

氏名 星野昌幸

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第135号

学位授与の日付 平成7年3月23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 大型超伝導コイルの安定性と絶縁に関する研究

論文審査委員 主査 教授 山本純也  
教授 佐藤哲也  
教授 本島修  
教授 百田弘  
教授 塚本修巳

（横浜国立大学）

## 論文内容の要旨

超伝導コイルの要件に安定性と安全性がある。安定性は超伝導コイルがクエンチし難いこと、安全性は、もしクエンチが発生してもコイルが健全に保護されることである。コイルが大型化すれば、蓄積エネルギーが増大するため両要件とも重要度が増すことは明白である。本研究では、安定性に関して素線間電流転流現象、安全性に関して極低温ヘリウムの絶縁特性を明らかにすることによって大型コイル開発の促進に役立てることを目的としている。

本論文は5章からなり、それぞれの章においては、以下のような点について述べている。

第1章は序論で、本研究の目的について述べる。大型超伝導コイルには、安定性および製作性より撚線導体が用いられる。撚線導体の場合には、撚線内の数本が常伝導転移した場合に、常伝導転移した超伝導素線から電流および熱が残りの超伝導素線に移動する。このような現象のためモノリシック導体と異なる安定性を持つ。従来、電気回路解析や数値解析によって、素線間接触コンダクタンスの必要性が指摘されている。しかし、通電の行なわれる極低温では物性値が非線形に大きく値を変え不明確点が多く、実験による研究が各所で行なわれている現状にある。素線間電流転流現象を明らかにすることは大型超伝導コイル安定性の観点での急務である。

また、同じ超伝導線を用いて高磁界化、安定性の向上が行なえるため、超流動ヘリウムによる冷却が大型ヘリカル装置のような大型超伝導コイルで検討されている。飽和超流動ヘリウムは、パッシュェン曲線より絶縁破壊電圧が低いと予想されるガスヘリウム状態に容易に気化する。しかし、このような極低温低圧力状態のガスヘリウムの絶縁破壊電圧を調べた例はない。また、沿面絶縁破壊電圧は一般に絶縁媒体の絶縁破壊電圧に比べて小さくなり、沿面絶縁を含む極低温低圧力状態のガスヘリウムの絶縁破壊特性を調べることはコイル安全性の観点より重要である。このように本研究の目的は大型超伝導コイル開発の重要課題である。

第2章では、超伝導2本撚線による実験によって、素線間転流現象の基本特性を明らかにした。電流測定素子には、素線間の電流分配を変えずに電流測定できるピックアップコイルを用いた。また、常温でピックアップコイルの較正を行なった場合、冷却による熱収縮のためピックアップコイルの形状および位置が不明確になる。これを避けるため、液体ヘリウム温度でピックアップコイルを較正する方法を開発し実施した。

直流大型超伝導コイルとしての実用性を考えて、銅マトリックスNbTi超伝導線用いて実験を行ない、表面は自然酸化状態とし素線間に接触コンダクタンスを持たせた。実験により、ヒーターを入力した超伝導素線から隣接超伝導素線に電流が移るより、熱が素線間で伝わる方が遅いことを見いだした。また、電流転流が完了した後に隣接線が常伝導転移するため、ヒーター入力前の素線間の偏流によって安定性マージンが変わらないことを示した。電流転流現象を説明する数値解析コードを開発し実験と比較することによって、隣接線への熱伝達の遅れが準定常核沸騰熱伝達で説明できることを示した。素線間の接触抵抗、超伝導線の常伝導抵抗、素線間インダクタンス等の電気回路特性に限らず、素線間の熱伝達特性とヘリウム熱伝達特性によって電流転流が変わることを明らかにした。

第3章は、撚線の安定性について電流転流実験および数値解析によって明らかにしてい

る。ヒーターパルス幅を変えて安定性マージンを調べた結果、燃線においてもヒーターパルス幅が短い場合には入力したエネルギーによって、ヒーターパルス幅が長い場合にはヒーター電力によってクエンチの発生が決定されることを確認した。接触コンダクタンスが  $5 \times 10^{-4} \text{ S}$  と大きい場合には、ヒーターパルス幅を短くしてもクエンチ発生までの遅れ時間が短くならず、 $20 \text{ msec}$  と長いことがわかった。このため、均一に加熱された場合に比べ液体ヘリウムに対して熱伝達している時間が長くなり、均一擾乱に比べ局所擾乱の安定性マージンが高い可能性を示した。

