Development of assembled current lead prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes

Y 系超伝導テープ線材を用いた集合型電流リードの開発

Ryosuke MATSUMURA, Haruki MOTOHASHI, Yuto HOSONO and Yutaka YAMADA

Department of Materials Science, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

TEL: +81-463-58-1211 FAX: +81-463-50-2096 e-mail: moet.chandon.0731@gmail.com

(Received 7 March, 2014 Accepted 18 April, 2014)

Abstract – HTS current lead have been prepared by the TFA-MOD processed YBCO tapes. A current lead unit is composed of 6 bundles stacked by 4 YBCO tapes, Cu end caps and a pair of stainless steel boards. The YBCO tape is 5 mm in width and around 130 μm in overall thickness. The YBCO superconducting layer with 1.5 μm is formed on oxide buffered layers on Hastelloy substrate tape. The critical current of 24 YBCO tapes ranges from 145 A to 166 A at 77 K and self-field. The YBCO current lead is assembled from the 4 current lead units in parallel. The transport current of 10 kA at 77 K was stably carried with no voltage generation on the YBCO tapes of the assembled current lead for 10 minutes. Rogowski coils were attached on 4 current lead units to evaluate current distribution of them. The current unbalance of 930 A occurred between 4 units at transport current of 10 kA.

Keywords : HTS current lead, TFA-MOD process, YBCO tapes, Transport performance, Current distribution

I. INTRODUCTION

$\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi2223) や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ (Bi2212)などを代表とする臨界温度 77 K 以上を示す酸化物系高温超伝導体(HTS)の応用として電流リードが考えられる。電流リードとは室温におかれる電源から極低温下の超伝導機器に電流を供給する導体である。一般には Cu あるいは Cu 合金が用いられているが、通電時のジュール発熱と室温からの伝導熱により最適化しても 1.2 W/kA の熱侵入量が避けられない。一方、酸化物系高温超伝導体を用いると電気抵抗が 0 であるためジュール発熱が無く、熱伝導もセラミックスであるため低く、大電流・低熱侵入の超伝導電流リードが可能となる。本研究では、TFA-MOD(Tri Fluoro Acetates-Metal Organic Deposition)法 YBCO 超伝導テープ線材を用いた 2

kA 級電流リードユニット¹を作製し、これらを集合させた集合型電流リード²の開発を目的とする。

II. EXPERIMENTAL

Figure 1 に TFA-MOD 法 YBCO 線材の外観写真及び断面模式図を示す。YBCO 線材構造は上から Ag 安定化保護層(厚さ: 24 μm)、YBCO 超伝導層(厚さ: 1.5 μm)、酸化物中間層(厚さ: 2.2 μm)、Hastelloy 基板(厚さ: 100 μm)である。リールに巻かれた長尺線材から幅 5 mm の長尺線材から長さ 280 mm と、長さ 240 mm の線材をおのおの 48 本、計 96 本を切り出した。

Figure 2 に液体窒素中・自己磁場下における YBCO 線材の素線 I_c 値を示す。YBCO 線材 96 本の素線 I_c 値は最大 166 A、最小 145 A、平均 153 A である。また各電流リードユニットの素線 I_c 値の合計は、Unit 1 が 3647 A、Unit 2 が 3606 A、Unit 3 が 3930 A、Unit 4 が 2980 A である。

SAS Award was given to this paper presented as Poster Presentation at the 2013 SAS Intelligent Symposium.

Figure 3 に作製した電流リードユニットの外観及び模式図を示す。YBCO 線材は上述した長短各 2 本、計 4 本 1 組を重ね合わせ、それらを並列に 3 列等間隔に配置した後、反対側にも同様に 3 列配置した。表裏側の計 6 列 24 本の YBCO 線材両端を Cu 電極にハンダ接合し、Cu 電極両側にシャントの機能を兼ね備えた補強材として厚さ 2 mm のステンレス鋼板 2 枚を挟み込む形でボルト接続し電流リードユニットを作製した。同様の作製方法で Unit 1~4 の、計 4 組を作製した。

Figure 4 に集合型電流リードの外観及び模式図を示す。4 組の電流リードユニットの両端を四角形 Cu 電極の外周部にボルト接続した。通電試験は液体窒素中・自己磁場下において行い、直流 4 端子法により各電圧端子間の発生電圧を測定した。集合型電流リードの電圧測定箇所は電流リードユニットの発生電圧： V_{Unit} 、Cu 電極と YBCO 線材間の発生電圧： $V_{\text{Cu}(+)}$ および $V_{\text{Cu}(-)}$ 、YBCO 線材の発生電圧： V_{YBCO} (電圧端子間距離：170 mm) である。

Figure 5 にログスキーコイルの外観及び模式図を示す。ログスキーコイルは直径 3 mm、全長 100 mm のシリコンチューブに、直径 0.084 mm の Cu 線材を巻きつけたものを用いた。形状は周回長 0.087 m、小半径 0.0015 m、巻き数 3000 である。ログスキーコイルの起電力 e_s の計算は (1) 式を用いた。

$$e_s = \frac{\pi r^2 \mu_0 N}{l} \frac{di}{dt} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

r : 小半径 [m]、 μ_0 : 透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]、 N : 巻き数、 l : 周回長 [m]

Fig. 1. TFA-MOD processed YBCO tape. (a) Long tape wound on a reel, (b) Schematic cross-section of the tape.

このログスキーコイルを各電流リードユニットに取り付け、(1) 式より得られた計算値と通電時の測定値を比較し、電流スイープ時における集合型電流リード内 4 組の電流リードユニットの偏流を評価した。

Fig. 2. Transport current of YBCO tapes prepared for the current lead at 77 K in self-field.

Fig. 3. A current lead unit composed of 24 YBCO tapes, stainless steel boards and Cu caps at both ends.

Fig. 4. Current lead assembled from 4 current lead units in parallel.

Fig. 5. Rogowski coil attached on each current lead unit.

III. RESULTS AND DISCUSSION

集合型電流リードに 10 kA 通電したときの電流 Unit 4 における通電結果を Fig. 6 に示す。Unit 4 の各電圧 $V_{Cu(+)}$ 、 $V_{Cu(-)}$ 、 V_{Unit} は 10 kA までほぼ直線的に増加したが、 V_{YBCO} には電圧の発生なく通電ができた。10 kA 通電時の Cu 電極部 $V_{Cu(+)}$ には 1.2 mV、 $V_{Cu(-)}$ には 1.1 mV の電圧が発生し、これらの和は全体電圧 V_{Unit} の 2.3 mV とほぼ等しくなった。

Figure 7 に集合型電流リードに 10 kA、10 分間の連続通電結果を示す。一部のユニットの V_{YBCO} に電圧発生がみられたが、 $V_{Cu(+)}$ 、 $V_{Cu(-)}$ 、 V_{Unit} に電圧の変動はみられず安定した通電が可能であった。

Figure 8 にスweepレート 2500 A/s で 10 kA 通電時の電流の立ち上げ - 保持 - 立ち下げをしたときのログスキーコイルの起電力を示す。通電開始後約 1.6 秒後(4000 A) 近傍の Unit 1~4 の起電力はそれぞれ 181 μV 、236 μV 、217 μV 、218 μV であったが、電流の増加と共に各ユニット間の起電力に差が生じ、4 秒後(10 kA)通電時には Unit 1~4 にそれぞれ 126 μV 、260 μV 、215 μV 、226 μV の起電力となり、各ユニット間に最大 134 μV の差が生じた。その後、10 kA 一定電流通電時にはログスキーコイルの起電力は 0 となり、電流立ち下げ時のログスキーコイルには立ち上げ時とほぼ同様の起電力が生じた。

Figure 9 にログスキーコイルの起電力より計算した集合型電流リード各ユニットに分流した電流値を示す。10 kA まで通電したとき、Unit 1 には 2180 A、Unit 2 には 3170 A、Unit 3 には 2710 A、Unit 4 には 2870 A の電流が流れたものと計算され、電流リードユニットには最大 990 A の偏流が生じたと思われる。この時電流値の合計値は 10930 A となるので、実際の通電電流値である 10000 A とは 930 A の差が生じたが、集合型電流リード内の偏流をある程度定量的に評価出来た。

Fig. 6. Transport current performance of the current lead unit 4 (@77 K, s. f.).

Fig. 7. Transport current performance of the assembled current lead (@77 K, s. f.).

Fig. 8. Voltage in Rogowski coil vs transport current up to 10 kA at sweep rate of 2500 A/s.

Fig. 9. Current distribution between 4 units in transport current of 10 kA.

IV. CONCLUSIONS

1. TFA-MOD 法 YBCO 線材を 24 本使用した電流リードユニットを 4 組作製し、これらを集合させた 10 kA 級集合型電流リードを作製した。
2. 集合型電流リードは、液体窒素中・自己磁場下において 10 kA 通電時まで $V_{Cu(+)}$ 、 $V_{Cu(-)}$ 、 V_{Unit} は直線的

に増加し、 V_{YBCO} に電圧が発生することなく通電できた。また 10 kA を 10 分間連続通電しても $V_{Cu(+)}$ 、 $V_{Cu(-)}$ 、 V_{Unit} に電圧の変動が見られず安定した通電が可能であった。

3. 2500 A/s で 10 kA 通電時における集合型電流リード各ユニット間には、3170 A~2180 A の電流が流れたものと計算され、最大で 990 A の偏流が生じたことが推定された。各ユニットの電流値の和は 10930 A と計算され、実際の通電電流値である 10 kA とは 930 A の差が生じたが、集合型電流リードの偏流をある程度定量的に評価出来た。

REFERENCES

- ¹ H. Motohashi, Y. Sakai, Y. Hosono, Y. Yamada, T. Koizumi, Y. Hikichi, M. Minowa, H. Tamura and T. Mito, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012), p19.
- ² Y. Hosono, H. Motohashi, R. Matsumura, Y. Yamada, Y. Hikichi, M. Minowa, T. Koizumi, H. Tamura and T. Mito, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013), p146.