

審査の結果の要旨

氏名 武田 泰明

武田泰明氏が提出した学位請求論文「**Bi2223**における粒間臨界電流特性制御と超伝導接合の創製」の審査結果を以下に記す。

Bi2223[(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y]は銅酸化物高温超伝導体の一つである。多結晶材料である銀シース多芯テープ線材はゼロ抵抗で流せる電流の最大値（臨界電流 I_c ）が高く、液体窒素（沸点 77 K）冷却の電力ケーブルや超伝導磁石への応用が進められている。超伝導磁石では線材をコイルにし、その末端を超伝導材料で接続する「超伝導接合」技術によって、減衰しない超伝導電流がコイルを流し続けることで実質的な永久磁石として利用されている。一方、**Bi2223** 線材間の超伝導接合技術は確立しておらず、広範な磁石応用が妨げられている問題があった。

Bi2223 線材間の超伝導接合は、接合の中間層にバルク形状の **Bi2223** 多結晶を用いることで実現できることが報告されているが、その I_c は線材の 1/100 程度と低かった。武田氏は、その要因が接合中間層の I_c が低いことであると考えた。

Bi2223 多結晶では、機械的な一軸プレスや圧延によって超伝導電流が流れる CuO_2 面が揃った c 軸配向組織が得られる。このため、圧延加工されたテープ線材の開発が主に行われている。線材の I_c を決める粒間臨界電流は、高純度化に加え、高密度化および微細組織の c 軸配向化により改善されることが知られている。しかし、接合中間層に代表されるバルク形状の試料には、線材が破壊されてしまう等の問題のため、圧延加工は採用できない。このように、バルク試料では、線材の材料開発で得られている従来の知見は適用できないため、空隙の多い組織しか得られないなど、課題が山積していた。そこで武田氏は、普遍的な粒間臨界電流の特性制御指針の確立を目的として、結晶粒の微細化による粒界特性の改善や、超伝導キャリア（ホール）密度が増加する Bi^{3+} サイトの Pb^{2+} 置換、過剰酸素量および金属不定比性の制御に着目した材料開発を行い、超伝導接合の創製を目指した。

本論文では、**Bi2223** における粒間臨界電流特性の制御指針の確立、およびそ

れを活用した超伝導接合の創製が記されている。論文は全 7 章から構成されている。

第 1 章では序論として、超伝導の基礎、銅酸化物超伝導体の特徴、Bi2223 の材料科学的な先行研究、Bi2223 線材の開発と応用の現状、および超伝導磁石についての研究背景を記している。

第 2 章では、原料、試料作製手順、および評価方法等、本研究の実験方法を示している。

第 3 章では、普遍的な粒間臨界電流特性の制御指針の確立についての研究がまとめられている。報告されている超伝導特性や材料開発の現状、およびそれらを踏まえ、Ag 管内で作製した焼結体、および Ag 箔内で作製した厚膜材料における特性制御を記している。低温・低 P_{O_2} 下での焼成および原料粉末への Bi2223 の混合による結晶粒の微細化、高濃度 Pb 置換およびアニールによる不定比化学組成の精密制御という、従来にない化学組成の複合制御により、高い粒間臨界電流特性が達成できることを示している。

第 4 章では、様々な線材とその接合についての背景を述べた後に、上記の特性制御指針を活用した線材間の超伝導接合の創製について記している。線材は 100 本以上の細線状の Bi2223 多結晶が Ag 中に埋まった構造をしている。この微構造に着目して、新規な機械加工および接合技術を開発した。具体的には、バルク中間層を介して全ての細線を露出させた線材を接合し、第 3 章で示した化学組成の複合制御を施すことで、接合 I_c が飛躍的に向上することを実証した。本接合で得られた超伝導特性は、永久磁石への実装を可能とする高いものであると結論付けている。

第 5 章では、創製した超伝導接合における接合機構を記している。接合界面付近の微細組織観察から、良好な粒子接触領域の形成と界面をまたいだ粒子成長という多結晶で特徴的な微細構造の発達により超伝導接合が達成されることを述べている。

第 6 章では、高 I_c 化を可能とする金属組成制御および超伝導接合の実装技術について示している。焼成時の低酸素分圧化により、従来よりも多くの Pb^{2+} を Bi^{3+} サイトに置換可能となり、超電導キャリア密度の増大が可能であることを述べている。また、接合の磁石実装にむけた基盤技術について記し、実際の磁石に使われる線材でも接合が可能であることを示している。

第 7 章では、一連の研究成果の総括と総合討論、および今後の展望を記している。

以上本論文では、Bi2223 における粒界特性や不定比化学組成に着目した普遍的な粒間臨界電流特性の制御指針、およびそれを活用した接合中間層を用いた超伝導接合の創製が詳述されている。本研究で確立した指針は、従来の線材開

発で培われた純度や組織に注目したものとは異なり、粒界特性や複合化学組成を精密に制御するという点で、多結晶材料の飛躍的な進展に大きく貢献するものである。得られた成果を活用した超伝導接合では、実用レベルの高い接合特性を世界で初めて実証しており、**Bi2223** 線材の広範な磁石応用を大きく推進するものとして高く評価できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。