

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686132

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Design of joint structure with electromagnetic forces in a remountable high-temperature superconducting magnet by quantification of joint resistance generating mechanism

研究代表者

伊藤 悟 (Ito, Satoshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60422078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,700,000円、(間接経費) 5,310,000円

研究成果の概要(和文)：経済性・保守性の高い核融合炉の実現に向けて提案されている分割型高温超伝導マグネットには高温超伝導導体の機械的接合法の研究開発が必要である。本研究では、機械的接合法における接合抵抗発生メカニズムを超伝導理論・接触理論に基づいて定量化し、大型導体の機械的接合における接合構造の検討に必要な接合抵抗予測手法を提案した。また、従来の機械的接合法に加えて機械的ブリッジジョイント、機械的エッジジョイントを提案して、低接合抵抗が実現可能であることを実験・数値解析を用いて実証した。さらに構造解析を元に分割型マグネットの最適構造設計案について議論し、冷却電力解析を元に分割型マグネットの実現性を示した。

研究成果の概要(英文)：Research and development of mechanical joint of high-temperature superconducting (HTS) conductor are required for a remountable HTS magnet proposed to realize a fusion reactor having high economic efficiency and maintainability. In this research, joint resistance generating mechanism was quantified based on superconductivity and contact theories, then a method of joint resistance prediction needed to investigate joint structure for a mechanical joint of a large-scale conductor. In addition, we proposed mechanical bridge and edge joints as new mechanical joints and demonstrate low joint resistance with the joints using experiments and numerical analyses. Furthermore, we discussed the optimum structural design for a remountable magnet based on structural analysis and indicated feasibility of the remountable magnet based on calculation of electric power to run a cryo-plant.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

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

今後、核融合炉が商用炉として社会的に受け入れられるためには、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、申請者らは核融合炉用超伝導マグネットの革新的な設計案としてマグネットを分割して製造し、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提案した。本設計は、超伝導マグネットの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 以上に使用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している。抵抗損失による運転コストの増加は、使用温度を上げるという冷却コストの低減により相殺することができる。本構想は物理的優位性があるにもかかわらず、工学的な課題の多いヘリカル炉において特に効果的であると考えられる。すなわち 1) ヘリカルコイルを半ピッチごとに製作できる（巨大な巻き線機不要・同形状のパーツの量産）、2) 真空容器などの周辺機器の分割製造も可能（クレーンの重量制限を越えずに炉の建設が可能）、3) パーツごとに製作・通電試験が可能であるため、製造失敗による経済的損失が小さい。4) マグネットを取り外すことで炉内構造物へのアクセス性が向上する。5) クエンチによる焼損、中性子照射による性能劣化で損傷したパーツを交換することができる。以上、ヘリカル炉について記載してきたが、球状トカマク炉や他の外部導体系の核融合炉でも共通の利点があることは言うまでもない。

分割型高温超伝導マグネットを実現するために、これまで申請者らは高温超伝導テープおよび積層導体の機械的接合法（機械的ラップジョイントおよび機械的バットジョイント）に関する研究を進めてきた。これまで得た成果を以下に簡単にまとめる。まず、銅ジャケット付 BSCCO 2223 積層導体（臨界電流 1 kA）を用いて機械的バットジョイントを行い接合抵抗 140 nΩ を達成した。外挿による予測によれば、核融合炉用マグネットに必要な 100 kA 級導体では 1 nΩ 程度まで接合抵抗を下げられる。続いて、接合面接触圧を均一化させる接合構造を用いて接触抵抗を低減できることを構造解析と接合試験から証明した。さらに、接合面近傍でひずみによる局所的な臨界電流の低下が接合抵抗の要因なることを電磁場-熱連成解析と接合試験から証明した。

以上により接合抵抗発生メカニズムを定性的に説明し、分割型高温超伝導マグネットの設計可能性を示してきた。

2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導導体の機械的接合法における抵抗発生メカニズムを基礎実験および数値解析によって定量的に分析する手法を確立して、機械的接合の接合構造・接

合力負荷法を最適化し、核融合炉環境下でも低抵抗な機械的接合が可能であることを実証することを目的とする。また構造解析や冷却電力解析を元に分割型マグネットの最適構造設計案および実現性について議論する。以下に具体的な実施項目をまとめる。

