

配向 Cu テープ上に導電性中間層を配置した低コスト REBCO 線材における中間層の抵抗率の検討

Effects of Resistivity of Buffer Layer for Low-cost REBCO CC Using Conductive Buffer Layer on Textured Cu Tape

土井 俊哉(京大, JST-ALCA); 井上 靖也(京大); 堀井 滋(京大, JST-ALCA); 一瀬 中(電中研, JST-ALCA);
北口 仁(NIMS, JST-ALCA)

DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA); INOUE Seiya (Kyoto Univ.); HORII Shigeru (Kyoto Univ., JST-ALCA);
ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS, 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 REBCO 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 REBCO 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 REBCO 線材の中で基材テープ、および Ag 層は大きなコストウェイ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 Ni-W 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、REBCO 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 [3]、更に通電電流が I_c 値を超えた際には配向銅テープに電流が回避することを報告[4]してきた。しかし、現状では導電性中間層に求められる抵抗 (抵抗率と厚さ) に関して、ほとんど知見が無い。そこで、本研究では導電性中間層の抵抗率を変化させた場合に、線材に流れる全電流が REBCO 層と Cu 層に分配される割合がどのように変化するのか、有限要素法を用いた数値計算により検討した。

2. 実験方法

解析には(株)フoton社の解析ソフト VOLT を使用した。我々は YBCO/SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃/Ni/Cu/SUS316 構造を提案し、開発中であるが、数値解析では Ni 層と SUS316 テープを削除した YBCO/SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃/Cu 構造について計算を行った。試料温度は 77 K で一定であると仮定し、Cu 層の厚さは 30 μm、抵抗率は 77 K における純銅の抵抗率に固定した。YBCO 層の厚さは 3 μm、YBCO 層の電流 I と電圧 V は n 値モデルに従うと仮定し、n 値は同一条件で別途絶縁性の SrTiO₃ 単結晶基板上に同一条件で作製した YBCO 薄膜試料の I-V 曲線から算出した値もしくは低電界領域の I-V 曲線から見積もった値を

用いた。SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃ 導電性中間層の厚さは 1 μm、抵抗率 ρ₀ は 1.0 × 10⁻⁴ ~ 1.0 × 10¹ Ω・cm の範囲で変化させて、計算を行った。

3. 結果と考察

解析は 2 次元で行い、線材幅方向の端から端まで長さ方向 5 mm に渡って YBCO 層が常伝導化した領域が発生したと仮定し、超伝導層に流れていた電流 (I=0.5 I_c) がどのように導電性中間層を通して Cu 層に分流し、また復帰するのか計算した。図 1 に、SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃ の抵抗率 ρ₀ を 1.0 × 10⁻⁴、1.0 × 10⁻¹ Ω cm として解析した結果を示す。ρ₀=1.0 × 10⁻⁴ の場合、電流が超伝導層から分流 (全電流の 90%) する為に必要な距離は非常に小さく、ρ₀=1.0 × 10⁻¹ の場合には、9 mm 程度必要であることが分かった。

当日は、ρ₀ を様々に変化させた結果、常伝導化した領域の大きさ (長さ) を変化させた結果等についても報告する。

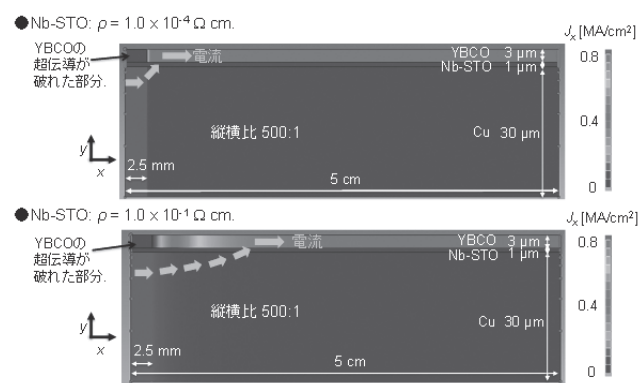


Fig. 1 Current distribution in x-direction (J_x) for the YBCO/Nb-STO/Cu tape.

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.
- [4] 土井ら、第 95 回低温工学・超電導学会 p.4 (2017).

