

Gd-Ba-Cu-O 超電導バルクにおけるソレノイドコイルとスプリットコイルを用いたパルス着磁特性

Trapped field characteristics of Gd-Ba-Cu-O superconducting bulk magnetized by pulsed field using solenoid coil and split coil

望月 豪彦, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大); Yun-hua Shi, Mark Douglas Ainslie (Cambridge 大)

MOCHIZUKI Hidehiko, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);

Yun-hua Shi, Mark Douglas Ainslie (Univ. of Cambridge)

E-mail: t2214035@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO(REは希土類元素またはY)は高磁場においても高い臨界電流密度を示すことから永久磁石としての応用が期待されている。超電導バルクの研究は超電導マグネットを用いた磁場中冷却着磁法(FCM)による着磁が一般的であるが、バルク応用を考えると銅コイルを用いたコンパクトかつ短時間の着磁が可能なパルス着磁(PFM)が有効であると考えられる。さらに船舶用のモーターや磁気分離のような列状や面上のバルクを着磁するためには大口径ソレノイドコイルの開発を必要とするなど、FCMには応用上問題が多くある。東京海洋大の井田らはバルク上下に渦巻き型のコイルを設置したパルス着磁特性を報告しており、ソレノイドコイルよりも効率的な着磁方法であることを報告している[1]。藤代らは渦巻き型コイルを用いたパルス着磁特性をシミュレーションにより解析し、ソレノイドコイルよりも着磁効率が良いと報告している[2]。そこで本研究ではGdBCOバルクに対しソレノイドコイルとスプリットコイルを用いたPFM実験結果とシミュレーションによる解析結果を報告する。また、スプリットコイルのサイズによる捕捉磁場特性の影響を報告する。

2. 実験方法

本研究で用いたGdBCOバルクはTSMG法で作製し、直径30mm、厚さ15mmに成形した。スプリットコイルによるPFMは銅ホルダーにバルクを固定し、*ab*-planeを冷却方向としてGM冷凍機により各初期温度に伝導冷却した。ソレノイドコイルによるPFM実験では、バルクをSTYCASTを用いて補強SUSリングに埋め込み、コールドヘッドに固定した。それぞれのコイルは真空容器の外側で液体窒素による冷却を行い、立ち上がり時間が十数msのパルス磁場を印加した。捕捉磁場はバルク表面中心に設置したホールセンサーを用いて測定し、磁場分布の際にはバルク表面から2mm上方において1mmピッチで走査し測定した。またソレノイドコイルとスプリットコイルの着磁特性を比較するために(株)フォトンのPHOTO-EDDYとPHOTO-THERMOを用いてバルク内の温度や磁束の侵入経路を解析した。

3. 実験結果

Fig. 1に $T_s=65$ K, 40 Kにおけるソレノイドコイルとスプリットコイルを用いた捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。スプリットコイルはソレノイドコイルよりも B_T が急な立ち上がりをしていることから、スプリットコイルは磁束が均一に侵入していることが考えられる。また、スプリットコイルの最大捕捉磁場は $T_s=40$ Kにおいて $B_T=3.20$ T、ソレノイドコイルで $B_T=1.92$ Tであった。GdBCOバルクの熱伝導率は*c*-axis方向よりも*ab*-plane方向が約4倍大きい。その結果*c*-axis方向が冷却方向であるソレノイドコイルの着磁よりも*ab*-planeが冷却方向であるスプリットコイルのほうが熱はけがよく、捕捉磁場が向上したと考える。

Fig. 2にバルク表面2mm上方におけるそれぞれのコイルで着磁した磁場分布を示す。40 Kでは高いピン止め力を持つためバルク内の不均一な発熱により、不均一な磁場分布が得られるが、スプリットコイルを用いて着磁したバルクは非常に

均一な磁場分布を示しており、2mm上方においても1.8 T捕捉されていることが確認できた。磁場分布の結果からもスプリットコイルはソレノイドコイルに比べ効果的な着磁方法であると考えられる。

講演では、捕捉磁場特性と磁場分布の結果とともに、温度上昇やコイルのサイズによる捕捉磁場特性の影響について議論する予定である。

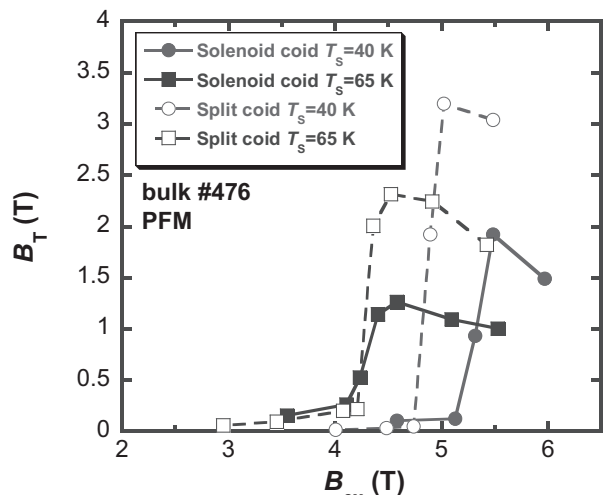


Fig. 1 Applied field dependence of the trapped field magnetized by split or solenoid coil at 40 and 65 K.

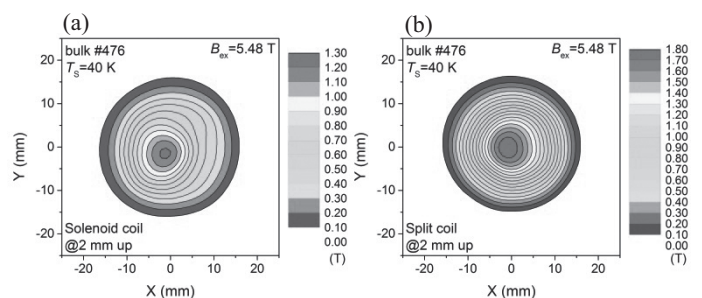


Fig. 2 Trapped field profile magnetized by (a) solenoid and (b) split coil 2 mm above the bulk surface for $B_{ex}=5.48$ T at 40 K.

謝辞

本研究は、日本学術振興会の二国間交流事業オープンパートナーシップ共同研究による支援を得た。

参考文献

- [1] T. Ida *et al.*: Physica C 412-414 (2004) 638-645
- [2] H. Fujishiro *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 075015

細孔加工したバルク磁石の細孔の位置と捕捉磁場特性の関係

Relationship between a position of a small hole and a trapped field performance in a hole-processed superconducting bulk magnet

横山 和哉, クラワンシャ エランダ, 趙 元鼎(足利工大); 岡 徹雄(新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, KULAWANSHA Eranda, ZHAO Yuanding (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

大型・高特性の超伝導バルク体において, パルス磁化法でも磁束の侵入を容易にするために, 試料の一部に細孔を加工したバルク体を考案した。これまでは比較的特性の低い GSR (Growth Sector Region) 部に細孔を加工してきたが, 本文では磁場侵入時の磁気シールドを低減することを考慮して GSB (Growth Sector Boundary) 部に加工した。GdBCO バルク体の GSB 部の 1 か所に細孔を加工して単一パルス磁場を印加する実験を行い, GSR 部に加工した場合の結果と比較する。

2. 実験

$\phi 60 \times 20$ mm の GdBCO バルク体(新日鐵住金製)の GSB の外周近傍1か所に $\phi 2$ mm の細孔を貫通させ, ハンダを充填した。同試料を 2 段式の GM サイクル冷凍機 (RF273SA, アイシン精機製) で冷却して, 温度コントローラで 20~50 K に調整し, 各温度において 3.1~7.0 T のパルス磁場 (立ち上がり時間: 10 ms) を各 1 回印加した。

試料表面の細孔を加工した GSB 部 (H1), 細孔を加工していない GSB 部 (H2), GSR 部 (H3), 中心 (H4) の 4 か所にホールセンサ (BHT-921, F.W.BELL) を貼り付け, データロガー (PA-S1000/8, P&A テクノロジーズ) を用いて磁束密度の時間変化を測定した。さらに, 磁極表面 (試料からの距離: 4 mm) の磁束密度分布を, 三次元ホールセンサ (BH-703, F.W.BELL) を用いて測定した。

3. 結果および考察

図 1 に印加磁場 3.9, 5.4, 7.0 T の時の試料表面における磁束密度の時間変化を示す。上段が GSB に細孔を加工した場合, 下段が GSR に加工した場合の結果である。印加磁場 3.9 T において GSB 及び GSR 共に細孔を加工した部分の値 (H1) が大きくなっており, 細孔部から磁束が侵入していることがわかる。印加磁場 5.4 T において中心部分の H4 の値を比較すると, GSR の場合と比べて GSB の場合の方が値が小さく, 磁束が侵入し難くなっていることが考えられる。

図 2 に磁極表面の磁束密度分布を示す。上段が GSB に細孔を加工した場合, 下段が GSR に加工した場合の結果である。印加磁場 3.9 T において, 細孔部分に磁束密度のピークが表れており, この結果からも細孔部分から磁束が侵入して捕捉されていることがわかる。

図 3 に最大値で規格化した総磁束量 (左軸, open symbol) 及び加工前と加工後の総磁束量の比 (右軸, solid symbol) の印加磁場依存性を示す。前者の結果は, すべての印加磁場において細孔を GSR に加工した sample1 より GSB に加工した sample2 の値が大きくなっている。後者の結果は, 印加磁場 4.6 T 以上で sample2 の値が大きい傾向があり, GSB に細孔を加工した方が良くなる可能性を示唆している。

4. まとめ

GSB に細孔を加工した GdBCO バルク体において着磁特性を評価し, GSR に加工した場合の結果と比較した。磁束密度の時間変化の結果から, GSB に加工した場合でも磁束が侵入し易くなることを確認した。また, 総磁束量の結果から, GSB に加工した方が GSR に加工するよりも捕捉磁場の点で有利である可能性を明らかにした。

本研究は JSPS 科研費 24560343 の助成を受けたものである。

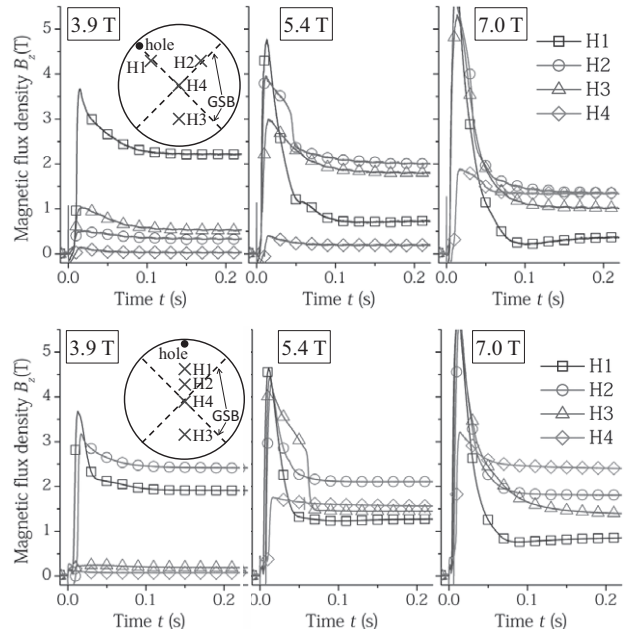


Fig. 1. Time responses of magnetic flux density on the bulk surface for $\mu_0 H = 3.9, 5.4$ and 6.2 T at 20 K.

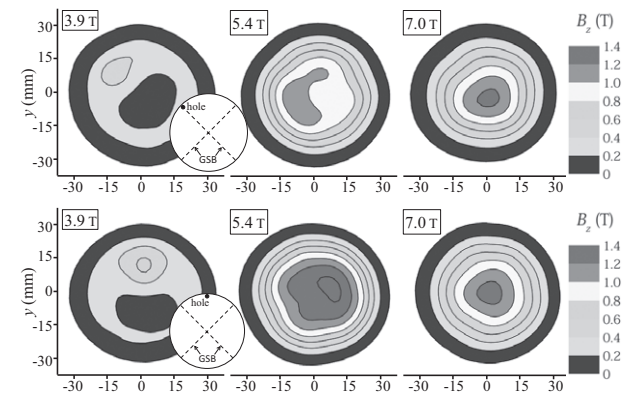


Fig. 2. Trapped field distributions on the chamber surface in applied fields of 3.9, 5.4, and 7.0 T at 20 K.

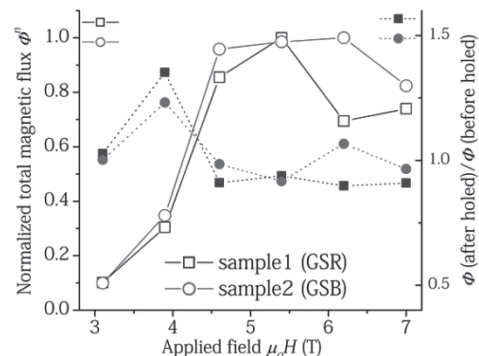


Fig. 3. Applied field dependence of normalized total magnetic flux (left axis) and the ratio of total magnetic flux before and after processing (right axis) at 20 K.

超伝導バルク磁石の細孔サイズが捕捉磁場特性に及ぼす影響

Influence of the hole size on trapped field performance in a hole-processed bulk superconductor

クラワンシャ エランダ, 鼎 元鼎 (足利工大), 岡 徹雄 (新潟大), 横山 和哉 (足利工大)

KULAWANSHA Eranda, ZHAO Yuanding (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ); YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.)

1. はじめに

超伝導バルク磁石は小型な装置で大きな磁場を発生させることができる。超伝導体の磁化方法は磁場中冷却法とパルス磁化法に大別できるが、前者は大きな磁場を発生できるものの大型かつ高価な励磁装置が必要である。後者は汎用の装置を使用して短時間で磁化することが可能である。ただし、発生できる磁場は前者の半分程度であるが、様々な改良型パルス磁化法が提案され、捕捉磁場が向上してきた。一方、近年の材料技術の向上に伴い、改良型パルス磁化法においても大きな磁場を捕捉させることが難しくなりつつある。そこで、著者らは試料に細孔を加工して意図的に超伝導特性を低下させ、その部分から磁束を効率的に侵入させて捕捉磁場を向上させる手法を提案してきた。本文は細孔の大きさが捕捉磁場特性に与える影響を調べた結果を報告する。

2. 実験

GdBa₂Cu₃O_x バルク体 (φ60×20 mm, 新日鐵住金(株)) の結晶成長領域 (Growth Sector Region: GSR) の外周近傍 1か所に φ1 mm の細孔を、ドリルを用いて加工した。なお、機械的補強のために細孔にはハンダを充填した。その試料を 2 段式の GM 冷凍機 (RF273SA, アイシン精機) で冷却して、温度コントローラで 20~50 K に調整し、各温度において 3.1~7.0 T のパルス磁場 (立ち上がり時間: 10 ms) を各 1 回印加した。着磁中の試料表面における磁束密度の時間変化を測定するとともに、磁場印加後、磁極表面 (試料からの距離: 4 mm) の磁束密度分布を測定した。次に、その細孔を φ2 mm に拡大して同様の着磁実験を行い、細孔の大きさが着磁特性に及ぼす影響を評価した。

3. 結果および考察

図 1 に細孔の大きさが (a) φ1 mm 及び (b) φ2 mm の場合の捕捉磁場分布を示す。印加磁場 3.9 T では細孔が大きい方が捕捉磁場が大きくなっている。5.4 T の場合では最大値は φ2 mm の方が大きいものの、細孔による分布の歪みが大きく表れている。7.0 T では φ1 mm では 5.4 T よりも増加しているが、φ2 mm では減少している。

図 2 に 20 及び 40 K における印加磁場と総磁束量の関係を示す。なお、加工前の結果及びこれまでに行った φ2 mm の細孔を 4 個加工した場合の結果も比較のために示している。20 K では印加磁場と共に総磁束量は大きくなり、印加磁場 5.4 T で最大とを取っている。最大値は加工前に比べて低くなっているが、φ1 mm と φ2 mm に大きな差はない。印加磁場が 5.4 T より大きい場合、印加磁場と共に総磁束量は減少し

ている。ここで、6.2 T において値が大きく低下しているが、これはフラックスジャンプが発生したためであることを確認している。一方、40 K では印加磁場 4.6 T で最大値を取り、その後低下している。また、φ2 mm の場合は細孔 4 個の場合と同様に低い値となっており、細孔が大き過ぎる可能性があることが示唆された。

4. まとめ

大型・高特性バルク体においてパルス磁化法により捕捉磁場を向上させることを目的として、細孔を加工したバルク体において細孔の大きさが捕捉磁場特性に及ぼす影響を調べた。直径 1 及び 2 mm の場合を比較した結果、後者では磁束フローによる磁束密度の減少が大きくなってしまふことから、磁束密度の向上の観点からは細孔の大きさは φ1 mm 程度が適しているという知見が得られた。

