

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

A new project focusing on the joining- technology between high temperature superconductors: Towards a persistent-mode 1.3 GHz (30.5 T) NMR and superconducting DC cables for railway systems

前田 秀明(JST、理研); 下山 淳一(青学大); 柳澤 吉紀(理研);
石井 佳誉(東工大、理研); 富田 優(鉄道総研)

Hideaki Maeda(JST, RIKEN); Jun-ichi Shimoyama (Aoyama Gakuin University); Yoshinori Yanagisawa(RIKEN);
Yoshitaka Ishii (Tokyo Institute of Technology, RIKEN); Masaru Tomita (Railway Technical Research Institute)
E-mail: hideaki.maeda@riken.jp

1. はじめに

国立研究開発法人科学技術振興機構(以下 JST)では、2017年度から未来社会創造事業を開始した[1]。この事業では、社会インパクトの大きい目標を設定し、実用化が検証できる段階まで研究開発を行う(概念実証、Proof of Concept 以下 POC)。我々は、「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」という研究開発課題を提案し採択された。ここでは、研究開発の概要を簡単に紹介する。

2. 背景と目的

超電導マグネットは、NMR、MRI などに利用されるが、低温超電導(以下 LTS)線材を用いた場合、磁場の上限は約 24 T である。超電導技術の社会実装を進めるには、液体窒素中でも使用でき、液体ヘリウム中では LTS 線材より強い磁場を形成できる高温超電導(以下 HTS)線材の使用が有効である。しかしながら、HTS 線材は現状では数百 m 単位でしか製造できず、多数の接合部が必要になる欠点がある。これが、機器の製造や取り扱いを複雑にし、機器の特性を低下させる。本研究開発では、HTS 線材同士の「接合技術」を確立し、磁場発生技術や送電技術に適用する。これにより、HTS 技術の社会実装を進展させ、わが国の将来の社会・産業に大きなインパクトをもたらすことをめざす。

3. 研究開発の概要

HTS 線材間の接合の基礎技術を開発し、それらを 2 種類の代表的な HTS 機器システムに実装して、接合の実用性と有効性を検証する(POC)。該当する機器システムは、次の通りである。

(イ) POC 1(磁場形成技術への適用性検証): 最初に HTS 線材同士を超電導接合する技術を開発し[2]、これを 30.5 T (テスラ)(水素原子核¹Hの共鳴周波数で 1.3 GHz)NMR マグネットに実装して、永久電流運転を行う[3]。この装置を用いて微量のタンパク質の固体 NMR 信号を取得し、超電導接合の特性と、超高磁場 NMR 技術への適用性を検証する。

(ロ) POC 2(送電技術への適用性検証): 近年、都市部を中心に鉄道路線の直流送電化が進んでいる。鉄道路線では 3 から 5 km の間隔で変電所が設置され、車両に電力を供給している。変電所と変電所の間を超電導き電ケーブルで結べば、省エネや変電所間の負荷平準化が期待できる[4]。変電所を結ぶためには 3 から 5 km の長尺ケーブルが必要であるが、ケーブルの搬送車両の制約から、ケーブル単長は約 500 m が限度である。この結果、多くの中間接合部が必要になり、社会実装上のネックになっていた。ここでは、超電導ケーブル同士をオンサイト(現場)で簡易的に極低抵抗に接合する技術を開発し、接合ケーブルを用いて鉄道総合技術研究所構内での車両の走行試験により、ケーブルの接合特性と送電技術への適用性を検証する。

プロジェクトの概要を Fig. 1 に示す

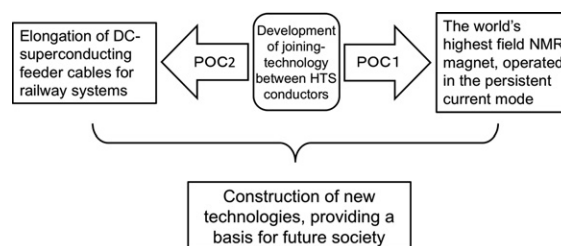


Fig. 1 Schematic diagram of the project.

4. 開発体制とスケジュール

研究開発は研究開発代表者を中心に、4 共同研究グループで実施し、接合技術の開発と 2 種類の POC を達成する。グループ名、グループリーダー(GL)、参加機関は次の通りである。

(i) 接合基盤技術共同研究グループ: 青学大(下山淳一 GL)、ティーイービー(株)、物材機構、住友電工(株)、ファイセラミックスセンター、九大。

(ii) 精密超高磁場形成 POC 共同研究グループ: 理研(柳澤吉紀 GL)、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)、物材機構、岡山大。

(iii) 高磁場社会インパクト実証共同研究グループ: 東工大(石井佳誉 GL)、(株)JEOL RESONANCE。

(iv) 鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究グループ: 鉄道総研(富田優 GL)、九大、九工大。

2017年度に「高温超電導線材をつなぐ実用的新規接合方法の開発」について公募を実施した。これに関連して、2018年度から 5 研究機関が研究開発に加わる。

研究開発は2017年 11 月に開始された。数度の技術審査をパスすれば、全体で 10 年間の開発期間となる。この場合、開発の予算は全体で約 40 億円が想定されている。

5. まとめ

HTS 線材の接合技術は、未来社会を創造する新しい技術体系の基盤を構成する重要なものである。これにより、HTS 線材による磁場発生技術や送電技術の社会実装が飛躍的に進展し、我が国の将来の社会や産業に大きなインパクトをもたらすものと期待している。

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJM17A2 の支援を受けたものである。

参考文献

1. <http://www.jst.go.jp/mirai/jp/>
2. K. Ohki et al., *Supercond. Sci. Technol.* **30** (2017) 115017.
3. H. Maeda et al. *eMagRes* **5** (2016) 1109.
4. M. Tomita, *RRR* **72** (2015) 8-11.

超電導接合を用いた永久電流 1.3 GHz (30.5 T) NMR に向けて ～永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR 用 REBCO 内層コイルの 4 K 単体試験特性～

Towards a persistent current 1.3 GHz NMR using superconducting joints

– 4 K test results of a REBCO inner coil for a 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR –

柳澤 吉紀(理研);末富 佑(千葉大);山岸 風摩, 高尾 智明(上智大); 大木 康太郎, 山口 高史,
永石 竜起(住友電工);北口 仁(NIMS);斉藤 一功, 濱田 衛(JASTEC);朴 任中(理研);前田 秀明(JST)
YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); SUETOMI Yu (Chiba Univ.); YAMAGISHI Kazama, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
OHKI Kotaro, YAMAGUCHI Takashi, NAGAISHI Tatsuo (SEI); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);
SAITO Kazuyoshi, HAMADA Mamoru (JASTEC); PIAO Renzhong (RIKEN); MAEDA Hideaki (JST)
E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

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」において、永久電流 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS NMR の開発実証を目指している。最大の挑戦は、永久電流運転を実現するための超電導接合の開発とコイル実装であり、これには HTS 線材同士の接合と、HTS 線材と LTS 線材同士の接合を含めた数種類の接合が必要となる。

現在、これに向けた要素開発として、REBCO 線材同士の超電導接合 [1] を用いた永久電流 400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR の開発を進めている [2]。これは、高分解能 NMR 計測を通して接合特性を精密に評価するとともに、HTS 線材同士の超電導接合を用いた初の永久電流 NMR 磁石を実証するための開発である。

本報では、永久電流 REBCO 内層コイルに求められる技術的要件を整理するとともに、試作した内層コイルの 4 K における永久電流運転の結果を報告する。

2. 400 MHz NMR 用 REBCO 内層コイル

1.3 GHz NMR では、LTS-HTS コイルの直列運転を想定するが、現段階では REBCO 線材と NbTi 線材の接合ができていないため、今回の 400 MHz NMR では、LTS 外層コイルと REBCO 内層コイルをそれぞれ個別に永久電流運転する。Table 1 に REBCO 内層コイル、REBCO PCS、LTS 外層コイルの諸元を示す。REBCO 内層コイルは一本の線材でレイヤー巻きするため、接合は両端の計二か所である。REBCO コイルには住友電工製の REBCO 線材 (SCC[®]) を用いた。また、初期的な試作として、PCS には高抵抗化を図るためのハステロイベースの REBCO 線材 (SuperPower, SF4050) を用いた。この場合、コイル・PCS 間には異種 REBCO 線材接合が必要となる。NMR 磁石に求められる磁場減衰率 (10^{-8} /h) と、異種 REBCO 線材接合の I_c -B 特性 (77 K, 4.2 K) を考慮し、n 値モデルを仮定すると、接合部は、77 K において 42 A 以上の I_c を持つことが必要になる。今回試作した REBCO 内層コイルでは、二か所の接合 I_c がそれぞれ 15.2 A と 21.5 A であり、上記の値に満たなかったが、このコイルを用いて 77 K, 4.2 K における永久電流運転評価を行った。

