

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月13日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220913

研究課題名(和文)革新的核融合炉実現へ向けた分割型高温超伝導マグネットの実証と普遍的接合法の創成

研究課題名(英文) Demonstration of a remountable high-temperature superconducting magnet and construction of universal joints toward the realization of an innovative fusion reactor

研究代表者

橋爪 秀利 (Hashizume, Hidetoshi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：80198663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 146,500,000円

研究成果の概要(和文)：極低温・強磁場環境下でREBCO線材の接合抵抗を予測する手法を確立し、冷却性能予測に不可欠となる金属多孔質体のプール沸騰伝熱相関式の高度化を図った。また、10 kA導体のブリッジ式機械的ラップジョイントにジョイントピースと低温熱処理を導入し、従来の1/6の製作時間、1/3の接合抵抗を実現することに成功した。さらに、臨界状態モデルおよび自己磁場評価に基づいたピン導入実験を陽子線照射により実施し、臨界電流値を制御できることが明らかとなり、超伝導物理に基づく機能分割構造導体の可能性が示された。以上のように革新的核融合炉へ向けた分割型高温超伝導マグネットの実証と普遍的接合法の構築がなされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、高温超伝導体の機械的接合部の電磁気的性能を支配している物理を解明し、液体窒素温度の測定値から極低温・強磁場下での特性を予測でき、また、導出された多孔質体における沸騰伝熱関係式を用いて除熱システムの設計が可能となった。一方、量子化された磁束の分布を制御するためのピン止め導入方法により臨界電流密度を制御できることが示され、今後、本理論に基づいてより高性能な超伝導導体集合体を設計することが可能となった。さらに、従来の接合方法より高速かつ高性能で、ばらつきの非常に少ない接合方法を考案している。このような結果を基に、分割型高温超伝導マグネットを用いた次期核融合炉装置が提案されている。

研究成果の概要(英文)：We established a method to predict the jointing resistance of the REBCO tapes under cryogenic temperature, strong magnetic field environment and improved heat transfer correlation for pool boiling in the metal porous media indispensable for the cooling performance prediction. In addition, we introduced joint piece and low temperature heat-treatment into the bridge-type mechanical lap joint of the 10kA conductor to succeed realizing 1/3 jointing resistance with 1/6 fabrication time. Furthermore, we performed a pinning center introduction based on a critical state model and a self-magnetic field evaluation by using proton beam irradiation to show controllability of a critical current density, which indicates the possibility of the function-divided conductor based on the superconductivity physics. According to the above results, the demountable high Tc superconducting magnet for an innovative nuclear fusion reactor is demonstrated together with the general jointing method for the magnets.

研究分野：核融合炉工学 超伝導工学

キーワード：分割型高温超伝導マグネット ヘリカル型核融合炉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ITER 計画が進むなど、次世代エネルギー源として期待されている核融合炉の開発は着実に進展している。一方で、莫大な建設コストの低減、保守・点検の合理的なシナリオの構築が工学的課題として残っている状況にある。そこで核融合炉の重要な構成機器の1つである超伝導マグネットを高温超伝導体で製作し、かつ分割化することにより、高コストな超伝導マグネットの製作・保守の合理化、超伝導マグネットよりも内側に位置する炉内構造物へのアクセス性向上、を同時に図る分割型高温超伝導マグネット(図1)を研究代表者らは世界に先駆けて2000年に提案した。この方式ではマグネットの接合部での抵抗発熱は不可避であるため、従来の低温超伝導体ではなく高温超伝導体を用いることこそがこの方式を実現させるための解となり、建設コストの劇的な低減と容易な保守・点検ができると我々は考えている。その後、米国のMITにおいても機械的接合の研究が始まるなど、世界的に研究活動が活発になってきた。すでに研究代表者は、過去10年以上にわたる研究開発を通して性能向上を進め、世界最高性能の高温超伝導体の機械的接合技術(100 kA 導体・抵抗値 2 nΩ)と液体窒素による除熱技術(金属多孔質体の使用により 0.4 MW/m² の除熱性能)の確立に成功している。これまでの研究で解決に至っていない課題は以下の通りである。