(1) 機械的接合接触解析モデルの構築：

高温超伝導テープ・積層導体の機械的接合法において接合抵抗（接合部を含む区間での電圧降下を印加電流で除して評価する抵抗）の要因となるのは 1) 接触抵抗、2) ひずみによる超伝導体の臨界電流密度の低下にともなう発生する磁束流抵抗、3) 接触面・超伝導体以外の超伝導テープ・積層導体の構成材料や接触材料を電流が流れる際の抵抗、の 3 点である。これらを接触理論、超伝導テープの厚さ方向圧縮ひずみ-臨界電流特性、接合試験データをもとにモデル化し、接合力・電流を与えた場合の接合部における抵抗分布を数値解析（電流分布解析）により明らかにする。この数値解析により、接合部構造・接合力負荷法の違いによる接合抵抗発生メカニズムを特定・解明し、高温超伝導テープおよび積層導体の機械的接合法の接合構造を最適化する。

(2) 高温超伝導導体の機械的接合試験：

これまで研究対象としてきた機械的ラップジョイント・機械的バットジョイントに加えて低抵抗が実現できる可能性のある機械的接合を提案し、実験的に低接合抵抗を実証する。手法としては、まず REBCO 系の高温超伝導テープを用いて 1 kA 級の導体を製作し、新たな接合方法に対する接合試験を行う。1 kA 級導体で機械的接合法の成立性の実証ができた後は、さらに数 kA ~ 数 10kA 級の導体を製作し、同様に機械的接合試験を行い、核融合炉用超伝導マグネットで用いるような大電流用導体でも機械的接合法が成立することを示す。本接合試験では、最大 8 T の外部磁場を印加し、強磁場下での機械的接合の成立性も実証する。なお、「(1) 機械的接合接触解析モデルの構築」で検討する接合抵抗評価手法（数値解析）を用いて、接合試験結果を分析し、低抵抗を実現できる接合構造の検討も併せて行う。

(3) 核融合炉用分割型高温超伝導マグネットの構造・冷却電力解析：

ヘリカル炉を対象にして、電磁力、接触を考慮に入れた構造解析を行うことで、分割型高温超伝導マグネット接合部での構造的挙動を評価する。構造解析では、ヘリカルコイルを 2 次元円形コイルでモデル化し、機械的接合法を用いた場合に必要な支持構造について議論する。またヘリカル炉におけるヘリカルコイル内の磁場分布と「(1) 機械的接合接触解析モデルの構築」「(2) 高温超伝導導体の機械的接合試験」の結果を用いて実コイルにおける接合抵抗の総計値とコイル冷却電力を評価し、分割型マグネットの実現性を議論する。

3. 研究の方法

(1) 機械的接合接触解析モデルの構築：

これまでの研究では、BSCCO 2223 テープを用いてきたが、核融合炉の強磁場環境において臨界電流を高く保つことは困難である。そこで、本研究より REBCO 系 (YBCO、GdBCO など) テープを用いた導体を適用することを検討することにした。まず、3つの接合抵抗の要因のうち、「ひずみによる超伝導体の臨界電流密度の低下にともなって発生する磁束流抵抗」の影響について、高温超伝導テープの種類の依存性を確認した。多くの機械的接合法では接合面に接合力を加える際に、高温超伝導テープの厚さ方向に圧縮応力を付加する。まず接合力の増加により、接触抵抗が減少し接合抵抗は低減されるが、過剰な接合力が付加されると高温超伝導テープ内に塑性ひずみが発生して臨界電流が著しく低下し、逆に接合抵抗が増加する。したがって、厚さ方向圧縮応力と臨界電流の関係を高温超伝導テープごとに評価しておく必要がある。ここで、図1のように、「(2) 高温超伝導体の機械的接合試験」と関連して提案するブリッジ式機械的ラップジョイント (機械的ブリッジジョイント) の体系を考慮して考えると、高温超伝導テープの積層枚数が増えた場合に、厚さ方向圧縮ひずみに加えて、高温超伝導テープ端部に局所的な曲げひずみ、もしくはせん断ひずみが発生する可能性がある。そこで厚さ方向圧縮応力と臨界電流の関係の高温超伝導テープの積層枚数依存性を評価して、厚さ方向圧縮ひずみ・まげひずみ・せん断ひずみの影響を確認した。

