

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420849

研究課題名(和文) 分割型高温超伝導マグネットの最適機械接触界面構造および接合荷重履歴シナリオの構築

研究課題名(英文) Establishment of the optimum mechanical contact interface structure and scenario of joint load hysteresis for remountable high-temperature superconducting magnet

研究代表者

伊藤 悟 (Ito, Satoshi)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60422078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：革新的核融合炉用超伝導マグネットの設計案として機械的接合法を利用した分割型高温超伝導マグネットが提案されている。本研究では、接合抵抗の温度・磁場・応力依存性の定量評価を通して、接合性能の予測・安定化および接合部の製作・運転・着脱を想定した最適荷重シナリオ構築を目指したものである。本研究により、接触抵抗の温度・磁場依存性を説明するモデルを構築し、また接合部製作時に100℃程度の熱処理を導入することにより接合抵抗を低減することに成功した。また、接合部の機械的・電気的特性を基にして、一連の製作・運転・着脱が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Remountable high-temperature superconducting magnet using mechanical joint has been proposed as design of superconducting magnet for an innovative fusion reactor. This study aims at prediction and reduction of joint resistance, and establishment of the optimum loading scenario considering fabrication, operation and remounting of joint sections through quantitative evaluation of temperature, magnetic field and stress dependence of joint resistance. This study established a model to explain temperature and magnetic field dependence of contact resistance and achieved reduction of joint resistance by introducing heat treatment at around 100 degree C at fabrication. This study also showed that operation, remounting of the joint is possible based on mechanical and electrical characteristics of the joint.

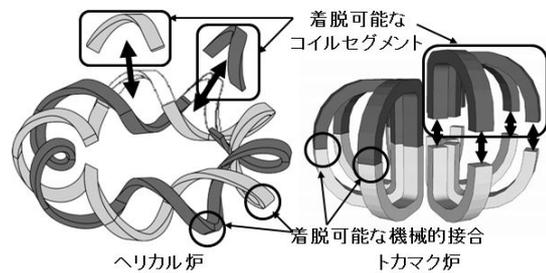
研究分野：工学

キーワード：電磁・マグネット 超伝導材料・素子 プラズマ・核融合

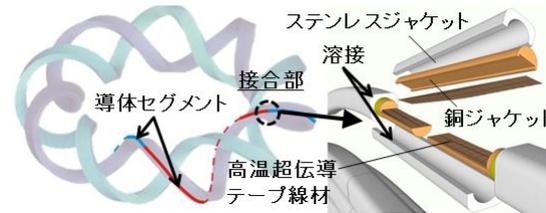
1. 研究開始当初の背景

核融合原型炉や商用炉では、高い経済性と合理的な保全（保守・点検）活動シナリオの確立が必要不可欠であり、それらを成立させる革新的な設計案として、高温超伝導マグネットをコイルセグメントごとに分割して製造し、機械的接合法を利用することによってマグネットの組立・分解を可能とする分割型高温超伝導マグネットを申請者らは提案した（図1(a)参照）。また、組立後の分解はできないが製作簡易化の目的で導体セグメントを接続しながら巻線する導体接続巻線方式（図1(b)参照）も提案されている。本設計では、マグネット材料を高温超伝導体とし、材料の比熱が飛躍的に上昇する 20 K 以上に運転温度を設定することで、機械的接合部での抵抗をある程度許容することを基本とする。抵抗損失による運転コスト増加は、運転温度上昇による冷却コスト低減で相殺できる。特に物理的、炉工学的な優位性（本質的に定常運転、中性子壁負荷・熱負荷が小さい）があるヘリカル炉の大きな工学的課題である、複雑・巨大なヘリカルコイルの製作の問題を解決する重要な有用な設計案である。