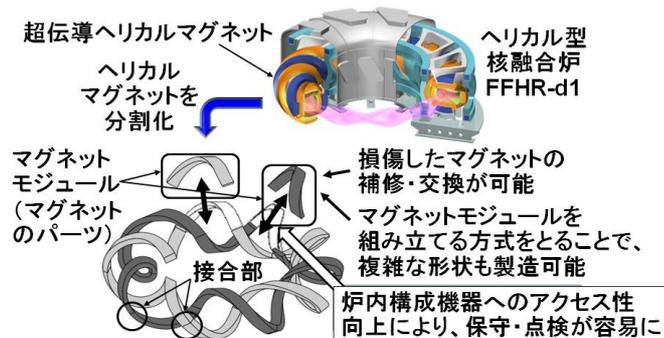


図1 分割型高温超伝導マグネット

これまでの研究で解決に至っていない課題は以下の通りである。

- 1) 使用時の接合抵抗予測と接合抵抗値のばらつき低減(5 nΩ以下の接合抵抗再現性向上)
- 2) 超伝導物理モデルと線材の構造に基づく、導体ケーブルと接合部の構造最適化方法
- 3) 多孔質体等を使用した、分割された除熱システムの提案
- 4) 複数の導体ケーブルを使用した大型マグネットの接合部の設計・製作とその実証
- 5) 核融合炉で使用する際の電磁構造問題と、電磁力の接合荷重への変換機構の開発

2. 研究の目的

本研究は、これまでの研究で得られた成果をもとに、上記1)~4)の課題の解決を目指し、(1)接合部極限性能予測手法の開発、(2)接合部構造最適化と超伝導物理に基づく機能分割導体設計、(3)多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計、(4)100 kA級のモックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証、を行ない、学術的視点に基づいた分割型高温超伝導マグネットの飛躍的性能向上により核融合炉実現に向けた工学的ブレイクスルーを確立することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) **接合部極限性能予測手法の開発**：まず、組立時の接合性能評価手法として非破壊検査手法の確立を目指す。また、極低温/強磁場環境下での接合性能(接合抵抗の温度・磁場依存性)のメカニズムの解明を行う。これらの知見に基づき、分割型高温超伝導マグネット使用時(低温(超伝導)・高磁場・大電流)の接合性能を、組立時(常温(常電導)・ゼロ磁場・ゼロ電流)の状態ですべて予測する手法を構築する。
- (2) **接合部構造最適化と超伝導物理に基づく機能分割導体設計**：最適な接合パラメータ(接合面の材質・膜厚等)の評価を通して接合抵抗の低減と再現性の向上を目指す。また、接合部の着脱特性の向上に取り組む。さらにマグネットを構成する導体の性能向上を図るために、第二種超伝導体の電流輸送モデル(超伝導体の物理モデル)に基づいて、電流輸送を担う超伝導体とピン止めを担う超伝導体を組み合わせた機能分割導体を設計するための知見を得る。
- (3) **多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計**：液体窒素・水などを用いて多孔質体冷却システムの伝熱データ(熱流束の多孔質体材料/粒子径/伝熱面熱抵抗・冷媒流量/サブクール度依存性)を基に各種冷媒を用いた際の伝熱性能を予測する伝熱相関式を構築する。また温度・磁場・Load Factor(運転電流/臨界電流)などを踏まえた熱的安定性解析、および複雑流路内の流動検証も踏まえて、分割流路設計の指針を得る。
- (4) **100 kA 級モックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証**：接合部を有する100 kA級のモックアップマグネットを製作し、長時間の100 kA通電実証を行う。さらに、(1)、(2)に基づいて大型導体接合部の短時間製作・低接合抵抗を達成できる手法を液体ヘリウムクライオスタット、10 kA級中型導体を用いて開発する。加えて、(1)~(3)で得られた知見、および電磁力・支持構造を踏まえた構造解析と3Dプリンタによる検討を通して、核融合炉へ適用できる分割型高温超伝導マグネットの製作シナリオ策定、および分割型マグネットの総合設計を行う。

4. 研究成果

(1) 接合部極限性能予測手法の開発

接合部非破壊検査手法（性能予測事前評価技術）の開発

REBCO 高温超伝導線材の機械的ラップジョイント（接合部にインジウム箔を挿入）をサンプルとして、冷却前に接合部の性能を評価する方法の検討を行った。ここでは、一定の成果が得られた X 線 CT およびガイド波（超音波モードの1つ）による接合部性能評価についてまとめる。

