

DI-BSCCO Type HT-NX の低温・磁場中における臨界電流のひずみ効果 II

Strain effect on critical current of DI-BSCCO Type HT-NX in magnetic fields at low temperature II

酒井 康平, 岡田 達典, 淡路 智(東北大)

SAKAI Kohei, OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: k.sakai@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超伝導マグネットにおいて線材は径方向外向きの電磁力 (hoop 力) を受ける。Bi2223 線材では液体窒素温度や液体ヘリウム温度における磁場中臨界電流のひずみ依存性は測定されている[1]が、マグネット応用で想定される冷凍機冷却温度におけるこれらの特性は、測定の複雑さから明らかになっていない。よって、超伝導線材のマグネット応用には臨界電流の磁場とひずみに対する依存性を調べるのが重要となる。本研究では高強度である DI-BSCCO Type HT-NX の 40 K 及び 66 K、磁場中 (< 2 T) における臨界電流の引っ張りひずみ (< 0.7%) 依存性を測定したので報告する。

2. 実験方法

磁場中における臨界電流の引っ張りひずみ、および引っ張り応力依存性測定にはレバー式引っ張り試験装置[2]を用いた。この装置では上端に続くロッドを引っ張ることで下部のカムとレバーが動き、レバーと装置本体に両端を固定した試料に引っ張り方向の力が加わるようになっている。この時ロッドに印加する荷重をロードセルで測定し、これを試料断面積で割ることで試料に生じる応力を計測できる。ひずみはひずみゲージを用いて測定したが、曲げ方向成分を除去するために試料の両面にひずみゲージを取り付け、二つのひずみゲージの平均値を印加ひずみとした。

温度は He ガスフローによって 40 K に、液体窒素を用いて 66 K および比較として 77 K にそれぞれ冷却し測定した。低温では臨界電流が大きくなるため、無冷媒超伝導マグネットを用いて最大 2 T の外部磁場を印加し、臨界電流を抑えて測定を行った。電流は最大 220 A を印加し、四端子法によって電圧-電流特性を測定して電界基準を $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とし臨界電流を算出した。

3. 実験結果

Fig.1 に 40 K, 66 K, 77 K における応力-ひずみ曲線を示す。ヤング率はひずみを 0.4% 印加した後に戻し、再びひずみを印加した際のマイナー曲線において、0.3-0.4% のひずみ領域から求めると、それぞれ 121 GPa, 113 GPa, 107 GPa となり、冷却により試料の剛性が向上したことが分かった。

Fig.2 に臨界電流の引っ張りひずみ依存性を、Fig.3 に臨界電流の引っ張り応力依存性を示す。臨界電流が急激に低下する引っ張りひずみ及び応力は 77 K で約 0.47%, 約 480 MPa, 66 K で約 0.45%, 約 470 MPa, 40 K で約 0.44%, 約 480 MPa となり、大きな差は無かった。温度低下に伴い可逆領域における臨界電流の低下が大きくなる振る舞いが現れた。

参考文献

1. Y. Miyoshi *et al.*: Supercond. Sci. Technol., **28** (2015) 075013.
2. G. Nishijima *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., **20** (2010) 1391.

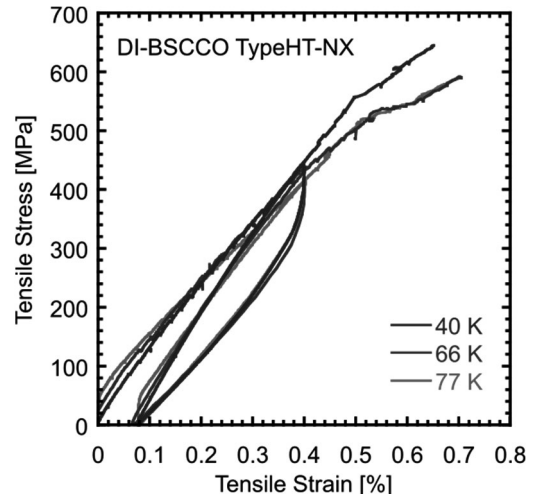


Fig.1 Tensile Stress-Strain Curve of DI-BSCCO Type HT-NX.

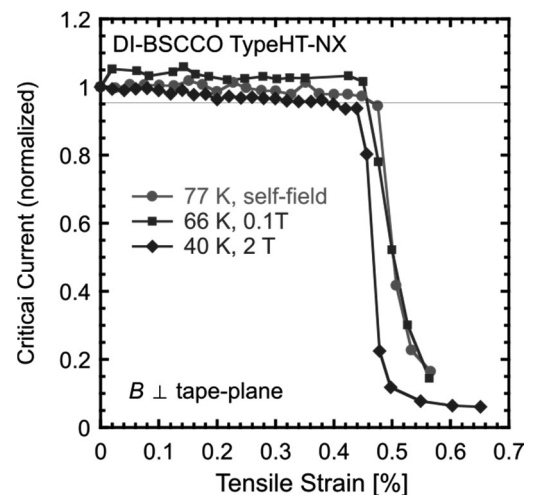


Fig.2 Tensile Strain Dependence of Critical Current.

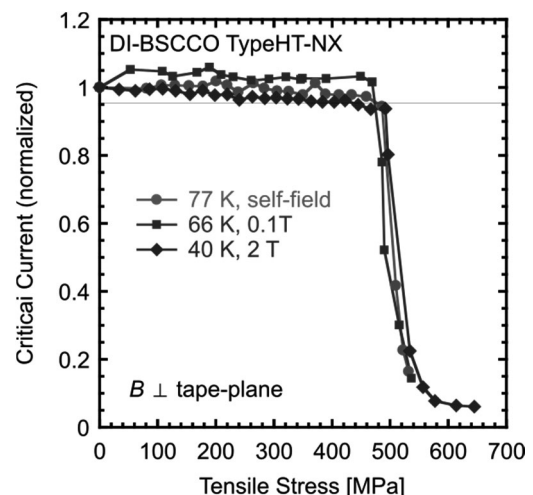


Fig.3 Tensile Stress Dependence of Critical Current.

高 Pb 濃度 Bi2223 厚膜に対する低温焼成効果 Effects of low temperature sintering for heavily Pb doped Bi2223 thick films

田中智之(青学大); 武田泰明(東大); 岩見壮徒, 元木貴則, 下山淳一 (青学大); 今康一, 稲森聡(ティーイーピー)
TANAKA Tomoyuki (Aoyama Gakuin Univ.); TAKEDA Yasuaki (The Univ. of Tokyo); IWAMI Taketo, MOTOKI Takanori,
SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); KON Kouichi, INAMORI Satoshi (TEP)
E-mail: c5618052@aoyama.jp

1. はじめに

これまで我々は $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ [Bi2223] 多結晶材料における臨界電流特性の改善に向けた粒間結合強化手法を提案してきた[1]。最近では理想的な高密度かつ高度 c 軸配向組織の形成が可能な厚膜材料に注目しており、Bi2223 厚膜において仕込 Pb 置換量の増大に伴って、実効置換量の増大、 c 軸の短縮を確認したこと、Pb 置換量 $x \sim 0.39$ の厚膜試料が 4.2 K、77 K においてそれぞれ $\sim 50 \text{ kAcm}^{-2}$ 、 $\sim 8 \text{ kAcm}^{-2}$ という高い J_c を記録したことを報告した[2]。これらの事実は Pb 置換量の増大が粒間結合の強化に有効で多結晶材料の臨界電流特性の向上を伴うことを示している。さらに前回は、簡便な手法による Bi2223 厚膜における配向組織の形成を報告したが[3]、作製方法、焼成条件等の最適化には至らなかった。

これらの背景のもと、本研究では Bi2223 多結晶材料に対する高濃度 Pb 置換効果の解明を目的とした。今回は、磁場配向法により c 軸配向した高濃度 Pb 置換 Bi2223 厚膜試料($x \sim 0.43$)の作製条件の最適化を試み、焼成温度が微細組織や超伝導特性に与える影響を系統的に調べた結果を報告する。

2. 実験方法

スラリー調製に用いる Bi2223 粉末は、 Bi_2O_3 、 SrCO_3 、 CaCO_3 、 CuO を原料とし、Bi: Pb: Sr: Ca: Cu = 2.05- x : x : 1.9: 2.0: 3.0 ($x = 0.35$ -0.55)の仕込組成で秤量、混合し、空气中 780°C で仮焼、ペレット成型後に $P_{\text{O}_2} = 1$ -3 kPa 下(1-3% O_2/Ar 気流中)で焼結し、粉砕することにより作製した。得られた粉末を EtOH とともに ~ 24 h ボールミル混合することでスラリーとした。表面磁場 0.4 T の永久磁石上で Ag 箔にスラリーを 30 μL 滴下し乾燥させることで磁場配向体を作製した[4]。その後、Ag 箔で挟み、緻密化および c 軸配向度強化のための一軸プレス(~ 1 GPa)と熱処理を行い Bi2223 厚膜($x \sim 0.35$ - 0.45, $\sim 100 \mu\text{m}^2$) を作製した。焼成は $P_{\text{O}_2} = 3$ kPa 下で行い、一部の試料に対しては $P_{\text{O}_2} = 500$ Pa 下での金属組成制御を目的とした還元ポストアニールを施した。試料の酸素量は酸素気流中 300°C でのアニールによりキャリアの弱いオーバードープ状態になるように制御した。試料の微細組織は SEM により観察し、構成相・格子定数・Lotgering Factor (LF) は XRD により評価した。化学組成分析は試料研磨面に対して EPMA により行い、超伝導特性は SQUID 磁束計を用いプレス面に垂直に印加した磁場下での磁化測定により調べた。

3. 実験結果

Pb 置換量 $x \sim 0.45$ の厚膜試料について焼成温度を 805 - 820°C の間で変えて作製した。Fig. 1 に 820°C、805°C で焼成した Bi2223 厚膜の破断面の二次電子像を示す。低温焼成試料ほど結晶が c 軸方向により薄い平板状になることがわかった。このことは、低温焼成のほうが高密度、高配向度化に有利であることを示唆している。

また、Fig. 2 に示したように、10 Oe での ZFC 磁化率の温度依存性において低温焼成試料ほど超伝導転移がシャープとなった。これは低温焼成が強い粒間結合の形成に有効であることを示唆している。

当日は実効 Pb 置換量、電気抵抗率の温度依存性や粒間 J_c 、 I - V 特性などについても報告する予定である。

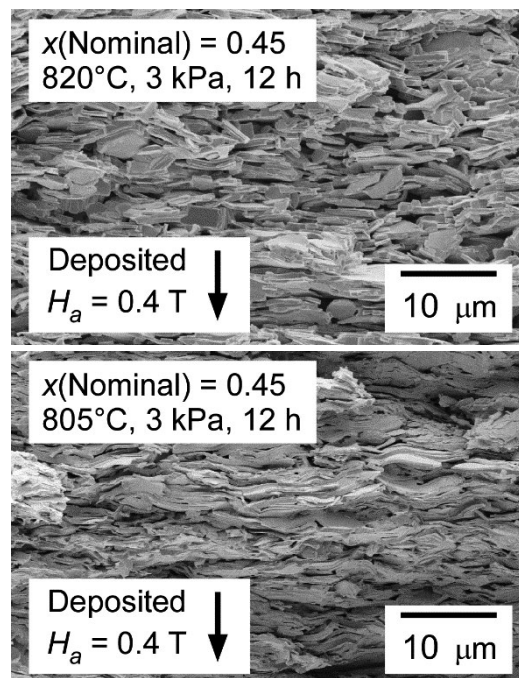


Fig.1 Secondary electron images of fractured surface of Bi2223 thick films with $x=0.45$ sintered at 820°C and 805°C.

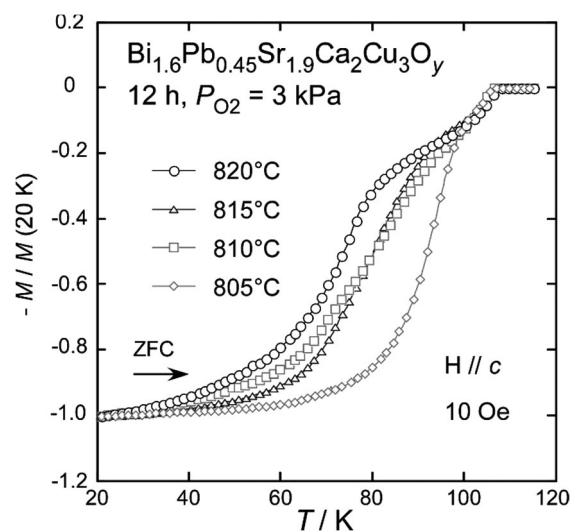


Fig.2 Temperature dependence of normalized ZFC magnetization for Bi2223 thick films sintered at various temperatures.

参考文献

- [1] Y. Takeda *et al.*, *Physica C* **534** (2017) 9-12.
- [2] Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **95** (2017) 179.
- [3] T. Tanaka *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **97** (2018) 1B-p11.
- [4] J. Shimoyama *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **97** (2018) 1B-p06.

Ba-122 多結晶バルク体の結晶粒組織解析

Grain structural observation for polycrystalline Ba-122 superconductors

嶋田 雄介(東北大);山本 明保(東京農工大);岸尾 光二(産総研);下山 淳一(青学大);
波多 聡(九大);今野 豊彦(東北大)

SHIMADA Yusuke (Tohoku Univ.);YAMAMOTO Akiyasu (TUAT);KISHIO Kohji (AIST);
SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);HATA Satoshi (Kyushu Univ.);KONNO Toyohiko (Tohoku Univ.)
E-mail: yshimada@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

多結晶超伝導バルク体の輸送電流特性は、その組織、特に結晶粒内および結晶粒界といった結晶粒組織に強く依存する。一方で、対象とする材料によって、電流特性に支配的に効果を及ぼす機構は磁束ピンニング[1]やコネクティビティ[2]、粒界特性[3,4]など多岐にわたり、検討すべき組織的要因が異なるのが実際である。本研究では、固相焼結で作製し、ランダム方位を有する Co ドープ Ba-122 多結晶バルク体に着目してマルチスケール結晶粒組織解析を行うことで、超伝導輸送電流特性に及ぼす組織的要因について検討を行った。

2. 実験方法

Co ドープ Ba-122 多結晶バルクは、Ba, Fe, Co および As 粉末を組成が $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ となるように秤量、さらにはボールミルにより混合したものを、600°Cから 900°Cの温度で 48 時間焼結を行うことで作製した[5]。

超伝導特性は四端子法による輸送電流測定のほか、SQUID を用いた残留磁化測定により得た。結晶粒組織解析をマクロスケールでは走査電子顕微鏡法 (SEM)、ナノスケールを走査/透過電子顕微鏡法 (S/TEM) により行った。

3. 結果および考察

600°Cで作製した Ba-122 バルクは、Fig.1 の SEM 反射電子 (BSE) 像(a)で示すようにおおそ単相であることがわかる。このときの Ba-122 相の粒径は約 300 nm、体積分率は約 68%であった。また、結晶粒組織を拡大した高角散乱環状暗視野 (HAADF)-STEM 像(b)において、ほとんどの結晶粒界に暗い領域がみられる。これは、結晶粒界の高分解能像(c)から非晶質相であることがわかる。組成分析の結果、この非晶質相は Ba-O 相であることがわかった。また、一方で結晶粒内には Fig. 1(d)に示すような多数の Fe-As 層が(001)に沿って抜けた積層欠陥もみられた。700°Cで作製したバルクでは結晶粒界および粒内における組織的特徴に 600°Cで作製したバルクと大きな違いはみられなかったが、1 μm 程度への結晶粒成長および粒内クラックの発生がいくつか観察された。800°Cの焼結では、10 μm を超える焼結温度に対して指数関数的な結晶粒粗大化がおこり、さらに Fe-Co-As 相などの常伝導相が多く生成していた。700°C焼結バルクでみられた粒内クラックの増加のほか、粒界にもサブミクロンオーダーの厚みを有する Ba-O 相が生成し粒間の結合を低下させるなど、粒内、粒界ともに電流輸送経路が分断されたような組織がみられた。

