

博士論文審査報告書

論 文 題 目

高電流密度と高磁場を両立する
高強度高温超電導コイル化技術に関する研究
Study on high-strength HTS coil to achieve both
high current density and high magnetic field

申 請 者

渡部	智則
Tomonori	WATANABE

2022年7月

希土類系超電導線材は、従来の金属系超電導線材に比べて、高温・高磁場下で高い臨界電流を維持できる極めて優れた特性を有しているが、巻線・コイル開発が進むにつれて、希土類系超電導線材特有の薄膜多層テープ構造に起因する層間剥離による特性劣化や熱暴走による焼損が多数報告されるようになった。高磁場応用を目的とする超電導機器の実用化には、高磁場をより高電流密度で発生させることにより、高額な希土類系超電導線材の使用量を削減することが不可欠となるが、高磁場下での高電流密度通電は、超電導線材の強度を超える強い電磁力が作用するため、コイルの高機械強度化が必須となる。また高電流密度での通電は、常電導転移時の発熱量が大きくなるので、熱暴走による焼損事故を回避するには熱的安定性の更なる向上が必要となる。以上の背景のもと、本研究では、希土類系超電導線材の優れた通電特性を活かし、これまで到達できなかった高電流密度で高磁場を発生可能なコイルの実現を目標として、層間剥離の防止対策を行った上で、高機械強度化と高熱的安定化を可能とするコイル化技術を提案し、試作コイルによる評価実験により有効性を検証している。本論文はその成果をまとめたもので7章から構成されている。以下に各章の概要を述べ評価を加える。

第1章「序文」では、希土類系超電導コイルの実用化に望まれる高電流密度化・高磁場化には、高機械強度化と高熱的安定化の確保が不可欠な技術要素であることを説明している。そしてこれらの技術要素の両立が、希土類系超電導コイルの実用化に必須であることから、これを本研究の目的としたことが述べられている。

第2章「希土類系超電導線材のコイル化への技術課題の明確化」では、希土類系超電導線材特有の薄膜多層構造に起因する層間剥離の問題に着目し、線材の剥離強度試験を行っている。そして線材の欠陥サイズの分布測定から剥離強度を確率的に予測することで、剥離応力の作用する面積が大きくなると小さな応力でも剥離が生じやすいことを示し、希土類系超電導コイルにおいては、ターン間に作用する応力を最小化して、コイル径方向応力を抑制するコイル構造が必要であることを明らかにしている。本章の成果は、巻線・コイル化における剥離対策の指針を示したものと評価できる。

第3章「高強度超電導コイル（Yoroi-coil）の開発」では、第2章で得られた知見にしたがって、希土類系超電導線材の剥離防止のため、ターン間を拘束しないコイル巻線方式を採用し、且つ高磁場応用において十分な電磁力耐性を有する超電導コイルの高強度化を実現可能なコイル構造として「Yoroi-coil (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil)」構造を提案し、フープ応力耐性を実験と数値解析により評価している。Yoroi-coil コイル構造は、コイル巻線と、巻線の外周に配置された枠材、およびコイル巻線の上下面に設置され枠材に接合された側板から構成されている。これによりコイル巻線に作用する電磁力（フープ応力）を外枠および上下側板が分担して支えることが可能となる。側板として G-FRP（ガラス繊維強化プラスチック）を用いた試作コイル（内径：143mm、巻数：60）の実験により、1.7GPa（温度：4.2K、外部印加磁場：8

T、通電電流：1,500 A) まで特性劣化が生じないことが実証された。希土類系線材の引張応力限界が 800MPa 程度であることから、適切に応力分担が行われ、線材の変形・ひずみが効果的に抑えられていると考えることができ、並行して行った三次元構造解析においても効果が確認されている。Yoroi-coil 構造により、高電流密度・高磁場の運転条件において不可欠となる高い電磁力耐性を有するコイルが実現できる見通しを得ることができたことは高く評価できる。

第 4 章「Yoroi-coil 構造の補強効果の検証」では、電磁力に対する Yoroi-coil 構造の補強効果を、補強材として C-FRP (炭素繊維強化プラスチック) とステンレス鋼を用いた試作コイルの高磁場中通電試験により検証している。剛性の高い C-FRP 補強板を用いたコイルでは、2 GPa (温度：4.2K、外部印加磁場：14 T、通電電流：1,130 A) とさらに強大なフープ応力条件下においても、Yoroi-coil 構造により巻線に作用する応力が緩和できることが確認された。ステンレス鋼を補強部材としコイル巻線を緻密化した (線材厚：100 μ m) Yoroi-coil 構造コイルでは、1.1 GPa (温度：4.2K、外部印加磁場：11 T、通電電流：260A) が作用する環境下で 450 A/mm² 近傍の高い電流密度の通電が達成された。本章の評価実験と三次元構造解析の結果から、Yoroi-coil 構造の補強材を適切に選ぶことにより、応用目的に応じた高強度コイルが実現可能であることが示された意義は大きい。

第 5 章「無絶縁コイル巻線技術の Yoroi-coil 構造への適用の検討」では、まず、熱的安定性向上のため、ターン間に電気絶縁を施さずに巻線する無絶縁 (NI:No-Insulation) コイル技術を Yoroi-coil 構造の希土類系超電導コイルに適用した場合の熱的安定性確保のための伝導冷却効果を改善する方法について検討している。NI コイル巻線では、巻線と伝導冷却板の間の熱接触が不十分になる。そこで冷却板と巻線の間伝熱シート (シリコンシート) を挿入した場合の効果、伝導冷却下での電流遮断試験による温度上昇計測によって評価し、伝熱シートにより温度上昇を著しく低減できることを確認している。次に NI コイル巻線の課題である励磁遅延の回避を図るため、4 本の線材によって構成されるバンドル導体を用いた Yoroi-coil 構造 NI コイルを提案し、試作コイルによる通電試験により評価している。最大 5 A/s の電流掃引速度で励磁しても、バンドル間の電氣的結合を防ぎ、励起遅延を大きく改善できることを確認している。さらに局所的常電導転移発生時の評価実験を実施し、バンドル内の線材間電流転流により継続運転が可能であり、コイル電流と発生磁場が維持されていることが確認できた。本章の成果は、第 1 章で本研究の目的として示した二律背反の関係にある高電流密度・高磁場化と高熱的安定化の両立が、Yoroi-coil 構造に NI コイル巻線方式を導入することにより可能となることを実験により実証したものと評価できる。

第 6 章「非円形コイルにおける Yoroi-coil 構造の補強効果の検証」では、まず、加速器用マグネットなどに必要とされる非円形コイルにおける Yoroi-coil 補強構造の効果を、二等辺三角形形状の NI コイルを試作し、外部高磁場中でのコイル通電による強度試験により評価している。Yoroi-coil 構造を適用していないコイル

では、10T の外部磁場中で 160 A 以上の通電をしたところで抵抗性の電圧が観測された。試験後の解体調査でコイル巻線の一部が塑性変形していることが確認されたが、NI コイル巻線の採用により焼損は免れている。これに対し、Yoroi-coil 構造を適用したコイルでは、外部磁場 14 T 中 300 A までの通電において急峻な電圧上昇は観測されなかった。これにより 2.8 倍の応力が加わったにもかかわらず Yoroi-coil 構造の採用により超電導特性が維持されていることが確認された。試験後のコイル解体調査でも、コイル巻線の乱れは認められなかった。並行して行った三次元構造解析でも補強効果や応力集中箇所におけるひずみ低減効果を確認している。さらに、直流誘導加熱装置への応用を想定して、Yoroi-coil 構造を有する矩形 NI コイルを 3 個ずつ配置したスプリットコイルペアを作製し、直径 300 mm 程度の対抗距離で、臨界電流までコイル通電を繰り返したところ、200 回以上の励磁の繰り返しにおいても臨界電流の低下は認められず、劣化を防止できる可能性があることを確認している。以上のように、実応用を想定した非円形コイルにおいても、Yoroi-coil 構造が高磁場・高電流密度コイル実現のための要素技術として有効であることを実証した本章の成果は高く評価できる。

第 7 章「結言」では、本研究で得られた成果・知見を総括し、この成果が超電導技術の導入に貢献することの期待を示して、まとめとしている。

以上が本論文の要旨とその評価である。要するに本研究は、希土類系超電導線材の持つ優れた特性を活かして高磁場・高電流密度コイルを実現するために不可欠となる高機械強度化と高熱的安定化を達成するための要素技術として、新たに提案・開発した Yoroi-coil 構造と無絶縁 (NI) コイル巻線技術を組み合わせたコイル化技術が有効であることを実験と数値解析に基づき検証したものである。この成果は、超電導機器開発とその応用分野の拡大に多くの貴重な知見を与え、超電導工学及び電気機器分野の発展に多大な貢献をなしている。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。

2022 年 7 月

審査員 (主査) 早稲田大学教授 工学博士 (早稲田大学) 石山敦士

早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 若尾真治

早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 林 泰弘

早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 近藤圭一郎
