chem. Soc., 130, 3296 (2008).
- [2] Y. Mizuguchi et. al.: Superconductivity in S-substituted FeTe, Appl. Phys. Lett. 94, 012503 (2009)

小型レーストラックコイルの通電特性 (2) -積層パンケーキコイル-

Transport characteristics of racetrack shape RE coil (2) -Stacked pancake coil-

小方正文, 荒井有氣, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢(鉄道総研)

OGATA Masafumi, ARAI Yuuki, HASEGAWA Hitoshi, SASAKAWA Takashi, NAGASHIMA Ken

(Railway Technical Research Institute)

E-mail:ogata@rtri.or.jp

1. はじめに

RE 系線材(RE-Ba-Cu-O 線材)を浮上式鉄道用高温超電導磁石へ適用する概念設計検討[1][2]を進めている。今回、事前に通電特性評価を行ったRE 系線材を用いて小型レーストラック形状のシングルパンケーキコイルを複数製作し、これを積層コイル化して通電試験を実施した。

2. 積層パンケーキコイル

先ず、表1に示すRE 系線材を用いてシングルパンケーキコイルを5 個製作した。本コイルは、外径100 mm、直線部長さ150 mm のレーストラック形FRP巻枠に、長さ100 m の線材を巻き回したものである。そして、5 個の内1 個を評価用シングルパンケーキコイルとし、他の4 個を直列にスタッキングして積層パンケーキコイル(図1)とした。

3. 通電試験結果

通電特性評価試験装置[3]等を使用して、(1)線材、(2)シングルパンケーキコイル、(3)積層パンケーキコイルの各段階にて通電試験を実施し、線材の通電試験結果とシングルパンケーキコイルおよび積層パンケーキコイルの通電試験結果との比較検討を行った。

(1) 線材

線材テープ面に垂直な磁場印加条件における I_c の温度および磁場依存性の結果例を図2に示す。この他に、線材テープ面に平行な磁場印加条件においてもデータを取得し、線材 I_c の異方性を把握した。

(2) シングルパンケーキコイル

自己磁場条件における I_c とn値の77 Kから20 Kの範囲の温度依存性を確認した。結果を図3に示す。

(3) 積層パンケーキコイル

液体窒素浸漬冷却にて、 I_c が46 Aであることを確認した。

4. おわりに

今後は、積層パンケーキコイルの低温領域までの通電特性確認を進めるとともに、本コイルを用いて、クライオ構造の簡素化も指向した、50 Kにて最大経験磁場1 Tが発生可能なRE系モバイルマグネットの開発を進めていく計画である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. K.Nagashima, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.76 (2007) p.84
2. K.Nagashima, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.77(2007)p.176
3. M.Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.78(2008)p.102

Table 1 specifications of RE wire

Type	YBCO (MOCVD)/Hastelloy
Width	4.1 mm
Thickness	0.1 mm
Minimum I_c (77 K, self-field)	112 A

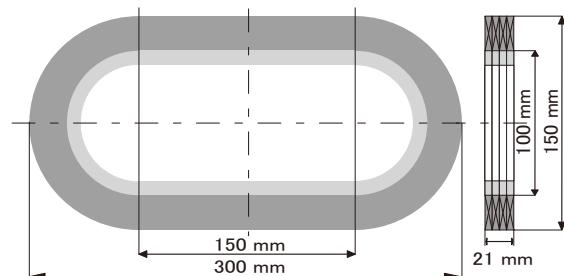


Fig.1 Stacked pancake coil

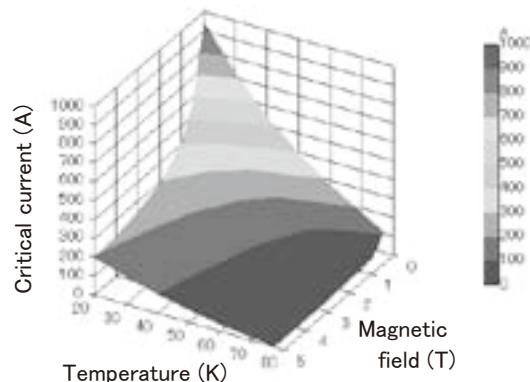


Fig.2 Temperature and magnetic field dependence of I_c for RE wire (B//c)

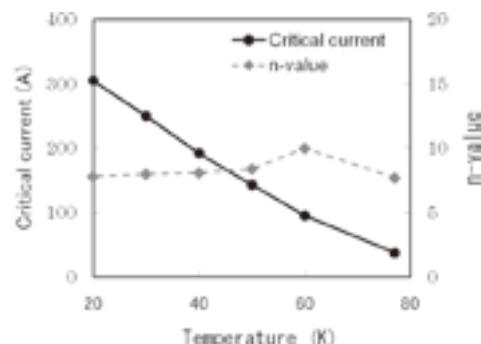


Fig.3 Temperature dependence of I_c and n-value for single pancake coil

RE123 テープによる 18T 無冷媒超伝導マグネットのアップグレードデザイン Upgrading design of the 18T cryogen-free superconducting magnet using RE123 tape

淡路 智, 石原亮輔, 難波雅史, 渡辺和雄(東北大金研・強磁場センター), 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫 (中部電力)
AWAJI Satoshi, ISHIHARA Ryosuke, NAMBA Masafumi, WATANABE Kazuo (HFLSM, IMR, Tohoku Univ.), SHIKIMACHI Koji,

HIRANO Naoki and NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O₇ (RE123, RE は希土類)の最近の特性向上と長尺化により、応用超伝導機器へと展開されつつある。RE123 線材の大きな特徴は、高温でも高磁場特性に優れる点の他、基板に用いられている Hastelloy が高い弾性定数と降伏応力を有しているため、機械特性に優れている点である。これは、従来高磁場マグネットを設計する際に問題となる、大きな電磁力に対する補強が必要ない事を意味しており、効率よく磁場を発生できる能力を有している。一方で、東北大金研強磁場センターでは、銀シース Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Ag/Bi2223)コイルを最内層とした 18T 無冷媒超伝導マグネットが 2005 年より稼働している[1]。ここに用いられている Bi2223 コイルでは、厚み 0.3mm の SUS テープを共巻きにすることで補強しているが、それでも最大 hoop 力は 100MPa に過ぎない。本研究では、Bi2223 内層コイルを機械特性の優れた Y123 コイルで置き換えることで、さらなる高磁場無冷媒超伝導マグネットへのアップグレードについて検討した結果について報告する。

2. 結果と議論

線材は、100mm 厚のハステロイテープを用いた CVD-Y123 テープを想定する。このテープは Ag の保護層 30mm を含めてトータル厚 133μm であり、これに 0.06μm のカプトンテープ絶縁を施す構造とした。コイルサイズは、現在用いている Bi2223 内層コイルとほぼ同じ内径 90 mm x 外径 176 mm x 高さ 251mm とし、5mm 幅のテープ線材を用いダブルパンケーキコイルを 22 個スタックする構造とした。現在内層コイル用に用いられている電源は最大 200A であるが、ここでは、限界を見るために、最大

hoop 応力を 600MPa として、設計を行った。このとき、中層 Nb₃Sn コイルと外挿 NbTi コイルにより発生する爆アップ磁場は、中心磁場で 15.6T である。図 1 に、運転電流が 200A の時と 295A の時の磁場分布、及び hoop 応力分布を示す。hoop 応力は、BJR により計算した値を用いている。電源により制限される 200A では、中心磁場が約 22T であるが、295A では 25T となることが分かる。このときのコイル内部の最大 hoop 応力は、運転電流 200A の時で 404MPa、295A の時に 600MPa となる。このときの Y123 内層コイルのロードラインを図 2 に示す。ここには想定している CVD-Y123/IBAD-GZO/Hastelloy の J_c 及び 5mm 幅あたりの I_c を示してある。運転電流 295A は、特性の優れる $B \perp c$ 方向の I_c に対して半分以下となっていて、十分なマージンを有している。一方で、低温でも残っている I_c の大きな異方性を考慮する必要がある。近似的に発生磁場の c 軸方向成分 (コイルの径方向成分) に対するロードラインも図 2 に示した。 $I_{op}=295A$ は丁度 $B \parallel c$ の臨界電流密度がロードラインとほぼ公差する点にあることが分かる。角度依存成を考慮した解析については当日報告するが、CVD-Y123 線材の場合、発生磁場は、傾いた磁場によって決まる臨界電流と、応力の両方によって制限されることが分かった。

謝辞

本研究の一部は、NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] G. Nishijima et al, *Fusion Engineering and Design*, 81, pp. 2425–2432, 2006.

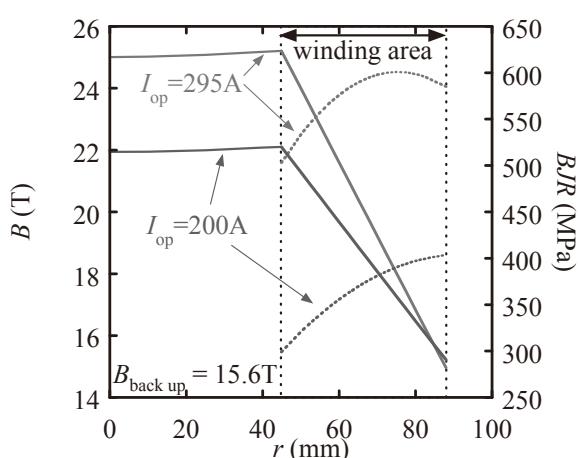


Fig. 1 Distribution of magnetic field and hoop stress as a function of radius at the mid-plane of the coil.

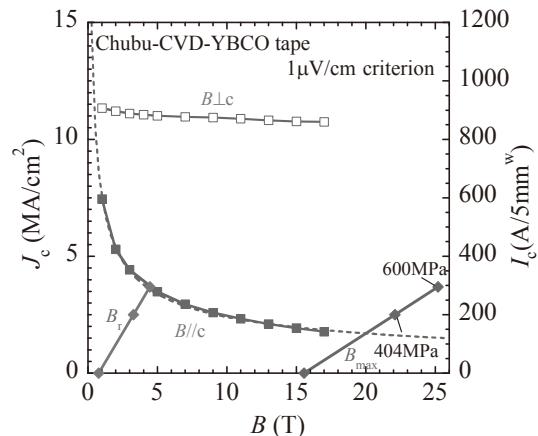


Fig. 2 Load lines of the Y123 insert coil. B_{max} and B_r are the maximum field and the radial direction component of field.

PXI システムを用いた有効電力法による超電導コイルのクエンチ保護システムの開発

Development of a quench protection system for a superconducting coil
by an active power method using a PXI system

七戸 希, 村瀬 曜 (岡山大)
NANATO Nozomu, MURASE Satoru (Okayama University)
E-mail:nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

著者らはこれまで有効電力法による超電導コイルのクエンチ保護システムの有効性を報告してきた[1]~[3]。従来のシステムはその主要部であるクエンチ検出回路をアナログ回路にて構成していたが、これをソフトウェアで実現できれば、多機能化、メンテナンス性の向上など様々な有用性が見込まれる。そこで、NI PXI システムを用いてソフトウェアベースの検出装置を作製した。本装置により高温超電導コイルのクエンチ保護試験を行い、アナログ回路と同等の検出精度を確認したため、その結果を報告する。

2. PXI システム

PXI システムは LabVIEW によって制御されるソフトウェアベースシステムである。クエンチ保護システムとして、電圧・電流信号を計測して有効電力法によるクエンチの判定を行い、判定結果に基づいて保護回路の制御を行うことを、リアルタイムで実現できるよう構築した。

3. 実験結果

開発した保護システムの有効性を検証するために、Bi2223 高温超電導コイル($I_c:119A$, 自己インダクタンス:21.7 μ H, 高さ:140mm, 外径:150mm)を対象として、これまでに開発をしてきたアナログ回路ベースの保護システムと今回のソフトウェアベースシステムとを比較・検討した。同コイルを液体窒素にて浸漬冷却し、80A の直流電流を通電している状態でコイルの上半分を液体窒素から引き出し、室温空気にて温度上昇させることで常電導転移を発生させ、両システムにて常電導転移の検出と保護回路の制御を行った。

Fig. 1 に PXI システムによる実験結果を示す。図はすべて常電導転移発生前後の時間の波形を示している。同図(a)のようにコイルに 80A の直流電流を通電している状態でコイルの上半分を液体窒素から引き出すと、同図(b)の v_{SC} (超電導コイル両端電圧)および同図(c)の P' が上昇していることからわかるように常電導転移が発生した。本実験では閾値を 20W に設定しているため、 P' が 20W に達した瞬間(128s), 保護回路スイッチのゲート信号が同図(d)のように切り替わり、同図(a)のように電流が遮断されていることがわかる。以上より、PXI システムにて常電導転移の発生を検出し、超電導コイルの保護を行うまでの動作が問題なく行われていることがわかる。Fig. 2 に

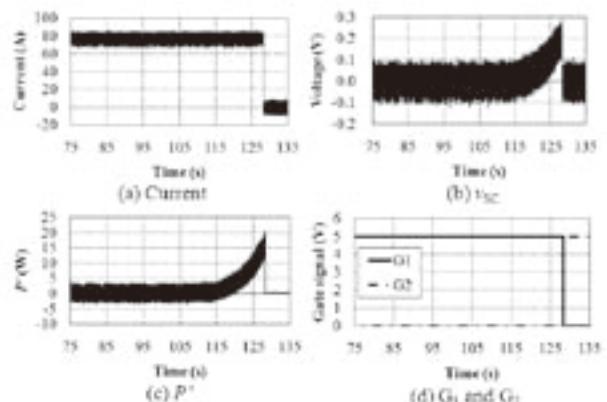


Fig. 1 Experimental results using a PXI system

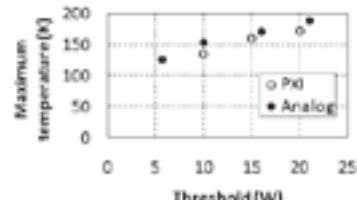


Fig. 2 Threshold vs. maximum temperature

閾値に対する保護動作後の超電導コイルの最高到達温度の関係をアナログ回路ベースシステムと PXI システムの両方について示す。どちらのシステムでも閾値に対する最高到達温度はおおよそ一致しており、両システムの精度が同等であると言える。今後は冷凍機冷却型低温超電導マグネットなどにて試験を行い、さらなる高性能化に向け検討を行っていく。

謝辞

本研究の一部は財団法人岩谷直治記念財団、財団法人中国電力技術研究財団、財団法人ウエスコ学術振興財団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] N. Nanato: Proceedings of International Conference on Electrical Engineering 2008, No. P-171, CD-ROM
- [2] N. Nanato: IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials (Society A), Vol. 128-A, No. 6 (2008), p. 386
- [3] N. Nanato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.107

YBCOテープ線材を用いた直流リアクトル用トロイダルコイルの製作

Fabrication of toroidal coil using YBCO tapes for DC reactor

原田 直幸, 伊藤 俊, 内藤 裕志, 植田 清隆(山口大); 津田 理, 濱島 高太郎(東北大)
古瀬 充穂, 渕野 修一郎(産総研); 野口 聰(北大)

HARADA Naoyuki, ITO Suguru, NAITO Hiroshi, UEDA Kiyotaka (Yamaguchi University)
TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takatomo (Tohoku University)

FURUSE Mitsuho, FUCHINO Shuichiro (AIST); NOGUCHI So (Hokkaido University)

E-mail: naoyuki@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

低損失の直流リアクトルを開発するため, YBCO テープ線材を用いて 8 個のダブルパンケーキコイルを作製し, トロイダルコイルを製作した。トロイダルコイルのインダクタンスは, 直流による電力融通を検討している系に必要な値の 1/10 としてモデルコイルを製作した。今回は, YBCO テープ線材を用いたコイルの製作と通電試験の結果について報告する。

2. ダブルパンケーキコイルの製作

コイルの導体には, 幅 4[mm], 厚さ 0.1[mm] の市販の YBCO テープ線材 [1] を使用した。この線材には, 両面に厚さ 20[μ m] の安定化銅が配置されている。線材の臨界電流 I_c は, 液体窒素温度, 自己磁場において 80[A] 以上である。

ダブルパンケーキコイルには連続した 50[m] のテープ線材を 2 本用いて, 絶縁材と共に巻線を行い, 最内層で 2 つのコイルを半田接続した。また, 剛性を高めるためにエポキシ樹脂で含侵を行った。このコイルの内半径は 37[mm], 外半径は 70[mm] である。8 個のコイルのターン数は 292~297, インダクタンスは液体窒素中において 9.9~10.1[mH] であった。

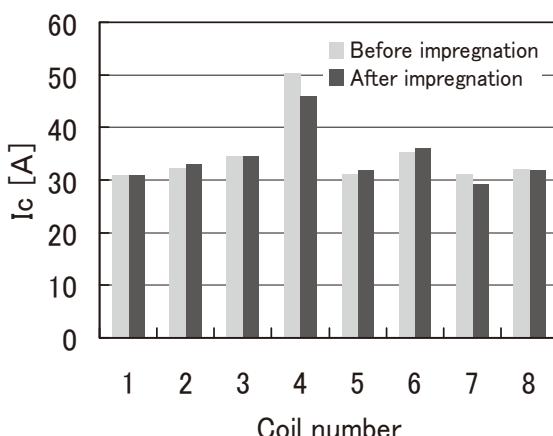


Fig.1 I_c of double pancake coil at 77K.

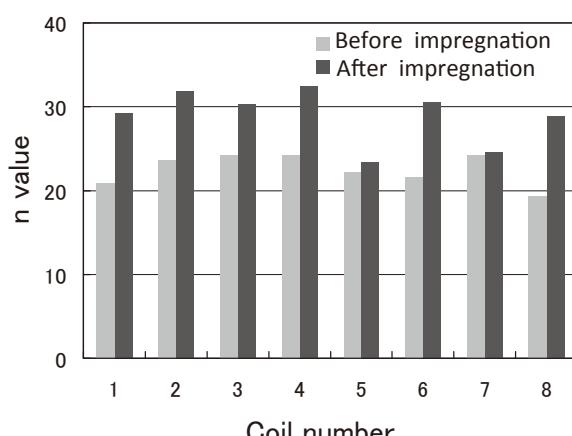


Fig.2 n value of double pancake coil at 77K.

3. 通電試験

個々のダブルパンケーキコイルの含侵前後の I_c 等の変化を調べるために, 液体窒素中で通電試験を行った。 I_c 及び n 値の比較を Fig.1 と Fig.2 にそれぞれ示す。また, コイル 8 において通電電流に対して発生電圧をプロットした結果を Fig.3 に示す。ここで, I_c の基準は $1[\mu V/cm]$ とした。従って, 各コイルでの発生電圧が $10[mV]$ となる電流値が I_c に相当する。Fig.1 から含侵による I_c の変化はほとんど無いものと考えられる。一方, Fig.2 に示すように多くのコイルで含侵後 n 値が大きく増加していることがわかった。この原因是, 含侵により熱はけが悪くなつたため, Fig.3 に示すように $I_c(31.8[A])$ を越えると含侵前に比べて含侵後の発生電圧が高くなり, n 値が大きく算出されたものと考えられる。また, Fig.3 から含侵前は含侵後に比べて $I_c(31.8[A])$ 以下で発生電圧の変動が大きく, 電磁力により導体が動いていたことが推定され, 含侵により剛性を高めることでこのような電圧の発生が抑制できたと考えられる。次に, 8 個のコイルを直列に接続して Fig.4 に示すトロイダルコイルとした。この結果, トロイダルコイルのインダクタンスはトロイダル半径を 130[mm] としたときに 97.7[mH] であった。今後, リアクトルとして使用する場合の損失を測定する予定である。

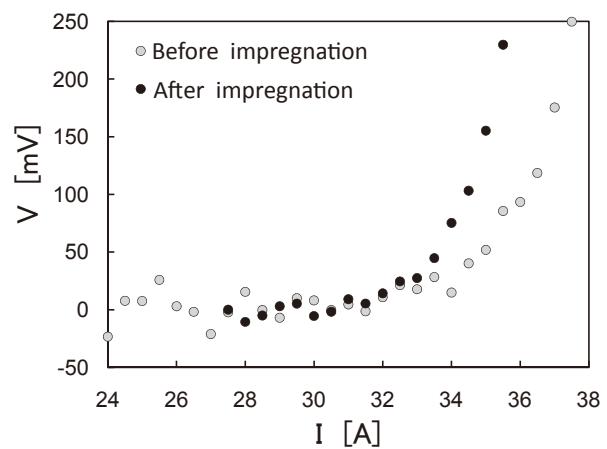


Fig.3 Current-voltage characteristics of coil 8 at 77K.

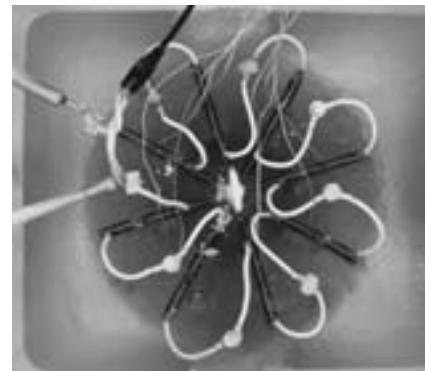


Fig.4 Toroidal coil in liquid nitrogen.

参考文献

1. <http://www.superpower-inc.com/content/products>

YBCO テープ円筒による永久電流磁場均一度の向上

Improvement of the magnetic field homogeneity by a YBCO tape cylinder for a persistent current mode magnet

小澤 俊一、高尾 智明(上智大学)、柳澤 吉紀(千葉大)、高橋 雅人、前田 秀明(理研)
OZAWA Shunichi, TAKAO Tomoaki(Sophia Univ)、YANAGISAWA Yoshinori(Chiba Univ)、TAKAHASHI Masato,
MAEDA Hideaki(RIKEN)
E-mail: shunich-o@hoffman.cc.sophia.ac.jp

1. はじめに

従来、超伝導コイルの磁場均一度の向上には超伝導シムコイルを利用することが多い。超伝導シムコイルの磁場補正能力は高いものの、複雑なコイル配置となり、コスト上昇の要因となる。これに対して、鉄片や超伝導円筒などを用いる passive shim は簡便・安価な方法である。NbTi シートを用いた磁場補正については既に報告されている[1]。我々は、高磁場にも使用できる YBCO 円筒を用いた磁場補正の研究を開始した。ここでは永久電流モードコイルのボアに YBCO テープを巻いた円筒を設置し、磁場均一度への効果を調べたので報告する。

2. 実験方法・結果

(1) メインコイルの特性と超伝導シムによる補正

メインコイル (NbTi) の諸元を Table. 1 に示す。YBCO 円筒との比較のために 2 次までの超伝導シムコイルを用意した。各コイル共に超伝導接続を施し永久電流の減衰を低く抑えた。各コイルには永久電流スイッチを設置し、ヒータで動作させた。

メインコイルに 32.07A の電流を流し、磁場を発生させた (4.2K)。Fig. 1 に示すように、低温ホール素子を約 1mm ステップで動かし、磁場(軸方向成分)分布を求めた(△)。得られたメインコイルの磁場分布を Fig. 2 に示す(横軸は軸上の位置)。z2 シムを用いて 2 次のエラー磁場を補正したが(○)、まだ完全には補正できていない。今後さらに補正を進める。

(2) YBCO 円筒による磁場補正

使用した YBCO テープ (Superpower SCS4050-i) の諸元を Table. 2 に示す。メインコイルの径方向磁場で YBCO テープに遮蔽電流が誘導され、これが偶数次のエラー磁場を作る。この成分はメインコイルと逆方向なので、メインコイル磁場を補正できる。

径方向磁場により YBCO テープに誘導される遮蔽電流とそれが作る磁場を数値解析で求め[2]、メインコイルの 2 次エラー磁場を補正する円筒形状(長さやターン数)を求めた。この円筒を用いた場合の磁場補正能力をシムコイルの場合と比較して当日示す。

3. まとめ

メインコイルとシムコイルの製作と評価を進めた。YBCO テープ円筒を用いた磁場均一効果の実験結果は当日報告する。

Table. 1. Specification of main and sim coil

	main	z1	z2
Number of turns	7200	80	480 80
Number of layers	20	4	4
Coil height(mm)	200	5.4	32.4 5.4
Inner diameter(mm)	44	75	75
Outer diameter(mm)	64	77	77

Table. 2. Specification of Insulator YBCO tape

Conductor width(mm)	4.07
Conductor Thickness(mm)	0.1
Total width(mm)	4.15
Total thickness(mm)	0.328

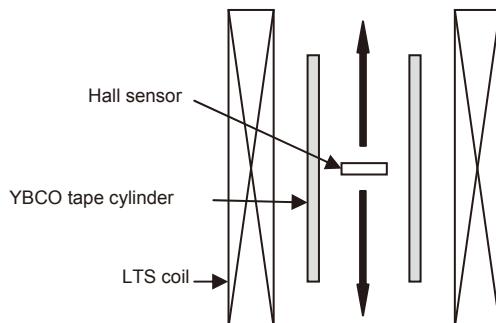


Fig. 1. Schematic drawing for a LTS coil with a YBCO tape cylinder.

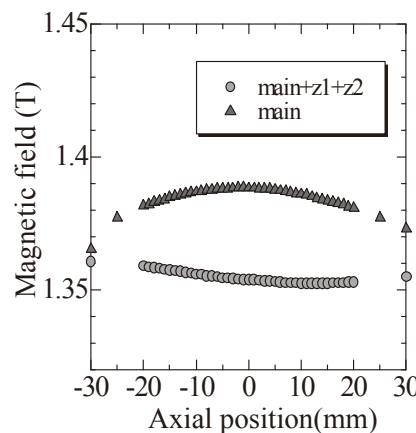


Fig. 2. Measured axial magnetic field distribution

参考文献

1. M. Tsuchimoto, et al., Physica C 412-414 (2004) 719-722
2. Y. Yanagisawa, et al., Physica C 1996-1999(2009)

HTS-rf-SQUID を用いた低磁場 NMR に関する研究

Study of Low-Field Nuclear Magnetic Resonance Using HTS-rf-SQUID

廿日出 好, 林 正浩, 勝 行広, 福元 翔平, 田中 三郎(豊橋技科大)
HATSUKADE Y., HAYASHI M., KATSU Y., FUKUMOTO S., TANAKA S. (TUT)
E-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp

1. はじめに

NMR は分子の組織や構造に関する多くの情報を得ることができ、化学、生物学、薬学など広い分野で用いられるツールとなっており、MRI の基礎でもある。従来の NMR/MRI では数 T 以上の静磁場を発生する超伝導磁石をベースとしており、更なる高感度、高分解能を得るために、より強い数 10T の高磁場計測装置の開発が進められている。一方、近年では、超伝導磁石をノーマルな電磁石に置き換えた、 μ T オーダーの低磁場 NMR/MRI に注目が集まっている[1,2]。低磁場 NMR/MRI では、共鳴周波数が低周波数となるため、通常の誘導コイルでは感度が不足する。このため感度が周波数に依存しない高感度な SQUID 磁気センサが用いられており、また、低磁場による微弱な核磁気モーメントを増大するため、90° パルスの役割も果たす分極 DC パルス磁場を用いた方法が提案されている。このような低磁場 NMR/MRI は、従来技術よりもシンプルなシステムとなるため大幅な低コスト化が見込まれ、オープンな環境において可搬性を持たすことが可能であるなどのメリットもあり、その実用化が期待されている。

そこで、我々は、静電気対策などが不要で取扱の容易な HTS-rf-SQUID を用いた低磁場 NMR システムの試作を行ってきた。今回、静磁場の均一性を向上させるため勾配コイルを導入し、プロトン ^1H の FID 信号を計測することにより、その効果を検証した。また、スピニエコー信号を計測するため、AC パルスコイルを導入して、180° パルスを与える条件について実験的に検討を行ったので報告する。

2. HTS-rf-SQUID を用いた低磁場 NMR システム

本研究で試作した低磁場 NMR システムは、基板共振型 HTS-rf-SQUID マグネットメータ[2]とクライオスタット、SQUID エレクトロニクス、常温のヘルムホルツ型静磁場コイル、ソレノイド型分極磁場コイル、勾配コイル、AC パルス磁場コイル、遅延パルス発生器、電流源、ミキサー、スペクトラムアナライザなどから構成される(Fig.1)。SQUID やコイルなど装置の一部は磁気シールドルーム内に設置した。図に示すように静磁場 B_m ($\sim 50 \mu\text{T}$)を印加する方向を z 方向とし、これに垂直な分極磁場 B_p ($\sim 40\text{mT}$)を印加する方向を x 方向とすると、両者に対して垂直な磁場成分 B_y を計測するように HTS-rf-SQUID を設置した。分極磁場コイルの中にサンプル(市水 20ml)を設置し、SQUID はサンプル中心上リフトオフ約 20mm の場所に設置した。勾配コイルは、サンプル付近の磁場勾配 dB_z/dx , dB_z/dy , dB_z/dz がゼロになるよう補償する 2 個のゴーレイコイル、そして 1 個のマクスウェルコイルから構成される。AC パルス磁場コイルは分極磁場コイルの周りに巻かれており、静磁場 B_m におけるラモア周波数 f_L ($= \gamma B_m$, γ は核磁気回転比、 ^1H の場合 42.6MHz/T)と同じ周波数の AC バースト磁場をサンプルに印加することにより核スピンを回転させる。ここでは遅延パルス発生器を用いて、Fig.2 に示すような自由誘導減衰(FID)信号およびスピニエコー信号を発生・計測するシーケンスを開発した。図に示すように、 B_p をオフした直後に SQUID をロックし、発生する FID 信号を計測する。スピニエコーを計測する場合、FID 信号が減衰した後、180° パルスとなる $\pi = \gamma B_{ac} \tau$ (B_{ac} は AC パルス振幅、 τ は印加時間)という条件をもつ AC パルス磁場を印加し、発生するエコー信号を計測する。NMR 信号は時間波形およびスペクトラムとして記録する。本装置の SQUID 感度は約 85 fT/Hz $^{1/2}$ である。

3. ^1H の FID 信号とスピニエコー信号の計測実験

ここでは、まず勾配コイルにより静磁場均一性が改善されるかどうかを実験により調べた。45 μT の静磁場(f_L は 1908Hz)に加え、36.8mT の分極磁場を 5s 印加してオフした後、 ^1H の FID 信号を勾配コイルによる磁場均一性補償無しと有りの場合について計測した。両方のスペクトラム計測結果において 1908Hz に NMR ピーク信号が得られた。信号雑音(SN)比を高めて FID 信号を計測するため、ミキサーを用いて 250Hz にダウンコンバートして記録した FID 信号を Fig.3 に示す。磁場補償有りの場合、無しの場合と比較して見かけの横緩和時間 T_2^* が 2.2s と 1.7 倍増長した。以上より勾配コイルにより静磁場均一性が向上することが示された。また、180° パルスとなる B_{ac} の印加条件(振幅と印加時間 τ , 印加タイミング)を実験により調べたところ、振幅を 1 μT とした場合、 τ は 16ms、タイミングは B_p オフ後 2.5s 以降とすればよいことが分かった。

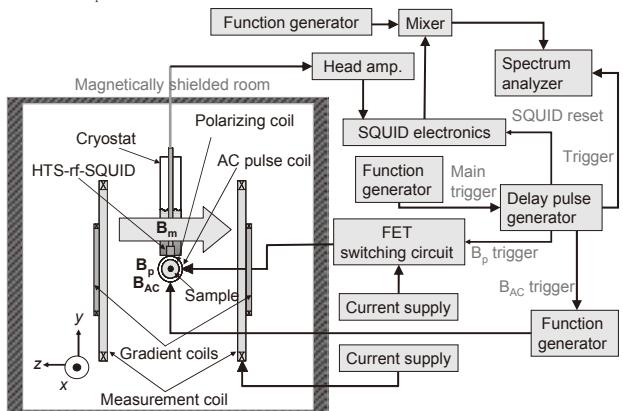


Fig.1 Schematic diagram of LF-SQUID-NMR system.

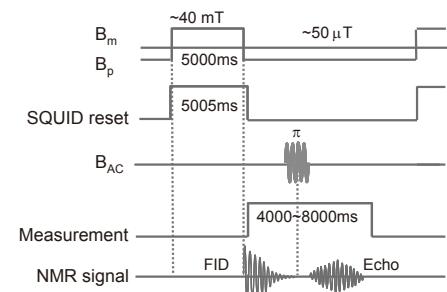


Fig.2 Measurement sequence of FID and echo signals.

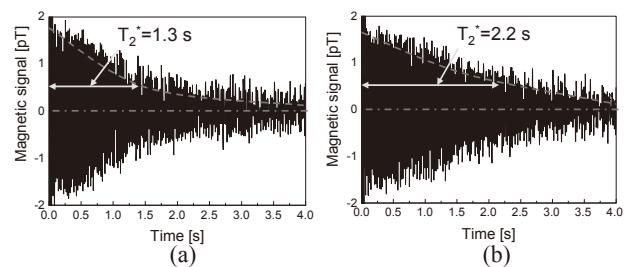


Fig.3 FID signals measured (a) without gradient coils, and (b) with gradient coils.

参考文献

- [1] R.McDermott, et al.: Science, Vol.295 (2002) p.2247
- [2] Y.Zhang, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 90 (2007) p.182503

ミュオンビームライン用超伝導ソレノイドの設計概要とモデルコイルの試験結果

Design of Superconducting Solenoids for muon beamline and tests of model solenoids

足立 泰平(東大); 中原 一隆, 池戸 豊, 槙田 康博, 安島 泰雄, 萩津 透, 山本 明, 中本 建志, 佐々木 憲一, 田中 賢一, STRASSER Patrick, 下村 浩一郎, 三宅 康博(KEK)

Taihei Adachi(Univ. of Tokyo); Kazutaka Nakahara, Yutaka Ikeda, Yasuhiro Makida, Yasuo Ajima, Toru Ogitsu, Akira Yamamoto, Tatsushi Nakamoto, Kenichi Sasaki, Kenichi Tanaka, Strasser Patrick, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake(KEK)

E-mail: adachit@post.kek.jp

1. はじめに

“Super-Omega”[1]と呼ばれるミュオンビームラインがJ-PARCの物質・生命科学研究施設(MLF)にて建設中である。このビームラインでは、ミュオンの捕獲および輸送にソレノイドを用い、特に輸送部分には、超伝導かつ両端に45°の湾曲部をもつソレノイドが用いられる予定である。(Fig.1) 本講演では、湾曲ソレノイドの設計及びモデルコイルの試験を行った結果について報告する。

2. 超伝導湾曲ソレノイドの設計

湾曲ソレノイドは、6つのセグメントに分割されており、各セグメントは、短い直線型のソレノイドと、その軸方向の前後に、テーパー付きのスペーサーを取り付けた構造になっている。これを軸方向に6つ連結することで、湾曲したソレノイドを実現した。[2] 各セグメントを同一形状とし、直線型とすることで、製作を容易にした。1セグメントでのパラメータをTable 1に示す。

Table 1 Specifications of a segment of the Curved Solenoid

Parameters	
Coil inner diameter	400mm
Axial coil length	43mm
Number of turns/layer × layers	25×6
Superconductor	Nb-47wt%Ti
Cu/NbTi ratio	4.3±0.4
Width × Height of wire	1.67×2.7mm
Operational temperature	6K
Coil weight (w/o spacers)	27kg
Nominal operational current	330A

3. モデルコイル

前述の湾曲ソレノイドを構成するセグメント6つの内、2つを製作し、これを連結してモデルコイルとした。セグメントのサイズや構造は、湾曲ソレノイドの設計と同一であり、その製作過程や連結の検証を行った。常温硬化のエポキシを用いた塗り巻き法で製作し、2セグメントの製作に成功した。

4. 試験

GM (Gifford-McMahon)冷凍機のみを用いた伝導冷却により、モデルコイルおよびカレントリードを冷却した。冷却は、およそ4日で完了し、ソレノイドの最低到達温度は、約7Kであった。(Fig.2) 330Aまで励磁を行い、簡易な磁場の測定を行った。測定された磁場は、計算値よりも中心付近で数パーセント大きいものであった。(Fig.3)

5. まとめ

超伝導湾曲ソレノイドを分割型で設計し、そのモデルコイルの製作に成功した。また、GM 冷凍機のみでの冷却と 330Aまでの励磁に成功した。今後、磁場のずれの検証と校正、力

学的変形の測定を行う予定である。また、分割構造では、直接のクエンチ伝搬は期待できないので、なんらかのクエンチバックが求められており、この設計および検証を行う予定である。

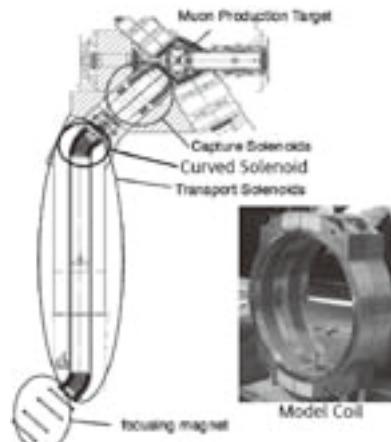


Fig.1 Super-Omega Muon Beam Line and Model Coil.

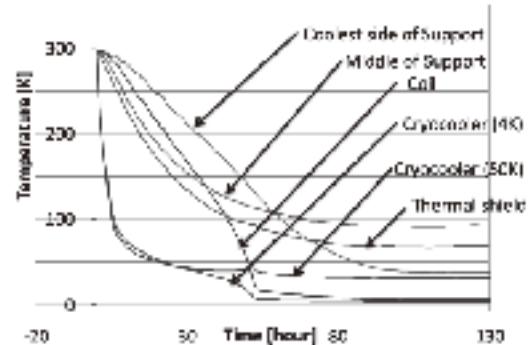


Fig. 2 Cooling trend.

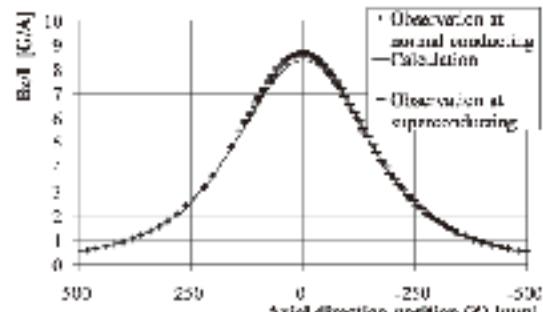


Fig. 3 Magnetic flux density par excitation current on axis.

参考文献

1. K. Shimomura et al, AIP Conference Proceeding 721, 2004, pp. 346-349.
2. K. Nakahara et al, AIP Conference Proceeding 981, 2007, pp. 312-314.

³³S-NMR 低温プローブ用の低温プリアンプの開発

Development of highly-sensitive low temperature preamplifier for ³³S cryogenic NMR probe

斎藤雄太(上智大); 佐藤直樹, 保母史郎(横浜市大); 高橋雅人(理研・横浜市大); 高尾智明(上智大);
前田秀明(理研・横浜市大)

SAITO Yuta(Sophia Univ.); SATO Naoki, HOBO Fumio(Yokohama City Univ.);
TAKAHASHI Masato(RIKEN, Yokohama City Univ.); TAKAO Tomoaki(Sophia Univ.);
MAEDA Hideaki(RIKEN, Yokohama City Univ.)

E-mail: y-saito@gsc.riken.jp

1. はじめに

硫黄は生体を構成する基本元素であり、多様な機能を付加するので生物学的に重要である。しかしNMRで計測可能な同位体である³³Sの天然存在比は0.76%であり、ラーモア周波数も低いためNMR計測が難しく、生物学研究への利用が困難な状況にある。通常のプロードバンドプローブでタウリンを測定した場合5mM程度が限界であるが、人に含まれるタウリンは比較的濃度の高い尿で0.8mM程度であり通常のNMRプローブでは計測が不可能である。³³SのNMR感度を大幅に向上させこの種の計測を実現するために、³³S溶液NMR低温プローブを開発した。このプローブはRFコイルを冷却し、プローブ下部ボックス中にプリアンプを設置し冷却してアンプノイズを低減する。両冷却により³³Sの計測感度(S/N比)を1桁以上向上できる。

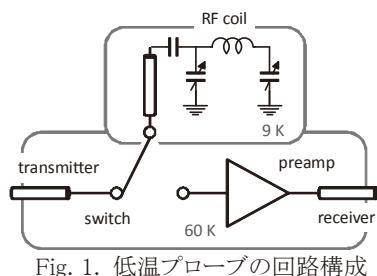
NMRの感度は(1)式で示され、冷却でプリアンプの雑音指数(NF)をすることでコイルの冷却の効果を引き出すことが出来る。

$$S/N \propto \frac{1}{\sqrt{T_c R_c + T_s R_s + T_a (R_c + R_s)}} \quad (1)$$

ここで、 T_c はRFコイルの温度、 R_c はRFコイルの抵抗、 T_s はサンプル温度、 R_s はサンプル等価抵抗、 T_a はプリアンプの等価雑音温度である。本プローブでは、 T_c と T_a を下げることでS/Nを向上させる。

2. 実験方法

開発した³³S低温プローブの回路構成をFig. 1に示す。スイッチを発信側(transmitter)にしてRFパルスをサンプルに照射し、受信側(receiver)に切換えてNMR信号を受信し、低ノイズプリアンプで増幅する。また冷却構成をFig. 2に示す。2段GM/JT冷凍機で熱交換した液体Heでプローブ内の冷却ステージを冷却し、これに熱的に接触したRFコイルを9Kまで伝導冷却した。また、別の1段GM冷凍機で熱交換した液体Heで基板を冷やし、それに固定したスイッチとプリアンプを60Kまで冷却した。GM冷凍機の振動はNMR測定に影響するため、フレキシブルなHeトランスファーラインで影響を軽減した。



3. 実験結果と検討

(1)RFコイルのみを冷却した効果

Fig. 3にRFコイルだけを冷却した時の³³S計測スペクトルを示す。計測試料は生体の機能に密接に関係するタウリンで、20mMの濃度を持つ。4万回積算した結果を、(a)通常の室温プローブと(b)低温プローブで計測した結果を比較して示した。RF

コイル温度は25.6Kである。今回開発した低温プローブでは測定するサンプルに合わせ、通常のプローブの2倍の径のサンプル管(サンプル量)で測定できるようにしたため、同じ濃度で約2倍の感度が得られる。低温プローブにより室温プローブに比べS/Nは合計で5.6倍に向上した。低感度核である³³Sにおいては、この感度向上は非常に有効である。

(2)プリアンプの低温特性

今後、さらにプリアンプも冷却すれば、合計10倍以上の感度上昇が期待できる。この目標に向けて、低温で動作するスイッチとプリアンプの開発を終え、単体での低温特性を確認した。Fig. 4に液体窒素中での特性を室温特性と比較して示す。横軸は周波数、縦軸はアンプの雑音温度とゲインである。液体窒素中における雑音温度は20K(NFは0.3dB)であり、十分低い。現在、このプリアンプを収めた低温プローブで低温での³³S NMR計測を実施している。結果は、当日発表する。

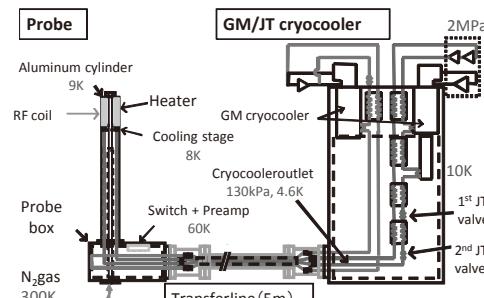


Fig. 2. プローブの冷却構成

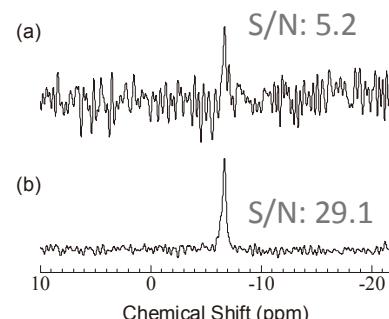


Fig. 3. 20 mM タウリン水溶液の³³S NMR信号(40,000回積算2時間) (a) 常温プローブ (b) 低温プローブ

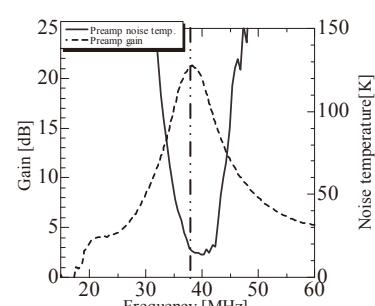


Fig. 4. プリアンプの雑音温度と増幅特性

2009 年度第 12 回低温技術講習夏合宿 —7T 超電導マグネットへの挑戦—

12th summer seminar for cryogenic technology – The challenge to making a 7T superconducting magnet –

藤田 真司, 大保 雅載(フジクラ); 尾坂 亮太(九大); 糸木 温子, 南 いつか(JASTEC); 吉田 潤(住重)
FUJITA Shinji, DAIBO Masanori (Fujikura Ltd.); OSAKA Ryota (Kyushu University);
 ITOKI Atsuko, MINAMI Itsuka (JASTEC); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.)
 E-mail: sfujita@fujikura.co.jp

1. はじめに

12 回目を迎える本講習は, 若手研究者や技術者を対象に, 超伝導および低温技術への理解を深める目的で開催されている. 講習では, 低温工学や超伝導マグネットに関する座学と並行して, 中心磁場 7T の超伝導マグネットの巻線実習を行った. 実習内容と講習の成果について報告する.

2. 座学

本講習は超伝導マグネットに関する座学と, 巾線実習で構成される. 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, クライオスタット, 液体ヘリウムの取り扱い, 励磁回路と結線方法等, 低温技術の基礎的な講義が行われた.

3. 超伝導マグネット巻線実習

4.2K において中心磁場 7T を達成することを目的に超伝導マグネットの巻線実習を行った. 例年使用している線材は線径 0.7mm の NbTi 丸線であるが, 今回の実習では厚さ 0.47mm, 幅 0.86mm の NbTi 平角線を使用した. 線材の 4.2K における臨界電流値は外部磁場 5.6T で 320A, 8.0T で 137A である. 使用した巻枠は内径 54mm, 外径 71mm の SUS 製のボビンであり, カプトンシートと FRP で絶縁を施した. これを巻線機にセットし, 巾張力を約 4.0kgf に調整して巻線を開始した.

巻線作業は受講者が 3 班に分かれて 1 層ずつ交代で行った. 平角線であったため丸線よりも隙間無く巻けたが, 各層の端部には隙間ができるため, エポキシ系のグリーンバテで隙間を埋めた. このようにして最終的に総ターン数 4009 ターン(約 77 ターン/層, 52 層)のコイルを作製した(Fig.1 参照). NbTi 線の巻線後は, コイルをカプトンシートで絶縁し, 補強のために SUS 線を 2 層巻き, 最後に結線部の処理を施した.

4. 励磁試験

完成した超伝導マグネットをクライオスタットにセットし, 液体ヘリウムで 4.2K まで冷却した. この冷却の際, コイルの抵抗値をモニターしており, NbTi が超伝導に転移したことを確認した. 冷却後, まず予備実験として保護抵抗の抵抗値とコイルのインダクタンスを測定した. インダクタンスは, コイルに数 A 通電し, 電流を遮断した際の緩和時間と保護抵抗の抵抗値(0.176 Ω @ 4.2K)から算出し, $L=0.65[H]$ を得た.

次に励磁試験を行った. 励磁試験の実施回数と, クエンチ発生時のコイル中心磁場を Fig.2 に示す. 一回目の励磁では, クエンチ電流 126A, 中心磁場 5.98T であり, その後計 8 回の励磁試験を実施した. 中心磁場は 4 回目の励磁試験の 6.04T が最大であり, トレーニング効果が見られなかったため試験を終了した.

5. おわりに

励磁試験の結果, 残念ながら 7T は達成できなかった. やはり巻き線時の各層の両端のバテ埋めが成功の鍵を握っているように思う. 超伝導コイル作製の大変さと難しさを知った実習であった. しかしながら, 自分達で実際に超伝導コイルを

作製し, 液体ヘリウム中での励磁試験まで行ったことは非常に貴重な体験であり, 座学も非常に有意義なものであった. 講習以外でも他の受講者や講師の方々とのつながりができ, 充実した 6 日間を過ごすことが出来た.

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 我妻洋先生, 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 柚川一弘先生, クライオウェア 藤岡耕治先生には, 座学や巻線実習を通じて超伝導マグネットの知識と技術をご教授頂きました. 深く感謝申し上げます. また冷凍部会の光田忍様にも大変お世話になりました. 誠に有難うございました.

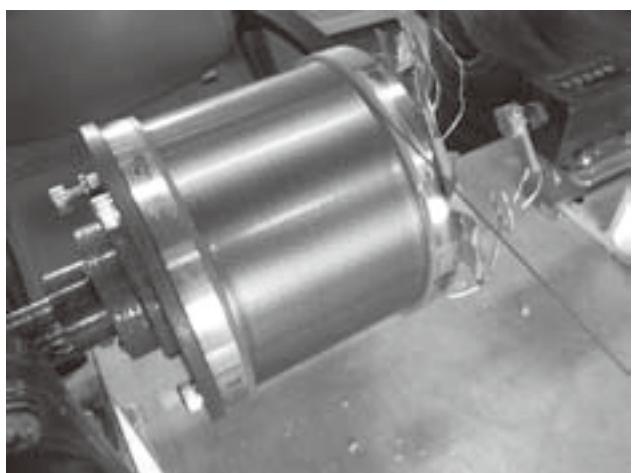


Fig.1 Superconducting magnet in winding process

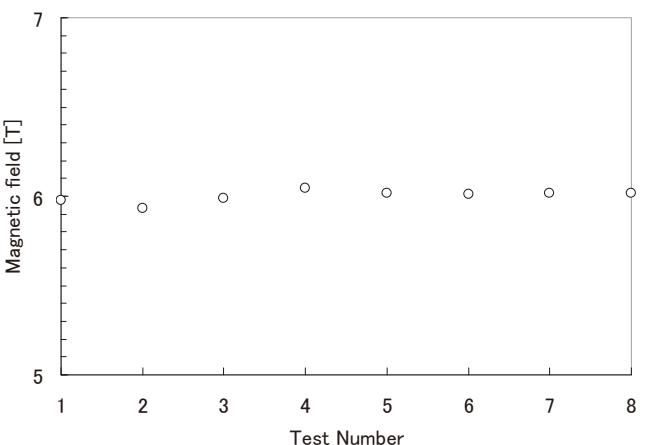


Fig.2 Experimental results of excitation test

Y系超伝導線材の細線化による超伝導送電ケーブルの交流損失低減

Ac loss reduction of power transmission cables using narrow strips of coated conductors

竹内 活徳, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大・工); LI Quan (University of Cambridge)

八木 正史 (古河電工); 藤原 昇 (SRL)

TAKEUCHI Katsutoku, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Graduate School of Engineering, Kyoto University)

LI Quan (University of Cambridge) YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., Ltd.) FUJIWARA Noboru (SRL)

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

1. はじめに

超伝導ケーブルの交流損失を低減する方法のひとつとして、線材の細線化がある。一般に、現在利用可能なY系線材の幅方向の J_c 分布は均一ではなく、線材の両端付近において低下している。線材幅が大きい場合、これらの影響は小さいと考えられるが、線材を細線化した場合、端部での J_c の低下は交流損失に大きく影響する。

これらの影響を見積もるために、 J_c 分布を反映した交流損失解析を行い、一様な J_c 分布を仮定した場合の解析結果、及び交流損失測定結果と比較した。また、レーザによって線材端部を切り落とすことにより、端部の J_c 低下を抑えた場合を想定した解析を行なった。

2. 解析対象

ケーブル断面内において、一次元有限要素法を用いて解析を行なった。まず、実際の測定結果と比較した解析の諸元を Table 1 に示す。この導体は狭いギャップ(0.04 mm)と広いギャップ(0.391 / 0.309 mm)が交互に配置された構造をしている。磁気ナフ法での測定結果より、 J_c の低下している領域は 0.3 mm 程度であったので、解析では Fig. 1 に示すような台形分布を仮定した。次に、線材幅と J_c 分布の肩幅の異なる 2 種類の線材で構成されたケーブルを解析した。これまでの我々の測定で、製造上のプロセスによって生じる J_c 分布の線材端における低下は場合によって 1 mm 程度まで達するのに対し、レーザ切断による切断面付近の J_c の低下は 0.3 mm 程度まで抑えられる可能性があることがわかった。そこで、両端 0.8 mm の領域で J_c が低下している 5 mm 幅の線材で構成されたケーブル(Model A)と、その線材の両端の J_c 低下領域 0.5 mm を削って、低下領域が 0.3 mm である幅 4 mm の線材ができたと仮定し、この線材で構成されたケーブル(Model B)を交流損失解析した。これらのケーブルの諸元を Table 2 に示す。なお、通電電流はどちらのケーブルとも 50 Hz、3 kA _{rms} とした。

3. 解析結果

Fig. 2 に解析と測定の比較をした。台形 J_c 分布を仮定した場合の交流損失は、一様 J_c 分布を仮定した場合に比べ大きくなり、測定結果に近づいた。また Fig. 3 より、レーザ切断などで J_c が低下している線材端部の切り落とすことによって、交流損失を効果的に低減できることがわかった。線材には端部から磁束が侵入するため、交流損失の多くは線材の端部で発生している。そのため端部での J_c の低下は、より広範囲に磁束の侵入を招き、交流損失に大きく影響したと考えられる。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器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の委託のもと、国際超電導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

Table 1 Specifications of 2 layer cable

Conductor width	2.23 mm
No. of conductor in inner / outer layer	36 / 38
Wide gaps of inner / outer layer	0.391 / 0.309 mm
Narrow gaps of inner / outer layer	0.04 / 0.04 mm
Total critical current	4547 A

Table 2 Specifications of 2 layer cables

	Model A	Model B
Conductor width	5 mm	4 mm
No. of conductor in inner / outer layer	14 / 15	17 / 18
Gaps of inner / outer layer	0.444 / 0.494 mm	0.462 / 0.559 mm
I_c of each conductors	252 A	222 A
Total I_c of cable	7308 A	7770 A
Shoulder of J_c	0.8 mm	0.3 mm

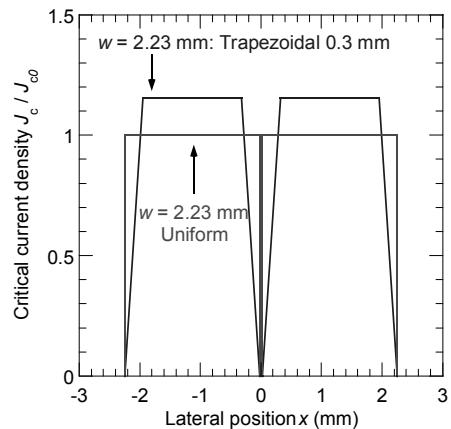


Fig. 1 Lateral J_c distributions supposed in analysis:
Shoulder width of trapezoidal distribution is supposed 0.3 mm.

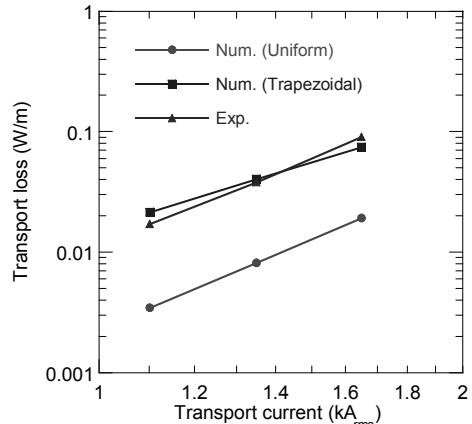


Fig. 2 Transport loss of 2 layer cables

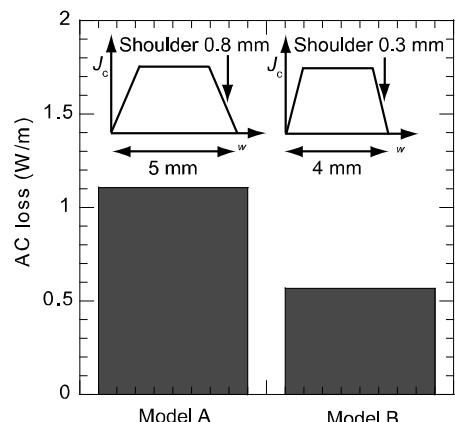


Fig. 3 Calculated AC loss of 2 layer cables:
Model A is a cable composed by 5 mm wide conductors with 0.8 mm shoulders and Model B is 4 mm wide conductors with 0.3 mm shoulders.

200メートル直流超電導送電ケーブル試験装置の計測システム

A measurement system for a new 200 m DC superconducting power cable

孫 建(中部大), 江本 雅彦(NIFS), 芳村 幸治(中部大), イワノフ ユーリ(中部大), 渡邊 裕文(中部大), 浜辺 誠(中部大), 河原 敏男(中部大), 山口 作太郎(中部大);

SUN Jian (Chubu Univ.), EMOTO Masahiko (NIFS), YOSHIMURA Koji (Chubu Univ.), IVANOV Yury (Chubu Univ.), WATANABE Hirofumi (Chubu Univ.), HAMABE Makoto (Chubu Univ.), KAWAHARA Toshio (Chubu Univ.), YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);

E-mail: j_sun@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

A new 200 m DC superconducting power transmission (DC-SCPT) cable test facility is under construction at Chubu University to evaluate the performance and characteristics of this cable [1]. The cable uses bismuth-based multi-filamentary tapes as the current conductors. In order to monitor the operation of this test facility, kinds of sensing units and a data acquisition system is made. The data are acquired in a real time and displayed. At the same time, the data queue for all the sensing units are continuously saved for a long-term running. In this paper, we present the development of the measurement system for this test facility.

2. Measurement system configuration

Fig.1 shows a sketch of the measurement system. The measurement system consists of the sensing units, a data logger and a personal computer. 529 sensing units such as voltage taps, thermocouples, Pt resistive thermometer devices (RTDs), vacuum gauges, flow meter, pressure gauges, current transducers and level meters are utilized, which are widely distributed. 195 voltage taps and 234 T-type thermocouples are located at the two terminations to measure the potential differences and temperatures of conductors and current leads. 37 Pt RTDs are used to measure the temperature of coolant, i.e. liquid nitrogen, circulating through the cryogenic system, cryostat and inner tube of the thermal insulated double layer tubes around the cable. 1 mass flow meter, 2 pressure gauges, 2 level meters and 4 thermometers are used in the cryogenic system with analogue outputs of 4–20 mA. 10 vacuum gauges are installed in the double layer tubes with analogue outputs of 0–10V. 39 current transducers are used to monitor the transport current through each SC tape. Five voltage signals are acquired to monitor the power supplies current output and the copper former's temperature. Two KEITHLEY digital multimeters (DMMs) are used as a data acquisition system which provides up to 600 channels as shown in Fig.1. The DMMs are connected to a personal computer via a GPIB bus. Fig.2 shows an example of graphical user window developed by LabVIEW for monitoring the cryogenic system. For a long-term running of the facility, e.g. 3 months, the total data are estimated to be 44GB.

3. Conclusion and future works

At present time, the measurement system is still being developed. The scan speed is as faster as 0.5s/600channels

which depends on the value of number of power line cycles (nplc). In the program, nplc is set to be 0.006 and the sampling time is 1 second by the personal computer's clock which is efficient for monitoring the facility. We are planning to assemble the total measurement system with the facility in November.

Reference

1. S. Yamaguchi et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.57

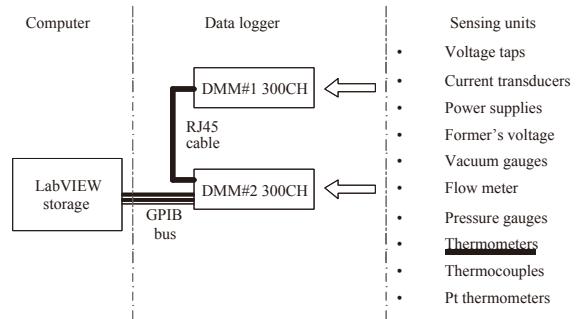


Fig.1 The schematic layout of the measurement system

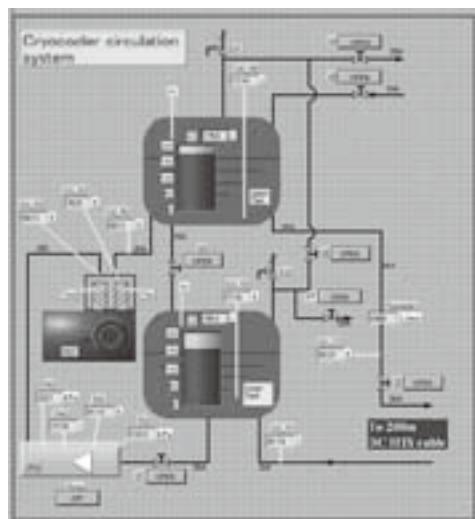


Fig. 2 A LabVIEW user interface for monitoring the cryogenic system

ペルチェ電流リードの省エネルギー効果

Energy saving due to Peltier current lead

藤井 友宏, 福田 真治, 河原 敏男, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 山口 作太郎(中部大); 江本 雅彦(NIFS)
FUJII Tomohiro, FUKUDA Shinji, KAWAHARA Toshio, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi,
YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); EMOTO Masahiko (NIFS)
E-mail: te08009@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では実用化に向けた直流超伝導送電システムの研究を行っている。2006 年から 20m 級直流超伝導送電ケーブル試験装置が稼動し、現在 200m 級システムの敷設を行っている。近年電力需要が急増しているインターネットデータセンターでは省エネ化の一つとして直流給電の検証が進められており、直流超伝導により給電する計画も進められている。直流超伝導送電において熱侵入低減は重要な技術課題の一つである。電流リード端末部、配管部から熱が侵入するが、短距離送電では電流リード端末からの熱侵入が支配的となる。電流リードからの熱侵入を低減するために、20m 級試験装置ではペルチェ素子を用いたペルチェ電流リード(Peltier current lead: PCL)[1]を採用している。今回、PCL を用いることにより熱侵入が低減され、これにより発生する省エネルギー効果を評価した。

2. 電流リードの熱侵入

PCL の概略図を Fig.1 に示す。PCL は従来の電流リード(CCL)の一部にペルチェ素子である BiTe 合金を挿入したものであり、ペルチェ素子の低い熱伝導率と通電により発生するペルチェ効果により超伝導装置への熱侵入を低減することができる。電流リードにおける温度分布を示す熱バランス式(1)を次に示す。

$$\frac{d}{dx} \left(\kappa A \frac{dT}{dx} - \alpha T I \right) + \rho \frac{I^2}{A} = Q \quad \cdots (1)$$

ここで κ は熱伝導率、 A は断面積、 T は温度、 α はゼーベック係数、 I は電流、 ρ は電気抵抗率である。ペルチェ素子の高温側を 300K、銅リードの低温側を 77K として方程式を解くことにより、熱侵入量とリードの最適形状が求められる。

Table1 に示すように、熱侵入が最小となるように最適化した場合、通電電流によらず CCL は 42.5W/kA[2]、PCL は 26.7W/kA と求められる。また、0.1kA に対する最適形状は、リードの長さを L 、断面積を A とすると、CCL で L/A は 35960 m^{-1} 、PCL で $Cu25240 \text{ m}^{-1}$ 、BiTe63.7m⁻¹ となった。

3. 省エネルギー効果

Fig.1 に効率 80% の電源で 100A、80W の負荷を運転する超伝導システムの例を示す。冷媒は成績係数 0.067@77K のスターリング冷凍機により 77K に保たれる。

電流リードに CCL を用いた場合、銅部分におけるジュール損失を無視すると、電源の消費電力は $80/0.8=100\text{W}$ となる。このとき、熱侵入は 4.25W となるため、この熱量を汲み上げるために必要な電力はスターリング冷凍機で $4.25/0.067=63.4\text{W}$ となる。

PCL を用いた場合、ペルチェ素子である BiTe は銅よりも電気抵抗率が大きく、91.1mV の電圧降下が発生するため、電源の負荷増となり、消費電力は 111W に増加する。しかし、侵入熱は 2.67W に低下するため、スターリング冷凍機の消費電力は 39.9W に低減する。

以上の結果を Table2 にまとめた。PCL を用いると BiTe 部のジュール発熱により電源の消費電力は 11W 増加するが、冷凍機の消費電力は 23.5W 減少する。よって、このシステムで

は 12.5W の電力を削減することができる。

中部大敷設の 20m 級直流超伝導ケーブルには、77K での臨界電流が 108A(実験値)の HTS Tape 線材が 39 本用いられており、電流リードは合計で 78 本ある。電流リードすべてに PCL を適用し、線材 1 本あたり 100A でシステムを稼動した場合に、削減できる消費電力を Table 3 に示す。冷凍機は、GM パルス、GM サイクル、スターリング冷凍機とし、それぞれの成績係数(COP)は 77K で 0.0033、0.013、0.067 とした[3]。最も COP の良いスターリング冷凍機を用いた場合で 1.44kW 、GM パルス冷凍機では 36.5kW の電力を削減できることがわかる。

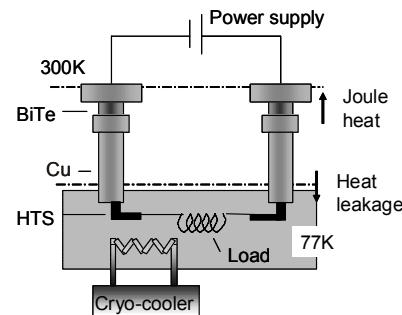


Fig. 1 Superconducting system with PCLs

Table1 Optimum conditions for CCL and PCL

	Heat leakage [W/kA]	L/A [m ⁻¹] @0.1kW	
		Cu	BiTe
CCL	42.5	35960	–
PCL	26.7	25240	63.7

Table2 Power Consumption of the supply and the cooler

	CCL	PCL
Power supply [W]	100	111
Cryo-cooler [W]	63.4	39.9
Total power [W]	163.4	150.9

Table 3 Saving power using 78 PCLs

Cryo-cooler	GM Pulse	GM Cycle	Stirling
Cooling power@77K [kW]	0.004	0.015	1
Consumption power [kW]	1.2	1.2	15
COP @77K	0.0033	0.013	0.067
Saving power [kW]	36.5	9.45	1.44

※COP=Cooling power/Consumption power

参考文献

1. S. Yamaguchi et al.: Proc 16th Inter. Cryogenic Eng. Conf./Inter. Cryogenic Mater. Conf., (1996) pp1159–1162
2. H. Okumura et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 7, (1997) p.715
3. <http://www.aisin.co.jp/product/energy/index.html>

超電導直流送電用ケーブルの磁場分布解析

Analysis of magnetic field distributions in superconducting DC transmission cables

渡邊裕文, 杉野慎, 孫建, 浜辺誠, 河原敏男, 山口作太郎(中部大学)

WATANABE Hirofumi, SUGINO Makoto, SUN Jian, HAMABE Makoto,

KAWAHARA Toshio, and YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)

E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

超電導直流送電用ケーブルは通常二層の高温超電導線材の層を持ち、線材はフォーマーと呼ばれる銅の芯材と絶縁体の周りを螺旋状に巻かれる(図1)[1]。ケーブルを流れる電流が生成する磁場が滑らかにケーブルを周回するように、通常、線材は密に巻かれるが、内側の層と外側の層では円周長が異なるため、内層と外層で異なる数の線材が用いられる。内層と外層で線材数を同じにできれば高価な線材を余分に使う必要が無くなる。線材数を同数にするためには片側の層の線材は疎に巻かれることになるが、その結果ケーブル周りの磁場は乱れる。線材を芯材に疎に巻くことにより(図2)、電流により生成される磁場の分布を数値計算により求め、疎に巻くことにより予想される磁場の変化を議論する。

2. 計算方法

ケーブルに螺旋状に巻かれた線材を流れる電流により生成した磁場を、ビオサバールの法則により計算した。計算にはANSYS[2]と呼ばれるソフトウェアを用いた。ANSYSでは電流による磁場をビオサバールの法則で求めた後、その磁場強度を節点加重として用い有限要素法計算を行う。そのため、計算結果は有限要素法のメッシュサイズや計算領域や境界条件の影響を受けるが、条件を変えて計算することにより計算結果にそれらの影響は無いことは確認した。磁場の計算は巻き付け半径を一定にして巻き付け本数を変化させたものと、巻き付け本数を一定にして巻き付け半径を変化させたものについて行った。線材の中央と、線材を疎に巻くことによる影響が最も大きいと考えられる線材の端について磁場の計算を行った。

3. 結果

図3に磁場計算の一例を示す。巻き付け半径を $r=16\text{mm}$ と一定とし、巻き付け本数を変化させた場合の結果である。線材は幅4mm 厚さ0.22mm、巻き付けピッチを180mmとしたため、22枚巻き付けた場合が最密となる。電流はケーブル全体に100A流した場合である。従って、巻き付け本数が1本の場合は線材に100A流れているが、巻き付け本数が20本の場合は線材には5Aの電流が流れている。参考のために直線状の線材に電流を100A流した場合の結果を線材数0の所に示した。aと表してあるのが線材に沿って、cと表しているのが線材表面に垂直、bと表しているのがaとcに対して垂直方向(線材横方向)の結果である。

結果から、巻き付けが密になるに連れて、磁束密度は小さくなるが、巻き付け線材数が5を超えると、変化の度合いは極めて小さくなる。線材の臨界電流に大きな影響を与えると考えられるc方向の磁束密度は、いずれの結果でも直線状の線材の自己磁場に比べて小さい。

本講演ではその他の結果も合わせて、線材の巻き付け方による、発生する磁場の変化について議論する。

参考文献

1. S.Yamaguchi et al. J. Phys.:Conf. Series **97** (2008) 012290.
2. <http://www.ansys.com/>

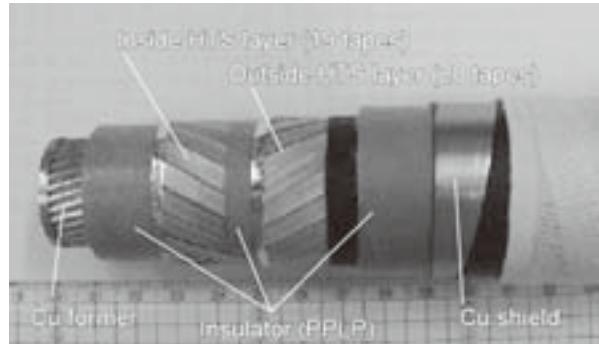


Fig.1 The cut-out model of a DC superconducting power transmission cable.

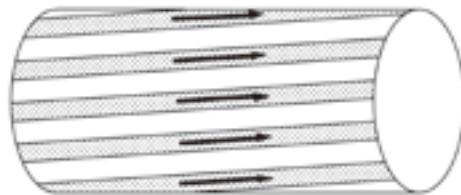


Fig.2 The model of calculations.

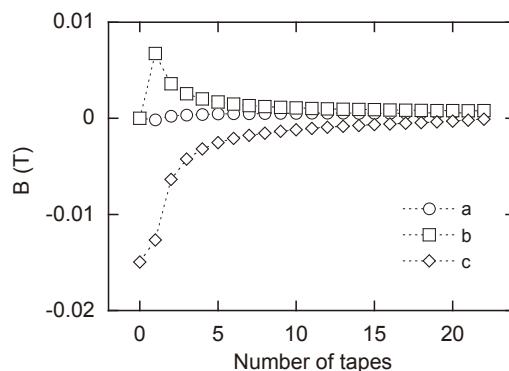


Fig.3 The components of magnetic flux densities produced at the edge of a HTS tape.

YBCO超電導線材の交流過電流通電特性

The AC Over-Current Characteristics in YBCO Coated Conductors

百足 弘史, 新井 道生, 河野 秀太郎, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学);
斎藤 隆(フジクラ), 青木 裕治(昭和電線);八木 正史(古河電工), 藤原 昇(ISTEC-SRL)

MOMOTARI Hiroshi, ARAI Michio, KONO Hidetaro, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
SAITO Takashi(Fujikura);AOKI Yuji(SWCC Showa Holdings);YAGI Masashi(Furukawa Electric);FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

YBCO 線材を送電ケーブルに応用した際に、短絡事故電流により線材が劣化・焼損してしまう可能性がある。そのため各素線に流れる短絡事故電流による線材の特性劣化や焼損しない電流の限界値を調査し、想定した事故電流に対する裕度を評価しておく必要がある。今回は、まず、開発した計算機シミュレータによる解析から、66kV 階級のケーブルを想定して、31.5kA_{rms}、60Hz、2s という短絡事故が起きた際、YBCO 超電導ケーブル内の導体層の各超電導素線に流れる交流過電流波形を求めた。次に、これと同じ交流過電流パルスを波高値をパラメータとして YBCO 線材に印加する実験を行った。そして、YBCO 超電導線材の交流過電流に対する特性を調査したので報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. シミュレーション

本解析に用いたシミュレーションモデル及びプログラムは参考文献⁽¹⁾にて報告したものである。

解析条件として、ケーブルの仕様を以下のように想定した。フォーマの銅撲り線の断面積を 140mm^2 、HTS 導体層は 2mm 幅 Clad 基板線材を用いた 6 層(総数 165 本)で外径 22mm、絶縁層は PPLP 厚さ 6mm で外径 35mm、HTS シールド層は 2mm 幅 Clad 基板線材を用いた 3 層(総数 149 本)で外径は 36mm、銅シールド保護層は 4 層で外径が 42mm である。長さは 1m とする。このケーブルに 31.5kA_{rms}、60Hz、2s の交流過電流が流れた時に各導体層が経験する電流波形を解析した。そして最も電流が流れる層の各素線が経験する電流波形を求めた。解析結果は Fig.1 である。

3. 実験方法

実験に用いた線材の諸元を Table.1 に示す。実験で用いた線材は IBAD/TFA-MOD 法で作製されたもので、安定化層として銀層の上に銅層がメッキされたものである。

実験は GM 冷凍機による伝導冷却方式を採用し、線材両端から冷却し、運転温度は 77 K で行った。実験では線材に電圧タップを 1 区間(V_{12})設置した。実験手順は以下の通りである。

- V_{12} の臨界電流値 I_c ($1\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準)を測定
- 解析結果の波高値 I_{peak} (Fig.1 参照)を I_c 以上として通電
- 再び I_c を測定し、 I_c の劣化の有無を確認

今回の実験では、 I_c 測定時に $\pm 2\text{A}$ 程度の誤差が含まれるため、2A 以上の I_c の低下かつ継続して I_c が低下することを劣化と定義した。 I_c の劣化が観測されるまで交流過電流パルスの I_{peak} を上げながら(ii)、(iii)の手順を繰り返し、劣化開始時の I_{peak} を求めた。

4. 実験結果とまとめ

実験結果を Fig.2 に示す。 I_c が 2A 以上劣化しない I_{peak} の値は Sample1、2 の場合で 315A、310A となった。

今後は、想定した短絡事故の波高値 I_{peak} (=100.82A)に対する電流の裕度を調査していく。

Table.1 Specifications of YBCO sample tapes

	Sample 1,2	
Manufacturing Method	IBAD/TFA-MOD	
Length	mm	150
Width	mm	5.0
Cu Thickness	μm	50
Ag Thickness	μm	15
YBCO Thickness	μm	1.5
CeO ₂ and Gd ₂ Zr ₂ O ₇ Thickness	μm	1
Hastelloy Thickness	μm	100
Operating Temperature	K	77
Initial I_c @77K	A	118.6 123.2

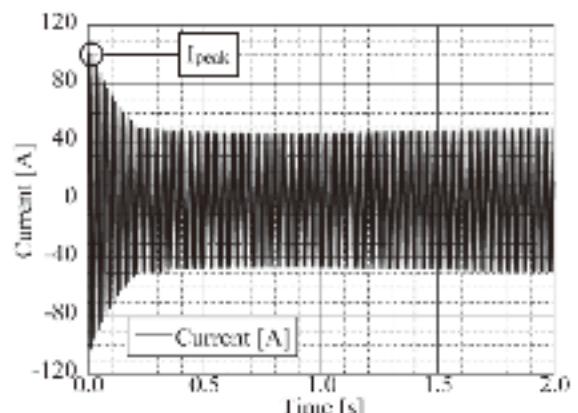


Fig.1 Simulation result of current trace in each YBCO tape

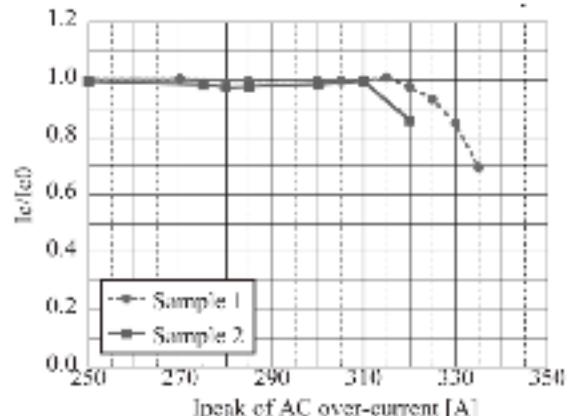


Fig.2 Experimental results of I_c/I_{c0} with AC over-current

5. 参考文献

1. WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi, et al, Developments of an Electrothermal Coupled Numerical Simulator for Designing YBCO Superconducting Cables, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.90

66 kV 系統高温超電導ケーブルの過電流通電特性評価

Evaluation on Over-current Characteristics in 66 kV HTS Power Cable

瓜生 季邦, 百足 弘史, 佐藤 俊祐, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大);
大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 藤原 昇(SRL)

URYU Toshikuni, MOMOTARI Hiroshi, SATO Shunsuke, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
OYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Elec.); FUJIWARA Noboru (SRL)

E-mail: atsushi@waseda.ne.jp

1. はじめに

YBCO 線材を送電ケーブルに応用した際に、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。これまでに YBCO 超電導線材や YBCO 超電導ケーブルの過電流通電試験を行うとともに、計算機シミュレータによる解析を行い、実験結果との比較により、その妥当性の検証も行ってきた[1]。今回はより実際の構成に即したケーブルを解析する計算機シミュレータを開発したこと、さらに高精度なケーブルの設計最適化を行った。

今回は 2 m 長の YBCO 超電導モデルケーブルを試作し、66 kV 系統を想定した短絡電流(31.5 kA_{rms}, 2 s)による過電流試験を行った。また、開発した計算機シミュレータを用いて解析評価を行ったので報告する。

2. 実験

実験で使用した超電導モデルケーブルの諸元を Table. 1 に、構成を Fig. 1 に示す。今回ケーブルを 2 本用意したが、超電導線材が含まれているのはコア A のみであり、コア B には超電導線材の代わりに銅テープを用いた。導体層は電源に接続されており、シールド層はコア A、B 間で短絡している。温度測定用の熱電対温度計、電流計測用のロゴスキーコイルを各層の表面に、漏れ磁場計測用のホール素子をコアの外表部に設置した。そして、これらの測定は、コア A のケーブルに関して行った。このケーブルに液体窒素浸漬冷却下(77 K)で過電流を通電し、その時のケーブルの温度上昇、電流、漏れ磁場を測定した。

3. 解析

3 次元有限要素法と回路方程式を用いた電流分布解析と熱解析の連成計算を行う計算機シミュレータを開発し、解析を行った。電流分布解析では式(1)(2)、熱解析では式(3)を用いて定式化した。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 特性には n 値モデルを採用した。境界条件として、超電導線材は銅フォーマが端部のみで電気的に接触し、ケーブルの最外層の保護層の表面が液体窒素に触れていると仮定し、飽和液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。また、インダクタンス L 、 M 及び接触抵抗 R は集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma (\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cond}} & 0 \\ 0 & R_{\text{shield}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{cond}} & M \\ M & L_{\text{shield}} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\text{cond}} \\ V_{\text{shield}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\text{cond}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (3)$$

式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は導電率を表す。式(2)の I は電流、 V は式(1)から得られる超電導線材の電圧降下、 E は両端電圧である。添え字の cond は導体層及び銅フォーマ、shield はシールド層を示す。式(3)の T は温度、 ρ は密度、 c は熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は電流分布から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素冷却を示す。

4. 結果と今後の予定

Fig. 2 に 31.5 kA_{rms} の過電流通電をした際の銅フォーマ、HTS 導体、HTS シールド、銅シールドの各層の温度変化の解析結果と実験結果を示す。その他の実験結果に関しては発表当日に報告する。実験結果から銅フォーマ、HTS 導体層、HTS シールド層、銅シールド層の各層の温度変化 ΔT は、245 K、137 K、96 K、153 K となった。また、実験結果と解析結果は概ね一致している。今後は詳細に 66 kV 超電導ケーブルの耐過電流保護設計について検討していく予定である。

なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施されたものである。

Table. 1 Specifications of Superconducting Model Cable

Cu former (Cu-stranded wire)	140
Cross-sectional area (mm ²)	
HTS conductor layer (6 layer, 165 tapes)	
Outer diameter (mm)	22
Width of a tape (mm)	2.0
Electrical insulation (PPLP)	
Outer diameter (mm)	35
Thickness (mm)	6.0
HTS shield layer (3 layer, 149 tapes)	
Outer diameter (mm)	36
Width of a tape (mm)	2.0
Cu shield layer (4 layer)	
Outer diameter (mm)	42

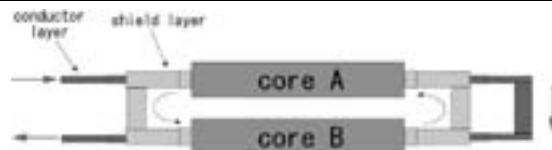


Fig. 1 Composition of Superconducting Model Cable

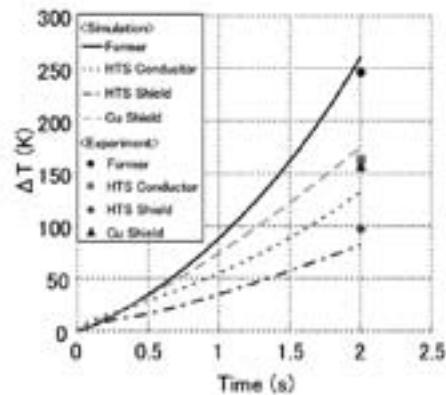


Fig. 2 Simulation and Experiment Result with an Over-current of 31.5 kA_{rms}, 2 s

参考文献

1. X. Wang, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.49

積層構造高温超電導バルク体を用いた小型 NMR 用マグネット開発に関する研究

Development of the compact NMR magnet using stacked HTS bulks

高野 力, 今井 諒, 金 錫範(岡山大学)

Riki Takano, Makoto Imai, SeokBeom Kim (Okayama University)

E-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance : NMR)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, 装置の性能向上が進められている。しかし, NMR 装置は, 大容量, 高コストであるため容易に使える装置とは言えないのが現状である。我々は, NMR 装置のコンパクト化・低コスト化を目的として, 高温超電導バルク体を用いる小型 NMR 装置用高磁界発生マグネット開発を目指した研究を行ってきた。現在, 手に入る高温超電導バルク体は, 製造技術の向上により高い臨界電流密度を達成しているが, 臨界電流密度の不均一性により NMR 用マグネットとして使用できる磁場の空間的均一度を得ることが非常に難しく, 測定空間での磁場の均一度を高める方法の検討が必要になると思われる。

これまでの研究で, バルク体を積層構造にすることにより, 高強度で空間的均一度に優れた磁場が発生可能であることがわかっている。そこで本研究では, バルク体の積層構造の最適化を図るために, バルク体の厚みとバルク体間の積層間隔をパラメータにしたときの発生磁場の強度および空間均一度への影響について電磁場数値解析による検討を行ったので報告する。

2. 解析手法

第二種超電導体での電界と臨界電流は標準的な臨界電流モデルで表わされ, 超電導体中での巨視的な電磁現象はマクスウェルの方程式で記述される。下式は, 臨界状態モデルにおける E-J の関係式であり, 超電導体固有の特性を表すことができる。

$$J = J_c(B) \frac{E}{|E|} (if |E| \neq 0), \quad \frac{\partial J_{sc}}{\partial t} = 0 (if |E| = 0)$$

本解析では, 高温超電導体の基礎特性を評価するために, 臨界電流モデルを採用し, 各時間ステップでの超電導体に流れる遮蔽電流による発生磁場を捕捉磁場とし, バルク体の捕捉磁場による内部空間での磁場強度および空間均一度について検討を行った。

解析モデルを Fig.1 に示す。内径 20mm, 外径 60mm のバルク体を高さ方向に積層させている。積層した個々のバルク体の厚みを 3mm, 5mm, 10mm, 12.5mm, 25mm とし, バルク体間のギャップを 3~10mm まで変化させ, 外部磁場 1T を印加した場合における発生磁場の強度および均一度について評価した。このとき, 超電導層の総和は 50mm になるようにしている。解析に用いたバルク体の厚みとバルク体間のギャップを Table1 に示す。超電導層の総和は 50mm であるが, ギャップを設けることにより積層構造の全体の高さは伸長される。

3. HTS バルク間のギャップによる発生磁場への影響

解析結果の一例を Fig.2 に示す。Fig.2 は, 厚さ 5mm のバルク体を用いてバルク体間のギャップを設けて積層した場合における内部中心位置の高さ方向への発生磁場強度の解析結果を示している。また, 比較のために厚さ 50mm のバルク体における 1T 印加時の発生磁場も示した。バルク体間にギャップを設けて積層することにより, 磁場発生部は高さ方向に伸長し, 50mm のバルクに比べて高さ方向の磁場の平滑長さも増加している。高さ方向

の磁場強度の空間均一性は, 積層ギャップが 5mm 以下では, 厚さ 50mm の単一バルク体の場合より向上される。しかしながら, ギャップを 7.5mm 以上に設定した場合は, ギャップ長さの影響により発生磁場分布に凹凸が生じ, 50mm のバルク体に比べ磁場の空間的均一度は減少した。以上の解析結果より, バルク体間のギャップを設けて積層することによって高さ方向への発生磁場の均一度が向上されることが明らかになった。従って, 開発する小型 NMR 装置のマグネットとして高温超電導バルク体を積層して作製する際には, 積層するバルク体の厚みに伴うバルク体間の積層距離を最適化することで最大効果が得られると考えられる。

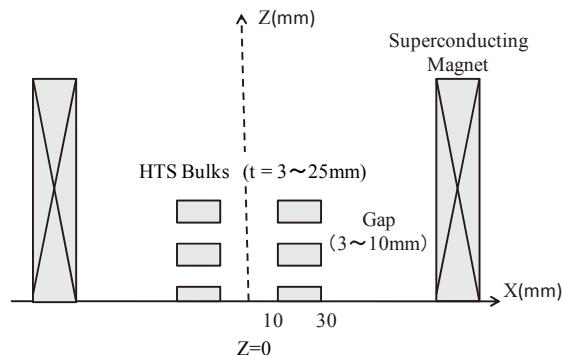


Fig.1 Analytical model of stacked HTS bulk magnets with various gaps for the NMR magnets.

Table 1 Parameters of HTS bulk magnets in numerical calculation

gap	stacked structure thickness of bulks × number of bulks				
	3mm × 17	5mm × 10	10mm × 5	12.5mm × 4	25mm × 2
3mm	98	77	62	59	53
5mm	120	95	70	65	55
6mm	146	104	74	68	56
7.5mm	170	117.5	80	72.5	57.5
10mm	210	140	90	80	60

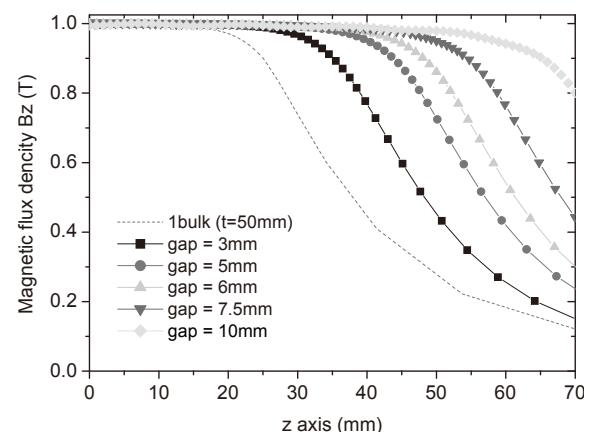


Fig.2 Calculated magnetic flux densities along the z-axis as function of gap length at 5mm thickness of HTS bulk and 1T applied.

積層構造高温超電導バルクと薄膜を用いた小型 NMR 用マグネット開発に関する研究

Development of compact NMR magnets with stacked HTS bulks and films

金 錫範, 高野 力, 今井 諒 (岡山大学), S.Y. Hahn, 岩佐幸和(MIT), V. John (AMSC)
 S.B. Kim, R. Takano, M. Imai (Okayama University), S.Y. Hahn, Y. Iwasa (MIT), V. John (AMSC)
 kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年、超電導マグネットによる GHz 級の NMR 装置が開発されているが、既存の NMR 装置は、まだ非常に高価・大型であるために大きい病院や大学などで設置されてはいるものの個人が自由に使える装置とは言えないのが現状である。もし、安価・小型で、さらに簡便な方法で使える NMR 装置が開発され、研究室ごと、または各個人が自由に使えるようになると、高性能 NMR 診断装置で測定する前の基礎診断や判断などが可能となるため、医学分野や食品開発など幅広い分野において急速な進展が得られると考えられる。そこで、本研究では、高温超電導体の強力な捕捉磁場を利用して小型で簡便な NMR 用マグネットを開発することによって、コンパクトで持ち運べるパーソナル NMR 装置の開発を目的として行っている。今回は、高温超電導バルク体と薄膜を積層することで小型 NMR 用マグネットを開発しようと試みたので、その結果について報告する。

2. 小型 NMR 用マグネットの概要

本研究で開発する NMR 装置は、酸化物超電導体の強力な捕捉磁場を利用するものであり、高温超電導バルク体または、高温超電導薄膜を積層構造にしたマグネットを小型低温容器に挿入し、低温容器を外部磁場印加装置である励磁用超電導マグネットの室温空間に配置して磁場中冷却方式(FC 法:Field cooling Method)を採用して高温超電導体を着磁させる。高温超電導体が着磁された後は、低温容器ごと励磁用マグネットから取り出して NMR 用マグネットとして使用することが可能となるため非常にコンパクトな装置となる。本研究は、直径 20mm の球状測定空間に 4.7T (200MHz 相当)の均一磁場を発生させることを当面の目標としており、その目標を達成させるためには、積層構造の最適化や適切な冷却方法の選定などが必要になると思われる。

3. 実験方法および結果

本研究では、持ち運べる小型 NMR 用マグネットの開発を目的としており、開発する小型マグネットは、高温超電導バルク体と金属基板を有する高温超電導薄膜を積層することで形成される。また、マグネットの構成においては、高温超電導バルク体のみの積層構造、高温超電導薄膜のみの積層構造、そしてバルク体と薄膜を両方用いるハイブリッド構造を考えている。

まず、3 個の高温超電導バルク体を縦方向へ積層し、温度および印加磁場による捕捉磁場強度および空間分布特性について検討を行った。実験に用いた高温超電導バルク体は、厚み 15mm と 20mm、外径 60mm の GdBaCO バルク体であり、内径 20mm のリング形状のものである。積層バルク体の概念図と測定結果の一例を図 1 に示す。図 1 の測定結果は、バルク体間に間隔を設けず縦方向に積層し、液体窒素と冷凍機伝導冷却により 20K で測定した結果である。液体窒素温度においては、バルク体の臨

界電流密度が低く、印加した磁場に比べて捕捉磁場強度は半分程度になっている。それに対して、20K においては、印加磁場強度とほぼ同じ捕捉磁場が得られ、高さ方向への磁場分布も平滑になっており、磁場の空間均一性も向上されていることが明らかになった。高さ方向において磁場強度が対称になっていないのは、バルク体 A と B の臨界電流密度の相違によるものであり、飽和状態にある液体窒素温度での結果が顕著である。図 2 は、YBCO 超電導薄膜 (YBCO 層の厚み 0.8μm、Ni 金属基板の厚み 75μm) を 500 枚積層したときのマグネットの外見であり積層高さは 41mm である。図 3 は、図 2 の YBCO 薄膜マグネットの液体ヘリウムでの捕捉磁場強度分布を示しており、印加磁場は 3T である。図 3 から、薄膜マグネットの場合、実際の超電導層の総和は非常に薄いため (総厚み 400μm) 捕捉可能な磁場強度も低くなっていると思われる。しかし、薄膜を用いても目標とする NMR 用マグネットの開発が可能であることが示された。

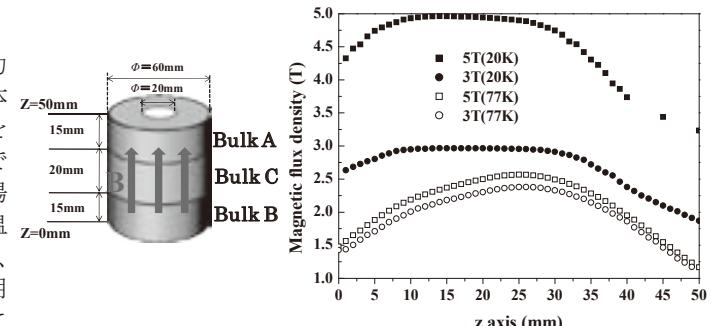


Fig.1 Schematic scaled drawing for three stacked HTS bulks for NMR magnets, and measured the axial magnetic field profiles at 20 and 77K.

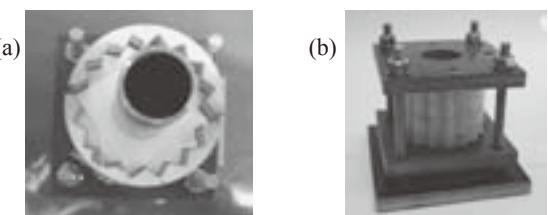


Fig.2 Stacked 500 YBCO films: (a) stacking with a serrated guide structure; (b) completed 500-plate assembly with support structure.

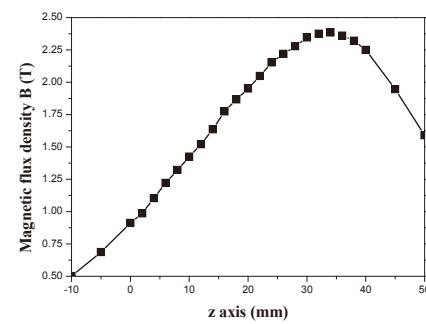


Fig.3 Measured axial magnetic field profiles for 500 stacked YBCO films trapped at L.He.

Measurement of the residual magnetic field and relaxation in YBCO coil

ウリエッティ ダヴィデ, 木吉 司
 UGLIETTI Davide, KIYOSHI Tsukasa
 E-mail: uglietti.davide@nims.go.jp

1. Introduction

Coated conductors are a promising candidate for the construction of NMR magnets above 1 GHz, but in contrast to modern multifilamentary wires, in coated conductors the superconducting material consists of a single layer. When coated conductors are employed for building solenoids, large screening currents are induced by the radial component of the magnetic field. The screening currents affect the magnetic field in the coil center, the time stability and the axial uniformity. The reduction of the central magnetic field in the coil center field was measured in old Nb_3Sn and V_3Ga magnets [1-2] while the axial distribution was measured recently in Bi2223 coils for NMR magnets [3].

Three coils (minim volume criteria, see table I) have been constructed using coated conductor from Superpower, and the effect of the screening currents on the central field has been studied.