製作した REBCO 線材の機械的ラップジョイントの事例と取得した X 線 CT 画像を図 2 に示す。この結果より、X 線 CT を用いた接合部画像解析により、接合面において接触領域 / 非接触領域を判別できることが示された。続いて、41 個の接合サンプルに対して、X 線 CT による真実接触面積の評価を行った。さらに、各サンプルの接合抵抗を評価し、後述の(1) で構築した接合抵抗モデルに基づいて接触抵抗を算出した。接触抵抗は理論的には真実接触面積に逆比例するが、一部のサンプルを除いて両者には良い相関性が得られた。これにより、X 線 CT による真実接触面積評価は接合性能の事前評価技術の候補となりうることが示された。

図 3 に REBCO 線材の機械的ラップジョイントへのガイド波の適用体系の概略図とガイド波信号の事例を示す。ここでは接合面の全面をインジウム箔で接合させたサンプル（Normal）と接合面の半分程度の領域を剥離させたサンプル（Delaminated）に対して、ガイド波を適用している。一方の REBCO 線材にガイド波を発振する Exciter PZT（PZT: ピエゾ素子）を取り付け、もう一方の REBCO 線材にガイド波を受け取る Receiver PZT を配置した。図 3 の結果の黒の実線は Exciter PZT の発振信号であり、青、赤の実線は Normal、Delaminated それぞれのサンプルにおいて、Receiver PZT が受け取った信号である。図 3 の結果が示すように、剥離の有無でガイド波の信号には顕著な差が生じており、ガイド波による剥離調査も接合性能の事前評価技術の候補となりうることが示された。

以上で開発された非破壊検査手法（常温での特性と 77 K での特性の関係性）と後述の (1) で得られた接合抵抗の温度依存性を組み合わせることで、分割型高温超伝導マグネット使用時（低温（超伝導）・高磁場・大電流）の接合性能を、組立時（常温（常電導）・ゼロ磁場・ゼロ電流）の状態で購入するための見通しが得られた。

極低温 / 強磁場環境下での接合抵抗発生メカニズムの解明

REBCO 線材の機械的ラップジョイントの接合抵抗の温度・磁場（強度・方向）依存性を評価し、接合抵抗が線材内の抵抗、挿入インジウム、接触抵抗から構成されること、および接触理論を用いて、77 K、0 T の接合抵抗から極低温 / 強磁場環境での接合抵抗を予測するモデルを提唱した。図 4 に実験的に評価した接触抵抗 R_{Contact} (Experiment) と提唱したモデルによって評価した接触抵抗 R_{Contact} (Model) の比較を示すが、これらの良好な一致を得た。接触抵抗のうち、集中抵抗 $R_{\text{Constriction}}$ と皮膜抵抗 R_{film} の寄与を評価すると 10 K 付近の低温領域においては皮膜抵抗が支配的であり、77 K 付近では集中抵抗と皮膜抵抗が同程度の影響を持つことが分析によって明らかになった。ここで、上記の実験的に得られた接合抵抗から接触抵抗を抽出するためには、REBCO 線材内に存在する線材構成材料の界面抵抗（線材のロットごとに異なる）を評価する必要があるため、この界面抵抗を非破壊的に評価する新手法を開発した。図 5 に本手法の概

