

氏 名 松永 信之介

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2392 号

学位授与の日付 2023 年 3 月 24 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 低融点金属含浸した無絶縁高温超伝導コイルとそのクエンチ
保護に関する研究

論文審査委員 主 査 平野 直樹
核融合科学専攻 教授
柳 長門
核融合科学専攻 教授
田村 仁
核融合科学専攻 准教授
野口 聡
北海道大学 情報科学研究院 准教授
谷貝 剛
上智大学 理工学部 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 松永 信之介

論文題目 低融点金属含浸した無絶縁高温超伝導コイルとそのクエンチ保護に関する研究

超伝導コイルは、磁気浮上、核磁気共鳴、核融合のような定常強磁場を必要とするアプリケーションにおける必須技術である。現行で実用化されている超伝導コイルに使われている超伝導材料は NbTi や Nb₃Sn であり、これらは 20 K 以下の温度で超伝導が発現し、実際には液体ヘリウム温度 (4 K 付近) で使われる。他方、BSCCO、REBCO 等の銅酸化物系超伝導材料を用いた実用線材の製造方法が確立し、種々の応用に向けた研究開発が急速に進展している。これらは従来のもより高い超伝導転移温度を持つため、高温超伝導 (HTS) 線材と呼ばれる (これに対して従来のは低温超伝導 (LTS) 線材と呼ばれる)。超伝導材料には超伝導状態を維持できる磁場強度の臨界値 (臨界磁場) があるが、HTS 線材は従来の材料よりもその特性が優れており高磁場下で使用可能である。そのため、HTS 線材を用いた超伝導コイル、すなわち HTS コイルは現行より高い磁場が発生可能な超伝導マグネットを構成できると期待されており、例えば、高磁場核磁気共鳴では解像度の向上が、核融合装置ではプラズマ閉じ込め性能の改善が見込まれている。また、HTS 線材を用いることで従来よりもコイル電流密度の向上が可能であり、ヘリカル型核融合装置や球状トカマク装置の設計においてはコイルスペースを減少させて狭隘な炉構造を改善することができる。以上のように HTS コイルは魅力的な技術であるが、高い超伝導転移温度と高い電流密度を持つ HTS コイルではクエンチ保護が難しいという課題がある。HTS コイルの安定性は極めて高いため、一部分で生じた常伝導部は LTS と比べて千分の 1 程度の速度でゆっくりと伝播する。このため、常伝導転移部で発熱が集中しやすく、損傷する程にホットスポット温度が上昇するまでの時間が短い。例えば、ヘリカル型核融合装置の場合、STARS 導体 (HTS 導体の一種) で構成されたヘリカルコイルを想定した先行研究において、目標値である 80 A/mm² の電流密度では 200 K に到達するまで 3 秒以下であると見積もられている。1.5 GHz 級 NMR 装置で想定されているような数百 A/mm² の運転電流密度で運用される HTS コイルの場合は数百ミリ秒である。現状、蓄積磁気エネルギーを外部放電することでクエンチ保護する従来型の方法を HTS コイルに適用することは技術的に難しく、早期クエンチの検出法やコイルの多数ブロック分割による高速遮断法が検討されている。一方、本研究では HTS コイルのクエンチ保護として急速に安定性を向上させてクエンチを抑制する方法を検証した。これは、メイン磁場コイルに磁氣的にカップリングしたサブコイルを用いて、電磁誘導によってメイン磁場コイルの電流値を急速に減少させるというものである。この概念を「レスキューコイル法」と呼称する。この方法では動作時の磁束の変化が小さく発生電圧を抑えられるため急速な減流が可能になる。レスキューコイルの基本原理を検証するため、小型の HTS コイルを用いて実験を実施した。実験の結果、サブコイルの電流を制御することによってメイン磁場コイルの電流値を急速に減少できることを実証した。次に、熱擾乱を加えて無絶縁コイルのクエンチを誘発させた場合におけるレスキュー

ーコイルの動作を実験によって検証した。このとき、電圧上昇する無絶縁コイルに対して磁場変動を加えると、上昇していた電圧が急下降した。実験データを解析した結果、電圧の急下降後、電流分布の再分配過程を経て熱擾乱を加える前の状態に復帰する挙動が確認された。

高磁場マグネットの基盤技術として無絶縁コイルという巻線方法が注目されている。無絶縁コイルとはコイル巻線間の電気絶縁を除いた超伝導コイルである。巻線間に絶縁がないため電流は常伝導転移部を避けるように隣の健全なターンに転流する。従来の巻線間絶縁を持つ超伝導コイルでは常伝導転移部で局所的に発熱するため温度上昇が急峻であるが、無絶縁コイルでは転流機構によってジュール発熱が分散するためホットスポット温度の上昇がゆるやかである。あるいは、クエンチまで至らずに常伝導転移部が自然に消滅することで運転を続行できることも期待できる。一方、無絶縁コイルでは巻線間が低抵抗で短絡されておりコイル両端から急速に電流を掃引することができないため、蓄積磁気エネルギーを巻線外で放電させることができない。このとき、運転温度から許容温度まで上昇するまでのコイル本体部のエンタルピーが蓄積磁気エネルギーより小さいと許容温度を超えてしまう。ヘリカル型核融合炉のマグネットシステムを想定して試算したところ、到達温度は許容温度として設定されている 150 K を超えることがわかった。このような条件では無絶縁コイルは成立しないと考えられるが、先述のレスキューコイル法はメイン磁場コイルの周回電圧に直接作用することができるため、無絶縁コイルと組み合わせることができる。本研究では更に無絶縁コイルとレスキューコイル法を組み合わせた大型の高磁場マグネットの構成を検討した。そこで、無絶縁コイル巻線手法である **Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes (WISE)** に注目した。これは、フレキシブルスパイラルチューブを用いて HTS 線材を束ねて巻線し、その後に低融点金属で含浸するという方法であり、巻線間が低融点金属で短絡された無絶縁コイルとなる。また、含浸前の WISE 導体は良好な可撓性を持っていることから巻線が容易であること、巻線時に線材が固定されていないため線材間の経路長の差異による歪みが生じないことが特徴である。無絶縁コイルの問題のひとつとして迂回電流と磁場によるローレンツ力により機械的に破壊される事象が考えられている。これに対して、レイヤー間絶縁を施したレイヤーWISE 巻線ならば迂回電流と磁場を平行にしてローレンツ力を低減できると考えられる。しかし、WISE 導体、および WISE 導体で構成されたコイル (WISE コイル) はこれまで製作された例はなく、その成立性や特性は不明であった。そこで、WISE 導体、および WISE コイルのサンプルを製作して冷却・励磁試験を行いその結果を分析し、超伝導コイルとしての成立性や特性を調査した。製作した WISE コイル (ソレノイドコイル、300 A の導入電流で約 0.075 T の中心磁場) は設計値どおりの磁場を発生させたことから、WISE コイルの成立性を実証した。このとき、冷却サイクルによって HTS 線材が損傷して生じたと思われる常伝導抵抗が確認された。無絶縁コイルにおいて両端電圧と運転電流のみから通電特性を解析することは不可能であることから、磁場測定と電気回路モデルを組み合わせる解析手法を構築した。この解析方法によって WISE 導体の電界-電流特性を取得することに成功した。

本研究では、高磁場 HTS マグネットの実現のために新しい能動的安定化概念：レスキューコイル法を構築、検証した。レスキューコイル法と無絶縁コイルと組み合わせることで、非常に良好な安定性を持つ新しい高磁場マグネットシステムの構成を示した。また、レス

キューコイル法との相性が良い無絶縁コイルの巻線方法として WISE に注目し、実際に製作して試験をすることでその基本特性を取得した。本研究で得られた知見は従来以上の大型・高磁場のマグネットシステムを成立させることに資すると考えられる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 松永 信之介

Title
論文題目 低融点金属含浸した無絶縁高温超伝導コイルとそのクエンチ保護に関する研究

松永信之介氏は、大型の高温超伝導コイルを特に高電流密度において実用化するうえでクエンチ保護が確立していない問題に着目し、新しいクエンチ保護概念として、メイン磁場コイルに磁氣的にカップリングするサブコイルを用いてクエンチ発生時に電磁誘導によってメイン磁場コイルの電流値を急速に減少させる方法を提案し、このサブコイルをレスキューコイルと命名、原理実証実験をはじめとする基本的な検証を実施した。同時に、クエンチ保護として別途有効と考えられる自己安定機能を備えた無絶縁コイルに着目し、新しい大型無絶縁コイル巻線の概念であるフレキシブルスパイラルチューブ内に高温超伝導線材を束ねた状態で巻線し巻線完了後に低融点金属を充填して含浸するという **Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes (WISE)** 導体および **WISE** コイルについて、その成立性を世界で初めて検証し、超伝導コイルとしての基礎特性を把握した。本論文は、高磁場高温超伝導コイルのクエンチ保護の新しい能動的安定化概念であるレスキューコイル法の構築とその検証、レスキューコイル法との相性が良い無絶縁コイルの巻線方法である **WISE** コイルを製作・試験することで取得した基礎特性ならびにその解析結果についてまとめたものである。

