

低温容器外周のピックアップコイル群を使う 高温超伝導コイル巻線で発生する常伝導領域の非接触型検出法 Non-contact Detectors of Normal Zone Appearing in Superconducting Coil Windings by Using Pickup Coils Put Outside a Cryostat

川越 明史, 藤岡 直人, 森部 裕章, 住吉 文夫 (鹿児島大学)

AKIFUMI Kawagoe, FUJIOKA Naoto, MORIBE Hiroaki, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);

E-mail: kawagoe@eee.kagoshi-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導コイルを安全に運転するには、巻線温度が局所的に上昇するホットスポットなどの異常を測定することのできる測定法が必要である。我々は、高温超伝導コイルに発生する局所的な異常を非接触で測定できる新しい測定法を提案している^{1,2)}。この測定法の特長は、保冷容器外から測定することができるため、安全でメンテナンス性に優れていることである。これまでに、低温容器外周を覆った金属シート表面のポインティングベクトルを測定する方法と、金属シートを用いず、ピックアップコイルのみを用いる方法を提案している。今回は、これらの測定方法の原理を理論的に説明する。

2. 金属シートを用いる非接触型異常測定法とその問題点

金属シートを用いる非接触型異常測定方法では、Fig.1 に示すように、超伝導コイルを金属シートで覆い、その表面のポインティングベクトルを測定する。この測定法では、金属表面に設置したポテンシャルリードで電界を測定する。ここでは、軸方向磁界と周方向電界から求められるポインティングベクトルのみを考える。

Fig. 2 は、Fig.1 をコイル軸から見た平面図であり、保冷容器は省いている。ループ1は金属シートを、ループ2はポテンシャルリードを示している。いずれのループも抵抗率の高い金属製であり、導電率はそれぞれ σ_1, σ_2 とする。またループ内の電流によって電磁界は乱されないとし、電磁界は軸対称とする。

ループ1の電界は、誘導電界 E_{1i} と静電界 E_{1s} で表されるので、ループ1の電界を一周線積分すると、次式が成り立つ。

$$\frac{1}{\sigma_1} \oint J_1 \cdot ds = \oint E_1 \cdot ds = \oint (E_{1i} + E_{1s}) \cdot ds \quad (1)$$

ここで J_1 は、ループ1に流れる電流の電流密度である。同様の式はループに2についても成り立つので、ループ2を一周する電流はゼロであること、弧 A_1B_1 上の電流は J_1 と同じになることを考慮すると、ループ2上の誘導電界 E_{2i} と静電界 E_{2s} を使って、

$$\frac{1}{\sigma_1} |J_1| \int_{A_1}^{B_1} ds = \oint E_{2s} \cdot ds + \oint E_{2i} \cdot ds \quad (2)$$

と書ける。したがって、点 A_2 と点 A_2' における静電ポテン

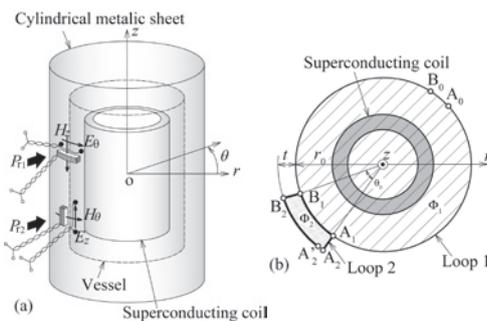


Fig.1 (a) Example of sensor arrangements to measure the Poynting's vector around superconducting coils, (b) principle of non-contact measurement of local electric fields.

シャルをそれぞれ $\phi_2(A_2')$, $\phi_2(A_2)$ とし、ループ1が閉じていることから $E_{1s}=0$ であることを考慮して(1)式も使うと、(2)式は、

$$E_{1i} r_0 \theta_0 = - \frac{d\Phi_1}{dt} \frac{\theta_0}{2\pi} = - \frac{d\Phi_2}{dt} - [\phi_2(A_2') - \phi(A_2)] \quad (4)$$

と書ける。したがって、 $t \ll r_0$ であれば $\Phi_2 \equiv 0$ となるので、

$$E_{1i} r_0 \theta_0 \equiv -[\phi_2(A_2') - \phi(A_2)] \quad (5)$$

となる。(5)式は、点 A_2' と点 A_2 の電位差として弧 B_1A_1 上の電界が測定できることを表している。

この測定法の問題点は、局所的な測定を行なうために θ_0 を小さくすると信号電圧が小さくなることである。

3. ピックアップコイルを用いる非接触型異常測定法の原理

上記の問題点を解決したピックアップコイルのみを用いる新しい非接触型異常測定法について説明する。この方法では、Fig. 2(a)に示すようなピックアップコイルのみを用いて、超伝導コイル周辺のポインティングベクトルを測定する。

Fig. 2(b)は、Fig.1(b)と同じ方向から見た図であり、ポテンシャルリードを、電磁エネルギーの流れが無視できるほど小さな場所まで r 方向に引き伸ばしている。また、弧 A_0B_0 を切ってループ1をオープン回路にしている。

ループ1がオープンであることから、 J_1 はゼロであることを考慮すると、(4)式は、

$$- \frac{d\Phi_2}{dt} = \phi(A_2') - \phi(A_2) \quad (6)$$

と書ける。 $t \gg r_0$ のとき、 $\Phi_1 \cdot \theta_0 / 2\pi + \Phi_2 \equiv 0$ となるので、(6)式は、

$$\frac{d\Phi_1}{dt} \frac{\theta_0}{2\pi} = -E_{1i} r_0 \theta_0 \equiv \phi(A_2') - \phi(A_2) \quad (7)$$

