

大電流容量 ReBCO 導体の機械的接合試験

Mechanical Joint Test of ReBCO Conductor Having Large Current Capacity

伊藤 悟¹, 橋爪 秀利¹, 大日方 達也¹, 川井 健司¹, 清野 祐太郎¹, 小黒 英俊²

¹東北大・工, ²東北大・金研.

S Ito¹, H. Hashizume¹, T. Ohinata¹, K. Kawai², Y. Seino² and H. Oguro²

¹ Faculty of Engineering, Tohoku University

² Institute 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。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ジュール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。また、分割型高温超伝導マグネットに用いる高温超伝導線材としては、強磁場環境下において比較的臨界電流値を高く保つことができる REBCO 系(YBCO, GdBCO など)高温超伝導テープが適していると考えられる。

これまでの研究において、~2 kA 級の REBCO 導体を製作して、Fig. 2 に示すような様々な構造の機械的接合法の接合抵抗を評価してきた[4][5]。しかしながら、ヘリカル型原型炉 FFHR-d1 においては、100 kA 級の導体が必要とされており[6]、今後は数 10 kA~100 kA 級の大型導体を用いた接合試験(実証試験)を行う必要がある。また、ヘリカル型原型炉の分割型高温超伝導マグネット設計オプションでは、20 K~77 K, 13 T の運転条件を想定しているが、これまでの研究においては 77 K、自己磁場の環境下で接合抵抗を評価してきたものがほとんどである。

事前に大型導体の接合構造を検討する、また大型導体の接合試験結果を元に接合構造を改善するためには、接合抵抗の導体構造・接合部構造依存性、温度・磁場依存性を要素試験および数値解析により予測する手法を確立する必要がある。高温超伝導導体の機械的接合試験においては、接合部を含む区間の電圧降下と通電電流から接合抵抗を評価する。この接合抵抗には、主に以下の 4 つの抵抗要因が含まれると考えられる。

- 1) 機械的接合面(接触面)における接触抵抗
- 2) 高温超伝導導体を構成する材料の電気抵抗
- 3) 高温超伝導導体内のはんだ接合部の抵抗

4) 高温超伝導体の磁束流抵抗

以上の抵抗要因を要素試験および数値解析によって明らかにし(文献値があるものについてはそれを採用し)、その後、各接合構造を模擬した数値解析モデルを使って電流分布解析を行うことで、接合抵抗の予測が可能となる。ここで、Holm の接触理論[7]によると接触抵抗は接触面の酸化皮膜に起因する皮膜抵抗と、真実接触面積が接觸面積より小さいことに起因する集中抵抗に分けられる。集中抵抗は接觸面を構成する材料(接点材料)の電気抵抗率に比例するため、機械的接合における接合抵抗は温度、磁場に依存することが予想される。

上記の接合抵抗予測手法の確立に向け、まず、本年度は GdBCO テープの 1 枚同士のラップジョイント体系における接合抵抗の温度・磁場依存性を実験により評価した。実験条件は温度 10 K~70 K、磁場 0 T~15 T とした。また、電流分布解析を用いて実験的に求めた接合抵抗から接触抵抗を抽出し、Holm の接触理論と比較を行った。

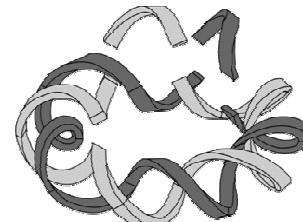


Fig. 1 Schematic illustration of a remountable (demountable) high-temperature superconducting magnet.

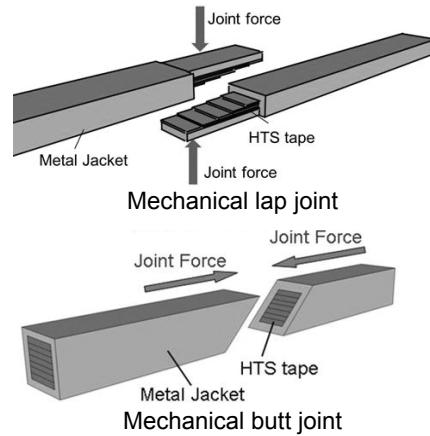


Fig. 2 Schematic illustrations of mechanical joints of a stacked REBCO conductors with a metal jacket.