REBCO 線材における安定化材との電流分配への超伝導層表面の影響

Effect of REBCO layer surface on the current sharing between REBCO layer and stabilizer in coated conductors

北口 仁 (NIMS, JST-ALCA); 土井 俊哉 (京大, JST-ALCA)

KITAGUCHI Hitoshi (NIMS, JST-ALCA); DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA)

E-mail: KITAGUCHI.Hitoshi@nims.go.jp

1. はじめに

REBCO 線材を用いた高磁場或いは高温動作マグネットへの期待が大きく、REBCO 線材を用いたコイル開発が数多く進められている。その中で、コイル通電試験における熱暴走による焼損の報告例も多い[1]。コイル保護(焼損防止)のためには、臨界電流を超える電流を安定化材である銅に分流させることが必要となる。本報では、REBCO 線材における超伝導層と安定化材との電流分配に与える超伝導層表面の影響について述べる。

2. 実験方法

TFA-MOD 法等の化学的成膜法では超伝導層表面に不純物が集中し、超伝導層と銅安定化材との電流受け渡しを阻害することが懸念される。このことから、電流電極近傍での銅安定化材から超伝導層への電流流入を詳しく調べた。

試料として用いた REBCO 線材は、TFA-MOD 法によって作製された線材 2 種(#1:超伝導層表面に不純物が多く析出したもの、#2:熱処理の工夫により不純物の析出を抑制したもの)及び市販の CVD 法線材(#3)の 3 種であり、全てが銅安定化材(厚さ $40 \pm 10 \mu\text{m}$)を有した 4 mm 幅線材である。

測定は液体窒素中で行った(試験装置の詳細は[2]で報告)。電流電極は機械的圧接で形成した。その際、Fig.1 に示すように、試料テープ線材と電極間の大部分をポリイミドテープを用いて絶縁し、電流電極内側の 1 mm の部分に配したインジウム箔(厚さ 0.1 mm)部分だけで電極から線材超伝導層側銅安定化材表面に電流が流入するようにした。また、電圧計測線は銀ペーストを用いて線材超伝導層側の銅安定化材表面に取り付けた。電流電極間の距離は 42 mm であり、最も電流電極側の電圧計測線は電流電極から 1 mm の位置とした。

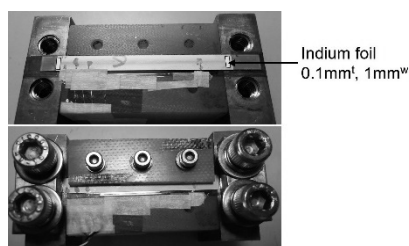


Fig.1 Sample setting

3. 結果と考察

試料#1の結果を Fig.2 に示す。電極近傍では大きな電界が観測された。1~4 mm 区間での発生電界と常伝導状態での試料の抵抗率から見積もると、1~4 mm 区間の平均で、電流の 5%が銅安定化材を流れていたと考えられる。また、電圧計測線位置を変えた測定も行った結果、全ての電流が超伝導層部分に流れ込むのに必要な長さ(電流流入距離)は 13 mm 以上であった。超伝導層表面に不純物の少ない試料#2の結果を Fig.3 に示す。試料#2 では電流流入距離が 5 mm 以下と短くなっており、不純物が超伝導層と安定化材との電流受け渡しを阻害していることが確認された。一方で、超伝導層表面の不純物が極めて少ない CVD 法線材(Fig.4)では、電流流入距離は 1 mm 以下であった。