続いて、3つの接合抵抗の要因のうち、「接触抵抗」のモデル化・定量化を試みた。これまでの研究では、77 K、自己磁場で行った高温超伝導テープ・積層導体の接合試験の結果から接触抵抗の値を実験的に推測していた。しかしながら、実際の分割型高温超伝導マグネットの運転温度は臨界電流や構造強度等の制約から 20 K 程度になる見込みであり、また、核融合炉は 10 T を超える強磁場環境である。そこで以下の Holm の接触理論を導入する。

$$R = R_f + R_c = R_f + \frac{\rho}{2a}$$

ここで R は接触抵抗, R_f は皮膜抵抗, R_c は集中抵抗, ρ は接点材料の抵抗率, a は真実接触部の半径である。接合面を十分に研磨・洗浄した場合には第一項の皮膜抵抗は集中抵抗に比べて小さくなる。また、接触部が十分に塑性変形している場合には温度変化による真実接触部の半径の変化は小さく、結果として接触抵抗は温度・磁場に依存する接点材料の抵抗率にほぼ比例することになる。本研究では以上の仮定を検証するために、まず図2に示す実験体系を用いて温度 10~70 K、磁場 0~15 T の条件で GdBCO テープの機械的ラップジョイントにおける接合抵抗を実験

的に評価した。続いて図3のように機械的ラップジョイントをモデル化して電流分布解析を行い、実験で評価した接合抵抗から接触抵抗を抽出して、接触抵抗の温度・磁場依存性を評価し、Holm の接触理論との比較を試みた。

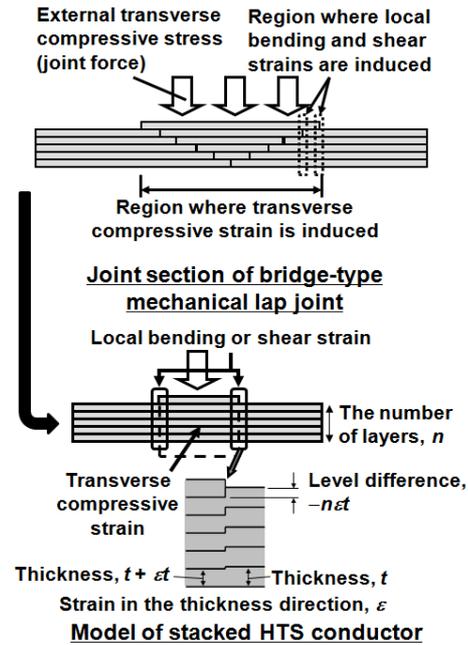


図1 機械的ブリッジジョイントにおける局所ひずみのモデル

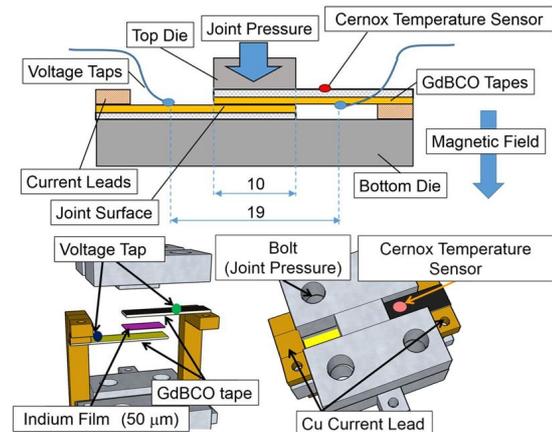


図2 機械的ラップジョイントの接合抵抗の温度・磁場依存性評価体系

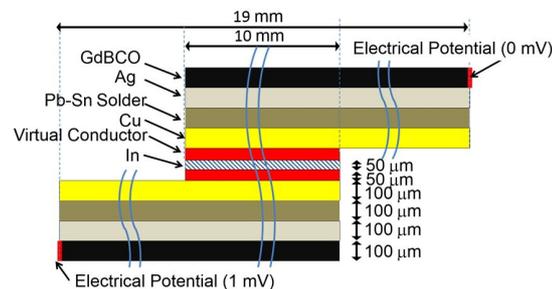


図3 電流分布解析における機械的ラップジョイントのモデル化

(2) 高温超伝導導体の機械的接合試験：

本研究では図4に示すように機械的のラップジョイント・機械的のバットジョイントに加えて機械的ブリッジジョイント・機械的エッジジョイントを新たに提案する。機械的ブリッジジョイントは機械的ラップジョイントを2つ組み合わせたものであり、導電面が片面のみに存在する REBCO 系テープ (Coated Conductor) に対して施工性を高めた機械的接合法である。また機械的エッジジョイントは機械的バットジョイントの接合面積を大きくして接合抵抗を低減する接合方法である。

