

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760593
 研究課題名 (和文) セルフジョイント方式を導入した革新的超伝導マグネットへの挑戦
 研究課題名 (英文) A challenge for an innovative superconducting magnet introducing the self-joint method
 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

研究成果の概要 (和文)：経済性・保守性の高い商用核融合炉の実現のために研究開発が行われている分割型高温超伝導マグネットに用いる機械的接合技術として、研究代表者は負熱膨張特性を持つ材料および電磁力を利用するセルフジョイント技術を提案した。本研究を通して、負熱膨張特性を持つ材料 DFRP を用いての機械的接合が可能であること、また電磁力を利用できる大電流印加時でも低抵抗接合が実現可能であることを示すことができた。

研究成果の概要 (英文)：The self-joint technique using a material having negative thermal expansion coefficient and electromagnetic force is proposed as a mechanical joint method for a remountable high-temperature superconducting magnet developed for realization of a commercial fusion reactor achieving high economic efficiency and high maintenance performance. Through this study, the following results were obtained. DFRP having negative thermal expansion coefficient can be useful for a mechanical joint method. And low joint resistance can be achieved at high current value needed for a mechanical joint with electromagnetic force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 分割型高温超伝導マグネットの提案

原子力施設である核融合炉が商用発電炉

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る。核融合炉の構成機器の中でも巨大かつ複雑である超伝導マグネットは核融合炉の経済性、保

守性に大きく影響する。従来の一体型超伝導マグネットでは、i) 超伝導焼成炉の巨大化、ii) 複雑形状コイル製作の長期化、iii) コイル損傷時に部分的な交換が不可能であること、iv) 点検時における炉内構造物(第一壁、ダイバータ、ブランケット)へのアクセス性の低下などが経済性・保守性に大きく影響する問題点として挙げられる。

これらの問題は分割および再着脱可能な超伝導マグネットの開発により解決できると考えられる。過去に金属超伝導マグネットの分割化の研究が実施されたが、接合部の発熱によるクエンチの問題により実現には至らなかった。現在、金属超伝導体の接合法としては非着脱のものしか報告されていない。

そこで、研究代表者らは高温超伝導体を用いた分割型高温超伝導マグネットを提案した。材料として用いる高温超伝導体の使用温度は比較的高く設定することができ、極低温下では比熱が温度の3乗に比例することから、接合部の発熱を許容できると考えられる。また、核融合炉環境下で運転時に発生する電磁力を接合に利用することにより作動時には接合力が作用し、停止時には接合力が作用しないため、保守・点検を容易に行うことができると考えられる。

(2) これまでの成果

分割型高温超伝導マグネットの実現を目指し、研究代表者らはこれまでに高温超伝導ケーブルの機械的接合法の研究および分割型高温超伝導マグネットの試作を行い、以下の成果を得た。

- ① 高温超伝導テープの機械的バットジョイント (接合法の検討と基礎特性の把握)
 - 超伝導テープの断面同士を機械的に接合する機械的バットジョイント法を用いることにより、接合部の電気抵抗を十分に小さくできた。
 - 機械的バットジョイントにおいて電流増加にともなう接合部抵抗の増加を確認し、それらが接合部付近の超伝導フィラメントの材料劣化に起因することを電磁場・熱連成解析法により明らかにした。
- ② 積層高温超伝導体の機械的バットジョイント
 - 超伝導テープを 10 枚積層したケーブルの断面に 30~45 度の傾斜を設けることで、ケーブルの垂直方向から接合力を負荷し、接合性能を向上させることができた。
 - 安定化材と同種金属のメッキを接合面に施すことにより、接合部抵抗の低減、着脱による接合性能の劣化を抑制が可能であることを確認した。

- 77 K、500 A で、クエンチおよび臨界電流値の低下の抑制が可能であることを実証した。

- ③ 分割型高温超伝導プロトタイプの製作とその性能評価
- 機械的バットジョイントを利用した接合部 4 箇所を分割型高温超伝導マグネットプロトタイプを製作し、これが作動することを確認し、分割型高温超伝導マグネットの原理を実証した。

