

氏 名 寺崎 義朗

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1907 号

学位授与の日付 平成29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 ヘリカル型核融合炉に適した高温超伝導・大電流積層導体の安定性に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 室賀 健夫
教授 柳 長門
教授 高畑 一也
教授 岩熊 成卓 九州大学
准教授 伊藤 悟 東北大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

磁場閉じ込め方式の核融合炉では、プラズマを閉じ込めるために強力な磁場を発生することが必須であり、これには、超伝導マグネットが用いられる。将来のヘリカル型核融合炉の超伝導マグネットに用いる大電流導体として先進の高温超伝導 (High-Temperature Superconductor; HTS) 線材を用いる提案が行われたことを受けて、プロトタイプの大電流導体サンプルを実際に試作し、100 kAの電流値を達成するとともに、得られた実験結果について数値解析を用いて検証し、安定に臨界電流まで通電できたことを実証した。

現在、稼働中の核融合実験装置のマグネットでは、低温超伝導 (Low-Temperature Superconductor; LTS) 線材を用いて大電流導体が製造され、巻線が行われている。例えば、核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device; LHD) では、ヘリカルコイル用導体の仕様は、定格磁場7 Tにおいて定格電流13 kAであり、ニオブチタン (NbTi) 線材が用いられている。一方、国際プロジェクトとして建設中の核融合実験炉 ITERでは、トロイダル磁場 (TF) コイル用導体について、定格磁場11 T、定格電流68 kAとなっており、ニオブ3スズ (Nb₃Sn) 線材が用いられている。これに対して、将来の核融合炉 (原型炉およびその先の商用炉) では、磁場12 T以上において電流100 kA級の超伝導導体が要求され、一層の技術進展が必要となっている。近年、導体候補のひとつとして HTS導体を用いる提案がなされ、現在、開発が始まっている。HTS線材は20 T以上の高磁場まで高い臨界電流を有するため、コイルを小型化 (高電流密度化) したり、炉全体を小型化したりできる可能性がある。また、臨界温度として100 K付近の高い値を有することから安定性マージンに優れ、クエンチリスクを大幅に低減できる。さらには、運転温度を20 K付近に設定することで冷凍機に必要な電力を低減できるとともに、多数の接続を入れた新しい巻線方法も想定可能となるなど、大きなポテンシャルを有する。ただし、大型導体について確立された方式はまだなく、開発は始まったところである。

本博士論文では、NIFSにおいて概念設計が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1の直流運転超伝導マグネットに用いることを想定した HTS 大電流積層導体の開発研究を行い、特に、電磁・冷却安定性に関する特性を明らかにすべく、実験と解析を遂行した。この導体では、HTS 線材のうちイトリウム系の GdBCO 薄膜線材を用いて、テープ形状の線材を単純に積層するという構造を採用している。これは、従来の LTS 導体や欧米で開発されているトカマク型核融合炉のパルス運転を想定した HTS 導体と大きく異なり、線材間に撚りや空間転位を施さないタイプであり、簡素な構造ゆえに機械強度が高く、接続作業が容易で、低コストの導体になるものと見込まれる。一方、テープ線材間のインダクタンスの差や幅広いテープ面に流れる遮蔽電流によって電流分布が不均一になると考えられる。これにより局所的に臨界電流密度に達する部分が生じた場合、その部分から発熱が始まり、導体全体として予測される臨界電流値より低い電流値においても熱暴走 (クエンチ) に至る懸念が残る。このため、このタイプの HTS 導体で本当に大電流まで安定に通電できるかどうかの検証が大きな課題であった。

