

メタルジャケット付き高温超伝導導体の機械的接合の基礎研究 Fundamental study on mechanical joint of HTS conductor with metal jacket

東北大・工 伊藤 悟, 橋爪 秀利
東北大・金研 小黒 英俊, 淡路 智
S. Ito¹, H. Hashizume¹, H. Oguro² and S. Awaji²
¹Faculty of Engineering, Tohoku University
²Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

本研究グループでは核融合炉の建設コスト、メンテナンスコストを削減する新しい設計案として、Fig. 1 に示すようなマグネットを分割製造し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットを提案している[1,2]。本設計は複雑かつ巨大な超伝導マグネットを有するヘリカル炉の工学的課題を解決するために有効である。また米国では、Component-Test Machine として、分割型高温超伝導マグネットを採用したトカマク炉の設計も進められている[3]。

マグネットを着脱可能とするためには、機械的接合法を採用する必要がある。本設計では、接合部でのジュール発熱を許容するため、使用温度域を上げることで比熱をある程度大きくできる高温超伝導体を材料として選択している。使用温度域を高めた場合、冷却に必要な電力を減らすことができるため、接合部である程度の損失があったとしても、分割型高温超伝導マグネットの運転コストは低温超伝導体の超伝導マグネットのそれよりも低くすることが可能である。

高温超伝導導体の機械的接合法の基礎研究として、これまで本研究グループでは銅ジャケット付 BSCCO (BSCCO 2223) 積層導体の機械的 Butt Joint (研磨処理やめっき処理を施した積層導体の切断面を機械的に接合する)の研究を行ってきた[4,5]。昨年度までの研究において、臨界電流が 1 kA 程度の BSCCO 導体を用いて、接合抵抗を 500 nΩ程度まで下げることが成功した。

本年度は接合試験装置体系を改良することで、BSCCO 導体の機械的 Butt Joint の更なる接合抵抗の低減を図った。また、核融合炉のような強磁場環境においては、BSCCO 導体よりも、高い臨界電流を有する ReBCO 導体を使用することが望ましいため、本年度より GdBCO 導体の機械的 Butt Joint の試験を開始した。GdBCO 導体の試験については、6T-CSM に 500A の電流印加が可能な機械的接合試験装置(液体素素浸漬冷却体系)を設置し、磁場を印加しながらの実験も行った。

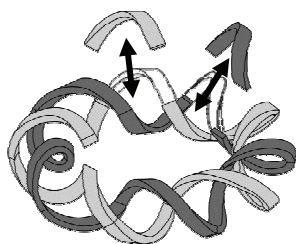


Fig. 1 Schematic view of a remountable (demountable) high-temperature superconducting magnet.

2. BSCCO 導体の機械的バットジョイント

機械的 Butt Joint では、接合面の接触圧力を均一化することで、接合抵抗の低減が可能であると考えられる。そこで、まず、接合面へ均一な接触圧力を与えるための接合構造を構造解析により検討した。Fig. 2 に構造解析に用いたモデルを示す。(a)は過去の研究で用いてきた接合試験体系 (Model A), (b)は新たに提案した接合試験体系 (Model B)である。それぞれのモデルに対して ANSYS を用いて構造解析(2次元弾性解析・平面応力状態)を実施し、接合面上の接触圧力分布を評価した。垂直方向接合力を 100 MPa として、平行方向接合力を 1 MPa, 100 Pa とした場合の解析結果を Fig.2 に示す。本解析により新たに提案した Model B の体系を用いた場合に均一な接触圧力分布が得られることが確認できた。