機械的ブリッジジョイントについては、研磨した接合同士を直接接触させる直接接合と、接合面接触圧力の不均一化を目的として接合面にインジウム箔 (In 箔) を挿入する In 箔挿入接合の2種類の接合試験を GdBCO テープを用いて実施し、低接合抵抗を実現できる接合構造の検討を行った。また、接合力を付加する時の温度の影響を評価し、熱ひずみの影響や施工方法についても検討した。

機械的エッジジョイントについては 1 kA 級の GdBCO 導体を製作し、接合抵抗の評価を行った。また実験結果を数値解析結果と比較し、大型導体において機械的エッジジョイントを適用した場合に、十分な低抵抗が得られるかを検証した。

最後に簡易的に施工が可能な機械的ブリッジジョイントを用いて GdBCO テープを積層して製作した大型導体の接合試験を、最大 8 T の外部磁場下で実施し、「(1) 機械的接合接触解析モデルの構築」を踏まえて、大型導体でも低接合抵抗が実現可能であるかを検証した。

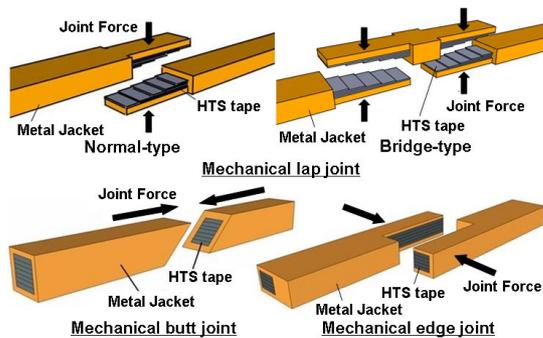


図4 機械的接合法

(3) 核融合炉用分割型高温超伝導マグネットの構造・冷却電力解析：

図5に示すようにヘリカル炉 FFHR のヘリカルコイルを円形コイルでモデル化し、機械的接合法を導入した分割型高温超伝導マグネットの電磁力 (体積力として与える) にもなう接触面の挙動を構造解析によって評価し、必要な接合力・支持構造について検討した。また、ヘリカルコイル内の磁場分布と「(1) 機械的接合接触解析モデルの構築」「(2) 高温超伝導導体の機械的接合試験」の結果を用いて実コイルにおける接合抵抗の総計値とコイル冷却電力を評価した。