上記の成果を基に、今後は大電流印加時かつ高磁場下においても作動する分割型高温超伝導マグネットの実現を想定して研究を進めていく必要がある。

2. 研究の目的

分割型高温超伝導マグネットの研究開発の課題の一つとして、マグネットの電磁力による接合技術の確立が挙げられる。しかしながら、十分に小さな接合抵抗を得るために必要な電磁力は電流印加開始時には得られない。また、マグネットの巨大化、他の機器への干渉の問題から外部接合機の導入は望ましくない。そこで、本研究では、負膨張性材料である DFRP を利用した接合法を新たに提案する。DFRP は、ポリエチレン繊維(東洋紡: Dyneema®)を強化繊維とする複合材料であり、繊維方向に負の熱膨張係数をもつため冷却すると膨張するという性質をもつ。DFRP の導入により以下のシナリオが成立可能となる。

- (1) マグネット温度を作動温度まで低下させると同時に、DFRP の負膨張により接合力を作用させる。
- (2) 電流印加により電磁力による接合力が作用する。また印加電流増加とともに接合力が大きくなり、接合抵抗が低減される。

温度を低くすればするほど、印加電流を増加させることができ、また印加電流の値が大きくなればなるほど、接合部における発熱量は増加する。本研究で新たに提案する上記のコンセプトは、発熱量が増加する低温時および大電流時ほど接合力が増加し、接合抵抗を低減するという正のフィードバックが自動的に働く自己完結型接合方式、すなわちセルフジョイント方式であり、大電流印加時、高磁場環境下において有効な新しいシステムである。本研究では研究代表者が提案するセルフジョイント技術を確立し、電磁力を利用できる大電流印加時でも低抵抗接合が実現可能であることを示すことによって大電流・高磁場用分割型高温超伝導マグネットが設計可能であることを示すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) DFRP による接合法の構築

まず、DFRP の負熱膨張特性を利用した高温超伝導ケーブルの機械的バットジョイントの実現可能性を実験（接合試験）により検証する。接合試験は液体窒素浸漬冷却体系（図1）、GM サイクル冷凍機伝導冷却体系（図2）の双方で行う。本実験で用いる試験用ケーブルは BSCCO 2223 テープを 10 層積層し、低温はんだで束ねたものであり、接合面はケーブルの長手方向に対して 45°傾いている。試験用ケーブルの接合面を接触させ、冷却時に発生する DFRP の膨張力によって、垂直上方より接合部に圧縮応力（接合応力）を加える。接合部に直接触れている SUS304 製のロッドにはひずみゲージを取り付け、得られたひずみと SUS 304 のヤング率を用いて接合応力を算出する。本試験では、DFRP によって発生する接合応力の確認、DFRP を用いた試験体系における接合抵抗の評価を行う。

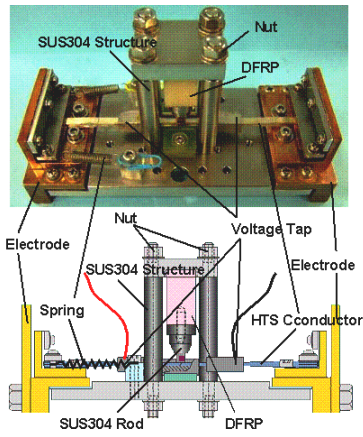


図1 DFRP による接合試験体系（液体窒素浸漬冷却）

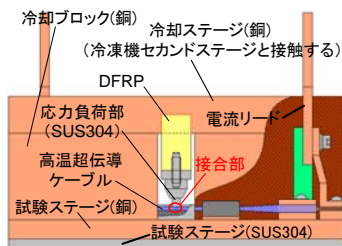
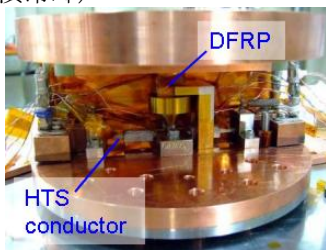


図2 DFRP による接合試験体系（伝導冷却）

(2) 大電流用の高温超伝導ケーブルの機械的バットジョイント

大電流用の高温超伝導ケーブルとして、銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブル（図3）を製作する。この試験用ケーブルの機械的バットジョイントにおいて低接合抵抗を実現するために、構造解析による接合構造の最適化を行い、それを元に接合試験を行う。

① 構造解析による接合構造の最適化

接合試験体系を2次元でモデル化し、ANSYS を用いて構造解析を行う。本解析では、接合力の負荷方法による接合面の接触状況の違いを評価する。モデル化する接合力負荷方法は、モデル A：従来の試験体系を模擬したもの（垂直上方からの圧縮応力のみを加えたもの）、モデル B：垂直応力と平行応力を組み合わせたもの（図4）、モデル C：接合力を負荷するロッドの断面積を広げ、上下から圧縮応力を加えたもの（図5）の3パターンとする。