と書くことができ、弧 B_1A_1 上の電界を測定できることがわかる。このとき、弧 A_0A_1 , 弧 B_0B_1 は取り扱うことができる。したがって、Fig.2(a)で示すようなピックアップコイルで電界を測定することができるので、ターン数を増やすことで信号電圧の増幅が可能になり、局所的な電界を高感度で測定することができる。

参考文献

1. M. Tokuda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p. 207
2. T. Kimoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2010) p. 199

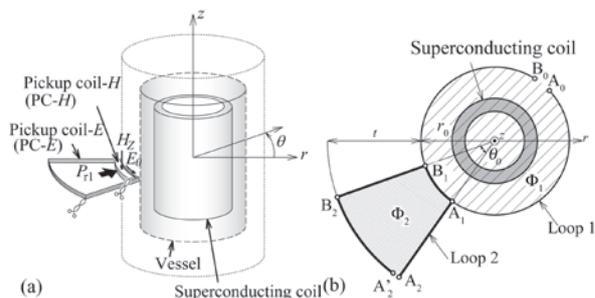


Fig. 2 (a) Pickup coil arrangements to measure the Poynting's vector around superconducting coils, (b) principle of non-contact measurement of local electric fields.

ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発4 —誘導性負荷変動中の常伝導転移の検出—

Development of a Monitoring System of Superconducting Transformer by Using Poynting's vector method 4 -Detection of normal zone appearing in windings during inductive load change -

小坂 亮大, 濱田 佳志, 川越 明史, 住吉 文夫(鹿児島大学); 岡元 洋(九州電力)
KOSAKA Ryota, HAMADA Keishi, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);
OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co.,Inc.)
E-mail: k8197118@kadai.jp

1. はじめに

実用段階の超伝導変圧器は、巻線状態を常に監視しておくことが必要である。また、超伝導変圧器は負荷が変動する際に、変圧器の有効電力が変化する。そのため、有効電力が変化する中でも、巻線に生じた異常を確実に検出するシステムが必要である。そこで我々は、ピックアップコイルを用いて損失エネルギーフロー密度を室温空間から測定する非接触型のモニタリングシステムを提案している。

これまでに、鉄心を持つ変圧器に本監視システムが適用可能であること、一次側巻線と二次側巻線で発生する異常を判別可能であることを実証している[1][2]。また、抵抗性負荷の変動中に超伝導変圧器巻線の異常を検出できることを実証している[3]。今回は、超伝導変圧器の二次側に接続した誘導性負荷を変動させた時、巻線異常の検出が可能であることを実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 本監視システムの測定方法と装置概要

我々の提案しているポインティングベクトル法では、電界測定用ピックアップコイルと磁界測定用ピックアップコイルで局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求めている。さらに、磁界測定用ピックアップコイルの電圧を用いて、電界測定用ピックアップコイルの電圧から誘導性の成分をキャンセルして電界測定の精度を高めている。これまで、負荷変動と巻線異常を区別するために、超伝導変圧器の上部と下部の対称な位置のポインティングベクトルを同時に測定し、その差分を監視することで、測定センサーの近くで異常が起きた場合、その異常を検出できると考えられる。

装置の概要を説明する。変圧器は、高さ約 100mm、一次側内径 80mm、二次側内径 110mm である。定格容量は、500VA である。巻線には、臨界電流が 88A の高強度 Bi-2223 多芯テープ線材を使用した。

3. 実験条件及び実験結果

実験手順を説明する。超伝導変圧器に 20A_{rms}、50Hz の交流電流を定電圧モードで通電し、変圧器周辺のポインティングベクトルを測定した。測定センサーは、コイル中心の位置から軸方向に+30mm の場所に System 1、-30mm の場所に System 2 を設置した。負荷は、抵抗性負荷を用いた定格運転から誘導性負荷を接続することで、二次側負荷の力率を 1.0 から 0.7 まで変化させ、同時に有効電力も変化させた。巻線部の異常は、電磁界を乱さないように液体窒素の自然蒸発によってコイル上部から発生させた。

巻線状態が正常である時の実験結果を Fig. 1 に示す。System 1 と System 2 の差分は、正常時の損失エネルギーフロー密度の比率で補正して求めている。Fig. 1(a) から、センサーで測定した損失エネルギーフロー密度が負荷変動に伴って大きく変動していることがわかる。そのため、巻線の異常を検出できない。しかし、Fig. 1(b) の差分は変化していないので、巻線状態は正常であると判断できる。次に、異常発生時の差

分の測定結果を Fig. 2 に示す。差分に大きい変化が見られるので、巻線で発生した異常を検出できることがわかる。以上より、本システムで誘導性負荷の変動中に、超伝導変圧器の巻線部に発生した異常を検出できることがわかった。

4. まとめ

超伝導変圧器の二次側に誘導性負荷を設置し、実際に巻線異常の検出試験を行った。その結果、誘導性負荷の変動中に、巻線部で発生した異常を検出できることを実証した。このことから、超伝導変圧器の運転監視装置として、本監視システムが有効であることを示した。

