

前駆体膜を利用した $GdBa_2Cu_3O_{7-y}$ 薄膜線材の超伝導接続に関する基礎的研究

宮島, 友博

<https://doi.org/10.15017/4060110>

出版情報 : 九州大学, 2019, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 宮島 友博

論 文 名 : 前駆体膜を利用した $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜線材の超伝導接続に関する
基礎的研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) は、様々な超伝導物質の中でも約 90 K 以上の高い臨界温度 (Critical temperature: T_c) を有し、磁場中における臨界電流密度 (Critical current density: J_c) が高いことから、磁気共鳴画像 (Magnetic resonance imaging: MRI) 装置や核磁気共鳴 (Nuclear magnetic resonance: NMR) 装置における超伝導電磁石としての応用が期待されている。REBCO を MRI や NMR などに応用するためには、臨界電流 (Critical current: I_c) が数百 A 程度を有する数十 km 長の線材開発が求められるが、現有プロセスでは全長に亘って高 I_c を有する線材長は約 1 km が限度である。そのため、REBCO 線材同士を低い電気抵抗で接続する手法の開発が行われ、線材の超伝導層同士を接続する超伝導接続の成功が 2014 年に世界で初めて報告された。今後、REBCO 線材の電力機器応用には接続技術を発展させていく必要があり、そのためには様々な接続手法でアプローチし、知見を得ていくことが不可欠であるが、現在までその知見は十分ではない。

既存の超伝導接続手法では接続界面に空隙や第二相の生成が報告され、これらは通電性能の低下を招く要因となっている。本研究では接続界面でのこれらの発生を抑制し得る新たな接続手法を提案し、接続条件と組織や性能との相関を系統的に調査して接続メカニズムを明らかにすることを目的とした。なお、本論文は全 6 章で構成され、それぞれの概要は以下のとおりである。

第 1 章では、REBCO 線材における接続技術の重要性と先行研究、本研究の目的を示した。

第 2 章では、既存の接続手法における組織制御の課題を解決しうる新接続手法を提案し、試料の作製条件と評価方法について述べた。

第 3 章では、第 2 章で提案した新接続手法の有用性を検討するために、接続前の前駆体膜の組織観察、接続試料の電流特性の評価および組織観察を行った。その結果、接続体の作製に成功し、その T_c は 90.8 K と高く、接続界面には第二相や空隙がほとんど存在しなかった。これらの結果より、本研究で提案する新接続手法の有用性が示された。

接続界面抵抗率 (Joint boundary resistivity: R_j) は $3.5 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$ であり、Ag 安定化層を介した接続における報告値 ($3.7 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$) と同程度であった ($8 \sim 20 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$)。 J_c は 18.9 A/cm^2 であり、既往の報告値 (5600 A/cm^2) より低かった。これらの原因としては、接続部の GdBCO 結晶中における酸素ドープ量が低いこと、接続界面において結晶方位ズレに起因する歪みが存在することが挙げられた。

第 4 章では、接続部に印加された圧力の平均値 (Locally applied pressure: P_L) が接続試料の電流特性、機械的特性、組織に及ぼす影響を調査した。圧力条件を振ったうち、最も低圧の $P_L = 2.5 \text{ MPa}$ の試料では、他の試料に比べて R_j が大きく ($468 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$)、引張試験の結果から界面の密着性が低いことが示された。このことから、界面の密着性は R_j を大きく左右する因子であることが示された。

また、いずれの試料の R_j も Ag 安定化層を介した接続における報告値 ($3.7 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$) と同程度であった ($8 \sim 20 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$)。この原因として、接続界面における密着性の他に、歪み、第二相、空隙、などが考えられた。また、 P_L の増加に伴い接続面積および機械的特性は向上するが、 T_c および J_c は低下することが明らかとなった。XRD 測定および TEM 観察の結果から、 P_L の増加に伴う接続面積の増加が接続部内部への酸素拡散を困難にし、接続部内部で酸素不足が引き起こされ、 T_c および J_c の低下につながったことが示された。

接続部の断面 TEM 観察の結果から、 P_L が 65 MPa の試料の接続部の中心部において液相を介したことが示された。接続熱処理時に液相を介してしまうと他の接続手法と同様に組織の制御が困難になり、本研究で提案する接続手法の有用性を失ってしまう。そのため、接続条件と液相の発生との因果関係についての調査が求められることを述べた。

第 5 章では、接続条件と液相の発生との因果関係について調査するために、圧力印加時の温度および酸素分圧 (PO_2) を変化させた時の GdBCO の分解挙動を調査した。その結果、温度および PO_2 に応じて接続熱処理時に液相を介する条件と介さない条件とに分かれることが明らかとなった。得られた結果を GdBCO の平衡状態図にまとめたところ、対向部においては酸素流路が閉ざされているため、対向部が感じる PO_2 は非対向部よりも低いことが判明した。第 4 章において P_L が 65 MPa の試料で液相を介した組織が得られた原因は、接続面積の増加に伴い接続部の中心部における PO_2 の低下が顕著になったことであると示された。

第 6 章では、本論文を総括した。本研究で提案した「前駆体膜の結晶化と接続を同時に行う手法」では、他の手法に比べて空隙や第二相の生成を抑制できる可能性が示された。しかし R_j は高く、 J_c は低かった。それらの原因として、接続部内部への酸素拡散が困難であること、接続界面に方位ズレに起因する歪みが導入されること、を挙げた。それぞれの対策として、REBCO 線材に穴や溝を導入することで接続部内部への酸素流路を確保すること、接続後に歪みを解消する熱処理を施すこと、などを挙げた。

本研究で得られた知見は他の接続手法の研究に対しても有益な情報であり、接続に関する研究分野の発展に貢献し得ると考えられる。将来、実用的な接続技術が確立すれば、REBCO 線材の実用化が進展し、医療・分析機器の高性能化および小型化や、新たなエネルギー貯蔵・運搬・送電技術の実現が期待される。