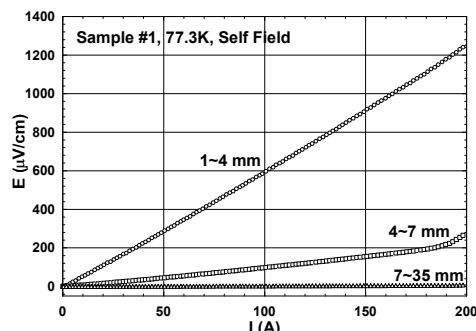


Fig.2 E-I plot for sample #1

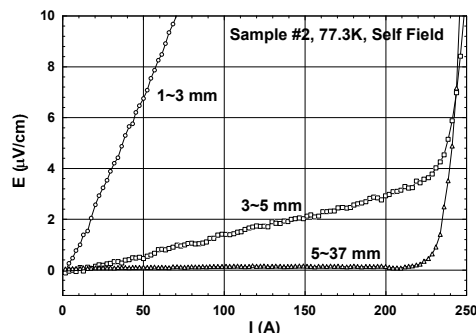


Fig.3 E-I plot for sample #2

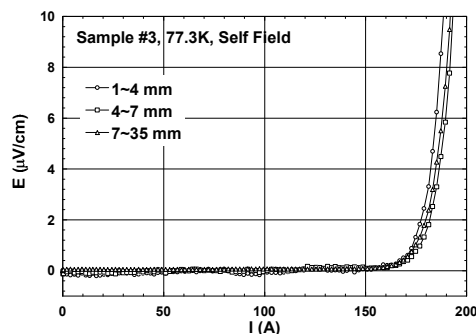


Fig.4 E-I plot for sample #3

クエンチ等で常伝導部が発生した場合の安定化材への分流でも超伝導層/安定化材の界面抵抗に応じて本実験結果と同様の傾向になると予想される。今回の結果は、化学的(湿式)成膜法を用いる場合には超伝導層表面状態を清浄とする製法或いは工程が必要なことを示唆している。

本研究の一部は、JST-ALCA「低コスト高温超伝導線材」課題で実施された。

参考文献

- 例えば、S. Matsumoto, et al.: Supercond. Sci. and Technol., 25 (2012) 025017
- G. Nishijima, et al.: Rev. Sci. Instrum., 84 (2013) 015113

Face-to-Face Double Stack (FFDS) 構造を有する 1 mm 幅細線加工 REBCO コート線材の電流-電圧特性

Current-Voltage Characteristics in Face-to-Face Double Stacked (FFDS) 1-mm-Wide REBCO Coated Conductor Tapes

木須 隆暢, 西宮 悠平, 東川 甲平, 鈴木 匠, 井上 昌睦 (九大);

衣斐 顕, 町 敬人, 和泉 輝郎 (産総研); Valery Petrykin³, Sergey Lee (SuperOX JP)

KISS Takanobu, NISHIMIYA Yuhei, HIGASHIKAWA Kohei, SUZUKI Takumi, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);

IBI Akira, MACHI Takato, IZUMI Teruo (AIST); PETRYKIN Valery, LEE Sergey (SuperOX JP)

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

1. はじめに

希土類系高温超伝導 (REBCO) コート線材は、モノリシックな超伝導層を幅広のテープに積層する構造を有する事から、線材幅に比例した大きな磁化が線材に誘起され、磁化損失の発生や、マグネット巻線における精密磁界の阻害因子となる。素線の磁化低減には、マルチフィラメント化や細線加工が有効であるが、細線化にともない局所的な不均一性の影響が顕著となり、素線の I_c の著しい低下や、発生電界の局在を招くことから、電流輸送媒体としてのロバスト性や信頼性の向上が重要な研究課題となっている。筆者等は、REBCO コート線材の超伝導層同士を対向させて低抵抗接続を行う Face-to-Face Double Stack: FFDS 構造によって、局所欠陥に伴う電界集中を低減でき、素線のロバスト性向上に有効である事を示した[1]。本研究では、REBCO 線材の非線形電流輸送特性を記述するモデルを基に、FFDS 導体構造における I - V 特性の解析モデルを提案し、単一欠陥を導入したモデル素子による実験によってその定量性を検証すると共に、本解析モデルを用いて、1 mm 幅の細線加工した線材に対し単一素線ならびに FFDS 構造とした場合の I - V 特性について考察した。

2. 実験結果及び考察

まず始めに、単一の人為的な欠陥を導入した素線を用いて FFDS 構造を作製し、その電流輸送特性について実験と解析との比較を行った。Fig. 1(a)に計算に用いた分布定数回路を示す。ここで、それぞれの REBCO 素線の非線形抵抗は、リール式磁気顕微測定によって得られた I_c の長手分布の計測結果をもとに、等価断面の長手変化を考慮したパーコレーション転移モデルによって記述した[2]。Fig. 1(b)に実測した I - V 特性 (シンボル) と解析結果 (実線) との比較を示す。両者は定量的に良い一致を示す事が分かる。また、銀拡散接合の界面抵抗は fitting parameter として導出でき、 $R_N=6.9 \times 10^{-13} \Omega m^2$ を得た。本解析モデルを用いて、1 mm 幅に細線加工した 0.1 m 長の REBCO 線材の I - V 特性を解析した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a), (b) は実測した I_c 分布より導出される各素線の I - V 特性、(c) は R_N 無限大、(d) 通常のハンダ接合で見込める $R_N=6.9 \times 10^{-12} \Omega m^2$ の場合、(e) は銀拡散接合 $R_N=6.9 \times 10^{-13} \Omega m^2$ の場合、(f) は界面抵抗を無視した場合の FFDS を示す。素線 I_c の単純和 (c) に比べ、ハンダ接合においても充分大きな I_c 向上効果が見込める事が分かる。詳細については当日報告する。