2. 接合試験

2-1. 実験方法

5 mm 幅の GdBCO テープ(フジクラ社・FYSC-SC05)一枚同士の機械的ラップジョイント試験を行い、接合抵抗の温度・磁場依存性を評価した。Fig. 3 に使用した GdBCO テープの構造を示す。なお、サンプルの臨界電流は自己磁場、77 Kにおいて 260 A である。Fig. 4 に試験部の概要を示す。GdBCO テープの銅層同士を直接接触させるドライジョイント(直接接合)と銅層間に厚さ 50 μm のインジウム箔(以後 In 箔)を挿入する In 箔挿入接合の 2 種類の接合方法における接合抵抗を評価した。皮膜抵抗の影響を軽減するために接合面を粒径 5 μm のアルミナ粒子で研磨し、アセトンとエタノールで洗浄した後、ボルト締めにより 100 MPa の接合応力を加えた。接合抵抗は通電電流と接合部を含む電圧タップの電圧から計算した。試験部は GM 冷凍機付のクライオスタット内に設置されており、ヒーターによって温度が調整されている。温度は GdBCO テープのハステロイ面に取り付けたセルノックス抵抗温度計によって測定した。また、15T-CSM のボア内に試験部をインストールし、最大 15 T の磁場を GdBCO テープの *c* 軸方向に印加した。

2-2. 実験結果

0 T における接合抵抗の温度依存性を Fig. 5 に、10 K における接合抵抗の磁場依存性を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の縦軸 ΔR は各磁場中における接合抵抗を 0 T における接合抵抗で規格化したものである。直接接合の場合、接点材料は銅であり、In 箔挿入接合の場合、接点材料は銅とインジウムである。実際に使用した接点材料(GdBCO テープの銅層・In 箔)の抵抗率の温度・磁場依存性を実験的に評価した結果を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 5, 6 に示すように接点材料の違いによって接合抵抗の温度、磁場依存性の特性が異なることが確認できたが、これは Fig. 7, 8 に示すように接点材料自体の抵抗の

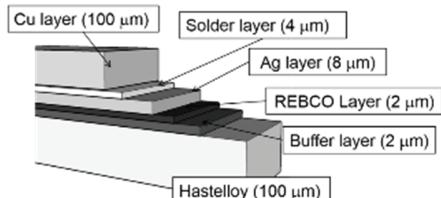


Fig. 3 Configuration of a GdBCO tape sample.

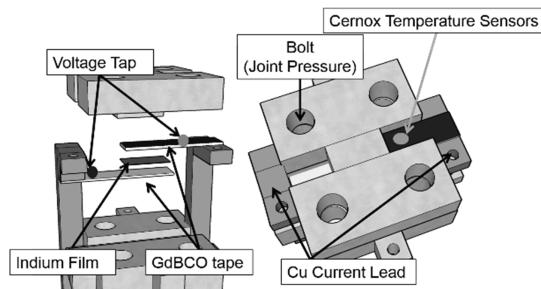


Fig. 4 Test section of the joint test.

温度・磁場依存性が異なり、それによって接触抵抗の温度・磁場依存性が変化するためであると考えられる。

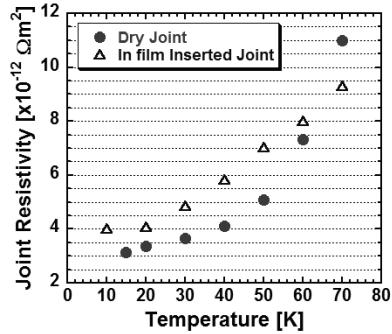


Fig. 5 Relationship between temperature and joint resistivity at 100 A.

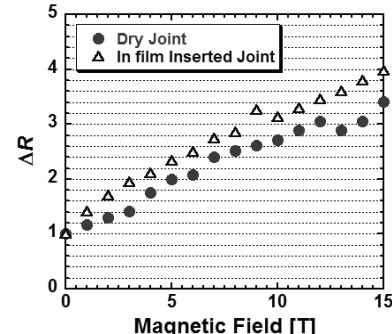


Fig. 6 Relationship between magnetic field and joint resistivity at 100 A.

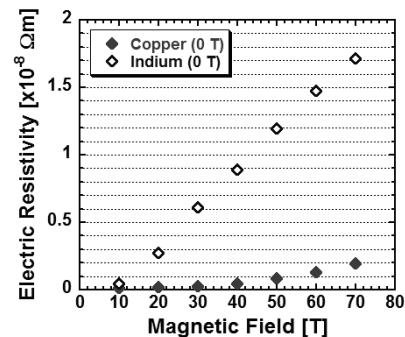


Fig. 7 Relationship between temperature and electric resistivity.

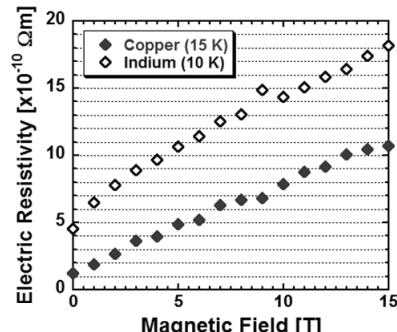


Fig. 8 Relationship between magnetic field and electric resistivity.

3. 電流分布解析

3-1. 解析方法

続いて、電流分布解析を用いて接合試験で評価した接合抵抗から接触抵抗を抽出し、接触抵抗の温度依存性を定量的に評価した。直接接合、In 箔挿入接合の場合の数値解析モデルをそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 に示す。絶縁層である中間層には電流が流れないと想定したため、モデル化において中間層とハスティオイ層は除外した。接触抵抗は仮想導体により模擬している。直接接合の場合は接触抵抗を模擬する仮想導体が 1 ケ所、In 箔挿入接合の場合は 2 ケ所になっている。銅層、In 層の電気抵抗率は実験で測定した値を使用し、銀層については文献値 [8] を用いた。はんだ接合部(はんだ層)については、過去の研究において、同構造の GdBCO テープのはんだ接合(ラップジョイント)の接合抵抗を評価した例[9]があり、その実験結果と数値解析を用いて算出した。はんだ接合の接合抵抗率(電流と電圧降下から実験的に求めたもの)からははんだ層の接合抵抗率(はんだ層のみが寄与する抵抗分)を求めるための数値解析モデルについては、Fig. 11 に示すものを使用した。モデル内に存在する 3 つのはんだ層の接合抵抗率は全て同じであると仮定して計算を行った。

本解析では商用有限要素法コードの COMSOL Multiphysics 4.2a を用いた。支配方程式は静電ポテンシャルの式(ポアソン方程式)である。また、Fig. 9 に示すように超伝導層の両端に境界条件として電位ポテンシャルを設定し、その電位差は 0.1 mV とした。要素は 4 接点アイソパラメトリック要素を用い、要素数は約 43,000 個である。接触抵抗を仮定し、全計算領域のジュール損失を算出することにより接合抵抗を評価することが可能である。Fig. 5 の実験結果と一致する接合抵抗を与える接触抵抗の仮定値が、接合試験で評価した接合抵抗から抽出される接触抵抗である。

得られた接触抵抗を最終的には Holm の接触理論で説明される以下の式を用いて検証した。

$$R = R_f + R_c = R_f + \frac{\rho}{2a} \quad (1)$$

ここで、 R は接触抵抗、 R_f は皮膜抵抗、 R_c は集中抵抗、 ρ は接点材料の電気伝導率、 a は真実接触部の半径である。

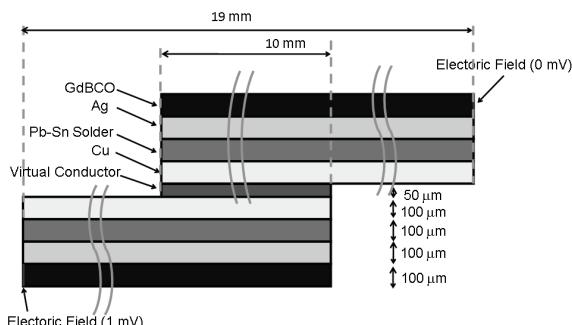


Fig. 9 Numerical model for the dry joint.

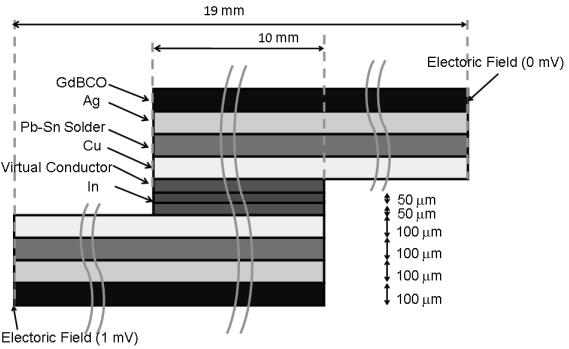


Fig. 10 Numerical model for the indium film inserted joint.

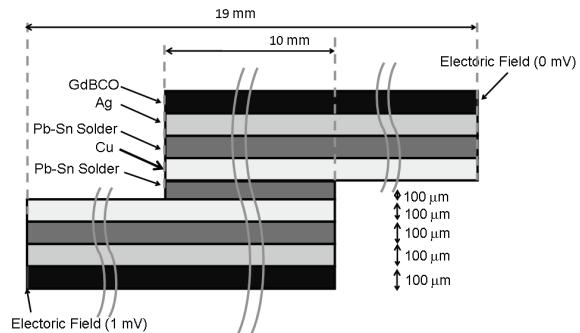


Fig. 11 Numerical model for the soldered lap joint.

3-2. 解析結果

Fig. 12 にははんだ層の接合抵抗率の解析結果を示す。接合抵抗率は温度の低下とともに減少しているが、はんだ層が、PbSn はんだ、銅と PbSn はんだの合金層、すなわち金属材料から構成されていることを考えれば、これは定性的に見て妥当な結果である。得られたはんだ層の接合抵抗率を用いて直接接合および In 箔挿入接合の接合試験結果より接触抵抗率を抽出した結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 のプロットは抽出した接触抵抗率、実線・波線は接触抵抗に皮膜抵抗が含まれていないと仮定して 70 K の接合抵抗と Fig. 7, Fig. 8 の銅層、In 箔の抵抗率を元に Holm の接触理論の式(1)を用いて計算した接合抵抗である($R_f=0$ としている)。なお、式(1)を用いた計算において、接合部は塑性変形しており、温度変化によって真実接觸面積は変化しないと仮定している。抽出した接合抵抗の値は温度の低下とともに減少しているが、接合抵抗に皮膜抵抗が含まれていない(接合抵抗は集中抵抗のみで表わされる)と仮定して計算した結果とは一致していない。これは、接合試験のサンプル準備において皮膜抵抗の影響が取り切れておらず、接合抵抗に皮膜抵抗が含まれていた可能性を示すものである。また、マシンタイムの関係上、取得データが限られており、再現性を確認するなど、データの精査も必要である。今後、再実験によって再現性を確認するとともに、皮膜抵抗の原因となる酸化物の物質特定とその電気抵抗率の温度依存性を文献調査、もしくは実験的に評価することで、実験結果を再度分析する予定である。また、接合抵抗の磁場依存性についての議論に必要なデータも順次取得し、結果の分析を進める。

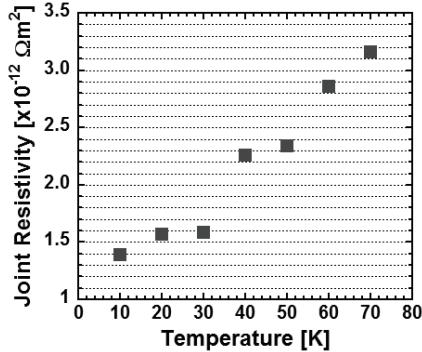


Fig. 12 Relationship between temperature and joint resistivity of a solder-layer.

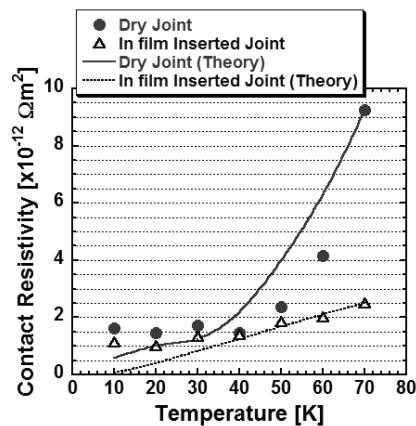


Fig. 13 Relationship between temperature and contact resistivity.

4. まとめ

大型の高温超伝導導体の機械的接合法における接合抵抗の導体構造・接合部構造依存性、温度・磁場依存性を要素試験および数値解析により予測する手法を確立するために、要素試験として GdBCO テープ1枚同士の機械的ラップジョイントにおける接合抵抗の温度、磁場依存性を実験的に評価した。その結果、接合抵抗の温度、磁場依存性の特性は接点材料の電気抵抗率の温度、磁場依存性によって異なることが確認できた。また電流分布解析により接触抵抗の温度依存性を評価し、Holm の接触理論と比較することで、その妥当性を検証した。接触抵抗には皮膜抵抗が含まれている可能性があり、今後は皮膜抵抗の原因となる物質の特定やその電気伝導率の評価が必要である。また、接触抵抗の温度依存性のみならず、磁場依存性についても詳細に分析していく予定である。

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 SC 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] Z. S. Hartwig, C. B. Haakonsen, R. T. Mumgaard, and L. Bromberg, "An initial study of demountable high-temperature superconducting toroidal field magnets for the Vulcan tokamak conceptual design", Fusion Engineering and Design, vol. 87, (2012), pp. 201-214.
- [4] K. Kawai, S. Ito, Y. Seino, N. Yanagi, H. Tamura, A. Sagara, H. Hashizume, "Optimization of a Mechanical Bridge Joint Structure in a Stacked HTS Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, (2013), pp. 4801704.
- [5] S. Ito, T. Ohinata, L. Bromberg, H. Hashizume, "Structure improvement and joint resistance estimation in demountable butt and edge joints of a stacked REBCO conductor within a metal jacket", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, accepted for publication.
- [6] A. Sagara, T. Goto, J. Miyazawa, N. Yanagi, T. Tanaka, H. Tamura, R. Sakamoto, M. Tanaka, K. Tsumori, O. Mitarai, S. Imagawa, T. Muroga, The FFHR design group, "Design activities on helical DEMO reactor FFHR-d1", Fusion Engineering and Design, vol. 87, (2012), pp. 594-602.
- [7] R. Holm, "Electrical contacts – Theory and Application", Springer Verlag, Berlin, (1967).
- [8] J.E. Jensen, W.A. Tuttle, R.B. Stewart, H. Brechne and A.G. Prodell, "Brookhaven National Laboratory Selected Cryogenic Data Notebook", BNL 10200-R, (1980).
- [9] 寺崎義朗, 柳長門, 保坂友一朗, 内島健一朗, 森川惇二, 三戸利行, 小川雄一, 岩熊成卓, 「Mini-RT アップグレードに伴うイットリウム系超伝導線材の接続抵抗測定」, 第9回核融合エネルギー連合講演会予稿集, (2012), 28A-76P.