分割型高温超伝導マグネットの実現に向け、これまで高温超伝導体の機械的接合法を複数提案し、実際に導体を製作して接合抵抗を実験および数値解析を用いて評価してきた。ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 に分割型高温超伝導マグネットを適用する場合、12 T、20 K で 100 kA を通電し、5 nΩ 以下に接合抵抗を抑えることが必要となるが、2013 年度には、高温超伝導テープ線材の一種である GdBCO テープ線材を 3 列 14 層に配列した導体を製作して、液体ヘリウム冷却（4.2 K）、自己磁場環境で最大通電電流 118 kA、接合抵抗 1.8 nΩ を達成しており、2000 年から開始した 13 年間の当該研究で着実な進歩を遂げている。これら実証試験を進める一方で、2011～2013 年度に実施してきた科研費若手研究 (A)「接合抵抗発生メカニズム定量化による分割型高温超伝導マグネットの電磁力接合構造設計」では、接合抵抗の発生要因を切り分けて抵抗発生メカニズムを定量化し、特に接合抵抗の温度依存性を定量的に説明することに成功した。これを元に小型導体の接合試験結果と電流分布解析から大型導体の接合抵抗を予測する手法を提案した。また、接合抵抗が接合荷重負荷時の温度に大きく影響されること、すなわち接触材料が同一でも温度変化による硬さのコントロールによって接触抵抗を大きく下げられる可能性があることを示唆した。一方で、核融合炉環境で重要となる接合抵抗の磁場依存性の評価、接合部の応力緩和、接合面のせん断荷重が接合抵抗に与える影響の評価については未解決・未着手の状態にある。



(a) コイルセグメント着脱可能方式



(b) 導体接続巻線方式

図1 分割型高温超伝導マグネット

2. 研究の目的

本研究では、着脱可能な機械的接合法を利用した分割型高温超伝導マグネットにおける接合抵抗発生メカニズムの温度・磁場・応力依存性を接触理論・超伝導理論・構造力学の各観点から定量化して、接合抵抗を最小化する最適機械接触界面構造を明らかにすること、また、上記のような接合部におけるミクロな接触界面物理と応力緩和・摩擦等のマクロな構造特性の双方を踏まえて接合部施工・マグネット運転・接合部着脱までを想定した最適荷重履歴シナリオを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 最適機械接触界面構造の検討

接合抵抗は、接合部を含む区間での電圧降下を輸送電流で除することで評価される。接合抵抗の発生要因は、臨界電流以下においては 1) 高温超伝導テープ線材構成材料、および金属ジャケットの電気抵抗、2) 機械的接触面の接触抵抗、に分けることが可能である。上記抵抗発生要因のうち、本項目では 2) 機械的接触面の接触抵抗に着目する。Holm の接触理論では、接触抵抗 R_{cont} は集中抵抗 R_c （電流が接触点に集中することで生じる抵抗）と皮膜抵抗 R_f （接触面の酸化被膜・油等によって発生する抵抗）の和で表わされる。これら接触抵抗の構成要素は以下のパラメータに依存する。

- 接触材料の電気抵抗率：温度、磁場強度、磁場方向
- 真実接触面積：接触荷重（履歴）、接触材料の硬さ、温度履歴（熱ひずみ）
- 皮膜抵抗：皮膜材料の種類（抵抗率・厚さ）、接触面処理、接触材料の組合せ

接合抵抗の温度・磁場依存性分析

上記を踏まえ、REBCO テープ線材（核融合炉で使用想定されている高温超伝導線材）の機械的ラップジョイント（接合面にインジ

ウム箔を挿入)の接合抵抗の温度、磁場依存性を評価し、接触理論を基にして接合抵抗の温度・磁場依存性の予測モデルを構築する。

熱処理導入による接合抵抗低減化

接合サンプル製作時に熱処理を加えることで、接合抵抗の低減を図る。インジウムの融点は156.6℃と比較的低く、REBCOテープ線材の性能を保証する限界温度がおよそ200℃であることを踏まえると、接合時に温度コントロールを行うことで(例えば~100℃)硬さが下がり、低荷重でも真実接触面積が飛躍的に増加する可能性もある。

(2) 最適接合荷重履歴シナリオの検討

本項目では、接合部の機械的・電気的特性を明らかにし、接合部施工・マグネット運転・接合部着脱までを想定した場合の運用(接合荷重履歴を最適化)を検討することを目的にする。これら一連の評価を通して、接合部の健全性を保持できる最適接合荷重履歴シナリオの構築を行う。

接合部製作時の応力緩和の影響評価

接合部に挿入するインジウムは常温においてもクリープ変形が生じるため、時間の経過によって接触圧力の緩和が生じる可能性がある。そこで接合サンプルを放置した場合の接触圧力・接合抵抗の時間変化を評価し、応力緩和が接合部の特性に与える影響を評価する。