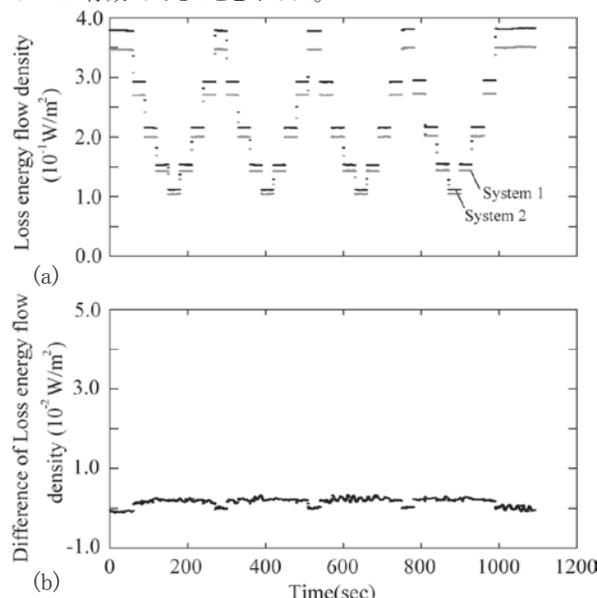


Fig. 1 Experimental results for usual condition

(a) Energy flow densities, (b) Difference of energy flow density

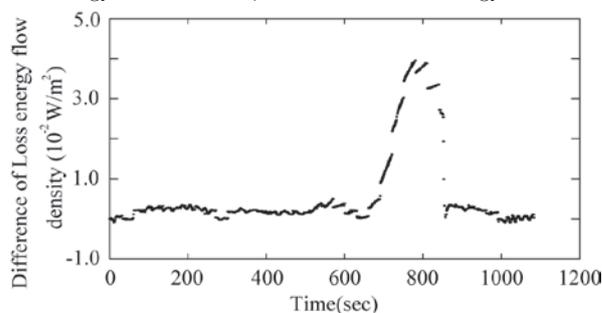


Fig. 2 Experimental results for unusual condition

参考文献

1. K. Habu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.121
2. K. Habu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.135
3. R. Kosaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.152

伝導冷却型 4 T 級 Y 系コイルの通電特性

Test results of conduction-cooled 4 T-class coil wound with YBCO tapes

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi,

URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

Y 系超電導コイルの実機適用に向け、伝導冷却システムにおいて、中心磁場 4 T 以上発生可能な超電導コイルの開発を進めている。コイル開発では、樹脂含浸による劣化のないことおよびコイル電流-電圧特性を定量的に予測できることが重要である。これまで、磁場特性の向上が見込まれる人工ピン入り Y 系線材を使用して、樹脂含浸による劣化のないシングルパンケーキコイルを 12 枚積層したコイルを試作し、コイル温度 20 K において中心磁場 4.7 T の発生に成功した[1]。今回、12 積層コイルの温度を 20 K から 60 K まで 10 K 刻みで変化させて通電試験を実施し、コイル電流-電圧特性を実験と解析の両面から評価したので報告する。

2. コイル諸元および伝導冷却システム構成

使用した線材の諸元を Table 1 に、12 積層コイルに使用したシングルパンケーキコイルの諸元および液体窒素中での通電試験結果より測定したコイル I_c (10^{-6} V/cm 定義) およびコイル n 値 (10^{-8} ~ 10^{-7} V/cm 定義) を Table 2 に示す。ここで、試作したコイルは含浸前後でコイル電流-電圧特性を比較して、樹脂含浸による劣化が無いことを確認している。Fig.1 に示した 12 積層コイルはコイル内周および外周で電気的に接続されており、2 枚のパンケーキコイルごとに厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付け、各アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。コイル温度は 2 段冷却ステージに取り付けたヒータにより制御し、発生電圧は各パンケーキコイルの両端で測定した。

3. 伝導冷却試験

12 積層コイルの温度を 20 K から 60 K まで 10 K 刻みで変化させて通電試験を実施し、各パンケーキコイルの両端電圧を測定した。全温度領域で電圧発生が最も大きかったコイル #3 の電流-電圧特性を Fig.2 に示す。また、Fig.2 には、短尺線材の臨界電流特性およびコイル磁場分布から計算した電流-電圧特性も併せて示している。ここで、コイル電流-電圧特性を計算する際には、線材の長手方向の I_c のばらつきおよびロットによる磁場角度依存性の違いを考慮して計算した。 10^{-7} V/cm 発生時の電流値で実験値と計算値を比較すると、最も差が大きかった 30 K においても、実験値 224.8 A に対して、計算値 210.5 A と 6.8% 以内の差で一致しており、コイル電流-電圧特性を定量的に予測できることを確認した。

4. まとめ

人工ピン入り線材を使用した 12 積層コイルを試作し、伝導冷却中で通電試験を実施した。幅広い温度領域で良好な超電導特性を有していることを確認し、線材の長手方向の I_c のばらつきやロットによる磁場角度依存性を考慮することによりコイル電流-電圧特性を定量的に予測できることを示した。引き続き、Y 系コイルの実機適用に向けて、コイルの高磁場化および大型化を目指した開発を進めていく。

Table 1 Specification of YBCO tape

Width (mm)	4
Thickness (mm)	0.1
Copper stabilizer thickness (mm)	0.04
Substrate	Hastelloy®
Type	Zr-doped wire
I_c @77 K, self field (A)	86~112

Table 2 Main features of impregnated pancake coils

Coil No.	#1	#2	#3	#4	#5
Inner dia. (mm)	50	50	50	50	50
Outer dia. (mm)	90	89	87	88	89
Hight (mm)	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Turns	111	111	111	111	111
Tape length (m)	24	24	24	24	24
Coil I_c (A)	48	51	45	48	48
n value	24	24	26	31	26

#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
50	50	50	50	50	50	50
89	89	89	88	88	88	88
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
111	111	111	111	111	111	111
24	24	24	24	24	24	24
48	55	55	52	49	49	49
26	27	29	23	25	24	22

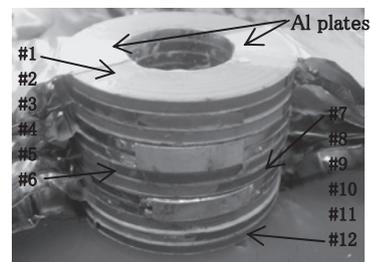


Fig.1 A stack of 12 single pancake coils

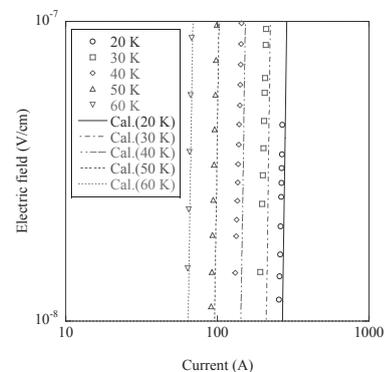


Fig.2 E-I characteristics of #3 pancake coil of a stack of 12 single pancake coils from 20 K to 60 K

