

Hot-wall PLD による人工ピン導入 REBCO 線材

Development of BMO doped REBCO coated conductors by the hot-wall PLD technique

平田 渉, 柿本 一臣, 五十嵐 光則, 藤田 真司, 吉田 朋, 武藤 翔吾, 飯島 康裕, 直江 邦浩(フジクラ);
岡田 達典, 淡路 智(東北大); 木須 隆暢(九大)

HIRATA Wataru, KAKIMOTO Kazuomi, IGARASHI Mitsunori, FUJITA Shinji, YOSHIDA Tomo, MUTO Shogo, IJIMA Yasuhiro,
NAOE Kunihiro (FUJIKURA); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
E-mail: wataru.hirata@jp.fujikura.com

1. はじめに

フジクラでは、IBAD/PLD 法を用いた高品質な長尺 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO)線材の開発、製造をおこなっており、磁場中 J_c を向上させるため、Hot-wall 方式の PLD 装置を用いた人工ピン導入 REBCO 線材の開発を進めている。近年では、 BaHfO_3 (BHO)を人工ピンとして EuBCO に導入することで、顕著な特性向上が報告されており[1]、フジクラでも成膜条件の最適化や長尺化を進めている[2]。今回は、人工ピン導入 REBCO 線材の磁場中 J_c の向上を目指し、BHO 添加量を変えて特性の変化を調査した結果を報告する。

2. 線材作製

75 μm 厚, 12 mm 幅の Hastelloy[®]テープ上に IBAD-MgO 層を含む中間層薄膜を成膜した基板の上に、人工ピンとして BHO を添加した EuBCO ターゲットを使用して Hot-wall PLD 装置で REBCO 層を成膜した。BHO の添加量が異なるターゲットを用い、高蒸着速度で成膜したサンプルの諸元を Table 1 に示す。BHO の添加量はサンプル A, B, C の順に多くなっている。REBCO 層上にはスパッタ法により Ag 保護層を成膜した。

3. 評価方法

磁場中 J_c の評価には、フォトリソグラフィおよびウェットエッチングにより 30 μm 程度 \times 1 mm 長のマイクロブリッジを形成した。サンプルを He ガスで冷却し、超伝導マグネットを用いて磁場を印加して四端子通電法で I - V 測定を行った。臨界電流 I_c の電界基準は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とし、10 mm 幅換算 I_c [A/cm] は、測定した I_c に、77.3 K, self-field におけるブリッジ加工前後の I_c 比を掛けて算出した。強磁場中での I_c 測定は、東北大金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターにおいて実施した。

REBCO 層の微細構造は、集束イオンビーム装置を用いてサンプルを加工し、透過電子顕微鏡により断面/平面観察を行った。

4. 結果および考察

各サンプルの 30 K, 7 T における J_c の磁場角度依存性を Fig. 1 に示す。BHO 添加量が少ないサンプル A や B の場合、 $\theta = 90^\circ$ ($B//ab$) の J_c が高く、 $\theta = 0^\circ$ ($B//c$) 付近の J_c の角度依存性は小さい。BHO 添加量が多いサンプル C では、 $\theta = 90^\circ$ 付近の J_c は低下しているが、 $\theta = 0^\circ$ 付近の J_c が向上していることがわかる。

Fig. 2 にサンプル C の平面 STEM 像を示す。BHO ナノロッドの径は 5nm 程度であり、10nm 程度の間隔において均一に分散していることがわかる。断面 STEM 像においても c 軸方向に直線状に成長するナノロッドを確認しており、 $B//c$ 付近の J_c の増加に寄与していると考えられる。

生産性向上に有利な高蒸着速度の成膜条件でも、直線状のナノロッドが成長することを確認でき、磁場中 J_c を制御できる見込みが得られた。

Table 1 Specifications of BHO doped EuBCO samples.

Index	Thickness [μm]	I_c [A/cm] (77.3K, self-field)	J_c [MA/cm ²] (77.3K, self-field)	T_c [K]
A	2.9	713	2.4	92.9
B	2.4	496	2.1	92.3
C	2.9	249	0.9	89.5

※ BHO concentration : A < B < C

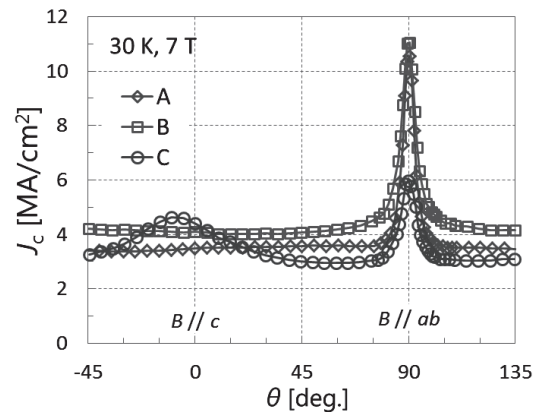
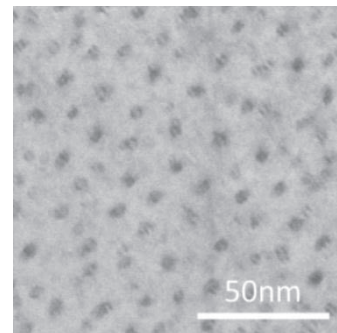
Fig. 1 Angular dependences of J_c at $T = 30$ K and $B = 7$ T.

Fig. 2 Plan-view STEM image of the sample C.

謝辞

この成果の一部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)の委託および助成事業の結果得られたものである。

参考文献

- [1] T. Yoshida *et al.*, J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 49 No. 3 (2014) p.163.
[2] S. Fujita *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.28.

PLD-SmBCO 中尺線材のプルームの組成分布の均一化及び高 J_c 化技術

High J_c in SmBCO Coated Conductor by homogeneous composition in plume during PLD process

後藤 大志, 土屋 雄司, 一野 祐亮(名大), 淡路 智(東北大), 松本 要(九工大), 吉田 隆(名大)

GOTO Daishi, TSUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University);

AWAJI Satoshi (Tohoku University); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: goto-daishi16@ees.nagoya-u.ac.jp

1.はじめに

REBa₂Cu₃O₇(REBCO)高温超伝導線材は磁場中臨界電流密度 J_c の特性が優れる材料として様々な超伝導機器へ応用が期待されている。代表的な作製法であるパルスレーザー蒸着(PLD)法は、REBCO 焼結体ターゲットに高エネルギー紫外レーザーを照射し、ターゲットのアブレーションにより蒸着する方法である。また、PLD 法を用いた長尺線材作製には Reel to Reel (RTR)システムで線材を移動させながら成膜を行う。しかし、PLD 法では、プルーム内のアブレーションした元素の組成分布が存在するために線材などの組成に不均一な点が課題として挙げられる。

そこで、本研究では RTR システムを用いた PLD-SmBCO 線材の J_c 向上を目的として、マスクを用いた線材の組成の均一性の向上を行った。そのため、PLD 法により蒸着された元素の組成分布を測定し、組成ずれが起こる領域にマスクを設けて蒸着を抑制し、その J_c に与える影響を検討した。

2. 実験方法

KrF エキシマレーザー、RTR システムを用いた PLD 法により IBAD-MgO 基板上に SmBCO 線材を作製した。固定基板試験として、線材を固定して元素分布および蒸着レート分布を測定した。次に、線材を送りながら成膜を行った。このとき、マスクの有無により、試料を with Mask、without Mask と表記する。両試料の作製条件は、成膜温度は 850°C 固定し、線材送り速度 0.072-0.288 m/h に対しレーザー繰り返し周波数を 10-40 Hz と、同等の膜厚となるように変化させた。Fig.1 にマスクを用いた SmBCO 線材の成膜模式図を示す。with Mask 線材は Fig.1 に示すようにヒーター加熱部の中心を原点として、-3 cm 以下および+3 cm 以上の領域にマスクを設置した。作製した試料の組成及び膜厚は、誘導結合プラズマ(ICP)分光法を用いて評価した。試料の超伝導特性は、直流四端子法により測定した。また、X 線回折により線材の結晶構造を同定した。

3. 実験結果及び考察

Fig.2 に固定基板試験の結果として、位置 x での組成比および成膜レートを示す。中心から 3 cm 以上離れた領域では、Sm/Cu 及び Ba/Cu の比率が SmBCO 組成より小さく、Cu-rich であった。また、図より成膜レートは中心から離れるほど 1 次関数的に減少した。そこで、中心から 3 cm 以内の組成ずれの小さい領域で成膜を行うため、6 cm 幅のマスクを設けることで組成分布を均一化し、 J_c の向上を図った。

Fig.3 に with Mask 及び without Mask 線材の線材送り速度に対する J_c を示す。図より全ての線材送り速度について with Mask の方が J_c が向上することが分かり、マスクは J_c の向上に有効であることが確認された。また X 線回折の結果より線材送り速度が速いほど a 軸配向相の増加することが確認された。これは線材送り速度が速いほどレーザー繰り返し周波数が大きく、成膜レートが増加するためであると考えられる。したがって、Fig.3 で確認される線材送り速度が増加するに伴う J_c の向上率の減少は a 軸配向相の増加による J_c の低下が支配的になるためであると推察される。

当日は with Mask 及び without Mask の表面形状や結晶配向性についても議論するとともに高 J_c 長尺線材に開発状況について発表する予定である。

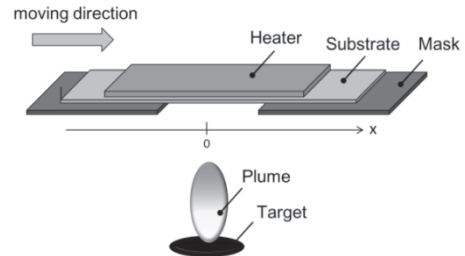


Fig. 1 Schematic drawing of RTR-system PLD with Mask

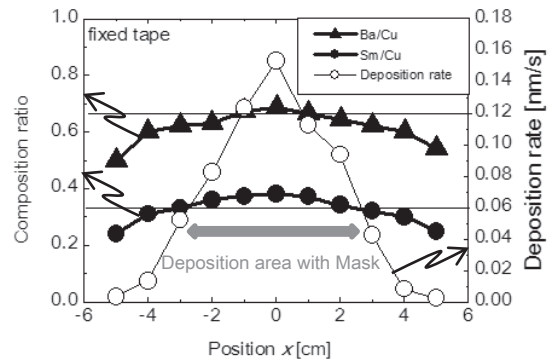


Fig. 2 Composition ratio and deposition rate of fixed PLD-SmBCO CCs.

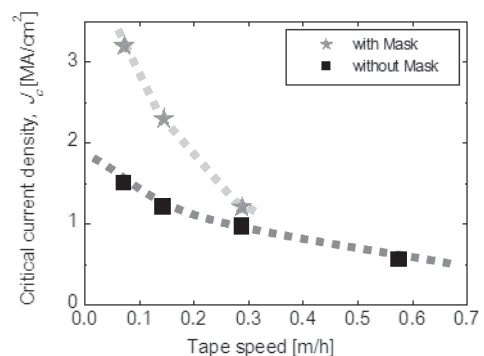


Fig. 3 J_c at 77 K for the SmBa₂Cu₃O₇ coated conductors with or without Mask

4.謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費(15H04252, 15K14301, 15K14302,16H04512 及び 16K20898)と先端的低炭素技術開発(JST-ALCA)及び名大-産総研アライアンス事業からの助成を受けて実施したものである。また、本研究では、株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープに関して御協力を得た。

デュアルビームによるレーザスクライビング加工の速度向上

Increase of speed of laser scribing process by dual beam

町 敬人, 衣斐 颯, 和泉輝郎 (産総研)
 Takato MACHI, Akira Ibi, Teruo Izumi (AIST)
 E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材を超電導マグネットに応用する上で交流損失の低減および遮蔽磁場の影響の低減が必要不可欠である。そのために我々は安定化層と超電導層を溝状に切削するレーザスクライビング法を用いて線材の細線加工を行っている[1]。これまでエキシマレーザー(KrF)を用いた長尺スクライビング装置の開発を行い、溝幅の制御性に優れ、加工による劣化を生じにくく、剥離強度も維持でき、長尺線材に適用できる手法であることを示してきた。次に克服しなくてはならない技術課題は、加工速度の向上である。

開発した装置では一度に1本のビームしか照射できないことが加工速度を律速する最大の要因であった。レーザー源として用いているコヒーレント社のエキシマレーザーはガスレーザーであるため、固体レーザーほどの強いガウシアン成分があるわけではないが、光学マスクによって長方形に整形されたレーザービームは均一でなく、中央部に向かって強度が高くなるため、一度に1本のビームしか作り出すことができなかった。

そこで、線材の幅方向に相当する方向にビームホモジナイザーを導入することによってマスク面でのビーム強度を均一にすることを試み、得られた均一ビームによりデュアルビームを作り出して2本同時のスクライビングを行った結果を報告する。

2. 実験方法

(1) 装置設計

デュアルビーム化には線材の幅方向(短軸方向)でのレーザービーム強度の均一化が必要である。線材は一定の速度で搬送されており、そこに長方形に整形されたパルスビームが照射されるので、線材の長手方向の均一度は必要としない。改造する光学系の概念図を図1に示した。

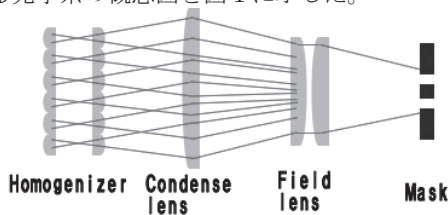


Fig.1 Concept of optical design for uniformity of laser beam

短軸方向のビームを均一化する方法として、シリンダリカルレンズを短軸方向に複数組み合わせるものを2枚セットにした方式(ホモジナイザー)を採用した。またマスク直前のフィールドレンズ面で一定の大きさとなるようにするためのコンデンサーレンズを設けた。マスクを通過したビームを照射するためにも新たなフィールドレンズを設けた。線材面で均一な範囲が幅方向で0.6mm以上と設計した。これは、5mm幅線材を10分割(0.5mm間隔でスクライビング)加工するためである。

(2) ビームの均一性の観察とREBCO線材での加工

線材面でのビームの強度分布はビームプロファイラを用いて観察した。またAg厚8μmのEuBCO線材に形成した2本の溝の深さを走査型レーザー顕微鏡で観察した。

3. 実験結果および考察

図2に線材面でのレーザーの強度分布の観察結果を示す。改造後にマスクを抜いてビーム強度を測定した場合(a)には、幅方向に780μmの均一なビームプロファイルが得られ、設計値600μmよりも均一幅が広くとれることが分かった。マスクを挿入してデュアルビームとした場合(b)でも、強度が均一な2本のビームを得ることに成功した。

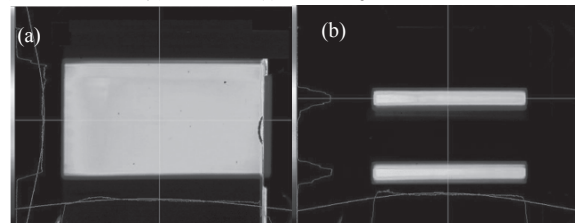


Fig.2 Beam profiles obtained by beam profiler, (a) a profile without mask after modification, (b) a profile of dual beam after modification.