謝辞: 本研究の一部は、科研費 (JP16H02334) ならびに JST 未来社会創造事業の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] T. Kiss et al., 30th ISS, WB6-6-INV, Dec. 14, 2017.
[2] T. Kiss et al., Cyogenics 80 (2016) 221.

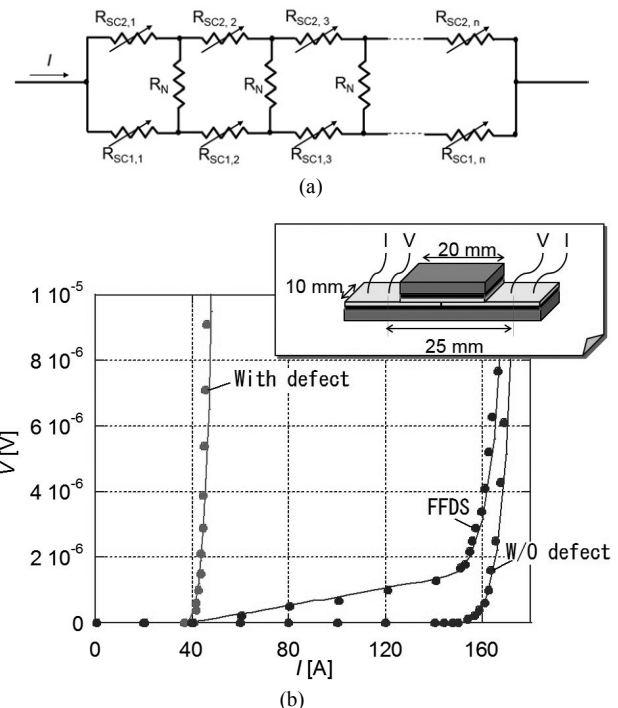


Fig. 1 (a) Distributed circuit model for the FFDS: $R_{Sc1(2),i}$ is nonlinear resistance of the REBCO tape strand, R_N is joint resistance. (b) Current-voltage characteristics of single REBCO tape (with and without defect) and FFDS connected by silver diffusion contact, where R_N is estimated to be $6.9 \times 10^{-13} \Omega m^2$.

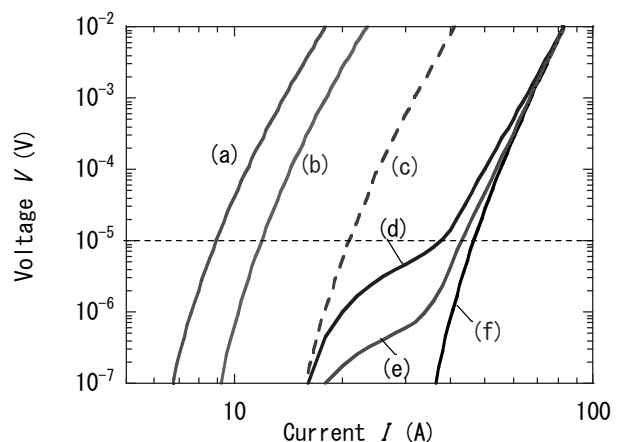


Fig. 2 Current-voltage characteristics of 1-mm-wide 0.1-m-long REBCO tape (a) single layer of strand 1, (b) single layer of strand 2, FFDSs with (c) $R_N = \infty$, (d) $R_N = 6.9 \times 10^{-12} \Omega m^2$, (e) $R_N = 6.9 \times 10^{-13} \Omega m^2$, (f) $R_N = 0 \Omega m^2$.

数値解析による LTS クエンチ検出器の REBCO パンケーキコイルへの適用性評価

Numerical evaluation of applicability of a LTS detector to REBCO pancake coils

泊瀬川 晋, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

HASEGAWA Shin, ITO Satoshi and HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: shase@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

発表者らは、希土類系銅酸化物超伝導 (REBCO) コイルの新たなクエンチ検出手法として、クエンチ検出用の低温超伝導 (LTS) 検出器を使用する方法を提案している[1]。原理検証実験では、1枚の REBCO 線材に NbTi 線材を設置した場合、REBCO 線材のクエンチ時に、REBCO 線材の焼損よりも十分に早く、NbTi 線材で 1 V 以上の高電圧が検出された[1]。本手法を REBCO パンケーキコイルへ適用する場合、コイル内の不均一な磁場分布を考慮し、例えば Fig. 1 のように複数の異なる使用条件の LTS 検出器の設置が必要と考えられる。一方、クエンチ検出信号の測定体系の複雑性を緩和するため、LTS 検出器の数を最低限に抑える必要があるが、REBCO 線材中および線材間絶縁の熱抵抗や REBCO 線材中の発熱密度などの、本手法のクエンチ検出感度への影響も考慮する必要がある。そこで本研究では、クエンチ検出感度に影響を与える因子として、REBCO 線材の構造 (銅安定化材厚さ t_{stab} , ハステロイ基板層厚さ), REBCO 線材間絶縁厚さ, LTS 検出器の材料に着目した。本発表では、REBCO パンケーキコイルを模擬した REBCO 線材の積層体に LTS 検出器を設置した体系を対象に、1つの LTS 検出器による空間的なクエンチ検出範囲の上記因子の依存性を数値解析で評価した結果を報告する。

2. 解析体系

解析対象と 2 次元の解析体系を Fig. 2 に示す。なお、図中 (b), (c) では左右対称な解析体系の半分を示している。長さ 200 mm (x 方向) の REBCO 線材、絶縁体 (ポリイミド) の積層体上に、LTS 検出器を配置した体系を想定し、4.2 K の無冷媒冷却下を仮定した。また、REBCO 線材でのクエンチ模擬のため、REBCO 中の x 方向の中心 2 mm の領域での臨界電流密度を 0 A/mm^2 とした。本解析では、REBCO 線材の積層体と LTS 検出器でそれぞれ静電ポテンシャル場解析と温度場解析の弱連成解析を行った。温度分布は REBCO 線材積層体内と LTS 検出器内でそれぞれ 2 次元熱伝導方程式から有限要素法を用いて計算した。静電ポテンシャル分布は、REBCO 線材積層体内では、 n 値モデルを用いて各 REBCO 線材ごとに、 x 方向に計算した。また、NbTi 検出器内では 1 次元ポアソン方程式から x 方向に計算した。以上の解析を通して、各 t_{stab} に対する、クエンチ検出時の REBCO 線材の最大温度が 100 K 以下となる REBCO 線材の積層数 n_{max} を計算した。 t_{stab} は、商用の REBCO 線材の構造を考慮し、 $30 \sim 75 \mu\text{m}$ とした。また、LTS 検出器の材料は NbTi, Nb₃Sn, Nb₃Al とし、LTS 検出器でのクエンチ検出の閾値は 100 mV とした。

3. 解析結果

Fig. 3 に、REBCO 線材、NbTi 検出器への電流負荷率をそれぞれ 0.5, 0.1, 基板層厚さ、REBCO 線材間絶縁厚さをそれぞれ $50 \mu\text{m}$, $35 \mu\text{m}$ に固定した場合の、 n_{max} の t_{stab} 依存性を示す。 t_{stab} の増加に対して n_{max} が増加する傾向が見られる。これは、 t_{stab} の増加により REBCO 線材の積層方向の熱抵抗が増加する一方、REBCO 線材内の発熱密度が減少し、REBCO 線材内の温度上昇が抑制されるためだと考えられる。

4. まとめ

本研究では、REBCO パンケーキコイルを模擬した YBCO 線材積層体に設置された 1 つの LTS 検出器による空間的なクエンチ検出範囲の t_{stab} 依存性の数値解析による評価を行った。その結果、商用の REBCO 線材の t_{stab} の範囲では、 t_{stab} の増加による本手法のクエンチ検出性能への影響の内、REBCO 線材内の温度上昇速度の抑制が支配的である可能性が示された。解析条件の詳細およびその他の依存性評価の結果は発表当日に報告する。

参考文献

- [1] S. Hasegawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 28 (2018) 4700605

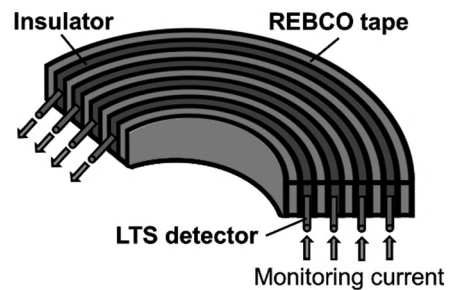


Fig. 1 Arrangement of LTS quench detectors to the REBCO pancake coil (LTS detectors are co-winded)

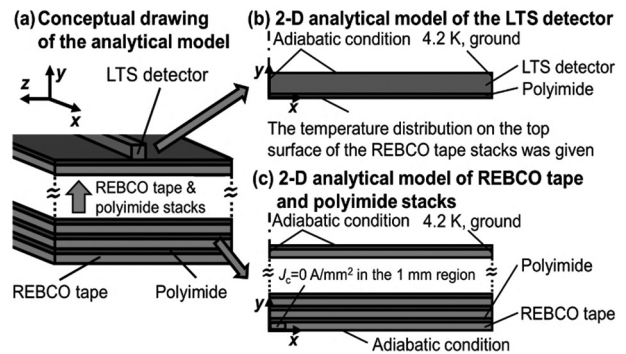


Fig. 2 Analytical model for the numerical simulation

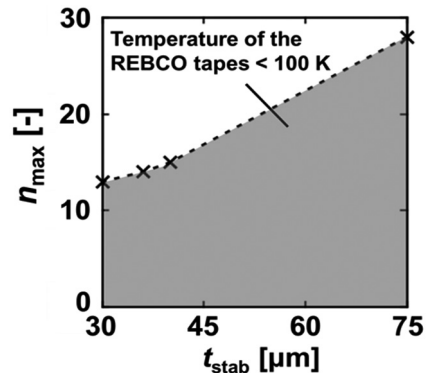


Fig. 3 The acceptable number of the REBCO tape stacks for one NbTi detector vs thickness of the copper stabilizer

高温超電導コイルの巻線ひずみに対する臨界電流特性の外部磁場依存性に関する実験研究

Magnetic field dependence of the critical current for winding strain in HTS coils

鎌田 太陽, 植木 徹, ニノ宮 晃, 野村 新一 (明治大); 谷貝 剛 (上智大); 中村 武恒 (京大); 力石 浩孝 (NIFS)

KAMADA Hiroharu, UEKI Toru, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.); YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); CHIKARAISHI Hiroataka (NIFS)

E-mail: kamada@meiji.ac.jp

1 はじめに

一般に高温超電導コイルの製作過程では、形状に起因した曲げや巻線張力による機械ひずみが線材に不可避免的に印加される。さらに冷却によるひずみ、通電時に生じる電磁力が重畳される。高温超電導コイルの運転電流を設計する上で、複合的なひずみに対する臨界電流特性のみならず、外部印加磁場に対する臨界電流—複合ひずみ特性を明らかにする必要がある。弾性領域であれば複合ひずみは線形的に扱うことができるが [1][2]、線形領域における複合ひずみが同値でもその与え方が異なる場合において外部磁場特性は同様に扱うことができるか、筆者らは YBCO 線材を用いてこれらの特性をまずは実験により明らかにすることを目指し、ここでは厚み方向曲げと巻線張力とを組み合わせた実験結果について報告する。

2 実験方法

Fig.1 はサンプルコイルの外観である。製作にはフジクラ社製の YBCO 線材 (平均幅 5.04 mm, 平均厚み 0.16 mm) を用いた。巻棒径は 60 mm から 120 mm の範囲で任意に用意し、最大 200 N までの範囲 (248 MPa の引張荷重) で任意の張力を一定とし YBCO 線を 1 巻きしたサンプルコイルを製作した。その際、電圧タップをはんだ付けするため Cu 層が外側となるよう巻線した。製作したコイルを最大 10 T まで発生可能な超伝導マグネットに取り付けて、液体窒素浸漬冷却のもと 0.1 T から 1.0 T まで 0.1 T 刻みに、1.0 T から 3.0 T までは 0.5 T 刻みに磁場を印加したときの臨界電流を測定した。磁場はサンプルコイルの中心軸方向に対して平行 (Fig.1(a)) と、径方向に対して平行 (Fig.1(b)) に加えた。尚、電圧タップ間の電圧が $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 相当に達した時を臨界電流とした。

3 実験結果

Fig.2(a) 及び Fig.2(b) に直径 80 mm の巻棒に張力 5 N (6.2 MPa 相当) で巻線したサンプルコイルと、直径 60 mm の巻棒に張力 100 N (124 MPa 相当) で巻線したものの、印加磁場に対する規格化臨界電流特性の例をそれぞれ示す。臨界電流の規格化には短尺直状の臨界電流 ($I_{c0} = 285 \text{ A}$) を基準値として用いた。Fig.2 から 0.0 T では両者とも I_{c0} に対してほとんど低下していないが、印加磁場に対する臨界電流の低下率は機械的ひずみが大きい Fig.2(b) の方が大きい結果となった。また YBCO 線材の厚み方向に平行な磁場が印加された時の方が臨界電流の低下が大きくなった。実験結果の詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業 (基盤研究 (B) 16H04321) の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] M. Sugano *et al.*: *Physica C* 463-465 (2007) 742-746
 [2] D C van der Laan *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115002 (6pp)

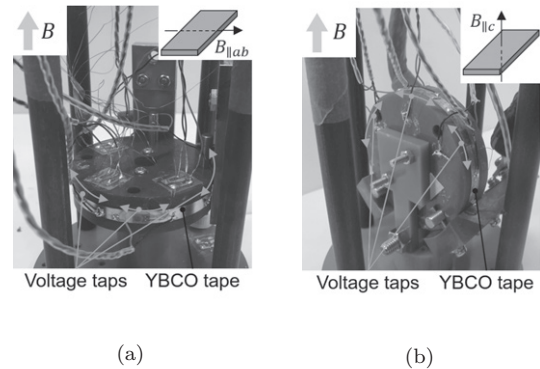


Fig. 1. Experimental setup for I_c of sample YBCO coil under (a) $B_{//ab}$, and (b) $B_{//c}$.

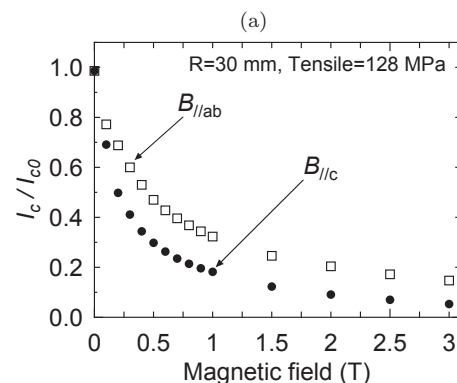
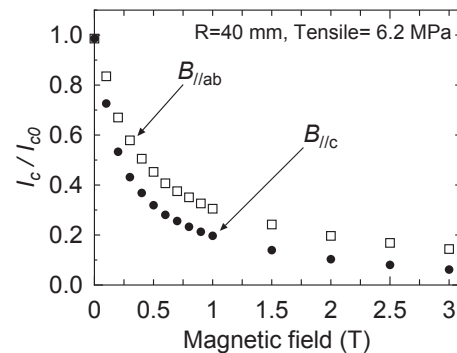


Fig. 2. I_c with tensile and bending strain under $B_{//c}$ and $B_{//ab}$. (a) flatwise bending radii of 40 mm under 5 N winding tension (6.2 MPa), and (b) bending radii of 30 mm under 100 N winding tension (128 MPa).

超音波透過信号を用いた室温環境下における REBCO 線材の剥離診断 -空隙による厚みの変化の検出- Delamination diagnostic method of REBCO tapes using ultrasonic transmission signals at the room temperature -Thickness deformation due to gap-

富塚 貴大, ニノ宮 晃, 野村 新一 (明治大)

TOMITSUKA Takahiro, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi (Meiji Univ.)

E-mail: ce171048@meiji.ac.jp

1 はじめに

REBCO 線材はその強い異方性から、線材長手方向と厚み方向の機械強度は大きく異なるため、線材端部に引き剥がす力が加わると、部分剥離または剥離進展による全面剥離が生じ、超電導層の破壊に伴い臨界電流が著しく損なわれる。[1][2]しかし線材内部の傷を直接計測する手段は無く、また臨界電流も極低温下で試験するまで把握できない。本研究では、AE センサにより線材内部の状態を推定し、更に臨界電流をこの状態推定手法により室温環境下で評価することを目指している。REBCO 線材の健全部位と剥離部位の両状態を有する試料に、超音波透過特性と線材の厚みとを照合し、厚みの大きな変化を透過特性により検出できることが分かった。また、同一試料の液体窒素温度下における臨界電流特性と室温下の超音波透過特性とを照合した。本講演ではこれらの結果について報告する。

2 剥離診断方法

Fig. 1 に剥離診断方法を示す。使用した AE センサは厚み 2 mm, 径 5 mm である。REBCO 線材の両面に送信用, 受信用 AE センサを配置し、線材間の透過波について検討した。線材内部に剥離や機械的欠損等が生じた場合、信号の伝搬経路に変化による超音波特性の振幅や位相の変化が生じることが想定される。そこで、線材長手方向に対し、等間隔で AE センサをスライドさせ、各箇所における超音波特性の評価と線材厚みの変化、臨界電流特性の評価を行い、剥離後も同様に試験して比較した。

3 剥離診断結果

剥離診断試験で使用した REBCO 線材は、フジクラ製の 4 mm 幅、銅メッキ有り、短尺 25 cm の短尺試料である。診断領域は試料中央から長手方向に各 15 mm の領域である。AE センサを 2.5 mm 間隔でスライドし、5 回のセンサ取り外しによる診断を行った。剥離領域は、試料中央から長手方向に各 5 mm の領域を剥離させた。送信用 AE センサにはパルス幅 1 μ s, 電圧 100 mV の印加により超音波を発生させた。また、受信信号をディスキリミネータにより 20 dB 増幅し、送受信信号を FFT30 回平均化処理を行った。

Fig. 2 は、同箇所の健全時と剥離時の超音波伝達特性の共振点近傍の変化の一例である。410 kHz の共振点に注目すると、剥離時に 100° の位相変化が見られた。

Fig. 3 は、線材長手方向の位置に対する共振点近傍の超音波特性による剥離診断結果である。410 kHz に注目した場合、伝達特性は 1 以下、位相特性は -250° 以下を示した。これらの結果より、線材内部に生じる空隙の変化によって超音波特性の変化を確認することができた。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業 (挑戦的萌芽研究 16K14219) の助成を受けて実施した。

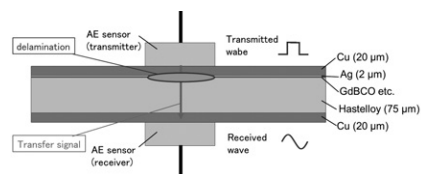


Fig. 1. Delamination diagnosis methods using ultrasonic waves based on the opposite arrangement of the AE sensors.

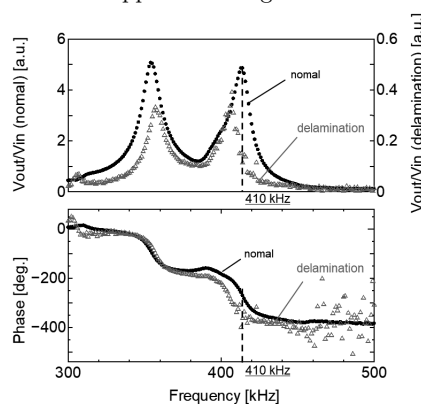


Fig. 2. Frequency dependence of the ultrasonic phase characteristics for the healthy position and delamination position.

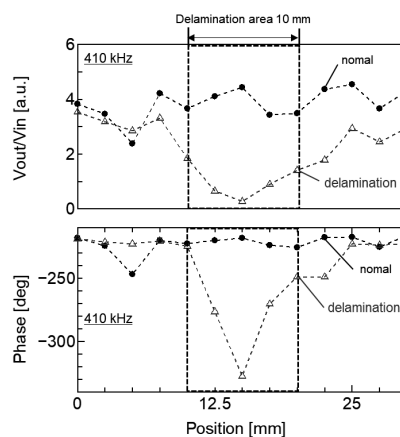


Fig. 3. Comparison of the ultrasonic transfer signal between the healthy position and the delamination position around the resonance frequency.

参考文献

- [1] D.C.van der Laan, et al.: Supercond. Sci Technol., 20,765-770 (2007).
- [2] H. Maeda, et al.: Physica C 471,480-485 (2011).
- [3] T. Ishigohka, et al.: TEIONKOUGAKU vol.22 No.1 pp.42-45 (1987).