TFA-MOD 法 YBCO 線材を用いた超伝導電流リードの 通電特性と電流分布の評価

松村 亮佑^{1,*} 山田 豊¹ 引地 康雄² 広長 隆介²
小泉 勉² 田村 仁³ 三戸 利行³

¹東海大学工学部

²昭和電線ケーブルシステム株式会社

³核融合科学研究所

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 80, No. 7 (2016), pp. 443–446
Special Issue on High Performance Superconducting Materials —Progress of Microstructure Control—
© 2016 The Japan Institute of Metals and Materials

Transport Performance and Current Distribution of HTS Current Lead Prepared by the TFA-MOD Processed YBCO Tapes

Ryosuke Matsumura^{1,*}, Yutaka Yamada¹, Yasuo Hikichi², Ryusuke Hironaga²,
Tsutomu Koizumi², Hitoshi Tamura³ and Toshiyuki Mito³

¹*School of Engineering, Tokai University, Hiratsuka 259-1292*

²*SWCC Showa Cable System Co., LTD., Sagami-hara 252-0253*

³*NIFS National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292*

High Temperature Superconducting HTS current lead has been prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes. The YBCO tape has higher critical current density J_c and better magnetic property than the Bi2223 tape. Furthermore, thermal conductivity of YBCO tape with thin Ag layer is much lower than that of Ag-sheathed Bi2223 tape. The critical current of the YBCO tapes ranges from 150 A to 190 A in liquid nitrogen and self-field. A current lead is composed of eight YBCO tapes, Cu end caps and a pair of stainless steel boards. Rogowski coils and Hall sensors used for estimation of current distribution are attached on each YBCO tapes. The transport current of 1000 A was carried with no voltage on every YBCO tape at 77 K. The voltages between Cu cap and YBCO tapes almost linearly increased with increasing transport current, and they range from 0.206 mV to 0.234 mV and 0.210 mV to 0.230 mV at 1000 A, respectively. The low voltages correspond to 0.206 $\mu\Omega$ to 0.234 $\mu\Omega$ and 0.210 $\mu\Omega$ to 0.230 $\mu\Omega$. The low contact resistance results in low joule heating at Cu joints. The current calculated by Rogowski coils in eight YBCO tapes varies from 4 A to 179 A at 1000 A and sweep rate of 200 A/s. Therefore, the imbalance among eight YBCO tapes is evaluated to be 175 A. The current of eight YBCO tapes calculated by Rogowski coils sums up to 1001 A, which is the slight difference of 1 A in comparison with transport current of 1000 A. Rogowski coils and Hall sensors are effective at evaluating of current distribution for current lead. [doi:10.2320/jinstmet.JC201601]

(Received January 8, 2016; Accepted February 15, 2016; Published March 18, 2016)

Keywords: YBCO tape, high temperature superconducting current lead, Rogowski coil, transport current performance, current distribution

1. はじめに

臨界温度 (T_c) が液体窒素温度 77 K 以上を示す $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ (YBCO), $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi2223), $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$ (Bi2212) などに代表される高温超伝導体 (HTS) を応用した製品の 1 つに電流リードが挙げられる¹⁻⁴⁾。電流リードとは、極低温下で使用される超伝導マグネット等様々な超伝導機器⁵⁻⁷⁾に電流を供給する導体である。従来は銅のような電気抵抗率の低い材料が用いられていたが、電気抵抗率が低い材料は一般的に熱伝導率が高く、熱侵入量が大きくなってしまいう問題がある。これは超伝導機器

を冷却・保持するためのコストに多大な負担となる。一方、高温超伝導材料を用いた場合、 T_c 以下においては電気抵抗 = 0 であるため通電時のジュール発熱が無く、また酸化物であるため熱伝導率も極めて低く、銅リードよりも大幅に熱侵入量を低減した理想的な電流リードが可能となる。

本研究室では、試作した超伝導電流リードを用いて液体窒素温度 77 K において安定した大電流の通電を達成した^{8,9)}、安全性確保の点からも通電時の電流分布を定量的に評価することが課題だと考えている。そこで本研究では三フッ化酢酸塩有機酸塩塗布熱分解法 (Tri Fluoro Acetates-Metal Organic Deposition: TFA-MOD) により作製した YBCO 超伝導テープ線材¹⁰⁻¹³⁾を用いた 1000 A 級電流リードを試作し、通電特性とともにロゴスキーコイルとホール素子を用いて通電時の電流分布を評価した^{14,15)}。