運転時に電磁力が接合部に与える影響および接合部のせん断強度特性の評価

本研究では、まず図1(b)の導体接続巻線方式における接合部の機械特性をターゲットに進める。ヘリカル型核融合炉FFHR-d1のヘリカルコイルをモデル化し、電磁力によって接合部に発生する引張・せん断応力の評価を構造解析(数値解析)によって行う。続いて、REBCOテープ線材の機械的ラップジョイント(接合面にインジウム箔挿入)の引張せん断試験を実施し、接合部せん断強度および接合抵抗の応力・変形依存性を評価して、マグネット運転時の接合部の健全性について評価する。

接合部解体時の発生応力の評価

常温におけるREBCOテープ線材の機械特性を評価し(常温引張をしたのち、臨界電流を測定する)さらにREBCOテープ線材の機械的ラップジョイントを常温で引張によって解体する場合に必要な応力を評価することで、接合部着脱について考察する。

4. 研究成果

(1) 最適機械接触界面構造の検討

接合抵抗の温度・磁場依存性分析

図2に示す実験体系を用いて、REBCOテープ線材(フジクラ社製銅安定化層付GdBCOテープ線材:FYSC-SC05)の機械的ラップジョイントにおける接合抵抗の温度磁場依存性(温度:10~70K、磁場:0~15T、磁場角度:テープ面に垂直もしくは平行)を評価し

た。なお、磁場印加には東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの伝導冷却超伝導マグネット15T-CSMを用いた。図3に接合抵抗率の温度(10K,30Kのみ)・磁場強度・磁場角度依存性を示す。凡例のF1~F4はサンプル番号を示し、F1、F2では磁場条件をテープ面に垂直、F3、F4では磁場条件をテープ面に平行としている。図3より、温度上昇、磁場上昇とともに接合抵抗率は上昇し、また、磁場がテープ面に平行である場合、10K以下の低温領域で磁場上昇とともに接合抵抗率の上昇の度合いが大きくなることわかる。

本研究で用いたインジウム箔を接合面に挿入した機械的ラップジョイントの場合、接合抵抗を成分ごとに表して、その和として表した場合、以下の式(1)ようになる。

$$R_{\text{joint}} = 2R_{\text{REBCO-Ag}} + 2R_{\text{Ag}} + 2R_{\text{Ag-Cu}} + 2R_{\text{Cu}} + 2R_{\text{Cu-In}} + R_{\text{In}} \quad (1)$$

ここで、 R_{joint} は接合抵抗、 R_{Ag} 、 R_{Cu} 、 R_{In} はそれぞれ銀層、銅層、インジウム箔の抵抗、 $R_{\text{REBCO-Ag}}$ 、 $R_{\text{Ag-Cu}}$ 、 $R_{\text{Cu-In}}$ はREBCO層と銀層、銀層と銅層、銅層とインジウム箔の界面抵抗を表す。実験的に求めた R_{Ag} 、 R_{Cu} 、 R_{In} 、 $R_{\text{Ag-Cu}}$ のデータを元に、 $R_{\text{Cu-In}}$ の温度・磁場依存性を算出し、これに適用するモデル式の構築を行った。なお $R_{\text{REBCO-Ag}}$ は十分に小さいとしてここでは無視している。図4に接触抵抗率(接触抵抗と接合面積の積)の温度・磁場依存性(式(1)で求めた $R_{\text{Cu-In}}$ とこの後示すモデル式で求めた R_{Contact} の比較)を示す。新たに修正したモデル式は以下の通りである。

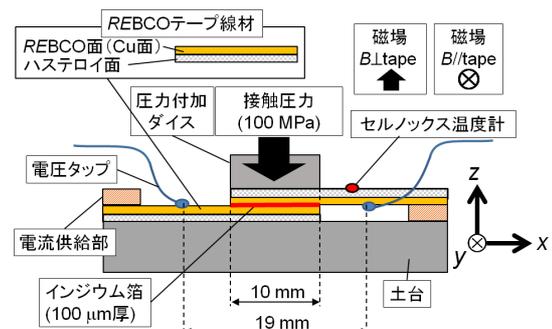


図2 接合抵抗の温度・磁場依存性評価実験

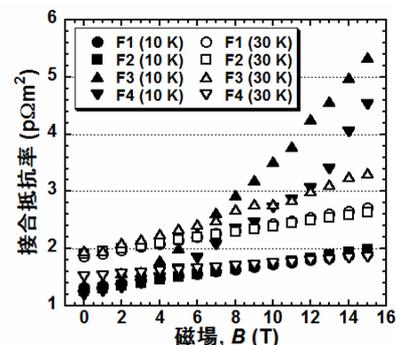
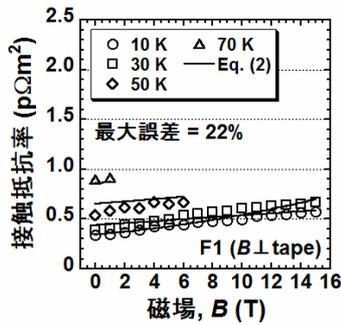
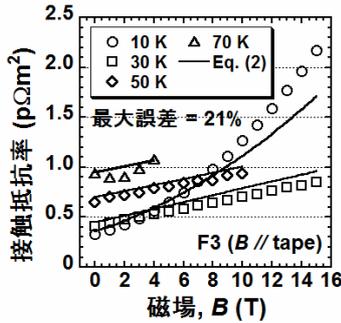


図3 接合抵抗の温度・磁場角度依存性



(a) 磁場が REBCO テープ線材に垂直な場合



(b) 磁場が REBCO テープ線材に平行な場合
図 4 実験およびモデル式で得られた接触抵抗率の比較

$$R_{\text{contact}}(T, B) = R_{\text{constriction}}(T, B) + R_{\text{film}}(T, B)$$

$$R_{\text{constriction}}(T, B) = [D' \{ \rho_{\text{Cu}}(T, B) + \rho_{\text{In}}(T, B) \} + (1 - D') \{ \rho_{\text{Cu}}(T, 0) + \rho_{\text{In}}(T, 0) \}]$$

$$\times \frac{1}{2\sqrt{n\pi S}} \left\{ \sqrt{\frac{S}{S_m}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{S}{S_m}} - 1 \right) - 0.842 \left(1 - \sqrt{\frac{S_m}{S}} \right) \right\}$$

$$R_{\text{film}}(T, B) = \frac{a}{S_m} \{ 1 + D' C_1 B + D' C_2(T) B^2 \} \exp \left(\frac{b}{T} \right)$$

$$D' = D \text{ (for } \mathbf{B} \perp \text{tape)}, D' = 1 - D/2 \text{ (for } \mathbf{B} // \text{tape)} \quad (2)$$

ここで、 T , B , ρ_{Cu} , ρ_{In} , S , S_m , n はそれぞれ温度、磁場、銅の抵抗率、インジウムの抵抗率、みかけの接触面積、真実接触面積、真実接触点密度である。また、 a , b , C_1 , $C_2(T)$ はそれぞれ酸化層の抵抗率と厚さ、酸化物の抵抗率の温度依存性、酸化物の抵抗率の磁場の 1 乗の依存性、酸化物の抵抗率の磁場の 2 乗の依存性を表す係数である。 D' は電流ベクトルと磁場ベクトルの成す角度による磁気抵抗効果の影響度合いを示す。図 2 の x , y , z 方向を参照した場合、磁場が接触面に垂直 (z 方向) であるとき、電流ベクトルの x , y 成分が磁気抵抗に影響し、磁場が接触面に平行 (y 方向) であるとき、電流ベクトルの x , z 成分が磁気抵抗に影響するとして、 D' の式を決定した。電流ベクトルの x , y 成分が同値であると仮定すると、垂直磁場の時の D' を D とした場合に、平行磁場の時の D' は $1 - D/2$ となる。図 4 に示されている式(2)を表す線は、式(2)において、 S , S_m , n , a , b を $R_{\text{contact}}(T, 0)$ が式(1)で得られた $R_{\text{Cu-In}}$ と一致するように与え、 D および C_1 をそれぞれ 0.24 および 0.14 T^{-1} , $C_2(T)$ を 10 K で 0.01 T^{-2} , その他の温度で 0 T^{-2} としたものである。図 4 に示す通り、今回提案した式は、おおよそ

20%程度の誤差で、接触抵抗を表現できるものとなった。なお、 $C_2(T)$ については現状、10 K と 20 K 以上に対してしか分析を行っていないため、今後は温度依存性について詳細に分析する必要がある。

熱処理導入による接合抵抗低減化

REBCO テープ線材の機械的ラップジョイント (接合面にインジウム箔を挿入) の製作時に熱処理を行った。なお接合の際にボルト締めで接合圧力を加えてから熱処理を行った場合と、プレス機を用いて熱処理中に接合圧力を加え続けた場合で比較した。図 5 に接合サンプルの熱処理温度と 77 K、自己磁場で評価した接合サンプルの接合抵抗率の関係を示す。ボルト締めで加圧した後に熱処理した場合、接合抵抗率は熱処理温度 90 °C 付近で最小となり、熱処理温度がそれより高くなると接合抵抗率が上昇した。接合部のインジウム箔を X 線 CT で撮影したところ、熱処理温度 120 °C 以上では、インジウム箔に空隙が発生することがわかった。昇温脱離ガス分析装置 (TDS) を用いて、REBCO テープ線材から発生するガスを分析したところ、100 °C 以上では、表面に付着していた水が気体となり空隙の原因になりうるということが判明した。そこで事前にベーキング処理をしたところ、熱処理温度 100 °C 以上での抵抗上昇を抑えることができた (X 線 CT により接合部インジウム箔内の空隙も発生しないことが確認できた)。また、熱処理中に接合圧力を加え続けることで、さらに接合抵抗率は低減し、最大で 60%程度の接合抵抗率低減を達成した。また、本加熱処理手法を多層多列の大型導体に適用したところ、従来の接合抵抗率の 1/3 程度に抑えることができた。さらに接合抵抗のばらつきも抑えることができ、大型導体の接合部を製作する際の手法として有効であることが示された。

(2) 最適接合荷重履歴シナリオの検討

接合部製作時の応力緩和の影響評価

図 6 に、厚さ 500 μm 、100 μm のインジウム箔を挿入して、100 MPa の接触圧力を 1 日ごとに付加した場合の接合抵抗率の測定結

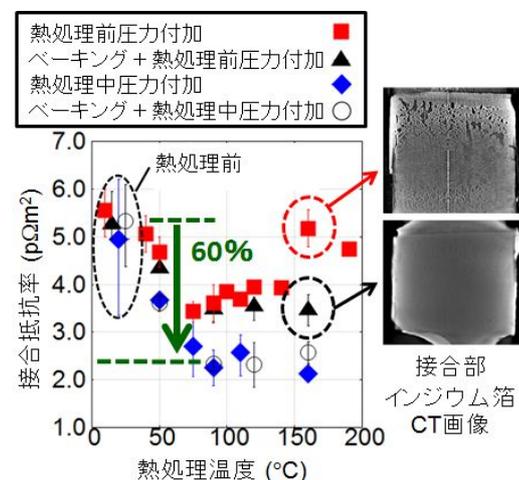
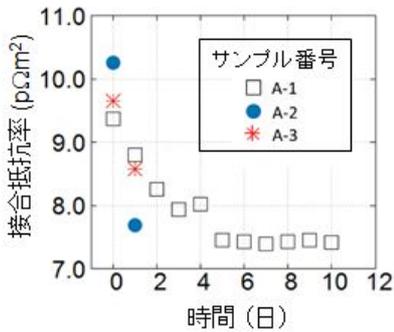
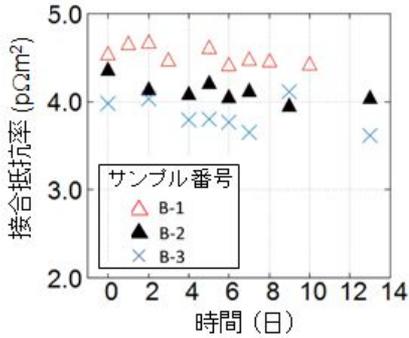


図 5 熱処理温度と接合抵抗率の関係



(a) 初期インジウム箔厚さ 500 μm の場合



(b) 初期インジウム箔厚さ 100 μm の場合

図 6 接合抵抗率の時間依存性

果を示す。厚さ 500 μm のインジウム箔を用いた場合は、一定のインジウム箔厚さになるまで 7 日以上かかり、接合抵抗率もそれともななって減少する。一方、厚さ 100 μm のインジウム箔を挿入した場合は、始めに接触圧力を付加した後は、インジウム箔に厚さ変化はほぼなく、接合抵抗率の変化もほぼないことがわかった。これは、(1) 最適機械接触界面構造の検討で開発した熱処理法を導入した場合でも同様であり、接合部製作時の応力緩和の影響は、十分に薄いインジウム箔を用いることで無視できることが示された。