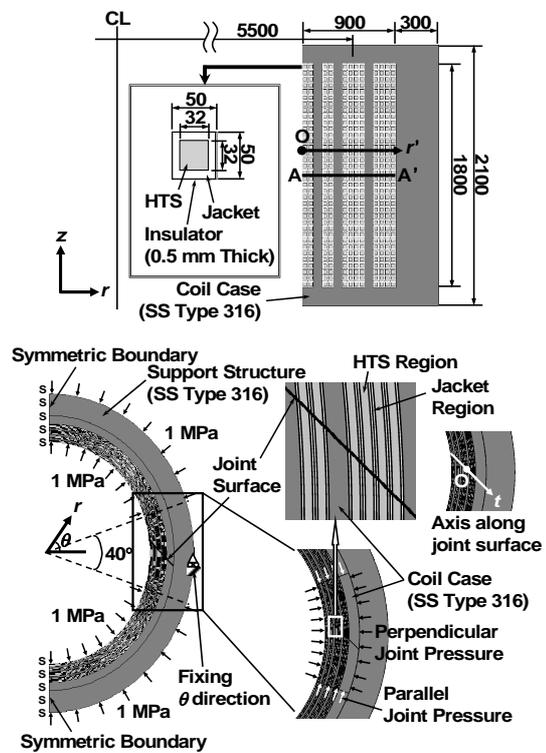


図5 分割型マグネット構造解析モデル

4. 研究成果

(1) 機械的接合接触解析モデルの構築：

図6に BSCCO 2223 テープおよび GdBCO テープの厚さ方向圧縮応力と臨界電流の関係の積層枚数依存性を示す。BSCCO 2223 テープを用いた場合、積層枚数が増加すると臨界電流が低下するが、GdBCO テープを用いた場合には、10 枚積層の場合でも 400 MPa の厚さ方向圧縮応力まで臨界電流の低下が確認されなかった。実際の接合部施工においては最大でも 200 MPa 程度の接合応力があれば十分である。また、REBCO 系テープはいずれも、今回用いた GdBCO テープと同様の構造を持つことから、REBCO 系テープを用いた積層導体の機械的接合においては、接合力による臨界電流の低下は、理想的な接合条件下では起こらないと考えてよいと判断できる。

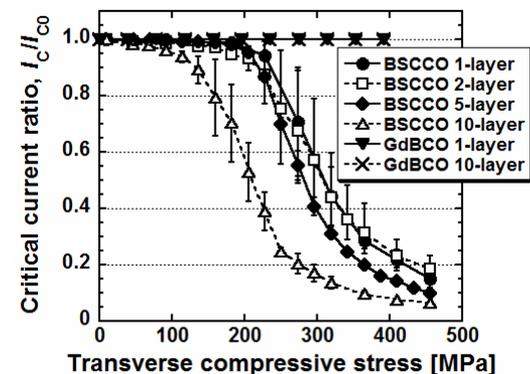


図6 厚さ方向圧縮応力と臨界電流の関係

図7に機械的ラップジョイント(In箔挿入接合)の接合抵抗率(接合抵抗と接合面積の積)の温度依存性を示す。凡例はGdBCOテープの接合面(銅層表面)を研磨する際の研磨紙のアルミナ粒子の粒径を示している。挿入するIn箔は研磨が困難であるために、表面に酸化層が残る。したがってGdBCOテープの接合面を粗くしたほうが、接合面のミクロな凹凸がIn箔の酸化層を破壊し、良好な接触点が得られるため、接合抵抗が低下するものと考えられる。図8に電流分布解析によって抽出した接触抵抗率(接触抵抗と接合面積の積)の関係を示す。また、Holmの接触理論の集中抵抗の式で予想される接触抵抗率の理論計算結果を粒径40 μm の研磨紙で接合面を研磨した場合の結果に適用している。なお、理論計算では、まず70Kのときの接触抵抗率を集中抵抗のみから構成されていると仮定し、真実接触部の半径を計算し、その真実接触部の半径が温度によって変化しないという仮定で解を求めている。粒径40 μm の研磨紙で接合面を研磨した場合、実験と数値解析によって得られた接触抵抗率はHolmの接触理論による集中抵抗の理論計算結果とほぼ一致し、接合抵抗の温度依存性については接触理論によって定量的に予測することが可能であることを示すことができた。図9に同様の実験における接合抵抗率の磁場依存性を示す。磁場依存性については実験的に接合抵抗率を評価する段階にとどまっております、今後、電流分布解析によって詳細に接触抵抗率の磁場依存性の評価を行う予定である。

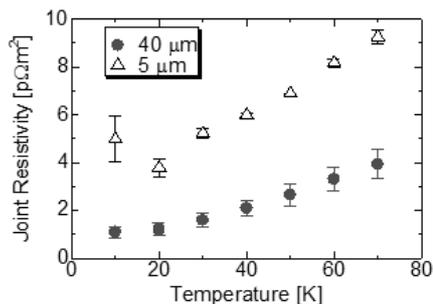


図7 GdBCOテープの機械的ラップジョイント(In箔挿入接合)における接合抵抗率の温度依存性(100 A、0 T)

