

令和元年6月12日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18885

研究課題名（和文）パルス通電融着による超伝導接続の形成と特性評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of a pulse current induced fusion splicing method for superconducting joints and their characterization techniques

研究代表者

木須 隆暢（Kiss, Takanobu）

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：00221911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高温超伝導線材を用いたコイル巻線に適用可能な、超伝導接続技術の可能性を明らかとし、定常強磁場発生を可能とする高温超伝導マグネットの永久電流運転実現のための基盤技術確立しようとするものである。パルス通電融着法の可能性について調べると共に、接続部位の超低抵抗特性を局所的にかつ高精度に計測する手法を確立した。本手法を用いて、PbSnBiハンダ接続を用いた超伝導接続に対し、極低温・磁界下の測定を実施し、接続内の局所的な超伝導電流密度 J_c の分布や臨界温度 T_c の分布が評価可能である事を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、液体ヘリウムを用いない高温超伝導線材を用いた高磁界NMRや医療用MRIシステムの実現において不可欠な技術である永久電流スイッチの実現を加速する事が可能となる。これらの装置の実現は、先進医療や先端バイオセンシング技術として大きな波及効果が期待できる。また、磁気浮上鉄道やエネルギー貯蔵など、超伝導マグネットの産業応用という観点からも、運輸やエネルギーの分野において重要な貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study clarifies the possibility of superconducting joint technology applicable to the coil winding using high-temperature superconducting wires, and intends to establish a basic technology for the persistent current operation of the high-temperature superconducting magnet which enables the generation of steady strong magnetic field. This study examines the possibility of pulse current fusing method, and establishes a method for measuring the ultra low resistance characteristic of the joint locally and with high accuracy. Using this technique, we carried out measurements under cryogenic temperature and magnetic field for superconducting joint using PbSnBi solder connection, and showed that the distribution of local superconducting current density J_c and the distribution of critical temperature T_c inside the joint can be evaluated.

研究分野：超伝導工学、計測工学

キーワード：超伝導接続 高温超伝導線材 永久電流 超伝導マグネット 磁気顕微鏡 電流計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超伝導線材は電気抵抗ゼロで銅やアルミに代表される常伝導線材の100倍以上の大電流を通電することができ、最も典型的な実用例は、定常強磁場の発生が可能な電磁石、すなわち超伝導マグネットである。しかしながら、超伝導マグネットにおいて基盤となる技術は線材の性能のみならず、コイルの励磁後、両端電極間を超伝導スイッチによって閉じ、超伝導ループを形成することでコイルに生じた磁界を安定に保持する、いわゆる永久電流運転にある。言い換えるとループの抵抗がゼロとなる超伝導閉ループを形成できれば、時定数が無限大となり、外部電源が無くともコイル電流が無限に流れ続け、一定の磁場を一年以上の長時間にわたり保持することができる。このようなマグネットは医療用MRIマグネットや、NMRスペクトロメータ用のマグネットとして広く用いられている。これらのマグネットには一般には金属系超伝導線材が用いられており、金属系特有の高いキャリア密度のため、PbBiを用いた半田接続によって線材間の超伝導接続が実現されている。

一方、近年長尺線材が市販されるに至った、酸化物高温超伝導線材では、液体ヘリウムを用いない高温動作や、金属系超伝導マグネットを遙かに凌駕する超高磁界の発生など優れたポテンシャルが実証されているにもかかわらず、未だ線材間の超伝導接続技術が確立できておらず、この事がマグネット応用を制限する大きな問題となっている。すなわち、酸化物高温超伝導線材の超伝導接続技術の開発は喫緊の課題である。また、超伝導接続に求められる抵抗値は、 $10^{-12}\Omega$ 以下の極めて低い値であると同時に、超伝導接続における電流分布は複雑であるため、接続特性の評価手法そのものの確立も挑戦性の高い研究課題といえる。

2. 研究の目的

本研究は、高温超伝導線材を用いたコイル巻線過程に適用可能な、超伝導接続技術の可能性を明らかとし、高温超伝導マグネットの定常強磁場発生を可能とする永久電流運転実現のための基盤技術を確認することを目的とする。パルス通電融着法を適用することで、巻線時に重要となる、1) 短時間の処理時間、2) 引き出し部位のみの局所的な処理が可能となる実用的な接続技術の可能性を明らかとする。並行して、実用上求められる $10^{-12}\Omega$ 以下の極めて低い抵抗値を精度良く評価するため、磁化緩和計測を適用し、超低電界領域における精度の高い抵抗測定手法を確認する。また、接続部位の電磁気的な結合の空間分布および界面組織との対応を磁気顕微計測とX線トモグラフィーを統合的に用いたハイブリット顕微観察によって実現し、接続箇所における電流輸送特性を明らかとし、効果的なプロセス開発を実現する。

3. 研究の方法

(1) パルス通電流融着による超伝導接続プロセス技術開発

高融点材料である酸化物高温超伝導体の融着を実現するため、電流印加に伴う非線形な抵抗発生に着目し、大電流パルスの印加によって局所的な非線形発熱を誘起し、超伝導界面を融着することを試みる。

(2) 超低電界における計測評価技術開発

実用上求められる超伝導接続のためには、 $10^{-12}\Omega$ 以下の超低抵抗領域の高精度な計測手法の確認が必要となる。通常の電圧測定では、雑音レベルの制限によって、このような超低抵抗領域の測定は極めて困難である。本研究では、磁化緩和測定法を応用し、 10^{-10}V/m 以下の超低電界領域における電流輸送特性を電磁気的に計測する評価技術を開発する。

(3) 接続部位における局所電流分布の可視化

複雑な電流分布を有する接続部における電流輸送特性を解明するために磁気顕微法を用いて電流印加時の接続部位の磁気像を取得し、逆問題を解くことによって接続を流れる局所電流密度の空間分布を可視化する。この事により、マクロな測定では検出不可能な局所的な接続の不均一性を明らかとする。

(4) X線CTを用いた接続部位の3次元非破壊構造解析

上述した電磁気的な結合分布の評価とともに、接続部位の組織構造を非破壊にかつin-situに評価するため、X線マイクロCTを用いて3次元の構造解析を実施する。その結果を元に、電磁気的な空間分布と組織との対応を明らかとする。

4. 研究成果

(1) パルス通電流融着による超伝導接続プロセス技術開発

大電流パルス波形、接続圧力を変えた実験によって、電流通電によって局所的な溶融が可能である事確認した。しかしながら、高温超伝導線材内の薄い超伝導層のダメージを避けるためには、投入エネルギーを下げ、界面のみに選択的にエネルギーを集中するための更なる改善が必要と考えられる。

(2) 超低電界における計測評価技術開発

磁気的手法を適用する事によって、超低電界領域における電流輸送特性を計測し、運転温度、

磁界ならびに電流負荷の影響について明らかにすると共に、実用環境下における超伝導マグネットに永久電流モードを行う場合に実現可能な運転電流を定量的に評価することに成功した。図1に希土類系高温超伝導線材の評価結果を示す。

(3) 接続部位における局所電流分布の可視化

PbSnBi ハンダを介して接続した Bi-2223 高温超伝導線材と NbTi 線材の超伝導接続に対して、開発した磁気計測手法を用いて極低温・磁界下の測定を実施し、接続内の局所的な超伝導電流密度 J_c の空間分布や臨界温度 T_c の分布が評価可能である事を示した。図2に接続部位における局所 J_c の空間分布の評価結果を示す。

(4) X線CTを用いた接続部位の3次元非破壊構造解析

接続界面の構造を空間分解能約 $1\mu\text{m}$ で3次元的に計測すると共に、前項で述べた磁気顕微法による測定との比較によって電流分布との関係を明らかとした。

以上により、本研究で開発した評価手法を複合的に用いることによって、接続部位の複雑な電流分布を詳細に把握できるとともに局所構造との対応が明確となり、接続における電流性制限因子解明のための評価手法として極めて有用であることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 16 件)

1. 久島 宏平、沼田 尚大、東川 甲平、小野寺 優太、鈴木 匠、井上 昌睦、木須 隆暢 “磁気顕微法を用いた RE-123 線材の通電環境下における磁化緩和特性評価” 第78回応用物理学会秋季学術講演会 2017年
2. Kohei Hisajima, Naohiro Numata, Kohei Higashikawa, Takumi Suzuki, Masayoshi Inoue, Takanobu Kiss “Magnetic Microscopy for Magnetic Relaxation in RE-123 Coated Conductor with DC Transport Current and External Magnetic Field” The 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017) (国際学会) 2017年
3. Takanobu Kiss, Yuta Onodera, Shohei Noda, Kohei Higashikawa, Kazutaka Imamura, Kohei Higashikawa, Takumi Suzuki, Masayoshi Inoue “Analysis of Magnetic Moment Relaxation in REBCO Coated Conductors by Use of Hall Probe Magnetometry” The 9th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC2017) (招待講演) (国際学会) 2017年
4. 東川 甲平, MOHAN Shyam, 鈴木 匠, 大村 俊介, 今村 和孝, 井上 昌睦, 淡路 智, 中岡 晃一, 和泉 輝郎, 木須 隆暢 “UTOC-MOD法による BZO 導入 YGdBCO 線材の磁界中磁気顕微観察” 2017年度秋季低温工学・超電導学会 2017年
5. 久島 宏平, 沼田 尚大, 東川 甲平, 小野寺 優太, 鈴木 匠, 井上 昌睦, 木須 隆暢 “磁気顕微法を用いた外部磁界ならびに通電電流の同時印加環境下における RE-123 線材の磁化緩和特性評価と解析” 2017年度秋季低温工学・超電導学会 2017年
6. 木須 隆暢 “超伝導材料をはじめとする先進機能性材料の特性評価技術” 平成29年度九州パワーアカデミーフォーラム 2017年
7. Takanobu Kiss, Yuta Onodera, Shohei Noda, Kazutaka Imamura, Kohei Higashikawa, Takumi Suzuki,

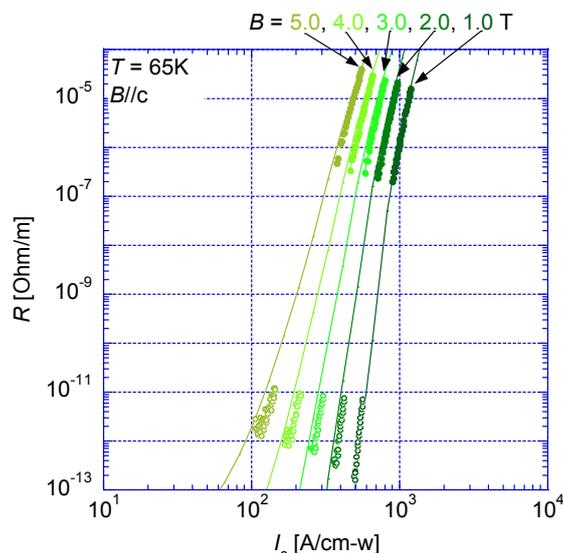


図1. 希土類系高温超伝導線材の超低抵抗領域を含む電流輸送特性の評価結果 (65 K, 垂直外部磁界中)。

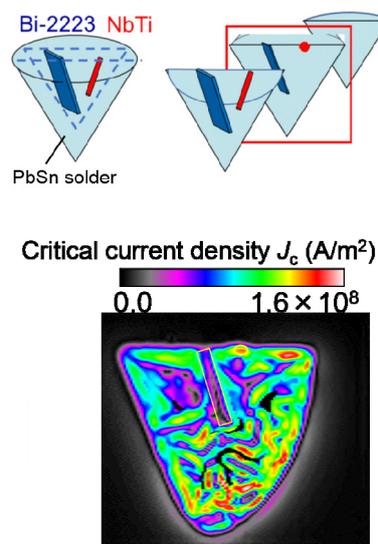


図2. PbSnBi ハンダを介した Bi-2223 高温超伝導線材と NbTi 線材の超伝導接続における局所臨界電流分布

- Masayoshi Inoue “Spatially Resolved Measurement on Local Electromagnetic Field Distribution in a Long $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coated Conductor during Magnetic Moment Relaxation by use of Hall Probe” The 2nd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2017 年
8. Shyam Mohan, Yuta Onodera, Kazutaka Imamura, Takumi Suzuki, Kohei Higashikawa, Masayoshi Inoue, Takanobu Kiss “Hall Probe Magnetometry for Measuring In-field Current Transport Properties of REBCO Coated Conductors” The 2nd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2017 年
 9. Yuta Onodera, Takanobu Kiss, Kohei Hisajima, Shyam Mohan, Kazutaka Imamura, Takumi Suzuki, Kohei Higashikawa, Masayoshi Inoue, Akira Ibi, Takato Machi, Teruo Izumi “Extended Current-Voltage Characteristics in Both Bi-2223 and RE-123 Tapes Over 8 Decades of Electric Fields Including Flux Creep and Flux Flow Regime” The 2nd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2017 年
 10. Yuta Onodera, Kazutaka Imamura, Takumi Suzuki, Kohei Higashikawa, Masayoshi Inoue, Akira Ibi, Takato Machi, Teruo Izumi, Takanobu Kiss “Electric Field vs. Current Density Characteristics in REBCO Coated Conductor over Wide Range of Electric Fields Including Flux Creep and Flux flow Regimes” 4th HTS4Fusion Conductor Workshop (国際学会) 2018 年
 11. 呉 澤宇, 東川 甲平, 井上 昌睦, 黄河, 姚 超, 馬 衍偉, 木須 隆暢 “磁界中磁気顕微法による $(Ba, K)Fe_2As_2$ 銀シース線材の局所臨界電流分布評価と磁気緩和測定” 2018 年度秋季低温工学・超電導学会 2018 年
 12. LIN Lyu, Yukihiisa Kumagai, Kohei Higashikawa, Takumi Ssuzuki, Takanobu Kiss “Magnetic Relaxation and $E-I$ characteristics in a Copper-alloy Reinforced Bi-2223 Tape” The 3rd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2018 年
 13. Naohiro Numata, Kohei Hisajima, Kohei Higashikawa, Kiss Takanobu “Numerical analysis of electromagnetic phenomena in high-Tc superconducting tape wire under magnetic field and current applied environment” The 3rd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2018 年
 14. Zeyu Wu, Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss, He Huang, Chao Yao, Yanwei Ma “Flux Creep Characteristics in a $(Ba, K)Fe_2As_2/Ag$ Superconducting Tape Based on In-field Magnetic Microscopy” The 3rd Asian Applied Physics Conference (国際学会) 2018 年
 15. 呉 澤宇, 東川 甲平, 井上 昌睦, 黄河, 姚 超, Ma Yanwei, 木須 隆暢 “磁気顕微法によるホットプレス $(Ba, K)Fe_2As_2$ 銀シース線材の磁束クリープ特性評価” 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 2019 年
 16. 呉 澤宇, 東川 甲平, 松本 凌, 高野 義彦, 木須 隆暢 “磁気顕微法による NbTi-Bi2223 超伝導接合の局所臨界電流分布評価” 2019 年度春季低温工学・超電導学会 2019 年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

該当無し

○取得状況 (計 0 件)

該当無し

[その他]

ホームページ等

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K000239/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：東川 甲平

ローマ字氏名：HIGASHIKAWA, Kohei

所属研究機関名：九州大学

部局名：システム情報科学研究院

職名：准教授

研究者番号：40599651

研究分担者氏名：鈴木 匠

ローマ字氏名：SUZUKI, Takumi

所属研究機関名：九州大学

部局名：システム情報科学研究院

職名：助教

研究者番号：70756238

研究分担者氏名：井上 昌睦

ローマ字氏名：INOUE, Masayoshi

所属研究機関名：福岡工業大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号：80346824

(2)研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。