

氏名	鄭 允 道
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2864号
学位授与の日付	平成19年9月25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	工学研究科電気工学専攻
学位論文題目	Basic Studies on Persistent Current Compensator for Superconducting Magnet by Use of Linear Type Magnetic Flux Pump (リニア型磁束ポンプを適用した超伝導マグネット用永久電流補償装置に関する基礎研究)
論文調査委員	(主査) 教授 引原隆士 教授 小林哲生 准教授 中村武恒

論文内容の要旨

本論文は、リニア型磁束ポンプの提案ならびに同磁束ポンプを適用した高温超伝導マグネット用永久電流補償装置に関する研究成果をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、超伝導材料の基礎特性について紹介している。また、磁気共鳴断層撮影装置や核磁気共鳴分析器など、液体ヘリウム(4K)冷却低温超伝導コイルを適用した実用例について説明するとともに、今後上記機器の高磁界化を指向する場合、マグネットの高温超伝導化が不可欠であることを述べている。一方、一般に超伝導特性は温度が低下するほど向上するが、高温超伝導マグネットの永久電流モード運転が液体ヘリウム冷却温度でさえも実現されていない現状を指摘するとともに、永久電流減衰補償装置として磁束ポンプの必要性を指摘している。

第2章では、既存の磁束ポンプの駆動メカニズムについて述べるとともに、それらの問題点を指摘している。また、上記問題点を解決する新しい方式の磁束ポンプとして、液体ヘリウム冷却高温超伝導マグネットを対象としたリニア型磁束ポンプを提案するとともに、その動作原理を説明している。さらに、従来から用いられているポンピング電流評価式に関して、特に駆動周波数が高い領域で実験結果と相違が生じる可能性を指摘している。そして、リニア型磁束ポンプのキーコンポーネントである低温超伝導ニオブフォイルについて、同フォイル中に侵入する量子化磁束の磁気拡散現象を考慮して理論評価式を拡張している。最後に、拡張した理論評価式によって、低温超伝導ニオブフォイルに侵入する量子化磁束領域(normal spot領域)が駆動周波数増加に伴って拡大する現象を説明するとともに、リニア型磁束ポンプのポンピング電流が周波数依存性を有する可能性を指摘している。

第3章では、3次元有限要素法を用いてリニア型磁束ポンプの電磁界解析を行っている。解析に際しては、実際の試作器を想定してモデルを作成している。また、低温超伝導ニオブフォイルの非線形電流密度-電界特性を測定結果に基づいて定式化し、詳細な解析を行っている。その結果、移動磁界中の低温超伝導ニオブフォイルに侵入する量子化磁束領域の大きさが、駆動周波数に伴って増加することや、その増加割合が25Hz付近で変化することなどを明らかにし、第2章で拡張した理論評価式の妥当性を示すことに成功している。また、実際に駆動する際のバイアス電流などの最適運転条件を決定している。

第4章では、試作したリニア型磁束ポンプの詳細な構造について説明している。試作に際しては、第3章の解析モデルに基づいて設計を実施し、解析結果との比較検討を可能にしている。また、リニア型磁束ポンプの動作特性を異なった負荷コイルに対して検討するために、2種類のニオブチタン低温超伝導コイル(ソレノイドコイル(インダクタンス値:1.3mH)、トロイダルコイル(インダクタンス値:543mH))を試作している。なお、現状は均一な特性を有する高温超伝導コイル作製が困難であることから、実績のある上記低温超伝導ニオブチタン線を使用し、接触抵抗を大きくすることで電流減衰を発生させ、原理検証を行っている。さらに、超伝導永久電流モード実験を実施するため、ニオブチタン線材を適用したヒータ

型超伝導永久電流スイッチを試作している。

第5章では、試作したリニア型磁束ポンプにおける基礎特性の試験結果について説明している。まず、リニアコアのギャップ磁束密度をホールセンサーで測定し、磁束ポンピング動作に必要な振幅の移動磁界が実現されていることを確認している。また、磁束ポンピングに伴う電流増加特性を異なった移動磁界振幅および駆動周波数に対して測定し、第3章で得られた最適運転条件の妥当性を明らかにしている。さらに、ポンピング電流の増加率が駆動周波数依存性を有することを示している。即ち、ポンピング電流の増加率は駆動周波数の増加と共に増加するが、20Hzにおいてピーク値を示し、それ以上の周波数では逆に低下することを明らかにしている。そして、上記ポンピング電流の駆動周波数依存性は、第2章で導出した拡張理論評価式によって良く説明されるとともに、第3章の解析結果とも一致することを実証している。つまり、ポンピング電流の駆動周波数依存性は、超伝導ニオブフォイルに侵入する量子化磁束領域の周波数依存性として説明できることを初めて明らかにしている。

第6章では、第4章で試作したリニア型磁束ポンプ、負荷コイル、電流計測用ホールセンサー、およびフィードバック制御回路を用いた永久電流補償試験システムについて説明している。次に、永久電流モード運転に不可欠なヒータ型永久電流スイッチの正常な動作を確認している。また、トロイダル型超伝導負荷コイルの永久電流減衰特性を測定し、フィードバック制御回路を適用した補償動作について説明している。試験の結果、超伝導トロイダル負荷コイルの電流を $10A \pm 1mA$ の範囲で補償できること、つまり電流変動率0.01%の補償動作を達成している。また、今後システムの改良により、さらなる電流変動率低減の可能性を指摘している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、永久電流モード運転高温超伝導マグネットに関して、その微小な電流減衰を補償するためのリニア型磁束ポンプを提案するとともに、基礎特性を理論的ならびに実験的に研究した成果について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) 既に永久電流モード運転が実現されている液体ヘリウム（4 K）冷却低温超伝導マグネットおよびその実用例について説明するとともに、今後のさらなる高磁界化の観点から、高温超伝導マグネットの開発が重要であると指摘した。また、高温超伝導マグネットに関して、未だ超伝導接続技術が確立されていないことや磁氣的緩和現象などによって微小な電流減衰が発生し、現状は完全な永久電流モードの実現が困難であることを論じた。その上で、液体ヘリウム冷却高温超伝導マグネットの上記電流減衰を非接触に補償可能であるリニア型超伝導磁束ポンプを提案し、低温超伝導材料であるニオブフォイルを適用した場合について、既存の磁束ポンプとの比較から有用性を示した。
- (2) 一般的に用いられている磁束ポンピング電流の理論評価式に関して、特に駆動周波数が高い領域で実験結果との相違が生じることを明らかにした。その上で、リニア型磁束ポンプのキーコンポーネントである超伝導ニオブフォイルについて、同フォイル中に侵入する量子化磁束（ノーマルスポット）の大きさが磁気拡散現象に伴って周波数依存性を有することを示し、ポンピング電流の理論評価式を拡張した。また、拡張した理論評価式の妥当性を、実験結果との比較から明らかにするとともに、3次元有限要素法によって解析的に検証した。
- (3) リニア型磁束ポンプの試験システムを試作し、インダクタンスの異なる2種類の負荷コイルについて磁束ポンピング動作が達成されることを実験的に確認した。特に、ポンピング電流の駆動周波数依存性について、上記拡張理論式と良く一致することを明らかにし、20Hz付近で磁束ポンピング率がピークを有するなど、最適駆動周波数の存在を示した。さらに、ホールセンサーならびにフィードバック制御回路を組み込んだ電流減衰補償試験を実施し、10Aの負荷電流において電流変動幅0.01%の補償動作を達成した。

以上の内容により、本論文は、高温超伝導マグネットの永久電流減衰補償用磁束ポンプの実現に、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年8月2日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。