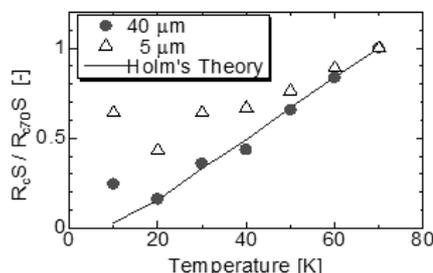


図8 GdBCOテープの機械的ラップジョイント(In箔挿入接合)における接触抵抗率の温度依存性

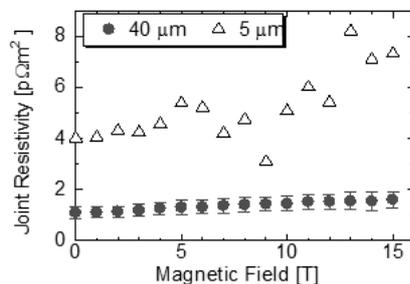


図9 GdBCOテープの機械的ラップジョイント(In箔挿入接合)における接合抵抗率の磁場依存性(100 A、10 K)

(2) 高温超伝導導体の機械的接合試験:

図10に機械的ブリッジジョイント試験(In箔挿入試験)で得られた接合抵抗率を示す。図10の凡例にあるFYSC-S05、FYSC-SC05はそれぞれ銅層なし、銅層ありのGdBCOテープを意味している。直接接合の場合、高温超伝導テープの積層枚数が増えるにしたがい、接合面の接触圧力分布の不均一性が強くなり、接合抵抗が上昇するが、In箔挿入接合の場合、接触圧力が比較的均一化されるために、積層枚数が増えても接合抵抗の増加は抑えられる。また、接合力を常温で付加した場合、接合力を77Kで付加した場合に比べて、接合力増加に伴う接合抵抗の減少の割合が大きくなることも確認できた。

図11に機械的エッジジョイント試験で得られた接合抵抗を示す。機械的エッジジョイントでは、100 μm 厚銅層付きGdBCOテープを10枚積層して銅ジャケットに納めて製作したサンプルType1と、Type1に100 μm 厚銅リボンも10枚追加して積層して製作したサンプルType2を用いて試験を行った。なお、接合面には100 μm 厚のIn箔を挿入している。図11中の各ラインは導体接合面とIn箔の接触抵抗およびIn箔自体の抵抗を含めて評価した接合抵抗率の一部を過去の実績を元に $5 \sim 7 \times 10^{-12} \Omega\text{m}^2$ と予想して、数値解析(電流分布解析)を行って求めた接合抵抗を示している。実験結果は数値解析結果とおおよそ一致しており、図11は機械的エッジジョイントにおいて所定の性能が得られたことを示している。得られた結果を元に100kA級導体に機械的エッジジョイントを適用すると $\sim 1 \text{ n}\Omega$ の接合抵抗が達成できると予想される。

最後にGdBCOテープを2列10層に積層して製作した30kA級導体および3列14層に積層して製作した100kA級導体を製作し、機械的ブリッジジョイントの接合試験を実施した。最大外部磁場8Tに対し、100kA通電時に $\sim 2 \text{ n}\Omega$ が達成できることを実証した。得られた接合抵抗値は十分に低い値であったが、「(1) 機械的接合接触解析モデルの構築」で得られた接合抵抗の温度・磁場依存性を考慮すると、理想値の2~3倍程度の値であり、今後、大型導体において、基礎試験と同様の接合性能が得られるような接合部施工法を検討する必要がある。

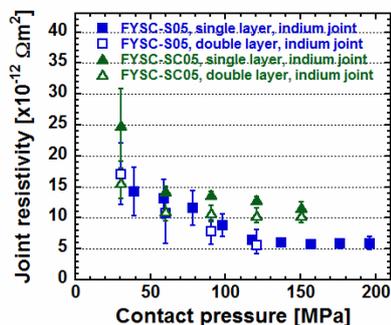


図 10 機械的ブリッジジョイント試験で得られた接合抵抗率

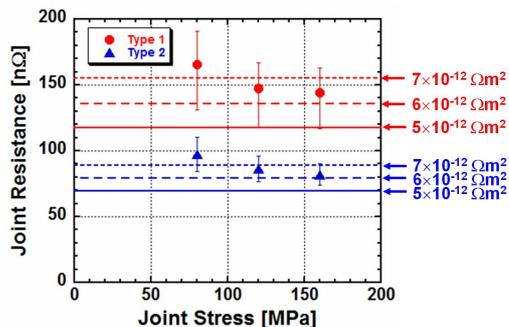


図 11 機械的エッジジョイント試験で得られた接合抵抗 (1 kA 通電時)