運転時に電磁力が接合部に与える影響および接合部のせん断強度特性の評価

図 7 にヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の構造解析結果を示す。REBCO 線材部には最大で線材長手方向に最大 0.145% の引張りひずみが発生し、最大 32 MPa の面内せん断応力 (面内せん断ひずみ 0.052%) が発生する。線材および線材接合部においては、これらの応力・ひずみ下においても接合抵抗を低く、臨界電流を高く保つ必要がある。REBCO テープ線

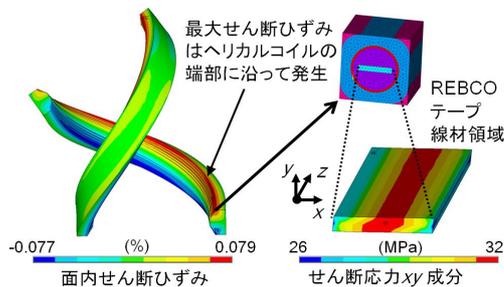


図 7 ヘリカルコイル構造解析結果

材の不可逆引張りひずみはフジクラ社製のもので 0.43 ~ 0.53%、Superpower 社製のもので 0.6% と報告されており、また不可逆ねじりせん断ひずみが Superpower 社製のもので 1% と報告されているため、REBCO テープ線材自体は電磁力に十分耐えられる強度を有していると考えられる。

続いて図 8 に示す体系で、液体窒素で冷却した状態で、REBCO テープ線接合サンプルの引張せん断試験を実施した。図 9 に得られた接合部の接触導電率 (接触抵抗率の逆数) と接合部のせん断強度の関係を示す。図 9 の領域 A では、接触導電率の上昇とともにせん断強度は上昇し、領域 B ではせん断強度は一定となった。なお、領域 A において接合部固定ジグが存在する場合 (接触圧力が 0 MPa でない場合) に、接合部固定ジグが存在しない場合 (接触圧力が 0 MPa である場合) に比べて、せん断強度が大きな値にシフトしている。これは、引張試験の際に接合部に回転モーメントが働いて、接合面を剥離する方向に力が加わるためである。なお実際の分割型マグネットの接合部では、ジャケット等で接合部が固定されている状態にあるので、ジグが存在している状況と同等であると考えられる。領域 A と領域 B での挙動の違いは、破壊挙動の違いを示すものである。領域 A のサンプルでは、インジウムと REBCO テープ線材の銅面の接触界面のすべりによって接合面が破壊されており (界面破壊)、領域 B のサンプルでは、インジウム自体のせん断破壊によって接合面が破壊されていた (凝集破壊)。したがって、液体窒素温度では、機械的ラップジョイントのせん断強度は 36 MPa 程度が上限であると考えられる。図 10 にせん断破壊破壊後のサンプルの変位と無負荷状態の接合抵抗で規格化した接合抵抗の関係を示す。ここで、予測モデルとしているのは、凝集破壊

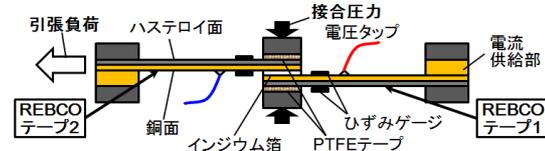


図 8 GdBCO テープ線材の引張せん断試験

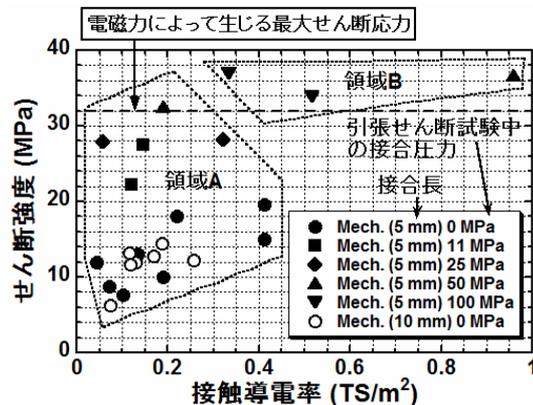


図 9 引張せん断試験結果

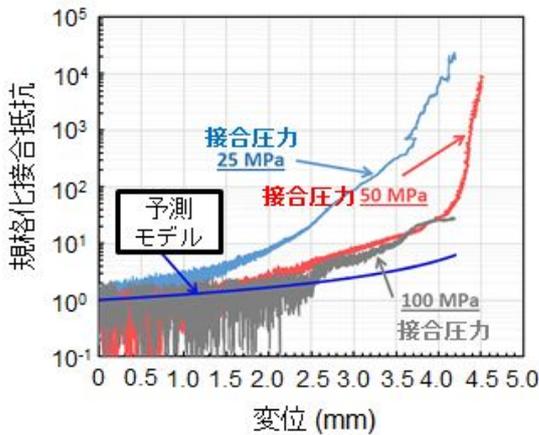


図 10 破壊後のサンプルの変位と無負荷状態の接合抵抗で規格化した接合抵抗の関係

によって発生した変位 x により、接合長 L_{joint} が $L_{\text{joint}} - x$ に減少したと考え、接合抵抗上昇を接合長の減少から単純計算したものである。図 10 が示すように接合圧力 100 MPa の条件では、接合抵抗の上昇が変位 2 mm 程度までは予測モデルとほぼ一致しており、接合面積が減少した結果、接合抵抗が上昇すると考えてよいことがわかる。一方で、界面破壊が生じたサンプル（接触圧力 25, 50 MPa）では、接合抵抗の上昇は予測モデルを上回り、より接合面積が減少していることが予想される。ここで、FFHR-d1 で用いる導体構造を考えると、REBCO テープ線材の周辺には銅およびステンレスジャケットがあり、線材厚さとせん断応力を踏まえると、接合部の変位はせいぜい 0.5 mm 程度に留まることから、電磁力によってせん断破壊が発生しても、接合抵抗に与える影響は軽微であり、界面破壊が生じない程度の接合性能を達成しておけば、接合部の強度には問題がないと考えられる。

接合部解体時の発生応力の評価

図 8 に示す実験体系で常温および 80 °C において引張せん断試験を行った。常温でのインジウムのせん断破壊強度（凝集破壊強度）は 4 MPa 程度であり、また温度を 80 °C にすることで 1 MPa 以下まで低下した。REBCO テープ線材の常温での引張応力と臨界電流の関係を評価した結果を踏まえると、常温では線材一枚あたり接合長 20 mm 程度、80 °C では接合長 100 mm 程度の接合部までは引張によって線材の臨界電流を低下させることなく接合部の解体が可能であることがわかった。FFHR-d1 に適用する分割型高温超伝導マグネット（導体接続巻線方式）における接合長は線材一枚あたり 25 mm 程度と想定されており、接合作業時に何らかの不具合があり、解体を必要とする場合にも、REBCO テープ線材の臨界電流を低下させることなく解体することができると思われる。また、接合面の残留インジウムは融解させたのちにシリコンオイルで除去することが有効であることも示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

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, プラズマ・核融合学会誌, 査読有, 92 巻, 2016 年, 623-634

URL: http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_08/jspf2016_08-623.pdf

S. Ito, N. Yusa, N. Yanagi, H. Tamura, A. Sagara, H. Hashizume, Mechanical and Electrical Characteristics of a Bridge-type Mechanical Lap Joint of HTS STARS Conductors, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 26, 2016, 4201510

DOI: 10.1109/TASC.2016.2517197

S. Ito, Y. Seino, T. Nishio, H. Oguro, H. Hashizume, Structure and magnetic field dependences of joint resistance in a mechanical joint of REBCO tapes, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 26, 2016, 6601505

DOI: 10.1109/TASC.2016.2539210

〔学会発表〕(計 24 件)

伊藤 悟, 橋爪 秀利, 柳 長門, 田村 仁, 相良 明男, 分割型高温超伝導マグネット接合部製作技術の開発進展, 第 11 回核融合エネルギー連合講演会, 2016 年 7 月 14 日-15 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

伊藤 悟, 清野 祐太郎, 西尾 樹, 陳 偉熙, 遊佐 訓孝, 橋爪 秀利, 小黒 英俊, 分割型高温超伝導マグネットの接合性能予測手法と接合部製作法の改善, 第 91 回 (2015 年度春季) 低温工学・超電導学会, 2015 年 5 月 27 日-29 日, 産業技術総合研究所つくばセンター (茨城県つくば市)

S. Ito, H. Oguro, H. Tamura, N. Yanagi, H. Hashizume, Fundamental investigation on tensile characteristics of mechanical lap joint of a REBCO tape, Applied Superconductivity Conference 2014, 2014 年 8 月 11 日-15 日, Charlotte Convention Center (Charlotte, USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 悟 (ITO, Satoshi)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60422078

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし