

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14691

研究課題名（和文）核融合炉用大電流高温超伝導導体の通電特性の評価と解析

研究課題名（英文）Evaluation and Analysis of Transport Characteristics of Large-Current High-Temperature Superconducting Conductors for Fusion Reactor

研究代表者

小野寺 優太 (Onodera, Yuta)

核融合科学研究所・研究部・助教

研究者番号：70823847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、核融合炉用マグネットに向けた大電流高温超伝導導体の開発において、素線の通電特性を詳細に評価した上で導体を試作するとともに、導体そのものの通電特性を非破壊・非接触で評価する技術の確立を目的とした。この目的達成を目指し、ピックアップコイルを用いて任意の磁場・温度・磁場印加角度における素線の通電特性を評価する装置を開発した。また、回転磁化法を用いた着磁技術によって評価する手法を提案した。得られた素線の通電特性により試作した導体の臨界電流値を評価した。また、回転磁化法による着磁によって素線内の欠陥位置を評価可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉用マグネットに用いられる高温超伝導線材は、従来線材を凌駕する高磁界特性を有している。そのため大電流領域では一般的な通電法による測定が困難となる。そこで相補的な手法として磁化法を用いた計測装置を製作した。ピックアップコイルと回転磁化法により任意の磁場・温度・磁場印加角度における素線の通電特性を評価可能となる。また、導体の健全性を非破壊・非接触で評価する手法は、導体そのものが開発段階であることから確立できていない。そこで、回転磁化法を用いた本評価手法を適用することで劣化位置を把握でき、導体開発へのフィードバックにつなげることができると考える。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop large-current, high-temperature superconducting conductors for fusion reactor magnets. The research focuses on thoroughly evaluating the current-carrying characteristics of the strands, prototyping the conductors, and establishing non-destructive, non-contact techniques for assessing the current-carrying characteristics of the conductors themselves. To achieve these objectives, we developed an apparatus utilizing pickup coils to evaluate the current-carrying characteristics of the strands under various magnetic fields, temperatures, and magnetic field application angles. Additionally, we proposed an evaluation method based on magnetization techniques using the rotational magnetization method. The critical current value of the prototype conductor was assessed based on the obtained current-carrying characteristics of the strands. Furthermore, we demonstrated that the rotational magnetization method enables the evaluation of defect positions within the strands.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導線材 高温超伝導導体 磁化計測 非破壊検査

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め型核融合炉用マグネットには広い高磁界空間をつくりだすため、数十 kA クラスの大電流容量超伝導導体が用いられる。プラズマ性能を向上するためにも更なる高磁界化が求められている中、HTS 線材の応用が注目されている。HTS 線材は従来の低温超伝導 (LTS) 線材に比べ飛躍的に高い臨界温度 (T_c) を示し、従来線材を凌駕する高磁界特性を有している。したがって、4.2 K よりも高い温度で超伝導マグネットを運転することができ、冷凍機の電力を低減させることができるとともに、 T_c が高いため安定性に優れた超伝導マグネットを製作できる期待がある。

HTS 線材を導体化した際の実用性能を決定づける重要なパラメータとして、無損失で流せる電流の最大値である臨界電流密度 (J_c) がある。従来の LTS 線材を用いたマグネット機器では、動作温度は液体ヘリウム中である 4.2 K 付近に限られている。また、線材に鎖交する外部磁界の角度によって J_c 値は変化しない。すなわち、 J_c の磁界依存性のみを把握する必要があった。一方、HTS 線材は高い T_c (>90 K) を有することから、温度・磁界によって J_c が大きく変化する。さらに、二次元的な結晶構造に起因して、鎖交する外部磁界の方向によって J_c が大きく異なる。したがって、HTS 線材を用いる上で複雑に変化する J_c の温度・磁界強度・磁界印加角度依存性の把握が必要不可欠である。

また、HTS 線材は製法の制約からアスペクト比の高いテープ形状をしており、テープ面に磁界が鎖交した際に生じる交流損や電流偏流による磁場の乱れが、マグネット機器において問題となっている。それらの影響を減少させるために捻り加工を加える必要があるが、HTS 線材はエッジワイズ方向には曲がりにくく無理に曲げると J_c が低下する。そのため、捻り加工を施した導体制作後の通電特性の分布や電流偏流についても把握する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、複雑に通電特性が変化する HTS 線材を用いて大電流 HTS 導体を作製するために、まず、HTS 線材の通電特性をデータベース化する。次に、データベースをもとに大電流 HTS 導体を設計・試作するとともに、磁化測定を用いた新たな導体評価技術を開発し、導体の通電特性および電流偏流の挙動を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、磁化測定によって任意の温度・磁界強度・磁界印加角度における通電特性を非破壊・非接触かつ自動的に評価し解析可能なシステムを作製する。そして、得られた結果をもとに通電特性のデータベースを構築するとともに、そのデータを使って導体の通電特性や電流分布の挙動を解析的に明らかとする。さらに、回転させながら着磁する手法を導体評価技術へと展開する。捻り加工を施した導体では、内部の線材位置によっては着磁できない部分が生じてしまう。そこで静磁界中にて導体を搬送しつつ回転させる新しい着磁方法を用いることで、全長に亘って通電特性が評価可能となる。本手法を用いて、試作した導体の通電特性および電流偏流の挙動を実験的にも明らかとする。

4. 研究成果

まず、導体に用いる HTS 線材の任意の温度・磁界強度・磁界印加角度における通電特性を評価するために、装置の製作を行った。従来の高磁界マグネットに温度可変インサートを取り付け、温調機能を加えるとともに、ピックアップコイルを配置したサンプルホルダーを製作した。ピックアップコイル中に任意の角度に変更可能なサンプルステージを配置し、歯車で回転させつつ磁界中を搬送させる機構を盛り込むためには、低温磁界中でも駆動可能な構造が必要であり、一つの開発要素であった。また、ピックアップコイル自体も、計測する磁化信号を増強するために極細線の銀銅線を使用した。コイルを巻く際に切断するトラブルが多く発生し、製作手法に検討が必要であった。そのため、研究期間終了間際によくサンプルホルダーを完成させることができた。図 1 に低温中でも駆動可能なように製作したサンプルステージおよびピックアップコイルの外観写真を示す。ピックアップコイルは引き抜く方向とその法線方向の磁化信号を取得するため、ソレノイドコイルと鞍型コイルを組み合わせた形となっている。

その間にも、巻線が容易で扱いやすい大電流容量の HTS 導体 (FAIR 導体) の開発を進めた。FAIR 導体とは、摩擦攪拌接合 (FSW)、アルミニウム合金被覆 (Aluminum alloy jacket)、間接冷却 (Indirect cooling)、HTS 線材の一つである REBCO 線材の頭文字をとったものであり、本導体は HTS 線材と緩衝材である高純度アルミニウムシートを交互に積層させ、円形断面のアルミニウム合金の溝部に入れ、蓋部を摩擦攪拌接合で接合した後、全体に捻りを加えて製作される。本導体の縮小版において使用される HTS 線材の低磁界・77 K 中の通電特性を、HTS マグネットおよび回転ステージを用いた評価装置を製作し評価するとともに、自己磁界を考慮した J_c 値の解析を行った [1]。図 2 に製作した評価装置の図面および外観写真を示す。サンプルへの着磁には HTS 線材を用いたスプリットペアマグネットを使用した。また、図 3 に得られた臨界電流値の磁界印加角度依存性の実験結果および導体断面における磁界分布の解析結果を示す。

その他にも、積層させた HTS 線材の転流分布を評価するために、試料に通電させながらホールセンサを 3 次元に移動させつつ磁界分布を評価可能な装置を製作し、転流分布の評価を行った。したがって、導体製作に必要な HTS 線材の通電特性を評価しデータベース化するための評価装置の構築に成功するとともに、導体製作にも活用することができた。

次に、静磁界中にて導体を搬送しつつ回転させる新しい着磁方法を用いた磁化測定を検証するために、実験装置を試作した。意図的に欠陥を導入した REBCO 線材を積層し、永久磁石間にて回転させつつ搬送した結果、信号のピーク値の強弱によって導体内の劣化箇所を判別可能であることが確認できた[2]。図 4 に要素試験のために製作した装置および得られた磁場分布を示す。また、NbTi 線を用いたスプリットコイル (~5 T) を伝導冷却 (4.2 K) するための真空容器を組み上げ、液体窒素容器に挿入し中心部で HTS 導体を回転させつつ搬送させる装置を製作し、1m 長の FAIR 導体を用いて欠陥検出を行う予定であったが期間内に完成させることはできなかった。したがって、実導体においての検証はできなかったものの、本着磁手法によって積層線材中における欠陥位置を評価可能であること示すことができた。

- [1] Onodera, Yuta, et al. "Development of a Compact HTS-FAIR Conductor for Magnet Application." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 33.5 (2023): 1-4.
- [2] Onodera, Yuta, Toshiyuki Mito, and Naoki Hirano. "Rotating magnetization method for inspection of local defect in HTS conductor." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1857. No. 1. IOP Publishing, 2021.

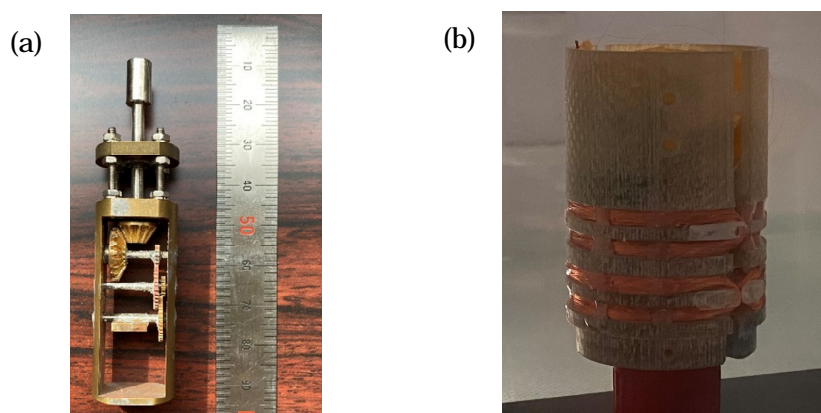


図 1 (a)サンプルステージおよび (b)ピックアップコイル部の外観図

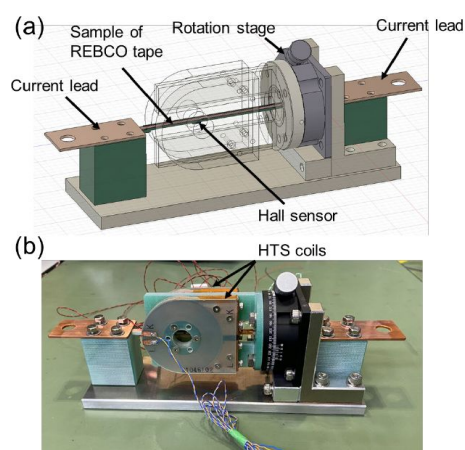


図 2 (a)製作した装置の模式図と(b)外観図 [1]

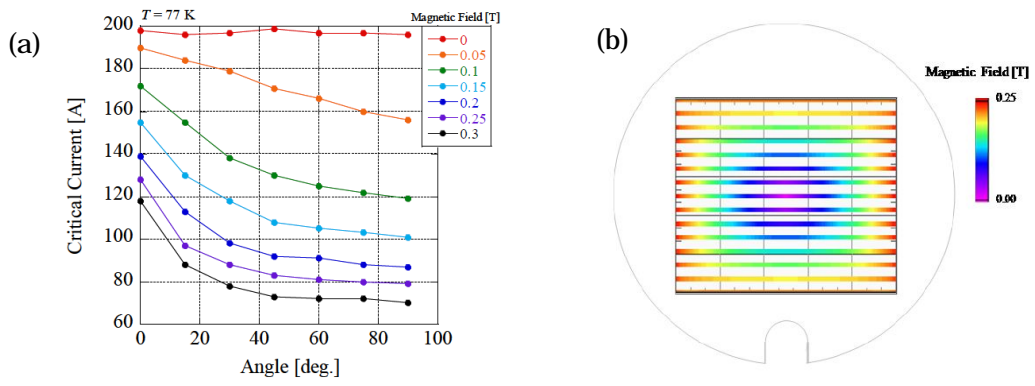


図 3 (a)計測した磁界印加角度依存性 (b)導体断面における磁界分布の解析結果 [1]

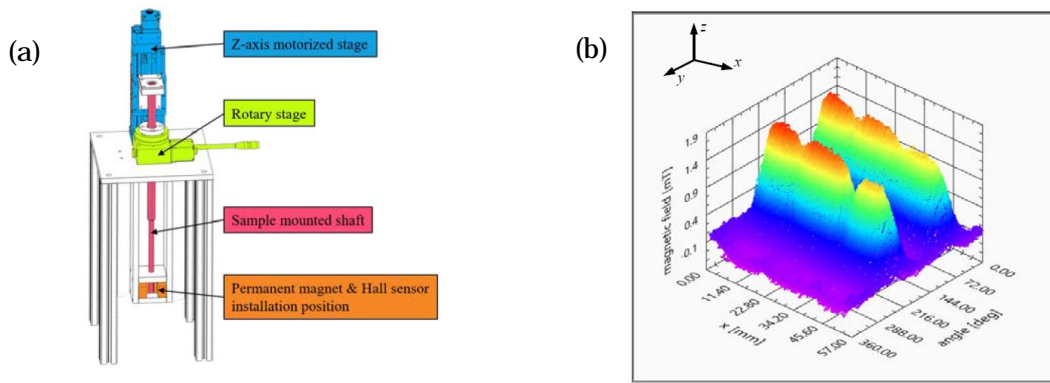


図 4 (a)回転磁化法による劣化位置計測装置 (b)計測した磁界分布 [2]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Onodera Yuta, Hirano Naoki, Baba Tomosumi, Mito Toshiyuki, Kawanami Ryoza	4. 巻 33
2. 論文標題 Development of a Compact HTS-FAIR Conductor for Magnet Application	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3254492	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Onodera Y, Mito T, Takahata K, Hirano N	4. 巻 1559
2. 論文標題 Novel HTS coil protection method using secondary windings as a quench heater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012118 ~ 012118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1559/1/012118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Naoki Hirano	4. 巻 1857
2. 論文標題 Rotating magnetization method for inspection of local defect in HTS conductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012012~012012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1857/1/012012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 小野寺優太、平野直樹、成嶋吉朗、馬場智澄、三戸利行、川並良造
2. 発表標題 縮小版FAIR導体の開発と通電特性の評価
3. 学会等名 2022年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Naoki Hirano, Tomosumi Baba, Toshiyuki Mito, Ryozo Kawanami
2. 発表標題 Development of a Compact HTS-FAIR Conductor for Magnet Application
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野寺優太、三戸利行、平野直樹、馬場智澄、川並良造
2. 発表標題 大電流HTS導体 (FAIR導体) における端部製作と接触抵抗評価
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Naoki Hirano, Kazuya Takahata, Nagato Yanagi, Akifumi Iwamoto, Hirotaka Chikaraishi, Shinji Hamaguchi, Suguru Takada, Tomosumi Baba, Noriko Chikumoto, Akifumi Kawagoe, Ryozo Kawanami
2. 発表標題 Current- transport properties of HTS-FAIR conductor at variable temperatures in high magnetic field
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Naoki Hirano, Tomosumi Baba, Maki Otsuji, Shinji Hamaguchi, Hirotaka Chikaraishi, Toshiyuki Mito
2. 発表標題 New HTS conductors testing facility with 4.2 K - 50 K variable temperature insert in 9 T magnetic field
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Kazuya Takahata, Naoki Hirano
2. 発表標題 HTS magnet protection method by use of secondary windings as a quench heater for experimental fusion device
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺優太、三戸利行、平野直樹
2. 発表標題 REBCO線材を積層させた導体中における欠陥検出手法の検討
3. 学会等名 2020年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Kazuya Takahata, Naoki Hirano
2. 発表標題 Novel HTS coil protection method using secondary windings as a quench heater
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Naoki Hirano
2. 発表標題 Non-destructive inspection of local defect in HTS conductor by using magnetization method
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Onodera, Toshiyuki Mito, Naoki Hirano
2. 発表標題 Rotating magnetization method for inspection of local defect in HTS conductor
3. 学会等名 10th ACASC / 2nd ASIAN-ICMC /CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺 優太、三戸 利行、平野 直樹、高畑 一也
2. 発表標題 2次巻線をクエンチヒーターとして用いた超伝導マグネット保護方式の検討
3. 学会等名 第98回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------