

氏 名	お お や ま さ よ し 大 屋 正 義
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 128 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻
学位論文題目	Stability of superconducting magnets cooled by superfluid helium (超流動ヘリウム冷却超電導マグネットの安定性)

論文調査委員 (主査) 教授 塩津正博 教授 宅田裕彦 助教授 白井康之

論 文 内 容 の 要 旨

超流動ヘリウム (He II) は常流動ヘリウム (He I) に比して優れた冷却特性を持ち、核融合炉や加速器などの大型超伝導マグネットの冷媒として期待されている。本研究論文は、He II 冷却超伝導マグネットの設計に不可欠である機械的擾乱に対する安定性の理解のため、細線超伝導体や実際に核融合実験炉に用いられるような大型導体を用いた試験コイルを He II 冷却した場合の冷却安定性について、実験的及び解析的に論じた結果をまとめており、7 章からなっている。主な内容は以下のとおりである。

第 1 章は序論で、超伝導体の基本的特性及び超伝導マグネットの不安定性の原因となる擾乱について説明した後に、通常液体とは全く異なった超流動ヘリウムの物性や、熱伝達特性についての概要を説明している。さらにこれまでに行われた超伝導マグネットの安定性及び大型導体特有の常伝導部の伝播現象に関する実験的及び解析的研究の歴史を説明し、超流動冷却超伝導マグネットの安定性に関する知見を得るために擾乱によって発生した常伝導部の回復・伝播現象解明の必要性を指摘し、これを研究の目的としている。

第 2 章は、異なる表面状態 (裸銅, 黒化処理) を持つ直径 0.5mm の NbTi/Cu 複合超電導細線を捲いた単層試験コイルを製作して安定性試験を行い、熱擾乱を模擬したヒータ入熱によって発生した常伝導部の回復・伝播特性を明らかにするとともに、超流動冷却の有効性を定量的に示している。また、超流動冷却時には試験コイルの最大回復電流が導体表面状態に大きく依存することを明らかにしている。

第 3 章は、超流動ヘリウム冷却超電導コイルの安定性をより詳細に理解するため、熱バランス方程式、分流モデル及び本研究室の超流動ヘリウム熱伝達データベースに基づく 1 次元計算コードを開発し、発生した常伝導部の回復伝播特性が上述の実験結果と良く一致することを示し、高磁場・高電流密度領域における安定性は従来基準として考えられていた液体ヘリウムの臨界熱流束よりも導体表面状態に依存する Kapitza 抵抗によって支配されており、より高い安定性を得るためには導体表面の Kapitza 抵抗を十分に考慮した導体設計を行うことが重要であることを明らかにしている。

第 4 章は、核融合科学研究所の核融合実験装置 (LHD) に用いられているアルミ安定化大型導体の安定性及びこの導体特有の電磁現象について研究を行っている。まず、超流動ヘリウム中で数十 kA 級の大型導体の安定性試験を可能にする変圧器方式電流供給法を開発している。この方法は、今後、種々の大型導体を用いて安定性試験を行う際に非常に有用なものである。各冷却モードにおける安定限界電流を比較した結果、例えば 5.5T において、飽和 He I (4.2K) から subcooled He I (2.2K) に移行することで 15%、4.2K から加圧 He II (2.0K) に移行することで 50% 程度上昇し、サブクール常流動及び超流動冷却の有効性を定量的に明らかにした。さらに、表面に施されている黒化処理を除去した LHD 導体を用いた試験コイルについても試験を行い、加圧 He II 冷却の場合、安定限界電流が黒化処理導体より 50% も上昇する等、導体表面状態が過渡安定性に及ぼす影響を明らかにしている。

第 5 章は、アルミ安定化導体特有の電流拡散の遅れとホール効果を解析モデルに組み込むことで、導体設計時には予測で

きなかつた導体の過渡有効抵抗の増加を解析的に明らかにしている。

第6章では、大型導体特有の電磁現象を考慮したモデルと超流動ヘリウムの熱伝達データベースを用いて二次元過渡安定性解析コードを開発して解析を行った結果、発生した常電導部が導体長手方向に対して非対称に伝播する現象を初めてシミュレートし、LHD導体の過渡安定性を記述することに成功している。

第7章は、本論文で得られた成果を総括して結論としている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合炉や、加速器、超伝導エネルギー貯蔵装置などに用いられる大型超伝導マグネットの小型化・高電流密度化のために期待されている超流動冷却超伝導マグネットの設計に特に重要と考えられる機械的擾乱に対する安定性に関する研究結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1)直径0.5mmのNbTi/Cu複合超伝導細線を巻いた単層試験コイルで安定性試験を行い、熱擾乱を模擬したヒータ入熱によって発生した常電導部の回復・伝播特性を明らかにするとともに、超流動冷却の有効性を定量的に示した。また、超流動冷却時には試験コイルの最大回復電流が導体表面状態に大きく依存することを明らかにした。
- (2)熱バランス方程式、分流モデル及び超流動ヘリウム熱伝達データベースに基づく1次元計算コードを開発し、発生した常電導部の回復伝播特性が上述の実験結果と良く一致することを示し、高磁場・高電流密度領域における安定性は従来基準として考えられていた液体ヘリウムの臨界熱流束よりも導体表面状態に依存するKapitza抵抗によって支配されること、より高い安定性を得るためには導体表面のKapitza抵抗を十分に考慮した導体設計を行うことが重要であることを明らかにした。
- (3)核融合科学研究所の核融合実験装置(LHD)に用いられているアルミ安定化大型導体の安定性及びこの導体特有の電磁現象について研究を行っている。まず、超流動ヘリウム中で数十kA級の大型導体の安定性試験を可能にする変圧器型電流供給法を開発している。この方法は、今後、種々の大型導体を用いて安定性試験を行う際に非常に有用なものである。各冷却モードにおける安定限界電流を比較した結果、例えば5.5Tにおいて、飽和He I (4.2K)からsubcooled He I (2.2K)に移行することで15%、4.2Kから加圧He II (2.0K)に移行することで50%程度上昇し、サブクール常流動及び超流動冷却の有効性を定量的に明らかにした。
- (4)LHD導体表面に施されている黒化処理を除去した試験コイルについて試験を行い、加圧He II冷却の場合、安定限界電流が黒化処理導体より50%も上昇する等、導体表面状態が過渡安定性に及ぼす影響を明らかにした。
- (5)電磁現象と超流動ヘリウムの熱伝達データベースを用いて二次元過渡安定性解析コードを開発して解析を行った結果、発生した常電導部が導体長手方向に対して非対称に伝播する現象を初めてシミュレートし、LHD導体の過渡安定性を記述することに成功している。

以上要するに、本論文は超流動ヘリウム冷却超伝導マグネットの設計に重要な熱擾乱に対する冷却安定性について、NbTi/Cu複合超伝導細線と、臨界電流数十kA級のアルミ安定化LHD導体を用いた安定性試験を行い、NbTi導体を高磁場・高電流密度領域において使用する場合に共通の問題や大型導体に特有の過渡安定性に関する問題点を明らかにすると共に、数値解析によってその原因を検討し明らかにしたものである。得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成18年1月25日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。