Table I Coil parameters

turns X layers	\mathcal{O}_{in} (mm)	\mathcal{O}_{out} (mm)	H (mm)	Tape length	mT/A
6 X 30	18	28	25	14 m	6.6
6 X 60	18	40	25	30 m	12.5
9 X 1060	18	46	37	100 m	23

We indicate with H the magnetic induction (in mT) at the coil center calculated using the Fabry factor. B (measured in mT) is the actual magnetic field generated in the coil center, and is measured using a Hall sensor (Lakeshore). The magnetization is calculated as $M=H-B$.

The magnetic field B versus the current is shown in fig.1 for the coil 6x30, up to the coil critical current (30 A); the dashed line is the $H(I)$ curve. At the virgin run, the magnetic field is lower than the expected value (that is $B < H$) when charging the coil while it is $B > H$ when discharging to zero. For subsequent runs the line #3 is followed.

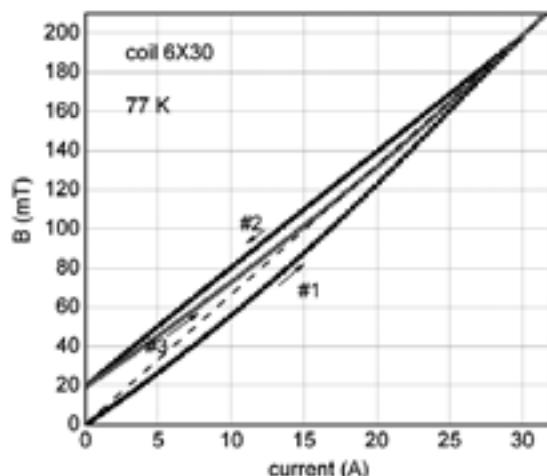


Fig.1 Magnetic field, B , versus current at 0T for the coil 6x30: #1 and #2 are for the virgin run, while #3 is a subsequent run.

The M/H ratio is plotted at 77 K and 4.2 K in fig.2. At 4.2 K the maximum current was limited by the probe capacity to values lower than the coil critical currents. H is the theoretical magnetic field that the coil should generate, while the M/H ratio is the reduction caused by the screening currents. The reduction is large at low currents and decreases to zero at the coil critical current.

Depending on the operating current, which may be assumed to be between 10% and 80% of the coil critical current, the field reduction may vary from 20% to 5%. These results should be taken into account when designing high field magnets using coated conductors.

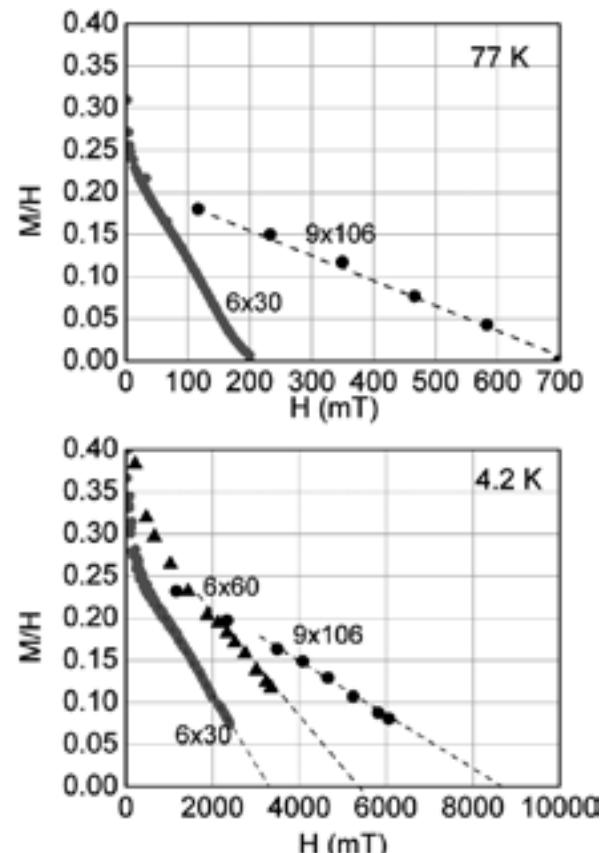


Fig.2 M/H versus H for the coils studied in this work. Lines are guides for the eye.

References

1. P. L. Walstrom J. Appl. Phys. Vol.45 (1974) p.2293
2. D. B. Richards, L. R. Edwards, C. M. Cornforth, S. Legvold, The Review of Scientific Instruments, Vol.41, 5, (1970), p.647-649
3. S. Hahn et al., J. Appl. Phys. Vol.105 (2009) p.02451

Ta バリア MgB_2 線材を用いた小パルスコイルの試作(4) MgB_2 線材 E-J 特性の磁界・温度依存性Test of a small pulse coil using Ta barrier MgB_2 wire4. Dependence of E-J property of MgB_2 wires on magnetic field and temperature

浦竹 勇希寛, 中尾 彰浩, 田中 和英, 岩熊 成卓, 柚川 一弘, 船木 和夫(九大);

岡田 道哉(AIST);熊倉 浩明(NIMS)

URATAKE Yukihiro, NAKAO Akihiro, TANAKA Kazuhide, IWAKUMA Masataka, KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ); OKADA Michiya (Hitachi Ltd.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS);

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

1. はじめに

MgB_2 線材は金属系超伝導体としては高い臨界温度である39Kを有し¹⁾、液体水素温度レベルに至る幅広い温度領域におけるコイル用巻線として期待されている。本報では、交流損失低減を目的として試作したCu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線材による試験用小コイルを用いて、危険な熱負荷のレベルや冷却条件との関係などを評価するため、伝導冷却時の幅広い温度領域での過電流通電に対するコイル応答、温度分布を測定した。今回は、小コイル励磁特性を数値シミュレーションするために、 MgB_2 短尺線材の E-J 特性を実験により求め、その磁界・温度依存性を検討し、この結果を表現する実験式を構築することを試みた。

2. 実験

試料として Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 短尺線材(線径 0.78mm、断面構成比 Cu : Cu-Ni : Ta : MgB_2 = 0.06 : 0.745 : 0.10 : 0.095)を用いた。線材は、図 1 のように AlN 製のステージ上に乗せ両端を銅板にハンダ付けして固定し、4 本の電圧タップを間隔が全て 1cm になるよう取り付けた。冷却はステージから線材に伝わるものとし、線材に臨界電流値を越す直流電流を流したときの2つのタップ間電圧(V_{ab} , V_{cd})から V-I 特性(E-J 特性)を測定した。ただし臨界電流は、発生電界が $1\mu V/cm$ になる値とした。また、線材と垂直に磁場を印加し、温度および磁界に対して臨界電流密度および n 値の依存性を観測した。

3. 結果と考察

図 2、図 3 に E-J 特性から得られた臨界電流密度 J_c および n 値の磁界依存性を 10K から 30K の温度範囲で示す。図 2、図 3 ともに各温度で同じ傾向が見られ、同様の磁界の関数として表されることが期待できる。 J_c 、 n 値の各磁界における温度依存性にも同様の傾向が見られた。従来の臨界電流密度についてのスケール則の考え方²⁾を参考にして実験から得られた E-J 特性の磁界依存性および温度依存性を表現できる実験式を構築した。発表時にはこの実験式を示し、 J_c 、 n 値の実験結果についてスケール則が近似的に成立することを報告する。今後は、 J_c 、 n 値を用いた E-J 特性のスケール則をコイル内の発熱に組み込み、有限要素法を用いて³⁾コイルの発熱を考慮した励磁特性のシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- 低温工学協会 : 低温工学 vol.36 (2001)
- 松下照男 : 「磁束ビンディングと電磁現象」
- 中田孝義、高橋則雄 : 「電気工学の有限要素法」
- H. Miyazaki et al. : "Thermal runaway of a 1T cryocooler-cooled oxidesuperconductingpulsed coil in ac operation," IEEE Trans. on Appl.Supercond., Vol. 15 (2005) pp.1663-1666

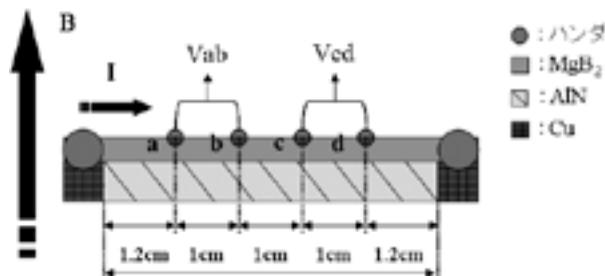


Fig.1 Schematic diagram of measurement sample

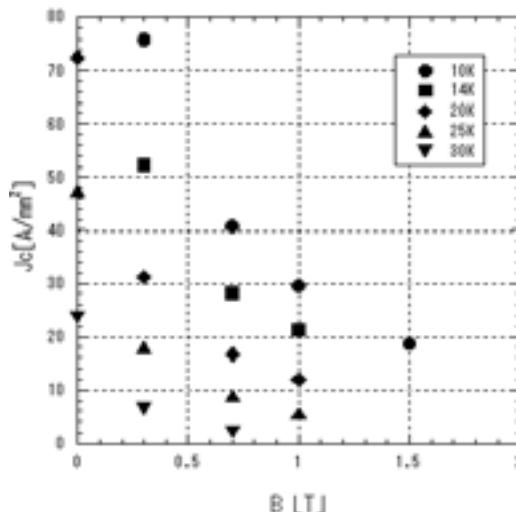


Fig.2 Magnetic field dependence of critical current density

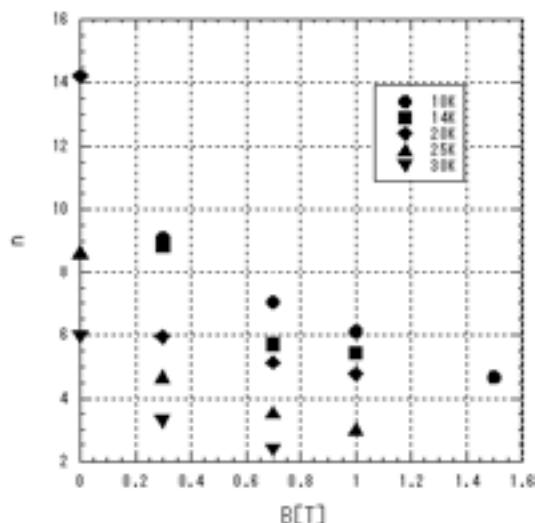


Fig.3 Magnetic field dependence of n value

Ta バリア MgB_2 線材を用いた小パルスコイルの試作 (5) 热的安定性とコイル保護

Test of a small pulse coil using Ta barrier MgB_2 wire 5. Thermal stability and magnet protection

田中 和英, 中尾 彰浩, 浦竹 勇希寛, 岩熊 成卓, 桧川 一弘, 船木 和夫(九大),
岡田 道哉(AIST), 熊倉 浩明(NIMS)

TANAKA Kazuhide, NAKAO Akihiro, URATAKE Yukihiko, IWAKUMA Masataka,
KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo, (Kyushu Univ.); OKADA Michiya (AIST); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
E-mail: kazuhide.tanaka.je@hitachi.com

1. はじめに

MgB_2 超電導体は、従来の金属系超電導体に比べて高い臨界温度(39K)を有する。また、比較的簡略な工程で線材化できることから、電流容量の向上が可能で、NbTiの代替材料あるいは冷凍機冷却コイル等の超電導応用が期待できる。

本報では、低損失化を目的として試作した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線材を用いて作製した小コイルを、幅広い温度領域で過電流通電した。得られた熱的応答の結果から、 MgB_2 コイルの熱的安定性やクエンチ保護について検討した。

2. 実験

in-situ 法により作製した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6芯線材(線径 0.78mm、断面構成比 Cu : Cu-Ni : Ta : MgB_2 = 0.06 : 0.745 : 0.10 : 0.095)を用い、小コイルを作製した。Fig.1 に線材の横断面及びコイル外観とその仕様を示す。巻線に用いた線材長さは 58m である。コイルボビンには熱伝導性の良い AlN 製を用いた。コイルは、温度調整可能な内挿クライオスタット内の冷却ヘッドに装着し、5~30K の温度範囲で特性評価した。

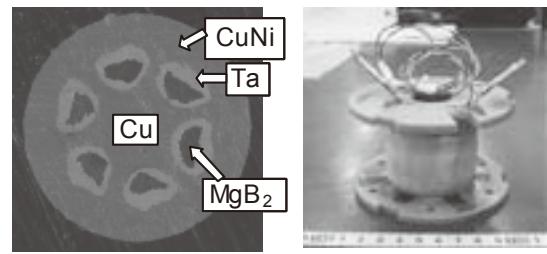
コイル温度は、ボビン中央部、ボビン下部、巻線部下端(それぞれ、 T_{ic} 、 T_{ic} 、 T_{ob} と記す)に設置したセルノックス温度センサで測定した。コイル上フランジと冷却ヘッドはグリースを介して面接触させ、ボビンを介した伝導冷却とした。

コイルへの過電流通電は、ある所定値で電流を保持し、その後急速遮断した。コイル臨界電流 I_c の温度依存性で得られた結果をもとに、通電電流の保持する値を I_c レベルから始めて、 I_c の 10%刻みで増加させた。このパターンを、熱暴走が観測されるまで電流の保持値を増加させながら繰返し通電した。

3. 結果と考察

過剰電流通電に伴う磁束フロー損失によって発生する熱負荷に対してのコイルの熱的安定性を検討した。ここでは、 I_c を超える過剰な電流を 300 秒間連続して通電させた。Fig.2 に 14K 及び 20K において、過電流通電したときのコイルの両端電圧応答と、コイル各部に設置した温度センサの変化を示す。いずれの温度においても I_c の 1.4 倍の通電では、300 秒間までクエンチに至らないことから、熱的安定性を維持できている。一方、 I_c の 1.5 倍を通電すると、Fig.2 の電圧応答に矢印で示す変曲点が観察されたことから、熱暴走と判断できる。しかしながら、コイル両端電圧や温度変化は比較的緩やかであることから、コイル保護の観点からはその対策が十分に可能なレベルであるといえる。

当時は、数値シミュレーションによる熱解析を行って、実験値と比較した結果についても示す。



Wire	Length	58 m
Coil	Inner dia.	35 mm
	Outer dia.	51 mm
	Height	48 mm
	Turn	40 × 10
	Inductance	3.66 mH
	Coil const.	0.0082 T/A
Insulator	T-glass	
Resin	Epoxy (in vacuum)	

Fig.1 Photograph of Cu-Ni sheathed Ta-barrier 6-filaments MgB_2 wire and specifications of the present coil.

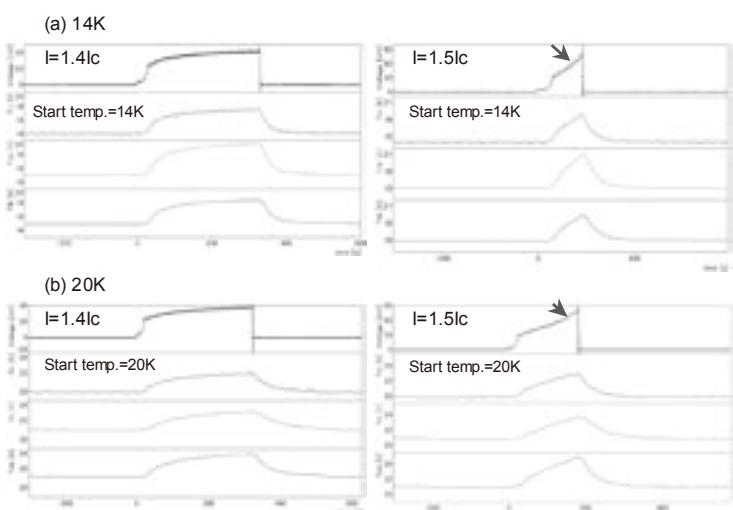


Fig. 2 Alteration of coil-voltage and sensor temperature with triangle waving overcurrent turned on. (a)14K and (b)20K.

YBCO 超電導コイルの安定性と保護

Stability and Protection of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor

植田 浩史, 石山 敦士(早大);式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

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

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

HTS 線材・コイルは LTS 線材・コイルに比べて温度マージンが 1 枠以上大きく、運転温度を高くとれるため、熱容量が 2 ~ 3 枠大きくなる。その結果、これまでのコイル巻線技術の蓄積から考えて想定される機械的擾乱などによるコイルクエンチの発生の可能性は極めて少なく、HTS 線材・コイルは、LTS に比べて圧倒的に高い熱的安定性を有していると言える[1]。しかし、素線が疲労などによって局所的に劣化し、常電導転移が発生すると、常電導領域の伝播が極めて遅いため、局所的な温度上昇(ホットスポット)の発生の可能性がある。特に、集合導体で巻線した際、素線自身の自己インダクタンスおよび素線間の相互インダクタンスによって、他の素線に転流が遅れることも考えられる。そこで、集合導体を巻線したときの素線のインダクタンスを考慮した電流分布解析と、熱解析を連成し、常電導伝播特性と転流現象の評価を行った。また、クエンチ検出から保護動作後の最高到達温度を評価した。

なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 解析モデル

電流分布解析において、YBCO 線材の抵抗発生は I - V 特性(J_C , n 値)の分布に依存するため、有限要素法で解くことにした。YBCO 線材は、 I_C を 600 A@1 μ V/cm 基準(20 K), n 値を 30 とし、コイル内の磁場による超電導特性の分布は考慮していない。YBCO 集合導体は Fig. 1 によって YBCO 線材を 4 枚束ねたもので、3 回の転位をパンケーキ間の接続部で行う。素線間のインダクタンスは Table I のようになる。コイル諸元は Table II に示した通りである(以下、集合導体内の素線はコイル内側から順に Tape 1, 2, 3, 4 と呼ぶ)。集合導体は、交流損失を低減するため、素線間絶縁を施したとして、線材の途中で他の線材に転流せず、線材端部でのみ転流が起きるとした。従って、素線レベルの自己および相互インダクタンス L , M は集中定数で与えた。熱解析は有限要素法を用いて、電流分布解析と連成することで、発熱分布を考慮できるようにした。冷却条件は断熱とした。運転温度は 20 K とした。

3. 転流

電流 $420A \times 4$ 枚 = 1680 A を通電した状態で、Tape 3 で長手方向に 1 cm の劣化($I_C = 0$ A)が $t = 0$ で起きた時の電流、温度の変化を Fig. 3 に示す。劣化直後から転流がはじまり、20 秒程度で他の素線に電流は移ることがわかる。温度は 1000 秒後で 35K まで上昇する。以上の結果から、素線内で劣化が発生しても、インダクタンスによる転流の遅れはなく、他の素線に電流が移るため、ホットスポットが発生する可能性は少ない。

4. クエンチ検出電圧と温度上昇

Fig. 4 は長手方向に 1 cm の劣化($I_C = 0$ A)が発生した場合、コイル両端電圧が 0.1 V になった時の時間と線材内の最高温度を銅層の厚さを変えて、素線当たりの通電電流 480, 540A に対して計算したものである。これらの結果から、クエンチ検出を 0.1 V で行うとすると、その時の温度は銅層の厚さにほとんど依存せず、170 K 程度である。保護動作はこの後に開始することになるため、保護動作中の最高到達温度の評価には注意する必要がある。

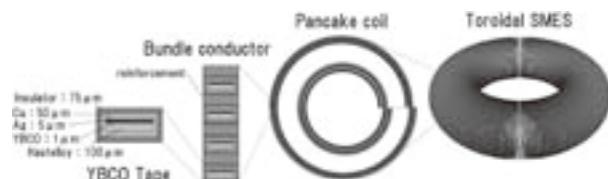


Fig. 1 Schematic drawings of YBCO tape, conductor, and coil.

TABLE I INDUCTANCE OF BETWEEN THE TAPES IN THE COIL.

Pancake coil 4	4	3	2	1
Pancake coil 3	X	X	X	X
Pancake coil 2	3	4	1	2
Pancake coil 1	2	1	4	3
	1	2	3	4

TABLE II SPECIFICATIONS OF PANCAKE COIL

Inner radius	1.0 m
Outer radius	1.4 m
Height	0.06 m
Width of the tape	15 mm
Thickness of the tape including insulation and reinforcement	1.1 mm
Number of tapes in the conductor	4
Number of turns	91

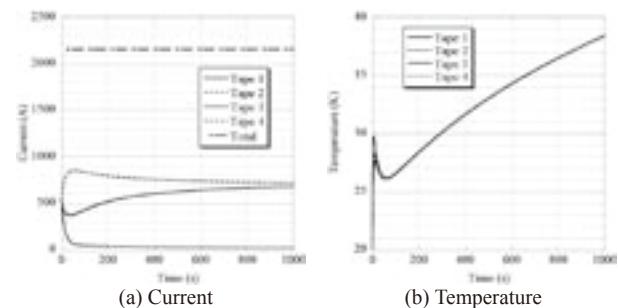


Fig. 3 Current distribution of tapes with a total current of 540 A. It is assumed that starting at 0 s, Tape 3's I_C degrades to 0 A along the longitudinal direction within a length of 1 cm.

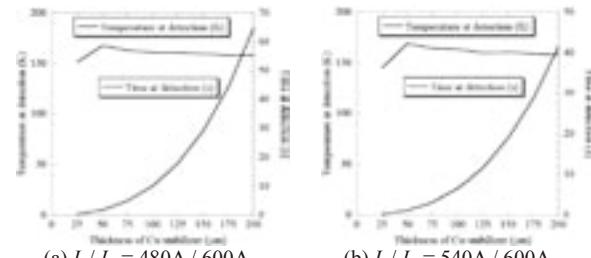


Fig. 4 Temperature and time at the detection voltage of 0.1 V for various thicknesses of Cu stabilizers. The thickness of Hastelloy is 800 μ m (including the 700- μ m-thick reinforcement); I_C is 600 A at 1 μ V/cm.

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, no.2, pp.1659-1662 (2005)
2. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.80, p.101 (2009).

YBCO コイルに生じる遮蔽電流磁場強度に及ぼすコイル形状の効果

Effect of YBCO-coil shape on the screening current-induced magnetic field

柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大); 胡 瑞鑫, 竹松 卓也, 高尾 智明(上智大);
ウリエッティ ダビデ, 木吉 司(NIMS); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); HU Ruixin, TAKEMATSU Takuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); UGLIETTI Davide, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: y_yanagisawa@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

YBCO 線材の市販化により各種応用を目指したコイル化が急速に進み始めている。しかしながら、YBCO 線材自体の物理的特性に関する研究は数多くなされている一方で、コイル化した場合の特性や付随する問題はほとんど明らかになっていない[1]。そこで本報では YBCO ソレノイドコイルに関して、コイル形状が遮蔽電流磁場に与える影響を実験と数値計算により検証した。まず、(i) YBCO コイルに発生する遮蔽電流磁場を解析する数値計算コードを構築し、(ii) 小型の YBCO コイルに発生する遮蔽電流磁場について実験と数値計算を比較し、数値計算の妥当性を検証した。これをもとに(iii) YBCO コイルの形状が遮蔽電流磁場に与える効果を数値計算により検討した。

2. 数値計算方法

ソレノイドコイルを通電した場合の各ターン中の電流密度を、外部磁場と自己磁場下における超伝導薄板モデルにより解析した。コイルのターンごとに 1 から M の番号を振り、ターン中の超伝導層を線材幅方向に $2N$ 個のポイントに離散化すると、 m 番目ターンにおける i 番目離散化ポイントにおける電流密度 $J_{m,i}$ の拡散方程式は以下の式で表される。

$$J_{m,i}(t + \Delta t) = J_{m,i}(t) + \frac{2\pi\Delta t}{\mu_0 d} \sum_j^{2N} K_j^{-1} [E_{m,j}(t) + \nabla \phi_m(t) - y_j \dot{B}_{r_m}(t)] \quad (m=1, \dots, M; i=1, \dots, 2N) \quad (1)$$

ここで d は線材中の超伝導層の厚さ、 E は電界、 ϕ は通電電流に起因するスカラーポテンシャル勾配、 y は離散化ポイントの座標、 B_r は他のターンが作る径方向磁場の合計値である。各ターンにおける式(1)を連立して解くことで全離散化ポイントにおける電流密度が得られる。この電流密度分布をもとにコイル中心における遮蔽電流磁場を求める。なお超伝導体の E - J 特性には n 値モデルを用いた。

3. 結果

内径 18 mm、外形 40 mm、高さ 25 mm のソレノイドコイルの遮蔽電流磁場のヒステリシスループを Fig. 1 に示す。実験結果(実線)と数値計算結果(破線)は良く一致している。前年度報告した Bi-2223 コイルの場合と同様に反磁性的なヒステリシスを示しているが[2]、遮蔽電流磁場の値は Bi-2223 コイルの場合に比べ 1 衍大きい。これはコイル形状が遮蔽電流磁場の強度に影響を与えることを示唆している。そこで次に、コイル形状が遮蔽電流磁場の強度に与える影響を数値計算により検証した。ファブリのコイル形状係数を一定にした(即ち内半径と電流密度が等しければ中心磁場強度が等しい)8 種類のソレノイドに関して、1 A だけ通電した場合の遮蔽電流磁場 B_s と遮蔽電流磁場を考慮しない場合のコイル中心磁場 B_c の比を求めた(電流は Fig. 1 のヒステリシスの線形領域に対応している)。ソレノイドは全て 18 mm の内径で設計した。この比をコイルの巻き線体積と合わせてプロットした結果を Fig. 2 に示す。図で、白丸は磁場の比率、黒丸はコイル体積、横軸は β (=コイル高さ/内径) である。線材使用量を最小化する設計(min. volume)の場合に遮蔽電流磁場の割合が最大となる。すなわち min. volume で設計されたソレノイドは発生磁場を自

分自身の遮蔽電流で大きく打ち消してしまう。このとき遮蔽電流磁場の比 $|B_s/B_c|$ は 0.16 (16%) であり、中心磁場が設計値の 84%しか発生しないことを意味している。さらに、通電後のフラックスクリープによる磁場の時間変動[3]について解析したところ、min. volume 設計のソレノイドが最も大きく、変動量は薄肉ソレノイド (Fig. 2 参照) より 10 倍大きかった。遮蔽電流磁場は YBCO 層にスリットの入った多芯線材を用いることで低減可能と考えられる。また磁場の時間変動はオーバーシュート通電を用いることで抑制することが出来る[3]。

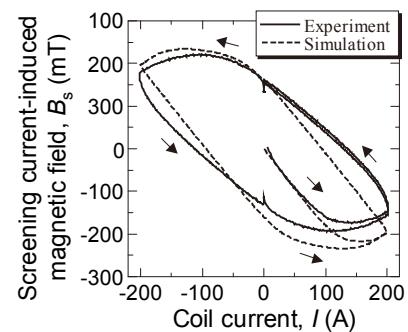


Fig. 1. Hysteresis of the screening current-induced magnetic field at the coil center, B_s , as a function of the coil current, I . The solid line shows the experimental results while the dashed line is the numerical simulation.

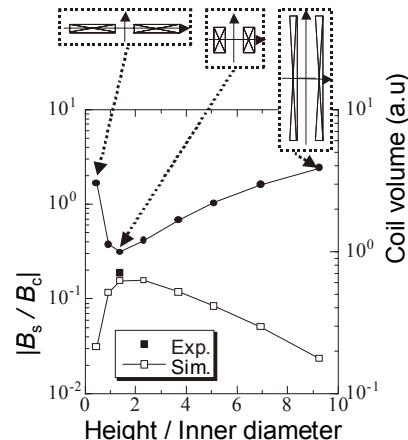


Fig. 2. The ratio of $|B_s/B_c|$ as a function of β . The open squares are for a coil current of 1 A. The closed circle indicates coil volume normalized by the minimum volume.

4. まとめ

(i) ファブリの係数を一定にして YBCO ソレノイドの形状を変えていくと、min. volume 付近で遮蔽電流磁場が最大になる。
(ii) YBCO ソレノイドは遮蔽電流磁場について、(1) 最大 16% に及ぶ中心磁場の減少と、(2) フラックスクリープによる中心磁場の長期変動という二つの大きな問題を持つ。

参考文献

- [1] D. Uglietti et. al., Abstracts of CSJ Conference, vol. 80, p.22, 2009
- [2] Y. Koyama et. al, *Physica C*, 469, pp. 694-701, 2009
- [3] Y. Yanagisawa et. al, *Physica C*, 469, pp. 1996-1999, 2009

YBCO ダブルパンケーキコイルにおける電流掃引逆転の効果

Effect of current sweep reversal on the magnetic field for a YBCO superconducting double-pancake coil

胡 瑞鑫, 竹松 卓也, 高尾 智明(上智大) ; 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大) ;

UGLIETTI Davide, 木吉 司 (NIMS) ; 濱田 衛 (神戸製鋼) ; 高橋 雅人, 前田 秀明 (理研)

HU Ruixin, TAKEMATSU Takuya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.) ; YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.) ;

UGLIETTI Davide, KIYOSHI Tsukasa (NIMS) ; HAMADA Mamoru (Kobe Steel) ; TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: ruixin6514@ssbc.riken.jp

1. まえがき

HTS コイルでは径方向磁場でテープ面に遮蔽電流が生じ、コイル中心に逆向きの磁場を作る。この磁場はフラックスクリープで減衰するが、長時間の磁場ドリフトを引き起こす。[1] ここでは YBCO コイルにおける遮蔽電流磁場のヒステリシスとその緩和について報告する。

2. 実験方法

実験に用いた YBCO ダブルパンケーキコイルは内径 30mm、外径 38mm、長さ 37.8mm である。低温型のホール素子を用いて中心磁場を測定した。励磁係数は 50G/A である。実験は 4.2K と 77K で実施した。実験手順を次に示す。励磁係数に基づき、見かけの磁場から遮蔽磁場を求めた。

- (1) 電流を 0A から定格電流まで励磁し、20分間電流をホールドした後消磁した。
 - (2) 逆極性に励消磁して磁束履歴を消去した後、再度定格まで励磁し、1% 消磁して20分間ホールドした後、消磁した(以下オーバーシュートと呼ぶ)。
 - (3) 再度逆極性に励消磁して磁束履歴を消した後、定格まで励磁し、5% 消磁して20分間ホールドした後、消磁した。
- 4.2K では ± 200 A まで励消磁してヒステリシスを計測し、更に 120A まで励磁して磁場の時間変化を計測した。77K では、 ± 40 A まで励磁し、ヒステリシスと磁場の時間変化を計測した。

3. 実験結果

Fig. 1 に、遮蔽電流磁場のヒステリシスを示す。77K では、ヒステリシスが 4.2K の 1/10 に減る。遮蔽電流は 4.2K で中心磁場を 7.5% (200A)、77K では 3% (40A) 減少させる。

電流ホールド時の遮蔽電流磁場の時間変化成分を Fig. 2 に示す。定格電流を一定にホールドすると、遮蔽電流磁場(負方向)が緩和し見かけの磁場が増加する。時間 t における遮蔽電流磁場の初期値に対する変化の割合は 4.2K で 1% (Fig. 2(a); 120A, $t=1200$ s)、77K で 25% (Fig. 2(b); 40A, $t=1200$ s) になる。77K では遮蔽磁場は比較的短時間(数時間)で急激に消失することが分かる。

Fig. 2 よりオーバーシュートの効果は顕著である。1% のオーバーシュートで磁場変動率は減少する。5% のオーバーシュートにより、磁場は完全に安定化できされている。これはオーバーシュートにより、YBCO テープ内の上下端の遮蔽磁場勾配が逆転し、フラックスが外部から侵入できなくなり、フラックスクリープが抑制されるからである。[2] この方法は、YBCO の超電導磁石コイルを安定な磁場が要求される NMR、MRI、加速器などに利用する場合に、非常に有効である。

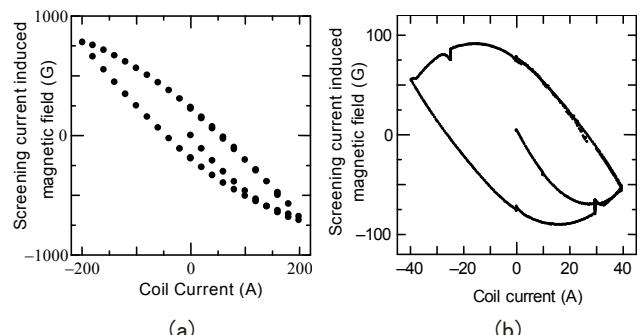


Fig.1 Hysteresis effect of the screening current-induced magnetic field (a) at 4.2K and (b) at 77K.

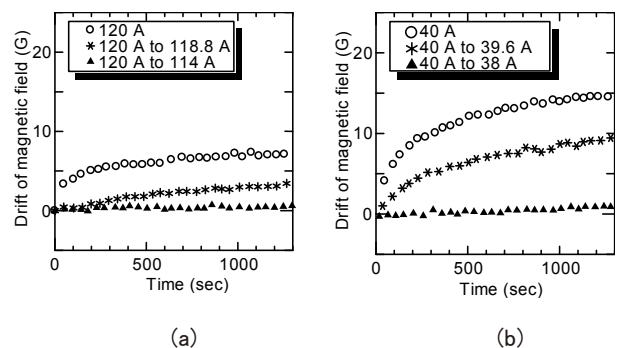


Fig.2 Magnetic field drifts with time due to screening current (a) at 4.2K and (b) at 77K. Effect of overshoot is also shown in the figure.

4. まとめ

YBCO コイルでは遮蔽電流磁場により、中心磁場のヒステリシスと磁場の時間変化が生じる。オーバーシュート法により、磁場変化を安定化できる。前者については、マルチフィーメント化が有効である。

参考文献

1. Y. Koyama et al.: Physica C 469(2009) p.694.
2. Y. Yanagisawa et al.: Physica C 469(2009) p.1996.

本報告の一部は(独) 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。

ポインチングベクトル法による超伝導トランスの運転モニタリングシステムの開発

A Monitoring System of Superconducting Transformer by Using the Poynting's Vector Method

羽生 大仁、上之原 伸一、木元 武尊、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工); 岡元 洋 (九州電力)

HABU Kisato, KAMINOHARA Shinichi, KIMOTO Takeru, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);
OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: k6994843@kadai.jp

1. はじめに

我々は、超伝導コイルの状態監視システムとして、ポインチングベクトル法を用いた新しいシステムの開発を行ってきた。このシステムの特長は、コイルに直接電圧リードを取り付けないために放電事故を誘発しないこと、電気的な測定法であるため、感度が良いことである。

これまで、非接触で測定が可能であることを実証している[1]。さらに、測定感度向上のための新しい手法を提案し、その効果も実証している[2]。今回は、超伝導トランスの運転モニタリングシステムに本システムが適用可能かどうかについて検討を行った。小型の超電導トランスを Bi-2223 のテープ線材を用いて試作し、本システムを適用することにより、超電導トランスの外周からその状態を測定検出できるかどうかを調べた。

2. 測定方法と測定装置

本測定方法は、超伝導コイル周辺のポインチングベクトルを測定することで異常検出を行っている。超電導コイル周辺の磁界と電界を測定し、それらの外積からポインチングベクトルを求める。磁界の測定にはピックアップコイル、電界の測定にはポテンシャルリードとキャンセルコイルを用いる。ポテンシャルリード電圧のうち誘導性電圧をキャンセルコイル電圧を使ってキャンセルし、電界測定の精度を上げた。ポインチングベクトルは、Fig. 1 に示すように二つの成分を測定する(P_{rl} , P_{r2})。 P_{rl} と P_{r2} の分布の変化を観測することにより、コイルの状態を監視することができる。

今回の測定装置の概略図を Fig.2 に示す。高さ約 100mm、一次側内径 80mm、二次側内径 110mm の小型の超伝導トランスを、臨界電流が 88A の高強度 Bi-2223 多芯テープ線材を用いて試作した。容量 500VA、一次側 47 ターン、二次側 24 ターンである。漏れインピーダンスは 3.4% であり、二次側には抵抗 0.34Ω の負荷を接続している。測定装置は、12 ターンのポテンシャルリードと 140 ターンのキャンセルコイルを用いてポインチングベクトル P_{rl} の測定を行っている[2]。そして、超電導トランス周囲のポインチングベクトル P_{rl} の時間的変化を観測することにより超電導トランスのモニタリングを行った。本測定では、鉄心をもつ超伝導トランスの状態を、トランスの外周から電磁気的に非接触で検出できるかが重要である。

3. 実験及び結果

次の手順で実験を行った。試作した超電導トランスに、50Hz, 20Arms の交流電流を定電流モードで通電したまま、熱絶縁の悪いデュワを用いて液体窒素のレベルを減らしていく、超電導トランスの上部から強制的に常伝導転移させた。また、二次側の負荷は変化させずに、巻線だけに温度上昇が生ずるようにしている。そして、その時のコイル上部の付近でポインチングベクトルの時間的変化を観測することにより、超電導トランスのモニタリングを行った。

試作したトランスに用いている超電導コイルの状態をモニタするために、超電導コイル一次側の両端電圧と各ターンの温度も同時に測定した。

ポインチングベクトルと超電導コイル一次側の両端電圧の測定結果を Fig. 3 に示す。横軸は、測定開始からの経過時間である。試作した超電導コイルの両端電圧が変化し

ていると同時に、エネルギー流れも変化していることがわかる。一次巻線と二次巻線が電磁気的に結合しているので、両端電圧やエネルギー流れには、負荷への電力供給成分が含まれている。しかしながら、負荷の消費電力は変化していないので、測定値の変化は、一次側巻線と二次側巻線の状態の変化を示していると考えられる。この結果より、超電導トランスに本システムを適用することにより、トランス周辺のポインチングベクトル及び巻線状態の変化を測定可能であることがわかった。

4. まとめ

超電導トランスに本システムが適用可能かどうかを調べるために、超電導トランスを実際に試作し、本システムを適用して、超電導トランス周辺のポインチングベクトルを測定した。その結果、本測定法による超電導トランスの運転モニタリングシステムの実現可能性を示した。



Fig.1 Example of sensor arrangements to measure the poynting's vector

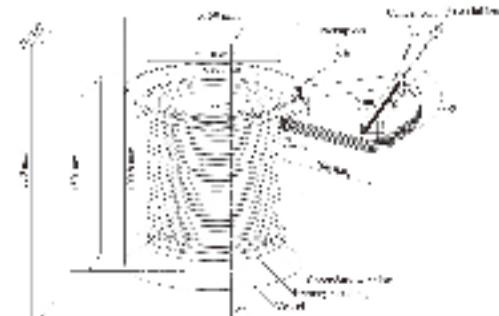


Fig.2 Experimental set up

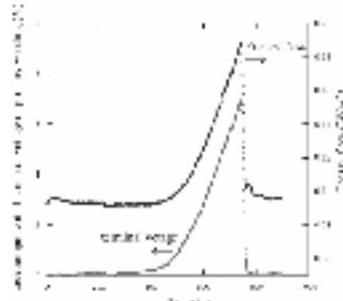


Fig. 3 Result of unusual condition Reference

[1] M. Tokuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2009) p.22

[2] K. Kaminohara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80(2009) p.210

金属ジャケット付 BSCCO2223 導体の機械的バットジョントの基礎評価

Fundamental Evaluation of Mechanical Butt Joint of BSCCO 2223 Conductor with Metal Jacket

伊藤 悟, 坂下 武志, 橋爪 秀利(東北大)
 ITO Satoshi, SAKASHITA Takeshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々の研究グループでは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を提案している。マグネット材料としては、比較的高温で使用でき、材料の比熱を大きくすることができる高温超伝導体を採用している。

これまで、分割型高温超伝導マグネットの基礎研究として、銅ジャケット付 BSCCO 2223 積層導体による着脱可能な機械的バットジョントの実験的研究を進めてきた[1]。しかしながら、これまでの実験では試験結果にばらつきがあるという問題が発生しており、再現性のあるデータを取得するのが難しい状況にある。そこで、評価方法を改善することを目的として、試験結果に影響すると考えられる導体形状、接合面状態、接合力の与え方の 3 点について実験、および構造解析により、その影響を考察した。今回の発表ではその結果を報告する。

2. 実験

今回、新たに製作した導体を Fig.1 に示す。本研究では接合面角度を 45 度とし、垂直方向からの圧縮力によって導体を機械的に接合している。過去の研究では、導体断面形状が長方形ではなく、接合力を付加する際に導体位置がずれるという問題点があったと考えられるため、今回は断面形状を長方形とした。この導体の接合面を#240(粒径 74-88 μm)、#600(粒径 26-31 μm)、#1000(粒径 14.5-18 μm)のそれぞれの研磨紙、および 3-5 μm のアルミナ粒子で研磨したものを機械的バットジョントして取得した接合抵抗を Fig.2 に示す。Fig.2 では#240 の場合のみ 3 回の実験データの平均値とエラーバー(3 回のデータの最大値と最小値)を示している。その他の場合については 1 回の実験データを示している。今回の実験データでは接合面のラフネスが大きいほど接合抵抗が小さくなる傾向が見られた。Fig.3 に研磨した接合面をサーフェイスプロファイラーで測定した結果を示す。今回の接合面処理では、研磨されて生成した BSCCO 2223 の粒子が更に面を削り取ってしまい、小さな粒径の研磨粒子を使用した場合に平滑面が得られなかつたものと考えられる。研磨粒子の粒子径の選定によるラフネス制御だけではなく、接合面のうねりをなくすような加工処理を導入することでデータのばらつきを抑え、接合面のラフネスと接合性能の相関性を確認することができると考えられる。

3. 構造解析

上記導体の接合試験体系を 2 次元でモデル化し、ANSYS を用いて構造解析を行った。本解析では、接合力の付加による接合面の接触状況を評価した。Fig.4 に実験と同様に垂直方向からの接合力を増加させていった場合の接合面に生じるギャップ距離を示す。Fig.4 の横軸の t は Fig.1 に示されているように接合面上の位置を示す。Fig.4 より垂直方向の接合力のみでは、接合面が離れてしまうことがわかる。水平方向からの接合力を組み合わせることにより、このギャップはなくなることも解析から得ることができた。接合試験でも導体位置の安定化のために水平方向から導体に力を加えてはいるが、その値を定量化はしていない。したがって、実験ごとに接合状況が異なっている可能性が高く、これがデータのばらつきにつながる一因であると考えられる。

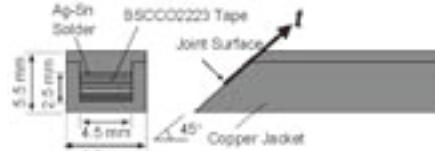


Fig.1 BSCCO 2223 Cable with Copper Jacket

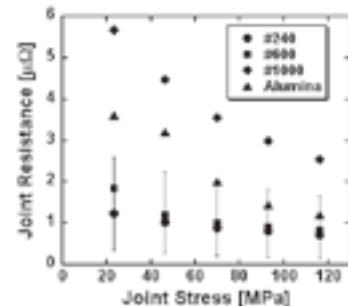


Fig.2 Experimental Result

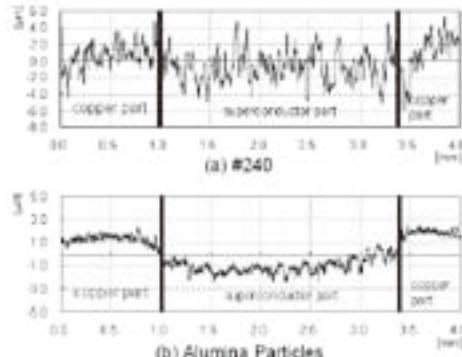


Fig.3 Joint Surface Condition

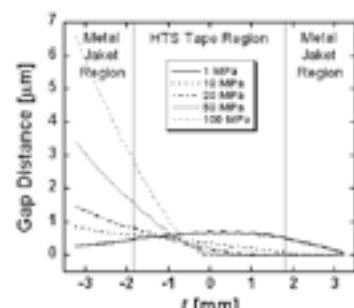


Fig.4 Gap Distance at Joint Surface

4. まとめ

本報告では、導体形状、接合面状態、接合力付加の各要素が金属ジャケット付高温超伝導導体の機械的バットジョントに与える影響を実験、解析により評価し、接合面加工方法、接合力付加方法の改善により接合性能を正しく評価できることを示した。今後は今回の考察を反映して実験体系を改善し、評価を続けていく予定である。

参考文献

1. S. Ito, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19 (2009) p.1536

NiめっきCu/SUS316貼合せテープ上への $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 厚膜の作製

Fabrication of thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ film on Ni-electroplated Cu/SUS316 laminated tape

宇田 達也、土井 俊哉、大王 学、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)
 UDA Tatsuya, DOI Toshiya, DAIO Manabu, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);
 SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.);
 KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)
 E-mail: k0165361@kadai.jp

1. はじめに

我々は、強磁性を持つNi系合金テープに換えて、非磁性体であり価格の安い $\{100\}<001>$ 集合組織を有するCuテープ上にYBCO薄膜を形成し、実用化レベルの高い臨界電流密度(J_c)が得られることを実証した[1]。今回、 J_c の向上を目指してYBCOの厚膜化を試みた結果を報告する。

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30μm厚のCuテープを作製し、100μm厚のSUS316テープと表面活性化接合法で貼り合わせた。次にCuテープ表面を研磨した後、0.5μm厚のNiめっき層を形成した。Niめっき層の上に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1μm厚のYBCO薄膜を作製した。 CeO_2 薄膜、YSZ薄膜、YBCO薄膜の配向性はX線回折(XRD)測定により確認した。また、YBCO薄膜表面の状態は走査型電子顕微鏡を用いて観察を行い、YBCO薄膜の臨界電流は四端子法を用いて測定を行った。

3. 結果と考察

Fig.1にNiめっきCu/SUS316貼合せテープ上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 中間層を介して作製したYBCO厚膜のYBCO(103)面を用いて測定した極点図を示す。 $\alpha=45^\circ$ 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。この結果から、NiめっきCu/SUS316貼合せテープ上に2軸配向したYBCO厚膜が作製できていることが分かった。このときのYBCO(103)回折線を用いた β スキャンの測定結果から求めたピーク半値幅は 7.0° であった。作製したYBCO厚膜は良好な配向状態にあることが確認できた。Fig.2には走査型電子顕微鏡によるYBCO厚膜表面の観察結果を示す。基板に使用したCuテープの粒界グループ部分に対応するような凹みは観察されず、また、YBCOのa軸配向粒は存在しないことが分かる。Fig.3にNiめっきCu/SUS316貼合せテープ上に作製したYBCO厚膜の J_c の磁場依存性を示す。外部磁場を印加しない時の J_c は1.5 MA/cm²であった。また、低磁場での J_c の低下がほとんどないことから、弱結合が存在しない良質なYBCO厚膜であることが確認できる。

以上のように、NiめっきCu/SUS316貼合せテープ上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 中間層を介した線材構成により、高特性のYBCO厚膜を作製することが可能であることを示した。

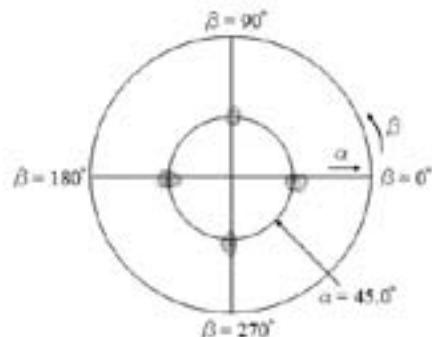


Fig.1 YBCO (103) pole figure for the YBCO(1μm)/CeO₂/YSZ/CeO₂/Ni/Cu/SUS316 laminated tape.

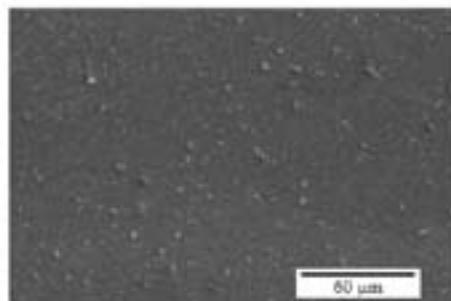


Fig.2 SEM micrograph of the YBCO surface.

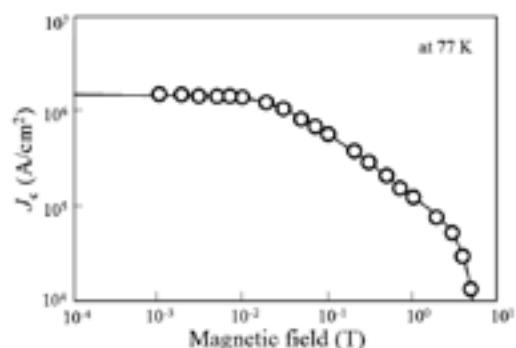


Fig.3 Magnetic field dependence of J_c for the YBCO film prepared on the $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}/\text{SUS316}$ laminated tape.

4. 参考文献

- [1] Tokudome, et al., J. Appl. Phys. **104**, (2008)103913.

IBAD-MgO 基板を用いた PLD 法による RE123 線材作製

Preparation of RE123 coated wire on IBAD-MgO template by PLD method

柿本 一臣, 五十嵐 光則, 須藤 泰範, 花田 康, 田下 千晴, 羽生 智, 林田 知朗, 森田 克洋, 藤田 真司, 朽網 寛, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)

KAKIMOTO Kazuomi, IGARASHI Mitunori, TASHITA Chiharu, HANADA Yasushi, HANYU Satoru, HAYASHIDA Tomoaki, MORITA Katuhiro, SINJI Fujita, KUTAMI Hiroshi, IIJIMA Yasuhiro, SAITO Tomoaki (Fujikura)

E-mail: kkakimoto@fujikura.co.jp

1. はじめに

世界的に RE 系酸化物超電導線材の高 I_c 化、長尺化が進み、変圧器、限流器、船舶用モーター等の機器への応用段階に近づいている。我々は、これまでに RE 系酸化物超電導線材作製において $I_c \times L = 176,023 \text{ A} \cdot \text{m}$ ($I_c = 349.6 \text{ A/cm}^w$, $L = 503.5 \text{ m}$)を記録し、長尺線材作製の可能性を示した。これからは、ユーザー側のニーズから線材仕様として $I_c > 500 \text{ A}$ で単長 $> 1 \text{ km}$ 線材を安定供給できるような量産体制確立を目指して、各プロセスの安定化及び高速化を図っていく。

今回、フジクラでの RE 系酸化物超電導線材の開発状況を報告する。

2. 作製方法

耐熱性の $0.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ハスティロイテープ材は、連続研磨装置により作製速度 100 m/h で $R_a = \text{数 nm}$, $R_z = \text{数十 nm}$ の表面粗さにした。IBAD 層を、GZO 材料では作製速度 $3 \sim 5 \text{ m/h}$ で、MgO 材料では作製速度 $300 \sim 1000 \text{ m/h}$ で形成した。CeO₂ 層は、PLD 法により作製速度 60 m/h で形成した。その時の CeO₂ - $\Delta \Phi = 4 \sim 5^\circ$ であった。Gd123 層は、PLD 法により作製速度 $4 \sim 15 \text{ m/h}$ で形成した。

Gd123 膜評価としては、TEM 観察および四端子法による I_c 測定(77 K , 0 T)を行った。

3. 結果と検討

図 1 に約 $6 \mu \text{m}$ まで厚膜化した Gd123 膜の断面 TEM 写真を示す。この試料は、全長約 20 cm で $I_c = 997 \text{ A}$ である。この図から、Gd123 膜は基板に対して垂直に c 軸配向し、CeO₂ 層との反応は見られない。そして、単結晶に近い Gd123 膜が形成できていることがわかる。

図 2 に IBAD-MgO 基板を用いて作製速度 15 m/h で作製した約 100 m 長線材の I_c 分布を示す。この図から、 $I_c > 600 \text{ A}$ でバラツキ $\pm 2\%$ の均一な I_c 分布を有する線材が作製できていることがわかる。

図 3 に今年度 10 月までに提供した線材の累積長を示す。この図のように、線材仕様 5 mm 幅で $I_c = 100 \text{ A} \sim 180 \text{ A}$ の線材をトータル約 3 km 以上作製提供した。

以上のように、基板形成プロセスにおいて高品質のものが高速形成できるに至っている。また、超電導形成プロセスにおいて成膜領域の均熱化を図ることにより $I_c > 600 \text{ A}$ 以上の長尺線材が作製できる見通しが得られている。

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」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」からの受託により実施された。

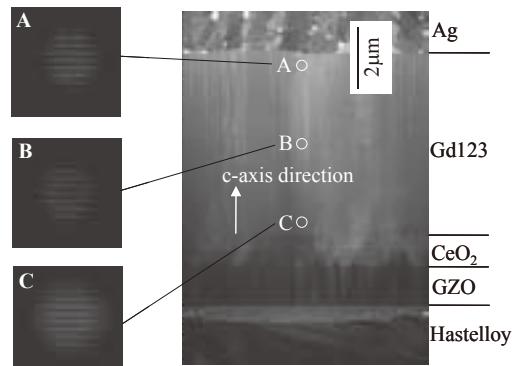


Fig.1 Cross-sectional bright field STEM image of the Gd123 film with an I_c of 1.0 kA .

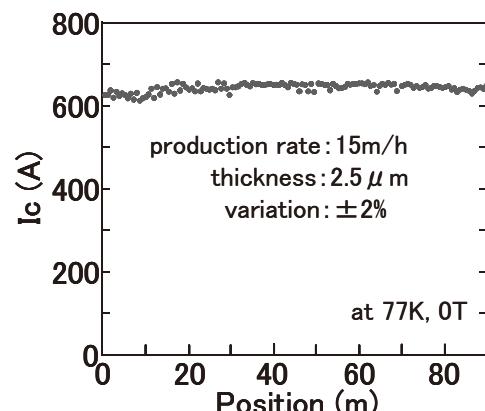


Fig.2 I_c distribution for long Gd123 film on IBAD-MgO template.

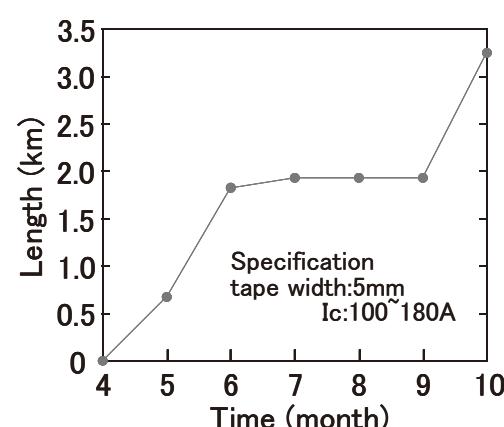


Fig.3 Track record by October for supply of Gd123 wires.

**REBa₂Cu₃O_{7-d} 線材用二軸配向基板の配向度に与える
IBAD-MgO 層の表面ラフネスの影響**

**Influence of Surface Roughness of IBAD-MgO Layer on Grain Alignment of
Biaxially-Textured Substrates for REBa₂Cu₃O_{7-d} Coated Conductors**

宮田 成紀, 衣斐 頤, 畠山 英之, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所),
加藤 丈晴, 平山 司 (ファインセラミックスセンター)
MIYATA Seiki, IBI Akira, HATAKEYAMA Hideyuki, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC);
KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC)
E-mail: miyata@istec.or.jp

REBa₂Cu₃O_{7-d}(REBCO)超電導線材およびそのための二軸配向基板の開発を行っている。二軸配向膜の形成にはイオンビームアシスト蒸着(IBAD)法を採用し、この基板を用いた線材としての電流特性は、臨界電流密度(J_c)として 5MA/cm²以上の、あるいは臨界電流(I_c)として 700A 以上の高い特性を得るに到っている[1]。しかしながら産業化念頭においていた工業プロセスとして見た場合、製造速度はまだ十分とは言えない。我々のグループでは線材構造として四層の中間層を含む REBCO/CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO/Gd-Zr-O/Ni-alloy の構造を採用しているが、これらの中間層のうち現時点では CeO₂の製造速度が 10-20m/h 程度と最も低い。基板として高い配向度を得るために 500nm 以上の膜厚が必要なことがその理由である。二軸配向構造そのものが形成されるのは IBAD-MgO 層においてであるが、IBAD 基板上にパルスレーザー蒸着(PLD)法を用いてエピタキシャル成長させることで配向度が向上するという CeO₂層の特性を生かし、基板の配向度としては、CeO₂層成膜後典型的には $\Delta\phi \sim 4^\circ$ 程度の値を得たうえで超電導層成膜に使用している。CeO₂層における配向度の向上は膜厚とともに進むため、現状としては上記配向度を達成するためにおよそ 500nm の膜厚が必要となっているというわけである。翻って言うとこれは出発点となる IBAD-MgO 層の配向度を上げることで CeO₂層の膜厚を削減できる可能性があることを意味しており、この方針に従い、中間層プロセスの高速化を目指した IBAD-MgO 層の高配向化の検討を行っている。

IBAD-MgO 層の成膜条件と、得られる基板としての配向度との関係を調べると、特徴の一つとして MgO 層の層厚に関して最適領域というものが存在することがあげられる。IBAD-MgO 層厚に対して、初期段階では配向度は向上するが、ある値を超えると逆に増大する傾向にある。前回、このような配向度の劣化が生じる厚膜領域においては MgO 層表面のラフネスが非常に大きな値になっており、AFM 分析により詳細に調べた結果その表面ラフネスは膜厚と共に単調に増加していることを報告した[2]。もともと IBAD-MgO の配向性は下地となるシード層の表面粗さに非常に敏感であることが分かっているため、IBAD-MgO 膜の成膜過程をホモエピタキシャル成長として見た場合、このような IBAD-MgO 層自身の表面ラフネスの増大が配向度劣化の原因となっている可能性は十分考えられる。Fig.1(a)に標準的に採用される(配向度に対して最適化された)成膜条件を用いた場合の AFM 画像を示す。この条件におけるアシストイオン電圧は $V_{as}=900V$ である。他の条件を変えずに V_{as} だけを 500V に下げて成膜した場合、得られる配向度(CeO₂層)は $\Delta\phi > 10^\circ$ 以上と大きくなるが、ラフネスが著しく減少した膜が得られることがわかった(Fig.1 および 2)。これら二つの条件を組み合わせることによって、高い配向度と平滑な表面を備えた IBAD-MgO 膜を作製し、それによって配向度の劣化を抑制することがプロセスとして可能かどうかについて調べた。

試料の作製および評価にご協力いただいた栗木礼二氏、青木大志氏に感謝いたします。本研究は、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。

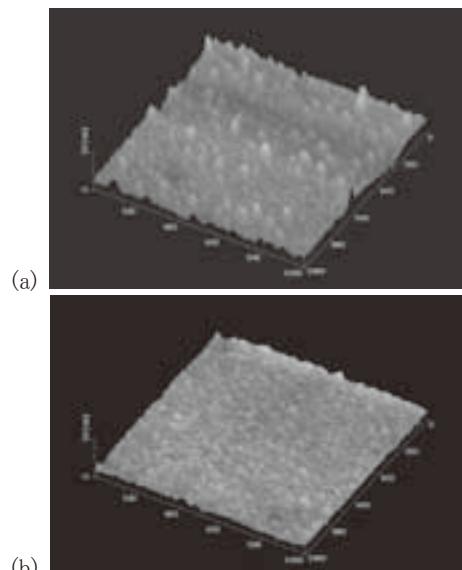


Fig. 1 AFM images (Scan area: 1μm x 1μm) of the surface of IBAD-MgO films of (a) $V_{as}=900V$ and (b) 500V.

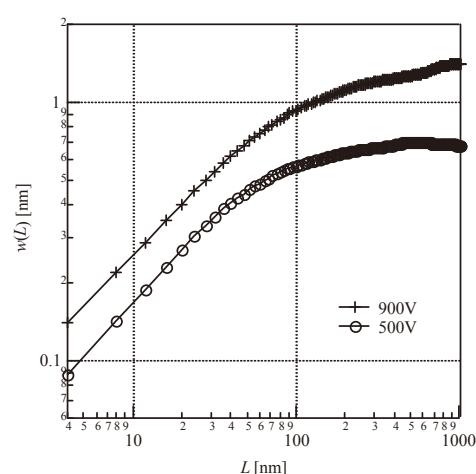


Fig. 2 Root-mean-square values (w) of height data [2] as a function of a data length (L) for IBAD-MgO films fabricated with assisting ion voltages of 900(cross) and 500V(circle).

[1] A. Ibi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.112 など。

[2] S. Miyata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.183.

TFA-MOD 法による低成本 YBCO 線材の開発(9)

- TFA-MOD YBCO 線材量産プロセスにおける歩留向上的検討 -

Development of the low cost YBCO coated conductor using TFA-MOD process (9)

- Investigation of yield improvement in mass production of YBCO coated conductor using TFA-MOD process -

小泉 勉, 中西 達尚, 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)

高橋 保夫, 吉積 正晃, 宮田 成紀, 山田 穂, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所)

KOIZUMI Tsutomu, NAKANISHI Tatsuji, AOKI Yuji, HASEGAWA Takao (SWCC-CS)

IIJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura)

TAKAHASHI Yasuo, YOSHIZUMI Masateru, MIYATA Seiki, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

t.koizumi576@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

近年、高温超電導線材が用いられた、電力送電ケーブルや変圧器等の機器開発が、様々な機関において行われており、中でも、RE-123 超電導体は液体窒素温度での特性に優れているため、RE-123 超電導線材の開発が様々な機関で進められている。

我々は、TFA-MOD 法により作製される Y-123 線材の実用化を目指し、特性向上及び長尺化、製造速度の高速化等の検討を行い、500 m 級において、 $I_c = 300 \text{ A/cm-width}$ のレベルにまで到達することが出来ている。現在、量産を考慮した製造プロセスの確立を行っており、これまでに総長 6 km 以上の YBCO 長尺線材の量産試作を行っている。

本報では、Y-123 超電導長尺線材の開発状況、及びその結果について報告する。

2. 実験方法

出発原料に、トリフルオロ酢酸塩 (Y-、Ba-)、及びナフテン酸塩 (Cu-) を用い、金属元素組成比 Y:Ba:Cu=1.0:1.5:3.0 として混合した原料溶液を、HastelloyTM C-276/Gd₂Zr₂O₇ (IBAD)/CeO₂(Sputtering) の構造を持つ幅 5mm の金属基板上に Reel-to-reel (RTR) 式塗布・仮焼装置を用い、10 m/h の速度で前駆体膜を形成し仮焼テープとした。その仮焼テープをバッチ式焼成炉により、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中、最高到達温度 750°C の条件下で本焼を行った。その後、Ag 安定化層を形成し、酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。

長尺線材の臨界電流 (I_c) 値は、直流四端子法により液体窒素・自己磁場中において、電圧端子間距離 750mm で、700mm 間隔で連続に測定を行った。尚、 I_c 値は電圧基準 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した。

3. 結果

Fig. 1 にこれまでに作製した Y-123 線材の歩留りの遷移を示す。図に示す歩留りは、単長 30 m 全ての領域において $I_c > 200 \text{ A/cm-width}$ 以上であったものを示している。図に示すように、本年 2 月から安定して作製されていることが判る。

Fig. 2 に Fig. 1 に示した 30 m 級 Y-123 線材の I_c 値の平均値分布を示す。また、標準偏差については、08 年度作製分は $\sigma = 40.9$ 、09 年度分は $\sigma = 18.9$ であった。09 年度に作製した線材の I_c 分布は 08 年度分と比較すると分布が狭くなっていることが判る。これは、基板を含む各種材料の性能の安定化に加え、バッチ式焼成炉の水蒸気供給系を含むガス供給系の改善によるものである。

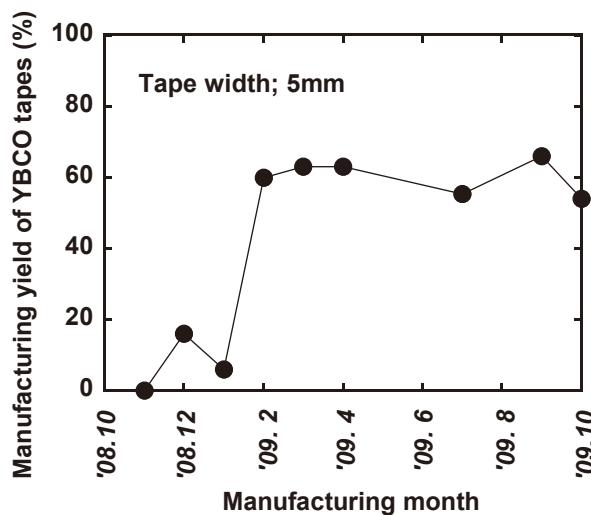


Fig. 1 Manufacturing yield of the 30m-class YBCO tapes.

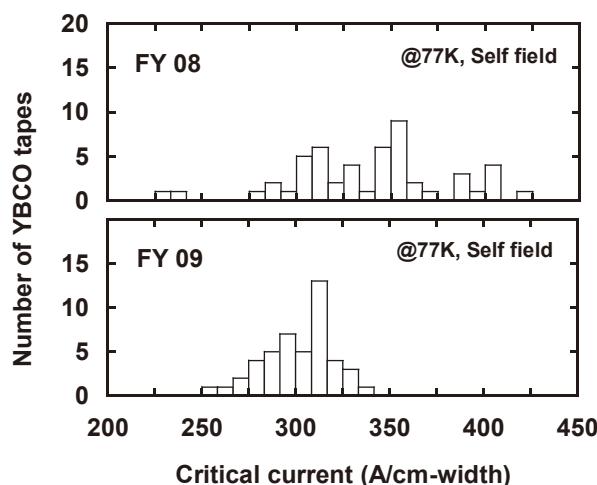


Fig. 2 Distribution of the critical current of the 30m-class YBCO tapes.

謝辞

本研究は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受け実施したものである。

微細組織制御による TFA-MOD 線材の磁場中特性向上(2) ～REBCO+BZO 層の結晶成長メカニズム～

Microstructure control of TFA-MOD derived REBCO coated conductors for high magnetic field dependence of J_c (2)
～Crystal growth mechanism of REBCO+BZO layer～

吉積 正晃, 三浦 正志, 山田 穂, 和泉 輝郎, 塩原 融(超電導工学研究所)
YOSHIZUMI Masateru, MIURA Masashi, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
E-mail: myoshizumi@istec.or.jp

1. はじめに

TFA-MOD (Metal Organic Deposition using Trifluoro Acetates) 法は低コストで高い特性が得られる手法であるため、将来の実用化線材作製プロセスとして期待されている。TFA-MOD 法における開発の課題は、コスト削減のための製造速度向上と高臨界電流密度 (J_c) 化、磁場中応用のための磁場中特性向上に大別される。磁場中特性の向上のためには、磁場中での J_c 特性の異方性を抑制し、 J_c 特性の低下を抑制するため磁束のピン止め点導入が必要である。前回、Miura らにより世界で初めて開発された、高い磁場中特性を有する厚膜の TFA-MOD 線材[1]における分析結果として微細な Ba₂ZrO₃ (BZO) 粒子が試料中に均一に分散しており、ピン止め点として働いていると考えられる事と、BZO 粒子の形成及び REBCO 層への取り込み時期、REBCO 層膜厚による組織変化について紹介したが、本研究では、その組織変化が起こる機構について更に調査を進め、考察した結果を報告する。

2. 実験方法

RE-TFA (RE:Y, Sm, Gd)、Ba-TFA、Cu-ナフテン酸塩からなる出発原料を Y:Sm or Gd:Ba:Cu=1:0.3:2.3.5 組成 (Ba-deficient) になるよう混合し、更に金属比で 1wt% の Zr 塩を混合して有機溶媒に溶かし、出発原料溶液とした。この原料溶液を PLD-CeO₂/Sputter-LaMnO₃/IBAD-MgO/Sputter-Gd-Zr-O/ハステロイ™ 基板上にスピンドルコートにより塗布して 500°C、酸素雰囲気で仮焼し、前駆体膜を得た。所定の膜厚を得るため、塗布・仮焼プロセスを繰り返した後、760°C、500ppm 酸素中で本焼成した[1]。本焼成途中では時間を見てクエンチを行い、結晶成長段階の異なる試料を作製した。得られた試料は 4 端子法により磁場中での J_c 特性を評価し、TEM により微細組織観察を行った。

3. 結果及び考察

作製された YGdBCO+BZO 線材は高成長速度で成長させた試料では、1.9 μ m 厚まで自己磁場下で 4MA/cm² と非常に高い J_c 特性を維持しており、TFA-MOD 法により作製された超電導線材の I_c 特性の世界記録となる 760A/cm-w、1T の磁場中で I_c _{min} = 115A/cm-w、3T で 35A/cm-w と高い特性を得た。この線材は、低成長速度になるほど、厚膜化時の J_c 特性低下が起こっており、その原因是、組織観察の結果、膜内の膜厚方向への組成分布発生と未反応粒子の粗大化にある事が示唆された。厚膜の試料においては膜下部と上部とで RE₂Cu₂O₅ 粒子の分布に大きな差があり、膜下部では RE₂Cu₂O₅ が少なく小さかったのに対して、上部では粗大な RE₂Cu₂O₅ 粒子が数多く見られた。これは、膜内の平均組成が均一ではなく、下部では膜全体の平均組成 (Ba-deficient) よりも RE:Ba:Cu 比が 1:2:3 に近く、上部では逆に Ba が殆どなく、123 相の形成が少ない事を意味している。RE₂Cu₂O₅ 粒子は 123 層生成前には駆体中に均一に分布している事から、123 層成長に伴い分布の変化が発生している事が分かった。

この、膜内の組成変動と粒子の粗大化については、REBCO 成長時に RE₂Cu₂O₅ 粒子を REBCO 成長界面が押し出す (pushing 効果) 事と、RE₂Cu₂O₅ 粒子が REBCO 成長界面に取り込まれる前に界面遠方から Ba が供給されて REBCO を形成するという、2つが挙げられる。

組成ずれの発生メカニズムを明らかにするため、厚膜試料をクエンチし、TEM 観察を行った。pushing 現象においては、臨界粒子サイズは $r = a_0 \Delta \sigma / 12\eta R$ (r: 粒子径、 a_0 : 特性距離、 $\Delta \sigma$: 粒子-matrix 界面エネルギー、 η : matrix 粘性、R: REBCO 成長速度) で表され、成長速度 R が大きいほど小さい粒子が押し出されずに REBCO 内に取り込まれる。REBCO 成長界面近傍の前駆体中と REBCO 結晶中の未反応粒子のサイズを比較した所、pushing 機構が示唆するような、前駆体中の方が小さいと言う事はなく、むしろ REBCO 結晶中の方が小さいほどであった。このことから、膜厚方向の組成ずれは pushing によるものではなく、REBCO の成長時に Ba が遠方 (膜上部) からも供給される事によるものと考えられる。これは、REBCO 成長速度が遅いほど界面遠方からの Ba の拡散時間が長くなるため、REBCO 成長界面遠方からも Ba が供給されやすくなり、組成ずれが起こりやすくなるというものであり、Ba の前駆体中の拡散速度によって決定される拡散時間と成長速度及び膜厚によって決定される、各部位での保持時間との相対関係によりその影響の度合いが決定される。膜厚方向の Ba 濃度分布を考えると、pushing の場合は、成長界面において REBCO 結晶により排出された RE₂Cu₂O₅ 粒子が集まることにより Ba 濃度が極端に低下し、界面遠方ではまた初期組成に戻っていくのに対し、REBCO 成長界面遠方からの Ba 拡散においては、界面近傍での極端な Ba 濃度低下は起こらず、界面遠方まで Ba の濃度低下が起こる。

RE₂Cu₂O₅ 粒子の粗大化は、Coarsening によるものと考えられるが、Ostwald Ripening 理論によると、平均粒径は保持時間の $1/n$ 乗に比例し、保持時間が長いほど粒子は粗大化する。本プロセスでは、保持時間は成長速度に反比例し、膜の上部ほど保持時間が長くなるため、粗大化が進行する。この時、粗大化した粒子は未反応粒子として REBCO 中に残留し、ポアの起源となる他、反応終了を遅らせる要因となる。

以上の事から、平均組成分布、粒子の粗大化とともに、低成長速度ほど促進される事が明らかとなった。この事から、最適な特性を得るための平均組成としては、現在 RE:Ba:Cu=1:1.5:3 を利用しているが、成長速度を考慮した上で組成の最適化を行う事により、更なる特性の向上の可能性がある事が示唆される。

4. 謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器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) からの委託を受け実施したものである。

参考文献

1. M. Miura, et al.: Appl. Phys. Express 1 (2008) p.051701

4 点曲げ試験法による Y 系線材の I_c -ひずみ測定

I_c -strain measurement using 4-point bending method for YBCO coated conductor

菅野未知央(京大) ; 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫(中部電力)

SUGANO Michinaka (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

われわれは Y 系線材を超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)に適用するための機械的な基礎特性評価を行っている。Y 系線材の自己磁場下での臨界電流(I_c)—ひずみ特性においては、金属系超伝導体と同様に、 I_c が一軸ひずみに対してパラボリックに変化することが知られている。われわれはこれまで、線材両端を銅電流電極に固定して、一方の電極を移動させることにより引張ひずみを負荷する方式を用いて Y 系線材の磁場中の I_c —ひずみ特性を測定してきた。この方法は、冷却中に電極が移動可能な状態であることから、治具の収縮による予ひずみの影響を受けず、測定されたひずみ値の絶対値を信頼できるという利点がある。この測定方法を用いた測定結果から、以下のような Y 系線材のひずみ特性に関して以下の特徴が見出されている[1][2]。

- ① 高温低磁場において I_c が最大となるひずみ(ピークひずみ)が磁場に依存して変化する。
- ② 高温、高磁場ほど I_c がひずみに強く依存する。
- ③ 自己磁場下において、ピークひずみは低温ほど圧縮ひずみ側に移動する。

このうち、①③の特徴は、ピークひずみが熱残留ひずみだけでは決定されないことを示しており、これは「超伝導体のゼロひずみで I_c が最大となる」とされている金属系とは根本的に異なる。

さらに興味深いことに圧縮側を含めた I_c —ひずみ測定の結果から、ある磁場領域では引張ひずみ側に加えて、圧縮ひずみ側にもピークが存在することが報告されている[3]。このことは、ひずみ特性のメカニズムを議論するためには、圧縮ひずみ側も含めた測定を行うことが重要であることを示している。今回、4 点曲げ試験法による磁場温度可変環境での I_c —引張/圧縮ひずみ測定を行ったのでその結果について報告する。

2. 実験方法

本研究で用いた Y 系線材の構造は、Ag (10-20 μm) /MOCVD-YBCO (0.1 or 1 μm) /PLD-CeO₂ (0.4 μm) /IBAD-Gd₂Zr₂O₇ (1 μm) /Hastelloy C-276 (100 μm) となっている。括弧内の数値は各層の厚さを表す。線材の Hastelloy 面を紙やすりで研磨し表面酸化膜を除去した後、Cu-Be の板にハンド付けにより固定した。電圧端子間距離は 6 mm とし、端子間にひずみゲージと通電状態での線材の温度測定のための温度センサー(Cernox-1050-BC)を取り付けた。温度制御は、温度可変クライオスタットからの温調ヘリウムガスと線材表面に取り付けたニクロム線ヒーターの出力の PID 制御により行った。ひずみ負荷は 4 点曲げにより Cu-Be 板ごと曲げ変形を与える方法を取った。ひずみの負荷方向を変更する場合は、一旦クライオスタットから取り出し、Cu-Be の表裏を反転させた。測定条件は、温度 40—83 K、磁場 0—10 T の範囲内で変化させた。磁場印可方向は全て YBCO の c 軸に平行な方向とした。

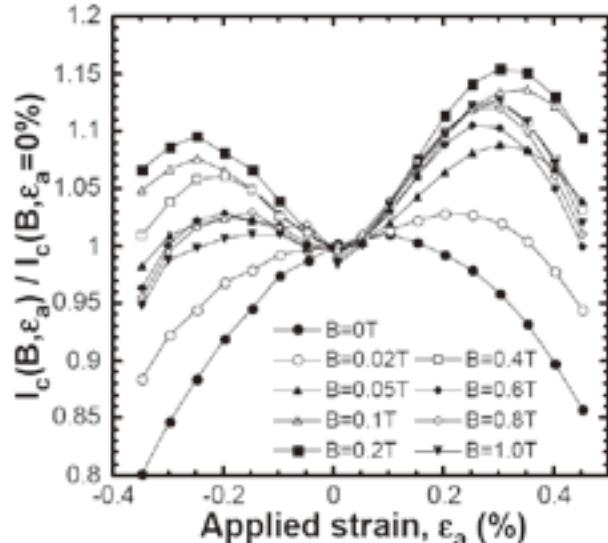


Fig. 1 I_c -strain curves measured at 83 K under magnetic fields.

3. 実験結果

Fig. 1 に 83 K で測定した磁場中の I_c —ひずみ特性を示す。縦軸は、負荷ひずみゼロでの値 I_c で規格化している。自己磁場状態 ($B=0$ T) では、パラボリックな I_c のひずみ依存性が確認された。一方で、磁場を増加させると 0.02 T で非対称な振る舞いが現れ出し、0.05 T で明らかに圧縮、引張両側にピークが観察されるようになる。ピークの高さは 0.2 T で最大となり、自己磁場の I_c と比較して、圧縮側で約 10%、引張側で約 16% 増加している。さらに磁場を増加させると、 I_c の変化は小さくなる方向に推移した。また、 I_c が最大となるひずみは、自己磁場で 0.1% であるのに対して、0.2 T では -0.25% および 0.3% であった。さらに、ピーク以上のひずみを負荷した部分から、 I_c のひずみ感度は、磁場が大きくなるにつれて大きくなっていることがわかる。

以上のように、圧縮側を含めた測定を行うことにより、Y 系線材の複雑な磁場中の I_c —ひずみ特性について、その全体像が明らかになることが期待できる。当日は、その温度依存性についても報告する予定である。

参考文献

1. Sugano et al, SUST, Vol. 21 (2008) 115019.
2. 菅野ら, 第 80 回低温工学・超電導学会講演概要集, 1A-a09 (2009).
3. 今村ら, 第 80 回低温工学・超電導学会講演概要集, 1A-a0910 (2009).

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

PLD-GdBCO/IBAD 線材の磁界環境下における一軸機械歪依存性

Axial strain dependence of in-field critical current of PLD-GdBCO/IBAD coated conductors

今村和孝, 東川甲平, 井上昌睦, 木須隆暢(九大); 衣斐顕, 宮田成紀, 山田穣, 和泉輝郎(ISTEC)

K. Imamura, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss(Kyushu Univ); A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada, T. Izumi(ISTEC)

e-mail; imamura@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

GdBCO 超伝導線材は YBCO 線材に比べて T_c が高く、臨界電流特性にすぐれている事から、線材の研究、開発が精力的に行われており、既に IBAD/PLD 法により平均 400A を超える I_c を有する 500m 長の線材が得られるに至っている。これにより、応用機器への適用が期待されているが、特に実用上インパクトの大きい高磁界マグネット応用では、線材に大きなフープ力を生じるため、電流輸送特性と共に機械歪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、高磁界マグネットへの適用が期待される PLD-GdBCO/IBAD 線材の磁界環境下における臨界電流特性の一軸機械歪依存性を実験的に明らかにした。

2. 実験方法

U 字型ステージと一体で変形するよう測定試料を固定する。ステッピングモータによりステージ脚部両端のギャップを変化させ、試料に均一な引張および圧縮歪みを生じさせる。測定は、直流四端子法による電界—電流密度($E-J$)測定を、機械歪、外部磁界を系統的に変化させながら行った。尚、試料は測定中、液体窒素による浸漬冷却を行った。

3. 実験結果

実験により得られた歪みによる J_c の変化率を Fig.1,2 に示す。Fig. 1 に示すとおり、比較的弱い外部磁界中で、歪みを印加時に圧縮側と引張り側でピークを示す特異な振舞いが観測された。特に 0.5 T の外部磁界中で顕著に見られる。この事は、歪みによる変化に対して、二つの競合するメカニズムが存在することを示唆している。一方、自己磁界中および印加磁界 2T 以上では引張・圧縮歪の印加にともない J_c は単調に低下している。また、印加磁界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。15%程度変化が見られる条件下にあっても、 J_c 変化の可逆性があることを確認した。

GdBCO 膜中に BZO 人工ピンを導入した試料では、全ての印加磁界において、 J_c の歪依存性が圧縮歪から引張歪にいたるまで一つのピークを示し、印加磁界の増加とともに J_c 低下率が増大する単調な変化をすることから、先述の複雑な振る舞いは、超伝導層の膜質に依存すると考えられる。

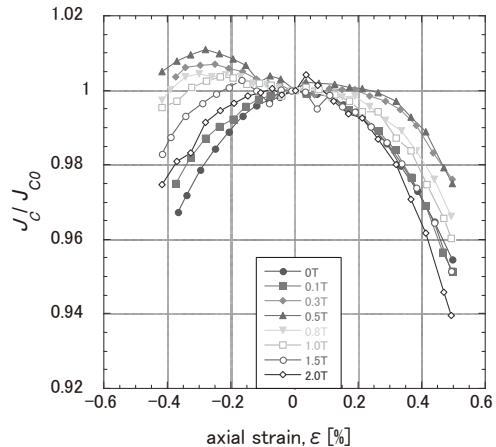


Fig.1 Strain effects on J_c in GdBCO coated conductor under external fields less than 2.0 T.

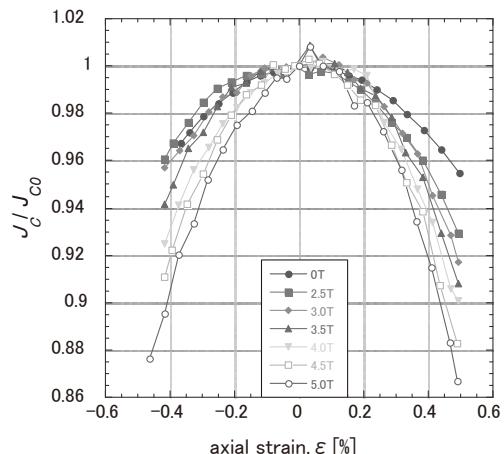


Fig.2 Strain effects on J_c in GdBCO coated conductor under s.f. and external fields high than 2.5 T.

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施すると共に、科学研究費補助金 基盤研究(B):20360143 の助成を得て行ったものである。

RE123 系線材の応力 - ひずみ特性 (1) IBAD-MgO 線材のフラットワイズ曲げ

Stress-strain characteristics on RE123 wires 1. Flat-wise bending of IBAD-MgO wire

山田 雄一, 山田 穂, 藤原 昇, 町 敬人, 衣斐 顯, 和泉 輝郎 (ISTEC-SRL); 朽網 寛, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
 YAMADA Yuichi, YAMADA Yutaka, FUJIWARA Noboru, MACHI Takato, IBI Akira, IZUMI Teruo (ISTEC-SRL);
 KUTAMI Hiroshi, IIJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.)
 E-mail: yamada-yuichi@istec.or.jp

1. はじめに

Y 系線材の応用機器として、電力ケーブル、SMES、変圧器を中心開発がすすめられているが、いずれの場合にも、線材には様々な応力やひずみが加わり、それによって臨界電流性能の低下が想定される。これらの機器応用に向けて、従来の GzO 中間層に比較して薄膜化と量産化可能な IBAD-MgO 中間層を有する PLD 線材の高 I_c 化開発が進展しており、この新しい線材の曲げ歪みによる I_c の変化を評価した。

2. 評価線材

0.1mm 厚のハステロイ基板上に IBAD 法によって約 10nm の MgO 中間層を設け、PLD 法によって CeO_2 キャップ層と $\text{Gd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超電導層を成膜し、安定化層として 20 μm の銀をスパッタした (フジクラ製: F-PLD、SRL 製: S-PLD)。さらに S-PLD に銅を 10-100 μm めつきした超電導線を作成した。

3. 曲げ試験方法

線材の曲げ試験としては、以下の 3 種の方法で実施した。
 (1) 曲げ戻し評価 主として (コイル、ケーブル) 卷線時の繰り返し曲げを想定し、常温にて各種の直径をもった FRP の治具に線材を巻きつけ、直状に戻して I_c 測定する。
 (2) 曲げ評価 主として卷線形状によって加えられた歪を想定し、常温にて各種の直径をもった I_c 測定プローブに線材を巻きつけ、その状態のまま冷却して I_c 測定する。
 (3) 連続曲げ評価 低温中で連続的に曲げ (戻し) を加え、所定の各状態における I_c 測定を行う。この評価には、いわゆる “Goldacker 式” の試験装置 (Fig.1) [1] を用いた。

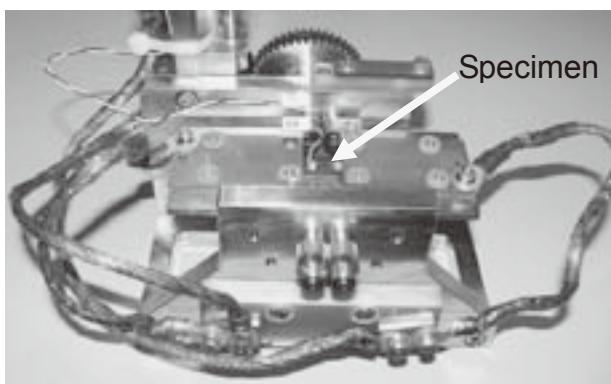


Fig. 1 Continuous bending test apparatus

4. 評価結果

Fig. 2 に F-PLD 線材の繰り返し曲げ戻し評価結果を示す。超電導層が内側、すなわち圧縮側に曲げた場合、直径 12mm の曲げまで I_c の低下は認められなかった。一方、超電導層が外側、すなわち引張側に曲げた場合、直径 20mm より大きい径では I_c の低下がなく、20mm より小さい径では 1 回の曲げでほぼ I_c がゼロになった。直径 20mm では繰り返しにより、 I_c の低下が見られた。Fig. 3 に F-PLD 線材の連続曲げ評価の結果を示す。超電導層を内側にして曲げた場合、歪み率で約 1%まで I_c の変化はなく、外側にして曲げた場合は、約 0.55% (直径 22mm) で当初 I_c の 95% 程度に低下した。

また、銅めっき線材、その他の評価結果は当報告する。

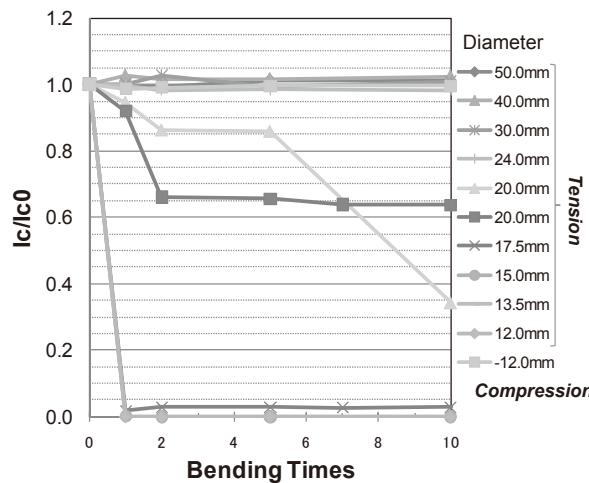


Fig. 2 Bending characteristics by repeat-bending

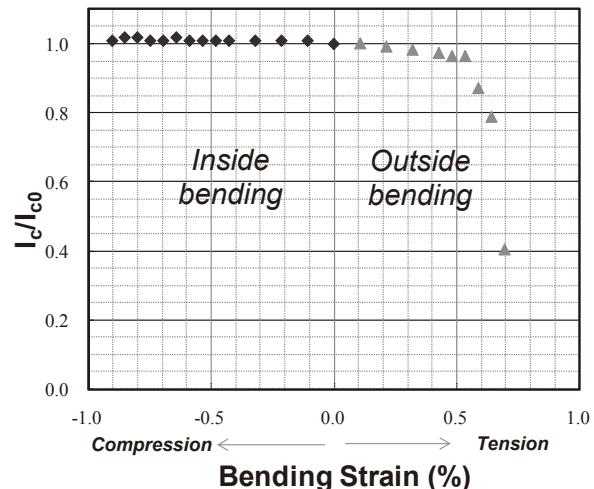


Fig. 3 Bending characteristics using the continuous bending test apparatus (Goldacker type)

5. 結論

低コスト化かつ量産化可能な IBAD-MgO 中間層超電導線は、外側曲げでも約 20mm 直径までの I_c 低下は小さく、現在の応用機器には十分な曲げ歪特性を有することが確認できた。

6. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の研究として、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。

また、Goldacker 式試験装置については NIMS・黒田先生及び岩手大学・笠場先生の、銅めっきについては住友電工のご協力を頂きました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

1. W. Goldacker, et al.: 2002 Adv. Cryog. Eng. Vol. 48 (2002) p.469

銅複合化 YBCO 薄膜超伝導線材における YBCO/CeO₂ 界面はく離の破壊力学的検討

YBCO/CeO₂ interlaminar fracture toughness in Cu laminated YBCO coated conductor

宮里 尚史, 北條 正樹, 菅野 未知央, 安達 泰治, 井上 康博(京大), 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

MIYAZATO Takafumi, HOJO Masaki, SUGANO Michinaka, ADACHI Taiji, INOUE Yasuhiro (Kyoto Univ.);

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

E-mail: takafumi.miyazato@physics2005.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

銅複合化 YBCO 薄膜超伝導線材(以下、銅複合化 YBCO 線材)をSMES用コイルとして使用する際、ローレンツ力由来のフープ応力が作用し、線材基板に生じる応力は、降伏応力の50%に相当する600MPa以上となる¹⁾。基板に生じている残留応力が-40MPa程度であるため¹⁾、主にフープ応力によってYBCO/CeO₂界面ではく離破壊が生じると考えられ、線材実用化への問題となっている。そこで、本研究では、双片持ちはり(Double cantilever beam, DCB)試験を銅複合化YBCO線材に応用し、Mode I界面はく離破壊じん性の評価を試みた。

2. 試験方法

本研究で用いた材料は、中部電力により製造された銅複合化 YBCO 線材(Hastelloy C-276(100μm), Gd₂Zr₂O₇(1μm), CeO₂(0.4μm), YBCO(1μm), Ag(10μm))に、Bi-Sn はんだを用いて Cu(100μm)を接合した構造を有する。ここで、括弧内の数値は、各層の厚さを表す。

試験は、CFRP の層間はく離破壊じん性試験法(JISK7086)を参考にして実施した²⁾。図 1 に DCB 試験片の模式図を示す。YBCO/CeO₂ 界面に、基準線(2 つのアルミプロックのピン穴中心を結ぶ線)から約 15mm の予き裂をカッターナイフで導入した。試験を実施する際に必要な剛性を確保するため、Hastelloy C-276 補助板(厚さ 0.8mm)を線材の両面にエポキシ系接着剤で接着した。また、試験中にき裂長さを読み取るため、試験片側面に白色塗料を塗布した。

電気サーボ油圧式試験機(島津製作所製、サーボパルサ EHF-ED1)を用い、荷重変位点速度 0.5mm/min で試験を実施した。き裂が 2-5mm 程度進むごとに一旦除荷し、読取顕微鏡を用いてき裂長さを計測した。

3. 結果および考察

荷重 P -荷重点変位 u のグラフを図 2(a)に示す。き裂進展開始荷重 P_c は、荷重-変位関係の非線形開始点(4N)とした。き裂は、その進展量が約 25mm に達するまで、安定的に伝ばした。き裂長さ a とコンプライアンス C の間には、式(1)のような関係がある^{2,3)}。ここで、 B を板厚、 α_0 、 α_1 を定数とする。

$$a = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (BC)^{1/3} \quad (1)$$

α_1 と荷重 P より、エネルギー解放率 G は式(2)のように求まる^{2,3)}。

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{P}{B} \right)^2 \cdot \frac{(BC)^{2/3}}{\alpha_1} \quad (2)$$

ここで、 P に除荷直前の限界荷重 P_R を代入すれば、破壊じん性値 G_{IR} が求まる。 G_{IR} とき裂進展量 Δa の関係を図2(b)に示す。き裂進展開始時の破壊じん性値 G_{Ic} は、約 4J/m² であった。また、き裂の進展に伴い、破壊じん性が上昇した。

破面観察結果を図3に示す。マクロ観察(a)において、き裂進展領域は、上下両破面とも、大半を占める黒い部分と、白い筋状の部分にわけられる。その黒い部分の色が、予き裂部の YBCO の黒色と一致し、かつ、CeO₂ の色と異なることより、き裂が、YBCO/CeO₂ 界面から YBCO 層内へ伝ばしたことがわかる。また、(a)で白い筋状に見える物質は、YBCO層に隣接す

る Ag だと考えられる。続いて、筋状の部分の走査電子顕微鏡観察を行った。結果を(b)に示す。筋状の部分には、Ag スパッタリングの際に生じたと考えられる空孔が観察された。また、YBCO の部分には、割れが、き裂進展方向に沿って連続的に生じていた。これより、き裂進展に伴う破壊じん性の上昇は、き裂先端が Ag 層に達し、また、き裂先端の塑性変形領域が Cu 層へも達している可能性があることから、これらの層においてエネルギーが消費されることに関係していると考えられる。

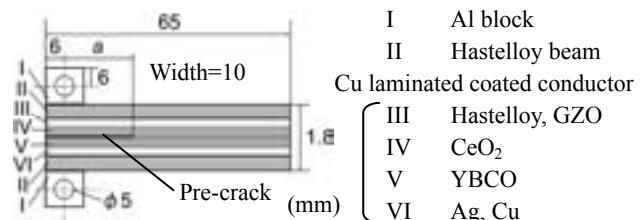


Fig.1 Schematic of specimen

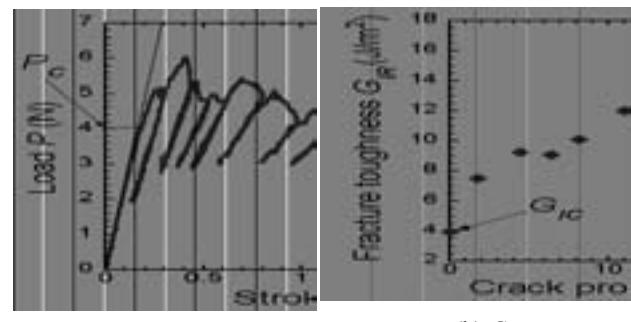


Fig.2 Load-displacement curve and R-curve

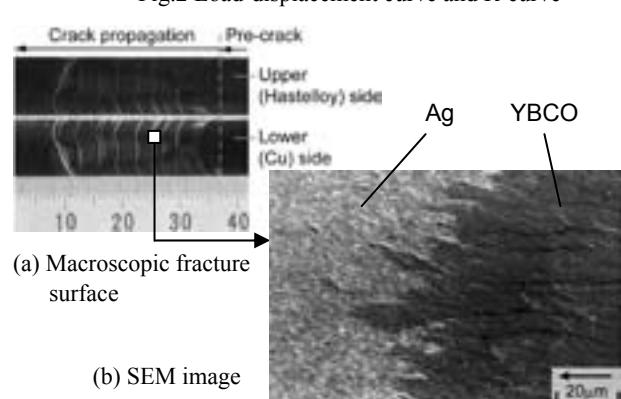


Fig.3 Observation of fracture surface

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環で実施したものである。

参考文献

- 吉田 悠介, 修士論文, 京都大学, (2009).
- JIS K7086-1993, 「炭素繊維強化プラスチックの層間破壊じん性試験方法」, 日本規格協会, (1993).
- M. Hojo, et al.: Composites, Vol. 26 (1995) P.243-255.

Gd系123高性能溶融バルク緻密材の作製と特性評価(IV) – 77Kでの曲げ強度 –

Preparation and properties of high-quality melt growth Gd123 bulks with low void density (IV)

– Flexural Strength at 77K –

藤本 浩之 (鉄道総研) ; 村上 明 (弘前大) ; 手嶋 英一, 森田 充 (新日鐵)
 FUJIMOTO Hiroyuki (Railway Technical Research Institute); MURAKAMI Akira (Hirosaki Univ.);
 TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.)
 E-mail: fujimoto@rtri.or.jp

1. はじめに

希土類(RE)系酸化物高温超電導バルク材は、液体窒素温度でも高い臨界電流密度、強い捕捉磁界、さらに強い磁気浮上力を有し、強力磁石、非接触軸受、回転機、磁気分離、電流リードなど、種々の超電導応用機器が提案されている。バルク体の高性能化やバルク応用機器の実用化のためには、電磁気的特性とともに、機械的特性の把握とその向上が非常に重要である。一般に、希土類系バルク材は大気中での溶融法で作製されるが[1]、プロセスに起因して試料内部にボイド(気孔)が存在する。ボイドは欠陥であり、機械的強度向上のためにはボイド密度の低減が必要である。これまでに、酸素中溶融などによって Sm 系で、超電導特性に課題が残るが、ボイド密度を減少させ、微細組織や機械的強度が改善することが報告されている[2,3]。最近、優れた超電導特性を有する低ボイド密度の Dy 系で、機械的強度の向上が報告された[4]。そこで本研究では、ボイド密度が低い、電磁気的特性の優れた Gd 系($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$; Gd-123)超電導バルク体試料を作製し、その特性(室温での曲げ強度、硬さ、弾性率、破壊靭性などの機械的特性と組織観察、超電導特性)を評価してきた[5]。また、これまでの報告[5]で、緻密材の超電導特性は、77K での捕捉磁界測定結果では、バルク体の 0.5mm 表面上で最大 1.2T 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の値が得られたことから、ボイド密度低減による機械的特性の改善と超電導特性が両立することが示されている。ここでは、第IV 報として、同バルク体の 77K での曲げ強度について報告する。

2. Gd-123 の作製方法と特性評価

本研究で評価した Gd 系バルク材は、Gd123 相:Gd 211 相 = 3:1 の組成比に 0.5wt% の Pt と 10wt% の Ag_2O 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二段階雰囲気調整熱処理法にて作製した。その結果、直径 46mm、厚さ 15mm 程度の超電導バルク体を得た[5]。ここでは、二段階雰囲気調整熱処理法にて作製したものを緻密材(Densified)、比較のため全て大気中で作製したものを標準材(Standard)と呼ぶ。本研究での Gd 系バルク材の機械的特性評価は、ファインセラミックスの試験評価方法を参考に実施した。試験片は、円柱状バルク体を上中下の三段以上にスライスし、主に JIS R 1601(曲げ強度試験)に基づいた寸法・形状に切断・研削加工して得た。そして試験片の表面をラッピングフィルムなどで鏡面仕上げして、光学顕微鏡、レーザ顕微鏡により組織を観察し、ボイド率、銀分布、211 相分布を測定した[5]。また、77K での曲げ強度は、JIS R 1601 に従い、 $4 \times 3 \times 36 \sim 40 \text{ mm}^3$ の試験片を用いて、四点曲げ試験で評価した。クロスヘッド速度は 0.5mm/s、サポートスパンの長さは $L=30\text{mm}$ で、破壊強度を求めた。

3. Gd-123 の機械的特性等評価結果

表 1 に曲げ試験における、標準材と緻密材試料・試験片の寸法、本数などを示す。これまでの報告で、標準材では数十 μm 程度のボイドが多数存在する(ボイド率 15%程度)が、

緻密材ではボイドがほとんど存在しない(ボイド率 3%以下)ことを示した。図 1 に、77K 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 62MPa(アニール処理なし)と 88MPa(酸素アニール処理済)、緻密材で 76MPa(アニール処理なし)と 105MPa(酸素アニール処理済)であり、組織の緻密化により酸素アニール処理の有無に関らず、1.2 倍程度向上していることがわかる。機械的強度が改善した理由は、ボイド密度が低減したことであると考えられる。

また、酸素アニール処理の有無については、標準材・緻密材とも、酸素アニール処理を施すことで約 1.4 倍となった。さらに、以前報告した[5]室温での曲げ強度(酸素アニール処理済)平均値との比較では、標準材の 58MPa、緻密材の 72MPa に対し、77K では、標準材 88MPa、緻密材 105MPa となり、1.5 倍程度に向上することが明らかになった。これは、格子間隔が狭くなったことを反映している。

TABLE I EXPERIMENTAL CONDITIONS OF THE SPECIMENS AMONG $\text{GdBaCuO}/\text{Ag}$ BULKS.

	Standard		Densified	
Bulk size /mm	46 / ϕ x 15 /t		46 / ϕ x 15 /t	
Heat treatment	As-grown	Annealed	As-grown	Annealed
Specimen size /mm	4 /w x 3 /t x 40 /L			
# of Specimens	9	9	9	8

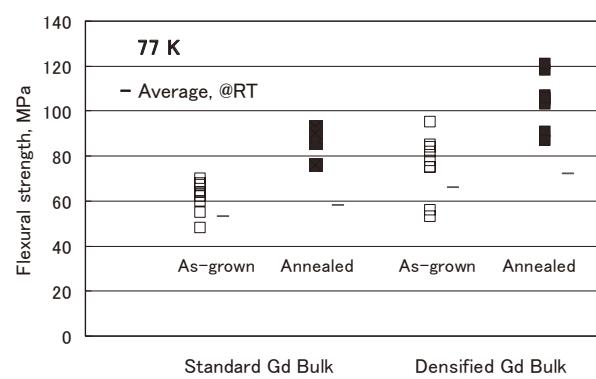


Fig. 1 FLEXURAL STRENGTH OF THE SPECIMENS AMONG $\text{GdBaCuO}/\text{Ag}$ BULKS.

参考文献

1. M.Morita et al.: Physica C 235-240 (1994) 209.
2. N.Sakai et al.: Supercond. Sci. Technol. 13-6 (2000) 770.
3. K.Tazoe, H.Ikuta et al.: Physica C, 357-360 (2001) 807.
4. H.Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77, (2007), 2P-p13, p.158.
5. 例えば、H.Fujimoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78, (2008), 2D-a04, p.145.

磁気薬剤配達システムに関する基礎的研究

Development of magnetic Drug Delivery System

廣田 友佳,三島 史人,秋山 庸子,西嶋 茂宏(大阪大学)

HIROTA Yuka, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka Univ.)

E-mail: y-hirota@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

薬剤配達システム(ドラッグデリバリーシステム:DDS)とは体内の薬剤の拡散を量的、空間的、時間的に制御することで体内での薬剤の拡散を防ぎ、患部へ選択的に輸送することを可能とした技術である。磁気力薬剤配達システム(MDDS)は標的指向型の技術の一つである。本研究では特に生体内深部の初期癌の治療のための薬剤の局所的集積を目指し、HTS パルク磁石と強磁性針を用いて薬剤の集積効率を上げることを最終的な目的としている。その基礎的検討として、まず対向型磁石と強磁性針を用いた模擬毛細血管モデルにおける集積実験を行った。次に、そのデータをもとに、ラットの肝臓において強磁性針を用いた強磁性粒子の集積実験をおこない、局所的集積の可能性を検討した。その結果、強磁性針を用いた肝臓での強磁性微粒子の局所的集積に成功したので報告する。

2. 模擬臓器での集積実験

2.1 実験方法

対向型磁石と強磁性針を用いて、模擬臓器内での強磁性粒子の局所的集積が可能かどうかの検討を行った。 $\phi 13\text{mm}$ のシリンジに $250\mu\text{m}$ のガラスビーズを充填し、シリンジの両端に金属フィルターを配置したものを模擬臓器とした。作製した模擬臓器に $\phi 0.3\text{mm} \times 20\text{ mm}$ の強磁性針(SUS430)を挿入し、対向型磁石($120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 、ギャップ間隔 50 mm 、最大磁束密度 0.7 T)の中央部に来るよう配置した。直径 100nm のマグネタイト粒子 200mg/L を 10wt\% のゼラチンにより懸濁液としたものをシリンジに流した(流速 1mm/s)。ゼラチンの温度は懸濁液の粘性率が $5\text{mPa}\cdot\text{s}$ になるように調整した。強磁性粒子の集積を確認するため、切断した模擬臓器をまずマイクロスコープ(Dino-Lite)で観察した。さらに、集積したマグネタイト量を定量するため、 4N の塩酸 15mL に、切断した模擬臓器の断片 $1\text{枚}(0.1\text{g})$ を 2日間 浸漬させ、 $0.2\mu\text{L}$ シリンジフィルターに通した後 ICP-AES(高周波誘導結合プラズマ原子発光分析;島津製作所 ICPS-7500)を使用して鉄イオン濃度を測定した。

2.2 結果と考察

強磁性針の周辺では明らかな集積が見られ、特に模擬臓器は目視でも分かる程度に針の周辺 1mm 以内の範囲に強磁性粒子が集積している様子が観察された。しかし、強磁性粒子の集積は針の有無にかかわらず、針に対して上流部では集積量が相対的に多く、下流部では集積量が相対的に低かった。これは、対向型磁石の端の磁場勾配の高い部分で、針による磁場勾配ではなく磁石自体の磁場勾配により上流部で粒子が集積している可能性があると考えられる。したがって、磁石の磁場勾配による集積を防ぐためには、薬剤の循環系が全て均一磁場内に入った状態で強磁性針による集積を行うことが重要であるといえる。

3. 動物実験

3.1 実験方法

体重約 120g のラットを麻酔下で開腹し、肝臓のうちの一つに直径 0.4mm の強磁性針(SUS430)を挿入した。この状態で、

マグネタイト懸濁液(平均粒子径 100nm 、濃度 200mg/L)を門脈から 1 分間かけて注射した。注射後、3.1 の実験と同じ磁石の中央部にラットの肝臓が来るよう配置した。その後、肝臓を摘出して凍結させ、ミクロトーム(Leica CM1510-Cryostat)を使用し、Fig.1 に示す方向に厚さ $10\mu\text{m}$ の薄片とした。

倒立顕微鏡(Olympus BX51、接眼レンズ:WH20X)を使用して、これらの薄片の血管断面内に分布するマグネタイト粒子の集積を観察した。実験の概略図を Fig.1 に示す。

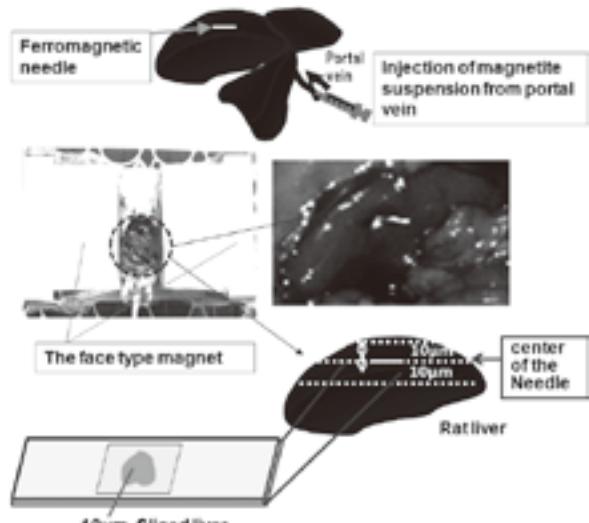


Fig.1 The schematic view of animal experiment.

3.2 結果と考察

凍結させた肝臓を厚さ $10\mu\text{m}$ の薄片とし、顕微鏡観察を行った結果を Fig.2 に示す。(a)は針中央部の薄片、(b)は針中央部から $10\mu\text{m}$ の離れた位置の薄片、(c)は針中央部から 5mm 以上離れた位置の薄片である。この図より、針中央部で強磁性粒子の集積が見られた。

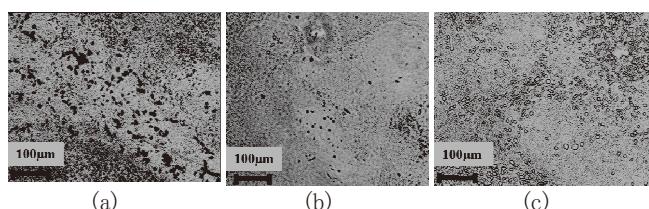


Fig.2 Micrographs of the slices of the rat liver at in the vicinity of the needle.

(a)In the vicinity of the needle (b) $10\mu\text{m}$ from the needle (c)sufficiently far from the needle ($>5\text{mm}$)

4. 結論

以上のことから、強磁性針による磁場勾配により粒子が針の近傍に集積できることが確認できたが、完全な均一磁場ではないため、磁石そのものの磁場勾配による集積の影響が無視できないことから、今後超伝導パルク磁石の配置の設計も含め、強磁性針の付近のみに集積できる条件について検討が必要である。

バルク磁石を用いた局所空間の磁場変調に関する基礎的研究(2) —特性の向上—

Study for spatially magnetic modulation using superconducting bulk magnet (2) --- Enhancement of characteristics ---

古田大樹, 藤代博之, 内藤智之, 吉本則之 (岩手大工)

FURUTA Daiki, FUJISHIRO Hiroyuki, NAITO Tomoyuki, YOSHIMOTO Noriyuki (Iwate Univ.)
(E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

本研究グループは超伝導バルク磁石が発生する数テスラ級の強磁場を用いて、代表的な有機半導体であるペンタセンをテトラヒドロフラン溶媒などに溶解し、溶媒の反磁性を利用したモーゼ効果(反磁性溶液の表面が強磁場により割れ込む現象)により溶液厚みを薄くして局所的に過飽和度を上げ、磁場勾配 dB/dx に沿ってペンタセン単結晶薄膜を配向させることを見いだした[1]。さらにバルク磁石が発生する磁束を強磁性微細パターンに集中させ、離れた位置に非接触で反磁性溶液に対してパターンに一致したモーゼ効果を起こさせ、有機半導体の配向した単結晶薄膜を形成する新しい結晶成長法を検討している。前回は、バルク磁石1個を用いた基礎実験を報告したが[2]、本研究では、逆極性に着磁した2個のバルク磁石を用いて、磁場高低差の向上を実現したので報告する。

実験と検討

図1に実験の配置図を示す。40 Kに伝導冷却した直径45 mmのSm系及びY系超伝導バルクをパルス着磁により逆極性に磁石化し、真空容器表面でそれぞれ+2.4 T, -1.8 Tの中心磁場を実現した[3]。2つの超伝導バルクを挟んで3組の方向性珪素鋼板(JFEスチール)を磁気的に接続し、微小ギャップを含む磁気回路を構成した。珪素鋼板の厚さを W (0.35~1.4 mm)、珪素鋼板間の間隔を S (3~9 mm)、微小ギャップの幅を G (1~6 mm)として、ホール素子を用いてギャップ内の磁場分布の測定を行った。

図2に、 $G=2$ mm, $S=6$ mmの場合の様々な W に対する磁場分布 $B(x)$ を示す。磁場高低差 ΔB を中心の最大磁場 B_{max} と隣の極小磁場 B_{min} の差と定義すると、 ΔB は W の増加と共に増大する。両側の珪素鋼板による磁場は、図2の右軸に示すバルクの真空容器表面での円錐型磁場分布の影響を受けて、中心の磁場に比べて減少する。

図3に $W=1.4$ mm, $S=6$ mmの場合の様々な G に対する磁場分布 $B(x)$ を示す。 G の値が大きい場合、ギャップ付近での漏れ磁場のために磁気的結合が弱くなり B_{max} , ΔB ともに小さくなるが、 G の値の減少と共に急激にこれらの値は増大し、 $G=1$ mmの場合に $B_{max}=0.94$ T, $\Delta B=0.76$ Tを実現した。

ギャップ内の磁場分布 $B(x)$ は、バルク本体の磁場分布に影響された漏れ磁場と珪素鋼板に集中された磁場の和と考えて、 G , W , S の値による $B(x)$ の実験結果を説明することが出来る。図3に示す $G=1$ mm, $W=1.4$ mm, $S=6$ mmの場合の最大の磁場勾配 dB/dx 、磁気力場 BdB/dx は、それぞれ 600 T/m、500 T²/mとなり、バルク磁石単体の値(250 T/m、280 T²/m)よりも大きく、局所的に大きな磁気力 F_m を実現できることが分かった。

参考文献

- [1] 特願 2007-242624 「薄膜の製造方法及び半導体装置」.
- [2] 八重樫晃一ほか、第80回春季低温工学・超電導学会[2P-p26].
- [3] H. Fujishiro *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 1007.

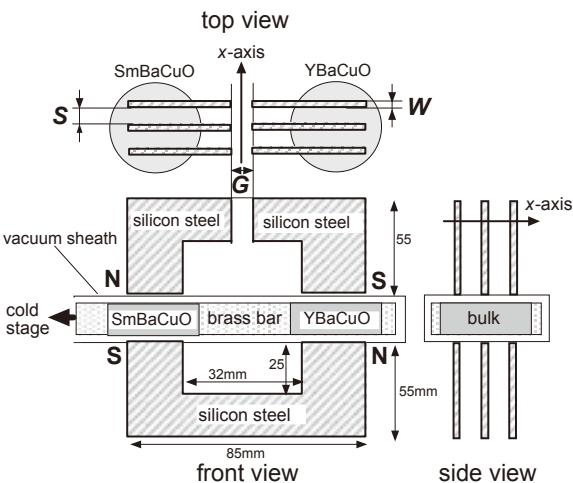


Fig. 1. The experimental setup and the dimensions of the apparatus used in this study.

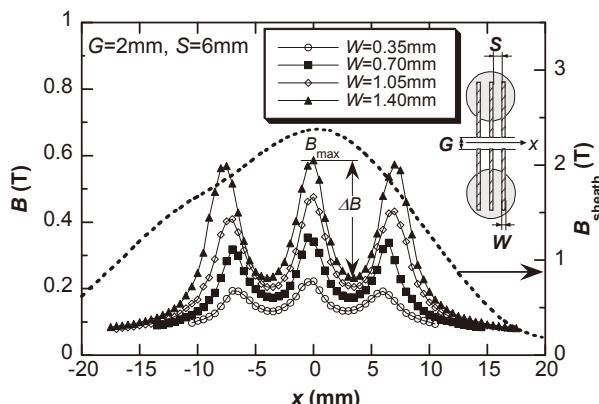


Fig. 2. The x dependence of the magnetic field $B(x)$ in the gap for various thicknesses of the silicon steel bundles W under the conditions of $G=2$ mm, $S=6$ mm.

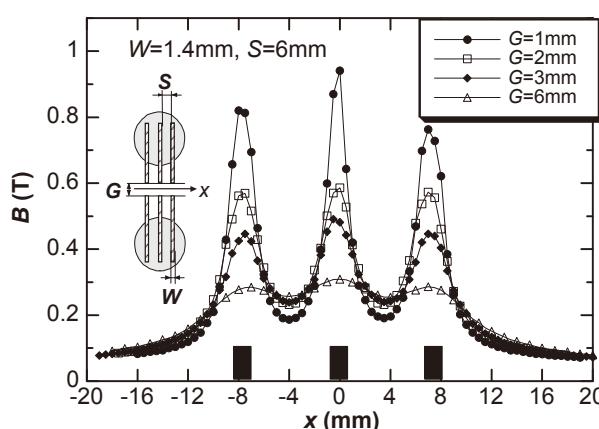


Fig. 3. The x dependence of the magnetic field $B(x)$ in the gap for various widths of the open gap G under the conditions of $W=1.4$ mm and $S=6$ mm.

13 K 冷凍機を用いた小型超伝導バルク磁石の開発

Development of a small size superconducting bulk magnet system using a 13 K refrigerator

横山 和哉(足利工大); 岡 徹雄(新潟大); 能登 宏七(岩手大)

YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.); NOTO Koshichi (Iwate Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石(以下、バルク磁石と呼ぶ)は従来の永久磁石や電磁石の限界である2 Tを超える大きな磁場を容易に発生することができ、磁気分離やモーター・発電機、薬剤搬送システム、マグネットロンスピッタリングなどの産業応用が検討されている。今後、さらに応用を広げるためには、発生磁場の拡大とともに、装置の取り扱い易さが重要である。

本研究は①13 K 冷凍機を用い、②着磁方法をパルス磁化法(以下、PFMと略す)に限定した小型超伝導バルク磁石装置の開発を目的としている。①については低温で大きな熱容量を確保できること、②は磁極の長さを短くすることに関係する。本文では $\phi 60$ mmのGd123バルク体を用いた基礎的な実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 小型バルク磁石装置

図1に13 K 冷凍機を用いた小型バルク磁石装置の概略を、表1に主要スペックをそれぞれ示す。冷凍機は2段式のGM型を用い、2ndステージにおける最低到達温度は13 K以下、熱容量は5 W@20 Kである。装置の全長は570 mm、磁極径は $\phi 87$ mm、入力は3相200 V、消費電力は1.6 kWである。

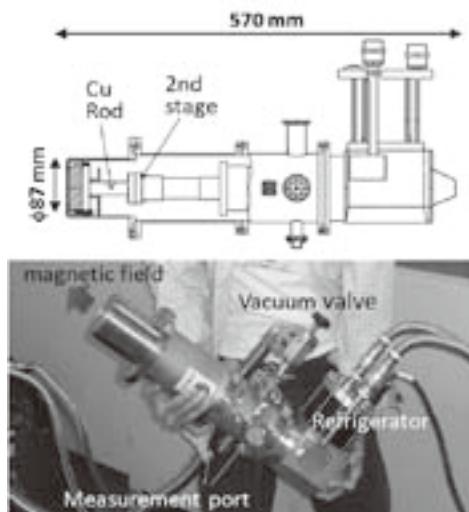


Fig. 1. Schematic and photograph of the bulk magnet system.

Table 1. Specifications of the proposed bulk magnet system

Symbol	Spec
Superconductor	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} , $\phi 60$ mm × 20 mm
Magnetization method	Pulsed field
Refrigerator	2-stage-type Gifford-McMahon
Compressor unit	Indoor. Air-cooled
Cooling capacity	5 W @ 20 K (2nd stage)
Ultimate temperature	≤ 13 K (2nd stage)
Power supply	3 Phase AC 200 V, 50 Hz
Power consumption	1.6 kW
Magnetic pole size	$\phi 87$ mm × 570 mm

3. 実験

$\phi 60 \times 20$ mmのGd123バルク体を2ndステージに接続した銅ロッドの先端に取り付け、真空断熱したのち最低到達温度まで冷却した。印加磁場の大きさを4.64, 6.19, 6.97および7.74 Tに変えて、各5発のパルス磁場を印加しながらバルク体表面中央の捕捉磁場および温度を測定した。また、1発目印加後の磁極表面の磁場分布を測定した。

4. 結果および考察

図2に各印加磁場におけるバルク体直上の捕捉磁場を示す。印加磁場 $\mu_0 H = 4.64$ Tではバルク体中心にほとんど磁場が捕捉されないが、 $\mu_0 H$ を大きくすると捕捉磁場 B_T は大きくなり、 $\mu_0 H = 7.74$ Tでは最大で2.76 Tを捕捉した。また、 $\mu_0 H = 6.97$ および7.74 Tの3発目以降は大き過ぎる $\mu_0 H$ のために B_T が減少したと考えられる。

図3に $\mu_0 H = 4.64$ および7.74 Tの磁極表面の磁束密度分布を示す。 $\mu_0 H = 4.64$ Tの低い磁場では既知の通りドーナツ型の分布になっているが、捕捉磁場の最大値は1.32 Tでかなり大きくなっている。この結果、M型の磁場分布[1]になっていると考えられ、2発目以降の着磁方法を検討することにより捕捉磁場の拡大が期待できる。また、 $\mu_0 H = 7.74$ Tの場合は同心円状の分布になり、最大値は1.42 Tであった。

5. まとめ

低い到達温度および大きな熱容量をもつ13 K 冷凍機を用いた小型バルク磁石装置を作成し、基礎的な実験を行った。今回の実験の基礎データをもとに、今後捕捉磁場を目指した着磁実験を行う予定である。

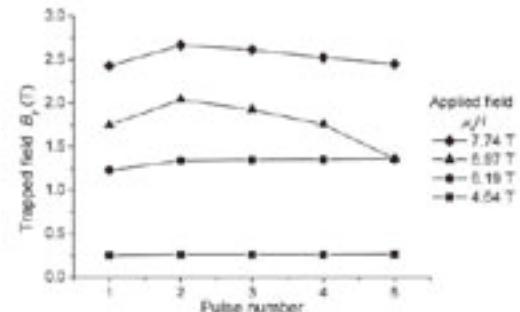


Fig. 2. The pulse number dependence of trapped flux density for each applied field.

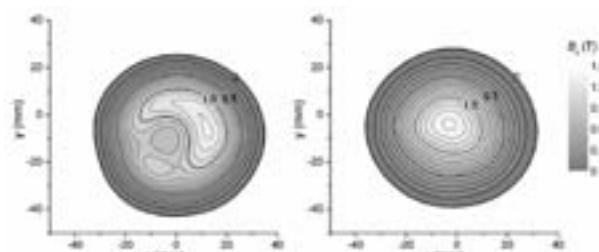


Fig. 3. Trapped field distributions on 4 mm from the bulk surface after no. 1 pulse

参考文献

1. H.Fujishiro, et al.: Physica C, Vol. 463-465 (2007) p.394

超伝導バルク磁石の強磁場を用いた永久磁石の着磁

Magnetizing of Permanent Magnet using HTS Bulk Magnet

今井 順、村谷 知樹、樋口 将規、川崎 信隆、福井 聰、小川 純、佐藤 孝雄、岡 徹雄(新潟大)、
伊藤 佳孝、寺澤 俊久、薮野 良平(イムラ材研)

IMAI Jun, MURAYA Tomoki, HIGUTI Masanori, KAWASAKI Nobutaka, HUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATO Takao,
OKA Tetsuo (Niigata University), ITO Yositaka, TERASAWA Toshihisa, YABUNO Ryohei (IMRA Material Co.Ltd)

E-mail: f08e053a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

永久磁石の着磁はパルス磁場中に曝して着磁する方法が一般的である。本研究はパルス磁場に変わって超伝導バルク磁石を用いているが、その利点として、パルス磁場とは違い常に発生している強磁場中に固定した永久磁石を走査しながら曝すので、磁場で文字を書くことなど、着磁の自由度が高いということが挙げられる。試料(日立金属製 NEOMAX: HS-47DH)を走査させることで、N極に着磁された磁場をS極に反転(書き換え)させることができ、磁石に多極の着磁を施すことが可能である。本研究は高性能なモータの開発をにらみ、永久磁石の多極着磁を主眼に着磁し、理想的な着磁を探っていくことをねらいとしている。

2. 着磁実験

今回の着磁で目指したことは正弦波状の着磁状況を作ることであり、3極の着磁では正弦波上の磁場が得られなかつた。バルク磁石で予め着磁された試料に対して、書き換えを行うことで5極の着磁を施した。試料のS極面をS極のバルク磁場に走査しながら曝して書き換えを行い、5極の着磁を行った。Fig1がその着磁イメージである。着磁の方法として、 $\phi 60\text{mm} \times 15\text{mm}$ のバルク磁石を用いて $50*76*5\text{mm}$ の形状の試料を長辺方向に書き換えた。バルクの着磁可能領域は30mmほどであり、Fig1.iは中心部分を残して上部を2回書き換えた。同様に下部も2回書き換えた。結果的に着磁部が長辺方向に10mmずつ残るように着磁を施している。Fig1.iiは短辺方向に書き換えを行い、中心部を残して左部に2回、右部に2回書き換えを行い、結果的に15mmずつ残るように着磁を施した。Fig1の着磁部の境界線は磁場がゼロの部分である。

3. 実験結果と考察

長辺方向の磁場分布をFig2、短辺方向の磁場分布をFig3に示す。磁場分布は本来3Dのグラフである。Fig2は試料短辺方向の中心部を切り取り、単極着磁の磁場分布を重ねたもの、Fig3は試料長辺方向の中心部を切り取り、単極着磁の磁場分布と重ねたものである。2つのグラフで共通することは、単極で着磁したときよりも磁場の絶対値が増加していることである。単極の場合、試料の中心部では0.1T程度なのに對し、Fig2では0.228T、Fig3では0.277Tを示し、それぞれ単極磁場の228%、277%となっている。試料表面のZ軸方向の磁束量に関しても、単極では $5.51 \times 10^{-4}\text{Wb}$ 、Fig2では $5.73 \times 10^{-4}\text{Wb}$ と大きな違いは無いものの、Fig3では $6.59 \times 10^{-4}\text{Wb}$ と、単極の磁束量より20%の増加が見られた。書き換えの方向でこれだけの磁束量の違いが見られたのは、長辺方向に書き換えた方が磁場のゼロ部分が長いため、ゼロ部分の磁場が短い短辺方向の書き換えの方が大きくなっているものと推察される。

磁場の形状としては長辺方向に書き換えた方が綺麗な磁場を表現している。磁場が鋭く現れるようにするには書き換え部の領域を狭くすれば良く、より多極に着磁を施すことで県庁に現れて来ると考えられる。

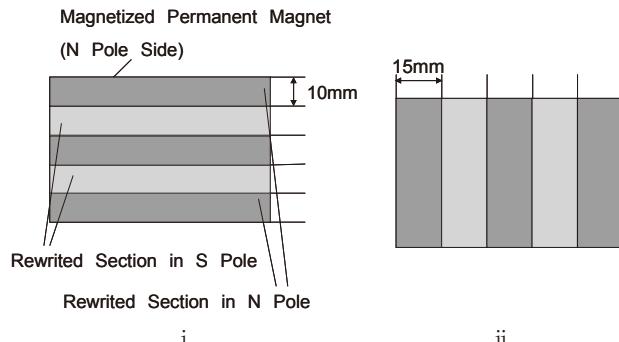


Fig1. Images of 5 Pole Magnetization
i Long Side Rewriting
ii Short Side Rewriting

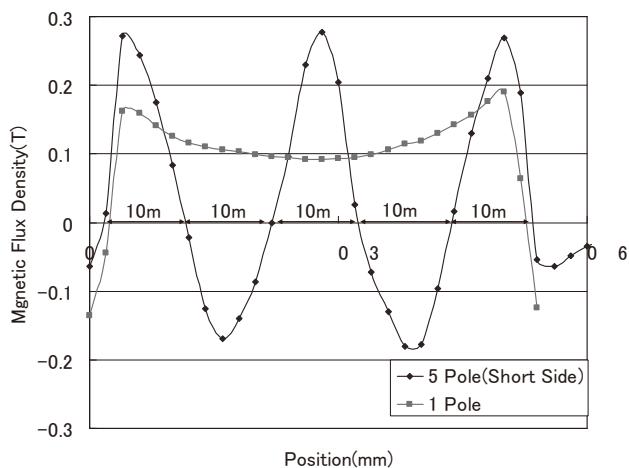


Fig2. Magnetic field distribution of Long Side Rewriting

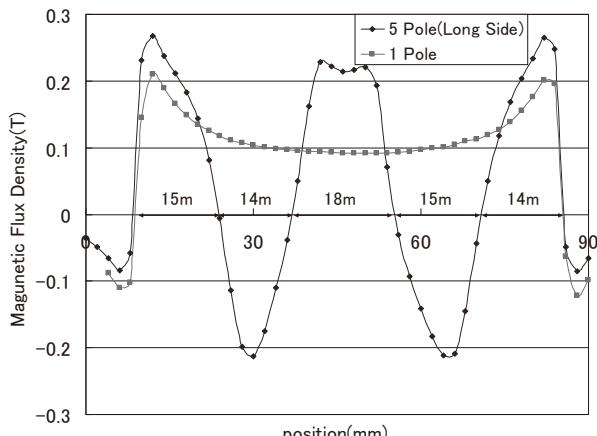


Fig3. Magnetic field distribution of Short Side Rewriting

ヘリカル型海流 MHD 発電機の流動特性 (2)

Hydraulic characteristics of helical-type seawater MHD power generator (2)

BUI ANH KIET, 武田実(神戸大学); 木吉司(物質・材料研究機構)
 BUI ANH KIET, TAKEDA Minoru (Kobe University); KIYOSHI Tsukasa (NIMS)
 E-mail: kietthujp@yahoo.co.jp

1. はじめに

本研究室ではクリーンな自然エネルギーのひとつである海洋エネルギーに着目し、超伝導技術の海事科学分野への応用として超伝導マグネットの強磁場を利用した海流 MHD 発電の研究が行われてきた。ここで、MHD とは電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics) の略であり、海流 MHD 発電とは海流が超伝導マグネットによる磁場を横切る時に発生する起電力を取り出す、いわゆるフレミングの右手の法則を利用した発電方法のことである。この海流 MHD 発電では海水が作動するだけなので、機械的駆動部がなくメンテナンスが不要である。また、海水の運動エネルギーを電気エネルギーに変換しているので、地球温暖化の原因となっている二酸化炭素の排出がないというメリットがある。現在では、リニア型よりも有效地に印加磁場を利用できるヘリカル型発電方式の研究^{1,2)}を行っている。ヘリカル型において発電出力および効率を上げるために、流体損失を低減し流速を増加させることが重要である。そのためには、回転数、ピッチ長、電極直径等を含む発電機形状を最適化することが重要である。本研究では流体損失の計算モデルを構築する観点から³⁾、今回は主にピッチ長に着目して圧力分布および流体損失などを実験的に調べた。

2. 実験装置・実験方法

実験装置の構成機器は、圧力分布測定装置、循環ポンプ (CMP6-63.7 寺田ポンプ社)、流量制御バルブ (ボールバルブ 21 型呼び径 80 mm フランジ形 旭有機材工業株式会社)、流量計 (UZG FROW UZU-VTS2-L 日本フローセル株式会社)、整流器、1000L 貯水タンク、バルク形半導体圧力トランジスタ (PMS-5WE 豊田工機株式会社)、定格圧力がそれぞれ 100 kPa、30 kPa の 2 種類の拡散形半導体圧力トランジスタ (DD101K 株式会社ジェイテクト)、循環用ホース、各配管である。流量と圧力の計測は、株式会社デイシ製のデータ集録装置 FE300 によって、20 ms 間隔で 512 個のデータをパソコンに取り込む自動計測を各 3 回ずつ行い、解析にはこれらの平均値を用いた。作整した 3 つの実験装置 (ヘリカルモデル) には、ポリ塩化ビニル製で直径 100 mm、内径 10 mm、回転数 7、ピッチ長は 30、37.5、45 mm のヘリカル壁が入っている。次に実験方法について述べる。まず循環ポンプを使い貯水タンクから水を吸い上げ、整流器を介してヘリカルモデル内に水を流した。次に、流量をゼロから 2 m³/h ずつ増やし、循環ポンプの最大流量 40 m³/h まで増加させ、バルク形半導体トランジスタ (DD101K) を 1 つ、拡散形半導体トランジスタ (PMS-5WE) を 2 つ、計 3 つの圧力センサーを同時に使用して、それぞれの流量における各測定孔の圧力の測定を行った。

3. 実験結果

Fig.1 にピッチ長をパラメーターとして測定した流体損失 (ヘリカルモデルの入口と出口の圧力差) と流量の関係を示す。図中の曲線は、ピッチ長をパラメーターとして計算した流体損失である。Fig.1 よりピッチ長 37.5 mm の場合、流量が 10 m³/h 以下で流体損失の実験値と計算値はよく一致していることが分かる。また、ピッチ長 45 mm の場合、流量が 20 m³/h 以下で流体損失の実験値と計算値はよく一致した。さらに、ピッチ長 30、37.5、45 mm の場合に流量が最大の時に、実験値は計算値の約 3 倍、約 1.3 倍、約 1.3 倍であ

ることが分かった。

次に、流量をパラメーターとして流体損失とピッチ長の関係を Fig.2 に示す。この図より、ピッチ長 37.5、45 mm の場合は流体損失のピッチ長依存性が小さく、ピッチ長 30 mm の場合はピッチ長依存性が大きいことが分かる。また、ピッチ長 30 mm 場合、流量が増加すると流体損失が著しく増加している。学会では、実験結果に基づいて考察した計算モデルについて述べる。

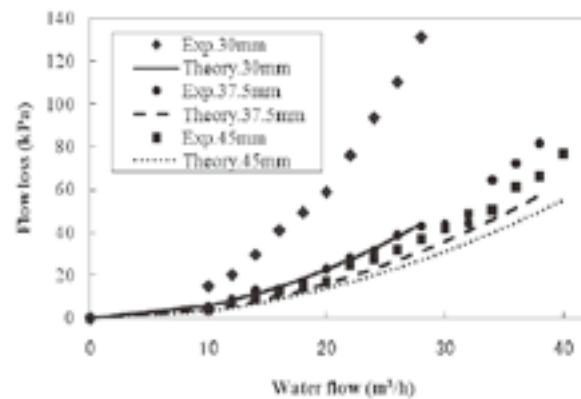


Fig.1 Flow dependence of flow loss for pitch lengths of 30, 37.5, and 45 mm with rotation number 7.

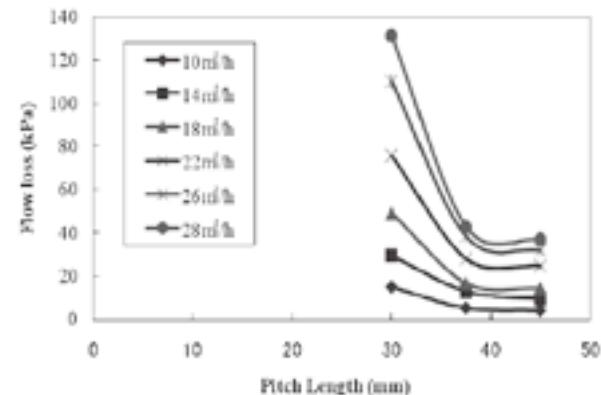


Fig.2 Pitch length dependence of flow loss with the parameter of water flow.

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B)(21360429)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) M.Takeda *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2 (2005) pp. 2170-2173
- 2) M.Takeda *et al.*: J. JIME, Vol. 43, No. 1 (2008) pp. 130-134
- 3) K. A. Bui *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.45

ペルチェ電流リードの通電電流による形状最適化と界面応力

Current dependence of form factor and thermal stress for Peltier current lead

河原敏男、渡邊裕文、藤井友宏、江本雅彦*、浜辺誠、山口作太郎（中部大、*核融合研）

KAWAHARA Toshio, WATANABE Hirofumi, FUJII Tomohiro, EMOTO Masahiko*, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Satarou
(Chubu Univ., *NIFS)
E-mail: toshi@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

地球環境問題の解決のために、地球温暖化ガスの代表である CO_2 の削減は、例えば、2020 年までに 25% 削減が数値目標として挙げられるなど緊急に対策を迫られている課題の一つである。そこで、自然エネルギーの導入とともに、省エネルギー技術として超伝導応用が注目を集めている。特に超伝導による送電技術は、自然エネルギーと組み合わせてスマートグリッドの基盤技術となるものであり実用化が強く求められている。

超伝導送電システムの応用のためには、熱侵入を低減し性能向上を図ることが必須であるが、その中で端末部での熱侵入を低減する方法として、我々はペルチェモジュール(BiTe)を用いた電流リード (PCL) の改良を進めている [1]。そして、超伝導線材の性能向上、送電設備の電流量増大等に対応することを目標に、その形状を電流量に応じて最適化を行っていく必要がある。そこで、今までには 100A 級の超伝導テープで最適化・評価を行っていたが、本発表では、電流値が大きくなった場合の形状最適化の結果を発表する。さらに、物性値の違う材料を組み合わせて用いる PCL では異種結合界面に熱応力がかかるため、界面での応力を評価した結果も述べる。

2. シミュレーション方法

電流リードの熱分布は、電流方向の一次元熱伝導方程式で評価した。このとき、熱バランスとして、熱伝導による熱流入、電流リードでのジュール熱、ペルチェ効果による熱ポンプ効果を考える。熱電素子は室温側に導入し、モデル熱電特性を用いて熱侵入量を極小にする形状因子 (Shape factor)を求めた。次に、最適化された形状因子の元での温度分布から ANSYS[2]を用いて電流リード上での熱応力を評価した。

3. 結果と議論

Figure 1 に、最適形状因子の電流依存性を示す。電流の増加と共にジュール損失の影響を小さくするため電流リードの形状因子は小さくなる。そのため、最適形状として、断面積を増やすか、あるいは、長さを短くすることになる。例えば、電流が 100 A から 200 A に増加したとき、1 cm 角の電流リードでは、熱電部の長さが 6 mm から 2.8 mm、銅部の長さが 2.51 m から 1.26 m と、共に短くなる。

次に、熱応力を計算した結果を Figs. 2, 3 に示す。ここでは、電流が 100 A と 200 A の場合に対して、x 方向(通電

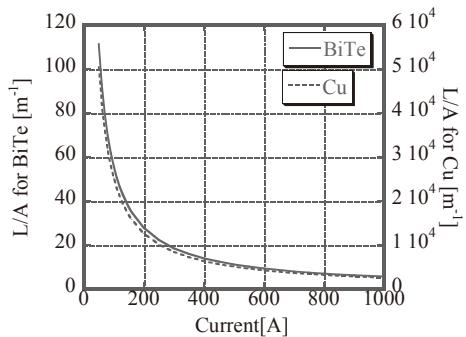


Fig.1 Optimum shape factor for Cu and BiTe

方向と垂直)の応力を示した。応力分布は電流リードの端部に比べて中央部で大きくなっている。そして、電流依存性は、例えば、電流リードの角の部分の応力を見ると、電流が 100 A のときの 3×10^6 (Pa) に比べて、200 A では 1×10^7 (Pa) と約 3 倍の応力がかかることになる。中央部分でも同じ割合で応力が増加している。また、z 方向の応力は、電流リードの端部で銅の方向に大きな応力がかかるが、中央部は小さい。また、電流による増加は x 方向に比べて小さく 2 倍程度である。

以上の結果より、電流が増加の際に形状因子の最適化と共に電流リード界面での応力が増加する。その増加割合は端部で大きく、大電流化の際の電流リードでは、電流リードの形状の対称性と、熱電部の支持の対称性とを考慮した設計が重要となってくる。

4. まとめ

超伝導線材の高性能化等に伴い PCL が大電流化する際の電流リードの形状因子の最適化と熱応力の評価を行った。電流が増加するに従い形状因子が小さくなるので熱応力が増加する、そこで、電流リードの形状の対称性を増した設計で応力分布を最適化すれば、電流リードの長寿命化につながる。

参考文献

1. S. Yamaguchi, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 75 (2004) pp.207
2. <http://www.ansys.com/>

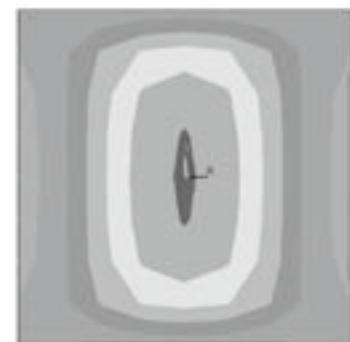


Fig.2 Thermal stress of x direction ($I = 100$ A).

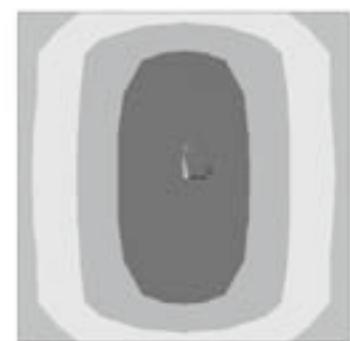


Fig.3 Thermal stress of x direction ($I = 200$ A)

SRC 用冷凍システムの運転状況

Operation of Helium Cooling System for SRC

段塚 知志, 奥野 広樹, 真家 武士, 山田 一成, 加瀬 昌之(理研)
 DANTSUKA Tomoyuki, OKUNO Hiroki, MAIE Takeshi, YAMADA Kazunari, KASE Masayuki (RIKEN)
 E-mail: mdantsuka@riken.jp

1. はじめに

2007 年から本格稼動を開始した RIBF の主加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) のヘリウム冷却系の運転状況について報告する。このヘリウム冷却機は、超電導磁石の冷却励磁試験やビームコミッションのために 2005 年秋から運転を行ってきたが、原因不明の冷凍能力の低下のために、その冷凍運転を 2 ヶ月に 1 度停止して冷凍機を室温まで昇温する必要があった。2008 年 2 月に冷凍機の系内に油が混入していることが発覚した。その後の調査によりこれまで繰り返し起きていた冷凍能力の低下問題もこれに起因している可能性がある事が判った。そのため我々は徹底的に冷凍機内の油を除去し、圧縮機の油分離器の能力増強を実施した。大掛かりな改修工事後、2008 年 9 月より冷却運転を開始し 10 月に磁石の超伝導状態に保つ為の定常運転に達した。その後、2009 年 5 月末まで約 250 日間の長期運転に成功した。

2. 洗浄

洗浄するために油の汚染範囲を調査したところ、80K 吸着器を通過してタービンにまで油が確認されたため冷凍機内のほぼ全域に広がっている可能性があった。本冷凍機の第 1-5 熱交換器は横型であるために洗浄するために多数の配管を切断し熱交換器を取り出して洗浄する必要があった。第 6-7 熱交換器は内部配管を切断すると復旧が困難であるために縦型であることも考慮し据え置いたままでの洗浄とした。また油を吸着し能力が低下している可能性のある 80K 吸着器、20K 吸着器は内部の活性炭を交換し前後に設置されているフェルトフィルターは洗浄試験を実施したうえで漬け置き洗浄とした。タービンは工場に持ち帰り洗浄を実施した。圧縮機出口高圧配管は循環洗浄を実施したが、圧縮機吸入低圧配管は油の発生源に戻るルートのため洗浄は実施していない。洗浄液には代替フロン (アサヒクリン AK-225G、科学名: HCFC-225cb) を使用した。洗浄の判定には NVR 検査 (Non Volatile Residue: 不揮発性残渣) を実施した。

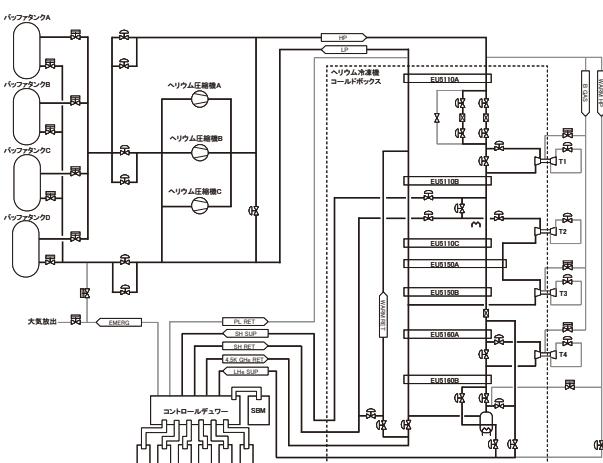


Fig.1 Helium Cooling System for SRC

3. 改造

洗浄を実施した系内に再度多量の油が流入する事を防止するために、ヘリウム圧縮機の油分離性能を増強した。従来

は 4 段で構成されていたオイルセパレーターを 6 段とした。油の流出は厳密には 0 にすることができないため冷凍機側においても油の流入に対しての改造を実施した。まずコールドボックス入口に焼結金属タイプのフィルターを追加した。また 80K 吸着器の活性炭充填口は本来溶接し閉止するのをフランジとして活性炭の状態を調査し必要に応じて活性炭交換できるように変更した。冷凍機の構成上、80K 吸着器の下流にタービンなどが構成されているために多少の油に対してもメンテナンスで対応できるシステムとなった。

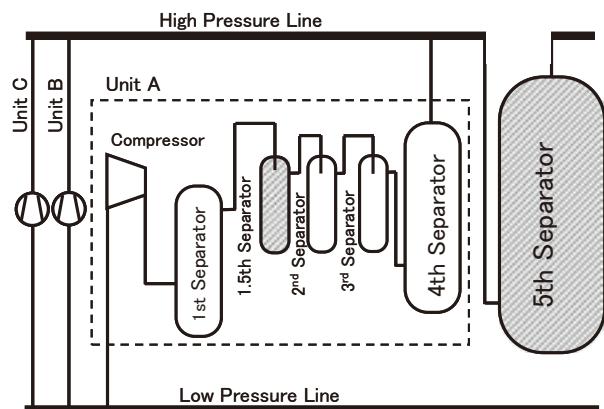


Fig.2 Helium Compressor Oil Separators

4. 性能試験

今回の改修により冷凍能力の低下が懸念されていたが、冷凍能力試験において 1378.2W の冷凍能力が確認された。納入時の冷凍能力は 1410.4W だが運転時の気温条件の違いやフィルターの増設による圧力損失の増加などを考慮すると十分な冷凍能力である。

5. 連続運転

2008 年 9 月より冷却運転を実施し 2009 年 5 月末まで約 250 日の連続運転を実施したが、その間タービン流量は低下することなく順調に運転することができた。

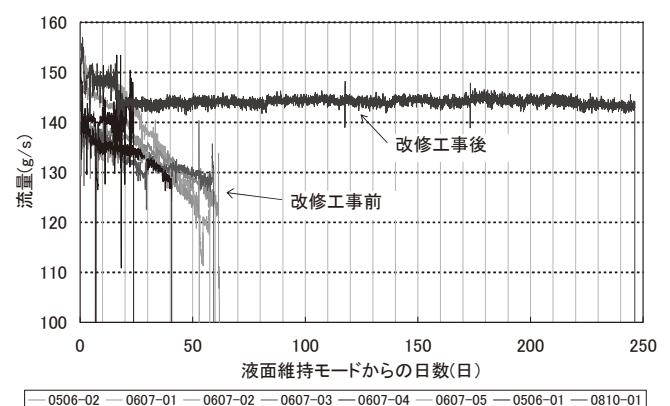


Fig.3 Long term Operation

6. 謝辞

今回の改修工事にご尽力いただいた三菱電機株式会社、大陽日酸株式会社及び前川製作所の関係者の方々に、この場を借りて感謝いたします。

自励振動式ヒートパイプを用いた超伝導マグネットの高効率冷却技術の開発

Development of highly effective cooling technologies for superconducting magnets using oscillating heat pipes

三戸利行, 柳長門, 田村仁 (NIFS); 夏目恭平 (総研大); 玉田勉, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫 (中部電力)

MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS); NATSUME Kyohei (SOKENDAI);

TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (CEPCO)

e-mail: mito@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

超伝導マグネットの新たな冷却技術として、シート状の自励振動式ヒートパイプを組み込むことにより、マグネット内の発熱を効率的に除去できる冷却構造を開発している[1]。自励振動式ヒートパイプ(Oscillating Heat Pipes: OHP)の低温での動作実験を行い、17K - 80 K の幅広い温度範囲での動作を確認すると共に、高純度金属の低温での高熱伝導率に匹敵する高い熱輸送特性を観測した。これらの実験結果に基づき、超伝導マグネットの高効率冷却への適用について提案する。

2. ヒートパイプ組込超伝導マグネットの概念設計

Fig. 1 に自励振動式ヒートパイプを巻線内部に組み込んだ伝導冷却／間接冷却方式の超伝導マグネットの概念設計例を示す。高温超伝導テープ線材をダブルパンケーキ巻にした巻線部の両側にヒートパイプを組み込んだ冷却パネルを密着させ、巻線内での発熱を効率的に巻線外部へ取り出す。巻線の内周及び外周には、冷媒を循環する冷却チャネル及びヒートパイプの冷却部が設置され、冷凍機から強制循環される冷媒と熱交換する。ヒートパイプの熱輸送は作動流体の移動速度で決まるため、固定熱伝導のみに頼る場合に問題となる運転温度の上昇に伴う構成材料の熱拡散率の低下、それによる応答の遅れがなく、高レスポンスな冷却が可能である。

3. 自励振動式ヒートパイプの低温動作実験

自励振動式ヒートパイプは、ヒートパイプ内に封入した作動流体の気液 2 相の密度変化及び温度勾配によって発生する自励振動を利用した高性能の熱輸送素子である。しかし、低温での使用実績はほとんどないため、Fig. 2 に構造を示した低温で動作可能なヒートパイプを製作し、GM 冷凍機を組み込んだクライオスタット内部に設置して、作動流体に水素、ネオン、窒素を用いた低温動作実験を行った[2]。ヒートパイプ部は外径 1.59mm(1/16 インチ)、内径 0.78mm のステンレスパイプを 10 回折り返してシート状に加工し、長さ 160mm の直線部の両側には、厚さ 8mm、長さ 30mm の銅ブロックがハンダ付けされている。上側の銅ブロックは冷却部として GM 冷凍機のコールドヘッドに接続され、下側の銅ブロックは加熱部としてヒーターを取り付けた。

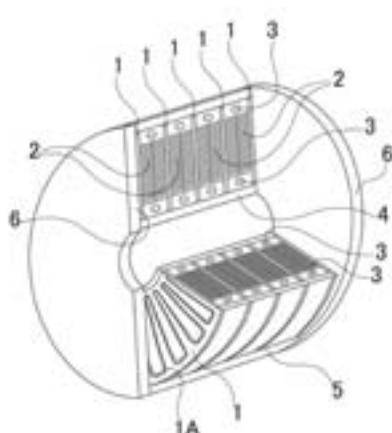


Fig. 1. Conceptual design configuration of an OHP imbedded HTS magnet, where 1: cooling panel, 1A: OHP, 2: coil windings, 3: cooling channels of refrigerant, 4: inner bobbin, 5: outer bobbin, 6: end plates.

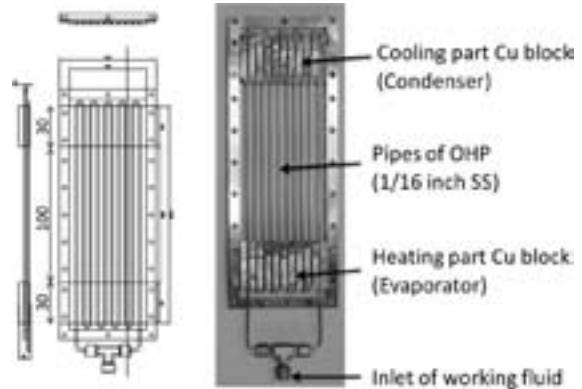


Fig. 2. OHP for cryogenic experiments.

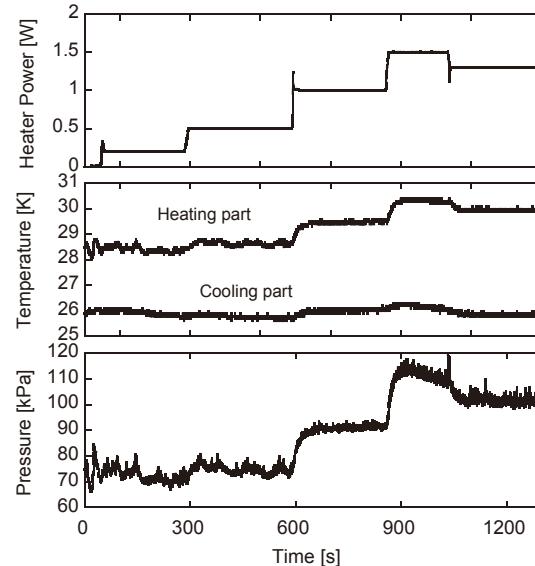


Fig. 3. Typical measurements of the heat input, temperatures of the heating part and the cooling part, and the pressure of the OHP.

作動流体にネオンを用い液体の充填率を 50%とした時の動作例を Fig. 3 に示す。低温部の温度をほぼ一定(26K)に保った状態で、加熱部のヒーター入熱を段階的に上昇させ、ヒートパイプ部(長さ 100mm × 10 本の並列、作動流体部の総断面積 4.8mm²)の温度勾配を測定した。1W の入熱に対して 3.5K の温度勾配となり、作業流体部の等価的な熱伝導率としては 5,980 W/m·K に達し、高純度金属の低温での高熱伝導率に匹敵する。講演では、自励振動式ヒートパイプを超伝導マグネットの高性能冷却素子として適用する方法について、実験で得られた低温での動作実績に基づいた提案を行う。本研究は、核融合科学研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、科研費(21360456)の助成を受けている。

参考文献

- [1] 三戸利行他, 「超伝導コイルの高効率伝導冷却技術の開発」 2009年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集, p. 29.
- [2] 夏目恭平他, 「超伝導マグネット冷却用自励振動式ヒートパイプの低温動作特性」 2009年度秋季低温工学・超伝導学会講演概要集, 2p-p08.

多層断熱材における熱負荷の荷重依存性測定

Load dependency measurement of heat leak in multi layer insulator

横山 彰一 (三菱電機)

YOKOYAMA Shoichi (MITSUBISHI Electric Corp.)

E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

極低温装置の断熱材としてよく使われる多層断熱材 (MLI) について、施工方法は概ね確立している [1]。しかしながら、伝導冷却マグネットなどで輻射シールドが複雑な形状で真空槽とのギャップが一部狭い磁石では MLI に荷重が加わる可能性がありその熱負荷の見積りが必要となる。ここでは、伝導冷却による低温試験装置を用い、MLI の熱負荷の荷重依存性を測定したので報告する。

2. 多層断熱材の熱負荷測定

これまで多層断熱材の熱負荷測定として、液体窒素を用い、その容器に MLI を施工し窒素の蒸発量を測る方法が報告されている [2]。このような手法では、低温側温度を大きく変化させることはできない。また、MLI に荷重を加えての測定は容易でない。筆者は、伝導冷却試験装置 [3] を用いて MLI の熱負荷測定を試みた。Fig. 1 に測定装置の構成図を示す。MLI は室温付近と 80K 程度の温度間の断熱材として用いるため、本測定では、装置において通常低温ステージを覆っている輻射シールドを取り外し、低温ステージと直径 200mm の熱侵入量測定プレート間に MLI 試料を挟むように設置した。MLI に荷重を加えない場合は、図のように糸で測定プレートを吊り上げ数 mm 程度のすき間を保持した。熱負荷は、温度制御している測定プレートの加熱量とした。また、測定プレートと同温に制御する輻射シールドで覆うことにより、真空容器温度 (室温) の影響がほぼ無くなり、測定精度が数 mW に向上した。荷重依存性は、厚さ、材料の異なる測定プレートを MLI 上に乗せ荷重を加え測定した。

3. MLI の熱負荷測定結果

MLI の試料は、アルミ蒸着ポリエスチルシートに層間スペーサとして、ポリエスチルのネットおよび不織布を用いたもの 10 層、20 層、40 層を用意した。試料形状は、直径 210mm と測定プレートより大きめにしている。今回の試験では、高温側、低温側の温度は、それぞれ 297K と 80K とした。

Fig. 2 に MLI の熱負荷の荷重依存性測定結果を示した。無荷重では、10 層、20 層、40 層でそれぞれ 1.8 W/m^2 、 1.4 W/m^2 、 0.8 W/m^2 と層数の依存性が測定できた。

図のように荷重を加えると大幅に熱負荷が増大し、当然ながら層数が少ない MLI ほど熱負荷が大きい。荷重下では概ね層数に逆比例しており素材の熱伝導が支配的であることが判る。一方無荷重では、層数に逆比例していないことから層間の輻射と熱伝導の複合による熱負荷であることが推定された。また、ネットと不織布スペーサの差はあまり見られなかった。

4.まとめ

伝導冷却試験装置を用い MLI の熱負荷を測定した。試料に荷重を加えた熱負荷特性を測定することができた。クライオでの MLI 施工空間依存性として整理した結果についても報告する。

謝辞

本測定にあたり、多層断熱材のレーザーカット加工サンプルをご提供いただきました宇部興産株式会社中内様、藤本様、RUAG Aerospace Austria 社 Udo 様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば「超伝導・低温工学ハンドブック」(低温工学協会編)362
- 2) 天野俊之、尾原昭徳：機会学会論文集 B 編 60 卷 569 号(1994) 292
- 3) 横山彰一ほか：第 54 回低温工学・超電導学会予稿集(1995) 46

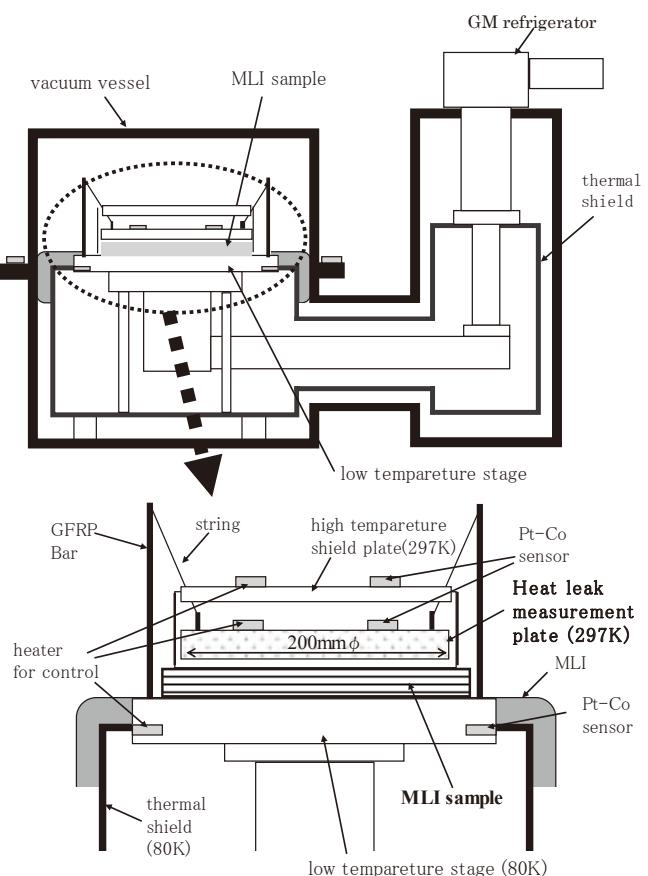


Fig.1 Schematic drawing of the heat leak measurement system by conduction cooling at no-load.

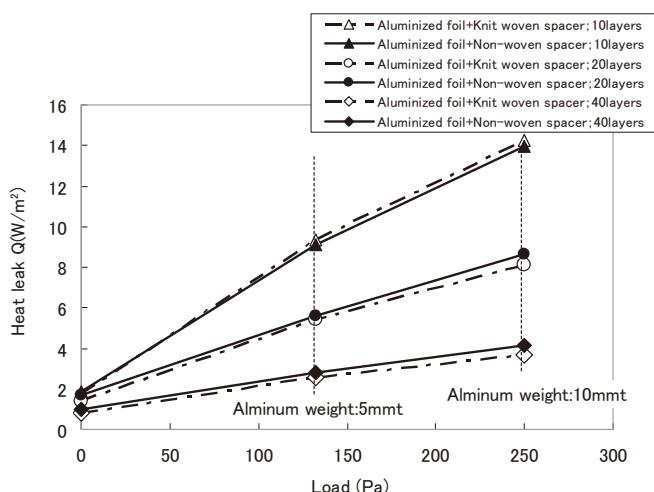


Fig.2 Experimental result of load dependence of heat leak in MLI.

低温カプラと漏れ

The Cryogenic coupler and a gas leak.

小田嶋 豊(理研:和光:仁科)

ODASHIMA Yutaka (Riken:Wako:Nishina)

E-mail: odashima@riken.jp

1. はじめに

低温カプラ（登録番号：特許第 2955661 号）は、以前にも書いたように液体ヘリウムを貯槽から小分け容器（各研究室で使用）に汲み出す際、小分け容器から蒸発した非常に冷たい（30K～50K 位）ヘリウムガスを回収配管でこのヘリウムガスを回収する。その時、小分け容器と回収配管を繋ぐジョイントを東大教養学部で開発した「低温カプラ」を使用する事によって、（通常は、生ゴム・ホース、シリコン・ホース、ネジ式ジョイント等で繋いでいるので汲み出し中に破損したり、汲み出し終了時ドライヤー等で繋ぎの部分を常温に戻してから外している）連続的に汲み出す事が出来ることと、繋ぎ（低温カプラ）をドライヤーで暖め、常温にしてから外す作業もない。また、この低温カプラは低温でも漏れないし、低温でも取り外しができ、かつ、外すと同時に自動的に逆支弁が働く。今回の報告は、この低温カプラの特許部分であるシールの変更です。

2. 「漏れ」とは

「漏れ」の定義は、よくわかりませんが、現実の状況を診てみますと圧力・温度・粘性等によって異なるかと思いますが、上記の状態での「隙間」ではないかと？多分、流体力学の領域かも！インターネットで「漏れ」を検索してみますと、漏れ：leakage：比較的少量の流れと検索されます。上記の圧力・温度・粘性等を考慮して新たな低温カプラを考えました。新たに開発した、低温カプラもボディーは、市場で販売されているボディーを利用しています。

3. PCTFE と PTFE

ダイフロン（ダイキン社製名：PCTFE：三弗化塩化エチレン）。テフロン（デュポン社製名：PTFE：ポリ四弗化エチレン）の 2 種類を比べてみると、低温での機械能力は PCTFE の方が優れている様ですが、実際、私が低温で使用した範囲では、PCTFE より PTFE の方が（冷たいヘリウムガスには）あう？！かも知れません！また、樹脂（特にテフロン）の厚さをマイクロ・メータで測定しますと 0.0? の 1/100 の厚さの値は、樹脂を圧縮してしまい 1/100 は誤差範囲と見なしても良いかと？私は思います。

4. 新たに開発した「低温カプラ」（大きさ：3P-A）

低温カプラ同様、市販されているカプラのパッキン部分

のゴム製 O リングを取り除いて、カプラのプラグとソケットの隙間にテフロン板をパッキンとし使用し、この隙間を無くすとともに、カプラが冷たくなってもプラグとソケットの 2 つに別れるようにしたものです。特許を取った低温カプラは、テフロン板だけでなくスプリング形状の S U S の板とパッキン固定のリングがあります。今回報告するのは、テフロンパッキンのみです。パッキンの耐久性は前回（低温カプラ）のものより少し欠けますが、使用に十分耐えるものです。

今回報告する低温カプラ（3P-A: 最小断面積: 51mm² 約 8 φ: 日東工器カタログより）は、ソケットにプラグを組み込んだ時、先端部分に隙間ができます（製作精度）。その隙間にテフロンパッキンを入れこの隙間を無くします。パッキンの厚さは：0.4+0.08+0.05=0.53mm ですが、0.5+α の α 部分は誤差範囲と見なしても良いかと？ただ、漏れた場合の対応は、0.01～0.04mm 位の厚さのテフロン（PTFE）パッキンを追加するのが最良の策かと（ベスト）と思います。

Fig. 1 低温カプラで回収配管と接続。小分け容器に液体ヘリウムを充填。Fig. 2 低温カプラで使用している PTFE パッキン。Fig. 3 貯槽タンク圧（0.03MPa）。Fig. 4 少し見にくいですが漏れが見える。

Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

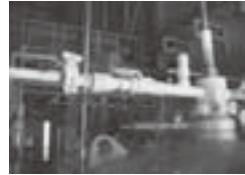


Fig. 1 I am connected to the collection pipe with a cryogenic coupler. I am filling up a subdivision container with liquid helium. Fig. 2 The PTFE packing that I use with a cryogenic coupler.

Fig. 3 Supply pressure. Fig. 4 Cold helium gas can leak from a cryogenic coupler.

詳しい報告は、講演当日に行う。

EXCEL によるフラックスジャンプモデル

Flux Jump Modeling with EXCEL

和気正芳(高エネルギー研); 山田隆治(フェルミ研)
WAKE Masayoshi (KEK); YAMADA Ryuji (Fermilab)
 E-mail: wake@post.kek.jp

1. はじめに

フラックスジャンプは超伝導磁石開発の初期に不安定性の原因として研究されたが、極細多芯線が使われるようになってからはあまり問題にされなかった。しかし、最近の Nb3Sn の高電流密度化により再び問題として取り上げられるようになっている[1]。しかし、非線形の臨界現象で磁場と温度の2つの自由度を持つため意外と難しく、あまりシミュレーションが行われていないようだ。今回1次元のスラブモデルではあるが Excel の機能を使ってうまくシミュレーションができたので報告することにする。Excelを使ったシミュレーションと言う方法は簡便で有力であり、他にも様々な用途があると思われる。

2. フラックスジャンプ

フラックスジャンプは教科書[2]で解説されているように微小な磁束の動きで生じる熱が動きを加速し、動きがどんどん広がる場合に起こる。最初にジャンプが起こる条件は

$$\frac{\mu_0 J_c^2 a^2}{\gamma C(\theta_c - \theta_0)} < 3 \quad (1)$$

と計算されているが、磁化測定などで見られるようにジャンプは何度も起こる。安定性に関係するのはむしろ少し磁場が上がった所でのジャンプなのであるが、これは複雑でシミュレーションにたよる必要がある。

3. 磁化の計算

磁化は超伝導電流によって発生するので、電流分布を積分すれば磁化になる。ゼロから出発して外部磁場との違いを埋めるように流せばよい。臨界磁場 J_c 以上は流せないので内部に磁場が入ることになる。磁場が下がる時も $-J_c$ 以上は流せないことで同じ計算を行えばヒステリシスになる。スラブモデルなら要素数20くらいで十分シミュレートできる。計算は Excel のマクロで行うが、簡単なのでほぼそのままパワーポイントに移してパワーポイントのマクロでも動かせる。

4. 温度の計算

磁化を計算する要素に電流の他に温度の自由度を加えたクラスで要素を定義する。おなじような磁化過程に熱伝導の関係式にあわせる操作を毎回実行する。常伝導状態の電気抵抗による発熱と比熱・熱伝導率による時定数を用いる。安定化材への分流は今のところ考慮できていないが、表面での熱抵抗と温度伝播の時定数に組み込めるのではないかと思う。フラックスが動くたびに磁場エネルギーの変化分の絶対値が発熱となる計算を行う。エネルギーは入っても出ても振動しないということは熱として消費されると言うことである。

5. 計算の実際

Excel の場合一行を要素として温度や磁場などの自由度や物性値を並べる。そうすると近隣の行の関係式として Flux Penetration などは記述できる。しかし、外部磁場の時間変化や熱伝導を入れるためにマクロプログラムを組む必要があるが大掛かりなものではない。

Excel の場合要素内の動きが全て表の中で見え、必要に応じてグラフ化でき、シミュレーションの進行に応じてグラフ自分が自動的に変化してくれる。これは素人プログラマにとっ

て大変都合のよい事で、複雑なデバッグテクニックを使う必要もさらさらない。

問題点としては当然ながら実行速度の遅いことがあげられる。フラックスジャンプを追いかけた磁化曲線でノートパソコンなら5時間くらいを要する。30以上に要素数が増やすのは難しい。2次元も考えられないではないがまだ試みていない。

6. まとめ

ExcelやPowerPointといった一般的なツールでも簡単にシミュレーションが出来、フラックスジャンプのような一見複雑な現象も追いかけることがわかった。2回目3回目のジャンプではだんだんジャンプの幅が小さくなり、単純に教科書の式で磁石の安定性を議論[1]することは出来ない。

参考文献

1. V.V. Kashikhin and A.V. Zlobin; "Magnetic instabilities in Nb3Sn strands and cables", IEEE Trans Appl Supercond 15 (2) (2005), p. 1621.
2. M.N.Wilson; "Superconducting Magnets", Oxford University. Press (1983) ISBN 0-019-854805-2 p.131

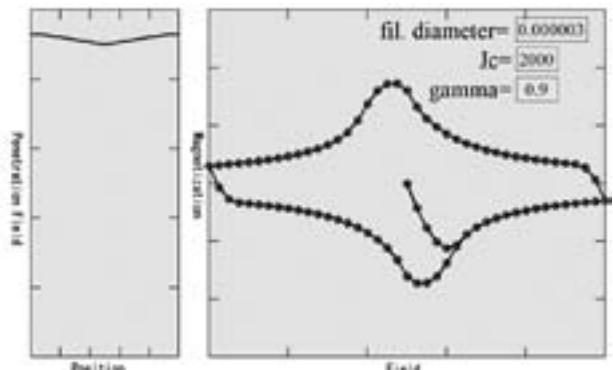


Fig1. Field Distribution and Magnetization
 Simulation was made using macro function of presentation software POWER POINT.

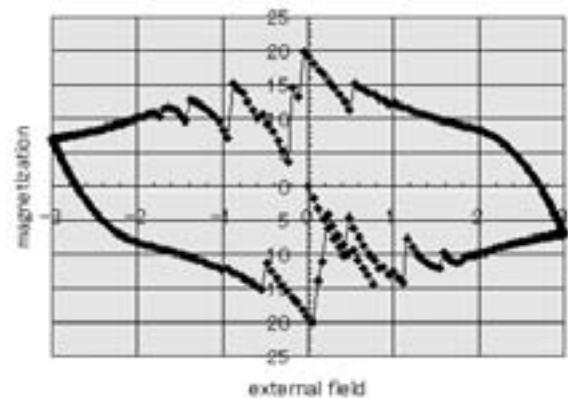


Fig2. Magnetization Curve with Flux Jump
 Simulation was made using Excel macro function.

高 Sn 濃度ブロンズ合金の組織と機械的特性

Microstructure and mechanical characteristic of high tin content bronze alloy

谷口 博康, 佐伯 伸二, 文珠 義之, 水田 泰成, 水田 泰次 (大阪合金);

菊池 章弘, 吉田 勇二 (NIMS); 長村 光造 (応用科学研)

TANIGUCHI Hiroyasu, SAEKI Shinji, MONJYU Yoshiyuki, MIZUTA Yasunari, MIZUTA Taiji (OAW)

KIKUCHI Akihiro, YOSHIDA Yuji (NIMS); OSAMURA Kozo (RIAS)

E-mail: taniguchi@osakagokin.co.jp

1. はじめに

現在、ブロンズ法 Nb_3Sn 線材は実用線材として既に多くの高磁場超伝導磁石に応用されており、また最近では、ITER(国際熱核融合実験炉)計画により多量の線材が求められる状況下にある。しかし一方で、臨界電流密度の高い内部 Sn 拡散法線材の量産化技術も年々着実に進歩しており、ブロンズ法を基軸とした我が国の線材メーカーにとっては、益々ブロンズ法線材の高臨界電流密度が重要な課題となる。そのためには、原料ブロンズそのものの材料科学的知見の蓄積と、従来ブロンズと同等の塑性加工性が確保された新しい高 Sn 濃度ブロンズの開発が求められる。

2. 高 Sn 濃度ブロンズ実験塊の作製

大阪合金工業所では、黒鉛坩堝を直接水冷しながら一方向凝固させる「水田式溶製法」を考案し、Ti 添加ブロンズ原料の量産技術の確立に成功した。今回、この水田式溶製法により、Sn 固溶限 ($\sim 15.8\text{wt\%}$) を超えた高 Sn 濃度ブロンズ ($\sim 20\text{wt\%Sn}$) を作製した。なお今回の溶製塊は、量産サイズ ($\sim \phi 220$) よりも小さい $\phi 80$ の実験サイズである。溶製直後の試料は初晶 α デンドライトの隙間に δ 相が析出している。組織の均質化のために、600°Cで 200h の溶体化熱処理を大気中で実施しているが、15.8wt%Sn 未満のブロンズでは α 相と微細な CuSnTi 粒子のみの

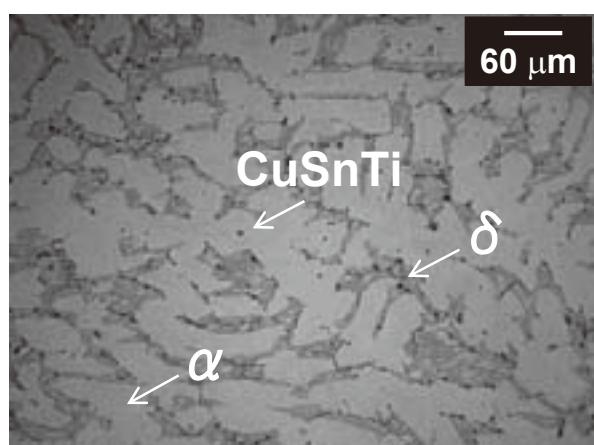


Fig. 1. Microstructure of high Tin content bronze alloy (Cu-20wt%Sn-0.3wt%Ti) after a heat treatment of 600°C for 200h. This Billet has 80 mm in outer diameter.

組織となる。今回の高 Sn 濃度ブロンズでは、溶体化熱処理後に多くの δ 相が残留し、Sn 濃度が高くなると当然 δ 相の残留量も多くなる。Fig. 1 はその一例であり、組成は Cu-20wt%Sn-0.3wt%Ti である。

3. 機械的特性の評価

作製した実験溶製塊から約 20mm × 20mm の角棒を切り出し、事前加工として溝ロール及びスエジャー加工により $\phi 2.15$ の線材を用意した。事前加工はすべて冷間で行い、600°Cでの中間焼鈍を頻繁に行った。最終的に $\phi 2.15$ になった時点で、4 種類の最終焼鈍 (400°C, 500°C, 600°C, 700°C) を各 1h 行った。なお、最終焼鈍直前に試料に付与した加工率は約 27% である。これら事前加工後に異なる最終焼鈍を行った試料を、冷間で連続ダイス引抜き加工を実施し、断線するまでの積算加工率を調査した。同サイズのダイスにて 2 回連続して断線した場合を断線として定義した。Fig. 2 に積算加工率とブロンズ中の Sn 濃度の関係をまとめた。今回の高 Sn 濃度ブロンズでの結果は、前回に報告した 16wt%Sn 以下のブロンズで得られた結果とその傾向がよく一致した。600°Cの最終焼鈍で最も優れた冷間加工性を示し、18.5wt%Sn でも約 60% の連続引抜き加工が可能であることがわかった。

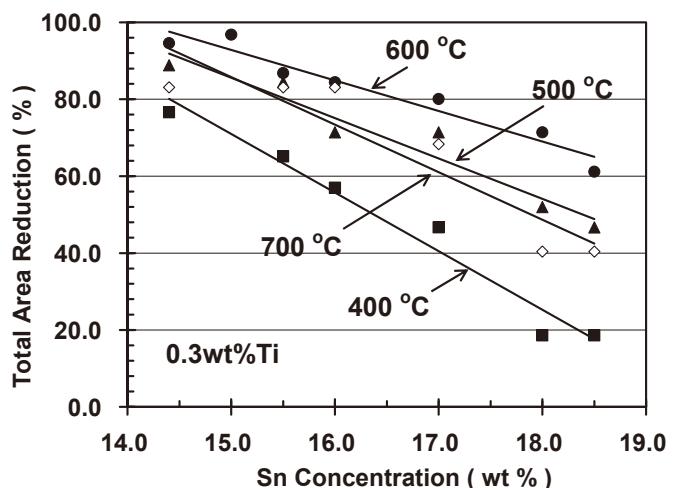


Fig. 2. Total area reduction at the cold drawing from $\phi 2.15$ versus Sn concentration in bronze alloys. All bronze samples have a same Ti concentration of 0.3wt%.

CuNb 補強 Nb₃Sn 超伝導線材における臨界電流の 3 次元歪効果

Three-dimensional strain effect of critical current for CuNb reinforced Nb₃Sn superconducting wire

西島 元, 峯岸 一博 (東北大); 小黒 英俊 (茨城大); 渡辺 和雄 (東北大)
 GEN Nishijima, MINEGISHI Kazuhiro (Tohoku University); OGURO Hidetoshi (Ibaraki University);
 WATANABE Kazuo (Tohoku University)
 E-mail: gen@imr.edu

1. はじめに

我々は、実用 Nb₃Sn 複合多芯超伝導線における事前曲げ効果を見出して以来[1]、Nb₃Sn 線材の歪効果について調べてきた。そして、線材軸方向だけでなく横方向（直径方向）の歪を含めた 3 次元歪を考えることで Nb₃Sn の超伝導特性を普遍的に記述できることを明らかにした[2,3]。しかし、これまでの研究では上部臨界磁場 (B_c) および臨界温度 (T_c) について調べているものの、応用上最も重要な特性である臨界電流 (I_c) については調べてこなかった。

そこで本研究では、3 次元歪が Nb₃Sn 線材の I_c に与える影響について考察する。

2. 試料線材および実験方法

試料として CuNb 補強 Nb₃Sn 線材(CuNb/Nb₃Sn)を用いた。断面を Fig. 1 に、諸元を Table 1 に示す。直径 1 mm の線材の最内層に Nb₃Sn、その外側に補強材 CuNb、さらにその外側に安定化材 Cu が配置されている。

I_c -応力/歪特性評価に用いた装置の概略を Fig. 2 に示す。片桐らによって開発された装置[4]を参考に製作した本装置を東北大学金属材料研究所附属強磁場センターの 18 T 超伝導マグネットと組み合わせることで、4.2 K, 18 T までの磁場中で I_c -応力/歪の測定が可能である。応力は、負荷ロッドに印加する力を室温部分でロードセルによって測定する。また、歪は線材の電流端子間距離をクリップゲージによってモニタし、初期長さで除して求める。 I_c は、線材に引張り歪を加えた状態で測定する。電圧端子間距離は 10 mm なので、 I_c 決定基準は 1 μ V/cm とした。

線材の 3 次元歪は、線材軸方向歪と横方向（線材直径方向）歪を測定することにより評価した。線材の軸方向と横方向を測定する歪ゲージを、たわみ成分を除去できるよう 2 枚ずつ接着し、2 アクティブ法で測定した[5]。

3. 実験結果

Fig. 3 に CuNb/Nb₃Sn 線材の応力-歪特性および I_c -歪特性を示す。一軸歪はクリップゲージで測定した値を用いたが、線材の初期状態にたわみがあるために、低歪側が過小評価されている。

I_c の歪依存性は Ekin らのスケーリング則において a~1000 (tensile), 800 (compressive) を用いて良くフィットでき、 I_c 最大となる予歪 (ϵ_m) は 0.38% と評価された。

謝辞

本研究は科学研究費補助金若手研究(A)(21686064)の助成を受けた。また、試料線材は古河電工より提供して頂いた。

参考文献

- [1] S. Awaji, et al., Supercond. Sci. Technol. 16 (2003) 733.
- [2] 小黒英俊, 東北大学博士論文 (2009)
- [3] H. Oguro, et al., presented at MT-21 (Hefei, China).
- [4] K. Katagiri, et al., Adv. Cryog. Eng. 36 (1990) 69.
- [5] K. Watanabe, et al., presented at MT-21 (Hefei, China).

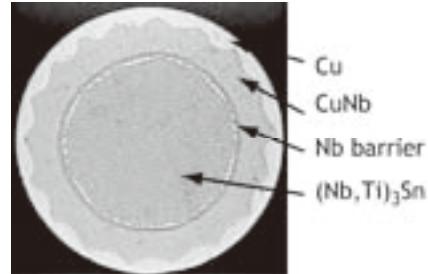


Fig. 1 Cross sectional view of the CuNb/Nb₃Sn wire.

Table 1 Specification of the CuNb/Nb₃Sn wire

Wire diameter (mm)	1.0
Bronze	Cu-14 wt%Sn-0.2 wt%Ti
Filament diameter (μm)	3.3
Number of filaments	11457
Barrier	Nb
Reinforcement material	in-situ Cu-20 wt%Nb
Cu / Reinforcement /SC (%)	17.7 / 35.4 / 46.9
Heat treatment	670 °C × 96 h

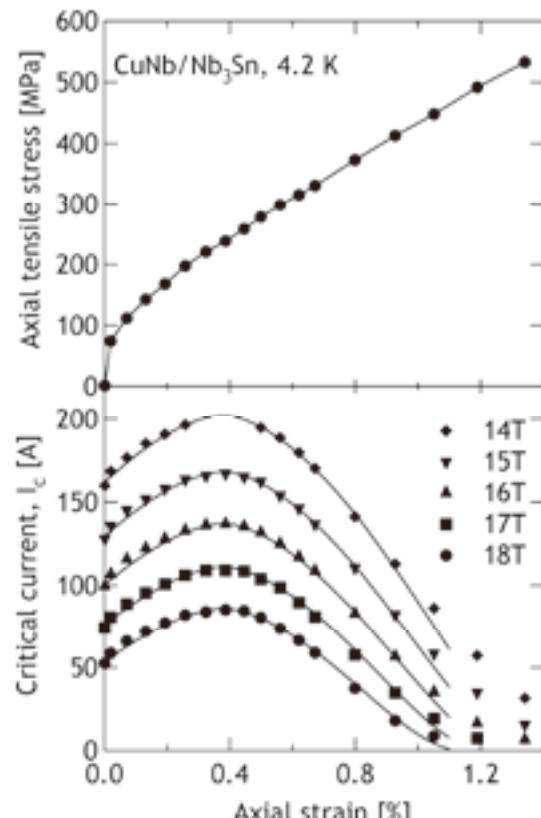


Fig. 2 Tensile stress and I_c as a function of axial strain.

中性回折による高強度 Nb₃Sn 線材における低温内部歪み状態の角度分布

Internal strain angle distribution in high strength Nb₃Sn wires by neutron diffraction

淡路 智, 西島 元, 渡辺和雄(東北大金研・強磁場センター), 小黒英俊 (茨城大), 鈴木 裕士(原子力機構),
町屋 修太郎(大同大), 土屋 佳則(NIMS), 長村 光造(応用科学研)

AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen, WATANABE Kazuo (HFLSM, IMR, Tohoku Univ.), OGURO Hidetoshi (Ibaraki Univ.), SUZUKI Hiroshi (JAEA), MACHIYA Shutaro (Daido Univ.), TSUCHIYA Yoshinori (NIMS), OSAMURA Kozo (RIAS)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Sn 線材における、超伝導特性の歪み依存性の理解は、その応用上非常に重要であると認識されている。これまでの多くの研究では、線材に引っ張り歪みを印加して、その超伝導特性を評価することで、引っ張り歪み依存性の理解を行ってきた。一方で、その引っ張り方向以外の内部歪み状態は不明のまま、パラメータとして用いるに過ぎなかった。我々は、中性子回折を用いることで、Nb₃Sn 線材内部歪みを3次元的に測定し、その超伝導特性の歪み依存性の理解を進めている[1-3]。今回は、線材の内部歪みの方向依存性を測定し、試料の長手方向から横方向までの歪みの角度依存性について測定した結果を中心に、その内部歪み状態について議論する。

2. 実験方法

測定に用いた試料は、Φ1.0 mm の CuNb 補強ブロンズ Nb₃Sn 超伝導線材で、CuNb を線材内側（コア）部分に配置した線材(IS1)と外側に配置した線材(IS2)の2種類である。内部歪み状態を変えるため、室温で0.8%の曲げ歪みを両振りで5セット印加した(PB)ものも用意した。残留歪の測定には、線材を1辺1 mm の立方体状に積み上げ、これを用いて、線材の残留歪の角度依存性を測定した。この測定は、室温と低温(10 K)において行い、それぞれの温度における残留歪を評価した。低温の実験では、試料を回転させることで、線材内部歪みの角度依存性も測定した。引張り応力下における測定では、Nb₃Sn 線材7本をエポキシ樹脂で固めて、一体化させた。その束ねた線材を引張りながら、中性子回折実験を行った。このとき、同時にひずみゲージと伸び計で引張り歪を測定しており、この値と中性子回折から得られた残留歪の値を比較した。測定は、原子力機構のRESAを用いて行った。このとき、Nb₃Sn の321回折にしぼって測定を行った。歪を算出する際の歪ゼロの試料として、線材から取り出したNb₃Sn フィラメントの、低温X線回折の結果を利用した。

3. 結果と議論

図1に、10 Kにおける残留歪みの角度依存性を示す。ここで、90, 270度方向が線材長手方向であり、0, 180度

が線材垂直方向（径方向）である。これまで分かっているように、長手方向には圧縮、横方向には引っ張りの残留歪みとなっている。さらに、角度依存性から、長手方向の圧縮歪みは、角度が増すにつれて急激にゼロに近づき、ほぼ45度付近でゼロとなる、さらに角度を増加すると緩やかに増加し、引っ張り歪みとなっている。また、2つの試料を比較すると、線材長手方向付近のみで、歪みが大きく異なっているが、それ以外の多くの部分では残留歪みの違いが非常に小さくなっている。この結果が、偏差歪みの違いとして大きく現れることで、臨界電流や上部臨界磁場の歪み依存性に大きく影響を与えていていると考えられる。

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)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] S. Awaji et al., IEEE TAS, **16** (2006) 1228.
- [2] H. Oguro et. al., J. Appl Phys. **101** (2007) 103913.
- [3] 小黒英俊ら, 2008年秋期低温工学・超電導学会予稿集, 1C-a04, 2008, p144.

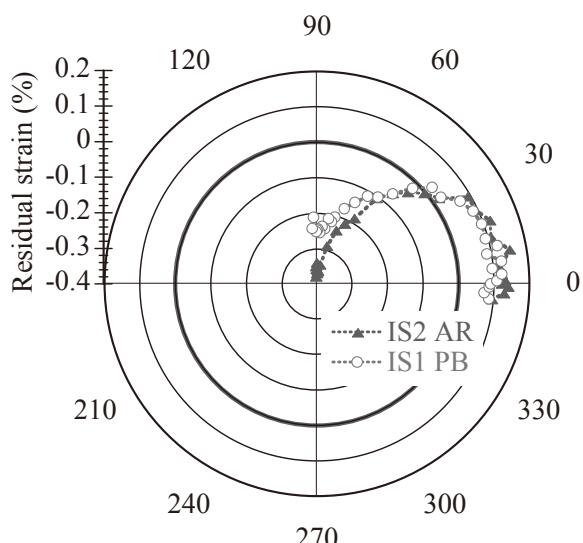


Fig. 1 Angular dependence of residual strains at 10 K for the outer-CuNb/Nb₃Sn (IS2) and the inner-CuNb/Nb₃Sn wires.(IS1). 90° and 270° are axial direction of the wires.

Table 1 Sample specifications

sample	reinforcement	0.8 % prebending
IS1 PB	CuNb inside	○
IS2 AR	CuNb outside	×

Sn 基合金を用いた Nb_3Sn 線材の組織と特性

Structure and Superconducting Properties of Nb_3Sn Wires Prepared from Sn-based Alloy

太刀川 恭治, 山口 真弘(院), 佐々木 弘樹(院), 安藤 智紘(学部), 中野 俊邦(学部) (東海大・工); 竹内 孝夫(NIMS)

K.Tachikawa, M.Yamaguchi, H.Sasaki, T.Ando, T.Nakano (Faculty of Engr., Tokai Univ.); T.Takeuchi(NIMS)

E-mail:tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

新しい Nb_3Sn 線材の製法として Sn-Ta 系及び Sn-B 系合金シートを用いたジェリーロール(JR)法について研究した。本研究では Sn-B 系合金シートを用いても Sn-Ta 系と同様に有望な特性をもつ線材がえられることがわかった。

2. 実験方法

原子比が 4/1-8/1 の Sn/Ta 及び Sn/B に対して少量の Ti を置換し Cu を添加した混合粉末を石英るつぼに入れ、真空中で熱処理して円形のボタン状インゴットを作製した。これらの合金をプレスと平ロール圧延によって厚さ $80\mu m$ のシート状に加工して市販の Nb シートと重ね、Nb-3.3at%Ta 芯棒に巻きつけて JR 複合体を作製し、Nb-3.3at%Ta シースに挿入して線材に加工した。なお、Sn-B 系シートを用いた JR 法線材では Nb-1.8at%Ti シースの使用も試みた。これらの線材は真空中 $725-775^{\circ}C$ で熱処理し、試料とした。Sn 基合金及び作製した試料の組織は EMPA と SEM を用いて観察した。試料の臨界温度 T_c は直流四端子法により測定した。

3. 実験結果と考察

Fig.1 に Sn-B 系シートを用いた JR 法 Nb_3Sn 線材断面の EPMA による元素マッピングを示す。図より、シース部に厚くて組成の均一な Nb_3Sn 層が生成されていることがわかる。Sn-B 系シートの部分に Nb が見られることから、Nb と Sn の相互拡散により Sn 拡散後のポイドの生成なしに厚い Nb_3Sn 層が生成されると考えられる。 Nb_3Sn 層の Sn 量は化学量論比に近い組成を示す。B は殆ど Sn-B 系シート部に残留しており、 Nb_3Sn 層中の存在は確認できなかった。SEM 観察では Nb_3Sn 層は比較的等方的で均一な結晶組織を示した。なお、Nb-1.8at%Ti シースを使用した場合は同じ熱処理後 1-2at% の Ti がシース側の Nb_3Sn 層に含まれていた。

Fig.2 には本研究による各種線材とブロンズ法線材の T_c 遷移を示した。ブロンズ法線材と本線材では縦軸と横軸の目盛が異なっている。ブロンズ法線材は、16wt% の Sn と 0.1wt% の Ti を含むブロンズを用いた最近の線材であるが、onset は $17.2K$ 、offset は $16.8K$ の遷移を示した。本研究の線材は offset $18.1K$ 前後、遷移幅は $0.1K$ 以下と格段にシャープで高い T_c 遷移を示した。この結果は本線材の Nb_3Sn 層の Sn 組成が化学量論比に近く、またその濃度分布がブロンズ法線材に比べてはるかに均一なことによるものと考えられる。さきに Sn-Ta 系シート JR 線材は磁化変化でも $18.1K$ で鋭い遷移を示した[1]。Sn-B 系シート線材は Sn-Ta 系シート線材と同様に高い offset T_c を示し、⑤の試料の中点は $18.18K$ であった。

Sn-B 系シートを用いた JR 法線材は Sn-Ta 系シート線材とほぼ同様な高磁界特性を示した。Sn-B 系は B の微粒子を用いると Sn-Ta 系より極細線の作製に有利であろう。終わりに本研究における EPMA 分析について御尽力いただいた東海大学技術共同管理室 宮本泰男 室長に謝意を表する。

参考文献

1. G.Iwaki et.al, Abstract CSJ Conf., 75 (2006) 150.

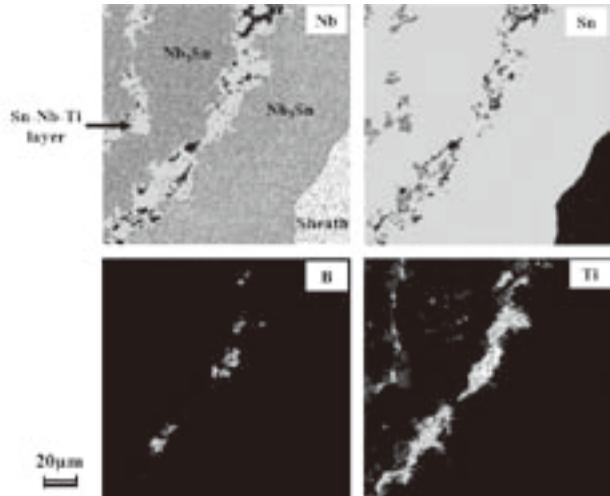


Fig.1 EPMA composition mappings on the JR wire reacted at $750^{\circ}C$ for 100h, the sheet composition being 8/1(Sn/B)-4at%Ti+3wt%Cu.

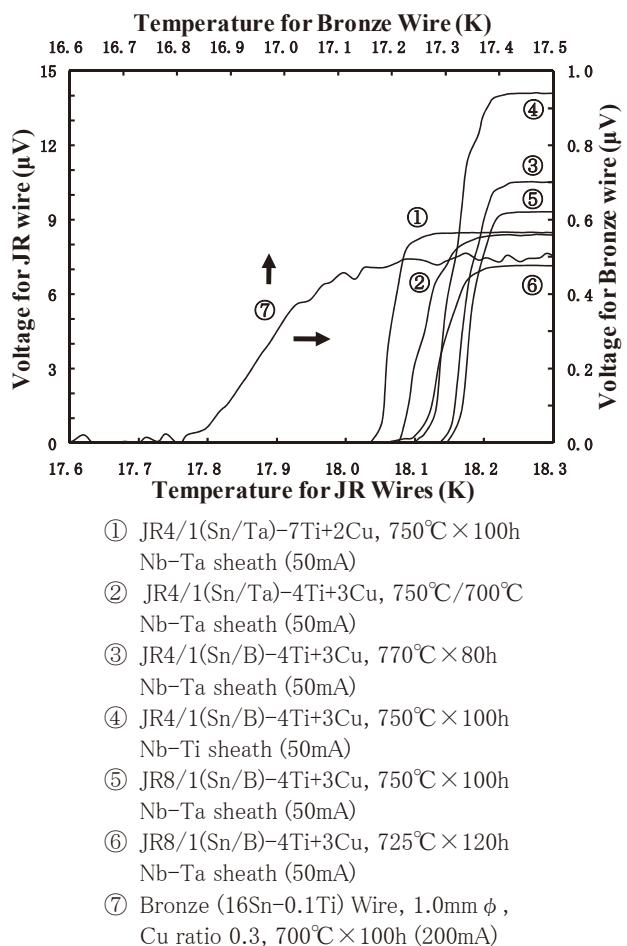


Fig.2 T_c transition of quoted JR wires and a bronze wire.

溶融過程を含まない V-Ti 合金線材の作製とその超伝導特性

Fabrication of V-Ti Alloy Wires without Melting Process and Their Superconducting Properties

湯本 淳志(院), 飯塚 悠太(学), 斎藤 榮(足利工大) ; 竹内 孝夫(NIMS)
 YUMOTO Atsushi, IIZUKA Yuta, SAITO Sakae(AIT); TAKEUCHI Takao(NIMS)

1. はじめに

V-Ti 合金は Nb-Ti 合金に比べて超伝導特性は劣るが、中性子照射による誘導放射化の半減期は非常に短い。V-Ti 合金の超伝導特性が向上すれば、その特徴を生かした用途がある。超伝導特性の中で J_c 特性は線材化方法に依存するとされている。即ち、 J_c 特性向上のため、V-Ti 合金の新しい線材化方法を検討することは意義がある。本研究では、通常の合金作製法(溶解鑄造→塑性加工)とは異なる溶融過程を含まない CCE 法¹⁾による 4 種類の化学組成の V-Ti 合金線材作製とそれらの超伝導特性を検討した。

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。本研究では化学組成の異なる 4 種類の V-Ti 合金線材を作製するが、素材の板厚が異なること以外は同一の方法である。

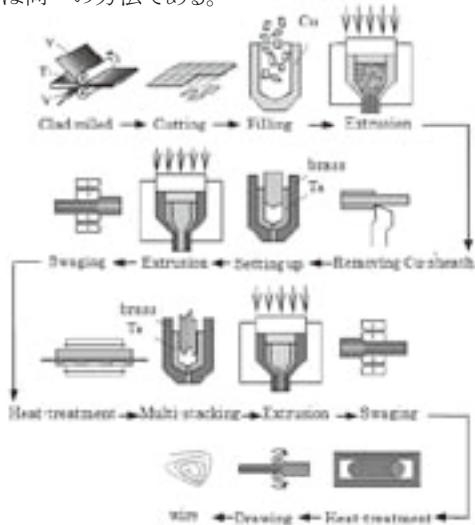


Fig.1 Experimental procedure

CCE 法は、化学組成をクラッド圧延時の板厚の比で制御するので 4 種類の目標化学組成(V-35.0at%Ti, V-42.0at%Ti, V-55.0at%Ti, V-65.0at%Ti)に対し、V と Ti の板厚の組合せを、各 (1.1mmV : 1.5mmTi), (0.8mmV : 1.5mmTi), (0.8mmV : 2.5mmTi), (0.5mmV : 2.5mmTi) としたクラッド圧延を行い、最終的な厚さ約 0.3mm の V/Ti/V 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、純銅容器に充填し、押出し比 2.5 で冷間押出し加工を行った。押出し後の複合体棒を 890°C で焼鈍し、被覆材の純銅を旋盤で除去し、得られた複合体を Ta 管に挿入し、さらに丹銅容器に充填し押出し比 5 で冷間押出し加工を行った。得られた複合体棒をロータリースエービングマシンで ϕ 3mm 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、Ta 管に束ねて挿入し、さらに丹銅容器に充填した後、押出し比 5 で冷間押出し加工を行った。得られた押出し棒をロータリースエービングとローラーダイス引抜きで ϕ 1mm 程度まで加工(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(890°C 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(固相拡散)熱処理と析出熱処理を行い、標準的な 4 端子法で T_c 特性と J_c -B 特性を測定した。

3. 結果

溶融過程を含まない既述のプロセスで直径 1mm、長さ 10m 程度の V-Ti 線材を作製することができた。作製した線材の輪切り断面ならびに長手方向断面の一例を Fig.2 に示す。これらより CCE 法で健全な V-Ti 合金線材の作製が作製可能であることが分かる。作製した線材の J_c -B 曲線の一例を Fig.3 に、また、 T_c 特性の一例を Table 1 に示す。これらより化学組成依存性、各熱処理条件、加工度条件による超伝導特性の違いを見ることが出来る。

本研究により、溶融過程を経ない方法での線材化が可能であること、熱処理条件、加工度条件が J_c 値向上に影響を与えることが見られることが分かった。今後、より詳細な化学組成の最適化や熱処理条件、加工度条件の最適化を課題として検討を行う予定である。

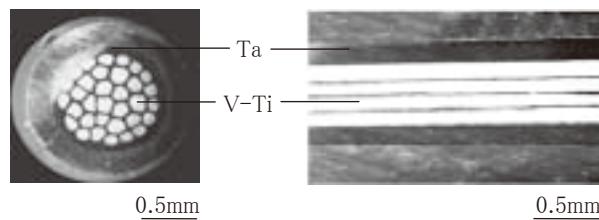
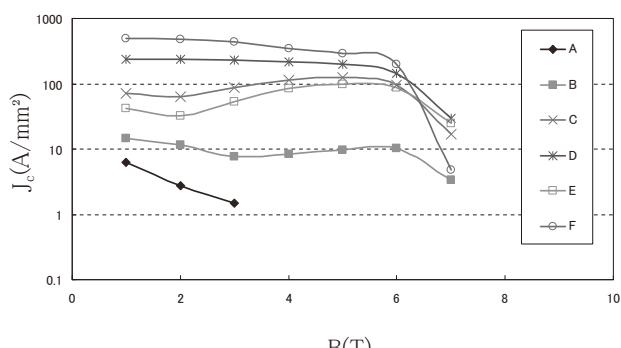


Fig.2 Cross section of V-Ti multifilamentary wires

Table 1 Critical temperature (T_c) of the wires

Sample	V-32.5at%Ti Multi (ϕ 1.04)	V-41.7at%Ti Multi (ϕ 1.00)	V-45.9at%Ti Multi (ϕ 0.71)	V-65.0at%Ti Multi (ϕ 1.00)
T_c (K)	7.78	7.46	7.62	7.30



A: ϕ 2.1 \rightarrow ϕ 1.0 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h)
 B: ϕ 2.1 \rightarrow ϕ 1.0 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h) \rightarrow (Heat treatment 400°C-10h)
 C: ϕ 2.1 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h) \rightarrow ϕ 1.0
 D: ϕ 2.1 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h) \rightarrow ϕ 1.0 \rightarrow (Heat treatment 400°C-10h)
 E: ϕ 2.1 \rightarrow ϕ 1.5 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h) \rightarrow ϕ 1.0
 F: ϕ 2.1 \rightarrow ϕ 1.5 \rightarrow (Heat treatment 890°C-20h) \rightarrow ϕ 1.0 (Heat treatment 400°C-10h)

Fig.3 J_c vs. B curves for V-65.0at%Ti wires

参考文献

1) 斎藤栄、他:日本金属学会誌、53巻4号(1989)pp.458-463.

RHQT 法 Nb₃Al 線材と拡散法 Nb₃Al 線材

RHQT Prosessed Nb₃Al Strand and Diffusion Processed Nb₃Al Strand

菊池 章弘 (NIMS) ; 山田 隆治 (Fermilab) ; 土屋 清澄 (KEK) ; Emanuela Barzi (Fermilab) ;

中川和彦, 宮下克巳 (日立電線) ; 中本 建志(KEK) ; 竹内孝夫 (NIMS)

KIKUCHI Akihiro (NIMS) ; YAMADA Ryuji (Fermilab) ; TSUCHIYA Kiyosumi (KEK) ; BARZI Emanuela (Fermilab) ;

NAKAGAWA Kazuhiko, MIYASHITA Katsumi (Hitachi Cable) ; NAKAMOTO Tatsushi (KEK) ; TAKEUCHI Takao (NIMS)

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

1. はじめに

近年、急熱急冷・変態(RHQT)法 Nb₃Al 線材については、1km 級の銅安定化長尺線材も製造出来るようになった。加速器応用を念頭にしたラザフォードケーブルも多数回にわたって試作され、その導体試験も実施されている。さらに最近では、KEK-NIMS-Fermilab の共同研究として、13T の Nb₃Al レーストラック磁石の開発も進行中である。一方、拡散法による安定化銅を母材とした Nb₃Al 線材の開発が原研の先導により実施されてきたことはよく知られている。残念ながら現在は開発が中断されているが、RHQT 法と比較すると製法が格段にシンプルで、安定化銅の複合も容易なことからコスト面では非常に有利である。応力効果については、RHQT 法及び拡散法のいずれの線材も Nb₃Sn 線材より優れていることが報告されている。

今回、銅安定化が図れるようになった最近の RHQT 法線材と、同じく銅安定された拡散法線材の各種特性を比較検討した。

2. RHQT 法 Nb₃Al 線材の特徴

通電加熱と Ga 浸漬急冷 (急熱急冷処理) を行って、まずは過飽和固溶体を制せさせることが最大の特徴で、そのため、線材母材には高融点の Nb や Ta を使用する。低磁場でのフィラメント結合を抑制するには、現状ではフィラメント間の材質には Ta が適している。安定化銅の複合は急熱急冷処理の後に実施し、通常は銅めっきにより行う。銅箔をクラッド加工する場合もあるが、平角線のみ適用が可能で銅比も小さい場合に限られる。急熱急冷処理前に銅や銀のモジュールを前駆体線材中に含有させる内部安定化構造もあるが、これも銅比を大きくすることが難しい。フィラメントは Nb シートと Al シートを重ねて巻き込んだジェリーロール法により製造され、前駆体線材における Al シートの厚みは 150~200 nm に設定されている。最終的な A15 相への変態は、銅めっきの後に 800 °C の熱処理により行う。

3. 拡散法 Nb₃Al 線材の特徴

RHQT 法線材と同じく、フィラメントは Nb シートと Al シートを重ねて巻き込んだジェリーロール法により製造される。但し、熱処理は 750~800°C 程度で実施され、生成する A15 相を増やすために Al シートの厚みを 100 nm まで薄くして拡散距離を短く設定されている。また、Al リッチな化合物相 (Nb₂Al 等) の残留を減らすために、Nb と Al の原子比は 3:1 ではなく、あえて 4:1 に調整されている。母材は安定化材

となる無酸素銅を用いており、10 km を超える長尺線材製造の実績もある。

4. 臨界電流密度の比較

RHQT 法線材と拡散法線材の臨界電流密度については、これまで多数の報告がある。しかしながら、1.9 K の極低温領域で比較した結果はなく、今回、本研究で初めて実施した。特に LHC への応用については、2.0 K でのラザフォード導体の性能が求められることから、加速器応用にとって意義が大きい。

Fig. 1 (a) は 12 T の non Cu J_c を温度をパラメータとして比較したものである。比較に使用した RHQT 法線材の外径は 1.0 mm で銅比が 1.0 であり、一方、拡散法線材の外径は 0.805 mm で銅比が 2.1 である。RHQT 法線材の 4.2 K、12 T での non Cu J_c は約 1,300 A/mm² であり、拡散法線材の約 2 倍である。ところが、1.9 K ではその有意差は 1.5 倍程度に減少した。Fig. 1 (b) に示すように、4.2 K の J_c で規格化すると、温度の低下にともなう J_c の増加率は拡散法線材の方が明らかに大きいことがわかる。

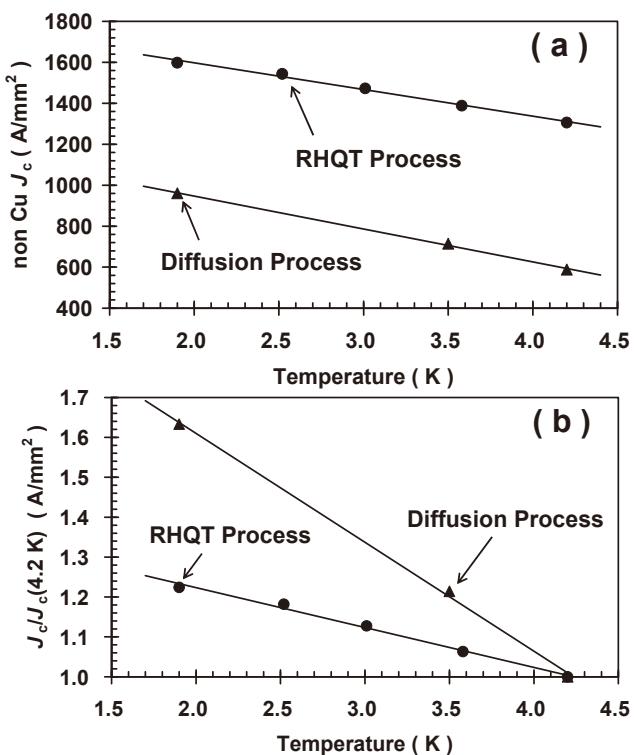


Fig. 1. J_c at 12 T versus Temperature curves for the RHQT-processed and the diffusion-processed Nb₃Al strands. (a) is plotted by non Cu J_c , and (b) is plotted by the normalized $J_c/J_c(4.2 \text{ K})$.

Nb-Al 系において第二急冷処理により得られる相 Phase formation by second rapid-quenching in Nb-Al system

伴野信哉, 竹内孝夫, 井上廉, 飯島安男, 菊池章弘 (物質・材料研究機構)
 BANNO N, TAKEUCHI T, INOUE K, IIJIMA Y, KIKUCHI A (NIMS)
 E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Nb_3Al 本来の臨界温度 T_c は 19K を超える値[1]であるが、急熱急冷・変態法で得られる Nb_3Al 線材の T_c は通常は 17.5K 程度であり、なお 1K 以上の開きがある。そもそも状態図にない原子分率 25%Al の Nb-Al 過飽和固溶体が、急熱急冷処理によっていつ生成されるか十分明らかでなく、また特性の良い場合でも 18.5K 以上の T_c が得られないことも疑問として残る。

本研究では、急熱急冷処理によりどのような相変化が起こるのかを調べるために、より均質な組成から出発することを考えた。そのために急熱急冷処理により一旦過飽和 BCC 相を生成した試料を再度急熱急冷処理し、その変化を調べた。幾つか興味深い結果が得られたが、現時点では状態エネルギーの観点からはまだそれが何をあらわすのかはつきりとはわからない。

2. 試料

試料は Nb と Al-5at%Mg ロッドを使用し、ロッド・イン・チューブ法により作製した。前駆体線材の Al 芯数ならびに芯径は、公称で 159607 ならびに 270nm、反応相における Nb と Al の原子比は 3:1 である。またバリア材には、多段の急熱急冷処理によりバリア材と Nb-Al コアとの反応を防ぐために Ta を使用した。

3. 実験結果

紙面の関係上多くの結果を載せることができないので、興味深いと思われる結果を一つ示すことにする。Fig.1 は、第 2 急熱急冷処理を施し、その後 800°C で Nb_3Al 相へと変態させた試料の T_c 遷移を示したグラフである。これまでにも示されてきたように、2 回目の急熱急冷処理時には、条件の低いところでは A15 相が直接生成する(第 1 段階)。その T_c は約 18K である。その後条件を上げていくと、A15 相が再び相変態して BCC 相となり(第 2 段階)、800°C で再変態させることで、 T_c =17.3K 程度の A15 相となる。興味深いのはそのさらに上の条件である。Fig.1 でいうところの条件 103A を超えたあたりから、2 段遷移が現れ始めて(第 3 段階)、驚くことにオンセットの T_c では約 19K であった。遷移図の横には第 2 急冷条件 106A の試料の組織の反射電子像を示す。この像から考えて、この領域は 2 相領域の組織と思われる。

Fig.2 に Nb-Al 系における、2060°C および 1940°C の Gibbs の自由エネルギー G の模式図を示す。2060°C の包晶温度では BCC 相、A15 相および液相のエネルギー曲線が共通接線で結ばれ、また 1940°C の包晶温度では A15 相、 α 相および液相のエネルギー曲線が共通接線で結ばれることから、概念的には図示の状態となる。

第 1 段階で完全な化学量論組成の A15 相が得られないのは、比較的低い温度で組成のずれた A15 相が析出してしまう、組成の揺らぎが改善されぬまま急冷冷却されたためではないだろうか。

第 2 段階は、以下のように示される G を考える。

$$G \equiv U - TS \quad (U: \text{内部エネルギー}, T: \text{温度}, S: \text{エンタルピー})$$

通常外部から熱を与える場合(平衡反応)では、その温度で決まる最も低位の平衡相以外の相は現れないが、通電加熱の場合には、直接内部エネルギーの増加をもたらしエネルギー的に高い相を析出させるのではないか。つまり第 2 段階の BCC 相は、平衡反応では本来決して現れない相であるが、通電加熱という特殊な加熱法により、2000°C 付近で A15 相からエネルギー的に接近したその上の準位である BCC 相にステップ(相変態)したと考えられないだろうか。

第 3 段階の T_c の高い A15 相の析出は、組織から見ると、変態により生成した BCC 相が、さらに液相に分離していく過程において過渡的に現れたものではないだろうか。第 1 急冷のときに現れて、第 2 急冷のときに現れないのは依然はつきりとはわからないが、粒界付近における Al の濃度勾配の違いは一つの要因として考えられるだろう。

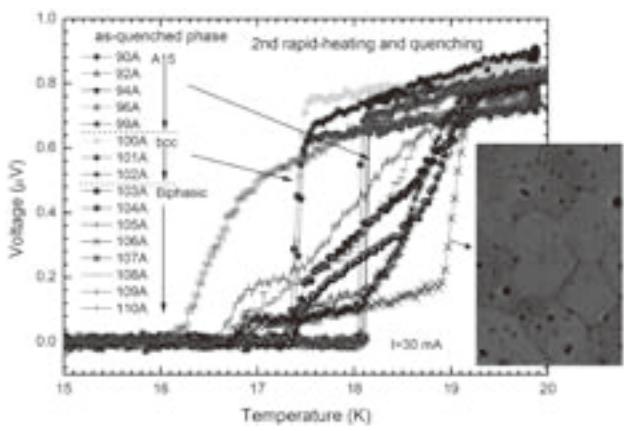


Fig. 1. T_c transition.

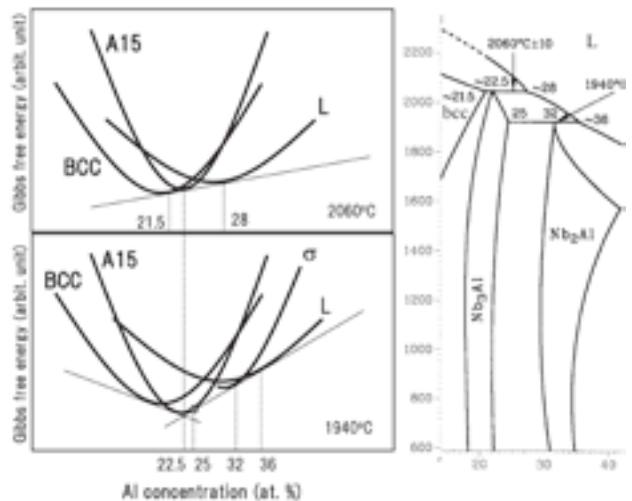


Fig. 2. Schematic of Gibbs free energy.

[1] J.L. Jorda, R. Flükiger et al. 1981 IEEE Trans. Magn. MAG-15 557.
 なお本研究の一部は平成 21 年度産業技術研究助成事業の一環で行われた。

单芯 JR 法 Nb_3Al 線材の RHQ 処理条件と J_c 特性

J_c properties of single core JR- Nb_3Al wire made by various RHQ 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

前回の報告で、RHQ 処理の電極間隔を長くすることで実用線材である JR 法線材でも RIT 法線材同様に超伝導特性の向上が出来ないかということで、マトリックスを Ta にした Al 厚の厚い单芯 JR 法線材を用いて実験を行った結果、Al 厚の薄い JR 多芯線材と同等の超伝導特性を得ることが出来た。

本報告では、同線材を用いて通電電極間隔をさらに長くした場合に特性向上はできるのか、また、通電電極間隔の短い 100mm では優れた特性が得られないのかを J_c 特性を中心に検討したので報告する。

【2】実験方法

Ta マトリックス JR 法单芯前駆体線材は日立電線㈱で作製したもの用いた。線径は 0.53mm、Ta マトリックス比 0.6、Al 厚約 600nm である。RHQ 処理は、通電電極間隔: 100, 300, 470 mm の 3 条件、線材移動速度: 0.33~1.00m/s の間で 3~5 条件行った。そのときの RHQ 加熱時間は 0.1~1.18s である。RHQ 電圧設定(到達温度または急冷温度)は直接 A15 相が出来る条件から過飽和 bcc 固溶体領域までの範囲を狙って行った。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。

J_c 測定は 4 端子抵抗法で測定し、線材保護のためのシャント抵抗を使用して行った。組織観察は、線材横断面および長手方向断面を研磨し、5% 希硫酸水溶液中で 35V の電圧を

かけて陽極酸化し、光学顕微鏡で行った。

【3】実験結果

線材長手断面および横断面を観察すると、それぞれの電極間隔で加熱エネルギーを上げていくと、到達温度が低い場合 RHQ 処理で直接生成された A15 相が現れ、次いで過飽和 bcc 相が観察される。さらに到達温度を高くすると過飽和 bcc 相の 2 相分離が始まり超伝導特性の低下につながる。RHQ 処理の電極間隔が長い場合と短い場合を比較すると、短い場合は相対的に単位長さ当たりの加熱エネルギーが大きいため RHQ 条件変動の影響を受けやすく、線材中心の Ta と反応して出来たと思われる大きな空孔が観察された。

図 1 に昇温時間と各 RHQ 条件で得られた最高の T_c 値との関係を示す。 T_c は昇温時間が長くなるにしたがって増加する傾向にある。しかしながら、同じ電極間隔の中であまり長くしそぎると線材移動速度が遅くなってしまい急冷出来ずに RHQ 処理で直接 A15 相が生成してしまう。それを避けるため線材移動速度をあまり遅くせずに電極間隔を長くすることで昇温時間を長くすることが望ましいと考えられる。

図 2 に各電極間隔で得られた最高の J_c -B カーブを示す。各電極間隔の中で比較的遅い線材移動速度(急冷速度)0.4m/s で最高の J_c が得られた。これは単位長さ当たりの加熱エネルギーを小さくし、昇温時間を長くすることで超伝導特性が向上する可能性があることを示している。

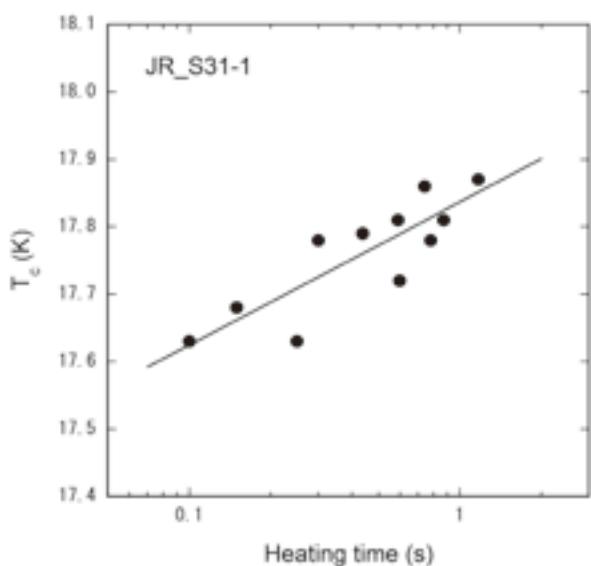


Fig.1 T_c versus RHQ heating time for single core JR- Nb_3Al wire.

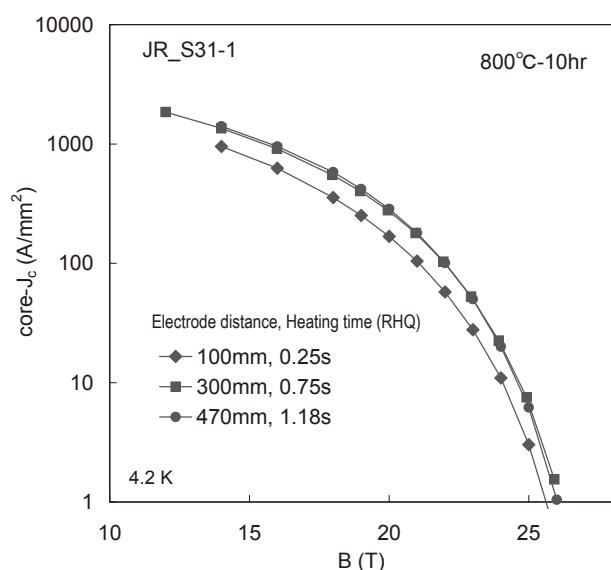


Fig.2 J_c versus B curves for single core JR- Nb_3Al wire at 0.4 m/s wire velocities.

バリア型 Cu 内部安定化・急熱急冷変態法 Nb₃Al 線材の超伝導特性 Superconductivities of barrier-type Cu internally stabilized RHQT Nb₃Al wires

竹内 孝夫(NIMS); 土屋 清澄 (KEK); 田中 和英, 中川 和彦(日立電線); 伴野 信哉, 飯嶋 安男, 菊池 章弘(NIMS)
TAKEUCHI Takao NIMS); TUSCHIYA Kiyosumi (KEK); TANAKA Kazuhide, NAKAGAWA Kazuhiko (Hitachi Cable); BANNO
Nobuya, IIJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro (NIMS)
E-mail: TAKEUCHI.Takao@nims.go.jp

1. はじめに

耐歪み特性に優れるため核融合・加速器等への利用が期待される急熱急冷変態法Nb₃Al線材の課題の一つとして低成本の安定化材複合技術の開発がある。丸素線に対する既存の安定化材複合技術は、Nb/Al前駆体外周のCuを除去してから急熱急冷処理を施し、その急冷線材について表面を酸洗・研磨し、これにCuイオンプレーティングを施して酸化皮膜が介在しない強固な密着性のCuを成膜し、これに電解メッキによりCuを厚く複合するものである。この安定化材複合の線材コストに占める割合は大きい。一方、フィラメント間マトリックス(バリア)がTaの「Taマトリックス線材」において、Nb/Alフィラメントの一部をTa被覆Cu(Ta/Cu)で置換することにより線材断面内部にCu安定化材が分散した内部安定化方式は、急冷後の処理が不要で低成本が可能な安定化材複合技術である。今回、バリアとしてCu/Ta複合バリアを採用することにより、多芯線ビレット組み込み前のシングル線のCu除去工程を省略した低成本化可能な新しいCu内部安定化方式を提案した。その微視的組織と超伝導特性について報告する。

2. 断面構造

図1に従来のCu内部安定化・前駆体多芯線(0.8mm φ)の断面組織を示す。伸線加工に必要だったCu外皮をエッチングで除去したTa/(Nb/Al)六角線66本とともに、Ta被覆Cu六角線を中心ダミーとして19本配置している。Cu/non-Cu比は0.13でJR(Nb/Al)フィラメント径は63.6 μmである。一方、図2に今回試作したバリア型Cu内部安定化・前駆体多芯線(1.35mm φ)の断面組織を示す。Cu外皮を除去しないままのCu/Ta/(Nb/Al)六角シングル線222本が、を中心ダミーCu/Ta六角線19本とともに配置されている(図2)。Ta(Nb)/Nb₃Al比は1.279、また、Cu/non-Cu比は0.149であり、JR(Nb/Al)フィラメント径は63 μmである。Taマトリックス前駆体の伸線加工性は、TaがNbと比べて硬く延性に劣るため、例えばフィラメント間で十分な密着性が得られず、これまで無断線での伸線加工は困難であった。それに対しバリア型Cu内部安定化・前駆体多芯線では無断線で伸線加工できた。フィラメント間がTa/Cu/Taの3層構造となることにより、Ta/Ta構造より密着性が改善したためと思われる。

3. 急冷処理と臨界温度

2種類の方法で急熱急冷処理を実施した。1つは従来と同じReel-to-reelの連続急熱急冷(RHQ)処理である。もう一つは、短尺(120mm)の線材の一端を高速で落下可能な電極に固定し、もう一端をGa溶融浴に5mmだけ浸漬した状態で短時間(0.9s)の通電加熱したのち電極を落下させて線材の急冷を行うもの(RHQシミュレータ)である。図3にRHQシミュレータで急冷した状態での臨界温度T_cの通電電流I_{RHQ}依存性を示す。I_{RHQ}が198Aを越えるまで14Kに近いT_cが確認されている。すなわち、I_{RHQ}が198Aの加熱は、目視した加熱の程度から、明らかに通常の過飽和固溶体が生成する上限温度の2000°Cより高いがA15相が生成する。これは、急冷後の曲げ試験からも確認できる。一方、I_{RHQ}が198A以上ではT_cが9Kになるものの、依然として曲げ試験では脆い化合物が生成していることを示唆する。実際、800°Cの熱処理を施しても17K付近で幅広の超伝導遷移となり、通常の過飽和固溶体を経由したNb₃Alとは違う挙動を示した。

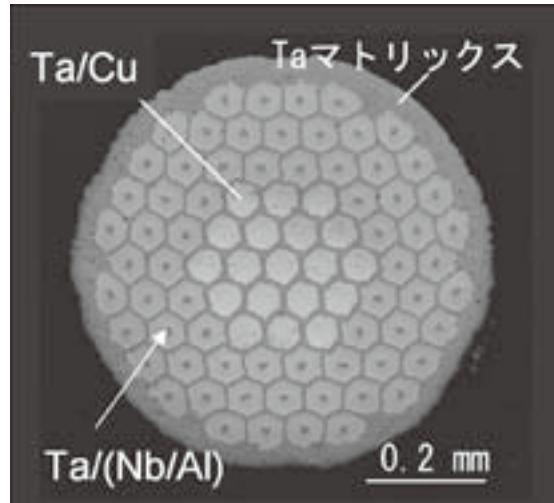


図1 従来のCu内部安定化・前駆体多芯線(0.8mm φ)

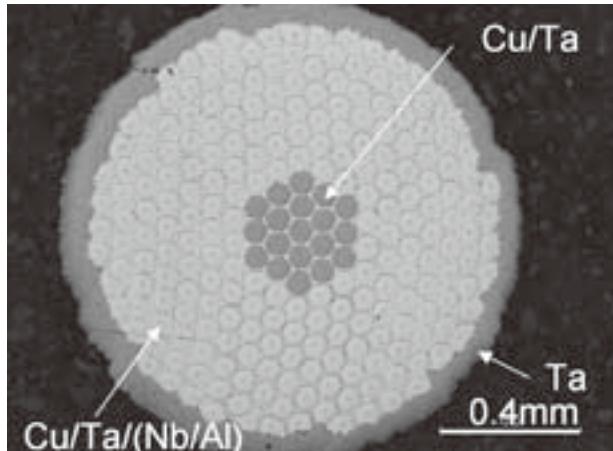


図2 バリア型Cu内部安定化・前駆体多芯線(1.35mm φ)

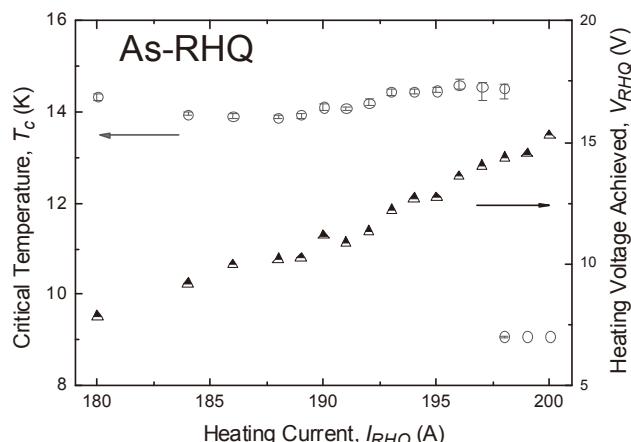


図3 バリア型前駆体線をRHQシミュレータで急冷した状態での臨界温度の通電電流I_{RHQ}依存性。

謝辞 本研究は科研費(特定領域研究20025008)の助成を受けたものである。

カルコゲナイト超伝導体の比熱測定

Specific Heat of Chalcogenide Superconductor

赤塚 智紀, 山田 真一郎, 内川 貴浩, 中田 有紀子, 堀 純也, 藤井佳子(岡山理大)

AKATSUKA Tomonori, YAMADA Shinichiro, UCHIKAWA Takahiro, NAKADA Yukiko, Hori Jun'ya, FUJII Yoshiko(OUS)
E-mail: s08pm01at@std.ous.ac.jp

1. はじめに

カルコゲン化合物 $A_xV_6S_8$ ($A = In, Tl, K$) は Nb_3S_4 構造を有し、V-V ジグジグ鎖が c 軸方向に並んだ擬一次元化合物である。これらの物質の超伝導転移機構を明らかにするため、我々は熱緩和法により 0.1K から 3.7K の温度域で比熱測定を行っている。

熱緩和法において重要な事柄は、測定セル各部の熱接触を良くすること、アデンダの熱容量を試料の熱容量に対してできるだけ小さくすること、測定セルと熱浴を繋ぐ熱抵抗線以外からの熱の出入りを小さくすること、熱浴は測定セルに対して十分な熱容量を持つことである。そこで我々は、次章に示す工夫を行なながら測定を行っている。

まずははじめに、高純度銅の比熱測定を行い文献と比較して我々の測定精度を確かめた。

その後、 TlV_6S_8 の比熱測定を行った。

2. 測定セルと熱浴

Fig.1 に測定セルを示す。試料は TlV_6S_8 の焼結体を用いた。測定セル各部の熱接触を良くするため、接着剤に銀ペーストを用い、水平な台で十分に圧着を行った。温度計には RuO_2 抵抗温度計 (1mm × 2mm × 0.5mm) を、ヒーターにはストレインゲージ(室温抵抗 350Ω)を用いた。温度計とヒーターのリード線には Nb-Ti 超伝導線を用いた。また、ヒーターのリード線で測定セルを支持した。熱抵抗線には白金線 ($\phi 50 \mu m \times 20mm$ 、純度 99.98%) を用いた。以前は $\phi 20 \mu m$ の白金線を用いていたが、4.2K 付近の温度域での測定の際にリード線に用いている Nb-Ti 線の熱抵抗が小さくなるため、白金線以外からの熱の出入りが起きてしまうことがわかった。この対策として、白金線の径を $50 \mu m$ にし、白金線の熱抵抗をリード線の熱抵抗に対して十分に小さくすることで、この温度域でも白金線が唯一の熱の逃げ道となるようにした。

温度測定には交流ブリッジ(RV-Elektronikka AVS-46)を用い、熱緩和時間の測定には 2 位相ロックインアンプ(SRS SR830)を用いた。

試料は岡山理大 化学科大谷研で作成されたものである。

3. 測定結果

常伝導状態の比熱は $C = \gamma T + \beta T^3$ で表され、転移温度 $T_{c\chi}$ 以上の測定により、格子比熱定数 (β) と電子比熱定数 (γ) が求められる。

Fig.2 に TlV_6S_8 の比熱測定結果を示す。このグラフに示している矢印の温度附近にわずかな比熱の変化が見られた。また比熱測定に用いた試料と同一ロットの試料について磁化率測定を行ったところ、 $T_{c\chi}$ は 2.74K であった。

Fig.3 は縦軸 C/T 、横軸 T^2 のグラフである。 $T_{c\chi}$ 以上の温度の点にフィッティングをかけて算出した β は $34.7 [mJ/mol \cdot K^4]$ 、 γ は $341 [mJ/mol \cdot K^2]$ である。

比熱の測定結果では、超伝導転移に伴う比熱のとびは非常に小さなものであった。しかし、磁化率測定においては転移温度ではつきりとした磁化率の変化が見られた。このことは超伝導転移が、バルクな転移ではなく、擬一次元性の強い超伝導体特有の現象であると考えられる[1]。

参考文献

- [1] Y.Ito, T.Katumi, H.Okamoto, H.Kaneko and Y.Ishihara: J. Phys.: Condens. Matter **16** (2004) 2033-2041

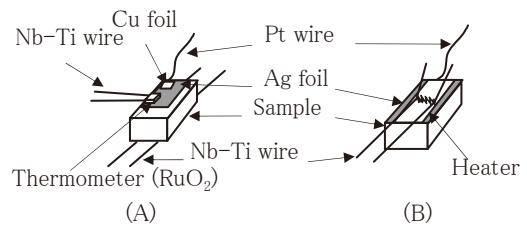


Fig.1 Schematic drawing of a sample cell.
(A) Upper side. (B) Under side.

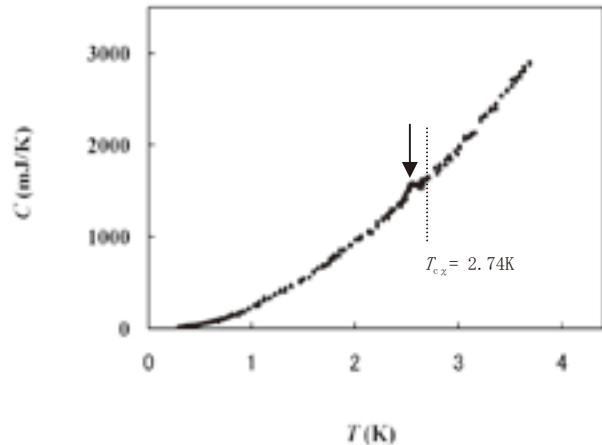


Fig.2 Specific heat of TlV_6S_8 .
 $T_{c\chi}$ is a critical temperature obtained by magnetic susceptibility measurement.

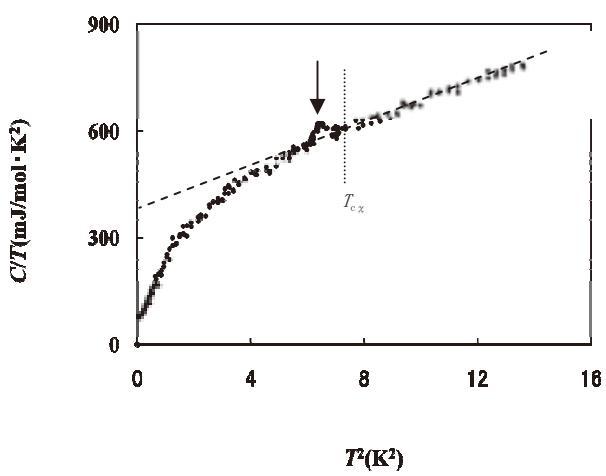


Fig.3 C/T vs. T^2 .
Small shoulder was seen near an arrow.

レーザー核融合用低密度フォーム内における固体水素の充填状況の測定

Characterization of the state of solid hydrogen in the foam used for Fast Ignition Target of Inertial Confinement Fusion

藤村 猛, 中井 光男, 乘松 孝好, 本間 啓史, ヤン ハン, 疋地 宏 (大阪大学レーザーエネルギー学研究センター);
岩本 晃史, 坂上 仁志, 三戸 利行 (核融合科学研究所)

FUJIMURA Takeshi, NAKAI Mitsuo, NORIMATSU Takayoshi, HOMMA Hirofumi, YANG Han, AZECHI Hiroshi (ILE);
IWAMOTO Akifumi, MITO Toshiyuki (NIFS)
E-mail: t-fujimura@ile.osaka-u.ac.jp

要旨

レーザー核融合高速点火用ターゲットに用いられる低密度フォーム素材に充填した固体水素の状況の変化を計測した。水素の液体から固体への相変化の際に生じるボイドの存在を実験的に確認し、フォーム素材中のボイドの時間変化について調べた。

1. 緒言

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(ILE)では高速点火手法がより高い利得を得ることが出来るため、注力して研究しており、燃料のイオン温度が5keV達成を目標としたFIREX-II[1]という計画が進めている[2]。この計画においてはFig.1に示すターゲットが必要である[3]。このターゲットの低密度フォーム層に水素同位体燃料を燃料導入管を用いて充填させ固化させることでターゲットは完成となる。ここで燃料層の重量不均一性は1%以内が要求されている。一般に液体から固体へ相変化する際に、密度が変化する。水素の場合には固体の密度は液体の密度に比べ11%も高く[4]、燃料が追加供給されない限り、密度の逆比にしたがうボイドが燃料層内にできてしまうおそれがある。これらのボイドが偏在することになれば燃料の均一性の観点から望ましくない。そこで平板フォーム層に固体燃料を充填させ、充填状況の可視化を行った。

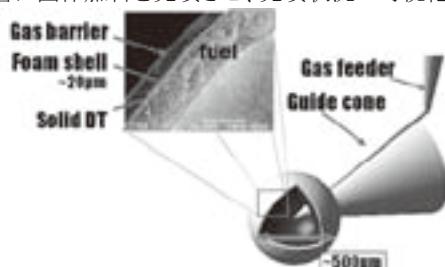


Figure 1. A schematic view of a cryogenic target with a plastic foam shell and a gas feeder.

2. 実験装置

実験装置の概略をFig.2に示す。底面が底辺10mm、高さ0.9mmの三角形に高さ10mmである三角柱の中に、密度100mg/ccのフォーム素材をいたしたものにガスフィーダーを付けサンプルとして使用した。この時フォーム素材にはResorcinol-Formaldehydeの重合物を用いた。冷凍機付きクライオチャンバー[5]内にターゲットをセットし、ガスヘリウムを冷媒として用いた。計測はHeNeレーザーを用いたシェアリング

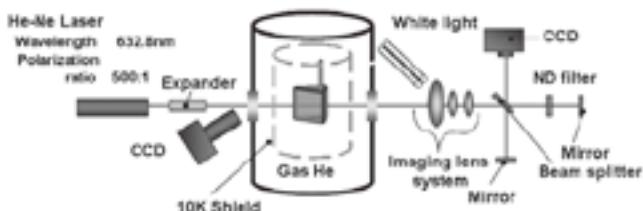


Figure 2. A schematic view of a experimental set-up.

干渉計及び透過計測と、白色光を光源とした望遠レンズつきCCDカメラを用いて行った。

3. 結果と考察

液体水素充填後と、固化直後、固化後30分後、80分後のそれぞれの画像をFig. 3 に示す。液体水素が充填された画像と固化直後の画像を比較すると固化直後の画像において濁りが観測される。この濁った部分と液体の部分の透過光量を比較すると液体部分の方が平均して18%ほど光強度が強かった。固化は下方向から上にむかって進んだ。固化直後から時間をおいてフォーム内部の様子を確認すると、時間の経過と共に下方向へ黒線(Fig. 3 (C)と(D)における矢印)が動いていく様子が観測された。干渉計測像においては何も入っていない状態に比べ液体水素が入っているものの方が、干渉縞の間隔が狭かった。しかし、固化後の画像についてはノイズが多く、比較できなかった。この計測に関しては今後の課題である。

固化後に濁りが生じ、透過光成分が減ったこと理由は水素固化後のフォームにボイドは存在することによる散乱成分の増加であると考えられる。固化が下方向から始まったため、サンプル中においては下方向のほうがより温度が低いと考えられる。黒線の動きは、温度の高い方向へボイドが移動し、より温度の低い方では比較的密度の高い固体水素の層ができるることによって固気界面が生成され、ボイドの集まりに伴い下方向に動いているものだと考えられる。ターゲットにおいては外側が最も冷えているため、時間と温度を調整することで密度の高い均一な燃料層を形成できると考えられる。

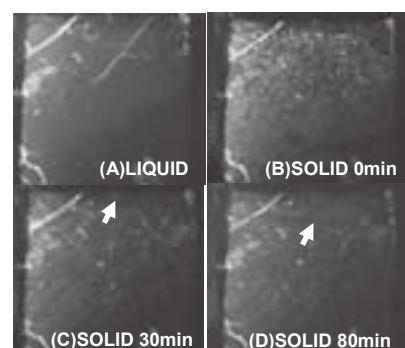


Figure 3. Stages of solidification. Liquid fuel was fed into the foam (A). These pictures shows the void existed in the foam when the fuel was solidified (B). (C) and (D) are 30 min and 80 min after (B) respectively.

参考文献

- [1] H. Azechi and the FIREX project, *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** B267-B275 (2006).
- [2] R. Kodama *et al.*, *Nature* **418**, 933 (2002).
- [3] K. Nagai *et al.*, *Nucl. Fusion* **45** 1277-1283 (2005).
- [4] H. M. Roder *et al.*, *Survey of the properties of the Hydrogen isotopes below their critical temperature* (1973)
- [5] A. Iwamoto *et al.*, *Fusion sci. technol.* **51** 753-757 (2007)

高純度アルミニウムにおける内部摩擦の温度変化測定

Temperature dependence of internal friction in Al

野村 秋之, 六車 美紀, 堀 純也, 藤井 佳子, 畑中 啓作(岡山理大)

NOMURA Akiyuki, MUGURUMA Miki, Hori Jun'ya, FUJII Yoshiko, HATANAKA Keisaku(OUS)
E-mail: s09pm12na@std.ous.ac.jp

1. はじめに

バイブレーティングリード法を用いて、Alの減衰 Γ (内部摩擦)を室温(300K)から液体窒素温度(77K)まで測定した。減衰 Γ とは試料自身の摩擦(内部摩擦)を示す値で、物質の内部構造を論じる場合に重要なものである。バイブレー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減衰 Γ の測定ができる。

2. 試料および測定方法

Table.1に示すように、純度2N(99%)、5N、6Nについて測定を行った。入手先の異なる圧延版と地金(インゴット)から試料を切り出した。試料の形状は、長さ20mm、幅3mm、厚さは0.3mm、0.4mmと0.5mmである。

測定においては、試料の両端に電極(Drive, Detect)を配置する。これにより試料と電極の間でコンデンサーが形成される。Drive電極からの交流電場により試料を電気的に振動させ、Detect電極側の電流変化を読み取り、この変化から共振周波数 f を検出する。

バイブレーティングリード法において、減衰 Γ は次式で求める。

$$\Gamma = \angle \omega / 2$$

ここで、 $\angle \omega$ は半値幅である。半値幅は共振周波数 f における振幅を $1/\sqrt{2}$ 倍した大きさになる周波数の幅である。

3. 測定結果および考察

Fig.1に300Kから77Kにおける減衰 Γ を示す。2Nの試料では、温度が下がるにつれて減衰が単調に低くなっていくが、5N、6Nでは減衰にピークが見られるようになった。また、5Nではインゴットと圧延版で測定をしたがピーク時の温度はほとんど変化がなかった。6Nでは、一度使用した試料(8)を焼きなまし(9)して測定した。熱処理を加えると、減衰の値は大きくなつた。我々はこの減衰のピークをボルドーニー・ピークではないかと考えている。

ボルドーニー・ピークは、塑性変形によって導入された転位が原因となって生じるもので、その特徴として、ピークの位置(温度)は加工度や不純物の存在によってほとんど影響を受けない、不純物の存在がピークの高さ(減衰)を著しく変化させるなどがあげられている。今までの測定では、2Nから5N、6Nと純度を上げるにつれ減衰の値も大きくなつて、インゴットと圧延版にはピークに大きな変化がなかった。しかし、焼きなましをすると転位が消滅してピークの高さが減少すると考えられるが、ピークの位置は高温側にシフトし、ピーク値も上昇した。試料によっては焼きなましによりピーク値が減少するものもあったが、大きくなるものが大半だった。以上のことより、ボルドーニー・ピークと断言することは難しい。

今後、焼きなましの条件を変化させた測定を行い、焼きなましによる効果を明らかにしたい。

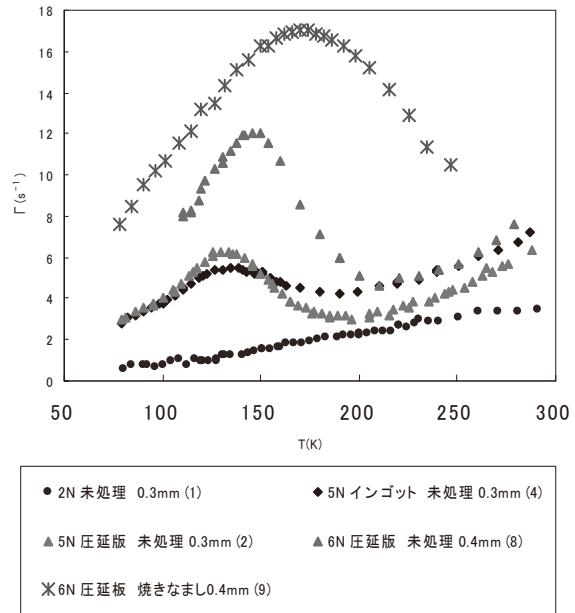


Fig.1 Temperature dependence of attenuation for various Al samples.

材質 純度	厚み [mm]	焼きなまし	ピークにおける値		
			減衰 [s⁻¹]	温度 [K]	共振周波数 [Hz]
(1)圧延版 2N	0.3	—	—	—	—
(2)圧延版 5N	0.3	—	6.23	133	549
(3)圧延版 5N	0.3	400°C(1h)	3.14	130	442
(4)インゴット 5N	0.3	—	5.46	134	715
(5)インゴット 5N	0.3	400°C(1h)	8.67	135	573
(6)インゴット 5N	0.3	400°C(4h)	16.8	160	620
(7)インゴット 5N	0.3	400°C(8h)	7.85	135	524
(8)圧延版 6N	0.4	—	12	146	701
(9)圧延版 6N	0.4	500°C(6h)	17	174	708
(10)圧延版 6N	0.4	—	11.5	176	713
(11)圧延版 6N	0.4	500°C(6h)	13	152	707
(12)圧延版 6N	0.4	500°C(6h)	17.9	155	717

Table.1 Peak of attenuation for various Al samples.

異種核スピンの同時制御

Simultaneous control among dissimilar nuclear spins

藤井宗明(熊本大)
 FUJII Muneaki (Kumamoto university)
 E-mail: fujimune@sci.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

超微細相互作用を利用して核スピンの運動を制御する試みについて述べる。超微細相互作用とは原子核スピン I と電子スピン S との間に働く相互作用 IAS のことである。A は超微細相互作用テンソルである。AS は有効磁場とよばれ、原子核スピン I に対して磁場と同じ働きをする。超微細相互作用は交換相互作用の一種で原子核と電子の波動関数の重なりによって生ずる。物質によればこの有効磁場は数百テスラにも達する。

電子スピン同士にも交換相互作用 J があり磁気整列(強磁性、反強磁性等)の原因となる。原子核スピン同士には双極子相互作用が存在しているが上の二つの相互作用に比べて小さいので通常は無視できる。

物質の磁気転移温度以下では、巨視的な数の電子スピン同士が整列しており、それぞれの電子スピンに原子核スピンが超微細相互作用により結合している。磁気転移温度以下温度が下がると、原子核スピンは有効磁場の方向へ整列を始める。その結果として、A と J を介して、原子核スピン同士が協同運動をする。このことをを利用して異種核スピンを同時に制御することが可能になる。

通常の核磁気共鳴(NMR)においては、外部磁場 H を印可し、 $\omega = \gamma H$ の共鳴周波数で NMR を観測するのであるが、磁気転移温度以下の物質においては外部磁場零で NMR が観測され、異種核スピンの間で情報が交換される。これはオングストロームのレベルで配線された情報処理装置と見ることができる。

2. 電子スピンと核スピンの協同運動

磁気転移温度以下の電子スピン S と原子核スピン I の運動は以下の運動方程式により記述される。

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \left[\mathbf{S} \times \left(\sum_{j=1}^4 \left(-\frac{\mathbf{A}(j)\mathbf{I}(j)}{\hbar} \right) - \lambda(\mathbf{S} \cdot \mathbf{I})\mathbf{I} + \gamma\mathbf{H}_e \right) \right] - \frac{\mathbf{S} - \langle \mathbf{S} \rangle}{T_{1e}}$$

$$\frac{d\mathbf{I}(j)}{dt} = \left[\mathbf{I}(j) \times \left(-\frac{\mathbf{A}(j)\mathbf{S}}{\hbar} \right) \right] (j=1-4)$$

ここに λ は磁気異方性、 T_{1e} は電子の緩和時間を示すパラメーターである。この場合、核種数は 4 である。この方程式を線形化し、振動の固有方程式を解くと固有値と固有ベクトルが得られる。固有ベクトルにより、どの核種がどのように運動しているか表現されている。

3. 具体例

K_2CuF_4 は面内の異方性が小さいとされている 2 次元強磁性体であり、強磁性転移点は 6.25K である。外部磁場零で NMR 実験を行うことにより、NMR モードの転移現象が観測された。これは電子スピンを介して核スピンが超微細相互作用により協同運動を起こすとして説明される。

Fig. 1 に固有値の温度変化を示す。固有値は NMR 周波数を示している。NMR スペクトルの温度変化はこの図と一致し、核スピンの協同運動が示される。

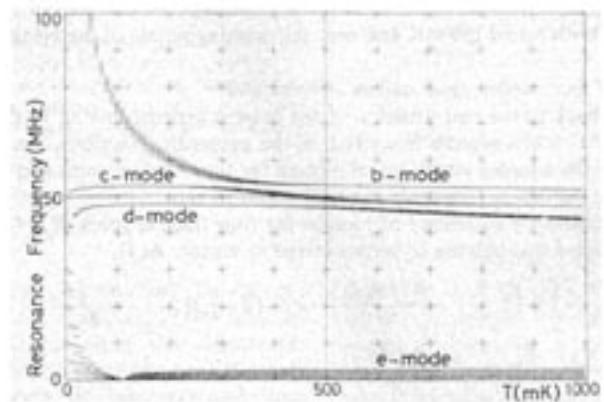


Fig.1 Temperature dependences of NMR frequencies .

下の Table 1 に固有ベクトルの温度変化を示す。この表から、たとえば、100 mK 以下、で 53 MHz のラジオ波をこの物質に印可すれば、I(2)スピンと I(3)スピンを、逆位相で協同運動させていることがわかる。

Temperature range				
	$T < 100$	$100 < T < 350$	$350 < T < 550$	$550 < T$
a-mode	I(1)	I(1)	I(1)	I(1)
b-mode	I(4) - S	I(4) - S	I(2)	I(2)
c-mode	I(2) - I(3)	I(2)	I(4) - S	I(3)
d-mode	I(3) + I(2)	I(3)	I(3)	I(4) - S
e-mode	S	S	S	S

表 1. 主に関連しているスピンの温度変化

Table 1 Temperature dependences of eigen vector.

精密熱侵入量測定装置による断熱二重管の熱侵入

Heat Leak Measurement of Cryogenic Pipes by New Test Bench

杉野 慎, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 山口 作太郎(中部大学); 石黒 康英, 新司 修(JFEスチール)
SUGINO Makoto, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);
 ISHIGURO yasuhide, SHINSHI Osamu (JFE Steel)
 E-mail: te09009@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では高温超伝導体を送電ケーブルに用いた直流超伝導送電システムの実用化に向けて、研究を行っている。直流超伝導送電システムを数百 km 規模の距離で利用したときの効率が従来の銅ケーブルを使用した直流送電システムを上回るために、断熱二重配管での熱侵入量を 0.5 W/m 以下に抑える必要がある。そのために、断熱二重配管の熱輻射シールドの簡素化を図る研究を、縦置き型の熱侵入量測定装置を用いて、1.65m の断熱二重配管で行ってきた。その結果、外管 $150\text{A}(\phi 165.2)$ 、内管 $80\text{A}(\phi 89.1)$ において輻射熱侵入量を 0.5W/m 程度まで低減できることが確認できた[1]。そこで、これらのような低熱量の輻射熱をさらに高精度で測定するために、新たに約 3m の断熱二重配管について実験を行うことができる精密熱侵入量測定装置を設計・製作し[2]、測定を開始した。

2. 測定装置

新たに製作した精密熱侵入量測定装置の概略図を Fig.1 に示す。液面測定部は長さ 300mm 、内径 $\phi 19$ となっており、前装置と同様に液面の時間変化から熱侵入量を測定する。それに加えて蒸発した N_2 ガスの流量を室温で測定することによっても熱侵入量を評価できるようにした。この測定装置の内部には極力、内管へ輻射熱が侵入しないように多層断熱材を使用している。約 3m の被測定管の取り付け部は横向きになっており、このことから以下の 2 点の特徴を有する。

- (1)被測定管の長さを天井高さの制約から逃がすことができ、精度の高い測定が可能である。
 - (2)実用化する際に、必要になると考えられる内管の支持構造からの伝導熱を考慮することができる。
- なお、取り付け部は被測定内管上部に蒸発したガスが溜まらないように 10° の傾斜角で取り付けるようになっている。被測定管として、外管には規格 $200\text{A}(\phi 216.3)$ の鋼管を、内管には $50\text{A}(\phi 60.5)$ の SUS 管を使用した。外管、内管ともに亜鉛メッキによる表面加工が施されている。

3. 熱侵入量測定

被測定管の測定の前に、被測定管以外の部分からの熱侵入量を求める必要がある。そこで、被測定管がない状態で測定した液体窒素液面の時間変化を Fig.2 に示す。Fig.2 から算出した熱侵入量は 0.53W となった。前装置の熱侵入量は 1.2W であったため、熱侵入量は約 $1/2$ に低減した。この結果から、被測定部以外からの影響が小さくなつたため、前装置より高精度な測定が可能である。本講演では、被測定管への輻射熱侵入量の測定結果を合わせて報告する予定である。

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。

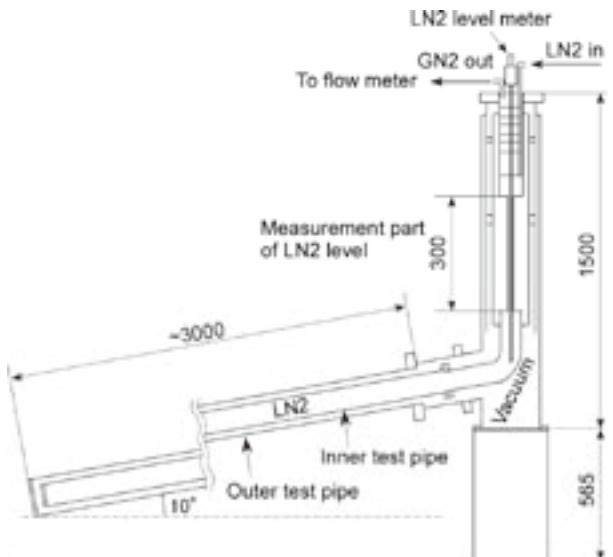


Fig.1 A Schematic Diagram of New Test Bench for Heat Leak Measurement on Cryogenic Pipes.

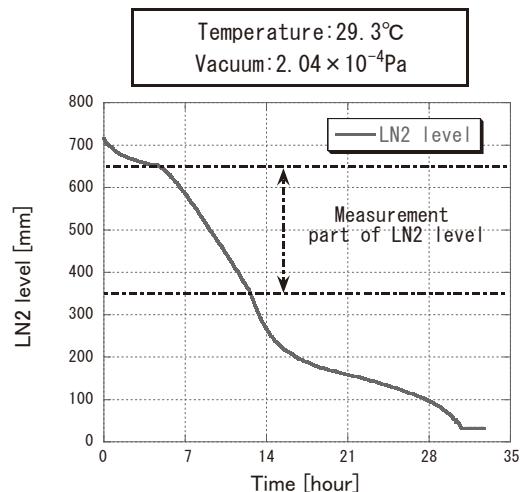


Fig.2 Evaporation time of LN2 on New Test Bench.

参考文献

1. Y. Nasu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.97
2. M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.60

SKS 超伝導電磁石の改造と建設

Remodeling and construction of the SKS superconducting magnet

青木 香苗, 槙田 康博, 岡村 崇弘, 荒岡 修, 飯田 真久, 大畠 洋克, 鈴木 祥仁, 川井 正徳, 近藤 良也, 笠見 勝祐,
春山 富義, 高橋 俊行, 垣口 豊, 白壁 義久, 関本 美知子(KEK)
AOKI Kanae, MAKIDA Yasuhiro, OKAMURA Takahiro, ARAOKA Osamu, IIIDA Masahisa, OHHATA Hirokatsu,
SUZUKI Shoji, KAWAI Masanori, KONDO Yoshinari, KASAMI Katsuyu, HARUYAMA Tomiyoshi,
TAKAHASHI Toshiyuki, KAKIGUCHI Yutaka, SHIRAKABE Yoshihisa, SEKIMOTO Michiko(KEK)
E-mail: kanae.aoki@kek.jp

1. はじめに

SKS は 1991 年に KEK12-GeV PS 北カウンターホール K6 ビームラインに原子核実験用のスペクトロメータとして建設され、2005 年末まで利用されてきた。低温システムとしては、冷却方法として浸漬冷却法をとる扇形の超伝導ダイポールマグネットと、中型のヘリウム冷凍システム (300 W @ 4.5 K) から構成されていた。

この SKS 超伝導電磁石であるが、新たに J-PARC ハドロンホール K1.8 ビームラインに移設するにあたって、冷却システムの改造を行った。その際、浸漬冷却法をとるコイル容器部分はそのまま利用した。具体的には、3.5 W at 4.5 K at 50 Hz の GM-JT 冷凍機を 3 台搭載することによって定常状態を維持するものである。

2008 年の工場における改造、冷却試験を経て、2009 年 2 月に J-PARC ハドロンホール K1.8 ビームラインに再組み立てが完了した。引き続き、配線配管作業、冷却試験、励磁試験が成功裏に終了し、現在定常状態にある。

2. 冷却システムの改造

従来の熱侵入量が 5 W と低いことから、移設に当たっては冷却系の簡易化を進める目的で、従来の中型ヘリウム冷凍機を廃止し、小型冷凍機を組み合わせて冷凍運転を行うこととした。具体的には、

- GM-JT 冷凍機を 3 台搭載することで、定常状態におけるヘリウム液面の維持を行うことにした。また、この GM-JT 冷凍機ポートを低温に維持することが、性能を十分に発揮させる上で必要であるので、新たにポート冷却用の 2 段 GM 冷凍機を採用した。[1]
- これまでの銅の電流リードをヘリウム蒸気で冷却する方法は採れないで、HTC 電流リードを採用し、新たに設けた専用の 1 段 GM 冷凍機の伝導でこれを冷却する。
- 以上の改造は、上部のヘリウム容器が対象となる。従来のヘリウム容器を取り去って新設のヘリウム容器を、変更を行わなかつた下部のコイル容器に連結させた。このコイル容器に関しては、従来より 2 段 GM 冷凍機による輻射シールドを採用しており、引き続き改造後もこの方法を採用する。

以上、改造後は合計で 6 台の小型冷凍機の組み合わせによる冷凍システムとなった。Fig.1 に改造前後の比較を示す。

この冷凍システムでは、室温から 4.3 K までの冷却能力はない。そのため、予冷には液体窒素と液体ヘリウムのデュワーからの液送が必要である。

3. SKS 超伝導電磁石の建設

2008 年 1 月に KEK12-GeV PS 北カウンターホール K6 ビームラインにおいて解体され、取り出された真空容器は、東芝京浜事業所へと運ばれ冷却システムの変更のため上部のヘリウム容器が改造された。

2008 年 12 月に東芝京浜事業所内で室温から 4.3 K までの冷却試験を行い、この冷却システムで定常維持できることを確認した。

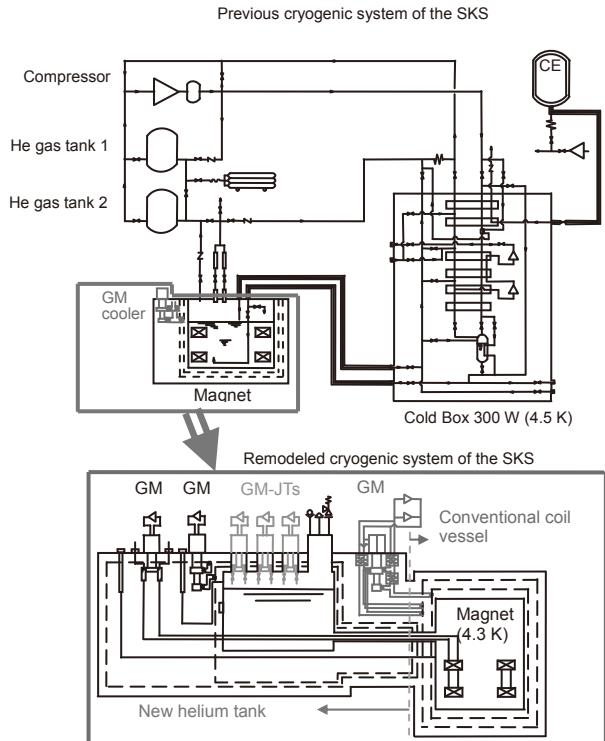


Fig.1 Comparison of cryogenic systems of the SKS

その後、2009 年 1、2 月で J-PARC ハドロンホール K1.8 ビームラインへの再組み立てが行われた。引き続き、配線配管、制御系の建設が行われた。6 台の小型冷凍機の圧縮機は、全てハドロンホール外の K1.8 測定機械棟におかれ、コールドヘッドまでは 40m のフレキシブルホースで結ばれている。

4. 冷却試験

2009 年 8 月から 10 月初めに掛けて、室温から 4.3 K までの冷却をおこなった。この冷却を要した液体窒素は 2500 L、液体ヘリウムは 10000 L である。

ヘリウム容器の液溜め後、GM-JT 冷凍機による定常状態の維持を確認した。ヘリウム容器内の圧力は、絶対圧で 113 kPa (ヒーターは OFF)、この時の 3 台の GM-JT 冷凍機凝縮部の温度は、4.35 K、4.46 K、4.35 K であった。

5. 励磁試験

定格電流値 400 A での連続通電で、HTC カレントリード部の温度上昇がどこまで上がるかを確認した。約 5 時間で、41 K まで上昇し飽和した。HTC 部の温度としては、安全圏内であることが確認された。

参考文献

1. K. Aoki, et al.: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 53A (2008) p.351

短距離送電用高温超電導ケーブルのための液体窒素の自然循環技術

Cooling of HTS cable for short distance power transmission by naturally circulated liquid nitrogen

IVANOV Yury (Chubu Univ.); RADOVINSKY Alexey, ZHUKOVSKY Alexander (MIT); WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

The rapid progress in the field of high temperature superconducting (HTS) material manufacturing technologies and successful realization of several pilot projects of superconducting power transmission (HTS PT) lines have created the background of commercial application of HTS PT. However, one of the difficult problems remains is cooling of HTS cable. Generally, the liquid nitrogen (LN2) is utilized for this purpose, and the pumps are used to circulate LN2. Unfortunately, the pump power is an additional heat load for the cryogenic system. In order to avoid this problem a thermal siphon can be used to circulate LN2. In recent papers [1-3] we have analyzed inclined thermosyphon for cooling cables are built in mountainous terrain. Now, we study the effectiveness and reliability of knee siphon as a part of electrical energy delivery system to plants and Internet Data Centers (iDC).

2. Model

The thermosiphon circulation loop is comprised of two short vertical segments and two long horizontal ones. The natural circulation is caused by the difference of LN2 density in vertical pipes. A cooled HTS cables are placed inside horizontal pipes. Calculations were performed for the DC power transmission line which is much more efficient due to absence of AC losses. Cable O.D. is 40 mm while pipe I.D. is 80 mm. Distributed heat load is assumed to be 1 W/m, and each current lead creates additional 100 W point heat load.

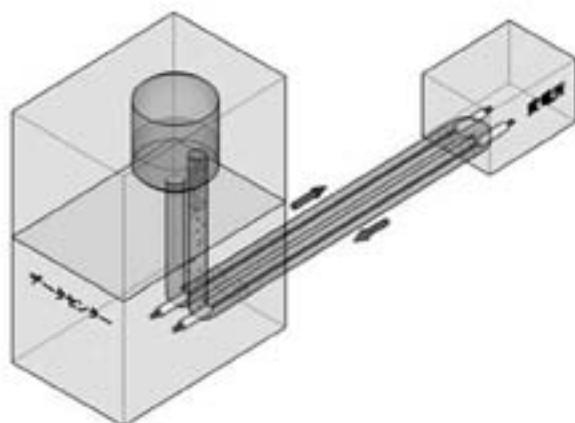


Fig.1 Thermosiphon for cooling of HTS cables.

3. Analysis and Results

The system of design differential equations was solved numerically by the Runge-Kutta method. Apparatus with the cooling cryopipe length of 200–500 m, which is important for in-plant and Internet Data Center applications were analysed. It was found that thermosiphon can exhibit either one- or two-phase flow operating regime depending on the initial conditions. In the case of two-phase regime boiling occurs just before outlet. To determine the boundaries of regimes key parameters, namely mass flow (\dot{m}) and vapor quality (χ)

were calculated as functions of horizontal segment length, pressure and subcooling degree.

Design equations

$$\begin{cases} \dot{m}C_{pl}\frac{dT}{dx} = q(x) \\ \frac{dp}{dx} = \rho_l g \sin \beta - \frac{2fG^2}{\rho_l D_h} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Before} \\ \text{boiling} \\ \text{point} \end{array}$$

$$\begin{cases} \dot{m}[(1-\chi)C_{pl} + \chi C_{pg}]\frac{dT}{dx} + r\dot{m}\frac{d\chi}{dx} = -q(x) \\ \frac{dp}{dx} = \left(\frac{\chi}{\rho_g} + \frac{1-\chi}{\rho_l}\right)^{-1} g \sin \beta + \frac{2fG^2}{\rho_l D_h} \frac{1 + (\rho_l/\rho_g - 1)\chi}{[1 + (\mu_l/\mu_g - 1)\chi]^{0.25}} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{After} \\ \text{boiling} \\ \text{point} \end{array}$$

$$T = T_{sat}(p)$$

It was found that in one-phase ($\chi=0$) mode \dot{m} is almost everywhere constant, being in the range 0.176–0.199 kg/s. The transition in two-phase mode occurs smoothly, without jerk in loading. Both \dot{m} and χ growth almost linear with cable length. One-phase mode is more technologically advanced because there is not necessary to dispose of gaseous nitrogen. The boiling can be efficiently suppressed by subcooling or pressurization. For example, it is enough to cool down LN2 by 4 K to keep one-phase flow in 500-m apparatus.

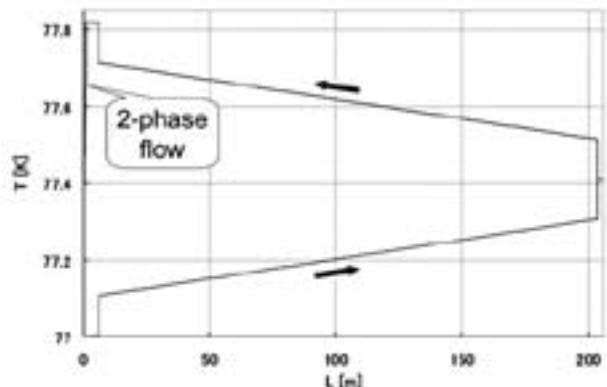


Fig.2 Typical temperature profile of LN2 in cryopipes.

4. Conclusion

It was shown that the simple thermal siphon can be used for effective cooling of 500-meter-class HTS cables. The technologically advanced one-phase operating mode can be easily achieved within all operation range by medium subcooling.

References

1. A. Radovinsky, A. Zhukovsky: (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022106-1
2. A. Radovinsky, A. Zhukovsky: (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022806-1
3. Yu. Ivanov, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p. 82

超伝導マグネット冷却用自励振動式ヒートパイプの低温動作特性

Cryogenic characteristics of oscillating heat pipes for effective cooling of superconducting magnets

夏目 恭平(総研大); 三戸 利行, 柳 長門, 田村 仁(NIFS); 玉田 勉, 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)
 NATSUME Kyohei (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS); TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki and NAGAYA Shigeo (CEPCO)

E-mail: Natsume@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

近年、技術的な進歩により高温超伝導コイルの開発、使用が可能になり、その高性能化が盛んに研究されている。しかし、高温超伝導コイルで想定されている動作温度領域では、従来の低温超伝導コイルと比べて、コイル構成材料の熱拡散率が小さいため、コイル内部に局所的に発生した熱を取り出す事は容易ではない。本研究では新しい冷却技術として、低温動作の自励振動式ヒートパイプ(oscillating heat pipes: OHP)を開発し、超伝導コイル内部に導入することによって、効率良い冷却方式の確立を目指す。

2. 低温動作自励振動式ヒートパイプ

超伝導コイル内部で発生した熱は、コイルのクエンチや導体の超伝導特性の劣化を引き起こす原因となり得ることから、速やかにコイル外部に輸送、冷却する必要がある。

一般にOHPは、加熱部と冷却部の間で一本の細管を何回も折り曲げた構造をしている。その配管内部で蒸気圧曲線上で気液2相混合の状態になるように、適当な量の作動流体を封入する。これを加熱すると加熱部では液が蒸発し、冷却部では凝縮する。その相転移に伴う圧力変化により振動流が形成され熱が輸送される。

3. 実験方法

実際にOHPを製作し[1]、その動作特性を調べた。Fig. 1に実験装置の概略図を示す。OHPの加熱部と冷却部は、温度計の付いた銅のプレートを介して、それぞれヒーターと冷凍機に接続され、真空クライオスタット内に設置される。OHP配管内の圧力変動は室温部にある圧力計により観測される。ヒーターに入熱することで自励振動を起こし、冷却部と加熱部の温度差を測定することにより、その実効的な熱伝導度を見積もった。実験パラメーターは、作動流体の種類(N_2 , Ne , H_2)、その封入量、ヒーター入熱量、冷却部温度、OHP設置方向、OHP配管径である。

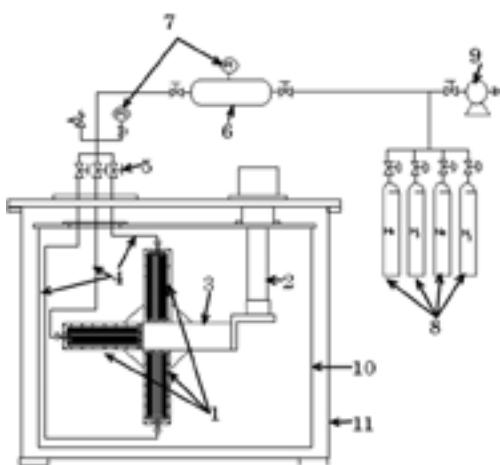


Fig. 1 Experimental set-up for cryogenic OHP, where 1: cryogenic OHP, 2: GM cryocooler, 3: Cu bar, 4: filling pipe, 5: isolation valves, 6: buffer tank, 7: pressure gauge, 8: gas cylinders (He , H_2 , Ne , N_2), 9: vacuum pump, 10: radiation shield, 11: cryostat.

4. 実験結果と考察

まず内径 0.78 mm の配管を用いて OHP を製作し、下部が加熱部、上部が冷却部となるような配置で実験を行った。動作温度範囲は、作動流体の種類によって N_2 で 67 - 90 [K]、 Ne で 26 - 34 [K]、 H_2 で 17 - 25 [K] となった。

実験結果の例として Fig. 2 を示す。これは作動流体として Ne を封入した場合の、ヒーター入熱量に対する冷却部と加熱部の温度差を表している。この測定結果から見積もられる OHP の内部流体の実効的な熱伝導度は 1,000 - 8,000 [W/m*K] に達した (Fig. 3)。他の作動流体についても同様な実験を行い、実効的な熱伝導度はそれぞれ 5,000 - 18,000 [W/m*K] (N_2)、500 - 3,000 [W/m*K] (H_2) となった。

これらの数値は、高純度金属の低温での値と同程度か、より大きい(例えば残留抵抗比(RRR)が 100 の銅の熱伝導度は、温度 20Kにおいて 2,000 [W/m*K] 程度である)。従って、低温動作の OHP を超伝導コイルの冷却へ応用することによって、その冷却性能を向上させることができると考えられる。

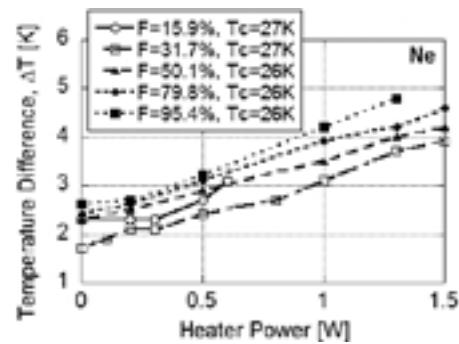


Fig. 2 Temperature gradient between heating part and the cooling part of the OHP.

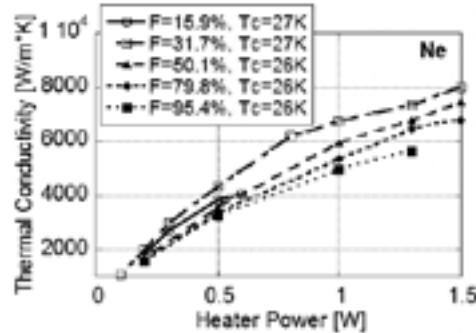


Fig. 3 Equivalent thermal conductivity of the OHP

本研究は、核融合科学研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、科研費(21360456)の助成を受けたものである。

参考文献

- 三戸利行他、「自励振動式ヒートパイプを用いた超伝導マグネットの高効率冷却技術の開発」2009 年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集, 2c-ao8.

製法の異なる Nb₃Sn 超電導線の事前曲げ効果の 3 次元歪解析による検討

Study on prebending effect of Nb₃Sn composite wires with different processes by three directional FEM analyses

延原正彦, 村瀬暁, 七戸希(岡山大), 淡路智, 西島元, 渡辺和雄(東北大金研)

M. Nobuhara, S. Murase, N. Nanato (Okayama University), S. Awaji, G. Nishijima,

K. Watanabe (Tohoku University)

E-mail:masahiko.n@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. まえがき

超電導応用で広く利用される Nb₃Sn 複合超電導線は、製作時に必要な熱処理と使用する極低温の温度差によって残留歪が線材に生じ、Nb₃Sn の臨界電流密度 J_c の低下の原因となる。また、室温でプーリーを通して事前曲げ歪を加えると J_c が向上することが知られている[1]。今までブロンズ法によって作製される超電導線に関して、事前曲げ歪効果の検討を 3 次元歪解析で明らかにしてきた[2]。本研究ではブロンズ法で作製される超電導線に加えて、RRP(restacked rod process)で作製される超電導線について 3 次元歪に及ぼす影響を FEM 解析を用いて検討した。

2. 解析モデルと解析方法

Fig. 1 に FEM 解析に用いたブロンズ法で作製される (a) 外部補強、(b) 内部補強、(c) 補強材なしの 3 種類のモデルと RRP で作製される (d) チューブ型のモデル断面図を示す。次のような流れで解析を行った。948 K の Nb₃Sn 生成熱処理温度から室温まで冷却し、その後事前曲げ歪を 0.8% で 90° ずつずらして 5 回繰り返して、4.2 K まで冷却する。その後、フープ応力に対応する引張り歪を印加する。そして Nb₃Sn フィラメント部に印加する 3 次元歪(von Mises 歪)の平均値を評価した。

3. 解析結果と考察

Fig. 2 にブロンズ法による外部補強 Nb₃Sn 超電導線(a)の印加歪-3 次元歪の特性を示す。事前曲げを加えると 3 次元歪の最小値の減少が見られ、3 次元歪が最小値をとる印加歪の値が低歪側にシフトしている。ブロンズ法 Nb₃Sn 超電導線は 3 種類とも事前曲げを加えることで上記のような特性を示した。

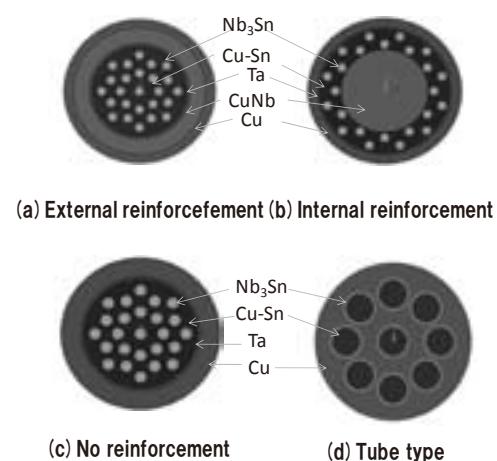


Fig. 1 Cross sectional views of four Nb₃Sn wire models

次に Fig. 3 に RRP によって作製されるチューブ型の超電導線の印加歪-3 次元歪特性を示す。事前曲げを加えると印加歪 0% では若干事前曲げ無しの値より低い 3 次元歪を示しているが、印加歪を与えると 3 次元歪が事前曲げ無しの値より大きくなっている。このことからチューブ型の線材では事前曲げによって特性の向上は図れないのではないかと考えられる。また、Nb₃Sn 部の歪分布から 3 次元歪に影響を与えていた歪について考察も行った。

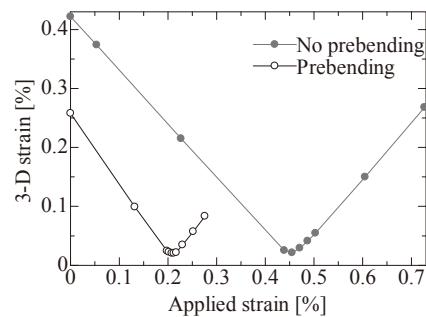


Fig. 2 Characteristics of 3-D strain vs. applied strain in bronze-processed /Nb₃Sn (external reinforcement (a)) for bending strains

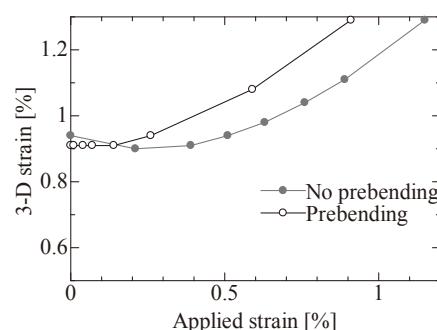


Fig. 3 Characteristics of 3-D strain vs. applied strain in RRP Nb₃Sn (tube type) for bending strains

謝辞: 本研究を遂行するにあたり東北大額金属材料研究所計算材料科学センターの SR11000 スーパーコンピューティングシステムを利用しました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- P. Badica et al : Supercond. Sci. Technol., Vol. 20, (2007) pp. 273-280
- S. Murase et al : IEEE Trans. Supercond., Vol. 17(2007)2676.

クラッドチップ押出し法による Nb-Zr 合金線材の作製法とその超伝導特性

Fabrication Process of Nb-Zr Alloy Wires by Clad-Chip Extrusion Method and Their Superconducting Properties

白石 剛(院), 三田一也(学), 斎藤 榮(足利工大); 竹内 孝夫 (NIMS)

SHIRAI SHI Go, MITA Kazuya, SAITO Sakae(AIT) ; TAKEUCHI Takao (NIMS)

1. はじめに

合金系の超伝導材料である Nb-Zr は現在実用化されている Nb-Ti 合金と同等の特性を持っており、また、Nb-Ti 合金よりも早く発見されたこともあって伝導線材として実用化も検討された。しかし、安定化銅との複合加工性が悪いため実用化されなかった。このような欠点は、通常の合金線材作製法(溶解鋳造→塑性加工)に対してのことであるが、溶融過程を経ない作製法があるならば状況は変わる可能性がある。そこで、本研究では Nb-Zr 合金超伝導線材を従来の作製法とは全く異なる溶融過程を経ないプロセスで作製することを目的とした。本研究で検討したプロセスはクラッド・チップ押出し法(CCE 法)¹⁾で、それにより得られた 4 種類の Nb-Zr 合金線材の超伝導特性の評価も行った。

2. 実験方法

実験工程の概略図を Fig.1 に示す。この工程順に実験方法を述べると以下の通りである。

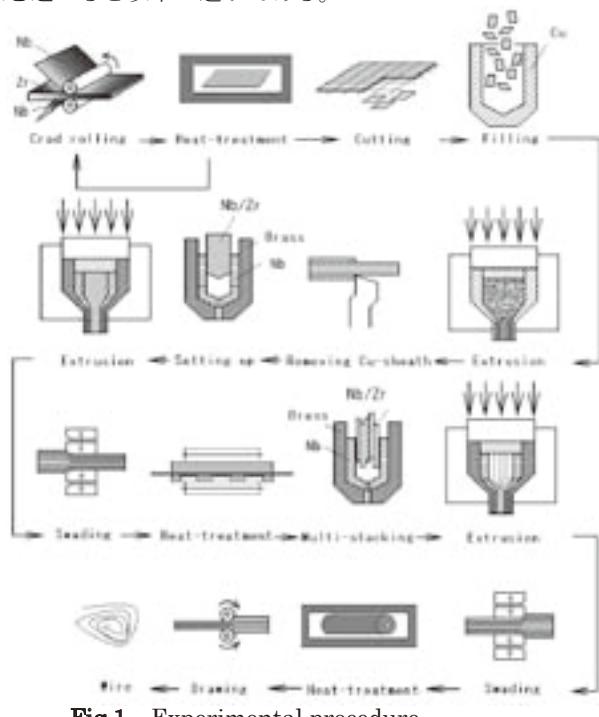


Fig.1 Experimental procedure

Nb 板を折り曲げ、その間に Zr 板を挟みクラッド圧延と焼鈍(真空度 5×10^{-4} Torr 程度で、850°Cで 1 h)を繰り返し行い(1 パス・1 ヒート)、Nb/Zr/Nb の三層構造の積層薄板材(最終的な厚さ約 0.4 mm)を作製した。得られた三層薄板材を約 4~7 mm 角に細片化し、純銅容器に充填した後、押し出し比 2.5 で冷間押出し加工を行った。押出された棒材の被覆銅を旋盤により切削除去し、内部の複合体棒を取り出した。それを Nb 容器で被覆した後、丹銅容器に充填した。その後、押し出し比 5 で再押出しを行った。得られた Nb-Zr 複合体棒をロータリースエージ加工によ

り ϕ 3.8 mmまで加工した。得られた複合体線の被覆銅を濃硝酸で除去し、長さ 40 mm程度に切り揃え、Nb 容器に収束充填し、さらに丹銅容器に充填した後、押し出し比 5 で冷間押出し加工を行った。得られた複合体棒をロータリースエージ加工と線引き加工により ϕ 1 mm程度まで加工(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°Cで 1 h)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た後、真空中で合金化(固相拡散)熱処理を行ない Nb-Zr 合金線材を作製した。

得られた各線材に対して標準的な四端子法を用いて、臨界電流(Ic)、臨界温度(Tc)を測定し超伝導特性の評価を行った。

3. 結果

本研究で得られたクラッド材断面を Fig.2 右部に示す。Fig.2 左部は本研究以前の方法(熱処理なしの圧延)である。両者を比較すると、本研究の検討(1 パス・1 ヒート処理の圧延)の効果がわかる。即ち、断面の積層状態は焼鈍処理せずにクラッド圧延したときに比べ飛躍的に均一な塑性流動になった。CCE 法では構成金属の層厚比で化学組成を制御するので、Fig.2 右部のような積層薄板が要

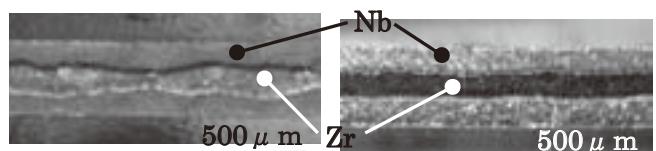


Fig.2 Cross-section of Nb-Zr clad-rolled sheet

求される。

出発材料である素材の厚さを変え Fig.1 の CCE 法により 4 種類の化学組成(Nb-13.6%Zr, Nb-28%Zr, Nb-32%Zr, Nb-40%Zr)の線材(ϕ 約 1.0 mm、長さ 6 m程度)を作製することができた。最終的に得られた、本研究での線材における横断面と縦断面の一例を Fig.3 に示す。

作製した線材の Jc-B 特性は従来の手法による線材に比べ低い値を示した。一方、Tc 特性は一般的な作製方法で作られた Nb-Zr 線材とほぼ同等の値(Nb-13.6~28 at%Zr, で 10.9 K, Nb-32~40 at%Zr で 10.8 K)を示した。

今後の課題として、化学組成の異なる線材の作製と熱処理条件の最適化による Jc 特性の向上が挙げられる。

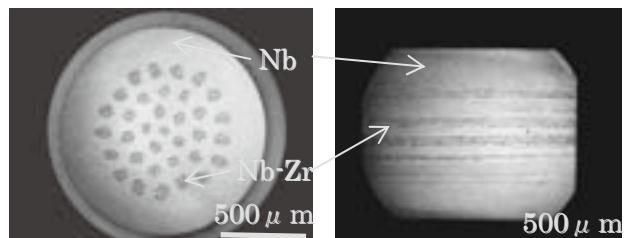


Fig.3 Cross section of Nb-Zr multifilamentary wire

参考文献

1) 斎藤 榮、他:日本金属学会誌、53巻4号(1989)pp.458-463.

CCE 法による Nb-Ti 合金超伝導線材の作製

Fabrication of Nb-Ti Alloy Wire by CCE-Method

齋藤 榮, 小瀬雅穂(院)(足利工大); 竹内 孝夫 (NIMS)

SAITO Sakae, OSONO Masatoshi (AIT); TAKEUCHI Takao (NIMS)

1. はじめに

Nb-Ti 合金は現在実用化されている超伝導線材の殆どを占める。それは特性と製造法が信頼され、かつ、確立されているからである。この超伝導線材は延性を有する合金であるので、従来の合金製造方法(溶製された鋳塊を塑性加工する方法)が適用される。線材化後は塑性ひずみの導入や α -Ti を析出させる熱処理などで高磁界特性を向上させる。当然のことながら、このような処理はすべて溶解鋳造された Nb-Ti 合金を前提とする。

全く観点を変えて溶融過程を含まない Nb-Ti 合金の線材化プロセスを想定すると、高磁界特性向上の手法は異なってくる。それを検討することにより新規な知見へのブレークスルーの可能性も考えられる。そこで本研究では溶融工程を含まない合金線材の作製法である CCE 法¹⁾により Nb-Ti 合金の線材化プロセスを検討した。

2. 実験方法

実験工程の概略図を Fig.1 に示す。

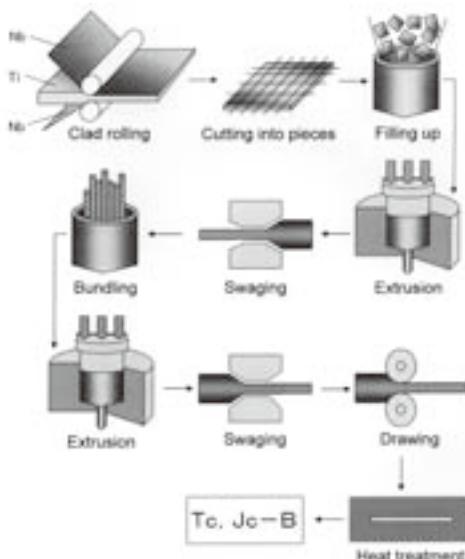


Fig.1 Experimental procedure

Nb 板を折り曲げ、その間に Ti 板を挟みクラッド圧延し、Nb/Zr/Nb の三層構造の積層薄板材(最終的な厚さ約 0.4 mm)を作製した。得られた三層薄板材を約 4~7 mm 角に細片化し、純銅容器に充填した後、押し出し比 2.5 で冷間押し出し加工を行った。押出された棒材の被覆銅を旋盤により切削除去し、内部の複合体棒を取り出した。それを Nb 容器で被覆し、丹銅容器に充填した。その後、押し出し比 5 で再押し出しを行った。得られた Nb-Ti 複合体棒をロータリースエージ加工により $\phi 3.8$ mm まで加工した。得られた複合体線の被覆銅を濃硝酸で除去し、長さ 40 mm 程度に切り揃え、Nb 容器に収束充填し、さらに丹銅容器に充填したビレットを押し出し比 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加工と線引き加工により $\phi 1$ mm 程度まで加工(線材化)した。なお、各工程途中で加工性改善のため焼純処理(800°C で 1 h)を行った。最終的に得られた前駆体線材を真空中で合金化(固相

拡散) 热処理を行ない Nb-Ti 合金線材を作製した。得られた各線材に対して標準的な四端子法を用いて、臨界電流(I_c)、臨界温度(T_c)を測定し超伝導特性の評価を行った。

3. 結果

CCE 法ではクラッド圧延時の素材板厚の比で化学組成を制御する。本研究では出発材料である純 Nb と純 Ti の初期板厚比の組合せを変え、3 種類の化学組成(Nb-32%Ti, Nb-44%Ti, Nb-69%Ti)の線材(直径 ϕ 約 1.0 mm、長さ約 10 m)を作製することができた。最終的に得られた、本研究での線材における横断面と縦断面の一例を Fig.2 に示す。

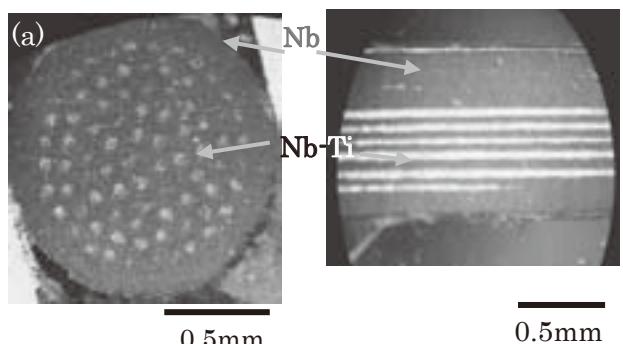


Fig.2 Cross section of the wire;
(a) transverse direction, (b) longitudinal

超伝導特性として、臨界温度(T_c)は、従来の手法で作製された Nb-Ti 合金線材と同様の 10K(Nb-44at%Ti 線材での最高値)であった。

臨界電流密度特性の一例として、Fig.3 に Nb-69at%Ti 線材の場合を示す。図中の種々の記号は熱処理条件を示すもので、CCE 法では固相拡散により合金化させるため、 J_c -B 特性は熱処理により大きく変化する。これに関する詳細な検討は現在進行中である。

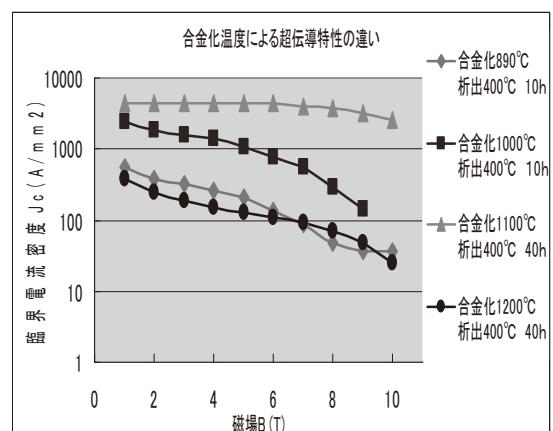


Fig.3 J_c vs B curves of Nb-Ti wires

参考文献

1)齋藤、他:日本金属学会誌、53巻4号(1989)pp.458-463.

高強度 Nb₃Sn 摲線の歪み解析モデル

Analytical Model on Strains of Strengthened Nb₃Sn Cable

三好 一富 (古河電工)
 MIYOSHI Kazutomi (Furukawa Electric)
 E-mail: miyoshi.kazutomi@furukawa.co.jp

1. はじめに

超電導磁石の高磁界化、大口径化によって増大する線材への電磁力に対応するために、各種高強度 Nb₃Sn 線材の開発が進められている。その中で、東北大学と古河電工のグループは、CuNb を強化材とした高強度 Nb₃Sn 線材の開発を行っており、さらに高強度化を生かしたリアクト・アンド・ワインド方式の磁石製造検討を進めて来た[1]。この過程で事前曲げ歪み効果が発見され、この効果を活用した撲線を磁石へ適用することが検討されている[2]。

本報告では、リアクト済み Nb₃Sn 素線の撲線を用いた磁石の製造時および運転時の電磁力による歪み(ε)の線材 I_c への影響を検討することを目的として、素線の撲線時における歪みと、その撲線の巻線時における ε について、解析的に計算するモデルを検討し、 I_c への影響について過去の実験データとの比較を行った。

2. 歪みの解析モデル

撲線構造は、東北大で実施した実験結果[3]との比較のために、3ヶ撲りと7ヶ撲りの2つのケースとした。Fig.1に撲線の断面構造を示す。 ε の計算は、撲線および巻線時の素線の曲率半径 ρ を元にして、幾何学的に求めた。具体的には、撲線時について素線のスパイラル曲げの ε を求める、磁石の巻線時の ε については、撲線を半径 r_0 曲げた際に素線が撲線内部で相互にスライドするモデル(自由スライドモデル)と、素線の一部が固定したモデル(固定モデル)について検討した。Fig.2に撲線の曲げにおける素線の座標系を示す。素線を撲り合わせた時の ε は、素線の、直徑 d とピッチ P とすると、

$$\varepsilon = \frac{d}{2\rho} \quad , \quad \rho = r \cdot \left(1 + \left(\frac{P}{2\pi r} \right)^2 \right)$$

また、自由スライドモデルの ρ は、素線のスパイラルの中立軸半径を r として下式で表される。

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{1}{k^4} \left(r^2 \left(1 + u^2 \left(4 + (u^2 - 2) \cos^2 \vartheta \right) \right) + 2u^2 \left(1 + u^2 \right) r_0 r \cos \vartheta + u^4 r_0^2 \right)$$

$$k = \sqrt{r^2 + \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2} \quad , \quad u = \frac{P}{2\pi r_0}$$

もう一つの固定モデルは、下式で表される。

$$\varepsilon = \frac{r}{r_0} \sin \vartheta \cos^2 \eta \left(1 + \frac{2r}{r_0} \sin \vartheta \sin^2 \eta \right)$$

3. 解析モデル計算結果

計算で仮定した高強度 Nb₃Sn 素線の諸元は、Cu-20%Nb で内部補強され事前曲げ歪み 0.8%印加した素線であって、 $d=0.6\text{mm}$, $I_c=112\text{A}/10\text{T}$ とした。この素線を3本および7本用いた撲線の P に対する ε の計算例として、 ε を1%以内にとるには、3本撲りでは P が 21mm 以上で、7本撲りでは P が 27mm 以上必要となることが分かる。ここで実験との比較のために $P=40\text{mm}$ の撲線を $r_0=131\text{mm}$ で曲げた時の ε の自由スライドモデルについて計算すると、撲り合わせによって ε は 3 本撲りで 0.26%, 7 本撲りで 0.44%となり、撲線を r_0 で曲げると ε の最大値はそれぞれ 0.46%と 0.63%となった。

4. 実験結果との比較

$\varepsilon - I_c$ の実験結果[4]に基づいて、上で計算された自由スライドモデルによる ε を I_c に換算すると、撲線後の I_c で規格化して、3本撲線の曲げによる $\varepsilon=0.46\%$ の時に I_c の 0.82 となり、7本撲線の $\varepsilon=0.63\%$ の時に 0.60 となった。これに対して実験結果で通電方向が撲線の圧縮方向において I_c は、3本撲線で 0.85, 7本撲線で 0.59 であることから、計算値とほぼ一致することが分かる。一方、固定モデルでは ε が数%の大きさになることから、実験結果と合わなかった。

このことから、Nb₃Sn 撲線の巻線時の歪みは、自由スライドモデルで解析することが可能であって、巻線において撲線内で素線がスライドすると考えられる。

5. まとめ

本報告では、素線の撲線時における歪みと、その撲線の巻線時における歪みについて、解析的に計算するモデルを検討し、撲り合わせ時にはスパイラル歪み計算モデル、巻線時は自由スライドモデルを提案した。そして歪みの I_c への影響について過去の実験データと比較して、これらモデルの有効性を議論した。

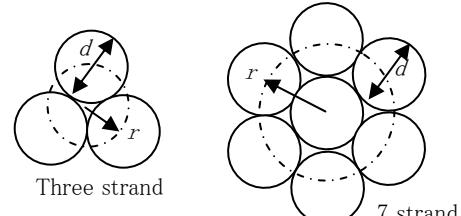


Fig.1 Cross sectional view of cables

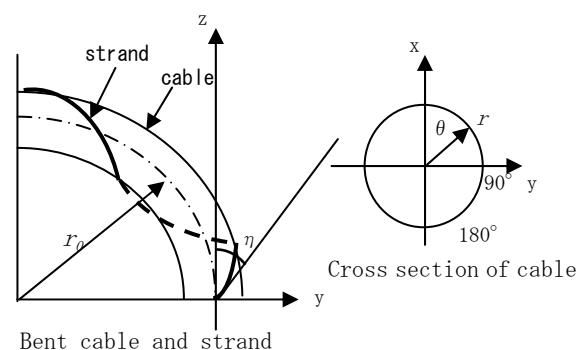


Fig.2 Coordinate of strand and cable

参考文献

1. H. Sakamoto, et al.: IEEE trans. on Appl. Supercond., Vol. 12 (2002) p.1067
2. H. Tsubouchi, et al.: IEEE trans. on Appl. Supercond., Vol. 18 (2008) p.1018
3. G. Nishijima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.47
4. H. Oguro, et al.: IEEE trans. on Appl. Supercond., Vol. 18 (2008) p.1047

MgB₂ 超電導体における希土類元素添加効果

Effect of rare earth doping on MgB₂ superconductor

菊池 吉展, 小岩 慶祐, 基卦川 尚子

KIKUCHI Yoshinobu, KOIWA Keisuke, KIKEGAWA Takako

(Ichinoseki National College of Technology)

E-mail: takakokikegawa@yahoo.co.jp

1. はじめに

MgB₂は超電導転移温度 $T_c=39K$ を持つ金属超電導体であり、酸化物超電導体と比較して異方性が低く、実用化に向けて様々な研究が行なわれている。最近、N. Ojha らによつて、Eu 添加により MgB₂の臨界電流密度特性が大きく向上することが報告された[1]。本研究では、線材化を念頭に金属シース管を用いた希土類添加 MgB₂ 超電導体の作製を試みた。添加希土類元素として、不可逆磁場を向上させるという報告のある Eu とそれより一つだけ原子番号が小さい Sm を選んだ。

2. 実験方法

Eu、Sm を添加した試料 ($Mg_{1-x}Eu_xB_2$, $Mg_{1-x}Sm_xB_2$) は、種結晶を使用した PICT(Powder-In-Closed-Tube) 加圧拡散法[2]を用いて作製した。出発材料として Mg 粉末(99.9% 180 μm)、B 粉末(99% 45 μm)、MgB₂ 粉末(99%)を使用し、添加物として Eu₂O₃、Sm を用いた。Eu₂O₃ 添加では配合比を 1.2-x:2: x/2:0.5(Mg:B:Eu₂O₃):MgB₂ x=0.02, x=0.05)、Sm 添加では配合比を 1.2-x:2:x:0.5(Mg:B:Eu₂O₃):MgB₂ x=0.02, x=0.05)のモル比に設定した。シース管として、内径 6mm、外形 8mm の SUS316 を使用し、管壁と試料の反応を防ぐために、管の内側に Mo シートを巻いた。MgB₂ を種結晶としてシース管の中央に詰め、それを挟むように両脇から予め混合した原料粉末を入れた後、管を加圧し、両端を TIG 溶接で封じた(図 1 参照)。SUS 管封入した試料をそのまま電気炉に入れ、850°Cで 24h 加熱して反応させた。

試料の T_c は直流 4 端子法により電気抵抗を 20K から常温まで測定することで求めた。また X 線回折により成分分析を行つた。

3. 結果と考察

電気抵抗測定から得られた転移温度(超電導転移が始まる温度)は、我々が MgH₂ を原料として作製した無添加 MgB₂ の 39K に対して、Sm2~5% 添加で 38.5~38K に Eu5% 添加で 37K に低下した。また、 T_c 近傍の常伝導状態の電気抵抗は、無添加 MgB₂ と Sm 添加試料で 10 $\mu \Omega cm$ 以下であるのに對して、Eu 添加では、200 $\mu \Omega cm$ にも達した。

図2と3に、それぞれ、Sm5%と Eu5% 添加試料の X 線回折のパターンを示す。Sm 添加では、2 $\theta = 30^\circ$ と 50° の辺りに SmB₆ のピークが確認できる。42° 近傍のピークは、MgB₂ のピークと重なつて区別できない。他に、MgO のピークも認められる。Eu 添加では、EuB₆ と MgB₂、MgO で同定できないピークが多数観測され、不純物が多く存在していることを示しており、電気抵抗率が大きくなつたことと対応している。

常磁性(RE)B₆ 相の析出は、磁束ピンニングに寄与すると考えられ、MgB₂ の臨界電流密度の高磁場特性の向上に有効な要素であるが、簡便な PICT 法による作製で、(RE)B₆ 相を含んだ MgB₂ 超電導体を作製することが出来た。特に Sm 添加では、不純物相の少ない試料の作製に成功した。

参考文献

- [1] Y. Katsumata et. al., Physica C 469(2009) 846-851
- [2] B. Ni, et. al., Physica C 468(2008) 1443-1446



Fig.1 Mixture of starting materials packed in a SUS316 pipe.

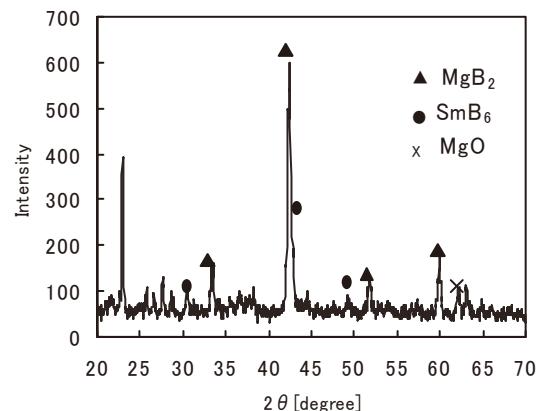


Fig.2 X-ray diffraction pattern of $Mg_{0.95}Sm_{0.05}B_2$ (nominal composition)

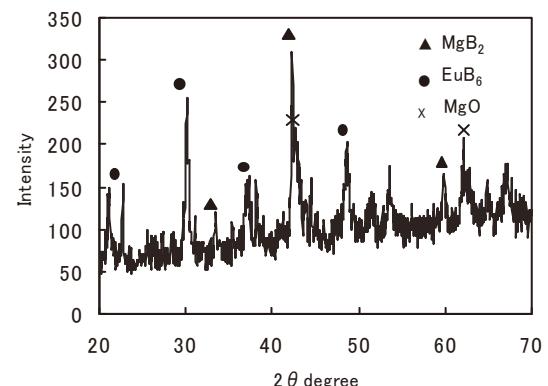


Fig.3 X-ray diffraction pattern of $Mg_{0.95}Eu_{0.05}B_2$ (nominal composition)

In-situ 法 MgB₂/Nb/Monel 線材の線径依存性 —組織と超伝導特性—

Outer diameter dependence of In-situ MgB₂/Nb/Monel Wire ~Microstructure and Superconducting Properties~

渡辺 喜史, 松岡 宏明(日大理工); 前田 穂, 金 正鎧 (UOW); 久保田 洋二(日大理工)

WATANABE Yoshifumi, MATUOKA Hiroaki (nihon-u); MAEDA Minoru, KIM Jung Ho(UOW);

KUBOTA Yoji (nihon-u)

E-mail: yw4423@yahoo.co.jp

1. はじめに

MgB₂ は金属系超伝導体の中で最も高い臨界温度 T_c (39K)を示し、20K 近傍での実用化に向けた研究が盛んに行われている。我々は、PIT-In-situ 法により MgB₂ 線材を作製する際には圧延過程で、Mg が繊維状に伸びる事が高 J_c を得るには必要である事を示してきた[1]。また、Fe シースを用いて臨界電流密度 J_c の高い MgB₂ 線材を作製してきた。今回は、MgB₂/Nb/Monel 線材の臨界電流密度 J_c の線径依存に注目してこれらの組織及び、超伝導特性を調べたので、その結果を報告する。

2. 実験

試薬の Mg(99.9%, 150μm) と B (99%, 1μm) を化学量論比 Mg : B=1 : 2 で 40 分間混合し、加重 4.0 トンで $\phi 5.5\text{mm}$ の円柱状に圧粉成型をする。成型体を長さ 40mm、外径 9.5mm、内径 5.6mm の Nb シースに詰め、溝ロールと丸溝ロールで外径 3.5mm まで圧延加工を施し、さらに最外層に外径 8mm、内径 3.5mm の Monel パイプを挿入し、再び六角溝ロールと丸ダイスを用いて線径 0.95mm~0.381mm までそれぞれ縮径した。これらをアルゴンガスフロー中で 600°C-4h の熱処理を行い試料とした。試料の組織と臨界電流密度 J_c は、SEM と I_c 測定装置を用いて調べた。 I_c は 1μV/cm の電場が発生した電圧で定義した。また、交流帯磁率は SQUID を用いて直流磁場 $\mu_0 H_{dc}=5\text{T}$ 、交流磁場 $\mu_0 H_{ac}=200\mu\text{T}$ 、周波数 $f=76.97\text{ Hz}$ で測定した。

3. 結果

Table.1 に各線径における超伝導体のコア面積と常伝導マトリックスの面積比を示す。 $\phi 0.95\text{mm}$ から $\phi 0.381\text{mm}$ で、すべての試料での面積比がほぼ 6% と一定になっており、縮径共に MgB₂ と常伝導マトリックスが一様に伸びている事が示されている。

Fig.2 に外部磁場 5T における各試料の交流帯磁率の実数部 χ' を示す。図からわかるように、 T_c は線材径に依らずほぼ一定値 23K を示している。一方、最も細い $\phi 0.381\text{mm}$ では二段の転移をしていることがわかった。

Fig.3 に各磁場における臨界温度を示す。試料の線径を 0.95mm から 0.381mm まで細くしても臨界温度に大きな変化は見られなかった。詳細な検討は当日報告する。

参考文献

[1] D. Uchiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 71

Table 1. Sample specification

O.D. (mm)	Core size (mm ²)	S/N(%)
0.95	0.0443	6.3
0.834	0.0321	5.9
0.671	0.022	6.2
0.52	0.0127	6.0
0.381	0.0066	5.8

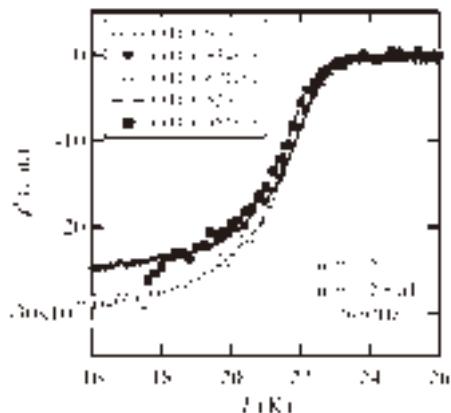


Fig.1. The real component of the ac susceptibility

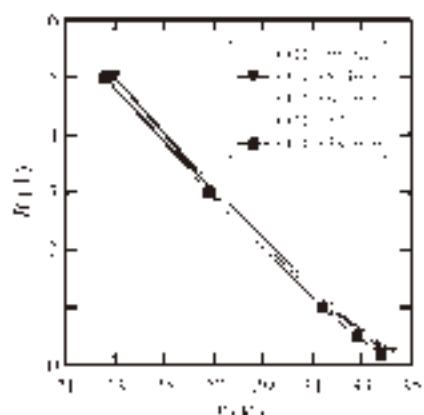


Fig.2. Temperature dependent of critical field

MgB₂/Al-In 基超伝導複合材料の作製とその特性

Fabrication and property of MgB₂/Al-In composite material.

水谷 学(富山大・院生);松田 健二, 西村 克彦, 川畠 常眞(富山大);

菱沼 義光(NIFS);青山 茂樹(日軽新潟株);池野 進(富山大)

MANABU Mizutani; KENJI Matsuda, KATSUHIKO Nishimura, TOKIMASA Kawabata (Toyama University);

YOSHIMITSU Hishinuma (NIFS); SHIGEKI Aoyama (Nikkeiniigata); SUSUMU Ikeno (Toyama University)

E-mail: ikenolab@eng.u-toyama.ac.jp

1. 緒言

我々はこれまで、アルミニウムと MgB₂粒子との複合材料ビレットを作製し、押出加工により棒材や線材を得て、それぞれの複合材料が MgB₂ 単体と同様の 37~39K の T_c を示すことを報告してきた[1-2]。本実験では、MgB₂ の J_c の改善が報告されている In[3]を母相の純 Al に添加することで、MgB₂/Al 複合材料の J_c の向上を図ったので、それらの結果を報告する。

2. 実験方法

使用した粒子は㈱高純度化学研究所製の粒径 40 μ m 以下の MgB₂ 粒子を用いて直径が 30mm で高さが 42mm のプリフォームを作製し、金型の中に入れ金型を所定の温度に加熱した。その後大気中であらかじめ溶解した 99.99mass%純度のアルミニウム溶湯を金型の中に注ぎ、黒鉛の蓋を置き、上部より油圧プレスにて加圧することによりプリフォーム中にアルミニウム溶湯を加圧浸透させる方法を用いてビレットを作製した。母相への In 添加は、純 Al を溶解させた際に溶湯中に所定量の In を投入し、攪拌後 15 分間保持したものを使用することで行なった。組織観察用試料は、走査型電子顕微鏡(SEM)観察はビレットをマイクロカッターにて切断した後、機械研磨および電解研磨法により観察面を鏡面処理して作製し、透過型電子顕微鏡(TEM)観察はビレットをマイクロカッターにて切断後、機械研磨し、日立製 FB-2100 集束イオンビーム加工装置(FIB)を用いてマイクロサンプリング法で作製した。観察には SEM は Oxford Opal を備えた日立製 S-3500H、TEM はトプコン製 EM-002B、JEOL 製 4010T を用いた。電気抵抗率の温度依存性は、カンタムデザイン社製物理特性測定システム(PPMS)で直流四端子法により、温度 2K から 300K の領域で測定した。磁化の温度・磁場依存性はカンタムデザイン社製物理特性測定システム(SQID)を用いて測定した。

3. 実験結果

Fig.1 は作製した MgB₂/Al-0.1mass%In のビレットの縦断面の接写である。灰色のコントラストの領域が複合している部分であり、写真の両端の白色のコントラストは母相の Al の領域である。図は省略するが、適切な作製条件で作製されなかつた場合のビレットには大きな空隙が確認された。これはプリフォーム中に溶湯が浸透しなかつた部分で、ビレットを切断する際に粒子が抜け落ちたためにできたと考えられた。Fig.1 からはこれらの欠陥は見受けられず、適切な条件で作製することができた。

Fig.2 は、Fig.1 の縦断面の一部を拡大した SEM 像である。この写真からも巣や溶湯の未浸透部分などの欠陥は見受けられなかつた。MgB₂ 粒子の黒色のコントラストと、母相である Al の白いコントラストが確認された。粒子のコントラストは比較的均一に分散していることが分かる。

図は省略するが、複合材料の電気抵抗の温度依存性、磁化の温度依存性を測定した結果、純 Al 母相の複合材料と Al-0.1%In 母相の複合材料それぞれで、超伝導材料の特徴の一つである電気抵抗、磁化の低下が確認された。

磁化率の外部磁場に対する依存性を測定した結果を Bean の式に代入して得られた J_c を磁場に対してプロットしたものを Fig.4 に示した。この図より、母相に In を添加した複合材料の方が In を添加していない複合材料よりも常に高い J_c を示しており、In の効果が表れたと考えられた。

参考文献

- 1) K.Matsuda, S.Ikeno, T.Saiki, K.Nishimura, K.Mori, M.Narita :J.Japan Inst. Metals, Vol.69 (2005) pp.977 – 982
- 2) M.Morobayashi, K.Matsuda, K.Nishimura, K.Mori, S.Ikeno :Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.111 (2006) pp.237 – 238
- 3) K.Tachikawa, Y. Yamada, O. Suzuki, M. Enomoto, M. Aodai:Physica C 382 (2002) 108 – 112

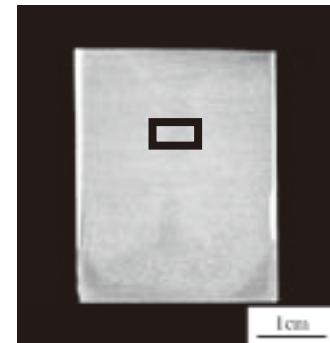


Fig.1 Cross section of MgB₂/Al-0.1% composite material.

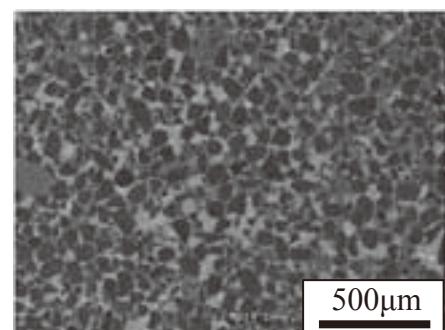


Fig.2 Enlarged SEM image of MgB₂/Al-0.1%In composite.

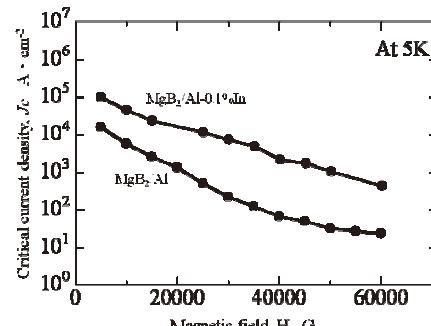


Fig.3 Critical current density of the composites materials.

種々の温度及び濃度で溶液処理した粉末を用いて 作製した ex-situ 法 MgB₂ 線材の特性

Effect of temperature and concentration in solution process for powder
on the properties of ex-situ processed MgB₂ tapes

藤井 宏樹, 熊倉 浩明, 小澤 清 (NIMS)

FUJII Hiroki, KUMAKURA Hiroaki, OZAWA Kiyoshi (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

(序) PIT 法 ex-situ プロセスで作製する MgB₂ 線材では、充填粉 MgB₂ を予め有機酸溶液で処理すると、 J_c - B 特性が向上する。粒間結合が若干劣化するものの、溶媒からの炭素置換によって B_{c2} が向上するためである。本研究では溶液処理プロセスの最適化を図り、更なる特性の向上を目指した。

(実験) 市販 MgB₂ 粉を有機酸溶液 A (安息香酸/ベンゼン) 及び B (ラウリン酸/ヘキサン) で、室温(RT)から沸点(BP)以下の温度で 15h 処理した。溶液濃度は 5mM、0.05M、0.5M とした。こうして得られた粉末を Fe 管に充填し、線材形状に加工後、Ar ガス気流中 950°C で加熱処理した。また、比較のために未処理粉を用いた線材試料も作製した。溶液 A、B での処理粉、及び未処理粉を用いて作製した線材試料をそれぞれ A、B、C とした。

(結果) XRD 測定からは、MgB₂ 粉と溶液との反応は確認されなかった。線材試料 A、C における MgB₂ の 110XRD ピークプロファイルを Fig. 1 に示す。線材 C と比べて、A(0.5M/RT)、A(5mM/BP) のピーク位置はそれぞれ 0.15° 及び 0.05° 高角度側にシフトしていた。一方、他の A(5mM/RT) 及び A(0.5M/BP) については、シフトは見られなかった。このシフトは a 軸長の縮小、すなわち炭素置換のためである。以上のことから、RT 及び BP 処理では、高濃度及び低濃度が、それぞれ炭素置換に有利であることが明らかとなった。試料 B でも同様の傾向が見られたが、A ほど顕著でなかった。

SQUID による測定から、A(0.5M/RT) の T_c は 37K で、他の試料よりも 1K 程低かった。また、AC 磁化率の振幅依存性は A(5mM/RT) 及び A(0.5M/BP) で若干大きく、炭素置換による T_c の低下、及び粒間結合の劣化が示唆された。

Fig. 2 に、4.2K、種々の磁界中での、線材試料 A、B の transport J_c の濃度依存性を示す。RT 処理では、両試料ともに、濃度が高くなるほど高磁界側での J_c 値が向上した。一方、BP 処理では、試料 A では逆の傾向を示し、低濃度の方が高い J_c 値を示したのに対し、試料 B では濃度依存性はほとんど見られなかった。これらは Fig. 1 の炭素置換量と対応している。

以上のことから、 J_c 特性は炭素置換量に大きく依存し、室温高濃度溶液での処理が特性改善に有効であることが明らかとなった。また、炭素置換のメカニズムは RT と BP とで異なっているものと考えられる。

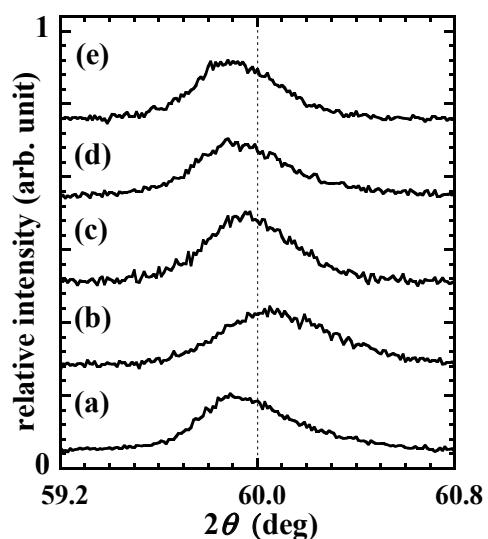


Fig. 1. 110 XRD peak profiles for MgB₂ in tapes (a) A(5mM/RT), (b) A(0.5M/RT), (c) A(5mM/BP), (d) A(0.5M/BP) and (e) C.

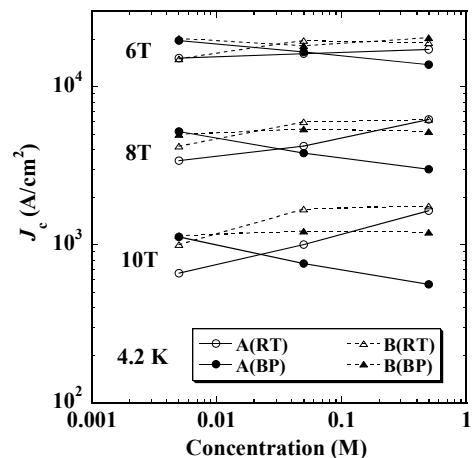


Fig. 2. Transport J_c as a function of solution concentration for MgB₂ tapes A and B at 4.2K in fields of 6, 8 and 10T, applied parallel to the tape surface. The treatment temperatures for powders were RT and the BPs for each solution.

冷凍機冷却下における MgB₂ 超電導線材の熱的安定性

Thermal stability of MgB₂ wires under the cryocooler-cooled condition

小段 尊則, 村瀬 晓, 七戸 希(岡山大); 山田 豊(東海大)

KODAN Takanori, MURASE Satoru, NANATO Nozomu(Okayama University);

YAMADA Yutaka(Tokai University)

E-mail: kodan@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超電導線材は安価で T_c が高いことから、低磁場用の超電導マグネットに応用されることが期待されている。超電導体に熱擾乱が加わると、そこに常電導部の芽が発生し、自己ジュール発熱により常電導部の伝播・拡大が起こりクエンチしてしまう。MgB₂ 線の実用化のためにはこの熱的不安定性を解消しなければならない。

そこで、MgB₂ 超電導線材について超電導コイルを模擬し、熱的安定性の指標とされる最小クエンチエネルギー(MQE;Minimum Quench Energy)および常電導部伝播速度(NZPV;Normal Zone Propagation Velocity)について、冷凍機冷却下において外部印加磁場、運転温度、電流負荷率を変えてそれぞれの変化を測定した。

また、Nb₃Al, Nb₃Sn など他の超電導線材と比較し、構成材料の違いによる安定性への影響について考察した。

2. 実験方法

Fig.1 に今回使用した MgB₂ 超電導線材の断面図を示す。シーズ材として Fe, 安定化材として Cu を使用している。本実験は冷凍機冷却型の超電導マグネットに使用されることを想定し、直徑 36mm の FRP 製のサンプルホルダを使用した。MgB₂ 超電導線材に Fig.2 に示すように電圧タップ(V_1-V_5), 温度計(T_1-T_4), ヒータ(H_1)を配置し、サンプルホルダにコイル状に 3 ターン巻き、GM 冷凍機の先端ステージに取り付けた。冷凍機冷却下においてヒータにパルス状の熱擾乱を投入してクエンチさせ、熱擾乱の大きさを変化させて複数回測定し、クエンチする擾乱エネルギーの中で最小のものを MQE とした。次に、MQE 測定時の波形から各タップ間電圧が立ち上がる時間の差から NZPV を算出した。

3. 実験結果及び考察

Fig.3(a)に磁場 0-0.5T, 温度 25K, (b)に温度 10-20K, 2T における MQE-負荷率特性を示す。MQE は負荷率、外部印加磁場を大きくする減少し、線材温度を高くすると増加する傾向が得られた。これは過去に研究してきた冷凍機冷却下における Nb₃Al, Nb₃Sn と同様の傾向である。

Fig.4 に磁場 1.5T-2.5T, 温度 10K における MQE-温度マージン特性を示す。同図より温度マージンの増加とともに MQE は増加している。これは温度マージンが大きければ線材温度と臨界温度の差が大きくなり、クエンチしにくくなったと考えられる。

また、Fig.5 に磁場 0T, 温度 25K-30K における NZPV-通電電流密度 J_{op} 特性を示す。同図より NZPV は通電電流密度 J_{op} が大きくなると増加する傾向が得られた。これは式(1)で示されるように NZPV は J_{op} に比例するためである。

また、冷凍機冷却下において他の金属超電導線材である Nb₃Al, Nb₃Sn と比較すると MgB₂ の MQE は他の金属超電導体よりも 2~3 枠ほど大きく、NZPV は 1~2 枠ほど遅かった。

これは測定温度域の違い(MgB₂:10-30K, Nb₃Sn:3.7-7K, Nb₃Al:7-12K)が主な原因と考えられ、測定温度域が高い MgB₂ は熱容量が大きいため、熱容量に比例する MQE は大きく、熱容量に反比例する NZPV は小さくなったものと考えられる。

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

このとき、 J_{op} :通電電流密度, γ :密度, c :比熱, ρ :比抵抗, κ :熱伝導率, T_c :臨界温度, T_{op} :運転温度である。

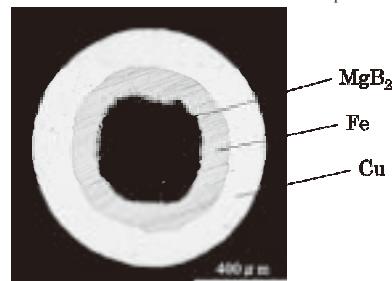


Fig.1 Cross-sectional view of the MgB₂ wire

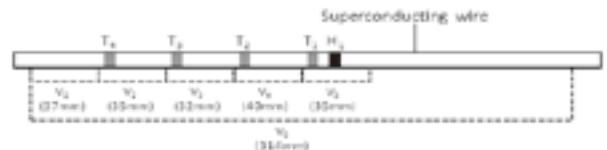


Fig.2 Layout of the voltage taps, thermometers, and heater

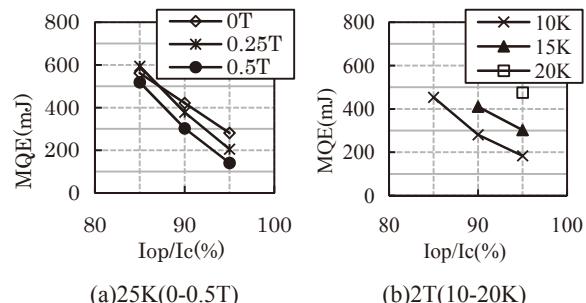


Fig.3 MQE-normalized current characteristics of MgB₂ wires

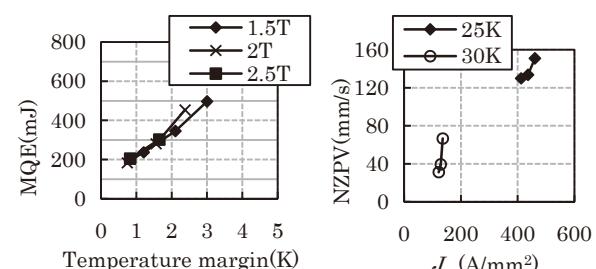


Fig.4 MQE-temperature margin characteristics of MgB₂ wires

Fig.5 NZPV-transport current density characteristics of MgB₂ wires

銅メッキ YBCO 超電導線材の疲労特性試験

Fatigue tests of YBCO coated conductors with copper stabilizer

青木 佳明, 川井 優季, 植田 浩史, 石山 敦士 (早大) ;
 鹿島 直二, 渡辺 智則, 平野 直樹(中部電力) ; 山本 潔(古河電工) ;
AOKI Yoshiaki, KAWAI Yuki, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.) ;
KASHIMA Naoji, WATANABE Tomonori, HIRANO Naoki (Chubu Electric Power) ;
YAMAMOTO Kiyoshi (Furukawa Electric) ;
 E-mail : yoshi-aoki@hotmail.co.jp

1. はじめに

SMES 用コイルに用いられる YBCO 超電導線材は、冷却による圧縮ひずみに加え、周期的な励磁・減磁に伴ってローレンツ力による引張り・圧縮ひずみを繰り返し受ける。そこで、生じたひずみが線材の超電導特性にどのような影響を与えるかを調べるために、我々は Fig.1 に示すような U 字型の治具を用いて自己磁場中における YBCO 超電導線材のひずみ- I_c 特性およびひずみの繰り返し印加による疲労特性について、実験的に調査してきた^{[1][2]}。

今回はIBAD/MOCVD 法で作製された銅メッキ線材について繰り返し回数 20000 回の疲労試験を行ったので報告する。

2. 実験装置

試料線材は、IBAD/MOCVD 法で作製されたものを使用した。その諸元を Table 1 に示す。なお、線材は 1cm 幅を 3 分割して細線化したものに、安定化層として銅メッキを施したものである。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。ひずみは、ステッピングモータで a 点を上下に動かすことにより線材長手方向に印加される仕組みとなっており、線材の表面に張られたひずみゲージによって値を測定する。

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。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。この作業を繰り返し行い、まずひずみと I_c の関係 (I_c / I_{c0} - ε 特性) を求めた(ひずみ特性試験)。

次に、ひずみ ε_{max} (本実験では 0.3、0.4%) 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

ひずみ特性試験の結果を Fig.2 に、疲労特性試験の結果を Fig.3 に示す。なお、Fig.2 では熱ひずみの補正(-0.13%)を考慮している。

ひずみ特性試験では、2 本の試料線材とも、ひずみが 0.2%程度から I_c の低下が見られ、0.3%、0.4%では I_c はそれぞれ、約 2%、約 5%の低下となり、従来の結果と同様の結果となった^{[1][2]}。

疲労特性試験では、Sample1 について 0.3%のひずみを 20000 回印加したが、 I_c の明確な劣化は見られなかった。また、Sample2 についても 0.4%のひずみ印加で繰り返し回数 20000 回の疲労試験を実施したが、同様に劣化は観測されなかった。

5. まとめ

今回は銅メッキ付き IBAD/MOCVD 法線材について試験を行った。ひずみ特性試験では、従来と同様の結果が得られた。また、疲労試験では、0.3%のひずみを 20000 回印加したが、明確な I_c の劣化は見られなかった。

発表当日は、Sample2 における印加ひずみ 0.4%、繰り返し回数 20000 回の疲労試験の結果も交えて報告する。

Table 1 Specifications of YBCO sample tapes

		Sample1,2
Process		IBAD/MOCVD
Length	mm	70
Width	mm	3.3
Thickness	Cu μm	100(50×2,coated)
	Ag μm	30
	YBCO μm	1.6
	CeO ₂ μm	0.4
	GZO μm	0.7
	Hastelloy μm	100

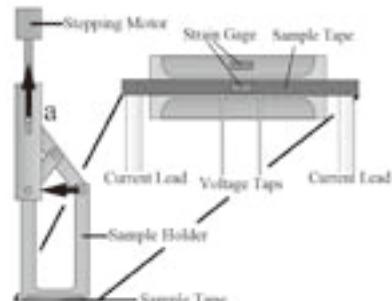


Fig. 1 Experimental apparatus

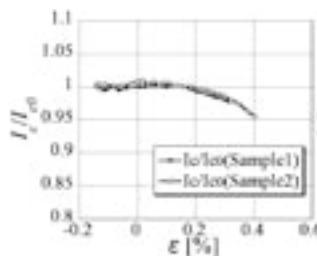


Fig. 2 $I_c / I_{c0} - \varepsilon$ relation

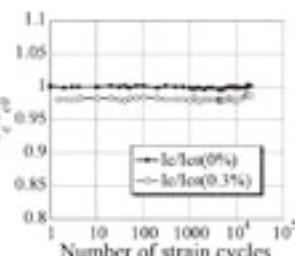


Fig. 3 Fatigue properties of YBCO coated conductors

本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] A.Ishiyama Y.Tanaka et al.: The Papers of Technical Meeting, IEE Japan ASC(2008)P.53-58
- [2] A.Ishiyama K.Kawai et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol79(2008)p182

積層した GdBCO コート線材における磁化損失の評価

Evaluation of magnetization loss in stacked GdBCO coated conductor

中山 祐輔, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大);

岡元 洋 (九州電力); 齊藤 隆 (フジクラ); 和泉 輝郎 (超電導工学研究所)

NAKAYAMA Yusuke, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power); SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo (SRL)

E-mail: nakayama@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに

近年、高温超電導テープ線材を用いた電力機器などの研究開発が進められている。この場合、交流条件下で生じる損失が大きな問題となる。コート線材では超電導層の厚さに比べて幅が非常に大きく、こうした形状効果のために、加わる磁界の方向等により従来の円柱形線材等とは異なる損失特性を示す。また、実用化において、線材は単独ではなく複合導体として使用されることが多く、線材同士の磁気的な相互作用のため、試料の配置によってその振る舞いが異なる。これらの損失は交流機器の性能に大きく影響するため、正確に把握しておく必要がある。前回の報告では、厚さ方向に6層または12層に重ねたGdBCOコート線材において、テープ面に垂直に磁界を印加したときの磁化損失を評価したところ、低磁界領域で理論値と若干のずれが見られた。今回の報告ではより詳細な測定や解析を行い、理論値とのずれについて議論する。

実験

本研究で使用した試料はフジクラ社により作製されたGdBCOコート線材である。線材から $2.3 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ 程度の試料を切り出し、厚さ方向に6層、12層に重ねた試料に加え、2層、3層での測定を行った。超電導層の厚さは $2 \mu\text{m}$ 、重ねたときの超電導層間の間隔は 0.55 mm である。測定はSQUID磁力計を用いてテープ面に垂直に磁界を印加したときの磁化Mのヒステリシスを測定し、その面積から磁化損失密度を評価した。印加磁界の振幅は $1.5 \text{ mT} - 5 \text{ T}$ 、温度は 66.0 K 、 77.3 K 、 85.0 K とした。

結果及び検討

Fig. 1に 77.3 K における1枚、3層、12層試料の磁化損失密度の磁界振幅依存性を示す。横軸は $J_c d / \pi$ で規格化した磁界振幅、縦軸は $W_c = \mu_0 I_c^2 / \pi$ で規格化した磁化損失密度を示しており、実線はBrandtらによるテープ1枚の場合の理論値[1]、破線はMawatariによる無限積層モデルにおける理論値[2]を示している。また、これらの理論値はパラメータである J_c の磁界依存を考慮して計算した。Fig. 1より、磁化損失密度の折れ曲がり点である中心到達磁界 B_p 以下では、積層することにより損失が小さくなつた。12層試料においては1枚の試料に比べ、 $h_0 = 1$ において約1/4程度に低減した。また、 B_p 以上では1枚試料、積層試料共にほぼ等しい値となつた。

Fig. 2に 77.3 K 、 $h_0 = 1$ における実験値と無限積層モデルにおける理論値との比 W/W_{infinite} のテープ枚数依存性を示す。Fig. 2より、テープの枚数が増えるにつれ損失が小さくなつていることが分かる。これは、枚数が増えるにつれ磁気的相互作用の効果が大きくなるためと考えられる。また、今回の実験では12枚の試料において無限積層モデルにおける理論値と比

べ約3倍大きい結果となつた。なお、理論式や、他の温度における測定結果、詳細な解析等については当日報告する。

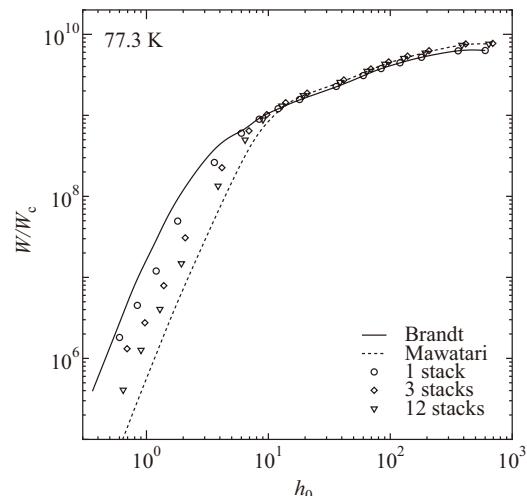


Fig. 1: Normalized magnetic field amplitude dependence of normalized magnetization loss density at 77.3 K .

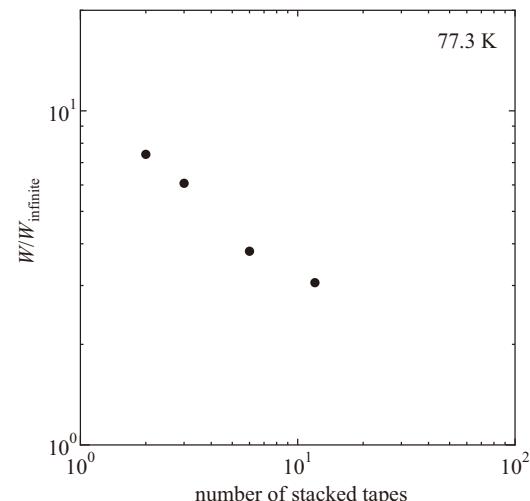


Fig. 2: Tape number dependence of magnetization loss density at $h_0 = 1$.

謝辞

本研究の一部は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」をNEDO委託事業により実施した。

参考文献

1. E. H. Brandt *et al.*, *Europhys. Lett.* **22** (1993) 735-740.
2. Y. Mawatari, *Phys. Rev. B* **54** (1996) 13215-13221.

REBCO 超電導テープ線材の交流損失特性(1)

—中間層 IBAD-MgO 基板をベースにした GdBCO 超電導 5 分割テープ線材—

AC Loss of REBCO coated superconducting -5filaments GdBCO coated conductor based on IBAD-MgO layer -

中村 聰介、山崎 恵士、岩熊 成卓、船木 和夫(九大);

斎藤 隆、飯島 康裕(フジクラ);衣斐 顕、山田 穂、和泉 輝郎、塙原 融(SRL)

NAKAMURA Sosuke, YAMASAKI Satoshi, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.); SAITO Takashi,

IJIMA Yasuhiro(Fujikura Ltd.); IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SIOHARA Yuu (SRL)

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

1. はじめに

超伝導線材を電力機器に応用する場合、超伝導巻線部に発生する交流損失は機器の全熱負荷の大部分を占めるため、様々な温度での損失の見積りが重要になる。我々はこれまで、YBCO テープ線材の交流損失特性を評価し、温度スケーリング則が成立することを示してきた。

最近では、スライビング技術による線材細線加工により、損失低減可能であると示されている。さらに、MgO を中間層にすることで、非常に高い製造速度(数十 m/h)が実現可能であることが報告されている。

そこで本研究では、中間層 IBAD-MgO 基板をベースにした GdBCO 超電導テープ線材を 5 フィラメントに分割し更なる低交流損失を目指した試料に対して、鞍型ピックアップコイル法により交流損失を測定・評価、比較したので報告する。

2. 試料と測定法

試料は中間層に IBAD で生膜された MgO 基板に、PLD 法によって GdBCO 超伝導層を成膜させ、基盤を除いた部分をスライビング技術により 5 分割したものである。

各層の構成を Fig.1 に示す。この短尺線材を 3 枚積層して、鞍型ピックアップコイル法により、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。

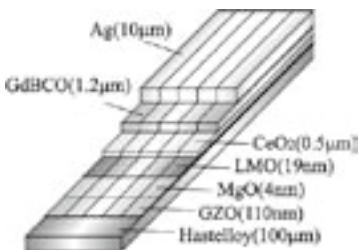


Fig.1 5filaments GdBCO coated conductor based on IBAD-MgO

3. 実験結果

今回測定した交流損失の結果を Fig.2 に示す。

これまでに測定してきた様々な種類の YBCO、GdBCO 線材の臨界電流特性(I_c - B)は、各温度の零磁場の臨界電流(以下、 $I_{c0}(0, T)$)で規格化することにより温度に関してスケーリングされ、また、交流損失も温度に関してスケーリングされることを確認している。

そこで、Fig.2 に示す交流損失に対しても、同様に横軸を $I_{c0}(0, T)$ 、横軸を $I_{c0}(0, T)$ の 2 乗値で規格化することで各温度の曲線が一つのマスターカーブに一致した[Fig.3]。さらに Fig.3 にはフィラメント分割有無の比較のため同時に、平成 21 年度春季低温学会[1]で報告した、同じ中間層 MgO 基板を用いた GdBCO 線材のフィラメント分割無しの線材の交流損失をスケーリングしたものも示す。

4. まとめ

以上の結果より、今回の線材に対しても、これまで同様に温度スケーリング則が適用可能であることを示した。また、IBAD-MgO 層を用いた線材に対しても、我々が示してきたようにフィラメント分割することで交流損失を無分割線材に比べ、分割数分の 1、今回は 5 分の 1 に低減できた事を示した。

また、今後も人工ピンを導入した 5 分割線材についても測定・評価を行う予定である。

5. 謝辞

本研究は、超電導応用基板技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託を受けて実施しているものである。

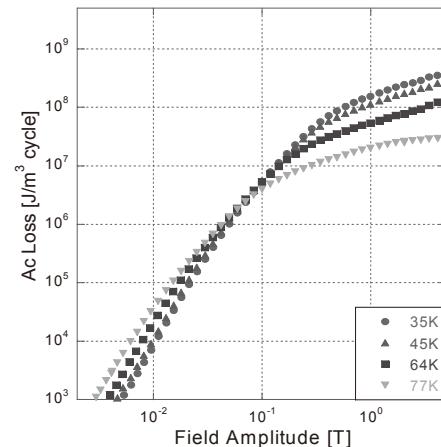


Fig.2 Ac loss of 5filaments GdBCO coated conductor based on IBAD-MgO

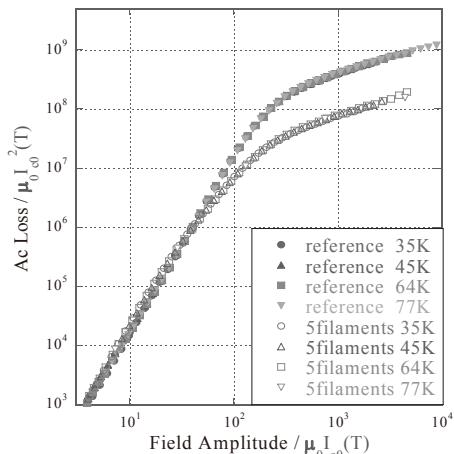


Fig.3 The normalized AC losses by $I_{c0}(0, T)$

参考文献

1. S.Yamasaki et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p.96

六角形配置 YBCO 集合導体の交流損失特性の測定及び評価

Measurement and evaluation of AC loss characteristics of hexagonal YBCO assembled conductor

杉澤 淳樹, 丸子 敦, 伊藤 貴大, 小川 純, 福井 聰, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学)

SUGISAWA Junki, MARUKO Atsushi, ITO Takahiro, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao(Niigata Univ.)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

世界各所で酸化物高温超伝導線材の開発が行われており、Y 系高温超伝導線材は Bi 系高温超伝導線材に比べ、超伝導領域でより高い臨界電流密度特性を示すことから、Y 系線材を複数本束ね集合導体化した高温超伝導ケーブルの開発が行われている。Y 系線材は薄膜形状であることから図 1 に示すように線材面に対し平行方向に磁界を印加した場合、交流損失は減少することが報告されており、多角形配置することにより周方向磁界が支配的になることから、交流損失の低減効果が期待される。本研究では、YBCO 線材を多角形配置した集合導体における線材間距離による交流通電損失低減効果について、実験により定量的評価を行った。

2. 実験内容

図 2 に示すように、六角形の GFRP の表面に線材幅 4.0mm、銅保護層あり、臨界電流値 92~107A の YBCO 線材を線材間距離 0.85, 2.00mm で配置したサンプル 2 種類を作製した。使用した超伝導線材は線材間距離による交流損失を定量的に比較するために、同一の超伝導線材を使用した。また、各線材の臨界電流値の違いは交流損失特性に影響を及ぼすが、完全に均一な超伝導線材を得ることは不可能であるため、同一の線材を使用し各線材に生じる交流損失の総和で評価を行った。このため各線材個々に生じる交流損失の大小に関しては検討を行わない。

交流通電損失の評価方法は、図 2 に示すように各線材それぞれに配置したスパイラル電圧リードループと矩形電圧リードループによる電圧の平均値から四端子法により測定を行った。両電圧リードループより得られた電圧は等しかったことから、損失特性はスパイラル電圧ループを使用したときの値を用いる。超伝導線材はそれぞれが電気的に独立しており、各線材にそれぞれ通電した条件を単独通電、各線材を直列接続し通電を行った場合の条件を直列通電と定義する。直列通電をすることにより超伝導ケーブルの一区間に偏流がない状態を模擬して通電を行うことが可能である。

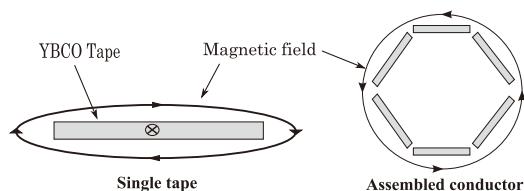


Fig.1 Magnetic field distribution of single HTS tape and assembled conductor

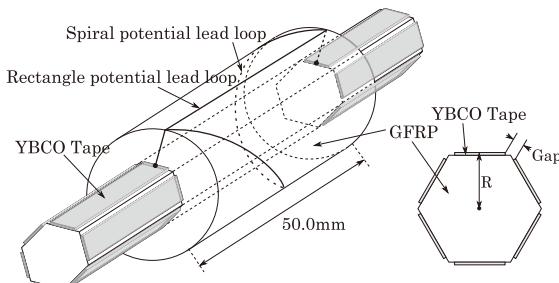


Fig.2 Schematic illustration of HTS hexagonal assembled conductor attached spiral voltage lead loops.

3. 測定結果

図 3 に線材間距離が 2.0mm のときの単独通電時の周波数特性を示す。この図は横軸に通電電流の波高値 I_m 、縦軸に一サイクル単位長さあたりの交流通電損失 Q_m を示す。この図より、交流通電損失は周波数で規格化することにより特性が一致することが示されている。この理由として交流損失がヒステリシス的に生じていることが考えられ、銅保護層の渦電流損失に比べヒステリシス損失が支配的であると言える。高周波数領域でなければ交流損失はヒステリシス損失が支配的であるという従来の報告からよく一致している。よって、本研究では実験の簡略化のため、商用周波数である 60Hz のみの測定で交流損失特性の検討を行った。

図 4 に線材間距離が 2.0mm, 0.85mm のときの直列通電時の交流損失特性を示す。比較のため単独通電時の各線材の総和を示す。図 4 より、線材間距離が 0.85mm のとき交流通電損失が減少しており、60A のとき約 57% 減少しており、集合導体化することによる交流通電損失の低減効果を確認できた。これは、前述したように線材間距離が近づくことにより、各線材間の電磁的結合が支配的になったためと考えられる。

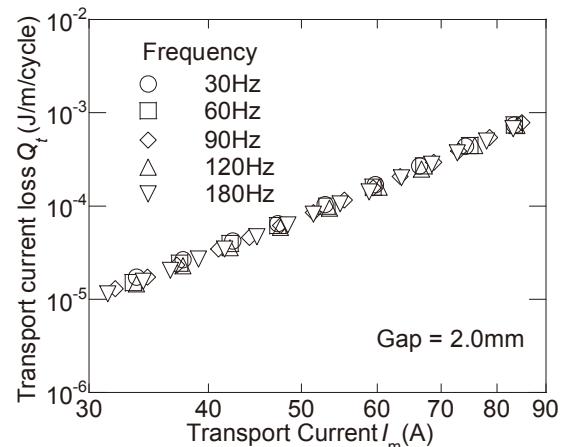


Fig.3 AC transport current loss in HTS hexagonal assembled conductor vs. transport current I_m for different frequency.

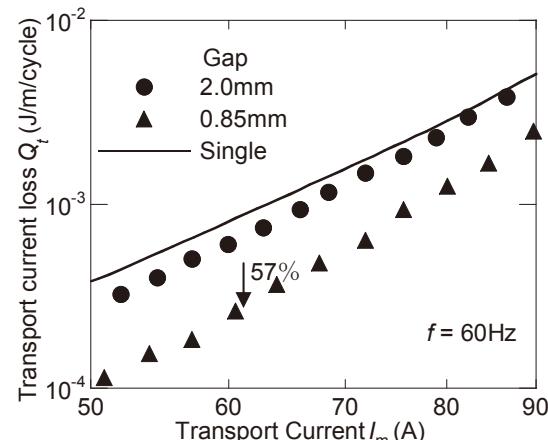


Fig.4 AC transport current loss in HTS hexagonal assembled conductor for different distance of 2.0mm and 0.85mm.

高温超伝導薄膜テープ線材を用いたスパイラル集合導体の 交流損失特性と導体構造の関係

Relation between AC loss and Geometrical Parameters of Multi-layer Spiral Conductor
Assembled by HTS Coated Tape Wire

鈴木 喜也, 福井 聰, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大)

SUZUKI Nobuya, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University);

E-mail : fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

YBCO 線材は超伝導層の厚さが極めて小さいので、完全に円形断面のケーブルにすることはできれば、交流損失は劇的に減少する。しかしながら、YBCO 線材を多層スパイラルケーブルにした場合、線材の剛性が高いため断面が円形より多角形に近くなり、交流損失が下がり止まってしまうことが懸念される。このような電磁現象は隣接線材間のギャップと線材幅に大きく依存する。従って本研究では、テープ線材を多角形・多層に配置したスパイラル集合導体の交流通電損失を解析する理論モデルを示し、それに基づいて、線材幅・線材間ギャップとケーブルの交流損失との関係を定量的に評価する。

2. 解析モデル

Fig.1 にスパイラル集合導体の交流損失解析モデルを示す。導体構造パラメータは幾何学的に以下の関係を満たす。

$$(R_i + d_1 + \frac{d_2}{2}) = \frac{1}{2l_p \tan(\pi/N)} \sqrt{(2\pi R_i')^2 + l_p^2} \left(W + \frac{g_i}{\cos(\pi/N)} \right) \quad (1)$$

ここで、 N は線材本数、 W は線材幅、 g_i は第 i 層の線材間ギャップ、 R_i 、 R_i' は第 i 層の内接半径及び円筒中心から線材端部までの距離、 l_p はスパイラルピッチ、 d_1 、 d_2 は線材の基盤及び超伝導層の厚さである。

超伝導線材内部において、以下の式が成立する。

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = -\mathbf{E} - \nabla V \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{A} 及び \mathbf{E} はベクトルポテンシャル及び電解、 ∇V は電気スカラポテンシャルの勾配を表わす。ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は

$$A = \sum_k \frac{\mu_0 |\mathbf{J}_k|}{4\pi} \int_{\mathbf{r}_{k,1}}^{\mathbf{r}_{k,2}} \log \frac{\mathbf{r}_{k,12} \cdot (\mathbf{r}_{k,2} - \mathbf{r}_i) + |\mathbf{r}_{k,12}| |\mathbf{r}_{k,2} - \mathbf{r}_i|}{\mathbf{r}_{k,12} \cdot (\mathbf{r}_{k,1} - \mathbf{r}_i) + |\mathbf{r}_{k,12}| |\mathbf{r}_{k,1} - \mathbf{r}_i|} d\mathbf{r}_i \quad (3)$$

と書ける。 \mathbf{J} は電流密度、 μ_0 は真空の透磁率、 \mathbf{r} は導体を構成する微小線分要素である。右辺の Σ は、線材断面全体及び導体長さ方向に十分長い距離に渡っての数値積分を示す。また、 n 値を用いた以下の $\mathbf{E} - \mathbf{J}$ 特性を用いる。

$$|\mathbf{E}| = E_0 \left(\frac{|\mathbf{j}|}{j_c} \right)^n \quad (4)$$

ここで、 j_c は臨界電流密度であり、 $E_0 = 10^4 \text{ V/m}$ とする。(2)～(4)式を数値解析することにより、線材内部の \mathbf{E} 、 \mathbf{j} の分布が得られる。求められた電流密度・電界分布より、集合導体の交流損失 P_t [J/m] を以下の式を用いて算出する。

$$P_t = \int_0^T \sum_{i=1}^N \left(\int_{S_i} \mathbf{E} \cdot \mathbf{j} dS_i \right) dt \quad (5)$$

3. 結果

2 層導体において、 $l_p = 0.5 \text{ m}$ 、外層の臨界電流 $I_{c2} = 1430 \text{ A}$ 一定とした時の線材幅と交流損失の関係及び線材幅と

内接半径、負荷率の関係を Fig.2 に示す。線材幅が小さくなると交流損失は減少する。一般に多層導体の場合、外層の方が自己磁界が大きくなるので、線材幅を減少させて垂直磁界を低減する効果が外層で顕著になると考えられる。また、内層の臨界電流が増加するので、内層では垂直磁界の低減と負荷率の減少が交流損失低減に相乗して寄与する。

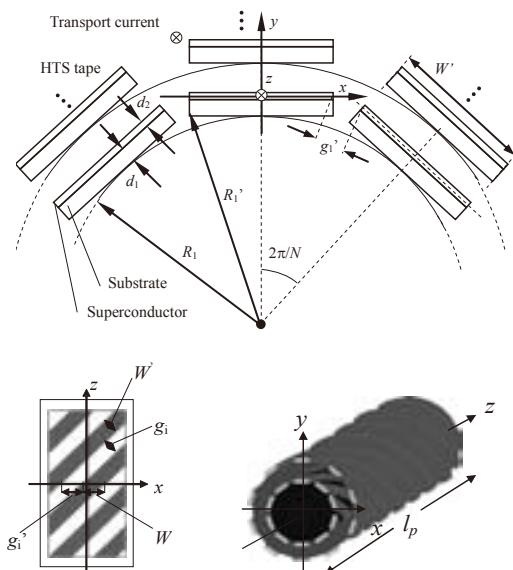


Fig.1 Numerical model

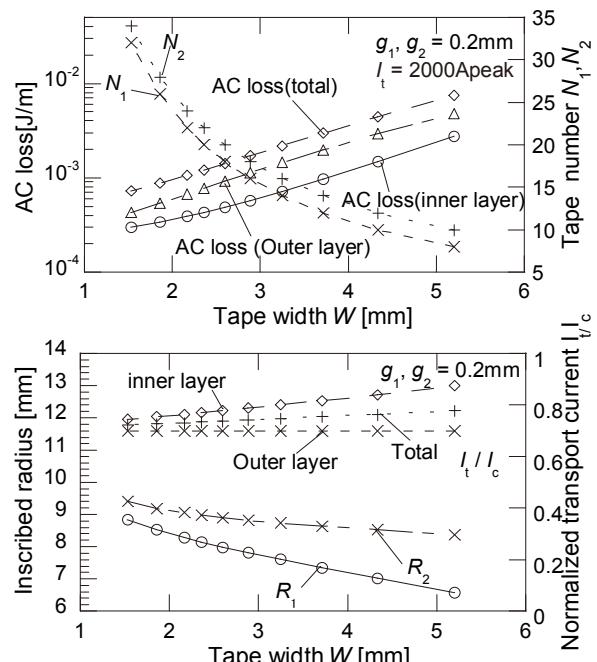


Fig.2 AC loss vs. Tape width ($g = 0.2 \text{ mm}$)

高温超伝導集合導体の四端子法による交流通電損失測定法の検討

Study on AC transport current loss measurement in assembled conductor using a four terminal method

伊藤 貴大, 新海 一也, 小川 純, 福井 聰, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄 (新潟大学)
 ITO Takahiro, SHINKAI Kazuya, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao(Niigata University)
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導集合導体の交流通電損失測定を行う際の通電方法は各線材を直列接続し強制的に均流化した条件と、超伝導ケーブルなどのように集合導体端部で一括に接続することにより通電する方法がある。一括で通電した場合には、集合導体内の電流分布はインダクタンスと接続抵抗により決定される。特に短尺ケーブルの場合はインダクタンスよりも超伝導線材と電流リードの接続抵抗による不均一さの影響を受ける可能性がある。このため集合導体内の線材配置としては同条件であっても均一の電流が流れていらない場合が生じる。ただし、長尺の超伝導ケーブルの場合には超伝導部分の電磁的影響が大きいため特に問題とならない。短尺のサンプル測定の場合には接続抵抗による集合導体内部の電流分布の不均一性の影響が生じることから、本研究では不均一電流が集合導体の交流通電損失測定に及ぼす影響について検討を行った。

2. 高温超伝導集合導体の交流通電損失測定方法

図1に一般的な高温超伝導集合導体に対しスパイラル電圧リードループを用い四端子法により電気的に測定するためのサンプル図を示す。スパイラル電圧リードループは各線材それぞれに取り付けており、集合導体全体を取り囲むように配置している。この理由として、集合導体内の線材はエネルギーのやり取りをそれぞれの線材間で行なっており、このやり取りをすべて含めた形で損失を評価する必要がある。このためスパイラル電圧リードループを集合導体全体に取り囲むように配置することにより、すべて含めた形で測定することが可能である。

測定サンプルは、臨界電流値が約80Aの3本のBi2223/Ag線材を積層配置し、集合導体の各線材に取り付けたスパイラル電圧リードループより得られた電圧を V_1 , V_2 , V_3 、各線材に通電される交流通電電流を I_1 , I_2 , I_3 とし、集合導体全体に流れる電流値を I とした。

3. スパイラル電圧リードループを用いた高温超伝導集合導体の交流通電損失測定法の検討

集合導体全体に生じる交流通電損失 Q_t は、各線材の通電電流と各線材に取り付けられているスパイラル電圧リードループより得られるそれぞれの電圧の積の和により、導出することが可能であることが報告されている[1]。

$$Q_t [J/m/cycle] = (V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3) / lf \quad (1)$$

I : 電圧リードループのタップ間距離[m]

f : 周波数[Hz]

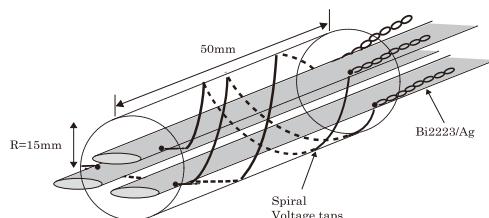


Fig. 1 Schematic illustration of HTS assembled conductor attached spiral voltage lead loops.

本研究では電気的測定法と熱的測定法を同区間同時に用い、電流の方向、積層の仕方、不均一電流による影響の検証を行った。これらの結果より電気的測定法と熱的測定法が良く一致することから、電気的測定法による測定が可能であることを確認した。

一般的に超伝導集合導体の電流リードは一括接続で行っているため、超伝導集合導体を構成するそれぞれの線材に流れている通電電流を測定することはできない。仮に集合導体全体に流れる電流値 I のみしかわからない場合、各電圧リードループより得られる電圧の平均値 V_{ave} を用い以下の式より交流損失 Q_{ave} の導出を行っている。

$$Q_{ave} [J/m/cycle]$$

$$= \frac{(V_1 + V_2 + V_3) / 3}{lf} \times \frac{(I_1 + I_2 + I_3) / lf}{lf} = \frac{V_{ave} I}{lf} \quad (2)$$

図2に同軸上に3本の線材が積層されている集合導体に、2本の線材に50A通電した状態で表面の1本のみの通電電流を変化させたときの交流損失を(1)と(2)より導出した値 Q_t と Q_{ave} を示す。ここで Q_t を真値とみなす。この結果より、点線で示された Q_{ave} は150Aを境に電流値が小さい場合には大きな値を、電流値が大きい場合には小さな値を示すことがわかる。この結果より各線材に流れている電流値が分からぬ場合には四端子法による測定は正確に測定できないことを示している。

高温超伝導ケーブルを四端子法で測定する場合には、均流化されているという前提で測定を行っている。しかし、実際には接続抵抗による影響があるために同条件においても正確に交流通電損失測定ができない可能性があることを示している。集合導体全体に生じている交流通電損失を導出するためには、集合導体全体に通電されている電流値のみでは正確に測定することができず、各線材に通電されている電流値を把握しなければならない。また、集合導体全体に通電されている電流値のみしか測定できない場合には、接続抵抗やツイストなどの均流化の条件に留意し測定する必要がある。

参考文献

- [1] J. Ogawa, et al.: Physica C, vol. 445-448 (2006) pp.1083-1087

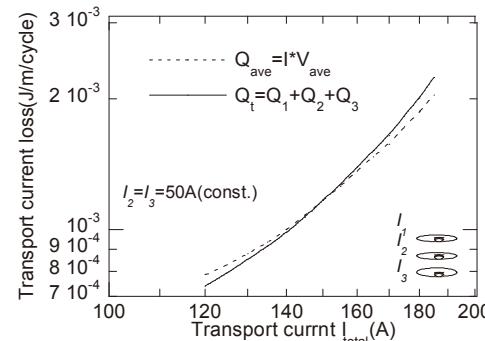


Fig.2 AC trasnport current loss in HTS vertical assembled conductor with unbalanced transport current induced by the eq.(1) and (2), are plotted agenst the total transport current.

超伝導二本転位並列導体の巻き乱れが付加的交流損失に及ぼす影響

The influence that transposed two parallel SC conductors with rolling disorder gives to an additional AC loss

渋田 寛, 林田 昌之, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学);林 秀美, 岡元 洋(九州電力);藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC);SHIBUTA Hiroshi, HAYASHIDA Masayuki, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu-Univ.); HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi(Kyushu Electric Power Co.); FUJIWARA Noboru, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC);

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

1. はじめに

我々は大電流容量酸化物超電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。本研究はこの転位並列導体に不均一な外部磁界を印加した場合に発生する付加的交流損失を定量的に明らかにすることを目的としている。

今回は、巻き数の半分で転位し、線の途中で巻き乱れが発生した場合の二本転位並列導体について解析を行った。

2. 並列導体の交流損失

図1は二本転位並列導体を1層コイルに巻き、全体の巻き数の半分の位置で転位を行い、さらにN巻きのコイルの途中で巻き乱れが起こり $\angle 1$ ずれた場合のコイル鳥瞰図である。図2は想定した導体に印加される磁界分布のグラフである。コイルの真ん中の位置での磁界振幅を B_m とした。このように巻き乱れ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、非飽和条件下の付加的交流損失の式は次式で表される。

$$W = \frac{1}{K} \frac{\pi \omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{1}{2N^2 \mu_0 d_s w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{L} \right)^2$$

一方、遮蔽電流が臨界電流値に達する場合である飽和条件下における交流損失は次式で表される。

$$W = \frac{2d_s I_c}{N^2 u w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{d_s L} - \mu_0 \frac{K}{u} I_c \right)$$

3. 考察

図3は、巻き乱れが転位位置から25巻き目で発生し、そのずれ幅が $\angle 1/w = 10$ の場合の付加的交流損失の磁界振幅 B_m 依存性である。その他に巻き乱れが1巻き目で発生した場合、50巻き目で発生した場合についても解析を行った。その結果、いずれの場合にも付加的交流損失は、磁界振幅 B_m が大きいほど大きくなり、遮蔽電流が臨界電流値に達し飽和状態になると付加的交流損失は一気に増大することがわかった。

さらに、巻き乱れによる電流の偏流を補正する方法についても考察した。巻き乱れが発生したターン以降のすべてのターンを使って少しずつずれを修正するモデルと、巻き乱れが発生したすぐ後のできるだけ少ないターン数でそれを修正してしまうモデルとを比較すると、巻き乱れの位置がどこであっても、また、磁界分布の次数 n が何であってもできるだけ狭い範囲で巻き乱れを修正するモデルの方が付加的交流損失は小さくなることがわかった。また、この場合、巻き乱れの位置としては、正規の転位位置の近くで発生した場合に付加的交流損失の増加が小さいということもわかった。

4. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

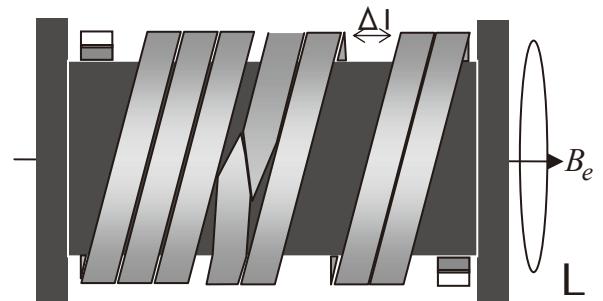


Fig.1 Transposed parallel SC

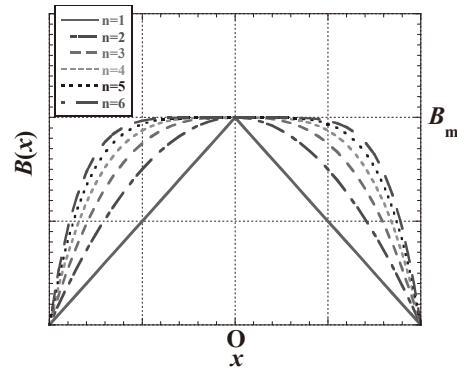


Fig.2 Magnetic field distribution

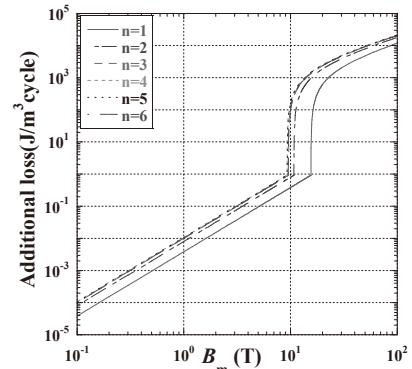


Fig.3 The gap of rolling disorder dependences of the Additional loss

超電導並列導体をパンケーキコイルに巻いた際の電流分流特性

Study on the current sharing properties of superconducting parallel conductors wound into pancake coil

高山 洸, 富岡 章, 岩熊 成卓(九州大学);林 秀美, 岡元 洋(九州電力);
藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TAKAYAMA Kou, TOMIOKA Akira, IWAKUMA Masataka(Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi(Kyushu Electric Power Co.);

FUJIWARA Noboru, GOSHIO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC)

E-mail: takayama@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、テープ状に加工されているため、大電流容量化するためにはテープ状の素線を並列に重ね合わせて並列導体を構成する必要がある。しかし、単に積層しただけでは自己磁界効果によりそれぞれの素線に流れる電流が偏ってしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施し、電流分流比を均一にしなければならない。

そこで本研究ではこれまでの研究により考案した、電流分流比を最も均一にする転位方法についての考察を行ったので報告する。

2. 転位方法

4本並列導体をパンケーキコイルに適用する際に、Fig.1に示すような転位方法をとり、電流分流比の均一化を図った。パンケーキコイルはその形状上、シングルパンケーキコイル間においてのみ、転位を行うことができる。これまでの研究で並列導体をコイル状に巻く際、素線が対称となるように転位を施すことで電流分流比を均一にできるということがわかつてゐるためそれを応用し、転位を施した。計算した電流分流比のパンケーキコイル枚数依存性の結果をFig.2に示す。

3. コイル形状変化に対する依存性

考案した転位方法を実用化するためにはコイルの大型化を図る必要がある。そこでコイルの大型化への適用のために、コイル形状変化による電流分流特性の変化について検討を行った。ターン数を一定にしてコイル内径を変化させた場合と、コイル内径を一定にしてターン数を変化させた場合について検討を行った。

4. 巻き乱れに対する電流分流比の変化

実際に並列導体をパンケーキコイルに巻くと、巻き乱れが生じる可能性がある。そこで、パンケーキコイルのある一枚のみ巻き乱れ生じたと仮定し、電流分流比を計算した。結果をFig.3に記す。

5. 考察

今回考案した転位方法による電流分流比の計算結果から、パンケーキコイルの形状が大きくなるほど電流分流比が均一に近づく特徴があることがわかつた。今後はよりよい転位方法の検討、また実験計測を行うことによる有効性の確認などを行う必要がある。

6. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] 香月良太 他 : 2008年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.178



Fig.1 Transposition method of a 4-strands parallel conductor

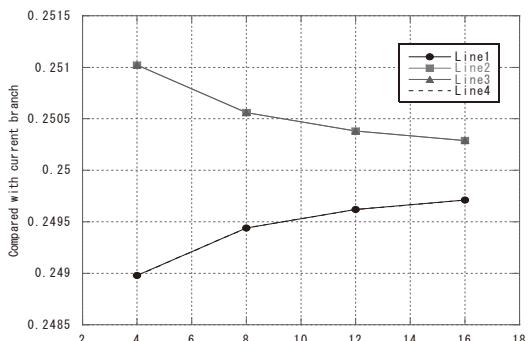


Fig.2 The current distribution in a 4-strands parallel conductor

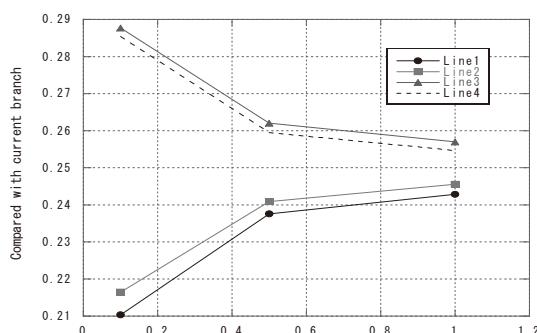


Fig.3 The current distribution in a 4-strands parallel conductor with a winding pitch disorder

電力ケーブルの交流損失における超電導テープ線材の形状効果

Effects of the shape of the superconducting tapes on the ac losses in power cables

馬渡 康徳(産総研); Alexis P. Malozemoff (AMSC); 和泉 輝郎, 藤原 昇, 田辺 圭一, 塩原 融(SRL)

MAWATARI Yasunori (AIST); MALOZEMOFF Alexis P. (AMSC);
IZUMI Teruo, FUJIWARA Noboru, TANABE Keiich, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

高温超電導テープ線材を用いる電力ケーブルは、多数の超電導テープ線材が円筒フォーマの周囲に並べて配置された構造をもつ。このような超電導電力ケーブルにおける交流通電損失は、超電導テープ線材の幅や枚数、フォーマの半径、およびテープ線材間のギャップといった構造パラメータに依存し、低損失化を含めた様々な要請のもとに構造パラメータを最適化する必要がある。電力ケーブルの低損失化のためには幅が小さい細線化した線材を用いるべきであると考えられてきたが、最近 Malozemoff らは、必ずしも幅が小さい線材が有利であるとは限らないことを理論的に示した[1]。

本研究では、超電導電力ケーブルを模擬した単純なモデル導体における交流損失の理論式を基に、低損失化のための導体構造について考察した。比較のため、平坦な超電導テープ線材を用いた角張った導体と、円筒フォーマに完全に沿うよう湾曲した超電導テープ線材を用いた円筒状の導体の2種の導体について、交流通電損失のテープ線材幅に対する依存性を調べ、テープ線材の形状効果について考察した。

2. 単層超電導電力ケーブルのモデル導体

Fig. 1 に、電力ケーブルを模擬したモデル導体の断面図を示す。Fig. 1(a)は平坦な超電導テープ線材による角張った導体[2]、および Fig. 1(b)は円筒フォーマに沿うよう湾曲した超電導テープ線材による円筒状導体である[3]。簡単のため、超電導テープ線材は単層で、テープ線材は長手方向に直線状で無限に長く、螺旋巻の効果を無視するものとする。円筒フォーマの半径を R 、超電導テープ線材の幅を $2w$ 、線材の数を n とし、線材のエッジ間の距離(ギャップ)を $2g$ とする。これらの構造パラメータは、幾何学的な制約により全てが独立ではなく、 $n \gg 1$ の場合には $2g \approx 2\pi R/n - 2w$ を満たす。

超電導テープ線材の超電導層の厚み d は、 R 、 $2w$ 、および $2g$ に比べて十分小さいものとし、また臨界電流密度 j_c は一定とする臨界状態モデルに基づき、超電導層の履歴損失による交流通電損失を求めた。Fig. 1(a)のような角張った導体の損失 Q_{agl} の理論式[2]と Fig. 1(b)のような円筒状導体の損失 Q_{rnd} の理論式[3]を基に、 Q_{agl} と Q_{rnd} とを比較するとともに、これらの損失のテープ線材幅 $2w$ 依存性について考察した。

3. 交流損失の線材幅依存性

超電導テープ線材(超電導層)の臨界面電流密度 $j_c d$ と導体全体の輸送電流振幅 I_p を固定し、導体構造パラメータ R 、 $2g$ 、および $2nw$ を変化させた場合の交流損失 Q_{agl} 、 Q_{rnd} の線材幅 $2w$ 依存性を調べた。線材数 n ではなく $2nw$ を一つのパラメータとする理由は、導体全体の臨界電流は $I_c = 2n j_c w d \propto 2nw$ となるからである。幾何学的制約 $2g \approx 2\pi R/n - 2w$ に注意して、 R 、 $2g$ 、および $2nw$ の3つのパラメータのうち2つを固定

するような、次の(i), (ii)、および(iii)の場合に分けて Q_{agl} 、 Q_{rnd} の $2w$ 依存性について考察する。

(i) $2nw$ と R を固定する場合、導体全体の臨界電流と導体径が固定され、幾何学的制約のためギャップ $2g$ は線材幅 $2w$ にはほぼ比例する。ギャップが小さいほど損失は小さいので、損失も線材幅とともに小さくなる。しかし、電力ケーブルの柔軟性を確保するため、あるいはテープ線材エッジの劣化などの理由から、ギャップを小さくするには限界がある。そこで、次の(ii), (iii)では $2g$ を固定する場合を考える。

(ii) $2g$ と $2nw$ を固定する場合、幾何学的制約のため R は変化する。 $2w \gg 2g$ のとき R はほぼ一定で、 $2w$ の増加とともに Q_{agl} は増加、 Q_{rnd} は減少する。 $2w \lesssim 2g$ のとき、 $2w$ が減少するにつれて Q_{agl} 、 Q_{rnd} はともに減少するが、 R は非現実的に大きくなってしまう。

(iii) $2g$ と R を固定する場合、幾何学的制約のため $2nw$ (すなわち I_c) は変化する。 $2w \gg 2g$ のとき $2nw$ はほぼ一定で、 $2w$ の増加とともに Q_{agl} は増加、 Q_{rnd} は減少する。 $2w \lesssim 2g$ のとき $2nw$ すなわち I_c が小さくなり、損失 Q_{agl} 、 Q_{rnd} はともに大きくなってしまう。

まとめると、Fig. 1 の電力ケーブル状導体の低損失化の指針は次のようになる。ギャップ $2g$ を小さくすることが重要であり、幅の小さい超電導テープ線材が常に低損失化に有利であるわけではない。ギャップを小さくするのに限界があつて $2g$ を固定する場合、あまりに幅が小さい線材を用いると、導体径の増大や臨界電流の減少等の問題がおこる。一般に Fig. 1(a)の角張った導体よりも Fig. 1(b)の円筒状導体の方が損失は小さく、その円筒状導体でギャップを固定する場合、少數の幅広のテープ線材を用いる方が低損失化に有利である。

本研究の一部は、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] A.P. Malozemoff, G. Snitchler, and Y. Mawatari, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 3115
- [2] Y. Mawatari and K. Kajikawa, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 012504
- [3] Y. Mawatari, submitted to Phys. Rev. B

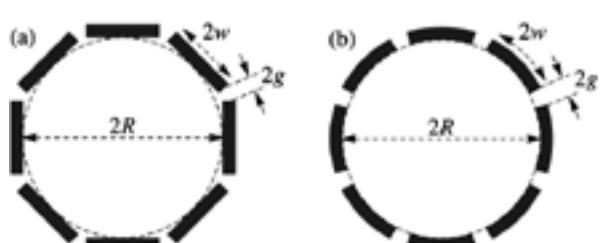


Fig. 1: Schematic of the cross sections of power cables: (a) an angular cable with flat tapes and (b) a round cable with curved tapes.

イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発 (2)

- 過電流と曲げ特性 -

Winding technology development of Y-based HTS power transformers (2)

- Over current and bending characteristics -

岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 岩熊成卓(九州大学); 齊藤 隆(フジクラ); 五所嘉弘, 田辺圭一, 塩原 融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);

SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); GOSHO Yoshihiro, TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh(SRL)

E-mail: hiroshi_a_okamoto@kyuden.co.jp

1. はじめに

経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導変圧器技術開発では、変圧器巻線の耐短絡電流、大電流化および低損失化のための技術開発を行っている。超電導変圧器巻線を設計するには、イットリウム(Y)系線材のコイル化による電気・機械特性が必要となる。プロジェクトが開発を見通す超電導変圧器は、三相 20MVA 器 (66/6.9kV, 175/1674A) である。変圧器巻線は、定格電流の約 7 倍程度の短絡電流に対しても損壊しないことが要求される。現在の設計では、変圧器巻線素線の短絡電流は 465A rms である。素線が一定時間の事故電流通電に耐えるには、銀層を含めた銅などの金属材料による安定化材による保護構造の最適化が必要である。また、大電流通電のために多層並列化された巻線の素線電流を均流化するには、素線を転位しなければならない。転位による素線の曲げ歪によって、素線 I_c が低下しない最小転位長の把握が必要である。

今回は、コイル形状の過電流特性(3 重ね:3 素線)と曲げ特性の検証結果を報告する。

2. 実験方法

(1) 過電流特性

試料コイルの仕様は、巻線内径 ϕ 250mm、12 ターン、素線数 3(転位処理)。Y 系素線は、5mm 幅、臨界電流 110~130A 級。安定化銅の配置は、①銀層側と②ハスティロイ基板側の 2 ケース。巻線の過電流特性は上記の短絡電流の通電エネルギー量を変化させ、過電流の通電毎に、巻線の臨界電流 I_c を評価した。

(2) 曲げ特性

試料コイルの仕様は、巻線内径 ϕ 360mm、9 ターン。素線は、中間層が異なる GZO 線材と MgO 線材である。多層並列導体の転位部をモデル化した 2 並列素線の転位部長 134~198mm 間における各転位部の I_c を評価した。

3. 実験結果

(1) 過電流特性

Fig. 1 に、上記の 2 ケースの安定化銅構造における印加エネルギーと巻線規格化 I_c を示す。目標エネルギー(410J/m)内での安定化構造による明確な特性の相違はない。印加エネルギー増による I_c の低下は、巻線の熱特性が関連するので Y 系線材の熱特性を取得後に解析を行う。Fig. 2 に、上記の安定化構造①における過電流通電時の波形で、上段は全電流、下段は 3 素線の各電流を示す。3 素線は転位によって電流が均一化され波形が重ねていている、過電流通電時も転位が有効であることが確認できる。

(2) 曲げ特性

Fig. 3 に各転位部の曲げ特性を規格化臨界電流で示す。上記の転位長の範囲では、曲げ歪みによる I_c 低下は見られない。従って、5mm 幅 Y 系線材では今回の最小転位長による巻線製作が可能なことが分る。今後は、巻線の低損失化に伴う細線化線材の曲げ特性を検証する。

謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」を NEDO 委託事業により実施した。富士電機システムズ(株)関係者の支援に謝意を表します。

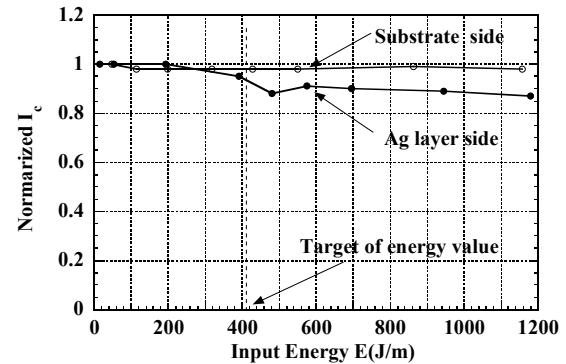


Fig.1 Over current characteristics on two types of stabilizer structure.

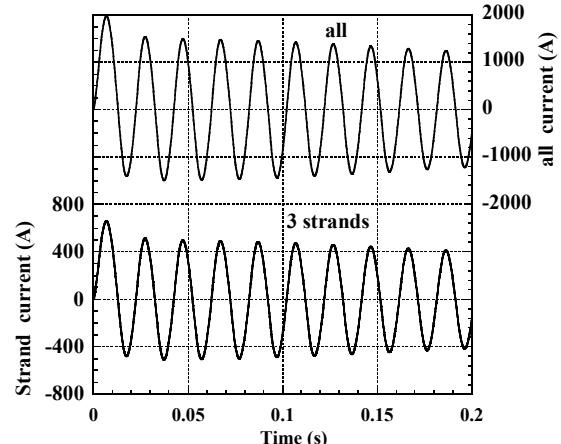


Fig.2 Over current of each strand.

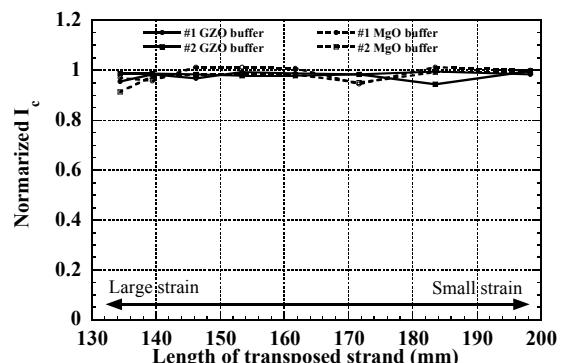


Fig.3 Bending characteristics of transposed strand.

限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(1)-設計・試作-

Fabrication and characteristic evaluation of small-scale YBCO superconducting transformer with current limiting function (1).-Design and fabrication-

乙成 貴明, 緒方 俊之, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学);

林 秀美, 岡元 洋(九州電力);飯島 康裕, 斎藤隆(フジクラ);

青木 裕治(昭和電線);藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

OTONARI Takaaki, OGATA Toshiyuki,

TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.);IIJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

AOKI Yuji (SWCC-CS); FUJIWARA Noboru, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

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

1. はじめに

YBCO 酸化物超電導体は、臨界温度が液体窒素以上であり、同じ酸化物超電導体である Bi 系線材に比べ、磁界中での臨界電流特性に優れ、次世代線材として期待されている。

超電導線材を用いて変圧器を超電導化することで、小型、軽量、高効率になることが期待される。本研究では、この YBCO 線材を用いた限流機能付き Y 系超電導変圧器の開発を目指し、要素技術開発として、実験用に数 kVA の小型4巻線構造超電導変圧器の設計・試作を行ったので報告する。

2. 原理・設計

今回試作した4巻線構造超電導変圧器の結線回路図を Fig.1 に示す。巻線は左から1次補助巻線、1次主巻線、2次主巻線、2次補助巻線となっている。この変圧器を使って、落雷などを想定した突発短絡実験を行い、Y 系線材の過大電流に対する応答特性を明らかにしていく。

主巻線クエンチ後の変圧器の等価回路図は Fig.2 のようになる。 $L_{\sigma 11'}$ 、 $L_{\sigma 22'}$ 、 $L_{\sigma 12}$ はそれぞれ1次主と1次補助、2次主と2次補助、1次主と2次主の巻線間の漏れインダクタンスを表している。これらの値は、試験段階で実測可能である。今回、変圧器を4巻線構造にした理由は、主巻線、補助巻線に流れる電流値を計測することによって、図2の等価回路を用いて短絡後の主巻線の抵抗値 R_1 、 R_2 を個別に求めるためである。[1]

3. 変圧器仕様

試作した4巻線構造超電導変圧器の仕様を Fig.3 に示す。内側から 2A(2次補助巻線)、1M(内側1次主巻線)、2M(2次主巻線)、1M(外側1次主巻線)、1A(1次補助巻線)の順で巻かれている。各巻線の巻数は 300、定格電圧は 393.6V、定格電流は 20A、1 ターン電圧は 1.31V となっている。

4. 試験

試作した変圧器を、液体窒素で冷却、通電試験を行い、巻線間漏れリアクタンス、鉄損、電流分流比を測定した。巻線間漏れリアクタンスの測定結果を Table.1 に示す。

この変圧器の突発短絡試験の結果は「限流機能付き小型 Y 系超電導変圧器の設計・試作と特性評価(2)-特性評価-」において示す。

5. 謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] 岩熊成卓:「超電導変圧器における巻線のクエンチ現象に関する研究」

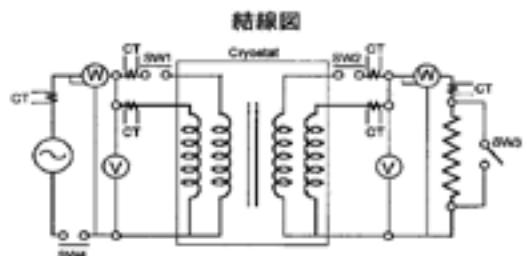


Fig.1 Figure of the whole circuit

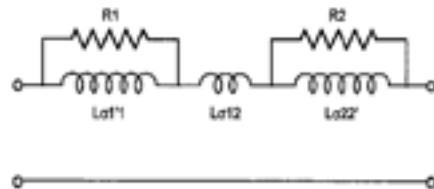


Fig.2 Figure of the equivalent circuit of transformer after sudden-shorted

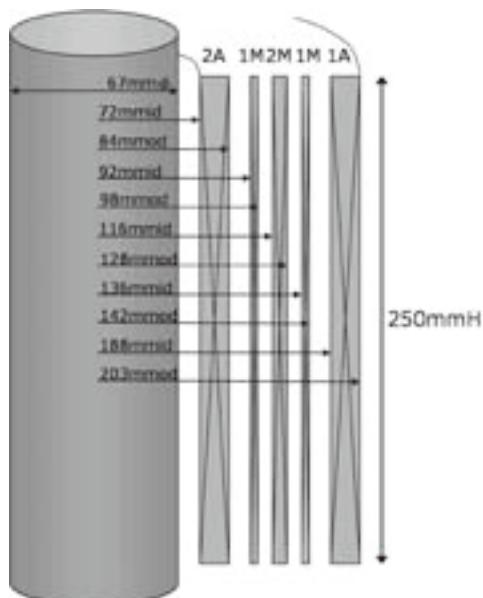


Fig.3 Spec of fabricated YBCO superconducting transformer

Table.1 Measurement value of leakage reactance

	$\omega L_{\sigma} (\Omega)$
1M1A	2.2100
2M2A	0.9987
1M2M	0.2660

限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(2)-特性評価-

Fabrication and characteristic evaluation of small-scale YBCO superconducting transformer with current limiting function (2).-Characteristic evaluation-

緒方 俊之, 乙成 貴明, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学);

林 秀美, 岡元 洋(九州電力);飯島 康裕, 斎藤隆(フジクラ);

青木 裕治(昭和電線);藤原 昇, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

OGATA Toshiyuki, OTONARI Takaaki,

TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.);IIJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

AOKI Yuji (SWCC-CS); FUJIWARA Noboru, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

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

1. はじめに

Y 系酸化物超電導体は高温酸化物超電導体の中でも磁場中の臨界電流特性が高く、次世代線材として様々な応用研究がなされている。一方、変圧器は雷サージや短絡事故による過電圧・突入電流が問題となっている。我々は限流機能付き Y 系超電導変圧器の開発を目指しており、要素技術開発として 4巻線構造の限流機能付き Y 系小型超電導変圧器を設計・試作した。

今回、試作した超電導変圧器で突発短絡事故を模擬した過電流実験を行い超電導変圧器による限流効果について評価したので報告する。

2. 実験結果

詳細な変圧器構造は「限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(1)-設計・試作-」を参照されたい。冷却は液体窒素浸漬冷却で行い、コイルの急激な熱収縮による J_c の劣化を抑えるために約 2.5h かけて 77K まで冷却した。

まず、通常負荷として 12Ω を接続し通電試験を行い「限流機能付き Y 系小型超電導変圧器の設計・試作と特性評価(1)-設計・試作-」において測定された変圧器の電流分流比が負荷のある状態でも変わらないことを確認した。200V における波形を Fig.1 に示す。電源は周波数を 60Hz とし 200, 250, 280, 325V において突発短絡事故を模擬した実験を行った。325V, 77K における突発短絡時の一次側電流の測定結果を Fig.2 に示す。短絡により主巻線に過大電流が流れ抵抗が発生することで補助巻線に転流している事がわかる。Fig3 には 1 次主巻線の電流波形を限流効果がない場合の理論波形と比較して示している。限流効果がない場合、短絡電流の理論値は 1200A である。実験で主巻線に流れる電流は約 43A であるため、主巻線の限流機能により電流が約 1/30 に抑えられたことがわかる。

3. まとめ

今回、試作した超電導変圧器は設計どおりの仕様であった。この変圧器を用いて突発短絡事故の模擬実験を行い変圧器の限流機能を確認した。今後、数値解析により変圧器巻線の過大電流による常電導転移現象についての定量的把握を行っていく。

4. 謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

5. 参考文献

[1] 岩熊成卓:「超電導変圧器における巻線のクエンチ現象に関する研究」

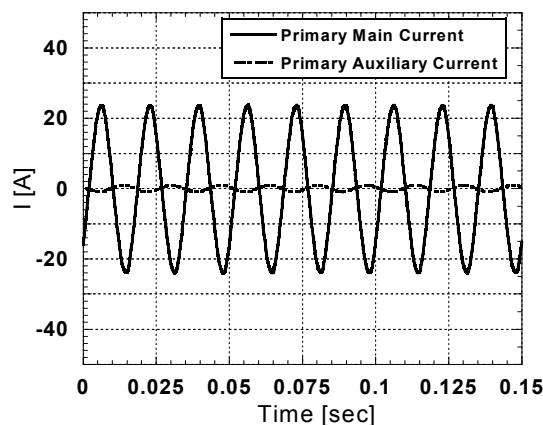


Fig.1 Primary current of normal-load test

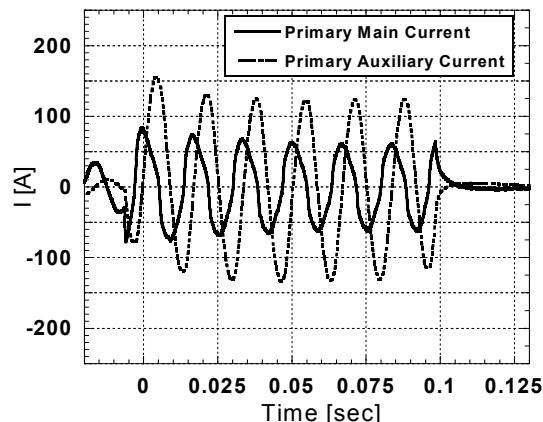


Fig.2 Primary current of sudden short circuit test

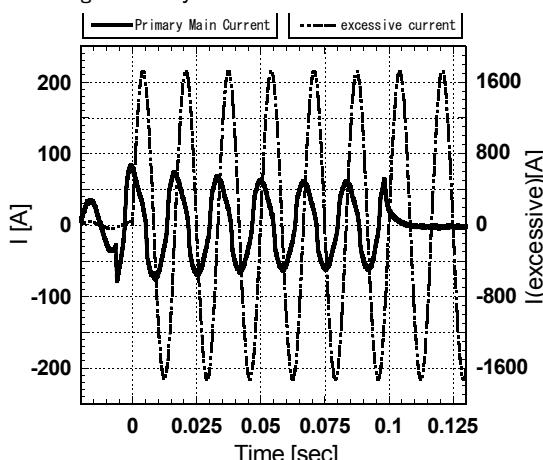


Fig.3 Compare experimental current with excessive current

高温超伝導界磁を有する大規模風力用同期発電機の基礎検討

Study of Large Scale Wind Turbine Synchronous Generators with HTS Field Windings

福井 聰, 荒川 研人, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大学);塚本 修巳(横浜国立大学);鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)

FUKUI Satoshi, ARAKAWA Kento, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);

TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); KASHIMA Naohji, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co. Inc.)

E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

風力発電では発電サイト単位面積から取り出せる電力が発電機単機容量の増大とともに増大することが知られており、そのスケールメリットを生かすべく欧洲では単機容量5MW以上の大規模風力発電の開発が進められている。一般に大型風力発電では、風車の回転数は機械的強度の問題で10rpm前後であり、増速機を用いない直結駆動では発電機の効率を確保するためには極端に多極かつ鉄機械に振った設計が必要になる。この場合、タワー頭部の重量が過大になり、土木コストの増大につながる。一方、増速機を用いない直結駆動を考えた場合、低回転・高トルクでかつ高効率・軽量な同期発電機の開発が重要な課題である。近年、高温超伝導の線材技術の進歩は著しく、高電流密度・高磁界という超伝導の特徴を生かすことにより、風力発電機の軽量・高出力・高効率化の可能性が出てきた。超伝導の特性を十分に発揮するためには、直流の界磁巻線のみを超伝導化し、かつ鉄心の飽和磁束密度を大きく上回るような高磁界化を図った空心機が望ましい。本研究では、風力発電用の界磁超伝導型の10MW級空心同期発電機の概念設計を行うことにより、その電磁設計例を示すことを目的とする。

2. 大規模風力発電用同期発電機の概念設計

超伝導の特徴（高電流密度・高磁界・直流では損失ゼロ）を十分に生かすには、界磁巻線のみを超伝導化して空心で3T以上の高磁界化を図ることが良いと考えられる。この場合、界磁磁束を有効に電機子巻線に鎖交させるために、界磁巻線を半径方向に2分割しそのギャップ間に電機子巻線を配置する構造と、ひとつの界磁巻線を電機子で挟み込む構造を考える。本研究では次世代の大規模風力発電でターゲットとなる容量10MVA/電圧3.3kVを想定し、回転数は10rpm、極数は8とする。

界磁巻線は20K冷却のYBCO線材の臨界電流特性を考慮して、巻線部の最大磁界を10T以下としつつ、電機子巻線部の磁界が3T程度になるようにする。

電機子巻線は短筋・分布巻/2層巻とし、毎相毎極のスロット数を $q=3.5$ とする。まず、電機子巻線の必要直列導体数を見積もる。本機は界磁巻線は集中巻構成であるので、ギャップ部の磁界分布には空間高調波が含まれる。ここでは、その基本波成分の振幅を $B_0=3T$ として計算する。相電圧は $E_0=1905V$ であるので、毎相の直列導体数 $n_0=10.2$ となるが、2層巻にすることを考えて $n_0=12$ とする。

Tab.1に解析を行った各パターンの界磁巻線の断面寸法、およびスロット数、スロット/導体寸法をまとめた。Fig.1に本機の概略断面構造を示す。表1の設計値の元でFEM解析を行った。無負荷時のギャップ磁界分布及び相電圧波形をFig.2に示す。相電圧の基本波分の実効値は1931Vとなり、概ね設計値通りとなつた。

Tab.1 Specification of 10MVA HTS wind generator

界磁スプリット型			
界磁巻線			
超伝導線材	YBCO 線材	巻線寸法	内 130 ×160 mm ²
電流密度	1.6×10^8 A/m ²	外 160 ×160 mm ²	
運転温度	20K 程度	最大磁界	8.2T 以内
設計空隙磁界	3T	内径	1760 mm
		外径	2210 mm
電機子巻線			
スロット数/相・極 q	3.5	導体寸法	25 ×14 mm ²
スロット数/相 Q	28	スロット寸法	
導体数/slot	12		70 ×120 mm ²
電流密度（導体）	5 A/mm ²		

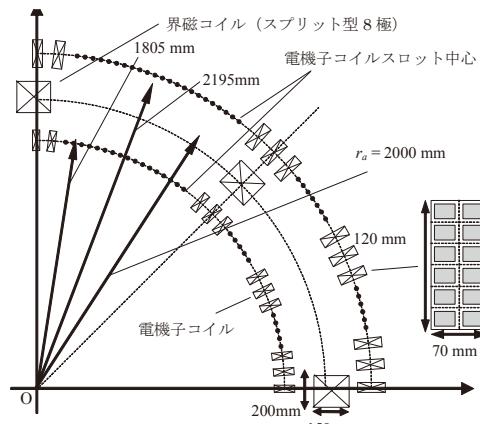


Fig. 1 Cross section

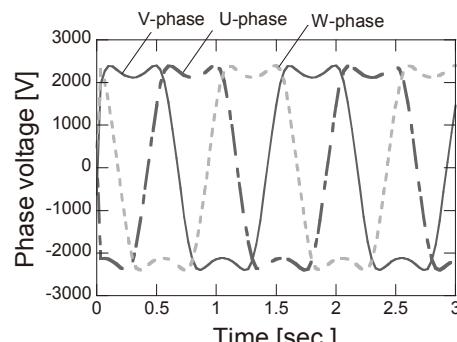
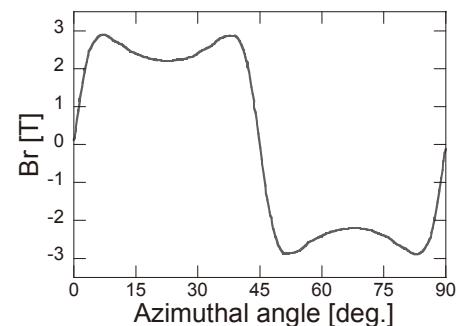


Fig.2 Analytical results

小型クライオクーラーを用いたコアレス超伝導モーターの開発

Development of a coreless superconducting motor with a compact cryocooler

坂井 仁志、河村 実生、クルモフ バレリー、金枝 敏明(岡山理科大学);福光 一真(徳山電機製作所)
 SAKAI Hitoshi, KAWAMURA Minaru, VALERI Kroumov, KANEEDA Toshiaki(OUS); FUKUMITSU Kazuma(TDS)

1 はじめに

近年の高温超伝導ワイヤーの製造技術の進歩とクライオクーラーの小型軽量化および冷凍効率の向上により超伝導技術が身近なものとなってきている。我々の研究室では、これらを利用し従来のモーターに比べ、小型軽量かつハイパワーで理想的な特性をもつ超伝導モーターの実用化を目指して、小型クライオクーラーを搭載した断熱性能の高いコアレス超伝導モーターの開発を行っている。本発表では、最近製作した試作機の構造および特性について報告する。

2 コアレス超伝導モーターの概要

今回製作したコアレス超電導モーターの原理を Fig. 1 に示す。図中の円形磁石によって、その中心に擬似的な磁気单極子 (pseudo magnetic monopole) がイメージされ、これが超伝導コイルによって作られる磁場によって加速され、結果的にイメージを作り出している周りの磁石が力を受け加速される。近年の高温超電導ワイヤーの臨界電流密度の上昇によりコアレスでありながら強力な磁石と組み合わせることにより 1000[N] 程度の力を発生させるのはそれほど困難ではない。この原理に基づく超伝導モーターの予測される特性は、超伝導ワイヤーと永久磁石からのみ構成されているため原理的にモーターのエネルギー損失の原因である銅損と鉄損が存在しないためエネルギー効率が理想的なものとなると考えられ、このモーターを応用することにより高い効率で回生エネルギーを利用できると考えられる。また、コイルと磁場が直交しており、コアレス構造であるため誘導起電力の影響による高速回転におけるトルクの低下を抑えることが可能である。また、このモーターは断熱性能の高い構造が実現可能で、今回試作したモーターの概略を Fig. 2 に示す。以下にそれについて説明を行う。

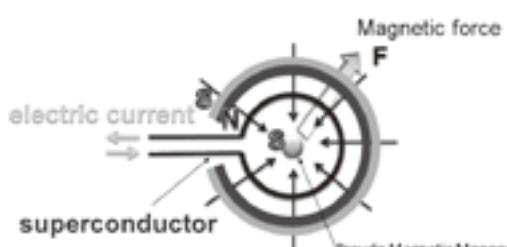


Fig. 1 The basic principle of the superconducting motor

2.1 固定子

コイルには、住友電工の DI-BSCCO 高温超伝導線材を使用した。この線材は幅 4.5 ± 0.3 mm、厚み 0.36 ± 0.04 mm、臨界電流が 170A のものである。さらに臨界電流密度の大きく、交流損失の少ない第二世代イットリウム系超伝導ワイヤーも存在するが高価なため今回はビスマス系の線材を使用した。

コイルのボビンには熱伝導性の高いセラミックスを使用し固定子として利用した。ボビンをセラミックス製にした理由としてモーターを冷却する際、ボビン内部に差し込むように取り付けた銅製のピンを通じてクライオクーラーでボビンを冷やし熱伝導によって超伝導ワイヤーを超伝導状態にする方法をとったからである。このボビンに一相につき 8 個、三相合わせて 24 個のコイルを巻きつけている。

2.2 回転子

回転子にはシャフトを中心とした放射線状に溝を掘りそこに半円に作った永久磁石を片面 16 個、上下合わせて 32 個埋め込んだ。この永久磁石は表面磁束密度が一つにつき 0.5T のものを使用した。それを超伝導ワイヤーが巻かれたボビンを挟み込む形で配置している。

また、ボビンを回転子に接触せずに固定するために PBI (polybenzimidazole) といわれる耐熱性及び機械的強度に優れた高機能スーパーエンジニアリングプラスチック素材を使用し作製したピンを用いて真空チェンバーに固定している。その際チェンバー内の真空を保つためにピンに溝を掘り O リングをはめられるようしている。

2.3 クライオスタッフ

モーターの内部は断熱のため真空状態になっており、モーター容器全体がクライオスタッフを構成している。今回試作したモーターの側面および上部、下部の蓋は透明アクリルで作成されており、モーター内部が観測できるようになっている。

図上部のフタに開けたシャフト用の穴にはフランジ付きのフェローシールが取り付けてある。このフェローシールはシャフトの廻りを磁性流体で取り囲むことでガス・蒸気・霧・微細粒子に対してハーメチックシールを形成するものである。またフェローシールは非接触型のシールであり、磁性流体の粘性抵抗が低いため高速回転能力に優れ、シャフト一本でトルク伝達が行えることから 100 パーセントのトルク伝達とバックラッシュのない同相動力伝達が行える。

電源用の配線はフランジに取り付けたコネクターに熱伝導率の低い超伝導ワイヤーで配線し制御回路及び電源へつなげている。

モーターの冷却に使用したクライオクーラーは SunPower 社の CryoTel Cryocooler GT である。これは無負荷の状態で最大 35K まで下げることができ、77K で 15W の Lift 能力があり、温度制御が ± 0.1 K の制度で可能である。

試作モーターの出力性能および、断熱性能、交流損失や効率については本発表において報告する予定である。

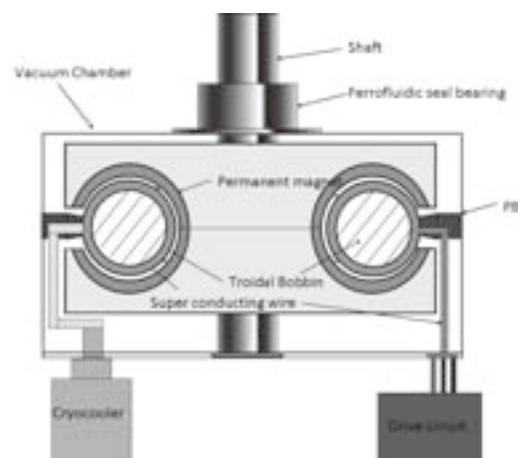


Fig. 2 Schematic diagram of the superconducting motor

高温超電導コイルとバルクを併用した風力発電機の出力特性の解析

Output characteristic analysis of wind turbine generators with field magnets composed of high-temperature superconducting coils and bulks

寺尾 悠, 関野 正樹, 大崎 博之(東大); 手嶋 英一, 森田 充(新日鐵)

TERAO Yutaka, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo);

TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.)

E-mail: y_terao-008@ohsaki.k.u-tokyo.co.jp

1. はじめに

風力発電は、現在最も注目されているクリーンエネルギーの一つである。近年、風車単機あたりの発電容量は増加傾向にあり、10 MW 級発電機の研究開発も行われている[1]。その一方で、発電機が搭載されるナセルの重量増加を抑えるため、発電機を高出力密度化する必要がある。

我々は10 MW 級発電機への応用を目指し、バルク超電導磁気遮蔽材と超電導コイルを組み合わせ、強いギャップ磁束を発生させる界磁系を提案した[2]。

本稿では、電機子コイルの誘導起電力及び同期リアクタンスを、3次元有限要素法(FEM)解析より算出し、それに基づいた等価回路から発電機出力特性を求め、考察した結果を報告する。

2. 解析モデル

Fig.1に回転子の構造を示す。低速運転(10 rpm)を前提としており、直徑 7 m、軸方向長さ 1.82m、110 極となっている。リング状に巻かれた超電導コイル 7 セットへ互いに逆向きに 1.86MA・turn の電流を流して発生した磁界が、バルク超電導体 A(200mm × 200mm × 40mm)、B(190mm × 200mm × 10mm)の遮蔽効果によって局所的に集中し、発電機の界磁となる。この状態で回転子が回転することで、磁束の遮蔽部分と発生部分が交互に繰り返し、電磁石の NS 構造となる(Fig.2)。

今回は巻数 10、電流密度 2 A/mm²と仮定した電機子コイル(断面: 50mm × 100mm、軸方向長さ: 1820mm)を、ギャップ 20mm として配置し、鎖交磁束から誘導起電力を求めた(Fig.3)。

解析を行うにあたり、バルク超電導体部分は比透磁率 10⁻⁵の等方性磁性体で近似した。

3. 解析結果

Table 1 に解析結果を示す。電機子コイルに発生する誘導起電力は1ターンあたりで 6.3 V である。いま、同期リアクタンス及び巻線抵抗を算出し、同期発電機の等価回路を用いて考察した場合、二つの回路要素における電圧降下を考慮すると、発電機出力は 9.7 MW となった。

4. まとめ

高温超電導コイル及びバルク超電導体を用いた風力発電機について3次元のFEM解析を行い、発電機出力特性を求めた。今後の課題として、極数及びギャップの見直しを行った上で、超電導臨界状態モデルを取り入れた解析を行っていく予定である。

参考文献

- A. B. Abrahamsen, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 19(2009), pp.1678-1682
- Y. Terao, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009), p.177

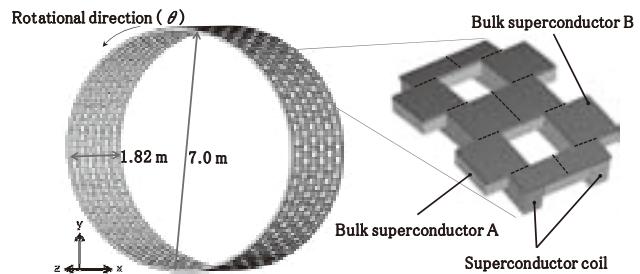


Fig.1. Rotor structure with superconductor coils and bulks (110 poles)

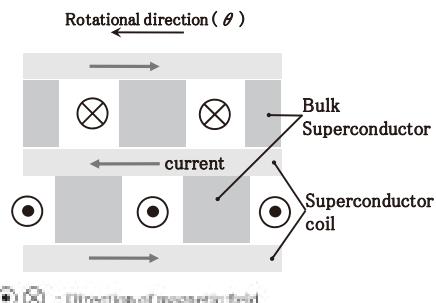


Fig.2. Magnet field generated by superconductor coil currents and bulk superconductors for magnetic shielding

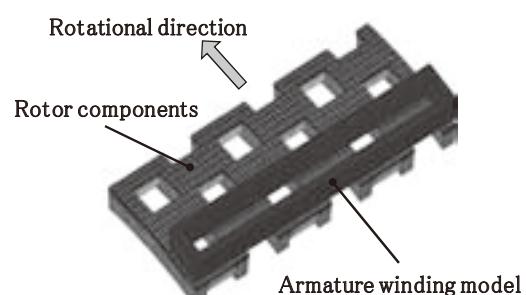


Fig.3. Armature winding model for calculating its interlinkage magnetic flux and induced voltage when the rotor rotates at 10 rpm

Table 1. Specifications of armature windings and basic characteristics of the generator

Revolution	10 rpm
Output power	9.7 MW
Armature windings	
Cross section	50 mm × 100 mm
Current density	2 A/mm ²
One-turn voltage	6.3 V
Maximum magnetic field	12 T (on a superconductor coil)

超伝導フライホイール用非接触伝達機構に関する研究

Study of non-contact momentum transfer for superconducting flywheel

田中 優, 村上雅人 (芝浦工大)
 TANAKA Yu, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)
 E-mail: m208017@sic.shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

最近超伝導の浮上技術を利用したフライホイール型電力貯蔵装置の開発が進められている。超伝導フライホイールとは、軸受けロスの無い超伝導磁気ペアリングを用いた電力貯蔵装置である。モータによりフライホイールを回転させ、電力を回転エネルギーに変換し、必要に応じて電力を取り出す仕組みである。

エネルギーの出し入れは、フライホイールとモータが同軸で接続された状態で行われるが、接続した状態ではロスが生じるため、必要に応じてフライホイールとモータが接続できる構造が望ましい。

本研究では、永久磁石を利用した非接触伝達機構について簡単な評価装置を用いて実験および検討を行った。

2. 実験方法

Fig.1 に実験に用いた評価装置を示す。装置の構成は下部のジャッキに固定されたモータ、上部の出力端子のついた発電機、それぞれの回転軸にFig. 2 のような NS が対になった磁石回路(カップリング磁石)が取り付けられている。

使用したモータは 100rpm から 1600rpm まで回転数を変えることができる。なお上下の磁石が接触しないために磁石間に塩化ビニール製の板を挿入してある。

カップリング特性は以下のように評価した。まずカップリング磁石間の距離を 10mm から 30mm まで 5mm 間隔で設定する。出力端子にデジタルテスターを接続し、測定レンジを交流電圧に設定する。モータの回転数を徐々に増加させながら出力電圧を測定する。

次にテスターの測定レンジを交流電流に設定し、モータの回転数を上昇しながら出力される電流を測定しカップリング特性を評価する。

また、磁石間のカップリング力と結合力のバックデータとしてカップリング磁石の磁場分布測定の距離依存性をホール素子走査型磁場分布測定装置を用い測定した。

3. 実験結果

Fig.3 にカップリング磁石間の距離を変えながら測定した出力電圧の回転数依存性を示す。出力電圧は回転数に比例しており、距離に関係なく、すべてが一本の直線に載っていることが分かる。これは、ギャップ 10mm から 30mm の間では、負荷のない状態では、磁石間がよくカップリングしていることを示している。磁場分布測定結果でも 30mm の高さで弱いながら NS 極性が観察され、カップリングすると考えられる。

つぎに、Fig.4 にカップリング磁石間の距離を変えながら測定した出力電流の回転数依存性を示す。出力電圧とは異なり、回転数の増加とともに、出力電流は単調な増加は示さずに飽和する傾向にある。

また、磁石間距離が小さい場合には、1500rpm までカップリングがみとめられたが、磁石間の距離が大きくなるにつれて、ある回転数以上では、カップリングがはずれ、マスターカーブから突然、はずれている。これは、電流測定では、系に負荷がかかった状態となるため、磁石間結合の弱いギャップの大きい範囲では、カップリングが維持できなくなるためと考えられる。

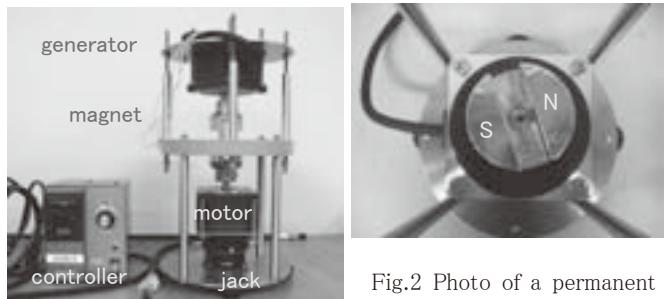


Fig.1 Photo of experimental setup.
 Fig.2 Photo of a permanent magnet circuit for rotational transfer.

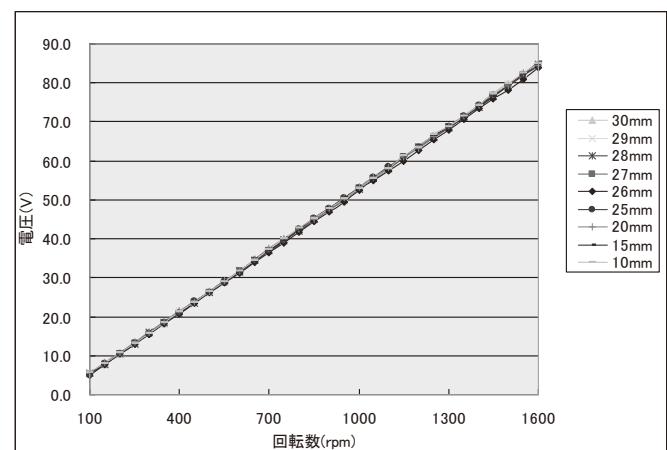


Fig. 3 Dependence of rotational speed on the output voltages for various gaps.

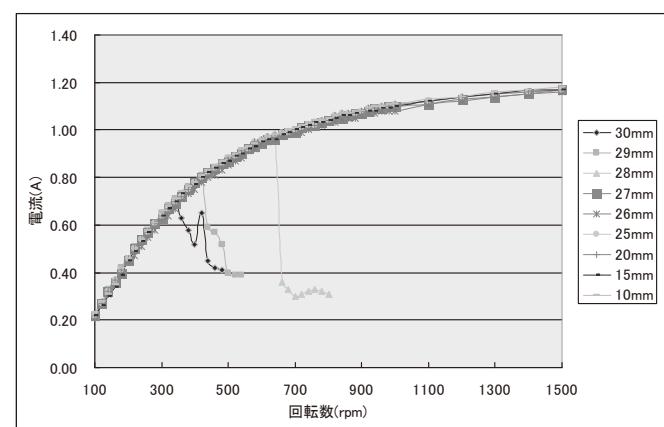


Fig. 4 Dependence of rotational speed on the output currents for various gaps.

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性評価

Evaluation of Stability in Active Magnetic Levitation using Spherical Bulk Superconductor

王 輩, 陸 旭棟, 青木 徹, 阿部 昂機, 植田 浩史, 我妻 洋, 石山 敦士(早大); 岩本 晃史, 柳 長門, 三戸 利行(NIFS)

WANG Tao, RIKU kyokutoh, AOKI Tohru, ABE Kohki, UEDA Hiroshi, AGATSUMA Koh,

ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); IWAMOTO Akihumi, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki(NIFS)

Email: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

複数の電磁石(コイル)を用いて酸化物バルク超電導体(バルク体)をアクティブ磁気浮上させるシステムは、制御コイルの通電電量を変化するだけで簡単にバルク超電導体の磁気浮上高度を制御することができる。さらに、非接触かつ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ている。そこで本研究では、慣性核融合における一つの課題である「燃料を非接触でレーザー照準位置に精度よく移動させること」を可能にさせるため、超電導を利用した磁気浮上装置を応用することを考えた。一方、慣性核融合に用いるには目標となる球状バルク超電導体が磁気浮上する際ににおける水平方向、垂直方向、回転方向という三方向の安定性が要求される。我々は、安定浮上可能な磁場分布を作り、垂直方向における浮上位置精度を向上させることに成功した。今回は、我々は複数の銅コイルを用いて試作したアクティブ浮上装置を用いて、目標位置での水平方向復元力を測定し、水平方向の安定性を評価した。また、Fig.1 で示した線状電流を用いることで、5mm 球状バルク超電導体の回転方向安定性を確保する試みを施した。併せて電磁界解析により、5mm 球状バルク超電導体の目標位置における復元力を計算したので、実験結果と共に報告する。

2. コイルシステムの構成

安定浮上を実現するために、我々は Fig.2(a)に示すようなコイル(Coil A)の上部に、Fig.2(b)のような逆向きの磁場を発生するコイル(Coil B)を配置した。今回は5mm 球状バルク超電導体が磁気浮上する目標高度を $z=3\text{mm}$ と定め、コイルの電磁界解析を行うことにより、安定浮上が可能で最適なコイルの寸法を決めた。試作したコイルシステムの諸元を Fig.1 に示す。また、Coil 1 と Coil 3 に 15A、Coil 2 に 13A の電流を流し、磁気浮上する領域における磁場分布を実測した。その結果を Fig.3 に示す。実験的に窪みがある磁場分布を確認できた。

3. 5mm 球状バルク超電導体の安定性評価

バルク超電導体のアクティブ磁気浮上には磁場の窪みの大きさや深さ、そして 5mm 球状バルク超電導体の目標位置における水平方向の復元力が安定性評価の指標となる。それと同時に、外乱による球状バルク体の回転を抑えるため、回転方向安定性の確保も要求される。そこで、線状電流を Fig.1 のように用いて(実際は 3 本)、磁気浮上する際の球状バルク超電導体の回転を抑制した。水平方向の安定性については、Fig.2 に示したとおり、水平復元力が 30mN 前後である。また、回転方向の安定性については我々がデジタルビデオカメラの映像で球状バルク超電導体が回転せずに磁気浮上することを確認した。

4. まとめ

5mm 球状バルク超電導体が磁気浮上の目標位置における水平方向及び回転方向の安定性を電磁界解析と実験により評価し、良好な結果を得た。

参考文献

1. H.Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.74(2006) p.118
2. K.Riku, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.79(2008) p.182

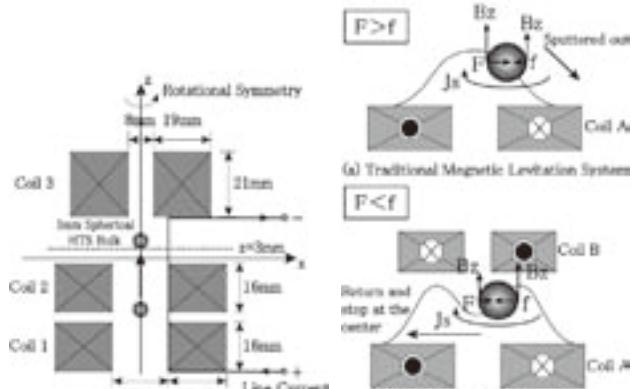


Fig.1 Structure of Active Magnetic Levitation Coil system

Fig.2 Principle of Stability on Horizontal Direction

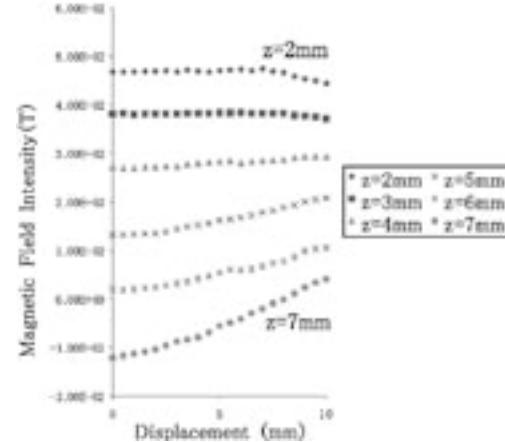


Fig.3 Experimental results of distributions of magnetic field in target area

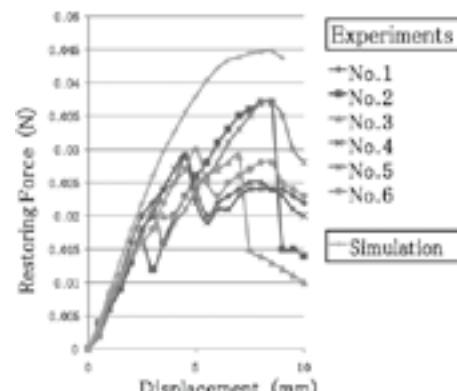


Fig.4 Relation of restoring force and displacement

2次元配列した電磁石群の3次元超電導アクチュエータの浮上特性への影響

The effects of the shape of the 2-D arranged electromagnets on levitation performances of the 3-D superconducting actuator

奥川 恵介, 金 錫範, 朱 鎮弘, 井上 大嗣, 上荷 洋平, 村瀬 曜(岡山大学)

OKUGAWA Keisuke, KIM SeokBeom, JIN-HONG Joo, INOUE Daiji, UWANI Youhei, MURASE Satoru (Okayama University)

E-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導バルク体(以下バルク体)の特性向上に伴って機器応用への開発研究が活発に行われている。我々は、クリーンルームでのシリコンウェハ搬送や空間的に隔てた環境における遠隔操作が可能な超電導アクチュエータの開発を行ってきた[1]。開発する超電導アクチュエータは、固定子である2次元配列された電磁石群と移動子であるバルク体によって構成されている。電磁石を個別に制御することによってバルク体の鉛直方向、水平方向への移動および回転を可能としている。3次元超電導アクチュエータのコストパフォーマンスを改善するためには、電磁石間の距離を大きくさせることで、電磁石の総数を減らすことが望ましいと思われる。そこで、電磁石間の距離を大きくした場合の超電導バルク体における浮上力の駆動電流依存性について実験と解析の両面から検証し、電磁石の最適な極性パターンについて見当したので、その結果について報告する。

2. 解析方法

本研究では、3次元有限要素法に基づく電磁界解析ソフトを使用し、超電導バルク体の捕捉磁場分布と浮上力特性について解析を行った。バルク体は直径60mm、厚み15mm、質量294gのものを用いた。

解析では、超電導現象を渦電流問題として考え、バルク体内部に捕捉される磁場の分布について計算した。解析に用いた支配方程式は、次式となる。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = -\sigma \left(\mathbf{A} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(\mathbf{A} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)の \mathbf{A} は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。なお、超電導体の非線形特性については n 値モデルにより表現した。

浮上力の算出は、バルク体内部の磁束密度と電流密度によるローレンツ力を計算することで行った。バルク体に影響する磁束密度 \mathbf{B}_0 は次式で表される。

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_{sc} \quad (3)$$

式(3)の \mathbf{B}_e は電磁石によって生じる磁束密度、 \mathbf{B}_{sc} は超電導バルク体内部の磁束密度である。ローレンツ力の方程式より、発生する浮上力 \mathbf{F}_z は次式で表される。

$$\mathbf{F}_z = \int_V (\mathbf{J}_x \times \mathbf{B}_y - \mathbf{J}_y \times \mathbf{B}_x) dV \quad (4)$$

ここで \mathbf{J}_x と \mathbf{J}_y は、バルク体内の電流密度の x と y 方向成分、 \mathbf{B}_x と \mathbf{B}_y は、 \mathbf{B}_0 の x と y 方向成分、 V はバルク体の体積である。バルク体に働く重力の影響を考慮すると、実際の浮上力 \mathbf{F}_{lev} は次式で表される。

$$F_{lev} = F_z - mg \quad (5)$$

m はバルク体の質量、 g は重力加速度である。

3. 解析結果と考察

Fig.1に、バルク体における浮上力の駆動電流依存性の解析結果を示す。電磁石間隔を大きくしていくにつれて、浮上力は減少した。これは、電磁石間隔を広げることによって、バルク体が電磁石の鉄心に接する面積が小さくなるため、捕捉される磁場が低下したためであると考えられる。NSNS パターンは、隣接する極への磁場の流入により、NNSS パターンに比べて磁気回路が強まるため電磁石の発生磁場が大きくなるが、早期に鉄心が磁気飽和してしまうため、電磁石の発生磁場も NNSS に比べて小さい駆動電流で飽和してしまう。そのため、浮上力にもその飽和傾向が顕著に見られる。NNSS パターンは、NSNS パターンより浮上力の飽和が少し遅れるものの、20A付近から飽和傾向を示しており、今回行った解析範囲内では、NSNS パターンの浮上力が NNSS パターンより大きかった。

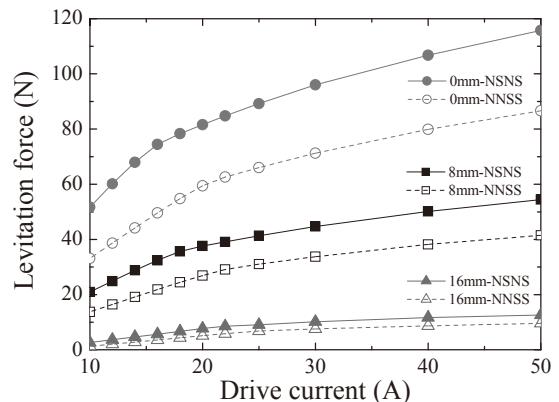


Fig.1 Analyzed levitation force for various driving current (10-50A) as function of the interval between electromagnets with NNSS and NSNS pole patterns.

4. まとめ

3次元有限要素法により、バルク体の捕捉磁場に関するシミュレーションを用い、バルク体内の捕捉磁場強度及び分布によりバルク体の浮上力を算出した。電磁石間の間隔と極性パターンをパラメータにして解析を行った結果、電磁石間隔を大きくした場合、NNSS、NSNS パターン共に浮上力は減少した。電磁石の駆動電流を増加させた場合、NSNS パターンの方が早期に浮上力が飽和したが、NNSS パターンよりは浮上力が大きくなることがわかった。駆動電流 20A まで飽和傾向の見られなかった NNSS パターンにおいても、20A付近で浮上力の飽和が確認され、通電電流を 20A 以上にした場合でも浮上力は NSNS パターンの方が大きい。このことから、電磁石間の距離を大きくした 3次元超電導アクチュエータにおいても、より大きな浮上力を得ることのできる電磁石の極性パターンは NSNS パターンであるということが確認された。

参考文献

- [1] K. Kawakami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76(2007) p.83

強磁場中にある磁性細線周囲における磁性微粒子の凝集挙動のモンテカルロシミュレーション

Monte Carlo Simulation of accumulation of Magnetic Fine Particles around Magnetized Fine Wire

新潟大学:八柳智也[○], 福井 聰, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 今泉 洋

Niigata University: Tomoya Yatsuyanagi, Satoshi Fukui, Jun Ogawa, Tetsuo Oka, Hiroshi Imaizumi

1. はじめに

実用的な磁気分離装置の磁気フィルターの設計を行なうことを考えた場合, 捕獲すべき対象粒子の磁性や粒子径, 単位時間当たりの必要処理量にあわせて, フィルターの磁性細線の寸法・充填率, 磁性細線への付着飽和など設計或いは評価すべきファクターは多数あり, これらを系統的に扱える理論的な枠組みは未だ十分に確立されてはいない。我々は, 磁気フィルターを構成する磁性線周囲の粒子付着・凝集現象を解析するモデルの開発を第一目標として研究を行っている。これが確立できれば, その発展形として, フィルター性能の経時変化を論じることが可能と考えられる。本稿では, 均一磁場中に1本の磁性細線を配置し, その周囲への磁性粒子の集積現象を, 流れ場による影響を考慮したメトロポリス・モンテカルロ法によるモデル化について報告する。

2. モデル

本研究では, 均一な強磁場中に置かれた1本の磁性曲線に, 磁性微粒子が分散した液体を一定速度で流し, このときの磁性細線周囲への磁性粒子の集積現象をメトロポリス法によるモンテカルロシミュレーションを用いて行う。解析のアルゴリズムを以下にまとめる。

1. 解析領域内に粒子を初期配置させる。
2. 全粒子系のポテンシャルエネルギー U を以下の式で計算する。

$$U = U_M + U_F$$

$$U_M = \sum_{i=1}^N \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{ip} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_i^e) + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{if} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_i^e) \right) + \sum_{j=1}^N \sum_{i \neq j} \left(-\frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{ip} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_{ij}^m) + \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot (\mathbf{m}_{if} \cdot \mu_0 \mathbf{H}_{ij}^m) \right)$$

$$\mathbf{m}_{ip} = \begin{cases} \frac{3\chi_p}{3+\chi_p} \mathbf{H}_i^e & (\mathbf{m}_{ip} < m_{ps}) \\ \frac{\mathbf{H}_i^e}{|\mathbf{H}_i^e|} & (\mathbf{m}_{ip} \geq m_{ps}) \end{cases} \quad \mathbf{m}_{if} = \frac{3\chi_f}{3+\chi_f} \mathbf{H}_i^e$$

$$\mathbf{H}_{ij}^m = -\text{grad} \left(\frac{1}{4\pi} \frac{\mathbf{m}_{jp} \cdot \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|^3} \right) = \frac{1}{4\pi} \left(-\frac{\mathbf{m}_{jp}}{|\mathbf{r}_{ji}|^3} + \frac{3(\mathbf{m}_{jp} \cdot \mathbf{r}_{ji}) \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|^5} \right)$$

$$U_F = \sum_{i=1}^N - \int 6\pi\eta r_p \cdot \mathbf{v}_{fi} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\mathbf{v}_{fi} = (v_0 \frac{a^2}{r_{0i}^2} \sin 2\theta, v_0 (1 - \frac{a^2}{r_{0i}^2} \cos 2\theta))$$

ここで, r_p は粒子半径, χ_p は磁性粒子の磁化率, χ_f は分散媒の磁化率, \mathbf{m}_{ip} は粒子 i の磁化, \mathbf{m}_{if} は粒子 i と同位置・同体積の分散媒の磁化, m_{ps} は粒子 i の飽和磁化の大きさ, \mathbf{H}_i^e は粒子 i の位置での外部磁場, \mathbf{H}_{ij}^m は粒子 j の磁化 \mathbf{m}_{jp} が粒子 i の位置に作用する磁場, \mathbf{r}_{ji} は粒子 j と粒子 i の中心間を結ぶ位置ベクトル, v_0 は磁性線から十分離れた位置での一様流の流速, a は磁性線の半径, r_{0i} は磁性線中心から粒子までの距離である。

3. 粒子を1つ選び, 粒子位置を乱数を用いてランダムに変位させる。
4. ポテンシャルエネルギーを再度計算しその変化 δU が負なら, これを新しい粒子状態としてステップ3から繰り返す。もし, $\delta U > 0$ ならば, 乱数列から更に c_{ran} 取り出し, $\exp(-\delta U/kT) > c_{ran}$ の場合, 粒子の移動後の状態をマルコフ連鎖の推移後の状態とみなして, ステップ3から繰り返す。 $\exp(-\delta U/kT) \leq c_{ran}$ の場合, 粒子の移動する前の状態でステップ3から繰り返す。
5. 2~4の操作を系が平衡状態になるまで反復する。

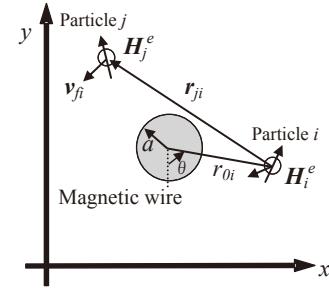


Fig.1 Analytical model of potential energy

3. 解析結果

まず解析領域内の磁場分布をFEM解析する。初期状態として磁性粒子を配置し1000MCステップ経過ごとに新たに粒子を追加していく。また粒子を追加する際, 以前の集積状況から予測して集積範囲を限定している(Fig2~5)。本研究では, 磁性細線周囲の磁場の大きい範囲に磁性粒子が集積しつつ, 流れ場の影響により磁性細線下部へ粒子が移動していく様子が解析結果に表われている。

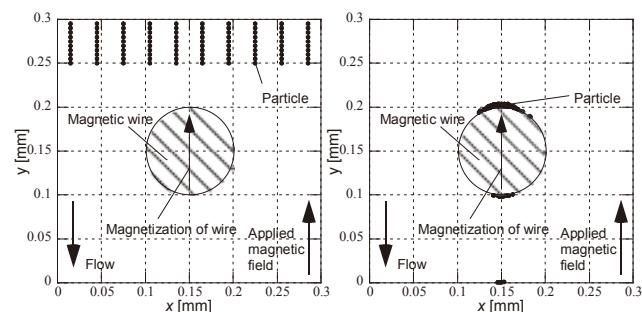


Fig.2 MC=0step

Fig.3 MC=1000step

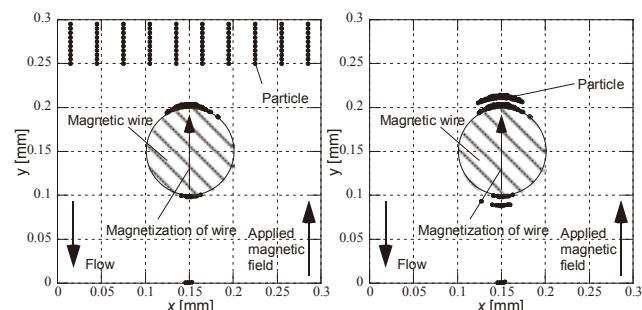


Fig.4 MC=2000step

Fig.5 MC=3000step

平行平板電極中を流れる海水の電気分解

Electrolysis of salt water flowing in a duct with parallel plate electrode

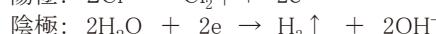
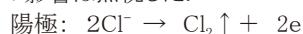
中本 雄也, 大角 和也, 大塚 康平, 岩本 雄二, 赤澤 輝彦, 梅田 民樹 (神戸大)
 NAKAMOTO Yuya, OHSUMI Kazuya, OTSUKA Kohei, IWAMOTO Yuji, AKAZAWA Teruhiko,
 UMEDA Tamiki (Kobe University)
 E-mail: akazawa@tiger.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

海水に磁場を印加し, 磁場と垂直な方向に通電を行うと, 海水にはローレンツ力が作用する. 一方, 不導体である油には電流が流れないので, ローレンツ力は発生しない. このローレンツ力の作用の違いを利用することにより, 油と海水を分離する装置に関する基礎研究を我々のグループは行っている. これまでに行われた研究では, 分離装置内で発生するローレンツ力や分離力を計算すると, 海水を液体金属と同様の導電性をもつ流体(電磁流体)と考え, 大雑把な評価しかしていなかった. しかしながら, 海水は電磁流体ではなく, 流体である水と電気伝導を担う複数の種類のイオンからなる電解液である. つまり, 分離装置内で海水に発生するローレンツ力の空間分布を数値計算により精密に導出するためには, 電磁流体モデルではなく, 電解溶液モデルを用いて計算を行う必要がある. そこで, 我々は電解溶液の電磁場中での運動を取り扱える数値計算法を確立することを目標にして研究を進めている. この目標への第一歩として, 電解溶液モデルに基づき, 平行平板電極をもつダクトを流れる海水の電気分解について数値シミュレーションを行った. この結果について講演概要では報告する. また, 数値シミュレーションと同一形状のダクトを作製し, 海水を実際に流しながら電気分解を行った. このときダクト内に発生する電位の空間分布を計測した結果についても学会では報告する. 実際の計測値と数値シミュレーションの結果を比較・考察することから, 数値シミュレーションに用いた電解溶液モデルの妥当性についても検証する予定である.

2. 数値シミュレーション

数値シミュレーションに用いた海水ダクトの形状は, Fig.1 に示す通りである. また, 簡単のため陰極および陽極で起きる化学反応は以下のものとし, 電極板で発生する気体の海水への影響は無視した.



ダクト入口から流入する海水の初期流速 u_0 は一様であると仮定し, 海水の運動については, Navier-Stokes の式を, 海水中のそれぞれのイオンの運動については, Nernst-Planck の式を用いた. 海水中に存在する各イオンの拡散係数等の物理定数は, 参考文献1より引用した. また, 数値シミュレーションには, COMSOL Multiphysics を用いた.

3. シミュレーション結果

ダクトに流入する海水の初期流速 u_0 を 0.03cm/s , 電極板の表面での電流密度 I を 1000A/m^2 としたとき, 数値シミュレーションより得られたダクト内の電位および各イオン濃度の空間分布を Fig.1 および Fig.2 にそれぞれ示す.

各イオン濃度は, ダクト内の流速分布に強く影響を受けることがわかった. 特に, ダクトのコーナー付近で, 海水流速が遅くなることを反映して, Na^+ や OH^- の濃度が最も高くなる場所がダクトコーナー付近に出現することがわかった.

また, 海水の流れの方向に沿って電位をみると, 電極板の入り口に比べ, 出口の電位が高くなっている, 電極中央に対し非対称な形の電位分布が生じていることがわかった. 電気分解により生じる各イオンの濃度変化が, 付加的な電場を発

生させるため, このような電位分布が形成されると考えられる. 従来適応していた電磁流体モデルからは, イオンの作る電場効果は計算できない. 電解質モデルで海水を取り扱う適合性を示した現象と考えられる.

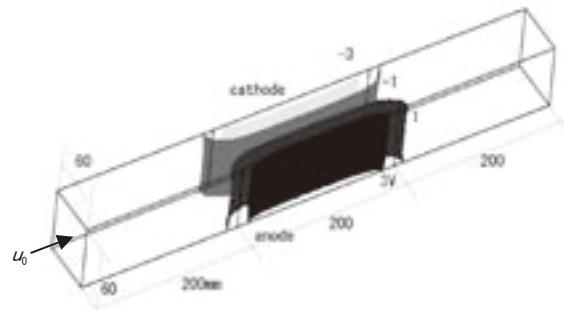


Fig.1 Feature size of the duct and spatial property of electric potential.

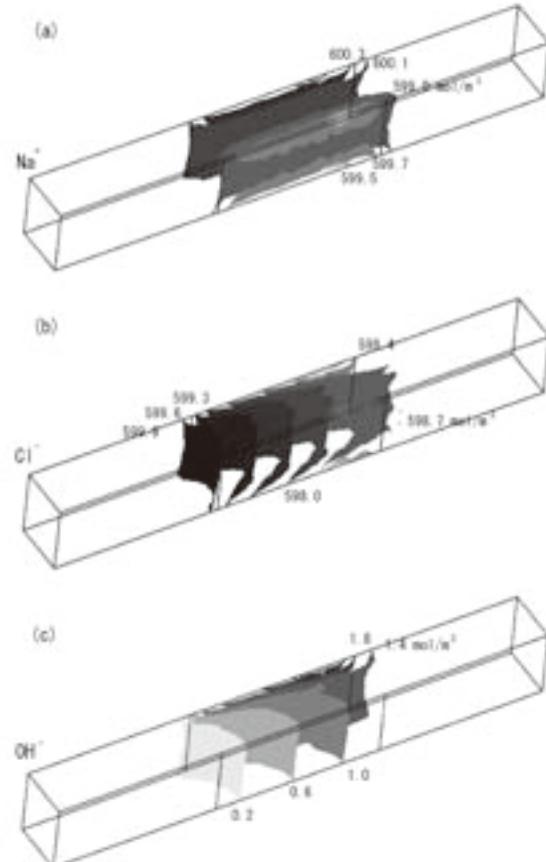


Fig.2 Spatial distribution of ionic concentration in the duct:
 (a) Na^+ , (b) Cl^- and (c) OH^- .

参考文献

1. J. Lu, et al.: *Electrochimica Acta*, Vol. 53 (2007) p.768.

小動物用 SQUID システムによる心疾患モデルマウスの異常心磁図と解析評価

Measurements and Analyses on Abnormal Magnetocardiography of Heart-disease-model Mice Using SQUID System for Small Animals

石山 敦士, 鎌野 裕介, 南沢 享, 葛西 直子(早大); 小野 弓絵(神奈川歯科大)

ISHIYAMA Atsushi, TATENO Yusuke, MINAMISAWA Susumu, KASAI Naoko (Waseda Univ.); ONO Yumie (KDC)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、非侵襲的な検査方法である小動物用心磁図(MCG)計測システムの開発を行っている。これまでに、磁場コンターマップに異常が出現した2匹のマウスの解剖結果において、心筋梗塞の進行と思われるような症状が確認された。今回は、心筋梗塞モデルマウスのMCG計測において得られた異常磁場コンターマップから、独自に開発した計算機プログラムを用いて逆問題解析を行い、心筋興奮過程の状態や疾患部位の推定を行った。そして、病理解剖検査等の結果の比較評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

心筋梗塞モデルマウスには、(NZW×BXS)F₁ 7匹(以下A,B,C,D,E,F,Gと呼ぶ)を用い、コントロールとして、NZW/N 1匹(Y)を用いた。心磁図計測は基本的に1週間ごとに行った。コントロールマウスYは7~15週齢時に、心筋梗塞モデルマウスA,C,Dを9,10週齢時に、Bは9~14週齢時に、Eは9~16週齢時に、Fは9~11週齢時に、Gは10~12週齢時において計測を行った。計測には筆者らが開発した小動物用生体磁気計測システム^[2]を用い、胸部の4×4点(4mm間隔)を計測した。また、計測中、マウスは体温保持のため温水ベッドに仰向けに寝かせ、麻酔としてイソフルラン、酸素および笑気の混合ガスを吸引させた。計測の際、サンプリング周波数を4000Hzとし、50Hzのノッチフィルタおよび700Hzのローパスフィルタを用いた。また、心磁図と同時に心電図も計測し、R波ピークをトリガとして用い、400回加算平均を行った。

また、心臓の興奮過程を見るために、得られたコンターマップから心臓の電流源を推定した。各電流ダイポールは、各時間帯における、心筋の興奮波面のおおよその中心位置を示している。

3. 実験結果と考察

コントロールマウスYと心筋梗塞モデルマウスAの心磁図から得られたS波時刻における磁場コンターマップをFig.1に示す。コントロールマウスでは14週齢時までR,S,T波時刻において変化は見られなかった。一方、心筋梗塞モデルマウスAでは10週齢時で磁場の湧き出しと吸い込みの位置が9週齢時と比較して90度回転している。また、マウスBではT波時刻において同様の変化が見られた。

磁場コンターマップに変化の見られたマウスA,B、比較対象のために変化の見られなかったマウスC、およびコントロールマウスについて心エコー検査、血行動態検査、病理解剖検査を行った。その結果、心エコー検査、血行動態検査による心機能検査では4匹全てのマウスで特に異常は見られなかった。しかし、解剖検査によって、心筋梗塞モデルマウスA,Bの心臓に異常が見られた。4匹のマウスの心臓のスライスをFig.2に示す。心筋梗塞モデルマウスAの心臓では、冠動脈が太くなり、心室壁が肥大化していた(Fig.2)。また、組織変成が少し進行しており、血液の浸潤が確認された。これは、何らかの原因で組織変成が生じ、血液が浸潤したものと思われる。また、マウスBの心臓では、マウスAの心臓と同様に、冠動脈が太くなり、心室壁が肥大化していた。また、左心室において組織の線維化が確認された。さらに、心臓の血管周りに異常が見られた。これらの症状は程度こそ違うが、心筋梗塞の進行と思われるような症状であると考えられる。

得られたMCGデータを用いて逆問題解析を行い、各時刻の心筋興奮波面の中心位置と向きを矢印で示したものがFig.3である。同図からマウスAにおいて、9週齢時と10週齢時とを比較すると、矢印が全体的に広がりを見せており、特にS波の時間帯では流れの回転方向が逆になっている。コントロールマウスでは、特に目立った変化は見られない。以上の結果から、Fig.3のような評価法が、心疾患の発症や薬理効果に関する研究に適用できる可能性が示されたと考える。

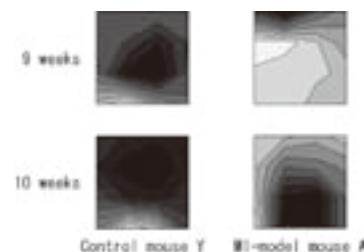


Fig.1 Magnetic contour maps for the control mouse Y and MI-model mouse A at S wave time



Fig.2 Slice of hearts of the control mouse Y and MI-model mouse A

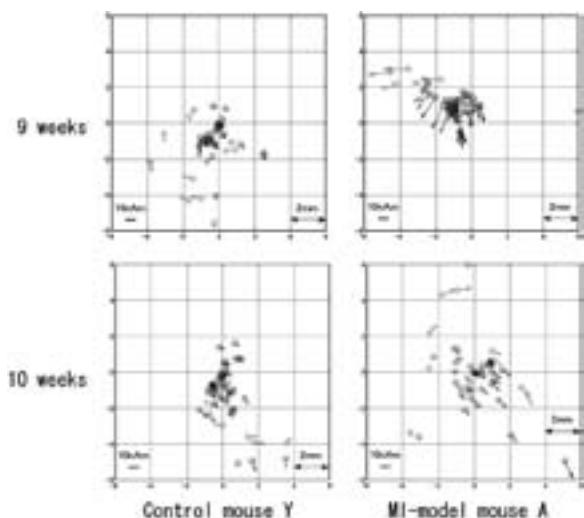


Fig.3 Dipole stream of the Control mouse Y and MI-model mouse A

参考文献

- [1] Y.Kasai, A.Ishiyama, Y.Ono, N.Kasai. et al.: Continuous measurements of MCG with heart disease model mice. *J Jpn Biomag Bioelectromag Soc* 20 (2007) p.212-213.
- [2] Y.Ono, A.Ishiyama, N.Kasai, K.Chinone.: Development of biomagnetic measurement system for mice with high spatial resolution. *Appl Phys Lett* 85 (2007) p.332-334.

認知症研究用の新型 MRI モデルマグネットの検討

Study of a proto type off-center MRI magnet for dementia research

南 いつか, 広瀬 量一, 伊藤 聰, 竹田雅詳 (JASTEC);
 尾崎 修 (神戸製鋼); 大崎 博之, 関野 正樹 (東大); 和田 仁 (NIMS)
MINAMI Itsuka, HIROSE Ryoichi, ITO Satoshi, TAKEDA Masaaki (JASTEC);
 OZAKI Osamu (KSL); OSAKI Hiroyuki, SEKINO Masaki (Univ. of Tokyo); WADA Hitoshi (NIMS)

1. はじめに

通常の MRI では、画像を得るための均一磁場空間をマグネットの中心で発生する。この均一磁場空間を中心より端面側にオフセットした位置に発生することができれば、頭部用の MRI として認知症の原因究明等への活用が期待される。本発表では、オフセンターMRI 用マグネットの実証を目指し、小型モデルマグネットを設計・製作し、得られた性能について報告する。

2. マグネット仕様とコイル設計

モデルマグネットは、小動物の MRI 撮像を考慮し、マグネットの磁場均一度の設計上の目標を $< 5 \text{ ppm} @ 35 \text{ mm DSV}$ とした。また、軸方向にオフセンター化された均一磁場空間を生成するため、複数のコイルを Fig.1 のように階段状に配置する必要がある。全てのコイルは軸対称であるので、磁場不均一度の z'' 成分だけを考慮して設計を行えばよい。

MRI のように磁場均一度が要求される場合、複数のコイルの z'' 成分の係数の和が 0 になるコイル配置を求める。本モデルマグネットに対しても同様に、 z の 1 次から 7 次までの各係数の和を極力 0 に近付くようコイル配置を検討した。

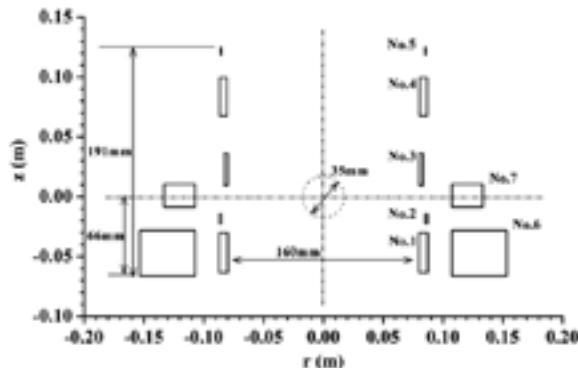


Fig.1 Coil configuration of a prototype magnet. Dotted circle indicates the homogeneous field zone.

3. マグネット仕様

Table 1 に本マグネットの仕様を示す。

Table 1 Specifications of off centered magnet

Magnetic field	0.77 T
Field homogeneity as design	5 ppm @ 35 mm DSV
Operation current	90 A
Operation temperature	4.2 K
Conductor type	Cu matrix NbTi
Conductor size	$\phi 0.5 \text{ mm}, 0.6 \text{ mm}, 0.7 \text{ mm}$
Inductance	2.7 H

4. マグネット及びクライオスタットの製作

所定の均一磁場空間を得るため、巻線は巻枠とコイル間の絶縁シート厚みを 0.1 mm 単位で調整した。

コイル間の接続は超電導接続とし、永久電流モード運転による磁場安定性を確保する。

マグネットを収めるクライオスタットは、NMR 用と同形状のもので、液体ヘリウムによる浸漬冷却方式である。均一磁場空間はクライオスタット下部プレートから 211 mm に位置している。室温ボア径は小動物のイメージを得られるよう 89 mm とした。

5. 磁場分布測定

マグネットを永久電流モードに保持した状態で、直径 35 mm の球面上をトラバースする形で 63 点の磁場強度を NMR 式磁場測定装置(METROLAB 社製)で測定した。磁場均一度は peak to peak で 1231 ppm となり、設計値の 5 ppm を大きく逸脱した。これは、コイル位置精度を確保したものの、作業の都合から総巻数が予定と異なるコイルが生じたためと考えられる。

6. 磁性体シム調整

超電導コイルのみで得られた磁場均一度を更に改善するため、磁性体を用いた磁場調整を実施した。室温部に置いた直径 78 mm の磁性体シム調整用ボアに $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ の長方形磁性体シムを貼り付けた。磁性体の貼付位置及び厚さは、磁性体使用量が最小となる最適化計算結果に基づいて決定している。なお、磁性体シムの厚みは 0.1 mm 及び 0.05 mm を用いた。

磁性体シムによる調整によって、磁場均一度は 165 ppm となつた。Fig.2 に 35 mm DSV で実測された B_z 成分を平面に展開して示す。

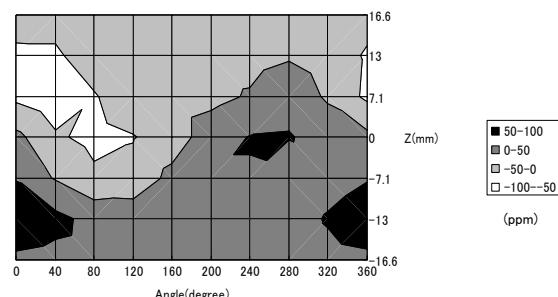


Fig.2 Magnetic field distribution after shimming with iron pieces.

7. まとめ

非対称のオフセンターマグネットを設計・試作し、マグネットの中心から離れた位置において均一磁場空間を発生することができた。このようにクライオスタット端部近傍で均一な磁場空間を発生できれば、手足が自由な状態での頭部のみの MRI 観測が可能となり、認知症研究等に活用されることが期待される。

今後、新タイプ MRI の開発に向けて、本モデルマグネットによる画像取得を試みる予定である。

NMR 用マグネットの磁場安定化技術

Technology of Magnetic Field Stabilization for NMR Magnet

大塚 昭弘(ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社)

OTSUKA Akihiro (Japan Superconductor Technology, Inc.)

E-mail:otsuka.akihiro@kobelco.com

1. 核磁気共鳴と超伝導マグネット

磁場中におかれた原子核はゼーマン効果によって磁場強度に比例する複数のエネルギー準位に分かれる。このエネルギー差に相当する電磁波を照射すると電磁波の吸収・放出が起こる。この共鳴現象は核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance、NMR) と呼ばれ、1946年にBlochとPurcellが多数の分子のNMR観測に成功した。NMRスペクトルの測定感度は磁場の3/2乗に比例し、磁場が高くなれば分解能も向上するので、NMR分析装置の高性能化はマグネットの高磁場化によるところが大きい。

当初は鉄芯の電磁石が使用されたが、超伝導の応用は比較的早い時期から試みられ、1968年頃NbTiの単芯線を用いて¹Hの共鳴周波数で180 MHz(4.2 T)のNMR用超伝導マグネットが製作された。その後、NbTiの多芯化やプロンズ法Nb₃Snの実用化により、1988年には600 MHz(14.1 T)のNMR用超伝導マグネットが実現した。更に、超流動ヘリウム冷却の採用により動作温度を3 K以下に下げて臨界電流の向上を図ることでFig.1に示すように発生磁場は上昇を続け、今年ついに1 GHz(23.5 T)のNMRシステムが完成した[1]。

これらは全てNbTiとNb₃Snが使われているが、 B_{c2} の制約により1 GHzを超える磁場の発生は困難とされている。Y系やBi系の高温超電導(HTS)は20 T以上で高い臨界電流を有しており、23 T以上のマグネットにはHTSが必要とされている。しかし、超伝導接続技術が未完成であり、永久電流モードでは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。このような状況を開拓するため、磁場安定化の新たな手法の開発を試みてきた。

2. NMRに求められる磁場安定度

溶液用NMRシステムでは、スペクトルの半値幅は約0.1 Hzと非常に高い分解能を要求する。これにより化学シフトやスピニ結合のような微細な化学結合情報が得られるので、現在では化学分析機器として広く利用されている。この分解能を実現するため、超伝導シムコイル、RT(室温)シムコイルを使って0.01 ppmの高い磁場均一度を達成し、更に試料を回転して平均化することが行われている。

一方で観測にかかる同位体存在比が低いこともあり、信号強度が小さい欠点がある。これを解決するためにNMR信号の積算が行われるが、磁場が変動すると積算する毎に信号がずれてしまうので $10^{-10}/h$ レベルで磁場を安定化させる必要がある。このため重水素化した溶媒を用い、²Hの信号を検出してRT^zシムコイルの電流値をフィードバック制御するNMRロックが一般的に行われている。しかし、外部磁場の変化が大きくなると追随できなくなるので、NMR用超伝導マグネットの磁場安定度は $10^{-8}/h$ レベルが必要である。

NbTiとNb₃Snを使ったマグネットでは、接続抵抗が $0.01\text{n}\Omega$ 以下の超伝導接続が実現できたこと、また線材のn値を考慮した $(I_{op}/I_c)^n < 10^{-9}$ の設計基準を採用することにより、 $10^{-8}/h$ レ

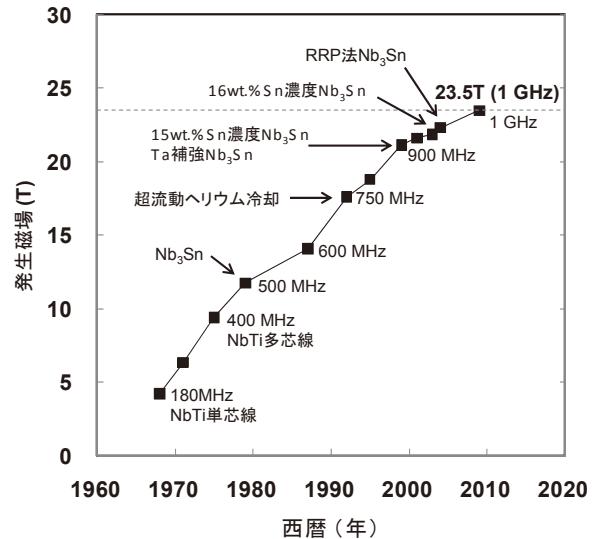


Fig.1 Increase of the magnetic fields of superconducting NMR magnets.

ベルの安定度を実現することが可能であった。

3. フラックスポンプによるドリフト補償

超伝導接続ができない状態で永久電流運転を行うと、接続抵抗により磁場は単調に減衰する。これを補うため筆者らはフラックスポンプを使ったドリフト補償コイルを開発し、-0.7 ppm/hと通常より70倍ドリフトの大きい600 MHz(14.1 T)NMR用超伝導マグネットに組み込んだ。

このドリフト補償コイルは、一つの巻枠に巻線された2次コイル(内コイル)と1次コイル(外コイル)で構成される。2次コイルはメインコイルと連続して結線され、1次コイルは外部電源に接続されている。外部電源はデジタル制御による掃引方式を採用することで、最小掃引速度0.3 mA/minの非常に遅い電流掃引が可能となっている。

NMRテスラメーターで測定した磁場がある範囲内に収まるよう、1次コイルの電流を僅かに上下させながら外部電源の電流を掃引した。これにより、-0.7 ppm/hのドリフトが、平均値で $-8.24 \times 10^{-12}/h$ と大幅に改善された。この状態を3日以上に渡って保持することができ、フラックスポンプによるドリフト補償コイルの有効性を実証した。

4. 電源駆動モードにおける磁場安定度

フラックスポンプを用いたドリフト補償には限界があるので、10 ppm/hを超えるドリフトが生じるような場合には、電源駆動運転(ドリブンモード)を選択せざるを得ない。NMR用マグネットは永久電流モードで冷媒消費量が最小になるよう設計されているので、長期間の電源駆動運転には適していない。そこで、マグネットおよびクライオスタットの改造を行った。

NMR用超伝導マグネットには永久電流運転のため永久電

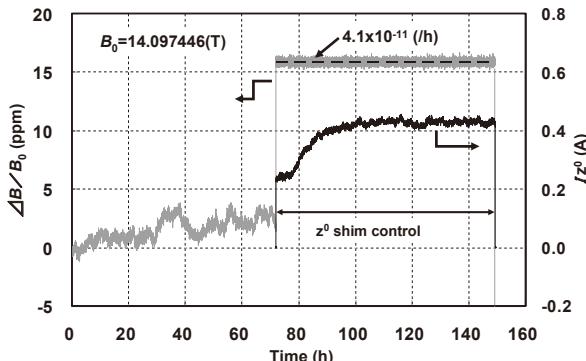


Fig.2 Magnetic field fluctuation with controlling the z^0 shim current to maintain a constant filed.

流スイッチが付いているが、励磁するにはスイッチのヒーターに通電してオフ状態としなければならず液体ヘリウム蒸発量の増加をもたらす。このため、メインコイルの永久電流スイッチを取り外し、電源駆動モード専用に改造した。

クライオスタットについては、酸化物超伝導体の電流リードを採用することで、通電状態でのヘリウム槽への侵入熱を大幅に低減させた。更に、4K-GM 冷凍機を組込み、蒸発したヘリウムガスを再凝縮させるゼロボイルオフ型とした。この時、酸化物超伝導電流リードの高温端を冷凍機の 1st ステージに熱的に接触させることで電流リードの安定な動作を確保した。

高安定度の電源を用いてドリブンモードで運転したところ、300 時間では約 6 ppm の変動だが、30 時間では約 2 ppm に抑えられた結果が得られた。NMR テスラメーターで測定した磁場から超伝導 z^0 シム電流を制御して磁場を一定に保持することで、Fig.2 に示すように平均値ではあるが $10^{-10} / h$ 以下の安定度を達成することができた。

この実験以外にも通電状態で使用しており、14.1 T の磁場を発生させた状態で 294 日保持した。この間液体ヘリウムの補充は全く行っておらず、クライオスタットの性能および長期信頼性を実証することができた。

5. HTS ダンパーコイルによる変動磁場の低減

超伝導マグネットはインダクタンスが大きいので、電源出力に電圧リップルがあつても電流リップルとしては非常に小さくなる。柳澤らは本マグネットのコイル両端電圧を解析し、電圧変動の周波数スペクトルを求めた。この結果とメインコイルのインダクタンスから求められるインピーダンスより電流変動のスペクトルが得られる。この結果、主な電流変動は 0.5 Hz 以下の成分で、これより高い周波数成分は 1 ppb 未満である。

超伝導 z^0 シムで磁場変動を補償した時の磁場変化をフーリエ変換すると約 0.01 Hz にピークを持つことがわかった。電磁波 ($f=0.01$ Hz) の表皮深さは銅を液体窒素温度まで冷却した場合 0.22 m であり、シールド材として実用にならない。

そこで Bi-2223 のテープ状線材を銅パイプの上に 2 層 \times 49 ターン巻線し、全体をハンダ付けしてダンパーコイルを製作した。このコイルをドリブンモードで運転するマグネットの磁場中に設置し、冷凍機を使って冷却した。

Fig.3 に示すように、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。ダンパーコイルの効果を調べるために、超伝導 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。ダンパーコイ

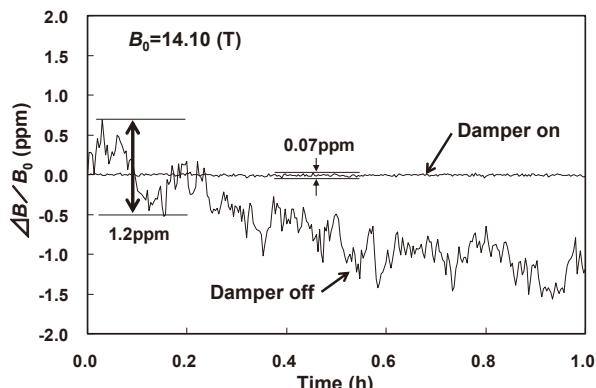


Fig.3 Magnetic field fluctuation with and without the HTS damper coil in the driven mode.

ル動作時と非動作時の磁場変化の比較より求めた変動磁場低減効果は 0.02 であることが判った。これにより、ダンパーコイル動作時の磁場変動は 0.04 ppm 程度と推定される。これまで安定度が問題とされてきた電源駆動モードでも、永久電流モードに近い高い磁場安定度を実現することができた。

6. HTS-500 の NMR 測定

ドリブンモードの磁場安定度の測定やダンパーコイルの試験を行った後、600 MHz マグネットは Nb₃Sn の内層コイルを Bi-2223 で製作したコイルと置き換えた。ブロンズで補強された Bi-2223 線の寸法は 4.55 mm \times 0.36 mm で、厚さ 0.025 mm のポリイミドテープをハーフラップ巻きして絶縁されている。この線材を 1 層あたり 81 ターンで 48 層巻線してコイルを製作した。巻線端部での巻き方を工夫することで、アスペクト比 12.6 のテープ状の線材だが、レヤー巻きを行うことができた。

Bi-2223 コイルを組み込んだ状態で、超高安定度電源を用いて 500 MHz(11.7 T)まで励磁した。Bi-2223 導体に誘導された遮蔽電流により励磁後磁場の上昇が観測されたが、5 日後には 0.05 ppm/h まで落ちていた。

NMR ロック機構を調整した分光計との組合せで NMR スペクトルを測定した。冷凍機の振動によるノイズが観測されたが、永久電流モードと遜色のない S/N 比で 3 次元までの NMR スペクトルを得ることができた[2]。

7. まとめ

HTS コイルをドリブンモードで運転し、高分解能 NMR 測定が十分行えることを示すことができた。従来技術では 1 GHz が限界とされてきたが、筆者らの成果はこの壁を打ち破る礎となるものである。

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 (JST) の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] <http://www.bruker-biospin.com/av1000-dir.html>
- [2] Y. Yanagisawa, et al.: "Towards an NMR spectrometer beyond 1 GHz operation of the 500 MHz LTS/HTS NMR," 50th ENC abstract 2009

備前焼“緋襷”模様の材料科学的研究 - 伝統技術に潜むナノサイエンス - Materials science study of a characteristic red color pattern “Hidasuki” in Bizen pottery - Nanoscience in traditional technique -

高田 潤（岡山大学）、草野 圭弘（倉敷芸術科学大学）

Jun Takada (Okayama University) and Yoshihiro Kusano (Kurashiki Arts and Science University)

E-mail : jtakada@cc.okayama-u.ac.jp and yoshi-k@arts.kusa.ac.jp

1. はじめに

日本を代表する伝統的な陶磁器として有田焼と備前焼がよく知られている。両者は、大変美しい赤色を示し、古くから多くの人を魅了している。これらの共通点は、赤色の発色が焼き物の表面のガラス相中に分散した微細な酸化鉄 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ （ヘマタイト）粒子に起因していることである。一方相違点は、色調、歴史、土や作製方法などの点である。有田焼上絵付け磁器は江戸時代初期に作られ始めたのに対して、備前焼は古墳時代の須恵器が発展したもので、六古窯（信楽、常滑、瀬戸、越前、丹波、備前）の一つとして知られ、1000年以上の歴史を有する伝統的な焼き物である。有田焼絵付け磁器は、様々な顔料・釉薬を利用し、絵付けを施して、三回の焼成で作られる。他方備前焼は、無釉焼き締め陶と言われ、釉薬を施さずに一回の焼成で完成される。しかし、備前焼の焼成後の作品の表面には、様々な色の模様が現れるため「土と炎の芸術」とも称され、そのシンプルな美しさから「侘び寂び」の焼き物として珍重されてきた。

知り合いの備前焼作家の方の話では、備前焼の作製には非常に長時間（約1ヶ月）を要し、窯の温度管理が大変だとのことである。特に、冷却には約10~14日という長時間掛けていることが、有田焼などとは大きく異なる特徴である。

代表的な備前焼模様には、黄色模様の「胡麻（ごま）」、グレーや青色の「桟切り（さんぎり）」、黒、グレー、オレンジ色が織りなすグラデーションの「窯変（ようへん）」、特徴的な赤色模様の「緋襷（火襷、ひだすき）」（Fig. 1），強還元の焼成により現れる「青備前」等がある。備前焼は、釉薬を施さずに焼かれるため、作品を詰めて重ねて焼かれるが、その際に作品を置く棚板や他の作品との接触を避けるため稻藁が使用される。これらを1200°C付近で焼成すると、稻藁と接触していた部分に

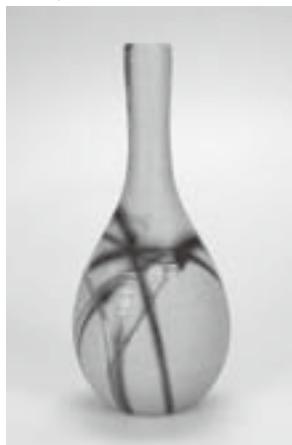


Fig. 1 A typical “Hidasuki” pattern on the Bizen stoneware.

特徴ある赤色模様が現れる。この模様が、「緋襷」である。しかし、その微細構造および発色メカニズムについては今まで明らかにされていなかった。我々は最近、「緋襷」模様部の詳細な微細構造観察を行った結果、非常にユニークな酸化鉄 $(\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3)$ （ヘマタイト）の結晶成長が起こっていることを見出した[1]。本発表では、この「緋襷」模様についてこれまでの研究結果を紹介する。

2. 「緋襷」模様の形成過程

備前焼粘土中には鉄分が多く含まれ、酸化鉄 (Fe_2O_3) に換算して約3wt%弱も含まれている[2]。一方、稻藁中にはカリウムが多く含まれ、1000°Cで熱処理した灰中には酸化カリウム (K_2O) として約13wt%弱のカリウム分が存在している[1]。「緋襷」模様は、鉄分を多く含む備前焼粘土と稻藁のカリウムが反応することにより現れる。我々は、「緋襷」模様の発色機構を解明するために、備前焼粘土のペレット上に稻わらを置いて様々な条件で加熱冷却するモデル実験を行った。特に稻わらの存在、冷却速度および雰囲気を主要な条件と考えた。備前焼粘土のみを大気中にて1250°Cで焼成した場合には、赤色を示さず、黄褐色のざらついた試料表面であった。備前焼粘土に稻藁を置き1250°Cで熱処理後急冷すると、赤色を示さず、光沢透明のガラス相が生成していた。これらとは対照的に、10°C/minおよび1°C/minで冷却（徐冷）した試料では、赤色を示し、冷却速度が遅いほど赤味が増すことが明らかとなった。X線回折結果より、徐冷試料表面には、ヘマタイト $(\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3)$ が生成しており、その生成量は冷却速度の低下とともに多くなる。

以上のことから、赤色の要因となるヘマタイトは冷却過程で析出することから、「緋襷」模様は高温焼成後の冷却過程で形成することが明らかとなった。

3. 「緋襷」模様部の微細構造

透過型電子顕微鏡観察(TEM)の結果、素地部に存在する主な結晶相は針状のムライトであった。一方、稻藁と備前焼粘土を熱処理して急冷した試料では、約1μm径のコランダムの板状粒子が主に観察された（Fig. 2(a)）。通常、コランダムは粒状の粒子形態をとるが、生成時にSi, Ca, MgおよびNaイオン等が存在すると板状の粒子形態とな

ることが知られている[3]. 備前焼粘土中にはこれら全てのイオンが含まれているため、板状粒子となったと考えられる. Fig. 2(b)と(c)に、「紺襷」模様部のTEMによる微細構造観察結果を示す. Fig. 2(b)は、10°C/minで冷却した試料のTEM像を示しており、約1μm径のコランダム粒子の周囲に、約0.3μmの小さなヘマタイト粒子が付着しているのが分かる. 冷却速度が更に遅い1°C/minの試料(c)では、ヘマタイトの結晶成長が進む. Fig. 2(c)中でAl₂O₃+Fe₂O₃で示した粒子は、コランダム粒子をヘマタイトが完全に覆い尽くした粒子である. Fig. 3(a)に示す電子線回折(ED)の結果、コランダム粒子およびその周りに付着しているヘマタイト粒子の回折スポットの方位置は完全に一致したことから、ヘマタイトはコランダムにエピタキシャルに成長していると判断される. Fig. 3(b)は、断面の[1210]入射像である. 小さなコランダム粒子をヘマタイトがサンドイッチした粒子形態となっている. よって、Fig. 2(c)のAl₂O₃+Fe₂O₃で示した粒子は、餡がコランダムで皮がヘマタイトの饅頭構造の粒子であると考えられる. コランダムのc面は非常に平滑であるが、端部には多数のステップやキンクが存在しているのが分かる. これらがヘマタイトの核生成の場となり、冷却速度が遅くなるとヘマタイトの結晶成長が進行する結果、特長ある赤色の「紺襷」模様が現れることが初めて明らかとなった.

4. おわりに

近年、様々なナノ構造のセラミックスが注目され、世界で活発に研究されているのに対して、伝統セラミックス分野の「やきもの」の色についての研究はほとんど行われていないのが現状である. しかし、伝統セラミックスにも今後の材料開発につながる「ナノ科学」が潜んでいる可能性がある. さらに、日本には陶磁器以外にも、数多く

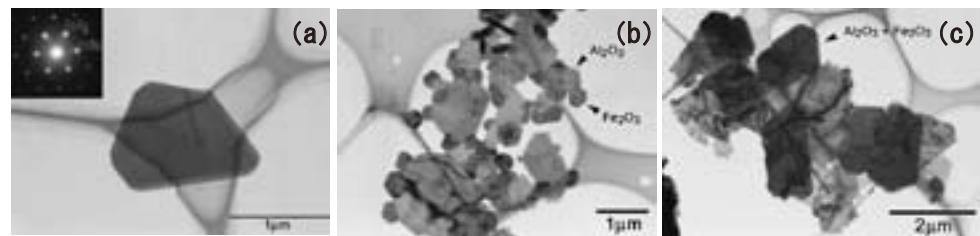


Fig. 2 TEM images of oxide particles formed in the surface layer of the samples subjected to various cooling conditions: rapid cooling (a), slow cooling with a rate of 10°C/min(b), and 1°C/min(c).

の伝統的な技術が残されており、これらを科学的に解明する研究は今後ますます重要であり、日本から世界へと発信すべき新しい研究分野となると考える. そのためには、化学領域、物理系領域、生物系領域をはじめとし、芸術や考古学などを含めた異分野融合的・学際的な研究体制も必要であろう.

本発表でご紹介した備前焼「紺襷」の微細構造と生成過程についての研究に対し、2005年「第8回コレアル 色の科学と芸術賞」(国際賞)金賞が授与され、高い評価を頂いた. さらに翌年12月には、JSTのサイエンスチャンネルで、これらの研究成果を基に「赤き器の物語せよ」番組が作られ、放映された. この番組は、現在もJSTのホームページで見ることが出来る[4]. また、本発表での内容は、多くの分野の方々に興味を持っていただき、既にいくつかの科学専門誌に小論を掲載していただいている[5,6]ので、詳細はそれらをお目通しいただければ幸いである.

私たちは最近、備前焼の紺襷模様以外の模様(例えば、銀彩模様や窯変模様)の発色の再現と発色機構の解明の研究にとりかかっているが、これらは紺襷模様よりもはるかに複雑で微妙であり、現在悪戦苦闘中である.

参考文献

- Y. Kusano, M. Fukuhara, T. Fujii, J. Takada, R. Murakami, A. Doi, L. Anthony, Y. Ikeda, M. Takano, *Chem. Mater.*, **16**, 3641-3646 (2004).
- 土井章, 坂本尚史, 堤貞夫, 大塚良平, 加藤忠蔵, 日化, 71-75 (1979).
- H. Song, R. L. Coble, *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**, 2077-2085 (1990).
- JST サイエンスチャンネル 色彩と科学「赤き器の物語せよ」, http://sc-smn.jst.go.jp/8/bangumi.asp?i_series_code=J067016&i_renbancode=003
- 草野圭弘、高田潤、科学、**76**, 589-591(2006).
- 草野圭弘、藤井達生、高田潤、固体物理、**43**, 589-591(2006).

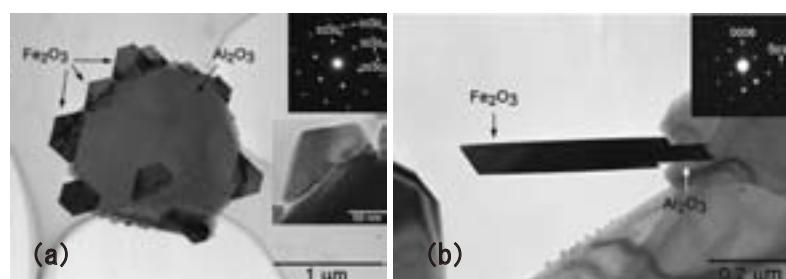


Fig. 3 TEM images and ED patterns of the oxide particles formed in the "Hidasuki" pattern subjected to slow cooling of 10°C/min: Epitaxial growth (a) and sandwiched structure(b).

医薬用たんぱく質の高速分離・精製・回収用高勾配磁気分離システムの回収率改善の検討

Improvement in Recovery of Magnetic nano-beads with High Gradient Magnetic Separation System for Trapping Immunoglobulin in Serum

植田 浩史, 石山 敦士(早大); 我妻 洋, 古瀬 充穂, 淵野 修一郎(産総研); 杉川 一弘(九大); 小泉 達雄(住重)

UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

AGATSUMA Koh, FURUSE Mitsuho, FUCHINO Syuichiro (AIST);

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); KOIZUMI Tatsuo (Sumitomo Heavy Industries)

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

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(Fig. 1)を応用する検討を行ってきた。既存技術では、分離できる磁気ビーズの大きさは約 1.5 μm 程度以下には出来ないが、超電導マグネットを用いることにより磁性ナノ微粒子を高勾配磁気分離で効率よく分離・精製できることをこれまでに実験的に示した[1]。また、フィルターの設計・検討を詳細な磁場解析により行ってきた[2][3][5]。しかし、捕獲されたビーズは、磁場をゼロにしても、残留磁気にによりビーズ同士が互いに引き合って大きな塊となり、残留磁気が残っているフィルターに捕獲されたままで、回収されにくくなると考えられる。そこで、我々は、ビーズおよびフィルターの残留磁気を、超電導マグネットを交流消磁回路として利用する方法を提案し、回路設計を行ったので報告する。

2. 超電導マグネットを利用した消磁回路

通常の消磁には LRC 直列回路を用いた交流消磁法が用いられている。 L は磁場を発生させるコイルでもあり、これに抵抗とコンデンサーを直列接続し、交流電圧をかけて直列共振により交流磁場を発生させ減衰させる。しかし、コイルが常電導では、装置が大掛かりで高価なものになる。さらに、この交流消磁を行う装置を、高勾配磁気分離装置に新たに組み込むことは、物理的空間的にも困難であり、また装置も大掛かりになり、費用もかさむことになる。我々が提案している超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離装置は、高い磁場を作り出し、大きなインダクタンスをもち、かつ抵抗の殆ど無い超電導マグネットシステムが用いている。そこで、この超電導マグネットを消磁用の磁場発生装置として利用し、交流電源が不要な交流消磁を行わせる付加回路を考案した[4]。

3. 消磁回路と手順

Fig. 2 に示すような付加回路を用意する。

a) 励磁過程

S_1 及び S_2 を閉じることにより、直流電源 E からコイル L に電流を供給し、超電導電磁石の駆動を行い、励磁する。

b) 消磁過程

- 1) 磁気フィルター及び磁気ビーズを消磁するときには、そのまま所定の電流まで超電導マグネットを減磁する。
- 2) S_3 のみを閉じ、保護抵抗 R_0 を介して L 内の電流を $L-R_0$ の閉回路に転流させる。
- 3) S_1 を開放し、 L への通電を完全に停止する。
- 4) S_2 を開くと共に S_4 を閉じる。このとき LRC 回路が形成されて、電源の接続なしに交流消磁回路を形成し、それによるコイル、及びその周囲の磁性フィルター及び磁気ビーズの消磁がなされる。

4. 消磁回路の設計

超電導マグネットを利用した交流消磁回路の設計条件として、1) 超電導マグネットの両端電圧は 50 V 以下とする、2) 初期電流は発生磁場が残留磁場(約 0.2 T)以上に相当する 1 A 程度とする、3) 減衰時間は 60~30 秒程度とする、4) 消

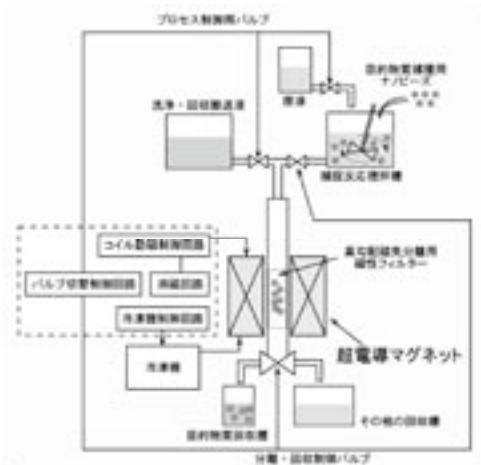


Fig. 1 HGMS for Medical Application.

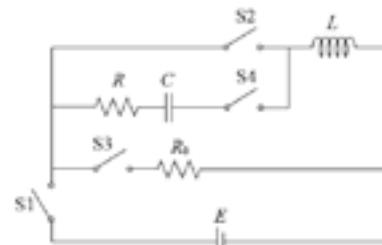


Fig. 2 Demagnetization LRC circuits added to superconducting magnet to improve the recovery ratio of magnetic nano-beads.

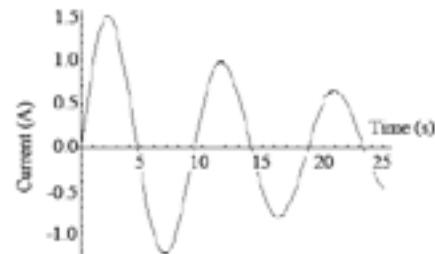


Fig. 3 Current trace of demagnetization circuit.

磁用交流電源より安価である(設置空間から常電導交流消磁用コイルの設置は無理)ことを設定した。回路定数は、超電導コイルの L は磁気分離装置の仕様として 22.13 H で決まっているので、 R_0 および C を上記条件を満足するよう決定した。今回は、 $L = 22.13$ H、 $R = 2$ Ω 、 $R_0 = 1$ m Ω 、 $C = 100$ mF、 $E = 25$ V とした。このときの電流波形を図 3 に示す。

参考文献

1. K. Agatsuma, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.77, p.132 (2007).
2. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.77, p.133 (2007).
3. K. Agatsuma, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.78, p.126 (2007).
4. K. Agatsuma, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.79, p.218 (2008).
5. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.79, p.219 (2008).

粉体磁気分離のための粒子間相互作用の基礎的検討

Fundamental study on the interaction between particles
for magnetic separation under powder stat

三島 史人, 中井 裕樹, 秋山 康子, 西嶋 茂宏 (大阪大学 大学院工学研究科)
MISHIMA Fumihito, NAKAI Yuki, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (OSAKA Univ.)
E-mail: f-mishima@see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

食品や薬品などの工業製品の生産ラインにおいて、そのかくはん時や搬送時で、装置の可動部や配管接合部分から生じる微小なステンレス(SUS304)粉の混入が問題となっている。それらのSUS粉は強加工によるマルテンサイト変態を起こすことで強磁性の性質を示す。この分離・除去方法として、物質(粉)の磁気特性に着目し、磁気分離法の適用を検討している。このような混合粉体中の強磁性を示す不純物を分離する際には、前処理を必要とせず、全工程を乾式条件下で分離するプロセスで行うことが望ましい。ただし乾式の磁気分離法では従来の水処理系とは異なり粒子間に入り込む媒体がないため粒子間の相互作用が問題になる。今回はその因子となる粒子の水分量(含水量)、表面積および形状など分離率に大きく影響する因子についての検討を行なった。

2. 実験

平均粒子径 $1.5 \mu\text{m}$ のアルミナ粒子 0.1g、平均粒子径 $1.5 \mu\text{m}$ のシリカ粒子 0.1g に対してそれぞれ強磁性粒子(平均粒子径 500nm)0.01g 添加し、最大磁束密度 0.4T のネオジウム磁石を用いて、ビーカーレベルでの強磁性粒子の乾式磁気分離を行った。図1に示すように、混合粉体をデッショ上に置き、その下に永久磁石を配置し、振動(6500r.p.m)を3分間与えることで強磁性粒子と被分離物質との分離を行った。分離後の強磁性粒子を含むアルミナ粒子とシリカ粒子の状態についての観察を行った。

また使用したアルミナ粒子とシリカ粒子の含水率、比表面積の測定、顕微鏡観察を行い、それぞれの粒子が乾式(粉体)条件下で分離の際に受ける影響について検討を行った。

3. 実験結果 および 考察

強磁性粒子を添加した分離前・後のそれぞれの粒子の顕微鏡写真を図2(a)-(d)に示す。図はそれぞれ(a)アルミナとマグネタイト混合試料、(b)シリカとマグネタイトの混合試料、(c)振動による磁気分離後のアルミナ混合試料、(d)振動による磁気分離後のシリカ混合試料である。分離前の混合試料(a)は、強磁性粒子がアルミナ粒子に大量に絡み付いて複合体を形成している。また、マグネタイトを混合する前のアルミナ粒子は粒子同士に強い凝集が観察された。一方、(b)では、マグネタイト試料はシリカ粒子の表面に点在して付着している傾向が見られた。ここでもシリカ粒子の凝集はアルミナ試料ほどではないが観察された。

それぞれの振動磁気分離後の試料について(c)ではアルミナ粒子がわずかに分離されていたが、アルミナ粒子と強磁性粒子が分離されていなかった。磁気分離後は強磁性体同士が磁気凝集をして、複合体(アルミナ、マグネタイト)がさらに凝集している様子が観察された。(d)について、シリカ粒子が振動により、分散し、シリカ粒子とマグネタイト粒子が分離されている様子が観察された。なおアルミナとシリカの比重差を考慮し、シリカ 0.05g を強磁性体 0.01g と混合した試料で実験を行った条件でも同様の結果がみられた。

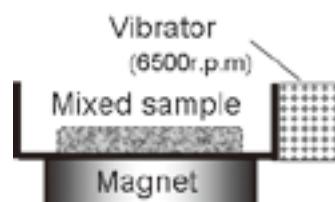


Fig.1 Schematic Illustration of the Magnetic Separation using Vibration.

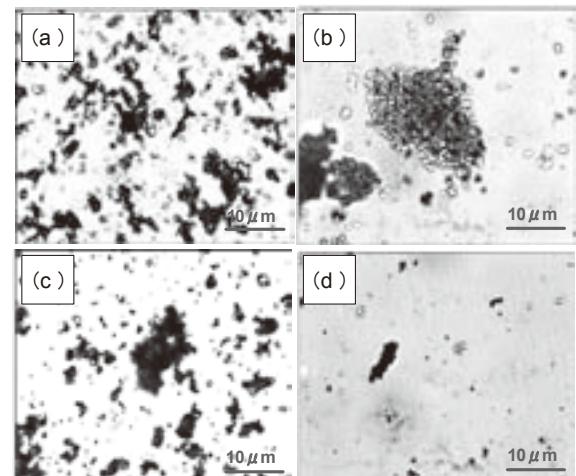


Fig.2 Observation by optical microscope(x400).

アルミナ粒子、シリカ粒子のそれぞれの含水率はそれぞれ0.3%、9.2%であった。また比表面積は、 $0.8\text{m}^2/\text{g}$ 、 $80\text{m}^2/\text{g}$ 、と100倍の差があった。これらの結果からはシリカ粒子が凝集の影響により乾式磁気分離が困難であると考えられるが、実験では逆の結果が得られた。また振動篩による、凝集度の測定(粒子 2g を篩いにかけ振動を与える、ダマになりやすさを比較)を行い、アルミナの凝集度がシリカ粒子に比べ高い結果が示された。

また含水率、比表面積の測定結果から、シリカ粒子が多孔質で、粒子の表面形状は凹凸を持ち、マグネタイト粒子との接触面積が小さいこと(シリカ粒子間同士も同様に小さい)が、磁気分離が行いやすい効果となっていると考えられる。

4.まとめ

乾式磁気分離を行う際に、分離結果に影響する様々な粒子間の相互作用のうち、凝集度、含水率、比表面積についての検討をおこなった。その結果、粒子形状や凝集度が分離効率に大きく影響していることが示された。また、磁場領域内に試料が投入される段階での粉体の分散処理が不十分である場合、試料によっては、磁気凝集によって分離効率の大幅な低下が起こることが示唆された。今後は、粒子間の凝集を軽減するために、粒子の静電反発力、付着力、形状および被分離対象物質の粒子径の組み合わせによる影響についての検討を行う予定である。

超伝導バルク磁石を用いた磁気分離によるめっき廃液中のニッケルの回収

Collecting Nickel Element from Waste Solution of Plating Process by Magnetic Separation with Superconducting Bulk Magnet

田中 克昌, 木村 貴史, 三村 大樹, 福井 聰, 小川 純, 佐藤 孝雄, 大泉 学, 岡 徹雄(新潟大学)
寺澤 俊久(イムラ材研);辻村 盛夫(愛知技研)

TANAKA Katsuyoshi, KIMURA Takafumi, MIMURA Daiki, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun,
SATO Takao, OIZUMI Manabu, OKA Tetsuo (Niigata University);
TERASAWA Toshihisa (IMRA Material Co.Ltd); TSUJIMURA Morio (Aichigiken CO.Ltd)
E-mail: F08E073F@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

無電解ニッケルめっきは複雑な形状の製品にも均一に被膜し、防錆は勿論耐食性や硬度に優れることから電子産業や自動車産業において広く利用されている。それに伴い使用済みめっき液(めっき廃液)の処理が大きな問題になっており、ニッケルを回収して再利用するための新たなプロセスの確立が望まれている。

本研究ではニッケルがもつ磁性に着眼した。ニッケルを含む沈殿などの化合物ではわずかながら磁性を持つことが期待できるので、超伝導バルク磁石の強磁場での吸着が可能になると考えた。超伝導バルク磁石による磁気分離によってめっき廃液よりニッケルを回収・再利用することがねらいである。

2. 実験方法

2-1 ニッケル化合物の生成

磁気分離を行うためには、まずニッケル化合物を生成する必要がある。無電解ニッケルめっきは次亜リン酸イオンの還元反応によりめっきを行なうが、同時に亜リン酸イオンを生成する。亜リン酸イオンが大量に増えることでめっき反応が起こりにくくなり、めっき廃液となる。このめっき廃液中に含まれる亜リン酸イオンはニッケルの濃度、PH、温度を調節することで亜リン酸ニッケルとして沈殿する。この沈殿には多くの亜リン酸が含まれるためそのままでは使用することができない。

そこで亜リン酸ニッケルを硫酸で溶かすことでめっき液の原材料である硫酸ニッケルとして回収できないかと考えた。亜リン酸ニッケルを硫酸で溶かし濃縮することで結晶を生成した(Fig.1)。この結晶をICP発光分析装置によりNiとPの濃度分析を行なった結果をFig.2に示す。結晶化したものは多少のリンが含まれているが、ニッケルを6356ppm含んでいることが確認できる。

2-2 磁気分離実験

Ga123系超伝導バルク体(Φ60mmx15mm)を搭載したバルク磁石を使用した。Field Cooling法により励磁し、バルク表面に33Kで最大3.9T、磁場使用可能空間で最大3.4Tの磁場を得た。この空間に導管を配置し、結晶が含まれる実験液を下から上方向へ送液し磁気分離を行なった。導管は磁場の強い空間に実験液を通過させるために一部が5mmと狭くなっている。

3. 実験結果および考察

磁気分離後の導管内の様子をFig.3に示す。磁場の強い部分に結晶が蓄積していることが確認できる。バルク磁石による結晶の磁気分離に成功した。

磁気分離により回収した結晶を同様にICP発光分析装置により濃度分析を行なった結果をFig.2に示す。結晶化したものに比べNi濃度は増加しP濃度は減少していることが確認できる。この結果より磁気分離により磁性の強い硫酸ニッケルの結晶を選択的に分離していると推測できる。

これらの事は磁気分離を使用した新たなニッケル回収・再利用プロセスの可能性を示している。

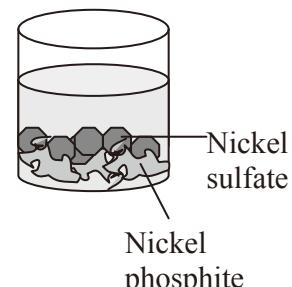


Fig. 1 Crystallized nickel sulfate and nickel phosphite

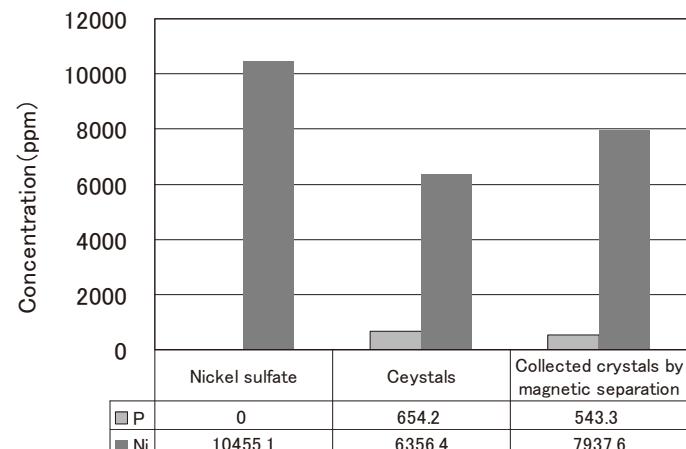


Fig.2 Measured concentration of Ni and P by ICP

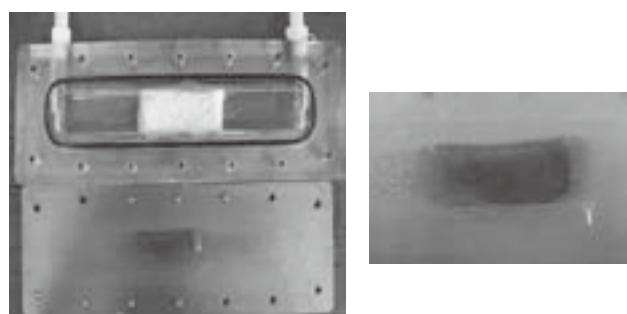


Fig.3 Collected crystals by magnetic separation

磁気分離による染料排水の処理についての基礎的研究

Fundamental Study on Magnetic Separation of Organic Dyes

方 美娜, 三島 史人, 秋山 康子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

Fang Meina, Fumihito Mishima, Yoko Akiyama, Shigehiro Nishijima (Osaka Univ.)

E-mail: fangmeina@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

染料を含む着色排水は代表的な難分解性排水であり、処理技術として凝集沈澱処理や生物処理、活性炭による吸着処理などが挙げられる。しかし、処理後にも水溶性の難分解性着色成分が残留することが多く、更に、処理に長い時間を要したり、処理システムが複雑であったり、膨大な量の固体廃棄物が生じたりするという問題点がある。これらの問題を解決するために、本研究では高効率かつ高速処理が可能で、装置がコンパクトであるという利点を有する磁気分離法に着目した。

磁気分離には被分離物質に強磁性粒子を付着させて強磁性を付与する磁気シーディング技術と超伝導磁石を用いた磁気分離技術が必要である。染料の分離のためにはまず、磁気シーディングのメカニズムを明らかにし、対象となる染料に応じた磁気シーディング法を設計することが必要である。そこで、工業分野で使われている代表的な6種類の染料について、磁気シーディングの可能性を検討し、染料と強磁性粒子の相互作用について検討した。

2. 実験方法

本実験では Direct red, Crystal violet, Methylene blue, Methyl orange, Amaranth, Cibacron Brilliant Yellow 3G-P の6種類の染料を用いて磁気分離実験を行った。ビーカーにそれぞれ上記の6種類の染料水溶液(濃度: 5×10^{-5} mol/L) 100mL に磁気シーディング剤として機能性鉄粉(戸田工業、粒径 70nm、含水率 72%)を、乾燥重量 0.7g となるように添加し、かくはん翼(回転数 480rpm)でかくはんを行った。1分、2分、5分、10分の時点で、かくはん中の混合液から 4mL を採取し、永久磁石で機能性鉄粉の回収を行い、上澄み溶液を採集して吸光度を調べた。以下の式により吸光度から吸着率を求めた。

$$\text{吸着率} (\%) = (\text{処理前の吸光度} - \text{処理後の吸光度}) / (\text{処理前の吸光度}) \times 100 \quad (1)$$

なお本研究で使用した機能性鉄粉はスラリー状であるため、分散媒の影響を検討するため、スラリーの状態で添加した場合と、60°Cで減圧乾燥して添加した場合について検討した。

3. 結果と考察

磁気分離による染料排水の処理においては、劉らの研究[1]により、磁気シーディング剤として磁性コロイドを用いることにより高い分離率が得られると報告されている。しかし、磁性コロイド法は調製の手法が複雑であり、実用化への適用が難しいという問題点がある。そこで本実験では、磁気シーディング剤として市販の機能性鉄粉を用いて実験を行った。

機能性鉄粉をスラリー(含水率 72%)の状態で磁気シーディング剤として用いた場合、6種類の染料においていずれも 80%以上の良好な処理効率が得られ、さらに、吸着率の経時変化から、1分間という短時間のかくはんにより吸着がほぼ平衡に達することが明らかになった。

続いて染料と機能性鉄粉の相互作用について検討する

ため、機能性鉄粉を 60°Cで 1 日間乾燥した粉末を磁気シーディング剤とし、乾燥重量をスラリーの場合と同じになるよう添加し、Direct red, Crystal violet, Amaranth の3種類の染料について比較実験を行った。Fig1 にその結果を示す。

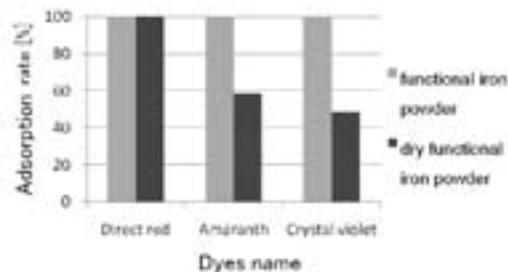


Fig1. Absorption rate with functional iron powder.

機能性鉄粉を乾燥させて分散媒を完全に除去した場合、スラリーの状態で加えた場合と比較して 2種類の染料においては吸着率が減少する傾向が見られた。これらの染料は水中で解離して正あるいは負に帯電しているため、機能性鉄粉のζ電位を調べることにより、静電的相互作用について検討した。

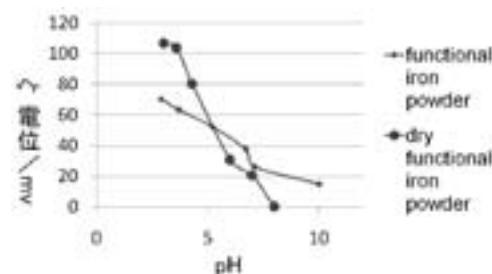


Fig2. zeta potential of functional iron powder.

磁気シーディング処理を行う際、染料と機能性鉄粉、及び機能性鉄粉粉の混合液の pH は 6~10 の範囲であり、この pH 範囲では機能性鉄粉はスラリーの場合も粉の場合も正に帯電している。ただし中性より高 pH ではスラリー状の方が ζ 電位が高い傾向が見られる。また Fig. 1 で用いた染料のうち Crystal Vioret は水溶液中で正に帯電しており、その他の染料は負に帯電している。負帯電の染料が比較的高い吸着率を示し、さらに ζ 電位の高いスラリー状の機能性鉄粉で特に高い吸着率を示していることから、静電的相互作用が染料と機能性鉄粉の相互作用の一つであることが予測される。このことから、pH の調整により粒子表面の ζ 電位を制御し、分離率をさらに向上させることが可能であると考えられ、今後検討していく予定である。

参考文献

1. S. Yu, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn Vol 38, No.2 (2003) pp.77-82.

高粘性流体のための高勾配磁気分離システムの開発

Development of High Gradient Magnetic Separation System for Highly Viscous Fluid

林信吾, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏(阪大)

HAYASHI Shingo, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)

E-mail: hayashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

食品や工業製品製造過程で、可動部等から高粘性流体中に混入する金属磨耗粉が製品の品質低下の要因となり、これらの不純物の除去が求められている。しかし、媒質が高粘性であるために重力分離法や膜分離法が適用できず、有効な分離技術は未だ確立されていない。そこで本研究では、分離のための物質移動の推進力として分離対象粒子の磁気的性質に着目した。分離対象粒子である金属磨耗粉は強加工されてマルテンサイト変態により強磁性を示すため、磁気力による分離が可能である[1]。高粘性流体からの高速大量、高効率の分離を可能とする磁気力を得るために、磁気フィルターを用いた高勾配磁気分離(HGMS)法を用い、強力な磁気力が得られる超電導高勾配磁気分離システムの開発を試みた。

2. 磁気分離の理論

磁気分離法とは、粒子に働く磁気力の違いを利用して、分離対象となる粒子のみを選択的に分離する技術である。流体中からの磁気分離では、被分離粒子には主に磁気力、ドラッグ力が働く。被分離粒子に働く磁気力を式(1)、ドラッグ力を式(2)に示す。

$$\mathbf{F}_M = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_D = 6 \pi \eta r_p (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{F}_M は磁気力、 \mathbf{F}_D はドラッグ力、 r_p は粒子半径、 \mathbf{M} は磁化、 \mathbf{H} は磁場強度、 η は粘度、 \mathbf{v}_f は流体速度、 \mathbf{v}_p は粒子速度である。磁気力がドラッグ力を上回っている場合に、磁気分離可能となる。高粘性流体からの磁気分離の場合、粘度 η が大きくなり、ドラッグ力が増加する。そのため、分離に必要な磁気力も大きくなり、分離が難しくなる。

3. 実験方法

模擬試料として、粘度 1Pa·s の PVA(ポリビニルアルコール)溶液に、強加工されて強磁性を示す SUS304 粉(平均粒径: 50 μm)を 0.1g/l の濃度で分散させたものを用いた。強磁性を示す SUS 粉の分散には攪拌翼を用いた。装置の模式図を Fig. 1 に示す。

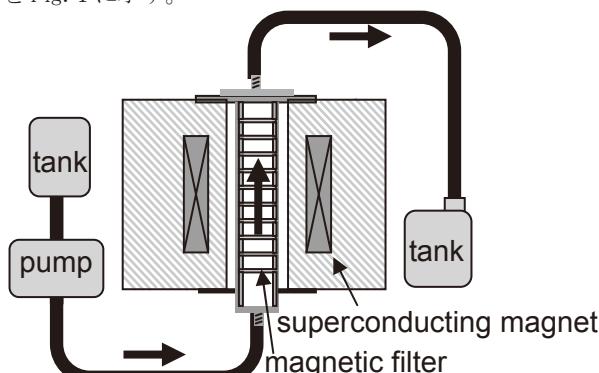


Fig. 1 A schematic diagram of magnetic separation apparatus of superconducting electromagnet.

この装置は超電導磁石ボア内に設置した磁気分離装置にポンプを用いて SUS 懸濁液を流すという設計になっている。模擬試料は、4l を流路に流し、流速は 3.4mm/s とした。分離

装置内には、磁場勾配を高めるための磁気フィルターが設置されている。磁気フィルターの条件を Table.1 に示す。フィルター条件 D は、B、C のフィルターを共に用いた条件である。このフィルターの条件をパラメータとした実験を行った。すべての磁気フィルターが飽和磁化に達するように、外部印加磁場は 2T とした。

Table. 1 Parameters of magnetic filters.

Condition number	A	B	C	D
Mesh number(mesh)	5	14	30	14, 30
Wire diameter(mm)	1	0.5	0.3	0.5, 0.3
Open area of filter(%)	65	53	42	53, 42
Number of filters	20	20	20	40

4. 結果と考察

磁気フィルターの条件をパラメータとした実験の結果を Fig. 2 に示す。フィルター条件 A では、分離率 96.0%、B では 98.9%、C では 99.5%、D では 99.6% であった。この結果より、フィルター条件 B、C、D で、ほぼ全ての強磁性粒子を除去できたことがわかった。高い分離率を達成できた要因として、フィルターのメッシュ数が大きかったため、開孔率が小さかったことがあげられる。開孔率とは、フィルターの面積に対してフィルターの存在しない領域の投影面積の割合である。

実用化に向けて、さらに高粘度、高流速の媒質中からの分離が必要となる。そのため、高い分離率を得るために、さらにフィルターのメッシュ数を大きくすることで開孔率を小さくすることが考えられるが、そうすると圧力損失、フィルターにかかる負荷が問題となってくる。今後、これらの問題に対して、フィルターの形状、枚数などを最適化する必要がある。

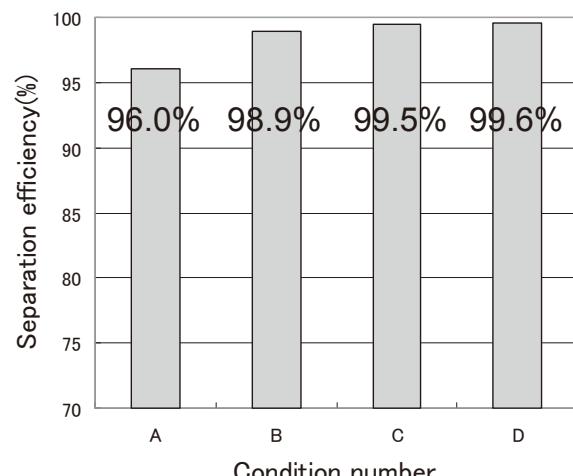


Fig. 2 Separation efficiency of SUS particle with the condition of magnetic filter.

参考文献

- [1] F. Mishima, S. Takeda, M. Fukushima, S. Nishijima
“A superconducting magnetic separation system of ferromagnetic fine particles from a viscous fluid”.
Physica C 463–465 (2007) 1302–1305

超電導インバータの可能性

Possible Design of Superconducting Inverter

長村 光造 (応用科学研)、酒井 明 (京大)、中村 武恒 (京大)、岡 徹雄 (新潟大)
 OSAMURA Kozo(RIAS), SAKAI Akira(Kyoto Univ.), NAKAMURA Taketsune(Kyoto Univ.) and OKA Tetsuo(Niigata Univ.)
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

超電導モータ、超電導直流送電等の応用において、インバータ/コンバータ等の電力変換器が用いられるが、現状では半導体トランジスターが用いられているため、そこで大きなジュール損失が発生している。もし超電導インバータが発明されれば、原理的にジュール損失の発生を回避できる。本研究では、この点に着目して、超電導インバータを構成できるかどうかの検討を行った。ごく簡単なブリッジ回路により直流から交流への変換が可能であることを確認した。交流への変換効率は低いものであるが、その改良により本格的なインバータの製作が可能になるか検討したので報告したい。

2. 基本原理

本発想の基本的な骨子は図1に示すような4個の電気抵抗がゼロの「完全超電導状態」にある超伝導素子(A, B, A' およびB' と名前を付す)を並列に並べた回路となっている。ここで一組の超伝導素子B, B' をスイッチングによって「抵抗状態」に移す。この抵抗状態には磁束の運動により抵抗が発生した「磁束フロー超伝導状態」と常伝導に転移した「常伝導状態」とがある。

さて負荷Zが完全超伝導体で抵抗がゼロの理想状態では、B, B' が「抵抗状態」にあると完全超伝導状態を保つ超伝導素子A, A' にのみ電流が流れようになり、超伝導素子B, B' には電流が流れなくなるので図1に示すように電流の経路はA→Z→A' となる。次のステップでA, A' を「抵抗状態」に、B, B' を「完全超伝導状態」にスイッチングすると電流の経路はB→Z→B' となり、負荷Zを流れる電流の方向は逆向きになる。このように「完全超伝導状態」と「抵抗状態」をスイッチングにより交互に周期的に印加すれば、負荷Zを通過する電力波形は交流となる。すなわち直流電力の一部分を交流電力に変換して取り出しことなる。つまり超伝導インバータの実現が原理的に可能なことを理論的に示したものである。しかもオン状態は超伝導状態であるため抵抗はゼロであり、ジュール熱発生はゼロとなる。

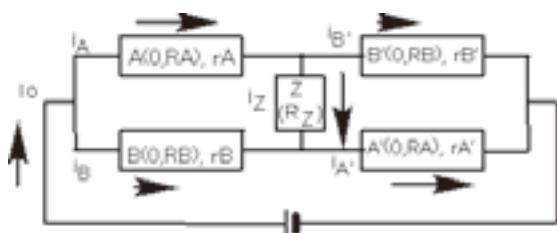


Fig. 1 Principal circuit of SC inverter.

このような理想的なインバータは(1)負荷Zの抵抗がゼロの場合、(2)負荷Zの抵抗がゼロでない場合には、超伝導素子の抵抗状態での抵抗が無限大である場合に限られる。しかし実際にはこのような理想状態を得ることは難しい。従って現実に負荷Zの抵抗 R_Z 、超伝導素子の抵抗状態での抵抗 R_A ($=R_B=R_{A'}=R_{B'}$)の相互関係がどの範囲にあれば、実用的な超伝導インバータとして有効になるかを検討しなければならない。

3. 実験的検証

用いた超伝導素子はサファイア基板上にYBCO結晶を厚さ300nm成長させたもので、表面に保護層として金が厚さ100nm付けられている。この素子の臨界電流は77Kで $I_c=20A$ であった。この素子を図1の回路のA, B, A', B'に配置し、負荷には抵抗 $R_Z=50\mu\Omega$ の金属棒を用いた。今回はスイッチング動作をさせるため電磁石を用い、素子A, A'あるいは素子B, B'が同時に抵抗状態になるようにした。磁場波形が正弦波的に $B=B_{\max}[1+\sin(2\pi ft)]$ になるようした。つまり各素子には0から B_{\max} までの振幅の磁場が印加される。周波数として $f=0.1Hz$ から $100Hz$ の範囲を調べた。

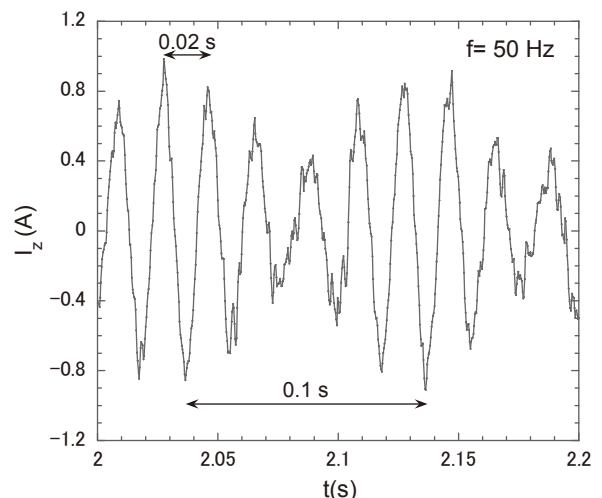


Fig. 2 Temporal change of current I_Z inverted by the alternating magnetic field with $f= 50 Hz$, where I_o was 32 A.

負荷Zに印加される電圧を V_Z とすると、負荷Zを流れる電流は $I_Z=V_Z/R_Z$ で求められる。電源電流を $I_o=32A$ 、交流磁界の条件を $f=50Hz$ としたときの、負荷Zに流れる電流の時間変化を図2に示す。周期0.02sと0.1sの周期的変化が見られるが、前者は50Hzの磁場変化に対応しており、後者は商用周波数60Hzと磁場周波数50Hzの合成による唸りに相当する。図2から最大電流 $I_{Z,\max}$ はほぼ0.0Aになることがわかる。今後実用化のためには“高抵抗”超伝導素子の開発、周波数帯域幅の拡大が必要となる。

4. 考察およびまとめ

負荷Zおよび超伝導素子の抵抗状態の抵抗の比を $\alpha=R_Z/R_A$ と定義する。図1の回路で超伝導素子の抵抗状態の抵抗が有限であるため発生するジュール熱による損失を定格20kW, 100Aの交流機器で見積もると、もし $\alpha \approx 10^{-5}$ 程度の比が実現できれば1W程度の損失に押さえることができる。これは同一条件でパワーMOSFETトランジスターを用いるときの80Wのジュール熱損失に比べて十分低い。このように本発想の原理の実用的な機器への展開の可能性と有用性を示すことができた。

高温超電導ロータ・ステータで構成される磁気軸受の電磁力解析

Electromagnetic analysis of a magnetic bearing composed of the HTS rotor/stator

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. 概要

高温超電導体のロータ/ステータで構成される磁気軸受を想定して電磁力解析を行った。解析には、電磁場解析ソフト ELF/MAGIC を用いて、スラスト(浮上力), ラジアル(径方向力)の両方向変位に対する静的な電磁力を評価した。ロータは完全反磁性の超電導バルク体とし、4 辺のループ電流で要素の中心位置の磁界をゼロにする平面要素でモデル化した。コイルは HTS テープ(幅 5mm, 厚さ 0.3~0.4mm)をパンケーキ積層することとて、起磁力と形状を算出してモデル化した。

単コイルと単純なディスク形状のバルク体の組み合わせでは、通常、浮上力と径方向案内の復元力の両立が難しい。安定した磁気軸浮上を実現させるためには、カスプ磁場が有効であるが、この場合、コイル巻線が 2 倍でも、浮上力は 2/3 程度となり、ステータ側磁石のコストが高くなる欠点がある。現在、高温超電導コイルのコストは線材長さに大きく依存する。このため、バルク体の形状をパラメータとして、単コイルにおいても安定した浮上・案内ができる軸受を検討することとした。

解析結果では、ロータにディスク形状のバルク体を複数個使用することで、ステータをソレノイドの単コイルとしても、安定したラジアル、スラスト復元力を発生できることが確認できた。

2. コイル内に配置した超電導バルク体の電磁力特性

コイル内に超電導バルク体を配置した時の電磁力特性を解析し、一定質量の浮上体を磁気軸支持した時の変位に対する復元力の有無という観点で磁気軸支持の安定性を評価した。バルク体は直径 46mm, 厚さ 15mm のディスク形状とし、コイル内直径は 53.5mm、起磁力は 98kA とした。

Fig. 1 はコイル内にバルク体を配置し、これを上下方向に移動させた時の両者の相対位置と発生電磁力の関係を示す。本計算では、径方向変位に対する復元力を評価するために 1mm の径方向変位を付与している。横軸は、超電導バルク体と超電導コイルとの軸方向相対変位を表している。z=0 で両者の高さ中心が一致しており、z が負でバルク体がコイルより下方、正で上方に位置する。z>0 で上下方向電磁力(Fz)は浮上力となるが、このうち z<18 の領域では、バルク体の高さが下がるほど、浮上力が小さくなるので下方に変位したときの復元力とはならない。一方、z>18 の領域ではバルク体の高さが下がるほど、浮上力は大きくなるので、変位に対する復元力を有する安定浮上となる。径方向電磁

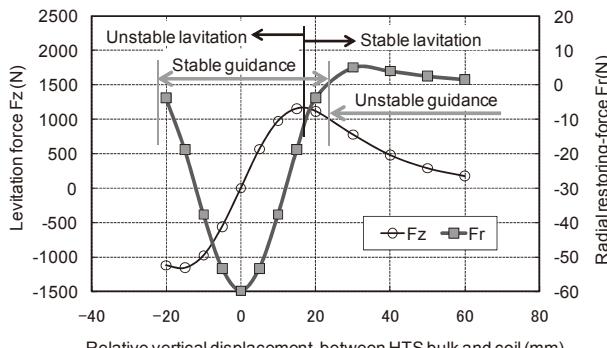


Fig.1 Levitation property of coupling of a HTS bulk and a coil

力(Fr)については、コイル中心高さ(z=0)付近で大きく、コイル中心高さより一定長さ以上遠ざかる(z>20, z<-20)と、径方向電磁力(Fr)が変位を増長させる方向に働くか、ほぼ 0 となり不安定となる。径方向電磁力(Fr)が復元力として発揮される-20>z>20 の領域では、上下方向電磁力(Fz)に復元力が発生しないために、安定浮上はできない。また、上下方向に安定浮上できる z>18 の領域では、径方向の電磁力(Fr)が不安定となる。従って、単コイルを磁場発生源とした場合は、完全反磁性状態の超電導バルク体を安定して浮上支持することができない。一方で見方を変えれば、コイル中心部付近の径方向復元力が大きい領域に径方向案内用のバルク体を、浮上力の安定するコイル上部に浮上用バルク体を配置することにより、安定した浮上支持ができる可能性がある。これを解析によって確認した。

3. 単コイルでバルク体を安定浮上させる磁気軸受

先の解析で得られたバルク体の電磁力特性を利用して、大きな異なる 2 種類のディスク形状バルク体を組み合わせてロータとする軸受を検討した。Table 1 と Fig. 2 に軸受基本諸元を示す。Fig. 3 にロータ側バルク体とコイルとの相対変位と浮上力・径方向電磁力の解析結果を示す。

上向き変位(正変位)で浮上力が低下し、下向き変位(負変位)で浮上力が増加するので、一定質量の浮上体を磁気軸支持した場合は復元力となる。径方向変位についても、変位方向に対して逆向きの電磁力が発生するので復元力となる。よって、安定浮上となることが確認できる。

Table 1 Properties of HTS-coupling bearing

Shape	Rotor: HTS bulk		Stator: HTS coil			
	Size(mm)	Amount	Diameter (mm)	Thickness (mm)	MFM (kA)	
			Inner	Outer		
Disk	60	20	1	56	270	30
	46	30	1			314

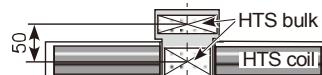


Fig.2 Basic structure of coupling of a HTS bulk and a coil

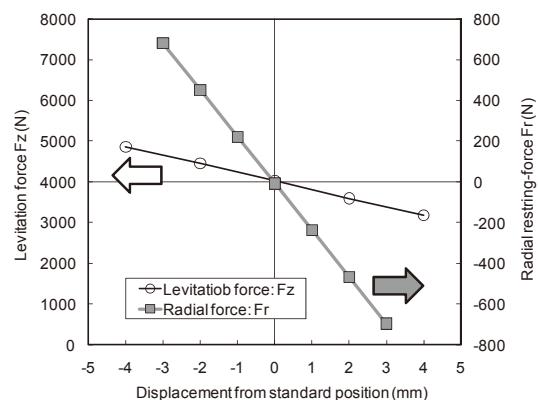


Fig.3 Levitation property of HTS-coupling bearing

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。

アンテナ結合アルミ超伝導トンネル接合素子(AI-STJ)を用いた CMB偏光検出器の開発

Development of an Antenna-Coupled Al Superconducting Tunnel Junction (AI-STJ)
for a Detection of Cosmic Microwave Background Polarization

美馬 覚, 石野 宏和, 樹林 敏子(岡山大); 羽澄 昌史, 住澤 一高, 樋口 岳雄, 吉田 光宏,
田島 治, 渡辺 広記(KEK); 佐藤 広海, 大谷 知行, 有吉 誠一郎(理研)
MIMA Satoru, ISHINO Hirokazu, KIBAYASHI Atsuko (Okayama Univ.), HAZUMI Masashi, SUMISAWA Ichitaka,
HIGUCHI Takeo, YOSHIDA Mituhiro, TAJIMA Osamu, WATANABE Hiroki (KEK);
SATO Hiromi, OTANI Chiko, ARIYOSHI Seiichiro (RIKEN)
E-mail: mima@fphy.hep.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年の宇宙背景マイクロ波放射(CMB:Cosmic Microwave Background)の観測は宇宙論に大きな進展をもたらしている。2001年に打ち上げられたWMAP衛星[1]によるCMBの精密測定から、正確な宇宙の年齢や組成、インフレーション宇宙論を支持する結果を得た。今後のCMB研究で最大の目的はその偏光成分の精密測定であり、測定から宇宙誕生後 10^{-38} 秒後について知見を得ることが期待される。

CMB偏光観測に向けて日本では、高エネルギー加速器研究機構を中心にしてCMB偏光観測用衛星プロジェクト[2]が進すすめられている。観測においてCMB偏光の強度がCMBの100万分の1であり、CMB波長帯(ミリ波:30~300GHz)では銀河からの偏光成分が主要な成分であることから、高感度でミリ波に帯域のある検出器が要求されている。この要求に応える検出器は現時点で存在しない。岡山大学と高エネ研、理化学研究所は共同で、次世代のミリ波検出器としてアルミ超伝導体トンネル接合素子(AI-STJ:Al Superconducting Tunnel Junction)の開発を2007年より進めてきた。本発表では、AI-STJの原理について紹介し、現状での開発成果について報告する、ご意見・御討論をお願いしたい。

2. アルミ超伝導体トンネル接合素子:AI-STJ

STJは2枚の超伝導体で薄い絶縁体をはさんだ構造をしたジョセフソン素子の一種である。入射した電磁波がクーパー対を壊すことで生じた準粒子(=電子)がトンネル電流を信号として検出される。クーパー対の作る超伝導ギャップ(2Δ)と転移温度(T_c)には $2\Delta(0K) = 3.528kT_c$ の関係があり、超伝導体がAl($T_c=1.2K$)に達ぶと周波数で40GHz以上の電磁波が検出でき、CMBの周波数をカバーする。CMB観測の検出感度の原理的な限界は光子ノイズで決まり(雑音等価指数(NEP)で $2 \times 10^{-18}W/\sqrt{Hz}$ に相当)、衛星実験では検出器に



Fig.1 Design of an Antenna Coupled Al-STJ

CMB光子ノイズ限界以上の感度が求められる[3]。AI-STJでは $NEP=2 \times 10^{-19}W/\sqrt{Hz}$ まで到達可能で、主要なインフレーションモデル全てについて検証可能である。

また、宇宙物理以外でも超高感度ミリ波検出器として様々な産業応用が期待される。

3. 試作・性能評価

アンテナ結合AI-STJは、ログペリアルアンテナの上に伝送線とSTJを乗せた構造をしており、アンテナで受けた電磁波をSTJまで導き電流に変換される。今回は周波数は150GHz(AI-STJ用)と400GHz(Nb-STJ:テスト用)になるよう設計しているFig.1。素子は高エネ研でフォトリソグラフィにより試作した。ソーブショット冷凍機を使い0.3Kで150GHzにデザインされたAI-STJのI-V特性を測定し、特性の良いジョセフソン素子ができるていることを確認Fig.2。ついでこの状態で、77Kと300Kの黒体を素子から見えるように冷凍機の窓の前に配置し、切り替えることで光に対する応答を確認した(0.1nA程の変化を確認)。最後にフーリエ分光器を用い100GHzから3THzまでマイクロ波に対する応答をみた。ここでは光に関する感度は見られたが、ゲインは非常に小さく、ピークも200GHz付近にみえ設計値からはずれた特性を示した。詳細については講演にて報告する。

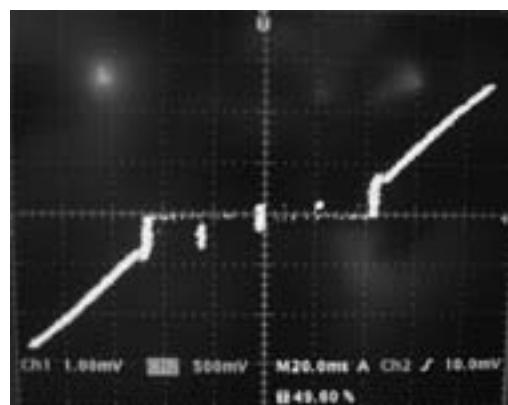


Fig.2 I-V curve (150GHz)

4. 今後

電磁波に感度のあるアンテナ結合AI-STJを試作した、今後は設計通りのゲイン、周波数を示すようにSTJのパラメータを変更し新しく試作をおこなう

参考文献

1. E. Komatsu, et al.: arXiv: 0803.0547v2 [astro-ph]
2. LiteBird Web Page
<http://cmbpol.kek.jp/litebird/documents.html>
3. James Bock, et al.: arXiv: 0604101v1 [astro-ph]

巻き戻し構造をもつ変圧器型超電導限流器の限流特性実験

Current limiting characteristics of transformer type HTS fault current limiter with re-wound structure

白井 康之, 小田 さや香, 新居 辰彦, 塩津 正博(京大)
SHIRAI Yasuyuki, ODA Sayaka, NII Tatsuhiko, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.)
E-mail: shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

変圧器型超電導限流器の1次側及び短絡2次側ともに巻き戻しコイル構造とした試験装置を設計製作し、限流効果確認の基礎実験を行ったので報告する。巻き戻しコイルとしたため、設計インダクタンスに対する必要線材長が比較的広い範囲で設計することができる。また、事故電流が比較的小さい場合は2次側コイルのみ常電導転移して主にリアクタンス成分で限流し、大きくなると1次側コイルも常電導転移して抵抗成分でさらに限流することができることを確認した。

2. 巷き戻しコイル構造をもつ変圧器型限流器

作成した巻き戻しコイル構造をもつ変圧器型限流器モデルの断面概略図と写真を Fig.1 に示す。まず1次コイルとして内径を異にする2つの円筒に同方向に BSCCO 線(n 値 21, 臨界電流値 100A)を巻き、下端を短絡、上端はパワーラインに接続する。それぞれの巻数は、できるだけ内側空間の磁場がキャンセルされるように設定する。巻数は図中に記載。次いで、2 次コイルを同様に 1 次コイルの上から巻き、上端下端ともに短絡する。1, 2 次コイルともに超電導(待機)状態の時は、ライン電流によって作られる磁場エネルギーが 2 つの円筒の隙間も含めて最小になるように 2 次コイルに誘導電流が誘起され、限流器インピーダンスは小さくなる。

3. 限流動作基礎実験

実験は、限流器と負荷リアクトルと電磁スイッチを直列した回路に、交流電圧 V_{cir} (0~40V)を印加し、ほぼ 0.1 秒間スイッチを on にして、流れる電流、発生インピーダンスを測定した。限流器は 1 周期の間に、限流/待機を繰り返し、電流のピークが抑えられる歪み波形となった。そのピーク値と印加電圧の関係を示したのが Fig.2 である。図中 2 本の斜め直線は、1, 2 次コイルの既約電流のピーク値である。巻数比によって 2 次側にほぼ 2 倍の電流が誘起されるので、先に 2 次コイルに抵抗が現れ、1, 2 次電流ともに限流効果が現れる。さらに印加電圧、すなわち回路電流が大きくなると、1 次コイルにも抵抗が現れ、さらに 1 次コイル電流は限流される。

Fig.3 は、限流器の電圧・電流から基本波成分をとりだし、等価的なインピーダンスとそのリアクタンス及び抵抗成分を求めたものである。インピーダンスは待機時の漏れリアクタンスから、2 次コイルの抵抗発生にともない磁場相殺の状態が破れて 1 次コイル自身のリアクタンス値に向かって大きくなる(リアクタンス限流)。さらに電圧(電流)が大きくなると、1 次側コイルに抵抗が現れ限流インピーダンスは抵抗成分が主になつていくことがわかる。

Fig.4 に限流器の電圧・電流の瞬時値の積を 0.1 秒間積分した結果をしめす。リアクタンス限流では発熱は小さく、抵抗限流に移るにつれて大きくなり印加電圧に比例する。

4. まとめ

提案した限流器は、ほぼ設計通りに限流動作を行つことを確認した。この限流器は限流インピーダンスが、事故電流の大きさによってリアクタンスリッチから抵抗リッチまで変化する。巻き戻し構造の内外ボビンの径を適当にすることで、限流器の限流インピーダンスの設計(リアクタンス/抵抗の大きさやその切りかわる電流値など)の自由度が大きくとれる。

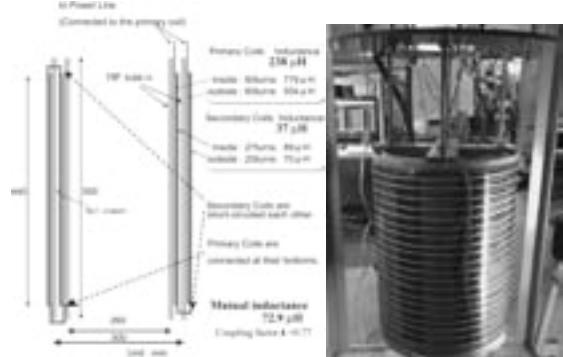


Fig.1 Cross-sectional and overall photo view of the test SCFCL with rewound structure.

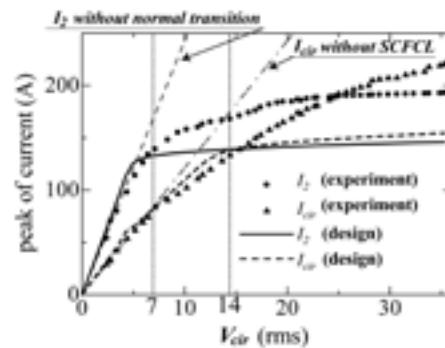


Fig.2 Peak of I_2 and I_{cir} as a function of V_{cir} (rms).

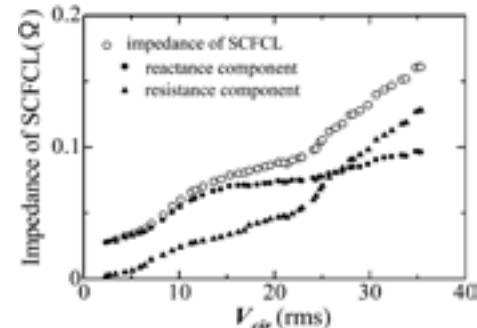


Fig.3 Current limiting impedance and its components as a function of V_{cir} (rms).

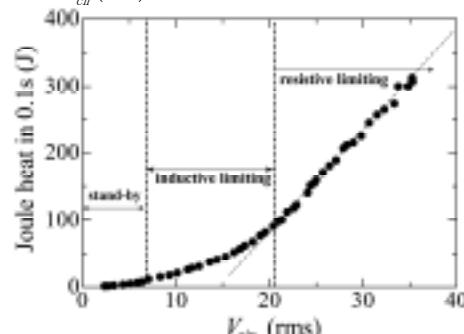


Fig.4 Heat generation in SCFCL during current limiting operation (0.1 s) as a function of V_{cir} (rms).

トロイダル配置されたY系SMESコイルの保護動作

Evaluation of Protection Mode of YBCO Toroidal Coils for SMES

植田 浩史, 石山 敦士(早大);式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

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

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

大容量 SMES では、漏れ磁束を少なくし、交流損失を少なくするために、複数のコイルをトロイダル配置することが想定される。超電導コイルでは、1 つのコイルに何らかの異常が発生した場合、保護のため、外部抵抗によってそのコイルのエネルギーをダンプすることになる。コイルをトロイダル配置すると、1 つのコイルをダンプした場合、他のコイルを永久電流モードのままにしておくと、ダンプするコイルの電流減衰のよる誘導電流が重畳されることになる。こうしたトロイダル配置のコイルにおいて、1 つのコイルが保護動作に入った場合の、他のコイルの挙動を回路解析によって評価した。

なお、本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. トロイダルコイル諸元

今回の解析では、線材は幅 1 cm、ハステロイ厚さ 100 μm 、銅層厚さ 100 μm で、 $I_{\text{C}}=540 \text{ A}$ (@0.05 $\mu\text{V}/\text{cm}$, 20K) のものを想定した。コイルの諸元を Table I, II に示す。導体は線材 4 枚を積層して構成し、ダブルパンケーキ 2 段をユニットコイルとし、それを 180 個トロイダル配置する。Fig. 2 にインダクタンスの計算結果を示す。ユニットコイルの自己インダクタンスは 0.51 H、相互インダクタンスは 3 つ隣のコイルで自己インダクタンスの 1/2、7 つ隣のコイルで自己インダクタンスの 1/4 となる。蓄積エネルギーは、1500 A (素線 375 A \times 4 枚バンドル) 通電時で 1.1 GJ、2160 A (素線 540 A \times 4 枚バンドル) 通電時で 2.2 GJ である。

3. 保護動作中の挙動解析

解析は回路解析と熱解析を連成し、断熱条件で、YBCO の I_{C} 、銅の抵抗および熱容量、ハステロイの熱容量の温度依存性を考慮した。

180 個のコイルが独立に電流 1500 A (素線 375 A \times 4 枚バンドル) で永久電流モードにあるとする。その状態から、1 つのコイルが外部抵抗保護モード (抵抗 1 Ω で閉ループ)、他のコイルがそのまま永久電流モード (0 Ω で閉ループ、超電導状態を維持) の場合、各コイルの電流、電圧変化を回路方程式を解くことで求めた。結果を Fig. 3 に示す。隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はほとんど遮へいされるため、隣のコイルの電流が 1.5 kA から 2.2 kA に増加する。しかし、温度上昇はないため、クエンチせずにその状態で電流が流れ続ける。電圧は最大で 1.5 kV 発生する。

4.まとめ

トロイダルコイルの保護動作中の電流、電圧変化について回路解析と熱解析を連成して評価した。180 個のユニットコイルの内、1 個が保護動作に入つても、他のコイルに誘導される電流は最大 1.5 倍程度で、 $I_{\text{C}} = 2160 \text{ A}$ (@0.05 $\mu\text{V}/\text{cm}$, 20K) に対して 1.5 kA の運転電流では温度上昇も起きない。

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, no.2, pp.1659-1662 (2005)
2. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.80, p.101 (2009).

TABLE I SPECIFICATIONS OF 2 GJ CLASS TOROIDAL SMES.

Stored energy	2.4 GJ
Operating temperature	20 K
Number of unit coils	180
Radius of the toroid	3.7 m
Peak of the operating current	2160 A
Maximum magnetic field (perpendicular component)	11 T (0.67 T)

TABLE II SPECIFICATIONS OF THE UNIT COIL IN TOROIDAL SMES.

Inner radius	1.0 m
Outer radius	1.4 m
Height	0.06 m
Width of the tape	15 mm
Thickness of the tape including insulation and reinforcement	1.1 mm
Number of tapes in the conductor	4
Number of turns	91

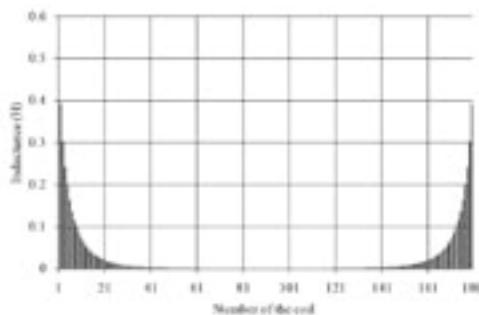
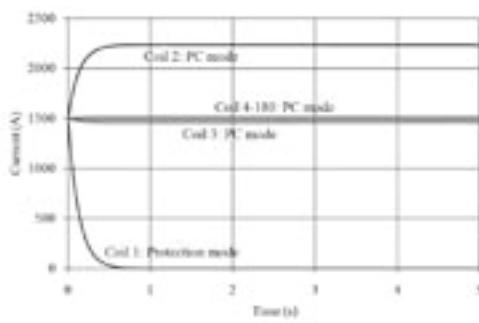


Fig. 2 Inductance between the coils.



(a) Current

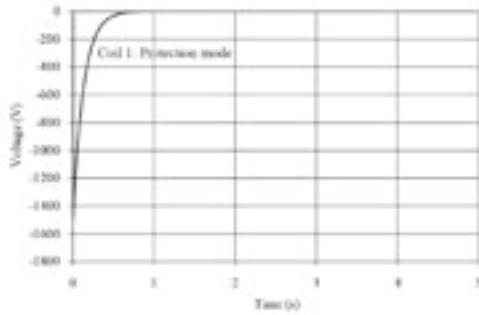


Fig. 3 Numerical results of current and voltage in protection mode.

室温磁気冷凍機のAMRダクト内部の壁面流に関する実験的考察

Research on Drift Flow in AMR Duct of Room-Temperature magnetic Refrigerator

小山 尚人, 和田 篤史, 岡村 哲至(東工大); 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 伊藤 孝治(蔵王精機)
 OYAMA Naoto, WADA Atsushi, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech.);
 HIRANO Naoki, NAGAYA Fumio (Chubu Electric Power Co.);
 ITOU Kouji (Zaouseiki CO, Inc)
 E-mail: oyama.n.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

現在エアコンや冷蔵庫など幅広い機器に気体冷凍が用いられているが、気体の膨張・圧縮を用いた方法では冷媒ガスとしてフロンや代替フロンを用いるため環境に負荷がかかると共に、大幅な効率の上昇は見込めない。そこで、新たな冷凍方式として注目を浴びているのが、磁気冷凍方式である。

磁気冷凍方式では磁性材料の磁化・消磁の際の発熱・吸熱(磁気熱量効果)を利用して冷凍を行う。この方式では、冷媒に水を用いるので環境に易しく、効率の観点からも気体冷凍を越える可能性がある。しかし、磁気冷凍機に一般的に用いられる AMR ダクト内の球状の磁性材料と水の熱交換についての詳細な研究は少なく、COP の向上の妨げとなっている。これは、AMR ダクト内の冷媒の流れが複雑かつ、使用する材料の球径、ダクトの形状によっても熱交換率が変わってしまうからだと考えられる。

そこで、本研究では AMR ダクト内の壁面流に着目し、壁面流の存在を明らかにし、その効果を確認する実験を行ったので、その結果を報告する。

2. AMR ダクト内の壁面流

充填層内を冷媒が流れる際に壁面近傍では局所的に充填率が変化するために、定性的に冷媒が流れやすくなる。その結果、主流の流量が小さくなり熱交換率が低くなる。主流の流量が小さくなると、圧力損失が小さくなる。そこで、管径の異なるダクトを用いて同じ充填率で材料を充填し、同じ流速で水を流し圧力損失の差を見ることで壁面流の存在が確認する。管径の小さなダクトの方が断面積に対して円周の比が大きくなり、壁面流の割合が多くなるので圧力損失は小さくなる。ダクト内の流れを主流と壁面流に分け、モデル化を行い壁面流の割合を求め数値計算を行った結果を Fig.1 に示す。

3. 実験原理

実験に用いた流路を Fig.2 に示す。用いるダクトは3種類で、それぞれ管径を 24, 19, 14[mm] とし、球径は 0.5~0.7[mm]、充填率は一定で 0.6 とした。ただし、各ダクトで球径のばらつきがあると考えられるので、実験の前に空気透過法により、比表面積 S_v を測定し、実験を行った。

層流の充填層の圧力損失は以下の式で求められる。

$$\Delta P = \alpha \mu v S_v^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} L$$

粘性係数 μ 、流速 v 、充填率 ε 、ダクト長さ L は一定として実験を行ったので、壁面流の影響がなければ $\Delta P / S_v^2$ は各ダクトで一定となる。壁面流の影響がみられる場合は管径の小さなダクトの $\Delta P / S_v^2$ が小さくなるものと考えられる。

4. 実験結果

実験結果を Fig.3 に示す。Fig.3 から $\Delta P / S_v^2$ の値が管径が小さいほど小さな値をとっていることが分かる。これは壁面流の存在により小さくなっていると考えられる。この実験結果

から壁面流の存在によりダクト内部の熱交換率が小さくなっていることが指摘される。

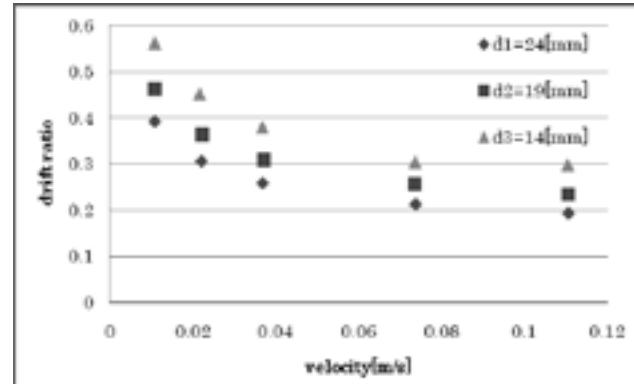


Fig.1 drift ratio estimated by calculation

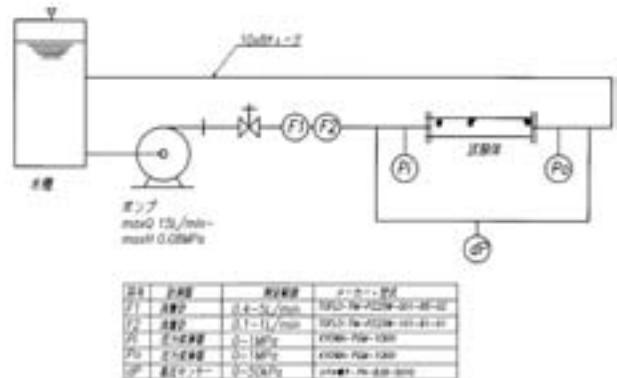


Fig.2 Experimental apparatus

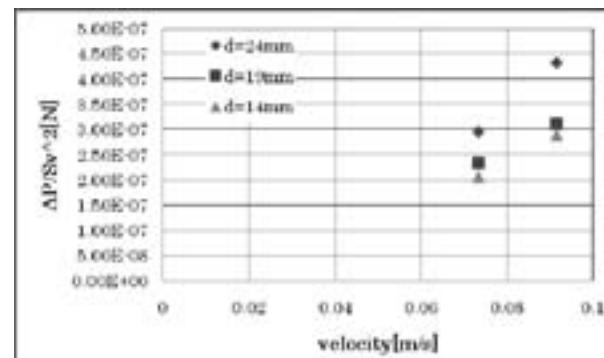


Fig.3 Experimental result

5. 謝辞

本研究は、「CoolEarth-エネルギー革新技術計画」に貢献することを目的とするエネルギーイノベーションプログラムの一環である「省エネルギー革新技術開発事業」として、独立行政法人(NEDO)の委託により実施したものである。

室温磁気冷凍の熱負荷特性

Heat load test on AMR refrigeration

坂本 浩崇, 内本 真司, 中込 秀樹(千葉大); 小林 忠彦, 加治 志織, 斎藤 明子(東芝)
 SAKAMOTO Hirotaka, UCHIMOTO Shinji, NAKAGOME Hideki (Chiba University);
 KOBAYASHI Tadahiko, KAJI Shiori, SAITO Akiko (Toshiba)
 E-mail: sakamoto@graduate.chiba-u.jp

1.はじめに

環境負荷の小さい未来の冷熱技術として期待が寄せられている室温磁気冷凍技術は、永久磁石を用いたAMR(能動的蓄冷型磁気冷凍)方式により、室温近傍から零下の温度生成を達成している[1]。

磁気冷凍では作業物質である磁性材料のエントロピー変化量: ΔS が冷凍性能に関係し、キュリー温度近傍で極大となる温度依存性を有している。一方、実際の冷凍機を想定した場合、冷却部である低温端に熱負荷が加わるため磁性材料の温度が変化する。このため、AMR式磁気冷凍では、磁性材料の ΔS の温度変化に対して熱負荷による温度変化の影響を明らかにする必要がある。

本研究では、磁性材料が充填された熱交換容器の低温端側に設けたヒーターで熱負荷を加えて冷凍試験を検証した。尚、ヒーターによる熱負荷のうち、磁性材料の温度上昇に直接寄与する有効熱負荷については、冷媒静止状態での検討結果[2]を基に熱散逸量が微少であるとして、ヒーター入力による熱量をそのまま有効熱負荷として扱った。

2. 実験装置

本試験装置の概略図を Fig.1 に示す。装置は外部温度制御ユニット(空調)に接続された断熱ボックス内にあり、環境温度を任意に設定することが可能である。装置本体は、~1T 永久磁石に対して、磁性材料を充填した熱交換容器が上下移動することで磁界の印加・除去を行う構成である。磁性材料は、粒径 500~600 μm の GdY 球を用い、充填部: 内径 15mm、長さ 115mm、充填量~100g である。

また、水中ヒーターは冷媒移動を行う下部軸のピストン先端に固定してある。AMR 冷凍サイクルは上下電動シリンダーを制御することにより、磁界印加 \Rightarrow 高温冷媒移動 \Rightarrow 磁界除去 \Rightarrow 低温冷媒移動の各動作を行う。水中ヒーターは冷媒中にあり、直流電源による定電流モードで一定の熱負荷を加えた。温度測定は、熱交換容器の径方向(中心)に挿入した熱電対を用いた。さらに、熱交換容器内部の温度勾配を評価するために容器長手方向の 11 ヶ所について温度データを取得した。

3. 実験結果

環境温度: 15°C、AMR 冷凍サイクル周波数: 0.4Hz で運転した際の温度差: ΔT_{span} と入力熱負荷の関係を Fig.2 に示す。Fig.2 より、本試験機では熱負荷の増大により ΔT_{span} が減少し、4W 程度で ΔT_{span} がゼロになることが判った。この点を最大冷凍出力とし、充填量当たりに換算すると約 40W/kg の出力に相当すると思われる。

また、熱交換容器内の温度勾配を解析し、無負荷および熱負荷状態での比較・検討も行った。これらの詳細については、講演にて詳述する。

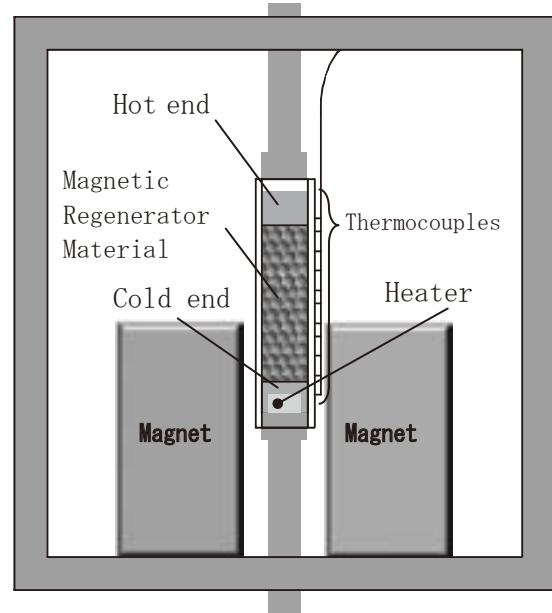


Fig. 1 Schematic illustration of the test apparatus

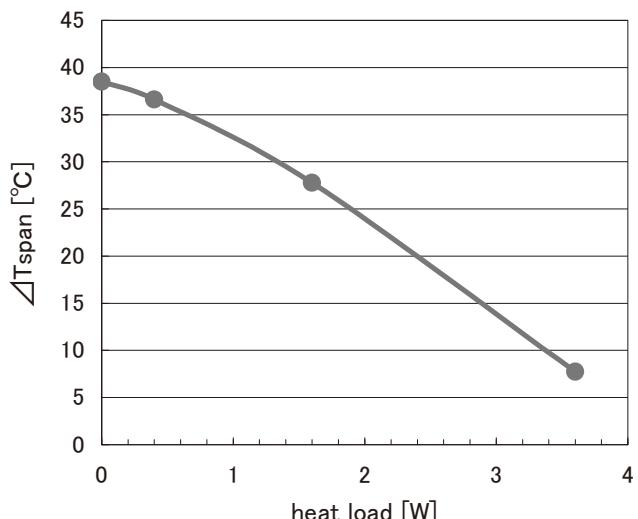


Fig. 2 Temperature span dependence on heat load

参考文献

1. T. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 138
2. H. Sakamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p. 78

能動的蓄冷型磁気冷凍サイクルの解析

Numerical analysis of the Active Magnetic refrigeration cycle

内本 真司, 坂本 浩崇, 中込 秀樹(千葉大); 小林 忠彦, 加治 志織, 斎藤 明子(東芝)

UCHIMOTO Shinji, SAKAMOTO Hirotaka, NAKAGOME Hideki(Chiba University);

KOBAYASHI Tadahiko, KAJI Shiori, SAITO Akiko(Toshiba)

E-mail: shinji.uchimoto@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

磁気冷凍システムはノンフロン冷凍が可能であり、高い効率の実現に期待が寄せられている。これまでに、能動的蓄冷型磁気冷凍(AMR; Active Magnetic Regenerative Refrigeration)サイクルによる磁気冷凍の基礎実験について報告してきた。AMR サイクルでは、冷凍作業を行なう磁性体自身が蓄熱(蓄冷)材料としても動作し、熱輸送は主に流体が担うため、熱の流れが複雑であり、多くのパラメータが冷凍性能に影響を与える。このため、計算手法による基礎的な考察が様々に試みられている。本稿では、単純モデルによる AMR サイクルの模擬を行ったので、結果について報告する。

2. モデルと計算方法

Fig.1 に、これまでの磁気冷凍実験に用いた装置^[1]を示した。熱交換容器は磁性体粒子と熱輸送用の流体で満たされており、上下動によって永久磁石が作る磁場空間に出入りすることで磁場印加/除去を反復する。また、これとは独立に流体の上下動を制御し、これらの組合せで AMR サイクル動作を行なっている。計算では、熱交換容器内部を熱流方向に区分して、各々の温度を時間と場所の関数として取扱い、磁場印加、流体上昇、磁場除去、流体下降の AMR サイクルを模擬した。磁性体としては T_c の異なる2つの材料を考慮し、磁気エントロピー変化と比熱の温度および磁場依存性を反映させて、AMR サイクル動作による冷凍性能を検討した。

3. 結果

Fig.2 は、計算に用いた磁性体について、磁場を零から1Tまで変化させた時の磁気エントロピー変化を示したものである。これらや磁場中比熱などの物性値を用いて、AMR サイクルのモデル計算を行った。Fig.3 は、 $T_c \sim 295$ K の磁性体を用いた場合の計算結果であり、図中の各色は、熱交換容器内部の等間隔な数箇所における AMR サイクルに伴う温度変化の様子を示している。同様条件の実験結果と、概観はよく整合していることが確認された。このモデルを用いて材料をハイブリッド化させた場合の AMR サイクル動作による冷凍性能の検討についても、当日の講演にて報告する。

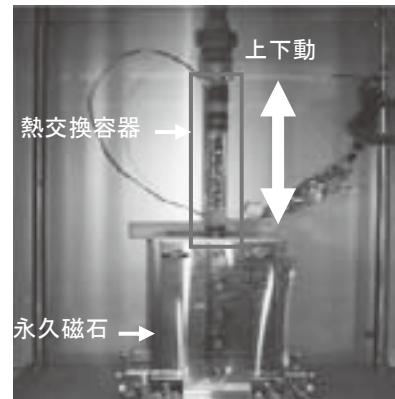


Fig.1. Experimental apparatus of the AMR cycle.

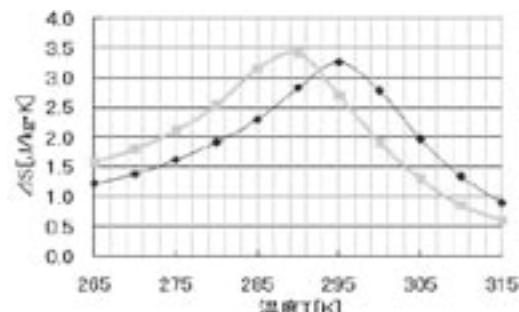


Fig.2. Temperature dependence of ΔS of magnetic materials.

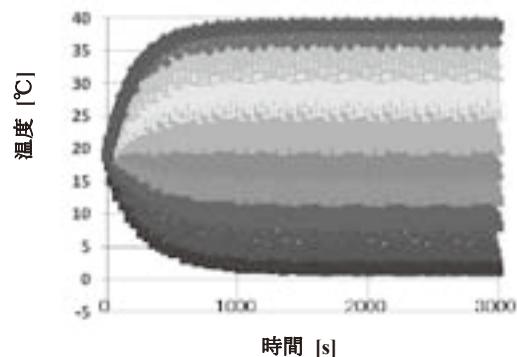


Fig.3. Temperature change inside heat exchange container.

参考文献

- [1] 小林忠彦他, 第 75 回秋季低温工学・超伝導学会講演概要集, (2006) p.112

磁気冷凍応用を目指した球状 GdN 材料の合成

Synthesis of spherical material of GdN for magnetic refrigerant

岡田 裕之, 西村 健太郎, 平山 悠介, 中川 貴, 山本 孝夫(阪大工); 楠瀬 尚史(阪大産研); 入江 年雄, 中村 英次(三徳)
 Hiroyuki Okada, Kentaro Nishimura, Yusuke Hirayama, Takashi Nakagawa, Takao Yamamoto(Osaka Univ.);
 Takashi Kusunose(Osaka Univ.); Toshio Irie, Eiji Nakamura(Santoku Corp.)
 E-mail : h-okada@mit.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

来るべき水素エネルギー社会の実現に向けて、磁気冷凍法は水素を高効率に液化できる技術として期待されている[1]。その磁気冷凍材料として、20K～70K にキュリ一点を持ちその近傍で大きな磁気エントロピー変化を持つ重希土類窒化物が適していることを我々は報告してきた[2]。しかし、この物質は容易に空気中の水分と反応して酸化するという問題を持つ。比表面積の小さな緻密な球状材料にすると酸化が抑制されるはずである。また、圧力損失が少なく熱伝達が優れているといった理由からも球状材料が好ましいとされる[3]。しかし、重希土類窒化物を球状に合成する技術は見当たらない。本研究では例として Gd を取り上げ、HIP 法により Gd 金属球を変形させず窒化させ球状材料を得る条件を探索し、得られた窒化物の耐酸化性を評価した。

2. 実験方法

球状の Gd 金属球(ϕ : 0.85mm～1.0mm)を HIP 装置中で高温高圧の窒素ガスで数時間窒化処理した。圧力は 100～200MPa、温度は 1100～1600°C、時間は 24～50h の間で変化させた。出発物質中の金属のどれ程が窒化したかを表す窒化率は、得られた試料の磁化率を測定して算出した。湿度調節した容器内の湿度を 30% (DRY) と 100% (WET) に変え、保持した時の磁化率の経時変化を観測し、これを酸化度とし両者を比較した。

3. 実験結果

窒化率と健全な球材料が得られた率の温度への依存性を Fig.1 に示す。1400°C 200MPa 30h の条件で亀裂が入らず球のまま完全窒化することを見出した(Fig.2(b))。なお Fig.2(a) は完全窒化したが亀裂が入った試料である。これら 2 つの試料の室温での酸化劣化の挙動を DRY 環境および WET 環境下で観測・比較した結果を Fig.3 に示す。どちらも酸化度の湿度依存性が高く、WET 環境下では亀裂のない球は亀裂のある球より初期酸化が抑えられることが分かった。

参考文献

- [1] K. Kamiya, et. al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.30
- [2] Y. Hirayama, et. al. : Abstract of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.72
- [3] T. Utaki, et. al. : Master thesis, Osaka university, 2006

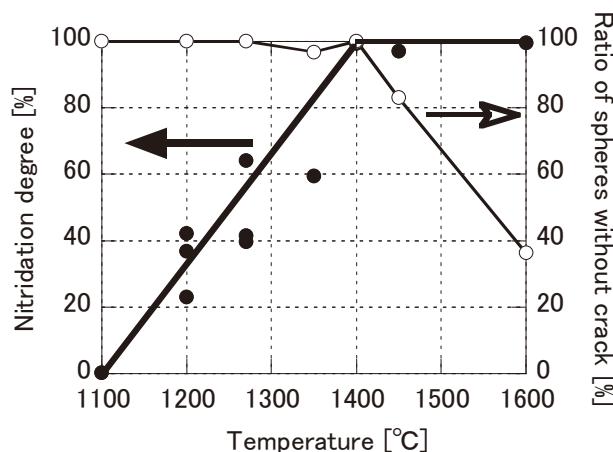
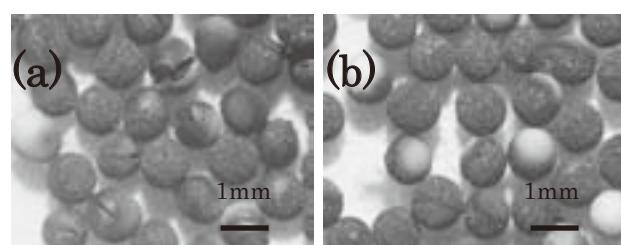


Fig.1 Temperature dependence of nitridation degree and ratio of spheres without crack.



(a) Partially cracked (1600°C 130MPa 24h)

(b) Crack free (1400°C 200MPa 30h)

Fig.2 Photographs of GdN.

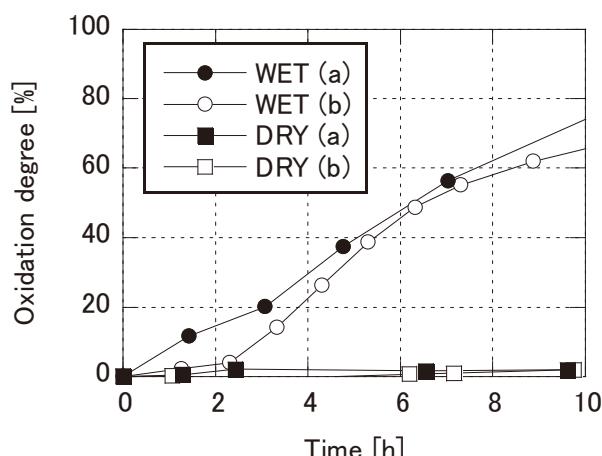


Fig.3 Time dependence of oxidation degree of GdN spheres of Fig.2(a) and Fig.2(b) under high (WET) and low (DRY) humidity conditions.

希土類窒化物の電気伝導度測定

Electric conductivity of rare earth nitride

西村 健太郎, 岡田 裕之, 平山 悠介, 中川 貴, 楠瀬 尚史, 山本 孝夫(阪大)
 NISHIMURA Kentaro, OKADA Hiroyuki, HIRAYAMA Yusuke, NAKAGAWA Takashi, KUSUNOSE Takashi,
 YAMAMOTO Takao (Osaka University)
 E-mail:k-nishimura@mit.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

来るべき水素エネルギー社会の実現に向けて、エネルギー密度が最大である液体水素を、輸送や貯蔵の面で有効に使うため、水素液化の高効率化は重要な技術課題である。しかし水素の液化にはその沸点20Kまで冷やす必要があり、従来の気体冷凍法に代わる新たな高効率冷凍技術として磁気冷凍法に期待が寄せられている[1]。我々はこれに向けた磁性材料として、磁気エントロピー変化 ΔS の大きい重希土類(Gd, Tb, Dy, Ho, Er)の窒化物を研究し、その有用性を示してきた[2]。しかし水素液化に必要な低温領域での希土類窒化物の物性には、未知の部分があり、本研究ではこれを補うために電気伝導度の測定を行った。

2. 実験

純度 99.9% の希土類金属の棒(Gd, Tb, Dy, Ho, Er)を出発物質として、HIP 装置により、130MPa の窒素ガス中 1600K で 2 時間保持し直接窒化した。X 線回折により試料の相を調べ、無磁場・磁場中で 2~300K の温度範囲で四端子法を用いた電気伝導度測定を行った。使用装置は PPMS model6000 を用い、試料形状は 2×2×15mm の棒状であり、反磁場の影響を少なくするために、棒の長手方向を磁場(0~5T)に沿うように配置した。

3. 結果

GdN, TbN, DyN, HoN, ErN の電気抵抗率の温度依存性を図 1 に示す。無磁場での抵抗率はすべての試料において磁気転移温度付近で顕著なピークを示した。ピーク位置は無磁場中での磁気比熱のピーク[2]と対応している(図 2 に GdN の場合の例を示す)。

図 3 は GdN の電気抵抗率の温度依存性を各磁場強度に対して示す。磁場が強いほど、図 1 で示した無磁場でのピークは目立たなくなった。磁気転移点付近での電気抵抗率の上昇は、局在スピンと伝導電子によるスピン依存散乱が大きく影響していると考えられる。また抵抗率は温度の上昇に伴い増大しており、GdN の電気伝導率は金属的と言える。

参考文献

1. K. Kamiya, *et al.*: Abstract of CSJ Conf., **72** (2005) 30.
2. Y. Hirayama, *et al.*: Abstract of CSJ Conf., **79** (2008) 72.

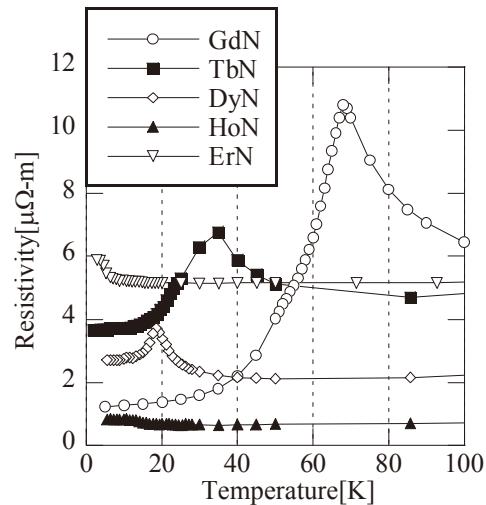


Fig.1 Resistivity of GdN, TbN, DyN, HoN, ErN at 0T

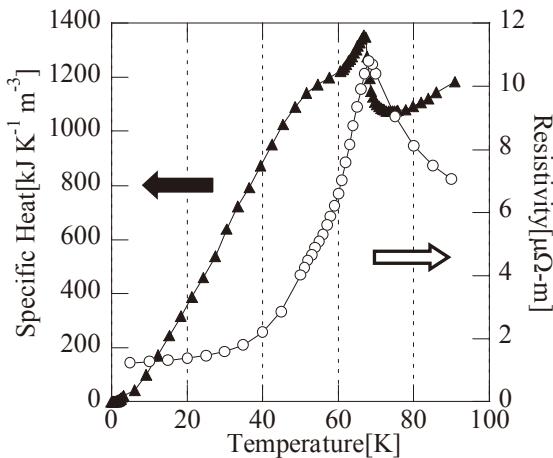


Fig.2 Specific heat and Resistivity of GdN at 0T

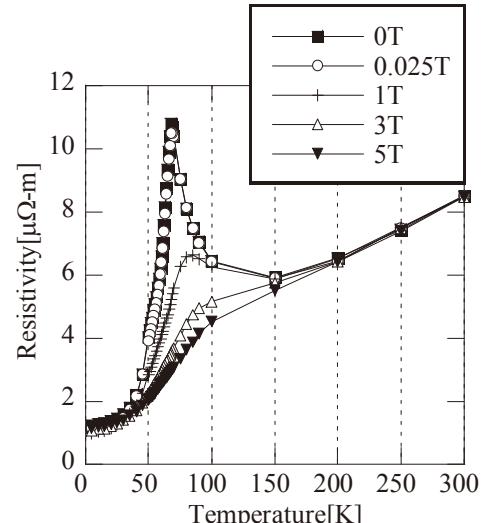


Fig.3 Resistivity of GdN at 0, 0.025, 1, 3, 5T

鉛代替蓄冷材の開発

Development of a new Regenerator Material substituting for Lead

岩崎圭祐, 生田博志(名大工)
 IWASAKI Keisuke, IKUTA Hiroshi (Nagoya Univ.)
 E-mail: iwasaki@iku.xtal.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

蓄冷材は小型冷凍機の冷凍能力を左右する重要な要素である。鉛は低いデバイ温度を有するため体積比熱が大きく、また安価であることから、もっとも一般的な蓄冷材として10K冷凍機で広く使われている。しかし鉛には毒性があり、環境負荷が大きい。そのため鉛は今後世界中で使用できなくなる可能性が高い。鉛は非常に優秀な蓄冷材であるためこれまでこれに代わる蓄冷材の開発は行われてこなかった。4K冷凍機で使用される「 Er_3Ni 」などの磁性蓄冷材は性能は高いものの「 Er 」をはじめとする希土類元素が非常に高価であるために、鉛の代替にはなりえない。

そこで我々は鉛に代わる安全で、安価な蓄冷材の開発を行っている。蓄冷材の条件の中でも最も重要だと考えられている、体積比熱の大きな材料の開発を目指した。今回は有望な鉛代替の蓄冷材として、Bi系(Bi_xSn_{1-x})が鉛の使用温度域で比較的大きな体積比熱を持つことを見出し、冷凍能力の測定なども行ったので報告する。

2. 実験方法

試料はアーク溶解法により作製した。均一な試料を得るために繰り返し溶解させた。相の同定はX線回折法により行った。緩和法による比熱測定装置(OXFORD社:Heat Capacity System)を用いて比熱の測定を行った。磁化率測定はSQUID磁束計(Quantum Design:MPMS)を用いた。またビッカース硬さの測定を行うとともに、球状粉($\phi 0.2mm$)を冷凍機に搭載して冷凍能力の検証を行った。

3. 実験結果

Fig. 1にいくつかの代表的な組成の Bi_xSn_{1-x} 試料の体積比熱を示す。また、比較のためにPbとHeガスの比熱も示す。図から分かるように、 Bi_xSn_{1-x} のいずれの試料も鉛には劣るもの、20K以上においてヘリウムガスよりも大きい比熱を持つ。蓄冷材が熱交換する相手はヘリウムガスであることから、この比熱の値は十分な大きさであると言える。またビッカース硬さの測定は、BiとSnはPbに比べて硬度が劣るもの、BiとSnを固溶させることにより、硬さが鉛を上回ることを示している(Fig. 2)。

硬さがPbを上回る試料のうち、最も比熱が大きい $Bi_{0.95}Sn_{0.05}$ について、冷凍能力の評価を行った(Fig. 3)。蓄冷材に鉛を使用した時と比べ、同程度の到達温度、90%程度の冷凍能力を持つ。これは蓄冷材として実用化可能な値である。Bi、Sn共に毒性、危険性のない元素であり、価格も安価である。したがって鉛代替の蓄冷材として有望であると考えられる。

4. Al系

我々は現在、Al系の磁性材料に注目し、その比熱測定も行っている。一例をFig. 4に示すが、Bi系よりも大きな体積比熱を持つことが分かる。詳細については当日発表する。

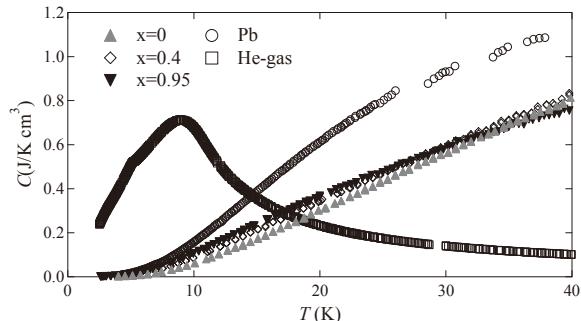


Fig.1 Temperature dependence of volumetric specific heat of Bi_xSn_{1-x} , Pb and He gas.

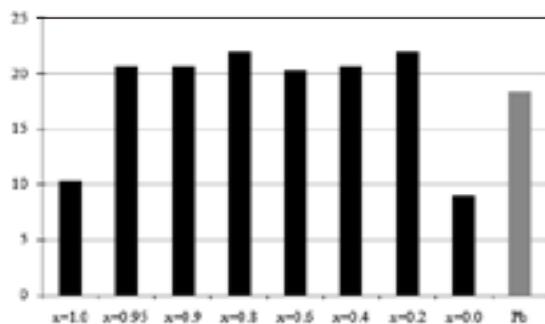


Fig.2 Vickers hardness of Bi_xSn_{1-x} and Pb.

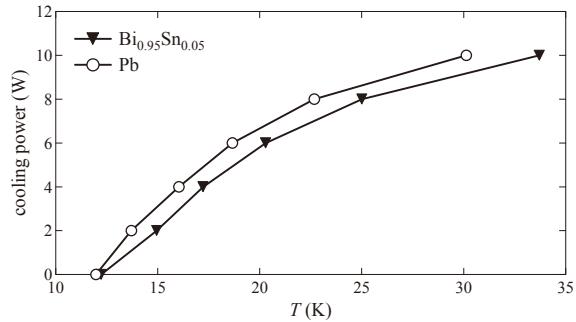


Fig.3 Temperature dependence of cooling power.

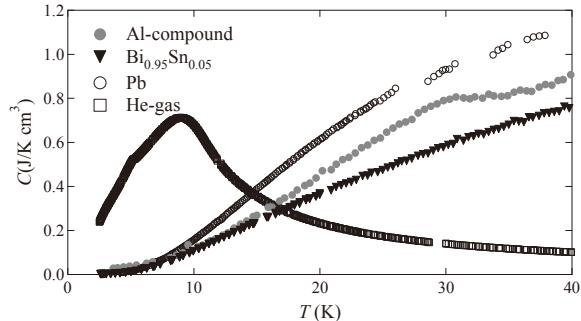


Fig.4 Temperature dependence of volumetric specific heat of an Al compound, $Bi_{0.95}Sn_{0.05}$, Pb and He gas.

水素磁気冷凍用 AMR サイクル評価試験装置の構築

Experimental study of AMR cycle for hydrogen magnetic refrigeration

沼澤 健則(NIMS); 平野 雄大, 服部 英之(NIMS 千葉大); 祖父江 雅充, 朝本 海, 西村 優大, 松本 宏一(金沢大); 中込 秀樹(千葉大)

NUMAZAWA Takenori (NIMS); HIRANO Yuta, HATTORI Yukihide (NIMS, Chiba University); SOFUE Masamitsu, ASAMOTO Kai, NISHIMURA Yuta, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University); NAKAGOME Hideki (Chiba University)
E-mail: HIRANO.Yuta@nims.go.jp

1. はじめに

物質・材料研究機構と金沢大学は、NEDO 水素安全利用等革新技術プロジェクトにより水素液化用磁気冷凍機の開発を進めている。これまでに、水素液化用磁気冷凍機を使用し、水素液化実証試験、磁性体の充填密度や形状に対する液化特性および水素ガスを予冷する 77K から水素液化温度 20K までの能動的蓄冷型磁気冷凍機 AMR (Active Magnetic Regenerator) の予備試験について報告を行なった。^[1]

本講演では、最近完成した AMR(能動的蓄冷型磁気冷凍サイクル)試験装置について報告を行なう。

2. 磁性体

本実験では、Gadolinium Gallium Garnet (=GGG) の Ga を一部 Fe で置換した GGIG=Gd₃(Ga_xFe_{1-x})₅O₁₂、および RNi₂、RAL₂ (R: 希土類元素) などの金属間化合物を取り上げる。前者は多結晶セラミックスで直径約 0.4mm、後者は粉碎、あるいは粒状化試料で同様の直径である。

3. 実験方法

AMR サイクルは、磁場変化による磁性体の磁気熱量効果と、磁性体ホルダー中を移動する熱交換流体による熱輸送によりサイクルを形成する。これを Fig.1 に示す。磁場変化と熱交換流体の位相は、独立かつ同期した制御が必要となる。

我々が従来構築した実験装置では磁場空間が直径 10cm しかなかったため、断熱空間に 2 つの駆動機構を設置することが困難であった。そのため、封じこめたガスの中で磁性体ホルダーを駆動することにより、磁場変化と熱交換を同時に実行する、大幅に簡略化されたサイクルを採用していた^[1]。



Fig.1 AMR Cycle Operation



Fig.2 Schematic & Photo of AMR Test Apparatus

これに対し、新しく構築された実験装置は以下の特性を有する:

- (1) 室温で直径 30cm の大口径超伝導マグネットを用いる
- (2) 磁性体とガスシリンダー駆動用アクチュエータを用いる
- (3) 最大ストロークは 20cm、最大駆動速度は 10cm/秒

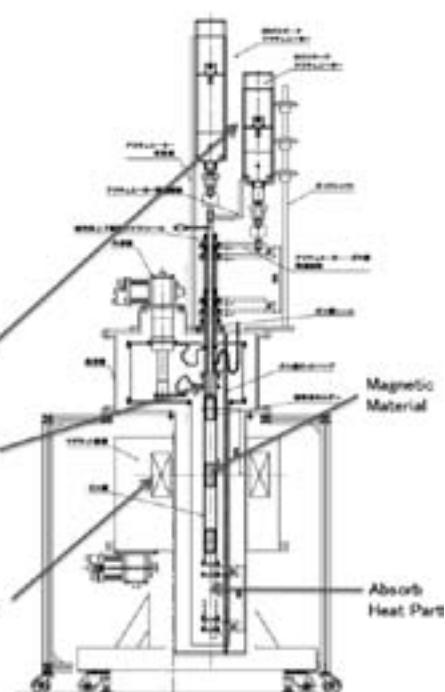
以上のように、従来困難であった磁場と熱交換流体の制御が独立して行なうことが可能となった。実験装置について断面図と写真を Fig.3 に示す。現状における問題は、超伝導マグネットの磁場分布がブロードであり、磁性体を引き抜いた場所で相当量の残留磁場が存在することである(最大磁場の約 30%)。このため、GGIG のように磁場変化を大きくしない性能が発揮しない磁性体では、磁気熱量効果が相対的に小さく、蓄冷効果が得られにくい状況にある。現在、とり性能の高い希土類金属系の試験を進めている。本講演では磁気冷凍サイクルの試験結果を中心に、装置の基本的な特性について報告する。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託により、水素安全利用等革新技術プロジェクトの一環として実施されている。

参考文献

- [1] 吉岡尚吾他、第 78 回春季低温工学・超伝導学会講演概要集、pp212 (2008)



水素磁気冷凍用静電容量式液面計の研究

Study on capacitive liquid level meter for hydrogen magnetic refrigerator

祖父江 雅充, 松本 宏一, 朝本 海, 西村 優大 (金沢大); 沼澤 健則 (NIMS)

SOBUE Masamitsu, MATSUMOT Koichi, ASAMOTO Kai, NISHIMURA Yuta (Kanazawa-U);

NUMAZAWA Takenori (NIMS)

E-mail: sunright@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

金沢大学と物質・材料研究機構では高効率水素液化システムの実現に向けて、磁気熱量効果を利用した磁気冷凍法による水素液化用冷凍機の開発を行っている。

開発中の試験冷凍機は水素槽の容量が小さいため小容量の水素を精度良く測るための液面計が必要である。本講演では静電容量式液面計の設計、製作、性能試験の結果について報告する。また超伝導式液面計との比較についても検討する

2. 積層平行平板型静電容量式液面計

静電容量式液面計では、コンデンサ電極内にある液体と気体の誘電率の違いにより、液面変化が起こるときに静電容量が変化することを原理としている。

しかし1つのコンデンサでは容量が小さく、ノイズ、浮遊容量の影響を受けやすい。そこで我々は8枚の電極からなる7組の平行平板コンデンサを用いることで感度、精度向上を狙った。

Fig.1は製作した液面計とその模式図で、極板の銅箔部分に液面が存在するとき静電容量の値から液面の位置を導くことができる。両端電極は片側のみで極板間には0.8mmのスペーサーを使用し、極板間の間隔の実測値は0.7mmであった。また酸化を防ぐため銅箔は金メッキが施してある。

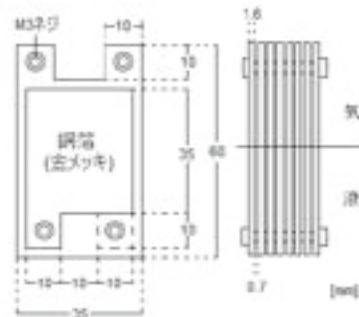


Fig.1 Capacitive level meter

3. 液面計試験

液面計を大気圧下で液体水素に浸け、熱侵入により時間の経過とともに液体水素の液面が下がる。そのときの液面の位置と静電容量の関係を調べた。液面の位置はデュワーに設置した物差しから目視で測定し、静電容量の測定はアンディーン社の自動キャパシタンスブリッジを用い、2端子法で行った

4. 試験結果

Fig.2に静電容量と液面の関係を示す。電極の有効な範囲(35mm)で液面の変化に対し静電容量がほぼ線形に変化していることが分かる。蒸発した水素の気泡が電極の間を移動することによる揺らぎが観測されたが、これによる誤差は静電容量測定の積分時間を長くすることで軽減された。また液面の高さをデュワーの外側で目視により求めることによる誤差も考えられる。以上を考慮したうえで十分な精度、感度があると考えられる。

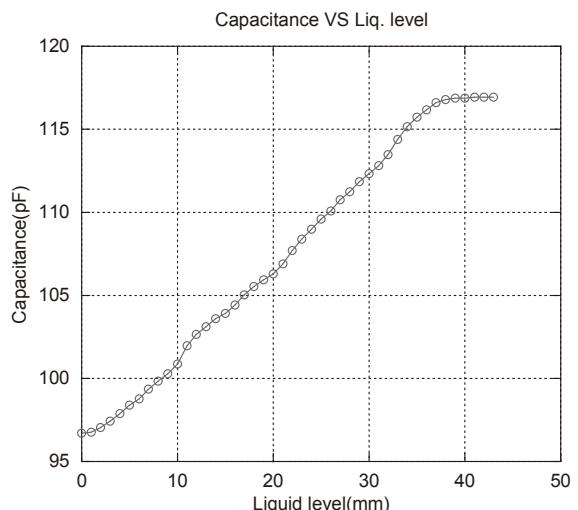


Fig.2 Capacitance variation of liquid hydrogen level

5. 参考文献

R. Sawada, et al.: Cryogenics, Vol. 43 (2003) p.449

水素磁気冷凍用粒状化 RT_2 系磁気作業物質の特性

Properties of RT_2 particles for hydrogen magnetic refrigerator

朝本 海(金沢大)、祖父江 雅充(金沢大)、西村 優大(金沢大)、松本 宏一(金沢大)、沼澤 健則(NIMS)、森高 桂(三徳)、
入江 年雄(三徳)

ASAMOTO Kai, SOBUE Masamitsu, NISHIMURA Yuta, MATUMOTO Koichi(Kanazawa Univ.) ,

NUMAZAWA Takenori(NIMS), MORITAKA Katsura, IRIE Toshio(SANTOKU)

E-mail : a-kai@stukanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々の研究グループでは、20K から 77K の温度領域での磁気冷凍機の開発を行っている。この温度領域では RT_2 (R:希土類、T:Al, Ni, Co) の金属間化合物が有望であることを、これまでに明らかにしてきた。以前行ったこの物質の破碎材を用いた冷凍試験では、材料が微粉化するという問題が起きた。そこで RT_2 系材料の粒状化を試み、 $GdNi_2$ 、 $DyAl_2$ の粒状化試料の作成が可能になったので、熱磁気特性の測定結果とともに報告する。

2. 粒状化 RT_2 系金属間化合物

本研究では $GdNi_2$ 、 $DyAl_2$ をともに遠心鋳造法によって粒状化した(Fig.1)。サンプルを粒径によって3つに分るいわけ ($GdNi_2$: <350μm, 350~500μm, 500~850μm, $DyAl_2$: 350~500μm, 500~850μm, 850μm~1.18mm)、それぞれ結晶構造を粉末 X 線回折によって解析したところ、Fig.2 に示されるようにラーベス相が確認された。

3. 磁化測定

Quantum Design 社の MPMS(磁気特性測定システム)を用いて各粒径ごとに磁化測定を行った。Fig.3 に $GdNi_2$ (粒径: 500μm~850μm) の磁化の温度依存性を示す。強磁性常磁性転移がシャープに起こっている、0.1T の結果についてキュリ一・ワイズ則を用いて解析したところ、転移温度は 74.8K であった。また有効ボーラー磁子数を求めるとき、8.32 となり文献値の 8.00 と近い値であった。磁化の温度依存は、過去に我々が測定した高周波溶解によって製作した $GdNi_2$ の破碎材と高磁場 (5T, 3T) ではよく一致している。これらから良質の物質が合成できたと考えられる。また 0.1T の強磁性相で磁化の値が以前の測定と少し異なっていたが、これは、粒子内の結晶粒界や試料形状による反磁場の違いではないかと考えている。 $DyAl_2$ についても同様の解析を行い、粒状化試料は他の製法の物質とほぼ同様の磁気特性を示した。



Fig. 1 $GdNi_2$ particles with 500~850 μm diameter

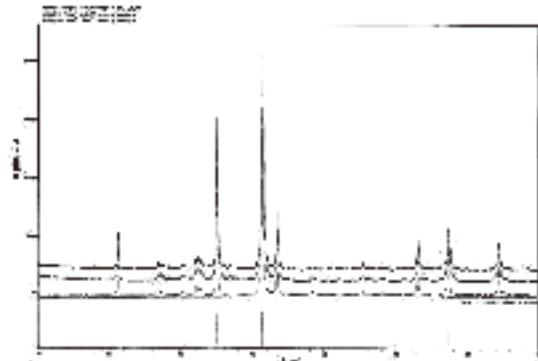


Fig. 2 X-ray powder diffraction patterns of $GdNi_2$

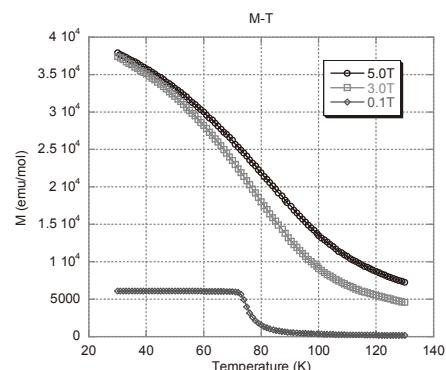


Fig. 3 Magnetization versus temperature curves for $GdNi_2$ particles (500μm~850μm)

In-situ 法 MgB₂/Fe 線材の線径依存性 —組織と超伝導特性—

Outer diameter dependence of In-situ MgB₂/Fe Wire —Microstructure and Superconducting Properties—

渡辺 喜史, 松岡 宏明 (日大理工) ; 前田 穂, 金 正鎧 (UOW) ; 久保田 洋二 (日大理工)

WATANABE Yoshifumi, MATUOKA Hiroaki (nihon-u); MAEDA Minoru, KIM Jung Ho (UOW);

KUBOTA Yoji (nihon-u)

E-mail: yw4423@yahoo.co.jp

1. はじめに

MgB₂ は金属系超伝導体の中で最も高い臨界温度 T_c (39K)を示し、20K 近傍での実用化に向けた研究が盛んに行われている。我々は、PIT-In-situ 法により MgB₂ 線材を作製する際には圧延過程で、Mg が繊維状に伸びる事が高 J_c を得るには必要である事を示してきた[1]。また、Fe シースを用いて臨界電流密度 J_c の高い MgB₂ 線材を作製してきた。今回は、MgB₂/Fe 線材の臨界電流密度 J_c の線径依存に注目して組織及び、超伝導特性を調べたので、その結果を報告する。

2. 実験

試薬の Mg(99.9%, 150μm) と B (99%, 1μm) を化学量論比 Mg : B=1 : 2 で 40 分間混合し、加重 4.0 トンで ϕ 5.5mm の円柱状に圧粉成型をする。成型体を長さ 40mm、外径 9.5mm、内径 5.6mm の Fe シースに詰め、溝ロールと丸溝ロールで外径 3.5mm まで圧延加工を施し、これを最外層に外径 8mm、内径 3.5mm の Fe パイプに挿入し、再び六角溝ロールと丸ダイスを用いて線径 0.95mm~0.381mm までそれぞれ縮径した。これらをアルゴンガスフロー中で 600°C-4h の熱処理を行い試料とした。試料の組織と臨界電流密度 J_c は、SEM と I_c 測定装置を用いて調べた。 I_c は 1 μ V/cm の電場が発生した電圧で定義した。

3. 結果

Fig.1 に各試料の 4.2K における J_c の磁場依存性を示す。 ϕ 0.52mm の線材 10T での J_c は 3.1×10^3 A/cm であった。 ϕ 0.95mm の線材の J_c は他の試料に比べて約半分と小さくなっている。これ以外の試料はほぼ同じ J_c を示している。

Fig.2 に 4.2K, 8T における I_c の線径依存性を示す。 ϕ 0.95mm から ϕ 0.834mm に減面すると I_c は逆に増大した。しかし、 ϕ 0.834mm から ϕ 0.381mm まで減面していくと I_c は徐々に減少していった。

Fig.3 に 4.2K, 8T における J_c の線径依存性を示す。 J_c は I_c を線径の core 面積で割り求めた。図からわかるように線径が ϕ 0.834mm から ϕ 0.381mm まで J_c はほぼ一定である。詳細な検討は当日報告する。

参考文献

[1] D. Uchiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 71

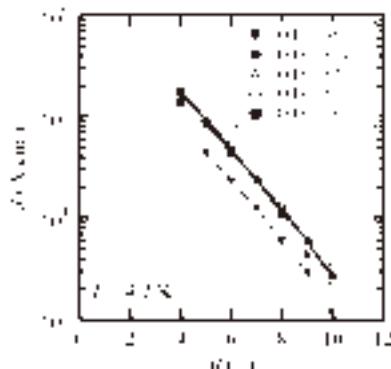


Fig. 1 Critical current densities of all samples at 4.2K as a function of applied magnetic fields.

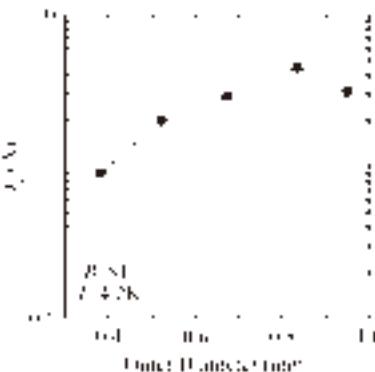


Fig. 2 Outer diameter dependence of critical current

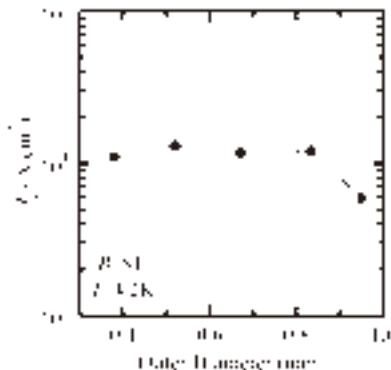


Fig. 3 Outer diameter dependence of critical current densities

高断面アスペクト比をもつ MgB₂ テープ線材の臨界電流特性

Critical current properties of MgB₂ tapes with high aspect-ratio cross-sections

松島 健介, 吉留 佑介, 若林 佑樹, 川越 明史, 川畠 秋馬, 住吉 文夫(鹿児島大);
柳 長門, 三戸 利行(核融合研);木内 勝, 小田部 莊司, 松下 照男(九工大);
高橋 雅也, 和久田 納(日立)

MATSUSHIMA Kensuke, YOSHIDOME Yusuke, WAKABAYASHI Yuki, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma,
SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS);
KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo, (Kyushu Institute of Technology);
TAKAHASHI Masaya, WAKUDA Tsuyoshi (HITACHI);
E-mail: k6320148@kadai.jp

1. はじめに

核融合装置用コイルには、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。本研究では、臨界電流向上と損失低減を両立させるために、高断面アスペクト比の MgB₂ テープ線材の開発を行っている。本テープ線材は、丸線材を圧延した後に熱処理した in-situ 法線材である。これまでに、テープ形状に圧延することによって、高臨界電流密度と低交流損失の両方の性能が向上することを明らかにしている^[1, 2]。今回は、SiC 添加された線材でも同様の効果があるかどうかを確かめるために、SiC 添加した線材でテープ線材を作製し、臨界電流の測定を行った。

2. 試作線材と測定方法

SiC 添加有りの MgB₂ 単芯丸線材のパラメータを Table1 に示す。本測定に用いたサンプルは、直径 0.790mm、0.580mm の 2 種類の丸線材とそれらの丸線材から圧延したアスペクト比の異なる 2 種類のテープ線材で、計 6 種類である。テープ線材のアスペクト比は、4~10 となっていて、それらのフィラメントのアスペクト比は、7~18 となっている。丸線材を 08Wire、06Wire とし、テープ線材を 08Tape6、08Tape10、06Tape4、06Tape10 とした。臨界電流の測定は、長さ 60mm の短尺直線形状 4 本を平行に配置して直列に接続し、液体ヘリウム中で 4 端子法により測定した。サンプルには 4~8T の直流外部磁界を印加し、印加方向は、線材幅広面に対して平行(EO 方向)と垂直(FO 方向)の 2 方向とした。端子間距離 10mm の電圧端子を 4 本の線材それぞれに取り付けて、電界基準を 1μV/cm として測定した。

3. 結果および検討

フィラメントの臨界電流密度 J_c に及ぼす圧延の影響を検討する。7T 印加時の丸線材の J_c に対するテープ線材の J_c の比 (J_c 向上率) を縦軸にとり、フィラメントのアスペクト比を横軸にとったグラフを Fig.1 に示す。今回測定したデータと共に、添加物無しのデータも▲・△印で示す^[1]。グラフからわかるように、SiC 添加有りの EO 磁界中データは、SiC 添加無しのデータと同様の J_c 向上率特性を示している。このとから、 J_c 向上率は添加物の有無に依存しないことがわかる。また J_c 向上率は、フィラメントのアスペクト比が 15.2 のときに、丸線材の約 7 倍と大きく向上している。なお、06Tape10 の EO 磁界中のデータは低く抑えられているのは、線材の加工限界を超えたためと考えている。

SiC 添加の有無により、 J_c の異方性が異なっている。SiC 添加無しの場合は、FO 磁界中の J_c が EO 磁界中の 6 割程度であるのに対し、SiC 添加有りの場合は 9 割程度である。この原因は、SiC 添加の有無により不可逆磁界が大きく異なることだと考えられる。すなわち、EO 磁界中の不可逆磁界は、6~9%だけ FO 磁界中よりも大きく、不可逆磁界に近い磁界中では J_c の異方性が顕著に表れる。添加物有り無しの不可逆磁界は、それぞれ約 20T と 11T であり、不可逆磁界の小さな添加物無しの J_c の異方性が大きくなつたと考えられる。

フィラメントが圧延されたことによって J_c が向上する要因としては、FO 磁界印加時にも J_c が向上していることから、MgB₂ 充填率の向上による、MgB₂ 結晶粒間の電気的結合度の向上が考えられる。

4. まとめ

SiC 添加した MgB₂ 単芯丸線材を圧延して、高い断面アスペクト比のテープ線材を作製し、その臨界電流密度の測定を行った。EO 方向磁界中で観測された最大の J_c 向上率は、フィラメントのアスペクト比が 15.2 のときに約 7 倍であった。この J_c 向上特性には、添加物の有無が影響していないことを明らかにした。また、アスペクト比を上げすぎたことにより J_c 劣化が起こることも観測され、テープ線加工に関する一つの設計指針も得られた。

謝辞

本研究は、核融合研究所の LHD 計画共同研究 (NIFS07KOBA019) として実施されたものである。

参考文献

- [1] Y. Wakabayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.197.
- [2] A. Kawagoe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.198.

Table1 Parameters of MgB₂ samples

Sample	08Wire	08Tape6	08Tape10
dimension[mm]	Φ 0.790	1.692×0.285	1.978×0.207
Filament dimension[mm]	Φ 0.421	1.238×0.116	1.476×0.097
Filament Aspect ratio	1.0	10.7	15.2
Sample	06Wire	06Tape4	06Tape10
dimension[mm]	Φ 0.580	1.005×0.235	1.675×0.167
Filament dimension[mm]	Φ 0.305	0.702×0.108	1.256×0.069
Filament Aspect ratio	1.0	6.5	18.3

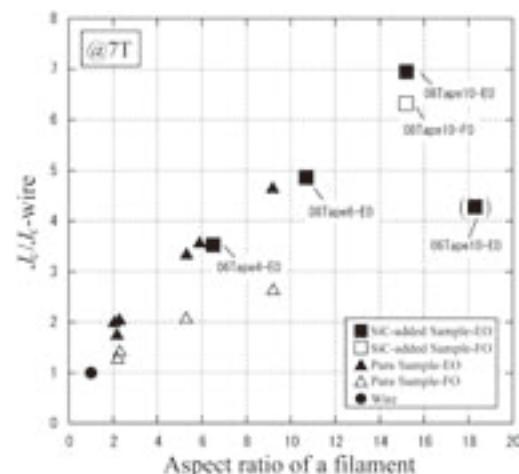


Fig. 1 Increase in critical current densities in MgB₂ filament with high aspect ratio cross-section under 7T.

SS/Fe シース MgB₂ 細径線材の加工性と超伝導特性 (2) —極細線材の作製と評価—

Superconducting properties and workability of SS/Fe sheathed MgB₂ thin wires (2)
—fabrication and evaluation in thinner wires—

根本 豊, 金澤 昌哉, 山田 豊, 太刀川 恭治(東海大); 柚川 一弘(九大)
中吉 熟, 西村 俊一(トクセン工業); 熊倉 浩明(NIMS)

NEMOTO Yutaka, KANAZAWA Masaya, YAMADA Yutaka, TACHIKAWA Kyoji (Tokai University);

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); NAKAYOSHI Isao, NISHIMURA Shunichi (TOKUSEN);

KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail : 8aazm020@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導線材の作製には PIT (Powder in Tube) 法が主と用いられるが、PIT 法は製造法が比較的容易で、製造コストも安価であることが期待されている。前報では、In-situ PIT 法を用いて作製した SS/Fe 2 重シース MgB₂ 線材を直径 0.19 mmφ まで線引き加工したが、本報ではさらに 0.063 mmφ まで線引き加工した線材の加工性と超電導特性について報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に、In-situ PIT 法による SS/Fe 2 重シース MgB₂ 細径線材作製方法を示す。MgH₂ 粉末とアモルファス B 粉末の混合粉末および同粉末に 5 mass% の SiC ナノ粉末を添加したものを外径 6 mmφ、内径 4 mmφ の純鉄シースに充填し、線引き加工した。同線材をステンレス鋼管 (SS:SUS304) に挿入し、直径 0.53 mmφ より断面積が 1/2 になる線材毎に試料とし、最細径 0.063 mmφ まで線引き加工した。熱処理は 630°C × 5 h、Ar 霧囲気中で行った。MgB₂ 細径線材の SS/Fe シース部の加工硬化傾向をビッカース硬さ試験により調べた。4.2 K における臨界電流 (Ic) の磁場依存性については物質・材料研究機構 (NIMS) において測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に 0.38~0.063 mmφ における SS/Fe シース部のビッカース硬さと加工率との関係を示す。熱処理前では加工率の上昇とともに急激に加工硬化したが、0.063 mmφ まで線引き加工でき、その時 SS シース部は 661 Hv、Fe シース部は 532 Hv の硬さとなった。熱処理後、SS の硬さは全体的に 100~150 Hv、Fe では約 200~300 Hv ほど低下した。0.19 mmφ 線材のシース (SS+Fe)/コア比は 3.72 であったが、0.13 mmφ では 4.44、0.094 mmφ では 4.74、最細径 0.063 mmφ では 5.17 とシース/コア比は大きくなかった。これは細線化とともにシース金属が加工硬化し、混合粉末部の方が相対的に線引きされて断面積がより減少したためと考えられる。

Fig. 3 に無添加 MgB₂ 線材 (0.19~0.094 mmφ) の 4.2 K における Ic の磁場依存性を示す。自己磁場における Ic 値はそれぞれ、54.5 A (0.19 mmφ)、29.25 A (0.13 mmφ)、10.0 A (0.094 mmφ) であった。これらの Jc (コア) 値は、約 8,000~11,000 A/mm² に相当する。

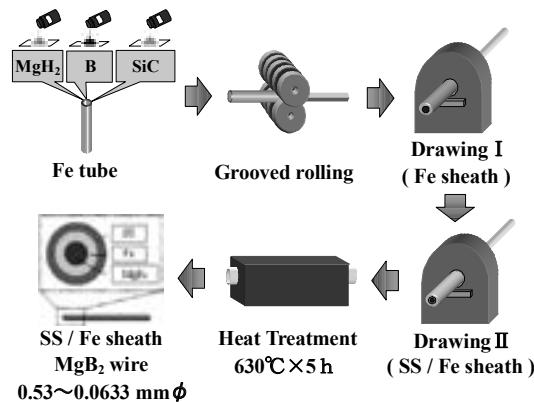


Fig. 1 Preparation procedure for SS/Fe sheathed MgB₂ wires.

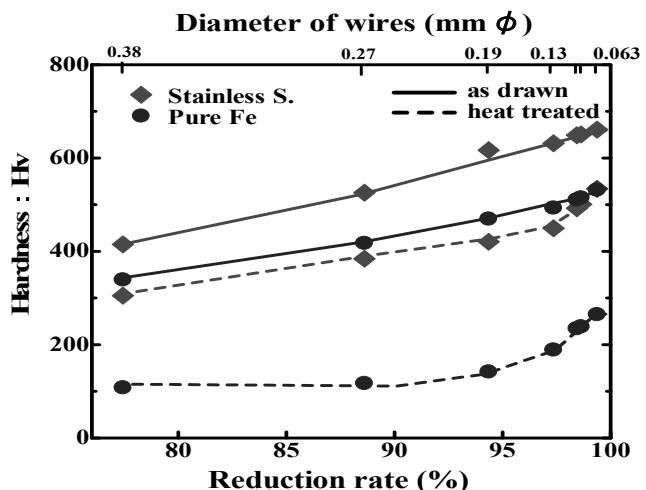


Fig. 2 Vickers hardness versus reduction rate in MgB₂ wires.

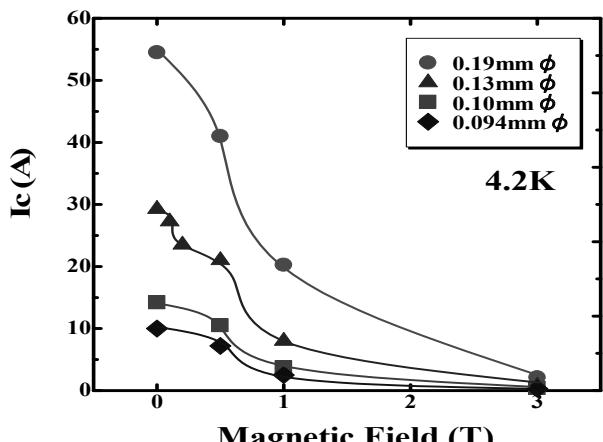


Fig. 3 Magnetic field dependence of Ic at 4.2 K for the MgB₂ wires.

CuNi シースをもつ MgB₂ 線材における常伝導部自動生成の測定

Measurement of automatic development of normal zone in MgB₂ wires with CuNi sheath

柁川 一弘, JOKINEN Antti(九大); 高橋 雅也, 和久田 育(日立)

KAJIKAWA Kazuhiro, JOKINEN Antti (Kyushu Univ.); TAKAHASHI Masaya, WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi, Ltd.)

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

1. はじめに

大気圧下で約 20 K の沸点をもつ液体水素の容器内残量を高精度かつ連続的に計測するために、我々の研究グループは MgB₂ 線材を適用した超伝導式液位センサを開発している。その一環として実施した CuNi シースをもつ MgB₂ 線材を用いた実験より、蒸発ガス冷却下だけでなく、浸漬冷却下においても、外部からのヒータ入力なしに通電電流を徐々に増加するだけで常伝導部が自動生成する結果が得られた[1,2]。そこで、線径の異なる 3 種類の CuNi シースをもつ MgB₂ 線材について、通電電流の増加とともに自動的に生じる常伝導部の特性を、液体ヘリウム浸漬冷却条件下で測定した。

2. 作製試料

実験に用いた MgB₂ 線材の諸元を、Table 1 に示す。単芯の MgB₂ 超伝導体の周囲に CuNi 合金シースが配置されており、同一ロッドの線引工程において線径の異なる 3 種類の線材を抽出した。臨界温度 T_c は 32–33 K であり、 T_c 直上の常伝導抵抗率は約 50 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ である。この MgB₂ 線材を用いて、Table 2 に示すように計 6 個の試料を作製した。試料の基本構造を、Fig. 1 に模式的に示す。平坦な絶縁板上に直線状に配置した MgB₂ 線材の両端を電極にハンダ付けし、一方の電極と線材中央部に 1 対の電圧タップを取り付けた。電極部の電圧降下は非常に小さいため、Fig. 1 に示すように、タップ間電圧を生じる有効長は電極端部と線材中央部の間の距離で与えられる。線径 0.185, 0.155, 0.110 mm を用いた試料名にはそれぞれ、記号 A, B, C を付している。また、試料 A, B として、試料ホルダの材料や電圧タップ間の有効長が異なる複数のものを用意し、A-1, B-2 のように番号を付与した。本試料全体を液体ヘリウム中に浸漬し、通電試験を実施した。

3. 実験結果

各試料に通電する電流を徐々に増加したときのタップ間電圧の実験結果について、その一例を Fig. 2 に示す。全ての場合で、臨界電流よりも小さな電流値において電圧が瞬時に大きくなることがわかる。また、増大後の電圧はほぼ電流に比例しており、その等価抵抗率は約 50 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ である。つまり、電圧が増大した後は、タップ間全域が常伝導転移していると推察される。一方、通電電流が小さくタップ間電圧が増大する前については、両対数プロット上の近似直線の傾きが 1.1–2.5 の範囲で各々異なっており、線材径やホルダ材料、およびタップ間有効長に対する影響の傾向は見出せず、作製した試料自身に強く依存していることがわかる。この低電流における電位差、つまり Joule 発熱が、タップ間電圧が瞬時に増大して常伝導転移に導く要因になっていると思われる。この要因の候補として、銅電極から CuNi シースを介して MgB₂ 超伝導体に通電電流が流れ込む電流分流長の影響[3]や、MgB₂ 結晶の小さな充填密度に起因する粒間接続性の影響[4]等が考えられる。通電電流をピーク値まで増加後にゼロまで減少した場合のヒステリシス特性や、冷却と昇温を繰り返した場合の熱サイクルの影響については、当日報告する。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成 20 年度産業技術研究助成事業(課題番号: 08B38006a)の一環として実施したものである。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. 76 (2007) 1D-a04
2. K. Kajikawa, et al.: J. Phys. Conf. Ser. 97 (2008) 012140
3. T. Holubek, et al.: Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 123
4. J.M. Rowell: Supercond. Sci. Technol. 16 (2003) R17

Table 1 Specifications of MgB₂ sample wires.

Diameter of wire	0.185 mm	0.155 mm	0.110 mm
Sheath material	CuNi		
Number of filament	1		
Diameter of filament	0.115 mm	0.095 mm	0.065 mm
Critical temperature, T_c	-	33 K	32 K
Normal resistivity of wire just above T_c	-	48 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	46 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$

Table 2 Characteristics of samples.

Sample name	Diameter of wire	Material of sample holder	Effective length between taps
A-1	0.185 mm	GFRP	25 mm
A-2	0.185 mm	GFRP	40 mm
A-3	0.185 mm	AlN	15 mm
B-1	0.155 mm	GFRP	40 mm
B-2	0.155 mm	GFRP	20 mm
C	0.110 mm	GFRP	25 mm

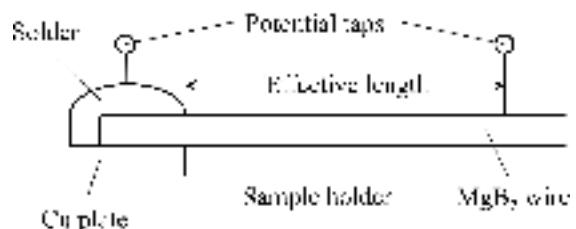


Fig. 1 Schematic diagram of basic structure of samples.

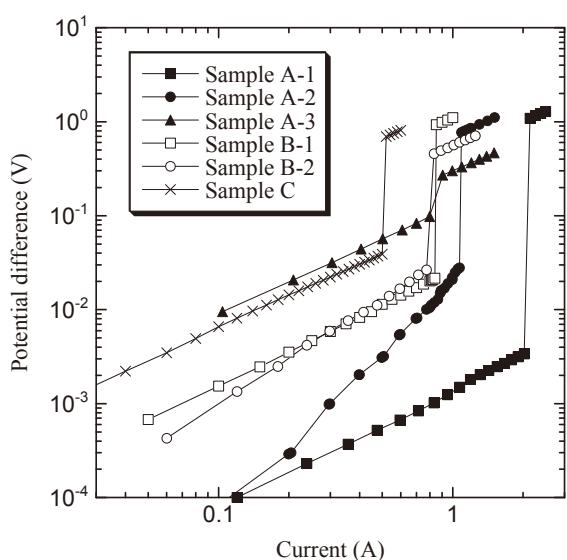


Fig. 2 An example of voltage-current characteristics in prepared samples during increasing current.

MgB₂ 線材を用いた固定子巻線の交流損失特性に関する有限要素解析

Finite element analysis for AC loss characteristics of stator windings wound with MgB₂ wire

尾坂 亮太, 川野 友裕, 柚川 一弘(九大); 中村 武恒(京大); 高橋 雅也, 和久田 肇(日立)

OSAKA Ryota, KAWANO Tomohiro, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);

TAKAHASHI Masaya, WAKUDA Tsuyoshi (Hitachi)

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

1 はじめに

現在人類が抱えているエネルギー問題や環境問題を改善する一つの先進技術として、水素利用社会が期待されている。将来の水素利用インフラの1つとして、我々の研究グループでは、液体水素やスラッシュ水素を循環もしくは移送するためのポンプを駆動する超電導誘導/同期モータを提案している[1]。本研究では、MgB₂ 線材を用いて超電導化した固定子巻線で発生する交流損失を有限要素法により数値計算し、既存機との比較を行う。また、固定子巻線のスロット形状や巻線ターン数を変化させて解析を行い、超電導巻線に適した固定子構造の指針を検討する。

2 数値解析

既存誘導機(3相4極36スロット二層分布巻構造)の銅巻線をMgB₂ 線材で置き換えたものを解析対象とする。想定するMgB₂ 線材は、直径0.8 mm、フィラメント径0.555 mmの単芯構造を有する。また、シース部にはNbとCuが使われており、20 Kでの臨界電流 I_c は336 Aである[2]。鉄心の比透磁率を無限大と仮定すると、対称性からFig.1に示すような1/2スロット内のみを考慮すればよい[1]。この場合、局所磁界は解析領域に流れる電流が作る自己磁界 \mathbf{H}_s のみで与えられ、次式が成立つ[3]。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}_s) = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}_s}{\partial t} \quad (1)$$

$$\oint_C \mathbf{H}_s \cdot d\mathbf{s} = -H_g g = -\frac{NI_a}{2} + \frac{N(I_b + I_c)}{2} \quad (2)$$

$$\int_{C_1} \mathbf{H}_s \cdot d\mathbf{s} = \frac{I_b}{2}, \quad \int_{C_2} \mathbf{H}_s \cdot d\mathbf{s} = \frac{I_c}{2} \quad (3)$$

ここで、 H_g はギャップ部の磁界、 g はギャップ長、 N は巻線ターン数、 ρ は抵抗率である。また、 I_a 、 I_b 、 I_c はそれぞれa相、b相、c相電流である。式(2)の境界条件、式(3)の拘束条件のもとで式(1)の支配方程式を辺要素有限要素法[4]により解く。交流損失は、局所的な電界と電流密度の積を線材領域で積算し、時間積分することにより計算する。

3 交流損失評価

本研究では、既存機の起磁力が234 A_{peak}であることを考慮して、巻線ターン数が1ターンと2ターンの場合を考える。この場合、一次電流はそれぞれ234, 117 A_{peak}、負荷率はそれぞれ0.70, 0.35である。また、周波数は60 Hzである。まず、固定子巻線で発生する交流損失のスロット幅依存性をFig.2に示す。スロット幅 $2w$ を小さくすると交流損失は単調に増加することが分かる。次に、Fig.2に示す交流損失を一次抵抗に換算したものと、既存機を20 Kに冷却した場合の銅線の一次抵抗を比較した結果をFig.3に示す。既存機に比べて一次抵抗は3桁程度小さくなり、固定子巻線で発生する損失を大幅に低減できることが分かる。また、交流損失のスロット深さ依存性、巻

線ターン数依存性を別に評価した。交流損失はスロット深さ d を小さくするとわずかながら増加し、巻線ターン数 N を多くすると単調に減少する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成20年度産業技術研究助成事業(課題番号:08B38006a)の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] K. Kajikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 1669.
- [2] 山田他, 平成21年電気学会全国大会 (2009) 5-120
- [3] K. Kajikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 3630.
- [4] J. Jin, The finite element method in electromagnetics, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (2002) 273.

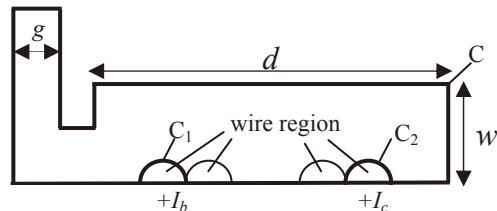


Fig.1 Analytical model for $N = 2$.

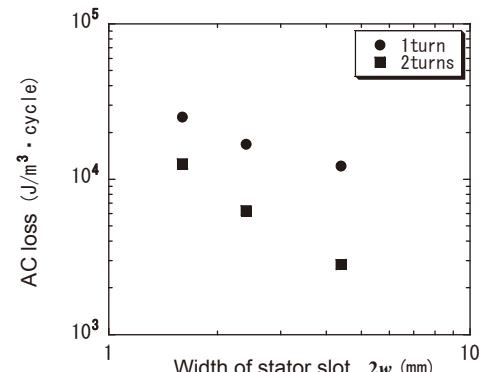


Fig.2 Dependence of AC loss on width of stator slot.

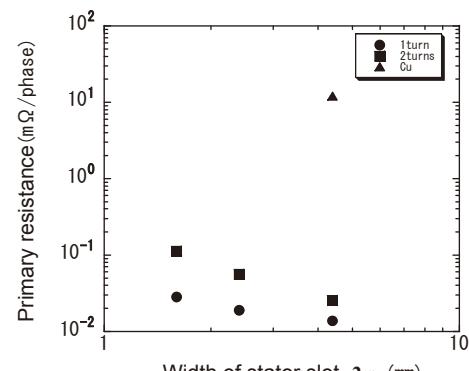


Fig.3 Comparison between primary resistance of Cu winding and corresponding resistance for superconducting windings.

Structure and properties of MgB₂ wires by an internal Mg diffusion Process (2nd report)

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 MgB₂ wire fabricated by an internal Mg diffusion (IMD) process shows quite hard dense structure in the reacted layer after heat treatment. Also, choice of sheath material is an important factor because the higher MgB₂ core density corresponds to the stronger sheath material. In this 2nd work, heat treatment temperature dependences of transport critical current (I_c), cross sectional area of the reacted layer, critical current density (J_c) and Vickers hardness (HV) of IMD processed MgB₂ wires with Fe and Ta sheaths were systematically investigated.

2. Sample preparation

The preparation of IMD processed wire is reported in our previous paper [1]. In this study, an inner Fe or Ta sheath with an outer Cu/20wt%Ni alloy sheath were used. Heat treatment was carried out at 600, 640, 680, 700°C for dwell time of 0.25, 0.5, 1, 3, 10 hours. Also, Ta sheathed mono-core wire was compared with multi-core wire reported by Togano *et al.* [2].

3. Results and discussion

A. Analysis of Fe and Ta sheathed mono-core

The heat treatment temperature dependence of I_c , cross sectional area of reacted layer, J_c and HV for dwell time of 0.5 hr are shown in figure 1. Although I_c for mono-core wire with Ta sheath is almost the same or slightly lower than the Fe sheathed mono-core wire, excellent J_c is obtained for Ta sheathed mono-core because the cross-sectional area of the reacted layers was thinner than that of the Fe sheathed mono-core. Vickers hardness increased with increasing heat treatment temperature for both samples, respectively.

B. Analysis of Ta sheathed mono-core and multi-core

The I_c , cross sectional areas and J_c for Ta sheathed 10mol%SiC doped mono- and multi-core wire heat treated at various temperature for 1 hr are shown in figure 2. The I_c of multi-core wire is higher than the mono-core wire, on the other hands, cross sectional area in multi-core wire is almost constant due to the shorter diffusion length. As a result, J_c values for mono- and multi-core wires are almost equal.

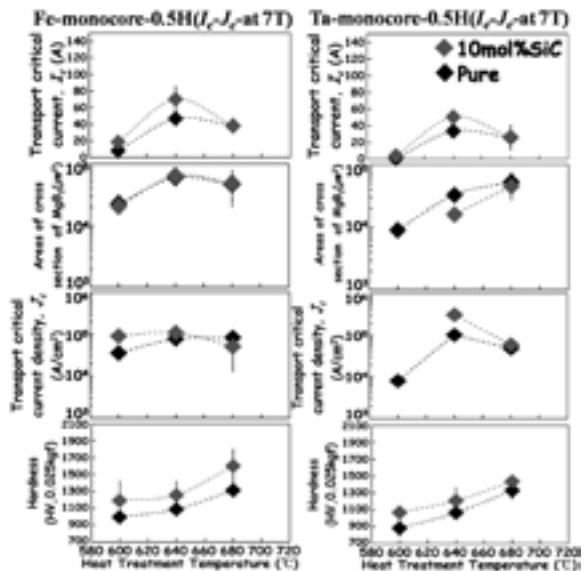


Fig. 1 I_c at 7T, cross sectional areas, J_c at 7T and hardness; for Fe and Ta sheathed mono-core wires with dwell time of 0.5 hr in various heat treatment temperature.

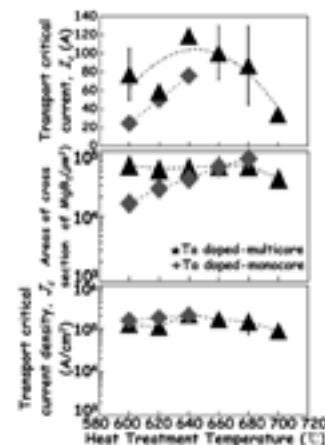


Fig. 2 I_c at 7T, cross sectional areas and J_c at 7T; for Ta sheathed mono- and multi-core wires with dwell time of 1 hr in various heat treatment temperature.

Acknowledgement

This work was supported in part by JSPS KAKENHI(21560764)

References

- 1) JM. Hur *et al.*, Supercond. Sci. Technol 21(2008)032001.
- 2) K Togano *et al.*, Supercond. Sci. Technol 22(2009)015003

Mgチューブを用いて外部拡散法により作製したMgB₂線材の超伝導特性と組織 (2)

— 臨界電流特性に及ぼす組織の影響 —

Superconducting properties and structures of MgB₂ wires prepared by external diffusion process using Mg tube

— Effect of microstructures on critical current properties —

和田 恭輔、金澤 昌哉、山田 豊、太刀川 恭治(東海大)；熊倉 浩明(NIMS)；
 WADA Kyosuke, KANAZWA Masaya, YAMADA Yutaka, TACHIKAWA Kyoji (Tokai University) ;
 KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
 E-mail:8aazm026@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

MgB₂線材は PIT(Powder In Tube)法によって作製されることが多いが、特に In-situ 法では MgB₂合成時に多数の空孔が形成され、臨界電流特性の低下の一因となっている。そこで本報では、高密度の MgB₂コアを得る方法として、B 粉末の外側に Mg 金属チューブを配した外部拡散法により MgB₂線材を作製し、超伝導特性と組織について評価した。

2. 実験方法

Fig. 1 に外部拡散法による MgB₂線材の試料作製方法を示す。外径/内径が 13/6 mm^φ の純 Fe シースに、外径/内径が 6/4 ~ 4.2 mm^φ の Mg 金属チューブを挿入し、そのチューブ内に 5 mol% の SiC 粉末を添加したアモルファス B 粉末を充填した後、溝ロール加工および線引き加工により直径 1.0 ~ 0.6 mm^φ の MgB₂線材を作製した。630°Cで 5 h、Ar 霧囲気中で拡散熱処理を行い、一部の試料について、前報では、100 MPa のホットプレス処理を行ったが、今回は、630°C×5 h の熱処理の後半 30 min、10 MPa および 20 MPa のホットプレス処理を行った。4.2 K における臨界電流(Ic)の磁場依存性については NIMS にて測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に Mg チューブ外径/内径:6/4 mm^φ より作製した直径 1.0 mm^φ 試料横断面の光学顕微鏡写真を示す。630°C×5 h 热処理後の断面(a)に依れば、金属 Mg と B の拡散反応により線材中央部に MgB₂ が生成し、Mg の拡散によって空孔が生じ、溝ロール加工の形跡があつた四隅には未反応の Mg が残留している。また、同試料を 10 MPa でホットプレス処理した断面(b)に依れば、MgB₂コア外周部に生じる空孔をプレス圧により押し潰しており、両者の MgB₂コア面積はほとんど変わらなかつた。線材中央部における Mg と B の EPMA による面分析に依れば、B と Mg 共にほぼ均一に分布しており、溝ロールの形跡が残つてゐた四隅には Mg が多く存在していた。また、コア中央部とその外周部の定量分析を行つた結果、コア中央部 Mg:B=1:2.6、外周部 Mg:B=1:2.5 と B rich であることが分かつた。

Fig. 3 に 4.2 K における臨界電流密度(Jc)の磁場依存性を示す。前報では直径 1.0 mm^φ(出発 Mg 管 6/4 mm^φ)試料に 100 MPa のホットプレス処理を行つたところ、MgB₂コアにクラックが生じ、臨界電流(Ic)が 5 T で 91 A(Jc=1.0×10³ A/mm²)と低下したが、10 MPa に圧力を下げる試料では、MgB₂コアを壊さずに空孔を押し潰することで、純鉄シースより MgB₂コアへ通電が良好になり、Ic が 136 A(Jc=1.8×10³ A/mm²)と向上した。

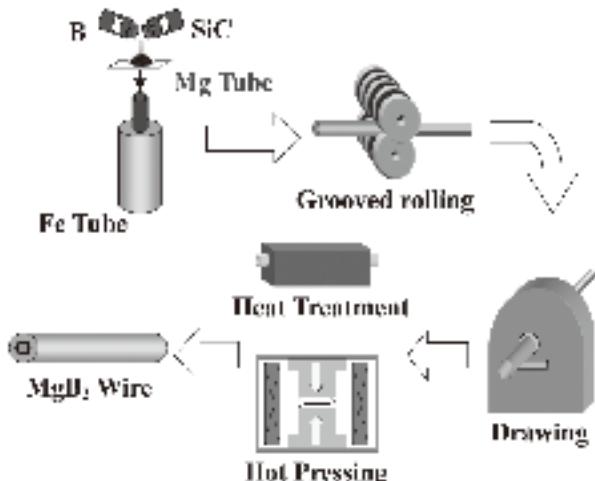


Fig. 1 Preparation procedure of MgB₂ wires by external diffusion process using Mg tube.

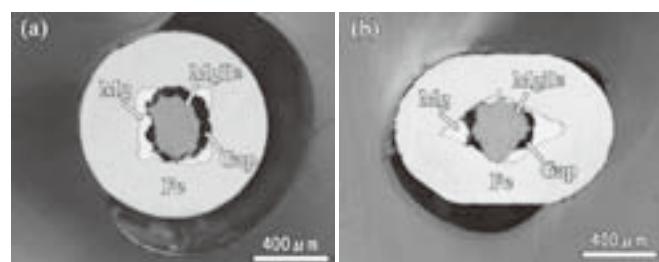


Fig. 2 Macrostructures of cross sections in MgB₂ wires of 1.0 mm^φ in diameter. (a) heat-treated at 630°C for 5 h, (b) hot pressed under 10 MPa.

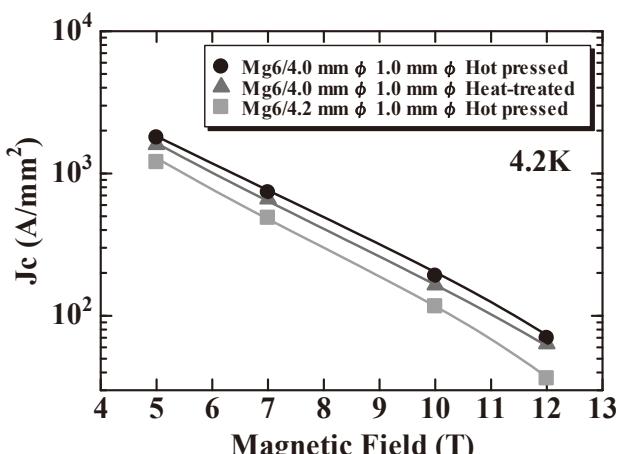


Fig. 3 Magnetic field dependence of Jc at 4.2 K for the MgB₂ wires heat-treated and hot pressed at 630°C for 5 h under 10 MPa.

c 軸配向高密度 MgB₂ バルクの開発

Development of c-axis oriented and highly dense MgB₂ bulks

望月 利彦, 下山 淳一, 萩野 拓, 岸尾 光二(東大), 堀井 滋(高知工大), 和田 恭輔, 山田 豊(東海大)

MOCHIZUKI Toshihiko, SHIMOYAMA Jun-ichi, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji(University of Tokyo),

HORII Shigeru(Kochi University of Technology), WADA Kyosuke, YAMADA Yutaka(Tokai University)

E-mail: tt086731@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

金属系超伝導体では最も高い T_c (~40 K)を持つ MgB₂ は、低い異方性と長いコヒーレンス長に由来して無配向のバルク体でも低磁場下では比較的高い臨界電流密度 J_c を示す。しかし、NbTi や Nb₃Sn など実用超伝導線材に比べて、磁場下での低い J_c が MgB₂ 線材の広範な実用の障害になっている。一方、c 軸配向エピタキシャル薄膜において 20 K における J_c が 10^8 A/cm² を超える報告[1]や、MgB₂ 多結晶体の粒界性格について、整合性の良い対応粒界の存在が低磁場での高い J_c に寄与する可能性が最近指摘[2]されている。よって、多結晶バルクや線材においても、結晶配向による J_c 特性向上が期待できる。そこで我々は、電気泳動堆積法(EPD 法)と磁場配向法とを組み合わせて、ex-situ 法 c 軸配向 MgB₂ バルクを作製し、c 軸配向が臨界電流特性改善に有効であることを前回報告した[3]。本研究では c 軸配向に加えホットプレス焼結による高密度化を図り、さらなる J_c の向上を目指した。得られた MgB₂ バルクについて、超伝導特性、常伝導状態の抵抗率、微細組織を評価し、c 軸配向と高密度化が J_c 改善に及ぼす効果を考察した。

2. 実験方法

市販 MgB₂ 粉末(フルウチ化学製、純度 99%、100 mesh)、Mg と B の混合粉末から SUS316 封管中で 900°C、30 分間焼成することによって作製した自作 MgB₂ 粉末を、それぞれ遊星式ボールミルにより粉碎した。得られた微粉末を溶媒中に分散させスラリーを調製し、印加磁場($\mu_0 H_a$)10 T、印加電場 100 V / cm//(H_a)で 30 分間 EPD を行い、厚膜状の粉末堆積物(as-deposited 試料)を作製した。これを室温で乾燥後、Mg 粉末とともに SUS316 管に入れ、一軸プレスによって両端を封じ、厚膜部分をテープ状に成型した。焼結は 2 通りの方法で行い、石英管に真空封入後、900°C で 24 時間焼結した“Tape 試料”、Ar 雰囲気下 900°C で 6 時間、30 または 100 MPa でホットプレスした“HP Tape 試料”を得た。SUS316 を剥いて得られた焼結体試料について、SQUID 磁束計による磁化測定から超伝導特性を、交流四端子法により常伝導状態の抵抗率を評価し、FE-SEM により微細組織を観察した。構成相と配向度は、X 線回折(XRD)測定により調べた。

3. 結果と考察

Fig.1 には市販 MgB₂ の粉末 XRD パターンと as-deposited 試料(自作粉末(H)、市販粉末(C))、Tape 試料(H)、HP Tape 試料(H)の表面 XRD パターンを示す。磁場配向の効果によって as-deposited 試料の表面 XRD パターンでは、002 ピークが明らかに強くなっていることがわかる。また、自作粉末を用いた as-deposited 試料(H)の方が市販粉末のものより強く配向していることがわかる。これは自作粉末の方が、粒径が大きいためと考えられる。一方、Tape 試料の表面 XRD パターンを見ると、002 ピークの強度が低下しているのに対して、HP Tape 試料は一軸加圧と結晶成長によって、高い配向度を維持していることがわかる。また、HP Tape 試料には不純物のピークが見られたが、これはシースと反応してできた不純物が試料表面に付着したものであると考えられ、試料の粉末 XRD パターンにはこのようなピークは見られなかった。

Fig. 2 には Tape、HP Tape 試料の 10, 20 K における J_c の磁場依存性を示した。いずれの試料も ex-situ バルクに比べて高い J_c を示し、さらに HP Tape 試料は、高密度化と高い配向度を反映して、Tape 試料より約 2 倍高い J_c を示し、特に HP Tape 試料(H, 100 MPa)は $J_c \sim 7 \times 10^5$ A/cm²(20 K, 500 Oe) という ex-situ 法によるバルク、線材の中で最も高い J_c を記録した。この試料は多量の MgO を含んでおり connectivity が 20% 以下でしかないことは、MgO 量の低減によって、 J_c のさらなる改善が可能であることを意味する。また、30 MPa でホットプレスした試料もほぼ同等の臨界電流特性を記録した。この圧力は量産 Bi 系高温超伝導線材の加圧焼成に採用されている値と同じである。以上、本研究の結果は、ex-situ 法 MgB₂ 線材の劇的な特性改善が可能であることを強く示唆するものといえる。

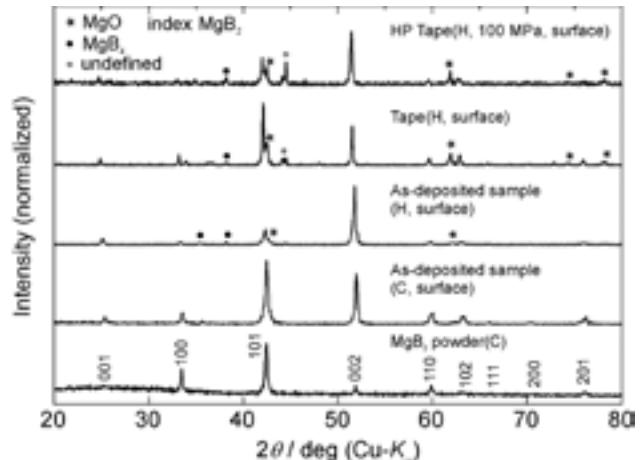


Fig.1 Powder XRD pattern of commercialized MgB₂ powder and surface XRD patterns of as-deposited, Tape and HP Tape(100 MPa) samples.

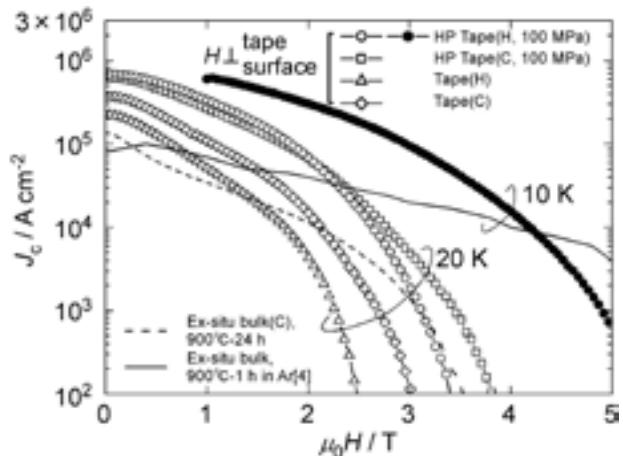


Fig. 2 Magnetic field dependences of J_c for various MgB₂ tapes and bulks at 10 and 20 K.

[1] C.G.Zhuang *et al.*, *J. Appl. Phys.* **104**, 013924 (2008)

[2] 大橋 他、2008年度秋季低温工学・超電導学会(3A-a06)

[3] 望月 他、2009年度春季低温工学・超電導学会(3B-a03)

[4] Fujii *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 095018 (2008)

ホットプレス法によって作製した MgB₂ 線材の組織と超伝導特性

The superconducting properties and microstructure of MgB₂ tapes fabricated by hot-pressed PIT method

松本 明善、熊倉 浩明(NIMS)、山田 秀之、五十嵐 基仁(JR 東海)、和田 恭輔、山田 豊(東海大学)
MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki(NIMS), YAMADA Hideyuki, IGARASHI Motohiro(Central JR)
 WADA Kyosuke, YAMADA Yutaka(Tokai Univ.)
 E-mail: matsumoto.akiyoshi@nims.go.jp

1. 緒言

MgB₂ 超伝導体の研究は現在、実用化を目指して世界各国で活発に進められており、MRI 用マグネット等への実用化の研究も行われつつある。そのような状況の中、現時点においても臨界電流密度特性の向上は喫緊の課題であり、さらなる応用範囲の拡大のためにも欠かすことの出来ない研究である。我々のグループではホットプレス法によって作製した MgB₂ 線材において高い臨界電流密度(J_c)が得られている事を報告してきた[1]。本研究では、ホットプレス法によって作製された線材の電気抵抗測定や J_c の異方性、さらに詳細な組織観察からホットプレス加工の有効性について議論を行う。

2. 実験方法

ホットプレス加工に使用する線材は通常のパウダー・イン・チューブ法によって作製した。作製した線材は MgH₂ (99.8%) とアモルファス硼素(99.99%)の混合粉末を用いた無添加線材、およびこれらの粉末にさらにナノサイズ SiC (30nm)、エチルトルエンの2つの不純物を同時添加した線材とした。これらの線材をホットプレス機で 100MPa の圧力を掛けながら、630°C で2時間の熱処理を行った[1]。このとき、ホットプレス機内の熱処理はアルゴンガス雰囲気下で行った。得られた試料については SEM や XRD による組織観察、および電気抵抗率測定や臨界電流密度測定等の超伝導特性評価を行った。

3. 結果

ホットプレスによって臨界電流密度(J_c)が向上することは既に報告済である[1]。Fig.1 の SEM 像に示すようにホットプレス無しとホットプレス有りでは研磨した組織に明らかに違いが見られる。つまり、ホットプレス無しの試料においては空隙が多數観察される。一方、空隙でない領域においても十分密とは言えない状況にあることがわかった。一方、ホットプレス試料は界面が非常に平滑で、空隙がほとんど観察されず、研磨面も粒子が密に詰まっている様子がわかった。

J_c 特性が向上した理由は上記したような組織改善、特に密度の向上が挙げられる。我々はこれまでに電気抵抗率測定から粒間結合性について議論を行ってきた。ホットプレス試料についても同様の実験を行った結果、ホットプレス無しの試料では電気的な有効断面積が 17.4% であったのが、ホットプレスにより 21.7% まで上昇していることがわかった。また、残留抵抗率も $102 \mu \Omega \text{ cm}$ であったのが、 $43 \mu \Omega \text{ cm}$ まで減少していることが明らかになった。以上の結果から、充填密度の上昇によって電気的に有効な面積が増加し、 J_c 特性が向上したと考えられる。

Fig.2 に J_c の磁場印可方位依存性の結果を示す。図からも明らかなように、試料面に対して平行に磁場を印加した場合、10T の磁場で 4 万 A/cm² 以上の J_c が得られている。Fig.3 には Fig.2 から得られた J_c -B のデータから得られた異方性について示す。異方性は磁場印可とともに急激に上昇する傾向がある。特に 10 T 以上では異方性が 10 を越える。つまり、桁のオーダーで J_c が減少することがわかった。ホットプレスを行った線材においても同じ傾向が見られる。ホットプレス有りの試料においてはホットプレス無しの試料と比べて、さらに異方性が増していることがわかった。これらの結果から、結晶粒自体も方位

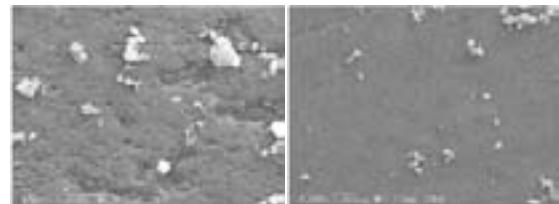


Fig.1 Polished cross-sectional SEM images of (a) no hot-pressed tape, and (b) hot-pressed tape.

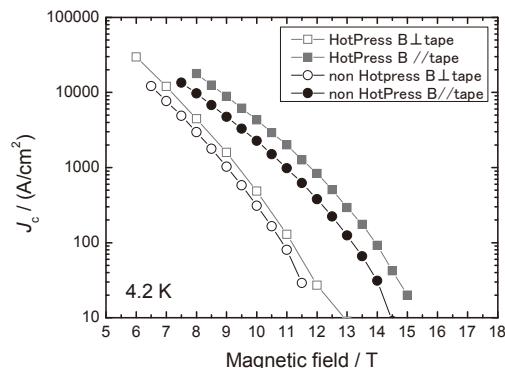


Fig. 2 J_c -B curve of non-hot pressed and hot pressed samples.

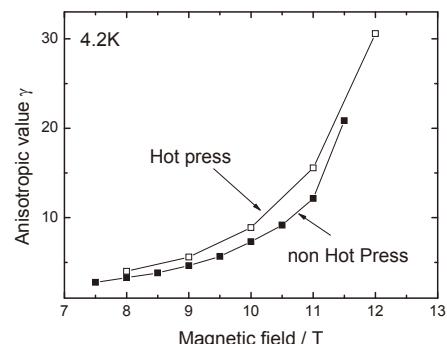


Fig. 3 Anisotropic factors as a function of magnetic field of non-hot pressed and hot pressed samples.

が揃つてきていることを示唆している。本報告ではさらに SiC およびエチルトルエンの不純物を同時に添加した線材においてその違いを報告する。

4. 謝辞

本研究の一部は科研費(19760016)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 山田秀之、他：低温工学春季講演会 2009

ホットプレスした MgB₂ バルク体における異方性に関する研究

Study on anisotropy in MgB₂ bulks by applying hot pressing

山本 佳昭, 池田 博, 森 友祐 (筑波大学); 石川 法人 (原子力機構)

YAMAMOTO Yoshiaki, IKEDA Hiroshi, MORI Yusuke (University of Tsukuba); ISHIKAWA Norito (JAEA)

E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. Introduction

MgB₂は約40 Kで超伝導の性質を示し、原料が安いことや高い上部臨界磁場 H_{c2} をもつことなどから広範囲での実用化が構想されている。しかし、NbTiやNb₃Snなどの実用超伝導線材に比べ、高磁場下の臨界電流密度 J_c が低いことが問題となっている。我々の研究室ではin-situ PICT法で作製した試料にホットプレス(HP)処理を施すことによって、 J_c 特性が改善されることを報告している[1]。本研究では、HPバルク試料を異方性という観点から見直すことを目的としている。最近の研究から、磁場配向法によりc軸配向したバルク試料に関して、高磁場での J_c 特性の改善が報告されている[2]。このことから、 J_c 特性の改善指針として試料の配向特性について知見を得ることが重要であると考えられる。本研究では、配向性を考慮したホットプレス(HP)MgB₂バルク体の電気抵抗の角度依存性を調べ、その異方性についての知見を得ることを目的とした。また、重イオン照射が及ぼす影響についても考察した。

2. Experimental

原料となるMg粉末とB粉末をに秤量し、in-situ PICT法によってMgB₂バルク試料を作製した。焼成温度は最も高い J_c 値を得られた690°Cを用いた。焼成したMgB₂試料をアルゴン雰囲気中で加熱しながら一軸性($\parallel H_a$)のプレス(HP)を施した。HP条件は、圧力400 kg/cm²・温度750°Cで行った。試料への重イオン照射は原子力機構のタンデム型加速器により、試料面に対して垂直($\parallel H_a$)に照射量10¹³ions/cm²で行った。作製したMgB₂バルク試料試料に1~6Tの磁場を印加し、その電気抵抗率 ρ の温度依存性を測定した。また、磁場方向の対して試料の角度を0から90°に変化させ、電気抵抗率の変化を調べた。電気抵抗率はPPMS (Physical Property Measurement System) 装置を用いて測定・評価した。

3. Results and Discussion

Fig. 1はHPしたバルク試料における比抵抗 ρ の温度依存性である。 T_c 近傍で角度を0から90°に上げるに従って ρ が上昇しているのが見てとれる。この変化は、外部印加磁場を減少させると大きくなることがわかった。Fig. 2は照射を行ったHPバルク試料における比抵抗 ρ の温度依存性である。この結果からは角度大きくするに従って ρ が減少する傾向と32.9 K付近での ρ が増加する傾向が見てとれる。前者は外部磁場を大きくするに従って顕著に表れ、後者はFig. 1の結果と同じように外部印加磁場を減少させると大きくなることがわかった。このことから、照射した試料においては試料の異方性に二つの因子が関与していることが示唆される。一方は形状的な要因、他方がバルク試料の配向に関する要因であると考えられる。照射した試料の比抵抗の減少は、外部印加磁場を大きくすると増大することから上部臨界磁場 H_{c2} の異方性に起因していると

考えられる。一方で、比抵抗 ρ の増加する効果は、外部磁場を小さくすると顕著に表れることから形状的な要因が関係していると考えられる。また、照射ありの試料において前述の効果は小さくなつた。これは、照射による欠陥がピンとして働いて形状的な効果を小さくしたと思われる。形状的な要因であれば、試料のサイズを小さくすることによって抑えることができるはずなので、今後実験を行う予定である。

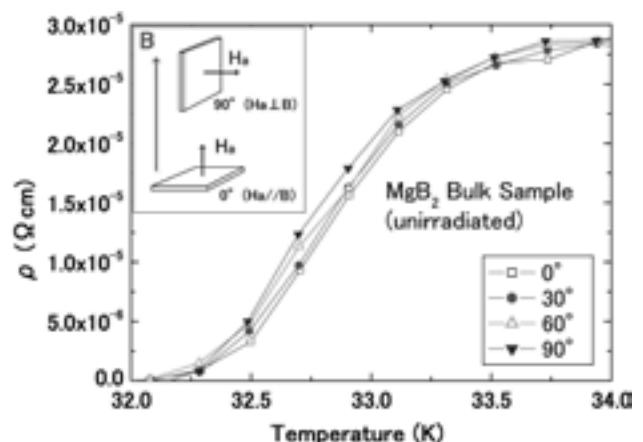


Fig. 1: Temperature dependence of the resistivity in 2T for unirradiated sample.

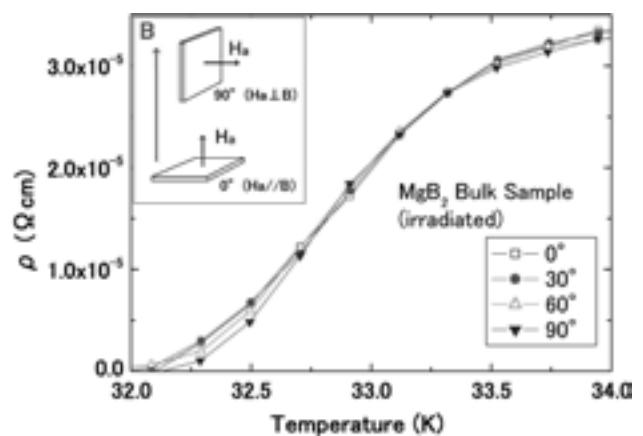


Fig. 2: Temperature dependence of the resistivity in 2T for irradiated sample.

参考文献

- [1] K. Shinohara, T. Futatsumori and H. Ikeda., Physica C, **468** (2008) p.1369-1371.
- [2] K. Mothizuki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.194.

Comparative study of mono- and multi-filaments MgB₂ wires with different boron powders and malic acid addition

JUNG HO Kim (NIMS and University of Wollongong); SHI XUE Dou (University of Wollongong); MATT Rindfleisch, MIKE Tomsic, (Hyper Tech Research Inc.); AKIYOSHI Matsumoto, HIROAKI Kumakura (NIMS)
E-mail: KIM.Jungho@nims.go.jp, Jhk@uow.edu.au

Compared to high temperature superconductor, MgB₂ has lower transition temperature of 39 K, but its simple binary composition, lack of weak-link at grain boundaries, abundance of starting materials, and low anisotropy of critical current density make the MgB₂ promising candidate for real applications operated at a wide range of 4.2-30 K. In the past few years, substantial efforts have been focused on enhanced J_c and irreversibility field (B_{irr}) via various dopants. Recently, much more attention goes on to characterizations of various boron powders because there is no more good quality boron in stock. From an economical point of view, using low purity boron would be even more valuable. In contrast, using high purity amorphous boron still gives the best J_c performance under magnetic field. It is thus necessary to study the effects of different boron powders on the J_c performance of the MgB₂ conductors.

Recently, the chemical solution route via carbohydrate dopants, i.e., malic acid, has been to increase the J_c for MgB₂, even better than SiC under low- and high-fields [1,2]. It is believed that the enhancement of superconducting properties is mainly attributed to homogeneous mixing between boron and carbon powders and less MgO fraction in the matrix. In addition, multi-filamentary conductors fabricated for real applications further improve critical current density, mechanical strength, superconducting joint, and thermal stability. Thus J_c performance of the mono- and multi-filaments conductors fabricated should be estimated with different boron powders and malic acid additive. In this study, we will discuss the effects of different boron powders, conductor geometries, and malic acid dopant on the J_c performance in detail.

A series of various wires fabricated by a continuous tube forming and filling (CTFF) were

studied in this work. The starting powders used in this study were magnesium (99%, 325 mesh) and different borons with amorphous or semi-crystalline phases that were V-mixed together and ball-milled. For a malic acid doped powder, after dissolving amount of 5-10 wt% malic acid (C₄H₆O₅) in toluene, the solution was mixed with an appropriate amount of B powder in a Spex mill for 10 min with 100 rpm. This slurry was dried at 150°C under vacuum to form a carbon coating on the surface of B powder. These composites were then mixed with an Mg powder and mixed in Fritsch planetary milling machine for 10 min with 500 rpm. The details of wire processing have been described elsewhere. To manufacture a multifilaments wire, numerous monofilaments containing the superconducting powder were stacked within a metallic tube and then drawn to the required wire diameter and length. Details of wire specifications are listed in Table I. A short length wire samples were sealed with Zr foil to prohibit an oxidation and sintered under argon flowing. All samples were sintered at different sintering temperatures and times. Transport critical current at 4.2 K was measured by using the standard four probes method with a criterion of 1 uV/cm. Transmission electron microscopy (TEM) observation was conducted in a JEOL 300 KeV field-emission transmission electron microscope at National Institute for Materials Science, Japan.

References

1. J. H. Kim et al.: Appl. Phys. Lett. Vol. 14 (2006) p. 142505
2. J. H. Kim et al.: J. Appl. Phys. Vol. 104 (2008) p. 063911

Table I. Details of specifications in the MgB₂ strands.

Strand ID	Sub No.	Barrier	Mono sheath	Multi sheath	Additive	B source	Mg:B	O.D. (mm)	SC (%)
940	1	Nb	Monel			99	1.15:2	0.834	20.0
960	1	Nb	Monel			99	1:2	0.834	27.0
1391	1	Nb	Monel		10wt% C ₄ H ₆ O ₅ ^d	99	1:2	0.834	21.0
1494	1	Nb	Monel			SMI ^b	1:2	0.834	29.9
1649	1	Nb	Monel			Tangshan ^c	1:2	0.834	26.4
1780	1	Nb	Monel		10wt% C ₄ H ₆ O ₅	Tangshan	1:2	0.834	28.6
1794	1	Nb	Monel		10wt% C ₄ H ₆ O ₅	SMI	1:2	0.834	26.3
1871	36	Fe	Cu	Monel	10wt% C ₄ H ₆ O ₅	Tangshan	1:2	1.01	17.1
1905	36	Fe	Cu	Monel	10wt% C ₄ H ₆ O ₅	SMI	1:2	1.01	17.1
1940	6	Nb	Cu	Monel	5wt% C ₄ H ₆ O ₅	Tangshan	1:2	0.834	13.9

^a 99% = 99% amorphous boron, ^b SMI and Tangshan = 97% semi-crystalline boron, ^c C₄H₆O₅ = malic acid

ショートビーム試験による絶縁材料システムの極低温層間せん断強度評価

Evaluation of cryogenic interlaminar shear strength of insulation systems by short beam shear test

三浦 正哉, 進藤 裕英, 竹田 智, 成田 史生, 渡邊 慎也(東北大工); 小泉 徳潔, 出崎 亮, 奥野 清(原子力機構);
 MIURA Masaya, SHINDO Yasuhide, TAKEDA Tomo, NARITA Fumio, WATANABE Shinya (Tohoku University);
 KOIZUMI Norikiyo, IDESAKI Akira, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: shindo@material.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Insulation systems are a critical component in superconducting magnets of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Cryogenic magnet systems have often relied on polymer composite materials (e.g., woven glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite laminates) for insulation [1,2]. In particular, hybrid materials consisting of the woven GFRP composite insulation in combination with a barrier have been considered as the ITER candidate insulation systems, and polyimide films have been selected as barrier materials. Therefore, the mechanical performance of the candidate insulation materials must be explored so that they can be used with confidence and advances can be made in future material development. In addition, the insulation systems for the ITER toroidal field (TF) coils will be exposed to high fast-neutron and gamma irradiation fluences, and understanding of their mechanical properties after gamma irradiation only is of great importance in order to establish similarities and differences between radiation damage due to gamma rays and fast neutrons. The purpose of this research is to characterize the cryogenic interlaminar shear properties of composite insulation systems for the superconducting magnets of the ITER.

2. Experimental procedure

Three different types of hybrid insulation systems (Samples A, B and C) [3] were considered in this work. The polymer resins for Samples A, B and C were an epoxy containing diglycidyl ether of bisphenol-F (DGEBF) and cyanate ester, an epoxy containing DGEBF and N,N,N',N'-tetraglycidyl-4,4'-diaminophenylmethane (TGDDM), and a diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) epoxy, respectively. All insulation systems used an S-glass fabric with a plain weave as their reinforcement. The barrier was a polyimide film of 25 μm thickness. All sample plates consisted of eleven layers of the plain weave S-glass fabric and ten layers of the polyimide film. The as-received thickness of the plates t was about 2.5 mm. The specimens for the short beam shear tests were machined from the sample plates to the following dimensions: length $l = 20$ mm and width $b = 10$ mm. These specimens were cut with the length parallel to the warp direction (warp specimens) and the fill direction (fill specimens). Warp specimens irradiated by gamma rays at room temperature were also prepared. The gamma doses were 10 MGy (equivalent to $1 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}$) and 30 MGy (equivalent to $3 \times 10^{22} \text{ m}^{-2}$).

The short beam shear test setup is shown in Fig. 1. Here, s refers to the span length. We selected a span to thickness ratio s/t of 5 as indicated in Ref. [4]. The short beam shear tests were conducted at room temperature, 77 K and 4 K. The failure load P_B was interpreted as the first maximum load attained. Following the ASTM D 2344 [5], the apparent interlaminar shear strength S_H was calculated from the solution for the short beam shear specimens:

$$S_H = 3P_B/4bt. \quad (1)$$

After the short beam shear tests, the edge sections of the tested specimens were examined by optical microscopy.

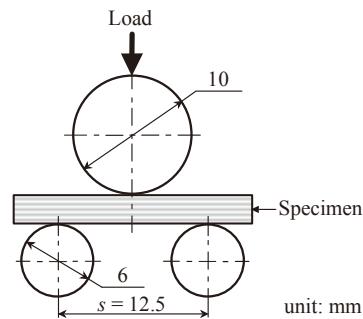


Fig.1 Schematic diagram of short beam shear test

3. Results and discussion

Fig. 2 shows the average apparent interlaminar shear strength S_H of Sample A at room temperature (RT), 77 K and 4 K. The dotted bar represents the average S_H value for the specimens with the tensile composite layer failure, and the error bars indicate the maximum and minimum strengths. The apparent interlaminar shear strength of the insulation systems is affected by the temperature. Also, the insulation systems exhibit the strength anisotropy in the warp and fill directions. Based on the short beam shear testing, the 4-K apparent interlaminar shear strength of Sample B is found to be higher than those of the others. The effect of irradiation on the cryogenic interlaminar shear properties is also discussed. It is found that Sample B shows the degradation in the apparent interlaminar shear strength after room temperature gamma irradiation.

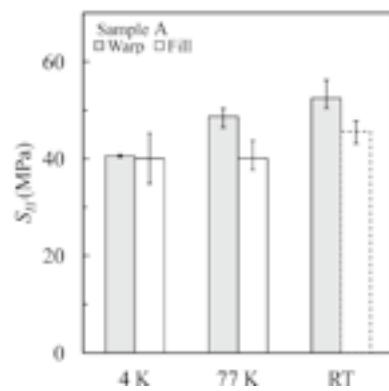


Fig.2 Apparent interlaminar shear strength of Sample A

References

1. Y. Shindo, et al.: ASME J. Eng. Mater. Tech., Vol. 121 (1999) 367-373
2. Y. Shindo, et al.: Comp. Sci. Tech., Vol. 69 (2009) 1904-1911
3. A. Idesaki, et al.: Adv. Cryog. Eng., Vol. 54 (2008) 169-173
4. Y. Shindo, et al.: ASME J. Eng. Mater. Tech., Vol. 123 (2001) 112-118
5. ASTM D 2344-84, Standard test method for apparent interlaminar shear strength of parallel fiber composites by short-beam method

Ti-6Al-4V Normal 材の低温における破壊靭性と疲労特性

Fracture Toughness and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Normal Alloy at Low Temperature

由利 哲美、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構);砂川 英生(宇宙航空研究開発機構)

Tetsumi Yuri, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS); HIDEO Sunakawa (JAXA)

E-mail: YURI.Tetsumi@nims.go.jp

1. はじめに

これまでに我々は、液体水素ロケットエンジン用材料の高特性かつ低コスト化を目指し、Ti-6Al-4V (Ti64) ELI 合金の極低温における材料特性¹⁾を求め、各材料特性は現在使用されている Ti-5Al-2.5 ELI 合金²⁾と同水準もしくはそれ以上であることを示した。コスト削減としては、Ti64Normal 材も候補材料として取り上げられている。但し、Normal 材(鍛造材)では低温で破壊靭性値は低下することや、高サイクル疲労試験では、 10^6 回付近の高サイクル側で疲労強度が低下すること等が報告されている³⁾。しかしながら、Ti64Normal 材は熱処理による組織制御により、低温においても ELI 材と同程度の破壊靭性値を示すことも報告されている⁴⁾。本研究では、比較的強度-靭性バランスが良好と考えられる等軸 α と針状 $\alpha + \beta$ の混合組織から成る Ti64 Normal 材を用いて、低温において引張、破壊靭性および高サイクル疲労試験を行い、各材料特性を取得し、Ti64ELI¹⁾ 材と比較した結果について報告する。

2. 実験方法

供試材は、Ti64 Normal 材(鍛造比 2.4、 $\phi 350 \times 200$ 、AMS4928 相当)、940°C-120min 保持後水冷、705°C-170min 保持後空冷の焼鈍材を用いた。液体窒素(77 K)および室温(293 K)にて、引張試験、破壊靭性試験および高サイクル疲労試験を行った。破壊靭性試験片は C-R 方向より採取し、77 K では K_{IC} 試験(ASTM E 399 に準拠)、293 K では J_{IC} 試験(ASTM E 1820-01 に準拠)を行った。疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い応力比 $R=0.01$ とし、試験周波数は 10~15Hz で試験を行った。各試験後、SEM により破面観察も行った。

3. 結果

比較のために Table と Fig には、Ti64ELI 材¹⁾のデータも示してある。各試験温度における Ti64Normal 材および Ti64ELI 材の引張試験の結果を Table 1 に示す。各試験温度において Ti64Normal 材の 0.2%耐力 ($\sigma_{0.2}$) および引張強度 (σ_B) の値は、Ti64ELI 材に比較し 120~130MPa 程度高い値を示している。伸び (ϵ) はほぼ同程度、絞り (ϕ) は Ti64Normal 材の方が高い。Table 2 に各試験温度における破壊靭性試験の結果を示す。Ti64Normal 材(4 個の平均値)は各試験温度において 40% 程度 Ti64ELI 材より低下が見られるが、Nagai³⁾らの Ti64Normal 材の値に比べると高い。Fig.1 に各試験温度における S-N 曲線を示す。293 K においては、Ti64Normal 材および Ti64ELI 材の疲労強度はほぼ同じである。77K では、 5×10^6 回付近までは Ti64Normal 材の方が低下しているが、それより長寿命側では Ti64Normal 材の方が疲労強度は高い。試験後の SEM による疲労破面観察結果では、疲労破壊起点はすべて表面破壊であった。各試験後の破面観察結果の詳細については、発表当日行う予定である。

参考文献

- (1) T.YURI,et al.: Abstracts of CSJ Conference,Vol.80(2009) p.75
- (2) NIMS SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET No.1: National Institute for Materials Science, Japan (2003)
- (3) K.Nagai,et al. : ISIJ International,Vol.31 No.8 (1991) p.882
- (4) K.Nagai,et al. : Trans. JIM,Vol.26, No.86(1985) p.405

Table 1 Tensile properties of Ti-6Al-4V Normal and Ti-6Al-4V ELI¹⁾

Materials	Temp.	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϵ (%)	ϕ (%)
64Normal	293 K	893	959	19	30
	77 K	1405	1511	14	25
64ELI	293 K	770	833	13	12
	77 K	1276	1370	15	13

Table 2 Fracture toughness of Ti-6Al-4V Normal and Ti-6Al-4V ELI¹⁾

Materials	Temp.	
	293 K	77 K
64Normal	70	51
64ELI	112	81

Unit : MPa \sqrt{m}

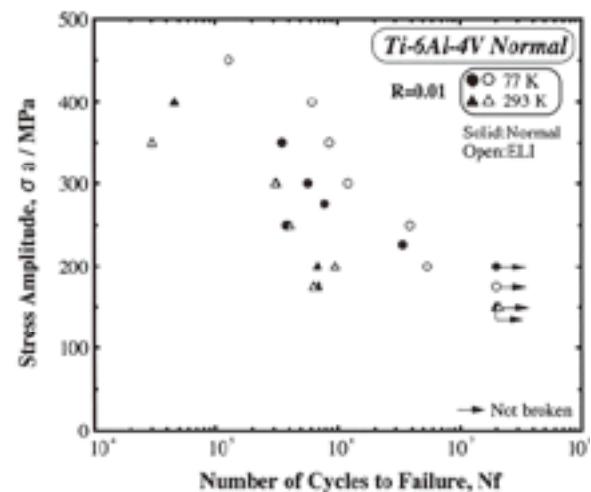


Fig.1 S-N curves of Ti-6Al-4V Normal and Ti-6Al-4V ELI¹⁾.

α チタン合金の低温疲労特性に及ぼす応力比の影響

Effect of stress ratio on low-temperature fatigue properties of α -Titanium Alloy

小野 嘉則 由利 哲美 緒形 俊夫 (物質・材料研究機構)

松岡 三郎 (九州大学) 砂川 英生 (宇宙航空研究開発機構)

ONO Yoshinori, YURI Tetsumi, and OGATA Toshio (National Institute for Materials Science)

MATSUOKA Saburo (Kyushu University), SUNAKAWA Hideo (Japan Aerospace Exploration Agency)

E-mail: ONO.Yoshinori@nims.go.jp

【1.緒言】

実際の機械部品として使用される場合、作用する荷重条件は平均応力が広範囲にわたるため、疲労特性に及ぼす平均応力(応力比)の影響を把握することは重要である。

著者らは、低温用 α チタン合金である Ti-5%Al-2.5%Sn ELI (Ti525 ELI) 合金の鍛造材の極低温高サイクル疲労特性(応力比 $R=0.01$)を調査し、低温では室温に比べて高サイクル疲労強度が低くなることを報告した¹⁾。また、低温では双晶変形に起因してき裂発生寿命が短くなり、その結果疲労強度が低くなると考えられることが示された¹⁾。Ti525 ELI 合金の場合、室温と低温では、き裂発生機構が異なるため、疲労特性に及ぼす応力比の影響が異なることも予想される。

本研究では、Ti525 ELI 合金の低温高サイクル疲労特性に及ぼす応力比の影響について調査した。

【2.実験方法】

供試材は、鋳塊を 1473 K (β 单相域) および 1233 K ($\alpha+\beta$ 二相域) での熱間鍛造後、1073 K で 7.2 ks 烧鈍した。下部組織は、等軸組織と層状組織の混合組織となっていた。高サイクル疲労試験は、室温 77 K で周波数 $f=10\sim15$ Hz の正弦波軸荷重で行った。応力比は、 $R=-1, 0.01, 0.5$ とし、さらに荷重制御で可能な最高応力比側の試験として、最大応力 σ_{max} を 0.2%耐力 ($\sigma_{0.2}$) に固定し、応力比を固定しない試験(以下、 $\sigma_{max}=\sigma_{0.2}$ 試験と呼ぶ)²⁾を行った。なお、供試材の $\sigma_{0.2}$ と引張強度 (σ_B) は、室温 (293 K) では $\sigma_{0.2}:741$ MPa, $\sigma_B:765$ MPa、77 K では $\sigma_{0.2}:1135$ MPa, $\sigma_B:1212$ MPa である。

【3.結果】

Fig. 1 は、供試材の室温(a)および77 K(b)でのS-N線図である。室温の S-N 線図では、 $\sigma_{max}=\sigma_{0.2}$ 試験の結果を除いて、 10^5 あるいは $10^6\sim10^7$ 回にかけて S-N 線図に水平部が生じる傾向が見られる。一方、77 K では、S-N 線図の傾きは、室温に比べて大きい。 $R=-1, 0.01, 0.5$ の 10^7 回強度を比較すると、いずれも室温より 77 K の方が低くなっている。77 K では、広い応力比範囲において、疲労試験時に双晶変形が起こり、それに起因して早期にき裂が発生することにより、疲労強度が低下していると推察される。Fig. 2 に疲労限度線図を示す。疲労限には 10^7 回強度を採用した。また、 10^7 回強度は 10^7 回未満で破断したデータのうち最も低い応力値と、 10^7 回で破断しなかったデータのうち最も高い応力値の平均とした。室温の場合、 10^7 回強度は修正グッドマン線上にほぼ位置しており、いずれの応力比も修正グッドマン則で予測可能であることがわかる。一方、77 K での修正グッドマン則による予測は、 $R=0.7$ 付近では安全側になるものの、 $R=0.01$ と 0.5 では危険側になることが明らかになった。講演では、破面観察結果もふまえて、低温疲労特性に及ぼす応力比の影響について考察した内容も説明する。

本研究の一部は、平成 21 年度科学研究費補助金「若手研究(B)」課題番号 21760567 の補助を得て行われた。ここに謝意を表する。

【参考文献】

- [1] Y. Ono et al.: TRANS. OF JSME, A74, 739 (2008), pp. 329-334.
- [2] E. Takeuchi et al.: TRANS. OF JSME, A70, 698 (2004), pp. 1405-1411.

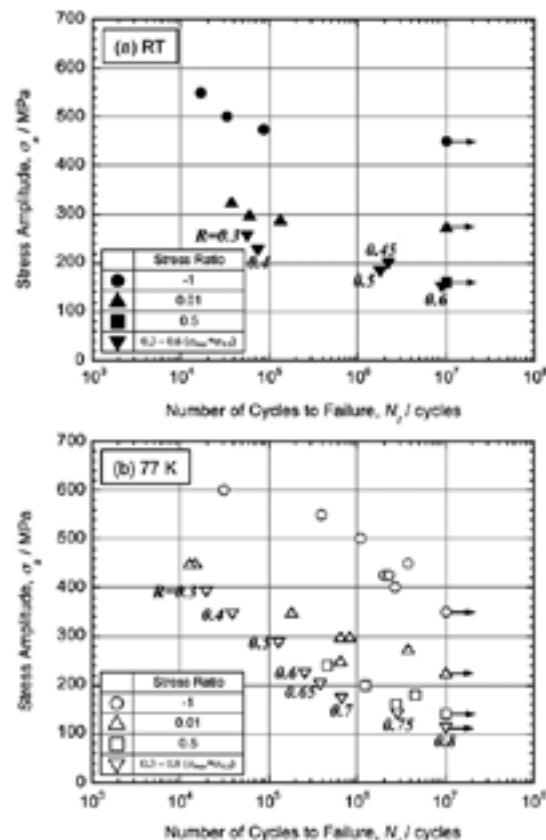


Fig. 1 S-N diagrams of Ti-5%Al-2.5%Sn ELI alloy.

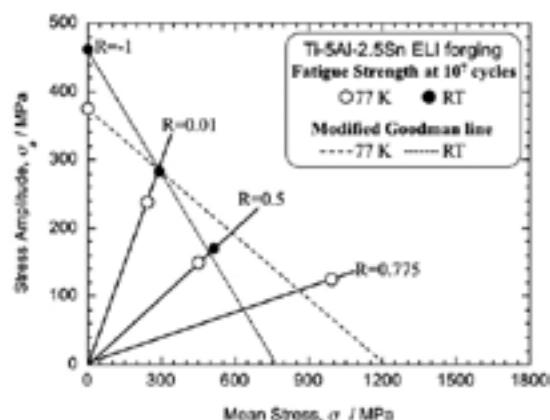


Fig. 2 Endurance limit diagram of Ti-5%Al-2.5%Sn ELI alloy.

水素含有金属の共振周波数の温度依存性

Temperature Dependence of Temperature dependence of Resonance Frequency of Hydrogen content metals

重松 利信, 金原 恒平, 寺崎 義朗(佐世保高専); 小野 文慈(佐賀大); 河江 達也(九大工); 橋爪 健一(九大総理工);
SHIGEMATSU Toshinobu, KANAHARA Kyohei, TERAZAKI Yoshiro(Sasebo National College of Tech.);
 ONO Bunji(Saga Univ.); KAWAE Tatsuya(Kyushu Univ.); HASHIZUME Kenichi(Kyushu Univ.)
 E-mail: shige@post.cc.sasebo.ac.jp

1. はじめに

我々は Vibrating Reed 法を用いて、金属の共振周波数の温度依存を調べる計画を持っている。それにより水素などの不純物効果を検出し、例えば水素脆性の予知が可能になるのではないかと考えている。

我々はこれまで実験装置を完成させ、SUS304 の水素含有の有無による共振周波数の温度依存に関する first data を報告した¹⁾。その後、ノイズ等で測定ができなくなっていた。そこで、検出系の改良を行い、光を用いたノイズに強い測定系を完成させた。以下に、その詳細を記述すると共に、SUSや Al の共振周波数の温度依存について述べる。

2. 実験装置

Vibrating Reed 法を用いた測定回路系統図を Fig.1 に示す。室温の発振器からの信号が低温部の実験セル部の電極に伝えられ、サンプルは次式に従う力で引かれる。

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{V}{\ell} \right)^2 S$$

ここで、V は電圧、S は電極面積、 ℓ は電極 - サンプル間距離である。その振動を室温に設置したレーザードップラ干渉計でピックアップする。ところで、実験セルは冷凍機 (Iwatan i; Cryomini HE05) で冷却している。

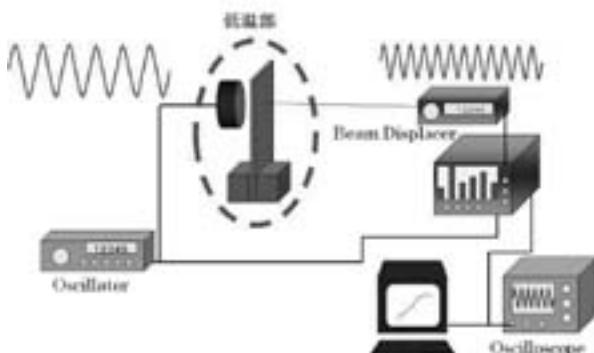


Fig.1 Schematic setup of vibrating reed and block diagram for measurements

本研究では、Vibrating Reed 法の測定精度を調べるためにアルミニウムをサンプルとした測定を行ったのちに、水素含有金属の試料として SUS304 を用いて測定した。SUSへの水素の charge は以下のようにした。

サンプル名	熱処理過程および水素のチャージ
熱処理のみ	真空中, 1000°C, 1 時間
ガスチャージ	真空中, 1000°C, 1 時間 + 1000°C・30min・H ₂ 500Torr(ガスチャージ)
電界チャージ	真空中, 1000°C, 1 時間 + 0.5V・0.02A・22h(電界チャージ)

3. 測定結果

アルミの測定結果を Fig.2 に示す。

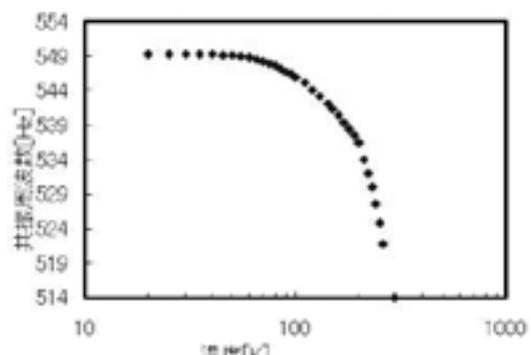


Fig.2 Temperature dependence of resonance frequency of Aluminum sample.

共振周波数は窒素温度付近まで急激に変化し、それ以下の温度では変化が非常に小さい。これは Reed 等によるヤング率の温度依存性の結果²⁾と一致する。また、波動方程式から求めた以下の式に従って、ヤング率 (E) を計算し、温度依存を比較したところ非常に良い一致であった。

$$E = \frac{12\rho}{t^2} \left(\frac{2\pi f l^2}{\lambda_n} \right)^2$$

ρ : 密度, t : 試料の厚み,

l : 試料の長さ, λ_n : 振動モード定数

Fig.3 に SUS の測定結果を示す。縦軸は 10K の共振周波数で規格化した値である。水素有無での違いは、窒素温度以上での温度変化に現われているようであるが、その詳細は未だ議論できる状態に達していない。

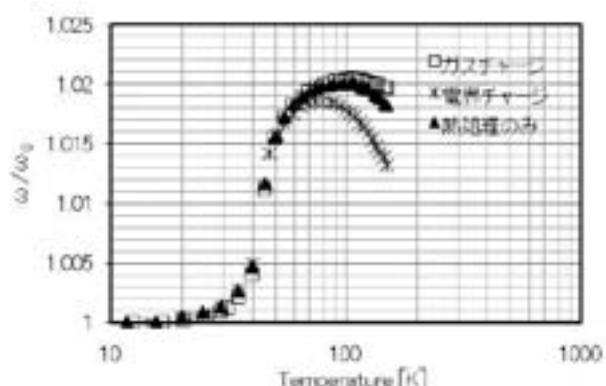


Fig.3 Temperature dependence of resonance frequency of SUS sample.

参考文献

1. K. Watanabe et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.211
2. 超電導・低温工学ハンドブック, pp.1073, (1993)

液体水素用超伝導 MgB_2 液面センサーの液面検知特性に関する研究

Studies on characteristics of MgB_2 sensor for detecting level of liquid hydrogen

世良 佑樹, 森田 剛至, 武田 実(神戸大学); 松野 優, 藤川 静一(岩谷瓦斯); 熊倉 浩明, 黒田 恒生(物材機構)
 SERA Yuki, MORITA Tsuyoshi, TAKEDA Minoru (Kobe University); MATSUNO Yu, FUJIKAWA Shizuechi (Iwatani Ind.Gas.);
 KUMAKURA Hiroaki, KURODA Tsuneo (NIMS)
 E-mail: r5c7x5@bma.biglobe.ne.jp

1. はじめに

高精度かつ連続的に液面検知可能な液体水素用の液面計として, MgB_2 線材にマンガニン線(ヒーター)を巻き付けた外部加熱型・超伝導液面計の研究を行っている。これまでの研究では液面センサーを試作し, 液面センサーの静特性として液面平衡時における液面検知特性を調べた。その結果, 液面位置とセンサー出力との直線性は非常に良く, 直線近似との相関係数は 0.998 以上であった。[1,2]

一方, MgB_2 液面センサーは連続的に液面検知が可能であるので, 液面センサーの動特性も優れていると予想されるが, その詳細は調べられていない。そこで本研究では液面センサーの動特性として, 連続的に液面を振動させた時の出力信号の追従性について調べる事を目的とする。

2. MgB_2 液面センサー

MgB_2 液面センサーは, 直径 0.32 mm の MgB_2 線材へある一定間隔でヒーター(マンガニン線)を巻き付けたものである。 MgB_2 線材は, Powder-In-Tube 法をベースとした in-situ 法により作製を行った。具体的には, CuNi(7:3)のシース管の中に, Mg と B の混合粉末を充填した後に, 直径 0.32 mm まで線引き加工をし, 最後に Ar 霧囲気中にて熱処理を施した。尚, 超伝導転移温度をコントロールするために, 混合粉末をシース管に充填する際 10 % の SiC を添加し, サンプルの熱処理時の焼成温度を 600 °C で 1 時間とした。センサーで使用した MgB_2 線材の諸性能を添加物なしの線材と比較して Table1 に示す。[3,4]

3. 測定原理

超伝導液面計の測定原理について以下に述べる。まずセンサーを LH_2 へ沈め, ヒーターへある一定電力を入力する。これにより, 液体中のセンサーは超伝導状態のまま, 気体中のセンサーは常伝導状態となり, 液面の高さによってセンサー全体の電気抵抗値が変化する。つまり, センサーに電流を流し, その出力信号を測定するだけで, 非常にシンプルに液面検知が出来る。

4. 実験装置

センサーの動特性を調べる実験システムの構築を行った。その概略図を Fig.1 に示す。実験システムは, MgB_2 液面センサー, 光学観測クライオスタット, 横振動試験装置, 東芝テリ一株式会社製 CCD カメラ, 株式会社ディシー製データ収録装置 FE300(最大サンプリング周波数 256 kHz), 定電流電源で構成されている。横振動試験装置は光学観測クライオスタットの底に取り付けられており, サーボモーターのパラメータを調整する事によって最大加速度 ± 0.1 G, 最大振幅 ± 100 mm まで制御可能となっている。

5. 予備実験

構築した実験システムの妥当性を確かめるため, NbTi 線を用いた液体ヘリウム用超伝導液面計を自作し, その液面振動時の出力信号の追従性について調べた。

予備実験では, まずクライオスタットのサンプル槽に LHe を充填し, センサーに液面検知可能な測定電流及びヒーター

を入力した。次に, 横振動試験装置に 0.1 G の加速度を 0.2 秒間与えサンプル槽内部の LHe の液面を振動させた。その様子を光学観測窓から CCD カメラを用いて 1/30 秒間隔にて撮影し, それと同期させてセンサーからの出力信号を PC に収録し両者を比較した。その結果, センサーからの出力信号の周期と, 液面が変化する周期はどちらも 1/30 秒以内で一致した。これらの詳細は, 学会で発表する予定である。

6. まとめ

横振動試験装置を用いたセンサーの動特性を調べる実験システムの構築を行い, そのシステムの妥当性を評価した。

今後は LH_2 を用いて MgB_2 液面センサーの出力信号の追従性について調べ, LHe 実験データと比較検討していく予定である。

Table1 Characteristics of fabricated MgB_2 wire.

Additive	Diameter[mm]	Tc.on[K]	Ron[Ω /m]
10% SiC	0.32	33.87	5.10
None	0.65	35.4	1.27

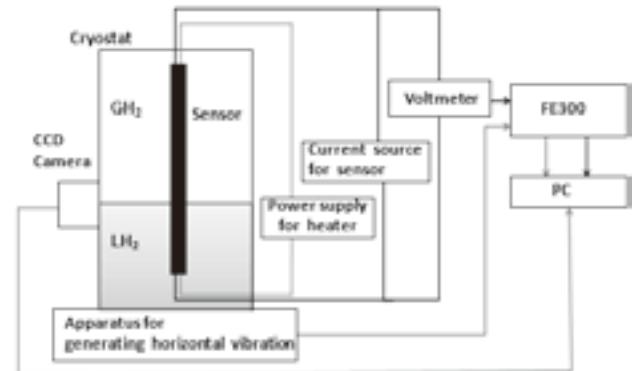


Fig.1 The liquid hydrogen experiment system.

参考文献

- 1.M.Takeda, et al.:Adv.Cryo.Eng.,Vol.53 (2008) pp.933-939
- 2.M.Takeda, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond.,Vol.19, No.3 (2009) pp.764-767
- 3.Y.Matsuno, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.58
- 4.Y.Matsuno, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.49

謝辞

本研究の一部に対して, 日本郵船・ハイダール記念事業による助成金の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

液体水素用 MgB_2 液面センサーの液面検知特性に対する外部ヒーターの影響

The influence of external heater on characteristics of MgB_2 level sensor for liquid hydrogen

森田剛臣, 世良佑樹, 武田実 (神戸大学); 松野優, 藤川静一 (岩谷瓦斯); 熊倉浩明, 黒田恒生 (物林機器)

MORITA Tsuyoshi, SERA Yuki, TAKEDA Minoru (Kobe University); MATSUNO Yu, FUJIKAWA Shizuchi (Iwatani Ind. Gases);

KUMAKURA Hikoaki, KURODA Taneo (NIMS)

E-mail: 084w527w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

MgB_2 液面センサーは MgB_2 線材の超伝導特性を利用して液体水素の液面を検知するものである。液体水素の蒸気による冷却のため、 MgB_2 センサーは常に超伝導状態となり、正確な液面検知ができない。これを防ぐため、センサー全体にマンガニン線の外部ヒーターをらせん状に巻いている。これによって、正確な液面検知ができることがわかつてきただ。[1]

本研究では、外部ヒーターの液面検知特性に及ぼす影響を計算的に調べるために熱入力値を変え、種々の条件下でセンサーの温度分布を有限要素法により求めることを目的とした。

2. 計算条件

液体水素容器は直径96 mm、高さ200 mmのものを想定した。センサーは直径0.32 mm(CuNiシース材を含む)、長さ200 mmのもので、外部ヒーターは1mmおきに巻くことにした。この容器の底面から40 mmの位置に液体水素の液面があるとした。ただし、容器全体を含めたモデルでは、解析ソフトANSYSの節点制限数を越えるため、本研究では気相部分は液面から40 mmの高さまでを対象とした(Fig.1参照)。さらに、容器内は全域で大気圧とし、容器外周は断熱され、容器内における全ての物質の初期温度は20.4 Kとした。外部ヒーターの熱入力は、200回巻で(長さ200 mmのセンサーを想定したとき)1~25 Wとした。発熱開始時刻を0 sとし、各熱入力において、系が定常状態となる時刻まで温度分布を計算した。

3. 定式化

MgB_2 線材がY軸方向に十分に細長いとすると、この線材の MgB_2 部分の非定常熱伝導方程式は次のようになる。

$$\gamma C \frac{\partial T}{\partial y} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + G + H \quad (1)$$

$$G = \rho \frac{I^2}{S^2} \quad (2) \quad H = \frac{2\pi l (T - T_0)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{R_0}{R_1}} \times n \quad (3)$$

ここで、 γ, C, T, κ : MgB_2 の密度比熱、温度、熱伝導率である。 G, H はそれぞれ、単位体積あたりの MgB_2 の自己発熱量、外部ヒーターからの伝熱量である。また、 I : センサーの測定電流、 ρ, S, A : センサーの電気抵抗率、断面積である。

面積表面積 h : センサーの気体水素に対する熱伝達率、 T : 外部ヒーター(マンガニン線表面の温度)、 T_0 : MgB_2 とシース材(CuNi)の境界面の温度、 l : 外部ヒーターの幅、 λ_1, λ_2 : 外部ヒーター、シース材の熱伝導率、 R_0, R_1, R_2 : センサー中心から MgB_2 とシース材の境界面までの半径、シース材と外部ヒーターの境界面までの半径、外部ヒーターと気体水素の境界面までの半径、 n : 外部ヒーターの巻数である。

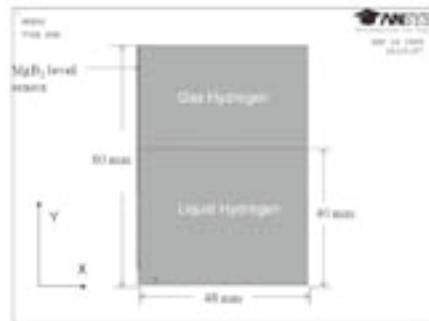


Fig.1 Analytical Model (Y axis symmetry)

4. 解析結果

Fig.2に発熱開始1 s後のセンサーの MgB_2 部分の温度分布により求めた液面位置を示す。熱入力値が10 Wを越えると、仮定した40 mmの液面位置に近づいていることがわかる。詳細な解析結果は、学会で述べる。

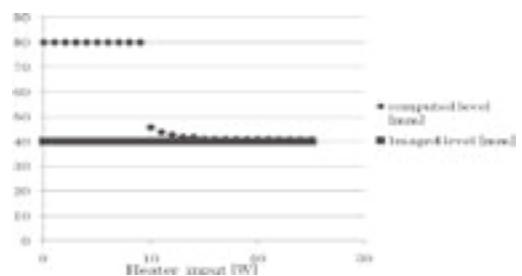


Fig.2 Comparison between computed level and imaged level (Time=1.0 s)

謝辞

本研究の一部に対して、日本郵船・ヘイエルダール記念事業による助成金の援助を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

1. Y.Matsuno et al. : Abstracts of CSJ Conference , Vol.79 (2008) p.58

HTS-SQUID を用いた直交磁場印加型非破壊検査システムの開発

Development of a nondestructive testing system using HTS-SQUID with a normal pickup-coil

三宅 悅朗, 紀和 利彦, 塚田 啓二(岡山大); 塚本 晃(日立)

MIYAKE Etsuro, KIWA Toshihiko, TSUKADA Keiji (Okayama Univ.) ; TSUKAMOTO Akira (HITACHI)

E-mail : gen20353@s.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

構造体や建築物の安全性・信頼性を確保する非破壊検査の有効な手法として、超高感度磁気センサのSQUIDを用いた交流磁場検査法がある。SQUIDを用いることにより、従来判別できなかった欠陥の検出が期待できるため、研究が行われている。我々は、交流磁場を計測対象に印加し、誘導される磁場を検出するHTS-SQUID非破壊検査システムの開発を行っている。今回、検出コイルと直列に接続したインプットコイルによって、磁気シールド内のSQUIDへ信号を伝達するシステムを構築した。本稿では、開発したシステムの概要と、ステンレス板の溶接検査を行った結果について報告する。

2. 直交磁場印加型非破壊検査システム

開発した検査システムをFig.1に示す。本検査システムは、磁場印加コイル、HTS-SQUID、FLL回路、ロックインアンプ、互いに直列に接続された検出コイルとインプットコイル、2層磁気シールド、走査ステージおよびPCで構成される。SQUID、インプットコイルおよびFLL回路は、磁気シールド内に設置している。磁場印加コイルはヘルムホルツコイルを使用し、その大きさは、直径400 mm、コイル間距離200 mmで、巻き数は各100回である。検出コイルとインプットコイルは断面直径0.32 mmの銅線を用いて作製し、前者のコイル径は20 mmで巻き数は180回、後者のコイル径は15 mmで巻き数は40回である。検出コイルの感度軸は印加磁場に対して直交に配置されており、計測対象から発生する磁場のみを検出することができる。HTS-SQUIDとインプットコイルは、真空デュウ内の液体窒素によって冷却されている。計測方法は、まず、ヘルムホルツコイルから計測対象に対して交流磁場を印加し、試料から発生する磁場を検出コイルで検出する。検出した信号をインプットコイルによってHTS-SQUIDに伝達し、SQUIDの信号をロックイン検波した後、PCでデータの保存および解析を行う。

3. 実験と考察

開発した検査システムを利用して、ステンレス板の溶接検査を行った。ステンレス板の材質はSUS304で、板厚は0.5 mm、大きさは 100 mm×100 mmである。溶接部の幅は約4 mmである。印加磁場強度を3.7 μ T、周波数を900 Hzとし、検出コイルと試料表面間の距離は2 mmで保った状態で、計測対象を走査して測定を行った。溶接を行った試料と溶接を行っていない試料について測定し、これらを比較した。測定結果をFig.2に示す。溶接を行った試料では、溶接部周辺で信号強度の変化が観察された。SUS304は溶接を施すことにより、溶接部で磁性変化が生じると考えられており [1]、今回得られた結果も、この磁性変化を捉えたものであると考えられる。

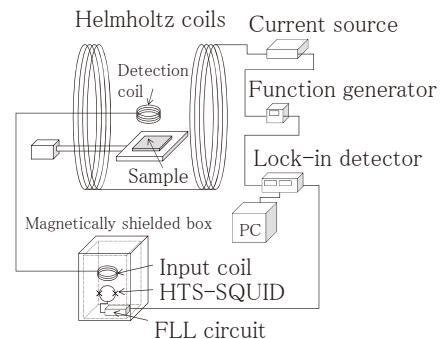


Fig.1 Nondestructive testing system using HTS-SQUID with a normal pickup-coil

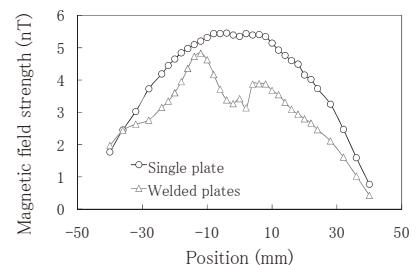


Fig.2 Weld inspection of SUS304 plates

参考文献

1. T. Hayashi, et al.: NDT&E International, Vol. 42 (2009) 308-315