

博士論文概要

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

2015年11月

生命・基礎科学研究用 NMR や医療用 MRI，がん治療用加速器に用いられる超電導コイルの高磁場化（NMR 用：24T 以上，MRI 用：7T 以上，加速器用：6T 以上）による機器の小型・高性能化が求められている。そのような状況のもと，近年進展著しい高温超電導（HTS）技術を活用した高磁場発生用コイルの研究開発が内外で活発となっているが，経済性や利便性に課題があり，現状では普及・拡大が難しい状況にある。また，NMR/MRI や加速器用の超電導コイルシステム開発においては，特に，高い発生磁場精度と高度の安全性・信頼性を確保した上で，小型化(高磁場化・高電流密度化)・低コスト化を実現しなければならない。

現在，超電導線材として，REBCO 超電導線材の使用が主流となっている。その理由としては，高温領域で優れた超電導特性を有していること，コイルシステムの高磁場化・小型化が実現される可能性が高く，また，高い熱的安定性により，安全性・信頼性の高いシステムの実現が可能となること，さらに，基板として Hastelloy を使用することから，引張強度が強く，高磁場下での耐電磁応力特性に優れていることなどが挙げられる。しかし，積層テープ形状をしているため，線材厚みのわずかな不均一性により，コイル巻線時にばらつきが発生し，これが磁場均一度に影響を与える。また，コイル励磁および減磁時に線材に加わる磁場の時間変化により，テープ形状をした REBCO 線材内の超電導層に長時定数の遮蔽電流が顕著に誘導され，その結果として発生磁場の空間的・時間的安定性に無視できない影響が生まれる。一方，高温超電導コイルシステムの小型化の実現のためには，高い熱的安定性と高いレベルでのコイル保護を確保しつつ，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化は，本来二律背反の関係にあることから，この両者を同時に満足する技術の開発が必要となっている。このように，高温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不可欠となる。

以上のような背景のもとに，本研究では，REBCO 超電導パンケーキコイルの医療応用を目的とし，高磁場・高精度磁場の発生と，高電流密度化と高熱的安定化の両立を可能とする高温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。以下に各章の概要をまとめる。

第 1 章「序論」

本章では，まず，本研究の対象である次世代の NMR/MRI や医療用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・性能について概説する。次に，目的とする超電導コイルシステムの開発・実現に必要な技術課題を挙げるとともに，本研究で開発した数値解析・評価技術の必要性について言及し，本研究の位置づけと意義を述べる。そして最後に本論文の構成と各章の概要をまとめる。

第 2 章「REBCO 超電導パンケーキコイルの巻線精度」

本章では、REBCO 超電導パンケーキコイルを対象に、コイル巻線誤差の高精度測定と、巻線誤差の発生磁場精度に与える影響の評価を行った結果について述べている。医療用 MRI や生命・基礎科学研究用 NMR、がん治療用加速器に用いられる超電導コイルシステムには極めて高い磁場精度が要求される。例えば、重粒子線がん治療用加速器では、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ の磁場精度が必要とされている。本研究ではパンケーキコイル製作時の巻線精度の発生磁場精度に与える影響に着目した。テープ形状をした REBCO 超電導線材でパンケーキコイルを製作すると、線材の長手方向厚みの不均一性により、コイル巻厚にばらつきが発生し、結果として経方向の巻線誤差が発生する。また、コイル巻線機の回転軸の振動により、軸方向の巻線誤差が発生する。そこで本研究では、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および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。そしてこの基礎データを用いて、重粒子線治療を目的とするサクロトロン等の等時性磁場発生用実規模コイルを対象に、巻線誤差が磁場精度に与える影響を解析・評価した。その結果、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することができた。これらの成果は、実際の高磁場精度超電導コイルシステムの設計・製作のための目安・基準として貴重なデータを提供するものと考えられる。

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」

本章では、高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術として期待されている無絶縁コイルに着目し、これまで明らかにされていなかった無絶縁コイル巻線内の電磁的・熱的挙動を解析できる計算機プログラムの開発について述べている。無絶縁コイルは電気絶縁を施していない超電導線材で巻線を行うもので、線材間の銅安定化層を共有できるため平均電流密度を高くすることができ、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期待できる。しかし、巻線内の電磁的・熱的振る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。これまで無絶縁コイルの特性解析には、コイル周方向の電流パスと、コイル半径方向、すなわち巻線層間を流れる電流パスの 2 方向のみを考慮した簡易等価回路が用いられてきたが、巻線内の局所的な挙動を再現・評価することができなかった。そこで本研究では、部分要素等価回路 (PEEC) モデルを用いた無絶縁コイル内電流分布解析と、有限要素法に基づく巻線内発熱・温度分布解析を連成した計算機プログラムを開発した。そして先行研究における無絶縁 REBCO コイルの過電流通電試験の結果との比較によりその妥当性を確認した。開発したプログラムにより、無絶縁コイル内の電流や発熱・温度分布の時間変化を可視化することができ、複雑な電磁的・熱的現象の把握ができるようになった。

