

## 伝導冷却 HTS コイルの安定性と保護

## Design study on conductively cooled HTS coil for protection

戸坂 泰造, 岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 小柳 圭, 田崎 賢司, 石井 祐介 (東芝); 荻津 透 (KEK); 雨宮 尚之 (京大)  
 TOSAKA Taizo, IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TASAKI Kenji, KOYANAGI Kei, ISHII Yusuke (Toshiba);  
 OGITSU Toru (KEK); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)  
 E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

臨界電流が数倍向上することが見込まれている Y 系線材を機器応用する場合の大きな魅力は、高い電流密度のコイル設計により高磁場を発生できることである[1]。しかし、コイル保護として熱暴走を検出する場合、電流密度が高くなるほど線材の保護層を厚くする必要があるため、結果として高い電流密度の設計が困難となる。一方で、数十 K での運転であれば高い熱的安定性のため不測の熱暴走は発生しないと考えられる。そのため、熱暴走が発生する条件を設計段階で正確に把握し、コイル温度等を監視することにより、熱暴走に至らない範囲で運転することをコイル保護と考えれば、高い電流密度の設計も可能になると考えられる。そこで、線材の臨界電流値等をパラメータとして、伝導冷却の高温超電導コイルで熱暴走が発生する条件について評価する。

## 2. 計算方法

交流運転における交流損失など発熱量が大きい場合には、冷凍機の冷却能力が熱暴走発生に大きな影響を与える[2]が、熱暴走の直接的な原因であるフラックスフロー発熱自体は小さいので、それ以外の発熱量が大きい場合には冷却パスにおける  $\Delta T$  が重要なファクターとなる。そこで、Fig.1 に示す線材と冷却板の間の対地絶縁層に生じる温度差  $\Delta T$  を支配的要因と考えた簡易計算モデルを考える。熱暴走が発生する条件は、線材のフラックスフロー発熱と対地絶縁層を介した伝導冷却の熱バランスにより求める。

## 3. 計算結果

線材の臨界電流値を 77 K 自己磁場で現状スペックの 80 A、対地絶縁層の厚さを 1 mm とし、運転条件を冷却板温度 30 K、経験磁場 6 T とした場合の計算結果として、フラックスフロー発熱および伝導冷却特性を Fig.2 に示す。この場合、運転電流値が 75.9 A より大きくなると、発熱と冷却のバランスがとれなくなるため、75.9 A、線材の温度 31.3 K が熱暴走発生の条件となる。熱暴走が発生する条件を、線材の臨界電流値および対地絶縁層の厚さをパラメータとして計算し、コイル負荷率の観点でまとめると Fig.3 になる。線材の臨界電流値が今後数倍向上したとしても、熱暴走が発生する条件での負荷率はあまり減少しないことがわかった。また、対地絶縁層の厚さに関しても、影響はさほど大きくないことがわかる。

## 4. まとめ

伝導冷却コイルで熱暴走が発生する条件を、対地絶縁層を介した冷却で生じる  $\Delta T$  に着目した簡易計算モデルにより評価した。その結果、臨界電流値が現状線材の 4 倍になっても熱暴走が発生する負荷率は、100%に近い値で維持されることがわかった。熱暴走に至らない範囲で運転するというコイル保護の考え方においては、冷却パスが確実に確保されているとともに、コイルの電流-電圧特性が高い精度で予測可能であることが不可欠である。そのためには、線材の臨界電流や n 値の温度・磁場のスケールアップ因子、剥離強度等のデータ等について、ばらつきも含めて正確に把握しておく必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」として、科学技術振興機構からの委託により実施された。

## 参考文献

1. K. Takahashi et al, "Magnetic Field Design of Coil-Dominated Magnet Wound with Coated Conductors," *IEEE trans. Appl. Supercond.*, vol.22, no.3, p.490175, June, 2012.
2. A. Ishiyama et al., "A Stability criterion for Cryocooler-Cooled HTS Coils," *IEEE trans. Appl. Supercond.*, vol.11, no.1, pp.1832-1835, Mar, 2001.

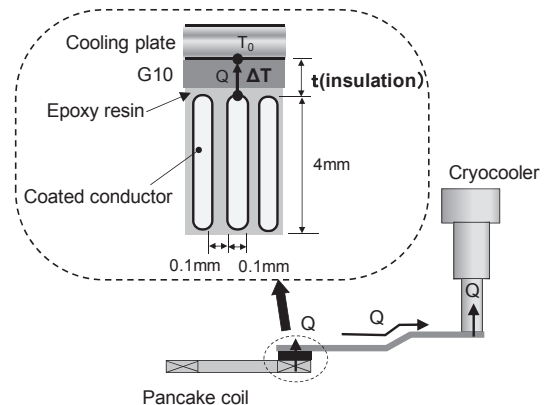


Fig.1 Calculation model of conductively cooled HTS coil

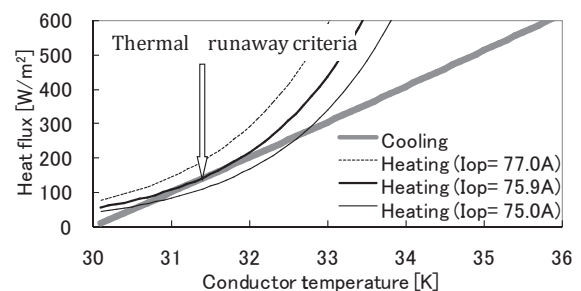


Fig.2 Heat generation by flux flow resistance and cooling capacity by conduction

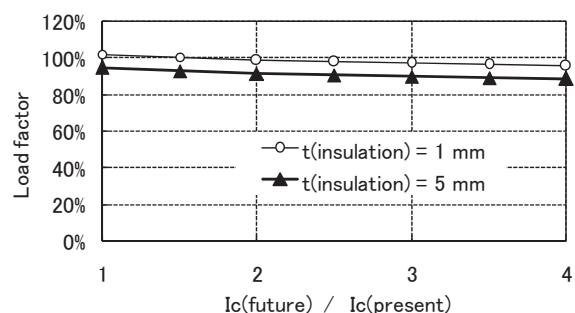


Fig.3 Thermal runaway criteria

# 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 5 — 局所異常発生時の測定 —

## Development of a Monitoring System of Superconducting Transformer by Using Poynting's Vector Method 5 –Measurements of Local Abnormal Condition–

樋渡 裕紀, 濱田 佳志, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大学); 岡元 洋 (九州電力)  
HIWATASHI Hiroki, HAMADA Keishi, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University);  
OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co., Inc.)  
E-mail: k1219098@kadai.jp

### 1. はじめに

超伝導変圧器の実用化には、運転中に巻線の健全性を常時監視するシステムの開発が必要である。そこで我々は、ポインティングベクトル法を応用した超伝導変圧器の非接触型運転モニタリングシステムを提案している。

これまでに、巻線を冷却する液体窒素を自然蒸発させることで広範囲に異常を発生させて異常検出試験を行い、次のことを実証している。①鉄心を持つ変圧器でも本システムが適用可能である。②一次巻線と二次巻線のどちらで発生した異常かを判別可能である。③接続された負荷が変動していても、超伝導変圧器巻線の異常を検出できる[1][2]。しかしながら、実際には局所的な異常が発生する可能性が高いと考えられる。そこで今回は、本システムによる局所異常の検出および異常発生箇所の特定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及び装置概要

我々の提案しているポインティングベクトル法では、電界測定用と磁界測定用の1対のピックアップコイルを用いて、それぞれ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。巻線の状態の情報は、線材の交流損失の大きさに含まれる。そこで本測定法では、ポインティングベクトルを1周期時間積分した有効電力成分(エネルギーフロー)のみを観測する。巻線に異常が生じると、巻線周辺のエネルギーフローが変化するため、異常発生箇所周辺に設置したピックアップコイル対により、それを検出できる。測定の際には、磁界の信号電圧を用いて、電界の信号電圧から誘導性の成分をキャンセルする。これにより、異常測定の検出感度を高め、室温空間からの測定を可能としている。

実験に使用した超伝導変圧器は、高さ約120 mm、一次側内径106 mm、二次側内径70 mmの800 VA超伝導変圧器である。巻線には、77 K、自己磁界中での臨界電流が115 Aの高強度Bi-2223多芯テープ線材を使用した。

### 3. 実験

超伝導変圧器に35.6 A<sub>rms</sub>、50 Hzの交流定格電流を通電し、一定負荷運転時における異常発生箇所周辺のエネルギーフローを測定した。異常の発生には、一次巻線端部の一部に室温の窒素ガスを吹きつけ、その部分を局所的に常伝導転移させる方法を用いた。超伝導変圧器及びピックアップコイル対の設置箇所をFig. 1に示す。異常発生部に1セットのピックアップコイル対を設置し、さらにその隣接する位置にもう1セットを設置した。この2つのピックアップコイル対でそれぞれ測定されるエネルギーフローを比較することにより、異常発生部及び正常部における巻線の健全性を観測した。

異常発生部及び正常部で観測されたエネルギーフローの変化をFig. 2に示す。Fig. 2の縦軸は、正常時の値で規格化した規格化エネルギーフローであり、横軸は測定開始からの経過時間である。測定結果からわかるように、異常発生部で

は異常の発生に伴いエネルギーフローが大きく変化しているのに対し、正常側では、エネルギーフローの変化はほとんど見られない。このことから、巻線で生じた局所的な異常の検出及び異常発生領域の特定が可能であることがわかる。

### 4. まとめ

超伝導変圧器の一次巻線端部に局所的な異常を発生させ、異常検出試験を行った。その結果、局所異常の検出及び異常発生箇所の特定が可能であることを実証した。このことから、本システムが超伝導変圧器の運転モニタリングシステムとして有効であることを示した。

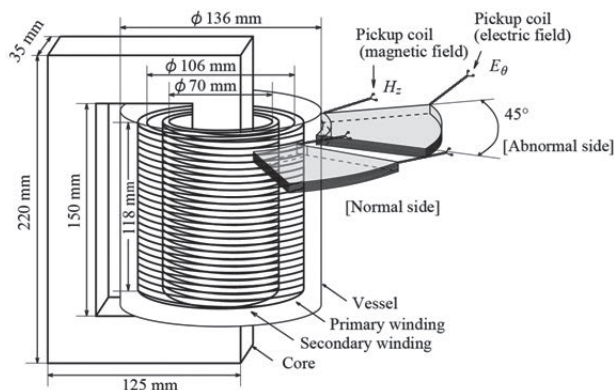


Fig. 1 Measuring system to detect locally abnormal condition in HTS transformer.

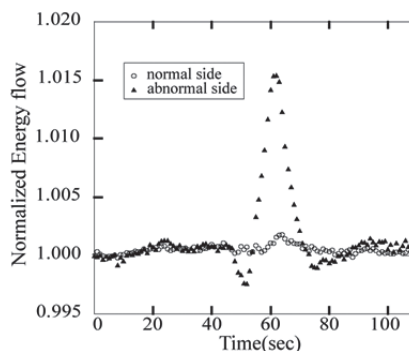


Fig. 2 Results of tests on detection of local winding condition.

### 参考文献

1. A. Kawagoe, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.), 47 (2012) p. 268
2. R. Kosaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p. 178

# ピックアップコイル対による高温超伝導コイルの健全性診断

Health diagnosis in high temperature superconducting coils by using pick-up coil

柿山 昂佑, 森部 裕章, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大・工)

KAKIYAMA Kosuke, MORIBE Hiroaki, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k9264132@kadai.jp

## 1. はじめに

高温超伝導線材は、使用温度領域が高く、比熱が大きいため、安定性が高い。しかし、一旦異常が発生すると、常伝導領域が伝播しにくく、局所的に温度が上昇し、放置すると線材が損傷する危険性がある。したがって、高温超伝導コイルの運転監視・診断システムには、局所的な異常を検出することが必要である。そこで我々は、高温超伝導コイルに発生する局所的な異常を室温空間から非接触で検出できる測定法を提案している。これまでに、非接触で異常を検出できることと、ある程度以上線材温度が上昇すると測定信号が大きく低下することを実証している[1, 2]。

本測定法を実際のコイル運転時に適用するには、本測定法で観測される信号からコイルの異常がどの程度かを判断する必要がある。そこで今回は、通電電流や異常発生箇所の温度を変化させ、その時のサンプルコイル巻線の温度分布と観測される信号を測定し、その関係を調べた。

## 2. 測定方法と測定装置

本測定法では、ピックアップコイル対によって超伝導コイル周辺のポインティングベクトル分布を測定し、その時間変化から異常を測定する。ポインティングベクトルは、超伝導コイル周辺の局所的な電界と磁界をそれぞれ測定し、電界と磁界の外積から求められる。電界と磁界の測定には、Fig. 1(a)に示すような、電界測定用ピックアップコイル(PC-E)と磁界測定用ピックアップコイル(PC-H)を用いる[2]。

## 3. 実験方法

サンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、液体窒素中77Kの自己磁界中で、 $I_c$ が115Aの高強度銀シースBi-2223多芯テープ線材を1層×15ターン巻線した内径70mm、高さ63.2mmのソレノイドコイルである。

周波数50Hz、振幅は50A<sub>op</sub>、70A<sub>op</sub>、90A<sub>op</sub>の交流電流を通電して行った。サンプルコイル巻線に局所的な異常を発生させるために、縦9mm、横3mmの穴1個をボビンに明け、ボビンの裏側からその穴に窒素ガスを噴きつけることによって、その部分の巻線部の温度を上昇させた。穴の場所は、コイル中心高さである8ターン目とした。この異常発生箇所とピックアップコイルの設置場所をFig. 1(a), (b)に示す。ピックアップコイルは、異常発生箇所直近に設置した。また、異常発生箇所とその周辺の巻線温度を測定した。

## 4. 測定結果

50Hz、90A<sub>op</sub>の時、窒素ガスは、0.1MPa、流量0.19l/secで噴きつけ、噴出時間は25秒間(25~50秒の間)とした。本測定法で観測される信号であるエネルギーフロー、異常発生箇所周辺の温度(7~9ターン目)の結果をFig. 2に示す。Fig. 2の横軸は、測定開始からの経過時間である。窒素ガスの噴出期間を灰色で示している。

まず、窒素ガスを注入すると、測定信号が上昇している。さらに温度が上昇すると、測定信号は上昇から下降に転じていることが分かる。下降に転じる時の測定信号は、白塗りのプロットで強調している。この傾向は、通電電流の振幅を変えても観測された。測定信号と巻線温度の関係を調べるために、測定信号が下降に転じる巻線温度の閾値温度を縦軸に、横軸に通電電流の振幅をサンプルコイルの臨界電流で規格化したグラフをFig. 3に示す。実線は臨界温度の予測値である。

閾値温度は巻線の臨界温度とほぼ一致しており、測定信号の落ち込みを観測することにより、巻線温度が臨界温度近傍まで上昇しているという判断が可能であることを示している。

以上のことから、本測定法によって、事前の特別な解析なしに、超伝導コイルの巻線温度が臨界温度を超えたかどうかの判断が可能であることを示した。

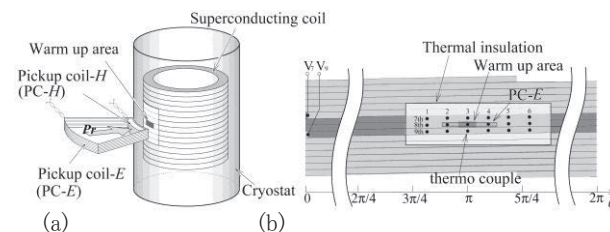


Fig. 1 (a) Measuring system to detect locally abnormal condition in HTS coil, (b) Measuring sensor arrangement.

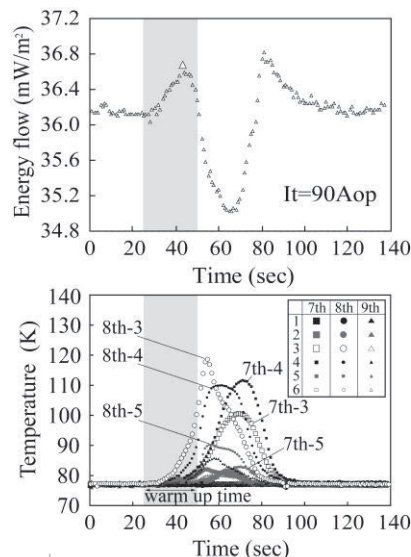


Fig. 2 Results of tests on detection of local winding condition in the sample coil.

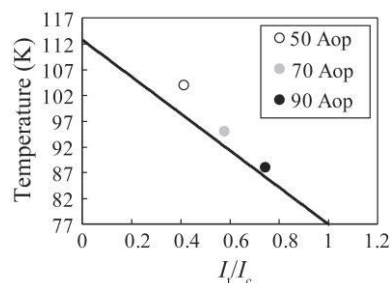


Fig. 3 Transport current dependences of threshold temperatures.

## Reference

- [1] N. Fujioka, et al.: Abstracts of CSJ Conference Vol. 83 (2010) p.151
- [2] A. Kawagoe, et al.: "Non-contact Detection of Normal Transitions in Superconducting Coils -Proposal of a New Measuring Method by Using Pick-up Coils Outside a Vessel-" TEION KOGAKU Vol.46 (2011) pp.481-488



# YBCO パンケーキコイルにおける 局所的な特性劣化に起因する熱暴走の抑制手法

Suppression of thermal runaway for YBCO pancake coils due to partial conductor degradation

福田 竜彦, 高尾 智明(上智大); 柳澤 吉紀, 佐藤 耕太, 中込 秀樹(千葉大);

上林 裕之(三菱電線工業); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

FUKUDA Tatsuhiko, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori, SATO Kota,  
NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); KAMIBAYASHI Hiroyuki (MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES);  
TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: tatsuh-f@sophia.ac.jp

## 1. はじめに

YBCO 線材は強度の異方性に起因する脆弱性を持ち[1]、コイル巻き線時のキックやエポキシ含浸によって巻線内部に局所的な劣化部位が出来やすい。この種の劣化を持つコイルを通电すると、急峻な電圧上昇(テイクオフ電圧)を伴う熱暴走が起き、最悪の場合線材の損傷に至る[2]。エポキシ含浸による劣化を防ぐ有効な技術は開発されてきたが[3]、線材の持つ本質的な脆弱性を考慮すると、大量の線材を使用する実規模のコイルにおいて局所的な線材特性の劣化を完全に除去することは困難であると考えられる。本研究ではこの観点から、局所的な特性劣化がある場合でも、コイル臨界電流までは熱暴走を起こさずに通电できる手法として、サーマルグリッド法と呼ぶ手法を提案した。この手法では、ポリイミド電着(polyimide electro-deposition: PIED)した YBCO 線材で巻いたパンケーキコイルにおいて、コイル巻線の内部に金属のヒートチャンネルを生成し、巻線部の熱伝導を向上させることで、熱暴走を抑制する。本報ではサーマルグリッド法が熱暴走電流に与える効果を小型試験コイルと解析により検証した。

## 2. 実験方法

幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm の YBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) を用いて、3 個の試験パンケーキコイル (coil-A, coil-B, coil-C) を製作した。これらのコイルの内径は 30 mm、層数は 5 であり、第 3 層の中心に n 値が 1.5 の劣化部位を作製した。Coil-A は 2 重にしたカプトンテープ (35 μm 厚) を共巻きしたコイルである。Coil-B は厚さ約 10 μm の PIED [3] を施した YBCO 線材で巻いたコイルである。Coil-C は coil-B と同じ PIED YBCO 線材に、幅 5 mm, 厚さ 20 μm のインジウムシートを共巻きし、巻き線後に溶かしたインジウムをコイル上下端に加えることで層間のインジウムを接合し、Fig.1 に示すようなグリッドを作製した。これらのコイルを液体窒素中で熱暴走が起きるまで通电した。

## 3. 数値解析手法

下記の熱バランス方程式でサーマルグリッド方式の YBCO パンケーキコイルの熱暴走現象を解析した。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_r(T) A \frac{\partial T}{\partial x} \right) - C(T) A \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k_t}{d_{\text{composite}}} (T - T_{\text{Outer}}) w - \frac{k_t}{d_{\text{composite}}} (T - T_{\text{Inner}}) w + g_J + g_C = 0$$

ここで  $k_r$  はコイル周方向の実効的な熱伝導率、 $k_t$  はコイル径方向の実効的な熱伝導率である。線材から発生するジュール発熱は n 値モデルを用いて計算した。実験と同様に第 3 層に劣化部位を仮定し、5~30 層の層数パンケーキコイルについて熱暴走解析を行った。

## 4. 結果と考察

Coil-A, coil-B, coil-C の熱暴走実験における熱暴走電流を Fig.2 に示す(それぞれ ■, ●, ▼ で表記)。熱暴走電流はそれぞれ、53.5 A, 61.0 A, 64.1 A であり、PIED 線材の使用、さらにサーマルグリッド法の適用によって熱暴走電流が上昇し

ている。しかし、これらの熱暴走電流はコイル臨界電流より低い。

パンケーキコイルの層数が熱暴走電流に与える影響を数値解析で検証した。Fig.2 に示すように、カプトンテープ共巻きコイル (□) と PIED 線材コイル (○) では、層数が増えるにつれて熱暴走電流が減少する。これは巻線部の厚みが増加することで、発熱部である局所劣化部位の冷却状態が悪くなるためである。一方サーマルグリッドコイルの場合 (△)、巻き数が増えるにつれて熱暴走電流が上昇し、20 層以上ではコイル臨界電流を上回る。これは、巻線部の径方向熱伝導性が高いため、ジュール発熱がコイル巻線全体に速やかに広がり、劣化部位周辺の局所的な温度上昇が抑制されるためである。

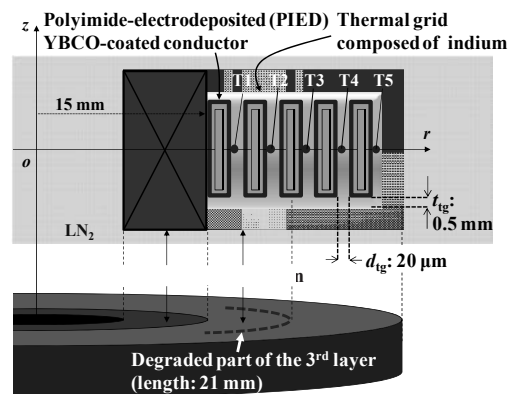


Fig.1 Schematic drawing of the experimental apparatus of a thermal grid coil using a PIED conductor and indium sheet.

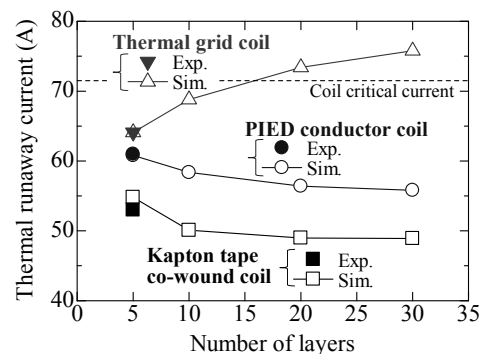


Fig. 2 Thermal runaway current vs. number of layers of a pancake coil with a partial degraded conductor.

## 5. まとめ

サーマルグリッド法を用いることで YBCO パンケーキコイルにおける局所的な劣化に起因する熱暴走を抑制することが出来る。

## 参考文献

- Y. Yanagisawa, et al.: Physica C, 471 (2011) p. 480-485
- Y. Yanagisawa, et al.: Super. Sci. Tech., 25 (2012) 07514
- K. Sato, et al.: Submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.

# ポリイミド電着被膜 YBCO 線材を用いた 実機サイズのエポキシ含浸パンケーキコイルの特性

## Characteristics of an epoxy impregnated pancake coil wound with a polyimide-electrodeposited YBCO-coated conductor

佐藤 耕太, 朴 任中, 柳澤 吉紀, 中込 秀樹(千葉大); 上林 裕之(三菱電線工業);  
松田 徹郎(横浜市大); 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

SATO Kota, PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori, NAKAGOME Hideki(Chiba Univ.);  
KAMIBAYASHI Hiroyuki(MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES); MATSUDA Tetsuro(Yokohama City Univ.);  
TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki(RIKEN)  
E-mail: kotasato@chiba-u.jp

### 1. はじめに

YBCO コイルではエポキシ含浸を施すと、冷却時の熱応力によって線材の剥離が起こり、通電特性が劣化する[1]。我々はポリイミド電着被膜を施した YBCO 線材を開発し、これで巻いたコイルではエポキシ含浸による劣化が完全に防がれることを、内径 30 mm、外径 73 mm の小型試験コイルで示した[2]。しかし、ポリイミド電着 YBCO 線材を長尺化し、実機サイズのコイルに拡張可能であるかは明らかでなかった。本研究では、31 m のポリイミド電着被膜 YBCO 線材を製作し、外径 73 mm の実機サイズのパンケーキコイルを製作して通電特性を検証した。

### 2. 実験方法

銅メッキされた長さ 35 m の YBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) にポリイミド電着被膜を施した。被膜の厚さは線材両端部で 20  $\mu\text{m}$ 、中央部で 12  $\mu\text{m}$  である。この線材を用いて非含浸のシングルパンケーキコイル (内径: 30 mm、外径: 73 mm、ターン数: 190、使用線材長: 31 m) を非含浸で製作した。巻き枠には厚み 3 mm の FRP 円筒を用いた。このコイルを液体窒素中で通電し、電圧-電流 (V-I) 特性を測定した。その後、コイルをエポキシ樹脂 (Emerson&Cuming, Stycast<sup>®</sup>1266) で真空含浸して硬化させた後、液体窒素及び液体ヘリウム中で通電し、V-I 特性を測定した。Fig.1 にエポキシ含浸したコイルを示す。