図3に2本のビームによってスクライビング加工した溝の深さのエネルギー密度依存性を示す。2本のビームの深さ分布はほぼ同一となり、設計通りに同時に2本のスクライビング加工が可能となったことを示せた。

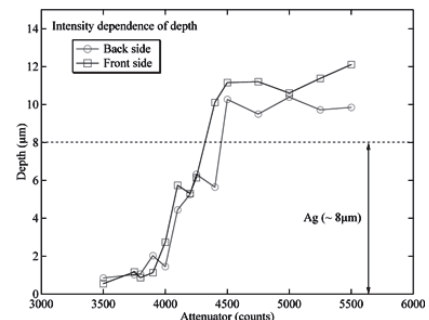


Fig.3 The energy density dependence of the slope depth in simultaneous laser scribing processing.

今後は、集光レンズの分解能を高めることによってビームの数を増加させる技術を開発する。

4. 謝辞

本研究は、METI, AMEDおよびNEDO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).

配向 Cu テープ上に導電性中間層を配置した低コスト REBCO 線材の検討

Development of Low-cost REBCO CC Using Conductive Buffer Layer on Textured Cu Tape

土井 俊哉(京大, JST-ALCA), 森村 岳雄(京大), 堀井 滋(京大, JST-ALCA); 一瀬 中(電中研, JST-ALCA)

DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA), MORIMURA Takeo (Kyoto Univ.), HORII Shigeru (Kyoto Univ., JST-ALCA);

ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA)

E-mail: doi@device.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

液体窒素冷却で使用可能な Y 系線材の開発が進み、現在 IBAD 法もしくは RABITS 法によって製造された Y 系超電導線材が市販されている。しかし、どちらの線材も非常に高価格であるため、一般への普及が進まない状況にある。これら Y 系線材の中で基材テープ、および Ag 層は大きなコストウエートを占めていると考えられる。これらの部分の大幅なコスト低減を図るためには、ハステロイや NiW 合金テープを安価なコモンメタルを用いた基材テープに変更すると同時に、YBCO 層の上に安定化層を形成するために不可欠な Ag 層を不要にする新しい線材構造の採用が有効と考えられる。

我々は、これまで絶縁性酸化物が用いられてきた中間層に導電性酸化物を採用した新規な YBCO/SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃/Ni/{100}<001>Cu テープ構造を提案し[1, 2]、新構造の短尺線材で 2.6 MA/cm² (at 77 K, 自己磁場中)と実用線材と同等の高い J_c が得られることを報告してきた[3]。今回、通電電流が I_c 値を超えた際に、配向銅テープに電流が回避することを確認したので報告する。

2. 実験方法

基材には田中貴金属工業製(市販)の Ni めっき{100}<001>結晶集合組織 Cu/SUS316 貼合せテープを用いた。SrTi_{0.85}Nb_{0.15}O₃ (Nb-STO)および YBCO 層の作製には KrF エキシマレーザーを光源とするパルスレーザー蒸着法(PLD 法)を用いた。SrTi_{0.85}Nb_{0.15}O₃、YBCO 層の厚さはそれぞれ 310 nm、190 nm とした。作製した薄膜の表面状態の評価は走査型電子顕微鏡(SEM)により、配向度の評価は X 線回折により行った。また、各層の厚さは透過型電子顕微鏡(TEM)による試料断面の観察結果より求めた。

I - V 測定に用いた試料の YBCO 層部分はマスクを掛けた後、レーザーを照射することで長さ 10 mm、幅 0.2 mm に加工した。印加磁場無し状態で試料を液体窒素に浸漬しながら、直流 4 端子法により I - V 測定を行った。

3. 結果と考察

Ni めっき{100}<001>結晶集合組織 Cu/SUS316 貼合せテープ(Ni/Cu/SUS316 テープ)上に、Nb-STO 導電性中間層を形成し、その上に YBCO 層を作製した。X 線回折測定(θ -2

θ 法および極点図法)結果から、Nb-STO 層および YBCO 層は良好な 2 軸配向を有していることが確認できた。

図 1 に、YBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SUS316 テープ試料の測定結果を、有限要素法(FEM)によるシミュレーション結果と併せて示した。 I_c は 0.94 A、 J_c に換算すると 2.5 MA/cm² と十分な値であることが確認できた。図中、赤の実線は n 値モデルで計算した I - V 曲線、4 本の破線は Nb-STO 層の抵抗率を変化させて FEM で計算した I - V 曲線である。測定結果は、Nb-STO 層の抵抗率を 1 Ω cm、5 Ω cm として計算した I - V 曲線の間に来ていることから、通電電流が I_c 以上になった時、電流が Nb-STO 層を通りぬけて配向 Cu テープに分流していることが確認できた。

以上のことから、新規な線材構造 YBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SUS316 テープとすることで、基材として使用する純 Cu テープに、テンプレート層と安定化層の役割を同時に担わせることが可能であることが確認できた。つまり、新規構造とすることで、高価な Ag を必要としない REBCO 線材が作製可能となることが分かる。

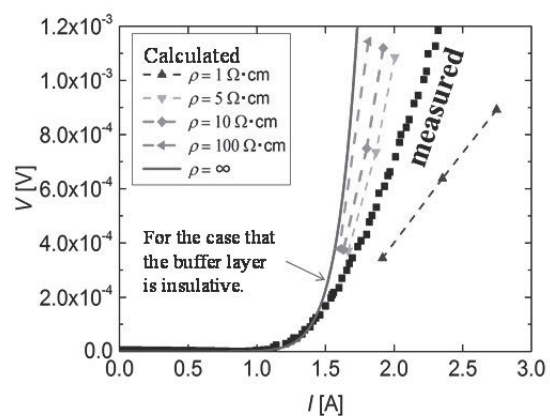


Fig. 1 I - V characteristics of the YBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SS316 tape, comparing with calculated curves by a finite element method.

参考文献

- [1] 土井ら, 応用物理 84(2015) 419.
- [2] Ichinose et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 56(2017)103101.
- [3] Doi et. al., Materials Trans. 58(2017)1493.

配向 Cu テープ上に導電性中間層を配置した YBCO 線材の微細組織

Microstructures of YBCO CC Using Conductive Buffer Layer on Textured Cu Tape

一瀬 中 (電中研, JST-ALCA); 森村 岳雄(京大), 堀井 滋, 土井 俊哉 (京大, JST-ALCA)
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA); MORIMURA Takeo (Kyoto Univ.),
 HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA)
 E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

最近では液体窒素冷却で使用可能な Y 系線材の開発が進み, IBAD 法もしくは RABiTS 法によって製造された Y 系超電導線材が市販されている。しかし, どちらの線材も非常に高価格であるため, 一般への普及が進まない状況にある。これら Y 系線材の中で基材テープ, および, 超電導層上に電氣的安定化層の厚い Cu を作製するために避けられない Ag 層は材料コストにおいてウエートを占めている。したがって, 大幅なコスト低減を図るためには, ハステロイや NiW 合金テープを安価なコモンメタルを用いた基材テープに変更するとともに, YBCO 層の上に安定化層を形成するために不可欠な Ag 層を不要にする新しい線材構造が必要となる。

我々は, 絶縁性酸化物が用いられてきた中間層に導電性酸化物を採用した新規な YBCO/Nb-STO/Ni/{100}<001>Cu テープ構造を提案し[1], 約 100nm の Nb-STO 中間層上に 2.6 MA/cm² (at 77 K, 自己磁場)の高い J_c を有する YBCO 層の作製に成功した。しかし, この線材では Ni と Nb-STO の界面に Ni の酸化物が生成していることがわかった [2]。また, Nb-STO 厚を 500nm 程度にすると界面の Ni 酸化物がほとんど生成しないことも確認した [3]。そこで, 今回, Nb-STO 層の厚さを最適化して YBCO 層を作製したところ, 2 軸配向し, 2.5 MA/cm² の J_c が得られたので, 内部組織を透過型電子顕微鏡で調べた。

2. 実験方法

基材には田中貴金属工業製(市販)の Ni めっき {100}<001>結晶集合組織 Cu/SUS316 貼合せテープを用いた。SrTi_{0.85}Nb_{0.15}O₃ (Nb-STO)および YBCO 層の作製には KrF エキシマレーザーを光源とするパルスレーザー蒸着法 (PLD 法)を用いた。Nb-STO 層の厚さは透過型電子顕微鏡 (TEM)で実測した結果 310 nm であった。作製した薄膜の配向度の評価は X 線回折により行い, 試料断面の組織観察および元素分析は TEM を用いた。

3. 実験結果および考察

Ni めっき {100}<001>結晶集合組織 Cu/SUS316 貼合せテープ (Ni/Cu/SUS316 テープ) 上に, Nb-STO 導電性中間層を形成し, その上に YBCO 層を作製した。X 線回折測定 (θ - 2θ 法および極点図法) 結果から, Nb-STO 層および YBCO 層は良好な 2 軸配向を有していることが確認できた。

310nm の Nb-STO 層を用いて作製した YBCO/Nb-STO/Ni/Cu/SUS316 テープ試料の断面 TEM 観察結果および各層の

制限視野電子線回折 (SAED) を図1に示す。Nb-STO/YBCO 界面はシャープで Nb-STO 中間層と YBCO 層の間で反応や拡散は生じていないことがわかる。EDX 分析を行った結果からも同様のことが確認できた。また, Ni/Nb-STO 界面もシャープで反応あるいは拡散層が存在せず, EDX 分析を行った結果からも界面に NiO などの反応層は存在しないことが確認できた。約 100nm の Nb-STO 層を用いて作製した試料においては, Ni/Nb-STO 界面に一部薄い NiO 層が生成していたが [2], 今回, Nb-STO 層の厚さを最適化することで, 比較的薄い 310 nm の Nb-STO 層で YBCO 作製中の酸素拡散をブロックして, Ni めっき層表面での絶縁性 NiO 層の生成を防止可能ながわかった。

以上のことから, 導電性中間層として 310nmの厚さの Nb-STO を用いることで界面に反応生成物が存在しない, 良好な REBCO 線材が作製可能であることがわかった。

参考文献

- [1] 土井ら, 応用物理 84(2015), pp.419-422.
- [2] 土井ら, 日本金属学会誌, 印刷中.
- [3] A. Ichinose, S.Horii, T. Doi, JJAP 2017.

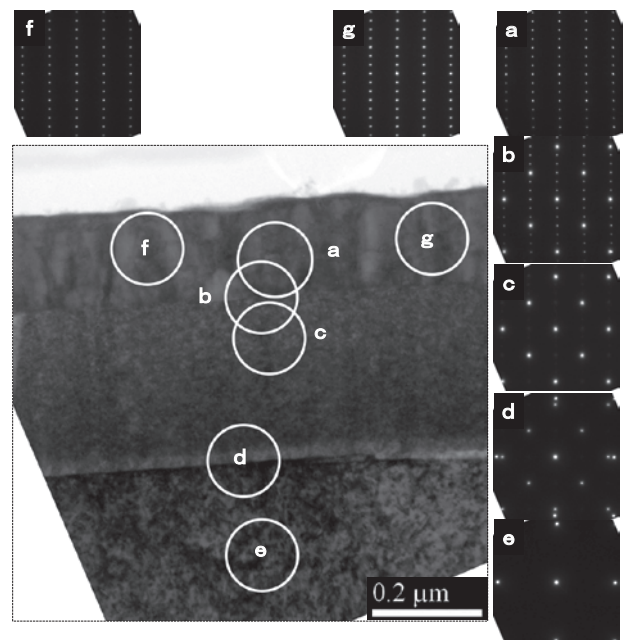


Fig. 1. Cross-sectional TEM image and SAEDs (a-g) from each circles indicated in the TEM image.

UTOC-MOD 法による BZO 導入 YGdBCO 線材の磁界中磁気顕微観察 In-field Magnetic Microscopy of BaZrO₃ Doped YGdBCO Coated Conductor Made by UTOC-MOD Process

東川 甲平, モハン シヤム, 鈴木 匠, 大村 俊介, 今村 和孝, 井上 昌睦 (九大);

淡路 智 (東北大); 中岡 晃一, 和泉 輝郎 (産総研); 木須 隆暢 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei, MOHAN Shyam, SUZUKI Takumi, OMURA Shunsuke, IMAMURA Kazutaka, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);

AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); NAKAOKA Koichi, IZUMI Teruo (AIST); KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

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

1. はじめに

TFA-MOD 法は、RE-123 線材の作製プロセスの中でも、将来の量産化に不可欠な低コストプロセスであることが期待されている。今回は、その中でも極薄膜を積層して作製する UTOC-MOD (Ultra-Thin-Once-Coating MOD) 法^{[1][2]}によって、顕著な特性の向上が見られることを、四端子法による評価に基づいて報告した^[3]。本報告では、走査型ホール素子顕微鏡 (SHPM) による評価に基づき、実際にマグネット応用で重要となる低電界領域の特性や、局所臨界電流密度の空間均一性について、そのプロセスの優位性を評価した。

2. 実験方法

SHPM による測定は 2 種類の製法の試料に対して行った。1 つは超伝導層を 170 nm の膜厚で 4 回塗布した総膜厚 0.75 μm の試料 ($d_{\text{once}} = 170 \text{ nm}$)、もう 1 つは超伝導層を 30 nm の膜厚で 20 回塗布した総膜厚 0.53 μm の試料 ($d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$) である。それぞれに対して、2 mm 幅 4 mm 長の試料を 2 つずつ用意し、計 4 つの試料に対して、外部磁界した際の磁界分布を計測し、Biot-Savart 則の逆問題を解くことで、磁化した試料中のシート電流密度分布を評価した。

3. 結果・考察

試料温度 20 K において外部磁界 3 T を印加した際に得られたシート電流密度分布を Fig. 1 に示す。 $d_{\text{once}} = 170 \text{ nm}$ の試料よりも $d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$ の試料の方が、総膜厚が小さいにもかかわらず、高いシート電流密度を有しており、これは臨界電流密度がかなり高いことを意味している。また、本シート電流密度分布において臨界状態モデルから臨界電流密度に達していると考えられる領域についてヒストグラムをとったものを Fig. 2 に示す。 $d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$ の試料は、臨界電流密度の値のみならず、その空間均一性にも優れることが本手法によって明らかとなった。さらに、磁気緩和計測により、それぞれの臨界電流密度を様々な電界基準に対して得たものを Fig. 3 に示している。四端子法による測定結果も合わせて示しているが、四端子法では評価の困難であった実用的な低電界領域においても、 $d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$ の試料の優位性が見られている。また、本手法と四端子法との対応は良く、本手法の定量性の確認も確認できている。

以上のように、一回当たりの塗布膜厚を低減した UTOC-MOD 法は、マグネット応用で重要となる低電界領域まで臨界電流密度に大きな優位性を有しているとともに、こちらも重要となる空間均一性に関しても優位性が見られる高いポテンシャルを有する製法であることが、本測定によって明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費 (16H02334, 16K14216) による助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] K. Nakaoka et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 8000304.
- [2] T. Izumi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 27 (2017) 6601604.
- [3] T. Suzuki et al., Abstract of CSSJ Conference 94 (2017) 17.

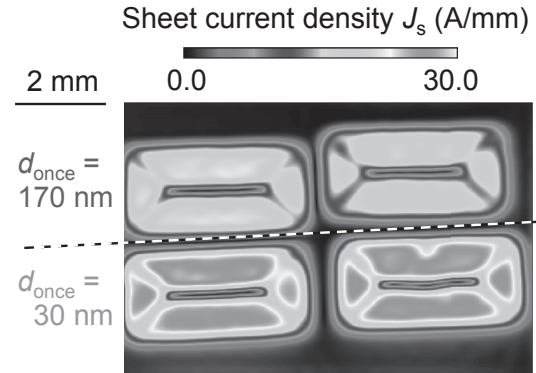


Fig. 1. Sheet current density distributions of the magnetized samples obtained by the SHPM at 3 T and 20 K.

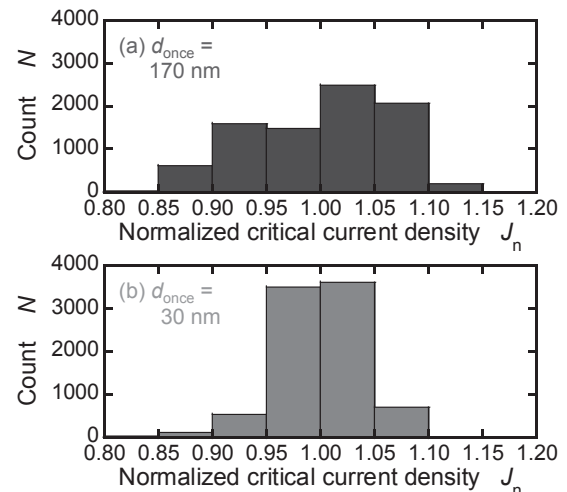


Fig. 2. Histograms of normalized critical current density shown for the two fabrication processes: $d_{\text{once}} = 170 \text{ nm}$ and $d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$.

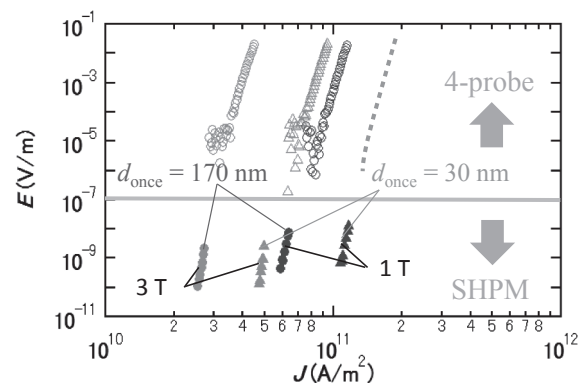


Fig. 3. Current density, J , vs. electric field, E , properties at 20 K obtained for the samples with the two fabrication processes: $d_{\text{once}} = 170 \text{ nm}$ and $d_{\text{once}} = 30 \text{ nm}$.

ナノロッドと積層欠陥を導入した YBCO 薄膜の磁束ピンニング特性 Vortex pinning property in YBCO film containing nanorods and stacking faults

堀出 朋哉; 大坪 紘二(九工大); 喜多 隆介(静大); 石丸 学(九工大); 淡路 智(東北大); 松本 要(九工大)
 HORIDE Tomoya; OTSUBO Koji (Kyushu Inst. Technol.); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.); ISHIMARU Manabu (Kyushu Inst. Technol.); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Technol.)
 E-mail: horide@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. はじめに

超伝導マグネットやケーブル応用に向け超伝導線材開発が進められている。YBa₂Cu₃O_{7-x}(YBCO)は磁場中臨界電流密度(J_c)特性が優れており、磁場中でも巨大な電流を流すことができる超伝導線材の開発が期待されている。YBCOは物質固有の超伝導特性として高い J_c を有するが、さらなる高 J_c 化のためにピンニングセンターの導入が行われてきた。BaZrO₃やBaHfO₃(BHO)などからなるナノロッドやナノ粒子が有効なピンニングセンターであると考えられており、これらを導入することにより温度や磁場によっては J_c が10倍以上に向上することが報告されている。

ナノロッドによる磁束ピンニングはナノロッドの密度や形状に大きく依存する。BaZrO₃、BaSnO₃、BHO、Ba₂NbYO₆などを導入することによりナノロッドが形成されるが、材料選択によりナノロッドの構造は大きく変化する。さらにナノロッド構造は成膜温度や成長レートなどの成膜条件にも強く依存する。このように成膜条件や材料選択によりナノロッドの直径、間隔、長さなど数nm-数百nmスケールの構造を制御することができる。このようなスケールの構造制御はかなり高いレベルで可能になってきており、これまでの J_c 向上に大きく寄与してきた。

これまでの磁束ピンニング制御において着目されていない因子として酸素量があげられる。YBCOは酸素不定比性を有し、 δ は0-1の値をとりうる。YBCO薄膜の酸素量は蒸着後の冷却時の酸素導入条件やポストアニールにより制御でき、添加物や薄膜/バルク形態によらず、 T_c や J_c を大きく変化させることができる。ナノロッドと酸素量に関しては、高分解能透過型電子顕微鏡(TEM)によりナノロッド界面で酸素空孔濃度が大きくなること示された[1]。またナノロッドのひずみによりマトリックスの酸素空孔濃度が増加し、 T_c が減少することも報告された[2]。このようにナノロッドピンニングに酸素空孔分布が大きく影響することが明らかになってきている。しかし酸素不定比性に着目したナノロッド構造やピンニング制御に関する研究はこれまでにほとんど行われてこなかった。

本研究では酸素アニールがナノロッドピンニングに及ぼす影響を議論する。成膜後の冷却過程で十分な酸素量を導入した後、さらに追加ポストアニールを行った。その結果、積層欠陥が導入され高い J_c 特性を得ることができた。本研究では高 J_c の機構を明らかにするために、追加ポストアニールしたYBCO+BHO薄膜の構造を解析する。さらにさまざまな温度や磁場において J_c 特性を測定する。得られた結果をもとに、追加酸素アニールによるナノロッドピンニング制御の可能性について議論する。

2. 実験方法

パルスレーザー蒸着(PLD)を用いてSrTiO₃(100)基板上に薄膜作製を行った。ターゲットはYBCO+BHOとし、BHO添加量は4.7 vol%とした。YBCO+BHO薄膜成膜時には酸素分圧55000 Paとして冷却した後、酸素量を制御するためにさらに酸素フロー中で1時間酸素アニールを行った。透過型電子顕微鏡(TEM)を用いてYBCO+BHO薄膜の構造評価を行った。またYBCO+BHO薄膜の不可逆温度と J_c をPhysical Property Measurement Systemで測定した。さらに東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料センターにおいて0-16 T、20-77 Kで J_c 測定を行った。

3. 結果

図1に酸素アニールしたYBCO+BHO薄膜の20, 40, 65, 77 Kにおける J_c の磁場依存性を示す。また巨視的ピン力($F_p = J_c B$)の磁場依存性も示した。77 Kでは $F_p = 7.8 \text{ GN/m}^3$ であり、ナノロッドを導入したYBCO薄膜としては大きくはない。しかし40 Kでは $F_p = 312 \text{ GN/m}^3$ となっており、マトリックスをYBCOに限定したものとしては極めて大きな値になっている。低温でのみ高 J_c を示すことが本薄膜の特徴である。アニールを行った450°Cでは拡散を伴うナノロッドの形状や密度の変化は難しいと考えられる。また T_c は86.9 Kと低い値であり、高 J_c 化の原因とは考えにくい。TEMにおいて積層欠陥が観察されており、積層欠陥が界面やマトリックス構造を変化させ、高 J_c 化に寄与した可能性が考えられる[3]。当日はこのような観点からポストアニールによる低温 J_c 向上の原因を議論する予定である。

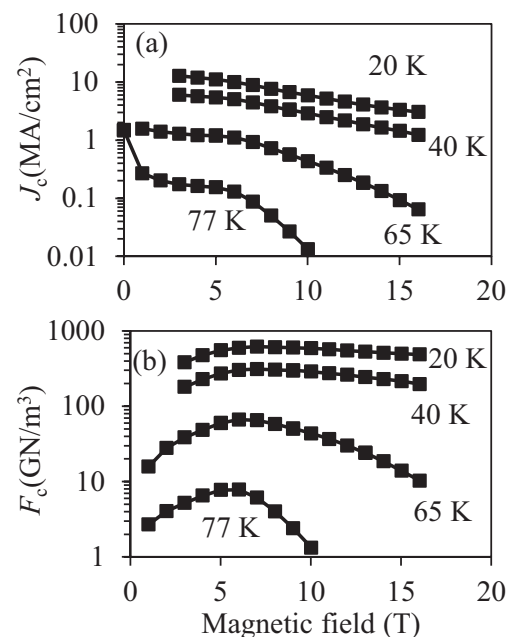


Fig.1 (a) J_c - B and (b) F_p - B characteristics in the annealed YBCO+BHO film at 20, 40, 65, and 77 K.

参考文献

1. C. Cantoni et al.: ACS Nano, Vol. 5 (2011) p. 4783-4789
2. T. Horide et al.: ACS Nano, Vol. 11 (2017) p. 1780-1788
3. T. Horide et al.: Supercond. Sci. Techno., Vol. 30 (2017) p. 074009

BHO ナノロッドを導入した SmBCO 高温超伝導薄膜における磁化緩和特性

Magnetization relaxation in SmBa₂Cu₃O_y films with BaHfO₃ nanorods

土屋雄司(名大); 木内勝(九工大); 一野祐亮, 三浦峻(名大); 淡路智(東北大); 松本要(九工大); 吉田隆(名大)
 TSUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke, MIURA Shun, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);
 AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); KIUCHI Masaru, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)
 E-mail: tsuchiya@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 高温超伝導線材は、高い転移温度と磁場中で高い臨界電流密度 J_c から、次世代電力機器への応用が期待されている。一方、REBCO 線材のマグネット応用において、線材がテープ形状であることによる大きな遮蔽電流に起因した磁化による不整磁場が問題となる。この遮蔽電流による磁化は、磁束クリープによって時間経過にともない減衰(磁化緩和)し、磁場ドリフトの原因となる。REBCO 線材のマグネット応用では、磁場ドリフトを防止するため磁化緩和の抑制が重要である。

いままで我々のグループでは、SmBa₂Cu₃O_y (SmBCO) 薄膜への BaHfO₃ (BHO) の添加による磁場中 J_c の増強について報告してきた。特に、 c 軸相関のある人工ピン BHO ナノロッドの導入によって 77 K において 32 GN/m³ と高いピン力密度を報告している[1]。本研究では、SmBCO 薄膜への BHO ナノロッドの添加量を変化させて広い温度磁場範囲での磁化緩和特性を測定することで、人工ピンが磁化緩和へ与える影響について調べた。特に中温域(20-40 K)、強磁場(3-5 T)中での磁化緩和特性に着目した。

2. 実験方法

PLD 法を用いて IBAD 基板上に 0-3.8vol.% の BHO を添加した SmBCO 薄膜を作製した。薄膜をブリッジ加工し、東北大金研強磁場センターにおける 20 T 超伝導マグネットと大電流回転プローブを用いて、0-15 T、4.2-77 K で直流四端子法による J_c の輸送測定を行った。また、薄膜を約 2 mm 角に加工し、カンタムデザイン社 MPMS を用いて 0-5 T、10-77 K における磁化ヒステリシスおよび磁化の時間依存性を測定した。磁化ヒステリシスから J_c を、磁化緩和特性から規格化磁化緩和率 $S(= d\ln M/d\ln t)$ を評価した。

3. 実験結果および考察

図 1 に、BHO 添加 SmBCO 薄膜における 30 K、 c 軸方向に磁場を印加したときの S の BHO 添加量依存性を示す。 S は、BHO 添加量増加にともない、低磁場(1 T)では増加したのに対し、強磁場(3 および 5 T)では減少した。YBCO 単結晶に対して重イオン照射によって柱状ピンを導入すると、低磁場では磁束量子の 2 重キックによって磁化緩和が加速することが報告されている[2]。本研究の結果も同様の磁束量子の振舞いを示唆している。一方、強磁場中では BHO ナノロッドの導入が S の抑制に効果的であることが示唆された。

図 2(a) および図 2(b) に、無添加および 2.2vol.% BHO 添加 SmBCO 薄膜における S の磁場温度依存性を示す。両図におけるカラースケールは同じである。図 2(b) に、2.2vol.% BHO 添加試料における $B_\Phi = 3.3$ T を示した。この磁場は、 F_p が最大を示す磁場および 3.8vol.% BHO 添加試料の平面 TEM 観察から計算した $B_\Phi = 5.8$ T から算出した。無添加薄膜では温度・磁場の増加にともない S が単調増加するのに対し、BHO 添加薄膜では非単調な振舞いが見られた。特に、低磁場(1 T)では、 S の温度変化に対する極大値が現れ、 B_Φ 付近に S の磁場に対する極小値が見られた。これらの振舞いはそれぞれ、磁束量子の 2 重キックおよびモット絶縁体的振舞いと考えられる。

本講演では、磁化緩和特性の結果から、マグネット応用に適した人工ピンニングセンターの添加量について議論する。

謝辞 本研究は、科研費(23226014, 15K14301, 15K14302, 15H04252, 16K20898, 16H04512)、JST-ALCA の助成を受けて実施した。産総研 和泉輝郎氏からテープ基板の提供を受けた。

参考文献

1. S. Miura *et al.*, Appl. Phys. Express **10**, 103101 (2017).
2. Y. Yeshurun *et al.*, Rev. Mod. Phys. **68**, 911 (1996).

