

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

高磁場・高精度磁場発生のための  
高温超電導コイル化技術に関する研究

Study on an HTS Magnet Technology for  
High-Intensity and High-Accuracy Field Generation

申請者

王	韜
Tao	WANG

電気・情報生命専攻 超電導応用研究

2016年 7月

近年性能向上が著しい REBCO 超電導線材（希土類系高温超電導線材）を巻線したコイルの応用に向けた研究・開発が内外で活発となっている。その中で筆者は、REBCO 線材を巻線したパンケーキコイルを医療用 MRI および癌治療用粒子線加速器に応用することを最終目標として研究・開発を進めてきた。これらの医療応用においては、高度の安全性・信頼性を確保しつつ、高い発生磁場精度の実現と、高電流密度化・高磁場化による小型化・低コスト化が不可欠となる。REBCO 線材はテープ形状をしているため、線材厚みの不均一性によりコイル巻線時にばらつきが発生し、これが高精度の磁場発生に悪影響を与える。超電導コイルシステムの小型化の実現のためには、高い熱的安定性を確保しつつ高電流密度化を達成する必要がある。しかし、高電流密度化と高熱的安定性は本来二律背反の関係にあることから、これらを両立することのできる技術の開発が必要となる。このように REBCO 超電導線材の有する性能を十分に活かすためには、より高度なコイル化技術の開発が必須となる。

著者は以上のような背景のもと、REBCO パンケーキコイルの医療応用を目的とし、高精度磁場の発生と、高電流密度化と高熱的安定性の両立を可能とする超電導コイル化技術の開発を行ってきた。本論文はその成果をまとめたものであり 6 章から構成されている。以下各章毎の概要を述べ評価を加える。

第 1 章「序論」では、まず、本研究の応用目標である医療用 MRI と癌治療用粒子線サイクロトロン型加速器に用いられる高温超電導コイルシステムに求められる仕様と性能について概説している。次に、目的とする高温超電導コイルを開発するための課題を挙げ、本研究の位置づけと意義を明確にした上で、本論文全体の概要を記している。

第 2 章「REBCO 超電導パンケーキコイルの巻線精度の影響評価」では、パンケーキコイル製作時の巻線精度の測定・評価と、実規模コイルにおける発生磁場精度への影響評価について述べている。テープ形状を有する REBCO 線材でパンケーキコイルを製作すると、線材の厚さの不均一性によりコイル巻厚にばらつきが発生する。また、コイル巻線機の回転軸の振動などにより、巻線軸方向に巻線誤差が生じる。そこでここでは、レーザー変位計と表面粗さ測定機を用いた高精度測定系を構築し、市販の REBCO 線材を対象に線材厚みのばらつきとコイル軸方向の巻線誤差に関する基礎データを取得した。そして得られたデータを用いて、先行研究により設計された重粒子線癌治療を目的とするサイクロトロンの等時性磁場発生用実規模コイルシステムを対象に、巻線誤差が磁場精度に与える影響を解析・評価した。そして目的とする高磁場精度を実現するための巻線誤差の許容範囲を明らかにしている。さらに巻線誤差によって発生する不整磁場を低減するための方策の一つとして、超電導コイルシステムの負荷率（臨界電流値に対する運転電流の割合）を最適化する方法を提案している。これらの成果は、高磁場精度の超電導コイルシステムを設計・製作するために貴重なデータを提供するものと評価できる。

第3章「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの電磁的・熱的挙動解析用プログラム」では、無絶縁 REBCO パンケーキコイル巻線内の電流分布および発熱・温度分布の時間変化を解析することのできるプログラムの開発について述べている。無絶縁コイル巻線は、超電導線材に電気絶縁を施さずに巻線するもので、本来二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定性を両立することのできる巻線技術として期待されている。すなわち、線材間の銅安定化層を共有できるため巻線内の平均電流密度を高くすることができる。また、巻線内に常電導転移が発生した場合、電流が隣接する線材に迂回できるため、熱的安定性の向上が可能となる。しかし、無絶縁コイル巻線内の電磁的・熱的振舞いは極めて複雑となることから、これらをより正確に解析できる適切な解析モデルの開発が不可欠となっていた。そこで本研究では、部分要素等価回路 (PEEC) モデルに基づく電流分布解析と、有限要素法に基づく温度分布解析を連成させた計算機プログラムを開発している。そしてまず、先行研究により行われた無絶縁 REBCO コイルの過電流通電試験の結果との比較により、開発したプログラムの妥当性を確認している。次に開発プログラムを用いて、無絶縁コイルの励磁・遮断・過電流・常電導転移時の巻線内の電磁的・熱的過渡現象の解析に適用し、これまで明らかにされていなかった無絶縁コイル特有の振舞いを再現・可視化することに成功している。ここで開発されたプログラムにより、無絶縁コイル巻線内の電流や発熱・温度分布の時間変化を把握できるようになったという成果は極めて高く評価できる。

第4章「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの熱的安定性の解析・評価」では、第3章で述べた無絶縁コイルの挙動解析用計算機プログラムを用いて、REBCO 線材を構成する銅安定化層の厚みと負荷率が無絶縁 REBCO パンケーキコイルの高電流密度化に与える影響と、層間接触電気抵抗が励磁特性（無絶縁コイル特有の発生磁場の遅れ）と熱的安定性に与える影響について解析・評価を行った結果について述べている。第3章までの検討により、無絶縁 REBCO パンケーキコイルが高い熱的安定性を有しつつ高電流密度化を達成できることが示された。しかし、本研究の応用目的である MRI やサイクロトロンに用いられる大口徑（内直徑 1000mm 級）超電導パンケーキコイルに無絶縁巻線技術を適用するためには、高熱的安定性と高電流密度化の両立に加えて、高熱的安定性と高励磁特性（発生磁場遅れの改善）を両立させなくてはならない。そこで本研究では、まず開発した無絶縁コイルの電磁的・熱的挙動解析用プログラムを用いて、小型（内直徑 60mm）および大口徑（内直徑 1000mm）無絶縁パンケーキコイルを対象として、層間接触電気抵抗、銅安定化層の厚みおよび負荷率が熱的安定性に与える影響を解析・評価している。また高電流密度化と高熱的安定性を両立するための銅安定化層厚みと負荷率の決定法と、熱的安定性を保ちつつ目標とする励磁特性を実現するための層間接触電気抵抗の決定法を提案している。ここで得られた成果は、無絶縁コイル巻線技術の実応用に向けて貴重な知見を与えたものと評価できる。

第 5 章「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの常電導転移検出技術」では、第 3 章で述べた無絶縁コイルの挙動解析用計算機プログラムを用いて、無絶縁 REBCO パンケーキコイル巻線内の局所的常電導転移を検出する方法として、ピックアップコイルを用いる方法の有効性について検討した結果について述べている。超電導コイルの実応用においては、コイル巻線内の常電導転移事故を正確に早期検出し、速やかにコイルに蓄えられている磁気エネルギーを回収することによって巻線内の温度上昇を抑える必要がある。無絶縁コイルにおいては、常電導転移発生に伴う巻線内電流分布の時間変化が絶縁コイルと大きく異なるため、従来の常電導抵抗発生に起因する電圧検出法を利用することが難しい可能性がある。そこで本研究では、常電導転移発生時の無絶縁コイル巻線内の電流分布変化に伴う発生磁場の変化をピックアップコイルにより検出する方法に着目し、その有効性について、第 3 章で述べた無絶縁コイルの挙動解析用計算機プログラムを用いて大口径（内直径 1000mm 級）・実規模無絶縁コイルを対象に評価している。その結果、ピックアップコイルにより局所的常電導転移を検出可能であることは示された。実応用が期待される無絶縁コイルの実現に向けて意義のある成果と評価できる。

第 6 章「総括」では、本研究で得られた知見および成果を総括している。

以上が本論文の要旨とその評価であるが、要するに本論文は、高温超電導コイル技術を活かした医療用 MRI および癌治療用粒子線サイクロトロン的小型・高性能化を目指し、超電導コイルシステムの高精度磁場発生技術、高熱的安定性と高電流密度化を両立する技術の開発を行ってきた成果をまとめたものである。特に、応用・実現が期待されている無絶縁コイル技術のための挙動解析用プログラムの開発は極めて重要な成果と評価できる。本論文は、今後の高温超電導コイルシステムの開発・実用化に向けて貴重な知見を与えており、超電導工学分野の発展に多大な貢献をなすものと評価できる。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。

2016 年 6 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	工学博士	早稲田大学	岩本	伸一
	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