

氏 名 辺見 努

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 893 号

学位授与の日付 平成 17 年 9 月 30 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 高温超伝導コイルの電磁特性に対する線材内遮蔽電流の影響に関する研究

論文審査委員	主 査 教授	岡村 昇一
	教授	三戸 利行
	助教授	高畑 一也
	教授	濱田 泰司
	教授	雨宮 尚之（横浜国立大学）

## 論文内容の要旨

磁場閉じ込め方式の核融合炉の場合、強磁場を定常的に生成する必要があるため、経済性の観点から超伝導コイルが必須とされている。コイルの電流密度を上げることで、装置サイズを軽減するとともに、超伝導コイルに対して十分な放射線防護シールドを設置できるようになる。よって、超伝導コイルの高性能化は重要な研究課題である。一方、発見から約 20 年が経過した高温超伝導体は km 級の線材化が可能となりつつあり、超伝導コイルへの応用が始まっている。高温超伝導線材が核融合炉の磁場閉じ込めコイルに適用可能となれば、高い運転温度を設定できることにより冷却に必要な電力負荷を軽減し、発電効率を向上できる。また、上部臨界磁場が金属系低温超伝導体に比べてはるかに高いことから、20 T 以上の高磁場発生が可能であり、コンパクトな炉設計へつながる可能性がある。さらに、運転温度を 20 K 程度にすることにより、コイル構成材料の固体比熱は 4 K と比較して約 100 倍に大きくなるため、電磁力による素線の動きや放射線による核発熱などに対して温度マージンを大きくとることができる。このため、低温超伝導体と比べて冷却安定性が格段に向上する。しかしながら、大型超伝導コイルへの高温超伝導体の応用には、導体の特性向上を含めて、更なる研究開発や複雑な非線形特性を持つ電磁現象などの特性の解明が必要とされている。

高温超伝導線材のプラズマ核融合実験装置への応用例としては、東京大学高温プラズマ研究センターで建設された内部導体型プラズマ閉じ込め装置「Mini-RT」がある。この装置は、磁気浮上させたリング状のコイルを用いてダイポール磁場を発生するとともに、プラズマ中に生成した径電場により高速流を誘起し、これに伴う緩和過程を利用して高ベータ・プラズマを閉じ込めるものである。磁気浮上コイルは、真空中で長時間浮上する必要があるため、高温プラズマを生成するためにはプラズマと直交するような電流リードや冷却配管等を取り付けることができない。そのため、浮上コイルは永久電流モードで動作し、コイルの比熱だけで長時間低温に保つ必要がある。そこで、磁気浮上コイルの巻線には銀シース・ピスマス 2223 テープ線材を採用し、高温超伝導線材の持つ高い臨界温度特性を利用することによって運転温度を 20 K から 40 K の範囲に設定し、数時間におよぶ磁気浮上を可能としている。Mini-RT 装置が完成した際に、磁気浮上コイルの特性試験を行ったところ、永久電流の減衰時定数が予測よりも大幅に短いことが観測された。高温超伝導線材の場合は、磁束フローにもとづく本質的な抵抗が存在するが、輸送電流のみが流れているとして磁束フロー抵抗の磁場依存性を考慮して永久電流の減衰時定数を推定した値と比較して、実際に測定された減衰時定数は一桁近く短いものであった。この原因としては、高温超伝導線材の製造や巻線に伴う機械的な劣化も懸念されたが、これに加えて、現状の線材においては超伝導フィラメント間にツイストが施されていない構造であることから、コイル自身が発生する変動磁場により大きな遮蔽電流が高温超伝導線材内に流れることが推測され、これと輸送電流との相互作用により永久電流の減衰特性に影響することが考えられた。

これまで高温超伝導線材において遮蔽電流と輸送電流の相互作用に関する電磁現象のメカニズムを解明した研究はない。特に、高温超伝導線材の非線形特性に関連する電磁現象の解明は、高温超伝導コイルの永久電流減衰特性の改善につながるだけでなく、プラズマ閉じ込め装置のための高精度な誤差磁場の抑制や高温超伝導線材の交流

損失の低減、安定性の向上に対しても重要な意味があるものと考えられる。そこで、本研究の目的は、高温超伝導コイル内の輸送電流と遮蔽電流の相互作用に関するメカニズムの解明をコイル形状の長尺試料を用いた実験と有限要素法による数値解析を用いて行い、高温超伝導コイルの永久電流減衰特性へ与える影響と核融合装置へ応用する際に必要となる高温超伝導線材の電磁現象の理解と特性改善のための知見を得ることにある。

このための実験を行うために、まず、長尺のコイル状試料に対して一様な外部磁場を加えることができるとともに、温度、輸送電流、外部磁場の強度、磁場の方向を独立に変化させることができる高温超伝導コイル試験装置を開発した。外部磁場を印加するために2つのニオブチタン超伝導コイルを製作し、スプリットコイルの形として組み込み、それらの間にサンプル用高温超伝導コイルを配置する構造とした。外部磁場印加用ニオブチタンコイルは、励磁方向と励磁電流をそれぞれ制御することで、外部磁場の強度と方向を任意に変化させることができるようになっている。そのため、このコイルには電磁力が様々な方向に加わることとなるため、3次元の有限要素法を用いた応力解析による詳細設計を行い、十分な機械的強度を保証した。実際に製作されたコイルでは、GM冷凍機を用いた伝導冷却によって絶対温度4.4ケルビンまでの冷却を行うことができ、励磁試験の結果、4テスラの磁場を発生できることを確認した。また、外部磁場印加用超伝導コイルとサンプル用高温超伝導コイルは2台の冷凍機によって別々に冷却されるため、冷凍機の動作に起因して試験用超伝導コイルの電圧計測に対してノイズが加わるが、これを軽減するための工夫を行い、100ナノボルト以下の微小電圧を精度良く計測するシステムを構築した。また、試験装置には、熱侵入量を軽減するために高温超伝導電流リードを用いたが、この方式の電流リードについて最適化手法を確立することにも成功した。また、その結果を伝導冷却型金属系超伝導パルスコイルへも適用することによって、高温超伝導電流リードの熱的特性と健全性を詳細に調べ、設計法の妥当性を明らかにした。

次に、Mini-RT装置の磁気浮上コイルに用いられているものと同様の銀シース・ピスマス2223テープ線材を用いて、シングルパンケーキ状に巻線を行った高温超伝導コイルサンプルを製作して、上記のコイル試験装置に装着した。コイルサンプルには、線材の表面にホール素子を取り付け、線材直上における磁場を外部磁場と比較することによって線材の磁化特性を調べた。また、コイルサンプルの線材両端に電圧タップを取り付け、輸送電流印加時に発生する磁束フロー電圧を計測するものとした。このセットアップにより、外部磁場、温度、励磁パターン、温度を変化させ、高温超伝導試験サンプルコイル内の遮蔽電流の振舞いについて詳細に調べた。その結果、観測された遮蔽電流の減衰特性は、高温超伝導バルク体において一般的に見られるように時間に対する対数関数を用いて近似できることが見出された。この観測結果に対して、遮蔽電流の分布を均一な往復電流で近似した簡易モデルを用いて検討したところ、遮蔽電流の大きさは外部磁場による誘導起電力と高温超伝導体のE-J特性（電場-電流密度特性）によって決まることがわかった。また、遮蔽電流の減衰特性はコイル形状（遮蔽電流ループのインダクタンス）と高温超伝導体のE-J特性により決定されることを見出した。これは、コイル化による磁氣的結合により、高温超伝導線材内を流れる遮蔽電流の減衰が遅くなっているものと解釈できる。外部磁場の励磁パターンや高温超

伝導コイルの温度履歴によって、遮蔽電流の大きさや電流分布が変化することも観測され、高温超伝導コイルの励磁方法を工夫することにより、永久電流の減衰特性を改善できる可能性を見いだした。また、外部磁場により遮蔽電流を誘起した状態で高温超伝導コイルへ輸送電流を通電することで、遮蔽電流の減衰が促進されること、および、電流分布が変化することを見いだし、高温超伝導コイル内の遮蔽電流と輸送電流の相互作用に起因するフロー損失の増大を明らかにした。

次に、上記の実験による成果をもとに、高温超伝導コイルの電磁現象に対する数値解析モデルを構築した。具体的には、遮蔽電流の減衰特性がバルク体と同様の振舞いをしていること、および、フィラメント間をわたるときの常伝導抵抗の影響は小さいという観測結果から、多芯線である高温超伝導線材のフィラメントを単芯の楕円断面で近似し、軸対称三次元場を解析の対象とした。支配方程式は、マックスウェルの方程式から導かれる磁気ベクトルポテンシャルと電気スカラーポテンシャルを径方向微分したものを未知数とした軸対称三次元場に関する一般的な電磁場の式、および、ターンごとの導体内を流れる電流の総和を輸送電流と等しくなるとおいた式（キルヒホッフの電流則）の2式である。これを有限要素法により離散化し、連立一次方程式を解く問題に帰着させ、係数行列を正定値対称疎行列とすることで、前処理付き共役勾配法を用いた高速な解法を実現した。これにより、コイル形状と高温超伝導体の非線形電磁特性を考慮した有限要素法による高温超伝導コイルの数値解析手法を確立した。開発した数値解析コードを用いて遮蔽電流の減衰特性に関する計算を行ったところ、実験で観測された磁場変化や電圧発生をシミュレートすることができた。また、数値解析により求められた詳細な電流分布を用いることで、遮蔽電流と輸送電流の相互作用について明らかにすることができた。特に、数値解析結果と実験結果を比較することにより、高温超伝導線材に鎖交する変動磁場によって線材内には臨界電流に匹敵する遮蔽電流が流れていること、その遮蔽電流と輸送電流の相互作用により輸送電流のみを考えた場合よりもはるかに大きな損失が発生することが明らかとなった。

実験と数値解析の結果から、当初、予想した通り、遮蔽電流が高温超伝導コイルの永久電流の減衰に影響を与えることがわかった。そこで、実際に高温超伝導コイルを永久電流モードで運転し、永久電流の減衰特性を調べた。その結果、励磁履歴によって永久電流の減衰時定数が異なることがわかり、それが遮蔽電流の影響であることが明らかとなった。また、高温超伝導コイルの数値解析法にキルヒホッフの電圧則に基づき、電圧のバランス式を加えて、永久電流モードで動作する高温超伝導コイルの動作シミュレーションを可能とした。実験と数値解析の結果より、コイル内における磁気エネルギーの授受や励磁履歴による影響など、高温超伝導コイルの永久電流減衰特性に対する遮蔽電流の影響が明らかとなった。

以上のように、高温超伝導線材に変動磁場による線材内の遮蔽電流の影響について、詳細な実験及び数値解析を行い、電磁現象の解明に成功した。これにより、核融合装置に適した線材構造や線材幅広面に垂直な磁場が加わらないように捻りながら巻線する巻線構造などの提案が可能となった。さらに、核融合炉に高温超伝導導体を適用するために今後必要と考えられる、導体構造やコイル構造を探るための研究の方向性を示すことができた。

本論文の研究は、高温超伝導線材を用いて作られた超伝導コイルの電磁特性に、線材内の遮蔽電流の特性がどのような影響を与えるかについて調べたものである。高温超伝導コイルは、低温超伝導コイルと比べて、高い臨界温度による冷却効率の向上が魅力的であるだけでなく、高い臨界磁場による高磁場への応用など、その優れた性能から応用の範囲を急速に広げている。東京大学高温プラズマ研究センターにおいても、高温超伝導コイルを磁気浮上コイルとして用いた世界最初の核融合プラズマ実験装置として Mini-RT 装置が建設され、プラズマの閉じ込め実験が開始された。しかしながら、永久電流モードで運転される高温超伝導コイルの電流減衰の時定数が予測よりも大幅に短いことが観測され、その原因を探ることがこの研究のきっかけとなった。