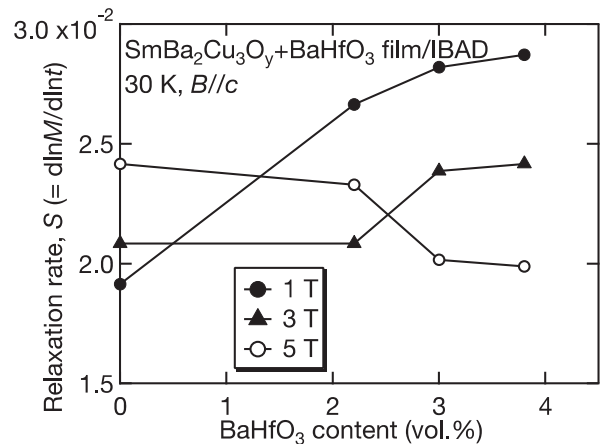


Fig. 1 BHO content dependence of relaxation rate S in BHO-doped SmBCO films at 30 K and 1, 3, and 5 T.

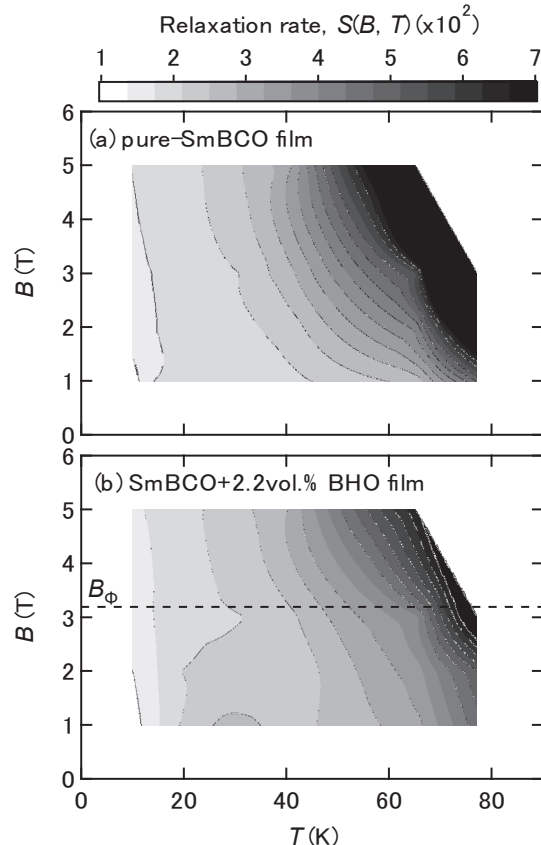


Fig. 2 Relaxation rate maps for magnetic field and temperature in (a) pure and (b) 2.2vol.% BHO-doped SmBCO films.

局所 J_c 分布を有する REBCO 線材の電界-電流密度特性 *E-J* characteristics of REBCO coated conductors under the influence of local J_c variation

鈴木 匠, 辻野 大樹, 大村 俊介, 東川 甲平, 井上 昌睦, (九大);
 Valery Petrykin, Sergey Lee, (SuperOx Japan); 木須 隆暢 (九大)

SUZUKI Takumi, TSUJINO Daiki, OOMURA Syunsuke, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, (Kyushu Univ.);
 VALERY Petrykin, SERGEY Lee (SuperOx Japan); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
 E-mail: suzuki@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O₇(REBCO)線材は一般に Bi 系線材に比べ大きな n 値を有しており、空間不均一性の影響を顕著に受ける。すなわち、限流器やマグネットのクエンチ検出等のような用途において、局所的に I_c が低下している領域を含む場合における *E-J* 特性への影響や安定化層への電流分流の正確な把握が重要となる。これまで、*E-J* 特性は n 値モデルを用いて表現し、安定化層への電流分流を考慮して n 値の低下を記述する例が多く見られるが、モデルの妥当性や定量性に関しては不明瞭である。本研究では局所的な I_c の変化と *E-J* 特性の関係について安定化層の有無による影響を実験的に評価し、局所 I_c 分布を考慮した *E-J* 特性のモデル化[1]を行った。

2. 実験方法

測定試料は SuperOx 社の PLD 法で作製された 1 mm 幅 GdBCO 線材である。リール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM) を用いて線材長手方向の I_c 分布を測定し、同試料に電圧端子間距離 10 mm 間隔で複数の電圧端子を取り付け四端子法による通電法で *E-J* 特性を測定した。その後、ウェットエッチングにより最表面の銀の安定化層を取り除き、同様に通電法で *E-J* 特性を測定した。通電法では $E_c=10^{-6}$ V/cm を電界基準とした。

3. 実験結果、考察

Fig.1 に RTR-SHPM を用いて計測した $I_c(x)$ と通電法で計測した I_c を示す。これらの計測手法では電界基準が 4 桁ほど異なるため RTR-SHPM の I_c は通電法による I_c より低く見積もられる。(a)は I_c が均一な領域(均一部)であり、どの区間でも、ほぼ同程度の I_c となる。(b)は I_c が大幅に低下している部分を含む領域(低 I_c 部)となり、通電法による I_c も 1/3 ほどに低下している。これらの区間の *E-I* 特性を Fig. 2 に示す。均一部と低 I_c 部の傾きを比較すると、低 I_c 部で傾きが緩やかになっていることが分かり、 n 値では均一部分の 30 程度に比べ 20 程度まで低下している。また、銀を取り除いた場合、エッチングの影響で I_c はわずかに低下しているが、 n 値は健全部、低 I_c 部でそれぞれ、30, 20 程度でありほぼ変化はない。よって、電流分流がない場合でも n 値が低下することを実験的に明らかにした。この実験結果は、通常の n 値モデルでは記述できない。すなわち、*E-J* 特性におけるパワー指数が電界により変化することを明確に示している。次に、*E-J* 特性を RTR-SHPM から得られた局所臨界電流分布の変化は超伝導の有効断面積の変化であるとして、*E-J* 特性をパーコレーション転移モデルと n 値モデルでそれぞれ仮定し記述した。Fig. 3 にその結果を示す。どちらの場合も電界基準での I_c は同程度であるが、パーコレーションモデルでは実験結果の傾きを良く記述できていることが分かる。よって、 n 値モデルでは高電界でより実験値との乖離が大きくなると考えられる。更に、パーコレーション転移モデルで得られる様な、超伝導層の磁束フロー領域における上に凸の *E-J* 特性によって、超伝導の本質的な特性として n 値が低下することが分かった。

4. 謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(16H02334)の助成を得て行った。

参考文献

[1] T. Kiss *et al.*, *Cryogenics* **80** (2016) 221-228.

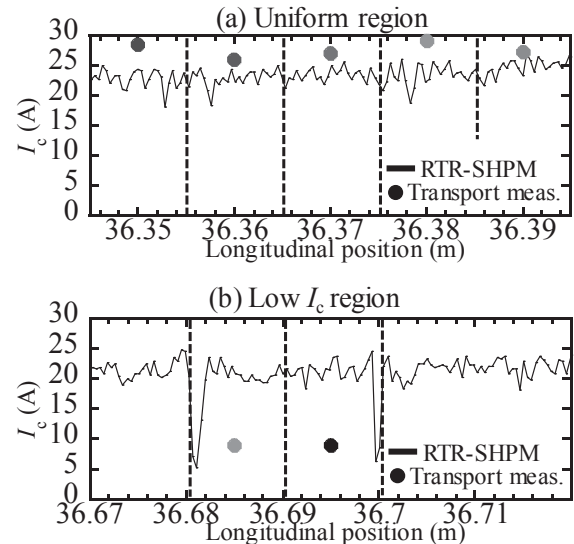


Fig.1 Comparison with critical current at reel-to-reel SHPM and four probe method. (a)Uniform region, (b)Low I_c region.

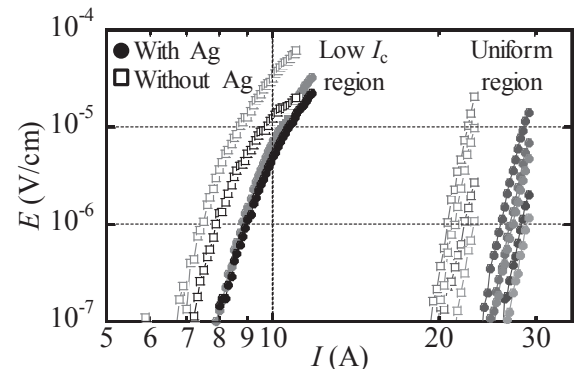


Fig.2 *E-I* characteristics of uniform region and comparison with *E-I* characteristics with and without Ag including low I_c region.

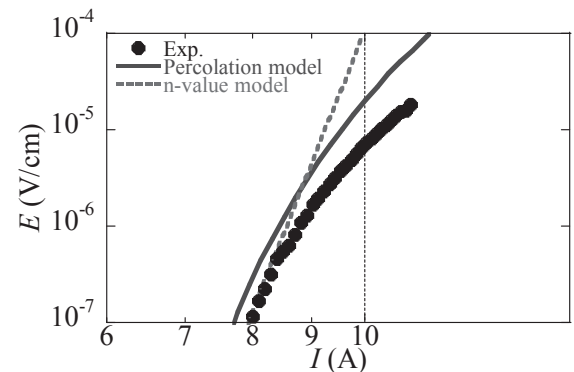


Fig.3 *E-I* characteristics of the experiment and theoretical curves including low I_c region using n -value model and percolation transition model, respectively.

4.2 K、平行磁場下における REBCO 線材の臨界電流測定

Critical current measurement of REBCO conductors at 4.2 K in parallel field

土屋 清澄, 寺島 昭男, 王 旭東(KEK); 菊池章弘 (NIMS); 則本 知哉, 内田 聖, 高尾 智明(上智大)
 TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akiyo, WANG Xudong (KEK); KIKUCHI Akihiro (NIMS); NORIMOTO Kazuki,
 UCHIDA Mio, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.)
 E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

1. はじめに

REBCO線材を用いた高磁場ソレノイドの開発は、世界の多くの高磁場研究所で推進されている。また、近年 CERN が検討を始めた 100 TeV クラスの超大型加速器 Future Circular Collider (FCC)においても HTS 線材を用いた 20 T 級磁石が1つの候補に上げられており、今後これらの磁石開発が活発化するとと思われる。このような状況の中、我々は市販 REBCO 導体の 4.2 K に於ける臨界電流特性の研究を開始した。本稿では、既報の 4.2、垂直磁場下での特性測定[1,2]に続いて行った平行磁場下での Ic 測定の概略と結果について報告する。

2. 平行磁場下での臨界電流測定

SuperPower-CF, SuNAM, SuperOx 社の REBCO 導体の Ic 測定を行った。測定した導体の諸元を Table 1 に示す。測定に用いたサンプルホルダーは、NIMS 強磁場ステーションの 18 T ソレノイド(口径 52mm)の中で、4.2K、平行磁場下で Full size 導体の Ic 測定を行うために開発したもので、2本の線材が取り付けられる。その外観を Fig. 1 に示す。

Ic 測定は、18 T ~ 2 T の範囲で磁場を変化させて行った。液体ヘリウム中での測定であるため、測定温度は、4.2 K である。サンプルの長さは~130 mm で、取り付けた電圧タップは、Ic 測定用(タップ間距離:50 mm)、2つの Ic タップ外側電圧モニター用(タップ間距離:13 mm)と線材のクエンチ保護用(13+50+13 mm)の4つである。線材と電極の接続には Sn-Bi はんだを用い、その長さは 18 mm であった。また、線材はハステロイ基盤を外側にするように取り付けられた。

サンプルをホルダーに取り付けた後、まず、液体窒素中、自己磁場下での Ic 測定を行った。その後、18T ソレノイド中にホルダーを挿入して平行磁場下での Ic 測定を行った。測定磁場は 18 T から磁場を徐々に下げ、Ic 値が 1000 A 程度となる磁場までの測定を行った。臨界電流は Ic 測定用電圧タップ信号の電界が 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ (時には 0.2 $\mu\text{V}/\text{cm}$)となった時の電値とし、n 値は 0.1-1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の範囲で求めた。

Table 1 Technical characteristics of REBCO samples

Conductor	Hastelloy thickness	Cu stabilizer thickness	Dimensions (w×t)
SuNAM	60 μm	20 μm	4.1 × 0.10 mm
SuperOx	60 μm	40 μm	4.0 × 0.152 mm
SuperPower-CF	50 μm	20 μm	4.0 × 0.09 mm



Fig. 1. Sample holder

Table 2. Ic (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) and n-values measured using the sample holder at 77 K and self-field condition. The values in the parentheses are of the perpendicular field.

	Ic (A)	n-value
SuNAM	210 (217)	46 (43)
SuperOx	126 (132)	34 (36)
SuperPower-CF	118 (116)	34 (31)

3. 測定結果

サンプル取り付け時の特性劣化を確認するために、4.2 K での Ic 測定に先立ち、ホルダーに付けた 4 mm 幅のサンプル

の液体窒素中、自己磁場下での Ic 測定を行なった。その結果を Table 2 に示す。垂直磁場下での Ic 測定用 U 型ホルダーでの測定値と比べ 5 % 程度の差が見られるが、これは線材特性のばらつきや取り扱いによる多少の劣化によるものではないかと思われる。Fig. 2 に測定したサンプルの 4.2 K、平行磁場下における Ic-B 特性を、また、Fig. 3 には平行磁場下 Ic 値と垂直磁場下 Ic 値の比を示す。

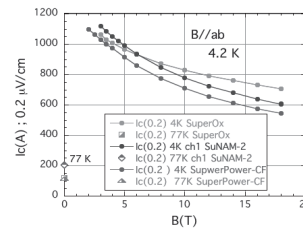


Fig. 2. Critical current of REBCO conductors at 4.2 K in parallel field.

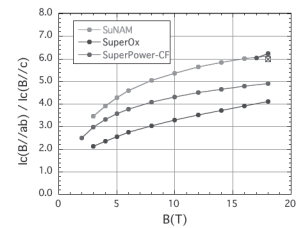


Fig. 3. Ratio of Ic in parallel field to Ic in perpendicular field at 4.2 K.

Fig. 2 より、Ic 値の磁場依存性は線材により異なることがわかる。SuNAM 線と SuperPower-CF 線はよく似た振る舞いをするが、SuperOx 線はそれとは異なっている。SuperOx 線の Ic 値は低磁場で低く、高磁場で高い。SuNAM 線と SuperPower-CF 線がよく似た特性を持つことは、垂直磁場下での Ic-B 特性でも見られているが、この場合には、SuperPower-CF 線の方が SuNAM 線より高目の Ic 値を有していた。Fig. 3 からは、どの線材においても Ic(B//ab) と Ic(B/c) の比は磁場とともに大きくなること、線材によりこの値は異なり、15 T 以上の磁場では 4~6 程度の値となることなどがわかる。

4. まとめ

4 mm 幅の市販 REBCO 導体の 4.2 K、平行磁場下における臨界電流測定を行った。平行磁場下の測定では、垂直磁場下での測定に比べ、線材に働く電磁力が 4 倍以上となり、その線材支持方法に苦労したが、平行磁場下での full size 導体の Ic 測定ホルダーを開発することができた。測定した線材では、平行磁場下での Ic 値は垂直磁場下での値に比べて 4~6 倍程度 (@B>15 T) となること、又、この Ic 値の比は低磁場で小さく、高磁場で大きくなることなどが分かった。

謝辞

本サンプルホルダーの製作では、KEK 機械工学センターの方々大変お世話になりました。感謝申し上げます。本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

参考文献

1. K. Tsuchiya et al., Cryogenics 85 (2017) 1.
2. K. Tsuchiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, June 2017.

高磁場 HTS コイルに生じる早期熱暴走(クエンチ)の抑制(1) ~早期熱暴走の事例と抑制法の体系化~

Suppression of premature thermal runaway (quench) in high-field HTS coils (1) - Cases and suppression method of premature thermal runaways -

柳澤 吉紀(理研);末富 佑(千葉大);持田 寛希,高尾 智明(上智大);濱田 衛(JASTEC);松本 真治(NIMS);
 朴 任中,前田 秀明(理研)

YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); SUTOMI Yu (Chiba Univ.); MOCHIDA Hiroki, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
 HAMADA Mamoru (JASTEC); MATSUMOTO Shinji (NIMS); PIAO Renzhong, MAEDA Hideaki (RIKEN)
 E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

LTS コイルではワイヤーモーションなどの微弱なパルス発熱(μm レベル)により早期熱暴走(クエンチ)が生じるので、クエンチを防ぐ技術(安定化)と、クエンチしても損傷しない技術(保護)が重要である。一方、HTS コイルではこの種の早期クエンチは生じないが、電磁力による線材の局所劣化で定常発熱が生じ、早期熱暴走に至る。この時、電流密度が高いとコイルが焼損し、マグネット全体に被害が及ぶ。従って、線材の局所劣化と熱暴走の防止は HTS コイル技術の重要な分野である。本報ではこの技術の体系化を目指す。

本報では、絶縁 HTS (REBCO, Bi-2223) 線材を用いたコイルの高磁場における線材劣化・熱暴走の事例をもとに、劣化モードと、熱暴走が起きる発熱量を整理する。つづく第 2 報では、熱暴走の数値解析によって、劣化がある場合にもコイルを安定的に運転するためのクライテリアを得る。第 3 報では、レイヤー巻コイルにおいて、NI 法の熱暴走抑制・自己保護性を得ながら、短い磁場遅れも両立する技術を示す。

2. 絶縁 HTS 線材コイルの高磁場における劣化と熱暴走

これまで製作・評価した HTS 試験コイルの外部磁場中での電磁力に起因した特性の劣化状態を Table 1 に示す。多層構造かつ、曲げ剛性の低い REBCO 線材のコイルは、低負荷率の段階から応力集中モードによって局所的(数 mm オーダー)な劣化が起きる。一方、Bi-2223 コイルはこの種の劣化は起きないが、長い周長(100 mm オーダー)にわたり過剰なフープ応力を経験すると劣化が起きる。すなわち、Bi-2223 コイルの劣化防止は応力設計(フープ応力・軸圧縮応力)の問題として対処できるが、REBCO コイルの場合は、応力設計だけでは微小な劣化部の発生を完全に防止することは難しい。

Table 2 に外部磁場中で試験した HTS コイルにおいて、電磁力による劣化・早期熱暴走が起きたケースの運転条件を示す。REBCO コイルの場合、定常発熱(=コイル電圧×電流)が 1 W 未満で熱暴走が起きた(No.2,3,5)。一方、Bi-2223 コイルは 1 例(No.6)のみではあるが、より大きな発熱量(1.5 W)でも熱暴走が起きなかった。すなわち、高磁場 HTS コイルにおいて熱暴走が発生する定常発熱はコンマ数 W~1 W レベルである。これは、高磁場 HTS コイルの励磁にあたって非常に重要な指標である。次報では、数値解析によって運転条件をパラメータとしてこの指標を体系化する。

3. まとめ

Table 3 に、HTS コイルにおける特性の要求と、適したコイル構成の関係、さらに熱暴走防止の考え方を示す。NI 法が適用できるコイルでは、劣化があっても電流が迂回するので熱暴走は起きない[9]、自己保護作用が働く。一方、NI 法が適用できない機器では絶縁コイルが必要となる。Bi-2223 の場合、適切な応力設計によって熱暴走が防げるが、REBCO の場合はこれに加えて、局所劣化が生じたとしても、不可逆な早期熱暴走に至らない発熱基準を守る運転が必要である。

Table 1 Stress mode of electromagnetic force-induced degradation in REBCO and Bi-2223 coils. [1,2]

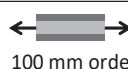
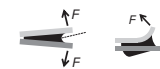

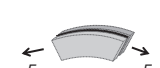
	REBCO	Bi-2223
Tensile		
Peeling / cleavage		Stress concentration Several mm order
Buckling		
Tensile stress under edgewise bending (combination)		

Table 2 Operating conditions of degradations and thermal runaways [3-8]

N o.	Coil	Layers	B_0 (T)	J_{cond} (A/mm ²)	Q (V x I) (W)	Thermal runaway	Degradation mode
1	REBCO	4	11.4	1025	0.37	No	Combination
2	REBCO	8	17.7	803	0.72	Yes	Buckling
3	REBCO	8	17.9	883	0.71	Yes	Buckling
4	REBCO	74	25	284	0.46	No	Peeling / cleavage
5	REBCO	76	27.6	389	0.4	Yes	?
6	Bi2223	6	17.7	383	1.5	No	Tensile stress

Table 3 Requirements of applications and suitable coil configurations.

	Pancake	Layer	Premature thermal runaway (quench)
NI	High field	<ul style="list-style-type: none"> Persistent current Homogeneous field 	Defect irrelevant [9] Bi-2223: Stress management REBCO: Stress management and heating criteria
Insulated	Applications which cannot accept field delay and charging loss		

謝辞: 本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業 戦略的イノベーション創出推進プログラムの補助を受けた。

参考文献

[1] Maeda and Yanagisawa. IEEE TAS 24 (2014) 4602412
 [2] Kajita et al. SuST 30 (2017) 074002
 [3] Matsuda et al. presented at ASC2016 3LPo1G-11
 [4] 松田他、2015 年度秋季低温工学・超電導学会、1B-a04
 [5] Matsumoto et al. IEEE TAS 22 (2012) 9501604
 [6] Kajita et al. IEEE TAS 26 (2016) 4301106
 [7] Yanagisawa et al. IEEE/CSC & ESAS SNF, July 2016
 [8] Yanagisawa et al. SuST 28 (2015) 125005
 [9] Hahn et al. SuST 29 (2016) 105017

高磁場 HTS コイルに生じる早期熱暴走(クエンチ)の抑制 (2) ～絶縁コイルの安定運転に許容される発熱基準～ Suppression of premature thermal runaway (quench) in high-field HTS coils (2) - Joule heating criteria of a thermal runaway for an insulated coil -

末富 佑(千葉大); 持田 寛希, 高尾 智明(上智大); 朴任中, 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)
 SUTOMI Yu (Chiba Univ.); MOCHIDA Hiroki, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
 PIAO Renzhong, YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

1. はじめに

高磁場の絶縁 REBCO コイルでは、負荷率の低い範囲であっても、電磁力に起因した応力集中(引き剥がし、座屈、複合応力など)によって数 mm オーダーの局所劣化が起き、定常的な発熱が大きくなると不可逆な熱暴走(クエンチ)に至る。この種の早期熱暴走の抑制には、まず劣化を防ぐ技術が重要であるが、10 km オーダーの REBCO 線材を用いる実コイルにおいて、この種の劣化を完全に排除することは困難である。すなわち、絶縁コイルにおいては、局所劣化によるコイル電圧が発生した場合でも、熱暴走を起こさずに運転できる定常発熱クライテリアを把握し、それを通電の上限とする考え方が実用上必要になってくる。本報では、高磁場 HTS (REBCO, Bi-2223) コイルの熱暴走現象をもとにモデル化した数値解析により、4.2 K における定常発熱クライテリアを体系化し、許容発熱指標を求めた。

2. 数値解析モデル

準 2 次元熱伝導解析と超伝導線材内並列回路解析を用いて、内径 80 mm の 5 ターンシングルパンケーキ巻コイルをモデル化した。REBCO 線材(4 mm×0.13 mm, $I_{c(77K, SF)} = 200$ A, 銅安定化材厚み 50 μ m)と高強度 Bi-2223 線材(4.5 mm×0.31 mm, $I_{c(77K, SF)} = 180$ A, 銀比 1.6)を想定した。3 ターン目中央部に定常発熱を生じさせた時に、熱暴走に至る発熱を Q_{tr} とする。外部磁場 (B_{ex} : 0, 10, 20 T, 線材面に並行)をパラメータにし、 Q_{tr} と線材電流密度 J_{cond} の関係を調べた。解析では臨界電流・臨界温度・安定化材抵抗率の磁場依存性を考慮した。臨界温度は、不可逆磁場 B_{irr} - T 曲線[1,2]により導出した。また、コイル表面は断熱、コイル端末部の線材のみ 4.2 K 固定境界条件とし、冷媒の対流冷却が効かない系を想定した。

3. 解析結果: HTS コイルの定常発熱クライテリア

4.2 K における Q_{tr} - J_{cond} 曲線を Fig. 1 (REBCO)、Fig. 2 (Bi-2223) に示す。前報で示した電磁力による劣化の実例に基づき、REBCO コイルでは発熱長 10 mm、Bi-2223 コイルでは発熱長 100 mm とした。

Fig. 1 に示す通り REBCO コイルにおいては、 B_{ex} と J_{cond} に関わらず、 Q_{tr} が 0.8 - 1 W である。これは、REBCO の T_c の磁場依存性が小さく、また低負荷率にあるためである。ただし、このグラフの範囲を超えた高負荷率(80%)の運転環境では熱的マージンが小さくなるため Q_{tr} は 0.2 W にまで減少する。同種の REBCO 線材を用いた実際の高磁場コイル[3,4]における熱暴走時の定常発熱量をプロットすると、それぞれグラフ上の (a)、(b) に位置する。これらのプロットは Q_{tr} - J_{cond} 曲線と比べ少し低い。これは、実際のコイルでは、線材面に垂直な磁場成分によって J_c が低くなっており、さらに、ターン数・レイヤー数が多く熱はけが悪いためである。この点については、さらなる検討を行い当日発表する。

Fig. 2 に Bi-2223 コイルの Q_{tr} - J_{cond} 曲線を示すが、REBCO コイルとは振る舞いが大きく異なり、 B_{ex} と J_{cond} が高くなるほど Q_{tr} が大きく減少する。Bi-2223 は、 T_c の磁場依存性が大きく、また、REBCO と比べて J_c が低いため、熱的なマージンが顕著に減少するためである。低磁場中では数 W レベルの大きい定常発熱にも耐えるため、実質的な運転条件下では熱暴走

はほぼ起きないといえるが、高磁場・高電流密度では、REBCO と同様に 1 W 以下の小さい定常発熱量で熱暴走するようになるため、注意が必要である。

4. まとめ

4.2 K・高磁場の HTS コイルにおいて、局所劣化による電圧が生じたときに許容される定常発熱指標を数値解析によって得た。超高磁場 NMR などにとって実用的な運転環境(>20 T, >200 A/mm²)において、REBCO コイルは 0.2 W 程度、Bi-2223 コイルは 0.5 W 程度の定常発熱の範囲で運転する必要がある。特に、局所劣化の発生を抑制することが困難な REBCO コイルにおいては、このクライテリアが特に重要であり、励磁中にコイル電圧を精度よくモニターし、定常発熱量を把握する手法の開発が必須である。

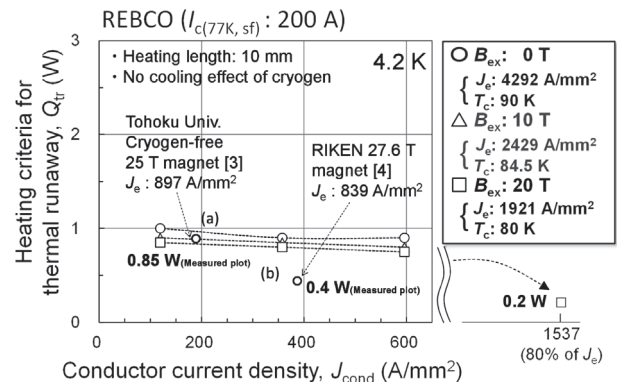


Fig.1 Q_{tr} - J_{cond} curves of a REBCO coil (ID 80 mm, 5 turns).

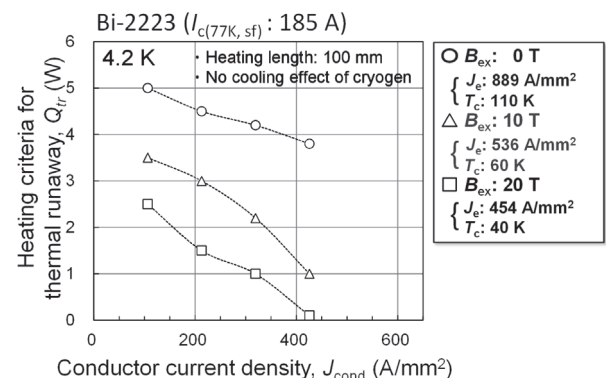


Fig.2 Q_{tr} - J_{cond} curves of a Bi-2223 coil (ID 80 mm, 5 turns).

参考文献

- [1] Fuger et al. IEEE TAS 19 (2009) 1532-1535
- [2] Ayai et al. Physica C 468 (2008) 1747-1752
- [3] Awaji et al. SuST 30 (2017) 065001
- [4] Yanagisawa et al. IEEE/CSC & ESAS SNF, July 2016

謝辞: 本研究は JST の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

高磁場 HTS コイルに生じる早期熱暴走(クエンチ)の抑制 (3) ~NI レイヤー巻コイルにおける短い磁場遅れと自己保護性の両立~

Suppression of premature thermal runaway (quench) in high-field HTS coils (3)

-Compatibility of a short field delay and self-protection characteristics for a NI layer-wound coil-

末富 佑(千葉大);高橋 俊二, 高尾 智明(上智大);柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)
SUETOMI Yu (Chiba Univ.); TAKAHASHI Shunji, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.);
YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

1. はじめに

No-insulation (NI)法によれば、電磁力で局所劣化部が生じても電流が劣化部を迂回するので、発熱による熱暴走が生じない。それ故、超高磁場(>20T)を発生させるための REBCO コイルの巻線方式として極めて有効である。一方、磁場精度と永久電流運転の観点からは、レイヤー巻コイルの方が望ましいが、NI レイヤー巻コイルでは、パンケーキ巻コイルと比較して数桁長い励磁遅れを示すので[1]、実用的ではないと考えられてきた。これは、巻線内部に大きな二次回路が形成される事が原因である。我々は、NIレイヤー巻コイルにおいて、短い磁場遅れと、熱暴走防止・自己保護性を両立する新たな手法を提案し、実験により実証したので報告する。

2. 層内非絶縁(intra-Layer No-Insulation: LNI)法

Fig. 1(a)に、NIレイヤー巻コイルにおける各ターンのインダクタンスと径方向・軸方向の線材間接触抵抗から成る回路構造を示す。レイヤー同士がショートする事で、長い励磁遅れの原因となる大きな二次回路が形成される。レイヤー間に絶縁シートを入れる事でショート回路を切ると、回路構造は Fig. 1(b)の様に、大きな二次回路をなくす事ができる。この回路構造は NI パンケーキ巻コイルと等価である。すなわち、幾何的形狀はレイヤー巻コイルのまま、NI パンケーキ巻コイルと同じ内部回路になるので、励磁遅れの劇的な低減が期待できる。

3. 実験方法

REBCO 線材(幅 4.0 mm, 厚み 0.13 mm, 銅メッキ)を用いて、レイヤー間にポリイミドシート(厚さ 12.5 μm)を挟みながら、内径 80 mm の 8レイヤー(総巻数 157.9)の LNI コイル製作した。コイルのロードラインと線材の I_c - B 曲線から見積もったコイル I_c は 103 A である。このコイルを用いて、液体窒素中で、磁場遅れを測定する電源遮断試験(10 A)と、熱暴走からの自己保護性を評価する過電流試験を行った。過電流試験では、熱暴走が発生するまで励磁速度 0.16 A/s で通電し、各レイヤーの電圧信号(最内層より $V1 \sim V8$)と、ボア内の上部・中心部・下部に取り付けたホール素子による磁場信号(B_{up} , B_{center} , B_{low})を計測した。

4. 実験結果

Fig. 2 に、(a)比較用の同形状の NI レイヤー巻コイル[1]、(b)今回の LNI コイルの電源遮断試験の結果を示す。LNI コイルの磁場減衰時定数 τ は 0.2 s であり、従来の NI レイヤー巻コイルの 500 s と比較して、劇的に短い(1/2500)。

Fig. 3(a)に過電流試験における各レイヤー電圧を、Fig. 3(b)に電源電流と磁場を示す。なお、磁場は最大値で正規化した。通電電流 145.7 A(負荷率 141%)で、 $V1$ から急激な電圧上昇が発生し $V2$ に伝播した。 $V1$ と $V2$ がピークに達した時点で、急激な磁場減衰が始まった。この時 $V3$ - $V8$ には負電圧が発生し、ピークを迎えたのち $V1$, $V2$ とともに減衰した。この過程(<1 s)で中心磁場は熱暴走が起きる前の 2 割にまで減少した。これは、まず第 1, 2レイヤーで熱暴走(クエンチ)が起き電流が減少し、磁氣的に結合した外層側レイヤーの電流が増えることで速やかに熱暴走が伝播したことを示す。

この後、熱暴走収束後もさらに電流上昇させる実験(最大 186 A)を繰り返したところ、口出し部の線材が焼損したが、巻線部の通電特性は実験前後で変化はなく、熱暴走からの自己保護性が確認された。熱暴走時の B_{up} , B_{center} , B_{low} を比べると、同様の減衰カーブを描いており、コイル軸方向について均一な電流減衰が起きたことを示している。この振る舞いは、熱暴走時の電磁力アンバランスを防ぐ観点から有利である。

5. まとめ

レイヤー巻コイルにおいて、短い励磁遅れと自己保護性を両立する手法である LNI 法の効果を 77 K において実証した。この手法は、NMR の様な高い磁場精度が必要で、永久電流が求められる機器における REBCO コイルの巻線方式として期待できる。今後、4 K における特性、高磁場における評価を進める。

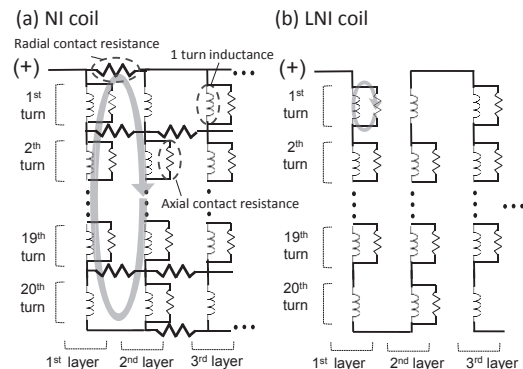


Fig.1 Circuit models. (a) NI coil. (b) LNI coil.

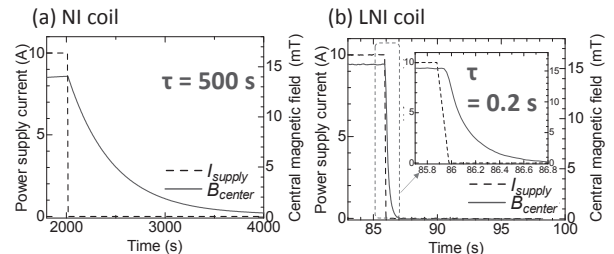


Fig.2 Measured magnetic field of current dump measurement. (a) NI coil. (b) LNI coil.

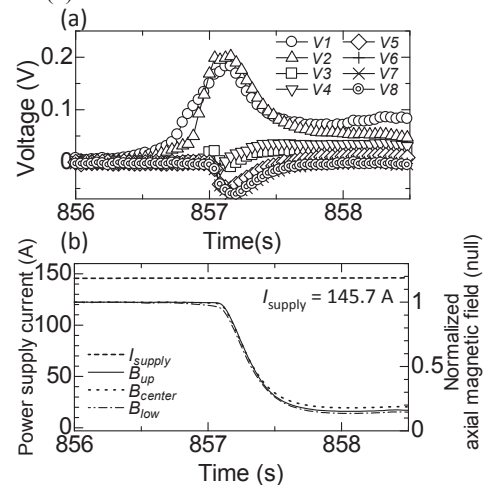


Fig.3 (a) Layer voltages and (b) power supply current and normalized magnetic field in an over current operation.

参考文献

[1] Suetomi et al. SuST 29 (2016) 10502

伝導冷却型高温超電導コイルの保護技術(1)

-開発方針-

Quench protection technique for a conduction-cooled HTS coil

-Development policy-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 石井 祐介, 野村 俊自, 来栖 努(東芝エネルギーシステムズ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo,

ISHII Yusuke, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)

E-mail: hiroschi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

高電流密度設計の伝導冷却高温超電導コイルは、クエンチ(熱暴走)すると焼損する危険性が極めて高いため、クエンチに対するコイル保護設計が重要となる。これまで熱暴走限界を正確に予測し、コイル温度をモニタして未然に防止する方法を採用してきた。今回、新たなコイル保護方法として、フラックスフロー抵抗発生時に、電流の迂回路として、コイルの両端を微小抵抗(超電導スイッチ)で短絡する方法、およびターン間を微小抵抗(導電性樹脂)で短絡する方法の2つのコイル保護手法の開発を進めている。

2. クエンチ(熱暴走)原因

高温超電導コイルは、熱的安定性が高いため、低温超電導コイルのようにワイヤーモーションや含浸材の割れなどのわずかな擾乱でクエンチする可能性は低く、クエンチの原因としては、①コイルの発熱(フラックスフロー損失、交流損失、接続部のジュール損失、渦電流損失)、②超電導特性の劣化(冷却時の熱応力、電磁力、絶縁破壊)、③システム故障(計測系、電源、断線、保護系、冷却系)などが考えられる。

高温超電導コイルは常伝導領域が広がりやすいため、電圧発生でクエンチを検出した時点で、すでに局所的に温度が上昇しており、焼損を回避することが困難となる。また、焼損を防ぐために電流密度を下げてしまうと、高電流密度化による小型化という高温超電導のメリットが失われてしまう。そこで、高電流密度構成を維持しつつ保護可能な方法について検討した。

3. コイル保護思想

これまで、伝導冷却高温超電導コイルの保護方法として、熱暴走限界を正確に予測し、コイル温度をモニタして未然に防止する方法を採用してきた。しかしながら、コイルの超電導特性が劣化してしまうと、正確な予測が困難になる。また、近年、ターン間の絶縁材を無くした無絶縁コイルの研究が盛んに進められ、臨界電流を超えて通電しても焼損しない結果が示されている。無絶縁コイル構成では伝導冷却への対応の難しさや励磁時の磁場遅れなどが課題となっている。そこで、新たな方式として、コイル両端を微小抵抗(超電導スイッチ)で短絡し、フラックスフロー抵抗発生時に微小抵抗に電流を迂回させる保護方法の開発を進めている。

4. 微小抵抗でコイル両端を短絡したコイル保護(1A-p05)

何らかの異常でコイル温度が上昇し、コイル内部にフラックスフロー抵抗が生じた場合に、コイルと並列に取り付けた微小抵抗に電流を迂回させることでコイルに流れる電流を自動的に減少させコイルを保護する。なお、微小抵抗を超電導スイッチとすることで、励磁時に微小抵抗に電流が迂回してしまうのを防止することができる。

本手法が適用可能な範囲は、温度上昇速度が電流減衰速度を下回る範囲であり、蓄積エネルギーが大きいコイルへの適用は困難となる。そこで、微小抵抗を複数取り付け、電流

減衰を速める構成とした。たとえばパンケーキを積層したコイルであれば、パンケーキごとに微小抵抗を取り付けることもできる。実際に4積層 REBCO コイルを試作し、2積層コイル毎に微小抵抗を取り付けることで保護が可能であることを実験と解析の両面で確認した。

5. 導電性樹脂でターン間を短絡したコイル保護(1A-p06)

短絡箇所を増やしていくと最終的にはターン間を短絡した無絶縁コイルと同じ思想となる。無絶縁コイルはターン間の抵抗が小さすぎると励磁時の磁場遅れが問題となる。また、伝導冷却コイルでは、冷凍機と線材を適切な冷却パスでつなぐためコイルは樹脂含浸する必要があるが、樹脂含浸されたコイルの内部ではターン間の電気的な接続が難しいだけでなく、冷却時の熱応力で超電導特性が劣化してしまう。そこで、熱応力を低減しつつターン間を電気的に接続する方法として、パンケーキの側面を導電性の樹脂で含浸する保護方法の開発を進めている。Fig. 2 に示すようにターン間には離形処理したポリイミドテープを挿入することで熱応力による劣化を回避し、かつ導電性の樹脂で含浸することで、フラックスフロー抵抗が発生した際には、導電性樹脂を介して電流を迂回させることができる。導電性樹脂は、金属フィラーを樹脂に混ぜて形成する。また、金属フィラーの種類や量を変化させることでターン間の抵抗をコントロールし、励磁時の磁場の遅れの影響を低減できる。今回、実際に導電性樹脂で含浸した REBCO コイルを試作し、液体窒素中および伝導冷却中にて通電試験を実施し、保護が可能であることを確認した。