3. 試作 REBCO 内層コイルの 4.2 K 単体永久電流試験

試作した REBCO 内層コイルを 4.2 K で 100 A まで通電し、永久電流運転し、中心磁場をホール素子で測定した。接合部はコイルから離れているため、経験磁場は 0.1 mT 以下である。Fig. 1 に示すように、350 分間にわたって、ホール素子の計測精度の中では有意な磁場減衰は見られなかった。指数関数曲線と比べると、減衰の特性抵抗は 10^{-11} Ω より小さいことがわかる。また、別途通電モードで 100 A 運転することで、遮蔽電流の緩和が磁場減衰に影響を与えていないことを確認した。

Table.1 Specifications of the REBCO inner coil, REBCO PCS and LTS outer coils for a 400 MHz LTS/REBCO NMR magnet.

	REBCO inner coil	REBCO PCS	LTS outer coils
Conductor	REBCO (SEI)	REBCO (SuperPower)	Nb ₃ Sn, NbTi
Conductor width/thickness (mm)	4.09/0.14	4.0/0.09	-
Conductor I_c at 77 K (A)	215	119	-
Conductor length (m)	42.4	0.73	-
ID/OD/Height (mm)	81.5 / 82.7/170.2	-	132.6 / 289.3/-
Total turns	164	-	-
Number of layers	4	-	-
Operating current (A)	134	134	134
Field (T/MHz)	0.146/6.22	-	9.23/394

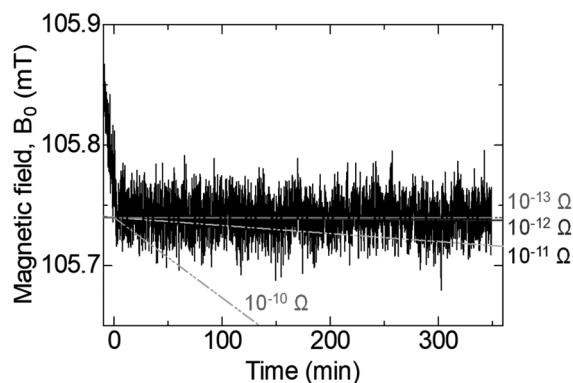


Fig.1 Measured magnetic field in a persistent current operation at 4.2 K at 100 A.

今回は自己磁場における試験であるが、NMR 用内層コイルとして設計された HTS コイルについて、永久電流運転を実証することができた。発表では、接合試料の I_c -B 特性と、400 MHz NMR 試験に用いる内層コイルの製作状況も報告する予定である。

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] Ohki et al. SuST 30 (2017) 115017

[2] 上野他, 2017 年度秋季低温工学・超電導学会 2A-a04

多結晶 Bi2223 中間層を介した DI-BSCCO 線材間の超伝導接合

Superconducting joints for DI-BSCCO tapes connected by polycrystalline Bi2223 layer

武田 泰明 (東大院工); 田中 智之, 小池 遼, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大);
北口 仁 (NIMS); 中島 隆芳, 小林 慎一, 加藤 武志 (住友電工)

TAKEDA Yasuaki (The Univ. of Tokyo); TANAKA Tomoyuki, KOIKE Ryo, MOTOKI Takanori,
SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);
NAKASHIMA Takayoshi, KOBAYASHI Shin-ichi, KATO Takeshi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: ytakeda@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

Ag シース $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ [Bi2223] 多芯線材 (DI-BSCCO) は、高い臨界電流特性や優れた量産性[1]から、超伝導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[2,3]。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いる。

一方、我々はこれまで Bi2223 多結晶材料における J_c 特性改善手法を議論してきた[4]。最近では前駆体粉末を分散させたスラリーから作製する、高密度かつ c 軸配向組織を形成しやすい Bi2223 厚膜 ($\sim 40 \mu\text{m}^f$) に注目している。前駆体粉末の構成相の最適化により焼成後の組織における c 軸配向度を高め、また不定比化学組成を制御するポストアニール過程を導入することで、 J_c 特性を大きく改善させることができた。さらに Bi サイトへの Pb 置換量を増加 ($x \sim 0.39$) させることで、高い粒間 $J_c \sim 8 \text{ kA cm}^{-2}$ (77 K, s.f.) を達成している[5,6]。

Bi2223 線材間の超伝導接合における課題の一つに、異なる線材の結晶粒の間に強い電氣的結合を形成するのが困難であることが挙げられる。そこで我々は上記の Bi2223 多結晶厚膜作製技術が、DI-BSCCO 線材の接合中間層形成に適用できると考えた。以上の背景を踏まえ、本研究では、Bi2223 多結晶中間層を介した、DI-BSCCO 線材間の高 I_c 超伝導接合を試みた。

2. 実験方法

Fig. 1 に示す外観・構成の接合試料を作製した。まず DI-BSCCO 線材 [Type H, 121 芯, I_c (77 K, s.f.) $> 170 \text{ A}$, $\sim 4.5 \text{ mm}^w \times 0.25 \text{ mm}^f$] の Ag シースを除去し、超伝導フィラメントを露出させた。一部試料では $\sim 0.5^\circ$ の傾斜角度で線材端部を研磨し、多数のフィラメント間での接合を試みた (Fig. 1 (c))。スラリーからグリーンテープ作製を経て一軸プレス・熱処理を行う手法 [5,6] で、露出したフィラメント間に Bi2223 厚膜中間層 ($\sim 50 \mu\text{m}^f$) を形成し、接合試料とした。

試料の微細組織は SEM および TEM により観察し、臨界電流特性は様々な温度・磁場条件のもとで直流四端子法により調べた。磁場は線材表面に平行に印加した。

3. 結果と考察

本研究で作製した接合試料の臨界電流特性の一例として、Fig. 1 (c) に示す構成で、70 本程度の超伝導フィラメントを接合した試料の、様々な温度・自己磁場下での E - I 曲線を Fig. 2 に示す。77 K では $\sim 25 \text{ A}$ 、4.2 K では $\sim 120 \text{ A}$ までゼロ抵抗を維持した。この試料は 4.2 K、1 T の磁場中でも $\sim 80 \text{ A}$ までゼロ抵抗を示し、磁場中応用にも適する可能性が示唆された。当日は、作製手法・条件が異なる様々な接合試料の I_c 特性や微細組織なども示し、永久電流回路を備えた超伝導磁石作製の基盤技術である、DI-BSCCO 線材間の超伝導接合技術の開発に向けた、本接合手法のポテンシャルを議論する。

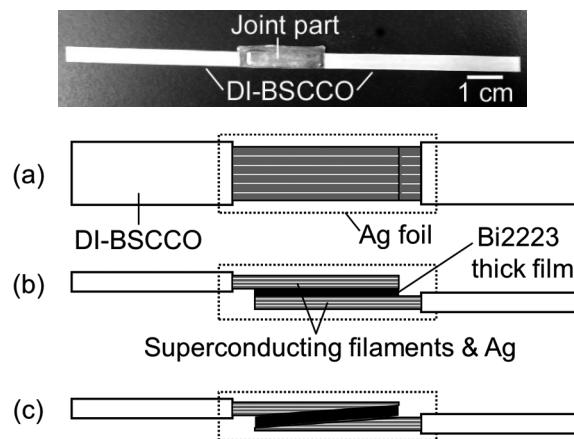


Fig. 1 Photograph of a joint sample and schematic illustrations of joint structure between DI-BSCCO tapes via Bi2223 thick films ((a): top view, (b), (c): side view).

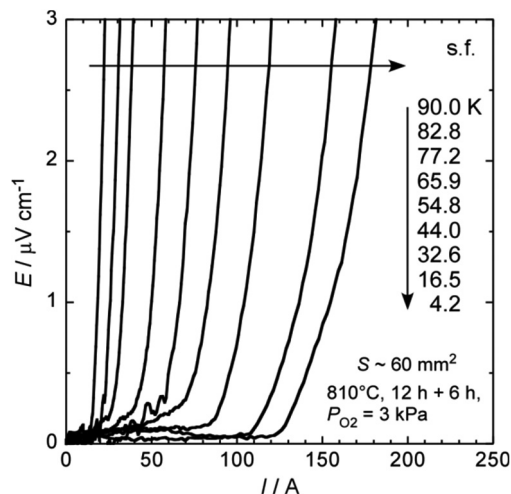


Fig. 2 E - I curves for a joint sample measured at various temperatures in self-field.

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] T. Nakashima *et al.*, *Cryogenics* **52** (2012) 713-718.
- [2] K. Sato *et al.*, *JJAP* **51** (2012) 010006.
- [3] G. Nishijima *et al.*, *IEEE TAS* **26** (2016) 4303007.
- [4] Y. Takeda *et al.*, *Physica C* **534** (2017) 9-12.
- [5] Y. Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **95** (2017) 186.
- [6] Y. Takeda *et al.*, submitted.

Bi2223 多芯線材間の分解溶融を利用した超電導接合

Superconducting joint between multi-filamentary Bi2223 tapes with incongruent melting

金 新哲(室工大);末富 佑, 朴 任中, 柳澤 吉紀(理研);前田 秀明(JST)

Xinzhe Jin (Muroran-IT.); Yu Suetomi, Renzhong Piao, Yoshinori Yanagisawa (RIKEN); Hideaki Maeda (JST)

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

1. はじめに

高温超電導線材の超電導接合技術は、NMR や MRI の永久電流運転のために開発が強く求められている技術である。この種の技術は、近年 RE123 コート線材において大きな進展がみられている。我々は、Bi2223 多芯線材について、2223 相の分解溶融を利用した超電導接合を行っている。これまで 77 K で 12 A の臨界電流 ($1\mu\text{V}$ 基準) を示す接合体が得られ、小型コイルの自己磁場中での永久電流測定では、半日経過後において $10^{-12}\ \Omega$ レベルの抵抗に対応する磁場減衰を示した。本報では、液体ヘリウム温度で臨界電流を測定し、SEM 観察により界面状態を調べたので、会議当日で報告する予定である。

2. 接合方法の特徴

線材の Ag シースは溶融せずに Bi2223 相を溶融させ、線材間のフィラメントを直接に接合するアプローチをとった。この方法を Joint by Incongruent Melting (JIM) 法と呼ぶ。過去に開発した RE123 線材間の接合方法 (CJMB 法) [1] と比べると、接合媒体が必須ではないことが特徴である。そのため、JIM 法では媒体を作製する過程を省略でき、より簡易的な製造ができる。両方法の共通点は、高温超電導体の溶融を利用して接着し、高い接着強度を持ちながら超電導電流パスを形成することである。

3. 実験方法

原材料は住友電工製の Ni 合金補強 Bi2223 多芯テープ線を用いて接合体を作製した。線材の仕様を Table 1 に、接合の構造を Fig. 1 に示す。界面と示した部分で接合されることで、接合媒体をいれていない。

Table 1 Specifications of Bi2223 tape

Wire type	DI-BSCCO Type HT-NX
Critical current 77 K (A)	>140
Width/Thickness (mm)	4.0/0.26
Filament number	121
Piece length (mm)	150

接合体の作製手順は、まず 2 本の線材を用意し、端末付近の補強材を片面だけ剥がす。その後、ヤスリを用いて Bi2223 フィラメントを露出させる。2 本の線材の露出面同士を接して融点以上の温度で熱処理する。その後、酸素雰囲気中 350°C で 10 時間アニールする。

4. 実験結果

Fig. 2 に接合体の 77 K、4.2 K における I - V 特性 (自己磁場中) を示す。77 K では臨界電流 I_c ($1\mu\text{V}$ 基準) が 12 A であり、4.2 K では 177 A になっていた。その温度差による上昇率は 15 倍であり、 I_c の電圧基準を下げると、この率はさらに向上する。また、 I_c - T 特性を調べたところ、特に低温領域における I_c の顕著な上昇が見られた。

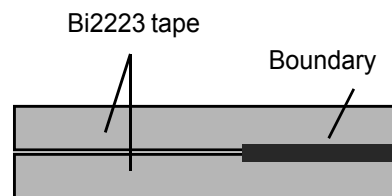
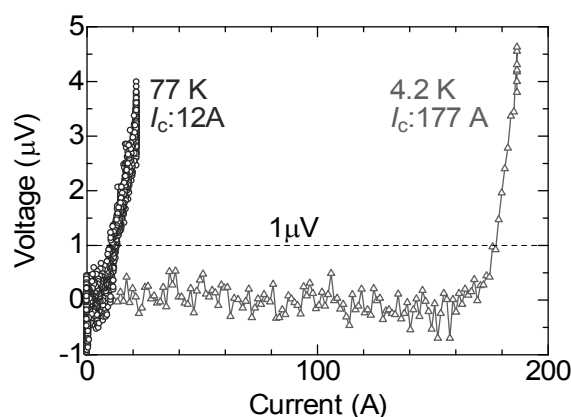


Fig. 1 The joint configuration of Bi-2223 multi-filamentary tape with a JIM method.

Fig. 2 I - V characteristics of a Bi2223 JIM joint

5. まとめ

市販の Bi2223 線材間に超電導接合を形成するために、JIM 法を利用して接合し、4.2 K で 177 A の臨界電流が得られた。Bi2223 線材間はこのような方法により超電導電流パスを形成されるが、元の線材と比べるとまだ臨界電流が小さい。接合内に超電導電流が流れるメカニズムは明らかでなく、今後この観点からの分析を行うとともに、接合特性の向上を目指す。また、マグネットにおける実装の観点からは、磁場中の通電特性が重要であり、接合体の I_c - B 特性も学会において報告する。

謝辞

本研究は MEXT 卓越研究員事業 (課題 ID: 16810210) と、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」の「高温超電導線材をつなぐ実用的新規接合方法の開発」、および JSPS 科研費 (JP18965778) の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Xinzhe Jin et al., Superconductor Science and Technology **28** (2015) 075010 (6pp)

RE 系超電導テープ線材への超電導半田接合 Superconducting solder joint on REBCO tape

伴野信哉, 浅野稔久, 小森和範, 北口仁(物材機構)

BANNO Nobuya, ASANO Toshihisa, KOMORI Kazunori, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. 緒言

RE 系 (REBCO) 超電導線材と低温金属系超電導線材 (LTS) との超電導接合技術の開発は、強磁場永久電流運転マグネットの開発に重要である。REBCO と LTS の異種接合は、接合処理時の雰囲気・温度条件などの制約が厳しい。そのため、いわゆる超電導半田接合技術以外には適用が難しい。しかしながら、シンプルに思える超電導半田接合であるが、これまで REBCO テープ線材への超電導半田接合の報告例はない。その原因を明らかにすることは REBCO への超電導半田接合実現にとって重要である。超電導半田接合が実現できれば、その簡便さも一つの魅力になり得る。本研究では、それまで実現できなかった要因を探るとともに、得られた結果を基に RE 系超電導テープ線への超電導半田接合試作を行ったので報告する。

2. 超電導半田接合技術

Fig. 1 は、標準的な NbTi 線において、Cu マトリクスを硝酸でエッチングし、フィラメントを露出して観察した SEM 像である。超電導半田接合といっても、Nb 系超電導線材でさえ、直接表面にはんだ付けすることは難しい。それは、NbTi フィラメントが大気に晒されると、表面に薄い酸化被膜が形成され、また半田自身も酸化されるため、強い表面張力が働いて両金属間の濡れ性が著しく低下するためである。

したがって NbTi と超電導半田との接合において重要な点の一つは、いかに両者の新生面同士を密着 (接近) させてできるだけ大きなファンデルワールス力を確保するかという点である。そういう点では、超電導半田接合研究というのは、材料科学というよりは表面科学や界面化学という方が適しているかもしれない。

またさらに大事な点は、NbTi 線が極細多芯構造であるという点である。極細多芯構造のため、超電導フィラメントと超電導半田との界面面積が非常に大きく、界面抵抗の大幅な減少が期待できる。それだけでなく接合体の機械的強度という点でも有利である。

一方 REBCO 超電導線材は、配向基板の上にエピタキシャル成長させて作製されている。超電導層自体が酸化物体であることに加え、表面が極めて平滑である。このように、REBCO 層への超電導半田接合は、濡れ性、低表面積、機械的構造の観点で整理して見れば、非常に困難な状況にあるということがわかる。

3. 予備観察

Fig. 2 は、Fujikura 製 GdBCO 線材に対し、Cu シースと Ag 保護膜を、希硝酸および (過酸化水素水 + アンモニア水) の希釈液でそれぞれ化学腐食して GdBCO 層を露出した際の、SEM および EDX (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) マッピング像を表す。Ag が少し残る状態であるが、GdBCO 層にはエッチピットが見受けられる。

Fig. 3 は、GdBCO 層の線分析を行った結果である。超電導層内で Gd、Ba、Cu、O が同様のきれいな分布を示している。

謝辞 本研究の一部は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものです。

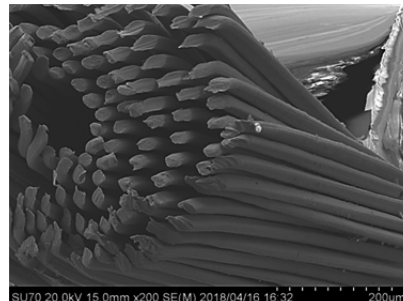


Fig. 1. SEM image of a NbTi wire after chemically etching Cu matrix.

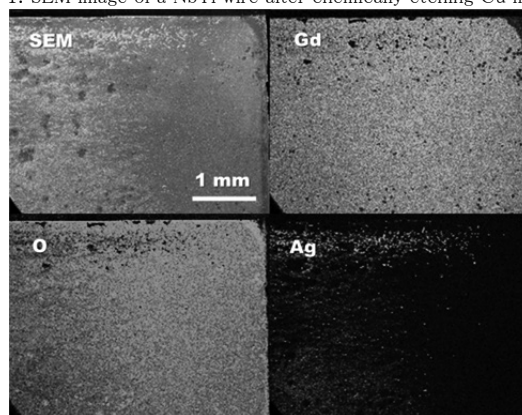


Fig. 2. SEM and EDX mapping on the GdBCO layer after chemically etching Cu sheath and Ag protective layer.

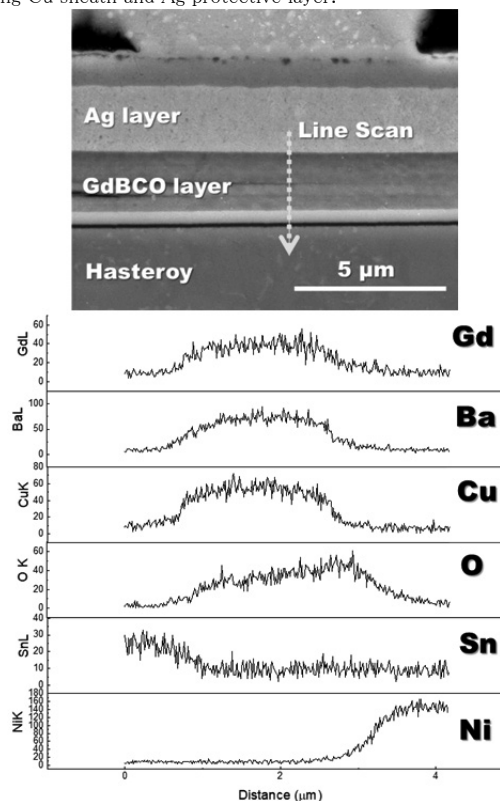


Fig. 3. SEM image of GdBCO layer and compositional distribution measured by line scan.

超伝導接続のためのエピタキシャル NbTi 薄膜の成長と電気的特性 Epitaxial NbTi thin films grown on SrTiO₃ single crystal substrates for superconducting joints

高島 浩, 清水 雄平, 外岡 和彦, 吉田 良行, 古瀬 充穂 (産総研)

TAKASHIMA Hiroshi, SHIMIZU Yuhei, TONOOKA Kazuhiko, YOSHIDA Yoshiyuki, FURUSE Mitsuho (AIST)

E-mail: h-takashima@aist.go.jp

1. はじめに

近年、高温超伝導線材は次世代高磁場 MRI 用のコイル線材としての利用が期待され、超伝導接続技術の研究開発が活発になっている。高温超伝導線材の接続は、主に Direct 接続と Indirect 接続の 2 手法が挙げられる [1]。Direct 接続の課題は、接続箇所の結晶方位の差異や高温熱処理による超伝導特性の劣化が挙げられる。我々は、線材とは異なる異種超伝導体薄膜を用いた Indirect 超伝導接続の開発を進めており [2、3]、室温での薄膜接続により線材の超伝導特性の劣化を回避する手法を提唱している [2]。

NbTi 合金線材は、現行の MRI 装置など幅広く利用され、NbTi 合金線材間の超伝導接合技術はすでに確立されていることが知られている。本研究では、室温において Indirect 接続法により高温超伝導線材を接続することを目的とし、まず典型的な高温超伝導線材の格子定数に近い SrTiO₃ (001) 単結晶基板上に NbTi 薄膜を成膜し、結晶性、表面形状、電気的特性について調査を行い、室温成膜による超伝導接続の可能性について検討を行ったので報告する。

2. 実験

NbTi 薄膜は NbTi ターゲット (純度 99.9%) を用いて RF マグネトロンスパッタリング法により成長を行った。基板材料には SrTiO₃ (001) 光学研磨基板 (格子定数 0.3905nm) を用いた。高温超伝導線材として用いられている YBCO との格子ミスマッチは 2% である。成膜中の基板保持温度は室温である。スパッタリングガスには Ar を用いた。成膜した薄膜サンプルの結晶性は X 線回折装置を用いて評価した。薄膜表面の凹凸は走査型プローブ顕微鏡を用いて観察し評価した。また、薄膜の電気抵抗率は物理特性測定装置 (Quantum Design, PPMS) を用いて、4 端子法により温度 2K から 300K の間で測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に基板温度が室温で、Ar ガス圧 1.0 Pa で成膜した典型的な NbTi 薄膜 (膜厚 200nm) の XRD パターンを示す。基板に由来するピーク以外には (*h*0) のピークのみが出現しており、それ以外のピークは存在しないことが分かった。さらに反射高速電子線回折 (RHEED) を用いて薄膜表面の結晶性を調べた結果、ストリーク状の回折パターンを観測した。これらの結果、NbTi 薄膜は (110) 方位にエピタキシャル成長していることが分かった。また、薄膜の平坦性について原子間力顕微鏡 (AFM) 像で確認した結果、基板の [100], [010] 方向に沿った網目状構造を確認し、典型的な平均面粗さ (Ra) は 0.6nm (膜厚 200nm) であることが分かり、極めて平坦な薄膜であることが分かった。Fig. 2 に NbTi 各種膜厚 (10nm から 600nm) に対する抵抗率の温度依存性を示す。室温成膜で、超伝導転移点が 4.3 K から 8.9 K であり、膜厚が厚い方が超伝導転移点が高いことが分かった。典型的な高温超伝導線材は高温熱処理プロセスによって超伝導特性の劣化が生じる。そのため超伝導接続技術は室温での全プロセスが理想である。本研究では、NbTi エピタキシャル薄膜の作製において、典型的な高温超伝導線材の格子定数に近い SrTiO₃ (001) 基板上に室温成膜で $T_c=8.9$ K を実現した。この結果、NbTi 薄膜が YBCO エピタキシャル薄膜上に、室温成膜でエピタキシャル成長する可能性があり、Indirect 接続法に有効であると考えられる。

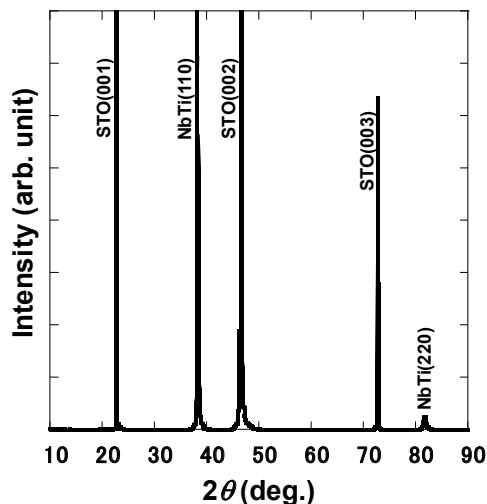


Fig.1 θ - 2θ X-ray diffraction pattern for NbTi film on a SrTiO₃ (001) substrate.

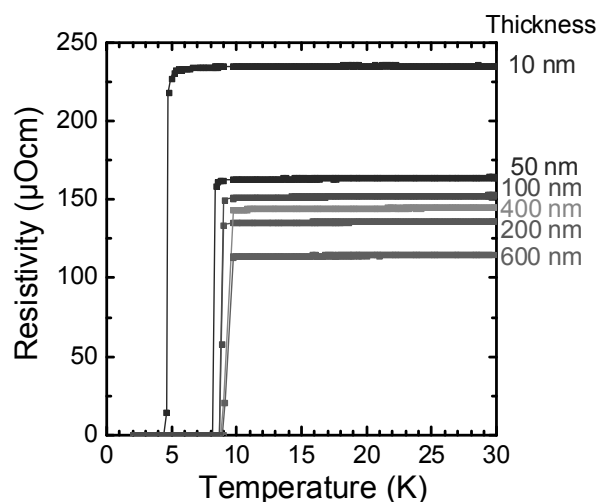


Fig.2 Temperature dependence of resistivity for various film thicknesses.

謝辞

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の援助により行われた。

参考文献

- G.D. Brittles et al., Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 093001.
- Y. Shimizu et al., Applied Surface Science, 444, (2018) 71.
- Y. Shimizu et al., IEEE Transactions Applied Superconductivity, 28, (2018) 7500104.

追加堆積膜を利用した REBCO 線材の超伝導接続

Superconducting joint of REBCO coated conductors by crystallization of additionally deposited precursor films

寺西 亮, 安山正太郎, 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(NIMS); 淡路智(東北大学)

TERANISHI Ryo, YASUYAMA Shotaro, MIYAJIMA Tomohiro, SATO Yukio, KANEKO Kenji (Kyushu Univ.);

PETRYKIN Valery, LEE Sergey (SuperOx Japan); MATSUMOTO Akiyoshi(NIMS); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

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

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) 薄膜線材の電力機器応用には、線材の通電性能の高性能化や長尺化が必要であり、長尺化には線材を電気抵抗ゼロで接続する技術が不可欠である。これまで、韓国のグループをはじめ、国内においても接続のプロセス開発が進められている[1-4]。近年、我々のグループでも、薄膜線材上に追加堆積膜を作製して対向させる手法による接続を検討しており[5]、GdBCO 線材の接続体を得ている。しかしながら、臨界温度(Tc)は 81.9 K と低く、このことは接続部で酸素ドーピングが不十分であることが原因と示差されている。そこで、本研究では接続熱処理前の試料の追加堆積前駆体膜の表面を加工して溝を導入し、熱処理時のガスの拡散を高効率化して Tc を向上させることを検討した。

2. 実験方法

MOD 法を用いて、幅 6 mm、長さ 10 mm の GdBCO 線材上に YBCO もしくは GdBCO の原料溶液(Gd : Ba : Cu = 1:2:3) をスピコートで追加塗布し、550°C で仮焼熱処理して前駆体膜を得た。このように作製した 2 つの前駆体膜を長さ約 3 mm 長で重なり合うように対向させて、加圧しながら 800°C で本焼熱処理して接続体を得た。また、本研究では GdBCO 前駆体膜の表面に幅約 20 μm の溝を線材長手方向に等間隔(約 720 μm 間隔)で導入し、上述した接続熱処理を施した試料も作製した。なお、作製した YBCO/GdBCO 試料は透過電子顕微鏡による接続界面の組織観察に用い、GdBCO/GdBCO 試料は超伝導特性の評価に用いた。得られた GdBCO/GdBCO 試料を 500°C で 200 時間酸素アニールした後、四端子法にて Tc の測定を行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に YBCO/GdBCO 試料同士を用いて作製した接続体の透過電子顕微鏡像を示す。下地である GdBCO 層と追加堆積した YBCO との界面および YBCO 層同士の接続界面のい

ずれにおいても、一部で空隙が観察された以外は、観察視野全体にわたって異相の生成は見られず、密着性良く試料作製できていることが観察された。

Fig.2 に、接続熱処理前の GdBCO 前駆体膜表面に溝を導入した試料の接続熱処理前の外観写真を示す。この表面加工を施した試料を用いて作製した接続体の Tc を評価した結果、87.5 K であった。表面加工無しの試料で作製した接続体の Tc は 81.9 K であったことから、接続前の試料に表面加工を施すことにより Tc が約 5.6 K 向上した。このことから、表面加工を施すことにより接続熱処理および酸素アニール時のガスの拡散が高効率化されたことが示差された。

参考文献

- [1]Y. J. Park et al., Supercond. Sci. Technol., 27 (2014) 85008.
 [2]X. Jin et al., Supercond. Sci. Technol., 28 (2015) 75010.
 [3]FurukawaElectricwebsite:
https://furukawa.co.jp/release/2016/kenkai_160427.html
 [4]K. Ohki et al., Supercond. Sci. Technol., 30 (2017) 11501.
 [5]K. Hiratsuki et al., Physics Procedia, 81 (2016) 109.

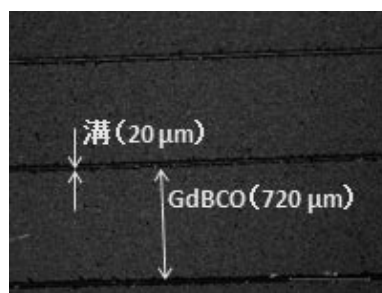


Fig. 2 Photograph of additionally deposited precursor film with pass for gas diffusion.

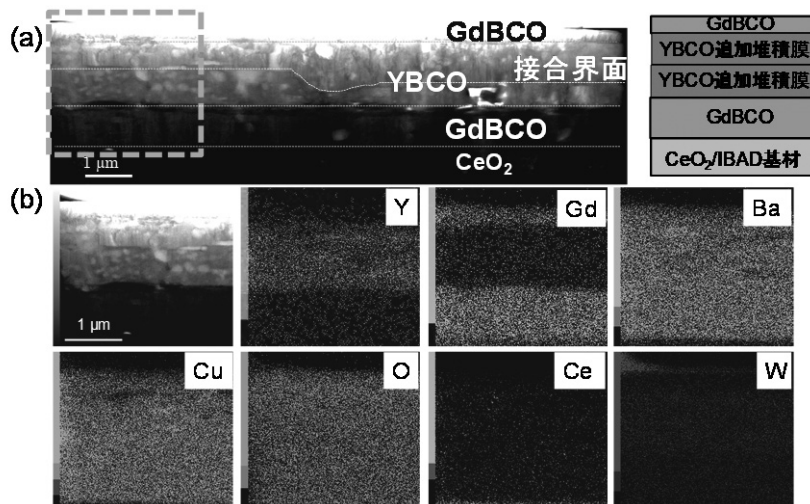


Fig. 1 (a) BF-STEM image and (b) STEM-EDS images of joint interface of joined sample prepared by YBCO/GdBCO films.

25T 無冷媒超伝導マグネットの運転特性と計画 Operation of 25T cryogen-free superconducting magnet and future plan

淡路 智, 岡田達典, 高橋弘紀, 木村尚次郎, 野尻浩之 (東北大学)

AWAJI Satoshi, OKADA, Tatsunori, TAKAHASHI Kohki, KIMURA Shojiro, NOJIRI Hiroyuki (Tohoku Univ.)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

日本の強磁場計画として、東大・阪大・東北大・物材機構で構成される強磁場コラボラトリ計画が進行中である。その一環として、これまでに 25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)を東北大学に建設し、 $\phi 52$ mm の室温空間に 24.6 T の磁場発生に成功した[1]。現在 25T-CSM は、1 年以上共同利用に供され様々な実験に用いられている。25T-CSM は、14 T の金属系超伝導コイル (LTS コイル) と 11 T の高温超伝導コイル (HTS コイル) から構成されている。HTS コイルは、ニッケル合金補強 Bi2223 (HT-Nx) と RE123 コイルの 2 種類作製したが、最終的には Bi2223 コイルで 24.6 T の磁場発生に成功し、現在も運用している。このマグネットは、HTS 及び LTS コイル共に、高い電磁力で設計されている点特徴であり、LTS で最大 250 MPa、HTS(Bi2223)で最大 330 MPa の hoop 力となる設計である。また、すでに問題となっている HTS テープに伴う遮蔽電流の効果も少なからず現れている。将来の HTS コイルを用いた強磁場マグネット開発には、25T-CSM の運転特性が非常に重要な意味を持つ。本発表では、これらの特殊性を鑑み、すでに 1 年以上の運転を実施してきた実績に基づいて、コイルの運転特性について報告し、次期計画としての 30T 無冷媒超伝導マグネットについて述べる。

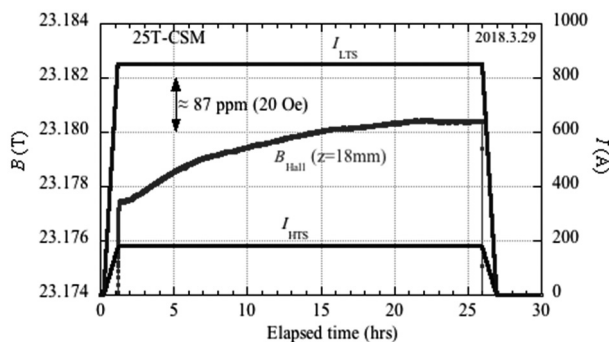


Fig. 1 Field stability at $z=18$ mm above the center at $B_0=24$ T.

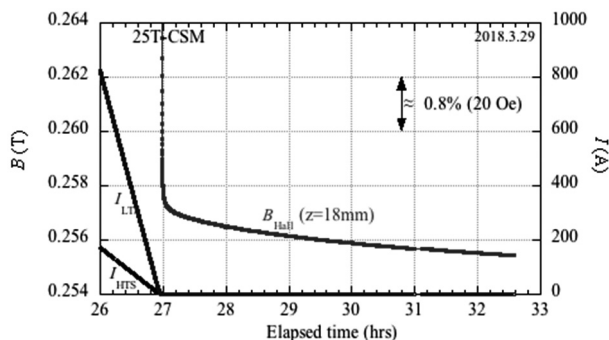


Fig. 2 Field stability at 18 mm above the center without operation current.

2. 25T-CSM の運転特性

Fig. 1 は中心磁場 $B_0=24$ T 発生時にホール素子で測定した磁場の時間変化である。ホール素子は磁場中心から 18 mm 上に位置しているため、中心磁場が 24 T よりも低くなっているが、時間とともに上昇し、飽和する傾向があることが分かる。磁場発生直後は、約 3.2 Oe/h (14 ppm/h) の磁場変化が、24 時間経過後には約 0.052 Oe/h (0.23 ppm/h) に減少している。この変化は銅合金補強された Bi2223 (HT-CA) を用いた 20T-CSM とほぼ同じとなっている。一方で、運転電流をゼロとした場合の残留磁場は、約 0.25 T 程度であり、時間とともに減少する。そのときの変化率は約 3.5 Oe/h となることが分かった。

最初のテスト運転時、HTS コイルと LTS コイル双方でコイル電圧にスパイクノイズが頻繁に現れた(Fig. 3)。これは、高電磁力による線材の動きによると考えている。このため、コイルのバランス電圧は常時モニタしており、異常が見られた場合には運転を停止する事としている。スパイクノイズの大きさは、時間の経過と共に減少しており、1 年以上経過した最近では LTS コイルでスパイクノイズはほとんど現れなくなっている。一方で HTS コイルではまだスパイクノイズが見られ、特に減磁過程の高磁場側で大きくなる傾向がある。hoop 力の低減のため、コイルの一部をターン間離型していることでコイルの剛性が低下していることが原因ではないかと考えている。

3. 次期計画としての 30T 無冷媒超伝導マグネット

25T-CSM の結果を踏まえて 30T 無冷媒超伝導マグネットの開発を計画している。これは、強磁場コラボラトリ計画に当初から予定されていた計画であり、25T-CSM はその R&D を兼ねていた。現在、25T-CSM の内層コイルを RE123 コイルで置き換えることで 30 T を発生するアップグレード案と、全体を開発する案の両方を計画中である。いずれの場合にも、HTS, LTS 共に導体のさらなる高強度化あるいは補強が必要である。

参考文献

[1] S. Awaji *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001.

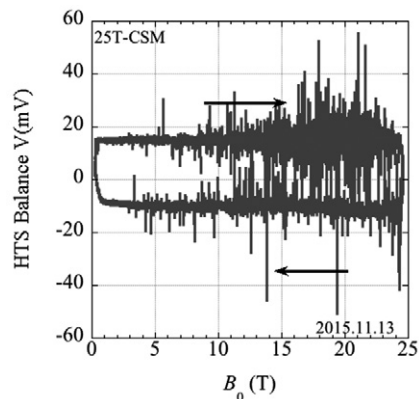


Fig. 3 Balance voltage of Bi2223 insert coil as a function of central field at the 1st performance test.

Yoroi-coil 構造を有する高磁場用高温超電導マグネットの応力伝達特性

Stress transmission characteristics of high-field HTS magnets using Yoroi-coil structure

吉田 悠人, 加藤 雅大, 宮城 大輔, 津田 理, 淡路 智(東北大)

YOSHIDA Yuto, KATO Masahiro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yuto.yoshida.q7@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

強磁場生成は新現象発見の宝庫と考えられており、銅マグネットよりもコンパクトかつ省電力な超電導マグネットが注目を集めている。しかし、強磁場化に伴い、超電導線材に強力なフープ応力が作用することで、超電導線材が破壊される恐れがある。この課題に対して、コイル半径の増大を抑えつつ、強力な電磁力に耐えうる構造として、Yoroi-coil 構造が提案されている[1]。本研究では、内層コイルの上下に厚い円盤を設ける従来の Yoroi-coil 構造と、パンケーキコイル毎に Yoroi-coil 構造を構築し、それらを積層した構造と比較し、従来のオーバーバンド構造を含め、コイルおよび補強材に働く応力の低減効果およびコイル半径の抑制効果を検討した。

2. 解析方法

解析した Yoroi-coil の諸元を Table 1 に示す。また、解析モデルの断面図を Fig.1 に示す。本解析では、Yoroi-coil 構造の対称性を考慮して 1/8 モデルを作成した。また、超電導コイルを一体物として扱い、コイル外周面と補強構造部の接触面に接触条件を適用することで応力の伝達を模擬した。冷却時の熱収縮を考慮するため、コイル構造全体を 293K から 4K に冷却し、定常熱応力を計算した。コイルには、バックアップ磁場として z 軸正方向の一律磁場 (38T) が印加されているとし、コイル電流が 130 A の場合の応力分布を、三次元有限要素法により解析した。

3. 解析結果及び考察

超電導コイルに作用する最大フープ応力と補強材外半径の関係を図 2 に示す。図 2 より、Yoroi-coil 構造を構築することで、従来型のオーバーバンド構造よりも小さい補強材外半径で、超電導コイルの最大フープ応力を 500MPa に抑制できることがわかった。一方で、補強材に作用する最大フープ応力と補強材外半径の関係を図 3 に示す。図 3 より、オーバーバンド構造やマグネット全体で Yoroi-coil 構造を構築した場合は、制約条件(500MPa)以下に収まるが、パンケーキコイル毎に Yoroi-coil 構造を構築した場合は、常に最大フープ応力が 500MPa を超過することがわかった。これは、補強円盤先端部にフープ応力が集中することで、超電導コイルに働く強力な電磁力に対抗できないためと考えられる。以上より、マグネット全体で Yoroi-coil 構造を構築する手法が有効であることがわかった。

謝辞

本研究は、科研費 (15H03586) の助成を受けて実施したものである。

Table 1 Specifications of a Yoroi-coil

Superconducting wire type	PLD-GdBCO-IBAD
HTS tape width	4 mm
HTS tape thickness	0.13 mm
Insulation thickness	12.5 μ m
Number of turns	360 turns
Inner diameter of coil	40 mm
B at central	12 T
Frame and plates	SUS316L
Operating current	130 A

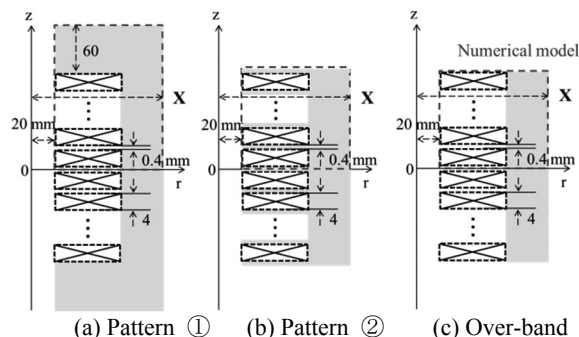


Fig.1 Analytical models of Yoroi-coil.

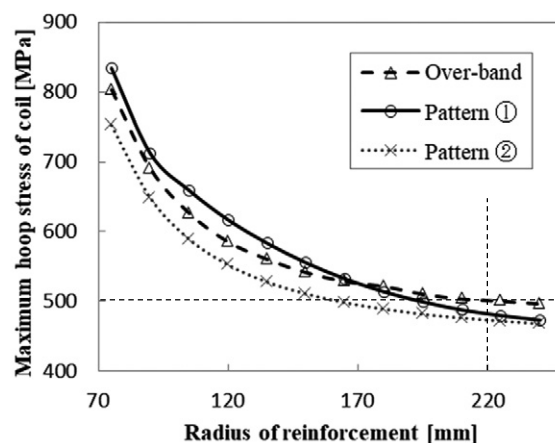


Fig.2 Relationship between outer radius of reinforcement and maximum hoop stress of coil.

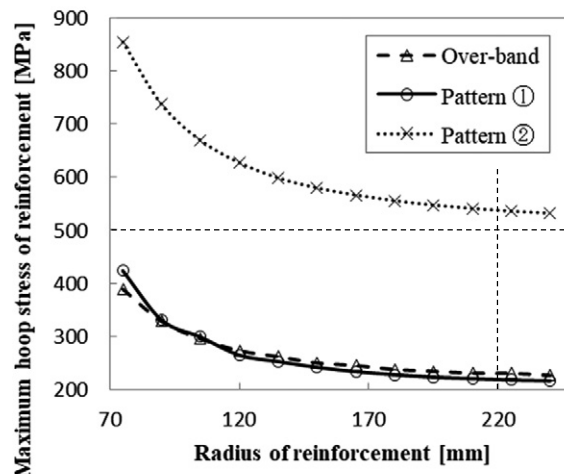


Fig.3 Relationship between outer radius of reinforcement and maximum hoop stress of reinforcement.

参考文献

- 渡部智則・長屋重夫・平野直樹・淡路智・小黒英俊・石山敦士・王旭東:「高強度パンケーキコイル構造 (Yoroi-coil) の開発」, 低温工学, Vol.48, No.5 pp.213-219 (2013)

マルチフィラメント薄膜線材で巻かれたダブルパンケーキコイルとソレノイドコイルの遮蔽電流磁場に与える銅端子の影響

Influence of copper terminals on shielding-current-induced fields in stacked double pancake coils and layer-wound solenoid coil wound with multifilament coated conductors

溝端 悠大, 富永 直樹 (京大); 曾我部 友輔 (京大・学振 DC1); 雨宮 尚之 (京大)
 MIZOBATA Yudai, TOMINAGA Naoki (Kyoto University); SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1);
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)
 E-mail: y-mizobata@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

遮蔽電流磁場 (SCIF) の低減にマルチフィラメント化が有効であることが知られている。マルチフィラメント化した線材を銅メッキした銅メッキマルチフィラメント薄膜高温超伝導線材では銅メッキ層を介して流れる遮蔽電流 (結合電流) が誘導され、この結合電流が減衰してはじめて SCIF が低減される。電流導入部として線材両端に銅端子を取り付ける場合、銅端子を介しても結合電流が流れる。本研究では、銅端子のついた場合もマルチフィラメント化が SCIF の低減に有効であるかどうかを数値電磁界解析によって評価した。

2. 解析条件

線材として、モノフィラメント高温超伝導線材、銅メッキマルチフィラメント薄膜高温超伝導線材、フィラメント間絶縁マルチフィラメント薄膜高温超伝導線材の三種類を考えた。これらの線材で巻かれた積層されたダブルパンケーキコイル (DPC) とソレノイドコイル (SLC) のモデルを作成し、線材内の遮蔽電流の分布や SCIF の振る舞いを評価した。線材に幅 4 mm、厚さ 10 mm、長さ 50 mm の銅端子をつけた場合とつけない場合の解析を行い、比較検討した。線材の幅は 4 mm、厚さは 0.1 mm、超伝導層の厚さは 1.75 μm である。DPC、SLC ともにコイルの内径を 40 mm、径方向のターン数を 40、高さ方向のターン数を 10 として、径方向、高さ方向の線材の間隔は 0.1 mm とすることでコイルの断面がほぼ同じとなるようにした。SLC は 8 層を一条の線材で巻くことで、DPC と SLC を構成する線材の長さを約 12 m に揃えている。超伝導特性はパーコレーション遷移モデルで表現し、フィラメント間の横断抵抗、銅端子の抵抗にはそれぞれ結合損失測定から決定した値を銅の温度依存性により補正した値 [1]、RRR=100 の銅の抵抗を用いた。温度を 40 K として、10 s で 300 A まで励磁後、 2×10^4 s 間一定の電流を流した。

3. 解析結果

コイル中心における SCIF の時間変化を Fig. 1 に示す。SCIF が 0.06 T となるまでの時間を比べると、DPC では、銅端子のない場合の 1.4×10^4 s に比べて、銅端子がある場合は 2×10^4 s と明らかに遅くなっている。一方、SLC では、銅端子がない場合、ある場合でそれぞれ、630 s、700 s であり、SLC では DPC より SCIF の減衰が速く [1]、銅端子の有無が減衰時間にほとんど影響しない。この SCIF の減衰は結合電流の減衰に依存している。

Fig. 2 に線材端付近の電流流線図を示す。銅端子がない場合線材端で結合電流の減衰に伴う磁束の侵入が見られるが、銅端子がある場合 DPC、SLC ともに線材端から磁束が侵入しにくくなっていることがわかる。一方で Fig. 3 の SLC の線材中央付近の電流流線図をみると、コイルの中央の平面 (midplane) で垂直磁界成分の向きが反転し等価的にツイストされたような形となるため、ここから磁束が侵入していることがわかる。SLC の線材では midplane と交差する部位が 8 か所あり、midplane が線材端 (2 か所) より磁束の侵入を支配しているため、SLC では銅端子は SCIF の減衰にはほとんど影響

を与えない。一方、DPC では、垂直磁界の向きが反転するような部位はなく、磁束の侵入が線材端からに限定されるため、銅端子をつけることで SCIF の減衰が遅くなる。

謝辞

本研究の一部は科研費 (JP16H02326) の支援により、一部は JST S-イノベの支援により行われた。

参考文献

1. Y. Mizobata, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol.95 (2017) p. 22.

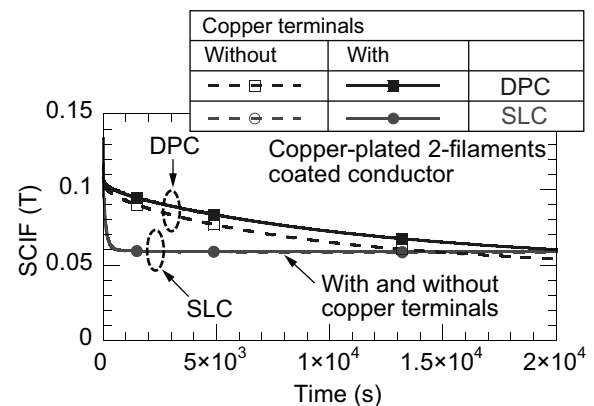


Fig. 1 Temporal change of the SCIF at center of coil wound with copper-plated 2-filaments.