本博士論文は全4章からなり、第2章では、定格電流 30 kA 級および 100 kA 級の HTS

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

導体の試作および特性試験について詳述した。100 kA という大電流を流す超伝導コイル用直流電源は世界でも存在しないため、サンプルを短絡コイル形状として外部磁場の変化によって電流を誘起する方法を採用するとともに非接触の電流計測を行うなど、多くの工夫を取り入れた。実験結果として、温度 4~30 K、磁場 0~7 T、励磁速度 1 kA/s までの条件において、臨界電流の特徴を示す電流まで安定に通電できることが示された。第 3 章では、この結果を検証し、さらにコイル実証へ研究を進展させることを目的として数値解析を行った結果が述べられている。線材の臨界電流特性をもとに導体内の電流分布と磁場分布を整合性良く取り入れて計算を行い、実験で得られた各条件での最大到達電流が線材の臨界電流特性からその総和として計算される導体全体の臨界電流で説明できるかどうかを検証した。ここで、線材単線の臨界電流は、温度と磁場強度、および、磁場の印加角度を正確に考慮して与えた。計算の結果として得られた導体の臨界電流は実験で観測されたものと近く、外部磁場および自己磁場に応じて電流が線材間でスムーズに転流することにより高い電流値まで安定に通電できたと考察した。また、臨界電流到達時に観測されたサンプル電流の変化について伝熱・電気回路の連成解析を行い、冷却安定性について検証した。その結果、まず、銅安定化材部分の電流密度として 85 A/mm^2 以下であると臨界電流を超えても熱暴走せず高い安定性を示すことを確認し、今後の導体設計の指針を与えるものとなった。また、開発した解析コードを FFHR-d1 の 100 kA 級導体モデルにも適用し、常伝導転移に必要なエネルギーの同定や転移後の導体温度分布の上昇過程を解析することに成功した。特に、万一、常伝導転移が生じ、それが拡大してクエンチに至った場合の保護の問題を検討し、導体が局所的に到達する最高温度（ホットスポット温度）について電源遮断時定数に対する関係を求めた。その結果、LTS 導体を用いた場合よりも十分に遅い 30 秒程度の時定数においてもホットスポット温度として 200 K 程度で収まることが得られ、遮断時の電圧発生を 10 kV に抑える観点からも極めて有効であることがわかった。

以上の結果をもとに、HTS 導体がヘリカル型核融合炉の超伝導マグネットにおいて適用可能であることを示し、大きな研究成果となった。

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本博士論文では、ヘリカル型核融合の超伝導マグネットに用いる大電流導体として提案されている先進の高温超伝導（High-Temperature Superconductor; HTS）線材を用いた単純積層導体についてプロトタイプの大電流導体サンプルを実際に試作し、100 kAの電流値を達成するとともに、得られた実験結果について数値解析を用いて検証し、安定に臨界電流まで通電できたことを実証した。これにより、HTS導体がヘリカル型核融合炉に適用可能であることを示すことができ、大きな研究成果となった。この結果をもとに、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しているものと判断した。

2017年1月24日に開催された本審査会においては、博士論文の内容に関して口述試験を実施した。まず論文内容について約1時間で説明を行った後、約2時間に渡り質疑応答を行った。提出論文の内容について詳細に説明するとともに、審査委員から出された全ての質問に対して十分な回答を行った。質問の主なものとしては、実験結果における臨界電流到達の判定方法や臨界電流値の算出方法（n値モデル）、数値計算における線材内の電流分布・磁場分布を考慮した臨界電流の算出方法などに関するものであった。

2017年1月31日に行われた公開発表会では、約1時間の発表、および、約半時間の質疑応答を行った。この発表にあたり、先の口述試験時に行われた質疑応答をもとに発表内容をさらに充実させ、研究の背景、目的、考察をさらにわかりやすく説明するとともに、得られた実験結果と数値解析結果について丁寧に説明した。質疑応答では、約25件に及ぶ質問があり、そのほとんどに的確かつ明快に回答した。

これまでの発表論文としては、査読付き第一著者英語論文3本が刊行済みであり、1本が刊行予定である。国際会議では、3回の口頭発表と5回のポスター発表を行っており、英語による研究発表能力も十分であると判断した。

以上の審査結果をもとに、本論文が博士学位論文として認定されるものと判定した。