6. まとめ

伝導冷却型高温超電導コイルの保護手法として、フラックスフロー抵抗発生時に、コイル両端に取り付けた微小抵抗に電流を迂回させる方法、および導電性樹脂を介してターン間に電流を迂回させる方法の開発を進めている。今後、それぞれの方式で保護可能な範囲を明確にするため、温度、電流密度および蓄積エネルギーなどをパラメータとした検討を進め、本保護手法の有効性を検証していく。

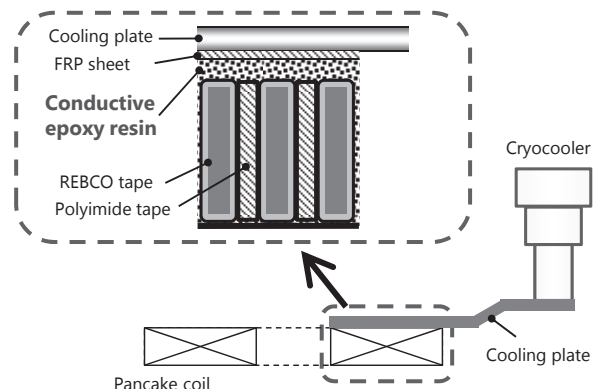


Fig. 1 Schematic drawing of HTS coil impregnated with conductive epoxy resin

伝導冷却型高温超電導コイルの保護技術(2) —フラックスフロー抵抗を利用したコイル保護—

Quench protection technique for a conduction-cooled HTS coil (2) —Protection method using flux flow resistance—

岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 大谷 安見, 石井 祐介, 野村 俊自 (東芝エネルギーシステムズ)
IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, OHTANI Yasumi,
ISHII Yusuke, NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)
E-mail: sadanori.iwai@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却型高温超電導コイルの保護を目的とした開発を進めている。熱暴走前にコイルが発生するフラックスフロー抵抗を利用したコンセプトであり、その1つとして低温部のコイル両端に微小抵抗体を接続し、電流を迂回させる方式を提案している。これまでに、蓄積エネルギーが1 kJのREBCOコイルをモチーフとした原理検証試験を実施しており[1]、一定電流値190 Aを通电しながらコイル温度を上昇させた際、負荷率の上昇に伴い微小抵抗体へ電流が迂回し、熱暴走の回避を確認した。ただし、蓄積エネルギーが高くなると熱暴走の回避は、より難しくなる。そこで今回、蓄積エネルギーが5.4 kJの4積層REBCOコイルを試作し、高負荷率運転した際の保護動作を検証したので報告する。

2. 4積層REBCOコイルの諸元

保護動作の検証試験に使用した4積層REBCOコイルの諸元をTable 1に示す。4つのシングルパンケーキは、同諸元で試作し、パンケーキ同士の層間には、伝導冷却用にアルミ伝熱板を挿入した。220 A 通电時、コイル断面での電流密度は200 A/mm²となる。また、インダクタンスは、原理検証試験で用いた2積層REBCOコイルの約4倍となる221 mHで、蓄積エネルギーは5.4 kJである。なお、試作したシングルパンケーキは、それぞれ液体窒素中で通电検査し、4つとも超電導特性に劣化がないことを確認した上で伝導冷却試験装置に組み込んだ。

3. 保護回路の構成

回路構成をFig. 1に示す。今回、インダクタンス、および蓄積エネルギーが、原理検証試験時よりも高くなったことに対応するため、4積層の両端ではなく、2層毎の両端を短絡するように、2つの微小抵抗体を並列接続した。なお、励磁時の微小抵抗体への分流を抑制するため、微小抵抗体にはヒーターを取り付けており、永久電流スイッチのように励磁時には常電導転移温度以上に昇温した。励磁直後の初期状態は、ほぼ全ての電流がコイルへ流れる。一方、コイル温度が上昇するなどして負荷率が上がり、フラックスフロー抵抗が発生すると、直流電源から供給される電流値は、微小抵抗体とコイルの抵抗比によって自動的に分流し、徐々に微小抵抗体へ電流を迂回させることができる。

4. 伝導冷却下における保護動作の検証試験結果

アルミ伝熱板を2段GM冷凍機に接続し、4積層REBCOコイルを伝導冷却した。また、初期冷却後、コイル温度を25 Kに制御した状態で220 Aまで励磁した。通电後、高負荷率運転した際の保護動作を検証するため、冷凍機を停止してコイル温度を上昇させた。コイル温度と、コイルに流れる電流値の時間変化をFig. 2に示す。コイルに流れる電流値は、ホール素子により測定した中心磁場から算出した。初期状態から120分後、負荷率が約100%となる50 Kに達したが、コイルに流れる電流は減少し、熱暴走の回避が実験的に確認できた。

5. まとめ

フラックスフロー抵抗の発生による微小抵抗体への電流迂回現象を利用した保護回路について、蓄積エネルギー5.4 kJの4積層REBCOコイルをモチーフとした保護動作を検証した。結果、コイル温度の上昇時、REBCOコイルに流れる電流値は自動的に減少し、熱暴走の回避に成功した。今後、電流密度や温度上昇速度を変化させた試験を進めていく。

Table 1 Specification of the test coil composed of a stack of four single pancakes.

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.17
Tape length (m/pancake)	154
Inner diameter (mm)	200
Outer diameter (mm)	291
Number of turns/pancake	200
Number of stacks	4
Total inductance (mH)	221
Operating current (A)	220
Stored energy (kJ)	5.4

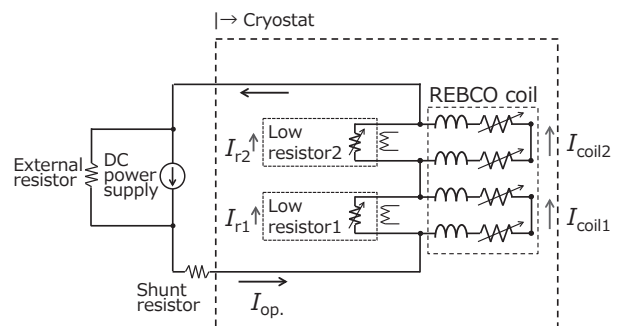


Fig. 1 Schematic diagram of the protection circuit.

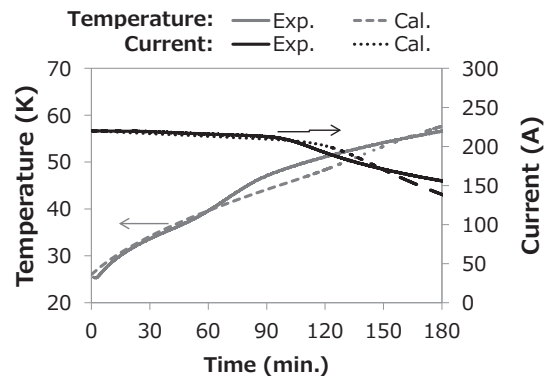


Fig. 2 Test results of the protection circuit.

参考文献

- 岩井貞憲、戸坂泰造、宮崎寛史他: 第92回2015年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p12 (2015)

伝導冷却型高温超電導コイルの保護技術(3)

-導電性樹脂を利用したコイル保護-

Quench protection technique for a conduction-cooled HTS coil

-Protection method using conductive epoxy resin-

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 宇都 達郎, 草野 貴史, 小柳 圭, 石井 祐介, 野村 俊自 (東芝エネルギーシステムズ)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, UTO Tatsuro, KUSANO Takashi,

KOYANAGI Kei i, ISHII Yusuke, NOMURA Shunji (Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却型高温超電導コイルを保護する方法として、コイルに異常が生じた場合に、導電性樹脂を介して、ターン間に電流を迂回させる方法を開発している。ターン間を短絡させた場合には、励磁時に短絡箇所にて電流が迂回することによる励磁遅れが課題となるが、導電性樹脂の抵抗率をコントロールすることで励磁遅れの影響を減らすことが可能となる。本講演では、導電性樹脂を使用して試作した含浸コイルの通電試験結果等について報告する。

2. コイル諸元

導電性樹脂を使用して試作した含浸コイルの諸元および外観を Table 1 および Fig. 1 に示す。樹脂含浸したコイルは冷却時の熱応力により超電導特性が劣化してしまう問題があるため、離形処理したポリイミドテープと REBCO 超電導線材を共巻きし、導電性樹脂で樹脂含浸した。今回使用した導電性樹脂は、金属とエポキシ樹脂を混合したものであり、体積抵抗率は $3 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$ である。線材にフラックスフロー抵抗が発生した場合には、導電性樹脂を介して電流が迂回し、コイルを保護することができる。

3. 通電試験結果

最初に、導電性樹脂で含浸したシングルパンケーキコイルを液体窒素中で冷却し、遮断試験を実施した。コイル中心に設置したホール素子で磁場を測定し、遮断時の磁場の遅れから径方向の抵抗を算出した。試験は 10 A 通電時に遮断した際の電流と磁場を測定し、磁場の減衰時定数から径方向の抵抗を算出している。試験結果を Fig. 2 に示す。時定数は、0.24 s であり、径方向の抵抗に換算すると 2.9 m Ω となり、樹脂の体積抵抗率から得られる値とほぼ同等であった。

次に、液体窒素中で通電試験を実施した。電流、電圧の時間変化を Fig. 3 に示す。 I_0 は、コイル周方向の電流であり、中心磁場の測定結果から磁場係数を元に計算した値である。また、全電流から I_0 を引くことでコイル径方向電流 I_r を計算した。通電開始後 2500 s で径方向に電流が迂回し、その後、通電を続けたが、 I_0 は減少し、熱暴走することなく安定に消磁した。

4. まとめ

導電性樹脂で REBCO コイルを含浸することで、コイル内部にフラックスフロー抵抗が発生した場合には、導電性樹脂を介して径方向に電流を迂回し、保護する方法を開発している。今回、内径 100 mm、外径 128 mm、60 ターンのシングルパンケーキコイルを体積抵抗率 $3 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$ の樹脂で含浸したコイルを試作し、液体窒素中にて通電試験を実施した。負荷率 100% を超える電流を通電しても、電流が径方向に迂回し、熱暴走することなく安定に通電できることを確認した。今後、伝導冷却中にて通電試験を実施し、温度および電流密度をパラメータとした試験を実施していく。

Table 1 Specification of single pancake coil impregnated with conductive epoxy resin

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.17
Tape length (m)	20
Inner diameter (mm)	100
Outer diameter (mm)	128
Number of turns/pancake	60

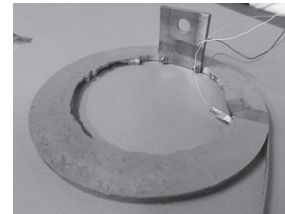


Fig. 1 Photograph of single pancake coil impregnated with conductive epoxy resin

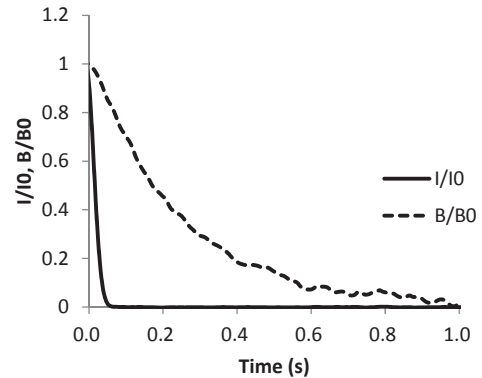


Fig. 2 Sudden discharging test result of single pancake coil impregnated with conductive epoxy resin

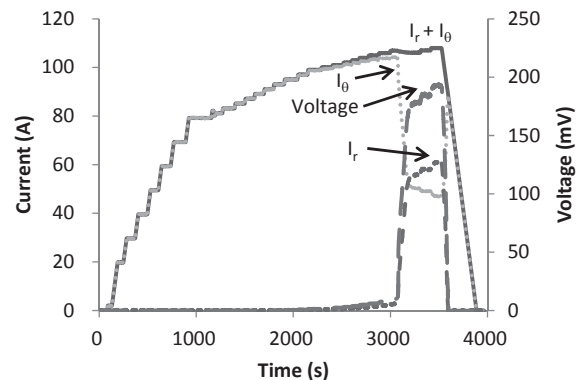


Fig. 3 Overcurrent test result of single pancake coil impregnated with conductive epoxy resin

MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導コイルの基本設計

The basic design of high temperature superconducting coil with active shielding coil for a half-size 5T MRI

三浦 英明, 松田 哲也, 大屋 正義, 横山 彰一, 大穀 晃裕 (三菱電機)

MIURA Hideaki, MATSUDA Tetsuya, OYA Masayoshi, YOKOYAMA Shoichi, DAIKOKU Akihiro (Mitsubishi Electric Corp.)