### 3. 実験結果

Fig. 1(a) に 77 K における V-I 特性を示す。非含浸の場合 (白抜き丸印: ○)、30 A において常伝導電圧が立ち上がり始め、1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  に対応する臨界電流は 37.2 A である。V-I 曲線から求められる n 値は 23 である。このコイルをエポキシ含浸した後でも (黒塗り三角印: ▲)、臨界電流と n 値共に変化はほぼなく、特性劣化は起こっていない。

Fig.1(b) に 4.2 K におけるコイルの V-I 特性 (白抜き丸印: ○) を示す。電極付近の電流トランスファー電圧によって  $5 \times 10^{-8} \Omega$  の抵抗が発生している。0.1  $\mu\text{V}$  に対応するコイル臨界電流である 296 A を超える 299 A においても常伝導電圧は発生しておらず、特性劣化は起こっていない。299 A におけるコイル電流密度は 529  $\text{A}/\text{mm}^2$  であり、中心磁場は 1.45 T である。

### 4. ポリイミド電着被膜 YBCO 線材の拡張性

ポリイミド電着線材 YBCO 線材は、NMR や MRI などで広く用いられている汎用超伝導線材であるホルマール被覆 NbTi 線材と同様に、高信頼性かつ取り扱いが容易で、さらに長尺化が容易である。さらにこの線材は、非含浸巻線、パラフィン含浸、エポキシ含浸などのあらゆるコイル製造法に適用できる。また、被覆の厚みを 20  $\mu\text{m}$  以下にまで薄くすることが出来るため、線材断面積あたりの導体の占有率が向上し (>70%)、コイルの電流密度を飛躍的に向上させることが出来る。

### 5. まとめ

ポリイミド電着被膜 YBCO 線材を用いた実機レベルのエポキシ含浸コイルを製作し、4.2 K において特性劣化を起さずにコ

イル電流密度 529  $\text{A}/\text{mm}^2$  (通電電流 299 A)、中心磁場 1.45 T を達成した。

ポリイミド電着被膜 YBCO 線材はあらゆるコイル製造方法に容易に適用可能で、コイルの電流密度を飛躍的に向上させることの出来る汎用超伝導線材である。



Fig.1 A 73 mm outer diameter pancake coil wound with a PIED YBCO-coated conductor impregnated with epoxy.

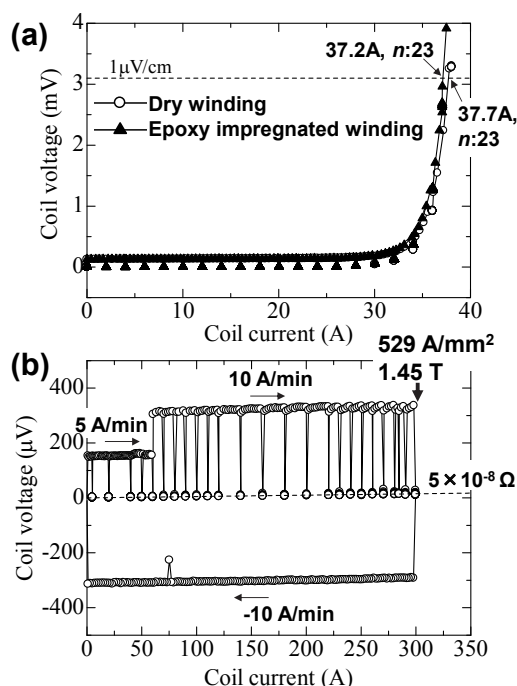


Fig.2 V-I characteristic of the the coil at 4.2 K (open circles). The V-I characteristic is not degraded by epoxy impregnation at 4.2 K.

### 参考文献

1. T. Takematsu, et al.: Physica C, 470 (2010) pp.674-666
2. Y. Yanagisawa, et al.: Physica C, 476 (2012) pp.19-22

# SMES 用伝導冷却 YBCO コイルにおける常電導転移検出実験

## Experiments on detection of normal transition for cryocooler-cooled YBCO coil for SMES

増井 裕太, 大西 秀明, 石山 敦士(早稲田大学);  
 渡部 智則, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 植田 浩史(大阪大学)  
 MASUI Yuta, ONISHI Hideaki, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);  
 WATANABE Tomonori, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.)  
 E-mail: atsushi@waseda.jp

### 1. はじめに

SMES 用伝導冷却 YBCO コイルは、励磁・減磁の繰り返しによる応力の印加、および事故時の過電流等によって、YBCO コイルの一部が局所的に劣化する可能性がある。我々はこれまでの研究で、系統安定化及び負荷変動補償用 SMES を想定した YBCO 線材の 4 枚積層導体を用いたコイルにおいて、局所的な常電導転移の検出が従来の電圧監視では困難であるのに対して、積層導体内の電流転流を監視することで早期検出が可能であることを数値解析により示してきた [1],[2]。そこで、今回は製作した伝導冷却ダブルパンケーキ小型モデルコイルを用いて、転流監視による常電導転移検出法の有効性を検証するため、ヒーター投入による常電導転移実験を行ったので報告する。なお、本研究は「リ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. 実験方法

本研究で用いた積層導体モデルコイルは、素線絶縁を施した銅メッキ YBCO 線材を 4 枚積層した導体(上記 NEDO プロジェクトの設計値である 2kA 導体を想定)を、ダブルパンケーキ巻線したものである。線材はコイル間で実際に想定しているコイルを模擬して転位させている。コイルの内径は 200mm、外径は 242mm である(Fig.1)。実験は伝導冷却(77K)、自己磁場中で行った。コイル巻線内における常電導領域の発生を模擬するため、超電導線材各 1 枚に対してコイルの最内層に取り付けたヒーター(ひずみゲージ)で熱的擾乱を投入することで局所的に常電導領域を発生させた。また、積層導体では各素線に流れる電流を直接測定することができないため、Fig.2 に示すようにコイルと電流リードとの接続部付近にホール素子を配置し、磁場分布測定から電流分布を逆推定した。電流が一定に流れている状態で、ヒーターを投入し、推定した電流値、ヒーター付近(常電導領域)の電圧、コイルの両端電圧を測定した。

### 3. 実験結果

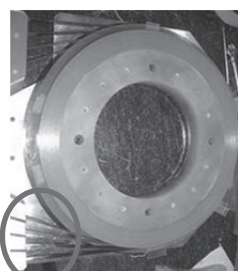
実験結果の一例として、超電導線材 3 (Tape 3) にヒーターを投入した時について、モデルコイルの各線材に流れる電流の推定値とその総和、投入したヒーターの出力を Fig.3 に示す。超電導状態での各線材の電流が均流していないのは、各線材のコイル両端での電流リードとの接触抵抗の差によるものと考えられる。Fig.3 から、ヒーター投入後、コイル内で常電導転移が発生した際に生じる電流の転流を検出できることがわかる。このことから、電流監視による常電導転移の検出が有効であることが確認された。また、1 枚のヒーター部が常電導転移した時には、正常な他の線材に電流が転流し、4 枚同時にヒーターを投入し、常電導転移を発生させた時には、各線材の電流が均流化される傾向を示した。これは線材で生じている常電導転移による抵抗が接触抵抗よりも大きいためだと考えられる。

1 枚のヒーター部が常電導転移した時に発生する抵抗性の電圧は、コイル両端の電圧を測定する際に生じるノイズに埋もれてしまい、電圧による監視は困難であった。

### 4. まとめ

4 枚の YBCO 線材を積層した導体を用いた伝導冷却小型モデルコイルの常電導転移検出実験を行い、線材間の電流転流を監視する方法の有効性を検証した。

今後は、SMES 運用時に通電する電流を模擬した電流を通電し、同様の常電導転移検出ができるかを実験する予定である。



Number of bundles	4
Inner diameter [mm]	200
Outer diameter [mm]	242
Number of turns	16
Width of HTS tape [mm]	10