数値解析によって超臨界ヘリウム冷却による安定性の変化を調べた結果、超臨界ヘリウム冷却では、大きな過渡熱伝達により安定性マージンは大きい、超伝導素線がお互いに全長に渡って接触している1次燃線では、電流および熱が迅速に隣接する超伝導素線に移動するため電流転流が安定性を向上する現象とならないことがわかった。実導体において、熱伝導が小さいことが予想される燃線間での電流転流現象を調べる必要性を指摘した。

第4章は、極低温ヘリウムガスの絶縁破壊特性について述べる。飽和超流動ヘリウム状態は容易に最小破壊電圧状態近傍のガスヘリウムに変わる。そこで、圧力を  $1.33$  から  $101 \text{ kPa}$  の間で変えて、飽和状態より幾らか温度の高い状態のヘリウムガスについて絶縁破壊電圧を測定した。測定を行なった範囲において、絶縁破壊電圧はパッシュンの法則に従い、ヘリウムガス密度とスペーサ厚さの積のみの関数となることを明らかにした。密度×厚さの小さい領域では、放電は沿面でなく気中ギャップで起こり、絶縁破壊電圧も同じギャップ長のヘリウムガス絶縁破壊電圧に一致する。これに対して、密度×厚さの大きい場合には、沿面で絶縁破壊して、破壊電圧もヘリウムガス絶縁破壊電圧よりも小さくなることを示した。誤差の範囲で、スペーサの直径や厚さによる絶縁破壊電圧の違いが無いことを確認し、本研究の結果が実際の超伝導コイルの設計に適用できることを示した。

第5章は、本研究で得られた結果についてまとめ、今後の研究課題について記述している。まず、超伝導燃線の電流転流現象の基本特性を明らかにし、超伝導燃線安定性設計の指針を示した。次に、ヘリウム絶縁破壊特性を調査し超流動ヘリウム冷却超伝導コイルの絶縁設計の基準を示した。今後の課題として、実機サイズでの確認の必要がある。

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文では、超伝導燃線の素線間電流転流現象とその燃線安定性におよぼす効果およびヘリウムガス沿面絶縁破壊を研究し、大型超伝導コイル開発に関して安定性と安全性の両面より論じられている。

素線間に電気接触コンダクタンスを持つ超伝導燃線の電流転流現象は超伝導燃線開発において重要であるが、実験による検証が十分に進んでいなかった。これは、素線間に電気接触コンダクタンスを持つため、シャント抵抗の直列挿入やロゴスキーコイルを超伝導素線取付けることによる燃線状態の変化によって超伝導燃線内の電流分布が変化してしまい、一般的な電流計測によって超伝導素線の電流が計測できないことによる。本論文ではピックアップコイル計測法を採用し、ピックアップコイルの配置方法などを工夫し、超伝導燃線の状態を変えることなく、電流転流現象の起こっている超伝導燃線の部位での電流計測に成功している。本実験によりヘリウム過渡熱伝達特性が電流転流現象に大きく影響を与えることが見いだされ、これに基づき実験結果をシミュレートする数値計算コードの開発も進んだ。さらには、実験および数値計算を用いて超伝導燃線を冷却するためのヘリウム状態の超伝導燃線の安定性への影響を明確にしている。これは、超伝導燃線の安定性研究において有益な進歩である。

大型超伝導コイルの超流動ヘリウム冷却技術の開発はまだ発達途上にあるが、本論文ではさらさらに進んで飽和超流動ヘリウム状態近傍でのガスヘリウムの耐電圧特性がクエンチ保護において重要であるにもかかわらずこの領域のヘリウムガスの絶縁破壊電圧が測定されていないことを指摘し、絶縁設計を念頭において絶縁スペーサを持つ平板電極系で絶縁破壊電圧が測定された。沿面絶縁破壊電圧のガスヘリウム絶縁破壊電圧のパッシェン曲線よりのずれと絶縁破壊箇所の関係を視覚による観察で明らかにした。また、絶縁破壊電圧の沿面面積効果が確認され、超伝導コイル絶縁設計のための重要なデータを取得している。これらは超流動ヘリウム冷却超伝導コイル絶縁設計において重要な知見である。

本論文は十分な学術内容を持ち大型超伝導コイル開発に貢献しているため学位論文として認められる。