(3) 核融合炉用分割型高温超伝導マグネットの構造・冷却電力解析:

図 12 に SUS 316 製の支持構造の厚さを 0.3 m、幅をコイル幅の 2 倍としてモデル化した場合のコイルへの通電電流値とその際に発生する電磁力によって生じる接合面の周方向ギャップの関係の接合応力依存性を示す。ヘリカル炉 FFHR では通電電流 100 kA が必要とされるが、現実的に溶接可能な支持構造厚さ 0.3 m の場合、接合応力 200 MPa が必要であるという評価結果を得た。機械的バットジョイントの場合、周方向の接合面の移動は許容できないため、これは、機械的ブリッジジョイントや機械的エッジジョイントを用いて構造を最適化する必要性を示している。

また、冷却電力の観点から許容できるヘリカル炉 FFHR に分割型高温超伝導マグネットを適用した場合に許容できる接合抵抗の値を算出したところ、20 K 運転では、導体 1 ヶ

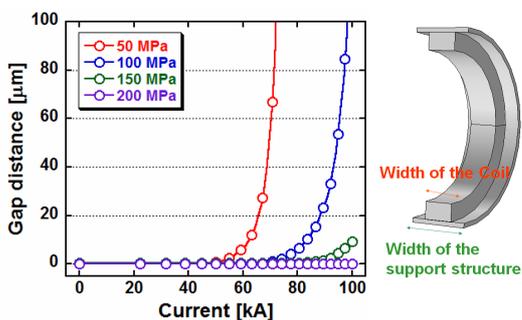


図 12 支持構造の厚さ：0.3 m、幅：コイル幅の 2 倍の場合の通電電流値と接合面に生じるギャップの関係の接合応力依存性

所あたりの接合抵抗が 4 nΩ程度 のときに、接合部のない低温超伝導コイルの冷却電力と同等になる計算となった。ヘリカルコイル内の磁場分布を考慮して現状得られている接合抵抗から実環境の接合抵抗を求めても ~2 nΩに抑えることが可能であり、冷却電力の観点で許容できる十分に低い抵抗が接合試験において実証できたと考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

S. Ito, K. Kawai, Y. Seino, T. Ohinata, Y. Tanno, N. Yanagi, Y. Terazaki, K. Natsume, S. Hamaguchi, H. Noguchi, H. Tamura, T. Mito, A. Sagara, H. Hashizume, Performance of a Mechanical Bridge Joint for 30-kA-class High-temperature Superconducting Conductors, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 24-3 巻, 2014 年, 4602305 DOI: 10.1109/TASC.2013.2291157

Y. Seino, S. Ito, H. Hashizume, Joint Resistance Characteristics of Mechanical Lap Joint of a GdBCO Tape with a Change in Temperature and Magnetic Field, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 24-3 巻, 2014 年, 4602105 DOI: 10.1109/TASC.2013.2289356

S. Ito, L. Bromberg, M. Takayasu, J.V. Minervini, H. Hashizume, Proposal of Electrical Edge Joint for a Demountable High-Temperature Superconducting Magnet, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, 40-5 巻, 2012 年, 1446-1452 DOI: 10.1109/TPS.2012.2190103 [学会発表](計 20 件)

伊藤 悟, 清野 祐太郎, 柳 長門, 寺崎 義朗, 相良 明男, 橋爪 秀利, ヘリカル型核融合炉への適用を目指した 100 kA 級高温超伝導導体の製作と試験 (2) 接合部抵抗評価, 第 88 回 (2013 年秋季) 低温工学・超電導学会, 2013 年 12 月 6 日, ウィンクあいち (愛知県名古屋市)

伊藤 悟, L. Bromberg, M. Takayasu, J.V. Minervini, 橋爪 秀利, 分割型高温超伝導マグネットのための高温超伝導導体の機械的エッジジョイントの基礎研究, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 28 日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)

S. Ito, H. Hashizume, H. Tamura, N. Yanagi, S. Imagawa, A. Sagara, Discussion of structural design issues on a remountable high-temperature superconducting magnet, 21st International Toki Conference, 2011 年 11 月 29 日, セラトピア土岐 (岐阜県土岐市)

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・助教

研究者番号：60422078

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし