

積層高温超伝導テープ線における電流分担と接続抵抗

佐浦 啓介 (指導教員 渡邊清政)

1. 緒言

高温超伝導(HTS)は臨界温度が高く、液体窒素で冷却することによって電流密度を銅線よりも 1~2 桁大きくできる等の優れた特性を持ち、大電流を扱う核融合発電や MRI 等様々な分野への応用が期待されている。しかし HTS は脆い酸化物であり、加工が困難で形状の自由度が低いという大きな欠点がある。そのため HTS 線材の殆どすべてがテープ状に形成されており、高温超伝導体の大電流環境下での利用には線材加工の最適化が重要である。HTS 線材の加工方法として、細線化や燃り加工、及び積層化などがあげられる。単純な積層化は、細線化や燃り加工に比べ加工が容易であり、与えるひずみや張力が小さいという点で優位である。しかし、積層超伝導体の電流導入部における電流伝達メカニズムに関する研究はあまり行われておらず、電流導入部の最適構造の製作指針は明らかにされていない。

ITER トロイダル磁場コイルジョイント部の接続抵抗計測試験において、銅ブスバーの発熱抵抗を軽減する目的で添わせた HTS ブスバーに接続抵抗の電流値依存性が観測された。本研究では、この特異な電流電圧特性を解析することで積層超伝導体の電流導入部における電流伝達メカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

積層 HTS 線材を銅ケースに収納した HTS ブスバーを 2 つ作製し、厚板の銅ブスバー側面にはんだ接合して、ITER トロイダル磁場コイルジョイント部の接続抵抗計測試験に使用した。サンプル電流は 150A/s の速度で変化させ、抵抗測定のため 15, 30, 45, 60, 68.1 kA の電流値に達した際には各 3 分

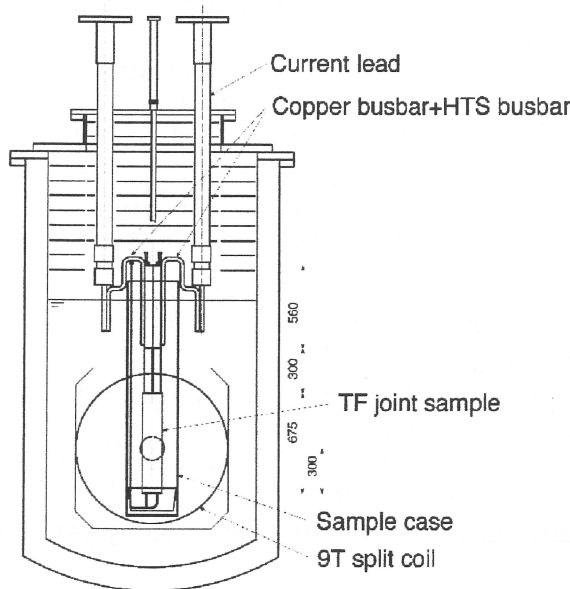


Fig. 1 Setup for examination of an ITER-TF joint sample.

間の電流保持を行った。銅ブスバーと HTS ブスバーの各々の電流値はログスキーコイルを用いて測定した。

用いた実験装置を Fig.1 に示し、HTS ブスバーの詳細と各種測定点を Fig.2 に示す。HTS ブスバーは最小曲率 50mm で U 字に折り曲げた銅ケース(1.1m)に 35 枚束ねた HTS 線材(DI-BSCCO TypeH)を差し込み、鉛ずず共晶はんだを流し込み作製した(Fig.2 上図)。この際、電流の均流化を目的に全ての HTS 線材の幅狭面と銅ブスバーが接触するよう製作した。スプリットコイルは液体ヘリウムで冷却され、最大で 9T の磁場を印加可能である。磁場中心にステンレス容器に収納された TF コイルジョイントサンプルを設置している。TF コイルジョイントサンプルはヘリウム冷凍機からの超臨界圧ヘリウムによって強制冷却されている。実験中の He の流量は 1~3g/s、入口圧力は 0.3~0.5MPa である。

3. HTS ブスバーの電流特性

Fig.3 に HTS と銅のそれぞれのブスバーの電流電圧特性とブスバー全電流値に対して HTS 部に流れた電流比を示す。HTS ブスバーの電流電圧特性が上に凸な曲線となっている、つまり接続抵抗が電流値により変化する性質(電圧[電流]の増加とともに抵抗値が増加)を持っているということが判明した。HTS ブスバーの接触抵抗は HTS ブスバーに流れる電流の増加に伴って HTS ブスバーの抵抗値が増大し、20kA 通電時には 1kA 通電時の 2 倍以上の抵抗値になっていることが明らかになった。これは単層の超伝導体には無い、積層体ならではの特性であると考えられる。

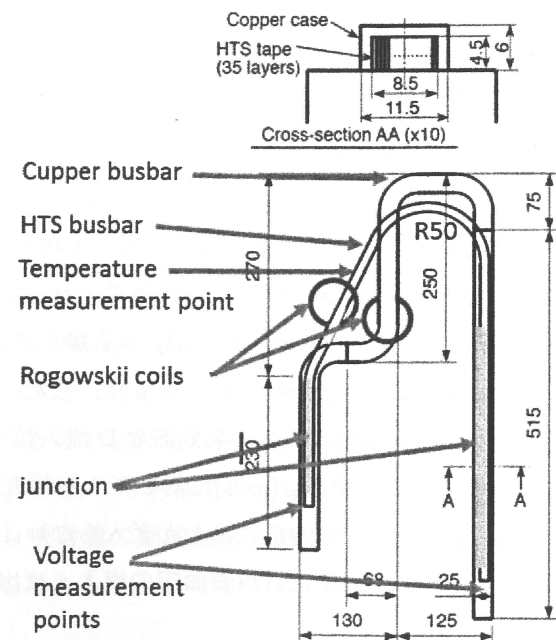


Fig.2 Setup for examination of an ITER-TF joint sample.

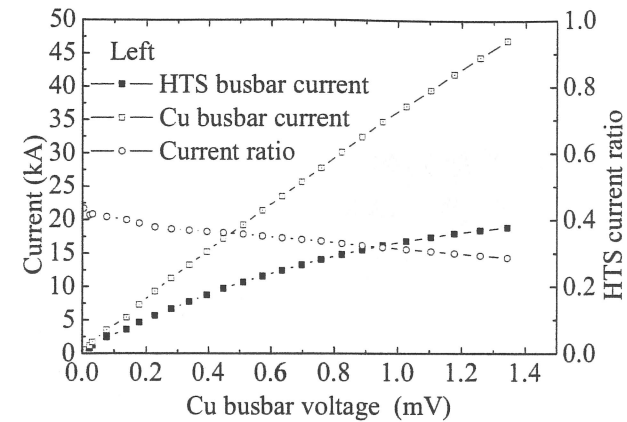


Fig.3 Currents of HTS busbar and Cu busbar as function of Cu busbar voltage

4. 積層超伝導体の電流伝達メカニズムの考察

前節の HTS ブスバーの抵抗値が電流依存性を持つという特性は超伝導体を積層化したことによって引き起こされると考えられる。抵抗値の電流依存性を説明するために数値シミュレーションを行う。

Fig.4 に数値シミュレーションに用いた積層化された超伝導体の電気特性モデルを表す。主電流は Fig.4 の紙面に垂直方向に電流が流れており、接続部では、Fig.4 の I_{perp} , $I_{||}$ の経路で電流が銅ブスバーから HTS ブスバーに乗り移ると仮定している。この時、銅ブスバーと HTS 線材幅狭面が一樣な抵抗値 $R_{||}$ で接続し、幅広面側は積層化 HTS 線材同士及び銅ケースと超伝導テープ線材間が一樣な抵抗値 R_{perp} で接続していると仮定する。また、銅ケースと銅ブスバー間の抵抗値を R_{Cu} とおく。このようなモデルでは、 $R_{||}$ が十分小さい時、接続部の電流経路は $I_{||}$ が支配的となるので、HTS ブスバーの電流は電圧にほぼ比例し、HTS ブスバー全体の I_c 値(臨界電流値の合計)に達するとその値で飽和すると考えられる(Fig.5 破線参照; 詳細後述)。一方、 R_{perp} に比べて $R_{||}$ が十分大きい時、接続部の電流経路は I_{perp} が支配的となるので、第一層の HTS 線材の電流値が I_c 値を超えるまでは、他の層の HTS 線材に電流の乗り移りが起こらないと考えられる。したがって、HTS ブスバー全体に電流が乗り移る際には、Fig.4 のより銅ケースに近い HTS 線材が I_c に達した後、その一つ隣の HTS 線材へと順々に電流が乗り移ると考えられる。この場合、銅ケースから遠い HTS 線材ほど接触面の数が増えて実効的な接続抵抗が大きくなると考えられる。そのため HTS ブスバーの電流値が増加するとともに抵抗値が増加するよう振舞うと予想される(Fig.5 一点鎖線参照)。実際の実験では上記の 2 つが競合して起こ

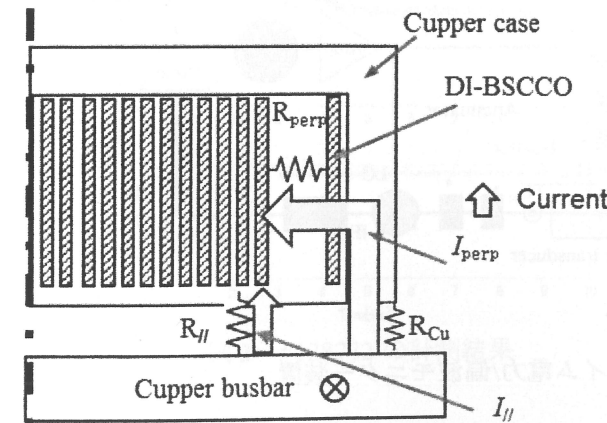


Fig.4 Schematic illustration of HTS busbar and current.

ていると考えられる。

以上の仮説の元に行った数値シミュレーション結果を Fig.5 に示す。黒点は Fig.3 のそれと同じ実験結果で実線が実験結果を再現した場合のシミュレーション結果である。この時、仮定した接触抵抗率は $R_{||}=30p\Omega m^2$, $R_{perp}=150p\Omega m^2$ で、この値は接続長が 100 mm 程度のはんだ付けの接続抵抗率の目安である $21p\Omega m^2$ [1] に比べてそれぞれ 1.5 倍と 7.5 倍である。このことから R_{perp} は目安値と同程度であるものの $R_{||}$ の値は目安値より一桁近く大きいことが分かった。Fig.6 に DI-BSCCO の断面図を示す。黒い部分が超伝導部で色の薄い部分はシース部を示す。 $R_{||}$ の値が R_{perp} の値より大きい理由として、Fig.6 からわかるように DI-BSCCO の端部が曲面となっていること、また端部から超伝導部分までの距離が幅広面からの距離より数倍長いことによる影響が考えられるが、製作上の問題の可能性も残されているため、今後の検証実験が必要である。一方、積層導体で幅広面を接触させる場合は積層枚数が多くなる程接触面の数が増えて実効的な接続抵抗が大きくなるため、その効果を考慮する必要がある。

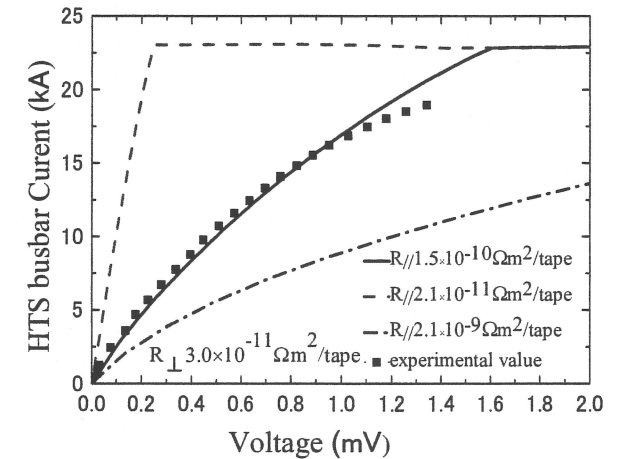


Fig.5 Comparison between simulation and experimental value.

▲ DI-BSCCO Type H

Fig.6 Sectional view of DI-BSCCO. [2]

5. 結言

積層した HTS 線材を銅ケースに収納した複合ブスバーの電流特性を測定したところ接続抵抗値が電流値に依存することが判明した。積層した HTS 線材間では外側より順に臨界電流に達することを考慮した解析モデルを構築することにより、抵抗値の電流依存性を再現することに成功した。その結果、幅狭面の接続抵抗率は幅広面よりも 5 倍程度高いと推察される。幅狭面の接続抵抗率が高いことが HTS 線材の構造に由来する場合、積層した HTS 線材を偏流のない大電流導体として利用する場合に接続長や接続構造の見直しが必要となるため、幅狭面の高い接続抵抗率の原因の究明に向けてさらなる研究が必要である。

参考文献

- [1] 田中光雄 他, 福井大学研究紀要第 38 号, pp.351-358, 2008
 - [2] 住友電工 (http://www.sei.co.jp/super/hts/type_h.html)
- 発表実績
1. 秋季第 89 回低温工学・超伝導学会(名古屋, 2013)
 2. Plasma Conference 2014 (Toki, 2014)