走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いた高温超伝導テープ線材の 交流電流分布可視化手法の開発 Visualization of alternating current distribution

in multi-filamentary model samples by using the Hall-probe microscopy

<u>本田 貴裕</u>, 東川 甲平, 阿比留 健志, 井上 昌睦, 岩熊 成卓, 木須 隆暢(九大); 中尾 公一, 山田 穰, 和泉 輝郎(SRL) <u>HONDA Yoshihiro</u>, HIGASHIKAWA Kohei, ABIRU Kenji, INOUE Masayoshi, IWAKUMA Masataka, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); NAKAO Koichi, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo (SRL)

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

1. はじめに

近年、RE123 高温超伝線材の作製プロセスは急速な進展 を遂げており、応用機器開発の研究が本格化している。電力 機器応用においては交流損失低減のための細線化、マルチ フィラメント化の加工技術等の確立が急務となっている。直流 電流を印加した際の加工技術等の効果については評価を行 ってきたが^[1]、交流電流を印加した際の効果については十分 に評価されていない。

そこで本研究では、高温超伝導テープ線材の交流電流印 加時における自己磁界分布測定装置を開発し、断線やブリッ ジングを模擬したマルチフィラメント線材に交流電流を印加し た際の電流分布を可視化した。

2. 実験

測定に使用した走査型ホール素子磁気顕微鏡システムの 構成を Fig. 1 に示す。同システムに備え付けられているホー ル素子は、ステッピングモータにより駆動され、xy 平面に対し て 1µm、z軸に対して 0.25µm の分解能で走査が可能である。

ホール素子には、ファンクションジェネレータ Ch1 により 1kHz の交流のバイアス電流を印加し、これを参照信号として、 ロックインアンプを用いてホール電圧を測定する。試料への 交流電流は、ファンクションジェネレータ Ch2 による正弦波を バイポーラ電源で増幅し、印加している。この時、Ch2 の信 号波形を同期信号として用い、位相遅れを徐々に変化させ てホール電圧を取り込む事により、一周期分の磁界変化を 得た。同様の操作を各座標位置で繰返す事により、磁気像 の動画の取得が可能となる。

測定試料の冷却には伝導冷却方式を用いており、液体窒素により試料ステージを約 80K まで冷却する事ができる。試料を冷却し、電流を印加した後、発生した自己磁界分布の垂直成分をホール素子で測定する。得られた自己磁界分布より、フーリエ変換を用いて、ビオ・サバールの式の逆変換を解くことにより、電流分布を得る事ができる。

実験結果の定量性の詳細等に関しては当日報告する。

3. 結果と考察

本実験では、1cm 幅の YBCO 線材にエッチングにより幅 340µm、長さ 8mm のフィラメントを 10 本作製し、フィラメント間 のブリッジング、フィラメント内の欠陥、フィラメントの断線を有 したマルチフィラメント模擬線材を測定試料として用いた。

まず 30A、2Hz の交流電流を印加し、発生した交流自己磁 界分布を測定し、電流密度分布へと変換した。得られた自己 磁界分布をFig. 2(a) に、電流密度分布のx成分を(b) に示 す。また、その際の印加電流を図の間に示す。印加電流が減 少するにつれ、磁場分布の強度が上半分と下半分で反転し ていく様子がはっきりと可視化されている。また電流分布にお いては、外側のフィラメントから電流が出て行き、再び外側の フィラメントから順に電流が進入していく様子が可視化されて いる。

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、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 Schematic diagram of scanning Hall-probe microscopy system for ac measurement.



Fig. 2 (a) Magnetic field and (b) current distribution of x component in the multi-filamentary model sample with a 2Hz of ac transport current. The value of bias current at each moment was shown between figures.

5. 参考文献

[1] K. Abiru et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p. 162.

YBCO マルチフィラメント模擬線材における交流通電時損失分布の可視化 Visualization of Transport AC Loss Distribution in YBCO Multifilamentary Model Sample

東川 甲平, 本田 貴裕, 阿比留 健志, 井上 昌睦, 岩熊 成卓, 木須 隆暢 (九大);

中尾 公一, 山田 穣, 和泉 輝郎 (SRL)

HIGASHIKAWA Kohei, HONDA Yoshihiro, ABIRU Kenji, INOUE Masayoshi, IWAKUMA Masataka, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); NAKAO Koichi, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo (SRL)

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に関しては、SMES・ケーブル・変 圧器等の電力機器への適用に向けて、細線化・接続等の加工 技術の確立が重要な局面を迎えている。一方、同技術の成否 は、特に電力応用では重要となる交流環境下の電磁現象まで 把握することにより議論されるべきである。そこで本研究では、 走査型ホール素子顕微鏡を用いた超伝導テープ材交流通電 時自己磁界分布測定システムを構築し^[1]、電流密度分布・電界 分布の評価を経て損失分布まで可視化する手法を開発した。

2. 交流通電時自己磁界分布の測定

既に報告している走査型ホール素子顕微鏡を用いたシステム^[2]に、ファンクションジェネレータからの正弦波を制御信号と するバイポーラ電源(最大印加可能電流: 200 A)を接続するこ とによって、測定試料に交流通電を行う。また、ある測定位置に おける通電電流1周期分の磁界変化をホール素子によって測 定し、その他の位置でも位相を合わせてサンプリングすることに より、最終的に自己磁界(B_z)分布の時間変化が得られる^[1]。

3. 電流密度分布・電界分布・損失分布の評価

上記で得られた自己磁界分布に対して Biot-Savart の法則 の逆変換を施すことにより、電流密度 (J_x , J_y)分布が得られる。 また、Faraday の法則を適用すれば、電界 (E_x , E_y)分布が得ら れる。ただし、両者に際しては、試料から少し(リフトオフ距離) 離れた位置における磁界分布から試料面上の分布を再現する という過程を伴う関係から、既に報告されているフーリエ変換を 用いた手法 ^{[3][4]}を適用している。最後に、両者の内積 ($J_xE_x+J_yE_y$)を求めることで、損失(q)分布が得られる。なお、本 手法の妥当性に関しては、一部を既に報告している^[5]。

4. 結果·考察

一例として、10 mm 幅の YBCO 線材をエッチングすること によって作製した試料^[6] (Fig. 1 左上)に振幅 30 A, 周波数 2 Hz での通電を行った際の電流密度分布・電界分布・損失分 布を Fig. 1 に示す。フィラメントに欠陥や結合がある場合の 複雑な電流分布の評価が可能であると共に、同電流分布の みからは評価困難な損失分布を含めた電磁現象を可視化 することに成功している。また、別途 50 Hz での通電も行って おり、電界領域が異なることで電流分布や損失分布が変化 する様子なども得られている。このように、本評価手法によれ ば、比較的複雑な構造を有する細線化線材や線材接続部 における電磁現象の把握が、使用される環境に近い状態で 可能となり、電力機器への適用に向けた同線材の加工技術 の開発に有効な知見をもたらすことが期待される。

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] Y. Honda et al.: presented at this conference, 1A-a01.
- [2] K. Abiru et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p. 162.
- [3] B. J. Roth et al.: J. Appl. Phys., Vol. 65 (1989) pp. 361-372.
- [4] R. B. Dinner et al.: Phys. Rev. B, Vol. 75 (2007) pp. 144503-1-12.
- [5] K. Higashikawa et al.: The 2009 Annual Meeting Record I.E.E. Japan, No. 5 (2009) p. 202.
- [6] K. Abiru et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p. 18.



Fig. 1. Time-dependent distributions of current density, electric field and heat generation in a multifilamentary model sample of YBCO coated conductor with AC transport current of 30 A and 2 Hz.

湾曲した超伝導テープ線材の交流通電損失

Alternating current losses of bent superconducting tapes carrying transport currents

馬渡 康徳(産総研) MAWATARI Yasunori (AIST) E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

超伝導電力機器等への応用において,超伝導テープ線 材は輸送電流や外部磁場が印加されるなど様々な電磁環境 にさらされ,そのときの超伝導テープ線材における電流・磁場 分布および交流損失などの電磁応答は重要な研究要素の一 つである[1].超伝導テープ線材の交流損失に関して,輸送 電流を印加した場合[2],および垂直磁場を印加した場合[3] とも解析的に解かれており,これらの理論結果はテープ線材 の基礎特性評価に広く用いられている.ただし,文献[2,3]を 初めとするこれまでの解析は,Fig. 1(a)のように平坦な(幅広 面が xz 面に平行な)形状のテープ線材を対象としている.

一方,超伝導電力ケーブルのように円筒フォーマの周りに テープ線材を並列に配置する場合,テープ線材はフォーマ に沿うよう幅方向に湾曲する可能性があり,そのような湾曲の 効果が交流損失などの電磁応答にどのような影響を及ぼす か明らかにする必要がある.そこで本研究では,Fig. 1(b)のよ うに円筒に沿って幅方向に湾曲したテープ線材に輸送電流 を印加した場合の交流損失について理論解析を行った.

2. 湾曲した超伝導テープ線材

長手方向(z 方向)には直線状で無限に長く, 超伝導層の 厚さ d で幅 2a の超伝導テープ線材について考える. 超伝導 層の臨界電流密度 j_c は一定とする臨界状態モデルに基づい て解析を行い, 線材一枚の臨界電流は $I_c = 2j_c ad$ である. 本 稿では, Fig. 1(a)のように矩形断面をもつ平坦なものを flat tape と呼び, Fig. 1(b)のように幅方向に湾曲したものを bent tapeと呼ぶ. 幅 2a, 厚さd, および臨界電流密度 j_c は, flat tape と bent tape ともに同一であるとし, それぞれ孤立した一枚のテ ープ線材について, 両者の電磁応答を比較して湾曲の幾何 学的効果について考察する. 超伝導層の厚さは幅に比べて



Fig. 1: Schematic of superconducting tapes: (a) a flat tape and (b) a bent tape. Cross sections of bent tapes in the xy plane are shown in (c).

無限に小さい極限 $d/a \rightarrow 0$ を考え, bent tape の断面は半径 Rおよび中心角 a/R の円弧に相当するものと仮定する. この定 義によれば, bent tape における $a/R \rightarrow 0$ の極限は flat tape に 一致する. 幅 2aを固定して a/Rを変化させたときの bent tape の断面の変化を, Fig. 1(c)に示した.

3. 湾曲した超伝導テープ線材の電磁応答

湾曲したテープ線材の上表面(湾曲した内側の面)と下表 面(湾曲した外側の面)は対照的ではないので,輸送電流によ る自己磁場はテープ面に対して傾斜した磁場をつくる.その 結果, bent tape の場合の垂直磁場成分は flat tape の場合に 比べて小さく,交流輸送電流による損失も小さい.

孤立した一枚のテープ線材に振幅 I_0 の交流輸送電流を 流したときの,線材単位長あたりの損失 Qの理論解析結 果を Fig. 2 に示した.実線は bent tape $(0 < a/R < \pi)$ の損失 であり,破線は flat tape の損失[2] (すなわち bent tape にお ける $a/R \rightarrow 0$ の極限)である.a/Rが大きくなる(大きく湾 曲する)とともに損失が小さくなることがわかる.Bent tape の損失の flat tape の損失に対する比は, $I_0 ~ I_c$ 近傍を 除く低電流領域ではあまり I_0 によらずほぼ一定であり, $a/R = 0.3\pi, 0.5\pi, 0.7\pi$,および 0.9π の場合の比は,それぞれ 0.86, 0.62, 0.31,および 0.05 程度である.

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.

参考文献

- Y. Mawatari, TEION KOGAKU 1 (2009) 2 (in Japanese)
 馬渡康徳,低温工学1 (2009) 2
- [2] W.T. Norris, J. Phys. D 3 (1970) 489
- [3] M.R. Halse, J. Phys. D 3 (1970) 717



Fig. 2: Alternating current losses Q of bent superconducting tapes as the function of the amplitude I_0 of the ac transport currents. The R is radius of the curvature and a/R is the central angle of the arc for the bent tape.

YBCO 積層導体の結合損失特性 Coupling loss properties of assembled YBCO coated conductors

<u>井口</u>靖明, 瀬尾 祐介, 川越 明史, 川畑 秋馬, 住吉 文夫(鹿児島大学) 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

INOKUCHI Yasuaki, SEO Yusuke, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co) E-mail: k1490587@kadai.jp

1. はじめに

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

2. YBCO 線材の導体化と測定条件

結合損失を測定した導体の諸元を Table. 1 に示す。試作し た導体は、線材幅 10mm、線材長 300mm、厚み 0.14mm の絶 縁なし YBCO 線材 2 本もしくは 4 本で構成され短尺直線状導 体である。今回はハステロイ基板面同士、Ag 面同士、ハステ ロイ基板面と Ag 面を接触させた導体を試作した。さらに導体 の両端部を短絡したサンプルもそれぞれ作製した。なお、す べての導体は導体厚み方向に対して約 7.6MPa の面圧が加 えられている。結合損失の測定は、周波数 1~200Hz、磁界振 幅 0.01mT~10mT の交流横磁界を印加し、ピックアップコイル 法を用いて液体へリウム中で行った。

3. 結合損失と接触抵抗及び接続抵抗

測定した損失の周波数依存性を Fig. 1 に示す。横軸は周 波数、縦軸は測定した単位体積あたりの交流損失を印加磁界 の2乗で規格化した規格化損失である。凡例のAg-Haは銀面 とハステロイ基板面を向き合わせた導体の測定結果を、 Ag-Ag は銀面同士を向き合わせた導体の測定結果を示して いる。測定値はいずれも印加磁界の 2 乗に比例していた。ま た、短絡ありの導体は、典型的なデバイ曲線の特性になって おり、結合損失が測定されていることがわかる。短絡なし導体 では、いずれの導体でも装置の誤差レベルの測定値となって おり、測定できないほど小さな損失であることがわかった。した がって今回の導体では、線材間の接触面の抵抗が非常に大 きいと考えられる。したがって、短絡あり導体の結合損失は、 短絡部でのみ発生していることになる。

銀面とハステロイ基板面を向き合わせた導体の短絡あり導体の測定結果について説明する。2枚重ね導体と4枚重ね導体の特性は、ピーク周波数がそれぞれ70Hzと30Hzとなっている。このことから、結合時定数はそれぞれ2.3msec、5.3msecとなることがわかる。またピーク値は、4枚重ね導体の方が2枚重ね導体よりも大きくなっている。これらのデータは、結合電流が誘起される閉ループの面積と接続抵抗で説明できる。今回は、接続抵抗がサンプル同士で変わらないようにサンプルを作製しているので、データの差は閉ループの面積の差で説明できた。銀面同士を向き合わせた導体の短絡あり導体の測定結果について説明する。ピーク周波数は35Hzとなっている。このことから、結合時定数は4.5msecとなることがわかる。これは、銀面とハステロイ面を向き合わせた導体の短絡あり導体と

同程度である。これは、これらの導体の閉ループの面積にほとんど差がないためであると考えられる。

4. まとめ

様々な YBCO 導体の結合損失測定を行った。その結果、 銀面とハステロイ基板面を向き合わせた導体、及び Ag 面同 士を向き合わせた導体では接触面における抵抗が非常に大 きく、結合損失は導体端部の短絡部分で発生することがわか った。短絡あり導体の結合損失は、一般的な理論と矛盾しな い結果であった。したがって、4 枚重ねの導体でも、短絡部の 抵抗と閉ループのインダクタンスを定量的に評価することによ って、積層導体の結合損失を評価できることがわかった。

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」 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。

Table. 1 Specifications of sample conductors				
assembled conductor				
Number of coated conductors 2 or 4				
Insulation between strands	no			
length (mm)	300			
Coated conductor				
width (mm)	10			
thickness (mm)	0.14			
$I_{\rm c}({\rm A})$	160			



Fig. 1 Frequency dependences of ac losses in assembled YBCO coated conductors

ピックアップコイル群による低損失加工された HTS 線材の電流分布測定 Measurement of AC current distributions in low-loss processed HTS tapes by a pickup coil array

宫原和矢,川畑秋馬,川越明史,住吉文夫(鹿児島大・工);塩原融(SRL) MIYAHARA Kazuya, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); SHIOHARA Yuh (SRL) E-mail:k2590086@kadai.jp

1. はじめに

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評価できる測定法を確立し、その電流 分布特性を評価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界分布を測定し、その結果から数値 計算により電流分布を求める¹⁾。今回はピックアップコイル群 の製作精度の改善やピックアップコイル群を構成するコイル 数の増加による測定領域の拡大などによって、電流分布測定 精度の向上を図った。また測定磁場分布からの数値計算によ る電流算出精度についても検討した。

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は φ 40µm の絶縁 Cu 線 を機械で巻線したものであり、寸法は断面積が 4.46mm× 0.33mm、ターン数は 3 層 17ターンである。Fig.1 にピックアッ プコイル群の概観を示す。前回までピックアップコイル群を構 成するコイル数は 20 個であったが、測定領域を拡大して測定 精度の向上を図るために、コイル数を 30 個に増やした。また ピックアップコイル群を複数個使用することによる電流分布測 定精度への影響を調べるために、コイル群を2セット重ねた測 定も行った。

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、φ1.0mmの絶縁 Cu丸線を5本並列に並べたものを用い、各 Cu線の通電電流値はシャント抵抗を用いて測定した。

4. 測定結果

測定結果の一例を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。Fig. 2 は試験導体に一様に電流を通電したときの磁場分布の測定結果であり、縦軸はピックアップコイルの測定電圧、横軸はピックアップコイルの位置を示している。プロットは、製作精度の改善を図る前後でのコイル群の測定値を示している。また、Fig. 3 は、測定磁場分布から算出した試験導体の電流分布であり、試験導体を構成する5本の各 Cu線の電流値を表している。棒グラフはシャント抵抗でモニタした電流値であるが、同図からコイル群の製作精度の改善により電流算出精度が改善したことがわかる。この5本の Cu 丸線から成る試験導体を用いて測定精度の評価した結果、10%以内の誤差で電流値が測定できることがわかった。

ピックアップコイル群の構成コイル数の増加による測定精度 の改善効果は見られなかったが、複数のコイル群の使用によ る測定精度の改善効果は確認できた。また、顕微鏡を利用す ることによるピックアップコイル群の試験導体への設置精度を 向上させることにより、電流測定精度が向上することも確かめ られた。

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」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)田代 他,2007 年度秋季低温工学·超電導学会講概要 集,1A-a03



Fig. 1 Overview of a pickup coil array.



Fig. 2 Measured results of field distributions around the test conductor.



Fig. 3 Calculated results of current distributions in the test conductor.

様々に傾いた柱状欠陥を含む 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 various aligned columnar defects

<u>末吉 哲郎</u>,油谷真吾,藤吉孝則,光木文秋,池上知顯(熊本大);知見康弘,石川法人(原子力機構) <u>SUEYOSHI Tetsuro</u>, YUTANI Shingo, FUJIYOSHI Takanori, MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.); CHIMI Yasuhiro, ISHIKAWA Norito (JAEA) E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

PLD法においてBaを含むペロブスカイト構造の酸化物 をドープして REBCO 薄膜内を作製した場合,ナノロッド が形成されこれが 1 次元ピンとして有効に作用して臨界 電流密度 J_cの異方性の改善に寄与することが知られてい る[1].また,ナノロッドを形成する 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,これがピンニング 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 照射を利用して,様々な交差角で柱状欠陥を YBCO 薄膜 内に導入して,臨界電流密度の磁場角度依存性に与える 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50µm,長さ1mmのブリッジ状 に加工した. 試料の膜厚は約 400nm 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 210MeV の Xe イオンを用いて行った.様々な 交差角の柱状欠陥を試料へ導入するために, c軸に対して 1~2 方向より照射を行った. 試料の c 軸に対して 6°の1 方 向から照射した試料を pa06,0°-10°の2方向から交差して 照射した試料を cr10 とし,同様に±10°の2 方向から照射し た試料を sp10 とする. ただし,全ての試料で照射方向は 試料のブリッジ方向に対して常に垂直に行っている. ま た照射量は全7.25×10¹⁰ions/cm²であり,これはマッチング 磁場 B_{Φ} =1.5T に相当する. 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を Ec=1.0×10⁻⁴V/m として 定義した.Jc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 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, c 軸方向に磁場を印加したときの T=77.3K に おける J_cの磁場依存性について示す.1方向に重イオン照 射した pa06の試料は,他の試料と比較して高磁場での J_c が高い値を示している.高磁場において,柱状欠陥に磁 束線が集団的にピン止めされることが報告されている[3]. 一方柱状欠陥が交差すると,磁束線間の弾性相互作用と 互いに傾いた柱状欠陥のピン止め作用が競合するために, J_cが低下すると考えられる.また, B=0.8~1T 付近の J_cの 磁場依存性においてわずかに凸状になっている.一方, 交差角が大きい cr10 においてはほとんど見られない.こ れは,磁束線と柱状欠陥とのマッチング作用により生じ, マッチング磁場より低い磁場で生じているのは柱状欠陥 のランダムな配置によるものと考えられる[4].

Fig.2に, J_c の磁場角度依存性より評価した θ_a の磁場依存性について示す.ここで、 θ_a は J_c の磁場角度依存性において J_c が最小値を示す角度で、柱状欠陥からのピン止め作用が及ぶ角度、トラップ角度と見なせる.試料 pa06の



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



Fig.2 Magnetic field dependences of accommodation angle θ_{a} estimated from angular dependences of J_{c} .

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. A. Mazilu et al.: Phys. Rev. B 58 (1998) R8909.

塗布熱分解法により作製された混晶系 RE123 線材の臨界電流特性 Critical current property of (Y, Gd)BCO coated conductors fabricated by TFA-MOD process

<u>井上 昌睦</u>, 兒玉 青樹, 木須 隆暢(九大); 兼子 敦, 青木 裕治(昭和電線); 宮田 成紀, 和泉 輝郎, 山田 穣, 塩原 融(SRL)

INOUE Masayoshi, KODAMA Seiju, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); KANEKO Atsushi, AOKI Yuji (SWCC); MIYATA Seiki, IZUMI Teruo, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)

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

1. はじめに

低コスト線材としての実用化が期待されているバッチ式本 焼プロセスを適用した塗布熱分解法による希土類(Rare Earth、 RE)123線材の研究開発が進められており、磁場中の臨界電 流特性を向上させる手法についても検討されている[1]。本研 究では、Y と Gd を混晶させた、(Y, Gd)BCO線材ならびに Dy を添加した YBCO+Dy線材の臨界電流特性及びピンニン グ特性について報告する。

2. 実験

実験に用いた(Y,Gd)BCO 線材ならびに YBCO+Dy 線材 はいずれも CeO₂/IBAD-Gd₂Zr₂O₇/HastelloyTM 基板上に塗布 熱分解法によって膜厚 1µmの超伝導層を形成したものである。 幅 4.5mm の線材を 2.5cm 程度切り出して、電流-電圧特性の 温度、磁場、磁場印加角度依存性を調べており、両者の 77K、 自己磁場の J_c (= $J_c^{77K,sf}$)は、1.46×10¹⁰A/m²、1.22×10¹⁰A/m²で あった。また、臨界電流特性等の比較に用いた YBCO線材の $J_c^{77K,sf}$ は、1.67×10¹⁰A/m²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

Fig.1 に、77K及び65Kにおける臨界電流密度 J_c の磁場依存性を示す。(Y,Gd)BCO線材の磁場中の J_c 値が、YBCO線材に比べて高くなっていることが分かる。また、Fig.2 に示す、 J_c の角度依存性について見てみると、(Y,Gd)BCO線材の90°付近の J_c ピークがより大きくなっていることから、90°方向を中心にピンニング特性が向上していると考えられる。一方、0°での J_c ピークは小さくなっているため、 J_c の異方性は改善される方向に推移している。YBCO+Dy線材でも、同様の結果が得られているが、 J_c ^{77K,st}が他に比べて低かったこともあり、磁場中の J_c 値そのものの顕著な向上は得られていない。

ピンニング特性の詳細について議論するため、電流-電圧 特性から J_c の統計分布パラメータ及びピンニングパラメータを 抽出した。Fig.3 に示す転移磁場 B_{GL} の温度依存性より、 (Y,Gd)BCO線材及び YBCO+Dy線材のピンニング特性が向 上していることが確認された。一方、 J_c の統計分布を見てみる みと、Fig.4 示すように、(Y,Gd)BCO線材及び YBCO+Dy線 材の J_c の統計分布が高 J_c 側に広がっている、すなわち J_c の 最小値のみならず、 J_c の統計分布の最瀕値も顕著に上昇して いることが分かる。このことは、超伝導層内の均一性を向上さ せることによる更なる高 J_c 化の可能性を示唆している。ピン力 密度や転移磁場等を含めたピンニング特性の比較の詳細に ついては、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 (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。

参考文献

[1] A. Kaneko, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.82



Fig.1 J_c -B characteristics at 65K and 77K in 90°(B//c).









Fig.4 Statistical distribution of J_c . at 77K and 3.2T.

パルス中性子を用いた高温超伝導テープ線材のひずみ測定

Stress Measurement of HTS tapes using Pulsed Neutron Source

<u>町屋 修太郎</u>(大同大); 長村 光造(応用科学研究所); 鈴木 裕士(原子力機構); ハルヨ ステファヌス(原子力機構); 伊藤崇芳(原子力機構); 土屋 佳則(物材機構)

<u>Shutaro MACHIYA</u> (Daido Univ.); Kozo OSAMURA (RIAS); Hiroshi SUZUKI(JAEA); HARJO Stefanus (JAEA); Takayoshi ITO (JAEA); Yoshinori TSUCHIYA(NIMS) E-mail: machiya@daido-it.ac.jp

1. 緒言

本年度から, 原子力機構にある J-PARC の物質・生命科学 実験施設 (MLF) において, 工学応用を目的とした TOF 法を用 いた中性子回折装置(工学材料回折装置「匠」)の共用が開始 され, 測定が可能となっている. 匠はひずみ分解能に優れて いるのみならず, TOF 法では, 複数の回折ピークが同時に測 定されるメリットがあり, 複合材である実用超伝導の測定には大 変有用である.

そこで、我々は匠において、実用超伝導複合線材の応力・ ひずみの影響というタイトルでプロジェクト研究の申請を行い、 引張荷重下で、いくつかの超伝導線材での予備的な測定を行った.本発表は、その中で DI-BSCCO-Bi2223 テープ線材と Super Power 社の SCS シリーズの YBCO テープ線材に関して の結果を報告する.

2. 試料および実験方法

用いた Bi-2223 の試料は 50 µmの Brass をインサート材の両面にラミネートしたものである. 幅 4.5 mm,厚さは約 0.36 mm であり、2 枚張り合わせたものを引張試験機に取り付け,中性子散乱実験を行った. Bi 相については,無ひずみの標準試料としてフィラメント取り出し,さらに粉末にしたものを準備した. YBCO は,幅 4.0 mm,厚さ 95µmの試料であり超伝導相の厚さは約 1µm である. こちらも同様に 2 枚張り合わせたものを引 張試験機に取り付け実験を行った.

3. 結果および考察

図1に各引張荷重下で、Bi-2223 テープ線材のスキャッタリングベクトルが試料軸方向となるように調整された、TOF による回折線図を示す. 図中では見やすいように各負荷で200カウント、強度をオフセットしている. 負荷によりピークが右側にシフトしているのがわかる. 得られたピークを格子面間隔に変換することで、各相のひずみとして評価することができる. 標準試料の無ひずみの格子面間隔 d から得られたフィラメントの無負荷での残留ひずみは、0.101%であり、JRR-3の RESA で得られた 0.081%とほぼ等しい.

図2にTOF法で得られた回折線図を示す.試料に対するス キャッタリングベクトルは,図中上側が試料の厚み方向 (Transverse),図中下側が軸方向(Axial)に相当する.Axial方 向からは軸方向ひずみ,Transverse方向からは膜厚方向のひ ずみが評価できる.図中では見やすいようにTransverseの値を 200カウント,オフセットしている.YBCOは2軸の強配向を持 つが,180度の対向した検出器を持つ匠では、ビーム軸に対し 試料を面内で45度オフセットさせることで、c軸による00X面と, a,b軸による200,020回折を同時に測定できる.

4. まとめ

本実験では、実用高温超伝導線材である BSCCO-Bi-2223 テープ線材とYBCOテープ線材において、TOF 法による回折 実験を行い、軸方向と膜厚方向のひずみ測定を行った. 各 相のひずみを測定することで、BSCCO では残留ひずみの測 定を行い、さらに負荷条件下では複合則に基づく応力分担の 推定を行った.



Fig. 1 Change of diffraction profiles along axial direction by increasing uniaxial load for Brass 3ply Bi-2223 tape.



Fig. 2 Diffraction profile using TOF method in YBCO tape.

Y 系線材の I_c-ひずみ曲線におけるピークひずみと熱残留ひずみの関係

Correlation between peak strain of Ic-strain curve and thermal residual strain in YBCO coated conductor

<u>菅野未知央</u>(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 (Chube Electric Power Co.)

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

1. はじめに

YBCO coated conductor は、磁場中での高い電流輸送特性 に加えて、Hastelloy を基板として用いた場合には弾性限が1 GPa を越える優れた機械的強度を有することから超電導磁気 エネルギー貯蔵(SMES)用コイルへの応用が検討されている。 Y 系線材を使用することにより、SMES コイルの強磁場設計が 可能となり、コイルサイズのコンパクトが期待できるとの報告が なされている[1]。Y系線材では、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。金属系超伝導体においては、Ic が最大となるひずみ(ピ ークひずみ)は、超伝導体のひずみがゼロになる値に相当す ることが知られており、この性質は温度や磁場に依らない。こ れに対して、これまでの我々の研究から、Y 系線材ではより複 雑な振る舞いが見出されている。すなわち、一定温度で磁場 を増加させた場合に、ピークひずみが一旦増加し、その後減 少することが確認されている[2]。このことは、Y 系線材におけ るピークひずみの起源が従来型の線材からの類推では理解 できないことを示唆している。今回は、Y系線材のIc-ひずみ特 性を20K~83Kまでの広い温度範囲に渡って測定し、ピーク ひずみと熱残留ひずみをより定量的に比較した結果について 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 µm) /MOCVD-YBCO (0.1 µm) /PLD-CeO₂ (0.4 µm) /IBAD-Gd₂Zr₂O₇(1µm) /Hastelloy C-276 (100µm)となって いる。括弧内の数値は各層の厚さを表す。通電による測定 中の温度上昇を抑えるため、YBCO 膜厚の薄い線材を用い た。*I_c*-ひずみ測定は、我々が開発した磁場温度可変環境下 でのひずみ特性測定装置を用いて行った[2]。目標温度よ りも 0.5~2 K 低い一定温度に設定したヘリウムガスをフ ローし、さらに線材表面上の温度センサーの値を目標値に Cu 製の電磁力サポート板内のヒーター出力を調整して温 度コントロールを行った。温度の精度は約±0.1 K以下で あった。試料温度は 20 K~83 K の範囲で変化させた。ひ ずみの値は線材に直接取り付けた対称型伸び計により測 定した。

3. 実験結果

本研究で用いた線材の自己磁場中での $I_c(J_c)$ は 77.3 K で 17 A(1.7 MA/cm²)、20 K で 128 A(12.8 MA/cm²)であった。 また、77.3 K で行った I_c -ひずみ測定の結果から、不可逆ひずみ 炎 ϵ_{irr} =1.11%と求められた。これらの結果を元に、可逆ひずみ 範囲内である 0~0.7%で、自己磁場中、様々な温度において I_c -ひずみ特性を測定した Fig. 1 に示す通り、60 K 以上では、 温度による特性の変化が顕著に観察されている。すなわち、 高温ほどひずみによる I_c の抑制が顕著に起こることが確認さ れた。具体的には、0.7%での、ゼロひずみ状態の $Ic(I_{c0})$ で規 格化した $I_c(I_cI_{c0})$ は、70 K、77.3 K、83 K の各温度に対して、 0.91、0.86、0.64 であった。一方、60 K 以下では、0.7%で I_c/I_{c0} ~0.94 であった。このように従来から報告がある液体窒素温度



Fig. 1 I_c -strain curves measured at various temperatures in self field.

よりもより低温で、ひずみによる *I_c* の抑制が小さくなるという知見が得られた。

Fig. 1 の各曲線を式(1)でフィッティングすることにより、ピーク ひずみを評価した。

$$\frac{I_c(T,\varepsilon)}{I_c(T,\varepsilon=0)} = \frac{1-a(\varepsilon_a - \varepsilon_p)^2}{1-a(-\varepsilon_p)^2}$$
(1)

ここで、フィッティングパラメータは a、 ε_ρ であり、それぞれ曲線 の曲率とピークひずみに相当する。解析の結果、ピークひず みは低温ほど圧縮側に大きくなる傾向を示し、20 K と 77.3 K の値の差は、-0.358%であった。一方、Hastelloy と YBCO の ab 面内での線膨張率の差から算出した両温度での熱残留ひ ずみの差はわずか-0.06%であった。これらの結果から、ピーク ひずみの移動は、熱残留ひずみの変化と比較して、絶対値が 大きいだけではなく、ひずみの符号も逆であるが明らかになっ た。つまり、Y 系線材のピークひずみの温度による変化は熱残 留ひずみでは説明できないことが定量的に確認された。

参考文献

- 1. Higashikawa et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) 1990.
- 2. Sugano et al, SUST, Vol. 21 (2008) 115019.

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。

IBAD/PLD 法により作製された GdBCO 線材の磁界環境下における 一軸機械歪依存性の評価

Estimation of in-field axial strain dependence in GdBCO coated conductors fabricated by IBAD/PLD process

<u>今村和孝</u>, 東川甲平, 井上昌睦, 木須隆暢(九大); 福島弘之, 衣斐顕, 宮田成紀, 山田穰, 和泉輝郎(SRL) <u>K. Imamura</u>, K.Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss(Kyushu Univ); H.Fukushima, A.Ibi, S.Miyata, Y.Yamada, T.Izumi(SRL) 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 440A の 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、GdBCO 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評価した。

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

実験で得られた *E*-*J*特性を用いてパーコレーションモ デル(1)に基づくピンニング特性解析を行った。各歪率での 磁束グラス-液体転移磁界 *B_{GL}*の値を Fig.1 に示す。歪の印 加にともない *B_{GL}*が変化しており、Ekin によって示され た金属系線材のスケーリング則⁽²⁾と類似する結果が得ら れた。

実験より得られた Jc およびスケール則により求めた Jcの歪み依存性を Fig.2 に示す。引張・圧縮歪の印加にとも ない J_c が低下している。また、1T 程度の低磁界では自己 磁界中に比べ歪みの影響による J_c の低下率は比較的小さ いが、2T 以上では印加磁界が大きくなるにつれて、 J_c の 低下率が大きくなっており、5T では最大約 20%の J_c の低 下がみられる。 B_{GL} が歪みにより減少する事が高磁場側で の J_c の歪依存性の増大の要因と考えられる。ピンニング 特性等の詳細については当日報告する。



AXIAI Strain, E [%]



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。

参考文献

1.T.Kiss et al., : Applied Superconductivity, Institute of Physics Conference Series(158), 1121-1124(1997)2. J.W.Ekin : Cryogenics 30, 823 (1984)

RE123における点欠陥の要素ピニングカと不可逆磁場

Relationship between Irreversible Fields and Elementary Pinning Forces by Point Defects in RE123 <u>石井悠衣</u>, 赤坂友幸, 荻野拓, 下山淳一, 岸尾光二 (東大院工); 堀井滋 (高知工大); 淡路智 (東北大金研) <u>Yui Ishii</u>, Tomoyuki Akasaka, Hiraku Ogino, Jun-ichi Shimoyama and Kohji Kishio (Univ. Tokyo); Shigeru Horii (Kochi Univ. of Technol.); Satoshi Awaji (Tohoku Univ.)

E-mail: tt077126@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (Y. Ishii)

【はじめに】希土類(RE)123 超伝導材料の磁場中ピニング 特性向上を目的とし、主に非超伝導相の導入をはじめとし たピニングセンターの導入が試みられてきた。これらの材 料設計においては、できるだけコヒーレンス長(とか)と同程 度の大きさを持つピンの導入に主眼がおかれてきた。しか しながら、酸素欠損や双晶など結晶構造に特有なピニング センターを含み、Tcが高い反面高温でのクリープが速いこ の物質において、Jcに影響する要素は多様であり、結晶が 含む各々のピンの要素ピニング力の温度依存性が、Jcの温 度依存性に与える影響は十分理解されていない。また最近 では、酸化雰囲気中ではイオン半径の十分小さな Y にお いてもY1+xBa2-xCu3Ovで表される金属不定比性を示すこと が報告されている[1]ことから、RE123の材料設計には結 晶中に含まれる固有な点欠陥的ピンによる要素ピニング 力の性質を理解することが重要である。そこで本研究では、 Ba サイトへの Gd 置換領域により結晶の ab 面方向に数 10 nm 程度の大きさのピンを含むと考えられる[2]Gd123 単結 晶と、実効的なピンの大きさがコヒーレンス長より小さい と考えられる Sr および Co ドープした Y123 単結晶[3]を用 い、十分酸素アニールを行って酸素欠損量を減らした試料 について Jcの温度・磁場依存性や不可逆磁場(Hirr)を評価 した。さらに巨視的ピニング力密度の温度依存性について、 凝縮エネルギー相互作用に基づいて要素ピニング力(fp)の 温度依存性を解析し、実験結果と比較した。

【実験方法】BaZrO₃ 坩堝を用いた自己フラックス法によ り空気中で Y123 単結晶と Gd123 単結晶を育成した。Sr および Co ドープした Y123 単結晶については、あらかじ めそれらを所定量添加したフラックスを用いて結晶育成 を行った。Y123、Gd123 単結晶についてそれぞれ、 500~375°C, 400~300°C で酸素アニールを行った。超伝導特 性は SQUID 磁束計および VSM による磁化測定により評 価した。 $H_{\rm irr}$ は、 $J_{\rm c}$ = 100 Acm⁻²を閾値として決定した。

【結果と考察】作製した単結晶はいずれも90 K 以上の高 い *T_c* と鋭い超伝導転移を示し、undoped Y123, Sr-doped Y123, Co-doped Y123, Gd123 単結晶の *T_c*(onset)はそれぞれ 91.9, 90.6, 91.6, 93.3 K だった。またアニール温度に対する *T_c*の変化から、最終的に 375°C および 300°C でアニール した Y123、Gd123 単結晶はキャリアの弱いオーバードー プ状態に調節されていることがわかり、*J_c-H* 特性からはこ れらの試料で酸素欠損量が十分減らされていることを確 認した。

これらの試料について、各測定温度での 30 kOe におけ る *J*_cを比較したところ、Sr-, Co-doped Y123 単結晶では温 度の低下に伴い急激に *J*_cが増加した一方で、Gd123 単結

晶は、77 K以上では高いJ。を示したにもかかわらず、温 度の低下に伴う J_cの増加は大きくないことがわかった。 この傾向は10kOe,20kOeにおいても同様であった。さら に、これらの試料について Hirrを規格化温度 t (=T/T_c)に対 してプロットしたところ、Fig.1に示したようにSr, Coド ープした試料のほうが Gd123 単結晶よりも大きく温度に 依存することがわかった。また、Gd123 試料の Hirr は Tc 近傍では確かに高いものの、およそ83K以下ではundoped Y123 試料よりやや低くなった。これについて、凝縮エネ ルギー相互作用に基づき、Gd/Ba 置換領域、Sr, Co 置換領 域の、ピンとしての実効的な大きさをそれぞれ数 10 nm、 1 nm として要素ピニング力の温度依存性を計算したとこ ろ、*ξab* が温度の低下とともに短くなることを反映して、 ピンの大きさが2ξabより小さい場合に温度の低下に伴うfn の増加が急峻であることがわかった。これはJ_cやH_{irr}の温 度依存性と定性的に一致するものである。

ナノサイズのピンの f_p について、その温度依存性はこれ まであまり重視されてこなかった。しかしながら以上の結 果は、これらが RE123 のピニング特性に対し幅広い磁場 領域で大きな影響を与えていることを強く示唆する結果 であり、RE123 において J_c の温度依存性が結晶中の格子 欠陥によるピニング特性を反映しているといえる。



Fig. 1 H_{irr} for the undoped, Sr-doped and Co-doped Y123 single crystals and Gd123 single crystal plotted against the normalized temperature t (= T/T_c).

【参考文献】

[1] 下山ほか、第 56 回春季応用物理学関連連合講演会 (2009), [2] T. Egi et al., Appl. Phys. Lett. 67, 2406 (1995), [3] Y. Ishii et al., Appl. Phys. Lett. 89, 202514 (2006)

重イオン照射した RE123膜の高磁場臨界電流密度特性 J_c properties in high magnetic fields for the heavy-ion-irradiated RE123 films

難波 雅史, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大); 甲斐 英樹, 向田 昌志 (九大); 岡安 悟 (原子力機構)

NAMBA Masafumi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

KAI Hideki, MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.) ; OKAYASU Satoru (JAEA)

E-mail : baji@imr.tohoku.ac.jp

【はじめに】 REBa₂Cu₃O_y (RE123) 薄膜線材 (coated conductor)では臨界電流密度 J_c 向上のため、人工ピンが積極的に導入されている.特に BaZrO₃ ナノロッドに代表される B//c軸方向の J_c を向上させる柱状欠陥に対する関心が高まっている.柱状欠陥を導入した単結晶、薄膜の J_c 特性は、柱状欠陥の密度相当の磁場 (マッチング磁場)以下で有効に働くことがこれまで分かっている.しかしながら、RE123 薄膜線材は、マッチング磁場より高い高磁場領域での応用が期待されているため、高磁場領域における J_c 特性を詳細に調べる必要がある.本研究では、重イオン照射により柱状欠陥を導入した Er123 膜について、臨界電流密度の温度、磁場、磁場の角度依存性を調べた.

【実験方法】 試料は、PLD 法により成膜した Er123 膜(T_c = 90.8 K)に重イオン(200MeV Au¹³⁺)を照射した薄膜である. 照射欠陥密度は、マッチング磁場換算で 1 T とした. さらに、 重イオン照射を c 軸に平行方向(CD1T Er123 film, T_c = 88.1 K)、及び c 軸から 23° 傾いた方向(CD1T-tilt Er123 film, T_c = 88.4 K)に照射した. これらの薄膜をブリッジ状に成形し、直流 4 端子法を用い、臨界電流密度の温度、磁場、磁場の角度依 存性を定量的に評価した. 臨界電流密度は 1 μ V/cm の電界 基準で決定した. 印加磁場は最大 17 T で、磁場の印加角度 は B//c 軸方向を θ = 0° とした.

【実験結果と考察】 Fig. 1 に CD1T Er123 film と CD1T-tilt Er123 film の 60 K, 9 T, 及び 17 T における J_c の磁場印加角 度依存性を示す.両試料の B//ab 面方向 ($\theta = 90^\circ$)付近の J_c は磁場によらずほぼ一致した.すなわち,両試料はランダムピ ンニング特性がほぼ同じ試料と位置付けられる.加えて, B//c軸方向 ($\theta = 0^\circ$)付近には,重イオン照射の照射方向に依存し た鋭いピークが存在した.これは,柱状欠陥が相関ピンとして 有効に働き, J_c を向上させたためである.照射方向のピーク高 さは,磁場の増加に伴い減少したが,17 T においてもピーク は存在した.

次に、Fig. 1 より 60 K、17 T においても J_c を向上させる柱状 欠陥の温度による影響を Fig. 2 に示す. Fig. 2 は CD1T-tilt Er123 film の柱状欠陥を導入した方向(23°)、及び反対方向 (-23°)の 17 T における J_c の温度依存性である. この差が柱状 欠陥による J_c 向上に対応している. Fig. 2 より、マッチング磁場 よりはるかに高い 17 T においても柱状欠陥が不可逆磁場近 傍の 70 K から約 10 K の低温領域にわたり, 有効に働くことが 分かった.

謝辞

本研究は科研費(20-6749)の助成を受けたものである.



Fig. 1 Field angular dependence of J_c at 60.0 K and 9, 17 T for the CD1T Er123 film and the CD1T-tilt Er123 film.



Fig. 2 Temperature dependence of J_c at 17 T and 23, -23° for the CD1T-tilt Er123 film.

PLD-Y123 及び Gd123 線材のピン止め特性: 重イオン照射欠陥とBaZrO₃ナノロッドの比較

Pinning properties of PLD-Y123 and Gd123 coated conductors:

comparative study of irradiation-induced columnar defects and BaZrO3 nano-rods

<u>筑本 知子</u>, セルゲイ リー, 衣斐 顕, 田辺 圭一(超電導工学研究所);宇敷 洋、寺井 隆幸(東京大学) <u>CHIKUMOTO Noriko</u>, LEE Sergey, IBI Akira, TANABE Keiichi (ISTEC-SRL); USHIKI Hiroshi, TERAI Takayuki (Univ. of Tokyo) E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

PLD法Y123(又はGd123)の高 J。化のためには、BaZrO3 (BZO)添加等により形成されるナノロッド状ピン止め中心が有 効であることが知られている。しかしながら、BZO 添加による 方法では、ピン止め中心の形状、密度、方位の制御が困難で あり、そのピン止め特性にそれぞれのパラメーターがどのよう に効いてくるのか明確化しにくい。そこで、本研究では、ピン 止め中心の形状、密度、方位等のコントロールが比較的容易 な重イオン照射を用いて円柱状アモルファス欠陥を導入し、 臨界電流の磁場角度依存性、欠陥密度依存性等について系 統的な測定を行った。本報告では、その結果を示すとともに、 BZO 添加試料の特性との比較・考察を行う。

2. 実験方法

重イオン照射実験には PLD(Pulsed Laser Deposition)法によ りCeO₂/ IBAD-Gd₂Zr₂O₇/ハステロイ基板上に成膜を行った Y23 と Gd123の2種類の線材を用いた。Y123 については超 電導層の厚さの影響を調べるために、0.8-2.25µmの範囲で 厚さを変えた試料を準備した。それぞれの線材から 2mm×50mm 程度の試料を切り出し、重イオン照射部位のみ Ag 層をケミカルエッチングにより除去した。重イオン照射は、 日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の AVF サイ クロトロンを用い、450MeVの Xe²³⁺を c 軸に対して平行に照射 した。一般に重イオン照射によって生成する欠陥サイズ及び 形状は,入射イオンの電子的阻止能、S[keV/nm]、によって決 まるといわれている。ここでは、2.5-10µm の銀箔を超電導層 の上面(入射側)に置く事で S。値の制御を行った。TRIM コー ドを用いて計算した銀箔の厚さと超電導層上面(x=0)及び下 面(x=0.08, 2.25µm)での Se値の関係を Fig.1 に示すが、この 方法により S。値を 20 から 30.8keV まで変化させることが可能 である。試料は照射前後について、通電法で」の磁場依存性 および磁界角度依存性の評価を行った。

3. 実験結果

Fig.2 に Ag 箔 2.5 μ m、照射フルエンス 7.5×10¹¹ ions/cm²で照射を行った時の Y123 膜(膜厚:2.25 μ m)の 1 T 及び 3 T の磁場中での J_c の磁場角度依存性を示す。照 射により c 軸方向(θ =0°)の J_c が大きく上昇し、導入 された欠陥が強いピン止め中心となっていることがわか る。一方、B_a//ab(θ =90°)の J_c の減少が見られた。

c軸相関ビンの導入によって、θ=90°のJ_cピークが小 さくなる現象は、BZO導入試料等においていくつかのグル ープから報告されている。θ=90°のJ_cピークについては、 一般には酸化物超電導体特有の層状構造による intrinsic pinningあるいは積層欠陥等によるピン止めが 起源といわれている。重イオン照射により積層欠陥の数 は変化していないと考えられることから、θ=90°のJ_c ピークの減少の起源について、照射欠陥の導入により生 じた格子ひずみ等で超電導相の凝縮エネルギーが減少し たことの他、直交する c軸相関ピンの導入によって、ab 方向のピン止めの次元性が低下する等で実効的なピンポ テンシャルが減少したことが考えられる。

超電導膜厚依存性や銀箔の厚さ依存性等については、 当日報告する。

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」の一環として実施された。



Fig.1 Dependence of $S_{\rm e}$ value on the thickness of Ag foil. x is the distance from the Y123 surface.



Fig.2 Field angular dependence of J_c at B_a =1T and 3T for Y123 before (open symbols) and after (closed symbols) irradiation $(7.5 \times 10^{11} \text{ ions/cm}^2)$ measured at 77K.

Ba/Sm-Zr-O を添加した SmBa₂Cu₃O_{7-x}薄膜の微細構造と磁束ピンニング特性

Flux pinning properties and microstructure in SmBa₂Cu₃O_{7-x} thin film doped with (Ba,Sm)-Zr-O

<u>吉田 隆</u>, 一野 祐亮, 滝沢 智生, 高井 吉明(名大工); 一瀬 中(電中研);

松本 要(九工大工); 向田 昌志(九大工); 堀井 滋(高知工大工);

YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, TAKIZAWA Tomoo, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);

ICHINOSE Ataru (CRIEPI); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.); HORII Shigeru (Kochi Univ. of Tech.);

MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.)

E-mail: yoshida@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

最近、磁場中超伝導特性向上を目的とした、人工ピン導入の超伝導薄膜や超伝導線材の研究が報告されている。特に、 BaZrO₃(BZO)を添加した REBCO 薄膜は BZO が c 軸方向にロッド状に自己組織化し、c 軸方向に強力な磁束ピンニング特性を示すことが知られている。また、我々は、蛍石構造をもつSm₂Zr₂O₇(SmZrO)を添加した SmBCO 薄膜を作製し、様々な方向の磁場に対して有効な磁束ピンニング点として機能する粒状の析出物(3D-PC:3 次元ピンニングセンター)が導入されることを報告した。

本報告では、磁場印加方向に対する超伝導特性の異方性の制御を目的として、SmZrOとBaZrOの2種類の磁束ピンニング材料を添加した SmBCO 薄膜を作製し、その微細構造及び超伝導特性を比較した。

2. 実験方法

SmBCO+(Ba/Sm)ZrO 薄膜は PLD 法(KrF エキシマレー ザ: $\lambda = 248$ nm)を用いて、MgO(100)単結晶基板上に基板温 度(T_s) 900°C、酸素圧力(pO_2) 0.4 Torr で作製した。なお、本 研究で作製した薄膜の膜厚は 500~600 nm とした。添加した Zr 酸化物を Sm/Ba 組成比 z を用いて(Sm_{1-z}Ba₂)-Zr-O(SBZO) と表記する。つまり、SmZrO、BZO はそれぞれ SBZO(0.0)及 び SBZO(1.0)、SmZrO+BZO は SBZO(0.5)と表記される。微細 組織観察に透過電子顕微鏡(TEM)、組成分析に走査透過電 子顕微鏡(STEM)を用いた。また、臨界電流密度(J_c)及び臨 界温度(T_c)を直流四端子法により測定した。

3. 結果及び考察

SmBCO+SBZO 薄膜は、SBZO 添加量に伴い J_c は 2.8 MA/cm²から 1MA/cm²(77K,s.f.)、 T_c は 92.4 Kから 89.6 Kに変化した。次に自己磁場中の $J_c(J_c^{s.f.})$ で規格化した J_c 値を用いて、磁場印加方向に対するピンニング力の異方性について検討した。図 1 に SBZO(z)を添加した SmBCO 薄膜の



Fig.1 Magnetic field angular dependence of J_c in PLD-SmBCO+(Ba/Sm)-Zr-O film.

 $J_c/J_c^{\text{sf.}}$ の磁場印加角度依存性を示す。比較のため無添加の SmBCO 薄膜の値も示す。SmBCO+SBZO (1.0)薄膜と SmBCO 薄膜を比較すると、SBZO(1.0)を添加した薄膜の $J_c/J_c^{\text{sf.}}$ 値は B//c 方向の磁場に対し大きなピークを示した。 SmBCO+SBZO(0.5) 薄膜 に注目すると、SmBCO+S BZO(0.0)薄膜に比べ、強い c軸相関ピンが確認され、また、 SmBCO+SBZO(1.0)薄膜と比べ、全磁場領域でピンニング 力を向上していることが分かる。

図2にSmBCO+SBZO(0.5)薄膜の断面TEM像を示す。 BZOと考えられるナノロッド状の析出物(a部)とSm-rich、 Ba-poor な粒状の析出物(b部)が観察された。この粒状の 析出物は、SmBCO+SBZO(0.0)薄膜で観察されたものと同 様の析出物であると考えられる。これまで報告されてき たREBCO+BZO(BSO)では、ナノロッドは基板界面から膜 表面まで c軸方向に成長している。しかし、図2の微細 構造でも確認できるように、SmBCO+SBZO(0.5)薄膜では、 数十 nm 程度の長さに断続的に成長していることが確認され た。図3にSmBCO+(Ba/Sm)ZrO 薄膜の(Ba/Sm)組成比の違 いによる微細構造の概念図を示す。(Ba/Sm)組成比でナノロ ッド形状を変化させることができ、磁場印加角度に対す る超伝導特性の異方性の制御が可能であることが分かっ た。

4. 謝辞

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



Fig. 2 Cross-sectional TEM image of PLD-SmBCO+(Ba/Sm)-Zr-O film.



PLD-SmBCO+(Ba/Sm)-Zr-O film.

異なる成膜温度で作製した BaZrO₃ 添加 Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y 薄膜の 磁束ピンニング特性と微細構造観察

Flux pinning properties and microstructures of BZO-doped $Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_y$ thin films

prepared at various deposition temperatures

 <u>尾崎</u>壽紀,吉田隆,一野祐亮,高井吉明(名大工);一瀬中(電中研); 松本要(九工大工);向田昌志(九大工);堀井滋(高知工大);
 <u>OZAKI Toshinori</u>, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.);
 HORII Shigeru (Kochi Univ. of Tech.); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.) E-mail: ozaki_t@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_v (REBCO) 膜において、磁場中での臨界電流 密度(Jc)を向上させるために、ナノ組織制御により膜中に人工 ピンニングセンター(APC)を導入する研究が世界中で行われ ている。その中でも REBCO 膜における B//c 方向の磁束ピン ニング特性を著しく向上させる BaZrO3 (BZO)ナノロッドは、非 常に有効な c 軸相関ピンであることが知られている。これまで 我々は、低温成膜(LTG)プロセスを用いて作製した LTG-SmBCO 薄膜に BZO ナノロッドを導入した LTG-SmBCO+BZO 薄膜を作製してきた。LTG-SmBCO+BZO 薄膜における BZO ナノロッドは通常の PLD 法 で作製したBZOナノロッドより、直径が小さく、長さが短くなり、 更に SmBCO 薄膜の c 軸方向に対して斜めに成長することが 分かった[1]。本研究では、低い成膜温度でも c 軸配向する LTG プロセスを用いることにより異なる成膜温度で SmBCO+BZO 薄膜を作製し、成膜温度が SmBCO+BZO 薄 膜の超伝導特性や BZO の成長に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

試料は PLD 法(KrF, λ =243 nm)を用いて、MgO(100)基板 上に作製した。BZOを添加した SmBCO (SmBCO+BZO)薄膜 は、基板温度(T_s) 890°C でシード層(Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_y)を作製 し、その上に $T_s = 800-920$ °C で BZO を添加した Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_yの超伝導層を作製した。なお、本研究で Sm_{1.04}Ba_{1.96}Cu₃O_y ターゲットに添加した BZO の混合量は 2 vol.%とした。

評価方法は、得られた薄膜の結晶構造を X 線回折法 (XRD)、超伝導特性は直流四端子法を用いた。超伝導薄膜 の微細組織観察は透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて断面 TEM 観察を行った。

3. 結果及び考察

XRD の結果からすべての SmBCO+BZO 薄膜は、c 軸 配向し、(005)面ロッキングカーブからは BZO を添加し たことによる結晶性の大きな低下はみられなかった。ま た、成膜温度の低下に伴い T_c は 91.5 K から 90.5 K まで 低下し、自己磁場 J_c は 2.9 MA/cm² から 1.5 MA/cm²まで 低下した。

Fig.1 に不可逆磁場(B_{irr})の温度依存性を示す。B=3T以上の高磁場においては、 B_{irr} の増大率はほとんど同じであることから、B=3T以上における c 軸相関ピンの振る舞いに大きな変化はないと考えることができる。一方、B=2T以下の磁場においては、B=1-2Tにおける B_{irr} の増大率が成膜温度の低下にともない増加している。これは、成膜温度の低下に伴い BZO ナノロッドの密度が増加したことによりB=2T付近の磁束ピンニング特性が向上したためと推察される。

Fig.2 に成膜温度を変化させたときの SmBCO+BZO 薄膜における J_cの磁場依存性(77 K, B//c)を示す。矢印で 示すように、すべての膜において J_c のブロードなピーク が確認でき、成膜温度の低下に伴い B = 0.5 T から 2.5 T までピークが高磁場にシフトしていることがわかる。こ れは、成膜温度が低下することにより BZO ナノロッド の密度が増加したためと考えられる。また、この結果か ら BZO の添加量を変化させなくとも成膜温度を制御す ることにより BZOナノロッドの密度を制御することで、 磁束ピンニング特性を制御できることが示唆される。



Fig. 1 Irreversibility line SmBCO including BZO nanorods films prepared at various deposited temperature for B//c.



Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c for SmBCO including BZO nanorods films prepared at various deposited temperature at 77 K.

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005, 20686065)の助成を受けて実施されたものである。また、本研究の一部は(独)日本学術振興会の特別研究員奨励費(20・ 1311)の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

 T. Ozaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.16

極薄 X(X:Ni,B) 層を人エピンとして導入した MgB2薄膜のマッチング磁場とX 層間隔

Relationship between the interlayer distance and matching fields for very thin X-layer inserted MgB₂ thin films (X: Ni, B) as artificial pinning layers

土井 俊哉, 白樂 善則(鹿児島大); 北口 仁, 高橋 健一郎(物材機構)

DOI Toshiya, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima Univ.); KITAGUCHI Hitoshi, TAKAHASHI Kenichiro (NIMS)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

ニホウ化マグネシウム (MgB₂)は、金属系超伝導体の中で 最高の超伝導転移温度 (T_c =39 K)を有している。また、構成 元素が 2 種類と少ないことから組成制御が比較的容易である と考えられ、更に構成元素である Mg と B はいずれも資源的に 豊富で安価であり、環境にも優しい。このようなことから、実用 化に向けて精力的に研究開発が行われている。

我々は、MgB₂ 中のピンニングセンターについての研究を系 統的に進めてきており、これまでに柱状結晶の粒界[1], B リッ チ組成によって導入された欠陥[2], MgO[3,4], 薄い Ni 層 [5,6]や B 層[7]が有効なピンニングセンターとして働くことを報 告してきた。今回、MgB₂ 薄膜中に異なる間隔で導入した極薄 Ni 層, B 層の挿入間隔とマッチング磁場の大きさの関係につ いて報告する。

2. MgB2/X 多層膜の作製方法

MgB₂/X(X:Ni,B)多層膜は, Coaxial Vacuum Arc Deposition (CVAD)銃を備えた電子ビーム蒸着装置によって作製した。基 板温度は相互の拡散や反応を避けるため 250℃とした。 MgB₂/Ni多層膜は, MgB₂層を15又は22, 31nm形成した後, Ni 層を 1nm 形成した。これを繰り返し,トータル厚さ約 300nm の3種類のMgB₂/Ni多層膜を作製した[6]。また, MgB₂/B多層 膜は, MgB₂層を 15nm, B 層を 5nm として作製した。比較のた めに, 同様の条件で 16nm 厚さの MgB₂層を 20 回積層した MgB₂ 単層膜も作製した。また,得られた試料は Ni 層と MgB₂ 層の間の反応や拡散も無く,綺麗な多層膜が得られているこ とを確認している。

3. 結果と考察

図1に, Ni 層挿入間隔を32, 23, 16nm である MgB₂/Ni 多層 膜の Ni 層に平行に磁場を印加して4.2K で測定した J_cから求 めた体積ピンカ F_pの磁場依存性を示す。Ni 層間隔 32nm の 試料では2T, 23nm の試料では3.5T, 16nm の試料では6T に 明確なピークが存在する。この印加磁場は超伝導薄膜内部に 侵入した量子化磁束線格子の間隔とよく一致している。従っ て、挿入した Ni 層は強いピンニングセンターとして働いている ことが分かる。ここで Ni 層間隔 23nm の結果に注目する。21nm の半分の 11.5nm 及び2倍の 42nm の量子化磁束線格子に相 当するマッチング磁場は、14 及び 1T である。しかしながら印 加磁場が 1T の位置にも、14T の位置にもピークは観測されて いない。これは、1T 以上といった非常に大きな磁場が印加さ れた場合でも、即ち、磁場侵入長を考慮した場合に隣接する 量子化磁束線同士がほぼ重なってしまうような状態において も、量子化磁束線は単独で存在し、三角格子を組んでいるこ とを示唆しているものと考えられる。



本研究の一部は財団法人岩谷直治記念財団科学技術助成 金の支援により実施された。

- [1] H. Kitaguchi et.al., APL 85(2004)2842.
- [2] K. Nagatomoet.al., Physica C 426-431(2005)1459.

[3] M. Okuzono et.al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15(2005)3253.

- [4] M. Harutaet.al., JAP 102(2007)076114-1
- [5] K. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett.92(2008)102510.
- [6] K. Takahashi et al., SuST. 22(2009)025008.
- [7] 山下ら,低温工学 44(2009)126.

強いピン止め力を有する超伝導バルク体を用いたパルス着磁における捕捉磁場特性

Trapped Field Properties for Superconducting Bulks with Strong Pinning Force by Pulse Field Magnetization

<u>三浦 崇</u>,藤代 博之,内藤 智之(岩手大工) <u>MIURA Takashi</u>, FUJISHIRO Hiroyuki, and NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.) (E-mail:fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

ー定温度で行う磁場中冷却着磁(FCM)においては、超伝導バル ク内のピン止め力 F_p (または臨界電流密度 $_L$)の増加により捕捉磁 場 B_r 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、ピン止め力の大きなバルクでは、ピン止め損失 による大きな発熱も考えられ、ピン止め力と捕捉磁場の関係には検 討すべき点が多い。これまで我々は、強いピン止め力を有する ϕ 45 mm の Gd 系超伝導バルク (B_r (FCM)=1.8 T at 77 K: SRL-ISTEC 製を用いてパルス着磁を行い、 B_r =4 T を超える捕捉磁場を実現し ている[1]。本研究では、さらにピン止め力の強い ϕ 36 mm の Gd 系 超伝導バルク(B_r (FCM)=1.79 T at 77 K SRL-ISTEC 製を用いてパ ルス着磁を行った。FCM の結果との比較や、温度上昇結果を参考 に、ピン止め力の強いバルクの PFM 特性について考察した。

<u>実験と検討</u>

PFM は、T_s=20 K~40 K に伝導冷却した ϕ 36 mm の Gd 系バル クに、ソレノイド型パルスコイルを用いて、単一又は複数回の同一 パルス磁場(B_{er}=4.0~6.0 T)を印加して行った。また、FCM は超伝 導マグネットを用いて、超伝導転移温度 T_o以上の温度でバルクに 静磁場(B_{er}=3.0 T)を印加して T_s=40~80 K まで伝導冷却して行った。 PFM ではバルク表面から0.5 mm、4.0 mm 上方の磁場分布を、FCM では 4.0 mm 上方の捕捉磁場分布を測定した。

図1に、T_s=20KでB_{ac}=3.51,4.68,5.27,6.37Tのパルス磁場を 印加した時のバルク表面から0.5mm上方の捕捉磁場分布を示す。 印加磁場の違いによって捕捉磁場が最大となる場所が異なる。これ は、バルク内の温度依存性を含めたピン止め力の不均一性を表し ている。印加磁場B_{ac}=3.51Tの時、磁束はバルク中心まで侵入する ことが出来ないが、B_{ac}=4.68Tを超えると磁束はバルク中心まで侵 入し捕捉する。B_{ac}=5.27Tの時、最大捕捉磁場はB_{MAX}=3.00Tであ った。B_{ac}=6.37Tの時、大きな温度上昇のためバルク内で捕捉磁場 が逃げ、捕捉磁場分布は他とは異なる結果となった。図2に図1の 捕捉磁場分布の縦方向の断面を示した。印加磁場 B_{ac}の増加に伴 って不均一が顕著になり、捕捉磁場 B_Tが減少していることがわかる。また、 同一パルスを印加した3発目では、温度上昇の低下により捕捉磁場 は大きく増大したことが分かる。

図3にT_s=20KでのPFMの温度上昇の印加磁場依存性を示す。 印加磁場の増加に伴い最高温度も増加し、6Tの印加で60Kまで バルク温度は上昇する。B_{ex}=4.0Tの時、図1(a)からバルク中心に 磁束が侵入していないが、バルク中心での温度上昇が大きくなっ た。当日は、FCMの捕捉磁場分布の結果と比較することによって、 パルス着磁によって明らかになるバルク内の不均一性を報告する。

参考文献

[1]日山ほか、2007 年度秋季 低温工学・超電導学会講演概要集 [3C-a06]



Fig. 1. Trapped field profiles at $T_s=20$ K on the GdBaCuO bulk 36 mm in diameter after applying the pulse field of (a) $B_{ex}=3.51$ T, (b) $B_{ex}=4.68$ T, (c) $B_{ex}=5.27$ T and (d) $B_{ex}=6.37$ T.



Fig. 2. The cross sections of the trapped field profiles on the bulk at 20 K for various pulse field applications.



Fig. 3. The maximum temperature T_{max} during PFM at $T_s=20$ K, as a function of applied pulsed field Bex.

複数パルス磁場印加による大型超伝導バルクの総磁束量の増大効果

Enhancement of total trapped flux on large HTSC bulk magnetized by multi pulse technique

<u>藤代博之</u>,欠端浩介,内藤智之(岩手大工),柳 陽介,伊藤佳孝(イムラ材研) <u>FUJISHIRO Hiroyuki</u>, KAKEHATA Kousuke, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.), YANAGI Yousuke and ITOH Yoshitaka (IMRA Material R&D) (E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

<u>はじめに</u>

Beanの臨界状態モデルによると、超伝導バルクの臨界 電流密度 \mathcal{A} が等しいならば、磁場中冷却着磁(FCM)によ るバルク中心での捕捉磁場 Br^{FC} は直径 dに比例し、総磁 束量 σr^{FC} は直径 dの三乗に比例するため、大型超伝導バ ルクへの期待は大きい。しかし、直径 60 mm を越える大 型バルクをパルス着磁(PFM)する場合、捕捉磁場 Br^{P} の向 上のためには大きな磁場パルスを印加しなければならず、 装置の制約上難しいという問題があった。本研究では、大 型バルクの長所を生かして直径 65 mmの超伝導バルクへ 複数パルス磁場印加(SPA+IMRA 法)による総磁束量 σr^{P} の向上を検討し、FCM による総磁束量 σr^{FC} との比較を行 った。さらに、同一バルクを用いて PFM における温度上 昇を測定し、得られた捕捉磁場や総磁束量の結果に対して 温度上昇の観点から考察した。

実験と検討

直径 65 mm の Gd 系超伝導バルク($BT^{FC}=1.92$ T at 77 K、 $BT^{P}=3.0$ T at 40 K by MMPSC 法[1])は、冷凍機を用 いて $T_{s}=40$ K または 60 K に冷却し、同一パルス磁場 B1=6.6 T を 3 回印加後(SPA 法)、印加磁場を徐々に低減しな がら合計 13 回のパルス磁場を印加する SPA+IMRA 法に より着磁した。図 1 に $T_{s}=40$ K、B1=6.6 T で行った場合 の、バルク表面から 0.5 mm 上部における捕捉磁場分布 $BT^{P}(0.5mm)$ の印加パルス回数依存性を示す。 $T_{s}=40$ K で はピン力が強いため、B1=6.6 T の磁場印加では中心まで 十分に磁束が進入できず、凹型の磁場分布となる。その後 IMRA 法を適用することで周辺部に多くの磁束が捕捉さ れ、最終的に総磁束量は飽和する傾向が見られる。

図2には図1と同一の着磁したバルクを、バルク表面から4mm上部で測定した捕捉磁場分布 B_{T} P(4mm)の印加パルス回数依存性を示す。0.5mm上部での凹型の磁場分布は、4mm上部では台形型になるが、中心での磁場強度は殆ど減衰していないことが分かる。図中には同一バルクを様々な温度で $B_{ex}=3$ Tの磁場中でFCMを行った後の磁場分布 B_{T} FC(4mm)の傾きを示すが、IMRA法によるパルス印加回数の増加により、バルクの温度上昇の低減が推定される。例えば、No.3パルスの捕捉磁場の傾きは77KでのFCMの傾きと等しく、この温度は実際に測定した温度上昇の最高温度(73 K)とほぼ一致する結果であった。

図3にSPA+IMRA法により得られた総磁束量 σ_{T} Pとバルク表面からの距離 zの関係を示す。 σ_{T} Pはzとともに単調に減少し、温度の低下とともに増大する。 T_{s} =40Kでは z=0.5 mmで σ_{T} P=5.05 mWbと高い値を示し、同様の方法 で着磁した直径 45 mmのバルクの約2倍の σ_{T} P値を示した[2]。図中には様々な温度で B_{ex} =3 Tの磁場中で FCM を行った後の σ_{T} FCの z 依存性を点線で示す。 q_{s} =40Kでの SPA+IMRA 法による σ_{T} Pは、48 K での σ_{T} FC とほぼ等し い値を示すことが分かった。FCM は印加磁場 B_{ex} の増大 により σ_{T} FC を増大させることが出来るが、フープカによ りバルクが割れる問題があり、複数パルス磁場印加法は σ_{T} の増大に対する 1 つの方法を提案している。

参考文献

[1] H. Fujishiro et al., Physica C 468 (2008) 1477.

[2] H. Fujishiro et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 4108.



Fig. 1. The B_T^p (0.5mm) vs. the pulse number for the SPA+IMRA method (T_s =40 K, *B1*=6.6 T).



Fig. 2. The $B_T^{P}(4mm)$ vs. the pulse number for the SPA+IMRA method (T_s =40 K, B1=6.6 T). The slopes of the $B_T^{FC}(4mm)$ profiles are indicated for various T_s in FCM.



Fig. 3. The $\Phi_T(z)$ values as a function of the distance *z* from the bulk surface by the SPA+IMRA method at T_s =40 K and 60 K (*B1*=6.6 T). Φ_T F^C(*z*) by FCM under the static magnetic field of 3 T at *T*=48, 60, 70 and 77 K and Φ_T (5 mm) by the MMPSC+IMRA method for the ϕ 45 mm GdBaCuO bulk at T_s =30 K [2] are also indicated.

高温超伝導バルク磁石のパルス着磁と捕捉磁場性能の研究

Study of pulsed field magnetization for high temperature superconducting bulk magnet and trapped field performance.

<u>山崎 英誠</u>, 関 啓孝, 広瀬 豊, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄, 岡 徹雄(新潟大学) <u>YAMAZAKI Hidetaka</u>, SEKI Hirotaka, HIROSE Yutaka, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao,

> OKA Tetsuo(Niigata University) E-mail: F08E090F@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

2. 実験方法

本実験は ϕ 30mm×t10mmのGd系バルクを用いた。バル クはGM冷凍機(AISIN製GD101S)を用いた磁極中にFig.1 のように設置し、最大30Kまで冷却した。PFMによる捕捉磁場 形成過程を見るために、40mFパルス電源を300V~800Vに 充電し、パルス磁場を合計10回印加した。1回のパルス印加 ごとにコイルを外し、真空容器表面をホールセンサーでスキャ ンすることにより磁場分布を得た。パルス印加順序はIMRA法 を参考にした[1]。また、高い印加磁場による捕捉磁場特性を 調べるため、電源のコンデンサ容量を変え着磁を行った。着 磁電源は20mF~120mFまで可変な日本電磁測器製 SBV-10124を用い、40mFから20mFずつ容量を上げ、計5種 類の容量で5回のパルスを放つことで着磁を行い、バルク表 面のホールセンサーで捕捉磁場を測定した。充電電圧は 40mF着磁の1回目から5回目までの値と同一とした。

3. 実験結果および考察

Fig.2 に連続して着磁した場合の磁場捕捉の結果を示す。 10回の印加により真空容器表面で最大1.49Tの磁場が捕捉 できた。1、2回目がM字型の分布であるのに対し、3回目以 降は山型になった。これは1、2回目がバルク外周までの磁束 侵入だったのに対し、3回目で一気にその中心に磁束が侵入 したことを意味する。これにより印加磁場の急激な上昇が捕捉 磁場の変化をもたらすと考えられる。

Fig.3 にコンデンサ容量を変えた場合の印加磁場と捕捉磁場の関係を示す。最大印加磁場は 120mF 電源を用いた 8.43T でこのときのバルク温度は53.6Kまで上昇し、温度上昇量は25.1K に及んだ。ここで、初期捕捉磁場より40~80mFと 100~120mF の大きく2つのグループに分けることができる。 前者は3発目の捕捉磁場上昇量が大きいのに対し、後者は少ない。この原因として、①3発目の印加磁場があまりに大き く、バルク内の発熱が起こった、②1発目の磁束侵入の位置 の違い、の2つの原因を考えている。

①に関して3発目の温度上昇を各容量別にみると、80mF は 21.1K、100mF は 23.6K であり、その差は 2.5K である。

②に関して1発目の捕捉磁場を各容量別にみると、80mF は 0.59T、100mF は 1.47T である。これは 80mF が Fig.2 に示 したように凹型に着磁されているのに対し、100mF では磁束 が中心に侵入し、凸型に着磁されたのではないかと見ている。 そのため、1発目の磁場侵入量が大きく影響しているものと考 えられ、まずは最適な初期印加磁場の模索を行っていく。



Fig.1 Experimental device sketch







参考文献

[1] 能登宏七,入門磁気活用技術,工業調査会,(2005), pp.56-58

YBCO 薄膜超電導体を用いた小型 NMR 用マグネットの開発 Development of compact NMR magnet using YBCO thin films

_ 錫範(岡山大学), S.Y. Hahn, M.C. Ahn, 岩佐幸和(MIT), V. John (AMSC) S.B. Kim (Okayama University), S.Y. Hahn, M.C. Ahn, Y. Iwasa (MIT), V. John (AMSC) kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

タンパク質などの機能や構造解析に有効なツールとし て注目されている核磁気共鳴(NMR; Nuclear Magnetic Resonance)診断装置は、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。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 診断装置に持っていく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(酸化物)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、世界 で初めて YBCO 薄膜超電導体を積層することによって上 記の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。

小型 NMR 用マグネットの概要

開発する小型 NMR 装置の基礎概念図を Fig.1 に示す。 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、外部磁場印加装置であ る励磁用の超電導マグネットの室温空間に低温容器に入 った NMR 用マグネットを配置して磁場中冷却方式(FC 法:Field cooling Method)を採用して酸化物超電導体を着 磁させる。酸化物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。本研究の当面の目標は、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 ることであり、上記の目標を達成させるためには、酸化 物超電導薄膜の性能向上を始め、マグネットの形状およ び冷却方法などの最適化が必要になると思われる。



Fig.1 Conceptual drawing of a compact NMR magnet using HTS thin films.

実験方法および結果

本研究では、持ち運べる NMR 用マグネットの開発を目 的としており、最終的には数千枚の酸化物超電導薄膜を 積層することで実現できると考えている。そこで、まず 本研究の実現可能性を確認するために 500 枚の酸化物超 電導薄膜を用いて試験的検討を行った。この試験用マグ ネットに用いられた酸化物超電導薄膜は、厚み75μmの配 向 Ni 金属基板上に、厚み 0.8µm の YBCO 層を蒸着した 次世代線材用の酸化物超電導薄膜であり、試料薄膜の臨 界電流密度は 2.2~2.5MA/cm²のものである。図 2 に試料 薄膜の形状と寸法および励磁磁場 0.1T によって試料薄膜 に捕捉された磁場分布を示す。図2の捕捉磁場分布の測 定結果から、内側の磁場分布が円形ではなく長方形にな っていることが明らかである。これの原因としては、Ni 金属基板の結晶方位を配向させるために行う圧延プロセ スにより長方形の結晶が形成されているためであると考 えられる。そこで、試料薄膜の圧延方向と圧延方向の垂 直方向への臨界電流を測定した結果、臨界電流の大きさ 比は、およそ 10:8 であることが明らかになった。このよ うな臨界電流の異方性は、線材応用においてはそれほど 問題にならないが、本研究のような捕捉磁場を利用する 場合においては非常に大きい問題となる。従って、今回 の試験では円形の発生磁場を得るために正方形の試料薄 膜を圧延方向に対して 22.5°ずつ回転させながら積層させ た。500 枚の試料薄膜を積層した試験用 NMR マグネット の高さは 41mm であり、液体窒素冷却によるマグネット 内部中心での高さ方向磁場分布と高さ中心での2次元磁 場分布を図3に示す。液体窒素温度での試料薄膜の Jc-B 特性により、捕捉磁場によるマグネット内部発生磁場の 強度は目標値よりかなり低いものの比較的円形の磁場分 布が得られた。従って、目標値の発生磁場強度を得るた めには、より高性能の超電導薄膜を使用するか、液体窒 素温度より低い温度で励磁させて使う必要があると思わ れる。最後に、試験 NMR 用マグネットを用いて液体ヘリ ウムで行った実験では2.35Tの磁場強度を得ている。



Fig.3 Measured axial magnetic field (B_z) profiles and magnetic field distribution at the center of z-axis.

Magnetic flux

500MHz 及び 1.05GHzNMR 用検出コイルの最適形状に関する検討 Examination of optimal shape of pick up coil for 500MHz and 1.05GHzNMR

<u>冨山 秀貴</u>, 武田 和幸, 相澤 慶二, 齊藤 敦, 大嶋 重利 (山形大学); 高橋 雅人, 前田 秀明 (理化学研究所)

HIDEKI Tomiyama, KAZUYUKI Takeda, KEIJI Aizawa, ATSUSHI Saito, SHIGETOSHI Ohshima (Yamagata UNIV); MASATO Takahasi, HIDEAKI Maeda (RIKEN) E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

NMR(核磁気共鳴装置)は生体物質の分子情報等を非破壊かつ無侵襲で測定可能であり、その広い汎用性から「プロテオミクス分野」や「メタボロミクス分野」等に利用されている。 しかし、現在の NMR は他の分析機器に比べ原理的な感度の低さが大きな課題となっている。それ故 NMR 用マグネットの高磁場化、また高磁場化に対応した検出コイルの改良による感度向上が図られている[1]。

現在高磁場化については 1.05GHzNMR 用高温超電導マグ ネットの研究がなされている。そこでこのマグネットに対応した 1.05GHzNMR 用検出コイル、また試作コイルの性能評価が可 能であり汎用性が高い 500MHzNMR 用検出コイルの形状の 最適化を行ったので報告する。

2. 検出コイル

NMR で使用される検出コイルの形状は測定対象の物質状態 により固体用 NMR と溶液用 NMR に分類される。本検討では 溶液用を想定し検出コイルはサドル型を選択した。材質は銅 を仮定してシミュレーションを行った。

3. シミュレーション

3次元電磁界シミュレータMW-studioを用いて検出コイルの 電磁界解析と設計を行った。MW-studioの解析原理は有限 積分法及び完全境界近似法を用いている。Fig. 1 にコイル形 状と各パラメータを示す。コイルの最適化法はまず一つのパラ メータのみを変化させ、得られたコイル内の磁場分布から標 準偏差σを算出する。

算出した値より磁場の均一性の検討を行い、均一性の最も高い数値を固定し、順次パラメータを変化させた。また回路を構成した際に周波数調整を容易に行うため、コイルの自己共振周波について同時に検討を行った。NMR 装置の仕様によりコイルの内半径は 3.05[mm]一定とした。

4. 結果及び考察

最適化したコイルの各パラメータ値を Table.1 に示す。 また Fig.2 に最適化前と最適化後の Y, Z 方向での磁場分布 を示す。最適化したコイルは自己共振周波数が 1.82GHz、B1 磁場の Y 軸、Z 軸方向に対する均一性がそれぞれの使用時 の有効範囲において 90%以上の均一性を持つことが確認で きた。今後は得られた最適化形状のコイルの試作を行い、シミ ュレーション結果との相違について検討を行う。

Table 1	1	Optimal	shape	of coil
---------	---	---------	-------	---------

t coil [mm]	0.1	d gap [mm]	1
l coil [mm]	5	l slit [mm]	1.5
w rec gap[mm]	4.84	l taper [mm]	15
l rec gap [mm]	13	d feed [mm]	1.5



Fig. 1 Each parameter of coil shape



参考文献

- Effect of Dielectric Properties of Solvents on the Quality Factor for a beyond 900 MHz Cryogenic Probe Model, Takashi Horiuchi, Masato Takahashi, Ju. Kikuchi, Shigeyuki Yokoyama, and <u>Hideaki Maeda</u>, Journal of Magnetic Resonance **174**, p33- 41 (2005).
 - ・JST 先端計測技術・機器開発事業の成果である。

<u>ウリエッティ ダヴィデ</u>,木吉 司 <u>UGLIETTI Davide</u>, 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.

In contrast to ordinary multifilamentary wires, in coated conductors the superconducting material consists of a single layer, and large screening currents can be induced by the applied magnetic field. Rather large magnetization have been measured in Bi2223 coils [1-2] for NMR applications. It was shown that the residual magnetic field in the coil centre is arising from the magnetization currents induced mainly at the coil ends by the radial component of the magnetic field [1,3].

Magnetisation measurements have not yet been performed on coils built with coated conductors. For this purpose two coils have been constructed using coated conductor from Superpower. The coil parameters are shown in Table I.

Γa	ble	1	Coil	parameters	
----	-----	---	------	------------	--

turns X layers	ф _{іл} (тт)	¢ _{out} (mm)	H (mm)	Tape length	mT/A
7 X 25	16	34	29	14 m	4.5
6 X 30	18	28	25	14 m	6.2

3. Residual magnetic field

The axial component of the residual magnetic field in the coil centre after charging the coil in 0 T background field at 4.2 K was found to be about 8% of the generated field (see Fig.1). This value is about one order of magnitude larger than what has been observed in long Bi2223 coils [1-2]. It is not clear if the large residual magnetic field is due to the coil geometry (the coil measured in this work are very short) or to the intrinsic magnetization properties of coated conductors. Calculations and further experiments are planned to better understand the origin of the magnetisation in coils built with coated conductors.

3. Time decay

The temporal dependence of the residual magnetic field was measured for the coil 7X25. The coil was inserted in a superconducting magnet, the background field was set and the coil charged up to 200 A. After discharging the coil, the value of the residual magnetic field was measured during about 3 hours (see Fig.2). After each measurement the coil was warmed to room temperature: measurements were performed at 0, 8 and 15 T. The activation energy was found to be about 35 meV in a background field of 0 T, while at higher field (8 T and 15 T) the value decreases to about 11 meV.

From Fig.2 the decay rate can be estimated to be about 10^{-4} mT/h after about 700 h (one month). This value is about ten times larger than the one required for NMR operation, but it has been measured on a short coil. Measurements on long coils are planned to determine if the decay rate in coated conductor coils is compatible with NMR operation.



NMR

Fig.1 Magnetic field versus current at 0T for the coils studied in this work.



Fig.2 Relaxation of the residual magnetic field for the coil 7X25 at 0 T, 8 T and 15 T. The decay rate of 10^{-3} mT/h is also shown at 700 h.

References

- 1. H. Maeda et al., to be published in Physica C
- 2. S. Hahn et al., J. Appl. Phys. Vol.105 (2009) p.02451
- N. Amemiya and K. Akachi, Supercond. Sci. Technol. Vol. 21 (2008) p.95001

Bi-2223 ダブルパンケーキコイルの線材内の非線形電磁現象に起因する 磁界の時間変化

Temporal evolution of magnetic field originated from non-linear electromagnetic behavior of superconducting tapes in a Bi-2223 double-pancake coil

<u>盛重 彰仁</u>, 中村 武恒, 雨宮 尚之(京大); 赤地 健(横浜国大); 尾山 仁(住友電工) <u>MORISHIGE Akihito</u>, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); AKACHI Ken (Yokohama National University); OYAMA Hitoshi (Sumitomo Electronic Industries, Ltd.) E-mail: akihito@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

冷却コストの低減及び高磁界発生等の観点から,高温超 伝導コイルのNMRマグネットやMRIマグネット等への応用が 考えられている。しかし,高温超伝導コイルの1ターンの線材 に着目すると, Fig. 1に示すように自身と他の線材に流れる電 流によって発生する磁界に晒され,それに対する遮蔽電流 (磁化電流)が誘起される。この遮蔽電流によって付加的磁界 が発生する。したがって,遮蔽電流の時間的な変化に伴い, コイルの発生磁界は変化することになる。さらに、コイル内の 磁界分布とBi-2223線材の複雑な電流輸送特性に起因して, その振る舞いを定量的に示すのは容易でない。

本研究では、Bi-2223 ダブルパンケーキコイルを対象とし、 その線材内の非線形電磁現象に伴う磁界の時間変化を実験 的に検討した。

2. 実験方法

実験に使用した Bi-2223 ダブルパンケーキコイルの諸元を Table 1 に示す。本研究では、液体窒素中(77 K)において、 Fig. 1 に示すようにホールセンサを用いて、三点でコイルが発 生させる磁界を測定した。通電電流の励消磁に伴う発生磁界 の時間変化に着目し、以下の二通りの方法で実験を行った。 測定はいずれも10000 s に亘って行い、励磁電流値を変化さ せて複数回行った。

(1) コイルを一定の電流値まで励磁し, 300 s 間その電流値を 保持する。その後, 電流を瞬時に遮断し, 電流が0 になった 時点を測定の開始時刻とした。

(2) コイルを一定の電流値まで瞬時に励磁し,通電した状態を保持する。励磁直後を測定の開始時刻とした。

3. 結果及び考察

Fig. 2 (a) に電流を遮断した場合の実験結果とそれに対応 するパーコレーション遷移モデルによる解析結果を示す[1]。 解析では、実験に用いたコイルと異なる線材のパラメータを使 用したにもかかわらず、残留磁界の絶対値はよく一致している。 また、Fig. 2 (b) には、実験結果を対数減衰式でフィッティン グした結果を示すが、特性は良く一致している。上記結果より、 対数減衰式は、一般に磁束クリープ理論によって説明される が、本コイルについてはパーコレーション遷移モデルによって も記述可能であることが明らかとなった。

測定位置による変化の相違は、線材面に垂直な垂直磁界 成分の大きさによって議論することができる。また、励磁電流 値によっても時間変化の様子は複雑に変化するが、それらは パーコレーション遷移モデルによって説明できる。電流を保持 した場合も同様である。

4. まとめ

Bi-2223 ダブルパンケーキコイルにおける通電電流の励消 磁に伴う磁界の時間変化は、パーコレーション遷移モデルに よって説明できることが明らかとなった。今後は上記の影響を 考慮して、その補償法について検討する予定である。

Table 1. Specifications of superconducting coil				
Number of turns	1500			
Number of double-pancakes	15			
Coil height	147.3 mm			
Inner diameter	66 mm			
Outer diameter	96 mm			
Critical current	49.4 A			
<i>n</i> value	12			

参考文献

[1]木須隆暢他: 低温工学, vol. 34, no. 7 (1999) pp. 322-331







Fig. 1 Cross section of HTS coil and magnetic fields

高温超伝導ダイポールマグネットにおける 多極磁界成分の測定と残留磁化の影響

Measurement of multi-pole magnetic field components in HTS dipole magnet and influence of residual magnetization

<u>岡田 奈々</u>, 雨宮 尚之, 藤井 陽介, 中村 武恒(京大・工); 荻津 透(KEK); 小平 政宣, 小野 通隆, 折笠 朝文(東芝);野田 耕司(放医研) <u>OKADA Nana</u>, AMEMIYA Naoyuki, FUJII Yosuke, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); OGITSU Toru (KEK); KODAIRA Masanobu, ONO Michitaka, ORIKASA Tomofumi (Toshiba), NODA Koji (NIRS) E-mail: okada@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

加速器用マグネットの磁界は多極展開という考え方で議論 されることが多いが、高温超伝導を加速器用マグネットに応用 した場合の多極磁界成分に関する研究例はない。高温超伝 導テープ線材による3次元鞍型巻き線の構成は難しく、制約 された巻き線形状故、高次の多極磁界成分が大きくなる可能 性がある。また、高温超伝導テープ線材内には、磁界の変化 に伴って遮蔽電流が流れ、これが付加的な多極磁界成分を 発生すると予想される。本研究では、Bi-2223テープ線材で 巻かれたダイポールマグネットの発生する多極磁界成分を測 定し、二次元近似解析の結果と比較検討した。

2. 実験方法

多極磁界成分の測定には、回転ピックアップコイル法(Fig. 1)を用いた。ピックアップコイルを回転して得られる信号から 磁界の角度依存性を求め、それを Fourier 展開することで多 極磁界成分を求めた。

3. 結果および考察

30 A の電流を流した時の、多極磁界成分の実験値と理論 解析値を Fig. 2(a)に示す(ダイポール(2 極)成分で規格化)。 磁界解析は、Fig. 3(a)に示すようなマグネットの電流分布を仮 定した二次元近似によるものである。実験値を見ると、ダイポ ール成分が最も大きく、高次成分ほど小さい。マグネットの対 称性から考えて理論的にも出現すべき 2、6、10、14 極 (Allowed 極)では、実験値と理論解析値はよく一致している。 また、理論上、理想的には零となるべき 4、8、12 極 (Un-allowed 極)の実験値は、Allowed 極より小さかった。

次に、30 A の通電電流を遮断したあとの、残留磁化による 多極磁界成分の実験値と理論解析値を Fig. 2(b)に示す。磁 界解析は、Fig. 3(b)に示すような電流分布を仮定して行った。 通電電流を流した時と同様、実験値を見るとダイポール成分 が最も大きく、高次成分ほど小さい。また、Allowed 極の実験 値と理論解析値はよく一致していて、Un-allowed 極の実験値 は Allowed 極より小さいことが確認できる。加速器用ダイポー ルマグネットにおいて、高次磁界成分はダイポール磁界成分 に対して小さいことが望まれる。電流遮断後のダイポール成 分に対する高次成分の大きさを見ると、通電中よりも大きいこ とが特徴的である。

4. まとめ

遮蔽電流による付加的磁界(残留磁化による磁界)が発生 していることを実験的に確認できた。今回は電流遮断後の付 加的磁界の多極磁界成分を測定しているが、付加的磁界は マグネット励磁中にも現れていると考えられ、加速器用高温超 伝導マグネットの磁界精度を損なう可能性があり、今後の検 討が必要である。

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 HTS dipole magnet and pick-up coil







Fig. 3 Assumed current distribution: (a) when carrying transport current of 30 A, (b) after shutting down transport current

ゼロ磁場冷却法により励磁する高温超伝導溶融バルク磁石の 温度と磁場侵入の挙動 Temperature and Magnetic Flux behaviors of HTS Melt-Processed Bulk Magnet

Activated by Zero Field Cooling

<u>岡 徹雄</u>(新潟大), 横山 和哉(足利工大), 藤代 博之(岩手大), 能登 宏七(岩手大) OKA Tetsuo, YOKOYAMA Kazuya, FUJISHIRO Hiroyuki and NOTO Koshichi E-mail: okat@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

90Kの超伝導遷移温度をもつ希土類123系と呼ばれる超 伝導バルク体に磁場を捕捉して実現される超伝導バルク磁石 は、コンパクトに強磁場を発生できる応用例として研究されて いる[1]。我々は超伝導状態で磁場を印加する励磁過程にお いて、試料への磁束の侵入にともなって起こる発熱を、磁場 侵入の経路に着目し、磁場中冷却(FC)法によるその挙動に ついて報告を行ってきた[2]。今回の報告では、熱処理工程 でその結晶軸を揃え、擬似単結晶として合成した Sm123 系の 超伝導バルク磁石が、5Tの静磁場によるゼロ磁場冷却(ZFC) 法によって励磁された場合のその温度変化と磁化過程を詳 細に調べた結果を報告する。

2. 実験方法

試料の超伝導バルク磁石は同和鉱業製の Sm123系で、 Sm211相とPt が混合してあり、その形状は直径45mm厚さ1 5mmである。全体が擬似単結晶に合成され、77K において ひずみのない同心円状の磁場分布をもつ。試料は GM 冷凍 機の冷却部に直接接触させて固定し、50K ならびに60K に 冷却した。その試料表面には 76µmのクロメル・コンスタンタ ン熱電対を5本接着してある。印加ならびに捕捉された磁場 は表面中央付近に貼付したホールセンサ(FW Bell BHT920)によって測定した。なお試料表面中心に設置する 熱電対のため、ホールセンサの位置は中心部からずれる。こ のため磁場の測定値は最大ではない。ZFC 法による磁場の 印加は JASTEC 製の無冷媒マグネットを用いて最大5T まで 行い、5T で増加を止めて 12ks のちに減少に転じた。磁束の 運動によって起こる発熱はその印加磁場の変化速度(sweep rate)に大きく依存すると考えられるため、温度領域に加えて、 その変化速度を 5.06 と 11.3 mT/s に変化させた[1]。

3. 実験結果と考察

実験した50-60Kでは強いピン止め点の存在によって磁束 量子の侵入が制限されるとともに、その際の発熱は磁場性能 に無視できない温度上昇をもたらす。Fig. 1 に示すように、印 加磁場の増加につれ、5本の熱電対は一斉に温度上昇を検 知し、ピン止めに抗して起こる磁束運動による発熱が大きいこ とを示す(Fig. 1 の図中a)。最大の特徴は、磁場が5T に達し て停止した後も、温度と磁場の上昇が続くこと。外部磁場が変 化しなくとも、フラックスクリープによって試料内部に向かって 磁束は雪崩のように侵入する。12ks に及んで続く5Tの保持 の後も、外部磁場にはるかに及ばない 1.5T が侵入した磁場 の最大値である。磁場増加時には一様に温度上昇を伴った 発熱が見られるのに対し、磁場減少過程では、その減少速度 によって温度変化に大きな違いが見られた。磁場変化が早い (11.3mT/s)場合、磁場の減少過程で鋭い発熱と温度上昇が 観察されたのに対し、遅い(5.06mT/s)場合は、冷却系の伝 熱性能と試料で起こる発熱のバランスによって、磁場増加過 程のような温度上昇は観察されなかった(Fig. 1の図中b)。こ れは磁場増加と減少の過程で、磁束の運動が異なり、磁束の 侵入と拡散の行程が異なることを示す。50Kで行った磁場印



Fig.1 Temperature and trapped field evolutions in ZFC with a sweep rate $5.06 \ \text{mT/s}$



Fig.2 Schematic illustration of field invasion to bulk sample in ZFC process

加速度 5.06mT/s の場合での、ZFC による磁場侵入の過程を Fig. 2 に模式的に示す。静磁場着磁 (ZFC)における捕捉磁場 分布は結果的に台形となる。

4. まとめ

磁場増加過程における試料への磁場侵入は、印加磁場を 止めても、フラックスクリープ現象によって続いた。ゼロ磁場冷 却法による静磁場印加に際して上昇する温度は磁場印加速 度が5.06mT/sの場合で7.5Kになり、磁場上昇過程と下降過 程で磁束の振る舞いは異なった。温度上昇は磁束量子の運 動による発熱と冷却系の冷却速度とのバランスで理解され、 材料の伝熱性能の改良や冷却系における冷却速度の向上 によって捕捉磁場性能が改善できることを示した。

参考文献

1. K. Yokoyama, M. Kaneyama, T. Oka, H. Fujishiro, K. Noto, Physica C, Vol.412-414 (2004) p. 688

2. T. Oka, et al.: Physica C, Vol. 460–462 (2007) p. 748

HTS超伝導コイルの過負荷耐量特性の実験的検討

Experimental investigation on overload characteristics of HTS superconducting coils

家永 寛史, <u>二ノ宮 晃</u>, 石郷岡 猛(成蹊大);古瀬 充穂(産総研) IENAGA Hiroshi, <u>NINOMIYA Akira</u>, ISHIGOHKA Takeshi (SEIKEI Univ.); FURUSE Mitsuho (AIST) E-mail: ninomiya@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

液体窒素で浸漬冷却される HTS 超伝導コイルは、冷媒 の冷却能力や導体の特性を考慮すると、通常言われてい る1µV/cmの臨界電流の電界基準を上回る領域での利用 が期待できる。この点を考慮して、我々は、含浸・非含 浸の2種類の試験用超伝導コイルを自作して、熱暴走発 生までの超伝導限界特性について実験的に検討した。な お、ここに示すのは主として含浸コイルの結果である。

試験は以下3項目について実施した。第一は、試作コ イルの冷却安定性把握の試験であり、コイルには直接通 電せずにステンレステープにのみ通電してコイルの冷却 性能を動的に検討した。これより、ある条件で熱振動が 発生することが確認できた。この結果を踏まえて、第二 の試験は直流通電試験、第三の試験では交流通電試験を 行った。これらより、直流通電時は、1µV/cmの臨界条 件以上でも運転が可能であること、また低電流領域では、熱振 動現象を確認した。そして、高電流領域では、熱振 動を起こさずに直接熱暴走をすることが把握できた。こ の現象は、ステンレステープ導体を加熱させながら HTS 導体を交流通電させた試験でも確認した。なお、熱暴走 を生ずる交流電流(実効値)の値は、直流の臨界電流値に ほぼ一致した。

2. 装置および試験方法

本研究で作製した試験コイルを図1 に示す。寸法は、 内径 50mm,外径 58mm,幅 4mm で、1 ターン構成は、Bi 系 HTS テープ線材(住友電工製)、ポリイミドテープ、SUS テー プ,ポリイミドテープの4層から成り、これを13 回巻い てコイルとした。また、最内層と中間部分の7~8ターン 目に熱電対を挿入した。SUS テープは、機械的補強の役割 と共にヒータとしても利用する。含浸コイルは1mm 厚の ベークライト製巻き枠でコイルを挟んで断熱した。他方、 非含浸コイルは、片面のみベークライトを取り付け、も う一方は直接冷媒に接触する状態とした。



Fig.1 Overview of test coils, where left one is with epoxy-impregnated coil and right one is non-impregnated coil. These coils have SUS tape utilization for heater and thermo-couples.

3. 試験結果と結論

ステンレステープ線にのみ通電して、最内層部において 熱振動の発生を確認した一例を図2に示す。ここでは、102K ~107Kの範囲で熱振動が発生した。なお、この現象は中間 部分では確認できなかった。

図3は、直流通電時に追加してヒータ加熱を行い、熱暴走を 発生させたときの特性である。過熱を止めても引き続き電圧が 上昇していることが確認できる。

図4に、温度に対する臨界電流(Ic)と熱暴走電流(Iq)の変 化を示す。なお、交流では、熱暴走時のピーク値(Iq peak)と 実効値(Iq rms)を示している。これより、77K付近の特性を見 ると、交流のクエンチ電流実効値(Iq rms)が直流の臨界電流 (Ic)とほぼ一致していることが確認できる。



Fig. 2 Thermal oscillation characteristics due to the heater input into the epoxy impregnated HTS coil.



Fig.3 Thermal runaway characteristics at the DC excitation of HTS coil with heater input.



Fig.4 Change of critical currents and thermal runaway currents by temperature.

参考文献

 V.R. Romanovskii, et al., IEEE Trans.on App. Super., Vol., 17, No.2, June 1007.

TFA-MOD法YBCOテープ線材を用いた電流リードの開発③ (500 A級電流リードユニットの作製とその特性) Development of current leads prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes③ (500 A-class current lead units and their properties)

<u>塩原 敬</u>、堺 智、石井 雄一、山田 豊、太刀川 恭治(東海大)、小泉 勉、青木 裕治、長谷川 隆代(昭和電線) <u>Kei SHIOHARA</u>, Satoshi SAKAI, Yuichi ISHII, Yutaka YAMADA, Kyoji TACHIKAWA (Tokai University); Tsutomu KOIZUMI, Yuji AOKI, Takayo HASEGAWA (SWCC)

E-mail:8aazm017@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

TFA-MOD 法により新たに作製した YBCO テープ線材を 用いて 500 A 級電流リードユニットを作製し、その通電特 性及び熱侵入量等を評価したので報告する。

2. 実験方法

TFA-MOD 法により新たに作製した YBCO 線材は、厚さ 100 μ m の HastelloyTM 基板上に酸化物の中間層を経て厚さ 1.5 μ m の YBCO 超電導層、その上に 15 μ m の Ag 保護層 から構成され、幅 5 mm である。Fig. 1 に試作した 500 A 級 電流リードユニットの外観及び模式図を示す。YBCO 線材 5 本を GFRP 板で補強し、両端を Cu 電極にハンダ接合し て 500 A 級電流リードユニットを 2 組作製した。本実験で 用いた YBCO 線材の *Ic* 値は液体窒素中、自己磁場下 (@77 K, s. f.) で 171 A~189 A の範囲で平均 178 A であった。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に電流リードユニット通電時(@77 K, s. f.)の Cu 電極間(V_{Cu-Cu})、正極側・負極側のCu 電極と各素線の 接続抵抗($V_{Cu+v}V_{Cu}$)及びYBCO各素線の発生電圧(V_{YBCO}) について示す。通電電流 800A まで5本のYBCO線材全て に電圧は生ぜず、900 A までクエンチすることなく通電出 来た。Cu 電極間の電圧は通電電流と共にほぼ直線的に増 加し、800 A で V_{Cu-Cu} は約 580 μ V、 V_{Cu+} 及び V_{Cu} は約 290 μ V であった。さらに、500 A ユニットを2 組並列に接続し、 1,500 A を超える通電に成功した。

Fig. 3 に熱伝導率より計算した YBCO 線材、GFRP 板及 び電流リード(C.L.)ユニットの4.2 K-77 K間の熱侵入量と 各長さとの関係を示す。本電流リードユニット(有効長 さ:150 mm)の熱侵入量は、5本の YBCO 線材が41 mW、 GFRP 板が5 mW で計46 mW と算出され、ユニット2組 を組合せて1,000 A 級とした場合には92 mW となる。前報 で本研究室が旧線材を用いて作製した1000 A 級電流リー ド(補強材:SUS 板)の総熱侵入量(約191 mW)と比較し ても1/2 以下であり、従来の Cu 製電流リード(1.2 W/kA) よりも1 桁以上低減するものと期待される。これは、GFRP の使用と YBCO 線材の臨界電流特性向上のためである。

謝辞

本研究は東海大学と昭和電線ケーブルシステム㈱の共同 研究の成果であり、超電導応用基盤技術開発(NEDO)プロ ジェクトの成果を引用している。



Fig. 1 500 A-class Current lead unit prepared by the 5 YBCO tapes on a GFRP board.



Fig. 2 Transport performance of a current lead unit at 77 K in self-field.



Fig. 3 Heat leakage of the current lead between 4.2 K and 77 K.

並列導体を用いたイットリウム系超電導コイルの開発 Uniformization of current distribution in YBCO coil wound with parallel conductors

宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 丸川 宏太郎, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, MARUKAWA Kotaro, HANAI Satoshi,
URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

電流容量を増加させるために、超電導テープ線を束ねた 並列導体を用いて超電導コイルを構成する場合がある。しか しながら単純に並列導体を用いた場合には、線材間に電流 偏流が生じてしまい、電流容量の減少や交流損失の増加等 の問題が生じる。今回、2本並列導体を用いた2層のパンケ ーキコイルにおいて最内ターンで1回だけ2本の超電導テー プ線の位置を入れ替えることで偏流抑制可能なコイル構成を 考案した。その効果を確認するため、含浸型のイットリウム系 超電導コイルを試作し、通電試験を実施した.

