

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和3（2021）年度 中間評価用〕

令和元年度採択分
令和3年3月31日現在

高温超伝導線材・導体・コイル巻線の評価技術の体系化と
高信頼性マグネットへの展開
Systematization of characterization technologies for
high-temperature superconducting wires, conductors and
coil windings, and their development to highly reliable
magnets

課題番号：19H05617

木須 隆暢 (KISS, Takanobu)

九州大学・超伝導システム科学研究センター・教授



研究の概要

研究代表者等がこれまでに開発した高温超伝導線材の先駆的評価手法を更に発展させ、線材・導体・コイル巻線の評価技術を体系化すると共に、実用性能制限因子を明らかとし、高信頼性マグネットを実現するための、REBCO 線材の特性向上と、電磁氣的・機械的ロバスト性にすぐれるマグネット用導体、ならびにコイル化技術を開発する。

研究分野：電気電子工学

キーワード：高温超伝導線材、導体、コイル、マグネット、電気電子材料

1. 研究開始当初の背景

REBCO 高温超伝導線材は、従来材料にくらべ飛躍的に高い臨界温度と臨界磁界を有しており、超高磁界マグネットや簡便な冷却システムによる超伝導応用を拓くものとして期待されている。しかしながら、長尺線材の局所不均一性やコイル巻線時の不安定性が顕在化しており、高温超伝導機器の可設計性の確立と信頼性の向上が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らが開発した、超伝導線材、導体、コイルの欠陥検出や電流輸送特性評価手法を体系化すると共に、これまで独立して進められてきた、REBCO 線材、導体、コイルの開発を融合し、高信頼性マグネットを実現するための、素線の性能向上と電磁氣的・機械的ロバスト性に優れる導体開発、ならびにコイル化技術の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高速磁気顕微鏡観察と AI の融合による超伝導線材・導体・コイル評価技術の革新：磁気顕微観察を AI の導入によって高度化すると共に、得られた結果を線材製造プロセス、巻線技術へフィードバックし、線材均一性の向上と巻線技術の確立へと導く。また、線材の空間的な不均一性を考慮した電流輸送特性の高精度なモデリングによって、導体、マグネット設計のための基盤を確立する。

(2) 新しい導体構造の提案によるロバスト性の向上：ロバスト性の向上と低コスト化を実

現するための導体構造を提案する。並行して、導体化のための具体的な製造プロセスを検討し、試作によって、その有効性を検証する。
(3) 新規導体を用いたコイル化のための要素技術の確立：前項に述べた導体を用いてコイル化した際の電磁特性について解析を行うと共に、コイル巻線時の健全性について、(1)で開発する高度診断技術を用いて評価を行い、巻線技術にフィードバックすることによってコイル化技術を確立する。
(4) 小型マグネットの試作評価：前項までの結果をもとに小型マグネットを試作し、REBCO 高温超伝導マグネットの信頼性・安定性・低損失性の向上を実証する。

4. これまでの成果

(1) 高速磁気顕微鏡観察と AI の融合による超伝導線材・導体・コイル評価技術の革新：市販の長尺 REBCO 線材を用いて、研究代表者等の開発したリール式高速磁気顕微鏡の観察結果に深層学習を用いた画像診断を新たに導入し、従来の臨界電流 (I_c) による基準では検知できない欠陥の自動検出に成功した。教師データを用いて欠陥サイズの異なる3つのクラス：large size、medium size、small size 欠陥領域と欠陥を含まない健全部位のあわせて4つのクラスを定義し、入力画像を自動的に分類する解析モデルを開発した。得られた結果の例を図1に示す。判定基準がブラックボックスとなる事を防ぐため、判定の根拠となる着目部位をヒートマップとして併せて表示すると共に、判定の確度を定量的に出力する。本手法は、これまで検出不能であ

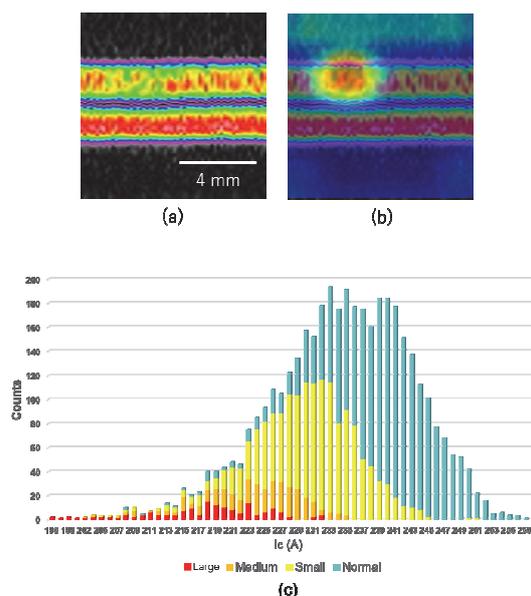


図1. AIによる長尺REBCO線材内欠陥の自動検出。(a) リール式磁気顕微鏡によって得られた磁化電流像、(b) AIによって中サイズ欠陥検出時のヒートマップ、(c) 4000枚を超える磁気像の解析によって得られた局所 I_c ヒストグラムと大・中・小サイズ欠陥の関係。

った、素線の局所不安定性の芽を初めて実用的なレベルで検知可能とした点で大きな価値を有している。今後、欠陥の機構解明による線材作製プロセスの改善や許容できる欠陥の定量化などに展開する。

(2) 新しい導体構造の提案によるロバスト性の向上：素線の局所 I_c 分布を許容できる導体構造として、REBCO線材の超伝導層を向かい合わせて積層するFace-to-Face Double Stacked (FFDS)構造による2-in-1素線を基本単位とするFFDS導体を提案すると共に、その製造技術として、REBCO線材の最表面のCu安定化層同士を音波の振動エネルギーのみを用いて、直接接合する音波接合について検討を行った。本研究では、長尺線材への適用を念頭に、半田や中間金属を一切用いず、加熱も行わない連続接合技術に挑戦した。

まず、短尺のラップ接合により、接合の特性とプロセス条件との関係をAIも活用して複合的に調べ、接合時の印加圧力、振動エネルギー、ピークパワーなどの条件を最適化することで、超伝導特性の劣化無く、低抵抗接合を安定して得られる事を明らかにした。

さらに、連続接合により数10 cm長級のFFDS導体を試作し、液体窒素中で試験した結果、厚さ約0.15 mm、幅2 mmで100 A以上、幅3 mmで200 A以上の大電流と、曲げ直径10 mmという柔軟性を併せ持った優れた導体であることを実証した。また、連続処理時の接合界面の抵抗率は、 $45 \text{ n}\Omega\text{cm}^2$ と半田

接合の約半分の値であり、引っ張り強度は素線そのものの強度を凌駕する十分な強度を有する事を示した。以上により、コイル用長尺FFDS導体作製の準備が整ったと言える。

5. 今後の計画

AIを用いた解析により、REBCO線材にこれまで充分認知されていない局所欠陥が残存する事が明らかとなり、空間均一性の改善の余地がある事が分かった。AIによる欠陥検出技術を用いて線材の作製プロセスとの関係を調べると共に、各条件と局所欠陥発生や I_c 統計分布との関係を調べることでデータ駆動型プロセス最適化手法を検討する。

また、コイルの試作に供し得る長尺FFDS導体の作製技術を確立すると共に、実証用小型コイルの試作評価を行い、REBCO高温超伝導マグネットの信頼性・安定性・可設計性を実証する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- 1) Higashikawa Kohei*, Kaneshige Tatsuhiro, Tokuyama Kohei, Imamura Kazutaka, Suzuki Kenji, Tomita Masaru, Kiss Takanobu: "Diagnostic Method for Monitoring Core Position and Strand Failure in DC Superconducting Cable" IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31 (2021) in press.
- 2) Wu Zeyu*, Higashikawa Kohei, Imamura Kazutaka, Xu Zhongtang, Ma Yanwei, Kiss Takanobu: "Characterization of Spatial Distribution of Local Critical Current Density in a Co-doped BaFe_2As_2 Film Based on Magnetic Microscopy" IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31 (2021) 7300304.
- 3) Higashikawa Kohei*, Numata Naohiro, Hisajima Kohei, Suzuki Takumi, Kiss Takanobu: "Measurement and Analysis on Local Magnetization Properties of RE-123 Coated Conductor with DC Transport Current and External Magnetic Field", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 30 (2020) 4701605.
- 4) Higashikawa Kohei*, Inoue Masayoshi, Ye Shujun, Matsumoto Akiyoshi, Kumakura Hiroaki, Yoshida Ryuji, Kato Takeharu, Machi Takato, Ibi Akira, Izumi Teruo, Kiss Takanobu: "Scanning Hall-probe microscopy for site-specific observation of microstructure in superconducting wires and tapes for the clarification of their performance bottlenecks", Superconductor Science and Technology 33 (2020) 064005.

7. ホームページ等

<http://super.ees.kyushu-u.ac.jp/>