* 東海大学大学院生 (Graduate Student, Tokai University)

2. 実験方法

Fig. 1 に本実験で用いた TFA-MOD 法 YBCO 線材の外観および模式図を示す. 幅 5 mm, 厚さ約 110 μm (Hastelloy substrate: 100 μm , Oxide buffered layers: 0.6 μm , YBCO layer: 1.5 μm , Ag layer: 6 μm) のテープ線材は, 液体窒素中・自己磁場下 (self field: s. f.) において 150~190 A の臨界電流 (I_c) 値を有している.

Fig. 2 に作製した電流リードの外観および模式図を示す. YBCO 線材を電流リードの表裏両面の片側に 4 本ずつ等間隔に平行配置した. YBCO 線材両端を無酸素銅電極にはんだ接合し, シャントを兼ねた 2 枚のステンレス鋼板 (SUS304: SS, 厚さ: 2 mm) を銅電極に挟み込んで, YBCO

Fig. 1 TFA-MOD processed YBCO tape. (a) long YBCO tape of 5 mm in width, (b) schematic cross section of the YBCO tape.

Fig. 2 HTS current lead composed of 8 YBCO tapes, 2 SS boards and Cu caps at both ends.

線材を補強した. また, ステンレス鋼板にはホール素子の取り付け精度を確保するために Al 製のガイドを取り付けた. 電流リードの電圧測定箇所は, 電流リード全体の発生電圧: V_{Overall} , Cu 電極と YBCO 線材間の発生電圧: $V_{\text{Cu}(+)}$, $V_{\text{Cu}(-)}$, YBCO 線材に取り付けた電圧タップ間の発生電圧: V_{YBCO} (電圧端子間距離: 170 mm) である.

Fig. 3 には通電時の電流分布を評価するために使用したログスキークoilとホール素子の外観と取り付け状況を示す. 同図 (a) のログスキークoilの形状は, 小半径: $r = 0.003$ m, 周回長: $l = 0.09$ m, 巻き数: $N = 3000$ である. YBCO 各線材をログスキークoilの円を貫くように装着し, 電流スイープ時の起電力を測定することで電流値を推定した. ログスキークoilの起電力: e_s は以下の式で算出される¹⁶⁾.

$$e_s = \pi r^2 \mu_0 N / l \times di/dt \quad (1)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率: $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m), di/dt は電流のスweep速度 (A/s) である. 同図 (b) のホール素子には, 廉価な GaAs タイプを用い, 個別に校正した後 YBCO 各線材の近くに設置して, 通電時に発生するテープ面に平行方向の磁場を測定することで電流値を推定した. さらに, YBCO 線材を順次 1 本ずつ切断して通電し, その前後の I_c 値から切断した線材の I_c 値と, ログスキークoilおよびホール素子から推定した電流値とを比較し, 電流リード全体の電流分布を評価した.

3. 実験結果および考察

3.1 電流リードの通電特性

Fig. 4 に電流リードの通電結果 (@77 K, s. f.) を示す. (−) 側 Cu 電極部の電圧: $V_{\text{Cu}(-)}$ が高く, (+) 側 Cu 電極部の電圧: $V_{\text{Cu}(+)}$ が低い YBCO 線材 (No.8) が 1 本認められた. 1000 A まで YBCO 線材に電圧発生することなく通電することができたが, 1010 A 通電時に一部の YBCO 線材に

Fig. 3 Rogowski coils and Hall sensors used for estimation of the current distribution of the current lead. (a) Rogowski coils, (b) Hall sensors.

Fig. 4 Transport current performance of the current lead (77 K, s. f.)

電圧が発生し、1080 A でクエンチした。YBCO 8 の $V_{Cu(+)}$ と $V_{Cu(-)}$ を除いて、Cu 電極部の電圧: $V_{Cu(+)}$, $V_{Cu(-)}$ は通電電流値に伴いほぼ直線的に増加し、1000 A 通電時において、 $V_{Cu(+)}$ 側には 0.206 mV ~ 0.234 mV, $V_{Cu(-)}$ 側には 0.210 mV ~ 0.230 mV の電圧が発生した。従って接続抵抗は、 $V_{Cu(+)}$ 側で $0.206 \mu\Omega \sim 0.234 \mu\Omega$, $V_{Cu(-)}$ 側で $0.210 \mu\Omega \sim 0.230 \mu\Omega$ に相当し、低抵抗の接続ができた。全体電圧 $V_{Overall}$ は、1000 A 通電時に 0.444 mV となり、 V_{YBCO} , $V_{Cu(+)}$ および $V_{Cu(-)}$ の総和とほぼ等しくなった。

3.2 電流リード内の電流分布の評価

Fig. 5 に 200 A/s のスイープ速度で 1000 A まで通電した時のログスキーコイルに生じた起電力を示す。Fig. 5 に依れば、起電力がほとんど生じなかった線材 (No.8) が 1 本認められたが、残り 7 本の線材には式 (1) 式より算出した値: $e_s = 29.6 \mu V$ と比較してスイープ初期の電圧変動時を除けば、ほぼ計算値に近い電圧が出力された。この起電力値を積分することで YBCO 各線材に流れたと思われる電流値を算出した。

Fig. 6 に 200 A/s, 1000 A 通電時の YBCO 各線材の電流値をログスキーコイルにより推定した結果を示す。電流がほとんど流れていない (4 A) 線材が 1 本認められたが、YBCO 1 ~ 7 の 7 本の線材間の電流値は 128 ~ 179 A と推定され、最大 51 A の偏流が生じた。しかしながらこれらの電流の総和は 1001 A となり、実際の通電電流値 1000 A に対してほぼ等しい値となった。

Fig. 7 にログスキーコイルとホール素子より推定された 8 本の YBCO 線材の電流値を比較して示す。ホール素子によると、電流が流れていないとされる YBCO 線材には 1 A, YBCO 1 ~ 7 の 7 本の YBCO 線材には 96 ~ 187 A と推定され、最大 91 A の偏流が生じた。この時電流の総和は 1008 A となり通電電流値に対してやや大きい値となったが、ログスキーコイルにより推定される電流値とホール素子により推定される電流値には大きな差はなく、従って、電流分布にも大きな違いは見られなかった。なお、電流がほとんど流れ

Fig. 5 Voltage in Rogowski coils versus transport current up to 1000 A at sweep rate of 200 A/s.

Fig. 6 Current distribution of the current lead up to 1000 A at sweep rate of 200 A/s.

Fig. 7 Current distribution evaluated by Rogowski coils and Hall sensors for the current lead composed of 8 YBCO tapes.

なかった YBCO 線材は、Fig. 4 における Cu 電極部の電圧: $V_{Cu(-)}$ が高い線材であるため線材と Cu 電極との接続不良により電流がほとんど流れなかったためと考えられる。

さらに、YBCO 線材を順次 1 本ずつ切断した時の通電電

Fig. 8 Current degradation and current distribution of the current lead with decreasing the number of YBCO tapes. (a) current degradation, (b) current distribution.

流値の変化及び電流分布の変化をログスキーコイルにより推定した結果を Fig. 8 に示す. なお Fig. 8(b) の x 軸は YBCO 線材の番号, y 軸は電流値, z 軸は電流リード内の線材の本数を示す. YBCO 線材を線材番号 7 番から降順に 1 番まで切断した. YBCO 線材を順次切断する毎に同図(a)に示すように通電電流値は減少した. 一方, 同図(b)に示すように線材の減少に伴う残された線材間の電流分布に変化はほとんど見られなかった. これは YBCO 各線材を集合した時の素線 I_c 値と Cu 電極部における接続抵抗により各線材が分担する電流がほぼ決まるため線材を切断する毎に通電電流全体の値は減少するものの, 残された線材間の電流分布にほとんど変化はないものと推定される. これまでの結果に依れば, ログスキーコイルはホール素子と比較して, 通電電流値をより正確に推定でき, 取り付けも容易であるが, 電流スイープ時しか測定できない難点がある. 一方ホール素子は, 定常通電時にも測定できるメリットがあるが, テープ線材に対する位置や角度等, 取り付け精度による誤差や取り付け方法に制約がある. 従って, ログスキーコイルとホール素子を併用し, 両者の長を生かした測定方法により, 電流リード内の電流分布を定量的に推定できるものと思われる.

4. 結 論

TFA-MOD 法 YBCO 線材を用いた超伝導電流リードを作製し, 通電特性を評価すると共に, ログスキーコイル及びホール素子を用いて電流分布を評価した.