輸送臨界電流密度 J_c は、600°C焼結バルクで最も高く、焼結温度の上昇と共に低下、800°C以上の焼結ではほとんどゼロとなり、とくに結晶粒径が 10 μm 以下のときには粒径の逆数と正の相関をもつことがわかった。一方で、残留磁化測定から 600°Cからの焼結温度上昇に伴い、粒間電流ピーク磁場の減少と同時に粒内電流ピーク磁場の増加がみられた。その要因としては、結晶粒粗大化による粒内でのループ電流の増大とそれに伴う粒界を越える電流の減少による影響が大きいこと

が考えられる。つまり、これは Ba-122 多結晶バルクにおいて、輸送電流にジョセフソンジャンクションモデルの効果を有することを示唆している[6]。ただし、結晶粒径が 10 μm を超える 800°C以上の焼結バルクでは Ba-O 相が粗大化し、粒間が完全に分断すると粒界電流がゼロとなり、電流輸送経路が遮断される効果が強く出ることから、粒径と J_c の相関からずれることが考えられた。

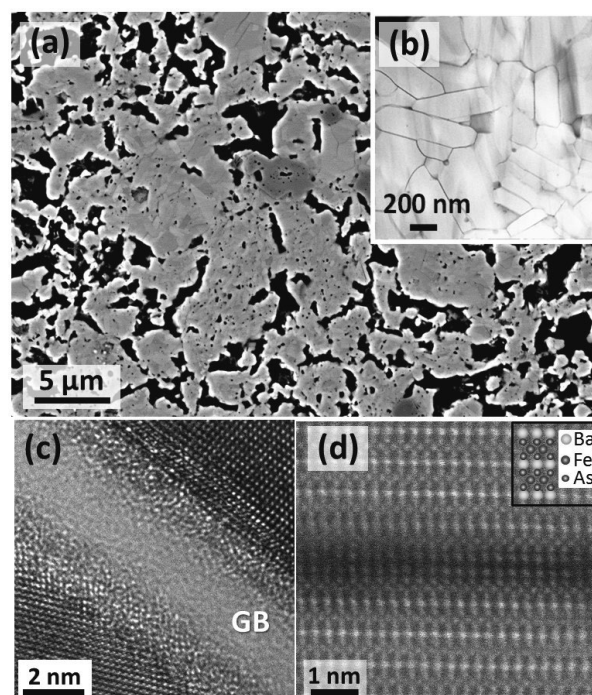


Fig.1 SEM-BSE image (a) and HAADF-STEM image (b) of the samples heated at 600°C. High resolution images acquired by TEM (c) and HAADF-STEM (d) were obtained from grain boundary and intra-grain, respectively.

謝辞

本研究は JST-CREST(JPMJCR18J4)の支援、並びに JSPS 科研費 (JP18K14012)の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

1. G. Zerweck: J. Low. Temp. Phys., Vol. 42(1981) p.1-9
2. T. Matsushita, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21(2008) 015008
3. T. Katase, et al.: Nat. Commun., Vol. 2(2011) p. 409
4. D. Dimos, et al.: Phys. Rev. B, Vol. 41(1990) p. 4038-4049
5. Y. Hayashi, et al.: Physica C, Vol. 504(2014) 28-32
6. J. Hecher, et al.; Supercond. Sci. Technol., Vol. 29(2016) 025004

気相拡散法による鉄系高温超伝導 122 相の合成

Synthesis of 122 phase iron-based superconductors by diffusion method

植村 俊己, 山本 明保 (東京農工大学)
 UEMURA Toshiki, YAMAMOTO Akiyasu (TUAT)
 E-mail: s186930v@st.go.tuat.ac.jp

1. 研究目的

2008 年に東工大の神原、細野らにより発見された鉄系高温超伝導体[1]は、銅酸化物系に次ぐ高い臨界温度($T_c = 58$ K)と上部臨界磁場($H_{c2} > 100$ T)を持つため、強磁場磁石などへの応用が期待されている。鉄系高温超伝導体の一種である $BaFe_2As_2$ ($Ba122$)は電磁的異方性が小さく[2]、単相試料の合成が比較的容易であることから、薄膜、線材、バルク磁石などの材料化研究[3]が盛んに行われている。一方で、実用化に向けた課題の一つとして、 $Ba122$ の相生成機構や熱力学的特性が明らかでなく、組織制御の普遍的な指針が確立されていないことが挙げられる。そこで我々は、 $Ba122$ が生成する過程を観察することで、生成機構に関する基礎的知見を得ることを試みている[4]。具体的には気相の Ba , As を用いた拡散法により $Ba122$ を純 Fe 板表面に生成させ、サンプルの生成層・界面を評価した。また、純 Fe 板に加え、純 Fe ワイヤー表面に $Ba122$ を生成させることも試みた。

2. 実験方法

レーザー加工機を用いて 10 mm の長さ、5 mm の幅、及び、0.5 mm の厚さを有する板状形状に純 Fe 板を加工したものを Fe 基材として用いた。 Ar 雰囲気下で $Ba:As = 1:2$ (mol 比)で単体金属を秤量し、ボールミル混合した組成 $BaAs_2$ の固体原料を成型したものを、蒸気源として用いた。 Fe 基材と $BaAs_2$ 蒸気源ペレットとを分離して反応容器内に配置し、石英管中に真空封入をした後、熱処理を行った。また、 Fe 基材として直径 1.45 mm の純 Fe ワイヤーを用いたものに対しても、 Fe 基材と $BaAs_2$ 蒸気源ペレットとを分離して Ar 雰囲気下で熱処理を行った。 Fe 基材表面に得られた反応生成層に対して、XRD により相分析、SEM・EDX による生成層、微細組織、化学組成の評価を行った。

3. 結果・考察

900°C、24h 及び 800°C、24h の熱処理を行った試料について、純 Fe 板表面の生成層に対する XRD パターンを Fig. 1 に示す。900°C で熱処理した試料では $Ba122$ に起因するピークのみが観測され、ほぼ単相の $Ba122$ が得られたことが分かった。Rietveld 法による格子定数は $a = 0.39604$ nm, $c = 1.30033$ nm であり、ノドープ $Ba122$ の文献値 ($a = 0.39621$ nm, $c = 1.30178$ nm [5]) とほぼ同等であった。一方、800°C で熱処理した試料では、 $Ba122$ ピークのほかに Fe_2As に起因するピークが確認された。これらの試料の断面研磨面の反射電子 (BSE) 像を Fig. 2(a), (b) に示す。900°C で熱処理したサンプルの表面には白色の相のみが確認された一方で、800°C で熱処理したサンプルの表面には斑状の複数コントラストの組織が確認された。白色の領域は EDX 元素分析から、 $Ba122$ であることが確認された。一方、斑状領域の薄灰色領域は、 As 及び Ba の濃度が低い領域に対応しており (Fig. 2(c)), XRD の結果から Fe_2As と予想された。純 Fe ワイヤーを用いて熱処理を行った結果、Fig. 3 に示すように表面が $Ba122$ 層で覆われたワイヤー状の試料を作製することができた。

謝辞 有益な御助言を賜った太刀川恭治博士(NIMS、東海大)に御礼申し上げます。本研究は、文部科学省「元素戦略プロジェクト」、JSPS 科研費 JP18H01699 の助成、JST-CREST(JPMJCR18J4)の支援を得て行われたものである。

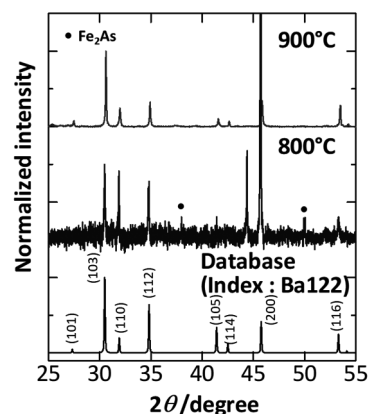


Fig. 1 XRD patterns for the surface of samples with different heating temperatures. For reference, $Ba122$ simulation pattern is shown.

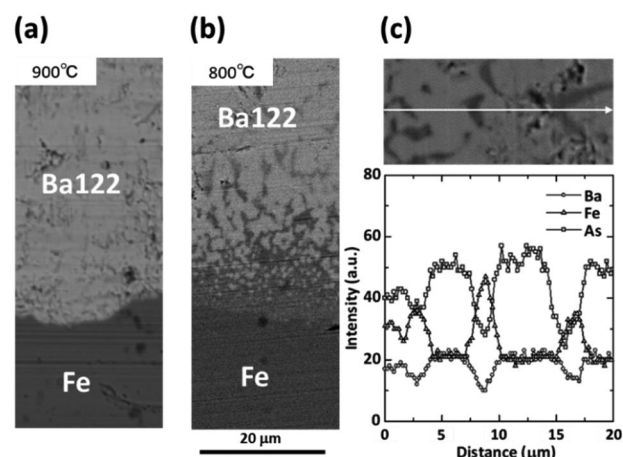


Fig. 2 (a), (b) Cross-sectional back scattered electron image of the samples heated at 900°C (a) and 800°C (b). (c) EDX line scan analysis on a cross section of the sample heated at 800°C. The top panel shows BSE image of the corresponding position.

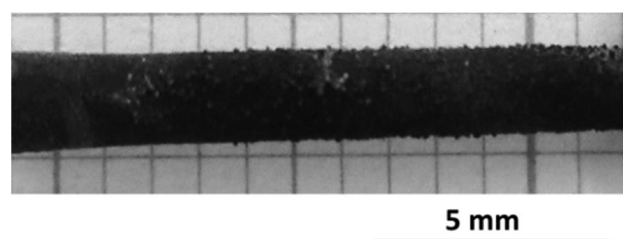


Fig. 3 The photograph of the sample produced using pure iron wire as the iron source material.

参考文献

1. Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
2. A. Yamamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 062511 (2009).
3. H. Hosono *et al.*, *Materials Today* **21**, 278 (2018).
4. 植村俊己ら、第 97 回秋季低温工学・超伝導学会、講演概要集 p.29 (2018).
5. N. Ni *et al.*, *Phys. Rev. B* **78**, 214515 (2008).

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅲ-1)

～プロジェクト概要～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (III-1)

-Outline of the project -

横山彰一, 松田哲也, 野村航大, 三浦英明, 江口諒, 森田友輔, 大竹俊輔, 井上達也, 田邊肇, 佐藤伸治 (三菱電機); 東川甲平, 木須隆暢 (九大); 宮城大輔 (千葉大); 津田理 (東北大); 中村武恒, 白井康之 (京大)

YOKOYAMA Shoichi, MATSUDA Tetsuya, NOMURA Kota, MIURA Hideaki, EGUCHI Ryo, MORITA Yusuke, OTAKE Syunsuke, INOUE Tatsuya, TANABE Hajime, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.); HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takano (Kyushu Univ.); MIYAGI Daisuke (Chiba Univ.); TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); NAKAMURA Taketsune, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: Yokoyama.Shoichi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

液体ヘリウムレスの医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を平成 28 年度より NEDO プロジェクトとして実施中である[1,2]。本プロジェクトでは、MRI システムへの実用化に向け超電導マグネットシステムを開発し、課題などを検討しており、1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットを試作し、MRI への適用を実証する。最終目標は、全身用 3T-MRI マグネットの設計完了である。

2. 研究開発ターゲット

本研究開発のターゲットは、大きく 2 つあり、1 つは地球資源であるヘリウムガスの枯渇、供給不安への対策として大量に使用している液体ヘリウムを用いない MRI マグネットを開発すること。もう 1 つは現在多くの病院で使用されている 1.5T-MRI マグネットが将来 3T-MRI マグネットに置き換わる時に 1.5T 機と同等の形状、重量、漏れ磁場領域の 3T 機を提供することで容易に置き換えることができるマグネットの開発である。このために、従来の金属系超電導より高温かつ高磁場で使用できる高温超電導のマグネットを開発し、MRI に適用するための技術開発を実施している。

3. 高温超電導コイルの実用化技術開発

1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの設計、製作が完了した[3,4]。本コイルの外観写真を Fig.1 に示す。図のように主磁場を発生する 3 対のメインコイルと 1 対のシールドコイルから成り、フランジ外径は 1260mm、フランジ面軸長 1060mm である。使用した超電導線材は、4mm 幅の銅メッキ REBCO 線で、総線材長は 70km である。コイルインダクタンスは 145H であり、定格中心磁場 2.9T での蓄積エネルギーは 1.6MJ と高温超電導コイルとして世界最大級のものである。なお、磁場均一度を出すためにパンケーキコイルの巻線精度は径方向 0.1mm 以下、コイル組立精度 0.5mm 以下で製作している。

また、全身 3T 実用機を実現するために高電流密度化する必要があり、磁場中での超電導特性を改善するために、人工ピン入り REBCO 線材を入手し、内径 560mm のパンケーキコイルを試作した。次年度から人工ピン入り REBCO 線材を用い最大磁場 7T 発生する検証コイルを試作、評価する。

NMR プローブを用いた高精度の磁場変動測定や磁場安定化手法[5]、等価回路による磁場制御手法[6]を提案した。さらに、コイル製作時の劣化について大口径コイルの局所劣化部位を特定、評価するための非接触測定を実施[7]した。

4. 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

MRI 超電導マグネットの小型、軽量化を検討するために 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイル設計を実施し、電磁力軽減構造を提案した [8]。また、全身 3T 実用機のコイル設計を開始し、設計手法に免疫遺伝アルゴリズムを取り入れてコイルの最適化を検討している。また、初期冷却を時間短縮する冷却システムを検討し前述の 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットに適用した。

5. まとめ

液体ヘリウムを用いない小型・軽量の高温超電導 3T-MRI マグネットを実現するためにコイル試作、最適設計、計測手法検討などを行った。1/2 サイズアクティブシールド型 3T が製作完了し、冷却・励磁試験、磁場安定性、磁場均一度など評価し、イメージング試験にて MRI 超電導マグネットとしての実証を行う。

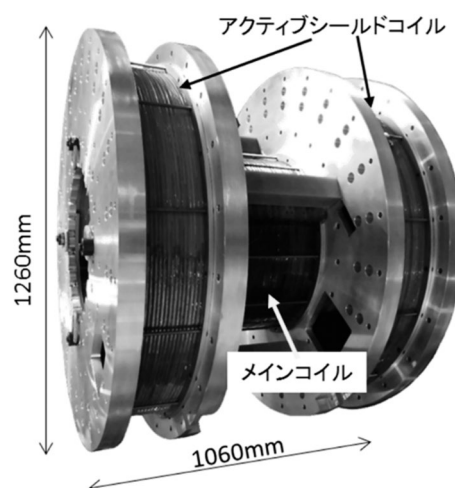


Fig.1 Photograph of half-size REBCO superconducting coil for MRI with active shield coils.

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.76
2. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.1
3. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.90
4. H. Miura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) 3A-a06
5. M.Kanamaru, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) P.92
6. S. Kitada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) 3A-a07
7. T. Kiss, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) 3A-a09
8. L. Wei, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 98 (2019) 3A-a08

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (III-2) ～1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの開発～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (III-2) -Development status of a half-size 3T magnet-

三浦 英明, 松田 哲也, 野村 航大, 江口 諒, 森田 友輔, 大竹 俊輔,
井上 達也, 田邊 肇, 横山 彰一, 佐藤 伸治 (三菱電機)

MIURA Hideaki, MATSUDA Tetsuya, NOMURA Kota, EGUCHI Ryo, MORITA Yusuke, OTAKE Shunsuke,
INOUE Tatsuya, TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, SATO Shinji (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: Miura.Hideaki@dx.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

我々は NEDO プロジェクトにて、液体ヘリウムを必要としない MRI マグネットを実用化するための研究開発を実施している。このプロジェクトの目標は、高温超電導マグネットによる 3T イメージングの実証である。三菱電機では、3T イメージング実証用の 1/2 サイズアクティブシールド型 3T 高温超電導マグネットを製作している[1]。本報では、高温超電導コイルの開発状況および高温超電導マグネットの製作状況について報告する。

2. 高温超電導コイル試作

高温超電導コイルには銅メッキが施された REBCO 線材を使用し、コイル形状は製作性の観点からシングルパンケーキ形状とした。1/2 サイズ 3T マグネットには、 $\phi 560\text{mm}$ の主コイルおよび $\phi 1200\text{mm}$ のシールドコイルが合計 200 枚以上必要である。コイル製作段階での臨界電流特性を確認するため、液体窒素浸漬冷却下の $I-V$ 特性を取得した。コイルの良品・不良品の判定は、臨界電流通電時のコイル電圧が 0.5mV 以下であることとした。その結果、良品率は約 80%であった。現在、劣化要因を調査するため、劣化部位を特定し、微細構造分析を実施している。

3. 高温超電導コイルの劣化長評価

臨界電流値が設計値以下であるコイルの $I-V$ 特性から、超電導層の劣化状態について考察した。コイルの臨界電流特性評価には、四端子で $I-V$ 特性を取得する通電法や、外部磁場印加による捕捉磁界から臨界電流特性を算出する磁化法などが挙げられる。我々は、通電法によりコイルの臨界電流特性を取得した。Fig.1 に 2 種類の代表的な劣化したコイルの $I-V$ 特性を示す(ただし、誘導電圧を除く)。コイル A は、通電開始とともに抵抗が出ている。これは、常に常電導層(銅メッキ層)に電流が流れており、線材幅方向に超電導層が破壊されていることを示唆している。コイル B は、約 25A まで抵抗がゼロ、25A～60A 間は線型に抵抗が増加、60A 以上は非線形に抵抗が増加した。これは、線材幅方向の超電導層が一部破壊されていることで、臨界電流が 25A 程度となり、それ以上の電流通電時は常電導層へ分流していると考えられる。

次に試験結果から超電導層の劣化長を検討した。使用した REBCO 線材は、線材厚 0.13mm 、線材幅 4mm 、銅メッキ厚 $20\mu\text{m}$ である。77K における一般的な銅の比抵抗は $2 \times 10^{-9}\Omega\text{m}$ であることから、超電導層の劣化長を計算した。Fig.1 のコイル A およびコイル B の常電導部の抵抗は $10 \sim 20\mu\Omega$ であることから、超電導層の劣化長は約 1mm であることがわかった。一方、磁化法による検討では m オーダーの劣化が見られることがわかった[2]。以上の結果から、線材幅端面に部分劣化が多く存在し、一部の超電導層が線材幅方向に破壊されているのではないかと考えられる。

4. 高温超電導マグネット製作

高温超電導マグネット製作では、高磁場均一度 ($2\text{ppm}@250\text{mmDSV}$) を達成するため、コイル積層時の製作誤差

を 0.5mm 以下とした。径方向の製作誤差を抑制するために、Fig.2 に示す位置決め治具を使用し、軸方向の製作誤差を抑制するために、コイル間に層間スペーサを挿入した。コイル積層作業完了後、コイル間の接続作業を実施した。今後、主コイル群およびシールドコイル群の一体化作業を完了させ、クライオスタットへの組み込み作業、真空引き、冷却を実施する。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

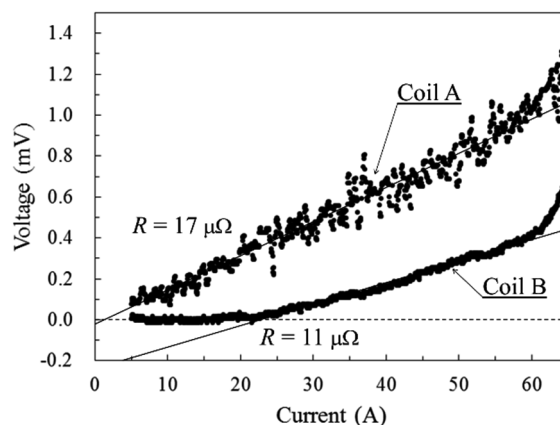


Fig.1 $I-V$ curves of the REBCO coils including degradation of superconducting characteristics.

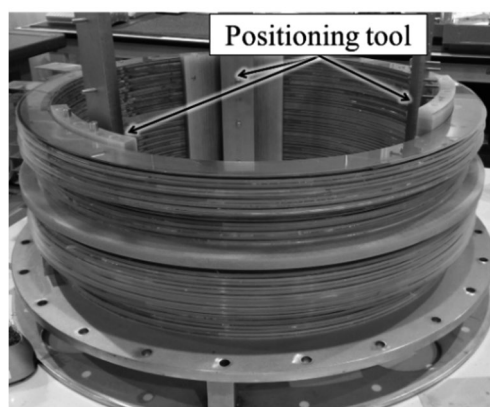


Fig. 2 Stacking operation of single-pancake coils.

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 97 (2018), p.90
2. T. Kiss, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 98 (2019), 3A-a09

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅲ-3)

～磁場補正用微小電流電源を用いた磁場安定性向上フィードフォワード制御の検討～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (III-3)

-Feed forward control of small trimming current superimposed on exciting current for stable magnetic field-

北田 悟史, 坂本 龍平, 白井 康之(京都大学); 横山 彰一(三菱電機)

KITADA Satoshi, SAKAMOTO Ryuhei, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto University); YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Co.)

E-mail: kitada.satoshi.34z@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

現在普及している低温超電導(LTS) MRI は、冷却の際に大量の液体ヘリウムを使用しているが、液体ヘリウムは希少、かつ高価であり、近年供給リスクが高まっている。そのため、ヘリウムフリーで運転可能な高温超電導(HTS) MRI マグネットの開発が望まれている。ここで、MRI で鮮明な画像を得るためには高安定な磁場が必要だが、HTS-MRI マグネットには遮蔽電流によって、長い時定数を持つ磁場変動が生じてしまうという課題が存在する。遮蔽電流とは、励消磁でのマグネットの磁束がテープ線材面を横切ること誘導される電流であり、これが励磁終了後も時間とともに減衰するために、磁場も時間とともに変化してしまう。

本稿では、主励磁電源に小容量の磁場補正微小電流電源を並列に接続し、主電流に μA オーダーの微小磁場補正電流を重畳させることで、磁場安定性を向上させることを提案し、実際に HTS-MRI マグネットを実験する前段階として、LTS-MRI マグネットを用いた磁場安定度の評価実験を行った。

2. 実験概要

まず、LTS-MRI マグネット(114H) のフリーラン実験をもとに、電力系統瞬時値解析プログラムXTAPを用いて実験回路を模擬し、予め微小電流電源による制御補正電流量を求めた。

実験は、LTSマグネットを、1Aのオーバーシュート励磁法を用いて、0.07A/secの掃引速度で224.3Aに励磁した。主励磁電源による電流が一定になった後、予め求めた電流制御量を用いたフィードフォワード制御で微小電流を重畳させ、コイル中心の磁場を約3時間測定した。実験回路を Fig.1 に示す。

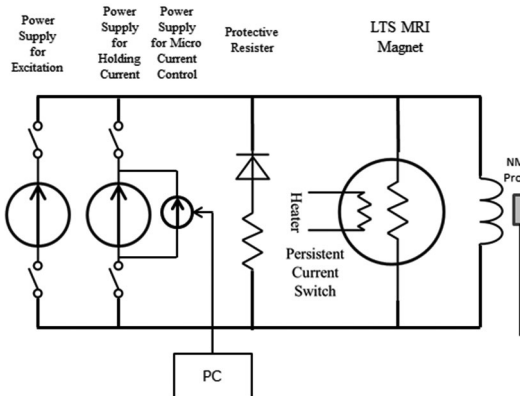


Fig.1 Circuit diagram of LTS-MRI magnet test

3. 実験結果と考察

Fig.2 に、1.5T 励磁終了後のコイル中心の磁場変動を、フリーラン(微小電流制御無し)と微小電流制御有りの場合を比較して示す。さらにこれを拡大して、励磁終了後およそ1時間の磁場変動について、Fig.3にフリーランの場合、Fig.4に電流制御時の場合をそれぞれ示す。制御を行った結果、フリーランに比べ、磁場変動を約0.08倍にまで抑制することができ、イメージングに必要とされる1ppm/hour以下の変動を達成できた。

4. まとめ

励磁パターンが固定されれば、遮蔽電流の磁場変動への影響もほぼ予測できるので、補正電流値を予め決定し、小容量の電源を追加することで磁場安定化が図れることを示した。今後 HTS-MRI マグネットに適用して実証する予定である。

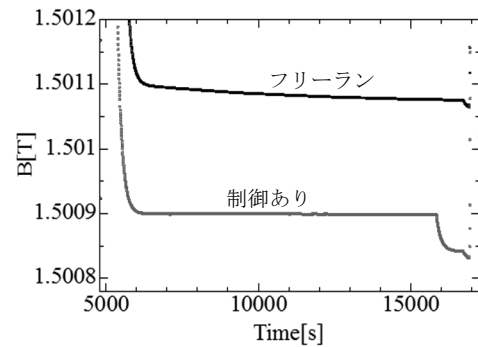


Fig.2 Magnetic field at the Coil center

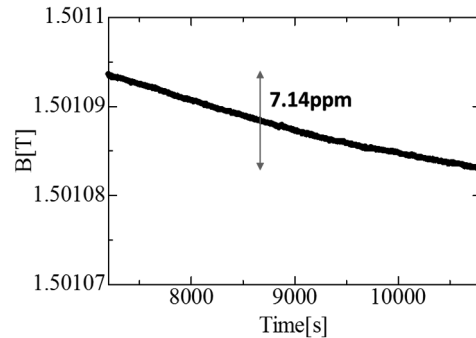


Fig.3 Magnetic field without current control

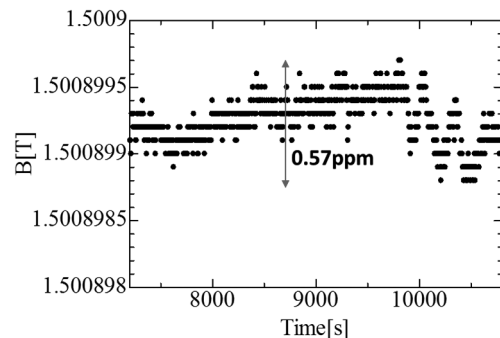


Fig.4 Magnetic field with current control

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

[1] M. Yoshikawa, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 3 (2016) 4401105

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発(Ⅲ-4) ～線電流近似と有限要素法を連携した 3 T ホールボディマグネット の最適化設計～

Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (III-5) –Optimal design of a 3 T whole body magnet by using line current approximation and finite element method –

魏 亮亮, 山田 祥子, 趙 珈卉, 中村 武恒, 西野 竜平 (京大); 松田 哲也, 横山 彰一 (三菱電機)
WEI Liangliang, YAMADA Shoko, ZHAO Jiahui, NAKAMURA Taketsune, NISHINO Ryohei (Kyoto Univ.);
MATSUDA Tetsuya, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)
E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は, MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステムの研究開発[1]の一環として, 全身 3T-MRI 用高温超電導コイルの最適化設計に関する研究開発を実施している。本研究では, コイルの運転温度も変数とした最適化設計コードの開発を行っている[2]。一方で, 上記設計では線電流近似を用いているが, 同近似では線材断面内電流分布が考慮されておらず, その空間磁場均一度に与える影響が明らかでない。

本講演では, まず 3 T ホールボディマグネットを対象として, 上記線電流近似を用いた最適化設計を実施した。そして, 設計したコイルの 3 次元有限要素法モデルを作成し, 空間磁場分布の相違を検討したので報告する。

2. 解析方法

前報[2]で作成した 3 T ホールボディマグネットの諸元を対象として, まず線電流近似を用いた最適化設計を実施した。その際, 新たに免疫遺伝アルゴリズムを導入し, 収束性の改善ならびに設計時間の短縮を図った。

線電流近似による設計後, 同コイルを 3 次元有限要素法モデルとして線材断面構造を含めて忠実に再現して, 正確な空間磁場分布を評価した。

3. 解析結果と考察

Fig. 1には, 前回設計したコイル[2]を対象として, 線材の断面中心1点に線電流(I)を印加した場合(同図(a))と幅方向に19分割して各々 $I/19$ を印加した場合(同図(b))のエラー磁場分布を示す。同図に示すように, 両者のエラー磁場に相違は殆ど無く, 本研究では簡単のため線材断面1点のみに通電する線電流近似を採用した。Fig. 2には, 線電流近似による最適化設計結果の一例を示す。同図では, 主コイルの形状は固定し, 補正コイルのみを変数としている。同図の 500 mm 球における磁場均一度は 2.03 ppm であった。また Fig. 3には, Fig. 2 のコイルを有限要素法で再現した磁場分布の解析結果を示す。同図の中心磁場は 2.89602 T であり, また磁場均一度は 15.34 ppm であった。一般に, 線電流近似に比較して有限要素法の磁場解析精度が高いと考えられる。上記から, 線電流近似に比較して有限要素法の磁場均一度が低下していることから, コイル設計に際してはこのことも考慮する必要があると考えられる。その他, 有限要素法における線材断面のメッシュ数がコイルボア内空間磁場分布に与える影響の検討結果など, 詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高温超電導実用化促進技術開発」のうち「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」により委託・支援を受け実施したものである。

参考文献

1. S. Yokoyama, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 98, 3A-a05 (2019)
2. S. Yamada, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 96, 1A-a04 (2018)

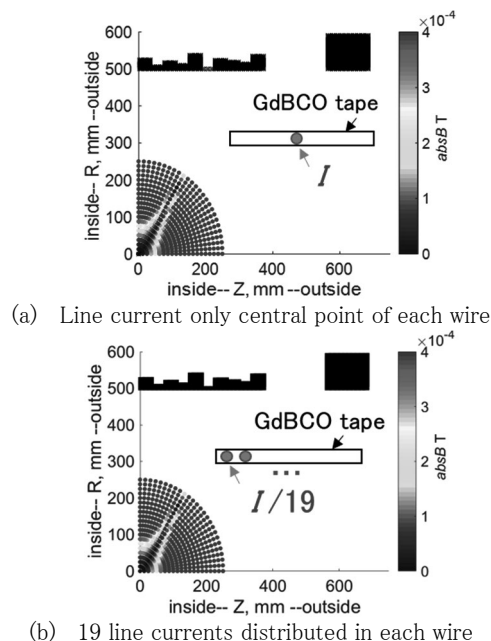


Fig. 1 Error magnetic field contours of already reported 3 T whole body magnet [2].

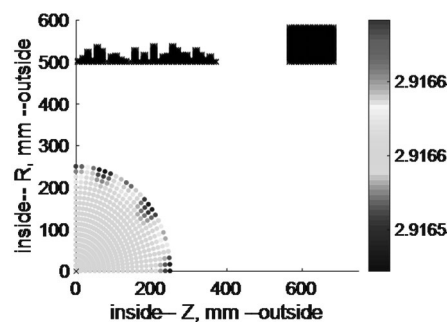


Fig. 2 Optimal design result of a 3 T whole body magnet.

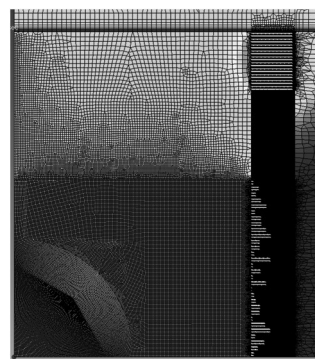


Fig. 3 FEM analysis result of 3 T whole body magnet designed from line current approximation (Fig. 2).

MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (Ⅲ-5) ～大口徑 REBCO パンケーキコイルの欠陥可視化に関する検討～ Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI (III-5) – Visualization of local defects in large bore REBCO pancake coils –

木須 隆暢, 東川 甲平, 太田 省吾, 財部 祐輔, 今村 和孝, 鈴木 匠 (九大);
 三浦 英明, 横山 彰一 (三菱電機)

KISS Takanobu, HIGASHIKAWA Kohei, OOTA Shogo, TAKARABE Yusuke, IMAMURA Kazutaka,
 SUZUKI Takumi (Kyushu Univ.); MIURA Hideaki, YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric)

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導テープ線材を用いた MRI マグネットシステムの構築において、基本構成要素となるパンケーキコイルの信頼性の高い巻線技術の確立と歩留まり率の向上は喫緊の課題となっている。しかしながら、コイル化の際に時折観測される n 値の低下など、特性劣化のメカニズムは未だ十分に解明されていない。本研究では、昨年度報告した積層導体内の局所欠陥可視化技術[1]を更に高度化し、大型コイルへの適用について検討すると共に、1/2 サイズ 3T-MRI 用の大口徑 REBCO シールドコイルの特性評価を行った。

2. 実験

今回の測定対象のコイルは大口徑であるため、コイルを分割してコイル片ごとに測定の後、コイルの全体像を再構成した。本測定では、着磁したコイル表面の磁場分布を磁気顕微鏡により計測し、空間分布の乱れより欠陥位置を可視化している[1]。

3. 実験結果及び考察

コイル全体像を構成した結果を Fig. 1 に示す。スペースの都合上 4 つのセクションに分けて表示する。コイル巻線内の層に沿って円弧状の軌跡として I_c 低下 (欠陥) 部位が確認できる。また、前述の通り、本測定ではコイルを分割し、複数回に分けて独立に計測した結果をまとめたものであるが、コイル片の結合部位において、筋状の欠陥は連続的に繋がっていることから、欠陥位置の検出結果の再現性を

を確認出来る。すなわち、独立した計測において検出した欠陥位置は再現している。なお、コイルの継ぎ目に観察されるノッチ状の切れ込みは、観測の際の走査領域の制限によって、計測データが得られていないことに起因しており、コイルの特性に起因するものではない。

今回得られた観測結果は、欠陥生成の原因について次のような重要な知見を与えるものである。

1) 素線の局所 I_c 低下 (欠陥) 位置は周方向にある程度の距離を有している。

2) 複数の巻き線の層において欠陥が観測される。

以上の結果は、通電法によって検知される通電 I_c の顕著な低下に至る以前に、素線端部における劣化が生じている事を示唆している。今後、局所的な組織構造と I_c 低下部位とのより詳細な対応の調査によって、劣化メカニズムに対する知見とその対策に対する方策が得られるものと期待できる。本手法は、通常の計測技術では困難な欠陥位置の特定を高空間分解能で可能とするものであり、パンケーキコイル製造における電流制限因子の解明ならびに歩留まり向上の鍵となる計測評価手法として期待できる。

謝辞 本研究の一部は、NEDO「高温超電導実用化促進技術開発」(16100554-0)による支援を得て実施したものである。

参考文献

[1] 木須ほか、2018 年度春季低温工学・超電導学会、1A-a06、2018 年 5 月

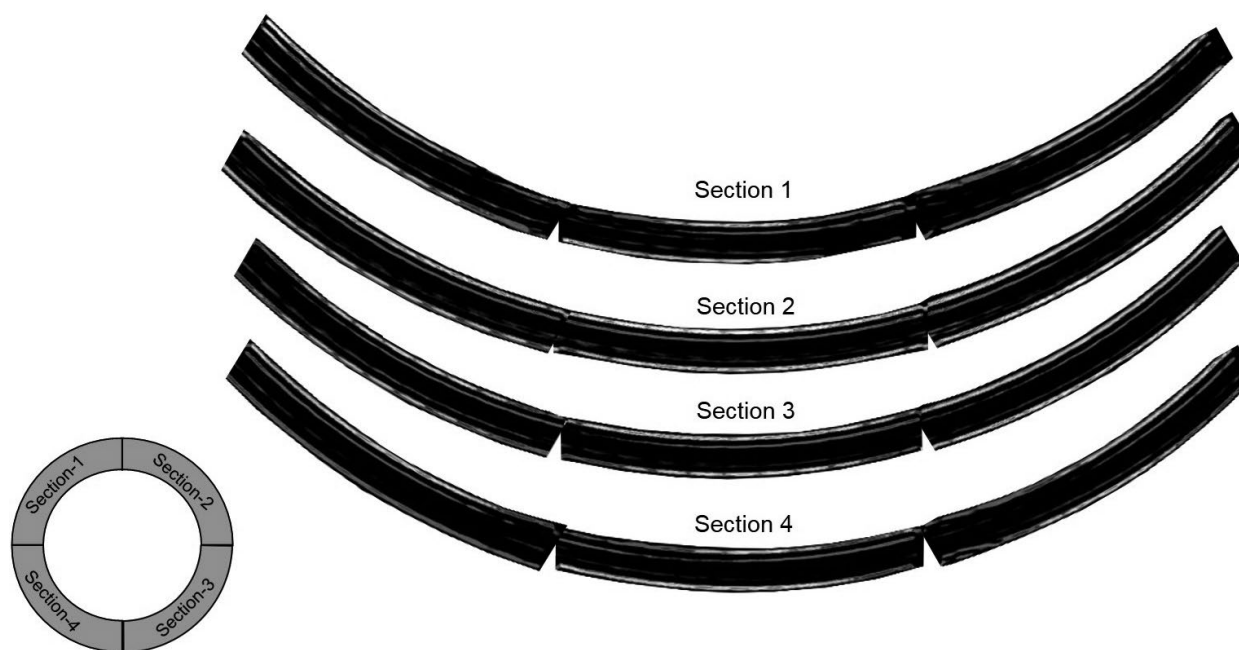


Fig. 1 Magnetic microscopy visualizing local defects in a large bore shield coil in a 1/2 size MRI magnet system.

MRI 磁石を用いた超高均一度シミングの可能性検討

Discussions on possibility of high accuracy shimming operation for ultra-homogeneity on MRI magnet

阿部充志, 佐々木憲一, 山口博史, 荻津透, 下村浩一郎, 三部勉, 齊藤直人 (高エネ研); 田中陶冶 (東大); 大金千織, 齋藤真慶, 杉田萌, 柳井京輔, 飯沼裕美 (茨城大学)

M. Abe, K. Sasaki, H. Yamaguchi, T. Ogitsu, K. Shimomura, T. Mibe, N. Saito (KEK); T. Tanaka (Univ. Tokyo); C. Oogane, M. Saito, M. Sugita, K. Yanai, H. Inuma, (Ibrakai Univ.)

E-mail: abemk@post.kek.jp

1. はじめに

高エネ研では、ミュオン磁気・電気モーメントを正確に計測する g-2/EDM 計測実験、ミュオンビームの超微細構造を精密にマイクロ波分光する MuSEUM 実験が、計画されている[1]。後者ではすでにゼロ磁場中の実験が進行中で、今後、1.70T の高磁場中実験を行う。共に、極めて精度の良い磁場が要求される。前者では、半径 33.3cm で幅 3.0cm 高さ 10.0cm の円筒領域で 3.0T±0.1ppm 以内の磁場振幅(均一度 0.2ppm)、後者では実験領域(30cm 長・20cm 幅の回転体)で 0.5ppm(1.7T)以下で、通常の全身診断用 MRI 磁石より一桁良好な均一度である。超高均一度を目指すには、磁石中の起磁力(コイル)配置、および、設置時に周囲環境からの誤差磁場などを補正する磁場シミングを検討する。今回、後者について、MuSEUM 実験用に用意している磁石(全身 MRI 用 NbTi 超伝導磁石)で超高均一度を試みた結果を述べる。

2. シミング計算と作業手順

良好な均一度の能力を持つ起磁力配置設計の磁石でも、設置直後では数ガウス以上の誤差磁場を持ち、シミング作業を必要とする。今回は粗いシミング済みで、直径 30cm 球面(30cmDSS: 30cm Diameter Spherical Surface)で 5.31ppm (peak-to-peak 値, 以下同じ)から超高均一度を目指した。受動的シミング(磁化鉄片の磁気モーメント(MM)利用)である。精度よい MM 配置の算出(シミング計算)が重要で、打ち切り特異値分解(TSVD)正則化を利用した手法[2, 3]を使って、下記の作業を行った。

- (i) フィールドカメラで 50cmDSS の磁場分布 B^{MS} 計測。
- (ii) 磁場評価点(MFEP: Magnetic Field Evaluation Point)へ計測磁場から内挿。ここでは 30cmDSS に MFEP を配置。
- (iii) 目標磁場強度 B^{TG} を決め、誤差磁場 B^{ER} を算出。

$$B_i^{ER} = B^{TG} - B_i^{MS}, \quad (1)$$

ここで、下添え字 i は i 番目磁場評価点を示す。

- (iv) 誤差磁場を補正する磁気モーメント配置 M の関係式から TSVD 利用で逆問題解(SVD 固有分布 k について加算)。

$$B^{ER} = AM, \rightarrow \text{逆問題解 } M = \sum (v_k u_k^T / \lambda_k) B^{ER}, \quad (2)$$

を算出。ここで行列 A の要素 A_{ij} は j 番目 MM が、 i 番目磁場計測点に作る単位 MM(Am²)当たりの軸方向磁場(B_z)強度である。各 M_j には配置容量制限を考慮する。

- (v) 各 M_j を飽和磁化(1cc 鉄=1.711Am²)鉄片に換算。最小鉄片(3cm×4cm×0.005cm=0.06cc)単位の離散化を行う。
- (vi) 計測磁場からの内挿磁場に鉄片磁場を加算し、シミング後の磁場分布・到達可能均一度を推定し、目標と比較する。

計算結果が仕様の均一度より悪い場合、固有モード数 M_D 、目標磁場 B^{TG} を変更して、シミング計算をやり直す。問題なければ、鉄片配置と磁場計測を行い、磁場計測を行い、均一度を確認する。個々の鉄片にも量的な誤差があり、一回の作業では計算通りの均一度は難しく、繰り返し作業を行う。

3. 検討内容と結果

以上の計算・作業で超高均一度を実現する場合、問題点として、(a) 内挿計算の妥当性、(b) 鉄量離散化の影響、(c) 起磁力配置の実力、が想定され、これらを検討した。

内挿計算の妥当性確認のため、鉄片 3cc を配置し、その MM による磁場を、計算値と計測・内挿した値と比較した。その結果、28ppm(50cmDSS)の磁場分布が有っても、30cmDSS では 0.13ppm(±0.1μT)以内の誤差で再現された。良くシミングされた磁場では、さらに精度良く内挿・再現されると言える。

鉄量離散化の影響把握のために、到達可能均一度の B^{TG} 依存性を計算した。その結果を Fig.1 に示す。数値は、鉄量最小単位であり、今回は 0.06cc である。同図に最小単位を小さくした場合も示した。0.06cc 単位では鉄量離散化の影響は大きく、到達可能均一度は劣化する。しかし、0.02cc 以下の最小単位であれば、超高均一度が余裕を持って達成できる。極小さな単位とした場合の到達均一度も示した。0.27ppm が可能である。この均一度は磁石中で離散配置の起磁力による均一度の限界と考えている。今回(最小単位 0.06cc)は最良(0.39ppm)となる $B^{TG} = 1.69996893T$ でシミング作業を行った。その結果、得られた磁場分布(強度等高線)を Fig.2 に示す。0.45ppm(30cmDSS)の超高均一度が計測された。しかし、計測誤差、長時間磁場変動などの可能性を考えた場合、余裕を持って超高均一度を実現するために、シム片単位の小量化が有効であると考えている。

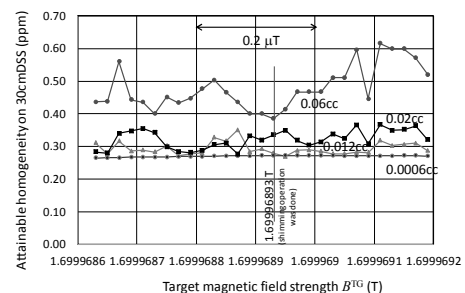


Fig. 1. Predicted homogeneities on 30cm diameter spherical surface. Target magnetic field is scanned for four minimum iron piece units.

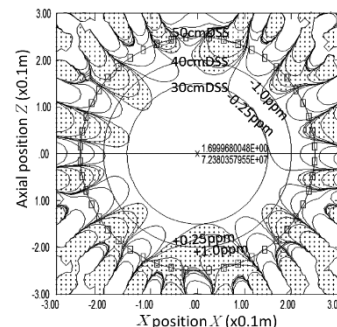


Fig. 2. Predicted residual magnetic field distribution on a X-Z plane. Only inside of 50cmDSS is available. Contours are at ±0.25, ±1.0, ±5.0, ±25.0 ppm residuals.

参考文献

- [1] <http://g-2.kek.jp/portal/index.html> など
- [2] M. Abe, Magn. Reason. Med. Sci. Vol. 16, (2017) p. 284.
- [3] M. Abe, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 27, (2017) p.4400812.

永久電流 HTS 磁石を目指した DI-BSCCO 線材間の超伝導接合

Superconducting joints between DI-BSCCO tapes towards persistent current HTS magnets

武田 泰明(東大院工); 田中 智之, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大); 北口 仁(NIMS);
 松竹 優一, 谷貝 剛(上智大); 末富 佑(千葉大); 柳澤 吉紀(理研); 中島 隆芳, 小林 慎一, 加藤 武志(住友電工)
 TAKEDA Yasuaki (The Univ. of Tokyo); TANAKA Tomoyuki, MOTOKI Takanori,
 SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama gakuin Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);
 MATSUTAKE Yuichi, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);
 NAKASHIMA Takayoshi, KOBAYASHI Shin-ichi, KATO Takeshi (Sumitomo Electric Industries)
 E-mail: ytakeda@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

Ag シース(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y [Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO)[1] は、高い臨界電流特性や優れた量産性[2]から、送電ケーブルや超伝導磁石など様々な用途に応用されている[3, 4]。しかし、線材間の高 I_c 超伝導接合技術は未開発であり、永久電流回路を備えた Bi2223 線材による超伝導磁石の設計・製作は困難と考えられてきた。

一方、我々は最近、高 J_c 特性 Bi2223 多結晶厚膜の作製指針[5]を活用した、DI-BSCCO 線材間の超伝導接合技術の開発を報告している[6, 7]。この技術は、DI-BSCCO 線材の超伝導フィラメント間に、 J_c 特性に優れる Bi2223 多結晶接合中間層を形成させることで超伝導接合を達成するものである。接合 I_c の向上には傾斜した面での研磨により多数のフィラメントを大きな面積で露出させることが有効で、これまでに短尺、直線状の接合試料で、 $10^{-9} \Omega$ 基準で $I_c > 400 \text{ A}$ (4.2 K, s.f.) を記録している。この技術を応用した永久電流 HTS 超伝導磁石を開発するためには、コイル端部の線材の接合に適した形状の「挿み合わせ」形状の接合手法の確立や、 $10^{-12} \Omega$ 級の低い接合抵抗の実現が必要である。以上を踏まえ本研究では、短尺線材間挿み合わせ接合の作製方法の確立および、小型コイルでの永久電流試験による低接合抵抗の実証を目指している。

2. 実験方法

挿み合わせ接合試料は、~15 cm 長の 2 本の DI-BSCCO 線材 [Type H, 121 芯, I_c (77 K, s.f.) > 170 A, ~4.5 mm^w × 0.25 mm^t] から作製した。線材の幅広面に対し 0.3–0.4° の傾斜角度で端部を研磨することで多数のフィラメントを露出させた。接合中間層である Bi2223 厚膜 (~50 μm^t) を、スラリーからデップコート法によるグリーンテープ作製を経て、一軸プレス・熱処理を行う手順[7]で露出したフィラメント間に形成し、接合試料とした。得られた試料に対して、微細組織を SEM により観察し、 I_c 特性を様々な温度・磁場条件のもとで直流四端子法により調べた。また、磁場は線材表面に平行に印加した。

小型シングルパンケーキコイルは DI-BSCCO Type HT-NX から作製した。その諸元を Table 1 に、外観を Fig. 1 に示す。

3. 結果と考察

Fig. 2 に、挿み合わせ接合試料の 77 K 自己磁場下での通電特性の一例を示した。挿み合わせ形状でも $I_{c(\text{joint})} > 50 \text{ A}$ が達成できることがわかった。両試料の接合面積は同程度であったが傾斜研磨角度が大きい方が I_c が高く、これは露出フィラメント数の増加に起因するものと考えている。当日は、様々な接合試料の I_c の温度・磁場依存性を報告する。

小型コイルでは、接合を可能とするための補強材の除去技術を確立した。今後、挿み合わせ接合をコイル端末線材に対して行い、77 K での永久電流試験を実施する予定である。

Table 1 Specification of a small Bi2223 coil.

