

積層金属—セラミックス複合テープにおける 高精度導電性マイクロパス加工技術の構築

名古屋大学 大学院 工学研究科 電気工学専攻
教授 吉田 隆

(2020年度 一般研究開発助成 AF-2020203-B2)

キーワード：高温超伝導材料，レーザ加工，マイクロパス

1. 研究の目的と背景

高温超伝導材料は高い臨界温度や臨界磁場を有しており、液体水素温度 (20K)、高磁場下での高い臨界電流なども報告され、超伝導電力貯蔵装置 (SMES)¹⁾、Magnetic Resonance Imaging (MRI)²⁾ 及び Nuclear Magnetic Resonance (NMR)³⁾ などの超伝導応用への展開が期待されている。特に核融合マグネットでは、20-30 K で大電流かつ高磁場の動作が可能である $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) の運用が期待されている⁴⁾。そのため、核融合装置用に大電流を流すことができる REBCO 積層型導体の研究開発が進んでいる。例えば、核融合研によって提案されている FAIR 導体は、高純度アルミシートを緩衝材として挟んだ REBCO のテープを積層したものを、アルミ合金製ジャケットの溝に入れ、摩擦撹拌接合で蓋をした導体であり、大型ヘリカル装置 (LHD) への適用が期待されている⁵⁻⁶⁾。また、高磁場下で高特性が報告されている REBCO 高温超伝導線材は、超伝導結晶構造に起因する異方性などのため、薄いテープ形状 (積層金属—セラミックス複合テープ) の素線で開発が進んできた⁷⁾。そのため、撚線などによる大電流導体の作製が困難で、それをを用いた大型コイル応用への大きな課題となっていた。さらに、REBCO 線材を用いた高磁場マグネットにおいて、線材の局所的な特性劣化の発生により、いくつかの事故例が報告され、実用化・応用への障害となっている。

この REBCO 積層導体では、高い工学電流密度 J_c の下でのクエンチ保護が課題とされている⁸⁻⁹⁾。 J_c を高めるためには、導体の大部分を占める銅安定化層を減らす必要がある。しかし、REBCO テープの銅安定化層を減らすと、導体内の REBCO 線材間転流が困難となり、導体の熱安定性が低下する。

本研究では、大電流導体を構築することに適した新しい構造の REBCO 線材を研究開発する。具体的には、複数の積層金属—セラミックスで構成される REBCO 線材を積層する際、従来の REBCO 線材は REBCO 層とハステロイ等の基材の間に絶縁物の中間層があるため、単純な積層だけでは REBCO 線間で電流が転流できず、導体としての安定性を高くすることができない。本研究では、中間層にレーザ加工技術を用いて新たに高精度導電性マイクロパスを設け、さらにその技術の応用展開をはかることを目的とする。そこで、REBCO 線材間の電流を分配し、導体の安定性を向上させるために、導電性マイクロパスを提案する。図 1 は、

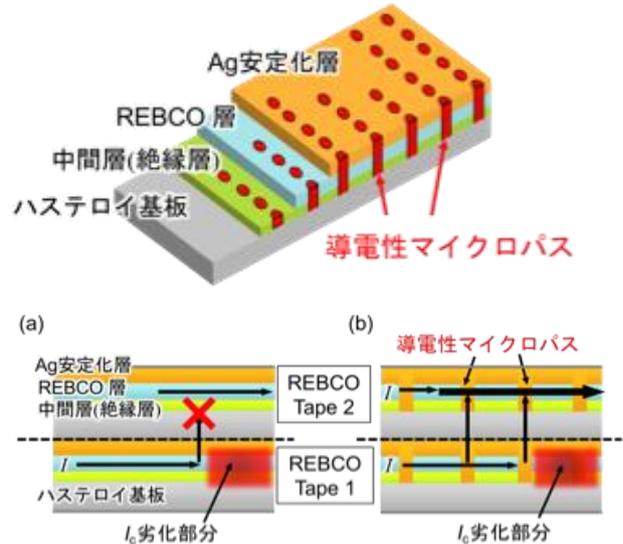


図 1 導電性マイクロパスを有する $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材の模式図及び局所的な欠陥 (ブリッジ部) を意図的に加工した際の導電性マイクロパスがある場合とない場合の REBCO テープ間の電流概念図