参考文献

- H. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.154

複数のイットリウム系超電導線材内に発生する遮蔽電流が生み出す 磁場分布とその時間変化

Temporal variation of magnetic field distribution generated by screening current flowing in multiple coated conductors

宮副 照久, 中西 泰章, 関野 正樹, 大崎 博之(東京大学); 木吉 司(物質・材料研究機構)

MIYAZOE Akihisa, NAKANISHI Yasuaki, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The Univ. of Tokyo); KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

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

1. はじめに

テープ形状のイットリウム(Y)系線材によって作製される超電導コイルの発生磁場は、線材のテープ面を貫く磁束がもたらす遮蔽電流によって影響を受ける[1]。遮蔽電流の大きさは臨界電流に相当するものであり、磁束クリープによってその遮蔽電流は減衰する。とくに高い磁場均一度や時間的安定度が要求される超電導コイルにおいては重要な課題である。本研究では複数の短尺Y系線材に外部磁場を印加し、Y系線材内に発生する磁場分布とその磁場の時間変化について評価した。

2. 実験方法

液体ヘリウム中で冷却した複数のY系線材に対してテープ面に垂直方向に外部磁場を超電導マグネットにより印加した。線材上でホールセンサを走査し、遮蔽電流が発生する磁場の分布を測定した。ホールセンサはY系線材に接するように配置した。ホールセンサの表面とアクティブエリアまでの距離は0.30 mmである。Fig. 1に3枚のY系線材を並列させたときの磁場分布測定の概要図を示す。使用したY系線材は4.1 mm幅のSuperPower社製の線材である。中央に置いた線材の幅中心を $x = 0$ mm と定義した。

3. 並列枚数による磁場の变化

Fig. 2に外部磁場を0 Tから1.0 Tに励磁した際、遮蔽電流により発生する磁場分布の並列枚数に対する変化を示す。丸は一枚の線材における実測値、四角は三枚の線材を並列に並べた時の実測値を示す。一枚の線材において測定した磁場分布の結果からTikhonovの正則化を用いて線材内の電流分布を求めた[2]。一枚の線材内の電流分布が三枚の線材それぞれで等しく分布すると仮定したときの磁場分布の計算結果を破線で示す。計算値と実測値はよく一致しており、一層において並列したときの遮蔽電流による磁場の分布は並列した線間で相互作用が見られないことを示している。

4. 積層枚数による遮蔽電流が発生する磁場の時間変化

Fig. 3に並列させたY系線材の遮蔽電流が発生する磁場の時間変化を示す。ここでは外部磁場が0 Tまで減少したときの線材内の捕捉磁場を測定している。外部磁場印加用の超電導マグネットの磁場が0 Tになったときを $t = 0$ s とした。丸は三枚の線材を一層に並列させたときの磁場分布の時間変化を示しており、ダイヤは三枚の並列させた線材を三層に積層したときの磁場分布の時間変化を示している。それぞれの $t = 3000$ s までの時間変化を示している。磁束密度が大きい箇所ほど減衰が大きいことを示している。

5. まとめ

積層、配列させたY系線材上の遮蔽電流が発生する磁場の分布およびその時間変化を測定した。一層に三枚並列させた磁場分布については一枚の線材の遮蔽電流から示されることが確認された。

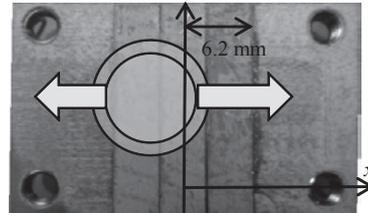


Fig.1 Setup for measurement of screening-current-induced field distribution

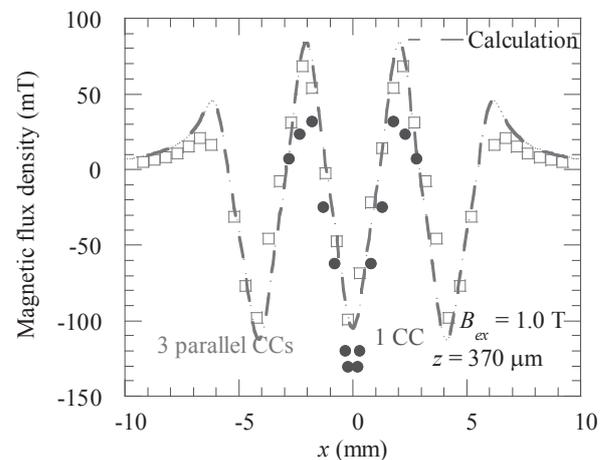


Fig.2 Variation of magnetic field distribution generated by screening current flowing in coated conductors

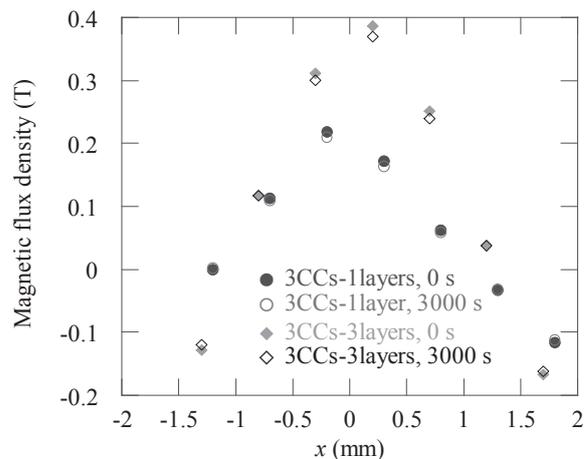


Fig.3 Temporal variation of remnant magnetic field distribution generated by screening current.