Parameters	
Conductor	DI-BSCCO Type HT-NX
Conductor I_c (77 K, s.f.) before joining [A]	~193
Inner diameter [mm]	39.6
Outer diameter [mm]	46.4
Total turns	10
Packing factor	0.882
Total conductor length [m]	1.35
Self-inductance [μH]	6.89
Coil constant [mT/A]	0.292

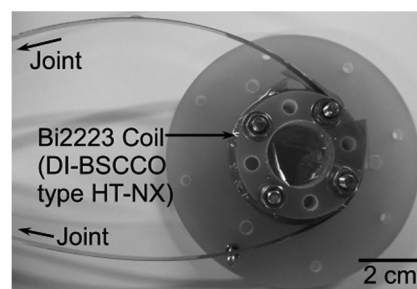


Fig. 1 Photograph of a Bi2223 single pancake coil.

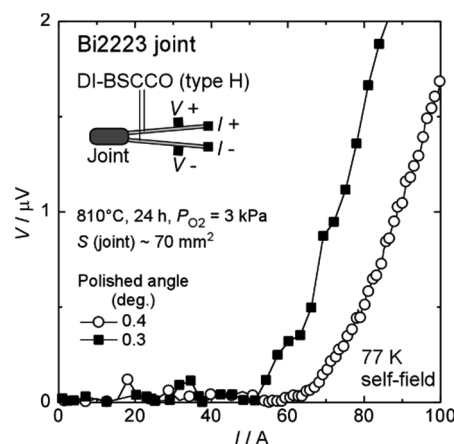


Fig. 2 $V-I$ curves for Bi2223 joint samples.

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2の支援を受けたものである。

参考文献

1. N. Ayai *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **97** (2008) 012112.
2. T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713–718.
3. K. Sato *et al.*, *JJAP* **51** (2012) 010006.
4. G. Nishijima *et al.*, *IEEE TAS* **26** (2016) 4303007.
5. Y. Takeda *et al.*, *SuST* **31** (2018) 074002.
6. Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **97** (2018) 4.
7. Y. Takeda *et al.*, *APEX* **12** (2019) 023003.

JIM 法による Bi2223 多芯線材間の超電導接合の微細組織

Microstructure of superconducting joint between multi-filamentary Bi2223 tapes fabricated by JIM method

金 新哲(室工大);加藤 丈晴, 横江 大作(JFCC);柳澤 吉紀(理研)

Xinzhe Jin (Muroran Institute of Technology); Kato Takeharu, Yokoe Daisaku (JFCC); Yoshinori Yanagisawa (RIKEN)

E-mail: shin_kin@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

Bi2223 線材間の超伝導接合について、Bi2223 相の分解溶解を利用した接合 (JIM) により 4.2 K で 170 A 以上の臨界電流が得られている[1, 2]。接合処理は 890°C でわずか 1 分程度でありながらもこのような性能が得られたことに対し、そのメカニズムを解明すべく、まず生成された物質と結晶配向について調べる必要がある。

2. 実験方法

線材は住友電工製の Ni 合金補強 Bi2223 多芯テープ線を使用した。77 K での臨界電流は 210 A 程度である。接合部の製作方法はこれまでと同様な方法 (890 °C で 1 min) である。装置は X 線回折装置と SEM を利用した。

3. 実験結果

Fig. 1 に SEM 測定結果を示す。Fig. 1(a) は部分的に接合されているサンプルであり、一部の Bi2223 が溶解して接合されていることが観察された。接合部の周りは Ag 層に囲まれていて空気に触れないような構造となっている。Fig. 1(b) は 4.2 K で臨界電流 177 A を測定されたサンプルの断面であり、接合界面が識別できず、十分な接合面積を有している。なお、EDX 測定結果は当日発表する予定である。

Fig. 2 は接合前後の XRD 測定結果であり、Bi2223 相はほぼ分解されて Bi2212 相に転移する。結晶配向については、00L 面のみ現れ、本来の配向をほぼ維持していると考えている。これは高い臨界電流を維持するに有効であり、実験評価において重要である。接合部から接合されていない部分までの物質の組成は加熱温度によって異なり、基本的に溶解しない Bi2223 が増加するが、線材長手方向で十分な接合長さを得るには Bi2212 の占有面積を増やす必要がある。

4. まとめ

JIM 法では界面が隙間なく十分に接合できることがわかった。接合部には Bi2212 相が現れ、かつ配向していることが観察された。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「高温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への社会実装」(JPMJMI17A2)、MEXT 卓越研究員事業(課題 ID: 16810210)、および JSPS 科研費 (JP18965778) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 金 新哲, 柳澤吉紀, 朴任中, 末富, 「高温超伝導線材の接続体および接続方法」, 特願 2018-184184, 2018.09.30
- [2] Xinzhe Jin, Yu Suetomi, Renzhong Piao, Yuichi Matsutake, Tsuyoshi Yagai, Hiroki Mochida, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda, "Superconducting joint between multi-filamentary $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ tapes based on incongruent melting for NMR and MRI applications", Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 035011

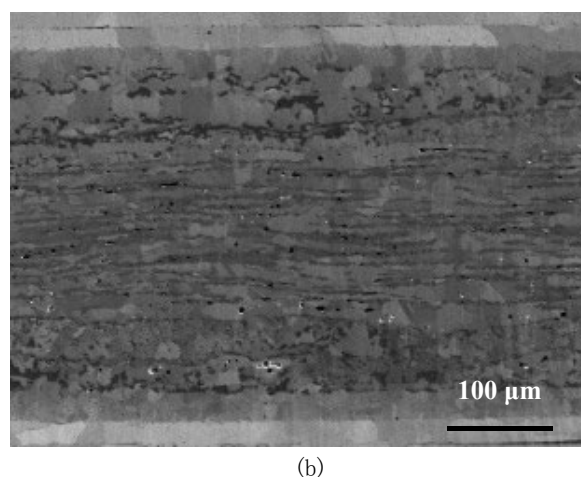
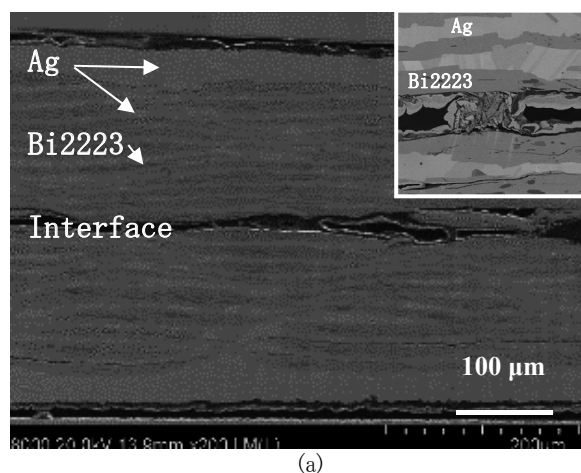


Fig. 1 SEM images of interfaces for (a) joining process and (b) after completion of joint.

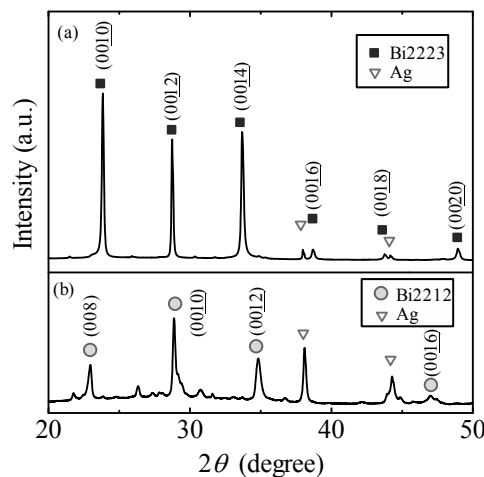


Fig. 2 XRD patterns (a) before and (b) after joint.

REBCO 線材間のヘテロ接合の微細構造

Microstructure of hetero junction between REBCO coated conductors

金 新哲(室工大);加藤 丈晴, 横江 大作(JFCC);柳澤 吉紀(理研)

Xinzhe Jin (Muroran Institute of Technology); Kato Takeharu, Yokoe Daisaku (JFCC); Yoshinori Yanagisawa (RIKEN)

E-mail: shin_kin@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材間に Yb123 シートなどの媒体を入れて、分解溶融により接合する CJMB 法[1, 2, 3]では、再現性良く超電導接合が可能である。しかし、接合原理はまだ十分解明されていない、今回は接合界面の構造と特性について調べた。

2. サンプルの作製方法

接合サンプル1はフジクラ製の Gd123 線材を使用した。媒体は Yb123 粉末を利用し、作製条件は温度 930°C で 1min である。接合サンプル 2 は住友電工製の Gd123 線と Yb123 多結晶バルクを用いて、上記と同じ焼成方法で作製した。

3. 実験結果

Fig. 1 はサンプル1の接合界面の断面写真である。Yb123 粉末は接合過程で粒間が接合され、Gd123 との界面にも接合される。下図は Gd123 との界面を示し、接合過程で液体となった CuO-BaCuO 化合物が界面に残っていることから、この化合物が Yb123-Gd123 間の接合に働くと考えている。また、黒色の部分は粒間の空洞を示し、接合後の酸素ドーブの加熱過程で酸素の通路になるので、短時間で酸素ドーブができると考えられる。臨界電流測定では、77 K で 7 A であった。

Fig. 2 はサンプル2の接合界面の写真である。多結晶バルクを使用した接合は粉末媒体の場合と異なって粒間がより多くつながっているが、多孔質の特徴は溶融分解してもある程度保持されている。このように、バルク内の接合面積が粉末媒体の場合と比べて大きくなっているが、臨界電流測定ではほぼ同じ 8 A を示していた。このようなことは、粉末媒体ですでに十分な界面面積が取れていることを示し、単位面積当たりの接合面積を増加させることより、全体の接合面積を増加させることが重要であることを説明している。

4. まとめ

Gd123 線材間の接合において、Yb123 媒体は粉末よりバルクで大きな接合面積が得られる。しかし、臨界電流では同程度を示すことから、単位面積当たりの接合面積を増加させることで臨界電流が改善されない可能性が高い。臨界電流を増加させるためには全体の接合面積を増加させることが望ましいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP18965778) と MEXT 卓越研究員事業 (課題 ID:16810210) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 金 新哲, 前田 秀明, 柳澤 吉紀, “高温超伝導線材の低抵抗接続体および接続方法”, PCT/JP2014/77966, 2014.10.22; 特願 2014-19034, 2014.02.04
- [2] 金 新哲, 前田 秀明, 柳澤 吉紀, “高温超伝導線材の接続体”, 特願 2017-165142, 2017.08.30
- [3] Xinzhe Jin, et al., “Microstructural Analysis of Superconducting Joint Fabricated Using CJMB Between Gd123-coated Conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. (in press)

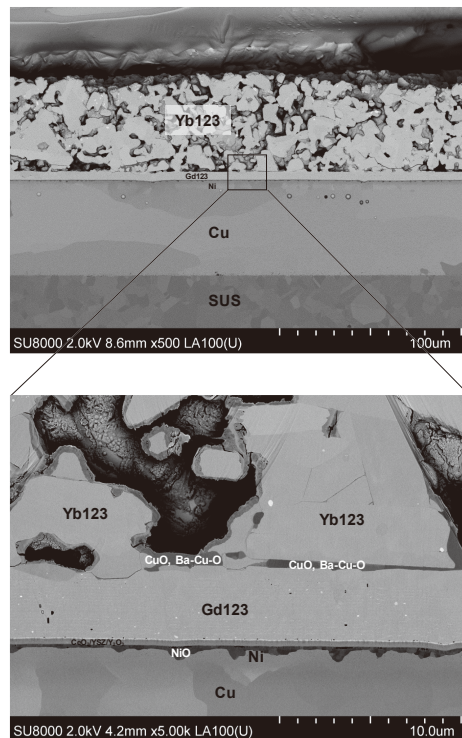


Fig. 1 SEM images for cross-section of sample 1.

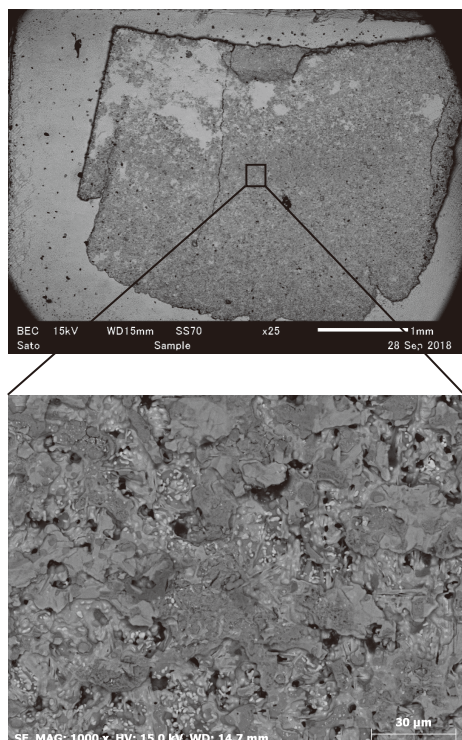


Fig. 2 SEM images for joint boundary of sample 2.