2. コイル試作および直流通電

試作した含浸コイルの概略図を Fig.1 に示し,諸元を Table.1 に示す。FRP 巻枠内に銅電極を対称な位置に取り付 け,イットリウム系線材 1(YBCO Tape 1)は電極 1(Cu1)に、イッ トリウム系線材 2(YBCO Tape 2)は電極 2(Cu2)にハンダ接続し て巻線することで、2本のイットリウム系線材の位置を最内ター ンで入れ替えている。その結果、2本の線材が作るループが 対称構造となることで、インダクタンスを等しくでき、偏流を防 止できる。ここで、2本の線材間および層間は絶縁されてい る。

試作した含浸コイルの健全性を評価するため,液体窒素 中で直流通電試験を実施し、イットリウム系線材1および2が 作るコイルの両端電圧を測定した。通電試験結果を Fig.2 に 示す。コイルn値はともに20以上であり、10⁻⁸ V/cm以下の低 電界領域まで良好な超電導特性を有していることから、コイル が健全であることを確認した。また、イットリウム系線材1 およ び2のコイル臨界電流値は、それぞれ50.7 Aおよび52.1 A であった。

3. 偏流測定

試作した含浸コイルの偏流抑制効果を確認するため,液体窒素中で交流(正弦波)通電を実施し,2本のイットリウム系線材に流れる電流を測定した。電流は室温部で分岐させてCTで測定しているため,周波数が低い場合には抵抗成分の影響を受けてしまい,偏流抑制効果の確認ができない。そこで,周波数を300 Hzと大きくすることで,抵抗成分の影響を小さくし,誘導成分が支配的な状況で試験を行った。通電試験結果をFig.3 に示す。ここで,電流値は通電電流の最大値で除して規格化している。Fig.3 に示すように、2本のイットリウム系線材には均一な電流が流れており,偏流は最大で2%と小さいことを確認した。

4. まとめ

2本のイットリウム系線材を用いて,最内ターンで1回のみ 転位処理を施した含浸コイルを試作した。液体窒素中で直流 通電試験を実施し,コイルの健全性を確認後,交流(正弦波) 通電を実施した。正弦波300Hz通電において,2本の線材に 均一に電流が流れ,考案したコイル構成が偏流抑制に有効 であることを確認した。



Table.1 Specifications of YBCO tape and coil Tape width 4.4 mm Tape thickness 0.2 mm Min. Ic @77 K, 0 T 80 A Number of tapes 2 Inner diameter 100 mm Outer diameter 154 mm 100 turn (50 turn \times 2) Number of turns Number of lavers 2







Fig. 3 Current distribution properties of YBCO coil at 77 K, 300 Hz

超電導コイルの高効率伝導冷却技術の開発 Development of highly effective conduction cooling technology of superconducting coil

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 (中部電力) MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS); NATSUME Kyohei (SOKENDAI); TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki (CEPCO) e-mail: mito@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超電導コイルの冷却構造を考える場合、従来の低温 超電導コイルでは局所的擾乱に対する安定性を重視した設 計が重要課題であったのに対し、高温超電導材料の高い臨 界温度に伴う比熱の増大により、クエンチを防止する安定性 の重要度は低くなる。ところが、コイル内の熱の伝わり易さを 示す熱拡散率は、温度と共に減少し、運転温度の上昇に伴 って冷却し難くなる傾向にあり、コイル内の排熱特性を考慮し た設計が重要となる。コイル内の排熱特性が低下すると、効 率の良い運転が困難になると共に、クエンチ発生時の熱暴走 等により、コイル内で局所的な熱歪みが発生し、機械的な破 損や超電導特性の劣化が起きることが懸念される。本研究で は、冷却の新技術として、自励振動式ヒートパイプをシート状 に加工したパネルを超電導コイルの冷却素子として組み込む ことにより、コイル内の発熱を効率的に除去できる高効率の伝 導冷却構造を開発することを目標としている。

2. ヒートパイプ組込みコイル冷却構造

ヒートパイプ組込みの伝導冷却型高温超電導モデルコイ ルの概念構成を Fig. 1 に示す。高温超電導テープ線材をダ ブルパンケーキ巻きした巻線の両側面にシート状のヒートパイ プを配置し、コイル内の定常発熱及び局所的に発生した熱を 速やかに巻線の外周側へ伝える。巻線の外周側には、冷却 パイプが設置され、冷凍機で冷却した冷媒ガスを循環するこ とにより冷却される。ヒートパイプの最近の技術進歩は目覚ま しく、様々な原理・構造のものが開発・実用化されている。中 でも自励振動式ヒートパイプは従来形のヒートパイプに比べ 熱輸送量が10倍以上大きい、薄いシート状に加工できる、設 置方向に依存せずに動作するなど、超電導コイルに組み込 む冷却パネル用として適している。論文(1)によれば、ヒートパ イプ内蔵熱拡散板の実効熱伝導率として、銅に比べて100倍 程度が達成可能とされている。現在開発されている自励振動 式ヒートパイプは、作動ガスとしてブタン等を用いた室温動作 のものであり、そのままでは超電導コイルの冷却に応用するこ とはできない。しかし、作動ガスとしてヘリウム、水素、ネオン 等を用い、最適化を図ることにより、4 K, 20 K, 30 K 付近で動 作する自励振動式ヒートパイプの開発が可能である。



HTS Tapes

Fig. 1. Conduction cooled HTS coil with heat pipes.

3. 有限要素法による熱伝導解析

自励振動式ヒートパイプを用いた伝導冷却型超電導コイ ルの冷却効果を評価するために、有限要素モデルによる解 析を行った。Fig. 2 に計算に用いた直径 300mm の小型コイル の有限要素モデルを示す。アルミ合金の厚板を冷却板として 設置した場合と、銅の10倍の熱伝導率をもつヒートパイプを 用いた冷却板を設置した場合を想定し、コイル内温度分布の 相違について比較した。冷却条件として、冷却チャネル部の 温度は20Kに固定し、熱負荷として、巻線部に18Wの発熱 が全域に渡って発生するとして定常状態での温度分布解析 を行った。伝熱板にアルミ合金を使用した場合の結果を Fig. 3に示す。アルミ合金内で温度分布が生じ、冷却チャネルから 遠い位置にある巻き線部で最大 5K の温度差がついている。 一方、伝熱板にヒートパイプを設置したモデルでは Fig. 4 に 示すように、ヒートパイプの熱伝導の良さから、伝熱板での温 度分布はほとんどなく、巻き線部の温度差は 1.9K に留まり、 ・様に効率良く冷却されていることが分かる。



21.294 21.509 21.725 21.941 20.431 20.647 20.862 21.078 20.216 Fig. 4. Temperature distribution with heat pipe cooling panels..

4. 実験と今後の計画

自励振動式ヒートパイプに関する文献調査を行い、自励 振動が発生する動作範囲に関して理論解析やシミュレーショ ンによる研究・検討が進められているが、現時点では確立した モデルはなく、特に低温での自励振動式ヒートパイプの開発 例はないことから、実験による確認、データの蓄積が必要であ ることが明らかとなった。自励振動式ヒートパイプの冷媒ガスを、 窒素、ネオン、水素、ヘリウムに置換し、それぞれの、動作範 囲を温度、圧力、熱入力をパラメータとして測定する実験装置 の設計および製作を行った。今後、自励振動式ヒートパイプ の極低温での詳細な動作特性の把握により、超電導コイルの 冷却素子としての最適化を図る予定である。

参考文献

1. 西尾茂文·永田真一·馬場史朗 "SEMOS Heat Pipe に関 する研究",日本機械学会論文集(B編), Vol.68, No.671, 2002.7, pp.2086-2092.

放射線管理区域への 15T 超伝導マグネット導入計画 Installation Plan of 15T Superconducting Magnet in Radiation Controlled Area

<u>西村</u>新(核融合研);竹内 孝夫(物材機構);西嶋 茂宏(阪大);落合 謙太郎(原子力機構);渡辺 和雄、四竈 樹男(東北大) <u>NISHIMURA Arata</u> (NIFS); TAKEUCHI Takao (JAEA); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.); OCHIAI Kentaro (JAEA); WATANABE Kazuo, SHIKAMA Tatsuo (Tohoku Univ.)

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

1. はじめに

核融合炉では、D-DもしくはD-T反応によって高エネルギ ー中性子が生産され、その運動エネルギーを熱エネルギー に変換することによって核融合エネルギーを取り出すことがで きる。D-D反応によって生じた 2.45 MeV 中性子、D-T反応に よって生じた 14 MeV 中性子は、核融合炉内壁に設置された ブランケットを透過し、もしくはプラズマ加熱用のポートから漏 えいし、プラズマ真空容器外に設置された超伝導マグネットに 到達する。この中性子によってコイル容器を含む超伝導マグ ネット材料は放射化され、ガンマ線を発生するようになる。す なわち、超伝導マグネット材料は中性子とガンマ線に曝される ことになる。超伝導線材が中性子に照射されると照射量に応 じて臨界電流や臨界温度が変化することが知られており(Fig. 1)、エポキシ樹脂製電気絶縁材料はガンマ線によって劣化 することが知られている。

中性子照射された物質は、その内部に何らかの同位体が 形成され放射線を発生するようになる。放射化した物質は放 射線管理区域内で取り扱うことが定められており、中性子照 射した超伝導線材や絶縁材料を一般の実験室で取り扱うこと はできない。これまでの放射化した試料の実験はすべて法令 を順守して日本原子力研究開発機構や東北大学金属材料 研究所の放射線管理区域で行ってきている。(Fig. 2) しかし、 これまでに確立してきた実験手順では取り扱える核種や数量 に関しては制限があり、より高い放射線を発生する試料や 種々の核種を有する試料については取り扱いが非常に難しく なる。

そこで、東北大学 金属材料研究所 量子エネルギー材 料科学国際研究センター(大洗センター)の管理区域内に 15T 級のマグネットを設置し、放射化した超伝導線材の超伝 導特性評価を実施できる体制を構築することとした。

本報告では、この15T級超伝導マグネットならびに計測シ ステムについて、その概要を紹介する。

2. 放射線管理区域内での特殊な要求事項

放射線管理区域は一般の実験室とは異なり以下のような 配慮すべき項目がある。

(1)実験スペースが限られているので、実験装置自体をコンパクトにするとともに、漏れ磁場を極力少なくする。

(2)管理区域内は独立した空調システムを有しているため、 ヘリウムガスや窒素ガスなどの排出をできるだけ抑える。

- (3) 機械冷却水の使用を抑える。
- (4) 試料の脱着時など、被曝を少なくする構造とする。

メンテナンスを容易にする方法を検討すべきであるが、現 状では、作業員の方々に放射線業務従事者登録など必要な 手続きをしていただいて、管理区域内でメンテナンスを行って いただく方針である。

3. マグネットおよび測定機器の仕様

これらの状況を考慮して、伝導冷却型の超伝導マグネット を採用し、室温ボア空間を直径50 mm以上、最大磁場を15.5 T以上とした。そして、漏れ磁場を低減するため、25 mmから 30 mmの厚さの磁気シールドを施す予定である。冷凍機とし ては空冷式の GM 冷凍機を採用し、コンプレッサー部分は空



Fig. 1 Irradiation effect of neutron fluence on Ic.

調能力に余裕のある空間に設置することとした。試料は温度 可変のインサートに取り付け、伝導冷却マグネットの室温ボア 部に挿入される。試料の通電電流としては500Aが目標である が、中性子照射によってIcが2倍以上に大きく上昇するという 報告があるため(Fig. 1)、試料温度を5Kなり6Kなりに上昇さ せてIcを測定することができる構造、システムを採用する予定 である。このインサートも、ヘリウムガスの使用を抑えることを目 的として、伝導冷却で試料温度を保持できるように設計を進 める予定である。

全体の計画は2008年度から2010年度の3年計画であり、 2010年度中には高い残留放射線を発する超伝導線材の高 磁場試験を予定している。

4. おわりに

核融合炉用超伝導マグネットの中性子照射を想定した中 性子照射試験と、その後の照射後試験の研究体制の確立を 目指して、研究連携体制の構築と施設設備の拡充を進めて 来ている。今回の15 T級マグネットの導入によって、ITERクラ スの超伝導線材の照射後特性評価が容易になると共に、さら に大電磁力(高磁場、大電流)、高照射量が予想される DEMO 炉開発に向けて、さらなる研究の進展が期待される。

各位のご指導、ご協力をお願いする次第である。



Fig. 2 Collaboration network on neutron effect investigation of superconducting magnet materials.

中性子照射試料評価用 15T マグネットシステムと温度可変インサートの概念設計

Design of 15T superconducting magnet system and variable temperature insert for investigations on the properties of neutron irradiated superconductors.

<u>奥井 良夫</u>, 広瀬 量一, 伊藤 聡, 宮田 斉(JASTEC);尾崎 修(神戸製鋼);西村 新(NIFS);竹内 孝夫(NIMS); 西嶋 茂宏(阪大);渡辺 和雄, 四竈 樹男(東北大)

OKUI Yoshio, HIROSE Ryoichi, ITO Satoshi, MIYATA Hitoshi (JASTEC); OZAKI Osamu (Kobe steel); NISHIMURA Arata (NIFS); TAKEUCHI Takao (NIMS); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.); WATANABE Kazuo, SHIKAMA Tatsuo (Tohoku Univ.) E-mail: okui.yoshio@kobelco.com

1. はじめに

中性子照射した超電導試料の臨界電流評価システムを, 2008-2010 の3ヵ年で東北大学金属材料研究所付属量子エ ネルギー材料科学国際研究センターの放射線管理区域に導 入する計画である。システムは、超電導マグネット,温度可変 インサート,臨界電流計測システムからなる。超電導マグネッ トは、無冷媒運転で52mmの室温空間に15T以上の磁場を 発生する[1]。鉄シールドで遮蔽され、外部への漏洩磁場を 5 ガウス以下に抑制する。温度可変インサートは35mm ボア の試料空間を4-10Kの範囲で温度制御しつつ、最大500A の試料電流を通電する。本報では、2008年度に実施したマグ ネットシステムと温度可変インサートの概念設計について述べ る。

2.1. マグネットシステム

想定される無冷媒超電導マグネットの 5 ガウスラインは径 方向 3.2m, 軸方向 4.2m と漏れ磁場が大きい。そこで周辺の 機器や作業者への影響を考慮して実験空間(水平方向 1.9 m の範囲)から磁場が漏れない磁気シールドを検討した。

2.2. 磁気シールドの検討結果

W1.9m×D1.9m×H1.8m の箱型, φ1.9m×H1.8m の円 筒型の2種類の形状に関して,シールド厚みを 20mm, 30mm, 40mm (材質はいずれも SS400 を仮定)の 3 ケースで磁場解 析を行い,次の結果を得た。

- ・いずれの形状でも 30mm 厚の鉄板が必要。
- ・ 試料空間内での磁場均一度は 0.5% @ \$2mm× H35mm 以下を満たす。
- シールドとマグネット間に働く電磁力は、いずれの形状でも鉛直方向に約1400kgfである。
- ・円筒形状とすることで、シールド重量を軽くすることが可能。30mm 厚の場合で概略重量は、4.4tとなる。

解析結果の1例(円筒型, 30mm 厚さ)をFig.1 に示す。



3.1. 温度可変インサート

最大 500A の電流を通電するため, 試料への電流導入部 の温度分布がどのようになるかが大変重要である。そのため に材質/形状/寸法, 試料形状(直線状, コイル状)等の条件 を変えて温度分布を計算し、適切な導入部の在り方を評価し た。

3.2. 電流導入部の評価結果

電流導入部について,6 種類のモデルを想定し,温度制 御前の各ポイントの温度を計算した。その結果をFig.2 に示す。 4-10K での温度制御を考慮すると、この時点での試料温度は 4K 台である必要がある。その観点から、試料を冷却するため の冷凍機は2台必要であり、試料を伝導冷却するための冷却 ロッドは高純度アルミニウム(6NAI)を使用する必要がある。一 方、採用した高純度アルミニウムの物性値はメーカー参考値 のため、インサート寸法を模擬した実験で想定通りの冷却性 能が得られるかを確認する必要がある。

Mark	Model	Sample Shape	Insert Length	Cooling Rod	Refrigerator
	1	straight	400mm	C1020	$1W \times 2$
0	2	straight	400mm	6NAl	$1W \times 2$
	3	Coil	400mm	6NAl	$1W \times 2$
	4	straight	280mm	6NA1	$1W \times 2$
•	5	Coil	280mm	6NAl	$1W \times 2$
	б	Coil	280mm	6NA1	1W×1





4. まとめ

2008年度はマグネットシステム及び温度可変インサートの 概念設計として、2件の解析・評価を実施した。2009年度は本 解析・評価に基づいて詳細設計を進める計画である。

参考文献

1. R. Hirose, et al.: TEION KOGAKU, 41 (2006) 561-565

Fig.1 A Result of Magnetic Shield Analysis, Cylindrical Shape

LHD ポロイダルコイルの交流損失測定 AC Losses in Poloidal Coils of the Large Helical Device(LHD)

<u>高畑 一也</u>,力石浩孝,三戸利行,今川信作 (NIFS) <u>TAKAHATA Kazuya</u>, 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(CIC)導体を使用した大型超 伝導コイルである。ヘリカル装置である 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 入した。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 させることが可能となった。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 CIC 導体の結合損失時定数を評価した。

2. 交流損失の測定方法と結果

コイル内で発生する損失は、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。図1は、 交流損失測定時の典型的な電流波形と $m\Delta H$ の観測結果で ある。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。通電前の約 15 W が定常熱負 荷であり、通電後の増加分が交流損失による発熱である。

図 2 は,最大通電電流が 2 kA と 4 kA の場合の全損失の 1/ τ_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/ τ_0 依存性は直 線近似が可能であり、1/ τ_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。そして全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。を次の表式で規格化した。

(1)

(2)

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

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 A^* は形状因子、 B_m は最大磁場、 V_m は素線の体積である。図 2 のすべてのデータから結合損失を見積もり、それを式(1)を用いて、導体全長に渡り規格化した。その結果を図 3 に示す。規格化したために、最大通電電流の依存性がなくなっている。ここで結合損失時定数を 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。

$$Q^* = 2\tau / \tau_0$$

この式を用いて評価した 2 個の IV コイルの結合損失時定数 は、IV-L コイルが 80 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 2.5 倍の 差が現れた。これは、IV-L コイルの製作時期が早いこと、単 独通電試験を LHD 組み込み前に行っていることなどの履歴 の違いにより、素線間接触抵抗に違いが生じ、素線間結合電 流の発生に影響したためと考えられる。特に使用されている 素線の表面はコーティングを施していない銅の裸面であり、 酸化被膜の影響を受けた可能性もある。



Fig.1 Current and heat loss of the IV-L coil during the AC loss measurements







LHDヘリカルコイルの過冷却(サブクール)改造の成果 Results of lowering temperatures of the LHD helical coils by subcooling system.

<u>今川 信作</u>, 尾花 哲浩, 柳 長門, 濱口 真司, 関口 温朗, 三戸 利行(NIFS);岡村 哲至(東工大) <u>IMAGAWA Shinsaku</u>, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, SEKIGUCHI Haruo, MITO Toshiyuki (NIFS), OKAMURA Tetsuji (Tokyo Institute of Technology) E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)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]。これまでに、4.4 K 飽和ヘリウム冷却の場合には11.0 kAにおいて数回の常伝導伝 播と回復が観測されたのに対して、3年間のサブクール運転に おいては、コイル出口3.95 K以下の場合に11.4 kA以下では常 伝導伝播は観測されておらず、一定の冷却安定性の改善効果 が確認されている。

2. 最小伝播電流の比較

サブクール運転時には,温度低下によってヒステリシス損失が 増大する効果も加わり, 励磁時の交流損失によるコイル内部の 冷媒温度上昇が無視できなくなる。無励磁状態から通常の半 分の励磁速度で高磁場まで励磁を行った際に, 11.4 kAを超え たところで,冷媒出口に近いコイル上部からの常伝導伝播が2 回観測された[2]。そのため、高磁場励磁の前には11 kA付近で 2時間の冷却時間を確保するように励磁方法を変更したが、こ の方法でも11.4 kAを超えた時点でコイル下部から短い常伝導 伝播が観測された。それ以降は最内層のH-Iブロックの電流値 を11.4 kA以下に制限してプラズマ実験に供しており,常伝導 伝播は観測されていない。これまでにヘリカルコイルで観測さ れている最小伝播電流をモデルコイルと比較して図1に示す。 モデルコイルでは、層間スペーサと導体の間に挿入したテープ ヒータを用いて, 20 msの印加時間で最大100 Wまでの加熱に より短い常伝導部を生成し、この常伝導部が拡大伝播し得る最 小の電流値を調べた。最小伝播電流に対するサブクールの効 果は、モデルコイルよりもヘリカルコイルの方が小さいところに 止まっている。

3. 伝播速度の比較

ヘリカルコイルでの常伝導伝播速度は、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。1ピッチ以上の伝播があった3ケースについて伝 播速度の分布を図2に示す。外側赤道部(0 deg)で遅く、内側 赤道部(180 deg)で速くなっており、磁場分布と相関がある。低 磁場側と高磁場側の2点ずつの平均値を通電電流値で整理し た結果をモデルコイルと比較して図3に示す。経験磁界の差を 考慮すると、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では、11.4 kAでの伝播 速度が6 m/s程度であり、モデルコイルでの最低速度よりも遅い。 モデルコイルでは伝播しなかった電流域であったことが推測さ れる。このことは、ヒータによる初期常伝導部が十分な長さに達 していなかったことを示唆している。

4. まとめ

LHDヘリカルコイルでは、冷却温度を4.4 K飽和からコイル出 ロ3.95 Kまで下げることにより、最小伝播電流が11.0 kAから 11.4 kAに上昇した。ヘリカルコイル3ブロックの電流比を傾斜さ せた励磁法と組み合わせることにより、平均11.6 kA (H-O/M/I=11.4/12.0/11.4 kA)でのプラズマ実験が可能となり、 プラズマ実験範囲の拡大に貢献した。

参考文献

[1] S. Imagawa, et al., Nuclear Fusion 47 (2007) 353-360.

[2] S. Imagawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (June 2008) 455-458.



Fig.1. Minimum currents for dynamic propagation of a normal-zone, $I_{(mp)}^*$. Normal-zones in the LHD helical coil are estimated to be induced at the third layer.



Fig. 2. Propagation velocities of a normal zone in the LHD helical coil and the transverse magnetic field at 11.2 kA.



Fig.3. Comparison of propagation velocities in the LHD helical coil and the model coil.

超流動ヘリウム冷却大型超電導導体の三次元安定性解析

Three-dimensional analysis of stability of large scale superconductor cooled by superfluid helium

小林 啓人, 白井 康之, 塩津 正博(京大);今川 信作(核融合科学研究所) <u>KOBAYASHI Hiroto</u>, SHIRAI Yasuyuki , SHIOTSU Masahiro(Kyoto Univ.); IMAGAWA Shinsaku (NIFS) E-mail: hiroto-e@t05.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では核融合科学研究所の大型ヘリカル装置のヘリ カルコイルに用いられている超電導導体(LHD 導体)につい て、導体に発生した常電導部が非対称に伝播する片側伝播 現象のシミュレーションに成功し、片側伝播現象の要因である ホール電流の発生についてこれまでに報告を行っている[1]。 しかし、これまでに用いてきた二次元数値解析モデルでは、 横断面方向の電流拡散などを考慮できず、導体内の電磁現 象を十分に説明できていない部分があった。今回、横断面方 向の電流拡散や熱伝播が導体安定性に与える影響の検討、 また LHD 導体における常電導部伝播現象のさらなる解明を 目的として、三次元コードを開発し、例として Hell 冷却時の数 値解析を行ったので、本発表でその結果について報告する。

2. 解析モデル、解析条件

Fig.1 に LHD 導体の横断面と長手方向断面の解析モデル をそれぞれ示す。導体横断面は左右対称な形状をしているため、輸送電流拡散と Hall 電流も対称な拡がりを持つことを考慮し、断面の半分のみをモデル化している。メッシュの大きさはそれぞれ $\Delta x=0.22$ mm, $\Delta y=0.22$ mm, $\Delta z=1.00$ mm とし、時間ステップは 2.0×10⁻⁷s とした。電流拡散方程式、熱伝導方程式、Hall 効果の式、超流動 He の表面冷却熱流束の式を用いて、各メッシュそれぞれの輸送電流、Hall 電流、ジュール発熱密度、温度を計算した。Rutherford 導体長手方向の抵抗は超電導時はゼロ、常電導時は銅とNbTiの並列抵抗とし、横断面方向は銅抵抗の断面積比分とした。バルク液温 T_b=2.0K で 有限差分法を用いて解析を行った。

3. 解析結果と今後の課題

解析結果の一例として、横断面方向、導体長手方向それ ぞれの断面内での、t=1.0msにおけるジュール発熱の分布を 等高線で表したものと、Hall電流の流れを重ねた図をFig.2, Fig.3に示す。いずれの断面においても、ジュール発熱が発 生し始めた部分に沿ってHall電流が発生していることが分か る。特に長手方向のHall電流が大きく、常電導部分の非対称 性は横断面方向のHall電流とはあまり関係がないと考えられ る。本研究室における安定性試験の結果を基準として二次元 解析モデルとの比較を行った結果、常電導伝播の非対称性、 過渡安定性などについては改善が見られず、試験結果よりも 非対称性は小さくなった。これは、電流の横断面方向への拡 散が、常電導部伝播現象の非対称性の本質的な要因ではな いということを示唆しており、今後さらなる検討を要する。

また、今回はRutherford導体部分の物性を一様として扱っ たが、実導体はFig.1 の写真のように複雑な構造を持ってい るため、正確な導体シミュレーションを行うために、今後は Rutherford導体部分のモデルの改良、解析条件の検討など を行う予定である。

参考文献

[1] 大屋他:2005 年春季低温工学協会・超電導学会 謝辞:本研究の一部は核融合科学研究所 LHD 計画共同研 究並びに 21 世紀 COE プログラムにより行われたものである。



Fig. 1 Cross-sectional view of LHD conductor, and transverse and longitudinal simulation model of the LHD condoctor



Fig.2 Simulated longitudinal Hall current flow and joule heat distribution at T_B =2.0K, B_0 =6T, I=16.2kA, t=1.0ms.



Fig.3 Simulated transverse Hall current flow and joule heat distribution at T_R =2.0K, B_0 =6T, I=16.2kA, t=1.0ms.

LHD型核融合エネルギー炉の高温超伝導オプション設計 Design studies of the LHD-type fusion energy reactor with HTS option

<u>柳 長門</u>, 高畑 一也, 三戸 利行, 相良 明男, 今川 信作 (NIFS); バンサル ゴーラブ (IPR); 岩熊 成卓 (九大)

YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio, IMAGAWA Shinsaku (NIFS); BANSAL Gourab (Institute for Plasma Research, India); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

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

1. 研究の背景と目的

ヘリカル(LHD)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) は、100 kA 級の超 伝導導体によって巻線される。現在の基本案では、Nb3Al 線 材を用いたケーブルインコンジット導体(CICC)を用いた強制 冷却コイルを第一オプションとしており、ITER で開発された技 術の延長として製作可能と想定される[2]。ただし、導体1本あ たりの冷却長に関する制限から、コイルには複雑な配管構造 が要求される。そこで、ソリッド導体を用いた間接冷却コイルが 第2オプションとして提案され、Nb₃Sn 平角撚線を転移させて アルミ合金ジャケットに収めた導体が開発されている[3]。一方、 近年の急速な技術進展により、高温超伝導(HTS)コイルを採 用することも第3オプションとなり得る。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 ルを実現できるとともに、ヘリカルコイルの半ピッチごとに導体 を接続して分割組立することも原理的に可能となる[4]。

2. 100 kA 級 HTS 導体の設計、R&Dと課題

Fig.1に、現在提案している100 kA級 HTS 導体の設計例 を示す。Y系テープ線材を単純に積層してステンレス製ジャケ ットの中心に配置し、回りにホットスポット温度低減用の安定化 銅を入れた構造としている。高い臨界電流密度を有した HTS 線材は導体中心に薄く配置されるため、ヘリカル形状の巻線 に伴う歪みを十分に小さく抑えることができる。また、線材は単 純に積層されているため、機械的にも強固な導体となる。ここ で、線材間には転位がないため、必然的に電流分布の不均 ー(偏流)が生じることになるが、大きな温度マージンと熱容量 のために安定性は問題にならないと期待できる。実際、10 kA 級のプロトタイプ導体を試作して短尺試験を行ったところ、こ れらの基本事項を確認することに成功した[4]。一方、積層さ れたテープ線材には大きな磁気遮蔽電流が誘起され、プラズ マの閉じ込め磁場に対して影響を与えることが懸念される。こ の問題については、本来、ヘリカルピッチの対称性があるため、 トロイダル方向への積分として構成される磁気面(磁力線で構 成される入れ子状の面;Fig. 2 に計算例)に対して大きな影響 を与えることはないと考えてきた。今回、このことに対する定量 的な確認を行ったので、以下に報告する。

3. 磁気遮蔽電流を考慮した磁気面計算

HTS 導体のテープ線材はヘリカルコイルの小半径方向に 積層されるため、テープ面に誘起される磁気遮蔽電流によっ て、主に磁場の小半径成分が弱められることになる。最も厳し い条件としては、完全遮蔽を考えれば良いだろう。そこで、巻 線の各部において完全遮蔽となる磁化を計算によって与えれ ば良いが、より簡便な方法として、コイルのエッジ部にシート状 の電流を仮定することで小半径方向の磁場をキャンセルでき ることがわかった。Fig. 2 の下部に、この方法によって磁気遮 蔽電流を取り入れた小半径方向磁場成分の空間分布をヘリ カルコイルの断面に対して示す。ここで、シート状電流の大き さはコイル巻線全体が担う輸送電流とちょうど同じにしており、 この条件において小半径磁場をほぼゼロにできることがわか る。ただし、シート状電流のリターンパスについては、巻線全 体で一様と仮定している。また、これらの条件において得られ る磁気面の計算結果について、Fig. 2 の上部に示す。これを 見ると、磁気遮蔽電流の有無による磁気面形状の違いはごく わずかであり、よって、コイル内の磁気遮蔽効果がプラズマの 閉じ込めに対して大きな影響を与えることはないものと判断で きる。また、現実には線材の臨界電流密度は有限であり、完 全な磁気遮蔽が生じるわけではないため、この影響はさらに 小さくなると期待される。なお、今後、各巻線位置において予 測される臨界電流密度をもとに、さらに正確に磁気遮蔽効果 を取り入れた計算を行うことも計画している。



Fig. 1 Configuration of the 100 kA-class HTS conductor proposed for FFHR.



Fig. 2 Upper: Magnetic surfaces calculated for FFHR-2m2 Type-A (R = 17.33 m) with (a) and without (b) shielding currents. Lower: Spatial distributions of the radial component of the magnetic field inside the helical coil on the plane perpendicular to the winding direction.

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., IEEE Trans. Appl. SC. 18 (2008) 1151.

ILC 開発用 STF-6m クライオモジュール低温要素試験(1) 2K Performance Tests of STF-6m Cryomodule Components for ILC(1)

大内德人,小島裕二,近藤良也,土屋清澄,寺島昭男,仲井浩孝,中西功太,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(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,

NAKANISHI Kota, HAYANO Hitoshi, HARA Kazufumi, HIGASHI Norio, HISAMATSU Hiromi, HOSOYAMA Kenji,

YAMAMOTO Akira, MASUZAWA Mika (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 を組み込んだクライオモジュールの開発を行ってきた [1]。その開発の第1段階として、4台の超伝導空洞を組 込んだ6m長のクライオモジュールの冷却試験を2008年5 月から12月まで行い、クライオモジュールの熱的・機械 的特性を測定してきた[2,3]。

この試験結果及び設計検討から、ILC 用クライオモジ ュール設計の最適化を行うために必要な熱パラメータ及 び確立しなければならない技術課題が明らかとなってき ている。この為、高エネ研では 2009 年度に於いて4 台の 模擬空洞容器を持つクライオモジュールを2K に冷却し低 温機器の熱的・機械的性能に着目した試験を行い、その 結果をこれから始まる ILC クライオモジュールの設計に 反映させる。今回の学会では、試験全体のスケジュール 及び試験結果の一部について報告を行う。

2. STF クライオモジュールの構成

クライオモジュールのパラメータ及び断面図を表1と 図1に示してある。又、表1には熱負荷の計算値と測定 値が示してある。

Table 1 Design Parameters of STF Cryomodule

Cavity type	TESLA-like	
Vacuum vessel length (SS400)	5515 mm	
Vac. vessel outer diameter	965.2 mm	
Gas return pipe length (SUS316L)	5832 mm	
Cold mass, kg		
4 cavities	410	
Gas return pipe	515	
5 K shield (A1050)	185	
80 K shield (A1050)	210	
Helium supply pipe (SUS316L)	50	
Heat Load (Static, 4 Cavities), W	Cal./Meas.	
2 K	4.1/ 5.4	
5 K	10.1 / 8.2	
80 K	71.1/66.1	



Fig. 1 Cross Section of STF Cryomodule

STF クライオモジュールの主要部品は、内径 300mm の蒸 発ガス戻り配管とその配管からサポートされた超伝導空 洞4台で、これら機器は 2K に冷却される。超伝導空洞ビ ームパイプへは、RF エネルギーを送るための入力カップ ラーが室温の真空容器から接続されている。熱輻射によ る侵入熱の低減及び 5K、80K の温度定点として液体へリ ウムと液体窒素で冷却された 2 組のシールド板を低温機 器の外周部に持つ。

3. 熱的·機械的性能試験

2009 年度にクライオモジュールの冷却試験で実験的に 確立すべき技術と熱パラメータの測定項目を以下に示す。

(1)5K 熱輻射シールド板を取り外した場合の2Kへの熱 負荷の変化。ILCクライオモジュールでは、熱輻射シール ド板を1組にすることを検討している。STFクライオモジ ュールを用い、5Kシールドがある場合とない場合の熱輻 射による熱負荷の差を測定し、クライオモジュール熱設 計の基礎データとする。

(2) RF ケーブルの温度アンカーの最適設計と性能評価。 STF クライオモジュール単体での 2K への熱負荷の測定値 は 5.4W であるが、RF ケーブルの伝導による侵入熱がその 85%を占めることが低温試験から測定されている。このた め RF ケーブルの温度アンカーを含めた熱設計の改善を行 い、熱負荷の測定を行う。

(3) 超伝導空洞冷却時の変位測定。超伝導空洞を組込ん だヘリウム容器は蒸発ガス戻り配管から支持されている が、冷却時には、これらの機器の熱変形によりその位置 が変化する。この位置変化を測定するセンサーの開発及 び蒸発ガス戻り配管の変形の測定を行う。

(4)真空中及び減圧ヘリウムガス中での温度測定。10K 以下に冷却された機器の温度測定は、主に CERNOX 温度計 により行っている。真空中に於いては温度計の機器への 取付状態が測定値に大きく影響を与えることから、取り 付けも含めた測定条件の確立を行う。

(5)低温における磁気シールドの性能評価。真空容器に 組込まれた 9 セルの超伝導空洞には磁気シールドが取り 付けられているが、低温での遮蔽効果の測定を行う。

4. まとめ

高エネルギー加速器研究機構で開発を行っている STF 超伝導加速器空洞クライオモジュールの冷却試験から、 熱的・機械的な性能を向上させるために今後検討・開発 しなければならない課題が明らかとなった。冷却試験は4 月から始まっており、結果は本学会にて報告を行う。

参考文献

- K. Tsuchiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008), 2B-a01, p.123.
- [2] N. Ohuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008), 2B-a02, p.124.
- [3] K. Hara, et al., : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008), 2B-a03, p.125.
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(18) - 磁石システムの試運転結果 -

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiment (18)

- 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, 槙田 康博, 荻津 透, 荒岡 修, 飯田 真久, 笠見 勝祐, 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

現在東海村に建設中の大強度陽子加速器 J-PARC において、50 GeV-750 kW 陽子ビームを利用した次期ニュートリノ 振動実験計画が進行中である。このビームラインでは2.6 Tの2 極磁場と19 T/mの4 極磁場を同時に発生する複合磁場型 超伝導電磁石[1]が28 台並べられ、全てが電気的に直列に 接続される。その他、伝導冷却の補正用超伝導2極磁石3台 (6コイル)もビームライン上に配置される。冷凍機および磁石 システムの設置・接続作業は2008 年 12 月までにほぼ終了し、 12 月中旬から下旬にかけて冷凍機単体の性能試験を行った [2]。その後、2009 年 1 月からシステム全系の冷却を開始し、2 月から3 月にかけて磁石システムの試運転を行った。本報で は、主に磁石に関する試運転結果について報告する。

2. 試験日程

全系冷却は2009年1月13日から開始され、1月21日に 励磁準備完了となった。その後、クエンチ検出器のバランス 電圧調整、インターロックシステム試験、クエンチ保護ヒータの 動作確認などを行い、2月9日から主磁石の励磁試験を開始 した。試験項目としては、長時間励磁、保護システム確認試 験などがある。平行して、補正磁石の励磁試験も行っており、 こちらも主磁石と同様の試験を行った。主磁石と補正磁石の 同時励磁試験などを行った後、3月3日に試験を終了した。

3. 試験結果

電源調整および保護回路動作確認のために遮断試験を 数回行ったあと、2月21日に電流値5000Aをトレーニング無 しに達成した(Fig.1)。この値は当面のビーム強度である 30 GeV 陽子ビームの定格4400Aを超える値である。約10 分保持した後、4400Aにて2日間の長時間通電試験を行った。 Fig.1には磁石システムから戻ってきた超臨界へリウムの温度 も示してある。通電電流に合わせて冷却状態を調整している ため、若干温度が下がっているが、大きな温度上昇はなく、安 定して通電できている事が分かる。

本システムにおける主磁石の保護システムはクエンチ保護 ヒータとコールドダイオードで構成される。Fig. 2 に保護システ ム動作試験における信号例を示す。この試験では疑似電圧 によりクエンチ検出器を動作させた。電源はヒータ印加と同時 に遮断しており約 20 秒の時定数で電流減衰している。ヒータ 印加により磁石電圧は急激に上昇しているが、コールドダイ オードの動作電圧・約6 Vを超えると磁石と並列に接続された ダイオードへ電流がバイパスし始め、電圧が下がり、磁石が焼 損から保護される。以上のヒータ動作試験を全ての磁石につ いて行い、磁石が問題なく保護される事を確認した。

4. まとめ・今後の予定

完成したニュートリノビームライン用超伝導磁石システムの 試運転を行い、冷却システムおよび主磁石システムについて



Fig.2 Example of Current and Voltage Signals during Quench Protection Heater Test

大きな問題のない事を確認した。その他の試験結果の詳細に ついては当日報告する。今後の予定として、2009年4月にビ ームコミッショニングを行い、その後定常運転に入る予定であ る。

- T. Okamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2009) p.198
- Y. Makida, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) 1B-p09

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(19) - 冷却系コミッショニング-

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiment (19) Commissioning results of J-PARC cryogenic systems

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

伊藤 厚之, 永見 将和, 熊木 卓也, 高橋 亘, 中嶋 俊哉, 金田 知士 (大陽日酸); 市原 直 (三菱電機) MAKIDA Yasuhiro, OHHATA Hirokatsu, KIMURA Nobuhiro, OKAMURA Takahiro, SASAKI Ken-ich, NAKAMOTO Tatsushi, TOMARU Takayuki, IIDA Masahisa, TANAKA Kenichi, ARAOKA Osamu, SUZUKI Shoji, OGITSU Toru, YAMAMOTO Akira (KEK); ITOU Atsushi, NAGAMI Masakazu, KUMAKI Takuya, TAKAHASHI Tooru, NAKASHIMA Toshiya, KANEDA Satoshi(Taiyo Nippon Sanso); ICHIHARA Tadashi(Mitsubishi) E-mail: yasuhiro.makida@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が主体のビームラ イン装置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 設備が3年の期間をかけて建設された。

2. 低温設備の概要

低温設備の概略フローをFig.1に示す。設計方針を以下に まとめる。

コイル導体は直接冷媒に接して冷却される。このため、絶 縁耐圧及び流動不安定性の視点からガス相が混じる二相 流ではなく超臨界ヘリウム単相流でコイルを冷却する。 磁石列中に再冷却器は置かず、低温ポンプによる超臨界 ヘリウムの単純な1ループ循環が行われる。従って低温設 備は、Fig. 1 に示すように、室温圧縮機+冷凍機による冷 凍サイクルと低温ポンプ循環を組合わせた構成になる。 磁石中の超臨界へリウム流の圧力損失は、4.5 K, 0.4 MPa, 300 g/s の供給で 85 kPa と予測される。

磁石はコールドアイロン方式で、コールドマスとしては鉄 200トンとなり、これを20日以内に予冷する。

電流リードは、通常よく用いられるガス冷却式のもので、超 臨界へリウム流路より最大1g/sほど直接分流する。 予冷、加温時に、温度勾配、冷却速度の制限はない。 輻射シールドは 60~100 K に冷却する。輻射シールドの冷 却は冷凍機より分流させたヘリウムガスで行う。 クエンチ後の再予冷は、6時間以内とする。 液体窒素は、予冷完了後には使用しない。

低温設備は液体窒素部分を除き、高圧ガス保安法冷凍則 に準拠して設計・製作・検査を行う。

磁石は、陽子ビームからの放射線に晒されるため、トンネル 内に低温設備の機器の設置を極力排した。クエンチ時の 緊急放出弁は磁石内に組込まれるが、耐放射線性を有し、 電子回路であるポジショナーを使わない自動弁を新たに開 発した[1]。

3. 低温設備の設計・製作

主圧縮機は前川製作所製のスクリュー式 2 段圧縮機 (HE3225MSC)で、5 段のオイルセパレーターと結合し、 1.4MPa, 150 g/s の圧縮ヘリウムガスを供給する。冷凍機(コ ールドボックス)は、Linde 社で組立てられ、リンデの新系列の 膨張タービン(TED22 タービン)3 基とアルミプレートフィン式 の熱交換器、吸着筒及びバルブ類で構成される。サブクーラ ーはジェック東理社で製作され、液体ヘリウム貯槽とJT弁、ポ ンプと熱交換器及びバルブ類で構成され、液体ヘリウムの貯 液とポンプによる超臨界ヘリウムの供給を行う。ポンプは Barber Nichols 社製の遠心ポンプ(4.5 K, 0.4 MPa(outlet), 0.3 MPa(inlet), 300 g/s)を使用する。 屋外には 100m³ の ヘリウムタ ンクが4基設置され、うち3基は低温設備待機時のガス貯蔵 及びクエンチ時の放圧先として、残り1基は圧縮機のバッファ ーとして機能する。補助寒冷となる液体窒素は屋外の貯槽 (20000 @)にて受入及び貯蔵され、コールドボックスや低温精 製器に供給される。

4. 性能試験結果

冷却サイクルとしては4.5 Kで1500 Wの冷却能力が確認され た。磁石熱負荷300 W+1 g/sにポンプ負荷350 Wそして予測

Shield

Raduatui

Supply

Shield

されるビームロスの最大値 150 Wを十分冷却できる能 力があることを確認した。予 冷は、調整に要した時間を 除けば8日になった。クエン チ試験は加速器30 GeV運 転に対応した4400 Aで行い、 圧力上昇は緊急放出弁が 機能し、0.6 MPaにとどまっ た。再予冷時間も6時間以 内になった。

参考文献

1. Y. Makida, M. Iida, H. Ohhata, T. Okamura, T. Ogitsu, N. Kimura, K. Tanaka, T. Nakamoto, A. Yamamoto, R. Idesaki and N. Morishita : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.30.



Fig.1 Flow diagram of neutrino cryogenics.

イットリウム系超電導変圧器の巻線技術開発

Winding technology development of Y-based HTS power transformers

<u>岡元 洋</u>,林 秀美(九州電力);岩熊成卓(九州大学);吉田 茂(大陽日酸);斉藤 隆(フジクラ);青木裕治(昭和電線); 伊東 隆,田辺圭一,塩原 融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); YOSHIDA Shigeru(Taiyo Nissan); SAITO Takashi (Fujikura); AOKI Yuji (SWCC); ITO Takashi, 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(超電導変圧器)」(5ヵ年計画)は、平成20年度に開 始し、イットリウム系超電導線材(以下、Y系線材)を適用し配 電用変電所に設置する66kV20MVA級超電導変圧器の実用 化技術を検証する。本プロジェクトは、平成22年度に中間評 価を行い、評価結果により、平成23年度から変圧器システム 検証を行う。今回は、変圧器本体の開発目標、開発項目およ び20年度に実施した試験結果の一部を報告する。

2. 開発目標

超電導変圧器は、既設変圧器に比べて、小型化・高効率 が期待される。Y系線材による変圧器巻線技術として、大電 流化、低損失化、耐短絡電流についての技術開発を行う。ま た、電力系統の短絡容量対策として、変圧器巻線による限流 機能を検証する。Table1に、開発目標を示す。

Table 1 Targets of HTS power transformers

巻線技術	2kA 級通電巻線 100m 長級巻線の交流損失 1/3 以下 耐短絡電流巻線 (20MVA%インピーダンス)
限流機能	数100kVA限流機能付変圧器による定格 電流の3倍以下抑制
システム化	2MVA級66/6.9kV変圧器

3. 開発項目

本プロジェクトでは、下記の技術と共に、変圧器冷却システ ムや線材安定製造・加工技術の開発を行う。

(1)大電流化

三相 66k V 20MVA 変圧器の二次巻線定格電流 (1,676A_{rms})に対応する多層並列巻線は、素線電流を均流に するために素線間インダクタンスの均一化が必要である。この ために転位構造を採用する。素線電流分布のバラツキの低 減は、多層素線数減や低交流損失化にも寄与する。1kA級 モデルの成果(超電導応用基盤技術開発:以下、前プロジェ クト)を基に、2kA級モデルを開発する[1]。

(2)低損失化

変圧器巻線の低交流損失化は、変圧器効率向上と冷却 器容量の低減の要素である。長手方向に細線加工された短 尺5分割による巻線損失の1/5低減技術は、前プロジェクトで 実証した[2]。100m級長尺のY系線材分割加工技術を適用し た線材を用いたモデルコイルにより、低損化を実証する。

(3) 耐短絡電流強度

電力系統に短絡事故等が発生時には、事故箇所が保護 装置で分離されるまで、過大電流が変圧器巻線に継続して 通電される。また、変圧器は系統に接続する毎に、励磁突入 電流(遮断器の投入条件等により電流の大きさは異なる)が発 生する。過大電流の通電による常電導転移の解析や変圧器 巻線構造の最適化を行い、モデルコイルの短絡試験などによ り変圧器巻線の健全性を実証する。

(4)限流機能付加

変圧器巻線による限流機能検証のため、四巻線構造変圧 器モデルなどにより限流特性の解析・試験を実施する。

4. 超電導線材の安定化構造試験

(1)実験方法

過大電流通電時の保護として、超電導線に安定化銅を銀 層側又は基板側に配置した2種類の導体で、モデルコイルを 製作した。20MVA変圧器の短絡電流相当(1本当り465Arms) の電流を印加し、特性劣化の有無は巻線の臨界電流 I。値で 評価した。モデルコイルの仕様は下記に示す。

・線材仕様:5mm幅Gd線材、ハステロイ基板

・コイル仕様:内径Φ250、1重12ターン(巻線長さ9.4m) (2)実験結果

Fig1 に、印加エネルギーに対する巻線 *I*。の劣化状況を示 す。上記の安定化銅配置において、銀層側が優れていること が分かった。しかし、基板側もある程度の印加エネルギー耐 力があり、線材の長手方向 *I*。分布の改善により耐エネルギー 特性の向上が期待される。Fig2 に、安定化銅の配置が、(1)銀 層側、(2)基板側の場合の過電流通電時の波形を示す。電流 減衰(*I*_{cu}+*I*_{sc},*I*_{cu})および安定化銅への転流(*I*_{cu})を確認した。









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。

- H. Okamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.91
- H. Okamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.72

三相巻線超電導限流器の基礎特性

Study on Three-phase Superconducting Fault Current Limiter

<u>蔡</u> 泳, 奥田 聡一郎, 小竹 達也, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大学) SAI Yon, OKUDA Soichiro, ODAKE Tatsuya, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University)

E-mail: cc0219@live.com

1. はじめに

近年、電力系統の大規模化及び複雑化に伴い、故障電 流が増大し、送電線や電力設備に大きな被害が発生すること が懸念される。故障電流増大の解決策の一つとして、限流器 の採用が提案されている。我々は三相巻線超電導限流器を 新しく提案する。これは磁気遮蔽型限流器と三巻線リアクトル の両方のメリットを生かした機能を持つ。本限流器の原理実 証を行うため、小型モデルを製作し、試験を行ったので、その 結果について述べる。

2. 三相超電導限流器の概要と原理

Fig.1 に,提案した三相巻線超電導限流器の概略図を示 す。これは,三巻線リアクトル[1]の原理に基づており,巻数が 等しい5つのコイルの中,コイルal, bl, cl は鉄心の左脚に設 置され,それぞれ系統のa相, b相, c相に接続される。また中 央脚には,円筒型のバルク超電導体とb相, c相にそれぞれ 直列に接続されたコイル b2, c2 が設置される。なおコイル c2 のみ,その他4つのコイルに対して逆向きとする。

定常時は、コイル al, bl, cl に三相平衡電流が流れるため、3 つのコイルが作る磁束は互いに打ち消しあい、中央脚のコイルb2, c2が作る磁束は、超電導体に流れる遮蔽電流が作る逆向きの磁束によって打ち消される。このように、定常時は鉄心に磁束が入らない状態となるため、限流器のインピーダンスはコイルの巻線抵抗のみとなり、非常に小さくなる。

不平衡故障時には,故障相の電流が三相限流リアクトル によって限流される。平衡故障時には,超電導体がクエンチ し,鉄心に磁束が入ることによって,大きなインピーダンスが 発生して限流する。

3. 実証試験の結果と解析

提案した限流器は全ての故障に対して限流効果を持つこ とを実証するため、小型モデルを製作し、試験を行った。電源 を振幅2 Vの三相平衡電圧、負荷を5 Ωの三相平衡負荷と した。5つのコイルの巻数を、全て60巻とする。故障はトライア ックにより負荷を短絡することで模擬し、故障期間は50 msとし た。全ての故障パターン(1LG, 2LG, 3LG, 2LS)について故障 試験を行った。

Fig.2 に,平衡故障の一例である三線地絡故障時の電流 波形を示す。故障電流は三相とも抑制されており,限流器に よる効果が確認できた。

Fig.3 は全ての故障に対して,限流器がある場合とない場合の故障電流の比である。提案した限流器は全ての故障において電流を60%以下に抑制できた。

Table 1 に,解析で求めた故障電流の振幅を,実験値との 比較をあわせて示す。実験値と解析値は比較的よい一致を 示したことから,実験結果の妥当性が証明された。

4. おわりに

以上,解析と実験を通して,提案した限流器の原理実証 や有用性の検証を行った。今後は,超電導体の挙動を含め た限流器の特性の把握と,限流効果を向上させるための検討, さらには実系統モデルの設計を行い,実用化に向けて研究を 進めることが必要である。







Fig. 2 Fault current waveforms after 3LG



Fig. 3 Fault current ratio for all fault conditions

Γ	a	b	le	1	С	omparison	of	exper	imental	and	cal	lcu	lated	va	lue

	Expe	rimental	value	Calo	culated v	value
	Ia[A]	Ib[A]	Ic[A]	Ia[A]	Ib[A]	Ic[A]
1LG (a)	3.48			3.30		
1LG (b)		2.20			2.17	
1LG (c)			2.70			2.76
2LG(a,b)	6.03	4.17		6.50	3.68	
2LG (a,c)	3.50		4.13	2.59		2.60
2LG (b,c)		2.36	1.79		1.10	1.56
3LG	6.14	4.43	4.05	6.90	3.93	1.60

参考文献

[1] S. Shimizu, O. Tsukamoto, T. Ishigohka, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 3 (1993) p. 578

高温超電導誘導/同期機の車載応用への適用可能性に関する検討

Study on applicability of HTS induction/synchronous machine to automobile application

中村 武恒, 松村 一弘, 西村 敏治, 長尾 和昌 (京大); 伊藤 佳孝, 寺澤 俊久 (イムラ材研); 岡 徹雄 (新潟大); 長村 光造 (応用科学研); 雨宮 尚之 (京大)

NAKAMURA Taketsune, MATSUMURA Kazuhiro, NISHIMURA Toshiharu, NAGAO Kazumasa (Kyoto Univ.); ITOH Yoshitaka, TERAZAWA Toshihisa (IMRA); OKA Tetsuo (Niigata Univ.); OSAMURA Kozo (RIAS); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

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

1. はじめに 我々は,高温超電導誘導/同期機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)を電気駆動式自動車に搭載するための精力的かつ 包括的検討を実施している。HTS-ISM は,我が国の電気自動 車用モータとして専ら検討されている埋め込み磁石形 (Interior Permanent Magnet: IPM)モータには無い優位性を有しており, 次世代の車載用モータとして期待している[1]。車載駆動用モー タに主として要求される特性は、広範な速度範囲に亘る高効率 化ならびに高トルク密度化である。本報告では, HTS-ISM の車 載応用への可能性について,上記観点から検討したので報告 する。

2. 試作と試験方法 Fig. 1 には, 高出力試験のために開発し たHTS ロータバーの概略側面図を示す。臨界電流 74 A@77 K のビスマス系高温超電導テープ材(テープ幅: 2.6 mm)を10枚 バンドルし、1本のロータバーとした(1本当たりの臨界電流:74 A×10= 740 A)。また, Fig. 2 には試作した HTS ロータの外観 写真を示す。試作した同ロータを既存(常電導)の固定子内に 挿入し,液体窒素浸漬状態にて試験を実施した。

3. 高トルク化の実証試験 Fig. 3 には, Fig. 2 の回転子を適用 した負荷試験結果の一例を示す。一次周波数 40 Hz, 入力線 間電圧 250 V において, 80 Nm を超える準同期トルク^[2]が達成 されていることが分かる。同一体格のかご形誘導機(アルミダイ カスト)の定格トルクが室温で約8 Nm 程度であることを考えると, 高効率同期回転状態であるにもかかわらず約1桁トルクが向上 している。この値は、 上記アルミダイカスト誘導機を液体窒素に 冷却しても到底得られない値である。

4. 効率マップ 上記試験結果をベースに,トヨタ自動車の第二 世代プリウスに搭載されている 50 kW 級駆動モータを想定し, 様々なトルクならびに車速における効率マップを,非線形等価 回路解析結果によって求めた。固定子巻線抵抗が,液体窒素 温度の銅線に比較して1桁低減した場合について Fig. 4 に示 す。同図から, HTS-ISM を車載した場合, プリウス搭載の IPM モータ^[3]に比較して非常に広範な速度範囲で高効率であること が明確である。試験や解析方法,あるいは具体的なシステムの 検討結果など,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た。







Fig. 2 Fabricated HTS rotor.



Fig. 3 An example of torque curve at 77 K.



Fig. 4. An example of efficiency map of HTS-ISM obtained from electrical equivalent circuit.

- [1] 中村武恒 他:平成 21 年電気学会全国大会、平成 21 年 3月17~19日,北海道大学 (2009年3月) 5-116.
 [2] 長尾和昌 他:平成 21 年電気学会全国大会、平成 21 年
- 3月17~19日,北海道大学 (2009年3月) 5-117. [3] R. H. Staunton et al., "Evaluation of 2004 Toyota Prius
- Hybrid Electric Drive System", U.S. Department of Energy Report (DE-AC05-00OR22725) (2006) p. 34.

液体水素移送ポンプ用 MgB,超電導モータの特性評価

Characteristic evaluation of MgB₂ superconductor motor

for liquid hydrogen circulation pump

中村 武恒, 山田 裕輝, 菅野 未知央 (京大); 柁川 一弘 (九大); 高橋 雅也, 岡田 道哉 (日立) NAKAMURA Taketsune, YAMADA Yuki, SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); TAKAHASHI Masaya, OKADA Michiya (Hitachi, Ltd)

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

1. はじめに 我々は, 高効率な液体水素循環ポンプとして, MgB, 超電導線材を適用した高温超電導誘導/同期モータ (High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM)を研究開発している^[1,2]。本稿では, 試作なら びに特性評価の現状について報告する。

2. 試作と試験方法 回転子試作に使用する MgB₂線材(0.8 mm φ, 銅シース, 単芯)は, 日立研究所において PIT 法で作 製された。実験結果をもとに20Kにおける通電特性を評価した ところ、(臨界電流, n 値)=(336 A, 180)であった^[2]。Fig. 1 には、 MgB2かご形回転子試作のために開発したHTSロータバーとエ ンドリングの外観写真を示す(日立研究所において製作)。また, Fig. 2 には試作した HTS ロータの外観写真を, さらに Fig. 3 に は試験用クライオスタットの外観写真をそれぞれ示す。

3. 特性評価 試験に先立ち,まず非線形等価回路解析に基 づいてトルク特性を計算した。運転温度 20 K(液体水素大気圧 沸点)における解析結果をFig.4に示す。同図から明らかなよう に、HTS-ISM は 22 Nm 程度の準同期トルク^[3]を有している。さ らに注目すべきは、回転数によらずほぼ一定のすべりトルクを 有していることであり、このことは、複雑な流動負荷が印加され た場合にもロバストであることを示している。上記定トルク特性は、 真にMgB2線材の極めて大きなn値が機器特性として具現され たものであり、同線材をHTS-ISM に適用する大きなメリットの一 つが明確化された。試験や解析方法など,詳細は講演当日に 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。

- [1] K. Kajikawa et al., IEEE Trans. Applied. Supercond., in press
- [2] 山田裕輝 他:平成 21 年電気学会全国大会、平成 21 年 3月17~19日,北海道大学(2009年3月)5-120. [3] 長尾和昌 他:平成 21 年電気学会全国大会、平成 21 年
- 3月17~19日,北海道大学(2009年3月)5-117.



(a) Rotor bars (b) End ring Fig. 1 Photographs of components for HTS cage windings.



Fig. 2 A photograph of MgB₂ cage rotor.



Fig. 3 Photograph of cryostat.



Fig. 4 Analysis result of torque (τ) vs. slip (s) curve at 20 K, which is obtained from the nonlinear electrical equivalent circuit.

高温超伝導バルク磁石を用いた永久磁石の同面異極着磁とその磁場分布

Magnetizing of Permanent Magnet Using HTS Bulk Magnet and the Magnetic Field Distribution Measurement

川崎 信隆*, 村谷 知樹, 今井 順, 広瀬 豊, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄,

岡 徹雄(新潟大学),伊藤 佳孝,寺沢 俊久(イムラ材研)

Nobutaka kawasaki, Tomoki Muraya, Jun Imai, Yutaka Hirose, Jun Ogawa, Satoshi Fukui, Takano Sato,

Tetsuo Oka (Niigata University) Yoshitaka Ito, Tosihisa Terasawa(IMRA MATERIAL R&D)

1.はじめに

電気自動車や燃料電池自動車にはモータが搭載されており、 そのモータ内にある永久磁石の着磁方法は鉄のヨークを使用 するので、その飽和磁束密度の影響で2T以上の着磁磁場を 発生することが困難になっている。一方、高性能な希土類磁 石の着磁には2.5T以上の磁場が必要とするため、モータ自 体の設計自由度を下げることになる。高温超伝導バルク磁石 (以下バルク磁石)は、3Tもの強磁場を捕捉することができ、 在来のパルス着磁で発生してしまう熱や、冷却用の大量の水 が必要ないために安全に着磁を完了することができる。本報 告ではバルク磁石による、新たな着磁方法の提案をねらう。

今回はバルク磁石を用いた着磁で、板状の試料に異極の磁場を与えて着磁する際に、磁極の走査ピッチを変化(オフセット)させるという実験を行ったのでその報告をする。

2.実験方法

今回の着磁実験にはFig.1のGMサイクル冷凍機(アイシン精 機製、GD101S)を用いた対向型の磁極装置で、バルク磁石を 向かい合う筒状のチャンバー内に据え付け、その表面には N 極(右)に3.42T、S 極(左)に3.27Tの磁場を捕捉した。試料に はNEOMAX(NdFeB系の焼結磁石76×50×5mm³)を用いた。

実験方法は、試料をS極で走査して着磁し、同面をN極で1 回目の走査軌跡からオフセットした位置で再度走査する。その 後ホールセンサーによる磁場分布測定装置(F.W.ベル社製、 RHT920)で試料の磁場分布を測定した。

3.実験結果と考察

Fig.2にS極とN極走査距離と試料表面の磁場分布の関係 を示す。比較のために、超伝導マグネットにより完全着磁され た2枚の永久磁石を示す。オーバラップ20mmではN-Sが磁 石表面で左右対称に着磁されている。Fig.3には走査距離と N-S極間の傾きの関係を示す。操作距離0-10mmでは0.035mm から徐々に減少し 0.023mm まで傾きが小さくなっていくが、 操作距離20mmでは0.050mmと傾きが大きくなりそれ以降では 傾きは一定となる。

傾きが 0.050mm 付近でほぼ一定となる理由としては、 1度着磁された磁極が書き換えられたためと考えられる。

4.今後の計画

JMAGを利用し着磁解析を行い、書き換えが行われた磁 極間の磁場解析を行う。







ヘリカル型海流 MHD 発電機の流動特性

Hydraulic characteristics of helical-type seawater MHD power generator

<u>BUI ANH KIET</u>, 武田実(神戸大);木吉司(物質・材料研究機構) 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として海洋エネルギ 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、リニア型よりも有効に印加 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 は、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、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⁾、まず回転数に着目して圧力分 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ス デューサー(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 スデューサー(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、株式会社デイシー 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(へ 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3、5、7 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10 m²/h ずつ増やし、循環ポンプで 流すことの可能な最大流量 45 m³/h まで増加させ、バルク形 半導体トランスデューサーを1つ、拡散形半導体トランスデュ ーサーを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

回転数 3、5、7 のヘリカルモデルを用いて、圧力分布の測定を行った。Fig.1 に回転数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、最小二乗法による2次の近似曲線である。2次近似の係数はそれぞれ0.028、0.032、0.044 であった。Fig.1 よりヘリカルモデルの入口から出口までの圧力の減少率を見ると、流量40 m³/hのときに、3回転では51%、5回転では55%、7回転では54%となり、回転数依存性はあまり見られなかった。また、ヘリカルモデル入口付近の圧力減少率は3回転、5回転、7回転共に約20%であり、流体損失に与

える影響が大きいことが分かった。

次に、流量をパラメーターとして流体損失と回転数の関係 をFig.2 に示す。流量 10 m²/hのときの流体損失を基準として、 流量 40 m²/hのときの値(流量および流速が 4 倍)を見ると、3 回転では17倍、5回転では15倍、7回転では12倍であった。 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 with rotation number of 3, 5 and 7.



Fig.2 Rotation number dependence of flow loss with water flow of 10, 20,30 and 40 $\rm m^3/h.$

参考文献

 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. 74 (2006) p.221

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(c)(18560767)の助成を 受けたものである。

磁気浮上型超電導免震装置の浮上力改善に適した永久磁石配置とバルク体形状

Suitable PM arrangement and HTS bulk shape for improving levitation force in a magnetic levitation type seismic isolation device

<u>津田理</u>, 佐々木修平, 島田健作, 谷貝 剛, 濱島高太郎(東北大学); 山田高之, 安井健治(奥村組) <u>TSUDA Makoto</u>, SASAKI Shuhei, SHIMADA Kensaku, YAGAI Tsuyoshi, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University); YAMADA Takashi, YASUI Kenji (Okumura Corporation) E-mail: tsuda@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

これまでに、HTS バルク体と永久磁石を用いた磁気浮上 型超電導免震装置を提案し、モデル装置を用いた免震原理 検証、浮上力・振動伝達特性評価を行ってきた[1-2]。現在は、 バルク体冷却に液体窒素を使用しているが、超電導免震装 置を実用化する際には、バルク体を低温容器に収納し、冷凍 機冷却する必要がある。しかし、低温容器には真空層がある ため、バルク体と永久磁石間のギャップは、最低でも5mm 確 保する必要がある。そこで、本研究では、大きなギャップ時に 大きな浮上力を得るのに適した永久磁石配置とバルク体形状 について検討した。

2. 実験方法

浮上力はバルク体の経験磁場に大きく依存するため、大 きなギャップ時に大きな浮上力を得るには、永久磁石表面か ら離れた位置での磁束密度を可能な限り大きくする必要があ る。そこで、本研究では、これまでのモデル装置に適用してき た Fig.1(a)の磁極配列(Opposite 配列)に対し、新たに Fig.1(b)の Halbach 配列に着目し、バルク体に働く浮上力のギ ャップ依存性を評価した。浮上力測定に使用した永久磁石は、 10mm×10mm×10mmのNd-Fe-B永久磁石(表面磁束密度 約450mT)であり、これらを厚さ0.5mmの鉄板の上に配置した。 バルク体は、直径 32mm、厚さ 5mm の円柱状 QMG-DyBCO バルク体で、バルク体冷却には液体窒素を使用した。永久磁 石上空に、zステージに固定されたバルク体を設置し、z ステ ージを用いて永久磁石とのギャップを変化させた時の浮上力 を、ロードセルで測定した。次に、Fig.1(b)の Halbach 配列を 用いて、直径 32mm で厚さの異なる 5 種類(1~5mm)の円柱 状 QMG-GdBCO バルク体の浮上力測定を行い、浮上力のバ ルク体厚さ依存性について検討した。なお、以上の実験では、 バルク体着磁時のギャップをすべて 20mm とした。

3. 実験結果·考察

Fig.1 の2種類の永久磁石配列における、バルク体単位厚 さあたりの浮上力のギャップ依存性を Fig.2 に示す。これより、 Opposite 配列では、ギャップが小さい場合には大きな浮上力 が得られるものの、5mm 以上のギャップではほとんど浮上力 が得られず、冷凍機冷却時の浮上力確保が困難であることが 予想される。これに対し、Halbach 配列では、ギャップが 5mm 以上であっても、バルク体単位面積あたりの浮上力 10~ 20kN/m²(一般家屋に相当)が得られており、Halbach 配列が 冷凍機冷却時にも有効であるといえる。Fig.3 に Halbach 配列 時における、浮上力のバルク体厚さ依存性を示す。これより、 浮上力はバルク体の厚さとともに増加するものの、5mm 以上 のギャップでは、バルク体厚さが小さい程、バルク体単位厚さ あたりの浮上力が大きくなることがわかった。よって、実用化の 際には、バルク体厚さをできるだけ小さくし、その分バルク体 数を増やす方が、有効であるといえる。また、Fig.2とFig.3より、 DyBCO バルク体と GdBCO バルク体とでは、GdBCO バルク 体の方が、大きな浮上力が得られた。GdBCO バルク体の方 が加工しやすい点も考慮すると、実用化の際には、GdBCO バルク体を使用する方が望ましいといえる。



Fig.1 Schematic drawing of two types of permanent magnet arrangements for improving levitation force of HTS bulk.



Fig.2 Experimental results of lift per unit thickness of disk-shaped DyBCO bulk in a levitation system using Opposite and Halbach arrangements of PM.



Fig.3 Experimental results of lift per unit thickness of disk-shaped GdBCO bulk as a function of bulk thickness in a levitation system using Halbach arrangement of PM.

- M. Tsuda et al.: IEEE Trans. on Appl. Super. Vol.17 (2007) p.2059
- M. Tsuda et al.: IEEE Trans. on Appl. Super. Vol.18 (2008) p.832

20kN 対応超電導磁気軸受の開発

Development of superconducting magnetic bearing that capacitated 20kN-levitation

<u>清野 寛</u>, 長嶋 賢(鉄道総研)

<u>SEINO Hiroshi</u>, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: seino@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁石と超電導バルク体を組み合わせた磁気軸受(超電 導磁気軸受)の開発を進めている。鉄道用フライホイール蓄電装 置の支持軸受に適用することを目的としている。開発の第一段階 として、液体窒素冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、 固定側に超電導磁石を配置する構成を採用し、これをスラスト軸 受に適用した。2005-2007年度は試験用超電導磁気軸受を製作 して、静荷重で10kNの浮上支持能力を確認し¹⁾、5kN 負荷で最 高速度 3000rpmの回転試験を行った²⁾。2008年度からの2カ年 間で、試験用超電導磁気軸受の支持荷重を 20kN に向上し、特 性確認試験を行う予定である。

2. 鉄道用フライホイール蓄電装置の軸受荷重容量

回生失効対策用の蓄電装置として必要な蓄電容量は、営業電車での回生絞り込みの実態調査の結果³³から、10kWh(36MJ)程度と見積もることができる。一般的な慣性モーメントと角速度から回転慣性エネルギを求める計算式⁴¹によって、このエネルギを蓄積できるフライホイール形状を試算すると Fig. 1 のようになる。これは、3000rpm から 1500rpm までの回転数変化で放出される蓄積エネルギが 36MJとなるフライホイール質量を算出したものである。質量 2000~4000kg 程度のものを 3000rpm で回転させることで、10kWh(36MJ)のエネルギ蓄積が可能である。これが、超電導磁気軸受の荷重容量、回転速度のひとつの目標となる。このため、高荷重化の目標数値を 20kN と設定した。



Fig.1 Example of the 10kWh energy-storage flywheel

3. 試験用超電導磁気軸受の改良

Table 1 Properties of SC-bearing for 20kN-levitation

Levit	ation side: HTS	S-bulk	Ground side	: SC-magnet
H	ΓS -bulk ropert	ies	Magnet propirties: Cusp field, Nb-Ti	
Material	Gd-Ba-Cu-O,	LN ₂ cool	coils, Dry magnet	
Ring: Din 30/Dout 80, t20, Disk: Dout 80, t20,			, Magnetic flux density	
Postion-1:2	Postion-1: Z=-20 / Position-2: Z=190			% output)
/	Position-1	Position-2	Position-1	Position-2
Amount of HTS bulks	2 disks	2 rings	$ \begin{array}{c} 1.6 \text{ T} \\ \left(\begin{array}{c} \text{Min. 0} \\ \text{Max. 3} \end{array}\right) $	2.3 T (Min. 1.7 (Max. 3.1)
Levitation load capacity		Maximum	24 (kN)
Letinution	oud explicitly	Rated	20 (kN)	

Table 1 に 20kN 対応の試験用超電導磁気軸受の仕様を示す。 超電導磁石の磁界仕様は変更せずに,荷重支持材を変更して 耐荷重を20kN(最大負荷荷重24kN)に改良した。ロータ側の超電 導バルク体については大型化し,数量を倍加することで,発生す る電磁力を向上した。

4. 静荷重試験結果

高荷重化改良した試験用超電導磁気軸受の静荷重試験を行い、20kNの安定浮上支持能力があることを確認した。

なお,静荷重試験では,磁束侵入の抑制に効果のある予荷重 法 ⁵も試行した。静荷重試験の結果,超電導コイル出力 65%程 度で 20kN の浮上力が発生することを確認した。バルク体を完全 反磁性として磁場解析した結果では 58%程度で 20kN が発生して いることから,磁束侵入の影響を受けているものと考えられる。

Fig. 2 に予荷重法の適用有無での電磁力保持特性の比較を示す。予荷重法では、20kNの20%増しの24kNを10分間付与している。予荷重の付与なしでは5時間で20.5kNから18.6kNまで電磁力が低下したが、予荷重を付与したものは10時間保持しても電磁力は20.1kNであった。この間の電磁力の低下率は2%程度である。このことから、高荷重の浮上力を発生させる本軸受においても、予荷重法が磁束侵入による電磁力低下を抑制するのに効果的であることが確認できた。



(Example of a stable levitation)

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。

- H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.262
- H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2007) p.33
- S. Tamaki, et al.: Proc. the 10th J-Rail Symposium, No.03-51, 199-230 (2003).
- JSME edit: JSME Mechanical Engineers' Handbook, Applications, B1-p.148, 1990
- M. Hirose, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 37, No. 11, pp. 712–717, 2002

工学材料回折装置「匠」および実用超伝導コンポジットへの応力・ひずみの影響 Engineering Materials Diffractometer "TAKUMI" and Stress/Strain Effects on Industrial Superconducting Composites

<u>ハルヨ ステファヌス</u>,相澤 一也,伊藤 崇芳,新井 正敏,辺見 努,松井 邦浩,鈴木 裕士(原子力機構);長村 光造(応用科 学研);町屋 修太郎(大同大学);土屋 佳則(NIMS);淡路 智,小黒 英俊,西島 元(東北大)

HARJO Stefanus, AIZAWA Kazuya, ITO Takayoshi, ARAI Masatoshi, HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, SUZUKI Hiroshi (JAEA); OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); TSUCHIYA Yoshinori (NIMS); AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, NISHIJIMA Gen (Tohoku Univ.)

E-mail: harjo.stefanus@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速研究機構 は共同で、物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理および 原子力科学の推進を目指して、大強度陽子加速器計画 (J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex)を 2001 年より進めてきた。J-PARC では工学応用を目的とした 飛行時間型中性子回折装置(工学材料回折装置「匠」)の建 設が進んでおり、間近に完成する。匠の最初の成果を出すた めに、我々は実用超伝導コンポジットへの応力・ひずみの影 響というタイトルでプロジェクト研究を申請し、いくつかの予備 実験を行なった。本発表では、匠の詳細性能、現状、可能な 応用等について紹介し、上記のプロジェクト研究について最 初の成果を含めて紹介し、ご意見・討論をお願いしたい。

2. J-PARC 工学材料回折装置「匠」[1]

匠は応力・ひずみ解析やその他結晶構造解析を含む材 料工学の研究を行なうための飛行時間型中性子回折装置で ある。匠は、25Hz 運転の 1MW 級の液体水銀ターゲットのパ ルス中性子源を持つ J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF)のビームポート No.19 に設置された。 匠の最高分解能 Δ d/d は 0.2%以下であり、100με以下のひずみ測定精度に相 当する。広い入射波長幅および飛行時間法を用いたため、同 時に測定できる面間隔レンジが広く、0.5 < d < 5.0Å (通常モ ードでは0.5 < d < 3.0Å)であり、複数の回折ピークが同時に測 定される。したがって、匠は1)工業部品内のひずみまたは応 力の評価のみでなく、2)変形および熱的なプロセス中の構 造変化の評価、3) 工学材料中の微小領域での結晶構造解 析、4) 製造過程および使用中のその場測定、および 5) 集 合組織解析、等をカバーし、材料工学の研究には非常に使 いやすい装置である。さらに、J-PARC の高強度中性子源と の組み合わせにより、時間スケールの短い時分割測定等の 応用が可能となり、様々な応用が期待される。



Fig. 1 Current status of the Engineering Materials Diffractometer "TAKUMI"

匠の建設は現在最終段階にあり、中性子ビームを用いた コミッショニングが既に2008年9月より開始し、同年12月より 20kW での施設供用が開始した。コミッショニングから、設計 どおりの仕様が実現できたことを確認し、通常の測定もできる ようになった。さらに、2009年3月にFig.1に示すように匠はほ ぼ完成された状態となり、今後の様々な分野での利用が期待 される。

3. 匠を用いた実用超伝導材料に関するプロジェクト研究

実用超伝導コンポジットの超伝導特性は内部ひずみに大きく影響されることはよく知られている。また、我々は実用超伝導コンポジットの内部ひずみを測定するために量子ビーム(中性子、X線、放射光)の応用が非常に有効であることを示し、 最近、「超伝導材料の応力・ひずみ効果に関する量子ビーム応用研究会」を立ち上げた。匠の最初の施設供用の成果にもなるように J-PARC のプロジェクト研究を申請して、研究会のメンバーはほぼ全員が参加し、いくつかの実験を行なった。 2008年度に実施した課題は次のとおりである。ITERのCSコイル内の内部ひずみ予備測定、Nb₃Sn素線の室温引張変形中その場測定である。

本稿では YBCO テープの室温引張変形中その場測定を 代表的記述する。用いた YBCO テープは幅が 3.9mm、厚さが 約 90µm であり、その中に YBCO 層は約 1µm である。このテ ープを2枚重ねて匠付属の引張試験機に Fig.2のようにセット して荷重を段階的に増加させて 5.4ks の測定時間で回折プロ ファイルを収集した。得られた引張方向の回折プロファイル (北検出器バンクで収集した)を Fig.2 に示す。荷重の増加に 伴い、YBCO のピーク位置が大きい面間隔にシフトし、格子ひ ずみが大きくなることが分かった。詳細は講演で紹介する。



Fig. 2 YBCO specimen alignment for measurement and diffraction profiles measured at north detector bank

4. 終わりに

匠は材料工学研究を行なうためにパワフルなプローブの 一つであり、超伝導材料のひずみ問題や新規材料開発への 適用が期待される。本研究のテーマに留まらず、様々なテー マで今後ご自由にご応募ください。

参考文献

1. ステファヌス ハルヨ:日本結晶学会誌, Vol. 50 (2008), p. 40-45

66kV 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 66 kV YBCO Superconducting Cable

王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大);大屋 正義, 湯村 洋康(住友電工);藤原 昇, 塩原 融(ISTEC-SRL)

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

OHYA Masayoshi, Yumura Hiroyasu (Sumitomo Electric); FUJIWARA Noboru, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

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

1. はじめに

現在開発中の 66 kV-5 kA 級超電導ケーブルは、3 心一括 のケーブル構造が考えられており、ケーブルコアはケーブル中 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、それらの複合導体には最大で31.5 kArms、2 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 66 kV-5 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)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、FV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 ブルの最外層であるPPLP絶縁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。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} (\nabla \boldsymbol{\phi}) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{\text{cond}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{R}_{\text{shield}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\text{cond}} \\ \boldsymbol{I}_{\text{shield}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{\text{cond}} & \boldsymbol{M} \\ \boldsymbol{M} & \boldsymbol{L}_{\text{shield}} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\text{cond}} \\ \boldsymbol{I}_{\text{shield}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{\text{cond}} \\ \boldsymbol{V}_{\text{shield}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{\text{cond}} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(2)

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

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_g は液体窒素による冷却で ある。

3. 結果

66kV-5kA 級超電導ケーブルの開発では、31.5 kArms、2 s の耐短絡電流保護が要求される。そして、超電導層の温度上 昇(ΔT)が 200 K 以内(常温未満)となるように(今回の設計目 標)、線材安定化層および銅シールド層について検討した。

3.1 線材安定化層の検討

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 140 mm²と設定し、線材安定化層の厚みをパラメータとして、31.5 kArms、2 s の短絡電流通電による温度上昇について評価した。 線材安定化層の厚みと Δ Tの関係をFig. 2 に示す。線材安定 化層の厚みが 30 μ m 以上で HTS 導体層と銅フォーマの温度 上昇が 200 K 以下となった。

3.1 銅シールド層の検討

HTS シールド層の耐短絡電流保護として、銅シールド層と線 材安定化層が設けられている。今回は、線材安定化層の厚さ を52 µmと設定し、銅シールド層が3層(断面積 88 mm²)もしく は4層(断面積 118 mm²)の場合において、31.5 kA、2 secの短 絡電流通電による温度上昇について評価した。銅シールド層 の層数と Δ Tの関係をFig. 3 に示す。銅シールド層を4層(断 面積 118 mm²)にした場合、HTS シールド層の温度上昇が200 K以下となった。

4. まとめ

今回は、66 kV-5 kA 級超電導ケーブルの耐過電流設計を 行うために、線材安定化層と銅シールド層について検討した。 今後は、超電導モデルケーブルを作製し、その短絡試験およ び数値解析を行っていく予定である。



Fig. 2 Δ T vs. thickness of copper stabilizer



Fig. 3 Δ T vs. cross-sectional area of Cu shield layers

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

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

三相同一軸ケーブルの事故時の温度上昇 Temperature Rise of a Tri-axial HTS cable at Fault Condition

胡 南南, 添田 誠司 戸田 雅久 オズジバン・ヌリ 谷貝 剛 津田 理 濱島 高太郎 (東北大)

HU Nannan SOEDA Seiji TODA Masahisha OZCIVAN Nuri YAGAI Tsuyoshi TSUDA Makoto HAMAJIMA Takataro

(Tohoku Univ)

E-mail:hunannan@ecei.tohoku.ac.jp

1. Introduction

By the advantage of more compact structure, small leakage field, and low heat loss, tri-axial cable become to be mainstream design in recently HTS practical project. However, before the cable can be putted into practical use, the reliability of the cable in fault condition should be ensured. Since fault occurred in the circuit, the fault current might be several times larger than cable critical current. As shown in Fig. 1, Cu stabilizer layer was set under the HTS layer to prevent burn out. Along with the quench of HTS layer, some part of the current can flow into the parallel Ag sheath and copper stabilizer layers; cable temperature may increase. This temperature rise can be controlled by the cooling perimeter and stabilizer layer design. Based on the two-section balanced tri-axial cable model $^{\left[1\right] },$ fault simulation, including the consideration of the effect of mutual-inductance on the current, was carried out to observe the cable temperature rise.

2. Temperature behavior

During the over-current simulation, voltage and temperature were changed as a function of time. In order to investigate the dynamic behavior of HTS cable, the temperature rise which is governed by the balance between heat generation and heat transfer can be expressed as:

$$\gamma_d C_p(T) \frac{dT}{dt} = G(T, I_t) - Q(T, t) \qquad [W/m^3]$$
(1)

where, $\gamma_{d}C$ is specific heat; $G(T,I_{l})$ is heat generation, Q(T,t) is heat transfer. As the initial stages of this research, here we assume that three phases of the cable were thermal insulation with each other; the cooling perimeter is 100% of the whole surface of current layer.

3. Current behavior

Besides, as shown in Fig. 2, because of the concentric structure, the mutual-inductance between phases may have an influence on the current distribution and this new characteristic will also be included in the simulation. The governing equation of the circuit is described as:

$$\begin{bmatrix} V_{a} \\ V_{b} \\ V_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{b} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{a}}{dt} \\ \frac{di_{b}}{dt} \\ \frac{di_{c}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1}(i,T) \\ v_{2}(i,T) \\ v_{3}(i,T) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{La}i_{a} \\ R_{Lb}i_{b} \\ R_{Lc}i_{c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{i}i_{a} \\ Z_{i}i_{b} \\ Z_{i}i_{c} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$$

where $V_{\rm a}$, $V_{\rm b}$, $V_{\rm c}$ is balanced three-phase voltage. L, M is the inductance of HTS cable. v_1 , v_2 , v_3 is the voltage drop due to normal transition after a fault has occurred. For simple calculation, and the most safety consideration, we use an ideal infinity n-value critical current model for the current behavior analysis in fault. Critical current $I_{\rm c}$ was linearity decreased with the increasing temperature.

4. Simulation & Results

A simulation of 31.5kA single line to ground fault which has 2

second duration time was carried out in a 66kV cable with different combinations of cooling perimeter and stabilizer area. The cooling perimeter is varied from 0.25m to 0.35m; the area of stabilizer is changed from 20 mm² to 200mm². The critical current of the cable is nearly 10.3kA. The critical temperature is 110K. As the result shown in Fig. 3, the existing of equilibrium temperature depends on the design of cooling perimeter and area of stabilizer. The copper stabilizer area is not seriously affecting the cable temperature rise in liquid nitrogen nucleate boiling region. Since the temperature over the region, cable has a rapid temperature rise. Increasing the area of stabilizer can be an effective method to limit cable temperature.



Fig.3 The final temperatures of phase A in 31.5kA/2s SLG References

 T. Hamajima, et al.: *IEEE Transaction on Appl. Supercond.* 16 (2006) p.1586-p.1589

三相同一軸型 HTS ケーブルの交流損失の最適化 Optimization of AC Losses in a Tri-axial HTS Cable

戸田 雅久,胡 南々,添田 誠司,ヌリ オズジバン,濱島 高太郎,津田 理,谷貝 剛(東北大)

<u>TODA Masahisa</u>, HU nannan, SOEDA Seiji, OZCIVAN Nuri A, HAMAJIMA Takataro, TSUDA Makoto, YAGAI Tsuyoshi (TOHOKU Univ.)

E-mail: toda@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年都市部では電力需要が増大している。しかし,地下は 混雑化しており,送電ケーブル用管路の新設は困難な状況 であるので,低損失・大容量・小型な超電導ケーブルが注目 されている。超電導体は交流磁界を受けると交流損失を発生 する。実用化に向けては,冷却機動力低減のために交流損 失の減少が重要な課題である。本研究では,小型・低損失な 構成として期待される三相同一軸型の交流損失の最適化を 図った。

2.2 分割モデルによる三相平衡の実現

三相同一軸型ケーブルは,三心一括型ケーブルに対して 超電導材料を大幅に減少でき,かつ正常時に漏洩磁界が小 さいという利点を有する。しかし,三相同一軸型ケーブルは各 相を同一軸上に配置した構成であるため,相半径の差によっ てインダクタンスが非対称となり,本質的に三相不平衡となっ てしまう。三相不平衡の場合,電力品質の低下や漏洩磁界の 増大を招き実用が困難となる。

この問題に対し、これまで筆者らは、三相同一軸型ケーブルを長手方向に2分割したモデルを用いて、各セクションの 撚りピッチを調節することで三相平衡を実現した。各相が n層 で構成されるとき、未知数である撚りピッチは 6n 個である。一 方、三相平衡条件及び相内一様電流分布条件より、6n-2本 の方程式が得られる。そのため、任意の2つの撚りピッチを定 めることで三相平衡を実現する各撚りピッチが求まる[1]。

3. 接続箇所最小時の交流損失

三相同一軸型ケーブル 2 分割モデルにおいて, 各相が 1 層の場合について述べる。各相が 1層の場合, 撚りピッチは6 つ存在しており, 任意の2つの撚りピッチを決定すると, 残る4 つの撚りピッチは三相平衡を実現するように一意に求まる。そ こで, 製作が最も容易になるように, a 相及び b 相における両 セクションの撚りピッチが等しいという接続箇所最小条件を用 いた場合の交流損失を計算した。接続箇所最小条件を用い た場合の, 2 分割モデルの各セクションの交流損失を Fig.1 に 示す。なお, 超電導ケーブルに生じる交流損失は磁界の関 数として表すことができる。超電導ケーブルの各相で超電導 テープ線に沿って電流が流れると, 相の内側には軸方向磁 界が, 外側には周方向磁界が発生する。これらの磁界によっ て超電導体に交流損失が生じる[2]。



Fig.1 AC Loss in Minimum Junction Condition

Fig.1 より,2 分割モデルにおける交流損失は軸方向磁界 による損失が支配的であることが分かる。軸方向磁界は撚りピ ッチの逆数の関数であり,撚りピッチは自由に調節できるパラ メータである。つまり,撚りピッチの調節によって損失を低減で きると考えられる。そこで,本研究では2分割モデルにおいて 撚りピッチを調整することによって損失の最小化を図った。

4.2 分割モデルにおける交流損失の最適化

2 分割モデルにおいて, 接続箇所最小条件下では軸方向 磁界による損失が支配的である。そのため, 低損失化を図る と, 軸方向磁界は撚りピッチの逆数の関数であることから, 各 セクションの撚りピッチを長くすることで損失が低減できると考 えられる。そこで今回は、 a 相第 1 セクションの撚りピッチ p_{a1} を 1000 mm に固定し, c 相第 1 セクションの撚りピッチ p_{c1} をパラ メータとして交流損失を計算した。ただし, p_{a1} は a 相の半径が 小さいために他相の撚りピッチよりも大きくなることが予想され るため, 上限を 1000 mm と仮定した。この結果, p_{c1} による損失 最小点が存在することが分かった。損失最小点においては, c 相の両セクションにおける撚りピッチが等しくなる, つまり, p_{c1} = p_{c2} という条件が成立することが分かった。

2 分割モデルにおいて, $p_{c1} = p_{c2}$ という損失最小化条件を 用いた場合の交流損失を Fig.2 に示す。Fig.2 から,周方向磁 界による損失はケーブルサイズによるためにほぼ等しくなるが, 軸方向磁界による損失は大幅に低減できていることが分かる。 損失最小化条件の適用によって,接続箇所最小条件と比較 して全損失を 60%程度に低減できた。このことから損失最小 化条件が有効であることが分かった。



Fig.2 AC Loss in Minimum Loss Condition 以上により, 三相同一軸型ケーブルにおいて三相平衡を 実現する 2 分割モデルを用い, 撚りピッチの調整によって交 流損失の低減が可能であることを求めた。

- T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai and N. Harada: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 15 (2005) p.1775–1778
- T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai, S. Monma, H. Sato and K. Shimoyama: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 17 (2007) p.1692-1695

超伝導電力ケーブルのらせん状テープ導体内の電流分布の計算 Current distributions of helical tape conductors of a superconducting power transmission cable

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

1. はじめに

テープ導体をらせん状に巻いた Fig.1(a)に示すような超伝 導送電ケーブルについて、テープ導体の厚さをゼロとして、 解析式により自己および相互インダクタンスを求め、送電ケー ブルのらせん状テープ導体の電流・磁場分布を計算した.

2. らせん状テープ導体の磁場,インダクタンスなど

らせん状薄肉テープ導体の磁場,ベクトルポテンシャル, インダクタンスは一般に変形ベッセル関数を用いた無限級数 の形式で解析的に計算できる[1,2].前回の報告に誤りがあっ たので,以下の式(1),(3)のように訂正する[1].各々半径, r₁, r₂, z = 0 での導体の角度及びその幅, $\varphi_1 \pm \Delta \varphi_1/2$, $\varphi_2 \pm \Delta \varphi_2/2$, ツイストパラメーターk₁ (= ±2π/l₁= ±2πn₁), k₂ (= ±2π/l₂),軸長 I>> r₂> r₁, の2つのらせん状薄肉テープ導体間の相互インダ クタンス L_{12,arc} は, k₁= k₂= k (or Δk=0)に対して,

$$\begin{split} &L_{12,arc} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \bigg[\ln \frac{2l}{r_2} - 1 \bigg] + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k^2 r_1^2 \\ &+ \frac{4\mu_0 l}{\pi \Delta \varphi_1 \Delta \varphi_2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n(n|k|r_1) K_n(n|k|r_2) \frac{\cos \big[n \big(\varphi_2 - \varphi_1 \big) \big]}{n^2} \sin(\frac{n \Delta \varphi_1}{2}) \sin(\frac{n \Delta \varphi_2}{2}) \\ &+ \frac{2\mu_0 l}{\pi \Delta \varphi_1 \Delta \varphi_2} k^2 r_1 r_2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \{ I_{n+1}(n|k|r_1) K_{n+1}(n|k|r_2) + I_{n-1}(n|k|r_1) K_{n-1}(n|k|r_2) \} \right\} \\ &\times \frac{\cos \big[n \big(\varphi_2 - \varphi_1 \big) \big]}{n^2} \sin(\frac{n \Delta \varphi_1}{2}) \sin(\frac{n \Delta \varphi_2}{2}) \bigg\} \end{split}$$
(1

他方,たとえ巻線ピッチが同じでも、右及び左巻きで巻方向が 異なる場合(正確には $|\Delta k| = |k_1 - k_2| > 2\pi/1$ の条件を満足する 場合)、など $k_1 \neq k_2$ に対して、

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

と表せる. ここでは, らせん導体の自己,相互インダクタンスは 軸長1が十分長い場合(I>>r₂>r₁)のみを考慮している. 表式(1) と(2)の違いは, 2つの十分長いらせん状テープ導体の相対的 な位置関係が一方のらせん導体を中心軸の周りに回転させ た時, $k_1 \neq k_2$ の場合には, 実質的に変化せず, $k_1 = k_2$ の場合に は変化することを反映している. 表式(1)の導体の角度 φ_1 , φ_2 に依存する項により, $k_1, k_2 \rightarrow 0$ の極限において, 撚りのない真 直ぐな導体 ($k_1 = k_2 = 0$)のインダクタンスに一致する. 一般に, 撚られた構造における相互インダクタンスは2つのらせん導体 のツイストピッチだけでなく, ツイストパラメーターの符号まで 考慮して, 右巻き又は左巻きの区別が必要になることがわか る. また, 半径 r_1 ,導体の角度幅 $\Delta \varphi$,ツイストパラメーターk, 軸 長 I>> r_1 , の自己インダクタンス L_{11,arc} は次のように表せる.

$$L_{11,arc} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_1} - 1 \right) + \frac{\mu_0 l}{4\pi} k^2 r_1^2 + \frac{4\mu_0 l}{\pi (\Delta \varphi_1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n(n|k|r_1) K_n(n|k|r_1) \frac{1}{n^2} \sin^2(\frac{n\Delta \varphi_1}{2}) + \frac{2\mu_0 l}{\pi (\Delta \varphi_1)^2} k^2 r_1^2 \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ I_{n+1}(n|k|r_1) K_{n+1}(n|k|r_1) + I_{n-1}(n|k|r_1) K_{n-1}(n|k|r_1) \right\} \frac{1}{n^2} \sin^2(\frac{n\Delta \varphi_1}{2})$$
(3)

3. 通電時の電流分布, 磁場分布の計算

Fig.1(a)に示すような超伝導送電ケーブルと戻り導体で構成された回路に関して、送電ケーブルにおけるらせん状テー プ導体内の通電時の電流分布は、上式を利用してインダクタンス行列を求め、回路方程式から計算できる.ここでは、1本の テープ導体についてテープ幅を等分に20分割(片側10分割) して、電流変数 10 の場合について解析した.その時、インダ クタンス行列は10×10の対称行列になる.1行分の10の行列 要素について,式(1),(3)に基づいた計算式での無限級数の 有限項の級数による近似における項数Nの依存性をFig.1(b) に示す.これから項数N=500以上が必要とされることがわかっ た.それで,必要とされる項数が多いために,この方法ではイ ンダクタンス行列の計算時間が長くなる問題があり,分割数 (電流変数)を増やすことが難しくなっている.電流分布,磁場 分布や磁力線(ベクトルポテンシャルの等高線)の計算結果を らせん状テープ導体単一の場合を Fig.2,12 本の場合を Fig.3 に示す.また,撚りのない場合の計算をして,本計算の 妥当性を確認した.分割数を増やすなどの改良が必要になる が,原理的には以上のような計算を,送電ケーブルにおける 交流損失などの評価に役立てることが期待できる.

4. まとめ

超伝導送電ケーブルのらせん状テープ導体内の電流分 布などに関する基礎的な計算手法の検討を行った.



Fig.1. (a) Schematic view of an excitation circuit for a superconducting power transmission cable of 6 helical tape conductors, together with a return conductor (a<<l). (b) The term number dependence on the summation of Eqs.(1) and (3) for the self- and mutual inductances of the circuit equation for a power cable of l=1 m.



Fig.2. (a) Current density distributions within a helical tape conductor. (b) Vector plots of the magnetic field and field lines (contour lines of the vector potential) due to a helical tape conductor for $I_i = I_1$.



Fig.3. (a) Current density distributions within a helical tape conductor. (b) Vector plots of the magnetic field and field lines (contour lines of the vector potential) due to a power cable with 12 helical tape conductors for $I_t = I_1$.

参考文献

T. Tominaka, Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.52.
 T. Tominaka, "Self- and mutual inductances of long coaxial helical conductors", Supercond. Sci. Technol., vol. 21, 015011(11pp) (2008).

超電導ケーブルのき電線への適用可能性に関する検討

Fundamental study on possibility to apply a superconducting cable to a feeder

<u>上條 弘貴</u>, 森田 岳, 小西 武史,(鉄道総研);伊東 利勝(JR 総研電気システム) <u>KAMIJO Hiroki</u>, MORITA Gaku, KONISHI Takeshi (RTRI); ITO Toshikatsu (JR Souken Electric Consulting) E-mail: hiroki@rtri.or.jp

1. はじめに

電気鉄道のき電回路における送電損失や電圧降下の低 減による効率向上、変電所数削減などを目指して、電力用と して近年開発が進んでいる超電導ケーブルのき電線への適 用を提案し[1]、その適用可能性について検討してきた [2],[3]。

本報告では、主に直流電化区間のき電線に超電導ケーブ ルを適用した場合を想定し、システム構成、導入効果などを 検討した結果などについて紹介する。

2. 直流電気鉄道の技術課題

直流電気鉄道では、き電線とレール(帰線)での電位降下 により変電所間隔が制約される、電車線電流による電位差に よりエアーセクションなどでトロリ線に損傷を与える、帰線路と して走行レールを使用するためこれに生じる電位が周辺の金 属構造物に電食を引き起こすなどの問題がある。これらの問 題は、有限抵抗の導体に電流を通電することによる発生電圧 が原因であり、き電線に超電導線のような電気抵抗の無い材 料を適用することにより解決が期待できる。

3. 超電導き電回路の構成

直流電気鉄道のき電回路に超電導ケーブルを適用する 場合、超電導ケーブル導入方法、構成には、何種類かのシス テムが考えられる[1]。システムにより、超電導ケーブルの導入 よる効果、導入に伴う課題などが異なり、個別に検討が必要 である。

超電導ケーブルを適用する場所として、(a)電車線(き電線) のみ、(b)帰線(レール)のみ、(c)電車線(き電線)と帰線(レール) の両方、の全線もしくは特定の一部区間に導入することが考 えられる。また、超電導ケーブルを上下線で独立して配置す るか、一括してまとめるかの選択、(c)の場合ではシールド層を 帰線として使用することなども想定できる。

電気車のパンタグラフが接触して電気を供給するトロリ線 および帰線であるレールと正負の超電導線を接続する間隔 (き電分岐間隔)として、(d)現状に準じる(250m 程度)、(e)熱侵 入の影響などを考慮して延長(1km 程度など)、(f)変電所間隔 (3~5km程度)=変電所の代替え、などが考えられる。(d)の場 合は従来のき電線を無くして超電導ケーブルのみで構成でき るが、(e)、(f)の場合は従来のき電線を併用する必要がある。

本報告では、図 1(a)のように電車線と帰線の両方に超電 導ケーブルを適用し、き電分岐間隔を現行設備と同程度とし た直流き電システム構成について検討した場合を紹介する [2],[3]。き電回路は、超電導ケーブルの正き電線(PF)と負き 電線(NF)、従来方式のトロリ線(T)とレール(R)によって構成さ れる。変電所の回線は PF と NF に接続され、複数個所に置 かれるき電分岐において、PF と T、NF と R(正確にはインピ ーダンスボンド中性点)がそれぞれ接続される。

4. 導入効果の一例

超電導直流き電システムにおける電圧・電流分布を図1(b) に示す[2]。電気車電流はこれを挟む二つのき電分岐間では、 電車線とレールに流れるが、それ以外の箇所では超電導き電 線に流れる。このため、電車線電位降下ならびにレール電位 は電気車が存在するき電分岐間のみに限定され、超電導き 電線部では電位差が殆ど生じない。例えば、き電距離 5km、 き電分岐間隔 250m、電気車電流 4,000A の場合について、 数値計算した結果を表 1 に示す。その結果、電車線電位降 下で 1/4 程度、レール電位は 1/20 に低減される。

5. まとめ

き電線に超電導ケーブルを適用することにより、電車線電 位降下、レール電位を非常に小さく抑えることができ、き電距 離の延長、変電所数の削減、回生電力の有効利用、電食防 止、エアーセクションの電位差対策などの効果が期待できる 可能性のあることが確かめられた。

ただし、適用に向けては、最適システム構成、変電設備、 故障対策、信頼性、コストなど総合的な検討が必要となる。





Table 1 Electrical parameters in worst-case condition[2]

	*			
	Voltage	Rail	Collected	Feeding
	drop	potential	voltage	loss
	(V)	(V)	(V)	(%)
Conventional	155	100	1250	17.0
Superconducting	40	5	1460	2.7

[計算条件] 送り出し電圧:1500V、き電距離:5km(単線)、 き電分岐間隔:250m、電気車電流:4,000A、 トロリ線:銅、断面積110mm²、帰線:50kgレール き電線:アルミ、断面積510mm²×2条(@従来)、 き電線臨界電流:4,000A以上(@超電導)

- 上條弘貴、秦広:特許公報、特許第 4080073 号(出願: 1998.10、登録:2008.2)
- 2. 森田岳、小西武史、上條弘貴、伊東利勝:平成 20 年電気 学会全国大会講演論文集 第5分冊(2008)、p.118
- 上條弘貴、森田岳、小西武史、伊東利勝: J-Rail2008 講 演論文集(2008)、p.369

液体窒素下における複合電気絶縁材料の特性について Characteristics of composite electrical insulator in LN₂

<u>市川 裕士</u>,藤原 昇(ISTEC-SRL); 八木 正史,向山 晋一(古河電工) ICHIKAWA Hiroshi, FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); E-mail: ichikawa. hiro@istec.or.jp

1. はじめに

平成20年度よりY系超電導線材を用いた超電導電力機器技術 開発プロジェクトが始まっている。Y系高温超電導線材は高電 流密度・低損失・高機械強度などの特性を有しており、開発が 盛んに行われ、低コスト・安定製造・高性能化が見込まれてい る。そこで本プロジェクトでは、Y系高温超電導線材を用いた 超電導電力ケーブルの開発を行っている。超電導電力ケーブル は従来のケーブルに比べ、送電損失が小さく、コンパクトで送 電容量を増加することができ、既設管路を有効活用して敷設で きるなどの特徴を有している。

本研究では、高電圧超電導電力ケーブルを開発するに伴い、 液体窒素下における高電圧用電気絶縁材料の誘電特性に関する 実験結果について報告する。

<u>2. 開発目標</u>

本プロジェクトでは、275kV級、3kAの高電圧ケーブルを開発 することを目標としており、Table 1に開発目標数値を示す。

3. 実験方法

絶縁材料の候補として、半合成紙(sample A, sample B) お よび Tyvek®(sample C)の3種類を選定した。半合成紙は PP(ポ リプロピレン)をクラフト紙でラミネート加工したもので OF ケ ーブルなどに使用されている。Sample A は PP 比率40%、sample B は PP 比率60%のものであり、PP 比率を変えることで低誘電 体損失が望める。また Sample C は低温度における絶縁材料とし ての実績があり選定した⁽¹⁾。各絶縁材料について液体窒素下にお ける絶縁性能を確認するため、モデル空中銅コア 2.2m を作製し、 その外周を絶縁材料で有効長1.7m 厚さ4mm になるように巻いて モデル導体を作製した。導体の外形を Fig.1 に示す。モデル導 体の中央部の絶縁材料に測定端子を設置し、電圧をかけた時発 生する静電容量 [pC],静電正接 tan δ を測定した。実験では、オ ープンバスの中に試料を置き、液体窒素を注ぎ試料を十分に浸 漬させ、液体窒素注入 60 分後、15 分毎に電圧 5kV をかけ約 3 時 間測定した。

4. 結果および考察

Fig.2 に SampleCの実験結果を示す。時間経過において tan δ 値は減少し、約70 分経過後落ち着く。逆に比誘電率 ϵ は上昇 し、約120 分経過後に落ち着いた。このことより絶縁材料に対 して、液体窒素が浸透するのにある一定の時間が必要であると 考えられる。

Table.2 に各 sample の約3時間後の実験結果を示す。この結 果より、sample C は tan δ が最も小さく (sample A の約 1/7, sample B の約1/6)、交流損失の低減が可能であるとの結果 を得た。しかし他の sample に比べて比誘電率が小さい。

次に Sample A, Bを比較すると、AとBは共に同程度の比誘電 率を有しているが、 $\tan \delta$ では約 20%の性能向上が sample Bに 確認された。このことは PP 比率を上げることで低誘電体損失が 望めることを実証した。

今後は、本実験データを元に絶縁材料の特性把握(機械特性・ 電気特性)を進め、絶縁材料の選定を行っていく。また絶縁材 料および設計厚に対する液体窒素の冷却効果を検証し、超電導 電力ケーブルの使用開始時間や過電流後の再使用時間などに反 映していく。

Table 1 Tai	Table 1 Targets of YBCO Superconducting Cables					
	275kV/3kA/single-phase					
	Outer diameter < 150 mm Φ , Length : 30m					
High-voltage	With terminal connection , inter-level connection					
cables	Loss < 0.8W/m/ph at 3kArms					
Gubico	Withstand for fault conditions of 63kA, 0.6s					
	and have no damage					



Fig.1 The model cable using composite electrical insulators



Fig .2 Time dependency of relative $\ \varepsilon$ and $\tan\delta$ about sample C

Table 2 Comparison of experimental results for candidates of composite electrical insulator

sample	length[m]	Е	$ an \delta$ [%]			
Sample A	2	1.92	0.0765			
Sample B	2	1.92	0.0607			
Sample C	2	1.80	0.0108			

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)の委託により実施したものである.

文 献 (1)八木他 H21年電気学会全国大会5-149(2009)

第80回 2009年度春季低温工学・超電導学会

66kV / 3kA 級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性 AC loss characteristics of 66kV / 3kA class RE-123 superconducting cable

大屋 正義, 湯村 洋康, 増田 孝人, 永石 竜起, 新海 優樹(住友電工);藤原 昇(ISTEC-SRL) <u>OHYA Masayoshi</u>, YUMURA Hiroyasu, MASUDA Takato, NAGAISHI Tatsuoki, SHINGAI Yuki (Sumitomo Electric Industries, Ltd); FUJIWARA Noboru (ISTEC-SRL) E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

平成 20 年度より、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトがスタートした^[1]。本プロジェクトにおいて、住友電工は 薄膜超電導線材を用いた 66kV / 5kA 級の大電流超電導ケ ーブルの開発を実施している。超電導ケーブルの開発目標 は以下の通りである。

- 66kV / 5kA 三相一括型
- φ150mm 管路へ収容可能
- ・ 損失 2.1W/m/ph(@5kArms, 66kV)以下
- ・ 過電流 31.5kA, 2sec に対して損傷無し

なお、損失はケーブルコアの交流損失と誘電損失を考慮した 値である。

今回は、開発の第一段階として、3kA 級の超電導ケーブル コアの試作を行い、超電導層多層化や線材細線化の影響に ついて検証を行った。

2. 試験サンプルの諸元

使用した薄膜線材の概略図と仕様を図1及び表1に示す。 線材は、幅10mmの配向性クラッド基板上にCeO₂ / YSZ / CeO₂の中間層を積層し、得られた中間層の上にGdBa₂Cu₃O_x の超電導層をPLD 法により成膜したものである^[2]。上記線材 は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 2mm 幅にスリットさ れ、全周に銅メッキを施してある。

薄膜線材を用いた超電導ケーブルコアサンプルの諸元を 表2に示す。コアサンプルは、導体6層及びシールド3層を それぞれ別の FRP パイプ上に線材を巻き付けて作製した後 に、シールド層の内部に導体層を挿入して構成されている。 各層のスパイラルビッチは、交流電流が均等に分流するよう に調整を行った。なお、コアサンプルの有効長は1mである。

Items	Details
Width (mm)	2.0
Thickness (mm)	0.15
Ic (A) at 77 K	36~60

Table2. Specifications	of the sample cable core
------------------------	--------------------------

Items	Details		Diameter (mm)
Former	FRP pipe		18
HTS Conductor	6 layers 2mm ^w RE-123 wires		22
Former	PRP pipe		34
HTS Shield	3 layers 2mm ^w RE-123 wires		36
Critical current (Ic)	Conductor: Shield:	7300 A 5750 A	A

3. 試験サンプルの Ic 測定結果

77Kにおけるコアサンプルの臨界電流(Ic)測定結果を図2 に示す。導体層及びシールド層の Ic は、それぞれ 7300A、 5750A であり、3kArms通電可能なレベルの Ic を有することを 確認した。現在、試作したコアサンプルの交流損失特性を評 価中である。



Fig.1 Structure of the RE-123 wire



Fig.2 Measured I–V characteristics of the sample cable core

4. まとめ

66kV / 5kA 級薄膜超電導ケーブルの開発の第一段階と して、2mm幅にスリットした薄膜線材を用いて3kA級の超電導 ケーブルコアサンプルの作製を行った。77Kにおけるコアサン プルの臨界電流は、導体層が7300A、シールド層が5750Aで ある。コアサンプルの交流損失については、現在評価中であ る。

尚、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構か ら委託している「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロ ジェクト」において実施したものである。

- N. Fujiwara, et al.: Abstract of IEEJ Technical Meeting, (2009) p.5-183
- Y. Shingai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.19

20m級直流超伝導送電ケーブル試験装置における冷却過程 Effect of Cooling Process in 20 m class DC Superconducting Cable Test Stand

<u>浜辺誠</u>,藤井友宏,杉野慎,佐々木淳,杉本達律,渡邉裕文,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, FUJII Tomohiro, SUGINO Makoto, SASAKI Atsushi, SUGIMOTO Tatsunori, 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

超伝導送電ケーブルはできる限り冷却状態にあることが望 ましいが、点検・修理時などで昇温する可能性がある。したが って、超伝導送電ケーブルの実用化に際しては、冷却サイク ルがケーブルの特性に影響しないことが望まれる。中部大学 の20m級直流超伝導送電ケーブル試験装置において、これ まで3回の冷却・通電試験を行ってきた[1]。本装置のケーブ ル配管には基本的に直管を使用し、ケーブルの冷却による収 縮を一部のベローズで吸収し、ケーブル自体も収縮に対して 自由に動く構造としている。本講演では、冷却過程でのこの ベローズの動作や超伝導転移の状況、および冷却サイクル による超伝導特性への影響について報告する。

2. 実験装置の概要

直流超伝導送電ケーブル試験装置のレイアウトをFig.1に 示す。各部の温度はすべてPtCo抵抗温度計で計測している。 また、冷却過程には、約20mの長さの超伝導ケーブル[2]に 使用されている39本のBi-2223テープ線材の一部に100mA、 ケーブル中心部にある銅フォーマーには1Aを通電し、冷却 過程における両端電圧を測定することで、ケーブル本体の冷 却状況も監視している。冷却による低温配管(SUS304 製直 管)の収縮は、配管直線部に挿入したベローズ(Fig.1のA, B)で吸収している。冷却時にはこの外管のベローズの収縮も 測定している。各温度・電圧データは自動計測とし、ベローズ 長のみ昼間30分おきにノギスで計測した。

3. 冷却過程における各部の変化

第3冷却サイクル(2008年5月~8月)の冷却過程(5月1 7日~21日)における各部温度・HTSテープおよび銅フォーマ ーの通電電圧・およびベローズ収縮量を Fig. 2 に示す。本装 置では昼間のみ低温窒素ガス・液体窒素で冷却し、夜間は 自然昇温させている。冷媒は Fig. 1 のクライオスタット A から 供給され、配管中で昇温した窒素ガスはクライオスタット B か ら排出される。したがって、Fig. 2(a)の、特に第一日目に顕著 なようにクライオスタット A から配管各部、クライオスタット B の 順で冷却される(ただし、夜間は電流リードからの熱侵入のた め、配管よりもクライオスタットは温度上昇が大きい)。このとき の銅フォーマーの両端電圧はクライオスタット・配管 A の温度 によく追随している。一方、HTS テープの電圧は超伝導状態 に近づく前は、配管の平均温度といえる配管Uの温度変化に よく似た傾向を示した(Fig. 2 (b))。ベローズの収縮(Fig. 2(c)) は近接した配管温度とよく追随している。本装置では比較的 短時間で冷却しているが、ケーブルの末端部を固定せず、低 温での収縮に応じて自由に可動する構造としており、冷却後 のHTSテープ線材の特性の劣化は見られていない[1]。

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.: IEEE Trans. Appl. Supercond, to be published



Fig.1 Schematic Diagram of 20 m class DC Superconducting Cable Test Stand



Fig. 2 Time dependence of (a) cryostat and cryopipe temperature, (b) HTS and former voltage, and (c) shrinkage of bellows, during the 3rd cooling process.

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

直流超伝導 200m ケーブルの設計研究 Design study of 200-meter DC Superconducting Power Cable

<u>山口作太郎</u>,河原敏男,浜辺誠,渡邉裕文,ユーリー・イワノフ,孫建, 杉本達律,服部敦,高橋道郎,飯吉厚夫(中部大学); <u>YAMAGUCHI Satarou</u>, KAWAHARA Tosion, HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, SUN Jian, SUGIMOTO Tatsunori, HATTORI Atsushi, TAKAHASHI Michio, IIYOSHI Atsuo (Chubu Univ.); E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では直流超伝導送電システムの新しい実験装置 の建設を進めている。規模は 200meter 長であり、電圧は DC ±10kV,電流は2kA以上である。基本的な方針は、この程度 の送電容量のシステムでも銅ケーブルと同等以上の損失にな ることを実証することである。このために、断熱2重管からの熱 侵入を最小限にすると同時に冷媒循環動力をできる限り下げ ることを目指した。更に、短い距離では端末での熱侵入を下 げることが実用化のキーであり、この問題の解決のために 色々なアイデアを試すことを予定している。そして、それらの 達成度を確認するための計測系の整備を行う予定である。以 下では、このプロジェクトについて概略を説明する。

2. 実験装置の概要

実験装置を設置する実験室とケーブルのレイアウトをFig.1 に示す。実験室内にケーブル端末を2つ設置し、冷凍機や循 環装置及び電源も設置する。ケーブルは断熱2重管内に設 置される。熱侵入量を最小限にするために、ケーブル径はで きる限り細くした。そして、内管は50Aのステンレス配管を用 いた。これは20mのケーブル試験装置の80Aより細くできた。 これによって熱侵入量の低減が期待できる。また、超伝導ケ ーブルの接続は高コストであることやケーブル事故が主に接 続部で生じるので、断熱2重管を最初に設置してからケーブ ルを挿入する工事方式をとることにした。更に、循環を容易に するために、ポンプによる冷媒駆動は2次的な方式にした。

端末での熱侵入を低減するために、今回もペルチェ電流リードを用いる予定であり、ペルチェ材料の選定を行うと同時に低

温用のペルチェ材料の手配を行っている段階である。また、 これについては MIT からも新たな提案があり、これを取り込む ための基礎実験を検討している。

ケーブルが長くなったので、熱侵入量の測定も高精度ででき るようになると考えていて、そのために各種測定機器を組み込 んでいる。

3. 建設スケジュール

現在装置の設計がほぼ終わり、ケーブル、クライオスタット、 冷凍機などは製造に入っている。そして、8月から中部大学で 組み立て作業に入る予定であり、今年度中に完成するつもり 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)による私学助成及びJFEスチールからの援助を得た。

- 1. M. Hamabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond, to be published
- 2. S. Yamaguchi et al., J. Physics Conference Series, 97(2008)012290.



低温度差熱音響スターリングエンジン

Low temperature thermoacoustic Stirling engine

<u>長谷川 大地</u>, 琵琶 哲志(東北大) <u>HASEGAWA Daichi</u>, BIWA Tetsushi (Tohoku univ.) E-mail: haseg**a**wa@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1999 年, Backhaus ら[1]は可動部を全く持たない外燃機関 でカルノー効率の42%を実現したという報告を行った.これは 通常の熱機関と同等の効率である.この外燃機関はループ 状の管部分と共鳴管状の部分,そして狭い流路の集合体(蓄 熱器)から構成されており,構造が非常に単純である.蓄熱器 両端に高温部 T_H と低温部 T_c を作り温度比 T_H/T_c がある臨 界値を超えると管内の流体がひとりでに振動を開始し,この外 燃機関が動作を開始する.出力仕事は音波という形で取り出 すことができる.このような機器は熱音響エンジンと呼ばれ低 環境負荷,廃熱の利用が可能といった利点があり,現在盛ん に研究されている.

彼らの装置は高いカルノー効率比は実現できたものの、その時の T_H/T_c は3.46であり、 T_H は998 K とかなり高温である. 我々は熱音響エンジンの動作開始温度(発振臨界温度比)を小さくできれば広い範囲の温度域で利用することが可能となると考え、ループ管部分に第二蓄熱器を設置するという方法で発振臨界温度比を小さくしようと試みた.

2. 実験装置

Fig.1 に本研究で対象とした熱音響エンジンを示す. エンジンは全長 1500 mmのループ管部分, 全長 1450 mmの共鳴管部分, 容量が2.0 × 10⁻² m³のタンク, 流路半径 r_0 =0.15 mmの蓄熱器から構成されており, Backhaus らの装置とほぼ同様の形状をしている. 発振器と接続されたスピーカーは T字型の配管パーツを介してループ管部分に接続した. 発振臨界温度比 T_H/T_c = 1.76 (温度差 ΔT = 226 K)のとき, 31 Hz で自励振動を開始する. ループ管内にはループ管の全長で無次元化した L 軸を反時計回りにとった. ループ管部分の黒く塗りつぶした位置は第二蓄熱器の設置位置である. 図では加振用スピーカーを取り付けてあるが実際に発振臨界温度比を確認する際は T型パーツと共にスピーカーを外し, その部分にエルボーを取り付けて実験を行った.

3. 実験方法

実験では第二蓄熱器の流路半径 r_0 ,第二蓄熱器の設置 位置 L,そして温度比 T_H/T_c を変化させ、自励振動前のQ値に着目することで発振臨界温度比を調べた. Q 値の算出 は管内を loud speaker で管内を連続的に加振し、圧力センサ ーでモニターした圧力を用いて共鳴曲線を求め、その半値幅 とピーク周波数を求めることで行った.



Fig.1 A schematic illustration of the thermoacoustic engine.



Fig. 2 1/Q as a function of the T_H/T_C for the engine with a single regenerator, two regenerators and five regenerators.

4. 実験結果

Fig. 2 に実験で得た 1/Q と T_H/T_c の関係を示す. 対象とした熱音響エンジンの場合, 第二蓄熱を設置した場合である. 点線は実験値の外挿線である. 第二蓄熱器の r_0 , L は発振 臨界温度比が最も小さくなるものを選んだ.

1/Qは系に蓄えられるエネルギー E_s ,系の単位時間当た りの散逸エネルギー \dot{E} ,角振動数 ω を用いて式 (*) のよう に表すことができる.更に \dot{E} は管での散逸エネルギー \dot{E}_{pipe} , 蓄熱器での散逸エネルギー \dot{E}_{Reg} ,蓄熱器に温度勾配を与え たことで生成される熱音響効果による生成エネルギー $\dot{E}_{\Delta T}$ に分けることができる.

$$\frac{1}{Q} = \frac{\dot{E}}{\omega E_S} = \frac{\dot{E}_{Pipe} + \dot{E}_{Reg.} - \dot{E}_{\Delta T}}{\omega E_S} \qquad \dots (*)$$

 $T_H/T_c = 1$ の時は蓄熱器内でエネルギー変換が起こって いない状態 ($\dot{E}_{\Delta T} = 0$) なので Fig. 2 中の外挿線の y 切片は 熱音響エンジンの室温での散逸の程度を表している. T_H/T_C を大きくすると1/Q が減少している. これは T_H/T_cを大きくす ることで \dot{E} が減少していることを意味し、 $\dot{E}_{\Delta T}$ が \dot{E}_{pipe} + $\dot{E}_{Reg.}$ を補った結果である.このことから,外挿線の傾きは蓄熱器内 でのエネルギー変換の活発さを表していると言える. 更に T_H/T_c を大きくすると対象とする熱音響エンジンでは T_H/T_c = 1.78 で 1/ $Q \rightarrow 0$ となる. このとき $\dot{E}_{\Delta T}$ が $\dot{E}_{pipe} + \dot{E}_{Reg.}$ と釣 り合っている状態である. 実際, $T_H/T_C = 1.76 (\Delta T = 226 \text{ K})$ で の自励振動の開始を確認したので,系が発振臨界温度比に 達するとき 1/Q→0 となることがわかる. 第二蓄熱器を設置し た場合では対象とした熱音響エンジンと比較して,外挿線の y 切片の値は大きくなるものの, 傾きは約三倍となり $T_H/T_C =$ 1.30 で 1/Q $\rightarrow 0$ になると読み取れる. 実際, $T_{H}/T_{C}=$ 1.34 (ΔT = 100 K) での自励振動の開始を確認した. 更に蓄熱器 を追加し合計五つ設置することで $T_H/T_C = 1.19$ ($\Delta T = 57$ K) での自励振動の開始を確認した.

参考文献

1. S. Backhaus and G. W. Swift: "A thermoacoustic Stirling heat engine" Nature, 339 (1999).

ダブルインレット型パルス管冷凍機の音響インピーダンス Acoustic impedance of double-inlet pulse tube refrigerator

<u>琵琶 哲志</u>, 岩瀬 貴志(東北大) <u>BIWA Tetsushi</u>, IWASE Takashi (Tohoku univ.) E-mail: biwa@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1960年代に開発されたパルス管冷凍機(ベーシック型パル ス管冷凍機)[1]は、低温部に可動部品がないという特長を備 えていたが、その到達温度は200K程度と満足できるものでは なかった.しかしパルス管の先にオリフィスを介してバッファー タンクを接続したオリフィス型パルス管冷凍機[2]によって到達 温度は105Kにまで低下した.ここからのパルス管冷凍機の発 展は目覚ましく、ダブルインレット型[3]やイナータンス型[4]な どの多様なパルス管冷凍機が開発、提案され、その冷凍性能 は著しく向上した.可動部品がないにも関わらず、ギフォード マクマホン冷凍機やスターリング冷凍機と遜色ないレベルに まで性能が向上したことは驚くに値する.

パルス管冷凍機の冷却機構の理解を目指して熱音響理論 [5]の構築が始まった.これによれば、冷凍能力の支配的因子 は蓄冷器低温端における圧力振動 $P = pe^{i(\omega t + \Phi)}$ と断面平均 流速振動 $U = ue^{i\omega t}$ の間の位相差であり、各種のバルス管冷 凍機は次のように分類される.

第1世代(Φ = -90°) ベーシック型

第2世代(-90 < Φ < 0°) オリフィス型

第3世代(0°<Φ) イナータンス型,ダブルインレット型 しかしながら、実際に位相差が実験的に観測された例は少な い.ダブルインレット配管を備えているからといって必ずしも第 3世代に分類されるべき冷凍機として動作する保証はない. 位相差に応じて冷却性能がどのように変化するかという問題と 同様、どのようにしてパルス管冷凍機の位相差が実現されて いるかは重要な問題である.

我々は、パルス管冷凍機における振動流ダイナミクスを直接観測し、UとPの位相差と振幅比を与える音響インピーダンスZ

Z = P/(AU)

をレーザードップラー流速計(LDV)と小型圧力センサによる 同時計測を通じて調べている.(A は流路断面積を表す.)昨 年の学会ではオリフィス型パルス管冷凍機が第2世代のパル ス管冷凍機としていつでも動作することを報告した[6].今回 はダブルインレット型パルス管冷凍機について調べた結果を 報告する.

2. 実験装置

Fig.1 に自作したダブルインレット型パルス管冷凍機の概要 を示す.パルス管(ガラス管)の内径は13.44 mm である. 蓄冷 器には 250 メッシュのステンレスメッシュを 50 mm 積層した. バッファータンクの容量は0.483×10⁴ m³である. バイパス管に 取り付けたバイパスバルブを閉じると系はオリフィス型パルス 管冷凍機として動作する. バイパス管には 1/8 インチもしくは 1/4 インチの管を用いた.

ファンクションジェネレータを用いて周波数5.9 Hzの正弦波 を出力し、ウーハースピーカーでパルス管冷凍機内の気柱 (大気圧空気)を強制振動した.オリフィスバルブ回転数を一 定に保ったまま、バイパスバルブ回転数をパラメータとして圧 力流速の同時計測を行った.

3. 実験結果

蓄冷器低温端に最も近い位置における音響インピーダンス をオリフィス型とダブルインレット型の場合について Fig.2 の複 素平面上に示した. オリフィス型では,音響インピーダンスは つねに第4象限に存在するのに対して、ダブルインレット型で はバイパスバルブを開けるに従って、第4象限から第1象限 に移行することが分かった.つまり適切な開度を保つことで第 3世代の冷凍機として動作することを示している.オリフィスバ ルブの回転数を変化させたところ、音響インピーダンスの描く 軌跡は大きく変化し、第2象限、第3象限に達する場合もあっ た.ダブルインレット型の音響インピーダンスはバルブ回転数 に大変敏感であり、適切な調整が必要である.



Fig. 1 Double-inlet pulse tube refrigerator prototype.



Fig. 2 Acoustic impedance of orifice pulse tube refrigerator and double-inlet pulse tube refrigerator.

- 1. W. Gifford and R. Longthworth: Trans. of the ASME, 86 (1964) 264.
- 2. E. Mikulin, et al.: Adv. Cryog. Eng., 29 (1984) 629.
- 3. K. Kanao, et al.: Proceedings of ICEC 15, Cryogenics 34 (1994) 167.
- 4. S. Zhou, et al.: Cryogenics **30** (1990) 514.
- 5. 富永昭, 熱音響工学の基礎, 内田老鶴圃.
- 6. T. Iwase, T. Biwa: Abstracts of CSJ Conference, **78** (2008) 140.

加圧窒素を作動流体とした進行波型熱音響冷凍機の開発 A traveling-wave thermoacoustic refrigerator filled with pressurized nitrogen gas

下川哲, <u>上田祐樹</u>, 秋澤淳(東京農工大学) SHIMOKAWA Satoshi, <u>UEDA Yuki</u>, AKISAWA Atsushi (TUAT) E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp

1. はじめに

音波が管内を伝ばする時,管壁と管内の流体が熱交換し, その結果,ヒートポンプ効果が得られることがある.この音波に よるヒートポンプ効果を利用した装置として熱音響冷凍機が知 られている.熱音響冷凍機は定在波型と進行波型に分類でき る.定在波型は管壁と流体の不可逆的な熱交換によりヒート ポンプ効果を得る.一方,進行波型は本質的に可逆的な熱 交換によりヒートポンプ効果を得る.そのため,定在波型に比 べて進行波型の方が高い成績係数を実現できる可能性があ る.

本研究では図1に示すループ管を有した進行波型熱音響 冷凍機⁽¹⁾を熱音響理論⁽²⁾を用いて設計し,製作した.作動流 体として 300 kPa から 700 kPa の窒素を用い,最低到達温度 -50℃,0℃での成績係数 0.75(高温熱源の温度約 40℃)を得 た.

2. 進行波型熱音響冷凍機

製作した冷凍機はリニアモータ,共鳴管,ループ管で構成 されている.ループ管内には長さ40mmの蓄熱器が挿入され ている.蓄熱器の両端には熱交換機が設置されており,一方 は水冷されており,もう一方には冷凍出力計測用にヒーター 線が巻かれている.さらに,ループ管内には音響質量流を抑 制するためのゴム膜が設置されている.装置内には加圧した 窒素が作動流体として内封されている.窒素の平均圧力は 300~700 kPa とした.

ループ管と共鳴管の長さは、管内の気柱の共鳴周波数が およそ 50 Hz になるように決めた.この理由はリニアモータの 固有振動数が約 50 Hz であったためである.計算からループ 管の平均周長を 1.5 m, 共鳴管の長さを 2.7 m とした.ループ 管の内径は 40 mm, 共鳴管の内径は 57 mm とした.ループ管 の内径に比べて共鳴管の内径を大きくした理由は,共鳴管壁 での散逸をできるだけ抑え,かつ,大きな音響パワーをルー プ管に供給するためである.共鳴管の一端にはベローズが取 り付けてあり,このベローズをリニアモータで加振することで, 音響パワーを共鳴管に入力する.リニアモータに加速度計を 取り付け,ベローズ端面のおおよその変位量を算出した.

蓄熱器としてステンレスメッシュスクリーンを積層したものを 用いた. #50~#200の4種類のメッシュスクリーンを用いた. 用 いた蓄熱器の有効流路半径⁽³⁾は0.05 mmから0.13 mm程度 である. 蓄熱器の設置位置は冷凍機性能に大きな影響を与 える. ⁽⁴⁾ そこで,本研究では熱音響理論を用いて,蓄熱器位 置を変えながら性能を計算⁽⁶⁾し,成績係数が大きくなり,かつ,







Fig. 2 The coefficient of performance of the travelingwave thermoacoustic refrigerator.

大きな冷凍出力が得られるように蓄熱器位置を決定した.

共鳴管壁に圧力センサを取り付け, 圧力変動を測定し, 音響パワーを算出⁽⁶⁾した.得られた圧力変動はループ管と共鳴 管の接合点でどの平均圧力でも平均圧力のおおよそ4%で, 得られた音響パワーは最大で30W程度であった.リニアモー タに印加した電力(We)と算出された音響パワー(Wa)の比 (Wa / We)である電気-音響パワー変換効率は60%程度で あった.

3. 実験結果

平均圧力を700 kPaとし, 蓄熱器として#200 のメッシュス クリーンを用いた時に実験で得られた成績係数(COP)と低温 熱交換器の温度の関係を図2に示す.この図から, 最低到達 温度が-50℃以下であることが分かる.また, 低温熱交換器の 温度を上昇させると, 成績係数が上昇することが分かる.0℃ の時, COP = 0.75 となった.この時, 水冷した熱交換器の温 度が38℃であったので, カルノーCOPの約10%が得られたこ とになる.

講演では蓄熱器の設置位置の決定方法および,計算結 果と実験結果の比較についても示す.

- G. W. Swift et al. J. Acoust. Soc. Am, Vol. 105 (1998) p.711-724
- A. Tominaga "Fundamental thermoacoustics" UCHIDA-ROKAKUHO (1998) Tokyo, Japan
- Y. Ueda, et al. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 125 (2009) p. 780-786.
- S. Shimokawa et al. submitted to Trans. Jap. Soc. Mech. Eng., Ser. B
- 5. Y. Ueda J. Pow. Energy Sys., Vol. 2 (2008) p.1276-1282
- A. M. Fusco, et al. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 91 (1992) p. 2229-2235

La 系磁性材料を用いた室温磁気冷凍機の冷凍能力の数値計算

Performance simulation of Room temperature Magnetic Refrigerator using Lanthanum-containing Magnetic materials

小山 尚人, 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);和田 裕文(九大)

OYAMA Naoto, OKAMURA Tetsuji(Tokyo Tech.);

HIRANO Naoki, NAGAYA Fumio (Chubu Electric Power Co.)

ITO Koji;WADA Hirofumi

E-mail: oyama.n.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

室温磁気冷凍機は磁性材料の磁気熱量効果によって冷凍 を行うものである。磁気熱量効果とは、励磁した際に磁気エ ントロピーが減少し、その分、磁性体の格子エントロピー が増大し発熱し、消磁の際には磁性体の磁気エントロピー が増大し、その分、磁性体の格子エントロピーは減少し吸 熱することである。これまでに本研究では磁性材料に Gd と GdDy を用いて実験と数値計算を行ってきた。本報告で は、新たに開発が見込まれるこれまでよりも低い温度で大 きな磁気熱量効果が見込める La を用いた磁性材料を作業 物質とした場合の室温磁気冷凍機の冷凍能力よよび温度 差について数値計算を行ったので、その結果を報告する。

2. 計算モデル(実験装置)

本研究で用いた計算モデルの概略図をfig.1 に示す。 冷却ステージ側に磁気転移温度の低い磁性材料を、逆側 に磁気転移温度の高い球状の磁性材料を充填し、カスケー ド接続する。

計算領域は図示の通りで、配管部に関しては計算グリッドを少なくしてある。計算は水のエネルギー保存式と磁性 材料のエネルギー保存式、kuniiの式を用いており、各グリッドごとに水と磁性材料の熱交換を計算している。入り 口条件として高温端温度 23[℃]とした。

3. La系磁性材料の断熱温度変化について

La 系磁性材料の断熱温度変化(0-1.1[T])を fig2 に示す。 比較のため Gd 系の磁性材料の断熱温度変化も載せる。なお、 磁気転移温度の低い順に右側に材料名を記した。La 系磁性 材料の断熱温度変化は Gd 系に比べ全体的に小さな値となる。 しかし、Gd 系磁性材料の比熱 0.25[kJ/kgK]に対し、La 系磁性 材料は 0.47[kJ/kgK]と約 2 倍となっており、1 回の励消磁で生 じる冷熱エネルギーとしては大きな値となる。

4. 謝辞

本研究は、地球温暖化防止新技術プログラムの一環であ る「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発」として、 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託により実施したものである。







Fig.2 Adiabatic temperature changes of Magnetic materials



Fig.3simulated Cooling Power

南極昭和基地新超伝導重力計の設置計画

Planning of New Superconducting Gravimeter Syowa Station at Antarctica

<u>池田</u>博(筑波大学);土井浩一郎,青山雄一,澁谷和雄(極地研) <u>IKEDA Hiroshi</u>, (University of Tsukuba); DOI Kouichirou, AOYAM Yuichi, SHIBUYA Kazuo (NIPR) E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

南極昭和基地では 1993 年から超伝導重力計(TT-70# 16)による重力の連続観測が行われている。2003 年から は4Kタイプ GM 冷凍機を装備した小型の超伝導重力計(CT #043)に更新され、現在も連続観測を行っている。超伝 導重力計は地球上の重力を測定して地球内部の動きや地 球自由振動の測定により地球の動的特性を解明しようと している。今回、2009 年 11 月に東京を出港する新南極観 測船しらせで第 3 世代の超伝導重力計(CT#058)を導入す る予定なので新超伝導重力計装置の概要及び出荷前試験 について以下に報告する。

2. 超伝導重力計

重力の測定方法として絶対値を測定する絶対重力測定 と重力差や時間的変化を測定する相対重力測定の2つに 大別される。超伝導重力計は相対重力計で超伝導コイルの つくる極めて安定な磁場で浮上した1インチニオブ球の 位置変化を検出することで重力の変化を測定する装置で ある。液体ヘリウム温度で使用しているため熱的ノイズは カットされ、絶対重力計に比べて3桁以上感度が高く、1 ナノガル(10⁻¹¹m/sec²)までの測定が可能である(1µガ ル=10mmの分解能)。そのため、超伝導重力計は地球深部 のダイナミックスを観測目的とするため国際観測プロジ ェクト GGP が組織され世界各国で観測が続行されている。 南極にある超伝導重力計は日本の昭和基地が唯一の装置 であり重要な観測点となっている。

3. 新超伝導重力計の概要

新しい超伝導重力計(CT#058)が筑波大学に搬入されたのは2009年1月末である。新超伝導重力計は小型の4KタイプGM冷凍機を装備した小型の超伝導重力計でユニットタイプになっており、計測系も温度コントロールされたボックスに収納されている。GPSや気圧計も装備しており時計や気圧変動を計算して潮汐信号を差し引いた残差を表示できる。冷凍機は100Vでコンパクトになっている。

Fig.1 に示すように冷凍機からの振動防止のためにア ルミ蒸着されたポリウレタン製のダイアフラムが使用さ れている。これにより従来のゴム製のダイアフラムでは除 振についてはある程度効果はあるが不純物混入防止策と しては空気やヘリウムガスが透過する問題が解決されな かったが、アルミ蒸着ポリウレタンの使用によりこれらの 問題が解決された。それにより長期連続運転が可能となっ た¹⁾。立ち上げ作業は液体窒素で予冷後、液体窒素を追い 出し、液体ヘリウムをトランスファーして冷却した。その 後、4K 冷凍機でヘリウム液化を行った。液体ヘリウムが 70%以上になってから超伝導重力計の調整を行い勾配調 整で 2.4V/10mA を達成した。動作試験の結果、冷凍機1 段で 35K、2 段で 3.6K を達成した。動作テストを2ヶ月行 い問題ないことを確認した。この後、冷凍機を停止したと きの蒸発量の測定と液化率の測定、さらに、室温まで戻し て再び冷却試験を行い9月に分解して輸送に備えて防振 対策を行い南極観測船しらせに積み込む予定である。現在 までに観測されている1カ月間の潮汐変化をFig.2に示し た。この図からひとつのサイン波が1日の潮汐でさらに大 きな周期のサイン波を見ることが出来るが、これは満月と 新月の周期である。また、上下に大きな振幅があるのは2 月1日起きた茨城県沖 Mn=5.8の地震による信号である。



Fig.1 Al-coated polyurethane diaphragm



Fig.2 Superconducting Gravimeter Signal

参考文献

1. H.Ikeda et al; TEION KOGAKU 39(2004) 348-353.

ガス冷却ペルチェ電流リードでの熱電材料特性の熱侵入量への影響 Thermoelectric property dependence on the heat leak at the terminal with gas cooled Peltier current lead

<u>河原敏男</u>、藤井友宏、江本雅彦*、浜辺誠、渡邉裕文、山口作太郎 (中部大、*核融合研) <u>Toshio Kawahar</u>a, Tomohiro Fujii, Masahiko Emoto*, Makoto Hamabe, Hirofumi Watanabe, Satarou Yamaguchi, (Chubu Univ., *NIFS) E-mail: toshi@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

エネルギー・環境問題は緊急の課題であり、その解決 が強く求められている。そこで、太陽エネルギーなどの自 然エネルギーへの移行が重要な課題であるとともに、スマ ートグリッドなどの送配電システムの改良も広く検討さ れ始めている。その中で、直流超伝導送電は超長距離の送 電を高効率に行えるため、大規模太陽光発電等との組み合 わせで世界規模の自然エネルギー網が可能となる。また、 インターネットデーターセンターなどへ応用すればグリ ーンインタネット(IT)技術としてエネルギー・環境問題の 解決の一助となる。したがって、電気抵抗がゼロの超伝導 技術による省エネルギー化を小規模システムまで含めて 検討することでエネルギー・環境問題の解決に近づく。

中部大学では、20 m級の直流超伝導送電線システムを 世界で初めて作製し、実用化を目指して熱侵入低減のため の各種パラメータを評価している[1]。直流の場合の熱侵 入には、超伝導ケーブルの断熱 2 重管での熱侵入と、電流 リードからの熱侵入があり、データーセンター等の小規模 システムでは、後者が支配的となる。そして、電流リード での熱侵入を低減する方法としてペルチェ素子を利用し たペルチェ電流リード(PCL)がある[2]。PCLでは電流が流 れたときの冷却効果と熱電材料での低熱伝導率により熱 侵入を抑える。一般に、PCL は熱電材料と銅線などを用い て構成されるが、そこに、現実的なパラメータを用いて熱 侵入量の評価を行うことが求められる。そこで、複数の熱 電材料特性を用いて熱分布を計算することにより熱侵入 量を見積もった結果の比較について報告する。本発表では、 BiTe 合金を熱電素子として想定した。

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 で評価する[3]。熱バランスは、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。そして、ガス冷却の場合、冷却ガスへの熱伝 達によりくみ出される熱量を熱交換効率fで表現する。f= 0は伝導冷却である。f=1は、自己冷却条件で、電流リー ドでの発熱と冷却ガスの熱交換が熱平衡となる。システム からの蒸発ガスを考慮する場合、f>1の値で表現する。 これをオーバーガス条件と呼ぶ。また、熱電素子は室温側 に導入し、各熱電特性から熱侵入量を極小にする形状因子 (Shape factor)を求めて、そのときの熱侵入量を計算した。

3. 結果と議論

モデルとして計算に用いた熱電特性を表1に示す。比較 的ゼーベック係数の大きい試料1,2とゼーベック係数の 小さい試料3,4を用いた。熱電材料は、その合金組成に応 じて特性が変化し、試料1,2は、ゼーベック係数が大きく、 電気抵抗も小さい熱電性能の高い材料である。

伝導冷却の場合とガス冷却の場合に、各試料の熱電特性を用いて計算した熱侵入量をFig.1 に示す。ガス冷却の場合は、オーバーガス条件で計算した。伝導冷却の場合でも、 PCLを用いなかった場合(42.5 W/kA)より侵入熱が減少している。そして、試料 1,2 では熱侵入が 30 W/kA 以下に

Table 1 Thermoelectric parameters for the model samples

	Electrical	Seebeck
	resistivity	coefficient
	ρ[Ωm]	α [V/K]
Sample 1	1.22E-05	3.55E-04
Sample 2	1.43E-05	2.82E-04
Sample 3	1.94E-05	2.19E-04
Sample 4	1.13E-05	1.27E-04



なってくるので、高性能電流リードとして期待できる。30 W/kA の熱侵入は、データーセンターをターゲットに 30 MW クラスを想定し、3 kA の電流を 400 m 送電すると仮 定すると、送電距離あたりの熱侵入は 0.2 W/m と見積もら れる。ここで、試料 2,3 のゼーベック係数を比較すると、 その差は 6.3x10⁻⁵ V/K であるが、熱侵入として 5 W/kA の 差があり、熱電特性の最適化を行っていくことが重要であ ることがわかる。

短距離ではさらに熱侵入を下げる必要があり、ガス冷却 電流リードを構成した場合の熱侵入を計算した。この場合 の熱侵入は15 W/k 以下となるので、200 m の送電を行う 場合でも0.2 W/m 程度の熱侵入となる。システム全体を考 えると、冷凍機での電力消費を下げるため熱侵入を低減す ることが必要であるが、PCL の導入で大きく貢献できるの で、小規模システムへの超伝導の導入が可能となる。

4. まとめ

PCL の超伝導応用システムへの適用を考慮しオーバー ガス条件も含めてガス冷却電流リードの評価を行った。熱 電特性の向上で熱侵入の低減が可能であることが分かっ た。電気抵抗によるジュール熱の寄与など熱電特性の寄与 が複雑な PCL では、最適形状の PCL を用いてさらに熱電 特性の最適化を行う必要がある。

参考文献

1. S. Yamaguchi, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 97 (2008) 012290

2. S. Yamaguchi, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 75 (2004) pp.207

3. H. Okumura, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7 (1997) pp.715

スラッシュ窒素生成装置の製作

Fabrication of apparatus of Slush Nitrogen Production

仲村 直子, 大野 隆介, 池内 正充, 矢口 広晴, 町田 明登(前川製作所)

<u>NAKAMURA Naoko</u>, ONO Ryusuke, IKEUCHI Masamitsu, YAGUCHI Hiroharu, MACHIDA Akito (Mayekawa) E-mail: naoko-nakamura@mayekawa.co.jp

1. はじめに

スラッシュ窒素を高温超電導送電ケーブルの冷媒として用いた場合、下記の効果が期待出来ると言われている。

- 冷媒温度を窒素の融点 63[K]近傍まで低下させることが 可能となり、高温超電導送電ケーブルを現状の液体窒 素温度より低温で安定的に冷却。
- スラッシュ窒素中に存在する固体窒素の熱容量を利用 するため、過渡的な熱が冷却システムに加わった際の温 度と圧力の降下に寄与する。

そこで、上記効果等の明確化を目的とし、スラッシュ窒素を 連続的に生成、循環、利用するための試験装置を製作して模 擬超電導送電ケーブルにおける搬送や熱特性の評価試験を 行う。

本研究では、初めにスラッシュ窒素を連続的に製造するた めの生成装置の製作を行った。ここでは、製作した生成装置 および試運転の結果について報告する。

2. スラッシュ窒素生成装置

連続的にスラッシュ窒素を生成するため、一般的にオーガ 法と呼ばれる掻き取り方式を採用した。本方式では、液体窒 素を凝固面で固化させ、回転させた羽根などを用いて生成し た固体窒素を砕き、粒子を生成する。

ここでは、固体窒素を生成するための冷却源として GM 冷 凍機を用いた。また、冷凍機の冷熱が理想的に固体窒素生 成に用いられると仮定し 0.1[mm]程度の粒子を生成するため の凝固面の表面積、形状を検討した結果、凝固部の寸法は 直径約 φ 50[mm]、高さ約 140[mm]とした。さらに、本生成装置 では、100%の伝熱および熱損失がない状態を仮定すると、約 3.0[g/s]の粒子の生成が予想される。

3. スラッシュ窒素生成装置の構造

本生成装置は、液体窒素および生成したスラッシュ窒素を 貯える液体窒素槽、同槽内に設置した凝固部、凝固部の温 度を調整するヒータ、断熱真空層、2台のGM冷凍機、掻き取 り羽根、掻き取り羽根の回転機構、観察窓、温度計、圧力計、 液面計で構成されている。図1に生成装置の概略図を示す。

本装置では、冷凍機の冷熱を凝固部に伝熱させて凝固部 の表面にて固体窒素を生成し、回転機構で掻き取り羽根の回 転速度を調整して凝固部に生成した固体窒素を掻き取る。さ らに、生成した粒子は観察窓より確認する。

液体窒素容器には、銅で加工した凝固部を設け、GM 冷 凍機を横向きに設置した。また、将来的にスラッシュ窒素を生 成しながら循環させることを考慮し、容器の最下部をフランジ 構造として取り出し口を設けた。

掻き取り羽根は、凝固部とのクリアランス、材質等を改良出 来るような構造とした。掻き取り羽根の回転機構には、回転数 変更、トルク測定が可能な状態を構築した。

4. 試験装置の試運転

試験装置は、スラッシュ窒素生成装置、GM 冷凍機の圧縮 機、真空ポンプ、直流電源、計測器、記録計等で構成した。 液体窒素を注入した後に冷凍機を運転し、凝固部に取り付けた温度計で温度を確認して回転速度を約10[rpm]に調整し、 掻き取り羽根を回転させた。その結果、固体窒素の粒子の生成を確認した。図2に観察窓から確認した固体窒素の様子を 示す。



Fig.1 Apparatus of slush nitrogen production



Fig.2 Solid nitrogen particles

5. まとめ

スラッシュ窒素の搬送、熱的な特性を評価するため、連続 的に生成、循環、利用するための試験装置を製作する。初め に、スラッシュ窒素を連続生成する試験装置を製作した。本 試験装置において、スラッシュ窒素の生成を確認した。今後 は、スラッシュ窒素の生成量の確認および固体形状等の評価 を実施する予定である。

なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術 総合開発機構(NEDO 技術開発機構)のプロジェクト「イットリ ウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したもの である。

金属多孔質体を用いた液体窒素伝熱促進に関する基礎研究

Fundamental Study on heat transfer enhancement with metal porous media

伊藤 悟, 茂庭 圭介, 橋爪 秀利(東北大);結城 和久(山口東京理科大)

ITO Satoshi, MONIWA Keisuke, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.); YUKI Kazuhisa (Tokyo Univ. of Science Yamaguchi) E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉の製造コスト,メンテナンスコストの削減のために マグネットを分割し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネ ットが提案されている[1]。本コンセプトでは、マグネット材料と して、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。分割型高温超伝導マグ ネットを実現するためには、低接合抵抗を実現する高温超伝 導導体の機械的接合法の確立、局所的にジュール発熱を起 こす接合部の冷却法の確立が必要となる。我々は分割型高 温超伝導マグネットの接合部の局所除熱システムとして金属 多孔質体を設置した冷却流路を用いることを提案している[2]。 金属多孔質体には、伝熱面積の拡大の効果、毛細管作用に よる膜沸騰遷移の防止の効果があるため、金属多孔質体を 流路に設置することは、膜沸騰状態に遷移しやすい液体窒 素を冷媒に用いての高熱流束除去に適した方法であると考 えられる。

本研究では,製作した液体窒素流動試験装置の流路にブ ロンズ粒子焼結体を金属多孔質体として設置した場合の液体 窒素の除熱特性を評価したので,その結果について報告す る。

2. 実験方法

Fig. 1 に使用した試験部を示す。本試験部では、金属多 孔質体が、く形流路に設置されており、その前後に取り付けら れているひずみゲージ式圧力計により、多孔質体前後での圧 力損失の計測が可能となっている。液体窒素の流量は、液体 窒素を供給するタンクの内圧を制御することで調整し、試験 部上流に取り付けられているタービン式流量計によって計測 することができる。また、使用する液体窒素供給タンクでは、 液体窒素をサブクール状態にすることができる。本実験で使 用した金属多孔質体はブロンズ粒子焼結体であり、伝熱面と なる銅ブロックに焼結接合された状態になっている。伝熱面 へは銅ブロック内に取り付けられたヒータにより熱が負荷され、 熱流束は銅ブロックに取り付けられた熱電対で測定した温度 分布より算出する。

本実験では、空孔径 20µm、60µm、120µm の各多孔質体 に対して、飽和状態の液体窒素、またはサブクール状態の液 体窒素を流し、除熱特性(壁面過熱度と入射熱流束の関係) を評価した。また、比較のため、多孔質体を設置していない場 合の除熱特性も取得した。

3. 結果と考察

Fig. 2 に液体窒素流量 2L/min の際に得られた壁面過熱度と熱流束の関係を示す。多孔質体を設置した場合の CHF (限界熱流束)は多孔質体を設置しない場合の CHF に比べて最大 6.9 倍となった。また、多孔質体を設置した場合において空孔径ごとの CHF に注目すると、空孔径が小さいほど CHF が大きくなるという結果になった。これは、空孔径が小さいほど毛細管力が大きくなり、伝熱面へ液体窒素が連続的に供給されやすくなるためと考えられる。

除熱特性は空孔径 20µm のブロンズ製多孔質体とサブク ール状態の液体窒素を用いた場合が最も優れているといえる が、この場合の圧力損失が比較的大きいうえに、この多孔質 体を飽和状態の液体窒素が通過した場合には、圧力損失お よび流量の周期的変動が出る可能性があり、流動特性の安 定性に欠けているといえる。したがって、流動特性の安定性 や除熱性能、ポンピングパワーなどを考慮した場合、空孔径 60µm 以上といった比較的空孔径の大きいブロンズ製多孔質 体を伝熱面に焼結したヒートシンクを用いたうえで、サブクー ル状態の液体窒素の流量を大きくする場合が、分割型超伝 導マグネット接合面の冷却システムとして適しているといえる。

4. まとめ

本研究では、金属多孔質体の除熱特性を実験的に評価し、 金属多孔質体を用いた液体窒素伝熱促進が可能であること を示した。本研究では流量を 2L/min に統一したが、より大き な流量における除熱特性を調査することで、本研究で得られ た CHF,または熱伝達率よりも大きな値が得られる可能性が 高い。今後はサブクール状態の液体窒素に絞って研究を進 め、除熱特性の流量依存性を調査していく予定である。

謝辞

本研究は科研費(18360440)の助成を受けたものである。

- S. Ito, H. Hashizume: Fusion Engineering and Design, Vol. 81 (2000) p.2527-2533
- K. Moniwa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.164



Fig.1 Test Section



Fig.2 Experimental Result

超電導送電ケーブル用冷却システムの研究概要

Study of cryogenic cooling system for superconducting cable

<u>池内 正充</u>,大野 隆介,仲村 直子,矢口広晴,町田明登(前川);野口裕,鬼頭豊,三村智男,本庄昇一(東京電力);渡部充彦, 増田孝人(住友電工)

<u>IKEUCHI Masamitsu,</u> ONO Ryusuke, NAKAMURA Naoko, YAGUCHI Hiroharu, MACHIDA Akito (Mayekawa); NOGUCHI Yu, KITO Yutaka, MIMURA Tomoo, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company); WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo

Electric Industries)

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

1. はじめに

平成 19 年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構(以 下 NEDO)の高温超電導ケーブル実証プロジェクトが発足し た.これまでの高温超電導ケーブル開発の成果や知見を用 いて,住友電気工業株式会社,東京電力株式会社,株式会 社前川製作所の三社による研究体制で高温超電導ケーブル システムを構築し,実系統に連系するプロジェクトである.実 系統に連系することで,線路設計・建設・運転・保守を含めた トータルでの安全性と信頼性を評価することを目的としてい る.

日本国内では高温超電導ケーブルを実系統に連系した実 績はなく、本プロジェクトはその実現に向け確認・検証すべき 多くの課題を有している.ここではプロジェクトに用いる冷却シ ステムの概要について紹介を行う.

2. 実証試験用冷却システムの検討

冷却システムに求められるのは大きく分けて

- ・1年間の長期にわたる高信頼性
- ・系統の負荷変動に対応したケーブル冷却

·無人運転, 監視

である.

これらの要求を満たすため、内外の高温超電導ケーブル 冷却方法や地中送電ケーブル用冷却システムなどの調査を 行い、実証試験に適した冷却システムの検討を行っている.

3. 実証試験に向けた冷却システムの開発ステップ

冷却システムの開発ステップを大きく分けて以下の3ステップからなる. (Table 1)

Stpe1:30m ケーブル検証試験 Step2:システム検証試験

Step3:実証ケーブル試験

30m ケーブル検証試験は高温超電導ケーブル,ジョイント, 端末の施工性,機械的,電気的特性の事前検証を行うもので あり,冷却システムは最小限のものである.システム検証試験 は詳細を検討中であるが,基本的に Step1 で検証できない, 複数台の冷凍機,循環ポンプを組合せ,実証試験前にその 運転特性等の確認を行うためのものである. Step3 は東京電 力管内の変電所において実系統に接続して行う 1 年間の試 験を指し,冷却システムにおいては,連続かつ無人運転を目 指す.

現在, 30m ケーブル検証試験において冷却システムの単 体冷却試験を実施中である.

Table1	Schedule	of	development	of	cooling	system
--------	----------	----	-------------	----	---------	--------



4. 冷却システムの構成機器

冷却システムは冷凍機,循環ポンプ,リザーバタンク等に て構成される.

- 冷凍機:使用する冷凍サイクルの検討を行ったが,熱負荷 が数kW 程度であることから蓄冷型冷凍機を複数台使 用することとした.
- 循環ポンプ:流量は高温超電導ケーブルを含めた系内の 圧力損失と液体窒素とケーブル間の熱伝達率を考慮 し,昇圧幅,流速を決めた上で選定を行う.
- リザーバタンク:ケーブルを含めた系内の液体窒素の体積 膨張,収縮分を吸収するとともに,系内の圧力を一定 に保つ機能を有する構造とした.

5. 冷却方式の検討

実用化時も見据え,ケーブルの冷却方式として以下の2 方式の検討を行った.

- ・冷凍機直接冷却:冷凍機で冷却した液体窒素を全量ケーブルに循環させる方式.
- ・冷凍機間接冷却:冷凍機循環とケーブル循環の液体窒素を分離し、両者で熱交換を行う方式。

この 2 方式の効率などの得失を比較検討し,今年度前半 には実証試験に用いる冷却方式を決定する予定である.

6. 制御方法の検討

前述のとおり、1年間の系統連系運転を予定しているが、 その間、冷却システムはケーブルに過冷却(sub-cool)液体窒 素を安定して供給することが求められる.このため以下の制御 方法を検討中である.

- 温度制御:ケーブル冷却の特徴として系内の液体窒素量 が多く,時定数が非常に長い.
- 圧力制御:ケーブル内で気泡が発生すると部分放電が生 じる恐れがある。そこでケーブル内の圧力を常に 0.2[MPaG]以上に保つ方針としている.
- 流量制御:系内の圧力損失は速度の二乗で増大する反面, 流速を遅くすればケーブルの冷却を十分に行うことが できない. そのため最適流量の検討を行い,その流量 を一定範囲に保つ必要がある.

7. 冷却システムの信頼性

信頼性向上のため、可動部を有する冷凍機、循環ポンプ、 冷却水系は冗長系を組み込むこととし、制御に用いる計測機 器についても二重化することを検討している.また故障モード の検討を行い、問題点の抽出ならびにメンテナンスや復旧方 法の検討を実施中である.

8. おわりに

本研究は「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として新 エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受 けて実施したものである.

低温拡散法にて作製した Cu 添加 MgB₂ 多芯線材の高温特性 Superconducting properties at high temperature region on the Cu addition MgB₂ multifilamentary wires through low temperature diffusion process

<u>菱沼 良光</u> (NIFS), 菊池 章弘, 竹内 孝夫 (NIMS), 山田 修一 (NIFS) <u>HISHINUMA Yoshimitsu</u> (NIFS), KIKUCHI Akihiro, TAKEUCHI Takao (NIMS), YAMADA Shuichi (NIFS),

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

近年、低炭素社会に向けた水素エネルギー利用が注目されている。将来の核融合発電システムにおける廃熱を利用した水素製造の可能性が検討され^[1]、次いで液体水素燃料と電力を同時に輸送する「Hybrid Energy Transfer Line; HETL」の設計例が提案されている^[2,3]。一方で MgB₂は、39K の高い臨界温度特性を有し且つ低コスト線材に該当し、実用化に向けて大きく前進している。従って、MgB₂線材は HETL のような液体水素温度(20K)冷却での超伝導送電システムにおける候補材料の1つであると考えられる。そこで、液体水素を冷媒とする超伝導送電を前提に MgB₂線材の適用可能性について検討するために4.2K 以上の高温環境下における *I_c*-B-T 特性を調査した。

2. 実験方法

本研究で用いた MgB_2 線材は低温拡散法にて作製した^[3]。 本研究のターゲットである「超伝導送電」は、低磁場領域での 応用範囲である。 MgB_2 線材における低温拡散法は低磁場領 域での J_c 特性を著しく向上する効果が明らかになっている^[3]。 Fig.1 に本研究で使用した MgB_2 19 芯多芯線材の断面写真を 示す。最終線径は 1.04 mm で Cu 添加は Mg_2 Cu 化合物を使 用し、1at%Cu 組成とした。1at%Cu 添加 MgB_2 前駆体粉末を Ta 管に充填し、 MgB_2/Ta 単芯線材を作製した。その後、Cu 管に 単芯線材を 19 本スタックし再度線材加工を行い、 $MgB_2/Ta/Cu 19 芯多芯線材を得た。その後、Ar 雰囲気中で$ 475℃×200h の低温拡散熱処理を行った。

熱処理後の試料について、NIMS 強磁場センターに設置している温度可変(VTI)装備の15T 超伝導スプリットマグネットを用いた I_c -B 測定を行った。測定は4.2K から5K、10K、15K、20K と試料を昇温しながら行い、試料温度はプローブに付けたCernox温度計の指示値とし、LHeを注入するニードルバルブの開度とヒーターで制御している。 I_c criterionは1 μ V/cmと設定し、 J_c 値は I_c 値を MgB₂充填コアの全断面積で除した値Core J_c とした。

3. 実験結果

最初に VTI の温度制御特性を調べるために、4.2K における LHe 浸漬冷却とガス冷却による Le特性を測定した。両者の



Fig.1 Typical SEM image on the cross-sectional area of the Cu addition MgB_2 multifilamentary wire. (19fila.)



Fig.2 . Typical I–V–T curves of ${\rm MgB}_2$ multifilamentary wires under the various temperature region. (@2T)

I。特性は5%程度の誤差を示し、VTIの高い温度制御特性が 確認された。Fig.2に2TにおけるI-V曲線及び試料環境温度 の変化を示す。環境温度の上昇に伴い、*I*。特性の低下が見ら れ、20K@2Tの条件で35A(Core *J*.: 560A/mm²に相当)の*I*。 特性が確認された。また、この場合 I-V 測定時に設定された 環境温度は通電中安定していることから、正確な特性が示唆 されているものと考えられる。しかしながら、通電電流が60Aを 越える領域になると環境温度が上昇する傾向が見られるが、 これは、通電電流の増大に伴って、VTI内への熱侵入が大き くなっていることに起因しているためと考えている。

当日は Fig.2 のような実験結果を基にした *I*_c-B-T 特性を示し、現在提案されている HETL の設計案との整合性について報告する。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(若手研究(B):21760240)、 NIFS 一般共同研究(NIFS07KKMF003、)、及び文科省原子力 試験研究費により行われた。

参考文献

67

- S. Yamada, et al, Abstract of CSJ conference, Vol. 78 (2008), p.209.
- 2. S. Yamada et al, J. Phy. Conf. Ser.97, (2008), 012167.
- S. Yamada, et al, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn), Vol.43, (2008), p.430
- Y. Hishinuma, et al, Supercond. Sci. Tech., Vol. 20, p.1178

極低温中における固液二相流の流動特性

Flow characteristics of solid-liquid two-phase flow in cryogenic temperature

池内 正充, 町田 明登, 矢口 広晴, 仲村 直子,大野 隆介 (前川製作所)

IKEUCHI Masamitsu, MACHIDA Akito, YAGUCHI Hiroharu, NAKAMURA Naoko, ONO Ryusuke (MYCOM)

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

1. 緒言

ー般に高温超電導ケーブル用冷媒には過冷却 (Sub-Cool)液体窒素が使用されているが、当社では氷蓄熱 に着目し固体窒素の融解潜熱の利用を可能とするスラッシュ 窒素冷媒の研究を行っている.これまでスラッシュ窒素の平 均粒径は 1.4mm 程度と比較的大きく、低流速時に粒子が沈 殿し、低レイノルズ数領域で圧力損失の増大[1,2]や固液分 離が生じる.そこでスラッシュ窒素搬送における最適な粒径を 定性的に整理するためシミュレーションによる特性評価を行っ た.

2. 解析

解析モデルは弊社搬送試験で使用しているものと同じ内径 14mmとし,流れ方向に関して,300mmの直管として3次元非 定常解析を実施した.流路入口に流速条件を流路出口は大 気圧とし,粒子の粒径をパラメータとした[1]. Fig.1 に解析モ デルを示す.

	flow direction	
, inlet	>	outlet
ĺ .	ϕ 14 × 300 mm	
R		

Fig.1 Model of flow analysis

Fig.2に管内に粒径1.4mmの粒子を流したときの流れのシミュレーション結果を示す.図は管内に63Kの液体窒素を流したときで、初期流速を①0.2m/secと②1m/secで流したときの様子である.低流速域の0.2m/secの場合、粒子に働く重力の影響により管底に沈降した粒子は流速を失い粘性により管底を引きずられ、管長を流れきれずに沈殿してしまう.管断面図を見ても、粒子の分散は確認されず下部に沈殿・堆積してしまう.また流速を1m/secで流しても、徐々にほとんどの粒子が管下部へと沈殿していき、管長に達する前に断面下半分を占めてしまう.



①initial velocity: 0.2m/sec (0.2sec)



②initial velocity: 1m/sec (0.25sec)

Fig.2 Particle distribution in a duct

そこでスラッシュ窒素が管内を沈殿することなく流れるための指標を得るため、固体粒子径と管内流速の関係をFig.3に示す.図のプロットは管長300mmの中を流体の慣性により比較的粒子の流速を維持したまま,沈殿傾向を示さずに流れるかどうかを粒径と流速の相関性で表している.Fig.3の管断面図に示すように初期流速0.2m/secにおいて粒径50 μ mは均一に分布しているのに対して、粒径100 μ mでは断面下方に粒子が堆積してしまうことがわかる.グラフのプロットの下方では右断面図のように、沈殿もしくは堆積する傾向を示すことになる.管内搬送において固液が分離することなく流すには、プロットより上方の流速域で流すことが必要となる.



initial velocity : 0.2m/secparticle dia. : $50 \mu m (1.2sec)$ initial velocity : 0.2m/secparticle dia. : $100 \mu m(1.2sec)$

Fig.3 Relationship between particle dia. and velocity

3. 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開 発機構(NEDO技術開発機構)のプロジェクト(イットリウム系超 電導電力機器技術開発)の一環として実施したものである. 関係各位に深甚なる謝意を表する.

- Ikeuchi M, Machida A, Ono R. Fundamental research on flow regime of fine particles in liquid Nitrogen. Abstructs of CSJ Conference (2007).
- [2] Ishimoto J, Ono R. Numerical study of the two-phase flow characteristics of slush nitrogen. Cryogenics 2005, 45, pp. 304-316.

スラッシュ水素と超伝導機器を利用した水素エネルギーシステムの開発

Hydrogen energy system using slush hydrogen and superconducting machines

大平 勝秀 (東北大 流体研) OHIRA Katsuhide (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

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

1. はじめに

液体水素中に固体水素粒子が混在する極低温固液二相 スラッシュ水素は、高密度流体、冷媒、燃料として優れた 特性を持っており、MgB2を使用した超伝導機器と組合せ ると、燃料と電力の同時輸送・貯蔵が可能となる。発表者 は図1に示すエネルギーシステムを提案しており[1]、磁 気冷凍法による水素液化[2]、スラッシュ水素の製造、高精 度密度計・流量計、核沸騰熱伝達特性[1]、スラッシュ窒 素の流動・伝熱特性について研究・開発を実施してきた。 システム実用化に必要な次の研究内容について報告する。

2. 磁気冷凍法による高効率水素液化

磁気冷凍は、冷媒である磁性体を励磁、消磁するサイクル を繰り返して寒冷を発生する方法である。理想的な場合はカ ルノーサイクルを実現できるため、従来の液化法に較べ、原理 的に高い液化動力効率が可能である。発表者は磁気冷凍法 による水素液化を初めて実証している[2]。図2は磁気冷凍時 の磁性体(GGG)の温度-エントロピー線図である。本実験では 励磁・消磁速度が最も速い 0.36 T/s のとき、水素の最大液化 量 50 cc/h が得られ、この時の%カルノーは 37%であった。

3. スラッシュ水素、液体水素の核沸騰熱伝達特性

超伝導電力貯蔵(SMES)の冷媒を目的として、スラッシュ水素、液体水素の核沸騰熱伝達特性の実験結果を図3 に示す。液体水素の熱伝達係数は液体へリウムと同程度が得られ、液体水素、スラッシュ水素の限界熱流束は液体へリウムより高く、冷媒として優れている。スラッシュ水素の熱伝達係数 は固体粒子が対流効果を抑制するため、液体水素に較べ低 下する。SMESの冷却には伝熱上、液体水素が適する。

4. スラッシュ窒素の管内流動・伝熱特性

スラッシュ窒素、サブクール液体窒素の管内流動時の圧力 損失と熱伝達係数を図4に示す。スラッシュ流体の圧力損失 低減効果と熱伝達劣化特性が明らかとなった。高流速時は通 常の固液二相流体に較べ、固相率に応じて圧力損失が液体 と同程度に近づく、もしくは液体より小さくなり、ポンプ動力の 低減が期待できる。圧力損失および熱伝達特性が低減する原 因は固体粒子が管軸方向に移動し、管中央部の固体粒子群 が管壁での乱流発生と熱伝達を抑制するためと考えられる。 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

K. Ohira: J.Cryo. Soc. Jpn, Vo. 41(2006) pp. 61-72.
 K. Ohira, et al.: Adv. Cryo. Eng. 45(2000) p.1747-1754.



Fig.1 Synergetic effect in combination with slush hydrogen and superconducting power machines.



Fig.2 *T-s* diagram of a magnetic refrigeration cycle.







Fig.4 Pressure drop and heat transfer to slush N₂.

スラッシュ窒素の管内絞り部流動時の圧力損失低減現象

Pressure drop reduction of slush nitrogen flowing through a constriction in a pipe

大平 勝秀、若林 陽一、高橋 幸一 (東北大 流体研)

OHIRA Katsuhide, WAKABAYASHI Yoichi, TAKAHASHI Koichi (Institute of Fluid Science, Tohoku University) E-mail: ohira@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

液体水素中に固体水素粒子が混在する固液二相スラッ シュ水素は、高密度流体、冷媒、燃料として優れた特性を 持っており、MgB2を使用した超伝導機器と組み合せると、 燃料と電力の同時輸送・貯蔵が可能となる。発表者は図1 に示すエネルギーシステムを提案しており[1]、スラッシュ 窒素を使用して流動・伝熱特性の研究を実施している[2]。

スラッシュ水素が部分開のバルブを流動する際、圧力損 失が液体水素より低減する結果[3]が報告されているが、そ の流動構造、低減現象については解明されていない。流れ 方向に長い絞り部をもつスロート管と短い絞り部をもつ くびれ管について、圧力損失測定と高速度カメラ、PIV 法による流動構造の解析を行い、低減現象の解明を行った。

2. 実験装置および実験方法

流動試験装置の概略図を図2に示す。上流部には内径 15 mmの SUS 製水平管、下流部には供試体である内径15 mm、絞り部径10 mmの石英ガラス製水平管を設けている。 スロート管の縮小部長さは80 mm、くびれ管のくびれ部全体 長さは約10 mmである。実験の固相率は0~30wt%である。

3. 実験結果および考察

スロート管のスラッシュ窒素の圧力損失は、同一流速で サブクール液体窒素(63 K)より大きく、くびれ管と比較す ると4倍程度大きな値となった。高速度カメラによる可視 化ではスロート部で発達した流れ(高流速)が拡大部で剥 離を発生している。くびれ管の実験結果を図3に示す。流 速 1.5 m/s 以上で圧力損失低減効果が見られ、固相率による 顕著な違いは見られない。PIV 法を使用してくびれ部を通過 する固体粒子の流跡線を測定した結果を図4に示す。ほぼ同 じ固相率(19wt%)において、低流速(1 m/s)ではくびれ部 下流に渦の発生が観察されるが、高流速(4 m/s)になると渦は 消滅している。また、流速が同程度の場合、渦の大きさは固相 率が大きいほど小さい結果が得られた。固体粒子が液体の剥 離を抑制する効果があることと、くびれ部を少ない損失で通過 した固体粒子が、下流で液体と運動量交換を行い、圧力回復 量が増加することが圧力損失低減効果の要因と考えられる。 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

K. Ohira: J.Cryo. Soc. Jpn, Vol. 41 (2006) pp. 61-72.
 K. Ohira, et al.: Proc. ICEC 22(2009). (to be published)
 C. F. Sindt, et al.: Adv. Cryo. Eng. 15 (1970) pp. 382-390.



Fig.1 Synergetic effect in combination with slush hydrogen and superconducting power machines.





Fig.2 Experimental apparatus for the slush N_2 flow test.

Fig.3 Mean velocity and pressure drop of slush N₂.



Fig.4 Flow pattern of solid nitrogen particles measured by PIV. (a) 1.0 m/s, 19.7 wt%, (b) 4.0 m/s, 19.0 wt%

サブクール液体窒素の C-D ノズル出口部キャビテーション現象

Cavitation phenomena of subcooled liquid nitrogen flowing in a C-D nozzle

永井孝佳、大平勝秀、高橋幸一(東北大流体研)

NAGAI Takayoshi, OHIRA Katsuhide, TAKAHASHI Koichi (Institute of Fluid Science, Tohoku University) E-mail: nagai@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

サブクール極低温流体は、ロケット推進剤の高密度化、およ び高温超電導機器の冷却性能向上を目的に実用化が進めら れている。温度を大気圧沸点以下に低下させたサブクール液 体窒素を使用し、収縮・拡大(C-D)ノズル出口部におけるキャ ビテーション挙動の解明を可視化観察を含めて行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。装置はランタンク、キャッ チタンクとその間の試験部で構成されている。両タンクを同時 に減圧し、液温を低下させる。試験はランタンクの液体窒素を 気体窒素で加圧し、大気圧のキャッチタンクへ圧送して行う。 試験部には内径10mmで最縮流部が2mmの石英ガラス製 C-Dノズルを設けた。試験条件はランタンクの液温と絶対圧で 設定した。設定条件は温度67~77.4K(大気圧沸点)、圧力 0.1~0.2 MPa。縮流部流速は5~20m/sの範囲であった。

3. 実験結果および考察

縮流部でキャビテーションが発生するまでの、飽和蒸気圧 からの圧力降下量(準安定状態の大きさ)は図 2 に示すように、 74 K付近で極大となり、キャビテーション発生時の圧力振動も 最大となった。また、キャビテーションの発生様相は、一旦発 生すると発生し続ける"連続的キャビテーション(●印)"と、発生 直後に消滅し液単相流に戻る"間欠的キャビテーション(○ 印)"に大きく二分された。キャビテーションの継続時間が短い ため、〇印はキャビテーションが発生する直前の値を用いてい る。それぞれの典型的な写真を図3に示す。発生様相は流体 温度に支配され、本実験系における境界温度は76Kであった。 間欠的キャビテーションに関しては、発生から消失までがミリ秒 スケールのものだけでなく、74~76 K の温度域においては数 秒間の連続的な発生の後に消滅する遷移的な挙動も観測さ れた(★印)。☆印は★印の発生直前の値をプロットしている。 これらのキャビテーション発生様相の変化は、気液二相化に 伴う音速の急激な低下が原因と考えられる。縮流部での流速 が音速に制限されたチョーク状態になると、静圧が上昇してキ ャビテーションは安定した発生を続けることができない。縮流 部流速と温度、キャビテーション発生様相の関係を図4に示す。 図中の曲線は次式のような二成分系の等温変化を仮定した音 速を表す。αはボイド率、Pは静圧、ρ」は液相の密度を示す。

$$c = \sqrt{\frac{P}{\alpha(1-\alpha)\rho_l}} \tag{1}$$

キャビテーション発生様相は、温度に強く支配されること、ま た、キャビテーション発生に伴う圧力振動は準安定状態に大き く関係していることが分かった。



Fig.1 Experimental apparatus for the cavitation test of subcooled LN_2 .



Fig.2 Temperature and static pressure at the nozzle throat.



(a) Continuous (77.2 K)(b) Intermittent (71.3 K)Fig.3 Photographs of cavitation at the nozzle throat.



Fig.4 Temperature and flow velocity at the nozzle throat.

超流動ヘリウムのキャビテーション流れにおける熱力学効果

Thermodynamic effect of superfluid cavitating flows

<u>村上 正秀</u>,原田 浩平,高田 卓,澤原 弘憲(筑波大) <u>MURAKAMI Masahide</u>, Harada Kohei, TAKADA Suguru, SAWAHARA Hironori (Univ. Tsukuba) E-mail: murakami@kz.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

我々の一連の実験により、He II ではキャビテーションが起き 易く、起きれば急速かつ大規模に発達することが分ってきた [1]。その中で、キャビテーションの熱力学的効果に関しても興 味ある事実が見出された。この効果とは、キャビテーションに 誘起された温度降下により液体の蒸気圧が低下し、結果的に キャビテーションの規模縮小が起こることである。この効果を 測る尺度としては、キャビテーションの規模の他に現象の温度 依存性がある。He I は典型的低温流体であり、熱力学効果が 顕著に表れる。では He II ではどうなのであろうか、以下では 我々の一連の実験結果を俯瞰しそれに基づいて議論する。

2. 実験装置

実験には、Fig. 1 に示した装置が用いられた。ベローズポンプから吐出された He II ないしは He I は、縮流部で加速され て静圧が降下し、流路拡大部ノズルからキャビテーションが始 まる。流路としては、ノズルスロート下流側で急拡大した平行 流路が主に使われた。この装置は可視化窓付きクライオスタ ット内に設置され、可視化、温度や圧力変化の測定、PIV 法 による流速測定などが行われた。

3. これまでの実験結果の纏めと議論

熱力学的効果の大きさを評価するパラメータの一つにΣ数

$$\Sigma(T) = L^2 \rho_V^2 / (\rho_L^2 c_{PL} T_{\infty} \alpha_L^{1/2}), \quad \alpha_L = \kappa_L / (\rho_L c_{PL}) \quad (1)$$

がある。その温度依存性は Fig. 2 に示した(横軸は臨界温度 で割った換算温度 T/T。)。そこでは、He IのΣは極めて大きく、 典型的低温流体であり、熱力学効果が顕著であることが示唆 される。一方 He II では、熱力学量だけからΣを計算すれば He I と同オーダーとなるが、熱拡散率 α, を物理熱伝導率で はなく超熱伝導率 κ_{super} で計算すれば、 Σ は 1 のオーダーと なり、熱力学効果は無いということになる。実験結果からはむ しろκ_{super}に基づく方が妥当である事が示された。これについ て議論するために、既存の主要な実験結果を以下に纏める。 1)初生確率実験や可視化実験からは、He IIの方がHe Iより キャビテーションが起き易く、その発達は急速かつ大規模とな ることが分かった。初生キャビテーション数は、He II の方が大 きくかつ温度依存性がないという点で He I と対照的である。 2) キャビテーション誘起性の圧力損失は、He II の方が大きく 温度依存性を持たない。この点でも He I とは対照的である。 3) キャビテーション誘起性の温度降下は、HeIでは特異的に 大きく、流れ中で He II へ λ-相転移することもある。また温度 依存性も強い。他方 He II でも He I 程ではないが有限の温度 降下があり、温度依存性もある。(Fig. 3 参照) 4) 可視化及び PIV 計測によれば、キャビテーション気泡群の 発達は He II の方が圧倒的に大規模かつ広域的である。 5) ボイド率は He II の方が相当に大きく、また PIV 計測と温度

降下計測から独立に導出した値はまずまずの一致を見た。

上述の大抵の実験結果は、He II キャビテーションには熱 力学効果が現れないと言う、Σ数に基づく予測が妥当するが、 上記の 3)の結果は予測に合致しない性質である。発表では この点に関する考察を展開する。 1. K. Harada: Ph. D Dissertation submitted to U. Tsukuba (2008).



Fig.1 Illustration of the test section and configuration of the 2-D parallel flow channel.



Fig. 2 Thermodynamic parameter Σ for liquid heliu and water as a function of reduced temperature, T/T_c .



Fig. 3 Cavitation-induced temperature depression as a function of the flow velocity V_{t} .

準安定オーステナイト系ステンレス鋼の極低温 疲労き裂進展挙動に及ぼす磁場の影響 High magnetic field effect on the cryogenic fatigue crack growth behavior of

metastable austenitic stainless steel

進藤裕英,竹田智,成田史生(東北大工)

SHINDO Yasuhide, TAKEDA Tomo, NARITA Fumio (Tohoku University)

E-mail: shindo@material.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Austenitic stainless steels are extensively used to construct cryogenic structural members. In the superconducting application the alloys sustain high stresses in high magnetic fields at liquid helium temperature (4 K). It is known that plastic deformation at cryogenic temperatures induces martensitic transformation in metastable austenitic steels and that the presence of a strong magnetic field enhances the transformation. If the metastable austenitic steels undergo strain-induced martensitic transformation under service conditions, there may be unanticipated effects, such as changes in the mechanical properties that can potentially degrade the performance of the device. Also, the components of the superconducting magnets are subjected to loadings in service that are cyclic in nature. Therefore, an understanding of both the fatigue crack growth and fracture characteristics of structural alloys under appropriate service conditions is essential to evaluate the structural integrity and useful life of components. Recently, Shindo et al. [1] investigated the fracture behavior of 304 stainless steel, a metastable alloy, in a 4 K, 6 T (T: Tesla) magnetic field environment using the compact tension (CT) specimens with side-grooves. In this study, we report examination of the fatigue crack growth behavior of 304 stainless steel in cryogenic high magnetic field environments.

2. Experimental procedure

The material investigated was SUS 304 austenitic stainless steel which belongs to the class of metastable steels. The CT specimens having width W = 25 mm and thickness B = 5 mm, i.e., 0.2TCT specimens, were machined from the plates. The geometry and dimensions of the 0.2TCT specimen are shown in Fig. 1. The specimens were precracked in fatigue at liquid nitrogen temperature (77 K). After precracking, a side-groove was made on each side of the specimens and the net specimen thickness B_N was 4 mm.

The fatigue crack growth tests were performed at 4 K in magnetic fields of 0 and 6 T using a 30 kN capacity servo-hydraulic testing machine. The tests at room temperature without an applied magnetic field (0 T) were also performed. A cryocooler-cooled superconducting magnet was used to create



Fig.1 Geometry and dimensions of 0.2TCT specimen

a static uniform magnetic field of 6 T normal to the crack surface. All tests were conducted under sinusoidal load control at a frequency of 3 Hz and a load ratio R of 0.1. The applied load was measured by the testing machine load cell. A clip gage was used to measure the load line displacement. The instantaneous crack length a as a function of the number of cycles N was inferred from the load-displacement slope.

Following the fatigue crack growth tests, the martensite measurement was made. A commercial device (Fischer Feritscope MP30) was used for measuring the martensite content in the specimens. In addition, the fracture surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM).

3. Finite element analysis

The fatigue crack growth rate da/dN can be related to the *J*-integral range $\Delta J = J_{max} - J_{min}$, where J_{max} and J_{min} are the maximum and minimum *J*-integrals corresponding to the maximum and minimum applied loads, respectively. In order to evaluate the *J*-integral range ΔJ during fatigue loading, three-dimensional elastic-plastic finite element analysis was carried out for the side-grooved CT specimen of SUS 304 stainless steel. The incremental strain theory and von Mises yield criterion were used. The *J*-integrals at the mid-thickness of the CT specimen were used to obtain the *J*-integral range ΔJ .

4. Results and discussion

Fig. 2 shows the plot of fatigue crack growth rate da/dN versus *J*-integral range ΔJ data for SUS 304 stainless steel at 4 K in 0 T and 6 T magnetic fields. Although the experimental data exhibit some scatter, the 4-K crack growth rate increases in a 6 T magnetic field. The temperature and magnetic field effects on the fatigue crack growth rates, martensite contents and fracture surface characteristics are also discussed in detail.



Fig.2 Fatigue crack growth rates as a function of *J*-integral range at 4 K in 0 T and 6 T magnetic fields

Reference

1. Y. Shindo, et al.: Strength Mater., in press.
α チタン合金の高サイクル疲労特性と疲労破壊起点部方位の温度依存性 Temperature Dependence of High-Cycle Fatigue Properties and Crystallographic Orientation of Fatigue Crack Initiation Site in α-Titanium Alloy

小野 嘉則 出村 雅彦 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, DEMURA Masahiko, 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】

著者らは、Ti-5% Al-2.5% Sn ELI 合金鍛造材の極低温高サ イクル疲労特性を調査し、低温では常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ている¹⁾。起点部と下部組織 の様相から、低温と常温ではき裂発生機構が異なり、低温で は常温に比べてき裂発生が起こりやすくなることを推察してい る。また著者らは、本合金のき裂発生機構を明らかにするため に、電子線後方散乱回折(EBSD)法を用いて、起点部に形成 される平坦部(ファセット)の面方位を測定する方法を確立し た²⁾。本研究では、SEM-EBSD 法により、常温以下で疲労破 壊した試験片のファセットの面方位を測定し、その結果をもと に高サイクル疲労特性の温度依存性について検討した。

【2.実験方法】

供試材は、鋳塊を 1473 K(β単相域)および 1233 K(α + β 二 相域)での熱間鍛造後、1073 K で 7.2 ks 焼鈍した。供試材の 平均 α 粒径は 80 µm である。4 K、20 K、77 K、常温で高サイ クル疲労試験(軸荷重制御、応力比 R=0.01、荷重波形は正 弦波、周波数は 4 K:4 Hz、20 K:5 Hz、77 K:10 Hz、常温:30 Hz)を行い、10⁵ 回以上で破断した試験片の起点部ファセット について方位解析を行った。なお、EBSD 解析を容易にする ために、ファセット面が観察方向にできるだけ垂直になるよう に試料を加工した。その後、レーザー顕微鏡でファセット面の 傾斜角度を測定し、EBSD 解析結果を補正した²)。

【3.結果および考察】

Fig. 1 は、疲労破壊した試験片の代表的な起点部近傍の様 相である。起点部は、常温(a)に比べ、低温(b)でより脆性的 な破壊様相を呈している。図中に矢印で示したファセット部分 で初期き裂が形成したものと判断し、ファセットの面方位解析 を行った。Fig. 2 は、各温度の 10⁶、10⁷回での繰り返しピーク 応力(σ_{max})を 0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)で規格化したものである。低温 では、 σ_{max} / σ_{0.2} の値が常温に比べて低く、高サイクル域ほど より低い。また、10⁷回では、 σ_{max} が $\sigma_{0,2}$ の25%~45%の低い応 カレベルでも破断している。Fig. 2 には方位解析結果も示して いる。ファセットの面方位は、常温では(0001)面、低温(4 K、 77 K)では{11 21}双晶面であり、常温と低温で異なることが判 明した。(0001)面でのファセットの形成は、過去の研究³⁾で報 告されており、本合金でも常温で疲労破壊した試験片では同 様の結果が得られた。一方、低温では、疲労試験中に {1121}双晶変形が起こり、き裂は{1121}双晶/母相界面で 発生していた。低温では、双晶変形に起因してき裂が早期に 発生するために、高サイクル疲労特性が低下したと考えられる。 低温疲労特性改善のためには、双晶の発生を抑制することが 重要であることが示唆された。

【参考文献】

- Y. Ono et al., MATERIALS TRANSACTIONS, 44, 9 (2003), pp.1702-1705.
- [2] Y. Ono et al.: TRANS. OF JSME, A74, 739 (2008), pp. 329-334.
- [3] 例えば V. Sinha et al.: Metall. Mater. Trans. Vol. 37A,

(2006), pp. 2015-2026.



Fig. 1 SEM images showing the vicinity of the fatigue crack initiation site of the specimens tested at 293 K ($\sigma_{max}=606$ MPa, $N_f=2.13\times10^5$ cycles) (a) and at 77 K ($\sigma_{max}=404$ MPa, $N_f=3.86\times10^6$ cycles) (b).



Fig. 2 Temperature dependence of the ratio of peak cyclic stress to 0.2% proof stress at 10^6 and 10^7 cycles, and crystallographic orientation of fatigue crack initiation site.

Ti-6AI-4V ELI 合金鍛造材の 20 K He ガス中における破壊靱性と疲労特性 Fracture Toughness and Fatigue Properties of Forged Ti-6AI-4V ELI Alloy in Gaseous He at 20 K

<u>由利 哲美</u>、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構) <u>Tetsumi Yuri</u>, Yoshinori Ono, Toshio Ogata(NIMS) E-mail: YURI. Tetumi@nims.go.jp

<u>1. はじめに</u>

前報¹⁾では、代表的なチタン合金である Ti-6Al-4V ELI 合金 (Ti64 ELI) 鍛造まま材¹⁾の 20 K He ガス雰囲気環境下における 引張および高サイクル疲労特性について報告した。それによると、 極低温における各材料特性は、液体水素ロケットエンジン用材 料として使用されているTi-5Al-2.5 ELI 合金²⁰(Ti525 ELI)と同水 準もしくはそれ以上であることを明らかにした。また、20 K He ガス 雰囲気中で得られた各材料特性は、液体水素環境下での材料 特性にほぼ代替できることも示した。本研究では、前報で用いた Ti64 ELI 鍛造まま材¹⁾に焼鈍を施した材料を用いて、極低温に おいて引張、破壊靱性および高サイクル疲労試験を行い、Ti64 ELI 鍛造まま材¹⁾およびTi525 ELI²⁾と比較した結果について報告 する。

<u>2. 実験方法</u>

供試材は、市販材の Ti64 ELI 鍛造まま材¹⁾(φ300)を各試験 片寸法程度の短冊状に切断後、真空中にて 720℃、2 時間保持 後炉冷の熱処理を施した焼鈍材を用いた。組織は等軸α相(平 均粒径は 17μm)であり、鍛造まま材との違いはほとんど認めら れなかった。試験温度は、液体ヘリウム(4 K)、He ガス中(20 K)、 液体窒素(77 K)および室温(293 K)で行った。20 K He ガス中に おける各試験は、冷凍機により試験片を常時冷却しながら、ヒー ターによる温度制御方法にて実施した^{1,3)}。試験片温度は試験片 中央部に取り付けた温度センサーにて測定し、試験片温度が一 定に保持されていることを確認し行った。破壊靱性試験片はC-R 方向より採取し、試験はASTM E 1820-01 に準拠して行った。疲 労試験片は、砂時計型試験片で試験片表面は最終的にエメリー 紙 600 番で軸方向に仕上げたものを用いた。疲労試験は、正弦 波での荷重制御にて行い応力比 R=0.01 とした。20 K He ガス中 における試験周波数は、4 K における条件とほぼ同様、10⁵回ま では5Hzで行い、破断しなかった試験片についてはその後10~ 15Hz に加速して試験を行った。

<u>3. 結果</u>

各試験温度における Ti64ELI 焼鈍材および鍛造まま材¹⁾の 0.2%耐力および引張強度はほぼ同等の値を示し、20 K における 0.2%耐力を除き、いずれの試験温度でも Ti525 ELI²⁾(20 K:液体 水素中、新日鐵で実施)より高い値を示した。Fig.1 に各試験温 度における破壊靱性試験の結果を示す。Ti64ELI 焼鈍材は、293 K では Ti525 ELI²⁾より低下しているが、77 K 以下では Ti525 ELI とほとんど値は変わらない。20 K における S-N 曲線を Fig.2 に示 す。疲労試験を 20 K He ガス中で行うにあたり、最初に応力振幅 σ a=600MPa (Nf=10,079)の試験中における試験片温度の測定 を実施した結果では、温度上昇は観察されなかった。したがって、 本実験範囲内で得られた疲労特性には温度上昇による影響は ないと判断した。10⁶回付近までは、Ti64ELI焼鈍材および鍛造ま ま材¹⁾の方が Ti525 ELI²⁾より高い疲労強度を示す。それより長寿 命側では、Ti525 ELI²⁾より若干低下がみられる。以上より、今回 実施した Ti64ELI 焼鈍材の極低温における各材料特性は、 Ti525 ELI²⁾とほぼ同等であり、良好であることがわかった。今後、 Ti64ELI 焼鈍材の液体水素中で求めた各材料特性との比較を行 う予定である。

参考文献

 T.YURI,et al.:Abstracts of CSJ Conference,Vol.79(2008) p.222
 NIMS SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET No.1: National Institute for Materials Science, Japan (2003)
 T.OGATA:Abstracts of CSJ Conference,Vol.79(2008) p.223







Fig.2 S-N curves of Ti-6Al-4V ELI and Ti-5Al-2.5Sn ELI at 20 K.

準安定オーステナイト系ステンレス鋼の高圧水素ガスによる脆化の温度依存性

Temperature dependence of embrittlement of meta-stable austenitic stainless steels in high pressure gaseous hydrogen

> <u>柴田 浩司</u>, 緒形 俊夫, 由利 哲美, 小野 嘉則(NIMS) <u>SHIBATA Koji</u>, OGATA Toshio, YURI Tetsumi, ONO Yoshinori (NIMS) E-mail: SHIBATA.koji@nims.go.jp

1. はじめに

緒形[1]は、高圧水素ガスを試験片内に封じ込んで 304、 304L、316L 準安定オーステナイト系ステンレス鋼を引張試験 し、水素による絞りの低下が 150K 付近で最も激しく、それより 低温および高温でその程度が減少することを示している。本 研究では、文献による拡散係数を用いて鋼中での水素の拡 散を計算し、緒形ら[2]によって測定された変形中に生じるマ ルテンサイト量と試験温度との関係をあわせて、上記現象の 生じる理由を考察した。

2. 方法

緒形[1]が行った引張試験方法は以下の通りである。試験 引張試験片の平行部直径は 6.25 mm で、試験片端部より 中心軸に内径2mmの穴をワイヤカットによりあけ、10MPa の水素ガスと比較のためヘリウムガスを封入した。試験 温度は、室温(298 K)から77 Kの範囲で、77 Kの試験は 液体窒素中に、室温より低いその他の温度での試験は冷 凍器により温度制御されたアルコール中に試験片を漬け て行った。これらのガスを封入して試験温度にしてから 約6時間後に、クロスヘッド速度3.6 mm/h(初期歪み速 度で 2.8 x 10⁻⁵ s⁻¹) で、引張試験を開始した。水素脆化 感受性は、水素ガス中で得られた絞り値をヘリウムガス 中で得られた絞り値で除する相対絞りを用いて評価した。 試験片中での水素の拡散は、試験片を輪切りにした円盤を 同心円状に 30 分割し、Fick の第一法則を使って逐次的に計 算し、種々の温度、時間の水素濃度分布曲線を得た。拡散係 数の温度依存は、オーステナイト相(γ)に対しては坂本ら[3]、 マルテンサイト相(α')に対しては Oriani ら[4]によって得られ た式を主に用いた。比較のため、一部、他の研究者によって 得られた式も用いた。試験片中の水素分布の時間変化は、 試験片の中での拡散速度だけでなく、試験片の内表面から の進入速度にも依存する。しかし、後者に関してはデータが 無いので、試験片の内表面の水素濃度(溶質原子数に対す る水素原子数比)は常に 100ppm(γ)、30ppm(α')とし、試 験片の外側の水素濃度は常にゼロと仮定した。計算温度は、 358K、300K、273K、200K、150K、100K、77K、50K などであ る。拡散時間は最長 1000h まで計算を行った。

3. 結果および考察

試験片全体が y として試験片内の水素の拡散を計算する と、坂本ら[3]の式に限らず他の研究者による式を用いて計算 しても、試験片内でほとんど拡散しないことが分かった。例え ば、33000s保持の場合、358K でもほんのわずか試験片の中 に拡散する程度で、室温以下の温度では試験片の中への拡 散は認められない。

試験片全体がα'として試験片内の水素の拡散を計算する と、33000s保持の場合 77K 近くまでは試験片内での拡散が 明瞭に認められるが、50K になると試験片内での拡散がほと んど認められなくなることが分かった。図1に計算結果の一部 を示す。

水素による脆化は試験片内で水素が拡散しないと生じない と考えられるので、304、304L、316Lなど準安定オーステナイ



Fig.1 Calculated distribution of hydrogen in the specimen having a hole after 33000s at 50K, 100K and 150K. In the calculation, hydrogen content at the inner surface of the specimen was assumed to be constantly 30ppm in the case of martensitic phase.

ト鋼において高圧水素ガスによる脆化が生じるためには、変 形によって生じるα'の存在が必要であると考えられる。また、 50Kのように温度が下がりすぎると水素はα'中でも拡散でき なくなるため、水素による脆化が生じなくものと考えられる。た だし、Fig.1に見られるように、計算では100Kにおいて試験片 内での水素の拡散が明瞭に認められる結果が得られたが、 緒形[1]による引張り験結果では、上記3 鋼とも100Kでは水 素による脆化を示さない。この不一致の理由については、用 いた拡散係数の式が低温まで適用できるのかどうか、試験片 内面からの水素の進入速度の影響、計算では試験片は単相 と仮定したが、実際は変形中α'、γあるいはイプシロン相も 混じり合った複合組織であることなどの点も検討する必要があ ろう。

4. まとめ

検討した温度範囲においては、水素はγ中でほとんど拡散 せず拡散はα'内でのみ生じること、α'内でも温度低下ととも に水素の拡散速度は遅くなり、50K にもなると水素の拡散は ほとんど生じなくなることが計算より示された。このことから、準 安定ステンレス鋼の高圧水素ガスによる脆化の温度依存性は、 変形によって生じるα'の量とα'内における水素の拡散速度 から定性的に説明できる。

- T.Ogata: J. of High Pressure Inst. of Japan, Vol.46, No.4(2008), p.200
- T.Ogata, T.Yuri, Y.Ono: J. of the Cryogenic Society of Japan, Vol.42, No.1, p.10
- Y.Sakamoto and H. Katayama: J. Japan Inst. of Metals, Vol.46, No.8(1982), p.805
- R.A.Oriani: Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking, ed. by R.W.Ataehle et al., NACE, (1969), p.32

室温磁気冷凍の高効率化-シミュレーションによる AMR サイクルの解析-

High efficiency magnetic refrigeration at room temperature —Numerical analysis of the AMR refrigeration cycle—

<u>内本 真司</u>, 坂本 浩崇, 神谷 宏治, 中込 秀樹(千葉大);小林 忠彦, 加治 志織, 齋藤 明子(東芝) <u>UCHIMOTO Shinji</u>, KAMIYA Koji, NAKAGOME Hideki(Chiba University); KOBAYASHI Tadahiko, KAJI Shiori, SAITO Akiko(Toshiba) E-mail:shinji.uchimoto@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

フロンガスの大幅削減予測を背景に、室温磁気冷凍システムに関する研究が注目されている。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る。また、磁場変化や流速・流量などのパラメータに性能は大きく依存する。このため、計算手法を用いた基礎的な考察も試みられている。本稿では、単純モデルを用いて AMR サイクル性能について考察した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^{III}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、磁性体と流体に分けて両者が熱交換する 単純なモデルとし、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った。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が、 ここでは磁場印加/除去を、a)セル端から時間差で行なう実験 に近い方法と、b)セル全体を同時に行なう場合 について性 能を検討した。

3. 結果

Fig.2 に、a) b)の方法で磁場印加/除去を行なった場合の AMR サイクルにおける熱交換容器内部の温度変化の様子を、 時間1サイクル分示した。縦軸は温度、横軸は時間、奥軸が 空間座標である。この各々の場合に対応する冷凍性能を評価 したところ、a)より b)の場合が冷凍能力、効率ともに高い結果 が得られた。これは、磁性体のエントロピー変化が空間全体で 均一に起こった方が冷凍性能が向上することを示唆している。 冷媒の熱容量を変化させた場合の 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. Time dependence of temperature at each site.

謝辞

本研究は、(独立行政法人)科学技術振興機構(JST)から 受託した革新技術開発研究事業にかかる研究の一部である。

参考文献

 [1] 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

室温磁気冷凍の高効率化 -AMR 冷凍機への熱負荷の検討-

High efficiency magnetic refrigeration at room temperature

- The examination of heat load for AMR refrigerator -

<u>坂本 浩崇</u>, 内本 真司, 中込 秀樹(千葉大); 小林 忠彦, 加治 志織, 齋藤 明子(東芝) <u>SAKAMOTO Hirotaka</u>, 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

室温磁気冷凍技術は環境負荷の小さい未来の冷凍技術 として注目されている。現在、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[1]しており、本試験機での冷凍性能を明ら かにするため熱交換容器の低温端側(冷却部分)にヒータ ーにより熱負荷をかける手法による測定を試みている。

この熱負荷は冷凍能力評価に寄与する有効熱量のほか、 熱交換容器以外への散逸熱量が考えられる。この熱散逸 量を正しく導くことが精度の高い冷凍能力の見積もりに つながるため、本実験を行い検討した。

2. 実験方法

ヒーターによる熱負荷のうち、熱交換容器内に入力された 有効熱量と種々の要因により環境中へ散逸した熱量がどの 程度であるかを見積もった。

具体的には①熱交換容器に純水のみを充填し、熱負荷を 加えて温度上昇を測定した。単純化により熱交換容器周囲の 空気との熱伝達係数およびヒーターによる発熱が熱交換容器 内に純水を介してどのように伝わるかを検証した。

②熱交換容器に純水および磁性材料を充填した AMR 構成で、冷媒移動や磁場変化は与えずに熱負荷を加えて温度 上昇を測定した。これにより、熱交換容器内部の軸熱伝導の 挙動を検証した。さらに、これらの結果により得られたパラメー タを基に伝熱解析で熱散逸量の妥当性を検証した。

3. 実験結果

①純水のみを充填した基礎実験より、熱交換容器内は一様な温度上昇を示すこと、および、ヒーターによる全熱量のうち1~2割程度が熱交換容器以外へ散逸しており、熱伝達係数が20~25[W/m²・K]程度であると見積もられた。

②AMR 構成での実験結果を Fig.1 に示す。①の場合と異なり温度勾配が生じており、軸熱伝導が小さいことが判った。

③Fig.2 に実験結果を基に熱移動の様子を反映させた伝 熱モデルを示す。また、①の実験で得られたパラメータを用い たシミュレーションを行い、温度飽和状態における熱交換容 器内部の温度勾配(計算値)と実験結果とを対比してFig.3 に 示す。シミュレーション結果は実験結果をと良い一致を示して いることが判った。これにより純水による単純な基礎実験によ り導出したパラメータの妥当性を検証することができた。

なお、モデルや計算条件などの詳細は当日報告する予定 である。

参考文献

[1] T. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.138



Fig.1 Temperature rise of each measurement points inside the AMR bed



Fig.2 Thermal simulation model. Three arrows (except for x-axis) express heat dissipated by convection, conduction and radiation.



Fig.3 Temperature gradient in the AMR bed. Plotted circle indicates experimental value. Solid line indicates calculated value.

GM 冷凍機の2段目蓄冷材による冷凍性能評価(2)

Cooling performance of a GM cryocooler altering 2nd-stage regenerator materials(2)

<u>今津卓也</u>, 福田祐介, 増山新二(大島商船高専); 沼津 健則(NIMS)

IMAZU Takuya, FUKUDA Yusuke, MASUYAMA Shinji(Oshima National College);NUMAZUWA Takenori(NIMS)

E-mail: d801@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

小型冷凍機は医療用のMRIで実用されており,更に磁気浮 上列車や超伝導電力貯蔵装置などの応用が期待されている。 これらには大きな磁場を発生可能な超伝導磁石が使用され, 極低温で冷却することが必要である。

Gifford-McMahon(GM)冷凍機等の小型冷凍機では冷却性 能向上に左右される要素として蓄冷材が挙げられ,特にその 比熱が大切である。HoCu₂や Er₃Ni などの磁性体蓄冷の開発 [1]により,2段小型冷凍機で4Kレベルの冷却が可能となって 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も期待されている[2]。

本研究では 4.2K 時における冷凍能力の向上を目的とし, GM 冷凍機内の2段目蓄冷材に Pb, HoCu₂, GOS を充填させ 冷凍性能評価を行っている[3]。

2. 実験装置

本実験で使用した冷凍機は SHI 製で 0.1W@4.2K の仕様 となっている。本冷凍機の特徴は、コンプレッサの消費電力が 60Hzの周波数で1.3kWであり、空冷タイプであるため、実験・ 測定が手軽に行えることである。この冷凍機は全ての実験に おいて同じ1段目蓄冷器を使用し、等しい充填圧力で測定を 行った。

3. 実験方法

GM 冷凍機の2段目蓄冷器に注目して研究を進める。Fig.1 に2段目蓄冷材の概略図を示す。長さ100 mm,内径15 mmの 円筒空間内に蓄冷材を積層させる。今回は高温部から40 mm までPb 球(直径0.4 mm)を入れ,これを一定量とした。残りの60 mmに HoCu₂球(直径0.2 mm)を全て充填させた。その後GOS 球(直径0.25 mm)を徐々に加えながら、HoCu₂とGOSの割合を 変えながら性能試験を行った。Fig.1で示すようにxをGOSの 割合とし、x=0 でGOS:0%, HoCu₂:100%, x=1 でGOS:100%, HoCu₂:0%となる。



Fig.1 A schematic of hybrid regenerator materials

4. 実験結果

Fig.2にxを0~0.67まで変化させたときの冷凍能力を示す。 縦軸に温度[K], 横軸に冷凍能力[W]を示す。2 段目ステージ 温度が7K 以上になると冷凍能力に大きく差が現れ, GOS の 量が多いほど冷凍能力が低下していくことが分かる。この原因 として, GOS はこの温度領域で使用することに適していないこ とが考察できる。

Fig.3 は 4.2K における冷凍能力の実験結果を示す。 横軸 は GOS の割合である。 実験結果は x=0.33 の時, 最も大きな 冷凍能力となり, その値は 210mW であった。 この時の蓄冷材 の体積比は Pb: HoCu₂: GOS=4:4:2 であり, GOS を加えてい ない時 (Pd:HoCu₂: GOS=4:6:0) と比較すると40%冷凍能力が 向上した。また、計算は REGEN3.3 を使用した解析結果であ り、実験値とほぼ同様な特性が得られている。



Fig. 2 Cooling power of the 2nd-stage altering regenerator materials



Fig. 3 Cooling power of the 2nd-stage at 4.2K

5. まとめ

GM冷凍機の2段目蓄冷器に充填するHoCu₂, GOSの割合 を変化させ冷凍能力を評価した。

低温端側に、GOSを適量入れることにより、本研究目的で ある4.2Kでの冷凍能力が40%向上させるこができた。これらの 結果は蓄冷材の比熱に影響されていることが考察できた。今 後の課題としては、HoCu₂、GOSの他にPbの割合も変化させ 測定を行うことや、蓄冷材の球径を変化させ冷凍性能評価を 行う予定である。

- 岡村正巳,大谷安見,斉藤明子,高性能磁性蓄冷材,東 芝レビューVol.55 No.1(2000)
- 沼澤健則,新冷却技術-セラミックス磁性蓄冷材料の実用 化に成功-,独立行政法人物質・材料研究機構,2003.5. May Vol.3 No.5
- T. Imazu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.156

NMR 測定用左右対称型希釈冷凍機

A symmetry dilution refrigerator for NMR measurement

<u>藤井宗明</u>(熊本大) <u>FUJII Muneaki</u> (Kumamoto university) E-mail: fujimune@sci.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

NMR 測定に便利な希釈冷凍機を開発して様々な場合に おいての実験を行って来た。装置の特徴と性能は以下の 通りである。

- 20mKから4.2Kまでの温度範囲でのNMR実験が可能で ある。(100mK での冷凍能力は約 10μW である。1K 前 後では温度が不安定であるので超流動渦冷凍機を用 いる。)
- 同調可能な NMR 周波数範囲は 10MHz から 800MHz である。試料部分の同調回路は室温からのステンレスパイプにより行う。
- ヘルムホルツ型超伝導磁石により、水平方向に 0.2T までの外部磁場が印加可能である。
- 渦電流発熱を抑えるため試料の周りの主要部分は非 金属を用いている。
- 5) 試料と温度計は³He-⁴He 希釈相に直接浸されていて、 熱接触は良好である。
- 試料の交換のためには、簡単に着脱可能で、超流動 状態のヘリウムでもリークのないソープグリセリン シールを用いている。
- 7) 左右対称型の混合室と試料室なので測定による熱負荷 に対して、安定した温度を保つ。



Fig.1. Dilution refrigerator.

2. 左右対称型希釈冷凍機

希釈冷凍機は、おおまかにいえば、熱交換器、混合 室、分留器そして室温部にあるガス操作系よりなる。混 合室と2つの対称に作られた試料室は、渦電流損失によ る発熱を押さえるため、すべて非金属(スタイキャスト 1266)で作られている。試料と温度計は³He-⁴He 希釈相に 直接浸されていて、熱接触は良好である。二重管式熱交 換器の内側の管を通って来たほぼ純粋な液体³He は混合 室上部の相分離面を通過して液体⁴He の中に希釈され冷 える。その後2つに分かれ、試料室内の試料を冷やし、 ふたたび混合室の上部で合流し、熱交換器で上から流入 してくる³He を冷やしながら、分留器に帰っていく。



Fig.2. Schematic drawing of the apparatus under the still.

A: mixing chamber, B: supporting ring, C: sample cell, D: heat protector, E: receiver coil, F: tuned coil, G: transmitter coil,

H: variable capacitor, I: connecting rod, J,K,L: thermometers, M: specimen

試料交換のためには、クライオスタット全体を室温に もどさなければならない。その時、³He の通るラインの内 側も空気にさらされるので、試料室を混合室のポートに 取り付けた後、ラインに⁴He ガスを流して、特に、熱交換 器、インピーダンスの内部に、空気、水分が残らないよ うによく掃除する必要がある。極低温の実験では、液体 ヘリウムをクライオスタットに汲むまえに、断熱真空部 への漏れを調べる、いわゆるリークテストをしなければ ならないが、ラインに⁴He ガスを流して、掃除とリークテ ストを同時に行っている。

3. 超微細相互作用

キュリー温度 T_c (or ネール温度 T_N) 以下の温度での磁性 イオンの NMR は外部から磁場を印可しなくても観測可能 である。これは超微細相互作用のため核スピンが感じる 有効磁場のためである。この NMR 信号を見つけることに より物質の内部構造に関する多くの情報を得る。

超微細相互作用による核スピンの共鳴周波数はふつう 10MHz から 800 MHz の広い範囲にわたる。共鳴現象はトリ ガー型の現象であり、信号の大きさ自体よりどの周波数 で共鳴が起こるかの印を見つけることがまず重要である。 外部磁場を加えて NMR 周波数をスキャンする方法もある が、零磁場の場合、千倍から十万倍位の信号増強因子を 得るので信号の検出には有利である。

NMR 共鳴点の検出にはラジオ波の共鳴信号そのものを検 出しなくても、共鳴現象に伴う磁場や温度のゆらぎを観測 する方法がある。特に、熱雑音や電磁気雑音の小さくなる 1K 以下の極低温ではそれらの方法が極めて有効であるこ とが明らかとなった。左右対称型の混合室と試料室なので 温度が安定であるが、超微細相互作用による共鳴点を最初 に見つける場合あえて対称性を破る方が有利である。

ペルチェモジュール用小型熱電素子を用いたペルチェ電流リードの見積もり Estimation of Peltier current lead used small thermoelectric elements for Peltier module

藤井 友宏, 杉野 慎,福田 真治,孫 建,河原 敏男,浜辺 誠,渡邉 裕文,山口 作太郎(中部大);江本 雅彦(核融合研) FUJII Tomohiro, SUGINO Makoto, FUKUDA Shinji, SUN Jian, 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

超伝導システムは、低温冷媒や冷凍機を用いて超伝導機 器部を低温に保つ必要がある。一方で、システム全体は室温 に置かれている。室温部と低温部の間の大きな温度差を保つ ため断熱が必要であるが、超伝導送電では電流リード端末部、 配管部から低温部へ熱侵入が存在する。特に、短距離の超 伝導送電では電流リード端末からの熱侵入が支配的となる。 そこで電流リードからの熱侵入を低減するために、中部大学 敷設の直流超伝導ケーブル試験装置では熱電素子を用いた ペルチェ電流リード(Peltier current lead: PCL)[1]を採用して いる。本報では Fig.1 のような性能指数を有する市販向けペ ルチェモジュール用の熱電素子を PCL に適応した場合の PCL 性能について述べる。

2. ペルチェ電流リード

PCLの概略図の例として直流超伝導ケーブル試験装置に 用いているものを Fig.2 に示す。熱電素子として BiTe 合金を 用いている。超伝導送電における電流リードには通常電気抵 抗の小さい銅リードが用いられるが、銅は熱伝導率が高いた め多くの伝導熱を低温側へ伝えてしまう。これに対して PCL は Fig.2 に示すように、銅リードの一部に熱電素子である BiTe を挿入している。BiTeの熱伝導率は銅の約0.3%であるため大 きな断熱効果を得ることができる。さらに、PCL は、ケーブル への通電電流で発生するペルチェ熱により内部の熱を外部 へ汲み出すことが可能である。BiTe は銅よりも電気抵抗が大 きいため通電時には銅よりも多くのジュール発熱が発生する が、熱量よりもペルチェ熱流量の方が大きければ熱侵入を低 く抑えることができる。さらに、ペルチェ熱流の方向は伝導キャ リアと電流の向きにより決定されるが、交流送電では、両方向 に電流が流れるため、電流リードに整流機能を付加する必要 があり、この部分での損失が生じる。一方、直流送電では一 方向にのみ電流が流れるため構造を単純化でき、損失も低く 抑えることができる。

3. 計算条件および結果

PCLには断熱、低通電損失が求められるため低電気抵抗 率、低熱伝導率、高ゼーベック係数の熱電材料が必要となる。 熱電素子に使用される熱電材料の性能は性能指数 $\mathcal{F} \alpha^2 \sigma / \kappa (\alpha: ゼーベック係数、\sigma: 電気伝導率、\kappa: 熱伝導率)の大き$ さで評価される[2]。今後超伝導ケーブルへの導入を目指しているBiTeの性能指数 2をFig.1 に示す。BiTeは組成等を変化させることで高い性能を保ちながら温度域を変化させることができることがわかっているが、この試料は 200-250K付近で性能が大きい。

ここではさらに計算条件として電流リードのガス冷却も行うこととしている。評価にはリードに沿って低温部から機器外部へ流出する窒素ガスによる冷却の効果を、ガス流量fをパラメータとして加えた。電流リード高温側は 300K、低温側は液体窒素温度である77Kで一定とした。HTS線材への通電電流は超伝導ケーブル臨界電流付近である100Aとした。

計算から得られるガス流量 f=0 のときの BiTe、銅の最適 L/A (Lは長さ、Aは断面積、)、とそのときの熱侵入を Table1 に示す。 f=0 において、 銅リードでは熱侵入は 0.0425W/A であるが、 PCL では 0.0316W/A となる。

本講演ではさらに f を変化させた場合について述べる予定 である。





Fig.2 A schematic diagram of PCL for HTS power cable.

Table1. Optimum demensions of BiTe and Cu of PCL for minimum heat leak Heat leak[W/A] BiTe L/A[m⁻¹] Cu L/A[m⁻¹]

		Heat leak[W/A]	BiTe L/A[m ^{-'}]	Cu L/A[m ⁻
	f=0	0.0316	41	27380
1				

- S.Yamaguchi, et al: Rev. Sci. Instrum., 75 (2004) pp.207-212.
- H. J. Goldsmid: "Thermoelectric Refrigeration", Plenum, New York (1964).

自然循環液体窒素によるターンフロー型冷却システム Counter-flow cooling system with gravity-fed circulating liquid nitrogen

<u>IVANOV Yury</u> (Chubu Univ.); RADOVINSKY Alexey, ZHUKOVSKY Alexander (MIT); SASAKI Atsushi, KAWAHARA Toshio, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.) E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

The liquid nitrogen (LN2) is usually used to keep the HTS cable low temperature. The pump is utilized to circulate LN2 inside the cryopipes. However, the pump power is one of heat loads for the cryogenic system, and if it is high, the effectiveness of SC cable system decreases. In order to solve this problem, a thermal siphon can be applied to circulate LN2. Two possible system configurations have been analyzed by Radovinsky and Zhukovsky [1, 2] along the basic idea proposed by S. Yamaguchi as the collaboration between Chubu Univ. and MIT. Here, we discuss the effectiveness of thermal siphon with counter–flow circulation loop composed of cryogen flow channel and inner cable channel. Such configuration allows us to simplify apparatus significantly especially for short–distance applications.

2. Model

The main difference with conventional system is that coolant flows down through inner channel of a superconducting cable, instead of through separate supply pipeline.



In this case hydraulic resistance in the narrow inner channel is high, the difference of hydraulic cross-sections of inner and outer channels is significant, and parasitic heat exchange between up and down flows due to relatively high thermal conductivity of electroinsulating material is essential.

3. Analysis and Results

Numerical Runge–Kutta method was used to solve the design equations. Feasibility of the proposed scheme for cable up to the length of 100 m was investigated. Key parameters of two–phase thermosiphon, namely mass flow (m_{dot}) and vapor quality (χ) were obtained. It was found that both m_{dot} and χ are slightly depend on inclination of the cable.

Table.1 Design equations

Top part Bottom part

$$\begin{aligned}
& mC_{I} \frac{dT_{1}}{dx} = k(T_{2} - T_{1}) \\
& m[(1 - \chi)C_{I} + \chi C_{g}] \frac{dT_{2}}{dx} + rm\frac{d\chi}{dx} = k(T_{2} - T_{1}) - q \\
& \frac{dp_{1}}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{GR1} - \left(\frac{dp}{dx}\right)_{FR1} \\
& \frac{dp_{2}}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_{GR2} - \left(\frac{dp}{dx}\right)_{FR2} - \left(\frac{dp}{dx}\right)_{AC2} \\
& T_{2} = T_{sor}(p_{2})
\end{aligned}$$

The calculated profiles of temperature and pressure show insignificant differences of T and p in inner and outer flows at the same height ($\Delta T_{max} \leq 1 \text{ K}$, $\Delta p_{max} \leq 0.01 \text{ MPa}$) that allows not to worry about mechanical stability of the cable. In the case under consideration, the thermal-insulating properties of standard electroinsulating material (polypropylene laminated paper) appear to be sufficient. Unlike the conventional system with the separate supply channel where the temperature maximum is achieved at initial boiling point, in the case under study T_{max} can appear at some point of the upward flow below initial boiling point depends on cable length and inclination. That can pose potential threat of cable overheat in case of underdeveloped process monitoring system.