参考文献

1. D. Uglietti, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 115002
2. A. Miyazoe, et al: IEEE Trans. Appl. Supercond., in press

高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発; 高電流密度コイル化技術の構築 (3) —接続部を有する REBCO コイルの耐電磁力試験—

Development of the next-generation NMR technology using HTS materials; For achievement of HTS coil with high operating current density (3) – Experimental results of REBCO coil including a joint between conductors under electro-magnetic forces –

松本 真治, 木吉 司(物材機構); 大塚 昭弘, 濱田 衛(JASTEC);

前田 秀明(理研); 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大学); 末松 浩人(日本電子)

MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa (NIMS); OTSUKA Akihiro, HAMADA Mamoru (JASTEC);

MAEDA Hideaki (Riken); YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.), SUEMATSU Hiroto (JEOL Ltd.)

E-mail: matsumoto.shinji@nims.go.jp

1. はじめに

科学技術振興機構産学イノベーション加速事業「戦略的イノベーション創出推進」研究開発テーマ「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」において、プロジェクト「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」を遂行している。プロジェクトでは、超伝導マグネットおよびプローブ(検出器)に高温超伝導材料を適用することで、性能と利便性を大幅に向上させた次世代NMRシステムの開発を目指している [1]。これまで、REBCO 線材により密巻きコイルを製作し、17 T 中で試験を行い、高温超伝導線材 (HTS) の高電流密度コイル化技術の構築を進めてきた。HASTELLOY® 基板を持つ2種類の線材を使用し試験用 REBCO コイル (#1: SuperPower Inc. 線材, #2: Fujikura 線材) を製作、耐電磁力試験を行った。コイル#1 は、試験中にクエンチし、線材が破断した [2]。コイル#1 と同タイプの線材でのコイル化技術の確立のため、コイル#1 を分解検査し、考えられるクエンチの原因を改善させた2個の試験コイルを製作した。また、実機用コイルの場合、コイル中での線材間接続は不可避であると考えられるため、一方のコイルは内部に線材間接続を有するものを製作した。これら新たに製作した2個のコイルについて、17 T 中で行った耐電磁力試験結果を報告する。

2. 耐電磁力試験結果

REBCO コイルの耐電磁力試験は、直径 139 mm コールドボア中に、17 T を発生させる超伝導マグネットを用いて行った。製作した耐電磁力試験用 REBCO コイル (#3, #4) の諸元を TABLE I に示す。コイル#3 は、第4層の途中に線材間接続を有する。線材の接続部は、HASTELLOY® 基板側がコイル外側となるように接続された。

TABLE I PARAMETERS OF LAYER WINDING REBCO COILS #3, #4

	#3	#4
Conductor/Supplier	REBCO/SuperPower Inc.	
Conductor Width×Thickness	4.00 mm × 0.11 mm	
Insulated Conductor Width×Thickness	4.10 mm × 0.21 mm	
Winding Type	Layer	
Coil Inner Diameter	78.9 mm	79.1 mm
Coil Outer Diameter	83.5 mm	82.4 mm
Coil Height	100.09 mm	96.60mm
Total Layers	8 layers	8 layers
Total Turns	184 turns	180.7 turns
Conductor Length	47.00 m (*1)	46.00 m
Impregnation	Wax	

(*1) joint in the 4th layer

コイル#1 は、17 T 中の試験において、通電電流が 200 A 付近でコイル電圧の増大の異常が見られ、その後、10 T 中の試験においてクエンチした [2]。コイル内部に線材間接続を有するコイル#3 は、17 T 中で、最大 BJR が 400 MPa を超える 268.9 A までの通電試験をおこなったが、コイル電圧の上昇は見られなかった。一方、コイル#4 は、コイル#1 と同じように、17 T 中の試験で、電圧の上昇が見られた (Fig.1)。コイル#4 で、コイル#1 同様、コイル電圧が増大した原因を検討する必要がある。

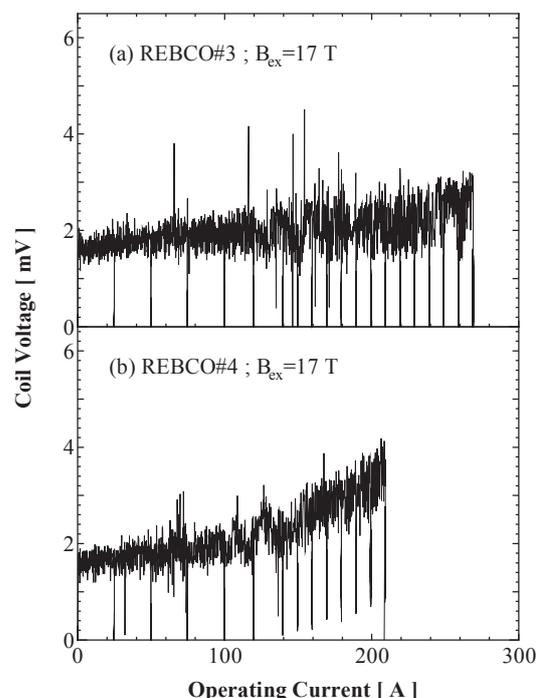


Fig.1 Coil voltage of REBCO coil (a) #3 at $B_{ex}=17$ T, and (b) #4 at $B_{ex}=17$ T.

