

セルフジョイントシステムを導入した BSCCO 2223 積層ケーブル Butt Joint の基礎研究

Fundamental Study on Butt Joint of Laminated BSCCO 2223 Cable with Self-joint System

東北大・工 伊藤 悟, 坂下 武志, 加藤 喬之, 茂庭 圭介, 橋爪 秀利
東北大・金研 西島 元

S. Ito¹, T. Sakashita¹, T. Kato¹, K. Moniwa¹, H. Hashizume¹, G. Nishijima²

¹ Faculty of Engineering, Tohoku University

² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

核融合炉の製造コスト、メンテナンスコストの削減のためにマグネットを分割し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている。Fig.1 に分割型高温超伝導マグネットの概念図を示す。マグネット材料としては、比較的高温で使用でき、材料の比熱を大きくすることができる高温超伝導体を採用している。これまで、分割型高温超伝導マグネットの基礎研究として、10 枚積層 BSCCO2223 ケーブルによるバットジョイント(機械的接合)の研究が進められてきた[1]。

現在、分割型超伝導マグネットの接合法として Fig.2 に示すようなセルフジョイントシステムを提案している。接合力としては負熱膨張特性を有する DFRP による接合部への圧縮力、および自己磁場によって発生する電磁力を利用する。セルフジョイントシステムの検証のためには、DFRP を組み込んだ接合試験装置において、温度変化、磁場変化にともなう接合性能の変化を評価する必要がある。

昨年度においては、予備試験として、Fig. 3 に示すような DFRP を組み込んだ接合試験装置を用いて、伝導冷却体系において BSCCO 2223 ケーブルの接合試験を行い、温度-接合抵抗特性を評価した。その結果、Fig. 4 に示すように温度の低下にともなう接合抵抗の低下が観察された。この要因としては温度低下にともなう BSCCO 2223 ケーブルの臨界電流の向上と DFRP の負膨張による接合応力の向上が考えられる。

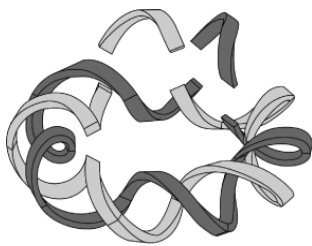


Fig.1 Schematic View of Remountable HTS Magnet

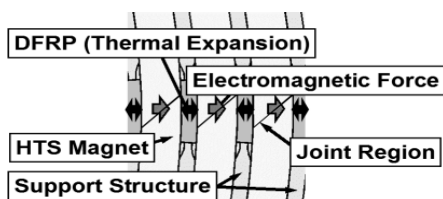


Fig.2 Self-Jointing System

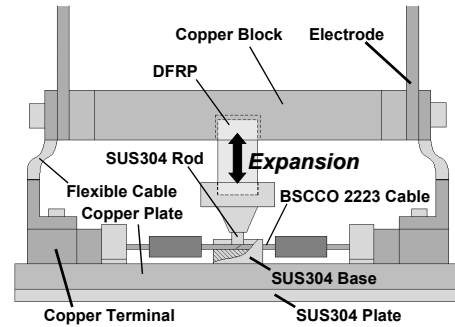


Fig.3 Conventional Experimental Set-up

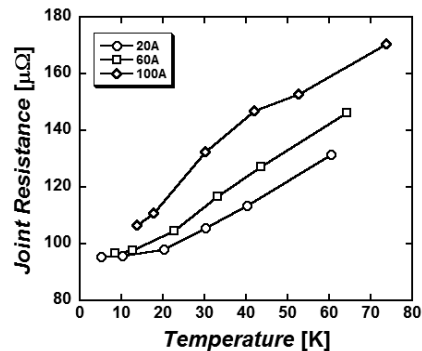


Fig.4 Temperature-Resistance Characteristic

上記のように温度低下にともなう接合抵抗の変化を定性的にとらえることはできたが、2 つの接合抵抗低減の要因の寄与の割合は不明であった。そこで、本年度は、臨界電流の向上による接合抵抗の低減効果の割合について定量的な考察を加えることを目的として、以下の 2 つの項目を実施した。

- (1) BSCCO2223 テープの磁場と臨界電流密度の関係を調べ、その結果から解析的に 10 枚積層 BSCCO2223 ケーブルの各温度における臨界電流密度を求める。
- (2) DFRP を組み込まない接合装置を製作し、その装置を用いて温度-接合抵抗特性を評価する。

2. BSCCO2223 ケーブルの臨界電流評価

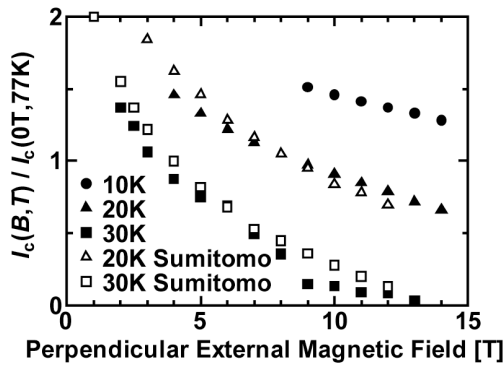
温度低下にともなう BSCCO2223 ケーブルの臨界電流の向上と接合抵抗の低下の関係を定量的に考察するためには、BSCCO2223 ケーブルの各温度における臨界電流が既知でなければならない。本節では、まず、BSCCO2223 テープの磁場と臨界電流密度の関係を実験的に評価し、得られたデータを製造元である住友電

気工業株式会社が提供しているデータと比較した。そのデータを元に、解析的に10枚積層BSCCO2223ケーブルの各温度における臨界電流密度を求めた。なお、本実験データ、および解析手法は、電磁力による接合の検討項目として将来的に実施予定である磁場-接合抵抗特性の評価のためにも必要なものである。

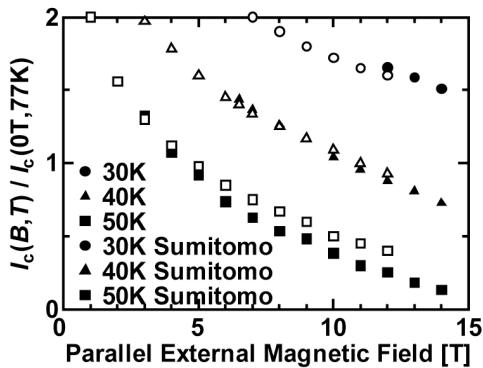
2-1. BSCCO2223 テープの磁場-臨界電流特性評価

評価対象であるBSCCO2223テープを超伝導マグネット(15T-CSM)のボア内に設置し、超伝導テープの表面に対して垂直方向、平行方向に磁場をそれぞれ印加することによって各温度における磁場-臨界電流特性を得た。使用したBSCCO2223テープは77K、自己磁場下において臨界電流が120Aのものである。

Fig. 5 に本実験で得られたBSCCO2223テープの磁場-臨界電流特性および住友電気工業株式会社により提供されたBSCCO2223テープの磁場-臨界電流特性を示す(黒塗りシンボル: 実測データ、白抜きシンボル: 住友電気工業株式会社提供データ)。Fig. 5 より、本実験で得られたデータと住友電気工業株式会社が提供しているデータがよく似た傾向を示していることが確認できる。本実験では各温度における磁場-臨界電流特性を臨界電流解析に十分なデータ数取ることができなかつたため、解析には住友電気工業株式会社が提供している磁場-臨界電流特性を用いることとした。



(a) Perpendicular



(b) Parallel

Fig. 5 Magnetic Field-Critical Current Characteristics of BSCCO2223 Tape

2-2. 臨界電流解析

2-2-1. 解析方法

BSCCO 2223 テープの磁場-臨界電流特性より10枚積層BSCCO 2223ケーブルの臨界電流を解析的に求める方法を示す。本解析ではFig. 6に示すように、電流をz軸方向に流した場合のxy平面に平行な方向に生じる磁場の分布を、2次元静磁場の支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -j_z \quad (1)$$

を有限体積法により解くことで得る。境界条件は無限遠方で $A_z=0$ である。得られた磁場分布とBSCCO2223テープの磁場-臨界電流密度特性を表す近似式より、臨界電流密度分布を求める。

BSCCO2223テープの磁場-臨界電流密度特性を表す近似式の1つとして、式(2)のような対数近似が提案されている[2]。

$$J_c = a + b \ln B \quad (2)$$

住友電気工業株式会社のデータより得られる係数をTable 1に示す。Table 1では、式(2)における係数を垂直磁場の場合に a_{\perp} 、 b_{\perp} 、平行磁場の場合に a_{\parallel} 、 b_{\parallel} としている。また、ある磁場での臨界電流値は、磁場角度に対して線形に変化せず、垂直磁場の影響をより多く受けることが知られている[3]。本解析では、この影響を考慮に入れ、以下の近似式を用いる。

$$J_c = a' + b' \ln B \quad (3)$$

$$a' = a_{\parallel} - (a_{\parallel} - a_{\perp}) \sin \phi \quad (4)$$

$$b' = b_{\parallel} - (b_{\parallel} - b_{\perp}) \sin \phi \quad (5)$$

$$\phi = \arcsin \left(\frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \right) \quad (6)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (7)$$

以下に解析手順を示す。

1. 初期臨界電流密度として十分大きな電流密度を仮定する。
2. 2次元静磁場の支配方程式からベクトルポテンシャル分布を求める。
3. $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ の関係式から磁場分布を求める。
4. 磁場と臨界電流密度の関係式(3)~(7)から各格子点における臨界電流密度 $J_{c\text{new}0}$ を決定する。
5. 前回の反復により決定した臨界電流密度 J_{Cold} と手順4で求めた臨界電流密度 $J_{c\text{new}0}$ の関係が、 $J_{\text{Cold}} > J_{c\text{new}0}$ の場合、 $J_{c\text{new}} = J_{\text{Cold}} - (J_{c\text{new}0} - J_{\text{Cold}}) / 2$ を新たな臨界電流密度とする。 $J_{\text{Cold}} < J_{c\text{new}0}$ の場合、 $J_{c\text{new}} = J_{c\text{new}0}$ とする。
6. $J_{c\text{new}}$ と J_{Cold} の差が十分小さくなるまで2から5の手順を繰り返す。

以上の手順より求めた、各格子点での臨界電流密度より10枚積層HTSケーブルの臨界電流値を決定する。

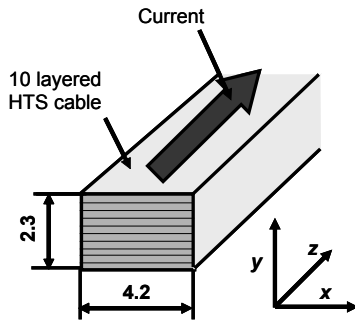


Fig. 6 Analytical Model

Table 1 Coefficient of Approximation Formula

T	a_{\perp}	b_{\perp}	a_{\parallel}	b_{\parallel}
20	3.49×10^8	-1.06×10^8	5.36×10^8	-1.02×10^8
30	2.62×10^8	-9.97×10^7	4.34×10^8	-9.52×10^7
40	1.78×10^8	-9.46×10^7	3.40×10^8	-8.89×10^7
50	1.03×10^8	-8.73×10^7	2.49×10^8	-8.02×10^7
60	3.81×10^7	-6.87×10^7	1.64×10^7	-6.75×10^7
70	-9.00×10^6	-5.52×10^7	-8.34×10^7	-4.77×10^7
77	-3.21×10^7	-4.54×10^7	-4.19×10^7	-3.43×10^7

2-2-2. 解析結果

Fig. 7 に得られたケーブル内の磁場分布、臨界電流密度分布を示す。磁場分布、電流密度分布は温度によってほとんど変化しなかったため、代表として 60K の時の分布を示す。磁場は中心で低く、中心から離れるにつれて高くなっている。また、同じ磁場の点であっても垂直磁場成分が大きい点で電流密度が低く、平行磁場成分が小さい点で電流密度が高くなっており、高温超伝導体の異方性を再現できていると考えられる。

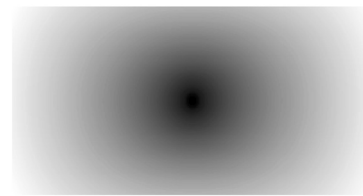
10 枚積層 HTS テープの各温度における臨界電流値を Fig. 8 に示す。温度の低下にともない臨界電流値がほぼ線形に増加していることが確認された。しかしながら、77K における臨界電流値が実測値である 520A より低かった。本来であれば、自己磁場の影響を除いた磁場-臨界電流密度特性を利用する必要があるが、本解析ではその影響を取り入れることができなかったため、臨界電流値が実験により求めた臨界電流値より小さくなったものと考えられる。

3. 10 枚積層 HTS ケーブルの接合試験

温度低下にともなう臨界電流の上昇と接合抵抗の変化の関係を評価するために、一定接合応力を接合部に負荷できる装置を製作し、その装置を用いて温度-接合抵抗特性を取得した。

3-1. 実験装置と試験用ケーブル

Fig. 9 に製作した装置を示す。この装置は Fig. 3 の装置の応力負荷部を変更したものである。V1~V6 は電圧端子位置、T1~T4 は温度計設置位置、S1、S2 はひずみゲージ設置位置を表している。応力負荷部における真鍮部の内側はめねじ構造となっており、



0.020693 B [T] 0.95650

(a) Magnetic Field Distribution



6.2319x10⁷ J [A/m²] 4.4211x10⁸

(b) Current Density Distribution

Fig. 7 Analytical Results

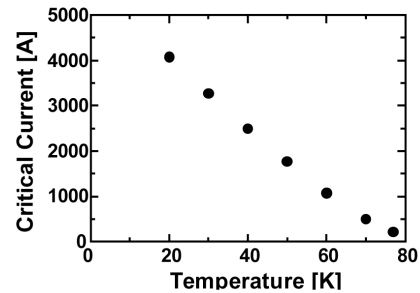
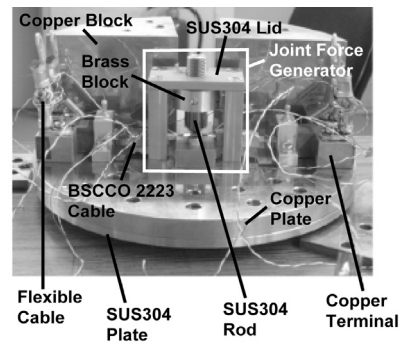
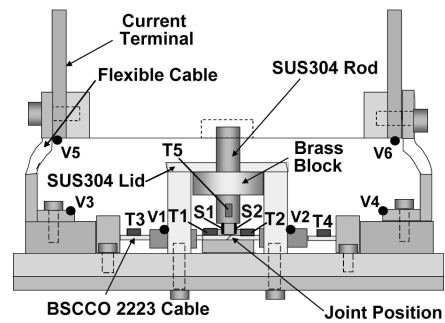


Fig. 8 Predicted Critical Current



(a) Photograph



(b) Schematic View

Fig. 9 Experimental Set-up

また SUS ロッドはおねじ構造を有している。真鍮部を時計回りに回転させたとき、真鍮部は SUS ロッドの上方に移動しようとするが上蓋により真鍮部の移動が妨げられるため、SUS ロッドが下方に移動する。このとき SUS ロッドの下に BSCCO 2223 ケーブルを置くことで接合部に圧縮応力を負荷することができる。また、SUS ロッドと上蓋はキー溝構造を有しており、SUS ロッドが回転することなく移動できる構造になっている。

Fig. 10 に実験に使用する BSCCO 2223 ケーブルを示す。このケーブルは BSCCO 2223 テープを 10 枚積層し、低温はんだで束ねたものである。接合面はケーブルの長手方向に対して 45 度傾いた形状となっており、 $3\mu\text{m}$ のアルミナ球による研磨処理がなされている。

3-2. 実験

伝導冷却体系において Fig. 9 の実験装置を使用し、BSCCO 2223 積層ケーブルの接合試験を行った。結果の説明で用いられる接合抵抗は Fig. 9 の V1-V2 間での電圧降下と印加電流より算出したもの、ケーブルの温度は Fig. 9 の T1 での温度、接合部に負荷した応力は、ひずみゲージ S1、S2 で計測したひずみから算出した応力の平均である。

実験装置組立時の応力が 100MPa の場合の電流－接合抵抗特性を Fig. 11 に示す。過去に液体窒素浸漬冷却体系において BSCCO2223 ケーブルの接合試験を行った際には接合抵抗が数 $\mu\Omega$ 程度であったが[1]、本試験では $200\mu\Omega$ 以上とかなり高めの接合抵抗が得られた。本実験装置では熱ひずみによる接合面の脱離を防ぐために Fig. 9 に示すようにフレキシブル端子を使用している。接合抵抗が高くなってしまったのは、このフレキシブル端子を電流供給部に接続する際に生じる変位、モーメントが BSCCO 2223 ケーブルの接合面のずれを引き起こしたためであると考えられる。

また、接合抵抗が数 $\mu\Omega$ 程度の場合、電流の増加にともない接合抵抗は単調に接合抵抗が上昇することが過去の研究により明らかにされているが[1]、本試験結果では、電流の増加にともない、接合抵抗値は一旦、増加してから減少するという結果が得られた。これは、ある値より大きな電流値では接合部のジュール発熱にともなう温度上昇による超伝導ケーブルの膨張が、接合面でのず

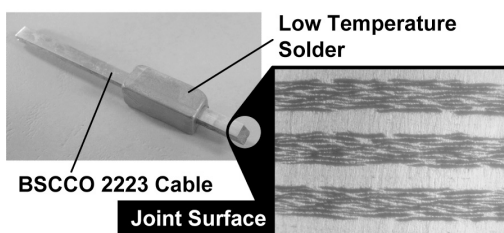


Fig. 10 Test Cable

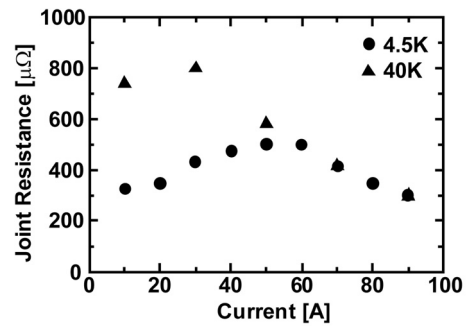


Fig. 11 Current-Joint Resistance Characteristic

れを緩和したためであり、接合抵抗が高い場合に特有の現象であると考えられる。

4. まとめ

BSCCO 2223 ケーブルのバットジョイントにおいて観察される臨界電流の向上による接合抵抗の低減効果の度合いについて定量的な考察を加えることを目的として、実験データと解析に基づく BSCCO 2223 ケーブルの臨界電流の予測、および新たな接合試験機の製作とその試験機での接合試験を行った。

臨界電流解析では、解析コードの妥当性を得ることはできたが、解析に導入した実験データが自己磁場の影響を考慮していなかったものであったため、正確な臨界電流の予測のために、今後は BSCCO 2223 テープの自己磁場の分布を実験的に取得することが必要である。

また、本年度、製作した接合試験機では、組立時の不具合により、温度低下にともなう臨界電流の上昇と接合抵抗の変化の関係を評価するために必要なデータを取得することができなかった。本年度の装置の問題を踏まえて、また、磁場下での接合試験を見据えて、来年度は装置を改良し、接合時の磁場－温度－接合抵抗特性の評価を行う予定である。

参考文献

- [1] S.Ito, H.Hashizume "Overview of fundamental study on remountable HTS magnet", Fusion Engineering and Design, 81 (2006) pp. 2527-2533
- [2] S. Kobayashi, T. Kaneko, T. Kato, J. Fujikami, K. Sato, "A novel scaling of magnetic field dependencies of critical currents for Ag-sheathed Bi-2223 Superconducting tape", Physica C, 258 (1996) pp. 336-340
- [3] 松下照夫、「磁束ピンニングと電磁現象」、産業図書株式会社