Fig.1 Overview of Small Model Double Pancake Coil

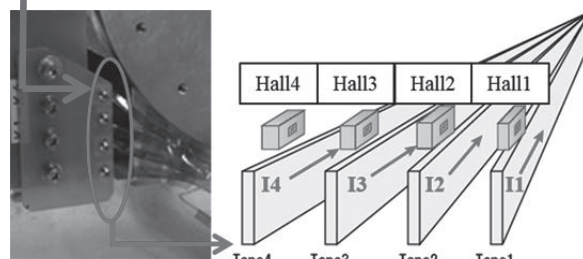


Fig.2 Arrangement of Hall Sensors

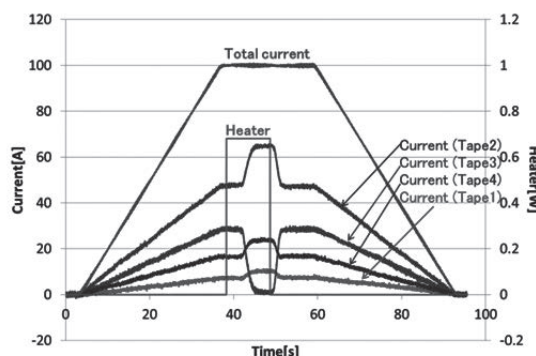


Fig.3 An Example of Estimated Current  
 Heater : Tape 3 (0.68W)

### 参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.154
2. H. Onishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.71



## RE 混合 RE123 溶融凝固バルクの組織、臨界電流特性

## Microstructure and critical current properties of RE-mixed RE123 melt-solidified bulks

瀬戸山 結衣, 山本 修, 下山 淳一, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大)

SETOYAMA Yui, YAMAKI Shu, SHIMOYAMA Jun-ichi, YAMAMOTO Akiyasu, OGINO Hiraku,

and KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail : 6071721904@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 1. 緒言

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(RE123)溶融凝固バルクにおける臨界電流密度  $J_c$  改善の一つの手法に RE<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>(RE211)粒子の導入が挙げられる。この際、123相と211相の界面がピンニングセンターとして働くため、微細化により界面密度を増加させることでのピン止め力改善が研究されてきた。

また、RE元素の混合もピンニング力の改善に有効であることが分かっており、(Nd,Eu,Sm)123溶融凝固バルクが77 Kにおいて4.5 Tで~70 kAcm<sup>-2</sup>の高い  $J_c$  を維持し14 Tを超える高い不可逆磁場  $H_{irr}$  を持つという報告[1]もある。しかしRE混合による  $J_c$  改善効果は再現性にやや乏しく、さらにその起源は十分に解明されていない。そこで本研究ではREを混合したRE123溶融凝固バルクを作製し、その微細組織や  $J_c$  特性の評価を通じてRE混合効果の起源を解明することを目指した。

## 2. 実験方法

RE元素にGd, Dyを選択し以下の方法で溶融凝固バルクを作製した。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, CuOの原料粉を混合し、固相反応法によりそれぞれのREについてRE123とRE211粉末を合成した。これらの粉末をモル比でGd123 : Dy211 = 7 : 3 (Sample 1), Dy123 : Gd123 : Gd211 = 6 : 1 : 3 (Sample 2)となるように秤量し各々Ptを0.5 wt%添加して混合後、一軸プレス(1 t cm<sup>-2</sup>)により20 mmφ × 10 mm<sup>t</sup>のペレットに成型した。両試料ともRE混合比はGd : Dy = 7 : 6である。種結晶にNd123単結晶を用い、底面加熱方式の電気炉にて溶融凝固を行った。育成したバルクの様々な部分から約2 mm × 2 mm × 1 mm<sup>//c-axis</sup>の薄片を切り出し、350°C酸素気流中でのアニール(100 h以上)を行った。得られた試料についてSEMによる微細組織観察、EDXによる元素分析、SQUIDによる磁化測定からの超伝導特性の評価を行った。

## 3. 結果と考察

同じ温度パターンによる結晶育成で両試料ともシングルドメインのバルク育成に成功した。元素分析の結果、両試料とも123相にはGdとDyがほぼ一様に分布しており、 $T_c$ は両試料とも約92 Kであった。微細組織観察によりFig. 1に示すようにSample 1では長径1.5 μm以下の微細な211相粒子が数多く存在する一方、Sample 2では211相粒子が少ないものの粒径の大きなものの割合が高いという大きな違いが認められた。これを反映してFig. 2に示したようにSample 1のほうがSample 2よりも特に低磁場で高い  $J_c$  を有することがわかった。大きく異なる微細組織が形成された機構を探るために211相粒子の局所組成を分析したところ、Fig. 3の反射電子像から明らかなようにSample 2の大きな211相粒子はGd-richな部分を内部に持ち周囲はDy-richな領域となっていた。これらの211相粒子の組成やサイズの違いは、包晶温度の差による徐冷過程での包晶

反応開始のタイミングの差によると考えられ、ある組成のRE混合バルクを作製時は123包晶温度の低いREを211相原料に使用すると211相粒子の粗大化が抑制され  $J_c$  が改善することが示唆された。さらに、211相粒子の微細化の観点からRE元素の組合せや混合比を最適化することにより、さらなる臨界電流特性の改善が期待できる。

## 参考文献

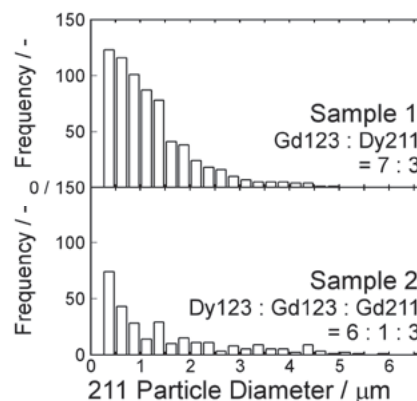
[1] M. Muralidhar, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **89**(2002) 237001.

Fig. 1 Particles size distribution of 211 in (Gd,Dy)123 bulks.

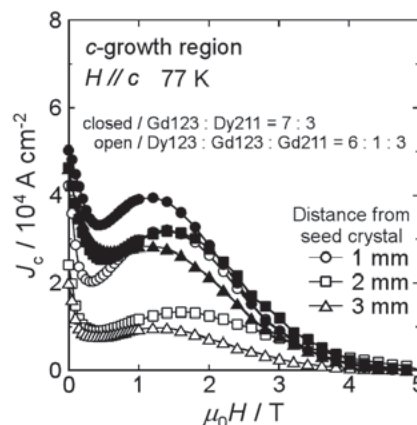
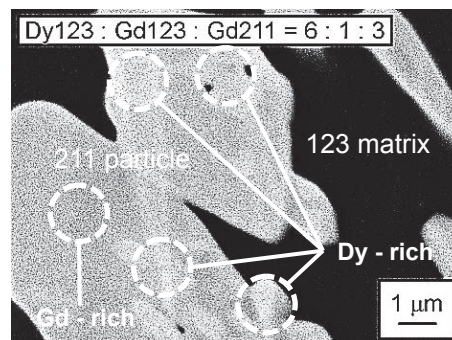
Fig. 2 Magnetic field dependence of  $J_c$ (77 K)

Fig. 3 Backscattered electron image of sample 2.

## 3.5 テスラ級 MgB<sub>2</sub> 超電導バルク磁石の開発 Development of 3.5 Tesla Class MgB<sub>2</sub> Superconducting Bulk Magnets

富田 優, 石原 篤, 赤坂 友幸(鉄道総研); 山本 明保 (東大, JST さきがけ); 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大)  
TOMITA Masaru, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki (Railway Technical Research Institute);  
YAMAMOTO Akiyasu (The Univ. of Tokyo, JST-PRESTO); SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (University of Tokyo)  
E-mail: tomita@rtri.or.jp

### 1. はじめに

冷凍機冷却による 5-30 K で応用可能な超電導バルク磁石として MgB<sub>2</sub> バルク体を検討した。金属系超電導体としては最高の転移温度  $T_c$  (40 K) を持つ MgB<sub>2</sub>[1] は、超電導コヒーレンス長が長く電磁的異方性が低いことから、無配向の多結晶体においても  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 以上の比較的高い臨界電流密度  $J_c$  を持つ巨視的超電導電流が得られる[2]。この結晶粒間における弱結合の不在は、多結晶試料全体にわたっての均一な超電導電流分布を可能とする[3]。また、MgB<sub>2</sub> バルク体はマグネシウムとホウ素の混合粉末に熱処理を施す *in-situ* 法などにより比較的容易に、かつ低コストで作製可能である。

MgB<sub>2</sub> は線材化研究が積極的に行われているが、弱結合フリーに由来する特徴は RE 系溶融凝固バルクで研究が進んでいる超電導バルク磁石としても最適である。すなわち、40 K 以下で動作可能な強力磁石として、輸送・医療等への応用が期待でき、とくに、高い磁場均質性が求められる MRI, NMR 等の計測機器への応用に適すると考えられる。

