

## 磁気緩和測定による高温超伝導線材の電流輸送特性 評価に関する研究

吳, 沢宇

<https://hdl.handle.net/2324/4784649>

---

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 吳 沢宇

論 文 名 : 磁気緩和測定による高温超伝導線材の電流輸送特性評価に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

高温超伝導(HTS)線材は、カーボンニュートラルや先進医療に大きく貢献できる技術として、モーターや NMR 分析装置用の高磁場マグネットなど、交流から直流に至るさまざまな応用が期待されている。応用によって対応する電界領域が大きく異なり、線材の臨界電流密度  $J_c$  もまた HTS のなだらかな電界—電流密度 ( $E$ - $J$ ) 特性に起因して変化する。一般に用いられている超伝導線材の電流輸送特性の評価手法は、直流四端子法と、磁化電流の大きさより臨界電流値を評価する磁気的手法とに大別できる。高温超伝導体は熱擾乱の影響やランダムなピン止め特性によって、なだらかな  $E$ - $J$  特性を有する事から、磁化測定における周波数依存性が顕著となり、測定条件に伴う電界基準の変化が測定結果に大きな影響を及ぼす。しかしながら、磁化測定におけるこの電界基準の影響は充分整理されておらず、現象論的に、直流磁化によって導出される  $J_c$  値は四端子法による  $J_c$  値に比べ小さな値を取り、両者は一致しないという理解に止まっている。また、実用上の観点からは、永久電流運転時に対応する、 $10^{-12} \sim 10^{-11}$  V/m 程度の超低電界領域における臨界電流の特性が重要となるが、これは通常電圧測定による電界感度に比べ 6 桁以上小さな値であり、従来法では計測が困難な領域である。現時点では、測定可能な高電界側の特性から外挿して近似的な検討にとどまっており、超低電界領域の計測法の確立と特性解明が喫緊の課題であった。

本研究では、高温超伝導体の磁化の緩和現象と  $E$ - $J$  特性との関係を明らかにするとともに、磁气的計測を用いた  $E$ - $J$  特性の評価手法として、その基本原理を体系的にまとめた。また、各種高温超伝導線材の特性評価に適用し、実用環境下における超低電界領域を含む広い電界領域にわたる  $E$ - $J$  特性のデータを取得した。さらに、理論的解析によって電流輸送特性を解析的に記述し、磁場下の量子化磁束挙動に対する熱擾乱の影響や空間不均一性について検討を行った。

本論文は次の 7 章からなる。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的について記述した。

第 2 章では、本研究で用いた磁気特性計測システムについて記述した。

第 3 章では、 $E$ - $J$  特性の磁气的計測手法について、体系的にまとめた。一般的に行われる試料全体のマクロな磁化の測定に加え、磁気顕微法を用いた試料表面の局所磁場分布とそのダイナミクス計測を導入し、試料のマクロな磁化と誘導電界の関係を実験的に調べ、解析的に導出した試料形状の補正係数や、磁化緩和時の誘導電界のスケール則を明らかとし、試料形状や磁気モーメントの大きさから簡便に測定時の電界を導出する手法を提案した。また、0.1 秒以下の初期緩和特性を測定することで、高電界側の測定レンジを四端子法と同程度の  $10^5$  V/m まで拡大するとともに、低電界領域の測定に関しても、磁化緩和時間を等価的に加速する測定手法の導入によって、直流マグネット応用で重要となる  $10^{-12}$  V/m オーダーの超低電界領域の計測法を確立した。さらに、得られた測定結果より、磁化緩和特性はピン止めされた量子化磁束の Anderson-Kim 型の熱励起によって良く説明できることを示した。

第4章では、第3章に述べた計測手法を複合的に適用し、希土類系高温超伝導線材の実用環境下の特性を $10^{-12} \sim 10^{-2}$  V/mにわたる10桁の電界領域に亘り連続的に計測することに成功するとともに、磁束クリープを考慮したパーコレーション転移モデルを用いて理論解析を行った。これにより、 $E$ - $J$ 特性の複雑な温度・磁場依存性を解析的に記述できることを示した。

第5章では、ビスマス系高温超伝導多芯線材について、同様に磁気的手法と四端子法とを組み合わせ、 $E$ - $J$ 特性を計測し、理論モデルを適用して解析を行った。特に現在検討が進められているNMR高磁場マグネットに対応した、 $10^{-12}$  V/m近傍の超低電界領域の極低温磁場下における特性を取得するとともに、一般に得られている四端子法による臨界電流との関係を明確化し、スケールファクタを導出することで、設計の際の臨界電流値を定量化した。

第6章では、現在開発途上にある鉄系超伝導体について磁気計測を適用し、その材料開発と線材プロセス改良のために重要となる空間不均一性の定量化について取り組んだ。単結晶基板上的エピタキシャル薄膜内の臨界温度の分布と $J_c$ の相関を明らかとするとともに、メートル級線材に対して、液体ヘリウム環境下における臨界電流 $I_c$ の連続測定に初めて成功した。線材長さ方向の $I_c$ 変化の1 Tまでの外部磁界依存性を基に、 $I_c$ の変化は、磁束ピンニング特性の差異によるものではなく、線材内のフィラメントの断面積の変化、すなわちソーセージングに起因することを明らかとした。

第7章は結論であり、本研究をまとめた。