本論文は全 4 章で構成されている。第 1 章で高温超伝導線材を用いた高磁場マグネットのターゲットとして核融合炉や **NMR** などについて紹介し、大型・高電流密度の高温超伝導コイルの課題はクエンチ保護技術が未確立であることと指摘した。この課題を解決するアプローチとして、第 2 章で無絶縁コイルに適用可能な電磁誘導による超伝導コイルの能動的急速安定化法であるレスキューコイル法の概念や、小型の無絶縁高温超伝導パンケーキコイルを用いた基礎試験による検証結果、ならびに回路モデルによる解析結果について述べている。続く第 3 章では、大型・高電流密度の高温超伝導コイルの巻線方法として、巻線間を絶縁しないことで良好な安定性が得られる無絶縁コイルにおいて、課題の一つに導体の一部が常伝導転移した際に近隣の導体に電流が転流する際に流れる迂回電流と磁場によるローレンツ力により導体が機械的な損傷を受ける事象が考えられることに着目した。これを解決する方法として、迂回電流と磁場の向きが等しくなることが期待されるレイヤー巻き無絶縁コイルを対象とし、その構成に向いている **WISE** コイルについて、2 種類のコイルを製作し励磁試験を実施した結果やその通電特性を解析する手法を構築し、**WISE** コイルの成立性を実証しその基礎特性を詳細に調査した結果を述べている。第 4 章では、本論文のまとめとして、レスキューコイル法とレイヤー巻き無絶縁 **WISE** コイルの組合せが電磁力を緩和し、クエンチを回避する安定化機構を備えた高磁場超伝導マグネットシステムを構成できる可能性がある結論付けている。

松永氏は、大型大電流密度の核融合炉用マグネットに高温超伝導を適用する際の課題と

して、クエンチ保護技術が確立していないことに着目し、高い安定性を持つ無絶縁コイルに適用可能で、無絶縁コイルの転流（自己安定）機構に加えて電磁誘導によって急速にコイル電流を減少させることでクエンチを回避させるという概念（レスキューコイル法）について、小型の無絶縁コイルを用いた液体窒素温度下での実験によりレスキューコイル法によるクエンチ保護を実証し、電気回路モデルでその動作を説明できることも示した。さらに、熱擾乱を加えて無絶縁コイルのクエンチを誘発させた場合におけるレスキューコイルの動作を実験によって検証した。このとき、電圧上昇する無絶縁コイルに対して磁場変動を加えると、上昇していた電圧が急下降し、その後、電流の再分配過程を経て熱擾乱を加える前の状態に復帰する挙動を確認しており、無絶縁コイルのクエンチ発生時におけるレスキューコイル法の有益性を検証している。

また、これまでの概念からは容易に想像できない金属による含浸で超伝導コイルを製作するという挑戦的な取り組みを行い、レイヤー巻きの **WISE** コイルを製作して励磁試験で基礎特性を把握し、設計値通りの磁場発生も確認できたことから、**WISE** コイルの成立性を実証できた。さらに、無絶縁コイルにおいて両端電圧と運転電流のみから通電特性を解析することは不可能であることから、磁場測定と電気回路モデルを組み合わせた解析手法を構築した。この解析方法によって無絶縁コイル **WISE** 導体の電流－電圧特性を取得することに成功し、無絶縁コイルの巻線間をバイパスする電流に影響を与える常伝導抵抗成分を定量的に評価するに至っている。

松永氏の成果は、今後、核融合炉も含めた高磁場用途の大型超伝導コイルの社会実装を実現していく上で重要な成果であり、新規性が高く、学術的な価値も高いと評価でき、今後の発展も大いに期待できる。これらのことから、審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な価値を有するものと判断した。