導電性マイクロパスを有する REBCO テープの模式図を示す。この場合、導電性マイクロパスは、金属基板と Ag 層の間の電流経路であり、電流は REBCO テープのバッファ層を通過して流れると期待される。図 1 は、局所的な欠陥 (ブリッジ部) を意図的に加工した際の導電性マイクロパスがある場合とない場合の REBCO テープ間の電流概念図を示す。導電性マイクロパスを持たない従来の積層導体では、中間層がテープ間を絶縁するため、REBCO 線材間で転流が発生しないことが考えられる。一方、導電性マイクロパスを導入することで、導電性マイクロパスを介して REBCO 線材間での転流が可能になるため、局所的 I_c 低部分 (ブリッジ部) に大電流が流れず、クエンチ発生が抑制されると期待される。

そこで本研究では、REBCO 線材に中間層を貫く導電性マイクロパスを作製し、REBCO テープ間でのマイクロパスを介した電流の転流に関して評価した。

2. 実験方法

2.1 導電性マイクロパスの作製

はじめに、REBCO テープに導電性マイクロパスを作製し

た。図 2 に、導電性マイクロパスの作製方法の概念図を示す。導電性マイクロパスは UV パルスレーザーとスパッタリング法を用いて作製した。本研究では、膜厚 $3\mu\text{m}$ の Ag 安定化層を持つフジクラ製 REBCO テープと $50\mu\text{m}$ 厚の基板 (FESC-S12) を使用した。まず、図 2 (a) に示すように、REBCO テープにレーザーを照射し、マイクロパスとして穴を作製した。レーザーパラメータは、様々な条件から最適化を行い、その結果周波数 80kHz、波長 355nm、Q パルス幅 $0.1\mu\text{s}$ 、走査速度 50mm/s と固定した。作製したマイクロパスのサイズとしては一辺が $500\mu\text{m}$ の正方形とした。次に、図 2(b) に示すように、テープ上にスパッタリング法で厚さ $3\mu\text{m}$ の Ag 膜を成膜し、パスに導電性を機能としてほどこした。

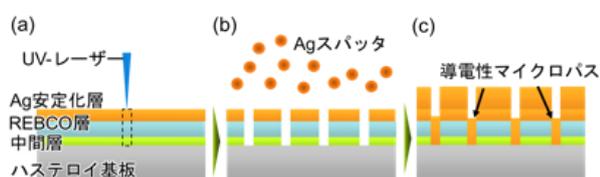


図 2 導電性マイクロパスの作製方法の概念図

このマイクロパスが Hastelloy 基板に到達していることを確認するために、レーザーで作製した穴と導電性マイクロパスの微細構造を走査型電子顕微鏡 (SEM) S-3400N (日立ナノテクノロジー社製) で観察した。また、エネルギー分散型 X 線分光分析装置 (EDX) (Inca E2H, OXFORD INSTRUMENTS) により、マイクロパス周辺の元素の空間分布を分析した。図 3 は Reel to Reel で図 2 の方法で作製する装置概念図と写真である。

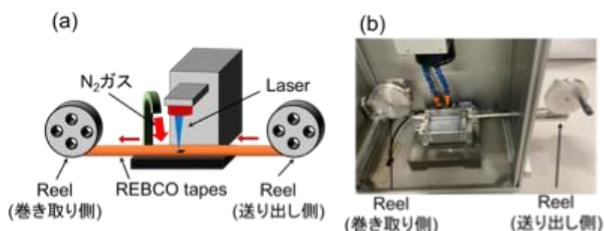


図 3 長尺導電性マイクロパス線材作製のための Reel to Reel レーザ加工装置の概念図と写真

2・2 導電性マイクロパスによる線材間転流の検証

導電性マイクロパスを導入した 2 本の線材を用いて、導電性マイクロパスを介した線材間転流を評価した。図 4 に、線材間転流試験の実験模式図を示す。図 4 (a) のように、2 本の導電性マイクロパスを導入した線材、Tape 1 と Tape 2 を重ね、その間に高純度 Al シートを挟んだ。テープ 1 の中央部には、局所的な I_c 損傷部分として幅 3 mm のブリッジ部を加工した。各部分における電圧を測定するため、図