謝辞

本研究は、産学イノベーション加速事業「戦略的イノベーション創出推進」として、科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

参考文献

1. H. Suematsu: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.185
2. S. Matsumoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.60; p.61

GdBCO 線材の積層導体を用いた機械的バットジョイントの基礎研究

Fundamental study on mechanical butt joint of stacked GdBCO conductor

大日方 達也, 伊藤 悟, 橋爪 秀利(東北大)

OHINATA Tatsuya, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: tohi@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

本研究グループでは核融合炉の建設コスト、メンテナンスコストを削減するため、マグネットを分割製造し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットを提案している。そのための基礎研究として行ってきた銅ジャケット付 BSCCO 2223 積層導体の機械的バットジョイントの研究において接合面へ均一な接触圧力を与えることで 1 kA 級導体で接合抵抗を 140 nΩまで低減できることが示されている[1]。しかしながら、核融合炉のような強磁場環境での利用を考えた場合、ReBCO 系導体の適用が必要である。そこで本研究では、ReBCO 系導体の機械的バットジョイントの抵抗特性の取得を目的として、GdBCO 線材を用いて製作した積層導体の機械的バットジョイントの試験を行った。

2. 実験

試験用導体としては、Fig.1 に示すような長手方向に対して 45 度の傾きのある接合面を持つ銅ジャケット付 GdBCO 積層導体 (GdBCO 線材 4 層、 $I_c = 570$ A at 77K, self field) と、比較のため銅のみで製作した銅製導体を用いた。なお、接合試験用 GdBCO 積層導体は、1 本の GdBCO 積層導体を製作し、臨界電流を測定した後に、切断して製作した。

Fig.2 に実験体系を示す。本実験体系では接合部に垂直方向と水平方向から接合力を負荷でき、垂直方向接合力の値はロードセルで測定が可能である。水平方向接合力はスタッドボルトをナットで締め上げることで発生させており、今回の試験ではナットの締結トルクを 1.6 Nm に固定した。比較のため、接合面を直接接合 (Dry Joint) させた場合、厚さ 0.01 mm の In 箔を接合面間に挿入した場合についてそれぞれ接合試験を行った。電圧端子①-②間を測定することで積層導体の電圧降下 (臨界電流)、電圧端子②-③間の電圧を測定することで接合抵抗を評価した。

Fig.3 に接合試験により得られた印加電流 200 A 時の垂直方向接合応力 (最大 120 MPa) と接合抵抗の関係を示す。結果より、In 箔挿入接合の方が接合抵抗を低減できることが分かるが、過去の研究で行った BSCCO 2223 積層導体や、銅製導体の接合抵抗よりも大きい値であることが確認できる。今回用いた銅製導体の断面サイズは幅 6.5 mm × 厚さ 5.5 mm、過去の研究で用いた BSCCO 2223 積層導体の断面サイズは幅 6.5 mm × 厚さ 5.5 mm (BSCCO 2223 線材部の幅 4.5 mm × 厚さ 2.5 mm) であり、GdBCO 積層導体の断面積とは異なるが、導体の種類による断面積の差異を考慮しても GdBCO 積層導体の接合抵抗が大きい。すなわち GdBCO 線材同士の接合抵抗が大きいことを示している。

Fig.4 に直接接合試験の際の電流-電圧特性 (垂直接合応力 69.6 MPa 時)、および切断前の積層導体の電流-電圧特性を示す。結果より積層導体を接合する事によって、積層導体の臨界電流値が大幅に低減したことが確認できる ($I_c =$ 約 300 A)。これは、積層した各 GdBCO 線材に流れる電流に偏りが生じたためであると考えられる。また、接合試験では低電流時に電圧が線形上昇することが確認できるが、これは銅ジャケットに電流が分流したことを意味している。これらの現象は GdBCO 線材同士の接合抵抗が銅ジャケット同士の接合抵抗より大幅に大きいため、接合部において電流が銅ジャケットを迂回するよう経路が存在する事に起因すると考えられる。

3. まとめ

GdBCO 積層導体を用いて機械的バットジョイント試験を行った結果、接合抵抗は過去の研究で得られた BSCCO 2223 導体での値よりも大幅に大きい値となった。接合抵抗を低減するため、今後は導体に流れる電流の分流状態を数値解析によって定量的に評価し、積層導体の設計を改良する予定である。

参考文献

1. S. Ito, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.263

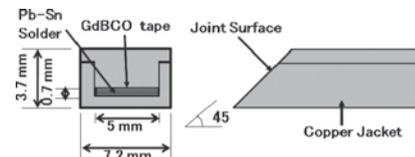


Fig.1 Test Cable

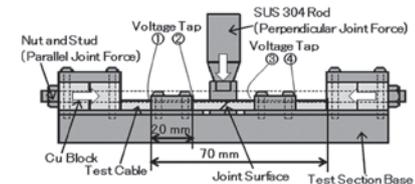


Fig.2 Experimental Set-up

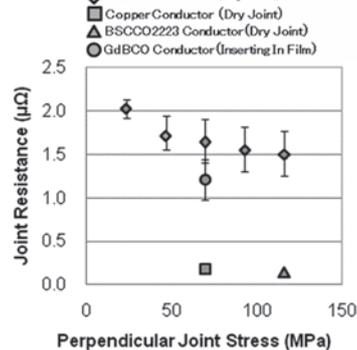


Fig.3 Relationship between Perpendicular Joint Stress and Joint Resistance

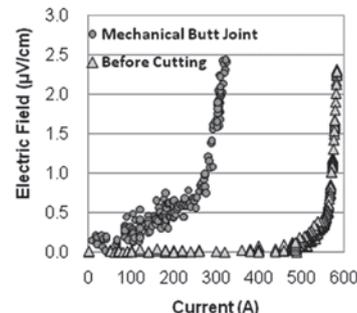


Fig.4 Voltage Drop of a Stacked GdBCO Conductor

Bi 系ならびに Y 系高温超電導導体の厚み方向熱拡散率に関する検討

Study on thickness-direction thermal diffusivity of Bi- and Y-system HTS conductors

中村 武恒, 小山 友一, 山川 宏 (京大); 船木 一幸 (JAXA); 雨宮 尚之 (京大)

NAKAMURA Taketsune, KOYAMA Yuichi, YAMAKAWA Hiroshi (Kyoto Univ.); FUNAKI Ikkoh (JAXA); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.)

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

1. はじめに

我々は、深宇宙探査を目標とし、太陽風プラズマと高温超電導コイルが作るダイポール磁界の相互作用を利用した磁気プラズマセルの検討を実施している[1]。既報告では、Y 系高温超電導薄膜テープ材の厚み方向熱拡散率について、実験的かつ解析的検討を実施した[2]。この結果は、磁気プラズマセルで想定している伝導冷却を基本とするマグネット設計に関して非常に重要な知見であり、つまり熱設計に際して考慮すべき制約条件を与える。

本講演では、もう1種類の市販高温超電導線材として、Bi 系テープ材についても同様の検討を実施した。即ち、Bi 系と Y 系では線材構造が大きく異なることから、それらテープ材を適用したマグネット熱設計に際して指針が大きく異なってくると予測される。そこで、Bi 系ならびに Y 系導体における厚み方向熱拡散率を実験ならびに数値解析に基づいて比較検討した。

2. 実験ならびに解析方法

対象とした高温超電導テープ材は、Y 系テープ材 (SCS-3050, Superpower 社製) ならびに Bi 系テープ材 (DI-BSCCO Type S, 住友電工製) である。表 1 には、使用したテープ材の厚みを示す。図 1 には、試験システムのセットアップ図を示す。上記テープ材をポリイミドテープ (25 μm 厚) で絶縁し、5 枚積層してバンドル導体とした。このバンドル導体の上面にバンドヒータを熱伝導グリスで接着した後、GM 冷凍機のクールドヘッド上に図のように設置した。

また、実験結果から熱拡散率を計算すべく、図 2 のような解析モデルを考えた。即ち、導体のテープ材長手方向における温度分布は均一とし、一次元モデルを考えて熱平衡方程式を離散化して数値解析した。

3. 結果と考察

まず、Y 系ならびに Bi 系高温超電導バンドル導体が所定の温度に到達後、ヒータ発熱を与えて導体両面の温度の時間変化を測定した。また、Cu のダミー導体にて同様の測定を実施し、そのデータをもとに見積もったヒータ導体間の熱抵抗を熱解析に用いた。図 3 には、実験ならびに解析によって評価した熱拡散率の温度依存性を示す。同図から明らかなように、Y 系テープ材の熱拡散率は Bi 系に比較して非常に小さいように見える。実験・解析の具体的方法他、詳細は当日に報告する。

参考文献

1. H. Yamakawa, I. Funaki et al.: Acta Astronautica, vol. 59, (2006) pp.777- 784
2. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 83 (2010) p. 248

Table 1 Thicknesses of the samples

種類	Cu	Bi	Y
テープ 1 本当りの厚み [mm]	0.11	0.18	0.1 1
5 枚バンドル導体厚 [mm]	1.2	1.6	1.2

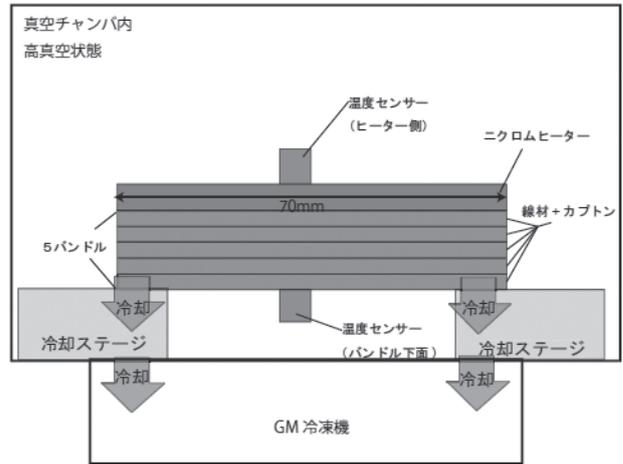


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for transient heat transfer properties in HTS bundled conductors.

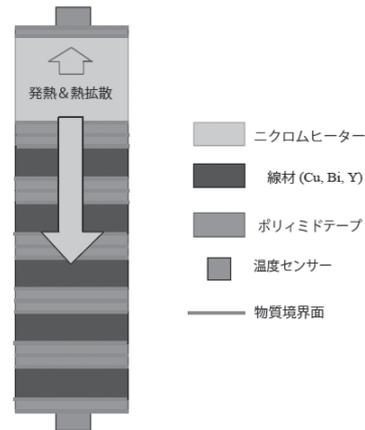


Fig. 2 Schematic diagram of 1D thermal analysis model.

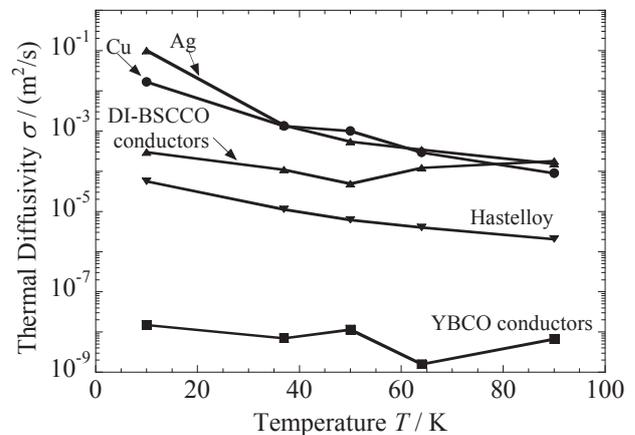


Fig. 3 Estimated thermal diffusivity.

TFA-MOD 法 YBCO テープ線材を用いた電流リードの開発⑤ (2 kA 級超電導電流リードユニットの作製と通電特性) Development of current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes ⑤ (Transport performance of 2 kA class current lead units)

石井 雄一、坂井 裕貴、山田 豊、太刀川 恭治 (東海大)、
中西 達尚、引地 康雄、青木 裕治 (昭和電線)、田村 仁、三戸 利行 (核融合科学研究所)
ISHII Yuichi, SAKAI Yuki, YAMADA Yutaka, TACHIKAWA Kyoji (Tokai University);
NAKANISHI Tatsuhisa, HIKICHI Yasuo, AOKI Yuji (SWCC); TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki (NIFS)
E-mail:0BAZM005@mail.tokai-u.jp

1. はじめに

前報では TFA-MOD 法により作製した YBCO テープ線材を 5 本用いた電流リードユニットを 10 組使用した集成型超電導電流リードについて報告を行ったが、本報では更なる通電電流の増大のため、同テープ線材を 20 本用いた 2 kA 級超電導電流リードユニットを作製し、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 法により作製した YBCO テープ線材は、幅 5 mm、厚さ 100 μm の Hastelloy™ 基板上に酸化物の中間層を経て厚さ 1.5 μm の YBCO 超電導層、その上に 26 μm の Ag 保護層から構成される。電流リードユニットに使用した 200 本の YBCO 線材は液体窒素中、自己磁場下 (@77 K, s.f.) において平均 140 A の臨界電流値を有し、20 本 1 組として 10 組の電流リードユニットを作製した。Fig. 1 に試作した電流リードユニットの外観及び模式図を示す。YBCO 線材 20 本を幅 44 mm、厚さ 1 mm、長さ 164 mm の GFRP と幅 44 mm、厚さ 2 mm、長さ 208 mm の SUS304 板で補強し、線材両端を Cu 電極にハンダ接合した電流リードユニットを 10 組作製した。通電試験は核融合科学研究所において行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に 10 組の電流リードユニットの 12 μV 発生時 (電界基準 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) の I_c 値を示す。各ユニットの YBCO 線材において、12 μV 発生時に、最大で 2,480 A、10 組平均で 2,210 A の直流通電 (@77 K, s.f.) をすることが出来た。

Fig. 3 に試作した 10 組の 2 kA 級超電導電流リードユニットの 1 つであるユニット H の通電結果 (@77 K, s.f.) を示す。2,800 A 通電時の各 YBCO 線材の発生電圧 (V_{YBCO}) は平均 8 μV となり、Cu 電極と各線材の接続抵抗 ($V_{\text{Cu}(+)}$ 、 $V_{\text{Cu}(-)}$) は約 518 μV 、496 μV 、ユニット全体 (V_{overall}) では 1021 μV となり、低抵抗接続が実現できた。熱侵入量は YBCO 線材 20 本で 273 mW と計算され、2,000 A の通電電流では約 137 mW/kA となり、従来のガス冷却型 Cu 電流リード (1.2 W/kA) と比較すると約 1/10 程度の値である。

謝辞

本研究は東海大学と昭和電線ケーブルシステム(株)の共同研究の一部であり、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。

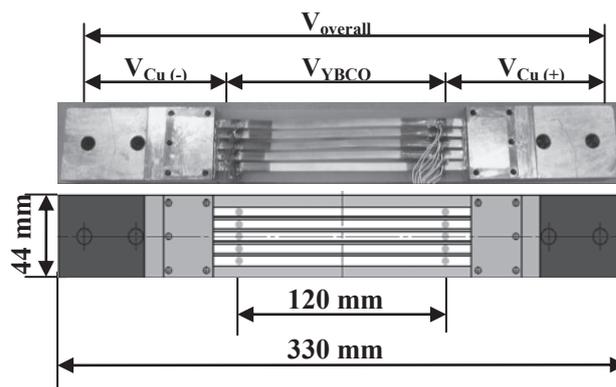


Fig. 1 Current lead unit prepared by twenty YBCO tapes.

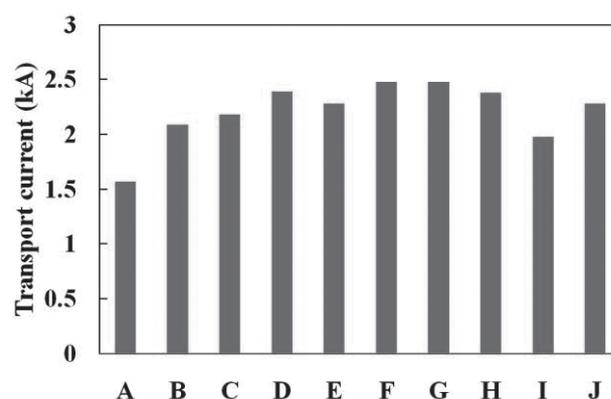


Fig. 2 Transport current at 77 K and 12 μV on YBCO tapes for the ten current lead units (unit A~J).

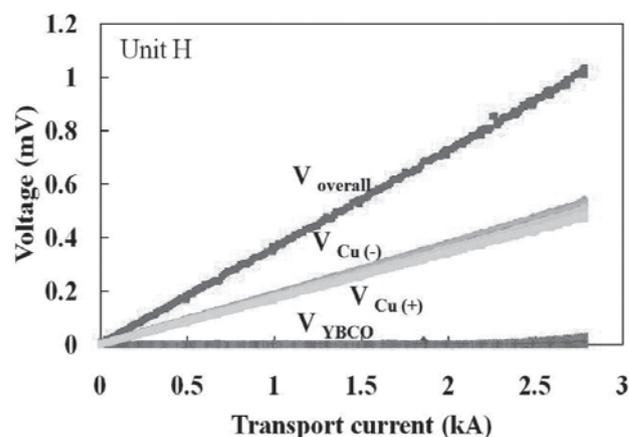


Fig. 3 Transport current at 77 K for the current lead unit H.