② 接合試験

構造解析結果を元にして、最適化された実験体系と製作した銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルを用いて接合試験を行う。印加電流は～1 kA とし、大電流印加時でも十分低い接合抵抗が得られることを確認する。

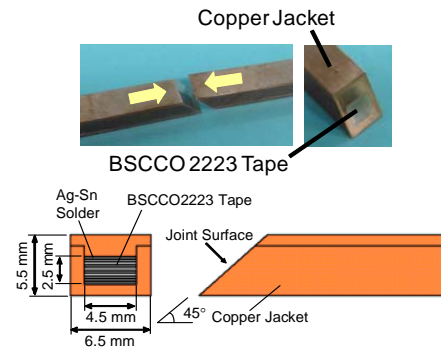


図3 銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブル

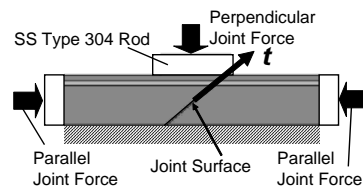


図4 解析体系（モデル B）

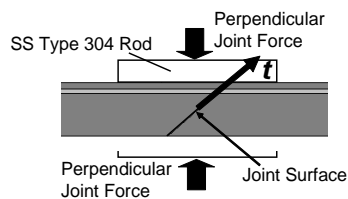


図5 解析体系（モデル C）

4. 研究成果

(1) DFRP による接合法の構築

図1に示す液体窒素浸漬冷却体系での接合試験において、まずDFRPの上に位置するSUS304製の板を締結するナットの締め付けトルクを常温で2 Nm、もしくは3 Nmにして、その後、液体窒素で冷却した。液体窒素で冷却した際にDFRPの膨張により接合応力が得られる。ナット締結、液体窒素による冷却、常温への昇温、ナット締結解除と順に行った際の接合応力の変化を図6に示す。図6より常温から液体窒素温度(77 K)への温度変化によりDFRPによって約120 MPaの接合応力が得られることが確認できた。

続いて、上記、ナットの締結トルクの2条件において、試験用ケーブルの接合抵抗を評価した。得られた接合応力-接合抵抗特性を図7に示す。本試験により、DFRPの膨張による接合力を用いた場合でも $\mu\Omega$ オーダーの低抵抗が得られることが確認できた。

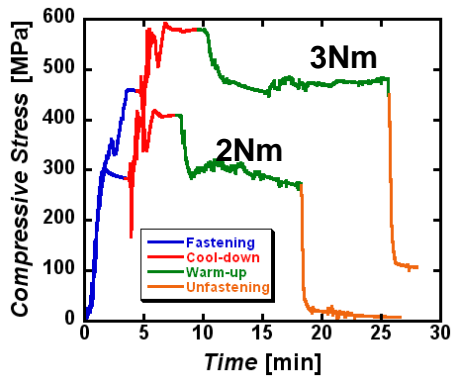


図6 DFRPの膨張による接合応力発生

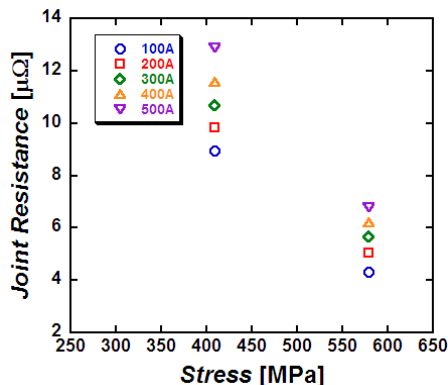


図7 液体窒素浸漬冷却体系で得られた接合応力-接合抵抗特性

続いて、図2に示す伝導冷却体系での接合試験において、作動温度をヒーターによって制御し、これによりDFRPの膨張による接合応力を変化させながら、試験用ケーブルの接合抵抗を評価した。得られた接合応力-接合抵抗特性を図8に示す。図8より接合応力の増加に対し、接合抵抗が減少することが確認できた。この傾向は過去の研究でも得られているものであり、DFRPを用いての接合試験においても、同様の傾向が得られることが確認できた。なお、伝導冷却体系では、試験部のセッティングが難しく、接合面のずれなどにより、得られた接合抵抗は比較的高い値となったが、液体窒素浸漬冷却体系で行った試験では、十分に低い抵抗が得られているため、2つの実験を通して、DFRPの負熱膨張特性を用いての機械的バットジョイントが実現可能であることが示せたと言える。