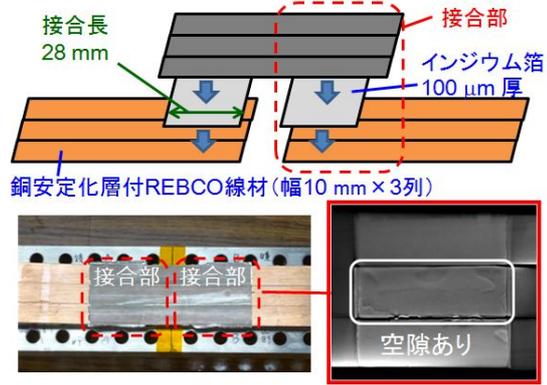


図 2 X 線 CT による接合部観察

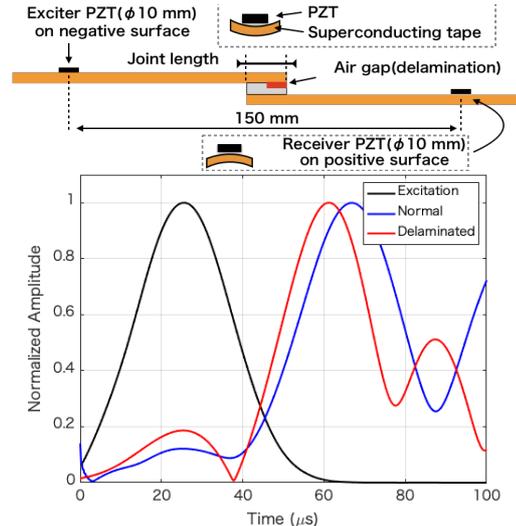


図 3 ガイド波による接合部剥離検査

Exciter PZT (PZT: ピエゾ素子) を取り付け、もう一方の REBCO 線材にガイド波を受け取る Receiver PZT を配置した。図 3 の結果の黒の実線は Exciter PZT の発振信号であり、青、赤の実線は Normal、Delaminated それぞれのサンプルにおいて、Receiver PZT が受け取った信号である。図 3 の結果が示すように、剥離の有無でガイド波の信号には顕著な差が生じており、ガイド波による剥離調査も接合性能の事前評価技術の候補となりうることが示された。

以上で開発された非破壊検査手法（常温での特性と 77 K での特性の関係性）と後述の (1) で得られた接合抵抗の温度依存性を組み合わせることで、分割型高温超伝導マグネット使用時（低温（超伝導）・高磁場・大電流）の接合性能を、組立時（常温（常電導）・ゼロ磁場・ゼロ電流）の状態で購入するための見通しが得られた。

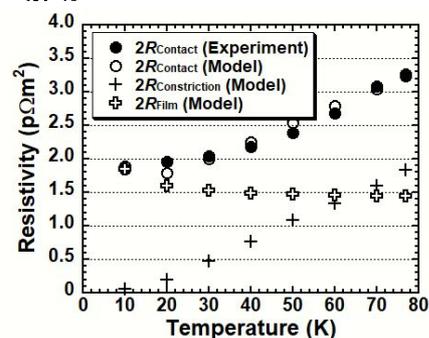


図 4 接触抵抗の温度依存性の分析事例

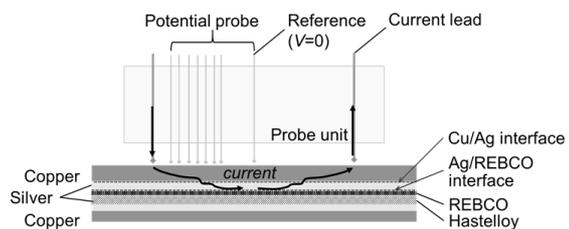


図 5 界面抵抗の非破壊評価手法

要を示す。まず複数本のコンタクトピンを一体化した測定プローブに REBCO 線材を取り付け、両端の 2 本のピンから電流を供給し、内側のピンで銅層の電圧分布を取得する。続いて取得した電圧分布から転流距離を計算することで、転流距離に依存する界面抵抗を評価することが出来る。

本モデルを用いて後述する(4)で得られた大型導体の接合抵抗を分析すると、小型接合サンプルの接合性能から予測される接合抵抗よりも高いことが判明した。これは、接合部の大型化にともない、接合圧力の均一化が難しくなるためである。この問題を解決するための接合抵抗低減手法は後述の(2)で開発しており、それを踏まえて、(4)において大型導体での接合抵抗低減の試みも行った。

(2) 接合部構造最適化と超伝導物理に基づく機能分割導体設計

接合部構造最適化（接合抵抗の安定的な低減と着脱性能の向上）

前述の(1) および後述の(4)で明らかになった接合圧力の不均一化の問題を解決するために、接触抵抗が接触材料硬度の平方根に反比例するという接触理論による予測に基づき、100 °C 程度の熱処理によって接合面に挿入するインジウム箔の硬度を下げて大型導体でも低接合抵抗を安定的に実現できる手法を開発した。インジウムの融点近くになると線材表面に付着していた水が蒸発し、ポイドができることが昇温脱離ガス分析法 (TDS) と X 線 CT の分析結果より明らかになった。このポイドは、事前に線材をベーキングする、あるいは熱処理中に加圧し続けることで抑制することが可能である。この熱処理により接合抵抗を従来から 60% 下げ、かつ安定的に低い接合抵抗を得ることに成功した。

インジウムを用いた機械的接合においては、機械的バットジョイント、機械的エッジジョイントを用いる場合には、導体の劣化なく接合部の着脱が可能である。一方、機械的ラップジョイントでは、接合部解体時の力が REBCO 線材の層間剥離を引き起こす可能性がある。加熱によりインジウムが柔らかくなる特性や、クリープ変形特性も踏まえると、線材剥離方向ではなく、線材引張方向に力を加えて接合部を解体することで、機械的ラップジョイントにおいても線材の劣化なく、接合部の着脱が可能であることを確かめた。

超伝導物理に基づく機能分割導体設計

超伝導体内のピン止め効果と巨視的電流の理論に基づき、導体内部のフラクソイド分布と合致するように人工ピンを配置することで、ピン止め機能と電流輸送機能を最大化する導体設計が可能であるという仮説を独自に立てた。続いて 4 mm 幅の REBCO 高温超伝導線材内に陽子線照射により人工ピン分布を生成し、同線材の臨界電流を 77 K、自己磁場において評価した。図 6 に照射量と臨界電流の関係を示す。図 6 における Total は全面照射、Edge-only は両端 1 mm ずつの照射、Center-only は中央 2 mm の照射、の条件で得たサンプルを示している。フラクソイドは導体表面から内部に向けて勾配を作って減少していくことから、仮説に基づけば Edge-only のサンプルにおいて臨界電流が上昇する傾向が得られるはずである。図 6 では、臨界電流の向上は得られていないものと同じ照射量において、Edge-only のサンプルが最も高い臨界電流を示している。人工ピンによる臨界電流向上は、より低温領域で発現することが過去の文献から明らかになっており、本結果と文献による知見を合わせると、Edge-only のサンプルで臨界電流向上が見込める。この知見により、導体の自己磁場や経験磁場を計算し、それに合うピン止め分布を形成することで、臨界電流を向上させる導体設計ができると考えられる。

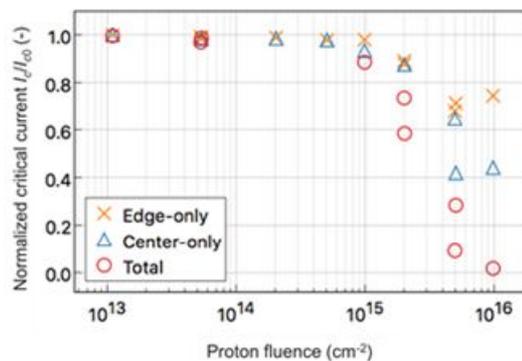


図 6 陽子線照射量と臨界電流の関係

(3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計

ブロンズ粒子焼結金属多孔質体・銅粒子焼結金属多孔質体と液体窒素を用いて、強制対流沸騰体系での除熱特性（沸騰曲線）の流量 G 、サブクール度 ΔT_{sub} 、多孔質体材質・粒子径 d の依存性を評価した（図 7 にブロンズ粒子焼結金属多孔質体を用いて得られた結果の例を示す）。また、過去の研究においてブロンズ粒子焼結金属多孔質体と水を用いて得た実験データも用いて既存の伝熱相関式を修正し、対流・核沸騰・核沸騰限界点の伝熱相関式を新たに構築した。また、伝熱相関式を基に、液体ヘリウム、液体ネオン、液体水素を用いた場合の熱伝達性能を予測した結果、液体ネオン、液体水素を用いた場合の核沸騰限界点は、液体ヘリウムを用いた場合の 10 倍程度になることがわかった。

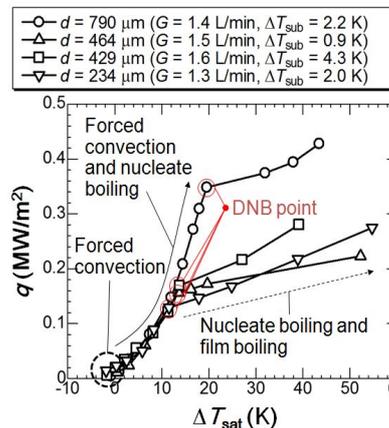


図 7 強制対流沸騰体系で取得した沸騰曲線

加えて分割型マグネットの接合部、流路構造をモデル化して、伝熱解析による冷却構造の検討を行った。強制対流による冷却の場合、レイノルズ数が数十万程度必要となるが、連続曲が

り管内流れの可視化、圧力振動計測実験の結果に基づく、接合部付近で必要となる連続曲がり冷却管では、流動励起振動が発生し、接合部の健全性に問題が発生することが明らかになった。多孔質体を用いた部分強制冷却の場合、低流速の冷却が可能であり、この問題を解決できること、また熱伝導性のよい絶縁材の配置ができれば、万一の接合抵抗上昇に対しても多孔質体を用いての冷却が可能であることを示した。

(4) 100 kA 級モックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証

液体ヘリウム浸漬冷却体系において、機械的接合部（ブリッジ式機械的ラップジョイント）を持つ大型高温超伝導導体の通電試験を最大 8 T の環境下で行い、接合抵抗 $2 \text{ n}\Omega$ で 1 時間の 100 kA 安定通電（図 8 に通電波形を示す）に成功した。なお、高温超伝導導体での 100 kA 安定通電は世界初のことであり、この成果が得られたのは、大型導体においても極めて低い接合抵抗が達成できたことが大きな要因である。しかしながら、ここで用いた 100 kA 導体の接合部に対しては 18 時間もの接合作業時間を費やしており、また本評価で得られた接合抵抗（4.2 K で接合抵抗率 $10 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ 程度）は、(1) で構築した接合抵抗モデルを用いて分析すると、小型接合サンプルの接合性能から予測される接合抵抗よりも高いことが判明した。そこで、(2) で開発した接合抵抗低減手法（熱処理手法）とジョイントピースの導入（図 9）を行うことで、接合抵抗の低減と製作時間の短縮を図った。これにより、接合時間は 3 時間に短縮され、また接合抵抗率も $1/3$ に低減することができた（77 K で $4.2 \sim 7.1 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ 、4.2 K で $2.1 \sim 3.6 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ ）。本サンプルに対しては、図 10 示すように大電流通電試験も行い、各層に均等に電流が分配し、接合有の導体が通常の状態と同様に使用できることを示した。図 11 に本研究を通して得られた REBCO 線材および導体の達成接合抵抗を示す。前述(2)の熱処理、また図 9 のジョイントピース導入により、大型導体においても、小型導体に匹敵するレベルの接合抵抗を安定的に達成する手法の開発に成功した。

また、ヘリカル型核融合炉のヘリカルコイル・支持構造材をモデル化して電磁力解析を行い、分割型マグネットを支持でき、かつメンテナンスポートを確保できる構造を提案した。さらに、図 12 のように 3D プリンタを用いた検討により、これまで構築されていた半ピッチ接続から 1 ピッチ接続に変更が可能であることを示した。さらには、曲率を持つ導体の機械的接合の検討も行い、導体を直線状に接合してから曲げを施した場合、接合部強度が REBCO 線材強度よりも高く運用可能であることも示した。

また、ヘリカル型核融合炉のヘリカルコイル・支持構造材をモデル化して電磁力解析を行い、分割型マグネットを支持でき、かつメンテナンスポートを確保できる構造を提案した。さらに、図 12 のように 3D プリンタを用いた検討により、これまで構築されていた半ピッチ接続から 1 ピッチ接続に変更が可能であることを示した。さらには、曲率を持つ導体の機械的接合の検討も行い、導体を直線状に接合してから曲げを施した場合、接合部強度が REBCO 線材強度よりも高く運用可能であることも示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 22 件)

Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume, Nagato Yanagi, Hitoshi Tamura, Bridge-type mechanical lap joint of HTS STARS conductors using an integrated joint piece, Fusion Engineering and Design, 査読有, in press, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.01.030.

Satoshi Ito, Hidetoshi Hashizume, Nagato Yanagi, Hitoshi Tamura, Advanced high-temperature superconducting magnet for fusion reactors: Segment fabrication and joint technique, Fusion Engineering and Design, 査読有, Vol. 136, No. A, (2018), pp. 239-246, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.01.072.

Hidetoshi Hashizume, Satoshi Ito, Nagato Yanagi, Hitoshi Tamura, Akio Sagara, Development of

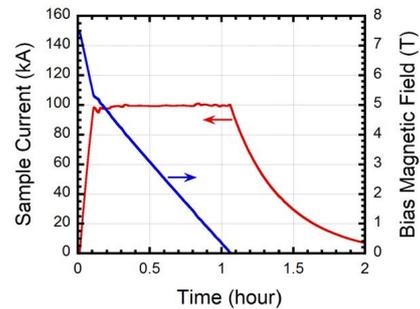


図 8 100 kA 通電波形

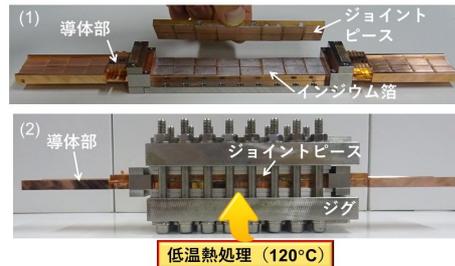


図 9 ジョイントピース導入

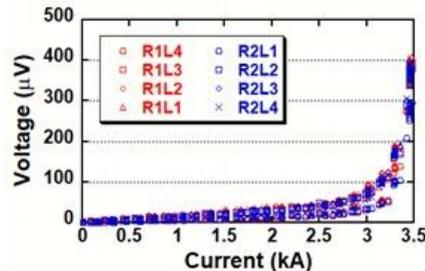


図 10 中型導体接合の通電試験結果

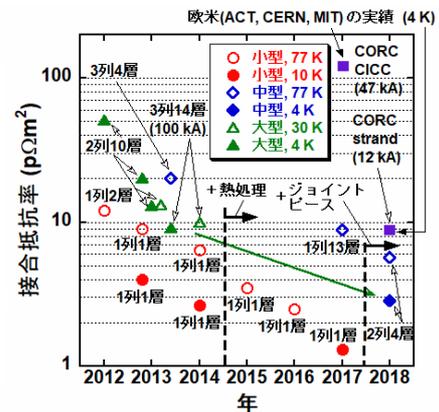


図 11 達成接合抵抗率

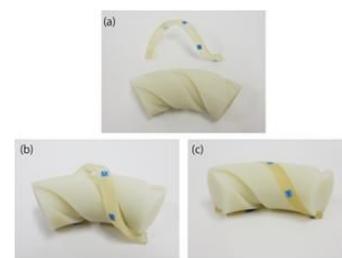


図 12 3D 造形による巻線検討

remountable joints and heat removable techniques for high-temperature superconducting magnets, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 58, No. 2, 2017, Art No. 026014, DOI: 10.1088/1741-4326/aa874f.

〔学会発表〕(計 63 件)

橋爪秀利, 高温超伝導ヘリカル装置計画に対する期待と要望, 第 35 回プラズマ・核融合学会年会, 2018 年 12 月 3 日~6 日, 大阪大学吹田キャンパス.

N. Yanagi, S. Ito, H. Hashizume, H. Tamura, Challenges on demountable / segmented coil concept for high-temperature superconducting magnet, 5th IAEA DEMO Programme Workshop, 2018 年 5 月 7 日~9 日, Daejeon, Republic of Korea.

伊藤悟, 橋爪秀利, 遊佐訓孝, 柳長門, 田村仁, 相良明男, 革新的核融合炉実現に向けた分割型高温超伝導マグネットの研究開発 ~高温超伝導導体の着脱可能な接合法の開発状況, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 2015 年 11 月 24 日~27 日, 名古屋大学東山キャンパス.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 : 江原 真司

ローマ字氏名 : (EBARA, Shinji)

所属研究機関名 : 東北大学

部局名 : 大学院工学研究科

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 30325485

研究分担者氏名 : 伊藤 悟

ローマ字氏名 : (ITO, Satoshi)

所属研究機関名 : 東北大学

部局名 : 大学院工学研究科

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 60422078

研究分担者氏名 : 遊佐 訓孝

ローマ字氏名 : (YUSA, Noritaka)

所属研究機関名 : 東北大学

部局名 : 大学院工学研究科

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 60466779

研究分担者氏名 : 柳 長門

ローマ字氏名 : (YANAGI, Nagato)

所属研究機関名 : 核融合科学研究所

部局名 : ヘリカル研究部

職名 : 教授

研究者番号 (8 桁) : 70230258

研究分担者氏名 : 田村 仁

ローマ字氏名 : (TAMURA, Hitoshi)

所属研究機関名 : 核融合科学研究所

部局名 : ヘリカル研究部

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 20236756