

# 博士論文概要

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5月

希土類系超電導線材は、これまでの金属系超電導線材よりも高い臨界温度を有し、高電流密度で高磁場を発生できると期待されているが、コイル化技術開発において線材の剥離による破壊や熱暴走による焼損など、希土類系超電導線材特有の課題が判明した。磁場応用では高電流密度で高磁場をコンパクトなコイルで発生させ、かつ、高額な希土類超電導線材の使用量を減じることが実用化には不可欠と考えられるが、高電流密度・高磁場は強い電磁力が作用するため高強度化が必要になる。また、高電流密度・高磁場発生のための大電流通電は常電導転移の際の発熱量が大きくなるので、熱的安定性を高める必要がある。以上を踏まえて、本研究では、希土類系超電導線材の磁場中の優れた通電特性を活かし、かつ、線材量を節約できるコンパクトな高電流密度・高磁場コイルの実現を目標として、希土類系超電導線材特有の課題である剥離の克服方法と、高電流密度・高磁場コイルの高機械強度化・高安定化の方策を提案・開発し、試作コイルによる評価実験により有効性を検証した。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。第1章では研究の背景と目的について述べた。第2章ではコイル化における線材の剥離現象について希土類系超電導線材特有の機械強度に関する課題を評価し、課題克服への指針を示した。第3章では、第2章の課題克服の指針をもとに、高機械強度でコイル巻線の形状を保持する高強度コイル構造としてYoroi-coil構造を提案しその有効性を評価した。第4章ではYoroi-coil構造の補強板を高強度化した際の補強効果と高電流密度化を検討した。第5章では超電導コイルの電導冷却下で熱的安定性の向上と、負荷率の向上を図って、無絶縁コイル巻線技術をYoroi-coilに適用する検討を行った。第6章では、無絶縁コイル巻線を適用したYoroi-coil構造によって、非円形コイルにおいても補強効果や熱的安定性の向上が達成できることを確認した。第7章では、本研究の知見・成果をまとめ、超電導コイル実用化に寄与の期待を述べた。以下に各章の概要を記す。

## 第1章 序文

希土類系超電導線材の特性を活用した高電流密度・高磁場コイルには、高機械強度化・高安定化の確保が必要である。高強度化や高安定化と高電流密度化・高磁場化は相反する要素であり、技術課題の一つが他の技術課題の解決方法に制約を与える、あるいは両立が難しい要素技術であるが、それらを同時に達成することを本研究の目的とした。

## 第2章 希土類系超電導線材のコイル化への技術課題

希土類系超電導線材のコイル化では、線材構造に由来する剥離が課題となる。ロッド試験を用いた剥離強度試験を行い、線材の欠陥サイズの分布測定結果と合成して剥離強度の確率的予測を行った。予測結果は、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る可能性が示され、希土類系超電導線材

のコイル巻線は、コイル内で線材に作用する径方向応力を最小化する必要があることを明確にした。

### 第3章 高信頼性・高耐久性超電導コイル（Yoroi-coil）の開発

第2章の結論より、希土類超電導コイルの剥離防止には巻線を一体化しないコイル構造が必要であるが、一方で、作用する電磁力に対して巻線の形状を維持し、変形を抑制する電磁力耐性を有するコイル構造が必要である。双方を達成するため、コイル構造全体で電磁力を支持する Yoroi-coil 構造を提案した。Yoroi-coil 構造の試験コイルを 4.2 K に冷却し、8 T の外部磁場下で 1,500 A 通電し、線材の耐力を超える 1.7 GPa のフープ応力が作用する条件下でも、コイル巻線に作用する電磁力を減じられることを確認した。また、構造解析によって、Yoroi-coil 構造コイルのコイル構造材全体が電磁力を支持することを明らかにした。

### 第4章 Yoroi-coil 構造の補強効果の検証

電磁力に対する Yoroi-coil 構造の強化効果を、補強材として C-FRP（炭素繊維強化プラスチック）やステンレス鋼を使用した試験用コイルを用いて、高磁場下でのコイル通電試験を行って検証した。C-FRP 補強板を用いた DP コイルでは、超電導線材の耐力の 2 倍の 2 GPa（ハステロイ基板換算）に迫るフープ応力がコイル巻線に作用する条件下でも、コイル構造を支持できることを示した。ステンレス鋼を補強部材としコイル巻線を緻密化した Yoroi-coil 構造コイルでは、1.1 GPa に及ぶフープ応力が作用する環境下で 450 A / mm<sup>2</sup> 近傍の高電流密度のコイル通電を達成し、Yoroi-coil 構造のさらなる高強度化の可能性を示した。

### 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

無絶縁（NI: No Insulation）コイル技術が Yoroi-coil 構造に熱安定性の向上をもたらすか確認するため、冷却構造の異なる 2 つの Yoroi-coil 構造ダブルパンケーキコイルを試作し、実応用で必要とされる伝導冷却下での電源遮断に伴う NI コイル巻線内の発熱による温度上昇特性評価試験を行い、熱的振舞いを比較した。伝熱シートを NI コイル巻線部とコイル巻枠の間に効果的に挿入することで伝熱特性をよくなることが実験的に示され、Yoroi-coil 構造コイルの熱的安定性を向上できることを確認した。NI コイル巻線の課題である励起遅延の回避と線材の欠陥を電流がバイパスする効果の両立の可能性を、4 本の超電導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 コイルの通電試験により評価した。バンドル間にステンレステープを挿入することで、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、励起遅延を回避することができること、局所的な常電導転移を引き起こした際、バンドル内の転流によりコイル発生磁場が維持されていることを確認した。Yoroi-coil 構造の NI コイルは、コイルの熱的安定性の向上が図られ、バンドル導体を用いることで励起遅延の回

避と線材の欠陥をバイパスする通電が両立できることを実験的に示した。

## 第6章 非円形コイルにおける Yoro-coil 構造の補強効果の検証

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 Yoro-coil 補強構造の効果を確認した。二等辺三角形の無絶縁コイルを試作し、外部高磁場中でのコイル通電試験を行い、不均質な応力に対する補強効果を確認した。Yoro-coil 構造を適用していない（外側フレームを固定していない）コイルでは、10T の外部磁場中で 160 A 以上の通電の際、抵抗による電圧が発生し、励磁中に超電導特性が失われ常電導になった箇所がコイル内に生じた。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分かったが、NI コイル巻線技術を適用したため熱暴走・焼損を回避することができた。Yoro-coil 構造を適用した（外側フレームを補強板に固定した）コイルに外部磁場 14 T 中で 300 A まで通電したところ、コイル両端電圧は 0.6 mV と小さく、急激な電圧上昇は観測されなかった。Yoro-coil 構造でないコイルと比較して、電磁力として 2.8 倍が加わったにもかかわらず、300 A 通電時の試験コイルの発生磁場も通電電流にほぼ比例し、減磁では誘導電圧のみが観測され、超電導特性が維持されている挙動であった。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。ひずみの測定結果からは Yoro 補強構造の採用により、コイルの変形を制限できたと推定される。Yoro-coil 構造の二等辺三角形上の試験コイルでは、通電電流を大きくしていくと次第にスパイク状の電圧が大きくなる現象が観測されたが、再び電流を増大させたとき、事前に到達した電流値までは新たなスパイクが生じないという通電特性を示した。補強効果とは別であるが、初めに電圧スパイクが発生させることで、2 回目以降の励磁は安定して行うことができる可能性があることを見出した。非円形無絶縁コイルとして矩形コイルを用いて Yoro-coil 構造による通電特性低下防止を検証した。Yoro-coil 構造の矩形 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。200 回以上の励磁の繰り返しにおいても、コイルの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が示唆された。

## 第7章 結言

本章では、本研究で得られた成果・知見を総括した。Yoro-coil 構造の補強効果はコイル巻線に作用する応力を減じでひずみを低減し、NI コイル巻線技術と組み合わせることで、高電流密度化・高磁場化を熱的安定性と機械強度を確保しつつ達成する見通しを得たという総括に至った。本研究の成果が、エネルギー、医療、輸送など多くの分野への超電導技術の導入とそれによる豊かな社会の発展に貢献することを期待する。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 渡部 智則 印

(2022年 4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）
論 文	<p>○[1] “Mechanical strength evaluation of a Yoroi-coil structured non-circular REBCO pancake coil in high magnetic field”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 32・2022・3149232、Tomonori Watanabe, Shigeo Nagaya, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Hiroshi Ueda and Gen Nishijima</p> <p>○[2] “Development of Conduction-Cooled Superconducting Split Coil for Metal Melting by DC Induction Heating”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol.28・2018・3700104、T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Fukui, M. Furuse</p> <p>○[3] “Progress of “Yoroi-Coil Structure” in Mechanical Strength With High Current Density”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 27・2017・4602305、T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, A. Ishiyama, M. Hojo, M Nishikawa</p> <p>○[4] “Elemental Development of Metal Melting by Electromagnetic Induction Heating Using Superconductor Coils”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 26・2016・3700504、T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Fukui</p> <p>○[5] “Strengthening Effect of “Yoroi-Coil Structure Against Electromagnetic Force”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 25・2015・8400204、T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, Y. Tsuchiya, T. Omura, S. Nimori, T. Shimizu, A. Ishiyama, X. Wang</p> <p>○[6] “Development of high strength pancake coil with stress controlling structure by REBCO coated conductor”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 23・2013・4601204、S. Nagaya, T. Watanabe, T. Tamada, M. Naruse, N. Kashima, T. Katagiri, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro and A. Ishiyama</p> <p>[7] “Rapid Formation of 200 m-long YBCO Coated Conductor by Multi-Stage CVD”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 17・2007・pp. 3386 - 3389、T. Watanabe, N. Kashima, N. Suda, M. Mori, S. Nagaya, S. Miyata, A. Ibi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara</p> <p>[8] “Development of Multi-plume and Multi-turn (MPT) PLD for YBCO Coated Conductor”、Materials Research Society Online Proceedings、vol. 868・2005・C2.7、T. Watanabe, R. Kuriki, T. Muroga, S. Miyata, A. Ibi, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama</p> <p>[9] “High rate deposition by PLD of YBCO films for coated conductors”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 15・2005・pp. 2566 - 2569、T. Watanabe, R. Kuriki, H. Iwai, T. Muroga, S. Miyata, A. Ibi, Y. Yamada, Y. Shiohara</p> <p>[10] “Investigation of multi-deposition for high Ic YBCO coated conductors prepared by PLD on self-epitaxial CeO<sub>2</sub> buffers”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、vol. 15・2005・pp. 2620 - 2623、T. Watanabe, H. Iwai, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara, T. Kato, T. Hirayama</p> <p>[11] 「YBCO のマルチ-プルーム・マルチ-ターン PLD 成膜」、低温工学、2004年 39 卷 11 号 p. 553-559、渡部 智則, 栗木 礼二, 岩井 博幸, 宮田 成紀, 室賀 岳海, 衣斐 顕, 山田 穰, 塩原 融</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 渡部 智則 印

(2022年 4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）
論 文	<p>[12] “Progress and future prospects of research and development on coated conductors in Japan”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、Vol. 13・2003・pp.2445 - 2451、T. Watanabe, Y. Shiohara, T. Izumi</p> <p>[13] Advances in Coated Conductor Development at SRL-Nagoya Coated Conductor Center”、Physica C、vol. 412-414・2003・ pp. 819-823. T. Watanabe, H. Iwai, T. Muroga, S. Miyata, Y. Yamada, Y. Shiohara</p> <p>[14] “Fabrication of Y-Ba-Cu-O Films on Surface-Oxidation Epitaxy (SOE) Processed Substrates”、Physica C・vol.378-381・2002・pp. 378-381、T. Watanabe, Y. Ohashi, T. Maeda, M. Mimura, I. Hirabayashi</p> <p>[15] “Surface-oxidation epitaxy of Ni-clad Ni-20wt%Cr and Ni-clad austenitic stainless steel tapes for Y-Ba-Cu-O coated conductors”、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、Vol. 11・2001・pp. 3134 - 3137、T. Watanabe, K. Matsumoto, T. Tanigawa, T. Maeda, I. Hirabayashi</p>
総 説	<p>[1] 渡部 智則, 石山 敦士、「超電導電力貯蔵システム (SMES)」、電気学会誌 134 巻 8 号、2014 年、p. 546-548</p> <p>[2] 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹、「高強度超電導コイルの開発」、電気評論、2013 年 7 号</p> <p>[3] 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹, 淡路 智, 小黒 英俊, 石山 敦士, 王 旭東「高強度パンケーキコイル構造 (Yoroi-coil) の開発 (特集 RE 系高温超電導線材を用いた実コイル製作の現状-テーマ解説)」、低温工学、48 巻 5 号、2013 年、p.213-219</p> <p>[4] 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹、「超電導電力貯蔵 (SMES) 技術の現状と今後の展望」、化学工学 77 巻 1 号、2013 年 1 月、p.19-22</p> <p>[5] 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹、「超電導電力貯蔵装置 (SMES) 次世代超電導コイル: 電磁力に耐える高強度コイルの開発」、配管技術 55 巻 1 号、2013 年 1 月、p. 27-30</p> <p>[6] 渡部 智則, 長屋 重夫, 平野 直樹、「超電導電力貯蔵装置 (SMES) の現状」、電気設備学会誌、32 巻(12)、2012 年、p. 873-876</p> <p>[7] 長屋 重夫, 渡部 智則, 平野 直樹、「超電導-次世代の電力系統を探る-」、新電気 Vol.66, No.11、2012 年、p, 6-15</p>
講 演	<p>[1] Tomonori Watanabe, ”Mechanical strength evaluation of Yotoi-coil structured non-circular REBCO pancake coil in high magnetic field”、27th International Conference on Magnet Technology、Fukuoka, Japan、2021 年 11 月、MT27 Organization</p> <p>[2] 渡部 智則、「スケルトンサイクロトロン」用 REBCO コイルシステムの開発 (その 2)」2021 年度春季低温工学・超電導学会、virtual、2021 年 5 月、低温工学・超電導学会</p> <p>[3] Tomonori Watanabe, ” Examination of strength of non-circular HTS coil against electromagnetic force”、the 2020 Applied Superconductivity Conference、virtual、2020 年 10-11 月、ASC2020 Inc.</p> <p>[4] Tomonori Watanabe, ” HTS Coils Wound by Bundle Conductor Composed of No-insulated REBCO tapes”、14th European Conference on Applied Superconductivity、Glasgow, UK、2019 年 9 月、EUCAS2019 Organization</p> <p>[5] Tomonori Watanabe, “Development of Conduction-Cooled Superconducting Split Coil for Metal Melting by DC Induction Heating”、the 2018 Applied Superconductivity Conference、Seattle, USA、2018 年 10-11 月、ASC2018 Inc.</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 渡部 智則 印

(2022年 4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）
講 演	<p>[6] Tomonori Watanabe, "Development of Conduction-cooled Superconducting Split Coil for Aluminum Melting Equipment", Shanghai High-Temperature Superconductor Conference 2018, Shanghai, China, 2018年8月、上海交通大学, Shanghai Superconductor 共催</p> <p>[7] Tomonori Watanabe, "Development of Conduction-cooled Superconducting Split Coil for Metal Melting by DC Induction Heating", 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherland, 2017年8-9月、MT25 Organization</p> <p>[8] Tomonori Watanabe, "Progress of "Yoroi-coil Structure" in Mechanical Strength in High Current density", the 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, USA, 2016年9月、ASC2016 Inc.</p> <p>[9] Tomonori Watanabe, "Elemental Development of Metal Melting by Electromagnetic Induction Heating Using Superconductor Coils", 12th European Conference on Applied Superconductivity, Lyon, France, 2015年9月、EUCAS2015 Organization</p> <p>[10] Tomonori Watanabe, "Strengthening Effect of "Yoroi-Coil Structure Against Electromagnetic Force", the 2014 Applied Superconductivity Conference, Charlotte, USA, 2014年9月、ASC2014 Inc</p> <p>[11] Tomonori Watanabe, "Development of Elemental Technologies for Y-based HTS SMES", International Symposium on EcoTopia Science 2013, 愛知県名古屋市, 2013年12月、名古屋大学 その他 25 件</p>
そ の 他 (特許)	<p>[1] 「超電導コイルの保護方法」、特許第 06486651 号、2019年3月1日登録</p> <p>[2] 「超電導コイルの電極構造」、特許第 06364235 号、2018年7月6日登録</p> <p>[3] 「超電導異形コイルの製造方法」、特許第 06262564 号、2017年12月22日登録</p> <p>[4] 「超電導コイルのクエンチ検出装置及びクエンチ検出方法」、特許第 06220554 号、2017年10月6日登録</p> <p>[5] 「耐低温性樹脂組成物及びそれを用いた超電導線材」、特許第 06021150 号、2016年10月14日登録</p> <p>[6] 「超電導コイル装置及びその製造方法」、特許第 06035050 号、2016年11月4日登録</p> <p>[7] 「超電導コイル装置及びその製造方法」、特許第 06005386 号、2016年9月16日登録</p> <p>[8] 「超電導コイルの伝導冷却板及び超電導コイル装置」、特許第 05921940 号、2016年4月22日登録</p> <p>[9] 「超電導線材」、特許第 05802473 号、2015年9月4日登録</p> <p>[10] 「エピタキシャル膜形成用配向基板及びその製造方法」、特許第 05763718 号、2015年6月19日登録</p> <p>[11] 「超電導線の製造方法」、特許第 05764404 号、2015年6月19日登録</p>
(刊行物)	<p>[1] 「超伝導現象と高温超伝導体」、株式会社エヌ・ティー・エス、2013年3月、第2編、第4章、第2節「超伝導電力貯蔵(SMES)技術」石山敦士・渡部智則分担執筆</p> <p>[2] Conseil International des Grands Reseaux Electriques (CIGRE), Working Groupe D1.38, "Common Characteristics and Emerging Test Technique for High Temperature Superconducting Power Equipment", CIGRE Technical Brochure N 644, ISBN 978-2-85873-347-7, 2015年12月、第5章-3「Superconducting magnetic energy storage」分担執筆</p>