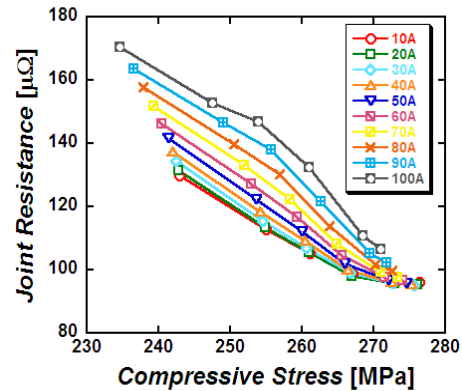


図8 伝導冷却体系で得られた接合応力-接合抵抗特性

(2) 大電流用の高温超伝導ケーブルの機械的バットジョイント

① 構造解析による接合構造の最適化

図9にモデルA(従来の実験体系)においてケーブルの垂直上方から加える圧縮応力を変化させた場合の接合面におけるギャップ距離分布の変化を示す。横軸の t は図4に示すように接合面と平行な方向の位置を意味している。図9より、従来の試験体系では、接合応力を増加させても接合面は半分程度しか接触していないことが確認できる。

図10にモデルBにおいて、ケーブルの垂直上方から加える圧縮応力を100 MPaに固定し、ケーブルの平行方向から加える圧縮応力を変化させた場合の接合面における接触圧力分布の変化を示す(平行方向からの接合応力の最大値は垂直方向からの接合応力と同じ100 MPaとしている)。図10より、平行方向からの接合応力を増加させることにより、接触している部分が増加し、接合面における

接触圧力も均一化していくことがわかる。したがって垂直方向からの接合応力と水平方向からの接合応力を組み合わせることで、接合抵抗を低減できる可能性がある。

図 11 にモデル C において、ケーブルの垂直方向（上下方向）から加える圧縮応力を変化させた場合の接合面における接触圧力分布の変化を示す。モデル C ではケーブルに平行方向の圧縮応力は与えていないにもかかわらず（解析上では 1 MPa だけ平行方向に圧縮応力を加えている）、接触圧力をモデル A に比べると均一化できることが確認できた。

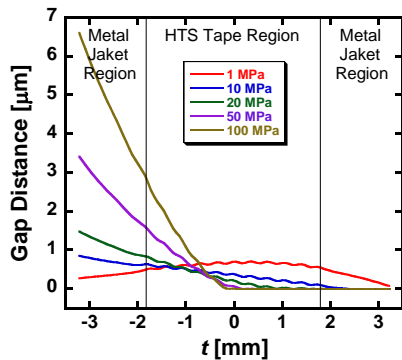


図 9 接合面のギャップ距離（モデル A）

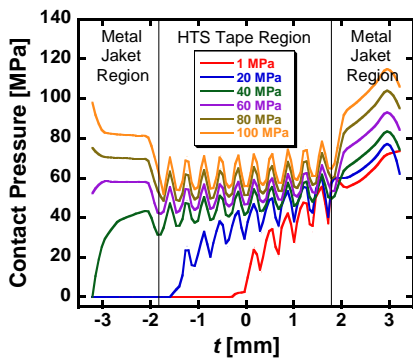


図 10 接合面の接触圧力（モデル B）

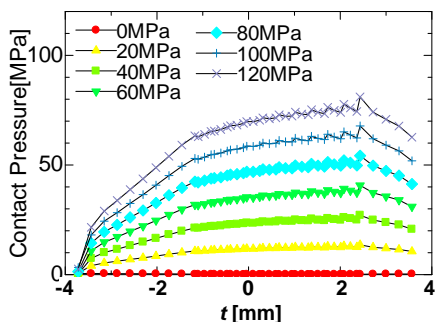


図 11 接合面の接触圧力（モデル C）

② 接合試験

解析結果よりモデル B の接合応力負荷方法が最適であることがわかったが、平行方向の接合応力を実験で制御することは難しいため、モデル C の体系を反映した実験装置を製作し、接合試験の低減を図ることとした。

本試験ではモデル A の実験体系、モデル C の実験体系の 2 条件で接合試験を行う。試験用ケーブルとしては、図 3 に示した銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルを用いる。図 12 にモデル A を反映した実験体系を、図 13 にモデル C を反映した実験体系を示す。なお、どちらの実験体系においても補助的に平行方向から接合応力を負荷しており、モデル B の体系を一部含む実験体系となっている。これはモデル A のみを反映させた体系にした場合、銅ジャケット付 BSCCO 2223 ケーブルでは熱ひずみの影響で、接合抵抗が著しく高くなってしまうことが確認されたためである。

図 14、図 15 に図 12、図 13 で示す実験体系で得られた接合抵抗を示す。図 14 は印加電流を 300 A に固定した場合の接合応力-接合抵抗特性であり、図 15 は接合応力を 23 MPa に固定した場合の電流-接合抵抗特性である。図 14、図 15 よりモデル C の体系にすることにより接合抵抗がモデル A の場合で得られるものの半分以下に低減できていることがわかる。これにより構造解析によって検討した接合応力の与え方が接合抵抗を低減させるのに有効であることが確認できた。また、図 15 より電磁力接合に必要な大電流印加時でも接合抵抗が低い状態（500nΩ～700nΩ）で保たれていることがわかる。

以上より、セルフジョイント方式による分割型高温超伝導マグネットの実現可能性を示すことができた。今後は大型導体を用いての実証試験、および具体的な構造設計が必要となると考えられる。

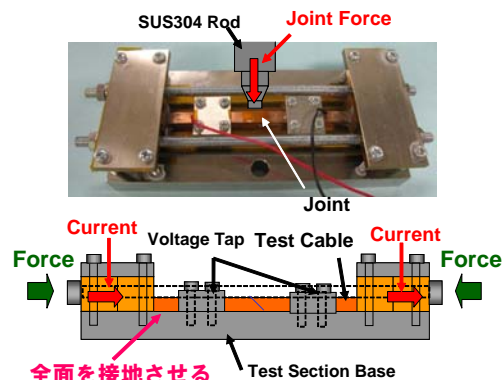


図 12 モデル A を模擬した実験体系

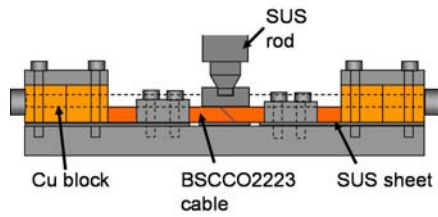


図 13 モデル C を模擬した実験体系

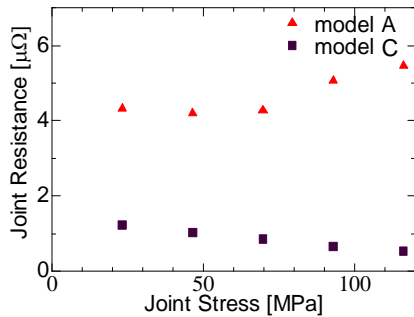


図 14 接合応力-接合抵抗特性 (300 A)

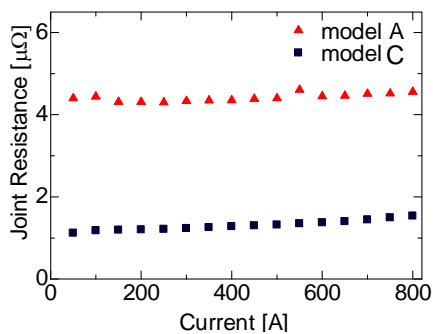


図 15 電流-接合抵抗特性 (23 MPa)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

1. 伊藤 悟, 金属ジャケット付BSCCO2223 導体の機械的バットジョントの基礎評価, 2009 年度秋季低温工学・超電導学会, 2009 年 11 月 19 日, 岡山県岡山市.
2. Satoshi Ito, Influence of Surface Roughness on Performance of Mechanical Butt Joint of Stacked BSCCO 2223 Cable, 21st International Conference on Magnet Technology, 2009 年 10 月 19 日, Hefei, China.

3. Satoshi Ito, Effect of Thermal Strain on the Mechanical Butt Joint of a Stacked HTS Cable with a Metal Jacket, 21st International Conference on Magnet Technology, 2009 年 10 月 19 日, Hefei, China.
4. 伊藤 悟, メタルジャケット付き BSCCO2223 ケーブルのバットジョントの性能評価, 2008 年度秋季低温工学・超電導学会, 2008 年 11 月 12 日, 高知県高知市.
5. Satoshi Ito, Mechanical Butt Joint of HTS Cable with DFRP for Remountable HTS Magnet, 16th Pacific Basin Nuclear Conference, 2008 年 10 月 17 日, 青森県青森市.
6. 伊藤 悟, 分割型高温超伝導マグネットのためのセルフジョイント法の提案, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 2007 年 11 月 21 日, 宮城県仙台市.
7. Satoshi Ito, Proposal of self-jointing system for remountable HTS magnet, The 20th Biennial Conference on Magnet Technology, 2007 年 8 月 27 日, Philadelphia, PA, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

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