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」

本章では、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 パンケーキコイルの熱的安定性の解析・評価を行った結果について述べている。先行研究で行われてきた試作・実験により、無絶縁超電導コイルが高い熱的安定性を有していることが示されたが、その設計・製作に必要な条件、すなわち、層間接触電気抵抗、銅安定化層の厚みや負荷率（運転電流とコイル臨界電流の比）の適正值を決定する基準が明確にされていなかった。そこで本研究では、第3章で述べ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、巻線内に局所的に常電導転移が発生したときの過渡的な振る舞いを解析し、層間接触電気抵抗、銅安定化層の厚み、負荷率の影響評価を行った。また、実用規模（例えば、全身用 MRI やがん治療用サイクロトロン）への応用を想定して、大口径（m 級）無絶縁コイルの挙動解析・評価を行った。その結果、無絶縁コイルの常電導転移発生時の過渡的な挙動と局所的な温度上昇が抑制されるメカニズムを明らかにすることができた。また、高電流密度（ここでは、 $500\text{A}/\text{mm}^2$ を目標値とした）を達成するための銅安定化層の厚みと層間接触電気抵抗値、負荷率の適正值を提示することができた。

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」

本章では、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について述べている。超電導コイルの実運転においては、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して巻線内の温度上昇を抑える必要がある。しかし無絶縁コイルの場合、常電導転移発生時の巻線内電流分布は極めて複雑となり、また、従来の常電導抵抗発生に伴う電圧検出法を利用することが困難である。そこで、本研究では、局所的常電導転移発生時の電流分布変化に伴う発生磁場の変化に着目し、これをピックアップコイルにより検出する方法を提案した。そして、実規模・大口径（m 級）REBCO パンケーキコイルを対象に、開発した PEEC モデルに基づく解析により求めた電流分布から発生する変動磁場を計算し、ピックアップコイルに誘導される電圧を求めた。その結果、コイル中心に設置した円形ピックアップコイルにより局所的常電導転移を検出できること、またコイル巻線上に置いた扇型ピックアップコイルにより転移箇所の同定が可能であることが示された。

第6章「総括」

本章では、本研究で得られた成果・知見を総括している。そして、本研究で対象とした REBCO 超電導コイルシステムの実用化に向けた今後の展望と開発課題を示し、本論文のまとめとした。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 王 韜 印

(2016年7月現在)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
査読論文	<p>○ Tao Wang, Hiroshi Ueda, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, “Evaluation of Positional Stability in Active Magnetic Levitation Using Spherical HTS Bulk for Inertial Nuclear Fusion”, <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 21, no. 3, Part: 2, 2010, pp. 1579 – 1583</p> <p>○ Tao Wang, Hiraku Karino, Kenta Michitsuji, Xudong Wang, Atsushi Ishiyama, Hiroshi Ueda, Mitsuhiro Fukuda, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Influence of Winding Accuracy on Magnetic Field Distribution in YBCO Pancake Coil for Cyclotron Application,” <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 24, no. 3, Art. No. 9002005, 2014.</p> <p>○ Tao Wang, So Noguchi, Xudong Wang, Issei Arakawa, Katsuhiko Minami, Katsutoshi Monma, Atsushi Ishiyama, Seungyong Hahn, and Yukikazu Iwasa, “Analysis on Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging”, <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 25, no. 3, Art. No. 4603409, 2015</p> <p>Wang, X.; Wang, T.; Ishiyama, A.; Yagi, M.; Maruyama, O.; Ohkuma, T.; “Experiments and Numerical Simulations on Local Degradation Characteristics of Coated Conductor Due to Overcurrent,” <i>IEEE Trans. Applied Supercond.</i>, vol. 23, no. 3, 8002205, (2013)</p> <p>Xudong Wang, Tao Wang, Erika Nakada, Atsushi Ishiyama, Ryusei Itoh, and So Noguchi, “Charging Behavior in No-Insulation REBCO Pancake Coils,” <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 25, no. 3, No. 4601805, 2015</p> <p>Aika Ikeda, Takahiro Oki, Tao Wang, Atsushi Ishiyama, Katsutoshi Monma, So Noguchi, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil During Local Normal-State Transition.” <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 26, no. 3, No. 400204, 2016</p> <p>Takahiro Oki, Aika Ikeda, Tao Wang, Atsushi Ishiyama, So noguchi, Katsutoshi Monma, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Evaluation on Quench Protection for No-Insulation REBCO Pancake Coil.”, <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 26, no. 3, 2016 (accepted)</p> <p>Hiroshi Ueda, Atsushi Ishiyama, Yuta Ariya, Tao Wang, Xudong Wang, Koh Agatsuma, Hiroshi Miyazaki, Taizo Tosaka, Shunji Nomura, Tsutomu Kurusu, Shinichi Urayama, and Hidenao Fukuyama, “Evaluation of Magnetic-Field Distribution by Screening Current in Multiple REBCO Coils,” <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 25, no. 3, Art. No. 4700705, 2015</p> <p>Hiroshi Ueda, Jun Saito, Yuta Ariya, Ayumu Mochida, Tao Wang, Xudong Wang, Koh, Agatsuma, and Atsushi Ishiyama, “Reduction of Irregular Magnetic Field Generated by Screen Current in REBCO Coil,” <i>IEEE Trans. Appl. Supercond.</i>, vol. 25, no. 3, Art. No. 6603205, 2015</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
国内学会	<p>王 韜, 植田 浩史, 我妻 洸, 石山 敦士, 「球状バルク超電導体を用いたアクティブ磁気浮上装置の開発:慣性核融合への応用を目指して」, 第 19 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, PS1-MA25, 日本 AEM 学会, 2010.11</p> <p>王 韜, 狩野 開, 道辻健太, 矢崎 真二郎, 柄澤 彰良, 王 旭東, 石山 敦士, 宮原 信幸, 植田 浩史, 鹿島 直二, 長屋 重夫, 「次世代超電導サイクロトロンの開発:YBCO パンケーキコイルの巻線精度評価」, 電気学会研究会資料, ASC-13-012, 2013.1</p> <p>梅田大貴, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 狩野 開, 道辻 健太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 植田 浩史, 渡部 智則, 長屋 重夫, 「次世代超電導サイクロトロンの開発:YBCO パンケーキコイルの巻線精度評価」, 電気学会研究会資料, ASC-13-042, 2013.10</p> <p>大木 隆広, 池田 愛花, 荒川 一誠, 南 克彦, 中田 恵理香, 王 韜, 石山敦士, 王 旭東, 野口 聡, Seungyong Hahn, 岩佐幸和, 「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの過電流特性に関する数値解析・評価」, 電気学会研究会資料, ASC-14-023, 2014. 9</p> <p>持田 歩, 今市 洋平, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 王 韜, 石山 敦士(早大), 植田 浩史(阪大), 「REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価」, 電気学会研究会資料, ASC-14-021, 2014. 9</p> <p>荒川 一誠, 南 克彦, 中田 恵理香, 大木 隆広, 池田 愛花, 王 韜, 石山 敦士, 野口 聡, 王旭東, 渡部 智則, 長屋 重夫, 「無絶縁および部分絶縁 REBCO パンケーキコイルの通電特性解析・評価」, 電気学会研究会資料, ASC-15-003, 2015. 1</p> <p>王 韜, 植田 浩史, 我妻 洸, 石山 敦士, 「球状バルク超電導体のアクティブ磁気浮上における安定性評価」, 2009 年秋季低温工学・超電導学会, 2P-p34, 岡山, 2009 年</p> <p>王 韜, 石山 敦士, 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 長屋 重夫, 鹿島 直二, 宮原 信幸, 「次世代超電導サイクロトロンの開発:YBCO パンケーキコイルの磁場精度解析」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, 2P-p39, 盛岡, 2012 年</p> <p>王 韜, 池田愛花, 大木隆宏, 王旭東, 石山敦士, 野口聡, HAHN Seungyong, 岩佐幸和, 「無絶縁 ReBCO 線材を巻線したパンケーキコイルの過電流通電特性に関する数値解析・評価」, 2A-a10, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 東京, 2014</p> <p>王 韜, 池田 愛花, 大木 隆宏, 賈 昀昊, 石山 敦士, 野口 聡, 門馬 克敏, 渡辺 智則, 長屋 重夫, 「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの局所的常電導転移時における銅安定化層厚が熱安定性に対する影響」, 2015 年度春季低温工学・超電導学会, 筑波, 2015</p> <p>王 韜, 賈 昀昊, 勝俣 一輝, 池田 愛花, 大木 隆広, 石山 敦士 (早大); 野口 聡, 門馬 克敏 (北大); 渡辺 智則, 長屋 重夫 (中部電力), 「m級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価:局所的常電導転移の検出法に関する提案」, 2P-p16, 2015 年度春季低温工学・超電導学会, 姫路, 2015</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際学会	Tao Wang , Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Katsutoshi Monma, Tomonori Watanabe, Shigeo Nagaya, "Detection Method of Local Normal-State Transition in No-Insulation REBCO Pancake Coil," P07, ACASC 2015, Hangzhou, China, 2015