(1) 素線 I_c 値 150~190 A の YBCO 線材を 8 本用いて, 1000 A 級超伝導電流リードを作製し通電試験を行ったところ, 液体窒素中・自己磁場下において YBCO 線材に電圧発生なく 1000 A の通電ができた. また, Cu 電極部における接続抵抗は, (+)(-) 側共に $0.2 \mu\Omega$ 程度の低抵抗の接続ができた.

(2) YBCO 各線材にログスキーコイルとホール素子を装着し, 電流分布評価を行ったところ, スイープ速度 200 A/s, 1000 A 通電時において, ログスキーコイルにより推定される電流値の総和は 1001 A, 一方ホール素子により推定される電流値は 1008 A とログスキーコイルの方が実際の通電電流値に近い値であったが, 両者の差は小さかった. またログスキーコイル及びホール素子を用いて YBCO 各線材に流れる電流値を推定でき, 電流リード内の電流分布を評価出来た.

本研究の一部は, 核融合科学研究所一般共同研究(NIFS14KECF011)により行いました.

文 献

- 1) A. Ballarino: IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**(1999) 523-526.
- 2) R. Heller, G. Friesinger, A. M. Fuchs and R. Wesche: IEEE Trans. Appl. Supercond. **12**(2002) 1285-1288.
- 3) A. Ballarino: Phys. C. **468**(2008) 2143-2148.
- 4) K. Shiohara, S. Sakai, S. Ohki, Y. Yamada, K. Tachikawa, T. Koizumi, Y. Aoki, Y. Hikichi, J. Nishioka and T. Hasegawa: Phys. C. **469**(2009) 1870-1872.
- 5) M. Ishizuka and J. Sakuraba: Phys. C. **433**(2006) 173-181.
- 6) M. H. Sohn, S. Kim, K. Sim, J. H. Bae, S.-J. Lee and H. Y. Park: IEEE Trans. Appl. Supercond. **20**(2010) No. 3 1755-1758.
- 7) L. Ren, Y. Tang, J. Li, Z. Li, L. Chen, J. Chen, J. Shi and J. Wen: IEEE Trans. Appl. Supercond. **20**(2010) 1737-1740.
- 8) Y. Yamada, Y. Ishii, S. Sakai, K. Shiohara, K. Tachikawa, Y. Aoki, A. Kaneko, T. Koizumi, H. Tamura and T. Mito: IEEE Trans. Appl. Supercond. **21**(2011) 1054-1057.
- 9) Y. Hosono, H. Motohashi, R. Matsumura, Y. Yamada, Y. Hikichi, M. Minowa, T. Koizumi, H. Tamura and T. Mito: Abstracts of CSSJ Conference. **88**(2013) p. 146.
- 10) Y. Aoki, R. Teranishi, Y. Kitoh, H. Fuji, K. Nakaoka, T. Koyama, J. Matsuda, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Tokunaga, Y. Yamada, T. Goto and A. Yajima: Phys. C. **426-431**(2005) 945-948.
- 11) S. Nomoto, T. Izumi, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara, Y. Aoki, T. Koizumi, A. Kaneko, Y. Takahashi, T. Nakanishi and T. Hasegawa: SWCC Review in Japanese. **56**(2006) No. 1, 47-51.
- 12) T. Izumi, J. Matsuda, K. Nakaoka, Y. Kitoh, Y. Sutoh, T. Nakanishi, M. Yoshizumi, Y. Yamada and Y. Shiohara: IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**(2007) 3329-3331.
- 13) Y. Shiohara, M. Yoshimizu, T. Izumi and Y. Yamada: Supercond. Sci. Technol. **24**(2008) 03400287.
- 14) R. Matsumura, Y. Hosono, R. Tanimoto, Y. Yamada, K. Takahashi, R. Hironaga, T. Hasegawa, H. Tamura and T. Mito: IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**(2016) 4800104.
- 15) R. Matsumura, Y. Nakanishi, Y. Yamada, K. Takahashi, Y. Hikichi, T. Koizumi, H. Tamura and T. Mito: Abstracts of CSSJ Conference. **92**(2015) p. 79.
- 16) Y. Suzuki, S. Kouno, R. Kataoka, T. Kimura and H. Kuwano: Transactions of the JSME (in Japanese). transjsme.14-00696.