最近我々はクラックの無い均一な組織を持つ MgB<sub>2</sub> バルク体を作製する技術を開発し、比較的大型のバルク体の作製が可能となった[4]。本研究では、Mg と B の混合粉末の圧粉成型体を熱処理することにより円盤型 MgB<sub>2</sub> バルク体を作製し、その捕捉磁場特性を評価した。

### 2. 実験方法

Mg と B の混合粉末を直径 10-60 mm $\phi$ 、厚さ 10 mm の円盤状に成型し、Ar 雰囲気下で 850°C、3 h の熱処理を行い MgB<sub>2</sub> バルク体を得た。一部のバルク体は、機械的強度を高めるために MgB<sub>2</sub> バルク体/金属(SUS)複合体とした。得られたバルク体試料、および 1 対のバルク体を厚さ 1.6 mm のスペーサーを介して組み合わせたバルクペア試料をヘリウム冷凍機で 15 K 以下まで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場下冷却(FC)条件により 6 T の磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関してはスペーサー内、バルク体表面に配置したホール素子を用いて測定し、捕捉磁場の温度依存性を評価した。

### 3. 結果と考察

直径 10-60 mm $\phi$ 、厚さ 10 mm のバルク体試料を着磁後、バルク体表面中心において測定した捕捉磁場の温度依存性、サイズ依存性を Fig.1 に示す。最大の直径 60 mm $\phi$  のバルク体試料では 20 K において 2.1 T、30 K で 1.0 T を超える捕捉磁場が得られた。また 20 K における捕捉磁場のバルク径依存性からは、40 mm $\phi$  を超える試料において捕捉磁場の増加に飽和がみられた。

次にバルク体試料 2 個を対向させたバルクペア試料(直径 20, 40 mm $\phi$ )を着磁後、バルク体間の中心の位置において測定した捕捉磁場の温度依存性を Fig.2 に示す。得られた捕捉磁場は 40 mm $\phi$  の試料で 13.5 K において 3.5 T であった。なお、測定後の試料にクラック発生等のバルク破壊は認められず、測定を繰り返した際の特性劣化は認められなかった。

### 4. 結論

MgB<sub>2</sub> バルク体を作製し、超電導バルク磁石としての素質を検討した。40 mm $\phi$  MgB<sub>2</sub> バルク体において、2 つのバルク体

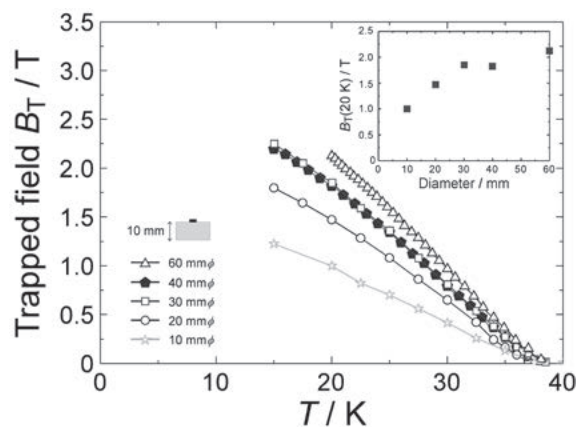


Fig. 1. Surface trapped magnetic field as a function of temperature for disk shape MgB<sub>2</sub> bulk samples with 10, 20, 30, 40 and 60 mm $\phi$  in diameter and 10 mm in thickness. The inset shows the surface trapped field at 20 K as a function of the diameter of the bulk samples.

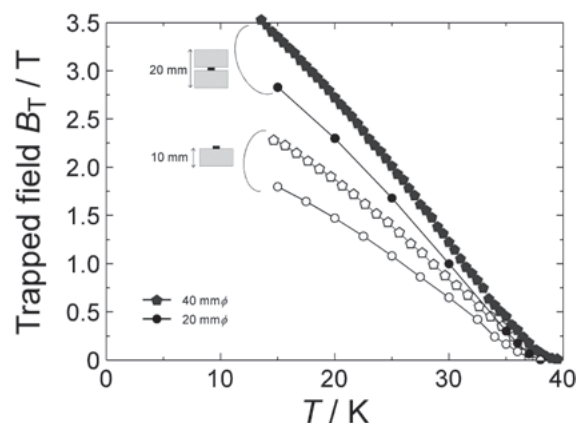


Fig. 2. Trapped magnetic field as a function of temperature for MgB<sub>2</sub> bulk pairs with 20 or 40 mm $\phi$ , 20 mm $t$ .

を対向させることで約 3.5 T(@13.5 K)の中心捕捉磁場が得られた。バルク体の臨界電流密度、微細組織の改善により捕捉磁場のさらなる向上が可能で、MgB<sub>2</sub> バルク体は数テスラ級の強力超電導バルク磁石候補として有望であるといえる。

### 5. 謝辞

本研究はJSPS科学研究費補助金(23246110)ならびにJST さきがけの助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 山本明保, アレクサンダー・グレビッチ, デビッド・ラバレス、下山淳一, 岸尾光二, 応用物理 **79**, 48 (2010).
- [4] 例えば、富田優 ほか, 第 83 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.86 (2010).



## MgB<sub>2</sub> 超伝導バルク磁石の磁束クリープ特性

### Flux creep properties of MgB<sub>2</sub> superconducting bulk magnets

山本 明保 (東大, JST さきがけ); 石原 篤, 赤坂 友幸, 富田 優 (鉄道総研); 岩瀬 和至, 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大)  
 YAMAMOTO Akiyasu (The University of Tokyo, JST-PRESTO);  
 ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute);  
 IWASE Kazuyuki, SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (The University of Tokyo)  
 E-mail: yamamoto@appchem.t.u-tokyo.ac.jp

#### 1. はじめに

冷凍機冷却による 15-30 K で応用可能な超伝導バルク磁石として MgB<sub>2</sub> バルク体を検討した。金属系超伝導体としては最高の転移温度  $T_c$  (40 K) を持つ MgB<sub>2</sub> は、超伝導コヒーレンス長が長く電磁的異方性が低いことから、無配向の多結晶体においても  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 以上の比較的高い臨界電流密度  $J_c$  を持つ巨視的超伝導電流が得られる[1]。この結晶粒間における弱結合の不在は、多結晶試料全体にわたっての均一な超伝導電流分布を可能とする[2]。また、MgB<sub>2</sub> バルク体はマグネシウムとホウ素の混合粉末に熱処理を施す *in-situ* 法などにより比較的容易に、かつ低コストで作製可能である。

MgB<sub>2</sub> は線材化研究が積極的に行われているが、弱結合フリーに由来する特徴は RE 系溶融凝固バルクで研究が進んでいる超伝導バルク磁石としても最適である。すなわち、40 K 以下で動作可能な強力磁石として、輸送・医療等への応用が期待でき、とくに、高い磁場安定性と磁場均質性が求められる MRI, NMR などへの応用に適すると考えられる。

最近我々はクラックの無い均一な組織を持つ MgB<sub>2</sub> バルク体を作製する技術を開発し、比較的大型のバルク体の作製が可能となった[3]。本研究では、Mg と B の混合粉末の圧粉成型体を熱処理することにより円盤型 MgB<sub>2</sub> バルク体を作製し、その捕捉磁場の緩和特性を評価した。

#### 2. 実験方法

Mg (99.6%, 325mesh) と B (99%, 300mesh) の混合粉末を直径 30 mm $\phi$ 、厚さ 10 mm の円盤状に成型し、アルゴン雰囲気下で 850°C、3 h の熱処理を行うことで MgB<sub>2</sub> バルク体を得た。一部のバルク体については、機械的強度を高めるために MgB<sub>2</sub> バルク体/金属(SUS)複合体とした。得られた一对の MgB<sub>2</sub> バルク体を厚さ 2 mm のスペーサーを介して組み合わせたバルクペア試料をヘリウム冷凍機で冷却し、超伝導マグネットを用いて磁場下冷却 (FC) 条件により 6 T の磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場はバルク体表面、及びスペーサー内に配置したホール素子を用いて測定した。バルクペア試料の捕捉磁場の時間依存性の測定は、所定の温度にて FC 着磁後に試料温度を等温制御し、3 日間測定した。試料温度は試料表面の温度とした。また、バルク体から切り出した試料片に対して、SQUID 磁束計により磁化測定を行った。

#### 3. 結果と考察

作製した MgB<sub>2</sub> バルク体試料の表面を光学顕微鏡で観察したところ、マクロスケールのクラック等はみられず均一な組織を有することが分かった。バルク体から切り出した試料の磁化特性を調べたところ、 $T_c$  は約 39 K であり、 $J_c$  は 20 K において  $2 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> 以上であった。