本研究は JSPS 科研費 24560343 の助成を受けたものである。

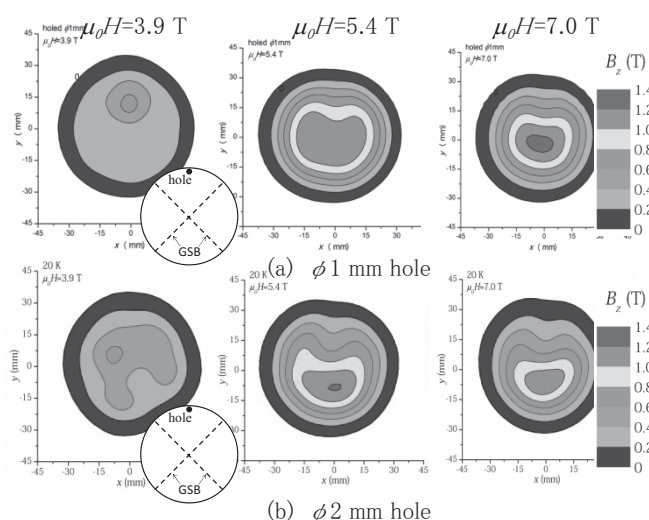


Fig.1. Trapped field distributions on the magnetic pole surface

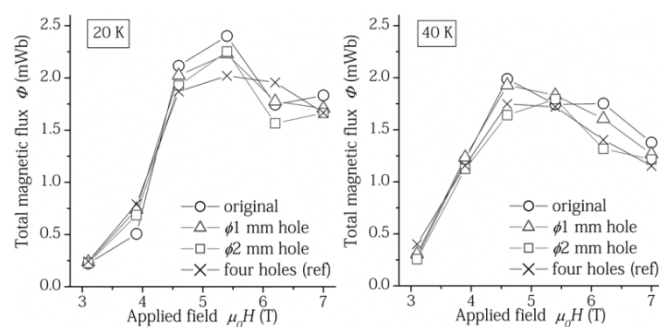


Fig.2. Applied field dependence of total magnetic flux

卓上型超伝導バルク磁石の反復パルス磁化法 による強磁場化の検討

Improvement of a trapped field by iterative pulsed field magnetization on a desktop type superconducting bulk magnet

趙 元鼎*, エランダ クラワンシャ(足利工大院);横山 和哉(足利工大);岡 徹雄(新潟大)
ZHAO Yuanding, ERANDA Kulawansa, YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

1. はじめに

超伝導バルク磁石(以下,バルク磁石と略す)は小型・安価で取り扱い易く,一般的な電磁石の限界である 2 T を超える磁場を容易に発生させることができる。多くのバルク磁石装置は GM 冷凍機が用いられているが,外部装置としてコンプレッサが必要であり,冷凍機は小さいものの装置全体としては大きくなってしまふ。そこで,著者らはスターリング冷凍機を用いた卓上型バルク磁石装置を開発した。同冷凍機は外部にコンプレッサを必要とせず,装置全体のコンパクト化に成功した。ただし,冷却性能が 8 W@77 K であり,GM 冷凍機に比べると低い値となっている。これまでの冷却及び着磁試験の結果,最低到達温度が 53 K,捕捉磁場が磁極表面で 1.3 T であった。本文は更なる強磁場化を目指して,反復パルス磁化法による着磁実験を行った結果を報告する。

2. 実験

GdBa₂Cu₃O_xバルク体(φ 45×15 mm, 新日鉄住金製)をスターリング冷凍機(CryoTel CT, SUNPOWER, 冷却能力:8 W@77 K)のクールドヘッドに接続したサンプルステージの先端に取り付け,真空チャンバを取り付ける。最低到達温度まで冷却した後,着磁コイルを取り付けて 3.1~7.0 T のパルス磁場(立ち上がり時間:10 ms)を複数回印加した。磁場印加毎にコイルを取り外し,三次元ホールセンサを用いて磁極表面(バルク体表面から 4 mm)の磁束密度分布を測定した。なお,パルス磁場を印加する間隔は,磁場分布の測定時間を含めて 90 分程度である。

3. 結果および考察

図 1(a)に 7.0-5.4-5.4 T の順にパルス磁場を印加した場合,同図(b)に 7.0-3.9-3.1 T の場合の磁極表面における磁場分布を示す。(a)の場合は 2 発目で捕捉磁場が増加するものの,3 発目で大きく減少していることがわかる。一方,(b)の場合は 2 発目と 3 発目の磁場分布に大きな違いはない。

図 2 に最大捕捉磁場とパルス磁場印加回数の関係を示す。1 発目に 7.0 T を印加した場合はいずれの場合も 2 発目が増加しているのに対して,1 発目に 5.4 T を印加した場合はいずれの場合も 2 発目が大きく減少していることがわかる。反復パルス磁化法では,大きな磁場を印加するとピンニング損失に

よる発熱により J_c が低下し,捕捉磁場が低下することがわかっているが,本結果はこれまでの傾向と異なり,更なる検討が必要である。

4. まとめ

本文はスターリング用いた卓上型超伝導バルク磁石装置において,反復パルス磁化法による着磁実験を行った。その結果,複数回パルス磁場を印加することで捕捉磁場の増加がみられたが,逆に大きく減少してしまうケースも確認された。現在も実験を継続中であり,発表当日に最新のデータを報告する予定である。

本研究はJSPS 科研費 15K05951 の助成を受けたものである。

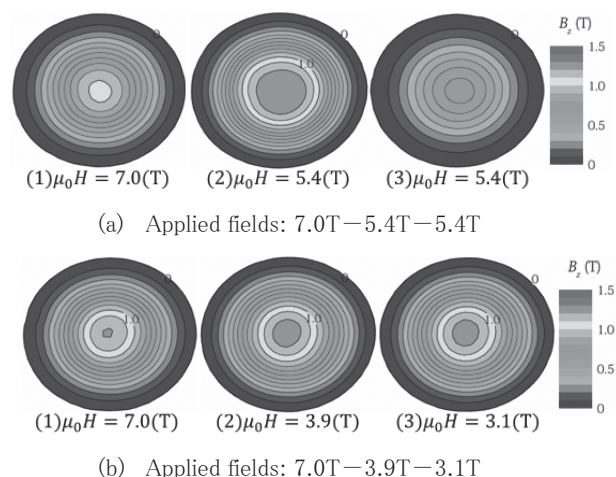


Fig. 1. Magnetic field distributions on the pole surface

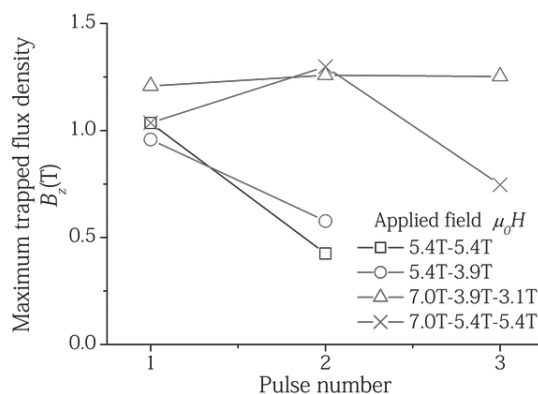


Fig. 2. Pulse number dependence of the maximum trapped field on the pole surface.

バルク超電導体への軸外し静磁場中冷却による捕捉磁場特性

Magnetic Flux Trapping in Bulk Superconductor under Off-axis Field Cool Magnetization

李 智, 和泉 充(東京海洋大学); 井田 徹哉(広島商船高専); 三木 基寛, 末海 竜(東京海洋大学);
張 玉鳳, 張 晓娟(上海電力学院)

LI Zhi, IZUMI Mitsuru (TUMSAT); IDA Tetsuya (NIT Hiroshima College); MIKI Motohiro, MATSUUMI Ryo; (TUMSAT);
ZHANG Yufeng, ZHANG Xiaojuan (SHIEP)
E-mail: d142021@kaiyodai.ac.jp

1. Introduction

HTS bulk has a promising performance being able to sustain higher magnetic field source compared with permanent magnets (PMs) once activated. The trapping magnetic flux potential of melt-textured HTS bulk has been reported to 17 T at 29 K, 11 T at 47 K and 3 T at 77 K [1-3] under field cooling magnetization (FCM) when external magnetic field is parallel with c -axis of bulk material. However, more detailed information about the trapping flux behaviors under off-axis field cooling magnetization is necessary for engineering applications of Gd-Ba-C-O bulk. In this paper, we perform experiments to clarify the trapping flux behaviors of single-grain bulk Gd-Ba-C-O 60 mm in diameter using off-axis FCM process with inclination angle θ ($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90°) at 77K and under 3T, where θ is the angle between the c -axis and the applied field.

2. Experimental

A cylindrical GdBCO bulk sample with dimension of $\phi 60 \times 20 \text{ mm}^3$ was selected to investigate the corresponding trapping flux behavior using off-axis FCM method as shown in Fig.1 (a).

All these FCM experiments were performed using a 5 T LTS solenoid magnet system with a 300 mm room temperature core (JMTD – 5T 300M – PC, Japan Magnet Technology, Inc.). The field sweep rate was setting at 1.39 mT/s during the excitation and demagnetization processes. The sample was cooled by liquid nitrogen under 3T with inclined θ of $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90° to the c -axis of the sample respectively. For inclined angle of 90° , we defined the arrangement pattern according to the angle between the c -axis and the applied field on vertical direction, where aligned growth sector boundary (GSB) pattern means one GSB is parallel to the applied field and misaligned GSB pattern means one GSB has a 45° angle with the applied field as shown in Fig. 1(b). We chose those two magnetization arrangement geometries to further explore the influence of anisotropic properties of bulks on the trapping flux behaviors. After demagnetization process, a 15-minute time interval before measurement was requisite considering possible relaxation influence on the trapping flux behaviors. Lastly, the trapping flux distribution was measured at every 1 mm distant by a cryogenic Bell Hall sensor (BHT921) mounted on an X-Y-Z movable platform with measurement range of $70 \times 70 \text{ mm}^2$ above the a - b plane. The total gap between the target surface of the sample and the active area of the Bell Hall sensor was strictly adjusted to 0.5 mm, including the thickness of protection mould of sensor 0.3mm.

3. Experiment Results and Analysis

Particularly high trapped fields were achieved when θ is 0° , with a maximum value of 1.60 T. Figure 1 (a) shows the experiment setup for measuring trapping flux behavior under off-axis FCM method.

We can find the peak value of trapping flux density decreases monotonously with the increasing θ . The peak trapped flux density doesn't change obviously till θ is 30° , as much as 96.25% of the $\theta = 0^\circ$ condition. The bulk can still trap 1.07 T under 45° inclination, equaling 85 % of $\theta = 0^\circ$ condition. The peak value decreases rapidly when the θ is larger than 60° .

Considering the anisotropic properties of bulks, trapping flux density distribution in growth sectors and growth sector boundaries were also analyzed as shown in Fig 1 (c). Four represent lines were chosen to figure out the trapped flux behavior.

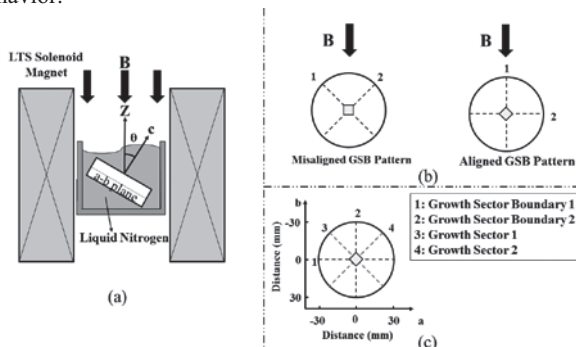


Figure 1 (a) Experiments for measuring trapping flux behavior under off-axis FCM; (b) Applied flux polarization configuration for GSB; (c) The four chosen area for trapping flux behavior analysis including GSB and GS areas.

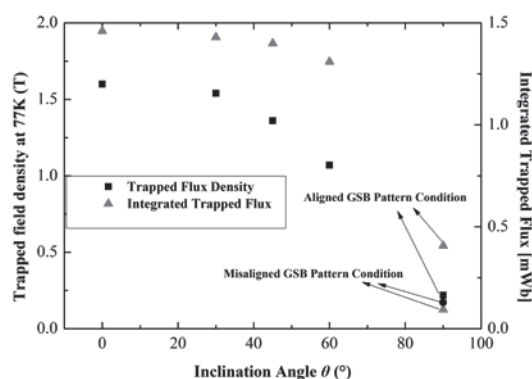


Figure 2. Influence of inclination angle of applied magnetic field on trapped flux density peak value and integrated trapped flux.

4. Conclusion

We have performed the experiment to clarify the trapping flux behavior of Gd-Ba-C-O under off-axis field cooling magnetization method. The maximum trapped field decreases monotonously and the ratio of trapped flux area over B_{ave} increases with increasing inclination angle. Till $\theta = 30^\circ$, the integrated trapped flux doesn't change obviously. These results give us more support for the future design of the applied HTS machines magnetization system.

Reference

- Tomita, M., Murakami, M.: Nature 421, 517 (2003).
- Gruss, S., Fuchs, G., Krabbes, G., et al.: Appl. Phys. Lett. 79, 3131 (2001).
- Nariki, S., Sakai, N., Murakami, M.: Supercond. Sci. Technol. 18, S126 (2005).

リング状 QMG® バルクマグネットの低温強磁場着磁とひずみ特性

Trapped field and strain properties on high field QMG ring bulk magnet at low temperature

森田 充, 手嶋 英一, 成木 紳也(新日鐵住金)

MORITA Mitsuru, TESHIMA Hidekazu, NARIKI Shinya (NSSMC)

E-mail: morita.d98.mitsuru@jp.nssmc.com

1. はじめに

優れた特性を有する QMG®(単結晶状の 123 相中に 211 相が微細分散したバルク状酸化物超電導材料)は、1988 年に初めて開発された¹⁻⁴⁾。その後、希土類元素(RE)を置換した種結晶を使用する単結晶育成技術により大型の QMG®が製造可能となり、種々の応用開発が進められた。⁵⁻⁶⁾バルクマグネット応用は、1989年に提案され、RE置換種結晶技術によりその基本形が完成した⁷⁻⁸⁾。最近では、特に低温・強磁場での着磁により数 T の磁場が捕捉可能となり、各種のバルクマグネット応用例が報告されている。

強磁場を着磁する場合、大きなフープ力により試料がひずみ、やがて破壊にいたる可能性がある。前回、NMR および医療応用を念頭に、リング状 QMG®の各温度・印加磁場条件下で、捕捉磁束密度とひずみの関係をひずみゲージを用いた実験から明らかにした⁹⁾。今回、リング状 QMG®バルクマグネットの特に低温・強磁場領域での着磁過程における捕捉磁場と QMG®リングのひずみとの関係を明らかにしたので報告する。

2. 実験方法

2-1 試料準備:肉厚 10mm のステンレスリングを嵌め補強した外径 60mm、内径 28mm、厚さ 20mmのリング試料を 2 個積層し試料を作製。上段のリングの内周面、補強リングの外周面にひずみゲージを貼りつけた。また、二段に重ねたリング中央にホール素子を配置した。試料は下面を冷凍機のクールドヘッドにグリースで固定した。Fig.1 に試料およびセンサーの配置を示す。

2-2 測定方法: 95K で 9T および 10T の磁場を印加し、20K に冷却した。この時のひずみゲージの値を基準に、着磁過程でひずみ変化量および磁束密度を記録した。また 20K で 10T 着磁後、95K まで 0.1K/分で昇温し、捕捉磁束密度およびひずみ変化量の温度依存性を測定した。

3. 実験結果・考察

20K、9T および 10T での着磁過程におけるひずみ変化量およびリング内の磁束密度から外部磁場を差し引いた QMG®リングが捕捉している磁束密度を Fig.2 に示す。

Fig.2 から、上記形状の QMG®リングを二段に積層することによって、9T および 10T の印加磁場をほぼ保持して着磁できていることが分かる。また、上段の QMG®リングの内周表面では、10T 着磁で、ひずみ変化量は $685 \mu \epsilon$ に達するものの割れることなく 10T を捕捉している。

Fig.3 に 10T 着磁後の捕捉磁束密度および各位置での捕捉磁場によるひずみ変化量の温度依存性を示す。この時、ひずみゲージの値は、温度変化により変化するため、ひずみ変化量は、磁場中冷却時のひずみゲージの値を基準にした。捕捉磁束密度の温度依存性が 55K 付近から低下していることから、約 55K 以上の温度で QMG®リングがフル着磁状態になっていることが分かる。また、高温側からのフル着磁状態の外挿線から、十分な補強がなされた場合、30K で 20T 級の着磁が可能となることが分かった。

今後は、QMG®リングの積層状態を変え、種々の着磁条件下での捕捉磁束密度特性およびひずみ特性に関し詳細に調べる予定である。

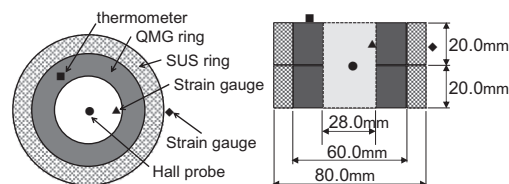


Fig.1 Arrangement of QMG rings and sensors

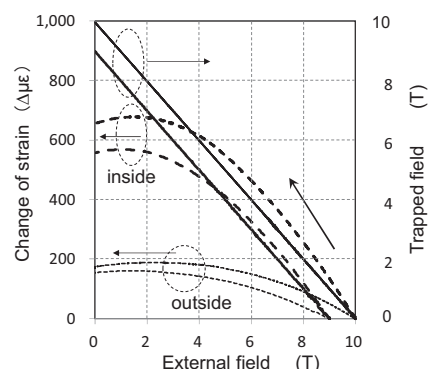


Fig.2 Change of trapped field and strain in each magnetization

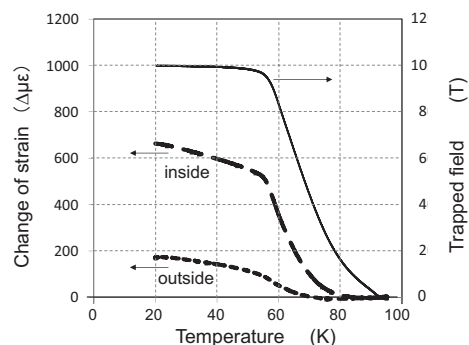


Fig.3 Temperature dependence of trapped field and strain

参考文献

1. 森田充, 松田昭一: New Superconducting Materials Forum News, No.10 (1988) 15
2. M. Morita, et al.: Patent No. US-5508253, Priority date: 06.06.1988
3. M. Morita, et al.: Physica C 172(1990)383-387 [参考文献1の英訳]
4. 森田 充等: 特許登録番号: 2556401
5. 森田 充: 博士論文「熔融成長法による大型酸化物超伝導体の作製と高臨界電流密度化に関する研究」北海道大学学術成果コレクション (HUSACP), <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/>
6. M. Morita, et al.: Advances in Superconductivity III (1991)733
7. 森田 充: 特許登録番号: 2055511
8. M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 41 (1989) p.14
9. M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.170

リング状 Gd-Ba-Cu-O 超電導バルクにおけるパルス着磁特性と破壊挙動

Trapped field characteristics and fracture behavior of Gd-Ba-Cu-O bulk ring during pulsed field magnetization

望月 豪彦, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大); 伊藤 佳孝, 柳 陽介 (イムラ材研); 仲村 高志 (理研)
 MOCHIZUKI Hidehiko, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);
 ITOH Yoshitaka, YANAGI Yousuke (IMURA); NAKAMURA Takashi (RIKEN)
 E-mail: t2214035@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

近年高温超電導線を用いた NMR マグネットの開発が盛んに行われており、NIMS は世界最高磁場である 24.0 T (1020 MHz)を発生できる NMR マグネットを実現した[1]。しかし高磁場を発生するとともに、マグネットの大型化が進むことや、線材の長尺化の困難さや製造コストも問題となっている。REBaCuO (RE は希土類元素または Y)バルクは 17 T 以上の磁場を発生できる。我々は超電導線材にはないバルクの特徴を生かし、コンパクトかつ液体ヘリウム冷却を必要としない NMR バルクマグネットの開発に取り組んでいる。NMR バルクマグネットの報告がいくつかあるが、これらの研究は高磁場、高安定性、高均一性を実現するために超電導マグネットによる磁場中冷却着磁 (FCM)を用いている[2]。コンパクトなパルス着磁法 (PFM)を用いることができれば、NMR バルクマグネットの実現が簡便となる。また、機械的強度の問題は捕捉磁場の向上と同じく重要な要素である。Ren らは FCM 過程における応力を計算し、クラックが起点となりバルクが破損することを報告した[3]。Johansen はゼロ磁場冷却着磁法(ZFCM)過程での半径方向応力とフープ応力を計算している[4]。そこで本研究は PFM による NMR バルクマグネットの実現に向けて、GdBaCuO リングバルクのパルス着磁特性と有限要素法 (FEM)による PFM 過程における応力を解析した。

2. 実験方法

本研究で用いた GdBaCuO リングバルク (OD=60 mm、ID=36 mm、t=17 mm)は改良型 QMG 法で作製した。このリングバルクは外側に補強アルミニウム合金リングが設置してある。バルクはコールドヘッドに設置したのちに初期温度 65 K まで GM 冷凍機により伝導冷却した。パルス磁場はソレノイド型銅コイルを用いて印加した。局所磁場はホール中心に設置したホールセンサーで測定し、磁場分布の際にはバルク表面 1 mm 上方で走査し測定した。また着磁過程における捕捉磁場と応力を(株)フォトンの PHOTO-EDDY、PHOTO-ELAS により解析した。シミュレーションは OD=60 mm、ID=0~36 mm の無限長リングバルクを想定し、外部磁場に依存しない Bean モデルを用いた。臨界電流密度は 2.25×10^8 A/m²とした。また、300 K から 65 K に冷却した際の熱応力を解析した。

3. 実験結果と解析結果

Fig. 1 に印加磁場 $B_{ex}=3.10$ T における局所磁場と印加磁場の時間依存性を示す。24 ms において磁束が急激にバルク中心に侵入していることが確認でき、最終的にホール中心ではマイナスの磁場となった。挿入図は $B_{ex}=3.10$ T のバルク表面 1 mm 上方における磁場分布を示す。左下に欠けが見られ、超電導電流が欠け部分を迂回していることがわかる。

Fig. 2 に (a)リングバルク (OD=60 mm、ID=36 mm)と (b)ディスクバルク (OD=60 mm)における冷却による熱応力、各印加磁場における最大フープ応力と、この 2 つの合計を示す。リングバルクはディスクバルクに比べ大きな圧縮応力が加わっていることがわかる。更にリングバルクにおいて熱応力だけでも約 90 MPa の圧縮応力がかかっている。 $B_{ex}=3$ T 以上印加するとバルクには 100 MPa 以上の応力が加えられることから、パ

ルス着磁においてはリング外側だけでなく、リング内側にも圧縮応力に対する補強リングが必要と考える。

講演では、実験結果とともにパルス着磁過程における応力の時間依存性や熱応力の径依存性を示し、破壊挙動について議論する予定である。

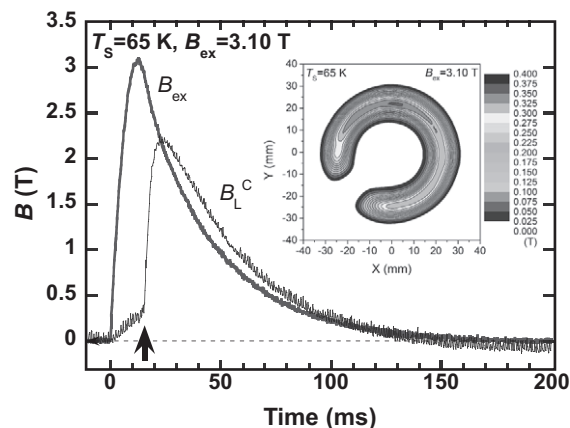


Fig. 1 Time dependence of the local field B_L^C and the applied pulsed field B_{ex} at the center of the hole for 3.10 T at 65 K. The inset shows the trapped field profile 1 mm above the bulk surface.

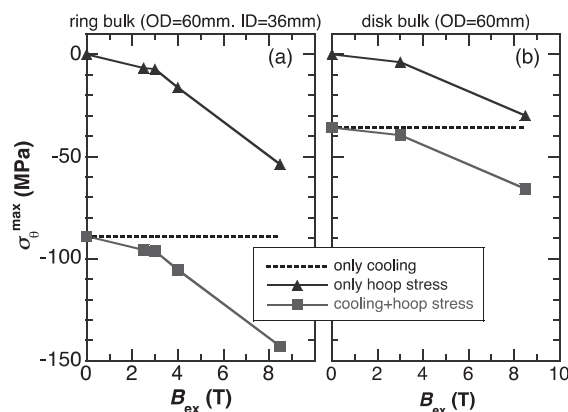


Fig. 2 The applied pulsed field dependence of the maximum hoop stress at 65 K for the (a) cylindrical bulk (OD = 60 mm, ID = 36 mm) and (b) disk bulk (OD = 60 mm).

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(15K04646)及び、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)の支援によって行われた。

参考文献

- [1] K. Hashi *et al.*: *J. Magn. Reson.* vol. 256 (2015) pp.30-33
- [2] 例えば、T. Nakamura *et al.*: *Concepts Magn. Reson. Part B* 31B (2007) pp.65-69
- [3] Y. Ren *et al.*: *Physica C* vol. 251 (1995) pp.15-26
- [4] T. H. Johansen: *Phys. Rev. B* vol. 60 (1991) pp.9690-9703

低コストコート線材開発に向けて Nbドープ SrTiO₃ バッファ層を用いた RE123 コート線材の微細構造

Microstructures of RE123 coated conductor using Nb-doped SrTiO₃ buffer layer toward development of low-cost coated conductors

一瀬 中(電中研, JST-ALCA);橋本 真幸(京大工);堀井 滋, 土井 俊哉(京大工, JST-ALCA)
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA); HASHIMOTO Masayuki (Kyoto Univ.);
 HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA)
 E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

RE系超電導のコートドコンダクターは、液体窒素冷却による使用条件の下、磁場が加わった際に臨界電流密度の低下が少ない材料として、超電導機器への適用が期待されている。さらに、電氣的保護層の一部に銀を使用しているが、長尺化が進んでいる Bi2223 銀シーす線材に比べると銀の使用量が少ないため低コスト化も期待され、研究開発が進められてきた。その結果、臨界電流特性においては、超電導機器の設計が求める特性をほぼ達成するところまでに至っている。しかし、コスト面では量産化というファクターを加えたとしても、線材価格は高く、超電導機器の実現には、線材の低コスト化が必要不可欠である。線材のコストとしては、製造プロセスコストと材料コストに大別され、製造プロセスコストは製造過程の効率化、マスマドクト化により低減が図られるが、材料コストは材料を見直さない限り低コスト化が実現できない。そこで、現在のコートドコンダクターの材料コストを見積ると、体積が大きく、比較的高価である金属基材、または、体積としてはあまり大きくないが、数ミクロンの厚さを有する銀のコストが高いことが分かった。以上のことから、金属基材にコモンメタルを用い、銀および銅による電気保護層を無くし、その代わりに金属基材に電気保護層の役割を持たせた新たな層構成のコートドコンダクターの開発を試みた。電気保護層の役割を金属基材に持たせるためには、導電性の中間層が必要であり、今回はニオブを添加した SrTiO₃ 中間層を用いて超電導テープを作製した。得られた超電導テープの 77K、自己磁場の臨界電流密度は 2.6MA/cm² で良好な特性を示したので、内部組織を透過型電子顕微鏡で観察した。

2. 実験方法

金属テープ線材は田中貴金属工業(株)製のものを使用した。金属テープ線材はステンレス補強した二軸配向銅テープ上に薄いニッケル層をメッキしたものである。導電性バッファ層としてニオブを添加した SrTiO₃ をパルスレーザー蒸着法で作製した。その後、YBCO 層を同様にパルスレーザー蒸着法で作製した。ニオブを添加した SrTiO₃ と YBCO の作製条件を表 1 にまとめる。

断面の微細組織観察は集束イオンビーム(FIB)装置を用いて超電導テープ線材の任意の場所から、切り出し、薄片化して透過型電子顕微鏡観察試料を作製した。微細組織観察は JEOLJEM-2100F で行い、断面組織観察を行うとともに、結晶配向を調べるために制限視野電子線回折またはナノビーム電子線回折を行った。さらに、組成の均一性等を調べるためにエネルギー分散型X線分光装置(EDX)を用いて元素分析を行った。

3. 実験結果および考察

図1に超電導テープの断面組織の STEM 像を示す。ニオブ添加した SrTiO₃ 層および YBCO 層は均一な組織を有するが、ニッケルの最表面層にコントラストの明るい部分が観察された。この部分が何の相であるかを調べるため、EDX で元素

Table I. Preparation conditions of the buffer and YBCO layers

Conditions	Nb-doped SrTiO ₃	YBCO
Wavelength (nm)	248	248
Frequency (Hz)	20	2
Laser Energy (mJ)	240	200
Gas	2%H ₂ +98%Ar	O ₂
Pressure (Pa)	1.2x10 ⁻²	35
Temperature (°C)	600	790
Thickness (nm)	120	160

マッピングを行った。その結果を図2に示す。図2よりニッケルの最表面のコントラストの明るい部分からはニッケルと酸素が検出された。一方、コントラストの暗い部分からはニッケルのみが検出され、酸素は検出されなかった。これらのコントラストの違い部分に電子線を絞るナノビーム電子線回折測定を行った結果、類似のパターンの回折スポットが得られたが、コントラストの明るい部分の格子長は暗い部分の格子長より長いことが確認できた。以上のことから、コントラストの明るい部分は酸化ニッケル(0.4178nm)でニッケル(0.3524)と同じ配向を有していることが確認できた。酸化ニッケルは酸素分圧の高い YBCO 層作製時に生成したと考えられる。酸化ニッケルの生成は好ましくないが、200~300nm のニッケル全体が酸化していないこと、また、表面の一部は酸化していないことから、プロセスの改良等による表面酸化防止の可能性が考えられる。また、元素マッピングにおいて銅とニッケルの界面は明瞭に観察されず、相互拡散していることからこの界面の接合は強く、剥離することは無いと考えられる。さらに、ニッケルの拡散はバッファ層でブロックされており、これが高い臨界電流密度の要因の一つと考えられる。

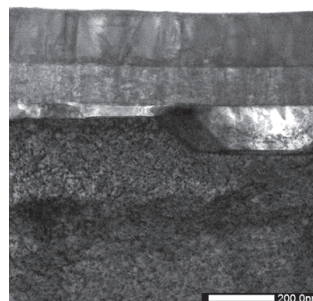


Fig.1 Cross-sectional STEM image of superconducting tape

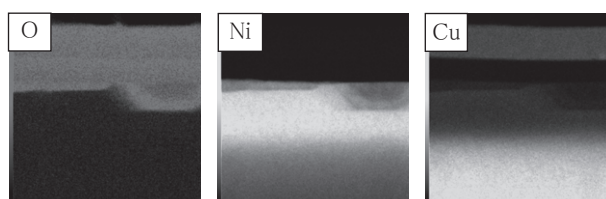


Fig.2 EDX mapping images corresponding to the Fig. 1.

単層バッファ配向クラッド金属基板を用いた薄膜高温超電導線材の開発

Development of coated conductors on a single buffer layer of clad-type substrates

吉原 健彦, 山口 高史, 本田 元気, 大木 康太郎, 小西 昌也, 永石 竜起(住友電工)

YOSHIHARA Tatsuhiko, YAMAGUCHI Takashi, HONDA Genki, OHKI Kotaro, KONISHI Masaya, NAGAIISHI Tatsuoki
(Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

E-mail: yoshihara-tatsuhiko@sei.co.jp

1. はじめに

ケーブルやマグネット等の超電導応用機器への適用を目指し、REBCO(RE: 希土類元素)系薄膜超電導線材の開発を進めている。我々の線材の特徴はクラッド配向金属基板を用いていることであり、また従来バッファ層として前記基板に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ の3層のセラミックス層を形成していた[1]。今回、低コスト化を目的として、バッファ層を Y_2O_3 単層化した薄膜高温超電導線材の開発を行った。バッファ層 Y_2O_3 の膜厚 130 nm で基板からの Ni 拡散を抑制し、従来の3層バッファ層の $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ 上と比べて遜色のない $1.7 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 以上の超電導臨界電流密度(J_c)を得られることを明らかにした。

2. 線材の構造と製法

線材の構造及び製法を Table.1 に示す。基板はクラッド基板であり、これは2軸配向させた Cu と SUS を貼り合せ、酸化防止のため Ni をめっきしたものである。バッファ層は Y_2O_3 単層を前記基板に RF スパッタリング法により形成した。超電導層は $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を pulsed laser deposition 法により成膜した。超電導層成膜後、銀層を DC スパッタリング法により蒸着し、酸素中熱処理を行った。最後に銅安定化層を電気めっき法により形成した。

3. 検討方針と結果

我々は薄膜高温超電導線材の低コスト化のために、構造、作製工程の簡略化に着目し、3層の $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ からなるバッファ層の層数低減を検討した。従来、基板から超電導層への Ni 拡散抑制層として YSZ を、GdBCO との格子整合層として CeO_2 を適用していた。3層バッファ層上の超電導層への Ni 拡散を評価した SIMS 測定より、YSZ のみではなく Y_2O_3 内で Ni の強度が低下していたことに着目し、 Y_2O_3 の Ni 拡散抑制層としての役割を評価した。超電導層 / 単層 Y_2O_3 / クラッド基板の SIMS 測定結果を Fig. 1 に示す。 Y_2O_3 バッファ層内で Ni の急峻な低下が見られており、超電導層内への Ni 拡散がないことがわかった。そこで YSZ のない $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ からなる2層バッファ層上の超電導特性を評価した。その結果、従来の3層バッファ層と同等の J_c を得られ、バッファ層2層化を実現した。また更に、GdBCO との格子整合層 CeO_2 (格子不整合性-0.62%)の役割を、格子不整合性は -3.30%と比較的大きい Y_2O_3 で担う可能性を検討したところ、単層 Y_2O_3 バッファ層上で従来の3層バッファ層と比べて

遜色のない $1.7 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 以上の J_c を得ることに成功した。既報[2]に対し、今回我々は 130nm と薄い Y_2O_3 単層で、より高 J_c である $1.7 \text{ MA}/\text{cm}^2$ を得た。

次にこれらの条件を基に、15m 長の薄膜高温超電導線材の作製を行った(Fig.2)。液体窒素中(77K)自己磁場下で直流四端子法により通電特性を評価した。結果、超電導層膜厚 $2.7 \mu\text{m}$ 、4mm 幅の超電導線材を測定し、 $I_c=191 \text{ A}$ を得た。

本成果により、クラッド配向金属基板、単層バッファ層、超電導層と簡略化された構造を実現した。クラッド配向金属基板の低コスト優位性に加え、単層バッファ層を適用することで低コスト超電導線材の開発が期待できる。

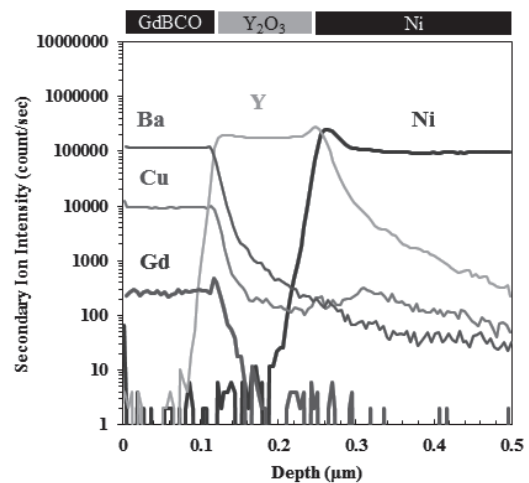


Fig.1 SIMS analysis of coated conductor on a single buffer layer.

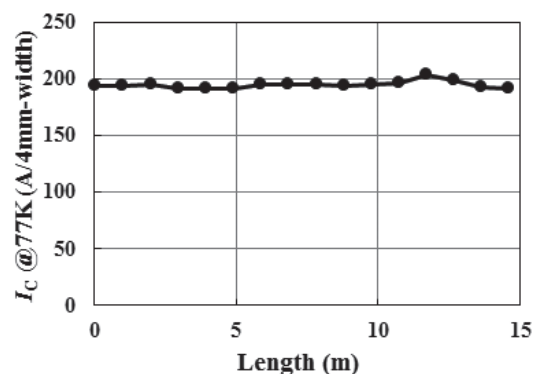


Fig.2 Longitudinal I_c distribution of 15 m GdBCO film on a single buffer layer.

Table.1 Structure and process of coated conductors

Layer	Materials	Process
Substrate	Clad-type substrate	—
Buffer layer	Y_2O_3	RF sputtering
Superconducting layer	$\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	Pulsed laser deposition
Protection layer	Ag	DC sputtering
Stabilization layer	Cu	Electroplating

参考文献

- 大木康太郎 他: 2010 年春季低温工学・超電導学会 2A-a11
- S. Adachi et al.: Phys. Rev. B, Vol. 61 p.4314 (2000)
- D Q Shi et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 18 (2005) p.561-565

多結晶体を用いた REBCO テープ線材の超伝導接続技術の開発 Development of Superconducting Joints for REBCO Tapes Using Polycrystalline Bulks

成瀬 晃樹, 長谷 友哉, 淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大); 中井 昭暢(古河電工)
NARUSE Koki, HASE Tomoya, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
NAKAI Akinobu (Furukawa Electric)
E-mail: naruse@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材を用いた, 伝導冷却 MRI 用コイルの開発が期待されている。そのためには, 永久電流モードを可能にする, 超伝導線材の超伝導接続技術を開発する必要がある。現在, REBCO 線材の超伝導接続に対して, 様々な研究が行われている[1,2]。我々は, 簡便な超伝導接続技術の開発を検討している。そこで, 本研究では, REBCO 多結晶バルクを用いて, 一定の圧力を印加しながら熱処理をすることにより, 超伝導接続の開発を試みた。

2. 実験方法

本研究で用いる多結晶バルクは, TEP 製の Y123 粉末をペレット状に成型し, 空気中で 900°C, 24 時間の焼結を行うことで得た。また, SuperPower 製で銅層の無い Gd123 テープ線材を使用し, 接続部には銀のエッチングを行った。

荷重の印加については, 溶融バルク同士の接続の研究[3,4]を参考にした。熱処理中でも一定の荷重をかけられる装置を作製し, 接続する試料に 1 MPa の圧力を印加しながら熱処理を行った。また, 熱処理により欠損した酸素を補うため, 接続した試料に, 酸素フロー中 470 °C, 12 時間の酸素アニールを行った。接続の評価は, 四端子法による電気抵抗測定を用いて行った。

3. バルク-バルク接続の実験結果

テープ線材の接続を行う前に, バルク同士を接続させる実験を行った。2 つのバルクに荷重を印加しながら, 空気中 900 °C, 12 時間の熱処理を行った。図 1 の挿入図に, バルク-バルクの接続試料の写真を示し, 図 1 に電気抵抗の温度依存性を示す。電流値が 10 mA の場合, 抵抗は約 91 K 以下で急激に落ちるが, 途中から緩やかに落ちている。オンセットをバルク部の超伝導転移とすると, この緩やかな抵抗の減少は, 低い T_c を持つ接続部の転移によるものと考えられる。また, 100 mA の電流では, 77 K 付近で抵抗はゼロになっている。接続部の断面積はおおよそ 2 mm² であることから, 77 K における臨界電流密度は, 5 A/cm² 程度になると予想できる。

4. テープ-バルク接続の実験結果

空気中で接続が可能な高温では, ハステロイ基板の酸化や REBCO 層の劣化の問題があったため, 熱処理時間を短くする必要があった。そこで, バルクとテープ線材に荷重を印加しながら, 空気中 900°C, 1 分の熱処理を行った。図 2 の挿入図に, テープ-バルクの接続試料の写真を示し, 図 2 に電気抵抗の温度依存性を示す。10 mA の電流値において, 50 K 付近で抵抗はゼロに落ちたものの, 転移が多段になっている。2 段の急激な抵抗の減少は, テープとバルクの超伝導転移によるもので, その後の緩やかな減少は, 接続部の超伝導転移と考えられる。さらに, 100 mA の電流値では, T_c が大きく減少している。これは, 熱処理によりテープ線材が劣化したためと考えられる。当日は, 低酸素分圧のアルゴン雰囲気中により, 熱処理温度を下げた結果も報告する。

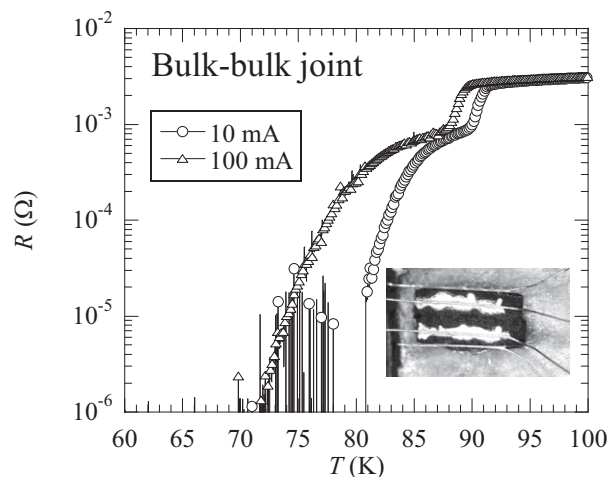


Fig. 1. Temperature dependence of resistance in the bulk-bulk joint. Inset shows the photograph of the bulk-bulk joint sample, which is equipped with current leads and voltage taps.

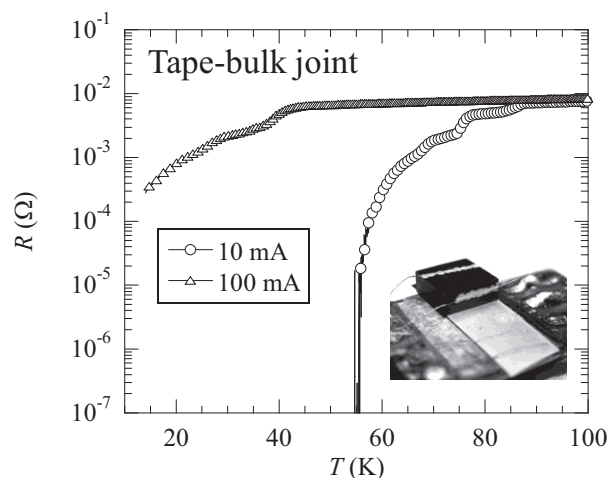


Fig. 2. Temperature dependence of resistance in the tape-bulk joint. Inset shows the photograph of the tape-bulk joint sample, which is equipped with current leads and voltage taps.

謝辞

本研究は, AMED「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」を通じて実施された。

参考文献

1. Y. J. Park, et al.: NPG Asia Mater., Vol. 6 (2014) p.e98
2. X. Jin, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 28 (2015) p.075010
3. L. Chen, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 15 (2002) p.672
4. W. Lo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 9 (1999) p.2042

スクライビング線材のフィラメント間抵抗と磁化緩和の相関

Improvement of laser scribing technique for fabrication of multi-filamentary coated conductors

町 敬人, 劉 勁, 和泉 輝郎(超電導工学研究所, 産業用超電導線材・機器技術研究組合); 岩熊 成卓(九州大学)
 Takato MACHI, Jin Liu, Teruo Izumi (SRL-ISTEC, iSTERA); Masataka Iwakuma (Kyushu univ.)
 E-mail: machi@istec.or.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材を MRI や医療用加速器のマグネット等に应用する場合には、時間的に変動する遮蔽電流の影響を低減しなければならない。また、急激な磁場変化や励磁・減磁が可能のように交流損失を低減することも重要である。低温超電導マグネットによく知られているように、遮蔽磁場の影響や交流損失を低減するためには、線材をマルチフィラメント化することが最も効果的である。我々は REBCO 線材においてマルチフィラメント構造を実現するためにレーザーを用いたスクライビング加工技術の開発を行っている^[1,2]。

臨界状態モデルにおいて、遮蔽電流はフィラメント幅と J_c に比例するので、遮蔽電流の影響を低減するにはフィラメント化することが有効である^[3]。遮蔽電流は時間的に変動するため、マグネットの発生磁場の時間変動を生じる。また遮蔽電流はフィラメント間のカップリングによっても変動するが、その時定数はフィラメント間抵抗に反比例することが知られている^[4]。金属系超電導線材で知られるこのような性質が REBCO 線材でも成り立つかどうかについて知見を得ることによってマグネット開発に資するため、レーザースクライビング技術によって分割加工した REBCO 線材において異なるフィラメント間抵抗を有する試料の磁化緩和を比較したので報告する。

2. 実験方法

(1) スクライビング線材

試料として 5 μ m 厚の Ag 安定化層が成膜された GdBCO 線材を用いた。長方形に整形したレーザービームを照射することによって幅約 25 μ m の溝を形成した。溝で区切られたフィラメント幅は約 470 μ m であり、これは 5mm 線材を 10 分割したことに相当する。異なるフィラメント間抵抗の試料として、以下の 4 つの試料を比較した。

- 無分割線材
- 故意に溝内に超電導層を残留させた分割線材。フィラメント間 I_c はフィラメント内の約 1/10。
- 超電導層まで溝を切削した後に Ag 5 μ m を成膜した分割線材 (フィラメント間抵抗率=銀の抵抗率)
- 通常の分割線材 (溝内の安定化層と超電導層が完全に取除かれた線材, フィラメント間抵抗~数 k Ω)

つまり、a から d の順番で、フィラメント間抵抗が大きくなるような試料を用いて磁化緩和測定を行った。

(2) 磁化緩和測定

SQUID 磁束計 (Quantum Design, MPMS-R2) を用いて磁化の時間変化を測定し、磁化緩和を評価した。SQUID 磁束計の試料スペースは限られているため、試料はすべて 3.1mm 角に切出してから評価を行った。そのため、3.1mm 角内に約 7 本のフィラメントがあった。切り出しにはガルバノスキャナを装備したファイバーレーザーを用いた。磁化緩和は 65K までゼロ磁場冷却した試料に 3T ($H//c$, 永久電流モードにて一定) の外部磁場を印加した後に、磁化の時間変化から求めた。

(3) 磁化の規格化

磁化の時間変化は $[M(\infty)-M(t)]/[M(\infty)-M(t=0)]$ と規格化して比較すべきであるが、SQUID 磁束計では $t=0$ の初期磁化の値を求めることができない (ここで $M(\infty)$ は常磁

性となる終状態)。そこで、SQUID 磁束計で求めた $M-H$ 曲線が初期磁化の 50% に緩和していると仮定して、磁化ヒステリシス ΔM によって磁化を規格化した ($[M(\infty)-M(t)]/[2\Delta M]$)。

3. 実験結果および考察

65 K, 3 T での磁化緩和の測定結果を図 1 に示す。超電導層を残留させた試料 (▼) の磁化緩和は無分割 (◆) に比べて規格化磁化が低下しており、超電導性が低下するだけでも磁化緩和が常磁性に近づく時間を短くすることはできることが分かる。しかしながら、Bi 系線材で作製されたマグネットの例^[5]を参考とすると、超安定電源によって時間変動を抑えるには、初期磁化の 5% 程度まで抑える必要があり、超電導層が残留している試料では十分に時間変化を低減できていないとは言えない。一方、フィラメント間抵抗が確保された通常の分割線材 (○) では、10⁴ sec 程度の時間で磁化緩和がほぼゼロに漸近した。この試料においては、図 1 から遮蔽電流の影響が比較的短時間で低減したこと、および別途ピックアップコイル法の測定から交流損失も低減したことが分かる。ここで、分割加工後に Ag 層を成膜することによってフィラメント間抵抗を低下させた試料 (△) において、6 \times 10⁴ sec 程度で規格化磁化は約 2% まで減少しており、交流損失は大きいものの、遮蔽電流の時間変動の影響は十分低減できたと考えられる。今後は、磁化緩和測定で得られた知見を実際にコイルを作製し評価することによって検証していく必要がある。

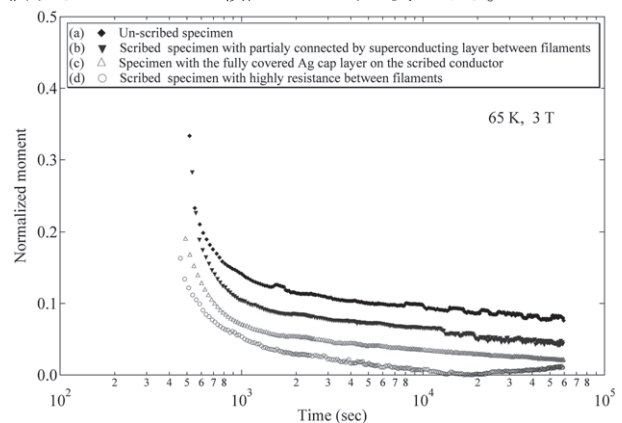


Fig.1 The time dependence of magnetic relaxation in different resistance specimens between filaments.

4. 謝辞

本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省ならびに日本医療研究開発機構の委託により実施したものである。

5. 参考文献

- [1] T. Machi, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013).
- [2] T. Machi, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, 88 (2013) 180.
- [3] Y. Yanagisawa and H. Maeda, Teion Kogaku 48 (2013)165.
- [4] M.N. Wilson: "Superconducting Magntes", Oxford Science Publishing (1996).
- [5] Fukuyama, *et al.*, 「JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム」(H20~24).

LTG 法を用いて IBAD-MgO 基板上に作製した BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 超伝導薄膜の低温磁場中における臨界電流特性の向上

Critical current characteristics in magnetic fields at low temperatures of BaHfO₃-doped SmBa₂Cu₃O_y superconducting tapes deposited on IBAD-MgO buffered metallic substrates by using the LTG technique.

道木 裕也, 三浦 峻, 一野 祐亮, 吉田 隆(名古屋大学); 衣斐 顕, 和泉 輝郎(ISTEC); 加藤 丈晴(JFCC)

Doki Yuya, Miura Shun, Ichino Yusuke, Yoshida Yutaka(Nagoya University)

Ibi Akira, Izumi Teruo(ISTEC); Kato Takeharu(JFCC)

E-mail: doki-yuya15@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

BaMO₃ (BMO: M = Zr, Sn, and Hf) 添加 REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 超伝導薄膜の液体窒素温度下における超伝導特性はこれまでに多くの研究がされてきた。しかし近年では、高温超伝導体のコイルを使用する機器などは 2 T 以上の強磁場中、さらに 20 - 50 K の温度範囲での使用も考えられている。これまで我々の研究グループでは、低温成膜(LTG)手法を用いて低温成膜基板温度で作製した単結晶基板上 BHO 添加 SmBCO 膜が上記磁場温度領域で超伝導特性が向上することを報告してきた。そこで本研究では、LTG 法を用いて IBAD-MgO 基板上に広い成膜温度範囲(690°C ~ 810°C)で BHO 添加 SmBCO 薄膜を作製することで、金属基板上においてナノロッドの形状を制御することを試み、また超伝導特性への影響も検討した。

2. 実験方法

BaHfO₃(BHO) 添加 SmBa₂Cu₃O_y(SmBCO) 超伝導薄膜は、IBAD-MgO 基板上にパルスレーザー蒸着(PLD)法により成膜した。10 Hz の KrF エキシマレーザー(λ=248 nm)を用いて成膜中の酸素分圧は 400 mTorr とした。作製手法として低温成膜(LTG)手法を用いた。LTG 手法を用いることで従来の PLD 法よりも低い成膜温度で c 軸配向 SmBCO 膜の作製が可能である。Seed 層の厚さは 30 ~ 40 nm、upper 層の厚さは約 250 nm とし、成膜温度を 690°C ~ 810°C と広い温度範囲で成膜した。BHO 添加量は 1.5 vol.% と一定とした。作製した薄膜の超伝導特性は、直流四端子法を用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に様々な成膜温度で作製した試料の 20 K における巨視的ピン力密度(F_p)の磁場依存性を示す。測定温度 77 K においては、810°C 試料の F_p が全磁場領域において高かったが、測定温度 20 K においては 750°C 試料と 810°C 試料は、9 T において $F_p = 530 \text{ GN/m}^3$ とほぼ同程度であった。一方、750°C 試料は 9 T 以上でさらに向上する傾向を示した。Fig. 2(a) に成膜温度の低い試料(750°C)及び Fig. 2(b) に高い試料(810°C)の断面 TEM 像を示す。図より 750°C 試料が 810°C 試料に比べ BHO ナノロッドが短く切れて傾いていることがわかる。単結晶基板上の結果と同様に、細く高密度のナノロッドが低温・強磁場において有効なピンニングセンターとして働いたと考えられる[1]。

当日は J_c の磁場印加角度依存性についても議論する予定である。

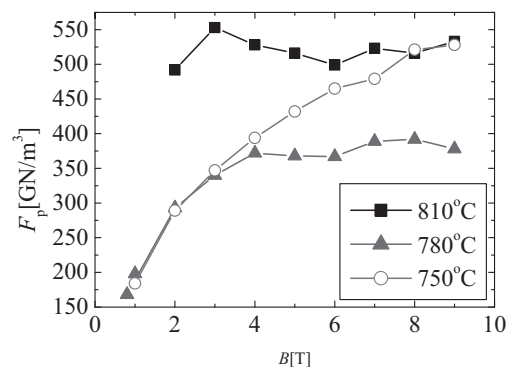


Fig. 1 Pinning force at the measurement temperature of 20 K in 1.5 vol.% BHO doped SmBCO superconducting thin film.

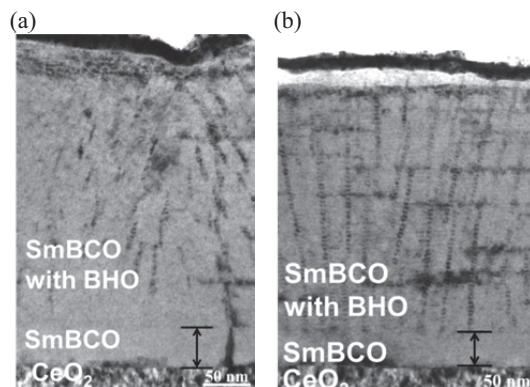


Fig. 2 Cross-sectional TEM image of (a) 750°C sample and - (b) 810°C sample.

4. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(23226014、25289358、15H04252、15K14301、15K1430)及び国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業の支援により行われた。

参考文献

- [1] S. Miura et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 28(2015) p. 65013

異なる積層数を有する IBAD-MgO 金属基板上 BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 積層膜の縦磁場効果

The longitudinal magnetic field effect for BaHfO₃-doped- SmBa₂Cu₃O_y multilayered films with various layer numbers deposited on IBAD-MgO buffered metal substrates

島崎 直人, 杉原 和樹, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大)

SHIMAZAKI Naoto, SUGIHARA Kazuki, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: shimazaki-naoto15@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

縦磁場効果は電流と印加磁場が平行な状態(フォース・フリー状態)において観測される電磁現象のことである。縦磁場効果の1つとして磁場中臨界電流密度(J_c)が自己磁場下における J_c (J_c^{self})と比較して向上する現象があり、その現象を利用した超伝導ケーブルなども提案されている[1]。 J_c が向上することにより、機器の小型化にもつながる。しかし、高温超伝導体における縦磁場効果の報告は少なく、縦磁場効果の起源は明らかになっていない。これまで、我々は LaAlO₃ 単結晶基板上に作製した人工ピンニングセンターとして BaHfO₃ (BHO)を導入した SmBa₂Cu₃O_y(SmBCO)積層膜において縦磁場効果による磁場中 J_c の向上を確認した[2]。この縦磁場効果を機器応用するためには、金属基板上 SmBCO 積層膜における、縦磁場効果の発現が必要不可欠である。そこで本研究では IBAD-MgO 金属基板上に無添加 SmBCO 層と BHO 添加 SmBCO 層から成る積層膜を作製し、縦磁場下において臨界電流特性を評価した。

2. 実験方法

KrF エキシマレーザーを用いたパルスレーザー蒸着(PLD)法により IBAD-MgO 金属基板($\Delta\phi=1.8^\circ$)上に SmBCO 薄膜を作製した。基板温度 880°C, ターゲット-基板間距離 60 mm, 酸素分圧 53 Pa で成膜を行った。レーザーの繰り返し周波数は 10 Hz とした。BHO は修飾ターゲット法により SmBCO に添加した。Fig. 1 に示すように BHO を添加していない SmBCO 層と BHO 添加層をそれぞれ 24 層ずつ、計 48 層を積層した。BHO 添加層における BHO 形状はナノロッド状である。BHO 添加層では BHO を 4.4 vol.% 添加した。作製した薄膜の磁場中超伝導特性の評価は PPMS (Physical Properties Measurement System), BHO 添加量は EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), 結晶構造は X 線回折(XRD)を用いて評価した。

3. 実験結果

XRD 測定より、作製した SmBCO 積層膜は良好な c 配向であり、面内配向度は 2.2°程度であることを確認した。また、EDX 分析より薄膜全体の組成比が均一であることを確認した。

作製した薄膜の超伝導特性を評価した結果、BHO 無添加 SmBCO 単層薄膜および BHO ナノロッド添加 SmBCO 積層膜の J_c^{self} はそれぞれ、2.93 MA/cm², 2.62 MA/cm² であった。また、臨界温度はそれぞれ、92.6 K, 92.1 K であった。Fig. 2 に、各薄膜の 77 K, $B//I$ における J_c^{self} で規格化した J_c の磁場依存性を示す。BHO ナノロッド添加 SmBCO 積層膜において、0.3 T 付近で J_c が J_c^{self} より 3% 向上することが確認された。一方、BHO 無添加 SmBCO 単層薄膜ではこのような J_c の向上は確認されなかった。

これらの実験結果より、IBAD-MgO 金属基板上でも縦磁場効果による J_c の上昇を確認することができた。これ

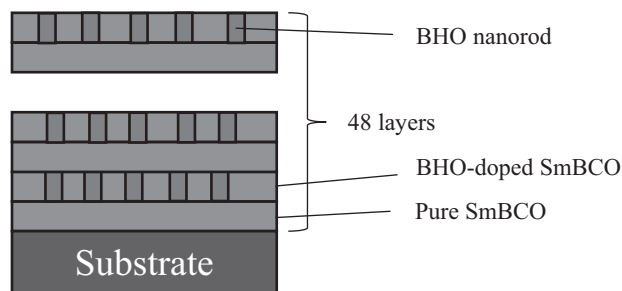


Fig. 1 Architecture in BHO-doped SmBCO multilayered film.

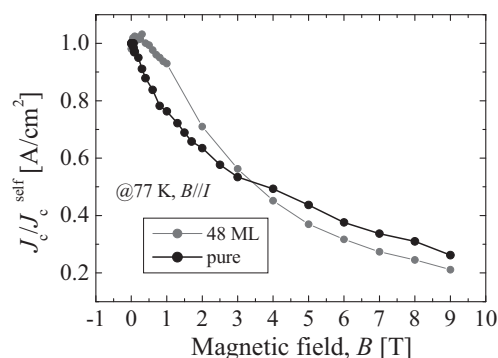


Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c/J_c^{self} at 77 K under $B//I$ in the pure SmBCO single layer (pure) and BHO-doped SmBCO multilayered (48 ML) films.

まで、単結晶基板上 SmBCO 積層膜の縦磁場効果に関する実験では、0.3 T 付近で 10%以上 J_c が向上することがわかっている。今後、さらなる条件の最適化を行うことで、IBAD-MgO 基板上においても大幅な J_c の向上を実現できる可能性がある。当日は、各層の膜厚、積層数を変化させた実験に関して報告を行う予定である。

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 25289358, 15H04252, 15K14301, 15K14302)の助成または国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) の未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業の支援によって行われた。

5. 参考文献

- [1] T. Matsushita et al. : Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 125009.
- [2] K. Sugihara et al. : Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 104004.

BaHfO₃人工ピン導入 EuBCO 線材の低温高磁場特性の評価Evaluation of low temperature and high magnetic field properties
in EuBCO coated conductor doped with artificial pinning center鈴木 匠, 小野寺 優太, 井上 昌睦, 東川 甲平, 木須 隆暢(九大);
衣斐 顕, 吉田 朋, 町敬人, 和泉 輝郎 (ISTEC)SUZUKI Takumi, ONODERA Yuta INOUE Masayoshi, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu(Kyushu Univ.);
IBI Akira, YOSHIDA Tomo, MACHI Takato, IZUMI Teruo (ISTEC)

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

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材(REBCO: RE は希土類元素)コート線材は磁場中でも高い臨界電流密度(J_c)を持つ。しかし、 c 軸方向に磁場を印加した場合の J_c が低く、異方性が大きいことから、 c 軸相関ピンとしての人工ピンの導入が数多く行われている。特に、BaHfO₃(BHO)を導入した EuBCO 線材は厚膜化した場合にも優れた J_c 特性を持つことから、高い臨界電流を持つ線材の実現が期待されている。

本研究では、厚膜のBHOを導入した、EuBCO線材の臨界電流特性について、通常の通電法による測定が困難な、低温、及び、高磁場領域について、引き抜き法による磁化測定装置を用いて評価を行った。その低温高磁場領域の臨界電流特性について報告する。

2. 実験方法

試料線材はIBAD基板上にPLD(Pulse Laser Deposition)法により製膜したEuBCO線材を用いた。人工ピンはBHOを導入している。超伝導層の膜厚は3.3 μm である。同線材の一部をレーザー加工により切り出し、試料サイズは2 \times 2 mmとした。引き抜き法を用いて、磁化ヒステリシス特性、及び、磁化緩和測定を行った。

3. 実験結果と考察

Fig.1に65 K及び、35 Kの各磁場での磁化ヒステリシス曲線を示す。この磁化ヒステリシスの値を用いて、 J_c 特性を以下の表式から導出した。

$$J_c = \frac{6l}{w(3l-w)} \Delta M \quad (1)$$

ここで、 l は長さ、 w は幅、 ΔM は磁化ヒステリシスの幅である。Fig.2に(1)式より見積もった J_c - B 特性を示す。臨界電流値は幅1 cmとして見積もり、35 K 9.5 Tにおいて、524 Aとなった。また、自己磁場では2800 A以上の非常に高い臨界電流値を持つ。しかし、Fig.3に示すような、磁化緩和測定から見積もられる電界は、以下の表式を用いて導出すると、

$$E = \frac{\mu_0 G w l}{2(l+w)} \cdot \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

10⁻⁸ V/m程度の電界での J_c を見積もることとなる。しかし、通常、電界基準は10⁻⁴ V/mである。そこで、磁化緩和特性から得られた E - I 特性から n 値を見積もると、20となった。 n 値モデルを仮定し10⁻⁴ V/mにおける臨界電流値を見積もると、35 K、10 Tにおいて890 Aとなった。このように、電界基準を補正することにより、人工ピンとして BHO を導入した厚膜のEuBCO線材は低温の高磁場においても非常に高い臨界電流を持つ高性能線材となることが分かった。測定法と解析の詳細は当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費(24760235)の助成を得て行ったものである。

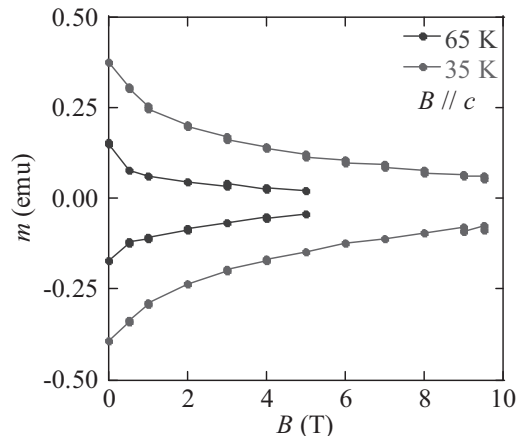
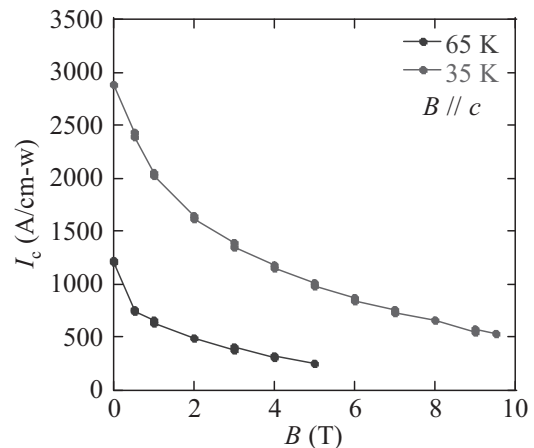
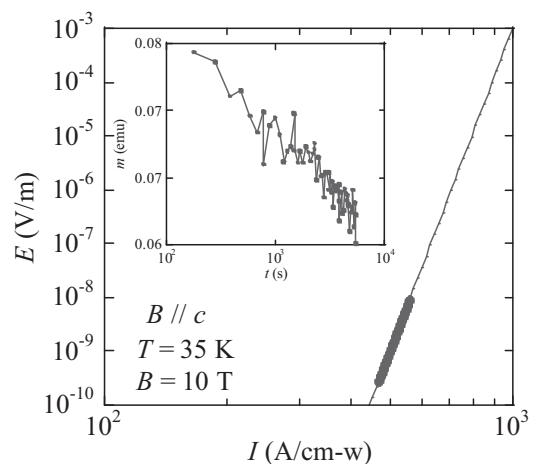


Fig.1 Magnetic field dependence of magnetization at 65 K and 35 K

Fig.2 J_c - B characteristics at 10⁻⁸ V/m in $B//c$ Fig.3 E - I characteristics at 35 K in $B//c$
(inset) magnetization relaxation at 35K

YBCO 薄膜におけるハイブリッド磁束ピンニングに対するナノ粒子の 粒径・空間分布の影響

Influence of size and spatial distribution of nanoparticles
on hybrid flux pinning in YBCO thin films

浦口 雄世, 上瀧 哲也, 末永 桃太郎, 牧原 隆博, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学)
URAGUCHI Yusei, KOTAKI Tetsuya, SUENAGA Momotaro, MAKIHARA Takahiro, SUEYOSHI Tetsuro,
FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)
E-mail: uraguchi@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体の応用の拡大のためには、その異方性を改善して、あらゆる印加磁場方向で高い臨界電流密度 J_c を得る必要がある。1次元ピンと3次元ピンを組み合わせたハイブリッド磁束ピンニングを導入することで、3次元ピンのアシスト効果より J_c の異方性の改善がより期待できる^[1]。

本研究では、擬似多層膜法により基板温度や層数を制御して、BaSnO₃(BSO)ナノ粒子を3次元ピンとしてYBa₂Cu₃O₇(YBCO)薄膜中に分布させ、さらに重イオン照射により柱状欠陥を1次元ピンとして導入することで、ハイブリッド磁束ピンニングを構築し、 J_c の磁場角度依存性に対するナノ粒子の粒径および、空間分布の影響について調べた。

2. 実験方法

BSO/YBCO 擬似多層膜は、PLD法を用いてSrTiO₃(100)基板上に作製した。KrFエキシマレーザーの繰り返し周波数は5 Hz、基板温度は750 °Cまたは770 °Cとして、300 mTorrの酸素雰囲気中で成膜を行った。YBCO層を堆積させた後に、BSOを数パルス堆積させ、この工程を繰り返すことでBSOを3次元ピンとしてYBCO内に導入した。1次元ピンは、200 MeVのXeイオンを用いて、YBCO薄膜のc軸方向に対して平行に照射することにより導入した。1層あたりのBSOパルス数 m 、YBCOの層数 n 、基板温度 T_s の試料をBSO(m , n) T_s と表記する。Table1に、今回作製した試料について示す。

超伝導特性は直流四端子法により測定し、 J_c は電界基準 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した。また、 J_c の磁場角度依存性では、印加する磁場方向が電流印加方向に対して常に垂直になるようにし、磁場と薄膜のc軸のなす角度を θ として測定を行った。

3. 結果および考察

Fig. 1(a), (b)に $T = 65 \text{ K}$ で、それぞれ(a) 1 T, (b) 5 Tにおける J_c の磁場角度依存性を示す。 $B = 1 \text{ T}$ ではc軸方向付近の J_c に対して、粒径、および空間分布の違いによる影響はほとんどないが、 $B = 5 \text{ T}$ ではBSO(1,100)770でc軸方向を中心に、広い角度範囲で高い J_c を示していることがわかる。これは、試料に均一に分布したナノ粒子の粒径が大きいほど、柱状欠陥に捕捉されていない磁束線に対して、有効にピン止めするためと考えられる。

また、 ab 面方向においては、層数が100層の試料では成膜温度に関係なくナノ粒子の導入効果がほとんど見られない。一方、層数が10層の試料では、突出した高い J_c のピークを示していることがわかる。これは、 ab 面方向に沿った磁束線が、面状に分布したナノ粒子により有効にピン止めされたためと考えられる。

Table 1 Specification of samples

Sample	BSO number of pulses	number of layers	T_s [°C]	T_c [K]
pure750	-	-	750	88.2
pure770	-	-	770	89.7
BSO(1,100)750	1	100	750	85.8
BSO(1,100)770	1	100	770	87.7
BSO(10,10)770	10	10	770	86.5

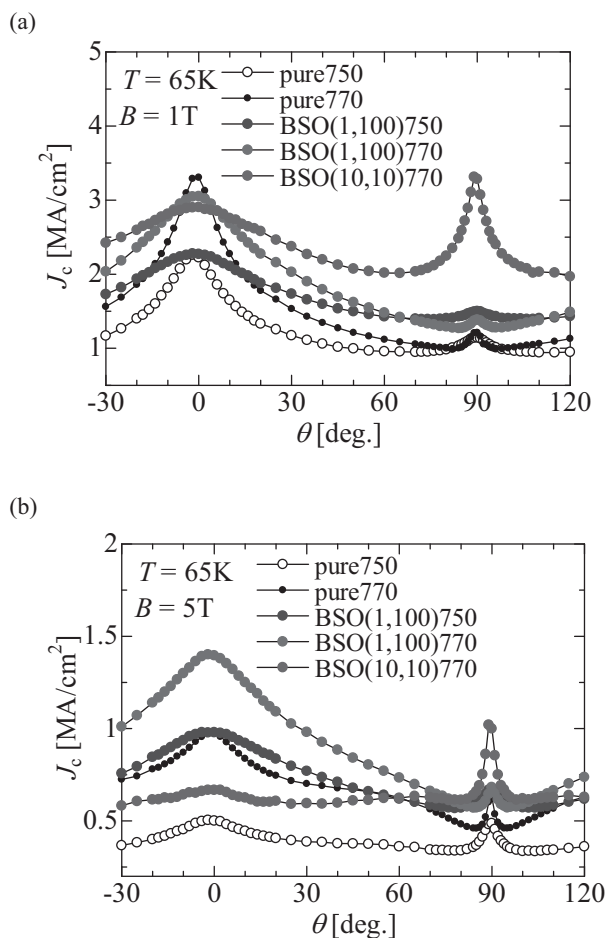


Fig. 1 Angular dependence of J_c at (a) $T = 65 \text{ K}$, $B = 1 \text{ T}$, (b) $T = 65 \text{ K}$, $B = 5 \text{ T}$.

参考文献

[1] T. Horide, et al.: Supercond. Sci. Technol. 26(2013) 075019

実用 REBCO 超電導線における臨界電流の一軸歪依存性 Uniaxial Strain Dependence of Critical Current of Practical REBCO Wires

長村 光造 (応用科学研) ; 町屋 修太郎 (大同大) ; Hampshire Damian (Durham 大)
OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); and HAMPSHIRE Damian (Durham Univ.)
E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

Superpower, SuNAM 等の実用 REBCO 超電導線の臨界電流の一軸歪依存性を Fig. 1 に示すように (a) 単純に引張歪を印加する方法、(b) springboard に貼り付けて圧縮から引張の全一軸歪を印加する方法 [1] で測定した。一方計算により (a), (b) の条件により生ずる 77K における超電導層に加わる熱歪を考慮した局所歪に対して臨界電流をプロットすると (a), (b) の両データを合理的に説明することができた。つまり臨界電流の真の歪依存性を知るためには、超電導層そのものに加わる局所歪に対する考察が必要であることを実証したので報告する。

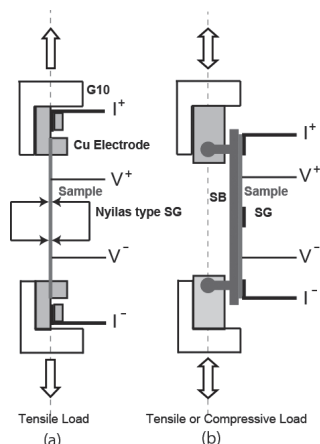


Fig. 1 Two techniques for evaluating of uniaxial strain dependence of I_c , where G10 is insulator, SG is strain gage, and SB is springboard, respectively.

2. 試験方法

供試料には市販されている、Superpower, SuNAM の 2 種類の REBCO テープ線材を用いた。島津製作所製引張試験機を用い Fig.1 に示す試料部分を液体窒素に浸漬し、試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して I-V 測定を行い臨界電流及び n 値を決定した。また Spring-8 BL45XU において Fig. 1 と同様な治具を用いて印加歪の下での超電導層に生起する局所歪の測定を室温で行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に Superpower のテープについて、それぞれ Fig. 1 の治具を用いて測定した臨界電流の印加歪依存性を示す。つまり (a) (Tape) のように引張歪を印加して測定すると $A > 0$ の範囲での臨界電流の変化を調べることができる。(b) (Tape on SB) の場合は試料テープをハンダ付けしたスプリングボードを引張および圧縮することにより圧縮歪から引張歪の範囲で臨界電流を測定することができる。

Fig. 2 に示されるように $A > 0$ の領域で両者の臨界電流の印加歪依存性を見ると、その依存性に違いがあることが解る。Tape on SB では臨界電流の歪依存性に極大が現れている。この顕著な相違は試料テープをスプリングボードにハンダ付けすることにより REBCO 超電導層に生起する局所歪が変化したことにより起因すると考えられる。そこで Tape そのもの、スプリングボードにハンダ付けした Tape の各々について室温で測

定した局所歪をもとに計算により 77 K における REBCO 超電導層に生起する局所歪 A_{REBCO} を求めた。

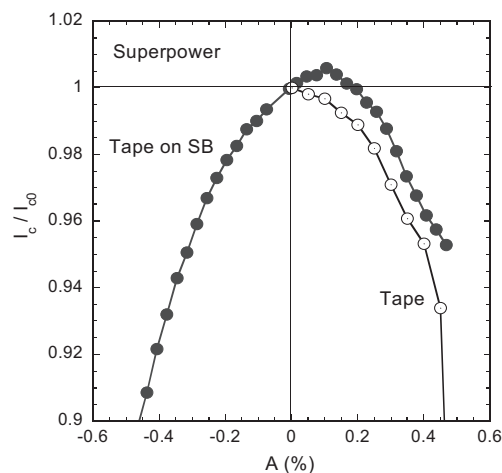


Fig.2 Normalized critical current as a function of applied strain for Superpower tapes measured by means of (a) (FS) and (b) (SB) of Fig. 1.

Fig. 3 に局所歪 A_{REBCO} の関数として規格化した臨界電流をプロットし直した。両者のデータは A_{REBCO} について滑らかに連続して接続していること、臨界電流の極大が圧縮歪側に位置するようになった。

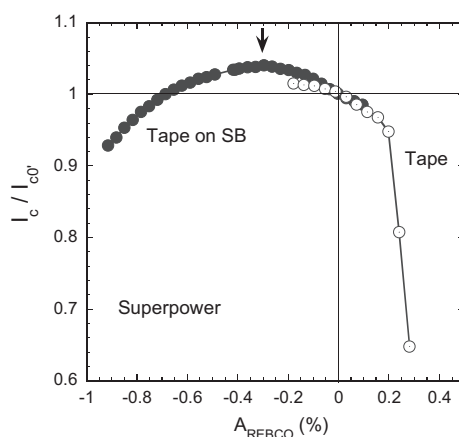


Fig.3 Normalized critical currents obtained by two techniques as a function of local strain exerted on REBCO layer for Superpower tape.

また SuNAM テープについても同様の結果を得ることができたことを確認している。

参考文献

1. K Osamura, S Machiya, D P Hampshire, Y Tsuchiya, T Shobu, K Kajiwara, G Osabe, K Yamazaki, Y Yamada and J Fujikami, 2014 Uniaxial strain dependence of the critical current of DI-BSCCO tapes Supercond. Sci. Technol. **27** 085005 (11pp)

YBCO 線材の複合曲げ試験による歪みの分布と超電導特性

Relation between deterioration of superconducting property and distributed strain applied to YBCO tape by complex bending

谷貝 剛, LEE DONG RYUN (上智大学); 鎌田 太陽, 野村 新一 (明治大); 中村 武恒 (京大); 筒井 広明 (東工大); 力石 浩孝, 柳 長門, 今川 信作 (NIFS)

YAGAI Tsuyoshi, LEE DONG RYUN (Sophia University); KAMADA Hiroharu, NOMURA Shinichi (Meiji University); NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); TSUTSUI Hiroaki (Tokyo Institute of Technology); CHIKARAIISHI Hirotaka, YANAGI Nagato and IMAGAWA Shinsaku (National Institute for Fusion Science)
E-mail: tsuyohi-yagai@sophia.ac.jp

1. はじめに

電磁力平衡コイル (Force Balanced Coil: FBC) は、ヘリカル形状をしたコイルであり、フープ応力と向心力が平衡する特長を持つ。電力貯蔵装置においては、大きなエネルギーの貯蔵はより大きな磁場の発生を意味するため、コイルを構成する導体にかかる応力も大きくなる。特に高温超伝導体を用いて大容量のコイルを製作する場合、FBC が最も適していると言える。一方で、FBC 製作時には、複雑な巻き線機を用いて機械的に脆いテープ線材を巻いていく必要があり[1]、このとき線材には、幅方向、厚み方向、そして長手方向軸周りの捻り歪みが印加されるため、巻線時に想定される歪みに対して、許容範囲を適切に評価しておく必要がある。

従って本研究では、FBC の巻線時に想定される複合曲げ、および引張歪みに対する超電導特性を評価し、FBC の巻線工程における超電導特性劣化を抑制する事目的とする。

2. 実験装置

コイル設計概念図と想定される歪みの概略を Fig.1 に示した。コイルの大半径は 150mm、小半径は 30mm であり、4.2K で 1kA 通電を想定し、蓄積エネルギーは小容量実証として約 1.2kJ に設定している。導体はテープ線材を積層する事で製作する予定である。

FBC 巻線時に印加されるフラットワイズ (FW; 幅広面に平行な軸まわりの曲げ)、エッジワイズ (EW; 厚み方向を曲げの軸とする曲げ) および長手方向の引張歪みを複合的に印加できる装置である[2]。テープ 1 本あたりの FW の最大印加歪みは 0.33%、EW 歪みは 0.41% であり、線材断面寸法 5mm 幅 × 0.2mm 厚みに印加される最大引張応力は約 200MPa である。ハステロイ基板と Cu 安定化層の積層材として線材のヤング率を評価すると、約 158GPa となり、最大引張歪みは 0.13% である。

これらの歪みが複合的に印加された場合、線材幅広面は非一様な歪みの分布になると考えられる。2mm 角の歪みゲージを長手方向中心軸対称、 $x = \pm 1.25\text{mm}$ の位置に、線材長手方向座標、 $y = 0\text{mm}, 10\text{mm}, 15\text{mm}, 25\text{mm}$ の位置に計 8ch、貼り付けて歪み分布を評価した。臨界電流および n 値の評価は $y = \pm 25\text{mm}$ に取り付けられた電圧タップによって電圧計測を行い、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ の電界発生をもって臨界電流値を定義した。

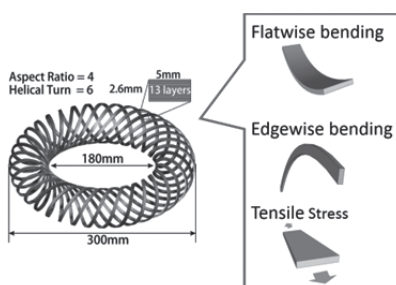


Fig.1 Schematics of FBC for SMES and expected applied strains

3. 実験結果および考察

Figure 2(a)は、印加された歪みの分布を計測した結果である。No.1 は FW 歪みと 20MPa の引張り歪みを印加した時の分布であり、線材長手方向の軸に対してほぼ対称な歪み分布になっている事がわかる。この条件では、FW 最大歪みを印加しても、 I_c および n 値の劣化は認められなかった。さらに EW 歪み (最大 0.41%) を印加し、引張り応力 170MPa および 200MPa を印加した結果が各々 No.2, No.3 である。FW, EW および引張歪みが複合的に印加されているため、歪みの分布は y 軸対称ではなく、 $x = +1.25\text{mm}$ 、 $y = 5 \sim 10\text{mm}$ 付近に大きな引張り歪み (正の歪み) が確認できる。このときの最大値は 0.8% を超えている事が測定の結果明らかになった。これらに対応する E-J 特性 (Fig.2(b)) を見ると、急激に I_c および n 値が劣化しており、 n 値は 22% の減少、 I_c は 12% 以上劣化している事がわかった。

巻線工程を考慮すると、FW および EW の最大歪み範囲内においては、巻線時の引張応力を 170MPa 以内 (線材の許容引張り強度は最大 400MPa) にする事が重要だと考えられる。

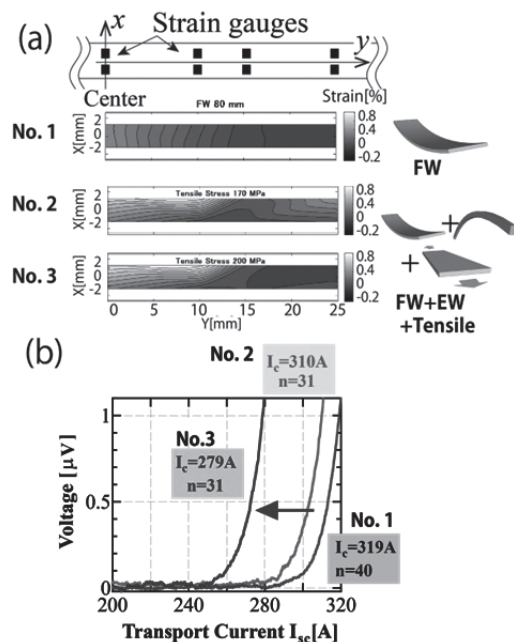


Fig.2 Results of measured strain distributions and corresponding E-J expressions.

参考文献

1. Y. Kimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.7
2. T. Yagai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.86

異なる CeO₂ 面内配向度を有する IBAD-MgO 基板上 BHO 添加 GdBCO 線材における臨界電流のひずみ依存性

Strain dependence of critical current properties of BaHfO₃ doped GdBa₂Cu₃O_y coated conductors on IBAD-MgO buffered substrates with different in-plane grain alignment of the CeO₂ layer

宇佐美 貴史, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大);菅野 未知央(KEK);町屋 修太郎(大同大学);衣斐 颯, 和泉 輝郎(SRL)

USAMI Takashi, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);

SUGANO Michinaka (KEK); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.); IBI Akira, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: usami-takashi14@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年、高特性の BMO 添加 REBCO 薄膜が多数報告されている[1-2]。これらの BMO 添加 REBCO 線材を機器応用するためには、 I_c のひずみ効果を評価することが必要不可欠である。これまで、BHO 添加 GdBCO 線材に関して、BHO 添加量の増加に伴い、 I_c の最大値をとるひずみの値(ピークひずみ)及び I_c のひずみ感受性が小さくなるという報告をしてきた[3]。また、放射光を用いた内部結晶ひずみ評価の結果、外部ひずみに対する I_c の変化に内部結晶ひずみは大きく影響しないことが明らかになった。ピークひずみが圧縮側にシフトするのは、粒界 I_c のひずみ依存性の特徴であるため、BHO 添加 GdBCO 線材における I_c のひずみ依存性の変化には、粒界にある BHO が寄与している可能性がある。

本研究では、粒界の BHO が GdBCO 線材における臨界電流のひずみ依存性に与える影響を評価するため、異なる CeO₂ 配向度を有する IBAD-MgO 基板を用いて BHO 添加 GdBCO 線材を作製し、曲げひずみに対する臨界電流特性を評価した。

2. 実験方法

Reel-to-Reel 装置を用いた Nd:YAG-PLD 法により IBAD-MgO 基板上に無添加 GdBCO 線材、BHO 添加 GdBCO 線材を同条件で作製した。本実験に用いた IBAD-MgO 基板の CeO₂ 配向度はそれぞれ $\Delta\phi=1.45^\circ$, 1.8° , 2.2° である。BHO と GdBCO の混合ターゲットを用い、BHO の添加量が 1.5 vol.% の線材を作製した。基板の移動速度を 0.02 mm/s とし、基板が成膜領域中で 780 °C になるようヒーター温度を決定した。機械的特性の評価には Goldacker 型試験機を用い、液体窒素中で連続的に曲げ変形を加えながら各ひずみで I_c を測定した。

3. 実験結果

XRD 測定の結果から、本研究で作製したすべての線材は良好な c 軸配向を示すことを確認した。また、超伝導層である GdBCO は線材長さ方向に [100]、[010] 配向であり、膜厚は 200 nm 程度であることを確認した。

Fig. 1 に本研究で作製した無添加 GdBCO 線材における I_c のひずみ依存性を示す。図中矢印はピークひずみを示している。Fig. 1 より、無添加 GdBCO 線材においては CeO₂ 配向度を変化させてもピークひずみは大きく変化しないことがわかった。Fig. 2 に BHO 添加 GdBCO 線材における I_c のひずみ依存性を示す。無添加 GdBCO 線材においてはピークひずみの変化が小さかったのに対して、BHO 添加 GdBCO 線材においてはピークひずみの値が大きく変化しているのがわかる。また、ピークひずみの値は CeO₂ 配向度と相関があり、CeO₂ 配向度が小さいほどピーク位置が圧縮ひずみ側にシフトしていることが確認された。当日は BHO 添加 GdBCO 線材におけるピークひずみのシフトに関して、粒界 I_c のひずみ依存性を考慮し、議論を行う予定である。

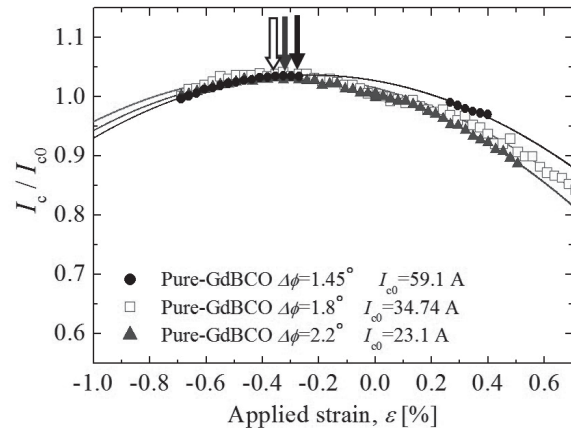


Fig. 1 Bending strain dependence of I_c for Pure-GdBCO CCs The arrows indicate the peak strains.

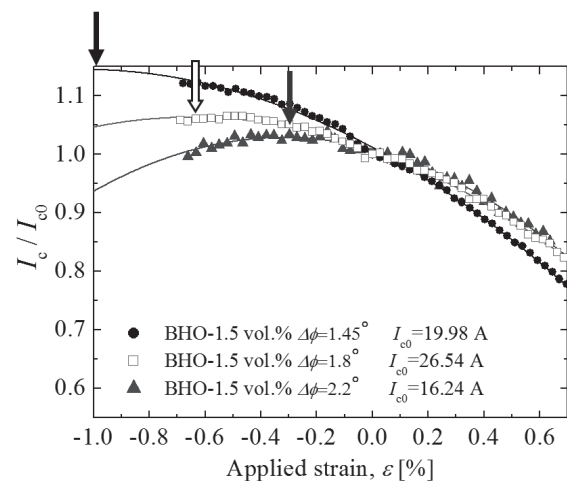


Fig. 2 Bending strain dependence of I_c for BHO-doped GdBCO CCs. The arrows indicate the peak strains.

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 25289358, 15H04252, 15K14301 及び 15K14302)の助成、及び SPring-8 利用研究課題(課題番号: 2015A1989)の下でビームライン BL46XU における JASRI の助成、及び高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として経済産業省の委託、及びイットリウム系超電導電力機器技術研究開発の一環として NEDO の委託、及び高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センターの助成により実施したものである。

参考文献

1. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 032002
2. A. Tsuruta, et al.: Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 065001
3. T. Usami, et al.: TEIONKOU GAKU vol.50 No.8 (2015) p.409

超音波を用いた GdBCO 線材の剥離診断法の可能性研究

Feasibility Study on Delamination Diagnosis Methods for GdBCO Coated Conductors Using Ultrasonic Waves

坂巻 裕太, ニノ宮 晃, 野村 新一(明治大学)
 SAKAMAKI Yuta, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.)
 E-mail: ce41044@meiji.ac.jp

1.はじめに

Y系高温超電導線材は厚み方向に層構造を成しており、実用化に際しては、線材に生じる機械的応力に起因する層間剥離による臨界電流特性の劣化を検討する必要がある。

GdBCO線材に装着した1対のAEセンサは、一方を超音波送信用に、他方を線材中を伝搬した信号の受信用として用いた。送受信間の信号伝達特性の変化より層間剥離診断の可能性を検討した。GdBCO線材の層間剥離は、線材を加熱することにより行い、層間剥離の状態は線材中を伝搬した信号の周波数特性及び共振点近傍の振幅変化により推定した。

2.GdBCO線材の剥離診断方法

Fig.1に本試験方法の概要を示す。剥離診断方法は、二種類の方法で検討した。その方法は、AEセンサの取り付け位置に起因している。すなわち、二種類の剥離診断方法は線材に超音波の送信用、受信用AEセンサを同じ面と逆の面に分散配置する方法(Fig. 1(a))と、線材を挟むように対向配置する方法(Fig. 1(b))である。超音波送信用センサにはパルス状信号を印加し、線材内を伝播した信号は、その伝搬経路に剥離などの機械的欠陥が存在するときは、受信信号の周波数や振幅に変化が生じることが想定される。そこで、これらの超音波伝達特性を評価することにより、剥離の有無を判断することで評価することとした。

3.剥離診断試験結果

剥離診断試験で使用したY系線材は、フジクラ製の10mm幅、加熱時の推奨温度は200℃以下、30cmの短尺線材である。短尺線材の層間剥離は、温度調整機能付き半田小手を用いて一部分を加熱(210-230℃)した。超音波伝達特性は、加熱前後での変化を常温中で測定した。送信用センサにはパルス幅1μs、電圧信号(分散配置する方法では3V_{p-p}、対向配置する方法では30mV_{p-p})を印加して超音波を発生させ、送受信信号をFFT処理したものを50回平均化処理して伝達特性とした。加熱点の最終到達温度は、210℃から10℃刻みで230℃まで加熱した。このときの加熱時間は2分間である。加熱点の温度は、加熱点から1cm間隔に貼った2つの熱電対の温度測定結果を基にして、定常状態で一様材料の条件下で1次元熱伝導方程式を考慮して求めた。

Fig.2は、送受信のAEセンサをそれぞれ分散配置したときの加熱処理温度に対する超音波伝達特性の共振点近傍の変化の一例である。このとき、送受信センサは同じ面に装着し、センサ間距離は15cmである。これより、加熱到達温度が220℃までは顕著な変化がみられなかったが、230℃まで加熱したとき、190kHz近傍の共振点の減衰が加熱前と比較し60%程度と顕著に低下することを確認した。

Fig.3は、送受信のAEセンサをFig.1(b)のように対向配置させて、センサ部分を固定し、線材を長手方向に2.5mm間隔でスライドさせたときの伝達特性の第1ピーク周波数での信号強度を評価した結果である。これより、加熱点付近では加熱前と比較して減衰が大きくなること確認できた。このときの第1ピーク周波数は測定位置により2~6kHz程度ずれる状態であった。

このように、両方法とも加熱により層間剥離が生じ、剥離箇所での超音波信号に顕著な特性変化を確認することができた。

4.まとめ

超音波を用いた2種類の剥離診断方法の可能性を確認した。今後は、コイルでの剥離等の機械的欠陥診断への適用の可能性検討および機械的応力に対する特性の剥離による影響を調査する予定である。

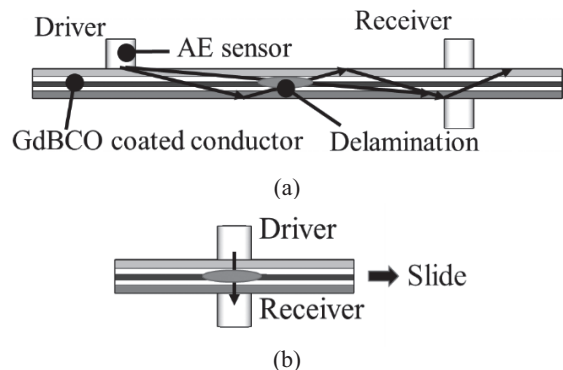


Fig. 1 Delamination diagnosis methods using ultrasonic waves based on the discrete arrangement of the AE sensors (a) and the opposite arrangement of the AE sensors (b).

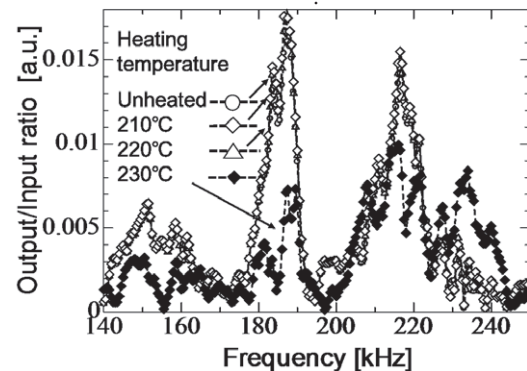


Fig. 2 Frequency dependence of the ultrasonic transfer characteristics on the heating temperature.

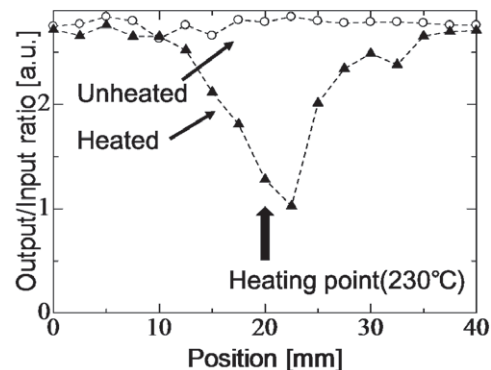


Fig. 3 Comparison of the AE signal intensity between the unheated sample and the heated sample around the resonance frequency.

交差した超伝導ナノストリップにおける電流集中と臨界電流

Current crowding and critical currents in crossed superconducting nanostrips

馬渡 康徳(産総研)

MAWATARI Yasunori (AIST)

E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

最近, MIT のグループにより, 超伝導ナノストリップを用いた新型の三端子デバイス素子が発表された[1]. この素子は, 超伝導ナノストリップが Y 字形に交差する点の電流集中を利用し, チャンネル電流の臨界電流がゲート電流に応じて変化する一種のクライオトロン[2]として動作するものであり, 超伝導ループ電流の非破壊読み出し等への応用が検討されている.

本研究では, この新型三端子素子を簡略化した超伝導ナノストリップ構造に電流を流す場合を考え, 電流分布および臨界電流を解析的に求めた. この新型素子の基本動作について理論的考察を行い, 実験結果と比較した.

2. 新型三端子素子の構造・動作原理

MIT のグループは, 厚さ 10nm 程度の NbN 超伝導薄膜を加工して, 幅数 100nm 程度の 2 本の超伝導ストリップが Y 字型に合流するナノ構造を作製し(Fig. 1), 新型三端子素子“yTron”として発表した[1]. この三端子素子の Gate 端子よりゲート電流 I_g を, Drain 端子よりチャンネル電流 I_{ch} を通電すると, I_{ch} の臨界電流が I_g に応じて変化する. この yTron は, 単一光子検出器におけるノイズを低減した読み出し回路や, 超伝導ループ電流(ループにおける磁束量子の数)の非破壊読み出し等への応用が検討されている.

超伝導ナノストリップが鋭い角をもって曲がる点では, 一般に電流密度が高くなる. この電流集中(current crowding)により量子化磁束線が発生して電圧を生じ, ストリップの曲がりの角度が鋭くなるほど臨界電流は小さくなる[3,4]. Fig. 1 の超伝導ストリップが交差する点 P においては, 電流集中が発生しやすいように, あえて交差角度が鋭いくさび形にしてある. ただし, ゲートにおける電流密度とチャンネルにおける電流密度が等しくなるように I_g および I_{ch} を設定すると, 点 P でも電流集中が起きることはない. MIT のグループは, ゲート電流 I_g の増加とともに, チャンネル電流 I_{ch} の臨界電流が線形に増加することを実験的に見出している[1].

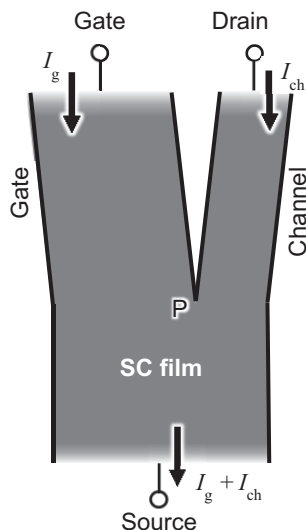


Fig. 1: Configuration of the new superconducting three-terminal device element, “yTron”. The gate current I_g and the channel current I_{ch} are injected, and the current crowding occurs at the sharp intersection P.

3. 単純化 yTron 構造における電流分布と臨界電流

本研究では, Fig. 1 の yTron 構造を Fig. 2 のように単純化した超伝導ナノストリップ構造について理論的考察を行った. 単純化 yTron 構造では, 幅が w_a および w_b の 2 本の超伝導ナノストリップの交差角度をゼロとしており, それぞれのストリップに流れる電流を I_a および I_b とする.

Clem の方法[3,4]に習い, この単純化 yTron 構造における電流分布を, 等角写像により解析的に求めた. 例えば, $I_d/w_a = I_b/w_b$ が成立する場合, 電流分布は一様で点 P における電流集中も無い. 一方, I_d/w_a と I_b/w_b の値が離れるほど点 P の電流集中は顕著になり, 量子化磁束線が発生しやすくなる.

交差点 P 付近における量子化磁束線に関する自由エネルギーを求めて安定性を解析し, 量子化磁束線が点 P で発生する条件より臨界電流を求めた. その結果, チャンネル電流の臨界電流 $I_{a,c}$ は, 次式で与えられることがわかった.

$$I_{a,c}/w_a = I_b/w_b + \gamma K_d, \quad (1)$$

ここで, $\gamma = [2\pi(w_a+w_b)\xi/w_a w_b]^{1/2}$, ξ はコヒーレンス長, および K_d は対破壊電流密度に膜厚 d を掛けた面電流密度である. ただし, $I_{a,c}/w_a$ は K_d を超えることはないので, (1)式は $0 < I_b/w_b < (1-\gamma)K_d$ の場合に有効であり, $(1-\gamma)K_d < I_b/w_b < K_d$ の場合は, $I_{a,c}/w_a = K_d$ で与えられる.

すなわち, ゲート電流 I_b の増加とともにチャンネル電流の臨界電流 $I_{a,c}$ は(増加率 w_d/w_b で)線形に増加するが, I_b が $(1-\gamma)K_d$ を超えると $I_{a,c}$ は飽和して一定となる. これらの振舞は実験データ[1]と定量的に一致する.

参考文献

- [1] A. McCaughan, “The yTron: A nanoscale superconducting 3-terminal device for inline readout of superconducting currents,” presented at 16th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD 16). <http://ltd16.grenoble.cnrs.fr/spip.php?article21>
- [2] D. A. Buck, Proceedings of the IRE **44**, 482 (1956).
- [3] J. R. Clem and K. K. Berggren, Phys. Rev. B **84**, 174510 (2011).
- [4] J. R. Clem, Y. Mawatari, G. R. Berdiyrov, and F. M. Peeters, Phys. Rev. B **85**, 144511 (2012).

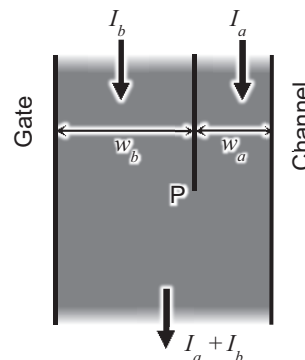


Fig. 2: Simplified yTron configuration with zero intersection angle. Two superconducting nanostrips of widths w_a and w_b carry transport currents I_a and I_b , respectively.

長尺 RE-123 線材における局所臨界電流の長手方向分布の統計性に関する考察

Statistical Investigation on Longitudinal Critical Current Distribution in Long RE-123 Coated Conductor

上津原 大, 東川 甲平, 井上 昌睦 (九大); 衣斐 颯, 和泉 輝朗 (SRL); 木須 隆暢 (九大)

UETSUHARA Dai, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.); IBI Akira, IZUMI Teruo (SRL); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

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

1. はじめに

超伝導線材は一次元電流輸送媒体であり局所特性低下部が電流の最大輸送量を制限するため、長手方向 I_c の均一性の確保が課題となっている。一方、現在のところその統計性に関するモデル化が十分に進んでおらず、機器設計や高均一線材実現へのフィードバックに有用な指標の提出が期待されている。そこで本研究では、リール式走査型ホール素子顕微鏡を用いて希土類系高温超伝導 (RE-123) 線材の局所 I_c 分布を測定し、その統計性に関する考察を行うことによって、 I_c 揺らぎの挙動に関する新たな評価指標の提出を目指した。

2. 方法

往復走査したホール素子によって RE-123 線材の残留磁界分布を取得し、Biot-Savart 則の逆問題を解くことによって、臨界電流密度に対応するシート電流密度の面内分布を評価した (Fig. 1 (a))。また、それを幅方向に積分することで局所 I_c の長手方向分布を得た (Fig. 1 (b))。

3. 結果及び考察

Fig. 2 に示した I_c の空間周波数解析から、主たる挙動は $1/f$ 揺らぎに起因していることがわかる。我々は既に、本質的な I_c の揺らぎは空間的な相関を有しており、その統計的振る舞いは Weibull 関数で記述できることを報告している [1]。一方、Fig. 1, 2 に見られるような周期的な I_c 低下部位は外的要因に由来し、Fig. 3 に示した I_c のヒストグラムの低 I_c 部分のテイルとして確認出来る。両者は別の統計事象と考えられ、RE-123 線材の長尺方向の均一性の揺らぎは二重 Weibull 関数によってより精度良く記述されることがわかった。この様な I_c 揺らぎの統計学的解析は、欠陥部の比率や、外来欠陥を除いた製膜法のポテンシャルなどを定量的に評価できる点で有効である。

謝辞: 本研究は、経産省並びに AMED による高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクト「共通基盤技術の研究開発」の助成を得て行ったものである。

[1] T. Kiss et al., ASC 2014, 1MOr2C-05, Aug. 11, 2014

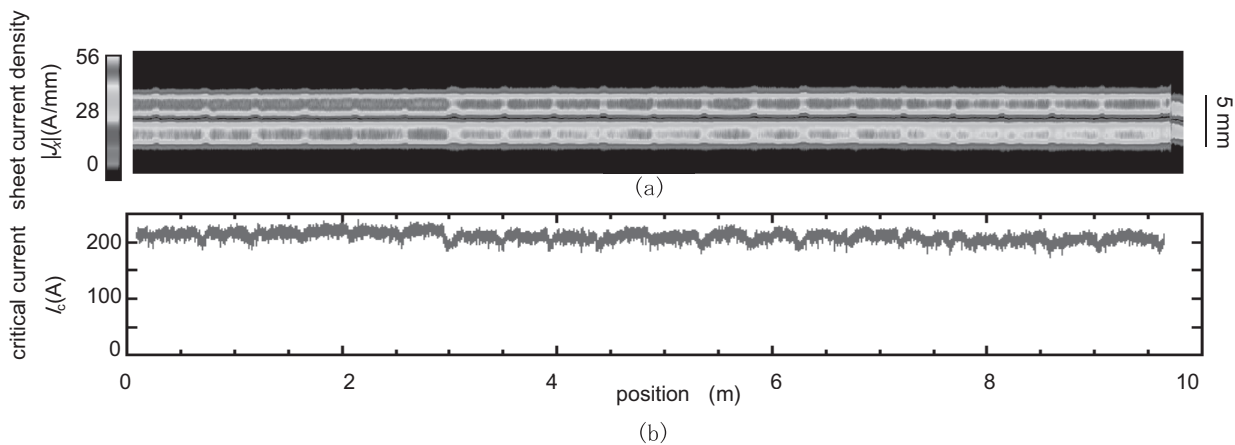


Fig.1 Results obtained by RTR-SHPM for 5-mm-wide RE-123 coated conductor
(a) 2D distribution of critical sheet current density and (b) longitudinal distribution of local critical currents

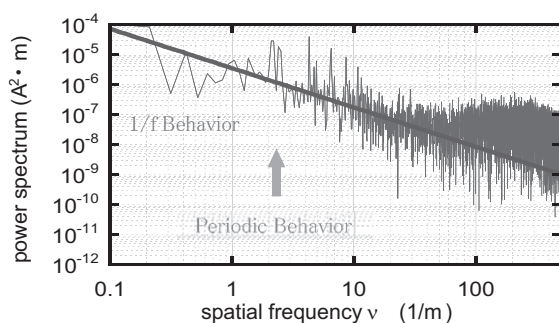


Fig. 2 Spatial power spectrum of local critical current which showed $1/f$ behavior (red line) together with periodic behavior (blue arrow)

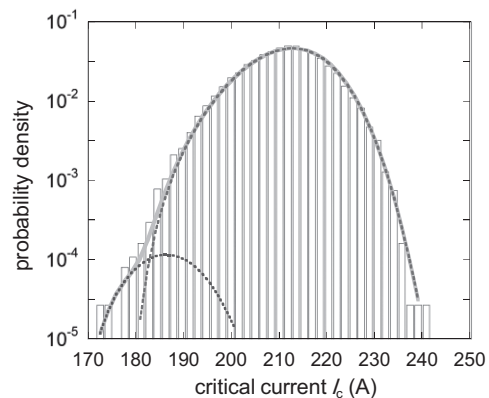


Fig. 3 Probability density function of local critical currents described by double Weibull functions

長尺高温超伝導線材における電流—電圧特性のマルチスケールモデリング

Multi-scale modeling of current-voltage characteristics in long length HTS tapes

市須 隆暢, 東川 甲平, 井上 昌睦, 鈴木 匠(九大シス情);
北口 仁(物材機構)

KISS Takanobu, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, SUZUKI Takumi (Kyushu Univ.);
KITATUCHI Hitoshi (NIMS)
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

一般に、高温超伝導線材の I - V 特性は短尺試料やマイクロブリッジを用いて温度、磁界依存性を計測し、その結果をもとに機器設計の為のパラメータが導出される。筆者らは前回の報告で、長尺線材の局所 I_c 分布の計測手法を開発し、長尺線材において短尺試料とは異なる長周期の空間揺らぎが存在する事を初めて明らかとした。すなわち、短尺線材の測定結果は、かならずしも長尺線材の振る舞いを記述出来ておらず、この事が、大型の高温超伝導マグネットの可設計性の確立や安定性・信頼性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。本研究では、局所 I_c 分布とマクロスケールでの I - V 特性の関係を明らかとし、長尺線材に適用可能な I - V 特性の解析式を導出した。本モデルの基本概念に加え、高温超伝導線材における実測結果との比較について報告する。

2. 実験

市販の Bi-2223 テープ線材に対して、リール式走査型磁気顕微鏡 (RTR-SHPM) を用い、テープ面内のシート臨界電流密度 J_c の空間分布を計測した。長手 (x) 方向の分解能は $840 \mu\text{m}$ 、幅 (y) 方向の分解能は $24 \mu\text{m}$ である。各座標位置 x において y 方向の電流密度を積分し線材の長手方向の I_c の変化を導出した。Fig. 1 に得られた結果を示す。本測定では、直流磁化より J_c を評価しているため電界基準は通電法に比べ4桁ほど小さく、 $2 \times 10^{-8} \text{ V/m}$ であった。その結果、得られる I_c 値は通常の電界基準による値に比べ約 30% 程度小さな値となる。また、高解像度計測の結果、Fig. 1 に示す様に線材中に局所的に I_c が 20% 程度低下している領域が存在する事を検知した。同一の試料を用いて、局所的な四端子測定を行った結果を Fig. 2(a) に示す。電圧端子を4箇所を設置し、Fig. 1 に示した3つの区間、P、M、Nと全体について測定を行った。

3. 実験結果及び考察

四端子法において、RTR-SHPM で検出した低 I_c 部位での I_c 低下が確認出来る。また、試料全体の区間で生じる磁束フロー電圧は、局所的な I_c 低下領域による電圧発生が支配的なことが分かる。一方、健全部位における I_c は 200 A を有している。Fig. 1 に示した $I_c(x)$ の結果をもとに、各区間の I - V 特性を解析的に記述した結果を Fig. 2(b) に示す。実験結果を良く再現出来ていることがわかる。

磁束フロー電圧は、メソスコピック領域における量子化磁束のフローによって誘起されると考えられる。我々は既に、高温超伝導体の電流輸送特性に関して、ローレンツ力による磁束の侵入を一種のパーコレーション過程として記述出来る事を示している[1]。ここで、以下の仮定のもとに、従来のパーコレーションモデルを拡張して長尺線材の解析式を導出した。仮定: 1) ナノスケールの磁束ピンニングの挙動は場所に依らず同様。2) RTR-SHPM で得た I_c の空間変化は、マクロサイズの欠陥起因による有効断面積の変化を示す。なお、プロセスによる I_c 向上や、X線CTを用いた低 I_c 領域の観測結果はこれらの仮定を支持している[2, 3]。

謝辞: 本研究の一部は、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の助成を得て行ったものである。

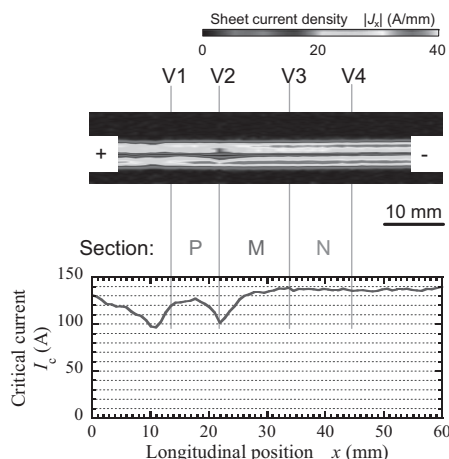


Fig. 1 I_c variation in a Bi-2223 tape visualized by scanning Hall-probe microscopy. Electric field criterion is $2 \times 10^{-8} \text{ V/m}$.

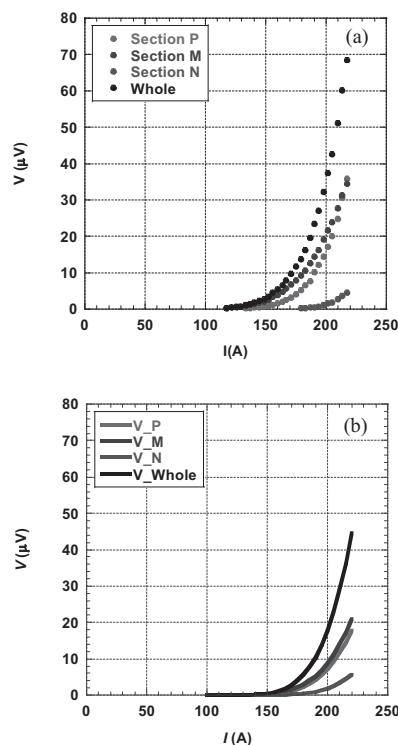


Fig. 2 (a) Site specified measurements on I - V characteristics and (b) analytical expression based on the $I_c(x)$ shown in Fig. 1.

参考文献

- [1] K. Yamafuji and T. Kiss, Physica C 258 (1996) 197
- [2] 鈴木匠ほか、2015 年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会、1C-a02
- [3] 井上昌睦ほか、2015 年度秋季低温工学・超電導学会研究発表会、1C-a03

二層ツイスト高温超伝導ケーブルのツイスト方向による交流損失特性への影響

Influence of twist direction to AC loss in two layered twisted HTS cable

小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, 原 祐輔, 東條 竜児, 小川 智也(新潟大学)

OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao, HARA Yusuke, TOJO Ryuji, OGAWA Tomoya (Niigata University)

1. はじめに

高温超伝導ケーブルの開発において、交流通電時に生じる交流損失の低減は、ケーブルの送電能力、安定性、ランニングコストに直結するためケーブル構造が交流通電損失に及ぼす影響を評価する事は重要となる。本研究は内層 S 撚りとし、外層を S 撚りと Z 撚りの超伝導ケーブルを模擬した二層ツイスト高温超伝導ケーブルを作成し、熱的測定法により内外層の交流通電損失をそれぞれ測定した。内外層の電流バランスを変化させた時の交流損失特性への影響の調査を行った。

2. ケーブルの構造と実験方法

図 1 に二層ツイスト高温超伝導ケーブルの概略図を示す。Bi2223/Ag 線材を内層直径 20mm に 9 本、外層直径 26.4mm に 12 本をそれぞれ独立させて巻き付けた。導体軸に対するツイスト角度は内外層共に 45 度とし、線材間距離を 1mm とした。測定する超伝導線材表面に熱電対を取り付け、線材を発泡スチロールで挟み込むことで断熱し交流損失による温度上昇の測定を行った。内層の線材を直列接続したときの臨界電流値は 74.0A、外層の線材を直列接続した時の臨界電流値は 83.1A となった。

内層、外層のそれぞれの線材は直列接続で接続されており、2 電源を用いそれぞれの層の電流バランスを変化させて交流損失特性の評価を行った。また、実験を簡易に実施するために外層内層それぞれの電流値を 8A から 64A まで 8A ずつ増加させて実験を行い、この時の測定値からフィッティングを行いそれぞれの電流バランスにおける交流損失特性を導出した。

3. 実験結果

図 2 に S-Z 撚りと S-S 撚りの二層ツイスト高温超伝導ケーブルにおいて電流バランスを変化させたときの交流損失特性を示す。それぞれの図の縦軸はケーブル全体の交流損失、横軸は線材 1 本当たりの内外層の電流の比を示している。縦軸の交流損失は内層、外層それぞれ代表的な 1 本の交流損失を測定し、それぞれの本数でかけて導出した。また、それぞれの図の電流値は、左側が外層の電流値が大きく、右側が内層の電流値が大きいことを

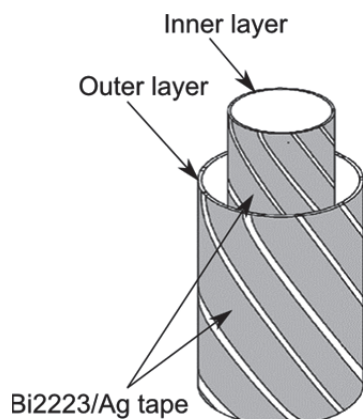


Fig.1 Schematic illustration of two layer twisted HTS cable

示している。それぞれのパラメータはケーブル断面を通過する電流量を示している。

図 2 より、S-Z 撚り、S-S 撚りともに 50 : 50 付近でケーブル全体の交流損失は最小値を示す。ここで、ケーブルにおける損失が発生する要因として、通電による損失と周囲の線材が作る磁界による損失が想定される。内層の線は内層と外層の線が作る縦磁界に晒されており、外層の線は内層の線が作る周方向磁界と外層の線が作る縦磁界による損失が生じる。S-Z 撚りと S-S 撚りを比較すると、若干ではあるが損失が最小となる条件が、S-Z 撚りのほうが内側に電流を流したほうにシフトしている。この理由として内外層の線材本数が異なるため、内外層の作る縦磁界の大きさは 50 : 50 ではなく、S-Z 撚り場合には内外層が作る縦磁界がキャンセルする方向に生じるため、内層と外層のトータルの電流値がほぼ等しい時に損失が小さくなることが予想される。

本研究で示した通り超伝導ケーブルを模擬した構造における交流損失特性を評価できることから、今後、ツイストピッチ、導体径、線材の種類などを変えて同様の実験を行うことにより体系的に交流損失評価を行う予定である。

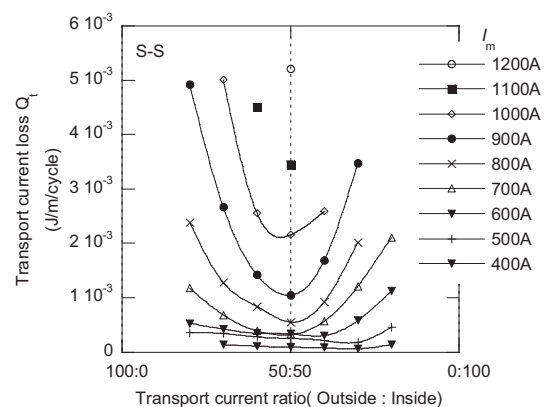
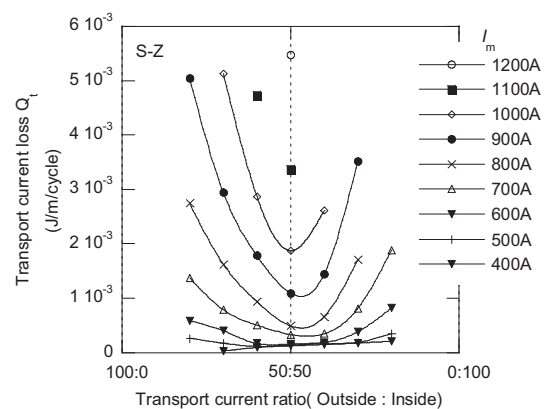


Fig.2 AC transport current losses in twisted two layer HTS cable vs. transport current ratio.

磁場転向板導入による Bi2223 超電導コイルの交流特性

AC characteristics of a prototype Bi2223 superconducting coil using a magnetic flux deflector

東川 励弥, 都築 啓太(鳥羽商船高専)
 Togawa Reiya, Tsuzuki Keita (NIT,Toba College)
 E-mail: 15502@g.toba-cmt.ac.jp

1. はじめに

近年、超電導リアなどで注目されている超電導技術は船舶推進動力用モータ等、様々な分野で応用されている。その一つである超電導回転機は従来機と比較して小型化、高効率化が実現可能であるため研究が進められている。

超電導コイルは超電導回転機の重要な構成要素である。超電導コイルの臨界電流特性は運転電流を決定する重要なパラメータである。本研究の磁場転向板とは超電導コイルの巻線の幅方向にあたるコイルの上下面に取り付ける磁性材料で構成された積層板のことである。これを用いることで、直流電流下において線材の a-b面に鎖交する磁束を抑制し、臨界電流特性を向上可能であることが先行研究によりわかっている[1]。

交流電流下における超伝導コイルには変動磁界に起因する交流損失が発生することから、磁場転向板を用いてその変動磁界を抑制できると考えた。本研究では交流電流通電時において磁場転向板の効果の検証を目的とした。Bi2223 線材を巻線した小型試作コイルを製作し、交流電流下での磁場転向板の有無による過渡特性の比較結果を報告する。

2. 磁場転向板について

超電導コイルの臨界電流値は、巻線されている超電導線材に鎖交する磁束密度の大きさ及びその角度に依存する。この角度によって流すことができる電流、即ち、回転機における運転電流が決定される。この電流は超電導材料の異方性から、線材の a-b面から見て 90° に近づくほど流れにくくなる。

Fig.1 は磁場転向板の有無による磁束線の変化を示す。磁場転向板は超電導コイルの上下に磁束を通しやすい磁性体で構成される材料を搭載することで、線材の a-b面に鎖交する磁束を抑制できる。よって、臨界電流特性を向上に繋がる有効な手段といえる[1, 2]。

3. 実験準備及び方法

Fig.2(a)に試作超電導コイルを示す。超伝導線材として、交流用超電導線として製品化されている Bi2223 線(Di-BISCCO Type-ACT,住友電工)を使用している。Fig.2(b)は試作超電導コイル用に軟磁性材料を積層して製作した磁場転向板である。

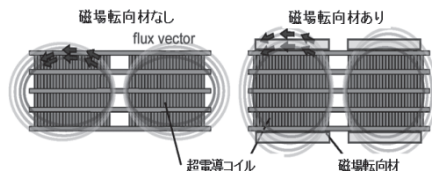


Fig.1 Structure and role of Magnetic Flux Deflector (MFD)

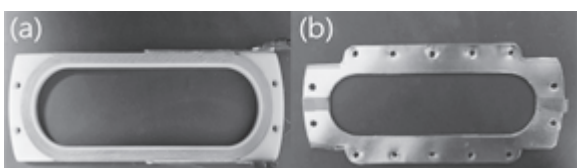


Fig.2 Photograph of prototype HTS coil with MFD:(a) shape of HTS winding (b) MFD

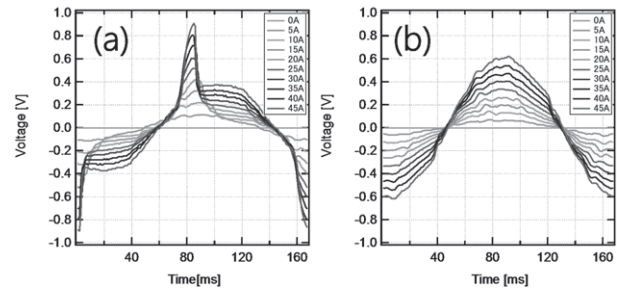


Fig.3 AC voltage waveform of HTS coil (a)with MFD (b)without MFD

実験方法として、通常の試作超電導コイルと試作超電導コイルに磁場転向板を装着した際の交流波形を液体窒素温度下(77K)で測定した。測定回路は交流電源に対して試作超電導コイル、シャント抵抗および電流調整用の負荷を直列接続した。商用電源の 100V,60Hz を使用し、スライドレギュレーターで変圧して電圧値を調整したものを交流電源として使用した。測定試験の際には試作超電導コイルに通電される任意の電流値において電流実効値が 45A に到達するまでの超電導コイル端子間電圧を測定した。

4. 実験結果及び考察

Fig.3に磁場転向板の有無によるコイル端子間電圧の比較を示す。縦軸にコイル端子間電圧[V]、横軸に時間[ms]を示す。結果から、(a),(b)の45Aの電流値におけるそれぞれの電圧実効値は磁場転向板を搭載することで低減され、磁場転向板を搭載した試作超電導コイルの発熱量は通常の試作小型超電導コイルの発熱量よりも低い事が確認された。

しかし、Fig.3(b)から分かるようには磁場転向板を搭載した場合において突起が見られる。そのため最大電圧は超電導コイルのみと比較して大幅に上回っている。この突起は搭載しない場合の電圧波形と試作超電導コイルに通電される電流波形には見られないため、磁場転向板の搭載が原因ということがわかる。この原因は試作超電導コイル周りの磁気回路が変化した影響と推測される。

5. まとめ

本研究では交流超電導回転機を想定した試作超電導コイルに磁場転向板の有無による超電導コイル端子間の交流波形を液体窒素温度(77K)で計測した。この結果、磁場転向板を導入した場合、発熱量を低減できることが確認された。

参考文献

1. K.Tsuzuki, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, Issue 3 (2013) Article#: 4603304
2. K.Tsuzuki, et al.: Elsevier: Physics Procedia(2012) pp,1-4