4(a) に示すように合計 12 個の電圧タップを設置した。例えば、電圧タップ A はテープ 1 の電圧を、電圧タップ T1 と T2 はテープ間の電圧を、またその他の電圧タップはテープ 2 の各部分の電圧を測定した。液体窒素中で直流電流を 1A/s で増加させながらテープ 1 に印可し、各電圧タップにおける電圧を測定した。本転流試験では、まずテープ 1 のみに電流を印可し、ブリッジ部の I_c 以上の電流が印可された場合にテープ 2 に転流が発生する挙動を想定している。図 5 には上記の転流試験の流れの詳細を示す。

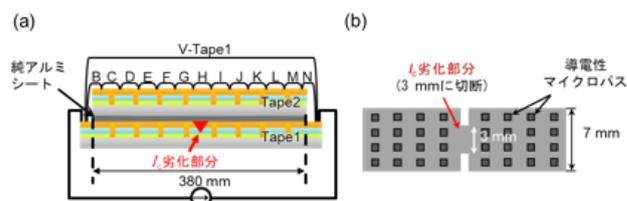


図 4 線材間転流試験の実験模式図

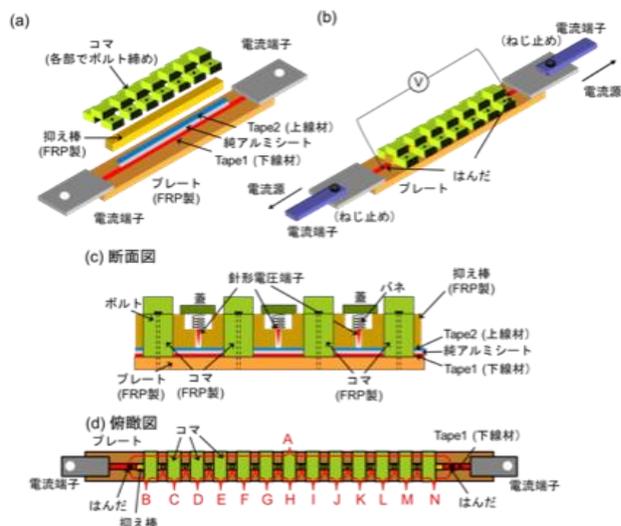


図 5 線材間転流試験の実験方法の詳細概念図

3. 実験結果

3・1 導電性マイクロパスの作製

図 6 に Ag スパッタリング前後のそれぞれのマイクロパスの (a) (d) SEM 画像、(b) (e) EDX マッピング分析、(c) (f) 高さプロファイルを示す。図 6(a) に示すように、Ag スパッタリング前の穴には、Ni 元素は検出されたが、Ce 元素は検出されなかった。また、図 6(c) に示すように、高さプロファイルから穴の深さは $5\sim 8\mu\text{m}$ であることが確認され、テープの金属基板まで到達していることが分かる。一方、図 6(e) に示すように、Ag スパッタリング後の孔には、Ag 元素は検出されたが、Ni 元素は検出されなかった。したがって、この穴はスパッタリングした Ag 膜によって埋められていることが確認された。

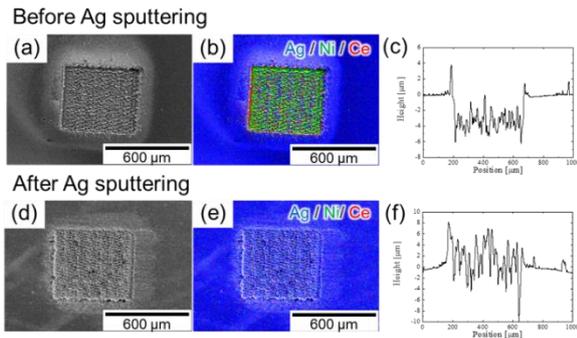


図6 Agスパッタリング前後のそれぞれのマイクロパスの (a) (d) SEM 画像、(b) (e) EDX マッピング分析、(c) (f) 高さプロファイル。

3・2 導電性マイクロパスによる線材間転流の検証

次に導電性マイクロパスを介した線材間転流に関する実験結果を示す。図7は、線材間転流試験結果 ((a) 導電性マイクロパスなし、(b) 導電性マイクロパスあり) を示す。これらの横軸は、電圧タップAで測定した各Tape1の臨界電流 I_c で規格化した (I_c =(a) 218.1 A, (b) 181.0 A)。ただし、電界基準は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

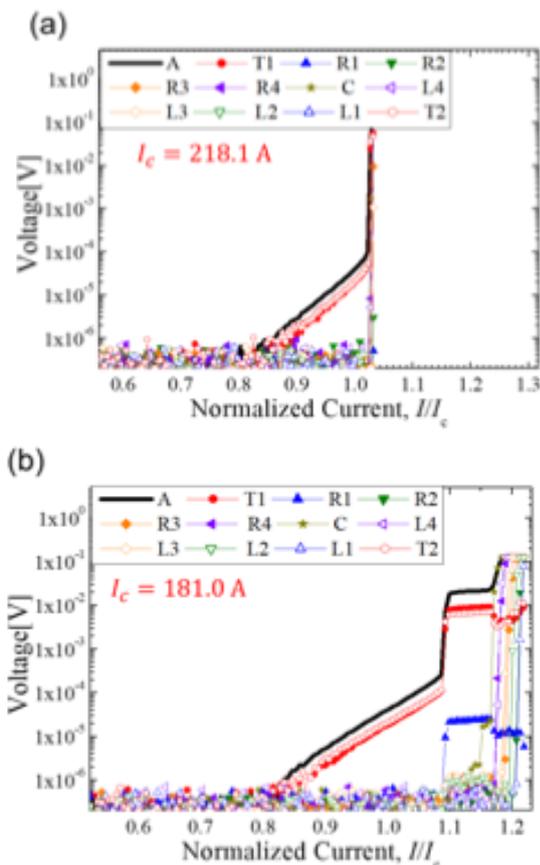


図7 線材間転流試験結果 ((a) 導電性マイクロパスなし、(b) 導電性マイクロパスあり)。これらの横軸は、電圧タップAで測定した各Tape1の臨界電流 I_c で規格化した。

導電性マイクロパスがない REBCO テープは、図7(a)に示すように、 $I/I_c < 0.8$ では、電流が臨界電流以下であるため、全ての電圧タップの電圧は 10^{-7} V 程度であり、ノイズ電圧のみが観測された。 $I/I_c > 0.8$ では、テープ1のブリッジの電圧が上昇したため、 V_A, V_{T1}, V_{T2} が上昇した。電圧タップAで測定した n 値は $I/I_c=1$ において 23.9 であった。一方、Tape2に取り付けた他の電圧タップでは、 10^{-7} V 程度の電圧となり、ノイズ電圧のみが観測された。 $I/I_c=1.05$ において全ての電圧タップの電圧が急激に上昇して、テープ1は焼損した。

図7(b)の導電性マイクロパスを持つ REBCO テープでは、 $I/I_c < 0.8$ で電圧が上昇するまで、図7(a)と同様の特性が観察された。電圧タップAで測定した n 値は、 $0.8 < I/I_c < 1.1$ において 20.6 であった。 $I/I_c > 1.1$ では、以下に述べるように異なる挙動が見られた。 $1.05 < I/I_c < 1.1$ では、 $I/I_c=1.1$ で急激に電圧が上昇した後、 V_A, V_{T1}, V_{T2} の上昇が 10^{-2} V 程度で緩やかになった。 V_{R1} の電圧上昇も 10^{-5} V 程度で緩やかになった。これらの電圧は図7では一定に見えるが、実際は直線的に上昇した。これはテープ1に印加する電流が増加してもブリッジを流れる電流が一定になったためである。以上のことから、 $1.1 < I/I_c < 1.05$ でテープ1からテープ2へ線材間転流が発生したと考えられる。図8にはこの線材間転流に関して概念図を用いてしめしている。

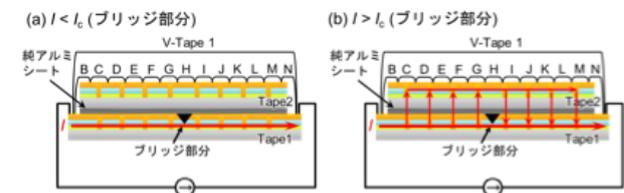


図8 本研究で得られた導電性マイクロパスを用いた線材間転流に関する概念図

4. 結論

本研究では、REBCO 線材間転流により導体の安定性を向上させるため、REBCO 線材へ REBCO 線材の中間層を貫通する電流経路である導電性マイクロパスの導入を提案した。まず、UVパルスレーザーとAgスパッタリング法を用いて、REBCO テープに導電性マイクロパスを作製した。その結果、作製した穴がテープの金属基板に到達し、その穴内部に蒸着したAgが充填されていることを確認した。次に、導電性マイクロパスのある REBCO 線材と導電性マイクロパスのない REBCO 線材を用いて線材間転流の評価を行った。その結果、導電性マイクロパスがない REBCO 線材では線材間転流は発生しなかった。一方、導電性マイクロパスがある REBCO 線材では、線材間転流が発生した。以上のことから、導電性マイクロパスを導入することで、線材間での転流が発生することが示された。

今後、導電性マイクロパスを有する REBCO テープを用いた REBCO 積層テープ導体は、テープ間の電流を共有し、導体安定性を向上させることが期待される。

謝 辞

本課題は公益財団法人天田財団の 2020 年度一般研究開発助成によって行われたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nagaya, Shigeo, et al. "The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan." *Cryogenics* 52.12 (2012): 708-712
- 2) S. Yokoyama, J. Lee, T. Imura, T. Matsuda, R. Eguchi, T. Inoue, T. Nagahiro, H. Tanabe, S. Sato, A. Daikoku, T. Nakamura, Y. Shirai, D. Miyagi, and M. Tsuda: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (2017) 4400604.
- 3) J. Bascuñán, S. Hahn, T. Lecrevisse, J. Song, D. Miyagi, and Y. Iwasa: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (2016) 4300205.
- 4) B.N. Sorbom, J. Ball, T. R. Palmer, F. J. Mangiarotti, J. M. Sierchio, P. Bonoli, C. Kasten, D. A. Sutherland, H. S. Barnard, C. B. Haakonsen, J. Goh, C. Sung, and D. G. Whyte: *Fusion Eng. Des.*, **100** (2015) pp. 378-405.
- 5) T. Mito, Y. Onodera, N. Hirano, K. Takahata, N. Yanagi, A. Iwa-moto, S. Hamaguchi, S. Takada, T. Baba, and N. Chikumoto: **4** (2020) 035009.
- 6) Y. Onodera, T. Mito, N. Hirano, K. Takahata, N. Yanagi, A. Iwamoto, H. Chikaraishi, S. Hamaguchi, S. Takada, T. Baba, N. Chikumoto, A. Kawagoe, R. Kawanami: *MT27* (2021) TUE-PO1-606-04.
- 7) Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Ikeno: *Appl. Phys. Lett.* 60 (1992) 769.
- 8) 電気学会: 「電気学会大学講座 超伝導工学」株式会社オーム社, (1998).
- 9) A. Ishiyama, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15** (2005) 1659-1662.