一对の直径 30 mm $\phi$ 、厚さ 10 mm のバルク体試料を組み合わせたバルクペア試料を 20 K において着磁後、バルク体間中心の位置において測定した捕捉磁場の時間依存性を Fig. 1 に示す。着磁直後の捕捉磁場は 2.875 T であった。捕捉磁場は時間の経過とともに減少する傾向を示し、1, 6, 24, 72 h 後の捕捉磁場はそれぞれ 2.859, 2.846, 2.834, 2.825 T であり、着磁直後の捕捉磁場に対する減衰率はそれぞれ

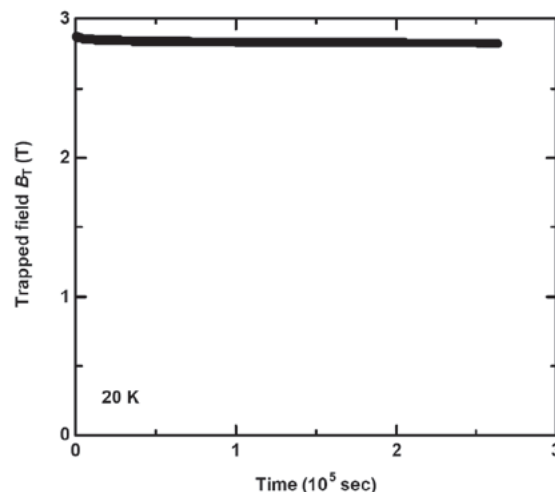


Fig. 1. Time dependence of the trapped field at 20 K for a MgB<sub>2</sub> bulk pair with 30 mm $\phi$   $\times$  20 mm<sup>l</sup> after the FC magnetization.

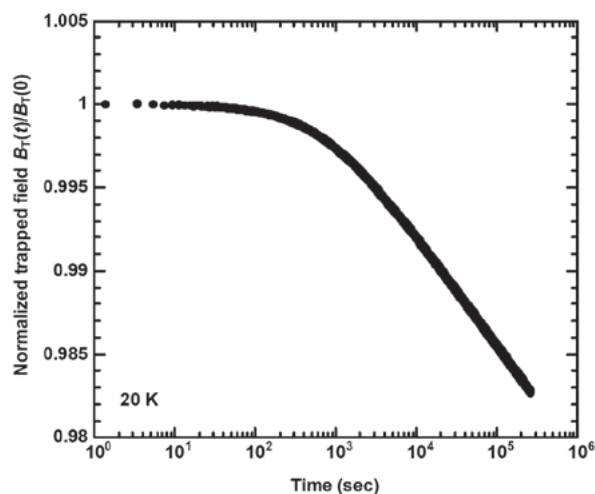


Fig. 2. Log scale time dependence of the normalized trapped field  $B_T(t)/B_T(0)$  at 20 K for a MgB<sub>2</sub> bulk pair with 30 mm $\phi$   $\times$  20 mm<sup>l</sup> after the FC magnetization.

0.54, 1.01, 1.41, 1.72%であった。また、試料の捕捉磁場は着磁後約 1 h (3600 sec) を経て、時間の経過とともに対数的に減衰する挙動を示した。着磁後 3 日間 (259200 sec) の捕捉磁場の減衰率は 2% 以下であり、超伝導バルク磁石として非常に小さい値であった。

#### 参考文献

- [1] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [2] 山本明保 ほか, 応用物理 **79**, 48 (2010).
- [3] 例えば, A. Yamamoto, H. Yumoto, J. Shimoyama, K. Kishio, A. Ishihara and M. Tomita, ISS2010 BLP-26.

## HIP 法で作製した大型 MgB<sub>2</sub>バルクの捕捉磁場特性 Trapped field properties of large MgB<sub>2</sub> bulk fabricated by HIP method

佐々木 智久, 内藤 智之, 藤代 博之(岩手大)

SASAKI Tomohisa, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: secret7maro@yahoo.co.jp

### 1. はじめに

RE-Ba-Cu-O 系 (RE:希土類元素)超電導バルク磁石は高い捕捉磁場を実現しているが、粒界における弱結合の問題があり結晶配向させた擬似単結晶バルクを用いる必要がある。MgB<sub>2</sub>は超電導転移温度  $T_c$  が約 39K と RE-Ba-Cu-O に比べると低いが、弱結合の問題がないため多結晶でバルク磁石が作製可能でテスラ級の捕捉磁場が実現されている[1] [2]。

in-situ 法で作製した MgB<sub>2</sub> は、焼結過程で原理的に空隙が生じるため、常圧で焼結すると充填率は約 50% になる。充填率を向上させることで、ピンニングセンターである粒界の面積や臨界電流密度  $J_c$  が増大し、同時に捕捉磁場の向上が期待できる。そこで我々は、HIP(Hot Isostatic Pressing)法を用いて高密度 MgB<sub>2</sub> バルクを作製し、捕捉磁場特性を評価した。

### 2. 実験方法

MgB<sub>2</sub> バルク前駆体ペレットは、モル比 Mg:B=1.05~1.1:2 の混合粉を用いて用意した。高密度サンプルは、真空中で前駆体ペレットをステンレス容器に密封した後、900 °C で 3 時間 HIP 処理した。印加圧力は 980 MPa であった(HIP 法)。常圧焼結サンプルは、前駆体を SUS フランジに加工した穴に装填し、Ar 雰囲気中で銅製ガスケットともう一枚の SUS フランジで密封した後、800 °C で 6 時間焼結して作製した(カプセル法)[1]。

伝導冷却型超電導マグネットを用いて 3-5T の磁場中で MgB<sub>2</sub> バルクを冷却して磁場を捕捉させ、バルク表面の中心にセットした極低温用ホール素子で捕捉磁場の温度依存性を測定した。電気抵抗率は直流四端子法で測定した。臨界電流密度  $J_c$  は SQUID 磁束計で測定した磁気ヒステリシス曲線から拡張型ビーンモデルを用いて算出した。

### 3. 実験結果

Fig.1 に HIP 法及びカプセル法で作製した MgB<sub>2</sub> バルクの捕捉磁場の温度依存性を示す。HIP 法で作製した直径 24 mm、厚さ 22 mm のバルク(HIP#24)は約 2.2 T(13.8 K)の磁場を捕捉した。またカプセル法で作製したバルクは、直径 20 mm、厚さ 5 mm のバルク(capsule#20)で約 1.4 T(13.5 K)、直径 30 mm、厚さ 9 mm のバルク(capsule#30)で約 1.5 T(16.5 K)の磁場を捕捉した。HIP 法バルクはカプセル法バルクよりも高い捕捉磁場を示した。Fig.2 に臨界電流密度の温度依存性を示す。HIP#24 バルクの  $J_c$  は 20 K 自己磁場中において約  $3 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> であり、カプセル法バルクの  $J_c$  の 2-3 倍であった。充填率は、HIP#24 バルクは 93.9%、2 つのカプセル法バルクは約 50% であり、HIP バルクにおいて充填率は大幅に向上した。充

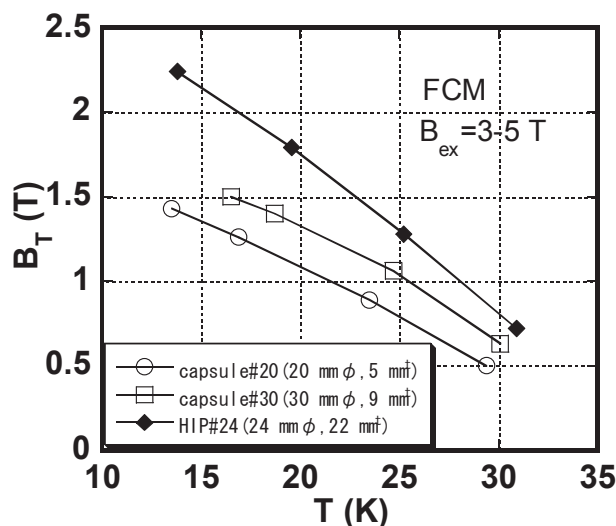


Fig.1 Temperature dependence of the trapped field for the MgB<sub>2</sub> bulks.

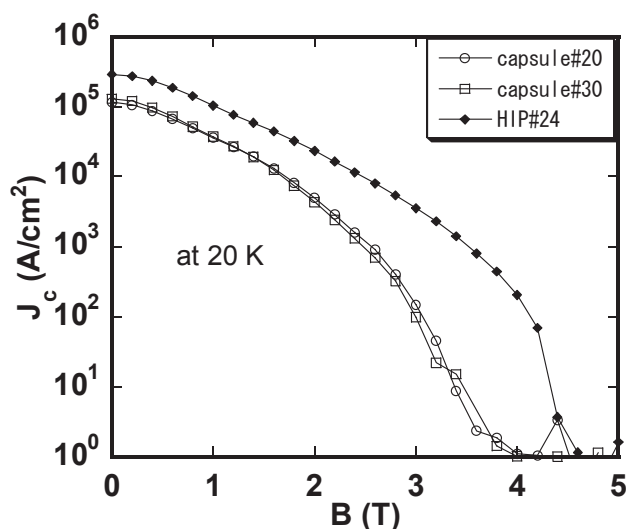


Fig.2 Temperature dependence of the critical current density for the MgB<sub>2</sub> bulks.

填率向上に伴った粒間結合性の向上や超電導分率の増大により  $J_c$  及び捕捉磁場が上昇したと考えられる。現在、サイズや印加圧力を変えて作製した MgB<sub>2</sub> バルクの評価を行っている。講演では、密度や微細組織と捕捉磁場特性の相関について議論する予定である。

### 参考文献

- [1] T. Naito *et al.* : Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 095012
- [2] 富田, 他 : 低温工学・超電導学会講演概要集 **85** (2011) 2P-p18

# 大型 MgB<sub>2</sub> バルクのパルス着磁特性

## Pulsed field magnetization of MgB<sub>2</sub> bulks

田村 拓也, 佐々木 智久, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

TAMURA Takuya, SASAKI Tomohisa, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: t2212020@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

超電導バルク磁石の着磁法のうち、パルス着磁法 (PFM) は着磁装置が簡単・安価、かつ短時間で着磁できるなどの利点があり、産業応用において有効な着磁方法である。しかし、PFM は瞬間的に磁場を印加するため、着磁時の発熱が大きく、超伝導マグネットを用いて行う磁場中冷却着磁法 (FCM) で着磁した場合よりも捕捉磁場が減少する。PFM は RE-Ba-Cu-O 系 (RE: 希土類元素)超電導バルク体が主であり、MgB<sub>2</sub>超電導バルク体の PFM の報告例は少ない。

本研究では、市販のステンレスフランジと銅製ガasketを使用し焼結するカプセル法で作製した充填率 50%程度の MgB<sub>2</sub> バルクと[1]、Mg-RLI 法で作製した充填率 90%程度の MgB<sub>2</sub> バルク[2] を PFM により着磁し、バルク表面初期温度や印加磁場強度を変化させた場合の捕捉磁場分布や温度上昇について考察した。さらに、Mg-RLI 法により作製した MgB<sub>2</sub> バルクは比熱の増大を目的に W をドーブした試料についても測定を行った。

### 2. 実験方法

試料はカプセル法で作製した Bulk-A ( $\phi$  30 mm  $\times$  9 mm<sup>3</sup>) および、Mg-RLI 法により作製した Bulk-B ( $\phi$  50 mm  $\times$  16 mm<sup>3</sup>, 体積分率 MgB<sub>2</sub>: 84.0 %, Mg: 15.5 %, Mg<sub>2</sub>B<sub>25</sub>: 0.50 %) , W をドーブした Bulk-C ( $\phi$  50 mm  $\times$  20 mm<sup>3</sup>, 体積分率 MgB<sub>2</sub>: 54.1 %, Mg: 26.3 %, WB: 19.6 %) を使用し、各 MgB<sub>2</sub> バルクで PFM を行った。PFM はバルク初期温度  $T_s=14\sim 30$  K に冷却し、ソレノイド型パルスコイルを用いパルス磁場(立ち上がり時間: 12 ms) を印加した。バルク表面温度は cernox 温度計を用いて測定し、着磁の際にはホールセンサーをバルク表面につけ、オシロスコープによりバルク表面の捕捉磁場の時間依存性を測定し、着磁後、走査型ホールセンサーにより、1 mm 上方の捕捉磁場分布を測定した。

### 3. 実験結果および考察

Fig.1 に Bulk-A, Bulk-B, Bulk-C の各バルクのバルク表面中心での中心捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。図中の初期温度  $T_s$  は各バルクでの中心捕捉磁場の最も高いピークを示した温度である。Bulk-A では  $T_s=14$  K の時、最大中心捕捉磁場  $B_T=0.71$  T, Bulk-B では  $T_s=23$  K の時、 $B_T=0.47$  T, Bulk-C では  $T_s=14$  K の時、 $B_T=0.17$  T が得られた。Bulk-A, Bulk-C は冷凍機の最低温度時のバルク表面温度  $T_s=14$  K の時に最大中心捕捉磁場を示したが、Bulk-B では最低温度でより高い  $T_s=23$  K の時に最大中心捕捉磁場が得られた。この結果より、カプセル法で作製した低密度の Bulk-A と Mg-RLI 法で作製した Bulk-B, Bulk-C のバルクでの最大中心捕捉磁場を比較すると低密度である Bulk-A の方が最大中心捕捉磁場が高く、この結果からは密度の大きさと捕捉磁場の相関は得られない。さらに Fig. 1 の Bulk-B の結果から、捕捉磁場の向上が必ずしもバルク表面の低温化に起因するわけではないこともわかる。

Fig. 2 にカプセル法で作製した Bulk-A の捕捉磁場分布 ( $T_s=14$  K,  $B_{ex}=1.54$  T) を示す。分布は左下、右下部分に多少歪みのあるものの、均一で中心が最も高いコーン型を示している。これは Bulk-A の  $J_c$  分布が均一であることを示している。

Fig. 3 に Mg-RLI 法で作製した (a) Bulk-B ( $T_s=23$  K,  $B_{ex}=1.05$  T), (b) Bulk-C ( $T_s=14$  K,  $B_{ex}=1.69$  T) の捕捉磁場分

布を示す。Bulk-B には大きな不均一性が見られた。この不均一性が Fig. 1 で示した中心捕捉磁場の印加磁場依存性におけるピーク点に影響したと考えられる。Bulk-C は捕捉磁場分布の歪みはほとんど見られないが、Bulk-B よりも捕捉磁場が小さい。これは比熱の増大を目的にドーブした W により Bulk-C の MgB<sub>2</sub> の体積分率が低くなり、 $J_c$  が小さくなったためであると考察される。

当日の発表ではさらにバルク初期温度を変えた条件での各バルクの捕捉磁場分布、中心捕捉磁場の印加磁場依存性、温度上昇などを、本研究室で行った RE-Ba-Cu-O 系超電導バルクでの PFM 特性と比較し、報告する。

### 4. 参考文献

- [1] T. Naito *et al.*, 2012 Supercond. Sci. Technol. 25 095012  
[2] G. Giunchi: Int. J. Mod. Phys. B 17 (2003) 453

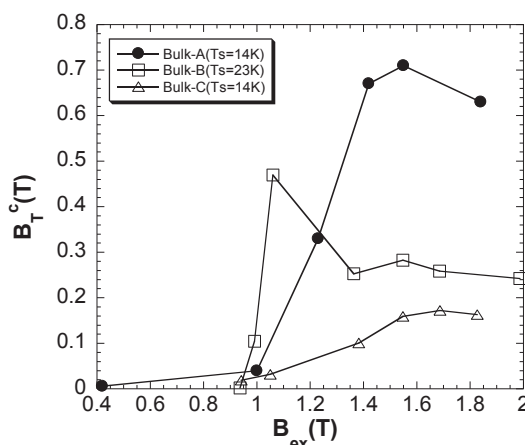


Fig. 1 The applied field dependence of the trapped field by PFM for the bulk

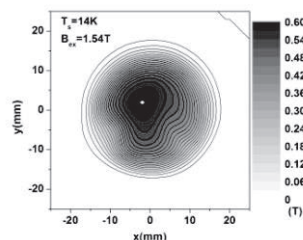


Fig. 2 Trapped field distribution of the Bulk-A fabricated by capsule method ( $T_s=14$ K,  $B_{ex}=1.54$ T)

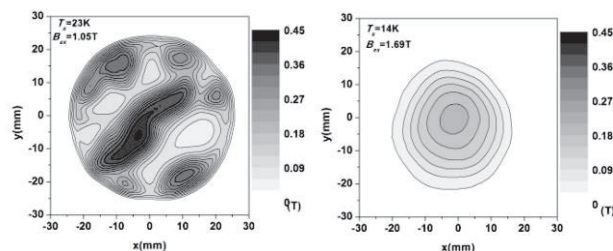


Fig. 3 Trapped field distribution of the (a)Bulk-B ( $T_s=23$ K,  $B_{ex}=1.05$ T), (b)Bulk-C ( $T_s=14$ K,  $B_{ex}=1.69$ T), which were fabricated by Mg-RLI method