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

1. はじめに

平成 28 年度より NEDO プロジェクトとして、液体ヘリウムレスかつ小型・軽量の医療用 MRI 超電導マグネットを実用化するための研究開発を実施している[1]。現在、液体ヘリウムレス全身用 MRI 実現に向けて、1/2 サイズアクティブシールド型 3T-MRI 超電導マグネットを製作中である[2]。全身用 3T マグネットと比較し、1/2 サイズ 3T マグネットは、超電導線に印加される磁場やコイルにはたらく電磁力が小さい。また、全身用 3T マグネットの小型・軽量化には、現在製作中のマグネットよりも高電流密度化が必要である。そこで、小型・軽量の全身用 3T マグネットを検証するため、プロジェクト後半にて 1/2 サイズ 5T マグネットを試作予定である。今回、1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導コイルの磁気設計を実施したので、その結果について報告する。

2. コイル設計

1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導マグネットを想定し、コイル最適配置を計算した。最適手法は Simulated Annealing 法とし、最適化の目的関数は磁場均一度とした[3]。磁場均一度の定義式を以下に示す。

$$\frac{1}{B(0,0,0)} \sqrt{\frac{\int (B(r,\theta,z) - B(0,0,0))^2 dv}{V}} \quad (1)$$

REBCO 線材は幅広であることから、コイルはパンケーキ形状となる。この形状により、軸(Z)方向へのコイル位置は連続的に変化させていくため、最適化パラメータはコイル高さとした。コイルは、アクティブシールドコイルを含め 8 コイル群(ダブルパンケーキコイル数:116 個)で構成し、主コイル群のコイル高さを変化させて、所定の磁場均一度以下になるよう磁場解析した。シールドコイルは、中心磁場の均一度に大きく影響しないことから、30 個すべて同じ形状とした。コイル設計の前提条件は以下の通り。

- ・メインコイル内半径:280 mm
- ・シールドコイル外半径:600 mm
- ・中心磁場:5.0 T
- ・磁場均一度:2 ppm 以下(ϕ 250 mmDSV)
- ・漏れ磁場領域:4 m x 2.5 m 以下 (5 ガウスライン)

コイル配置の計算結果を Fig.1 に示す。磁場均一度(ϕ 250 mmDSV)は 1.7 ppm、コイルの電流密度は 200 A/mm²である。5 T コイルの諸元を Table 1、位置誤差係数を Table 2 に示す。また、5 ガウスラインを Fig.2 に示す。5 ガウスラインは目標領域以下である。線材の最大経験磁場は、6.7 T(c 軸との角度 86°)であり、20 K における電流負荷率(臨界電流に対する通電電流の割合)の目安を 60%としている。

3. まとめ

1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導マグネットのコイル配置を設計した。磁場均一度(ϕ 250 mmDSV)は、1.7 ppm を得られた。平成 30 年度に基本設計を完了し、試作を行う予定である。

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. 94(2017) p. 76
2. M. Oya, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 94(2017) p. 77
3. T. Matsuda, et al.: *Abstracts of CSSJ Conference*, Vol. 92(2015) p. 8

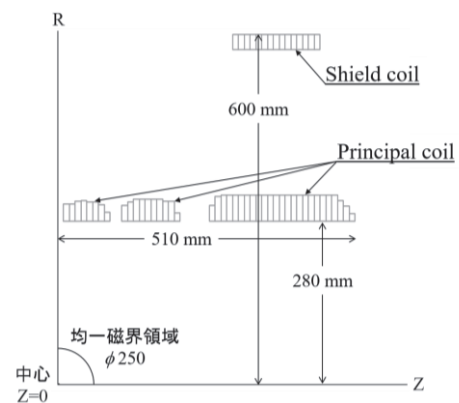


Fig. 1 1/4 cross sectional view of the half-size 5T coil.

Table 1 Specifications of the half-size 5T coil

コイル内半径	280 mm
コイル最大外半径	600 mm
コイル軸長	1020 mm
コイル電流密度	200 A/mm ²
中心磁場 / 最大経験磁場	5.0 T / 6.7 T
磁場均一度(ϕ 250 mmDSV)	1.7 ppm

Table 2 Inhomogeneous magnetic field over 250 mm DSV

Name	Z2	Z4	Z6	Z8	Z10	Z12
Value (ppm)	-1.72	3.10	-2.63	-15.41	-1.22	-1.81

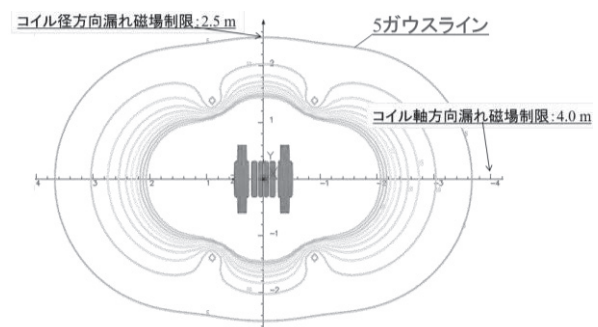


Fig. 2 Leakage magnetic field of the half-size 5T coil.

3 T HTS-MRI コイルの設計プログラム開発と非線形電流輸送特性を適用した特性解析

Design Program Development of 3 T HTS-MRI Coil and Its Characteristic Analysis Using Nonlinear Current Transport Property in HTS Tape

唐島 智治, 中村 武恒 (京大); 松田 哲也, 横山 彰一 (三菱電機)
 KARASHIMA Tomoharu, NAKAMURA Taketsune (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法に関する研究開発を実施している。特に, 冷凍機効率も含めたシステム効率の最適化を目標として, 運転温度を変化させた設計コードの開発を行っている。本講演では, 上記検討の一環として, 遺伝的アルゴリズムを適用して目標の磁場均一度を実現するコイル設計コードを開発した。そして, 設計したコイルの非線形直流通電特性を解析的に評価したので報告する。

2. 解析方法

まず, Gd系高温超電導線材の使用を前提として, 当該線電流近似したコイル特性解析コードを作成した(Gd系線材の幾何学的な断面形状は考慮している)。次に, 運転電流200 A, コイル内径1000 mm, およびコイル軸方向のコイル段数を120とし, 各々の段における巻数を変えることにより, 均一球500 mmの空間における磁場均一度最小化の最適化設計コード(遺伝的アルゴリズムを適用)を開発した。また, 最適化された線電流モデルを用いて二次元電磁場解析を実施し, 実際に所期の磁場ならびに磁場均一度が得られていることを確認した。さらに, 上記設計したコイルの通電時磁場ベクトルを計算し, 当該ベクトルと電流値から求められる局所電圧を加算することによって, コイル全体の非線形直流通電特性の温度依存性を評価した[2]。

3. 解析結果

Fig. 1には, 全てのコイル段の巻数をランダムに変化させた場合のコイル設計結果の一例を示す(対称性から, 1/4の領域のみを示している)。同図に示すように, コイル中心部の均一球空間の磁場は, 主として両端のコイル(主コイル)と中央付近のコイル(補正コイル)によって作られることが分かった[3]。そこで, 解析時間短縮のため, コイル両端の主コイル形状を固定し, 中央部コイルの巻数を変化させて設計した結果をFig. 2に示す。同図におけるコイルの磁場均一度は, 球体積の平均値で12 ppmであった。現在, さらに均一度の改善を検討している。また, 今後はさらに高温超電導線材の通電特性を考慮した温度特性や, あるいは遮蔽電流の影響を考慮した設計についても検討予定である。

Fig. 3には, Fig. 2で得られたコイルについて, コイル各部の局所磁場ベクトルから局所電圧を評価し, それをコイル全体に亘って加算することによって得られた直流電圧-電流特性を示す(発熱100 Wで計算を打ち切っている)。同図から, 本コイルの定格電流200 Aが臨界電流となる運転温度は45 K程度と推定される。設計法の詳細や磁場均一度を改善した設計結果, あるいは線材特性の長手方向不均一性を考慮した特性評価結果など, 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. 94, 2A-a01 (2017)
2. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92, 1A-p05 (2015)
3. T. Matsuda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92, 1A-p02 (2015)

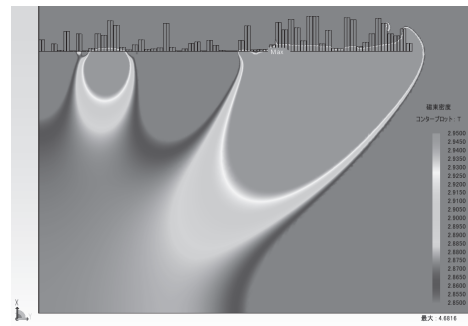


Fig. 1 Trial design result of a 3T whole-body MRI coil

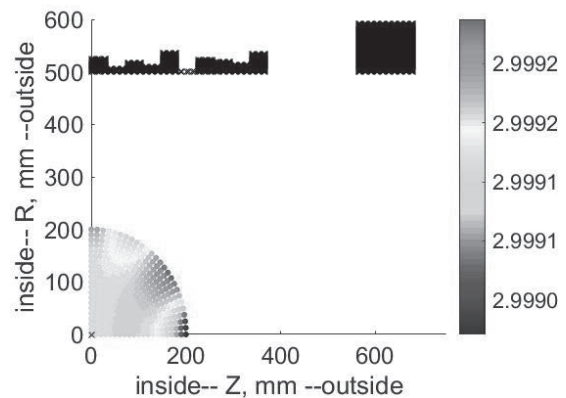


Fig. 2 An analysis result of magnetic field in a homogeneous ball space (500 mm) of whole-body 3T coil

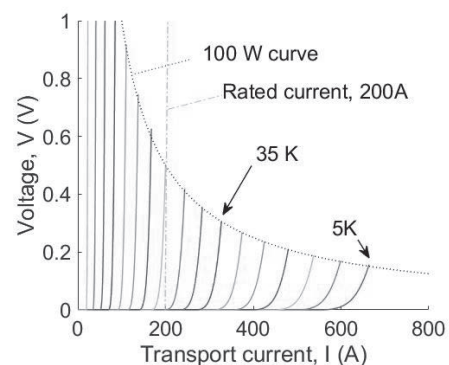


Fig. 3 An analysis result of temperature dependency of DC current transport characteristics of Fig. 2

加速器用 HTS マグネットの開発(5) —SuperKEKB 衝突点用六極マグネットのコイル試作—

Development of HTS accelerator magnet (5)

— Fabrication of prototype coils for SuperKEKB IR sextupole magnet —

藤田 真司, 武藤 翔吾, 飯島 康裕, 直江 邦浩 (フジクラ) ;

大内 徳人, 多和田 正文, 寺島 昭男, 増澤 美佳, 王 旭東, 土屋 清澄 (KEK) ; 菊池 章弘 (物材研)

FUJITA Shinji, MUTO Shogo, IJIMA Yasuhiro, NAOE Kunihiro (FUJIKURA) ;

OHUCHI Norihito, TAWADA Masafumi, TERASHIMA Akio, MASUZAWA Mika, WANG Xudong, TSUCHIYA Kiyosumi (KEK) ;
KIKUCHI Akihiro (NIMS)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB において, 色収差補正用のための HTS 六極マグネットが検討されている[1]. HTS 導体としては REBCO テープ線材を想定しており, これまで我々はマグネット設計[2], 小型 REBCO コイルを用いたクエンチ試験[3], クエンチ挙動の数値解析[4]を実施してきた. 今回, 六極マグネットのノーマル六極用の矩形レーストラック形状の REBCO コイルを作製したので, その特性について報告する.

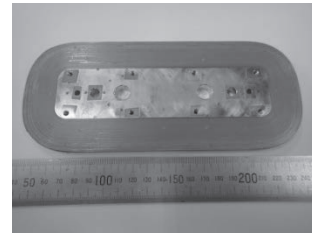


Fig. 1. Photograph of a REBCO coil (#6).

2. コイル仕様

コイルに使用した REBCO テープ線材はフジクラ製 4 mm 幅, 75 μm 基板, 全周 20 μm 厚 Cu めっき線材(ポリイミドテープ絶縁)である. コイル仕様を Table 1 に示す. 巻枠は真鍮製であり, 長方形の角を R8.5 mm とした矩形レーストラック形状である. コイルは 2 層のパンケーキコイルであり, 含浸はエポキシ樹脂による真空含浸とした. 巻線内部には線材同士の半田接続を 3 ヶ所含んでいる.

3. コイル試作結果

Fig. 1 に試作したコイルの外観写真を示す. このようなコイルを合計 6 個作製し, 液体窒素中で I - V 特性を測定した. I - V カーブには接続抵抗に起因するオーミックな傾きがある. その抵抗成分を差し引いた I - V 特性を図 2 に示す. 各コイルの I_c , n 値, 接続抵抗, コイル寸法の結果を Fig. 2 に示す. コイル I_c は線材 I_c によって多少のばらつきはあるが, n 値はすべて 20 以上であり, 良好な特性が得られた. 寸法に関しては, Table 1 の寸法仕様に対して ± 0.1 mm (望ましくは ± 0.05 mm) を目標としたが, 結果として 1 mm 程度の誤差が生じた. 今後さらなる寸法精度の改善が必要である.

4. まとめ

六極マグネット用の矩形レーストラック REBCO コイルを 6 個作製した. 電気的な特性は良好であったが, 寸法精度は目標に達しなかった. 今後, これらのコイルを六極マグネットに組み立て, 磁場精度等の評価を行う予定である.

Table 1. Specifications of a REBCO coil.

Parameters	Values
REBCO tape width, thickness (with insulation)	4.1 mm, 0.185 mm
REBCO tape length	110 m
Coil width (inner, outer)	38.6 mm, 83.6 mm
Coil length (inner, outer)	155.0 mm, 200.0 mm
Coil height	9.0 mm
Inner radius of curve part	8.5 mm
Number of turn	121 turns \times 2 layers

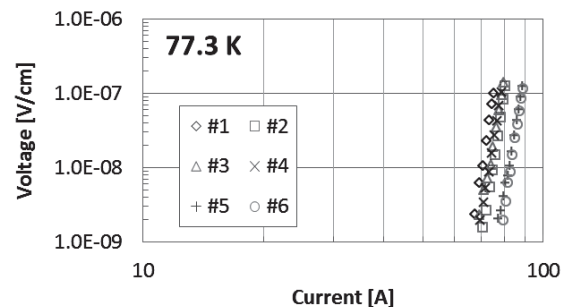


Fig. 2. I - V characteristics of all REBCO coils at 77.3 K.

Table 2. Results of REBCO coil fabrication.

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Coil I_c [A] (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ criteria)	75.2	80.3	79.1	78.9	88.4	88.6
Coil n -value (0.001 ~ 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	36	34	29	31	30	37
Joint resistance [$\mu\Omega$]	0.56	0.47	0.41	0.53	0.52	0.70
Coil width (outer) [mm]	84.45	84.69	84.52	83.82	83.75	84.07
Coil length (outer) [mm]	199.14	199.49	200.11	199.84	200.10	200.13
Coil height [mm]	8.85	8.84	8.83	8.90	8.97	8.90

謝辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

参考文献

- [1] K. Tsuchiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26 (2016) 4100904.
- [2] K. Tsuchiya et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.194.
- [3] S. Fujita et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.195.
- [4] X. Wang et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.196.