

氏 名 水 牧 祥 一

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第247号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 超伝導接合における電流伝播特性に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 新富 孝和
教 授 山本 明
教 授 黒川 眞一
助 教 授 光延 信二
助 教 授 三戸 利行
助 教 授 細山 謙二
助 教 授 雨宮 尚之（横浜国立大学）

論文内容の要旨

水牧祥一君の博士論文は、高エネルギー実験、加速器科学の分野で近年飛躍的に発展しつつある超伝導マグネットの応用において、究極的な姿として期待される「永久電流超伝導マグネット」の本格応用と長期にわたる安定性に関する。この種の永久電流超伝導マグネットは、長期間使用中に擾乱の無いと考えられる静かな環境で突如クエンチする現象が見られる。本論文は、この長期不安定性現象の原因解明を動機とし、安定性に深くかかわると考えられる超伝導接合部に着目し、その電流伝播の振舞いに関する実験的研究である。特に、永久電流閉ループの構成要素として不可欠な永久電流スイッチ用導体とコイル用導体との超伝導不完全性を有する超伝導接続部を取り上げ、その接続部内の電流伝播特性について独自の実験手法に基づき研究を行った。また、永久電流モードにおいて超伝導接続部での時間経過にともなう電流伝播の振舞いを観測し、クエンチの予兆と見られる接続部内での電流分布の変化（電流の侵入）の観測に成功した。

永久電流スイッチに用いられる超伝導線とコイル用の超伝導線では、フィラメントの径も本数も異なり、また原理的に個々のフィラメントを接続することも不可能である。従って、両者の超伝導接続部は、理想的な超伝導接続状態を再現していない。このようなフィラメントの接続状態から、接続部内での不均一な電流分布及び時間に依存した電流分布変化の発生が予測される。

通常用いられる接続部内で電流が折り返すヘアピンタイプで二つの導体を接続した場合を想定し、「往復直線電流とこれをつなぐ渡り部の電流からなるコの字形の電流ループ」についてその周辺の磁場分布を計算した。その結果から、“渡り電流の接続部長手方向の移動”にともない、渡り電流が磁場測定点近傍を通過する際、測定される磁場には“極性反転現象”が現れること、また、その幅方向（接続部の厚さ方向）に拡がる電流分布の変化に応じ、通電電流に対して“非線形な磁場の変化”が現れることが予測された。

本研究では、実際に永久電流超伝導マグネットにたびたび採用され、最も良い超伝導特性が期待される超伝導接続方法として、超伝導フィラメント同士を真空中で加熱・加圧することにより直接接続する固相接合（拡散接合）による方法に焦点を絞って実験を行った。また、接続の形状に関しては一般によく用いられているヘアピンタイプを対象とした。実験装置は、水牧祥一君自身の開発によるもので、超伝導線の高電流密度特性を利用し、近年開発された極微サイズのホールセンサーを活用して開発したものである。これを用いて、超伝導接続部の（直近）周辺磁場分布を高い精度で詳細に測定し、その解析結果から超伝導接続部内の電流分布の変化を間接的に観測する手法を実現した。

実験は、（１）“超伝導接続部単体”でのその通電電流の増加にともなう電流伝播の振舞いの観測と、（２）“永久電流モードにおける接続部”の温度上昇にともなう電流分布の変化の観測について行った。

（１）接続部通電電流の増加にともなう電流伝播の振舞いを観測する接続部単体実験では、通電電流の増加にともなう接続部周辺磁場の極性反転現象と非線形な変化を観測した。この実験結果は、ヘアピン電流ループが接続部先端に向かう長手方向と接続部の厚さ方向に二次元的に拡がっていくモデルによって理解されることを示した。

（２）永久電流モードにおける実験では、接続部の環境の変化（ここでは温度上昇）に

ともないその周辺磁場が変化した後、クエンチに至る現象を観測した。この実験結果と上記の接続部単体実験の考察より、永久電流モードのもとで接続部の温度上昇があった場合、接続部内の電流分布に変化が引き起こされ、クエンチの予兆となっている現象を実験的に確かめた。

これらの実験的な研究を通して、

(1) ホール素子を用いて接続部周辺磁場を精密に測定し、マッピングすることにより、接続部内の電流分布の変化の観測に成功した。

(2) ヘアピン接続部内の電流分布は、通電電流の増加にともない軸方向と幅方向に広がる二次元モデルによって理解できることを示した。

(3) 電氣的に静的な永久電流モードのもとでも、何らかの環境変化により（本研究では接続部の温度上昇）、接続部内の電流分布の変化が引き起こされ、やがてクエンチに至る現象を観測することに成功した。

以上で得られた知見により、永久電流超伝導マグネットの安定性に深くかかわりがあると考えられる超伝導接続部内の電流伝播の基本的な振舞いについてより明確な理解を得た。また、超伝導接続部の長期安定性の観測手法として（クエンチの予兆現象の観測等）、本研究で開発した手法が有効な一手段であることを見出した。

論文の審査結果の要旨

水牧祥一君の博士論文内容は、高エネルギー物理の分野で近年飛躍的に発展しつつある超伝導磁石の応用において、究極的な姿として期待される永久電流モードによる超伝導磁石の長期安定性に重要な「永久電流スイッチ用線とコイル用線との超伝導接続部」の電流分布の通電電流依存性とその時間変化に関する実験的研究である。

永久電流スイッチでは、コイル用超伝導線とは異なる超伝導線が使用される。このため、両超伝導線間の接続部は、異種超伝導線同士の接続となり、接続部内での不均一な電流分布あるいは電流分布の時間変化の発生が予測され、それが永久電流モードの不安定性を誘発すると予想される。

超伝導接続部での時間変化をともなう電流伝播の振舞いを観測するために、まず独自の実験手法の開発を行った。即ち、超伝導線の高電流密度特性と極微サイズのホールセンサーを活用し、超伝導接続部の周辺磁場分布を高い精度で詳細に測定し、それらの解析結果から電流分布あるいは電流分布の時間変化を求める手法を確立した。

実験対象である接続部の形状は、一般的に使われている、電流の向きが折り返すヘアピン型を用いた。このヘアピンループを含む平面に垂直な磁場成分の接続部長手方向の分布を測定し、間接的に電流分布を観測した。実験では、(1) “超伝導接続部単体”での通電電流に依存する電流分布の測定と(2) “永久電流モードにおける接続部”の環境変化(この実験では温度上昇)にともなう電流分布の時間変化を観測した。

(1) 接続部通電電流の増加にともなう電流伝播の振舞いを観測する接続部単体実験では、接続部周辺磁場の極性反転現象と非線形な変化を観測した。この実験結果は、ヘアピン電流ループが接続部先端に向かう長手方向と接続部の厚さ方向に拡がる二次元モデルによって理解されることを示した。

(2) 永久電流モードにおける実験では、接続部の温度上昇にともないその周辺磁場が変化した後、クエンチに至る現象を観測した。この実験結果と接続部単体実験の考察より、永久電流モードのもとで接続部の温度上昇があった場合、接続部内の電流分布に変化が引き起こされ、クエンチの予兆となっている現象を実験的に確かめた。

これらの実験的な研究を通して、永久電流超伝導マグネットの安定性に深くかかわりがあると考えられる超伝導接続部内の電流伝播の基本的な振舞いについてより明確な理解を得た。また、超伝導接続部の長期安定性の観測手法として(クエンチの予兆現象の観測等)、本研究で開発した手法が有効な一手段であることを見出した。

以上の研究は、実験装置の立ち上げ、独自の実験方法の確立と解析手法および新しい考え方の提案において、専門的にも総合的にも優秀であり、数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として十分に値しているものと判定した。また、学位論文に係わる専門分野及び基礎となる分野の学識の口述試験を行い、博士論文内容を中心として、広く、確実な基礎的学識を有していると判断した。さらに、筆頭執筆者として英語の論文が2編あることから、語学に関しても合格した。