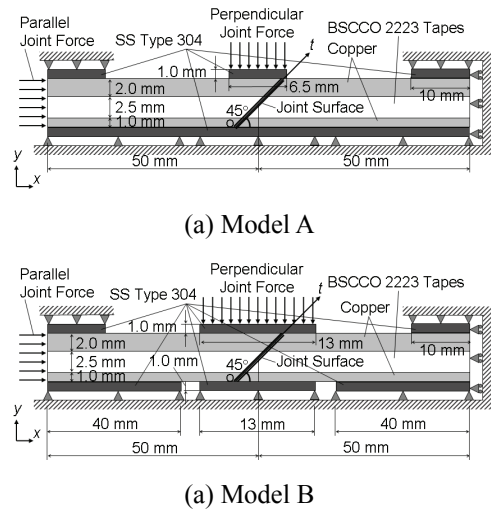


Fig. 2 Models for structural analysis

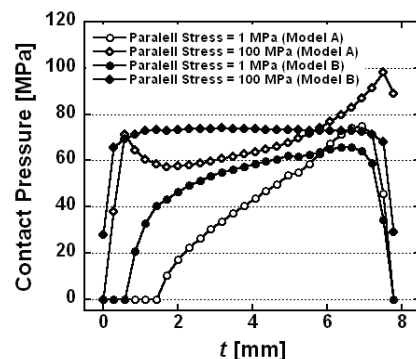


Fig. 3 Contact pressure distribution

続いて、Model Aと Model Bと元にして実験体系を構築し、BSCCO 導体を用いて機械的 Butt Joint の試験を行い、実験体系の違いによる接合抵抗の違いを評価した。Fig. 4 に Model B を元にした実験体系を示す。電圧端子①-②間、③-④を測定することで積層導体の電圧降下(臨界電流)、電圧端子②-③間の電圧を測定することで接合抵抗を評価することができる。試験用導体としては Fig. 5 に示すような長手方向に対して 45 度の傾きのある接合面を持つ銅ジャケット付 BSCCO 導体(BSCCO 線材 10 枚、 $I_c = 1 \text{ kA at } 77\text{K, self field}$)を用いた。本実験体系では、接合部に垂直方向、平行方向の双方から接合力を負荷でき、垂直方向接合力の値はロードセルで測定が可能である。平行方向接合力はスタッドボルトをナットで締め上げることで発生させており、ナットの締結トルクを条件として記録した。比較のため、接合面を直接接触させる Dry Joint の場合 (Model A, Model B 双方)、In 箔を接合面間に挿入した場合 (Model B のみ)、PbSn はんだで接続した場合についてそれぞれ接合試験を行った。Fig. 6 に導体に 500 A を印加し、垂直方向接合応力を 120 MPa に固定した場合の実験結果を示す(ただしはんだ接続の場合には接合力は負荷していない)。結果より Model A よりも Model B のほうが接合抵抗を低減できることが確認できる。また、水平接合力を加えていき、接合面での接触圧力を均一化させていくことで、Dry Joint での接合抵抗をはんだ付けや In 挿入の場合の接合抵抗よりも低くできることが確認できた(最小抵抗: 140 nΩ)。なお、導体の臨界電流は平行方向接合応力を制御するトルクが 1.6 Nm まででは 1 kA のまま変化しなかったが、3.0 Nm の条件では導体に塑性ひずみが発生し、臨界電流の低下が観測された。

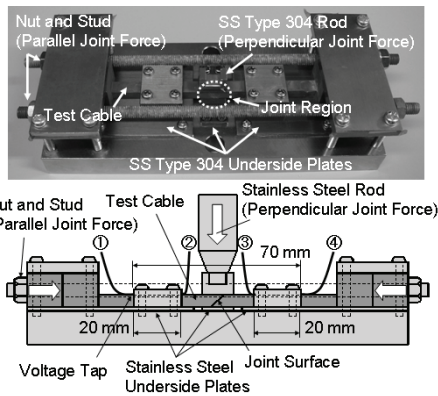


Fig. 4 Experimental set-up for mechanical butt joint of a stacked BSCCO conductor with copper jacket.

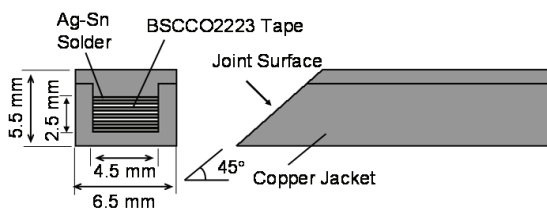


Fig. 5 Stacked BSCCO conductor with copper jacket.

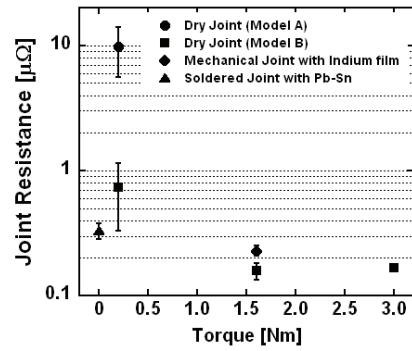


Fig. 6 Experimental results for mechanical butt joint of a stacked BSCCO conductor with copper jacket.

3. GdBCO 導体の機械的バットジョイント

銅ジャケット付き GdBCO 導体を用いて、BSCCO 導体と同様の接合試験を行った。Fig. 7 に長手方向に対して 45 度の傾きのある接合面を持つ銅ジャケット付 GdBCO 積層導体(GdBCO 線材 4 枚、 $I_c = 570 \text{ A at } 77\text{K, self field}$)を示す。なお、ここで用いた GdBCO 線材は銅層なし、ハステロイ層 100 μm、銀層 20 μm のものである。実験体系としては、Fig. 4 の Model B を元にして構築したものを用いた。比較のため、接合面を Dry Joint させた場合、厚さ 0.01 mm の In 箔を接合面間に挿入した場合についてそれぞれ接合試験を行った。

Fig. 8 に接合試験により得られた印加電流 200 A、水平方向接合応力制御トルク 1.6 Nm の際の垂直方向接合応力(最大 120 MPa)と接合抵抗の関係を示す。結果より、In 箔挿入接合の方が接合抵抗を低減できることが分かる。BSCCO 導体の機械的 Butt Joint の場合には Dry Joint のほうが接合抵抗を低減できたが、GdBCO 導体の機械的 Butt Joint の場合には逆の結果となった。これは、BSCCO 線材と GdBCO 線材の構造の違いに起因するものと考えられる。GdBCO 線材の場合、導電層となる超伝導層や銀層が薄いため、接合面のずれによる接合抵抗への影響が大きくなる。In 箔を接合部に挿入することによって、GdBCO 線材同士がずれ、銀層同士の接触断面積が減少して抵抗が増加してしまうことが抑制された結果、このような実験結果が得られたものと考えられる。

続いて、GdBCO 導体の機械的 Butt Joint の接合抵抗と BSCCO 導体の接合抵抗を比較する。ここでは、線材のずれの影響を無視するために、In 箔を挿入した場合の結果を用いて議論する。前節の実験で用いた BSCCO 導体の断面サイズと本節の実験で用いた GdBCO 導体の断面サイズは異なるので、断面積を考慮した比較が必要である。ここで、接続抵抗は導体の導電層(線材の銀層)の断面積に反比例すると仮定して計算すると GdBCO 積層導体の接合抵抗は約 3 μΩとなり、これは実験によって取得した接合抵抗よりも約 2 倍程度大きい値である。これは電流が接合部で銅ジャケットを迂回し、接合部全体としての接合抵抗が低下したためであると考えられる。

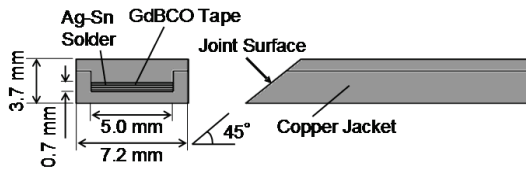


Fig. 7 Stacked GdSCCO conductor with copper jacket.

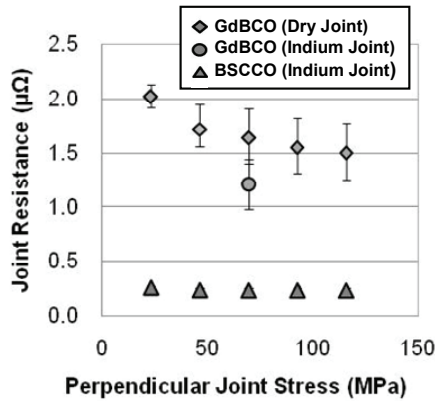


Fig. 8 Relationship between perpendicular joint stress and joint resistance for mechanical butt joint of a stacked GdBCO conductor with copper jacket.

Fig. 9 に直接接合試験の際の電流-電圧特性(垂直接合応力 69.6 MPa 時)、および切断前の積層導体の電流-電圧特性を示す。結果より積層導体を接合する事によって、積層導体の臨界電流値が大幅に低減したことが確認できる($I_c =$ 約 300 A)。これは、積層した各 GdBCO 線材に流れる電流に偏りが生じたためであると考えられる。また、接合試験では低電流時に電圧が線形上昇することが確認できるが、これは銅ジャケットに電流が分流したことを意味している。これらの現象は GdBCO 線材同士の接合抵抗が銅ジャケット同士の接合抵抗より大幅に大きいため、接合部において電流が銅ジャケットを迂回するよう経路が存在する事に起因すると考えられる。

Fig. 10 に直接接合試験の際の磁場-接合抵抗特性を示す。本試験では磁場を 1 T まで印加した。結果より磁場を 1 T まで印加しても接合抵抗はほぼ変化しないことが分かる。1 T 程度の低磁場では機械的バットジョイントによる接合抵抗への影響はない事を確認できた。現状では、1 T を超える磁場ではノイズにより接合抵抗を正しく評価できないため、来年度以降は信号処理を導入することにより、~5 T の磁場を印加した場合の接合抵抗の評価をしていく予定である。

4. まとめ

BSCCO 導体および GdBCO 積層導体を用いて機械的バットジョイント試験を行った。接合部の接触圧力を均一化させる実験体系の構築により、BSCCO 導体の接合抵抗を 140 nΩ まで低減することに成功した。一方、GdBCO 導体の場合、線材同士の接合抵抗が大きく、電流が銅ジャケットを迂回することが確認された。今後は GdBCO 導体の接合抵抗の低減方法を考案するとともに、大型の積層導体を使用し接合試験を行い、より強磁場での接合抵抗特性を取得する予定である。

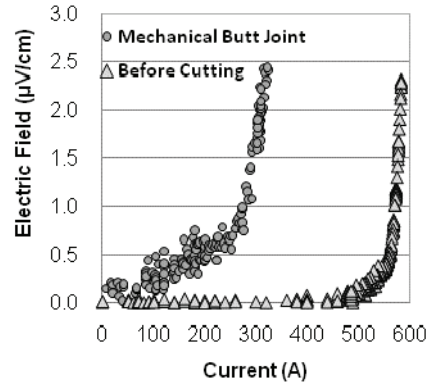


Fig. 9 Voltage drop of a stacked GdBCO conductor

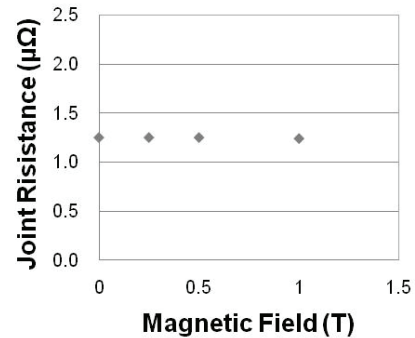


Fig. 10 Relationship between magnetic field and joint resistance

参考文献

- [1] H. Hashizume, S. Kitajima, S. Ito, K. Yagi, Y. Usui, Y. Hida, A. Sagara, "Advanced fusion reactor design using remountable HTc S.C. magnet", Journal of Plasma Fusion Research SERIES, vol. 5, (2002), pp. 532-536.
- [2] S. Ito, H. Hashizume, "Overview of fundamental study on remountable HTS magnet", Fusion Engineering and Design, vol. 81, (2006), pp. 2527-2533.
- [3] L. Bromberg, H. Hashizume, S. Ito, J. V. Minervini, N. Yanagi, "Status of High Temperature Superconducting Fusion Magnet Development", Fusion Science and Technology, Submitted.
- [4] S. Ito, T. Kato, H. Hashizume, "Mechanical butt joint of laminated HTS cable with metal jacket for remountable HTS magnet", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, (2009), pp. 1536-1539.
- [5] T. Sakashita, S. Ito, H. Hashizume, "Improvement of Joint Structure for Mechanical Butt Joint of Stacked BSCCO 2223 Cable", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, (2010), pp. 1751-1754.