追加堆積膜を利用した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材接合体の微細組織観察

Microstructure observation of joint interface of $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors prepared by additionally deposited precursor layers

寺西 亮, 宮島友博, 佐藤幸生, 金子賢治 (九州大学); Valery Petrykin, Sergey Lee (SuperOx Japan); 松本明善 (物質・材料研究機構); 岡田達典, 淡路智 (東北大学)

TERANISHI Ryo, MIYAJIMA Tomohiro, SATO Yukio, KANEKO Kenji (Kyushu Univ.); PETRYKIN Valery, LEE Sergey (SuperOx Japan); MATSUMOTO Akiyoshi (NIMS); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: teranishi@zaiko.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (REBCO) 薄膜線材のマグネット機器への応用には、長尺化のための線材接合技術が求められている。接合部での電気抵抗を限りなく小さくするには超伝導層同士の接合が有望視されており、技術開発が進められている[1,2]。我々は、 GdBCO 線材の超伝導層上に前駆体を追加堆積し、それら2つを対向させて機械的圧力を印加して熱処理を施し、前駆体を結晶化しながら接合する手法を検討している[3,4]。接合プロセスを広く展開していくには、接合条件、接合体の通電性能、微細組織などの相関を調査し、メカニズムを考察していくことが重要である。そこで、本研究では接合体の微細組織を観察し、作製条件との相関を考察すること目的とした。

2. 実験方法

線材の GdBCO 層上に、パルスレーザー蒸着法にて GdBCO の前駆体を 573 K で追加堆積した。その後、これら試料2つを線材幅 6 mm、長さ 5 mm の領域で対向させて、約 8 MPa の機械的圧力を印加しながら 1093 K で 1.5 h 熱処理を施し、接合体を得た。熱処理後、得られた接合体の接合部を剥がし、光学顕微鏡にて試料表面を観察して接合部を選定し、その接合部の断面組織を透過型電子顕微鏡 (TEM) にて観察し、微細組織の情報を得た。

3. 結果と考察

Fig.1(a)に、前駆体膜の断面明視野 TEM 像を示す。下地の GdBCO 線材 (Base- GdBCO と表記) と追加堆積した前駆体との界面は不明瞭であり、観察した範囲内では空隙は観察されなかった。これらより、前駆体は GdBCO 層上に密着性良く堆積していることが分かった。前駆体の表面は凹凸を有しており、凹んだ部分は幅が 60 から 800 nm で深さが 90 から 420 nm、Base- GdBCO と前駆体の膜厚合計は平均で 2.3 μm であった。Fig.1(a)中の①から③の各箇所から取得した制限視野回折 (SAEDP) 像を Fig.1(b)に示す。Fig.1(b)①では③の Base- GdBCO に類似した像が得られ、c 軸配向した GdBCO の存在が示された。また、②からはハローパターンが示され、 GdBCO 以外に非晶質も存在していることが示された。

接合後の断面明視野 TEM 像を Fig. 2(a)に示す。接合界面には空隙が幅 300 から 500 nm、厚み 100 から 140 nm でいくつか観察されたが、それ以外は密着性良く接合していた。Base- GdBCO と前駆体由来の GdBCO の膜厚合計は平均で 2.1 μm で、接合前に比べて約 9%減少していた。また、接合界面には Fig.1(a)で観察されたオーダーの凹凸は確認されなかった。Fig.2(a)の①から③の各箇所から取得した SAEDP 像を Fig.2(b)に示す。Fig.2(b)①から③にてハローパターンは観察されなかったことから、接合熱処理によって前駆体の非晶質が結晶化したことが示された。また、Fig.2(a)①および③の領域では、c 軸方向以外に配向した GdBCO の存在も示された。

以上より、本条件にて使用した前駆体の追加堆積膜には GdBCO の他に非晶質が含まれていること、接合熱処理によって非晶質が結晶化して約 9%ほど体積収縮すること、また熱処理時の圧力印加によって前駆体表面に見られる凹凸が変形

して熱処理後には平坦化して密着性良く接合すること、などの知見が得られた。

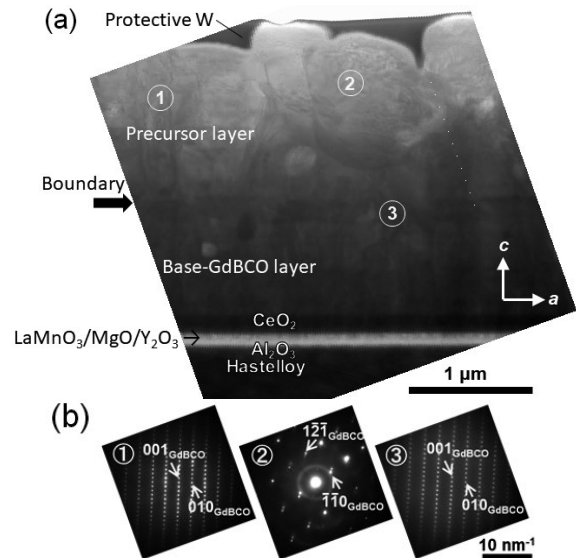


Fig. 1 Cross-sectional bright-field TEM image of precursor layer (a) and SAEDPs from three circular regions ① to ③ in figure 1(a).

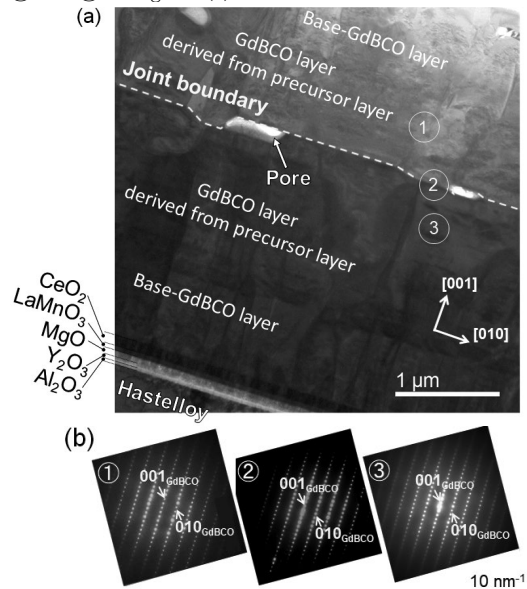


Fig. 2 Cross-sectional bright-field TEM image of the joint interface (a) and SAEDPs from three circular regions ① to ③ in figure 2(a).

参考文献

- [1]Y.J. Park et al., Supercond. Sci. Technol., 27 (2014) 85008.
- [2]K.Ohki et al., Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 11501.
- [3]T.Miyajima et al., J. J. Appl. Phys., 58 (2019) 050907.
- [4]T.Miyajima et al., J. J. Appl. Phys., 58 (2019) 050913.

Ex situ PIT 法による Ba-122 単芯線材の超伝導接続

Superconducting joints of ex situ PIT processed single-filamentary Ba-122 wires

戸叶 一正(NIMS); 菊池 章弘(NIMS); 松本 明善(NIMS); 熊倉浩明(NIMS); 北口 仁(NIMS)
 TOGANO Kazumasa(NIMS); KIKUCHI Akihiro(NIMS); MATSUMOTO Akiyoshi(NIMS);
 KUMAKURA Hiroaki(NIMS); KITAGUCHI Hitoshi(NIMS)
 E-mail: ktokano@khe.biglobe.ne.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体は、臨界温度 (T_c)、臨界磁界 (H_{c2}) が高く、また異方性 (γ) も小さいために、基礎研究のみならず実用面でも期待されている。中でも (Ba,K)Fe₂As₂、(Sr,As)Fe₂As₂ で代表される 122 系については、Powder-in tube (PIT) 法による線材化の研究が多く行われており、臨界電流密度 (J_c) は既に 10^5 A/cm² (4.2K, 10 T) の実用レベルを越えた値が報告された。しかし、超伝導マグネットに応用するためには線材同志の接続技術の開発が今後必要となってくる。122 系については、既にホットプレス[1]やコールドプレス[2]を用いた結果が報告されており、これらの研究では接続部の補強材として純銀が使われた。本研究では、Ag-Sn 合金を補強材として用いることによって、良好な結果が得られたので報告する。

2. 実験方法

まず通常の ex-situ PIT 法で外径 2 mm の銀被覆単芯線材を作製した。この Ag/Ba-122 線材の一端を斜めに切断した 2 本の短尺線を、予め準備した Ag-Sn 合金管(外径 3 mm、内径 2 mm)内で切断面が互いに接触するように挿入した後、圧延、プレスを通して接触面を機械的に密着させた(Fig. 1)。この接合を含む Ag-Sn/Ag/Ba-122 複合テープを 800-850°C の範囲で熱処理して試料とした。臨界電流 (I_c) の測定は超伝導マグネット中で四端子抵抗法によって行い、さらに断面組織を光学顕微鏡で観察した。

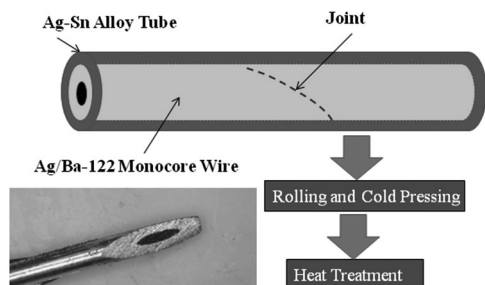


Fig.1 Fabrication process of the joint.

3. 結果および考察

純銀管の代わりに Ag-Sn 合金管を使うことにより、接合特性とその再現性が著しく改善されることが分かった。Fig. 2 は Ag-5 at%Sn 合金を使った場合の電圧-電流 ($V-I$) 特性を示す(熱処理温度; 825°C, 850°C)。いずれも比較的鋭い遷移を示す。この曲線から 1μ V/cm の基準で求めた臨界電流-磁場 (I_c-H) 特性も Fig. 2 に示した。825°C 試料の 4.2K, 10 T の I_c は 21 A で I_c に換算すると 1.7×10^4 A/cm² に相当する。

Fig. 3 には長手方向の断面組織を示した。接触面の焼結反応が進行している部分と、クラックが残っている部分が混在している。今後は接触面の反応をさらに改善していくことが課題である。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものである。

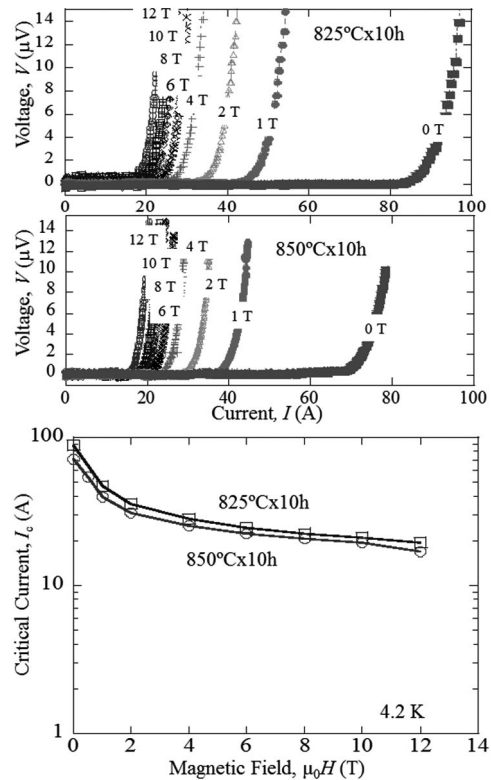


Fig.2 $V-I$ curves and I_c-H curves of the superconducting joint made by using Ag-5 at%Sn alloy outer sheath

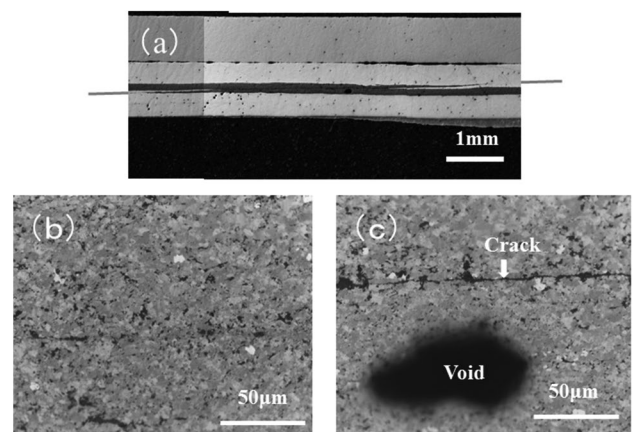


Fig.3 Microstructures of the longitudinal cross section (a) lower magnification; (b) and (c) higher magnification of the well and poorly connected parts, respectively

参考文献

1. Y. Zu et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 32(2019) 024002
2. S. Imai et al.: Abstract of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.144

超伝導線材接続抵抗評価装置の開発(3) Development of a joint resistance evaluation system (3)

小林 賢介, 内田 公, 天谷 宗徳, 北口 仁(NIMS)

KOBAYASHI Kensuke, UCHIDA Akira, AMAYA Munenori, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: kobayashi.kensuke@nims.go.jp

1. はじめに

超伝導線材の応用展開において、線材同士の超伝導接続技術を確立することは非常に重要である。近年、高温超伝導線材同士の接手法も提案され、世界中で盛んに研究開発が行われている。しかし、接続抵抗は通常 10^{-9} Ω 以下であることが多いため、電気抵抗測定に一般的に用いられる 4 端子法では正確な評価が困難である。接続抵抗の測定には、接続部を含む閉回路を作製し、回路に流れる電流の減衰によって評価する減衰法がよく用いられているが、温度・磁場などの様々なパラメーターに対する評価手法は確立されていない。我々は、超伝導接続試料に特化した減衰法を用いた評価装置の開発を行っており、各種パラメーターに対して迅速かつ高精度に評価可能であることを前回の学会で報告した[1, 2]。今回は、装置の性能限界確認のために行った NbTi 超伝導接続試料の評価試験結果について主に報告する。

2. 実験方法

実験は、産業技術総合研究所(AIST)の古瀬氏、物質・材料研究機構(NIMS)の伴野氏から提供を受けた両端をはんだで接合した NbTi 超伝導接合一回巻き試料を用いて行った。線材直近に配置したホールセンサーで電流減衰を計測し、フィッティングによって回路抵抗を評価した。NbTi の超伝導臨界温度 T_c 以下で線材の抵抗は無視できるため、回路抵抗は接続抵抗と等しいとみなせる。試料接合部の到達最低温度は 3 K 程度であるが、既報の結果と比較するため、4.2 K で実験を行った。また、接合部の臨界電流 I_c を評価するため、誘導電流依存性測定も行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に 4.2 K での各誘導電流における NIMS NbTi 試料減衰測定結果を示す。テープ線材で校正した値であるため、試料に誘導された電流は参考値だが、最大 300 A でも I_c を超えたと思われる挙動は見られなかった。130 A 以上で初期減衰が見られるが、1 時間後ぐらいにはほぼ横ばいになった。1 時間程度の測定データに対してフィッティングを行った結果、 10^{-14} Ω のオーダーの抵抗が得られた。測定完了後、試料温度を昇温すると、 ~ 8.9 K で試料電流は消失した。接続に用いたはんだの T_c とも概ね一致するため、この温度が接続部の T_c に相当すると考えられる。次に、誘導電流が接続部 I_c を超えた場合の挙動を確認するため、 T_c に近い 7.5 K で測定を行った。Fig.2 に測定結果を示す。誘導電流 33 A の振舞いは 4.2 K と同様だったが、130 A 以上では電流が急激に減衰し、およそ 50 A 程度で横ばいになった。この挙動は、7.5 K で永久電流として通電可能な電流値が 50 A 程度であり、この値を超過した誘導電流が常伝導状態の抵抗によって急激に減衰したと考えられる。通常の I-V 測定で得られる I_c は電界基準 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ などで定義しているため一概には比較できないが、線材もしくは接続部の I_c に相当すると考えられる。これらの結果から、本装置を用いて 10^{-14} Ω 以下の接続抵抗を 1 時間程度の測定で評価可能であり、また、接続部の T_c および任意の温度における試料の I_c に相当する物理量も評価可能であることが分かった。今後、様々な線材における試料誘導電流の定量性を高めるとともに、通常の I-V 測定から得られる I_c との整合性についても検討を行う予定である。

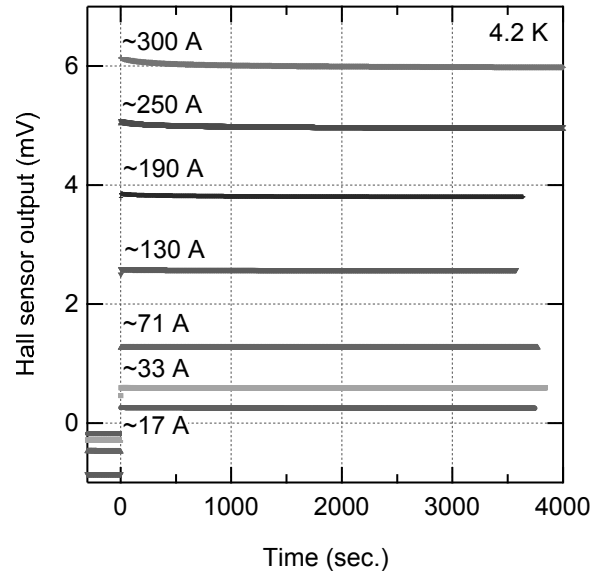


Fig. 1 Decay curves of various induction currents at 4.2 K. Induction currents are reference values.

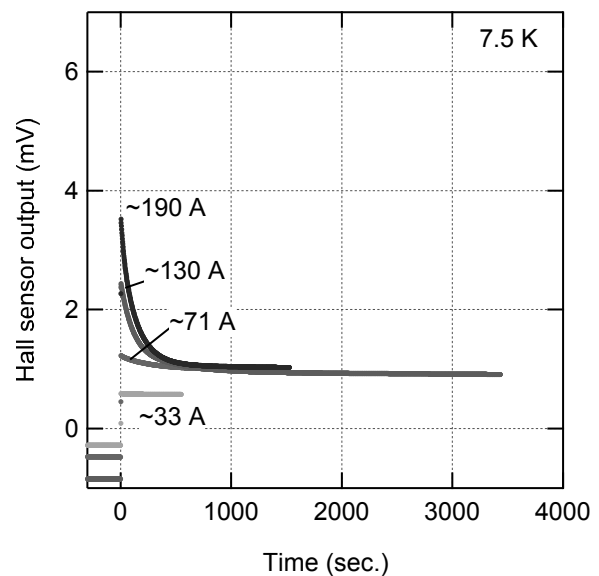


Fig. 2 Decay curves of various induction currents at 7.5 K. Induction currents are reference values.

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)事業の委託業務[16100555-0]とJST 未来社会創造事業[JPMJMI17A2]によって得られたものです。

参考文献

- [1] 内田他, 2018 年度秋季低温工学・超電導学会 1A-p09.
- [2] 小林他, 2018 年度秋季低温工学・超電導学会 1A-p10.

高温超伝導線材のインジウム挿入超音波接合： 接合性能のホーン・接合時間依存性評価

Indium-inserted ultrasonic welding of high-temperature superconducting tapes: horn and joining time dependence on joining performance

伊藤 悟, 早坂 遼一路, 佐藤 裕, 橋爪 秀利 (東北大学)

ITO Satoshi, HAYASAKA Ryoichiro, SATO Yutaka S., HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

著者らは高温超伝導線材の簡易接合法として、インジウム箔を接合部に挿入し、超音波接合する方法[1,2]を提案している。既報[1]においては、限られた接合条件で作られたサンプルの評価にとどまっておき、また Bi-2223 線材を接合した際に臨界電流の大幅な低下がみられた。そこで本発表では、超音波接合体系および条件を変更することで、臨界電流の低下防止、接合抵抗の低減を図った結果[2]を報告する。

2. 実験方法

高温超伝導線材としては、4 mm 幅の銅安定化層付 REBCO 線材 (Superpower, SCS4050-AP, 臨界電流 100 A at 77 K, self-field) および 4.3 mm 幅の Bi-2223 線材 (住友電工, DI-BSCCO Type-H, 臨界電流 180 A at 77 K, self-field) を用いた。各線材の接合面を #240 の研磨紙で研磨し、エタノールで洗浄した後に、厚さ 100 μm の In 箔を接合面に挟み、Fig. 1 に示す超音波接合機 (精電舎電子工業, SNOPET Σ GM-1200) で接合した。接合条件は接合圧力 0.3 MPa, 超音波振動周波数 19.15 kHz, 超音波振動振幅 51 μm とし、接合時間をサンプルごとに変更した。ホーンは、0.2 mm ピッチのピラミッド型の凹凸形状を持つ Horn A と、平滑面の Horn B の 2 パターンとし、アンビルとサンプルの間には A1050 板あるいは SUS316 板を設置した。接合サンプル製作後に電流電圧特性を液体窒素浸漬冷却体系にて評価し、接合抵抗率 (= 接合抵抗 \times 接合面積) を計算した。また接合サンプル厚さを測定して、接合抵抗率のうちのインジウム箔の抵抗の寄与分を評価した。なお次節での説明において、各サンプル名は線材 (REBCO: RE or Bi-2223: Bi) - ホーン (A or B) - 金属板 (A1050: Al or SUS316: SS) - 接合時間 (秒) で名付ける。

3. 結果と考察

Fig. 2 に Bi-2223 線材の接合サンプルで得られた電流電圧特性を示す。本結果より、平滑面の Horn B, SUS316 板, 接合時間 0.09 秒以下で、臨界電流の低下を大幅に抑制できていることがわかる。Table 1 に各サンプルの接合性能評価結果を示す。なお REBCO 線材の接合サンプルでは、臨界電流以下での電流電圧特性の傾きから接合抵抗を評価した。一方、Bi-2223 線材の接合サンプルでは、臨界電流以下での電流電圧特性の線形性が厳密には得られていなかったため、100 A 通電時の電圧から接合抵抗を評価している。高温超伝導線材のはんだ接合では、接合抵抗率は 30~50 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ であり、In 箔を用いた超音波接合では、これと同等あるいは低い接合抵抗率が得られている。また、より薄いインジウム箔を用いることで、接合抵抗率を REBCO 線材では 25 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 程度に、Bi-2223 線材では 20 $\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 程度に低減できる可能性もある。

4. まとめ

ホーン, 金属板, 接合時間を適切な組合せとすることで、高温超伝導線材のインジウム挿入超音波接合で臨界電流の低下を抑制し、かつはんだ付けと同等の接合抵抗率が得られることを示した。今後は、さらなる接合条件の最適化、長尺接合サンプルの製作、機械強度の評価に取り組む予定である。

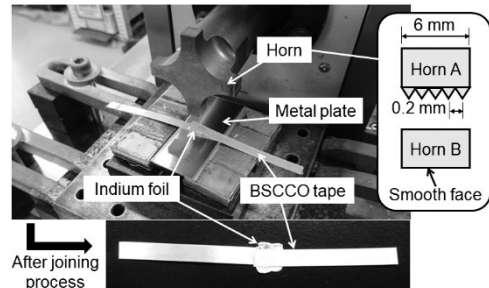


Fig. 1 Ultrasonic welding machine and its joint sample.

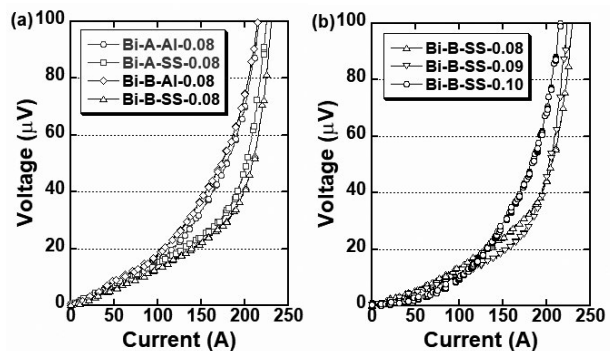


Fig. 2 Current-Voltage curves for Bi-2223 joint samples as functions of (a) horn and metal plate, and (b) joining time.

Table 1 Summary of joint performance (R_j : joint resistance, S_j : joint area, t_{in} : thickness of indium foil after joining process, R_{in} : resistance of indium,).

Sample name	$R_j S_j$ ($\text{n}\Omega\text{cm}^2$)	t_{in} (μm)	$R_{in} S_j$ ($\text{n}\Omega\text{cm}^2$)	$R_j S_j - R_{in} S_j$ ($\text{n}\Omega\text{cm}^2$)
RE-A-Al-0.10	31.6	41	7.7	23.9
	33.7	50	9.4	24.3
	32.5	48	9.0	23.5
Bi-A-Al-0.10	87.0	43	8.1	78.9
	149.6	39	7.3	142.3
Bi-A-Al-0.08	33.5	50	9.4	24.1
	40.5	91	17.0	23.5
Bi-A-SS-0.08	38.0	81	15.2	22.8
	39.8	82	15.3	24.5
Bi-B-Al-0.08	38.0	81	15.2	22.8
	46.5	82	15.3	31.2
Bi-B-SS-0.08	40.3	89	16.7	23.6
	35.5	70	13.1	22.4
Bi-B-SS-0.09	34.7	72	13.4	21.3
	25.8	62	11.7	14.1
Bi-B-SS-0.10	26.2	40	7.4	18.8
	22.7	26	4.9	17.8
	163.3	47	8.8	154.5

参考文献

- S. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.163.
- S. Ito, et al.: IEEE Tras, Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) Art ID 6600405.

IMD 法による 7 芯 MgB₂ 線材の局所均一性の向上

Improvement of Local Homogeneity in IMD-processed 7-filament MgB₂ Round Wire

加藤 大季, 國政 昭洋, 坊地 修平, 呉 澤宇, 東川 甲平(九大);

井上 昌睦(福工大); 熊倉 浩明(NIMS); 木須 隆暢(九大)

KATO Daiki, KUNIMASA Akihiro, BOCHI Shuhei, WU Zeyu, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.);

INOUE Masayoshi (Fukuoka Institute of Technology); KUMAKURA Hiroaki (NIMS); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

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

1. はじめに

IMD(Internal Mg Diffusion)法は同心に配置した金属管と Mg ロッドの間に B 粉末を充填し、線材加工と熱処理を行うもので、拡散反応によって高密度な MgB₂ を得ることができる線材の作製方法である。これによって高い臨界電流密度(J_c)を有する MgB₂ 線材の作製が可能であり、その多芯化にも成功している。一方で、IMD 法によって作製された 7 芯 MgB₂ 線材について、X 線 CT と走査型ホール素子磁気顕微鏡(SHPM)による評価を行った結果、その構造にはバリア材の破れが見られ、臨界電流分布の均一性にも課題を抱えていた。本研究では、作製プロセスを見直した 7 芯 MgB₂ 線材において、これらの評価手法によりフィラメント構造と局所臨界電流分布の評価と比較を行い、作製プロセスの妥当性の検討を試みた。

2. 方法

評価対象とした試料は、IMD 法によって作製された 7 芯 MgB₂ 線材である。その断面写真を Fig. 1(a)に示す。この線材はバリア材として鉄が、安定化のために銅が使用されている。この線材 10 mm 長を Fig. 1(b)に示すように SHPM の冷却ステージに設置し、外部から磁界を印加した際の磁界分布を測定する。鉄の磁化の影響を取り除くために、鉄の飽和磁界以上の外部磁界印加時の減磁時と増磁時の差分を取ることで、超伝導フィラメント由来の磁界分布の取得を試みた。また、各長手方向位置において、上記磁界分布をフィラメント毎の I_c とリフトオフ距離をパラメータとしてフィッティングすることにより、線材の I_c の長手方向分布を評価した。さらに、X 線 CT によるフィラメント構造観察と合わせ、バリア材に破れのあった 7 芯 MgB₂ 線材との比較を行った。

3. 結果・考察

Fig. 2(a)に X 線 CT で得られた長手方向の断面写真を示す。Fig. 2(b)で観測されたようなバリア材の局所的な破れは観測されず、作製プロセスの見直しによって均一性のあるフィラメントが形成されたことが確認できる。また、試料温度 10 K において外部磁界 2 T を印加した際の超伝導フィラメント由来の磁界分布を Fig. 3 に示す。今回の線材の方が磁気信号の強度と均一性の双方の観点から優れていることがわかる。また、この磁界分布から線材 I_c の長手方向分布を評価したものを Fig. 4 に示す。作製プロセスを見直す前後で、線材両端を除いた長手方向の臨界電流の平均値は 152 A から 344 A と大きく向上し、また均一性の向上も確認できるといえる。IMD 法による 7 芯 MgB₂ 線材において、作製プロセスの見直しによってフィラメント構造の大幅な改善と、局所臨界電流の向上を確認することができ、見直した作製プロセスの妥当性を判断することができた。

謝辞

本研究は、JST ALCA Grant Number JPMJAL1001 の支援を得て行ったものである。

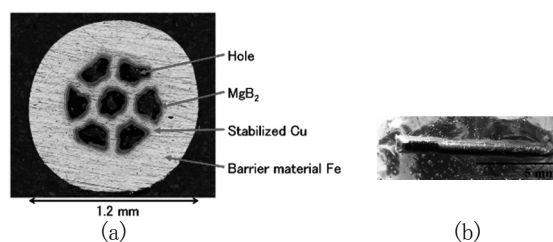


Fig. 1. Photographs of the sample: (a) the cross section, and (b) a 10-mm-long piece for the measurement.

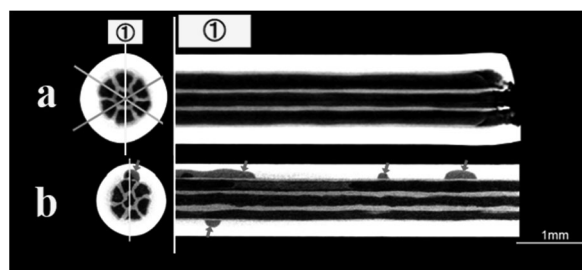


Fig. 2. X-ray CT images of lateral and longitudinal cross-sections of the sample: (a) the sample by an improved manufacturing process, and (b) the sample by the previous process.

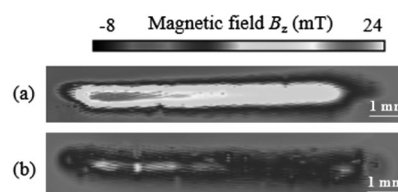


Fig. 3. Magnetic field images of the samples at 10 K, 2 T: (a) the sample by an improved manufacturing process, and (b) the sample by previous process.

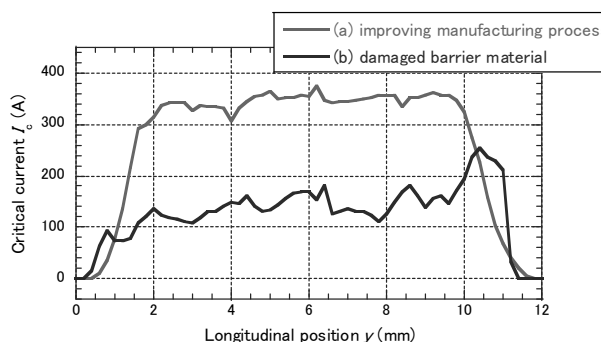


Fig. 4. Longitudinal distributions of local critical current in the samples at 10 K, 2 T.

MgB₄ を原料に用いた高密度 MgB₂ バルクの作製と微細組織

Synthesis of highly dense MgB₂ bulks using MgB₄ as a starting material

須藤 将太郎, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大)

SUDO Shotaro, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: c5619049@aoyama.jp

1. 緒言

MgB₂は金属系超伝導体の中で最高の $T_c \sim 39$ K を示し、かつ化学的に安定、合成が比較的容易、さらに粒間の結合に本質的に優れていることから、その線材は高価・希少な液体ヘリウムを用いない、冷凍機冷却による 15~20 K での医療用 MRI の電磁石や送電ケーブルなどへの応用が期待されている。一方で MgB₂ 線材のさらなる広範な応用に向けては、磁場中の臨界電流特性の改善が最も大きな課題であり、これには MgB₂ における主要なピンニングセンターである結晶粒界の高密度化、および有効な電流パスの割合 (connectivity: K) を決定する高純度化と多結晶組織の緻密化が有効な指針となる。多結晶 MgB₂ 材料では MgO が共存しやすくこれが K の低下を伴うことから組織の緻密化と同時に MgO の低減が K の向上に不可欠で、これには B と MgB₂ の混合粉末の圧粉体に Mg を拡散させる Premix-PICT 拡散法[1]が適している。以上の背景のもと、本研究では MgB₂ 結晶の成長抑制を目的とし、MgB₄ を B 原料に混合した Premix-PICT 拡散法による高密度 MgB₂ バルクの作製、さらに Mg と MgB₄ のみを出発原料とした拡散法による MgB₂ バルクの作製に取り組んでいる。

2. 実験方法

MgB₂ の熱分解および Mg (粒径 1 mm) : B = 1 : 4 の比のもとでの PICT 拡散法[2]によって高純度 MgB₄ 粉末の作製を試みた。さらに、これらの方法によって合成した MgB₄ 原料を用い、MgB₄ : B = 1 : 3 の混合圧粉体に Mg を拡散させることにより高密度 MgB₂ バルクを作製した。また、MgB₄ の圧粉体に Mg を拡散させる方法では仕込 Mg 組成を系統的に変えて試料を合成した。得られた試料の超伝導特性評価、微細組織観察はそれぞれ SQUID 磁束計、SEM により行い、 J_c は磁化ヒステリシスの幅より拡張 Bean モデルによって計算した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に作製した MgB₄ の粉末 XRD パターンを示す。MgB₂ の熱分解により合成した MgB₄ 粉末には、不純物 MgO が多量に含まれていた。一方、Mg と B を出発原料とした PICT 拡散法による MgB₄ の合成では、未反応 B の低減のために中間粉碎過程をはさんで 3 回の焼成を繰り返した結果、MgO が少ない高純度の MgB₄ が得られた。

この MgB₄ と Mg のみを出発原料とした拡散法による MgB₂ バルクの合成を試みたところ、ほぼ単相の高純度 MgB₂ バルクが得られた。しかし、Fig. 2 に 20 K における $J_c - H$ 特性を示したように、 J_c 、不可逆磁場とも通常の Premix PICT 拡散法で作製した試料よりも低いことがわかった。定比組成 (Mg : B = 1 : 2) から出発した試料よりも Mg-poor の試料において、 $J_c - H$ 特性が向上する傾向が認められた。 $y = 1$ の試料では相対密度が約 95% で MgB₂ 結晶が

いたことから、熱処理やプレス条件を最適化することによるさらなる改善が期待できる。

当日は B と MgB₄ の混合圧粉体に Mg を拡散させて作製したバルクを含めて、様々な焼成条件で合成した MgB₂ バルクの研磨面の微細組織、超伝導特性についても報告する。

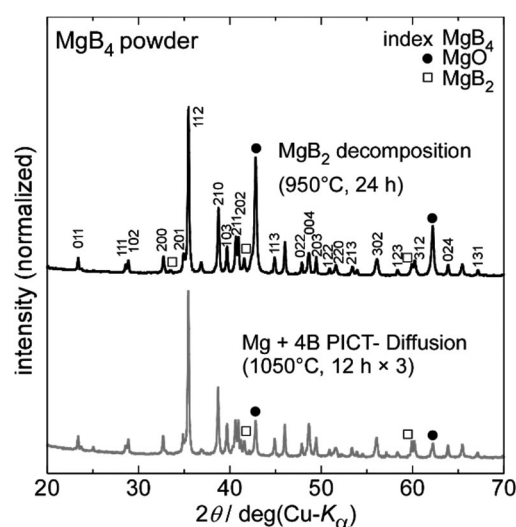


Fig. 1 XRD patterns of MgB₄ powder synthesized by MgB₂ decomposition method and PICT-Diffusion method.

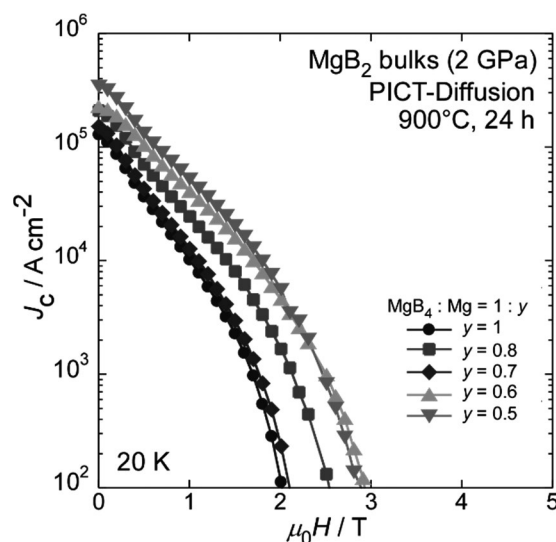


Fig. 2 $J_c - H$ curves at 20 K of dense MgB₂ bulks synthesized from Mg and MgB₄.

参考文献

- [1] I. Iwayama, et al., *Physica C* **460-462** (2007) 581-582.
- [2] S. Ueda et al., *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 222502

高温熱処理による MgB₂ 線材の室温での曲げ歪耐性向上

Enhancement of bending-strain tolerance at room temperature on MgB₂ wire sintered by higher temperature

田中 秀樹, 鈴木 孝明, 児玉 一宗(日立); 松本 明善, 西島 元(NIMS)

TANAKA Hideki, SUZUKI Takaaki, KODAMA Motomune (Hitachi); MATSUMOTO Akiyoshi, NISHIJIMA Gen (NIMS)

E-mail: hideki.tanaka.cj@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂ 線材は液体ヘリウムを必要としない中温(20 K 前後)で使用可能な超電導線材として期待されている。熱処理後の MgB₂ 線材を磁石形状に巻き回す React & Wind 法を用いる場合、線材の超電導特性が劣化しない限界歪みを把握しておく必要がある。特に限界曲げ歪みは磁石形状に与える影響が大きく、曲げ歪み耐性の把握と向上が重要である。先行研究[1,2,3]において、MgB₂ 線材の限界歪みが熱処理時の圧縮歪みの影響を受けることが示唆された。そこで本研究では、In situ PIT 法で作製した MgB₂ 線材を対象として、室温での曲げ歪み耐性の熱処理条件依存性を検討した。また、最適熱処理条件と比べ高温・長時間で熱処理された MgB₂ 線材は、 I_c - B 特性が低下することが知られているため、20 K における I_c の熱処理条件依存性も合わせて検討した。

2. 実験方法

様々な温度・時間条件を用いて熱処理した直線状長さ約 100 mm の MgB₂ 線材を複数本用意した。この MgB₂ 線材は最外層にモネル、中心に銅、バリア材に鉄を用いた線径 0.67 mm の 10 芯線であり、ツイストピッチは約 200 mm である。線材の一端を曲げ用のポビンに固定し、固定端から他端に向かって線材をポビンに沿わせることで所望の曲げ負荷を与えた。曲げ回数は3回である。 I_c 測定は電圧タップ間距離を 5 mm とし、液体ヘリウム浸漬冷却による四端子法を用いて実施した。

曲げによる臨界電流特性の劣化の有無は、 I_c に加え n 値 (0.2~2 μ V/cm) を用いて判断した。多芯 MgB₂ 線材において曲げによる特性劣化が起こる場合、 I_c の電界基準(1 μ V/cm)以下の比較的低い電界が通電電流値の増加に伴いゆっくりと上昇するため、 I_c のみでは劣化の有無が判断できず、 n 値を確認する必要がある[4]。

3. 結果

Fig. 1 に 800°C, 0.5 時間で熱処理した MgB₂ 線材に対して曲げ半径(r)100 mm~58 mm の曲げ負荷を与えたサンプルにおける IV カーブを示す。 $r = 65$ mm では明らかに I_c が低下しているため劣化したことが分かる。そのひとつ緩い曲げである $r = 80$ mm の I - V カーブは健全に見えるが n 値を確認する必要がある。Fig.2 に曲げ無しサンプルの値で規格化した I_c と n 値の曲げ半径依存性を示す。 $r = 80$ mm での n 値は曲げ無しサンプルよりも高い値であり超伝導特性が劣化していないことが確認できる。つまり 800°C, 0.5 時間で熱処理した MgB₂ 線材の曲げ半径限界は 80 mm と 65 mm の間であることが分かる。他の熱処理条件で作製したサンプルに対しても同様に I_c と n 値を用いて超伝導特性の劣化を判断した。

Fig.3 に、600°C, 6 時間または 800°C, 0.5 時間で熱処理した MgB₂ 線材の I_c - B 特性を示す。サンプル温度は 20 K である。熱処理条件 600°C, 6 時間は本線材に対し 20 K での I_c が最大となるよう選択した熱処理条件である。Fig.3 に示したように、800°C, 0.5 時間で熱処理した線材は 600°C, 6 時間と比較しておよそ一桁程度低い I_c の値しか有しておらず、800°C 維持時間の調整が必要と考えられる。

他の熱処理条件における I_c - B 特性や、限界曲げ半径の熱処理条件依存性などは当日合わせて報告する。

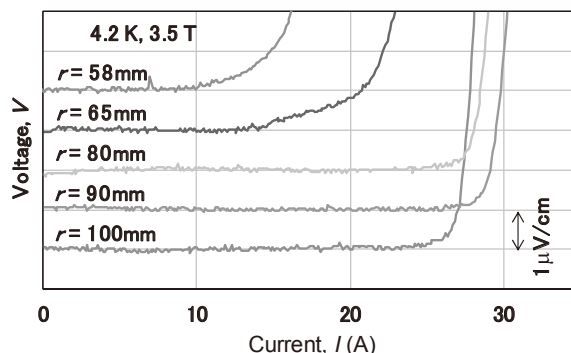


Fig. 1 I - V curves of bent MgB₂ wires sintered by 800°C

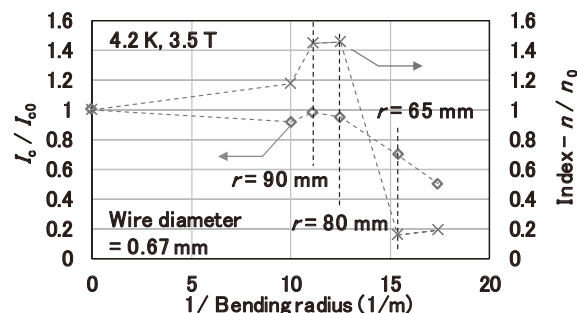


Fig. 2 Normalized I_c values and n values obtained from I_c measurement of which I - V curves were shown in Fig.1

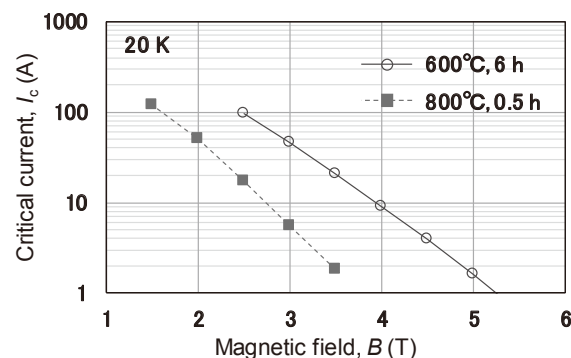


Fig. 3 I_c - B comparison between MgB₂ wires sintered by 600°C, 6h and 800°C, 0.5h

参考文献

1. P. Kováč, et al.: SUST, Vol. 16 (2003) p.600
2. K. Yamamoto, et al.:SUST, Vol. 16, no.9 (2003) p.1052
3. P. Alknes, et al.:IEEE TAS, Vol. 26, no.3 (2016) 8401205
4. H. Tanaka, et al.:IEEE TAS, Vol. 28, no.4 (2018) 8400605

複合 MgB₂ 超電導線の機械的性質

Mechanical Property of Composite MgB₂ Superconducting Wires

長村光造 (応用科研); 町屋修太郎 (大同大学); 菱沼良光 (核融合研); 谷口博康 (大阪合金)
 OSAMURA Kozo (RIAS); MACHIYA Shutaro (Daido Univ); HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS);
 and TANIGUCHI Hiroyasu (Osaka Gokin)
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

機械的特性は複合超電導線の製造時、磁場発生中のコイルに発生するフープ力等に対する安定性を検討するうえで重要なパラメータである。ヤング率、熱膨張係数を考慮した複合超電導線を設計することにより機械的性質に優れた超電導線を製造することができる。このような観点から現状の複数の MgB₂ 超電導線の機械特性を比較検討した。

現状では Columbus, Hyper Tech および Sam Dong の 3 社から複合 MgB₂ 超電導線が市販されている。本研究ではこれら市販されている3社の線材の引張試験を行い引張特性の比較検討を行った。さらに複合構造をもとに計算で予測したヤング率は実測した値によく一致することが明らかとなった。

2. 試験方法

供試料とした上記の市販されている3種類の線材の一般的な断面構造は図1示すようなものであった。Columbus 社では MgB₂ フィラメント・Ni マトリックス・Cu-Ni 外層シース、Sam Dong 社では MgB₂ フィラメント・Nb 内層シース・Cu マトリックス・Cu-Ni 外層シース、Hyper Tech 社では MgB₂/Cu フィラメント・Nb マトリックス・Cu-Ni 外層シースとそれぞれ異なり、さらに各成分の体積分率が異なることが機械的性質の差になって現れているようであった。

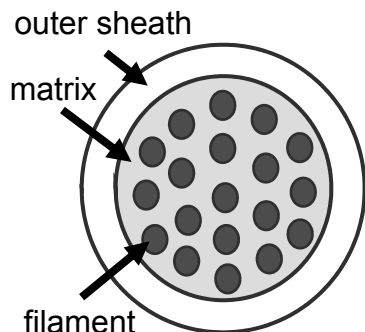


Fig. 1 Cross section of three kinds of MgB₂ wires investigated in present study.

島津製作所製引張試験機を用いチャック間距離 10 cm で国際標準 IEC-61788-XX [1, 2] に準じて室温で引張試験を行った。さらに試料部分を液体窒素に浸漬し、同様の引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

室温で測定した引張試験結果の一例を Fig.2 に示す。ヤング率として初期勾配から E_0 を、除荷曲線から E_u を決定した。また 0.2%耐力と歪 $R_{0.2}$, $A_{0.2}$ を求めた。それらの結果を Table 1 にまとめて示す。3 種類の線材の断面構造はかなり相違し、それに伴いヤング率、0.2%耐力はかなり異なることがわかった。弾塑性挙動については SamDong 線材が他の線材と異なる振る舞いを示したがこれは Cu マトリックスに原因すると考察された。一般的な傾向として 77 K でのヤング率は5%程度大きく、降伏後の耐力は低温になると大幅に上昇することが明らかとなった。

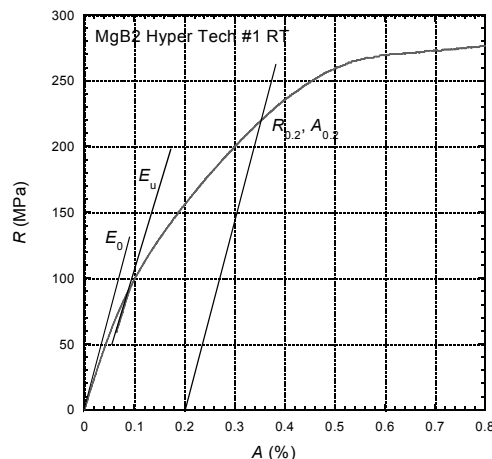


Fig. 2 Stress – strain curve for MgB₂ Hyper Tech wire

さらに線材の構造上次の Voigt 則によりヤング率を計算で評価した。

$$E_{\text{cal}} = \sum f_i E_i \quad (1)$$

ここで f_i , E_i は各成分の体積分率、ヤング率である。計算結果を Table 1 に示すが実測の E_0 とほぼよい対応があることが明らかとなった。とくに Columbus の線材では Ni マトリックスが使われているためヤング率が高くなる傾向があった。

工学的に機械的性質の評価方法の確立は重要であり、MgB₂ 線材についてもどのように引張試験方法の標準化を進めるか今後の検討課題と考えられる。

Table 1 Summary of experimental results

Manufacture	Columbus	Sam Dong	Hyper Tech
Filaments	MgB ₂	MgB ₂	MgB ₂ +Cu
Inner Sheath	-	Nb	-
Matrix	Ni	Cu	Nb
Outer Sheath	Cu-Ni	Cu-Ni	Cu-Ni
E_u (GPa)	160	125	124
$R_{0.2}$ (MPa)	220	734	233
E_{cal} (GPa)	152	119	116

参考文献

1. K Osamura et al, International RRT for mechanical properties of REBCO SC tapes at room temperature, SuST 27 (2014) 085009
2. IEC 61788-XX: 2015 Ed. 1.0 FDIS Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires