

長尺高温超伝導(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+x} 多芯線材における電流輸送特性のモデリングと 特性評価手法に関する研究

呂, 琳

<https://hdl.handle.net/2324/4110417>

出版情報：九州大学, 2020, 博士(工学), 課程博士
バージョン：
権利関係：

氏 名 : 呂 琳

論 文 名 : 長尺高温超伝導(Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+x} 多芯線材における電流輸送特性のモデリングと特性評価手法に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

酸化物高温超伝導体は、従来材料を凌駕する臨界温度 (T_c) と臨界磁界を有しており、液体窒素冷却による電力ケーブルや、高磁界マグネット、小型軽量高効率の回転機などへの応用が期待されている。特にビスマス系高温超伝導体((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+x}、以下 Bi-2223 と略記)は約 110 K の高い T_c を有すると共に、比較的容易に線材化が可能であることから、高温超伝導体の中では最も早く線材化に成功し、近年では数百メートル級の長尺線材の量産化技術も確立され、電力ケーブルや高磁界マグネットなど多くの適用実績を有する。線材化においては、脆い超伝導セラミクスに可撓性を与えるため、多芯の超伝導フィラメントを銀合金シース内に埋め込んだ構造を有する。

超伝導線材の実用性能を決定づける最も重要な材料パラメータは、電気抵抗ゼロで輸送できる電流値 (臨界電流値 I_c) であり、 I_c を如何に増大出来るかが重要な研究課題となる。また、従来の金属系超伝導材料では、輸送電流の増大に伴う電圧状態への遷移は急峻であるため、電界基準によらず I_c はほぼ一定と見なせるのに対し、高温超伝導体では、電圧状態への遷移がなだらかに生じる為、電界基準の変化によって I_c 値は大きく変化する。応用機器によって運転時の電界は大きく変化することから、電圧状態への遷移の急峻さを示す電流-電圧 (I - V) 特性の把握が求められる。一般に電圧は電流のべき乗に比例するパワー則: $V \propto I^n$ で近似できることが知られており、べきの指数 n 値も重要な材料パラメータとなる。さらに、実用線材では、長尺線の中の I_c 低下部位が全体の性能を制限することから、その電流輸送特性の温度、磁界依存性のみならず、空間的な I_c 分布の把握が重要となる。

一般に用いられる長尺線材の評価手法としては、線材を搬送させつつ、各区間の I - V 特性を四端子法で測定する方法と、超伝導線材を外部磁界下で着磁し、その磁気モーメントの計測により I_c を評価する手法とに大別できる。前者は、 I - V 特性そのものの評価が可能であることから電界基準や I_c 、 n 値を直接評価できる利点を有するが、典型的には 1 メートル程度の区間長の平均量の測定であるため、空間分解能が低く局所的な欠陥の検出が困難であるという問題を有する。また、後者の磁化による評価手法では、高解像度の評価が可能であることから低頻度で生じる局所欠陥を検出が可能である一方、計測時の電界基準が不明である事と、得られた局所 I_c の空間分布と、線材の I - V 特性との関係が不明確であるという問題を有する。

本研究では、長尺 Bi-2223 多芯線材の評価技術におけるこれらの問題点を解決するため、四端子法による評価結果と磁化法による評価結果の関係を明らかにすると同時に、 I_c の空間変化の影響下における長尺線材の電流輸送特性のモデリング手法の提案し、実測結果との比較によりその定量性を検証した。また、Bi-2223 多芯線材における磁化のダイナミクス特性の解明と、その知見に基づく実際の長尺線材の評価手法について研究開発を行った。

本論文は次の6章からなる。

第1章では、本研究の背景、対象となる Bi-2223 線材及び研究目的について記述した。

第2章では、本研究で実験に用いた計測システムの説明、及び計測で得られた磁界データより電流の導出手法と電界の導出手法について記述した。

第3章では、Bi-2223 線材短尺試料に対し、直流四端子法による電界—電流密度 (E - J) 特性評価と物理モデルを用いた理論的記述について詳述した。また、外部磁界下の線材磁化の挙動を磁気顕微鏡によって計測し、多芯フィラメント間が電磁氣的に結合して振る舞うことを実験的に明らかにした。さらに、磁化の緩和特性の計測より、フィラメントバンドルの E - J 特性を導出し、四端子法による測定結果との整合性を検証した。

第4章では、第3章に述べた短尺線材の磁化特性の結果をもとに連続磁化計測の長尺線材への適用について検討し、Bi-2223 長尺線材に対し、リール式走査型磁気顕微鏡を用いて連続的に磁化しながら残留磁界を計測する手法について記述した。また、得られる残留磁界により導出する臨界電流 I_c の空間分布の統計性について調べるとともに、 I_c の空間変化が存在する場合の任意区間における I - V 特性のモデリング手法を提案した。さらに本手法による解析結果と四端子法による測定結果の比較によって、モデリングの妥当性を検証した。また、計測の高速化についても検討し、高速スキャンにともなう雑音の抑制によって、シングルチャンネルの磁気センサを用いた測定で、空間解像度を落とすことなく、線材の搬送速度を従来の 12 m/h から 72 m/h に高速化する事に成功した。この事により、初めて 400 m 全長の Bi-2223 線材の I_c 分布を 1 mm の解像度で計測し、欠陥頻度 10^{-5} の統計事象を捉えた。また、高速計測手法の確立によって、リール式走査型顕微鏡において線材搬送速度をパラメータとする新たな計測モードを可能とした。

第5章では、リール式連続磁化計測における線材搬送速度に対する I_c の依存性について考察すると共に、前章に述べた高速リール式走査型磁気顕微鏡を用いて線材搬送速度依存性を実測し、線速依存性をもとに磁化緩和特性を解析することで、磁化測定における発生電界を導出する手法、及び局所 n 値の空間依存性を連続的に計測する新しい手法を提案した。

第6章は、総括であり、本研究をまとめた。