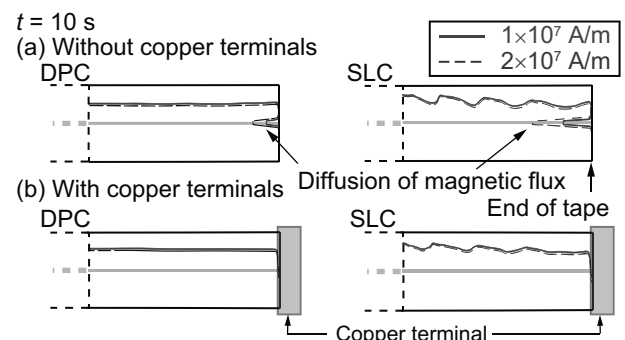


Fig. 2 Current lines in the coil wound with the copper-plated two-filaments coated conductor at end of tape.

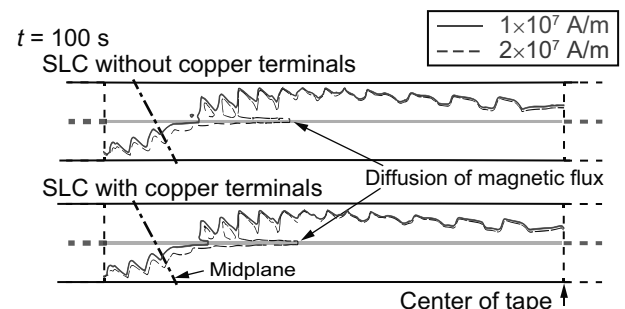


Fig. 3 Current lines in the SLC wound with the copper-plated two-filaments coated conductor at center of tape.

スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの 三次元電磁界解析による交流損失評価手法

Three-dimensional electromagnetic field analysis model for ac loss calculations of HTS coils in superferric magnets

曾我部 友輔(京大・学振 DC1); 安永 将広, 富永 直樹, 雨宮 尚之(京大)
SOGABE Yusuke (Kyoto University, JSPS DC1);
YASUNAGA Masahiro, TOMINAGA Naoki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)
E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

高繰り返しシンクロトロン消費電力低減には、高温超伝導コイルおよび強磁性材料から構成されるヨークを要素とするスーパーフェリクマグネット (Fig. 1) が有効である。高繰り返しシンクロトロンでは時間変化する磁界を発生することが要求されるため、スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失評価および低減は、システムの消費電力削減の観点において重要な課題である。今回は、スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失を評価するための電磁界解析手法について検討した。

2. 高温超伝導コイル経験磁界評価手法

スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失は、コイルに流れる電流によって発生する磁界 (自己磁界) と磁化した鉄ヨークがコイルに対して発生する磁界 (外部磁界) によって決まる。高温超伝導コイル内の外部磁界分布は鉄ヨークの非線形磁気特性の影響を受ける。

当手法では、コイル内の非一様な電流分布が鉄ヨークの磁化に与える影響は十分小さいと仮定し超伝導線材のもつ非線形導電特性は無視し、外部磁界分布をコイルおよび鉄ヨークが存在する場合の磁界分布からコイルのみが存在する場合の磁界分布を差し引くことによって計算した。この仮定の妥当性は磁界解析によって評価し、交流損失計算精度に問題がないことを確認した。鉄ヨークの非線形磁気特性の影響を受ける外部磁界はコイル通電電流値に比例しないため、コイル通電電流値をパラメータとした磁界解析を実施した。

3. 三次元電磁界解析による交流損失計算

当交流損失評価手法では、別途開発された大規模三次元電磁界解析モデル [1] を適用した。この電磁界解析モデルでは、消費メモリおよび計算時間削減のため階層型行列法を適用しており、従来の解析モデルから 95% 以上の消費メモリ削減効果が確認されている。

また、精密な交流損失計算のため、高温超伝導線材の電界 E -電流密度 J 特性の、磁界強度 B および磁界印加角度 ϕ 依存性を、実際の高温超伝導線材の測定結果に基づいて定式化した [2]。定式化結果を Fig. 2 に示す。定式化の上で、 E - J 特性は n 値モデルによって表現し、臨界電流密度 J_c および n 値が B および ϕ 依存性をもつとした。

上記のモデルを用い、ある高繰り返しシンクロトロン要求仕様に沿って設計されたスーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失計算を実施した。コイル内の交流損失密度分布を Fig. 3 に示す。Fig. 3 中の A の箇所は交流損失密度が高くなっている。この位置は超伝導線の経験磁界が大きく、かつ Fig. 2 中の J_c が低くなる ϕ に相当するため、超伝導線の臨界電流が低い、すなわち負荷率が高い箇所である。この位置の線材の経験磁界をマグネット形状設計によって制御することが、マグネット並びに高繰り返しシンクロトロンシステム全体での消費電力削減に重要である。

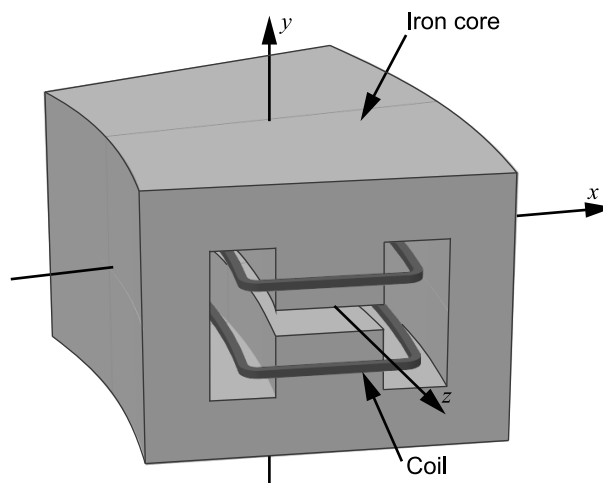


Fig. 1 Isometric view of a superferric magnet.

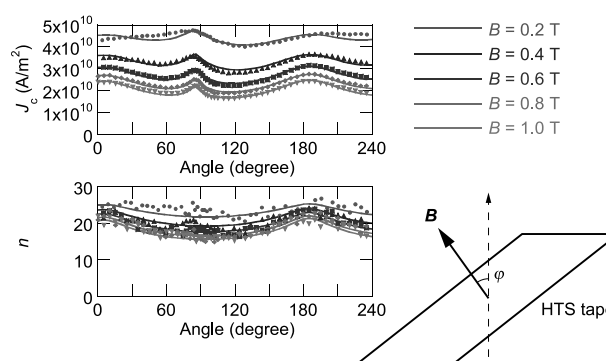


Fig. 2 Dependences of J_c and n -value on B and ϕ .

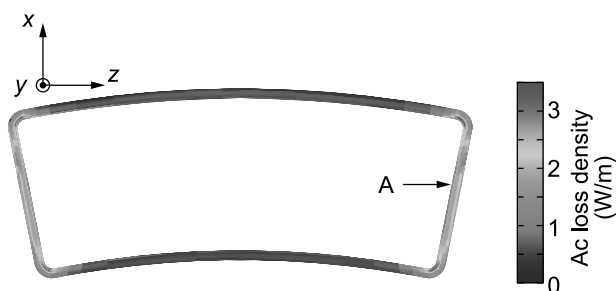


Fig. 3 Ac loss density distribution in an HTS coil

謝辞

本研究の一部は文部科学省の原子力システム研究開発事業の支援によって行われた。

参考文献

1. N. Tominaga, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018) 4900305.
2. Y. Sogabe, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018) 4700105.