Fig.2 A plot of vapor quality at the outlet (χ) versus cable length (L). Heat load is 1 W/m



Fig.3 Temperature profiles for 25, 50, 75 and 100 m cables

4. Conclusion

Results of numerical analyses indicate that counter-flow thermosiphon cooling system is a promising way to increase performance of short-length power transmission lines.

References

1. Radovinsky A., Zhukovsky A. (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022106-1.

2. Radovinsky A., Zhukovsky A. (2006) HVDC-MIT-Aradovinsky-022806-1.

氷を保冷剤として用いた極低温システムの保冷実験

Experiments of cryogenic system with ice as cryogen

<u>河野 明日美</u>, 水野 克俊, 岡村 哲至(東工大);宮崎 佳樹, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研) <u>KAWANO Asumi</u>, MIZUNO Katsutoshi, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); MIYAZAKI Yoshiki, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI) E-mail: kawano.a.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

現在さまざまな分野で高温超電導マグネットは応用されて いるが、例えば輸送機搭載型のモバイルマグネットには軽量 化が求められている。そこで冷凍機なしで長時間極低温を維 持できる方法を検討した。輸送機搭載型マグネットは十分な 強度が必要となるため、荷重支持材からの熱侵入が大きくな ると予想される。そのため従来のふく射シールドや多層断熱 材では断熱が不十分なので、固体保冷剤として氷を用いて保 冷実験を行い、解析と比較した。比熱が固体窒素には劣るも のの、扱いやすいことから本研究では氷を選択した。

2. 実験装置

本研究で使用した実験装置を Fig.1 に示す。保冷実験で はコイル自身の特性は考慮しないので、コイル模擬体として 円筒状の銅のブロックを用いた(10kg)。冷凍機を運転停止に した後に生じる残留ガスによる熱伝導を低減するため、コイル 模擬体の内側に活性炭を配置し、外側に多層断熱材を巻い ている。また、運転停止状態の冷凍機がコイル模擬体やふく 射シールド(2kg)に接触していると、大量の熱が侵入してくると 考えられるため、マルチラムと呼ばれる、本来は電流のコネク タとして使用されているものを、熱スイッチとして使用した。

3. 実験方法

コイル模擬体の底面に、約 1kg の水を封入したアルミニウムの容器を取り付けた。コイルの初期温度 20K まで冷却した後、冷凍機を切り離し 20K から 50K まで上昇するまでの時間(保冷時間と定義する)を測定した。シールドの底面に氷を取り付けた場合も同様に実験を行った。

4. 結果と考察

保冷時間についての実験と解析の結果をまとめたものを Fig.2 に示す。まず解析では、氷を取り付けていないとき よりコイルに氷を取り付けた場合の方が保冷時間は延び、 シールドに取り付けた方がさらに延びることが分かった。 シールドに氷を取り付けるとシールド全体の熱容量は 2 倍となり、コイルに取り付けた場合は熱容量は 1.6 倍にな る。よってシールドに取り付けたほうが保冷時間は延び るということが分かる。

実験でもそのような傾向が見られた。例えばシールド の底面に1kgの氷を取り付けた場合の実験結果として、コイル 模擬体とシールドの温度変化と真空容器内の圧力変化を Fig.3 に示す。点線で示すのは解析結果である。解析では 保冷時間は9.2 時間と予測されたが、実験結果は8.0 時間 と延びなかった。これはシールドの上面と氷が取り付け てある底面で、温度差が10Kもついてしまったことから、 荷重支持材からくる熱伝導を氷が十分に吸収できなかっ たことが原因と考えられる。氷とシールドの温度差を縮める ことができれば、氷の効果を最大限に活かせるだろう。

6. 結論

同量の氷を取り付ける場合、熱容量の増加の割合が大きく なるシールドに取り付けた方が効果的であるということが分か った。



Fig.1 Experimental apparatus



Fig.2 Experiment and analysis result



Fig.3 Time trace of temperature and pressure when ice of 1kg is attached at shield

参考文献

 K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.139

高温超電導マグネット保冷特性の基礎的研究 Fundamental study of a cold storage system for HTS magnet

宮崎佳樹,小方 正文,長嶋 賢,(鉄道総研),水野 克俊,河野 明日美,岡村 哲至(東京工業大学)<u>MIYAZAKI Yoshiki</u>, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken(RTRI);MIZUNO Katsutoshi, KAWANO Asumi, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

miyazaki@rtri.or.jp

1. はじめに

冷凍機を搭載しないモバイル高温超電導マグネットについ て,超電導コイルや熱シールドなどの構成部材の熱容量を利 用した極低温保持手法を検討した。マグネットを使用しないと きは冷凍機で冷却しておき,使用する際には冷凍機を切り離 した軽量な状態で運転すれば,可搬性に優れた省エネルギ ーなモバイルマグネットを考えることができる。一般的な定置 型マグネットと比較して,モバイルマグネットでは強度を上げる ため,荷重支持材を介しての熱伝導が大きくなると予測される。 そこで,このような系について極低温状態の保持時間を,熱解 析を用いて検討するとともに,超電導コイルを模擬した熱容量 体およびふく射熱シールドを用いて確認試験を行い,解析と の比較を行った。

2. 解析

本研究で想定したモバイルマグネットの仕様を Table.1 に 示す。コイル部分は模擬体として円筒状の銅ブロックとした。 超電導コイルの初期温度は 20K, シールドの初期温度は 50K とし, 超電導コイルが 20K から 50K まで昇温する間の時間を 保冷時間と定義する。一次元解析結果を Fig.1 に示す。シー ルド温度は 10 時間で約 100K 程度上昇するが、シールドで熱 侵入を吸収するため、コイルへの熱侵入は低減され、コイルの 温度上昇は緩やかなものになっている。一次元解析では、コ イルの保冷時間は 7.5 時間程度と見積もれた。

3. 試験装置構成

解析結果を検証するため,保冷試験装置を製作し,検証試

Table.1 Specs of the cold storage system

	Coil	Shield	support
Weight[kg]	10	2	-
Material	Cu	Al	Alumina-FRP
Cold storage time		6 hours	



Fig.1 Experimental apparatus

験を行った。装置構成及び装置内部の写真をFig.2 に示す。 冷凍機はマルチラムと呼ばれる着脱機構にて、コイルおよび シールドから切り離すことができる。初期条件にまで冷却した のち、冷凍機を切り離した後の昇温曲線を Fig.3 に示す。解 析と同じ条件で昇温させたときには、コイルの保冷時間は約 3 時間と、解析で見積もった保冷時間に対して約半分程度しか 保冷することができなかった。解析と比較して熱侵入の増大原 因は低温で吸着されていたガスが放出される、いわゆるアウト ガスによる熱伝導であると考えられたため、コイルに活性炭と MLI(:多層断熱材 Multi Layered Insulation)を施工し、再度試 験を行った。その結果、保冷時間は 6.5 時間を得ることができ た。

4. まとめ

モバイル高温超電導マグネットを想定した極低温保冷特性 について,解析と実験を行った。実験結果は解析と異なり,ア ウトガスによる熱伝導が系に与える影響が大きいことを示して いる。また,今回アウトガス対策として試行したコイル側への活 性炭の設置,および MLI の施工が,有効であることがわかっ た。

- K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.139.
- Scott TA, et al.: Solid and liquid nitrogen, Phys Rep 1976; 27(3) p.89-157



Ag-Au 合金を母材とする Bi2223 線材およびバリア入り Bi2223 線材の交流損失特性 AC loss properties of Bi2223 tapes with resistive Ag-Au alloy matrix or oxide barriers

稻田亮史,光野克紀,荘口和真,中村雄一,太田昭男(豊橋技科大);李成山,張平祥(西北有色金属研究院) INADA Ryoji, MITSUNO Yoshiki, SOGUCHI Kazuma, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT); LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)

E-mail: inada@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 線材の幅広面に垂直な横磁界中において交流損 失(磁化損失)を低減するためには、フィラメントのツイ ストだけでなくバリア導入等による横断抵抗率 ρ の向上 が必須である。我々は、SrZrO₃+Bi2212 (20wt%)バリアの 導入と10 mm以下のツイストを組み合わせることで、垂 直磁界下での特性周波数 f_c (= $1/2\pi r_c$, r_c :結合時定数)が 100 Hz以上に向上し、商用周波数域において40~50%程度 の垂直磁界損失の低減が得られたことを報告した^[1]。一方、 ツイスト長の低減と共にバリア層が破れフィラメント同 士の直接接触が発生することを確認しており、これが損失 低減の妨げになっている可能性がある。本研究では、純銀 より7~8倍程度高い抵抗率(= $2.2 \times 10^8 \Omega m @77 K$)を持 つ Ag-Au(8wt%)合金を母材とするフィラメント間接触が ないツイスト線材と、SrZrO₃+Bi2212 バリア入りツイスト 線材の垂直磁界損失特性を比較・検討した。

実験結果および考察

試料の諸元および横断面写真を Table 1 および Fig. 1 に 各々示す。Ag-Au 合金試料ではフィラメント同士の接触箇 所がないのに対し(Fig. 1(a)), SrZrO₃+Bi2212 バリア入 り試料では断面中心近傍においてフィラメント同士の部 分的な接触箇所が確認できる(Fig. 1(b))。

磁界振幅 $B_0 = 0.5 \text{ mT}$ に固定して測定した各試料の交流 損失 Q_m の周波数依存性を Fig. 2 に示す。測定値は測定範 囲内における最大値 Q_{m-max} で割った値でプロットしてい る。測定値に含まれる結合損失 Q_c が最大となる周波数が 特性周波数 f_c ($\propto nL_t^2/\rho_n$, n:形状係数) に対応するが,同 じツイスト長 ($L_t = 9 \text{ mm}$)で比較した場合,バリア入り 試料の f_c は Ag-Au 合金試料と比較して 2 倍以上高い。垂 直磁界に対する形状係数 n が試料間で大きく違わないこ とを考慮すると,バリア入り試料の ρ_t は Ag-Au 合金試料 と比較して 2 倍以上高いことが示唆される。

Fig. 3 に, 30 Hz において測定した Ag-Au 合金試料 (L_t = 4 mm, f_c = 160 Hz) およびバリア入り試料 (L_t = 9 mm, f_c = 125 Hz) の損失ファクタ Γ (= $\mu_0 Q_m/2B_0^2$) を示す。比較の ために, 楕円モデルを適用して求めたフィラメント同士が 完全に電磁結合して単芯的に振る舞う場合のヒステリシス損失 Q_h に対する Γ を破線で図中に示す^[2]。 Γ が最大となる B_0 は中心到達磁界 B_p にほぼ対応することから、どちらの試料においても結合時と比較して B_p は低減され, フィラメント間 結合が抑制されていることが確認できる。しかしながら, B_p 低減の度合いはバリア入り線材の方が少ない。 $B_0 \gg B_p$ における Q_h は, B_p の低減が大きいほど顕著に低減されることから, バリア入り試料ではフィラメント間接触箇所の存在に起因して, 個々のフィラメント寸法から予測されるレベルま で Q_h が低減していない可能性が高いと考えられる。

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),立松財団研究助成およ 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 クト助成を得て実施したものである。

Table 1. Characteristics of twisted Bi2223 tapes.

		T T
Matrix/Barriers	Ag-Au(8wt%)/None	Ag/SrZrO ₃ +Bi2212
Tape section	$2.5 \text{ mm} \times 0.23 \text{ mm}$	$3.1 \text{ mm} \times 0.27 \text{ mm}$
Filamentary region	$2.1 \text{ mm} \times 0.17 \text{ mm}$	$2.7 \text{ mm} \times 0.19 \text{ mm}$
(Shape factor <i>n</i>)	(~12)	(~14)
No. of filaments	19	19
Twist length L_t	4mm, 9mm	9mm
L at 77K, 0T	11.000 A/cm^2	7.500 A/cm^2



Fig. 1. Transverse cross sectional views of Bi2223 tapes with (a) Ag-Au alloy matrix and (b) $SrZrO_3 + Bi2212$ barriers.







Fig. 3. Loss factor Γ at 30 Hz for Bi2223 tapes with (a) Ag-Au alloy matrix and (b) SrZrO₃+ Bi2212 barriers.

参考文献

Y. Mitsuno et al.: Abstracts of CSJ Conference Vol.79 (2008) p.17.
 B. ten Haken et al.: Physica C 377 (2002) pp.156-164.

Bi-2223多芯テープ線材の臨界電流特性に及ぼす芯数の効果

Effect of number of filaments on the critical current density in multifilamentary Bi-2223 tapes

上野俊輔,山下翔平,木内勝,小田部荘司,松下照男(九工大); 綾井直樹,菊地昌志,林和彦,佐藤謙一(住友電工)

UENO Shunsuke, YAMASHITA Shohei, KIUCHI Masaru,

OTABE Edmund S, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Institute of Technology);

AYAI Naoki, KIKUCHI Masashi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: shunsuke@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、Bi-2223 銀シーステープ線材において最終焼 結プロセス時に加圧焼結処理 (ConTrolled Over Pressure : CT-OP)を行うことにより、従来の大気圧焼結 処理に比べて高い臨界電流 *I*c が得られることが報告さ れている¹⁾。加圧焼結法も改良が重ねられ、臨界電流 は飛躍的に向上した。更なる特性改善の可能性の一つ に、Bi-2223 テープの芯数の増加および細芯化がある。 そこで本研究では加圧焼結法により作製された芯数の 異なる Bi-2223 テープ線材の臨界電流特性を測定し、 その結果から芯数の変化がどのように特性に影響を与 えるかを検討する。また、磁束クリープ・フローモデ ルを用いて解析を行い、特性向上のメカニズムについ て考察を行う。

2. 実験

実験に用いた試料は PIT 法により作製された Bi-2223 多芯テープ線材で、いずれも最終焼結時に加圧 焼結法を用いて作製されている。Tabel. 1 に各試料の 77.3 K における自己磁界中での I_c と芯数を示す。測 定には直流四端子法と SQUID による直流磁化法を用 い、テープ面に対してを垂直方向と平行方向に磁界を 印加して測定した。電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m と して臨界電流密度 J_c を決定した。また、不可逆磁界は $J_c = 1.0 \times 10^7$ A/m² となる磁界で定義した。

_	試料	$I_{\rm c}[{\rm A}]$	芯数
	#1	155A	55
	#2	190A	121
	#3	190A	211

3. 結果及び検討

Fig. 1 に直流四端子法による 77.3 K、垂直磁界下に おける臨界電流密度の磁界依存性を示す。低磁界領域 において I_c の高い試料#2 と#3 の J_c が高く、 I_c の低 い試料#1 が低い結果となった。一方、高磁界領域で は#2 の磁界による劣化が大きく、#1 と同程度の値ま で J_c が低下している。全体的に見て芯数が多い試料ほ ど J_c の磁界依存性が良い結果となった。また、芯数が 多い試料ほど不可逆磁界が大きい傾向があることがわ かった. 銀界面付近の J_c は高いことが知られており、 銀界面近傍のピン力が強いと考えられる。よって芯数 が増えたことによりその銀界面が増え J_c や不可逆磁 界の向上に繋がったと考えられる。

次に試料の配向性を評価するために、 J_c の異方性の 磁界依存性を評価した。Fig. 2 に J_c の異方性の大きさ $J_c(0^\circ)/J_c(90^\circ)$ の磁界依存性を示す。ここでは、テー プ面に平行に磁界を印加した時の角度を 0° 、テープ面 に垂直に磁界を印加した時の角度を 90° としている。 Fig. 2 から最も異方性が高い試料は#2であり、次に #1、#3の順となっている。よって結晶の配向性は#2が最も良く、#3が最も悪いように見える。芯数が多い 試料はフィラメント径が小さく、銀界面が多い。銀界 面近傍の結晶の配向性は良い傾向にあると経験的に知 られており、#3の異方性は大きいと予想されたが、予 想から外れた結果となった。なお、異方性にはブロッ ク層の超伝導特性も影響するので、Fig. 2 で示す J_cの 異方性の低下の原因は、c 軸の misorientation 角の評 価を通して総合的に判断する必要がある。この結果と 検討は発表当日に行う。また、 SQUID 磁力計による 直流磁化法により測定した臨界電流密度の磁界依存性 や不可逆磁界の結果、磁束クリープ・フローモデルに よる解析結果も当日発表する。



Fig. 1: Critical currrent density in a normal magnetic field at 77.3 K.



Fig. 2: Field angle anistropy of critical current density at 77.3 K.

参考文献 1) S. Kobayashi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 2534.

ポストアニール条件が Bi2223 線材の組織および特性に及ぼす影響 Effect of post annealing on the properties of Bi2223 tape

中村 雄一, 成定 利明, 稲田 亮史, 太田 昭男 (豊橋技科大)

NAKAMURA Yuichi, NARISADA Toshiaki, INADA Ryoji, Oota Akio (Toyohashi University of Technology)

E-mail: nakamura@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

銀シース Bi2223 の焼成プロセスにおいて、本焼温度で熱処理したあとに低温でのポストアニール(PA)を入れることにより、J_c特性が向上することが報告されている。我々は前回、高温(840℃)での焼成だけでは高い J_cは得られず、逆に低温(820℃)だけで焼結した場合には Bi2223 相の生成率は低いものの良好なJ_cが得られることを報告した[1]。これらよりPAの役割としては、(Bi, Pb)過剰液相の粒界への偏析防止と低温焼結における粒界の超電導結合性の向上であると考えられ、効率的に高い J_cを得るためには高温焼結とPAの適切な組み合わせが重要であるといえるが、各温度における効果についてはまだ十分に明らかではない。そこで本研究では、Ag-Cu 合金シースBi2223線材の作製プロセスにおいて、種々の2次熱処理パターンで焼成を行い、その影響について検討した。

2. 実験方法

試料としては、PIT 法により作製した 19 芯の Ag-2%Cu 合金 シース Bi2223 テープ線材を使用した。前駆体としては平均組 成を Bi:Pb:Sr:Ca:Cu=1.8:0.3:1.87:2.0:2.6 として、2 粉末法に より作製した仮焼粉に、Bi2223 相を主相とする Bi2223 粉を 2wt%添加したものを使用した。熱処理としては、まず大気中 840℃で 20h 一次焼成の後、中間圧延を行った。その後、二 次焼成として大気中 840℃で 3~150 時間焼成後に 820℃25 時間 PA を行ったもの、および 840℃で 150 時間焼成後、810 ~830℃と PA 温度を変えた試料などを作製した。得られた試 料について、直流 4 端子法による J。評価、SEM による組織評 価、XRD による Bi2223 相の生成率の評価を行い、2 次焼成条 件の違いによる影響について検討した。

結果及び考察

840℃での2次焼成時間を変えた試料の、Bi2223相生成率 とんを図1に示す。図のようにBi2223相の生成率は3時間の 焼成で90%に達するが、しな焼成時間を増やすと共に上昇し 約100時間で飽和することがわかる。これらの試料のSEM 観 察から3時間焼成した試料では中間圧延で入ったクラックが 残留していたが、10h焼成後ではクラックが無くなり、以後平 板状の結晶粒が成長するのが見られた。一方、820℃でのみ で焼成した試料では、150h焼成後もクラックの残留が見られ たことから、840℃の焼成により短時間でクラック修復が進むこ とがわかった。このことからまず840℃でクラック修復と結晶粒 成長をさせた後、PAを行うことが、高しを得るために有効であ ると考えられる。

PA 温度を変えて作製した試料の Bi2223 相生成率と *J*を図 2 に示す。図のように 815℃で熱処理した試料で最も高い *J*。 が得られたが、Bi2223 生成率は 825℃付近で最も高い値とな り、PA 温度を更に低下すると Bi2223 の生成率も低下する傾 向が見られた。また 820℃で PA 時間を 75 時間としたところ、 *J*。は 2.3×10⁴(A/cm²)とわずかに上昇したが、Bi2223 相生成 率は逆に低下する傾向を示した。PA 温度が低く、また PA 時 間が長いほど Bi2223 比率が低下した理由として、高温で存在 していた(Bi,Pb)過剰液相が凝固する際、温度が低いほど速 度論的に Bi2223 よりも Bi2212 相となり易く、PA 時間が長くな るほど Bi2212 相の量が増え、相対的に Bi2223 比率が低下す ること、あるいは温度が低い場合、平衡状態図的に Bi2223 単 相ではなくBi2212相との共存領域となっていること等が考えられる。しかしながら今回の実験の条件の範囲では、Bi2223相の比率は低下しても、PAにより J。の低下は認められておらず、 PA後にBi2223相の比率を高く保つことができれば、更なる J。 の向上が期待できる。

4. まとめ

種々の 2 次焼結パターンで熱処理を行い、PA 条件の違い による影響について検討を行った。その結果、840℃の焼結 で短時間に Bi2223 相の生成及びクラックの修復が進むことが 確認できた。また PA 温度を変化させたところ、815℃で J。値が ピークを示し、また PA 温度が低くなることで Bi2223 相の生成 率が低下する傾向を示した。これらの結果より、本焼条件と適 切な PA 温度・時間の組み合わせが、高い J。を得るために重 要であり、Bi2223 比率を高めつつ低温で熱処理することで高 J。が得られる可能性があることがわかった。

参考文献

 Y. Nakamura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.168.



Fig.1 Effect of sintering time on the J_c value and conversion ratio from Bi2212 to Bi2223.



Fig.2 Effect of post–annealing temperature on the $J_{\rm c}$ value and conversion ratio from Bi2212 to Bi2223.

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, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学);

 斉藤 隆 (フジクラ);青木 祐治(昭和電線);八木 正史, 向山 晋一(古河電工);

 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 山田 穣, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

 ARAI Michio, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

 SAITO Takashi(Fujikura);AOKI Yuji(SWCC Showa Holdings);YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric);

 KATO Hideyuki (AIST);SHIOHARA Yuh (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 流の流入の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、275kV 級の YBCO 超電導ケーブルに用いられる IBAD/TFA-MOD 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。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ハンダ 付けされたものである。

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。線材において、電 $E P = 2 \sqrt{12} \sqrt{12}$

(i)各区間の臨界電流値 I_c(1 µV/cm 基準)を測定

(ii) I 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。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±2A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、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 Initial, I_{peak} =300,306,313,319 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} =300,306,313,319 A)が T_{max} を示している。実験結果から I_{peak} =306 Aの過電流パルスの通電によりV₇₈が劣化し、劣化開 始温度は514-551 Kとなった。また、 I_{peak} =319Aの過電流パル スの通電によりV₆₇が劣化し、劣化開始温度は578-616 Kとな った。

4. まとめと今後について

今回は 275kV 級の YBCO 超電導ケーブルに用いられる IBAD/TFA-MOD 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、銅層なしのも のや線材の中間層の製法の異なる線材も実験していく予定 である。

Fable.1 Specifications	of YBCO	sample	tape
------------------------	---------	--------	------

		Sample1	
Manufacturing Method		IBAD/TFA-MOD	
Length,	mm	70	
Width,	mm	5.0	
Cu Thickness	μ m	100	
Ag Thickness,	μ m	20	
YBCO Thickness	μ m	1.5	
CeO ₂ Thickness	μ m	1	
Gd ₂ Zr ₂ O ₇ Thickness	μm	1	
Hastelloy Thickness	μ m	100	
Operating Temperature	K	77	



Fig.1 Arrangement of voltage taps and thermo couples



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。

- 1. A.Ishiyama, Y.Tanaka, H.Ueda, et al.:IEEE Trans. Appl. Supercond.,vol.17(2007),no.2,pp.3509-3512
- A.Ishiyama,Y.Nishio,H.Ueda, et al.:Abstracts of CSJ Conference, vol77(2007)p5
- A.Ishiyama,H.Kono,H.Ueda, et al.:Abstracts of CSJ Conference, vol79(2008)p176

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

Influence of nanoparticles for ciritical current properties in TFA-MOD processed YGdBCO coated conductor.

<u>松谷 文也,</u> 高橋 祐治, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大); 三浦 正志, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)

MATSUTANI Fumiya, TAKAHASHI Yuji, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,

MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

MIURA Masashi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail : matutani@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

TAF-MOD 法によって作製された長尺 REBCO 線材 (RE:希土類)は、低コストであることから有望視され ており、実用化に向けて臨界電流密度 J. の磁界依存 性の更なる改善が望まれている。特に SMES などへ の応用において、磁界下での Jc は c 軸方向だけでな く、全ての磁界方向において向上させる必要がある。 REBCO 薄膜における磁界下での J_c は、ピン力を向上 させることによって大きく改善されることが知られて おり、有効な方法としてナノスケールの非超電導相を 導入することが挙げられる。TFA-MOD 法によって薄 膜内に人工ピン (APC) の導入を行うことは、PLD 法 と成長メカニズムが異なるので困難であったが、出発 溶液に Zr 塩を加えることで、BZO のナノ粒子が現れ、 全ての磁界方向において Jc が向上することが報告さ れている [1]。しかしこれら REBCO 線材+BZO に対 する詳細な臨界電流特性は報告されていないため、本 研究では、超電導層の厚さが 0.5 μm の BZO ナノ粒子 が導入された YGdBCO 線材について、直流磁化測定 を行い臨界電流特性を明らかにする。

2. 実験

今回使用した試料は、超電導膜厚 0.5 μ m の TFA/MOD 法による BZO ナノ粒子が導入された YGdBCO (Y: Gd: Ba: Cu= 0.77: 0.23: 1:5: 3) 線材 である。比較のため、ナノ粒子が導入されていない YGdBCO 線材を用い、Table 1 にそれらの諸元を示し ている。臨界電流密度 J_c を評価するために、SQUID 磁力計により広い温度範囲で直流磁化測定を行った。 測定の際に、磁界は c 軸に対して平行に印加した。不 可逆磁界 B_i は J_c が 1.0×10^8 A/m² に減少した磁界に より決定した。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20, 70, 77.3 K の *J_c-B* 特性を示す。低磁界 領域において BZO ナノ粒子の導入により *J_c* 値が 2 倍 以上高くなっていることから、これらのピンが低磁界 で有効に効いているものと考えられる。ここで、ピン 力密度の点から考察するために、ピン力密度の磁界依 存性を Fig. 2 に示した。これによると、BZO ナノ粒子 の導入により *F_p* は高くなるとともに、そのピークが 低磁界側に移っている。これは NbTi 超電導体におい てピンである α-Ti 相析出物が析出する過程における 変化 [2] と類似している。一方で、そうしたピンニング 変化にもかかわらず、高磁界特性の変化は小さい。

これらのピン導入による影響について詳細を得るために、磁束クリープ・フローモデルを用いて *E*-*J* 特性の実験値と理論値をフィッティングさせ、得られたピンニング・パラメータにより臨界電流特性について議論するが、詳細な議論は当日行う。

00 1 1 1	a •e		e .	•
	S DOOLT	aotion of	h (11)	$\alpha \alpha \alpha m \alpha m c$
ramer.	ODECHI	calion o	5	Decimens
14 OF 10 H O 14 F	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	00108088 01	~ ~ 1	0 0 0 HANA 0 HAN

144 6	to to to to to the second	on op common	
specimen	thickness d (μ m)	$T_{\rm c}~({\rm K})$	process
#1	0.5	90.0	MOD
#2	0.5	90.2	MOD+BZO



Fig. 1: J_c -*B* properties at 20, 70, 77.3 K.





4. 参考文献

[1] M. Miura, et al.: Applied Physics Express, Volume 2, Issue 2, (2009) 023002

[2] T. Matsushita: Flux Pinning in Superconductors p. 399

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。

CVD 法による YBCO 線材の磁化緩和特性に超電導層厚が与える影響 Superconducting layer thickness dependence of magnetic relaxation property for CVD processed YBCO

<u>高橋 祐治</u>, 姫木 携造, 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); 山田 穣, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)

TAKAHASHI Yuji, HIMEKI Keizo, KIUCHI Masaru, OTABE Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. Tech.);

SHIKIMACHI Koji, WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CEPCO);

YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: takahasi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

YBCO線材は優れた臨界電流密度(*f*)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。これまでの研究から、従来の PLD 法線材では超電導層の厚さによって臨界電流特性が異 なることが知られており、その機構が明らかにされた[1]。CVD 法線材についても同様の研究が望まれる。また、SMES の応 用にあたり、線材の超電導電流の緩和特性を評価することが 重要である。そこで本研究では IBAD/CVD-YBCO テープ線 材の超電導層の厚さが超電導電流の緩和特性に及ぼす影 響について議論を行う。

2. 実験

試料は IBAD/CVD 法により作製された YBCO 線材であり、 超電導層厚が 0.18, 0.45, 0.90 μ m の長尺線材から切り出し たもので、これらをそれぞれ #1, #2, #3 とした。試料 の超電導層の厚さ及び臨界温度 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見かけのピンポテンシャル U_0^* を評価した。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
rable	۰.	opecification	UI.	specifiens.

•	-	
specimen	thickness $d(\mu m)$	$T_{\rm c}({\rm K})$
#1	0.18	87.9
#2	0.45	89.5
#3	0.90	88.5

3. 結果及び検討

Fig.1に20Kでの各試料の J_c-B特性を示す。超電導層厚 が薄い試料ほど J_c が大きいことが分かる。このような特性とな るのは、超電導層厚膜化による超電導層の劣化が原因である と考えられる。

Fig. 2 に 20 K での各試料の U_0^* -B特性を示す。低磁界領 域では超電導層の薄い試料 #1 が最も高い U_0^* を示すが、 高磁界領域では、#1 の U_0^* が大きく減少している事が分 かる。低磁界領域では J_c の寄与が大きく、純粋に J_c の高 い薄い試料の U_0^* が大きな値を示したと考えられる。一方、 高磁界領域で薄い #1 の U_0^* が大きく減少したのは、縦方 向の理論的な磁束バンドルサイズLが2Tより高磁界で超 電導層厚を超えており、2 次元ピンニングとなっているため と考えられる。そのため超電導層厚で磁束バンドルサイズ が制限されてしまい、 U_0^* が減少したと考えられる。

さらに異なる温度領域での U₀*の磁界依存性について も評価し、温度によって磁化緩和特性がどのように変化 するかについて議論を行う。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: Magnetic field dependence of critical current density at 20 K.



Fig. 2: Magnetic field dependence of apparent pinning potential U_0^* at 20 K.

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、実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO線材は、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の委託により中部電力が製作 したものである。

参考文献

 木村ら:第73回低温工学・超電導学会講演概要集 1E-p06 (2005)

DyBCO コート線材の臨界電流密度に与える重イオン照射の影響

Effect of heavy ion irradiation on the critical current density

of DyBCO coated conductor

<u>水間 祐貴</u>、磯部 現、木内 勝、小田部 荘司、松下 照男 (九工大); 岡安 悟 (原子力機構); Werner Prusseit (THEVA Gmbh)

MIZUMA Yuki, ISOBE Gen, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

OKAYASU satoru (JAEA); Werner Prusseit (THEVA Gmbh)

E-mail : mizuma@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1.はじめに

REBaCuO 超伝導体は高温・高磁界中で優れた臨界電流 密度を持つことが知られている。このことより、磁界中で の応用に期待がされており、より一層の臨界電流密度の向 上が求められている。これを実現するために人工ピンの導 入が試みられている。

今まで、臨界電流密度の向上に有効な欠陥の条件については定量的な議論が行われていない。本研究ではDyBCOコート線材にいくつかの異なる条件で重イオン照射をして円柱状欠陥を導入し、欠陥のサイズや数密度が臨界電流密度に与える影響を調べた。

2.実験

試料は THEVA GmbH により作製された DyBCO コート線材で、厚さ90 μ mの HastelloyC276 基板上に、中間層として ISD(Inclined Substrate Deposition)法によって堆積した厚さが 3.7 μ mの MgO 層と、厚さ0.3 μ mの MgO キャップ層を作製し、その上に共蒸着 (co-evaporation)法によって厚さ1.5 μ mの DyBCO 層を堆積させ、最後に厚さ0.5 μ mの Ag 保護層が蒸着されているものである。

照射は、テープ面に対して垂直の方向から Au イオンお よび Ni イオンの条件を変えて行った。照射条件は Table1 に示す通りである。ここで B_{ϕ} はマッチング磁界、んは欠 陥半径である。また、臨界温度 7. は照射前が 89.7 K であ る。測定には SQUID 磁力計を使用して、テープ面に垂直、 すなわち円柱状欠陥に対して平行に磁界を印加し、直流磁 化測定から臨界電流密度 \mathcal{A} 、磁化緩和測定から E-J特性 および n値を評価した。

3. 結果および考察

Fig. 1 に Au イオンを照射する前後での臨界電流密度を 示す。低磁界では、照射後に \mathcal{L} が低下している。この \mathcal{L} の劣化と \mathcal{T}_c の劣化の間には相関が見られており、超伝導 組織の劣化が原因であると考えられる。また、Au イオン 照射により、特に高磁界になるほど \mathcal{L} の改善が顕著に見 られる。これは柱状欠陥が有効なピンとして働いているか らであると考えられる。照射量について比較すると、照射 量を増やすと低磁界での \mathcal{L} は低下するが、高磁界での \mathcal{L} は向上している。一方で、Ni イオン照射では \mathcal{B}_o が 5.0 T の試料においても大幅な特性改善は見られなかった。Ni イオン照射による欠陥は、Au イオン照射に比べサイズが とても小さく、要素的ピン力が弱いためであると考えられ る。したがって、導入される欠陥サイズが大きく、数が多 いほど高磁界側で高い臨界電流密度を示す傾向が見られ る。

Fig. 2 に磁化の緩和測定から求めた *E-J*から評価した *n* 値を示す。Au イオン照射により、*n*値が大きくなってい ることが分かり、ピンカの分布において柱状欠陥が支配的 に効いているので分布幅が小さくなっていると考えられ る。磁束クリープ・フローモデルを用いた解析と、要素的 ピンカの加算理論を用いた考察は当日報告する。

ion	energy (MeV)	<i>r</i> ₀ (nm)	B_{Φ} (T)	$T_{\rm c}~({\rm K})$
Au	320	8	1	88.3
Au	200	5	1	89.2
Au	200	5	2	87.2
Ni	200	2	1	89.6
Ni	200	2	5	89.3



Fig.1: Critical current densities of DyBCO coated conductor before and after the Au ion irradiation.



Fig.2: *n* value of DyBCO coated conductor before and after the heavy ion irradiation.

バックグラウンド磁場を変動させたときの短尺 Y 系テープ線材における 捕捉磁界と遮蔽効果

Trapped and/or shielded fields by an YBCO coated conductor under changing magnetic fields

<u>宮副 照久</u>, 関野 正樹, 大崎 博之(東京大学);木吉 司(物質•材料研究機構) <u>MIYAZOE Akihisa</u>, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The University of Tokyo); KIYOSHI Tsukasa (NIMS) E-mail: miyazoe@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

イットリウム(Y)系超電導線材の開発が進展するともに、超 電導マグネットを利用した応用機器への導入が検討されてい る。核磁気共鳴(Nuclear magnetic resonance: NMR)分光計 に使用される超電導マグネットは測定分解能を向上させるた めに、強磁場化が求められており、Y系超電導マグネットは金 属系超電導マグネットの内層に設置されることが期待される。 NMR 用マグネットは非常に高レベルな発生磁場の時間均一 性、および空間均一性を実現することが極めて重要な課題で ある。これまでに、Y系テープ線材を複数枚重ねた場合の磁 気遮蔽効果が報告されている[1]。バックグラウンド磁界を増 減させた場合に、Y系テープ線材が置かれている周囲の磁界 は磁束の捕捉により、ヒステリシスをとる。本研究では*c*軸方向 への捕捉磁場が磁界の遮蔽効果にもたらす影響を調査する ことを目的とする。

2. 測定方法

最大発生磁場 5 Tの超電導マグネットを用いて、液体窒素 温度(77 K)において Y 系線材の磁気特性を測定するものとし た。測定の装置の概念図を Fig. 1 に示す。超電導マグネット 中にて液体窒素内にホールセンサー(F.W. BELL 社製, BHA921)およびサンプル台を置く。サンプル台の表面図を Fig. 1に示す。ホールセンサプローブは上下方向に動かすこ とができる。サンプル台には長さ 20 mm の Y 系線材 (SuperPower 社製)が置かれ、その端部にはセルノックス抵抗 温度計 (Lakeshore 社製、CX-1010-SD)が置かれており、線 材の温度を測定した。ホールセンサによる測定時における断 面図を Fig. 1 の下図に示す。線材の表面から鉛直方向を z 方向とし、線材を置いていたサンプル台の表面を z = 0 とした。 超電導マグネットによる外部磁界を0 T →0.1 T →0.1 T と変動させたときの遮蔽磁界および捕捉磁界を測定した。 外部磁界の変動速度は 0.36、0.72 mT/s とした。



Fig.1 A measuring equipment for shielded and/or trapped magnetic field using a Hall sensor



Fig. 2 Influence of trapped magnetic fields to shielded fields

(Rate of increasing fields: 0.36 mT/s)



Fig. 3 Shielded magnetic fields dependences of rate of increasing applied magnetic fields

3. 捕捉磁界の有無による遮蔽磁界効果への影響

テープ線材にあらかじめ磁界が捕捉されている状態で外 部磁界を印加したものと捕捉されていない状態で外部磁界を 印加したときのテープ線材の中心、z = 1 mm における遮蔽磁 界の推移をFig. 2 に示す。外部磁界の増磁速度は0.36 mT/s である。外部磁界が 0.1 T に到達したときの遮蔽磁界は事前 に捕捉磁界があるときとないときとで変わらず、ほぼ、0.001 T で一致した。一方で、外部磁界変動中(0→0.1 T)の遮蔽効 果は異なる。また、Fig. 3 に遮蔽効果における増磁速度の依 存性を示す。0.1 T に到達したときの遮蔽効果は増磁速度に 依存せず、0.001 T であった。増磁中における遮蔽効果のピ ークは 0.01 T であり、この値はビーンモデルを仮定した長方 形回路で求められる結果とほぼ一致した。

4. まとめ

捕捉磁界の有無は十分に大きな到達磁界における遮蔽 効果には寄与しないことが明らかとなった。変動磁界中にお ける遮蔽効課については本発表にて報告する。

参考文献

92

 S. Matsumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.211

Dy 系酸化物超電導バルクの破壊に及ぼす影響因子 Influential parameters of fracture behaviors of Dy123 bulks

<u>村上明</u>,大高健(弘前大);岩本 晃史(核融合研) <u>MURAKAMI Akira</u>, OTAKA Ken (Hirosaki Univ.); IWAMOTO Akifumi (NIFS) E-mail: amura@mech.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

Dy 系酸化物超電導バルク(以下,バルク)は,原料粉末を 混錬・成形した前駆体を半溶融状態になるまで大気中で加熱 し,その上部中央に種結晶を配置して温度勾配下で結晶成 長させて作製されるが,前駆体に残存する空気などが原因で, 応力集中源となり破壊強度特性の低下を招く気孔を含む材 料(以下,従来材)となる.最近,前駆体の加熱・溶融を酸素 雰囲気で行うことにより,従来材の優れた超電導特性を損なう ことなく,内部に気孔を殆ど含まないDy系バルク(以下,緻密 材)が得られるようになったが[1],緻密材の破壊強度特性や 破壊機構は,これまでのところ断片的にしか明らかにされてい ない.本研究では,より優れた破壊強度特性を有するバルク を開発するための方向性を明らかにすることなどを目的に,従 来材と緻密材の破断面の解析を通して,バルクの破壊に及ぼ す影響因子について検討した.

2. 実験方法

新日本製鐵製の Dy 系従来材および緻密材(φ30 および 46)から採取した試験片(2.8 x 2.1 x 24 mm³)の3 点曲げ負荷 による破断面を,走査型電子顕微鏡により観察した.従来材 は、DyBa₂Cu₃O_xや Dy₂BaCuO₅などの粉末を混錬・成形した 前駆体を,大気中で1423Kまで加熱して1時間保持した後, 1313 K まで冷却し, Nd123 種結晶を配置して徐冷・結晶成長 させて作製された.一方, 緻密材は, 前駆体を 100 % 酸素雰 囲気で1423 Kまで加熱して1時間保持した後,1313 Kまで 冷却し、大気中で Nd123 種結晶を配置して徐冷・結晶成長さ せて作製された.なお,優れた超電導特性を得るために,結 晶成長後のバルクに Dy211 粒子を微細に分散させる効果の ある Pt を, いずれのバルクにも 0.5 wt.%添加している. バルク から採取した試験片に対して、723Kで100時間、酸素アニー ルを施した(以下,熱処理試験片).酸素アニールを施さなか った試験片(以下,未熱処理試験片)に対しても観察を行っ た.

3. 結果

熱処理試験片の破断面の観察では, c 軸に垂直な微視き 裂によるステップ状の凹凸が障害となり,き裂の発生・進展の 形跡を確認することは困難であった.

従来材から採取した未熱処理試験片の破断面を Fig.1 に 示す.写真の下側が曲げ負荷を行った際に引張応力が作用 した側である(以下,同様).破断面の右下に 250µm 程度の 比較的大きい気孔が存在し,それを拡大して観察したところ, き裂が発生した形跡を確認することができた(Fig.1 (b)).

緻密材から採取した未熱処理試験片の破断面を Fig.2 に示す.き裂の進展に伴い形成された放射状のパターンが引 張側の中央付近から広がっていて,破壊の起点付近には介 在物が観察された(Fig.2 (b)).エネルギー分散型X線分光分 析により,緻密材では Pt が破壊の起点となり得ることが明らか になった.また,従来材でも例外的に表層付近では、気孔が 著しく少なく,緻密材と同様に Pt が破壊の起点となっていた.

参考文献

 H. Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.158.





(b)

Fig.1 (a) Fracture surface of a specimen cut from a conventional Dy123 bulk sample melt-processed in air and (b) magnified view of crack initiation site.



(b)

Fig.2 (a) Fracture surface of a specimen cut from a dense Dy123 bulk sample melt-processed in 100 % $\rm O_2$ atmosphere and (b) magnified view of crack initiation site.

高温超電導線材の疲労特性評価試験装置

Apparatus for evaluation of fatigue properties of HTS conductors

<u>青木</u>佳明,川井 優季,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); <u>AOKI Yoshiaki</u>, KAWAI Yuki, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.) ; SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power) ; 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 ンツカによる引張り・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 U 字型の冶具を用いて自己磁 場中における YBCO 超電導線材のひずみ-*Ic* 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]。

今回は、新たに外部磁場中での特性の調査を行うため、円 形の治具^[2]を用いた特性評価試験装置を設計・製作した。

2. 目的

我々の従来の研究では、U 字型の治具を用いて、YBCO 超電導線材の疲労特性について評価を行ってきた。SMES 用 YBCO コイルの設計に有用な機械的特性のデータを得る ためには、U 字型の治具よりもさらに均一なひずみを試料に 印加する、また伝導冷却、外部磁場下において試験を行う、 ひずみ繰り返し回数を増やすといった様々な改良が求めら れる。これらの要求を満たすために、新たな実験装置の開発 を行うこととした。

3. 冶具の設計

上記の要求を満たすため、治具の設計を行った。従来の U 字型の治具では、均一なひずみを得られる部分は中心部 付近のみであったので、特に今回は広範囲に均一なひずみ 加わるような円形の冶具設計・製作を目指した。設計には、2 次元有限要素法を用い、円形冶具の直径は、伝導冷却に対 応できるよう、クライオスタットのサイズに合わせ 60mmとした。 設計の変数としては、肉厚部の半径や、肉厚部と肉薄部の 厚さの比などがある。周方向のひずみが一定になるように設 計を行った。

シミュレーション結果を Fig.1 に示す。縦軸はひずみの大きさ、横軸は円弧の長さで正規化した位置である。以上の設計から、広範囲で均一なひずみを得られるようになった。

4. 実験装置

以上の設計を踏まえて、実験装置を製作した。円形冶具の 写真を Fig. 2 に示す。円形冶具には銅を用いた。また、円形 冶具の詳細を Fig.3 に示す。円形冶具は二つの止め具によ って固定されている。このうち片方の止め具は固定され、もう 一方は可動式となっている。シャフトの先についた歯車を回 すことで、止め具が動き、円形冶具が開閉され、ひずみが印 加される仕組みとなっている。今後は、製作した冶具を用い て、疲労特性試験を行っていく予定である。





Fig. 2 Experimental apparatus



Fig. 3 Detail of circular bending beam

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

 A.Ishiyama Y.tanaka et al.:The Papers of Technical Meeting,IEE Japan ASC(2008)P.53-58
 A.Godeke:"Performance boundaries in Nb₃Sn superconductors", PhD Thesis, University of Twente, ISBN 90-365-2224-2, (2005) p.122-127

SMES の充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価

AC loss evaluation of pancake-coil winding for charge and discharge operation of SMES

<u>柁川 一弘</u>, 船木 和夫(九大); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.); SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.) E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超電導体を線材化した coated conductor は、 高磁界中でも良好な超電導特性を維持できるため、次世代 の超電導線材として熾烈な開発競争が繰り広げられている。 この coated conductor を用いた SMES 用コイルがこれまでに設 計されており、動作温度 20 K で 2 GJ 級の磁気エネルギーを 蓄積できる[1]。このコイルは、多数のパンケーキコイルをトロイ ド配置した構造を有するが、パンケーキコイルで発生する交 流損失、特に超電導体内部への不可逆な磁束侵入に伴う履 歴損失の評価手法はまだ確立されていない。これまでに、パ ンケーキコイル内の各ターンを単純化して、一定間隔で配置 した複数の coated conductor に垂直磁界を印加した場合の交 流損失特性を有限要素解析したところ、コイル全体で発生す る損失量を議論する限りは、パンケーキコイルの厚さを幅とす る無限平板として近似すれば十分なことがわかった[2]。そこ で、本研究では、SMES として想定される運転パターンを考慮 して、パンケーキコイル巻線に適用可能な履歴損失の理論表 式を導出し、その損失特性を明らかとする。

2. SMES の充放電動作に伴う電磁環境

負荷変動補償用 SMES として想定される運転パターンを 詳細に分析すると、待機状態では、基本単位として考える各 ターン自身に直流電流が流れ、それ以外の全ターンに流れる 電流が作る外部直流磁界にさらされる。その後、充放電動作 に伴うパルス運転に移行するとさらに、ターン自身に流れる交 流電流と他のターンが作る外部交流磁界が重畳されることと なる。つまり、SMES コイル内の巻線は、直流電流と交流電流、 および外部直流磁界と外部交流磁界が全て適用された電磁 環境にさらされるのが一般的と考えられる。ところが、このよう な電磁環境に適用可能な交流損失の理論表式はまだ導出さ れていない。無限平板に直流電流のみを通電した状態で外 部交流磁界を印加すると、小振幅では外部磁界のみを印加 した場合の損失値と等しい。しかし、磁界振幅が電流値で決 まる閾値を超えると、損失が急激に増加することが知られてい る[3]。一方、交流電流のみが流れた状態で外部交流磁界を 印加する同時掃引環境についても、無限平板に対する交流 損失の理論表式が既に導出されている[4]。この同時掃引環 境で発生する交流損失は、電流と外部磁界の相互作用により 現象が複雑となり、電流振幅が臨界電流値に近づくと、外部 磁界のみを印加した場合に比べて損失は無視できないほど 大きくなる。そこで、パンケーキコイル内の各ターンを単純化 して、平行磁界に対する超電導層と同一の厚さを持つ無限平 板や、垂直磁界に対する超電導層の幅を厚さとする無限平 板を対象に、SMES コイル内の巻線が経験する直流電流と交 流電流、および外部直流磁界と外部交流磁界が全て適用さ れた電磁環境を想定して、その際に発生する履歴損失の理 論表式について、次節で検討する。

3. 交流損失理論表式の導出

臨界電流密度 J_c が局所磁界の大きさに依存しない Bean モデルを仮定する。また、無限平板の厚さを 2δ とすると、外 部磁界のみを印加したときの中心到達磁界 H_p は $H_p = J_c\delta$ で 与えられる。外部直流磁界は発生する交流損失に直接的に 影響しないため[3,4]、ここでは陽には考慮しない。ただし、実 際にパンケーキコイル巻線の交流損失を見積るときには、外 部直流磁界の大きさが局所的な臨界電流密度の値を決める と考えれば良い。

外部交流磁界を $H_{ea}(-H_{em} \leq H_{ea}(t) \leq H_{em})$ 、自己磁界 H_i の直流成分を H_{id} 、交流成分を $H_{ia}(-H_{im} \leq H_{ia}(t) \leq H_{im}, H_{im} \leq H_{id})$ とする。ただし、 $H_{id} + H_{ia}(t) \leq H_{id} + H_{im} \leq H_p$ を前提とする。 このとき、無限平板の両側の表面磁界 H_1, H_2 はそれぞれ

$$H_{1}(t) = H_{ea} + H_{i} = H_{id} + (H_{ea} + H_{ia})$$
(1)

$$H_{2}(t) = H_{ea} - H_{i} = -H_{id} + (H_{ea} - H_{ia})$$
(2)

となる。交流損失の理論表式は (i) $H_{em} \leq H_p - H_{id}$ および (ii) $H_{em} > H_p - H_{id}$ の2通りに場合分けできる。Fig. 1 に、外部交流 磁界中で交流通電したときの単位体積・一周期当たりの交流 損失 W の理論曲線[4]を示す。また、バイアス交流通電に対す る理論曲線の一例($H_{id}/H_p = 0.6$ の場合)を、Fig. 2 に示す。

なお、本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開 発機構(NEDO)の支援の下、実施したものである。

- 1. K. Shikimachi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. (2009) in press
- 2. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. 79 (2008) 2P-p27
- 3. T. Ogasawara, et al.: Cryogenics 19 (1979) 736
- 4. W.J. Carr, Jr.: IEEE Trans. Magn. 15 (1979) 240



Fig. 1 AC loss property of infinite slab with alternating transport current in external AC magnetic field [4].



Fig. 2 AC loss property of infinite slab with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field.

REBCO 超伝導テープ線材の交流損失特性

ー中間層 IBAD-MgO 基板をベースにした人エピン ZrO,+GdBCO 超電導テープ線材ー

AC Loss of REBCO coated superconducting

-Artifical pinning centers ZrO₂ doped GdBCO coated superconducting tapes of IBAD-MgO layer-

山崎 怜土、柳田 治寛、岩熊 成卓、船木 和夫(九大);

斉藤 隆、飯島 康裕(フジクラ);衣斐 顕、山田 穣、和泉 輝郎、塩原 融(SRL)

YAMASAKI Satoshi, YANAGIDA Haruo, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.); SAITO Takashi,

IJIMA Yasuhiro(Fujikura Ltd.); IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SIOHARA Yuu (SRL)

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

1. はじめに

GdBCO線材は、YBCO線材に比べて臨界温度(T_c)が高 い、磁場中での臨界電流(I_c)が高い等の特性を持ち、変圧器 や限流器などの電力機器への実用化が期待されている線材 である。PLD法において、磁場中の臨界電流密度J_cを向 上させるために、超伝導膜を生成する際の原料にピン 止めとして不純物(BZO)を混入させるという人工ピン導 入方法[1]が期待されている。さらに、近年では薄膜線材 の低コスト化製造技術のために開発された中間層 IBAD-MgO基盤は、従来構造(GZO)に比べると中間層の積 層数が増えるものの中間層の高速製造(数10~100m/h)が実 現可能であることが近年報告されている[2]。

そこで本研究では、これらの技術が応用された中間層 IBAD-MgO 基板をベースにした人工ピン ZrO₂+GdBCO 超 電導テープ線材に対して、鞍型ピックアップコイル法により、 交流損失を測定・比較したので報告する。

2. 試料と測定法

試料の各層の構成は Fig.1 のようになっており、長さは 63mm、幅は10mm、臨界電流 Icは230A である。PLD 法によ って GdBCO 超伝導層(1.2μm)を成膜させる際に、ターゲット に人工ピン ZrO2を混入している。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、GM 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 GdBCO(+ZrO₂) tapes based on IBAD-MgO

3. 実験結果

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。そして、平成 21 年度春季全国電気学会で 報告[2]した IBAD-MgO 基板の GdBCO 線材に対しても温度 スケーリング則が成り立つことを示し、従来構造の GdBCO 線 材と比較した結果、交流損失と*I*_c-*B*特性の測定値が各温度に 対してそれぞれ同じ傾向になることがわかっている。

そこで、Fig.2のように今回測定した線材に対しても同様に 交流損失の横軸を I_{c0}(0,T)、縦軸を 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。 さらに、Fig.3 のように同じ中間層 MgO 基板を用いた GdBCO 線材との I_c -B 特性 (I_{c0} で規格化)を比較した結果、人工ピンを 添加した今回の線材のほうが磁界中で高 I_c であった。

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 層上でも人工ピンを導入することで従来構造と同 様に *I_c-B* 特性が向上することがわかった。つまり、従来構造と 同様の効果が見られたので、中間層 IBAD-MgO 技術は有効 な手段といえる。発表当日は、IBAD-MgO の人工ピン有無の GdBCO 線材の特性比較の結果も併せて報告する。

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 The normalized AC losses by $I_{c0}(0,T)$



Fig.3 The normalized I_c -B characteristics by $I_{c0}(\theta, T)$ of ZrO2+GdBCO on IBAD-MgO,GdBCO on IBAD-MgO at 64K

- A. Ibi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.78 (2008) p.112
- A. Yamasaki et al.: The 2009 ANNUAL MEETING RECORD I.E.E. Japan [5], p.212

高温超伝導薄膜テープ線材を用いた多層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 Polygonal Conductor Assembled by HTS Coated Tape Wire

<u>鈴木 喜也</u>,福井 聡,小川 純,岡 徹雄,佐藤 孝雄(新潟大学);塚本 修巳(横浜国立大学);高尾 智明(上智大学) <u>SUZUKI Nobuya</u>, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University); TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); Tomoaki Takao (Sophia 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ができれば,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下げ止 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,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 及び指針が必ず必要になる。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

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。

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

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



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 μmm
Critical current per tape width j_c	27.5 A/mm
n	50

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 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。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。なお,本研究の一部は科学 研究費補助金(20560261)による。



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

超伝導転位並列導体の巻き乱れによる付加的交流損失特性

AC loss in transposed parallel SC conductors with rolling disorder

<u>林田 昌之</u>, 中村 章, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学);伊東 隆, 藤原 昇, 塩原 融(SRL) <u>Hayashida Masayuki</u>, Nakamura Akira, Iwakuma Masataka, Funaki Kazuo (Kyushu University); Ito Takashi, Fujiwara Noboru, Shiohara Yuu (SRL)

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ている。

2. 並列導体の基礎方程式

図1は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/liずれた場 合の二本転位並列導体の図で、図2はこの導体に印加す る磁界分布のグラフである。終端での磁界振幅をB_mとする。 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のように表される。

$$W = \frac{1}{K} \frac{\pi \omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{1}{2N^2 \mu_0 d_s w} \left(\frac{\Phi_{B_{(s)}}}{L} \right)^2$$

また、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損失の式は次式のように表される。

$$W = \frac{2d_s I_c}{N^2 u w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{d_s L} - \mu_0 \frac{K}{u} I_c \right)$$

3. 解析結果

解析結果の例として図3に、巻き乱れが転位位置から2 5巻き目で発生した場合に、B_m=10Tとして巻き乱れのず れ△lを変化させた場合の解析結果を示している。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 した場合の解析を行った。さらに△lを固定し B_m が変化し た場合の解析も行っている。

4. まとめ

解析の結果付加的交流損失は

- ・磁界振幅 Bm、巻き乱れ /I が大きいほど大きくなる
- ・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
- ・巻き乱れが発生する位置が転位位置に近いほど損失は 大きくなり、遮蔽電流の飽和も早い
- という特性を示すことがわかった。

5. 謝辞

本研究は一部 NEDO 事業「イットリウム系超電導電力技術 開発プロジェクト」の支援により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

GdBCOコート線材における磁化損失の形状効果の影響

Evaluation of geometrical effect on magnetization loss in 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 伝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、従来の円柱形線材等とは異なる損失 特性を示す。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。本研 究では SQUID 磁力計を用いた GdBCO コート線材の 磁化損失の評価を行い、テープ線材を層状に重ねた場 合における形状効果の影響を調べた。

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。テープから 2.3 mm × 2.8 mm 程度の試料を切り出し、形状効果の 影響を調べるため、1 枚の場合とそれらの試料をテー プの厚さ方向に 6 層、12 層に重ねた場合における測定 を行った。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 を測定した。印加磁界の振幅を 1.5 mT – 5 T と変化さ せ、それぞれについてヒステリシスの面積から磁化損 失密度 *W* を評価した。

結果及び検討

Fig. 1 に各温度における試料 1 枚の時の垂直磁界下 の J_c の磁界依存性、Fig. 2 に 77.3 K における W の磁 界振幅依存性を示す。Fig. 2 において W の折れ曲がり 点が中心到達磁界 B_p である。 $W \propto B^{\alpha}$ とした場合、 実験結果における B_p 前後の各 α の値を Table 1 に示 す。Table 1 より、 $B < B_p$ では、全ての結果におい て W は B のおよそ 3 乗に比例していることが分かる。 しかし、 $B > B_p$ においては、Bean モデルを仮定した 場合の理論値である 1 より小さな値となった。これは、 Fig. 1 に示すように、この磁界領域では J_c が低下し、 それに伴い W が小さくなったことに起因する。

Fig. 2 の破線は W の理論値を示している。試料1枚 の場合はHalseの式[1]、複数枚重ねた場合はMawatari らの式 [2] を用い、パラメータである J_c は自己磁界中 における値を用いた。前述したように、高磁界領域で は Jc が低下するため、理論値と実験値が大きくずれて いる。従って、パラメータである J. が Fig. 1 の実線で 与えられるとして理論的に計算し、その結果を実線で 示した。このような修正を施すことで高磁界領域でほ ぼ一致することが分かった。一方で、 $B < B_p$ の低磁 界領域では、図のように若干のずれがあり、今後検討 する必要がある。また、Mawatari らによれば、複数枚 重ねた場合の損失は超電導層の積層間隔にのみ依存す る。6 層と 12 層試料では積層間隔が等しいため、理論 値と同様にほぼ同じ結果であることが分かった。なお、 理論式の詳細や、他の温度における測定結果、比較等 については当日報告する。

Table 1: Value of the α ($W \propto B^{\alpha}$) at 77.3 K.

	$B < B_{\rm p}$	$B > B_{\rm p}$
1stack	3.11	0.593
6stacks	3.17	0.564
12stacks	3.11	0.587



Fig. 1: Magnetic field dependence of J_c .



Fig. 2: Magnetic field amplitude dependence of magnetization loss density at 77.3 K.

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。

- [1] M. R. Halse: J. Phys. D 3 (1970) 717.
- [2] Y. Mawatari: J. Cryo. Soc. Jpn. Vol. 44 No. 1 (2009) p. 9.

液体窒素中で1Tを超える磁場を発生するBi-2223超電導マグネット

Bi-2223 superconducting magent generating over 1T in liquid nitrogen

小田部 荘司, 根本慎司, 木内 勝, 松下照男, (九工大);

林 敏広, 藤野剛三 (住友電工); 倪宝栄 (福工大)

OTABE Edmund Soji, NEMOTO Shinji, KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

HAYASHI Toshihiro, FUJINO Kousou (Sumitomo Electric Ind.);

NI Baorong (Fukuoka Inst. of Tech.)

E-mail: otabe@cse.kyutech.ac.jp

はじめに これまで、CT-OP(ConTrolled Over Pressure)法により作製された Bi-2223 銀シーステープを用いて、酸化物超電導マグネットを設計製作し、その特性を液体窒素中およびサブクール液体窒素中で評価した^{1),2)}。その結果 77 K で 0.40 T、65 K で 0.78 T を発生させることができることを確かめた。Bi-2223 銀シーステープはテープに垂直に磁場が印加すると臨界電流密度特性が急激に劣化する。したがってさらに特性を改善するためには、テープに垂直な磁場成分をできるだけ低減できるようにすればいい。前回、フランジ部分に磁性材料を使うことを提案し、数値計算の結果、2 倍以上の磁場を発生することができる可能性を示した³⁾。本研究では、実際にフランジを FRP から磁性ステンレス材 (SS400)を用いることにより特性改善を図り、その結果を報告する。

解析および実験結果 マグネットは 10 個のダブルパ ンケーキコイルを銅製の端子を通じて接続した構成で ある。これまでフランジに FRP を用いていたが、こ れを磁性ステンレス材 (SS400) に変更した。有限要素 法を用いて内部の磁場分布を求める。その結果、中心 での磁場 B_1 は 1.11 × 10⁻² T/A であることがわかっ た。同様にテープに平行および垂直な磁場成分の最大 値 B_2 , B_3 は 1.15 × 10⁻² T/A と 9.58 × 10⁻⁴ T/A で あった。これよりテープに垂直な成分を減らすことが できていることがわかる。Fig. 1 にロードラインを示 す。磁性ステンレスフランジの場合には、これまでの ようにテープに垂直な磁場成分ではなくて、テープに 平行な磁場成分により、マグネットの性能が決定され ていることがわかる。これより、マグネット全体の臨 界電流 Icは 62.0 A であり、その時の最大磁場は 0.69 T と予想することができる。

実際に通電試験を行った結果を Fig. 2 に示す。大気 圧下の液体窒素中で予想値と非常に近い 0.70 T の最大 磁場を得ることができた。またサブクール液体窒素中 では 1.0 T を優に超える 1.30 T の最大磁場を得ること ができた。

ソレノイドマグネットと比べて、必要な部分のパン ケーキコイルをより高性能なものに替えることによ り、マグネット全体の性能を向上させることができる。 今後、最適化を進めることでより高性能化を図ること ができると考えられる。



Fig. 1: Load line of the Bi-2223 superconducting magnet. Maximum magnetic field is determined by B_2 for B parallel to tape rather than B_3 for B normal to tape.



Fig. 2: *I-V* characteristics of the Bi-2223 superconducting coil in liquid nitrogen.

参考文献 1) E.S. Otabe *et al.*, to be published in Cryogenics (2009); 2) E.S. Otabe *et al.*, Abstracts of ICEC22/ICMC2008 (2009); 3) E.S. Otabe *et al.*, Abstracts of CSJ Conference **79** (2008) 31.

コイル巻線化された YBCO 集合化導体の常電導伝播特性解析 Numerical Simulation on Normal Propagation of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor

<u>植田 浩史</u>, 石山 敦士(早大);式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力) <u>UEDA Hiroshi,</u> 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桁以上大きく、運転温度を高くとれるため、熱容量が2 ~3桁大きくなる。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い[1]。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 が、何らかの要因で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。集合導体で巻線した際、素線が疲労な どによって局所的に劣化すると、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。

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、Icを 540A@0.05µV/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 にように YBCO 線材を 4 枚束ねたもので、コイル諸元は Table 1 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素線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20Kとし,導体を構成する4枚の線材の内,コイルの 最内層で一番内側の線材が長手方向に 1 cm 劣化した場合 (I_C = 0)の常電導伝播特性を解析した。2160 A(540 A/tape) 一定で通電し続けた時の各素線の電流および両端電圧と, 劣化箇所から1 cm 間隔で各素線の電圧, 温度を計算した。

3. 電流分布および温度

0 秒で劣化が起きた時の各素線の電流および両端電圧を Fig. 2 に,劣化部位から1 cm間隔で素線1,4の電圧,温度の 変化をそれぞれ Fig. 3,4 に示す。転流は徐々に起きる。Fig. 3を見ると,素線1(劣化が起きた線)では,線材長手方向の常 電導伝播はゆっくりしており、8 秒後に隣の電圧タップに達し て,電圧が急上昇することがわかる。また、Fig. 4 より、素線 4 では,約4 秒後にから電圧が出始めていることがわかる。 YBCO線材は n 値が大きいため、電圧および温度の上昇は 急激であるが、例えば、Fig. 2(b)において、クエンチ検出電圧 をコイル両端で 0.1 V とすれば、Fig. 3(b)より劣化部は 100 K まで温度が上昇していることになる。

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, no.2, pp.1659-1662 (2005)



Fig. 1 Schematic drawings of YBCO tape, bundle conductor and coil.

Table 1 Specifications of coil for numerical simulation.

要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.01015 m
1ターン幅	10.15 mm
1ターン厚(絶縁層厚)	0.356 mm (0.15 mm)
導体構成	4枚バンドル(導体厚1.424mm)
ターン数	91 turns





(a) Voltage (b) Temperature Fig. 4 Voltage and Temperature of Tape 4.

time (s)

10

0.005

0 0

4 time (s)

Design and fabrication of layer-wound YBCO coils

<u>ウリエッティ ダヴィデ</u>,木吉 司 <u>UGLIETTI Davide</u>, KIYOSHI Tsukasa E-mail: uglietti.davide@nims.go.jp

1. Introduction

REBCO coated conductors are available on longer and longer length from industrial manufacturers and because of the superior superconducting and mechanical properties, they represent a very interesting conductor for the construction of high field magnets (>21 T).

The double pancake construction has been often used for winding insert coil using high T_c superconducting tapes (Bi2212, Bi2223 and YBCO). In this work coils of various sizes (from 16 to 220 mm of inner diameter) have been fabricated by layer winding using coated conductor from Superpower.

2. Coil design

The coil current is either limited by the mechanical properties or by the critical current density. The superconducting critical current density and the mechanical critical current density (J_{cmec}, defined in [1]) at 500 MPa have been plotted in Fig.1. In a large coil (i.e. 220 mm diameter) J_{cmec} is limiting the coil current, while for small coils (<40 mm diameter) the superconducting critical current density (whose value is comprised between J_{c⊥} and J_c|) is limiting the coil current.

A large coil (220 mm \emptyset) and two small coils have been constructed to test the mechanical and superconducting properties of the tape.

Table 1 Coil parameters

turns X layers	\mathcal{O}_{in}	\mathscr{O}_{out}	Н	Tape	
	(mm)	(mm)	(mm)	length	mT/A
7X7	220	225	29	35 m	0.27
7X25	16	34	29	14 m	4.5
6X30	18	28	25	14 m	6.2



Fig.1 Mechanical critical current density, $J_{\rm cmec}$ (at 40 and 220 mm diameter), and superconducting current density (with field applied in parallel and perpendicular direction) for the Superpower YBCO tape.

3. Coils construction and performances

The coils have been layer wound using a simple bench installed at the Tsukuba Magnet Laboratory. The tension during winding was kept at about 10 $\rm N$ using a motor and a mechanical torque limiter.

For the 220 mm coil, the former is made with an aluminum tube. Copper wires were soldered directly to the coated conductor tape. The coil was tested in a 14 T background field, and the mechanical Hoop stress reached 200 N (corresponding to 530 MPa on the conductor cross section without insulation) at 130 A. No degradation of the superconducting properties was observed.

In the small diameter coils the former is made of bakelite and a copper ring is used for current lead. The coil insulated with Kapton (7 turns and 25 layers) generated 1.7 T in a background field of 15 T; the coil current was 375 A (380 A/mm^2).

A second coil (6 turns and 60 layers) was built using a thinner insulation: the total tape cross section was reduced of about 50%. This coil generated 1.9 T at 280 A (380 A/mm^2) in 15 T background field, and 2.2 T at 360 A (490 A/mm^2) in zero background field.

The generation of high magnetic field using coated conductors and layer wound technique was demonstrated. Coil current density can reach values of 490 A/mm^2 without problem of current transfer between the copper leads and the coil.



Fig.2 The 220 mm coil after the test in the 14 T magnet.



Fig.3 Coil 6X60 (6 turns times 60 layers).

References

 Uglietti et al. to be published in IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.19 (2009).

巻線断面形状の最適化設計による高温超伝導多極コイルの交流損失低減効果 Effect of AC Loss Reduction of HTS Multi-pole Coil by Optimal Structure Design of Winding Cross-section of Element Coils

<u>高橋 政樹</u>, 三輪 祥宏, 福井 聡, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大) <u>TAKAHASHI Masaki</u>, MIWA Yoshihiro, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University) E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系テープ線材を用いた巻線を製作すると、必然的にテ ープ面に垂直方向の磁界が加わり、巻線形状によっては交 流損失が過大になり、Y 系線材を用いた電力機器の実現性 そのものを阻害してしまう。従って、交流損失をなるべく低減 できるような巻線構造の設計は重要な課題である。コイルの交 流損失はその巻線断面形状と密接に関係するので、交流損 失を巻線断面寸法を変数とする関数と考え、それを最小化す る寸法を数理最適化問題として設計することができる。本研究 では、巻線断面形状を最適化することによりコイルの交流損 失を低減する手法を検討する。

2. 解析方法

本研究では、積層パンケーキコイルを要素コイルとする 2 極及び4極コイルを解析の対象とする。Fig.1に2極コイルと4 極コイルの配置の仕方を示す。まずコイルの形状を決定し, 線材に印加される磁界の大きさとテープ面に対する角度を求 める。Y 系線材では、テープ面に平行な磁界に対しては交流 損失が極めて小さいため、得られた磁界分布の垂直成分によ る交流損失のみを数値解析する。これをコイル全体で積分し て、コイル全体の損失 Ptcoil を算出する。コイルの交流損失 Ptcoil はその巻線断面形状に依存するので, Fig.2 のように要 素コイルの高さを固定し、要素コイルの各ダブルパンケーキコ イルのターン数を変化させながら, 交流損失が低減できる断 面形状を算出する。コイルの交流損失 Pt coilを各ダブルパンケ ーキコイルのターン数 $N_{dp,i}$ を変数とした目的関数とし,これを 最小化する最適化問題として解く。最適化アルゴリズムは,変 形ローゼンブロック法と焼きなまし法を併用する。制約条件と して蓄積エネルギーEと負荷率 Icoil/Ic,coil (通電電流/臨界電 流)を一定にする。このとき、コイルの臨界電流は、短尺線材 で測定した電流-電圧特性に基づき,巻線断面内の磁界の 強度・角度分布を考慮して各ターンに発生する電圧を計算し、 コイル内部の平均電界(端子電圧/線材長)が1.0×104 V/m 時の電流値として定義する。

3. 解析結果

本解析手法の妥当性を検証するためのケーススタディとし て、Tab.1 に示す諸元の線材で巻線されたコイルを想定し、制 約条件として E = 50 J, I_{coil}/I_{c.coil} = 0.65 として解析を行った。ま ず 2 極・4 極コイルそれぞれに対して、この制約条件を満たす 体積最小の長方形断面の要素コイルで構成された基準コイ ルを決定する。これを初期形状として、交流損失が最小にな る要素コイルの形状を最適化計算により求めた結果を Tab.2 に示す。2・4 極コイルともに、要素コイル端部の巻数が増え、 中央部の巻数が減るような断面形状が得られた。同程度の線 材量で、2・4 極コイルともに基準コイルと比較して約 40%の交 流損失が低減できることが示された。また巻線断面形状の変 化でコイル全体に印加される磁界が小さくなったことにより臨 界電流も上昇した。



Fig.1 Illustration of 2-pole and 4-pole coils

$\leftarrow N_{dp,l} \rightarrow$	DP-1
$\leftarrow N_{dp,2} \rightarrow$	
$\leftarrow N_{dp,3} \rightarrow$	DP-3
$\leftarrow N_{dp,4} \rightarrow$	DP-4
$\leftarrow N_{dp,5} \rightarrow$	DP-5
$\leftarrow N_{dp,6} \rightarrow$	<u>DP-6</u>

Fig. 2 Cross section of element coil

Tab.1 Specification of Tape				
線材幅 [mm]	4.0			
超伝導層の厚さ[mm]	0.001			
基盤厚さ [mm]	0.5			
臨界電流 [A] (at 0T)	120			
n 値 (at 0T)	30			

2 pole	基準コイル	最適化コイル
Number of DP 2M	8	8
Ndp.1	67	142
Ndp.2	67	37
Ndp.3	67	32
Ndp.4	67	30
インダクタンス L [mH]	122	91
必要線材長 [m]	634	662
Ic,coil [A]	44.1	51.0
$P_{\rm t,coil}$ [J]	7.53	4.28
4 pole	基準コイル	最適化コイル
Number of DP 2M	8	8
17.1 1		
Ndp.1	46	104
Ndp.1 Ndp.2	46 46	104 15
Ndp.1 Ndp.2 Ndp.3	46 46 46	104 15 19
Ndp.1 Ndp.2 Ndp.3 Ndp.4	46 46 46 46	104 15 19 25
Ndp.1 Ndp.2 Ndp.3 Ndp.4 インダクタンス L [mH]	46 46 46 46 105	104 15 19 25 78
Ndp.1 Ndp.2 Ndp.3 Ndp.4 インダクタンス L [mH] 必要線材長 [m]	46 46 46 105 773	104 15 19 25 78 799
Ndp.1 Ndp.2 Ndp.3 Ndp.4 インダクタンス L [mH] 必要線材長 [m] I _{c,coil} [A]	46 46 46 105 773 47.2	104 15 19 25 78 799 54.9

常電導転移特性を考慮した高温超電導コイルのクエンチ検出方法に関する検討 A study on quench detection method with regarding properties of normal transition in HTS coil

<u>朱 鎭弘</u>, 佐野 勇人, 門田 貴昌, 金 錫範, 村瀬 暁 (岡山大学), 權 永吉, 金 鎬民 (韓国電気研究院) <u>Jin-Hong Joo</u>, Hayato Sano, Takayoshi Kadota, SeokBeom Kim, Satoru Murase (Okayama University)

Young-Kil Kwon, Ho Min Kim (Korea Electrotechnology Research Institute)

kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導コイルは、低温超電導コイルに比べて比較 的に大きい熱容量と温度マージンを有しているために熱 的安定性はかなり向上されたものの、擾乱によってコイ ル内に局所的なホットスポットが生じた場合、常電導部 の伝播速度が非常に遅く[1]、また、常電導転移後にリカ バリするなど低温超電導コイルより複雑な転移挙動を示 すので早期・正確なクエンチの検出が非常に難しい.そ こで、本研究では、大きい熱容量と温度マージンを有し ている高温超電導コイルの複雑な常電導転移特性を伴う クエンチに対して、有効電力法に基づくハードウエアと ソフトウェアを併用することでより早く正確に検出でき る方法について検討したのでその結果について報告する.

2. 常電導転移特性を考慮したクエンチ検出方法

擾乱による高温超電導線材の転移特性を図1に示す。 高温超電導線材またはコイルにおける常電導転移特性は、 冷却効果により超電導状態へ回復(recovery),不十分な冷 却能力によるリカバリを経由する熱暴走(thermal runaway by insufficient recovery), そして, そのまま常電導状態へ転 移する典型的な熱暴走(typical thermal runaway)と分けられ る[2]. 従って、高温超電導線材およびコイルを保護する ためには、上述したすべての転移特性に適用できるクエ ンチ検出方法が必要となる.本研究では、擾乱に伴う高 温超電導線材またはコイルの発生電圧や温度の時間変化 に着目し、両データの時間変化率を常に監視・分析する ことでクエンチの判断を行う. また, 発生電圧において は有効電力法を用いてノイズなどを除去することでより 正確な判断ができるように工夫した.提案するクエンチ 検出方法について短尺高温超電導線材を用いて実験的に 検討を行ったので下記する.

3. 実験方法

図 2 で示すように長さ 20cm の YBCO 超電導線材 (AMSC 344C)を用いて, 試料の中央部に抵抗 1 kΩのひず みゲージを取り付け, 擾乱模擬用のヒーターとして使用 した. また, ひずみゲージの両側には電圧タップが 2cm 間隔で取り付けており, 各電圧タップの間には T 型熱電 対を設けることで擾乱に伴う試料の電圧および温度変化 を測定した. そして, 図 2 で示す測定試料は GM 冷凍機 による伝導冷却方法で運転されるため試料における冷却 条件は断熱条件となる.

4. 結果及び考察

本研究で用いた試料の臨界電流は 90A(@73K)であり, 負荷率 60%(54A)の電流を通電させたときに,最小クエン チエネルギー(MQE)に相当する 0.8J の熱擾乱を投入した 後に測定された試料の温度と電圧変化を図 3 に示す.図 より,擾乱が発生したところの電圧および温度波形は線 材長手方向への熱はけによって一旦リカバリの様子を示 した後に熱暴走に至ってしまう.この測定結果から提案 したクエンチ検出法は電圧や温度の時間変化率を監視・ 分析し,擾乱が発生した後 2.07 秒と 2.42 秒の時点でクエ ンチが起きたと判断された.一方,有効電力法を用いる 場合,擾乱発生後に end-to-end 電圧タップ(V1-6)の発生電 圧が閾値電圧 30mV を超える瞬間である 4.10 秒にクエン チが検出された.従って、提案する検出方法が充分有効 であることが示されたと思われる。



Fig. 1 Behavior of normal transition in HTS wire.



Fig. 2 Schematic view of measurement sample.



(a) Temperature traces during runaway by insufficient recovery



(b) Voltage traces during runaway by insufficient recovery Fig. 3 The quench detection results with the proposed method and active power method while the sample run-away by insufficient recovery.

- [1] W. S. Kim, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 18, (2008) p.1249
- [2] J.H. Joo, et al.: Development of Quench Detection Method Based on Normal Transition Behaviors for HTS Coils, IEEE Trans. on Appl. Supercond, (2009) in press

断面構造の異なる Nb₃Sn 素線の CIC 導体内における超電導特性の評価 Numerical Simulation on Critical Current Degradation of Nb₃Sn Strand

with Different Cross Sectional Structure in CICC

<u>梶谷 秀樹</u>, 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) <u>KAJITANI Hideki</u>, 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

Nb₃Sn/CIC 導体を用いたモデル・コイル試験の結果、電磁 力による素線の局所的な曲げ変形が原因と考えられる劣化が 観測された。そこで、Nb₃Sn 素線の曲げ変形に対する臨界電 流特性を調べるため、分布定数回路を用いた数値解析コード を開発し、これまでに運転条件や素線構造の違いが特性劣 化に与える影響について評価を行った。

今回はバリア層の素材や素線断面積、銅比など断面構造 の異なる素線で実験と解析の比較を行い、本解析コードの有 用性を確認するとともに、これらの違いがどのように素線の臨 界電流特性に影響するのかを調査したので報告する。

2. 解析モデル

CIC 導体内の素線の曲げ変形を模擬するために、素線に 5 mm 周期の曲げ変形を人為的に加えた実験⁽¹⁾および素線に 純曲げを加えた時の実験に対して以下の解析を行った。

素線が曲げ変形を受けると、一部のフィラメントは大きな歪 を受けて臨界電流値(以下 I_c)が低下する。その結果、フィラメ ント間で電流が転流する。この現象を分布定数回路を用いて モデル化した⁽²⁾。長手方向の超電導フィラメントの抵抗は n 値 モデルを用いて計算し、I_c, n 値の歪依存性も考慮した。フィ ラメントの歪は、曲げによる歪と銅母材との熱収縮差による歪 の和として与えた。素線の曲げ歪分布は両端固定梁モデル を仮定し計算した。銅、ブロンズの塑性および Nb₃Snフィラメン トの破断を考慮した。また、断面内のフィラメント間コンダクタ ンスは有限要素法で導電問題を解き等価的な値を求めた。

これまでに Table.1 の Sample1 の素線で実験と解析を実施 した結果、両者は比較的良く一致した⁽²⁾。今回は Sample2 のも ので同様の実験と解析を行った。Sample2 の素線断面図を Fig.1 に示す。解析において、バリア層は弾性変形を仮定し、 Sample1 は Ta(180Gpa)、Sample2 は Nb(130Gpa)とした。また、 バリア層の電気抵抗率は $2.3 \times 10^8 \Omega$ m とした。その結果を Fig.2 に示す。結果は比較的よく一致している。これより、本解 析コードの有用性を確認することができる。

3. I。特性の比較

5Kにおける印加荷重に対する両素線の劣化前の*I*_cで正規 化した値で*I*_c特性をFig.3に示す。比較すると、Sample2の方 が荷重に対して劣化しにくい。これは今までの研究から、銅比 が小さいことが要因だと考える⁽²⁾。

4. バリア層の影響

次にバリア層の影響について調べた。Fig.4(a)はバリア層の ヤング率を変化させた時の印加荷重に対する *I*。特性である。 バリア層のヤング率が高くなるほど劣化を抑えられる事がわか る。これは素線の曲げ剛性が増し、素線内の曲げ歪が減るた めである。しかし Ta と Nb では、ヤング率が比較的近いため、 その影響は小さいと考える。ただし、バリア層の厚さを増した 時には、影響は大きくなると考える。さらに詳しく評価するには 塑性も考慮する必要がある。

次にバリア層の電気抵抗率の影響について述べる。 Fig.4(b)はバリア層の電気抵抗率を変化させた時の印加荷重 に対する *I*。特性である。変化がほとんどない事がわかる。これ は、電流転流はほとんど超電導層で起きるため、バリア層の 抵抗率の影響は極めて小さいためである。

5. まとめ

I。特性においてバリア層の影響は小さく、銅比の影響が大きいことがわかった。*I*。特性は Sample2 の方が良いが、銅比が大きい方が導体の安定性は良い。つまり導体の安定性と併せて考える必要がある。そのため、今後は CIC 導体を想定した解析コードを開発する予定である。

Table.1 Specifications of strands			
	Sample1	Sample2	
素線半径[mm]	0.405	0.41	
銅比	1.5	1.0	
バリア層(厚さ)	$Ta(10 \mu m)$	Nb(10 μ m)	



Fig.1 Cross sectional view of strand(Sample2)





Fig.2 Critical current degradation of strand to periodic bending

Fig.3 Comparison of Critical current of each strand



Fig.4 Critical current degradation of strand to periodic bending strain. (a) Dependence of Young's modulus of barrier. (b) Dependence of resistivity of barrier.

参考文献

1.N. Koizumi, et al.: *Physica C*, Volumes 463–465, October 2007, pp. 1319–1326

 H. Murakami, et al.: *IEEj Trans. PE.* vol. 128, No.6 , pp. 853-859, June 2008

リング形状高温超電導バルク体を用いた小型 NMR マグネットの開発 Development of compact NMR magnet with HTS bulk annuli

<u>今井</u> 諒, 高野 力, 金 錫範(岡山大学) <u>Makoto Imai</u>, Riki Takano, SeokBeom Kim (Okayama University) kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

近年,核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance)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 装置は大型,高価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.そこで我々は,NMR 装置の小型・ 簡易化を目的として酸化物超電導バルク体を用いるNMR 装置の開発研究を行っている.しかしながら,製造プロ セスの発展により高い臨界電流密度を有する酸化物超電 導バルク体の作製が可能になったものの,臨界電流密度 の空間的均一性はまだ不十分であるのが現状である。従 って、現時点で手に入る酸化物超電導バルク体を用いて NMR 用マグネットとして使える空間的磁場均一度を得る ことが非常に難しいと思われる。

そこで本研究では、リング型酸化物超電導バルク体の 内部により均一な磁場領域を得るために、複数の酸化物 超電導バルク体を積層した NMR 用マグネットの内部空 間に鉄リングを配置することで磁場分布を補正する方法 について実験的に検討した。また、鉄リングを挿入した 場合の内部磁場分布特性について、有限要素法に基づい た数値解析を行っ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

開発する小型 NMR 装置の基礎概念図を Fig.1 に示す. 本研究で開発する NMR 装置は,酸化物超電導バルク体の 超電導特性である強力な捕捉磁場を利用するものである. 酸化物超電導バルク体の着磁においては、外部磁場印加 装置である超電導マグネットの室温空間に酸化物超電導 バルク体を配置させて行う.酸化物超電導バルク体が着 磁された後は超電導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. 市販されている酸化物超電導 バルク体を用いて液体窒素で着磁させた場合、その捕捉 磁場によるリング内部空間での発生磁場は約1T程度とな る. 従って, 200MHz(4.7T 相当)以上の NMR 用マグネッ トを実現させるためには、数個の酸化物超電導バルク体 を積層する必要があると考えられる.もしくは,酸化物 超電導バルク体を液体窒素温度より低い温度で着磁させ る必要があるため冷却方式について検討を行う必要があ ると思われる.また、十分な磁場の空間均一性を得るた めには磁場補正方法についても検討を行う必要がある. 従って,本研究の目的を達成させるためには,バルク体 の外形・内径などの形状と積層構造の最適化および着 磁・冷却方法の最適化が必要となる.

3. 実験方法および結果

本研究では、外径 60mm、内径 20mm、厚み 15mm およ び 20mmの二種類の GdBCO 酸化物超電導バルク体を試料 として用いて行った.超電導バルク体の着磁方法は、超 電導マグネットの室温空間である直径 100mmのボア内に 超電導バルク体を印加磁場に平行方向に固定した状態で 磁場を印加する.磁場を印加した状態で超電導バルク体 を液体窒素で冷却し、超電導状態にした後に取り出す磁 場中冷却方式(FC 法:Field cooling Method)を採用して行った.バルク体の捕捉磁場分布および内部磁場の分布については,高感度の3方向磁場成分が同時に測定可能なホール素子を用いることで高精度の磁場分布測定を行った.今回の測定に用いた単一超電導バルク体と3個積層構造のバルク体の寸法をFig.2に示す.また,液体窒素温度で1Tの印加磁場におけるバルク体内部の高さ方向の磁場分布特性をFig.3に示す.鉄リング装着による磁場補正の測定結果および数値解析によるバルク体の捕捉磁場特性および理論的考察などの詳細は当日に報告する.



Fig. 1. Conceptual drawing of a compact NMR device using oxide superconducting bulk annuli.



(a) Single bulk (b) 3stacked bulks

Fig.2 Schematic scaled drawing for a single and three stacked HTS bulk annuli.



Fig.3 Measured magnetic field profiles along the axis of the single and three stacked annuli when an applied magnetic field is 1 T.

有効電力法による冷凍機冷却型 6T 級 NbTi 超電導マグネットのクエンチ保護試験

Quench protection test of a cryocooler cooled 6T NbTi superconducting magnet by an active power method

<u>七戸 希</u>, 井上 貴裕, 村瀬 暁 (岡山大); 西島 元 (東北大); 玉川 克紀, 天谷 宗徳, 上村 芳文 (玉川製作所) <u>NANATO Nozomu</u>, INOUE Takahiro, MURASE Satoru (Okayama University); NISHIJIMA Gen (Tohoku University) TAMAKAWA Katsuki, AMAYA Munenori, UEMURA Yoshifumi (Tamakawa Co., Ltd.)

E-mail:nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

著者らはこれまで超電導コイルのクエンチ保護システムとし て有効電力法を提案してきており、種々のコイルにてその原 理的有効性を確認してきた[1]-[5]。しかしながらこれまで試験 に使用してきたコイルは有効電力法の原理検証を主目的とし ていたため、数 mH-数 100mH 程度の小コイルを対象としてき た。本稿では、実用規模の容量を持つコイルに対する有効性 を検証する第一段階として、冷凍機冷却型 6T 級 NbTi 超電導 マグネットを対象として保護試験を行い、提案システムの有効 性を確認したため、その結果を報告する。

2. 保護システム

有効電力法に基づくクエンチ保護システムを図 1 に示す。 マグネットが超電導状態であればスイッチ S_1 がオン, S_2 がオフ となり、電源からマグネットへ電流が供給され、クエンチと判定 された場合には、 S_2 がオン、 S_1 がオフとなり、電源からの通電 電流は遮断され、マグネットの磁気エネルギーは保護抵抗に て回収される。

3. 実験結果

実験にて使用したマグネットは(株)玉川製作所製の冷 凍機冷却型 6T 級 NbTi 超電導マグネットである。同マグネ ットを4.3Kに冷却し,1A/minのスイープレートで励磁を行 い,励磁中のワイヤーモーションにて生じたクエンチを検出し て保護を行う実験を試みた。Fig.2 に実験結果を示す。すべ ての図はクエンチ前後の時間の波形を拡大したものであり, 時間軸は励磁開始から1時間19分35秒経過時を0sとして 表示している。同図(a)は通電電流波形であり,11.2sまで励磁 が続いており,同図(b)に示すマグネット両端電圧より,その時 間まで電流スイープレートに応じた直流電圧が発生しているこ とがわかる。同図(c)は有効電力法におけるクエンチ判定信号 の P'であるが,11.2sにてクエンチが発生し,閾値 P_{th}=20W に



Fig. 1 Protection circuit



達した時点にてクエンチと判定され,同図(d)(e)のように各スイ ッチのオンオフが切り替えられた。それにより,マグネットは電 源と遮断および保護抵抗に接続され,同図(a)の電流波形の 11.2s 以降に示されるように磁気エネルギーが保護抵抗にて 回収されている。なお,その回収時において同図(c)の P'が 11.5-13.0s にて頭打ちになっているのは,P'を算出する回路 の最大出力電圧に P'が達したからである。同図(f)にクエンチ 前後のマグネットの温度波形を示す(他の図と時間軸が異な ることに注意されたい)。同図より,クエンチ後のマグネットの最 高到達温度は44K であり,マグネットの保護に成功したと言え る。

謝辞

本研究の一部は文部科学省(科学研究費補助金・若手 B (19760277)),財団法人岩谷直治記念財団,財団法人中国 電力技術研究財団の助成によることを付記し,ここに謝意を表 します。

- N. Nanato: Proceedings of International Conference on Electrical Engineering 2008, No. P-171, CD-ROM
- [2] 七戸希: 電気学会基礎·材料·共通部門誌(A 部門誌), 128 巻, 6 号 (2008) p. 386
- [3] K. Takeuchi, et al.: Cryogenics, Vol. 48/3-4 (2008) p. 148
- [4] 竹内和也, 他: 低温工学, 42 卷, 11 号 (2007) p. 382
- [5] N. Nanato, et al.: Physica C, Volumes 463-465 (2007)
 - p. 1281

JT-60SA 用プロトタイプ型 NbTi ケーブル・イン・コンジット導体の 接続部における磁場特性

Magnetic field characteristics on the joint of the prototype NbTi cable-in-conduit conductor for JT-60SA

<u>尾花 哲浩</u>,高畑 一也,濱口 真司,三戸 利行,今川 信作(NIFS);木津 要,村上 陽之,吉田 清(原子力機構) <u>OBANA Tetsuhiro</u>, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku (NIFS) ; KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA) E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合装置で使用される超伝導コイルには、数多くの導体接続部が存在する。そのため、導体接続部が超伝導コイルの性能に与える影響は大きい。導体接続部には、超伝導コイルの安定性への影響を出来る限り軽減するために、低接続抵抗で低交流損失が求められ、現在までに様々なタイプの導体接続部形状が開発されてきたが、どのような電磁現象が導体接続部で起きているのかは、未だによく理解されていない[1]。そこで、本研究では、JT-60SA プラズマ平衡磁場(EF)コイル用プロトタイプ型ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体[2]の接続サンプルを用いて、CIC 導体のシェイクハンド型ラップ接続部における磁場特性について発表する。

2. シェイクハンド型ラップ接続サンプル

486 本の NbTi 素線からなる CIC 導体の接続サンプルを、 Fig.1 に示す。Fig.2 に、接続部の断面図を示す。接続部では、 無酸素銅を用いた鞍型スペーサーに、Niメッキ及び SUS のジ ャケットとサブラップを取り除いて圧縮した 2 本の CIC 導体を ハンダ接続した。CIC 導体及び鞍型スペーサーは、SUS316L を用いたクランプによって固定した。CIC 導体の中心部に位 置するスパイラルセントラルチューブは、導体接続部において 取り除き、その代わりに、SUS 管を設置した。

3. 導体接続部における磁場測定

本実験では、液体ヘリウム中に浸漬冷却された接続サン プルヘ、励磁速度 10 A/s で、20 kA まで 5 kA ずつ階段状に 通電を行った。その際、CIC 導体接続部における y 方向(CIC 導体に対して垂直な方向)の磁場分布を測定するために、9 個のホール素子(H1~H9)を、2つの CIC 導体間の中央部に、 導体長手方向(z 方向)に沿って、20 mm ずつ等間隔に配置 した。Fig.3 に、磁場測定結果及びホール素子の配置図を示 す。電流の上流側に設置したホール素子 H1 の位置は z = 80 mm、 下流側に設置したホール素子 H9 の位置は z = -80 mm、 ホール素子 H5 の位置は z = 0 mm である。

磁場測定結果より、Fig.3 に示すように、ホール素子 H5 を 設置した接続部中心位置(z = 0 mm)を基準にして、接続部上 流側(H1~H4)と下流側(H6~H9)で、y 方向の磁場がほぼ対 称な関係になることが分かった。また、接続部中心位置にお いて、通電電流値に関係なく、y 方向の磁場が発生しないこと が分かった。以上の結果から、接続部中心位置(z = 0 mm)を 基準にして、接続部の上流側と下流側で、ほぼ均一に電流が 流れると考えられる。本測定結果に基づいて、線電流を用い た接続部での電流分布モデルを考案し、磁場計算を行った 結果は、当日発表する。

参考文献

- K. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 68 (2003) p.148
- K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.36



Fig.1 Joint sample of CIC conductors for JT-60SA EF coil.



Fig.2 Cross-section of the joint sample.



Fig.3 Measurement results of self-magnetic field at the joint region.

RE 系超伝導体における金属不定比性と超伝導特性

Cation Nonstoichiometry and Superconducting Properties of RE-Based Superconductors <u>下山淳一</u>、加來宏一、佐藤伸也、荻野拓、岸尾光二(東大院工);堀井滋(高知工大) <u>SHIMOYAMA Jun-ichi</u>, KAKU Hirokazu, Shin-ya Sato, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo); Shigeru Horii (Kochi Univ. of Technol.) E-mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp (J. Shimoyama)

【はじめに】 RE 系超伝導体には REBa₂Cu₃O_{7-δ}(RE123), RE₂Ba₄Cu₇O_{15-δ}(RE247), REBa₂Cu₄O₈(RE124)の 3 つの相が ある。RE123 は空気中を含む広い酸素分圧下、焼成温度で 相が生成し、かつ T_c が高いため、他 2 相と比べて研究例が多 く、また材料開発も活発に行われてきた。RE123 においては、 イオンが大きい軽中希土類の場合、それらが Ba サイトの一部 を置換する金属不定比性があり、低濃度の場合には磁場中 での臨界電流特性改善に寄与することが知られている。一方、 重希土類や Y の 123 相では RE の Ba サイトへの置換が起こ らないとされてきたが、最近我々はこれらの 123 相でも RE の Ba サイト置換を強く示唆する実験事実を得はじめている。

一方、RE247 や RE124 は相生成に高酸素分圧を必要とし、 生成温度範囲も狭いことから、合成がやや難しく、特に RE247 は 90 K 級の高い T_c が報告されていながら研究例が極めて少 ない。RE247 は RE123 と同じ CuO₁₋₀面を持ち、通常は 4~12 気圧の高酸素分圧下で合成されることから RE123 と同様に RE の Ba サイトへの置換が生じ超伝導特性が抑制されていた 可能性が高いが、これが実験的に示された例はない。

以上の背景のもと本研究では、Y123、Y247 について不定 比金属組成の有無および、その超伝導特性への影響を系統 的に調べた。

【実験】固相反応法により仕込金属組成が定比および意図 的に定比からずらした Y123、Y247 焼結体を作製した。焼成 はY123 で 0.54 MPa 以下、Y247 では 1.2 MPa 以下の酸素圧 力下で行い、ポストアニールによって試料の酸素量をほぼ最 適キャリアドープ状態になるように制御した。試料の構成相お よび格子定数を粉末 X 線回折(XRD)法により、超伝導特性に ついては SQUID 磁束計を用いた磁化測定によって評価し た。

【結果と考察】酸素気流中、905℃で焼成し、400℃、空気中 でアニール後急冷した仕込組成 Y_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y (x=0, 0.01, 0.02, 0.1)の焼結体試料について粉末 XRD 測定を行ったとこ ろ、格子定数の有意なx依存性は認められず、酸素気流中で はYのBaサイトへの置換がほとんど起こらないことが確認でき た。これらの試料を920°C、PO2 = 0.54 MPa で焼成し、同様に 空気中 400℃ でアニール、急冷を行った場合には、Fig. 1 に 示すように x の増加に伴い格子定数が変化することがわかり、 YはBaサイトの2~3%まで置換することが示唆された。実際、x = 0.1 の試料の XRD パターンには Y₂BaCuO₅ 相による回折ピ ークが存在したが、x = 0.01, 0.02の試料は Y123 単相であっ た。これらの試料の粉末の10e下における帯磁率測定から、x の増加に伴い T_{c(onset)}が若干低下すること、超伝導転移が著し くブロードになり、結晶内部の局所的なTcの変化幅が大きいこ とがわかった。また、250°C で酸素アニールを追加したところ、 x = 0の試料はキャリアのオーバードープによって $T_{c(onset)}$ がわ ずかに低下したのに対し、Y 過剰組成の試料のTc(onset)は上昇 した。これは中軽希土類 RE123 における挙動と同じである。

Fig. 2 には、x =0, 0.02 の焼結体試料について 250°C、酸素気流中でアニールした後に測定した磁化ヒステリシスの幅



Fig. 1 Lattice constants of $Y_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_y$ (*x*=0, 0.01, 0.02, 0.1) sintered at 920°C in $P_{O_2} = 0.54$ MPa, annealed at 400°C in air and quenched.



Fig. 2 Magnetic field dependences of ΔM for $Y_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_y$ (x=0, 0.02) polycrystalline bulks sintered at 920°C in $P_{O_2} = 0.54$ MPa and annealed at 250°C in flowing oxygen.

(ΔM)の磁場依存性を示した。なお、焼結体ではあるが Y123 の場合、粒間の結合が極めて弱いため、結晶粒の磁化特性 が現れていると見て良い。明らかに x = 0.02 の試料のほうが ΔM が小さく、磁場による減衰が大きいことがわかる。このこと は Y 過剰組成が臨界電流特性の劇的な劣化を招くことを意味 しており、非平衡状態で成膜する薄膜材料や Y 過剰組成とみ なせる溶融凝固バルクでは金属組成比に注意する必要があ ることを示唆する結果といえる。

講演では Y247 における Y の Ba サイト置換と超伝導特性の 変化、および Dy123 や Er123 における RE の Ba サイト置換に ついても報告する。
MOD 法 RE123 線材における強磁場下の n 値の挙動

n-values in high magnetic field for RE123 films prepared by MOD process

<u>淡路</u>智, 難波雅史, 渡辺和雄(東北大金研・強磁場センター), 三浦正志, 吉積正晃, 和泉輝郎, 塩原 融(超電導工研)

AWAJI Satoshi, NAMBA Masafumi, WATANABE Kazuo (HFLSM, IMR, Tohoku Univ.), MIURA Masashi, YOSHIZUMI Masateru,

IZUMI Tetsuo, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超伝導線材を,強磁場マグネットやその他の機器に利用するには、その臨界電流密度 J_c の他に、 J_c 近傍における電流—電圧特性の転移の鋭さの指標である n 値が重要となる.一般的に高温超伝導線材の n 値は、金属系超伝導材料と比べて低いとされてきたが、最近の技術開発によって J_c とともに n 値の向上も実現されつつある.しかし、高温超伝導材料の n 値は、線材の均一性などの品質だけでなく、本質的なピンニング特性にも関連しており、その点も考慮した、n 値制御の観点が必要である.本研究では TFA-MOD-REBa₂Cu₃O₇ (RE123, RE = rare earth)を中心として、n 値の挙動について詳細に評価したので、報告する.

2. 実験方法

試料は TFA-MOD 法によっ T CeO₂/IBAD-GZO/Hatelloy 上に作製した(Y_{0.77}Gd_{0.23})123 に ZrOを1wt%添加した膜である.Zr添加により、一般的な 成膜法で作製した場合には、ナノロッドが形成されるこ とが知られているが, MOD 法の場合には,結晶成長機構 の違いから、ナノ粒子となることが分かっている. この 試料に対して,通常の4端子法により,電気抵抗と臨界 電流の測定を,磁場と温度および磁場印加角度を変化さ せて測定した. 試料の温度はヘリウムガスフローによっ て調整した.磁場の印加角度は c 軸と平行方向をゼロ度 として定義した. 臨界電流は E=1µV/cm の基準で決定し, E=1-10µV/cm 付近の電流-電圧特性から, E Iⁿを仮定して n 値を求めた.



Fig. 1 Angular dependence of J_c for the Zr doped MOD-(Y,Gd)123 tape.

3. 結果と議論

Fig. 1 に 60K における Zr 添加 MOD-(Y,Gd)123 試料にお ける J_cの磁場印加角度依存性を示す. B_Lc 方向(*θ*=90°) に鋭いピークと B//c(θ=0°)方向にブロードなピークが現れ ている. 前回報告したように, B//c のピークの存在は, 何 らかの弱い相関ピンが MOD テープでも存在しているこ とを示唆している. Fig.2 に n 値の磁場印加角度依存性を 示す. θ=90°近傍では, n 値の角度依存性が, J_cと逆の相 関をもち、測定した磁場領域では、磁場に依存せずほぼ 同じ値を示した. 同様の振る舞いは、Civale らによって、 単結晶膜やコート線材ですでに報告されており、その起 源は, Intrinsic pinning の場合に形成される階段状磁束に起 因して、ピンニングポテンシャル Uoが小さくなり、磁場 に依存しなくなるためとされている[1]. また,類似の振 る舞いはBaZrO₃ナノロッド添加したEr123 膜でも報告さ れ, B_Lc 方向では, 低温領域で Intrinsic pinning が支配的 になると結論づけられている[2]. Jc 特性の優れた BLc 方向で,n値が小さくなることを意味しており,応用上深 刻な問題となる可能性を秘めているため、さらに詳細な 研究が必要と考えられる.

謝辞

本研究は,超電導応用基盤技術研究開発業務の一環と して,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

- L. Civale et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 15 (2005) 2808.
- [2] 淡路ら, 第68回応用物理学会予稿集 (2007)295.



Fig. 2 Angular dependence of *n*-value for the Zr doped MOD-(Y,Gd)123 tape.

MOCVD 法により作製された長尺 YBCO 線材の強磁場臨界電流密度特性

Critical current density property in high magnetic fields for the long length YBCO coated conductor prepared by MOCVD method

<u>石原亮輔</u>,難波雅史,淡路智,渡辺和雄(東北大);式町浩二,平野直樹,長屋重夫(中部電力) <u>ISHIHARA Ryousuke</u>, NAMBA Masafumi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo(Tohoku Univ.); SHIKIMACHI Kouji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo(Chubu electric power) Email: ryousuke@imr.touhoku.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y(YBCO)は高い磁場中臨界電流特性を有する超 伝導体であり、超伝導マグネットなどの強磁場下での応用が 期待されている[1].YBCO は異方性があるため磁場の印加方 向によって臨界電流特性が異なる。このため YBCO 線材にお ける強磁場臨界電流特性の研究は重要である.

本研究では MOCVD 法により開発された YBCO 長尺線材の 強磁場臨界電流特性を 4.2 K から 77.3 K の温度領域にわた って調べた。主に低温強磁場特性について報告する.

2. 実験方法

試料は MOCVD 法により CeO₂/IBAD-Z+IBAD-GZO/ Hastelloy 上に YBCO 薄膜を成膜し、その上に保護層としてAg を成膜した長尺線材である.この試料に対して直流4端子法を 用いて臨界電流密度(f_c)の温度、磁場、磁場の印加角度依存 性を測定した。試料温度はヘリウムガスフローによって調整し た.磁場の印加角度は c 軸と平行方向(B//c)をゼロ度として定 義した. f_c は電界基準 E=1 μ V/cm で決定した.

10 10 $J_{c}(A/cm^{2})$ 10 10 10^{3} 40 K 50 K 10^{2} B//c 60 K 70 K 10 $\int_{0}^{10} (A/cm^{2})^{10}$ 10 5 10 15 20

Fig.1 Magnetic field dependence of J_c in various temperatures

 $B(\mathbf{T})$

3. 実験結果

Fig.1 に 4.2 Kから 77.3 Kにおける B//cとB⊥cの J_c の磁場依存性を示す.温度低下に伴い,磁場による J_c の低下率が小さくなり, 20K, B⊥cでは, 17Tの磁場印加でも 1Tの値と比べて約 80%の J_c を保っている事が分かった.一方で, B//cでは, 4.2Kの低温でも, 17Tの J_c は 1Tと比べて約 24%まで減少する.

Fig.2 に, J_c の異方性として各磁場における B//c と B⊥c に 対する J_c の比を示す.高温・高磁場では,温度低下に伴い J_c の異方性は小さくなるが,さらに低温では極小値をとった後増 大することが分かった.特に,20K,17T において J_c の異方性 は約 7.7 になった.高温で見られる,温度減少にともなう異方 性の低下は, B//c のみが印加磁場が不可逆磁場に近づくた めに, J_c の磁場による急激な減少が起こるためである.一方, 低温では、両方向ともに不可逆磁場が十分高いため,本質的 な異方性が現れていると考えられる.

参考文献

[1] 淡路智,渡辺和雄,応用物理,Vol.77 (2008) 1303



Fig.2 Temperature dependence of J_c(B \perp c)/ J_c(B//c) in various magnetic fields

YBC0 C. C. の低温引張と中性子回折による内部歪変化のその場測定 Low Temperature Tensile Test and In-situ Measurements of Internal Strains in YBCO Coated Conductors by Means of Neutron Diffraction

<u>長村 光造</u>(応科研)、町屋 修太郎(大同大)、土屋 佳則(物材機構),鈴木 裕士(原子力機構) OSAMURA Kozo(RIAS), MACHIYA Shutaro(Daido Univ.) TSUCHIYA Yoshinori(NIMS), SUZUKI Hiroshi(JAEA) E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

JAEA の歪測定装置(RESA)に新たに設置した低温引張試験機を用いて、 5K~77Kの温度範囲でYBC0 coated conductors について引張試験を行うと 同時に中性子回折によりYBC0 超電導層、金属基板、ラミネート層の局所歪 を測定した。一方同一試料について引張荷重下で臨界電流測定を行った。 得られた結果を整理し、負荷歪に対する各成分中の局所歪がどのように変 化するかを明らかにした。特に超電導層中の局所歪は圧縮成分から引張成 分に変化し、臨界電流の歪依存性との関係にきわめて興味深い知見が得ら れた。

2. 試料及び実験方法

試料は前回(文献1)と同様 Cu を電着した YBCO coated conductor で、 Hastelloy 基板上にバッファー層を介して厚さ約 1µm の YBCO 層、さらに Ag 層が積層した構造をしており、ここでは幅 4mm(SCS4050)を用いた。液体窒素 温度で臨界電流の歪依存性の測定を行うとともに、JAEA JRR-3 の RESA に今 回新しく設置した中性子回折測定用低温引張試験機(文献2)を用いて、低温 において一軸引張荷重下における局所歪の測定を行った。



Fig. 1 Applied load dependence of (020) and (200) diffraction profiles measured at 77 K for Super Power YBCO tape.

3. 結果および考察

Fig.1は77Kで図中に示す一軸引張応力を与えて測定したYBCOの(020) および(200)回折面のプロファイルである。応力が増加するとピーク値は低角 側ヘシフトし、2つのピークの強度比が変化することが明らかとなった。この強 度比の変化は応力に対して可逆性があり、応力誘起に関連した興味ある現象 である。

Fig. 2 に種々の温度における(020)面間隔の歪依存性を示す。図に示す 歪範囲では面間隔は印加した歪に比例し、温度とともに面間隔は増加するこ とがわかる。同一試料について室温測定ではYBCO層に0.20%の圧縮歪が存 在することを明らかにしてきた。またYBCOの熱糖短係数を9.2 ppm/Kとする と77K での標準状態の(020), (200)面間隔の値を室温でのテープ材が無歪に あった時の測定値から推定することができる。 77K で YBCO テープ中には圧縮の残留歪が存在し、引張歪の増加とともに、 圧縮歪は小さくなり、force free strain ($A_{\rm fr}$)は 0.26%となり、理論的な 予測値(文献 3) の 0.26%に一致した。一方臨界電流の最大は A=0.035%に 存在し、従来の臨界電流最大は force free strain に一致するという考え 方は成立しないことが明らかとなった。



Fig. 2 Change of (020) lattice spacing of YBCO layer as a function of applied strain at various temperatures.



Fig. 3 Applied strain dependence of the residual strains exerted on YBCO layer determined from (020) and (200) lattice planes at 77 K.

謝辞:本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金(基盤B 19360289) により実施したものである。

文献

長村他; YBCO導体における超電導層中の局所歪(2A-a01)第79回
 2008年秋季低温工学・超電導学会講演概要集108

2) 土屋 他:中性子回折測定用低温引張試験機の開発(2C-a03) 第80回 2009 年春季低温工学・超電導学会講演概要集

 K.Osamura et al; "Internal Residual Strain and Critical Current Maximum of Surround Cu Stabilized YBCO Coated Conductor", SUST 22 (2009)065001(6pp)

クラッド基板上超電導薄膜の機械特性

Mechanical properties of coated conductors prepared on clad-type substrates

<u>新海 優樹</u>, 永石 竜起 小西 昌也 太田 肇 大松 一也(住友電工) <u>SHINGAI Yuki</u>, NAGAISHI Tatsuoki, KONISHI Masaya, OTA Hajime Ohmatsu Kazuya (SEI) E-mail: shingai-yuuki@sei.co.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_x(RE: rare earth elements)系超電導線材は電 カケーブル、SMES、コイル等、様々な機器への応用が期待さ れる素材である。我々は低損失・大電流を特徴とする超電導 ケーブルを開発・製造しており、現在はそのケーブルに用い るための REBa₂Cu₃O_x系超電導線材を開発・製造している。

低損失、大電流の交流ケーブルを開発するにはケーブル 設計段階で、その素材として用いる超電導線材の磁化特性、 臨界電流密度(Je)特性を把握しておく必要がある。また、線 材にはケーブル加工時にIc劣化を引き起こすことのない機械 特性を有していることが必要とされる。

今回我々は 2mm 幅の線材を作製し、その線材の機械特 性及び超電導特性を調査したので報告する。

2. 線材の構造と作製方法

今回我々が作製・評価した線材の構造を Fig.1 に示す。金 属基板として、クラッドタイプ基板と呼んでいる弱磁性の配向 金属基板を用い、その上に CeO₂/YSZ/CeO₂からなる中間層 をRFスパッタリング法により作製した。超電導層としてはGdB a₂Cu₃O_x層を用い Pulsed Laser Deposition 法により成膜した。 超電導層成膜後、銀を DC スパッタリング法により蒸着し、電 気炉を用い1気圧の純酸素中において熱処理を施すことによ り、超電導層への酸素導入を行った。その後、スリッターにより 細線化し、最後に電気めっき法により銅保護層を形成してい る。

3. 評価結果

Fig.2に我々の作製した線材の典型的な曲げ直径-Ic特性 (曲げ Ic)の評価結果を示す。曲げ Ic は所定の円環状の治具 の外周に超電導線材を沿わせた後、直線上に戻し 77K にて Ic を測定した。用いた線材のサイズは幅 2mm×長さ100mm× 厚み 0.15mm で線材の基板面側を治具に沿わせた。Fig.2の 横軸は円環の直径を、縦軸は曲げ無しの時の Ic で規格化し た Ic 値である。Fig.2より Ic の著しい低下は 20mm⁶以上にお いて確認されていない。

Fig.3 に作製した線材の引張張力-Ic 特性(引っ張り Ic)評価結果を示す。横軸は線材に印加した張力、縦軸は印加張力無し時の Ic で規格化した Ic 値である。線材への張力印加は室温において行った。Fig.3 より 9kgf 以下の印加張力では線材の Ic に劣化は見られなかった。



Fig.1 Architecture of our superconducting tapes

4. まとめ

ケーブル用に作製したREBa₂Cu₃O₄系超電導線材の曲げIc 特性と引っ張りIc特性について評価した。その結果、曲げIc特 性では20mm⁶以上おいて大きな劣化が認められず、また、引 っ張りIc特性においては9kgf以下の張力ではIcに劣化は見ら れなかった。これらの値はケーブル化に必要な特性を満足し ており、今回作製した2mm幅の超電導線材はケーブルに適 用可能な線材であることが確認できた。

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業務の 一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) の委託により実施したものである。



Fig.2 Ic dependence on bending diameter



Fig.3 Ic dependence on tension applied to the tape

市販 YBCO テープ線材の液体窒素温度における J_cの磁界角度依存性 Magnetic-field angle dependent critical current densities in commercial YBCO tapes at liquid nitrogen temperatures

<u>李 潤錫</u>((株)前川製作所);山崎 裕文,古瀬 充穂(産総研) <u>LEE Yoonseok</u> (Mayekawa MFG. Co., Ltd.); YAMASAKI Hirofumi, HURUSE Mituho (AIST) E-mail: lee-yoonseok@aist.go.jp

1. はじめに

Y系の第2世代超伝導テープは高い臨界電流密度(J_o と示しているが、その起源である磁束ピン止めの機構はまだ充分には理解されていない。今回、市販されている SuperPower 社製 MOCVD-YBCO テープ(YBCO 膜厚=1 μ m, 厚み=1.0mm, 幅=4.0mm)と American Superconductor 社製 MOD-YBCO テープ(YBCO 膜厚=1 μ m, 厚み=2.0mm, 幅=4.3mm)の J_c の磁界角度依存性を、液体窒素温度(70, 77.3K)において第3高調波誘導法[1]と輸送法で測定した。この測定結果とランダムピンのスケール解析の結果について報告する。

2. YBCO テープの J_cの磁界角度依存性

液体窒素中で温度を変化させながら誘導法と輸送法で 測定した市販 MOCVD-YBCO テープの J_c の磁界角度依存 性を図1に示す。77.3K から 70K まで温度を下げると、 J_c が2 倍以上増加した。臨界電流の高い低磁界の場合、輸送法の J_c の方が誘導法の J_c より少し大きいことが見出されたが、これ は粒界弱結合の存在に起因する[2]、と推測される。高磁界の 場合には両者の J_c はよく一致した。

図2に77.3Kで誘導法で測定したMOCVD-とMOD-YBCO



Fig.1 Comparison of magnetic–field angle dependences of J_c in an MOCVD–YBCO tape measured with a transport and an inductive method at 77.3K (a) and 70K (b).



Fig. 2 Comparison of magnetic-field angle dependences of J_c in MOD-YBCO and MOCVD-YBCO tapes measured with an inductive method.

テープの J_c の磁界角度依存性を比較する。磁界のない場合 は MOCVD-と MOD-YBCO テープの J_c はそれぞれ 1.83MA/cm²と 1.67MA/cm²で、MOCVD-YBCO テープの J_c の方が大きかったが、磁界中では逆転した。しかし、テープの 断面積あたりの工学的臨界電流密度 J_c は MOCVD-YBCO テープの方が大きい。そして、 $J_c(\theta)$ の異方性($J_c(H//ab)$ と $J_c(H//c)$ の比)は MOD-YBCO テープの方が小さかった。一方、 いずれのテープも H //ab の辺に富士山型のピークが形成さ れたが、H //c の付近にはピークがなかった。このような $J_c(\theta)$ は、YBCOのコヒーレンス長 ξ (=3.4nm, 77.3K)より小さい半径 の微細なランダムピン(相関のないピン)が主に寄与している ことを示唆する[3]。

3. 小さなランダムピンのスケール解析

もしランダムピンが系に存在する唯一のピンであれば、 $J_c(H, \theta)$ は εH ($\varepsilon(\theta) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$)のみの関数になり、 $\varepsilon H (c \pi) = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 5 \sim 7$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\gamma = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ $\varepsilon = (\cos^2 \theta + \cos^2 \theta / \gamma^2)^{1/2}$,



Fig. 3 Scaling analyses of small random pinning for J_c (*H*, θ) in MOD-YBCO (a) and MOCVD-YBCO (b) tapes.

- H. Yamasaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) p.3487
- D. T. Verebelyi, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 76 (2000) p.1755
- H. Yamasaki, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) p.125011
- 4. L. Civale, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 84 (2004) p.2121
- 5. http://www.amsc.com/products/htswire/

ホットウォール加熱型 PLD 装置による高特性 RE123 膜の高速成膜 High-speed deposition of high-quality RE123 films by hot-wall type PLD system

<u>柿本</u>一臣, 五十嵐 光則, 花田 康, 林田 知朗, 森田 克洋, 田下 千晴, 羽生 智, 須藤 泰範, 朽網 寛, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)

KAKIMOTO Kazuomi, IGARASHI Mitunori, HANADA Yasushi, HAYASHIDA Tomoaki, MORITA Katuhiro, TASHITA Chiharu, HANYU Satoru, SUTOH Yasunori, KUTAMI Hiroshi, IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi

(Fujikura)

E-mail: kkakimoto@fujikura.co.jp

1. はじめに

我々は、PLD 法による高特性 RE123 膜形成のために 2 タイプの加熱方式を検討している。

従来の接触加熱型 PLD 装置においては、2μm 以下の薄 膜における Jc 特性及び収率の改善により、Ic^{-300A}のGd123 膜を生産速度 40m/hの高速で形成できるまでに至っている。

ー方、ホットウォール加熱型 PLD 装置においては、6μm位 までの厚膜化に成功しており、Ic^{*}1000A 級の Gd123 膜を生 産速度 3^{*}4m/h で形成できている(図1参照)。

今回、ホットウォール加熱型 PLD 装置において、薄膜の Jc 特性改善により前回よりも高速でIc[~]1000AのGd123 膜を形成 することを検討した。

2. 実験方法

線材作製のベースとなる無配向金属基板は、耐熱性の 0.1mmt×10mmw ハステロイテープを用いた。中間層として、 第一中間層 IBAD-GZO($\Delta \Phi^{-12-13^{\circ}}$)と第二中間層 CeO₂ ($\Delta \Phi^{-4-5^{\circ}}$)を形成した。

Gd123 層形成は、ホットウォール加熱型 PLD 装置で行った。 一定線速で繰返し成膜することにより厚膜化した。その際、成 膜雰囲気は 100%O。数 100mTorr であった。

Gd123 膜に関して、ICP 分析及び SEM 観察を行った。超電 導特性評価としては、通電法による Tc 測定及び四端子法に よる Ic 測定(77K, 0T)を行った。

3. 実験結果と検討

図1に各加熱方式で成膜した Gd123 膜における Ic の膜厚 依存性を示す。さらに図1中のサンプル①、②のTc 及び組成 比を調査した結果を表1に示す。図1中のホットウォール加熱 方式によりターゲット-基板間距離(T-S):75mm で成膜したサ ンプル①と接触加熱方式により T-S:90mm で作製したサンプ ル②において、表1より Jc 値の低いサンプル①は、サンプル ②に比べTc が低い。また、組成比では、サンプル①の方がサ ンプル②より Ba が少なく、123 組成からさらにズレテいる。以 上の結果から、T-S 距離が異なることが発端となり、形成され る膜組成が両者で異なった。これにより超電導層のTc 値が変 わり、Jc 値の差として現れたものと思われる。

そこで、今回ホットウォール加熱型において T-S 距離: 95mm で条件の最適化を行った結果を図1中にサンプル③と して1点のみプロットしている。明らかに T-S 距離:75mm での 場合に比べ T-S 距離:95mm の場合は、Jc 特性の改善がなさ れており、約1µm での Gd123 膜において接触加熱型とほぼ 同等の Jc 特性が得られている。この Jc 特性改善により、 Ic^{300A}のGd123 膜生産速度が20m/hから30m/hに改善さ れた。

図1中のサンプル①、③の膜表面のSEM像を図2に示す。 Jc 値の高いサンプル③の方が、表面上に点在している析出 物の数が少ないことがわかる。もしかすると、123 組成からズレ が大きい場合に、析出物の数が増えるのかもしれない。

今後の予定では、今回得られた成膜条件にて厚膜化を検討 する。

4. 謝辞

本研究は、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。

Tc 測定をお願いした超電導工学研究所の筑本博士に感謝 致します。



Fig. 1 Dependence of Ic on thickness of Gd123 formed by 2 types heating.

Table 1 SC properties for 2 types heating

					-
sample	thick.	Ic	Jc	Tc	composition
No.	(μm)	(A)	(MA/cm²)	(K)	Gd:Ba:Cu
1	0.9	198	2.2	91.8	1:1.64:2.77
2	1.0	366	3.6	93.3	1:1.74:2.77
1	900 <u>Sum</u>	21 30	3 SEI 154V X	1. eae Ste	21.99.561

Fig. 2 SEM images for surface of each sample

In-plume PLD 法による GdBCO 長尺線材の高速成膜 High-rate deposition of long length GdBCO coated conductor using in-plume PLD method

<u>筑本 知子</u>, セルゲイ リー, 衣斐 顕, 田辺 圭一(超電導工学研究所) <u>CHIKUMOTO Noriko</u>, LEE Sergey, IBI Akira, TANABE Keiichi (ISTEC-SRL)

E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

パルスレーザー蒸着法(PLD 法)によるイットリウム系テー プ線材製造において、300 A/cm-w を超える高 Ic 値が長尺 で得られるようになってきているのは周知の通りであるが、将 来的な商業化を視野に入れたとき、高特性を維持しつつ製造 速度の向上を行う必要がある。

今まで、我々のグループでは、ターゲット-基板間隔(TS間隔)を短くすれば、原料供給量及び収率が増加するという単純な発想のもとに、レーザープルームの中に基板を保持して蒸着を行うin-plume PLD法を開発し、小型の装置を用いた短尺基板の蒸着において成膜速度が従来の2~3倍に向上することを確認し、報告してきた[1-2]。今回、この成果を発展させ、マルチプルーム・マルチターン(MPMT)法による長尺成膜における高速化を検討したので、その結果について報告する。

2. 実験方法

成膜には CeO₂/LaMnO₃/IBAD-MgO / ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板)又は CeO₂/ IBAD-Gd₂Zr₂O₇/ハステロイ (IBAD-GZO) 基板を用いた。GdBCO層はXeClエキシマレー ザを用いて、TS 間隔 6cm で MPMT (1x4 又は 3x6 プルーム、 5ターン) 成膜を行い、酸素分圧、レーザ発振エネルギー、周 波数等各種条件の検討を行った。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 Gd_{1.1}Ba_{1.9}Cu₃O_y であった。作製したテープは Ag を 10 μ m 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 μ V/cm の電圧基準で I_c 値を決定した。

3. 実験結果

Fig.1に3x6 プルーム、280Hz、20m/h(40m/h×2回) で成膜を行ったときの膜厚と酸素分圧、レーザ発振エネ ルギーの関係をまとめる。膜厚は ICP-AES 法の結果から 計算により見積もった。成膜速度を上げるためには、酸 素分圧を高くする事,及びレーザ-発振エネルギーを大き くすることが効果的であることが分かる。その他レーザ-スキャン法等の条件最適化の結果,今までに短尺テープ において、15m/h(30m/h×2回)の成膜で自己磁場中 I_c =446 A/cm-w及び3T(//c)で29.1 A/cm-wのものが得ら れている(Fig.2)。

Fig. 3 に IBAD-MgO 基板を用いて 20m/h で 9 m の成膜を 行った結果を示すが、 I_c ~400A/cm-w と長手方向に安定し た特性が得られることが確認できた。なお、IBAD-GZO 基 板 ($\Delta \phi$ =5-6°)を用いた 50m の成膜(成膜速度 20m/h) においても、 I_c ~300A/cm-w の長手方向にほぼ安定した特 性が得られており、in-plume PLD 法が長尺プロセスにも有 効であることが確認できた。

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」の一環として実施された。なお、本研究で用いた IBAD-GZO 基板及び IBAD-MgO 基板は SRL の栗木、宮田、吉積、福島、山

田の各氏から提供いただきました。ここに深く感謝致します。



Fig.1 Effect of oxygen partial pressure and laser energy on the GdBCO thickness. The thickness was estimated from ICP-AES analysis.



Fig.2 I_c -B characteristic for $B_a//c$ of GdBCO tape deposited at 15 m/h on IBAD-MgO substrate ($\Delta \phi$ =4.5-5°)



Fig.3 Longitudinal I_c distribution of about 9 m length GdBCO coated conductor fabricated on IBAD-MgO substrate $(\Delta \phi = 4.5-5^{\circ})$ at the rate of 20m/h.

- N. Chikumoto *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p196
- [2] N. Chikumoto *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p14.

Y系超電導線材のマルチフィラメント化技術の進展 Progress in multifilamentary process for coated conductors

<u>町 敬人</u>,田辺圭一(超電導工学研究所) <u>Takato MACHI</u>, Keiichi TANABE (SRL-ISTEC) E-mail: machi@istec.or.jp

1. はじめに

coated conductors を交流電力機器に応用するために は、マルチフィラメント化により交流損失を低減しなけ ればならない。前回報告したように、我々は従来のレー ザースクライビング法を改良して、Shallow laser scribing (浅いレーザー照射)および 2 段階エッチング により、フィラメント間抵抗を確保しつつ、溝幅 100-200 μ m、エッチング時間約 1/10、加工による I_c の低下率 は 10-25%という技術を開発した。

今回は、さらに加工時間を短縮するためにマスキング 方法の改良を行った結果および 30m 長の加工を試みた結 果を報告する。

2. 実験方法

加工実験に用いた超電導線材は 5mm 幅で, ハステロイ基 板に GZO(IBAD)-CeO₂(PLD)のバッファ層上に形成された PLD 線材であり, 加工前の臨界電流値は 110-130A (77K self field)であった。

スクライビングには、reel to reel(RTR)での加工が可能なレ ーザー(波長 355nm の Q スイッチ型 Nd:YAG 出力5W:片岡 製作 KLY-QV5α)加工機を用いた。これまでスクライブ後の エッチングのマスク材としては、12.5µm 厚(基材厚み)のカプト ンテープを用いてきたが、カプトンは耐熱性に優れているため に、1回のレーザー照射では充分に切断できない場合がある ので、今回はポリエステルテープをマスク材として選択した。 ポリエステルテープの基材厚みはカプトンと同じ 12.5µm で、 粘着材まで含めたテープ厚さは 20µm であった。また試料の 幅方向のエッジはこれまでレーザー照射してサイドエッチして いたが、ポリエステルテープ幅を 5mm 幅として、サイドエッチ の工程を省いた。5mm 幅の線材に同じ幅のテープをむらなく 貼るために、テープ貼り機

は別途開発した。

長尺線材がエッチング できるように RTR の化学エ ッチング装置(図1)を作製 し,これを用いて3分割に レーザー照射し 30m 長の 線材の2段階エッチングを 行った。Ag 層は過酸化水 素とアンモニアの混合液で, 超電導層は硝酸系エッチ ング液でそれぞれエッチン グした。



RTR etching equipment.

実験結果と考察

テープ幅を線材幅と同一にすることで、サイドエッチをしな



Fig.2 I-V curves and I_c results for each filament (3m).

くても, Ag 層とハステロイ基板との絶縁を確保できることが分かった。従来は線幅よりも広いマスクテープを貼り、線幅にカットすることでマスクを行っていたためマスクテープをカットする際に粘着材が線材のサイドを覆ってしまい、サイドに回り込んだ Ag がエッチングされなかったものと考えられる。

次に, RTR エッチングの試みの結果を示す(図2)。 図に示したのは,長さ3mの線材をRTR エッチング装置に より連続エッチングした結果である。ただし,ここで用 いたのは従来のカプトンテープマスクであるのでレーザ 一照射は1溝あたり2回であった。エッチング速度はAg 層 23m/h, RE123 層 46m/h とした。各フィラメントのETE- I_c は, I_c (#1)=27.2 A, I_c (#2)=30.8 A, I_c (#3)=34.2A と なり,加工前のIcは128A であったので,最小 I_c 3倍値 (81.6 A)の低下率は36%。総 I_c は92.2 A で低下率は28% であり,フィラメント間抵抗70kΩ/3m (=21MΩ/cm)確保 され RTR エッチングでマルチフィラメント化が可能であ ることが示された。溝幅は150µm であった。

実際に長尺線材に適用できるかどうかを確認するため



Fig.3 I-V curves and I_c results for each filament(30m).

に、5mm 幅 30m 長の線材について、今回の改良および RTR エッチングを試みた(図 3)。マスクテープはポリエス テルであるので、レーザー照射は1溝あたり1回のみで あり、エッチング速度は Ag 層 40m/h、RE123 層 40m/h と した。図に示した

ように、各フィラ メントの ETE- I_c は、 I_c (#1)=35.6A, I_c (#2)=35.3A, I_c (#3)=29.8A とな り、加工前の I_c は

Table 1 Improvement of processing speed.				
改良箇所	効果	総加工速度 の変化		
マスクテープ幅を 5mmへ	サイドエッチ 不要	2倍		

2回から1回へ

-照射を

2倍

118A であったので,最小 Ic 3 倍値(89.4 A)の低下率は24%。 総 I_c は 100.7 A で低下率は15%であり,フィラメント間 抵抗 100k Ω /30m が確保され RTR エッチングでマルチフィ ラメント化が可能であることが示された。今回の溝幅は 200µm であった。ポリエステルテープの粘着材はゴム系で あるため,除去が困難なので,今後は粘着材の検討が必 要である。

マスクテープの材質 をポルエステルへ

今回の結果をまとめると、表1にようにマスクテープ の改良によって、加工速度を4倍に向上できた。

4.謝辞

coated conductorsの試料を提供していただいたフジクラの 飯島氏(PLD線材)に感謝いたします。本研究は、新エネルギ 一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。

Nd:YAG パルスレーザー蒸着法を用いて作製した YBCO 薄膜の超伝導特性 Superconducting properties of YBCO films prepared by 4th harmonic Nd:YAG pulsed laser deposition method

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);加藤 丈晴(JFCC)
 <u>ICHINO Yusuke</u>, YOSHIDA Yutaka, YOSHIMURA Takuya, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);
 YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL); KATOH Takeharu (JFCC)
 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における超伝導層の作製方法として、パ ルスレーザー蒸着(PLD)法、有機金属化学気相蒸着法や有 機金属堆積法などが研究・開発されている。特にエキシマレ ーザーを用いた PLD 法は比較的簡単に高い超伝導特性が 得られるため、多くの研究がされている。

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。この Nd:YAG レーザーを用いた Y123 薄膜[1,2] や Bi 系超伝導薄膜[3]の作製に関する報告もされている。

以上から、本研究では 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 PLD 法を用いて Y123 薄膜 を成膜し、基板材料や基板温度などの成膜条件に対する薄 膜成長や超伝導特性に関して検討を行った。

2. 実験方法

四倍波 Nd:YAG レーザー(波長 266 nm)を用いて、MgO (100)および SrTiO₃ (100)上に Y123 薄膜を作製した。基板温 度(*T_s*) 700~900℃、酸素圧力(*p*O₂) 0.1~0.5 Torr、基板-ターゲ ット間距離(*d_{T-S}*) 35~55 mm、レーザーエネルギー密度(*D_L*) 1~3 J/cm²、繰り返し周波数(*f_L*) 1~10 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、表面形態は原 子間力顕微鏡(AFM)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

薄膜の成長や超伝導特性に大きな影響を及ぼす各種成 膜パラメータを変化させて Y123 薄膜を MgO 基板上に作製し、 配向性や超伝導特性を評価した結果、超伝導特性に関して は $d_{T,s}$ が最も大きな影響を与えることが分かった。Fig. 1 に $d_{T,s}$ に対する超伝導転移温度(T_c)と77 K、自己磁場における臨界 電流密度(J_c)を示す。なお、これらの薄膜は T_s =750°C、 pO_2 =0.3 Torr、 D_L =1.8 J/cm²、 f_L =1 Hz で作製しており、Y123 (001)[100] // MgO (001)[100]のエピタキシャル方位関係を確 認した。図より、 T_c も J_c も $d_{T,s}$ に対して上に凸の傾向にあり、 $d_{T,s}$ =45 mm 付近で T_c =88.7 K、 J_c =1.1 MA/cm²@77 K の極大 値を取った。次に STO 基板上に T_s =770°C、 $d_{T,s}$ =40 mm で Y123 薄膜を成膜し、Y123 (001)[100] // STO (001)[100]を確 認した。また、 T_c =89.7 K で、 J_c =2.1 MA/cm²@77 K を示した。 STO 基板は MgO 基板よりも Y123 との格子整合が良いため、 より良好な超伝導特性を示す薄膜が成長したと考えられる。

これらの薄膜における J_c の磁場依存性を Fig. 2 に示す。 比較のために、エキシマレーザーを用いた PLD 法で作製した MgO 基板上 Y123 薄膜(T_c =87.9 K、 J_c =1.8 MA/cm²)のデータ もプロットしている。図より、MgO 基板上では Nd:YAG-PLD 法 の方が低い J_c を示した。これは、自己磁場 J_c が低いことに関 係していると考えられる。一方、STO 基板上の Nd:YAG-PLD 法 Y123 薄膜は、1 T 以下の領域では J_c が急激に減少するが、 2 T 程度で J_c ピークを持っているように見える。この原因は不 明であるが、AFM 像から、Nd:YAG-PLD 法 Y123 薄膜は近い 条件で作製したエキシマ-PLD 法 Y123 薄膜よりも結晶粒が小 さいことを確認しており、この微細な結晶粒の粒界がピンニン グ点として働いている可能性も考えられる。

これまで、Nd:YAG-PLD 法で作製した Y123 薄膜が $J_c > 1$ MA/cm²を示した報告例はほとんどないが、本研究結果から、 Nd:YAGレーザーを用いた PLD 法でもコーテッドコンダクター に向けた Y123 薄膜の作製は十分可能であることが示された。 今後は、金属基板上への Y123 薄膜の成長を行う予定であ る。



Fig. 1 Distance between target and substrate vs. Superconducting properties of Y123 films fabricated on MgO substrates.



Fig. 2 J_c of Y123 films as a function of magnetic field applied perpendicular to the film surface.

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。

- 1. T. Kusumori, et al.: Physica C, Vol. 321 (1999) p.247
- 2. T. Kusumori, et al.: Physica C, Vol. 351 (2001) p.227
- 3. S. Becler, et al.: Physica C, Vol. 167 (1990) p.509

人間と機械の新しい関係 - ワセダのロボットたち -

New relationship between human and machine -Robots in Waseda University-

橋本 周司(早稲田大学) HASHIMOTO Shuji (Waseda University) E-mail: shuji@waseda.jp

1. はじめに

第2次産業に使用されてきたロボットを第3次産業に利用 するという動きが活発になってきた。ロボットは「機械にコン ピュータ(頭脳)が付いた」ものであるが、「コンピュータ が身体を持った」ものということもできる。身体を持ったコン ピュータの先は、心を持つ機械の実現、新しい生命を創る という身の程を超えた望みにつながっている。一方、エレク トロニクスを基盤とした情報技術と機械技術の結合は、誰で も使える気の利くロボットの実現という以上に、我々の生活環 境を大きく変えることになると思われる。ここでは、人間と機 械の新しい関係についての展望を述べ、早稲田大学のロボッ トたちを紹介する。

2. 工場から生活空間へ

最近の非産業用ロボットの用途はどのようなところにあるの であろうか。従来のロボットは、作業機械として人間の労働 を代行するものであった。次世代ロボットの第1の目的であ る人間との共同作業はこの延長上にあるが、工場での作業 ロボットに比べて、人間との相互作用がはるかに密に行われ る。定型的なコマンドに従って作業するのではなく、相手の 人間に応じた柔軟な行動の変更が必要なためである。ロボッ トにとって人間は、極めて情緒的で再現性のない非定常な 環境である。したがって、ロボットは、環境を観察して状況 を理解する情報機械としての人間を模倣したものにならざる を得ないのである。

次世代ロボットの第2の用途として、情報端末としてのロボットの利用が考えられる。現在のコンピュータ端末は、グラフィックスとポインティングデバイスによるGUIが主流となっているが、ネットワークにロボットを接続して、画像、音声、表情、身振り、触覚など人間のあらゆる知覚チャンネルを使って、情報を引き出したり計算機を使ったりするのである。そこでは、ロボットの手を握ること、嬉しそうに話すこと、画像を見せること、などが計算機システムへの入力であり、ロボットの仕草、ロボットの表情、ロボットが我々の肩をたたくこと、などが計算機の出力である。すでにホームネットワークのコンソールとしての試作も行われているが、人間と対話する能力さえあれば誰でもネットワーク資源が利用できる、ということが最終目標となる(Fig.1)。



Fig. 1 Robot as an interface

また、センサとアクチュエータの集合体として、ロボットの 第3の用途が考えられる。ロボットは多くのセンサを装備した 動く情報収集システムであるから、人間型でなくとも環境を自 律的に動き回ることにより情報収集を能動的に行なうことがで きる。災害時や深海、原子力施設など極限環境下でのロボッ トの利用は大いに期待されており、色々な試みがあるが、高 機能なダミー人形として、介護・救命の医療訓練、自動車 事故の人身被害実験など人間のシミュレータとして多くの用 途がある。現在のロボットはかなり整備された環境でなけれ ば歩行もままならないが、そのようなロボットが活動できる空 間ならば、身体に障害のある人間にも活動しやすいところで ある。実際にロボットのデモをするときに、会場がバリアフリー であるとロボットも動きやすく都合が良かった経験がある。

さらに、新しいメディアとしてロボットを考えることができる。 オーディオ・ビジュアルのマルチメディアでは伝え切れない 情報のやり取りが、物理的な身体を持つロボットには可能で ある。すでに商品化されている「癒し機械」としてのロボット も新しいメディアということができよう。現在、開発されている ペット型ロボットの多くは実際の作業を行なうには不充分であ るが、ユーザとのインタラクションによって感性的な満足感を 与えるにはある程度の有効性がある。また、現在のコンピュー タゲームに比べて身体を持ったゲームメディアとしてのロボット の可能性は非常に大きい。

3. ロボットの3つの形態

産業用ロボットではプレイバックあるいはプリプログラム方式 が主流を占めていたが、ロボットあるいはロボット技術の将来 の使い方を考えると3つの方向性がある。

第1は遠隔操縦型である。現在の多くのロボットは、ほと んどが遠隔操縦型であって原子炉の中などでの極限作業や 外科手術などでは非常に役に立つし、これを使ってゲーム をすることもあるかも知れない。遠隔操縦型の重要点は最終 的な判断が人間によって行われるということである。誰でも操 縦操作ができるようにするというインタフェースの問題を除け ば、基本的には自動車の操縦と同じであるから、もっとも実 現しやすいものである。最近の医療用ロボットの多くはこの タイプであり、手の微細な振えを抑制したり正確な執刀軌道 をガイドしたり、生身の人間では不可能な作業を実行にする 道具となっている。また、このタイプでは、万が一の事故の 際にも責任の所在がはっきりしており法律的な問題も少ない。 ただし、微妙な作業の場合、作業域の情報のフィードバック が不可欠であるのに対して、視覚、触覚など五感のすべて の情報を正確に伝えることは困難であるし、遠隔操縦では伝 送路遅延が問題となるので、実際にはある程度の自律性が 要求されることになる。

第2は、ロボットが自分で行動を決定する自律型の実現で ある。ロボット技術者の夢はやはり鉄腕アトムであろうが、人 間あるいは気の利いたペット並の知能と行動制御が可能にな るにはしばらく時間が必要であると思われる。このタイプのロ ボット研究は、自我とは何か、心とは何か、という哲学的な 問題にある種の解答を与える作業が不可欠であり、もっとも 挑戦的で困難な課題ということができる。そういう意味では、 故障などがあっても大きな事故につながらない小型のペット ロボットが自律型として出てきているのは、もっともなことであ る。当分はペット、エンターテイメントとしての利用が主流と なるであろうが、自律型ロボットについては、技術的に何が できて、何ができないかということを見据えながら、事故責任、 安全基準などの法的問題を超えて社会倫理的なより深い議 論が必要となる。

第3は、環境のロボット化である。ロボット技術が一般の個 人の生活環境を生成するものであり、つまり、センサやアク チュエータが装備された家という居心地のよいロボットの体内 で生活するのである。このような住空間の整備は元来は建築 家の仕事であるが、人間共存ロボットあるいは自動車のITS などと共通する技術的基盤にたつところも多い。コストの問題 はあるが、住宅の場合はシステムが占めるスペースや重量 の許容量に余裕がありエネルギ源についても柔軟性がある ので、ロボットや車に比べて同じ機能ならば早期に実現でき ると思われる。現在は情報技術が社会インフラの中心である が、ロボットのメカトロ技術を都市設計に適用すれば、高齢 者も含めて誰でもが安全で快適な社会活動が営めるロボット 化環境インフラの構築が可能である。また、自律型ロボット に比べて実現上の法的な問題も少ない。

4. これからのロボット開発

Fig.2 は、以上のような背景の中で行われてきた早稲田大 学のロボット研究の流れを、開発したロボットとともに示したも のである [1]。早稲田のロボット研究は故加藤一郎先生の提 唱された「マイ・ロボット」に始まり、最近の人間共存ロボッ トまでの流れの中で多くの人材を輩出し、少なからぬ貢献を してきたと自負している。しかしながら、基盤産業分野の創 出あるいはロボット学という点では、課題も多い。

ロボットは、計算機、情報処理、制御、機械、材料など 多くの工学の総合技術である。実装技術はシステムの形態 とその機能の関係を総合的にデザインするものである。-般人が利用する機械としてロボットに近いものは自動車であ る。最近の電子化された自動車の実装技術に学ぶことは多 いが、ロボットは自動車よりも人間の生活空間に深く入り込む 可能性が強いばかりでなく、必要に応じて自律的に変形す るという自動車にはない機構上の特徴がある。新しいロボット 産業が成立したとはいえないが、その可能性は大きい。ロボッ トの産業的な拡がりは、計算機産業をはるかに凌ぐものであ り、計算機産業+自動車産業+ ということができる。これ を本当に立ち上げるには、2つの課題がある。第1はロバ ストネスの追求である。ロボットは機械部品が多いので、壊 れやすい機械的に消耗することが避けられないが、自動車 を見るとロボットも同じように日常使用に耐えるものが作れる はずである。現在のように10分程度のデモを見せて、拍手

をもらって終わりというロボットではダメなのである。24時間活動を続けて使用することを前提に設計を行う必要がある。

第2は、安全性とエラーリカバリの向上である。対人安全 性に関しては基準作りが進行しているが、人間への危険排 除ばかりでなくロボット自身が機能を停止しないで活動でき るための安全性にも注意を払うべきである。人間への安全を 確保するために、現在の多くのロボットは自分の身を守るこ とに注意が払われていない。また、ロボットは不確定な要素 のある環境で作業を行うため、そのタスクを100%の確実性 をもって実行することは期待できない。したがって、間違っ たときの対処が重要であり、能力の半分はこのエラーリカバリ に割かれるべきではないかと考えている。ロボットデモを見て いるとエラーの度にリセットスタートをしたり、観客がロボットに 触れるのを嫌う場合が多い。以上の2点は本当に使えるロ ボットを作るための最重要課題である。丈夫で安全でたまに 仕事をやり損ねても自分で何とか後始末ができるロボットなら ば、大したことはできなくとも使ってみる気がするというもので ある。

また、学問の場である大学からみると、ロボット学の確立も 急務である。ロボットの製作には、種々の科学技術のインテ グレーションが不可欠であることは言うまでない。しかしなが ら、ITにおける論理代数、オートマトン理論、情報理論など の基盤学問に対応するロボット学の基礎が確立されていると は言い難い。人間と機械の新しい関係を構築して、次代の 社会・文化の礎となるためには、まだまだやるべきことが多 いのである。

5. あとがき

次世代ロボットについて、思うところを述べた。昨年、早 稲田大学のロボットグループは、グローバル COE に採択さ れた。そこでは、「グローバルロボットアカデミア」として、最 先端のロボット工学者・技術者の養成をする中で、新しい課 題への挑戦を始めている [2]。

参考文献

http://www.humanoid.waseda.ac.jp/index-j.html
 http://www.rt-gcoe.waseda.ac.jp/japanese/index.html



(Hashimoto) iSHA(Hashimoto)WABIAN II(Takanishi) Carrier robot(Takanishi) Fig. 2 Robots in Waseda University

120

ITER・TF コイル巻線の詳細製作設計と実規模試作

Detailed manufacturing design and large-scale trial manufactures of ITER TF coil winding pack

小泉 徳潔, 中嶋 秀夫, 松井 邦浩, 高野 克敏, 辺見 努, 大森 順次, 清水 辰也, 奥野 清(原子力機構) KOIZUMI Norikiyo, NAKAJIMA Hideo, MATSUI Kunihiro, TAKANO Katsutoshi, HEMMI Tsutomu, OOMORI Junji, SHIMIZU Tatsuya, OKUNO Kiyoshi (JAEA) F=mail: koizumi norikiyo@inea.gn in

E-mail: koizumi.norikiyo@jaea.gp.jp

1. はじめに

原子力機構(JAEA)は,ITER における日本の国内機関とし て,2008年11月19日に9個のITERトロイダル磁場(TF)コイ ル(Fig.1, Table 1)の1)巻線部及びコイル容器と巻線部の一 体化,及び2)コイル容器に関する2つの調達取り決めに調印 し,2009年3月からこのための作業をメーカー(東芝)と協力し て進めている。なお,スペア1台を含めた残りの10台のTFコ イル巻線及び一体化の調達は,欧州国内機関(EUDA)が担当 し,2008年6月に調達取り決めに調印している。また,これらの コイルの容器の調達については,EUDAの予算的措置の基に, 日本が調達することとなっており,今後,ITER機構(IO),JAEA 及び EUDA と協議の上,調達取り決めに調印する予定であ る。

2. TFコイル巻線部調達計画

TF コイル巻線部の調達取り決めでは,TF コイルに関する 技術的課題[1-3]を工場レベルで解決し,さらに,コスト低減を 図った上で9台のTFコイルの調達を,以下に記す3段階に 分けて段階的に実施する計画である。

- 1) 第一段階:技術的課題の解決とコスト低減化検討
- 2) 第二段階:治具の製作及び第一号コイルの製作
- 3) 第三段階:残りの8台のコイル製作

本講演では、第一段階に相当するTFコイルの詳細製作設計と実規模試作について報告する。

3. 詳細製作設計

TF コイル巻線調達の第一段階では、始めに、巻線部及び 一体化の製作コストの低減化を考慮した製作計画及び材料 調達計画の立案と製作冶具の設計を実施し、これらを一次製 造計画としてまとめる。

本検討結果を基に,次節に示す検証試験を実施した上で, 最終製造計画として,巻線部及び一体化の製作計画,材料調 達計画及び品質保証計画と製作冶具の設計の最終化,及び 製作図面の作成を行う。

4. 検証試験

第一段階では,製作技術の検証として,小規模試作及び実 規模試作を実施する計画である。以下に,その概要を記す。

4.1 小規模試作

小規模試作では,TFコイルの部材の製作試験及び小規模 なモデルによって製作技術の検証を行う。これらの試験の一 部はJAEAとEUDAで分担して実施し,その成果を共有するこ とで合理化を図っている。以下に,試験内容の概略を記す。

- ラジアル・プレートの製作試験:ラジアル・プレート(RP)のセグメントの製作試験及びセグメント間の溶接試験を実施し,RPの製作技術を確立する。加えて,RPにレーサー溶接して,導体を RP 溝中に固定するためのカハー・プレート(CP)の製作試験 も実施する。
- 2) CP 溶接試験: CPを RP 部分モデルにレーザー溶接し、溶接 変形が所定の公差内となることを検証する。
- 3) 巻線試験:高精度自動D型巻線技術を開発する。

- 熱処理試験:TF コイルで使用する Nb₃Sn CICC は、その 熱処理により導体長が変化する。本変化量を評価し、実 機巻線形状を決定する。
- 5) トランスファー試験:熱処理後に長さが変化した導体を,導体 絶縁も含めて,劣化させることなく RP 溝に挿入できること を検証する。
- 6) 含浸試験:耐放射線性に優れたシアネート・エステル樹脂とエ ポキシ樹脂の混合樹脂による含浸試験を実施する。
- 7) 一体化に関する試験:EUDAで実施する。

4.2 大規模試作

大規模試作では,前項の小規模試作の結果を踏まえて,実 規模 RP の試作及び実規模相当(1/3 以上)の DP の試作を 行う。これにより,TF コイル DP の製作技術を検証すると共に, その最終製造計画を策定し,第二段階へ速やかに移行する 準備を行う。



Fig. 1 ITER TF coil

Table 1 Major parameters	s of ITER-TF coil
--------------------------	-------------------

Number of coils	18
Number of DP per coil	7 (5 regular DPs + 2 side DPs)
Conductor length	760 m / Regular DP
	415 m / Side DP
Nominal current	68 kA
Nominal field	11.8 T

参考文献

- 1. N. Koizumi, et al., IEEE Trans. ASC, Vol. 18 (2008) p.475.
- 2. N. Koizumi, et al., To be published in Fus. Eng. Des.
- 3. T. Hemmi, et al., To be published in Fus. Eng. Des.

ITER

ITER・TFコイル ラジアル・プレート及びカバー・プレートの製作技術開発

Development of manufacturing technology of radial plate and cover plate

<u>高野</u>克敏, 中嶋 秀夫, 小泉 徳潔, 濱田 一弥, 奥野 清(原子力機構) <u>TAKANO Katsutoshi</u>, NAKAJIMA Hideo, KOIZUMI Norikiyo, HAMADA Kazuya, OKUNO Kiyoshi (JAEA) E-mail: takano.katsutoshi@jaea.go.jp

1. はじめに

トロイダル磁場(TF)コイル[1]の巻線部は、7枚のダブル・パ ンケーキ(DP)を積層して1体の巻線部を形成する構造である。 このため、14m×9mの大型構造物であるラジアル・プレート (RP)に対して、平面度で1mmの高い製作公差が要求されて いる。また、曲率部のカバー・プレート(CP)製作では、機械加 工による変形を防止するために、予想以上に長い加工時間が 必要となることが分かった[2]。これらの課題を解決しつつ、さ らに製作技術の合理化を図るために、原子力機構はメーカー と協力し、RP及び CPの合理的な製作技術の開発を進めてき た。本講演では、これらの成果について報告する。

2. RP セグメント製作

RP セグメントの製作は、1) ステンレス鋼板から機械加工で 製作する方法(Fig.1)、2) ビレットを熱押し・冷間引抜して製 作した十字材をレーザー溶接で接合し、最終機械加工で仕 上げる方法の2種類があり、これまでの開発で、その製作性を 実証するとともに、これらを組み合わせた製作方法を構築した [3]。これまでの機械加工による製作では、加工時間が長いた め、十字材を用いて機械加工を減らすことが合理的と考えら れた。さらに、機械加工による製作は、確実で簡単である反面、 材料の約8割を切り屑として捨てることとなり、(歩留まりは約2 割)素材費の高騰していた時期には、不適な製作方法であっ たが、近年、素材費の高騰も収まり、通常レベルへ戻ったこと から、製作方法及び検査方法が複雑な2)の方法ではなく、全 てのセグメントを1)で製作する案が浮上してきた。

このため、原子力機構は、TF コイルの調達を開始する[1]に 当たり、加工用チップの交換を増やしてでも高速で加工する 方法を用いることで、機械加工時間のさらなる合理化を図るこ とを目的とし、長さ1mの直状 RP部分モデルの加工試験を実 施した。この結果、最適化した新たな加工用チップを用いるこ とで、粗加工における1パスの切り込み深さを3倍以上にする ことが可能となり、加工時間を従来の約半分に短縮することが できた。また、加工後に行った計測では、目標の平面度を十 分に満足する0.3 mm以下の面外変形となり、高い製作精度 で RP セグメントを製作する合理的製作技術の見通しを得るこ とができた。

以上の技術的成果に加えて、機械加工は多数のメーカー で実施可能であることから、さらなる合理化も期待でき、機械 加工おける RP 製作も十分可能であることが分かった。

3. CP 曲げ加工

原子力機構では、直状部の CP を冷間押出しで±0.1 mm の高精度に製作する技術を開発した。一方、曲率部の CP に ついては、板材から機械加工して製作する計画であった。し かし、試作の結果、機械加工の削り代を十分に小さくしないと、 機械加工自体によって CP が変形してしまうため、目標公差の ±0.2 mm を達成するためには、予想以上に長い時間が必要 となることが判明した。

そこで、曲率部の CP 製作の合理化を図るために、3 点ロー ラー曲げ(Fig.2)と引張曲げによって、冷間引抜加工した直状 CPを曲げ加工して、高精度の曲率部 CPを製作する方法を検 討し、試作試験を実施した。この結果、1)3 点曲げでは、CPを 曲げローラーに複数回通して曲率を調整することで、2) 引張 曲げでは、曲げ治具の形状を最適化することで、曲げ加工精度として±0.2mmの高精度な曲げ加工を実現できる見通しを得た。

以上により、CPの高精度で合理的製作技術を開発すること ができ、CPの調達にも目途を立てた。

4. まとめ

合理的かつ高い製作公差を達成可能な RP セグメント及び CP の製作方法を開発し TF コイルの調達に目途を立てた。今後、実規模 RP 及び CP の製作性検証試験を進めて、実機 TF コイルの RP 及び CP の調達に速やかに移行する予定である。

- [1]小泉徳潔, 他, 本予稿集, 2B-a01
- [2] N. Koizumi, et al., To be published in Fus. Eng. Des.2009
 [3] 中嶋秀夫,他,2007 春季低温工学・超伝導学会 2A-a09
 講演概要集 98 ページ



Fig. 1 Machining of the Radial Plate section.



Fig. 2 Bending of Cover Plate.

ITER・TF コイル構造物の詳細製作設計と実規模試作

Detailed manufacturing design and large-scale trial manufactures of ITER TF coil structures

<u>中嶋 秀夫</u>, 新見 健一郎, 大森 順次, 高野 克敏, 濱田 一弥, 奥野 清 (原子力機構) <u>NAKAJIMA Hideo</u>, NIIMI Kenichiro, OHMORI Junji, TAKANO Katsutoshi, HAMADA Kazuya, OKUNO Kiyoshi (JAEA); 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、図1に示すトロイダル磁場 (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、TF 構造物の詳細製作設計と実規模試作を 実施する Phase II と呼ばれる活動を開始した。この活動では、 今後2年間で、(1)一次製作設計を実施し、TF 構造物の合理 的な製作方法を検討する段階、(2)要素技術の検証と小規模 試作により実規模試作のための基礎データを蓄積する段階、 (3)実規模のコイル容器の試作を通して、実機製作に必要な 技術課題を検証する段階、の三段階で技術開発を進め、実 機製作の準備を整える。さらに、最終的に試作結果に基づき 一次製作設計を見直し、TF 構造物の製作に必要な製作設 計を固め、製作図面を作成することで、実機製作の開始準備 を終了することを目指す。

2. 一次製作設計による合理的製作方法の検討

TF 構造物の最終形状はイーター機構により図面として与 えられており、図1に示すサブ・アッセンブリー(SA)と呼ばれ る四つのコイル容器を製作する。SA はベーシック・セグメント (BS)と呼ばれる、さらに分割されたセグメントから製作される が、分割方法も含め、製作方法は調達国である日本が決定 することになる。ITER の非常にタイトなスケジュールを満たす ためには、可能な限り合理的な製作を行う必要があり、これま でも、原子力機構が中心となり、製作合理化の観点から、コイ ル間構造物の構造変更等を提案してきた。Phase II の活動に おいては、製作メーカーと協力し、Phase II 早期に TF 構造物 全体の一次製作設計を進め、合理的製作方法を構築する。

3. 構造材料の品質確認

原子力機構は、コイル容器で使用する実機大の構造材料 を試作し、その製作性、及び液体ヘリウム温度での機械特性 の評価を進め、外国メーカーを含め4社の材料はITERで要 求される特性を満足することを実証した。Phase IIの活動にお いては、これらのメーカーから、実機の第一号機で使用できる 材料を調達し、品質確認を実施する。さらに、スケジュール合 理化を目指し、4社以外の供給メーカーからの調達も視野に 入れている。この場合、10ton以上の素材で材料内の均一性 等に関して詳細な品質検証を行い、実機材料の供給メー カーとして採用できるかどうかを判断する。

4. 要素技術の検証と小規模試作による技術課題検証

コイル容器は大型の溶接構造物であり、合理的製作のため には、溶接施工、検査等に関する要素技術の検証と溶接変 形等の基礎データの蓄積を行う必要がある。このため、Phase Ⅱの活動においては、以下の項目の作業を実施する。

- (1) 高温割れを防止するための溶接条件の絞り込み
- (2) 補修方法を含めた溶接施工方法の確立
- (3) 超音波探傷試験の溶接部への適用性検証
- (4) 高能率溶接方法の検討
- (5) 溶接変形矯正方法の検討
- (6) 小規模試作による溶接変形把握

特に、小規模試作は実規模試作に先立つ重要な試作であり、 インボード直状コイル容器及びアウトボード曲線コイル容器を 試作する。図2 にインボード直状コイル容器の試作計画を示 す。実機と同じ材質で、実断面形状を有する約1mのコイル容 器を試作し、さらに2分割したものを再度溶接することで、製 作性、拘束治具の妥当性、溶接変形量の把握等を行う。

5. 実規模試作による技術課題検証

小規模試作の結果に基づき、実機一号機でも使用可能な コイル容器の実規模試作を行い、製作方法の妥当性に関す る最終確認を実施する。実規模試作で製作する具体的なコイ ル容器部品の寸法、形状は一次設計の結果により決定する が、大型鍛鋼品の製作及び溶接技術の検証という観点から、 インボードコイル容器(図1のA1部)及びアウトボードコイル容 器(図1のB3部)の一部を選択する予定である。

6. まとめ

原子力機構は、Phase II と呼ばれる約2年間の調達活動を 開始した。Phase II では、TF構造物の製作合理化を図り、製 作設計を終了するとともに製作体制を構築し、実機一号機の 製作(Phase III)及びそれに引き続く18個のシリーズ製作 (Phase IV)に備える。



Fig.1 Basic segments and sub assembly of TF coil structure.



Fig.2 Manufacturing plan of straight segment for inboard coil case in small-scale trial.

ITER・TF コイル構造材料の品質検証 Qualification of structural materials for ITER TF coil

中嶋 秀夫, 高野 克敏, 河野 勝己, 堤 史明, 濱田 一弥, 奥野 清 (原子力機構)

<u>NAKAJIMA Hideo</u>, TAKANO Katsutoshi, KAWANO Katsumi, TSUTSUMI Fumiaki, HAMADA Kazuya, OKUNO Kiyoshi (JAEA); 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、ITER のトロイ ダル磁場(TF)コイルの構造物を調達するため、実機大の構 造材料を試作し、その製作性、及び液体へリウム温度での機 械特性の検証を進め、ITER で要求される特性を満足すること を確認した。以下にその結果を報告する。

2. 供試材

品質検証試験に供した構造材料を表1に示す。試作は二 期で実施し、第一期では、強度が高く、製造も難しい材料(表 1、1a-1d 材)を試作した。また、素材が均一に製造されている ことを確認するため、素材内部の強度分布を詳細に評価した。 第二期では、一期に比べ窒素の低い316LN素材(表1、 2a-2c 材)を試作し、1/4 厚さの位置を中心とした評価を実施 した。なお、第一期、二期とも素材は実機と同じ製造プロセス で製造した。さらに、広範囲の窒素含有量の影響を調査する ため、既存の316LN(表1、3a、3b 材)を供試材に加えた。

3. 試作材の品質検証

図1に第一期で試作した0.2%の窒素を含有する316LNの 厚さ方向の強度分布を示す。この図より、厚さ方向に大きな強 度分布はなく、均一に製作されていること、及び、製品形態や 製品厚さの差は、ほとんど無いことがわかる。また、JJ1(表1の 1a材)でも同様の結果であった。さらに、第一期、二期の試作 材は、ITERの使用箇所毎に要求される強度要求を満足し、 実機材料の調達は技術的に問題のないことが検証できた。

4. 強度推定式の検証

原子力機構は炭素と窒素量(C+N)と室温強度をパラメータ とした温度に関する二次式で強度の温度依存性を表すことが できることを実験的に示すとともに、約50℃毎のデータを測定 して推定式の有効性を実証した[1]。表 1 に示す鍛鋼品を用 いて、この二次式の検証を行った結果を一例として図 2 に示 す。図中のプロットは測定結果の平均値で、図中の線が二次 式による強度の推定値である。両者はよく一致しており、二次 式による強度の推定は十分可能であることがわかる。また、熱 間圧延板では、市販の 3b 材を除き同様の結果を得た。3b 材 では、予測値がやや高い値を示したが、これは、室温強度の 測定値が高めであるためと判断された。今後、ITER 用の低窒 素 316LN を試作し、さらに検証を進める予定である。

5. 材料仕様の決定

ITERで使用する構造材料は要求される4K耐力により4ク ラス(1,000MPa、900MPa、700MPa、500MPa以上)に分類さ れている。耐力1,000MPa以上のクラスにはJJ1を使用するが、 その他のクラスには316LNを(C+N)量でグレード分けして使 用する。上記推定式を応用すれば、各グレードの(C+N)量及 び室温耐力の下限を決定することができ、4K耐力900MPa、 700MPa、500MPa以上となる(C+N)量、室温耐力として、 (0.18%、280MPa)、(0.13%、245MPa)、(0.08%、205MPa)をそ れぞれ決定し材料仕様とした。なお、この考え方は、日本機 械学会・発電用設備規格委員会で策定された核融合設備規 格「超伝導マグネット構造規格」の材料規格策定の基礎となっ た。

Table 1 Form, thickness (T), carbon(C) and nitrogen(N) contents of materials tested (F: Forging, P: Hot rolled plate)

			-	0.07									
Material		Form	T (mm)	С	Ν	C+N							
1a	JJ1	F	400	0.017	0.225	0.242							
1b	316LN	F	410	0.018	0.200	0.218							
1c	316LN	Р	140	0.019	0.206	0.225							
1d	316LN	Р	200	0.019	0.206	0.225							
2a	316LN	F	400	0.020	0.166	0.186							
2b	316LN	Р	200	0.022	0.172	0.194							
2c	316LN	Р	200	0.020	0.134	0.154							
2d	316LN	Р	140	0.020	0.116	0.136							
3a	316LN	F	590	0.012	0.119	0.131							
3b	316LN	Р	60	0.021	0.070	0.091							



Fig. 1. Transverse strengths distribution of 1b, 1c, and 1d in through thickness direction. Location 0.5 means center of the thickness.



Fig. 2. Relation between strengths and temperature of forgings having various (C+N) contents.

参考文献

 H. Nakajima et al., to be published in proceedings of ASME PVP 2009, PVP2009-77553, 2009 <u>西村</u>新(核融合研);中嶋 秀夫(原子力機構) <u>NISHIMURA Arata</u> (NIFS); NAKAJIMA Hideo (JAEA) E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

ITER TF コイルは高さ約14 m、幅約9 m という巨大なコイ ルであるが、同時に巨大な極低温構造物である。この TF コイ ルの設計、製作を念頭におき、2008 年 10 月、日本機械学会 が「核融合規格 超伝導マグネット構造規格(JSME S KA1-2008)」を制定した。この規格は、一般要求事項(品質保 証)、材料、設計、製作(溶接)、非破壊検査、耐圧・漏洩試験、 用語の7 つの章から構成されており、世界ではじめて制定さ れた「超伝導コイルの作り方」に関する規格である。

本報告では、この規格の中の「材料」の内容を取り上げ、こ の規格ではじめて取り入れられた極低温用構造材料、極低温 強度の推定方法などを中心に紹介する。

2. 極低温用構造材料

本規格では、極低温での強度が規定される材料と規定されない材料があり、規定されない材料としては SUS304鋼、 SUS316 鋼、インコネル 718、Ni 及び Ni 合金、Cu 及び Cu 合 金、これらの溶接材料がある。極低温強度が規定されている 材料は Table 1 に示す。FMJJ1 鋼はマンガン添加ステンレス 鋼で、FM316LNL 鋼、FM316LNM 鋼、FM316LNH 鋼は SUS316LN 鋼を(C+N)で分類分けしたものである。 FM316LNTP 鋼はケーブルインコンジット導体のコンジット材 料である。FMYJJ1 鋼は FMJJ1 鋼の TIG 溶接用に開発された 溶接材料で、FM316LNL-H 鋼の TIG 溶接にも用いられる。

これらの材料が溶体化熱処理を行ったままの状態で構造 材料として使用される場合には、それらの材料の室温での設 計強度は Table 2 で与えられる。元板厚が薄いものは設計強 度を高くすることができる。Nb3Sn などの超伝導相生成のため の熱処理を行う場合には、Table 2 や次に述べる極低温強度 の推定方法を用いることはできず、必要な機械試験を必要な 試験温度で実施し、強度データを得ることとしている。

3. 極低温強度推定方法

オーステナイト系ステンレス鋼の降伏強度や引張強さが、 (C+N)に比例することは1980年代から知られている。そこで、 (C+N)を変数として、強度が試験温度の2乗の関数で回帰さ れた。

Sy = (5.78 x 10⁻² (C+N) - 7.51 x 10⁻³) T² + (-27.8 (C+N) + 1.72) T + (3520 (C+N) + 395) ------(1) ここで Sy は降伏強度 (MPa)、T は温度 (K) である。 強度を温度の二次関数で回帰する合理的理由は全くない が、この回帰式によって実験結果を良く表現することができる。 この回帰した強度を安全側に評価するため、室温での強度が Table 2 の強度となるように式(1)の各係数に一定の係数を掛 け、全温度範囲で低強度側にシフトさせる。そして4K や77K での強度が数値として切りの良い値となるような修正を施し、 規格の中に表の形で与えることとした。これらの係数を用いて 室温から4K までの設計降伏強度及び設計引張強度を求め ることができる。実験結果との比較を図1に示す。

4. おわりに

極低温構造物である大型超伝導コイルの製作に関わる規格が制定された。この規格は30年来の極低温構造材料の研究の成果の一端であり、有効に機能することが期待される。



図1 実験により得られる強度と設計強度の比較(FMJJ1)

Table 2 Mechanical properties at RT specified in the standard.

Material	Thickness (mm)	RTYS (MPa)	RTUTS (MPa)	RTEL (%)	RTRA (%)
EMILI	t < 200	300	620	20	40
FMJJ1	$200 \leq t < 400$	280	600	30	40
EM216L NI	t < 200	210	520	20	40
FM316LNL	$200 \leq t < 400$	205	480	50	40
EM216I NM	t < 200	245	550	20	40
FIVISTOLINIVI	$200 \leq t < 400$	230	520	30	40
EM216I NH	t < 200	280	580	20	40
FWISTOLINH	$200 \leq t < 400$	260	560	30	40
FM 316LNMTP	-	245	550	35	-

Table 1 Chemical compositions of structural materials specified in the stand	lard
--	------

	Table 1 Chemical compositions of structural materials specified in the standard.										
Material	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo	Ν	0	C+N
EM11	0.030	0.75	9.00-	0.035	0.015	11.00-	11.00-	4.00-	0.21-		
I'WIJJ I	max.	max.	11.00	max.	max.	13.00	13.00	6.00	0.27	-	-
EM216I NI	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00-	16.00-	2.00-	0.05-		> 0.080
TWISTOLINL	max.	max.	max.	max.	max.	14.00	18.50	3.00	0.12	-	≥ 0.080
EM216LNM	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00-	16.00-	2.00-	0.10-		> 0.120
FINISTOLINIM	max.	max.	max.	max.	max.	14.00	18.50	3.00	0.17	-	≥ 0.130
EM216I NH	0.030	0.75	2.00	0.035	0.020	10.00-	16.00-	2.00-	0.15-		> 0.180
FINISTOLINH	max.	max.	max.	max.	max.	14.00	18.50	3.00	0.22	-	≥ 0.180
FM	0.020	0.75	2.00	0.030	0.020	10.50-	16.00-	2.00-	0.11-		> 0.120
316LNMTP	max.	max.	max.	max.	max.	14.50	18.00	3.00	0.18	-	≥ 0.150
EMVII1	0.030	0.40-	9.5-	0.020	0.015	13.5-	11.5-	1555	0.11-	0.010	
FIVI I JJ I	max.	0.60	10.5	max.	max.	14.5	12.5	4.3-3.3	0.15	max.	-

ITER 用導体調達作業の進展 Progress in Procurement for ITER Superconductors

高橋良和、礒野高明、濱田一弥、布谷嘉彦、名原啓博、松井邦浩、辺見努、小泉徳潔、中嶋秀夫、河野勝己、押切雅幸、奥野清(原子力機構)TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki, HAMADA Kazuya, NUNOYA Yoshihiko,
NABARA Yoshihiro, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KOIZUMI Norikiyo,
NAKAJIMA Hideo, KAWANO Katsumi, OSHIKIRI Masayuki, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER 計画において、最初の調達取決めである「トロイ ダル磁場(TF)コイル用超伝導導体の調達取決め」が ITER 機構と日本原子力研究開発機構(JAEA)との間で 2007 年 11月 28日に締結された。TFコイル用導体は直径 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、ブロンズ法による Nb₃Sn 素線の一部が完成したの で、その性能について報告する。

2. 性能評価方法

ITER 計画において、各極の各メーカによる性能評価試 験方法及び結果が正しいことを確認するために、ベンチマ ーク試験が行われている。ITER 機構が供給する Nb₃Sn 素 線について、臨界電流値、ヒステリシス損失、RRR の液 体へリウム温度における測定に加えて、室温における素線 外径、ツイストピッチ、ツイストの方向、銅比、Cr メッ キ厚さを測定することになっている。供給された素線は、 欧州(EU)で製作されたブロンズ法の素線である。その 内、臨界電流値は、ITER 機構で熱処理され指定の Ti 合金 の巻枠(Fig. 1)に取付けられたサンプル3個(Table 1の 中の IO-1、IO-2、IO-3)を巡回させ、JAEA 及び素線を製 作している国内のメーカ2社で測定した。また、それぞれ の測定場所において、同じ方法で製作されたサンプル (Table 1の中の S)も測定することになっている。

その内の国内における臨界電流値及びヒステリシス損 失の測定結果を Table 1 に示す。臨界電流値は、ITER 機構 作製のサンプルにおいては 2%以内、各測定場所で作成し たサンプルにおいては 3%以内で一致している。前者は測 定装置及び測定方法、後者は熱処理を含めたサンプル製作 方法について確認するものであり、国内においてはよい一 致であった。

TIAIV grooved cylinder

Fig. 1 Critical current sample holder: Ti6Al4V hollow cylinder with two Copper rings (left) and assembled holder with a strand section wound on it.

3. 製作された素線の性能

これまでに国内2社で製作されたNb₃Sn素線は、約600km で、日本で製作されるものの約11%である。因みに、日本 はTFコイル用Nb₃Sn素線の25%である約26トンを生産す ることになっている。製作されたNb₃Sn素線の一部の素線 の臨界電流値及びヒステリシス損失の結果をFig. 2に示す。 図中の斜線部は仕様値(臨界電流値:190A以上、ヒステ リシス損失:500mJ/cm³以下)を満たしている。今後は、 予定どおりに生産を進めると同時に、メーカにおける測定 結果をJAEAにおいてもチェックする予定である。

4. まとめ

仕様を満足するNb₃Sn素線は、これまでに、日本分担分 の約11%が完成した。また、国内の各測定場所の測定方法 及びサンプル製作方法について、ベンチマーク試験により、 正しいことが確認できた。

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 線の製作及び導体化(ジャケット加工)作業を行う。

参考文献

1. Y. Takahashi, et al., "Performance of Japanese Nb_3Sn Conductors for ITER Toroidal Field Coils", *IEEE Appl. Supercond.*, vol. 18, No. 2, pp. 471-474, 2008.

		JAEA	А	В
	IO-1	192.4	194.2	190.0
$I_{\alpha}(\Lambda)$	IO-2	191.0	192.1	188.1
IC (A)	IO-3	192.5	190.5	188.5
	S	190.9	192.3	185.1
Qh (mJ/cm ³)	46	40	47

Table 1 Results of Benchmark Tests for EU strand in Japan

Ic: Critical current,

Qh: Hysteresis Loss for one cycle of +/- 3 T



Fig.2 Superconducting performance of Japanese Nb₃Sn strands for TF coils. Domain of slant lines shows specification (Critical current>190A, Hysteresis loss<500 mJ/cm³).

ITER 中心ソレノイド用導体サンプルの接続部内の電流分布解析 Analysis of current distribution in joint of conductor sample for ITER Central Solenoid

<u>長谷 隆司</u>,清水 辰也,辺見 努,松井 邦浩,小泉 徳潔,高橋 良和,奥野 清(原子力機構) <u>HASE Takashi</u>, SHIMIZU Tatsuya, HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, TAKAHASHI Yoshikazu, OKUNO Kiyoshi (JAEA) E-mail: hase.takashi@jaea.go.jp

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)の中心ソレノイド(CS)用導体 は、スイスのローザンヌ工科大学プラズマ物理研究センター (CRPP)が所有する実規模臨界電流試験装置(SULTAN)を 用いて、その超伝導特性が評価される。このSULTAN 試験の ための導体サンプルでは、二種類の導体が無酸素銅を介し て接続される[1]。その接続部は外部磁場発生用の超伝導マ グネットのボア近くに配置されるため、高勾配の磁場にさらさ れる。そのため、接続部の無酸素銅の磁気抵抗効果により、 接続部内に大きな電流分布が生じ、導体の正確な評価に支 障をきたす可能性がある。その確認と、CS 用導体の接続抵抗 を 2nΩ以下に抑制しながら接続部内の電流分布を均一化す る方法を明らかにすることを目的として、接続部内を流れる電 流の分布を有限要素法により計算して求めた。その結果につ いて報告する。

2. CS 用導体サンプルの接続部と解析方法

SULTAN 試験に用いる CS 用導体サンプルの接続部の断 面構造を Fig. 1 に示す。超伝導ケーブルはブロック状の銅 A によって囲まれ,さらにその外側にはステンレス鋼が配置され る。この単位構造を上下に並べ,板状の銅 B を挟んで接続さ れる。超伝導ケーブルは6本のサブケーブルから成り,銅Aと 銅 B の接続面と各サブケーブルとの距離がサブケーブル間 で異なるため,電気抵抗が異なる。これらのサブケーブル間 で異なるため,電気抵抗が異なる。これらのサブケーブルはz 方向に沿って撚られているため,優先的に電流が流れるサブ ケーブルは,z 方向の位置に依存して変化する。したがって, 接続部内で z 方向に電流分布が生じると,サブケーブル間で 電流分布が生じ,導体本来の特性を評価できない可能性が 高くなる。

接続部内の外部磁場は, 高磁場端から低磁場端まで z 方向に沿って近似的に一様な割合で変化すると仮定し, 銅材料の電気抵抗率の磁場依存性に関する Kohler の式 [2]を用いて、それぞれの位置での電気抵抗率を計算した。解析は有限要素法を用いて行い, 超伝導ケーブルの電気抵抗率は, 素線間抵抗を考慮して, $1.0 \times 10^{-13} \Omega m$ とした。解析に用いたパラメータの銅 A および銅 B の各残留抵抗比 (RRR)を Table 1 に示す。ここで銅の RRR は, 磁場 0T における 273K と 4.2K での電気抵抗率の比の値として定義している。接続部内の電流分布の計算では、銅 A と銅 B の境界 xz 面内を z 方向に 10mm ごとの小領域に分け, 両導体間に 100 μ V を印加した場合に, 各小領域に垂直方向(y 方向)に流れる電流を計算し, それを小領域の面積で除して電流密度 Jとし, その z 方向の分布を求めた。

3. 解析結果

最大外部磁場 11T 発生時の接続部内電流分布の計算結 果を Fig. 2 に示す。接続部の両端, z = 0 mm, 470 mm におけ る外部磁場はそれぞれ 0.29 T, 8.4 T である。最大電流密度 J_{max} と最小電流密度 J_{min} の比および全体の接続抵抗の計算結 果を Table 1 に示す。Fig. 1 と Table 1 より, 銅 A も銅 B も RRR = 100 の無酸素銅を用いる従来の接続構造(Case 3)では, 全 体の接続抵抗を 1.0 n Ω に下げることができるが, J_{max}/J_{min} は 1.67 と大きくなり, 不均一度が大きい。一方, 銅 A も銅 B も RRR = 4 の銅を用いる場合(Case 1)では、電流分布は均一化 するが、全体の接続抵抗は 5.8 n Ωと許容範囲をオーバーす る。しかし、RRR の値を適正化した Case 2 と Case 4 の場合に は、接続抵抗を2 n Ω以下に抑制しながら、 $J_{max}/J_{min} \leq 1.30$ の 状態にまで電流分布を均一化できることが明らかになった。 Case 4 の結果は、入手が難しい RRR = 20 の銅を用いる替わり に、入手が比較的容易な RRR = 4 のリン脱酸銅を用いること ができることを示している。

4. まとめ

CS 用導体 SULTAN サンプルの接続部内の電流分布を有 限要素法で解析した結果, RRR の値が高い無酸素銅を用い て接続した場合, その磁気抵抗効果により接続部内で大きな 電流分布が生じることが確認された。そして, 全体の接続抵 抗を許容範囲内に抑制しながら, 接続部内の電流分布を均 一化する方法として, RRR の値を適正範囲に制御することが 有効であることが示された。



Fig. 1 Cross-sectional view of joint of CS-SULTAN sample.

Table 1 Parameters and results of current distribution analysis.

Case No.	RRR of	RRR of	Joint	$J_{\rm max}/J_{\rm min}$
	copper A	copper B	resistance	
1	4	4	5.8 nΩ	1.05
2	20	20	1.9 nΩ	1.25
3	100	100	1.0 nΩ	1.67
4	100	4	1.8 nΩ	1.30



Fig. 2 Current and magnetic field distributions of joint of CS-SULTAN sample.

参考文献

1. T. Hemmi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.28.

2. Metals and Ceramics Information Center: Handbook on Materials for Superconducting Machinery, (1974) p.5.1.1-1.1.

JT-60SA 超伝導導体の複合化設備の建設と初期導体製作結果 Construction of the jacketing facility and first production results of superconductor for JT-60SA

<u>木津 要</u>, 土屋 勝彦, 柏 好敏, 村上 陽之, 吉田 清 (原子力機構) <u>KIZU Kaname</u>, TSUCHIYA Katsuhiko, KASHIWA Yoshitoshi, MURAKAMI Haruyuki, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA) E-mail: <u>kizu.kaname@jaea.go.jp</u>

1. はじめに

原子力機構(JAEA)のトカマク型核融合試験装置 JT-60 を、 日本と欧州共同で JT-60SA と呼ばれる超伝導トカマク装置に 改修する計画[1]が進行中である。JT-60SA の超伝導マグネッ トシステムは、18 個のトロイダル磁場コイル、4 つのモジュール から成る中心ソレノイド(CS)、そして、6 個のプラズマ平衡磁 場(EF)コイルより構成される。このうち、CSとEFコイルが日本 で製作される。本報告では、JT-60SA 用超伝導導体の複合 化設備の建設と初期導体製作結果について述べる。

2. 導体構造

CS、EF コイルの運転シナリオにおける導体の最大経験磁 場はそれぞれ、8.9T、6.2T であるため、CS 導体は Nb₃Sn 素線 を、EF コイル導体は NbTi 素線を用いる。Nb₃Sn 素線は、 ITER-TF コイル用素線と同じ仕様である。一方、NbTi 素線は、 JT-60SA 用に新規に設計・製作された素線で、ニッケルメッキ が施されている。CS、EF コイル導体は共に除熱特性を向上さ せるために導体中心にスパイラルで作られる冷却チャンネル を追加したケーブル・イン・コンジット(CIC)型の強制冷却導体 である。CS 導体は、応力が大きいために、矩形断面のジャケ ットを用いる。一方、EF コイル導体は、円形パイプに撚線を挿 入した後、矩形に圧縮・成型する方法を用いる。EF 導体は、 その運転磁場・電流に応じて、4.8T-20kA 用の EF-L 導体と 6.2T-20kA 用の EF-H 導体の 2 種類の導体を製作する。Fig. 1,2 および Table 1 に各導体の断面図とパラメータを示す。

3. 導体複合化設備

CENTRAL SPIRAL

導体は、メーカより納入された超伝導撚線とジャケットを JAEA 那珂核融合研究所内に建設中の全長約 660m の導体 複合化設備で複合化することで製作される。CS 用ジャケット、 EF 用ジャケットはそれぞれ単長が 7m、13m であり、ジャケット を芋継ぎ溶接することで最長で 585m の長尺ジャケットを製作 する。その後、ウインチで超伝導撚線を長尺ジャケット内に引



Fig. 2 Cross Section of EF-H Conductor.

き込んだ後に、コンパクション装置と呼ばれる装置で最終断 面形状に成型しながら、直径 3-4m 程度のドラムに巻き取る。 JT-60SA に使用する CIC 導体の総長は 44km あり、その溶接 部は 4300 箇所程度となる。超伝導コイルはトカマク装置本体 に設置後は容易には分解修理できないので、溶接部の検査 が重要である。全ての溶接部は X 線透過試験検査、He リーク 試験検査、耐圧・気密試験が行われる。本複合化設備は 5 月 中旬に完成し、6 月から溶接作業を開始する。

4. 導体製作状況

超伝導撚線とジャケットの製作は平成 20 年度より開始され ている。超伝導素線、銅ダミー撚線は要求仕様を満足するも のが製作され超伝導撚線の量産を開始している。超伝導素 線は Nb₃Sn 素線で 12T, 4.2K での臨界電流密度が要求値 650 A/mm² に対して、800 A/mm² 以上の、NbTi 素線は、5T, 4.2K での臨界電流が 450 A 以上に対して、510A 以上の素線 が製作されており、導体は設計に比べ十分に裕度を持って製 作できることがわかった。また、ジャケット溶接部の溶接材料 の選定のために、4K での溶接したジャケット材料の引張試験 を行い、要求を満足する結果を得た。また、銅ダミー撚線を用 いて、10m の EF 導体の複合化を行い所定の寸法を満足する ことを確認した。今後、CS でも同様の作業を行い、CS, EF ジ ャケットの量産を開始する。

5. まとめ

CS、EF 導体用の撚線、ジャケットは仕様を満足するものが 順調に製作されている。導体複合化設備の建設も5月に終了 する。機器の調整が終了後、まず最初に臨界電流の確認試 験を行うためのサンプル用導体を製作する予定である。

参考文献

 K. Yoshida, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.19

	CS	EF-L	EF-H
Type of Strands	Nb ₃ Sn	NbTi	NbTi
Maximum Current (kA)	20	20	20
Nominal Peak Field (T)	8.9	4.8	6.2
Operating Temperature (K)	5.5	4.8	5.0
Discharge time constant (s)	6	6	6
Delay time (s)	2	2	2
Number of SC Strands	216	216	450
Number of Cu wires	108	108	0
Local Void Fraction (%)	34	34	34
Cable dimensions (mm)	¢21.0	19.1 x 19.1	21.8 x 21.8
Central hole (id x od) (mm)	7 x 9	7 x 9	7 x 9
Conductor external dimensions (mm)	27.9 x 27.9	25.0x 25.0	27.7 x 27.7
Max. unit length of conductor (m)	500	585	478

Table 1 Conductor Parameters for CS and EF coils.

JT-60SA 平衡磁場コイル用 NbTi ケーブル・イン・コンジット導体のクエンチ試験

Quench test for NbTi CIC conductor of JT-60SA equilibrium field coil

<u>村上 陽之</u>, 市毛 寿一, 木津 要, 土屋 勝彦, 吉田 清(原子力機構)

MURAKAMI Haruyuki, ICHIGE Toshikatsu, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

OBANA Tetsuhiro, HAMAGUCHI Shinji, TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS) E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

日欧で設計、製造が進められている JT-60SA 装置におけ る超伝導マグネットシステム[1]のうち、平衡磁場(EF)コイルに は NbTi ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体が用いられる。 EF 導体の運転シナリオにおける最大通電電流、最大経験磁 場条件はそれぞれ 20kA、6.2T である。

EF 導体に用いられる NbTi 素線は、新たに設計開発され たものであり、EFコイルの運転条件においてこの NbTi 素線が EF 導体に適用可能であることを確認するため、日本原子力 研究開発機構(JAEA)と核融合科学研究所(NIFS)が共同で プロトタイプ導体を製作し試験を行ってきた。

前回の試験では、運転条件における臨界電流測定を行い、 開発された CIC 導体が EF コイル運転条件において、十分な 臨界電流値を持つことが確認された[2]。一方、コイル設計お よび製作において臨界電流値とともに安定性マージンやクエ ンチ時における最高到達温度、最大圧力などの検討も重要 である。そこで今回の試験では、MQE およびクエンチ時にお ける常伝導伝播の様子を観測するため、試験導体を誘導ヒー ターで加熱しクエンチ試験を行った。

本講演では、今回実施したクエンチ試験で得られた常伝 導伝播の観測結果および GANDALF を用いたクエンチ解析 の結果について示すとともに、実際の JT-60SA 超伝導コイル を模擬した場合のクエンチ解析結果について報告する。

2. クエンチ試験

プロトタイプ導体サンプルは 486 本の NbTi 素線で構成さ れ、Fig. 1 に示すように直径 300mm の円環部を持つラケット 型の形状に加工してある。電圧タップを用いて各区間の電圧 を測定した。試験中は、超臨界圧へリウム(SHe)が直線部より 導入され、ターミナル部より排出される。SHe の温度を制御す ることで、サンプル温度を調整した。スプリットコイルにより円環 部に一様な磁場を印加した。円環部中央付近に長さ約 30 mm、180 ターンの誘導加熱用コイルを設置し、この部分を加 熱することでクエンチを発生させた。磁場、通電電流、温度、 温度マージン、SHe 圧力、SHe 流量の各試験条件を Table 2 に示す。クエンチ試験で得られた常伝導伝播の結果を Fig.2 に示す。

3. クエンチ解析

GANDALF を用いて今回行ったクエンチ試験の解析を行った。解析領域は、V1-10に対応する導体長とした。SHeの流れは実験と異なり、V10部分より導入されV1部分で排出される。SHe 入口温度および入口圧力は実験と同じく 6.0 K、0.6 MPaとした。V2-9 に相当する円環部分の磁場は 6.2 Tとし、V2,V9より外側の領域は端部で0Tとなるように磁場を線形に変化させた。通電電流は 20 kA、素線の銅部分の RRR は 70 とした。誘導ヒーターは、解析領域中央部 30 mm 部分の素線に 10ms の入熱を加えることで模擬した。

クエンチ解析の結果を Fig.2 (Simulation A) に示す。Fig.2 に示した Simulation B は解析結果を 0.5 s 遅らせた結果である。実験結果と Simulation A を比較すると、入熱直後の伝播 速度が大きく異なることが分かる。これは、実験では外部磁場 分布が導体内周部と外周部で約0.4 T の違いがあること、導体断面内が均一に加熱されないことにより、導体断面内の臨 界電流密度に分布が生じ部分的に常伝導転移が起こっている可能性がある。一方、GANDALFの解析は瞬時に導体断面 全体が常伝導転移してしまうため大きな発熱が生じ急激な常 伝導伝播が起こってしまうと考えられる。

一方である程度常伝導が広がった後の伝播速度は、実験 と解析(Simulation B)は比較的近い傾向を示しており、導体断 面内が均一の条件になった後の挙動は GANDALF で再現で きると考えられる。パラメータの最適化を行い解析の精度を高 める必要はあるが、GANDALF を用いてクエンチ解析を行うこ とはコイル設計に有用であると言える。

GANDALF のパラメータを実導体に対応する値[3]に変更 し、実機運転時にクエンチが発生した場合の最高到達温度 および最大圧力等の評価を行った。実導体のクエンチ解析 結果は当日発表する。

参考文献

- K. Yoshida, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.19
- K. Kizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.36
- K. Kizu, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18 (2008) pp. 212-215



第80回 2009年度春季低温工学・超電導学会

尾花 哲浩, 濱口 真司, 高畑 一也, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS)

JT-60SA ポロイダル磁場コイルシステムの支持構造設計 Support structure design for the poloidal field coil system in JT-60SA

土屋 勝彦, 木津 要, 村上 陽之, 淺川 修二, 倉持 勝也, 吉田 清

TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, ASAKAWA Shuji, KURAMOCHI Masaya, YOSHIDA Kiyoshi

(JAEA)

E-mail: tsuchiya.katsuhiko@jaea.go.jp

1. はじめに

日欧で設計、製造が進められている JT-60SA 装置におけ る超伝導マグネットシステムのうち、中心ソレノイド(CS)および プラズマ平衡磁場(EF)コイルシステムからなるポロイダル (PF)コイルシステムは、日本が調達することになっている。昨 年末、これらポロイダルコイルシステムについて、調達取り決 めが日欧間で合意され、本コイルシステムは、製造段階に入 ることになった。この取り決めには、コイル支持の基本構造に 関する設計計算書も含まれ、機械的強度が十分であることの 確認もなされている。最近の設計活動においては、この基本 構造の考え方をベースにしたまま、製造性を考慮した最適化 を進めている。ここでは、特に製造が急がれる EF コイルにつ いての検討結果を示す。

2. 平衡磁場(EF)コイル支持の基本構造および改良点

4つのモジュールからなる CS および6つの EF コイルは、す ベてトロイダル磁場(TF)コイルケースに設置される。CS には モジュール全体を一体化して設置するためのマウント構造が 頭頂部に設置される。EF コイルは、TF コイルへの接続部に、 巻線を上下から挟む固定金具(クランプ)を設けている (Fig.1)。



Fig.1 Basic design for the support structure in EF4 coil.





クランプと巻線の間には、冷却時の収縮差によるギャップが 生じるほか、鉛直方向の電磁力により、クランプと巻線が離合 する。これらに起因するギャップをなくすため、設置段階から 初期締付をかけておく必要がある。このとき、本巻線端部に生 じる集中応力を緩和するため、「かまぼこ」型シムを考案し、そ の効果を評価した[1]が、当時の設計では、このシムは厚さが もっとも厚いところで4mm、最薄部で2.5mm 程度しかなく、し かも曲線形状であるため、異常な変形なく加工するのは困難 である。そこで、当該曲面部をクランプ板側に移し、初期締め 付け量も含めて、機械強度解析をしなおした。設計変更後の クランプ、シムの形状概念図をFig.2に示す。このとき、「かま ぼこ」形状のままでは、その頂点部が接触する巻線中央部で、 シムが局所的に変形することや、巻線表面に圧力が集中する 恐れのあることから、巻線全体幅の1/3から1/4 程度の領域 に平面部を設け、圧力緩和を実現している。

3. EF4 における応力解析

EF4 コイルは、TF 設置前に製造、設置する3つのコイル (EF4,5,6)のうちのひとつであり、全てのEFコイルの中で最速 で製造される。また、その配置から、口径が小さいので支持構 造物設置のための空間が制限される。そのため、TF コイル1 つおきに9個だけで支持される上、ターン数も多く電磁力も大 きいことから、機械的条件が最も厳しいコイルである。EF4 の 巻線は、上向き最大約17MN、下向き最大約24MNの鉛直電 磁力を受ける。このような電磁力を受けた状態でも巻線とクラ ンプが離れない状態を実現するには、室温時において、ロッ ドに147MPaの予荷重を与えておく必要のあることがわかった。 このとき、クランプは反り返るが、室温における最大トレスカ応 力は238MPaであり、材料として想定しているFM316LNM 鋼 [2]の室温での許容応力以下であった。

4. EF1 における応力解析

PF コイル最大口径を持つ EF1 についても、同様の解析を 行った結果、ロッド予荷重とクランプ板の最大トレスカ応力値 は、それぞれ 138MPa、150MPa となった。これらの値は、FM3 16LNM 鋼の室温時許容応力値を大きく下回っており、これら 構造材をさらに減量可能であることがわかった。

一方、プラズマ運転時(PFコイル励磁時)、EFコイルを設置 している TF コイルは、転倒力を受け変形する。特に、EF1 は 口径が最も大きいため、この TF コイル変形による影響を最も 大きく受ける。最近の欧州による設計に基づく電磁力解析に よると、EF1 の支持座近傍で、20mm 程度トロイダル方向へ移 動し、さらに台座が約 0.3° 傾斜することがわかった。この傾 斜による巻線への影響を今後詳細に評価する。

5. まとめ

EF コイル支持構造の最適化を目的として、クランプの形状 変更や、各コイルにおける電磁力を考慮した、詳細応力解析 を行い、現設計よりさらに減量化できる目処がついた。今後は、 TFコイルからの影響を考慮しつつ、次に製造すべきEF5 およ び EF6 の支持構造について最適化を進める。

- K. Tsuchiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.35
- 2. 日本機械学会 核融合設備規格 超伝導マグネット構造 規、JSME S KA 1-2008

ロボット式モバイル HTS-SQUID 非破壊検査装置による 水素燃料タンクの欠陥検出

Detection of Crack in Hydrogen Fuel Tank using Robot-based Mobile HTS-SQUID

Nondestructive Inspection System

<u>廿日出 好</u>,林 啓太,田中 三郎(豊橋技科大),田辺 圭一(SRL) <u>HATSUKADE Y.</u>, HAYASHI K., TANAKA S. (TUT), TANABE K. (SRL) E-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp

1. はじめに

クリーンな自動車として燃料電池自動車や水素自動車の 実用化・普及が期待されており、燃料である水素の高圧貯蔵 の実用化と安全性確保が課題となっている.現在,35MPa 級 高圧タンクとして、炭素繊維強化複合材料(CFRP)にアルミ合 金ライナー(内張)を施したものが試供されており、将来的に は高効率化のため70MPa 級が必要と見積もられている.この ようなタンクは積層・肉厚構造となっており、従来の超音波や 渦電流を用いた欠陥検査技術の適用が困難であり、品質・安 全管理のための非破壊検査技術確立が急務となっていた.

そこで、我々はこのような先進構造物の検査のため、低周 波数帯域において優れた感度を有する HTS-SQUID を用い た渦電流ベースの非破壊検査技術の研究を行ってきた[1]. これまでに、磁場耐性の高いランプエッジ型ジョセフソン接合 を持つ HTS-SQUID グラジオメータを用いたロボット式非破壊 検査システムを開発し、磁気シールドの無い環境磁場中にお いて SQUID の移動が可能であることを示した[2].本研究では、 このシステムを応用して、円筒ドーム形状の水素燃料タンク検 査のため、上記 SQUID を通常環境中で三次元的に移動させ るロボット制御・検査プログラムを開発した.本プログラムを用 いて、内部に疲労亀裂をもつ水素燃料タンクの三次元的スキ ャンを行い、欠陥検出デモを行ったので報告する.

2. タンク内深部欠陥検出原理と検査装置

積層・肉厚構造をもつ水素燃料タンク内に発生する欠陥として、高圧水素補給による繰返し疲労によりアルミライナー内側に発生する深部亀裂が予想される.そこで、本研究では、アルミライナー内部に繰返し疲労により発生させた疲労亀裂を持つ水素燃料タンクを用意し、この亀裂検査のため、金属内部まで渦電流を誘導できる低周波数励磁と、低周波数帯域で高感度なHTS-SQUIDを組み合わせた深部亀裂検出手法を適用した.一方、タンク周辺から内部亀裂を精度良く検出するため、励磁コイル及び SQUID と円筒形状のタンク表面間の距離(リフトオフ)を一定に保ったまま、タンク表面に沿って SQUID を走査させる検査プログラムが必要であった.

そこで,本研究では,まず Fig.1 に示すような構成のロボット 式モバイル SQUID 非破壊検査装置を構築した. ここでは, ラ ンプエッジ型ジョセフソン接合をもつ高磁場耐性 HTS-SQUID グラジオメータを小型クライオスタットにマウントして用いた[2]. 次に、タンク曲面に沿って SQUID を三次元的に移動させるロ ボット制御プログラムを開発した. 本プログラムにより, Fig.2 に 示すように励磁コイルおよび SQUID を走査範囲曲面上で連 続的に移動させる.また,この移動の際に,一定の時間間隔 で SQUID 出力を計測・記録する測定プログラムを, LabVIEW を用いて開発した.このプログラムは、ロボットのアーム先端位 置を読み出すことのできるロボット専用プログラム CIMPLICITY と組み合わせて, SQUID 出力測定と同期して測 定時の SQUID 位置を PC に記録し, SQUID 出力と統合する モジュールを持っている. これらのプログラムを用いたタンク 検査では、励磁コイルからの低周波数励磁磁場によりタンク 内アルミに渦電流を誘起させ、タンク表面に沿って SQUID グ ラジオメータを移動させて、アルミライナー内亀裂による渦電 流の乱れに起因する亀裂磁気信号を含む磁場勾配分布を計

測することにより亀裂の検出を行う. 3. 水素燃料タンクの深部亀裂検出

前述の深部亀裂をもつ水素燃料タンクサンプルに対して、 ロボット式モバイル SQUID 非破壊検査システムを適用して亀 裂検出試験を行った.タンクの直径は 168mm,長さ 420mm, 厚さは 6mm (CFRP3mm, アルミ 3mm)で、アルミ内に長さ 10mm の疲労亀裂をもつ.ここでは直径 30mm のダブル D型 励磁コイルを採用し、侵入深さ約 13~3mm に対応する 400~ 10kHz で7.5 μ Tの励磁磁場を用いた.SQUIDとタンク表面間 距離は約 5.5mm とし、移動速度は 2mm/s とした.移動の際、 SQUID のロックの外れや磁束トラップの発生はなく、移動によ 9 10 Hz 以下の低周波数ノイズが増加したが、ホワイトノイズレ ベルに変化はなかった.Fig.2 に示すようにタンク内亀裂の周 辺の磁場勾配分布を SQUID スキャンにより計測した結果、 Fig.3 に示す y-w 平面に展開した磁場勾配分布において、亀 裂を重心とする 8 極子的亀裂信号を検出することができた.



Fig.1 Robot-arm-based mobile SQUID-NDI system.



g.2 3D scanning around a hydrogen fuel tank with a oving SQUID in normal circumstance.



[1] 廿日出好, 他: 低温工学, 44 巻 2 号 (2009), p.54

[1] 廿日出刻,他:低温工学, 44 答 2 9 (2009), p.34
[2] 廿日出好,他:第 79 回 2008 年秋季低温工学·超電導学 会講演概要集(2008), p.60

Method for evaluating and enhancing the cooling capability of AIN ceramic as a potential thermal guide in cryocooler cooled SQUID systems

Eshraghi Mohamad Javad, Sasada Ichiro(Kyushu University); Kim Jin-Mok, Lee Yong-Ho(KRISS) E-mail: javad4@asem.kyushu-u.ac.jp

1. Introduction

In cryocooled LTC-SQUID systems, copper sensor holder could be used as a thermal guide [1] but white noise level due to the thermal magnetic noise is high [2]. Therefore finding insulating materials with high thermal conductivity in very low temperatures is of great importance. AlN ceramic is an insulating material that shows good thermal conductivity at the room temperature. Its thermal conductivity at the room temperature is nearly half of that of the copper. We examined the thermal conductivity of AlN ceramic as a potential material for the thermal guide in a cryocooler cooled SQUID systems. We found out that the AlN doesn't show very good thermal conductor at very low temperatures, therefore by implementing thin copper wires we tried to enhance its thermal conductivity.

2. Experimental setup

For examining the thermal conductivity of AlN, an AlN thin rectangular plate was prepared with dimensions of 3 mm in thickness, 12 cm in length and 4 cm in width. A thick copper plate of L-shape was used to fix the AlN plate to the second cold head of our two-stage pulse tube cryocooler. Apiezon N grease was used between AlN plate and the L-shaped copper attachment. The temperature of the L-shaped copper attachment, which was attached to the cold head, was measured with a Pt-Co temperature sensor. The temperature of the free end of the AlN plate was measured with a germanium temperature sensor which was attached to the AlN plate with bolt and Apiezon-N grease. Output from both of the temperature sensors were acquired automatically with a DAQ board.

3. Measurement result and discussion

Results of the temperature measurement are shown in Figs. 1 and 2. In Fig. 1 the temperature difference between the colder end which is connected to the L-shaped copper attachment and the free end of the AlN plate is plotted for the cold head temperature (solid line). As it is visible in this graph the free end of the AlN plate in the best case is at least 2 K warmer than the other end, so at the final stage that our cryocooler cold head reaches 3.5 K the AlN plate's warm end cannot reach the desired temperature for operating LTC SQUIDs which is 4.2K.

For enhancing the cooling capability of the AlN plate most of the back plane of the AlN plate is covered with a bundle of 0.1 mm thick insulated copper wires placed in a single layer. Because adjacent copper wires do not have electrical contact, electrons in the wires fluctuate only one dimensionally, hence, based on the Ref. [2] the thermal magnetic noise may be much lower than that observed with a thick copper plate used as a SQUID holder. The temperature of the free end of the AlN plate with the copper wire decoration has successfully reached 4 K about 1 hour after the cold head had maintained at 3.75 K. The result of examination of the thermal conductivity of this AlN plate is also shown in Figs. 1 and 2.

4. Conclusion

We observed that the temperature of the free end of the AlN plate hardly fell below 7 K even one hour after the cold head had reached 3.75 K. So we conclude that this material by itself cannot cool LTC SQUID sensors to operate.

The cooling capability of the AlN plate was enhanced by covering one side of it with 0.1 mm diameter, 12 cm long coated copper wires. The free end of AlN plate successfully



Fig.1 Temperature difference between the cold end of the AlN plate and its free end (solid line). Same quantity for the copper wire decorated AlN plate.



Fig.2 Temperature difference between the cold end of the AlN plate and its free end (solid line). Same quantity for the copper wire decorated AlN plate.

cooled down to 4 K. Therefore we hope that this material with the aforementioned improvement could be used as a thermal guide to cool SQUIDs. In the near future, we will attach Double Relaxation Oscillation SQUID first-order planar gradiometer on this plate and will compare the noise floor with the case of the copper plate thermal guide.

References

- 1. M.J. Eshraghi, I. Sasada, J.M. KIM, Y.H. Lee, Characterization of a low frequency magnetic noise from a two-stage pulse tube cryocooler, Cryogenics (2009), doi:10.1016/j.cryogenics.2009.03.001 (in press)
- T. Varpula, T. Poutanen, Magnetic field fluctuation arising from thermal motion of electric charge in conductors, J. Appl. Phys. (June 1984) 55(11), 4015-4021

レーザー核融合高速点火方式用クライオターゲットの開発 ーターゲット内温度分布に関する考察 – Development of cryogenic targets for FIREX-I -Consideration on temperature distribution in the target-

<u>岩本 晃史</u>,前川 龍司,坂上 仁志,三戸 利行(NIFS); 藤村 猛,中井 光男,乗松 孝好,疇地 宏(阪大レーザー研);長井 圭治(東工大) <u>IWAMOTO Akifumi</u>, MAEKAWA Ryuji, SAKAGAMI Hitoshi, MITO Toshiyuki (NIFS); FUJIMURA Takeshi, NAKAI Mitsuo, NORIMATSU Takayoshi, AZECHI Hiroshi (ILE, Osaka Univ.); NAGAI Keiji (Tokyo Tech) E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

レーザー核融合高速点火方式用固体水素ターゲットの 開発を行っている。均一な球殻状の固体水素層を生成するた めにターゲットは均一に冷却されている必要があるが、ターゲ ットのサイズが小さいため冷却状態を直接測定することはでき ない。そこで、固化した水素の分布が時間的に変化する状態 を観察した結果とANSYSを用いたターゲット内温度分布の 計算結果から、冷却状態を評価する手法の検討を行った。

現在、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター (ILE)では Fast Ignition Realization Experiment (FIREX)計画を 遂行中である。この計画では新方式の高速点火方式によるレ ーザー核融合の実現を目指しており、核融合反応を起こすた めに2種類のレーザーを必要とする。一つは燃料を超高密度 まで圧縮するレーザー、もう一方はその圧縮された燃料を加 熱し、核融合点火を起こすレーザーである。新方式であるた め、米国において開発がほぼ完了している中心点火方式とは 異なる仕様のターゲットを新たに開発する必要がある。ILE と NIFS が共同でそのターゲットの開発を行っている。

2. FIREX 用ターゲットの仕様

Fig. 1 に代表的な FIREX 用ターゲットを示す。燃料は水素の同位体である。球殻状の燃料層が必要であるため、フォームシェル内全体に燃料が満たされるのではなく、毛細管現象を利用してフォーム層内に液体状の燃料をしみ込ませ、その後、固化することで、中心の残留ガス圧が低い理想的なターゲットを作成することを目指している。この燃料層には表面荒さや真球度など厳しい基準を満たす必要がある。このフォームシェル内に充填された固体燃料層の表面状態などを必要な仕様まで仕上げるためには、ただ単に固化させるだけでは不十分であると考えられ、その後、均一な冷却状態の下で、その固体燃料の再配分などの処理が必要になる。



Fig. 1 Typical target for FIREX.

3. 実験

実験にはフォームシェルの代わりに、内部の様子が確認 できるように直径 2mm のポリスチレン(PS)シェルを取り付けた ダミーターゲットを用いた。このダミーターゲットをヘリウムガス 雰囲気(12.4K, 20Pa)で冷却し、PS シェル内に液体水素を充 填した後、100mK 温度を下げ、水素を固化させた。その後、 12.0K で温度を固定し、その内部の固体水素の状態変化を2 4時間観察した。Figs. 2(a) and (b)に固化直後から10時間後 の固体水素の状態変化を示す。



Figs. 2(a) and (b) Variation of solid hydrogen.

4. 計算

実験結果である10時間後の固体水素の分布を基にモデ ルを作成した(Fig.3)。このモデルを基に、水素のオルソーパ ラ変換(250 W/m³)による発熱やコーン部へのふく射熱(50 nW)を仮定し、温度分布を計算した結果をFig.4 に示す。この 計算結果は、24 時間後の固体水素の分布予測することが可 能な温度分布となっていることが分かった。



Fig.3 3D Model of PS shell filled with SH₂. Four different heat transfer coefficients related to free convection: 31.7 W/m²K from 0° to 45° of zenith angle, 28.5 W/m²K from 45° to 90°, 22.2 W/m²K from 90° to 135° and 7.9 W/m²K from 135° to 180°, are assigned.



Fig.4 Temperature profile in the dummy target with radiation.

超臨界ヘリウムにおける鉛直平板間自然対流中の渦構造

Vortical structures induced by natural convection between vertical parallel plates in supercritical helium

______ (KEK) OKAMURA Takahiro (KEK) E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

一般に流体機器における流動摩擦抵抗の低減や伝 1. 緒言 熱特性を向上させる有効的な手段の1つとして,流れ場に形 成される渦の構造と力学過程を把握しこれらを制御する方法 が挙げられる. 超臨界ヘリウム (SHe) を用いた加速器用超伝 導電磁石冷却流路等は空間的な制限も多いため、流れ場の制 御を行うことは非常に有益であり,妥当な制御を行うために も各種流れ場における渦の動力学を明らかにすることは必要 不可欠と考える. 前報では, 水平平板自然対流場における渦 構造の数値計算を行った [1]. 解析から密度差及び低熱拡散 性に起因した高温-低温ドメインの界面不安定性により対流 発生の初期の段階で多数の渦輪が形成される.その後は位相 幾何が変わり端部を有する管状渦により流れ場は支配される ことが示された.本報では渦構造の特異性が顕著だった臨界 点近傍に焦点を絞り、乱流への遷移過程等未だ不明点の多い 鉛直平板自然対流場における境界層内の流動状態について渦 構造と熱伝達の両面から議論する.

2. 解析系 解析体系は 3 次元系 $(x, y, z) \in \Omega_{3V}$ def [0, L_x] × [0, L_y] × [0, L_z] の方形流路とする. x 成分は鉛 直上向きを正とし, z 成分は流路ギャップ方向, y 成分はスパ ン方向を示す. z = 0 面の一様温度加熱系とし, $z = L_z$ の面は一定温度 T_o としている. 熱的緩和過程の単純な < $p(\mathbf{r}, t) > \simeq const$ 系を考え, $x = 0, L_x$ の面に流入流出 条件を適用する. 他の境界面は滑無し条件を適用する. なお 基礎式・計算手法等は当日述べる.

3. 結果と考察 計算結果の一例として, 圧力 $p_o = 229$ kPa, 初期流体温度 $T_o = 5.25$ K, $Pr_{\infty} = 5.17$, $Ra_{L_x} = PrGr_{L_x} = 8 \times 10^{12}$, $\Gamma_x = L_x/L_z = 14.4$, $\Gamma_y = L_y/L_z = 1$ の場合 (RUN-1) について以下で議論する. Fig.1-(i), Fig.1-(ii) に時間 $t_i = 1$ sec 及び $t_{ii} = 1.75$ sec の遷移域から乱流 領域の渦構造の側面図 $(x-z) \cdot 上面図 (x-y)$ を示す. 図中の白 い部分は管状渦を意味する. 両時刻における流れ場の特徴は それぞれ次のとおりである. (i) の段階で, スパン幅程度の長 さをもつ横渦が等間隔で形成される領域が存在し, その渦管 の両端は壁面にある. (ii) の段階では, 渦管の両端が壁面に 位置する渦はほとんど無く, 渦管の各々は複雑に縺れ合った 状態を形成し, 速度境界層界面も間歇的構造を示す. このよ うに Fig.1-(i) 図中心付近の横渦状態から (ii) の絡み合った渦



Fig. 2 Nu_x vs Ra_x at $t = t_{ii}$.

構造への遷移は主に 3 次元系での $\omega_j \partial_j u_i$ に起因する渦の伸 張,及びその凍結的な運動と壁面摩擦の相互作用が関係して いる.それぞれのメカニズムを裏付ける現象として,(i)→(ii) の平均渦管コア径の減少,及び(i)の下流領域において両端 が壁面にある渦管の捩れによる渦管の不安定化・巻き込み化 が得られている.また流れ場の時間発展を初期状態から見た 場合,一次・二次の流体力学的不安定性を経て不規則な渦構 造をもつ乱流状態へ遷移することが分かった.

Fig.2 に t_{ii} 時の局所的なヌセルト数 Nu_x とレイリー数 Ra_x の関係を示す. 同図中には比較のため,積分型境界層方 程式の層流時における解析解,及び高プラントル数流体及び 水の層流-乱流域を含めた熱伝達実験式をプロットしている. $Ra_x \leq Ra_c = 3.0 \times 10^{10}$ では層流領域の解析解と一致して いるが, $Ra_x \sim Ra_c$ で Nu_x は弱く揺らぎ始める. やがて $Ra_x \simeq 10^{11}$ 近傍で Nu_x に跳びが生じ,乱流熱伝達へ遷移す る. この跳びは非乱流領域流体の巻き込み化による混合に起 因したものである. この乱流熱伝達遷移点は実験式と異なっ ており議論の余地があるが,それ以降の乱流域熱伝達特性は 実験式と比較的良い一致を示しており,数値解は層流から乱 流状態への空間遷移を捕らえていると言うことが出来る.

謝辞本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究 B)の助成を得て行ったものである.

1. T. Okamura: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2008)



Fig. 1 Side (x-z) and Top (x-y) view of instantaneous vortical structures at $t_i = 1$ sec, Fig.1-(i) and $t_{ii} = 1.75$ sec, Fig.1-(ii).

Gd 系 123 高性能溶融バルク緻密材の作製と特性評価 (Ⅲ) Preparation and properties of high-quality melt growth Gd123 bulks with low void density (Ⅲ)

藤本 浩之 (鉄道総研);手嶋 英一,森田 充 (新日鐵)

<u>FUJIMOTO Hiroyuki</u> (Railway Technical Research Institute); 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(GdBa₂Cu₃O_x:Gd-123)超電導バルク体試料を作製 し[5]、その特性(曲げ強度、硬さ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[6,7]。ここでは、同バルク体 の弾性率、破壊靱性などについて報告する。

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 Ag₂O 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、各試 験項目に適した寸法・形状に切断加工して得た。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、弾性率(ヤング率)とポアソ ン比は、大気中・室温にて静的方法(歪ゲージ法)で測定 し、破壊靱性は、SEPB 法(JIS-R-1607 ファインセラミック スの破壊じん(靭)性試験方法)によって評価した。さらに、 超電導特性を評価した。

3. Gd -123 の機械的特性等評価結果

表1に標準材と緻密材の弾性率とポアソン比の測定結果 を示す。試験片は、バルク体外周部の下層から切り出し、寸 法は、8mm(縦)×8mm(横)×20mm(高さ、ab 面方向)である。 測定は、圧縮力を試験片の軸方向に与え、応力歪曲線より弾 性率を、縦歪と横歪の関係からポアソン比を求めた。弾性率 は、標準材の120GPa 程度の値に比べ、緻密化により、 145GPa 程度と大きくなっていることがわかる。また、緻密材の ポアソン比は、未熱処理、アニール熱処理材とも、標準材とほ ぼ同様な値を得た。アニール熱処理することで、ポアソン比が 小さくなっていることは明らかである。

表2には、同様に破壊靱性の測定結果を示す。ここでは、

ノッチ(切り欠き)付き試料を使う SEPB (Single Edge Precracked Beam) 法で片側貫通予き裂を導入し、3 点曲げ破壊試験を行 い、平面ひずみ破壊靱性 K_{lc} を求めた。破壊靱性の測定結果 からは、緻密材・未熱処理が 1.9 MPam^{1/2} 程度、熱処理材が 2.1 MPam^{1/2} 程度とアニール熱処理により大きくなっていること がわかる。また、標準材との比較では、それぞれ、1.8 MPam^{1/2} と 2.0 MPam^{1/2} 程度で、緻密材のほうが大きくなり、強度の向上 とともに、破壊靱性が向上することもわかった。また、組織の緻 密化により曲げ強度が 1.2 倍以上向上したことは、報告済み である **[5-7]**。

TABLE I ELASTICITY, *E*, AND POISSON'S RATIO OF THE SPECIMENS AMONG GdBaCu0/Ag BULKS.

	Stand	ard	Densif	fied
Heat	Elasticity	Poisson's	Elasticity	Poisson's
treatment	(GPa)	ratio	(GPa)	ratio
As-grown	121	0.36	145	0.37
Annealed	119	0.23	144	0.22

TABLE II AVERAGE FRACTURE TOUGHNESS, K_{IC} OF THE SPECIMENS AMONG GdBaCuO/Ag BULKS. (SEPB)

Heat		K_{IC} (MPam ^{1/2}): SEPB		
treatment	No.	Standard	Densified	
As-grown	1	1.9	1.8	
	2	1.7	1.9	
	Average	1.8	1.9	
	1	2.0	2.2	
Annealed	2	2.0	2.0	
	Average	2.0	2.1	

さらに、緻密材の超電導特性は、77K での捕捉磁界測定 結果から、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、本作製法による緻密化 Gd 系では、ボイド 密度低減による機械的特性の改善と高い超電導特性が両立 することが示唆される。

- 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.
- H.Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77, (2007), 2P-p13, p.158.
- H.Fujimoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78, (2008), 2D-a04, p.145.
- H.Fujimoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79, (2008), 3D-a08, p.229.
- 7. H. Fujimoto et al.: presented at ASC2008, to be published in IEEE Appl. Supercond. 2009.

結晶成長方位を変えた Y123 バルクの特徴

Features of Y123 Melt-Solidified Bulks with Different Crystal Growth Directions

<u>赤坂友幸</u>, 石井悠衣, 荻野拓, 下山淳一, 岸尾光二 (東大院工); 堀井滋,(高知工大) <u>T. Akasaka</u>, Y. Ishii, H. Ogino, J. Shimoyama, and K. Kishio (Univ. of Tokyo); S. Horii (Kochi Univ. of Technol.) E-mail: t070623@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (T. Akasaka)

【緒言】 円盤状 REBa₂Cu₃O_v(RE123)溶融凝固バルクの作 製では、通常 Fig. 1(a)のように種結晶の c 軸をペレット表 面に垂直に置き結晶成長を行い、種結晶直下方向に ab 面 に垂直な c-growth 領域を、動径方向に ab 面に平行な a-growth 領域を成長させる。c-growth 領域は結晶成長時の 過冷度が小さく、a-growth 領域では結晶成長が進むととも にそれが大きくなるが、過冷度の違いは RE₂BaCuO₅ (RE211)常伝導析出物の体積分率やRE123の結晶性に影響 し、結果的に J。特性が領域間で大きく異なることがわか っている[1]。しかし、これが単に過冷度の違いに起因する ものか、成長軸方向の本質的な違いによるものかは明らか にされていなかった。そこで本研究では、Fig. 1(b)のよう に種結晶の c 軸をペレットに平行に配置して Y123 溶融凝 固バルクを育成し、従来の方法で作製したバルクとの比較 から各成長領域の本質的な違いを明らかにし、RE123 溶融 凝固バルクのさらなるJ_cの改善手法の確立を目的とした。

【実験方法】 固相反応法によって予め作製した Y123 と Y211 の粉末を 7:3 のモル比で秤取し 0.5 wt%の Pt を加 え混合後、一軸プレス(1 t/cm²)によって 20 mm ϕ ×10 mm^t のペレットに成型した。Fig. 1(a), (b)のように Nd123 種結 晶をペレット上面中央に置き、空気中において溶融凝固を 行った後、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、SEM による微細 組織、極点図による結晶配向性、磁気光学法による磁束密 度分布、および SQUID 磁束計による磁化測定から T_c , J_c を評価した。

【結果と考察】 種結晶の c 軸をペレットに平行に配置し た新手法においても、種結晶からエピタキシャル成長した シングルドメインのバルク体が得られた。各領域における 過冷度は a-growth (垂直方向), c-growth (動径方向), a-growth (動径方向)の順に大きくなる。(103)極点図の測 定から過冷度が大きくなる順に結晶配向性の乱れが大き くなることがわかった。また同じ動径方向では c-growth 領域の方が高い結晶配向性を有し、過冷度及び成長領域と 結晶配向性に強い相関があることが示唆された。種結晶位 置から動径方向と直下方向における Y123 結晶内の Y211 析出物の体積分率の変化を Fig. 2 に示す。a-growth 領域に おける Y211の体積分率は成長方向による有意な差はなく、 c-growth 領域よりも高いことがわかった。よって、Y211 の体積分率は、過冷度の大小ではなく、a、c-growth の成 長領域によって本質的に異なることが明らかになった。 Fig.3に各成長領域の種結晶から1mm離れた部分より切 り出した試料の77KにおけるJ。の磁場依存性を示す。従 来法で成長したバルクの a-growth 領域では低磁場下の J_c は高いが高磁場下のJcは低く、Y211の体積分率が極めて 低い *c*-growth 領域では低磁場下の J_cは低いものの第2ピ ーク効果により高磁場下の J_c が高い。一方、新手法によ り育成したバルクは、成長領域によらず優れた J。特性を 示した。Jcの種結晶からの動径方向の距離依存性を調べた ところ、結晶配向性の優れた c-growth 領域の方が、a-growth 領域よりも距離によるJ。の低下が小さいことがわかった。 また新手法では、高い結晶配向性をもつ実用化に適した領

域が多いことと、種結晶の c 軸をペレットに平行に配置し て成長させていることから、加工により高結晶配向性領域 が主体の、アスペクト比の大きな指向性を持つバルク磁石 の開発が可能であり、薬剤の磁気搬送、小型磁気ベアリン グなどへの応用も期待できる。講演では a-growth 領域と c-growth 領域の特性の違いについて総合的に議論する。



Fig. 1 Schematics of conventional (a) and new (b) growth methods of Y123 melt-solidified bulks.



Fig. 2 Volume fraction of Y211 at various positions of Y123 melt-solidified bulks grown by the new method.



Fig. 3 J_c -H curves for Y123 melt-solidified bulks.

[1] T. Nakashima et al., Physica C 426-431 (2005) 726-730.

Capped-LPE 法によって作製した Yドープ Bi-2212 膜のキャリア濃度と超伝導特性 Carrier Density and Superconducting Properties Y-Doped Bi-2212 Films by Capped-LPE

千葉 孝,磯部 昌宏,新宅 崇修,中島 健介(山形大)

CHIBA Takashi, ISOBE Masahiro, SHINTAKU Takamasa, NAKAJIMA Kensuke (Yamagata Univ.)

E-mail: tam67078@st.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}(Bi-2212)に代表される異方性が強い高 温超伝導体は, c 軸方向に積層しており,結晶自体が CuO2 面が絶縁的な BiO 面を介してジョセフソン結合し固有ジョセフ ソン接合として機能するため,発振や検出などの高周波デバ イスへの応用が期待されている.固有ジョセフソン接合の特性 は, Bi-2212 の超伝導特性,特に, c 軸方向の臨界電流密度 $J_{\rm C}$ °に支配される.

これまで一般に J_{c} °は Bi-2212 の過剰酸素量 δ を変化させることで制御されてきた.しかしこの方法には、 δ を最適ドープから変化させると、 T_{c} が低下してしまうという問題があった. 一方、Bi-2212 の Ca サイトの一部を Y によって置換するとキャリア濃度が低下しc軸方向の J_{c} が低下するが、 T_{c} は逆に上昇するという報告がある^[1,2].

本研究では、Bi-2212 の Ca サイトの一部を Y で置換した Bi₂Sr₂Ca_{1-x}Y_xO_{8+ δ}(Bi(Y)-2212)膜を作製し、Y ドープがキャ リア濃度と超伝導特性に与える影響を評価した.

2. 実験方法

実験には Capped-LPE 法で成膜して Bi-2212 ならびに Yド ープ量を 2~10% に変化させた Bi₂Sr₂Ca_{1-x}Y_xO_{8+ δ} (Bi(Y)-2212)の薄膜を使用した. 試料は雰囲気制御赤外線 炉を用いて異なる酸素分圧(1~3000Pa)下で 400°C, 10 時間 アニールし超伝導転移温度 T_{c} ならびに c 軸方向の臨界電流 密度 J_{c} を測定した.

なお、 $J_{\rm C}$ 。は段差基板プロセスにより作製した固有ジョセフソン接合の面積と臨界電流 $I_{\rm C}$ から求めた.

3. 実験結果

Fig. 1に Bi-2212 の最適ドープ ($n=2.2 \times 10^{21}$ cm⁻³)に相当 する酸素分圧 P₀₂=10Pa でアニールした Yドープ量 4%と 8% の Bi(Y)-2212 の R-T 特性を同じ条件で酸素アニールした Bi-2212 のそれと比較して示す. Yドープしても Bi-2212 の平 衡酸素量に変化はないと仮定すると, アニール温度 400°Cで の P₀₂に対する Bi(Y)-2212 のキャリア密度は, Fig.2 のように 変化する. Fig.2 から P₀₂=10Pa でアニールした場合, Yドープ 量 4%と 8%の Bi(Y)-2212 はキャリア密度がそれぞれ n = 2.1× 10^{21} cm⁻³ と 1.92×10^{21} cm⁻³ となり, Bi-2212 であれば大幅 に $T_{\rm C}$ が低下するアンダードープ状態に相当する. しかしなが ら, Fig.1 から明らかなように Yドープ量 4%の Bi(Y)-2212 で は $T_{\rm C}$ は全く低下しなかった.

Yドープしていない Bi-2212 と Yドープ量 4%の Bi(Y)-2212 による固有ジョセフソン接合特性の *I-V* 特性を Fig.3 に示す. それぞれの接合面積から J_c^c は Bi-2212 は, 1200[A/cm²], Bi(Y4%)-2212 は, 730[A/cm²]と求められた.

以上のことから Y ドープが $T_c \epsilon$ 低下させることなく J_c ^c を抑制することに効果的であることが明らかとなった.

参考文献

[1] S. Sakai *et al.*, U. S. Patent #6, 441, 394 B2, Aug. 27 (2002)

[2] H.Eisaki *et al*., PHYSICAL REVIEW B 69, 064512 (2004)





Fig.2 Carrier densities vs. oxygen partial pressures estimated for Bi(Y)-2212 with various Y concentrations.



Fig.3 I-V characteristics of Bi-2212 (a) and Bi(Y=4%)-2212 (b) intrinsic Josephson junctions.

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 Examination of power handling capability of a microstrip line resonater

<u>宇野 正紘</u>, 遠藤 之正, 齊藤 剛司, 加藤 卓也, 小野 哲, 李 宰勲, 齊藤敦, 大嶋 重利(山形大学) <u>UNO Masahiro, ENDO Yukimasa, SAITO</u> Takashi, KATO Takuya, ONO Satoshi, LEE Jae Hun, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)

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増加が 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,移動体通信基地局受信用フィルタ が実用化されている.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. 耐電力特性が大きい 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[1]. 共振器形 状として最も一般的な λ。/2 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幅に電流が集中する.したが って線路幅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線路(MSL)を幅方 向に均等に分割した分割型 MSL を提案してきた[2]. 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. 今回, 電流集中をより緩和させる ために分割法を検討した. すなわち, 中の線路を広くするよう に分割し、その違いを報告する.

2. 結果及び検討

Fig.1(a)で示すような 2 段のフィルタを, 仕様(中心周波数 5[GHz], 帯域幅 100[MHz],)を満たすように設計する. この 1/2 波長の共振器を Fig.1(b)(c)(d)で示すような線路で作製し たとき, 共振器の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. straight 型共振器は分割なしの MSL である. balance 型共振器は、等間隔に 0.01[mm]のスリットを入れた線 路であり, unbalance 型共振器は線路端付近にスリットを入れ た線路である. 基板は 20×20[mm²], 厚さ 0.5[mm], ϵ_r = 9.85 とし, 共振器, 及びグランド面の導体は完全導体を想定し, 誘 電損失もゼロとし計算した. straight 型, balance 型及び, unbalance 型 2 段 MSLR フィルタの設計結果を図 2 に示す. straight 型, balance 型及び, unbalance 型 2 段び, unbalance 型 2 段び, unbalance 型 2 段 MSLR フィルタ に示す.

耐電力は共振器に流れる電流の大きさに依存するため, 表面電流密度の解析より耐電力の検討を行った.表1に straight型, balance型及び, unbalance型2段MSLRフィルタ の線路端表面電流密度(J)を示す.電流密度は共振器の線路 端の最も高い値を示している.表1の結果より straight型に対 して, balance型及び, unbalance型2段MSLRフィルタはそれ ぞれ~0.6dB, ~1.9dB耐電力が上昇すると想定される.

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, 実際にフィルタを試作し, その有効性を検証する.







Table 1 current density of straight-, balance-, and unbalancemicrostrip line filters

	J[A/m]
straight type	484.5268
balance type	452.9222
unbalance type	391.4576

参考文献

A. Saito, et al.: Physic C, Vol. 463(2007) p. 1064–1067
 S. Takeuchi, et al.: Physic C, Vol. 468(2008) p. 1954–1957

回転型低温6元対向スパッタによる Nb/AlOx-Al/Nb接合の作製

Nb/AIOx-AI/Nb Superconducting Tunnel Junction Fabricated by a Rotating Multi-Facing Target Sputtering System

<u>諸橋 信一</u>,波多野 雅也,河野 佑介,礒部 尚紀,永田 省吾(山口大学院) <u>SHINICHI Morohashi</u>, MASAYA Hatano, YUSUKE Kawano, NAOKI Isobe, SHOGO Nagata (YAMAGUCHI UNIV) E-mail: smoro@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導トンネル接合(STJ)素子は、X線検出器として半導体検出器を遙かに凌駕する性能を持っており、高分子材料の 非破壊検出・分析用検出器、あるいはテラヘルツ光の検出器 として宇宙観測用途にと期待されている。

本研究では、高性能なX線検出器用STJ素子作製のために、新規に開発した低温・6元・コンパクトを特徴とする多元スパッタ装置を用いて、Nb/AlOx-Al/Nb 接合の作製を行った。

2. 回転型低温6元対向スパッタの特徴

図1に装置概念図を示す。2つの対向する4角柱をおき、そ れぞれのボックス内の磁石は閉じた磁気回路を形成して おり、正対するボックスの磁石は反対磁極になっている。 正対するボックスを回転することで4元スパッタが可能と なる。図では4元スパッタの場合の4角柱で説明しているが、 ボックス内が閉じた磁気回路を構成していれば六角柱、 八角柱などでもよい。その特徴は、磁石の高機能な配置に よる、(a)マルチターゲット化、(b)低温スパッタ化、(c)カソード 容積のコンパクト化・省エネ化、の実現である¹⁻³⁾。製作した装 置は対向する6角柱のカソードにより、STJ素子用の接合電極 用 Nb, Ta, Al, W薄膜の4層及び、SiO₂とAl₂O₃の2種類の層 間絶縁膜,計6層の薄膜作製が可能な直径 100 mm Φの6つ のターゲットを備えている。

3. Nb/AIOx-AI/Nb 接合作製

作製した STJ 素子電極用 Nb 薄膜は,超伝導転移温度 Tc はバルク Nb と同じ 9.3 K,残留抵抗比は最大 4.9,AFM 測 定による表面荒さとして膜厚 100 nm で 2 nm 程度の値が 得られた 4^{-0} 。このときの基板温度は 50℃以下であった。 これらの結果は,不純ガスの取り込みの小さな高品質な Nb 薄膜の低温作製が実現していることを示している。

Al₂O₃薄膜を 10 nm 堆積した Si 基板上に, Nb 下部および上 部電極とも膜厚 100 nm, スパッタ時の Ar 圧力は 1.33 Pa, 堆 積速度 60 nm/min で, Al 層は膜厚 10 nm, スパッタ時の Ar 圧力は 1.0 Pa, 堆積速度 76 nm/min で, いずれも DC スパッ タで堆積した。AlOx 層は大気暴露 30 分で作製した。接合微 細加工方法はフォトリン, RIE および陽極酸化法を用いた⁵⁰。 図2に接合サイズ 25 μ m□の 4.2 K での素子特性を示す。 ギャップ電圧約 2.6 mV, 0.5 mV でのリーク電流密度 3.3 nA/ μ m²と良好な特性が得られた。

4. まとめ

低温・多元・省エネ・コンパクトを特徴とする回転型低温6 元対向スパッタを用いて Nb/AlOx-Al/Nb 接合を作製し,4.2 K でリーク電流密度の小さな特性が得られた。素子特性のス パッタ Ar 圧力依存性の詳細については当日講演する。

5. 謝辞

本研究の一部は, 平成17, 18年度経済産業省地域新生 コンソーシアム研究開発事業「有機 EL 電極・保護膜形成用 新型低温スパッタ装置の開発(研究代表者:山口大学諸橋信 一)17S6014」により実施したもので、関係各位に感謝する。

参考文献

- 特許第 3936970 号 薄膜作製用スパッタ装置, 発明者:諸橋信一
- 2)諸橋信一,日本真空工業会真空ジャーナル No. 113 (2007), pp. 14-18
- S. Morohashi, Transactions of Materials Research Society of Japan 33[4] 861-864(2008)
- 4)諸橋信一 他,第79回2008年度秋季低温工学・超電 導学会,3D-a10
- 5) S. Morohashi, etc, IEEE TRANSACTIONS APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, pp. 98-101, (2005)



Fig. 1 A schematic diagram of a rotating multi-facing target sputtering system



Fig. 2 I-V characteristics of Nb/AlOx-Al/Nb superconducting tunnel junction measured at 4.2 K. The junction size is 25 μ m \Box . Vertical scale is 0.25 mA/div. Horizontal scale is 0.5 mV/div.

Nb₃Sn線材の歪効果に対する3次元歪を用いたモデル

Three-dimensional strain model for strain effect of Nb₃Sn wires

<u>小黒 英俊</u> (茨城大); 淡路 智, 西島 元, 渡辺 和雄 (東北大) <u>OGURO Hidetoshi</u> (Ibaraki Univ.); AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.), E-mail: oguro@mx.ibaraki.ac.jp

1. はじめに

我々は、Nb₃Sn 線材の超伝導特性と歪との関係を正確に理 解するために、3次元歪に注目して研究を行ってきた[1]. そし て、中性子回折実験や線材の引張り試験から、Nb₃Sn 線材の 超伝導特性と3次元歪との関係を実験的に明らかにしてきた [2]. 今回はそれらのデータをまとめて、Nb₃Sn 線材の歪効果 に関してモデルを用いて表すことを試みる.実験で得られた3 次元歪とその B_{c2}の値から、3次元歪まで考慮したモデルを考 えた.

2.3 次元歪と超伝導特性

議論に用いる 3 次元歪と超伝導特性との関係は、これまで に発表してきた実験結果をそのまま用いる. 図 1 は断面構成 を変えた Nb₃Sn 線材の B_{c2} の引張り歪依存性を示している. 上 から、補強材 CuNb が内側にありその外に Nb₃Sn 層があるもの、 Nb₃Sn 層が内側にあり、その外側に補強材 CuNb があるもの、 補強材が無い標準的な線材の 3 種類を用いている. それぞ れ、熱処理直後と事前曲げ処理後の線材の結果を示してい るが、全てその振る舞いが異なっている. この異なる振る舞い をする Nb₃Sn 線材の B_{c2} の歪効果を、一つの式で表すことを 試みる.

3. モデルと考察

モデルは, Markiewicz の提案した Invariant strain function を基に考えた. 式を使うにあたり,まずは線材の軸,横方向歪とない下のように対応づけた.

$$\begin{split} \mathcal{E}_{z} &= \mathcal{E}_{ax}, \mathcal{E}_{x} = \mathcal{E}_{y} = \mathcal{E}_{lat} \\ \\ & これを, 偏差歪, 静水圧歪に直すと, \\ & \mathcal{E}_{dev} = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\mathcal{E}_{x} - \mathcal{E}_{y} \right)^{2} + \left(\mathcal{E}_{y} - \mathcal{E}_{z} \right)^{2} + \left(\mathcal{E}_{z} - \mathcal{E}_{x} \right)^{2}} \end{split}$$

 $\mathcal{E}_{hvd} = \mathcal{E}_{x} + \mathcal{E}_{v} + \mathcal{E}_{z}$

となる. この2つを用いて Invariant strain function を書き直すと、以下のような式となる.

$$S_{b} = \frac{B_{c2^{a}}(\varepsilon)}{B_{c2^{a}\max}} = \frac{1}{\left(1 + a_{1}\varepsilon_{\text{hyd}}\right)} \frac{1}{\left(1 + a_{2}\frac{3}{8}\varepsilon_{\text{dev}}^{2} + a_{3}\frac{\text{sgn}(\varepsilon_{\text{tensile}} + \varepsilon_{ax0})}{8\sqrt{2}}\varepsilon_{\text{dev}}^{3} + a_{4}\frac{9}{64}\varepsilon_{\text{dev}}^{4}\right)}$$

この式を用いて、実験結果に対してフィッティングすると、右図 の実線と点線のようになった.このときのフィッティングパラメー タは、 $\epsilon_{ax} > 0$ の時、 $a_1 = -0.1134$, $a_2 = 2.334$, $a_3 = -18.87$, $a_4 = 14.11$, $\epsilon_{ax} < 0$ の時, $a_1 = -0.1134$, $a_2 = 0.2987$, $a_3 = 8.214$, $a_4 = -2.714$ を全ての結果に対して使用している.つまり、全く同じ パラメータを使って、6 つの結果を示すことができた.さらにこ のモデルから考察を行うと、Nb₃Sn線材の超伝導特性に対す る歪効果を支配するのは、軸方向の残留歪 ϵ_{ax0} 、縦横比(軸方向へ引張り歪が生じた時に変化する横 方向歪の割合) vの 3 つだけであることが分かった.つまり、測 定可能な 3 つの量で、Nb₃Sn線材の超伝導特性の多様な歪 依存性が記述可能であることが分かった.

本研究は科学研究費補助金基盤(B)及び,科学研究費補助 金(特別研究員奨励費),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.



Fig. 1 The tensile strain dependence of the B_{c2} for Nb₃Sn wires. The points are the experimental results. The solid lines are the calculation results.

参考文献

 [1] H. Oguro *et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond.* 18 (2008) 1047–1050

[2] H. Oguro et. al., J. Appl Phys. 101 (2007) 103913

Nb₃Sn 線材の機械特性に与えるアルミナ分散銅複合の効果

Effect of Alumina Dispersed Copper Composition

for Nb₃Sn Wire Mechanical Characteristic

<u>西島</u>元, 峯岸 一博, 渡辺 和雄 (東北大); 大圃 一実, 中川 和彦 (日立電線) <u>NISHIJIMA Gen</u>, MINEGISHI Kazuhiro, WATANABE Kazuo (Tohoku University); OHATA Katsumi, NAKAGAWA Kazuhiko (Hitachi Cable) E-mail: gen@imr.edu

1. はじめに

Ta 繊維補強 Nb₃Sn 線材[1]は各フィラメントを Ta 繊維 によって補強する構造をとっている。この線材の特徴は 他の高強度 Nb₃Sn線材[2-4]と比べて高延性であることと, 予歪 (pre-strain) が 0.1%程度と非常に小さいことである [5]。これらは Ta の高弾性かつ高延性な特性と,熱膨張係 数が Nb₃Sn のそれと近いことに起因する。

一方, 歪感受性が同じで予歪の大きさの異なる Nb₃Sn 線材を考えると, 大きな引張り歪領域では, 予歪が大き い線材のほうが臨界電流は大きい。このような高歪応用 の観点から, 我々は Ta 繊維補強線材にアルミナ分散銅 (Oxygen Dispersion Strengthened Copper: ODS-Cu)を複合し, I_c 時性における予歪の増加と機械特性の向上について 報告した[6]。

今回はアルミナ分散銅複合が機械特性に与える効果を 調べるために、Ta 繊維補強の無い Nb₃Sn 線材に ODS-Cu を複合した。

2. 試料線材諸元および実験

Table 1 に試料線材諸元を示す。試料線材はどちらも直径 1 mmのブロンズ法 Nb₃Sn 線材であり,安定化 Cu の一部を ODS-Cu に置き換えた構造である。試料名 ODS/Ta/Nb₃Sn は各フィラメントが Ta 繊維補強され, ODS/Cu/Nb₃Sn はフィラメント補強のない試料である。

実験では 4.2 K, 磁場中で引張り歪を印加しながら臨界 電流を測定した。マグネットの磁場空間 (ϕ 52 mm) の制 限から試料長は 40 mm であり, 電圧端子間距離は 10 mm とした。歪は電極間距離の変化をクリップゲージで測定 し, 初期長さで除することで求めた。また, 臨界電流は 1 μ V/cm (10⁻⁴ V/m)定義で求めた。

3. 機械特性

Fig. 1 に 4.2 K における ODS-Cu 複合 Ta 繊維補強 Nb₃Sn 線材 (ODS/Ta/Nb₃Sn) および ODS-Cu 複合 Nb₃Sn 線材 (ODS/Cu/Nb₃Sn)の, 臨界電流密度の歪依存性 (J_{c} - ϵ) と応 力-歪曲線 (σ - ϵ) を示す。ここで, 臨界電流密度はいわゆ る non-Cu J_{c} であり, 測定した I_{c} を Table 1 における Nb+bronze の面積で除した値に相当する。

Fig. 1 から明らかなように, ODS/Ta/Nb₃Sn の応力-歪曲 線は ODS/Cu/Nb₃Sn のそれよりも高応力側に位置する。例 えば 0.3%歪における塑性流動応力は, 前者が 299 MPa で あるのに対し後者は 219 MPa である。この 30%近い応力 向上が Ta 繊維補強の効果であると推察される。

一方、J_c-ε特性においては、ゼロ歪の状態での J_c は
 ODS/Ta/Nb₃Sn の方が大きいが、J_cの最大値(J_{cm})で比較す
 ると ODS/Cu/Nb₃Sn の方が大きい。

当日は、Ta 繊維補強,ODS-Cu 複合の効果について詳細な検討を行いたい。

- [1] G. Iwaki et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 12 (2002) 1045.
- [2] K. Watanabe et al., IEEE Trans. Magn., 30 (1994) 1871.
- [3] S. Murase et al., IEEE Trans. Magn., 32 (1996) 2937.
- [4] H. Sakamoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 10 (2000) 1008.
- [5] G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3442.
- [6] 西島他, 2008 年度秋季低温工学·超電導学会 2D-a01

Table 1 Specification of Nb₃Sn wires

Table 1 Specification of No ₃ Sh wires				
	ODS/Ta/Nb ₃ Sn	ODS/Cu/Nb ₃ Sn		
Wire diameter	1.0 mm			
Bronze	Cu-16wt%Ta-0.3wt%Ti			
Diffusion barrier	Та			
Filament diameter	8.0 µm	4.6 µm		
Twist pitch	20 mm			
Heat treatment	650 °C × 200 hrs			
Volume fraction				
Ta reinforcement	20%	-		
Nb + bronze	41%	61%		
Ta barrier	6%			
ODS-Cu	20% 20%			
Cu stabilizer	13%			



Fig. 1 Tensile stress and critical current density (J_c) as a function of applied tensile strain for ODS composited Nb₃Sn wires.

Sn 基合金を用いた Nb₃Sn 線材の作製

Nb₃Sn Wires Prepared from Sn Based Alloys

太刀川 恭治, 佐々木 弘樹(院), <u>山口 真弘(院)</u>, 林 裕貴(院), 中田 光栄(院) (東海大・工); 竹内 孝夫(NIMS) K.Tachikawa, H.Sasaki, <u>M.Yamaguchi</u>, Y.Hayashi, K.Nakata (Faculty of Engr., Tokai Univ.); T.Takeuchi(NIMS) E-mail:tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

SnとTaの粉末を混合して~770℃で反応させるとタイトに凝固 した合金がえられ、シートやロッドに加工が容易である。これら と Nb を複合してジェリーロール(JR)法やロッド法で作製された Nb₃Sn 線材は B_{c2}(4.2K)が 26.9T(中点)と優れた高磁界特性を 示す。本研究では Sn-Ta 系シートの組織について検討するとと もに、新たに同様な方法で Sn-B 系シートを作製してその組織 を比較、研究し、さらに JR 法により線材化を試みた。

2. 実験方法

Sn/Ta 及び Sn/B 原子比が 4/1, 6/1, 8/1 の混合粉末に少量 の Ti と Cu を加え真空中で熱処理して合金を作製した。Sn-B 系は Sn-Ta 系より凝固性、加工性がさらに優れていた。これら の合金をプレス後厚さ 80 µ m のシートに加工し、Nb シートと重 ねまきして JR 複合体を作製し、シースに挿入して線材に加工し た。Sn-Ta 系ではロッドを用いて多芯ロッド(MR)線も作製した。 これらの線材は真空中 725~775℃で熱処理し、試料とした。シ ートと線材断面の線材断面の組織を EPMA により分析し、また Nb₃Sn 層の面積比を求めた。さらに線材の I₆を垂直磁界下で 4 端子法によって 1 µ V/cm の基準で測定し、非銅部線材断面で 除して non-Cu J₆をもとめた。

3. 実験結果と考察

Fig.1 に Sn-Ta 系合金シートの EPMA マッピングを示した。 図より、Ta 粒子と Cu-Sn 粒子が Sn matrix 中に分散しているこ とがわかる。また、Sn-Ti-Ta 層が Ta 粒子の周りに存在する傾 向がみられる。このことより、少量の Ti 置換により Ta 粒子と Sn マトリックスの結合を良くしてボタンの凝集性を高めていると考 えられる。

Table 1 に異なる Nb₃Sn 線材の Nb₃Sn 層の J_cと面積比を示 した。表より、Sn-Ta 合金を用いた JR 法ならびに MR 法 Nb₃Sn 線材は 20T 以上の高磁界で優れた特性を示すことがわかる。 JR 法線材はシース部の厚さの減少、また MR 法線材は Sn-Ta 部に Nb 芯を挿入する等の断面構造の最適化によりさらに Nb₃Sn 層面積比の改善が期待される。

Fig.2 に Sn-B 系シートの EPMA マッピングを示した。図より、 B 粒子と Cu-Sn 粒子が Sn matrix 中に分散していることがわか る。また、B-Ti-Sn 層が B 粒子の周りに存在する傾向がみられ る。このことより、少量の Ti 置換により B 粒子と Sn マトリックスの 結合を良くしてボタンの凝集性を高めていると考えられ、Sn-Ta 系と類似した組織を示すことがわかった。

Fig.3 に Sn-B 系シートを用いて作製した JR 法 Nb₃Sn 線材を 750 C×100h 熱処理後の光学顕微鏡像を示す。シース部と芯 部に厚さ60~70 μ m の Nb₃Sn 層が生成されている。また Nb₃Sn 層の Sn 量は化学量論比に近い組成を示すことがわかった。 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。今後 B の Nb₃Sn の高磁界特性に対する影響に ついて研究する。

終わりに本研究における EPMA 分析について御尽力を頂 いた東海大学技術共同管理室 宮本泰男 室長に御礼申上 げます。

*1 : Flükiger et.al. : Cryogenics No.48 (2008) P 303.



Fig.1 EPMA composition mapping on the 8/1(Sn/Ta)-6at%Ti+3 wt%Cu sheet.

Table 1 J _c at high fields	and areal fraction	of Nb ₃ Sn layers ir	۱
different wires. Non Cu	$J_c = Nb_3SnJc \times Area$	al Fraction.	

Wine Creeffication	J _c (A/mm ²) @4.2K		non-Cu
wire specification	20Т	22T	(%)
Bronze Wire ^{*1}	~400		23
OST(RRP) Wire*1	~550	~200	38
SMI(PIT) Wire ^{*1}	~600	~220	25
JR Wire	~720	400 - 410	32
MR Wire	~700	~400	29



Fig.2 EPMA composition mapping on the 6/1(Sn/B)-4at%Ti+3 wt%Cu sheet.



Fig.3 Cross section of 8/1(Sn/B)-4Ti+3Cu sheet JR wire.

Nb₃Sn 線材のための実用ブロンズ合金の組織と冷間加工性

Microstructure and cold-workability of practical bronze alloy for Nb₃Sn conductor.

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) <u>TANIGUCHI Hiroyasu</u>, 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 Nb₃Sn 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)計画により従来にない多量 の線材が求められる状況下にある。その前駆体複合加工 に対してブロンズ自身の加工性が大きな影響を与えること は言うまでもない。 臨界電流密度の向上に関わるブロン ズ合金の高 Sn 濃度化も塑性加工性の確保が実現の鍵で あり、ブロンズ合金そのものの材料科学的知見を得ること が重要となる。本研究では、量産型各種 Sn 濃度ブロン ズ合金(~16wt%Sn)の溶製・加工・再結晶の各ステージに おける組織を系統的に評価した。さらには組織と伸線加工 性の関係についても調査した。

2. 超伝導用ブロンズの実用溶製技術

Nb₃Sn に微量の Ti を添加すると高磁場特性が改善す る。Nb への Ti 添加は原料コストを高めるためブロンズへ の Ti 添加が望まれていた。しかし一般的な大気鋳造法で は Ti の酸化を防ぐのが困難で、また凝固時に逆偏析が起 こって鋳造組成が不均質になるという大きな問題もあった。 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。Fig. 1 は水田式溶製 法の原理であり、実用超伝導用ブロンズの製造法である。



Fig. 1. Schematic illustration of MIZUTA method.

3. 超伝導用ブロンズ溶製塊の金属組織

超伝導用ブロンズ(~16wt%Sn)の金属組織は fcc 構造 の α 固溶体と CuSnTi 化合物粒子からなる。但し、溶製直 後は初晶 α デンドライトの隙間に δ 相が析出しているが、 溶体化処理で δ 相は α 相へ固溶し均質化する。水田式 製法によると逆偏析が顕著に抑制され、溶製塊(~ ϕ 220) の外周部と中心部の Sn 濃度の差は少ない。溶製塊の外 周部は柱状晶、中心部は等軸晶で構成され、 α 相の結晶 粒径には相違がある。

4. 超伝導用ブロンズの機械的特性と冷間塑性加工性

α相中の Sn 濃度が高まると、室温における硬度や 0.2%耐力は僅かに増加し、一方伸びは低下する(Fig. 2)。 同じ fcc 構造でも Sn 濃度により冷間塑性加工性が異なる ことが推測される。ブロンズの冷間塑性加工(引抜き加工) は、主に{111}面のすべり変形によるもので、加工直後の 組織には多くのすべり線(すべり帯)が明瞭に観察できる。 今回、14wt%Sn、15wt%Sn 及び 16wt%Sn 濃度のブロンズの 冷間引抜き加工限界を調査したところ、断線に至った加工 限界の減面率は、Sn 濃度の低い順にそれぞれ 94.59%、 86.80%、84.44%であった。いずれの濃度のブロンズも、当 初に想定していた限界よりも格段に高い減面率まで無断 線加工が可能であることがわかった。冷間引抜き加工によ る硬度や微視的組織の変化、さらには中間焼鈍条件が冷 間加工に与える影響についても報告する。



Fig. 2. Mechanical properties of practical bronze alloys.

拡散法 Cu 安定化 V−Ti 合金多芯線

Cu stabilized V-Ti alloy multifilamentary wire

竹内 孝夫, 瀧川 博幸, 伴野 信哉(NIMS);中川 正規, 岩谷 雅義, 井上 廉(徳島大);菱沼 良光, 西村 新(NIFS) <u>TAKEUCHI Takao</u>, TAKIGAWA Hiroyuki, BANNO Nobuya (NIMS); NAKAGAWA Masami, IWATANI Masayoshi, INOUE Kiyoshi (Tokushima Univ.); HISHINUMA Masayoshi, INOUE Kiyoshi (Tokushima Univ.); HISHINUMA Yoshimitu, NISHIMURA Arata (NIFS)

E-mail: TAKEUCHI.Takao@nims.go.jp

1. はじめに

我々は、低放射化超伝導材料として拡散法による V-Ti 合金の多芯線化に関する研究を実施している。一昨年、Ti/V 単芯六角ロッドを出発材料に選び、これを多数本束ねて Cu/V 2 重管に挿入後静水圧押し出しし、伸線加工してシン グル(1次スタック)線を作製し、このシングル線について拡散 熱処理を施しその超伝導特性を報告した[1]。今回は、六角 成形した Cu/V/Ti/V シングル線を多数本束ねて Cu 管に挿 入、静水圧押し出し、伸線加工を実施してマルチ(2次スタッ ク)線を試作したので、その拡散組織と超伝導特性を報告す る。

2. マルチ線

対辺長が 1.2 mm の六角 Cu/V/Ti/V シングル線を121本 束ねて 20/14.9 mm ϕ の Cu 管に挿入して静水圧押し出しした のち線径が 3.98mm ϕ まで伸線加工を施した。Fig. 1 に光学 顕微鏡で撮影した断面組織を示す。Ti/V 要素のサイズが約 10 μ m である。このサイズで合金化熱処理を施した。熱処理 時間を決定するために事前に切り出した短尺線について 850℃で 15 分、1 時間および 5 時間の拡散熱処理とその断面 観察を行った(Fig.2)。この予備検討結果から、Ti/V 要素が 一様に合金化する 850℃-5h を合金化のための熱処理条件 に採用した。3.98mm ϕ で合金化熱処理した後、伸線加工し た。一部の試料については、2.15mm ϕ または 1.0mm ϕ まで 伸線したところで 400℃-24h の析出熱処理を施し、その後最 終線径まで伸線加工した。



Fig.1 Cross-section of a 121-filament Cu/V/Ti/V composite unreacted, 3.98 mm in diameter: (a) overall, (b) a magnified filament which consists of 139 Ti/V elements.



Fig.2 Cross-sections of diffusion reacted Cu/V/Ti/V composites at 850°C for (a) 15 min, (b) 1 h and (c) 5 h.

3. 輸送電流特性

合金化熱処理後0.82mm øまで伸線加工したままの試料と 1.0mm ø での析出熱処理をはさんで0.66mm øまで伸線加 工した試料について、電気抵抗率の温度依存性をFig.3に 示す。また、これらと異なる条件で析出熱処理と伸線加工を

施した試料も含め、臨界電流値 *I*。と非銅部臨界電流密度 non-Cu *J*の磁場依存性を整理して Fig. 4、Fig. 5 に示す。



Fig. 3 Typical temperature dependence of resistivity for diffusion processed Cu/V/(V-Ti) alloy wires.



Fig. 4 I_c -B curves of Cu/V/(V-Ti) alloy wires.



Fig. 5 non-Cu J_c -B curves of Cu/V/(V-Ti) alloy wires.

謝辞 本研究は原子力試験研究委託費により実施した。

単芯 JR 法 Nb₃AI 線材の RHQ 処理条件と超伝導特性

Superconducting properties and RHQ processing condition of single core JR-Nb₃Al wire

物質•材料研究機構 <u>飯嶋安男</u>、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

RHQT 法 Nb₃Al 線材は高磁界での J_c特性が優れているこ とから種々の研究がなされている。これまでに Al 厚の厚い RIT 法線材において RHQ 処理の通電電極間隔を 100 から 300mm と長くすることで J_c-B 特性を改善することが出来た。そ のことから Al 厚の厚い JR 法線材でも同様な結果が得られな いかということで、RHQ 処理の通電電極間隔を 300mm にして 実験を行った結果、Al 厚の薄い JR 多芯線材と同等の J_c-B 特 性を得ることが出来た。RHQ 処理の通電電極間隔を長くする ことは、上部電極プーリーの偏心および液面振動による電極 間隔変動を小さくすることができ、また、線材単位長さ当りの加 熱エネルギーを小さく出来る利点があるため、より安定した RHQ 処理が可能になる。

本報告では、Al厚の厚いJR法線材でさらに通電電極間隔 を長くした場合に特性改善はできるのか、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検討した ので報告する。TaマトリックスはマトリックスへのAlの余分な拡 散を防ぎ RHQ処理条件の影響を単純化するために用いてい る。Al厚の厚いJR法線材で優れた特性が得られればkm級 の前躯体線材作製が容易になりコストダウンが計れる可能性 がある。

【2】実験方法

Ta マトリックス JR 法単芯前駆体線材は日立電線㈱で作製 したものを用いた。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、 470mm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 0.1~1.17s である。 RHQ 電圧設定(到達温度)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~ の変態熱処理は一般的な 800℃-10hr の熱処理を 800℃まで 1hr で昇温、10hr 保持、炉冷して実施した。

超伝導特性は4端子抵抗法で測定した。T_cは抵抗遷移の 中点の温度とし、I_cは電圧が1µV/cmの電流値とした。JR法線 材のI_c測定は線材保護のためのシャント抵抗を使用して行っ た。試料は、線材横断面を研磨し、5%希硫酸水溶液中で35 Vの電圧をかけて陽極酸化を施し光学顕微鏡を用い組織観 察を行った。

【3】実験結果

電極間隔 100mmで加熱時間が短い 0.1sの試料の場合、

加熱エネルギー(到達温度)を上げていくと徐々に大きな空孔 が観察された。これは他の条件では観察されなかった。他の 条件では、加熱エネルギーを上げていくと最初細かい空孔が 観察されるが徐々に数は減少した。RHQ 処理の電極間隔が 長いものと比較して、短い場合加熱エネルギーの小さいところ で溶融状態からの凝固組織が観察された。また、電極間隔が 短い(加熱エネルギーが大きい)と拡散反応が長い範囲で起 きているように思われる。

 T_c のピークはRHQ処理の電極間隔を長くすると高加熱エネ ルギー側へシフトした。同じ電極間隔のとき加熱時間が長いも のほど高い加熱エネルギーまで直接A15相が生成した。図1 に T_c とRHQ加熱時間との関係を示す。 T_c はそれぞれの条件 で過飽和bccから変態した中で最も高い値を示している。加熱 時間を長くしていくと T_c は大きくなる傾向がある。しかしながら、 同じ電極間隔の中であまり長くしす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処理のとき直接A15相が生 成してしまう。本実験のAI厚さが600nmの場合 0.9s以下が望 ましいと考えられる。A1厚の薄いJR法多芯線材が 0.4sである のと比較すると約2倍の加熱時間が必要であることがわかる。 急冷速度を同等にしたい場合、通電電極間隔は2倍以上に 長くすることが必要であると考えられる。

本研究の一部は文部科学省の原子力試験委託費から助 成を受けて実施されたものである。



Fig.1 T_c versus heating time curves of the RHQT-Nb₃Al wire.

146
13T Nb₃Al/Nb₃Sn マグネット用 Nb₃Al 素線及びケーブルの研究開発

Nb₃Al strand and cable's R&D for 13 T Nb₃Al/Nb₃Sn magnet

 菊池 章弘
 (NIMS);
 土屋 清澄 (KEK);
 山田 隆治, Emanuela Barzi
 (Fermilab);

 中本 建志, 佐々木 憲一, 徐 慶金, 寺島 昭男, 瀧川 博幸, 山本 明 (KEK);

 竹内孝夫
 (NIMS);
 Alexander Zlobin
 (Fermilab)

 KIKUCHI Akihiro
 (NIMS);
 TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); YAMADA Ryuji, BARZI Emanuela (Fermilab);

 NAKAMOTO Tatsushi, SASAKI Ken-ichi, XU Qingjin, TERASHIMA Akio, TAKIGAWA Hiroyuki,

 YAMAMOTO Akira (KEK);
 TAKEUCHI Takao (NIMS);
 ZLOBIN Alexander (Fermilab)

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

1. はじめに

KEK では CERN-KEK 協力プログラム「LHC ルミ ノシティアップグレードのための先進超伝導磁石開 発」として、現在の NbTi 磁石に置き換わる新しい高 磁場超伝導磁石開発を推進している。新しい高磁場磁 石のための線材は A15 型化合物を候補とし、特に急 熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材の応用を検討している。 一方 NIMS では、急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材への 安定化銅の複合技術を開発し、1km 級の銅安定化長 尺線材を製造出来るようになった。さらに米国フェル ミ研と共同で Nb₃Al ラザフォードケーブルを先駆け て試作し有望性を示している。これまでの線材及び ケーブルの試作・評価結果を踏まえて、昨年度より CERN-KEK 協力プログラムのための Nb₃Al 線材及び ラザフォードケーブルの開発を、CERN-KEK-NIMS-Fermilab の4機関の協力で新たに開始している。

2. Nb₃Al/Nb₃Sn サブスケール磁石

高磁場加速器磁石用線材として Nb₃Sn 及び Nb₃Al が候補に挙げられる。Nb₃Sn 線材及びその磁石の開発 は、主に US-LARP プログラムで活発に行われている。 しかし、最近の Nb₃Sn 線材の高い臨界電流密度は注 目されるものの、機械的歪みによる特性劣化が未だ懸 念材料として残っている。さらにはケーブル加工で受 けたダメージで素線性能が大きく低下する報告もある。 一方 Nb₃Al 線材は、最近の Nb₃Sn 線材の臨界電流密度 には劣るものの、良好なケーブル加工性やハンドリン グ、もちろん早くから指摘されている優れた耐歪み特 性等の数多くのメリットがある。本プロジェクトでは、 Nb₃Sn 及び Nb₃Al の 2 つ線材を同時に評価するために、 複数の Nb₃Sn 及び Nb₃Al コイルからなるサブスケー ル磁石の開発を行う。2 個のダブルパンケーキ型 Nb₃Al コイルを最外層に配置し、2 個のダブルパン ケーキ型 Nb₃Sn コイルを中層に、さらに1 個の Nb₃Al コモンコイルを最内層に組み込む構成で、最大 13 T の発生磁場を想定している。なお磁石設計の詳細は、 本大会最終日に Q. Xu 等(3D-a03)から報告される。

3. Ta マトリックス Nb₃AI 線材

急熱急冷・変態法 Nb₃Al 線材は約 2,000℃の高温に曝 されるため、線材マトリックスには高融点で冷間加工性に 富む純 Nb が用いられる。ところが、純 Nb は液体ヘリウム 中(4.2 K)では超伝導状態にあるため、低磁場で Nb₃Al フィラメント同士が結合し磁気的に不安定化してしまう。結 合を切るにはフィラメント間のマトリックスを非超伝導化する ことが必要で、高温熱処理や冷間加工性を踏まえると Ta が Nb に代わるマトリックス候補となる。Ta は線材補強への 寄与が期待でき、さらに中性子線照射による放射化の影 響も小さいことから、衝突点近傍の磁石応用には好ましい。 しかし一方で、Ta は Nb の 2 倍以上も高コストであり、経 済的・実用的観点からは極力削減する必要がある。

今回、TaをNb₃Alフィラメント間マトリックス(バリア)のみ に使用し、他のマトリックスは従来のNbとした低コストを意 識した新しい断面構成の線材(K1)を試作した。また比較 のために、同じ断面構成で、但しマトリックスは全てTaとし た線材(K2)も試作した。Fig. 1 は線材断面のSEM写真 である。いずれの線材も、外径 1.0mm、銅比 1.0、フィラメ ント数 222本、フィラメント径 36 ミクロンである。これら2種 類の素線性能を比較すると共に、ラザフォードケーブルを 作製した結果について報告する。



Fig. 1. SEM images of (a) K1 and (b) K2 Nb₃Al strands.

謝辞

本研究は、CERN-KEK 協力プログラム、KEK、NIMS、 米国 DOE、及び科学研究費補助金(No. 20025008、No. 20340065、No. 19740158)の援助により実施している。

非破壊臨界電流密度測定—第3次高調波法— Development of nondestructive critical current density measurement -Third harmonic voltage method-

太田 茂弘, 齊藤 敦, <u>大嶋 重利</u>(山形大); 山崎 裕文(産総研) OTA Shigehiro, SAITO Atsushi, <u>OHSHIMA Shigetoshi</u> (Yamagata Univ.); YAMASAKI Hirofumi (AIST) E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導薄膜の臨界電流密度(Jc)を非破壊で測定できる手 法は幾つか提案されている。中でも第3次高調波法は、空間 分解能も比較的よく、精度も高いので、現在国際標準法とし て検討されている。しかしながら、その提案は液体窒素温度 での測定であり、低温領域まで測定できるシステムではない。 我々は、小型冷凍機を用いたシステムを開発し、第3次高調 波法でも広範囲な温度領域で正確なJcが測定できることを報 告してきた。今回は、通電法によるJc測定値と第3次高調波 法の測定値を比較し、どのくらいの温度領域まで測定可能か どうかどうか、Jcの測定精度はどのくらいか等を検討したので 報告する。

2. 装置システム

Fig.1 に我々の測定システムの電気回路系を示す。発振器 からでる f 信号をコイルに流し、超伝導薄膜から発生する 3f 信号をピックアップコイルで検出するシステムである。また、ド ライブコイルを内側にピックアップコイルを外側に巻いた一つ のコイル系を採用している。Fig.2 に、試作したキャビティーの 断面図を示す。コイルの上に配置した超電導薄膜を板ばね で押し、コイルと超電導薄膜を密着させている。また、薄膜の 表面に傷ができるのを抑えかつ薄膜とコイル間隔を常に一定



Fig,1. Electrical circuit of the third harmonic voltage method.



Fig.2 Cross section picture of the copper cavity

にするために、20ミクロン厚のポリミドテープを間に挿入してい る。

3. 実験結果及び検討

Fig.3に、第3次高調波歪の測定結果を示す。縦軸に、第3 次高調波電圧を測定周波数とコイル電流で割った値を示し、 横軸はコイル電流の実効値を示す。10K~80K の温度範囲 でノイズが少なく、安定して測定できることが分かった。Fig.4 に、誘導法と通電法で測定した Jc の温度測定結果を示す。 誘導法で Jc を決めるためには、コイル定数を定める必要があ る。ここでは、40K で測定した両者のJc値が一致するように決 めている。この結果、10K~70K の温度領域で、通電法の Jc と誘導法の Jc の誤差は10%以内であることが明らかとなっ た。

4. まとめ

小型冷凍機を持いて広い温度範囲でJcが評価できる第3次高調波法の測定システムを構築した。10K~70Kの温度 領域で精度よく測定できることを明らかにした。



Fig.3 Third-harmonic inductance V_3/fI_o vs. coil current $I_o/\sqrt{2}$ curves at various temperatures.



Fig.4 Comparison of temperature dependence of Jc measured by the third harmonic voltage method and the transport current method.

非破壊臨界電流密度測定装置の開発—磁気力検出法— Development of nondestructive critical current density measurement system(II) —Magnetic force measurement method—

梅津 一也 斎藤 敦 相澤 慶二 <u>大嶋 重利</u>(山形大学);高野祥暢 鈴木敏幸 横尾政好(東北精機) UMETSU Kazuya, SAITO Atsushi, AIZAWA Keiji, <u>OHSHIMA Shigetoshi</u>, (Yamagata Univ.) TAKANO Yoshinobu, SUZUKI Toshiyuki, TOKOO Masayoshi (Tohoku Seiki Ltd) E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超電導薄膜や超電導テープ線材の臨界電流密度(Jc)を非 破壊、非接触で且つ高速に測定できるシステムの開発が強く 望まれている。ホール素子法、レーザ走査法及び誘導法など が提案されているが、いずれも一長一短があり、未だどの手 法が最も適しているかは定かでない。我々は、永久磁石を用 いた新しい Jc 評価法を提案し、報告してきた[1]。今回はその 手法を拡張し、薄膜試料の Jc 面内分布を測定できるシステム を構築したので報告する。

2. 装置の概要

Fig.1に測定装置の概要と、実際の写真、Fig.2に磁石に働 く力と磁石一超伝導薄膜間隔の関係を示す。永久磁石を超 電導薄膜に近づけると磁石に反発力(F_r)が生じ、遠ざけると 吸引力(F_a)が生じる。距離ゼロに外挿した力F_mはJcに比例す る[1]。今回は、試料ホルダーをX-Yステージで移動させ、F_M の2次元分布を測定できるシステムを構築した。X-Yの移動 距離は±50mm、移動精度は、0.1mmである。



Fig.1. Schematic drawing of Jc measuring method using a permanent magnet, and an actual photograph



Fig.2 Magnetic force vs. distance between a permanent magnet and HTS film surface.

3. 実験結果

Fig.3 に、20mm 角の YBCO 薄膜のJc分布を示す。用いた 磁石は 3mm丸である。測定は 2 ミリ間隔の升目で行った。図 中の数値は MA/cm2 の単位で示されるJc値である。この結果、 端部から 5mm 以内の領域では、ほぼ同じJc値となっているこ とが分かる。また、試料エッジ部分のJc値が小さく測定されて いる。これは、薄膜表面に流れるシールド電流が非対象となり、 F_M が小さく測定されるからである。

より大きなサイズの薄膜やテープ線材のJcもこのシステム でJcを評価できることを確認している。薄膜のIcの大きさにより、 適切な磁石径を選ぶ必要があるが、どのサイズの磁石径にお いても、磁石サイズの 1.5 倍程度の端部領域では、測定値に 大きな誤差が入ることが明らかとなった。

*	1.39	1.45	1.57	1.53	1.66	1.64	1.45	1.47	1.28	1	
2.09	2.21	2.23	2.41	2.45	2.51	2.43	2.41	2.32	2.3	1.47	
2.41	2.71	2.86	2.88	2.84	2.88	2.84	2.86	2.86	2.63	1.72	
2.3	2.74	3.02	2.96	3.06	3.08	3.08	2.96	2.78	2.69	1.72	
2.61	2.86	3.04	3.11	3.11	3.1	3.11	3.02	3.02	2.63	1.72	
2.53	2.73	3.11	3.08	3.1	3.1	3.08	3.11	2.94	2.67	1.98	
2.43	2.86	2.88	3.11	3.08	3.08	3.13	3.11	3	2.74	2.01	
2.21	2.88	3	3.04	3.11	3.06	3.1	3.06	2.92	2.71	1.65	
2.17	2.86	2.92	2.82	3	3.08	3	3	2.94	2.61	1.74	
2.09	2.67	2.84	2.67	2.73	2.74	2.73	2.76	2.65	2.61	*	
1.94	2	2.03	2.07	2.03	2.07	1.96	1.92	1.92	1.94	*	

Fig.3 Jc distribution of HTS film measured by magnetic morce measurement method.

4. まとめ

永久磁石を用いた2次元Jc評価システムを構築し、薄膜 面内Jc分布の測定可能領域や精度を明らかにした。試料 端部から磁石径の1.5倍程度ど領域ではF_Mが予想以上に小 さくなることが明らかとなった。これは、表面に流れる シールド電流の非対称性に起因しているものと思われる。 今後、永久磁石のサイズを変えて測定し、最適なシステ ムを検討する。

参考文献

 S.Ohshima, K.Takeishi, A.Saito, M.Mukaida, Y.Takano, T.Nakamura, T.Suzuki, M.Yokoo." A Simple Measurement Technique for Critical Current Density Using a Permanent Magnet" IEEE Trans. Appl .Super. 15 (2005) 2911-2914

SQUID を用いたレール非破壊検査装置の開発 Fundamental Examination of Rail Inspections for Railway by SQUID

<u>宮崎佳樹</u>,清野 寛,田中 芳親,長嶋 賢(鉄道総研);糸崎 秀夫(大阪大学) <u>MIYAZAKI Yoshiki</u>, SEINO Hiroshi, TANAKA Yoshichika, NAGASHIMA Ken(RTRI); ITOZAKI Hideo (Osaka Univ) miyazaki@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道用レールは、車両の駆動・制御時に車輪の空転・滑走 により、表層部に白色層(White Etching Layer: WEL)と呼ばれ る硬くて脆い熱変態組織が発生することがある。白色層の存 在によりその内部および周囲に微小き裂が発生し、それらのき 裂を放置したままレールの使用を続けると、レール頭頂面の はく離(シェリング)や、レール破断を引き起こすことがある。こ のため、き裂の監視やレール交換に多くの労力と費用が投入 されている。

本研究では、白色層の検出手法として SQUID (超電導量子 干渉素子)による非破壊検知手法の検討を進めてきた[1, 2]。 今回、SQUID を屋外にて利用可能な測定システムを構築し、 強磁性体であるレール鋼の白色層および微小き裂を測定した ので報告する。

2. SQUID 検査システム構成

屋外型測定システムを構築するにあたって、環境磁場およ びレール残留磁化の影響を減じるために、SQUIDの測定シス テムを Fig. 1 のように構成した。レールには、探傷プローブの みを接近させる。探傷プローブは差動型コイルで構成されて おり、2 つのコイルはブリッジ回路により結合されている。試験 片の異常個所にさしかかったときに、2 つのコイルのつくる渦 電流分布が変化すると、ブリッジバランスが崩れ、インプットコ イルに電圧が発生する。このインプットコイルに発生した微弱 磁場を SQUID が検出する。この方式だと、SQUID 自体は磁気 シールドに完全に格納することができ、かつレールから離れた 位置に配置することができるため、レールの残留磁気の影響 を受けにくい安定な測定システムとすることができる。さらに、 ノイズフィードバック回路に補償器を追加することで、フィード バック回路を安定化させた。

ノイズフィードバック回路を動作させ、SQUID を磁気シール ドに格納して動作させたときのノイズ-周波数特性を Fig. 2 に 示す。対策後では、およそ 30~40dB のノイズ低減効果が確



認でき、ノイズの影響を受けにくい測定システムを構築することができた。

3. 模擬白色層検知実験

改良した測定システムにて、模擬白色層の測定を実施した。 測定は SQUIDを固定して試験片を XY ステージ上で移動して 行った。

SQUID 出力については、ロックインアンプを用いて、励磁信号に対する渦電流信号の位相変化を比較した。膜厚 50,90,140,150µm の試験片の測定結果を膜厚と位相変化についてまとめたグラフを Fig.3 に示す。図より、膜厚の増加に従い位相変化も大きくなることがわかる。

微小き裂を模擬するために、レール母材にエキシマレーザ ーでスリット加工を施した。スリットサイズは0.1mm×1mm, 深さ は10μmのものを製作した。

測定結果を Fig. 4 に示す。横軸は、ステージの移動量を示している。測定結果から、き裂位置で明瞭な信号が得られていることがわかり、想定される白色層周辺の微小き裂に対して本システムは有効な検出感度をもつことが示された。

4. まとめ

ノイズの影響を受けにくい回路方式と、ノイズフィードバック 回路の安定化により、現地でレール検査を行うためのシステム 構成の目途を得た。また、本方式による測定は、白色層およ び周辺の微小き裂に対して十分な検出感度を有することが示 された。

参考文献

- Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.78 (2008) p.182.
- Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) p.63



第80回 2009年度春季低温工学・超電導学会

極低温・強磁場下における光ファイバ温度センサ測定試験

Experimental Investigation of Optical Fiber Temperature Sensors at Cryogenic Temperatures and in High-magnetic Fields

田中 芳親,小方 正文,長嶋 賢 (鉄道総研),阿川 久夫,松浦 聡,熊谷 芳宏 (横河電機) TANAKA Yoshichika, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute) AGAWA Hisao, MATSUURA Satoshi, KUMAGAI Yoshihiro (Yokogawa Electric Corporation) E-mail: 44tanaka@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁石内部の状態監視を行うことが可能になれば, 故障を事前に検知して影響の少ないうちに運用が停止でき, 早期に修繕が可能になる。中でも温度測定は監視の有効な 手段と考えられる。温度測定の手段として,光ファイバ温 度センサは1本のセンサで分布的に測定が可能であり,熱 侵入やスペース,電気的絶縁性などの面で有利である。こ のため,光ファイバ温度センサの極低温,強磁場下におけ る特性を確認する試験を行い,超電導磁石への適用に対す る課題を明らかにした。

2. 光ファイバ温度センサ

光ファイバ温度センサには、多点型と分布型がある。前 者には FBG (Fiber Bragg Grating) 方式があり、ファイバ内 に加工した干渉格子の間隔が変化するのを、反射波の波長 から測定する方式である[1]。短時間で高精度な測定がで きるのが特長で、現状では 1 本のファイバで 30 点程度ま で同時測定が可能である。また後者は、ファイバ内に発生 する散乱光の温度変化に伴う変化を測定する方式で、この うち BOCDA (Brillouin Optical Correlation Dom ain Analysis) 方式[1]は低温での測定実績がある[2]。この方式は、両端 から入射させる連続光の発振周波数を変調することで、分 布的な測定を可能としており、通常の光ファイバを使用で きるのが特長である。本稿では、ここに挙げた FBG と BOCDA の 2 方式について試験結果を報告する。

3. 試験方法および結果

試験は Fig.1 に示すように,低温容器内部の冷凍機コールド

ヘッドに銅製伝熱板を接続し、この伝熱板に光ファイバ温度センサを敷設して実施した。基準となる温度は伝熱板に設置した 半導体センサで測定した。磁場は超電導磁石を用い印加した。

測定の結果, FBG 方式では, 反射波長変移量と温度は, 常 温域から極低温域まで一意的な関係を示すことが確認できた。 しかし, 約 50K 以下の領域では, 傾きが小さくなる結果となった。 また, 5T までの磁場による測定への影響はなかった(Fig.2)。

一方, BOCDA 方式では,約 100K 以上で散乱光周波数変 化と温度に一意的な関係を確認できたが,それ以下の領域に おいて傾きが小さくなり,約 50K 以下の領域では,温度が下が るにつれむしろ増加する傾向も見られた。磁場については, FBG 方式と同様影響は見られなかった(Fig.3)。

4. まとめ

FBG および BOCDA 方式の光ファイバ温度センサについて, 極低温, 強磁場への適用可能性について試験を行い, 磁場の 影響なく測定できること, および極低温領域で温度の分解能に 課題があることを明らかにした。今後, 極低温域における特性 向上の方策を探り, 低温機器に影響の少ないというメリットを活 かした, 測定システムの構築を検討してゆきたい。

なお,本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて 実施した。

参考文献

- 1. 足立正二: 日本学術振興会 光エレクトロニクス第 130 委員会 公開シンポジウム講演予稿集(2007)
- 2. Y. Yamamoto, et al. Abstract of CSJ Conference, Vol.75 (2006) p.166



Fig.1 Experimental Set-up

Fig.3 Measurement Result of BOCDA

Fig.2 Measurement Result of FBG

熱伝導発電ユニットの検討と予備試験

Conceptual design and preliminary test results of a thermoacoustic generator

前川 龍司(NIFS、名大), 鷹見 重幸(NIFS)、松原洋一(Cryo. Cons.)、加藤 直樹(名大)

MAEKAWA Ryuji (NIFS, Nagoya Univ.), TAKAMI Shigeyuki(NIFS),

MATSUBARA Yoichi (Cryo. Consultant), KATO Naoki (Nagoya Univ.)

E-mail: maekawa.ryuji@lhd.nifs.ac.jp

1. はじめに

プラントなどから排出されている熱を有効利用した効率改 善方法は、エネルギーや環境問題を解決する上で重要な課 題である。一般に、排熱の温度は比較的低い(300~400℃ 程度)ため、"質の悪い"エネルギーと位置づけられている。そ こで、排熱エネルギーを利用した熱音響発電機について検 討した。基本となるユニットは、再生器を高温・低温の熱交換 器で挟み、高温熱交換器側に仕事輸送管を取り付けたもの である。音響エネルギーはCFIC社のPressure Wave Ge nerator(PWG)を使って発生させ、解析モデルによる検討を おこなった。排熱温度が低いので、基本ユニットを直列に接 続し、段階的な音響エネルギー増幅方法についての有効性 を確認している。

2. 熱音響発電ユニット

Fig. 1に熱音響発電ユニットの構成を示す。2台(圧縮側 と膨張側)のPWGが基本ユニット(低温用熱交換器、再生器、 高温用熱交換器と仕事輸送管)の両端に設置されている。左 側に位置するPWG(ドライバー)から発生した音響エネルギ ーは基本ユニットの再生器を通過しながら増幅され、膨張用P WG(レシーバ)を駆動させる。そこで、レシーバに外部抵抗を 接続し、電力として回収することができる。



Fig.1 Illustration of thermoacoustic generator

3. モデル化

熱音響発電ユニットをモデル化(Fig. 2参照)し、数値解 析による最適化をおこなうため、ドライバーとレシーバには優 れたロバスト性と信頼性を持つ、フレクチャーベアリングを採 用したCFIC社のPWGを利用した。具体的には、CFIC社の モデル1S102M/A, 1S132M/A, 1S175M/A、1S24 1M/Aのスペックを参考にシミュレーションをおこなっている。 このときの高温・低温熱交換器の温度は、それぞれ358K/5 72Kまたは、358K/873Kを与えた。

モデルの最適化は遺伝的アルゴリズムを利用し、発電電力、入出力の電力差が最大になる様に各パラメータを決定している。パラメータにはPWGのピストン重量やモータハウジングの容積なども含まれている。基本となる微分方程式は以下のとおりであり、ドライバー側では、

$$M_{1} \frac{d^{2} x_{1}}{dt^{2}} + C_{1} \frac{dx_{1}}{dt} + K_{1} x_{1} + A_{1} (P_{1} - PB_{1}) = Bli_{1}$$
$$L_{1} \frac{di_{1}}{dt} + R_{1} i_{1} + Bl \frac{dx_{1}}{dt} = E \sin(\omega t)$$

再生器を通過する質量流量は、

$$\frac{dm}{dt} = \alpha (P_1 - P_2)$$
レシーバ側では、
 $M_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + C_2 \frac{dx_2}{dt} + K_2 x_2 + Bl_2 i_2 = A_2 (P_2 - PB_2)$
 $L_2 \frac{di_2}{dt} + (R_2 + R_{ex})i_2 = Bl_2 \frac{dx_2}{dt}$
各PWGにおけるバックボリュームへのガスの漏れは、

 $\frac{dmb_1}{dt} = \alpha b_1 (P_1 - PB_1)$ $\frac{dmb_2}{dt} = \alpha b_2 (P_2 - PB_2)$

M:ピストン重量、*C*:ダンピング係数、*K*:バネ係数、*a*:再 生器の流路抵抗、*a b*:PWGのピストンとシリンダーの隙間で の流路抵抗である。ここでサブスクリプトの1はドライバー側、2 はレシーバ側を表している。



Fig. 2 Simulation model for a thermoacoustic generator with a single unit.

Fig.3 は、基本ユニットを2台直列に接続した場合の計算結 果であり、低温側熱交換器温度358K,高温側熱交換器温 度573Kとしている。



Fig.3 Simulation results for a thermoacoustic generator with two basic unit connected in series. (1s132, Th=573K, Tl=358K)

シミュレーション結果と基本ユニットにオリフィス、バッファ ータンクを接続した基礎実験の結果については当日報告す る。

参考文献

1. Y.Matsubara, et al.: Cryocoolers 12, (2003) p.343

押出加工によるリスタックNb₃Al線材の作製とJc特性

Fabrication and transport properties of re-stack Nb₃Al wire by extrusion process

<u>田中 和英</u>、中川 和彦、田川 浩平(日立電線); 伴野 信哉、竹内 孝夫、飯嶋 安男、菊池 章弘(物材機構)

TANAKA Kazuhide, NAKAGAWA Kazuhiko, TAGAWA Kohei (Hitachi cable); BANNO Nobuya, TAKEUCHI Takao, IIJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiko (NIMS) E-mail:tanaka.kazuhide@hitachi-cable.co.jp

<u>1. はじめに</u>

我々は、Nb₃AIシングル線を複数本組込んで一次多芯線 を作製し、これを急熱急冷(RHQ)処理した後に、二次多芯 線として安定化Cuに組込んで複合化する「リスタックNb₃AI線 材」の検討を行ってきた[1-2]。

この線材は、急冷後のNb(Al) 過飽和固溶体の状態で、 Cu安定化材を外部に付与するために、線材に強加工を施し ている。この強加工により、Nb(Al) 過飽和固溶体相中に、高 密度の転位等による高いひずみエネルギーを蓄積すること が可能となる。また、フィラメントの縮径化も実現できることか ら、耐歪特性に優れた高Jc線材として期待される。

本報では、低放射化材料のTaをマトリックス材としたリスタックNb₃AI線材を量産化に適する押出加工により作製した。 そして、得られた押出材の加工性とJc特性を評価した結果 について報告する。

2. 実験方法

NbシートとAlシートを共巻きしたジェリーロール/Nb₃Al前駆体を用いて一次多芯線(84芯)を作製した。これを線径1.38mmまで伸線後、RHQ処理することにより、Ta/(Nb-Al)過飽和固溶体線材とした。得られた線材を六角形状に伸線した後、Cuパイプに18本組込み、二次多芯線(リスタック線)とした。これを(1)押出加工した場合、(2)共引き伸線した場合の2条件で縮径加工した。

作製したリスタック線材の仕様をTable 1に示す。Tableに示 すフィラメント径やバリア層厚みは、線径1.0mmまで加工したと きの計算値である。線材のCu比は0.99であり、線径1mmまで 加工するとフィラメント径は14μmと見積もられる。Fig. 1にリス タック線材の代表的な横断面を示す。左図は全体像、右図は 線材中心部の拡大である。バリア材にはTaを用いた。

A15相への変態熱処理は、800℃,10時間(真空中)で実施した。Icの測定は、4端子抵抗法を用いて液体ヘリウム中で行い、Icは1 µ V/cmの電界基準で定義した。Jcは、Icを断面内のCu以外の面積で除することにより求めた。

<u>3. 結果及び考察</u>

リスタック線材を共引き伸線すると、線径が約2mmで表面 にくびれが発生した。一方、押出加工を適用した場合には、 くびれの発生が抑制された。これは、押出による強加工でCu パイプとNb₃Alフィラメント間及びNb₃Alフィラメント同士の密 着性が向上したためと考えられる。また、押出加工を行って も、線径1.0mmまで加工できたことから、RHQ処理後でも押 出が適用可能であることを実証した。

Fig. 2に押出加工した場合と共引き伸線した場合のリスタ ック線のNon-Cu Jcの磁場依存性を示す。比較のために、リ スタック前の一次多芯線(as RHQ)のJcについても併せて示 す。押出加工を行っても、共引き伸線した場合と同等のJcが 得られることがわかった。押出加工した線材においては、線 径1.0mmと0.6mmで有意差がないことがわかった。 本研究の一部は、文部科学省原子力試験研究委託費に

より実施されたものである。

Table 1	Specifications	of the	re-stack	Nb ₃ Al	wire

	Second stack
	(Re-stack)
Wire diameter (mm)	1.0
Number of filament	84×18(=1512)
Filament diameter (µm)	14
Barrier	Та
Barrier thickness (µm)	2.3
Matrix/SC ratio (SC fraction %)	0.80 (28%)
Cu/non-Cu ratio (Cu fraction %)	0.99 (49%)



Fig.1 Cross sectional view of the re-stack Nb₃Al wire.



Fig. 2 Magnetic field dependence of Jc measured for various Nb₃Al wires.

参考文献

[1]N. Banno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) P.187

 $[2]\mathrm{K}.$ Tanaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.78 (2008) P.80

Nb₃AI 素線の臨界電流特性に及ぼす機械疲労の影響 Effect of cyclic strain on critical current properties of Nb₃AI strand

<u>和田山 芳英</u>,夏目 恭平(総研大);三戸 利行,柳 長門,高畑 一也,今川 信作(NIFS,総研大);濱口 真司(NIFS) <u>WADAYAMA Yoshihide</u>, NATSUME kyouei (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku (NIFS, SOKENDAI); HAMAGUCHI Shinji (NIFS)

E-mail: wadayama.yoshihide@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

Nb₃Al 線材は、耐ひずみ特性に優れた特長を有しており、 その臨界電流特性に及ぼす機械負荷の影響について多くの 実験評価がなされてきた^[1]。しかし、超電導線材が受けるひず み負荷は、コイル製作時と励磁時で異なり、前者は線材外部 からの強制変位であるのに対して、後者は電流が流れるフィ ラメント域に作用するローレンツ力が支配的となるが、その検 討例は少ない。

本研究では、Nb₃Al 素線へのひずみ負荷をローレンツ力 (体積力)とした実験条件において、その臨界電流の変化を 測定評価すること目的とした。ここでは、実験装置を製作と素 線レベルの疲労試験の進捗を報告する。

2. 実験方法

(a)測定サンプル

実験に用いた線材はジェリーロール法 Nb₃Al 素線である。 その主要諸元を表1に示す。主要諸元は、素線径: ϕ 0.805、 フィラメント径:約50 μ m、銅比:2.1 である。素線の長手方向 に対して電気/機械特性のばらつきを少なくするために長尺 均一性に優れた単長10kmの素線からサンプルを採取し、熱 処理条件は775℃×40hの拡散処理のみとした。

Table 1 Mian Parameter	r of sample strand
Process	Jelly-Roll
Wire diameter	$\phi 0.805 \text{mm}$
Filament diameter	$\phi~50~\mu$ m
Twist pitch	31mm
Matirix	Cu
Cu/Con-Cu ratio	2.1
RRR	260
Heat treatment	775℃×40h

(b)実験装置

外部磁場を印加する超電導マグネットは、ボア径: ¢58、 最大磁場14Tのソレノイド型である。ボア内部に測定サンプル を配置し、サンプル電流を繰返し掃引することで引張りの疲 労負荷を与えた。サンプル形状は小コイル状(¢43×5 ター ン)である。サンプル電流は、任意波形が通電制御できるパ ルス電源(500A, 1kHz max.)で、ここでは三角波,500A,0.1Hz (掃印速度:100A/s)を基本条件とした。クライオスタットの熱 侵入量は、500Aの繰返し通電において約2.5Wであり、1回 の注液で約5×10³回のひずみ負荷が可能である。

(c)実験手順

1つの測定サンプルに対して、臨界電流測定と繰返しひず み負荷を交互に実施し、その特性変化を連続的に評価した。

3. 結果と考察

図 1 に測定サンプルの臨界電流特性(繰返数 n=1,2, 1500)を示す。繰返し通電は、0.1Hz のパルス通電でクエンチ しない条件の 500A@5Tとした。この時に素線に作用するフィ ラメント域の引張り応力は約 320MPa である。最初の通電(n=1 からn=2)において、臨界電流が約4%低下し、その後の変化は わずかであった。初期の電流低下の要因は調査中である。 図 2 に繰返し数が n=2 と n=1500 における電流/電圧デー タを示す。これまでに計 1500 回の繰返しひずみを負荷したが、 n=2 以降において臨界電流やn 値の変化はほとんど認められ ていない。

Nb₃Sn 素線を室温で機械疲労させた報告^[2]によると、最初 のひずみ負荷(n=1)で臨界電流が変化し、以降の変化は非常 に小さい結果が得られているが、これはフィラメントの残留圧 縮応力が初回の引張り負荷を緩和したものと考えられる。これ ら n=1 におけるひずみ挙動を再評価すると共に、繰返し数を さらに増加させた特性評価を進める予定である。併せて、今 後は曲げ負荷の評価も計画中である。



Fig.1 Critical Current of Nb₃Al sample strand (Ic:0.1 μ V/cm)



Fig.2 Current/vortgae poperties of sample strand

- T. Sawada, et al.: J. Japan Inst. Metals, Vol. 61, No.9 (1987), pp..822-828.
- S. Ochiai, et al.: Cryogenics, Vol.32, No.6 (1992), pp.584–590.

V-Ga 及び Ti-Ga 系高 Ga 濃度化合物を Ga 源とした V₃Ga 超伝導相の生成

Forming of V₃Ga phase through the diffusion reaction using V-Ga and Ti-Ga compounds as high Ga content compound source materials

<u>菱沼 良光</u> (NIFS), 菊池 章弘, 竹内 孝夫(NIMS), 松田 健二(富山大), 西村 新 (NIFS), 谷口 博康, 朝永 満男 (大阪合金工業所) <u>HISHINUMA Yoshimitsu</u>(NIFS), KIKUCHI Akihiro, TAKEUCHI Takao (NIMS), MATSUDA Kenji (Univ. Toyama), NISHIMURA Arata (NIFS), TANIGUCHI Hiroyasu, TOMONAGA Mitsuo (OAW Co., Ltd),

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

V₃Ga 超伝導線材の超伝導特性向上を目的に前駆体に おける高 Ga 濃度化を考案し、高 Ga 濃度 Cu-Ga 化合物を 用いた線材を試作し、超伝導特性の改善を明らかにしてき た^[1,2,3]。本研究では Cu-Ga 系の他の高 Ga 濃度化合物とし て、V-Ga 及び Ti-Ga 系による V3Ga 超伝導相の拡散生成を 検討し、生成相の超伝導特性及び微細組織について調査 した。

2. 実験方法

本研究にて V-Ga 系及び Ti-Ga 系における高 Ga 濃度化合物として V_2Ga_5 及び TiGa₃を選択した。これらは平衡状態図にて金属間化合物として存在する化合物である^[4,5]、 V_2Ga_5 及び TiGa₃ 化合物はアーク溶解にて作製し、溶体化処理を行った後に粉砕することで両化合物粉末を得た。これら粉末を V 金属管に充填し、細線加工することで拡散対を作製した。以後、 V_2Ga_5/V 及び TiGa₃/V それぞれの拡散対試料を VG 拡散対及び TG 拡散対と記す。また、それぞれの拡散対に対して Cuの拡散促進効果を調査するために充填する粉末に対して10wt%の Cu粉末を添加した。VG及び TG 拡散対について真空中で 600℃から 900℃までの種々の条件で熱処理を行った。

熱処理後の一部の試料について、NIMS 強磁場センターの 18T 汎用超伝導マグネットとハイブリッドマグネットを用いて I_c -B 特性及び H_{c2} 特性で評価した。 J_c 値は I_c 値を生成した V_3 Ga 相断面積のみで除した Layer J_c とした。また、SEM 及び EPMA を用いた組織観察と組成の定量分析測定を行った。一部の試料について FIB 加工後に TEM による微細組織及び 定量分析を行った。

3. 実験結果

Fig.1 に作製した TiGa₃化合物の SEM 観察像を示す。 アーク溶解直後は柱状の TiGa₂相((a)濃灰色)と Ga 液相((a) 淡灰色)の混相であったが、溶体化処理を行うことで拡散 反応が進み TiGa₃相が生成した。しかしながら、TiGa₂相 が残存しており TiGa₃相との混合粉末であることが分か った。一方、 V_2Ga_5 化合物についても TiGa₃化合物と同様 に溶体化処理を行うことで V_2Ga_5 相と V_5Ga_{41} 相の混合粉 末であった。Fig.2 に TG 拡散対における熱処理温度(20h



Fig.1 BSE images of the arc-melted TiGa₃ compound. Figs.1 a) As-cast and b) After solution H.T samples.



Fig.2 BSE images of the cross-sectional area on the TiGa₃/V diffusion pairs after various H.T for 20h. a) 700°C, b) 750°C, c) 800°C, d) 850°C H. T conditions

熱処理)による生成相の変化を示す。いずれの熱処理温度 でも生成する拡散相厚はほぼ $40 \mu m$ であり、拡散相は $V_3Ga 相と V_6Ga_5 相の2 相が生成した。V_3Ga 相は V 母材と$ $拡散相界面に V_6Ga_5 相は TiGa_3 化合物粉末界面に沿って生$ $成した。また、700^oC熱処理からに沿って V_3Ga 相(濃灰色)$ $の生成が確認され、熱処理温度の上昇に伴い V_3Ga 相が厚$ $くなる傾向が見られた。これにより TG 拡散対では TiGa_3$ 化合物中の多量の Ga 成分が V 母材方向へ拡散していると考えられる。また、EPMA 結果から拡散相への Ti の拡散は認められなかった。

当日はTG及びVG拡散対に生成したV₃Ga相について Cu-Ga系と比較しながらJ_c特性や組成について報告する。

謝辞

本研究は NIFS 運営交付金(NIFS08UCFF005-2)、NIFS 一 般共同研究(NIFS07KKMF003)、及び文科省原子力試験研 究費により行われた。

- Y. Hishinuma, et al, Supercond. Sci. and Tech., vol. 20, No.6, (2007), p.569-p.573.
- Y. Hishinuma et al., Abstracts of CSJ Conference, vol. 76 (2007) p.188.
- 3. Y. Hishinuma et al., J. Phy. Conf. Ser.97, (2008), 012131.
- 4. ASM International, V-Ga binary phase diagram (1990 J. F. Smith)
- N.V Antonova et al., J. Alloys and compounds, vol.317-317, (2001), p.398-405.

in−situ MgB₂線材の熱処理過程の組織観察

Microstructural observation of heat treatment processes in in-situ MgB₂ tapes

<u>波多</u>聰, 大橋 徹也, 嶋田 雄介, 池田 賢一, 中島 英治(九大); 松本 明善, 北口 仁, 熊倉 浩明(NIMS) <u>HATA Satoshi</u>, OHASHI Tetsuya, SHIMADA Yusuke, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University); MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: hata@mm.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言

MgB₂の臨界電流特性と密接に関わる組織因子(結晶粒界, 充填率, MgO など)が,薄膜やバルク体および理論的アプロ ーチによる研究で明らかになってきている。線材作製の面で は, in-situ パウダー・イン・チューブ(PIT)法の最大の問題とも 言うべき充填率の低さを克服できる方法として,拡散法が注目 されている。拡散法も in-situ 法の一つであり, MgB₂の生成と 組織形成の理解が重要であることに変わりはない。そのような 観点から,本研究ではin-situ PIT 法での熱処理における組織 形成過程を再検討し,臨界電流特性との関連を考察した。

2. 実験方法

モル比 1:2の割合で秤量した MgH₂ 粉末と非晶質 B 粉末を 混合した。また, MgB₂ 生成量に対して SiC ナノ粒子を 10 mol% 添加した混合粉末も用意した。これらの混合粉末をそれぞれ Fe 管に充填し, 冷間圧延した後, 600℃で種々の時間(t = 1, 10, 30, 60 min)の Ar 雰囲気熱処理を行った。得られた線材に ついて, \int_{c} -B 測定(4.2 K), X 線回折, SEM 観察, TEM/STEM/EDX 観察を行った。

3. 結果

Table 1 に実験結果の要約を示す。詳細を以下に述べる。 【臨界電流特性】t = 10 min で J_c の磁場依存性を観測できた。 SiC 添加に伴う高磁場域での J_c 向上は, t = 10 min で既に明 瞭に現れた。SiC の有無に関わらず, t = 10 min から t = 30 min の間に, J_c は 5~12T の全磁場域で顕著に増加し, それより長 時間の熱処理では J_c の上昇は僅かであった。

【相変化】MgB₂の生成は t = 1 min で僅かながら観測され, t = 10 min で Mg は認められなくなった。t = 10 min から t = 30 min の間に MgB₂ からの回折強度が顕著に増大し, その後の変化 は小さかった。SiC の分解を示す Mg₂Si の生成は t = 10 min で観測された。MgB₂の hkl = 100 回折角の測定より, MgB₂結 晶の B→C 置換を示唆する a 軸長の収縮は t = 30 min から認 められた。

【充填率】平面研磨した線材断面の SEM 像では, t = 10 min で Mg の拡散,反応を示唆するボイドが多量に観察された。充 填率は,SiC の有無に関わらず平均50%程度であり,tの増加 と共にやや増加傾向を示したものの,t = 10 min とt = 30 min の間で大きな変化は認められなかった。

【組織】TEM 観察より, $t = 10 \min から t = 30 \min で MgB_2 結晶 の数が増加していた。一方, MgB_2 結晶粒径の時間変化は小さかった。過去の報告と同様に, SiC 添加材の方が MgB_2 結晶粒径は小さく,等方的形状のものが多かった。更に,今回新たに明らかとなった組織の特徴として以下が挙げられる。(i) MgH_2粉末を用いても,非晶質 B および SiC 粉末と共に酸素が 混入し, MgO が形成されていた。ただし,生成した MgO 粒子の多くは 5~10 mm と微細であった。(ii) Mg 原子は僅か <math>t = 1$ min で非晶質 B 粉末内部にまで拡散していた。しかし,熱処理後も未反応 B 領域が組織中に残っていた。(iii) SiC の有無で SEM レベルのマクロ組織にも違いが認められ,ボイドのない緻 密な領域が無添加材で多かった。

4. 考察

in-situ PIT 法で 600℃熱処理の場合, MgB₂線材の J_c 特性 は 30 分間の熱処理でほぼ決まる。これは, MgB₂結晶の生成 が完了することに対応していると考えられる。一方, 充填率と J_c 特性の変化に明瞭な相関は見られなかった。組織においては 改良の余地があり, 未反応 Bを減らすように Mg 供給量を最適 化すれば, 更なる J_c 向上が期待できる。初期粉末中の酸素や SiC の存在は, Mg の拡散と反応のプロセス, ひいては微細組 織形成に大きな影響を及ぼしていると考えられる。その結果と して, SiC 添加が J_c -B特性に与える効果は, MgB₂が生成し始 めて直ちに現れる。B→C 置換を含めた SiC が関与する反応 のキネティクスについては, 今後, 更なる検討が必要である。

本研究の一部は,文部科学省九州地区ナノテクノロジー拠 点ネットワーク(九州大学超高圧電子顕微鏡室)の支援の下 で実施されました。

Table 1. Summary of material properties of in-situ PIT MgB₂ tapes after heat treatment at 600°C with different durations.

	$t = 1 \min$	<i>t</i> = 10 min	<i>t</i> = 30 min	$t = 60 \min$		
J _c (5∼12 T, 4.2 K)	_	Measured (Non- & SiC-doped) Clear effectiveness of SiC-doping	Large increase (Non- & SiC-doped)	Small increase (Non- & SiC-doped)		
Main crystalline phases (XRD, TEM, EDX)	Mg, MgO SiC	MgB ₂ , MgO Mg ₂ Si	MgB ₂ (Large increase), MgO Mg ₂ Si	MgB ₂ , MgO Mg ₂ Si		
C substitution for B (from <i>hkl</i> =100 in XRD)	_	_	Measured (SiC-doped)	Measured (SiC-doped)		
Packing density (Cross-sectional SEM)	— (No voids)	30∼65%(Non-doped) 40∼65%(SiC-doped)	45~55%(Non-doped) 45~65%(SiC-doped)	60~75%(Non-doped) 40~70%(SiC-doped)		
Microstructural features	Rapid diffusion of Mg atoms into amorphous B powders (<i>t</i> = 1 min) Incorporation of oxygen atoms with B and SiC powders (<i>t</i> = 1 min) Different macroscopic morphology between non-doped and SiC-doped tapes (cross-sectional SEM) Smaller and equiaxed grains of MgB, crystals in SiC-doped tapes (TEM)					

Ti バッファ層を導入した MgB₂ 薄膜のピンニング特性 Pinning properties of MgB₂ thin films on Ti buffered substrates

<u>米倉</u>健志, 久郷 梓, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎(熊本大); 原田 善之(JST サテライト岩手); 吉澤 正人, 池田 健(岩手大); 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大)

YONEKURA Kenji, KUGO Azusa, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro(Kumamoto Univ.);

HARADA Yoshitomo(JST Satellite Iwate); YOSHIZAWA Masato, IKEDA Takeshi(Iwate Univ.);

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo(Tohoku Univ.)

E-mail: kenji@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂超伝導体は金属系超伝導体の中では最高の臨界温度 *T_c*=39K を有しているが,実用化の際には臨界電流密度 *J_c*のさらなる向上が必要となる。MgB₂ 薄膜において,結晶粒界が主要なピンニングセンターとして働いているため[1],結晶粒界の密度を制御することでピンニング効率を向上できると考えられる。

本研究では、デバイス応用に適した作製方法である低温 成膜の as-grown 法の一種である分子線エピタキシー(MBE) 法[2]で MgB₂ 薄膜を様々な基板上に作製した。このとき、 MgB₂の結晶粒界の密度に変化を与えるために異なる基板上 に Ti をバッファ層として堆積させ、MgB₂ 薄膜の磁束ピンニン グ特性に対してどのような影響を与えるかを調べた。

2. 実験

MBE 法を用いて、 MgB_2 薄膜を Ti を堆積させた基板上に 作製した。作製した MgB_2 薄膜の作製条件を Table.1 に示す。 基板は 200°Cに加熱し、蒸着前の真空度は 4.0×10^{-10} Torr 以下 の高真空状態であった。蒸着源には Mg 塊(99.99%), B 単結 晶粒(99.9%)を用いた。蒸着速度は B が 0.03nm/s であり、 Mg は B の蒸着速度の 8~9 倍程度になるように調節した。

作製した薄膜は通電特性を測定するためにマイクロブリッジパターンに加工した。四端子法によって通電特性を測定し、電界基準を 1×10^4 V/m として J_c を決定した。また、 J_c の磁場依存性、磁場角度依存性を評価した。また、電界一電流密度特性を様々な磁場中で測定し、ピンニングパラメータの解析を行った。

Table.1 MgB ₂ samples	3
----------------------------------	---

		0 4		
試料名	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4
基板	MgO(100)	Si(111)	MgO(100)	ZnO(001)
バッファ層	Ti(50nm)	Ti(50nm)	なし	Ti(20nm)
膜厚	150nm	150nm	300nm	300nm

3. 実験結果

作製した薄膜の T_c は,それぞれ Sample1:32.7K, Sample2:34.3K, Sample3:33.6K, Sample4:34.9K であった。 Fig.1 に T=20K, B//c における J_c の磁場依存性を示す。低磁 場では Sample4 が最も高い J_c を示しているが,高磁場では Sample1 と Sample2 の方が高い J_c を示しており、特に Sample2 は磁場の増加による J_c の低下が最も小さくなっていることがわ かる。また、同じ MgO 基板を使用した試料でも、Ti バッファ層 を導入した Sample2 の方が高い J_c を示している。このことから、 MgO 基板に Ti バッファを導入したことでピンニング特性が向 上したことがわかる。

Fig.1 から巨視的ピン力密度 $F_p=J_c \times B$ を求めて導出した F_p の磁場依存性を Fig.2 に示す。Sample3 および Sample4 の試料は F_p のピークは 2T 付近に存在しており、Sample4 が最も大きなピークを示している。これに対して、Sample1 および

Sample2の試料はピークが 3.5T 付近と、やや高磁場側にシフトしており、なおかつ磁場の増加に対する F_p の減少が小さいことがわかる。また、磁場中での電圧—電流特性から磁束グラス—液体転移温度 T_g およびピンニングパラメータ mを導出した。これらの結果から、Ti のバッファ層が MgB₂ 薄膜にどのような影響を与えているかを考察する。



Fig.1 Magnetic field dependence of $J_c(T=20K, B//c)$.



Fig.2 Magnetic field dependence of $F_p(T=20K, B//c)$.

- [1] H. Kitaguchi, et al.: Appl.Phys. Lett. 85 (2004) 2824.
- [2] Y. Harada, et al.: Physica C 445 (2006) 884.

Xe イオンを照射した高密度 MgB2 バルク体の磁化特性

Magnetization propeties of high density MgB₂ bulk irradiated with Xe ions

山本 佳昭, 池田 博 (筑波大学); 石川 法人 (原子力機構)

<u>YAMAMOTO Yoshiaki</u>, IKEDA Hiroshi (University of Tsukuba); ISHIKAWA Norito(JAEA) E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1.はじめに

in-situ PICT 法で作成される MgB₂ バルク体は、密度が 理論密度の半分以下になってしまうことが問題とされてい た。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、試料の密度が 80 %以上に向上することを報告している [1]。本研究では、HP によって高密度化した MgB₂ バルク試料に 210MeV の Xe イオンを照射し、その磁気特性を測定した。磁気特性は低磁 場と高磁場の 2 つに分けて比較検討したので報告する。

2. 試料作製および実験方法

原料となる Mg 粉末 (99.99 %,100mesh-150 μ m 以下) と B 粉末 (99.9 %,1 μ m 以下) を、モル比で Mg:B が 1:2 となる ように秤量し、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臨界電流密度 (J_c) 値を得 られた 690 ℃を用いた。焼成した MgB₂ 試料が入ったステ ンレス管に、HP 処理をアルゴン雰囲気中で 2 時間施した。 HP 条件として、圧力 400kg/cm² は変化させず、HP 温度 を 690 と 710 ℃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行った。それぞれの試料に対 して照射量 10¹²ions/cm² と 10¹³ions/cm² で Xe イオンを 照射し試料を得た。

作製した MgB₂ バルク試料の磁気的特性は MPMS 磁気特 性測定装置 (Magnetic Property Measurement System) を 用いて測定・評価した。外部印加磁場 20Oe における磁化の 温度依存性から、磁化率を求めそれを比較検討した。また、 20K におけるヒステリシス曲線を測定して、そこから J_c の 磁場依存性を Been モデルを用いて算出した。更に、20K,2T における磁化緩和から見かけのピンポテンシャル U₀* を求 めた。

3.結果と考察

Fig.1 に 710 ℃で HP を施した試料における磁場中冷却 (FC) 過程の磁化率の温度依存性を示す。外部印加磁場 200e の低磁場では、照射により超伝導転移温度以下での磁化率が 減少していることが見て取れる。これは、FC 過程中に常伝 導相から超伝導相に転移する際に、試料内に残留する磁束が 増えたためと考えられる。つまり,照射によって導入された 欠陥が低磁場においてはピンニングセンターとして働いたこ とを示唆している。

次に、HP 温度 710 \mathbb{C} の試料の高磁場 (1T 以上) における ヒステリシス曲線から算出した J_c の比較を Fig.2 に示す。 イオンを 10¹²ions/cm² 照射した試料と 10¹³ions/cm² で照 射した試料では大きな差は見られなかったが、ともに照射を していない試料に比べて J_c は減少したことが見てとれる。 20K,2T で J_c を比較すると照射前と照射後で 1/2 程度に低 下した。これは、照射により生成した欠陥が電流の阻害要因 として働き J_c の低下を引き起こしたためと考えられる。一 方、20K,2T における磁化緩和の測定から U_0^* は照射により

ほとんど変化しなかった。

これらのことから、高磁場においてイオン照射によって導入された欠陥は有効なピンニングセンターとして働いていないと考えられる。この原因としては、照射したイオンの侵入長が短いことがあげられる。試料の厚さが約0.6mmであるのに対して、210MeVのXeイオンがMgB2試料内に侵入する長さはおおよそ20µm程度と見積もられる。そのため、欠陥はバルク試料のごく表面にしか生成していないと考えられる。



Fig. 1: Temperature dependence of susceptibility at 20Oe for the MgB₂ bulks hot pressed at 710 $^{\circ}$ C.



Fig. 2: Magnetic field dependence of J_c at 20K for the MgB₂ bulks hot pressed at 710 °C.

K. Shinohara, T.Futatumori and H.Ikeda., Physica C, 468 (2008) p.1369-1371.

真空中で作製した In-situ 法 MgB₂/Fe 線材

ー組織と超伝導特性ー

In-situ MgB₂/Fe Wire Sintered in Vacuum - Microstructure and Superconducting Properties -

渡辺 喜史, 松岡 宏明 (日大理工); 前田 穂(UOW), 久保田 洋二(日大理工)

WATANABE Yoshifumi, MATUOKA Hiroaki(CST), MAEDA Minoru(UOW), KUBOTA Yoji(CST)

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、In-situ 法 MgB₂線材を作製する時に圧延加工で、Mg が繊維状に伸びることに注目してきた[1]。これまで、MgB₂線材の作製過程で熱処理する際には、静的 Ar ガス雰囲気中、動的 Ar ガス雰囲気中で焼成してきた。今回は真空中で MgB₂超伝導線材を作製し、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%, 50μm)と B (97%, 0.8μm)を化学量論比 Mg:B=1:2 で 40 分間混合し、加重 4.8 トンでφ5.5mm 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 パイプに詰め、角型ロールと丸 型ロールで 0.93mm まで圧延加工を施し、さらに、線径が 0.749mm まで丸ダイスを用いて縮径した。試料の熱処理条 件を Table .1 に示す。試料の形態、組成及び臨界電流密度 *J*cは、SEM、XRD,と *I*c 測定装置, SQUID を用いて調べた。 3. 結果

Fig. 1 に 20K における $J_{\rm C}$ の磁場依存性を示す。試料 S1 の $J_{\rm C}$ は試料 S2 の $J_{\rm C}$ に比べ、低磁場側 2T 付近で低い値と なったが、高磁場側 5T 付近で 2.5 倍増大した。Fig. 2 に上 部臨界磁場 $B_{\rm C2}$ の温度依存性を示す。外部磁場 0T におけ る S1 と S2 の $T_{\rm C}$ は、それぞれ 36.6K と 37.8K であった。 Ar ガス雰囲気中で熱処理した試料は真空中で熱処理した 試料に比べ、 $T_{\rm C}$ が 1K 以上高くなることがわかった。しか しながら、25K、5T 付近での $T_{\rm C}$ は、S1 に比べ S2 の方が 高かくなることがわかった。このように熱処理温度と時間 が同じ条件にもかかわらず、熱処理時の試料を取り巻く環 境の違いで磁場中における $J_{\rm C}$ 及び $T_{\rm C}$ が大きく変化した。 当日は、不純物 MgO の生成量, MgB₂の結晶粒サイズや 結晶性を含め、より詳細な報告をする。

Table 1	Specification of samples
14010.1	Specification of samples

Sample name	Sintering condition
S1	600°C-16h in Vacuum
S2	600°C-16h in Ar gas



Fig. 1 Critical current densities of all samples as a function of applied magnetic fields at 20K



Fig. 2 Temperature dependence of the B_{c2} for all samples

参考文献.

 D.Uchiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 71 (2004) p.108

BaZrO₃, YSZ を用いた YBCO 擬似多層膜の磁束ピンニング特性 Flux pinning properties in quasi-multilayered YBCO films with BaZrO₃ and YSZ

<u>末吉 哲郎</u>,嶋田充剛,油谷真吾,茅野伊三郎,藤吉孝則,光木文秋,池上知顯(熊本大) <u>SUEYOSHI Tetsuro</u>, SHIMADA Mitsutake, YUTANI Shingo, KAYANO Isaburo, FUJIYOSHI Takanori, MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.) E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

パルスレーザー堆積法(PLD法)において BaZrO3や YSZ を混入した希土類系高温超伝導体 REBCO ターゲットを 用いて成膜を行うと、REBCO 薄膜中に BaZrO3 がナノロ ッドとして析出する.これが磁束線を強くピン止めでき る1次元ピンとして作用して,飛躍的な臨界電流密度 J。 の向上を図れることが知られている[1].一方, REBCOと BaZrO,の二つのターゲットを交互に切り替えて薄膜を作 製する方法(ターゲット切替法)では、BaZrO3はナノドット 状に分散し、3次元ピンとして作用する[2]. これに対し、 ターゲット切替法において YSZ をピン物質として用いる と、短いナノロッドが形成される報告がある[3].本研究 では、BaZrO3とYSZを用いたターゲット切替法において、 YBCO 薄膜中へ BaZrO, がナノロッドまたはナノドットと して形成される条件を調べる.今回その第一段階として, BaZrO₃, YSZ の導入量をその堆積パルス数や多層膜の層 数により制御して BaZrO3, YSZ を擬似層とした BaZrO₃/YBCO, YSZ/YBCO 多層膜を作製し, その磁束ピン ニング特性についての比較を行った.

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 多層膜を作製した. 市販の BaZrO3, YSZ およびYBCOのターゲットに対し,エネルギー密度1J/cm², 繰り返し周波数 5Hz のパルスレーザーを用いて,酸素雰 囲気ガス 300mTorr, 基板温度 780℃の下で成膜を行った. その後,600Torrの酸素雰囲気中で室温まで自然冷却した. 多層膜作製の前に, BZO, YSZ が YBCO 層上にナノ粒子 として堆積する条件を調べるために、レーザーのパルス 数を変化させて YBCO 薄膜上に BZO, YSZ を堆積させ, その試料の表面観察を原子間力顕微鏡 AFM により行った. 擬似多層膜作製においては、YBCO 層を堆積した後 BaZrO3 または YSZ を mパルスで堆積し、これを n層で堆 積した試料を B(m, n), Y(m, n)とそれぞれ定義する. また, 全ての試料において,YBCO 堆積の総パルス数を 3,625 パ ルスとした. 臨界電流密度 Jcは, 四端子法を用いた通電 特性から電界基準を $E_c=1.0 \times 10^{-4} \text{V/m}$ として定義した. 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、Jc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, 層数 n=28 の多層膜での BaZrO₃, YSZ の堆積パ ルス数と超伝導転移温度の関係を示す.パルス数が増加 すると,超伝導転移温度が低くなっている.また,BZO に比べて YSZ の方がパルス数に対する T_cの減少が小さい. 一般に混合ターゲット法を用いた場合では,同ドープ量 の BZO と YSZ を含んだ YBCO 薄膜の T_cを比較すると, YSZ をドープした試料において T_cの減少が大きい[1].こ れは,BZO と比較して YSZ ターゲットをアブレーション したときのプルームが小さいことが考えられる.

Fig.2(a), (b) に, BaZrO₃/YBCO, YSZ/YBCO 擬似多層膜の

T=77.3K での臨界電流密度の磁場依存性をそれぞれ示す. 試料 B(3, 28)において,測定磁場領域にわたって最も高い $J_c を示した.$ 試料 B(3, 28)において, B=5T での YBCO 薄 膜の J_c の値を比較すると, T=77.3K で約 2.8 倍である. 一 方, YSZ/YBCO 擬似多層膜では,試料 Y(10, 28)において, 5T 以上の高磁場で YBCO 薄膜より高い J_c を示し, BZO/YBCO 多層膜と比較して,第 2 相物質への堆積パル ス数が J_c へ与える影響が小さい傾向にあった. 今回 BZO, YSZ を用いた多層膜では, J_c の磁場角度依存性において c軸方向で J_c のピークは確認できず, $\theta=90^\circ$ 付近でのみ J_c のピークが観測された.



Fig.1 Transition temperatures of quasi-multilayered YBCO films with $BaZrO_3$ and YSZ.



Fig.2 Magnetic field dependences of critical current density in (a) $BaZrO_3/YBCO$ and (b) YSZ/YBCO quasi-multilayered films.

- 1. S. Kang et al.: Physica C 457 (2007) 41.
- 2. Y. Yoshida et al.: Physica C 468 (2008) 1606.
- 3. L. Peng et al.: J. Phys. D 41 (2008) 155403.

YbBCOシード層を用いた IBAD-MgO 上 YBCO 線材の超伝導特性 Superconducting properties of YBCO films with YbBCO seed layer on IBAD-MgO buffered metal substrates

<u>鈴木 博之</u>,吉田 隆,一野 祐亮,高井 吉明(名大);吉積 正晃,和泉 輝郎,塩原 融(SRL); 加藤 丈晴(JFCC);淡路 智,渡辺 和雄(東北大) <u>SUZUKI Hiroyuki</u>, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.); YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL); KATO Takeharu (JFCC); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

E-mail: h-suzuki@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

IBAD-MgO 基板の開発により **REBa₂Cu₃O_y(REBCO)** coated conductor の作製速度が向上し、様々な超伝導機器への応用が現実的なものになってきている。

そこで、我々のグループは、PLD 法で YBa2Cu3Oy(YBCO) 薄膜を IBAD-MgO 基板上に作製し、評価を行なったところ、 J_c の磁場印加角度依存性において、B//cの時に強い J_c のピ ークを確認した^[1]。Cival らの報告によると IBAD 基板は点欠 陥が多く、ミスオリエンテーション角度が大きいため、ピンニン グ点が導入されるといった報告がある^[2]。しかし、IBAD 基板 上 YBCO 薄膜に c 軸相関ピンは、ほとんど存在していないと する報告もある^[3]。また、Wangらは、Y リッチの IBAD 基板上 YBCO 薄膜に Y2O3 ナノパーティクルがピンニング点として存 在していることを報告している^[4]。以上のように、IBAD 基板に おけるピンニング点に関しては様々な報告があり、未解明の 部分が多い。c 軸方向におけるピークの原因を解明するため、 IBAD-MgO 基 板 上 に YBCO 薄 膜 Yb0.9Nd0.1Ba2Cu3Ov(YbBCO)薄膜および YBCO-YbBCO 多 層薄膜を作製し、微細構造観察、超伝導特性について比較 検討を行なった。

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。また、YbBCO 薄膜は T_s = 850°C で作製した。YBCO-YbBCO 多層薄膜はシード層として YbBCOを T_s = 850°C において 100 nm 厚で作製し、次に上部 超伝導層として YBCOを T_s = 875°C で 350 nm 厚で作製した。 いずれも超伝導層の全膜厚を 450 nm 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 $\theta \delta \theta = -7^{\circ} \sim 127^{\circ}$ で変化させて 測定を行なった。

3. 結果及び考察

Fig. 1 にこれらの薄膜に対し、磁場を基板面法線方向(c 軸 方向)に印加したときの J_c を示す。この図より、YbBCO薄膜は c 軸方向への磁場により J_c が大きく減少することが分かる。ま た、YBCO 薄膜と比較すると、YBCO-YbBCO 多層薄膜も低 磁場領域(\sim 1T)では、 J_c の減少が大きいため低磁場領域で 効果的な c 軸相関ピンが少ないことが分かる。Fig. 2 にこれら の薄膜における J_c の磁場印加角度依存性を示す。これより YbBCO 薄膜には c 軸相関ピンは、ほとんど存在しないことが 確認され、Fig. 1 での YbBCO 薄膜の J_c の減少は c 軸相関ピ ンが存在しないことに起因すると考えられる。また YBCO-YbBCO 多層薄膜には、YBCO 薄膜と比べると弱い が、c 軸相関ピンが確認されたことから YbBCO をシード層に 用いても、上部超伝導層である YBCO に c 軸相関ピンが導入 されることが分かる。

現在、IBAD-MgO 上 YBCO 線材の c 軸相関ピンに関して の AFM や TEM などの微細構造の観察を行なっている。



Fig. 1 Magnetic Field dependence of *J*_c for REBCO films on IBAD-MgO Substrates



Fig. 2 Applied field Angular dependence of J_c normalized by J_c at 90degrees for REBCO films at 1T

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(N EDO)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。

- [1] 吉田 隆 他: 低温工学春季講演会(2009)
- [2] L. Civale, et al. : Appl. Phys. Lett, Vol. 84 (2004) 2121
- [3] Y. Yamada, et al. : Appl. Phys. Lett, Vol. 87 (2005) 132502
- [4] H. Wang, et al. : J. Appl. Phys, Vol. 100 (2006) 053904

MgO 中間層上に成長した YBa₂Cu₃O_y 薄膜の表面形態、およびピンニング特性 Surface morphorogy and pinning property of YBa₂Cu₃O_y thin film on MgO buffer layer

 高木 省伍, 吉田 隆, 一野 祐亮, 高井 吉明(名大工); 松本 要(九大工);

 一瀬 中(電中研); 向田 昌志(九大工);

 TAKAGI Shogo, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke,

 TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Tech.);

 ICHINOSE Ataru (CRIEPI); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.)

 E-mail: s-takagi@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y薄膜の磁場中超伝導特性を向上させるために、ピンニングセンターに関する様々な研究が行われている。常伝導物質をピンニングセンターとして導入する方法以外にも、例えば Y₂O₃ ドット上に作製した YBCO 薄膜の転位が c 軸相関ピンとして働く、という報告がある[1]。このように BaZrO₃ などの析出物導入によるピンニングセンターの導入以外にも、意図的に薄膜中に結晶欠陥を導入してピンニングセンターとする方法がある。そこで本研究では、結晶欠陥等をピンニングセンターとして効果的に薄膜中に導入することを目的として、STO 単結晶基板上に MgO 中間層としての MgO ドットを用いた YBCO 薄膜を作製し、薄膜の表面形態やピンニング特性について検討した。MgO は、基板材料のSrTiO₃(STO)より YBCOとの格子ミスフィットが大きいため、より多い転位の導入が期待される。

2. 実験方法

MgO ドットは、PLD 法(KrF, $\lambda = 248$ nm)を用いて、 $T_s = 500$ °C、 $pO_2 = 1 \times 10^4$ Torr で STO(100)単結晶基板上に 作製した。またレーザー繰り返し周波数は 10 Hz、成膜 時間は5秒~300秒(ショット数50~3000)とした。YBCO 薄膜は、PLD 法を用いて MgO 中間層上に、 $T_s = 950$ °C、 $pO_2 = 0.2$ Torr で作製した。作製した薄膜の結晶性及び 配向性は X 線回折法、表面形状はダイナミックフォー ス顕微鏡(DFM)、超伝導特性は四端子法で評価した。転 位密度の評価は Br₂-mehanol を用いて表面のエッチング 処理後、DFM を用いてエッチピットを観察した。また、 印加磁場を c 軸に対し、-8°~126° 変化させ、 J_c の磁場 印加角度依存性を評価した。

3. 結果及び考察

Fig. 1 に 77 K における MgO ドット(ショット数 50)上 に成長させた YBCO 薄膜の、 $J_c(B//ab)$ で規格化した J_c の磁場角度依存性を示す。比較のために、STO 単結晶 基板上 YBCO 薄膜のデータも同図に示す。STO 単結晶 上 YBCO 薄膜は、B//c においてピークが見られる。こ のようなピークは ErBCO でも報告されており[2]、刃状 転位や螺旋転位が c 軸相関ピンとして働いていると考 えられている[3]。しかし MgO ドット上 YBCO 薄膜に おいては B//c のピークが見られなかった。この違いが 現れた原因を、両膜の転位密度の比較から検討した。

Fig. 2に MgO ドット上 YBCO 薄膜(ショット数 50)と、 エッチング処理後の同膜の表面 DFM 像の一例を示す。 MgO ドット上 YBCO 薄膜の表面はスパイラル形状が確 認され、更に転位密度は 60/µm²であることが分かる。 一方、エッチング処理後の STO 基板上 YBCO 薄膜の表 面 DFM 像は MgO ドット上 YBCO 薄膜と同様で、その 転位密度は 55/µm²であり、大きな違いは確認されなかった。

今後、微細構造観察や77K以下の低温域でのピンニング特性の比較などを検討し、MgOドット上YBCO薄膜のピンニング特性を明らかにしたいと考えている。



Fig. 1 Magnetic field anglular dependece of J_c for various YBCO films at 77 K.



Fig. 2 DFM images of YBCO on MgO dots(a) and etched one(b).

4. 謝辞

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

【参考文献】

- 1. K. Matsumoto et al., Physica C 412 (2004) 1267-1271.
- 2. H. Yamada et al., Supercond. Sci Technol. 17 (2004) 58-64
- 3. M. Namba et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. (2008)

IBAD-MgO 上に製膜した YBCO 線材の微細構造と磁束ピンニング特性

Flux pinning properties and microstructure in YBCO coated conductor on IBAD-MgO

<u>吉田隆</u>、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)、淡路智、渡辺和雄(東北大、金研)

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

1. はじめに

超伝導線材の研究開発は、長尺化、低コスト化等ともに磁場中超伝導特性向上を目的とした、人工ピン導入の超伝導 薄膜や超伝導線材の研究が報告されてきている。特に、 BaZrO₃(BZO)を添加した REBCO 薄膜や線材は BZO が c 軸 方向にロッド状に自己組織化し、c 軸方向に強力な磁束ピン ニング特性を示すことが知られている。他に RE123 膜の RE-rich 相や BaSnO₃ロッド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。

これまで我々は、薄膜の結晶性向上(単結晶化)や高速製 膜のためにVapor-Liquid-Solid(VLS法)や磁場中高J_c-RE123 薄膜に向けてLow temperature Growth (LTG法)などの新た な製膜プロセスを提案してきた。そこで、これらの新たな製膜 プロセスで作製した RE123 薄膜は、IBAD-MgOテープ上に 成長した際の性能向上が期待される。本報告では、 IBAD-MgO上に製膜した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す る。

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~1µm 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 $\theta \in \theta$ =-7°~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 及び STO 単結晶基板上の YBCO 線材 (膜厚約 500 nm)の磁場中 J_c 特性を示す。自己磁場中では 数 MA/cm² と両者の間に大きな違いは確認されなかった。し かし、B=2T 付近の磁場中では IBAD-MgO 上 YBCO 線材の 特性の低下が抑制され、B=4T で J_c は0. 1MA/cm² を超える 値を示している。

図 2 に IBAD-MgO 上 YBCO 線材の異なる印加磁場における J_c の角度依1.性を示す。なお、自己磁場中の $J_c(J_c^{s.f.})$ で規格化した J_c 値を用いて、磁場印加方向に対するピンニング力の異方性について考察する。B=1 T 及び3 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=1T 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 BaZrO₃などの析出物を導入した 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。

これまで B. Dam や A. Diaz らは、表面微細観察などからス パイラル転位などのナノ組織がフラックスピンニングとして効 果的であることを報告している。⁽¹⁻⁴⁾

本研究で得られた結果は、金属基板上での高 Jc 線材による 超伝導応用への展開として期待されるだけでなく、ピンニング メカニズムの解明として興味が持たれる。現在、膜厚異存性、 TEM などの微細構造観察、異なる中間層材料などを検討している。

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(N EDO)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)B. Dam et al. : Nature 399 439(1999)

(2)A. Diaz et al.: PRL 80 3855(1998)

(3)J. C. Nie, H. Yamasaki et al.: SUST 16 768(2003)

(4)M. Namba, S. Awaji et al.: ASC2008





IBAD 中間層構造における中間層高速成膜検討

High throughput fabrication of interlayer for IBAD buffer layer structure

須藤 泰範,花田康,羽生智,林田知朗,田下千晴,森田克洋,五十嵐光則,

柿本 一臣, 朽網 寛, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)

<u>SUTOH Yasunori</u>, HANADA Yasushi, HANYU Satoru, HAYASHIDA Tomoaki, TASHITA Chiharu, MORITA Katsuhiro, IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, KUTAMI Hiroshi, IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)

E-mail: ysutoh@fujikura.co.jp

1. はじめに

RE 系次世代高温超電導線材の長尺化の実現¹⁾により、変 圧器や限流器のほか、車両や船舶等に用いられるモーター を含む回転機等の機器へ応用するための研究開発が進めら れてきている。機器開発において、線材には単長が長く且つ *I*。特性が高く均一であること、低コストであることが求められて いる。我々はこれまでに、製造速度の向上による低コスト化の 検討として、IBAD 中間層材料を Gd₂Zr₂O₇(以下 GZO)から MgO に移行し、高速成膜化検討を行ってきた^{1,2)}。MgO 層を 用いた IBAD 中間層構造では、MgO 層の下地層として Al₂O₃ 層及び Y₂O₃層を、キャップ層として、GdBCO 層との格子整合 性が良い CeO₂ 層を用いている。

今回、成膜条件の適正化及びマルチターン化による大面 積成膜化でのIBAD中間層構造の各層の作製速度の向上及 び中間層の長尺化状況について報告する。

2. 実験方法

金属テープ状基板として、ハステロイ C276(幅 10mm、厚さ 0.1mm) 基板を用いた。IBAD 中間層構造のバッファー層とし て、Al₂O₃、Y₂O₃層を成膜し、その上部にIBAD 法により MgO 層の成膜を行った。Al₂O₃、Y₂O₃層の成膜は Al₂O₃及び Y₂O₃ の焼結体をイオンビームスパッタすることで行った。成膜時の テープ移動速度は、100m/h~500m/h として成膜を行った。 MgO 層の成膜は、イオンビームを基板法線方向に対して 45°方向から入射し、アルゴンガスを使用して MgO 焼結体を イオンビームスパッタすることにより行った。加速電圧は 800~ 1500V を使用し、テープ移動速度を 100m/h~1000m/h として 成膜を行った。作製した MgO の評価は、IBAD-MgO 上に PLD 法により CeO₂キャップ層を成膜し、X 線回折測定により 得られた CeO₂<220>の正極点のピーク強度の半値幅であらわ される面内配向性($\Delta \Phi$)を測定することにより行った。

3. 結果及び考察

Table.1 に IBAD 中間層構造の各層の作製速度とその上部 に形成した CeO_3 キャップ層の面内配向性($\Delta \Phi$)を示す。各層 の厚みは Al₂O₃層 100nm、Y₂O₃層 20nm、MgO 層 5-10nm、 CeO₂層 300-500nm である。MgO 層の作製速度を向上させる ために、複数レーン位置で結晶配向性が良好となるように、ス パッタイオンビーム及びアシストイオンビームの出力条件など を適正化して成膜を行った。①100m/hの速度で1レーンのみ で成膜した場合、2500m/hで5レーンのマルチターン成膜を した場合、③1000m/hで11レーンのマルチターン成膜をした 場合、それぞれの条件にて成膜した試料上に CeO2 層を形成 し、△Φを比較した結果、同程度の値が得られていることがわ かった。成膜領域が大面積化できたことにより、高速成膜が可 能であることが確認できた。次に、MgO 層の下地層である、 Y2O3 層の作製速度を向上させるために、スパッタイオンビー ムの出力を高くして成膜を行い、その上部に MgO 層及び CeO₂層をそれぞれ成膜した。CeO₂層の $\Delta \Phi$ は、③の Y₂O₃ 層を 100m/h で成膜した場合、④の 500m/h で成膜した場合と で同程度の値であることから、Y2O3層を 500m/h で作製できる ことを確認した。CeO2の作製速度向上検討として、⑤のように 100m/hの速度で膜厚 300nmの膜を形成し、△ Φを調べた結

果、高配向化しており、配向性の値としては十分良いものが 得られることがわかった。

長尺化検討として、④のように Y_2O_3 層及び MgO 層の作製 速度の速い条件にて 200m、500m、1000m 長のハステロイ基 板上に各層の成膜を行い、両端部の CeO₂層の $\Delta \Phi$ を調べた。 結果を Fig.1 に示す。両端部において、 $\Delta \Phi$ =4.2° ~5.4° が 得られており、200m 長以上の長さで高速・高配向中間層が形 成できることが確認できた。

今後は Al_2O_3 層や CeO_2 層の作製速度の高速化検討を行っていく予定である。

Table.1 Throughput rate of interlayer and in-plane textures of CeO_2 for IBAD buffer layer structure. The tape width is 10 mm.

No.	Al2O3 Speed (m/h)	Y2O3 Speed (m/h)	IBAD- MgO Speed (m/h)	PLD- CeO ₂ Speed (m/h)	$\begin{array}{c} {\sf CeO_2} \\ \Delta \ \Phi \\ ({\sf deg.}) \end{array}$
1	100	100	100	60	3.9 - 4.9
2	100	100	500	60	4.1 - 4.6
3	100	100	1000	60	4.0 - 5.0
4	100	500	1000	60	4.2 - 5.0
5	100	100	1000	100	4.7 - 4.9



Fig.1 In-plane textures of $\rm CeO_2$ on IBAD-MgO(4-fold) long tape. The tape lengths are 200m, 500m and 1000m respectively.

謝辞

本研究は独立行政法人「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。

参考文献

1)五十嵐光則他、第78回春季低温工学・超電導学会講演概 要集、p113 2)羽生智他、第79回秋季低温工学・超電導学会講演概要集、 p10

Characterization of (Y,Ho)BCO Films Fabricated by Forth Harmonic Nd:YAG Pulsed Laser Deposition

INDIKA G. P. De Silva, MAEDA Toshihiko (Kochi Univ. Tech) E-mail: <u>108004c@gs.kochi-tech.ac.jp</u>

1. Introduction

Partial substitution of some rare-earth (RE) elements for Y sites of YBCO is known to be one of effective procedures to increase critical current density in an external magnetic field. The replacement of Y by RE causes local distortion of the crystal structure and electron density and as a result strain induced pinning improvements are occurred [1]. These effects depend on valence and size of RE ion. In this work, Ho is selected as the dopant because the ionic radius of Ho is almost similar to Y and therefore lattice distortion has not occurred. It may be possible to create the pinning effect as a result of different electron potential energies in randomly distributed Y and Ho sites. Even though high quality films have been prepared mostly using an excimer lasers, Nd:YAG laser was used in this study because it has some advantages over the excimer lasers. These advantages were reviewed in this study. The objective of this work is to prepare thin films of (Y₁- $_{x}Ho_{x}Ba_{2}Cu_{3}O_{z}$, (x=0, 0.3, 0.5, 0.7 and 1) with improved texture quality and current characteristics, using forth harmonic Nd:YAG laser and study the effect of Y:Ho ratio on these characteristics.

2. Experimental Procedure

Thin films of $(Y_{1-x}Ho_x)Ba_2Cu_3O_z$, x=0, 0.3, 0.5, 0.7 and 1) were deposited on (100) STO single crystal substrates by PLD method using fourth harmonic (266 nm) Nd:YAG lasers. Special attention was paid in setting laser parameters: pulse repetition rate, pulse duration (FWHM) and pump energy in order to enhance the quality of film. c-axis orientation of prepared thin films was analyzed by means of X-ray diffractometry (XRD: θ -2 θ scan) and in-plane texturing was assessed by conducting XRD ϕ -scan. Critical current (I_c) and critical temperature (T_c) were measured using standard four-probe method. I_c was measured at 77 K for narrow bridge in patterned samples using 10 μ V/cm criterion. Film thickness was measured using the cross-sectional image obtained by Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM).

3. Results and Discussion

c-axis oriented films were prepared for varying compositions of $(Y_{1-x}Ho_x)Ba_2Cu_3O_z, x=0, 0.3, 0.5, 0.7$ and 1 by adjusting PLD parameters as shown in Table1. It should be noted that all films contained both "cube-oncube" and a small amount of "45° rotated" configurations ("cube-on-cube" is predominant). Thicknesses of all films were ranged between 200 nm and 250 nm and average film deposition rate was calculated as 11 nm/min. T_c and J_c valves were obtained in the range of 87-90 K and 0.1-1.5 MA/cm² (at 77 K and self field), respectively (Table 2 and Fig. 1). Present experimental results showed that the Y/Ho ratio does not cause obvious changes in texture quality because of the nearly equal ionic radii of Y and Ho. As shown in Figure 1, Y/Ho ratio dependence of J_c was not clearly observed. For x=0.5, extremely low J_c was obtained which may be caused by some experimental error such as failure in oxygen annealing. Results obtained in this study further clarify the almost same conclusions of previous studies conducted on (Y,Ho)BCO films [2].

Table 1. Optimized parameters for $(Y_{1-x}Ho_x)Ba_2Cu_3O_z$ films.

Sample name	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Composition	x=0	<i>x</i> =0.3	<i>x</i> =0.5	<i>x</i> =0.7	<i>x</i> =1
Indicated temp. (°C)	840	840	850	857	865
O ₂ pressure (Pa)	45	45	45	45	45
T-S distance (cm)	37	37	37	37	37
Energy density (Jcm ⁻²)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Deposition time (min)	20	20	20	20	20

Table 2. Current characteristics of (Y1-xHox)BCO films

Sample name	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Composition	x=0	<i>x</i> =0.3	<i>x</i> =0.5	<i>x</i> =0.7	<i>x</i> =1
$I_{\rm c}({\rm mA})$	310	316	27	367	186
Thickness (nm)	250	200	200	250	200
Bridge width (µm)	108.3	104.2	97.4	116.3	112.2



Fig. 1. Y/Ho ratio dependence of J_{c} .

Acknowledgement

The authors would like to offer their deepest gratitude to Prof. Y. Yoshida and Prof. Y. Ichino of Nagoya University for their kind help in current characteristics measurement.

References

S.H. Wee, A. Goyal, Y.L. Zuev, S. Cook, L. Heatherly, Supercond. Sci. Technol. 20, 789 (2007).
 B. Gao, C.B. Cai, Z.Y. Liu, J.L. Liu, L.L. Ying, S.X. Cao, J. C. Zhang, T. Thersleff, R. Hühne, B. Holzapfel, Journal of Physics: EUCAS 2007, 97, 012245 (2008).

SmFeAsOF多結晶超電導体の臨界電流密度特性 Critical current density properties in polycristalline SmFeAsOF

<u>吉田 信之</u>, 中山 紘喜, 河合 真司, 木内 勝*, 小田部 荘司*, 松下 照男 (九工大); 森田 泰弘, 葛君, 倪宝栄* (福工大);

高召順, 王雷, 斉彦鵬, 張現平, 馬衍偉 * (中国科学院) (*JST–TRIP)

YOSHIDA Nobuyuki, NAKAYAMA Hiroki, KAWAI Shinji, KIUCHI Masaru*,

OTABE Edmund Soji*, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

MORITA Yoshihiro, GE Jun, NI Baorong^{*} (Fukuoka Inst. of Tech.);

GAO Zhaoshu, WANG Lei, QI Yanpeng, ZHANG Xianping,

MA Yanwai^{*} (Chinese Academy of Science) (*JST–TRIP)

E-mail : nobuyuki@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

近年、新しい系統となる鉄を含む超電導化合物 REFeAsO と AFe₂As₂(RE:希土類, A:アルカリ) が発 見された。これらの化合物は超電導層である FeAs 層 とブロック層である REO 層と A 層が交互に積層した 結晶構造をしている。その中でも SmFeAsO_{1-x}F_x が 50 K を超える臨界温度 T_c を持つことが発見され、今 後の発展に大きな注目が集まっている。本研究では鉄 ヒ素系超電導体の中でも比較的高い T_c を持つ多結晶 の SmFeAsO_{1-x}F_x のバルク材についてフッ素の置換 率や製法の異なる試料¹⁾ を作製し、SQUID 磁力計を 用いて文献 2) に示す方法で残留磁化より粒間と粒内 の臨界電流密度 J_c を評価し、置換率や製法による影響 を調査する。

2. 試料および実験

今回使用した試料は、SmFeAsO_{1-x}F_xをTaシース を用いたPIT(Powder In Tube)法で作製した#1,4と、 二段焼結法で作製した#2,3である。#1,2,4のフッ 素の置換率はx = 0.3であり、#3はx = 0.4となって いる。各試料の諸元をTable 1に示す。#1,4は製法、 フッ素の置換率は同じだが異なる管で作製された試料 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^{global} に分離した。

3. 結果及び検討

Fig. 1 (a) にゼロ磁場における粒間の臨界電流密度 J_c^{global} の温度依存性を示す。 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 幅wより評価した。ただし#3 は粒間電流がなかった。 J_c^{global} では異なる製法による大きな変化は見られな かった。Fig. 1 (b) にゼロ磁場における粒内の臨界電流 密度 J_c^{local} の温度依存性を示している。 J_c^{local} は残留磁 化測定の結果より得られた結晶粒の中心到達磁場と粒 径より評価した。粒径は数 μ m から数+ μ m に分布し、 さらに J_c の分布やボイドを考えると正確な J_c の評価 は難しい。ここでは単純に粒径を 10 μ m とした。

二段焼結法で作製した#2,3の J_c^{local} は 5–20 K の範 囲で著しく低下しているのに対し、PIT 法で作製した #1,4 は#2,3 ほど低下していないという結果が得られ た。得られた J_c^{global} , J_c^{local} の値は山本らの報告³⁾と 同じオーダーである。#2,3の測定結果からはフッ素 の置換率を変えたことによる J_c^{local} への大きな影響は 見られなかったが、#3では粒間電流による残留磁化 への寄与を確認できなかったため J_c^{global} を評価できな かった。これは#3自体に欠陥があるのか、フッ素の置 換率の影響によるものなのかを詳細に調べる必要がある。また製法の異なる試料で J^{local} の温度依存性に大きな差が現れたことについての要因も、今後さらに詳細に調べる必要がある。

Table 1: Specifications of $SmFeAsO_{1-x}F_x$ specimens.

Specification	#1	#2	#3	#4
length $l \pmod{m}$	1.93	1.92	2.30	2.18
width $w \pmod{mm}$	1.50	1.75	2.11	2.10
thickness $d \pmod{d}$	1.30	1.16	1.43	0.87
nominal composition	0.3	0.3	0.4	0.3
of F r				



Fig. 1 (a) Inter-grain and (b) intra-grain critical current density in the trapped flux condition.

【参考文献】

- 1) Z. Gao et al.: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 112001.
- K. H. Muller, et. al. : Phys. Rev. B 50 (1994) 10218.
- A. Yamamoto, et. al. : Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 095008.

Pt-Rh 線を複合化した Dy-123 系超電導溶融体の作製と特性評価 Preparation and properties of melt growth Dy-123 superconductor with Pt-Rh wires

島田 浩典(明星大);藤本 浩之(鉄道総研);吉澤 秀二(明星大)

SHIMADA Hironori (Meisei Univ.); <u>FUJIMOTO Hiroyuki</u> (Railway Tech. Res. Inst.); YOSHIZAWA Shuji (Meisei Univ.)

E-mail: fujimoto@rtri.or.jp

1. はじめに

希土類(RE)系超電導溶融体は、常伝導物質(RE-211)を 超電導体中に微細分散させることなどにより、より高い磁場を 捕捉することが可能で、磁気分離やフライホイール、電流リー ドなどへの応用が期待されている[例えば 1-2]。しかし、例え ば、磁場をバルク体に捕捉させるときの磁場と誘起電流の相 互作用によるローレンツ力や熱発生などにより、マイクロクラッ クやボイドなどの欠陥の存在がバルク体の破断をまねくことに なることが知られている。

これまで、我々は発熱を直接金属線で外部に逃がすこと を目的として、Dy-123 系超電導溶融体を用いて、成型する 前にバルク体に対してc軸方向になるよう Pt 合金線を複合 化し、超電導溶融体の作製を試みた結果、大気中では Pt 線が反応して、金属線として残留しないことを確認した。しか し、Pt線より融点の高い Pt-Rh線を複合化した溶融体(以下 PR 溶融体)を作製すると、Pt-Rh線が残留することを示した [3]。また、長さが短い(例えば、1~3mm) Pt-Rh線が分散す るように混合化(以下 PRS 溶融体)した。本研究では、Pt-Rh 線を複数の混合条件で複合化して、溶融体への影響を調べ、 熱伝導の向上を確認したので、報告する[4-5]。

2. Dy-123 系超電導溶融体の作製

出発原料として、仮焼粉である Dy-123と Dy-211 を準備し、 これらの仮焼粉を最適なモル比である 1:0.3 に秤量し、有機 溶媒中で湿式混合した。そして、融点降下と機械的強度の向 上を目的に Ag₂O を 30wt%添加し、混合した粉末を直径 20~ 30 mm、厚さ15~20mmの円盤状の前躯体にプレス機で成型 した。成型する際に、各バルク体に複合化した Pt-Rh 線 (Pt:Rh=87:13)の条件は、図 1と表 1 の通りである。さらに、成 型したバルク体の下に、バルク体と同様の混合モル比で Dy-123と Dy-211を有機溶媒中で湿式混合して、プレス機で 成型した敷きバルクを置き、その下にアルミナ基板を置いた。 温度勾配を有する電気炉を用いて、溶融凝固後、種付けを 行い、単一ドメインの結晶を生成させた。種結晶として、 Nd-123 の単結晶体を用い、その後結晶成長を行った。

試料 A、B および C ともファセットラインが種結晶を中心に 形成していることから、表面においてほぼ単一なドメインの成 長が確認できた[4-5]。また、Pt-Rh 線がドメイン内に複合化し ていることも確認した。この結果、結晶成長の際、Pt-Rh 線に よる結晶化への影響が少ないことがわかった。

3. Dy-123 系超電導溶融体の特性評価結果

作製した Dy-123 系溶融体の超電導特性を確認するため、 臨界温度(Tc)、臨界電流密度(Jc)、および捕捉磁場測定を行 った[4-5]。溶融体が捕捉した磁場は、ほぼ単一なピークを示 しており、種結晶を中心に単一ドメイン溶融体が生成して いることがわかる。

さらに、熱伝導を評価するために、熱伝導測定を行った。 熱伝導測定は、300~7K までを一定の条件のもとで、300~ 150K は 50K おき、150~4K は 10K おきに換算した。熱伝導 特性の測定に用いた溶融体試験片は、Pt-Rh 線を含むように 直方体形状に切り出し、試験片の長さ方向とバルク体のc軸 をほぼ平行とした。試料 A および試料 B の熱伝導の測定結果 例を図2 に示す。Pt-Rh 線を複合化することにより、Pt-Rh 線 Sample A Sample B Sample C

Fig.1 Illustration of the Dy123 samples with Pt-Rh wires.

Table I Size and number of Pt-Rh wire for Dy123 composites

Pt-Rh		Sample	
wire	А	B (PR 溶融体)	C (PRS 溶融体)
C: 0		0.4mm(D) $ imes$	0.3 mm(D) \times
Size &	Not	18mm(L)	3mm(L)
Number		2	30



Fig.2 Thermal conductivity of specimen A and B.

を複合化していない試料Aに比べて、約2~3割の熱伝導の 向上が確認できた。

4. まとめ

本研究では、Pt-Rh線を複合化したDy-123系超電導溶融 体を作製し、超電導・熱伝導特性評価と組織観察を行った結 果、単一ドメインバルク体が得られ、熱伝導率の向上が期待 できることがわかった。

参考文献

1. S. Nariki, N. Sakai and M. Murakami, Physica C, Vol. 357–360, 2001, pp. 814–816.

2. S. Nariki and M. Murakami, Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) pp.786-790.

3. H. Shimada, H. Fujimoto, S. Yoshizawa, Physica C, 468 (2008) 1359.

4. H.Shimada, H.Fujimoto, S.Yoshizawa, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79, (2008), 2P-p34, p.185.

5. H.Shimada, H.Fujimoto, S.Yoshizawa, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79, (2008), 3D-a07, p.228.

リング形状バルク材料の磁場分布測定

Measurement of the magnetic field of bulk superconductor annuli

<u>富田 優</u>, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研) <u>TOMITA Masaru</u>, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute); E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導バルク材の場合、17テスラ以上もの磁場の発生が 可能であるが、ppm 単位の均一磁場精度を要する NMR や MRI 等の分析機器応用レベルに達する均一な精密磁場を得 ることは難題と言える。バルク材の磁場の均一性については、 ①超電導バルク材の作製技術②材料形状や構造の工夫③ 周辺コイルの配置などが考えられる。

そこで、超電導バルク磁石の材料形状や構造に依存する 発生磁場を確認するため、直径87mm、内径47mmのリング状 に加工した樹脂含浸バルク材を製作し¹⁾、表面とリング内部の 発生磁場分布を測定した。

2. 試料および測定方法

超電導バルク材の形状を Table.1 に示す。バルク材の寸法 は樹脂含浸による表面の樹脂層を含んでいる。測定は、これ ら超電導バルク材に、超電導マグネットにより 3 テスラの外部 磁場を印加し、液体窒素温度下で着磁させる。バルク材の表 面をホール素子で計測し、表面捕捉磁場を計測する。また、 ホール素子をリング内空間でスキャンさせることにより、リング 内部の磁場分布を計測する。リング内部の磁場分布は、バル クを 3 個まで積層させる。

3. 測定結果

リング形状バルク材の表面磁場分布を Fig.1 に示す。Fig.2 に、高さ(h)方向をプロットした結果を示し、Fig.3 に、サンプル 中心部の半径(r)方向をプロットした結果を示す。それぞれの 結果より、リングの形状効果によって磁場分布も変化すること がわかる。Fig.2より、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 3 個まで積層させることにより 1.62T にまで磁場値が向上することがわかった。また、Fig.3よ り、積層数が多いほど磁場値は大きく、同時に中心部の磁場 傾斜も小さくなり、中心部における半径方向の磁場の均一性 が向上することがわかった。

Table.1 Specification of bulk superconductor annuli

Inner diameter (Except resin layer)	47mm (45mm)
Outer diameter (Except resin layer)	87mm (80mm)
Height (Except resin layer)	22mm (20mm)

Table.2 Center magnetic field of bulk annuli

Single bulk	0.75 T
Two bulks	1.32 T
Three bulks	1.62 T



Fig.1 Magnetic field on surface of bulk annuli



Fig.2 Magnetic field in direction of height



Fig.3 Magnetic field of in direction of radial (h=0:center)

^{1.} M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 60 (1999) p.216

5連型超伝導バルク磁石を用いた高精度磁気分離実験

Highly efficient Magnetic separation using five-aligned superconducting bulk magnet

藤代博之,三浦 崇,内藤智之(岩手大工),林 秀美(九州電力) FUJISHIRO Hiroyuki, MIURA Takashi, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.) and HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power) (E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

Nd-Fe-B 系永久磁石の 10 倍以上強力な数 T(テスラ)級 の磁場を捕捉出来る超伝導バルク磁石は、小型、可搬、強 磁場かつ高磁気勾配、漏れ磁場が少ないなどの利点から、 様々な応用が検討されている。本研究グループは、パルス 着磁による超伝導バルクへの捕捉磁場向上に関する系統 的な検討や、複数個のバルク磁石を列状に配置したマルチ バルク磁石装置の開発を行ってきた[1,2]。マルチバルク 磁石装置は、冷凍機で冷却した超伝導バルクを両側から挟 み、スプリット型銅コイルを用いたパルス着磁法でのみ実 現することができ、これまでに2連型と5連型を開発し、 真空容器表面で2T以上の強磁場を発生している。さらに、 磁気勾配(dB/dx=150T/m)や磁気力場(BdB/dx=200T²/m) も永久磁石を用いた場合の10倍以上大きく、他に類を見 ない装置である。5 連型の場合、表面と裏面を合わせて 10 個の磁極を活用できる。本研究では、5 連型バルク磁 石装置を用いて、強磁性粒子(マグネタイト: Fe₃O₄)、 弱磁性粒子(ヘマタイト:Fe2O3)を水に分散させ、磁極 を通過した後の粒子濃度及び磁気分離率を、粒子の粒径、 流量、初期濃度に対して実験的に検討した。

実験と検討

水中の初期分散濃度を $P_0 \ge 1$ つの磁極における磁 気分離率をk ($0 \le k \le 1$)とすると、n 個の磁極を通過した後 の濃度 $P \mathrel{\rm th} P = P_0(1-k)^n \ge x$ ますことが出来る。この計算結 果を図 1 に示す。磁極 1 個当たりの磁気分離率が k = 0.3と低くても、10 個の磁極を通過することで最終的な濃度 は初期濃度の 3%まで低下する(磁気分離率は 97%)。こ のことは、弱磁性体や強磁性ナノ粒子のような磁気力が弱 い場合でも高精度の磁気分離が可能になる。

図2に種々の平均粒径(3.2 µm, 0.5 µm, 0.1 µm)を有す るマグネタイト粒子を初期濃度 400 ppm で分散させた原 水を、5磁極及び 10 磁極を通過後の濃度の流量依存性を 示す。図1の挿入図に実験に用いた流路の概略を示すが、 断面が 30 x 80 mm² で磁気分離は open gradient 方式で 行った。粒子濃度は吸光度測定により決定した。3.2 µm, 0.5 µmのマグネタイト粒子の濃度は1 L/minの流量で10 ppm まで低下し、流量の増加とともに濃度はわずかに増 加する。10 磁極通過後の濃度が5 磁極通過後の濃度より も低下することが分かる。粒径 0.1 µm のマグネタイト粒 子では、磁気力の低下から分離率が低下するが、10 磁極 通過後の濃度は 170 ppm まで減少した。

図3に粒径1µmのヘマタイト粒子を500ppmに分散 させた原水の磁気分離の結果を示す。この場合は、流路の 磁極前面に教磁性メッシュを入れた高勾配磁気分離 (HGMS)方式で行った。磁場が存在しなくても磁性メッシ ュのフィルター効果で流量1 IL/minで10磁極通過後に 180ppmまで濃度が低下し、磁場の印加でさらに60ppm まで低下した。流路の構造や磁性メッシュ挿入方法の改良 により、更なる濃度の低下と大流量化が期待できる。

- [1] T. Hiyama et al., Physica C 468 (2008) 1469.
- [2] H. Fujishiro *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16** (2006) 1007



Fig. 1. The numerical calculation of the normalized particle concentration $P/P_0=(1-k)^n$ vs. the number of magnetic pole *n*, as a function of the separation rate *k* per magnetic pole.



Fig. 2. The flow rate dependence of concentration of magnetite (Fe_3O_4) particles with various particle sizes dispersed in water after passing the 5 and 10 magnetic poles.



Fig. 3. The flow rate dependence of concentration of hematite (Fe_2O_3) particles dispersed in water after passing the 5 and 10 magnetic poles by high gradient magnetic separation (HGMS). The results without magnetic field were also presented as baselines.

磁気クロマトグラフィー法による微細粒子分離現象に関する検討(その3) Investigation of separation phenomenon for ultra-fine particle by magnetic chromatography method (part III)

<u>片岡 克仁</u>, 岩本 竜一, 金 錫範, 村瀬 暁(岡山大学), 野口 聡(北海道大学), 岡田 秀彦(NIMS) <u>K. Kataoka</u>, R. Iwamoto, S.B. Kim, S. Murase (Okayama University), S. Noguchi (Hokkaido University), H. Okada (NIMS) kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

現在,磁気分離法の一つとして超電導マグネットを利用した高勾配磁気分離(HGMS; High Gradient Magnetic Separation)法が用いられているものの,微粒子やイオンなどに関しては分離が難しいとされている。一方,化学分野で利用されている液体クロマトグラフィー法の応用技術の一つとして超電導マグネットを利用した磁気クロマトグラフィー(MC: Magnetic Chromatography)法が微粒子やイオン分離に有効であるという研究結果が報告されており,我々は MC 法による微粒子およびイオン分離を目的とした基礎研究として流体力学と電磁気学に基づいた数値解析用プログラムおよび分離装置の開発を行っている⁽¹⁾.本研究では,まず,磁性微粒子及びコバルト(II)イオンにおける分離特性について実験的に検討を行うとともに,数値解析による磁性微粒子とイオンに関する磁気特性及び最適分離条件に関する検討を行ったのでその結果について報告する.

2. MC 法実験および数値解析手法

MC 法は,磁化率の異なる微粒子などを溶媒に混入させたものを均一で高磁場が発生できる超電導マグネットにより磁化させた磁気カラム内を通過させることで分離を行う方法である.これは,磁化率が大きい粒子では磁気勾配の影響を受け,カラム内の流路壁面付近に集中することに対し,磁化率の小さい粒子では磁場勾配の影響が小さいため,流路内で全体的に拡散するという現象に加え,流体の性質による流路壁面付近での流速低下を利用して高磁化粒子の排出時間を低磁化粒子より遅らせて分離させるものである.本研究では,幅10mm,高さ170µmの同心円状流路の上部と下部に強磁性線(Co93%,Ni7%)を配置した磁気カラム(Fig.1)を用いて微粒子およびイオンに関する分離実験を行った.また,コントロール・ボリューム法に基づく伝導方程式を用いて流体の流れや物質の移動について数値解析を行った.

結果及び考察

本研究では, Fig.1 に示す同心円状の磁気カラムを用いて 磁性微粒子 (Magnetic Particle) およびコバルト(Ⅱ) イオンを 溶液として用い,それぞれの分離特性について実験的に検 討した.実験に用いた磁性微粒子の平均長さは 150nm であ る.実験結果の一例として,異なる溶媒(メタノールとエタノー ル)と外部磁場(OT と 1T)の影響による排出時間の相違を Fig.2 に示す.外部磁場 0T においては,粒子に磁気力が作 用しないため, 拡散力のみが働く. また, 拡散力は粒子の半 径に反比例するので,磁性微粒子に比べて径が小さいイオン の拡散力が大きくなり,排出時間も遅くなる.外部磁場 1T に おいては,磁性微粒子は拡散力に加えて磁気勾配の影響も 受けるため排出が遅れる.一方,イオンは、磁気勾配による影 響が非常に小さいため,外部磁場 0T 時の結果に比べ変化 はほとんど見られない. また, 粘性の高いエタノールを溶媒と して用いることで粒子の流体に対する抵抗力が高くなり排出 が遅れることも明らかにした.

4. まとめ

本研究では、MC 法によるコバルト(II)イオン及び磁性微 粒子の分離特性について実験的検討を行い、流体粘性、磁 気勾配に依存して排出時間が変化することを確認した.さら に、流体力学と電磁気学に基づく数値解析を行い、流速、磁 気カラムの形状、カラム内の磁気勾配などのパラメータに対す る排出・分離特性についても検討した.その結果、特定の磁 性微粒子やイオンを分離させるための磁気カラムの構造、磁 気勾配、流速などの最適化が可能であることを示した.



Fig.1 Schematic top and cross-sectional views of magnetic column consisted of flow channel and ferromagnetic wires.



Fig.2 Measured volume fraction of the ion and the particle at the outlet when flow velocity is 0.5 ml/min, and magnetized fields are 0 T and 1 T.

 (1)金他;第74回春季低温工学・超電導工学会講演概要 集(2006)p.35

文

磁性メソポーラスカーボンを用いた難分解性溶存有機物の 高勾配磁気分離除去 High gradient magnetic separation of dissolved organic matters by magnetic mesoporus activated carbon

三浦 大介, 土居 亮子, 伊藤 大佐 (首都大学東京)

<u>MIURA Osuke</u>, DOI Ryoko, ITO Daisuke (Tokyo Metropolitan University) E-mail: miurao@tmu.ac.jp

1. はじめに

近年、河川や湖沼及び内湾の水質汚染原因の一つとし て難分解性溶存有機物が挙げられる。その代表としてフ ミン質等があり、安定なために長期にわたって水中に存 在し、水質処理過程において行われる塩素処理により発 がん性物質であるトリハロメタンを形成する。現在除去 法としてオゾン処理法と活性炭による高度浄水処理法が あるが、その除去率は60%に留まり、オゾン処理はエネ ルギー消費が大きく、また破過を迎えた活性炭のスラッ ジ処理が問題である。そこで我々は数年前から活性炭で 直接的にフミン酸等の高分子を吸着可能なメソ孔(20~ 30 nm)を有するメソポーラスカーボンを作製し、さらに 吸着した活性炭を磁気分離で回収させるべく磁性を付与 した磁性メソポーラスカーボン(MMPC)を開発した。 今回は粉末状MMPCを用いてフミン酸の吸着実験、お よび高勾配磁気分離実験を行った結果について報告する。

2. 実験方法

硝酸鉄水溶液を含浸した市販の粒状活性炭を多段のガス賦活処理により図1に示すメソポアを有する磁性メソポーラスカーボンを作製した。これを粉砕し平均粒径10 ミクロンの粉末状 MMPCとした。試薬のフミン酸200pp mに対してMMPC濃度を10~400ppm投入し、攪拌吸 着時間を10~90分と変化させた。その後、ろ紙で濾過し 吸光度計により吸着量を測定した。また100µmの磁性細 線フィルターを用いた10Tでの高勾配磁気分離実験を行い、濾過法と比較した。

3. 実験結果と結論

坦磁された物質はマグネタイトであり、飽和質量磁化は 12 emu/gという高い値が得られた。投入する MMPC の濃度 を増加するとフミン酸の吸着率は大幅に向上し、2倍の 濃度を加えたNo.4では90%以上の高い吸着性能を示した。 また、20分程度で吸着特性に飽和傾向がみられた。No.2 の試料を高勾配磁気分離した結果をろ紙濾過と比較して 図3に示す。ろ紙濾過の測定値より ABS(吸高度)が半分 になり、ろ紙濾過では取りきれなかった粉状 MMPC を磁性 フィルターに捕獲できていることがわかる。これらの結 果からフミン酸の除去に粉末 MMPC 吸着材による高勾配磁 気分離が非常に有効であることが明らかになった。

- S. Shiraishi, O. Miura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.110
- I. Ihara, O. Miura et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.113



Fig. 1 SEM image of MMPC.

Table. 1 Parameters for adsorption experiment.

		1 1	
実験番	フミン酸濃度	MMPC 濃度	フミン
号	[ppm]	[ppm]	酸:MMPC
No. 1	200	10	20:1
No. 2	200	50	4:1
No. 3	200	200	1:1
No. 4	200	400	1:2



Fig. 2 Residual ratio of Humic acid for filtered sample water.



Fig. 3 Comparison of elimination between filteration and high gradient magnetic separation.

余剰汚泥ゼロで操作される磁化活性汚泥法における微生物相の特徴 Bacterial Characterization of Magnetic Activated Sludge Process Operated without Excess Sludge Emission

<u>正法地 美奈</u>, 酒井 保藏, 前田 勇, 小泉 修, 廣島 浩二(宇都宮大) <u>SHOHOJI Mina</u>, SAKAI Yasuzo, MAEDA Isamu, KOIZUMI Osamu, HIROSIMA Koji (Utsunomiya Univ.) E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥法は、汚泥滞留時間無限大で標準活性汚 泥法の約1/5の極端に低い汚泥負荷での運転となる。そのた め、標準活性汚泥法とは異なる特殊な微生物相を形成してい ると考えられる。そこで、余剰汚泥を引き抜かないことが、微生 物相にどのような影響を及ぼすのかを調べることを目的として、 汚泥を引き抜かない超低負荷運転の系と標準活性汚泥法と 同程度の汚泥負荷になるように汚泥を定期的に引き抜く系と で比較・検討した。

本研究室では、磁化活性汚泥法について研究している。これまで、磁化活性汚泥法の水処理適応性を有機物分解速度や、呼吸活性等によって検討してきたが^{1,2}、磁化活性汚泥中に存在する微生物相に関しては今までに解析した例がなく、未解明の課題として残されている。そこで、未知の微生物群集を解析する方法である PCR-DGGE 法を用いて、磁化活性汚泥法の微生物相を解析することを目的として研究を行なった。

2. 実験方法

磁化活性汚泥は、グルコース-ポリペプトン含有合成排水と フェノール含有合成排水を一定期間ごとに交互に流入するラ ボスケールの磁化活性汚泥装置から、サンプリングした。定期 的に汚泥を引き抜きながら運転する装置,汚泥を引き抜かな いで運転する装置それぞれからサンプリングした。)この磁化 活性汚泥を凍結乾燥後,核酸を抽出し,それぞれの濃度を 測定した。抽出した DNA から, 16S rDNA の増幅を行なった。 真正細菌の16SrDNAのV3領域を増幅するために、プライマ ーは 341fGC, 518r を用いた。それぞれのサンプルについて PCR のサイクル数を変えて,真正細菌の鋳型 DNA 量に核酸 濃度が反映しているかを調べた。PCR 産物は,1%アガロース ゲル電気泳動で1本のバンドになっていることを確認し, DGGE のサンプルとして用いた。10%(wt/vol)ポリアクリルアミド ゲルの変性剤の濃度勾配は 0-50%に設定し, 60℃, 200V 定 電圧,4時間の条件でPCR産物を電気泳動させた。その結果 15-30%付近にバンドが多く集まっていたので、次に変性剤濃 度勾配を 15-30%とし, 泳動時間 6 時間で他は同様の条件で 電気泳動を行なった。

3. 結果と考察

乾燥重量が同じ汚泥から抽出された核酸の濃度は汚泥引 き抜き無しの方が汚泥引き抜き有りの方の 1/4~1/5 となった。 乾燥重量あたりの真正細菌 DNA 量も引き抜き無しの方が少 ないことがわかった。また,引き抜き有りの方が,断片化された DNAやRNAと考えられる比較的短い核酸が多く認められた。 これらの結果は,流入の有機物濃度が同じにもかかわらず引 き抜き有りの方が細菌の増殖が活発であるということに起因す ると考えられる。DGGE のバンドパターンを Fig.1 (変性剤の濃 度勾配 0-50%(a),15-30%(b))に示す。引き抜き無しの方の優 勢種は 5 種類,引き抜き有りの方の優勢種は 3 種類,共通の バンドが 5 種類見られることがわかった。汚泥の引き抜きの有 無によって優勢種が変わることがわかった。また,汚泥を引き 抜かない磁化活性汚泥法ではバンドの数が多く,細菌の多様 性が保たれる可能性が期待される。

4. おわりに

今回の試験により,汚泥を引き抜かないことで,多様な菌が 保持され,様々な排水に対応できることが考えられる。



Fig.1 Band pattern of DGGE

謝辞:本研究は科学研究費基盤研究(A)18201011, (A)21241020の支援を受けた。

- 1. S. Saigo, et al.: Abstract of the 42nd Annual Conference of JSWE (2008) p.71
- 2. O. Koizumi, et al.: Abstract of the 43rd Annual Conference of JSWE (2009) p.63

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

Study for spatial magnetic modulation using superconducting bulk magnet

八重樫晃一,<u>藤代博之</u>,内藤智之,吉本則之(岩手大工) YAEGASHI Kouichi, <u>FUJISHIRO Hiroyuki</u>, NAITO Tomoyuki, YOSHIMOTO Noriyuki (Iwate Univ.) (E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

近年、有機半導体を用いた電子デバイスが、低コスト、 低温プロセス、大面積かつフレキシブル基板への作製が可 能などの理由で注目されている。高性能化のためには有機 半導体単結晶薄膜の成長が必要であるが、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、超伝導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微小領域での モーゼ効果(マイクロモーゼ効果)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事を考えている。

本研究では、超伝導バルクの作る強磁場と強磁性体の周 期構造とを組み合わせることで、任意に局所空間の磁場変 調(高低)を実現する技術の開発を目指し、実験とシミュ レーションによる基礎的検討を行った。

<u>実験と検討</u>

40 K に伝導冷却した直径 45 mm の Sm 系超伝導バル クをパルス着磁により着磁し、真空容器表面で 2.2 T の磁 場と 160 T/m の磁気勾配を実現した[2]。図1 に実験の配 置図を示す。超伝導バルク直上の真空容器表面に方向性珪 素鋼板(JFE スチール)を、スペーサーを挟んで5 枚配置す る。珪素鋼板の厚さを $W(0.3 \sim 1.2 \text{ mm})$ 、長さを L (3~20 mm)、珪素鋼板間の間隔を S (2~6 mm)として(奥行き 20 mm)、珪素鋼板列の 0.5 mm 上部を、ホール素子を用い て磁場分布の測定を行った。また、解析ソフト(COMSOL Multiphysics 3.4)を用いて、 2 次元磁場分布を計算した。

図2に、測定結果の例を示す。(a)の L=6 mm, S=4 mm で珪素鋼板が薄い場合(W=0.3 mm)は、磁場の高低差が 0.1 T 程度しか無いが、(b)のように珪素鋼板を厚くするこ とで(W=1.2 mm)、0.3 T 程度の磁場高低差を実現できる が、計算で推定した結果(点線)よりかなり小さい。この 理由は実験では磁気回路が発散し、空間に多くの磁束の漏 れが生じるためである。本研究では1つの磁極のみを使用 しているが、裏面の磁極も使い、閉じた磁気回路を構成し 磁束を集中すればさらに大きな磁場高低差を実現できる。

1つの磁極のみを使用してさらに大きな磁場変調を実 現する方法として、珪素鋼板間のスペーサーに c 軸配向し たバルク超伝導体を用い、液体窒素で冷却しバルク磁石に 近づけた(ゼロ磁場冷却)後の磁場分布を測定した。図3 に磁場分布の測定結果を示す。バルク超伝導体を挟む前に は0.05 T 程度であった磁場変調は、バルク超伝導体を挟 むことで0.3 T 程度に増大した。これは超伝導体による磁 束の排除効果のためである。超伝導体の位置を含めた空間 的配置の改良により、磁場高低差はさらに大きく出来ると 考えられ、当日はその結果も含めて報告する。

<u>参考文献</u>

[1] 特願 2007-242624「薄膜の製造方法及び半導体装置」、発明

者:吉本則之、藤代博之、小川 智、出願人:岩手大学 [2] H. Fujishiro *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 (2006) 1007.



Fig. 1. Experimental setup for spatial magnetic field modulation using superconducting bulk magnet and ferromagnetic iron plates, which are periodically sandwiched with spacers.



Fig. 2. The line scan profiles of magnetic field 0.5 mm above the iron plate array stacked with spacer under the conditions of (a) W=0.3 mm and (b) W=1.2 mm.



Fig. 3 The line scan profiles of magnetic field in liquid N_2 0.5 mm above the iron plate array stacked with and without superconducting (SC) bulks.

超電導磁石の構造力学解析

Structural Dynamics Analysis on Superconducting Magnet

<u>脇</u>耕一郎,清野 寛,長嶋 賢(鉄道総研) WAKI Koichiro, SEINO Hiroshi, NAGASHIMA Ken (RTRI) E-mail: waki@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石の検査・診断技術を 検討している。運用中の超電導磁石は、冷却と昇温、走行の ための励磁と消磁、走行に伴う振動などの環境下に置かれる。 これまで、超電導磁石の検査・診断は、必要に応じて超電導 磁石を分解・調査することによって実施してきた。しかしながら、 分解せずに非破壊で検査・診断ができれば、超電導磁石の運 用に与える影響を小さくすることができる。今回は、超電導磁 石の振動特性の分析により、その構造変化の前兆を捉えること が目的である、構造力学解析結果について報告する。

2. 超電導磁石の構造と非破壊検査の必要性

超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石の構造[1]は、力を伝 える他の超電導磁石と同様である。超電導コイルは、寒材に浸 して超電導とするため、低温脆性を抑えた容器(内槽)に収納 する。内槽は、力を伝えるため、支持部材を介して構造部材に 取り付ける。支持部材は、内槽への伝導熱侵入を抑えるため、 断熱に優れた材質と形状を選ぶ。構造部材は、密閉した中空 容器(外槽)にして内槽を収納し、内槽への伝達熱侵入を抑え るため、外槽の内部は真空にする。また、内槽への輻射熱侵 入を抑えるため、外槽と内槽の間にシールドを挿入する。

外槽は、信頼性の確保のために溶接構造となっている。検 査・診断が必要となった場合に、分解・調査が容易には行えな い。これより、長期間の運用を果たすため、非破壊での検査・ 診断手法の確立が必要となる。

3. 調和応答解析を用いた超電導磁石の構造変化の検出

超電導磁石の構造が変化すれば、その振動特性は変化す る。従って、超電導磁石を分解しなくても、振動特性の分析に より、その構造変化の前兆を捉えることが可能と考えられる。

例えば,外槽と内槽の間で力を伝えるための支持部材の劣 化については,次のような振動特性の変化が考えられる。

(1)外槽と内槽が同位相で,外槽の振幅の方が小さい場合 には,劣化によって近傍の外槽の振幅は,更に小さくなる(近 傍の内槽の振幅は,更に大きくなる。)。

(2)外槽と内槽が同位相で,外槽の振幅の方が大きい場合 には,劣化によって近傍の外槽の振幅は,更に大きくなる(近 傍の内槽の振幅は,更に小さくなる。)。

(3)外槽と内槽が逆位相の場合には、劣化によって近傍の 外槽の振幅は、更に大きくなる(近傍の内槽の振幅も、更に大 きくなる。)。

超電導磁石の構造力学解析モデルを作成し,ある支持部

材の劣化を模擬して解析した。その劣化の他は、全く同じ条件 の調和応答において、Fig.1(劣化前)と Fig.2(劣化後)の間で (1)のような変化が見られ、その部材近傍の外槽(図中の濃 線)の、あるピーク振幅が半減することを確認した。

4. まとめ

外槽の振動特性は、実機において比較的容易に得られる。 この振動特性の変化を元に、外槽と内槽の間で力を伝えるた めの、支持部材の劣化を捉える手法について、その有効性を 構造力学解析によって検証した。今後は、実験的な検証を予 定している。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。



Frequency







参考文献

1. Y. Jizo, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol.29 No.10 (1994) p.516

超伝導磁気浮上を適用した非接触スピン処理装置の研究開発

Research and Development of Non-contact Spin Processor Applying Superconducting Magnetic Levitation

風間 亨介, 関矢 將太, <u>福井 聡</u>, 小川 純, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大); 斉藤 君世, 宮崎 紳介(MTC) KAZAMA Ryosuke, SEKIYA Shota, <u>FUKUI Satoshi</u>, OGAWA Jun, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University); SAITO Kimiyo,

MIYAZAKI Shinsuke (MTC)

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

1. はじめに

半導体フォトマスクなど半導体関連の製造プロセス (ウェットプロセス)ではスピン処理装置(スピンコー ターや洗浄装置など)を用いる。このスピン処理装置の 回転軸受から微粒子状ダストの放出が起こり、フォトマ スク等対象物周囲のクリーン度が低下する。その結果, 微粒子ダストがパターン間に混入して, パターン形成不 良を引き起こし、製品の低品質化或いは生産歩留まり低 下の原因となっており、この問題の解決が切望されてい る。この問題を解決するためには、スピン処理装置のタ ーンテーブル部分をクリーンベンチ内に完全隔離できる 非接触スピン処理装置の開発が必要不可欠である。本グ ループでは、上記問題点を解決する方法として、高温超 伝導バルクを用いた磁気浮上に着眼し、これをスピン処 理装置に適用するための共同研究開発を行っている[1]。 本稿では、試作した要素試験装置の概要と試験結果につ いて報告する。

2. 要素試験装置の設計・試作・試験

実用化開発に先立ち,小型の要素試験装置を設計・試作 した。Fig. 1 に試作した要素試験装置の概略図を示す。中空 同心円筒型のステンレス製チャンバ内に銅製冷却板を設置し, 冷却板に HTS バルク(Gd 系 直径 60mm × 厚さ 10mm)6 個を 埋め込む。冷却板の一端に一段 GM 冷凍機を接続し,30K 付近まで冷却して運転する。直径 220mm のアルミ製ターンテ ーブルに直径 190mmのネオジウム永久磁石の磁気回路を埋 め込み, HTS バルクと対向させて磁気浮上系を構成する。こ れまでの研究で、浮上高の向上には、半径方向に着磁した 永久磁石をカスプ配置した構造が有利であることがわかって いる[2]。そこで、本試験機の浮上用磁石にも同様の構造を採 用した。ターンテーブル中央部分及びクライオスタット架台に 固定した DC サーボモータに連結した回転フランジのそれぞ れに、磁気カップリングを取付けて非接触でターンテーブル を駆動する。磁気カップリングの必要伝達トルクは、必要な回 転加速 1500 rpm/sとすると、2.4 Nmとなる。これを満足する磁 気カップリングの構造を有限要素解析により設計した。

Fig.2に浮上試験の様子を示す。浮上高は最高で8mmで あった。また,鉛直方法の磁気剛性は25N/mmであった。 Fig.3に磁気カップリングの試験結果を示す。本試験機を 用いた浮上回転試験の結果は当日報告する。なお,本研 究は,科学技術振興機構「委託開発」による支援ののも

	~				
l'ob l	- C.	nontrontion	- +	toot	aninnor
1 4 0 1		DECITICATION		LCSI.	Source
140 1		peetiteation	1 01		opinior

Rotational speed	2000 rpm (Max. 3000 rpm)
Acceleration	1500 rpm/s
$(d\omega/dt (rad/s^2))$	(157.5 rad/s^2)
Diameter of turn table	220 mm
Weight of turn table	2.5 kg
Levitation height	5-10 mm
Necessary transfer torque	2.4 Nm
Capacity of drive motor	1 kW
Load	0 kg
Acceptable vibration	Not designed
Operating temperature	30 K





Magnetic coupling



Fig. 1 Schematic illustration of test spinner.



Fig. 3 Transfer torque characteristics of magnetic coupling

- 1. S. Fukui, et al., : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p.252.
- S. Fukui, et al., : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.179.

抵抗型薄膜限流器の限流特性

Current limiting characteristics of thin film resistive fault current limiter

<u>海保 勝之</u>,山崎 裕文,(産総研),柳父 悟(東京電機大) <u>KAIHO Katsuyuki</u>, YAMASAKI Hirofumi (AIST);YANABU Satoru (Tokyo denki U) E-mail: k-kaiho@aist.go.jp

<u>1. はじめに</u>

Y系超電導薄膜を用いた抵抗型限流器の開発を行っている [1]。フロー状態において発熱と冷却のバランスが崩れると超電 導薄膜の温度が急激に上昇する。このようなバランスが崩れる 電流値(クエンチ電流値)の計算法を明らかとしてきている[2]。

本報告においてはクエンチ電流に達した後の温度上昇速度 と電流増加速度の大小により、限流特性が異なる事を述べる。

2. 温度上昇に要する時間

Fig.1 において、①は温度上昇速度が電流増加速度に比べ 速い場合、②は電流増加速度が電流上昇速度に比べ速い場 合、それぞれの電流一電圧特性示している。

温度上昇に要する時間△tは(1)式のようになる。

$$\Delta t \approx \frac{2CS}{I^2 R_n} \left(T_c - T_0 \right) \tag{(1)}$$

但し、C:比熱、S:断面積、I:電流、 R_n :シャント 抵抗値[Ω/m]、T_c:臨界温度、T₀:冷媒温度

<u>3. 限流特性の比較</u>

(1)式より、温度上昇に要する時間はシャント抵抗値に反比 例することが解る。現在開発が行われているY系超電導薄膜に 用いられているシャント抵抗の値により下記2種のタイプの限流 特性が表れる。

(1) 高抵抗シャント型:50nm 程度厚みのAuAg合金をシャント 抵抗に用いると、R_nの値が大きくなり、

 $\triangle t = 20 \ [\mu s]$

となる。商用周波数では、この間の電流上昇は少なく、また不均一性に起因して極く限られた長さだけ薄膜は T。に達してしまう(ホットスポット)。T。に達した後は Fig.2(a)に示すように、ノーマル相の伝播により電流は急激に減少する。

(2) 低抵抗シャント型:10 µm 程度厚みのAgをシャント抵抗に 用いると、R_nの値が小さくなり、

 $\Delta t=4$ [ms]

となる。この間に電流が大幅に増加してしまう。このため、線方 向全体にわたりノーマル相となる。限流特性は Fig.2(b)に示す ように、緩やかな電流変化を示す。

但し、Fig.2において、 I_q :クエンチ電流、 I_p :電流ピーク値、 V_p : 超電導薄膜全体に加わる電圧のピーク値[V]、 R_0 :外部回路の 抵抗値 $[\Omega]$ 、L:Y 薄膜の長さ[m]

<u>4. まとめ</u>

高抵抗シャント型限流器はホットスポットが発生した後、ノーマル相が伝播し、これにより電流が急激に減少する。

低抵抗シャント型限流器はクエンチ電流に達した後、ホットス ポットが形成される前に電流が大幅に上昇し、線方向全体の温 度が、ほぼ同時に臨界温度まで上昇する。シャント抵抗の値が 小さいため、電流は減少せず緩やかに限流される。

参考文献

H.Yamasaki et al., Appl. Phys.Lett., Vol.85, (2004,11) p4427
 海保他、第 74 回低温工学研究発表会 (2006,5) 2P-p24



Fig.1. I-V characteristics of YBCO film after quenching.



(a)High resistive shunt layer type



(b)Low resistive shunt layer type

Fig.2. Current limiting characteristics

高温超電導コイルとバルクを併用した界磁を有する風力発電機の検討 Study of wind turbine generators with field magnets composed of high-temperature superconducting coils and bulks

<u>
寺尾 悠</u>, 関野 正樹, 大崎 博之(東京大学) <u>TERAO Yutaka</u>, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The University of Tokyo) E-mail: y_terao-008@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

クリーンエネルギーの代表格である風力発電は、近年 5MW 級の風力発電機が登場するなど、風力発電機の単機あ たりの発電容量が増加傾向にある。その一方で、風車の発電 機搭載部分の重量増加を抑えるため、発電機を高効率・高出 力密度化する必要がある。我々は高温超電導コイルとバルク 超電導体を組み合わせて強いギャップ磁束密度を発生させ つつ構造を簡単にするモータ用界磁コイルを報告したが[1]、 この構造は 10MW 級の大型風力発電機にも応用可能である。 本稿では、風力発電機用界磁コイルの概念設計と、有限要 素法を用いた電磁界解析結果を報告する。

2. 解析モデル

Fig.1 に解析モデルを示す。今回は、一辺が 20cm 程度の 方形状で、厚さ 40mm のバルク超電導体を磁気遮蔽材として 利用することを考える(正確には瓦形)。また、界磁部分の外 径は 5m を仮定する。その結果、バルクによる界磁の極数は 80 極としている。最初にバルク超電導体の反磁性を単純に比 透磁率 10⁻⁵ の等方性磁性体で近似する。超電導コイルの電 流は 1.6MA・Turn とした。バルク超電導体の直上に電機子コ イルを配置することを想定し、超電導コイルの発生磁束がバ ルク超電導体により遮蔽される部分と外側に出る部分が回転 方向に交互に繰り返し、発電機の回転界磁となる(Fig2)。バル ク直上における磁束密度のギャップ依存性及び、バルクの比 透磁率を変化させた場合の磁束量及び超電導コイルの最大 経験磁束密度の変化について三次元有限要素解析を行っ た。

3. 解析結果

Fig.3 に、バルク直上 20mm~50mm の位置におけるギャッ プ磁束密度 B_gを示す。この位置において2.5T~3.5T 程度の ギャップ磁束密度が得られるが,その一方で単極構造なので トルク発生部が面積で半分以下となることに注意が必要であ る。Fig.4 では、バルク直上 30mm の位置に集中巻きの電機子 コイル 1 個を配置したと仮定して、バルクの比透磁率 μ_rを変 化させた時にコイルに鎖交する磁束 Φ及び、界磁コイルの最 大経験磁束密度 B_{max}の変化を示す。この結果より、バルク超 電導体の遮蔽効果を透磁率で近似的に表現した場合、μ_r =0.2 で磁束量は半分になる。また、どのような状態においても、 超電導コイルには 10T 以上の最大経験磁束密度がかかること が分かる。

4. まとめ

高温超電導コイルと超電導バルク磁気遮蔽材を併用した超 電導発電機の界磁について、有限要素法による三次元の電 磁界解析を行った。今後の予定として、電機子コイルを実際 に配置して発電機としての詳細な特性解析及び、超電導特 性を考慮した解析も行っていく予定である。

参考文献

 鈴木達矢, 関野正樹, 大崎博之: 2008 年度春季低温工 学・超電導学会講演概要集, p.176



Fig. 1 FEM analysis model



Fig.2 Magnetic shielding of bulk superconductors (magnetic fields at 30mm above bulk superconductors)



Fig. 3 Dependence of magnetic flux density $B_{\rm g}$ on the gap from bulk superconductors (θ =0 ${\sim}18^{\circ}$)



Fig. 4 Dependence of the maximum magnetic flux density B_{max} in the field coil and flux Φ in the stator coil on the relative magnetic permeability μ_r of bulk superconductors

球状バルク超電導体の浮上安定性評価

Stability of active magnetic levitation using sphere-shaped HTS bulk

<u>植田 浩史</u>,陸 旭棟,青木 徹,石山 敦士(早大);岩本 晃史,柳 長門,三戸 利行(NIFS) <u>UEDA Hiroshi</u>, RIKU Kyokutoh, AOKI Tohru, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); IWAMOTO Akihumi, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS) E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

YBCO に代表される酸化物超電導体をレーザー核融合の 照射ターゲットに応用するには、球型の照射ターゲットの表面 に超電導層を設け、その超電導層によって、1)安定浮上を実 現する、2)照射ターゲットを非接触で目的の位置まで精度良 く移動させる、ことが重要となる。このためには、電磁石を用い たアクティブ磁気浮上システムが有効であり、これまでに、球 型バルク超電導体(以下、バルク体)における浮上力特性や 浮上安定性の評価および浮上位置制御方法の検討を行って きた[1][2]。今回は、バルク体の磁気浮上について、三次元 電磁場解析と実験によって、浮上安定性の評価を行った。

2. 浮上高度特性試験·浮上安定性(復元力測定)試験

Fig. 1 に示す実験システムを用いて、浮上高度特性試験 および水平方向の復元力測定を行った。バルク体は径 5 mm の球状の DyBCO である。復元力の測定にはロードセルを用 い、分解能は 100 μ N である。実験では、浮上安定性を確保 するため、Coil 3 は Coil 1, 2 と逆向きに電流を流した。また、 バルク体が Coil 2 と 3 の間に達した際の復元力を、X-Y-Zステ ージで実験システム全体を動かすことで測定した。バルク体 は鉛直方向(z 方向)が c 軸となるようにセットした。浮上高度 特性および復元力測定試験の結果をプロットでそれぞれ Fig. 2(a)、(b)に示す。復元力測定については実験結果の平均を 実線(灰色)で併せて示した。Fig. 2(a)より、コイル通電電流の 増加にしたがって、浮上することがわかる。Fig. 2(b)より、この 実験システムでは水平方向の復元力がはたらき、その大きさ は変位が大きくなるほど大きくなることがわかる。これは Coil 3 よって発生した窪んだ磁場によるものと考えられる。

3. 三次元電磁場解析による浮上高度・復元力特性評価

三次元電磁場解析によって、浮上高度特性および復元力 特性の評価を行った。浮上高度特性の解析結果を Fig. 2(a) に、これまでに開発した二次元回転対称電磁場解析による解 析結果と併せて示した。実験結果と解析結果はよく一致して いる。これより、開発した解析コードの妥当性が確認された。 次に、復元力特性の三次元電磁場解析の結果を Fig. 2(b)に 示す。一般に、バルク体に臨界電流密度には異方性があり、*c* 軸方向に流れる電流は*ab* 面のそれと比べて 1/3 程度のなるこ とが知られている。そこで、解析では、バルク体の異方性を考 慮しない場合と考慮した場合について解析を行った。Fig. 2(b) を見ると、実験結果と数値解析結果は曲線の形状は同 じであるが、定量的には一致していない。

復元力特性の実験結果と解析結果の差について、バルク 体に流れる遮蔽電流とローレンツ力から考察する。Fig.3にバ ルク体に流れる遮蔽電流の分布を示す。これより遮蔽電流が *c*軸方向にも流れており、異方性の考慮が必要であることがわ かる。しかし、Fig. 2(b)を見ると、異方性を考慮することで、わ ずかに復元力が下がるが、それでも実験結果とは一致しない。 次に、Fig.4にバルク体のローレンツ力の分布を示す。これよ り、ローレンツ力はバルク体を回転させるようにはたらくがわか る。解析では、バルク体の回転運動までは考慮していないが、 実験ではバルク体が回転していた可能性があり、実験結果と 解析結果の間に差が生じた可能性がある。



Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup for measurement of restoring force.







Fig. 3 Distributions of shielding current at a lateral displacement of 5 mm. (a) Cross-sectional view, (b) Surface of HTS bulk



Fig. 4 Distributions of Lorentz force at a lateral displacement of 5 mm. (a) Cross-sectional view, (b) Surface of HTS bulk

- 1. K. Riku, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 79 (2008) p.182.
- 2. Y. Ishigaki, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (2009) to be published.

スラッシュ窒素冷却下における高温超電導線材の過電流通電特性 Over-current Characteristics of HTS Tapes in Slush Nitrogen

百足 弘史, 瓜生 季邦, 佐藤 俊祐, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学);

淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産業総合技術研究所);池内 正充, 大野 隆介(前川製作所)

MOMOTARI Hiroshi, URYU Toshikuni, SATO Shunsuke, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda

University); FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST); IKEUCHI Masamitsu, ONO Ryusuke (Mayekawa)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. まえがき

高温超電導機器の冷媒として、スラッシュ窒素を利用することが出来れば、液体窒素の蒸発潜熱だけでなく、固体窒素の 融解潜熱を利用することができるため、超電導線材の熱的安 定性が増すと考えられる。そこで我々はスラッシュ窒素浸漬冷 却した状態で Bi2223 線材の過電流通電・伝熱特性の評価試 験を行った。今回は、その実験結果と、スラッシュ窒素の熱伝 達特性を考慮した数値シミュレーションについて報告する。

なお本研究は、(独)科学技術振興機構の産学共同シーズ イノベーション化事業「顕在化ステージ」として実施したもので ある。

2. 実験方法

長さ 333.7mm の Bi2223 線材(厚さ 200µm、幅4mm、 Ic=140A@77K自己磁場)をFRP製の円筒に巻き、これを実験 試料とした。この試料を入れたガラスデュワに液体窒素を入れ た後、真空ポンプでガラスデュワ内の圧力を下げていくと、三 重点付近で固体窒素が生成され、固液混合状態となる。この 時固体窒素が沈殿してしまうためプロペラ(300 rpm)で回転さ せ、攪拌する。スラッシュ窒素の状態は固液混合割合(固相 率:Ice Packing Factor)によって異なる。今回の実験では固相 率が0%、20%、40%とした。そして、矩形波状のパルス電流 を 2秒間通電し、その時の電圧及び温度の変化を観測した。 実験では線材の表面に電圧タップ(11 区間; $V_{12}, V_{23}...)$ をつ け、電圧を測定した。また Cernox 温度計を V_{23}, V_{67}, V_{1011} 間の 3か所に設置して線材の温度を測定した。

3. シミュレーションモデル

解析では電流分布解析と熱解析の練成解析を行った。電流分布解析では、線材内の電流分布については超電導層と 銀層が並列で界面接触抵抗は十分小さいとして、両者の電圧 が等しいとする。超電導特性はn値モデルを仮定して、線材内 の電流分布は式(1)より得られる。

$$0 = V_c (I_{sc} / I_c (T))^n - R_{ag} (T) I_{ag}$$
(1)

 V_c は電界基準、 I_c は臨界電流、 I_{sc} は超電導電流、 I_{ag} は銀層電流、 R_{ag} は銀層抵抗、nはn値、Tは線材温度である。

熱解析においては、線材内で熱が長手方向、幅方向へ分 布しないものと仮定し、熱伝導の項を無視すると熱平衡方程 式は式(2)となる。

$$C(dT/dt) = VI - h(T - T_b)S$$
⁽²⁾

ここで C は熱容量、t は時間、右辺第 1 項は線材内部の自己 ジュール発熱量、右辺第 2 項は熱伝達による線材表面から冷 媒への放熱量である。h は熱伝達係数、S は冷却部分の面積、 T_b は冷媒の温度である。一般に h は液体窒素の蒸発潜熱に 依存する。スラッシュ窒素の冷却特性は、固体窒素の粒径や 流速、固液混合割合(固相率 IPF)によって異なる。今回の解 析ではスラッシュ窒素の熱伝達特性として、Kutateladze の式 [1][2]に基づき液体窒素の蒸発潜熱だけでなく固体窒素の融 解潜熱を固相率と共に考慮することで模擬した。

4. 結果

結果の一例として、過電流390Aで2s矩形波パルス通電した場合の固相率40%における電圧波形の実験値と解析値(n値14、15の場合)をFig.1に示す。実験結果と解析結果は概ね一致している。

また、実験結果により得られた通電電流と固相率(IPF)をパ ラメータとした時の最大電圧の関係を示したものを Fig.2 に示 す。固相率が高いほど電圧上昇が抑えられており、熱的安定 性が増していることがわかる。







Fig.2 Experimental results of transport current vs. voltage

5. 参考文献

1. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: LEHRGANGSHANDBUCH KRYOTECHNIK,

(1982)p.214-218

2. I.L.Pioro, W.Rohsenow, S.S.Doerffer: International Journal of Heat and Mass Transfer 47, (2004)p.5045-5057

275kV 系統 YBCO 超電導ケーブルの定常運転時の伝熱特性 Thermal Characteristics of 275kV Class YBCO Superconducting Power Cable at Steady Operation

瓜生 季邦, 百足 弘史, 佐藤 俊祐, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早稲田大学);

八木 正史,斉藤 隆(古河電工);青木 裕治(昭和電線);藤原 昇,塩原 融(ISTEC-SRL)

URYU Toshikuni, MOMOTARI Hiroshi, SATO Shunsuke, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); YAGI Masashi, SAITO Takashi (Furukawa Elec.); AOKI Yuji (SWCC); FUJIWARA Noboru, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL) E-mail:atsushi@waseda.jp

1. はじめに

275kV系統を想定したYBCO超電導ケーブルは、絶縁層 を厚くする必要があるため、定常運転時には交流損失だけで なく高電圧による誘電損失が発生する。そこで超電導ケーブ ルの実用化に向けて、損失により発生する熱の挙動を調べる ために、我々は中空の銅フォーマからなる「中空型ダミーケー ブル」と通常の銅フォーマからなる「丸撚り型ダミーケーブル」 の2種類を用意した。そして、それぞれのケーブルの各層にヒ ータを設置することで交流損と誘電損による発熱を再現し、定 常伝熱特性を調べた。また3次元有限要素法を基にしたプロ グラムによる数値解析を行い、実験結果との比較を行った。 以上について報告する。

2. 実験方法と解析方法

今回の実験で使用したケーブルの全長は2本とも900mm であり、Fig.1に「丸撚り型ダミーケーブル」の断面図を示す。 「中空型ダミーケーブル」の断面もFig.1とほぼ同じだが銅フォ ーマに半径9mmの空洞がある。Fig.1の点線で示された導体 層、PPLP層中央及びシールド層に厚さ1mmのヒータをとりつ け、白金温度計をPPLP層、シールド層にそれぞれ3mm間隔 に角度をずらしながら3個ずつ設置した。またFig.1のように 90°ずらした位置にも同じように温度計を設置した。ケーブル は液体窒素で侵漬冷却した。今回損失による発熱を導体層と シールド層を0.15W/m、PPLP層を0.5W/mと仮定し、ヒータ 電流を40mA通電して再現した。そして定常状態になった時 に温度を測定し、理論値と比較した。今回の解析では式(1)の ような熱伝導方程式を用いて行った。

$$k\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(r\frac{dT}{dr}) + q = 0 \tag{1}$$

なお、この時の境界条件として、境界面の温度が同じであ ること、境界面の熱流速が同じであること、ケーブル表面が冷 却されていることを考慮した。また、「丸撚り型ダミーケーブル」 では断面の中心の熱流速が0とし、「中空型ダミーケーブル」 では導体層の内径部分が液体窒素に触れているとして解析 を行った。

3.実験結果と1次元熱解析結果

ケーブル断面の中心からの距離に対する温度の実験値及 び1次元熱解析による理論値を「丸撚り型ダミーケーブル」は Fig.2に、「中空型ダミーケーブル」はFig.3に示す。図中のH_c、 H_p、H_sはそれぞれ導体層、PPLP層、シールド層の領域を示 しており、境界部分の帯はヒータを示している。凡例のkは PPLPの熱伝導率を示している。今回はk=0.14とk=0.17の2 通りによる解析を行った。比較すると、どちらのケーブルに関 しても概ね実験値と理論値が一致していることがわかる。今後 は3次元有限要素法を用いてより細かく解析していく予定で ある。

4.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 の委託により実施されたものである。



Fig.1 Cross-sectional View of Superconducting Cable (Solid)



Fig.2 Experiment and Simulation Results of Solid Cable (Heater Current = 40mA)



Fig.3 Experiment and Simulation Results of Hollow Cable (Heater Current = 40mA)

鉄道き電線用の超電導ケーブルの試作

Design of superconducting cable for railway system

<u>富田 優</u>, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研) <u>TOMITA Masaru</u>, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute); E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

電気鉄道の直流電化区間では電圧が1500Vで、許容電圧 降下が小さいことから、変電所間隔が2~3km 程度となり、路 線に多くの変電所が設置されている。超電導材料は物性上、 直流で高い定格電流値を示す特徴を備えているため、大都 市部の通勤路線のき電線に送電用の超電導ケーブルの敷設 を想定した場合、電圧降下の低減と同時に変電所数の削減 が期待できる。

このような直流き電線への応用を想定し、通常時連続運転 で使用できる 1500V、5kA 級の超電導ケーブルを目標とした 1.5kA 級のプロトタイプを試作し、通電試験を行った。

2. 設計および仕様

ビスマス系線材による単層(導体・シールド1層、10本巻 き)構造の1.5kA対応の超電導ケーブルを設計した(Table.1)。 Fig. 1 に、断面形状を示し、Fig. 2 にケーブルの外観を示す。 超電導線材は幅 4.5mm、厚 0.35mm であり、フォーマ(Cu 撚り 線導体)の外径を16mm、線材間のギャップを0.5mm とすれば、 導体層は 1 層巻きで 10 本の超電導線材が巻線化できる。1 本当りの Ic は 160A(77K、self field)程度であるため、160× 10=1600A となる。同様にシールド層は 14 本の超電導線材を 巻線化しているため、160×14=2240A となる。

絶縁紙(PPLP)は、ケーブルコアの曲げ等による紙ズレを防止するために、SZの交互巻きとした。本条件および使用する 絶縁紙の厚み(約0.125mm)や枚数を考慮すると最低2mm厚が必要となる。このとき、1.5kV課電時の最大電界は約 0.8kV/mmであり、これは一般的な高圧ケーブルの設計電界 24kV/mmに比べ、大きな裕度を有する。

3. 通電試験

き電用超電導ケーブル(巻き線部)を液体窒素に浸し、導体層およびシールド層にそれぞれ通電をし、電流-電圧特性を測定した。測定結果を図 2,3 に示す、導体部の巻き線で1.72kA、シールド部の巻き線で2.43 kAの許容通電電流を確認した。導体層およびシールド層について、超電導線材の本数を考えると、1本当り172~3Aであるため、自己磁場の影響はないと推定できる。また、n 値も 17~18 と高い値であり、設計通りに巻線化できたことを確認した。

Table.1 Design of superconducting cable sample

	0 1 0 1
Wire	DI-BSCCO Type-HT
Core	HTS Conductor:1 Layer
	HTS Shield :1 Layer
Ic	DC1500A@77K、DC2400A@68K
Voltage	1500V



Fig. 1 Cross section of superconducting winding



Fig. 2 Photograph of superconducting winding



Fig. 3 I-V curve (HTS Conductor,77K)

MOD-RE2Zr2O7を用いた REBCO 線材用低コスト基板平坦化技術の開発

Preparation of the smooth surface on the metallic substrate using MOD RE₂Zr₂O₇ layer for low cost coated conductors.

高橋保夫、吉積正晃、伊藤岳文、衣斐顕、宮田成紀、福島弘之、和泉輝郎、塩原融、(ISTEC-SRL) 青木裕治、長谷川隆代 (昭和電線 CS)

> <u>Y.Takahashi</u>, M.Yoshizumi, T.Itoh, A.Ibi, N.Miyata, H.Fukushima, T.Izumi, Y.Shiohara (ISTEC-SRL) Y.Aoki, T.Hasegawa (SWCC Showa Cable System Co. Ltd).

> > e-mail: y.takahashi@istec.or.jp.

はじめに:

近年、高速で結晶性配向膜の得られる IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)による配向 MgO 中間層が REBCO 線材 用の低コスト基板として注目されている。IBAD-MgO 膜は膜厚 が 10nm 以下の非常に薄い領域で良好な 2 軸配向性が得ら れることから高速化が可能な半面、成膜に用いる基板の平坦 性が IBAD-MgO 層の2 軸配向性に影響を与えることが知られ ており、IBAD-MgO の成膜に用いる基板には2nm 以下程度 の平坦性が必要とされている。 現在一般的にはこれらの基 板の平坦性はハステロイ基板の表面を研磨することによって 得ている。 研磨による基板の平坦化は基板の高コスト化につ ながること及び長尺化を行うことにより研磨ムラ等の欠陥を除 去する必要性があることが問題となってきた。一方、MOD 法に より作製したベッド層による基板表面の平坦化の検討が米国 Sandia 国立研究所よりなされておりY2O3膜の多層コートによっ て基板表面粗さが減少するという報告がなされている。 そこ で本研究ではIBAD-MgO 層成膜に用いる基板の平坦性向上 の検討として IBAD-MgO 基板用ベッド層に MOD 法を採用し 基板平坦性の向上の検討及び中間層配向性の検討をおこな った。 また、MOD ベッド層の材料としては Ni-W 金属基板用 バリア層として実績がある Ce-Zr-O(CZO) を検討した。

実験方法:

MOD CZO 層はハステロイ基板上に Ce、Zr ナフテン 酸塩溶液を Dip コーティングにより塗布し、RTR 式の連 続焼成炉で焼成を行い作製した。ハステロイ基板平坦性向 上の検討として 表面平坦性の異なる電解研磨基板(Ra=7nm)、 圧延上り基板(Ra=12nm)上に MOD-CZO 成膜を行った。 CZO 層の表面平坦性は AFM 観察により行った。 また、 中間層の配向性の検討は MOD-CZO 上に IBS(イオンビーム スパッタ法)で GZO テンプレート層、IBAD 法で MgO 層、スパ ッタ法で LaMnO₃ 層及び PLD 法で CeO キャップ層を形 成し CeO₂ 層の配向性を評価した。 超電導層は PLD 法で成膜し表面観察を SEM、結晶構造の 評価は XRD (θ/2θ、極点図)を用いて行った。また、輸 送電流特性(*J*_c)の測定は 77K、自己磁界中で直流四端子法 を用いて行い、1μV/cm の電圧基準で定義した。

結果:

電解研磨基板及び圧延上り基板のいずれに対しても Ra 値は CZO の塗布回数に伴って減少する傾向が見られた。また、 電解研磨基板の場合には Ra が 2-3nm 程度まで減少し、従来 より用い高い特性を得ている機械研磨基板(2nm)に近い値を 示すことがわかり、MOD 膜による基板の平坦化効果を確認す ることができた。

塗布回数(n)とRaの関係は膜収縮率(t/t₀、t:焼成後膜厚、 t₀:塗布時膜厚)を用いて

$Ra=R_0(1-t/t_0)^n$

に従っていることがわかった。 ここで R0 は MOD 膜成膜前の 基板表面粗さを示す。

上記検討で得られた MOD 膜による平坦化基板の有効性を確 認するために同基板上に中間層、超電導層を成膜し配向性、 超電導特性を評価した。電解研磨基板上に MOD 平坦化層 を配した基板上に PLD-CeO₂ /LMO/ IBAD-MgO/ IBS-GZO の成膜を行い CeO₂層で評価した面内配向性は \triangle ϕ =4.1deg. であり、従来の機械研磨基板を用いた場合の CeO₂層の配向性($\triangle \phi \sim$ 4deg.)と同等であった。さらにこの 上に PLD 法で GdBCO 超電導層を形成し特性を評価した結 果 0.5 μ m 厚で Ic=249A(Jc~5MA/cm²)が得られ、機械研磨 基板上での特性(5~6MA/cm²)とほぼ同等の特性を得ること ができた。

謝辞: 本研究は、超電導応用基盤プロジェクトおよびイ 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 ネルギー産業技術開発機構 (NEDO)の委託により実施し たものである。
IBAD-MgO 膜の表面ラフニング

Surface Roughening of IBAD-MgO Films

<u>宮田</u>成紀,衣斐 顕,畠山 英之,山田 穣,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) <u>MIYATA Seiki</u>, IBI Akira, HATAKEYAMA Hideyuki, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC); KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC)

E-mail: miyata@istec.or.jp

REBa₂Cu₃O_{7-d}線材に用いられる IBAD (イオンビームアシス ト蒸着) 基板の開発においては、イットリア安定化ジルコニア (YSZ)や Gd₂Zr₂O₇ (GZO)などの蛍石系の構造をもつ物質を 用いる場合と MgO などの岩塩系の構造をもつ物質を用いる 場合の大きな二つの流れがある。IBAD 層物質として MgO を 用いた場合には、数 nm の膜厚で高い配向度が得られるため、 現在産業化を目指した高速化プロセスとして精力的に開発が 進められている。

その一方で、膜厚に対して単調に配向度が向上していく YSZ や GZO などの蛍石系の構造を持つ物質とは異なり、 IBAD-MgO 膜では、配向度はある最適膜厚まで向上する傾 向を示した後、再び増加に転じるような非単調な振る舞いを 示す。このため膜厚の制御が重要となり、プロセスの安定性に 影響を与える。このような配向度の劣化を抑制することはプロ セスの安定化に繋がり、さらに蛍石系に見られるような膜厚に 対する右肩下がりの単調な振る舞いを実現できれば高配向 化への道も拓けることになる。透過型電子顕微鏡(TEM)観察 の結果によるとそのような配向度が劣化した厚膜試料(~ 100nm^t)では、MgO 層表面に大きなうねりが生じていることが わかった。そこで、原子間力顕微鏡(AFM)により直接 MgO 膜 の表面形状を測定したところ、成膜時間(=膜厚)の増加とと もに表面上に大きな起伏を伴った構造が生じてくる様子が確 認された。Fig.1 はそれぞれ成膜時間 60sec および 300sec で 得られた IBAD-MgO 膜の表面 AFM 像である。60sec の試料 は、ほぼ最適条件にあたり、我々のグループで採用している 典型的な中間層構造(CeO2/LaMnO3/IBAD-MgO/GdZrO/ Ni-alloy)においてムφ=2.5-2.8°の面内配向度が得られる条件 である。一方、300sec の試料においては、同じ中間層条件・ 構造でも得られる配向度は 50°以上に劣化してしまう。したが って、このような表面ラフニングが配向度を劣化させている大 きな原因の一つであると考えられるため、その抑制を目指して まず現象としての把握を試みた。方法としては、このような不 規則な形状把握に有効であると考えられる、フラクタルの一種 である自己アファイン性(異方的自己相似性)を基礎にしたス ケーリングの手法を採用した。この解析法は薄膜成長だけで なく、地層断面や山脈の起伏パターン、バクテリアのコロニー 形成など非常に幅広い現象に対しての適用性が報告されて いる[1]。今回得られた MgO 膜の表面形状においても、実際 その二乗平均平方根(root-mean-square; RMS)で定義される 表面領域幅

$$w(L,t) = \left[\frac{1}{L}\int_{0}^{L} (h(r,t) - \bar{h}(t))^{2} dr\right]^{1/2}; \quad \bar{h}(t) = \frac{1}{L}\int_{0}^{L} h(r,t) dr$$

がスケーリングの仮定により予測される短距離スケールでの冪 乗的振る舞い($w \sim L^{\alpha}$)と長距離スケールにおける飽和傾向 を示すことが確認された(Fig.2)。冪乗領域から求められる空 間変調を特徴づけるラフネス指数 α は 0.6-0.7 の値を示し、こ れは成長過程における支配因子として表面拡散の重要性を 示唆するものである。また同様に時間発展を特徴づけるダイ ナミカル指数 β についても考察を行った。

CeO₂成膜において協力を頂いた栗木礼二氏に感謝いたします。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。



Fig. 1 AFM images (Scan area: 500nm x 500nm) of the surface of IBAD-MgO films of (a) t_{dep} =60sec (R_a =0.6nm) and (b) t_{dep} =300sec (R_a =2.7nm). (Note that the full-scales of vertical axes are different.)



Fig. 2 Surface width functions w(L,t) of the IBAD-MgO films with the deposition time of 20, 40, 60, 80, 120 and 300sec.

参考文献

^[1] A.-L. Barabasi and H. E. Stanley, *Fractal Concepts in Surface Growth*, (Cambridge Univ. Press, New York, 1995); タマス・ヴィチェック, フラクタル成長現象,(朝倉, 東京, 1990)など.

高速 IBAD-MgO 用 LMO バッファ層の長尺化 Long length LMO layer fabricated on IBAD-MgO substrate

<u>畠山 英之</u>, 福島 弘之, 吉積 正晃, 宮田 成紀, 衣斐 顕, 山田 穣, 和泉 輝郎, 塩原 融 <u>HATAKEYAMA Hideyuki</u>, FUKUSHIMA Hiroyuki, YOSHIZUMI Masateru, MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh

1. はじめに

近年開発された IBAD-MgO 基板は数 10-100 m/h の製造 が可能である。このため、我々は IBAD-MgO 基板を用いた 薄膜線材の低コスト化製造技術開発を行っている。構造が CeO₂/LaMnO₃(LMO)/IBAD-MgO/Gd-Zr-O/Hastelloy である 4 層構造 IBAD-MgO 基板において、前回、LMO 層の製造 速度をこれまでの 30m/h から 50 m/h に向上させて短尺基板 (2cm)を製造し、面内配向度 $\Delta \phi = 3.9^{\circ}$ を実現した [1]。 本研究では、LMO 層の成膜温度の最適化を行い、100m 基 板を作製した結果を報告する。さらに、4 層のバッファを簡略 化した CeO₂/IBAD-MgO/Gd-Zr-O/Hastelloy である 3 層構造 IBAD- MgO 基板において $\Delta \phi = 3.7^{\circ}$ を達成した。 2. 実験

ハステロイテープ上に Gd-Zr-O シード層をスパッタで蒸着 し、その上に IBAD-MgO 層を成膜し[2]、さらに、その上に LMO 層を酸化物 LMO ターゲットを用いて RF スパッタ法で 蒸着した。また、自己配向により配向度を高めるため、LMO 層の上に PLD 法で CeO₂ 成膜を行った。3 層構造 IBAD-MgO 基板においては LMO 成膜を行わず、 IBAD-MgO 層上に直接 PLD 法で CeO₂ 成膜を行った。超電 導層は、PLD 法で GdBCO 層を成膜し、4 端子法により I_c (7 7K, 0T)を測定した。

3. 結果

図1にReel to Reel 方式の長尺化装置でLMO 層の製造 速度を変えた場合の4層構造IBAD-MgO基板最上層CeO₂ 層の $\triangle \phi \delta c c - \phi$ 一設定温度の関係を示す。高温になるほ $\delta \triangle \phi \delta c c c \delta c$ のため、製造速度が 20 m/h (\bullet)の場合はヒーター設定温 度 870°Cで、30 m/h (\bigcirc)では 910°Cで、50 m/h (\bullet)では 960°Cで、60m/h (\Box)では 980°Cでそれぞれ $\triangle \phi$ が最小とな った。 $\triangle \phi$ が最小になるヒーター設定温度は、製造速度が 速くなるほど高温側に移動する。また、製造速度を速くする と最適温度範囲が狭くなった。このため、長尺化では長手方 向の温度の均一性の確保が難しくなる。そこで 100m 長尺化 では製造速度を 50m/h とした。

図 2 に作製した 4 層構造 IBAD-MgO100m基板の I_c 分布 (10m 毎に測定) と CeO_2 層の $\varDelta \phi c c c c c$, 100m 全体にわた り CeO_2 層の $\varDelta \phi$ は 3.7~5.3° と高配向を示し、その結果 GdBCO 層の I_c も 322~404 A と高い特性を示した。

本研究で目指している低コスト化のためには、 IBAD-MgOのバッファ層の数を減らすことも重要である。このため、LMO層を省き CeO₂を直接 MgO 層上に成膜した3 層構造基板の可能性も検討した。図3は、この基板での CeO₂層の配向度と厚さの関係である。格子定数がCeO₂と MgOで大きく違うにもかかわらず、従来の4層構造の基板と 同様に、良好な自己配向性を示し膜厚が500nmで $\bigcirc \phi = 3.7^{\circ}$ の良好な配向を得た。

4. まとめ

IBAD-MgO 基板において、LMO 中間層を RF スパッタ法 により 50m/h の高速で製造できた。これにより、100mの長尺 化に成功した。得られた配向度は、CeO2 層において△ φ が 3.7~5.3°であり、 I_c は 322~404Aの高い値を示した。また、 LMO 層を省いた 3 層構造 IBAD-MgO 基板でも、4 層構造 IBAD-MgO 基板と同程度である $\Delta \phi = 3.7^\circ$ の高配向を得た。

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。

 H. Fukushima, *et al.*: presented at CSJ Conference 2008 Kochi, Japan, Program No. 1A-p04

[2] M. Yoshizumi, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Kochi, Japan, Program No. 1P-p12



Fig. 1 Setting temperature dependences of in-plane grain alignment ($\bigtriangleup \phi$) of CeO₂ layers for 4 layered IBAD-MgO substrate



Fig. 2 I_c distribution for 100m long samples and in-plane grain alignment ($\Delta \phi$) distribution of PLD-CeO₂ layers.





大型アシストイオンビームを用いた長尺 IBAD-MgO 線材の高速成膜 High production rate of IBAD-MgO layer by a large assisting ion source

<u>羽生 智</u>,田下 千晴,林田 知朗,花田 康,森田 克洋,須藤 泰範,朽網 寛,五十嵐 光則,柿本 一臣, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)

HANYU Satoru, TASHITA Chiharu, HAYASHIDA Tomoaki, HANADA Yasushi, MORITA Katsuhiro, SUTOH Yasunori, KUTAMI Hiroshi, IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.) E-mail : s_hanyu@fujikura.co.jp

1. はじめに

RE123 系の超電導線材は現在世界中で研究が進められ ている。RE123 系の線材には配向中間層が必要となり、フジク ラでは IBAD 法により 2 軸配向中間層を作製してきた。IBAD 層の材料としては、これまで Gd₂Zr₂O₇(以下 GZO)が用いられ てきたが、高配向には数 100nm~1 μ m の膜厚が必要となっ ていた。しかしながら、製造速度の観点から nm オーダーで高 度に配向する MgO への移行が必要となり、開発を進めてきた。 フジクラではこれまで GZO の経験をいかし、世界最大のイオ ン源を有する大型 IBAD 装置により、IBAD-MgO を高速に成 膜することが可能となった。線材の構造も、IBAD-MgO 上で は世界的に LaMnO₃が用いられているが、直接 CeO₂を成膜 することにより簡素化を行っている。今回は IBAD-MgO の線 速 1 km/h にて CeO₂の $\Delta \phi$ =4° 台の達成と 1km 級の IBAD 線材の作製について報告する。

2. 実験方法

Ni 基金属テープ上にイオンビームスパッタにより Al₂O₃を 100~150 nm、Y₂O₃を~20 nm 成膜したものを基板として IBAD-MgO を成膜した。使用イオンは Ar とし、基板に対して イオンビームが 45° となるように入射した。加速電圧は 800~ 1500 Vとした。短尺成膜では、装置の全15レーンに試料をセ ットし、一つのレーンを往復させて成膜を行った。長尺成膜は、 15 レーンのうち必要なレーンを複数選び、線材速度 1 km/h にて成膜を行った。MgO の配向は、IBAD-MgO 上にイオンビ ームスパッタにより MgO をエピタキシャル成膜し、その MgO(220)の極点から△φを求め評価した。また、IBAD-MgO 上に直接 PLD 法によって CeO₂を成膜したものの CeO₂(220) の△φを測定することによっても確認した。

3. 結果および考察

短尺試験で線材速度 1 km/h にて 20~30 層往復成膜を 行った IBAD-MgO に関して、面内配向を測定したところ最も 配向の良いレーンで $\angle \phi = 5.2^{\circ}$ という配向を得ることができた。 このときの IBAD-MgO の膜厚は成膜レートから約 10~15 nm 程度と考えられる。また、同等の IBAD-MgO 上に PLD-CeO₂ を成膜すると $\angle \phi = 3.8^{\circ}$ という高い配向の膜を作製することが できた。なお Fig.1 に高分解能電子顕微鏡写真を示すように、 MgO 上の PLD-CeO₂ は MgO 上にクラック等なく原子レベル で綺麗に接合していることがわかっている。

長尺成膜では、1 km/hで1 passの成膜を試みた。基板として1 kmのハステロイに Al₂O₃、Y₂O₃を成膜したものを用い実験を行った。成膜後に長尺における配向分布を確認するために、20 m おきにサンプルをとり、PLD-CeO₂を成膜した。結果を Fig.2 に示すが、全長に渡り $\Delta \phi = \sim 4.2^{\circ}$ と非常に安定した面内配向を示すことが確認された。

1 km/h にて作製した IBAD-MgO 上の超電導特性に関しては、PLD-CeO₂を成膜後 PLD にて GdBCO を成膜した。その結果、77K、自己磁場下で $J_c = \sim 3MA/cm^2$ ($I_c = \sim 300A/cm$)のものが得られている。従って、実用可能な中間層の作製に成功したと考えられる。



Fig. 1 A Typical High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM) image of PLD-CeO₂ film on IBAD-MgO substrate. There is no crack between MgO and CeO₂ layer.



Fig. 2 In-plane texture of PLD-CeO $_2$ on 1 km IBAD-MgO substrate fabricated at 1 km/h. Texture-measurements were performed at each 20 m.

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。

5. 参考

本発表において作製した IBAD-MgO に関する報告は、 2P-p17 IBAD 中間層構造における中間層高速成膜検討 (須藤ら)

3A-a05 IBAD-MgO 基板を用いた長尺 GdBCO 線材の開発 (五十嵐ら)

IBAD-MgO 基板を用いた長尺 GdBCO 線材の開発

Development of long GdBCO coated conductors which consist of IBAD-MgO based substrates

五十嵐 光則, 柿本 一臣, 羽生 智, 田下 千晴, 林田 知朗, 花田 康, 森田 克洋, 須藤 泰範, 朽網 寬,

鵆

IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, HANYU Satoru, TASHITA Chiharu, HAYASHIDA Tomoaki, HANADA Yasushi, MORITA Katsuhiro, SUTOH Yasunori, KUTAMI Hiroshi, IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.) E-mail : m_igarashi@fujikura.co.jp

1. はじめに

こ数年、RE123薄膜超電導線材開発の進展は著しく、線 材の臨界電流特性は応用機器で必要とされる水準に到達し てきている。フジクラでは、これまで IBAD 法による2 軸配向膜 の材料として Gd₂Zr₂O₇(以下 IBAD 法によるプロセスを i-GZO のように略する)を用いた中間層基板上に超電導層を形成す る製造プロセスを確立してきたが、特に i-GZO 製造速度が 5 m / hと低速であることが難点であった。そこで数 10 nm の膜 厚で配向が完了し、高速製造が実現できる MgO を使用した 中間層基板の開発を開始している。世界最大のイオン源を有 する大型 IBAD 装置により、i-MgO を線速 500 m / h で作製し、 MgO上に直接 CeO, 層を形成したフジクラ独自の中間層の作 製に成功したことを前回報告した。その後、更なる条件最適 化の結果、i-MgOは線速1000m/hに達し、高配向を有する 100 m以上の長尺中間層基板を作製できるようになってきた。 そこでこれら基板上へ Gd₁Ba₂Cu₃O_v(以下 GdBCO)超電導層 の成膜を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験方法

Fig. 1に示すような 2 種類の構造を有する IBAD 中間層基 板を用意した。PLD 法により CeO₂を成膜した基板の配向度は 両者とも $\Delta \phi = 4 \sim 5^{\circ}$ であった。上記基板へ Reel-to-reel の大型 PLD 装置により GdBCO 超電導層を成膜した。レーザ周波数 300 Hz での高速成膜を行い、1pass 線速は 40 m/h または 80 m/hにして所定の膜厚を狙って繰り返し成膜を行った。作製 した超電導線材は、超電導層上に Agを 10 µm 程度スパッタ 蒸着した後、大型電気炉によって酸素気流中でアニールをし た。評価方法としては、相の同定は XRD の θ -2 θ 測定で行い、 配向度の評価は XRD による正極点測定の $\Delta \phi$ で行った。臨 界電流特性の評価は、閾値を 1 µV / cm として液体窒素中で の通電で行い、長尺では連続評価装置にて 70 cm 間隔で連 続測定を行った。

3. 結果および考察

1000 m / h で i-MgO 成膜した基板と従来の i-GZO 基板を 連結させ、温度を変えて GdBCO 成膜した短尺サンプルの I_c 特性を Fig. 2 に示す。MgO と GZO の両基板上への成膜は、 ほぼ同じ最適成膜温度領域を有していた。これは、i-MgO 基 板は膜厚が薄いが、多段構造で Al₂O₃ 層などを含んでおり、 熱伝導率が低いためであると考えている。また、1000 m / h と いう高速で成膜した i-MgO 基板においても高特性を再現でき ることが確認できた。

このように GdBCO 成膜においては、従来の i-GZO 基板に おける知見をほぼそのまま適用できることがわかったため、 100 m以上の長尺成膜を試みた。その結果、Fig. 3 に示すよう に、115 mの全長で $I_c > 400$ A、膜厚約 2.5 μ mの高特性線材 を GdBCO 成膜の実効線速 13.3 m / h で作製することに成功 した。 I_c の分布が若干大きくなってしまったが、これは単長 500 m以上の長尺線材作製を見据えて 1pass 速度を 80 m / h と高 速で成膜したことにより、線材の温度が最適の高温に達して いなかったことによるものと考えている。70 cm 間では $I_c = 631$ A、2 cm 間では $I_c = 670$ A と高特性の部分もあり、さらなる条 件の最適化により i-MgO 基板を使用しても分布の均一な高 特性の長尺線材を作製できる目処が立った。



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。

微細組織制御による TFA-MOD 線材の磁場中特性向上

Microstructure control of TFA-MOD derived REBCO coated conductors for high magnetic field dependence of Jc

<u>吉積</u>正晃,三浦 正志,山田 穰,和泉 輝郎,塩原 融(超電導工学研究所) <u>YOSHIZUMI Masateru</u>, 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(Jc)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Jc特性の異方性を抑制し、Jc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。これまで多く の研究者により様々な試みがなされてきたが、実用に耐えうる 膜厚と臨界電流特性(Ic)を有する線材中に磁束ピン止め点 を導入する事が難しく、最近になってMiuraらにより初めて高 い磁場中特性を有する厚膜のTFA-MOD 線材が開発された [1]。これは、微細なBaZrO₃(BZO)が試料中に均一に分散し てピン止め点として働いた結果と考えられるが、本研究では、 高特性を得るための微細組織制御機構について調査、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-ナフテン酸から なる出発原料を Y:Sm or Gd:Ba:Cu=1:0.3:2:3.5 組成 (Ba-defficient)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-Gd₂Zr₂O₇/ハステロイTM基板上にスピンコートにより塗 布して 500℃、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、76 0℃、500ppm酸素中で本焼成した[1]。本焼成途中では時間 を変えてクエンチを行い、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 Jc 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 線材は自己磁場で4MA/cm² と非常に高いJc特性を有しており、磁場中でも均一なJc-B-0 特性を有していた。この試料中には BZO 粒子が直径 10-20nm の球状で、面内方向、膜厚方向共に均一に分散し ており、これがあらゆる磁場方向に対して有効な磁束のピン 止め点として作用した結果、均一で高い特性を発揮したもの と考えられる。Zr 原子は仮焼膜中では BZO としては存在せず、 膜内に均一に分布していたが、クエンチ試料を分析した所、 760℃でのクエンチ試料において、REBCO が成長する前に BZO 粒子が前駆体膜全体に発生していた。Zr 原子は REBCO 内に混入すると Tc 特性を低下させるが、本プロセス で作製された膜には Tc 特性の劣化は確認されなかった。 れらの事から、仮焼膜内に均一に分布した Zr 原子は本焼プ ロセスにおいて、最初に BZO として均一核発生し、全ての Zr 原子が BZO となる。BZO 相は非常に安定なため、REBCO 成 長に伴い分解されず、REBCO成長界面にZr原子を供給しな いため、Zr 混入による Tc 特性の劣化を引き起こさず、高い特 性を維持したものと理解される。BZO 粒子は REBCO 成長に よってそのサイズ、分布に変化が見られず、均一であった。こ れは Coarsening が殆ど起こっていない事を示唆している。こ

の原因は、Zrの拡散が非常に遅い事や、BZO-matrixの界面 におけるGibbs-Thomson係数が小さく曲率による融点降下が 小さい事などが考えられる。

ー方、厚膜化した場合に、1.5 μ m以上では特性が低下 する傾向が見られた。そこで、薄膜と厚膜の組織を比較したと ころ、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-defficient)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。この、膜内の組成変動と粒子の粗大 化について、組織観察の結果を基に考察した。

膜内に組成変動が発生する原因は、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。粒子の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。一方、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組成ずれにつ いては、REBCO成長速度が遅いほど界面遠方からもBaが 供給されやすくなり、組成ずれが起こりやすくなる。結論として、 どちらの場合も成長速度が速いほど、膜内の組成分布が抑 制される。

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。

平均組成分布、粒子の粗大化ともに、低成長速度ほど促進される事が明らかとなったため、厚膜高特性化のため、高成長速度での成膜をこころみた。REBCOの成長速度Rは、雰囲気中の水蒸気分圧 P_{H20}とガス流速u、全圧 Ptの関数として R∝ ($u \cdot P_{H20}$)^{1/2}/Ptと表され、これらのパラメータ制御により REBCOの成長速度を上げた所、均一な組成および組織分布、高い自己磁場中、磁場中特性を維持したまま1.9 μ m厚までの厚膜化に成功した。結果として、自己磁場中では TFA-MOD 法により作製された超電導線材の Ic 特性の世界記録となる760A/cm-w、1T の磁場中で Ic_{min}=115A/cm-w、3T で 35A/cm-wと高い特性を得た。

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 (M-PACC)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

RF-Sputter 法による Re-123 系線材用 CeO₂ 中間層の開発(2) Development of CeO₂ buffer layer for coated conductors by RF-Sputtering (2)

<u>中西 達尚</u>,小泉 勉,兼子 敦,青木 裕治,長谷川 隆代(昭和電線); 飯島 康裕,齋藤 隆(フジクラ);高橋 保夫,和泉 輝郎,塩原 融(SRL)

NAKANISHI Tatsuhisa, KOIZUMI Tsutomu, KANEKO Atsushi, AOKI Yuji, HASEGAWA Takayo (SWCC-CS);

IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura); TAKAHASHI Yasuo, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL) E-mail:t.nakanishi508@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

前回、二軸配向した IBAD-Gd₂Zr₂O₇(GZO) 薄膜上に RF-Sputter 法で作製した CeO₂ 膜において、PLD 法によるも のと同様に膜厚の増加に伴い CeO₂ の面内配向が急激に向 上(自己配向)することを確認し、Reel-to-reel (RTR)式の連続 成膜を適用することにより長尺の CeO₂ 膜の作製が可能である ことを報告した[1]。今回、NEDO のプロジェクトである「イットリ ウム系超電導電力機器技術開発」における高電圧タイプの超 電導ケーブルおよび超電導変圧器の開発に用いる線材の中 間層として長尺の CeO₂ 膜を作製し RF-Sputter 法による CeO₂ 中間層の大量生産に関る膜質の再現性と長尺安定性につい て検討を行った。

2. 実験方法

CeO₂ 中間層は RTR 式マルチターン連続成膜機構を持つ RF-Sputter 装置で行った。基板は、㈱フジクラ製 IBAD-GZO 中間層付 HastelloyTM C276 テープ材を使用した。成膜時の設 定温度は 400~600°C、RF 投入電力は 2kW、線材移動速度 は 6m/h とした。成膜後の CeO₂ 中間層の膜厚は 1~1.5 μ m である。CeO₂ 膜の結晶性評価は X 線回折(XRD)法,表面形 状評価は AFM と SEM による観察を併用した。

3. 実験結果

Fig.1 に、単長約 100mの IBAD-GZO 膜上に作製した CeO₂ 膜の $\Delta \phi (\Delta \phi_{CeO2})$ と IBAD-GZO の $\Delta \phi (\Delta \phi_{GZO})$ との関係を 示す。 $\Delta \phi_{GZO}$ =14~18°の時、 $\Delta \phi_{CeO2}$ は \leq 6°が得られた。 $\Delta \phi_{CeO2}$ が $\Delta \phi_{GZO}$ に比例した分布を示し、分布も広がってい ないことから基板の $\Delta \phi_{GZO}$ を反映した二軸配向性を持つ CeO₂ 膜が再現性良くできていると考えられる。同等の二軸配 向性を持つ 200m 級の GZO 基板上に成膜した CeO₂中間層 でも、前後端の $\Delta \phi$ がそれぞれ 4.6, 4.1°の特性が得られた。 この CeO₂ 膜の表面は、Fig. 2 に示すように高い平坦性を示し ている。この長尺 CeO2 中間層上に作製した超電導層の特性 は当日報告する。



Fig.1 Relationship between $\Delta \phi_{GZO}$ and $\Delta \phi_{CeO2}$.



Ra=1.4nm

Fig.2 $5x5 \mu$ m AFM image of CeO₂surface.

参考文献

[1] T. Nakanishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79(2008) p.87

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。

TFA-MOD法による低コストYBCO線材の開発(8) - TFA-MOD YBCO 長尺テープ線材量産化の検討-

Development of the low cost YBCO coated conductor using TFA-MOD process (8) – Investigation of mass production of YBCO coated conductor using TFA-MOD process –

小泉勉, 中西達尚, 兼子敦, 青木裕治, 長谷川隆代 (昭和電線ケーブルシステム) 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ) 高橋保夫, 和泉輝郎, 宮田成紀, 山田穣, 塩原融 (超電導工学研究所)

<u>Tsutomu Koizumi</u>, Tatsuhisa Nakanishi, Atsushi Kaneko, Yuji Aoki, Takayo Hasegawa (SWCC-CS) Yasuhiro Iijima, Takashi Saitoh (Fujikura) Yasuo Takahashi, Teruo Izumi, Seiki Miyata, Yutaka Yamada, Yuh Shiohara (SRL)

E-mail: k910576@snt1.swcc.co.jp

1. <u>はじめに</u>

三弗化酢酸塩を使用した有機金属塩熱分解法 (TFA-MOD)により作製される RE-123 超電導線材は、原料 溶液を基板に連続的に塗布した後に仮焼を行い、比較的簡 便な装置により高速且つ安価に長尺線材を製造する事が可 能であることを特徴とする。更に一括処理が可能なバッチ式焼 成法を本焼に用いることにより更に高速、且つ安定な製造が 可能となり、現在 NEDOのプログラムである「イットリウム系超電 導電力機器技術開発」において超電導層電ケーブルと超電 導変圧器に使用する線材として開発を行っている。

本報では、Y 系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. 線材製造方法

トリフルオロ酢酸塩(Y-、Ba-)、及びナフテン酸塩(Cu-)を金 属元素組成比 Y:Ba:Cu=1.0:1.5:3.0 として混合して原料溶液と し、HastelloyC-276©/Gd₂Zr₂O₇(IBAD)/CeO₂(Sputtering)の積 層構造を持つ幅 5mm の金属基板上に 塗布・乾燥して前駆 体膜を作製した。この際、Reel-to-reel (RTR) 式塗布・仮焼装 置を使用し、速度 10m/h で溶液塗布を行なった。

上記 YBCO 超電導前駆体膜を水蒸気を含む減圧低酸素 雰囲気中、最高到達温度 750℃の焼成条件でバッチ式焼成 炉により本焼成を行った。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値(*I_c*)は、直流四端子法により液体窒素・自己磁場中で評価し、700mmの電圧端子間距離で連続 に測定を行った。尚、*I_c*値は電圧基準1µV/cmで定義した。

3. <u>結果</u>

TFA-MOD 法による YBCO 線材の実用化を目指し、特性の 向上と長尺化、製造速度の高速化等の検討を行ってきた。そ の結果、線材長 500m において、I_c=300A/cm-width 級線材 の作製に成功し、実用化への手応えを掴んだ。次のステップ として、量産を考慮した製造プロセスの確立の検討を行ってお り、これまでに総長 3km 以上の YBCO 長尺線材の量産試 作を行った。Fig.1 にこれまでに得られた製造歩留りの遷移を 示す。図に示す歩留りは、単長 30m 全ての領域において Ic>150A/cm-width 以上であったものをプロットした。これまで 作製した線材の総歩留りは 50%程度であるが、図に示すよう に製造量の増加に伴い製造歩留りが向上していることが判る。 これは、ハンドリングの向上、基板を含む各種材料の性能向 上等による効果であると考えている。また、製造した YBCO 線 材の I_c 値 の平均は、Fig. 2 のような分布を示し、製造した YBCO 線材の半数以上で Ic の平均値が 300A/cm-width を 超えている。これらの結果から、バッチ式本焼プロセスを用い た TFA-MOD 法は、 YBCO 線材の量産化において再現性の 高いプロセスであると考えられる。



Fig. 1 Manufacturing yield of the YBCO tapes.



Fig. 2 Distribution of mean value the critical current of the 30m-class YBCO tape.

<u>謝辞</u>

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。

30mm 幅超電導線材の開発 Development of 30 mm wide coated conductors

<u>太田 肇</u>, 新海 優樹, 小西 昌也, 永石 竜起, 大松 一也(住友電工) <u>OTA Hajime</u>, SHINGAI Yuki, KONISHI Masaya, NAGAISHI Tatsuoki, OHMATSU Kazuya (SEI) E-mail: ota-hajime@sei.co.jp

1. はじめに

超電導マグネットや超電導ケーブルなどの電力機器用途への 適用を目指し、RE-123(RE:希土類元素)系の薄膜超電導線材の開 発・検討が精力的に実施されている。交流応用に使用する場合、 交流損失の原因となる基板の磁性が問題となるが、我々は低磁性 クラッド金属基板の開発を行い基板の低磁性化を実現した。さら に低磁性クラッド金属基板の表面状態を改善することで臨界電 流特性が大幅に向上し、2µm厚で380A/cm-widthを短尺材で実現 した[1]。一方、超電導線材を工業製品として市場に拡販させる ためにはスループット向上が必須である。我々はスループット向 上のために30mm幅基板を用いた超電導線材の開発を行った。

今回、30mm 幅の低磁性クラッド金属基板を用いた超電導線材の幅方向および長手方向の特性均一化の検討について報告する。

2. 実験方法

40m 級 30mm 幅の低磁性クラッド金属基板を用い、その上に CeO₂/YSZ/CeO₂の3層構造からなる中間層を気相法によりエピタキ シャル成長させた。中間層の各層は RF スパッタリング法により成膜 を行い、各層の厚みは、それぞれ50nm、260nm、150nm である。さら に、中間層の上に、GdBa₂Cu₃O_y 膜をパルスレーザ蒸着法で、安定 化層を DC スパッタリング法で成膜を行い、線材を作製した。超電導 層の厚みは1層あたり0.3~0.5 µm である。超電導特性の長手方向 ならびに幅方向の均一化のため、レーザプルームの安定化などの 成膜条件検討を実施した。

作製した線材は、X線回折(θ-2θ, PF)により結晶性を、直流四端子法により超電導特性を評価した。

3. 実験結果と考察

40m 級 30mm 幅低磁性クラッド金属基板および中間層の特性を Table.1 に示す。(200)配向率(I(200) / [I(200) + I(111)])に関して は、基板の 100%に対してキャップ CeO₂は 95%~100%、面内配向度 ($\Delta \Phi$)に関しては、基板の約5°に対してキャップ CeO₂は約7°で あり、10mm 幅基板使用時と同等の良好な特性を実現した。(200)配 向率の幅方向分布は 5%以内、面内配向度の幅方向分布は 0.2°以 内であり、幅方向均一性に優れた中間層の作製を実現した。一方、 長手方向分布に関しても大幅な特性変化はなく、40m 級中間層の両 端特性の差は(200)配向率が約 5%、面内配向度($\Delta \Phi$)が約 0.4° で あった。中間層各層の(200)配向率の長手方向分布を Fig.1 に示す。 中間層各層で正常にエピタキシャル成長していることがわかる。し かし、基板の特性に比べキャップ CeO₂ の特性、特に面内配向度が 低下しており、基板特性を引き継ぐ中間層作製が今後の検討課題で ある。

30mm 幅方向に均一、かつ 10mm 幅時と同等の良好な中間層を 作製することができた。この中間層を使用した 30mm 幅超電導線材 の超電導特性は、中央部において 260A/cm-width(Jc 2.6MA/cm²) であり、10mm 幅線材と同等の特性を実現している。今後、膜厚分布 などの幅方向特性の均一化を行っていく。

Table.1 Properties of substrate and cap-CeO₂ in the width direction.

		I(200) / [I(200) + I(111)](%)	$\Delta \phi$ (deg.)		
		Right	Center	Left	Right	Center	Left
substrate	start point	100	100	100	4.7	4.9	4.7
	end point	100	100	100	4.7	4.8	4.7
cap-CeO ₂	start point	99.5	99.6	99.2	6.9	7.3	7.1
	end point	94.2	97.5	96.9	7.3	7.1	7



Fig.1 Distribution of cube orientation ratio in the longitudinal direction.

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。

参考文献

 Y. Shingai, et al.: presentation at Applied Superconductivity Conference 2008. (ASC 2008)

配向 Cu/SUS テープ上へ YSZ 中間層厚さを変えて作製した YBCO 薄膜

YBCO thin films prepared on textured-Cu/SUS tapes with different YSZ layer thickness

土井 俊哉、富安 亮太、徳留 誠、大王 学、白樂 善則(鹿児島大学);

窪田 秀一、嶋 邦弘(田中貴金属工業); 鹿島 直二、長屋 重夫(中部電力)

DOI Toshiya, TOMIYASU Ryota, TOKUDOME Makoto, DAIO Manabu, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

KUBOTA Shuichi, SHIMA Kunihiro (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系超伝導線材の基材テープには、配向金属テープを 使う手法と、無配向金属テープ上に IBAD 法により配向中 間層を形成する手法が用いられている。現在、国内では IBAD 法を中心に開発が進められているが、低コスト化を考 えた時には配向金属テープは熱処理のみで作製できるの で魅力的である。これまでNiもしくはNi-W合金テープが基 材テープに用いられてきたが、Ni や Ni-W合金は強磁性で あるために交流電流通電時に大きな損失が発生してしまい、 実用性に問題があった。そこで我々は、非磁性(反磁性体) である Cuを基板テープとした Y 系超伝導線材の開発に取 り組み、1MA/cm²(77K,自己磁場中)以上の高い J_cを得るこ とに成功した[1]。

Cu は代表的な FCC 金属であり、冷間圧延と熱処理によって容易に $\{100\}<001>$ 集合組織を得ることができる。また Cu は Ni に比べて大幅に素材コストを低減できる。昨年春の低 温工学会で、配向 Cu テープ上に Ni 鍍金を施し、その上に CeO₂/YSZ/CeO₂ 中間層を形成して高配向の YBCO 層を 得て、77K、自己磁場中で $J_c=4.5$ MA/cm²と非常に高い特 性を得たことを報告した。また、前回の低温工学会におい て、配向 Cu テープとSUS316を貼り合わせた高強度テープ 上に CeO₂/YSZ/CeO₂ 中間層を介して高配向・高 J_c の短尺 YBCO 線材を作製したことを報告した。今回は、YSZ バッフ ァ層厚を変化させて試料を作製し、バッファ層厚が YBCO 層の組織、配向性に与える影響を調べた。

2. 試料および実験方法

100 μ m厚の配向Cuテープは冷間圧延と熱処理によって作製した。その上に鍍金でNi層を形成し、このNi鍍金層上にPLD法を用いてCeO₂/YSZ/CeO₂層を形成し、その上にYBCO膜をPLD法で作製した。

CeO₂、YSZ、YBCO薄膜の配向性を確認するために θ -2 θ 法によるX線回折測定(XRD)および極点図測定を行った。 また、試料表面については走査電子顕微鏡(SEM)及び原 子間力顕微鏡(AFM)を用いて観察した。試料の臨界電流 密度(J_c)、臨界温度(T_c)は直流四端子通電法で測定した。

3. 結果と考察

Ni層を鍍金で形成した{100}<001>集合組織を有する Cu テープ上に、鍍金で 0.5 µ m 厚の Ni 層をエピタキシャル成 長させて、テープを作製した。その上に PLD 法で CeO₂を 410nm、YSZ を 360、260、170、85 nm、更に 410nm 厚の CeO₂ 中間層を形成し、その上に YBCO 層を形成した。作 製した YBCO 膜の(103)の極点図を測定したところ、何れの 試料においても α =45°のとき、 β 角が0°から90°おきに ピークが確認でき、良好な2軸配向膜であることが分かった。 また、 ϕ スキャン測定のピーク半値幅は 6 度程度と高い配 向度を有していることが分かった。図1に、YSZ 厚を 360 nm とした試料の 77K における J_c の磁場依存性を示す。十分に 高いを有する短尺線材が作製できていることが確認でき る。



Fig.1 Magnetic field dependence of J_c curve for the YBCO film on CeO₂/YSZ/CeO₂/Ni-electroplated Cu tape at 77 K.

異なる YSZ 厚の試料をそれぞれ2枚ずつ作製し、77K に おいて直流4端子法で J_c を測定したところ、YSZの厚さを85 nmとして作製した YBCO 薄膜の J_c は 0.31 M、0.08 MA/cm²、 YSZ 厚を170 nmとした YBCO は 0.34 M、0.10 MA/cm²、YSZ 厚を 260 nm とした YBCO は 3.37 M、2.27 MA/cm²、YSZ 厚 を 360 nm とした YBCO は 4.50 M、1.90 MA/cm²であった。 この結果から、YSZ 層は Ni 鍍金 Cu テープから YBCO への 有害元素の拡散をブロックしていることが分かる。

[1] M. Tokudome et al., J. Appl. Phys. vol.104(2008)103913

内部拡散法により作製したMgB2線材の構造とし。特性 Research of Structure and property of MgB2 wires by an internal Mg diffusion process

<u>許子萬</u>(東大), 戸叶 一正(NIMS), 松本 明善(NIMS), 熊倉 浩明(NIMS), 和田 仁(東大), 木村 薫(東大) J. M. Hur(Univ. of Tokyo), K.Togano(NIMS), A. Matsumoto(NIMS), H. Kumakura(NIMS). H.Wada(Univ. of Tokyo), K. Kimura(Univ. of Tokyo)

E-mail: jahmahn@phys.mm.t.u-tokyoac.jp , HUR.Jahmahn@nims.go.jp

1. Introduction

Recently, researchers engaged in MgB₂ wires and tapes are accessing to various fabrication processes in order to improve the critical current property. One of the promising methods is a n internal Mg diffusion process¹⁾. An advantage of Mg diffusion process is that higher density of MgB₂ core and hence, higher J_c values can be obtained than those of conventional PIT processed wire. In our previous study, excellent J_c of 81kA/cm² and 99kA/cm² at 4.2K and 10T were obtained for monocore and multicore wires by internal Mg diffusion process, respectively. In this study, we investigated the heat treatment temperature dependence of structure and superconducting properties of monocore MgB₂ wires.

2. Sample preparation

A pure Mg rod with 2 mm diameter was fixed at the center of Ta tube with 4 mm inner diameter and 6 mm outer diameter, and the empty space between Mg and Ta tube was filled with the powder mixture of B and 10 mol% SiC. The compound was initially cold worked into a rod shape with 2.3 x 2.3 mm² by using groove-rolling and then drawn into a wire of 1.3 mm in diameter. The wire was cut into short piece of 38 mm in length, and heat treated at 600, 640 and 680 °C for 1 hr under Ar gas atmosphere. I_c was measured with the resistive method at 4.2K in magnetic fields up to 12T. J_c was obtained by dividing I_c by the cross sectional area of MgB₂ layer.

3. Results and discussion

Figure 1 shows the SEM image and the EDX mapping of the cross section of mono-core wire heat treated at 600 °C for 1 hr. We obtained a thin layer of MgB_2 at this temperature due to short diffusion distance of Mg. However, this MgB_2 layer seems to contain less amount of precipitates than the layer obtained by a higher temperature heat treatment. The thickness of the reacted layer increased with increasing the heat treatment temperature.

Figure 2 shows transport J_c vs. field curves at 4.2 K of the monocore wires heat treated at several temperatures. At the heat treatment temperature of 680

°C, much lower J_c values were obtained probably due to the formation of impurity phases such as MgB₄. J_c rapidly enhanced with decreasing heat treatment temperature, and at 600 °C excellent J_c values were obtained due to the high quality MgB₂ thin layer.

This high quality MgB_2 layer may be related to the solid state diffusion of Mg into B layer at low temperature. However, for further improvement of J_c , we should optimize another factors such as diffusion distance, filament size, heat treatment time, dopants, and so on.

This work was supported by JSPS KAKENHI(19560 716).



Fig. 1 SEM image and EDX mapping of reacted $\rm MgB_2$ layer in diffusion processed monocore (MgB_2-10mol%SiC/Ta/Cu-20wt%Ni) wire heat treated at 600 °C for 1 hr.



Fig. 2 Transport J_c versus field curves at 4.2K of 10mol%SiC added monocore wires heat treated at several temperatures for 1hr.

Reference

1) JM. Hur, et al., Supercond. Sci. Technol 21(2008)032001.

ホットプレス加工による in situ PIT 法 MgB₂線材の臨界電流特性向上 Improvement of critical current properties of in situ PIT MgB₂ tapes by applying hot pressing

<u>山田 秀之(筑波大、JR東海)</u>,五十嵐 基仁(JR東海);

熊倉 浩明(物材機構、筑波大), 北口 仁, 松本 明善(物材機構)

Hideyuki Yamada (Tsukuba Univ., Central Japan Railway Co.), Motohiro Igarashi (Central Japan Railway Co.);

Hiroaki Kumakura (NIMS, Tsukuba Univ.), Hitoshi Kitaguchi, Akiyoshi Matsumoto (NIMS);

Kyoji Tachikawa, Yutaka Yamada, Yutaka Nemoto (Tokai Univ.)

E-mail:h.yamada@jr-central.co.jp

<u>1. はじめに</u>

MgB₂線材の一般的な作製方法であるin situ PIT 法で素線 材を作製して、ホットプレス(一軸加圧熱処理)加工を行ったと ころ、臨界電流特性が向上した。

in situ 法による MgB₂線材においては、MgB₂薄膜などと比較して、コアの充填密度があまり高くなく、MgB₂結晶粒のつながりが十分でないために、*J_c*が低いことが課題となっている。この充填密度を向上させる簡便な方法として、高圧で熱処理するホットプレス加工がある。今回、以前に我々が報告しているエチルトルエンとSiC 粉末の同時添加線材にホットプレス加工を適用し、*J_c*への影響を調べた。その結果、無添加線材及び同時添加線材ともホットプレス加工を行うことにより、*J_c*が向上したので報告する。

<u>2. 実験方法</u>

MgB₂線材は市販の MgH₂粉末及び市販のアモルファス B 粉末を用いて作製した。無添加線材及び 10mol%エチルトル エンと 10mol%SiC 粉末を同時添加した線材を作製した。原料 をボールミルを用いて1時間の粉砕・混合を行い、作製した 混合粉末を外径 6mm、内径 3.5mm の純鉄管に充填した後、 溝ロール加工と平ロール加工を用いて幅 4mm、厚さ 0.5mm のテープに伸線加工した。なお、粉末の混合と混合粉末の 鉄管への充填は、粉末の酸化を避けるため、グローブボック スを用いて、高純度アルゴンガス雰囲気中で実施した。また、 同時添加線材は、ホットプレス加工におけるガス発生の問題 を避けるため、540℃,1hの事前熱処理を行っている。

ホットプレス加工は、アルゴンガス雰囲気で、100MPa、 630℃で 2~10 時間行った。

Figure1に、熱処理と加圧のタイミングの1例を示す。昇温と 昇圧は同時にスタートし、所定の温度に達したとき加圧力も 100MPa に達し、この状態で所定の時間保持した後、約1時 間で降圧した。

臨界電流 I_c は、4端子抵抗法により、4.2K で 12T までの磁 界中で測定した。磁場はテープの面に平行に印加した。 I_c は 1 μ V/cm の電圧が発生する電流と定義した。

<u>3. 結果</u>

Figure2 に、光学顕微鏡を用いて観察した 630℃で 5 時間 のホットプレス加工を行った場合と、630℃で 5 時間の加圧な しの熱処理のみを行った場合の同時添加線材の断面写真を 示す。 ホットプレス加工により線材の厚さが減少していることがわ かる。また、断面積も減少しており、熱処理のみの線材の断 面積が約0.55mm²に対して、約0.44mm²であった。

Figure3 に、ホットプレス加工した無添加線材及び同時添加線材の J_c -B 特性を示す。比較として、以前に最適条件で通常の熱処理をした無添加線材及び同時添加線材の J_c -B 特性も示す。

ホットプレス加工した無添加線材は 10T で J_c =87A/mm²の 値が得られ、熱処理のみの線材の約 2.5 倍であった。また、 ホットプレス加工した同時添加線材は 10T で J_c =450A/mm²の 値が得られ、熱処理のみの同時添加線材(10T で J_c = 330A/mm²)より高い値が得られた。

このように、ホットプレス加工により J_eが向上することがわか るが、これはホットプレスによって MgB₂コアの密度が高くなっ たためと考えられる。



Figure1 An example of the hot pressing schedule (630°C,5h).



Figure2 Cross sections of the tapes (a) without hot pressing,



Figure3 J_c -B curves of the hot pressed MgB₂ tapes.

太刀川 恭治、山田 豊、根本 豊(東海大学)

磁気配向法による c 軸配向 MgB₂ バルクの作製 Synthesis of *c*-axis oriented MgB₂ bulks by the magnetic method

<u>望月 利彦</u>, 下山 淳一, 荻野 拓, 岸尾 光二(東大), 堀井 滋(高知工大) <u>MOCHIZUKI Toshihiko</u>, SHIMOYAMA Jun-ichi, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji(University of Tokyo), HORII Shigeru(Kochi University of Technology) E-mail: tt086731@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は、約 40 K という金属系超伝導体では最も高い T_c を持つことに加え、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、磁場下の J_c が低いことが MgB₂線材の広範な実用の障害になっている。一方、最近のエピタキシャル薄膜において 20 K における J_c が 10⁸ 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自己磁場での高い J_c に寄与する可能性が指摘[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。また、MgB₂の大型単結晶育成は困難であるため、高度な配向多結晶体が作製できれば基礎物性面でも新たな知見が得られる可能性もある。

そこで本研究では、電気泳動堆積 (EPD: ElectroPhoresis Deposition)法と磁場配向法を組み合わせ $MgB_2 \circ c$ 軸配向体の作製を試み、超伝導特性、常伝導状態の抵抗率、微細組織を評価し、さらに J_c の改善指針や異方性制御に有効な知見を得ることを目指した。

2. 実験方法

市販 MgB₂ 粉末(フルウチ化学製、純度 99%、100 mesh)を 遊星式ボールミルにより粉砕し、得られた微粉末を溶媒中に 分散させスラリーを作製した。このスラリーを用いて印加磁場 μ_0H_a 10 T,印加電場 100 V / cm(// H_a)で30 分間 EPDを行い 厚膜(as-depo 試料)を作製した。この厚膜を室温で乾燥させた 後、Mg 粉末とともに SUS316 管に充填し、両端を一軸プレス によって封じ、厚膜部分も一軸プレスによってテープ状に成 型した。これを石英管に真空封入し、950°C で 24 時間保持す ることによりテープ状の MgB₂ バルクを作製した。得られた試 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、SEM、 TEM により微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

Fig.1 にはボールミル後の市販 MgB₂の粉末 XRD パター ンとas-depo 試料、焼成後の MgB₂パルクの表面 XRD パター ンを示す。粉末 XRD パターンとas-depo 試料の表面 XRD パ ターンを比べると、002 ピークが明らかに強くなっていることが わかる。このことから、EPD 法厚膜作製における 10 T の磁場 印加が *c* 軸配向化に有効であることがわかった。しかし、熱処 理後の XRD パターンを見ると、002 ピークの強度がやや低く なっていることがわかる。これは、一軸プレスによって配向度 がやや低下したためと考えている。また、熱処理によって MgO の生成が認められた。これは粉末に付着した溶媒が酸 素源となったためであり、溶媒の選択や乾燥・脱媒、焼成条 件の最適化を進める予定である。

Fig. 2には MgB₂バルクの 20 K における J_c の磁場依存性 を示した。成膜の際の H_a と平行に磁場Hを印加した場合を白 抜きシンボルで、 H_a と垂直にHを印加した際のデータを黒塗 りシンボルで表した。両特性を比べると、後者の方が前者より も高磁場側まで高い J_c を示した。単結晶において、磁場をab面に平行に印加した場合の方が、c軸に平行に印加した場合 よりも上部臨界磁場 H_{c2} や不可逆磁場 H_{irr} が高いことからも、 今回の作製方法で e 軸配向した MgB2 試料が得られたと言える。なお、低磁場の J。には、結晶配向による顕著な改善は認められなかったが、これは粒間に存在する不純物、特に MgO による影響が大きいためと考えられる。

講演では抵抗率測定、connectivity、試料の微細組織観察 結果も示し、MgB2配向体の異方性についても議論する。



Fig.1 Powder XRD pattern and surface XRD patterns of as-depo sample and MgB₂ bulk heated at 950° C for 24 h.



Fig. 2 Magnetic field dependences of J_c at 20 K for MgB₂ bulks under $H_a//H$ and $H_a \perp H$.

C.G.Zhuang *et al., J. Appl. Phys.* **104**, 013924 (2008)
 大橋 他、2008年度秋季低温工学・超電導学会(3A-a06)

Evaluation of critical current density based on percolation model in carbohydrate doped MgB₂ wires

<u>JUNG HO Kim</u> (NIMS and University of Wollongong); SANGJUN Oh (NFRI); HIROAKI Kumakura, AKIYOSHI Matsumoto (NIMS); MIKE Tomsic, MATT Rindfleisch (Hyper Tech Research Inc.); SHI XUE Dou (University of Wollongong) E-mail: KIM.Jungho@nims.go.jp, Jhk@uow.edu.au

The critical current density shown in Figure 1 can be fitted reasonably well by a recent percolation model (lines in Figure 1) using the upper critical field calculated. The main idea of the percolation model is to calculate the overall critical current numerically based on a percolation theory [1]:

$$J_{c} = \int_{0}^{\infty} \left(\frac{p(J) - p_{c}}{1 - p_{c}} \right)^{1.79} dJ$$
 (1)

where p(J) is the fraction of grains having their critical current density above J and p_c is the minimum fraction needed for a percolative superconducting current flow. The critical current of each grain is assumed to be described by the same pinning model, for example, by a grain boundary pinning model: $J_c = F_m \cdot (1 - B / B_{c2})^2 / \sqrt{B_{c2}B}$. It is assumed that the pinning force maximum, F_m , of each grain is the same. The difference in the critical current density for each grain is due to the upper critical field anisotropy, which can be described by: $B_{c2}(\theta) = B_{c2}^{ab} / \sqrt{\gamma^2 \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)}$, following the anisotropic Ginzburg-Landau theory. The best fit (lines in Figure 1) is obtained with the anisotropy parameter γ and the pinning force maximum F_m values that are listed in Table I. As has been mentioned, the upper critical field calculated was used for the fitting. The percolation threshold p_c of 0.2 for densely packed MgB₂ bulk samples and around 0.26 for wire samples has been reported [1], and p_c of 0.26 was used in this work.

One of the interesting features observed in Figure 1 is that the decrease in the critical current density with higher sintering temperature is significantly lower for the carbohydrate doped samples. From the obtained parameters, it can be argued that this is due to the decrease in the anisotropy parameter with increased sintering temperature for the malic acid doped sample. However, it should be noted that the critical current density in the high field region can be affected either by the change in the anisotropy parameter or by the variation of the upper critical field. The parameters used are comparable to previous reports, and the self-consistency was checked by comparing the irreversibility field, B_{irr} , obtained from the above critical current fitting results and the estimation from the resistive broadening: $B_{irr} = B_{c2}^{ab} / \sqrt{(\gamma^2 - 1)p_c^2 + 1}$ [2], but even so, there is some uncertainty in the determination of the parameters.

The low field region is somewhat different. The critical current density at low field is mostly determined by the pinning force maximum and the obtained F_m listed in Table I is quite reliable. Consistent with the conventional argument

concerning the size dependence of the grain boundary pinning, there is a clear enhancement in the pinning at low sintering temperature for both doped and un-doped samples. On the other hand, contrary to the usual discussion on carbon doping in MgB₂, the pinning force did not increase, but decreased. Comprehensive study has reported in our previous work [3].

References

- 1. M. Eisterer, et al.: Phys. Rev. Lett. Vol. 90 (2003) p. 247002
- 2. M. Eisterer, et al.: J. Appl. Phys. Vol. 98 (2005) p. 033906
- 3. J. H. Kim et al.: J. Appl. Phys. Vol. 104 (2008) p. 063911



Fig. 1. The critical current density as a function of applied field for both un–doped and malic acid doped MgB_2 samples. Lines were calculated with the percolation model.

Table I The fitting parameters used for the calculation from the percolation model, equation (1), of the critical current density shown in Figure 1.

				-
Without doping		With	a carbohydrate doping	
	$650~^{\circ}C$	900 °C	650 °C	900 °C
γ	3.92	4.6	3.35	2.92
F_{m} (N/m ³)	$2.85 \cdot 10^{10}$	$1.95 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{10}$	$0.85 \cdot 10^{10}$

MgB₂線材における通電損失の温度および周波数依存性

Dependence of transport-current losses in MgB₂ wire on temperature and frequency

<u>川野 友裕</u>, 柁川 一弘(九大);中村 武恒, 山田 裕輝, 菅野 未知央(京大); 高橋 雅也, 岡田 道哉(日立)

KAWANO Tomohiro, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); NAKAMURA Taketsune, YAMADA Yuki,

SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.); TAKAHASHI Masaya, OKADA Michiya (Hitachi)

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

1. はじめに

我々は、近い将来の代替エネルギーとして期待されてい る水素利用社会において必要となる液体水素を循環、もしく は移送するためのポンプを駆動するモータの超電導化を検 討している[1]。これにより、液体水素を送液中に極力気化さ せない低損失な駆動モータの開発を目指す。まず、かご型誘 導機回転子に MgB2線材を適用することにより、同期運転の 実現に伴い回転子巻線で発生する損失を大幅に低減する [2,3]。更なる損失低減を目指して、固定子巻線をも MgB2線 材で構成した全超電導モータを開発するため、三相交流通 電に伴い発生する交流損失を評価する必要がある。そこで、 これまでに固定子巻線で発生する交流損失を理論的に評価 し、既存機に比べて損失が大幅に低減できることを確認した [4]。本研究では、固定子巻線で発生する交流損失を実験的 に評価することを目的とし、その一環として MgB2試料線材の 通電損失を電気的に測定したので報告する。

2. MgB2 試料線材の諸元

本研究では、PIT 法で作製された MgB₂ 単芯線材 (線径 0.8 mm¢)を使用した。この線材の諸元を Table 1 に示す。液 体へリウム温度 (4 K)下における自己磁場中の臨界電流 *I_c* は 535 A である。また、温度調節したヘリウムガスで冷却し、 同様の測定を行った[3]。得られた温度特性に Kramer Plot を 適用して内外挿した結果、26.7 K, 29.2 K, 30.8 K で、*I_c* はそ れぞれ 186 A, 128 A, 90 A である。

3. 通電損失の実験結果

 MgB_2 線材に自己磁場下で交流を通電し、四端子法によ り通電損失を測定した。周波数 100 Hz の電流を通電したとき の、単位長さ・一周期当りの交流損失 Q の温度依存性を Fig.1 に示す。測定した温度領域は 26.7 ~ 30.8 K である。横 軸の i_i は通電電流振幅を I_c で規格化したものである。Fig.1 から温度が高いほど臨界電流が減少するため、通電損失が 小さくなることがわかる。また、29.2 K における通電損失 Q の 周波数依存性を Fig.2 に示す。測定した周波数領域は 10 ~ 150 Hz である。実線は、次式のような臨界電流密度一定の Bean モデルを仮定したときの、丸線の単位長さ・一周期当り の通電損失の理論値である[5]。

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[i_t \left(1 - \frac{i_t}{2} \right) + \left(1 - i_t \right) \ln \left(1 - i_t \right) \right]$$
(1)

ここで、µ₀は真空の透磁率である。通電損失 Q は i,が小さい 場合、近似的に i, の 3 乗に比例して増えるが、i,=1 に近づく に従って、i, の 3 乗以上で急激に増えることが知られている。 Fig.2 から、低周波数では理論値とよく一致するが、周波数が 高くなるほど通電損失が増加することがわかる。これは、外側 シース部で渦電流損失が発生したものと考えられる。より詳細 な測定結果は当日報告する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)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

- K. Kajikawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.59
- T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol., 21 (2008) 085006
- Y. Yamada, et al.: 2009 Annual Meeting Record, I.E.E.Japan (2009) No. 5-120
- T. Kawano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.201
- 5. 船木和夫,住吉文夫:「多芯線と導体」,産業図書,東京 (1995) p.25

Structure	MgB ₂ /Nb/Cu
Number of filament	Mono-filament
Diameter of wire	0.8 mm
Diameter of filament	0.555 mm
Critical current at self-field	535 A @ 4 K
	100 A @ 20 0 K



Fig.1 Dependence of transport-current losses for different temperatures on current amplitude



Fig.2 Dependence of transport-current losses for different frequencies on current amplitude

高アスペクト比断面をもつ MgB₂テープ線材の開発 1 ―臨界電流特性―

Development of MgB_2 tapes with high aspect-ratio cross-sections 1

-Critical current properties -

若林 佑樹, 松島 健介, 川越 明史, 川畑 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 荘司, 松下 照男(九工大); 高橋 雅也, 岡田 道哉(日立)
 <u>WAKABAYASHI Yuki</u>, MATSUSHIMA Kensuke, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma,
 SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS);
 KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo, (Kyusyu Institute of Technology);
 TAKAHASHI Masaya, OKADA Michiya (HITACHI);

E-mail: k9366378@kadai.jp

1. はじめに

核融合装置や超伝導電力貯蔵装置用のコイルには、低損 失化と高安定化の両立、および低コスト化が必要である。本研 究では、低損失化と高安定化の両立を目指すために、高い断 面アスペクト比をもつ MgB2テープ線材の開発を行っている[1]。 本テープ線材は、丸線材を圧延したもので、高臨界電流密度 と低交流損失の両方の性能向上が期待できる。これまでに、 MgB2 多芯線をテープ形状にしたサンプルを試作し、丸線より も臨界電流密度が向上すること、結合損失が大幅に低減する ことを明らかにしている。ここでは、MgB2 フィラメントがテープ 形状に圧延されることによる効果を定量的に明らかにするため に、多芯線内のフィラメント1本を模擬した単芯線をサンプルと して臨界電流の測定を行った。

2. 試作線材と測定方法

今回用いた試作線材のパラメータを Table 1 に示す。直径 0.455mmの丸線材から圧延した細いテープ線が、多芯線内の フィラメントを模擬したサンプルである。この単芯線のフィラメン ト径は 0.22 μm であり、多芯線フィラメント径 0.100~0.150μm に 近い。テープ線にする前の線径の影響を調べるために、太い 単芯線も用意した。本測定に用いたサンプルは、直径が 0.807mm、0.585mm、0.455mm の 3 種類の丸線とそれらの丸 線から圧延したアスペクト比の異なる 2 種類のテープ線で、計 9種類である。テープ線は、線材のアスペクト比が2と4になる ように圧延した。丸線を Wire とし、テープ線を Tape2、Tape4 と した。臨界電流の測定は、4 端子法で行った。サンプルは、長 さ60mmの短尺直線形状4本を直列に接続し、端子間距離を 10mm とした電圧端子をそれぞれに取り付けた。1µV/cm の電 界が発生した電流を臨界電流と定義した。2~7.5Tの直流外部 磁界を印加し、液体ヘリウム中で測定した。外部磁界の印加 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。

3. 結果および検討

測定された臨界電流をフィラメントの断面積で割って臨界電 流密度 J_cを求め、サンプル間の比較を行う。丸線に対してテ ープ線の臨界電流密度がどの程度向上したかを明らかにする ために、丸線のJ_cに対するテープ線の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。EO 方向および FO 方向のどちらの磁界中でも、 アスペクト比が高くなるに従って J_cが向上していることがわかる。 また、元の丸線の線径に依存していない。多芯線内のフィラメ ントに近いサンプルは、テープ線で丸線の 3.3 倍まで向上し、 フィラメントのアスペクト比が 9.2 にまで圧延された 08Tape4 で は、4.5 倍と大きく向上している。また、このグラフからは、アス ペクト比をより向上させることによって、さらに J_cが向上する可 能性が示されている。 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、FO 磁界印加時にも J_cが向上していることから、MgB₂結晶 粒間の電気的結合度の向上が考えられる。またこれに加えて、 印加磁界に対する異方性が観測されていることから、別の要 因も影響していることが考えられる。

4. まとめ

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。この結 果、EO方向および FO方向磁界中ともに、臨界電流密度が向 上した。J_cの向上率は、最大で、フィラメントのアスペクト比が 9.2のときに4.5倍に向上していた。アスペクト比をさらに上げる ことで、J_cがより向上する可能性が示された。また、元の丸線材 の臨界電流密度や直径に関わらず、フィラメントのアスペクト比 に依存して臨界電流密度が向上することを明らかにした。

参考文献

 Y. Fukushima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.41.

Commute	0.0			
Sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	$\phi 0.807$	1.011×0.55	1.574×0.322	
Filament dimention [mm]	\$\$\phi(0.415)	0.616×0.265	1.163×0.126	
Aspect ratio of a filament	1.0	1.0 2.3		
Connella	0.6			
Sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	\$ 0.585	0.701×0.426	0.988×0.276	
Filament dimention [mm]	\$ 0.306	0.419×0.200	0.687×0.116	
Aspect ratio of a filament	1.0	2.1	5.9	
Sampla	0.4			
sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	\$\$ 0.455	0.558×0.324	0.710×0.233	
Filament dimention [mm]	Ø 0.220	0.341×0.153	0.474×0.090	
Aspect ratio of a filament	1.0	2.2	5.3	

Table1 Parameters of MgB₂ samples

0.8



Fig. 1 Increase in critical current densities in MgB2 filament with high aspect ratio cross-section.under the 7T.

高アスペクト比断面をもつ MgB₂テープ線材の開発 2 —交流損失特性—

Development of MgB_2 tapes with high aspect-ratio cross-sections 2

- AC loss properties -

 川越 明史, 吉留 祐介, 若林 佑樹, 川畑 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 荘司, 松下 照男(九工大); 高橋 雅也, 岡田 道哉(日立)
 <u>WAKABAYASHI Yuki</u>, MATSUSHIMA Kensuke, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS);
 KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo, (Kyusyu Institute of Technology); TAKAHASHI Masaya, OKADA Michiya (HITACHI) E-mail: kawagoe@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

核融合装置や超伝導電力貯蔵装置用のコイルには、低損 失化と高安定化の両立、および低コスト化が必要である。本研 究では、低損失化と高安定化の両立を目指すために、高い断 面アスペクト比をもつ MgB2テープ線材の開発を行っている[1]。 本テープ線材は、丸線材を圧延したもので、低交流損失と高 臨界電流密度の両方の性能向上が期待できる。これまでに、 MgB2 多芯線をテープ形状にしたサンプルを試作し、丸線より も臨界電流密度が向上すること、結合損失が大幅に低減する ことを明らかにしている。ここでは、MgB2 フィラメントがテープ 形状に圧延されることによる効果を定量的に明らかにするため に、多芯線内のフィラメント1本を模擬した単芯線をサンプルと して磁化の測定を行った。

2. 試作線材と測定方法

今回用いた試作線材のパラメータを Table 1 に示す。直径 0.455mmの丸線材から圧延した細いテープ線が、多芯線内の フィラメントを模擬したサンプルである。この単芯線のフィラメン ト径は 0.22µm であり、多芯線フィラメント径 0.100~0.150µm に 近い。テープ線にする前の線径の影響を調べるために、太い 単芯線も用意した。本測定に用いたサンプルは、直径が 0.807mm、0.585mm、0.455mmの3種類の丸線と、それらの丸 線を圧延したアスペクト比の異なる2種類のテープ線で、計9 種類である。テープ線のアスペクト比は、2 と 4 になるように圧 延した。丸線を Wire とし、テープ線を Tape2、Tape4 とした。磁 化の測定は、ピックアップコイル法で磁化曲線を測定し、その 磁化曲線から磁化の履歴幅(</m>を求めた。印加磁界は、直 流バイアス磁界 2~5T に、振幅 0.2~0.3T の台形波を両振りで 重畳した磁界とした。このときの印加磁界の挿引速度は、 0.0167T/secとした。サンプルは、長さ60mmの短尺直線形状4 本を印加磁界に対し平行に並べ、それぞれは絶縁した。液体 ヘリウム中で測定した。外部磁界の印加方向は、線材幅広面 に対して平行(EO 方向)とした。

3.結果および検討

測定された 之M を臨界電流密度で割ったものを等価フィラメ ント径と定義し、その等価フィラメント径が丸線に対してどの程 度小さくなっているかを調べた。この等価フィラメント径がヒステ リシス損失の大きさを表す。テープ線の等価フィラメント径の丸 線に対する比率を縦軸に、横軸にフィラメントのアスペクト比を とったグラフを Fig.1 に示している。フィラメントのアスペクト比が 大きくなると、それにしたがって等価フィラメント径が小さくなっ ており、ヒステリシス損失が低減できていることがわかる。アスペ クト比が 9.2 のサンプルでは、丸線の約 1/3~1/4 程度にまで低 減している。なお、実線は、丸断面のフィラメントが面積を変え ずに矩形断面になったとして求めた理論曲線である。実験値 とよく一致しており、圧延の効果が予測通りであることがわか る。

4. まとめ

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、その磁化の測定を行った。この結果、EO 方 向磁界印加時に予想通りのヒステリシス損失低減効果が得ら れていることが実験的に確かめられた。

参考文献

 Y. Fukushima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.41.

6)	0.8			
Sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	$\phi 0.807$	1.011×0.55	1.574×0.322	
Filament dimention [mm]	\$\$\phi_0.415\$	0.616×0.265	1.163×0.126	
Aspect ratio of a filament	1.0	2.3	9.2	
Consta	0.6			
Sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	$\phi 0.585$	0.701×0.426	0.988×0.276	
Filament dimention [mm]	\$\$ 0.306	0.419×0.200	0.687×0.116	
Aspect ratio of a filament	1.0	2.1	5.9	
Comple	0.4			
Sample	Wire	Tape2	Tape4	
dimention [mm]	\$\$ 0.455	0.558×0.324	0.710×0.233	
Filament dimention [mm]	$\phi 0.220$	0.341×0.153	0.474×0.090	
Aspect ratio of a filament	1.0	2.2	5.3	

Table1 Parameters of MgB₂ samples



Fig. 1 Decrease in effective filament diameters in MgB₂ filament with high aspect-ratio cross-section.

粉体分離のための磁気分離システムの開発

Development of Magnetic Separation System for Powder Separation

<u>中井 裕樹</u>, 三島 史人; 秋山 庸子; 西嶋 茂宏(阪大) <u>NAKAI Yuki</u>, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University); E-mail: y-nakai@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

食品, 薬品, 工業製品などの生産ラインにおいて, 装置可 動部分や配管接合部分から生じる微小なステンレス粉 (SUS304)の混入が問題となっている. これらの SUS 微粒粉は 加工によるマルテンサイト変態を起こすことで強磁性を示すこ とから, 分離・除去のためには, 物質の磁気特性に着目した 磁気分離法の利用が効果的である.

混合粉体中に存在する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可能であるプロセ スが望ましい.そこで本研究では,乾式条件下での高勾配磁 気分離法(HGMS)の検討を行った.乾式 HGMS では,磁気フ ィルタの閉塞に伴う処理効率の低下が大きな問題となってお り,これまで実用化には至っていなかった^[1].本研究では,フ ィルタ閉塞低減のために①フィルタ構造の検討及び②分離装 置内フィルタ部へのガス送気の検討を行い,乾式 HGMS シス テムの処理効率向上を目指した.

2. 超伝導磁石を用いた乾式 HGMS 実験

2.1. 実験装置

分離実験を行うための粉体磁気分離装置を設計・製作した. Fig. 1に装置概略図を示す.本装置は,供給部分(Fig. 1 中①)と分離部分(Fig. 1 中②)から構成されている. 超伝導磁 石ボア内部に供給された粉体試料の内,磁性粒子のみが外 部磁場により磁化した磁気フィルタの近傍で選択的に捕捉さ れる. その際,流路側部からのガス送気により磁気フィルタに 堆積した常磁性粒子を剥離することで,フィルタ部の閉塞の 低減される仕組みとなっている.

2.2. 実験手法

常磁性を示すアルミナ粒子 50.0g(平均粒径 20 µ m)とマル テンサイト変態により強磁性を示す SUS304 粉 50.0mg(平均粒 径 75 µ m)を用意し,回転式ボールミルを用いてこれらを 60 分 間混合したものを実験試料として用いた.

まず,フィルタ構造の評価のために(i)5mm 角の磁気フィル タを平行に配置したもの,(ii)5mm 角の磁気フィルタを順に45° ずつ回転させて配置したもの,(iii) 5 メッシュ+3 メッシュフィル タ重ね合わせて配置したもの,という三つのフィルタ構造に対 して分離実験を行った.各フィルタ構造をFig.2に示す.

次に,(iii)のフィルタ条件に対してガス送気流量を(a)送気 無し,(b)120L/min,(c)300L/minと変化させ,分離実験を行っ た.これらの実験を行う際,試料の供給速度は 7.9g/min,超 伝導磁石による印加磁束密度は 2.0T で一定とした.

3. 結果·考察

実験結果を Table 1 に示す. いずれも測定誤差 4%を含む.

Table 1 Separation Efficiency for Each Experimental Condition

Filter Arrangement	(i)	(ii)	(iii)
Separation Efficiency	89%	98%	100%
Gas Flow Rate	(a)	(b)	(c)
Separation Efficiency	99%	100%	99%

この結果から,高い分離率を目指すためにはフィルタ空隙率の低いフィルタ構造が適していることが確認できた.











(ii) Alternate Arrangement



(iii) 5mesh + 3mesh Filter

Arrangement of

Filter Matrix

Fig.2

Fig.1 Schematic Illustration of Separation System



Fig.3 Coagulation on Filter Gas Flow Rate with (a)No blow, (b)120L/min, (c)300L/min

また,各送気流量に対するフィルタ閉塞状況を Fig. 3 に示 す.この結果から,ガス送気流量の増加に伴うフィルタ閉塞状 況の改善が確認できた.

4. まとめ

従来の乾式 HGMS において,処理効率低下の原因となっ ていたフィルタ閉塞に対する対策として①フィルタ構造,②窒 素ガス送気機構の両観点からの検討を行った.その結果, 95%を超える高い分離率を保ったまま,フィルタ閉塞状況の改 善に成功した.今後は,不純物含有率の低い試料,不純物 粒径の小さい試料,凝集性の高い粉体試料などに対しても高 効率で不純物分離可能な乾式磁気分離システムの開発を実 施する予定である.

参考文献

 F. Mishima, et al.: "Research and Development of Superconducting Magnetic Separation System for Powdered Products" IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 18, no. 2, pp. 824-827, 2004.

HTS バルク磁石を用いたドラム缶洗浄廃液磁気ろ過システム -開発状況と試験結果報告-

Magnetic filtration system using HTS- bulk magnet for wash water of drum

-Developmental status and experimental results-

三島 史人,秋山 庸子(阪大院工); 飯野 勝彦, 小竹 祥雅(日本板硝子エンジニアリング(株);

大西 徹造(中央産業(株); 小林 豊(JRD プロジェクト); 大西 豊 (関西ドラムセンター); 西嶋 茂宏 (阪大院工) <u>MISHIMA Fumihito</u>, AKIYAMA Yoko (Osaka Univ.), IINO Katuhiko, Kotake Yoshimasa (NSGE), OHNISHI Tetuzo(Chuo Sangyo CO.,LTD.), KOBAYASHI Yutaka(JRD project), OHNISHI Yutaka (Kansai Drum Center Joint Business Cooperatives) and

NISHIJIMA Shigehiro(Osaka Univ.)

E-mail: f-mishima@ see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

日本国内で年間100万トン排出されるドラム缶の洗浄廃水 の再利用をするために、磁気ろ過分離システムのパイロットプ ラントを作製した。洗浄するドラム缶は化学会社、石油会社、 食品会社、薬品会社等で使用されたもので、洗浄廃水は 種々の油分や薬品等を含んだ混合廃水である。

パイロットプラントの目標値として、廃水の COD(化学的酸素要求量)を現在の250~500ppm(主に250ppm)から100ppm 以下に浄化し、その処理能力は40トン/日とした。将来的には 工業用水並の10ppm 以下とし、ドラム缶のすすぎ水として 100%利用を目指す。

2. 磁気ろ過システムの構成・ろ過方式

磁気ろ過システムの基本構成は、①磁化シーディング装置と、磁気ろ過部として②永久磁石を用いた磁気ろ過アシスト 沈殿装置、③HTS バルク磁石を用いた精密磁気ろ過装置の 3装置で構成される^{1,2}。その基本概念図を図1に示す。ドラム 缶洗浄廃水(pH11~12付近)は磁化シーディング装置内で、 凝集補助剤(ポリ硫酸第二鉄)でpH調整後、強磁性粒子と高 分子凝集剤を添加され、そのCOD成分は強磁性フロックとな る。そして、磁気ろ過アシスト沈殿装置に入り、そこで捕捉でき なかった小さなフロックは精密磁気ろ過装置に入り、最終的に 浄化水となる。

3. 試験方法と結果

試験期間として、装置の設置・調整後の11月後半~3月 上旬まで行った。ろ過方式に記載した流れで、廃水は連続運 転で毎分50~80Lで2時間処理された。PID制御でpH調整 (6.5)を行ったので、処理量に変動がある。強磁性粒子を毎 分125g、高分子凝集剤を毎分200cc添加した。そして磁気ろ 過処理水の COD 測定(JISK0102-17)を行った。その試験結 果を図2に示す。

試験結果より、ドラム缶洗浄廃水のCODを100ppm以下に 磁気ろ過処理が可能なことが確認できた。磁気アシスト沈殿 装置で捕捉されなかった小さいフロックは、HTS バルク磁石を 用いた精密磁気ろ過装置に捕捉されていることが確認された。

4. まとめ

本プロジェクトにおいて、磁気ろ過処理水を COD100ppm 以下にする目標値を達成した。現実的にドラム缶洗浄後のす すぎ水に用いるには、将来目標であるCOD10ppm 以下にす る必要があると考える。

本パイロットプラントはドラム缶洗浄廃液のみならず、他の 産業廃水処理にも十分適用が可能と考える。特に本磁気ろ 過部は、液中の強磁性粉について精密に高速大量にろ過を 必要とする分野に応用が可能であると思われる。

謝辞

本研究の一部は環境省、平成20年度次世代循環型社会形 成推進技術基盤整備事業補 "磁気ろ過器によるドラム缶洗 浄水のリサイクル"の研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- F. Mishima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.121
- F. Mishima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.220



Fig.2 Test result of the COD value before and after the magnetic filtration.



Fig.1 Schematic illustration of the magnetic filtration system.

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)

<u>HAYASHI Shingo</u>, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.) E-mail: hayashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

製品の品質向上のために、食品や工業製品製造過程で 配管等から高粘性流体中に混入する金属磨耗粉の除去が求 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、今まで有効な分離技術は確立 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。 これより分離に磁気分離法を用いることを考えた。高粘性流 体からの高速大量、高効率の分離を可能とするために、超電 導磁石と磁気フィルタを用いた高勾配磁気分離(HGMS)技術 を組み合わせることにより、強力な磁気力を得られる磁気分離 システムの開発を試みた。

2.実験

工業原料の模擬試料として、粘度 1Pa・s の PVA(ポリビニ ルアルコール)溶液に、強加工された SUS304 粉(平均粒径: 50 µ m)を0.1g/1の濃度で分散させたものを用いた。SUS 粉の 分散には撹拌翼を用いた。

装置の概念図を Fig.1 に示す。この装置はポンプで超電 導磁石のボア内に設置した磁気分離装置に溶液を流すとい う設計になっている。分離装置内には磁気フィルターが設置 されており、磁気フィルターは直径 50mmの円形で、厚さ1mm、 線径1mmである。目の細かさは、5、3、2メッシュの3種類のメ ッシュ数のフィルターを用意した。また、フィルター間にはスペ ーサーが挿入されており、フィルター間の間隔は15mmになっ ている。



Fig.1 A schematic diagram of magnetic separation apparatus of superconducting electromagnet

フィルター枚数を10枚とし、磁気フィルターのメッシュ数を5、 3、2メッシュとした条件で実験を行った。流速を2.5×10⁻²m/s とし、4Lの模擬試料を流した。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で実施した。

3. 結果と考察

Figure.2 は 5 メッシュでの磁気分離実験後の磁気フィルターに付着した SUS304 強加工粉の写真である。(a)は高粘性流体の流入口に最も近い磁気フィルター、(b)は流出口の流出口に最も近い磁気フィルターである。(a)には多くの SUS 粉の付着を確認することができたが、(b)ではごく少量しか SUS 粉

が付着していなかった。分離率を増加させる手段としてフィル ター枚数を増やすことが考えられるが、流出口に近い磁気フ ィルターにはごく少量しか SUS 粉が付着していなかったことか ら、この実験条件下では磁気フィルターを増やしても分離率 に大幅な向上は見込めないことが示唆される。しかし、さらに 流速が速く、粘度の高い試料を用いた厳しい条件では、フィ ルター枚数を増やすことで分離率の向上を望めると考えられ る。

Figure.3 に実験で測定した分離率と数値計算で求めた分 離率の理論値の結果を示す。この結果より、5 メッシュ時では 74%の分離率を達成できた。また、3 メッシュ時は分離率が 69%、 2メッシュ時は44%であることから、目の粗い磁気フィルターより 目の細かい磁気フィルターの方が分離率が良いことが確認で きた。理論値の分離率は 2、3、5 メッシュ時でそれぞれ 76%、 89%、98%となり、実験での値より高くなっている。この理由とし て、理論値では複数のフィルターを用いたことによる前段のフ ィルターによる後段への流れの影響を考慮していないことが 考えられる。

今後、実用化に向けてさらに高粘度の流体中に存在する さらに小さな粒子が分離対象になるため、分離率を向上させ るための検討が必要となってくる。そのための手段として、メッ シュ数、磁性細線の線径・形状を改良することにより、分離率 の向上をはかっていく。





(a)Magnetic filter adjacent

to influent area

(b)Magnetic filter adjacent to effluent area

Fig.2 A picture of SUS particle attached to magnetic filter



Fig.3 Separation efficiency of SUS particle with the number of magnetic filter

磁化活性汚泥法を活用した化学めっき廃液の資源回収・浄化プロセスの検討

Development of Purification and Material Recycling Process

of Chemical Plating Wastewater by Using Magnetic Activated Sludge Process

<u>酒井 保藏</u>(宇都宮大), 伊藤 繁則, 大和 弘之(栃木県産業技術センター), 桑名 朗, 島津 義政, 鷹觜 勲 (桑名商事(株)), 鈴木 松雄, 安野 光則, 宮本 真考 (パルシステム(株)) <u>SAKAI Yasuzo</u> (Utsunomiya Univ.), ITO Shigenori, YAMATO Hiroyuki (Ind. Tech. Center of Tochigi Pref.), KUWANA Akira, SHIMAZU Yoshimasa, TAKANOHASHI Isao (Kuwana Co. ltd.), SUZUKI Matsuo, YASUNO Mitsunori, MIYAMOTO Masataka (Pal System Inc.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

化学めっき廃液は高濃度の重金属,有機酸,リン,アンモ ニウムイオンを含み処理困難なため処分業者に委託されてい る。工場内での無害化処理は,重金属,リンは電解や凝集沈 殿法で回収・除去できるが,高濃度の有機酸,アンモニウムイ オンを活性汚泥法などで除去するには維持管理の難しさや 大量に発生する汚泥の脱水処理など手間とコストがかかる。 我々は磁化活性汚泥法を適用しめっき廃液の資源回収,浄 化プロセスを検討した。

化学めっきは還元剤を利用しためっき法であり、金属を高 濃度で含んだまま廃棄される。また有機酸約 20~30g/L、リン 約 30 g/L、アンモニウムイオン約 9 g/Lを含む。このようなめっ き廃液は 1 企業当たり 1 日数百 L~数 m³の規模で 1000 企 業以上から排出されていると推察される。廃液中のニッケルな どの金属は電解処理等によって回収でき、リンは凝集沈殿法 により除去できる。しかしながら、高濃度の有機酸は生物処理 等による除去が必要である。廃水量が少量であるため、管理 が簡単で汚泥発生の少ない生物処理法が適する。

本研究では、化学めっき廃液の資源回収・浄化処理システムを磁化活性汚泥法を活用して構築することを目標として、金属回収後の廃液の磁化活性汚泥法による浄化を検討した。

2. 実験方法

廃液は実際のめっき工場廃液を電気分解によりニッケル回 収後用いた。ニッケル回収後の廃液組成の概要を Table 1 に 示す。廃液は塩濃度が高く、そのままでは微生物処理が困難 なため、10 倍希釈して実験に用いた。この廃水を 2 L/d の流 量で連続処理した。また 262 日目から 2.5 L/d、298 日目から 3 L/d に負荷を増加させて水処理の経過を観察した。

汚泥の磁気分離装置は永久磁石を用いたドラムタイプのものを用いた。活性汚泥曝気槽は5Lである。種汚泥は栃木県 県央浄化センターより提供を受けた。初期汚泥濃度は 1.5 g/L(乾燥重量)とし、四三酸化鉄(関東化学製)を 1.5 g/L と なるように投入し、磁気分離により汚泥全量を返送しながら原 則として余剰汚泥引抜きなしで水処理をおこなった。汚泥濃 度の上昇に伴って、強磁性粉を微生物量に対して 1:1 になる よう適宜追加した。流出液中の有機酸濃度をイオンクロマトグ ラフ(ダイオネクス DX300)により測定した。

3. 結果と考察

全体の処理スキームとして Fig.1 のようなフローを考えた。 本研究では1段目の処理を終えた実廃液を10倍希釈したものを処理対象として3段目のリン除去プロセスに引き渡せるレベルの処理水を得ることが目的である。2段目のプロセスに磁化活性汚泥法を用いることで汚泥沈降性の管理と汚泥濃度管理を不要としプロセス全体の維持管理の手間を大幅に軽減することができる。通常の活性汚泥法では余剰汚泥が大量に発生し、濃縮汚泥濃度が1%の場合は廃液1m³処理につき Table 1. Composition of Chemical Plating Wastewater after Removing Ni Ion and before 10-Fold Dilution.

Ni ion:	<0.2 g/L
Organic Acid:	30 g/L
Total-P:	27 g/L
NH3-N:	7 g/L
BOD:	16 g/L





Fig.1. Process of Purification and Material Recycling of Chemical Plating Wastewater.

1~1.5 m³発生すると予想され, 脱水処理をおこなわなければ 廃液より多い汚泥懸濁液が発生すると想定された。従って, 磁化活性汚泥法により余剰汚泥発生を抑制することがこのプ ロセスの実用性にとって非常に重要であると考えられる。

300 日以上の実験期間中,汚泥の引抜きや濃度管理は不 要であった。強磁性粉の流出もほとんどなく汚泥濃度が安定 したあとは磁性粉を追加する必要はなかった。262 日目以降 は滞留時間を短縮して負荷を増加させたが,MLSS 濃度が 10 g/Lを越えても汚泥の磁気分離は問題なかった。流出水中の 有機酸濃度はほぼ 1 mg/L 以下を維持し,分解率はほぼ 100%と考えられる。流入 BOD 1600 mg/L に対して,処理後の BOD は 350 mg/L と約 80%の除去率であった。流出水中には 非凝集性の微生物が観察され,これをろ過により取り除いた BOD は 50 mg/L 以下であった。流出水はこの微生物により若 干白濁しているのが観察された。

4. おわりに

本研究により化学めっき廃液処理プロセスに磁化活性汚泥 法を適用し生物処理の管理の簡易化や余剰汚泥の負担を軽 減した水処理プロセス構築の可能性が確かめられた。

謝辞:本研究は H.20 年度栃木県プロジェクト形成支援事業の支援を受けた。また種汚泥は(財)栃木県建設総合技術 センター県央浄化センターから提供を受けた。ここに謝意を 表します。

磁化活性汚泥法のシーケンシャル制御による下水の窒素除去 Nitrogen Removal from Municipal Sewage by Sequential Operation of Magnetic Activated Sludge Process

渡辺 俊介, 酒井 保藏, 小林 力, 甘 強 (宇都宮大);ミヒル ラル サハ(ダッカ大) WATANABE Shunsuke, SAKAI Yasuzo, KOBAYASHI Chikara, Gan Qiang (Utsunomiya Univ.); Mihir Lal SAHA (Dhaka Univ.) E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥法による下水の窒素除去プロセスの確立を 目標として、間欠曝気による生物学的硝化・脱窒素プロセス のメカニズムを検討した。また、実下水を15m³/d 浄化処理す る磁化活性汚泥パイロットプラントを用いて、間欠曝気のタイミ ングに合わせて下水の流入制御をおこなうことによる、窒素除 去率の向上、安定化を検討した。

磁化活性汚泥法は、活性汚泥微生物にマグネタイト (Fe₃O₄)を吸着させ、磁気分離を適用した生物学的水処理法 である。現在、パイロットプラントでの実証試験をおこなってい るが、下水処理では5年間にわたり余剰汚泥ゼロでの運転が 可能であった。近年、窒素成分除去など高度処理への要求 が高いことから下水中の NH₃-N の除去スキームを検討してき た。曝気槽を間欠曝気することで高酸素(好気)条件で NH₃-N を NO₃に酸化し、低酸素(嫌気)条件で NO₃を N₂還元して脱 窒素できることを報告した。^{1,2,3)}しかしながら脱窒素率は 70% 程度で、大きな変動も見られた。そこで本発表では(1)間欠曝 気による生物学的硝化・脱窒素プロセスのメカニズムを検討 する、(2)間欠曝気のタイミングに合わせて下水流入を制御す る、硝化反応、脱窒素反応の促進をめざすシーケンシャル制 御による窒素除去率の向上を目指した検討をおこなった。

2. 実験方法

本実験は市水再生センターに設置された磁化活性汚泥法 パイロットプラント(Fig.1,処理量15 m³/d,HRT 12 時間)と,実 下水を用いた。必要に応じて流入部分に0.2m³の前段を設け 嫌気槽または好気槽とし,後段(7.6m³)は間欠曝気または連 続曝気を行なった。後段から流出した汚泥懸濁液は磁気分 離と沈降分離併用で固液分離されるハイブリッド方式の磁化 活性汚泥法である。本装置を利用して曝気タイミングに合わ せた下水流入をおこない汚濁成分の消長を計測した。

また, 好気時における NH_3 から NO_3 への酸化, 嫌気時にお ける NO_3 から N_2 への還元の様子をバッチ実験によって確かめ た。バッチ 実 験 では下水と濃 縮 磁 化 汚 泥(MLVSS: 6000mg/L)を曝気槽 10Lに入れ, 間欠曝気の1 サイクルにお ける DO, NH_3 , NO_3 , CODcr 等の経時変化を測定した。

3.結果と考察

前処理槽に好気槽を用い後段を連続曝気した結果,この 期間中の流入下水の平均の溶解 CODcr:54 mg/L, NH3-N:20mg/L に対し,処理水の平均の溶解 CODcr:14 mg/L(除去率75%),NH3-N:1mg/L(硝化率93%)であり有機物 除去と硝化については良好な結果が得られた。しかし,後段 を連続曝気槽としているため,処理水の硝酸濃度が平均 18mg/L となり,脱窒素はほとんどされていなかった。そこで後 段を間欠曝気にしてさらに検討を進めた。

下水の流入を一定流量でおこないながら間欠曝気をおこ なった従来の結果では平均 70%の除去率が得られたが NH3-Nが10mg/L付近に上昇したり, NO3-Nが20mg/L付近 に上昇したりすることがあり,安定性に欠ける課題が残された。 そこで,嫌気条件のタイミングで下水を流入させるシーケンシ ャル制御を導入した。窒素除去率については,有機物除去率 は平均73%,窒素除去率は平均66%という結果が得られた。ま た,硝化率については平均96%と高い値が得られた。嫌気条 件で下水を流入させることで有機物を水素供与体として脱窒 素反応が進行しやすく,また好気条件に移行したときにはDO を低下させる因子となる有機物がほぼ分解されているため硝 化反応がより進みやすいと考えられた。

4. まとめ

磁化活性汚泥法においては好気槽を前段に置く事によっ て有機物の分解と平行して硝化を進めることができることが分 かった。また、下水流入を曝気のタイミングに合わせておこな うシーケンシャル制御による窒素除去は硝化率については高 い値が得られた。今後は、さらに脱窒率を高めるため、条件 検討をパイロットプラントで進めたいと考える。

謝辞:本研究は科研費基盤 (A)18201011, (A)21241020 の支援を受けた。

参考文献

- S. Sasaki et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 70 (2004) p.233
- S. Watanabe et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78 (2008) p.122
- S. Watanabe et al.: Abstract of the 43rd Annual Conference of JSWE (2009) p.148



Fig.1 Experimental apparatus of MAS process pilot plant

超伝導バルク磁石を用いた 無電解ニッケルめっき廃液の磁気分離

Magnetic Separation by Superconducting Bulk Magnet for Waste Solution from Nickel Plating Process

<u>木村 貴史</u>,金山 隼人,田中 克昌,渡邊 直登,福井 聡,小川 純,佐藤 孝雄,岡 徹雄(新潟大);寺澤 俊久(イムラ材研); 辻村 盛夫(愛知技研)

<u>KIMURA Takafumi</u>,KANAYAMA Hayato,TANAKA Katsuyoshi,WATANABE Naoto,FUKUI Satoshi,OGAWA Jun, SATOH Takao,OKA Tetsuo(Niigata Univ.);TERASAWA Toshihisa(IMRA Material);TSUJIMURA Morio(Aichigiken CO.,Ltd) E-mail: f09e074j@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

無電解ニッケルめっき廃液の発生量は、年間約 125,000t にも達すると言われている。このうちの約3分の2は委託を受 けた専門業者により処理されているが、資源活用としての観 点からのリサイクルは限られている。そのため、ニッケルを回 収し再利用するプロセスの確立が望まれている[1]。

本研究では無電解ニッケルめっき廃液中のニッケルを金属 ニッケルとして沈殿させることによって磁性を持たせ,超伝導 バルク磁石の強力な磁場を用いて磁気分離を行った。

2. 実験方法

無電解ニッケルめっき廃液に攪拌しながら NaOH を約 pH10.30 になるまで加える。次に攪拌を止め、その溶液を約 90℃で暖めると気泡が発生し、約 60 分後にニッケルを含む磁 性を帯びた灰色の沈殿が析出する。Fig.1 は、沈殿処理後の 溶液を超伝導バルク磁石に近づけている様子である。

この実験ではパルス着磁型超伝導バルク対向磁極装置 (Fig.2)と交替型磁気分離装置(Fig.3)を用いた。超伝導バル ク磁石は Sm123 系で ϕ 65mm の大きさのものを使用し,パル ス着磁法によりチャンバー表面(バルク磁石表面から 3mm 離 れた位置)にそれぞれ左極で最大 1.86T (38K),右極で 2.00T (37K)の磁場を捕捉させた。交替型磁気分離装置の導 管には、 ϕ 1mm と ϕ 3mm の磁性ステンレス球(SUS430)をそれ ぞれ体積率 41.6%, 42.2%で充填し球フィルタとして応用した。 この磁気分離装置は一定期間ごとに可動部が移動することに より、磁気分離とフィルタ洗浄の二つの動作を交替で交互に 行うことができる。これにより、連続的な磁気分離が可能とな る。

3. 実験結果及び検討

Fig.4 に φ 1mm と φ 3mm のステンレス球におけるニッケル の流量一分離率特性を示す。分離率に関しては ICP 発光分 析によって,処理液の上澄みのニッケル濃度を達成値とし, 磁気分離後の溶液のニッケル濃度とを比較し評価した。結果 から、φ 1mm で流量 1.35L/min 以下で 90%以上の分離率を達 成した。また、フィルタ径によって明確な差が見られ、φ 1mm フィルタのほうが有効であることが言える。

4. まとめ

参考文献

1. 総合環境企業ミヤマ株式会社ホームページ

http://www.miyama.net/activities/recycle/case/case.html



Fig.1 Deposition adsorbed by bulk magnet



Fig.2 A face-to-face type superconducting magnetic field generator $% \left[{{{\rm{Fig.2}}} \right]$



Fig.3 A view of alternate magnetic separation system





超電導磁石を用いた水生生物の磁気分離に関する基礎的研究

Fundamental study on magnetic separation of aquatic organisms using superconducting magnet

<u>坂口 芙美</u>、三島 史人、秋山 庸子、西嶋 茂宏(阪大)

<u>SAKAGUCHI Fumi</u>, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka Univ.) E-mail:f-sakaguchi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、外来水生生物による海洋生態系の破壊や撹乱など の被害が報告されており、その対策として、水生生物を殺滅 あるいは除去する処理技術の開発が求められている。そこで 本研究では、高速大量処理が可能でコンパクトな水生生物 の磁気分離装置の開発を試みた。

ここでは、磁気シーディングによって強磁性を付与した水 生生物を高速・高効率に捕獲する磁気分離装置を設計する ために、粒子軌跡シミュレーションをもとにシステムの検討を 行った。

2. 計算体系

高速処理が可能な磁気分離装置を設計するために、粒子 軌跡シミュレーションを行い、システムについて検討した。

まず、解析ソフトの ANSYS[®]Ver.10.0(ANSYS. Inc.)を用い、 システムの磁場強度 Hおよび流体の流速 v_c の分布を解析し た。解析結果を(1)、(2)式に代入して、ある節点での磁気力 F_M とドラッグ力 F_b を求めた。磁気力とドラッグ力の合力を運動 方程式に代入して粒子の加速度、速度、および位置を求め た。これを繰り返すことで粒子軌跡を求めた。粒子は、水生生 物(直径 10 μ m)にマグネタイト(粒径 0.5 μ m)の粒子 1 個が 付着したモデルを粒子 A、凝集剤を用いて形成したフロック (直径 0.5mm)にマグネタイトの粒子 100 個が付着したモデル を粒子 B とした。

$$\boldsymbol{F}_{M} = \frac{1}{2} \boldsymbol{V}_{p} \operatorname{grad}(\boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{H}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F}_{D} = 6\pi a \,\eta(\boldsymbol{v}_{f} - \boldsymbol{v}_{p}) \tag{2}$$

 V_n :粒子中の強磁性粒子の総体積、M:磁化、

a:粒子の半径、η:流体の粘性、V_p:粒子の流速

超電導磁石(ボア中心磁場 2T)のボアを通過する流路中 に磁気フィルターを設置し、フロックを流速 0.2m/s で流入さ せた。磁気フィルターは、磁性細線(亜鉛引織網、¢0.63mm、 線間隔 3mm)を用いた格子状メッシュフィルタの間にスペー サー(厚さ10mm)を挟んで重ね合わせたものである。Fig.1 に 計算体系の概要図を示す。



Fig.1 A schematic view of magnetic separation system

3. 結果

粒子軌跡シミュレーションから、粒子 A は 1 本の磁性細線 の周囲 0.39mm の範囲で捕捉される可能性(捕獲半径)が 示され、磁性細線の比捕獲半径 ζ (=捕獲半径/磁性細線 の半径)が 1.2 であった。同様に粒子 B の捕獲半径は 0.35mm、比捕獲半径 ζ は 1.1 であった。これらの結果から計 算したフィルター1枚あたりの吸収係数 $\alpha_0 \varepsilon$ (3)式に代入し、 フィルターn枚による粒子の回収率 R [%]を計算した。フィル ター間の粒子濃度分布は均一であると仮定した。

$$R = \left[1 - \left(1 - \alpha_0\right)^n\right] \times 100 \tag{3}$$

フィルターの枚数と回収率との関係を Fig.2 に示す。フィル ター8 枚のとき粒子 A の回収率は 99%、粒子 B では 98%と なり、どちらの場合も高効率に回収される可能性が示された。 しかし、超電導磁石を用いた磁気分離実験では、粒子 A の モデルとした凝集剤なしの場合に磁気シーディングが成功し た水生生物はほぼ 100%回収され、一方で、粒子 Bのモデル である凝集剤を用いてフロックを形成した場合には、フロック の流出がみられ、この結果は計算から求めた高い回収率と矛 盾する。その原因として、フロックがフィルターに堆積すること で回収率が低下していくことや、フロック同士がさらに凝集し てフィルターに捕獲されにくくなることが考えられる。



Fig.2 The relationship between the number of filters and recovery rate[%]

4. まとめ

粒子軌跡シミュレーションおよび回収率計算から、粒子を 高効率に回収できる可能性が示された。しかし、フィルターへ の粒子の堆積による回収率の低下を考慮すると、凝集剤を 低減させてフロックの体積を低下させる必要があると考えられ る。また、フロックの体積や含水率を低くできる凝集剤の種類 についても検討し、汚泥処理のコスト削減を図る予定である。

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

<u>植田 浩史</u>,石山 敦士(早大);我妻 洸,古瀬 充穂,淵野 修一郎(産総研);柁川 一弘(九大);小泉 達雄(住重) <u>UEDA Hiroshi,</u> 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、捕捉されたビーズは、磁場をゼロにしても、残留磁気に 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捉されたままで、回収され難くな 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 方法でナノビーズの回収率の改善を試みたので報告する。

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 LRC の直 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。我々が今提案している 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 を作り出す、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. 消磁回路の原理および仕様

Fig. 2に示すような付加回路を用意する。このコイルLに対 して、直流電源E、スイッチS1、スイッチS2を順に直列に接続 し、これらのスイッチS1及びS2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、 電磁フィルターを励磁する。この状態から電磁フィルターの作 用を停止してコイルを消磁し、磁気フィルター及び磁気ビーズ を消磁するときには、このまま所定の電流まで超電導マグネッ トを減磁する。その後スイッチS3のみを閉じ、保護抵抗R₀を 介してコイルL内の電流をL-R₀の閉回路に転流させ、次いで スイッチS1を開放し、超電導コイルLへの通電を完全に停止 する。更にその後同スイッチS2を開くと共にスイッチS4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。

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



Fig. 1 HGMS for Medical Application.



Fig. 2 Demagnetization *LRC* circuits added to superconducting magnet to improve the recovery ratio of magnetic nano-beads.

1 A 程度とする, 3) 減衰時間は 60~30 秒程度とする, 4) 消 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に決定するこ とになる。

この超電導マグネットを利用した消磁回路を付加することで、磁気ビーズ回収率の大幅改善の達成を目指す。

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. Agatusma, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.78, p.126 (2007).
- 4. K. Agatusma, 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).

医薬用たんぱく質の高速分離・精製・回収用アフィニティー磁性ナノビーズ Affinity Magnetic nano-beads of High Gradient Magnetic Separation System

for Trapping Immunoglobulin in Serum

我妻 洸, 淵野 修一郎, 井村 知弘, 古瀬 充穂(産総研);<u>植田 浩史</u>, 石山 敦士(早大); 柁川 一弘(九大);三宅 新一, 五十嵐 弘(大陽日酸) AGATSUMA Koh, FUCHINO Syuichiro, IMURA Tomohiro, FURUSE Mitsuho (AIST); <u>UEDA Hiroshi</u>, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); MIYAKE Shinichi, GARASHI Hiroshi (Taiyo Nippon Sanso)

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

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 気分離システムを応用し,既存技術では,分離できない約1.5 ミクロン以下の磁性ナノビーズを,超電導マグネットを用いるこ とにより高勾配磁気分離で効率よく分離・精製できることを実 験的に示した[1]。磁性ナノビーズの表面に抗体と特異的に 結合するアフィニティー物質を付けることによって,抗体の連 続・大量・高速の分離・精製が可能になる。現在,アフィニティ 一物質として,主にタンパク質系リガンドのプロテイン A が用 いられているが,非常に高価で,免疫グロブリンG(IgG)としか 結合しない。これに対してIgG, IgM, IgAに対しても優れた結 合特性を示し,かつ,プロテイン A の約百分の一の価格で, 高機能なリガンドとして機能するバイオサーファクタント(BS) を用いたアフィニティー磁性ナノビーズの作製に成功したの で報告する。

2. マンノシル・エリスリトール・リピッド(MEL)

-般に, 微生物によって菌体外に生産される両親媒性脂 質である BS は,これまで十数種類生産が報告されている。代 表的なものとして,1) 糖型,2) アミノ酸型,3) 有機酸型,4) 高 分子型などがある。一部の BS は,既に食洗機用洗剤(ソホロ リピッド), 化粧品素材(サーファクチン)等として実用化されて いる。BSは、優れた界面活性と生体・環境適合性を併せ持つ ため, 新素材・材料として注目されている。特に, 酵母によっ て生産されるマンノシル・エリスリトール・リピッド(MEL)は、微 生物生産性が高く,特に抗微生物活性に加え,ヒト白血病細 胞やメラノーマ細胞等に対して抗腫瘍・分化誘導活性を示す。 また,抗体やレクチン等に対して特異的に結合する(結合定 数:10⁶ M⁻¹)。特に IgG, IgM, IgA に対しては,既存リガンドに 比べて優れた結合特性を示し(プロテインAに比べて約4倍 の親和性を示す)[3], 安価かつ高機能なリガンドとして, プロ テインAでは得られない高い有効性がある。一方,従来より抗 体を捕捉・分離する手法としてアフィニティー・クロマトグラフィ ー法を用いて行われており, その際に MEL を用いて抗体を 捕捉・分離することが行われている。このアフィニティー・クロ マトグラフィー法を用いるときには、分離用のカラムの表面に MEL を固定して、IgG を分離しようとすると、その分離効率は プロテイン A の約7分の1に低下してしまう。これはカラム担 体に MEL を固定しても、分離効率はカラム担体の表面の細 孔などの物性に依存するため低下すると考えられる。

本研究では、磁性ナノビーズの表面に付けるアフィニティ ー物質として、上記のような特性を備え、各種の用途に広く用 いられて、価格が数千円~数万円/kg 程度と非常に安価であ り、大豆油から作られる MEL を用いる。そして、MEL の欠点 である分離効率がプロテインAの約7分の1であるという問題 を、超電導による高勾配磁気分離を用いれば、効率良く磁気 ビーズを回収できるため、全体として極めて効率良く抗体を捕 捉・分離をすることで解決できると考える。今回は、MEL を用 いたアフィニティー磁性ナノビーズの作製を試みた。

3. 実験

3.1 MEL-A 導入量と各種タンパク質結合量の関係

実験条件は Table 1 の Test 1 に示した通りである。実験結 果を Fig. 1 に示す。MEL-A 導入量の増加に伴い、疎水性タ ンパク質である HSA 結合量が減少した。このことから、磁気ビ ーズ上の MEL-A が固定化され、磁気ビーズの非特異的結合 が抑制されることがわかった。また、MEL-A の導入量が 5 mL の際に、系全体中の IgG(0.05 mg)の約半分が MEL-A 固定 化磁気ビーズに結合した。今後の検討では、MEL-A の導入 量を 5 mL とした。

3.2 IgG 結合量とIgG 濃度の関係

実験条件は Table 1 の Test 2 に示した通りである。実験結 果を Fig. 2 に示す。IgG 濃度が 1 mg/mL 以下と, 1 mg/mL 以 上では結合様式が異なることが判明した。1 mg/mL 以下の場 合, Langmuir 型の結合をしており, 1 mg/mL 以上の場合, Freundrich 型の結合をしていると考えられる。なお, Langmuir 型の結合をしていると考えた場合, その結合定数は 2.9 x 10⁶ M⁻¹となり, 高いアフィニティーを示した。

参考文献

- 1. K. Agatsuma, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.77, p.132 (2007).
- 2. T. Imura, et al.: *Journal of Ole Science*, vol.57, pp.415-422 (2008).
- 3. T. Imura, et al.: *Biotechnol Lett*, vol.29, pp.865-870 (2007).

Table 1 Experimental conditions				
	Test 1	Test 2		
担体量	40 mg			
MEL-A 固定化方法	200 rpm, 1 h, インキュベーション			
MEL-A 導入量	1 – 5 mL	5 mL		
HSA 濃度	1 mg/mL			
HSA ブロッキング回数	3			
IgG 濃度	0.05 mg/mL	0.05 - 3 mg/mL		
タンパク質導入量	1 mL			
分析方法	GPC			

Table 1 Experimental conditions



Fig. 2 Experimental results. (a) Relationship between amount of MEL-A and binding of protein. (b) Relationship between binding and concentration of IgG.

ナノ磁気ビーズを用いた血液中水銀の磁気分離による浄化

Research on purification by magnetic separation of mercury in blood using nano magnetic beads

<u>岡本</u>貴之,三浦大介,伊藤大佐(首都大);竹内 道広(駒沢腎クリニック) OKAMOTO Takayuki, MIURA Osuke, ITO Daisuke(TMU);TAKEUCHI Michihiro(KOMAZAWA JIN CLINIC) E-mail: takayuki_1985_1106@yahoo.co.jp

1. はじめに

水銀は金の採掘, 蛍光灯や電池などに使用され, このとき の処理法を誤ると, 水銀が水に溶け出し, 川や海を汚染する。 その結果, 近年, 水銀による魚介類の汚染が深刻になってき ている。そして自然界の食物連鎖により濃縮された形で人体 に取り込まれている。また, これを人が食べると体内から自然 に取り除かれる半減期は約 60 日と非常に長いため, 体内に 蓄積されやすい。魚を多く食べる国では健康被害も報告され, 人体から水銀を除去する研究が必要とされている。

2. 目的

現在,水銀を体内から除去する効果的な方法がない。 我々は人工透析装置のダイアライザー(透析器)の部分を磁気 分離装置に置き換え,磁性を持ち,水銀のみを選択的に吸 着する磁気ビーズを用いた磁気分離により水銀を体内から浄 化することを目的として研究を進めている。本研究では,開発 したナノサイズ磁気ビーズの性能評価を行った。

3. 実験方法

開発したナノサイズ磁気ビーズを Fig.1 に示す。このビーズ の大きさは約100nm である。このビーズには水銀と特異的に 結合しやすい硫黄を含む SH 基を結合手として用いた。

磁気ビーズが磁気分離されることを確認するため SQUID 磁 化測定により磁気ビーズとメチル水銀の磁化特性を求めた。

濃度 0.1~20ppm のメチル水銀溶液を用意し,各濃度のメチル水銀溶液 1ml に対し磁気ビーズ溶液(磁気ビーズは濃度 4mg/ml の磁気ビーズ溶液として使用した)0.2ml を加え,攪拌を15分,湯煎を40℃で2分,磁気分離を5分行い,磁気分離したメチル水銀と磁気ビーズの混合溶液の上澄みを適量採り水銀分析装置(マーキュリー/MA-1S)により分析し,磁気ビーズ 1g あたりの水銀吸着量を算出した。



Fig. 1 Nano magnetic beads

4. 結果と検討

Fig.2 に磁気ビーズの磁化特性を Fig.3 にメチル水銀の磁 化特性を示す。磁気ビーズは強磁性をメチル水銀は弱い反 磁性を示した。これらの結果から磁気ビーズだけを磁気分離 できることが分かった。

Fig.4 に濃度を変化させたときの磁気ビーズ 1g あたりの水 銀吸着量を示す。その結果,磁気ビーズが 1g あたりに吸着で きる水銀量は 6.29[mg]前後で飽和することが分かった。



Fif.2 Magnetization of magnetic beads



Fig.3 Magnetization of methyllmercury



5. まとめ

水銀を選択的に吸着する磁気ビーズを開発し,水銀吸着 特性について評価した。この結果,設計どおり磁気ビーズがメ チル水銀を吸着することが分かった。今後,この磁気ビーズ の性能向上および血漿中の特性や超伝導磁石を用いた高勾 配磁気分離の適用を検討したい。

謝辞

水銀の濃度測定をする上で,実験に協力して頂き,さらに 研究を進める上で貴重な助言を下さった(地方独立行政法人) 東京都立産業技術研究センターの山崎正夫氏に深く感謝い たします。さらに,本研究で開発した磁気ビーズを作製して下 さったマグナビート(株)の大西徳幸氏に謝意を表します。

参考文献

M. Andac, S. Mirel, S. Senel, R. Say, A. Ersoz, A. Denizli "Ion-imprinted beads for molecular recognition based mercury removal from human serum" International Journal of Biological Macromolecules, **40** (2007). 159–166

多芯テープ線材の活用による超伝導コイルの性能向上 Improvement of coil performances by use of multifilamentary superconducting tapes

古別府 正, 星平 祐吾, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大学) <u>FURUBEPPU</u> <u>Tadashi</u>, HOSHIHIRA Yugo, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University) E-mail: k4849803@kadai.jp

1. はじめに

断面アスペクト比の大きな NbTi や MgB₂の多芯テープ線材 は、線材幅広面に平行な磁界に対して臨界電流密度が高く交流 損失も低く押えられることが最近の研究で明らかになってい る[1, 2]。本研究では、このような多芯テープ線材を活用して 超伝導コイルの臨界電流特性や損失特性の向上を図ることを 目的としている。ここでは、一例として、多芯テープ線材で巻 線したメインコイルに、テープ面に対し垂直な磁界を低く押え るためのサブコイルを付加するハイブリッド型コイルを考え る。瞬低補償用の伝導冷却型超伝導コイルを想定し、NbTi 多 芯線材を用いたハイブリッド型コイルの臨界電流特性と結合 損失特性について検討を行った。

2. 検討したコイルのパラメータ

今回用いた NbTi 多芯丸線材のパラメータは線材直径 2mm, フィラメント直径 26µm, フィラメント数 1767本, 銅比 2.4, ツ イストピッチ 34mm である。この丸線材を圧延したものを多芯 テープ線材[1]として用いた。ハイブリッド型コイルの構造、 寸法を Fig.1 に示す。ハイブリッド型コイルは多芯テープ線材 で巻線したメインコイルと、丸線材で巻線されたサブコイルで 構成されている。メインコイルは 52 層×24 ターン、サブコイ ルは 18 層×46 ターンである。基準コイルの構造、寸法を Fig.2 に示す。基準コイルはハイブリッド型コイルの比較対象であり、 ハイブリッド型コイルとインダクタンスが同じで、多芯丸線材 で巻線した 28 層×83 ターンのソレノイドコイルである。

3. コイルの運転条件と結果

コイルの初期温度は NbTi の臨界温度より低い 4.2K、電流は 瞬低を模擬して 50A/s の速さで 1 秒間、直線挿引した場合をコ イルの運転条件とし、フィラメント束領域[1]のアスペクト比 を最大 8 まで変化させて検討を行った。また、臨界電流は、線 材と外部との熱のやり取りは無いものとし、断熱条件として検 討を行った。コイル全体で発生する結合損失のテープ断面アス ペクト比依存性を Fig.3 に示す。アスペクト比 3.3 の場合に結 合損失が最も小さくなり、基準コイルと比較して約 1/2 に低減 できた。臨界電流のテープ断面アスペクト比依存性を Fig.4 に 示す。アスペクト比 3.3 の場合に臨界電流が最も高く、基準コ イルと比較して約 2 倍向上できた。以上より、今回検討したハ イブリッド型コイルでは、アスペクト比 3.3 のテープ線材を用 いた場合に最も結合損失が低減でき、最も臨界電流特性を向上 できることがわかった。

4. まとめ

多芯テープ線材を活用して超伝導コイルの性能を向上させ るために、ハイブリッド型コイルを考え、臨界電流特性と結合 損失特性について理論的な検討を行った。その結果、基準コイ ルと比べて、臨界電流が約2倍に向上、結合損失が約1/2に低 減できた。これより、多芯テープ線材を活用することにより、 超伝導コイルの臨界電流特性や損失特性を向上させることが できることを示した。





Fig.3 Dependences of coupling losses in coils on the aspect ratio of tape cross section.



Fig.4 Dependences of critical currents in coils on the aspect ratio of tape cross section.

参考文献

- A. Jikuzono, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p. 155.
- 2. Y. Fukushima, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 240.

ポインチングベクトル法を用いた超伝導コイルの異常監視・診断システム ー 高感度化 ー

A Quench Monitoring System of Superconducting Coils by Using the Poynting's Vector Method — Improvement of Sensitivity —

<u>上之原 伸一</u>、羽生 大仁、木元 武尊、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工); 岡元 洋 (九州電力) <u>KAMINOHARA Shinichi</u>, HABU Kisato, KIMOTO Takeru, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.,Inc.) E-mail: k6224561@kadai.jp

1. はじめに

我々は、超伝導コイルの異常検出方法として、ポインチン グベクトル法を用いた新しい測定方法を提案している。この測 定方法の特長は、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、異常の発生場所を推測でき ることである。

これまでに、小型の試作システムを用いて上述の特長を実 証している[1]。これまでの実験では、小型のシステムであった こと、1ターンコイルに相当するポテンシャルリードで電界を測 定していたことから、信号レベルが低く、高い測定技術を必要 としていた。したがって、本システムを、実機に適用する場合 には、感度を上げられるかどうかを確かめることが重要である。 そこで、今回は、感度を上げる手段について理論と実験の両 面から検討を行った。

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の検出を行っている。超伝導コイル周 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。磁界と電界の測定には、ピックアップコイルとポ テンシャルリードをそれぞれ用いる。ポインチングベクトルは、 Fig. 1 に示すように二方向の成分を測定する(P_{r1}, P_{r2})。P_{r1}と P_{r2}の分布の変化を観測することにより、コイル内の局所的な 異常を検出することができる。

感度の向上のためには、ポテンシャルリードを複数ターン にして測定電圧を上げる必要がある。複数ターンのポテンシ ャルリードで電界を測定するためには、Fig. 2(a) に示すように、 ab 間にポテンシャルリードを設置し、cd 間を通るリターンパス が必要になる。この場合、リターンパスが ab の近くを通ると、リ ターンパスが電界 *E*_{cd}を拾うために、測定される電圧は非常に 小さくなる。したがって、ab 間の電界 *E*_{ab}が測定できない。そこ で本研究では、Fig. 2(b) に示すように、電界がほぼゼロにな る場所にリターンパスを通すことによって、電界 *E*_{ab}の測定が できる。そして、ポテンシャルリードを複数ターンにすることに よって、測定感度の向上が達成できる。

今回は、Fig. 2(b) の方法で測定電圧が上がることを実験 的に確かめた。サンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、 高強度銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を巻線した 1 層×15 ターンのソレノイドコイルであり、内径 70mm、高さ 64.3mm で ある。なお、ポテンシャルリード電圧のうち誘導性電圧は、ピッ クアップコイル電圧を使ってキャンセルし、ポインチングベクト ル測定の精度を上げた。

3. 実験方法

次の手順で実験を行った。サンプルコイルに、20Hz、 20Armsの交流電流を定電流モードで通電し、その時のポテ ンシャルリード電圧損失成分を測定する。今回は、P_{r1}のポイ ンチングベクトルを測定するため周方向の電界を測定した。 測定を行った場所は、コイル中心の高さであり、試作したポテ ンシャルリードは、6ターン、8ターン、12ターンのものである。

ポテンシャルリード電圧損失成分の測定結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の横軸は、ターン数である。この結果より、改良した

ポテンシャルリードを用いてターン数を増やすことで電圧を大 きくできることが確かめられた。したがって、径方向の引き伸ば し部分を長くしてリターンパスを遠ざけることで測定電圧が打 ち消し合うのを防ぎ、更に巻数を増やすことで感度が向上で きることを実証した。

4. まとめ

実機に適用する場合を想定し、測定感度を向上させるため に、ポテンシャルリードを改良し測定を行った。その結果、引 き伸ばし部分を長くし、巻数を増やすことで測定される電圧が 大きくなることを理論と実験の両面から示した。



Fig. 1 Examples of sensor arrangements to measure the Poynting vector.



Fig. 2 Top views of improved sensor arrangements. (a) near return pass, (b) far return pass



Referrence

[1] M.Tokuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) p.22

Design of a high field Nb₃Al common coil magnet

Q. Xu, K. Sasaki, T. Nakamoto, A. Terashima, K. Tsuchiya, A. Yamamoto (KEK); A. Kikuchi, T. Takeuchi (NIMS) E-mail: qingjin.xu@kek.jp

1. Introduction

A research and development program of "Advanced Superconducting Magnets for the LHC Luminosity Upgrade" has been carried out since 2006, in the framework of the CERN-KEK cooperation program. It aims to develop high field superconducting magnets expected in the LHC luminosity upgrade with A15 superconductor. The first stage (2006-2008) has progressed in focusing to establish Nb₃Al superconductor and cable technology to prepare for the high field magnet application. At the second stage (2009-2011), a Nb₃Al common coil magnet will be fabricated, to demonstrate the feasibility of high field magnet wound with Nb₃Al cable, and also, as an R&D of the advanced structure for the high field magnets.

The design of the Nb₃Al high field magnet has been started from 2007, under collaboration with LBNL. The original 2D design was presented in references [1]. This paper presents the detailed 3D design and some new modifications.

2. Magnetic design

The common coil concept was adopted in the design of this magnet [2]. 3 Nb₃Al coils sandwiching 2 Nb₃Sn coils. The two kinds of coils were designed with different straight length, to reduce the peak field at the Nb₃Sn coils. For the Nb₃Al coils, the overall outer length is 200.5 mm; the width and the height are 100.5 mm and 30.8 mm respectively (14 turns per layer and 2 layers per coil). The peak field is 13.2 T, located at the center of the straight part. For the Nb₃Sn coils, the overall length is 252.9 mm; the width and the height are 100.5 mm and 16.9 mm respectively (20 turns per layer and 2 layers per coil). The peak field is 11.9 T, located at the end part. , Fig. 1 shows the 3D Ansys model for the magnet.

3. Mechanical design

To simplify the future assembly process, the shell structure was adopted in the mechanical design of the magnet [3]. Four 36mm-diameter aluminum rods apply the axial stress to the coils. The thermal contraction of the aluminum shell and rods, together with the pre-stress applied at the room temperature, to overcome the Lorenz force of the coils. With the assumption that the cryogenic cement can sustain 20 MPa separation stress, the pre-stress in three directions were optimized, as shown in Fig. 2. In x direction, the pre-stress is 55 MPa, and in z direction, it is 159 MPa. Y direction pre-stress is applied by the deformation of the shell during the x direction bladder operation.

Several bladders were tested with high water pressure. The burst pressure of the tested bladders differs from 69 MPa to 103 MPa.

4. Development status and future schedule

The Cable for the first Nb₃Al coil has been fabricated and wrapped with ceramic insulation material. The winding process will start soon. For the following two coils, the cable will be fabricated in the end of this year and the mid of next year.

Acknowledgement

This work was supported by KAKENHI (20340065).

References

1. K. Sasaki et. al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008), p.202

2. A. R. Hafalia et al., IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol.13, No.2 (2003), p.1258

3. A. R. Hafalia et al., IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol.12, No.1 (2002), p.47



Fig. 1. 3D model for the magnetic and mechanical simulation



Fig. 2. Load line of the magnet

同軸多層型 CIC 導体の電流分布特性 Analysis of Current Distribution in Coaxial Multi-Layer CIC Conductor

<u>手島 翔太郎</u>, 柴田 健志, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大);高畑 一也, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS) <u>TESHIMA Shotaro</u>, SHIBATA Yasuyuki, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro(Tohoku Univ.); TAKAHATA Kazuya, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki(NIFS)

E-mail: teshima@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉用超電導コイルなどには、安定性が高く、交流 損失が少なく、かつ機械的強度が高いケーブルインコンジット (CIC)導体が用いられる。一般的なトリプレット型ケーブル構成 の CIC 導体は撚り乱れにより偏流現象を生じ、安定性の低下 や交流損失の増大を招くおそれがある。そこで、新しく同軸多 層型ケーブルを提案する。この構成は規則的な素線配置が 可能であり、電流分布を正確に制御できるので、偏流を防止 することができる。本研究ではITER-CSコイル用導体と同じ素 線数の同軸多層型 CIC 導体を構成し、導体断面内の電流分 布を解析した。

2. 同軸多層型 CIC 導体の構成方法

同軸多層型 CIC 導体の断面図を Fig.1 に示す。ケーブル は、中心の冷却パイプの周囲に1層毎に素線を一定のピッチ で巻きつけることで構成される。n 層構成の最内層を第1層と する。以下に、ITER-CSコイル用導体と同じ素線数(超電導素 線 576本、銅線 288本、計 864本)で同軸多層型 CIC 導体を 構成する方法を述べる。

外部磁界の影響を無視した場合の各層の電流と撚りピッ チの基礎方程式は,隣接する層間の鎖交磁束をゼロとするこ とにより求まり,式(1)で表される[1]。

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

ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 I_i はi層の電流、 r_k はk層の半径、 P_k はk層の撚りピッチである。各素線の負荷率を同じにすると、 各素線の電流値は同じになるので、各層の運転電流は超電 導素線に比例した離散的な値となる。一方、第k層の中心半 径と撚りピッチが分かると、その層に巻線できる全素線数 n_k は 式(2)のように決まる。

$$n_{\rm k} = \left[\left(\frac{2\pi r_{\rm k}}{d_{\rm s}} \right) / \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\rm k}}{p_{\rm k}} \right)^2} \right] \tag{2}$$

ただし、記号[a]は a を超えない最大の整数である。

各層の電流分布を与えて、式(1)から撚りピッチを決定し、 式(2)を用いて各層の全素線数を求める。それらが、要求する 各層の全素線数と一致する様に外径を調整しながら繰り返し 計算を行い、撚りピッチの解を収束させる。ただし、外径は CS コイル用ケーブルの外径である 32.6mm 以内とする。

3. 同軸多層型 CIC 導体の構成結果

超電導素線2本に対して銅線1本を対応させ,隣に配置 した場合について,各層の超電導素線と銅線の配置数分布 をFig.2に示す。各層の電流値は超電導素線数に比例した値 となる。また,最内層の撚りピッチを500mmに固定して他の層 の撚りピッチを計算した結果をFig.3に示す。

Fig.2 より, 層数とともに電流値は大きくなるが, 最外層付 近では, 反対に電流値が減少している。これは, 層数とともに 半径が増大するが, 一方で Fig.3 より層数の増加とともに撚り ピッチが短くなるので、巻線できる素線数が最大となる層が10 層付近であることを示している。また、外層ほど撚りピッチが短 くなるのは、層数の増加とともに式(1)の第1項が正の大きな値 となるため、式(1)を満足するためには、第2,3項が負の大きな 値となる必要があり、外側ほど撚りピッチを短くしなければなら ないからである。



Fig.1 Cross section of a coaxial multi-layer CIC.





参考文献

 浜島高太郎他:超電導導体内の電流分布解析,低温工 学会誌, Vol. 135 No.4, p.176-183, 2000

Ta バリア MgB₂線材を用いた小パルスコイルの試作 (3)過電流による熱暴走特性 Test of small pulse coil using Ta barrier MgB₂ wire 3. Thermal runaway with an excess current

中尾 彰浩, 久保 輝朗, 浦竹 勇希寬, 田中 和英, 岩熊 成卓, 柁川 一弘, 船木 和夫(九大);
 岡田 道哉(日立); 熊倉 浩明(NIMS); 三戸 利行(NIFS); 林 秀美(九州電力)
 <u>NAKAO Akihiro</u>, KUBO Teruaki, URATAKE Yukihiro, TANAKA Kazuhide, IWAKUMA Masataka,
 KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ); OKADA Michiya(Hitachi Ltd);KUMAKURA Hiroaki(NIMS);
 MITO Toshiyuki(NIFS); HAYASHI Hidemi(Kyushu Electric Co.Inc.)
 E-mail: nakao@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MgB。線材は臨界温度が 39K と高く,液体水素温度レベル の温度領域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。我々は、将来実用化されるであろう MgB。 コイルの安定性や保護対策の考え方を確立する基盤をつくる ため、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 MgB2多芯線材による小コイルを用いて、伝導冷却時の 幅広い温度領域における過電流通電に対するコイル応答、 温度分布を測定した¹⁾。今回は各温度における許容発熱等の 安定化指標についての検討結果を報告する。

2. 実験

試料として CuNi シース Ta バリア MgB₂多芯線材による小 パルスコイルを用いた。巻枠には熱伝導率の良い窒化アルミ ニウムを用いている。コイルには、コイルの中心部、下フランジ 部、及び MgB₂巻線部下端の3箇所に温度センサー(それぞ れ Tic, Tib, Tob)を取り付けた。冷却は、温度調整されたヘリウ ムガスによりコイルの上フランジを面冷却し、それによる巻枠 からの伝導冷却とした。そしてコイルに臨界電流値を超える過 電流を5分間通電した際の各温度センサーの温度変化、コイ ル両端電圧を測定し、磁束フロー損失による熱負荷に対する コイルの熱的安定性を検討した。

3. 結果と考察

初期設定温度は10Kから30Kの範囲内で5K刻みの値と した。測定結果より、各初期設定温度ともに、通電電流が臨 界電流を超えてもある閾値以下であると各測定点とも過電流 に対し急峻なクエンチは生じず、熱的な安定性が保たれてい ることがわかった。また温度がある安定レベルに漸近しない通 電条件においても、端子電圧や温度変化は比較的緩やかで、 熱暴走の一種として理解できるであろう。

Fig.1は、過電流通電において最も温度上昇が顕著であった Tob の上昇分の漸近値について、その過電流設定値への 依存性を全ての初期設定温度についてまとめて表したもので ある。図中の縦線は、各初期設定温度において熱暴走を観 測した過電流レベルを表している。これより、初期設定温度が 低いほど、熱暴走に至るまでの温度上昇に余裕があることが わかる。これは初期設定温度が低いほど、臨界温度に至るま での余裕度(温度マージン)が大きいことによるものと考えられ る。

Fig.2 は熱暴走開始時のコイル発熱の初期温度依存性を示している。これを熱暴走を抑制できる発熱量の上限とみなすと、その限界レベルが12Kから14Kの範囲内で極大値を持っことがわかる。この要因として、温度マージンの初期温度依存性だけでなく、伝熱材料の伝熱効率の影響が可能性として考えられる。仮に上述のような見通しが立つとすると、熱的に安定な動作特性を持つコイルの冷却構造を設計するに当り、伝熱材料の熱伝導率の詳細評価が重要になることになる。



Fig.1 Increase of value of Tob when overcurrent turned on.



Fig.2 Total heat generation of coil with thermal runaway breaking out

4. 参考文献

- A. Nakao et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.79 (2008) 188
- 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
- 3) 低温工学協会:超伝導・低温工学ハンドブック(1993) pp. 1089-1095