超伝導コイルを構成する超伝導線材には、電流の立ち上げに際して磁束の侵入を阻止するように線材内に遮蔽電流が流れる。既に実用化が進んでいる金属系の低温超伝導コイルでは、超伝導フィラメントを常伝導金属の母材中に埋め込んでフィラメントをツイストするなど、線材内の遮蔽電流を抑制するためのさまざまな工夫が施されており、その特性についての詳細な研究がなされている。それに対して酸化物系の高温超伝導線材の場合は、材料の異方性や製法の違いもあって、このような低温超伝導線材に関する技術の蓄積をそのままでは適用することができない。高温超伝導線材の場合、一般的には薄いテープ形状であり、ツイストされたフィラメント構造を持たないことや、有限な磁束フロー抵抗等の発生により電気抵抗が完全にはゼロとならないことから、超伝導特有の履歴特性や磁束フロー抵抗の非線形性が複雑であり、遮蔽電流についての実験的・理論的研究は充分になされているとは言えない。交流応用については、交流損失の定量的評価を行う際に遮蔽電流が正確に考慮されているが、直流応用での遮蔽電流の影響、特に永久電流モードの超伝導コイルの等価的な抵抗への影響については本研究が初めての例となる。

本研究では、高温超伝導線材が超伝導コイルとして用いられた環境での特性を調べるために、コイル内の導体の一部を取り出したモデルとしてサンプルコイルを製作し、局所的な磁場及び電流の状態を模擬する実験装置を製作した。すなわち、高温超伝導線材 Bi-2223 を用いてパンケーキ巻きした比較的厚さの薄い試験コイルに、コイルの別の部分によって発生する磁場を模擬する外部磁場を加えることで、超伝導コイル環境下での線材の特性を調べた。また試験コイルの極く近傍に設置したホール素子により、遮蔽電流の大きさを輸送電流と分離して測定した。試験コイルの冷却温度、外部磁場強度、その時間変化などの制御条件をさまざまに変えて、遮蔽電流の減衰の時間変化を調べるとともに、試験コイルに輸送電流を加えたときの遮蔽電流と輸送電流の相互作用が試験コイルの電磁特性に及ぼす影響について実験を行った。これらの実験によって、高温超伝導線材を用いた超伝導コイルの基本的な電磁特性、特に等価的な抵抗について遮蔽電流の影響を見い出すと同時に、コイルの励磁の際に一時的に線材の温度を高く設定することで遮蔽電流を抑える方法、また外部磁場の励起を一時的に強くすることで遮蔽電流を抑制する方法など、運用上の対応策も見い出している。

また実験からはデータを得ることが難しい線材内の詳細な電流分布をモデル計算するために、有限要素法に基づいた計算コードも独自に開発した。この計算コードは、外部磁場

の時間変化、輸送電流の励起、温度変化などに伴う、線材内の電流分布の時間変化を計算することが可能で、上記の様々な条件の実験に対応した計算を行って実験で得られた結果と比較した。モデル計算は実験による測定結果を精度良く再現しており、そのことから逆に高温超伝導線材を用いた超伝導コイルの電磁特性を、遮蔽電流を含んだ内部電流分布の定量的な把握の上で理解することを可能としている。

辺見君は、高温超伝導線材を用いた超伝導コイルの電磁特性に対する線材内遮蔽電流の影響という研究テーマに対し、これまで交流応用では着目され研究されていたが、永久電流モードで運転される超伝導コイル等の直流用途でも線材内遮蔽電流が超伝導コイルの電磁特性に顕著な影響を及ぼすことを実験・モデル計算の両面からアプローチし、明らかにすることに成功した。この研究の成果は、磁場閉じ込めのために高精度の磁場発生が必要な核融合装置用超伝導コイル開発にとって重要な研究成果であるばかりでなく、様々な分野における今後の高温超伝導線材の応用研究にも寄与するところが大きいと考えられる。総研大の学位を与えるに十分な内容を持っているものと判断した。