

氏 名 平 野 直 樹

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第324号

学位授与の日付 平成10年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 大型超伝導導体の電流分布が安定性ならびに交流損失に及ぼす

影響に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 本島 修  
教 授 佐藤 定男  
教 授 新富 孝和  
教 授 百田 弘  
助 教 授 三戸 利行  
教 授 住吉 文夫（鹿児島大学）

## 論文内容の要旨

核融合炉用マグネット、および、超伝導電力貯蔵システム(SMES)等の大型電力機器への超伝導の応用を考えた場合、超伝導導体としては、数 10kA 級の大電流容量が必要であり、交流損失の低減及び冷却安定性の向上等の観点から、ケーブルインコンジット導体や成形撚線に見られるような複数の超伝導線を撚り合わせた構造の導体がいられる。このような撚線導体では、導体端部の接続抵抗のアンバランスや素線間インダクタンスの僅かな相違により、各素線に均一に電流が分配されない偏流状態が生じることが知られており、この現象の解明およびその対策が超伝導導体を応用する際の重要な課題となっている。

これまでの研究により、表面を電氣的に絶縁した超伝導素線を撚り合わせた導体では、この電流偏流によって一部の素線が臨界電流を超え、不安定となることが明らかとなっている。そこで、表面を絶縁しない素線を用いた撚線が開発され、局所的に一部の素線が常伝導転移してもそこを流れていた電流が他に乗り移る転流現象が生じることで、安定性の向上が図られた。しかしながら、偏流の問題が解決したわけではなく、偏流が安定性に与える影響については明確にされていなかった。

そこで、この点に着目し、大型超伝導撚線導体の基本構成単位である NbTi/Cu 3本撚線を用いて、局所的な擾乱を1本の素線に取り付けたカーボンペーストヒーターへのパルス通電により模擬し、超伝導撚線全体が常伝導転移するために必要となる最小のヒーター入熱エネルギーを測定することによって、種々の条件下における超伝導撚線の安定性を系統的に評価する実験を行った。

はじめに、3本撚線の安定性の通電電流依存性を測定し、素線1本の安定性測定結果との比較を行った。3本撚線の安定性は、素線の安定性を本数倍した値に比べて大幅に向上することを確認し、1次元熱平衡方程式による解析を通して、この安定性向上が撚線化に伴う効果的な電流転流によることを示した。次に、素線間の初期の電流分布を制御する独自の実験手法を用い、偏流が安定性に及ぼす影響を定量的に評価した。偏流の増大によって素線間を転流する電流量が増加し、素線間接触部でのジュール発熱によって安定性が劣化することが確認されたが、撚線化による安定性の向上に比べ、その影響は小さいことを明らかにした。

また、撚線の安定性に関して、従来から多くの研究が行われてきており、数値解析や数本の撚線を用いた基礎研究によって、素線間の電磁的・熱的な接触条件に依存して安定性が大きく変化することが示されている。しかしながら、素線間の接触状態を制御することは容易でないばかりか、素線間の接触抵抗を低くしすぎると、変動磁界中での素線間の結合電流が増大し、交流損失(結合損失)の増加を引き起こすことから、最適な接触条件は必ずしも明確になっていなかった。

そこで、素線間の接触条件を制御するために、撚線を巻き付ける試料ポピンを工夫し、ポピンの外径を変化させることによって素線に加わる張力を変化させ、撚線間の接触抵抗と安定性との関係を定量的に評価できる実験装置を考案した。接触抵抗の減少により、安定性が向上することが確認され、本実験装置を用いた実験により、安定性を確保するために必要な最大の接触抵抗値の評価が可能となった。

さらに、次世代の実用導体として期待されている Nb<sub>3</sub>Sn の 11 本成形撚線を試作開発

し、素線表面をクロムメッキすることによる接触抵抗の変化が安定性に与える影響について研究を行った。結果として、クロムメッキをしたことによる素線表面状態の変化に関わらず、有効な素線間接触面積の増加による接触抵抗の低下が安定性の向上に寄与することを、撚線間接触部の走査電子顕微鏡（SEM）観察やオージェ電子分光法による分析を通じて確認した。

このように、安定性の観点からは素線間の接触抵抗を低くすることが望ましいこととなるが、逆に交流損失（結合損失）は増大することが知られている。しかしながら、偏流が結合損失に及ぼす影響については明確にされておらず、撚線の安定性の評価と同時に結合損失の評価を行うことが重要であると考えた。撚線内で素線間のインダクタンスに僅かな相違があると、各素線の電流分布が一樣でなくなり、偏流が生じる。素線間を絶縁しない撚線の場合、この偏流は導体長手方向に対し不変ではなく、場所により変化し、局所的な偏流が生じる。このことは、撚線内に偏流に伴ったループ電流が流れることを示しており、この電流が新たな結合電流として交流損失増大の原因となると推定された。

最近行われたケーブルインコンジット導体を用いた大型超伝導マグネットの通電試験の結果、短尺導体による交流損失の測定結果からは予測できない交流損失の増大が運転周波数近くの低周波数領域で観測され、問題となっている。この交流損失増大の原因が、前述の撚線内の局所的な偏流に起因していると推定し、これを検証する実験を行った。実験は、偏流を発生させるために意図的に撚り乱れをついけた NbTi/Cu 2本撚線を製作し、交流損失の周波数特性を測定した。この結果、偏流によって長時定数の結合電流が発生し、低周波数領域での交流損失が増大することを実験的に確認した。このことは、大型超伝導マグネットで見られた交流損失増大の原因を解明する重要な糸口となる成果と言える。

最後に、以上の研究を基に、高い安定性と低い交流損失を同時に満足する超伝導撚線導体の構造について検討を行い、撚りピッチの 1/2 長さの偶数倍ごとに素線間を酸化物超伝導体粒子等の低抵抗物質で短絡させることにより、撚線内の電流分布を制御した導体構造が可能であることを示した。

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文は、超伝導の実応用の観点から重要な研究テーマとなっている超伝導導体内の電流分布が導体の特性に及ぼす影響について、安定性及び交流損失の両面から研究し論じたものである。特に、超伝導撚線導体の初期電流分布及び電流転流現象と安定性の関係について定量的に評価すると共に、電流分布の不均一（偏流）が交流損失の増大をもたらすことを実験的に証明している点が特徴となっている。

大電流容量の大型超伝導導体では、多数の超伝導素線を撚り合わせた撚線構造の導体を使用される。この撚線間の電流分布は、素線抵抗が0であることから、接続部の抵抗の相違や撚り乱れなどによる素線間の僅かなインピーダンスの相違によって大きく影響され、均一な分布とはならない。この様に導体内の電流分布が不均一でしかも撚線間の電流転流特性が悪い場合、導体の安定性が極端に悪化することが大型導体を用いた実際の超伝導コイルの実験結果から明らかとなっている。

本論文では、まず撚線間の電流分布を制御できる実験装置を工夫し、撚線間の電流分布の不均一が安定性に及ぼす影響について定量的な評価を行っている。結果として、撚線間の転流特性を転流部での発熱が安定性を悪化させない基準値以上に保てば、偏流が生じても安定性への影響は小さいことが示された。また、素線間の接触抵抗を撚線の張力を制御することによって変化させ、接触抵抗と安定性との関連について定量的な評価を行い、最小伝播電流以上の通電電流では、安定性が接触コンダクタンスの正の関数であることを確認した。更に、実際の超伝導導体の例として、素線の表面処理を変化させた  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超伝導成形撚線の電流転流特性及び安定性を測定し、素線表面処理の相違が導体の安定性に大きな影響を与えることを示した。

一方、撚線導体を用いた大型超伝導コイルの交流損失の測定結果から、運転周波数付近の低周波領域で交流損失が増大することが報告されており、大型超伝導コイルの実用化を阻む新たな要因として、その原因の究明が急がれていた。

本論文では、この課題の究明にも取り組み、撚線導体内の電流分布の不均一がその原因であるとの推察に基づき、2本撚線を用いた要素実験によって、撚り乱れに起因する電流分布の不均一が交流損失増大の原因となることを示している。この研究成果は、大型超伝導コイルの交流損失増大の原因究明の糸口として重要であり、今後の研究の先駆となるものである。最後に、本論文では上記の研究成果のまとめとして、安定性と低交流損失をバランスさせた超伝導導体の設計指針を示すと共に、新しい導体構造の提案を行っており、超伝導の実応用の観点から重要な示唆を与えている。

以上のように、本論文は数物科学研究科核融合科学専攻の博士学位論文としてふさわしい学術内容を持っているものと認められる。