

「高温超電導実用化促進技術開発」

研究開発項目：運輸分野への高温超電導適用基盤技術

研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネットシステム
技術開発

事業原簿【公開版】

| | |
|-----|--|
| 担当部 | 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 省エネルギー部 |
|-----|--|

「高温超電導実用化促進技術開発」事業原簿【公開版】

～目次～

事業原簿概要

用語集

| | |
|-------------------------------|------|
| I. 事業の位置づけ・必要性について | 1-1 |
| 1. 事業の背景・目的・位置づけ | 1-1 |
| 1.1 背景 | 1-1 |
| 1.2 目的 | 1-1 |
| 2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性 | 1-1 |
| 2.1 NEDOが関与することの意義 | 1-1 |
| 2.2 実施の効果（費用対効果） | 1-2 |
| | |
| II. 研究開発マネジメントについて | 2-1 |
| 1. 事業の目標 | 2-1 |
| 1.1 研究開発目標 | 2-1 |
| 1.2 研究開発項目毎の目標 | 2-1 |
| 1.2.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術 | 2-1 |
| 1.2.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | 2-2 |
| 2. 事業の計画内容 | 2-13 |
| 2.1 研究開発の内容 | 2-13 |
| 2.1.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術 | 2-21 |
| 2.1.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | 2-24 |
| 2.2 研究開発の実施体制 | 2-28 |
| 2.3 研究開発の運営管理 | 2-30 |
| 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性 | 2-30 |
| 3. 情勢変化への対応 | 2-31 |
| 4. 評価に関する事項 | 2-32 |
| | |
| III. 研究開発成果について | 3-1 |
| 1. 事業全体の成果 | 3-1 |
| 1.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術 | 3-1 |
| 1.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | 3-1 |
| 2. 研究開発項目毎の成果 | 3-16 |
| 2.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術 | 3-16 |
| 2.1.1 コンパクト冷凍機技術開発 | 3-17 |
| 2.1.2 液体窒素循環ポンプ技術開発 | 3-29 |
| 2.1.3 断熱管技術開発 | 3-37 |
| 2.1.4 実環境を想定した評価実施 | 3-46 |
| 2.1.5 システム保全技術開発 1 | 3-58 |
| 2.1.6 システム保全技術開発 2 | 3-66 |
| 2.1.7 実環境下での評価実施 | 3-88 |

| | |
|-------------------------------|-------|
| 2.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | 3-95 |
| 2.2.1 高温超電導コイルの実用化技術開発 | 3-95 |
| 2.2.2 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発 | 3-115 |
| 2.2.3 高温超電導線材の超電導接続技術開発 | 3-137 |
| 2.2.4 コイル保護・焼損対策手法の開発 | 3-227 |
| | |
| IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて | 4-1 |
| 1. 運輸分野への高温超電導適用基盤技術 | 4-1 |
| 2. 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | 4-2 |

【付録資料】

- ・付録資料1 プロジェクト基本計画
- ・付録資料2 事前評価関連資料
(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)
- ・付録資料3 特許リスト
- ・付録資料4 発表・論文リスト、成果の普及、受賞実績

概要

| | | | |
|----------------------------|---|----------|-------------|
| | | 最終更新日 | 2021年10月26日 |
| プログラム (又は施策)名 | | | |
| プロジェクト名 | 高温超電導実用化促進技術開発 | プロジェクト番号 | P16006 |
| 担当推進部/ PMまたは担当者 | 省エネルギー部 菱谷 清 (2016年4月～2016年4月) プロジェクトマネージャー、 岩坪 哲四郎 (2016年5月～2019年7月) プロジェクトマネージャー、 中原 裕司 (2016年4月～) プロジェクトマネージャー (2019年8月～)、 木下 晋 (2016年4月～) 赤城 協 (2019年5月～) | | |
| 0. 事業の概要 | 本プロジェクトでは、これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果を、実用化へ向けた開発へ移行させるための研究開発を行う。高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ (FS) 開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。 | | |
| 1. 事業の位置 付け・必要性 について | 我が国の成長戦略の鍵として、科学技術イノベーション総合戦略の推進が挙げられている。超電導送電技術は、その科学技術イノベーション総合戦略において取り組むべき課題、スキームの中で「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」の一つとして位置付けられており、温室効果ガスの排出を極力抑えたクリーンなエネルギー利用を達成した社会の確立に必要な技術とされている。また、エネルギー基本計画 (2018年7月) においても、2030年に向けた政策対応で、「徹底した省エネルギー社会の実現」がうたわれており、高温超電導技術による省エネルギーが寄与できる。 | | |
| 2. 研究開発マネジメントについて | | | |
| 事業の目標 | <p>研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」</p> <p>今後、鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの実用化へ向けては超電導ケーブルの長距離冷却技術開発が必要である。</p> <p>本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。</p> <p>【中間目標 (2018年度)】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築 <ul style="list-style-type: none"> ・サイズ2m³/kWの冷凍機の開発 ・揚程0.6MPa、流量50L/min以上の極低温循環ポンプの開発 ・2W/m以下、真空維持1年以上を見通せる断熱管の開発 ・システム保全技術の検証 2) 2km級長距離冷却システムの構築及び検証 <p>【最終目標 (2020年度)】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 路線環境に対応した信頼性評価 2) 鉄道き電線用長距離冷却システムの設計・評価基準、保全基準の策定 <p>研究開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」</p> <p>ヘリウムレス、省エネルギー及びシェア拡大に資する3T級MRI用を主眼とした高温超電導高磁場マグネットシステムの開発を行うとともに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のため、超電導接続技術の実現に向けた研究開発として、開発目標を以下のとおり定める。</p> <p>【中間目標 (2018年度)】</p> | | |

| | | | | | | | | |
|---|-------------------------|---|------------------------|-----------|----------|---------------|--------|-----------|
| | | <p>1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作(直径500mmボア、3T、漏れ磁場(2.5m×3m))</p> <p>2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価(安定度、均一度)。高温超電導マグネットによる小領域(30mmDSV(Diameter of Spherical Volume))イメージング実証</p> <p>3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証</p> <p>4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討</p> <p>【最終目標(2020年度)】</p> <p>1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3Tマグネットによるイメージング実証(150mmDSV)。磁場均一度10ppm(250mmDSV)未満、磁場安定度1ppm/hr未満性能を達成。</p> <p>2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5Tマグネットの試作(コイル平均電流密度200A/mm²(7T)超、低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場均一度10ppm(250mmDSV)、磁場安定度0.1ppm/hr未満)</p> <p>3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化実施</p> <p>4) コイル保護として、焼損対策手法の確立</p> <p>5) 高温超電導接続として、接続点での抵抗値10⁻¹²Ω以下の接続を実現</p> | | | | | | |
| 事業の計画内容 | 主な実施事項 | | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 | |
| | 輸送分野への高温超電導適用基盤技術 | コンパクト冷凍機技術開発 | 設計・製作 | | 総合運転試験 | 運転手法検討 | | |
| | | 液体窒素循環ポンプ技術開発 | 設計・製作 | | 評価試験 | 運転手法検討 | | |
| | | 断熱管技術開発 | 構造設計・試作、長尺製造技術開発 | | 長尺管試作・評価 | 敷設装置開発 | | |
| | | 長距離冷却システムの開発 | | | | 長距離冷却試験 | | |
| | 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 | コイル・マグネット製作技術 | 3Tマグネット製作 | | | 3Tイメージング | | 7T検証コイル評価 |
| | | マグネットのシステム最適化技術 | 3Tコイル設計 | 3Tマグネット設計 | 5Tコイル設計 | システム省エネ低コスト検討 | | |
| | | 超電導接続技術 | 超電導接続技術の開発、接続抵抗評価技術の開発 | | | | | |
| コイル保護・焼損対策技術 | | コイル保護方式検討 | | | 適用性評価 | | | |
| 開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円) | 会計・勘定 | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 | | |
| | 一般会計 | — | — | — | — | — | | |
| | 特別会計(電源) | 811.4 | 890.6 | 953.9 | 169.3 | 170.3 | | |
| | 開発成果促進財源 | — | — | — | — | — | | |

| | | | | | | |
|-------------------|---|---|-------|-------|-------|-------|
| | 総予算額 | 811.4 | 890.6 | 953.9 | 169.3 | 170.3 |
| | (委託) | 811.4 | 890.6 | 953.9 | 43.1 | 43.1 |
| | (助成) : 助成率2/3 | — | — | — | 126.1 | 127.1 |
| 開発体制 | 経産省担当原課 | 産業技術環境局 研究開発課 エネルギー・環境イノベーション戦略室 | | | | |
| | プロジェクト リーダー | 岡田 道哉 (国立研究開発法人産業技術総合研究所 TIA 推進センター 副センター長) | | | | |
| | 委託先・助成先 | 【委託先】 ・公益財団法人 鉄道総合技術研究所 (2016～2018 年度) [共同実施：前川製作所、I H I、三井金属エンジニアリング、東北大学 (2016～2018 年度)、九州大学 (2016～2018 年度)、三重大学、] ・三菱電機株式会社 (2016～2018 年度) [再委託：京都大学、東北大学、九州大学] ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 [再委託：国立研究開発法人物質・材料研究機構 (2016～2018 年度)、上智大、古河電工 (2019～2020 年度)、フジクラ (2019～2020 年度)] 【助成先】 ・公益財団法人 鉄道総合技術研究所 (2019～2020 年度) [共同研究：前川製作所、I H I、三井金属エンジニアリング、東北大学、三重大学、九州大学] ・三菱電機株式会社 (2019～20208 年度) [委託：京都大学、東北大学、九州大学] | | | | |
| 情勢変化への 対応 | 鉄道き電線については、鉄道国際会議で情報発信・収集を行ったが、特段の情勢変化はなく、対応は行わなかった。MR I コイルについては、競合する海外MR I システムメーカー (GE、フィリップス、シーメンス) の動向、高温超電導コイルの試作等の学会発表、実用化時期の公表に対応して、加速も含めて、研究開発内容を見直すなどの対応を準備していたが、特段の情勢変化はなく、対応は行わなかった。 | | | | | |
| 評価に関する 事項 | 事前評価 | 2016 年度 (採択審査委員会) | | | | |
| | 中間評価 | 2018 年度 | | | | |
| | 中間評価 | 2019 年度 | | | | |
| | 事後評価 | 2021 年度 | | | | |
| 3. 研究開発成果 について | 研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」 1) 冷却システム構成・評価 冷凍機・液体窒素循環ポンプ・断熱管などの要素機器と接続し、複数の断熱管を敷設・接続し、km 級長距離冷却システムを構成した。圧力 2 MPa 未満、流量 10 L/min 以上の液体窒素による冷却試験を実施し、長さ 1.2 km 以上の条件で循環性能を確認する目標に対し、総長 1.5 km 級 (1565 m) の冷却システムを構成し、流量約 30 L/min においても圧力損失約 0.7 MPa で循環冷却可能なことを確認した。また、低電圧電源による超電導動作を確認した。一連の試験を通じて、取得したデータをもとに、2 km 以上の長距離冷却システムの設計指針を確立した。 2) コンパクト冷凍機技術開発・運転手法検討 | | | | | |

鉄道現場への導入を想定し、 $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ 以下のコンパクトなブレイトン冷凍機実現を目指し、コールドボックス内配置の最適化・熱交換器の小型化・バッファタンクの分割・回転機の高効率化等を行い、設置容積 10 m^3 のブレイトン冷凍機を開発した。その後、模擬負荷を用いた閉ループ試験により、熱負荷と冷凍機を直列に接続して冷却する方式（直接冷却）と、熱負荷を冷却する回路と温まった窒素を冷凍機で冷却する回路を組み合わせ間接的に冷却する方式（間接冷却）について、ほぼ同等の熱負荷を冷却できることを確認した。運転手法として間接冷却を採用することで、故障時の冗長性を確保、設計圧力を低く設定できることから低コスト化（熱交換器の小型化等）が期待される。また、 5 kW 以上の冷凍能力を確認し、目標である $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ を達成した。

3) 液体窒素循環ポンプ技術開発・運転手法検討

動圧式ガス軸受を用いた、ポンプヘッド 0.6 MPa 、流量 50 L/min 以上の液体窒素循環ポンプの開発を行った。設計・製作後、単体でのポンプ評価試験を行い、ポンプヘッド 0.6 MPa 、流量 50 L/min 以上を確認した。長距離冷却システムにおいて必要となる高ポンプヘッドの確保のため、複数ポンプによる直列（タンデム）運転の解析および試験を実施し、ポンプヘッドが加算され、拡大できることを確認した。これにより、適切な回転数で運転することで、タンデム運転によるポンプヘッドの向上が可能であることが言える。

4) 長尺断熱管技術開発・敷設手法検討

複数の短尺サンプル比較による真空多層断熱構造の最適化により、短尺で断熱性能 2 W/m 以下を確認した。また、断熱層内のアウトガス分析を実施、それらを除去する洗浄方法、吸着剤について検討を行い、真空維持 1 年以上の見通しを得た。それらを元に開発した装置で長尺断熱管を製作し、 km 級長距離冷却システムを構成するために敷設した。敷設は、断熱管を巻いたドラムの下にローラー配置し、モーターブレーキにより回転させるアンダーローラー方式の敷設装置を開発し、これにより行った。また、車両運搬可能な 1 ユニットの長さ（約 350 m ）を延長するため、胴径を小さくする等、構造を改良した特殊ドラムを試作した。これにより、 400 m の断熱管の巻き付けに成功するとともに、 450 m 程度まで延長可能な見込みを得た。なお、 1.5 km 級においても、長尺にわたり、 2 W/m 以下の低熱侵入が実現できていることを確認した。

5) 状態監視、診断技術の開発・適用

冷却システムの状態監視技術開発として、モータ等回転機械等の稼働部付近等に加速度センサを取り付け、データ蓄積を行った。蓄積したデータをもとに、相対判定基準を用いて、加速度の時間領域実効値、時間領域ピーク値、時間領域変動係数、時間領域歪度、時間領域尖度、時間領域波高率、時間領域波形率、周波数領域幾何平均、および上記パラメータの主成分から総合的に診断する方法の検証、評価を行い、 km 級長距離冷却システムに向けた状態監視・診断技術の健全性を確認した。

開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

①大口径コイルの製作技術では、MRI 高温超電導マグネットを実現するために大口径コイル $1/2$ サイズアクティブシールド型 3 T コイルを製作、検証する。超電導特性劣化の一部劣化により中心磁場は目標の 3 T に対して約 0.3 T に留まったが、成体マウスの撮像に成功した。超電導劣化の要因について F T A (Fault Tree Analysis) を用いた分析及び、1) ⑤劣

化部位における要因検討を実施、必要な対策を検討した。また、高温超電導コイルの特徴となる小型・軽量化を目指し小型7 T検証コイルを試作した。3 Tマグネットの検討結果から得た対策を一部反映し、最大経験磁場約6.5 Tまでの励磁に成功した。

②磁化による磁場影響の計測技術では、磁化を有するマグネットの磁場測定技術を確立する。NMRプローブを用いた高精度の磁場変動測定、磁場制御・等価回路手法の提案、安定化の実証に成功し、目標を達成。

③磁化による磁場安定性の影響では、磁化を有するマグネットの磁場安定性の評価を行う。オーバーシュート(OS)法による安定性改善や繰り返しOS法や高温励磁法、両者の組み合わせを提案し、目標を達成。

④磁化による磁場均一度の影響では、磁化を有するマグネットの磁場均一度の評価を行う。磁化による磁場発生を解析可能にし、2 T評価コイルを解析し遮蔽特性の時間変化も解析可能になり、目標を達成。

⑤高温超電導線材への要求仕様導出では、劣化コイルの部位特定手法を確立し、要求仕様を導出する。高温超電導コイル内欠陥の非破壊・非接触評価手法を提案し、劣化部位の画像取得に成功、劣化要因の検討を実施した。また、応力評価設備を導入し、特性劣化評価を完了した。目標を達成。

2) マグネットのシステム最適化技術開発

①高温超電導マグネット最適化設計技術では、実機に向けた設計技術として1/2サイズアクティブシールド型5 Tコイルの設計、次世代の高温超電導MRIマグネットの概念設計を行う。1/2サイズアクティブシールド型5 Tコイルの設計を行い、電磁力の分割低減構造を提案。全身撮像用ホールボディ高温超電導マグネットの概念設計を実施、初期冷却を時間短縮する冷却システムを検討し3 Tマグネットに適用、冷却時間を短縮した。目標を達成。

②高安定磁場励磁システムの開発では、省エネ、低コスト励磁システムを提案する。大容量の励磁電源と小型の磁場保持電源を組合せ励磁後に省エネの磁場保持電源で磁場保持できることを実証、更に省エネとなるスイッチング式電源での画像取得にも成功し、目標を達成。

③MRIマグネットのシステム最適化では、高温超電導マグネットシステムの最小コスト条件の導出方法を確立する。コイルの磁場設計で、より高精度、高速で計算する手法を検討し、全身3 Tコイルの磁気設計を実施、超電導線材の特性からコイル形状における電流-電圧特性の解析を可能にした。目標を達成。

3) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

高温超電導線材の接続技術として、接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下の実現を目標とし、高温超電導MRIマグネットシステムにおける各種接続のための、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を有する手法の開発を行った。REBCO高温超電導線材の接続における抵抗の要因分析を行い、銀保護層の上から超電導はんだを用いて長尺にわたって均一に接続する技術を開発した。また、液体ヘリウム浸漬でない冷凍機冷却型の高温超電導マグネットにおいても、接続部専用の冷凍機を設けることにより、超電導材料を用いた低抵抗接続が可能であることを実証した。さらに、REBCO層と銀保護層の接触を改善した、低接続抵抗の新線材を開発し、実際に $10^{-12}\Omega$ オーダーの接続抵抗を実証し、接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下を見通す技術を確立した。また、開発の途上で、塗布して乾燥させる

と超電導体となる接着剤である超電導ペーストを開発した。これによる接続は成功しなかったが、エレクトロニクス応用等の他の用途への展開が期待される成果を得た。

4) コイル保護・焼損対策手法の開発

①ドライブモードに対する保護・焼損対策技術では、コストも考慮した実用的な高温超電導コイル保護方法を提案し、マグネットシステムとしての異常時の対応方法を提案する。コイルの劣化時の医療用MR I システムが人体に及ぼす影響を調査し、保護の指標を検討した。また、局所的劣化時の常電導転移現象への影響を明らかにし、常電導転移時や焼損直前のコイル両端電圧の増加に向けて両端電圧と安定化銅の配置方法やコイル冷却条件との関係を検討、高温超電導線材を用いた際の高安定なコイル構成方法の検討を行った。目標を達成。

②永久電流モードに対する保護・焼損対策技術では、永久電流モード運転の高温超電導コイルに対し、焼損を防ぐための異常検出と保護の技術を開発・確立することを目標とし、異常検出法として「共巻き法」を採用し、エネルギー回収保護法として「抵抗ショート法」を開発した。「共巻き法」は、REBCO 高温超電導線材とともに薄い銅箔を巻き込み、これを利用して高感度で高温超電導コイル内に発生する常電導転移を検出することができる。「抵抗ショート法」は、常電導転移を検出した後、回路を組み替えることで電流を他の健全なコイルに移し、ホットスポットの成長を抑制する技術である。マグネットシステムを模擬した複数の高温超電導コイルからなる小モデルを用い、「共巻き法」と「抵抗ショート法」を組み合わせた一連の保護動作の実証を行った。また大規模マグネットシステムでの保護効果についても、シミュレーション実験を通じて有効であることを示し、高温超電導マグネットの汎用の保護技術として確立させた。

| | |
|----------------------|--------------------------------|
| 投稿論文 | 「査読付き」 36件 |
| 特許 | 「出願済」 9件 |
| その他の外部発表 (プレス発表等) | 外部発表 121件、新聞雑誌等への掲載 5件、展示会等 6件 |

4. 実用化の見通しについて

研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」

(1) 超電導き電線

本研究開発テーマにて、km級の長距離冷却基盤技術が確立することで、直流電気鉄道への超電導技術導入が加速される。鉄道き電線を超電導化することで、回生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの大きな効果が期待できる。電気鉄道の直流路線は、き電電圧は異なるが、国内で11,843km、国外で94,880kmにおよび市場規模は大きい。

今後は、さらなる長距離冷却を目指し、長距離化を継続するとともに実路線における実証試験を経て、事業化を目指す。

(2) 冷凍機

鉄道用の冷却設備として、限られた設置スペースに大きな工事コストを必要とすることなくコンパクト冷凍機の設置が可能である。またブレイトンサイクルを採用した冷凍機であることから、冷凍能力kWあたりの消費電力が小さく、省エネ化・ランニングコスト削減を図ることが事業化のメリットとして期待できる。

窒素温度領域の冷凍機は超電導分野に限らず食品分野や細胞凍結等の医療分野、更には希土類元素回収用の凍結粉碎リサイクル技術などの新産業分野に幅広く利用可能である。しかし、産業用冷凍機は長時間の連続運転、高効率、小さな設置空間が常に求められる。本開発品であるブレイトン冷凍機はこれらの条件を全て満足し、新しい極低温産業を興す事ができる。世界初のコンパクト・ブレイトン冷凍機は我が国がこの分野で戦うための重要な武器となる。

(3)液体窒素循環ポンプ

現在、日本国内で使用されている極低温循環ポンプは、海外からの輸入、かつ玉軸受を採用したものが大部分である。よって、動圧式ガス軸受を採用した本開発品は、玉軸受方式ポンプの課題解決を目指し、高信頼性、高性能化、低コスト化を図っているため、国内外の市場に受け入れられる可能性が高く、波及効果は大きいと考えられる。

開発された窒素循環ポンプは、動圧式ガス軸受を採用することで、競合技術である従来の玉軸受方式のポンプに比べ、高信頼化、高性能化、低コスト化を図ることができ、超電導き電ケーブルほか、国内外の超電導応用機器の冷媒循環用ポンプとしての活用が期待される。

(4)断熱管技術開発

超電導き電線向け断熱管に必要とされる性能や長期信頼性を有する長尺断熱管の製造技術が確立されることで、当該市場向け断熱管供給の事業化が期待できる。また、極低温状態を保持できる断熱管として、例えば液体窒素や液化天然ガスなどの配管としても需要が期待できる

開発開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

(1)マグネットシステム

高温超電導3T-MRI マグネットが実現することにより、液体ヘリウムが不要となり、小型・軽量かつ漏れ磁場低減により1.5T-MRI マグネットからの置き換えが容易になり、高性能の3T-MRI が広範囲に使用され、世界の人々の健康維持管理に貢献できる。また、健診車への搭載も可能になり、地域診療の質の向上に期待できる。現状で、高温超電導線材の価格は、通電性能価格比（円/A・m比）でおよそ20倍近いものの、今後線材の量産化技術開発により価格比が1.5~2倍程度の価格帯に入ってくれば、事業成立が視野に入ってくると考えられる。従って、これらの状況を勘案しつつ高温超電導3T-MRI の市場投入時期を決定していく。高温超電導3T-MRI が市場投入された後には量産体制へ移行、高温超電導線材の価格はさらに低下していくと見込まれる。結果、小型・軽量化のアドバンテージを活かし、1.5T-MRI からの置き換え需要が喚起され、市場がさらに伸びることが期待できる。上記のような事業戦略を想定し、高温超電導コイル製造技術を深化すべく開発を継続、適切な時期に市場投入する。

(2)超電導接続

超電導接続では、高温超電導層どうしの直接接合ではなく、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を示す低抵抗接続技術を開発した。開発した接続技術は、高温超電導MRI マグネットシステムのみならず、あらゆる高温超電導機器に適用可能な汎用技術である。REBCO層と銀保護層の接触を改善した新型線材は、MRIのような 10^{-10} Ω級の超低抵抗接続が必須となるマグネット用としてのニーズが期待される。新型線材については特許の出願を行った。引き続き技術開発を継続し、マグネットメーカーおよび線材メーカーへの技術移転を行う。Nb系超電導薄膜の室温成膜技術、微小接続抵抗評価技術、冷凍機による接続アース技術は、学術的価値を重視し、論文発表を行った。

(3)永久電流モードコイル保護

| | | |
|---------------|---|---------------|
| | <p>永久電流モードに対する保護・焼損対策技術では、高い磁場安定性が求められ、NI（無絶縁）コイル技術が適用できないREBCO高温超電導マグネットに対しても有効な、汎用の保護技術を開発した。高温超電導マグネットの新しい保護方法として特許出願した。成果はすべて論文発表しており、今後様々なマグネットへの採用実績を積み重ね、信頼性を向上させることにより、開発成果の普及を目指す。</p> | |
| 5. 基本計画に関する事項 | 作成時期 | 制定：2016年3月 作成 |
| | 変更履歴 | 改訂：2018年9月 |
| | 変更履歴 | 改訂：2021年10月 |

用語集

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|--------------------------|---|
| 2 | 2次電子像 | 走査型電子顕微鏡観察において、試料に電子線を照射した際、試料表面の原子を励起して放出される電子（2次電子）を検出して得られる画像。試料表面の表面形状を反映している。 |
| A | Ag 安定化層（安定化銀、銀安定化層、銀保護層） | 超電導線材の通電の安定ならびに超電導層保護のために、超電導層の上に設けられた銀の層。 |
| | a 軸配向 | Y 系超電導線材の超電導体結晶粒は、最適成膜条件の範囲内では下地である中間層上をエピタキシャル成長し、c 軸が基板表面に垂直な方位をとる(c 軸配向粒)。その結果、超電導を担うCuO ₂ 面が基板表面と平行に揃うことで高い臨界電流を得ることが出来る。しかしながら、例えば成膜温度が低い場合には、a 軸が基板表面に垂直な方位をとるような結晶成長が起き(a 軸配向)、電流経路の減少につながり超電導特性が低下する。 |
| B | BHO | BaHfO ₃ 。ペロブスカイト構造を有するBaMO ₃ (BMO, M: metal)の一種。PLD法を用いて超電導層を成膜する場合、BMOの多くは、超電導層内に人工ピンニングセンターとして導入すると自動的に柱状構造を有し、おおよそ超電導層のc軸方向に協調成長することが知られている材料である。特にBHOは、そのサイズが小さく、方位のばらつきが大きいため、あらゆる印加磁場角度に対して有効なピン止め点として機能する。 |
| C | COP | 成績件数 (Coefficient Of Performance)とは冷凍量/所要動力で表される。 |
| D | Detect-and-Dump 法 | 超電導マグネット内で異常が発生したとき、これを検知し、回路を組み替えてマグネットの蓄積エネルギーを外部の抵抗に放出することにより、安全に減磁する保護方法。 |
| | Direct 接続 | 同種の超電導材料で接続する手法を示す。REBCOの場合、REBCO層の上に前駆体を形成し、線材を張り合わせて高温熱処理を行い、REBCO同士を一体化させる。 |
| E | EDX | エネルギー分散型X線分析。構成元素とその濃度を調べることができる元素分析法。 |
| F | FTA(fault analysis) tree | 事故や故障を系統的・論理的に分析する手法の一。もっとも望ましくない最上位の事象を定義し、この事象の要因となる中間事象を系統的に重複なく列挙する。次に、中間事象を、さらにこれ以上展開できない基本事象まで分割・列挙し、論理記号などを用いて図式化する。それぞれの事象の発生確率から最上位の発生確率を求めたり、事故や故障に至る経緯を推測したりするのに用いる。 |

| | | |
|---|--------------------|---|
| G | GM 冷凍機 | ギフォード・マクマホン冷凍機 (Gifford-McMahon cooler)。スターリング冷却器の構造に加えて、さらに、ディスプレイサに連動したロータリーバルブを持ち、このバルブにより管路の切り替えを周回的に行うことで、冷却性能を向上させた冷凍機。 |
| H | HTS | 高温超電導体。1986 年以降に発見された酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素にて超電導特性を示すことから、相対的な意味で「高温」と名づけられた。 |
| | Hastelloy | ニッケルを主体とし、クロムやモリブデンなど様々な合金成分を添加することにより、耐食性および耐熱性を高めたニッケル合金。 |
| I | IBAD | Ion Beam Assisted Deposition の略。イオンビームアシスト蒸着法。成膜時にイオンをある角度から照射すると、結晶が配向する。この方法を用いて高配向の中間層を成膜する。 |
| | Indirect 接続法 | 超電導線材とは別の材料を介した接続手法を示す。結晶方位を考慮する必要がなく、選択制に優れる。 |
| | I-V 特性 | 電流-電圧特性。高温超電導線の場合、通電電流が小さい場合は電圧は極めて小さいが、臨界電流を越える電流が流れると、急激に電圧が発生する。 |
| L | LaSrCuO (LSCO) | いわゆる 214 系と言われる銅酸化物系高温超電導体。組成は $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ 。 |
| | LTS | 低温超電導体。高温超電導との対比でより低い温度で超電導になる材料。 |
| M | MgB2 | 青山学院大秋光教授のグループにより 2001 年に超電導体であることが発見された。金属系化合物の中では比較的高い臨界温度を持つ。原料が比較的安価で機械的強度に優れ、実用的超電導線材として期待されている。 |
| | MRI | Magnetic Resonance Imaging：磁気共鳴画像法。高周波の磁場を与え、体内の水素原子に共鳴現象を起こさせる際に発生する電波を受信コイルで取得し、得られた信号データを画像に構成する。水分量が多い脳や血管などの部位を診断することに長けている。 |
| | MRI マグネット | 核磁気共鳴に必要となる均一静磁場を発生させるためのマグネット。 |
| N | Nb ₃ Sn | A15 型と呼ばれる結晶構造の 2 元系金属間化合物の超電導体。臨界温度は 18K、液体ヘリウム温度での上部臨界磁界は 26-29T と高く、NbTi より強い磁場を発生するマグネットに用いられる。 |

| | | |
|---|-------------------|--|
| | NbN | NaCl (B1) 型の金属化合物超電導体。臨界温度は 17.3K、液体ヘリウム温度での上部臨界磁界も 15-29T と、良好な超電導特性を持つ。 |
| | NbTi | 遷移金属合金の超電導体で、臨界温度は 9.9K、液体ヘリウム温度での上部臨界磁界は 12.5K。これを用いた超電導線は比較的安価で加工性にすぐれ、超電導接続技術が確立していることもあり、液体ヘリウム温度で動作する超電導マグネットのほとんどが NbTi 線を使用している。 |
| | NMR 装置 | 磁場中での原子核の核スピン共鳴現象（核磁気共鳴：NMR）を観測することで、物質の分子構造を原子レベルで解析する装置。MRI も基本原理は同じ。 |
| | No-insulation コイル | 絶縁処理を施していない超電導線で作成したコイル。ターン間絶縁されていないため、何らかの原因で常電導部が発生しても、電流は隣接する線材に迂回することにより、安定に励磁が可能になる。また高電流密度化が可能である。磁場の制御性に課題がある。 |
| | n 値 | 超電導線材の電流-電圧特性を、電流を横軸として両対数グラフ化した場合の傾き。n 値が大きいほど、電流の増加に伴う電圧の発生が急激に起こる。 |
| | n 値モデル | 超電導線材の電流-電圧特性において、電圧が電流の n 乗に比例するとしたモデル。高温超電導線材は低温超電導線材のように臨界電流値前後で急激な電圧変化を起こさないため、このようなモデルで電流-電圧特性を表現することが多い。より精密に表現したい場合は磁束クリープ・フローモデルやパーコレーションモデルが使われる。 |
| P | PbBi はんだ | 極低温で超電導になるはんだ。臨界温度は 8.8K、液体ヘリウム温度での上部臨界磁場は 3T の報告もある。 |
| | PbSn はんだ | 一般的なはんだ付けに使用される鉛と錫の合金。組成によるが、液体ヘリウム温度で超電導になる。 |
| | PID 制御 | フィードバック制御のひとつ。目標値と制御量の差を偏差値とし、偏差値の大きさに比例 (proportional) した動作 (P 動作)、偏差値の積分 (integral) に比例した動作 (I 動作)、偏差の変化量 (differential) に比例した動作を組み合わせて行う制御。 |
| | PID 制御用コントローラ | 制御目標値と制御量の差である制御偏差を打ち消すために行なう動作を制御動作と言い、その基本動作に PID 動作がある。P は比例動作、I は積分動作、D は微分動作を表す。これらの制御を行なう機器を PID 制御用コントローラと呼ぶ。 |
| | PLC | プログラマブルコントローラの略。リレー回路の代替装置として開発された制御装置であり、工場などの自動機械の制御に使われるほか、エレベーター・自動ドなど身近な機械の制御にも幅広く使用されている。 |

| | | |
|---|----------------------------------|--|
| | Powder-in-Tube 法 | シースとなるチューブに原料を充填し、線引き、熱処理して超電導線を製造する方法。鉄系超電導線材、MgB2 線材などの製造に用いられる。 |
| | PPLP | 熔融押出ポリプロピレン(PP)フィルムの両側をクラフト紙でサンドイッチした構造をしている。その優れた絶縁破壊特性と低誘電率、低 $\tan \delta$ により低誘電損失特性を有し、数多くの AC および DC 超高压ケーブル用絶縁材料として採用されている。 |
| R | RE (希土類) 系超電導体 | 組成式 $RE_2Cu_3O_{7-\delta}$ (RE は希土類元素) で表されるペロブスカイト構造を基本とした銅酸化物で、比較的高い温度 (液体窒素温度以上) で超電導となる物質。 |
| | REBCO 線材 (GdBCO, EuBCO, YBCO) | $RE_2Cu_3O_{7-\delta}$ (RE:Gd, Eu, Y などの希土類元素) の超電導材料で作られた線材。一般的に、テープ状であり、超電導部分は薄膜形状になっており薄膜線材 (Coated Conductor) とも呼ばれている。 |
| | RF コイル | MRI 画像取得のため、人体へ照射する電磁波を発生するコイルで、磁界方向は、MRI マグネットが作る静磁界とは直交方向。MRI マグネットの常温ボア内に設置。超電導コイル磁界強度が 2.9T の場合、123.5MHz (=2.9×42.6) の電磁波を発生。 |
| | RF マグネトロンスパッタリング法 | スパッタリングにおいて、ターゲット材料に高周波電圧を印加し、さらに磁界によって電子を捕捉することで不活性ガスのイオン化を促進し、成膜速度を大幅に向上させる方法で、プラズマによる薄膜表面のダメージを防ぐことができる。 |
| | RHEED パターン | 試料に電子線を照射し、表面の反射を蛍光スクリーンで観測して得る回折図形。表面が平坦で、反位相境界を含む小さな分域からなる場合は、ストリーク状のパターンが得られる。 |
| S | SEM | 走査型電子顕微鏡。試料表面 (断面) の微細構造を観察できる。 |
| | Simulated Annealing 法 | 大域的最適化問題への汎用の乱択アルゴリズムである。広大な探索空間内の与えられた関数の大域的最適解に対して、よい近似を与える。 |
| | SrTiO ₃ (001) 単結晶基板 | 格子定数 0.3905nm であり YBCO 薄膜と格子整合性が優れるため、安定した固体基板材料として用いられている。 |
| T | TEM | 透過型電子顕微鏡。観察対象に電子線をあて、透過してきた電子線の強弱から観察対象内の電子透過率の空間分布を観察する。 |
| | TG-DTA | 熱重量測定 (TG) と示差熱分析 (DTA)。試料の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、TG は試料の質量変化を、DTA は温度変化の際に起こる物理変化や化学変化に伴って試料内で発生する熱変化を基準物質との温度差として測定する。 |
| U | UPS | Uninterruptible Power Supply。入力電源に停電などの異常が発生しても、一定時間は停電することなく電力を供給し続ける電源装置。無停電電源装置。 |

| | | |
|---|-------------------------|--|
| X | XRD (X-ray diffraction) | X線が結晶格子で回折を示す現象。この現象を利用して物質の結晶構造を調べることが可能である。このようにX線の回折の結果を解析して結晶内部で原子がどのように配列しているかを決定する手法をX線結晶構造解析あるいはX線回折法という。 |
| | XRDパターン | X線回折によって得られた回折パターンであり、横軸が 2θ 、縦軸が回折強度である。 |
| | X線回折 | X線が結晶格子で回折することを利用して結晶構造を調べる方法。 |
| Y | Y系高温超電導線 | 化学式 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ で表される超電導体、および、Yのサイトを他の希土類元素で換えたもので超電導を示す超電導体を用いて作製した超電導線材。REBCO線材。 |
| あ | アーク放電 | 絶縁破壊の一種。高温のプラズマ電流が流れることにより、マグネットに致命的な損傷を与えることがある。 |
| | アイソレーションアンプ | 絶縁アンプ。 |
| | 安定化銅 | 超電導体が何らかの原因で局所的に常電導状態になったとしても、電流を迂回させて通電の安定を保つことを目的に線材に付加される。Y系高温超電導線材では、はんだによる貼り合わせやめっきが用いられる。 |
| | 安定性 | 超電導線の動きによる摩擦熱などの外乱(熱じょう乱)が原因となり、超電導線に常電導が生じその抵抗分によりジュール発熱した場合、冷却がその発熱量を上回り超電導状態に回復するか、もしくは常電導部が拡大しクエンチに至るかを判断する指標。 |
| | 安全弁 | ガスや蒸気などの配管や容器において爆発を防ぐための安全機構を有する弁。密閉した容器などで内圧が上がりそのまま圧力上昇すると内圧のため容器が破損する。このような爆発をさけるために安全弁が使用され、容器の内圧が上がり過ぎないようにする治具。 |
| い | 遺伝的アルゴリズム | 解の候補を遺伝子で表現した「個体」を複数用意し、適応度の高い個体を優先的に選択して交叉・突然変異などの操作を繰り返しながら解を探索する手法。 |
| | インバータ | モータに流れる交流の周波数を変化させることで回転数を制御する装置 |
| | インペラ | ポンプ等の回転機械に使用される羽根車 |
| | インターディフュージョン | 異種物質界面では、各層の原子が異相に拡散する。この原子の拡散を示す。 |

| | | |
|---|-----------|--|
| | インダクタンス | コイルを流れる電流を変化させたとき電磁誘導によりそのコイル、あるいはほかのコイルに発生する起電力の大きさを表わす量。1秒間に1Aの割合で電流が変化したとき、1Vの起電力を生じるものを1ヘンリーという。電流変化のあったコイル自体の誘導を表わす自己インダクタンスと、ほかのコイルへの誘導を表わす相互インダクタンスに区別される。 |
| | インピーダンス | 直流におけるオームの法則の電気抵抗の概念を複素数に拡張し、交流に適用したもの。インピーダンスにおいて、その実部(Re)をレジスタンス(resistance)または抵抗成分、虚部(Im)をリアクタンス(reactance)と呼ぶ。 |
| | 異相 | EuBCO相及びBH0相とは異なる化学的組成をもつ物質系。熱分解や組成ずれ、界面との反応等様々な要因で生成されるが、ここでは最表面に存在する、液相成長の過程で生成されたCu-O、Ba-O、Ba-Cu-O等の析出物を示す。 |
| | 異方粒 | 超電導層の結晶方位は、基本的にc軸が基板表面に垂直な方位をとるc軸配向粒になるよう成膜されるが、最適成膜条件からのずれ等の要因で、それとは異なる方位をもつ結晶粒が生成する場合がある。特に、方位に全く規則性をもたない結晶粒を異方粒と呼ぶ。 |
| え | 液体窒素循環ポンプ | 冷凍機内の液体窒素熱交換器へ、冷却された液体窒素を供給するためのポンプ。単に窒素循環ポンプ、あるいは循環ポンプと記載している場合がある。 |
| | 液体窒素循環冷却 | 被冷却体を冷却する1手法。冷凍機などで冷却された液体窒素を循環ポンプにより被冷却体に圧送し、液体窒素と被冷却体で熱交換を行うことにより冷却を行う。熱交換により温度の上昇した液体窒素は再び冷凍機などに圧送され、その温度は再び低下する。この循環サイクル回路を形成することにより、冷媒は蒸発することなく閉ループ循環を続けることができ、液の補給が不要であるという特徴を有する。 |
| | エッチング | 金属表面に対する浸食作用によって金属をその表面から除去する処理技術。化学エッチングは化学溶解作用の利用で、金属を表面から浸食除去する方法。 |
| | エピタキシャル成長 | 薄膜結晶成長技術の一種であり、固体基板である結晶の上に結晶成長を行い、下地の基板の結晶面にそろえて配列する。 |
| | 永久電流スイッチ | 超電導体の閉回路を形成するためのスイッチ。オン時には超電導状態となり抵抗がゼロで、オフ時には常電導状態となり抵抗を持つ。オンオフの切替の方式により、熱式と磁界式がある。 |
| | 永久電流モード | 超電導体で閉回路を形成すると、外部起電力がなくても定常電流を流すことができる。超電導マグネットシステムにおいて、このような超電導の閉回路を実現し、定常電流による極めて安定な静磁場を発生する運転方法を指す。通常は、コイルと永久電流スイッチを超電導接続して閉回路を形成する。 |

| | | |
|---|------------------|---|
| | エポキシ含浸 | 超電導コイルにエポキシ樹脂を含浸して硬化し、超電導線を強く固定することにより、超電導コイルのクエンチ電流を大きくすることができる。 |
| | 液相反応 | 液体内や液体間で行われる化学反応の総称。ここでは PLD 法による V (vapour)-L (liquid)-S (solid) 成長モードを意味している。 |
| | 液体ヘリウム | 大気圧中の沸点が 4.2K の液体。超電導の冷媒として用いる。 |
| お | オーバーシュート励磁法 | マグネットを励磁する際に通電電流を、一度目標電流値(=I ₀)を超えて(オーバーシュートして)から I ₀ へ下げる励磁手法 |
| か | 学習 | 設備診断において、あらかじめ状態がわかっているデータを用いて、閾値等を知能機械に覚えこませるステップ。 |
| | 過負荷 | 定格容量を超えた負荷。 |
| | 過冷却 | 過冷却 (sub-cool) とは沸点と凝固点の間の液体の状態を指す。液体窒素では大気圧下で 77K から 63K の間となる。 |
| | 簡易診断 | 設備状態診断の際にまず行う、異常の有無を調べる診断。 |
| | 間接冷却方式 | 冷却システムにおいて、冷媒がブラインと呼ばれる不凍液を冷却し、これを介して目的物を冷却する方式。 |
| き | 危険速度 | 回転軸が共振を起こす回転数 |
| | 強化繊維プラスチック (FRP) | ガラス繊維や炭素繊維などを補強材として埋め込んだ合成樹脂複合材料。軽くて機械的強度・耐食性・成形性にすぐれる。 |
| | 機械式熱スイッチ | 金属面接触による熱スイッチ |
| | キャリア | 電荷を担うものであり、電気伝導に寄与する伝導電子、正孔 (ホール)、伝導イオンなどを示す。 |
| | 強制通電電流 | 磁場変動によって生ずる遮蔽電流と異なり超電導導体に外部より電流を通電する電流。コイル形態での通電電流。 |
| | 金属系超電導体 | Nb-Ti 合金、Nb ₃ Sn、Nb ₃ Al、MgB ₂ 化合物などの金属や金属間化合物の超電導体。 |
| く | クエンチ | 一般的には、超電導コイルの一部が何らかのじょう乱により突発的に常電導状態になったとき、この常電導部広がってコイル全体が常電導転移する現象を言う。低温超電導コイルではこのようなクエンチが起きるが、高温超電導コイルの場合は常電導部が広がらず、ホットスポットを形成して焼損することがある。そこで本事業においては、高温超電導コイルの場合について、コイル内に発生した常電導部 (抵抗領域) の電圧がある設定された閾値を超えることと定義した。 |
| | クライオスタット | 被冷却物(超電導コイルなど)を収納して、その重さと発生する力などを支持できる断熱支持構造を持った開放又は密閉構造の低温を保持する装置。 |

| | | |
|---|---------------|---|
| け | 傾斜磁場コイル | MRI 画像取得時、パルス勾配磁界を発生する常温コイルで、X、Y、Z 方向の 3 種類のコイルで構成。MRI マグネットの常温ボア内に設置。 |
| | 減衰法 | 微小抵抗測定法のひとつ。既知のインダクタンス L と求める回路抵抗 R を有する閉回路を構成し、電流の時間変化を測定することで回路抵抗 R を求める手法。 |
| | 原子間力顕微鏡 (AFM) | 走査型プローブ顕微鏡の中で、原子間力を利用に凹凸を調べる手法を原子間力顕微鏡 (AFM) という。 |
| | 減磁 | 超電導マグネットの通電電流を下げ、発生磁界を小さくすること。 |
| こ | 固有振動数 | 物質が持つ固有の共振周波数のこと。この周波数では、一旦外力が生じると、外部から力を加えなくても自分自身だけで振動し続ける。 |
| | 高温励磁法 | コイルに目標電流を通電してからコイル温度を変化させる。 |
| | 格子不整合 | 2つの材料の格子定数が一致していないこと。 |
| | コールドヘッド | 冷凍機の熱交換部。 |
| | 格子定数 | 結晶軸の長さや軸間角度のことであり、単格格子の各稜間の角度 α, β, γ と、各軸の長さ a, b, c を表す 6 個の定数からなる。 |
| | 格子状ファントム | MRI イメージング取得時の試験用被写体。MRI には映らない樹脂で格子状空間を構成し、この空間に MRI で画像化可能な水や油を封入する。格子状ファントムを用いて MRI 画像を取得することで、MRI 画像の歪みが分かり、マグネットやイメージング装置の性能の検証が可能になる。 |
| | 固相反応 | 固体内や固体間で行われる化学反応の総称。分子や原子が固体内、固体間を拡散して反応する。ここでは、PLD (pulsed laser deposition) 法による V (vapour)-S (solid) 成長モードを意味している。 |
| | 誤検出防止機構 | 超電導マグネットシステムにおける異常検出で、検出電圧が継続しているかを一定時間モニタして誤検出を防止する機構のこと。 |
| | 誤差磁界係数 | コイルが発生する磁界を級数展開した係数。例えば Z 10 次であれば、Z 軸方向に 10 次で変化する成分のことを言う。B0 以外の誤差磁界係数を零に設定できれば完全に均一な磁界が得られる。 |
| | 固体式熱スイッチ | CFRP 積層板による熱スイッチ |
| さ | サブクール度 | 液体窒素飽和温度と過冷却液体窒素温度の差 |
| | シーケンス | 機器を自動制御する際の、あらかじめ設定しておく動作の順序。 |

| | | |
|---|-------------------|---|
| | シールド | 導体層に通電した際に発生する磁場を外部に漏らさないように、導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。 |
| | 最大許容発熱量 | 台形波電流を印加した場合、電流を目標電流でホールドしている時に、超電導状態を維持できる最大の発熱量 |
| | 最大経験磁界 | 超電導コイルおよび線材が受ける磁界の最大強度。 |
| | 残留磁化 | 強磁性体などの磁性体に外部磁場を加えたのち、磁場をゼロにしたとき物質に残留する磁化をいう。残留磁化を応用したものが永久磁石である。残留磁化の原因は物質の異方性と磁区構造に起因する。 |
| | 最小伝搬領域 (MPZ) | 常電導の芽が発生したとき、発熱が冷却を上回れば常電導部は拡大し、逆に冷却が上回れば超電導状態に回復する。常電導部が拡大し始める最小の常電導部の長さを最小伝搬領域 (Minimum Propagation Zone) と呼ぶ。これより長い常電導部が発生すると、コイルはクエンチする。 |
| | 最大許容欠陥 (MAD) | 高温超電導コイルにおいて、常電導部の原因となる欠陥部の大きさについて、常電導部が最小伝搬領域を越えない範囲の最大値を最大許容欠陥 (Maximum Allowable Length) と呼ぶ。 |
| | 三次元有限要素法コード TOSCA | 有限要素法静磁場解析の市販コード。加速器や MRI 等の高精度磁界が必要な場合に良く使われる。 |
| | 酸素欠損 | Y 系や RE 系 (RE : 希土類元素) などの結晶構造では、BaO 層に挟まれた Cu-O 鎖の酸素が欠損し易いことが知られている。この Cu-O 鎖の酸素原子は、酸素分圧や温度を変化させることで、可逆的に結合・解離が起こり、その結果、酸素欠損量 δ は約 0~1 まで変化する。この δ を用いて化学式では $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ あるいは $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ と記述される。 |
| | 残留抵抗 | 金属の電気抵抗は低温にするほど小さくなるが、絶対零度でもゼロにならずある抵抗を持つ。これを残留抵抗という。ここでは超電導体が転移温度以下でも抵抗ゼロとならず、一部残った抵抗を指す。 |
| し | 昇温 | 冷却を停止し、系内の温度を上昇させること。 |
| | ショートタイム FFT | 関数に窓関数をずらしながら掛けて、それに高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform) すること。 |
| | 真空断熱 | 熱の伝導のうち気体の対流熱伝導を抑制するため、断熱層を真空状態にする断熱方式。一般的には放射熱伝導を抑制するためのスーパーインシュレーション (多層断熱材) と組み合わせられて利用される。 |

| | |
|-----------|--|
| 侵入熱 | 断熱管外部（室温部）から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えるとともに、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。 |
| シート抵抗率 | 接続部の抵抗 (R) と接続部の面積 (S) の積 (RS)。接続部の面積の影響を排除して接続部の抵抗を評価する指標。 |
| 磁化 | 物体が磁気を帯びた状態にあること。常磁性体や反磁性体（磁性体）は磁場の中におかないと磁化しないが、強磁性体では外部に磁場がなくても自ら磁化している |
| 磁化履歴 | 強磁性体の磁化曲線において、外部磁場の変化に伴う磁化の変化が 1 つの閉じた曲線（ループ）を描く現象。磁気ヒステリシスともいい、この閉じた曲線を履歴曲線（ヒステリシス曲線）という。強磁性体は過去にどのような磁場が作用していたかによって磁化の状態が異なり、磁化の値は磁場だけでなく、その履歴に関係している。 |
| 磁気顕微鏡法 | 磁気双極子相互作用を利用する走査型プローブ顕微鏡の一種であり、表面の微小磁区を測定する事ができる顕微鏡。 |
| 磁気閃光 | 非常に強い超低周波磁界を頭部に浴びると、磁界による誘導電流が網膜を刺激するため、眼を閉じていても視野周辺に微弱光がチラチラ揺らいでみえる感覚が生じる。この現象を磁気閃光という。 |
| 磁気モーメント | 磁気双極子を特徴づけるベクトル量で、その大きさは、正磁極の大きさと正負磁極間の距離との積に等しく、その向きは、普通、負極から正極に向かう向きにとる。単極の磁荷は存在しないので、磁気の基本的な量と考えることができる。 |
| 自己インダクタンス | 一つの電気回路に自己誘導があるとき、誘導起電力は回路内に流れる電流の時間的変化に比例するが、このときの比例定数のこと。自己誘導係数。 |
| 磁束クリープ | 磁束線がピン止め点に捕まった状態は準安定状態であり、真の平衡状態に向けての緩和、すなわち時間がたつと対数的な減衰が起こる。この時の磁束線の運動を磁束クリープ（フラックスクリープ）といい、熱揺動に起因する。バルク超電導体に捕捉された磁場も磁場捕捉直後は急激な減衰を示し、その後安定する。 |
| 磁束密度 | 磁場の強弱を示す量。磁場の中を運動する荷電粒子は磁場から力を受ける。この力によって磁気の場の状態を決めた量。電場の強さに対応する磁場の基本量。単位テスラ（記号 T）または、ウェーバ毎平方メートル（記号 Wbm ² ）。 |

| | | |
|---|--------------|---|
| | 磁場均一度 | 静磁場強度の空間的な均一の程度。一般には、一定容積内（直径 20cm 球体など）の静磁場強度の最大値と最小値の差、もしくは標準偏差値を基準磁場強度で割って ppm 単位で表す（ppm on 20cm DSV：半径 20cm の球体内）。均一度が低いと共鳴周波数に幅ができ、分解能が低下したり、画像に歪みを生じる原因となる。 |
| | 消磁 | 超電導マグネットによって生じる静磁場を消滅させること。 |
| | 擾乱 | 超電導状態を破り常電導の芽を発生させる要因。超電導黎明期では線材の交流損失やフラックスジャンプにより超電導マグネットの強磁界下に難航したが、極細多芯撚線構造の線材の開発によりこれを解決。その後は電磁力による超電導線のわずかな動きやエポキシ樹脂の割れといった機械的なじょう乱が問題となった。 |
| | 初期冷却 | 超電導体を常温から超電導転移温度以下までに冷却すること。 |
| | シングルパンケーキコイル | テープ状の超電導線材を渦巻状に巻線したコイルで、単層のもの。 |
| | 浸漬冷却 | 液体窒素等の冷媒中に冷却対象物をそのまま浸して冷却すること。 |
| | 侵入熱 | 超電導ケーブルの断熱管外部（室温部）から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えるとともに、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。 |
| | 磁気シールド | 磁場の漏洩を防ぐ、または、外部からの磁場の影響を排除する目的で配置される、電磁氣的な障壁 |
| | 磁気結合 | 2つのコイルが磁束を共有している状態。 |
| | 常電導 | 超電導の対義語。超電導体の超電導状態が破れた状態を指す。 |
| | 真空含浸 | 超電導マグネット等を真空中でエポキシ樹脂等に浸漬、充填する方法。これにより超電導線が固定され、また熱伝導が改善される。 |
| す | スクリーン印刷 | スクリーンマスクにインクを通過させ、対象物へ印刷する手法。高細線な印刷を可能にするための開発が進み、エレクトロニクス分野での応用に注目が集まっている。 |
| | スタイロフォーム | 発泡プラスチック系の断熱材の一種。スタイロフォームは商品名で、一般名称は押し出し発泡ポリスチレンという。ポリスチレンを主原料に発泡成型したボード状の断熱材で、吸水性・透湿性・熱伝導率が小さい。主に床や土間・外壁などに用いられる。 |

| | | |
|---|------------------|---|
| | スピネコー法 | MRI 画像取得時、RF コイルから人体への電磁波の照射タイミングや傾斜磁場コイルの電流値やタイミングを変化させ、人体中のプロトンから出る電磁波信号を取得し、この信号から画像を再構成する。スピネコー法は最も一般的なシーケンスで180度パルスとよぶ電磁波を人体にを繰り返し照射する。他に、傾斜磁場コイルの電流値・通電タイミングの調整を主とするグラディエントエコー法がある。 |
| | スプリットコイル | コイルを2つに分けることにより、中心部にアクセス可能とするコイル構造。 |
| せ | 正準判別分析法 | カテゴリーデータである目的変数と数量データである説明変数の関係を調べ、正準判別関数を複数導き出す解析手法。 |
| | 精密診断 | 設備状態診断の際、異常種類を同定するために行う詳細な診断。 |
| | 静磁場解析 | 渦電流が発生しないものとし、印可磁場や励磁電流が時間的に変化しないものとして取り扱う解析。 |
| | 制約条件 | 最適化で、目的関数以外の項目がある一定条件内になる様に設定する式のこと。例えば、最小化する目的関数が $f(x)=x$ として、制約条件を $1 \geq x \geq -1$ とすると、 x は ± 1 以内のため、最小値は -1 になる。 |
| | セルノックス温度センサー | 負の温度係数をもった薄膜抵抗センサー。広い温度領域にわたって単一極性の温度応答特性を持ち、磁場の影響を受けにくいという特長を有する。 |
| | 接着ペースト | セラミックスや陶磁器の修理用など、広く使われている接着剤。 |
| | 線形計画法 | 線形結合した目的関数を最小あるいは最大化するアルゴリズム。線形計画法では解が存在する場合、大域的最適解（真の最適値）が得られることが数学的に証明されている。 |
| そ | 層間紙 | コイル巻線の径方向間に巻線の径方向高さ調整のために挟み込む樹脂製のシート。 |
| | 相互インダクタンス | 二つの回路に相互誘導があるとき一方に誘導される起電力は他方を流れる電流の変化の割合に比例する。この比例定数をいう。相互誘導係数。 |
| | 走査型プローブ顕微鏡 | 先端を尖らせた探針を用いて、物質の表面をなぞるように動かして表面状態を拡大観察する顕微鏡。 |
| | ダブルパンケーキコイル | シングルパンケーキコイル2つを並べて直列接続したユニットコイル。 |
| | 単一磁束量子 (RSFQ) 回路 | 超電導体を利用したデジタル回路。ジョセフソン接合を持つ超電導体のリングの中で量子化された磁束を情報担体として使用し、演算を行う。従来の半導体集積回路技術では実現が困難な、超高速・超低消費電力の演算処理が可能。 |

| | | |
|---|------------------|--|
| た | タブー探索法 | 最近に探索した解はタブーとしてしばらく探索しない探索法。 |
| | 断熱効率 | 損失を含んだ実際のターボ圧縮機またはターボ膨張機の仕事と断熱変化時の理想的な仕事の比。 |
| ち | 窒素 | 分子量 28 の 2 原子分子。大気の 8 割を占め、空気中から分離採取される。沸点 77K, 凝固点 63K であり、高温超電導体の冷却に広く用いられる。 |
| | 窒素循環ポンプ | 冷凍機液体窒素熱交換器を循環させるためのポンプ。脈動を防ぐため遠心式ポンプが用いられ、駆動のためのモータは熱侵入を低減するため長軸でポンプ本体と接続される。 |
| | 貯液 | 液体窒素を系内に供給し、貯めること。 |
| | 直接冷却方式 | 冷却システムにおいて、冷媒が直接被冷却物を冷やす方式。 |
| | 釣合良さ | 剛性ロータの釣合い程度を示す量 |
| | 着磁 | 磁気を帯びていない磁石に、磁気をつけること。コイルの中に対象物を置き、電流を流して磁界を発生させることにより磁気を帯びる。 |
| | 中心磁場 | 超電導コイルの中心（軸および径方向）に発生する磁場。 |
| | 超電導コイルクエンチ検出器 | 超電導コイルが極部発熱などで常伝導転移し伝播した場合に発生するクエンチ電圧を検出する装置。クエンチを検出し、コイル保護のために電源回路を遮断する信号を発生する。 |
| | 超電導接続 | 超電導線材間を接続する際に、ハンダなどの抵抗を持つ材料ではなく、超電導特性を有する材料を介して接続し、接続抵抗がないもの。超電導材をスポット溶接や圧着で直接接続するものもある。 |
| | 超電導特性 | 超電導材を評価する指標として、臨界電流、臨界温度、臨界磁場がありそれぞれの特性を越えると超電導状態が無くなる。 |
| | 超電導はんだ | Pb など低温で超電導状態になる金属材料を含んだはんだ。超電導接続を行う場合に使用されることがある。 |
| | 直流遮断器 | 超電導コイルに通電される電流は主に直流であり、コイルに異常が発生した場合にコイルを保護する際に電源回路から遮断するための遮断器 |
| | 蓄積エネルギー | ここではコイルに磁界の形で蓄えられるエネルギー。 |
| | 超電導転移 | 超電導体が常電導から超電導に相転移すること。 |
| | 超電導転移温度 | 超電導体が常電導から超電導、またはその逆に相転移する温度。臨界温度とも。記号は T_c 。 |
| | 超電導量子干渉計 (SQUID) | 極めて弱い磁場の検出に用いられる高感度の磁気センサ。ジョセフソン効果（絶縁体を挟む弱く結合した 2 つの超電導体の間に流れるトンネル電流）を利用している。 |
| つ | 通電特性 | 超電導コイルに通電する際に発生する電圧のうち抵抗成分を抽出し測定した、超電導状態から常伝導転移する特性 |

| | | |
|---|---------|--|
| | 通電履歴 | 超電導コイルの磁化特性において、過去の通電状態によって磁化特性がことなることから、磁化特性を評価するために必要な通電の履歴。 |
| て | 抵抗ショート法 | 永久電流モードで運転されている高温超電導コイル中に異常が生じた際、回路を切り替えて異常が発生したコイルの電流を他の健全なコイルに移し、安全に減磁する技術 |
| | ディップ | パンケーキコイルの非破壊評価において着磁した残留磁化が小さくなり磁場が小さい部分。 |
| | 鉄シム | 通常コイルの位置誤差などにより磁界均一度が設計値よりも悪化する。これを鉄シムと呼ぶ微小鉄片が発生する磁界で補正する。一般に、マグネット常温内径側に複数個の鉄シムを張り付ける。鉄シムの最適配置の決定が、MRI マグネットの磁界均一度を得るためのキーポイントの一つである。 |
| | 電界基準 | 超電導状態から常伝導転移する通電特性において、臨界電流を決めるための発生電界。電界は電圧を距離（長さ）で除した値。 |
| | 電磁応力 | 超電導コイルにおいて励磁時に磁場と電流によって発生するコイル内部応力。 |
| | 伝導冷却 | 低温で冷却する場合において、冷凍機などの冷却端から銅やアルミなどの良熱伝導部材を用い熱伝導で被冷却部を冷却する方法。一般的に真空断熱の構造で用いられる。 |
| | 伝熱効果 | 伝導冷却などで冷却する際に熱輸送を銅やアルミなどの良熱伝導部材で行うことで多くの熱を伝導できる効果 |
| | 電流拡散現象 | 磁場や電流が変化する際に超電導や微少抵抗材料には表皮電流のように集中電流が流れるが、欠陥などがあると電流が拡散すること。 |
| | 電流負荷率 | 超電導コイルの通電電流と発生磁場から得られるロードラインに対し、臨界電流の磁場依存性との交点を 100%とした場合の臨界電流 I_c に対し、運転電流 I_{op} の割合。 I_{op}/I_c (%)。 |
| | 電流リード | 超電導コイルなどに電流を流すためのリード。低温機器に備え付けるために熱侵入量が最小になるよう長さや断面積が最適化されている。また、中間温度より低温部には高温超電導による電流リードを用いることで、通電発熱が少なく、定常熱負荷も小さいリードを構成している。 |
| | 鉄系超電導体 | 2008年に東工大細野教授らにより発見された超電導体群で、FeAs層を持つことを特徴とする。線材としては122系と呼ばれる $(Ba_{1-x}, K_x)Fe_2As_2$ を中心に開発が行われており、高い臨界磁場のため強磁界マグネット用途が期待されている。銅酸化物より異方性が少ない。 |
| と | 特徴パラメータ | 振動信号の特徴を表し、設備状態にも鋭敏に反応する、振動信号を用いて算出されたパラメータ。 |

| | | |
|---|------------------|---|
| | 動圧式ガス軸受 | 軸と軸受面が持つくさび状隙間の相対運動によって浮上する軸受 |
| | 等価回路推定 | 超電導コイルの磁化などによる発生磁場の変動を等価回路を用いて評価したもの。 |
| | 等価回路モデル | インピーダンス測定により電気化学反応を含む現象をいろいろの素過程に分解し電子回路素子（抵抗、コンデンサー、インダクタンス）やワールブルク素子やその他の素子で置き換えて回路を再構成するインピーダンス解析法の一つ。 |
| | 等価抵抗成分 | 超電導コイルの磁化などによる発生磁場の変動を等価回路を用いて評価した抵抗成分。 |
| | 共巻き法 | 高温超電導線と共に巻かれた薄い銅テープを用いて高温超電導コイルに発生した異常を検出する技術 |
| | ドライブモード | 常時電源を接続してコイルに電流を流す通電方法 |
| | トレーニング | 超電導マグネットを励磁したとき、設計より低い電流値でクエンチを起こし、再励磁を繰り返すと徐々にクエンチを起こす電流値が向上する現象。マグネット内で超電導線が動くことによりクエンチが発生し、一度動いた線が安定な位置に固定されることで、再励磁時には別の不安定箇所でもクエンチが起きる。このようにして定格電流まで安定して励磁できるようになるまでトレーニングを繰り返す。 |
| | 等方性一液加熱硬化型導電性接着剤 | 電子材料の用途として、導電性を有し、導電性が等方的な特性を有す接着材。溶剤と硬化剤があらかじめ混合されており、加熱することにより硬化して、高い接着強さと耐久性を示す。 |
| な | ナノ粒子 | 物質・材料をナノメートルオーダーの粒子にしたものである。比表面積が極めて大きく、量子サイズ効果によって特有の物性を示すことなど、一般的な大きさの固体の材料とは組成が異なる。 |
| に | 二次側 | 超電導コイルの磁化などによる発生磁場の変動を等価回路として表す場合の遮蔽電流を二次側に例えて評価したもの。 |
| ね | 熱侵入 | 低温容器内に室温領域から熱伝導、熱輻射などで侵入してくる熱量。熱侵入とも表記する。 |
| | 熱損失 | 冷却システムで発生するジュール損や交流損失に伴う熱や侵入熱に伴う損失。これら損失に伴う熱により、冷媒の温度が上昇するため、必要な温度に冷却する必要がある。 |
| | ネオン | 原子量 20 の単原子分子である。常圧で無色無臭の気体。沸点 27K、凝固点 25K |
| | 熱伝達係数 | 温度差が生ずる複数の構造材間における熱の伝達しやすさ。介在する材料の熱容量および熱伝導、接触熱抵抗などの諸条件が影響する。 |
| | 熱電対 | 異種金属の 2 接点間の温度差によって熱起電力が生じる現象（ゼーベック効果）を利用した温度センサ。 |

| | | |
|---|-------------------|---|
| | 熱平衡方程式 | ある構成部材において発熱と冷却、熱容量を含め過渡および定常での温度を導出する計算式 |
| | 熱暴走 | 超電導体内に何らかの原因で常電導の芽が生じたとき、その部分のジュール発熱が冷却を上回ると温度が上昇し、さらに発熱量が増し、悪循環に陥ることがある。この急激な温度上昇を指す。 |
| は | ハイパスフィルタ | 設定値（カットオフ周波数）よりも低い周波数のデータをカットするフィルタ |
| | パス周波数 | 軸受傷によって生み出される異常衝撃波の周期。 |
| | パーコレーション遷移モデル | 超電導材内の欠陥などを考慮し輸送電流が複雑に流れる状態をモデル化し通電電流と発生電圧を品質工学的に表現したモデル |
| | バインダ | 接着ペーストを構成する主要成分であり、主に各種エポキシ樹脂が使用され硬化剤を選択することで硬化条件を制御する。 |
| | 剥離力 | 金属などの基板に成膜された高温超電導薄膜導体において、基板から剥離する方向に加わる力。剥離が生ずると薄膜が壊れ超電導特性が劣化する。一般的に剥離力は数十 MPa 以下と低い。 |
| | パルスレーザー堆積法 | REBCO 超電導膜や中間層薄膜などを生成するためにレーザーアブレーション法によりターゲットにパルスレーザーを照射しブルームと呼ばれるプラズマを発生させ基板に堆積するもの。 |
| | 反強磁性 | 鉄などの磁場に対し磁束を集中させる強磁性と反対に磁束の侵入を抑制する反磁性について、超電導などの強い反磁性を示すもの。一般的には銅のように弱い反磁性材料は存在するが、超電導体の場合は、遮蔽電流による現象のため磁性材料とは異なる特性を持つ。 |
| | パンケーキコイル | 超電導薄膜導体のような断面のアスペクト比が大きいテープ導体をコイル化する場合、ロールケーキ状に同心円状に巻線をする事が多い。このように巻線されたコイル。 |
| | 反射高速電子線回折 (RHEED) | 真空中で電子銃により電子を加速し、加速した電子を試料表面にごく薄い角度で入射させることで、電子線が試料表面で反射して、蛍光スクリーンに達し、回折パターンを示す。電子回折法の一種であり、物質の表面状態を調べる技術である。 |
| | 反射電子像 | 走査型電子顕微鏡観察において、試料に電子線を照射した際、試料表面で跳ね返された電子（反射電子）を検出して得られる画像。試料表面の組成分布を反映している。 |
| | パーコレーション遷移モデル | 超電導材内の欠陥などを考慮し輸送電流が複雑に流れる状態をモデル化し通電電流と発生電圧を品質工学的に表現したモデル |
| | バインダ | 接着ペーストを構成する主要成分であり、主に各種エポキシ樹脂が使用され硬化剤を選択することで硬化条件を制御する。 |

| | | |
|---|------------|--|
| | 剥離力 | 金属などの基板に成膜された高温超電導薄膜導体において、基板から剥離する方向に加わる力。剥離が生ずると薄膜が壊れ超電導特性が劣化する。一般的に剥離力は数十 MPa 以下と低い。 |
| | パルスレーザー堆積法 | REBCO 超電導膜や中間層薄膜などを生成するためにレーザーアブレーション法によりターゲットにパルスレーザーを照射しプラズマと呼ばれるプラズマを発生させ基板に堆積するもの。 |
| | 反強磁性 | 鉄などの磁場に対し磁束を集中させる強磁性と反対に磁束の侵入を抑制する反磁性について、超電導などの強い反磁性を示すもの。一般的には銅のように弱い反磁性材料は存在するが、超電導体の場合は、遮蔽電流による現象のため磁性材料とは異なる特性を持つ。 |
| ひ | ビーンモデル | 超電導の振る舞いを記述するモデル。簡易的に臨界電流密度が磁場によらず一定であると仮定する。 |
| | 微小電流値制御 | MRI のような高安定磁場を発生する場合に、電源をつないだまま磁場保持するドリブンモードにおいて、磁場安定性を NMR 信号などでフィードバック制御する場合に励磁電源に微小な電流で調整する制御方法。 |
| | 非線形最適化 | 任意の関数で構成した目的関数を最小化あるいは最大化するアルゴリズム。非線形最適化の場合、しばしば真の最適値からはずれた局所最適値に収束することがある。これを避けるため、MRI 用コイルの設計では SA や GA などが用いられることが多い。 |
| | 非線形等価回路 | 超電導コイルの磁化などによる発生磁場の変動を等価回路を用いて評価した抵抗やインダクタンス成分において定数ではなく、非線形性を考慮した回路。 |
| | 微調電源 | 微小電流値制御において、微小な電流を供給する電源 |
| | ピン止めセンター | 外部磁界を全く侵入させない(マイスナー効果)超電導体は、第 1 種超電導体と呼ばれている。これに対して第 2 種超電導体では下部臨界磁場 H_{c1} を超えると一部量子化磁束が侵入した混合状態となる。この状態で外部から電流を流すと、量子化磁束はローレンツ力を受けて動こうとするが、超電導体内の格子欠陥、析出相(絶縁相、常伝導相)、不純物、転位、粒界等の不均質な部分に外部磁束が捕捉され動きが妨げられる。これをピン止め(ピン止めセンター)という。ローレンツ力よりピン止め力のほうが大きければ、磁束は動かないが、電流または磁場が増加して、ピン止め力よりローレンツ力のほうが大きくなれば、磁束が動き電圧が発生する(電気抵抗が生じる)。このローレンツ力とピン止め力が拮抗した限界の状態における単位面積当たりの電流値が臨界電流密度 J_c となる。 |

| | | |
|---|---------------|---|
| ふ | φ スキャン | X線回折と同様で、薄膜面内での結晶性の対称性を調べる手法である。 |
| | ファンクションジェネレータ | 正弦波など各種の波形(はけい)を発生させる電子装置。 |
| | フィードバック制御 | 制御量 (PV 値) が目標値 (SV 値) になるよう、両者を比較を行いながら制御対象への操作量 (MV 値) を変化させていく制御方法。 |
| | フィードフォワード制御 | 自動制御の方式の一。制御系に入ってくる指令値や外乱を検知し、その影響が及ぶ前にこれを打ち消してしまうもの。普通、フィードバック制御に付加してより高性能化をはかる場合に用いる。 |
| | フィラー | Ag ペーストの場合には Ag であり、鱗片状 (フレーク) または球状粉が用いられる。熱・電気的物性特性はこの金属 (Ag) 粉末が支配する。 |
| | 輻射熱 | 遠赤外線線の熱線によって直接伝わる熱の事。つまり、高温の固体表面から低温の固体表面に、その間の空気その他の気体の存在に関係なく、直接電磁波の形で伝わる伝わり方を輻射といい、その熱を輻射熱という。 |
| | 輻射シールド | 放射率の低い材料を用いるなどして放射伝熱を抑える構造 |
| | フラックスジャンプ | 超電導体内の磁束がなだれのように移動する現象。超電導体内の磁束はピン止め点に拘束されるが、何らかの原因でピンを外れた磁束が移動すると、ジュール発熱により超電導体の温度が上がる。これによりピン止め力が低下して磁束線が動きやすくなると、連鎖して臨界温度を超え、常電導転移することがある。 |
| | ブリッジバランス法 | 超電導コイル内に発生する常電導の芽 (抵抗性電圧) を、ブリッジ回路のバランス電圧で検出する方法。 |
| | 物性特性測定装置 | 熱特性、磁気特性、電気特性、表面特性などの物性特性を、約 2K の極低温から室温以上まで自動で測定できる装置。 |
| へ | ヘリウムガス冷却 | 液体ヘリウムの浸漬冷却などで蒸発した低温ヘリウムガスを回収もしくは排出する際に流路を冷却する手法。 |

| | | |
|---|-------------|--|
| | 変圧器等価回路 | 高温超電導テープ線材を用いたマグネットにおいて、テープ線材に誘導された遮蔽電流ループのインダクタンスとコイルの自己インダクタンスが相互インダクタンスで結ばれると仮定。相互インダクタンスでカップリングした遮蔽電流回路を二次回路に持つ等価回路。 |
| ほ | ホール | 半導体（または絶縁体）において、（本来は電子で満たされているべき）価電子帯の電子が不足した状態を表す。たとえば光や熱などで価電子が伝導帯側に遷移することによって、価電子帯の電子が不足した状態ができる。この電子の不足によってできた孔（相対的に正の電荷を持っているように見える）。正孔 |
| | ホールセンサー | ホール効果（電流に対して垂直な磁場がかかると電流と磁場の両方に直交する方向に起電力が現れる現象）を利用して磁界を測定する素子。 |
| | ホールボディマグネット | 全身診断用の MRI 用マグネット。 |
| | 保護抵抗 | 超電導マグネット内で異常が発生したとき、これを検知し、回路を組み替えてマグネットの蓄積エネルギーを外部の抵抗に放出することにより、安全に減磁する。その際の外部抵抗のこと。 |
| | 保護放電回路出口電流 | MRI マグネットのクエンチ保護として保護抵抗によるエネルギー放出系を設けた場合に、その保護回路に流れる電流。 |
| | 補償電流 | 超電導コイルの磁場を微小に補正するために流す電流のことを本報告書では指す。 |
| | 捕捉磁束 | ピン止め効果により捕捉される磁束のこと。 |
| | ホットスポット | 超電導コイル内に発生する局所的な常電導部。高温超電導の場合は発生した常電導部が周囲に広がるスピードが遅く、大きな抵抗が発生しないために検出が難しい。そのため対応が遅れると高温になって焼損することがある。 |
| | ポリイミドテープ | 耐熱性、耐寒性、耐薬品性、電気特性、機械特性などにすぐれたポリイミド性のテープ。ポリイミドは剛直で強固な分子構造を持ち、且つイミド結合が強い分子間力を持つためにすべての高分子中で最高レベルの高い熱的、機械的、化学的性質を持つ。 |
| | 保護基 | 金属ナノ粒子は比表面積が大きく凝集しやすいため、それを防止するために金属ナノ粒子の表面に吸着させた有機物で構成される分散剤のこと。金属ナノペーストは、保護基で覆われたナノ粒子を溶剤に分散させたものである。 |

| | | |
|---|---------|---|
| む | 無酸素銅 | 工業用純銅の一種。高純度の電気銅を不活性ガス雰囲気あるいは真空中で溶解鑄造することによって、酸素およびその他の不純物をきわめて少なくしたもの。高い導電率をもち、また水素脆性（ぜいせい）を示さない。 |
| め | 面内配向 | 超電導層、中間層等の結晶軸の揃い方の程度を配向性という。面内配向は線材の長手方向の結晶の並びである配向のこと。 |
| も | 漏れ磁場 | 磁気回路の外に出た磁束の密度。透磁率の大きい材料で磁気回路をつくると、磁束はあまり漏れないが、回路に空隙があると磁束は漏れやすく、漏れた磁束を漏れ磁束という。ソレノイドが無限に長いときは磁束の漏れは起らないので、外部の磁束はゼロであるが、有限のときには外部に磁束が漏れる。 |
| | 目的関数 | 最適化において、目的関数から求めた目的値を最小化する。 |
| ゆ | 有限要素法解析 | コンピュータによって物理シミュレーションを行うための手法の一種。連続な物体を有限個の「要素」に分割し、各要素の特性を単純な数学的モデルで近似し、連立方程式の形にして全体の挙動を解析する。複雑な形状の解析が容易で、汎用(はんよう)プログラムをつくりやすい、計算上のモデルと実物との対応が明快で使いやすい、などの点が優れている。 |
| | 輸送電流 | 線材に通電している電流のこと。 |
| よ | 予冷 | 冷却システムにおいては、液体窒素の蒸発ガスを利用して循環ポンプや液体窒素配管、熱交換器冷却すること。 |
| | 予備励磁法 | 本励磁の前に目標電流よりも大きい電流を通電する励磁方法 |
| | 四象限動作 | 電源の動作を示す。負荷に電圧を加え、その時の電流をプロットしながら変化させていくと、抵抗(R)負荷の時に直線になる負荷線は、インダクタ(L)負荷では、円形となる。縦軸と横軸で区切られたグラフの4つの領域を「象限」と呼び、負荷がインダクタやコンデンサの場合には、負荷線は1象限から4象限まですべてに存在する。4象限の全領域で動作できる電源のことをバイポーラ電源という。 |
| | 四端子法 | 被検体に通電して評価対象部での発生電圧を測定し抵抗を算出する方法 |

| | | |
|---|---------|---|
| | 溶剤 | 接着ペーストを構成する主要成分であり、主にエーテル系溶液が選択され、主として硬化温度を制御する。 |
| ら | ランプ加熱方式 | 膜を成長させる基板の温度を確保するための構造であり、ランプを熱源とする。熱容量が小さいため、温度上昇、下降スピードが容易に制御できる。 |
| り | リーク | 配管や機器のシール部や溶接部から何らかの不具合により冷媒（液体窒素）が漏れること。真空層の場合には真空リークと言う。 |
| | リザーバタンク | 液体窒素は系内への不純物侵入を防ぐため閉サイクルで用いられる。しかし窒素温度が 77k から 63K まで変化すると液体の膨張・収縮が 7%程度生じる。この膨張・収縮変化を吸収するのがリザーバタンクと呼ばれる真空断熱容器である。さらにリザーバタンクを窒素圧力が最も低くなる窒素循環ポンプ吸入側に設置することで、その最低圧力を保持する圧力制御機能を持たせることで超電導体内での気泡の発生を防止し部分放電を防ぐ機能を付加している。 |
| | 履歴電流 | 超電導コイルを本励磁する前に流した最大通電電流 |
| | 理論磁場 | 遮蔽電流がゼロの場合の磁束密度 |
| | 臨界温度 | 温度上昇に伴い超電導状態（電気抵抗ゼロ）から常電導状態（電気抵抗を生じる）へと相転移する温度のこと。 |
| | 臨界電流特性 | 臨界電流は外部磁場の大きさや線材形状などの影響を受ける。 |
| | 臨界磁界 | 第一種超電導体では超電導状態から常電導状態へ転移を起こすときの磁場のことを示す。また、第二種超電導体ではマイスナー状態から混合状態への転移を起こすときの下部臨界磁場 (Hc1)、混合状態から常電導状態へ転移を起こすときの上部臨界磁場 (Hc2) の総称のことを示す。 |
| | 臨界電流 | 超電導体に抵抗ゼロで流すことができる電流の最大値であるが、実際にはある電界の閾値を決めて、それに達する電流値を臨界電流と定義する。記号は Ic。 |
| れ | 冷却システム | 主にブレイトン冷凍機、評価用試験装置を指す。 |

| | | |
|--|--------|--|
| | 冷凍機 | 対象となる物質から熱を奪い、それを水や空気などに移送する機械または装置の総称。対象物の温度を下げる働きをする。熱の輸送に使用される冷媒の種類、それを圧縮する方法、膨張により吸熱作用を発生させる工程などによっていくつかの冷凍方式に分類される。超電導マグネット用としてはGM（ギフォード・マクマホン）方式がよく用いられる。2段式冷凍機の場合、比較的高温の1stステージは輻射シールド等を冷却し、最も低温になる2ndステージで対象となる超電導マグネットを冷却することが多い。 |
| | 冷凍機の効率 | 動作温度において発熱量 $Q[W]$ を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 $W[W]$ とすると $COP=Q/W$ で表される。COP(Coefficient of Performance)とも表記する。 |
| | 励磁速度 | 超電導マグネットを定格磁場までに励磁する際の実速度。 |
| | 冷凍能力 | 被冷却体の熱損失と定常的に温度バランスしているときの冷凍システムの能力で定義される。 |

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置付け

1.1 背景

2012年末、超電導状態にするために冷媒として用いられるヘリウムが世界的に供給不足となる「ヘリウムショック」により、磁気共鳴画像装置（以下「MRI」（Magnetic Resonance Imaging）という。）、核磁気共鳴装置（以下「NMR」（Nuclear Magnetic Resonance）という。）等の停止を余儀なくされた。世界の商用ヘリウムの約8割を生産する米国では、2015年までの期限付きでの民間へのヘリウム放出抑制を2020年まで延長することとなったが、それまでに備蓄が底をつく可能性があると言われている。そのためヘリウムの供給不足リスクに備え、液体ヘリウムを必要としない超電導応用技術開発を行うことが資源セキュリティの観点からも急務となっている。また、鉄道き電線に、低損失・大容量送電が可能な高温超電導技術を適用することにより、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高める送電技術の確立が期待されている。

1.2 目的

これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果は、実用化へ向けた開発へ移行可能な段階にある。本プロジェクトでは高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フェージビリティスタディ（FS）開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。このため本プロジェクトにおいては、a. 高温超電導送配電技術開発、b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発を総合的に推進する。

2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDOが関与することの意義

超電導技術は科学技術イノベーション総合戦略において取り組むべき課題、スキームの中で「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」の一つとして位置づけられている。

また、2020年以降に急増すると考えられている大都市の老朽化した地中ケーブルのリプレース需要への対応及び再生可能エネルギー電源の大量導入による系統影響への対応のため、信頼性の高い次世代送電システムの開発が不可欠である。

しかしながら超電導ケーブルを実際に電力システムに適用するためには、不測の事故（地絡・短絡等）が発生した際の現象を把握し、リスクの内容、程度の検証と安全対策のための手段の検討を実施することが最終的な課題として存在する。しかし、安全性、信頼性の検証は評価方法の検討から始める必要があり、個別の企業の活動では達

成し得ない。ユーザーである電気事業者や複数の開発者、大学等の英知を集めた研究が不可欠である。NEDOのプロジェクトとして、本プロジェクトをマネジメントする事により、我が国の技術を結集した研究開発が可能となり、効率的にプロジェクトを推進する事で、的確に成果を挙げる事ができる。

また、超電導ケーブル開発は、NEDOの中期目標において省エネルギー分野中の横断分野で、「次世代送配電ネットワークの構築（高温超電導線材を活用した高機能電力機器等を含む）に不可欠な「熱・電力の次世代ネットワーク」等に係る技術開発に取り組んでいく。」と記されている。本技術は実用化直前の段階にあって、普及期には至っていない。従って本プロジェクトはNEDOのミッションに沿うものであり、NEDOの関与が必要とされるプロジェクトである。

加えて、電力分野での省エネ化あるいはCO₂削減を今後進めていく中で、発電分野だけで対策を行うことには限界があり、送配電分野における対策も必要となるが、既存の送配電技術は成熟しており、具体的な対応策を見つけることは困難な状況にある。

更に、海外においても、超電導ケーブルに係る技術開発は、韓国や欧州を中心に熱心に行われており、今後の送配電関連技術における世界市場を考察すると、日本と同様に、都市中心部での老朽化した地中ケーブルの代替として超電導ケーブルが活用される可能性は十分にある。現状、日本の超電導ケーブル技術は、高温超電導線材の性能（臨界電流値等）では世界トップクラスを維持し、実用化に向けて長期実証試験も実施しているが、他国でも匹敵する性能の線材が開発されつつあり、同様の実証試験も実施されるなど、技術レベルは肉迫してきている。このため、本プロジェクトを実施しない場合、実用化が遅れるだけでなく、諸外国と比較して優位性を失い、市場参入が遅れ、国際競争力を失う可能性が高い。

2.2 実施の効果（費用対効果）

研究開発項目：運輸分野への高温超電導適用基盤技術

鉄道き電線への超電導ケーブルシステム適用では、大幅な電圧降下ロス削減、回生電力の利用により、2030年度において年間6.9GWh省エネルギー効果が得られると見込まれる。加えて、電圧降下抑制により運行間隔の短縮、変電所間隔の拡大などが図れる。なお、超電導ケーブルを用いた鉄道き電線システムの国内の市場規模は、2030年において年間50億円程度見込まれる。

研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

MRI用途を主眼とした高温超電導マグネットは30K程度での運転を想定する。現行の低温超電導MRIマグネットの温度が4.2Kであるため、消費電力は30%低減（2kW/台）。年間1.7MWh/台の省エネ効果が期待できる。2030年度において年間6.5GWh省エネルギー効果が得られると見込まれる。

また、高温超電導MRIマグネットは、現行の低温超電導マグネットと同一サイズでの高磁場化が可能となる。これにより、現在広く医療現場で使用されている、1.5T低温超電導MRIシステムの寿命によるシステム置き換えの際、3T高温超電導マグネットが採用される可能性が高くなる。この3T高温超電導MRIシステムが医

療現場に浸透することにより、現行よりも高解像度な医療画像取得が可能になり、脳梗塞などの微小領域疾患の診断が期待できる。さらに、高磁場MRIシステムの実現により、神経系や細胞レベルでの診断に向けた医療情報の提供が可能になることも期待されている。また、いち早く世界市場に高温超電導技術による小型3Tマグネットを浸透させることができれば、これまで立ち後れていた我が国のMRIの世界シェアを拡大することができる。なお、高温超電導マグネットを用いたMRIの国内の市場規模は、2030年において年間965億円程度見込まれる。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発目標

これまでの研究開発成果を基に、実証を通して実用化への仕上げを実施する実用化促進実証技術開発として、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」、「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」及び「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」は実用への基盤技術を確立するため研究開発を実施する実用化促進基盤技術開発として実施する。

1.2 研究開発項目毎の目標

1.2.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術

超電導ケーブルを鉄道き電線へ適用することで、回生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの大きな効果が期待できる。また電気鉄道の直流路線は、国内で 11,000 km、国外で 94,000 km 以上に及び、市場規模は大きい。さらに低圧交流路線においても、大電流の送電となるため、超電導ケーブルを導入するメリットがある。

しかしながら、現在用いられている超電導機器の冷却システムは、数百 m 級機器の場合は冷媒循環による冷却であり、鉄道への導入に必要な数 km 以上の冷媒圧送は実現できていない。更に既存設備との共存の観点から、コンパクトで長距離の冷却システムの実現が必要不可欠であると言える。

本事業においては、超電導ケーブルの鉄道き電線への適用を想定し、超電導ケーブルの長距離冷却技術の開発および長距離冷却システムの構築を行う。具体的には、以下の項目に示すとおり、鉄道現場に設置可能なコンパクトな冷却システムの実現を目指し、コンパクト冷凍機、液体窒素循環ポンプ、断熱管などの基盤技術の研究開発およびシステムの保全技術として、冷却設備診断技術および超電導ケーブルの状態監視・診断技術の研究開発を行う。そして開発した要素技術を組み合わせて、km 級の長距離冷却システムを構築し、安定性、信頼性および実用性の確保を目指す。各研究開発項目の中間目標と最終目標を表 1-1 に示す。

(I) 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発

- ① コンパクト冷凍機技術開発
- ② 液体窒素循環ポンプ技術開発
- ③ 断熱管技術開発

(II) 長距離冷却システム構築・評価

- ① 実環境を想定した評価実施
- ② システム保全技術開発

(III) km 級長距離冷却システムの開発

① 実環境下での評価実施

表 1-1 各研究開発項目の中間目標と最終目標

| 項目 | 2018 年度 (中間目標) | 2020 年度 (最終目標) |
|------------------------|--|--|
| (I) 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発 | | |
| ①コンパクト冷凍機技術開発 | 運転試験による設置寸法 2 m ³ /kW の確認 | — |
| ②液体窒素循環ポンプ技術開発 | 単体性能評価試験による吐出圧：0.6 MPa、流量：50 L/min の確認 | — |
| ③断熱管技術開発 | 長尺断熱管を試作し、熱侵入：2 W/m、真空維持：1 年以上の見通し | — |
| (II) 長距離冷却システム構築・評価 | | |
| ①実環境を想定した評価実施 | 窒素ガス環境下の電流リード電界解析 | — |
| ②システム保全技術開発 | システム保全技術の適用指針の確立 | — |
| (III) km 級長距離冷却システムの開発 | | |
| ①実環境下での評価実施 | — | km 級長距離冷却システムの開発 (圧力 2 MPa 未満、流量 10 L/min 以上の液体窒素による冷却試験を実施し、長さ 1.2 km 以上の条件で循環性能を確認) |

1.2.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

高温超電導コイルの実用化技術開発に関しては、全身用 3T-MRI マグネットの実現を目指し、1m を越える大口徑コイルの製作技術を確立し、実機と同じ構成となる 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットを試作、評価する。また、高温超電導コイルの磁化の影響を評価し、対策を検討する。

高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発に関しては、実機と同じ最大経験磁界および電磁力を発生できる 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルを設計する。また、省エネ型の励磁システムを提案し検証する。

高温超電導線材の超電導接続技術開発に関しては、REBCO 高温超電導線材による永久電流モード運転を可能にするためのマグネットシステム内の線材接続について、接続点あたりの抵抗値 $10^{-12}\Omega$ を開発目標とする。またマグネット製作現場で施工が容易であることを重視して技術の研究開発を行う。開発した高温超電導接続技術を用い、永久電流

スイッチおよび必要な接続線とともに小型の永久電流マグネットを模擬した閉ループを構成し、超電導接続を実証する。

コイル保護・焼損対策手法の開発に関しては、コイル異常発生時に焼損に至る高温超電導コイルの特性に対し、異常検出方法、保護方法を検討する。

表 1-2 各年度目標

| 項目 | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度 (中間目標) |
|---------------------------|--|--|--|
| 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・内径560mmコイルの精度0.2mm以下の巻線技術確立 ・コイル製作良品率を95%に改善(現85%) ・高温超電導コイルの磁化影響の定量化 | <ul style="list-style-type: none"> ・外径1.2m大口径コイルの巻線技術の確立 ・直径1.2mアクティブシールドコイル製作、(良品率90%以上) ・1/2アクティブシールド型3T-コイルの組立完了、組立精度0.5mm以下 ・磁化の影響を抑制する手法を提案し、安定度0.1ppm/h未満の目処立て | <ul style="list-style-type: none"> ・1/2アクティブシールド型3T-マグネットの3T励磁達成 ・磁場均一度10ppm未満(200mDSV)、磁場安定度0.1ppm/h未満を満足させる1/2アクティブシールド型3T-マグネットの製作とイメージング実証 ・最終目標に向けた1/2サイズ5T-コイルの製作開始 ・高温超電導線材への要求仕様の導出の目処 |
| 2) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・1/2アクティブシールド型3T-マグネットの設計完了 ・マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムによる励消磁の実証 | <ul style="list-style-type: none"> ・1/2アクティブシールド型5T-コイルの基本設計の完了(コイル電流密度200A/mm²以上、最大経験磁界7T、低温超電導コイル比線材量30%以上低減) ・マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの省エネ性評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・1/2アクティブシールド型5T-マグネットの設計完了(磁場均一度10ppm未満(200mDSV)) ・マグネット励磁システムの低コスト、省エネ化の提案 ・高温超電導マグネットシステムの最小コスト条件の導出方法の確立 |

| | | | |
|----------------------|--|---|--|
| 3) 高温超電導線材の超電導接続技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・高温超電導線材上に接続部を形成するための基盤技術の確立 ・低磁場低温接続アシスト環境の設計技術の確立 ・接続抵抗評価のための基盤技術の確立 | <ul style="list-style-type: none"> ・低磁場低温接続アシスト技術の確立 ・異種超電導材料による接続技術の確立 | <ul style="list-style-type: none"> ・超電導接続の低抵抗化のための課題抽出 ・接続抵抗高精度評価技術の確立 |
| 4) コイル保護・焼損対策手法の開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・コイル異常検出方法および焼損過程の特性把握 ・コイル異常時における磁場変動発生における人体への影響把握 ・共巻き法による異常検出 ・保護条件の明確化 | <ul style="list-style-type: none"> ・高温超電導コイルの異常時のコイル保護方法の提案 ・コイル異常時における人体に影響する過大な磁場変動対策の提案 ・共巻きコイルによる異常検出技術の確立 | <ul style="list-style-type: none"> ・コストも考慮した実用的な高温超電導コイル保護方法の提案 ・マグネットシステムとしての異常時の対応方法の提案 ・共巻き法による異常検出・保護の小規模モデルコイルによる原理実証の完了 |

表 1-3 各年度目標 (助成 2019-2020)

| 項目 | 2018 年度 | 2019 年度 | 2020 年度 (最終目標) |
|---------------------|--|---|---|
| 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発 | | | |
| ①コイル・マグネット製作技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・1 / 2 サイズ 3 T マグネットの製造完了 ・大口徑高温超電導コイル製作技術の確立 ・高温超電導コイルの製作による劣化現象の把握 | <ul style="list-style-type: none"> ・1 / 2 サイズ 3 T マグネットによるイメージング実証 (150 mm 球) ・大口徑コイル製作の信頼性向上手法の確立 ・7 T 検証コイルの製作開始 | <ul style="list-style-type: none"> ・1 / 2 サイズ 3 T マグネットの磁場評価完了、限界試験 ・7 T 検証コイルによるコイル平均電流密度 200 A / m² (7 T) 超の検証 |
| ②磁場安定化技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・オーバーシュート法による磁場安定性改善手法の検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・1 / 2 サイズ 3 T マグネットでの磁場安定性の改善手法の検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。 |

| | | | |
|---------------------------|---|--|--|
| | 討と 2T コイルでの 検証 | ・磁化を考慮し た磁場解析手法 の検討 | |
| ③コイル保護 手法の検討 | ・高温超電導線材 の局部劣化による 常伝導領域拡大現 象の把握 | ・MR I システ ムとしての保護 構成の検討 | ・ドライブモードのコイル保 護としての超電導マグネット の保護システムの確立 |
| 2) 高温超電導マグネットのシステム最適化開発 | | | |
| ①高磁場・高 電流密度コイ ル設計技術 | ・1 / 2 サイズの アクティブシール ド型 5 T マグネッ ト設計完了 | ・7T検証コイ ルの設計完了 ・3 Tフルサイ ズコイルの基礎 検討実施 | ・3 Tフルサイズマグネット の小型化設計完了 |
| ②省エネ・低 コストシステ ムの開発 | ・励磁電源の磁場 保持電源分離方式 の検討、実証 | ・線材使用量最 小コイル設計検 討 ・冷凍機消費電 力の省エネ検討 | ・コイル形状、冷凍機能力、ク ライオスタット等のシステム 最適化完了 ・熱スイッチの効果の評価 |

| 項目 | 2019 年度 | 2020 年度（最終目標） |
|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 3) 高温超電導線材 の超電導接続技術 開発 | ・接続抵抗の低抵抗化 | ・接続点での抵抗値 $10^{-12} \Omega$ 以下の 接続技術の確立 ・高温超電導層表面を接続に適し た状態にする技術の確立 ・高温超電導線材と低温金属系超 電導線材の間の超電導接続の実証 |
| 4) コイル保護・焼 損対策手法の開発 | ・保護技術の大規模マグネッ トシステムにおける課題の抽 出 | ・永久電流モード高温超電導コイ ルの保護・焼損対策手法の確立 |

(1) 研究開発の必要性

(i) 高温超電導コイルの実用化技術開発

コイルに使用するREBCO高温超電導線材は、金属（ハステロイ）基板上にバリア材を介して単結晶薄膜を長尺に渡り1～3 μm厚さで成膜している。超電導膜を保護するために銀膜が蒸着され、表面に安定化材として銅箔をハンダ付けもしくは銅メッキが施工されている。高温超電導線材は、断面アスペクト比が大きいため線材表面に引っ張り応力が加わると超電導薄膜には剥離力となり、剥離強度が低いため超電導劣化が生ずる。そこで、表面に剥離力が加わったとしても超電導薄膜に応力が加わらないよう、電気絶縁のための樹脂フィルムにフッ素コーティングしたものを1枚入れることで、コイル巻線後にエポキシ含浸してコイル一体化したとしてもフッ素コー

ティングにより剥離力が発生しにくいという線材を適用し劣化を抑制することができている。しかしながら、実際にコイルを製作するとコイル形状が大型化するにつれて超電導特性が劣化するものが出てきた。内径320mmのパンケーキコイルを単体にて液体窒素中で特性測定した結果、およそ70個製作し、そのうちの15%が超電導劣化するという結果であった。実機サイズに向けた開発を行うが、より大口径化することで超電導劣化の発生数が増加する可能性がある。

そこで、高温超電導コイルの大口径化における巻線手法を確立するために、パンケーキコイルを試作し劣化要因と対策検討を実施する。また、1m程度のアクティブシールドコイルを試作しハンドリング時のたわみ、エポキシ含浸、巻線精度、コイル積層精度などの評価を行い、磁場均一度への影響が最低限になる検討、試作評価を行う。また、大口径化による超電導特性の劣化に対する評価を実施し、特性劣化の不良発生要因を特定し、対策を実施する。

(ii) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

MR I マグネットは、撮像空間および傾斜磁場コイル、RFアンテナコイルを設置するための室温ボアを有する。超電導コイルは、クライオスタットと呼ばれる断熱真空容器に設置され、冷凍機により固体熱伝導で冷却される。このように超電導マグネットは、コイルを取り巻く構成要素を最適設計により、より小型でより軽量、より低コストを実現することが重要である。保有する設計技術を駆使し、高温超電導マグネットのシステム最適設計を行う。まずは、実機システムを検証するために、コイルの大口径化に対応した1/2サイズアクティブシールド型3T-マグネットの磁気・構造設計を実施する。設計するマグネットは、磁場均一度を考慮したコイル配置を有するもので、室温ボア直径500mm、中心磁場3T、漏れ磁場2.5m×3m以内を目標とし、イメージングに資することができる磁場均一度のコイル設計を行う。上記マグネットで得られた最適化手法を用いて、将来の実用機を意識し、高温超電導の特長を活かしマグネットをより小型・軽量化するために、最大経験磁場7Tの高磁場でコイル平均電流密度200A/mm²超での1/2サイズのアクティブシールド型マグネットを設計する。中心磁場は5Tとし、高磁場、高電流密度化の効果を考慮して設計し、試作により実証する。この結果を元に、次世代の高温超電導MR I マグネットの概念設計を実施する。電源を常時接続するドライブモードのマグネットにおいて、MR I マグネットのインダクタンスは、100H程度と大変大きいため励磁電源は例えば200V-500Aという大型のものが必要である。この電源は、容積が大きく消費電力も大きくなるため、常時通電で磁場保持する場合は小容量の電源で済むことから、マグネットシステムを省エネ化するために、マグネットの励磁電源と磁場保持電源の分離システムを実証し、省エネ効果を評価、確認する。また、MR I 画像を高精細化するために必要である高安定磁場の0.1ppm/h以下を得るために高安定電源および電流の制御方法を検討し、通電試験にて実証する。また、イメージングの画像にて安定性を評価する。高温超電導マグネットのコスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化を検討し、冷却温度、冷却消費電力など最適条件設定手法を確立する。

(iii) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

実用的な規模の高温超電導コイルは、多数の線材間接続が存在する。現在供給されているリチウム系高温超電導線材の線長は、最大でも数百mであり、たとえば数十k

mの線材長を必要とするコイルを製作する場合、100カ所にもおよぶ接続が必要になる。線材同士をはんだで接続した場合、接続部1カ所あたりの抵抗は数十～数百nΩ程度が一般的である。この部分でのジュール発熱は、冷凍負荷となり、システムの効率を低下させると同時に、コイルの安定性を低下させる可能性がある。線材一本あたりの長さを長くできれば、接続数を減らすことができ、この問題を回避できるが、マグネットシステムが複数のコイルで成り立っている場合には、コイル間の接続が不可避免的に存在する。コイル内の線材間接続、コイル間の接続、ともにその接続部の抵抗を可能な限り低減することが求められる。

金属系低温超電導線材の場合、異種の超電導材料を用いることにより、接続部で抵抗が発生しない、いわゆる超電導接続技術が確立している。この超電導接続技術を利用し、コイル両端を短絡することにより電流を保持する「永久電流モード」が実現されている。しかしながら高温超電導線材では、超電導接続技術が未確立であるため、常時電源を接続してコイルに電流を流す「ドライブモード」が採用されている。ドライブモードであっても、高安定電源を使用することにより、常に安定な磁場を発生できる。しかし、永久電流モードが実現できれば、励磁時以外は電源を切り離すことができ、極めて高安定の磁場を維持できるとともに、高効率の運転が可能となる。またMRIにおいては、極めて高い磁場安定度のために撮像時間を短縮でき、患者負担を低減できるほか、脳機能MRI等の高分解能スペクトル情報を得ることも可能になる。永久電流モードでは、接続部に抵抗が残ってしまうと、その部分の発熱で電流が減衰してしまい、一定時間毎に再励磁が必要になってしまう。実用的な運用には、接続あたりの抵抗は $10^{-12}\Omega$ 以下が必要であり、本研究開発の目標として設定した。またMRIマグネット用接続技術としては、マグネット製作現場で容易に施工可能であること、再現性があり良品率が高いことを重視し、技術開発方針を決定した。

(iv) コイル保護・焼損対策手法の開発（ドライブモード）

金属系低温超電導線材を用いたコイルは、極低温で運転されるために比熱が小さく、わずかな外乱によりクエンチ（突然超電導状態が破れてコイルが抵抗状態になる現象）が発生する。そのため、クエンチが発生してもコイルが焼損しないように保護する技術や、そもそもクエンチが発生しないようなコイル設計技術が開発され、確立している。

クエンチの発生を抑制するには、外乱の主要因である電磁力による導体の動きを抑えるためにエポキシ樹脂でコイルを含浸する手法を取ることが多い。また、超電導線に銅やアルミなどの低抵抗の安定化材を多く付与することにより、常電導の芽が生じてもそれを成長させないような設計指針もある。しかしMRIなどの実用機においては、コストなどの理由から設計裕度に限界がある。そのため一般的な超電導コイル保護の手法としては、コイルの一部で常電導の芽が生じたことを検出したとき、その伝搬が遅い場合はコイルをヒーターで加熱するなどしてコイル全体が常電導の抵抗状態に移ることを促し、コイル最大温度を抑制する方法がある。同時に、コイルに蓄積されていたエネルギーをすみやかにコイル外に取り出して消費させることにより、コイルの温度上昇を抑制する。

一方、高温超電導線材によるコイルの場合、想定されるコイルの運転温度は液体ヘリウム温度より高く、線材およびコイルの比熱は低温超電導に比べて桁違いに大きい。ま

た臨界温度も従来の超電導材料に比べ高温であるため、多少の外乱では臨界温度を超える発熱は起こらず、クエンチは発生しにくい。しかし、何らかの原因で高温超電導コイル内に局所的な常電導の芽が発生した場合、その芽は周囲に拡がりやすいため、これを検知することが困難であるだけでなく、狭い常伝導領域にて蓄積エネルギーを消費するため局部発熱（ホットスポット）が発生する。異常検知後にコイルの通電電流を減衰させて一部の蓄積エネルギーを外部へ取り出せたとしても、コイルの一部が焼損または劣化し、当初の性能を発揮できなくなってしまう。このような高温超電導コイルの焼損・劣化に関する報告は多く、知見が蓄積されつつあるが、焼損を防ぐための標準的な手法や、高電流密度を保ちつつ焼損しにくいコイルを設計する手法は確立されていない。本技術開発では最適な保護・焼損対策技術を開発する。また、MRIシステムとしてコイル異常による焼損が発生した場合の磁場減衰による人体への影響を評価し、軽減対策を検討する。またコイル焼損時の改修システムの検討も実施する。

(v) コイル保護・焼損対策手法の開発（永久電流モード）

高温超電導コイルの保護技術の必要性については、ドライブモード・永久電流モードに変わりはない。何らかの異常が生じて安全に減磁させることができれば、マグネットシステムの大きな焼損を防ぐことができるため、高温超電導MRIの実用化のためには極めて重要な技術である。

永久電流モードの場合、電源ドライブモードと異なる点は、永久電流スイッチの存在である。永久電流スイッチは、オン時には抵抗ゼロでコイル両端を短絡して永久電流を流し続ける。このとき、超電導コイルに何らかの抵抗領域（異常）が生じて、これをコイル両端の端子電圧で検出することができない。また永久電流を切る場合、永久電流スイッチに熱を与えて超電導状態を破り、スイッチに抵抗を発生させる。しかし超電導から常電導に転移した後の永久電流スイッチの抵抗は一般的に高くなく、スイッチオフにより回路は開放状態にはならない。これは、通常のエネルギーダンプ法において、外部抵抗に蓄積エネルギーを移す（外部抵抗を使って電流を減衰させる）際、その時定数を短くできないことを意味する。よって、異常の検出から、コイルの安全な減磁まで、ドライブモードとは異なる方式を確立させなければならない。

本技術開発では、永久電流モードで運転されている高温超電導コイルの異常検出・保護焼損対策技術について、数値解析を通じた理論の構築から、モデルコイルによる実証まで行い、実機高温超電導MRIマグネットシステムに適用できる技術の確立を目指す。

(2) 研究開発の具体的な内容

(i) 高温超電導コイルの実用化技術開発

大口径高温超電導コイルを製作し、MRI超電導マグネットを実現するために以下の技術開発を実施する。

①コイル・マグネット製作技術

高温超電導コイルの大口径化に向けた試作を行い、励磁試験や磁場均一度補正、イメージングなどを実施し、高温超電導マグネットの実証を行う。また、アクティブシールドコイルを組合せたマグネット、小型化のための高電流密度コイルの試作、試験を実施する。

②磁化による磁場乱れ対策

高温超電導コイルの磁化による磁場影響を計測し、磁場安定性や磁場均一度などのMRIに欠かせない両特性の評価や課題発生時の対策を検討する。

Y系線材は比較的大きな磁化を有し、その磁化が磁束クリープを発生させ、磁場の均一度に影響をもたらすため、この磁場変動を理論的に検討し、高温超電導コイルの磁場安定性の影響を検討し、コイル通電履歴による磁化の影響を低減する手法を検討、検証する。

Y系線材は、幅広い薄膜面を有するため超電導線材の両端付近に長距離にわたり遮蔽電流が流れ、この電流が作る磁場が、空間均一度にどれほど影響するかを要素試験及び解析により検討し、医療用MRI超電導マグネットの高均一磁場を形成するためのコイルシステムを検討する。

③高温超電導線材への要求仕様導出

超電導コイルを冷却および励磁した際に生じる応力を検討し、本検討結果をもとに、試作したパンケーキコイルの機械強度試験を行って超電導特性を評価する。

製作時に超電導特性が劣化したコイルの劣化部位を特定し、劣化要因を検討する。上記機械強度試験向け超電導コイルを作製する。また、特定した劣化部位を調査する。さらに、検討結果をもとに超電導線材に要求される機械特性の仕様を導出する。

(ii) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発として以下の技術開発を実施する。

①高磁場・高電流密度コイル設計技術

高温超電導コイルおよび冷却等のシステムの最適設計を実施する。超電導線材の使用量の低減、低コスト化のための設計手法を検討する。また、次世代の高温超電導MRIマグネットとして全身撮像用超電導マグネットの概念設計を実施する。

②省エネ・低コストシステムの開発

ドライブモードにおける電源分離システムを実証し、省エネ性を測定する。また、高安定磁場0.1 ppm/h以下を達成するための電源および電流制御方法を検討し、試験にて評価する。

高温超電導マグネットのコスト低減のためにコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化を検討し、冷却温度、冷却消費電力など最適条件設定手法を確立する。

(iii) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

高温超電導MRIマグネットシステムの永久電流モード運転を実現するための目標として設定した、接続点あたりの抵抗 $10^{-12}\Omega$ 以下を達成するため、以下の要素技術群の開発を実施する。

① 低磁場低温接続アシスト環境技術

接続部を主マグネットから離れた、低磁場・低温環境におき、接続に用いることのできる超電導材料の選択肢を拡大する技術を開発する。

② 金属ペーストを用いた接合技術

接着性のペーストを用いて簡便かつ高強度に接続する技術において、ペーストを超低抵抗化する超電導ペーストを開発する。

③ 異種超電導物質薄膜接合技術

REBCO 超電導層の上に異なる超電導薄膜を形成し、接続する技術を開発する。

④ コイル間接続線開発

永久電流スイッチや、高温超電導コイルと永久電流スイッチ、および、高温超電導ユニットコイル間の接続に使用可能な超電導材料の線材化技術を開発する。

⑤ 接続抵抗評価技術

接続部の微小抵抗を、様々な磁場・温度環境で評価できる技術を開発し、接続抵抗評価装置を製作する。

⑥ 高温超電導線材接続技術

市販の REBCO 高温超電導線材で、長尺にわたり均一に接続する技術を開発する。REBCO 層表面の最適化により接続抵抗を低減する技術を開発する。REBCO コイルに永久電流スイッチを接続し、永久電流のオンオフを実証する。

(iv) コイル保護・焼損対策手法の開発

① ドライブモードシステムマグネットのシステム保護技術開発

高温超電導コイルがドライブモードで運転されている超電導マグネットの保護検討として、医療用MR I システムは公共性が高いため特に人体への影響を検討する必要がある。上述のように、高温超電導コイルに異常が発生し、磁場変動が発生した場合のマグネット内に入っている人体への影響を検討し、影響が及ぼさないような工夫が必要となる。下記の異常時のコイル挙動検討結果より人体影響がどうかまた対策を検討する。また、コイル焼損によりマグネット不具合が発生した場合に容易に改修できるシステムを検討、提案する。

② ドライブモードシステムマグネットの異常対策検討

高温超電導コイルがドライブモードで運転されている超電導マグネットの保護技術として、コイル異常検出と速やかなコイル蓄積エネルギーの取り出し、コイル加熱による常伝導領域の拡張などの条件を検討する必要がある。これらの条件を検討するためモデルコイルによる異常発生を模擬し、発生電圧、コイル最大温度、焼損に至る過程などの異常特性を把握し、コイルおよびシステムの保護方法を検討する。

(v) 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術

永久電流モードで運転されている高温超電導コイルの異常検出・保護焼損対策技術について、コイルに生じる抵抗性電圧を高感度に検出する技術として「共巻き法」、異常が生じたコイルの電流を速やかに他の健全なコイルに移して焼損を防ぐ技術として「抵抗ショート法」を開発する。またこれらを組み合わせて高温超電導コイルの一連の保護スキームを、小規模のコイルを用いて実証する。あらゆる規模の高温超電導コイルにも適用可能な汎用の保護・焼損対策技術として確立する。

(3) 達成目標とその根拠

(i) 高温超電導コイルの実用化技術開発

●中間目標（2018年度）

- ・1/2 アクティブシールド型3 Tマグネット製作完了
- ・5 T コイル製作開始
- ・高温超電導線材への要求仕様の導出の目処

●最終目標（2020年度）

- ・【委託時】1 / 2 アクティブシールド型5 Tマグネットの完成（コイル平均電流密度200 A/mm²超（7 T））
- ・【助成時】1/2 アクティブシールド型3 Tマグネットによる撮像及び、高密度電流コイル実証のための小型7 T 検証コイルの試作、検証

【目標設定の根拠】

全身撮像用3T-MR I 高温超電導マグネット（実機）を実現するために、課題の1つである1 mを越える大口径コイルの製作技術が必要であることから、直径1.2 mのアクティブシールドコイルを有する1/2 サイズアクティブシールド型3 Tコイルの製作完了を中間目標の1つに設定した。また、最終目標であり高電流密度、高磁場の5 Tコイルの製作開始を中間目標の1つに設定した。初年度実施時にコイル製作にて単体試験でコイルの特性劣化が顕著になったことから、高温超電導線材への要求仕様の導出の目処を中間目標に加え劣化要因の特定と対策を盛り込んだ最終目標とした。また、当初の最終目標は、実機で経験する経験磁場と電磁力を実証するために1 / 2 アクティブシールド型5 Tマグネットの完成としていたが、より効率よく高密度電流コイルの実証を行うため、小型7 T 検証コイルの試作。検証に切り替えた。

(ii) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

●中間目標（2018年度）

- ・1/2 アクティブシールド型5 Tマグネット設計完了
- ・励磁システムの低コスト、省エネ化の提案

●最終目標（2020年度）

- ・全身撮像用3 T-MR I マグネット実用機概念設計

【目標設定の根拠】

全身撮像用3T-MR I 高温超電導マグネット（実機）のシステムを最適化するために、小型軽量化に加え超電導線材の使用量最小、冷却温度などの諸条件を最適化するため、上記、高温超電導コイルの実用化技術開発で取り組む1/2 アクティブシールド型5 Tマグネットの設計に最適化技術を盛り込むことを中間目標とした。また、ドライブモードにおける励磁システムを低コスト、省エネ化するための提案をおこなうことも中間目標の1つに設定した。最適化技術を用いた全身撮像用3 T-MR I マグネット実用機概念設計を目標とした。

(iii) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

●中間目標（2018年度）

- ・超電導接続の低抵抗化のための課題抽出
- ・接続抵抗高精度評価技術の確立

●最終目標（2020年度）

・接続あたりの抵抗 $10^{-12} \Omega$ 以下の接続技術の確立（永久電流スイッチを含む閉ループによる実証）

【目標設定の根拠】

REBCO 高温超電導線材によるMR I マグネットシステムの永久電流モード運転を可能にするため、マグネットシステム内に存在する接続箇所の1箇所あたりの接続抵抗として $10^{-12} \Omega$ 以下を最終目標としており、これを実現するために上記要素技術群の開発を実施する。マグネット製作現場で施工容易で、再現性と良品率が高いことを重視した技術開発を実施するため、当初3年間は要素技術の基盤となる部分の開発に注力し、接続部の低抵抗化のための課題を抽出することを中間目標に設定した。接続抵抗高精度評価技術については、接続技術の開発において試作する接続部の抵抗を評価する必要があることから、当初3年間で技術を確立することとした。この中間目標を踏まえ、抽出した課題を解決していくことで最終目標である接続抵抗 $10^{-12} \Omega$ 以下の実現と閉ループ実証を目指す。

(iv) コイル保護・焼損対策手法の開発

●中間目標（2018年度）

・異常時の対応方法の提案

●最終目標（2020年度）

・経済性を考慮した異常時対策

【目標設定の根拠】

高温超電導コイルの課題の一つであるコイル保護については、従来の超電導コイルに比べ臨界温度が10倍程度高いため、比熱が1000倍となり常伝導部位の伝播速度が極めて遅くホットスポットとなり焼損に至るという問題がある。そのためコイル保護の対策は困難であり、異常時の対応方法の検討を中間目標とし、マグネットシステムのコストも考慮した異常時対策を最終目標とし、現実的な解決方法の提案を目指す。

(v) 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術

●中間目標（2018年度）

・共巻き法による異常検出、保護の小規模モデルコイルによる原理検証の完了

●最終目標（2020年度）

・永久電流モードに対する保護・焼損対策技術の確立

【目標設定の根拠】

高温超電導コイルの局所的焼損がマグネットシステム全体に損害を及ぼす事例が報告されており、高温超電導コイルの保護技術の確立は急務である。一方、永久電流モードでは永久電流スイッチを含む回路で異常検出と保護を実施しなければならず、従来考えられていた方法が適用できない。数値解析、小規模コイルでの理論検証、一連の保護の実証、MR I 実機規模のマグネットシステムへの適用可能性の検討と、段階を踏んで技術を確立させる。当初3年間では原理検証と一連の保護動作の実証を行い、その後MR I マグネットシステムへの最適設計法の開発を行い、最終目標の技術確立を目指す。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

研究開発項目：運輸分野への高温超電導適用基盤技術

表 2-1 に委託事業（2016～2018 年度）の実施計画を示す。1 回目の計画変更は、予算の増額に伴い実施し、模擬ケーブルの一部に超電導線材を用いることにより、長距離冷却試験を超電導き電ケーブルの実環境に近い条件で実施できるようになった。2 回目の実施計画の変更は、予算の減額に伴い実施した。当初の予算を精査し、改造費、材料費、性能試験の労務費等を削減・効率化することによってコンパクト冷凍機、液体窒素循環ポンプ、断熱管などの基盤技術開発への影響を最小限にとどめた。

表 2-2、表 2-3 に助成事業（2019～2020 年度）の開始時、計画変更時の実施計画をそれぞれ示す。計画変更は、より信頼性の高い長距離冷却システムとしてサブクーラを導入した試験を行い、実用化を加速させるために行った。

表 2-1 委託事業実施計画

| 事業項目 | 2016年度 | | | | 2017年度 | | | | 2018年度 | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| I. 超電導ケーブルの 長距離冷却技術開 発（公益財団法人鉄 道総合技術研究所） | | | | | | | | | | | | |
| ① コンパクト冷凍機技 術開発（公益財団法 人鉄道総合技術研 究所、株式会社前川製 作所） | | | | | | | | | | | | |
| ブレイトン冷凍機等 の設計 | | | | | | | | | | | | |
| ブレイトン冷凍機等 の製作 | | | | | | | | | | | | |
| 総合運転試験 | | | | | | | | | | | | |
| ② 液体窒素循環ポンプ 技術開発（公益財団 法人鉄道総合技術研 究所、株式会社 IHI） | | | | | | | | | | | | |
| 液体窒素循環ポンプ の設計 | | | | | | | | | | | | |
| 液体窒素循環ポンプ の製作 | | | | | | | | | | | | |
| 液体窒素循環ポンプ の評価試験 | | | | | | | | | | | | |
| ③ 断熱管技術開発 （公益財団法人鉄道 総合技術研究所、三 井金属エンジニアリ ング株式会社） | | | | | | | | | | | | |
| 断熱管の構造設計・ 試作 | | | | | | | | | | | | |
| 長尺断熱管製造技術 の開発 | | | | | | | | | | | | |
| 長尺断熱管の試作・ 評価 | | | | | | | | | | | | |

| 事業項目 | 2016年度 | | | | 2017年度 | | | | 2018年度 | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| II. 長距離冷却システム構築・評価(公益財団法人鉄道総合技術研究所) | | | | | | | | | | | | |
| ① 実環境を想定した評価実施(公益財団法人鉄道総合技術研究所、国立大学法人東京大学) | | | | | | | | | | | | |
| ② システム保全技術開発(公益財団法人鉄道総合技術研究所、国立大学法人三重大学、国立大学法人九州大学) | | | | | | | | | | | | |

表 2-2 実施計画（助成事業開始時）

| 事業項目 | 2019年度 | | | | 2020年度 | | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| ① 長距離冷却システムの構築・ 評価 | | | | 冷却 試験 | | | | |
| ①-1 実環境下での評価実施 | 冷媒配管等製作 | | | | 冷媒配管等製作 | | | |
| 冷却システム構成・評価 | | 要素機器接続 | | | km級システム構成 | | | |
| km級長距離冷却システム構 成・評価 | | | | | | | 冷却試験 ▲▲▲ | |
| | 移設 | | 制御特性評価 | | | | | まとめ |
| (前川製作所共同研究) 冷凍機の運転手法検討 | | | 運転手法検討 | | | | | |
| (IHI共同研究) 液体窒素循環系の運用手法検 討 | | | 課題抽出・改良 | | | | | |
| | | | 運用手法検討 | | | | | |
| | | 製作・敷設 | | | 製作・敷設 | | | |
| (三井金属エンジニアリング共同研 究) 長尺断熱管の製作 | | 敷設装置開発 | | | 特殊ドラム | 敷設試験 | | |
| 長尺断熱管の敷設手法検討 | データ蓄積 | | | | | データ蓄積 | | |
| | | 高度化検討 | | | | | | |
| (三重大学共同研究) 状態監視、診断技術の適用 | | | | | | 健全性 確認 | | まとめ |

表 2-3 実施計画（計画変更時）

| 事業項目 | 2019年度 | | | | 2020年度 | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | |
| ① 長距離冷却システムの 構築・評価 ①-1 実環境下での評価実施 冷却システム構成・評価 km級長距離冷却システム構 成・評価 (前川製作所共同研究) 冷凍機の運転手法検討 (IHI共同研究) 液体窒素循環系の運用手法検 討 (三井金属エンジニアリング共同研 究) 長尺断熱管の製作 長尺断熱管の敷設手法検討 (三重大学共同研究) 状態監視、診断技術の適用 | | 冷媒配管等製作 | 要素機器接続 | 冷却 試験 | 冷媒配管等製作 | サブクーラ製作 | km級システム構成 | 冷却試験 | まとめ |
| | 移設 | | 制御特性評価 | | | | | | |
| | | | 運転手法検討 | | | | | | |
| | | | 課題抽出・改良 | | | | | | |
| | | | 運用手法検討 | | | | | | |
| | | 製作・敷設 | | | 製作・敷設 | | | | |
| | | 敷設装置開発 | | | 特殊ドラム | | 敷設試験 | | |
| | データ蓄積 | | | | データ蓄積 | | | | |
| | | | 高度化検討 | | | | 健全性 確認 | | まとめ |

研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

高温超電導コイルを実用化するための技術開発として、超電導応用として量産されているMRI超電導マグネットをターゲットとして以下の内容で研究開発を行う。

- 高温超電導コイル製作技術として、コイルの巻線などの加工時、冷却時及び励磁時に生じる超電導特性の劣化を防ぐ構造、製造方法及び品質管理法を確立する。
- 線材の磁化による磁場特性阻害対策として、線材の磁化による磁場の乱れ及び安定性の影響を解析・実測の両面から定量化し、対策技術を確立する。
- 高温超電導コイルの製作技術を確立するため、冷却時および励磁時に生じるコイル応力に対して、高温超電導線材の特性劣化を防ぐために必要な線材機械特性の仕様を導出する。

高温超電導マグネットのシステムを最適化するための技術開発として、経済性、省エネ性も考慮して下記の内容で研究開発を行う。

- 高磁場かつ高電流密度コイル設計技術の開発として、実機コイルの高磁場化と小型化に対応した磁気設計、構造設計、冷却設計技術を確立する。
- 省エネかつ低コストシステムの開発として、励磁用と定常運転用で電源を分割する省エネシステムや運転条件（冷却温度、電流等）最適化等による低コスト化を検討する。

永久電流マグネットに必要な高温超電導線材の超電導接続の技術開発として、下記の内容で研究開発を行う。

- 実用的永久電流マグネットに必要な高温超電導接続技術を確立する。
- 永久電流モードを実現するための永久電流スイッチを開発する。

高温超電導コイルの課題である異常時のコイル保護・焼損の対策手法を開発するために下記の内容で研究開発を行う。

- ドライブモードのコイル保護手法の検討として、コイルに異常が発生した場合のコイル焼損を防止する保護手法やシステムの改修手順を検討する。
- 永久電流モードの高温超電導コイルの保護技術として、コイルの異常検出手法と焼損対策手法を確立する。

表 2-4 研究計画スケジュールと予算 (委託 2016-2018 年度)

| 事業項目 | 2016年度 | | | | 2017年度 | | | | 2018年度 | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発 | | | | | | | | | | | | |
| ①コイル・マグネット製作技術 (三菱電機株式会社) | | | | | | | | | | | | |
| ②磁化による磁場乱れ対策 (国立大学法人京都大学、国立大学法人東北大学) | | | | | | | | | | | | |
| ③高温超電導線材への要求仕様導出 (三菱電機株式会社、国立大学法人東北大学、国立大学法人九州大学) | | | | | | | | | | | | |
| 2) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発 | | | | | | | | | | | | |
| ①高磁場・高電流密度コイル設計技術 (三菱電機株式会社) | | | | | | | | | | | | |
| ②省エネ・低コストシステムの開発 (国立大学法人京都大学) | | | | | | | | | | | | |
| 3) 高温超電導線材の超電導接続技術開発 | | | | | | | | | | | | |
| ①超電導接続技術の開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所) | | | | | | | | | | | | |
| ②接続抵抗評価技術の開発 (国立研究開発法人物質・材料研究機構) | | | | | | | | | | | | |
| 4) コイル保護・焼損対策手法の開発 | | | | | | | | | | | | |
| ①ドライブモードに対する保護・焼損対策技術開発 (三菱電機株式会社、国立大学法人東北大学) | | | | | | | | | | | | |
| ②永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人上智学院) | | | | | | | | | | | | |

スケジュール詳細:

- 2016年度: 1/2-3T コイル設計 (第1四半期)
- 2017年度: 1/2-3T マグネット設計 (第2四半期), システム省エネ、低コスト検討 (第3四半期)
- 2018年度: 1/2-5T コイル設計 (第1四半期), 冷却・励磁時機械特性評価 (第2四半期)

共同研究/協力:

- 三菱電機株式会社: ①コイル・マグネット製作技術
- 国立大学法人京都大学: ②磁化による磁場乱れ対策, ②省エネ・低コストシステムの開発
- 国立大学法人東北大学: ②磁化による磁場乱れ対策, ③高温超電導線材への要求仕様導出
- 国立大学法人九州大学: ③高温超電導線材への要求仕様導出
- 国立研究開発法人産業技術総合研究所: ①超電導接続技術の開発
- 国立研究開発法人物質・材料研究機構: ②接続抵抗評価技術の開発
- 学校法人上智学院: ②永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発

技術的課題/目標:

- 低磁場低温アシスト環境
- 金属ペーストを用いた接合
- 異種超電導物質薄膜接合
- コイル間接続線
- 銀ペースト圧着超電導金属粉ペーストの作成・チューニング
- YBCO上の異種超電導薄膜形成技術開発
- 特性評価・鉄系線材開発
- 模擬モデル
- 接合実証
- 金属ペースト接合技術確立
- 市販線材での接続
- 接続線性能向上・接続良品率向上
- 液体窒素中予備実験
- 試料冷却機構部の開発
- 外部磁場マグネットの開発
- 外部磁場マグネットの開発
- 評価装置運転試験
- コイル保護方式検討
- コイル保護実用化検討
- 共巻きコイルによる異常検出原理検証 (試験用小コイル) 数値解析コード作成
- 保護条件の数値解析
- 複数小コイルによる検出実験
- 共巻きコイルによる新しい保護方法の検討
- 小規模モデルコイルによる保護スキーム実験

表 2-5 研究計画スケジュール(助成 2019-2020)

| 研究 | 予定 年月日 | 2019年 9月 | 2020年 3月 | 2020年 9月 | 2021年 2月 |
|--------------------------|----------------------|---|---------------------|-------------|---------------|
| | (1) 高温超電導コイルの実用化技術開発 | | | | |
| ①コイル・マグネット製作技術 | | 7 T 検証コイルの試作・試験 | | | |
| | | 大口徑コイルの信頼性向上手法の確立 | | | |
| ②磁場安定化技術 | | 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネット磁場評価・イメージング | | | 限界試験、 解体調査 |
| ③コイル保護手法の検討 | | コイル保護実用化検討 | | | |
| (2) 高温超電導マグネットのシステム最適化開発 | | | | | |
| ①高磁場・高電流密度コイル設計技術 | | | 3 T フルサイズマグネット小型化設計 | | |
| ②省エネ・低コストシステムの開発 | | | システム省エネ・低コスト検討 | | |

| 事業項目 | 2019年度 | | | | 2020年度 | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| 3) 高温超電導線材の接続技術開発 | | | | | | | | |
| ① 高温超電導接続技術の開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所) | | | | | | | | |
| ② 高温超電導線材と低温超電導線材の接続技術の開発(古河電気工業株式会社) | | | | | | | | |
| ③ 超電導層表面最適化技術の開発(株式会社フジクラ) | | | | | | | | |
| 4) コイル保護・焼損対策手法の開発 | | | | | | | | |
| ② 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発(国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人上智学院) | | | | | | | | |

2.1.1 超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発

(I) 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発

鉄道現場に設置可能なコンパクトな冷却システムの実現を目指し、必要な技術を検討し、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、断熱管などの基盤技術の開発を行う。

① コンパクト冷凍機技術開発

超電導き電線用の冷凍機は、設置スペースの制約からコンパクト性が強く求められている。また、必要とされる冷凍能力は数 km の長距離ケーブルで数 kW が見込まれている。

従来、高温超電導機器に要した冷却負荷が小さかったため、冷凍能力で 1 kW 以下の市販の蓄冷式冷凍機(スターリング冷凍機、GM 冷凍機など)を用いていた。仮に、これらを長距離冷却システムに適用すると、距離に応じた台数が必要となり、台数分だけ設置面積が増大する。

一方、近年開発が進められている熱交換式冷凍機であるブレイトン冷凍機は、冷媒ガスにヘリウムやネオンを採用することで回転機効率の向上や大容量化が見込め、1 台で数 km の長距離冷却負荷に対応することが可能である。また、ブレイトン冷凍機で用いるターボ圧縮機は磁気軸受を用いて非接触で運転することから、高い信頼性・耐久性を持ち、超電導き電線用冷却システムに適した冷凍機である。しかしながらこれまでの開発機では、成績係数(COP)が特に優先され、冷凍能力あたり 10 m³/kW 程度と過大な設置寸法となっており、鉄道現場への導入は、困難である。

よって本技術開発では、鉄道き電線への適用を想定し、冷凍機を構成するターボ圧縮機および膨張機、配管ラインの適正化や、鉄道き電線に適した冷凍機の運転・制御方法に基づいた最適な熱交換器システムの製作を行い、冷凍能力あたり $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ 以下の設置寸法を目標として、鉄道き電線でコンパクトなブレイトン冷凍機の研究開発を行う。

② 液体窒素循環ポンプ技術開発

従来、冷却システムに適用される液体窒素循環ポンプは玉軸受を適用したポンプが一般的であり、定期的（数千時間程度ごと）にポンプを停止して、軸受を交換する保守・点検を行う必要がある。さらに、玉軸受を適用したポンプは回転数に上限がありインペラを最適に設計できず、インペラ径が大きくなるため常温からの熱侵入量も大きい。また、磁気軸受を適用したポンプでも、制御機器や補助軸受（玉軸受）が必要なため、小型化、低コスト化が難しい。

上記のような現状の課題を克服することを目的とし、動圧式ガス軸受を適用した液体窒素循環ポンプの開発を行う。動圧式ガス軸受の採用により、保守・点検間隔の長期化、ポンプ軸の回転数向上によるインペラの小型化、常温からの熱侵入低減などポンプ性能の向上が期待できる。動圧式ガス軸受を採用した液体窒素循環ポンプはこれまでに開発されておらず、最大吐出圧 0.6 MPa 、最大流量 50 L/min を目標とし、研究開発を進める。

具体的には、動圧式ガス軸受を解析にて設計し、液体窒素循環ポンプの基本設計を実施する。続いて、部品個々の詳細設計、さらに液体窒素循環ポンプを試作し、回転安定性試験を実施後、性能試験によりその特性について評価する。

③ 断熱管技術開発

鉄道路線上に敷設する超電導き電ケーブルを収容する断熱管からの熱侵入は、長尺になればなるほど全体熱負荷に対し支配的となるため、この低減が冷却システムの小型化、高効率化の実現に重要である。また、敷設する鉄道現場に適した管径でなければならない。本技術開発においては、断熱管の内部構造などについて検討し、断熱性能 2 W/m を達成するとともに、長期的信頼性を確保するため、真空維持1年以上を見通せる断熱管技術を構築する。

断熱管の開発にあたり、内部構造の設計、試作、評価を行い、最適な構造設計を実施する。また長期の真空維持に向け、製造工程における洗浄方法などの検討、および、発生するアウトガスの分析、吸着剤の選定、導入方法の検討などを行い、短尺サンプルを試作し、その効果を検証する。そして構造設計及び短尺サンプルによる評価結果より得られた知見を元に、長尺断熱管の技術開発を行う。具体的には、長期真空維持が可能な洗浄システム、断熱材などの巻付け装置の張力制御などの技術開発を進め、信頼性の高い長尺断熱管の製造手法を確立し、試作を行う。また、実際の鉄道き電線としての導入を想定し、長尺断熱管の効率的な輸送および敷設方法について検討するとともに、敷設試験を実施し、輸送、敷設技術を確立する。

(II) 長距離冷却システム構築・評価

上述の要素技術の検討結果および開発した構成機器類により、km級の長距離冷却システムを構築する。検証試験として、液体窒素の循環試験を行い、開発した構成機器の性能評価などを実施後、長期的に冷却状態の維持が可能なことを確認する。あわせて、データの蓄積を行い、システム保全技術を開発する。

① 実環境を想定した評価実施

km級の長距離冷却システムに向け、冷却システムの設計および試験結果の評価を行う。また、超電導ケーブルと既設のき電線やトロリ線との接続に必要な電流端末は、鉄道用地内に配置する場合があります。更なる小型化が要求される機器である。電流端末の寸法は、要求される耐電圧性能を満足するために、主として電流リードと容器間の絶縁性能により決定される。具体的には、電流リードの設置環境を考慮した内部電界の数値解析モデルを構築するとともに、妥当性を評価する。

② システム保全技術開発

設備の異常を早期に発見し、その異常種類を精密診断により明確にすることで、システムの突然の停止を未然に防ぐことを目的とし、状態監視・診断システムを開発する。診断対象の振動加速度等を測定し、検証用信号のデータ収集を行うとともに、これまでの研究で得られた設備診断に関する成果・知見を踏まえ、鉄道用き電システムに適した設備診断要素技術、すなわち、異常信号の取得、検出技術（信号処理）、状態識別指標の抽出技術（特徴抽出）、状態判定基準の設定（状態判定）、異常種類の識別技術（精密診断）などについて開発を進め、システム保全技術の適用指針を得る。また、断熱管路内に収納される超電導ケーブルは、液体窒素冷却時に0.3%程度の熱収縮が生じるため、その挙動の把握が必要となる。断熱管路内に収納される超電導ケーブルは、外部からの状態監視が困難であり、現状ではX線透過検査によるモニタリング手法があるが、適用範囲が限られている。よって、km級超電導ケーブルの状態監視技術として、導体位置や内部素線を非接触に計測する技術を開発し、評価結果から、km級超電導ケーブルへの適用指針を得る。

(Ⅲ) km級長距離冷却システムの開発

開発したコンパクト冷凍機、液体窒素循環ポンプ、断熱管などの構成機器類により、km級の長距離冷却システムを開発する。

① 実環境を想定した評価実施

鉄道総研宮崎実験センターに複数箇所の中間接続部を有するkm級長距離冷却システムを構成する。初期冷却試験、循環冷却試験、超電導動作確認試験などを通じて、温度、圧力、流量などのデータを取得するとともに、圧力2MPa未満、流量10L/min以上の液体窒素による冷却試験を実施し、長さ1.2km以上の条件で循環性能を確認する。超電導動作確認試験では、低電圧電源装置を用い、断熱管内部に配置された冷媒配管の超電導線材に通電する。さらに、各試験データの評価結果から、2km以上の長距離冷却システムの設計指針を確立する。

また、冷凍機、液体窒素循環系の運転手法の検討を行い、さらなる改善を図る。長尺断熱管についてはkm級長距離冷却システムに必要な長尺断熱管を製作するとともに、

敷設手法の検討を行い、宮崎実験センターでの敷設試験を行い、敷設手法を確立する。状態監視・診断技術については、冷却システムの振動加速度データの蓄積を行い、検証・評価結果を通して、km級長距離冷却システムに向けた状態監視・診断技術の健全性を確認する。

2.1.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

(i) 高温超電導コイルの実用化技術開発（三菱電機、京都大学、東北大学、九州大学）

全身3T-MRI高温超電導マグネットを実現するために、大口径（1.2m）コイルを試作し磁場均一度、安定度を評価する。また、小型化のための高磁場・高電流密度を実証する

① 大口径コイルの製作技術（三菱電機）

高温超電導コイルの製作技術として、コイルにおける剥離方向応力による劣化を抑制するために線材の絶縁施工に工夫をしたものを適用する。また、製作時の応力を考慮した製作手順や装置を使用する。大口径コイルにおける取り扱いや冷却時の応力などを考慮した試験方法を検討する。試作したパンケーキコイルごとで単体試験を行い、コイルの劣化有無を確認しスクリーニングし1/2サイズアクティブシールド型3Tコイルに適用する。コイルの電磁力や冷却を考慮しエポキシ含浸一体コイルとしその製作方法を確立する。イメージングのために要求される高均一磁場を発生させるための製作精度を確保できる製作方法を検討し適用する。

製作完了した1/2サイズアクティブシールド型3Tマグネットを冷却、励磁し磁場の質を測定評価し、イメージングに適する磁場が得られるよう検討する。

最大経験磁界7T、200A/mm²以上の高電流密度線材を用いたコイルの試作を開始する。

② 磁化による磁場影響の計測技術（京都大学白井研）

高温超電導コイルの磁化が発生する磁場をNMRで計測する技術を確立する。電源励磁の影響や測定系の評価などを実施する。磁場安定性や磁場均一度などのMRIに欠かせない両特性の評価や課題発生時の対策を検討する。

③ 磁化による磁場安定性の影響（東北大学）

Y系線材は比較的大きな磁化を有し、その磁化が磁束クリープを発生させ、磁場の均一度に影響をもたらすため、この磁場変動を理論的に検討し、高温超電導コイルの磁場安定性の影響を検討し、コイル通電履歴による磁化の影響を低減する手法を検討、検証する。

④ 磁化による磁場均一度の影響（京都大学中村研）

Y系線材は、幅広い薄膜面を有するため超電導線材の両端付近に長距離にわたり遮蔽電流が流れ、この電流が作る磁場が、空間均一度にどれほど影響するかを要素試験及び解析により検討し、医療用MRI超電導マグネットの高均一磁場を形成するためのコイルシステムを検討する。

⑤ 高温超電導線材への要求仕様導出（九州大学・東北大学）

超電導コイルを冷却および励磁した際に生じる応力を検討し、本検討結果をもとに、試作したパンケーキコイルの機械強度試験を行って超電導特性を評価する。

製作時に超電導特性が劣化したコイルの劣化部位を特定し、劣化要因を検討する。

上記機械強度試験向け超電導コイルを作製する。また、特定した劣化部位を調査する。さらに、検討結果をもとに超電導線材に要求される機械特性の仕様を導出する。

(ii) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発（三菱電機、京都大学）

非線形計画法によるコイル配置の最適化設計を行い、高温超電導コイルの設計を実施。マグネットの励磁システムを省エネ、低コスト化する検討を行う

① 高温超電導マグネット最適化設計技術（三菱電機）

高温超電導コイルおよび冷却等のシステムの最適設計を実施する。超電導線材の使用量の低減、低コスト化のための設計手法を検討する。また、次世代の高温超電導MRIマグネットとして全身撮像用超電導マグネットの概念設計を実施する。

② 高安定磁場励磁システムの開発（京都大学白井研）

ドライブモードにおける電源分離システムを実証し、省エネ性を測定する。また、高安定磁場 0.1 ppm/h 以下を達成するための電源および電流制御方法を検討し、試験にて評価する。

③ MRIマグネットのシステム最適化（京都大学中村研）

高温超電導マグネットのコスト低減のためにコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化を検討し、冷却温度、冷却消費電力など最適条件設定手法を確立する。

(iii) 高温超電導線材の超電導接続技術開発（産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、株式会社フジクラ、古河電気工業株式会社）

高温超電導線材の接続点あたりの抵抗 $10^{-12} \Omega$ 以下を実現するための要素技術群として、以下の技術開発を実施する。各技術群の関係を図 2.1.3.1 に示す。

ア) 低磁場低温接続アシスト環境技術（産業技術総合研究所）

本技術開発では、接続のための高温超電導線材を主マグネットから引き出し、主マグネットから十分に離れた低磁場環境にて接続点を低温に保つことにより、接続に使用できる材料・プロセスの選択肢を拡大する。このコンセプトを実現するため、接続点のみを低磁場かつ低温の環境とする低磁場低温接続アシスト環境技術を開発する。具体的に、主マグネットを運転温度 30K 程度に保つ極低温冷凍機とは別に、接続点のみを 4.2K （液体ヘリウム温度）程度に保つ極低温冷凍機を 1 台用意し、高温のマグネット側から低温の接続点への流入熱量を低減して汎用冷凍機の冷凍能力内に抑え、接続点の温度を安定に制御する技術を開発する。

以下の②および③の前提となる技術であるため、当初 3 年間で技術を確立する。

イ) 金属ペーストを用いた接合技術（産業技術総合研究所）

高温超電導線材間接続技術として、銀または金のナノ粒子を含む接着ペーストを用いる方法があり、比較的高い機械的強度を有し、施工が簡便で再現性が良いことから、MRIマグネット用の接続技術として有望であると考えられる。この金属ペーストによる接続技術について、プロセスの最適化や溶剤等の選択による低抵抗化を図る。また同時に、ペーストに超電導金属粉を含む超電導ペーストを開発し、接続部の大幅な低抵抗化による目標達成を目指す。当初 3 年間でペーストによる接続プロセスの最適化のための課題抽出、超電導ペーストの開発を実施する。実際に市販

REBCO 高温超電導線材の接続試験を通じて、接続抵抗の要因分析を行い、低抵抗化のための課題を抽出する。これをもとに、接続抵抗 $10^{-12} \Omega$ の実現を目指す。

ウ) 異種超電導物質薄膜接合技術 (産業技術総合研究所)

液体ヘリウム温度で動作する低温超電導MRIマグネットで使われている NbTi 線は、極低温で超電導となるはんだを用いた接続技術が確立している。この技術を高温超電導線材どうしの接続に適用できるようにするため、高温超電導線材の周囲に超電導はんだと接合可能な超電導材料をコーティングする技術を開発する。当初3年間では、REBCO 上に異なる超電導材料を形成する基盤技術を確認する。またコーティングされた線材間の接続の低抵抗化のための課題を抽出する。これをもとに、接続抵抗 $10^{-12} \Omega$ の実現を目指す。

エ) コイル間接続線開発 (産業技術総合研究所)

高温超電導マグネットの永久電流モード運転を行う際に必要な永久電流スイッチと、REBCO 高温超電導コイルと永久電流スイッチ、または、MRI マグネットシステムにおける離れたコイルユニット間の接続に使用するための接続線を開発する。具体的に、主マグネットの運転温度とほぼ同じ 30K と、磁場 1T の環境下で十分な臨界電流特性を有し、かつ 1m 級の線材で、REBCO 高温超電導線材との良好な接続性を持つ接続線候補として、銀シース鉄系超電導材料による線材を開発する。ただし、それ以外の超電導材料による永久電流スイッチおよび接続線を選択から排除するものではない。当初3年間で技術の方向性を見定め、適切な超電導材料を選択する。

オ) 接続抵抗評価技術 (物質・材料研究機構)

開発する超電導接続部の微小抵抗の測定は、通電による電圧測定法では十分な精度を得ることができない。そこで、接続を含む閉ループに流れる電流が作る磁束の変化を測定し、減衰率から接続抵抗を評価する技術を開発する。具体的に、試料接続部の温度を 4.2K~90K 程度、印加磁場を 0~3T 程度の範囲で変化させつつ $10^{-12} \Omega$ オーダーの抵抗を評価できる装置を開発し、これを用いて上記で開発した接続試料の抵抗を評価する。当初3年間で接続抵抗評価装置の開発を完了し、各種接続試料の評価に供する。引き続き、短時間で測定を可能にする高感度化等の測定高度化技術を開発し、超電導接続の微小抵抗を高精度で評価できる技術を確認する。

カ) 高温超電導線材接続技術 (産業技術総合研究所、フジクラ、古河電気工業)

上記①~⑤の開発成果や得られた知見を活用し、実際の市販 REBCO 高温超電導線材での接続技術開発を行う。接続点あたりの抵抗 $10^{-12} \Omega$ 以下を目指し、中間目標まで洗い出された技術課題の解決に取り組む。高温超電導線材の高温超電導層表面を接続に適した状態にする技術を開発する。接続部の機械的強度を評価する。①低磁場低温接続アシスト環境技術を適用し、冷凍機冷却型高温超電導マグネットにおいても、開発した接続技術が適用可能であることを実証する。高温超電導線材と NbTi 等低温金属系超電導線材の間の超電導接続技術を開発し、永久電流のオンオフを実証する。

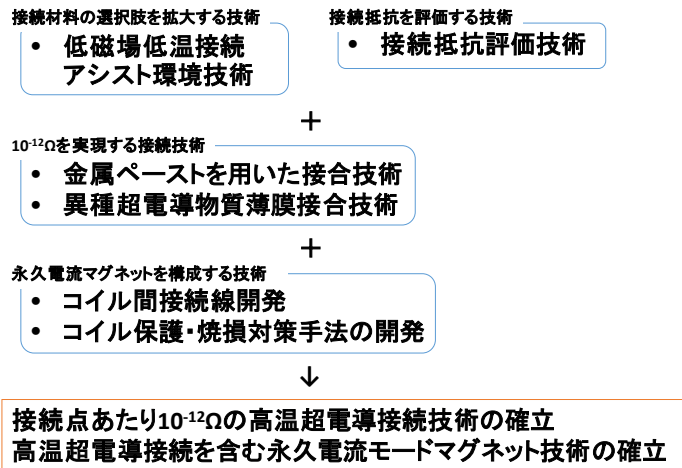


図 2-1 各要素技術群と開発目標

(iv) コイル保護・焼損対策手法の開発（三菱電機、東北大学）

ドライブモードの高温超電導コイルの異常検出および保護・焼損対策技術として、以下の要素技術群の開発を実施する。

ア) ドライブモードシステムマグネットのシステム保護技術開発（三菱電機株式会社）

高温超電導コイルがドライブモードで運転されている超電導マグネットの保護検討として、医療用MR I システムは公共性が高いため特に人体への影響を検討する必要がある。上述のように、高温超電導コイルに異常が発生し、磁場変動が発生した場合のマグネット内に入っている人体への影響を検討し、影響が及ぼさないような工夫が必要となる。下記の異常時のコイル挙動検討結果より人体影響がどうかまた対策を検討する。また、コイル焼損によりマグネット不具合が発生した場合に容易に改修できるシステムを検討、提案する。

イ) ドライブモードシステムマグネットの異常対策検討（東北大学津田研）

高温超電導コイルがドライブモードで運転されている超電導マグネットの保護技術として、コイル異常検出と速やかなコイル蓄積エネルギーの取り出し、コイル加熱による常伝導領域の拡張などの条件を検討する必要がある。これらの条件を検討するためモデルコイルによる異常発生を模擬し、発生電圧、コイル最大温度、焼損に至る過程などの異常特性を把握し、コイルおよびシステムの保護方法を検討する。

(v) 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術（産業技術総合研究所、上智大学）

永久電流モードの高温超電導コイルの異常検出および保護・焼損対策技術として、以下の要素技術群の開発を実施する。

ア) 共巻き法（産業技術総合研究所、上智大学）

コイル製作時に高温超電導線と共に薄い銅テープを巻き込むことにより、高温超電導コイルと密に結合した共巻きコイルを形成し、これを用いて高温超電導コイル内に発生した抵抗性電圧を高感度に検出する技術を開発する。数値解析により高温超電導コイルの保護条件を明らかにする。当初3年間では、高温超電導コイル内に発生するホットスポットの挙動、検出・保護限界を求める数値解析コードを開発し、

永久電流モード運転コイルの異常検出と保護に求められる条件を明らかにする。小規模のテストコイルを用いて共巻きコイルによる異常検出の原理検証を行う。数値解析コードの開発は上智大学が担当し、原理検証や実証試験は産業技術総合研究所と上智大学が共同で実施する。

イ) 抵抗ショート法（産業技術総合研究所、上智大学）

永久電流モードで運転されている高温超電導コイル中に異常が生じた際、速やかに電流を減衰させてホットスポットによる焼損を防ぐ方法として、回路の組み替えにより電流を他の健全なコイルに瞬時に移す抵抗ショート法を開発する。理論構築は上智大学が担当し、原理検証や実証試験は産業技術総合研究所と上智大学が共同で実施する。

当初3年間で上記要素技術それぞれの基礎を固め、また組み合わせにより、異常検出から保護までの一連の動作を実証する。

その後最終目標達成に向け、大インダクタンスコイルへの適用時に生じ得る課題を明らかにし、小規模コイルから大規模マグネットシステムまで適用可能な汎用の高温超電導コイル保護技術として確立させる。

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトはNEDOによるプロジェクト公募で実施され、研究開発項目「運輸分野への超電導適用基盤技術開発」については鉄道総合技術研究所が、研究開発項目「高温超電導高磁場マグネットシステム」については、三菱電機と産業技術総合研究所のチームで応募し、採択されたものである。

また、NEDOは研究全体を統括するために、産業技術総合研究所 岡田 道哉氏をプロジェクトリーダー（PL）とし、PLとの間で密接な連携をとりながらプロジェクトの舵取りを行っている。

さらに、NEDO内に産官学の有識者からなる委員会、超電導技術委員会（送配電）および（MR I）を設け委託研究開発に関する研究方針審議、個別成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、NEDO超電導研究開発プロジェクト間における技術情報の共有化を進め、研究開発の効率的、効果的实施を図っている。研究体制（2016～2018年度）を図2.2-1に、研究体制（2019～2020年度）を図2.2-2に示す。

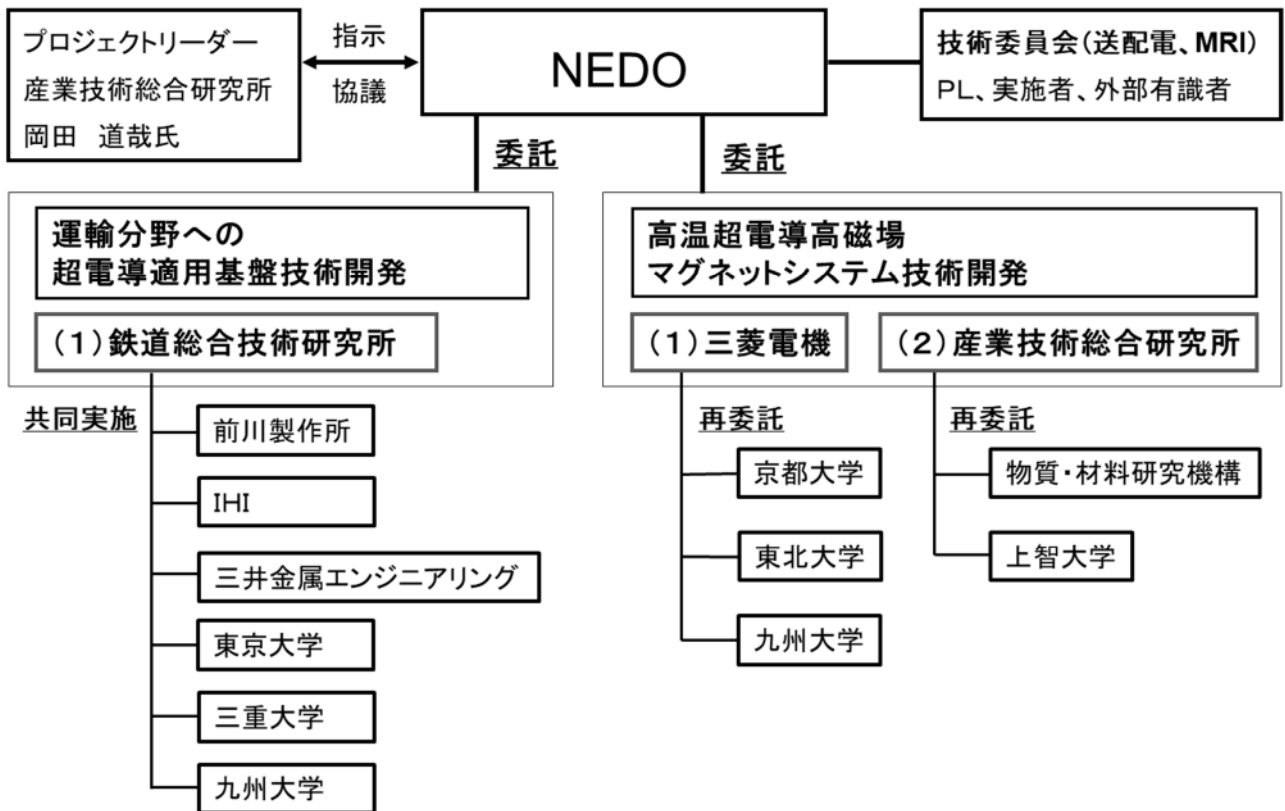


図 2-2 研究開発体制 (2016～2018 年度)

◆研究開発の実施体制 (2019～2020)

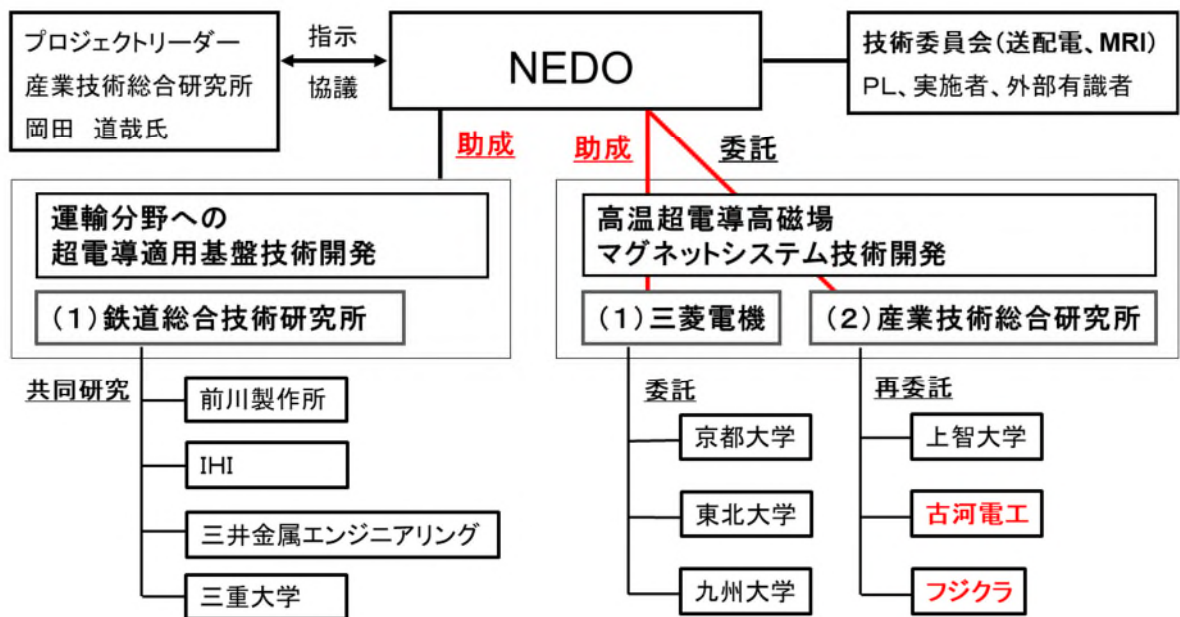


図 2-3 研究開発体制 (2019～2020 年度)

2.3 研究開発の運営管理

プロジェクトの成果について評価をいただくために、NEDO が主催する超電導技術委員会に定期的に進捗を報告し、その方向性の修正、課題解決のための助言、開発加速のための協議等を実施いただいている。

(1) 超電導技術委員会

NEDO 内には産官学の有識者による超電導技術委員会（2009 年度から委員長：大久保 仁 名古屋大学教授）が設けられ、NEDO の個々の超電導技術開発及び全体に関する研究方針審議、成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、並びに技術情報の共有を進めており、そこで得られた助言等をもとに NEDO 超電導技術開発の効率的、効果的運営が図られている。本プロジェクト開始にあたり、これまでの超電導技術委員会を超電導技術委員会（送配電：委員長 大久保 仁 愛知工業大学教授）とするとともに、新たに超電導技術委員会（MR I：委員長 東京大学 大崎 博之教授）を設置した。これらの超電導技術委員会はそれぞれ 10 回開催（2 回／年）されたが、定期的な研究方針審議と成果のレビューは言うに及ばず、NEDO が行った基本計画見直しに対する大所高所からの審議を行う等、研究開発の効率的かつ効果的な実施に結びついている。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 実用化につなげる戦略

超電導ケーブルの実用化をすすめるためには、最終ユーザーである電力会社の積極的関与が必要不可欠である。このため、電力会社がプロジェクトリーダーを務めることで、実適用時までを見通したプロジェクト運営に努めた。

超電導ケーブルの実用化をはかる手段の一つとして、旭変電所の超電導ケーブル実証システムの見学・説明会を積極的に開催した。特に、最終ユーザーである電力事業者や、海外展開を見据え海外来訪者を対象とした見学・説明会に注力した。その結果、電力事業者は 6 件 25 名、海外来訪者は 9 件 37 名が見学に訪れ、その他の見学者も含めると、合計 34 件 224 名が旭変電所を訪れている。高温超電導ケーブル実証プロジェクトから累計すると、来訪者は計 1040 人となる。

(2) 実用化につなげる知財戦略・標準化戦略

超電導ケーブルの基本構造やシステムについては、これまでの開発で既知の技術であるが、超電導ケーブルの安全対策に必要な、設計技術、アイデアを考案し、特許化を行う方針で、プロジェクトを進めた。

標準化については、CIGRE D1.64, 2016 の Working group が 2016 年発足予定である。Electrical Insulation at Cryogenic Temperatures との題目であり、委員として超電導ケーブルの安全性・信頼性に係る試験項目、試験内容を報告する機会を得た。なお、国内では電気学会「極低温環境下の電気絶縁技術」調査専門委員会が 2015 年 10 月より発足し、研究成果を報告する機会を得ている。

3. 情勢変化への対応

- 鉄道き電線

国内外の鉄道路線の省エネ問題や変電所事情の動向における調査を行い、鉄道国際会議で情報発信・収集を行ったが、特段の情勢変化はなかったため、対応事例無し。

- MR I 用高磁場コイル技術

海外MR I メーカーの動向（学会発表・展示会）を注視し、必要に応じて、研究の加速等を予定していたが、特段の情勢変化はなかったため、対応事例無し。

- 超電導接続技術

国内外の技術開発動向を注視し、情報の入手に努めたが、Y系線材同士の直接接続技術以外の成功事例はなく、特段の情勢変化はなかったため、対応事例無し。

4. 評価に関する事項

表 4-1 採択委員会

| | |
|-----------|--|
| | 採択審査委員会（事前評価） |
| ① 評価の実施時期 | 2016 年度 |
| ② 評価手法 | 外部評価 |
| ③ 評価事務局 | 省エネルギー部 |
| ④ 評価項目・基準 | ①提案内容の評価（公募目的・目標との整合性及び既存技術との優位差、提案の実現性、関連分野に関する実績） ②提案者の評価（関連分野に関する実績、開発体制の整備、必要設備の保有、人材の確保） ③成果の実用化（社会や他の技術への波及効果） |
| ④ 評価委員 | 表 4-2 採択委員会委員 |

表 4-2 採択委員会委員リスト

| | 氏名 | 所属 | | 役職 |
|---|-------|---------------------------|------------------------------|------------|
| 1 | 大久保 仁 | 学校法人 名古屋電機学園 愛知工業大学 | 工学部電気学科 | 教授 |
| 2 | 春山 富義 | 国立大学法人 東京大学 | カブリ数物連携宇宙研究機構 | 特任教授 |
| 3 | 下山 淳一 | 学校法人 青山学院大学 | 理工学部 物理・数理学科 | 教授 |
| 4 | 馬場 旬平 | 国立大学法人 東京大学 | 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 | 准教授 |
| 5 | 濱島高太郎 | 国立大学法人 東北大学 | 技術開発部 | 名誉教授 |
| 6 | 秋田 調 | 一般財団法人 電力中央研究所 | | 理事 |
| 7 | 竹村 文男 | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | エネルギー技術研究部門 | 副研究部門 長 |
| 8 | 渡津 章 | 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 | 構造材料研究部門 軽量金属 設計グループ | 主任研究員 |

Ⅲ. 研究開発成果について

1 事業全体の成果

1.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術

超電導ケーブルの長距離冷却に必要となる要素機器として、従来の約 1/6 の設置容積となる $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ のコンパクト冷凍機、吐出圧 0.6 MPa・流量 50 L/min のガス軸受方式液体窒素循環ポンプ、熱侵入量 2 W/m 以下の断熱管などを開発した。冷凍機や液体窒素循環ポンプなどにより構成した冷却システムと敷設した複数の断熱管を接続し、km 級長距離冷却システム（総長 1565 m）を構成した。液体窒素による冷却試験を実施し、圧力損失や温度分布など、更なる長距離化への設計指針となる重要な基礎データを取得した。さらに冷媒の安定循環を確認し、目標を達成した。

1.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

1.2.1 高温超電導コイルの実用化技術開発

1.2.1.1 大口径コイルの製作技術（三菱電機）

MRI 高温超電導マグネットを実現するために大口径コイルを製作実証にむけ、1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの製作並びに、最大経験磁界が 7 T となる高電流密度コイルの検証目標にして研究開発を実施した。

幅広の高温超電導線材は面垂直方向の剥離応力に弱いため、超電導線材の表面に施工する絶縁フィルムを 2 層にし、超電導線側の絶縁フィルムにフッ素コーティングしたフィルムを適用することでエポキシ含浸しても剥離応力に対し超電導線材に力が加わらない工夫をした。この線材を用い、内径 560mm のメインコイルおよび外径 1200mm のシールドコイルに用いるパンケーキコイルを製作し、液体窒素を用いて単体試験を行い特性評価した。1/2 サイズアクティブシールド型 3 T 要のコイルは製作数 272 個に対し、良品は 220 個（コイル必要数）となり良品率は 81%であった。イメージングのための要求磁場均一度 2ppm/200mmDSV からコイル巻線および組立精度は、巻線の径方向で 0.1mm 以下、パンケーキコイルの軸方向位置で 0.5mm 以下が求められる。そのために巻き線時に線材の位置をレーザー変位計で測定し、 $\pm 0.05\text{mm}$ を越える都度調整用のテープを足し引きして巻線高さ調整を全コイルにおいて実施した。また、組立精度について同軸度、軸方向位置などを計測しながら 0.5mm 以下になるよう組み立てている。パンケーキコイル間はハンダ接続を行い、1箇所 $100\text{n}\Omega$ 以下を目指し製作を実施している。1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルを冷却するためのクライオスタットの無負荷単体冷却試験を実施し、輻射シールド温度 45K、コイル冷却ステージ 5K と良好な結果が得られた。イメージングシステムにおいてはこれまで最大 150mm 球のイメージングシステムを強化し 200mm 球までイメージングできるようシステムを拡張した。コイルを冷却システムに組み込み、1/2 サイズアクティブシールド型 3 T 高温超電導マグネットの冷却・励磁特性試験を実施した。超電導特性劣化が見られたため、改修を試みたが、最終励磁時にも特性劣化が一部残存した。その結果、最終的な励磁は中心磁場約 0.3 T に留まったが、マウス（ $\sim 5 \text{ cm}$ ）の撮像に成功した。超電導の劣化を引き起こした要因について F T A（Fault Tree Analysis）を用いた分析を

進め、熱応力解析や表面観察、解体調査などを通じて劣化要因の検討を行った。複数の要因で劣化が生じていた可能性が示唆されたため、ホールボディマグネットの製作に向けて必要な対策について検討を行った。

また、次世代MR I システムとして高温超電導コイルの特徴となる小型・軽量化を目指し、全身撮像のホールボディ機を小型化するために最大経験磁界が7 Tとなることを想定した、7 T検証コイルの試作を行った。3 Tマグネットにおける劣化要因検討結果から得た対策を一部反映することで、単体コイル製作時の歩留まりの上昇を確認し、最大経験磁場約6.5 Tまでの励磁に成功した。

1.2.1.2 磁化による磁場影響の計測技術（京都大学白井研）

磁化を有するマグネットの磁場測定技術を確立することを目標にして研究開発を実施。NMRプローブを用い高精度の磁場変動測定を実施した。下記1.2.1-3で提案されたオーバーシュート法を用い、各オーバーシュート電流での励磁後の磁場変化を1ppmレベルで評価した。この変動を等価回路シミュレーションにより評価し得られた回路定数から変動解析をして変動磁場抑制の制御法を検討した。微小電流補正制御により磁場変動予測から制御電流を与えた結果、オーバーシュート電流が不十分な値であっても本制御方法を用いることで1ppm/h以下の安定度が得られることが実証できた。また、1.2.1-1で製作した1/2サイズアクティブシールド型3 T高温超電導マグネットの磁化による磁場影響を計測し、磁場安定性や磁場均一度などのMR Iに欠かせない両特性の評価や課題発生時の対策検討を行った。事前試験として、三種の電源を用いて、従来の低温超電導MR I マグネットで励磁・イメージング試験を実施し、電源駆動方式による静磁場安定性、撮像画像に与える影響を評価した。その結果に基づいて、1/2サイズアクティブシールド型3 T高温超電導マグネットの磁化による磁場変動の計測とその抑制を目的とした励磁試験を実施し、マウス(~5cm)の鮮明な画像を得た。磁場測定技術の確立並びに安定化の実証に成功し、最終目標を達成した。

1.2.1.3 磁化による磁場安定性の影響（東北大学）

高温超電導コイルにおける磁場変動の原因を明らかにするとともに、磁場安定性確保のための磁場変動抑制方法を確立することを目標にして研究開発を実施。遮蔽電流磁場いわゆる線材の磁化による磁場の変化は、磁束クリープと呼ばれる磁束の緩和現象が要因である。この磁場変動はREBCOテープ線内の磁場履歴に依存することが測定で分かった。磁場変動抑制のために励磁電流を定格値より若干多く流した後に定格値に戻すオーバーシュート法を適用しテストコイルにて評価を行った。その結果、磁場変動抑制に有効なオーバーシュート割合は、運転温度(20~60K)に関わらず、コイルへの電流負荷率に大きく依存することを明らかにした。また、定格電流に対し、オーバーシュート電流を段階的に繰り返し増加させることにより磁場変動抑制が効果的になる繰り返しオーバーシュート法を提案した。さらに、励磁時に運転温度を上げ定格電流に達したのちに運転温度を下げることで磁場変動率が大幅に抑制する高温励磁法を提案した。これらにより、遮蔽電流磁場の変動が抑制可能となることを明らかにした。

また、磁化の解析するためのモデルとして、NMRプローブによる高精度磁場測定が可能な均一磁界を発生できる2 T評価コイルを試作した。2 T高温超電導コイルを用いて

高温超電導線材の磁束クリープによる磁場安定性の挙動を測定し、コイルに磁化履歴が存在する再励磁時に有効な磁化の影響を低減する手法について検討、検証を行った。運転電流の5%以上の履歴電流を適用した後、繰り返しオーバーシュート法で5 ppm/h以下へ磁場変動抑制した後、高温励磁法で3Kの温度変化を与えることで、初回励磁と比較して短時間で磁場安定化が可能であることを明らかにした。コイル通電履歴による磁化の影響を低減する手法を提案、実証し、最終目標を達成した。

1.2.1.4 磁化による磁場均一度の影響（京都大学中村研）

磁化を有するマグネットの磁場均一度の評価を行うことを目標として研究開発を実施。線電流近似による磁場分布解析を実施し、上記2T評価コイルのボア内磁場分布解析を行った。また、パーコレーション遷移モデルを2T評価コイルに適用し、遺伝アルゴリズムを利用したフィッティングを行い、コイル温度20～77Kにおける電流－電圧特性を計算した。その結果、20Kにおけるコイル電圧特性からおおよそ280Aでの発生電圧から冷凍機の能力と釣り合う状況であることを導出した。また、使用する線材に対応するために高温超電導線材における直流通電特性の磁場依存性の評価、遮蔽特性の時間変化も解析可能になった。開発した遮蔽電流特性解析プログラムは、東北大学に提供しており、東北大学で開発している2T高温超電導コイルの遮蔽電流特性の研究結果について、これまでの知見に基づいて議論を行った。これらの成果をもって、最終目標を達成した。

1.2.1.5 高温超電導線材への要求仕様導出（三菱電機、東北大学、九州大学）

上記1.2.1-1で述べたように良品率の目標90%には届かなかったことから劣化コイルの部位特定手法を確立し、要求仕様の導出の目処を立てる。劣化の要因分析を品質管理分析手法に基づき実施した。まず要因の可能性が高い線材性能のバラツキについて検討。納入時試験成績ではいずれも仕様を満足しており磁化特性測定結果（テープスター）からは顕著な差は見られなかったが、良品率を入荷ロット順に整理した結果、ロット番号ごとに良品率が徐々に低下し、あるロットで50%以下と大幅に低下していることがわかった。その後徐々に回復し最終納入ロットでは100%の良品率となった。その他劣化要因として考えられる項目として、単体試験時の冷却時歪みがあり、幾つかのコイルで異なる冷却時間でコイル内温度差が30K以上のものと10K以下のもので比較したが、相関は見られなかった。その他、巻線張力、巻線速度、単体試験時の冷却速度や固定方向を変えたが顕著な相関は見られず、コイル製作における要因特定には至っていない。そこで、2017年度から追加テーマとして本項目の研究開発を開始。要因分析を行うために、劣化部位を詳細に特定できるよう高温超電導コイル内欠陥の非破壊・非接触評価手法を提案し、劣化部位の画像取得・劣化要因の検討を進めた。その結果、コイルから素線までを統合して評価可能な磁気顕微鏡手法を確立し、局所的な欠陥位置をピンポイントで特定して微細組織観察を行うことにより、樹脂離型処理不良に起因するコイル冷却時の超電導層の広域劣化モードと、巻線あるいは含浸工程における線材端部の機械的な損傷に起因する超電導層の局所劣化モードを明らかにした。

また、応力評価設備を導入し、高温超電導コイルに励磁した際に生じる軸方向圧縮応力を検討、応力限界の検討を行った。液体窒素冷却下の超電導コイルに軸方向圧縮応力を印加しながら通電特性を評価可能な実験系を確立し、臨界電流の軸方向圧縮応力依存性を測定した。その結果、100MPa以上において不可逆的な臨界電流の低下、10

0 MP a 以下においては応力印加時に可逆的な臨界電流の低下が発生することを明らかにした。加えて、実験を模擬した解析を実施した結果、線材端部に発生する径方向応力が臨界電流の低下を引き起こしているおそれがあることを明らかにした。これらの成果をもって劣化コイルの部位特定手法、線材への要求仕様導出という最終目標を達成した。

表 1.2.1-1 高温超電導コイルの実用化技術開発における成果のまとめ

| 要素技術 | 要素技術最終目標 | 主な成果 | 達成度 * |
|-----------------|--|--|----------|
| 大口径コイルの製作技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 1/2 サイズ 3T マグネットの製作・撮像実証 ・ 7T 検証コイルの製作 -平均電流密度 200A/mm² 超実証 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温超電導線を用いた大口径のコイル製作完了。1/2 サイズ マグネットで成体マウスの撮像を実証(0.3T) ・ 励磁試験を実施、最大磁場 6.5T を確認 | △ |
| 磁化による磁場影響の計測技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 磁化を有するマグネットの磁場測定技術の確立 ・ 磁場安定性や磁場均一度の評価・課題発生時の対策検討 | NMR プロブを用い高精度の磁場変動測定や磁場制御手法、等価回路手法を提案 1/2 サイズ高温超電導マグネットの磁化による磁場変動の計測とその抑制を目的とした励磁試験を実施し、鮮明な画像を得た | ○ |
| 磁化による磁場安定性の影響 | 磁化を有するマグネットの磁場安定性の評価・変動抑制技術の開発 | 短時間での磁場安定化並びに高精度な磁場変動抑制を両立する繰り返しオーバーシュート法と高温励磁法の併用を提案 | ○ |
| 磁化による磁場均一度の影響 | 磁化を有するマグネットの磁場均一度の評価並びに高均一磁場を形成するコイルシステムの検討 | 磁化による磁場発生を解析可能にし、2T 評価コイルを解析し遮蔽特性の時間変化も解析可能にし、2T 高温超電導コイルの遮蔽電流特性の研究結果の議論を実施 | ○ |
| 高温超電導線材への要求仕様導出 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 劣化コイルの部位特定手法を確立し、劣化要因を検討する | 高温超電導コイルにおいて、コイルから素線までを統合して評価可能な磁気顕微鏡手法を確立し製作時の劣化要因を検討した | ○ |

| 要素技術 | 要素技術最終目標 | 主な成果 | 達成度 * |
|------|----------|--|----------|
| | ・要求仕様の導出 | 応力評価設備を導入し、高温超電導コイルに励磁した際に生じる軸方向圧縮応力を検討、応力限界の評価を実施 | |

*◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成

1.2.2 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

1.2.2.1 高温超電導マグネット最適化設計技術（三菱電機）

MR I マグネットは、撮像空間および傾斜磁場コイル、RFアンテナコイルを設置するための室温ボアを有する。超電導コイルは、クライオスタットと呼ばれる断熱真空容器に設置され、冷凍機により固体熱伝導で冷却される。このように超電導マグネットは、コイルを取り巻く構成要素を最適設計により、より小型でより軽量、より低コストを実現することが重要である。これまでの研究成果を反映した全身撮像用ホールボディ高温超電導マグネットの概念設計を、従来型低温超電導マグネットと比較して実施した。

本研究開発で検討している高温超電導マグネットは、伝導冷却方式のため被冷却重量が大きいMRI マグネットの場合、小型冷凍機だけで初期冷却を行うと相当な時間を要してしまう。2018年度に製作が完了する1/2サイズアクティブシールド型3Tマグネットの初期冷却を解析によって算定した。その結果、コイル部900kg、シールド部100kgとした場合にGM冷凍機1台で室温から冷却を行うと約21日間（3週間）を要することがわかった。そこで、冷凍機を2台にし、各冷凍機の1stステージと2ndステージを熱短絡の入り切りができる熱スイッチを設け、初期冷却時に熱スイッチをONした結果、初期冷却時間が約14日間（2週間）と2/3に短縮しうることが分かった（計算）。実際に製作したマグネットの冷却システムは、2台のGM冷凍機と熱スイッチを備えており、熱スイッチが無い場合の解析結果と比べ、冷却時間が約40%短縮されることを実証した。

また、小型軽量、漏れ磁場領域低減を目指した全身用MRI超電導マグネットの基本設計に反映するために、コイル電流密度 $200\text{A}/\text{mm}^2$ 、最大経験磁界7TをREBCO超電導コイルで実証するために1/2サイズアクティブシールド型5Tコイルの基本設計を実施した。1/2サイズアクティブシールド型3Tコイルと同様に上記条件で設計を行い磁場均一度や線材長最小化などが得られたが、コイル内の軸方向電磁応力が最大で135MPaとなり超電導線材の横圧縮応力としては過大であると判断し再設計を行った。コイルごとを別支持構造とすることで積算される軸方向応力を緩和できる構成とした。設計条件として最大軸方向電磁応力を過去実績のある30MPa程度までとし設計した結果、メインコイルのうちサイドコイルを更に分割する必要性が分かった。サイドコイルを2分割することで最大軸方向応力はおおよそ30MPaとなり条件を満足できる設計が得られた。最終目標を達成した。

1.2.2.2 高安定磁場励磁システムの開発（京都大学白井研）

ドリブンモードで必須となるマグネットの励磁システムにおいて、実用化のための省エネかつ低コストを目指した励磁電源システムを提案・検証するための研究開発を行う。

省エネかつ低コスト化のため励磁時にインダクタンス分の電圧が必要な励磁電源と配線や接続抵抗分の微小電圧を補償するための磁場保持電源の2系統励磁回路を提案した。定格磁場が達成され長期間の運転に入る場合は、磁場保持電源だけが超電導マグネットに接続され、励磁電源は切り離され、他のマグネットの励磁用に適用される。励磁電源は大容量のため消費電力も多く、低コスト化は困難であるが、小型化が可能な磁場保持電源は省エネかつ低コスト化が可能である。本研究開発では、励磁電源と磁場保持電源の回路でMRI超電導マグネットを励磁、磁場保持できることを実証した。また、試作した電源で省エネ性を測定した結果、消費電力が50%低減できることが分かった。磁場保持電源の磁場安定度を制御する場合、MRI画像取得中には磁場の変動を測定するためのNMR信号を得ることができない。そこで、変動予測をするためにフィードフォワード(オープンループ)磁場制御を提案し、実用システムへの展開が期待できる。

また、電源分離システムも含めた三種の駆動用電源を製作し、ドライブモードにおける省エネ性を測定して比較評価した。また、高安定磁場 0.1 ppm/h 以下を達成するための電源および電流制御方法を検討した。低温超電導MRIマグネットを用いた磁場計測およびイメージング試験にて評価して目途を得た後、1/2サイズアクティブシールド型3T高温超電導マグネットを用いてマウスの鮮明な画像を得て、最終目標を達成した。

1.2.2.3 MRIマグネットのシステム最適化(京都大学中村研)

高温超電導マグネットシステムの最小コスト条件の導出方法を確立する。運転温度まで含めたMRIシステム検討の一環として、線電流近似と遺伝的アルゴリズムを適用した3Tホールボディマグネットの最適化設計を実施した。コイルボア径500mmにおける空間磁場均一度を最大化する設計を実施した結果、12ppmの磁場均一度が得られ、さらなる改善の可能性を見出すことができた。1.2.1-4で得られたパーコレーション遷移モデル、遺伝的アルゴリズムを利用したフィッティング手法を用い、コイル温度20~77Kにおける電流-電圧特性を計算し運転温度の設定条件を導出できる特性を導出した。また、設計したマグネットの空間磁場を2次元有限要素法によって解析し、希土類系高温超電導線材の断面構造がマグネットボア内磁場均一度に与える影響を明確化できた。

更なる最適化を目指し、3Tホールボディ高温超電導マグネットについて、線電流近似と免疫遺伝的アルゴリズムを連携した最適化設計を実施した。均一球500mmの空間内の空間磁場均一度最大化と5ガウスライン最小化の二目的関数のもとで設計した結果、平均磁場均一度 10.67 ppm 、5ガウスライン $2.67\text{ m} \times 4.50\text{ m}$ のマグネットの設計に成功した。上記磁場均一度について、高温超電導線材の詳細な断面構造を考慮した有限要素法で精密に検証したところ、 26.90 ppm であった。さらに、最適なマグネット形状の温度依存性の検討にも成功し、冷凍機能力、コイル形状や必要線材長、冷却法の変更に伴うクライオスタットとの関係を議論し、即ち全身撮像用超電導マグネットに適用できるシステム最適化設計法を実現した。最終目標を達成した。

表 1.2.2-1 マグネットのシステム最適化技術開発における成果のまとめ

| 要素技術 | 要素技術最終目標 | 主な成果 | 達成度 * |
|-------------------|---|---|----------|
| 高温超電導マグネット最適化設計技術 | 1/2 サイズアクティブシールド型 5 T コイルの設計 次世代の高温超電導MRI マグネットの概念設計 | 1/2 サイズアクティブシールド型 5 T コイルの設計完了、電磁力の分割低減構造を提案 全身撮像用ホールボディ高温超電導マグネットの概念設計を実施。熱スイッチの導入により、冷却時間を約 40% 短縮した | ○ |
| 高安定磁場励磁システムの開発 | 省エネ、低コスト励磁システムの提案 高安定磁場マグネットの励磁システムの開発 | 大容量の励磁電源と小型の磁場保持電源を組合せ励磁後に省エネの磁場保持電源で磁場保持できることを実証 また更に省エネ・低コストなスイッチング式電源での同等の画像取得に成功 | ○ |
| MRI マグネットのシステム最適化 | 高温超電導マグネットシステムの最小コスト条件の導出方法の確立 | 免疫遺伝的アルゴリズムによる磁場均一度と漏洩磁場低減を両立させる最適化手法の確立 最適なマグネット形状の温度依存性の検討にも成功し、全身撮像用超電導マグネットに適用できるシステム最適化設計法を実現 | ○ |

*◎：大きく上回って達成、○達成、△一部達成

1.2.3 高温超電導線材の超電導接続技術開発

実用的な規模の高温超電導コイルは、多数の線材間接続が存在する。現在供給されているレアアース系高温超電導線材の線長は、最大でも数百 m であり、たとえば数十 km の線材長を必要とするコイルを製作する場合、100 カ所にもおよぶ接続が必要になる。線材同士をはんだで接続した場合、接続部 1 カ所あたりの抵抗は数十～数百 nΩ 程度が一般的である。この部分でのジュール発熱は、冷凍負荷となり、システムの効率を低下させると同時に、コイルの安定性を低下させる可能性がある。線材一本あたりの長さを長くできれば、接続数を減らすことができ、この問題を回避できるが、マグネットシステムが複数のコイルで成り立っている場合には、コイル間の接続が不可避免的に存在する。

コイル内の線材間接続、コイル間の接続、ともにその接続部の抵抗を可能な限り低減することが求められる。

金属系低温超電導線材の場合、異種の超電導材料を用いることにより、接続部で抵抗が発生しない、いわゆる超電導接続技術が確立している。この超電導接続技術を利用し、コイル両端を短絡することにより電流を保持する「永久電流モード」が実現されている。しかしながら REBCO 高温超電導線材では、超電導接続技術が未確立であるため、常時電源を接続してコイルに電流を流す「ドライブモード」が採用されている。ドライブモードであっても、高安定電源を使用することにより、常に安定な磁場を発生できる。しかし、永久電流モードが実現できれば、励磁時以外は電源を切り離すことができ、極めて高安定の磁場を維持できるとともに、高効率の運転が可能となる。また、極めて高い磁場安定度のために撮像時間を短縮でき、患者負担を低減できるほか、脳機能 MRI 等の高分解能スペクトル情報を得ることも可能になる。永久電流モードでは、接続部に抵抗が残ってしまうと、その部分の発熱で電流が減衰してしまい、一定時間毎に再励磁が必要になってしまう。3T 級 MRI マグネットシステムを想定した場合、MRI に要求される磁場の時間的安定性は、0.1ppm/h である。仮にインダクタンス L を 100H とし、接続抵抗 R （接続箇所は 100 箇所あると仮定して、その合計の抵抗）との RL 直列回路を考えれば、要求性能を満たすためには、接続 1 箇所あたりの抵抗は $10^{-11}\Omega$ しか許容されず、実際にはそれより十分低い接続抵抗が求められる。本技術開発ではこれを踏まえ、開発目標を接続箇所あたり $10^{-12}\Omega$ 以下と設定している。

図 1.2.3-1 に示すように高温超電導コイルには、コイル内の線材間接続とコイル間の接続、永久電流モードを実現するための永久電流スイッチ（オン時には極めて抵抗が小さく、オフ時には抵抗を発生する、永久電流モードを実現するためのスイッチ）の接続の、計 3 種類接続が存在する。

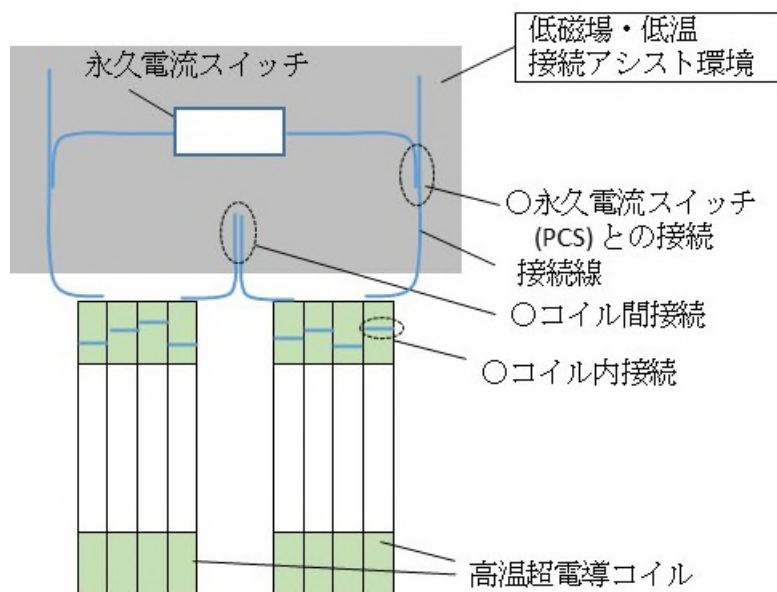


図 1.2.3-1 高温超電導コイルの接続構成

○コイル内接続

コイル内の接続は強い磁場環境下にあるため、そのような状況でも永久電流モードに対応可能な低抵抗を実現すること、電磁力に抗しうる機械強度を有すること、といった要件が求められる。十分に条長が長い高温超電導線材が量産されるようになれば、コイル内の接続は不要となる。もしくは、接続数が少なければ下記のコイル間接続と同様の扱いでも差し支えない。また、高温超電導層同士の直接接合技術が進展し、この方法では $10^{-12} \Omega$ 以下の接続が技術的に可能となった[1]ため、コイル内接続技術については本技術開発では扱わない。

○コイル間接続

MRI マグネットは、主磁場を発生させるための複数の超電導コイル、漏洩磁場を抑制するシールドコイル、不整磁場を補正するためのシムコイルといった複数の超電導コイルで構成されている。これらのコイル間の接続は、線をコイル外部に引き出し、低磁場環境において、適切な接続線・接続材料・接続プロセスを用いて行う。低温超電導コイルの場合は、適切な超電導材料を用いた超電導接続により、永久電流モードを実現している。高温超電導コイルの場合でも、同様のアプローチが可能である。すなわち、接続部だけを低磁場かつ極低温（液体ヘリウム温度付近）の環境に置くことで、接続材料・接続線としての超電導材料の選択肢を大幅に広げることができる。

○永久電流スイッチとその接続

永久電流モードの超電導コイルは、励磁時には電源に接続し、定格の電流が流れた段階で永久電流スイッチをオンにし、電源を解列する。電流は超電導接続された永久電流スイッチを流れ、コイル内の電流が保持される。高温超電導コイルの永久電流モード運転でも同様の永久電流スイッチが必要である。REBCO 高温超電導線材と NbTi 線材等の低温金属系超電導線材との接続技術が確立すれば、上記の接続アシスト環境を介して、すでに実用化されている永久電流スイッチを用いることができる。

よって、高温超電導マグネットシステム内の主要な接続となる、コイル間接続および永久電流スイッチとの接続について、低磁場低温環境での接続を前提とした接続技術を開発することとした。そして、接続点あたりの抵抗値 $10^{-12} \Omega$ を達成するための要素技術群を以下のように定めた。

- ① 低磁場低温接続アシスト環境技術
- ② 金属ペーストを用いた接合技術
- ③ 異種超電導物質薄膜接合技術
- ④ コイル間接続線開発
- ⑤ 接続抵抗評価技術
- ⑥ 高温超電導線材接続技術

1.2.3.1 低磁場低温接続アシスト環境技術（産業技術総合研究所）

接続のための高温超電導線材を主マグネットから引き出し、主マグネットから十分に離れた低磁場環境にて接続点を低温に保つことにより、接続部のみを低磁場低温の環境とする技術を開発した。これにより、接続材料として高温超電導体だけでなく、低温超電導材料を用いることができるようになり、材料・プロセスの選択肢を大幅に拡大した。具体的に、MRI マグネットシステムにおいて、主マグネットを運転温度 30K 程度に保つ

ための極低温冷凍機とは別に、接続点のみを 4.2K（液体ヘリウム温度）程度に保つ極低温冷凍機を 1 台用意することを想定する。高温のマグネット側から低温の接続点への流入熱量を低減して汎用冷凍機の冷凍能力内に抑え、接続点の温度を安定に制御する技術を開発した。

1.2.3.2 金属ペーストを用いた接合技術（産業技術総合研究所）

従来の金または銀のナノ粒子を含む接着ペーストを使った接続技術について、接続抵抗の低抵抗化のための検討を行った。その過程において、REBCO 層と銀保護層の間の界面の抵抗が接続抵抗を支配し、超電導元素や線材製造プロセスに影響されるという知見を得た。また、①低磁場低温接続アシスト環境技術の適用により、ペーストに混入する材料として金属系低温超電導材料を用いれば、ペースト接続の一層の低抵抗化が図れると考え、Nb 系超電導材料の粉末を含む接着ペーストを開発した。接着ペーストによる接続は、はんだ接続同様に簡便で、マグネット製作現場で施工が容易な方法として有望であったが、REBCO 層との良好な接合は実現できず、課題を残す結果となった。しかし、塗布して短時間の加温だけで超電導体となる超電導ペーストは、高温超電導線材の接続以外の用途が期待される。

1.2.3.3 異種超電導物質薄膜接合技術（産業技術総合研究所）

高温超電導線材の REBCO 層に直接、異種超電導物質を使って接続を形成する技術の開発に取り組んだ。低温超電導線材では超電導接続技術が確立しているため、REBCO 層の上に低温超電導の接続技術が適用できる超電導材料を形成（コーティング）できれば、その後は低温超電導の接続技術が適用可能になる。そのため、REBCO 層の上に Nb 系（Nb, NbTi）等の薄膜を成膜する技術開発を行った。その結果、下地となる REBCO 層の超電導特性を劣化させない、室温での成膜により、良好な超電導特性を持つ薄膜を形成する技術を確立することができた。しかしながら、REBCO 層とコーティングした薄膜の間の接続抵抗を下げることができず、接続技術としては完成できなかった。また、低温超電導の接続でも用いられ、最も簡便である鉛はんだによる接続技術について、REBCO 層に直接鉛はんだを接触させることで接続が可能か、検証を行った。その結果、一定の接続抵抗を持った接続ができた事例はあったものの、目標とする低抵抗の超電導接続は実現できなかった。この過程で、鉛はんだに添加剤を加えることにより融点と濡れ性を制御することについて知見を得ることができた。

1.2.3.4 コイル間接続線開発（産業技術総合研究所）

高温超電導マグネットシステムにおけるコイル間の接続や永久電流スイッチとの接続、また永久電流スイッチ自身にも使用できる接続線として、鉄系超電導線材の開発を実施した。接続アシスト環境を前提として、REBCO 高温超電導線材と他種類の超電導線材の接続が可能となれば、マグネットシステム内の配線には、曲げ等による劣化が懸念される REBCO 高温超電導線材以外の線が適している可能性がある。最も有力な候補は NbTi 線である。永久電流スイッチも、NbTi によるものが確立している。もし想定されるマグネットシステムの運転温度の 30K での運用を考えれば、低温超電導線材を使うことはできないため、別の材料を候補とせざるを得ない。いわゆる中温度域の超電導材料として、MgB₂ は近年の技術開発の進展が著しく、REBCO 高温超電導線材との接続ができて

ば、接続線の候補となる。また、2008年に発見された鉄系超電導体も、精力的に線材開発が進められている。そこで、鉄系超電導体による長さ1m級の接続線開発を行い、接続線としてのポテンシャルの評価を行った。また、永久電流スイッチの材料として使用可能かを評価するため、抵抗と比熱の温度依存性を評価し、 MgB_2 線材とも比較した。試作した鉄系線材の抵抗と比熱の温度特性は市販の MgB_2 と近く、 MgB_2 線材と同様に、接続線または永久電流スイッチとして用いることができることが明らかになった。

1.2.3.5 接続抵抗評価技術（産業技術総合研究所一再委託 物質・材料研究機構）

接続部の微小抵抗を高精度で評価する技術開発を行った。開発目標としている $10^{-12}\Omega$ オーダーの微小抵抗は、一般的な四端子通電法では、発生する電圧が小さいため計測できず、抵抗値を高精度で評価することができない。そこで、接続部を含む閉ループを形成する試料を作製し、そこに外部磁場の変動により誘導電流を流し、その電流の減衰を測定することにより、RL直列回路の電流減衰時定数から接続抵抗を評価する、いわゆる減衰法を採用した。また接続部の温度を4~90K、任意の角度で印加された0~3Tの磁界下で、液体ヘリウムを使わず接続抵抗を評価できる装置を開発した。

1.2.3.6 接続抵抗評価技術（産業技術総合研究所一再委託 フジクラ、古河電気工業）

上記の開発成果や得られた知見を活用し、実際の各種（市販や内製のものを含む）REBCO高温超電導線材での接続技術開発を行った。接続抵抗の要因分析を行い、REBCO層の最表面にある抵抗層が支配要因であることを突き止め、銀保護層の上から長尺に渡って均一に接続する技術を開発し、目標である接続点あたりの抵抗 $10^{-12}\Omega$ の実現の見通しを得た。さらに、REBCO層と銀保護層の間の抵抗を下げることを目的とした、超電導層最表面の最適化技術を開発し、接続抵抗が従来の線材の約1/10となる線材の開発に成功。実際に接続点あたりの抵抗 $10^{-12}\Omega$ オーダーを実現した。また、2台の極低温冷凍機を用いて、ループ部を30K、接続部を6Kに保ち、ループ試料に誘導電流を流すことにより、接続アシスト環境による高温超電導マグネットシステムが可能であることを実証した。最後に、REBCO高温超電導コイルとNbTi線の永久電流スイッチを接続し、オンオフを含む永久電流モード運転を実証した。

以上のように、高温超電導MRIマグネットシステムにおける各種接続のための、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を示す低抵抗接続技術の開発に成功し、 $10^{-12}\Omega$ オーダーの接続抵抗を実証するとともに、 $10^{-12}\Omega$ 以下を見通す技術を確立した。本事業の別テーマで開発が行われた高温超電導層同士の直接接合技術は、REBCO層を一体化させるため、完全な超電導接続を実現できるものの、接続工程において長時間の高温熱処理が必要で、完全な信頼性を得られにくいという点が課題であった。本成果は、接続に要する線材長が長くなる点で不利ではあるものの、通常使われている鉛系の超電導はんだを用いた、誰でもできる工業的な接続技術であり、広く普及が期待される。直接接合か本技術かの選択は、マグネットメーカーにおいて、部位や用途、製造性やコストを総合的に考慮して行われると考えられる。今後マグネットメーカーをはじめ、超電導線材メーカーも含め、技術移転を進めていく予定である。また、液体ヘリウム浸漬でない冷凍機冷却型の高温超電導マグネットにおいても、接続部専用の冷凍機を設けることにより、超電導材料を用いた低抵抗接続が可能であることを実証したことも大きな成果であ

る。さらに、従来手つかずであった REBCO 層と銀保護層の接触抵抗にも踏み込み、接続抵抗を低減する線材の開発にも目処がついた。接続部の超低抵抗が必須となるマグネット用の線材としてのニーズが考えられ、今後の発展が期待される。また、本事業において開発した超電導ペーストは、残念ながら事業の目的である接続には不向きであることが明らかになったものの、エレクトロニクス応用等のその他様々な用途が考えられ、開発成果を活用すべく産業技術総合研究所にて自主開発を継続している。

本テーマの成果のうち、学術的な価値が高いと思われるもの(Nb 薄膜の室温成膜技術、専用冷凍機を用いた接続部の冷却技術)については論文発表し、工業技術としてのノウハウは公開せずにとりまとめることを選択した。また REBCO 層と銀保護層の接触を改善した新線材については、特許出願を行った。このように成果の属性に応じて、適切な知財戦略を実施した。

表 1.2.3-1 高温超電導線材の超電導接続技術開発における成果のまとめ

| 要素技術 | 主な成果 | 達成度 | 成果の意義 |
|-------------------|---|-----|---|
| ① 低磁場低温接続アシスト環境技術 | コイルと、コイルから十分低磁場の環境に引き出された接続部の温度を、2 台の冷凍機で独立に制御する技術を開発 | ○ | 冷凍機冷却マグネットシステムにおいても、接続部のみ低磁場低温環境にできることを実証し、多様な超電導材料（特に超電導はんだ）を用いた接続を可能にした |
| ② 金属ペーストを用いた接合技術 | 超電導ペースト（超電導微粉を含んだ接着剤で、硬化後に臨界温度以下で電気抵抗がゼロとなるペースト）を開発 | ○ | 結果として REBCO 超電導線材の接続は成功しなかったが、塗布して乾燥させるだけで超電導になるという特性から、その他幅広い用途への展開が期待され、引き続き自主研究を実施している |
| ③ 異種超電導物質薄膜接合技術 | 単結晶基板上に成膜した YBCO の上に良好な超電導特性を持つ Nb 系超電導薄膜を室温プロセスで成膜する技術の開発に成功 | ○ | REBCO と低抵抗で接するコーティングは実現できなかったが、高度な室温での成膜プロセス技術を開発した |

| | | | |
|---------------|---|---|---|
| ④ コイル間接続線開発 | 長さ 1m 級の鉄系線材を開発、熱伝導率や抵抗率の温度依存性を評価 | ○ | 開発した鉄系線材は、今後も特性向上が求められるレベルであるが、MgB ₂ 線材と同等の温度特性を有しており、代替材料として期待できる |
| ⑤ 接続抵抗評価技術 | 接続抵抗を、接続部の温度・磁場を変えて精密に評価できる装置を開発 | ○ | 種々の超低抵抗接続方法について、定量的な評価が可能になった |
| ⑥ 高温超電導線材接続技術 | 銀保護層の上から PbBi 系はんだにより、長尺均一に接続する技術を開発。REBCO 層と銀層の接触を向上した新線材により、10 ⁻¹² Ω 以下を見通す接続技術を確立。2 台の冷凍機により、接続部のみを極低温にすることで、伝導冷却マグネットにおいても超電導はんだ接続が適用可能であることを実証。 | ○ | マグネット製造現場で施工が容易で、かつ再現性の高い工業技術としての接続技術を開発した |

文献

[1] 大木康太郎 他、「REBCO 線材の超電導接続」、低温工学、Vol. 55、No. 4、pp. 262-267 (2020)

1.2.4 コイル保護・焼損対策手法の開発

1.2.4.1 ドライブモードに対する保護・焼損対策技術開発（三菱電機株，東北大学）

ドライブモードで運転されている高温超電導マグネットの保護検討として、医療用MRIシステムが人体に及ぼす影響に基づいて、コイルが損傷した場合、1秒以上、10秒以下の範囲で緊急消磁するための外部抵抗について検討を行った。コイルの一部が損傷した場合のコイル保護およびリカバリ方法についても検討した。

また、コイル保護の指標を検討するために、局所的劣化時の常電導転移現象への影響を明らかにし、常電導転移時や焼損直前のコイル両端電圧の増加を安定化銅の有無、劣化状態や冷却状態を変化させて測定した。その結果、安定化銅の有無では熱暴走電

圧の挙動が大きくことなり安定化銅の分流効果、冷却効果が分かった。安定化銅の配置方法やコイル冷却条件を変えて過渡熱解析を行い、上記の試験結果と同様の評価を得た。この結果を受け、高温超電導コイルの予期せぬクエンチに対して高安定であるコイル構成方法として、コイルを素線間絶縁の無い並列導体で構成することを提案した。素線間絶縁を除くことにより、抵抗値が大きい異常部の周辺でローカルな転流が発生し、ジュール熱の発生を低減させることができると考えられる。しかしながら、並列導体の場合インダクタンスが小さい内側導体に多く電流が流れ、偏流が発生することが予想される。そこで、素線間絶縁の無い並列導体でコイルを構成した際の、通常励磁時における電流分布および異常が発生した際の電流分布についての検討を行った。

表 1.2.4-1 コイル保護・焼損対策手法の開発～ドライブモードに対する保護・焼損対策技術開発における成果のまとめ

| 要素技術 | 要素技術最終目標 | 主な成果 | 達成度 * |
|------------------------|--|---|----------|
| ドライブモードに対する保護・焼損対策技術開発 | コストも考慮した実用的な高温超電導コイル保護方法の提案 ドライブモードのコイル保護としての超電導マグネットの保護システムの確立 | コイルの劣化時の磁場減衰による人体への影響を調査し、保護指標を検討、コイルの一部が損傷した場合のコイル保護およびリカバリ方法について検討 常電導転移時や焼損直前のコイル両端電圧の増加に向けて両端電圧と安定化銅の配置方法やコイル冷却条件との関係を検討、絶縁無しの複数テープ線で構成される導体を用いたコイル化、励磁方法を提案 | ○ |

*◎：大きく上回って達成、○達成、△一部達成

1.2.4.2 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発

(産業技術総合研究所一再委託 上智大学)

金属系低温超電導線材を用いたコイルは、極低温で運転されるために比熱が小さく、わずかな外乱によりクエンチ（突然超電導状態が破れてコイルが抵抗状態になる現象）が発生する。そのため、クエンチが発生してもコイルが焼損しないように保護する技術や、そもそもクエンチが発生しないようなコイル設計技術が開発され、確立している。クエンチの発生を抑制するには、外乱の主要因である電磁力による導体の動きを抑えるためにエポキシ樹脂でコイルを含浸する手法を取ることが多い。また、超電導線に銅やアルミなどの低抵抗の安定化材を多く付与することにより、常電導の芽が生じてもそれを成長させないような設計指針もある。しかしMRIなどの実用機においては、コストなどの理由から設計裕度に限界がある。そのため一般的な超電導コイル保護の手法として

は、コイルの一部で常電導の芽が生じたことを検出したとき、その伝搬が遅い場合はコイルをヒータで加熱するなどしてコイル全体が常電導の抵抗状態に移ることを促し、コイル最大温度を抑制する方法がある。同時に、コイルに蓄積されていたエネルギーをすみやかにコイル外に取り出して消費させることにより、コイルの温度上昇を抑制する。

一方、REBCO 高温超電導線材によるコイルの場合、想定されるコイルの運転温度は液体ヘリウム温度より高く、線材およびコイルの比熱は低温超電導に比べて桁違いに大きい。また臨界温度も従来の超電導材料に比べ高温であるため、多少の外乱では臨界温度を超える発熱は起こらず、クエンチは発生しにくい。しかし、何らかの原因で REBCO 高温超電導コイル内に局所的な常電導の芽が発生した場合、その芽は周囲に拡がりにくいいため、これを検知することが困難であるだけでなく、狭い常電導領域にて蓄積エネルギーを消費するため局部発熱（ホットスポット）が発生する。異常検知ができたとして、その後コイルの通電電流を減衰させて一部の蓄積エネルギーを外部へ取り出したとしても、コイルの一部が焼損または劣化し、当初の性能を発揮できなくなってしまうことがある。このような REBCO 高温超電導コイルの焼損・劣化に関する報告は多く、知見が蓄積されつつあるが、焼損を防ぐための標準的な手法や、高電流密度を保ちつつ焼損しにくいコイルを設計する手法は確立されていない。また、永久電流モードを想定した場合、永久電流スイッチが接続されているため、これを考慮した保護方法を検討する必要がある。

そこで、REBCO 高温超電導コイルが永久電流モードで運転される場合の保護・焼損対策として、REBCO 高温超電導線とともにコイルに銅箔を巻き込むことにより、高感度で異常を検出できる「共巻き法」と、異常検出後に速やかに電流を他の健全なコイルに移し替えることにより、ホットスポットの成長を抑制する「抵抗ショート法」を開発した。それぞれの原理検証を、数値解析および実験の両面から実施し、さらに「共巻き法」と「抵抗ショート法」を組み合わせた一連の保護動作について、小規模コイルで実証を行った。

高温超電導コイルの保護技術として、No-Insulation（無絶縁、以下 NI）コイル技術の開発が盛んに進められている。自立安定で焼損を回避できる技術として、その効果が実証されているが、MRI のような極めて高い磁場の安定性・均一性を求めるマグネットにおいては適用できず、万能ではない。そのため、NI コイル技術が適用できない場合における新たな保護方法を提示した意義は大きい。本テーマでは「共巻き法」と「抵抗ショート法」をセットで扱っているが、原理的にはそれぞれ、異常検出とエネルギー回収の方法として別個に活用できる。「共巻き法」は巻線時に共巻き導体を挟むため、そのままでは電流密度が下がる。これを嫌う場合は、検出方法は従来法を用いつつ、「抵抗ショート法」でホットスポットを抑制することもできる。また、安定性の向上により、電流密度を向上した設計が可能であると判断されれば、共巻き導体を含んでも電流密度を維持できる可能性も示すことができた。

本テーマの成果はすべて論文発表を行い、査読課程や国際学会等での発表の場等で専門家のレビューを受けた。新しい高温超電導マグネットの保護技術として広く採用されていくことが期待される。

表 1.2.4-2 コイル保護・焼損対策手法の開発～永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発における成果のまとめ

| 要素技術 | 主な成果 | 達成度 | 成果の意義 |
|------------------|---|-----|--|
| 異常検出技術 | ノイズの影響を受けにくく高感度に永久電流モードマグネット内に生じた異常を検出できる「共巻き法」を開発した | ○ | 共巻き導体を用いることで、ホットスポットの目となる微小な抵抗性電圧の早期検知が可能になり、焼損リスクを低減することができる。また共巻き導体を異常検出のみならず、その後に電流を転流させることで保護に用いる方法についても可能性を示した。 |
| 保護技術 | 異常が検出されたコイルの電流を他の健全なコイルに転流させることによりホットスポットの成長を抑制する「抵抗ショート法」を開発した | ○ | 通常の方法では蓄積エネルギーの回収が間に合わず焼損してしまうケースでも、ホットスポットを抑制して焼損を防ぐ、従来にない保護方法を開発した。 |
| 異常検出・保護の一連の動作の実証 | 「共巻き法」による異常検出から「抵抗ショート法」によるエネルギー回収で、ホットスポットが抑制され、焼損を防ぎ保護が可能であることを、小規模モデルコイルによる試験で実証した | ○ | 実証試験を通じ、実際に保護可能範囲が広がることを示した。大規模マグネットほど効果が高いことがわかっており、汎用的な高温超電導マグネットシステムの保護の技術パッケージとして確立した。 |

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 運輸分野への高温超電導適用基盤技術

運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発については、超電導ケーブルの鉄道き電線への適用を想定し、超電導ケーブルの長距離冷却技術の開発および長距離冷却システムの構築を行った。具体的には超電導ケーブルの長距離冷却技術開発として、「コンパクト

冷凍機技術開発 (2.1.1 参照)」、「液体窒素循環ポンプ技術開発 (2.1.2 参照)」、「断熱管技術開発 (2.1.3 参照)」を、長距離冷却システム構築・評価として、「実環境を想定した評価実施 (2.1.4 参照)」、「システム保全技術開発 (2.1.5、6 参照)」、「実環境下での評価実施 (2.1.7 参照)」を実施した。以下に詳細を述べる。

2.1.1 コンパクト冷凍機技術開発 (実施先：公益財団法人鉄道総合技術研究所 —共同実施 株式会社前川製作所)

2.1.1.1 冷凍機の基本設計

(1) 冷凍サイクル

超電導き電向け冷凍機の実用時を想定し仕様を検討した。鉄道き電用を想定すると、必要冷凍能力の単機容量は 4~5 kW 程度が望ましい。単機容量を考慮すると数百 W~1kW 能力の GM サイクル、スターリングサイクル式よりも大容量化しやすいブレイトンサイクル方式を適用し、設計を進めた。図 2.2.1.1 にブレイトン冷凍機の基本サイクルフローを示す。

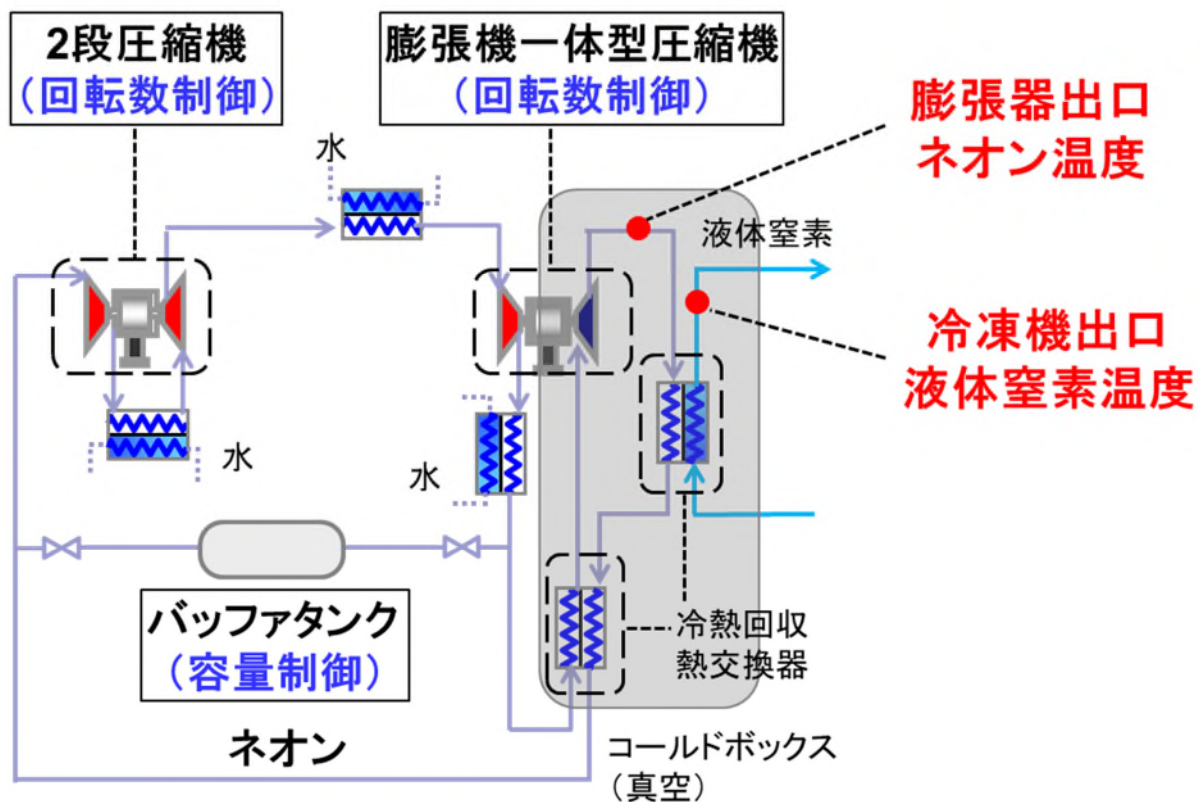


図 2.2.1.1 ブレイトン冷凍機の基本フロー (三段圧縮、一段膨張の場合)

(2) 回転機 (圧縮機、膨張機)

ブレイトンサイクルの特性を生かすため冷凍機の主要機器である圧縮機及び膨張機にはターボ型を適用した。冷媒のシステム設計や効率等を考慮して三段圧縮、一段膨張

とした。冷凍機の高信頼化のために圧縮機、膨張機の軸受には非接触磁気軸受を適用し、オイルフリー化、メンテナンスフリー化を図った。

(3) 冷媒

被冷却体である超電導き電ケーブルの想定される温度を基に冷凍機の冷媒を選定すると、その候補はヘリウム、水素、ネオンになるが、ターボ圧縮機・膨張機の高効率化と冷凍機のコンパクト化を達成するために、物性を考慮して冷凍機の冷媒にはネオンガスを適用した。

(4) 冷凍機ユニット

膨張機や熱交換器（冷熱回収熱交換器、液体窒素熱交換器）などの低温となる機器はコールドボックス内に配置して真空断熱とし、それ以外の室温で運転される機器もコンパクト化を考慮した配置とし一体型とした。

(5) 冷凍機運転制御

圧縮機と膨張機の回転数をコントロールする回転数制御と循環する冷媒の容量制御の両方を採用し、冷凍能力の調整を行えるようにした。

容量制御ではバッファタンクからのガス供給、バッファタンクへのガス回収により循環する冷媒の質量流量を調整して冷凍能力を制御する。また、バッファタンクを初期運転時のガス供給や停止時のガス回収にも利用することで予冷時の動力低減や温度上昇による体積膨張（圧力上昇）を緩和する効果も得られる。冷凍機の運転は液体窒素冷却前の「予冷運転」と液体窒素循環中の「循環運転（通常運転）」で温度制御点を切り替えている。「予冷運転」は冷熱回収熱交換器が急激な熱応力変化により劣化しない冷却速度としており、さらに、膨張機出口ネオン温度（設定値 66 K）を 1 K/min を超えない冷却速度となるようにターボ圧縮機・膨張機の回転数で制御し、膨張器 出口ネオン温度が設定温度に到達後は循環運転に備え運転状態を維持する制御を行っている。液体窒素循環ポンプ起動後、循環流量が設定値（20 L/min）以上となれば「循環運転」に移行し、冷凍機出口液体窒素温度が一定になる制御を行っている。

2.1.1.2 冷凍機のコンパクト化

コンパクトなブレイトン冷凍機の開発に向け、ターボ圧縮機（3 段）と膨張機（1 段）を基にネオン冷媒の流量、圧力比等をパラメータに冷凍能力、効率の最適化を行った。図 2.1.1-2 に計算例を示す。

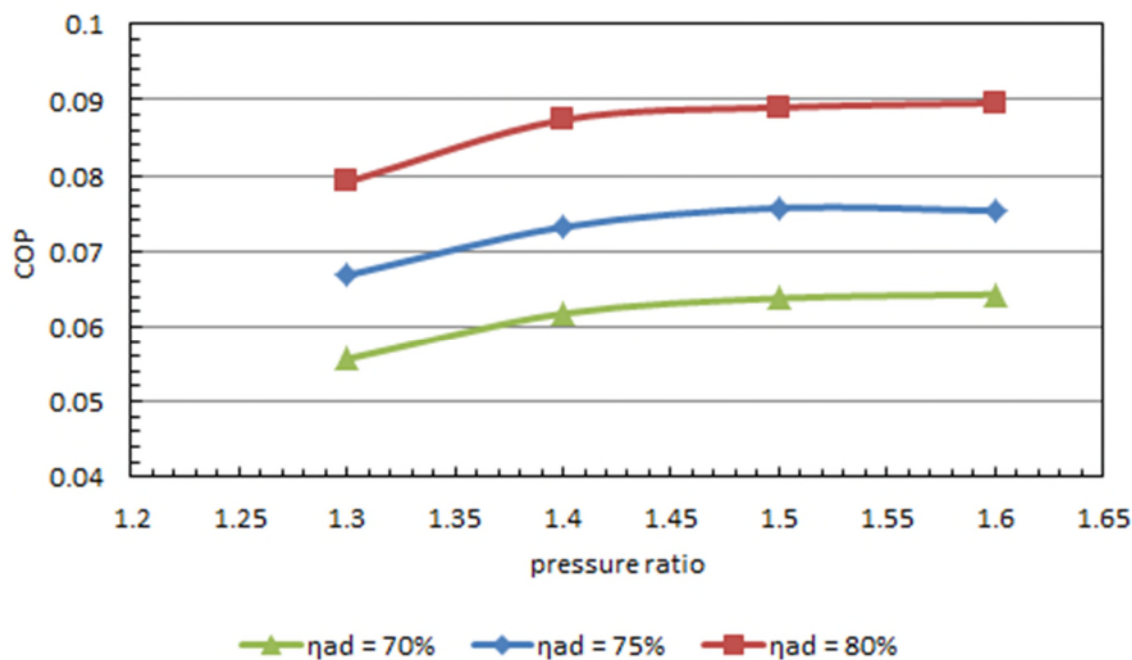


図 2. 1. 1-2 COP の圧縮比と断熱効率依存性

本計算結果を基に、回転機の高効率化を図るとともに、コンパクト化 (2 m³/kW) を実現すべく、機器や熱交換器の配置、配管レイアウトの最適化などを図った。詳細を以下に述べる。

(1) 回転機 (圧縮機、膨張機) の開発

ブレイトン冷凍機の主要機器であるターボ圧縮機及び膨張機の開発を実施し、CFD などによる空力解析、FEM などによる構造解析により回転機性能及び構造の最適化を図った。図 2. 1. 1-3 及び図 2. 1. 1-4 に 2 段目圧縮機 (以下、C2) と 3 段目圧縮機 (以下、C3) の CFD 解析結果の一例を示す。それぞれ、上段に相対マッハ数、下段にエントロピー分布を示している。またそれぞれの図の左側に従来機を踏まえた初期設計モデル、右側に最終設計モデルの解析結果を示している。C2 は高流量側性能、C3 は低流量側性能を改善するように設計を試みた。

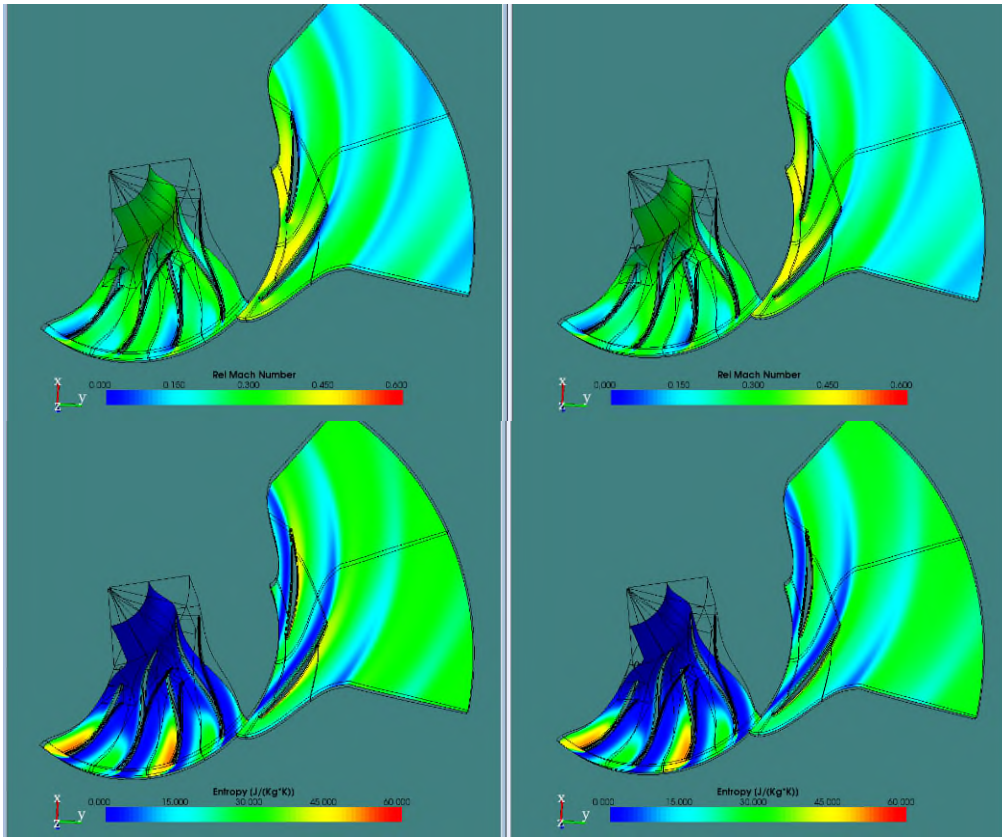


図 2.1.1-3 2 段目圧縮機 CFD 解析結果 (左:初期設計モデル, 右:最終設計モデル)

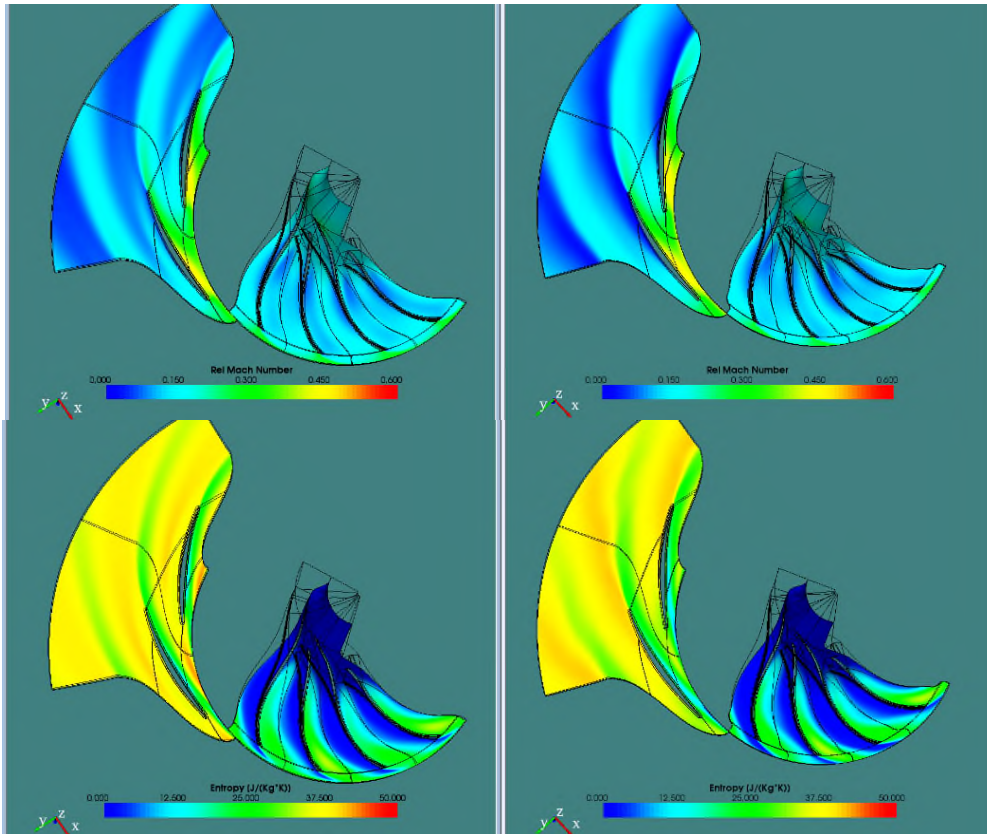


図 2.1.1-4 3 段目圧縮機 CFD 解析結果 (左:初期設計モデル, 右:最終設計モデル)

次に図 2.1.1-5 及び図 2.1.1-6 に C2、C3 インペラの FEM 解析結果の一例を示す。それぞれの図の左側が応力解析結果、右側が固有値解析結果である。高速回転に伴う遠心力によってインペラ外径近傍の翼根元部の応力が最も高くなり、特に外径近傍はシュラウド方向へ変位することが分かる。また、翼高さが最も大きいインペラ入口部が振動しやすいことも分かる。

応力や変位については材料強度やクリアランスに対して十分なマージンがあることを確認するとともに、固有値については定格回転数における励振周波数と一致しないように翼の厚みなどを調整した。

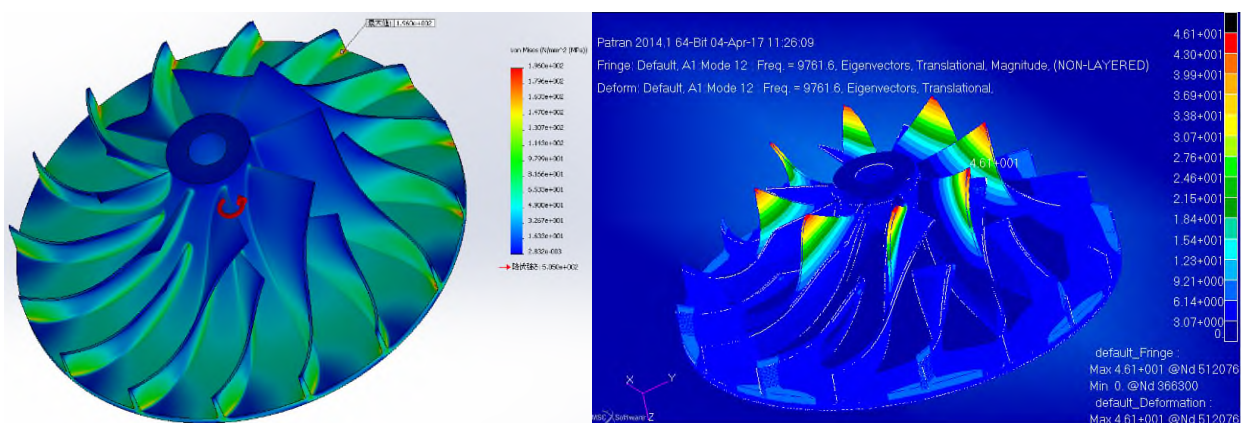


図 2.1.1-5 2 段目圧縮機 FEM 解析結果（左：応力解析結果，右：固有値解析結果）

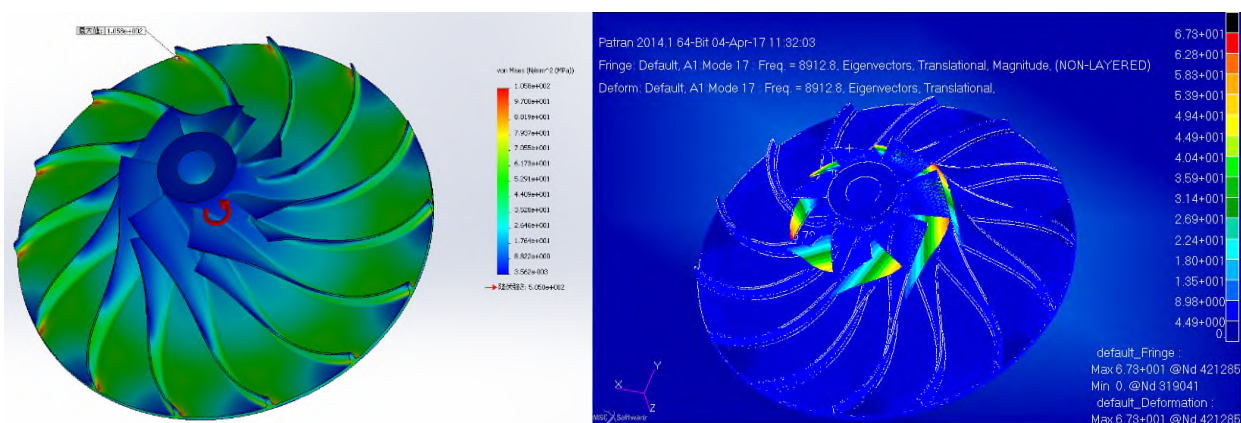


図 2.1.1-6 3 段目圧縮機 FEM 解析結果（左：応力解析結果，右：固有値解析結果）

(2) 熱交換器の最適化

コールドボックス内に配置する冷熱回収熱交換器（Ne-Ne 熱交）、液体窒素熱交換器（LN₂クーラー）には小型、高性能のアルミプレートフィン熱交換器を採用し、膨張後の低温ガスをより効率的に熱交換させるため流路の再検討を行い膨張機らの接続流路を変更し最短で行った。冷熱回収熱交換器は、ネオンガスを室温から 80 K 付近まで冷却させるため熱交換器が大きくなってしまいうので、熱交換器を 2 つに分割して並列に並べ、

直列にネオンガスが流れるように配管で接続する構造とした。またコンパクト化による冷凍機の運転能力低下を最小限にするために、配管口径や LN₂ クーラーヘッダー部を大きくする構造とした。

(3) 周辺機器の最適化

(a) 水熱交換器

圧縮機での圧縮熱を除去するため、各圧縮機の出口に水冷却器を配置した。本水冷却器はフィンチューブを用いた。

(b) ネオンバッファタンク

ターボ型の冷凍機は通常、回転数制御を用いて冷凍能力の調整を行うが、回転数のみによる制御では常に最高効率で運転することが難しい。そこでブレイトン冷凍機では、最高効率の運転範囲を拡大するために回転数制御だけでなく、ネオンガスのバッファタンクを用いて容量制御を行うこととした。またタンクを分割することで冷凍機の空隙部に設置を可能とした。ネオンバッファタンクの写真を図 2.1.1-7 に示す。



図 2.1.1-7 バッファタンク

(c) コールドボックス

コールドボックスには低温となる膨張機、冷熱回収熱交換器、LN₂ クーラーを配置した。コールドボックスは内部を真空状態とするため、内部機器と配管に積層断熱材で熱放射を防ぐ構造とした。またコールドボックス内を下方集中配管にし上容器を上方に開放する構造にしたことで、メンテナンススペースを必要としないため高さを低く抑えコンパクト化を可能とした。

またコールドボックス内の機器について、三次元構造解析により容器内面と機器との空間を事前に解析することで容器と機器の干渉なく小型化を行っている。

2.1.1.3 冷凍機の製作

製作した2段圧縮機と膨張機一体型圧縮機を図2.1.1-8に示す。回転機の定格運転前の健全性を確認するため2段圧縮機及び膨張機一体型圧縮機の組立調整、動作確認を行い、主軸バランス量（振れ回り量）を測定した。その結果、インペラを含む主軸バランスに問題がないことを確認した。表2.1.1-1に測定結果を示す。

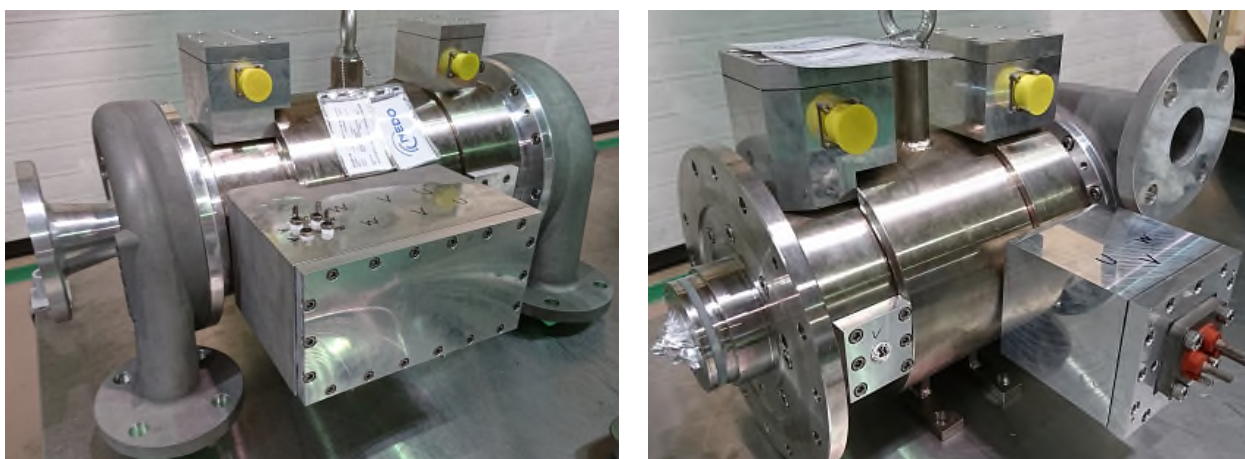


図 2.1.1-8 圧縮機・膨張機の外観（左：2段圧縮機，右：膨張機一体型圧縮機）

表 2.1.1-1 回転機の動作確認試験結果

| | 2段圧縮機 | 膨張機一体型圧縮機 |
|------------------------------|-------------------|--------------------|
| 回転数[rpm] (括弧内は定格) | 9,120 (47,000) | 12,060 (65,000) |
| 補助軸受隙間[μm] | 100 | 100 |
| 振れ回り量 X1-Y1[μm] | 2~3 | 2~3 |
| 振れ回り量 X2-Y2[μm] | 5~6 | 2~3 |

図2.1.1-9に組み立てた冷凍機の外観を示す。NEDO事業「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」にて開発した高温超電導ケーブル冷却用高効率機をもとに、特に冷凍機の小型化設計に特化し、2.1.1-2で述べたように、コールドボックス構造を下方集中配管にし、上容器の取り外しスペースをユニット内で必要としない構造することや、熱交換器の小型化、効率的な配管接続等の検討を図り約1/6のコンパクト化を実現した。製作した冷凍機の寸法は、図2.1.1-10に示すように約 10 m^3 （ $1.86\text{ m}\times 2.7\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ ）である。

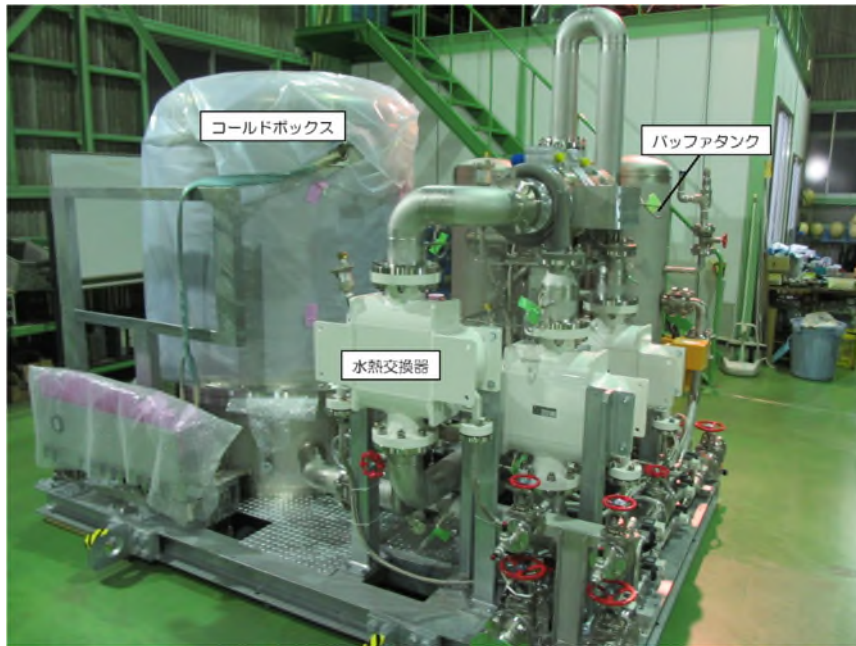


図 2.1.1-9 製作したブレイトン冷凍機の外観

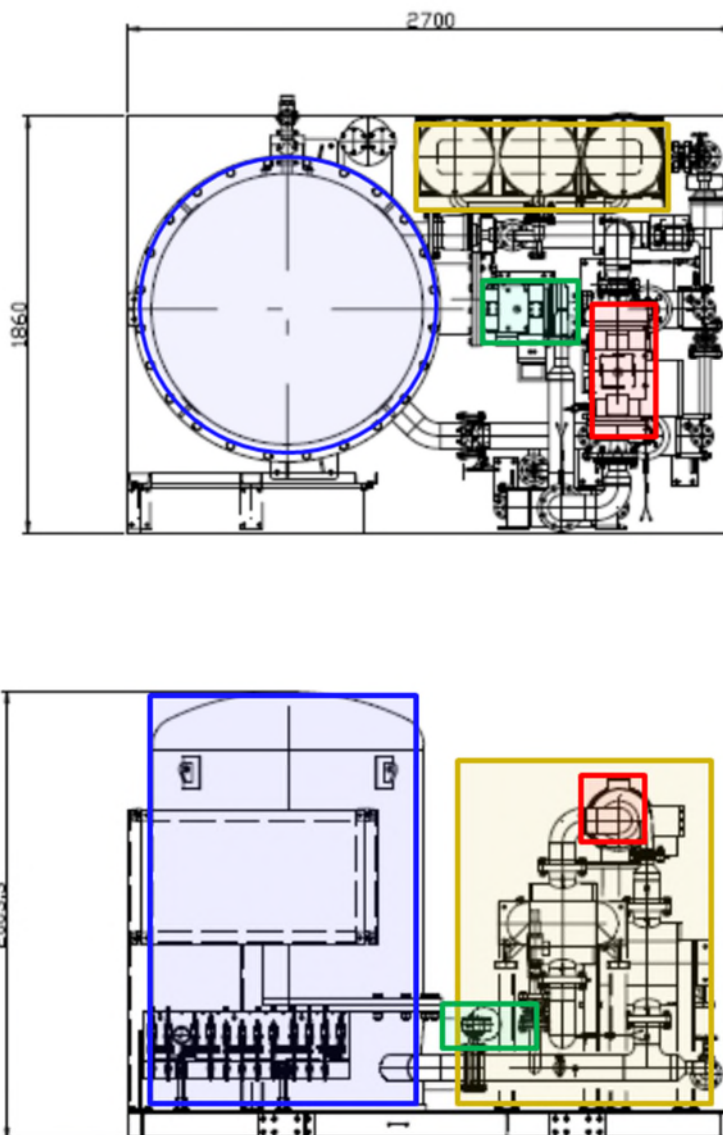


図 2.1.1-10 開発したブレイトン冷凍機設置寸法

2.1.1.4 冷凍機の単体性能試験

(1) 単体性能試験用循環装置の基本設計

ブレイトン冷凍機の内部循環冷却を行い、冷凍機の性能評価及び負荷変動を想定した構造とした。具体的には、液体窒素の負荷変動による体積膨張分を考慮したリザーバタンクを設け、タービン式流量計と内部循環機器をユニット化し一つのクライオスタットに納め侵入熱の低減化を図った。またケーブル熱負荷及び冷却システム熱負荷を合わせた最大熱負荷を 5kW 以上と想定し、6 kW ヒータ (1 kW シースヒータ 6 本) を断熱配管内に設けた。詳細を以下の(a)～(c)に示す。

(a) リザーバタンク

液体窒素を貯液するための真空断熱容器である。容器は冷凍機内部の LN_2 クーラーや循環する液体窒素の温度変化による膨張収縮量をカバーする容積を有している。リザー

バタンクは冷凍機内部循環ポンプの吸入側にあり、ポンプ位置より下側にまで液面が低下し、ポンプの吸い込み不良が起こらないように液面計で監視する。運転中にリザーバタンクは最も圧力が低い場所となるため液体窒素の圧力はここを基準として制御する。加圧は熱侵入を抑えるため液体窒素の蒸発ガスを利用した自然加圧方式を採用した。

(b) 内部循環ポンプユニット

冷凍機付属液体窒素循環ポンプと流量計を一体型のクライオスタットに配置した。流量計は圧損を抑えコンパクトにするためタービン式を採用した。

(c) ヒータユニット

液体窒素配管内にヒータを設けた。ヒータは、ブレイトン冷凍機の最大冷却能力をカバーできるように最大加熱容量 6 kW とした。

(2) 単体性能試験用循環装置の製作

ブレイトン冷凍機の性能評価及び信頼性評価に必要な単体性能評価試験用循環装置を製作した。図 2.1.1-11 に製作した単体性能評価試験用循環装置の概略図を、図 2.1.1-12 に工場試験の設置状態を示す。また、冷凍機や単体性能試験用循環装置、冷却水機器等の運転・制御・監視、保護等の機能を制御盤、インバータ盤に設け、各センサの電源ノイズの影響を抑制するため、動力線と制御線の配線を分配しシールドによる保護を行うとともに、冷凍機のコンパクト化に寄与するため冷凍機架台下の配線とした。

(3) 単体性能試験結果

これらの機器を用い、ブレイトン冷凍機の冷凍能力を測定した結果を、図 2.1.1-13 に示す。77 K において、冷凍能力は 5.0 kW 以上あり、設置容積 10 m³ から算出すると、冷凍能力当たりの容積は 2 m³/kW 以下となることを確認した。なお、本試験においては、冷媒ガスであるネオン側の温度・流量にて評価している。

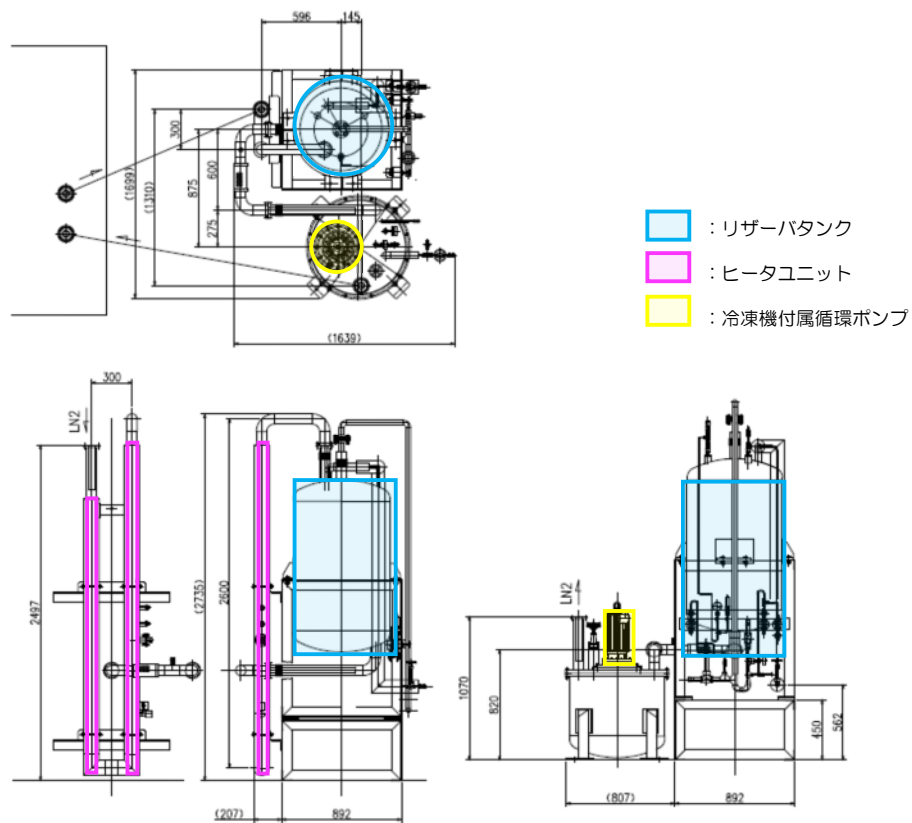


図 2. 1. 1-11 単体性能試験用循環装置の概略



図 2. 1. 1-12 単体性能試験の工場試験レイアウト

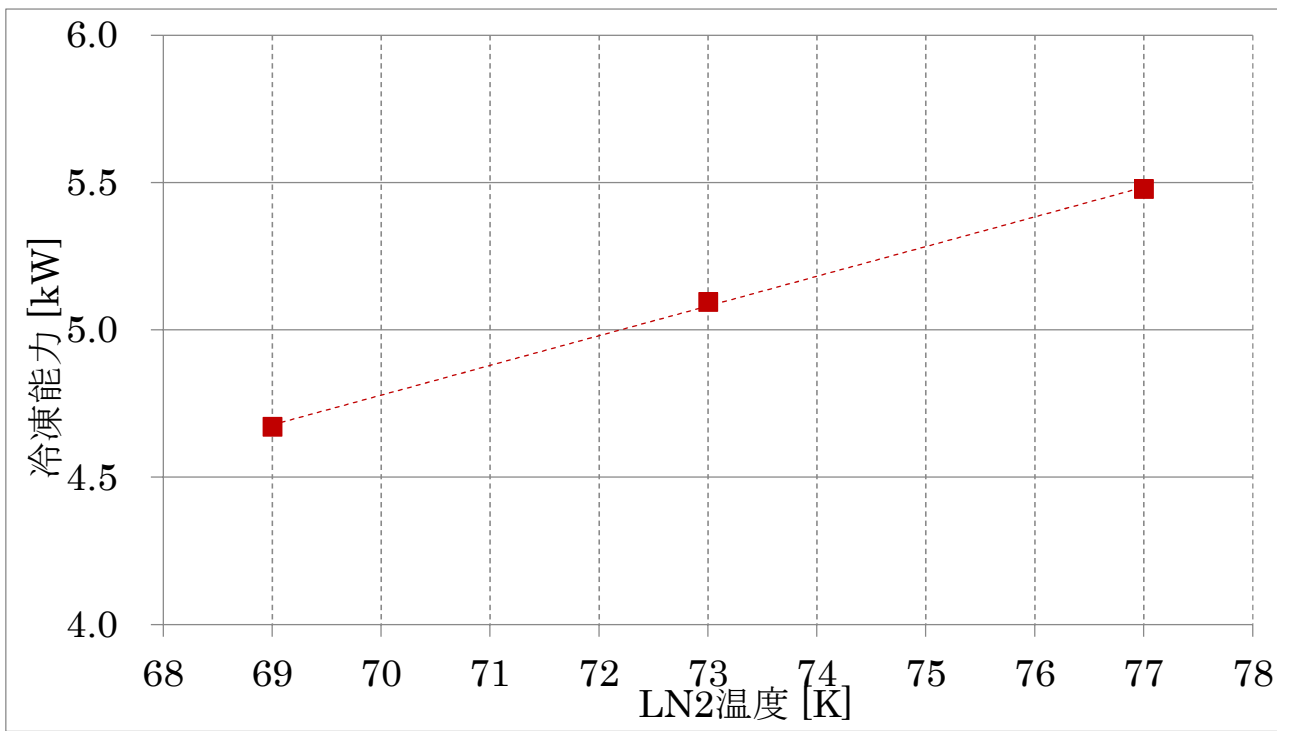


図 2. 1. 1-13 ブレイトン冷凍機の冷凍能力測定結果

2.1.2 液体窒素循環ポンプ技術開発

(実施先：公益財団法人鉄道総合技術研究所—共同実施 株式会社 IHI)

ポンプ性能目標の 50 L/min、吐出圧 0.6 MPa に基づきガス軸受、回転軸、電動機等に関するトレードオフ検討から最適設計し、高ヘッド、高信頼性を持つポンプの開発を行った。詳細を以下に述べる。

2.1.2.1 液体窒素循環ポンプ用ガス軸受の設計

現在、日本国内で使用されている液体窒素循環ポンプは、玉軸受を採用したものが大部分であり、寿命が短いという課題がある。そこで、玉軸受方式ポンプの課題解決を目指し、高信頼性、低価格化が期待できる、動圧式ガス軸受を採用した。

(1) スラスト軸受の設計

スラスト軸受にはテーパーランド型のバンプフォイル式ガス軸受を用いた。液体窒素循環ポンプの回転体は 回転軸が鉛直方向である縦軸配置になっており、スラスト軸受 (2 個/1 組構成) は、回転体側に設けられたディスクを上下に挟み込むことによって回転体の上下方向の動きを制限する。ディスクの下側と上側のスラスト軸受では、それぞれ求められる負荷能力が異なるため、各々別構造にした。

(2) ラジアル軸受の設計

ラジアル軸受はバンプフォイル式とし、設計にあたっては、最大軸受荷重に対する安全率を算出し、極低温下で安全率 2 以上の軸受サイズを選定した。ガス軸受のサイズを表 2.1.2-1 に示す。

表 2.1.2-1 ガス軸受サイズ一覧

| | 内周側軸受 | 外周側軸受 |
|----------|------------------------------|------------------------------|
| 上側スラスト軸受 | 外径 ϕ 68/内径 ϕ 29 mm | 外径 ϕ 98/内径 ϕ 71 mm |
| 下側スラスト軸受 | | — |
| ラジアル軸受 | ϕ 23x23mm | |

2.1.2.2 液体窒素循環ポンプの設計

液体窒素循環ポンプの設計仕様を、表 2.1.2-2 に示す。

表 2.1.2-2 液体窒素循環ポンプの設計仕様

| | |
|-----------|-------------|
| 入口温度 | 65 K |
| 入口圧力 (最大) | 0.3 MPa (A) |
| 最大流量 | 50 L/min |
| 最大吐出圧 | 0.6 MPa |
| 耐圧 | 2.1 MPa |

(1) 回転軸の固有値・危険速度解析・離調設計

軸の固有値・危険速度解析には伝達マトリクス法を用いた。設計したラジアル軸受、スラスト軸受、電動機およびインペラのサイズを考慮して軸の駆動部の主要寸法を決定した。インペラ部は低温（65 K）である一方で駆動部は常温であるため、軸を介して常温側から低温側への熱侵入が生じる。この熱侵入は冷却システムの効率を悪化させる要因となるため、熱侵入を最小化するために常温部と低温部の間を細い首長構造とした。首の径および長さは断熱性能と危険速度とのトレードオフとなり、伝達マトリクス法に用いた解析モデルを図 2.1.2-1 に、得られた固有値（危険速度）を図 2.1.2-2 に示す。危険速度からの安全マージン（離調率）はポンプ作動点によっても異なるが、おおむね 100%以上となり、十分にマージンを取りつつ軸を介した熱侵入を低減できる設計とした。

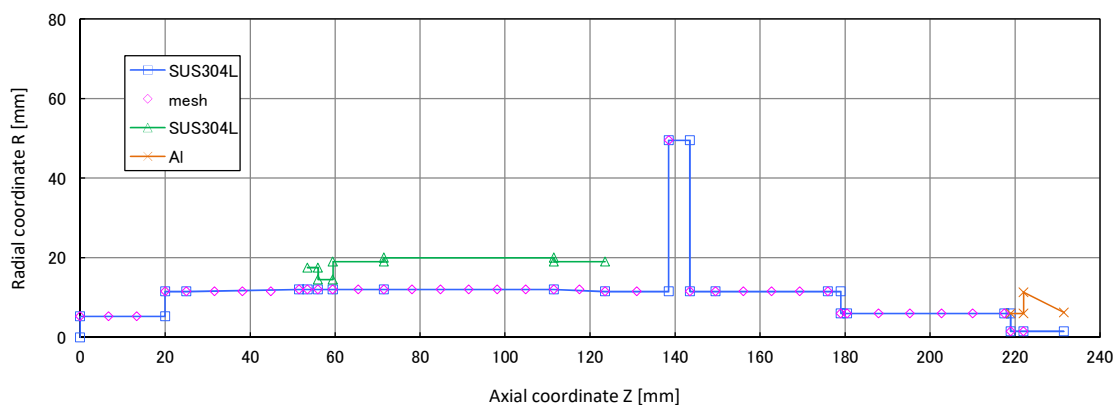


図 2.1.2-1 伝達マトリクス法の解析モデル（ピンクが解析モデルのメッシュ）

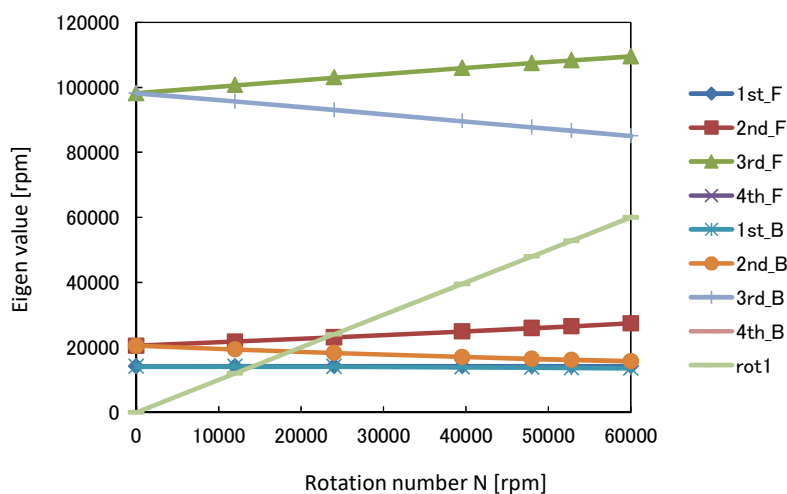


図 2.1.2-2 軸の固有値（危険速度）解析結果

(2) 軸の遠心応力解析および軸材の選定

ガス軸受が隣接する軸ディスクに関して FEM による遠心応力の見積もりを行った。使用したコードは ANSYS Mechanical である。解析結果を図 2.1.2-3 に示す。スラスト軸受ディスク部は常温設計であるが、低温にさらされる可能性を考慮して解析によって得られた応力でも破断せずかつ低温脆性のない材料として SUH660H を選定した。

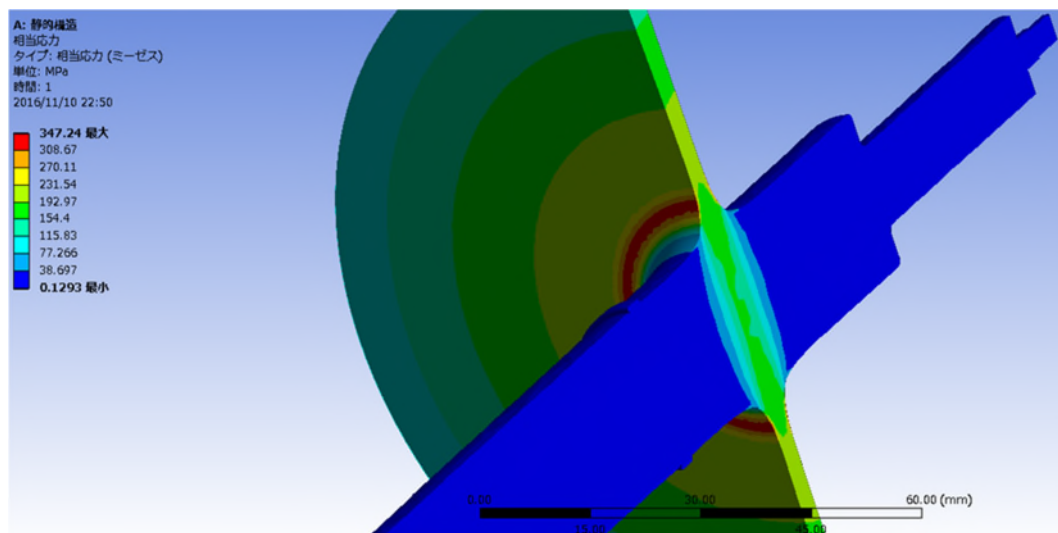


図 2.1.2-3 FEM (遠心応力) 解析結果

(3) 内部熱バランスの検討

電動機損失などによっておよそ 500 W 程度の内部発熱が見込まれる。これらの発熱を効率良く系外へ排出し低温への熱侵入を抑える目的で電動機周辺を水冷却する設計とした。水による冷却が妥当か FEM による伝熱解析を行い (図 2.1.2-4)、健全性であることを確認した。

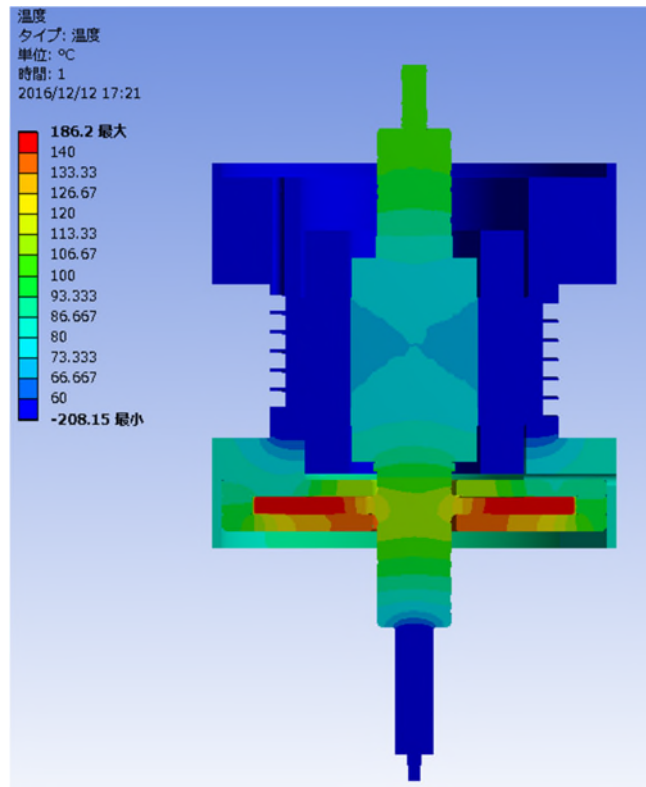


図 2.1.2-4 伝熱解析結果 (温度分布)

(4) ポンプケーシング耐圧設計および断熱設計

ケーシングの耐圧設計は高圧ガス保安法に基づく設計を行った。また、ポンプ常温部から低温部への熱侵入を最小化する目的で、図 2.1.2-5 に示すように真空断熱構造および薄肉断熱構造を採用した。

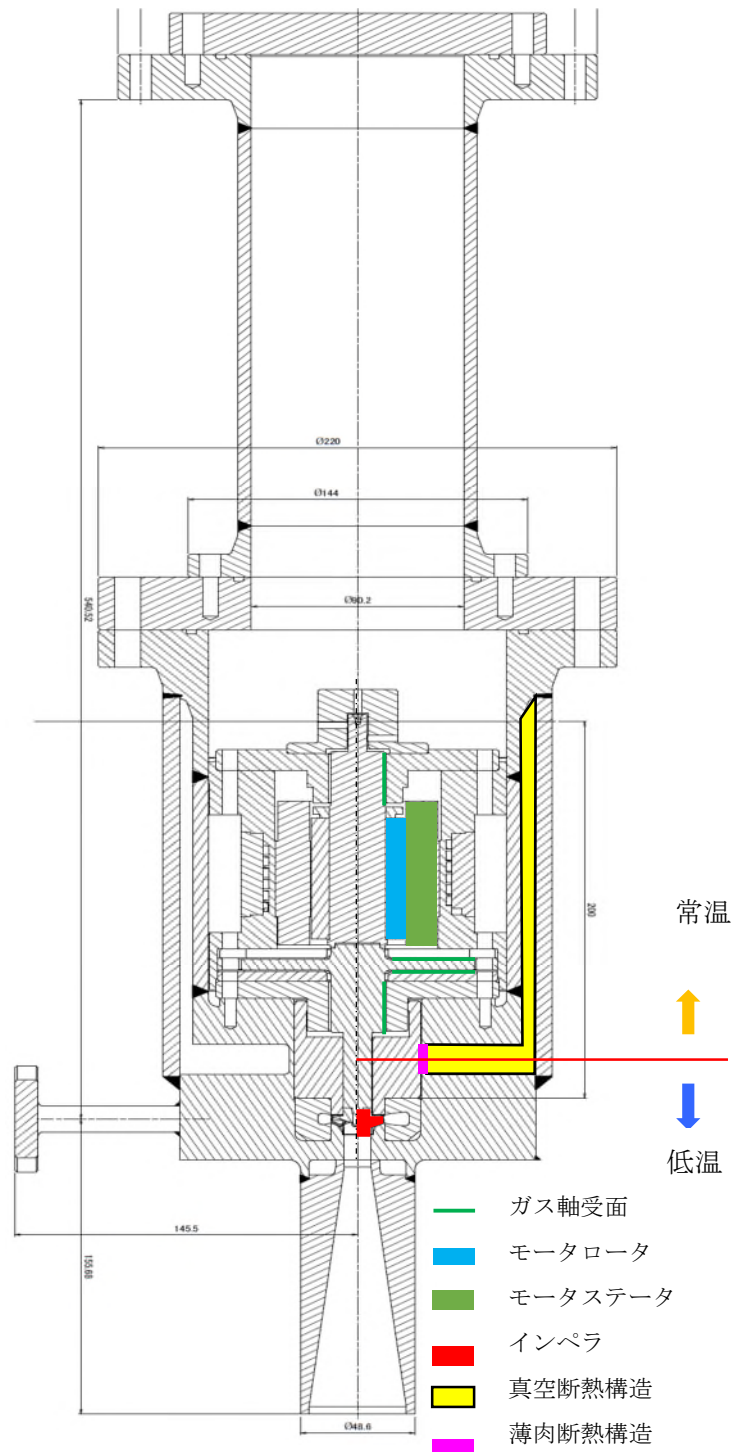


図 2.1.2-5 耐圧ケーシングおよび断熱構造概略

(5) 電動機・インバータ選定

電源はAC200 Vとし設計回転数 48000 rpm に対して 1.1 倍のマーヅンを見込んだ 52800

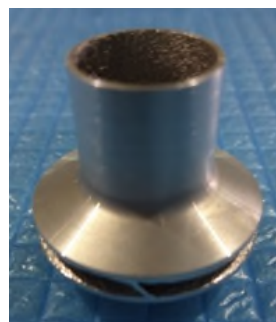
rpm を最大回転数に設定して、機械的、電氣的に作動可能な電動機・インバータを選定した。電動機は小型で安価な定トルク型の誘導電動機とし、誘導電動機のすべりを考慮して最高回転数における励磁周波数を 890 Hz とした。

2.1.2.3 液体窒素循環ポンプの製作・組立

製作したポンプ構成部品を図 2.1.2-6 に示す。インペラについてアルミ合金製インペラを採用した。軸については、回転不釣合いを改善するためバランス修正を行い、釣合良さの等級を G2.0 以下まで追い込んだ。耐圧ケーシングについては、高圧ガス設備試験を受験し、合格した。



(a) 軸



(b) インペラ



(c) 駆動部ケーシング



(d) 操作盤外観

図 2.1.2-6 製作した液体窒素循環ポンプ構成部品

続いて、製作したポンプ構成部品の組立を実施した (図 2.1.2-7)。組立後のガス軸受が健全であることを確認するため、回りだしトルクを計測し、設計値範囲内にあることを確認した。また、ヘリウムリーク試験を実施し、組立後の漏れがないことを確認した。



図 2.1.2-7 液体窒素循環ポンプの外観

2.1.2.4 液体窒素循環ポンプの動作試験

組立の健全性の確認後、ポンプとしての回転安定性を確認するため、常温の窒素雰囲気における回転確認試験を実施した（図 2.1.2-8）。

試験方法としては、インバータによって段階的に回転数を上げ、回転軸の変位量と軸受近傍の温度を計測し、軸変位量が表 2.1.2-3 に示す許容値以下であることを確認しながら、最高回転数まで上昇させた。

表 2.1.2-4 に運転時に計測されたラジアル方向の軸変位を示すが、各回転数でいずれも許容値以下の安定していることが確認される。また図 2.1.2-9 に示すパワースペクトルデータを見ても、回転 1 次成分以外の顕著な応答は確認されず、軸受起因の不安定な振動も発生していないことが確認された。また、軸受温度についても、許容値以内であることが確認された（図 2.1.2-10）。

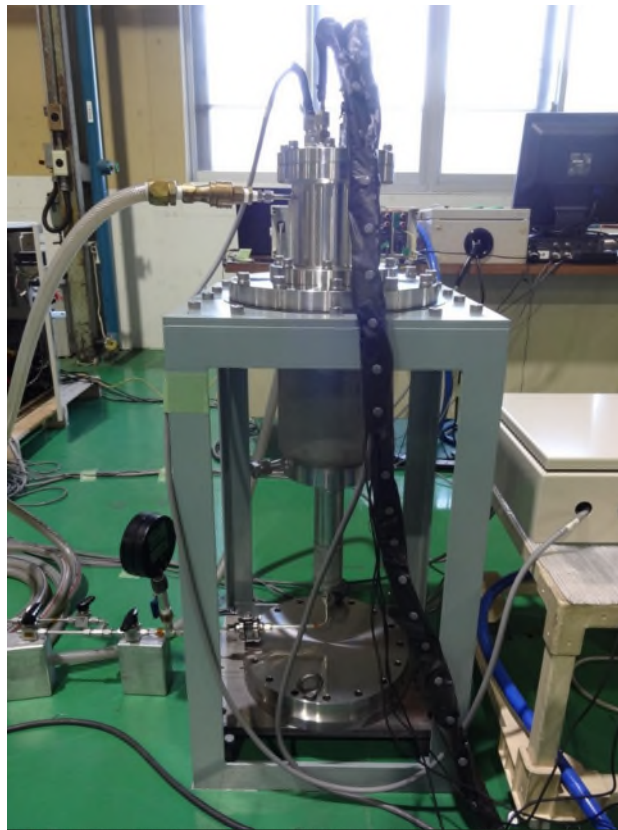


図 2.1.2-8 回転確認試験のセッティング

表 2.1.2-3 運転時の許容値一覧

| | | |
|-------------------------|--------------|---------------|
| ラジアル軸振動 (回転 1 次成分) | ラジアル 軸受温度 | アキシヤル 軸受温度 |
| 10 μm p-p 以下 | 100°C以下 | 300°C以下 |

表 2.1.2-4 回転数とラジアル方向の軸変位量の関係

| 回転数[rpm] | 変位量[μmpp] |
|----------|------------------------|
| 30,000 | 7.4 |
| 36,000 | 9.6 |
| 42,000 | 5.8 |
| 48,000 | 6.2 |
| 52,800 | 6.0 |

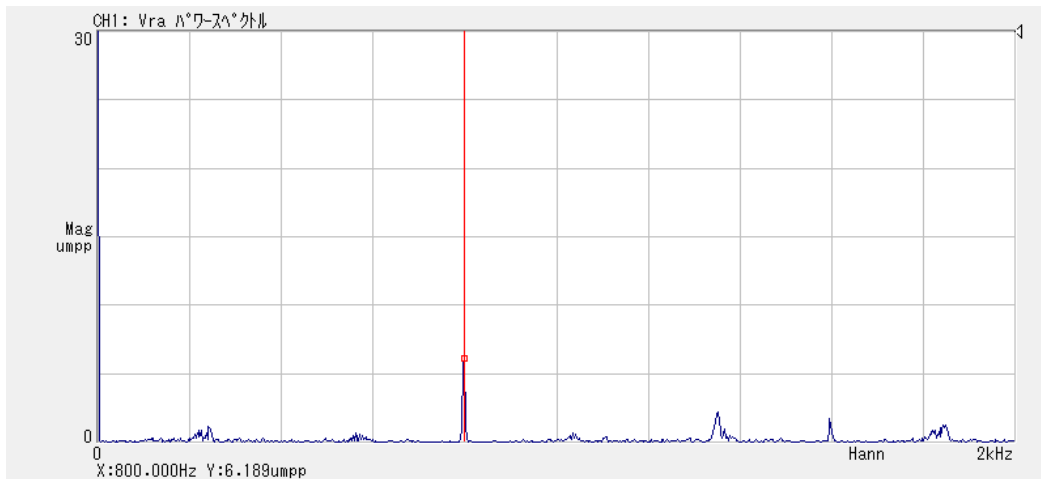


図 2.1.2-9 定格回転数（48,000rpm）におけるラジアル方向振動パワースペクトル

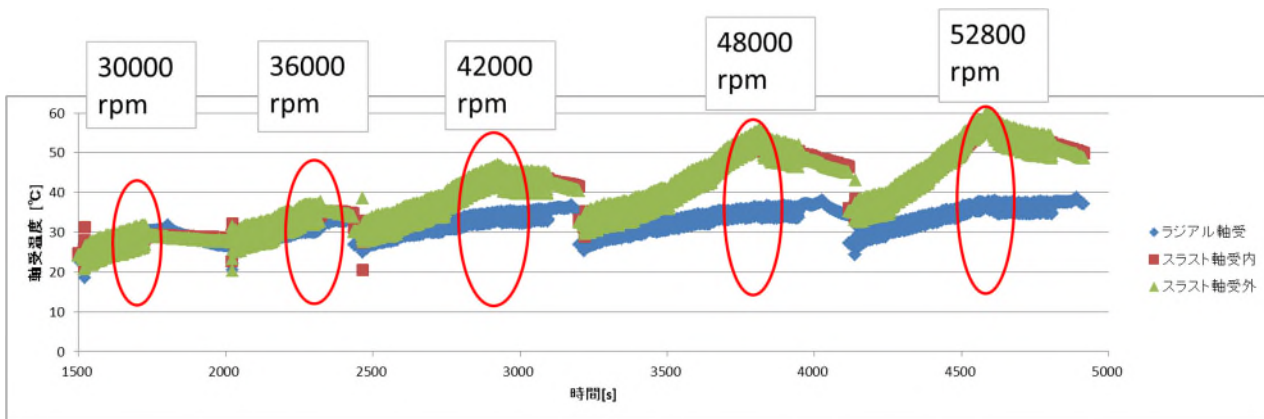


図 2.1.2-10 各回転数における軸受温度推移

2.1.3 「断熱管技術開発」（実施先：公益財団法人鉄道総合技術研究所 —共同実施 三井金属エンジニアリング株式会社）

2.1.3.1 断熱管技術開発

熱侵入 2 W/m 以下を目標に、低熱侵入の断熱管技術の開発を行った。熱の伝わり方には、熱伝達、熱放射、熱伝導の 3 種類がある。熱伝達は、気体や液体といった流体の対流によるものであり、流体速度・温度差・物体表面積が熱移動の要因となる。断熱層内の温度差や物体表面積は制御することが困難であるが、流体速度については真空度をあげることで無視できる。熱放射の観点からは、太陽からの電磁波の振動エネルギーを効率よく反射可能な材料を選定することが重要となる。主な反射材料としては、銀、銅、アルミがあげられるが、加工のしやすさやコストの面からアルミが一般的に用いられる。熱伝導は、固体や流体など物質内部において高温から低温へ熱が移動する現象である。特に、熱放射対策としてアルミを多層に構成する場合は、アルミ間の熱伝導を押さえるため熱伝導度の低い物質を用いて層間の熱絶縁を施すことが重要となる [3-2-2-3-1]。

以上より、ポリエステルフィルムの表面にアルミを真空蒸着させたものと、このフィルム間にスペーサとしてポリエステルのネットや構造がこれに近い紙を挿入して直接

フィルム同士が接触しないようにしたものを組み合わせ、多重層に巻き付ける多重層真空断熱 (multilayer insulation : MLI) を構成することが効果的である。MLI の施工層数については、下記の侵入熱計算によって決められる [3-2-2-3-2]。

$$Q_r = \frac{\varepsilon\sigma(A_h T_h^4 - A_c T_c^4)}{2(n+1)}$$

ここで、 Q_r : 空間を伝わる輻射熱 (W)、 ε : 輻射率、 σ : ステファンボルツマン常数 (5.67×10^{-12} W/cm²K⁴)、 A_h : 高温側の表面積 (cm²)、 A_c : 低温側の表面積 (cm²)、 T_h : 高温側温度 (K)、 T_c : 低温側温度 (K)、 n : 輻射膜枚数である。アルミ蒸着フィルムの場合、輻射率は 0.01~0.02 であるが、施工性を考慮して 0.05 を使用した。鉄道総研で使用している従来の寸法 (外管平均直径 : 11.66 cm、内管平均直径 : 8.225 cm) として計算すると、MLI 層数による輻射熱は図 2.1.3-1 のとおりとなる。

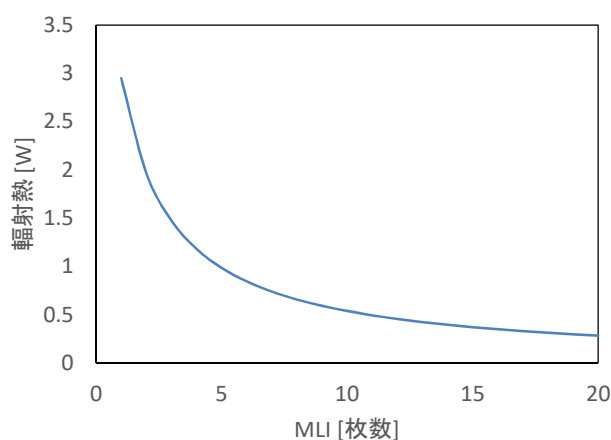


図 2.1.3-1 従来寸法による輻射熱と MLI の関係

目標値である 2W/m を輻射熱でクリアするためには MLI の層数は 2 枚以上で十分となるが、実際には輻射熱以外にも熱伝達、熱伝導の成分が含まれるため、これ以上の枚数が必要となる。

真空断熱層の構造検討のため、断熱管サンプルを複数本試作し、図 2.1.3-2 に示す構成で、液体窒素の蒸発量を測定することで熱侵入量を評価した。ヒータによる事前評価試験で測定誤差が 5% 未満であることを確認している (図 2.1.3-3)。断熱層の構成材料として、輻射熱を抑える SI (SuperInsulation)、Al テープ、熱伝導を抑える PE (ポリエチレンワイヤ) を用いて複数本の断熱管サンプルの評価が行われた (表 2.1.3-1) [3-2.1.3-1]。

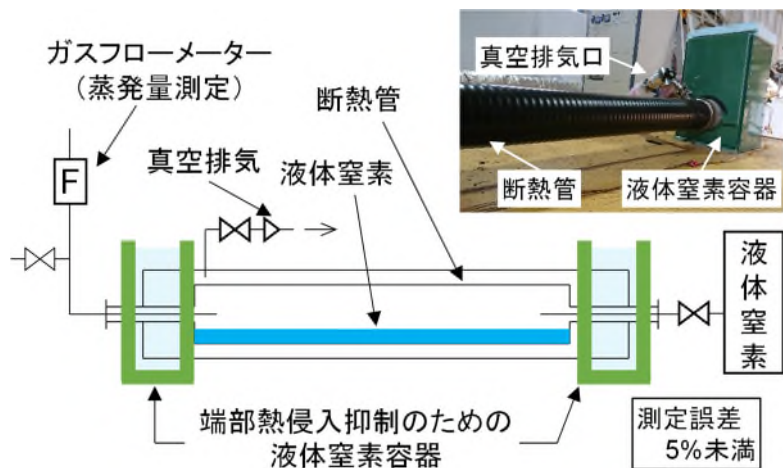


図 2.1.3-2 熱侵入量の評価方法

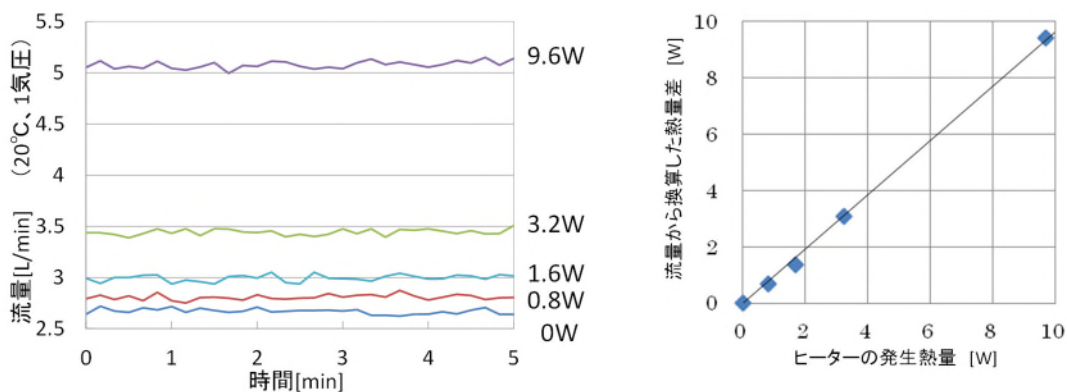


図 2.1.3-3 ヒータによる事前評価試験

表 2.1.3-1 評価したサンプルの構造

| SN | 内管側 | → | → | → | 外管側 |
|----|---------|--------|---------|---------|--------|
| A | SI (10) | Al (1) | | | |
| B | SI (10) | Al (1) | PE (1) | | |
| C | Al (1) | PE (1) | SI (10) | Al (1) | |
| D | PE (1) | Al (1) | PE (1) | SI (10) | Al (1) |
| E | SI (10) | | | | |
| F | Al (1) | PE (2) | SI (10) | Al (1) | |
| G | PE (1) | SI (5) | PE (1) | SI (5) | |

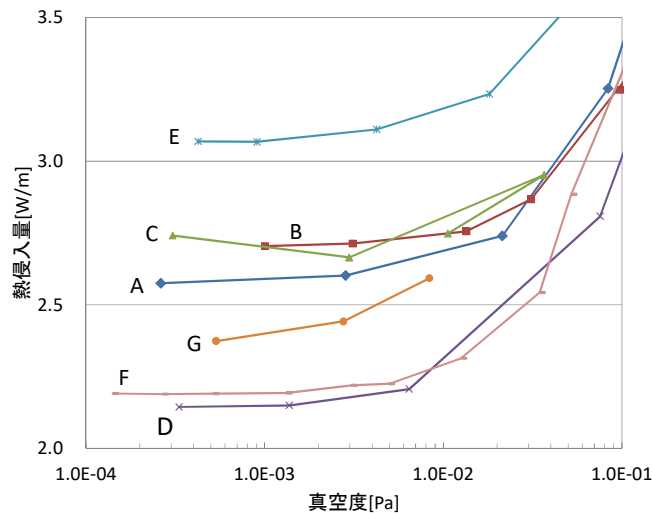


図 2.1.3-4 断熱管サンプルの評価結果

この評価結果（図 2.1.3-4）において、熱侵入量の小さい順は、 $D < F < G$ である。この評価に用いた SI は、アルミフィルムおよび不織布で構成されており両方とも 100mm 幅で重ねたものである。本結果より、内管側に輻射を抑える A1 テープおよび熱伝導を抑える PE を配置することが効果的であることがわかる。

この結果をふまえて、さらに SI 同士の熱伝導を抑えるため、アルミフィルムの幅を 55mm、不織布の幅を 70mm として中心固定し、また、製作工程の効率化のため PE ワイヤを 1 箇所 2 本巻く構造として、再度断熱管を試作し、熱侵入量の評価を実施した。評価の結果、熱侵入量は 1.5W/m となり、目標値である 2W/m を達成した（図 2.1.3-5）。

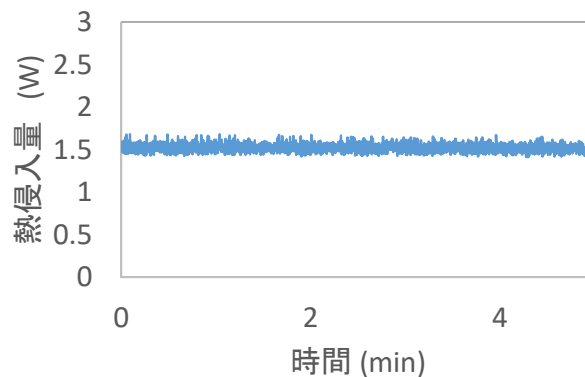


図 2.1.3-5 断熱管サンプルの評価結果

2.1.3.2 洗浄・乾燥機開発

長期の真空維持に向けて、真空維持を妨げる要因をあげて評価を行い、その対策技術の開発を行った。真空維持を妨げる要因として、主に、真空空間の外的要因であるリークや透過、また、内的要因であるアウトガス、内部汚染物などがあげられる（図 2.1.3-6）。現状の真空断熱配管が製造工程の上でどの程度の要因があるかを把握するため、質量分析により定量的な評価を行った（図 2.1.3-7）。測定したサンプルは、洗浄を実施し

ていないものである。質量分析の結果、主に、大気を除外すると、水素、メタン、水、炭化水素が支配的であることが分かった。水素、水の除去は吸着剤やベーキング、炭化水素の除去は製造工程で洗浄することで除去することができる。そのため、吸着剤の選定および洗浄機の開発を行った。

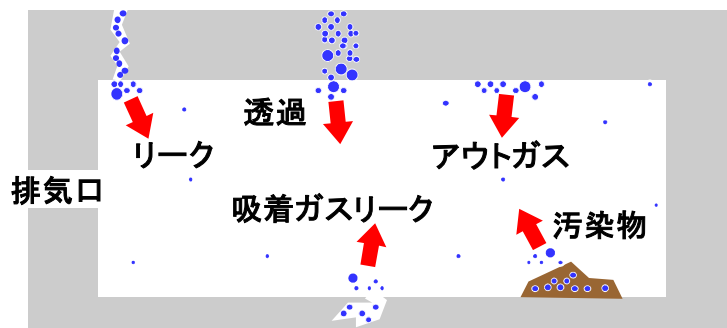


図 2.1.3-6 真空維持を妨げる要因

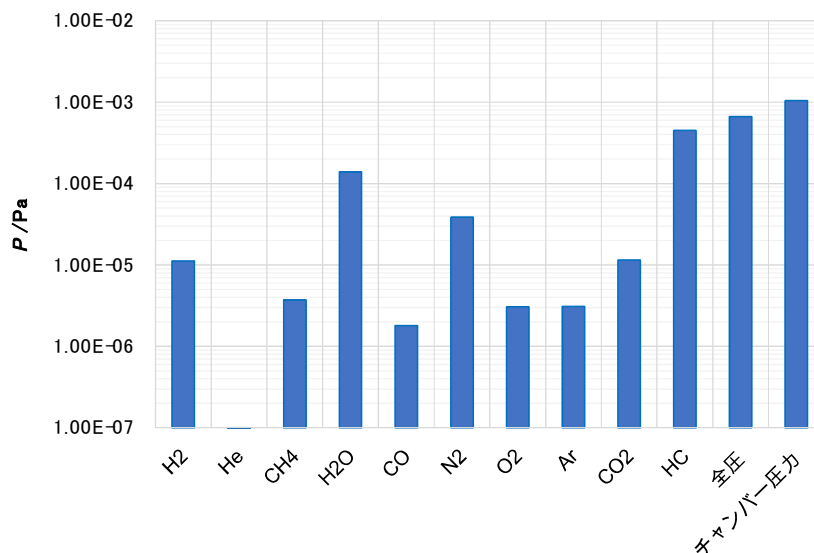


図 2.1.3-7 質量分析計による評価

(a) 吸着剤の選定

吸着とは、固相-気相、固相-液相、固相-固相などの界面で起こりうるもので、物質濃度が周囲よりも増加する現象である。吸着現象には、物理吸着、化学吸着、静電吸着などがあるが、水分の除去にはファンデルワールス力を原理とする物理吸着が有効である。効率的な物理吸着の方法としては、表面積の大きなものを吸着剤として利用する方法が上げられ、細孔の多い物質である多孔質材料を用いるのが一般的である。多孔質材料は一般に表面積が大きいほど吸着速度が速い傾向にあり、コスト面などから取り扱いが容易な材料として、活性炭やゼオライト、酸化カルシウムなどを選定した。

(b) 洗浄機の開発

長尺の製造工程において、真空維持を妨げる要因は、内管をコルゲートする際の潤滑油である。これを除去するために、洗浄行程を導入する。よって、洗浄液の種類および

洗浄時間の検討を実施した。洗浄方法として、炭化水素洗浄と水系（アルカリ洗剤）洗浄の2種類によるシャワー洗浄を検討した。

試験体として、200mm の内管サンプルを準備し、潤滑油を塗布、それぞれの洗浄液で洗浄し、ノルマルヘキサン抽出分析を実施した（図 2. 1. 3-8）。結果を表 2. 1. 3-2 に示す。



図 2. 1. 3-8 試験体（左）と洗浄の様子（右）

表 2. 1. 3-2 洗浄サンプルのノルマルヘキサン抽出分析結果

| パターン | 残留油分 [mg/本] |
|------------|-------------|
| 洗浄前 | 270.0 |
| 炭化水素系 10 秒 | 5.2 |
| 炭化水素系 30 秒 | 3.7 |
| 水系 10 秒 | 5.5 |
| 水系 30 秒 | 3.6 |

分析の結果、洗浄時間が延びるほど残留油分が少なくなり、炭化水素洗浄と水系（アルカリ洗剤）洗浄の洗浄能力には大きな違いが見られなかった。水系（アルカリ洗剤）洗浄の場合、排水処理施設が必要となるため、炭化水素洗浄を採用することとした。以上より洗浄装置は、炭化水素洗浄で、1m あたり 60 秒の洗浄が行えるものとして製作した（図 2. 1. 3-9）。

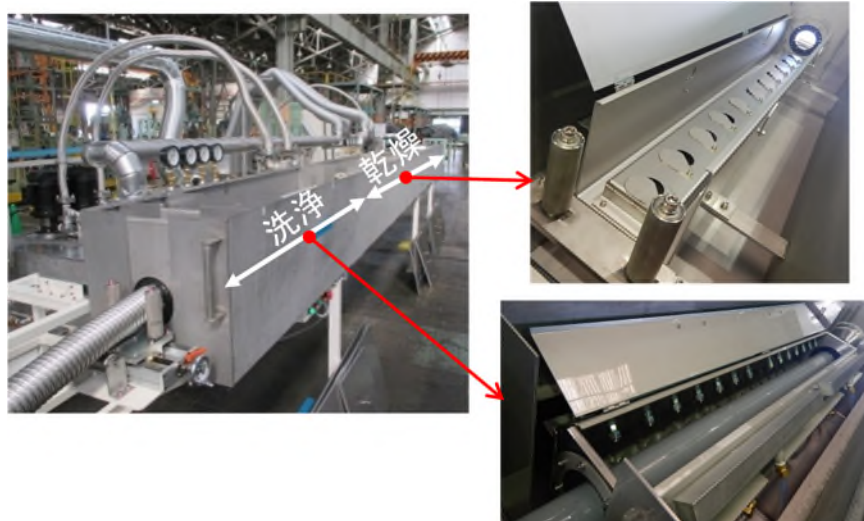
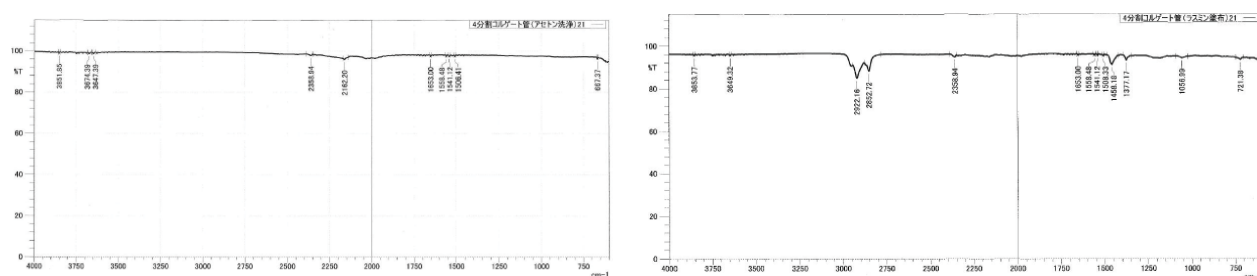


図 2.1.3-9 製作した洗浄装置の外観

製作した洗浄装置の洗浄能力を確認するため、装置を用いて断熱管を洗浄し、赤外分光法（IR）で測定を実施した。試験体は、洗浄ムラを確認するため天地左右に4分割したものと、長尺の内管より切断したものとした。

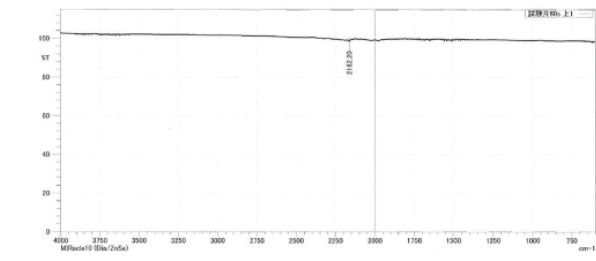
図 2.1.3-10 にバックデータを示す。リファレンスとして、試験片をアセトン洗浄したものと、潤滑油を塗布したものである。潤滑油塗布により現れるスペクトル箇所が今回の洗浄対象となる。図 2.1.3-11 に洗浄時間 60 秒の IR 測定結果を示す。各部共に潤滑油スペクトルは確認できず、洗浄ムラがないことがわかる。また、図 2.1.3-12 に洗浄時間別の IR 測定結果を示す。最も短い 30 秒においても洗浄できていることを確認した。



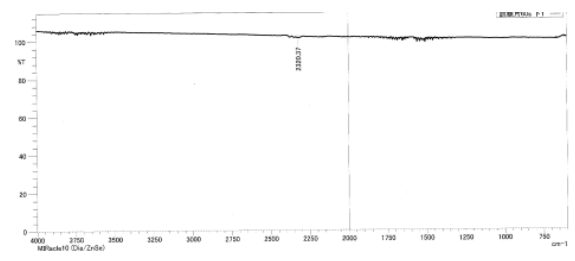
(a) 試験片 1 (アセトン洗浄)

(b) 試験片 1 (潤滑油塗布)

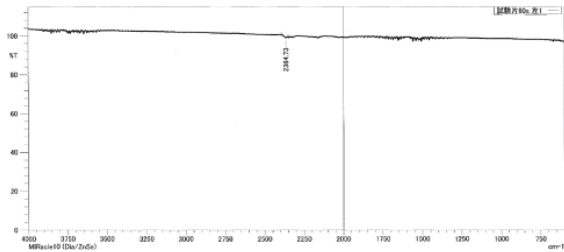
図 2.1.3-10 IR 測定のパックデータ



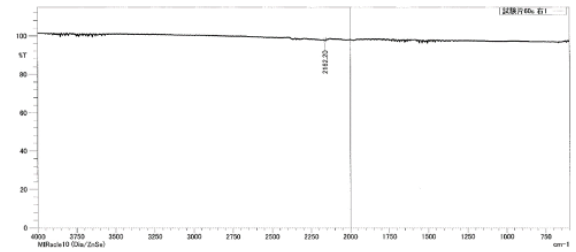
(a) 天



(b) 地

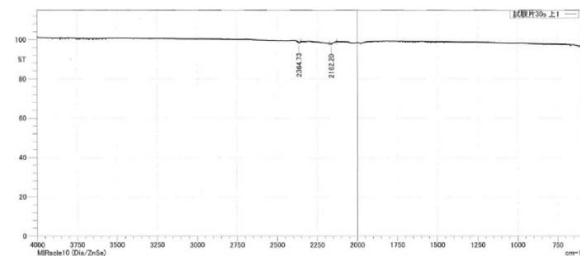


(c) 左

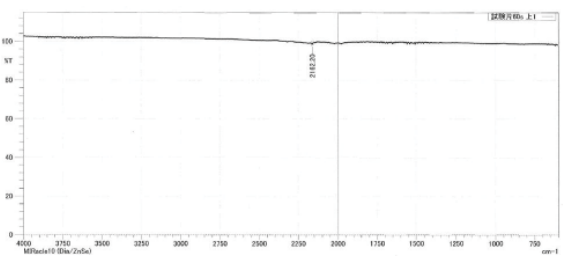


(d) 右

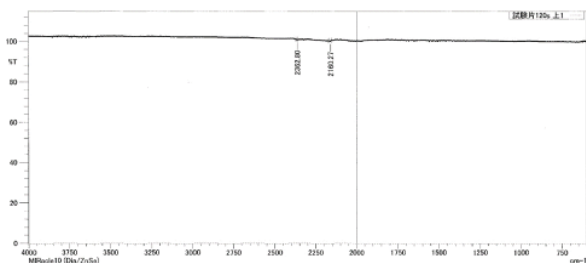
図 2.1.3-11 洗浄時間 60 秒の IR 測定結果



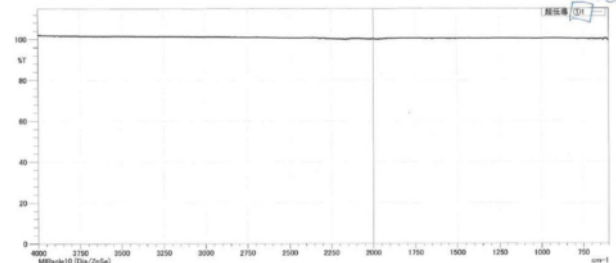
(a) 試験片 1 天 (30 秒)



(b) 試験片 1 天 (60 秒)



(c) 試験片 1 天 (120 秒)



(d) 試験片 2 (60 秒)

図 2.1.3-12 洗浄時間別と試験片 2 の IR 測定結果

2.1.3.3 断熱材巻付け装置開発

低温機器への MLI 巻き付けにおいて、熱伝導を防ぐため可能な限りゆるく巻くことが望ましいが、現在の製造工程におけるテープ巻きは張力をかけて巻くものしかなく、ゆるい巻きが不可能であった。短尺のサンプルは手巻きでゆるく巻いたため、具体的な数値化はされていなかったが、今回巻き付け装置のテンションを測定し、手巻きとの比較を行った。

テンションの測定方法は、コルゲート管と測定機器を 450mm 放した位置に設置し、SI の中心位置 (225mm) に加重を負荷し、SI の張り具合を確認し、テンションを測定した (図 2.1.3-13)。

試験結果を表 2.1.3-3 に示す。手巻きと比較した結果、適正なテンションは 1.5~3.5 N と定め、これを適用し、断熱材巻き付け装置を開発した (図 2.1.3-14)。

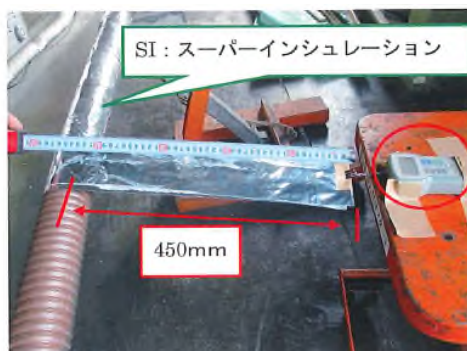


図 2.1.3-13 テンションの測定状況

表 2.1.3-3 テンション測定結果

| [N] | 手巻きとの比較 |
|---------|---------|
| 0.5-1 | 緩い |
| 1.25 | 少し緩い |
| 1.5-3.5 | 適正 |
| 3.75 | 少し強い |
| 4 | 強い |

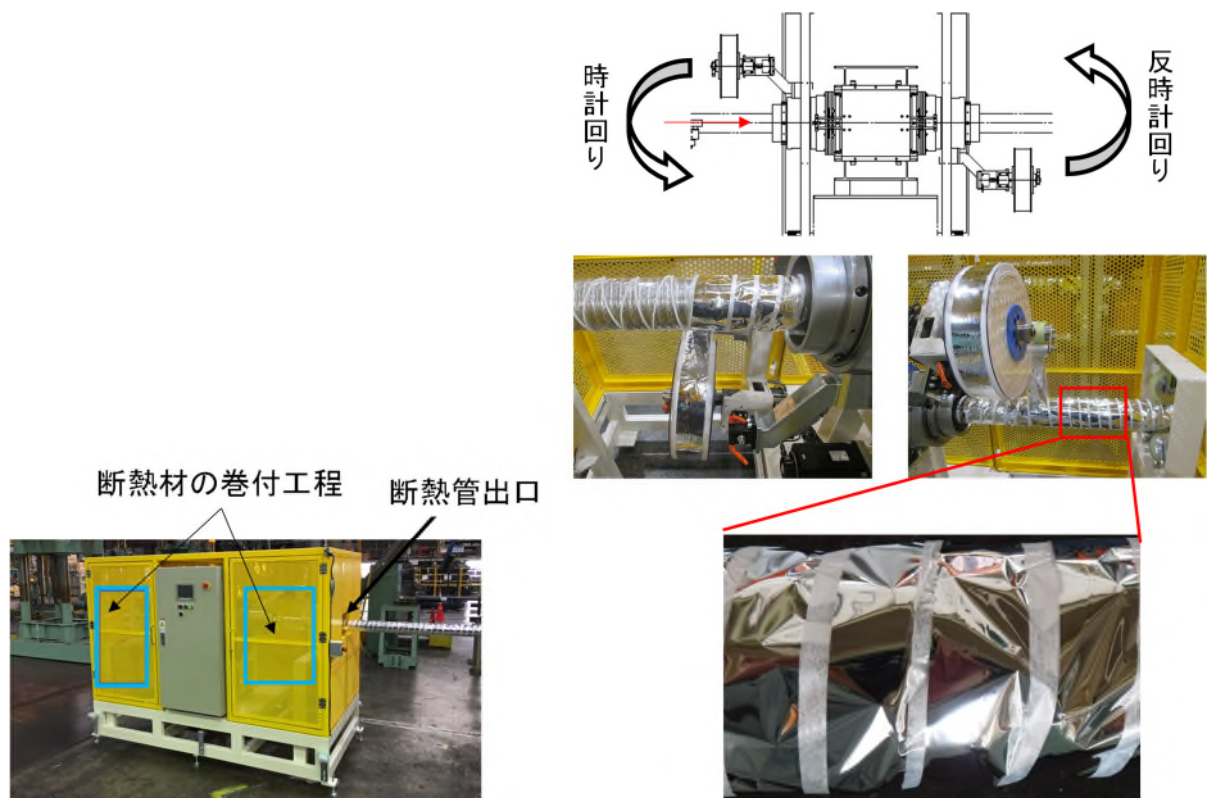


図 2.1.3-14 開発した断熱材巻き付け装置

2.1.4 「実環境を想定した評価実施」

(実施先：公益財団法人鉄道総合技術研究所—共同実施 国立大学法人東京大学)

図 2.1.4-1 に、超電導き電線用電流端末の写真を示す。電流は常温端から電流リードを通して超電導ケーブルへと供給される。電流リードと超電導ケーブルコア部は液体窒素による冷却が行われる。蒸発した窒素ガスは電流リード部の冷却や絶縁ガスとしての役割を担う。超電導き電システムの端末部は、電源から超電導ケーブルに電力を供給する機能の他、室温から極低温への温度勾配によって伝導する熱をできるだけ低減する機能も担う。また、冷却機構や熱応力低減対策等の関係から、電流容量が大きくなるほど超電導ケーブルシステムの端末部は大きくなるが、超電導き電システムの実用化を考えた場合、電流端末の小型化は重要である。



図 2.1.4-1 超電導き電線用電流端末

小型で大電流容量な電流端末の開発のためには、端末導体部である電流リードの熱的な設計だけではなく、ケーブル端部の電界集中緩和のための絶縁設計も重要である。電力機器の絶縁設計では、絶縁物の電気的および機械的性質を考慮して、適切な方法で絶縁を施し、絶縁物の形状を変えることにより過度な電界集中を緩和する。

2.1.4.1 各種電気絶縁方式の調査

超電導ケーブルの電流リードおよび電流端末部において、電界集中を緩和し、コンパクトな設計を行うために、各種電気絶縁方式について調査を行った。

(a) 気体および液体絶縁材料

一般に、平等電界における気体の絶縁破壊強度は、密度と電極間の距離によって決まる。密度と電極間の距離の積と絶縁破壊強度との関係はV字形曲線となり、これをPaschenの法則という。Paschenの法則では、気体の絶縁破壊電圧 V_s [V]は気体圧力 p と電極間距離 d の積 pd を用いて次式のように表される。ここで、 B と C は気体によって決まる係数である。

$$V_s = \frac{Bpd}{\ln(pd)+c} \quad [V] \quad (3-2-2-4-1)$$

多くの超電導応用機器では、熱絶縁に真空が用いられ、それはPaschenの曲線の左側の領域（高真空側）になる。気体の真空度がよくなり電子が衝突する確率が減ると、絶縁耐力が上がる。

超電導応用機器では、液体ヘリウムや液体窒素を冷媒として使用することが多く、高温超電導ケーブルでは主に液体窒素を使用している。液体の密度は気体と比べて高いため、絶縁破壊電圧も高い。そのため、冷媒としてだけではなく、絶縁体としても用いられる。液体窒素の絶縁破壊電圧は、ギャップ長を d [mm]とすると次式のように表せる[3-2-2-4-1]。

$$V_B = 29.0d^{0.8} \quad [kV] \quad (3-2-2-4-2)$$

液体絶縁では、気泡発生による絶縁破壊強度の低下が問題となる。気泡を満たす蒸気

の絶縁破壊強度は液体よりも低く、気泡内部での絶縁破壊が起こりやすいためである。また、気泡の発生頻度は使用温度が液体の沸点に近くなればなるほど上がるため、冷媒の温度は沸点よりもできるだけ低くして、過冷却状態で使用する。沸点までの温度マージンをとることにより気泡の発生が抑制されるため、絶縁破壊強度も上がる。

電流リードの絶縁には、ガス絶縁が用いられる。表 2.1.4-1 に示すように、SF6 ガスは空気の約三倍の絶縁耐力を持ち、非常に優れた気体絶縁材料であるが、地球温暖化への影響が非常に高く、近年では代替材料の研究が盛んに行われている。

表 2.1.4-1 ガス絶縁に用いられている気体とその絶縁耐力（大気圧条件下）

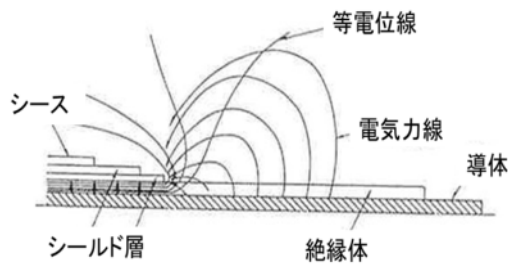
| 気体 | 絶縁耐力 [V/mm] |
|--------|-------------|
| 空気 | 3000 |
| 窒素ガス | 2700 |
| SF6 ガス | 8700 |

(b) 固体絶縁材料

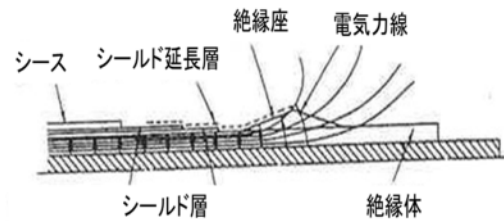
極低温機器には、絶縁材料として高分子材料や絶縁性の高強度構造材料である繊維強化プラスチック（FRP: Fiber Reinforced Plastics）が用いられる。また、これらの絶縁材料は断熱支持体としての用途もある。低温システムの絶縁材料として、エポキシ樹脂およびガラス繊維強化プラスチック（GFRP: Glass-Fiber Reinforced Plastics）が多く用いられている。エポキシ樹脂は、GFRP と比べて熱伝導率が低く、断熱支持材としては優秀である。しかし、線膨張率の絶対値が高いことから、極低温で使用する場合は熱収縮によって劣化が早まる恐れがある。そのため、極低温システム内での絶縁材料として GFRP をよく用いられる。

(c) ストレスコーンによる電界集中緩和

現在、多くのケーブル端部の絶縁処理にストレスコーンが用いられている。ストレスコーンとは端部の電界集中を緩和する働きがある端末処理である。図 2.1.4-2 はケーブルの端末処理におけるストレスコーンの効果を示したものであり、端末処理をしないでシールド層を剥き、そのまま電圧を加えたとき、シールド層端部に等電位線が集中して電界が高くなり、端部に電氣的応力が加わり、端部の絶縁破壊の危険性が高まる。そのため、シールド層を外側に広げ、等電位線の分布を広げることによって端部の電界集中を緩和する端末処理法が考案され、現在広く用いられている。



(a) ストレスコーンなし



(b) ストレスコーンあり

図 2.1.4-2 同軸ケーブル端におけるストレスコーンによる電界緩和の様子[3-2-2-4-3]

2.1.4.2 電流リード電界解析モデルの開発

電流リード部の電界解析を行うために、数値解析モデルとプログラムの開発を行った。電界解析の基礎方程式としてガウスの法則と電流連続の式を用い、三次元有限差分法に基づき定式化した。得られる連立一次方程式の解法には反復法の一つであるSOR法を用いた。プログラムはC言語により記述し、並列計算にも対応させた。一方、市販の有限要素法ベースのソフトウェアも適宜使用した。具体的な解析対象として、1.5 kA級電流リードの接続部を検討した。

(1) 電界解析方法

気体の絶縁耐力は気体圧力に依存するため、圧力も絶縁設計において重要なパラメータとなる。その検討をすることも目的の一つとして、電界解析プログラムの構築を行った。電界解析には3次元有限差分法、連立一次方程式の解法には反復法の一つであるSOR法を用いた。多くの場合、有限差分法は計算格子が直交格子であるため複雑形状における計算誤差が問題となる。そのため、複雑形状部分の格子間隔を小さくして計算精度を上げた。また、当解析プログラムはC言語を用いて作成し、並列計算に対応させた。一方、数値解析には、有限要素法に基づく市販のソフトウェアも適宜使用した。

(a) 基礎方程式

有限差分法は、微分方程式を差分化することによって解を得る数値計算手法であり、電界計算に用いるためには電界に関する微分方程式から導出する。基礎方程式としてガウスの法則を用いる。

$$\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \rho \quad (3-2-2-4-3)$$

ここで、 ε は誘電率[F/m]、 \mathbf{E} は電界[V/m]、 ρ は電荷密度[C/m³]、 ∇ はベクトル微分演算子である。解析では直流電圧を印加したときの電界分布を考えるので、電界も直流電界である。また、電流密度は連続であるとする。その結果、次のような電流連続の式を加えた形で基本方程式を作ることができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (3-2-2-4-4)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E} + \sigma \mathbf{E}) = \rho \quad (3-2-2-4-5)$$

ここで、 j は電流密度[A/m²]、 σ は導電率[S/m]であり、電流密度と電界の関係は局所的オームの法則に基づく。

空間電荷密度 $\rho = 0$ であるため式(3-2-2-4-5)は以下のようになる。

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E} + \sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (3-2-2-4-6)$$

ここで、電氣的スカラーポテンシャルである電圧を Φ とすると、電界は電圧の勾配として表せるため以下のような関係式となる。

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi \quad (3-2-2-4-7)$$

式(3-2-2-4-6)と式(3-2-2-4-7)より方程式は次のようになる。

$$\nabla \cdot \{(\varepsilon + \sigma)\nabla \Phi\} = 0 \quad (3-2-2-4-8)$$

$\varepsilon + \sigma$ を k_e とおくと、解くべき方程式は次のようになる。

$$\nabla \cdot (k_e \nabla \Phi) = 0 \quad (3-2-2-4-9)$$

(b) SOR (Successive Over-Relaxation) 法

差分法により導出された連立一次方程式の解法には、反復法の一つであるSOR法を用いた。式(3-2-2-4-10)のような微分方程式を差分化し、式(3-2-2-4-11)のような連立一次方程式に変換したのち、式(3-2-2-4-12)に示す解の近似値を複数回の計算によって求めた。

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = f(x) \quad (3-2-2-4-10)$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3-2-2-4-11)$$

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{Mx}^n + \mathbf{c} \quad (3-2-2-4-12)$$

A が疎行列である大規模計算では、Gaussの消去法のような直接法よりも反復法が広く用いられる。

(c) 計算の並列化

差分法では格子間隔の大きさによって計算の誤差があり、格子間隔が大きいほど誤差が大きい。そのため、誤差を小さくするためには格子間隔を小さくする必要がある。しかし、計算格子が小さくなると同じスペース分の解析には多くの格子数が必要となるため計算時間が長くなる。そこで、精度が求められる領域の格子を細かくし、計算を並列化することによって計算精度を上げ、且つ計算速度を向上させる。また、計算速度向上には反復法における行列計算の並列化も重要な要素となる。SOR法の漸化式をベクトルと行列を用いて表わせば次式のようなになる。ここで、 D 、 L 、 U はそれぞれ、係数行列 A の対角要素、下三角要素、上三角要素からなる行列である。

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \omega D^{-1}(\mathbf{b} - L\mathbf{u}^{n+1} - (D + U)\mathbf{u}^n) \quad (3-2-2-4-13)$$

式(3-2-2-4-13)より、式の右辺第二項が並列化可能である。

(d) 市販ソフトウェアによる解析

自作の差分法の解析プログラムを使った解析に加えて、有限要素法に基づく市販ソフトウェアである JMAG Designer および COMSOL Multiphysics も適宜併用して解析を行った。

(3) 電界解析結果

1.5 kA 用電流リードの、フレキシブル導体と下部電流リードの接続点における電界強度を、自作の電界計算モデルを用いて解析した結果を示す。図 2.1.4-3 に 1.5 kA 電流リードの断面図の一例を示す。上部電流リードの長さは 705 mm であり、フレキシブル導体の長さは 370 mm である。ボルト穴は直径 14 mm であるため、ボルトに M10 を使用した。電流リードの絶縁には真空絶縁を使用しており、真空層の直径は 267.1 mm で、真空層はステンレス鋼によって覆われている。ボルト先端部分における電界集中が絶縁破壊を及ぼすおそれがあるため、フレキシブル導体と下部電流リード接続部のボルト部の電界強度を調べた。

図 2.1.4-4 に電界解析における計算格子の配置を示す。ボルト部分は複雑形状であり、周囲の電界に誤差が出るので、格子収束性の向上のためにボルト近辺の計算格子をそれ以外の格子間隔と比べて 4 分の 1 として解析を行った。計算領域は x 方向、y 方向、z 方向それぞれ 300 mm とし、ボルト近辺の計算領域は x 方向、y 方向に 80 mm、z 方向に 100 mm とした。直流き電鉄道用の超電導ケーブルに使用するため、電気設備技術基準解釈第 15 条に基づき、電流リード部分にき電線の電圧の三倍である 4500 V を印加した状況を模擬して解析を行い、Micro AVS により結果の可視化を行った。

図 2.1.4-5 に電界計算結果の断面図を示す。ボルト先端部の電界強度は約 220 V/mm となり、フレキシブル導体表面及び下部電流リード表面の最大電界強度は約 160 V/mm となった。

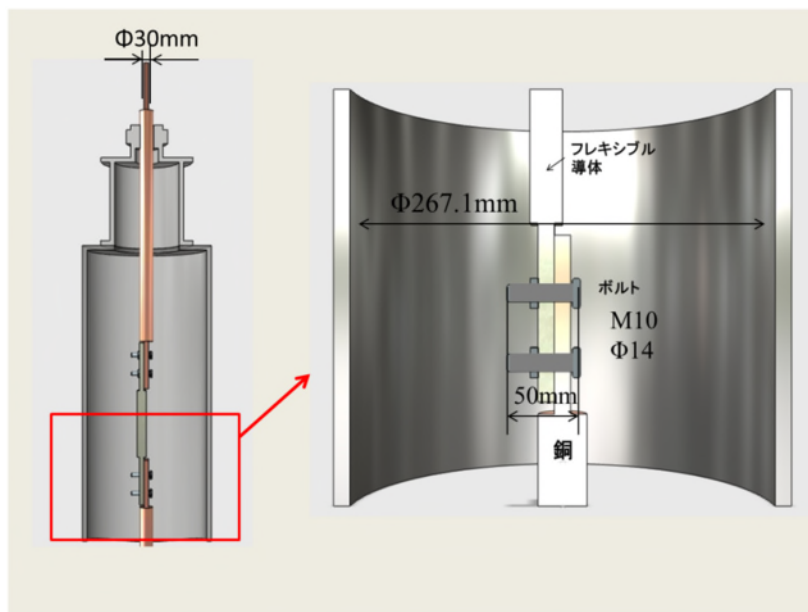


図 2.1.4-3 1.5 kA 電流リードの電界解析モデル

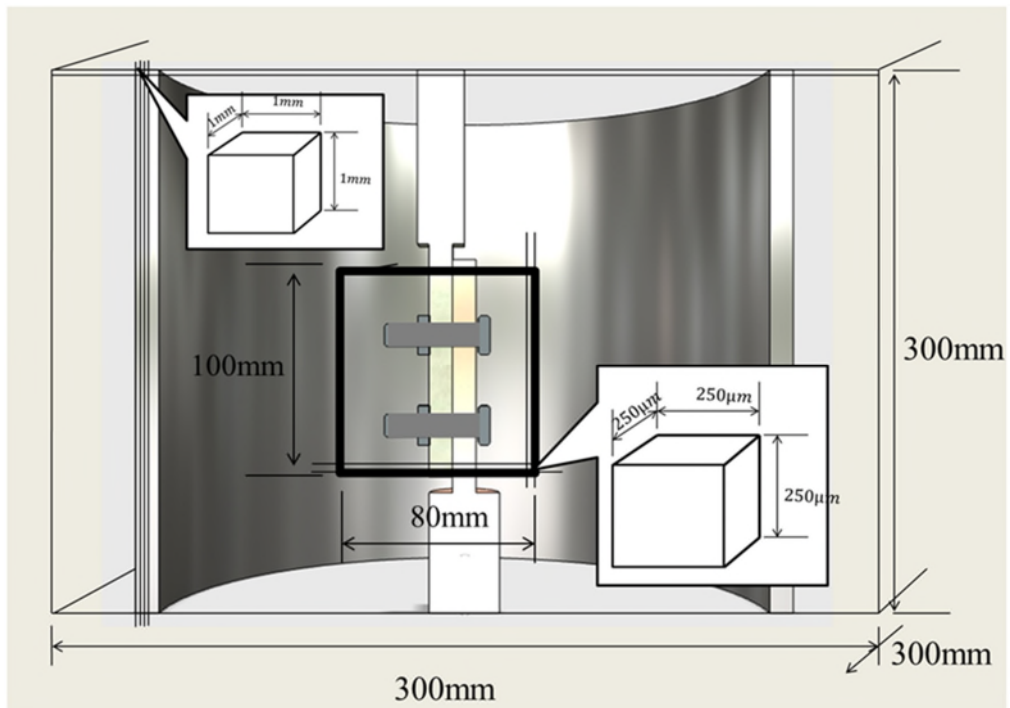


図 2.1.4-4 電界解析モデルにおける計算格子の配置図

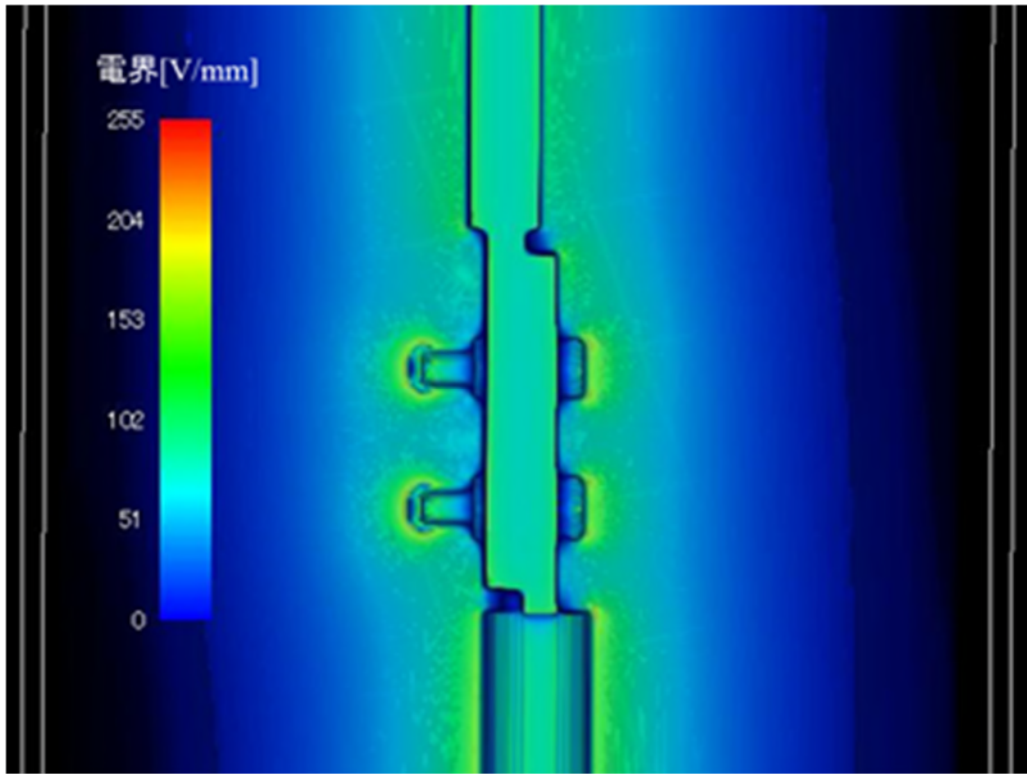


図 2.1.4-5 1.5 kA 用電流リードのフレキシブル導体—電流リード接続部の電界分布

2.1.4.3 電気絶縁特性解析に基づくコンパクトな電流リードの設計

直流電気鉄道用超電導ケーブルのための小型端末の絶縁設計の指標を決めるとともに、電流リード部および端末の液体窒素容器内部の絶縁設計を、有限要素法による電界解析に基づいて行った。解析には、電磁界解析ソフトウェア JMAG Designer を用いた。

(1) 超電導き電線用電流端末のための絶縁設計指標

表 2.1.4-2 に直流き電回路の絶縁協調指標を示す。現在の超電導き電ケーブルは、変電設備として扱われるため、20 kV 以上の雷インパルス耐電圧が求められる。

表 2.1.4-2 直流き電回路の絶縁協調[3-2-2-4-6]

| | | 変電所 | 電車線路 | 車両 | |
|---------------|--------------|----------------------|----------------|---------------|---------|
| 雷インパルス耐電圧 [V] | | 20000 | 50000 | 20000 | |
| 避雷器 の性能 | 定格電圧 [V] | 2100 | 2100 | 2100 | |
| | 動作開始電圧 [V] | 2600 | | 2100 | |
| | 直流放電開始電圧 [V] | | 9000 以上 | | |
| | 制限電圧 [V] | 2 kA | 4500 以下 | | 4500 以下 |
| | | 3 kA | | 25000 以下 | |
| | | 5 kA | 5000 以下 | 28000 以下 | 5000 以下 |
| 設置場所 | | 変電所き電線 引き出し | 線路 500 m 間隔 | パンタグラフ 二次側 | |
| がいしの雷インパルス耐電圧 | | 懸垂 180mm 1 個 100 kV | | | |
| | | 懸垂 180mm 2 個連 160 kV | | | |
| | | 長幹 DC 形 180 kV | | | |

絶縁設計には、雷インパルス耐電圧だけではなく、日常的に発生する過電圧や長期的な電圧負荷への耐久性も求められる。電気鉄道のき電回路における耐電圧試験方法は鉄道事業者毎により定められているが、1500V き電における耐電圧試験電圧は概ね 5.5 kV である。耐電圧試験では、5.5 kV を 10 分間線路に印加し、長期的な耐久性を確かめる。超電導き電線用電流端末の絶縁設計に必要な電圧を表 2.1.4-3 に示す。これらの試験電圧を基に、構成材料の耐電圧を超えず、かつ安全な小型端末の設計を目指す。

表 2.1.4-4 に端末の構成材料の商用周波数における耐電圧および雷インパルス耐電圧

を示す。端末の電流リード部における気体絶縁材料は、漏れによる環境影響がなく、融点が高いため 0℃以下で運用する電流リード中間部の絶縁材料として良好な窒素ガスを用いる。窒素ガスの雷インパルス耐電圧は、以下のような式で求めることができる[3-2-2-4-7]。

$$V_{\text{Limp}} = 17.4p^{0.54} \text{ [kV]} \quad (3-2-2-4-14)$$

ここで、 p はガス圧力 [MPa] である。設計した端末では、中間接続部のボルト先端における電界集中が懸念されるため、封入ガスの圧力を 1 MPa まで昇圧して絶縁を保つものとする。

表 2.1.4-3 鉄道用超電導ケーブルのための試験電圧

| | 試験電圧 [kV] |
|------------|-----------|
| 公称電圧 | 1.5 |
| 最高電圧 | 1.8 |
| 絶縁耐力試験電圧 | 5.5 |
| 雷インパルス試験電圧 | 20 |

表 2.1.4-4 絶縁材料の商用周波数絶縁破壊電界と雷インパルス絶縁破壊電圧 [3-2-2-4-8]

| | 商用周波数絶縁破壊電界 [kV/mm] | 雷インパルス絶縁破壊電界 [kV/mm] |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| 窒素ガス (大気圧) | 2.7 | 5.2 |
| 窒素ガス (1MPa) | 2.7 | 31.5 |
| 液体窒素 | 25 | 30 |
| GFRP | 20 | 30 |
| エポキシ樹脂 | 35 | 40 |
| PPL 紙 (LN ₂ 含浸時) | 40 | 140-160 |

(2) 液体窒素容器内の絶縁設計

超電導ケーブル端末では、ケーブルを冷却するための冷媒である液体窒素の容器部が最も大きく、端末の容積の増大を招く。よって端末部液体窒素容器内の絶縁設計の検討を、電界解析を用いて行った。図 2.1.4-6、2.1.4-7 に、今回設計検討した超電導ケーブル

ルのモデル、および端末部液体窒素容器の解析モデルを示す。ケーブル端部の電界集中の緩和は GFRP で構成されたストレスコーンにより行い、ケーブル引き込み口の表面電界の緩和には GFRP で構成された構造材を用いて行った。表 2. 1. 4-5 に絶縁材料の比誘電率を示す。解析における印加電圧は、雷インパルス電圧 20 kV を、P 相側に印加した場合と N 相側に印加した場合それぞれのケースを想定して行った。

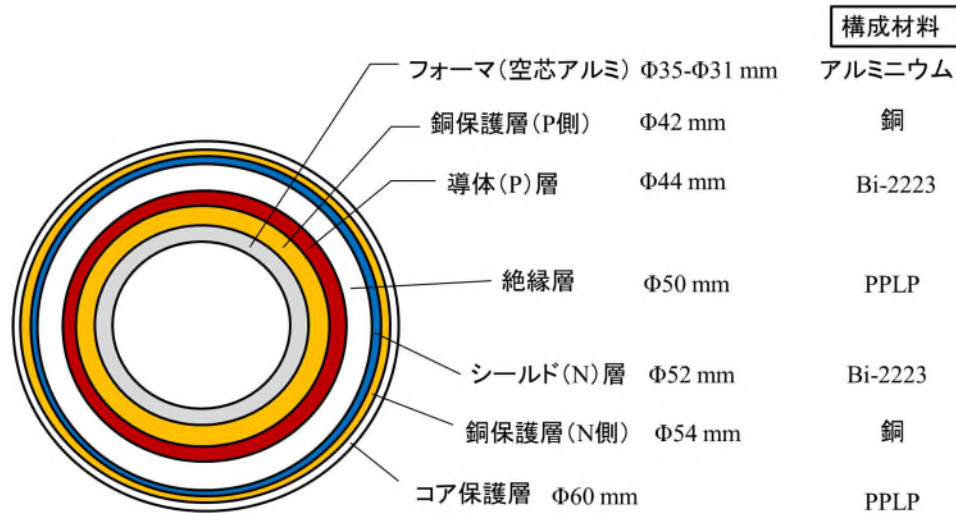
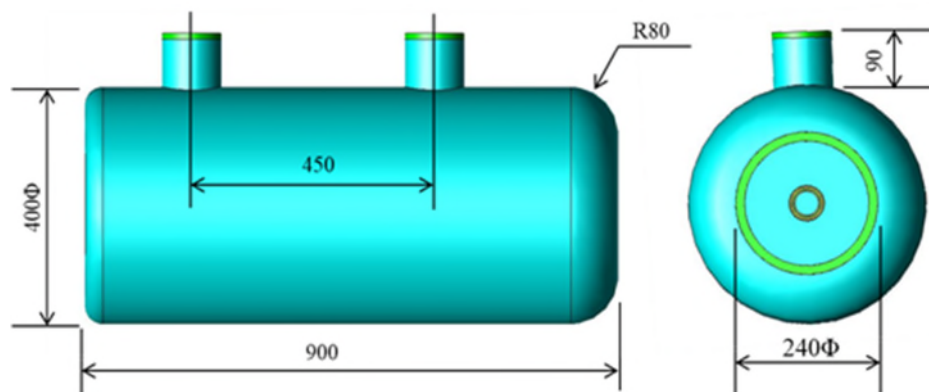
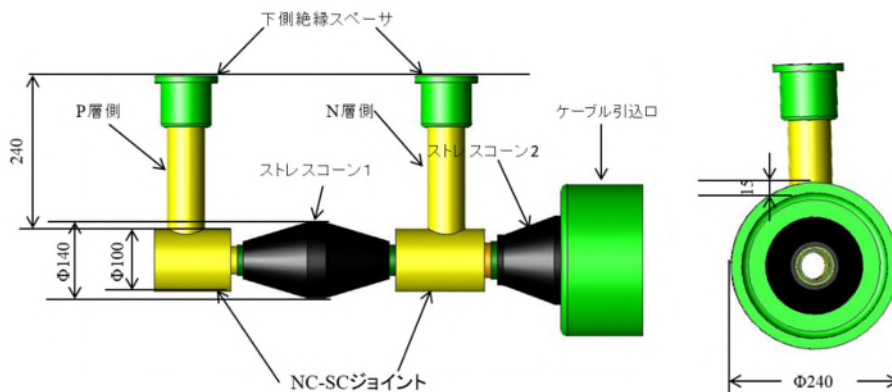


図 2. 1. 4-6 10 kA 級超電導ケーブルの解析モデル



(a) 液体窒素容器



(b) ケーブル端ジョイント部

図 2. 1. 4-7 液体窒素容器内の解析モデル

表 2.1.4-5 液体窒素容器内の絶縁材料の比誘電率

| 材料 | 比誘電率 |
|-------|------|
| 液体窒素 | 1.41 |
| PPL 紙 | 2.1 |
| GFRP | 4.0 |

P 相に雷インパルス試験電圧を課電した時の端末容器内の電位分布および電界分布を図 2.1.4-8 に示す。また、N 相に雷インパルス試験電圧を課電した時の電位分布および電界分布を図 2.1.4-9 に示す。P 相課電時の電位は、N 相側が接地されるためケーブル引き込み口への等電位線の侵入がみられない。電界分布については、ケーブル内絶縁層部における電界が大きく、最大電界は 6.71 kV/mm となった。液体窒素部の最大電界は 5.67 kV/mm であり、雷インパルス絶縁破壊電界は 35 kV/mm であるので絶縁は保たれるが、液体窒素容器内部では気泡が発生しやすく、気泡発生時における絶縁耐力の低下も考慮に入れなければいけない。また、表 2.1.4-6 に P 相課電時および N 相課電時の各部位における最大電界と絶縁破壊電界を示す。ストレスコーンによってケーブル表面の最大電界が緩和されている。また、ストレスコーンにかかる電界ストレスも絶縁破壊電界を大きく下回るものであるので、ストレスコーンによる端部の電界緩和の効果があるといえる。

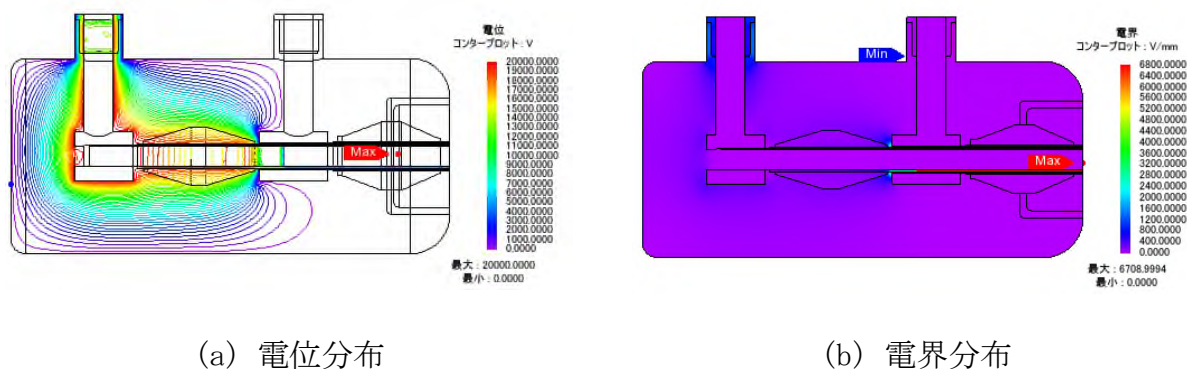


図 2.1.4-8 P 相側に 20 kV を印加した時の端末容器内電位分布および電界分布

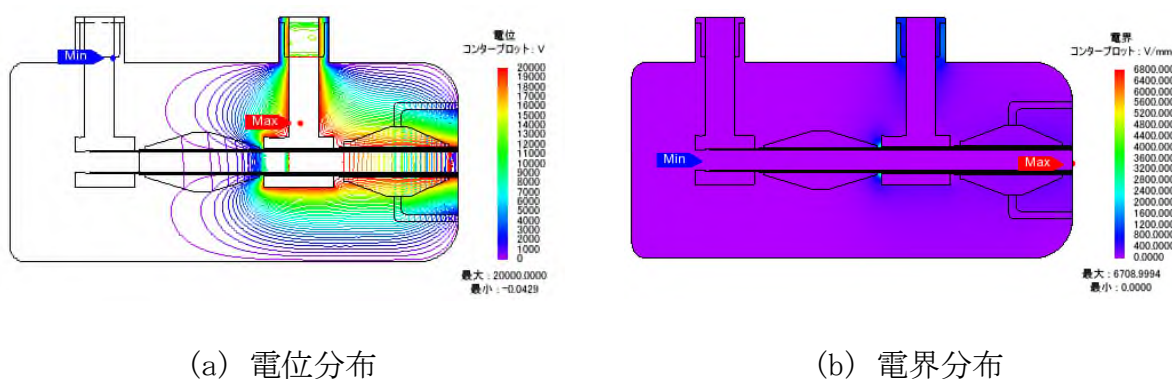


図 2.1.4-9 N 相側に 20 kV を印加した時の端末容器内電位分布および電界分布

表 2.1.4-6 P相課電時およびN相課電時の各部位における最大電界と絶縁破壊電界

| 部位 | P相課電時 [kV/mm] | N相課電時 [kV/mm] | 絶縁破壊電界 [kV/mm] |
|----------|------------------|------------------|-------------------|
| 液体窒素 | 5.67 | 5.67 | 30 |
| ストレスコーン1 | 0.74 | 0.71 | 35 |
| ストレスコーン2 | 0.81 | 0.19 | 35 |
| ケーブル内絶縁層 | 6.71 | 6.71 | 140-160 |

2.1.5 「システム保全技術開発1」

(実施先:公益財団法人鉄道総合技術研究所—共同実施 国立大学法人九州大学)

超電導ケーブルシステムの状態監視技術の開発については、超電導ケーブルシステム保全技術として重要となる、超電導き電ケーブルの劣化診断のための非接触な電流分布計測技術の開発、ならびに断熱管路内の導体位置をモニタする手法を開発することを目指した。断熱管路の外側に設置した磁気センサを用いて、ケーブル導体内の電流の不均一性を検知すると共に、冷却時の熱収縮による管路内のケーブルの挙動を把握するため、導体位置の計測手法を確立しようとするものである。超電導き電ケーブルは液体窒素冷却により約0.3%の熱収縮が生じるため、ケーブルコアの管路内の挙動の把握が重要となる。現状では、X線透過検査によるモニタ手法しかなく、適用範囲が限られており、実際のケーブルで必要となる地中ケーブルを含む複雑な敷設状況に適用可能で簡便な手法の確立が極めて重要である。本テーマに関するこれまでの成果は次の通りである。

2.1.5.1 基本原理の提案と定量的な検討

A) 図2.1.5-1に検出したい状況の模式図を示す。超電導線材からなる通電層が断熱管内の中央に位置している理想的な状態に対して、素線が断線することによる一部損傷状態や、断熱特性に影響を与える位置ずれ状態の様子を示している。

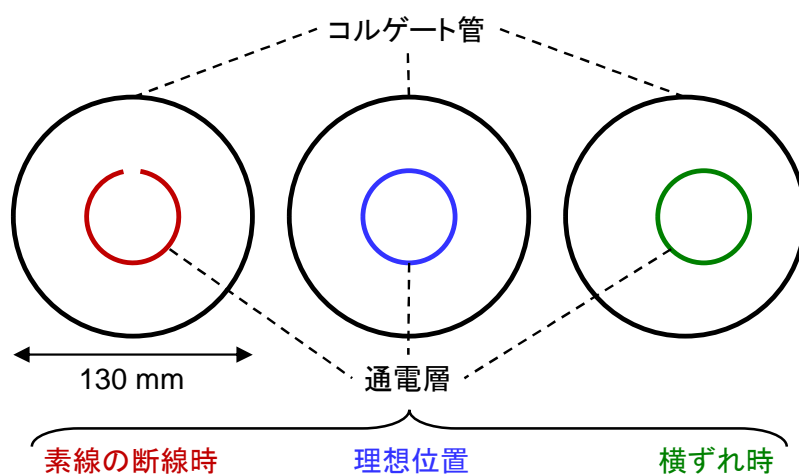


図 2.1.5-1 超電導き電ケーブルにおいて検出したい通電層の状態を表した模式図

これらの状態を断熱管の外から検出することを目的とし、断熱管表面の磁界の周方向成分 (B_θ) を計測することを考えた。それぞれの状態に対して予測される磁界分布を次式によって表されるアンペールの法則より求めた。

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \int \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'(\theta'))}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'(\theta')|^2} R d\theta' \quad (3-2-2-5-1)$$

ただし、 J は通電層に流れている電流、 \mathbf{r} は磁界を求める位置、 $\mathbf{r}'(\theta')$ は通電層の位置、 θ' は通電層の中心から見たその位置の角度である。(3-2-2-5-1)式より求まる B の断熱管表面の周方向の成分 B_θ は、 $\mathbf{B} = (B_x, B_y, 0)$ とすると、

$$B_\theta(\theta) = B_x(\theta) \cdot (-\sin \theta) + B_y(\theta) \cdot (\cos \theta) \quad (3-2-2-5-2)$$

ただし、 θ は断熱管の中心からの断熱管表面の傾きである。(3-2-2-5-2)式より、断熱管の直径を 130 mm、導体の印加電流を 1000 A とする場合の断熱管表面での磁界分布を図 2.1.5-2 に示す。例えば素線 36 本のうちの 1 本だけが断線した場合、あるいは通電層の位置が 1 mm ずれただけでも、断熱管の外側から状況に応じて異なる磁界分布を得られることが分かる。

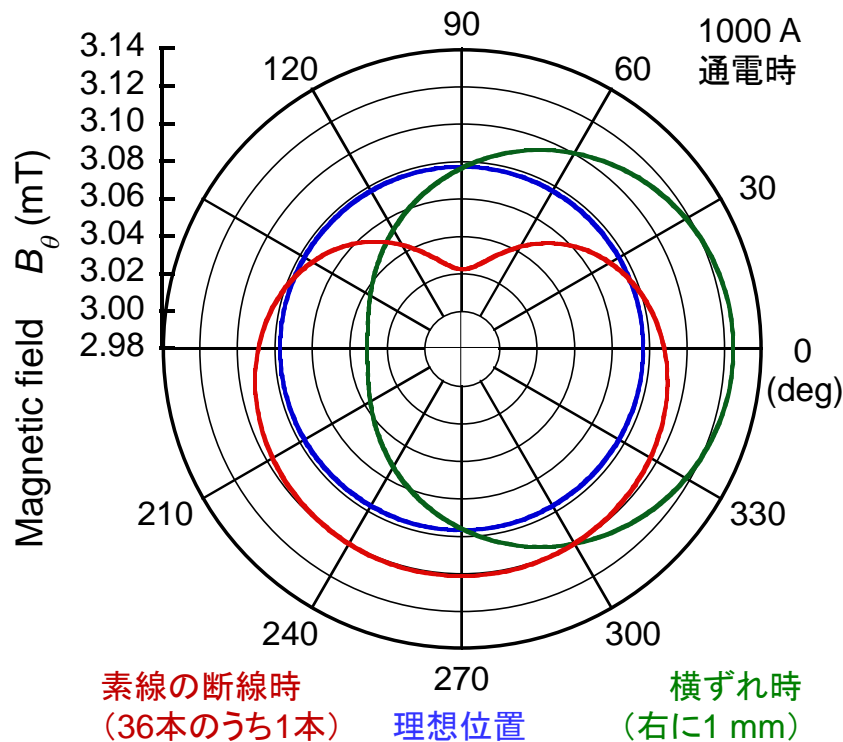


図 2.1.5-2. 断熱管表面に発生する周方向磁界分布の解析結果

次に、磁界分布を用いた導体位置の推定法について述べる。

図 2.1.5-3 のように、断熱管の中心を原点として測定位置を $X(x, y)$ 、導体の位置を $X'(x', y')$ と表す。導体に電流 I が流れているとき X における磁界 B は(3-2-2-5-2)式より、

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \quad (3-2-2-5-3)$$

となる。 B の断熱管に接する成分 B' は

$$B' = B \cos \delta \quad (3-2-2-5-4)$$

となる。このとき、 $\cos \delta$ は余弦定理より

$$\begin{aligned} \cos \delta &= \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} + \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{x'^2 + y'^2}}{2\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}\sqrt{x^2 + y^2}} \\ &= \frac{x^2 + y^2 - xx' - yy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}\sqrt{x^2 + y^2}} \end{aligned} \quad (3-2-2-5-5)$$

となる。よって、(3-2-2-5-4)式に(3-2-2-5-3)式と(3-2-2-5-5)式を代入すると

$$\begin{aligned} B' &= \frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \frac{x^2 + y^2 - xx' - yy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}\sqrt{x^2 + y^2}} \\ &= \frac{\mu_0 I (x^2 + y^2 - xx' - yy')}{2\pi\{(x-x')^2 + (y-y')^2\}\sqrt{x^2 + y^2}} \end{aligned} \quad (3-2-2-5-6)$$

を得る。

次に $X(R, \theta)$ 、 $X'(r, \theta')$ と極座標で表す。このとき x 、 y 、 x' 、 y' との対応は

$$x = R \cos \theta \quad (3-2-2-5-7)$$

$$y = R \sin \theta \quad (3-2-2-5-8)$$

$$x' = r \cos \theta' \quad (3-2-2-5-9)$$

$$y' = r \sin \theta' \quad (3-2-2-5-10)$$

となる。(3-2-2-5-7)～(3-2-2-5-10)式を(3-2-2-5-6)式に代入すると

$$B' = \frac{\mu_0 I (R^2 - Rr(\cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta'))}{2\pi r \{R^2 + r^2 - 2Rr(\cos \theta \cos \theta' - \sin \theta \sin \theta')\}}$$

$$= \frac{\mu_0 I \{R - r \cos(\theta - \theta')\}}{2\pi (R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\theta - \theta'))} \quad (3-2-2-5-11)$$

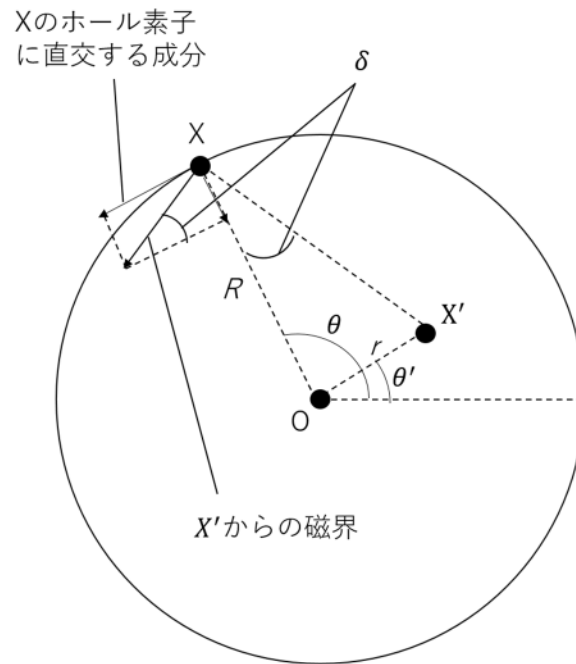


図 2. 1. 5-3 断熱管内の導体の位置と測定位置の関係

(1) 磁気センサの実装技術ならびに計測システムの開発

前項の検討結果をもとに、まず、磁気センサの実装技術の開発を行った。多数個のホール素子を断熱管路に実装するため、図 2. 1. 5-4 に示すような治具を設計した。ホール素子に磁界が直交するように図 2. 1. 5-5 青い面にホール素子を配置する。この枠を図 2. 1. 5-6 のように断熱管を挟み、断熱管表面は凹凸があるためネジ止めによる直径の変化によって調整できる。

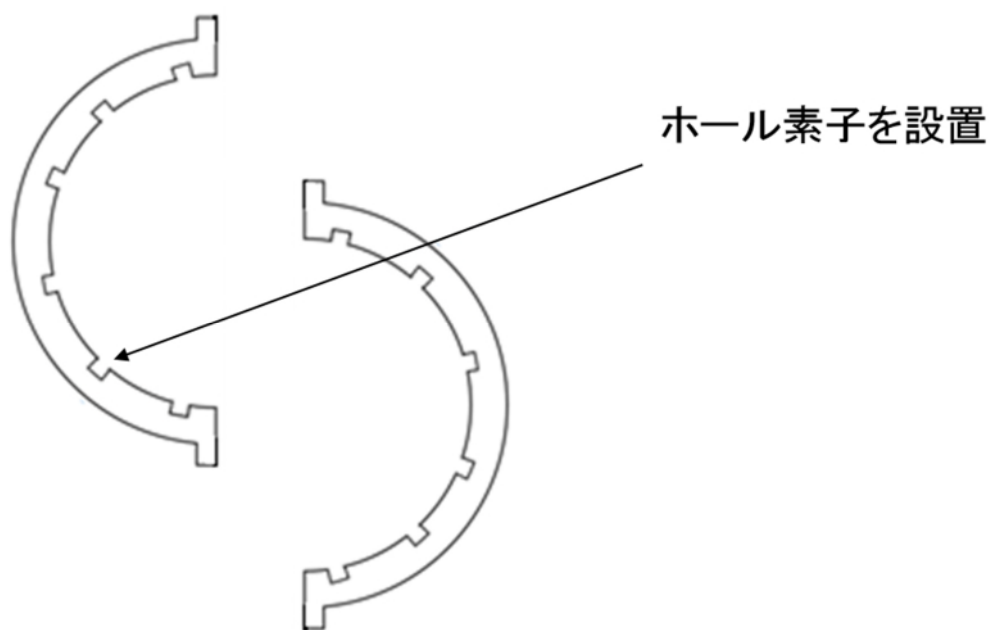


図 2.1.5-4 装置の一部（ホール素子の設置部）

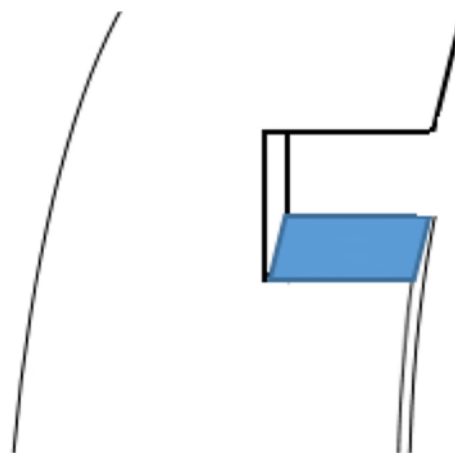


図 2.1.5-5 切れ込みの拡大図

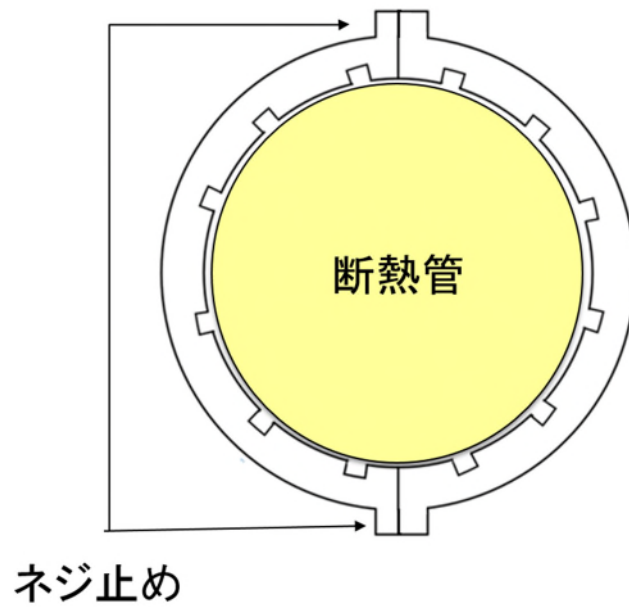


図 2.1.5-6 装置の使用図

ホール素子は基板にはんだ付けして使用する。その場合ホール素子が破損した場合に簡単に取り替えることができるよう、各ホール素子間の配線をピンとピンソケットで接続することを考案した。

ホール素子を設置して完成したホール素子実装用治具が図 2.1.5-7 である。

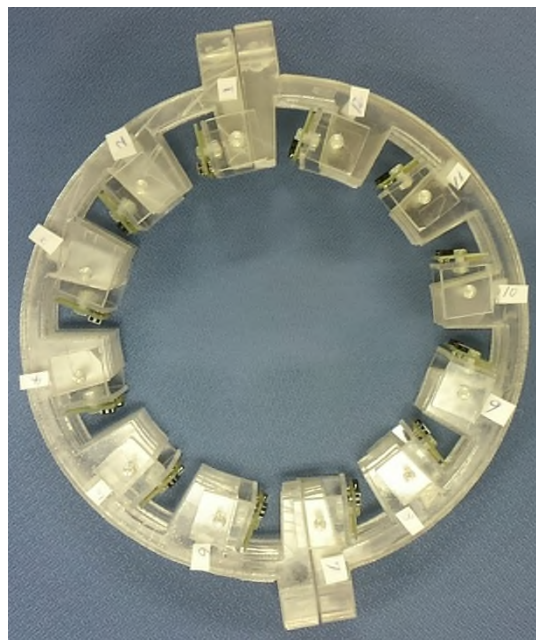
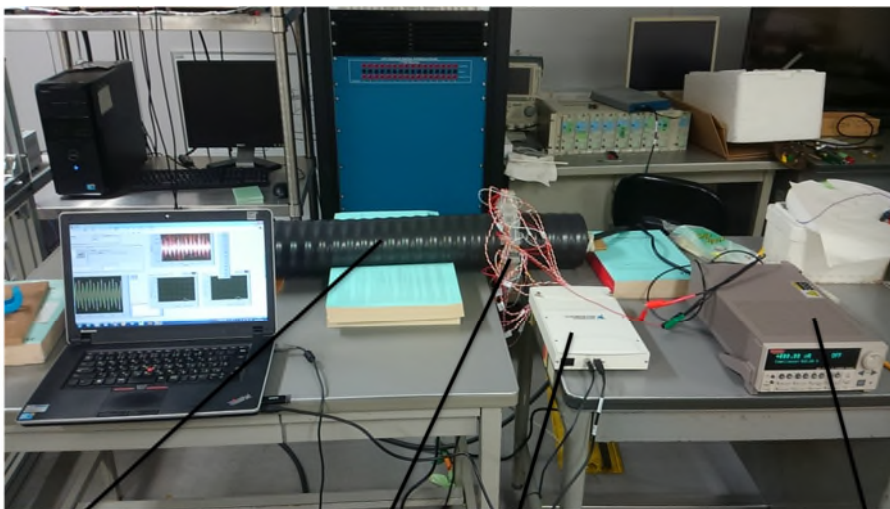
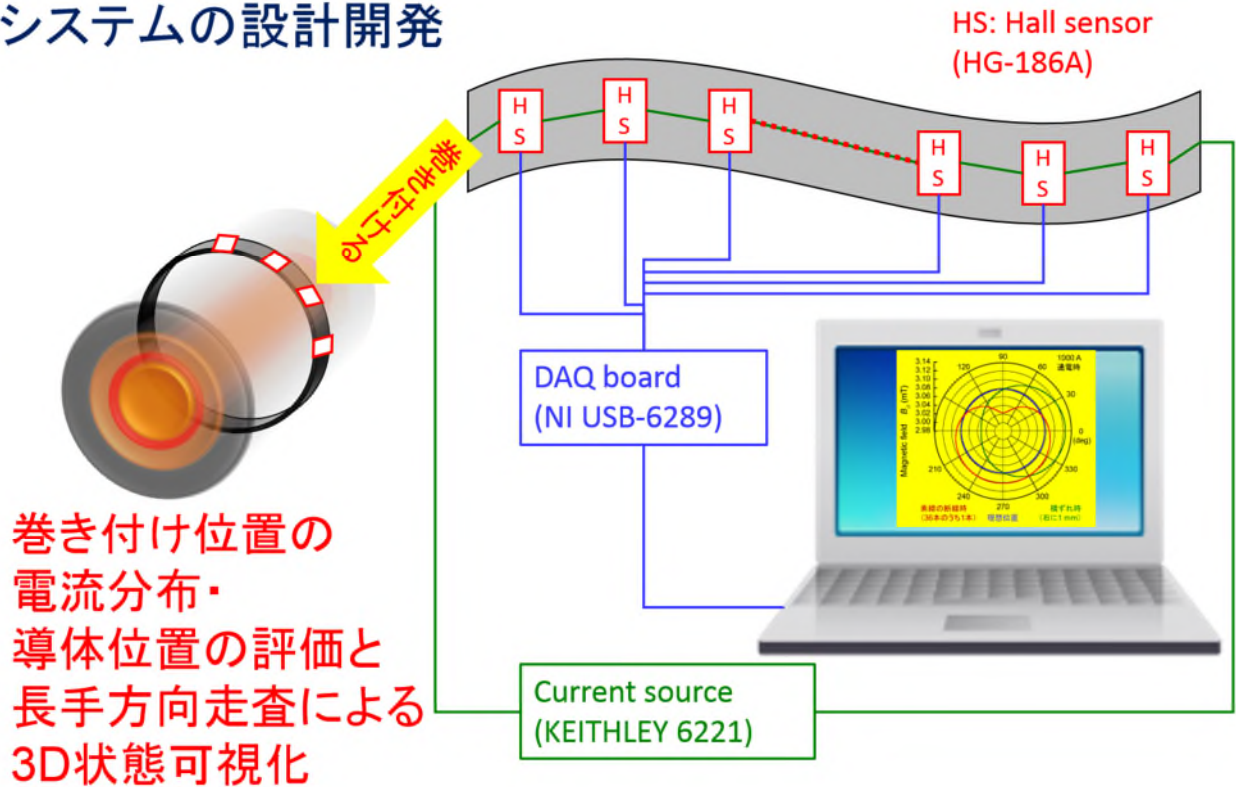


図 2.1.5-7 ホール素子実装用治具

(2) システム構成と実測試験

測定に用いた装置の構成を図 2. 1. 5-8 に示す。駆動電流の電源はケースレイアウトの KEITHLEY 6221、ホール起電力の測定はナショナルインスツルメンツ社の DAQ board(USB-6289)を用いており、測定結果の表示は DAQ board を接続したナショナルインスツルメンツ社の LabVIEW のプログラム上で行われる。また、断熱管の内径は 108.5 mm、外径が 133.6 mm である。また導体に電流を印加するための電源をに示す。0 ~200 A の通電が可能となる。

システムの設計開発



断熱管 作成した装置 NI USB-6289 KEITHLEY 6221

図 2.1.5-8 実験システムの構成

測定試料に用いた導体は、断熱管内で位置を固定し断熱管周辺での磁界分布を計測する。またホール素子にはそれぞれ 1~12 の番号を振っている。断熱管と導体、ホール素子の番号の対応は図 2.1.5-9 に示す通りである。

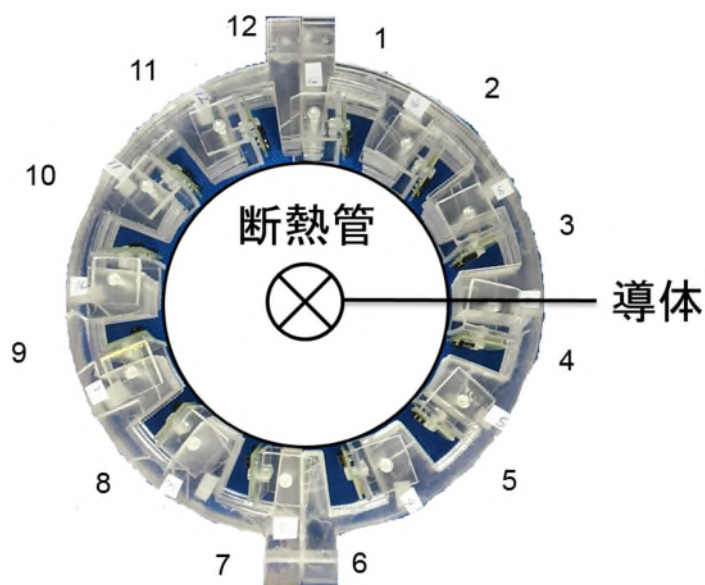


図 2.1.5-9 導体の位置とホール素子の番号

(3) 測定結果および考察

磁界分布を 12 チャンネルのホール素子を用いて測定し、得られた磁界分布より、導体位置をフィッティングによって導出した。フィッティングには非線形最小二乗問題を解くため Levenberg-Marquardt 法を用いており、導体位置を極座標で表し、断熱管の中心から導体までの距離と回転角をパラメータとしている。模擬導体の位置を原点から水平方向に移動した場合の結果を図 2.1.5-10、11 に示す。また、印加電流を 100 A, 200 A と変化させ、電流振幅と空間分布取得に対する定量性の検証を行った。

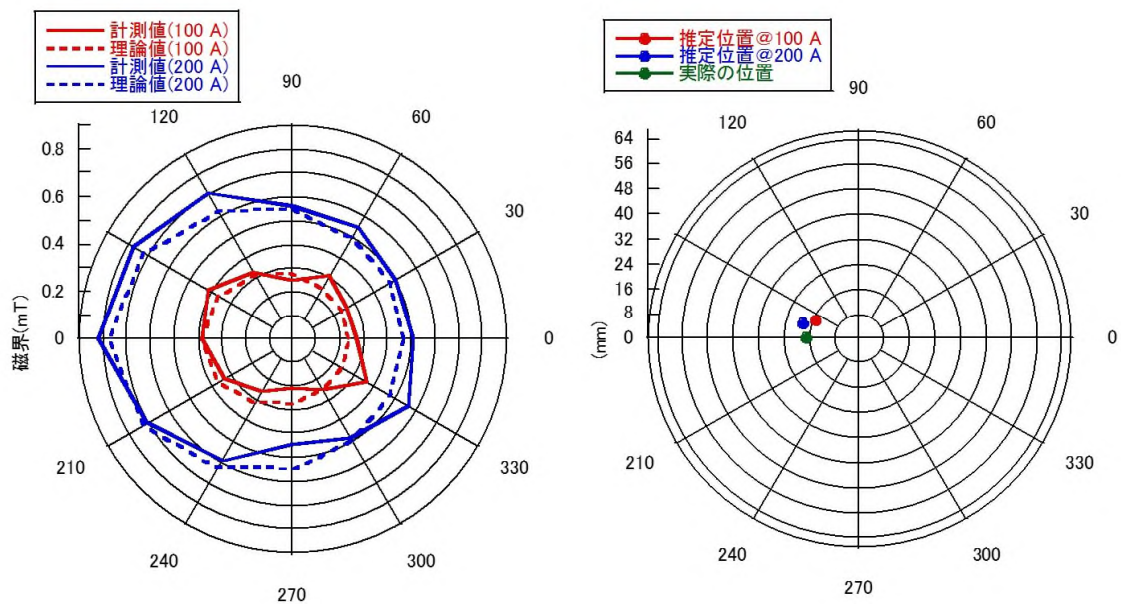


図 2.1.5-10 水平左方向に移動した場合

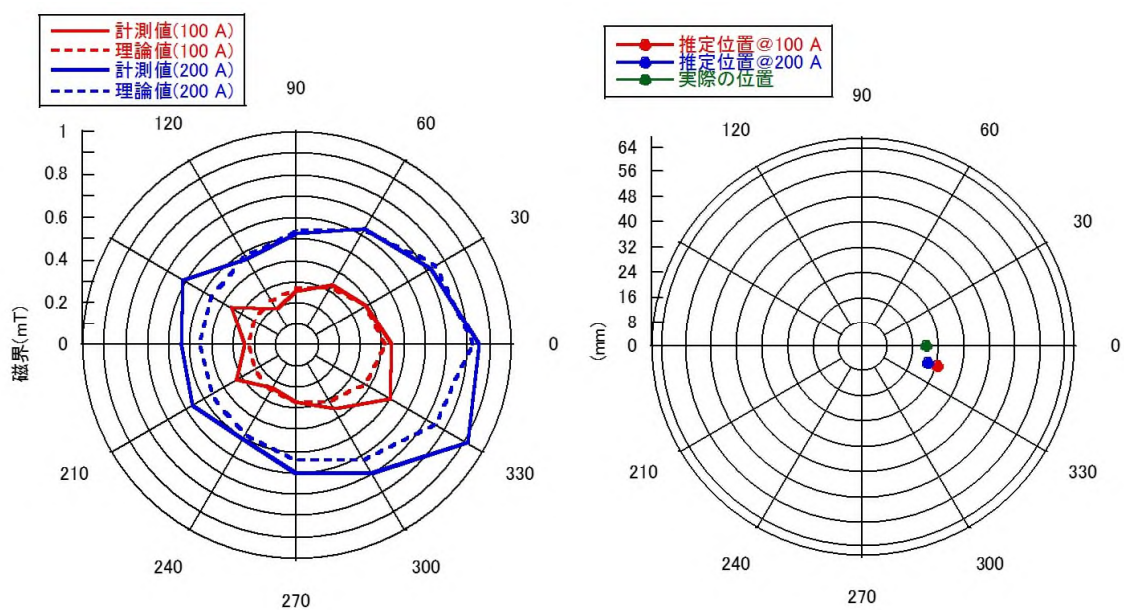


図 2.1.5-11 水平右方向に移動した場合

以上により、新しい計測法を提案すると共に、ケーブルへの実装技術ならびにデータ解析法を開発した。モデルケーブルを用いた実試験によって、ケーブル導体内の電流分布の検出を見通せる実験結果を得ると共に、ミリメートルオーダーの空間精度で導体位置を検出できる優れた精度を有する事を実証した。

2.1.6 「システム保全技術開発2」

(実施先：公益財団法人鉄道総合技術研究所－共同実施 国立大学法人三重大学)

長距離冷却システムを鉄道き電システムに採用した場合、長期間に亘って連続運用することが求められるため、冷却システムと超電導ケーブルの状態監視をすることがシステム全体の信頼性の向上に寄与する。そこで、超電導ケーブルシステムのシステム保全技術の実現を目指し、液体窒素ポンプへの導入を意識した遠隔測定による軸受異常検出法の開発を行うとともに、システム保全装置の構成法を検討した。

2.1.6.1 液体窒素ポンプ診断（遠隔測定による軸受異常検出法）

回転機械において回転体を支持する軸受は、回転機械に欠かせない最も重要な部品の一つである。軸受異常は初期異常（局所の剥離による傷）、中期異常（剥離の広がりによるフレーキング）および末期異常（転動体や保持器の破損）に分けることができるが、末期異常に至る前に軸受異常をできるだけ早期に検出し、効果的なメンテナンスやリペアを行うことが重要である[3-2-2-6-1、3-2-2-6-2]。

軸受の内部に傷が生じたときには、転動体が回転に伴って傷と衝突するため、衝撃的な異常振動が発生する。この衝撃的な振動は軸受内輪あるいは外輪の固有振動であり、この固有振動数は数 kHz 以上の高周波帯域にある。振動診断により異常を早期検出するためには、この高周波帯域の衝撃的な振動波形を加速度センサで測り、ハイパスフィルタ（High-pass filter: HPF）によりノイズを除去して抽出することが必要である[3-2-2-6-1]。しかし、現場における軸受の振動診断には、次のような二つの問題点がある。

- ・ 軸受の種類やサイズによって軸受内輪あるいは外輪の固有振動数が異なるため、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を適切に決定する必要がある。
- ・ 軸受の異常振動信号を敏感にキャッチするために、加速度センサはできるだけ診断対象の軸受近傍に設置する必要があるが、現場の設備によっては診断対象の軸受近傍に加速度センサを取り付けることが難しく、診断対象の軸受から離れた場所で軸受異常を計測・診断する場合もある。

従って、本開発では、上記の問題点を解決するために、診断対象の軸受から離れた場所に加速度センサを設置して、測定した信号から軸受異常の簡易診断・精密診断を自動的に行う基礎的な方法について検討を行った。具体的には、軸受異常振動信号を抽出するために遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm、GA）[3-2-2-6-3]-[3-2-2-6-5]とタブー探索法（Tabu Search、TS）[3-2-2-6-6]によりハイパスフィルタの最適なカットオフ周波数を自動的に探索・決定する方法、および決定木による軸受異常の自動診断法を開発し、これらの方法を診断対象の軸受から離れた場所で計測した振動信号に適用して、軸受異常の自動検出・診断の精度について検討を行った。

その結果、遺伝的アルゴリズムおよびタブー探索法を用いた簡易診断とハイパスフィルタ後の包絡線スペクトルから算出した軸受診断専用パラメータに決定木を用いる精密診断とを組み合わせた手法が有効であり、模擬装置を用いて決定した閾値・決定木を用い、様々なアルゴリズムを適用することで離れた場所での衝撃系異常が検出可能であることを明らかにした。詳細を以下に述べる。

(1) 軸受診断のフロー

(1-1) 全体のフロー

軸受から離れた場所で軸受異常を直接診断するのは難しいため、図 2.1.6-1 に示すフローでの診断を考案した。フロー中の簡易診断において軸受異常の有無を診断し、異常が確認された場合には精密診断で異常種類の同定を行う。

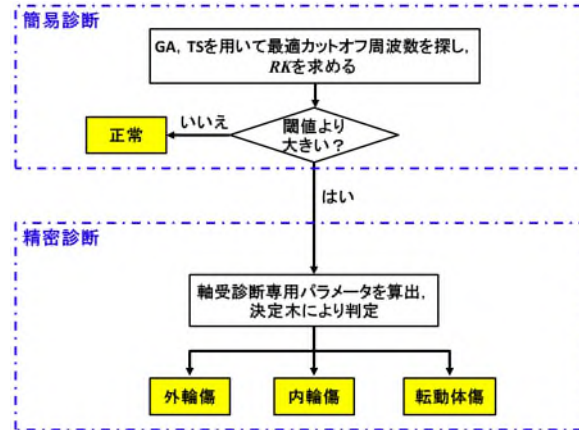


図 2.1.6-1 軸受診断のフロー図

(1-2) 簡易診断

簡易診断においては、遺伝的アルゴリズムおよびタブー探索法を組み合わせた手法により、次式に示す診断対象の尖り度 (*Kurtosis*) と正常軸受の尖り度の比率 *RK* を最大化するハイパスフィルタの最適なカットオフ周波数を 40,000 Hz までの範囲で探索し、そのときの *RK* を求めた (すなわち、*RK* は遺伝的アルゴリズムにおける適応度である)。

$$RK = \frac{Kurtosis_{Unknown}}{Kurtosis_{Normal}} \quad (3-2-2-6-1)$$

ここで $Kurtosis_{Normal}$ は正常であることが既知である軸受の尖り度、 $Kurtosis_{Unknown}$ は診断対象軸受の尖り度であり、

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} \quad (3-2-2-6-2)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3-2-2-6-3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3-2-2-6-4)$$

であり、 x_i ($i = 1 \sim N$) は軸受から離れた加速度センサにおけるハイパスフィルタ後の時系列加速度データである。

まず得られた加速度データの *RK* を最適化するハイパスフィルタのカットオフ周波数を探索した。遺伝的アルゴリズムの条件は図 2.1.6-2 の通りである。カットオフ周波数を長さ 8 の 2 進数 (遺伝子) に変換し、図 2.1.6-2 に示す条件で世代交代を繰り返し、*RK* を最適化する遺伝子のカットオフ周波数を探索した。また、遺伝的アルゴリズムだけでは局所解に陥ってしまう恐れがあるため、タブー探索法も併用した。具体的には遺伝

的アルゴリズムで得られた最適カットオフ周波数近傍の周波数を、一度選んだ周波数は二度と選ばない（タブーとする）条件で検索した。今回は単純に遺伝的アルゴリズムによる最適周波数±10,000 Hz の範囲を 1,000 Hz 刻みで重複なく検索し（図 2.1.6-3）、その周波数における RK が現在のものを上回った場合に最適周波数を書き換えることとした。

上記手法により得られた RK が学習段階で得られる閾値より大きいかどうかで正常、異常を判断した。

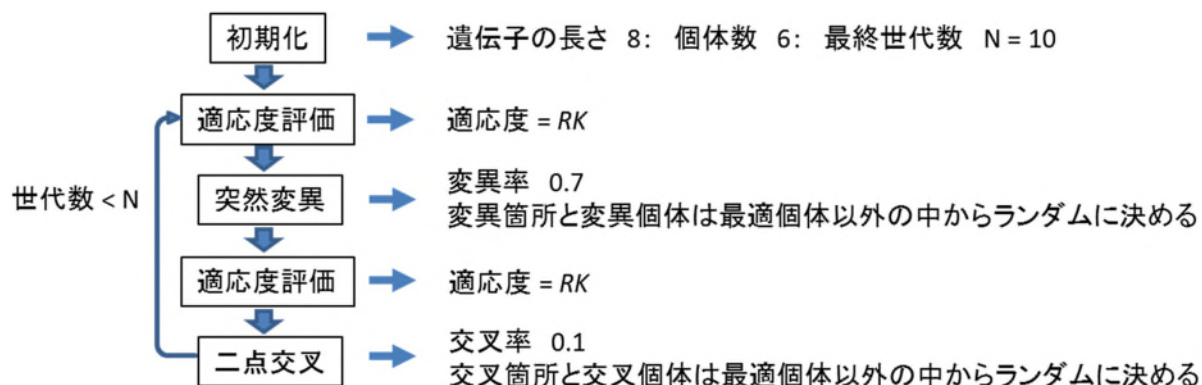


図 2.1.6-2 遺伝的アルゴリズムの流れ

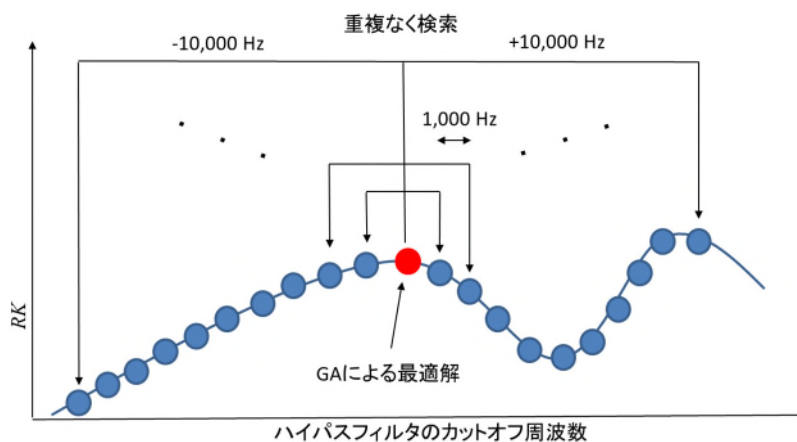


図 2.1.6-3 タブー探索法の流れ

(1-3) 精密診断

軸受異常を精密に診断するために、軸受傷による衝撃的な波形のパス周波数を振動波形の包絡線スペクトルから求めて異常種類を同定した[3-2-2-6-1]，[3-2-2-6-2]。

本開発における精密診断では学習時に簡易診断で探索した最適なカットオフ周波数のハイパスフィルタを用いて軸受から離れた加速度センサの生データをフィルタリングした後の包絡線波形に対し、軸受傷のパス周波数を反映した軸受診断専用パラメータを次のように考案した。

$$SPx = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^M S_f p_{x_i}}{\sum_{j=1}^N S_j} \quad (3-2-2-6-5)$$

ここで S_j は周波数 j Hz におけるスペクトル成分の高さで、 fp_{x_i} は x 状態のパス周波数の i 次高調波、 $i = 1, 2, \dots, M (M = 3, 4, \dots, 10)$ 、 $x = 0$ (外輪傷), I (内輪傷), R (転動体傷) である。 SPx の分母はスペクトル全体の積分、分子はパス周波数成分の和を示している。算出したパラメータにより標準 CART アルゴリズム [2-2-6-7]、[2-2-6-8] による決定木 [2-2-6-9]-[2-2-6-11] を用いて異常種類の判別を行った。標準 CART アルゴリズムでは各ノードで分割する属性を ΔI を最大にするという規準で選ぶ。ここで、

$$I(t) = 1 - \sum_{i=1}^C P^2(i|t) \quad (3-2-2-6-6)$$

$$\Delta I(s, t) = I(t) - (p_L I(t_L) + p_R I(t_R)) \quad (3-2-2-6-7)$$

であり、 t はノード、 C はクラス数 (異常種類数)、 $P(i|t)$ は t においてクラス i ($i = 0$ (外輪傷), I (内輪傷), R (転動体傷)) の事例が生起する確率、 s は分割条件、 $t_L \cdot t_R$ は分割後の 2 ノード、 $p_L \cdot p_R$ は分割後の事例数の割合である (図 2.1.6-4)。



図 2.1.6-4 標準 CART アルゴリズムでの分割例

(2) 検証実験のための装置と測定条件

回転機械設備を模擬した実験装置の写真を図 2.1.6-5 に示す。軸受近傍から順に加速度センサ（富士セラミックス製 SA12SC、感度：10 mV/g）が CH1、CH2、CH3 と取り付けられている。軸受は取り替えることができ、正常、外輪傷、内輪傷、転動体傷の軸受（図 2.1.6-6）を用いた。検証試験では 1,800 rpm で回転させた際の振動データを CH1、CH2 及び CH3 で計測した。なお、サンプリング周波数は 100 kHz でサンプリング時間は 10 秒である。

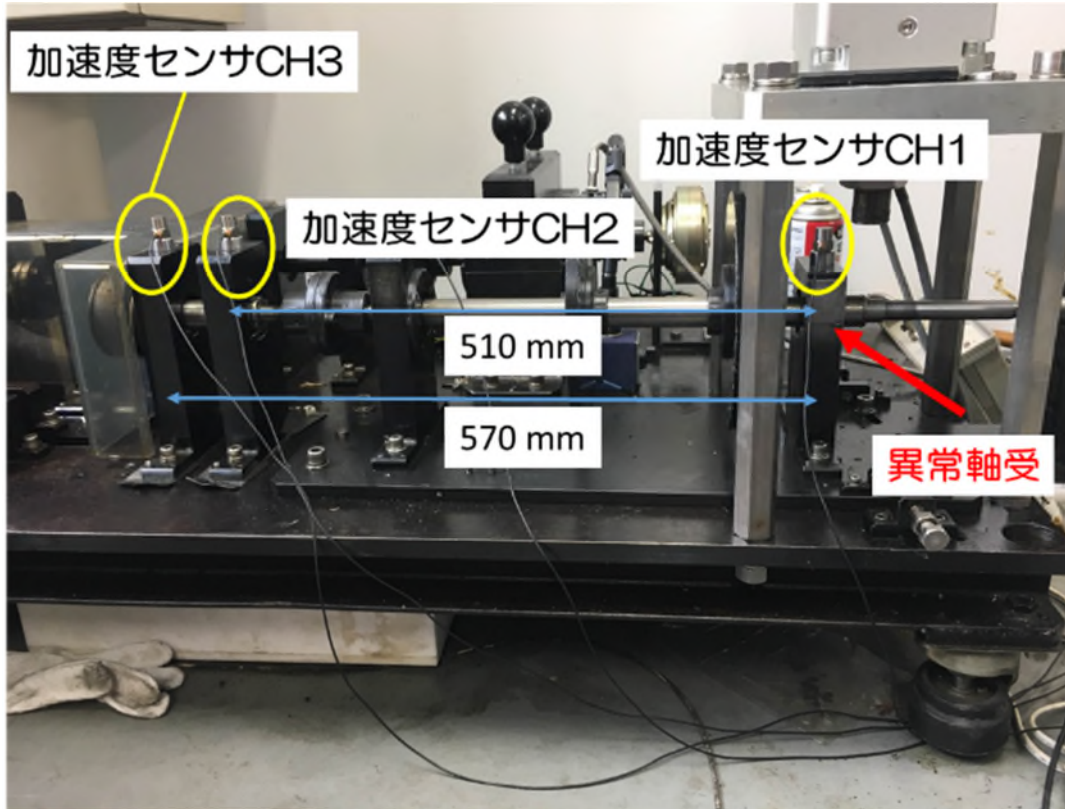
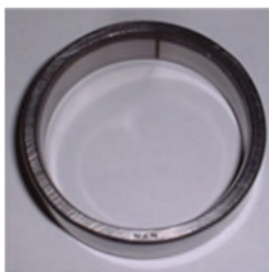
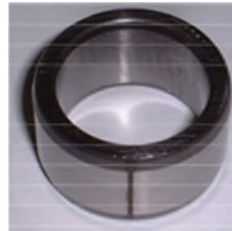


図 2.1.6-5 ポンプ設備を模擬した実験装置



(i) 外輪傷



(ii) 内輪傷



(iii) 転動体傷

図 2.1.6-6 衝撃系異常の軸受

(3) 軸受診断の学習

軸受診断の閾値や決定木を作成するため、軸受診断の学習を行った。詳細を以下に述べる。

(3-1) 簡易診断の学習

CH1、CH2、及びCH3での正常 ($Kurtosis_{Normal}$ の計算で用いたものとは別の試番)、外輪傷、内輪傷、転動体の軸受を用いた振動データでの最適なカットオフ周波数とRKの結果を表2.1.6-1に示すが、これらの結果より閾値を1.3に設定した。

表2.1.6-1 最適カットオフ周波数とRKの結果 (学習)

| 異常種類 | CH1 | | CH2 | | CH3 | |
|------|-----------|--------|-----------|-------|-----------|------|
| | カットオフ周波数 | RK | カットオフ周波数 | RK | カットオフ周波数 | RK |
| 正常 | 29,961 Hz | 1.23 | 800 Hz | 1.01 | 23,373 Hz | 1.02 |
| 外輪傷 | 38,844 Hz | 70.14 | 12,450 Hz | 2.47 | 22,602 Hz | 1.35 |
| 内輪傷 | 32,785 Hz | 95.23 | 31,687 Hz | 4.67 | 30,959 Hz | 5.08 |
| 転動体傷 | 16,057 Hz | 238.79 | 32,785 Hz | 12.92 | 36,136 Hz | 1.65 |

CH1とCH3の外輪傷軸受データにおける遺伝的アルゴリズムの適応度 (RK) の変化を図2.1.6-7に示す。図2.1.6-7によれば、軸受近傍 (CH1) では遺伝的アルゴリズムを用いなくてもRKが閾値より十分に大きく、異常判別が可能だが、遠方 (CH3) では遺伝的アルゴリズムにより何とかRKが閾値より大きくなっていることが分かり、異常軸受から離れた場所での診断における適切なアルゴリズム手法の重要性が伺える。

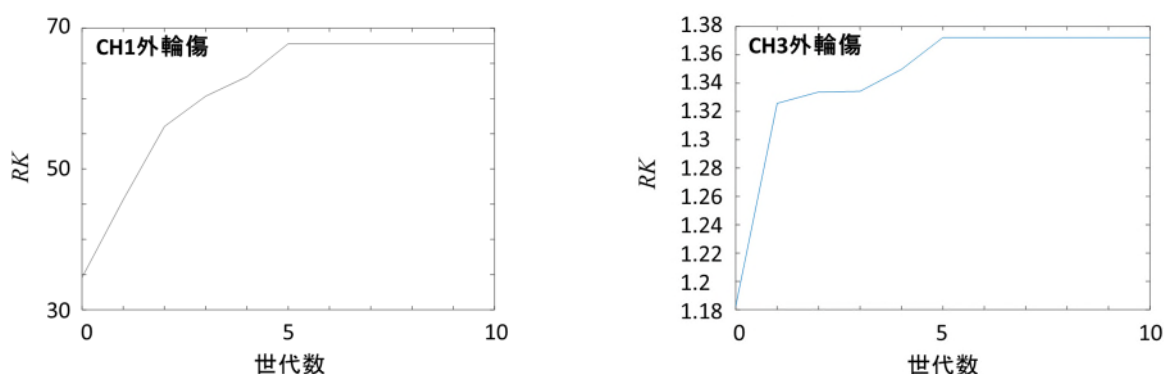


図2.1.6-7 CH1とCH3の外輪傷軸受データにおける遺伝的アルゴリズムの適応度 (RK) の変化。世代数0はフィルタなしでのRKを表す。

また、CH1の外輪傷軸受データにおける最適カットオフ周波数とRKの推移を図2.1.6-2に示す。これは遺伝的アルゴリズムでは極値解に陥ってしまったが、タブー探索法で極

値解を脱出して最適解を得た例であり、カットオフ周波数とRKの関係を詳細に調べると図2.1.6-8のようになっていた。本例はタブー探索法の有用性を示す良い例と言える。

表2.1.6-2 CH1の外輪傷軸受データにおける最適なカットオフ周波数とRKの推移

| 過程 | カットオフ周波数 | RK |
|------------|-----------|-------|
| 遺伝的アルゴリズム前 | 0 Hz | 34.58 |
| 遺伝的アルゴリズム後 | 30,118 Hz | 67.81 |
| タブー探索法後 | 38,844 Hz | 70.14 |

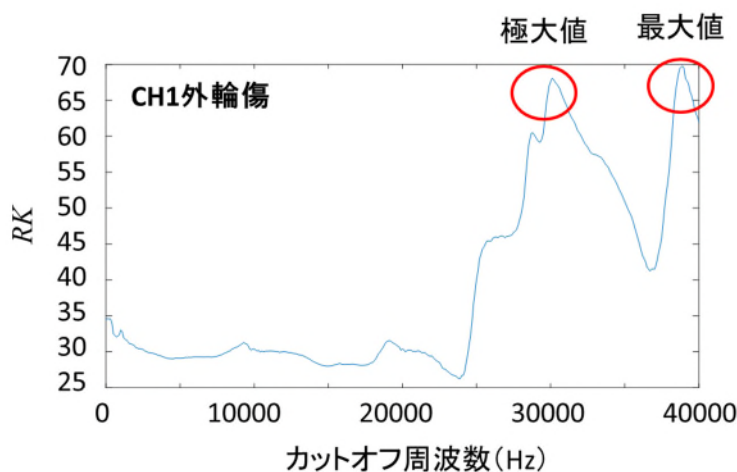


図2.1.6-8 CH1の外輪傷軸受データにおけるカットオフ周波数とRKの関係

(3-2) 精密診断の学習

CH1、CH2、及びCH3での、外輪傷、内輪傷、転動体傷の軸受を用いた振動データに対して3次までのパス周波数の高調波 ($M=3$) で式(3-2-2-6-5)に示す軸受診断専用パラメータを算出した結果を表2.1.6-3に示す。計測したデータを8分割して異常種類ごとに8つの算出結果を得ている。得られた結果より図2.1.6-9に示す決定木を作成した。CH1とCH2では作成した決定木により確実に異常種類を分類できるが、CH3では分類の際に例外が出ていた。これはCH3がCH2よりもさらに異常軸受から離れているためだと考えられ、複数の算出結果から多数決で最終的に診断結果を決定する必要があることを示している。

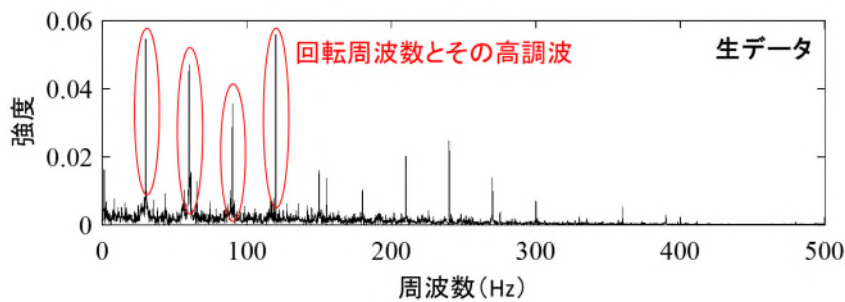
CH2での外輪傷軸受データにおけるフィルタリングと包絡線処理の結果を図2.1.6-10に示す。回転周波数に対応するスペクトルを除去し、パス周波数に対応するスペクトルのみを抽出できていることが確認でき、最適なカットオフ周波数でのハイパスフィルタを用いた包絡線処理の有用性が確認できた。

表2.1.6-3 軸受診断専用パラメータの算出結果 (学習)

| CH1 | | | | CH2 | | | | CH3 | | | |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 異常種類 | SPO | SPI | SPR | 異常種類 | SPO | SPI | SPR | 異常種類 | SPO | SPI | SPR |
| 外輪傷1 | 17.192 | 1.9437 | 1.8702 | 外輪傷1 | 7.2439 | 3.5005 | 3.0802 | 外輪傷1 | 7.4342 | 2.3798 | 2.9357 |
| 外輪傷2 | 18.912 | 3.5248 | 1.4874 | 外輪傷2 | 9.7527 | 3.9288 | 1.4548 | 外輪傷2 | 4.8949 | 1.5213 | 2.305 |
| 外輪傷3 | 12.805 | 2.0851 | 2.8056 | 外輪傷3 | 8.2672 | 1.7392 | 2.3901 | 外輪傷3 | 6.7536 | 3.2581 | 1.6032 |
| 外輪傷4 | 17.872 | 3.8773 | 1.0192 | 外輪傷4 | 7.2842 | 2.2036 | 1.76 | 外輪傷4 | 7.8528 | 2.8357 | 3.7442 |
| 外輪傷5 | 15.593 | 2.8128 | 2.0314 | 外輪傷5 | 8.8215 | 1.5186 | 2.0229 | 外輪傷5 | 6.7055 | 3.2894 | 3.2891 |
| 外輪傷6 | 15.473 | 2.2095 | 1.7456 | 外輪傷6 | 9.0243 | 1.7988 | 2.8165 | 外輪傷6 | 7.3771 | 3.3179 | 2.9625 |
| 外輪傷7 | 14.094 | 2.4402 | 1.8233 | 外輪傷7 | 8.5089 | 2.8945 | 2.5482 | 外輪傷7 | 5.0259 | 2.9882 | 4.0408 |
| 外輪傷8 | 16.015 | 2.8227 | 1.2015 | 外輪傷8 | 8.8834 | 4.3518 | 2.7119 | 外輪傷8 | 6.8856 | 3.1085 | 3.77 |
| 内輪傷1 | 3.8905 | 15.828 | 1.9349 | 内輪傷1 | 3.8044 | 7.919 | 2.3277 | 内輪傷1 | 4.0626 | 3.0314 | 1.4328 |
| 内輪傷2 | 2.5858 | 18.357 | 2.4678 | 内輪傷2 | 1.8187 | 6.8081 | 1.9757 | 内輪傷2 | 2.1924 | 2.9479 | 2.5818 |
| 内輪傷3 | 2.9298 | 13.779 | 1.5279 | 内輪傷3 | 2.6417 | 8.4601 | 2.1872 | 内輪傷3 | 4.7022 | 5.679 | 2.3602 |
| 内輪傷4 | 3.3518 | 15.58 | 1.7548 | 内輪傷4 | 3.4828 | 8.4651 | 2.1987 | 内輪傷4 | 2.7707 | 5.8494 | 1.9072 |
| 内輪傷5 | 3.7253 | 15.225 | 2.0188 | 内輪傷5 | 3.9259 | 6.8953 | 3.0828 | 内輪傷5 | 3.8413 | 4.7319 | 3.905 |
| 内輪傷6 | 2.3773 | 14.572 | 2.9231 | 内輪傷6 | 2.7821 | 6.1234 | 2.7944 | 内輪傷6 | 2.704 | 2.8698 | 2.3779 |
| 内輪傷7 | 3.2838 | 11.127 | 2.4239 | 内輪傷7 | 2.2087 | 6.8686 | 2.0629 | 内輪傷7 | 2.4431 | 5.0864 | 2.479 |
| 内輪傷8 | 4.0222 | 14.196 | 2.8131 | 内輪傷8 | 3.1294 | 7.2997 | 2.9079 | 内輪傷8 | 3.8636 | 4.3204 | 3.4328 |
| 転動体傷1 | 5.0184 | 2.647 | 2.528 | 転動体傷1 | 3.7455 | 1.8726 | 1.4958 | 転動体傷1 | 4.9898 | 3.1679 | 2.571 |
| 転動体傷2 | 3.676 | 3.0718 | 3.3732 | 転動体傷2 | 3.1087 | 1.5298 | 2.485 | 転動体傷2 | 4.1288 | 1.7507 | 2.861 |
| 転動体傷3 | 3.5876 | 2.8147 | 4.2596 | 転動体傷3 | 3.5401 | 3.3136 | 3.589 | 転動体傷3 | 3.0985 | 3.0729 | 2.5261 |
| 転動体傷4 | 3.6314 | 4.0844 | 2.7536 | 転動体傷4 | 2.5322 | 3.8563 | 1.8368 | 転動体傷4 | 2.3634 | 3.4045 | 2.0169 |
| 転動体傷5 | 4.8975 | 3.3497 | 2.5633 | 転動体傷5 | 2.8522 | 2.8154 | 1.8477 | 転動体傷5 | 3.6684 | 3.5173 | 2.8895 |
| 転動体傷6 | 3.0393 | 3.5012 | 2.8312 | 転動体傷6 | 2.566 | 2.957 | 3.1929 | 転動体傷6 | 5.4343 | 3.0461 | 3.488 |
| 転動体傷7 | 3.6598 | 2.9385 | 4.3108 | 転動体傷7 | 3.7451 | 3.1989 | 3.2805 | 転動体傷7 | 2.7971 | 2.6553 | 3.4312 |
| 転動体傷8 | 4.8813 | 3.7589 | 2.8582 | 転動体傷8 | 3.3818 | 2.8123 | 1.9799 | 転動体傷8 | 3.0087 | 3.0358 | 2.7371 |



図2.1.6-9 精密診断の決定木



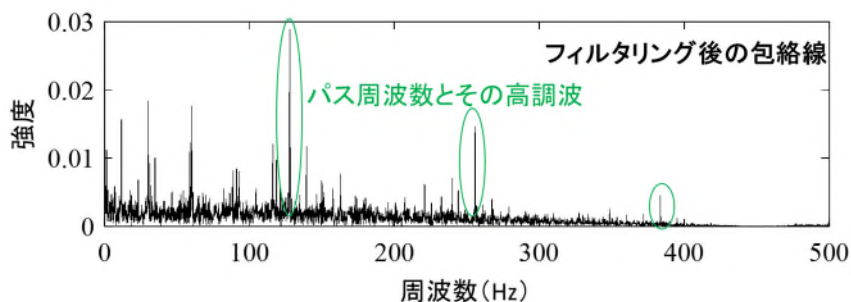


図2.1.6-10 CH2での外輪傷軸受データにおける生データスペクトルとフィルタリング後の包絡線スペクトル

(4) 軸受診断の検証

学習の際に使用したデータとは異なる試番を用いて軸受診断の検証を行った。表2.1.6-4、表2.1.6-5の結果を見て分かるように、簡易診断では全てのCHにおいて、精密診断ではCH1、CH2において軸受診断手法の妥当性が検証された。また、精密診断時のCH3においても多数決を行うことで異常種類の分類ができており、軸受診断手法の妥当性が検証された。

表2.1.6-4 最適カットオフ周波数と RK の結果 (検証)

| 異常種類 | CH1 | | CH2 | | CH3 | |
|------|-----------|--------|-----------|-------|-----------|------|
| | カットオフ周波数 | RK | カットオフ周波数 | RK | カットオフ周波数 | RK |
| 正常 | 29,589 Hz | 1.06 | 25,726 Hz | 1.01 | 785 Hz | 1.07 |
| 外輪傷 | 33,996 Hz | 110.66 | 32,471 Hz | 16.67 | 33,399 Hz | 1.73 |
| 内輪傷 | 38,903 Hz | 56.16 | 1,510 Hz | 2.26 | 20,477 Hz | 1.78 |
| 転動体傷 | 16,295 Hz | 339.66 | 32,628 Hz | 13.46 | 32,100 Hz | 2.41 |

表 2.1.6-5 軸受診断専用パラメータの算出結果（検証）

| GH1 | | | | GH2 | | | | GH3 | | | |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 異常種類 | SPO | SPI | SPR | 異常種類 | SPO | SPI | SPR | 異常種類 | SPO | SPI | SPR |
| 外輪傷1 | 20.329 | 3.3442 | 1.8005 | 外輪傷1 | 8.8316 | 3.417 | 1.761 | 外輪傷1 | 10.128 | 1.9491 | 2.8082 |
| 外輪傷2 | 20.888 | 2.2793 | 1.9276 | 外輪傷2 | 8.5091 | 2.0193 | 2.2879 | 外輪傷2 | 10.298 | 1.64 | 2.807 |
| 外輪傷3 | 17.593 | 2.7382 | 2.3106 | 外輪傷3 | 8.5087 | 2.4172 | 2.9333 | 外輪傷3 | 9.974 | 2.459 | 2.5181 |
| 外輪傷4 | 20.128 | 3.1869 | 2.0376 | 外輪傷4 | 10.042 | 2.3115 | 2.2713 | 外輪傷4 | 10.761 | 2.5097 | 2.7392 |
| 外輪傷5 | 20.97 | 3.0848 | 2.0979 | 外輪傷5 | 8.7819 | 2.234 | 2.5932 | 外輪傷5 | 10.825 | 2.6332 | 3.2024 |
| 外輪傷6 | 20.113 | 2.9501 | 1.8797 | 外輪傷6 | 9.0256 | 2.1652 | 2.5043 | 外輪傷6 | 8.8632 | 2.9181 | 2.2422 |
| 外輪傷7 | 18.93 | 3.9799 | 2.6781 | 外輪傷7 | 7.8862 | 3.8693 | 2.539 | 外輪傷7 | 9.1097 | 4.1743 | 2.3572 |
| 外輪傷8 | 18.817 | 3.2188 | 2.4728 | 外輪傷8 | 9.0909 | 3.1927 | 3.9593 | 外輪傷8 | 8.2024 | 2.3197 | 2.4672 |
| 内輪傷1 | 3.9105 | 12.011 | 3.0515 | 内輪傷1 | 2.6145 | 7.5917 | 2.052 | 内輪傷1 | 3.2607 | 4.1892 | 3.8748 |
| 内輪傷2 | 3.2832 | 10.585 | 3.1228 | 内輪傷2 | 3.8226 | 7.0248 | 2.3819 | 内輪傷2 | 2.9917 | 4.6307 | 2.682 |
| 内輪傷3 | 3.8359 | 9.3834 | 1.4859 | 内輪傷3 | 3.5714 | 7.8081 | 2.4819 | 内輪傷3 | 2.5445 | 3.9595 | 2.3058 |
| 内輪傷4 | 2.7942 | 14.414 | 2.8938 | 内輪傷4 | 4.0051 | 8.6274 | 2.3928 | 内輪傷4 | 3.6322 | 2.5611 | 2.8822 |
| 内輪傷5 | 3.1245 | 9.4895 | 2.7013 | 内輪傷5 | 3.0715 | 7.0982 | 2.8063 | 内輪傷5 | 3.1201 | 3.2497 | 3.2396 |
| 内輪傷6 | 4.286 | 11.717 | 2.1862 | 内輪傷6 | 2.5547 | 8.8335 | 2.848 | 内輪傷6 | 3.514 | 4.6724 | 2.106 |
| 内輪傷7 | 3.2468 | 10.287 | 2.1531 | 内輪傷7 | 3.2738 | 8.2546 | 2.5471 | 内輪傷7 | 3.5955 | 3.0853 | 3.0232 |
| 内輪傷8 | 3.4727 | 10.645 | 1.8804 | 内輪傷8 | 3.5513 | 7.8953 | 2.324 | 内輪傷8 | 3.0646 | 5.5988 | 2.5874 |
| 転動体傷1 | 3.5877 | 1.9594 | 3.0976 | 転動体傷1 | 3.2837 | 2.2274 | 1.9574 | 転動体傷1 | 2.8921 | 1.9803 | 3.364 |
| 転動体傷2 | 4.2944 | 4.8867 | 2.8529 | 転動体傷2 | 3.3867 | 3.0963 | 2.4829 | 転動体傷2 | 2.7422 | 4.1339 | 2.8054 |
| 転動体傷3 | 6.0781 | 2.5118 | 2.1038 | 転動体傷3 | 2.8413 | 3.7962 | 3.2482 | 転動体傷3 | 3.861 | 3.446 | 2.1518 |
| 転動体傷4 | 4.2899 | 4.0842 | 2.5171 | 転動体傷4 | 3.2518 | 2.7479 | 2.3703 | 転動体傷4 | 3.0651 | 3.5377 | 2.1553 |
| 転動体傷5 | 3.9891 | 3.4264 | 4.0823 | 転動体傷5 | 3.7645 | 2.7452 | 3.0834 | 転動体傷5 | 3.395 | 2.366 | 2.9607 |
| 転動体傷6 | 3.7806 | 3.1494 | 2.8757 | 転動体傷6 | 2.8832 | 2.5603 | 2.4672 | 転動体傷6 | 3.7502 | 2.2969 | 2.5064 |
| 転動体傷7 | 4.9058 | 2.4112 | 2.8284 | 転動体傷7 | 2.7085 | 2.0295 | 1.8097 | 転動体傷7 | 2.9453 | 4.8545 | 2.8547 |
| 転動体傷8 | 4.086 | 2.4137 | 2.3225 | 転動体傷8 | 3.6508 | 1.7073 | 2.4277 | 転動体傷8 | 3.3151 | 2.7071 | 2.8271 |

2.1.6.2 軸受複合異常診断法

軸受の異常診断については、外輪、内輪および転動体に発生した初期異常である単一傷に関する診断法が多く提案・発表されているが、軸受の外輪、内輪および転動体に複数の傷が同時に発生している場合（以下、複合異常という）は、異常種類と計測データの特徴との関係が複雑になるため、その診断は単一の異常状態に比べ、はるかに困難となる場合が多い。

これまでに、軸受複合異常診断についての文献[3-2-2-6-14]-[3-2-2-6-24]が多数発表されているが、中には複雑な信号処理方法が必要なものもあれば、色々な処理の係数や基準の定が試行錯誤や経験的に決定するものもあり、いずれも高精度な自動診断方法として実現しにくいものである。軸受複合異常の診断における重要な課題は、診断のために測定した振動信号から単一の異常成分のみを抽出すること、および異常種類を表わす特徴の集合とマッチングする方法の確立である。そこで、本開発では、単一の異常状態と同様な診断を可能にするために、複合異常を示す振動信号からそれぞれの単一の異常成分を、時間・周波数領域の解析手法の一つであるショートタイム FFT、および各瞬間の異常信号の強さを表わすスペクトル強度によって抽出する手法を考案した。また、抽出した瞬間異常スペクトルの特徴を表わす周波数領域の特徴パラメータ、および正準判別分析法 (Canonical Discriminant Analysis, CDA) により複数特徴パラメータを統合して異常種類を判別する方法を考案した。更に、異常種類を特定するために、各単一異常状態の正準変量の区間におけるマッチング得点に基づく推論により異常種類の特定方法も考案し、考案した諸手法を実際の軸受診断に適用・検証することにより、その有効性を確認した。

(1) 軸受複合異常の診断理論・方法

本開発で提案した軸受複合異常の診断処理法の流れを図 2.1.6-11 に示す。

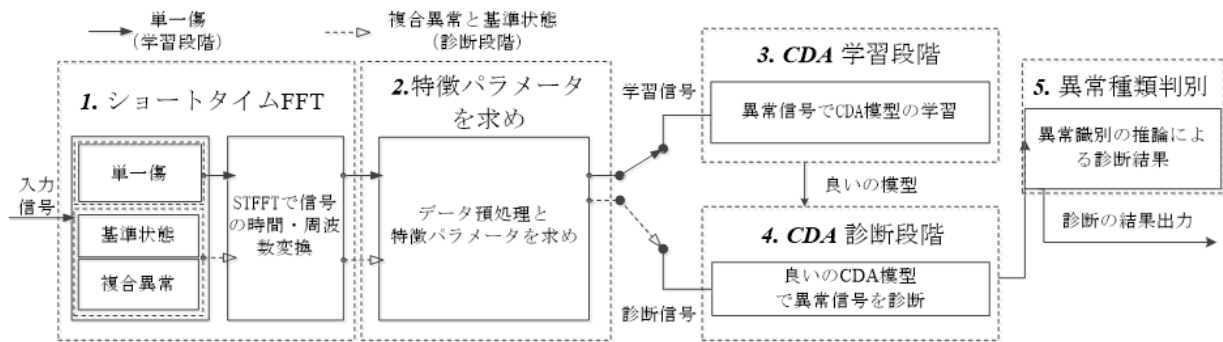


図 2.1.6-11 STFFT と CDA による軸受複合異常診断法の流れ図

学習段階においては、まず各基準状態、すなわち各単一異常状態（外輪傷、内輪傷、転動体傷）で測定した振動信号のショートタイム FFT（以下、STFFT と記する）により時間・周波数解析を行い、スペクトル強度により各瞬間スペクトルから異常成分（軸受傷による異常衝撃波）のスペクトルを抽出した。次に、抽出した各異常成分の瞬間スペクトルを用いて周波数領域の特徴パラメータを計算し、正準判別分析法による特徴パラメータの統合を行い、各状態の正準判別関数を求めておいた。

診断の時には、まず学習段階と同様に、測定した振動信号の STFFT を求め、高いスペクトル強度をもつ瞬間スペクトルを用いて周波数領域の特徴パラメータを算出した。次に、算出した周波数領域の特徴パラメータを、学習段階で得られた正準判別関数に代入して求めた正準変量値を各基準状態の正準変量区間とマッチングして、マッチング得点に基づく推論により異常種類を特定した。

(2) ショートタイム FFT (STFFT)

瞬間的に現れる異常信号（たとえば、軸受傷による衝撃的な波形）の周波数成分の時間変化を捉えるために、短時間毎に時系列信号を切り出しフーリエ変換したものが STFT (Short Time Fourier Transform) である。短時間フーリエ変換は、瞬間的に現れる異常信号の解析としては、時間・周波数解析の方法の中で最も単純で扱いやすい手法である。

次式のように、信号 $x(t)$ に幅が適切に狭くした窓関数 $w(t)$ をかけ、時間軸に沿ってフーリエ変換を行うことはショートタイムフーリエ変換 (STFFT) という。

$$S_F(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w'(\tau - t) e^{-2j\pi f\tau} d\tau \quad (3-2-2-6-8)$$

$S_F(t, f)$ は時刻 t における瞬間スペクトルと見なせ、 f は周波数であり、 τ は時間変数である。診断時に得られた信号 $x(t)$ の離散データ $x(i)$ については、下式で離散信号のショートタイムフーリエ変換 (STFFT) が得られる。

$$S_F\left(m\Delta t, \frac{n}{N\Delta t}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) w'((k-m)\Delta t) e^{\frac{-j2nk\pi}{N}} \quad (3-2-2-6-9)$$

上式の中に、 Δt はサンプリング時間間隔、 N はサンプリング総数、 $m, n=0,1,2,\dots,N-1$ である。

(3-2-2-6-9)から分かるように、 $s_F[m\Delta t, n/(N\Delta t)]$ は2次元の複素配列の瞬間スペクトル値であり、その行は信号の時間 t に対応し、その列は周波数 f に対応している。 $s_F[m\Delta t, n/(N\Delta t)]$ を「時系列スペクトル」を呼び、 $s_F[m\Delta t, n/(N\Delta t)]$ をもちいて信号の時間・周波数解析を行うことができる。

(3) 軸受異常の特徴抽出

(3-1) 異常信号の瞬間スペクトルの抽出

学習段階と診断時に測定した各状態の振動信号から(3-2-2-6-9)式のSTFFTにより信号の時系列スペクトルが得られ、図2.1.6-12に示すように、軸受に傷があれば、時系列スペクトル(図2.1.6-12(b))の中にその傷による衝撃波(図2.1.6-12(a))のスペクトル(高周波数領域における大きな値)が現れる。

軸受傷による衝撃波の瞬間スペクトルを抽出するために、時系列スペクトル $s_F[m\Delta t, n/(N\Delta t)]$ の強度 $I_F(t)$ (以下、スペクトル強度と記する)を次式のように定義した。

$$I_F(t) = I_F(m\Delta t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_F[m\Delta t, n/(N\Delta t)] \quad (3-2-2-6-10)$$

$I_F(t)$ の例は図2.1.6-12(c)に示す。

衝撃波の瞬間スペクトルを抽出するために、正常状態で測定した時系列スペクトルの時間強度 $I_F(t)$ の $u+T\sigma$ (u は平均値、 σ は標準偏差)を閾値として衝撃波の瞬間スペクトルを抽出した。係数 T は傷の大小により一概に決めにくいだが、数多くの実験により一般に3~6程度とすればよいと知られている[3-2-2-6-2]。

図2.1.6-12(c)は $T=6$ の例を示している。なお、抽出した異常信号(衝撃波)の瞬間スペクトルは図2.1.6-12(d)に示している。

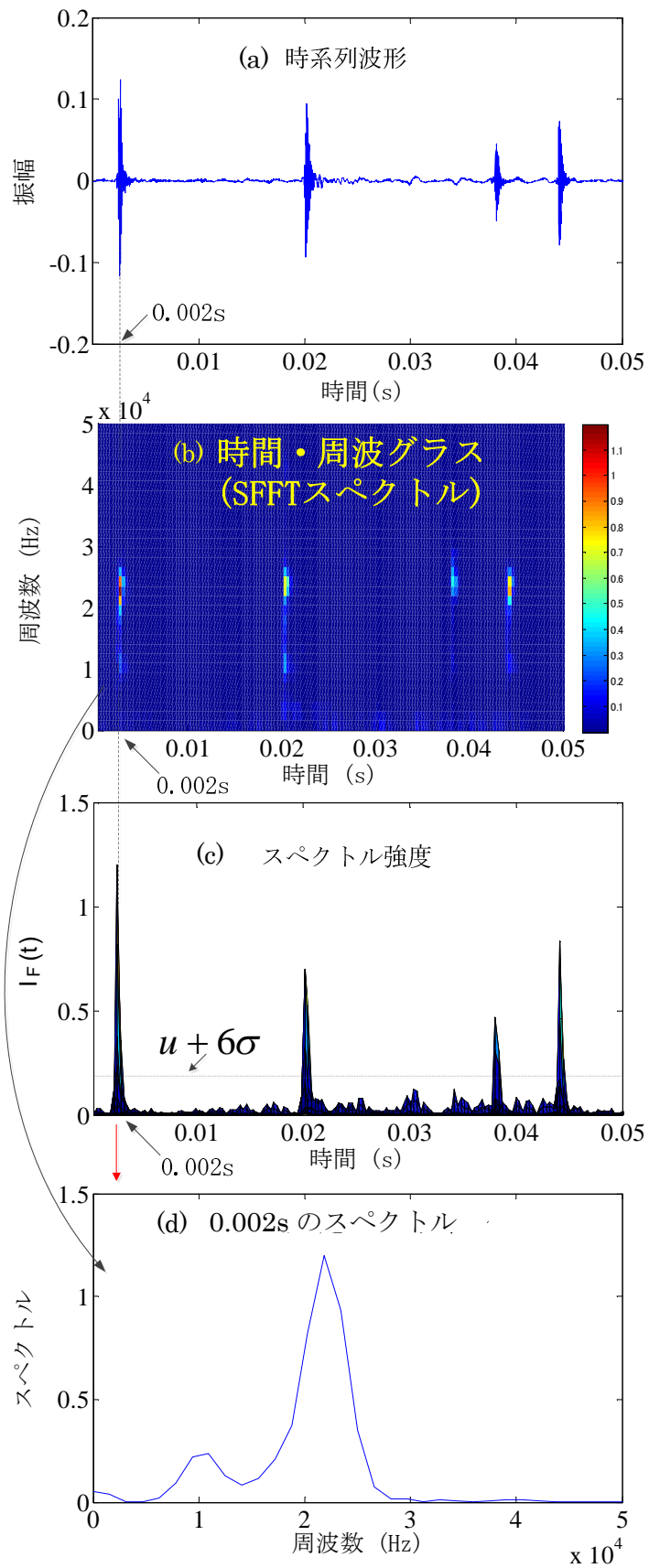


図 2.1.6-12 異常信号（衝撃波形）のスペクトル抽出例

(3-2) 周波数領域の特徴パラメータ

抽出した瞬間スペクトルの特徴を表わすために、(3-2-2-6-11)式～(3-2-2-6-17)式に表わす周波数領域の特徴パラメータ [3-2-2-6-25] を用いる。

$$p_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=N/3}^N f_i^2 S(f_i)}{\sum_{i=N/3}^N S(f_i)}} \quad (3-2-2-6-11)$$

(3-2-2-6-12)

$$p_3 = \frac{\sum_{i=N/3}^N f_i^2 S(f_i)}{\sqrt{\sum_{i=N/3}^N f_i^2 S(f_i) \sum_{i=N/3}^N S(f_i)}} \quad (3-2-2-6-13)$$

$$p_4 = \frac{\sigma}{\bar{f}} \quad (3-2-2-6-14)$$

$$p_5 = \frac{\sum_{i=N/3}^N (f - \bar{f})^3 S(f_i)}{\sigma^3 N} \quad (3-2-2-6-15)$$

$$p_6 = \frac{\sum_{i=N/3}^N (f - \bar{f})^4 S(f_i)}{\sigma^4 N} \quad (3-2-2-6-16)$$

$$p_7 = \frac{\sum_{i=N/3}^N \sqrt{|(f - \bar{f})|} S(f_i)}{\sqrt{\sigma} N} \quad (3-2-2-6-17)$$

ここで、

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=N/3}^N f_i S(f_i)}{\sum_{i=N/3}^N S(f_i)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=N/3}^N (f - \bar{f})^2 S(f_i)}{N}}$$

で与えられ、 N は信号データの総数、 f は周波数、 $S(f)$ は瞬間スペクトル、 $i=1,2,\dots,N$ である。

また、信号を測定するときに、アンプの電圧変動や増幅倍数などによる信号の振幅変化は周波数特徴パラメータの値にバラツキをもたらす。これらの影響を無くすために、特徴パラメータを計算する前に、以下のように、(3-2-2-6-18)式で瞬間スペクトルの正規化を、(3-2-2-6-19)式で特徴パラメータの正規化を行う。

$$S(f_i) = S'(f_i) / \sum_{i=1}^N S'(f_i) \quad (3-2-2-6-18)$$

$$p_i = (p_i' - \bar{p}_{ni}) / S p_{ni} \quad (3-2-2-6-19)$$

ここで、 $s'(f_i)$ と $s(f_i)$ はそれぞれ正規化前後の瞬間スペクトル、 p_i' と p_i はそれぞれ正規化前後の特徴パラメータであり、 \bar{p}_{ni} と Sp_{ni} はそれぞれ正常状態時の特徴パラメータ p_i' の平均値と標準偏差である。

(4) 正準判別分析法(CDA)による羽状種類の識別

正準判別分析法とは、群の分離の程度を最大になるように線形合成変量を作る手法である。M個の変数(特徴パラメータ)を p_1, p_2, \dots, p_M として、第 j 群、第 i ケースの合成変量を $Z_{ij}(j=1, 2, \dots, k; i=1, 2, \dots, n_j)$ とする。

$$Z_{ij} = a_{1ij}p_{1ij} + a_{2ij}p_{2ij} \dots + a_{Mij}p_{Mij} \quad (3-2-2-6-20)$$

$a_{1ij}, a_{2ij}, \dots, a_{Mij}$ は重み係数(判別係数)と呼ぶ。Zにより各群を判別するという事は、相関比 $\eta^2 = S_b/S_t$ を最大にするということに対応するので、 S_b/S_t を偏微分して相関比が最大になるように重み係数 $a_{1ij}, a_{2ij}, \dots, a_{Mij}$ を決定すればよい。ここで、 S_w は総平方和、 S_w と S_b は群内平方和と群間平方和である。全体の平均値を \bar{Z} 、第 j 群における平均値 \bar{Z}_j をとすれば、 $S_t = S_w + S_b$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Z_{ij} - \bar{Z})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Z_{ij} - \bar{Z}_j)^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Z}_j - \bar{Z})^2 \quad (3-2-2-6-21)$$

軸受複合異常を診断するために、本研究では相関比 η^2 が最大(寄与率が80%以上)である第1次正準変量と第2次正準変量を用いて軸受複合異常を診断する。

まず基準状態、すなわち単一異常状態(外輪傷、内輪傷、転動体傷)の瞬間スペクトルから計算された7個の周波数領域の特徴パラメータ値 $p_{jk}(j=1 \sim M, k=O, I, R)$ を学習データとして、単一状態を識別するための判別関数(正準変量)を(3-2-2-6-20)式~(3-2-2-6-21)式により求めておく。なお、基準状態の判別関数で求めた第1、2次正準変量は z_{1k} 、 z_{2k} で表し、ここで、 $k=0$ (外輪傷)、I(内輪傷)、R(転動体傷)である。

次に、診断時に測定したデータから抽出した瞬間スペクトルから計算された7個の周波数領域の特徴パラメータ値 $p_{jk}(j=1 \sim M)$ を各基準状態の判別関数に代入して得られた診

断時の第1、2次正準変量を z_{1x} 、 z_{2x} とする。以上に述べた内容をまとめて表 2.1.6-6 に示す。

表 2.1.6-6 判別関数 (正準変量)

| 学習による判別関数 (正準変量 z_{ik}) | 診断時の正準変量 z_{ix} |
|---|---|
| $z_{1k} = \sum_{j=1}^M a_{1j} p_{jk}$ $z_{2k} = \sum_{j=1}^M a_{2j} p_{jk}$ | $z_{1x} = \sum_{j=1}^M a_{1j} p_{jx}$ $z_{2x} = \sum_{j=1}^M a_{2j} p_{jx}$ |

(5) 異常種類判別のための推論法

基準状態の第1、2次正準変量 z_{1k} 、 z_{2k} の分布と診断時の第1、2次正準変量 z_{1x} 、 z_{2x} の分布とマッチングして推論することにより、複合異常種類が特定できる。すなわち、もし学習時の正準変量 z_{1k} 、 z_{2k} の分布 Z_k と診断時の正準変量 z_{1x} 、 z_{2x} の分布 Z_x と交われば、 k 種類の異常が発生した可能性が高い。このことを次のような推論式で表せる。

$$\text{if } (Z_k \cap Z_x) \neq \Phi \text{ (} k \in O, I, R \text{) then } x \in k \quad (3-2-2-6-22)$$

ここで、 Φ は空集合を表わす。たとえば、

$$\text{if } Z_O \cap Z_x \neq \Phi \ \& \ Z_I \cap Z_x \neq \Phi \ \& \ Z_R \cap Z_x = \Phi \ \& \ Z_N \cap Z_x = \Phi \ \text{then } x \in O, I$$

すなわち、外輪傷(O)と内輪傷(I)が同時に発生したと推定できる。

(6) 検証実験と結果

本開発で考案した手法の有効性を検証するために、図 2.1.6-13 に示すように、人工的に施した単一傷(外輪傷、内輪傷、転動体傷)および複合異常(内・外輪傷、内輪・転動体傷、外輪・転動体傷など)をもつ軸受を実験用の回転機械に取り付けて検証実験を行った。なお、検証に使用した軸受傷のサイズは、

外輪傷: $0.15\text{mm} \times 0.3\text{mm} (D \times W)$ 、内輪傷: $0.15\text{mm} \times 0.5\text{mm} (D \times W)$ 、転動体傷: $0.15\text{mm} \times 0.5\text{mm} (D \times W)$ である。なお、外輪傷の W が若干小さいが、この程度の違いは振動信号(傷による異常振動の衝撃波形)の特徴に殆ど影響しない。

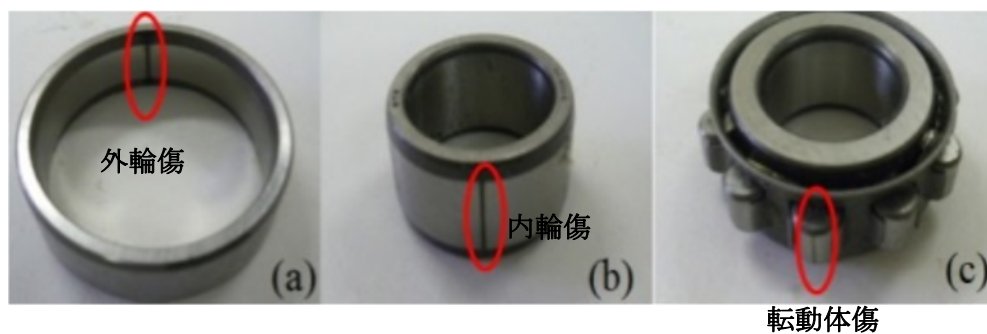
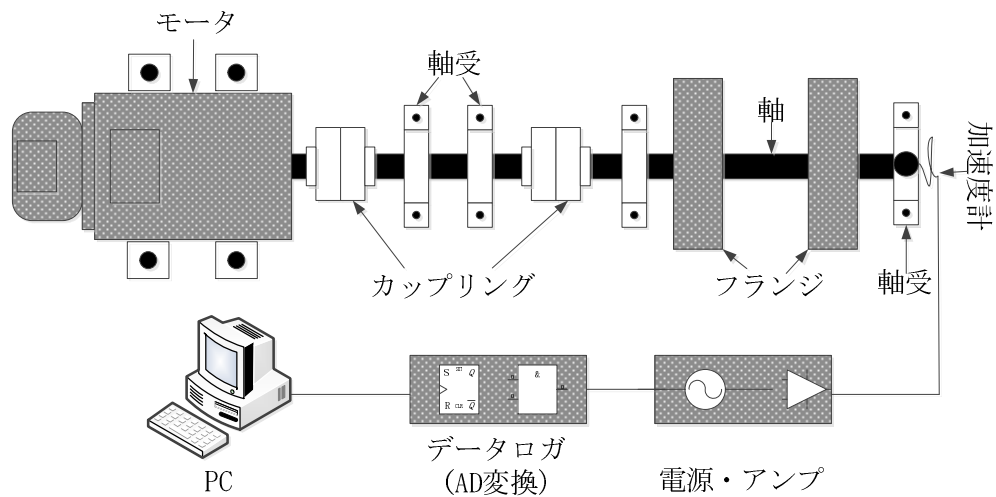


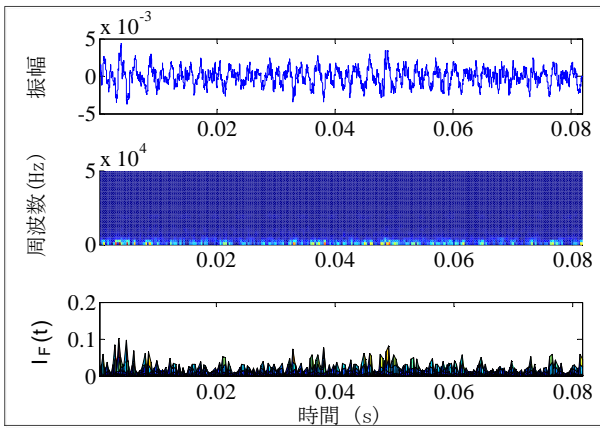
図 2.1.6-13 実験装置、診断対象の軸受

本実験では、図 2.1.6-13 に示すように振動加速度センサを軸受台座の上につけて振動加速度を計測した。なお、軸受の回転数が 1500rpm、信号計測時のサンプリング周波数が 100kHz、1 回の STFFT に用いたデータ総数は 8192 個 (2 回転分、0.0819s) である。

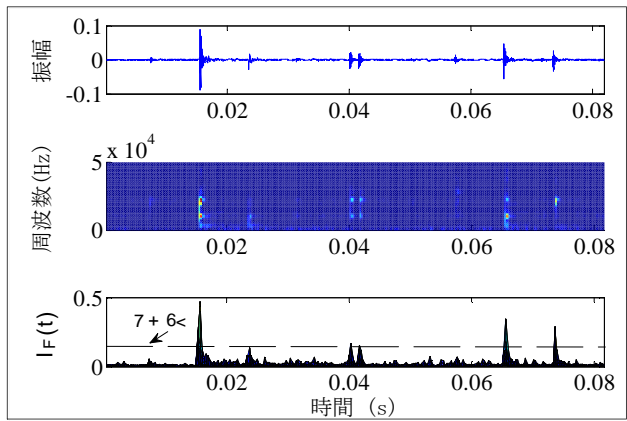
(6-1) STFFT と $I_F(t)$ による異常信号の瞬間スペクトルの抽出

信号の高低周波数帯域の特性を併せて配慮し、STFFT 窓の時間長を 0.00064s (64 ポイント) にした。図 2.1.6-14 には正常状態、各単一傷状態および複数傷状態 (内輪傷と転動体傷が同時に発生している状態) の時系列信号、時系列スペクトル (STFFT)、スペクトル強度 ($I_F(t)$) を示す。

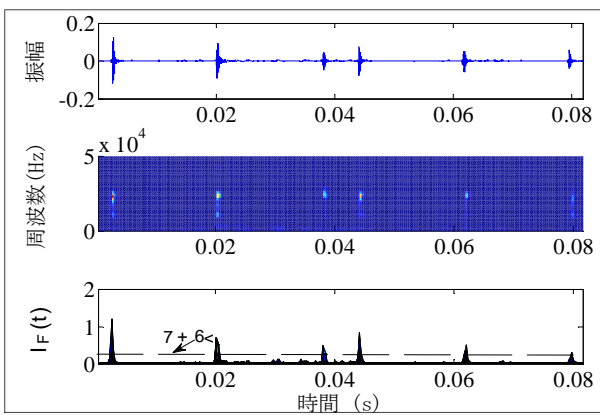
(a) 基準状態



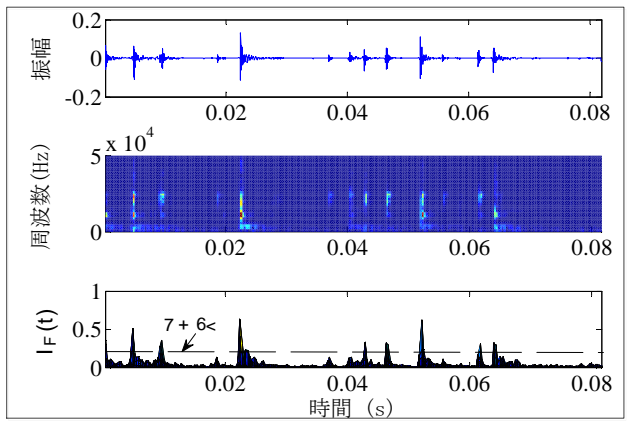
(d) 転動体傷状態



(b) 内輪傷状態



(e) 複合異常状態



(c) 外輪傷状態

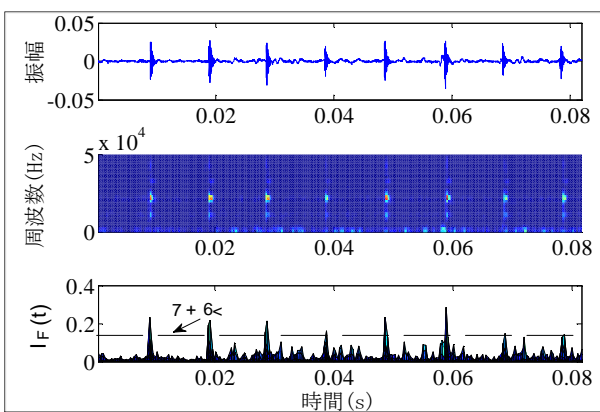


図 2.1.6-14 異常信号の時系列波形と SFFT スペクトル

これらの図で分かるように、軸受傷による時系列信号に発生している衝撃的な波形に対応して、時系列スペクトル (STFFT) とスペクトル強度 ($I_F(t)$) にも異常波形を示す高

い値が現れている。(3-1)で述べた通り、 $u+6\sigma$ の閾値をスペクトル強度 ($I_f(t)$) に適用して、各状態の時系列スペクトルから異常信号の瞬間スペクトルを抽出した。各瞬間スペクトルを(3-2-2-6-18)式で正規化した後、(3-2-2-6-11)式~(3-2-2-6-17)式により特徴パラメータを求め、(3-2-2-6-19)式で特徴パラメータの正規化した後、正準判別分析法で表 2. 1. 6-6 に示す各状態の判別関数 (正準変量) を求めた。

(6-2) 正準判別分析による状態判別

求めた判別関数 (正準変量 z_{ik}) を下式に示す。

第一判別関数 (第1次正準変量 z_{1k}) :

$$z_{1k} = \sum_{j=1}^M a_{1j} p_{jk} = 7.38P1 - 4.65P2 + 5.00P3 + 3.08P4 - 2.62P5 - 5.44P6 - 2.72P7 + 9.44 \quad (3-2-2-6-23)$$

第二判別関数 (第2次正準変量 z_{2k}) :

$$z_{2k} = \sum_{j=1}^M a_{2j} p_{jk} = -1.45P1 + 0.96P2 + 0.79P3 + 1.07P4 - 0.65P5 + 0.12P6 - 0.01P7 - 4.75 \quad (3-2-2-6-24)$$

これらの判別関数を用いた判別結果を図 2. 1. 6-15 に示すが、各状態の正準変量値の分布群が離れていることが確認でき、各状態の識別が可能であることがわかる。

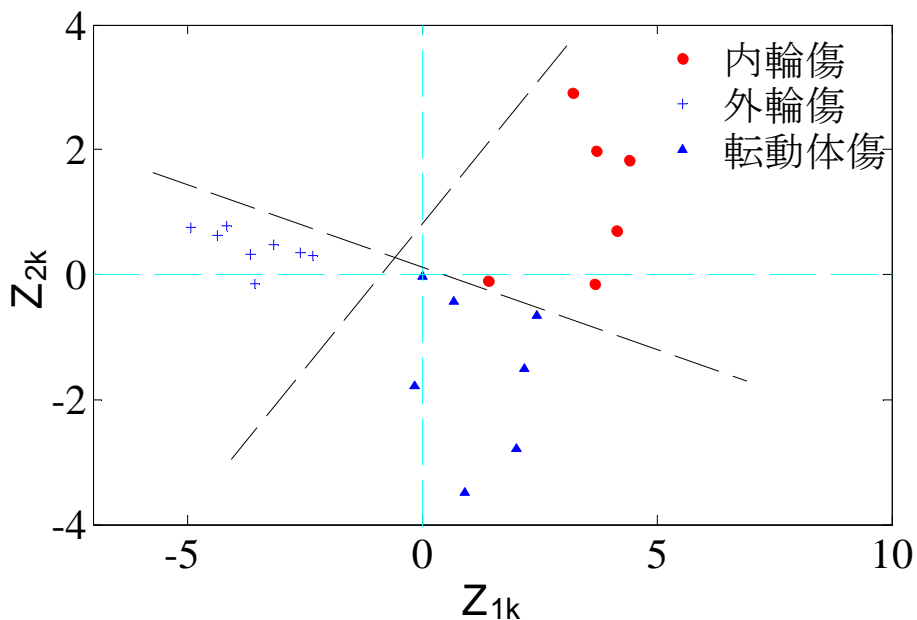


図 2. 1. 6-15 異常信号正準判別分析の例

(6-3) 異常識別の推論による診断結果

(3-2-2-6-22)式に基づく推論により軸受複合状態を特定するために、学習時の正準変量 z_{1k} 、 z_{2k} の分布 Z_k と診断時の正準変量 z_{1x} 、 z_{2x} の分布 Z_x を図 2.1.6-16 に示す。

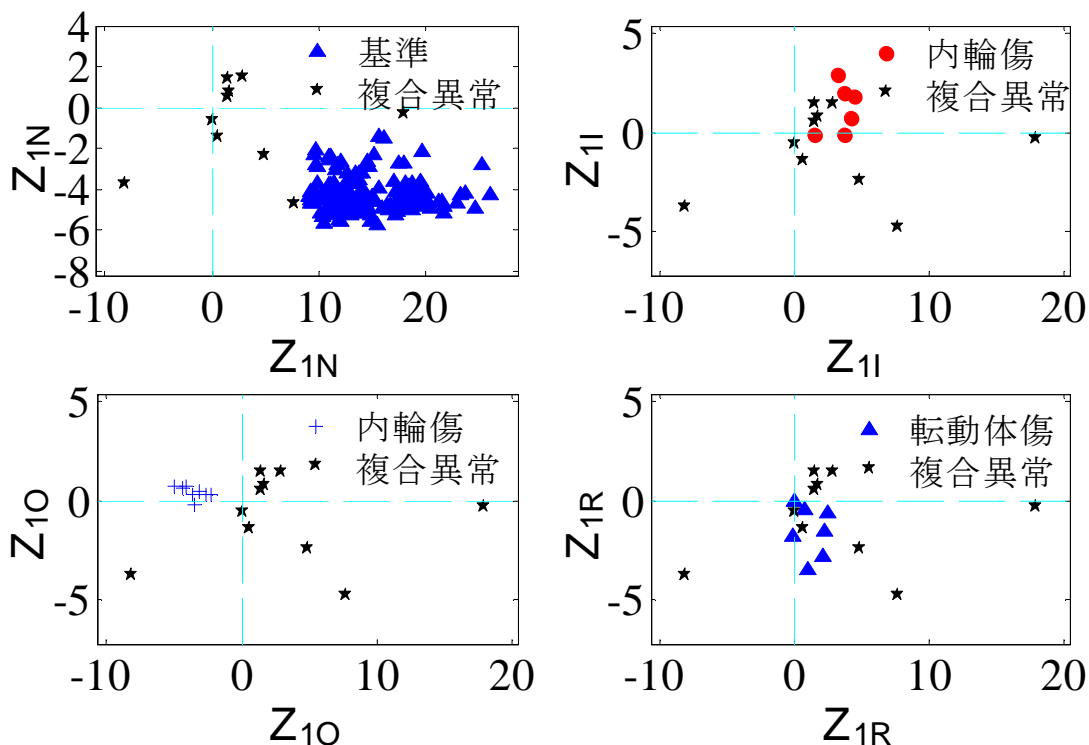


図 2.1.6-16 複合異常診断の例

図 2.1.6-16 によれば、診断時の正準変量 z_{1x} 、 z_{2x} の分布 Z_x は、内輪傷の正準変量 z_{1I} 、 z_{2I} の分布 Z_I と、転動体傷 z_{1R} 、 z_{2R} の分布 Z_R と交わっているが、正常状態 (z_{1N} 、 z_{2N}) の Z_N と外輪傷状態 (z_{1O} 、 z_{2O}) の Z_O と交わっていないから、(3-2-2-6-22)式に基づく以下の推論で「内輪傷と転動体傷が同時に発生している複合異常状態」と判定できる。

$$if Z_I \cap Z_x \neq \Phi \ \& \ Z_R \cap Z_x \neq \Phi \ \& \ Z_O \cap Z_x = \Phi \ \& \ Z_N \cap Z_x = \Phi \ then \ x \in I, R$$

以上に述べた軸受複合異常診断の実例により本開発で考案した方法が有効であることが分かる。

2.1.6.3 システム保全装置の構成法検討

(1) 超電導ケーブルシステム保全装置の構成案

超電導ケーブルシステム保全装置の構成案を図 2.1.6-17 に示す。液体窒素循環ポンプや冷凍機に取り付けられた加速度センサの信号をデータログで収録し、PCに取り込む。診断技術を用い自動状態診断を行い、図 2.1.6-18 に示すような状態表示画面を表示する。状態表示画面は数多くの状態監視対象（あるいは、計測ポイント）の状態表示などを一つのモニタ画面（ディスプレイ）上にまとめられ、各状態監視対象（あるいは、計測ポイント）の管理・状態監視・診断を効率的かつ容易に行えるものである。

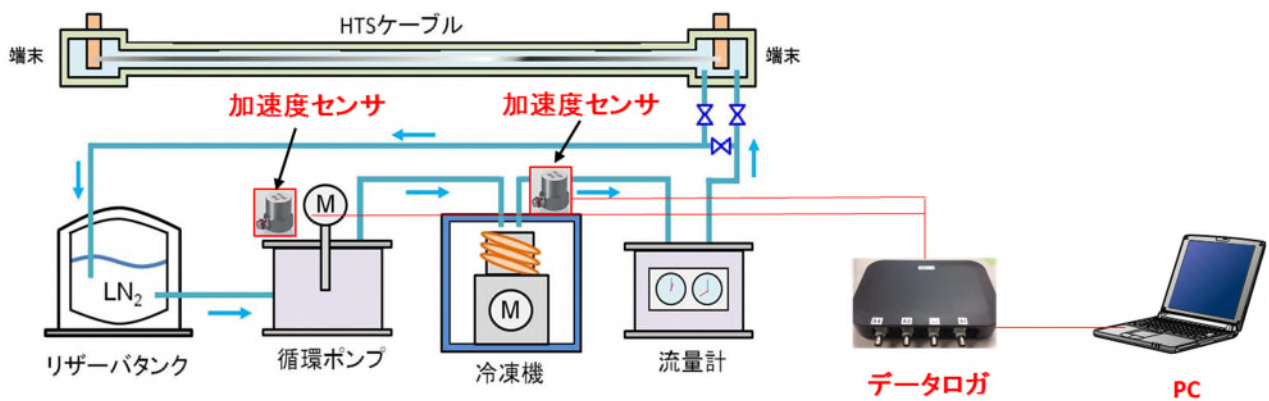


図 2.1.6-17 システム保全装置の構成例



図 2.1.6-18 状態表示画面例

(2) 計測信号の自動検査

設備診断のために信号を計測するとき、測定された信号が定常な信号か、非定常な信号かによって処理方法が異なる。定常な信号を処理して診断するような診断装置などに非定常な信号を入力すると、間違っただ診断結果が出力される可能性が高い。また、診断対象の設備から発生する真の信号が定常な信号である場合、計測ミスや外乱などの原因により計測された信号が非定常な信号、およびオーバーフローなどの発生や計測装置やセンサの故障により計測された信号が対象設備の真の信号でない不備な信号となることがある。このような非定常な信号や不備な信号を診断装置などに入力しても正確な診断結果が得られない。

そこでシステム保全装置にはこれらの計測信号不備を自動的に検出し、誤診断を防ぐ機能をもたせることが望ましい（図 2.1.6-18 における信号良否アイコン）。

(3) 状態の傾向管理

PC では各設備の仕様、各特徴パラメータの傾向グラフ、絶対・相対判定基準、各周波数帯域の特徴パラメータの値、状態判定結果などを表示する（図 2.1.6-19）機能を持つことで、設備状態の管理が効率よく行える。



図 2.1.6-19 状態の傾向管理

2.1.7 実環境下での評価実施（実施者：公益財団法人鉄道総合技術研究所）

2.1.7.1 閉ループ試験による冷却方式の検討

これまでに開発した冷凍機や液体窒素循環ポンプなどの要素機器を用いて、冷却システムを構築、長尺断熱管の入熱を模擬する模擬負荷と接続し、閉ループ試験を実施した。冷却フローは、図 2.1.7-1 に示すような冷凍機と模擬負荷を直列に接続して冷却する方式（直接冷却と呼ぶ）と、図 2.1.7-2 に示すようなリザーバーを介して模擬負荷を冷却する回路（メインライン）と温まった窒素を冷凍機で冷却する回路（サブライン）を組

み合わせる方式（間接冷却と呼ぶ）の二つの冷却方式について検証した。間接冷却が採用できれば、冷凍機故障時もメインラインの冷却を継続できるほか、それぞれのラインに適した設計が可能になる。例えば、大きな配管抵抗を有する長尺断熱管と分離することで、冷凍機に過大な圧力をかけずに済むため、設計圧力を低くでき、小型化をはかることが可能となる。

バルブの開閉により回路を切り替えることで直接冷却と間接冷却の回路を構成し、断熱管の熱侵入を模擬したヒータ負荷をどれだけ冷却できるか検証した。結果を図 2.1.7-3 に示す。直接冷却と間接冷却で冷却できる負荷に差は見られなかったため、前述の冗長性や低コスト化（冷凍機小型化等）の観点から、間接冷却に基づいた設計が望ましいといえる。

なお、冷凍機出口温度が約 73 K 以上であれば 3 kW 以上の冷却が可能であり、直接冷却・間接冷却ともに 2 W/m 以下の熱侵入の断熱管を 1.5 km 程度まで冷却できることを確認した。そのため、今回の長距離冷却システムでは、間接冷却を採用することとした。

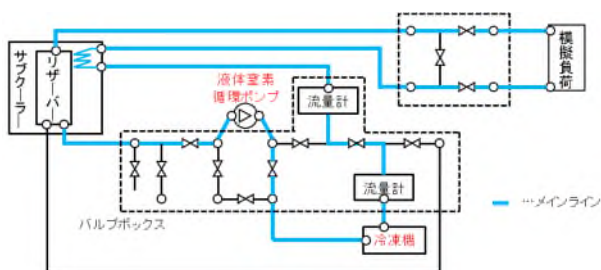


図 2.1.7-1. 直接冷却の模式図

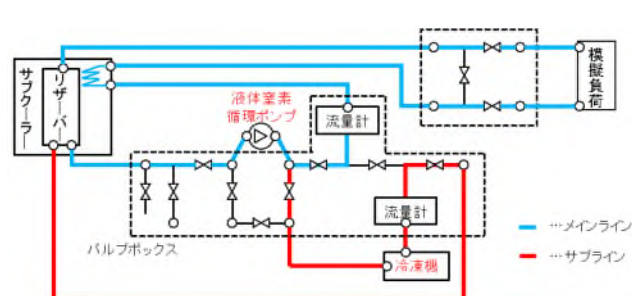


図 2.1.7-2. 間接冷却の模式図

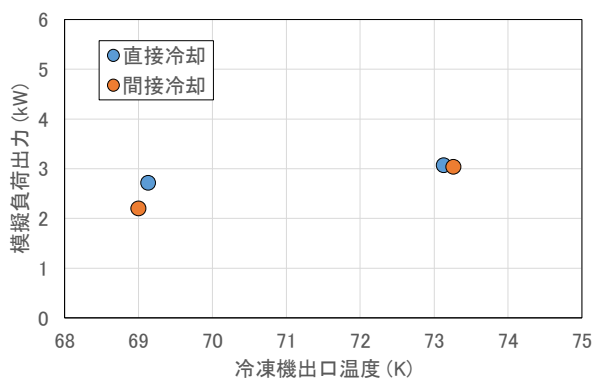


図 2.1.7-3 直接・間接方式の冷却能力比較試験

2.1.7.2 状態監視、診断技術の適用

冷却システムのモータ等回転機などの稼働部付近などに加速度センサを取り付け（図 2.1.7-4）、振動加速度データを蓄積した。さらに長距離冷却システムに向けた状態監視・診断技術の高度化に向け、蓄積データに基づき診断パラメータ（実効値やピーク値、幾何平均、変動率、歪度、尖度、波高率、波形率、主成分等）や閾値の検討を行った（図 2.1.7-5）。蓄積したデータをもとに、相対判定基準を用いて、加速度の時間領域実効値、

時間領域ピーク値、時間領域変動係数、時間領域歪度、時間領域尖度、時間領域波高率、時間領域波形率、周波数領域幾何平均、および上記パラメータの主成分から総合的に診断する方法の検証、評価を行い、km 級長距離冷却システムに向けた状態監視・診断技術の健全性を確認した。

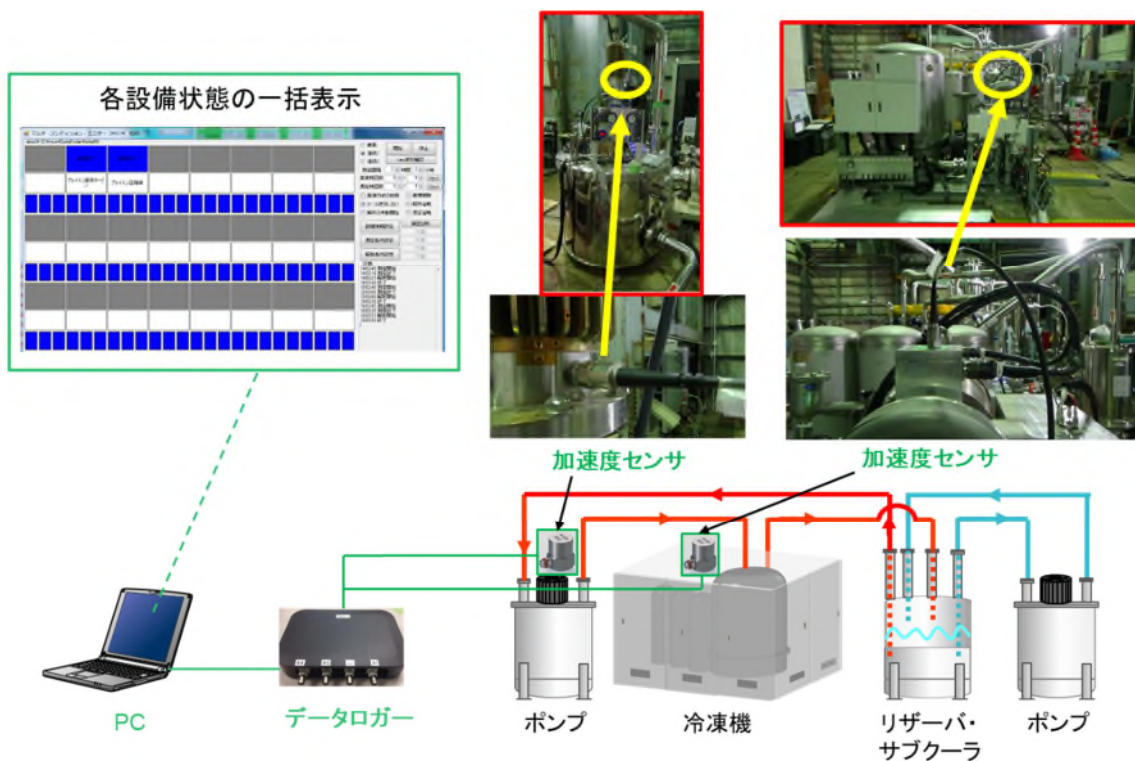


図 2. 1. 7-4 構築した冷却システムへの加速度センサの取り付け

| | 状態判定基準 | | | | | | |
|-----|------------------|------|-------------|------------------------|-----|-------------------------|-----|
| | 振動速度の絶対判定基準(実効値) | | | 有次元特徴パラメータの相対判定基準の比率係数 | | 無次元特徴パラメータの相対判定基準係数K(σ) | |
| | パワー(KW) | 支持基礎 | 推奨基準(mm/ss) | 注意 | 危険 | 注意 | 危険 |
| ▶ 1 | < 15 KW | 剛性基礎 | 0.71 | 2 | 6 | 2.5 | 6.3 |
| 2 | < 15 KW | 剛性基礎 | 0.71 | 2 | 6 | 2.5 | 6.3 |
| 3 | < 15 KW | 剛性基礎 | 0.71 | 2 | 6 | 2.5 | 6.3 |
| 4 | < 15 KW | 剛性基礎 | 0.71 | 2 | 6 | 2.5 | 6.3 |
| 5 | < 15 KW | 剛性基礎 | 0.71 | 1.2 | 6.3 | 4 | 9 |

図 2. 1. 7-5 閾値の検討例

2. 1. 7. 3 長尺断熱管の製作

長距離冷却試験に向け、長尺断熱管を製作した。製造工程のイメージ図を図 2. 1. 7-6 に示す。真空層を有する真空断熱二重配管を製作するため、通常のコルゲート管の製造工程に、開発した洗浄・乾燥工程と断熱材の巻き付け工程を追加している。

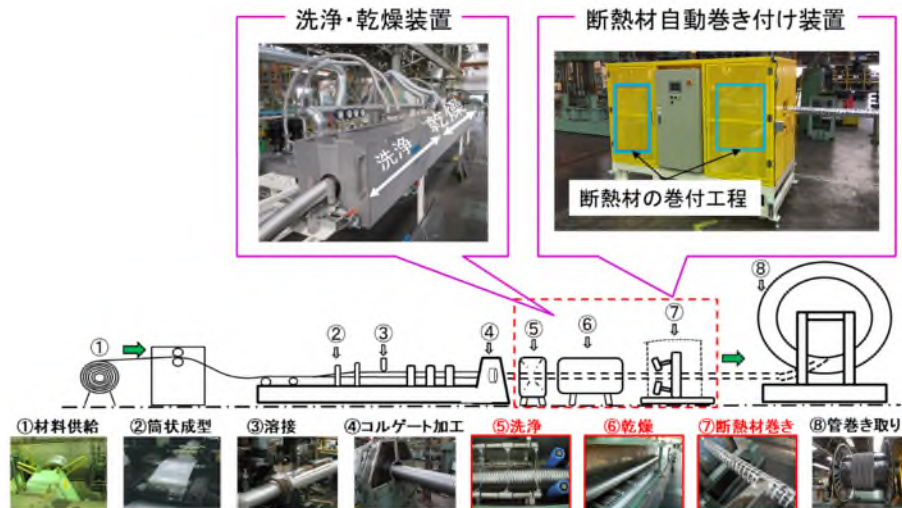


図 2.1.7-6. 長尺断熱管の製造工程のイメージ図

2.1.7.4 1.5 km 級システムの構成・評価

総長 1565 m の長尺断熱管を敷設（図 2.1.7-7）、
 端末を介して冷却システムと接続し、1.5 km 級シ
 ステムを構成した。冷却フローを図 2.1.7-8 に示
 す。断熱管の内部には超電導き電ケーブルを模擬
 した冷媒配管を配置し（図 2.1.7-9）、冷媒配管の
 内部を往路、冷媒配管と断熱管の間を復路として
 液体窒素を循環する対向流循環（Go-Return）方式
 とした。断熱管を冷却するメインラインと、冷媒を
 冷却するサブラインを分けた回路構成とし、サブ
 ラインには専用のサブポンプを設けた。

さらに、1.5 km 先には予備冷凍機を設置したが、
 本試験では稼働することなく冷却試験を実施し
 た。また、冷却システムに導入したサブクーラー
 は、冷凍機が停止した場合でも、真空ポンプでサブ
 クーラー内の液体窒素を減圧し過冷却にすること
 ができ、一定時間メインラインの冷却を継続するこ
 とができるため、冷却システムの冗
 長性向上に寄与する。本試験では、真空ポンプによりサブクーラー圧力を約 0.033 MPa(A) に減圧することで、サブクーラー内の液体窒素温度を 69 K とし、液面制御により液体窒素の自動供給を行った。長距離システムを構築後、窒素ガスによる全体の気密試験により気密性を確認し、液体窒素を充填、冷却試験を実施した。



図 2.1.7-7 敷設した断熱管

図 2.1.7-7 敷設した断熱管

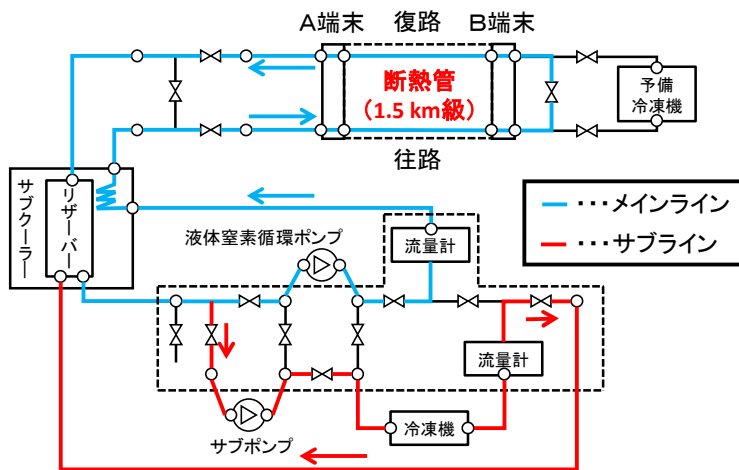


図 2.1.7-8 冷却フロー図

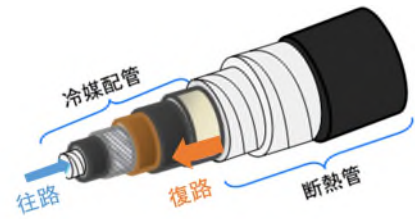


図 2.1.7-9 断熱管内部の構造

(1) 圧力損失の検討

流量を変化させ、各圧力計の表示から、往路および復路の圧力損失を測定した（図 2.1.7-10）。その結果、30 L/min の流量において往路で 0.63 MPa、復路で 0.07 MPa の圧力損失が発生していることを確認した。

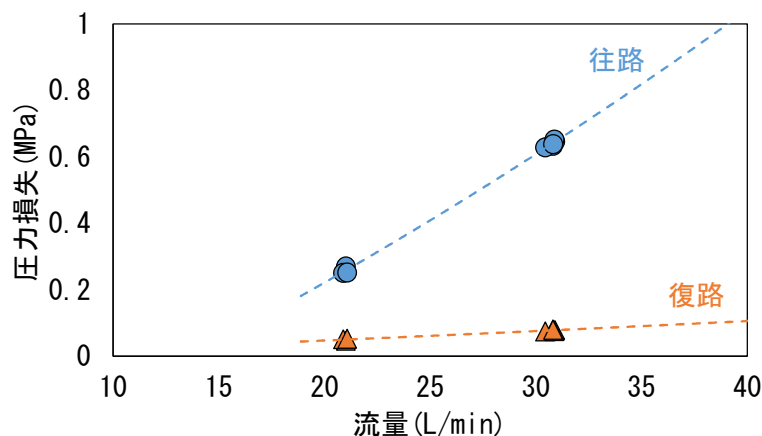


図 2.1.7-10 圧力損失測定結果（1.5 km 級システム）

(2) 長距離断熱管の熱侵入評価

冷却安定時の A 端末の入口および出口温度、流量を図 2.1.7-11 に示す。なおサブクーラーの液面制御による注液の際に A 端末入口温度がわずかに変動しているが、A 端末出口温度は安定しているためシステムの温度分布に与える影響はほとんどない。またこの時も予備冷凍機は使用していない。流量 30.9 L/min、A 端末の入口と出口の温度差 4.3 K であった。この測定値から熱負荷を計算すると、断熱管を含めた熱負荷部の熱侵入は 3.8 kW となる。既知の各機器の熱負荷と、圧力・流量による損失により、この内訳は表 2.1.7-1 のようになり、1.565 km の断熱管での熱侵入は 3.12 kW と見積もることができる。これにより、1.5 km 級においても、長尺に亘り、2 W/m 以下の熱侵入が実現できていることを確認した。

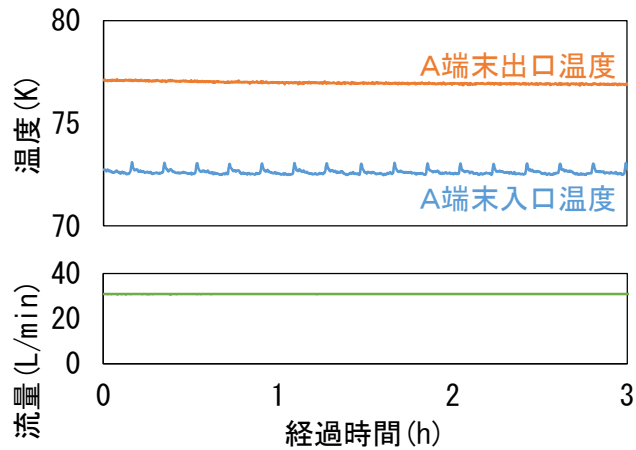


図 2.1.7-11 冷却安定時のA端末入口・出口温度と液体窒素流量（1.5 km 級システム）

表 2.1.7-1. 熱負荷内訳（1.5 km 級システム）

| 機器・損失 | 熱負荷 (W) |
|------------------|---------|
| 電流端末（2 基分） | 100 |
| 電流リード（A 端末 2 本分） | 150 |
| 冷却システム接続配管 | 60 |
| DPV ロス | 370 |
| 断熱管 | 3120 |

次に流量 30.9 L/min での温度計測結果をもとに、断熱管の温度分布の解析を行った（図 2.1.7-12）。シンボルは計測値であるが、これをよく再現できており、全体の温度差は 9 K 以内に収まっていることがわかる。

また、製作した長尺断熱管の一部を冷媒の戻し配管とし、冷媒を 1 方向へ流す循環冷却（Go-Go）方式による冷却も実施したが、同様に安定冷却できることを確認した。

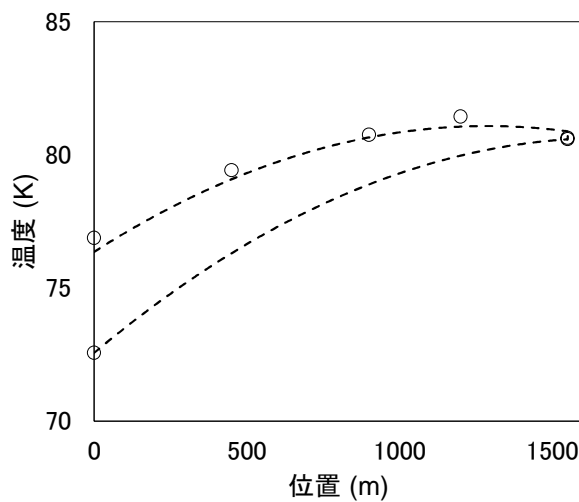


図 2.1.7-12. 解析した温度分布（1.5 km 級システム、シンボルは計測値）

(3) 状態監視、診断技術による評価

1.5 km 級システムの冷却の間、状態監視、診断技術による監視を行った。冷凍機・ポンプに取り付けた加速度センサから振動信号を PC に取り込み、PC で状態判定を行い、PC 上の監視画面で正常を表す青の表示がなされ、冷却システムが健全に動作していることが確認できた (図 2.1.7-13)。

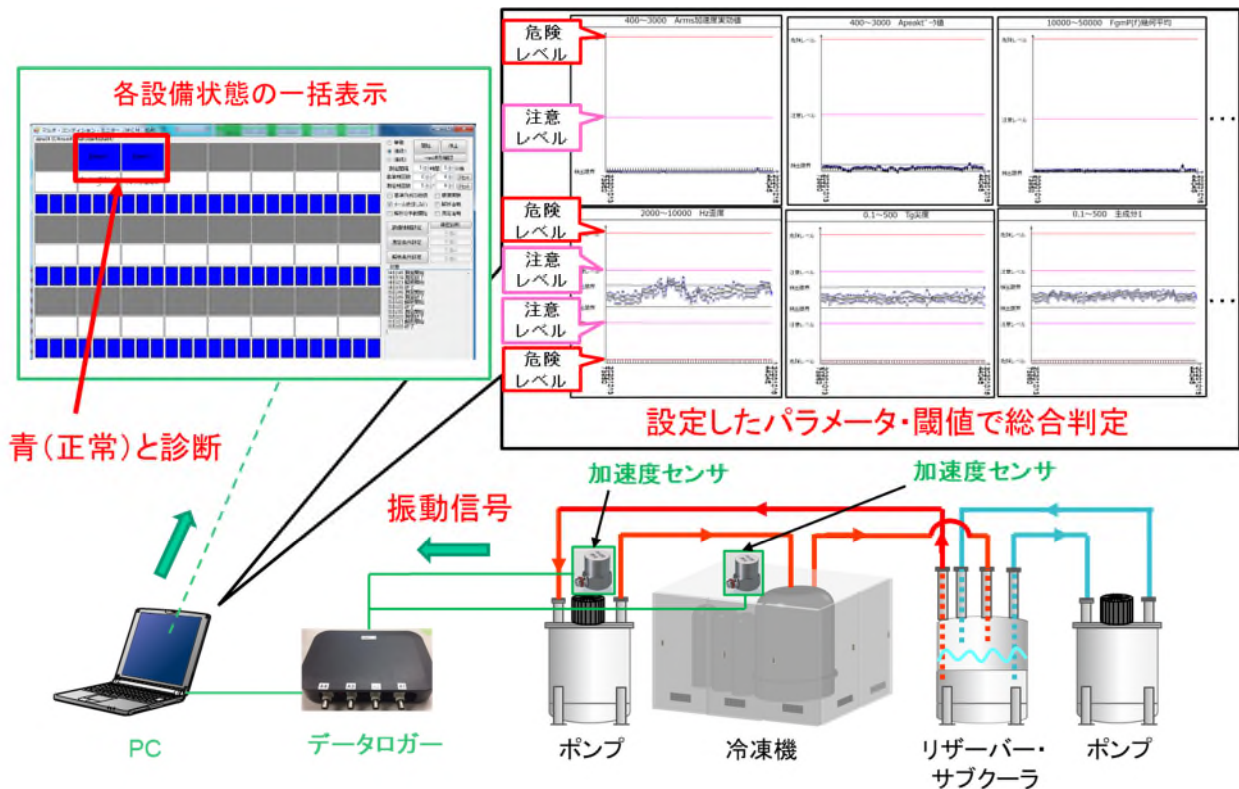


図 2.1.7-13. 状態監視・診断技術による 1.5 km 級システムの健全性確認

参考文献

- [3-2-2-3-1] 大森隆夫: 多層断熱技術 I-断熱性能の評価-, 低温工学, Vol.51 No.6(2016)
- [3-2-2-3-2] 上岡泰晴: 多層断熱技術 III-施工法および多層断熱用真空技術-, 低温工学, Vol.51 No.8(2016)
- [3-2-2-3-3] 富田優 他: 超電導き電ケーブルシステムの断熱管試作, 第 93 回 2016 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集 p73
- [3-2-2-4-1] 秋山秀典: 高電圧パルスパワー工学, オーム社, p.23, 2003
- [3-2-2-4-2] JCAA 技術報告書「高圧ケーブル用終端接続部について」, 1992 年 11 月
- [3-2-2-4-3] 安喰浩司, 島田健夫三: 鉄道の雷保護技術, 電気設備学会誌, Vol. 26, No. 7, pp.470-473, 2006.

- [3-2-2-4-4] 五島久司: 高気圧窒素ガスの雷インパルス絶縁特性 —純平等電界及び金属遺物存在時の絶縁特性—, 電力中央研究所報告書, T99047.
- [3-2-2-4-5] Enis Tuncer, et. al., “Electrical Insulation Characteristics of Glass Fiber Reinforced Resins,” *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 19, No. 3, pp. 2359–2362, 2009.
- [3-2-2-6-1] 陳山鵬: 軸受の損傷による回転機械の振動事例と診断方法, *トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌)*, Vol. 61, No. 7, pp. 431–436(2016)
- [3-2-2-6-2] 陳山鵬:「回転機械設備診断の基礎と応用」, DET LPP.出版(2015)
- [3-2-2-6-3] 安居院猛, 長尾智晴:「ジエネティックアルゴリズム」, 昭晃堂(1993)
- [3-2-2-6-4] 宋瀏陽, 陳山鵬, 王華慶, 浦中健: GA 統計フィルタとクラスタ分析による知的設備診断法:軸受診断への適用, *日本機械学会シンポジウム講演論文集*, No.14-43, pp. 7–10 (2014)
- [3-2-2-6-5] Liuyang Song, Huaqing Wang, Jinji Gao, Jianfeng Yang, Wenbin Liu and Peng Chen: Application of statistics filter method and clustering analysis in fault diagnosis of roller bearings, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 364, No. 1 (2012)
- [3-2-2-6-6] 橋本英樹, 野々部宏司: 入門タブー探索法, *オペレーティングリサーチ*, Vol. 58, No. 12, pp. 703–707(2013)
- [3-2-2-6-7] Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone: *Classification and Regression Trees*, *Chapman & Hall, Boca Raton* (1993)
- [3-2-2-6-8] 金田重郎: 決定木学習: 実用機を迎えたノンパラメトリック統計手法, *CIGSJ Bulletin*, Vol. 117, No. 4, pp. 9–14(2014)
- [3-2-2-6-9] J. R. Quinlan: *C4. 5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann, pp. 21–23 (1993)
- [3-2-2-6-10] A. Nourmohammadzadeh, and S. Hartmann: Fault Classification of a Centrifugal Pump in Normal and Noisy Environment with Artificial Neural Network and Support Vector Machine Enhanced by a Genetic Algorithm, *International Conference on Theory and Practice of Natural Computing*, pp. 58–70 (2015)
- [3-2-2-6-11] R. Gopinath, C. S. Kumar, V. Vaijeyanthi *et al.*: Fine Tuning Machine Fault Diagnosis System Towards Mission Critical Applications, *Intell. Syst. Technol. Appl.*, pp.217–226 (2016)
- [3-2-2-6-12] Randall, R. B., and Antoni, J.: Rolling element bearing diagnostics—a tutorial, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), pp. 485–520 (2011)
- [3-2-2-6-13] Yu, D. J., Wang, M., and Cheng, X. M.: A method for the compound fault diagnosis of gearboxes based on morphological component analysis, *Measurement*, 91, pp. 519–531 (2016)

- [3-2-2-6-14] Wang, H. Q., Li, R. T., Tang, G., Yuan, H. F., Zhao, Q. L., and Cao, X.: A Compound Fault Diagnosis for Rolling Bearings Method Based on Blind Source Separation and Ensemble Empirical Mode Decomposition, *Plos One*, 9(10), pp. 1-13 (2014)
- [3-2-2-6-15] Wang, Y., and Liang, M.: Identification of multiple transient faults based on the adaptive spectral kurtosis method, *Journal of Sound and Vibration*, 331(2), pp. 470-486 (2012)
- [3-2-2-6-16] Tang, G. J., Wang, X. L., and He, Y. L.: Diagnosis of compound faults of rolling bearings through adaptive maximum correlated kurtosis deconvolution, *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 30(1), pp. 43-54 (2016)
- [3-2-2-6-17] Wang, Y., He, Z., and Zi, Y.: Enhancement of signal denoising and multiple fault signatures detecting in rotating machinery using dual-tree complex wavelet transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(1), pp. 119-137 (2010)
- [3-2-2-6-18] Chen, J. L., Zi, Y. Y., He, Z. J., and Yuan, J.: Compound faults detection of rotating machinery using improved adaptive redundant lifting multiwavelet, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38(1), pp. 36-54 (2013)
- [3-2-2-6-19] Chen, J. L., Zi, Y. Y., He, Z. J., and Wang, X. D.: Construction of adaptive redundant multiwavelet packet and its application to compound faults detection of rotating machinery, *Science China-Technological Sciences*, 55(8), pp. 2083-2090 (2012)
- [3-2-2-6-20] Li, Z., Yan, X., Yuan, C., Peng, Z., and Li, L.: Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(7), pp. 2589-2607 (2011)
- [3-2-2-6-21] He, S. L., Chen, J. L., Zhou, Z. T., Zi, Y. Y., Wang, Y. X., and Wang, X. D.: Multifractal entropy based adaptive multiwavelet construction and its application for mechanical compound-fault diagnosis, *Mechanical Systems And Signal Processing*, 76-77, pp. 742-758 (2016)
- [3-2-2-6-22] Purushotham, V., Narayanan, S., and Prasad, S. A. N.: Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and hidden Markov model based fault recognition, *NDT & E International*, 38(8), pp. 654-664 (2005)
- [3-2-2-6-23] P. Chen, F. F., T. Toyota and Z. He, 2001, "Condition diagnosis of plant machine by sequential statistical tests and possibility theory using spectra of vibration signal," *Proc. of APVC2001*, pp. 820-825 (2001)

2.2 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

2.2.1 高温超電導コイルの実用化技術開発

2.2.1.1 コイル・マグネット製作技術

(1) 大口徑コイル巻線技術（三菱電機）

1. 高温超電導線材の評価

1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルに使用した REBCO 高温超電導線材は、H27 年度までに試作したモデルコイル用線材と異なり、劣化率およびハンダ接続作業性の改善を考慮してこれまでの超電導線材の銅保護層であった、銅箔（20 μ m 厚）を Sn ハンダによるフォーミング線材から、銅メッキ（20 μ m 厚）に仕様を変更した。また、線材メーカーでの特性改善提案を受けて 77K での臨界電流を抑えて 30K 以下かつ数 T 以上の磁場中での臨界電流を改善した線材を用いることとした。

臨界電流の代表的な値として、77K, 0T における臨界電流が 200A のものについて、6T, 30K において H25 年度線材は 150A であったが、H29 年度線材は 175A とおよそ 20% 向上した。そこで、生産性を向上するために納入仕様を H26 年度までの 200A 以上 (77K, 0T) から 165A 以上とした。また参考値として 30K, 3T の臨界電流を 250A 以上とし、サンプルリングでこの性能が維持できていることを確認している。

H29 年度購入の REBCO 超電導線の臨界電流の分布を磁化法 (Tape-star) での製品試験の結果について全長データから臨界電流の度数分布を算定した。結果、H25 年度と同様に大きく 3 つのピークが確認され、低いピークで 21% 低下、全体的に発生幅が広くなり、特性が低下しているように見える。1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの通電特性から 20K では十分な余裕があることから、本線材を用いることは問題無いと判断している。

2. 巻線手法、手順

1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの巻線について、メインコイル（内直径 ϕ 560 mm）および シールドコイル（外直径 1200mm）の製作を行った。H28 年度からはメインコイルの製作を行い、H29 年度下期から大口徑のシールドコイルの製作を並行して実施した。

コイル枚数はシングルパンケーキで 220 枚を用いる。その内訳は主磁場を発生するサイドコイルが 88 枚、磁場均一度を調整するセンターミドルコイルが 72 枚、漏れ磁場を抑制するシールドコイルが 60 枚用いる。

尚、将来、MRI マグネットを高温超電導で達成するための製作上の技術課題は主に下記 2 点と想定される。

① 高精度なコイル（含む高剛性）

② 低抵抗

これらの要求に対して、内径側は巻治具により精度の良い径を得ることが可能であるが、巻途中や外径側は線材の誤差、製作誤差等で不均一となる要素を含んでいる。また、良好な磁場均一度を得ようとするためには、コイル外径の巻き精度を上げるだけでは不十分で、コイル同士を積み重ねて一体化した時の組立位置精度が重要になる。その為にも高精度な単品コイルを量産出来るコイル化技術が必要となる。

(2) パンケーキコイルの単体試験 (三菱電機)

1. 目的

製作した 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル用のシングルパンケーキコイルが、必要な臨界電流値を有しているかを確認するため、シングルパンケーキコイルを液体窒素冷却下にて通電し、電流電圧特性を取得する。

2. 臨界電流値の解析

製作した 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル用の各シングルパンケーキコイルが、通電試験時に臨界電流値（電界基準： $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ）を超えて通電しないよう、各シングルパンケーキコイルの臨界電流を数値解析により導出した。計算に使用した超電導線材の磁場強度依存性と磁場角度依存性を図 2.2.1-1、図 2.2.2-2 に示す。図 2.2.1-3 上図のようなシングルパンケーキコイルのモデルを作成し、静磁場解析を実施した。静磁場解析ではコイルの対称性から、1/4 モデルにて解析を実施した。静磁場解析の一例として、サイドコイル 1 に 1 A 通電したときの静磁場解析結果を図 2.2.1-3 下図に示す。静磁場解析においてシングルパンケーキコイルの各ターンにおける磁場を導出し、図 2.2.1-1、図 2.2.2-2 の REBCO 線材の磁場強度依存性・磁場角度依存性を考慮して臨界電流値を導出した。各ターンにおける電圧の解析結果の一例（サイドコイル 1）を図 2.2.2-2～-4 に示す。最も電圧が大きい箇所は自己磁場が最も大きい、最内層となることがわかった。以後の通電試験では、最内層の電圧が電界基準 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ を超えないよう、試験を実施する。1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルを構成する各シングルパンケーキコイルの臨界電流値を表 2.2.1-1 に示す。

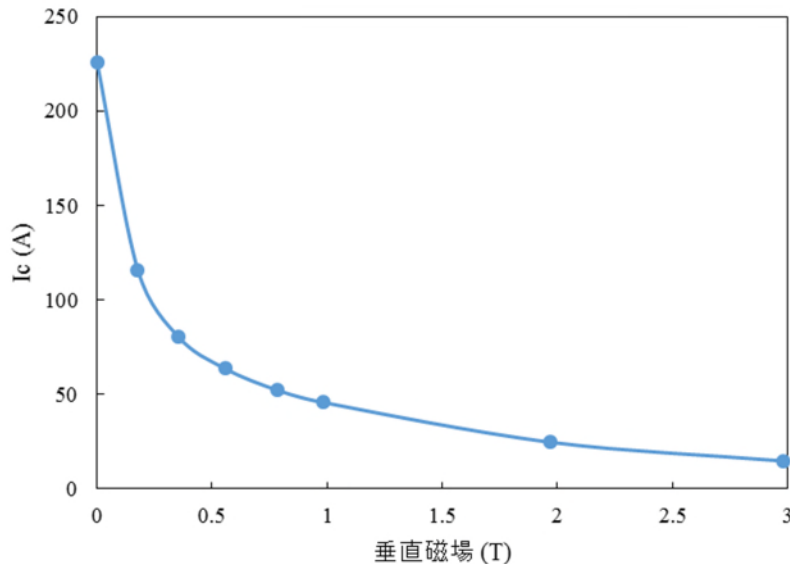


図 2.2.1-1 REBCO 線材の磁場強度依存性

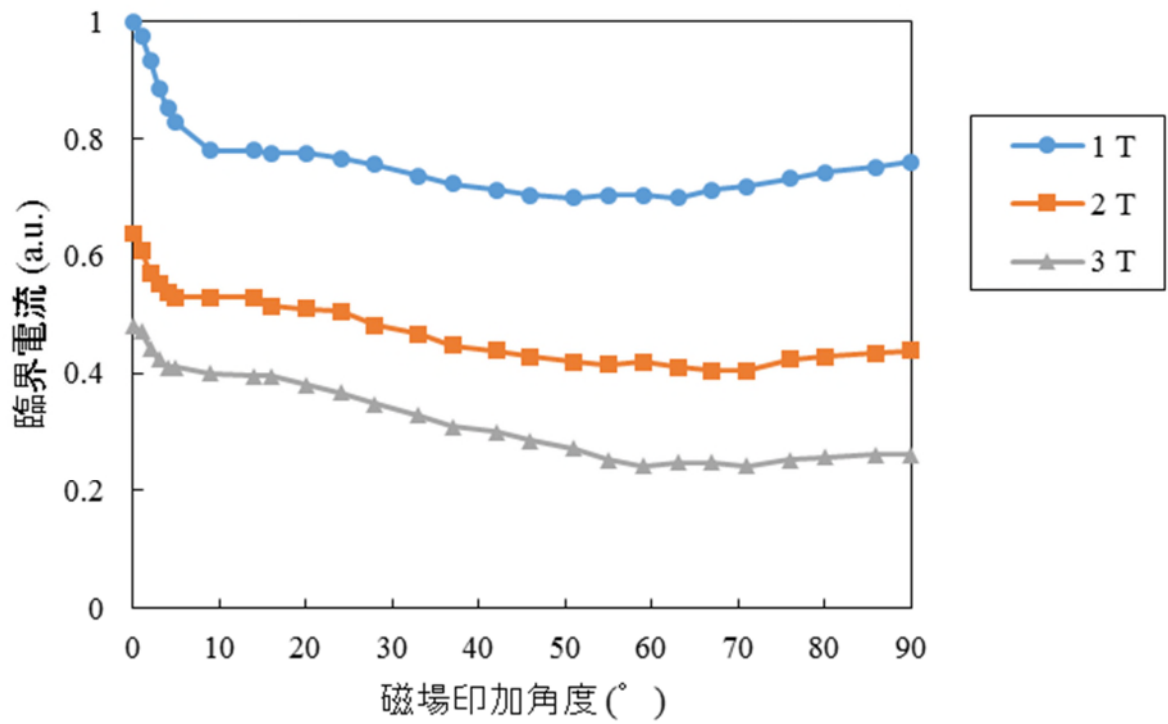


図 2. 2. 2-2 REBCO 線材の磁場角度依存性

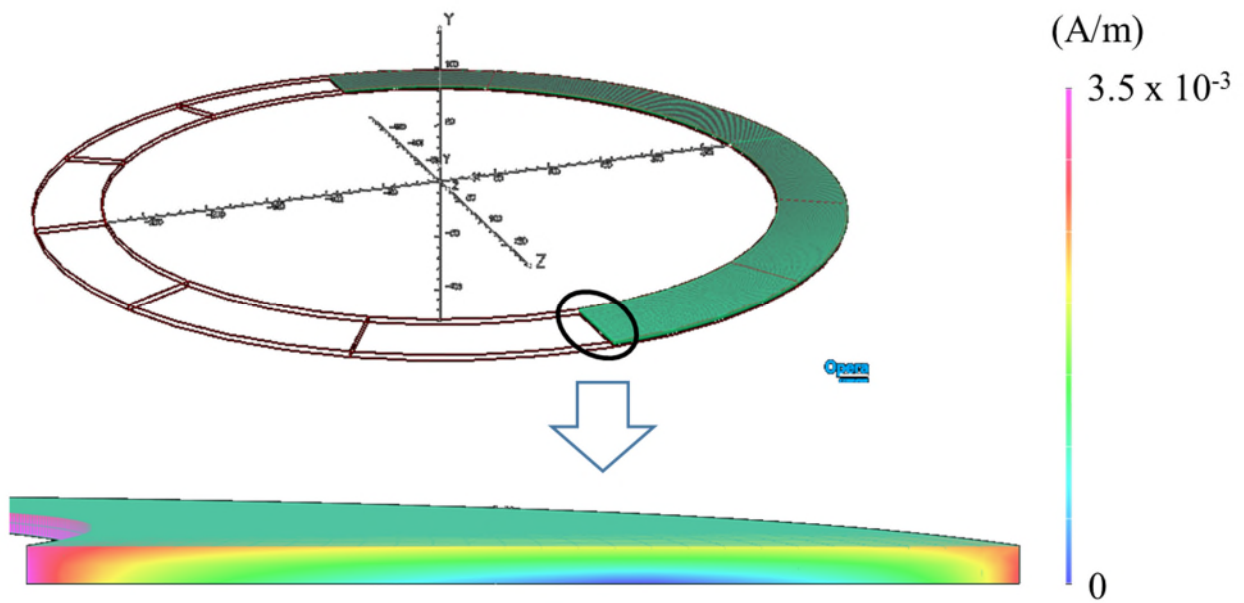


図 2. 2. 1-3 1A 通電時のサイドコイル内の磁場分布

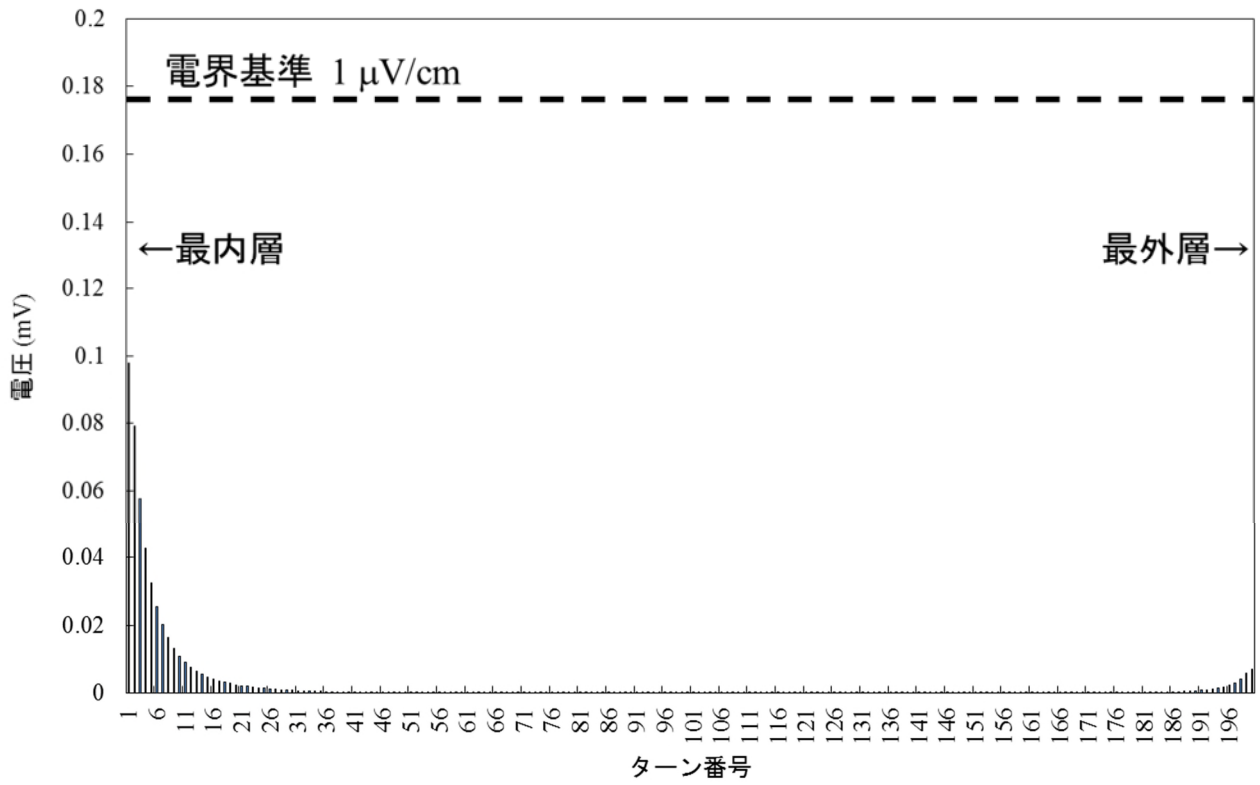


図 2.2.1-4 78A 通電時におけるサイドコイル 1 の各ターンの電圧

表 2.2.1-1 各コイルの臨界電流解析結果

| コイル | | Ic解析結果 (A) | コイル | | Ic解析結果 (A) |
|-----|----|---------------|-----|----|---------------|
| 群 | 番号 | | 群 | 番号 | |
| Ce | 1 | 80.9 | Sh | 1 | 85.2 |
| | 2 | | | 2 | |
| | 3 | 3 | | | |
| | 4 | 4 | | | |
| | 5 | 5 | | | |
| | 6 | 84.7 | | 6 | |
| | 7 | | | 7 | |
| | 8 | | | 8 | |
| Md | 1 | 81.0 | | 9 | |
| | 2 | 79.9 | | 10 | |
| | 3 | 79.9 | | 11 | |
| | 4 | | | 12 | |
| | 5 | 79.9 | | 13 | |
| | 6 | | | 14 | |
| | 7 | | | 15 | |
| | 8 | 85.2 | | | |
| | 9 | 85.2 | | | |
| | 10 | | | | |
| Si | 1 | 78.0 | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |
| | 4 | | | | |
| | 5 | | | | |
| | 6 | | | | |
| | 7 | | | | |
| | 8 | | | | |
| | 9 | | | | |
| | 10 | | | | |
| | 11 | | | | |
| | 12 | | | | |
| | 13 | | | | |
| | 14 | | | | |
| | 15 | | | | |
| | 16 | | | | |
| | 17 | 78.5 | | | |
| | 18 | 79.4 | | | |
| | 19 | 80.2 | | | |
| | 20 | 81.3 | | | |
| | 21 | 84.0 | | | |
| | 22 | 88.7 | | | |

3. 通電試験による評価

通電試験は2015年度の3T評価コイルの単体評価試験と同様に、冷却容器内にコイルを配置し、容器に液体窒素を入れてコイルを冷却した。急激な温度変化をさせないため、コイルはアルミ板で挟む構造とし、熱電対でコイル温度を計測しながら徐冷するようにした。冷却図を図 2.2.1-5 に示す。また、熱電対の設置箇所と冷却時間とコイル温度の関係を図 2.2.1-6, 図 2.2.1-7 に示す。

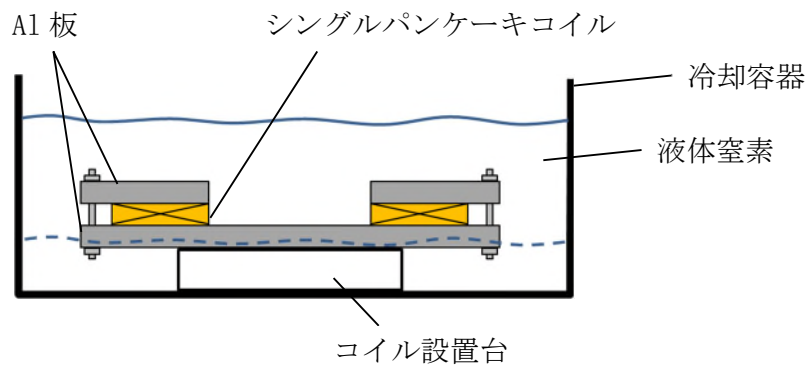


図 2. 2. 1-5 コイル単体試験の冷却図

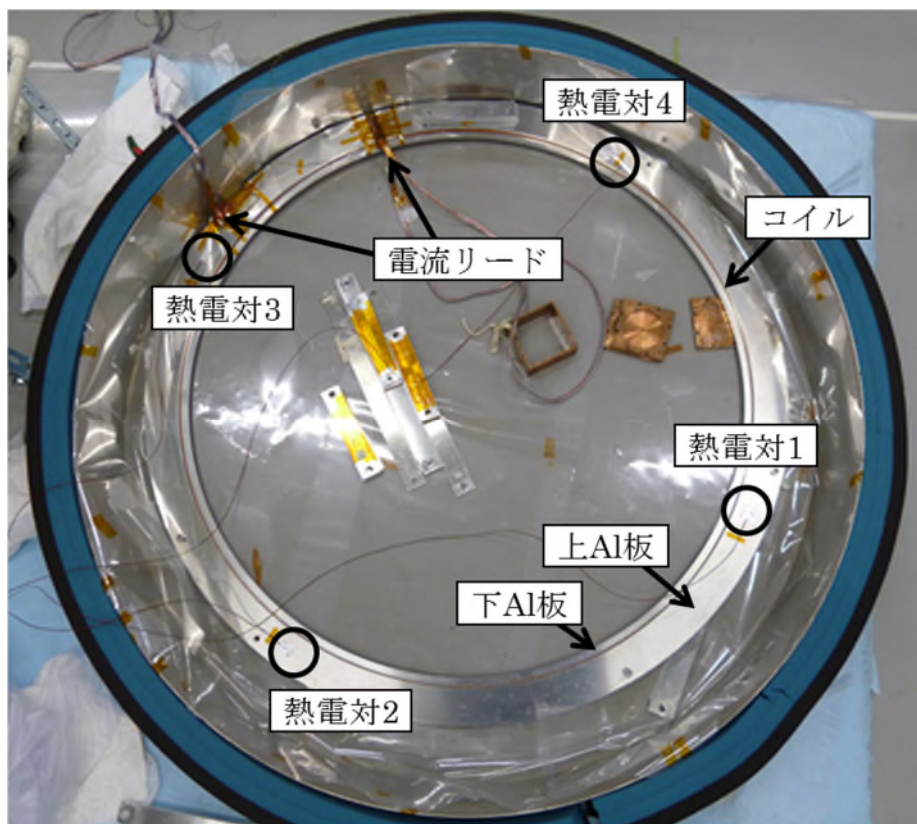


図 2. 2. 1-6 コイル単体試験の冷却状況

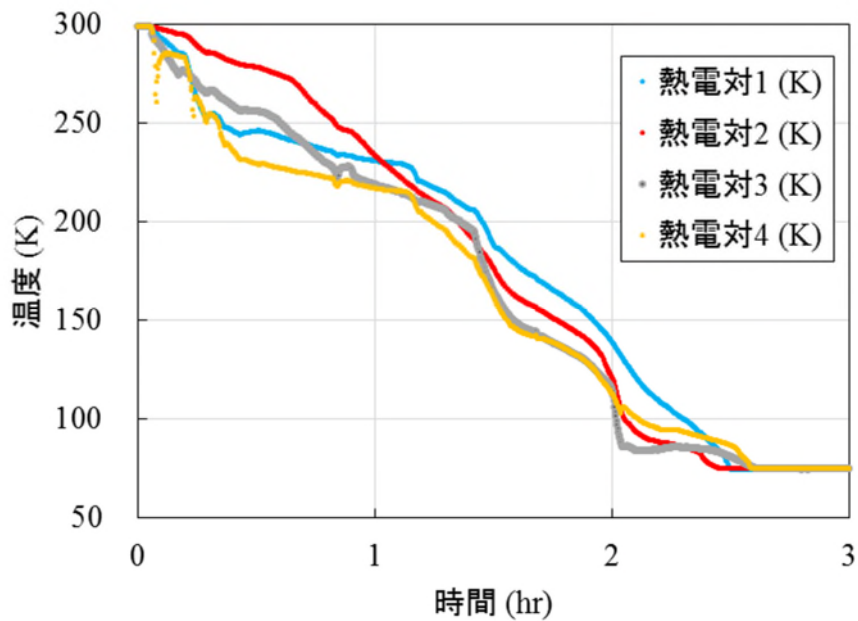


図 2.2.1-7 コイルの冷却時間とコイル温度

シングルパンケーキコイルの評価は2種類の通電試験にて実施した。IV特性を取得するための臨界電流通電試験と、電流を一定としたときの電圧からコイル抵抗値測定試験を実施した。コイルの良品・不良品の評価基準を表 2.2.2-2 に示す。

表 2.2.2-2 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルの評価基準

| 判定 | 臨界電流値 |
|----|---|
| ○ | 解析 I_c 以上かつ超電導劣化なし |
| × | 解析 I_c 未満または超電導劣化あり |
| 判定 | コイル抵抗値 |
| ○ | $0.1 \times 10^{-6} \Omega$ 以下 |
| △ | $0.1 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6} \Omega$ |
| × | $1.0 \times 10^{-6} \Omega$ 以上 |
| 判定 | 総合評価 |
| ○ | 臨界電流値とコイル抵抗値評価ともに○ |
| △ | 臨界電流値とコイル抵抗値評価ともに△以上（上記以外） |
| × | 臨界電流値とコイル抵抗値評価のいずれかが× |

臨界電流通電試験とコイル抵抗値の測定試験の通電波形を図 2. 2. 1-8-1, 図 2. 2. 1-8-2 に示す。

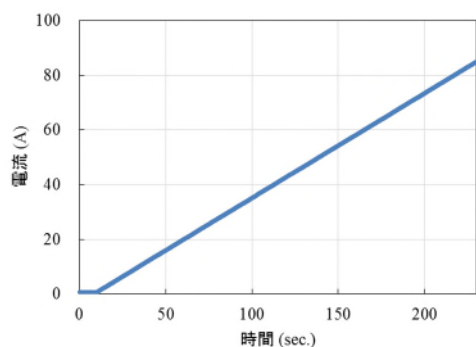


図 2. 2. 1-8-1 臨界電流通電試験の電流波形

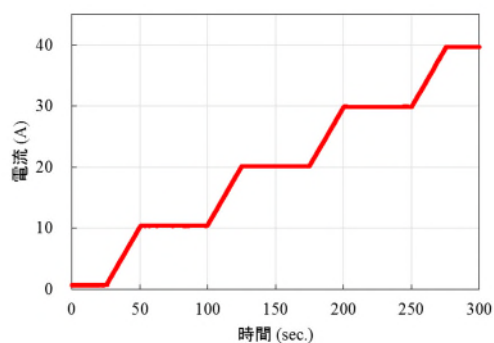


図 2. 2. 1-8-2 コイル抵抗値の測定実験の電流波形

臨界電流通電試験では電流を一定速度で掃引するため、誘導電圧 LdI/dt が発生する。臨界電流通電試験の結果は、誘導電圧分を測定電圧から差し引いた電圧を示す。臨界電流通電試験とコイル抵抗値測定試験の IV 特性の一例を図 2. 2. 1-9 に示す。なお、コイル抵抗値は、電流が一定時の電圧を線形近似したときの傾きとした。

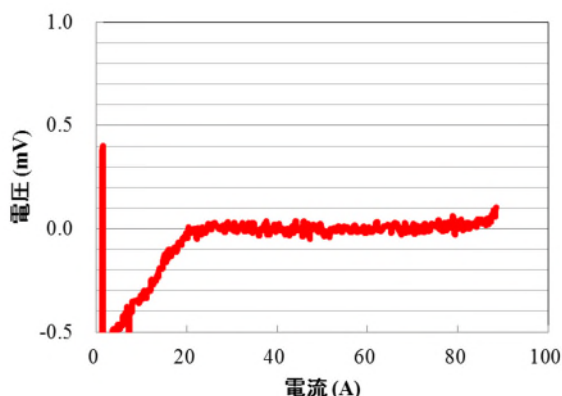


図 2. 2. 1-9-1 臨界電流通電試験の結果

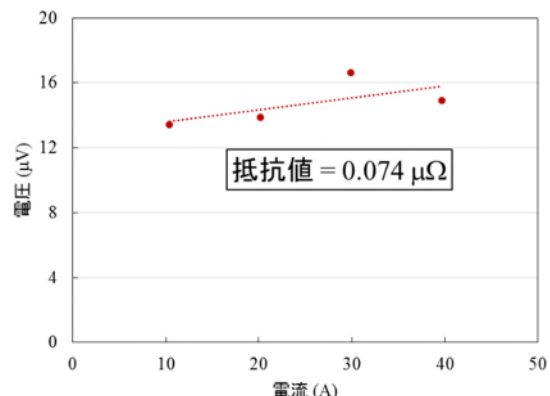


図 2. 2. 1-9-2 コイル抵抗値測定試験の結果

上記測定結果は評価○判定のコイルの測定結果である。図 2. 2. 1-10 に評価×判定のコイルの測定結果の一例を示す。

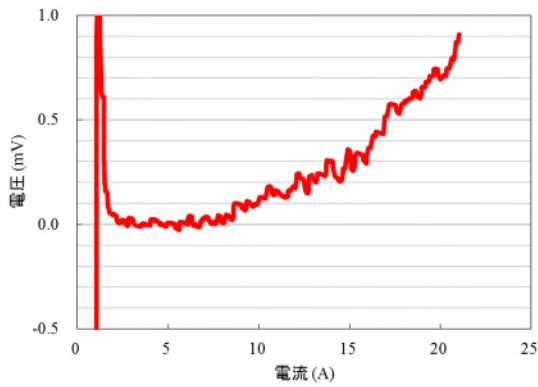


図 2. 2. 1-10-1 臨界電流通電試験の結果

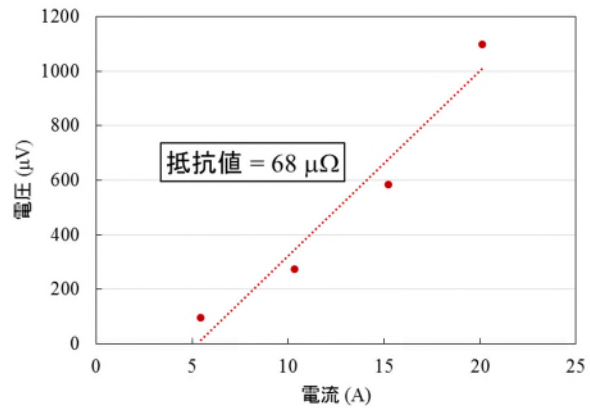


図 2. 2. 1-10-2 コイル抵抗値測定試験の結果

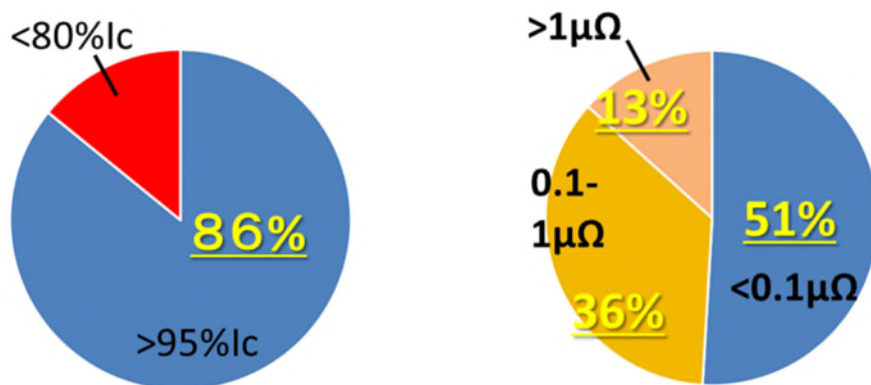
臨界電流通電試験とコイル抵抗値測定試験を評価した 269 枚のシングルパンケーキコイルの臨界電流通電試験とコイル抵抗値測定試験の評価結果をまとめたものを表 2. 2. 1-3 に示す。

表 2. 2. 1-3 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル用
シングルパンケーキコイルの評価結果まとめ

| 臨界電流値 | | | 接続抵抗値 | | | 総合評価 | | |
|-------|------|--------|-------|------|--------|------|------|--------|
| 判定 | コイル数 | 割合 | 判定 | コイル数 | 割合 | 判定 | コイル数 | 割合 |
| ○ | 231 | 85.9 % | ○ | 137 | 50.9 % | ○ | 133 | 49.4 % |
| × | 38 | 14.1 % | △ | 96 | 35.7 % | △ | 87 | 32.3 % |
| | | | × | 36 | 13.4 % | × | 49 | 18.2 % |

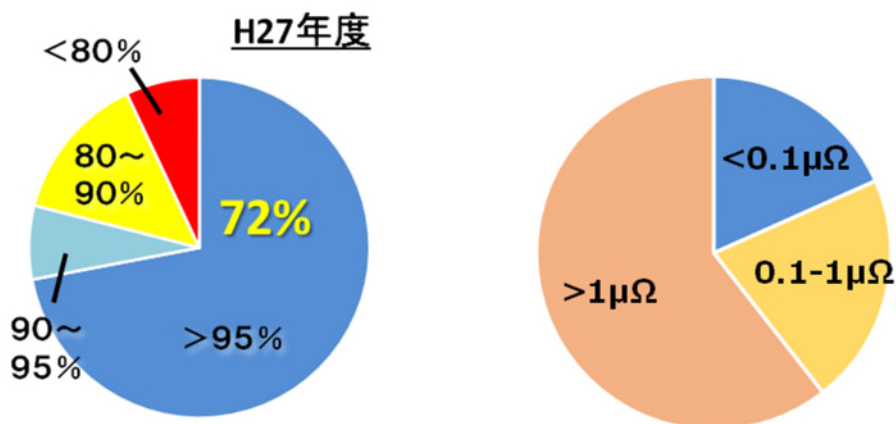
表中の評価○及び、評価△のコイルはジュール発熱量が小さく、1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルに問題なく適用できる。これら評価○及び△のコイルで 220 枚となり、1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルに必要な 220 枚を確保できた。1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイル用に製作した全 272 個のパンケーキコイルの良品率をまとめる。図 2. 2. 1-11 の 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル用シングルパンケーキコイルの評価結果に示すように、全体で良品率は 220 個/272 個=81%となり、目標の 90%には届かなかった。臨界電流においては設計の 95%以上を合格としたものは 86%。一方、コイル抵抗が $1\mu\Omega$ 以下として合格したものが 87%であった。全体の良品率と各合格率との差異は、両条件で合格していないものがあるためである。図 2. 2. 1-12 に示した H27 年度製作ミニコイル用シングルパンケーキコイルの評価結果と比較すると臨界電流の合格率は 72%から 86%に改善し、コイル抵抗の合格率は 40%から 87%と大幅に改善した。特にコイル抵抗の合格率については、線材を Sn ハンダによる銅フォーミング線から銅メッキ線に変えたことが改善要因だったと思われる。線材ロ

ットごとのシングルパンケーキコイルの良品率を図 2. 2. 1-13 にまとめた。図から分かるように、2016 年度製から 2017 年度製にかけて徐々に良品率が低下し、線材メーカーへ問題提起したのち 2018 年度製にてようやく回復した。このことから線材のなんらかの要因が考えられ、劣化要因を評価し、線材仕様を確立する必要がある。



(a) コイル単体試験での Ic 劣化評価 (b) コイル単体試験での接続抵抗評価

図 2. 2. 1-11 1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイル用
シングルパンケーキコイルの評価結果



(a) コイル単体試験での Ic 劣化評価 (b) コイル単体試験での接続抵抗評価

図 2. 2. 1-12 2015 年度製作ミニコイル用
シングルパンケーキコイルの評価結果

4. 劣化部位特定試験

評価が×となったコイルにおいて、超電導劣化の範囲の推定を行うため、劣化部位特定試験を実施した。試験はコイルの幅方向に 11 個信号線を取り付け、液体窒素冷却下にて通電したときの各タップ間の電圧を計測した。電圧タップの取り付け位置を図 2. 2. 1-13 に示す。

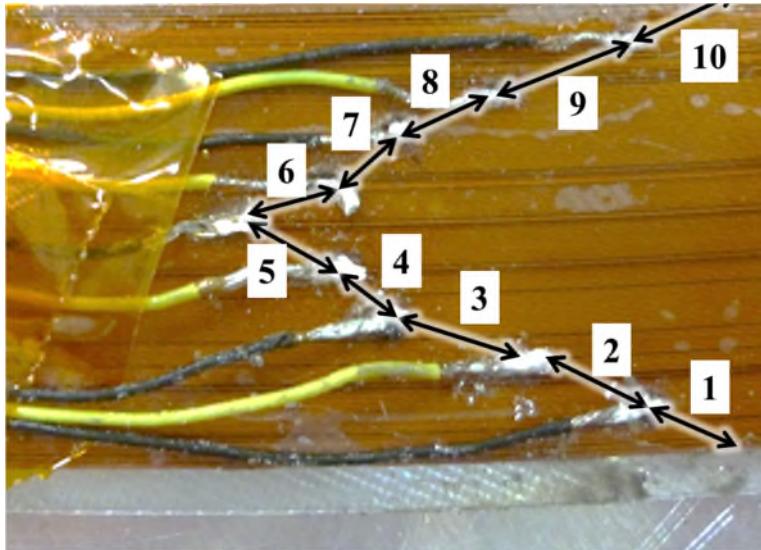


図 2.2.1-13 劣化部位特性試験の電圧タップの位置

劣化部位特定試験の結果を図 2.2.1-14 に示す。領域 3 に最も大きい劣化があり、次に領域 2 に劣化部位が存在することが分かった。領域 4 にも微小電圧が確認された。領域 2, 3, 3 の電圧を足すと全電圧に等しいことから、それ以外の部分は超電導状態であることが言える。常伝導転移している長さは、超電導線の常伝導抵抗（即ち、超電導層以外の部分の 77K における抵抗）が 3.2 mV であることから、23 mm と推定される。劣化部位の長さがある程度長さを持っていることと、領域 2, 3, 4 に劣化部位が存在することから、劣化部位が複数個存在していると考えられる。超電導劣化は冷却時の熱収縮により、超電導層に剥離応力が加わったことが考えられるが、明確に劣化要因はわかっていない。③高温超電導線材への要求仕様導出にて、非接触・非破壊試験にて劣化部位の可視化について検討しており、今後その結果を受け劣化要因を解明する予定である。

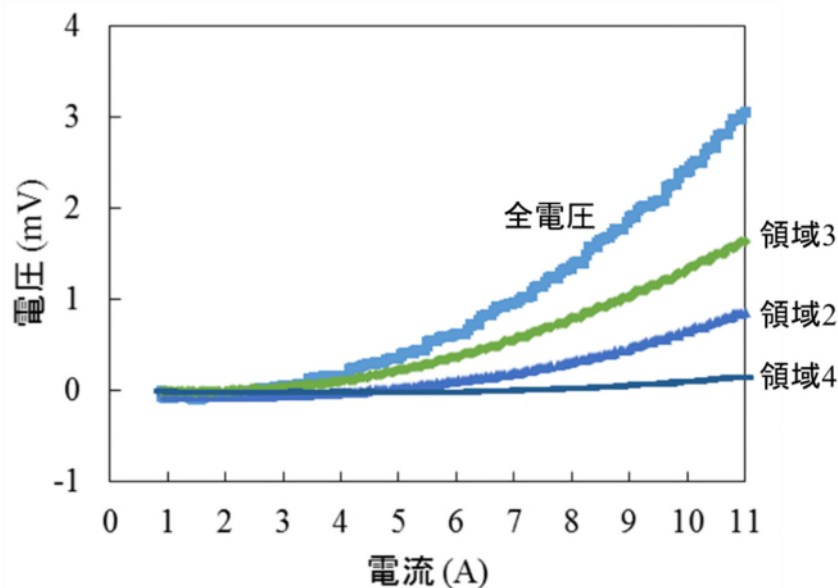


図 2.2.1-14 劣化部位特性試験の電圧波形

(3) コイル積層組立（三菱電機）

1. 組立

単体試験の終わったコイルを組立順番に従って積み重ねて、コイル間を低抵抗半田付けする。コイルは 5 群に分かれておりサイドコイル群（軸方向で完成品の両側にある）とシールドコイル群（軸方向で完成品の両側にある）とセンターミドルコイル群（軸方向で完成品の中央にある）がある。各コイル群のコイル間には、伝導冷却板と寸法調整部材を設けて、コイルが精度よく組み合わされ、冷却出来る構造としている。尚、これらのコイル群は両端にフランジを設け、ボルトで連結されている。このため、組立に際しては単体試験後のコイル厚さを実測し、組立に使用する寸法調整部材を増減してコイル位置調整を実施した。

2. 組立精度

軸方向のコイルの組立精度（軸方向のコイル位置）は設計値に対して、0～-1 mm を目標に組み立てた。「-」公差とした理由は、「+」側になるとコイルに無理な締付力が加わり、線材の特性劣化を招く恐れがある。これを防止するためである。径方向のコイルの組立精度（径方向のコイル位置）は、設計値に対して、±0.5mm を目標に組み立てる。

3. 含浸

コイル積層組立後、各コイル群をエポキシ含浸にて一体化する。含浸は、単体コイルの含浸手順と同様に処理する。但し、組み合わせたコイルの予備乾燥は実施せず、その後の半硬化乾燥は樹脂の硬化状況を確認しながら処理する。

4. クライオ組み込み

積層組立完成したコイルを、2018 年度で導入したクライオに組み込みマグネットとして完成させた。

(4) 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットの製作（三菱電機）

組立後の励磁試験で抵抗が生じたため、マグネットの改修作業を行った。改修後に完成した 1/2 サイズ 3T マグネットは、イメージングを行うため、高安定電源とイメージングシステムを設置している京都大学に三菱電機赤穂工場から移設した。輸送は低温状態で行い、およそ 1 昼夜かけて所定の位置に設置し再冷却を開始した。

据付、再冷却後コイル温度は工場試験と同じく 5 K となり 2018 年度に導入した高安定電源を接続して通電試験を実施した。この電源は 0.1 ppm/h 以下で電圧リップルは 10 mVp-p 以下のものである。励磁試験においては、コイルの抵抗成分の絶対値を確認するためにコイル群ごとの電圧および温度を測定した。また、コイル中心にホールプローブを設置し電流と発生磁場を確認しながら励磁を行った。また、所定電流にて漏れ磁場を測定し冷凍機や計測器などへの磁場影響を確認しながら通電を実施した。

しかしながら、最終励磁時にも改修時から抵抗箇所が新たに生じたため、焼損を避けるために中心磁場約 0.3 T 相当の励磁で停止した。中心磁場 0.3 T においてシミング作業を行い、画像取得可能な磁場均一度（36ppm @ 50 mmDSV）を達成した。

シミング作業が完了後、3T マグネットに 20A 通電し、0.3T でマウスのイメージングを取得した。取得した画像を図 2.2.1-15 に示す。心臓および鼻、背骨等を確認でき、φ 1200mm の大型高温超電導コイルを用いた MRI 用超電導マグネットにてイメージングに成功した。



図 2.2.1-15 マウス(～5cm)の撮像結果

(5) 3T マグネット製作における劣化要因の検討 (三菱電機)

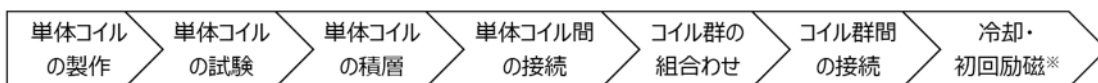
A) Fault Tree Analysis (FTA) を用いた劣化要因の検討 (三菱電機)

1/2 サイズ 3T マグネットの製作過程において、超電導特性の劣化によるコイルでの抵抗発生が見られた。液体窒素試験による劣化箇所の特定、コイル間接続の改修等の対応を行ったが、最終組上げ後の励磁においても新たに抵抗が発生した。劣化の要因を特定し、対策を検討するために Fault Tree Analysis (FTA) による分析を実施した。

FTA による要因分析の分類方法

検討事象を「1/2 サイズ 3T マグネット製作過程における超電導特性の劣化」とし、劣化部位による分類を行ったうえで、各劣化部位における劣化について、マグネット製作のどの工程で生じるものなのか、時系列で整理した。本マグネットは電氣的に直列接続された 4 対のコイル群から構成され、各コイル群は、構成要素の最小単位となる単体コイルに分けられる。単体コイル内部の劣化に加え、各単体コイルを接続する箇所及び、各コイル群を形成するためのコイル群間を接続する箇所における劣化が考えられる。そのため、部位別に I. 単体コイル内部、II. コイル間接続部、III. コイル群間接続部と分類した上で、劣化が起きうる工程を図 2.2.1-16 に示す製作工程に従って整理した。

1. 初回励磁までの製作工程 (※初回励磁で抵抗発生)



2. 初回励磁で抵抗が発生した後の改修工程



図 2.2.1-16 1/2 サイズ 3T マグネットの製作工程

(6) 7T 検証コイルの製作 (三菱電機)

小型・軽量の全身撮影用 3T-MRI 高温超電導マグネットに要求される最大経験磁場 7 T、コイル電流密度 200 A/mm² 超を検証するために試作した 7T 検証コイルについて記載する。

A) シングルパンケーキコイルの試作

A-1) 7T 検証コイルの諸元

最大経験磁場 7 T、コイル電流密度 200 A/mm² 超を満足する 7T 検証コイルを設計した。設計した 7T 検証コイルの諸元を表 2.2.1-4 に示す。7T 検証コイルは、人工ピンが導入された 4.05 mm 幅の REBCO 線材で巻回され、内径・外径が等しい 24 枚のシングルパンケーキコイルで構成される。2 つのシングルパンケーキコイルの間には、冷却用の銅板 1 枚と、層間絶縁用の絶縁フィルム 2 枚を挿入する設計とし、ダブルパンケーキコイルの間には、層間絶縁用の絶縁フィルム 1 枚を挿入する設計とした。

7T 検証コイルの最大経験磁場が 7 T になるときを定格運転とすると、そのときの諸元を表 2.2.1-5 に示し、磁場分布を図 2.2.1-17 に示す。Z 軸正の方向に向かって、No. 1 コイル、No. 2 コイル、No. 3 コイル、…、No. 24 コイルとすると、最大磁場 7.0 T は、コイルの軸方向中心部である No. 12 および No. 13 コイルの間で発生し、磁場方向は線材幅方向と同一方向であった。

次に REBCO 線材における臨界電流の磁場依存性と磁場角度依存性から、運転温度 30 K、定格運転時における電流負荷率を計算した。その結果、7T 検証コイルに 161 A を通電した際の線材の臨界電流最小値は 279 A であり、線材の臨界電流に対するコイル電流の割合は最大で 58% であった。コイル温度が 30 K 以下であれば超電導状態で定格運転が可能な設計である。

表 2.2.1-4 7T 検証コイルの諸元

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| 使用線材 | フジクラ社製 REBCO 線材 (人工ピン導入) |
| コイル形状 | シングルパンケーキ |
| コイル数 | 24 |
| 線材幅 / 線材厚 (絶縁層なし) | 4.05 mm / 0.111 mm |
| コイル内径 / 外径 | 130 mm / 206 mm |
| シングルパンケーキコイルの高さ | 4.4 mm |
| シングルパンケーキコイルのターン数 | 233 ターン |
| インダクタンス | 3.7 H |
| 総線材長 | 3.0 km |
| シングルパンケーキの線材長 | 123 m |

表 2.2.1-5 定格運転時の諸元

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 中心磁場 / 最大磁場 | 5.7 T / 7.0 T |
| コイル電流密度 (エポキシ含む、冷却銅板含まず) | 224 A/mm ² |
| 運転電流 | 161 A |
| 蓄積エネルギー | 48 kJ |

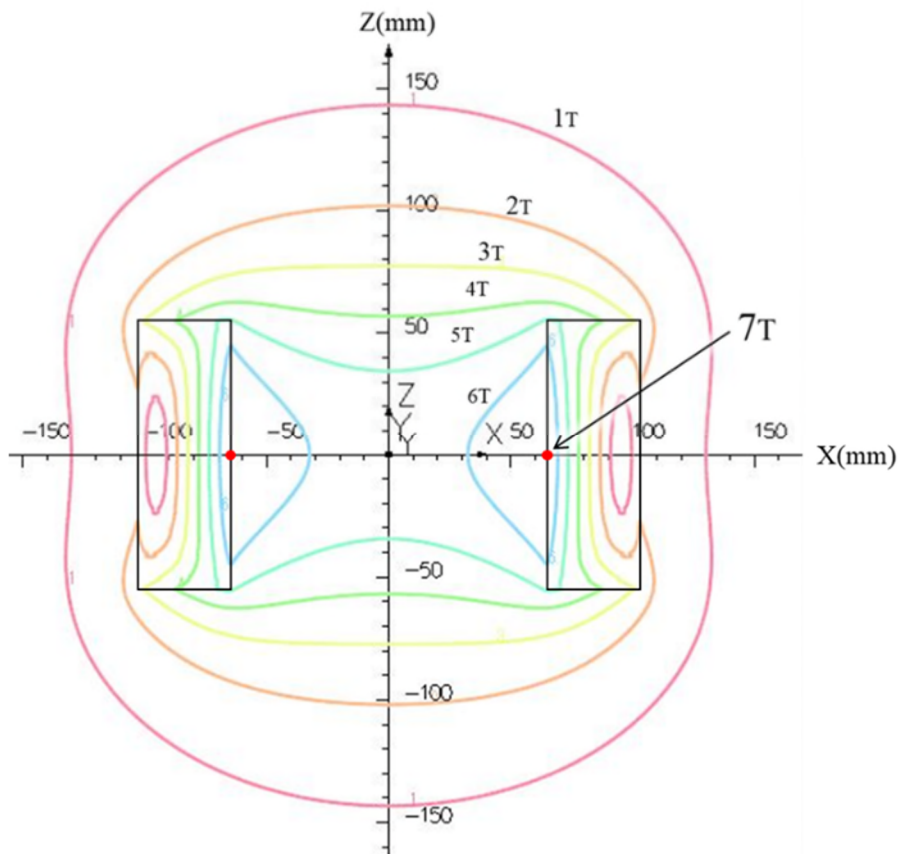


図 2.2.1-17 7T 検証コイルの定格運転時における磁場分布

2.2.1.2 磁化による磁場乱れ対策

(1) 超電導線材の磁化による磁場影響の計測技術に関する研究(京大白井研)

磁化を有するマグネットの磁場測定技術を確立することを目標にして研究開発を実施。NMRプローブを用い高精度の磁場変動測定を実施した。下記2.2.1-2(2)で提案されたオーバーシュート法を用い、各オーバーシュート電流での励磁後の磁場変化を1ppmレベルで評価した。この変動を等価回路シミュレーションにより評価し得られた回路定数から変動解析をして変動磁場抑制の制御法を検討した。微小電流補正制御により磁場変動予測から制御電流を与えた結果、オーバーシュート電流が不十分な値であっても本制御方法を用いることで1ppm/h以下の安定度が得られることが実証できた。

ドリブンモードで必須となるマグネットの励磁システムにおいて、実用化のための省エネかつ低コストを目指した励磁電源システムを提案・検証するための研究開発を行った。省エネかつ低コスト化のため励磁時にインダクタンス分の電圧が必要な励磁電源と配線や接続抵抗分の微小電圧を補償するための磁場保持電源の2系統励磁回路を提案した(図2.2.1-18)。定格磁場が達成され長期間の運転に入る場合は、磁場保持電源だけが超電導マグネットに接続され、励磁電源は切り離され、他のマグネットの励磁用に適用される。励磁電源は大容量のため消費電力も多く、低コスト化は困難であるが、小型化が可能な磁場保持電源は省エネかつ低コスト化が可能である。図2.2.1-19に示した励磁電源と磁場保持電源を用いMRI超電導マグネットを励磁、磁場保持できることを実証した。また、試作した電源の諸元を表2.2.1-2.1に示す。この励磁電源と磁場保持電源で励磁し、省エネ性を比較した結果、消費電力が50%低減できることが分かった(図2.2.1-20)。

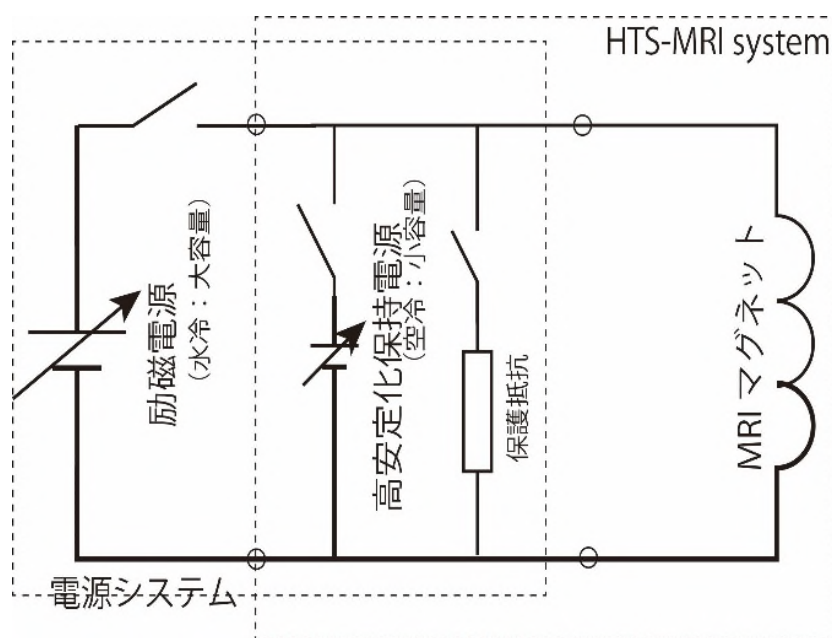


図 2.2.1-18 MRI 用省電力高安定励磁電源システム



図 2.2.1-19 MRI 用省電力高安定励磁電源システムの外観写真

表 2.2.1-2.1 MRI 用省電力高安定励磁電源システムの諸元

| 項目 | 励消磁電源 | 保持電源 |
|--------|-----------|---------------|
| 出力電流 | 1000A | 300A |
| 出力電圧 | ±15V | ±2V |
| 電流安定度 | 100ppm/h | <u>1ppm/h</u> |
| 電流リップル | 100ppmp-p | 10ppmp-p |
| 冷却方式 | 水冷・強制空冷併用 | 強制空冷 |

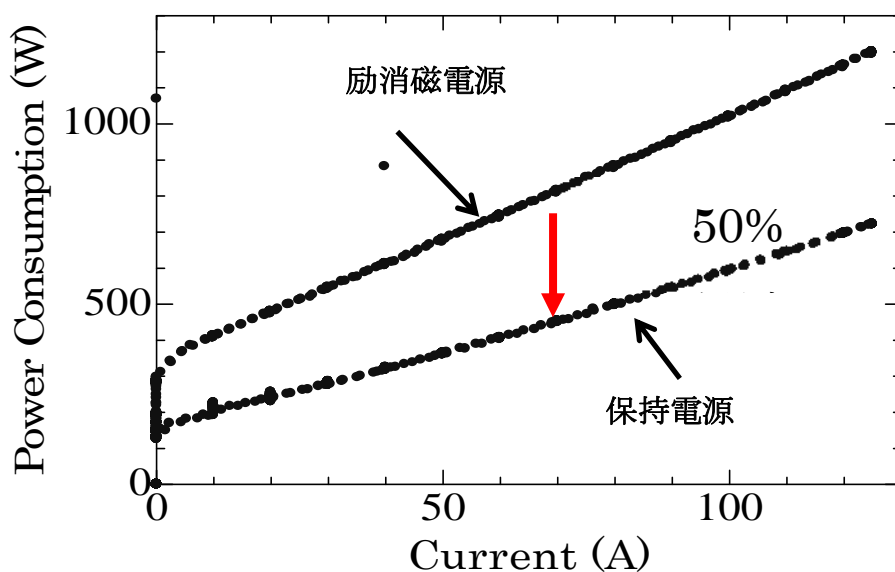


図 2.2.1-20 MRI 用省電力高安定励磁電源システムの外観写

(2) 高温超電導マグネットの磁化による磁場安定性の影響に関する研究

(東北大津田研)

A. 繰り返しオーバーシュート法及び高温励磁法による磁場変動抑制手法の検討

近年、MRI 用超電導マグネットの冷却に不可欠となるヘリウムの生産量減少による価格高騰が危惧されており、液体ヘリウムレスでも運転が可能な高温超電線材の MRI 用マグネットへの適用が期待されている。高温超電導線材の中でも、特に REBCO 線材は、高磁場中での通電特性が優れているため、高磁場 MRI 用超電導マグネットにも適用可能である。しかし、REBCO 線材は、テープ状の多層構造を有しているため、REBCO 線材で作製されたコイルを励磁する場合は、テープ線の幅広面に対して垂直に磁束が鎖交し、超電導層には遮蔽電流が誘起される。このため、超電導マグネット中心部の磁場は、輸送電流がつくる磁場と遮蔽電流がつくる磁場（遮蔽電流磁場）の合成磁場となる。しかし、遮蔽電流磁場は、磁束クリープによって時間的に変化するため、遮蔽電流磁場の変動を抑制して、超電導マグネット中心部の磁場の時間的安定性を確保する必要がある。

このため、高磁場で時間的に均一な磁場が要求される MRI 用超電導マグネットに REBCO コイルを適用する場合は、REBCO コイルの励磁時に誘起される遮蔽電流磁場の変動を可能な限り抑制する必要がある。これまでは、REBCO コイル励磁時の遮蔽電流磁場の基礎特性を明確にするために、REBCO コイルの励磁条件を変化させた場合の遮蔽電流磁場の変動特性を評価してきた。そして、遮蔽電流磁場の変動抑制は、遮蔽電流（磁場）をゼロにすることにより達成するのではなく、遮蔽電流（磁場）が存在している状態で実現する必要があることがわかった。また、コイル励磁時に、目標電流よりも大きな電流（オーバーシュート電流）を通電することにより、遮蔽電流磁場の変動が抑制され、オーバーシュート量の増加に伴い、遮蔽電流磁場の変化率が小さくなるものの、オーバーシュート量がある値よりも大きくなると、遮蔽電流磁場変動が減少から増加に転じることを明らかにした。このため、遮蔽電流磁場変動を可能な限り抑制

するには、遮蔽電流磁場の変動抑制に適したオーバーシュート量を明確にする必要があった。当初は、遮蔽電流磁場の基礎特性を明確にするために、REBCO コイルを励磁する際には、通電履歴の無い状態でコイルを励磁し、オーバーシュート量と遮蔽電流磁場の変化率の関係を評価していた。しかし、実規模コイルでは、通電履歴の無い状態での繰り返し実験により、遮蔽電流磁場の変動抑制に適したオーバーシュート量を明確にすることはできない。そこで、コイル励磁時のオーバーシュート量を徐々に大きくしながら、オーバーシュート波形を繰り返し適用することを提案し、一回のコイル励磁により遮蔽電流磁場の変動を大幅に抑制できる方法を構築した。しかし、実規模コイルでは、本励磁の前に、試運転が行われることが予想されるため、本励磁の際には、コイルが既に磁化されていることが予想される。この様に、試運転時の励磁条件により、本励磁時の遮蔽電流磁場の変動特性が異なることが考えられるため、本励磁前のコイルの励磁条件と、本励磁時の遮蔽電流磁場の変動特性の関係を明確にしておく必要がある。

また、これまでは、コイル励磁時の遮蔽電流磁場の変動抑制方法として、主に、オーバーシュート法に着目し、遮蔽電流磁場の変動抑制に適したオーバーシュート波形やコイルの励磁条件について検討してきたが、遮蔽電流磁場の変動抑制に有効な方法は他にも存在する。その代表的なものに、コイルの運転温度を変化させる方法（以下では「高温励磁法」と称す）がある。これは、コイル励磁中に運転温度を変化させることにより、磁束クリープを抑制するものである。しかし、これまでに、高温励磁法を REBCO コイルの遮蔽電流磁場の変動抑制に適用した例は少なく、また、どの様な温度変化が遮蔽電流磁場の変動抑制に有効であるかについては明らかにされていない。

以上を踏まえ、本年度は、本励磁前のコイル励磁条件と本励磁時の遮蔽電流磁場の変動特性の関係と、コイルの運転温度を変化させた場合の遮蔽電流磁場の変動特性について検討した。

B. HTS コイルに磁化履歴が存在する場合における磁場変動抑制の短時間化検討

MRI 用超電導マグネットへの適用が期待される、希土類系高温超電導線材 (Rare-Earth Barium Copper Oxide : 以下 REBCO 線材) は、高温かつ磁場中での通電特性に優れる一方、テープ上の多層構造を有するために、磁場発生時にはテープ面に鎖交する自己磁場により、線材内に遮蔽電流と呼ばれる誘導電流が発生し、これが時間的に減衰するため、コイル中心磁場の時間的安定性に悪影響を及ぼすという課題がある。そのため、REBCO 線材の MRI 用超電導マグネットへの適用には、遮蔽電流磁場の変動抑制が必要である。

これまで、REBCO 線材を適用したダブルパンケーキコイルを複数積層した、MRI 用超電導コイルのミニモデルとなる、積層型高温超電導コイル (以下 HTS コイル) を作成し、同コイルにおいて繰り返しオーバーシュート法や高温励磁法、または両法の組み合わせ法などの磁場変動抑制手法の効果を検討した。しかし、いずれの磁場変動抑制手法においても磁場安定化に数時間以上の長時間を要するほか、実際の MRI 運用で想定される頻繁なマグネットの消磁と再励磁に関する検討はされていない。

したがって、実際の MRI 運用環境を想定して、再励磁時における HTS コイルに磁化履歴が存在する場合の、従来法より短時間での磁場変動抑制が可能となる磁場変動抑制手法を検討した。

(3) 高温超電導マグネットの磁化による磁場均一度の影響に関する研究（京大中村研）

本研究では、まず三菱電機/東北大学で開発中の 2 T 超電導マグネットにおける遮蔽電流特性解析コードを開発した。解析コード作成に際して、等価回路を仮定して遮蔽電流をインダクタンスで与え、かつ希土類系高温超電導線材の非線形抵抗はパーコレーション遷移モデル(温度ならびに磁場ベクトル依存性の考慮可能)で表現した。現状、遮蔽電流ループのインダクタンスが不明であることから、適当な値を仮定して解析し、開発したコードの妥当性を検証した。希土類系高温超電導線材における直流通電特性の磁場依存性を評価し、伝導冷却希土類系高温超電導線材/コイルの伝導冷却時通電特性および遮蔽電流特性測定を実施した。運転温度まで含めた MRI システム検討の一環として、線電流近似と遺伝的アルゴリズムを適用した 3 T ホールボディマグネットの最適化設計を実施した。コイルボア径 500 mm における空間磁場均一度を最大化する設計を実施した結果、12 ppm の磁場均一度が得られ、さらなる改善の可能性を見出すことができた。また、設計したマグネットの空間磁場を 2 次元有限要素法によって解析し、希土類系高温超電導線材の断面構造がマグネットボア内磁場均一度に与える影響を明確化した。

2.2.1.3 高温超電導線材への要求仕様導出

(1) 高温超電導コイルの機械特性評価に関する研究（東北大津田研）

高温超電導コイルでは、予期せぬ局所的な超電導特性の劣化により、常電導転移して焼損する、臨界電流が低下することが報告されている。MRI 用マグネットのように、高磁場で空間的均一性を実現するために超電導コイルを積層してマグネットを構成する場合、通電時に生じる電磁力により局所的に通電特性が低下する恐れがある。特に超電導コイルに使用される REBCO 線材は長手方向の強度に対しては強い耐久性を有するが、積層方向の力に対しては脆弱である。そのため超電導コイルを励磁する際、軸方向の電磁力(軸方向圧縮応力)により、コイルの特性劣化や常電導転移が引き起こされる恐れがある。したがって、高温超伝導コイルの仕様を決定するために、軸方向圧縮応力が励磁時の高温超伝導コイルの通電特性に及ぼす影響に関して検討した。

また積層型 HTS コイルに印加する軸方向圧縮応力の低減に有効な手法の検討を行った。その結果、HTS コイルと接触する物体の径を揃えることが圧縮応力の低減に有効であることが明らかになった。また、SUS316 のようなヤング率の大きい硬い材料を用いることが有効であることが明らかになった。

(2) 高温超電導コイルの劣化部位特定および劣化要因検討に関する研究（九州大木須研）

A. 非破壊健全性評価技術を用いた、高温超電導コイルにおける欠陥位置の可視化

1 概要

高温超伝導マグネットシステムの基本構成要素となる高温超伝導パンケーキコイルに対し、非通電の磁気計測による非破壊健全性評価技術を開発し、欠陥位置の可視化に世界で初めて成功した。本技術は、通常の評価技術では困難な欠陥位置の特定を高空間分解能で可能とするものであり、欠陥をピンポイントで検査対象とできるようになることは、パンケーキコイル製造の歩留まり向上の鍵となる特性低下原因の究明の決定打と

なる顕著な成果である。また、本年度の成果をもとに、本プロジェクトで開発するより大型の要素コイルに適用するため、最大外径 1.2m のコイル試験を可能とする大型評価装置の基本構成部位の設計・製作を行った。

2 まえがき

希土類系高温超伝導線材は、線材長手方向の引っ張り強度は約 1GPa と高いが、劈開力 (Cleavage) や引きはがし力 (Peel) のような線材端部をこじ開ける力に対しては約 1MPa 程度と非常に低い耐力しか有していない。そのため、冷却や励磁の過程で線材に弱いモードの力が加わると、線材が剥離しコイルの超伝導特性が劣化する事が指摘されている。高温超伝導機器実用化のためには、コイル化における超伝導特性の劣化メカニズムを解明し、素線に対する要求性能を明確化すると共にコイル安定製造技術を確立ことが喫緊の課題となっている。

一般に、コイルの健全性評価にはコイルに電流を印加し通電特性を評価する事が行われる。すなわち、コイル I_c の低下や n 値の低下によって欠陥の有無を判断できる。しかしながらこのような通電法においては、電圧端子間の発生電圧を検出することにとどまっており、局所欠陥の位置や分布の同定は困難であり、劣化原因究明のための十分な情報を取得することができない。さらに、試験の際のコイルのハンドリングや電流印加による試験そのものによって、コイル特性の劣化を引き起こす危険性がある。これらの理由から、非破壊かつ非通電で欠陥位置を高解像度で検出することができる診断手法の開発に対するニーズが高い。

本研究では、パンケーキコイル内の局所欠陥を非破壊・非通電で高解像度に検出する新しい評価手法の確立を目的とし、磁気顕微法を用いた非破壊診断手法を提案し、あらかじめ欠陥の存在を確認した試験コイルを用いて、欠陥の可視化を試みることで提案手法の原理検証を行った。

2.2.2 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

2.2.2.1 高磁場・高電流密度コイル設計技術

(1) —1 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの磁気設計 (三菱電機)

ア) はじめに

本章では、1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルに関し、(1) 磁界均一度を最小化するコイル形状の最適化、(2) 組み立て後のコイルに位置誤差が生じた場合の誤差磁界係数の変化と予想磁界均一度の計算、(3) 鉄シムと呼ぶ微小鉄片を用いた磁界均一度の補正シミュレーション、(4) 試作 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイル用イメージング装置と低温 1.5T 超電導マグネットを用いた画像取得、について報告する。

イ) 各項目の検討結果

1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの形状最適化

設計条件

主な設計条件は、磁界強度 3T・常温ボア内直径 ϕ 500mm・コイル電流密度 120A/mm² で、磁界均一度 2ppm/ Φ 250mm 以下である。

次に、コイル構成について述べる。1/2 サイズ 3T コイルは、複数個のダブルパンケー

キコイルをコイル軸 Z 方向にスタックして構成する。ダブルパンケーキコイルの断面例 (Z 方向寸法) を図 2.2.2-1 に示す。HiTc 線材幅 4.25mm、パンケーキコイル間の隙間 0.5mm、ダブルパンケーキコイル間の隙間は 1mm である。ダブルパンケーキコイルは、シングルパンケーキコイルを 2 個独立に製作しコイル外径側で接続する。一方、ダブルパンケーキ間は内径側で接続する。この方法により、各ダブルパンケーキの高さは自由に設定可能である。また、最適化では、図 2.2.2-1 に示すダブルパンケーキコイル幅 9.0mm に一様に電流が流れるとした。超電導線材の厚みは 0.22mm、層間紙は 0.1mm で合計 0.32mm とした。

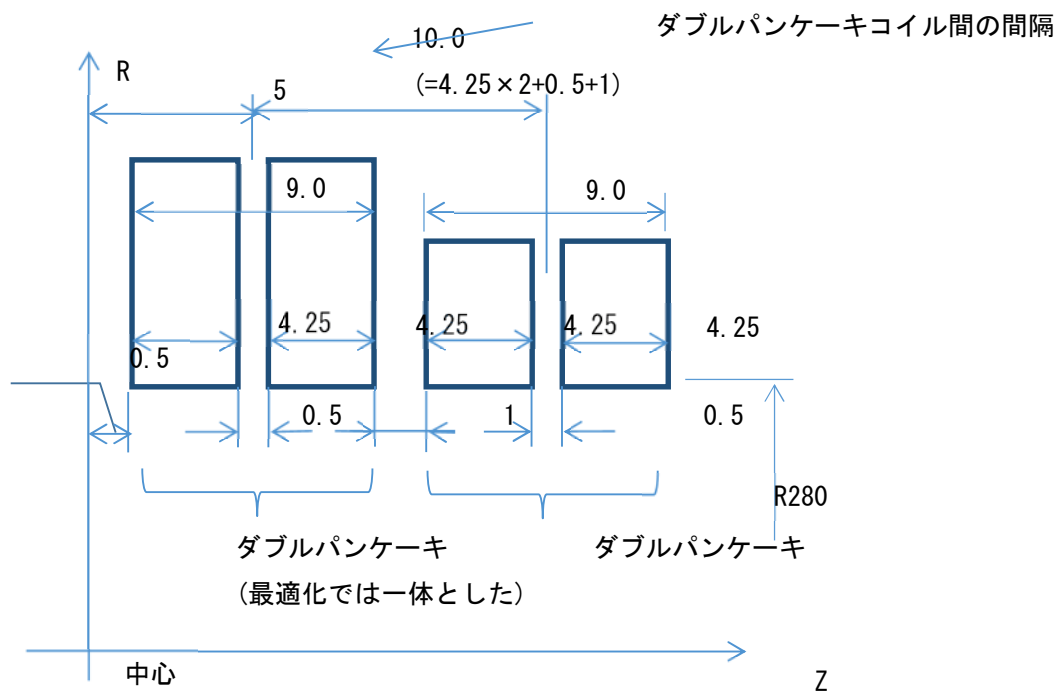


図 2.2.2-1 ダブルパンケーキコイル断面

空間的に均一な磁界を得るには、一般に非線形最適化を用いて、磁界均一度が良い方向にコイル位置を少しずつ変化させた。1/2 サイズ 3T コイルの場合、ダブルパンケーキコイル数の数が多く、各ダブルパンケーキコイルの高さ (径方向高さ) をパラメータとすることで十分磁界均一度が得られるため、Z 方向位置は固定とした。表 2.2.1-1-1, 2 に設計したコイル諸元と磁界均一度 及び 誤差磁界係数を示す。図 2.2.2-2~5 に設計したコイルの磁場分布を示す。

表 2.2.1-1-1 コイル諸元

| | 単位 | ケース |
|---------------------|-------------------|-------|
| 中心磁界 | T | 2.900 |
| 常温ボア直径 | m | 0.5 |
| コイル群数(マグネット) | 個 | 8 |
| ダブルパンケーキコイル数(マグネット) | 個 | 112 |
| 電流密度 | A/mm ² | 121 |

| | | |
|---------------|-----|-------|
| 磁界均一度 | ppm | 1.700 |
| 評価領域(直径) | m | 0.250 |
| 線材;層間紙厚み | mm | 0.320 |
| 線材長 | km | 58.3 |
| コイル AT(マグネット) | MA | 4.51 |
| コイル内半径 | m | 0.280 |
| 最大コイル外半径 | m | 0.600 |
| 全長 | m | 0.979 |
| Br_max | T | 2.89 |
| Bz_max | T | 4.20 |
| 漏れ磁界 R(5 ガウス) | m | 2.5 |
| 漏れ磁界 Z(5 ガウス) | m | 3.45 |

表 2.2.2.1 磁界均一度 及び 誤差磁界係数

| | 単位 | ケース |
|----------|-------------------|-----------|
| Vrms 均一度 | ppm | 1.70E+00 |
| 均一領域直径 | m | 0.25 |
| B0 | T | 2.90E+00 |
| z2 | T/m ² | -6.04E-03 |
| z4 | T/m ⁴ | -2.93E-01 |
| z6 | T/m ⁶ | -3.09E+00 |
| z8 | T/m ⁸ | -1.67E+01 |
| z10 | T/m ¹⁰ | -4.95E+00 |
| z12 | T/m ¹² | -1.46E-01 |
| z14 | T/m ¹⁴ | 7.72E-01 |
| z16 | T/m ¹⁶ | -2.75E-01 |
| z18 | T/m ¹⁸ | 6.10E-02 |
| z20 | T/m ²⁰ | -1.06E-02 |

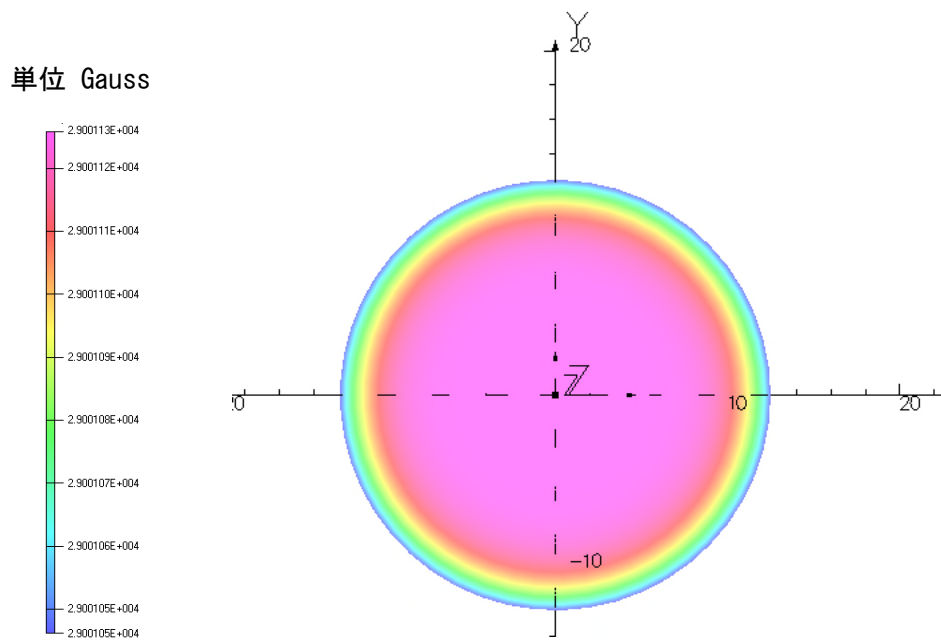


図 2. 2. 2-2 Axial 断面 磁界コンター図

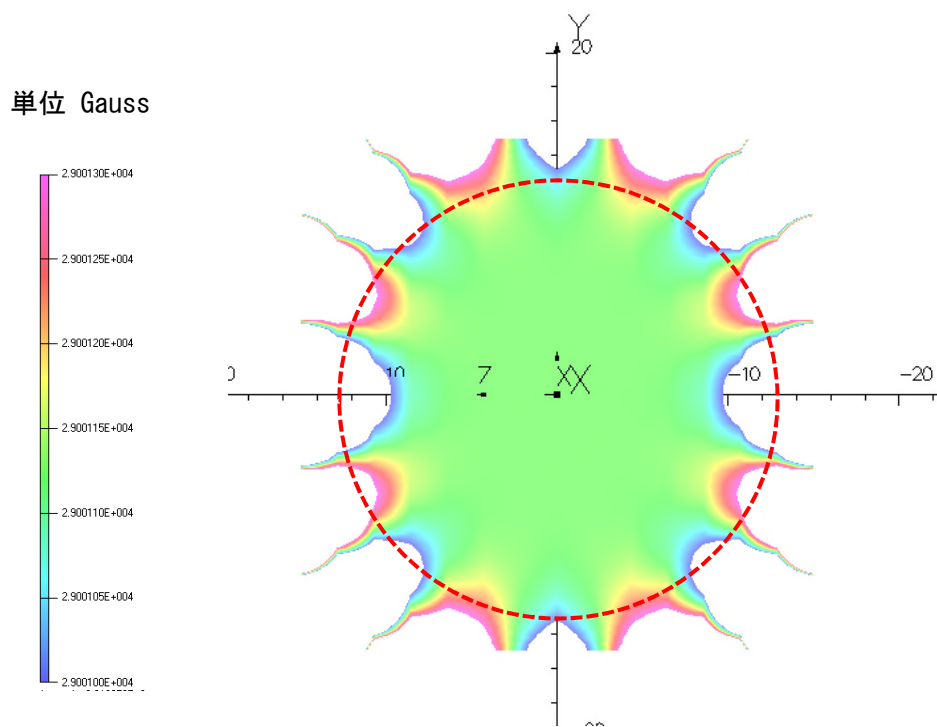


図 2. 2. 2-3 Radial 断面 磁界コンター図

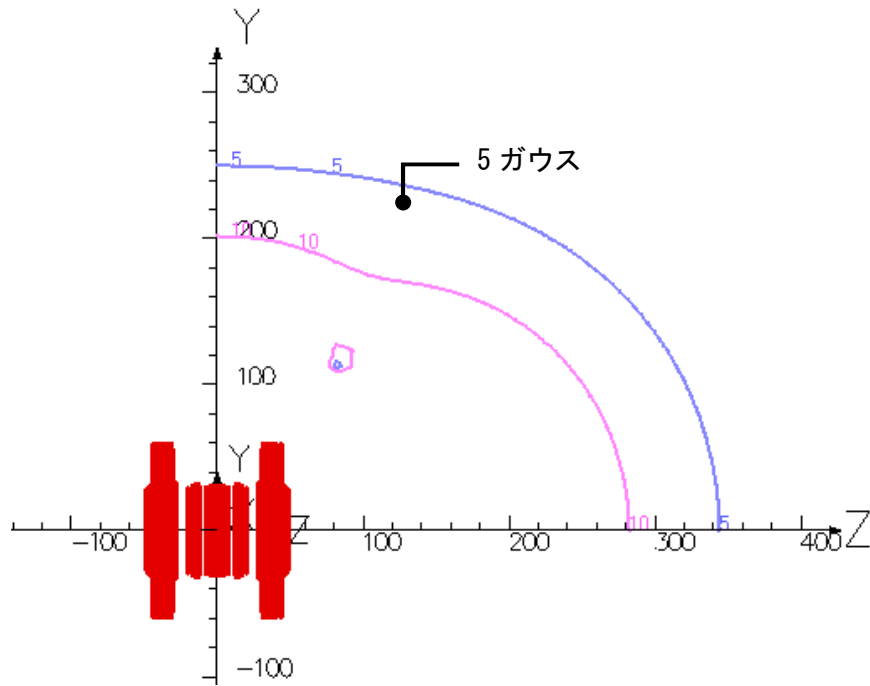


図 2.2.2-4 漏れ磁界分布

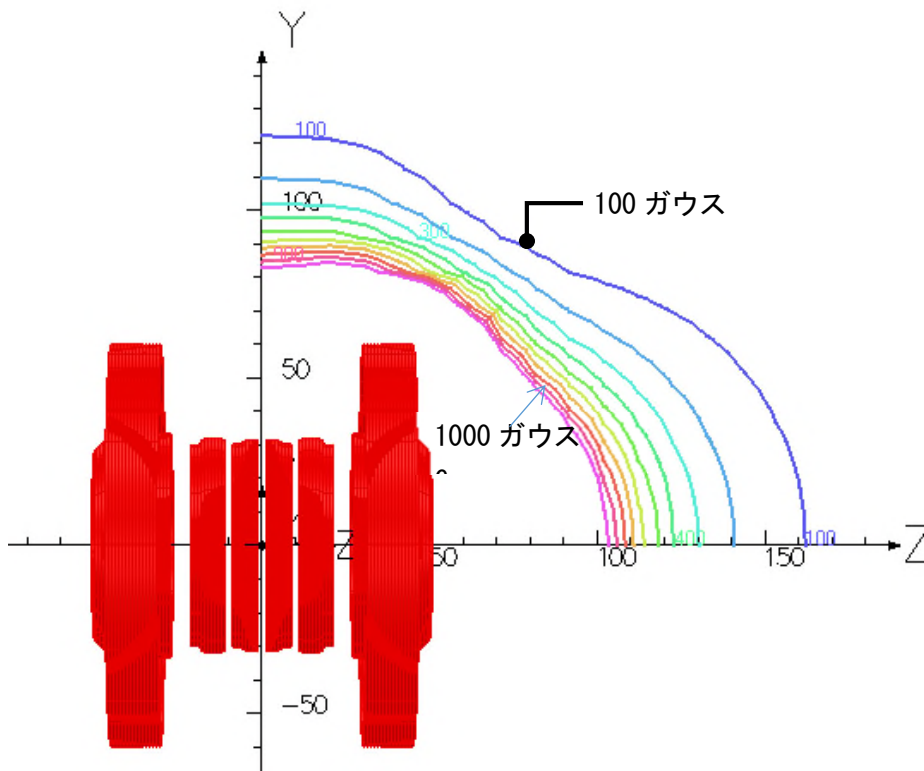


図 2.2.2-5 漏れ磁界分布 (拡大)

ウ) 1.5T Whole Body 低温超電導マグネットを取得したイメージング画像

2018 年度中に、1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルを用いたイメージングを予定しており、このためのイメージング装置を製作した。上記コイルは'18/8 現在では未完のため、1.5T に励磁した低温 Whole Body 用超電導マグネットにて、上記イメージング装置を用いて画像を所得することで、装置の性能を確認した。今回新規に製作した装置は、送信機・傾斜磁場コイル・RF コイルである。送信機は、撮像領域を $\Phi 200\text{mm}$ へと拡大するため(均一磁界領域は、それぞれ $\Phi 150\text{mm}$ と $\Phi 250\text{mm}$)、150W から 250W へとパワーアップした。また、ボア内径は $\Phi 300$ コイルの常温ボア内径 $\Phi 230\text{mm}$ に対し、1/2 サイズ 3T マグネットは $\Phi 400\text{mm}$ に拡大するため、傾斜磁場コイル・RF コイルも大型化した。傾斜磁場コイルの外直径は $\Phi 298\text{mm}$ 、RF コイルの内直径は $\Phi 200\text{mm}$ である。

1.5T に励磁した低温 Whole Body 低温マグネットを用いて、人間の手のイメージング画像を取得した。撮像法はスピノエコー法である。手の断層画像を図 2.2.2-6 に示す。この様に長さ 200mm 程度の手のサイズの画像が取得でき、今回試作のイメージング装置は 200mm サイズの被験体は、充分撮像可能であることが分かった。



図 2.2.2-6 人間の手の断層画像

(1) —2 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネットの
冷却システム熱スイッチの設計

液体ヘリウムを用いない伝導冷却超電導マグネットは、小型GM冷凍機の冷却ステージに超電導コイルが伝導冷却により直接冷やされる。室温からの輻射熱を中間温度で吸収するために輻射シールドが設置される。図 2.2.2.1-1 に 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T コイルの冷却構成を示す。REBCO 超電導コイルの冷却ルートは、製作したパンケーキコイルごとにそれぞれに冷却板が施工され、これらの冷却板から 2 つの冷却部材に集約したのちに GM 冷凍機の 2nd ステージに接続され冷却される。コイルおよび構成部材の被冷却重量は約 900kg であり、輻射シールドの重量は約 100kg である。被冷却重量が大きくなると初期冷却時間が長くなる。そこで、下記に示すように熱スイッチにより冷凍能力が大きく、被冷却重量が少ない 1st ステージ側と冷凍能力が小さく、被冷却重量が大きい 2nd ステージを熱短絡し、中間温度まで 1st ステージ側と 2nd ステージ側と一緒に冷却し初期冷却時間を短縮する工夫を盛り込んだ。図 2.2.2.1-1 の冷却構成に示したように熱スイッチは 2 系統有し、1 系統は金属面の接触による機械式熱スイッチともう一系統はこの機械式熱スイッチに直列に CFRP 積層板による固体式熱スイッチ（図 2.2.2.1-2）を設けた。CFRP 積層板による固体式熱スイッチは図 2.2.2.1-3 に示すように、熱伝導率が室温と 20~30K ではおよそ 100 倍の差があるため室温~100K では熱短絡部材として、100K 以下では熱絶縁材として可動部の不要な熱スイッチとして有用である。本研究開発では、固体式熱スイッチの効果が確認できるように上述のように機械式熱スイッチに直列にすることで効果を分離できる冷却システムにしている。

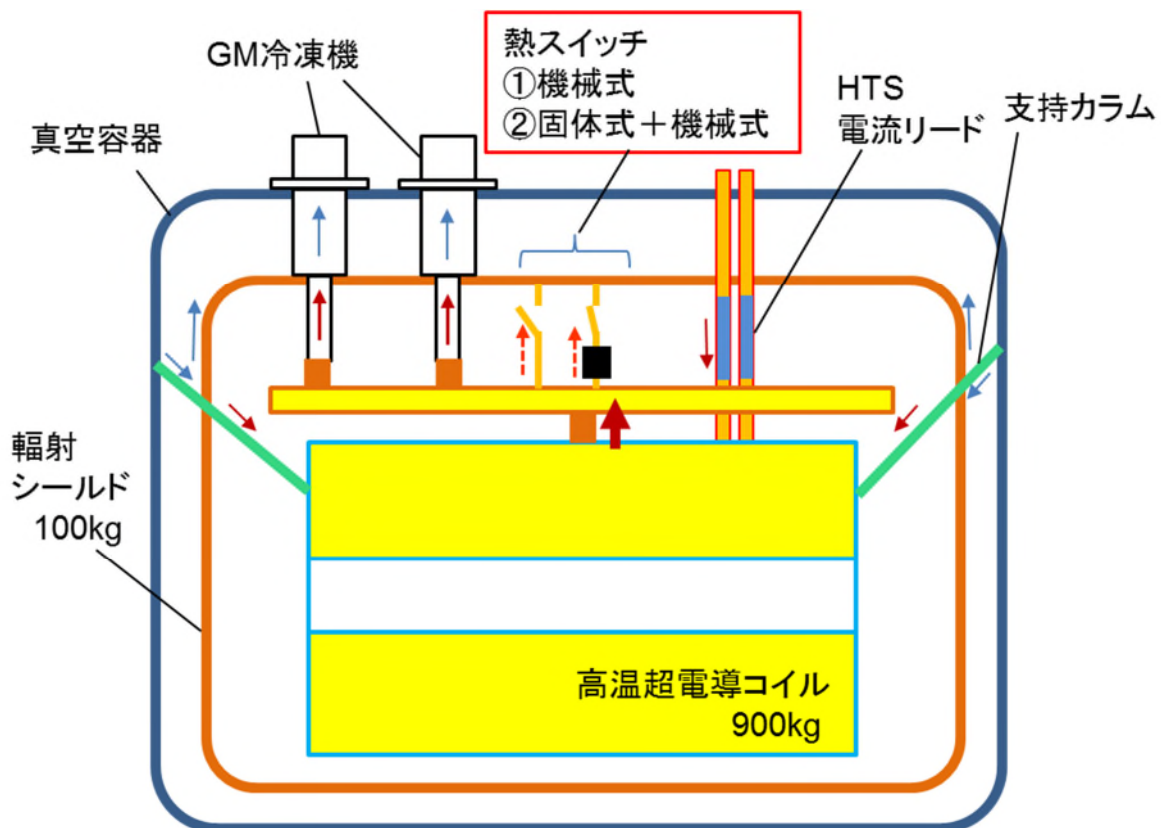


図 2.2.2.1-1 1 / 2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネットの冷却構成

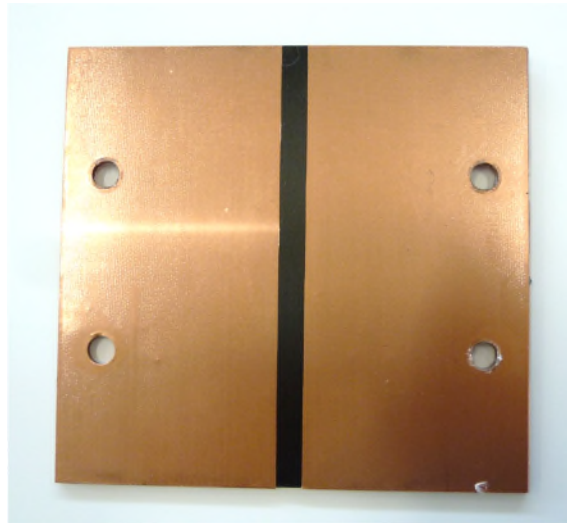


図 2. 2. 2. 1-2 CFRP 固体式熱スイッチの外観写真

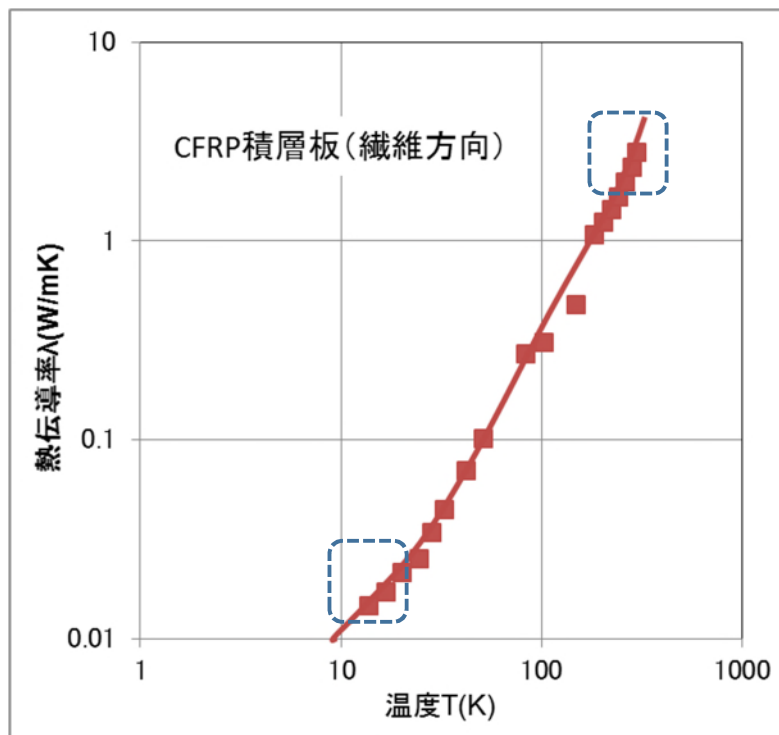


図 2. 2. 2. 1-3 CFRP 積層板の熱伝導率測定結果

GM 冷凍機を 2 台設置しているため、稼働している GM 冷凍機がメンテナンスする際にもう一方の GM 冷凍機に切り替えて冷却を継続することができ、運転を継続してできる冷却システムとしている。REBCO コイルをクライオスタットに組み込んだマグネットの構成図を図 2. 2. 2. 1-4 に示す。マグネットの高さは 1800mm であり、イメージングするための室温ボアは直径 480mm である。このボア内に、磁場均一度を調整するためのシミング設備とイメージング用の G コイル、RF コイルが設置される。

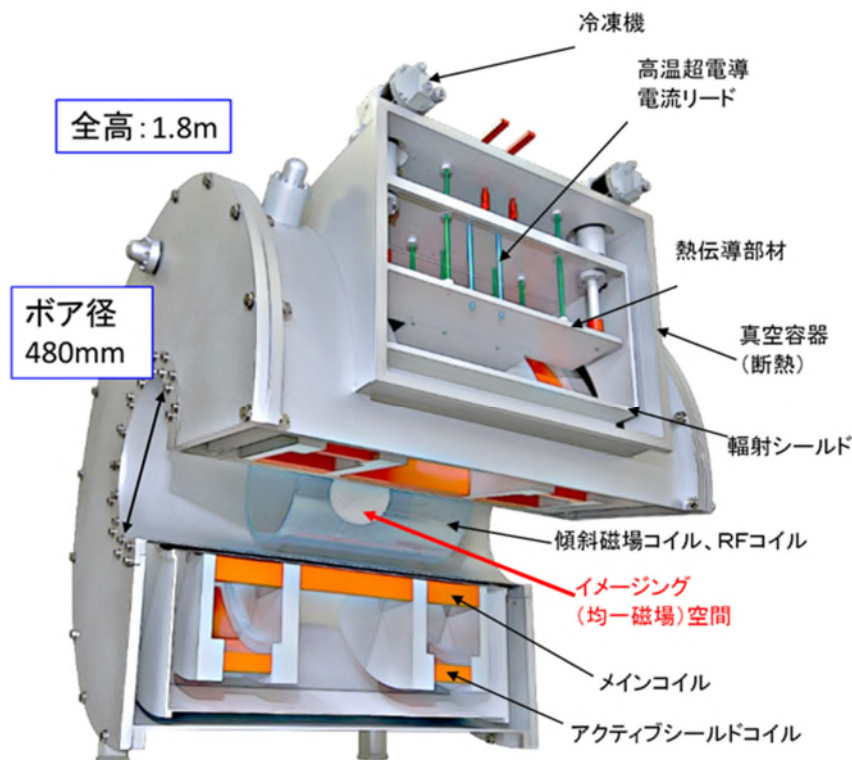


図 2.2.2.1-4 1 / 2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネット構成図

熱スイッチの効果検証

本節では、1/2 サイズ 3T マグネットの冷却システムを最適化するために設置した、熱スイッチの効果について記載する。

完成したコイルは、真空断熱・冷却するためのクライオスタットに挿入し 2 段式 GM 冷凍機の 2nd ステージと熱伝導部材を介して熱接続した。コイルは GFRP 製の断熱支持部材 12 本で真空槽から支持され、クライオスタット中心に対しアライメントを行い固定した。なお、常温部からの輻射熱を 1st ステージの中間温度でカットするためのアルミ製輻射シールドは、この断熱支持部材の途中部位を利用し支持固定した。クライオスタットには 2 台の GM 冷凍機を備え、初期冷却時間を短縮するために 1st ステージと 2nd ステージを熱短絡するための熱スイッチを 2 台設置した。

本マグネットの初期冷却時間は 19 日であった。被冷却重量がコイル側で約 1500kg でありその比熱の温度依存性、冷凍能力、熱抵抗などから初期冷却特性を解析した。図 2.2.2.1-5 に解析結果を示す。図には今回の実測結果 (○印) を記載しており、解析には熱スイッチを使用での本結果を用いて各部熱抵抗を算定し整合しほぼ同じ特性が計算できている。この整合した熱回路を用いて熱スイッチを未使用として解析を行った結果が、図 2.2.2.1-5 の実線である。解析結果から熱スイッチを使用しない場合は、冷却に 31 日間に要することが分かり、熱スイッチの効果は冷却時間を 40% 短縮できることを明らかにできた。

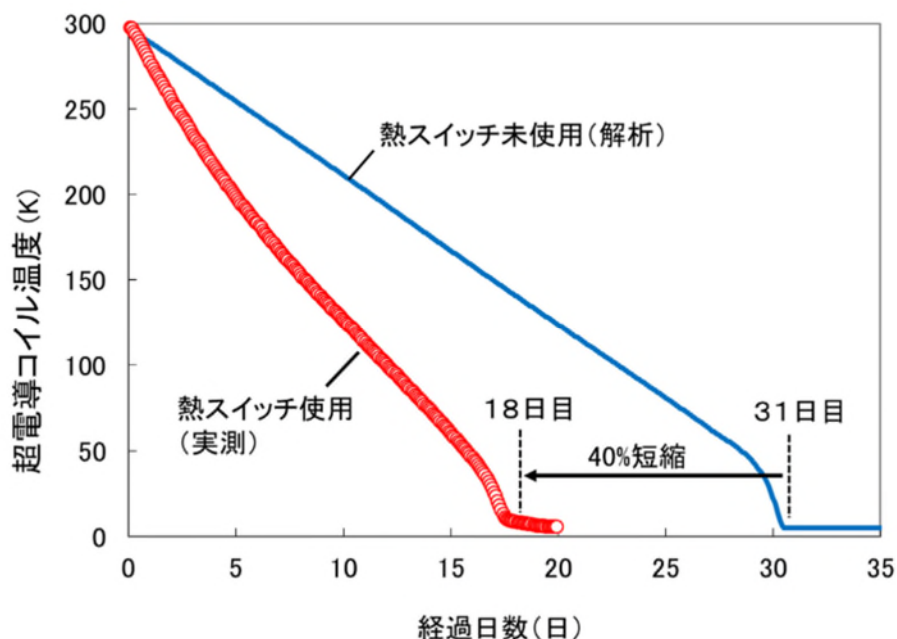


図 2.2.2.1-5 1/2 サイズ型 3T マグネットにおける熱スイッチ効果
熱スイッチ使用時の実測及び未使用時の解析結果

(2) 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルの基本設計 (三菱電機)

1. 目的

このプロジェクトの第一段階の目標は、1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネットを製造し、3T イメージングを実証すること (2016 年度-2018 年度)。第二段階の目標は、3T-MRI と同等の電流密度 200 A/mm²、最大経験磁場 7 T を経験する 1/2 サイズ 5T コイルを実証することである (2019 年度-2020 年度)。

1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネット、1/2 サイズアクティブシールド型 5T マグネット、全身撮影用 3T 高温超電導マグネットの諸元を表 2.2.2-1.2-1 に示す。1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルは、実用化を目指す全身用 3T-MRI と同様の中心磁場である。一方、最大経験磁場が 4 T、電流密度が 120 A/mm² であり、全身用 3T-MRI の最大経験磁場 7 T、電流密度 200 A/mm² を実証できない。最大経験磁場 7T とコイル電流密度 200 A/mm² を 1/2 サイズで実証するために 1/2 サイズアクティブシールド型 5T マグネットを製作予定である。本項では、1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルの磁気設計を実施した。磁場均一度は、MR イメージングが可能な 2 ppm (250 mmDSV) 以下を達成し、かつ超電導線材に印加される幅方向の電磁応力を低減できるコイル配置を検討した。

表 2.2.2-1.2-1 各コイルの諸元

| | 1/2 サイズアクティブシールド型 3T マグネット | 1/2 サイズアクティブシールド型 5T マグネット | 全身撮影用 3T 高温超電導マグネット |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 中心磁場 | 3 T | 5 T | 3 T |
| 最大経験磁場 | 4 T | 7 T | 7 T |
| 磁場均一度 均一磁場領域 (Vrms 値) | 2 ppm 以下 250 mmDSV | 2 ppm 以下 250 mmDSV | 2 ppm 以下 480 mmDSV |
| コイル電流密度 | 120 A/mm ² | 200 A/mm ² | 200 A/mm ² |

2. コイル最適化

1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルはパンケーキ巻きコイルを軸方向に沿って複数個配置する。このパンケーキコイル断面形状を、MRI 画像が取得可能均一領域の範囲で数 ppm (Vrms 値) が得られるように最適化する。磁場均一度の定義式を以下に示す。

$$\frac{1}{B(0,0,0)} \sqrt{\frac{\int (B(r, \theta, z) - B(0,0,0))^2 dv}{V}}$$

コイル設計の前提条件は以下のとおりである。

- (1) 主コイルの内径を 560 mm, シールドコイルの外径を 1200 mm とした。
- (2) コイルのオーバーオール電流密度は 200 A/mm²。
- (3) 磁場均一領域は 250 mmDSV, 磁場均一度は 2 ppm 以下。

コイル形状の最適化は、磁場均一度が最小となるように、各パンケーキコイルの外径（即ちコイル R 方向高さ）のみを非線形最適化（Simulated Annealing 法）で変化させ、コイル内径及びコイル軸方向 Z 位置は一定とした。目的関数・パラメータは以下の通りである。

- ① 目的関数
磁場均一度 Vrms
- ② パラメータ
コイル外径
- ③ 一定値
コイル内径
コイル Z 位置
シールドコイル形状

3. コイル最適化配置結果

最適化後のコイル配置を図 2.2.2-1.2-1 に示す。

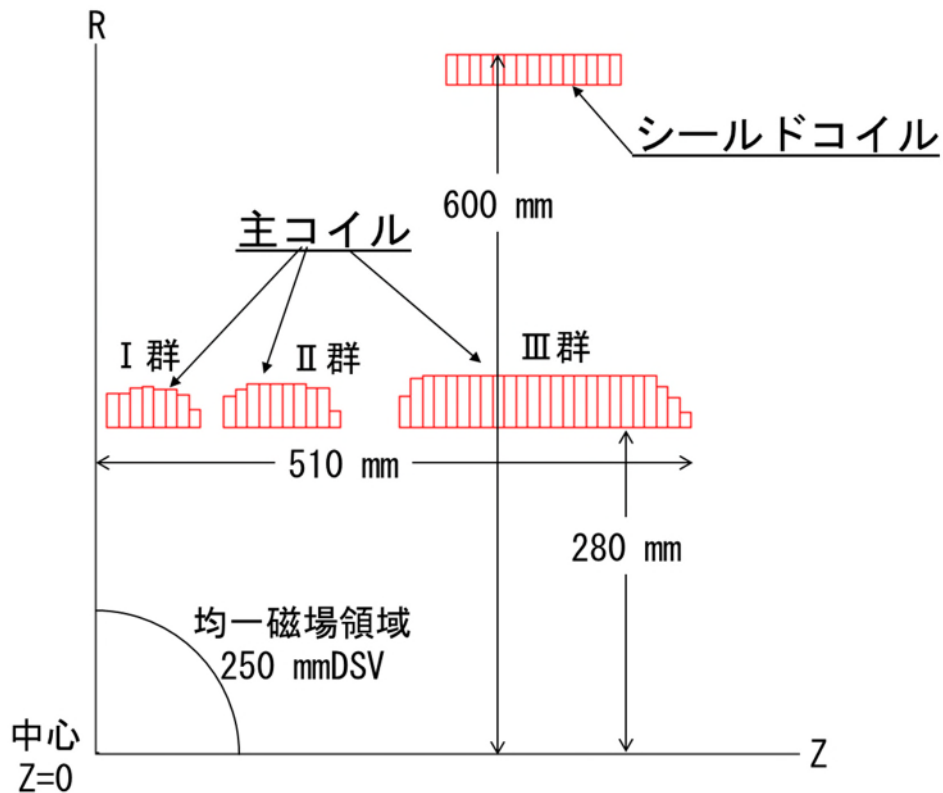


図 2.2.2-1.2-1 最適化後のコイル配置

コイルは主コイルが 6 群，シールドコイルが 2 群構成となった。使用するダブルパンケーキコイルは 116 枚。250 mmDSV の磁場均一度は 1.7 ppm であり，2 ppm 以下を満たした。漏れ磁場領域も目標値を満たした。

1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイルは，1/2 サイズアクティブシールド型 3T コイルと比較して，高電流密度化，高磁場化しているため，以下の式で与えられる電磁力が大きくなる。

$$F = J \times B$$

図 2.2.2-1.2-1 の主コイルを，電磁力支持材なしで一体型で製作した場合の各パンケーキコイル面に印加される電磁力と電磁応力を計算した。電磁力と電磁応力の計算結果を図 2.2.2-1.2-3 に示す。ただし，電磁応力を導出する際の断面積は，図 2.2.2-1.2-2 に示すコイル面のコイル高さ方向の面積とした。

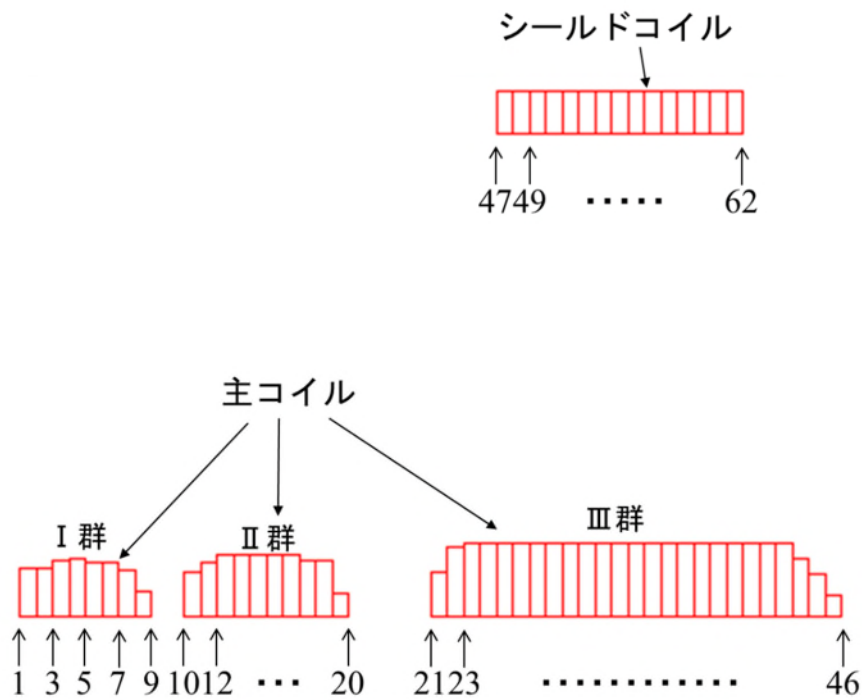


図 2. 2. 2-1. 2-2 パンケーキコイルのコイル面番号

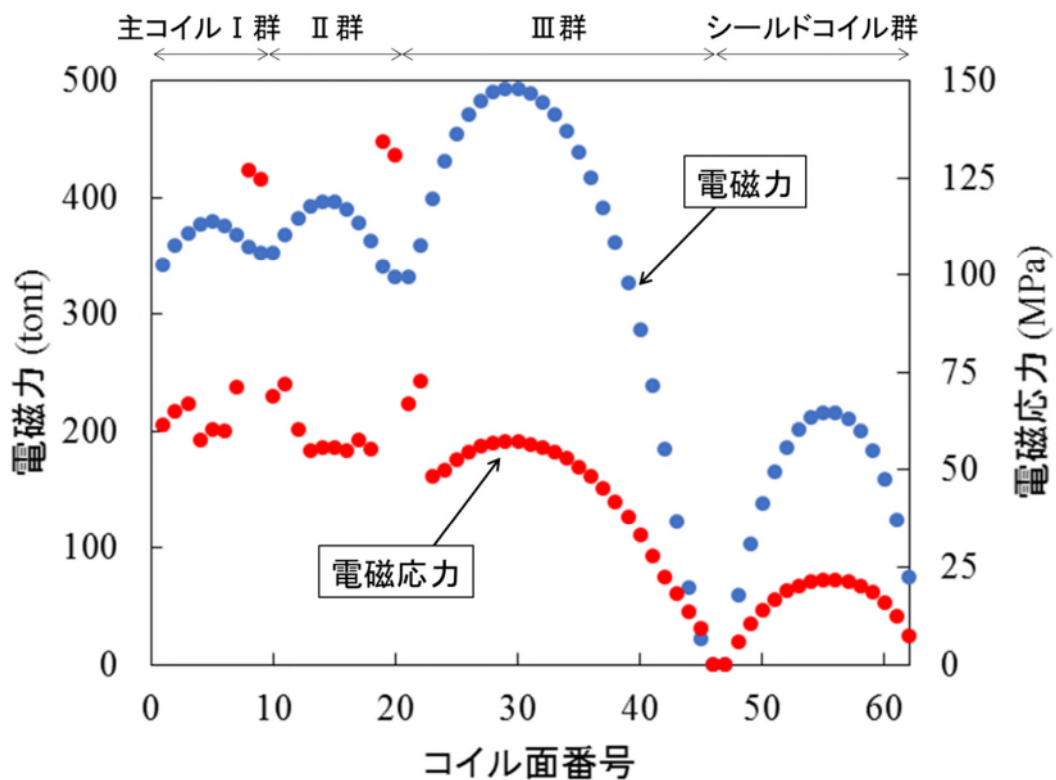


図 2. 2. 2-1. 2-3 各パンケーキコイル面にはたらく電磁力と電磁応力
(主コイル群を一体で製作した場合)

図 2. 2. 2-1. 2-3 より、主コイル群を一体で製作した場合、パンケーキコイル面に印加される最大の電磁力は 494 tonf、最大の軸方向電磁応力は 135 MPa となった。線材

幅方向の電磁応力により，高温超電導線材の超電導特性が劣化する可能性がある。超電導劣化を防ぐために電磁応力を緩和する必要があり，その緩和方法について検討した。

図 2.2.2-1.2-3 より，電磁力が大きい箇所は主コイルⅢ群であることから，主コイルⅢ群の電磁力を主コイルⅠ群とⅡ群に伝達しないよう，主コイルⅢ群の電磁力を独立に支持することが有効であると考えた。図 2.2.2-1.2-4 に主コイルⅢ群の電磁力を独立に支持した場合の各パンケーキコイル面に印加される電磁力と電磁応力を示す。

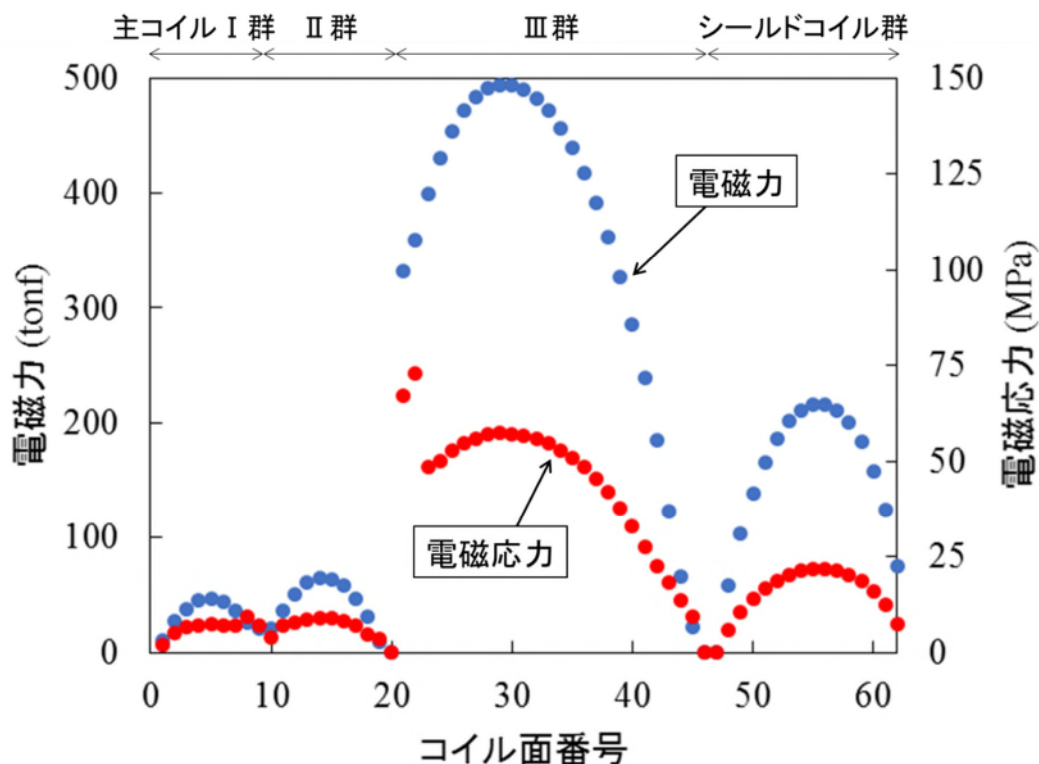


図 2.2.2-1.2-4 各パンケーキコイル面にはたらく電磁力と電磁応力
(主コイルⅢ群の電磁力を独立で支持した場合)

主コイルⅢ群の電磁力を独立に支持することで，最大の軸方向電磁応力は 73 MPa まで低減できた。線材幅方向の応力による超電導劣化の基準が明確でないことから，さらに電磁応力を低減するための方法を検討した。

主コイルⅢ群の電磁力を主コイルⅠ群，Ⅱ群に伝えない構造において，最も軸方向電磁応力が大きい箇所は，図 2.2.2-1.2-4 より主コイルⅢ群の内部であった。そこで，主コイルⅢ群を 2 分割し，それぞれのコイル群を独立して電磁力支持することで，軸方向最大電磁力の低減を検討した。

主コイルⅢ群を 2 分割とした場合の最適化を実施した。主コイルⅢ群を 2 分割にする際，電磁力を支持できるよう 30 mm の空間を設けた。このときのコイル配置を図 5 に示す。また，図 2.2.2-1.2-5 のコイル配置時の各コイル面にはたらく電磁力と電磁応力を図 2.2.2-1.2-6 に示す。

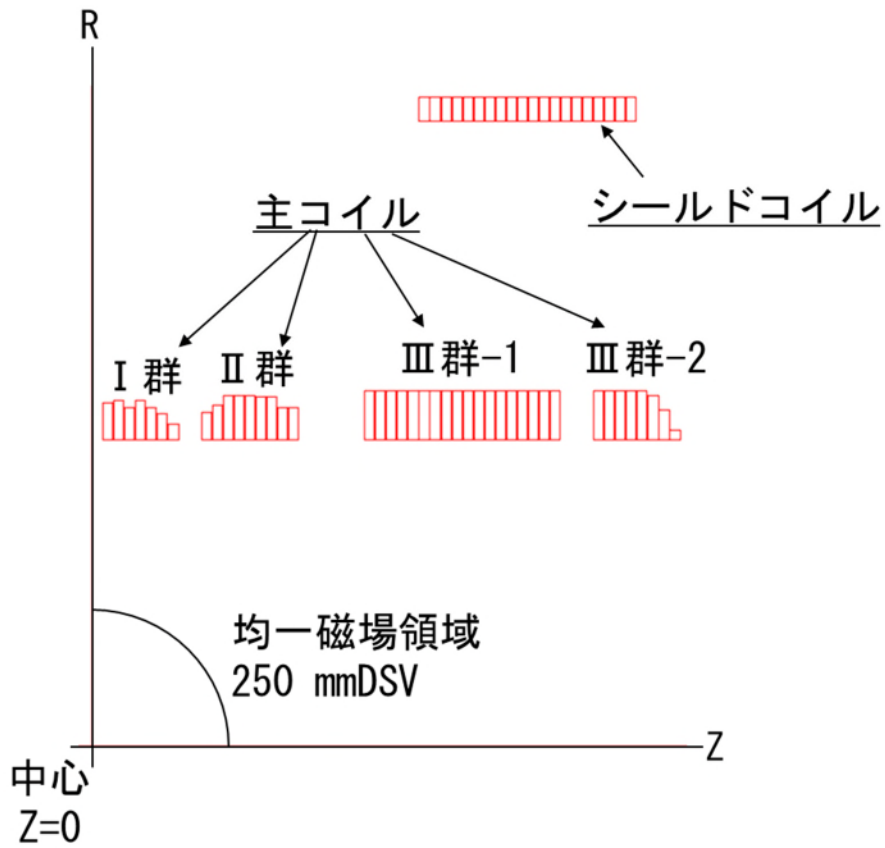


図 2. 2. 2-1. 2-5 電磁力を考慮したコイル配置

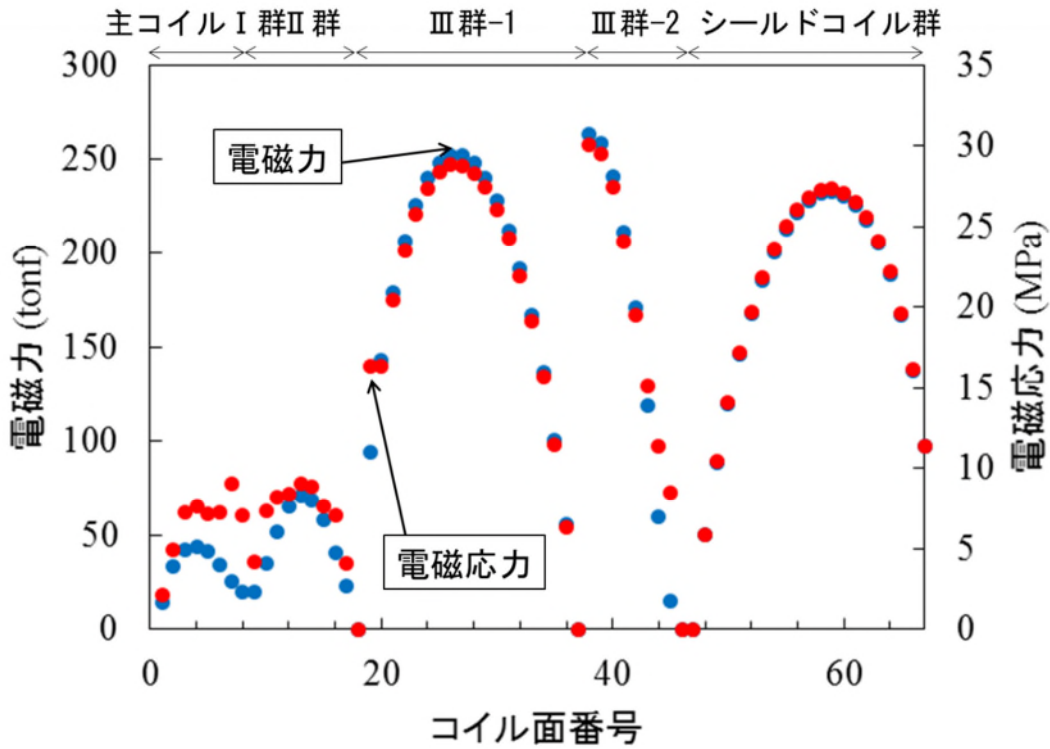


図 2. 2. 2-1. 2-6 各パンケーキコイル面にはたらく電磁力と電磁応力
(主コイルIII群-1 と III群-2 の電磁力を独立で支持した場合)

図 2.2.2-1.2-6 の結果より，軸方向の最大電磁応力を 30 MPa にすることができた。また，図 2.2.2-1.2-5 のコイル配置時におけるコイル中心の磁場分布，誤差磁場係数，漏れ磁場領域(0.5 mT ライン)を図 2.2.2-1.2-7，表 2.2.2-1.2-2，図 2.2.2-1.2-8 に示す。

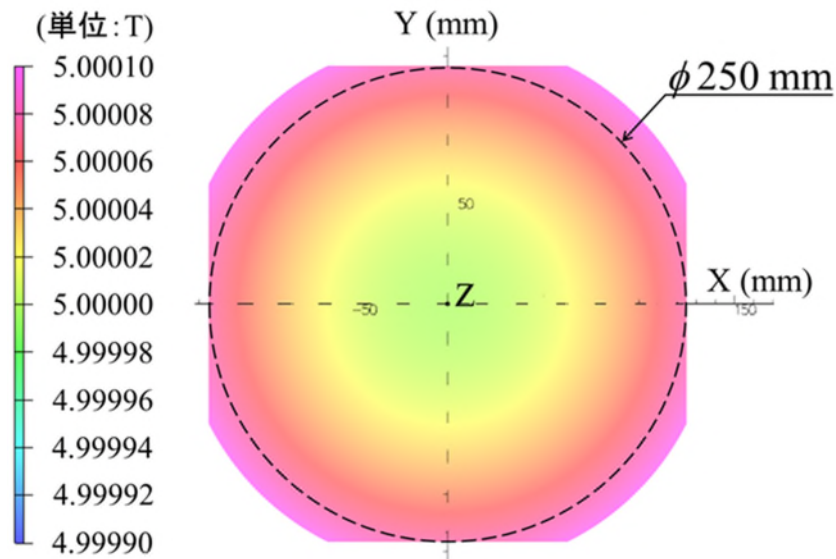


図 2.2.2-1.2-8-1 径方向の磁場分布

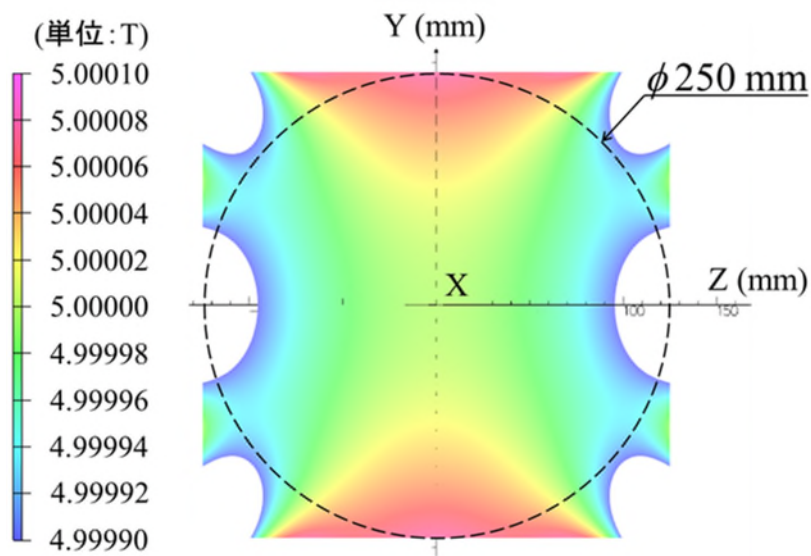


図 2.2.2-1.2-8-2 軸方向の磁場分布

表 2.2.2-1.2-2 誤差磁場係数

| | Z2 | Z4 | Z6 | Z8 | Z10 | Z12 |
|--------------------|------|-------|-------|--------|-------|------|
| 誤差磁場係数 (単位：ppm) | 0.00 | -0.24 | -3.14 | -15.61 | -9.20 | 1.95 |

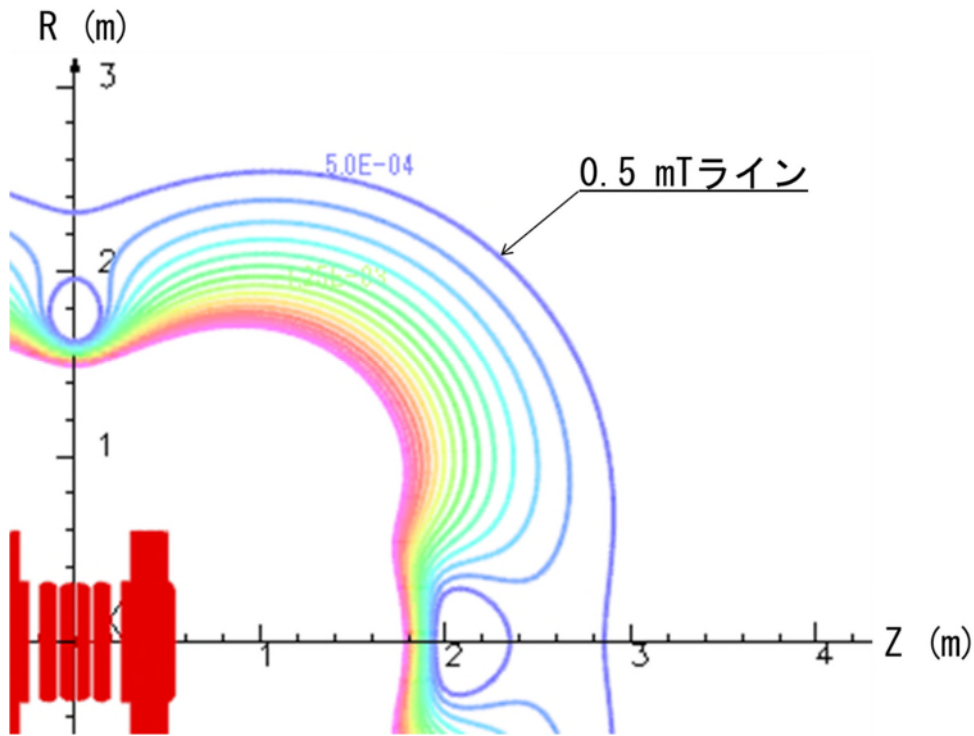


図 2.2.2-1.2-9 漏れ磁場領域

磁場均一度は 250 mmDSV で 1.7 ppm であり，目標の 2.0 ppm 以下を満たした。漏れ磁場領域（0.5 mT ライン）は，R 方向 2.5 m，Z 方向 2.9 であり，目標としていた「R 方向 2.5 m 以内，Z 方向 4.0m 以内」を満たさなかったが，問題ない値である。

コイルの諸元を表 2.2.2-1.2-3 にまとめた。

表 2.2.2-1.2-3 1/2 サイズアクティブシールド型 5T コイル

| 項目 | 値 |
|-----------|-----------------------|
| 中心磁場 | 5 T |
| 最大経験磁場 | 7 T |
| コイル群数 | 10 群 |
| パンケーキコイル数 | 124 枚 |
| コイル電流密度 | 200 A/mm ² |
| 磁場均一度 | 1.7 ppm |
| 均一磁場領域直径 | 250 mm |
| 主コイル内径 | 560 mm |
| シールドコイル外径 | 1200 mm |

4. 結論

高温超電導 3T-MRI の実用化に向けて、コイル電流密度 200 A/mm²、最大経験磁場 7 T の 1/2 サイズ 5T 高温超電導コイルのコイル配置を設計した。最適化には SA 法を用いてコイル配置を導出した。コイル配置における電磁力を計算したところ、超電導線材に印加される幅方向の電磁応力は、最大で 135 MPa であり、超電導線材が劣化する可能性があることがわかった。軸方向の最大電磁応力低減のために、コイル構成を従来の 8 群構成から 10 群構成とし、主コイルⅢ群に電磁力支持空間を設けた。電磁力が大きい主コイルⅢ群-1 とⅢ群-2 の電磁力を主コイルⅠ群とⅡ群に伝えないことで、最大電磁応力を 30 MPa まで低減できる。線材幅方向の応力による超電導特性の劣化を抑制するためには、以下の 2 点をコイル設計に導入することで解決できると考えられる。

- ・主コイルⅢ群の電磁力が大きいことから、Ⅲ群の電磁力を独立に支持する
- ・主コイルⅢ群の内部電磁応力が大きいことから、2 分割構造とする

したがって本研究により、高温超電導 3T-MRI の実現には電磁力の支持空間も考慮して設計しなければならないことがわかった。

2.2.2.2 省エネ・低コストシステムの開発

A. 励磁電源及び保持電源からなる実用化省エネ化励磁電源システム

(1) 高安定磁場マグネットの励磁システムの開発 (京大白井研)

1. 概要

高温超電導 MRI の常時電源駆動での運用を想定して、出力電流安定度が高い高安定電源システムを新たに設計・製作し、励磁試験を実施して磁場安定性へ与える影響を評価した。この電源システムは励消磁用電源 (±15 V、1000 A ; 水冷) ・電流保持用電源 (±2 V、300 A ; 空冷) ・保護抵抗・クエンチ検出器からなる。1.5T (66A) 励磁の場合、オーバーシュート電流 8 A としたとき、15 分間の磁場測定において電流保持電源では $\Delta B_{p-p}=0.3$ ppm と 10 分の 1 程度に抑制することが出来、1 時間の磁場安定度 2.4 ppm/hr であった。また、高安定磁場の実現のため、磁場を信号源とするフィードバック制御による抑制の検討を行い、0.7 ppm/hr の安定度を確認した。さらに高安定磁場を実現するとともに、実際のイメージング運転を想定して、あらかじめ電流補正量を予想したフィードフォワード制御の検討を行った。また、電源制御系の設計のために、HTS-MRI マグネットの等価回路表現について 5.5T-HTS-MRI の実験データを用いて、検討を行った。

2. 微小電流制御(磁場フィードバック制御)

遮蔽電流の減衰や電源の長時間電流変動による磁場の時間変化を抑制するために、NMR プローブで読み取った磁場信号をフィードバック信号として微小電流を通電電流に重畳しコントロールを行うことを提案し、そのために入力信号に比例して微小電流を通電電流に重畳する機能 (NMR 微調機能) を高安定電源システムに設計し搭載した。実験回路の全体図を図 2.2.2.2-1-1 に示す。電流保持電源による電流値一定制御に加えて、より高精度な磁場制御を行うために微小電流制御用の制御ループを加えている。次項の

微小電流制御（磁場フィードバック制御）では電流保持電源搭載の NMR 微調機能を使用し、NMR プローブにより測定された磁場をフィードバック信号に使用し、作成した制御プログラムにより制御を行った。

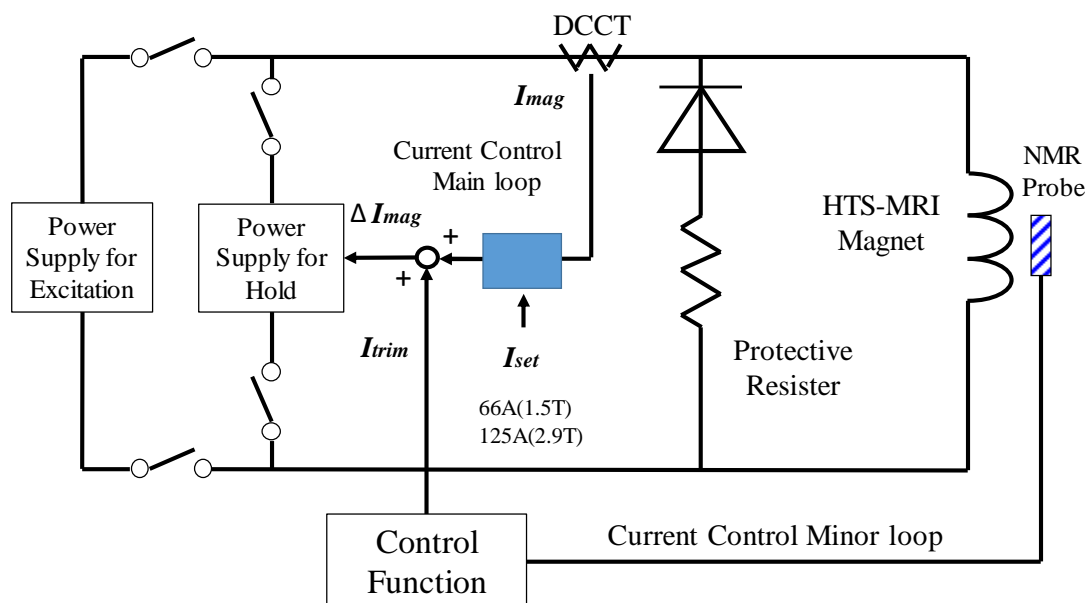


図 2. 2. 2. 2-1-1 微小電流制御時の実験回路

上記の NMR 微調機能を用いて、高安定な磁場を実現するために微小電流制御(磁場フィードバック制御)を HTS マグネットと高安定電源システムを用いて 1.5 T で 1 時間自動制御 行い、磁場安定度を評価した。

微小電流制御を行わず電源のみで電流保持した場合磁場安定度が 2.4 ppm/hour であったのに対し、さらに微小電流制御を行うことにより磁場安定度を 0.7 ppm/hour に向上できることが分かった。これはイメージングに必要とされる 1 ppm/hour の磁場安定度を満たしており、目標とする磁場安定度を微小電流制御により達成することが出来た。

3. フィードフォワード磁場補正制御実験

励消磁電源により LTS マグネットを 0 A から 225.3A まで 0.07 A/s の掃引速度で励磁した後、電源切替操作を行い、電流保持電源駆動で 224.3 A の電流値一定制御を行う。その後すぐに、電流値 $I_2 = 6.81 \times 10^{-3} \log(t+8453) + C'$ を基に、励磁開始後 6000 s ~ 6900 s、7200 s ~ 8100 s、8400 s ~ 9300 s、9600 s ~ 10500 s の 4 つのインターバルを目標にして微調電源に目的とする制御電流値を出力するような電圧信号を function generator から送信することで励磁電流のフィードフォワード制御を行い、NMR プローブを用いてコイル中心の磁場強度を測定した。

4. まとめ

新しく設計製作した電流補正微調整電源の運転調整実験を伝導冷却コイル・LTS-MRI マグネットを用いて実施した。この電源は主電流 100 A に対して、0.0002 ppm の調整制

度を持つ。保持電源電流に重畳する形で、精度の良い微小電流が制御でき、磁場制御ができることを確認した。

この電流補正微調整電源を用いて、磁場変動実験データから予め補正電流（関数）を算出し、開ループで磁場補正を行い、所望の精度を得た。この時、実際のイメージング運転を想定して、15分イメージング（磁場補正制御有）+5分（磁場測定+オフセット調整）のルーチンを繰り返す運用を試験した。

HTS コイルの電源設計のための等価回路表現の検討を行った。電源システムによる適切な励磁手法を検討・評価するためには、簡易的に遮蔽電流の減衰を予測できる等価回路モデルを構築する必要がある。遮蔽電流はコイルの自己磁場の変化により線材に誘導されることから、簡易的に弱結合の変圧器の等価回路モデルで表すこととした。二次側が誘導された遮蔽電流ループを表すが、実際には、遮蔽電流のループは一つではなく、また流れるルートを決めないと回路定数は求まらない。さらに、マグネットの負荷率や温度、磁化履歴などのパラメータによって変わってくると考えられる。しかし、実験結果から見ると、本来磁場成形されたMRIのマグネットでは相互インダクタンスは大きくない。運転磁場を固定すれば、簡単なモデルで一つの実験結果でフィッティングして、回路定数を推定することができる考えた。その推定した等価回路モデルで、オーバーシュート励磁運転の評価を行い、概ね実験結果を説明することができた。

B. スイッチング制御の定電流電源を用いた実用化省エネ化励磁電源システム

1. 概要

MRI マグネットを電源駆動で運用することは、常時電源を動かすコストがかかるだけでなく、電源自体の安定度が静磁場の安定度にも影響を及ぼしてしまう問題がある。

これまでに、高温超電導MRIの常時電源駆動での運用を想定して、出力電流安定度が高い高安定電源システムを新たに設計・製作し、励磁試験を実施して磁場安定性へ与える影響を評価した。電源システムは励消磁用電源（±15V, 1000A；水冷）・電流保持用電源（±2V, 300A；空冷）・保護抵抗・クエンチ検出器からなり、電源切り替えを含む運用方法を提案し、その動作について検証・評価を行った。また、高安定磁場の実現のため、磁場を信号源とするフィードバック制御による抑制の検討を行い、0.7ppm/hrの安定度を確認した。さらに高安定磁場を実現するとともに、実際のイメージング運転を想定して、あらかじめ電流補正量を予想したフィードフォワード制御の検討を行った。

電力損失は大きいですが、電流リップルが小さく安定性の高いドロップ制御の定電流電源と電力損失が小さく空冷で運転可能だが、電流リップルが大きいスイッチング制御の定電流電源、ドロップ制御とスイッチング制御を組み合わせた定電流電源の3種類の電源を導入して、中心磁場の時間安定性、イメージング画像に与える影響、電力損失の3つの点から比較を行うことを目的とした。

2. 電源電力損失

本実験では、電源の制御方式の違いによる静磁場の時間安定性、撮像画像、電力損失の3点への影響を評価するために、実際にドロップ電源、スイッチング電源、ドロップ制御とスイッチング制御を組み合わせた電源の3つの電源を導入した。電源による影響

を評価するため、遮蔽電流の影響の少ない従来型の LTS マグネットを用いて励磁・イメージングを行った。

静磁場の時間安定性は、ドロップ電源、スイッチング電源、励消磁電源でそれぞれ最も安定した 1 時間で 1.53 ppm/hour, 0.73 ppm/hour, 0.73 ppm/hour と鮮明なイメージングに必要とされる 1 ppm/hour 以下、あるいはそれに近い安定度を得られた。

実際にイメージングを行った画像では、どの電源を駆動させた状態での撮像でも永久電流モードでの撮像と同程度の画像の撮像に成功し、ノイズの多いとされるスイッチング制御方式の電源でも実用に足ることが分かった。ただし、LTS マグネットを電源駆動する場合、マグネットと並列に接続された PCS スイッチの抵抗が存在するため、HTS マグネットを電源駆動する場合よりも電源の安定性による影響が緩和されていると考えられる。

次に、電流安定度が優れたドロップ電源と消費電力が少ないスイッチング電源という 2 つの制御方式の電源で HTS-MRI マグネットを励磁した。また、励磁方法を変えることで遮蔽電流の影響と電源由来の電流変動を抑制できることを確認した。オーバーシュート励磁をすることでドロップ電源では磁場安定度が大きく向上し、スイッチング電源では減流時の電流応答が遅いことで遮蔽電流が再励磁されることがわかった。さらに、コイルと並列な抵抗を挿入することでどちらの電源も制御による電流変動を抑制し、特にスイッチング電源では目標値以下に電流が低下することを防ぐことができた。これによってドロップ電源では 1.98 ppm/hour、スイッチング電源では 5.53 ppm/hour という磁場安定度を得られた。2 つの電源でイメージングを行った。磁場安定度の劣るスイッチング電源においても並列抵抗を挿入することでドロップ電源と同程度に鮮明な SN 比 19 の画像を得ることができた。

電力損失については、高安定電源システムにおいて、励消磁電源と保持電源に分離することで出力電流 224.3 A (LTS マグネットでの 1.5 T 相当) 時、1000 W 弱の消費電力の削減を確認した。また、出力電流の値によらず、スイッチング電源の消費電力が一番小さく、ドロップ電源と比べると約 1/6、保持電源と比較しても約半分の消費電力に抑えられた。

(2) MRI 高温超電導マグネットのシステム最適化の検討 (京大中村研)

A. 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化設計

我々は、運転温度まで含めた高温超電導 MRI のシステム最適化の検討を行っている。一般に、希土類系高温超電導線材の臨界電流は温度が低下するほど向上し、一方で冷凍機の冷凍効率も温度低下するほど悪化する。従って、両者のトレードオフとしての最適な運転温度と同温度における最適コイル形状を決定することは、高温超電導 MRI の実用化を加速する上で重要と考えられる。本項では、上記検討の一環として、まず高温超電導線材の定量的非線形電流輸送特性を適用した最適化設計コードの開発を行い、3 T ホールボディマグネットを対象としたコイル設計を実施した。

最適化設計コードの概要

まず、希土類系高温超電導コイルの最適化設計コードを開発した。コイル内外の磁場は、ビオーサバールの法則を利用して線電流近似にて計算することにし、希土類系

高温超電導線材における超電導薄膜層の幾何学的中心点に強制電流を与えた。そして、コイルボアのφ500 mmの空間における磁場均一度を最大化する目的のもとで、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて最適化設計を実施した。

B. 免疫遺伝的アルゴリズムを用いた最適化設計

中心磁場3 TのホールボディMRIを対象として、高温超電導マグネットの最適化設計を実施した。図2.2.2-2-B-1にはマグネットの概形図を、表2.2.2-2-B-1には設計諸元をそれぞれ示す。本マグネットは、主磁場を発生する主コイル、磁場均一球内の空間磁場均一度を改善する補正コイル、および漏洩磁場を低減するシールドコイルから構成されている。上記3コイルの運転電流値は同一とし、その方向はシールドコイルについて他2コイルと逆向きに行っている。なお、運転電流値については、これまでの実績に基づいて214.1 Aとした。マグネットの幾何学的制約条件としては、内径1000 mm、軸長1500 mm以下とし、目標磁場均一球はφ500 mmとしている。対象とする希土類系高温超電導線材は、その幅が5.50 mm、厚み(絶縁層含む)が0.23 mmであり、また同線材を使用したダブルパンケーキコイル1つ分の幅は、絶縁層を考慮して12.5 mmとしている。

図2.2.2-2-B-2には、免疫遺伝的アルゴリズムのフローチャートを示す。初めに、各コイルの巻数の情報から521個の観測地点における磁束密度を計算し、中心との誤差から目的関数を算出する。性能評価のあと、確率でより良い個体の選択、交叉や突然変異を起こし、次世代のコイル巻数を生成する。また免疫機能を使って、探索開始時に過去の探索結果を含ませることで探索時間の短縮をはかっている。

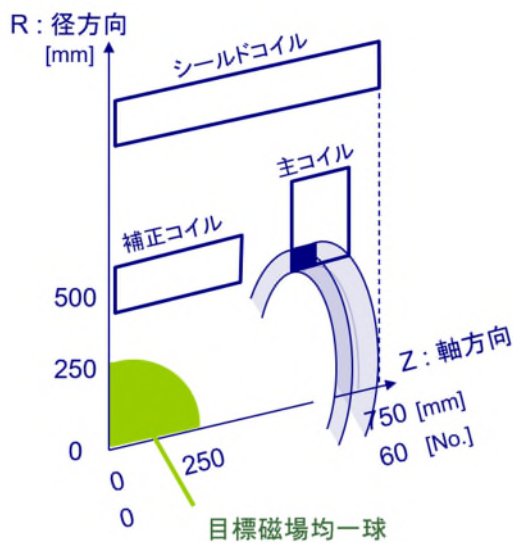


図 2.2.2-2-B-1 3 T ホールボディマグネットの概形図

表 2.2.2-2-B-1 3 T ホールボディマグネットの設計諸元

| | 全体 | 1/4モデル |
|-------------|----------------------|---------|
| 内径 | 1000 mm | |
| 軸長 | <1500 mm | <750 mm |
| 軸方向配置コイル数 | 120 | 60 |
| 線材厚み(絶縁層含む) | 0.23 mm | |
| 線材幅 | 5.5 mm | |
| コイル配置1つ分の幅 | 12.5 mm (ダブルパンケーキ構造) | |
| 運転電流 | 214.1 A | |
| 目標磁場 | 3 T | |
| 目標磁場均一球 | Φ 500 mm | |

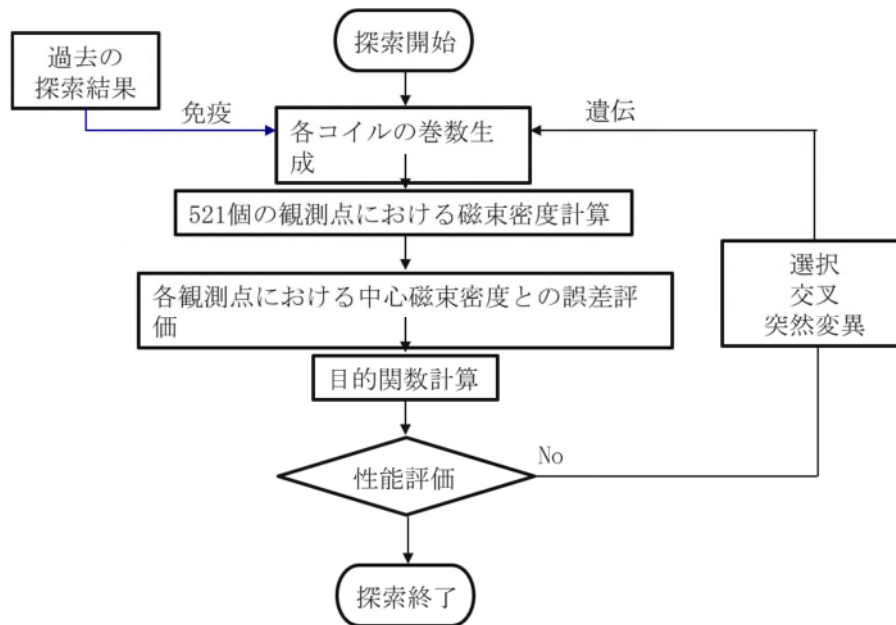


図 2.2.2-2-B-2 免疫遺伝アルゴリズムのフローチャート

2.2.3 高温超電導線材の超電導接続技術開発

(産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、フジクラ、古河電気工業)

1. 事業全体の評価 1.2.3 高温超電導線材の超電導接続技術開発 にて示した要素技術群①～⑥について、それぞれその成果を以下に示す。

① 低磁場低温接続アシスト環境技術 (産業技術総合研究所)

(1) 研究開発目的

接続の材料・プロセスの選択肢を大幅に拡大するために必要な、接続部のみを低磁場・低温環境にする技術 (接続アシスト技術) を確立するため、低磁場低温接続アシスト環境の概念設計を行い、接続部側への流入熱量の評価とその低減技術の開発、実際に冷凍機 2 台を用いた温度制御の確認を行う。

(2) 研究内容

接続部を主マグネットから離し、低磁場・低温の環境に置くステージについて概念設計を行った。まず低磁場の環境については、実際の MRI マグネットシステムにおいてはシールドコイルによって漏洩磁場を小さくする工夫がされており、シールドコイル外に接続部を置けば、数千ガウス以下のオーダーまで下がっており、十分な臨界磁界を持つ超電導材料であれば何ら対策をせずとも超電導となる。ただし、Nb のような臨界磁界が低い材料を用いる場合は、磁気シールドが必要となる。

接続部の温度は、専用の汎用極低温冷凍機 1 台で 4.2K に保つことを目標とした。想定する冷凍機冷凍能力は、4.2K で 1.5W である。一般的に MRI マグネットシステムにおける接続点はおよそ 100 カ所程度であり、この 100 の接続点を冷却するためのステージ (低温ステージ) を冷凍機ヘッドに取り付ける必要がある。低温ステージは十分な熱容量を

持つ高熱伝導性の無酸素銅のブロックが望ましい。主マグネットの運転温度は 30K を想定しており、接続線を伝って低温ステージに熱が流入する。この熱量が冷凍機の冷凍能力よりも小さい必要がある。

流入熱量を推計するため、市販の REBCO 高温超電導線（フジクラ社製）の熱伝導率の温度依存性を測定した。結果を図 2.3.1-1 に示す。市販超電導線は安定化のための銅がメッキされており、熱伝導率の振る舞いはほぼ銅のそれである。特にマグネットの運転温度である 30K で極大となっており、大きな熱流入が想定される。仮に長さ 50cm の銅安定化高温超電導線の両端を 30K と 4.2K としたとき、高温端から低温端へ流れる熱量は、数値解析によると 18.5mW となった（熱伝導率の温度依存性を考慮）。すなわち、接続点 1 カ所あたり 37mW が低温ステージに流れ込むことになり、冷凍機の冷凍能力 1.5W 以下とするためには、接続点は 40 カ所に制限されてしまうため、MRI 実機で適用できないことになる。

これを解決するためには、低温ステージの温度を上げて冷凍機の冷凍能力を向上させる方法が考えられるが、接続に用いる超電導材料の臨界温度が近づくため、現実的でない。そこでコイルから引き出した高温超電導線の熱伝導率を低減する方法について検討した。

図 2.3.1-1 には、銅メッキされていない REBCO 高温超電導線の熱伝導率測定結果を併記した（青プロット、縦軸は右側）。安定化銅がないと、熱伝導率は極めて小さいことがわかる。そこで接続線の全長 50cm のうち、低温ステージに近い方の半分、25cm の安定化銅を何らかの方法によって除去することを想定し、流入熱量を数値解析で求めたところ、接続線 1 本あたり 0.43mW と、およそ 1/40 に低減できることがわかった（接続線の長さ方向の温度分布を図 2.3.1-2 に示す）。これにより接続可能点数を大幅に増やすことが可能になり、実際の MRI マグネットシステムで適用可能となる。

なお、接続部の抵抗に対して通電により生じる発熱は、接続抵抗が目標の $10^{-12} \Omega$ を達成すれば、接続 1 箇所あたり 10nW しかなく、伝熱による流入熱量に比べて十分小さい。

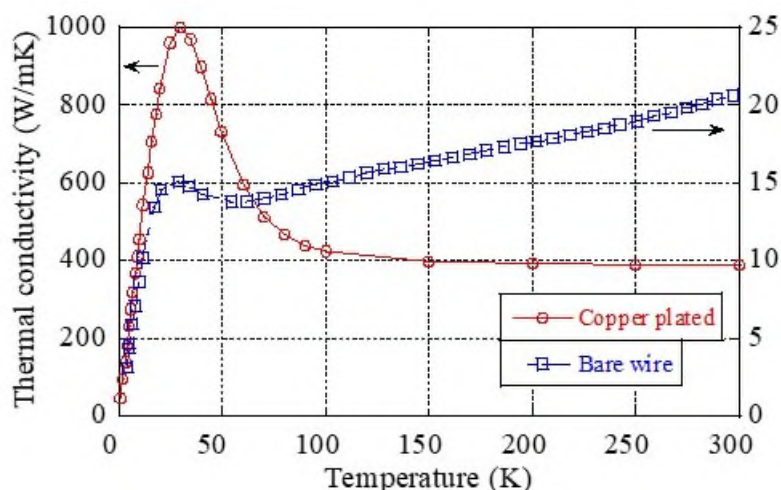


図 2.3.1-1 市販 REBCO 高温超電導線材の熱伝導率の測定結果

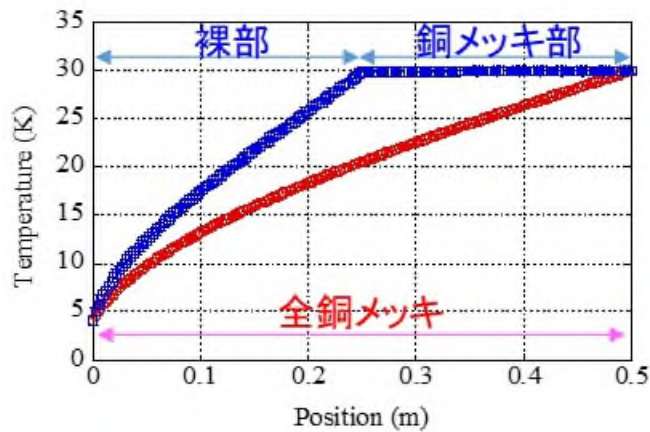


図 2.3.1-2 接続線長手方向の温度分布（全長にわたって銅メッキ有りの線と、半分の長さで銅メッキを除去した線の比較）

安定化銅を取り除くことは、超電導線の安定性を低下させることになるが、接続部に近い位置は図 2.3.1-2 に示すように主マグネット部より温度が低く、また低磁場環境にあるため、臨界電流に対する運転電流の比である負荷率が主マグネット部よりも十分に小さい。よって安定性の低下の懸念は小さい。

これらの検討結果を踏まえ、2台の冷凍機で主マグネットと接続部の低温ステージを模擬した、低磁場低温接続アシスト模擬モデルを製作した。図 2.3.1-3 に示す2つのステージ（無酸素銅製）を真空容器に納めたもので、それぞれのステージの温度を一定に保つためのヒータを内蔵し、温度コントローラーにより独立に温度を制御できる。実際に、接続を模擬して市販の REBCO 高温超電導線材（銅メッキ有）を2本接続したうえで冷凍機を運転し、それぞれのステージを独立に温度制御が可能であることを確認した。高温超電導線を接続したときと接続しないときで、低温ステージを 4.2K に制御するために投入されているヒータの熱量の変化を調べることで、30K に温度制御したステージ（高温ステージ）からの低温ステージへの流入熱量を評価したところ、0.04W となり、先の数値解析の結果をよく説明できる値を得た。同様に、端から約 8cm の安定化銅をエッチングにより取り除いた高温超電導線（図 2.3.1-4）を用意してアシスト模擬モデルに取り付けたところ、流入熱量は小さく測定不能であった。

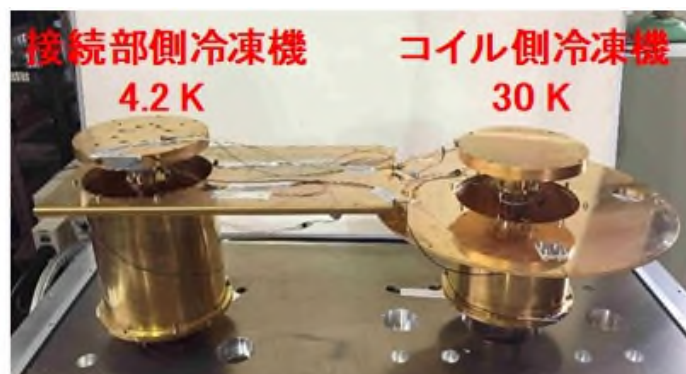


図 2.3.1-3 低磁場低温接続アシスト環境疑似モデルの温度制御ステージ部

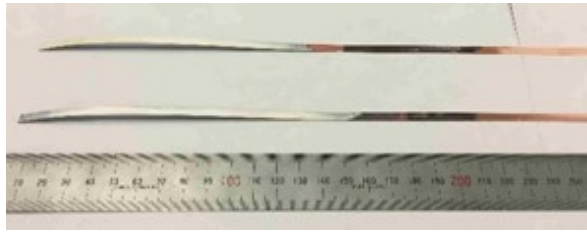


図 2.3.1-4 安定化銅をエッチングにより取り除き銀保護層を露出させた REBCO 高温超電導線

なお、この低磁場低温接続アシスト環境疑似モデルは、高温超電導コイルの両端を開発した接続技術で短絡し、コイル部を高温ステージで 30K、接続部を 4.2K に制御し、永久電流の閉ループを実証する試験に使用した。後の「⑥高温超電導接続技術開発 6 接続部を有するループによる永久電流の実証」において詳述する。

(3) 結果

低磁場低温接続アシスト環境の概念設計を行い、主マグネット側から接続部の低温ステージへ流れる熱量を低減する方法について検討した。2 台の冷凍機で構成するアシスト環境疑似モデルを製作し、市販の REBCO 高温超電導線材を接続線として接続したときでも、2 台の冷凍機を独立に温度制御できることを確認した。これにより接続部のみを低磁場・低温環境に置くことにより、接続に用いる超電導材料の選択肢を広げることが可能となった。

② 金属ペーストを用いた接合技術（産業技術総合研究所）

(1) 研究開発目的

金属ペーストを用いた接続は、はんだ接続と同様に簡便で、同等に近い低抵抗が期待できる。すでに確立している金または銀のナノ粒子を含む接着ペーストによる接続技術について、その限界を明らかにし、接続プロセスにおける課題を明らかにする。また、ペースト接続の一層の低抵抗化を図り、超電導材料を用いた接着ペーストを開発する。

(2) 研究内容

1. 金・銀ナノペーストによる接続プロセスの改良と、超電導元素による接続抵抗の違い
本プロジェクト開始時において、金および銀ナノペーストを用いた接続技術としては、大気中において REBCO 高温超電導線材が酸素欠損を起こさない 150℃の低温での接続に成功しており、図 2.3.2-1 に示すように、GdBCO 線材を用いた 10mm×160mm の接続面積で、液体窒素温度中で 3nΩ（シート抵抗率で 48 nΩ cm²）以下という低抵抗接続を実現していた[1]（本節での接続抵抗評価は四端子通電法を用いており、⑤接続抵抗評価技術で用いた減衰法に比べて精度が劣ることを付記する）。これに用いられた金属ナノペーストは、温度上昇とともに 2 段階で保護基が解離するもので、金ナノペーストは ULVAC 製の AU NANOMETAL、銀ナノペーストは同じく ULVAC 製の L-Ag1TeH であった。これらのペーストを銀保護層に塗布し、2 本の線材を対向で接触させて治具を用いて挟み込み、熱処理することで接続するという手法である（図 2.3.2-2）。

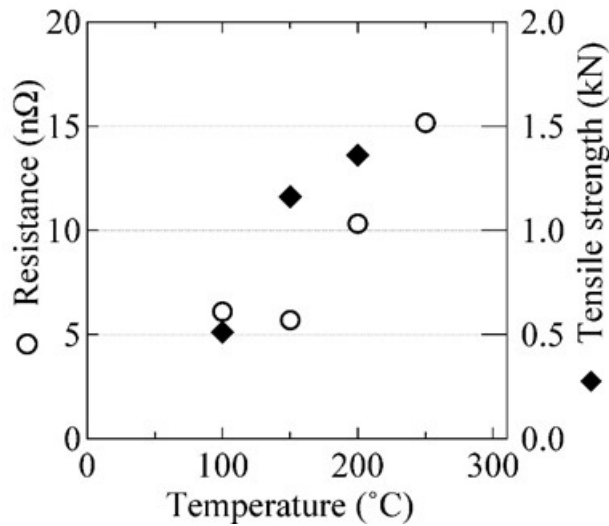


図 2.3.2-1 金ナノペーストによる接続抵抗と接続強度の接続温度依存性

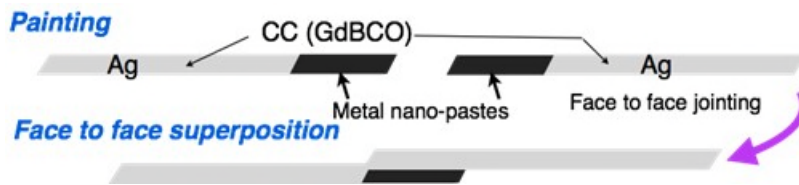


図 2.3.2-2 金属ナノペーストによる接続の模式図

従来技術における更なる低抵抗化のための課題は、図 2.3.2-3 の接続部の断面 SEM 写真に示すように、接続部分の金あるいは銀に存在する空孔を減らし、密度を向上させることである。液体状のペーストを塗布して熱処理するため、保護基や溶媒が気化して接続部分から放出される際に接続部分に空孔が生じてしまい、それによって接続抵抗が増加したと考えられる。そこで、接続抵抗の低減を行うために以下 3 つのアプローチを行った。

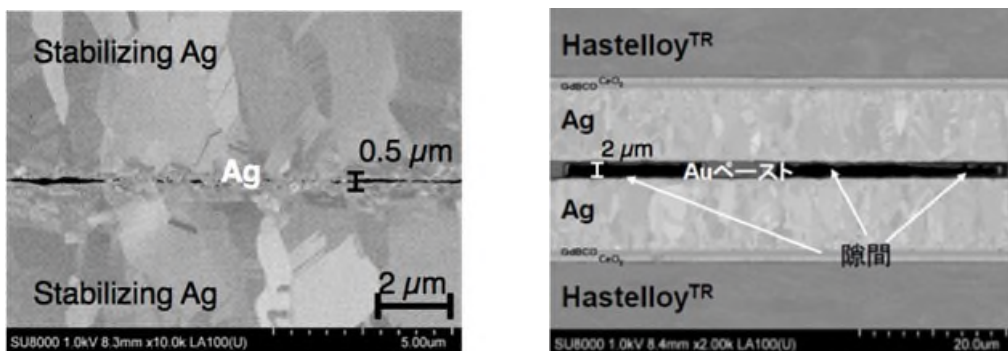


図 2.3.2-3 金属ナノペーストによる接続断面
(左：銀ナノペースト、右：金ナノペースト)

接続時の加圧・減圧による接続部の高密度化

加熱前に、金属ナノペーストを塗布した 2 本の線材を、挟み込み治具を用いて加圧して密着させている。しかし熱処理によって保護基や溶媒が気化すると、接続部の体積は

減少し、室温で印加した圧力も低下すると考えられる。そこで熱処理時に一軸加圧を印加し続けることによって、発生ガスを排出することを試みた。加圧と熱処理はホットプレスを用いて、一定圧力（ $\sim 0.1\text{GPa}$ ）を印加し、 150°C で60分加熱することで接続を行った。

また、熱処理時に保護基や溶媒が気化することによって発生する気体を減圧雰囲気中で加熱することで強制的に取り除く接続法も試みた。具体的には、金属ナノペーストを塗布した2本の線材を挟み込み治具にセットした状態で、真空乾燥機を用いてロータリーポンプにより減圧した雰囲気（約 1Torr ）中で接続を行った。熱処理条件は、上述と同様である。

図 2.3.2-4 に一軸加圧による接続を行った場合の液体窒素中での I-V 特性を示す。供試材は、GdBCO 線材とし、金ナノペーストを用いて接続を行った。同図より、シート抵抗率は、 $52\text{n}\Omega\text{cm}^2$ となり、従来のネジ止め接合治具でのシート抵抗率は $48\text{n}\Omega\text{cm}^2$ に比して、接続抵抗が増加することが分かった。これは、保護基や溶剤が気化して出来た空隙が加圧によって広げられて接続抵抗が増加したことが考えられる。これにより、加圧による接続抵抗の低下は困難であると考えられた。

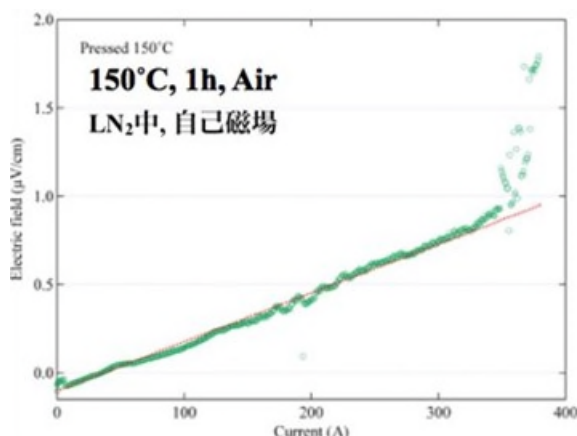
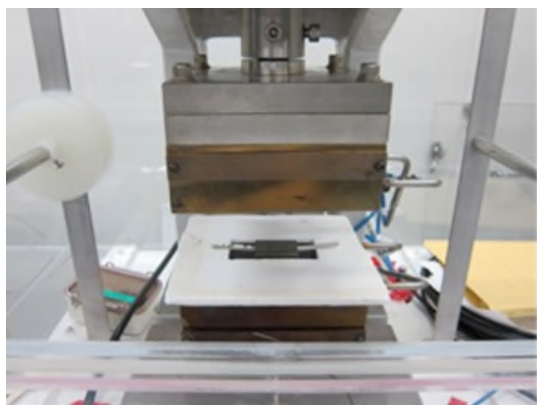


図 2.3.2-4 ホットプレスにセットした接続線材と一軸加圧熱処理で接続した場合の I-V 特性。傾きよりシート抵抗率は $52\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 。(液体窒素中)

図 2.3.2-5 には、減圧熱処理による接続を行った場合の液体窒素中での I-V 特性を示す。本試験では、通常のネジ止め接合治具で挟んだ線材を真空乾燥機に入れてロータリーポンプによる減圧熱処理を 150°C で行った。この場合のシート抵抗率は $40\text{n}\Omega\text{cm}^2$ となり、わずかに接続抵抗を低下させることができた。これは減圧により、気化した成分が外部の排出されることによって接続部の空隙が低下したと考えられる。しかしながら、目標とする接続抵抗達成は困難であると考えられた。

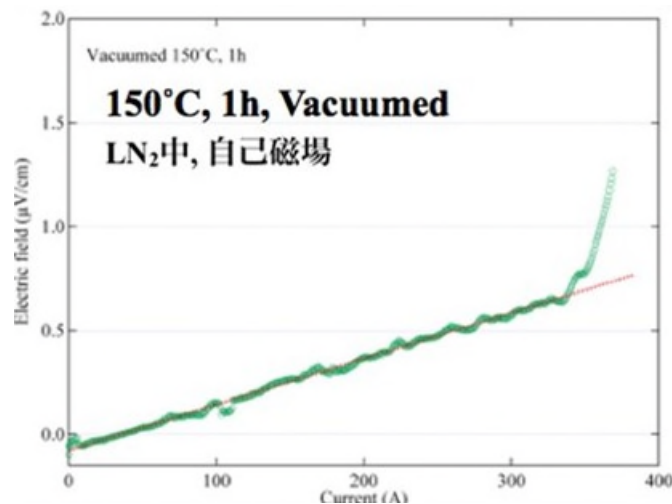


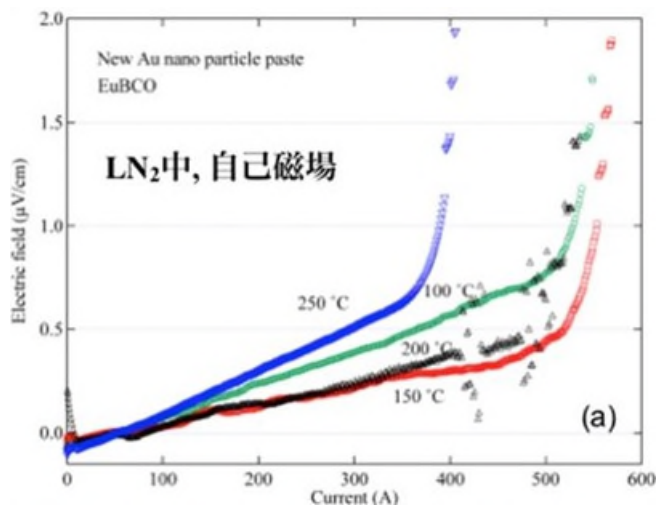
図 2.3.2-5 真空熱処理で接続した場合の I-V 特性。
傾きよりシート抵抗率は $40\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 。(液体窒素中)

REBCO 表面状態の適正化

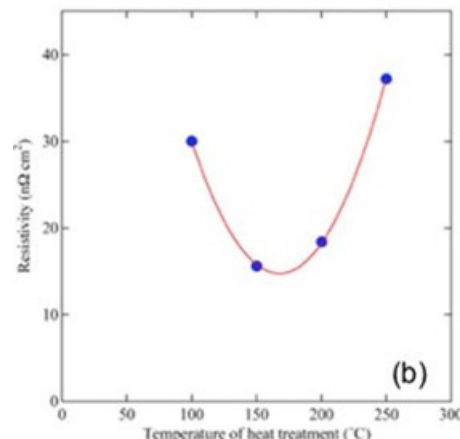
接続抵抗は、REBCO 層－銀保護層－ナノペースト－銀保護層－REBCO 層という直列回路の抵抗であるので(詳しい接続抵抗の要因分析は、⑥高温超電導接続技術開発 1.3 接続抵抗の要因分析)、REBCO の表面状態(異相等の状態)が接続抵抗に与える影響は大きいと考えられる。そこで、表面状態の異なる線材を用いた金属ナノペースト接続の抵抗の測定を行い、表面状態がどの程度寄与するのかを評価し、低抵抗化への指針を探った。具体的には、固相反応により成膜した線材(EuBCO pure 線材)と液層反応により成膜した線材(EuBCO+BHO 線材)の2種類で接続抵抗を比較評価した。

図 2.3.2-6 は、固相成長させた EuBCO 線材を金ナノペーストで接続した試料の液体窒素中での I-V 特性である。I-V 特性の傾きよりシート抵抗を求めた結果、約 160°C で最小となり、 $20\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 以下まで接続抵抗が低下した。

一方、液層成長させた EuBCO+BHO 線材の 150°C での接続 I-V 特性は、図 2.3.2-7 のようになった。この傾きより接続抵抗は $78\text{n}\Omega\text{cm}^2$ となり、他に比べ高い接続抵抗を示した。それぞれの線材の表面状態を SEM で観察した結果が図 2.3.2-8 である。固相成長させた EuBCO の結晶粒はサブミクロンオーダーで比較的均一であるのに対して、液層成長させた EuBCO+BHO の表面には a 軸配向などの異方粒とともに表面を覆う異相が存在することが分かった。後者は、液相(CuO が主相)が凝固したものであると考えられる。これらの異方粒及び異相の存在が、REBCO 層と銀保護層との間の抵抗を増加させ、接続抵抗を高くしていると考えられる。なお、固相反応 EuBCO 線材の 150°C の接続シート抵抗 $19\text{n}\Omega\text{cm}^2$ は、1cm 幅 16cm 長さの接続に換算すれば $1.2\text{n}\Omega$ となり、GdBCO の場合の $6\text{n}\Omega$ よりも大幅に低くなった。



(a) 固相成長 EuBCO 線材の接続 I-V 特性



(b) 熱処理温度とシート抵抗率 (I-V 特性の傾き) の関係

図 2.3.2-6

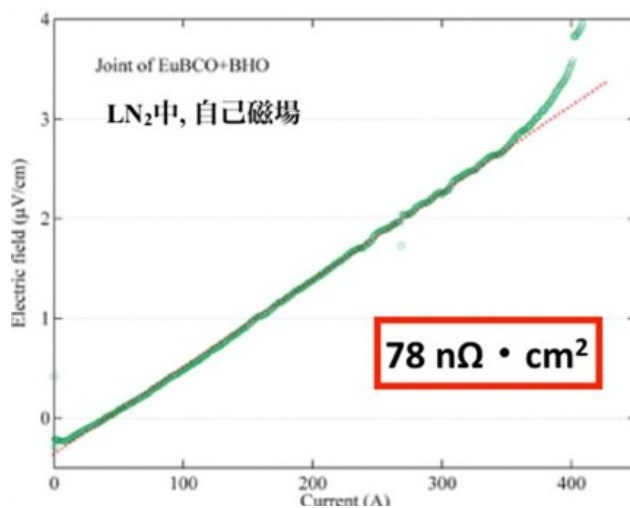
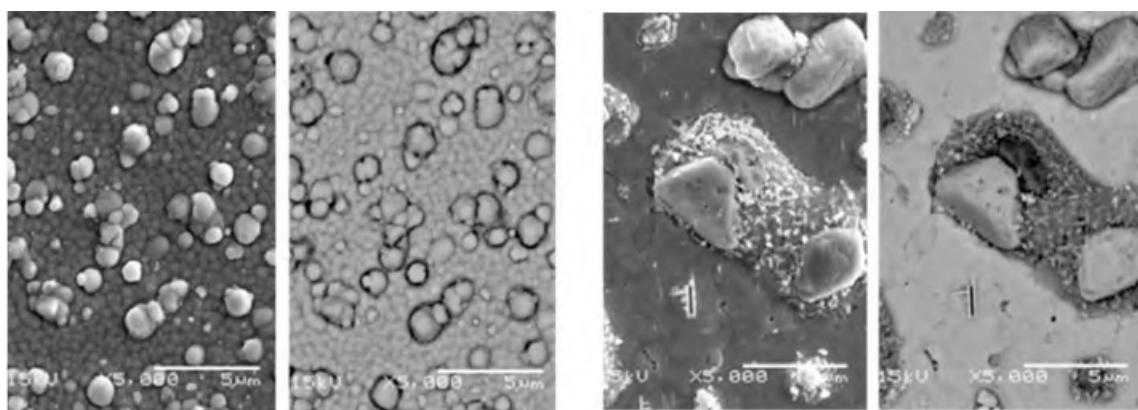


図 2.3.2-7 液相成長 EuBCO 線材の接続 I-V 特性

I-V 特性の傾きよりシート抵抗率は $78 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$



2次電子像

反射電子像

固相成長EuBCO線材超電導層

2次電子像

反射電子像

液相成長EuBCO+BHO線材超電導層

図 2.3.2-8 固相および液相成長 EuBCO 線材の表面観察結果

希土類の種類を選択

RE（希土類）系超電導体は、REの種類によって各温度、酸素分圧に平衡する酸素濃度が異なる。一方、ペースト接続技術では、ペーストの特性によって接続温度が決定される。従って、同じ温度条件では、超電導層（特に最表層）の酸素濃度が異なり、超電導特性が変化し、接続抵抗に影響を及ぼす可能性がある。そこで、REの種類が接続抵抗に与える影響を評価することにした。REとしてこれまでよく研究されてきたY（イットリウム）、Eu（ユーロピウム）、Gd（ガドリニウム）を選択し、それぞれの希土類でREBCO線材を作製した。ここで、成膜時の成長方法は固相反応を用い、ピン止めセンターを導入せず、膜厚も $0.5\mu\text{m}$ で統一して線材を作製した。これらの線材を用いて金ナノペーストによる接続を行い、接続抵抗を測定した。接続面積は $1\text{cm}\times 4\text{cm}$ とした。ここで金ナノペーストを用いたのは、断面観察を行う場合に、銀保護層と区別を付け易くするためである。

図2.3.2-9にそれぞれの接続の液体窒素中でのI-V特性を示す。I-V特性の傾きより、YBCOでは $11.5\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 、EuBCOでは $20.0\text{n}\Omega\text{cm}^2$ 、GdBCOでは $34.9\text{n}\Omega\text{cm}^2$ が得られた。N. Bargretsらは、購入した線材のはんだ接合を行い、接続抵抗が線材によって異なることを報告している[2]が、我々の結果はそれを希土類の違いによって系統的に明らかにしたと言える。

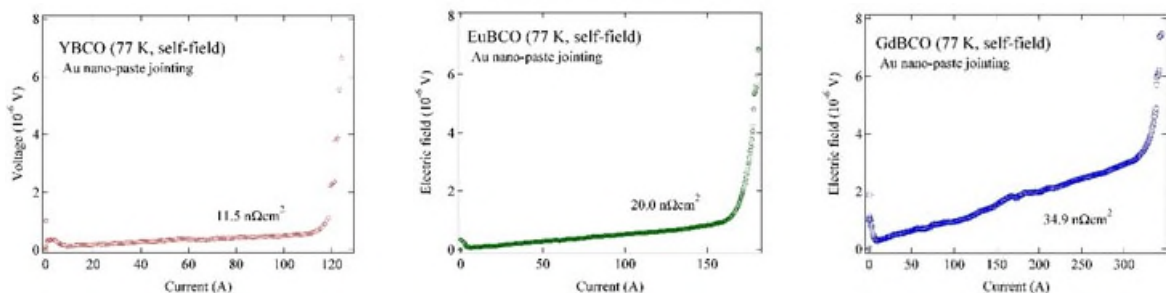


図 2.3.2-9 金ナノペーストによって接続したREBCO (RE=Y、Eu、Gd)線材の接続抵抗 (I-V 特性) の測定結果

また、3種の希土類で作製したREBCO線材の、REBCO層と銀保護層の界面付近の断面EDX観察による元素プロファイルの測定を行った。結果を図2.3.2-10に示す。どの線材においても、線材内部に向かって酸素の分布が生じていることが分かる。REBCOは酸素欠損により超電導性が劣化することが分かっているため、これにより表面抵抗も高くなることが考えられるが、酸素欠損量と接続抵抗の大小の相関は、元素プロファイルからははっきり読み取ることはできなかった。

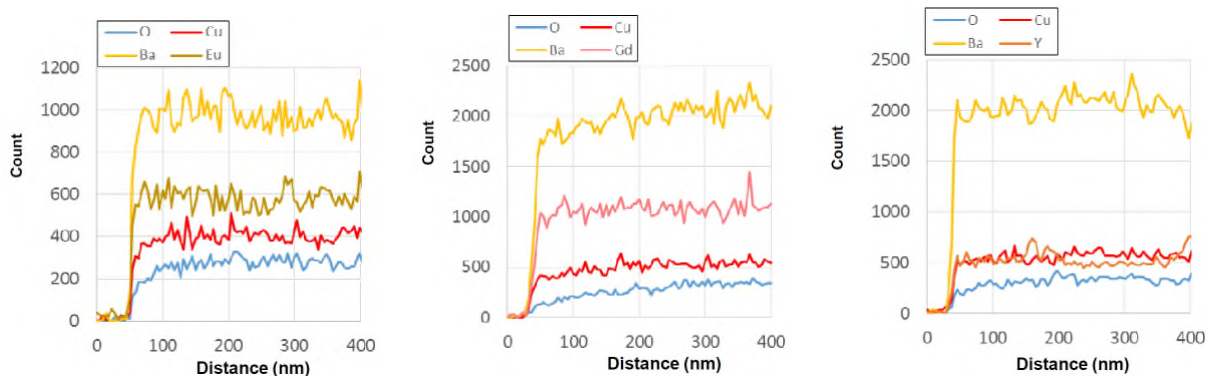


図 2.3.2-10 REBCO 断面 EDX による元素ラインプロファイル
左から (a) EuBCO、(b) GdBCO、(c) YBCO

2. 超電導ペーストの開発と、それによる接続

導電性ペーストは等方性一液加熱硬化型導電性接着剤と呼ばれ、一般的に銀ペーストとして知られる有機・無機コンパウンドである。温度 100~200°C、保持時間 30 分前後の加熱で、大気中で硬化する。ペースト状であり、スクリーン印刷やインクジェットなどの塗布法が適応可能であり、電気的機械的特性とハンドリング性に優れる特長がある。その電気伝導メカニズムについて、バインダの硬化収縮により、導電性のフィラーが接触して電気伝導が生じると一般的には考えられている。そのため、導電性能の向上には、収縮率が大きくフィラーの接触点を増大させるバインダを選択する必要がある。具体的にはフィラー粒子のナノ粒子化や、フレーク状にするなどの検討が多数報告されている [3, 4]。高温硬化では体積変化やバインダ、溶剤のアウトガスによるボイドが発生することにより、接着強度、密着性、導電性などが劣化することがある。硬化条件、使用材料であるバインダ、溶剤など多種の成分が直接的に導電性に影響を及ぼすことを調査し、ペーストで超電導性が実現できれば、超電導接続の実現に大きく近づくと考えられる。そのため、第一段階として典型的な金属超電導粉として Nb を挙げ、粒度分布、形状を考慮してペースト中の超電導金属粉の含有率の最適化や、充填密度の向上を目指す混合比を検討するとともに、硬化時の収縮挙動と反応を把握し、固定化の最適化を図りその電気的特性の詳細を調査した。

2.1 Nb ペーストの作製と固定化プロセスの最適化

ペーストは、材料（金属超電導粉末、エポキシ樹脂、溶剤、硬化剤、塗膜増強材）の正確な秤量、混合により、溶剤が均一になるよう製作した。固体基板上への塗布はメタルマスクを用いたスクリーン印刷法により行った。メタルマスクを用いたスクリーン印刷法は、薄膜のステンレス板材に塗布構造を加工し、印刷を行う。印刷構造上にペーストを配し、その上部をプラスチック製のはけ（スキージ）で印刷する。このためステンレス板材の厚みが当初の塗布厚となる。塗布構造はステンレス板材に加工するため、塗膜厚と印刷構造は自由に選択することが可能であり、接合面積（体積）を変化させるのが容易であるという利点がある。固体基板上にペーストを印刷した後、固化工程を行う。固化工程は、乾燥炉で 160°C、20 分、大気中でサンプルを保持する。これによって、溶剤が気化し、さらにエポキシ樹脂が硬化反応することにより、固体基板上にペーストが

固定化する。ここではスクリーン印刷のステンレス板材に 5mm×5mm の構造を加工し、YBCO 薄膜と同程度の熱収縮率である SrTiO₃(001) 単結晶基板を固体基板として用いて印刷を行った。

その XRD 結果を図 2.3.2-11 に示す。SrTiO₃(001) 単結晶基板の (001) と (002) の回折ピークと Nb(111) の回折ピークが確認できた。その他の不純物ピークはない。この結果、ペーストは Nb で構成されることが分かった。図 2.3.2-12 に、固化工程後のペーストの断面 SEM 写真を示す。SrTiO₃(001) 単結晶基板の上に Nb ペーストが固定化され、膜厚は約 80 μm であることが分かる。右図が拡大図である。最大 100 μm で直方体の Nb フィラーが確認できる。多くのフィラーは隣接するフィラーと接触していることが分かる。100 μm のステンレス板材に印刷して固化したのに、ペーストの厚みが 80 μm となったのは、溶剤が気化したことで密になった結果である。固化過程を精密に調査するため、ペースト固化時の熱収縮について測定した。ペーストの温度は放射温度計で測定し、ペーストの高さ方向の位置情報をレーザーで測定した。その結果を図 2.3.2-13 に示す。赤色がサンプル温度で紫色が収縮率を示している。単調な収縮を示しているのが分かる。これは溶剤が 50℃付近から気化が開始し、サンプル保持温度 200℃、時間 20 分、大気中で収縮はほぼ飽和する。次に保持温度を低下させると、僅かではあるが、収縮が生じる。これは温度低下による収縮の結果である。これらの結果から、温度、時間などの固化条件は上記条件で十分であることを示している。この固化プロセスでの最終的な収縮率は 23%であり、この値は印刷厚 100 μm と固化後の断面 SEM の結果の膜厚 80 μm とコンシステントである。次に固化過程の固化温度の最適化を図るため、ペーストの TG-DTA を 500 以下の範囲で測定した。結果を図 2.3.2-14 に示す。温度 80℃付近から重量減少が開始する。これは溶剤の気化に起因する。140℃付近でエポキシ硬化時の重合反応が見られる。また 230℃では、溶剤の沸点の DTA 変化が確認され、370℃ではエポキシの沸点が確認できる。以上の結果より、固化工程の条件は、エポキシ硬化時の重合反応が生じる温度以上で、より低温で Nb 粒子にダメージを与えない温度を選択するため、160℃が適切であると考える。さらに、時間は収縮率測定結果から、20 分が適切であることが分かった。

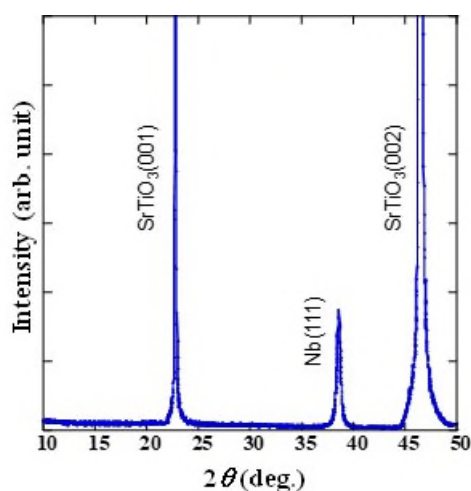


図 2.3.2-11 固化後のペーストの XRD 結果

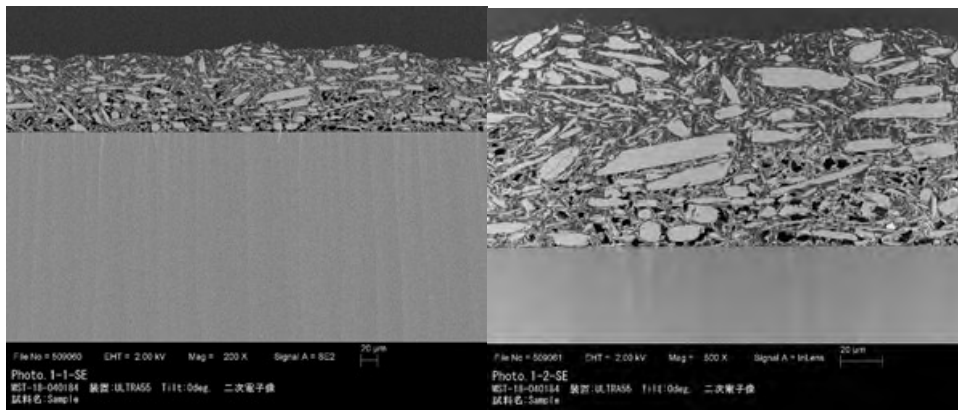


図 2.3.2-12 固化工程後のペーストの断面 SEM

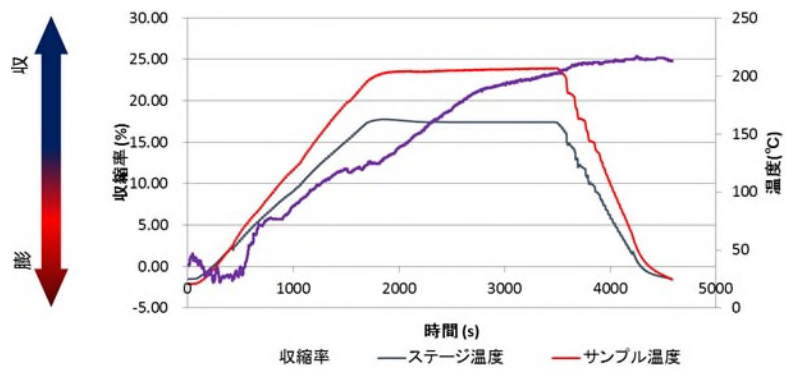


図 2.3.2-13 ペースト固化時の熱収縮測定

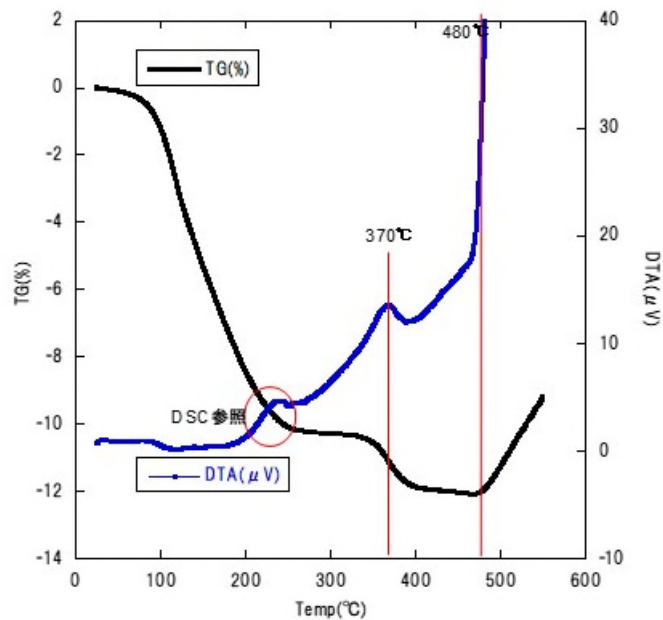


図 2.3.2-14 作成した Nb ペーストの熱重量・示差熱 (TG-DTA)

2.2 ペーストの電気的特性

ペーストの電気的特性を四端子法により、日本カンタム・デザイン社製の物理特性測定装置 (PPMS) を用いて調べた。結果を図 2.3.2-15 に示す。印刷時の厚み $100\ \mu\text{m}$ と 200

μm の時、室温から低温にかけて金属的電気伝導性を示し、8.2K 付近から抵抗の変化が見え始め、約 6.7K 付近で超電導を示すことが分かる。超電導ペーストの膜厚依存性はほぼ確認できない。

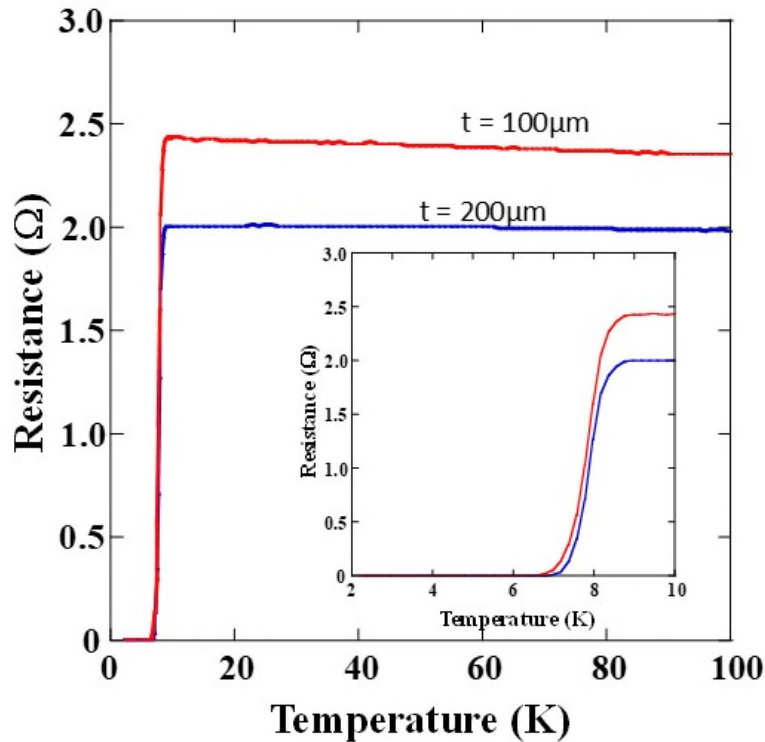


図 2.3.2-15 Nb ペーストの抵抗率の温度依存性

次にペーストの経年劣化を調べた。ペースト作製当日に印刷・固化したサンプルと、作製 5 日後に印刷・固化したサンプルの抵抗率の温度依存性の結果で比較した。ペースト作製当日に印刷・固化したサンプルは温度 8.2K で抵抗率の低下が開始し、約 6.7K で超電導に転移することが確認できたが、作製 5 日後に印刷・固化したサンプルでは、2K でも完全に超電導に転移はしなかった (図 2.3.2-16)。ペースト作製から印刷・固化するまでの時間が経過すると、超電導特性が劣化することが判明した。これは Nb 粒子が溶剤から化学的にダメージを受け、超電導性が劣化することが要因である。液体ヘリウム温度 4.2K で超電導を示すためには、作製後 2~3 日以内に印刷・固化することが必要であることが分かった。サンプル作製から移送、使用も含め 5 日あれば、日本国内、国外でも使用可能な期間であることから、安全性、信頼性を確保するために安全を見て 7 日以上の保存が必要であると考えられる。

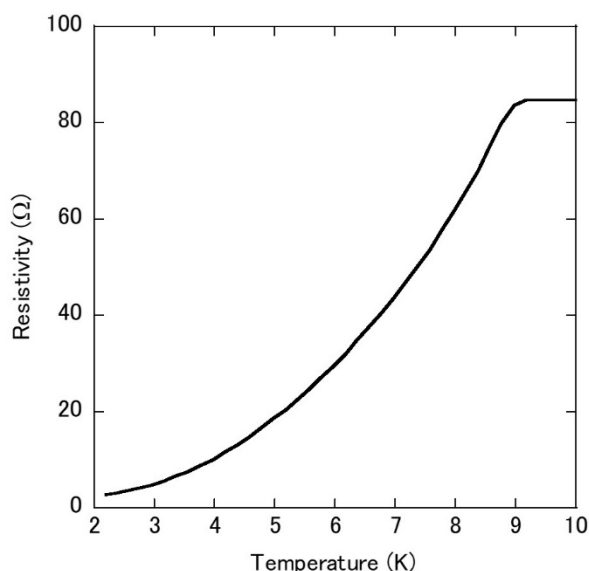


図 2.3.2-16 製造後 5 日での印刷塗布による Nb ペースト抵抗率

2.3 ペーストによる線材の接続

Nb ペーストを用いて超電導体 (NbTi) どうしの接続を試みた。図 2.3.2-17 に接続模式図を示す。STO 基板の上にメタルマスク法を用いて、幅 2mm、長さ 3mm の長方形ストリップライン 2 つをギャップ 1mm で隣接させ、スパッタリング法で成膜した。NbTi 膜の成膜は室温である。この 2 つのストリップラインのギャップを、前述の Nb ペーストを用いてブリッジする構造とした。ペーストの印刷面積は 4mm×3mm、厚みは印刷時 100 μm、固化後の厚みは 80 μm である。4 端子法により PPMS で抵抗の温度依存性を測定した。結果を図 2.3.2-18 に示す。温度の低下に伴い、金属的な振る舞いを示し、8.5K で抵抗の減少が始まり 6.5K で超電導転移することが確認できる。Nb ペーストによる、スパッタリングにより成長した NbTi 薄膜間の接続に成功した結果である。

また、Nb ペーストを用いて REBCO 高温超電導線材の接続を試みた。図 2.3.2-19 に対向接続模式図を示す。幅 5mm のハステロイ上に YBCO と保護層として Ag 層が形成された線材である。ペーストの印刷面積は 4mm×3mm、厚みは印刷時 100 μm、固化後は 80 μm である。4 端子法により PPMS で抵抗の温度依存性を測定した。結果を図 2.3.2-20 に示す。温度の低下に伴い、金属的な振る舞いを示し、8K で抵抗の急激な減少が確認できる。しかし、温度 2.2K 以上ではゼロ抵抗は確認できず残留抵抗を認めた。90K 付近での線材の超電導転移が確認できないのは、超電導線材の抵抗が極めて小さく、接続に用いた Nb ペーストの抵抗に支配されていたためと考えられる。図 2.3.2-21 に Nb ペースト接続線材の断面 SEM 写真を示す。上下のハステロイ/YBCO/Ag 間に Nb ペーストが確認できる。ペーストは両線材の Ag 層の間に一様に確認できるが、厚みは 40 μm であり、当初の予定の半分であることが分かった。これはペーストが閉空間であるため溶剤の気化が不十分であり、一部の溶剤がペースト中に残留し、Nb 粒子の超電導性を劣化させていることが原因と考える。

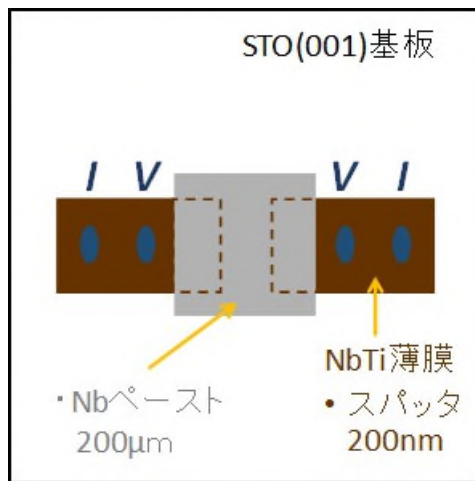


図 2.3.2-17 NbTi スパッタ超電導薄膜の Nb ペースト接続

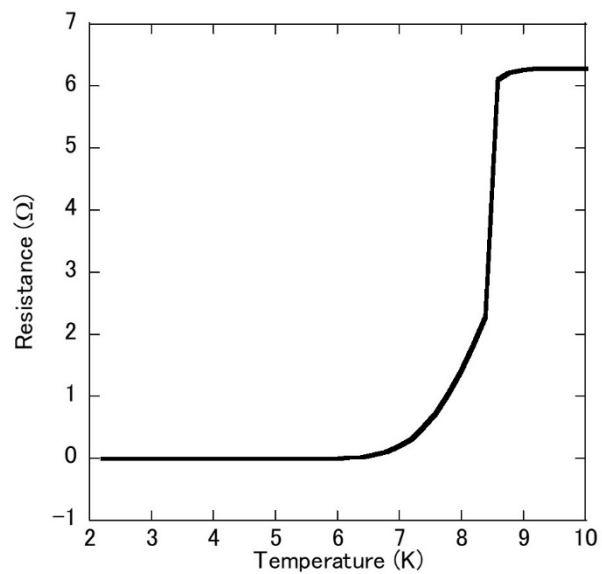


図 2.3.2-18 Nb ペースト接続線材の抵抗の温度依存性

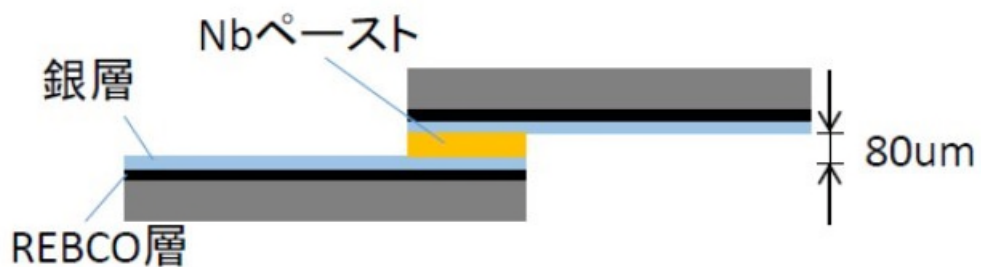


図 2.3.2-19 REBCO 高温超電導の対向接続模式図

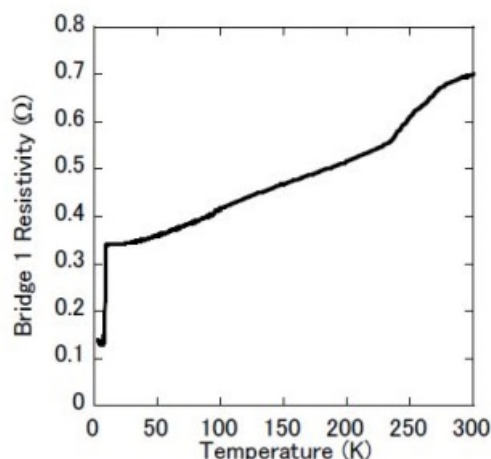


図 2.3.2-20 Nb ペースト接続部の抵抗の温度依存性

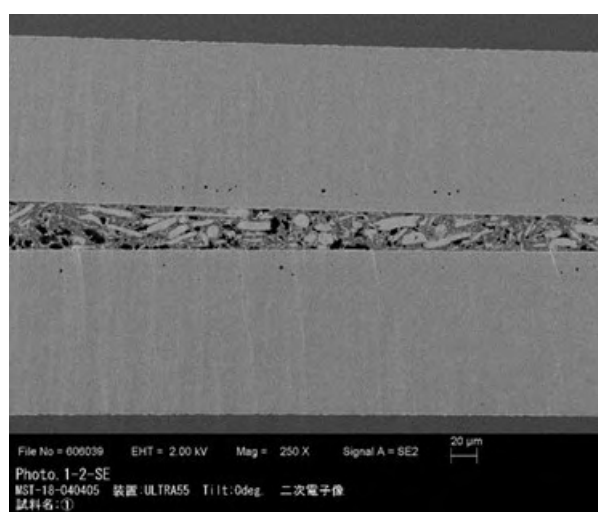


図 2.3.2-21 Nb ペースト接続線材の断面 SEM

2.4 超電導ペーストの耐久性向上

前節の通り、Nb ペーストは耐久性に課題があった。本節では、NbN（窒化ニオブ）を用いたペーストについて述べる。NbN は、BCS 系の超電導体として古くから知られ、ジョセフソン接合などに実用化されている。転移温度は 16K と、BCS 系の超電導体の中では高く、電圧標準素子としても用いられており、長期安定性に優れる。劣化せず長期利用が期待できることから、これを用いたペースト技術開発を行い、超電導接続術開発を行った。

導電性ペースト製造工程および固化・印刷工程は、Nb ペーストと同様である。SrTiO₃ (001) 単結晶基板を固体基板として印刷を行った。

その XRD 結果を図 2.3.2-22 に示す。SrTiO₃ (001) 単結晶基板の (001) と (002) の回折ピークと NbN (111)、(200)、(220)、(311)、(222)、(400)、(331) の回折ピークが確認できた。その他の不純物ピークはない。この結果、ペーストは NbN で構成されることが分かった。図 2.3.2-23 に固化工程後のペーストの断面 SEM 写真を示す。SrTiO₃ (001) 単結晶基板上に NbN ペーストが固定化され、膜厚は約 400 μm であることが分かる。右

図が拡大図である。最大 $10\ \mu\text{m}$ で直方体の NbN フィラーが確認できる。多くのフィラーは隣接するフィラーと接触していることが分かる。 $500\ \mu\text{m}$ のステンレス板材に印刷し固化し、ペーストの厚みは $400\ \mu\text{m}$ になったことが分かる。これは、溶剤が気化したことで密になった結果である。Nb ペースト作製時の技術的知見を踏まえ、NbN ペーストの固化工程の条件は、エポキシ硬化時の重合反応が生じる温度以上で、より低温で NbN 粒子にダメージを与えない温度を選択するため、 160°C が適切であると考えられる。さらに、時間は 20 分が適切であることが分かった。

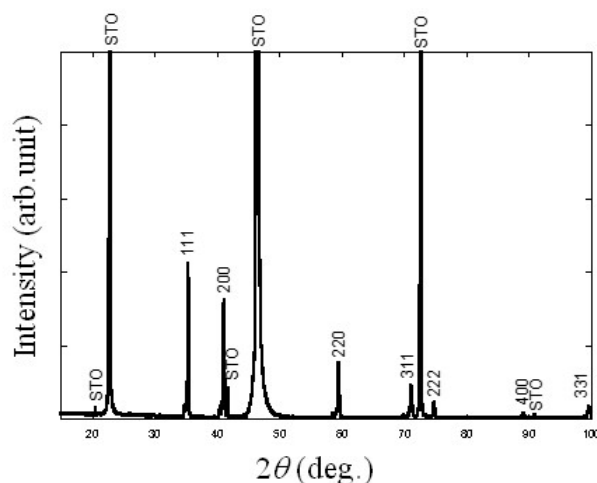


図 2.3.2-22 固化工程後の NbN ペーストの XRD 結果

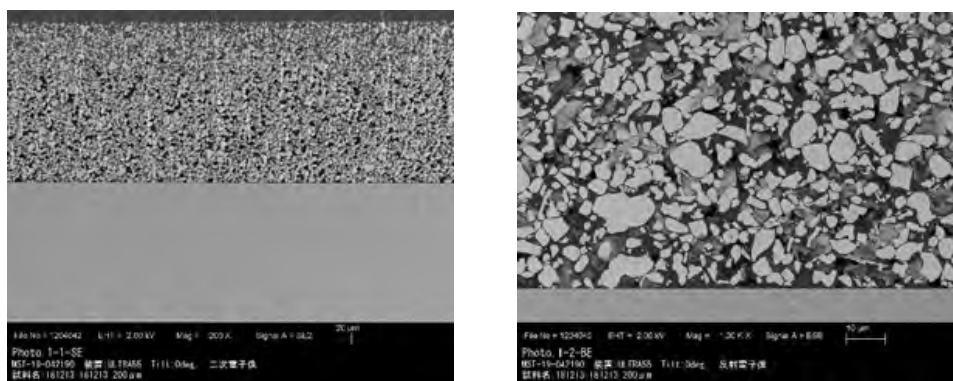


図 2.3.2-23 固化工程後の NbN ペーストの断面 SEM

ペーストの電気的特性を、四端子法を用いて PPMS によって調べた。その結果を図 2.3.2-24 に示す。厚み $300\ \mu\text{m}$ の時、室温から低温にかけて金属的電気伝導性を示し、 15K 付近から抵抗の変化が見え始め、約 10K 付近で超電導を示すことが分かる。NbN の超電導転移は 16K であり、抵抗率の低下が顕著になる温度は同様であるが、ゼロ抵抗を示す温度は低温化していることが分かる。

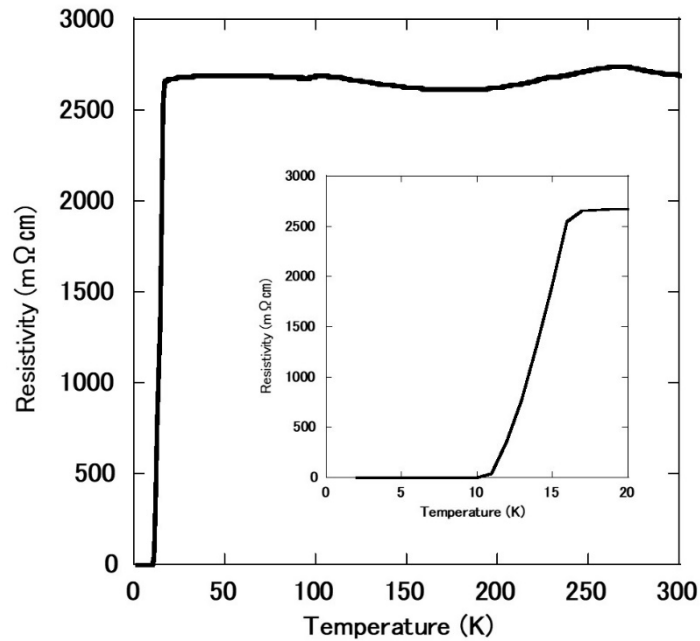


図 2.3.2-24 NbN ペースト抵抗率の温度依存性

次にペーストの経年劣化を調べた。ペースト作製当日に印刷・固化したサンプルと、作製 69 日後と 85 日後に印刷・固化したサンプルの抵抗率の温度依存性の結果を図 2.3.2-25 に示す。全てのサンプルは温度 16K で抵抗率の低下が開始し、約 10K で超電導に転移することが確認できた。ペースト作製から印刷・固化するまでの時間に依存せず超電導特性が得られることが分かった。これは NbN 粒子が溶剤から化学的にダメージを受けにくく、長期安定性に優れていることが分かる。NbN 粒子利用により、約 3 か月の長期安定性を確認することに成功した。

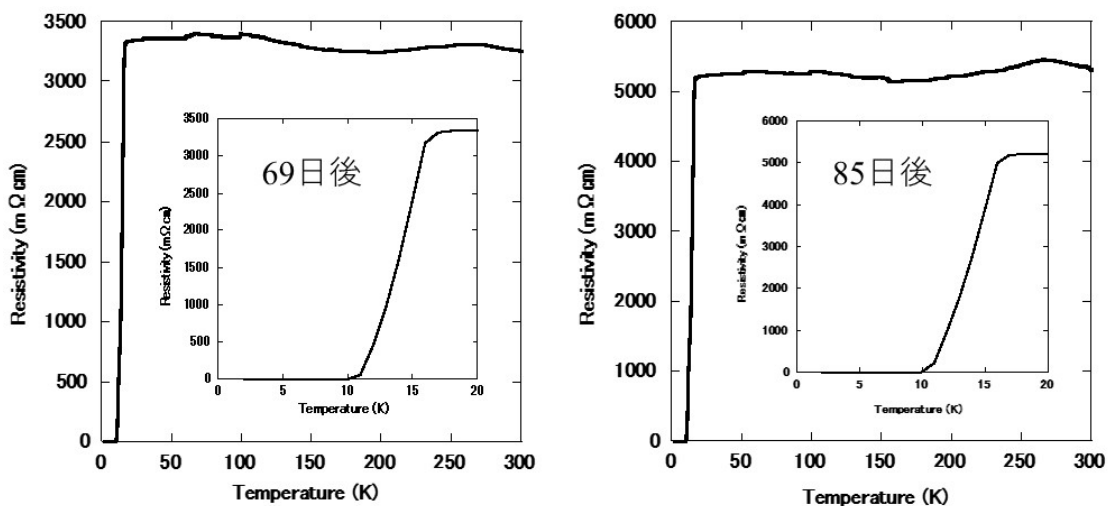


図 2.3.2-25 NbN ペースト抵抗率の経年劣化依存性

続いて、膜厚依存性を調べた。図 2.3.2-26 に結果を示す。ペースト作製翌日にサンプルを印刷したもので、その膜厚は 115、360、468 μm の 3 種である。全てのサンプルで、

温度 16K で抵抗率の低下が開始し、約 10K で超電導に転移することが確認できた。ペーストの膜厚に依存せず超電導特性が得られることが分かった。

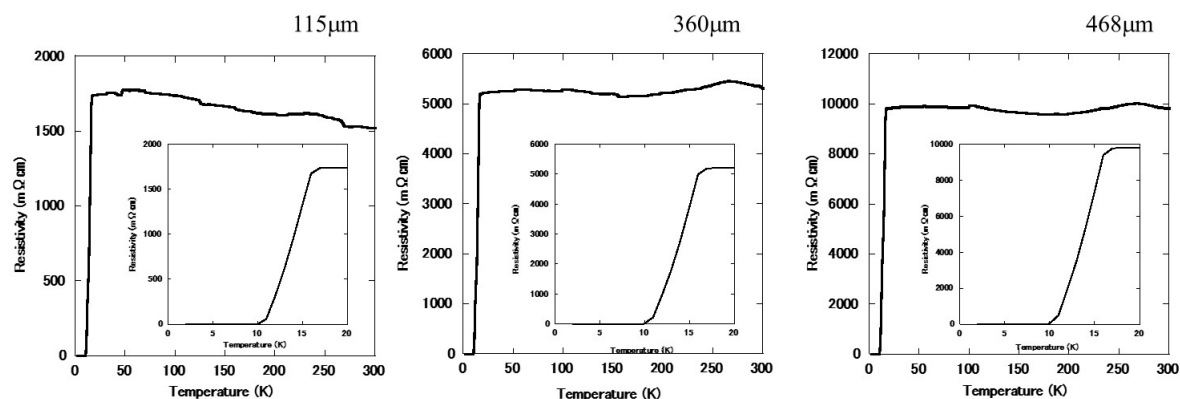


図 2.3.2-26 NbN ペースト抵抗率の膜厚依存性

図 2.3.2-27 に超電導電流の温度依存性の結果を示す。ペースト製造後翌日に印刷乾燥したサンプルで膜厚は $410\mu\text{m}$ である。サンプルは 2, 4, 6, 8K で保持され、それぞれの超電導電流値は 10, 9, 7, 6 mA である。電極面積から見積もった電流密度は 4 K で約 0.25 A/cm^2 であった。NbN 薄膜の 4.2K での電流密度は 106 A/cm^2 以上であり [5]、この値は非常に小さいことが分かる。固化された後の NbN 粒子間が点接触になっていることや、NbN 粒子の最表面が部分的にペーストの溶剤に化学的に侵食されてダメージを受けているためと考えられる。4.2K で 1A の超電導電流を得るためには、面積 4 cm^2 の接続面積が必要であることが見積もられる。

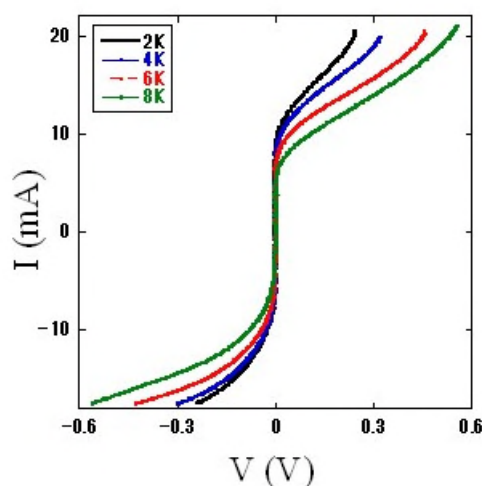


図 2.3.2-27 NbN ペーストの超電導電流の温度依存性

(3) 結果

既存の金属ペースト接続技術について、その接続プロセスについて検討を行い、溶剤が気化した際に発生するボイドが接続抵抗に影響することを突き止め、プロセス改良の指針を得た。しかし通常の銀・金ナノペーストを用いて銀保護層の上から接続する方法

では、十分な低抵抗接続は困難であることがわかった。

しかし、ペースト接続の検討過程において、REBCO 高温超電導線材の超電導元素種が、超電導層と銀保護層との間の抵抗に影響を与えている可能性を見出した。これは REBCO 高温超電導線材の材料・プロセスによって接続抵抗の高低が現れる可能性を示している。また、超電導材料を用いたペーストの開発について、Nb を用いた超電導ペーストの開発に成功した。このペーストは、製法、接着法どちらも極めて簡便であり、機械的特性にも優れている。SrTiO₃ (001) 単結晶基板上に塗布・固定化させた Nb ペーストは、約 6.7K で超電導となることを確認した。このペーストを用いて REBCO 高温超電導線材の接続を試行したが、固化したペーストは超電導を示したものの、線材間接続抵抗は十分に下がらなかった。これは、「⑥高温超電導接続技術開発」で詳述するように、ペーストと REBCO 層との間に存在する高抵抗層に起因するものと考えられる。

Nb ペーストは、作製後 2~3 日以内に印刷・固化しないと、超電導転移しなくなるという、耐久性の問題があった。これを解決するため、安定性に優れる NbN を用いたペーストを作製した。その結果、約 3 ヶ月の長期保存が可能なペーストの開発に成功した。

文献

- [1] T. Nakanishi et al., Physics Procedia 81 (2016) 105-108
- [2] N. Bagrets et al., IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 28, No.4 (2018)
- [3] 山崎和彦、前川克廣、レーザー加工学会誌 19 (2012) 206
- [4] 小日向茂 エレクトロニクス実装学会誌 16 (2013) 374
- [5] 鈴木光政他 低温工学 23 (1988) 96-102

③ 異種超電導物質薄膜接合技術 (産業技術総合研究所)

(1) 研究開発目的

REBCO 高温超電導線材の周囲に、超電導はんだと接合可能な、異なる種類の超電導材料をコーティングする技術を開発する。これにより、すでに低温超電導マグネットの製作で使われており、技術的に確立している超電導はんだ接続技術を、高温超電導線材にも適用可能にすることを目指す。

(2) 研究内容

すでに実用化されている超電導 MRI は、金属系超電導体の NbTi 線材が使用され、超電導接続により永久電流モードでの運転がされている。NbTi 線材どうしの超電導接続には、マグネットメーカー毎に様々なノウハウが取り入れられているものの、基本的には液体ヘリウム温度中で超電導となる鉛 (Pb) 系のはんだを用いている。強磁場マグネットで用いられる Nb₃Sn 線材や、最近進展の著しい MgB₂ も、NbTi との接続性がよいと言われており、どのような超電導材料であっても NbTi との接続が可能になれば、液体ヘリウム温度ではんだによる超電導接続と永久電流モードが可能になる。(もちろん、NbTi を介さずに直接超電導はんだと接合が可能であれば、そのまま超電導接続となる。) そこで、REBCO 高温超電導線材の REBCO 層の上に、Nb 系を中心とした異種の超電導薄膜を成膜し、既存の超電導接続技術を適用可能にすることを目指した。

1. Nb 合金等の成膜

本節の図の一部は、以下の文献を参照のこと。

文献(1) Y. Shimizu et al., “Room-temperature growth of thin films of niobium on strontium titanate (001) single-crystal substrates for superconducting joints,” Applied Surface Science. 444 pp.71-74 (2018)

文献(2) 高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020)

文献(3) Y. Shimizu et al., “Preparation of YBa₂Cu₃O_{7-δ} and La_{1.85}Sr_{0.15}CuO₄ Bilayer Structure for Superconducting Connection,” IEEE Trans. Appl. Super. 28, pp.7500104-1-4 (2018)

1.1 Nb 薄膜の作製とその特性

Nb は単体金属超電導体としては高い超電導転移温度 (T_c) を示し、他の超電導材料より安定で加工性に優れ、超電導量子干渉計 (SQUID) や高速単一磁束量子 (RSFQ) 回路などに利用されている [1-4]。Nb の T_c は約 9 K [5] であり、その超電導特性は REBCO 高温超電導体と比較して結晶方位の影響を受けない、即ち異方性がないことが知られている。さらに、室温での成膜により Nb の超電導薄膜を形成することができるため、接合部の熱処理は不要である [6, 7]。室温での接合部の形成は、REBCO での酸素空孔の生成を抑制し、その超電導特性の劣化を防ぐことが容易に期待できる。Nb 薄膜を REBCO 超電導線の接合部の中間層として使用するには、REBCO 上に Nb 薄膜を形成する必要がある。しかし、REBCO 上での Nb 薄膜の成長は詳細に調査されていない。このため、まず Nb 薄膜の成長に関する詳細の調査が必要である。単結晶 SrTiO₃ (STO) (001) は、REBCO (001) との良好な格子整合を示す典型的なペロブスカイト基板である。YBCO (001) と STO (001) の間の格子不整合は約 1.2% であり、高品質な結晶が実現できる [8, 9]。そこで、Nb を STO (001) 基板上に室温で成膜し、その Nb 薄膜の結晶性、表面形態、および超電導特性を調査した。

Nb 薄膜は、Nb (99.9%) ターゲットを使用し、高周波 (RF) マグネトロンスパッタリングによって、STO (001) 単結晶基板上およびシリカガラス上に成膜した。まずスパッタリングチャンバーを高真空に排気し、Ar ガスをチャンバーに導入して圧力を維持した。基板は室温である。各サンプルの最終的な膜厚は 400nm とした。薄膜の X 線回折 (XRD) パターンは、 θ - 2θ スキャンと Φ スキャンによって測定した。

文献(1) Fig. 1(a) は、室温で STO とシリカガラス上に堆積した Nb 薄膜の XRD パターンである。Nb の (hh0) に起因するピークが STO 基板とシリカガラス基板で観察され、Nb 薄膜が室温で結晶化したことを示している。体心の Nb 結晶立方格子は、(hh0) が Nb 結晶の中で最も密度の高い平面であるため、アモルファスシリカガラス上でも (hh0) 方向に配向していることが分かった。Nb (110) ピークの強度と半値全幅 (FWHM) は、STO 基板上の Nb 薄膜でそれぞれ 72,000 cps と 0.26 度、シリカガラス基板上のそれで 4,000cps と 0.42 度であった。STO 基板上の Nb 薄膜のピーク強度が強く、FWHM が狭いことは、STO 基板上の結晶化度が高いことを示している。文献(1) Fig. 1 (b) は、STO 基板上の Nb 薄膜の Φ スキャン XRD パターンを示しており、面内配向を調査するために測定した。 Φ スキャン測定では、Nb (h00) からの回折ピークを測定するために、サンプルス

ページの傾斜角と $\theta - 2\theta$ 角を設定した。続いて、傾斜角と $\theta - 2\theta$ 角を維持しながらサンプルステージを回転させることにより、XRD パターンを得た。したがって、すべての Nb 格子が平面内で同じ方向に配置されている場合、ピークは 180 回転ごとに検出されているはずだが、実際には 90 度毎に検出されているのが分かる。これは、いくつかの Nb 格子が (hh0) 平面で 90 度回転したことを示している。さらに、すべてのピークの強度は類似しており、回転した Nb 格子と回転していない Nb 格子の数がほぼ同じであることを示している。文献(1)Fig. 1 (c) は、STO 基板サンプルの RHEED パターンである。ストリークパターンは、Nb 薄膜が表面まで高い結晶性を持っていることを示している。

STO 基板上的 Nb 薄膜内部の原子配列を調べるために、断面 STEM 画像の観測を行った結果が文献(1)Fig. 2 である。規則的に整列した白い縞は Nb 原子に起因している。ストライプ間の間隔は 0.24nm であり、これは Nb (110) の面間間隔に相当する。断面 STEM 画像により、Nb の (hh0) 指向の成長が発生したことが確認された。観測された Nb 原子は球形ではないが、線で結ばれていることが分かった。これは、前部の Nb 格子が後部の Nb 格子と異なる面内配向で重なっていることを示している。断面 STEM 画像は、XRD から得られた結果と一致している。

文献(1)Fig. 3 は、STO 基板とシリカガラス基板上的 Nb 薄膜の表面 AFM 像である。平均粗さ R_a は、STO 基板サンプルで 0.9nm、シリカガラス基板サンプルで 1.0nm であり、両方の薄膜の表面が平坦であることを確認した。メッシュ状の細長い粒子が STO 基板上的 Nb 薄膜に観察され、メッシュは STO 基板の (100) および (010) 方向に沿って配向していた。一方、シリカガラス基板上的 Nb 薄膜では、ランダムな方向に配向した細長い粒子が観察された。STO 基板上的サンプルの表面形態とシリカガラス基板上的サンプルの表面形態の違いは、基板の構造の違いによるものである。STO 基板上的 Nb 薄膜で観察されたメッシュ構造は、STO(001) 面と Nb(110) 面の格子構造から生じていると考えられる (文献(1)Fig. 4)。STO(001) 格子は、各辺が 0.39 nm の正方格子であるのに対し、Nb(110) 格子は、長辺が 0.47 nm、短辺が 0.33nm の長方形である [10, 11]。つまり、直方格子の長辺の長さは正方格子の辺の長さよりも長いのに対し、直方格子の短辺の長さは正方格子の辺の長さよりも短くなる。正方形の辺の長さと同様の長方形の辺の長さの不一致は、長辺が 19.9%、短辺が 15.2% という大きな値を持っている。その結果、大きなひずみが蓄積するため、Nb が STO 上で一定の面内方向に成長することは困難となる。実際、XRD の Φ スキャンに示されているように、Nb 格子の半分が 90 度回転している。格子の対角線の長さは、STO で 0.55nm、Nb で 0.57nm であった。ミスマッチは 3.8% と小さい。相互に 90° 回転した Nb 格子は、界面全体の歪みを緩和するのに効果的であると考えられる。薄膜表面のメッシュ形状は、STO 格子に沿って 90° 回転した Nb (hh0) 長方形格子の配向と成長によって引き起こされた。同様のメッシュ形状の Nb が、正方格子の MgO(001) 基板でも観察されている [12]。一方、シリカガラス基板サンプルでは、アモルファス基板が Nb 格子の面内ランダム配向を引き起こし、ランダム配向の細長い形状の表面をもたらした。

文献(1)Fig. 5 は Nb 薄膜の電気抵抗率の温度依存性である。どちらの基板上的薄膜の抵抗率も、温度とともに低下する傾向を示した。STO 基板上的薄膜の抵抗率は 300K で 47m Ω cm、10K で 15m Ω cm であった。一方、シリカガラス基板上的薄膜の抵抗率は 300K で 52m Ω cm、10K で 21m Ω cm であった。超電導転移前の抵抗率は、STO 基板上的薄膜の方

がシリカガラス基板上の抵抗率よりも低かった。STO 基板上の Nb 薄膜の温度が下がると、抵抗率は 9.1 K で急激に低下し、最終的に Nb 薄膜は 8.7 K で超電導を示した。シリカガラス基板上の Nb 薄膜の場合、超電導転移は 8.5K で始まり、終点は 8.2K であった。バルク Nb の抵抗率は $0.05\text{m}\Omega\text{cm}$ at 10 K、 T_c は 9.46K である[13]。室温で Si(100) 基板の上に堆積された Nb 薄膜は、10K で $50.5\text{m}\Omega\text{cm}$ の抵抗率、 T_c は 7.7K である[14]。STO 基板上の Nb 薄膜の抵抗率と T_c は、バルク Nb のその値に達しない。ただし、他の基板上の Nb 薄膜と比較して、STO 基板上の薄膜の抵抗率が低く T_c が高いのは、STO 基板上の Nb の結晶化度が高いためと考えられる。その結果、STO(001) 格子は、Nb 薄膜の結晶性の向上に寄与し、それによって Nb 薄膜の超電導性能をさらに向上させる。REBCO(001) 格子も Nb の薄膜の成長に適していることが期待できる。

1.2 NbTi 薄膜の作製とその特性

NbTi は、現在の MRI 装置を含め、幅広く用いられている超電導体である[10, 13]。また NbTi で使用できる簡便な超電導接合技術が確立している[14, 15]。NbTi 薄膜を用いた REBCO 線材の超電導接続に関する文献を調査したが、NbTi 合金薄膜に関する既往の研究は見つからなかった。そのため、ひずみ、結晶化度、形態、超電導など、REBCO 上に形成された NbTi 合金薄膜の特性は詳細に理解されていない。REBCO 薄膜または線材上に成膜された NbTi 薄膜の特性を調査する場合、NbTi 薄膜だけでなく、REBCO もパラメータに影響を与えるため、分析は複雑になる。そこで、NbTi 合金薄膜の特性調査を目的とし、REBCO に成膜する前の予備研究として、NbTi 薄膜を SrTiO₃ (STO) (001) 単結晶基板に成膜した。STO は、格子定数 $a=3.901\text{\AA}$ の典型的な立方ペロブスカイト型酸化物であり、化学的安定性に優れている[16]。STO(001) 単結晶基板上の NbTi 合金薄膜のひずみ、結晶化度、表面形態、および超電導転移を、さまざまな膜厚をパラメータとして調査した。REBCO の超電導特性は、高温で酸素欠乏により劣化するため、温度は将来的に REBCO へ堆積するにあたって重要な条件である[11, 12, 17]。さらに、高温での成膜は、超電導体化学組成の変化につながる可能性がある。加熱せずに作製することで、REBCO の劣化や NbTi 薄膜の組成変化を防ぐことが期待されるため、STO 基板への NbTi 合金膜の成膜は室温で行った。さらに、薄膜により接続構造を作成し、その接続特性と課題抽出を行った。

NbTi 薄膜は、NbTi ターゲット（純度 99.9%）を用いて RF マグネトロンスパッタリング法により成長を行った。基板材料には 1cm 角の単結晶 SrTiO₃(001) 光学研磨基板（格子定数 0.3905nm ）を用いた。高温超電導線材として用いられている YBCO との格子ミスマッチは 1.2% であり、NbTi 薄膜とは、(110) に対し 19.12%、(001) に対し 15.77% と非常に大きい。成膜中の基板保持温度は室温で、スパッタリングガスには Ar を用いた。図 2.3.3-1 に、典型的な NbTi 薄膜の XRD パターンを示す。基板に由来するピーク以外には NbTi(hh0) のピークのみが出現していることが分かる。さらに反射高速電子線回折 (RHEED) を用いて薄膜表面の結晶性を調べた結果、ストリーク状の回折パターンを観測した。これらの結果から、NbTi 薄膜は (110) 方位にエピタキシャル成長していることが分かった。

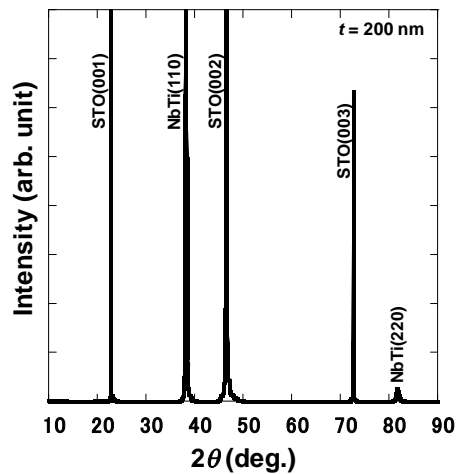


図 2.3.3-1 STO 基板上的 NbTi 薄膜の XRD パターン

(出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

次に、薄膜の平坦性について原子間力顕微鏡 (AFM) 像で確認した結果を図 2.3.3-2 に示す。基板の (100)、(010) 方向に沿った網目状構造を確認し、平均面粗さ (R_a) は 0.9nm であり、極めて平坦な薄膜であることが分かった。図 2.3.3-3 に抵抗率の温度依存性を示す。室温成膜の薄膜で、超電導転移温度 T_c が 8.5 K であることが分かった。図 2.3.3-4 に基板と薄膜界面近傍の断面 TEM 観測結果を示す。矢印の界面を境界として、下部に単結晶 $\text{SrTiO}_3(001)$ 光学研磨基板、上部に NbTi 薄膜であり、それぞれ明確な格子像が確認できる。NbTi 薄膜は成長初期から格子が規則的に並んでいることが分かる。また、TEM 観測の範囲で欠損やボイドなどは観測されず、連続した格子成長が達成されていることが分かった。また、AFM で観測された網目状構造は膜の内部では確認されなかった。よって、最表面のみ出現する特徴的構造と結論付けできる。これらの結果、RF マグネトロンスパッタ法により NbTi の室温成膜で良好な超電導特性を得ることができた。薄膜表面は平坦性に優れていることが分かった。また、格子像は規則性を有し基板表面から連側的に成長していることが分かった。YBCO などに代表される典型的な高温超電導線材は高温プロセスによってキャリアの欠損が発生し超電導特性の劣化が生じる。そのため超電導接続技術は室温で全プロセスが達成されることが理想である。NbTi エピタキシャル薄膜の作製において、典型的な高温超電導線材の格子定数に近い $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上に室温成膜で $T_c=8.5\text{K}$ が実現できた。この結果、NbTi 薄膜が YBCO エピタキシャル薄膜上に、室温成膜でエピタキシャル成長する可能性があり、Indirect 接続法に有効である可能性を見出した。

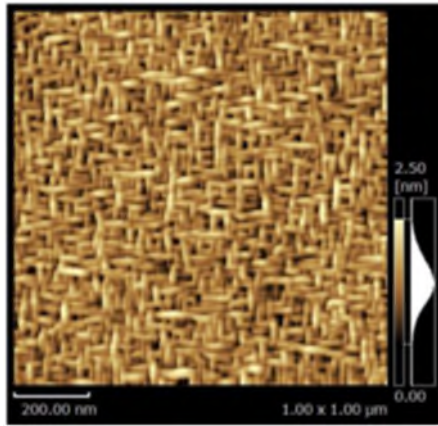


図 2.3.3-2* ST0 基板上的の NbTi 薄膜の AFM 画像

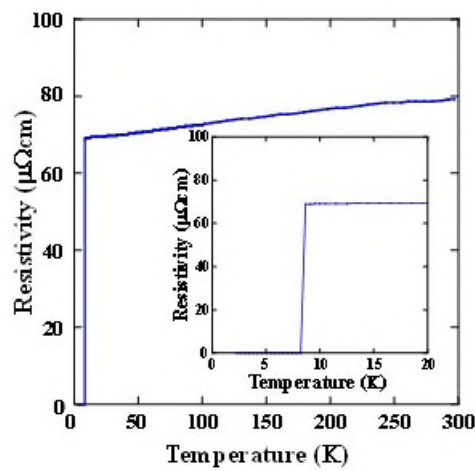


図 2.3.3-3* ST0 基板上的の NbTi 薄膜の抵抗率温度依存性

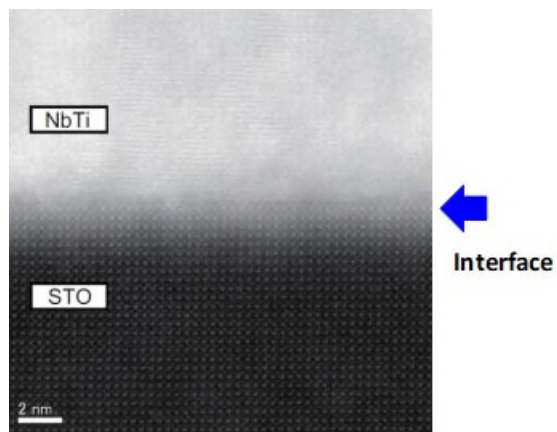


図 2.3.3-4* ST0 基板とその上に成膜した NbTi 薄膜の TEM イメージ
 (*図 2.3.3-2~4 出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

1.3 NbTi/NbTi 薄膜超電導接続の作製

すべての成膜は RF マグネトロンスパッタリング法により基板温度は室温で成長を行った。まず、メタルマスクを用いて、下部 NbTi 薄膜を SrTiO₃(001) 光学研磨基板上に成膜する。その後、大気中に取り出しメタルマスクを交換し、上部 NbTi 薄膜を成膜する。本研究で用いた典型的な超電導接続用ブリッジ構造を図 2.3.3-5 に示す。下部膜は線幅 2mm で長さ 3mm の 2 つの長方形でその間に 1mm のギャップがある構造である。上部膜はそのギャップを覆うように 3mm 角の正方形で構成される。上下膜が重なった 2 か所が接続箇所であり、面積は 1mm×2mm、2 つの接続抵抗の直列接続となる。成膜した上下 NbTi 薄膜の接続界面は断面 TEM 観察と EDX 分析により評価した。また、上下薄膜と超電導薄膜接続の電気抵抗率は物理特性測定装置 (Quantum Design, PPMS) を用いて、4 端子法により温度 2K から 300K の間で測定した。

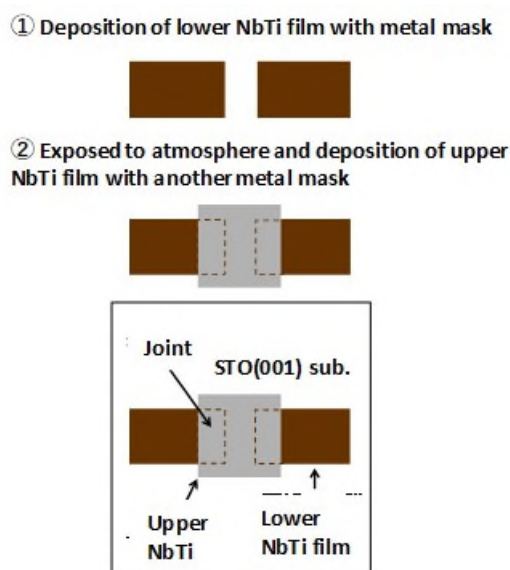


図 2.3.3-5 NbTi 薄膜のブリッジ接続模式図

(出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

図 2.3.3-6 に、接続抵抗の温度依存性を示す。室温から低温に向けて、金属的電気伝導性を示し、8.4K で顕著な抵抗のドロップが確認され、8.1K で抵抗がゼロとなり超電導を示した (PPMS システムの測定限界は $10^{-4} \Omega$)。上部 NbTi 膜を形成する直前に大気暴露しているにも関わらず、良好な接続が得られた。これは優れた結晶性を有す薄膜による結果である。PPMS の測定限界を越えて、さらに精密な抵抗値を算出するため、温度を固定して電流-電圧特性を測定し、その傾きから抵抗値を導き出した。その結果を図 2.3.3-7 に示す。温度 2K の際に超電導電流が 45mA であり、I-V 特性を測定しその傾きから抵抗値を算出し $0.03\text{m}\Omega$ 以下であることを確認した。この値は PPMS システムによる I-V 特性から算出する測定限界である。

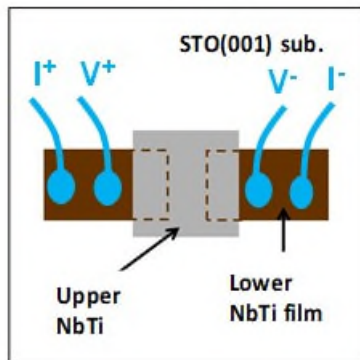
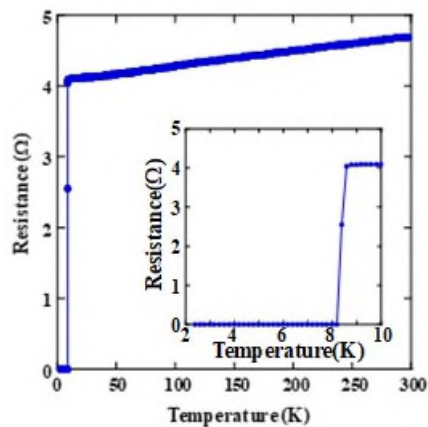


図 2.3.3-6* NbTi 薄膜ブリッジ接続部の抵抗温度依存性と、試料模式図

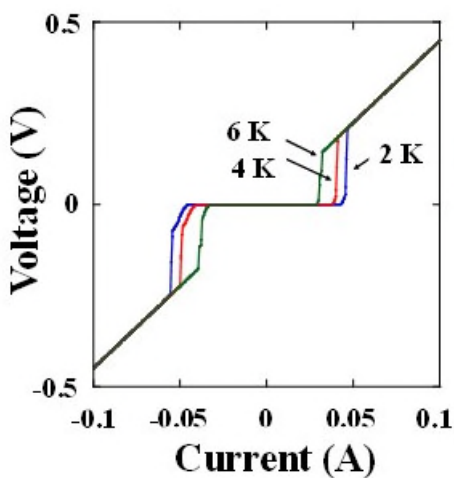


図 2.3.3-7* NbTi 薄膜ブリッジ接続部の I-V 特性

(*図 2.3.3-6~7 出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

下部 NbTi 薄膜と上部 NbTi 薄膜の界面を断面 TEM によって観察を行った。その結果を図 2.3.3-8 に示す。下部 NbTi 薄膜と上部 NbTi 薄膜の界面に、明らかに不連続な層を確認した。厚さ 2nm 程度である。界面近傍にボイドや欠陥などは確認されなかった。この層の組成について、EDX 元素マッピングで調べた。その結果を図 2.3.3-9 に示す。酸素、Ti、Nb について元素マッピングを示す。界面の厚み 2nm の層は Nb、Ti が欠損し酸素が

過剰な組成であり、酸化していることが分かった。下部 NbTi 薄膜を成膜した後、メタルマスクを交換するため一度、室温で大気に晒している。この際に、下部 NbTi 薄膜の最表面が大気暴露されたことにより、酸化されたことに起因する異質層と考えられる

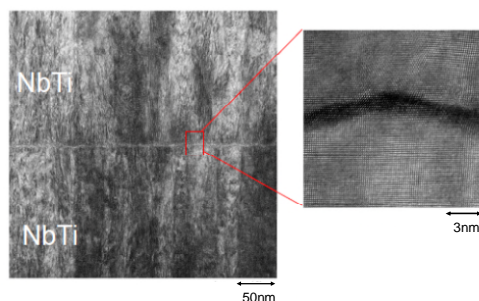


図 2.3.3-8* NbTi 薄膜ブリッジ接続界面の断面 TEM 像

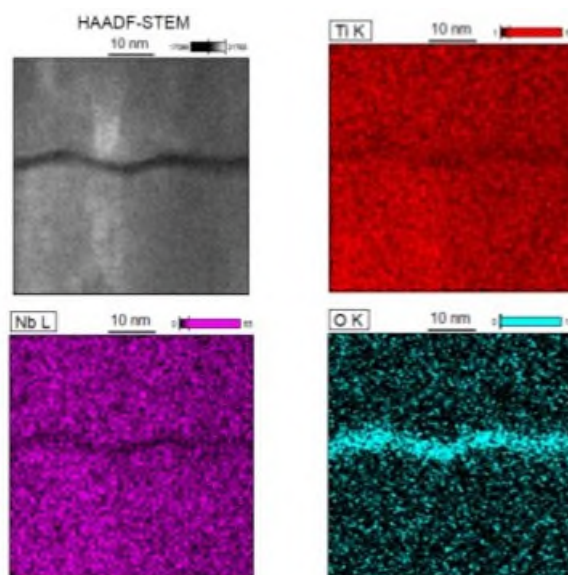


図 2.3.3-9* NbTi 薄膜ブリッジ接続界面の EDX マッピング

(*図 2.3.3-8~9 出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

下部 NbTi 薄膜を成長後大気暴露した NbTi/NbTi の接続構造を作製し、その電気特性を調べた結果、PPMS の測定限界以下の抵抗値を得ることに成功し、良好な電気的特性を実現することができた。

1.4 YBCO 薄膜/NbTi 薄膜の積層接続作製とその電気的特性

2つの高温超電導線の REBCO 層表面に NbTi 膜を室温成膜し、それらをすでに開発済みの NbTi 線材の超電導接続技術をこれに適応することを想定する。そのため、REBCO 高温超電導層と NbTi 薄膜の超電導接続技術の開発が要素技術として重要である。そこで、YBCO 薄膜上に NbTi 薄膜を成膜し、その電気的特性の評価を行った。YBCO 薄膜はパルスレーザー堆積法 (PLD) を用いて、光学研磨された SrTiO₃(001) 単結晶基板上に成膜し

た。その後、室温で大気中に暴露し、メタルマスクを YBCO 膜上に配し、NbTi 薄膜を RF マグネトロンスパッタリング法により室温成長を行った。典型的な膜厚は YBCO が 300nm、NbTi が 500nm である。接続の構造は前述の NbTi/NbTi 接続と同じである。図 2.3.3-10 に YBCO 薄膜/NbTi 薄膜の接続の抵抗の温度依存性と接続界面近傍の断面 TEM 写真を示す。抵抗値は室温から低温に伴い単調減少し、YBCO の超電導転移点である 90 K 付近で急減に低下、89 K で低下が完了し、その後、2 K まではほぼ一定の抵抗値を有し、上述の NbTi 薄膜の超電導転移温度以下でも、ゼロ抵抗を示さず残留抵抗を有す。この残留抵抗値は、YBCO 薄膜と NbTi 薄膜の界面で生じる抵抗値と考えられる。断面 TEM の観察結果から、YBCO と NbTi 薄膜の界面には厚さ 5 nm 以上の異質層を確認した。この異質層は YBCO 薄膜を成膜後、大気に晒しメタルマスクを配しスパッタリングに移動し、NbTi 薄膜を成膜するプロセスで生じた。この層は超電導層ではないため抵抗値を有し、NbTi の超電導転移温度以下でもゼロ抵抗を示さないと考える。この界面異質層をできるだけ薄くすることで、超電導接続は実現できると考えられる。本研究では、Ag 層を YBCO と NbTi 薄膜の間に挿入することを考えた。Ag は高温超電導線の保護膜として用いられ、超電導層を被覆し最表面にコートしてあることで知られる。さらに Ag の抵抗値は既知であり、成膜しやすく材料コストも安価である。典型的な温度 2 K における Ag の抵抗率は $\rho = 0.20 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ である。膜厚 t を 20 nm、断面積 S を $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ と仮定し、その抵抗値 R は $R = \rho t/S$ で表され、それぞれの数値を代入して計算すると $R = 1.6 \times 10^{-12} \Omega$ となる。すなわち、YBCO と NbTi の界面抵抗がこれよりも小さければ、超電導接続はこのコンフィギュレーションで $10^{-12} \Omega$ オーダーを実現することを見積もることができる。

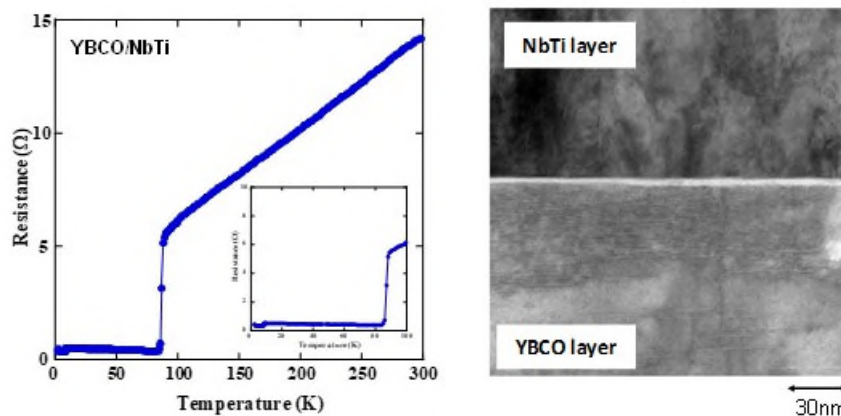


図 2.3.3-10 YBCO/NbTi 薄膜接合部の抵抗温度依存性と、断面 TEM 像
 (出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、
 低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

YBCO/Ag/NbTi の積層接続構造の作製手法を述べる。YBCO 薄膜はパルスレーザー堆積法 (PLD) を用いて成膜し、その後、室温で大気中に暴露し、メタルマスクを YBCO 膜上に配し、Ag 薄膜を RF マグネトロンスパッタリング法により室温で成長を行った。その後取り出し、室温で大気暴露し、メタルマスクを配して NbTi 薄膜を RF マグネトロンスパッタリング法により室温成長を行った。典型的な膜厚は YBCO が 300 nm で Ag が 20 nm、NbTi が 500 nm である。その際の抵抗の温度依存性を測定した結果と断面 TEM 観測結果

を図 2.3.3-11 に示す。抵抗値は室温から温度が下がるに伴い単調減少し YBCO の転移温度 90 K で急激に低下し 89 K で低下は完了する。その後一定の抵抗値を有し 8.1 K でゼロ抵抗を示す。89 K 以下の温度領域では YBCO は超電導に転移し、NbTi 薄膜の抵抗値が支配する。断面 TEM の(a)では YBCO と NbTi 薄膜の間に膜厚 20nm の Ag 層が確認できる。各層間にボイドや欠陥等は確認できない。連続的に格子が並んでおり、規則的に連続成長が達成されていることが分かる。断面 TEM(b)では、YBCO の c 軸長に相当した格子の周期構造が観測され、さらに YBCO と Ag 層の間に膜厚 0.5nm 程度の異質層が確認できる。c 軸配向 YBCO の異質層と想定すると 1 格子以下に相当する。さらに、Ag 層と NbTi 間は理想的な連続成長が達成され、異質層は確認できない。Ag 層の挿入により、YBCO と NbTi 間に生成された異質層が劇的に低減され理想的な連続的界面が形成され、接続抵抗が低下した。

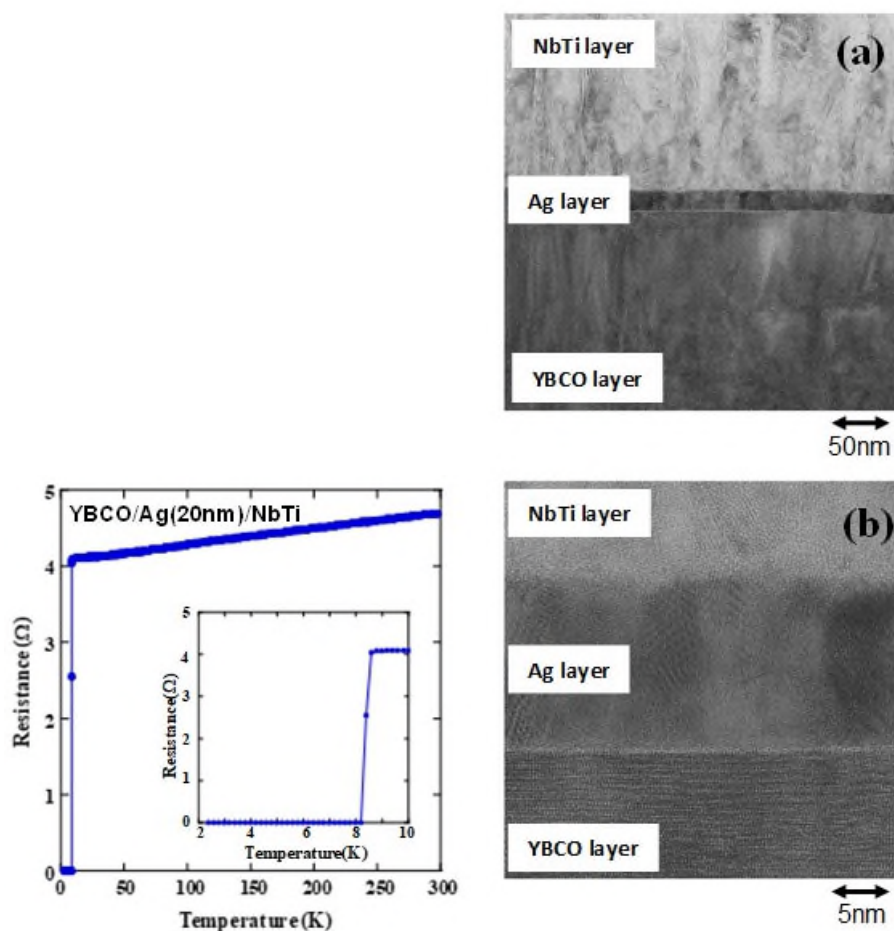


図 2.3.3-11 YBCO/Ag/NbTi 薄膜接合部の抵抗温度依存性と、断面 TEM 像
(出典：高島浩他、「NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術」、
低温工学 55 巻 4 号、p280-286 (2020))

前述の YBCO と NbTi の直接積層接続では、厚さ 5nm 以上の異質層が生じたことが分かったが、厚さ 20nm の Ag 層を間に挿入することで、異質層の厚みが劇的に薄くなった。上で述べた NbTi と NbTi の薄膜接続では、層間に膜厚 2nm 程度の異質層を確認し、0.03m

Ω 以下の抵抗値であった。それと比較し、YBCO と Ag および Ag と NbTi 層間では、0.5nm の異質層であり、各層間の抵抗値はそれよりも低いことが見積もられる。今回用いた接続面積は $1\text{mm} \times 2\text{mm}$ と非常に小さく、接続面積をさらに大きくすることは容易であり、これによって抵抗値をさらに低くすることができる。また、これと同時に超電導電流値を大きくすることも可能であり、今後、さらなる研究の進展が期待される。

1.5 YBCO 薄膜/ LaSrCuO 薄膜の接続

YBCO と LaSrCuO (LSCO) エピタキシャル薄膜の格子不整合性は 1.5% であり極めて小さい。そのため積層した際に、界面近傍で格子の受けるストレスは小さいことが期待できる。さらに YBCO と LSCO の超電導を担うキャリアはホールであり同一である。界面近傍でキャリアのやりとりがあったとしても、両者ともにホールの欠損は極めて少ないことが期待され、良好な超電導を保持した、接続界面が構成されることが期待できる。文献(3)Fig. 1 に示す構造を作製し、評価を行った。SrTiO₃(001) 上にメタルマスクを用いて下部 YBCO 薄膜 (膜厚 200nm) で形成する。その後、大気暴露しメタルマスクを交換し、上部 LSCO 薄膜を形成する。典型的な接続面積は $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ である。上部 LSCO 膜の膜厚は 400nm である。このように、下部 YBCO 薄膜は成膜直後、LSCO 成膜前に一度大気暴露される。電気抵抗率は物理特性測定装置 (Quantum Design, PPMS) を用いて、4 端子法により測定した。文献(3)Fig. 5 は PPMS で測定した抵抗率の温度依存性である。YBCO、LSCO 薄膜単体の転移点は 91K と 24K である。室温から低温に向けて、金属的電気伝導性を示しているのが分かる。接続の結果では、金属的な振る舞いを示し、まず、YBCO の転移点近傍で抵抗の急激な減少を示した。さらに LSCO の転移点近傍で急激な抵抗の減少を示した。20K 以下では $10^{-4}\Omega$ オーダーの残留抵抗が認められた。これは、YBCO 薄膜と LSCO 薄膜は超電導に転移しているが、両薄膜の異種物質界面近傍で接触抵抗が残留していることに起因していると考えられる。一つは、材料原子のインターディフュージョンや格子不整合性に起因するストレス層が考えられ、界面近傍で理想的な界面でない不純物層などが形成され、その抵抗が要因となっていることを明らかにした。

2. 鉛はんだによる接続技術

2.1 背景

前述の通り、Pb 系はんだを用いた NbTi 線の超電導接続技術はすでに確立しており、今日の永久電流モードの MRI マグネットの製作には欠かせない技術となっている。我々は、これまでに、RE 系超電導ロッド材に熔融銀で電極を形成する際に、RE 系超電導ロッド材と熔融銀との反応を抑制し、良好な電極を形成する技術を開発している。そこで、この技術のはんだ接続への適用を試みた。

2.2 実験方法

熔融した PbSn はんだに REBCO 粉末を混入させた浴に REBCO 線材を浸漬して、Ag をはんだに置換し、それらを重ね合わせて接続した (図 2.3.3-12)。

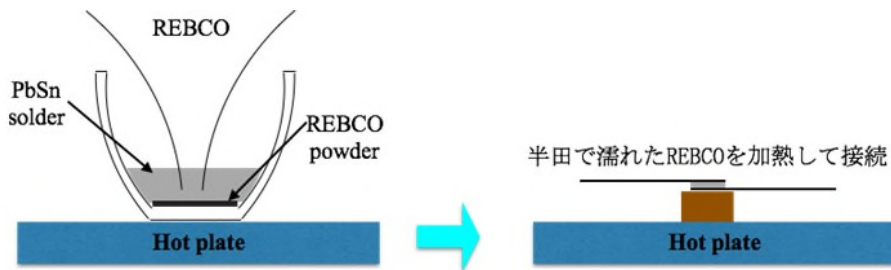


図 2.3.3-12 PbSn はんだ+REBCO 粉による接続方法

また、液体ヘリウム中で I-V 特性を、図 2.3.3-13 の装置で測定した。

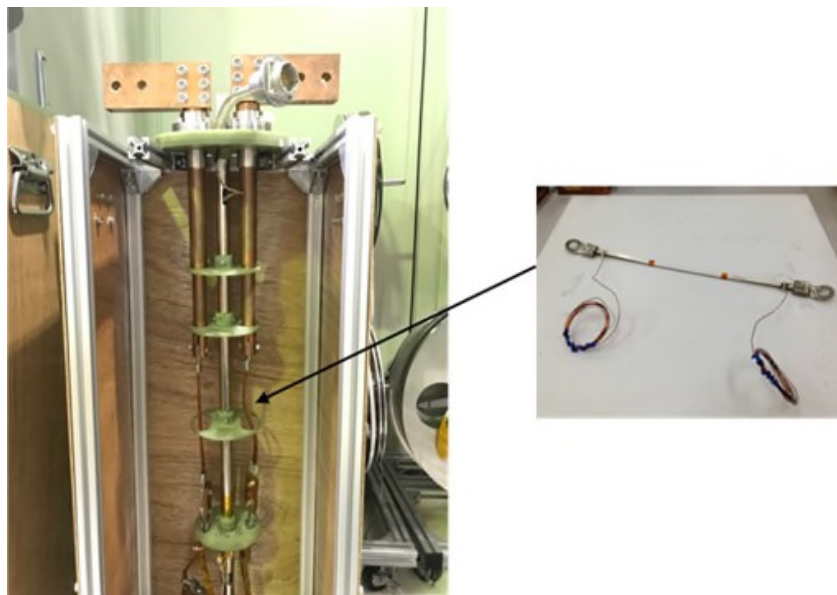


図 2.3.3-13 I-V 特性評価のためのセットアップ

2.3 結果と考察

まず、市販で手に入る Pb40-Sn60 はんだを溶融・凝固させたものと、溶融した Pb40-Sn60 はんだに EuBCO 粉末を混入したものを作製し、それぞれの磁化測定を行った。Pb40-Sn60 はんだの超電導転移温度 T_c は 7.6K であったが、Pb40-Sn60 + EuBCO の T_c は 6.2 K から 7.1 K まで分布した (図 2.3.3-14)。これは、はんだ中の EuBCO 濃度の分布があるためと思われる。いずれにしろ、Pb40-Sn60 + EuBCO は液体ヘリウム温度よりも高い T_c を有するので、これを用いた接続を試みた。

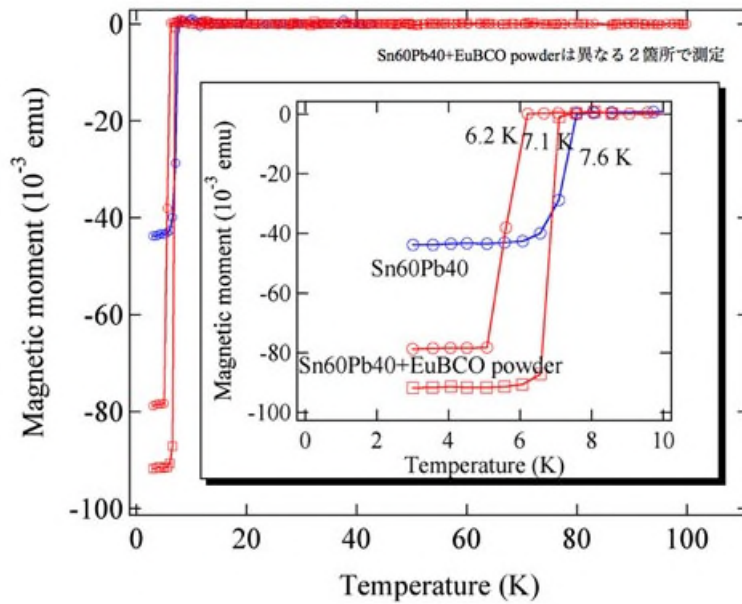
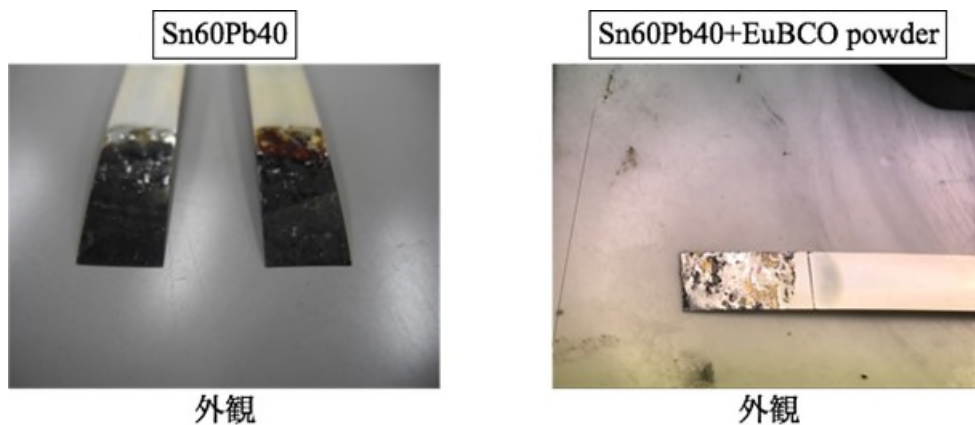


図 2.3.3-14 PbSn はんだと PbSn + EuBCO の磁化測定結果

溶融した Pb40-Sn60 はんだおよび Pb40-Sn60 + EuBCO はんだに、GdBCO 線材を浸漬した、その外観写真と断面 SEM 写真を図 2.3.3-15 の左図に示す。断面観察から REBCO 表面に何らかの反応層が生じてしまっていることが分かる。一方、Pb40-Sn60 + EuBCO に浸漬した線材の表面ははんだで覆われ、断面観察より REBCO と Pb40-Sn60 はんだがコンタクトしていることが分かった (図 2.3.3-15 右)。Pb40-Sn60 + EuBCO はんだではんだに置換された線材 2 本を重ね合わせて加熱して接続し、接続部の I-V 特性を液体ヘリウム中で測定した結果が図 2.3.3-16 である。2.2A まで電圧が出ず、超電導特有の I-V 特性に似た特性が観測された。



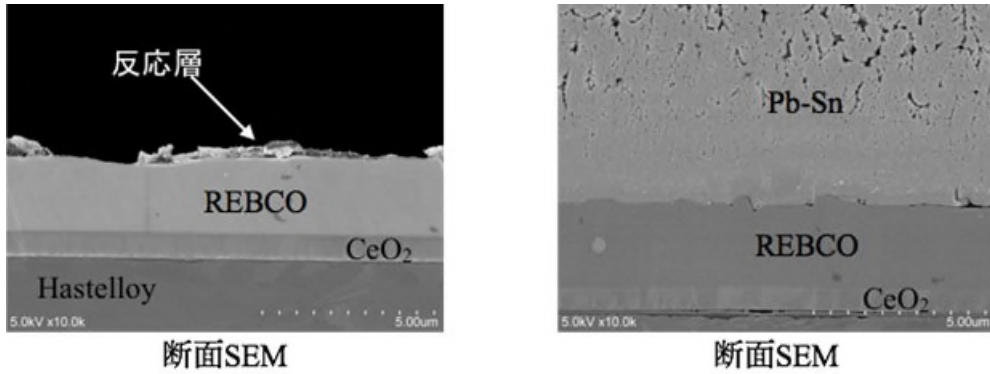


図 2. 3. 3-15 PbSn はんだと PbSn + EuBCO はんだに浸漬した REBCO 線材の表面と断面観察結果

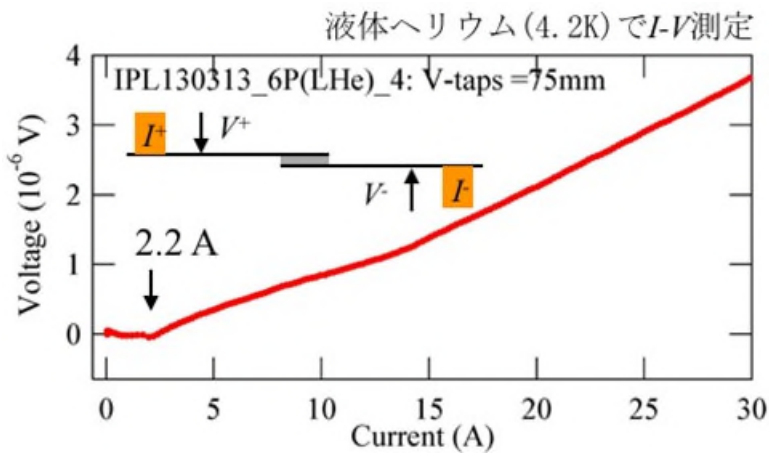


図 2. 3. 3-16 PbSn + EuBCO はんだで接続した REBCO 線材の I-V 特性

これが超電導接続によるものであるかを確認するため、⑤接続抵抗評価技術の章で詳説する減衰法によって、接続抵抗の評価を行った。試料は、産業技術総合研究所の内製の GdBCO 線材（銀保護層付き）で、超電導層が合わさるようにループを形成し、EuBCO を熔融させたはんだで接続した（拌み接続）。接続部の面積は、おおよそ 1cm^2 程度である。はんだには Pb40-Sn60 および Pb70-Bi30 を使用した。それぞれ試料 A、B とする。試料を液体ヘリウムに浸漬し、ガラスデュワーの外に置いた電磁石（銅コイル）に対し、電流を流したり遮断したりすることにより、試料ループに電流を誘起する。その電流の減衰を線材の脇に配置したホール素子で測定し、減衰時定数とループインダクタンスからループ回路の抵抗成分を評価した。測定装置（簡易接続抵抗評価装置）の外観を図 2. 3. 3-17 に、装置内に配置する試料の例を図 2. 3. 3-18 に示す。

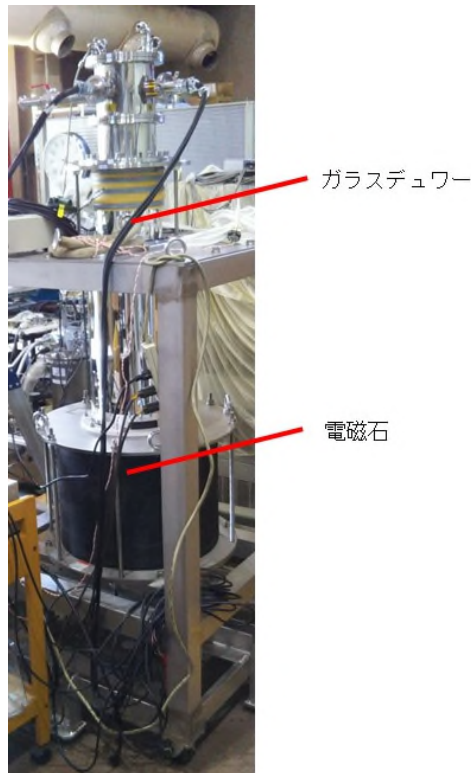


図 2.3.3-17 簡易接続抵抗評価装置の外観

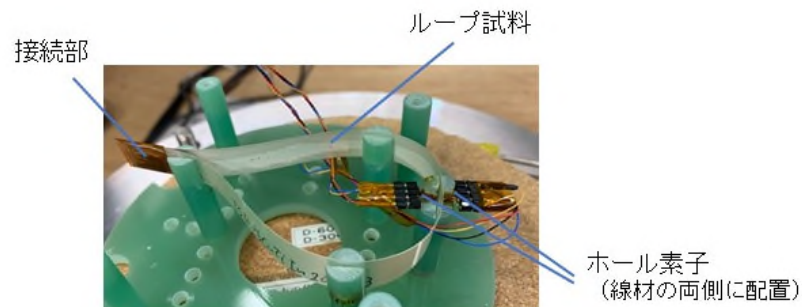


図 2.3.3-18 簡易接続抵抗評価装置に設置した試料の例

簡易接続抵抗評価装置は、液体ヘリウムを溜める二重のガラス製デュワーと、その外側の室温空間に配置される銅鉄電磁石で構成されている。電磁石は中心磁場で最大100mT発生できる。電磁石は直流電源と、間に電流遮断のための保護回路を挟んで接続している。一定電流通電時に電源を解列する際、電磁石の蓄積エネルギーを保護回路の抵抗で消費するため、電流の変化速度が制限されるが、1秒以内の減磁可能である。液体ヘリウムガラスデュワー内に設置する試料ホルダーには、挿み接続のループ試料を取り付けることができる。高温超電導線材の両側にホール素子が配置されており、外部電磁石により誘導されてループに流れる電流による自己磁界を測定することができる。使用しているホール素子は未校正であり、検知する磁界から線材に流れている電流を正確に算出することはできないが、電流の減衰時定数を測定することが目的であるため、流れている電流と素子の出力が線径で1対1で対応していれば差し支えはない。(磁場を発生する電磁石の初期電流とループ試料に誘導される電流の関係については、「⑥高

温超電導接続技術開発」にて詳述する。)

試料 A および B について、ホール素子の出力の測定結果を図 2.3.3-19 に示す。ホール素子の出力はループに流れる電流に比例しており、その減衰は指数関数に従っている。その減衰時定数とループ形状により決まるインダクタンスから接続抵抗を評価することができる。その結果は図中に示した通り、それぞれ $4.8 \times 10^{-8} \Omega$ と $3.4 \times 10^{-8} \Omega$ であった。フジクラ製線材および SuperPower 社製線材でも評価を行ったが、同様に接続あたり $10^{-8} \Omega$ 程度の接続抵抗であった。

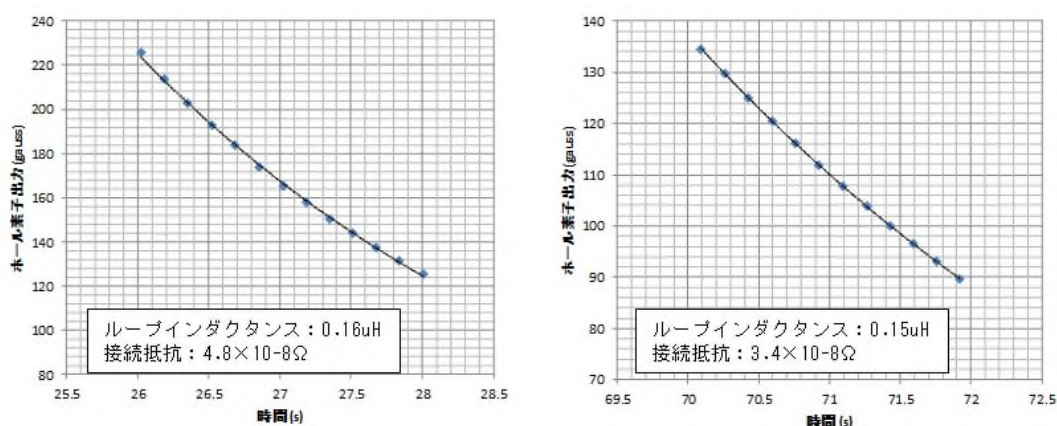


図 2.3.3-19 簡易接続抵抗評価装置によるはんだ接続試料の接続抵抗評価結果 (左が試料 A、右が試料 B)

以上のように、図 2.3.3-15 のような材料同士が良好な接触を得ている断面が観測され、図 2.3.3-16 のような超電導の I-V 特性が測定されているものの、ループ試料の減衰法による接続抵抗評価では、超電導接続と言える十分な低抵抗は得られなかった。断面観測、I-V 特性評価、接続抵抗評価の 3 つの証拠が揃わない限り、超電導接続が完成したとは断言できない。(なお、I-V 特性評価で一見超電導的なデータが観測された理由としては、銀保護層が接続材料のはんだと接続されていることにより、鉛はんだの I-V 特性を評価してしまったためと考えられる。) はんだに REBCO 粉末を混入することにより、はんだと REBCO 層との反応を抑制することを意図したが、その効果は十分でなかったか、もともと REBCO 層の最表面に存在する抵抗層が原因となって、超電導接続が実現しなかったと考えられる。接続における抵抗の要因については、「⑥高温超電導接続技術開発」にて詳述する。

同様に、鉛はんだ (Pb-Sn や Pb-Bi) に様々な添加剤を加えることにより、濡れ性を向上して超電導層と鉛はんだの接触を向上させることを試みた。評価した鉛はんだの組成および主な添加材料を表 2.3.3-1 に示す。一部の組合せで、超電導層と鉛はんだが強固に接続できることが明らかになったが、残念ながら全てのケースで、超電導接続が実現できたという明確な証拠を得ることはできなかった。

表 2.3.3-1 使用した鉛はんだの組成と主な添加剤

| はんだ材料 | 組成 | 主な添加金属 |
|-------|----------|--------------|
| Pb-Sn | 4:6 | Cu 等 |
| Pb-Bi | 1:1, 7:3 | Cu, In, Ag 等 |

(3) 結果

REBCO 高温超電導線材の周囲に、異なる種類の超電導材料をコーティングし、すでに確立している超電導はんだ接続技術を適用可能にすることを目指し、様々な超電導材料によるコーティングを試行した。特にベースとなる REBCO 高温超電導線材の特性を劣化させることなく、低温でのプロセスを指向した。

Nb 系超電導薄膜によるコーティングについては、YBCO と格子定数が近い STO 基板上に、室温プロセスで、高品質で優れた結晶性を有する Nb や NbTi の薄膜を形成する事に成功した。また実際に YBCO 上に Nb および NbTi の成膜を試みたが、成膜した Nb/NbTi は超電導になるものの、界面の何らかの高抵抗層により、接続抵抗が生じた。この高抵抗層は YBCO と Nb/NbTi の反応層である可能性が高い。そこで、YBCO の最表面に Ag 層を挿入することで、この反応を防ぎ、接続抵抗が低減できることを示した。

REBCO 層に直接鉛はんだを接触させて接続する方法については、鉛はんだに REBCO の粉末を加えることにより、REBCO 層の変質を抑えることを試みたが、断面観察では良好な接合ができていているように見えても、接続抵抗の評価結果は伴わなかった。詳細は「⑥高温超電導接続技術開発」で述べるが、REBCO 層が異なる超電導材料と接触すると、界面で変質が起き、高抵抗層となる。Ag は REBCO 層との相性がよく、変質が少ないため、Ag 層を挟むことによって接続抵抗が小さくできたと考えられる。

文献

- [1] Y. Asada et al., J. Phys. Soc. Jpn 26 (1969) 347-354.
- [2] S. Kohjiro et al., J. Appl. Phys. 115 (2014) 223902.
- [3] K. Yokosawa, S. Kuriki, Rev. Sci. Instrum. 65 (1994) 3814-3819.
- [4] M. Maezawa et al., Physica C 412-414 (2004) 1591.
- [5] B.T. Matthias, T.H. Geballe, V.B. Compton, Superconductivity, Rev. Mod. Phys. 35 (1963) 1-22.
- [6] O.V. Dobrovolskiy et al., Thin Solid Films 520 (2012) 5985-5990.
- [7] T.C. de Freitas et al., Thin Solid Films 611 (2016) 33-38.
- [8] Yu.A. Abramov et al., Acta Crystallogr. Sect. B: Struct. Sci. 51 (1995) 942-951.
- [9] F. Izumi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) L617-L618.
- [10] Parizh, M. et al., Supercond. Sci. Technol. 30, 014007 (2017).
- [11] Park, Y. J. et al., Supercond. Sci. Technol. 27, 085008 (2014).
- [12] Park, Y. et al., NPG Asia Mater. 6, e98 (2014).
- [13] Kumakura, H., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 010003 (2012).

- [14] Leupold, M. J. et al., Cryogenics 16, 215-216 (1976).
[15] Matsumoto, R. et al., Appl. Phys. Express 10, 093102 (2017).
[16] Abramov, Y. A. et al, Acta Crystallogr. B 51, 942-951 (1995).
[17] Brittles, G. D. et al, Supercond. Sci. Technol. 28, 093001 (2015).

④ コイル間接続線開発（産業技術総合研究所）

（１）研究開発目的

高温超電導マグネットシステムにおいて、ユニットコイル間や永久電流スイッチと接続するための接続線、または永久電流スイッチに使用できる超電導線材としては、30K、1T の環境下において十分な臨界電流を持つ超電導材料で、長さ 1m 級の線材が必要となる。候補材料である鉄系超電導材料による線材開発を行う。また永久電流スイッチ設計に必要な物性の評価を行う。

（２）研究内容

超電導マグネットシステムにおいて、接続線および永久電流スイッチの構成線材は、主マグネットと同種の超電導線材が用いられることが多い。しかしテープ形状で曲げ等による特性劣化が懸念される REBCO 高温超電導線材では、他の超電導線材に移し替えた方が、マグネットの製作性が向上することが考えられる。また REBCO 高温超電導線材は臨界温度が高く、熱式の永久電流スイッチを構成すると応答性が問題となる。高温超電導マグネットシステムで用いる接続線・永久電流スイッチ用線として、30K、1T の環境下で用いることを想定すると、候補材料は、 MgB_2 か鉄系超電導材料である。

MgB_2 は 2001 年に青山学院大学の秋光氏らにより発見され、金属系化合物の中では比較的高い臨界温度（39K）を示す物質である。臨界磁場については、 MgB_2 の高品質な単結晶は臨界磁場が低いが、原料粉末に SiC を添加して B を C に置換することで H_{c2} を上昇させる効果があり、4.2K で $H_{c2} \sim 30T$ となり Nb_3Sn と同等程度に、また、20K でも $H_{c2} \sim 11T$ となり、 $NbTi$ の 4.2 K の H_{c2} に匹敵する値となることが知られている（ただし、添加量により T_c は低下する）。また、原料が比較的安価で機械的強度に優れ、さらに軽量であるため線材の材料として有望視されている。 MgB_2 線材は PIT (Powder In Tube) 法により線材が作製され、イタリアの Columbus Superconductor 社、及び、アメリカの Hyper Tech 社から線材が市販されている。

そこで、市販されている MgB_2 線材の磁場中臨界電流特性を評価した。実際にマグネットシステムでの使用を考えたとき、文献に示されている最も優れたデータではなく、実際に市販されて入手可能な線材の実力を評価することが重要だからである。評価した線材は Hyper Tech 社製の $1 \times 2mm$ の矩形断面線材で、四端子法により 20K 及び 30K での磁場中臨界電流特性を測定した。結果を図 2.3.4-1 に示す。市販 MgB_2 線材の 30K、1T における臨界電流は 12.7A と低く、20K、1T においても約 22A 程度に留まるため、30K、1T での利用を想定した接続線としては、現状の性能では十分ではない。しかし今後の線材技術の進展により接続線としては有望な候補の一つである。ただし、一般的に MgB_2 線材は高抵抗金属をシース材に使用するため、異種超電導線材との接続には技術的課題がある。（ MgB_2 線材どうしの超電導接続技術は報告例がある）

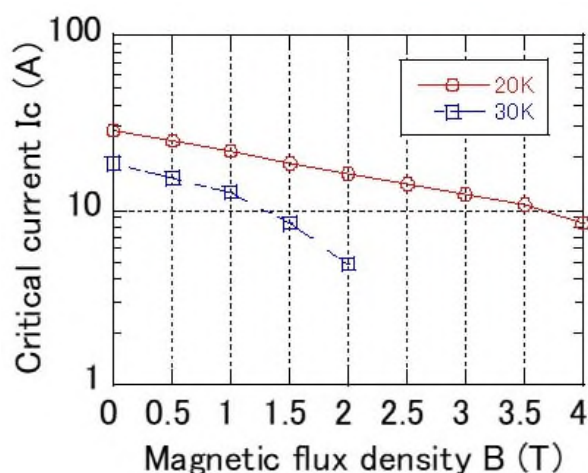


図 2.3.4-1 市販 MgB₂ 線材の磁場中臨界電流特性測定結果 (HyperTech 社製)

一方、鉄系超電導体は 2008 年に東工大細野氏らにより発見された物質群で、FeAs 層を持つことを特徴としている。その物質のパラエティーは数多く報告されており、超電導線材を想定したものとしては、主に、122 系と呼ばれる物質群で開発が行われている。122 系の物質群で代表的なものは (Ba_{1-x}, K_x)Fe₂As₂ である。この物質は K の濃度が増加することにより反強磁性から超電導を示す物質で、 $x < 0.2$ で反強磁性を示すとともに、 $x = 0.1 \sim 1.0$ までの範囲で超電導を示し、 $x = 0.4$ のときに最大の臨界温度 38K を示すことが知られている。臨界磁場については、FeAs 層に平行に印加した時には 100T を超え、異方性についても銅酸化物と異なり等方的に近いことで知られており、MgB₂ と比較して、高い磁場環境に強い線材であることが期待され、現在、大学や研究機関にて線材の開発が行われている状況である。

そこで接続用線・永久電流スイッチ用線として鉄系超電導体による線材の試作を行った。

鉄系 122 系線材は MgB₂ と同様に PIT 法で作成されている。線材の作製には、まずは、多結晶原料の最適化を行い、シース材の選択、圧延方法、及び、圧延後の熱処理条件の最適化をする必要がある。本開発では、(Ba_{1-x}, K_x)Fe₂As₂ を選択し、シース材については、REBCO 高温超電導線材や各種超電導線との接続性を重視し Ag シースを選択した。この系では、線材の作製に伴い K の濃度変化が生じるため、多結晶試料の合成から条件の最適化を行い、最終的に 4mm 幅、厚みが 0.5mm のテープ状に加工した長さが最長 3m の線材の作製に成功した (表 2.3.4-1、図 2.3.4-2)。

表 2.3.4-1 作製した鉄系超電導線材諸元

| | |
|-------|------------------|
| 製法 | Powder-in-tube 法 |
| シース材料 | Ag |
| 形状 | テープ状 |
| 長さ | ~3m |
| 熱処理条件 | 850°C、3h |

| | |
|-------|--|
| T_c | 35.4K |
| I_c | 35A @ 30K, 1T |
| J_c | 5,000A/cm ² @ 30K, 1T 50,000A/cm ² @ 4.2K, 1T |

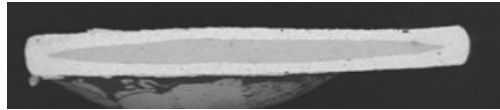


図 2.3.4-2 作製した鉄系超電導線材の断面

開発した鉄系線材について、超電導転移温度は若干低下しているが、文献で報告されている臨界電流密度の最大値付近での値 ($x = 0.35$ 付近) を示している。磁場中での臨界電流特性を図 2.3.4-3 に示す。マグネットシステムで想定する温度、磁場環境である 30K、1T において、臨界電流は 35A を示した。(20K、1T においては、臨界電流は 120A)

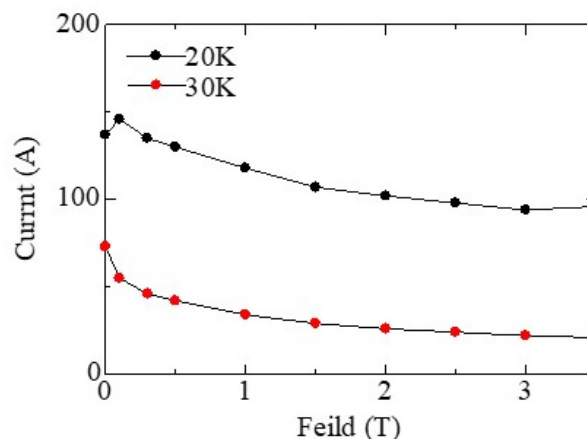


図 2.3.4-3 開発した線材の磁場中臨界電流特性

超電導マグネットシステム用の永久電流スイッチとしては、NbTi 線を用いた液体ヘリウム中で動作する熱式スイッチ（ヒータにより超電導状態を破って抵抗状態にする方式）が実用化されており、広く MRI や NMR 装置で用いられている。高温超電導線材と NbTi 線材を低磁場低温接続アシスト環境下にて超電導接続できれば、高温超電導マグネットシステムにおいても NbTi 永久電流スイッチを使用できると見込まれる。ただし、高温超電導マグネットシステムは伝導冷却方式であり、接続部に低温アシスト環境があるため、液体ヘリウム中での動作を前提としたスイッチをそのまま適用することはできず、最適設計が必要である。

一方、MgB₂ を用いた伝導冷却マグネット用の永久電流スイッチも開発されている（特許：W02014034295A1）。少ない熱量で高速動作が可能とされており、永久電流スイッチとして理想的である。NbTi 線との接続により、さらに高温超電導線材と接続すれば、高温

超電導マグネットシステムにおいても使用可能と考えられる。

鉄系超電導線材の永久電流スイッチへの適用性を検討するため、永久電流スイッチ設計において重要なパラメータとなる線材の抵抗-温度特性および比熱-温度特性を測定し、 MgB_2 と比較した。図 2.3.4-4 は長さあたりの抵抗の温度依存性、図 2.3.4-5 は比熱の温度依存性である。 T_c 直上の抵抗率は市販 MgB_2 線材、試作鉄系線材ともに大きな差はないが、高温では MgB_2 線材の方が抵抗が大きい。これは MgB_2 線材のシース材の抵抗が現れているものと考えられる。比熱については両者ともほぼ同じであった。よって永久電流スイッチの設計において MgB_2 線材と鉄系線材では大きな差異はなく、同様の設計法が適用できると考えられる。

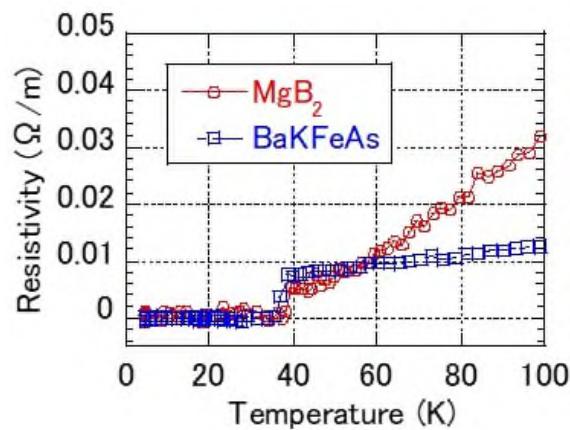


図 2.3.4-4 市販 MgB_2 線材と試作鉄系線材の抵抗の温度依存性

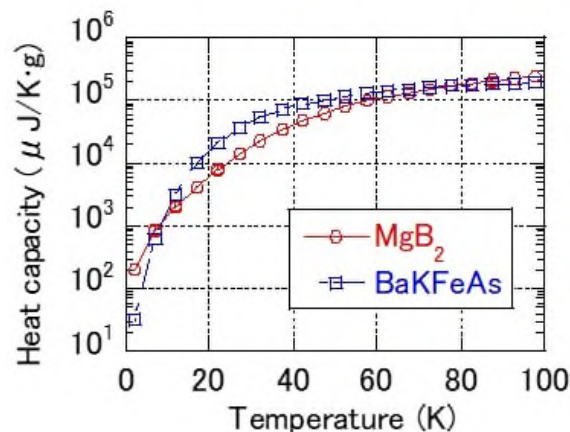


図 2.3.4-5 市販 MgB_2 線材と試作鉄系線材の比熱の温度依存性

銀シース鉄系超電導線材は外層が銀であるため、接続における抵抗を小さくでき、接続長を短くすることができる点も特長である。

(3) 結果

高温超電導マグネットシステムにおける接続線・永久電流スイッチ材料として使用可能な超電導線材として鉄系超電導線材の開発を行った。また永久電流スイッチへの使用を検討するため、抵抗や比熱の温度依存性をあわせて測定し、今後の線材化技術の進展により接続線または永久電流スイッチに十分適用可能であることが分かった。

⑤ 接続抵抗評価技術（物質・材料研究機構）

（１）研究開発目的

超電導接続開発の開発目標である $10^{-12}\Omega$ クラスの微小抵抗を評価する技術を確立する。接続部の温度、磁場強度、磁場方位をパラメータとして接続抵抗を評価できる装置を開発する。

（２）研究内容

1. 微小抵抗測定計の概念設計

$10^{-12}\Omega$ クラスの微小抵抗は、一般的な四端子通電法（被検体に通電して評価対象部での発生電圧を測定する方法、以下「四端子法」と記す）で測定することは、電圧測定器の分解能の制約から困難である。このため、微小抵抗測定にはいわゆる「減衰法」が用いられることが多い。減衰法では、インダクタンス L と回路抵抗 R を有する閉回路を構成する。この回路に流れる電流 I の時間 (t) 変化は、時間 t における電流 $I(t)$ を初期電流 ($t = 0$ の電流)、 R 、 L の関数として、

$$I(t) = I(0)\exp(-Rt/L) \quad \text{式 2.3.5-1}$$

で与えられる。このため、 L が既知の閉回路を形成して電流の時間変化を測定することで回路抵抗 R を求めることが出来る。閉回路が接続部一箇所を含む超電導線の場合、使用超電導線材の臨界温度 (T_c)、臨界電流 (I_c) 以下であれば超電導線の抵抗は無視出来るので、式 2.3.5-1 における回路抵抗 R と接続抵抗を等価と見做すことが出来る。以上の検討から、本開発では減衰法を採用することとした。

超電導マグネットにおいて接続部は、ある程度の磁場環境中に配置されることとなる。また、高温超電導線材の特性は、磁場強度だけでなく磁場方位にも依存することが知られている。さらに、超電導接続は作製法が開発途上にあるため、開発過程におけるフィードバックループを効果的に機能させるために、ある程度の短時間で接続抵抗を評価することも必要となる。以上を勘案し、本開発で構築する $10^{-12}\Omega$ クラスの微小抵抗を評価する測定系の主たる方針を

- （１）接続抵抗を 4～90K の温度範囲で測定可能であること
- （２）接続抵抗を 0～3T の磁場範囲で測定可能であること
- （３）磁場は、接続部の高温超電導線材テープ面に対して任意の角度で設定できること
- （４）接続部に最大 200A の電流を印加できること
- （５）できる限り短い時間で測定が出来ること
- （６）液体ヘリウム等の寒剤を必要としないこと

とした。図 2.3.5-1 に測定系の概略図を示す。

試料部と外部磁場マグネットを別体として、試料部を機械的に回転させることで磁場方位を変化させる構造とした。断熱構造を薄くして外部磁場コイルに試料部を近づけることが出来るように双方のクライオスタットは回転シールを介して一体型にすることと

した。マグネット温度を 5K 程度の低温に維持した状態で、試料温度を変化させることが出来るように、試料部とマグネット部はそれぞれ独立の冷凍機で冷却することとした。

試料部に関しては、試料回路に流れる電流を計測するための電流センサ、試料回路に流す電流を電磁誘導で誘起するための誘導コイル、試料回路の開閉を行うための永久電流スイッチ (PCS) ヒータを備える構造とした。減衰法測定における電流測定は、一般にはループ部の中心磁場で計測されることが多い。本開発では接続抵抗を迅速・簡便に評価することを目指していることから、低回路抵抗でも比較的短時間で減衰を評価できるようにループ部のインダクタンス L を小さく抑える必要がある。そのためループ部中心磁場が小さく、簡便かつ高精度でループ部中心磁場を測定することは容易ではない。高精度・高感度測定は NMR プロブ等を用いることで可能ではあるが、簡便とは言い難く、またプローブが室温動作であることから試料部を低温に維持しなければならない装置の設計にも大きな制約となってしまう。以上の理由により、線材近傍に電流が作る磁場をホール素子で測定することで電流を評価する方法を採用した。

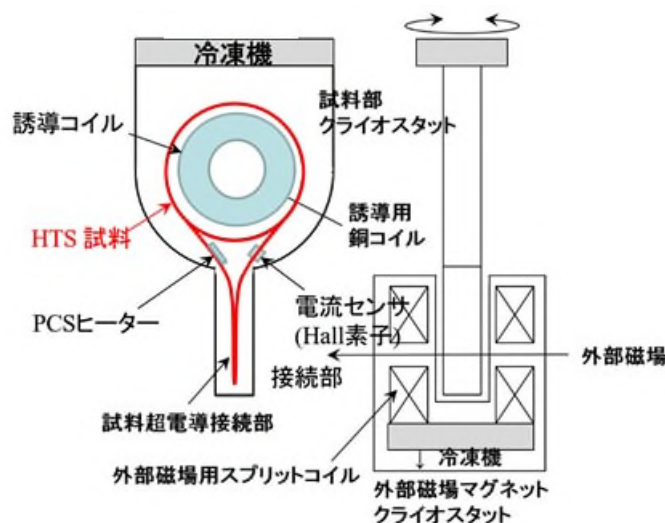


図 2.3.5-1 測定計の概念図

2. 予備的試験結果

予備的検討のために作製した接続抵抗評価試験用セットアップを図 2.3.5-2 に示す。REBCO 高温超電導線材でコイル (ループ) を作製し、両端をはんだ接続し閉回路を形成した。超電導状態にある REBCO 高温超電導線材の抵抗が無視できるため、回路抵抗は接続部の抵抗と見做すことができる。

前述の通り、線材近傍に電流が作る磁場をホール素子で測定することで電流を評価する方法を採用した。机上計算により、線材近傍の方がループ中心よりも大きな磁場となることを確認するとともに、低温環境で使用することが出来て且つ大きな出力を得ることが出来るホール素子を探して用いた。また、電流誘起には、銅コイルを作製してループ部中心に配した。この電流誘起用銅コイルに通電する電流を制御することで、閉回路に誘起する初期電流値を制御することが可能となる。



図 2.3.5-2 液体窒素中での接続抵抗評価予備試験のためのセットアップ

図 2.3.5-2 のセットアップを液体窒素中に浸漬して行った試験結果の一例を図 2.3.5-3 に示す。図 2.3.5-3 では時間（銅コイルの電流を遮断してループ部に電流を誘起した時点）を時間ゼロとしている）に対して、ホールセンサの検知磁場を対数目盛で示してある。電流変化が式 2.3.5-1 に従う場合、図 2.3.5-3 では直線関係が得られ、その直線の傾きが $-R/L$ に相当することとなる。これによって、インダクタンスが既知であれば回路抵抗値 R を算出できる。銅コイル電流 2A や 4A の場合には良好な直線関係が得られている。一方で銅コイル電流が 8A や 10A の場合、初期に直線から外れた大きな低下を示した後に直線的な関係となる。この大きな初期減衰は、REBCO 高温超電導線材に誘起された電流が臨界電流値を超えたために接続部以外の線材部分でも抵抗が発生し回路抵抗が増大したためと考えられる。しかしながら、直線関係が得られている部分の傾きは他の場合と同じであり、線材部分は超電導となって、回路抵抗は接続部の抵抗となっていることが分かる。

ループ部のインダクタンスを変えたり、REBCO 高温超電導線材の種類を変えたり、接続部のはんだ付けの条件を変えたりと複数の閉回路試料を作製して繰り返し試験を行った。それぞれの試験で銅コイル電流を変化させて、ホールセンサ検知磁場と時間の関係の傾きから接続抵抗を見積もった。また、減衰法による試験の後に接続部を切り出し、四端子通電法でも抵抗を評価した。代表的な二つの試料についての結果を表 2.3.5-1 に示す。何れの場合も減衰法と四端子法の結果は良好な一致を示している。

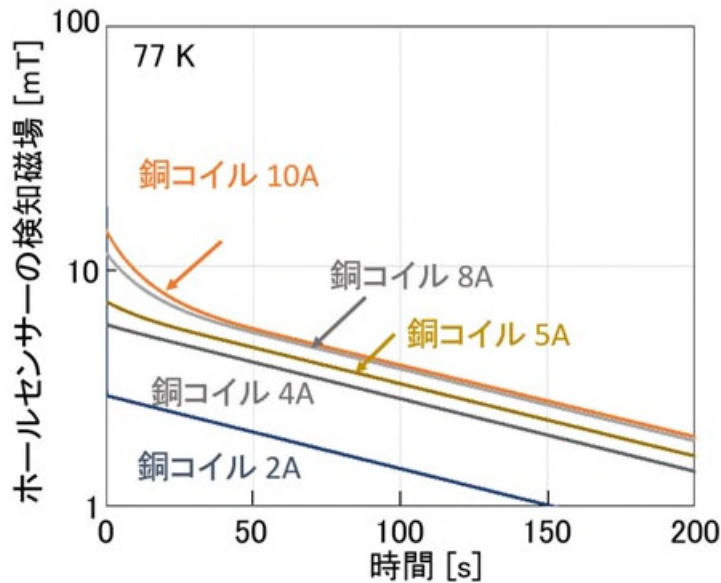


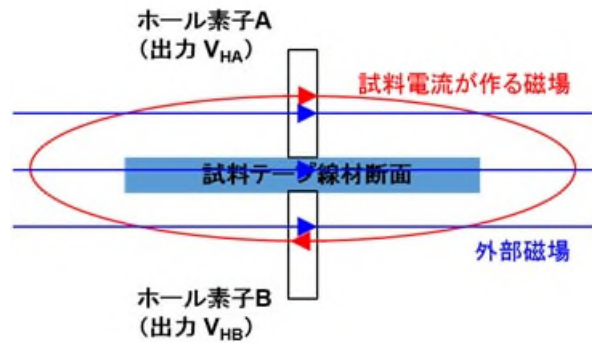
図 2.3.5-3 液体窒素中での予備試験結果の一例

表 2.3.5-1 接続抵抗評価結果の比較

| | | 減衰法 | | | | | 四端子法 |
|-----|--------------|------|------|------|------|-----|------------|
| 試料A | 銅コイル遮断電流 [A] | 2 | 4 | 5 | 8 | 10 | |
| | 接続抵抗値 [nΩ] | 247 | 247 | 245 | 244 | 243 | 242 |
| | | 減衰法 | | | | | 平均値245 nΩ |
| 試料B | 銅コイル遮断電流 [A] | 2 | 4 | 6 | 10 | | 四端子法 |
| | 接続抵抗値 [nΩ] | 18.5 | 19.5 | 20.0 | 20.1 | | 18.3 |
| | | 減衰法 | | | | | 平均値19.5 nΩ |

以上のことから、減衰法による接続抵抗評価が可能であることが確認できた。接続抵抗がさらに小さくなると電流の減衰はさらに遅くなるため、電流が発生する磁場の微小な変化を検出することが必要になる。これとともに、外部磁場の変化による擾乱に起因するノイズへの対策も必要となる。微小変化を検出するためのホールセンサ信号の高出力化に関しては、想定しているセンサ素子は十分に小型であるため、複数個を配置して出力を合算することで可能である。さらに、試料電流の作る磁場は電流方向を軸として対称（例えば、テープ表側と裏側では磁場の方向が反対）であるのに対し、環境磁場等の外部磁場はほぼ一様（テープ表側と裏側では磁場の方向が同じ）と考えられることから、テープ線材の表裏にセンサ素子を配置して差動型とすることで、外部磁場に起因する信号（ノイズ）をキャンセルすると同時に試料電流による信号を高出力化することが可能となると着想（概略を図 2.3.5-4 に示す。）した。この着想を検証するために予備実験を室温で行った。予備実験ではテープ線材試料の表裏それぞれにホール素子 3 個の計 6 個を配置した。評価試験では各ホール素子の出力を別個に計測し、数値データとして合算した。図 2.3.5-5 に結果を示すように高出力化が確認できた。また、テープ

線材試料に一定電流を通电した常態で永久磁石をセンサ部分近傍に近づけたり離れたりすることで外部磁場擾乱を模擬した試験（図 2.3.5-6）を行った。片側のセンサだけでは外部磁場擾乱による大きな信号が観測されるが、両側のセンサ出力を差動型で合算することにより外部磁場変化に起因する信号をキャンセル出来ることが確認された。以上の結果から、ホールセンサを高温超電導テープ両側に差動型で配置する方式を採用することとした。



試料電流は線材長手方向
(この場合は紙面に垂直、表から裏へ向かう方向)

試料電流が作る磁場によるホール電圧: V_{sample}
外部磁場によるホール電圧: $V_{external}$

$$V_{HA} = V_{sample} + V_{external}$$

$$V_{HB} = -V_{sample} + V_{external}$$

$$V_{HA} - V_{HB} = 2 \times V_{sample}$$

図 2.3.5-4 ホールセンサの差動型配置による高出力化とノイズ低減

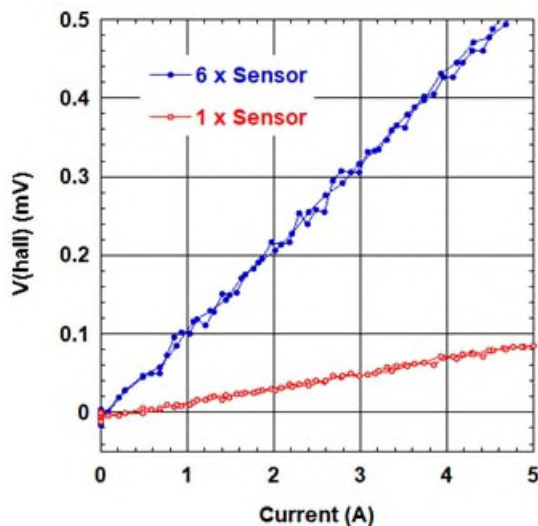


図 2.3.5-5 ホールセンサ高出力化の検証

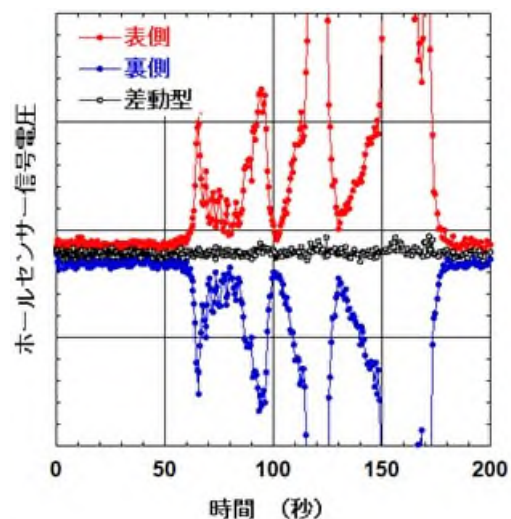


図 2.3.5-6 外部磁場ノイズ低減の検証

3. 接続抵抗評価装置詳細設計

1. に述べた方針に沿い、2. に述べた予備的試験結果を踏まえて、装置の最終設計を行った。設計した接続抵抗評価装置の外観を図 2.3.5-7 に示す。最終設計に当たっては、装置全体をなるべく小型化することも考慮した。外部磁場マグネットの設計では、試料部における外部磁場マグネット部からの漏れ磁場が評価試験に影響を及ぼす程度（中心磁場が 3T の時にループ部での漏れ磁場が 45mT）であり、その低減を鉄シールドで行おうとすると 200kg を超える鉄材が必要であることが判明した。このため、試料部での漏れ磁場低減と装置小型化を両立させるために、キャンセルコイルを備えるスプリットコイルを有する外部磁場マグネット部を、回転機構を有する一体型クライオスタットに納める形とした。ループ部での漏れ磁場は、設計上、キャンセルコイル無しの場合の 45mT から、キャンセルコイルにより 0.145mT と 1/300 程度に抑制される。試料部とマグネット部はそれぞれ別個の冷凍機によって冷却し、試料部温度はマグネット部温度とは独立に制御可能とした。試料電流の測定はループ部近傍の線材に対向型に配置するホールセンサによって測定する。また、温度や磁場を変化させて評価試験を繰り返して行うために、閉ループに誘起された電流をゼロに戻す必要がある。試料線材の超電導状態を破って回路抵抗を大きくすることで電流を急速に減衰させて短時間でゼロに戻すことができる。そのためのヒータもループ部近傍に配置した。ループ部の巻き径は 100mm であり、線材幅 <10mm、接続部長さ <60mm（外部磁場が設計上±1%以内）の接続試料を格納できる構造とした。また電流誘起用の銅コイルをループ部中心に配置した。この銅コイルは 1.7A 通電時に 0.1T を発生し、試料に十分な電流を誘起することが出来る。このコイルは冷凍機 1st ステージで冷却され、一方で試料ホルダー部は 2nd ステージで冷却される。

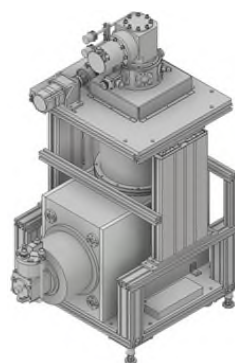


図 2.3.5-7 接続抵抗評価装置外観

4. 試料部単独の評価試験

装置製作は、試料部と外部磁場マグネット部に分けて別々に行った。先に完成した試料部装置について、単独で装置性能評価試験を行った。改めて図 2.3.5-8 に試料部の構成を示す。試料部は、2 段式パルスチューブ冷凍機（SHI 製 RP-082B2）を用い、冷凍機 1 段ステージで誘導コイル及び輻射シールドを、2 段ステージで試料治具を冷却する。誘導コイルは、中心磁場 0.1T を発生できる。試料温度を 4K～90K の範囲の任意の温度に保つために 2 段ステージは温調用ヒータを備えている。試料治具は、超電導線試料の一部のみを昇温して常電導転移させるためのヒータ（以下、PCS ヒータと記

す)を備え、試料全体を昇温すること無しに試料の一部のみを常電導転移させることで誘導電流を減衰させ、短時間で繰返し測定条件を変えた測定を行うことができるようにした。試料に流れる誘導電流の測定は、超電導線材の直近にホールセンサを配置することで、試料のインダクタンスに依らず高感度の電流測定を可能としている。

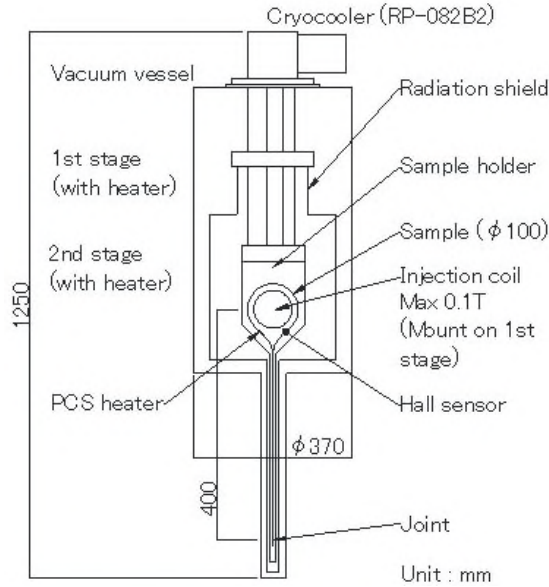


図 2.3.5-8 試料部構成概略

(出典：内田公他、「超伝導線材接続抵抗評価装置の開発(1)－装置設計と冷却試験－」、第 97 回 2018 年度秋季低温工学超電導学会講演概要集、1A-p09)

図 2.3.5-9 に常温からの冷却試験結果を示す。測定試料を約 4 時間で 4K 以下まで冷却し、試料全体を 1K 以内の温度分布に保つことが出来た。また、この状態で PCS ヒータを用いて線材の一部を昇温した場合、接続部温度をほとんど上昇させることなく、線材の一部のみを短時間に 100K 程度まで上昇させ再び冷却できることを確認した。(図 2.3.5-10)

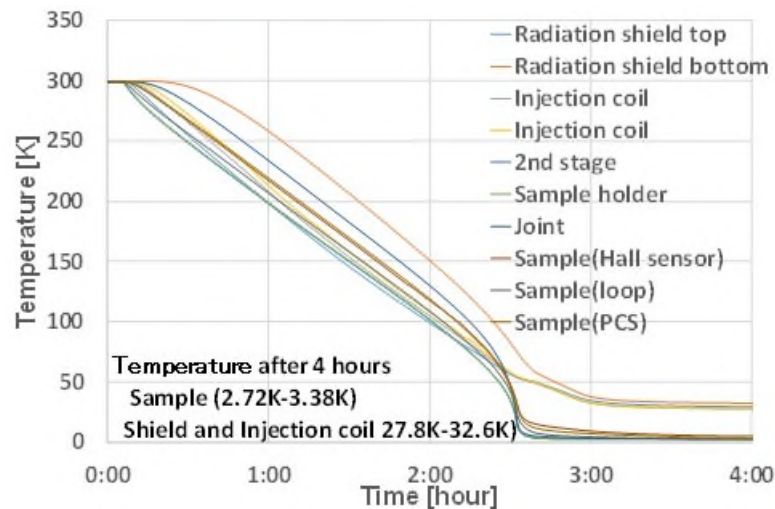


図 2.3.5-9* 室温からの初期冷却曲線

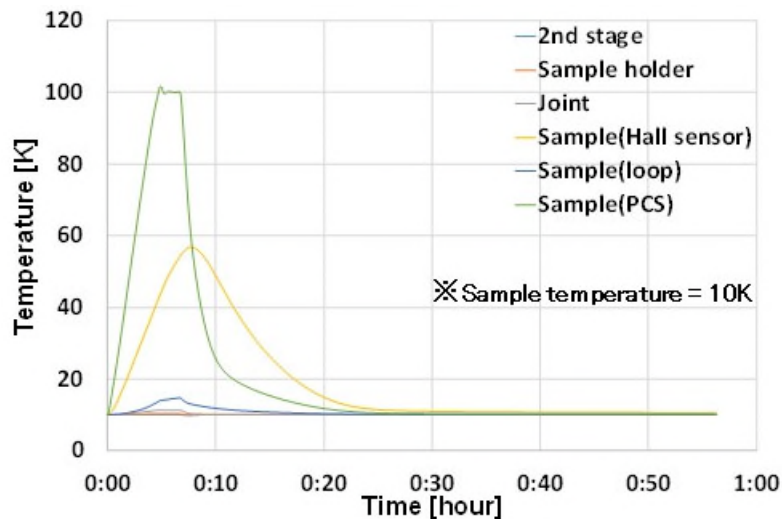


図 2.3.5-10* PCS ヒータ動作時の各部の温度変化

(*図 2.3.5-9～10 の出典：内田公他、「超伝導線材接続抵抗評価装置の開発(1) —装置設計と冷却試験—」、第97回2018年度秋季低温工学超電導学会講演概要集、1A-p09)

試料として、市販の REBCO 高温超電導線材の両端を $Pb_{0.37}Sn_{0.63}$ はんだを用いて接続した、1 回巻きから 10 回巻きの数種類を作製した。試料治具に試料を取り付けた状態を、はんだ接続部とあわせて図 2.3.5-11 に示す。回路抵抗 R は、REBCO 高温超電導線材直近のホールセンサ出力電圧の時間変化を測定し、減衰曲線に対して

$$V_{Hall}(t) = A + B \exp(-Rt/L) \quad \text{式 2.3.5-2}$$

でフィッティングすることで評価した。自己インダクタンス L は、LCR メーターで実測した値を用いた。はんだ接続の抵抗値は通常数十 $n\Omega$ が期待されるので、誘導コイルによって導入された電流の減衰に要する時間は数分程度と事前に見積もった。 $10^{-12} \Omega$ の接続抵抗の場合は、減衰時間は 12 時間以上と見積もられた。 $10^{-12} \Omega$ 以下の測定が可能かどうか評価するため、リボン状の PbSn はんだ線両端を溶接して 1 回巻き試料を作製し、はんだの臨界温度 (T_c) 7K 以下で回路抵抗の評価も試みた。



図 2.3.5-11 試料治具に取り付けた状態の試料とはんだ接続部

実際の抵抗評価は以下の手順で実施した。

- 1) 試料を所定温度で保持
- 2) PCS ヒータを投入して超電導回路を開く
- 3) 誘導コイルに所定電流を印加
- 4) PCS ヒータを切って接続部を含む超電導閉回路を構成
- 5) 試料温度が所定温度となるまで保持
- 6) 誘導コイル電流を遮断（試料に電流が誘導される。）ここを $t = 0$ とする
- 7) 電流（ホールセンサ出力電圧 V_{Hall} ）の時間変化を計測
- 8) 電流変化を、式 2.3.5-2 でフィッティングして回路抵抗 R を導出

結果の一例として最も電流減衰が早い 1 回巻き試料の各温度での減衰測定結果を図 2.3.5-12 に示す。 $t = 0$ で試料へ電流を導入し、減衰に要した時間は 77 K で 60 秒程度であった。減衰曲線から見積もった抵抗は $32.3\text{n}\Omega$ であり、この値ははんだ接続の抵抗値として妥当である。温度低下に伴って電流減衰時間は長くなっており、これは温度低下によって接続部の抵抗値が小さくなっていることを示している。最低温 3K での減衰時間は 3 分程度になり、抵抗値は $14.3\text{n}\Omega$ であった。得られた抵抗の温度依存性を図 2.3.5-13 に示す。温度に対して概ね線形に変化している。 $T < 10\text{K}$ で高温側からの外挿線より低下しているのは、はんだの超電導転移によるものと考えられ、4.3 K 以下の接続抵抗は、REBCO 高温超電導線材内部（REBCO 層／銀保護層／銅安定化層）及び銅安定化層とはんだ間の接触抵抗に相当すると考えられる。また、減衰の速い 1 ターンの試料であっても $100\text{n}\Omega$ 程度までは問題無く評価できること、及び、試料温度は 3K～100K の温度範囲で安定して保持できることも確認した。

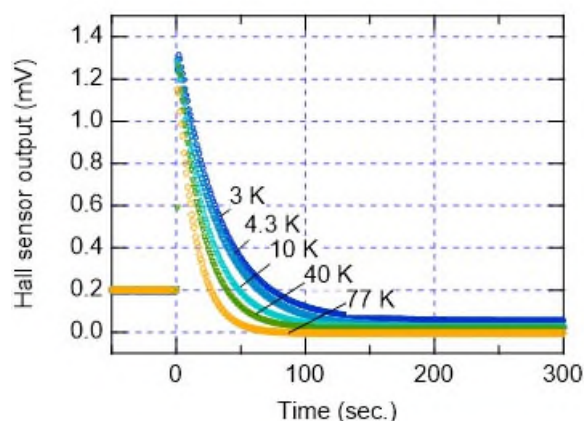


図 2.3.5-12* 各温度での減衰測定結果（1 回巻試料）

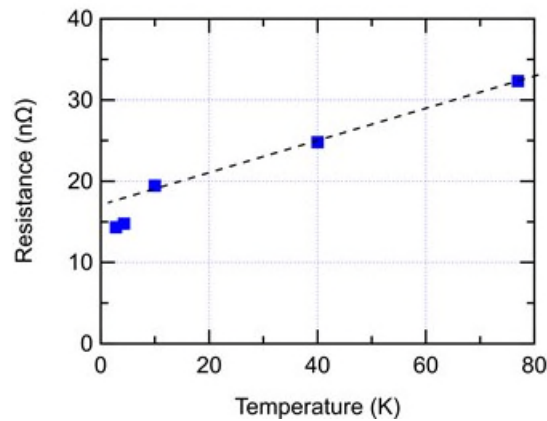


図 2.3.5-13* 接続抵抗の温度依存性 (1 回巻試料)

(*図 2.3.5-12~13 の出典：小林賢介他、「超伝導線材接続抵抗評価装置の開発(2)－抵抗測定試験－」、第 97 回 2018 年度秋季低温工学超電導学会講演概要集、1A-p10)

誘導電流の大きさは、別の通電治具を用意し、接続抵抗評価時と同じホールセンサを REBCO 高温超電導線材に取り付け、液体窒素中で評価した。図 2.3.5-14 は、試料電流 77K 及び 3K において、誘導コイル電流を変えて試料の誘導電流を変化させた結果を示す。誘導コイル電流 0.2A の場合、試料に導入された電流はおおむね 100A 程度と見積もられた。試料へ導入される電流は、77K では線材の臨界電流 $I_c \sim 140A$ で飽和した。(図 2.3.5-14 左図に見られるように、誘導コイル電流 0.4A の場合と 0.8A の場合でホールセンサ電圧が同じ挙動を示した。) 一方で、3K では誘導コイル電流に比例した電流が試料に導入され、誘導コイル電流 0.8A で 400A 程度の電流が導入されたと判断できる。

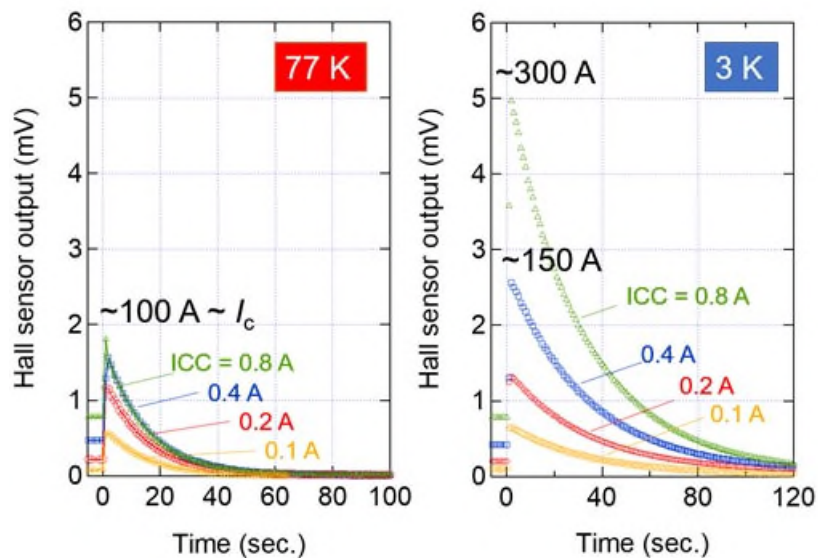


図 2.3.5-14 誘導コイル電流を変化させた結果 (ICC：誘導コイル電流)

完全な超電導閉回路を構成するためのリボン状 PbSn はんだ 1 回巻き試料の試験結果を図 2.3.5-15 に示す。図 2.3.5-15 左図に見られるように、3K においては試料電流が保

持され、はんだの T_c 以上である 10K では誘導コイル電流遮断後一瞬にして試料電流は減衰した。3K における電流減衰のフィッティングから導出した回路抵抗は $3.3 \times 10^{-11} \Omega$ であった。超電導閉回路の抵抗として期待された $10^{-12} \Omega$ レベルよりも高いのは、溶接による接続形成が不十分であったためと考えている。さらに、3K で導入した電流を保持した状態で試料温度を上昇させる試験を行った (図 2.3.5-16)。温度上昇に伴って保持されていた電流は、7K で急激に減衰した。この急激な電流減衰は試料であるリボン状 PbSn はんだの T_c に相当する。これによって、本装置によって超電導接続部の T_c 評価も可能であることが分かった。

以上のように、冷却や抵抗評価の基本的動作に問題の無いことが確認できた。装置設置面積も $1.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 程度と、当初に狙いとしていた「装置全体をなるべく小型化すること」も実現できている。

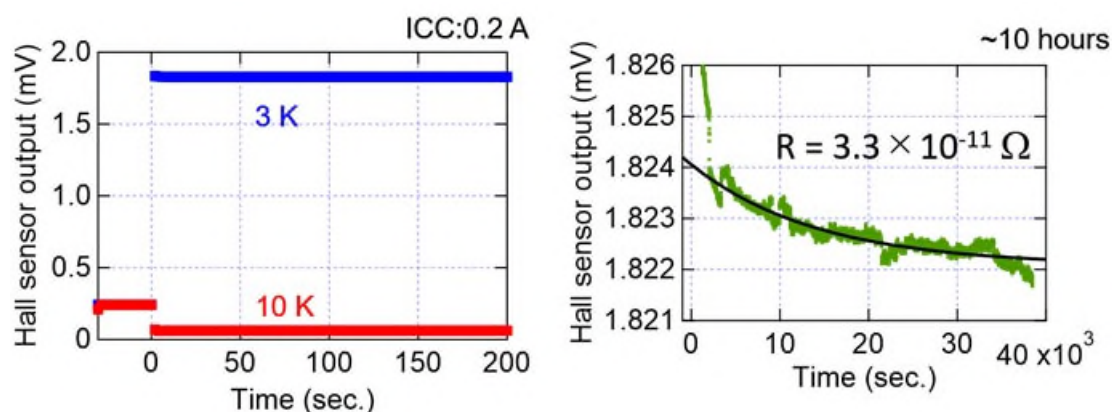


図 2.3.5-15 リボン状 PbSn はんだ 1 回巻き試料の試験結果 (ICC : 誘導コイル電流)

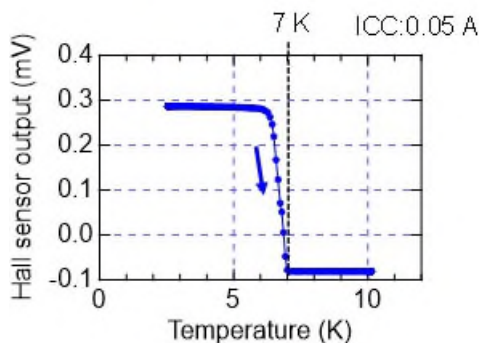


図 2.3.5-16 捕捉電流の温度依存性

5. 低接続抵抗評価実証試験

評価対象である $10^{-12} \Omega$ 程度の評価を実証するために、超電導はんだ (PbBi) による超電導接続技術が確立している NbTi 超電導線材を用いた試料を作製し、評価試験を行った。試料には線径 0.4mm の 55 芯 NbTi 多芯丸線 (絶縁被覆あり) を用いた。産業技術総合研究所 (本節に限り、以下 AIST と記す) 及び物質・材料研究機構 (同、以下 NIMS と記す) のそれぞれで、同じ NbTi 線材を用いて各機関独自の手法 (本質的には同じ手法であるが、接続形成プロセスの細部に違いがある。) で試料を作製した。

図 2.3.5-17 に、AIST 製試料を治具に取り付けた状態を示す。カプトンテープを用いて絶縁を確保した上で、試料をアルミテープで治具に固定した。電流計測用ホールセン

サは、REBCO 高温超電導線材で用いたものをそのまま使用した。丸線の場合のホールセンサ出力と誘導電流値の校正データがないため、誘導電流の絶対値は正確ではない。しかし、ホールセンサ出力と電流値の関係は比例関係にあるために、フィッティングによる抵抗値導出には影響は無い。

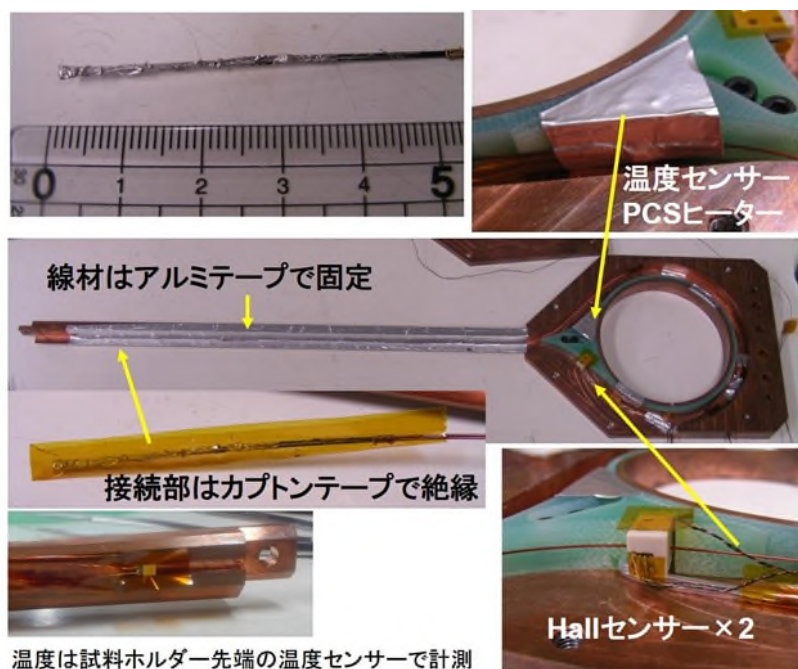


図 2.3.5-17 AIST 製の NbTi はんだ接続試料

NbTi の PbBi はんだ接続試料の場合、 T_c が線材で 9.5K 程度、はんだで 8.6K 程度と低いため、PCS ヒータを使用せずに以下の測定手順で試験を行った。

- 1) 試料を 15K で保持
- 2) 誘導コイルに所定電流を印加
- 3) 試料温度が 4.2K となるように冷却
- 4) 誘導コイル電流を遮断（試料に電流が誘導される。）ここを $t = 0$ とする
- 5) 電流（ホールセンサ出力電圧 V_{Hall} ）の時間変化を計測
- 6) 電流変化を、式 2.3.5-2 でフィッティングして回路抵抗 R を導出

誘導コイル電流を変化させて一連の測定を行った結果を図 2.3.5-18 に示す。誘導電流 24~330A (前述のように誘導電流の絶対値は目安) の全てで永久電流が確認された (測定時間は 1 時間程度)。また、誘導電流が大きくなるにつれて、減衰開始直後の抵抗値の時間変化が顕著となった。これは、線材内部の磁束が最適位置に再配置するために動いていることに起因すると考えているが、詳細な機構については明かでなく、検討が必要である。フィッティングによる抵抗導出結果を図 2.3.5-19 に示す。NbTi 線材は抵抗ゼロの超電導状態と見做しうるので、得られた抵抗は接続部分によるものと考えられる。図 2.3.5-19 において、フィッティングは黒の実線で示した。 $10^{-14} \Omega$ 台の抵抗値が 1 時間程度の測定によって良好なフィッティングで得られている。

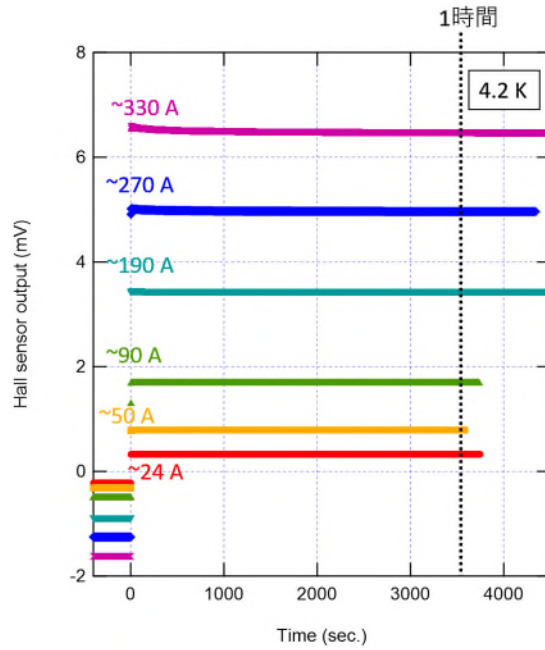


図 2.3.5-18 AIST 製 NbTi 接続試料の試験結果

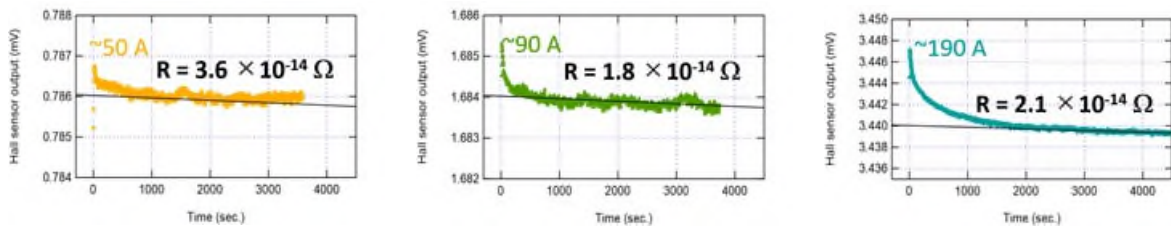


図 2.3.5-19 AIST 製 NbTi はんだ接続試料のフィッティングによる抵抗導出

誘導電流 330A で長時間測定を行った結果を図 2.3.5-20 に示す。16 時間経過時点でのフィッティングから導出された抵抗値は $5 \times 10^{-15} \Omega$ であった。抵抗値は時間の経過とともに徐々に低下していく。また、図 2.3.5-20 に 7 時間経過時点でのフィッティング結果（抵抗値： $2 \times 10^{-14} \Omega$ ）も示した。二つのフィッティング結果を比較すると、ホールセンサ電圧計測のノイズは十分に低く抑えられており、 $10^{-15} \Omega$ 台の分解能を有することが分かる。

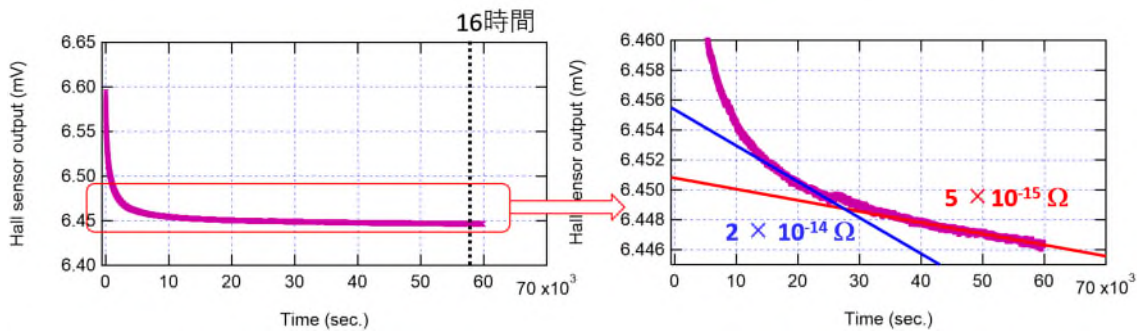


図 2.3.5-20 AIST 製 NbTi はんだ接続試料の長時間測定結果

図 2.3.5-21 に NIMS 製の NbTi はんだ接続試料の写真を示す。AIST 製試料と同様の評価試験を行った結果を図 2.3.5-22 に示す。誘導電流の減衰挙動は AIST 製試料の場合と殆ど同じであった。測定結果を経過時間 1 時間時点でフィッティングして得られた抵抗値を AIST 製試料と比較して表 2.3.5-2 に示す。本質的には同様の手法で作製された異なる試料の何れにおいても、 $10^{-14}\Omega$ 台の接続抵抗値が得られた。

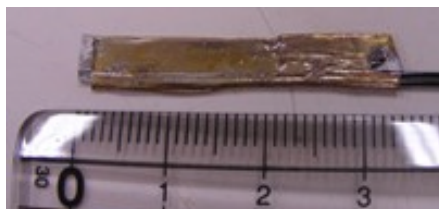


図 2.3.5-21 NIMS 製の NbTi はんだ接続試料

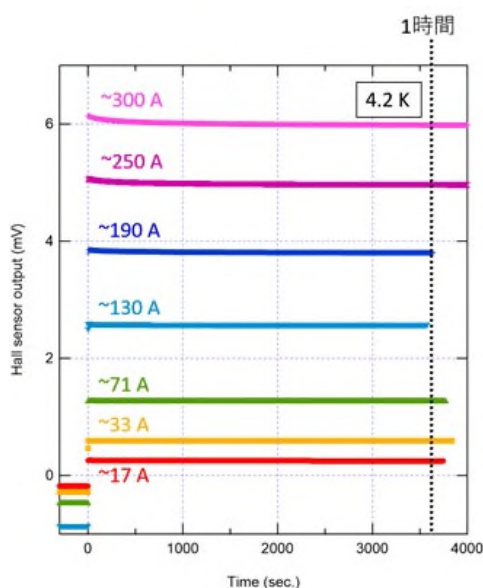


図 2.3.5-22 NIMS 製 NbTi 接続試料の試験結果

(出典：小林他、超伝導線材接続抵抗評価装置の開発(3)、第 98 回 2019 年度春季低温工学超電導学会講演概要集、3A-p06)

表 2.3.5-2 経過時間 1 時間時点でフィッティングして得られた抵抗値の比較

| 誘導電流 (A) | 抵抗値 ($10^{-14}\Omega$) | |
|----------|--------------------------|------|
| | AIST | NIMS |
| 33 | | 3.6 |
| 50 | 3.6 | |
| 71 | | 3.4 |
| 90 | 1.8 | |
| 130 | | 7.3 |
| 190 | 2.1 | |

本試料については、それぞれの誘導電流で昇温実験を行った。その結果を図 2.3.5-23 に示す。何れの誘導電流の場合でも、昇温すると電流が連続的に減少し、接続に用いた

はんだの T_c である 8.9K で電流は消失した。温度上昇に伴う電流の減少は初期誘導電流の値から一つの曲線に向かって低下し、その曲線に到達した後は初期誘導電流の値にかかわらず同じ挙動を示している。この曲線は I_c と温度の関係を示していると考えられる。このことから、本装置を用いて I_c の温度依存性測定が可能であることがわかった。

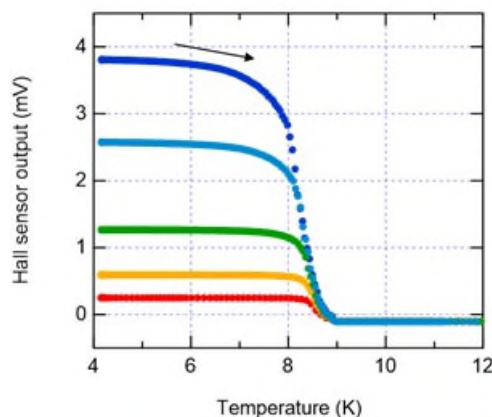


図 2.3.5-23 NIMS 製の NbTi はんだ接続試料の昇温試験

外部磁場下での評価試験を実施した。外部磁場マグネットは 0~3T の範囲で磁場発生を行った。試料は AIST 製 NbTi はんだ接続試料を用いた。図 2.3.5-24 に、4K 外部磁場 0T 及び 0.6T の結果を示す。外部磁場下においても問題無く接続抵抗評価のできることを確認できた。また、接続抵抗に大きな外部磁場依存性は認められなかった。得られた接続抵抗値は前出の AIST 製試料に比べて一桁程度高いが、これは試料間の個体差 (I_c の違い) によるものと考えている。外部磁場を掃引しながら行った測定の結果を図 2.3.5-25 に示す。図 2.3.5-25 左図に対向配置したホールセンサそれぞれの出力をプロットした。センサ部分での外部磁場マグネットの漏れ磁場の影響で誘導電流消失時のセンサ出力電圧はマグネットの発生磁場に比例して変化している。図 2.3.5-25 右図では、二つのセンサ出力を差動型で合算した。ホールセンサ部分での外部磁場（外部磁場マグネットの漏れ磁場）の変化による影響をホールセンサ素子の対向配置と差動検出でキャンセルできることが確認された。磁場を上げると 0.6T から電流は減少し、1.5T で消失する。0.6T から 1.5T の区間の電流値は、各磁場における I_c に対応していると考えられる。また電流の消失する 1.5T は、接続に用いたはんだの上部臨界磁場 (H_{c2}) に対応する。このことから、本装置を用いて、磁場中での I_c や H_{c2} の評価が可能であることがわかった。

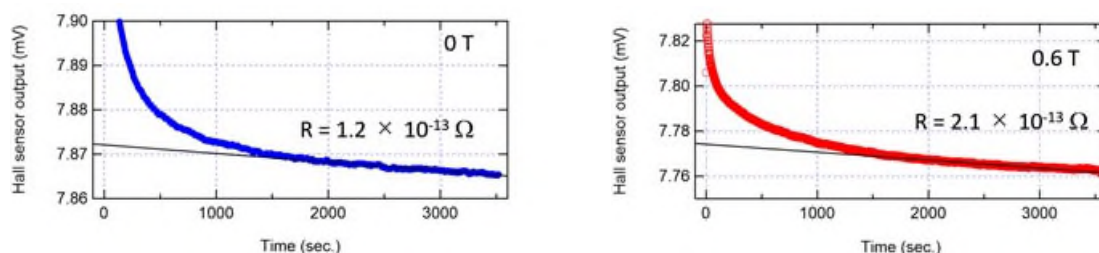


図 2.3.5-24 AIST 製 NbTi はんだ接続試料の磁場中試験結果

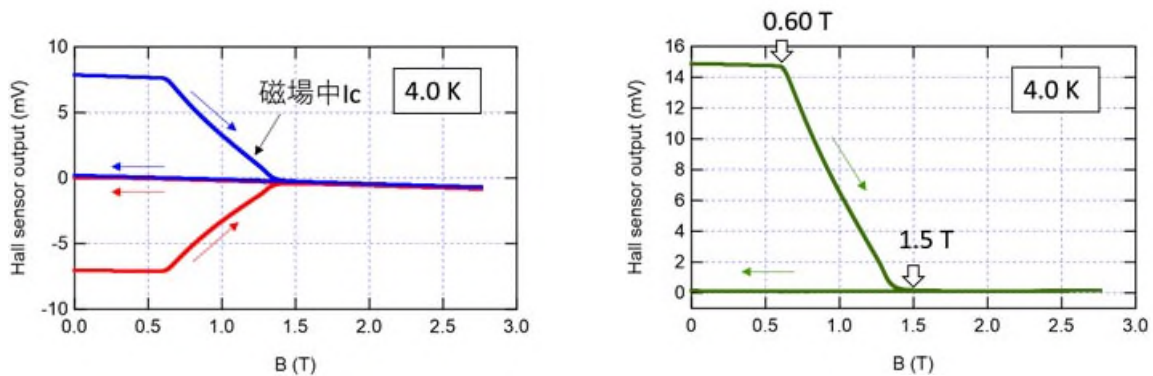


図 2.3.5-25 AIST 作製の Nb-Ti はんだ接続試料の磁場中試験結果（磁場挿引）

(3) 結果

$10^{-12} \Omega$ クラスの微小接続抵抗を減衰法により接続抵抗を効率よく評価できる接続抵抗評価装置を開発し、以下の性能を確認した。

- 1) 評価試験温度範囲：3K ～ 100K
- 2) 評価対象抵抗値： $10^{-7} \Omega$ ～ $10^{-15} \Omega$
- 3) 接続部最大通電電流：400A 程度
- 4) 外部磁場：0～3T

また、接続抵抗評価試験の標準的な手順を確立した。本装置のように、温度、磁場強度、磁場方位をパラメータとして接続抵抗評価を行う装置は他に類がなく、超電導接続技術開発において大きな貢献があった。

さらに、評価試験手順の工夫により、接続抵抗だけでなく臨界温度や臨界電流も、本装置で評価可能であることが見出された。

⑥ 高温超電導線材接続技術開発（産業技術総合研究所、フジクラ、古河電気工業）

(1) 研究開発目的

高温超電導線材同士の超低抵抗の簡便な接続技術を開発する。

(2) 研究内容

「②金属ペーストを用いた接合技術」に記した通り、高温超電導線の接続においては、超電導層と銀保護層の間の抵抗が接続抵抗を支配していること、その抵抗は超電導元素種や線材製造プロセスによって異なる可能性が見出された。また、「③異種超電導物質薄膜接合技」に記したとおり、銀保護層を取り除き異なる種類の超電導材料をコーティングする場合でも、高温超電導層との接合界面に高い抵抗層があらわれることが明らかになっている。本事業の目標である接続箇所あたり $10^{-12} \Omega$ の接続を実現するためには、この抵抗層への対策が必要となる。最良の方法は、この抵抗層を除去または改質することにより、抵抗を下げることである。次善の策としては、抵抗層をそのままに、接続面積を大きくすることにより、抵抗を下げることである。これらの方策について、以下の研究開発を実施した。

1. 接続部低抵抗化の技術課題

高温超電導線材どうしの対向接続において、①低磁場低温接続アシスト環境技術の節で述べたように、接続部への熱侵入を避けるために安定化銅を取り除いた後、銀保護層を残したまま接続する場合と、銀保護層まで取り除いて REBCO 層を剥き出しにして接続する場合が考えられる (図 2.3.6-1)。REBCO 層を剥き出しにした場合は、何らかの異種超電導材料でコーティングした後に接続するか、直接接続材料を用いて接続することができる。

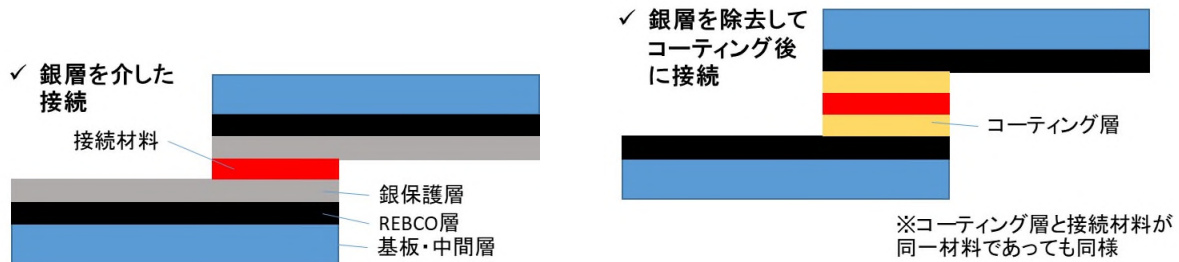


図 2.3.6-1 接続部の概念図

適切なコーティングを行うことができれば、REBCO 層とコーティング層が超電導的に接続され、理想的な超電導接続が可能になると考えられる (この考え方で、REBCO 層に直接鉛はんだを乗せて接続する方法については、③異種超電導物質薄膜接合技術で述べた)。しかし、REBCO 層が他の材料と接触したとき、その界面で変質層があらわれる。保護層に使われている銀以外の金属では、電気的に接続できなくなってしまう場合がある (1.3 接続抵抗の要因分析にて詳述する)。

接続がうまく形成されていれば、接続部の電流は、REBCO 層→銀保護層 (またはコーティング層) →接続材料→銀保護層 (またはコーティング層) →REBCO 層の順に流れることになり、従ってこの接続部の抵抗は、(1)REBCO 層と銀保護層との接触抵抗 (REBCO 層最表面の変質層と思われる抵抗層を含む)、(2)銀保護層、(3)銀保護層と接続材料の接触抵抗、(4)接続材料、の直列接続となる。(4)接続材料については、低磁場低温接続アシスト環境技術の適用により、極低温において超電導になる金属系低温超電導材料を用いることから、電気抵抗はゼロである。また、銀保護層と接続材料との接触については、ペーストを用いる場合は別途評価が必要となるが、はんだ接続の場合は十分な接触が得られるため、無視できるほど小さい。銀保護層の抵抗については、もともと一般的に 2~5 μm 程度の厚さであり、十分に抵抗が小さいと考えられるが、以下のように定量的に評価した。

REBCO と格子定数が近い STO 基板上に幅 0.2mm の銀の膜を成膜し、通常の線材作製プロセスと同じく、酸素アニールを 400 $^{\circ}\text{C}$ 、1 時間の条件で行った。これは、線材製造工程において、高温超電導層表面の酸素欠損を補い超電導特性を向上することを目的とし、銀保護層を形成したあとに行うものである。実際の線材の製法を模擬し、アニール処理後の銀の抵抗を評価した。抵抗は物理特性測定装置 (PPMS) を用い、四端子法で測定した。結果を図 2.3.6-2 に示す。厚さ 1 μm 以下の薄膜では抵抗値が大きく計測される傾

向はあるものの、それ以上ではほぼ体積抵抗率として一定で、市販高温超電導線材で一般的な約 $2\mu\text{m}$ の厚さでは、 4.2K で $1 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$ であった。銀のバルク体の極低温における残留抵抗は、およそ $10^{-11} \sim 10^{-10} \Omega\text{m}$ [1] であることから、これよりも $1 \sim 2$ 桁高い。しかし、厚さ $2\mu\text{m}$ の膜の実際の抵抗としては、接続面積 1m^2 で $2 \times 10^{-15} \Omega$ であることから、線材の接続抵抗の支配的な要因ではないということが明らかとなった。

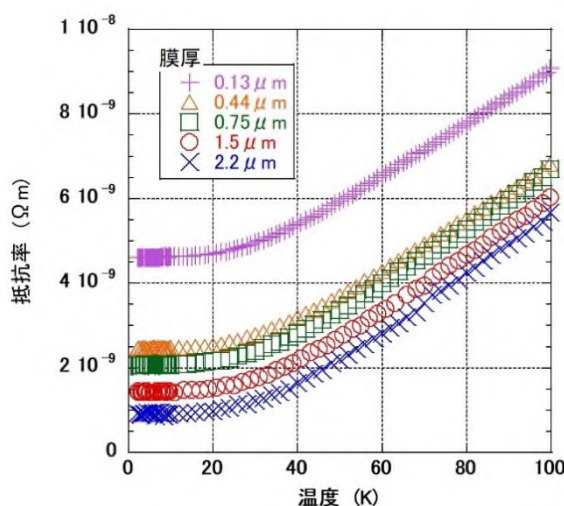


図 2.3.6-2 ST0 基板の上に成膜し、酸素アニール処理を経験させた銀薄膜の抵抗率

接続部の抵抗の要因を表にまとめると、表 2.3.6-1 のようになる。図 2.3.6-1 に示す接続においては、(1)の接触抵抗 (REBCO 層最表面の抵抗層を含む抵抗) が支配的であると考えられる。すなわち、低抵抗の接続を実現するには、この REBCO 層最表面の抵抗を低減する技術の開発が必要である。

表 2.3.6-1 接続部の抵抗の要因分解

| | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| ○銀層を介した接続 | 抵抗 (@4.2K) |
| REBCO 層と銀保護層との接触部 | $R_{\text{REBCO-Ag}}$ |
| 銀保護層 (厚さ $2\mu\text{m}$) | $2 \times 10^{-15} \Omega\text{m}^2$ |
| 銀保護層と接続材料の接触 | 接続方法に依存 |
| 接続材料 (LTS 材料) | 0 |
| ○銀層を除去してコーティング後に接続 | 抵抗 (@4.2K) |
| REBCO 層とコーティング層 (Z) との接触部 | $R_{\text{REBCO-Z}}$ |
| 銀保護層 (厚さ $2\mu\text{m}$) | $2 \times 10^{-15} \Omega\text{m}^2$ |

| | |
|-----------------|---------|
| コーティング層と接続材料の接触 | 接続方法に依存 |
| 接続材料 (LTS 材料) | 0 |

2. 市販高温超電導線材の長尺はんだ接続技術

高温超電導層最表面の抵抗層の改質については後述することとし、先に銀保護層を残したまま、線材を長距離に渡ってはんだで接続する接続技術を開発した。この方法は、REBCO 層最表面の抵抗層を温存したままの接続であるため、厳密には超電導接続技術とは言えないが、十分な長距離に渡って均一な接続ができれば、開発目標とする超低抵抗を実現することが可能である。また、接続部の抵抗評価を通じて、前述の REBCO 層最表面の抵抗層の正確な定量評価も可能となる。

市販高温超電導線材は通常、最外層に安定化銅層が付加されており、コイルの安定性を保っている。しかし①低磁場低温接続アシスト環境技術 で述べた接続アシスト環境技術の適用においては、高い熱伝導のために低温接続部側への熱流入が大きくなり、冷凍機の冷凍能力を超え、適切な温度を保てなくなる。そのため、接続部付近は銅を除去する必要がある（銅層の除去による熱侵入量の低減については、①低磁場低温接続アシスト環境技術 の節を参照）。本節での接続抵抗の評価試験は、そのほとんどが、安定化銅層を付ける前の銀保護層が最外層となっている線材を用いている。試験の一部については、実際のマグネット製作現場での施工を想定して、銅安定化層が付いた高温超電導線材に対し、これを除去して銀保護層を露出されてから接続を行い、抵抗評価試験を行った。

評価試験に使用した高温超電導線材は、産業技術総合研究所の内製の線材（人工ピン有りおよび無し）、株式会社フジクラの市販線と、本接続評価用に作製した線材、SuperPower 社の市販線材を用意した。表 2.3.6-2 に示す。

表 2.3.6-2 銀層の上からの接続に使用した高温超電導線材一覧

| | 超電導層 | 基板厚さ | 銀層厚さ | 線幅 | 77K 自己磁界における 臨界電流(線材幅 1cm に 換算) |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| 産総研内製線 (人工ピン有) | EuBCO-BHO | 100 μ m | 10 μ m | 5mm 10mm | 393A |
| 産総研内製線 (人工ピン無) | EuBCO | 100 μ m | 2.5 μ m | 10mm | 272A |
| *フジクラ市販 FYSC-SCH04 | REBCO (Gd 等) | 75 μ m | 2 μ m | 4mm | 505A |
| フジクラ特注 (薄い基板) | 同上 | 50 μ m | 2 μ m | 4mm 12mm | 550A |
| フジクラ特注 (厚い銀層) | 同上 | 50 μ m | 5 μ m | 12mm | 618A (ただし同一ロットの 別試料のデータ) |
| SuperPower 市 販 SF12100-CF | REBCO (Eu, Dy, Gd, Y) | 100 μ m | 2 μ m | 12mm | 260A |

*フジクラ FYSC-SCH04 は銅メッキ線のため、接続前にエッチングにより銅を除去した

接続に使用したはんだは、PbBi に添加剤として主に In を混ぜたものである。代表的な、PbBiIn はんだについて、物理特性測定システムを用いて抵抗温度依存性を測定した結果を図 2.3.6-3 に示す。温度 8K で超電導転移していることがわかる。文献によると、Pb60-Bi40 のはんだは、臨界温度 $T_c = 8.4$ K、上部臨界磁界 $H_{c2} = 1.77$ T である[2]から、これより若干臨界温度が低下している。これは組成のずれと添加剤の影響と考えられる。PbBi 系のはんだは、PnSn に比べて高い上部臨界磁界を持っているため、超電導マグネット用途として広く用いられている。

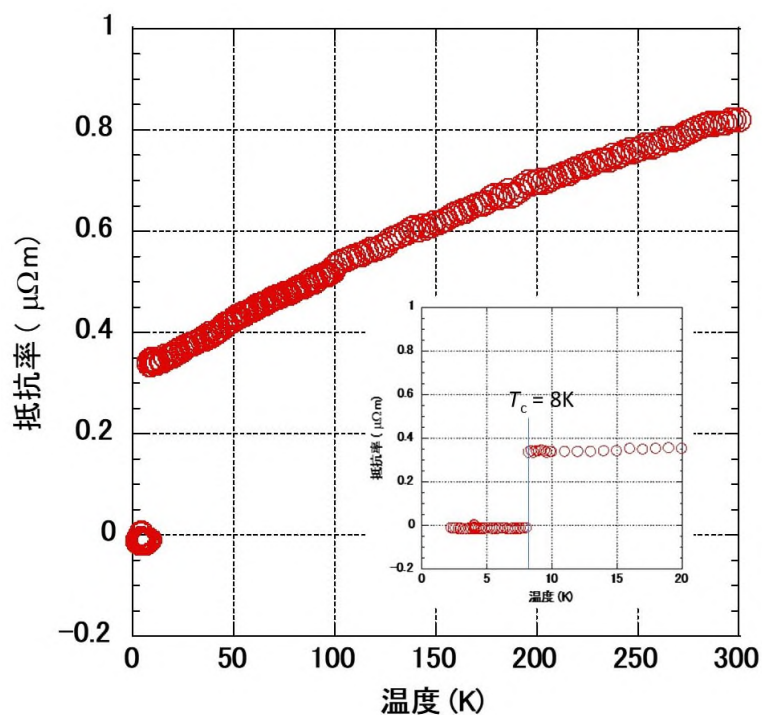


図 2.3.6-3 接続に用いた鉛はんだの抵抗温度依存特性例 (PbBiIn)

接続は、試料線材の両端を鉛はんだではんだあげし、これらを重ね合わせ、専用の治具で加熱して作製した。接続部分の面積（すなわち接続部の線の長さ）に応じて、図 2.3.6-4 に示すような 3 種類の形とした。電流誘起ループ周辺にホール素子を配置し、減衰法で接続抵抗を評価した。その結果を図 2.3.6-5 および表 2.3.6-3 に示す。

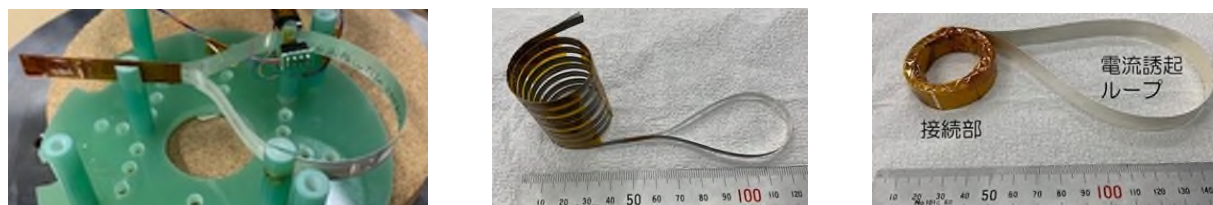


図 2.3.6-4 接続抵抗を測定した試料の例
(左から順に、接続面積が大きくなっている)

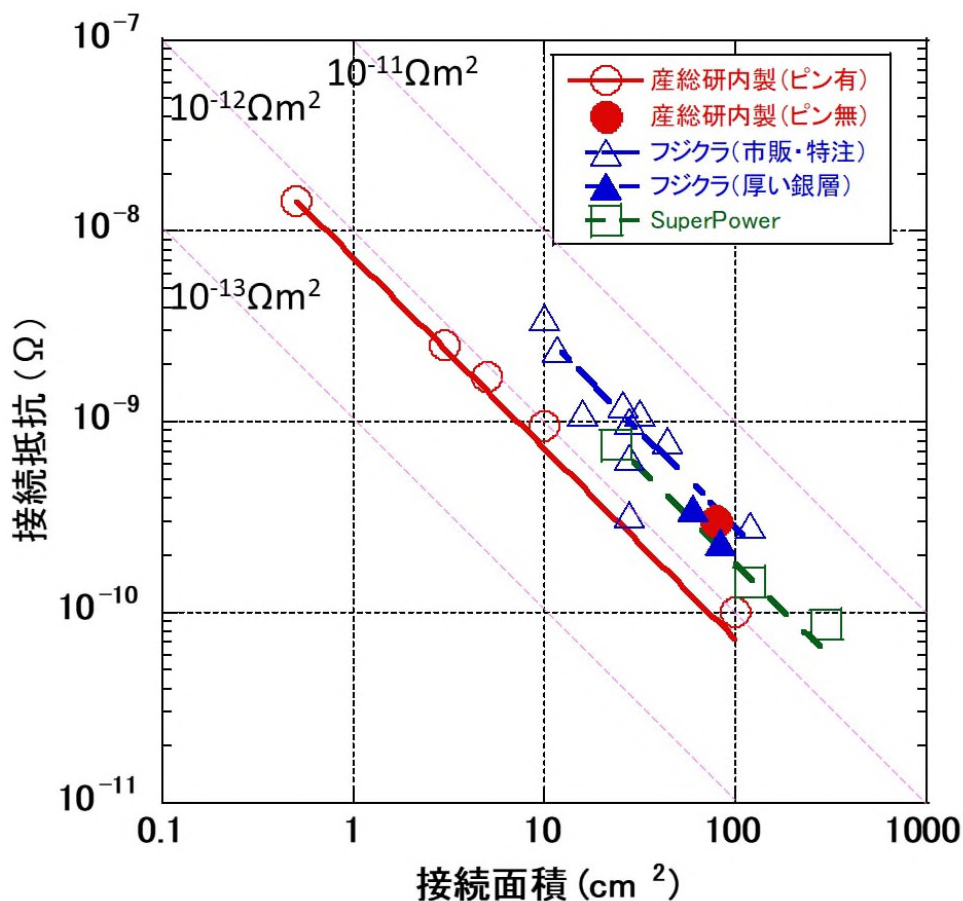


図 2.3.6-5 銀層の上から鉛はんだで接続した場合の接続抵抗

表 2.3.6-3 銀層の上から鉛はんだで接続した場合の接続抵抗 (データ)

| No. | 線材種類 | 線幅(mm) | 接続面積(cm ²) | はんだ材料 |
|------|-------------------------|--------|------------------------|-------|
| L-11 | 産総研内製(人工ピン有) | 5 | 0.5 | PbBi |
| L-12 | 産総研内製(人工ピン有) | 10 | 3 | PbBi |
| L-13 | 産総研内製(人工ピン有) | 10 | 5 | PbBi |
| L-14 | 産総研内製(人工ピン有) | 10 | 10 | PbBi |
| L-15 | 産総研内製(人工ピン有) | 10 | 100 | PbBi |
| L-41 | 産総研内製(人工ピン無) | 10 | 80 | PbBi |
| L-21 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 16 | PbBi |
| L-22 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 32 | PbBi |
| L-23 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 28 | PbBi |
| L-24 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 28 | PbBi |
| L-25 | フジクラ特注(薄い基板) | 12 | 120 | PbBi |
| L-26 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 44 | PbBi |
| L-27 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 26 | PbBi |
| L-28 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 11.6 | PbBi |
| L-29 | フジクラ特注(薄い基板) | 4 | 28 | PbBi |
| L-2a | フジクラ市販 FYSC-SCH04 | 4 | 10 | PbBi |
| L-2b | フジクラ市販 FYSC-SCH04 | 4 | 44 | PbBi |
| L-2c | フジクラ市販 旧型線材 | 5 | 50 | PbSn |
| L-2d | フジクラ特注(厚い銀層) | 12 | 60 | PbBi |
| L-2e | フジクラ特注(厚い銀層) | 12 | 84 | PbBi |
| L-31 | SuperPower市販 SF12100-CF | 12 | 24 | PbBi |
| L-32 | SuperPower市販 SF12100-CF | 12 | 120 | PbBi |
| L-33 | SuperPower市販 SF12100-CF | 12 | 300 | PbBi |

測定された接続抵抗は、接続部の面積に対して反比例しており、長尺に渡って均一に接続ができていることが明らかである。表 2.3.6-3 中では接続面積は最大で 300cm²であったが（後述の Ag 混入線材では最大 432cm²で試験を行っている）、図 2.3.6-4 の右図のような形状であれば、さらなる大面積化も容易である。

接続抵抗と接続面積の積は、シート抵抗と呼ばれ、上記の比例定数にあたる（図 2.3.6-5 中のピンク破線はオーダーを示す）。評価に十分な測定データが揃っている線材種の試料について、シート抵抗（比例定数）を求めた結果を、表 2.3.6-4 に示す。線材種により若干の差異はあるものの、基板や銀保護層の厚さ、接続部の形状、概ね 10⁻¹²Ωm²程度のシート抵抗であることがわかる。長尺均一の接続ができれば、シート抵抗を接続面積で割ることにより、ある長さに渡って接続部を形成したときの接続抵抗を求めることが出来る。銀保護層の上からはんだ接続した場合、10⁻¹²Ω の接続抵抗を得るためには、1m²の接続部を形成すればよい。

表 2.3.6-4 銀層の上から鉛はんだで接続した場合のシート抵抗

| 線材種 | シート抵抗 |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 産総研内製線（人工ピン有） | 0.7×10 ⁻¹² Ωm ² |
| フジクラ特注（薄い基板） | 2.8×10 ⁻¹² Ωm ² |
| SuperPower 市販 SF12100-CF | 1.8×10 ⁻¹² Ωm ² |

ここで、接続抵抗評価において外部電磁石により誘導されるループ試料の電流について考察する。誘導されたループ電流の検知には、試料線材のテープ面直近両側に置かれたホール素子を用いた。未校正の汎用品で、極低温での動作が保証された素子ではないが、液体ヘリウム中で磁場と出力電圧については線形性が保たれている（典型的なデータを図 2.3.6-6 に示す）。また、直径 55mm のループ試料線材に電流 44A が流れたときの周囲の磁束密度を数値解析し、実際のホール素子の位置との関係を求めたものが図 2.3.6-7 である。

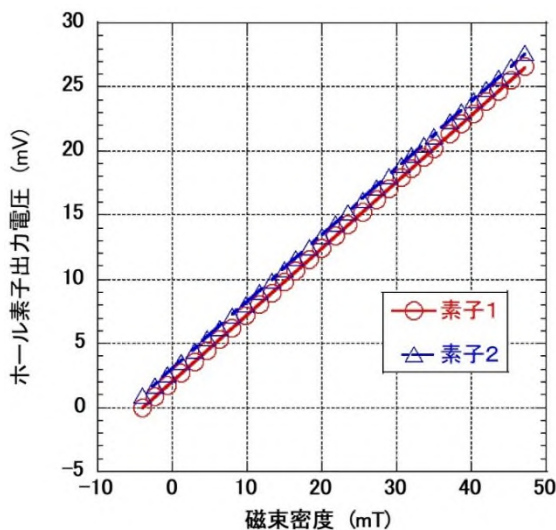


図 2.3.6-6 液体ヘリウム中でのホール素子（誘導電流検知用）の校正データ例

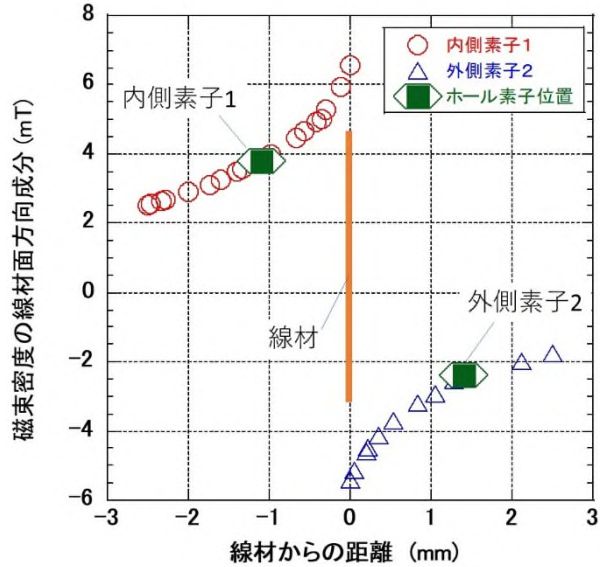


図 2.3.6-7 ループ試料 ($\Phi 55\text{mm}$) に電流 44A が流れたときの線材周辺の磁束密度 (線材テープ面方向成分) とホール素子の位置

実際に液体ヘリウム中で超電導線材に電流を流し、ホール素子の出力を得る校正実験は行えなかったため、減衰法による試験データ (表 2.3.6-3 の No. L-26) と比較する。図 2.3.6-8 はゼロフィールドで液体ヘリウム温度に冷却した L-26 試料に対し、 $t = 0$ で外部電磁石に約 1A 通電し、 $t \sim 700$ 秒に外部電磁石の通電電源を遮断したときの、ホール素子による磁場測定結果である。ゼロフィールドから外部電磁石に通電を行うと、ループに鎖交する磁界を遮蔽する向きに誘導電流が流れ、それが減衰していく様子が、線材の両側に置かれたホール素子 (図 2.3.6-7 中の内側素子 1 および外側素子 2) により観測できる。 $t \sim 700$ 秒で電源を遮断したときも同様に、ループ内に鎖交した磁束が減じるのを妨げる向きに、ループ試料の線材に誘導電流が流れ、それは時間と共に減衰する。この減衰時定数とループのインダクタンスから接続抵抗を評価することができることは、これまでに述べた。図 2.3.6-8 中の六角形のマークは、図 2.3.6-7 に示した、線材に 44A の電流が流れたときの、内側素子 1 および外側素子 2 が検出する磁束密度を示しており、実測値とよく一致している。これにより、この評価試験においては、ループ試料に対して最大おおよそ 44A の電流が誘導されたと考えられる。

外部電磁石の通電電流を変えると、誘導される電流も変化する。外部電磁石の通電電流と、それによりループ試料に誘導される電流および、その時の接続抵抗の測定結果 (L-29) を示したものが図 2.3.6-9 である。外部電磁石の通電電流が 10A になると、ループ試料に誘導される電流は 400A に達する。しかし液体ヘリウム中での試料線材の臨界電流はこれを上回っており、測定される接続抵抗も、外部電磁石の通電電流 (ループ試料に誘導される電流に対応) に対して変わらず一定値であった。

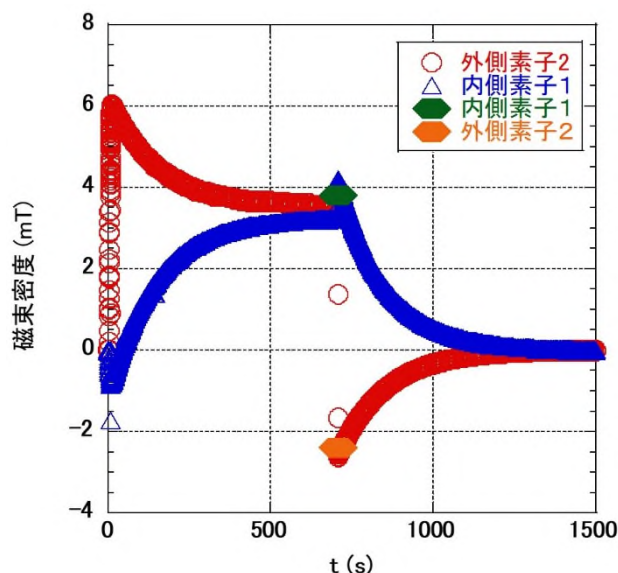


図 2.3.6-8 減衰法による接続抵抗の評価試験データ (L-26) と、数値解析により求めたホール素子位置での磁束密度 (44A 通電相当 六角形のマーク)

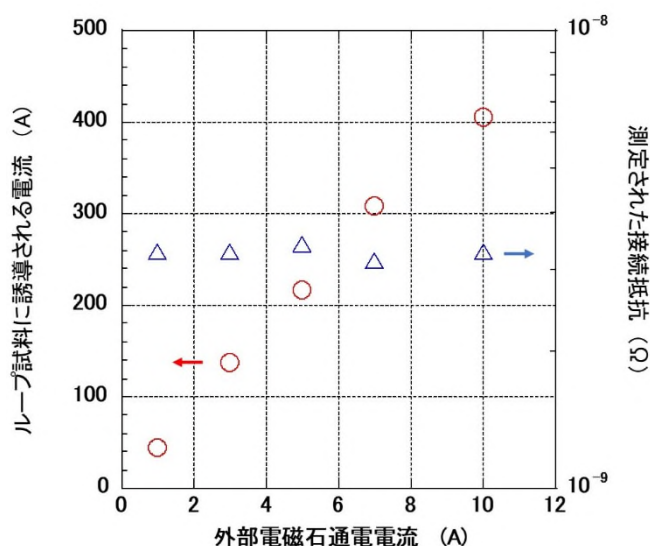


図 2.3.6-9 外部電磁石の通電電流とループ試料に誘導される電流の関係と、そのときに測定された接続抵抗 (試料 No. L-29)

銀層の上からはんだで接続した試料の一部 (ここでは L-33) について、図 2.3.6-10 に示すようにループ部を切り開き、液体ヘリウム中で接続部に直流電流を通電し、電流電圧特性を評価した。図 2.3.6-11 に示す。電源回路の制限から 300A の通電が上限であったが、その範囲では電流電圧特性は線形であった。はんだ接続部の臨界電流値が大きく劣化していることはなく、本節の接続方法により銀層の上から鉛はんだで接続した場合でも、高温超電導線材への大幅なダメージはないと考えられる。また電流電圧特性の傾きからはんだ接続部の抵抗を求めると、 $2 \times 10^{-10} \Omega$ であった。減衰法による評価結果は

$8.6 \times 10^{-11} \Omega$ であったから、2倍程度の差がある。これは、微小電圧の測定の困難に伴うもの、また、電流端子から流入する熱の影響などの原因が考えられ、通電法では高精度な接続抵抗の評価は不可能であることは明らかである。

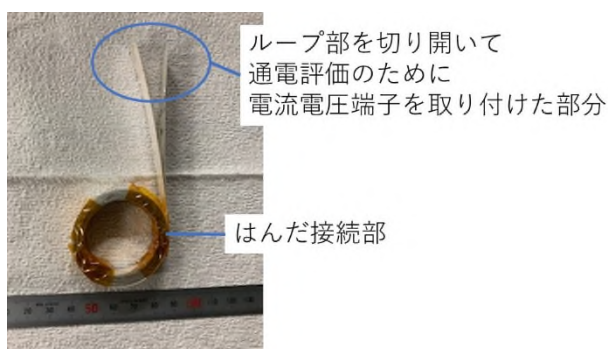


図 2.3.6-10 銀層の上からはんだ接続した試料 (L-33) のループ部を切り開いた試料

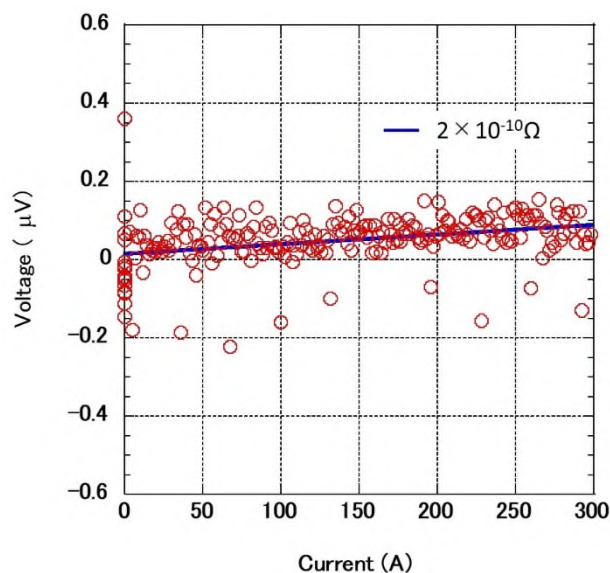


図 2.3.6-11 切り開いて通電により評価した電流電圧特性

3. 接続抵抗の要因分析

前節において、高温超電導線材の銀保護層の上から鉛はんだで接続した試料の接続抵抗の評価を行ったが、これにより液体ヘリウム温度での接続部の抵抗は、概ね $10^{-12} \Omega \text{m}^2$ であることがわかった。1.1 接続部低抵抗化の技術課題節 で述べたとおり、この抵抗は、REBCO層と銀保護層との接触抵抗 $R_{\text{REBCO-Ag}}$ が支配していると考えられる。

フジクラ製線材の断面写真を図 2.3.6-12 に、元素マッピングを図 2.3.6-13 に示す。超電導層と銀層の間に明瞭ではないものの何らかの層をみることができる。

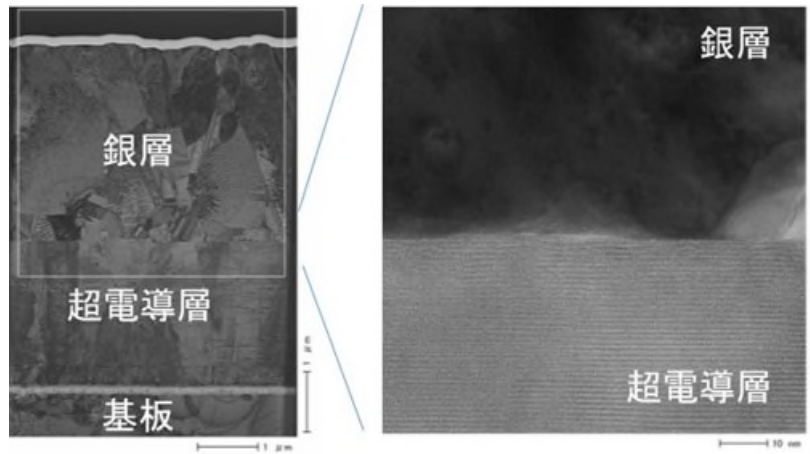


図 2.3.6-12 高温超電導線材断面の TEM 像（フジクラ社製線材）

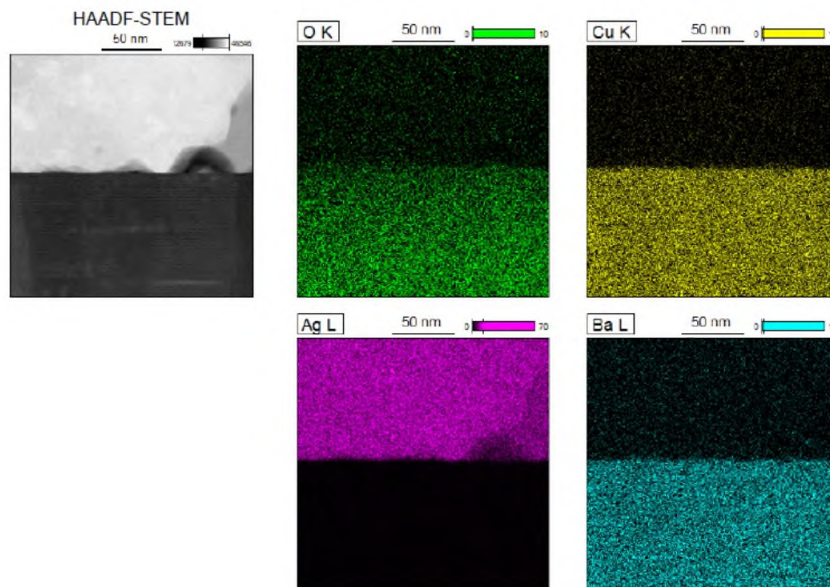


図 2.3.6-13 高温超電導線材断面の元素マッピング（フジクラ社製線材）

また、SuperPower 社製市販線材の二次イオン質量分析法（SIMS）による、銀保護層から REBCO 層までの成分分析結果を図 2.3.6-14 に示す。横軸は銀表面から銀保護層内と REBCO 層に向かっての深さである（銀保護層の厚さは公称で $2\mu\text{m}$ ）。銀層の中程まで酸素が拡散している様子が見られる。

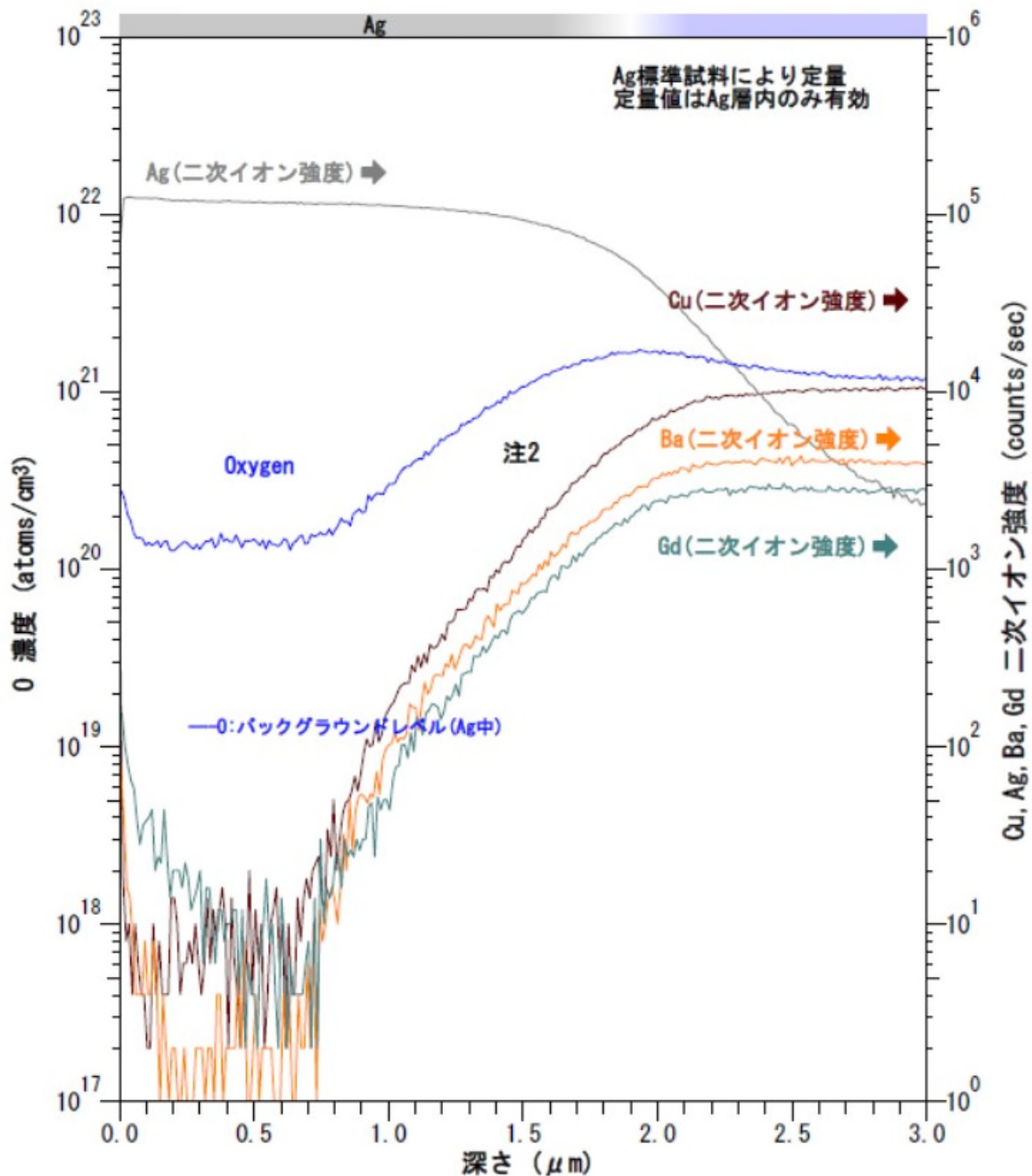


図 2.3.6-14 高温超電導線材の銀保護層から REBCO 層にかけての構成元素の SIMS 分析結果

同時に、実際に銀保護層の上から鉛はんだで接続した試料の断面を観察した（試料番号 L-11）。写真を図 2.3.6-15 に示す。高温超電導線材を押し合わせて接続したもので、上下に高温超電導線材があり、中間に鉛はんだが写っている。下側の線材において、銀保護層と REBCO 層の剥離が見られるが、これは断面観察用の試料加工時に発生したものである。銀保護層と鉛はんだの接触は良好であることがわかる。また鉛はんだ層の厚さは 20 μm 程度であった。

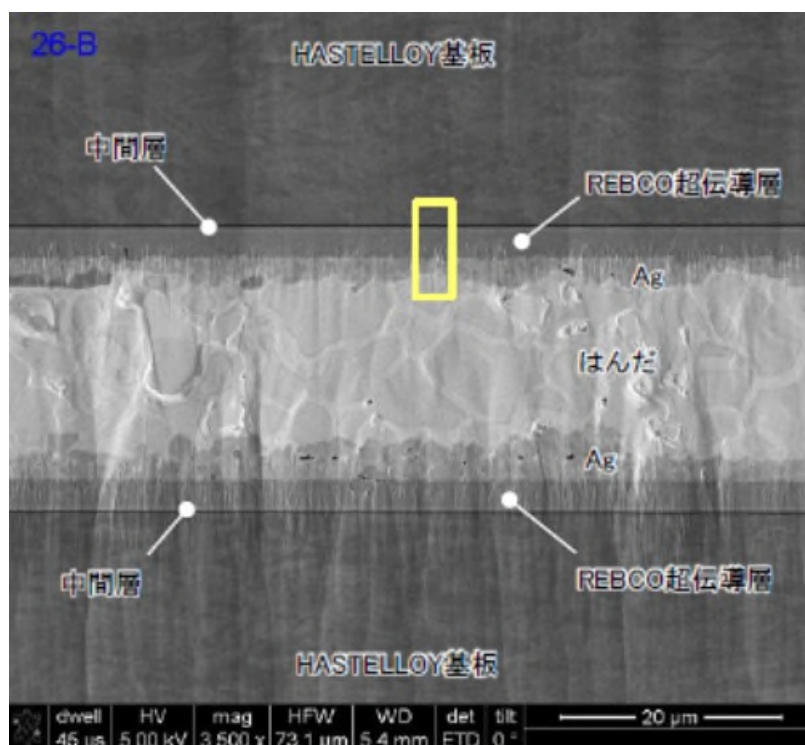


図 2.3.6-15 銀保護層の上から鉛はんだで接続した試料 (L-11) の接続部の断面写真

ここで、表 2.3.6-3 中のいくつかの試料について、液体窒素温度で接続抵抗を評価した。また、フジクラ社製の高温超電導線材の銅安定化層の上から PbSn はんだで接続した試料の接続抵抗も評価した。結果を図 2.3.6-16 に示す。色塗りされたマーカーが液体窒素温度、白抜きが液体ヘリウム温度での接続抵抗値を示しており、▽と▼は PbSn はんだで接続した試料である。

PbBi はんだで接続した試料については、液体窒素温度での接続のシート抵抗は、液体ヘリウム温度での接続抵抗値によらず、どれも $10^{-11} \Omega \text{m}^2$ であった。一方、PbSn はんだで接続した試料は、 $5 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$ と、半分ほどの値を示した。これは、図 2.3.6-3 に示すように液体窒素温度での PbBi はんだの抵抗が大きく、はんだ材料自体の抵抗が、接続抵抗を支配していることを示している。図 2.3.6-3 から読み取る 77K での PbBiIn はんだの抵抗率は $0.5 \mu \Omega \text{m}$ であり、図 2.3.6-15 のようにはんだの厚さが $20 \mu \text{m}$ であれば、接続のシート抵抗は $1 \times 10^{-11} \Omega \text{m}^2$ となり、図 2.3.6-16 の結果をよく説明できる。PbSn は液体窒素温度でも十分抵抗が小さく、はんだ材料の抵抗が接続抵抗の支配要因となることはない。そのため、液体窒素温度での各種高温超電導線材の接続抵抗について、PbSn を使用したもので詳細な定量的評価を実施した報告がある [3]。これによると、線材の種類・製法により傾向がわかれることが明らかになっている。概ね、REBCO 層の製法が PLD による線材の接続抵抗は低く、CVD の場合は高くなる。液体ヘリウム温度での接続抵抗の評価においては、表 2.3.6-1 に示す通り、PbBi も PbSn も超電導転移しており抵抗がゼロとなるため、接続抵抗ははんだ材料によらず、銀保護層と REBCO 層の界面抵抗が表れる。前節で述べたとおり、上部臨界磁界が高い PbBi は液体ヘリウム温度での接続に用いるのが適しており、臨界温度以上の運転温度では PbSn を用いる方がよい。

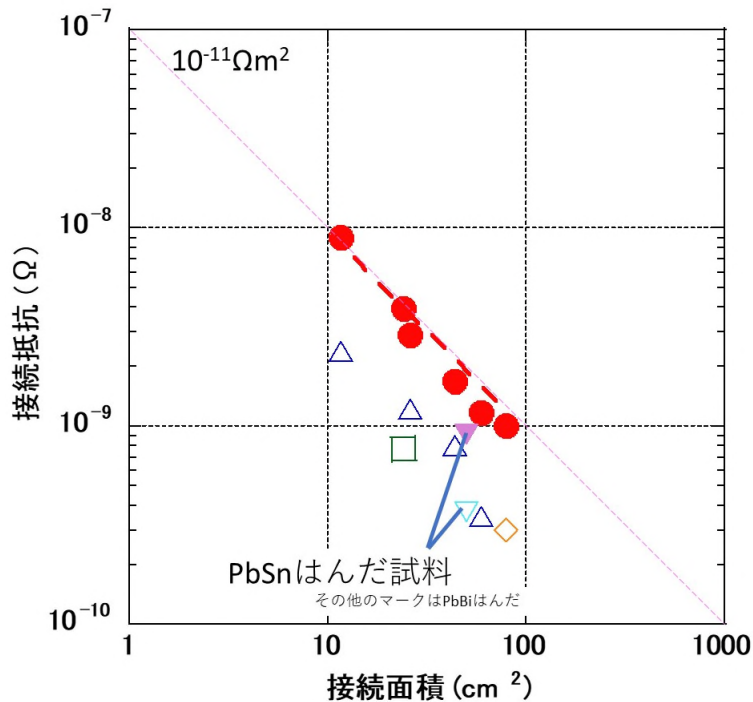


図 2.3.6-16 液体窒素温度での接続抵抗（銀層の上から鉛はんだ接続）の評価結果

次に、銀保護層を取り除き、直接 REBCO 層に異種超電導材料を接触させる接続について考察する。③異種超電導物質薄膜接合技術にて述べた通り、REBCO 層に直接異種超電導材料を接触させた場合、十分な低抵抗の接続は実現できなかった。REBCO 層と鉛はんだが接触する界面近傍の断面写真を図 2.3.6-17 に示す。図中、左上の写真に対し、右上、左下、右下の順で、界面近傍を拡大している。線材は SuperPower 社市販線材で、はんだは PbBi である。写真用の試料であり、ループを形成した接続抵抗の評価試験は行わなかった。右上の写真では、REBCO 層と鉛はんだ層は良好に接触しているように見える。このような良好な接触は、濡れ性をよくするために加えた添加剤の効果によるものである。何も添加剤を加えていない鉛はんだの場合、はんだが REBCO 層の上ではじかれて玉になり、接続を形成しても、手で容易に剥離させることができってしまう。接続部の剥離方向の機械的強度は定量的に評価できなかったが、添加剤を加えた場合は、手で剥離させようとすると、REBCO 層と中間層の間で剥離した。

一見良好な接続ができているように見えるが、図 2.3.6-17 中の下段の写真のように、REBCO 層とはんだ層の間に何らかの異質な層が見える。この部分の元素分析 (EDX 点分析) を行った結果を図 2.3.6-18 に示す。異質な層は、REBCO 層に対して鉛はんだが浸食してできており、主に添加剤が凝縮していることが伺える。この 1nm 程度の変質層が、REBCO 層から鉛はんだ層に超電導電流が流れるのを妨げていると考えられる。

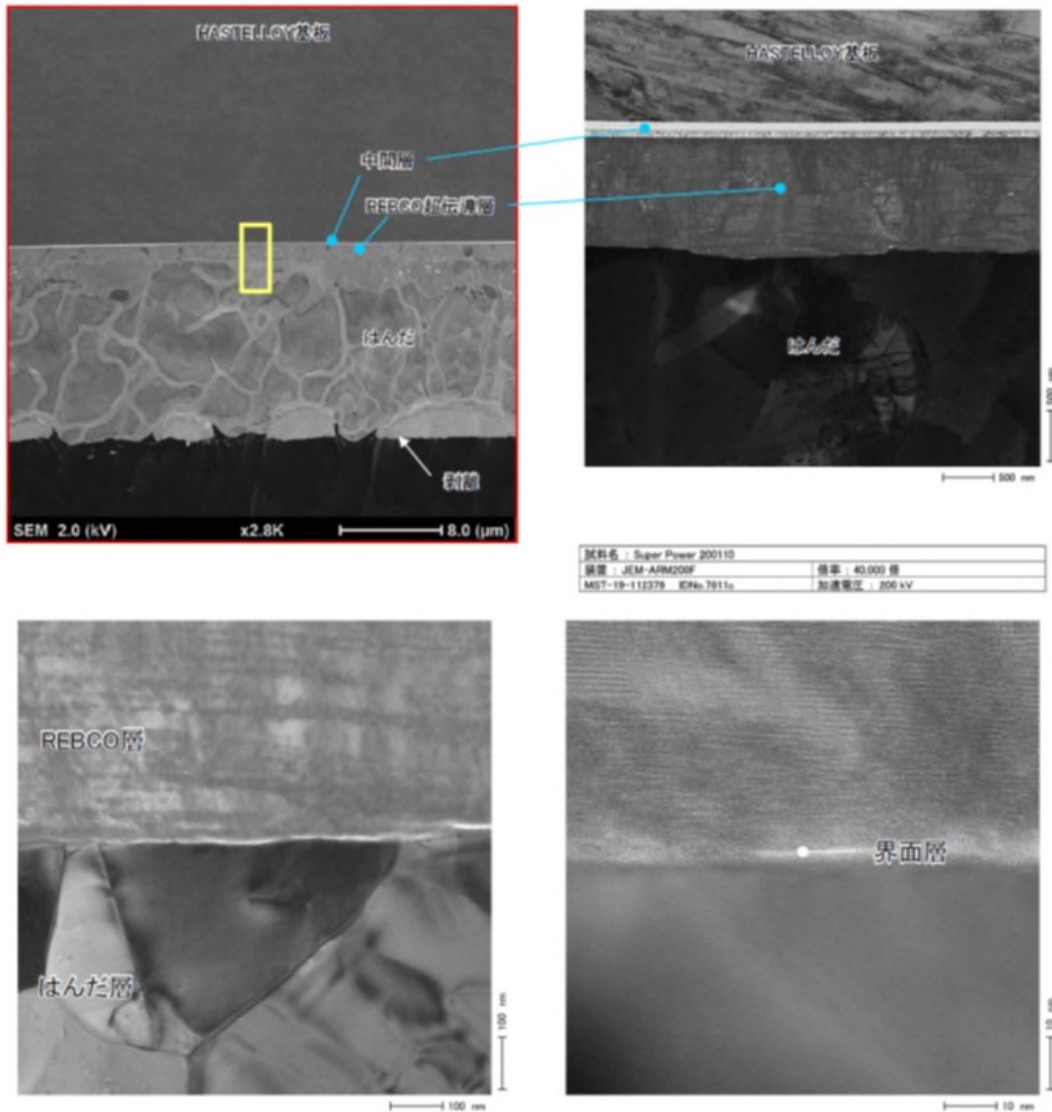


図 2.3.6-17 REBCO 層の上に直接鉛はんだをのせた試料の断面写真

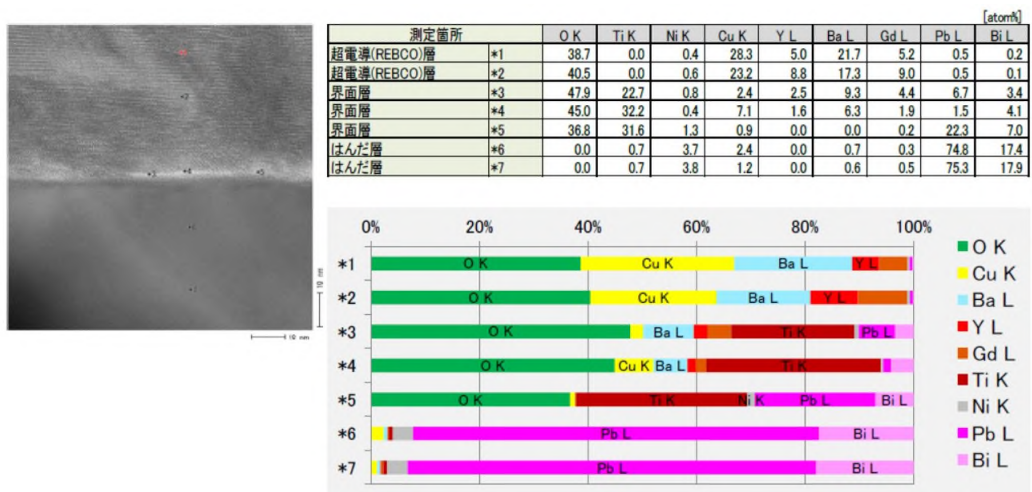


図 2.3.6-18 REBCO 層の上に直接鉛はんだをのせた試料の界面近傍の元素分析

REBCO 層と鉛はんだの接触については、東海大学の黒らが詳しい観察を行っており [4]、『PbBi と REBCO 界面において、Pb および Bi が REBCO 側へ、Ba が PbBi 側へ拡散している様子が見られた。さらにこの反応が室温で進行することがわかった』と報告している。

これらのことから、REBCO 層と異種超電導材料が接触することにより、REBCO 層最表面が変質し、それにより低抵抗の接続ができないことが明確に示された。

文献

- [1] (社) 低温工学協会関西支部低温データ調査研究会、「低温工学データ集」、1997
- [2] G. D. Brittles et al., “Persistent current joints between technological superconductors,” Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 093001
- [3] N. Bagrets et al., “Correlation Between Resistances of Face-to-Face Soldered Joints and Interface Resistance Between Layers in Superconducting Tapes,” IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 28, No. 4 (2018) 6600204
- [4] 武輪裕之、黒英俊他、「PbBi を用いた REBCO 線材の超伝導接続とその問題点」 Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 100 (2020) p.160

4. 超電導層表面最適化技術

前節の通り、REBCO 層表面には何らかの高抵抗層が存在しており、銀保護層の上から鉛はんだで接続を行った場合、 $10^{-12} \Omega \text{m}^2$ オーダーの抵抗が残ることがわかった。REBCO 高温超電導線材の製造においては、REBCO 層の形成後に銀等の金属材を蒸着して保護安定化層とする工程が一般的であるが、開発黎明期においてはこの金属保護層と REBCO 層間における接触抵抗が大きいことが課題となっていた。金属材蒸着後に酸素雰囲気中で適切な熱処理を行うことにより、4K での接触抵抗が $10^{-11} \Omega \text{m}^2$ 程度に低下することが早期に見出され [1]、保護層の機能としては充分となったが、保護金属層を介したはんだ接合形成に伴う接続抵抗としてはその後も無視できない値として残った。

そこで、この REBCO 層と銀保護層の間の抵抗を低減することを目指し、図 2.3.6-19 に示すような、銀保護層蒸着前の REBCO 層の表層に設置する、2 種のバッファ層を検討した。即ち、(a) 通常 c 軸垂直に配向した REBCO 層中に、c 軸が大きく傾いた a 軸配向粒及びランダム粒を成長させ、ab 平面のエッジ部が銀保護層と接触する構造としたバッファ層と、(b) REBCO 層中に金属 Ag 粒を分散させ、これを銀保護層と金属的に接触させて REBCO 超電導体と銀保護層間の接触面積を実質的に大きくする構造としたバッファ層、の 2 つである。

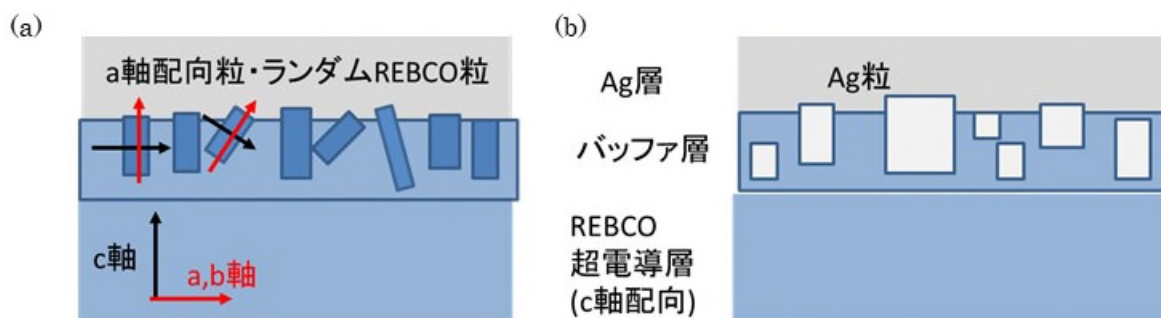


図 2.3.6-19 REBCO 層 - 銀保護層間に挿入を検討するバッファ層
 (a) a 軸配向粒混入バッファ層 (b) 金属 Ag 粒混入バッファ層

a) 超電導結晶配向制御による表面バッファ層の検討

前節の通り、REBCO 層と銀保護層の界面には、何等かの薄い常電導層又は絶縁層が生じていると考えられる。この超電導結晶配向制御のバッファ層については、REBCO 系材料の電気的異方性が極めて大きく、常電導導電率及びコヒーレンス長が c 軸平行方向に比べ a 軸に平行な方向に於いて遥かに大きくなることから[2]、a 軸配向粒の表層面上において銀保護層との接触抵抗が低減することを期待するものである。今回は下地超電導層との積層体を形成する前に、これらのバッファ層を直接配向中間層上に形成して、積層した銀保護層との界面抵抗を含む線材接続部の抵抗率の評価を中心に実施した。

試料線材として、厚さ 50~75 μm 、幅 12mm のハステロイ基板を用いて、IBAD 法配向中間層を介して PLD 法により REBCO 超電導薄膜を形成した。

図 2.3.6-20 に、REBCO 薄膜の X 線回折チャート例及び一部の拡大図を示す。通常 (a) のように REBCO 膜の c 軸が垂直に配向した結晶粒を示す (00n) ピークが明瞭に見られるが、(006) ピークのサテライト位置に a 軸が垂直に配向したことを示す (200) ピークが観測されるため、(b) に示すようにこの 2 つのピーク高さの比をとることによって、概ねどの程度の a 軸配向粒が混入しているかを判定できる。REBCO 超電導薄膜の上に、スパッタリング法により金属 Ag 保護層を 2 μm 形成し、酸素導入熱処理を実施した。

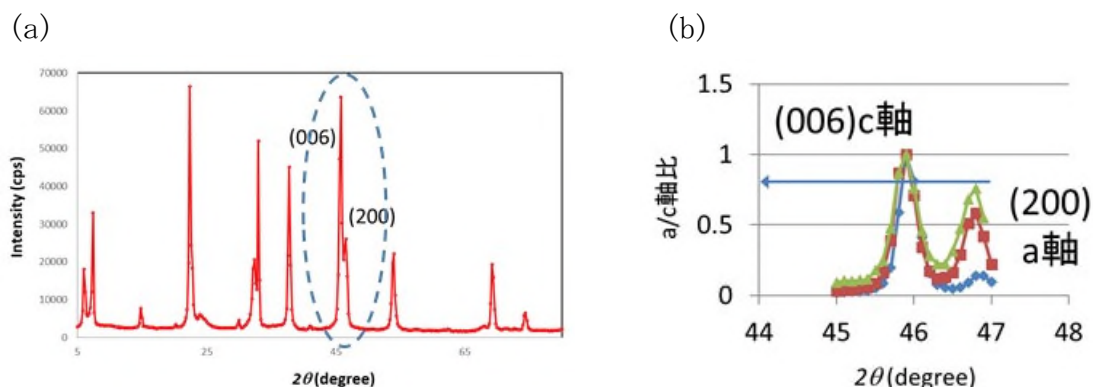


図 2.3.6-20 REBCO 超電導膜の X 線回折測定例 (a) と a 軸/c 軸ピーク比 (b)

REBCO 超電導膜は種々の成膜条件を変化させることにより、この a 軸配向結晶粒の混入量を制御することができる。ほぼ全量が c 軸配向したサンプルから、a 軸配向粒が支

配比的になっているサンプルまで作り分け、図 2.3.6-20 で示した a 軸 / c 軸ピーク高さ比をもとに、“a 軸配向粒率” を、(a 軸ピーク高さ) / (c 軸ピーク高さ + a 軸ピーク高さ) にて定義し、各サンプルについて作成したブリッジ接続を用いて、接続部の面抵抗率を、直流四端子法により液体窒素中で測定した結果を図 2.3.6-21 に示す。図中上部に示す通り、Ag 保護層を設けた 20mm 長の 12 mm 幅短尺超電導線材をブリッジ部とし、端部を突き合せた Ag 保護層付き線材に挿み合わせに被せるようにはんだにて接続している。

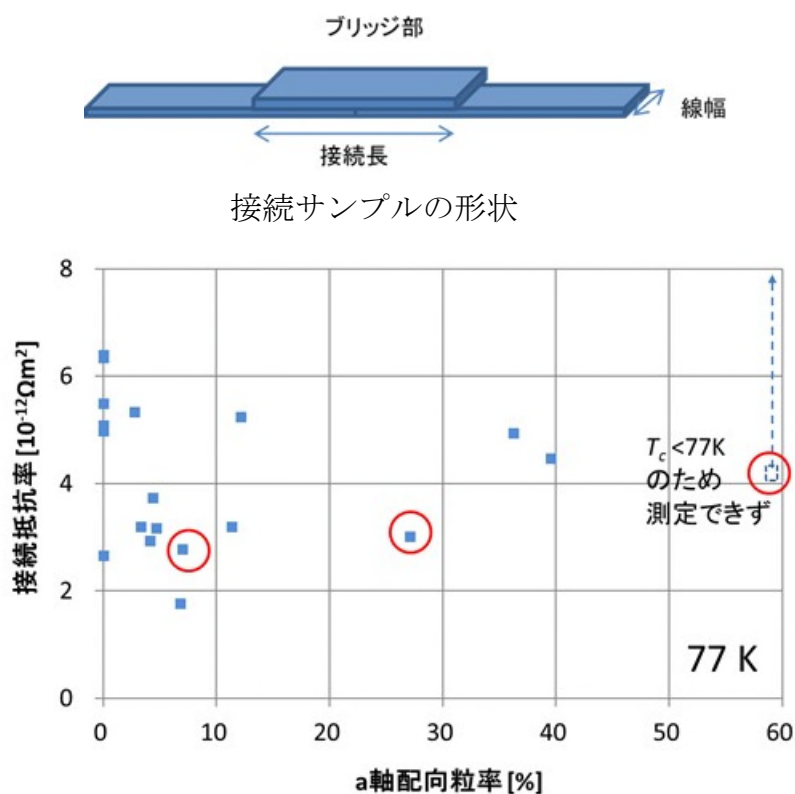


図 2.3.6-21 REBCO 超電導膜の a 軸配向粒率と接続抵抗率

ここに示すように、液体窒素温度にて測定した自己磁界中の接続抵抗率は $2 \sim 6 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$ の範囲で分散しており、a 軸配向粒率との相関はほぼ見られなかった。a 軸配向粒率 59% に達したサンプルについては、臨界温度が液体窒素温度以下となり、超電導膜としての接続抵抗率が測定できなかった。液体窒素温度に於いてははんだを構成する Pb 等の金属の抵抗が無視出来ないため、これを排除することも兼ねて図 2.3.6-21 で赤丸をつけた 3 つのサンプルについて液体ヘリウム温度における抵抗測定を実施したが、いずれも液体窒素温度での評価結果と変わらない $6 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$ 程度で、有意差は確認出来なかった。

b) Ag-超電導複合膜による表面バッファ層の検討

試料線材として、厚さ $50 \sim 75 \mu \text{m}$ 、幅 12mm のハステロイ基板を用いて、IBAD 法配向中間層を介して PLD 法により REBCO 超電導薄膜を形成した。1 つは通常のターゲット組成、もう 1 つはそれに金属 Ag を混合したものとし、同一の条件でそれぞれ成膜した。超電導

層の上に、スパッタリング法により Ag 保護層を $2.0\ \mu\text{m}$ 形成し、酸素導入熱処理を実施した。

図 2.3.6-21 と同様に、20mm のブリッジ式の接続サンプルを作製し、液体窒素中で直流 4 端子法により接続抵抗率を測定した結果を、図 2.3.6-22 に示す。Ag の混入によって通常よりも概ね 1/2 程度抵抗率が低減することが確認された。

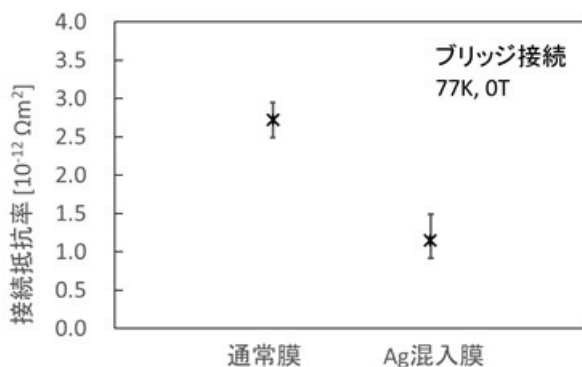


図 2.3.6-22 Ag 混入 REBCO 超電導膜の接続抵抗率 (液体窒素温度)

更に低い抵抗率が得られた線材サンプルについて、PbBiIn はんだを用いて挿み接続試料を作製し、液体ヘリウム温度における接続抵抗率を減衰法で測定した結果を、図 2.3.6-23 および表 2.3.6-5 に示す。図中には図 2.3.6-5 に示した他の線材の抵抗評価結果も示している。また、表 2.3.6-6 に接続シート抵抗を示す。通常の市販 REBCO 線材に比べ、1 桁低い接続抵抗率が得られ、有意な差が認められた。接続面積 432cm^2 では、接続抵抗は $6.3 \times 10^{-12}\ \Omega$ となり、接続箇所あたり $10^{-12}\ \Omega$ オーダーの接続を実現することができた。

表 2.3.6-5 Ag 混入線材の接続抵抗 (データ)

| No. | 線材種類 | 線幅(mm) | 接続面積(cm^2) | はんだ材料 |
|------|--------|--------|-----------------------|-------|
| L-F1 | フジクラ新線 | 12 | 100.8 | PbBi |
| L-F2 | フジクラ新線 | 12 | 57.6 | PbBi |
| L-F3 | フジクラ新線 | 12 | 32.4 | PbBi |
| L-F4 | フジクラ新線 | 12 | 432 | PbBi |

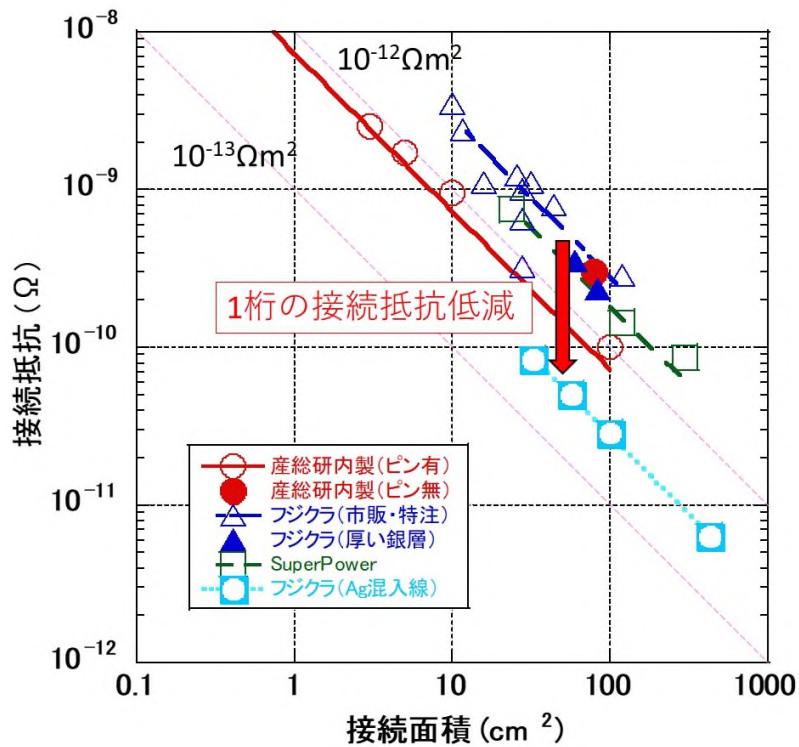


図 2. 3. 6-23 Ag 混入線材の接続抵抗

表 2. 3. 6-6 Ag 混入線材の接続シート抵抗

| 線材種 | シート抵抗 |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| フジクラ新線 (Ag 混入線) | $2.8 \times 10^{-13} \Omega m^2$ |
| Cf. フジクラ特注 (薄い基板 : ハステロイ $50 \mu m$) | $2.8 \times 10^{-12} \Omega m^2$ |

更に線材の機械強度評価のためピンプル法により垂直剥離応力試験を実施した。図 2. 3. 6-24 にその結果を示す。金属 Ag の分散並びに結晶配向性の乱れにも拘わらず、50MPa 程度の平均強度を持ち、通常の REBCO 膜と大きな差異は見られなかった。

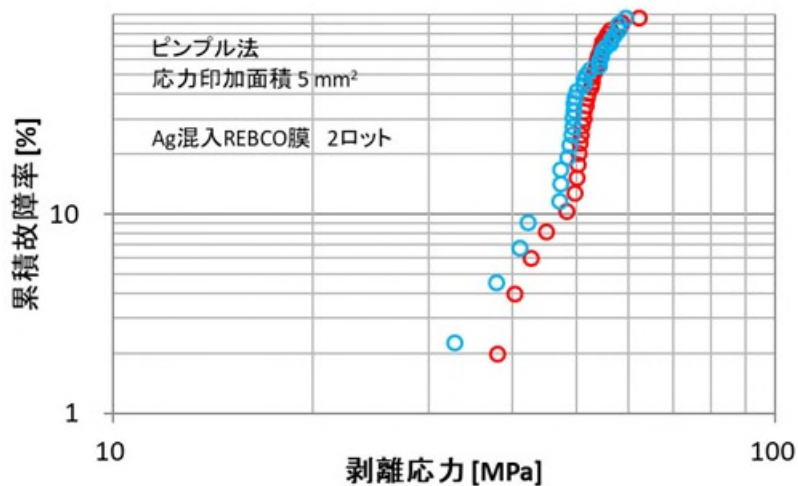


図 2.3.6-24 Ag 混入 REBCO 超電導膜の垂直剥離応力試験結果

以上のように、銀保護層を介した簡単な鉛はんだ接合での一層の低抵抗化を実現するため、成膜条件変更による a 軸垂直配向粒を含む REBCO 膜と、REBCO 膜中に金属 Ag を混入させた構造、の 2 種を用いて REBCO-Ag 界面の抵抗率の改善を試みた。その結果、成膜条件変更による a 軸垂直配向粒を含む REBCO 膜については、接続抵抗率の改善は確認できなかった。一方、REBCO 膜中に金属 Ag を混入させた構造にてについては、液体ヘリウム温度において顕著な接続抵抗率の改善を確認した。REBCO 膜中の金属 Ag 粒によって、REBCO-Ag の接触面積が大きくなっていると共に、Ag 添加に伴って REBCO 膜が全体に a 軸が垂直に配向し、表面平滑性が悪くなる傾向が見られる。しかしながら、測定された接続抵抗率は、Ag を多量に添加したバルク体で見られる抵抗率から推定される値に近く、Ag との接触面積の増加が接続抵抗の低減につながった、という説明が可能と考えられる [4]。他方、a 軸垂直配向粒も大きいことから、配向性の影響も現時点では否定しきれない。

文献

- [1] J. W. Ekin et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 5(2), 2400 (1995).
- [2] S. W. Tozer et al., Phys. Rev. Lett. 59, 1768 (1987).
- [3] W. Z. Zhou et al., Supercond. Sci. Technol. 12, 388 (1999).
- [4] V. M. Svistunov et al., Physica C 303, 177 (1998).

5. 接続部の耐久評価

図 2.3.6-4 に示すように、コイル間の接続用に REBCO 高温超電導線材を長尺に渡って接続する場合は、低磁場・低温域に引き出した銀保護層付き線材を拝み合わせにして鉛はんだで接続するため、コイル状に巻線した状態となる。この接続部の機会強度を評価するため、常温と液体窒素温度間でヒートサイクル試験を実施した。

表 2.3.6-2 中のフジクラ特注に相当する幅 4mm の線材を、約 30cm 程度の接続した試料を作製し、測定治具に固定したのが図 2.3.6-25 である。

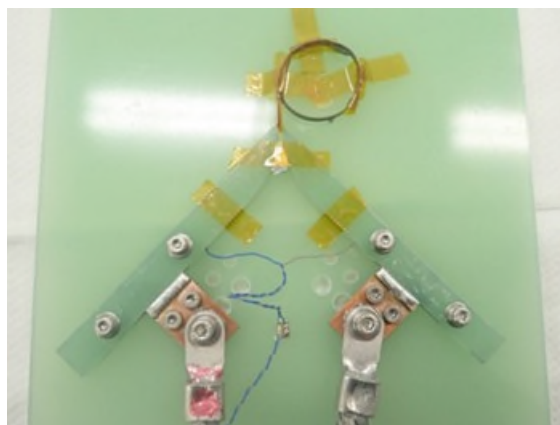


図 2.3.6-25 ヒートサイクル試験治具に固定した接続試料

これを液体窒素中に浸漬して臨界電流値及び接続抵抗値を測定し、取り出してヒートガンで加熱した後、数時間にわたって送風乾燥を行って常温に戻した。これを 30 サイクルまで繰り返し試験した。臨界電流値、 n 値、接続抵抗値は、図 2.3.6-26 に示すように I-V カーブの直線近似から接続抵抗分を引き去った後、 n 値モデルでフィッティングすることにより求めた。気圧により液体窒素温度が変化するため、都度測定室の気圧を測定した。

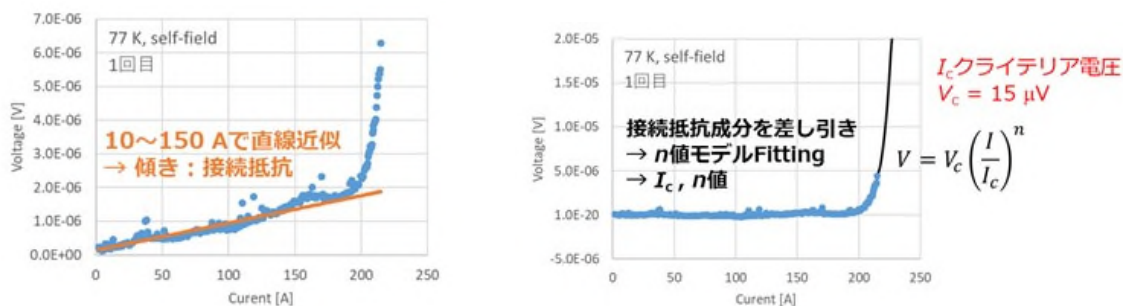
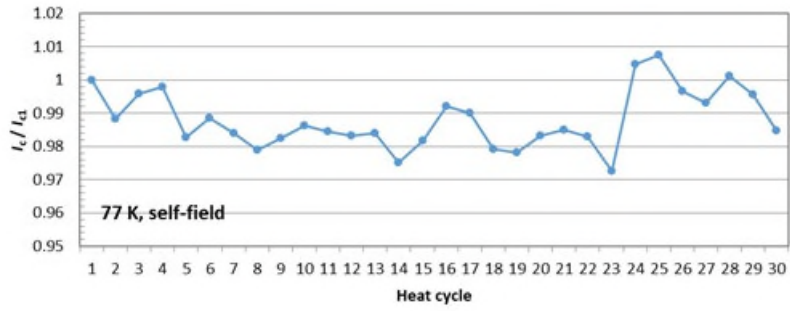
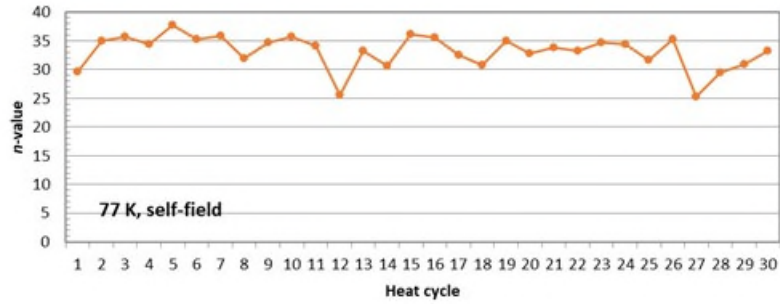


図 2.3.6-26 臨界電流値、 n 値、接続抵抗の評価方法

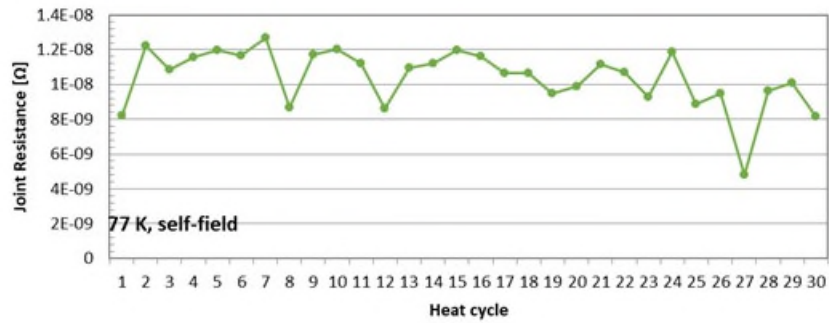
図 2.3.6-27 に、ヒートサイクル試験結果を示す。各測定値にはそれぞれ測定バラツキが見られるが、 I_c 値、 n 値の大きな低下を示す兆候は見られない。 I_c 値に見られる ±2% 程度のバラツキについて、23 回目以降でふるまいが変化しているように見られるが、液体窒素浸漬測定に於いては窒素の温度が気圧によって変化するので、その影響を受けた可能性がある。図 2.3.6-28 に、液体窒素浸漬測定時の気圧と I_c 実測値の相関を示す。これらを総合し、室温と液体窒素温度間の 30 回のヒートサイクルによる特性変化は認められないと言える。



(a) 初回の測定値で規格化した I_c 値



(b) n 値



(c) 接続抵抗値

図 2.3.6-27 ヒートサイクル試験結果

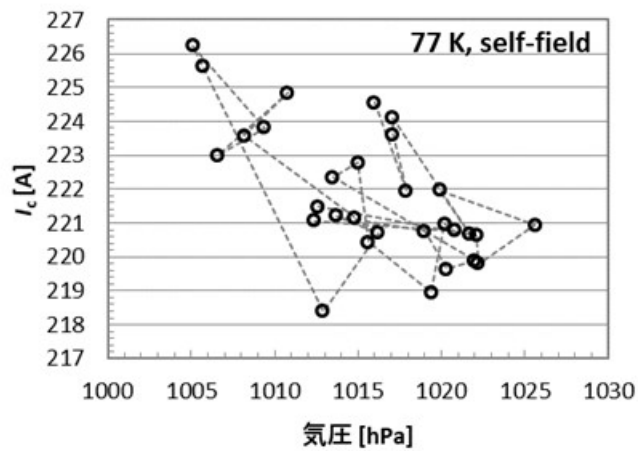


図 2.3.6-28 ヒートサイクル試験の I_c 測定時の気圧と I_c 実測値

6. 接続部を有するループによる永久電流の実証

以上のように開発した REBCO 高温超電導線材の接続技術を用いて接続部を有するループ試料を作製し、実際のマグネットシステムを想定して接続アシスト環境技術を適用し、ループ部の温度を 30K、接続部の温度を 4.2K としてループに誘導電流を流すことにより、永久電流の実証を行った。

ループ試料に使用した線材は、フジクラ社製 FYSC-SCH04 の銅メッキが施された線材で、両端部それぞれ 70cm にわたり銅をエッチングにより除去し、49cm ずつを組み合わせ、PbBi はんだで接続を形成した。

図 2.3.6-29 は、ループ試料を、図 2.3.1-4 の低磁場低温接続アシスト環境疑似モデルに取り付けたときの写真である。左側が 30K のステージで、右側が接続部を冷却する 4.2K のステージである。ループの中に設置した銅コイルにより、ループに誘導電流を流し、ループ試料の線の側に設置したホール素子により、その誘導電流の減衰を測定した。結果を図 2.3.6-30 に示す。接続部の抵抗は $2.0 \times 10^{-9} \Omega$ で、シート抵抗としては $4 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$ と、ほぼ表 2.3.6-4 の結果と同じであった。以上より、ループ部と接続部を別に温度コントロールすることにより、接続部を鉛はんだで形成して十分な低抵抗を得ることができ、長時定数のループ電流を維持できることが示された。

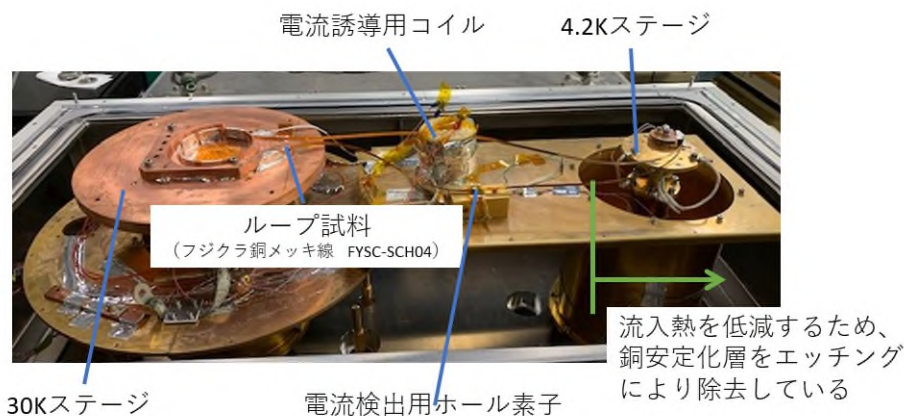


図 2.3.6-29 永久電流実証用ループ試料を取り付けた接続アシスト環境疑似モデル

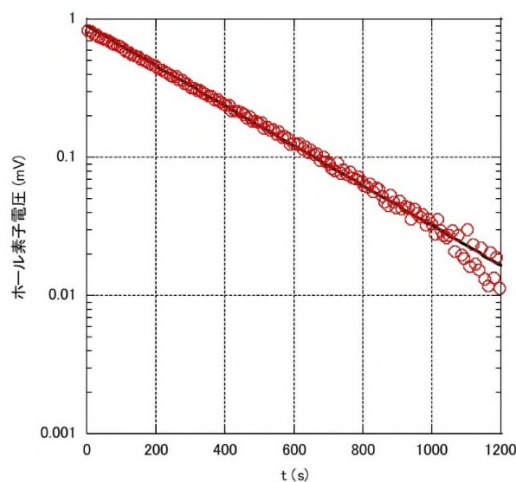


図 2.3.7-30 接続アシスト環境技術による永久電流実証の試験結果

7. 高温超電導線と低温超電導線の接続技術

MRI 等で用いられている永久電流モードの超電導コイルは、励磁時に電源に接続し、定格の電流が流れた段階で永久電流スイッチをオンすることで、電源からの電流供給を停止して解列することができる。超電導コイルと同様の高温超電導線を用いた永久電流スイッチの場合は、コイルとスイッチの接続は、高温超電導線同士の接続となる。低温低磁場接続アシスト環境技術を適用すれば、接続に低温超電導材料を利用できるようになると同時に、永久電流スイッチにも低温超電導線材を用いることができる。そのため必要となる技術として、高温超電導線と低温超電導線の接続について検討を行った。

REBCO 高温超電導線材は図 2. 3. 7-31 に示すような薄膜構造であり、低温超電導線は図 2. 3. 7-32 のように銅や銅合金などの安定化材中に NbTi や Nb₃Sn のような合金または化合物の超電導フィラメントが埋め込まれた構造となっている。まず、高温超電導線と、低温超電導線の低抵抗接続を実現しようとした場合、それぞれの超電導体を露出してそれらを直接接続する超電導接続方法を検討した。

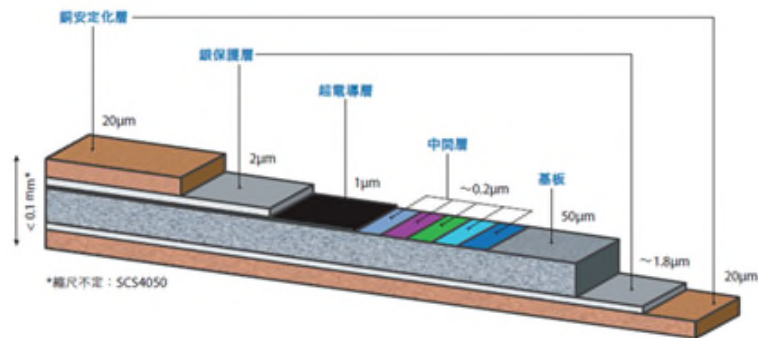


図 2. 3. 6-31 REBCO 高温超電導線材の構造例 (SuperPower 社製 SCS4050)

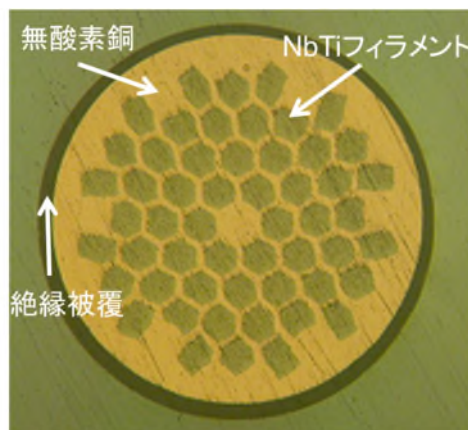


図 2. 3. 6-32 NbTi 線材の断面構造例

高温超電導線材と低温金属系超電導線材の接続技術開発を進めるにあたり、低温超電導線材 (NbTi 線材) 同士の接続で行われている接続方法について調査を行った。低温超電導線は、NbTi や Nb₃Sn などの超電導フィラメントが、銅やアルミの安定化材 (マトリックス) 内部に埋め込まれた構造となっていることから、安定化材に覆われた超電導線同士をそのまま接続すると、接続抵抗は銅およびアルミの抵抗値となり $10^{-8} \Omega$ が限界で

ある。永久電流モード運転の実現に必要な低抵抗を実現するためには、常電導金属を除去して、フィラメント同士を直接接続する必要がある。NbTi を代表とする合金系超電導線材では、超電導線をフレキシブルに曲げることが可能であり、超電導線から安定化材を除去して超電導フィラメントを露出させて撚り合わせることが可能である。一方で、Nb₃Sn を代表とする化合物超電導線の場合、金属間化合物となった Nb₃Sn 超電導体は脆弱であり、微小な曲げ等で超電導体が破壊されてしまう。そのため、化合物超電導線はフィラメントの取り出し方、フィラメント同士の接続方法など合金系超電導とは異なる方法をとることになる。ここでは、フィラメント露出が可能で比較的容易に接続可能な NbTi 線を選択した。NbTi 線同士の接続の場合、その接続方法として、一般的な安定化材である銅マトリックスを酸等で溶かしてフィラメントを露出させて、接続する超電導線のフィラメント相互をより合わせた後に、はんだ接続、圧着、固相接合で接続する方法が実施されている。

高温超電導線と低温超電導線の接続として、はんだ接続、圧着、固相接合の適用性について検討を行った。その結果を表 2.3.6-7 にまとめる。この結果より REBCO 層および超電導フィラメントを露出させて、2 つの超電導体を液体ヘリウム温度で超電導となるはんだ材料で接続することが最も期待できるとして、接続の開発を進めた。また、適用するはんだ材料としては、 T_c が 4.2K 以上のもので、臨界磁界 H_c が高いものを候補とした。文献調査の結果を表 2.3.6-8 に示す。ここでは、PbBi および InSn を候補とした。

表 2.3.6-7 高温超電導線材と低温金属系超電導線材の接続方法の検討

| 低温超電導線のフィラメントと高温超電導層の接合方法 | はんだ | 圧着 | 固相接合 |
|---------------------------|----------------------------------|---|--|
| 説明 | NbTi フィラメント、REBCO 層を露出させてはんだで接続 | REBCO 層に NbTi フィラメントをスリーブで圧力をかけて密着させる | REBCO 層と NbTi フィラメントを密着させ、高温をかけて拡散接合をする |
| 適用性判断 | ○ Bi-NbTi で超電導接続ができた実績より可能性あり | × REBCO 層がセラミックスでせい弱であることから、REBCO 層が破壊する | × REBCO を拡散接合するためには酸素中で 800°C 以上に加温するが、酸素中で 800°C では NbTi が酸化して超電導特性を失う |

表 2.3.6-8 各種はんだの臨界温度、臨界磁場

| Solder | T_c (K) | B_{c2} (T) |
|---|-----------|---------------|
| Pb ₆₀ Bi ₄₀ | 8.4 | 1.77 at 4.2 K |
| Pb ₃₂ Sn _{15.5} Bi _{52.5} | 8.68 | 1.985 |
| Pb ₃₈ Sn ₆₂ | 7.3 | 0.30 at 0 K |
| Pb ₅₇ Bi ₃₆ Sb ₇ | 8.5 | 2.5 at 0 K |
| Pb ₁₈ Sn ₁₂ Bi ₄₉ In ₂₁ | 6.4 | 3.3 at 0 K |
| In ₅₂ Sn ₄₈ | 6.4 | 0.34 at 0 K |
| In ₅₀ Sn ₃₅ Bi ₁₅ | 6.5 | 0.14 at 4.2 K |

(出典：向山晋一、「低温超電導線材の超電導接続技術」、低温工学、55 巻 4 号、pp. 255-261 (2020))

以上より、REBCO 高温超電導線の REBCO 層および NbTi 線の超電導フィラメントを露出させて、直接はんだで接続することとした。REBCO 高温超電導線の REBCO 層の露出方法としては、線材を硫酸溶液に浸漬させることで銅安定化層を溶解させ、その後にアンモニア-過酸化水素水溶液に浸漬させて銀保護層を溶解させて超電導層を露出させることが一般的に行われている。図 2.3.6-33 に REBCO 層を露出したサンプルを示す。また、NbTi 線については、硫酸溶液または硝酸溶液に線材を浸漬させて銅安定化材を溶解し、図 2.3.6-34 のように超電導フィラメントを露出させた。



図 2.3.6-33 銅安定化層および銀保護層を除去した REBCO 高温超電導線材



図 2.3.6-34 フィラメントを露出した NbTi 線材

低温超電導線の接続方法を参考として、REBCO 高温超電導線と NbTi 線の接続方法の手順を、図 2.3.6-35 に示す。REBCO 層と NbTi フィラメントを露出した線を、図 2.3.6-36 に示すジョイントカップに収納し、200°C で溶融した PbBi を注いで固化させて接続部を形成した。REBCO 高温超電導線と NbTi 線に電圧タップを取り付け、液体ヘリウム温度で

直流四端子法により接続抵抗を測定した。結果を図 2.3.6-37 に示す。四端子法のため、精度の良い測定はできなかったが、 $100\ \mu\ \Omega$ オーダーの接続抵抗と評価された。

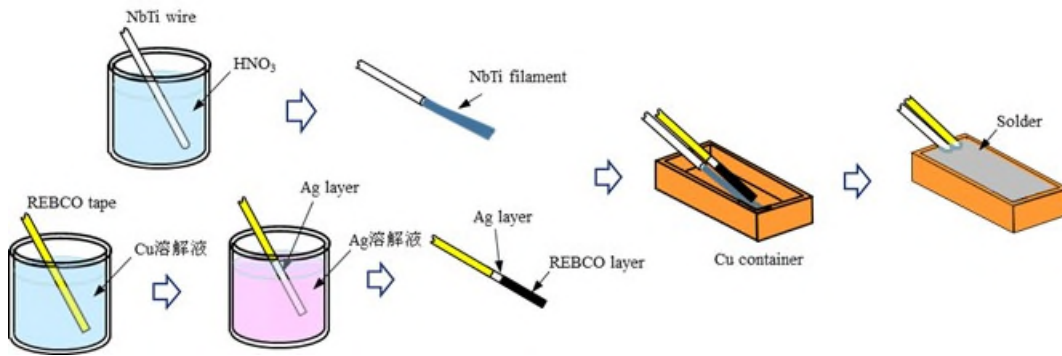


図 2.3.6-35 REBCO 高温超電導線と低温金属系超電導線の接続方法

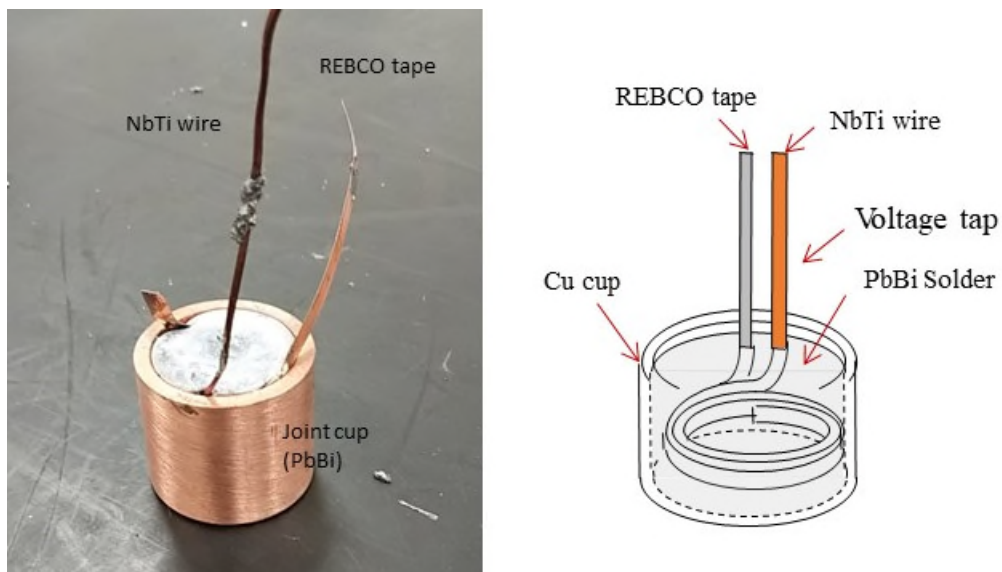


図 2.3.6-36 はんだによる接続試料

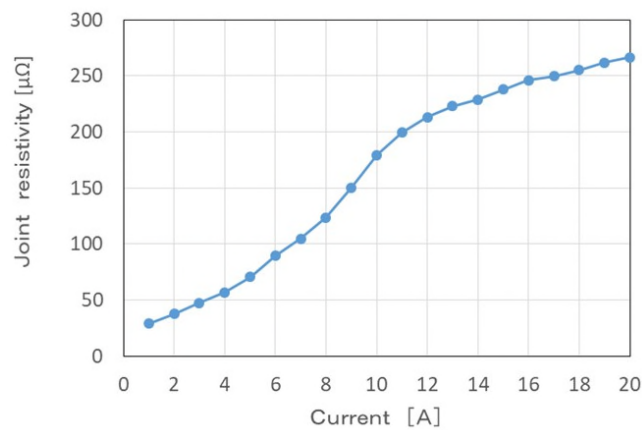


図 2.3.6-37 REBCO 高温超電導線材/NbTi 線材の接続抵抗 (4.2K、0T)

8. 永久電流スイッチを接続した永久電流モード運転の試験

前節で、REBCO 高温超電導線材と NbTi 線材の十分な低抵抗接続は実証できなかったが、ここでは REBCO 高温超電導コイルに NbTi 永久電流スイッチを接続し、永久電流モード運転を模擬した試験を行った。

永久電流システムの回路図を図 2.3.6-38 に示す。この回路においてコイルを励磁する方法は、図 2.3.6-39 の通りである。まず、永久電流スイッチをオフ、電源スイッチをオンの状態としてコイルに電圧を印加することで励磁する。コイルに流れる電流値が所定の値に達した後、永久電流スイッチをオン、電源の電流をゼロとして電源スイッチをオフとする事により、コイルと永久電流スイッチによる閉回路に永久電流ループが形成され、永久電流モードとなる。永久電流スイッチのオン、オフの方法としては、永久電流スイッチを T_c 以上に昇温して行う熱的な方法が可能で、永久電流スイッチを NbTi 線とすれば、10K 以上に昇温することで永久電流スイッチをオフに、また 4.2K 付近まで冷却することでオンにすることができる。これらのスイッチング動作における昇温温度は、REBCO コイルの T_c が 90K であることから、コイルのクエンチに対して十分なマージンがあり、低リスクで安定して実施することが可能である。

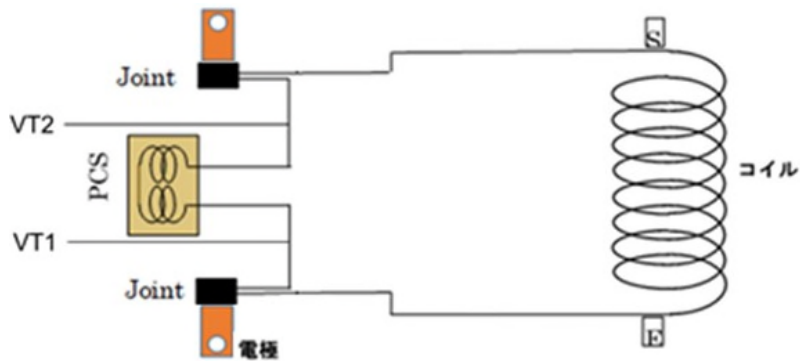
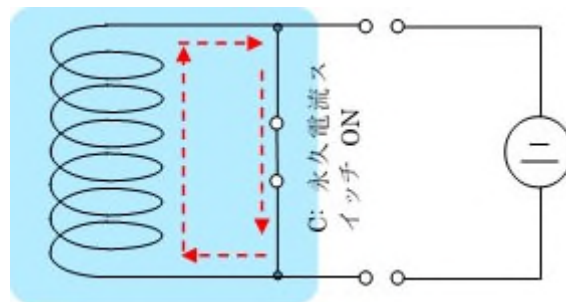
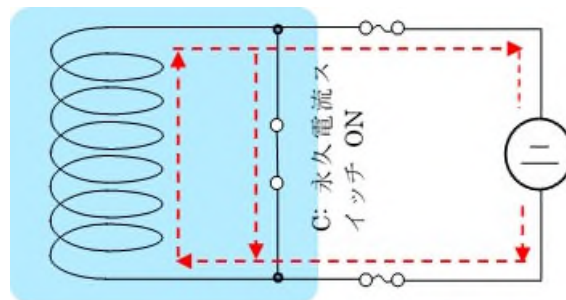


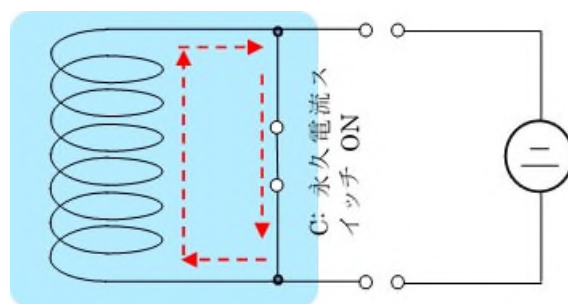
図 2.3.6-38 永久電流システムの回路構成



(a) Current feeding from current source (永久電流スイッチ OFF)



(b) Current decreasing in current source (永久電流スイッチ ON)



(c) Persistent current mode

図 2.3.6-39 永久電流回路の運転プロセス

(出典：向山晋一、「低温超電導線材の超電導接続技術」、低温工学、55 巻 4 号、pp. 255-261 (2020))

高温超電導コイルによる永久電流モード模擬試験を行うにあたり、REBCO 高温超電導線を用いてダブルパンケーキコイルを製作した。仕様を表 2.3.6-9 に示す。またコイルの写真を図 2.3.6-40 に示す。永久電流スイッチは直径 1mm の NbTi 線を、コイル状に巻き上げて製作した。永久電流スイッチの外観図を図 2.3.6-41 に、REBCO コイルと永久電流スイッチを組み合わせた試験装置（永久電流回路）を図 2.3.6-42 に示す。

表 2.3.6-9 永久電流モード試験用 REBCO 高温超電導コイルの仕様

| 線材仕様 | |
|-------------------|----------------------|
| 型番 | SPI社製 SCS4050-AP |
| 線材寸法 | 幅4mm, 厚さ 0.09mm |
| 安定化銅厚み | 20mm(片側) |
| $I_c @ 77K, s.f.$ | > 120A |
| コイル仕様 | |
| コイル内径 | 直径40mm SUSボビン+カプトン絶縁 |
| コイル外径 | 直径52mm |
| ターン数 | 70ターン × 2 |
| 共巻きカプトン | 厚さ 25mm 幅 4mm |
| 線長 | 10.5m × 2 |
| 含浸 | ワックス含浸 |
| インダクタンス | 1.5mH (実測値) 計算値1.7mH |



図 2.3.6-40 製作した REBCO 高温超電導試験コイル



図 2.3.6-41 NbTi 製永久電流スイッチ

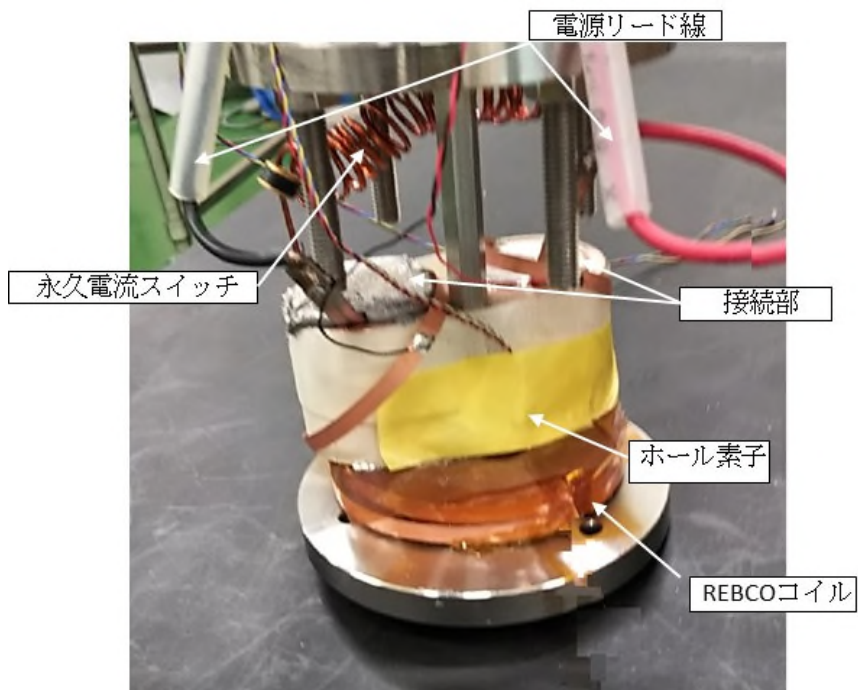


図 2.3.6-42 永久電流モード模擬試験の試験装置（永久電流回路）外観

永久電流回路を常温の状態から、超電導線が焼損しない低電流 1A を通電し、コイルの両端電圧を測定しながら冷却した。この場合、電流は超電導コイルと永久電流スイッチに対してそれぞれの抵抗に応じて分流して流れ、常電導抵抗分の電圧が発生する。液体窒素、液体ヘリウムで冷却をしていくが、室温から液体窒素温度までは超電導コイルの抵抗が冷却に応じて減少し、図 2.3.6-43 に示すように液体窒素温度以下になると超電導状態となり、電圧がゼロとなる。この状態では、電流はすべて超電導コイルに流れ、永久電流スイッチはオフ状態となる。

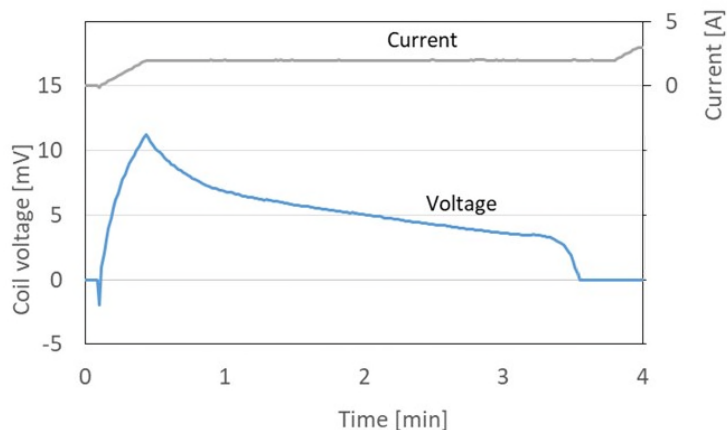


図 2.3.6-43 永久電流回路の液体窒素冷却時の高温超電導コイルの抵抗変化

さらに液体ヘリウム温度までの温度変化においては、図 2.3.6-44 のように NbTi 線が超電導になり、その後に鉛はんだを充填している接続部が超電導状態になっていくことが分かる。永久電流状態になると、電源から電流供給しても、回路内には電流は供給されずに、接続部の抵抗に応じた時定数で減衰が開始される。このことから、永久電流スイッチの温度によりオンオフができることが分かる。

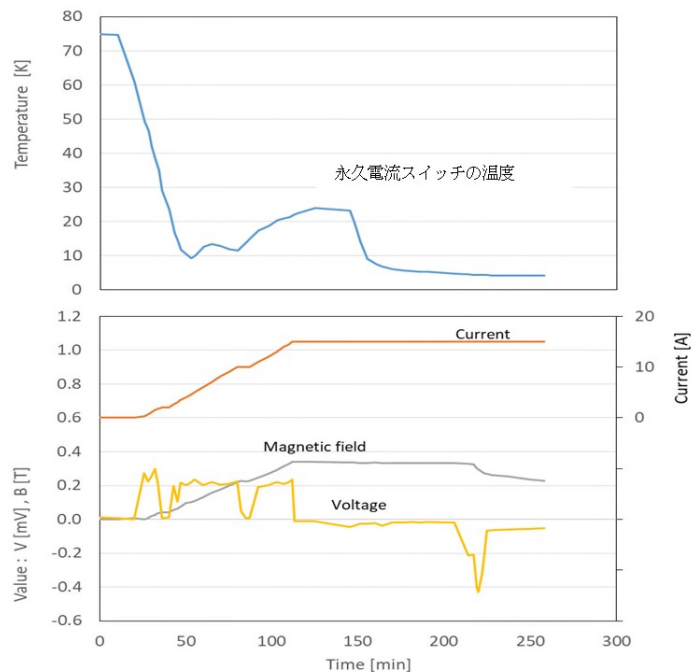


図 2.3.6-44 永久電流回路の液体ヘリウム冷却時のスイッチ温度、コイル電流、磁場、端子電圧

永久電流試験として、REBCO 高温超電導コイル、接続部、永久電流スイッチが極低温の状態、永久電流スイッチだけを温度上昇させてオフ状態とし、電源で通電して励磁して、その後永久電流スイッチを冷却して超電導状態（オン状態）として、電流減衰を測定する実験を行った。その時の動作状況を図 2.3.6-45 に示す。電源電流を遮断した後も、回路には電流が流れ、回路内の抵抗により減衰することが、発生磁場から分かる。この減衰率より回路内の抵抗を求めた。接続部の抵抗は $10\ \mu\ \Omega$ で、図 2.3.6-46 に示すとおり、オーミックであることが分かった。

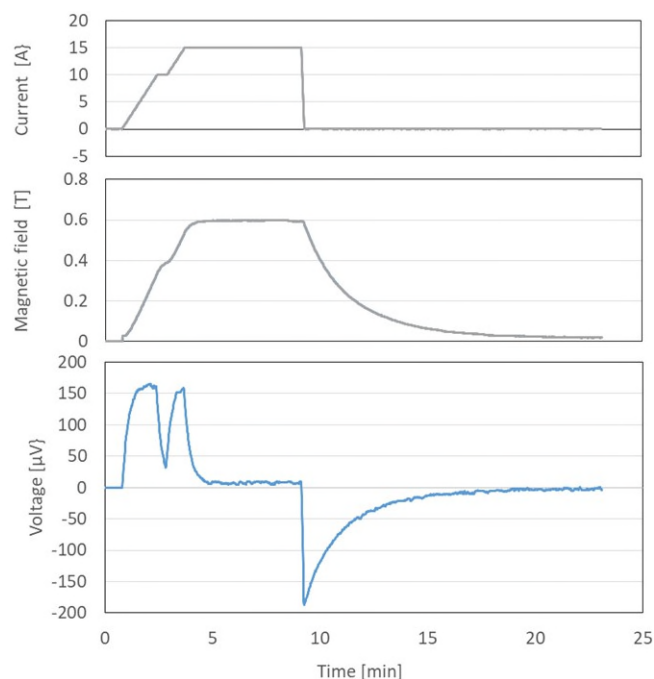


図 2.3.6-45 永久電流試験の動作状況
(上：電源通電電流、中：コイル磁場、下、コイル電圧)

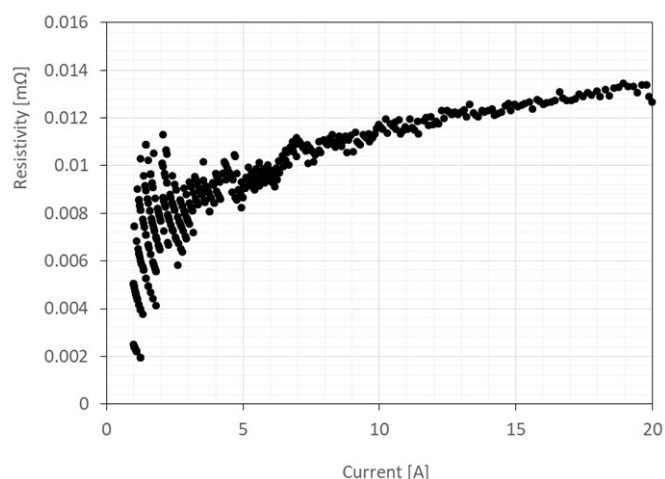


図 2.3.6-46 永久電流回路における接続抵抗の電流依存性

REBCO 高温超電導線材の REBCO 層と NbTi 線材の超電導フィラメントのはんだによる低抵抗接続は実現できなかったが、以上のように NbTi 線の永久電流スイッチと REBCO 高

高温超電導コイルの組み合わせによる永久電流回路において、NbTi 製永久電流スイッチを 4.2K 以上に昇温することでスイッチをオフにすることができ、永久電流モードの運転が可能であることが分かった。特に、液体ヘリウム温度では物質の比熱が小さいことより昇温が容易であり、オンオフを短時間でできることが確認できた。高温超電導線を用いた永久電流スイッチでは、永久電流スイッチを高温超電導体の T_c である 100 K 以上にあげるために過大な入熱を必要とし、コイル本体の昇温のリスクがあることに比べても、優位であることが分かった。

(3) 結果

各種 REBCO 高温超電導線材に対して、マグネット製作現場で施工が容易な、鉛はんだを用いた長尺接続技術の開発を行った。銀保護層の上から接続する方法において、REBCO 層と銀保護層の間の抵抗層が接続抵抗の支配要因であることを明らかにし、現状の REBCO 高温超電導線材では固有の $10^{-12} \Omega \text{m}^2$ であることを実験的に示した。また実際に長尺の接続を行い、接続面積に反比例して接続抵抗が低減できることを実証した。

REBCO 層と銀保護層の間の接触を改善した新しい線材を開発し、これを長尺にわたり鉛はんだで接続することにより、接続点あたりの接続抵抗 $10^{-12} \Omega$ オーダーを実現した。

また、2 台の極低温冷凍機を用いて、ループ部を 30K、接続部を 4.2K に保ち、ループ試料に誘導電流を流すことにより、接続アシスト環境による高温超電導マグネットシステムが可能であることを実証した。最後に、REBCO 高温超電導コイルと NbTi 永久電流スイッチを接続し、オンオフを含む永久電流モード運転を実証した。

2.2.4 コイル保護・焼損対策手法の開発

(1) ドライブモードに対する保護・焼損対策技術開発

(1) - 1 ドライブモードシステムマグネットのシステム保護技術開発(三菱電機)

本節では、ドライブモードで運転されている高温超電導マグネットの保護検討として、医療用 MRI システムとして人体に及ぼす影響に基づいて検討する。また、コイルの一部が損傷した場合のコイル保護およびリカバリ方法についても検討する。

A-1) 人体に及ぼす影響を考慮したコイル保護

医療用 MRI システムへの要求仕様は主に JISZ4951 (あるいは IEC60601-2-33) に述べられている。コイルが損傷した場合の緊急消磁に関しては大きく以下の 2 点が記載されている。

- ① 磁石の特性には、緊急減磁装置が作動してから磁石中心の磁場強度が 20 mT に低下するまでの時間を記載しなければならない (201.7.9.3.101(d))。
- ② 患者を漏洩静磁場による傾斜部分から磁石内に搬送するときの許容される動きの速度は、患者への最大 dB/dt 値が 3 T/s を超えないように制限しなければならない (201.12.4.104)。

上記記載において、②は患者を搬送する際の規定であるが、緊急消磁の際も同様の考え方ができる。①には具体的な消磁時間は記載されていないが、一般的には数秒から 10 秒程度で消磁出来るようなマグネット設計になっている。つまり、コイルが損傷した場合には、1 秒以上、10 秒以下の範囲で緊急消磁できることが求められる。全身

用フルサイズ 3T 高温超電導コイルの設計は決定していないため、ここでは 1/2 サイズ 3T コイルを対象として緊急消磁について検討した。

(1) - 2 ドライブモードシステムマグネットの異常対策検討 (東北大学 津田研)

A. 超電導コイル劣化時における局所的常電導転移が発生する機構の検討

高温超電導線を液体窒素温度で使用する場合は、高温超電導線を構成する材料の熱容量が、液体ヘリウム温度に比べて大きくなるため、線材の一部が常電導転移しても、金属系超電導線に比べて常電導伝播速度が遅く、局所的に温度上昇する。このため、高温超電導線を用いてコイルを構成する場合は、コイルの一部が常電導転移していたとしても、発生電圧が大きくならないため検出が難しく、検出可能な電圧が生じるのが焼損間近になるなど、コイル保護は容易ではない。REBCO コイルでは、金属系超電導コイルの様に、トレーニング効果が得られないため、一度通電特性が低下すると、それ以降に特性が改善されることはない。このため、通電特性が低下した場合は、そのまま継続して使用するのではなく、速やかに別のコイルに取り替える必要がある。以上より、REBCO コイルの場合は、通電特性が低下したコイルが起点となりコイル全体が焼損しない様に、早期に通電特性の低下を検知し、保護する方法を確立することが重要となる。

これまでに、REBCO コイルの安定性について多くの検討が行われているが、コイル内に常電導転移領域が発生した後の現象についての検討が中心であった。これは、REBCO コイル内の常電導領域の発生要因としては、コイル作製時にコイルに印加される応力、コイル冷却・昇温時の熱応力、コイル通電時の電磁応力などが考えられているが、現時点では、どの様なメカニズムで常電導転移が生じるのかが明確になっていないことに起因している。また、金属系超電導コイルと異なり、わずかな擾乱では常電導転移しないため、実験で常電導転移現象を模擬するには、ヒータを用いて大きな熱量を加える必要がある。しかし、超電導コイル内の常電導転移現象は、擾乱が生じた初期状態に大きく依存するため、擾乱を正確に模擬できないと、その後の電磁的・熱的振る舞いも正確に把握することができない。これまでは、高温超電導テープ線における常電導転移現象の発生メカニズムは明らかにされていないが、これまでの検討により、コイルが常電導転移する場合は、何らかの擾乱により、常電導転移領域付近の通電特性が低下している可能性があることが指摘されている。そこで、線材の一部を切断することで、線材の局所的通電特性（臨界電流）の低下を模擬し、局所的な通電特性の低下が、REBCO 線材や REBCO コイルの常電導転移現象に及ぼす影響を調べることにした。安定化銅が無い場合は、切断部の臨界電流を少し上回る電流値で線材が焼損するものの、安定化銅がある場合は、切断部の臨界電流をはるかに上回る電流でも安定性を維持できること、冷却条件がよいほど、コイルが焼損する電流を大きくし、常電導領域の両端電圧を大きくできること、局所的臨界電流の低下に対する安定性には、冷却効果よりも、安定化銅の分流効果の方が大きく影響することなどを明らかにした。

コイル形状では、線材長手方向だけでなく、コイルの径方向（層間方向）にも熱が伝達することや、線材よりも冷却効果が低下することが、安定性や常電導転移時の発生電圧に影響を及ぼすことが考えられる。線材の一部を切断した REBCO テープ線を用いて小型コイルを作製し、短線の場合と同様に、焼損に至る電流値や各通電電流に対する発生電圧を測定することにより、冷却条件やサンプル形状（短線 vs. コイル）が安定性や常

電導転移時の発生電圧に及ぼす影響について検討した。

切断長が臨界電流および焼損電流に及ぼす影響

切断長 3 mm の場合における短線およびコイルの通電電流に対するコイル両端電圧、そして、焼損電流を測定した。短線およびコイルにおいて、断熱条件下と液体窒素冷却下での切断後の臨界電流と焼損電流の切断長依存性について測定した。その結果を図 2.4.1-2-1 に示す。

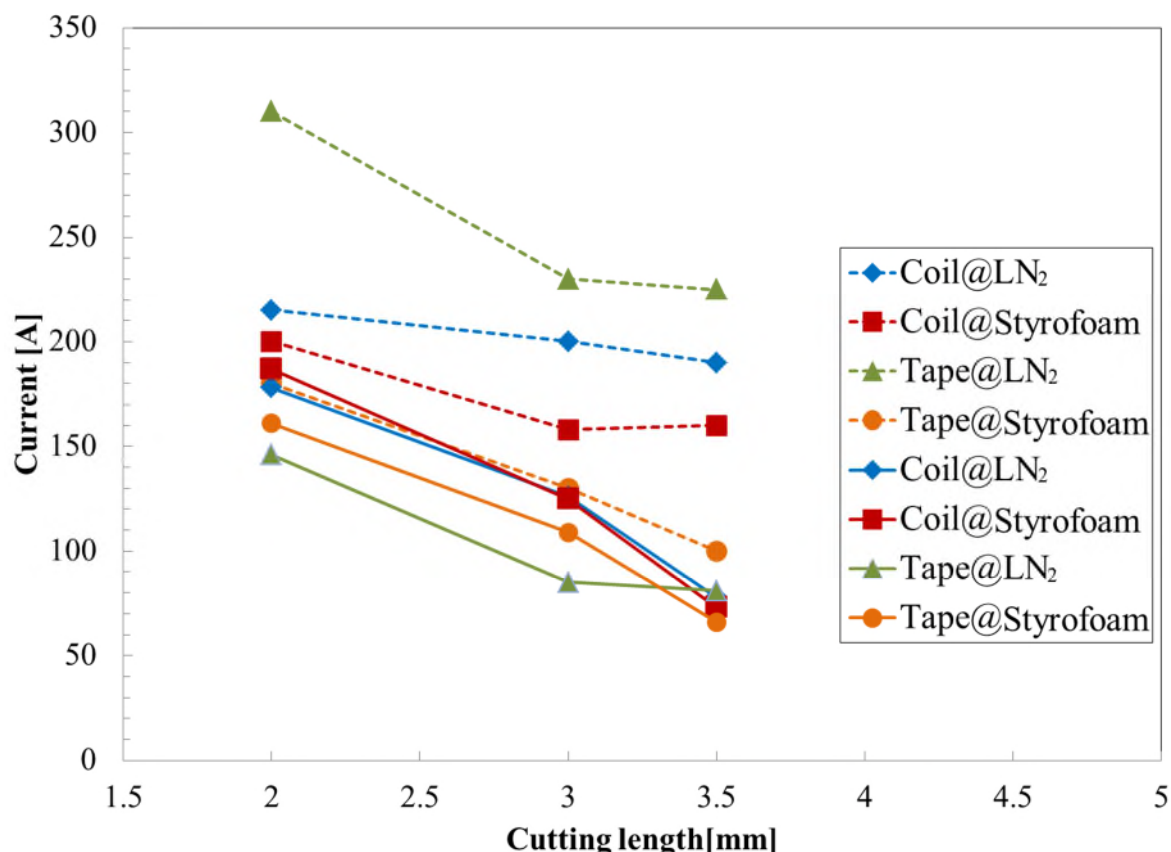


図 2.4.1-2-1 断熱条件下と液体窒素冷却下での切断後の臨界電流と焼損電流の切断長依存性
(実線：切断後の臨界電流、破線：各切断長における焼損電流)

図 2.4.1-2-1 では、実線が切断後の臨界電流を、破線が各切断長における焼損電流を表している。図より、どのサンプルにおいても、切断後の臨界電流は切断長さの増加によって線形的に減少しており、切断長さの等しいサンプル間に大きな違いは見られていない。一方、焼損電流は、全てのサンプルにおいて、切断長さが増加するにつれて減少しているが、切断長さが同じであってもサンプルによって値が大きく異なっている。これは、焼損電流が冷却条件に大きく依存するためであり、焼損電流は、冷却効果が高い順番に大きかった。また、短線に比べて、コイルの方が、切断長さに対する焼損電流の変化が小さく、液体窒素冷却時と断熱時の焼損電流の違いは、短線の場合よりも小さくなることがわかった。これは、コイルの場合は、パンケーキコイル形状であることから、テープの幅広面が直接液体窒素と接することがなく、液体窒素の冷却効果を短線ほど得ることができなかつたためと考えられる。

短線とコイルにおける最大許容発熱量

上記では、短線とコイルにおける臨界電流と焼損電流を比較したが、各サンプルの臨界電流に大きな違いが見られなかったのに対して、焼損電流には大きな違いが見られた。このため、冷却効果と安定性の関係を定性的に明らかにすることができた。しかし、同じ切断長さであっても、コイルの場合は、コイルの内外径や巻線数によって臨界電流や焼損電流が異なることが考えられる。このため、臨界電流や焼損電流の電流値の大小関係だけで、安定性の良し悪しを判断することは困難であるといえる。そこで、異なる臨界電流を有するサンプルの安定性を比較検討するために、サンプルの両端電圧とサンプル内部で生じている発熱量を評価し、各サンプルで許容できる最大の発熱量を比較することにした。

切断長さが 3 mm の場合の、断熱条件と液体窒素冷却条件における短線とコイルの通電電流と発熱量の関係を図 2.4.1-2-2 に示す。

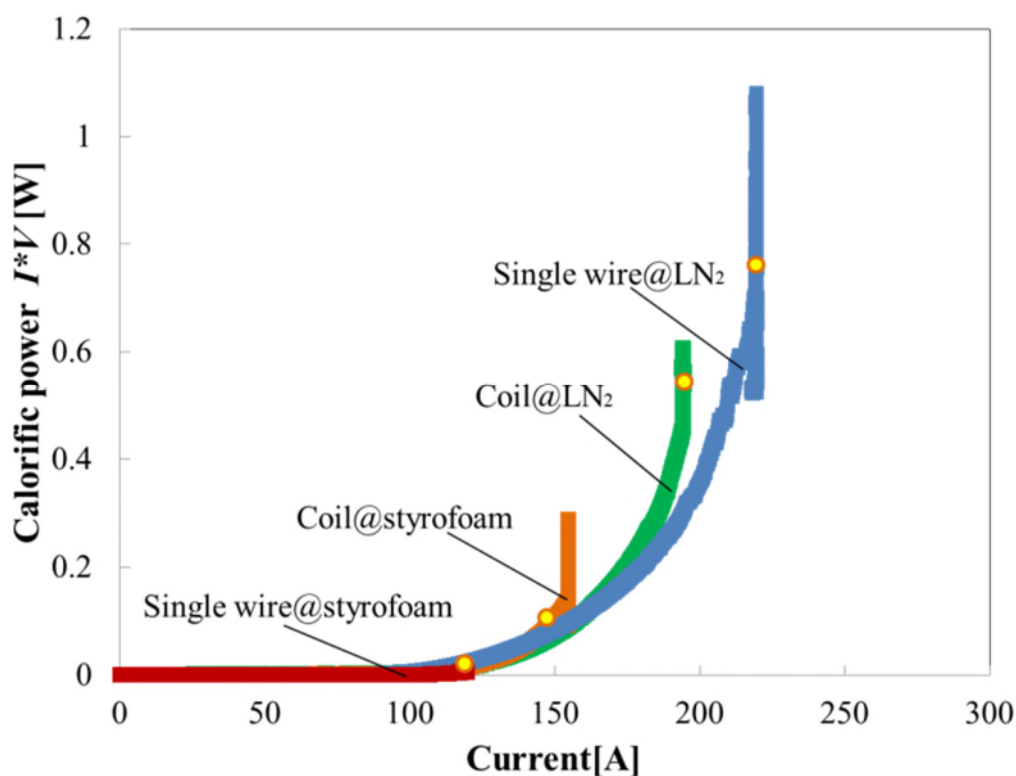


図 2.4.1-2-2 断熱条件と液体窒素冷却条件における短線とコイルの通電電流と発熱量の関係

図 2.4.1-2-2 中の黄色いプロットが、各サンプルにおける最大許容発熱量である。図 2.4.1-2-2 より、最大許容発熱量も断線電流の大小関係と同様の傾向を示していることがわかる。なお、最大許容発熱量（その時の電流値）は、短線@LN₂が 0.8 W(210 A)、コイル@LN₂が 0.585W(195 A)、コイル@断熱が 0.093 W(150A)、短線@断熱が 0.0069 W(120 A)であった。これより、切断長さが等しい場合でも、試料形状や冷却条件によって最大許容発熱量が大きく異なることがわかる。

B. 並列導体によるコイル保護の検討

高温超電導コイルは、従来の低温超電導体と比較して高電流密度であり、将来の実用化が期待されている反面、局所的な線材劣化によりクエンチが発生し、コイルが焼損してしまうことが課題となっている。また、クエンチの発生メカニズムも解明されておらず、予期せぬクエンチに対応する必要があるが、効果的な保護方法は未確立である。そこで、本検討ではこの課題を解決するために、素線間絶縁の無い並列導体をコイルとして用いることを提案する。これは、無絶縁の Y 系線材を複数本接合し、外側を絶縁層で覆った導体をコイルとして巻線したものである。複数の線材を共巻きすることで、コイルを並列として扱うことができるため、インダクタンスを低減することが可能である。よって、電流の減衰時定数が小さくなるため異常時の保護を迅速に行うことができると考えられる。また、素線間絶縁を除くことにより、抵抗値が大きい異常部の周辺でローカルな転流が発生し、ジュール熱の発生を低減させることができる。よって、全ての層間が絶縁されている従来の単線コイルと比較して、エネルギー消費を行う間に発生するコイルの温度上昇を低減させることができると期待できる。

(2) 永久電流モードに対する保護・焼損対策技術開発（産業技術総合研究所、上智大学）

ア) 研究開発目的

高温超電導マグネットシステムの永久電流モード運転における異常検出と保護の技術を開発する。原理検証実験から小規模コイルによる一連の保護動作の実証まで行い、高温超電導マグネットシステムの汎用の保護技術として確立させる。

イ) 研究内容

1. REBCO 高温超電導線材を用いたコイルのクエンチ

1.1 HTS コイルのクエンチ現象の LTS コイルとの違い、クエンチ保護の必要性

液体ヘリウム温度領域で用いられる低温超電導 (LTS) コイルは、初期の頃は超電導線に多くの銅を付け、しかも線が液体ヘリウムと直接接触できるように線の中に液体ヘリウム流通路を設けたコイル構造になっていた。これは、線の比熱が液体ヘリウム温度領域では数十 K 以上の温度領域に比較して 2 桁以上小さいため、わずかなじょう乱エネルギーや線のわずかな欠陥でクエンチが引き起こされる可能性があり、さらに当初は LTS 線に発生するじょう乱の大きさ自体が不明であったためである。

その後、多芯線の開発によりフラックスジャンプによるじょう乱は無くなり、残るは線のわずかな動き (ワイヤーモーション) によるじょう乱が大きな問題となった。実際、断熱状態の線はわずか 1cm 区間で数 mm 動いただけで、その摩擦エネルギーによりクエンチが発生する可能性がある。これに対応して線の寸法精度の向上、含浸や巻線の精度向上、巻線の細部に至るまでの固定法が開発され、ワイヤーモーションによるクエンチの発生確率は小さくなった。また、含浸材のひび割れによるじょう乱もクエンチの原因になるが、含浸法、含浸材料の工夫により小さく抑えられるようになった。これにより、液体ヘリウム流通路を設けず、伝導冷却によるコイルの実現が可能となった。

また LTS コイルの場合、ある程度コイルの容量が大きくなると (蓄積エネルギーが数 MJ 程度以上)、クエンチが起きて常電導部が発生しても、その伝搬速度は数～数十 m/s にも

なり、常電導の発熱領域は急速に広がるため、発熱が局所集中することはない。このため、コイルの蓄積エネルギーを適切に外部に放出すれば、コイルの熱による損傷は防げる。クエンチの原因となった箇所は、線は機械的に安定な場所に収まり、再励磁では同じ場所ではクエンチの発生は起きず、よりコイル電流を大きくできる。コイル電流が大きくなると、他の場所でワイヤーモーションが起きてクエンチが発生する。このようにクエンチを繰り返すとコイルの通電電流が増えて行く。このような現象をトレーニング効果と呼んでいる。

現在実用になっている巻線部電流密度の高いコイルでは、数回のトレーニングで定格電流になるようになっている例が多い。

一方高温超電導 (HTS) コイルの場合、たとえば 20K 程度の温度領域で運転される HTS コイルは、線の熱容量は LTS コイルの場合に比べ非常に大きく、また線の臨界温度も高く、線に常電導部を発生させクエンチを起こすエネルギー、すなわちクエンチエネルギーの値が数桁大きい。このため、LTS コイルの場合のような微小なじょう乱エネルギーではクエンチは起きない。しかし、実際には HTS コイルはクエンチを起こし、多くの場合コイルが損傷を起こしている。これはクエンチ保護に関しての関心が薄く、また、適切なクエンチ保護条件、方法が良くわかっていないためである。

HTS コイルでは線の比熱が大きいことが災いして、局所的に抵抗領域が発生した場合の常電導の領域の伝搬速度は数 cm/s 程度と非常に遅く、発熱が局所に集中してホットスポットが発生し、その部分の温度が極端に高くなる。

現在のところ、HTS コイルはトレーニング現象が起きないこと、クエンチの主要原因は線の局所的欠陥であることが知られている。コイルに巻く前に線そのものが持っている欠陥は、現在は線の全長にわたる臨界電流検査により知ることができるので、コイルの焼損に直接結びつく重大な欠陥はあらかじめ排除できる。しかし、コイル巻線時や冷却、励磁する過程で生じる欠陥、繰り返し励磁による欠陥の成長に関しては、現在のところ定量的に評価できていない。

以上のように、HTS コイルではトレーニング効果は無く、局所的抵抗領域の発生の原因が線の欠陥であることから、コイルが定格電流に達する前に抵抗領域が発生した場合、コイル保護が適切に行われてコイルが損傷しなかったとしても、そのままではコイルは目的の電流値 (磁場) が得られない。しかし、コイルが損傷から安全に保護されれば、

- ・マルチコイルのシステムにおいて、あるコイルの損傷の影響が他のコイルに及ぶことを防ぐことができる。特に当該コイルの線が焼断すると、アーク放電が発生してコイルシステム全体に損傷が及ぶことになるので、抵抗領域が発生したコイルの焼損を防ぐことができれば、他のコイルも結果として救うことができ、異常を起こしたコイル 1 つだけを交換することで済むことになる。
- ・抵抗領域が発生した電流値より定格電流を下げることにより、コイルの運転が行える。
- ・コイルの運転温度を下げることにより、コイルシステムの定格電流の達成が可能となる場合がある。

1.2 非絶縁コイルと絶縁コイルの特徴

近年、絶縁を施さない線材で構成した No-Insulation コイル (NI コイル) の研究が行

われている。NI コイルでは、線材の一部が抵抗状態になると、電流がその周りの線材に分流し、抵抗状態になった部分の発熱を抑えられ、ホットスポットが抑制され、安定性の優れたコイルが実現できる。実際その優れた安定性も実証されている。さらに、絶縁層が省略されるため、巻線部の電流密度の大幅な向上が可能になる利点がある。

しかし、この方法では以下のような問題点がある。

- ・コイル電流の変化に対して発生磁界の追従には時間遅れがあり、磁界の制御性がそこなわれる。
- ・また、減磁する場合において、磁界の減衰速度を制御することができないので、事故時には患者保護のために緊急な消磁が必要な MRI では、必要な対応が取れない。
- ・励磁の時や磁界を変化させるときには、遮蔽電流が線材間を渡って構成され、それに伴う遮蔽磁界が減衰するまでに多大な時間がかかり、発生磁界の精度維持が難しい。
- ・コイルの蓄積エネルギーを外部に取り出すことが困難で、コイルを停止するにあたっては蓄積エネルギーがすべて低温領域に放出されることになり、再励磁する際には大幅な時間がかかる。

以上のような問題点があるため、NI コイル方式は MRI への適用が難しいと考える。本研究では絶縁された線で構成されたコイルを対象としたクエンチ保護法について検討を行う。

1.3 クエンチの原因及び損傷の原因

超電導コイルのクエンチの原因は、何らかの原因で線に発生した抵抗領域でジュール発熱が起き、他の部分が加熱され、さらに抵抗領域が広がるためである。HTS コイルでは抵抗領域は線の欠陥部、すなわちその部分の臨界電流値が他の部分より劣化した部分で発生すると考えられる。適切な保護がされないと熱暴走が起き、線の損傷（臨界電流の大幅な劣化）さらには線の焼損、断線が発生する。

コイルの線が焼断線すれば、断線に伴う電流の急減とあわせて発生する高電圧により、断線部のみならずコイルシステムの至るところでアークが発生し、複数のコイルで構成されたマグネットではクエンチしたコイルのみならず、マグネット全体で絶縁破壊が発生する。

断線が起きなくても、保護時におけるコイル電圧のピーク値がコイル絶縁耐電圧を超えると、損傷が起きる可能性がある。一般的に行われている、クエンチを検出してコイルの蓄積エネルギーを外部のエネルギー放出抵抗に放出する、Detect-and-Dump 方式のクエンチ保護法ではコイル端子電圧のピーク値 V_p は下式であらわされる。

$$V_p = L I_0 / \tau \quad (\tau = L/R) \text{ 式 2.4.2-1}$$

ただし、 L ：コイルのインダクタンス、 R ：エネルギー放出抵抗の抵抗値、 I_0 ：コイル通電電流である。一般に電流の減衰時定数 τ を小さくすれば、ホットスポット温度を下げることができるが、この式からわかるように τ を小さくするにあたっては、コイルの絶縁耐電圧を V_{ws} とすれば、その下限は次式で制限を受ける。

$$\tau > L I_0 / V_{Ws} \quad \text{式 2.4.2-2}$$

この点も考慮して保護システムを考える必要がある。一般に V_{Ws} の値は 1kV といわれているが、永久電流モードコイルで、永久電流スイッチの耐電圧を高くすることは課題があり、従って V_{Ws} の値はこれより低くなる。

1.4 高温超電導コイルの保護における課題

図 2.4.2-1 に、従来一般的に使われている超電導コイルの保護方式である Detect-and-Dump 法の回路を示す。コイルに発生した抵抗領域の電圧 V_s をモニタし、その値が閾値 V_q を超えるとクエンチと判断し、保護シーケンスが始まる（以後クエンチとは抵抗電圧が V_q を超えることを指す。また何らかの欠陥の影響により抵抗領域が発生することを異常と呼ぶ。）。スイッチ S を開き、コイルを電源から切り離すことにより、コイルの蓄積エネルギーはダンプ抵抗 R_1 に放出される。このときコイル電流は次式のように減衰する。

$$I(t) = I_0 e^{(-t/\tau)} \quad \tau = L/R_1 \quad \text{式 2.4.2-3}$$

ホットスポット温度を下げるためには、

- (a) V_q の値を下げる
- (b) τ の値を小さくして $I(t)$ の減衰を早める

ことが考えられる。しかし、(a) に関して、コイルの電流の変動や変動外部磁化がある場合は、状況によっては V_s より 3 桁を超える誘導電圧が発生するため、抵抗成分のみを検出するに当たり、この誘導電圧をキャンセルしきれない場合、雑音の混入により V_q の低減には限度がある。また、(b) に関して、1.3 節で述べたようにコイルの絶縁耐圧の制限から τ の値の低減にも制約がある。コイルが大容量化し、インダクタンスが大きくなると、 τ の値の低減がより厳しくなる。

以上のように、従来の方法では限界があり、雑音を抑制して異常検出感度を上げ、 τ の値が大きくなってもホットスポット温度の上昇を抑制できる保護方式の開発が望まれている。

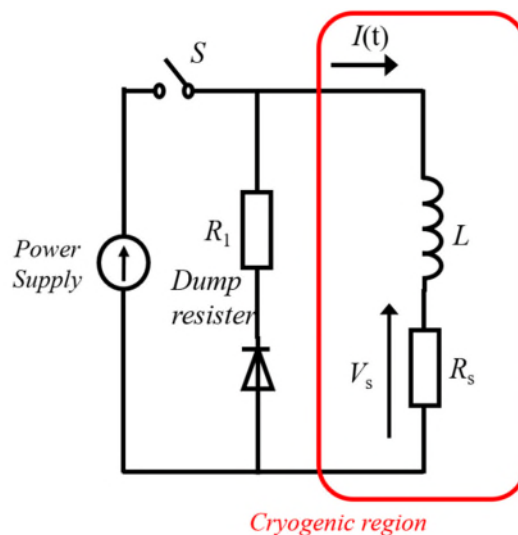


図 2.4.2-1 Detect-and-Dump クエンチ保護法（従来法）の回路

1.5 永久電流モードコイルのクエンチ保護・焼損対策法と課題

図 2.4.2-2 に、従来一般的に用いられているクエンチ検出法であるブリッジバランス法と、先の Detect-and-Dump 法を用いた場合の、永久電流モードコイルの保護回路を示す。永久電流スイッチは、ここでは一般的な LTS 線を用いたものを想定する。LTS 永久電流スイッチは、常電導転移時の抵抗値を容易に大きくできること、また抵抗値の急速な立ち上がり期待できるという利点がある。しかしコイルの蓄積エネルギーを永久電流スイッチに移すことはできないので、外部抵抗にエネルギーを放出するようにしてある。永久電流スイッチのオフ時の抵抗が、エネルギー放出用の外部抵抗より十分大きければ、コイルの蓄積エネルギーは外部抵抗に放出される。永久電流スイッチとしては、コイルに損傷が起きないように、 τ の値より十分短い時間で常電導転移するものである必要がある。

異常検出に関して、永久電流モードではコイルに抵抗領域が発生してもコイル端子には電圧が現れない。従って、コイル巻線の中点を取り出し、ブリッジバランスで電圧 V_{dBB} をモニターすることにより検出することになる。この方法では中点取り出し用のリード線の引回しの問題や、ブリッジ回路で誘導電圧を拾いやすいために検出感度にも問題がある。永久電流モードのコイルでも、雑音を低く抑えた高感度の検出方法として次に述べる「共巻き法」であれば、この問題を解決できる。

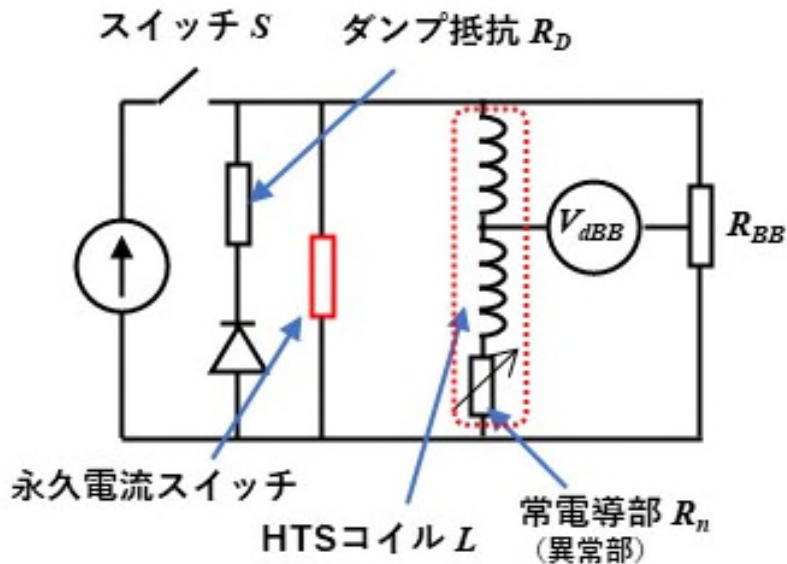


図 2.4.2-2 ブリッジバランス法によるクエンチ検出法を用いたクエンチ保護回路

2. 共巻き法による異常検出

2.1 共巻き法の原理

テープ形状の高温超電導線材に、絶縁層を介して銅テープを沿わせ、共巻き構造のコイルを構成する。図 2.4.2-3 に共巻き法によるクエンチ検出回路を示す。HTS コイルと銅テープの共巻きコイルとは磁氣的に強く結合をしており、誘導電圧を精度良くキャンセルできる。HTS コイルと共巻きコイルの電圧差 V_{dcw} をモニタすることにより、HTS コイルに生じた抵抗電圧を高感度で検出することが可能になる。

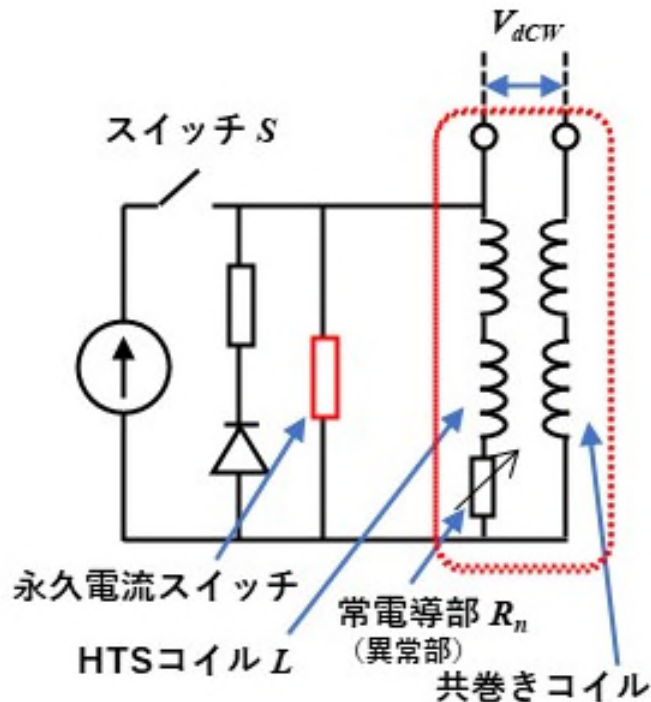


図 2.4.2-3 共巻きコイルによるクエンチ検出回路

2.2 誘導電圧抑制効果

共巻き法の誘導電圧抑制効果を検証するために、REBCO 高温超電導線と銅テープで構成した小型ダブルパンケーキコイルを作り、以下の実験を行った。ダブルパンケーキコイルの下部に外部コイルを置き、これに交流磁界を加えると、ダブルパンケーキコイルの上側コイルと下側コイルでは鎖交磁束が異なるため、外部磁界の変動によりダブルパンケーキに誘起される誘導電圧は、上下のコイルで異なる。これを利用し、ブリッジバランス法、共巻き法による誘導電圧を実測し、共巻コイル法の有効性を検証した。測定の結果、外部交流磁界下で小型ダブルパンケーキコイルの電流を減衰させた時、ブリッジバランス法では V_{dBB} に外部磁界の影響が大きく出たのに対し、共巻き法 V_{acw} では誘導電圧はほとんど表れなかった。

以上により、共巻き法では外部からの誘導性電圧成分が抑えられ、感度の良い異常検出が可能であることが示された。

3. ホットスポット温度限界

何らかの原因で高温超電導コイル内に抵抗領域が発生し、ホットスポットを形成したとき、その温度がある限界値を超えると、コイルは損傷を受け、再励磁にあたっては通電電流値の劣化が起きるか、最悪の場合はコイルの焼損が起きる。このホットスポット温度の限界値を評価するため、小型の REBCO 高温超電導コイルを製作し、実験を行った。

3.1 小型コイルによる実験

テストコイルは REBCO 高温超電導線材と、絶縁された薄い銅テープの共巻き構造のシングルパンケーキコイルで、エポキシ樹脂で真空含浸が施されている。コイルは銅の冷却板と連結した巻枠に巻かれており、冷凍機で冷却する。

HTS コイルと共巻き銅コイルの間の電圧差 (V_{acw}) を測定することで異常を検出する。コイル中に発生する抵抗性電圧 V_s はほとんど V_{acw} とすることができる。テストコイルの 12 層目には、REBCO 高温超電導線材と銅テープの間に、厚さ 50mm、幅 4mm のハステロイテープを挿入し、ヒータとして使用した。実験ではテストコイルに I_0 を通電している状態で、ハステロイヒータに電流を流し、2cm の長さにわたって温度上昇させ、常電導部を発生させた。ヒータ位置における 12 層目の超電導線材温度 (ホットスポット温度) は、REBCO 高温超電導線材と銅テープの間に銅片を挟み込み、これに銅-コンスタンタン熱電対をはんだ付けして計測した。熱電対の基準点は冷凍機のコールドヘッドに設置した。テストコイルは極低温冷凍機により 50K に冷却した。

テストコイルの電流 $I_t(t)$ は、PC からの信号により制御する。共巻き法によりモニターする電圧 V_{acw} が時刻 $t = t_q$ において検出閾値電圧 V_{acws} を越えたとすると、電流 $I_t(t)$ は式 2.4.2-4 式のように制御される。

$$I_t(t) = \begin{cases} I_0 & t < t_q + t_d \\ I_0 \exp(-(t - t_q - t_d)/\tau) & t \geq t_q + t_d \end{cases} \quad \text{式 2.4.2-4}$$

ただし、 I_0 はクエンチ検出前の通電電流値であり、クエンチ検出後、誤検出防止機構を想定して、 t_d の時間遅れの後に時定数 τ で通電電流を減衰させる。

実験では、保護動作時の通電電流 I_t 、高温超電導コイルと共巻き銅コイルの電圧差

V_{acw} 、および、コイルの 12 層目と 13 層目の間のヒータ位置に挿入した熱電対によって測定される温度 T_{12} をメモリーレコーダおよび PC で記録した。 T_{12} がホットスポット温度 T_{HS} となる。テストコイルが損傷しない限界温度を T_{HSs} として、検出閾値電圧 V_{acws} 、電流減衰時定数 τ 、運転電流 I_0 を変えて T_{HS} を評価し、ホットスポット限界温度 T_{HSs} を実験的に調査した。実験ではコイルに損傷が起きた度に、新しい同型のテストコイルに変えて評価を続けた。

検出電圧閾値を $V_{acws} = 15\text{mV}$ または 16mV に設定し、テストコイルに $I_0 = 140\text{A}$ を流した状態でヒータにより抵抗領域を発生させた時、ホットスポット温度 T_{HS} の時間挙動を測定した結果、(a) $V_{acws} = 15\text{mV}$ 場合、 T_{HS} は 326K であったが、コイルに損傷はなかった。しかし、(b) $V_{acws} = 16\text{mV}$ では、 T_{HS} は 343K で、コイルは損傷した。以上より、このテストコイルのホットスポット限界 T_{HSs} は 330K 程度であることがわかる。

4. ホットスポットの挙動と保護限界の数値解析

4.1 解析モデル

ホットスポットの振る舞いと保護の限界について、以下の解析を行った。

解析モデルの巻き線パックは、 $2n + 1$ 層のカプトンで絶縁された REBCO 高温超電導線で構成され、底面は冷却板で冷却されている。中心層 w_0 には長さ l_d の欠陥部あり、他の部分よりも低い臨界電流 I_{cd} を持つと仮定している。この欠陥部で抵抗領域が発生することを想定する。その他の部分はすべて同じ臨界電流 I_c とする。本解析では冷却板温度 T_{CB} は一定に保たれている。

解析モデルの第 i 層目の線材における熱平衡方程式を以下に示す。ただし、線断面での温度分布は一様と考える。

$$C_p \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial x} \right) + P_i(x, t) - h_l(2T_i - T_{i-1} - T_{i+1}) - h_b(T_i(x, t) - T_{CB})$$

式 2.4.2-5

$T_i(x, t)$ は第 i 層の線材温度、 κ [W/mK] と C_p [J/mK] はそれぞれ線材単位長さあたりの熱伝導率と熱容量である。また、 $P_i(x, t)$ [W/m] は第 i 層の線材単位長さあたりのジュール熱、 h_l 及び h_b はそれぞれ線材単位長さ当たりの隣の線材への熱伝達率、線材単位長さ当たりの冷却板と線材間の熱伝達率である。第 i 層のジュール熱は

$$P_i(x, t) = V_i(x, t)I_t(t) \quad \text{式 2.4.2-6}$$

で求められる。 $V_i(x, t)$ の値は以下に述べる電流分流モデルにより算出される。第 i 層の超電導線に流れる電流 $I_{Sci}(x, t)$ 、常電導層に流れる電流を $I_{Cui}(x, t)$ とすれば、 $I_t(t)$ は次の式で与えられる。

$$I_t(t) = I_{Sci}(x, t) + I_{Cui}(x, t) \quad \text{式 2.4.2-7}$$

また、n 値モデルより $I_{Sci}(x, t)$ と $V_i(x, t)$ の関係は以下の式で与えられる。

$$V_i(x, t) = 10^{-4} \left\{ \frac{I_{Sci}(x, t)}{I_{CB}(B_i, T_{CB})} \right\}^{n(B_i, T_i)} \quad \text{式 2.4.2-8}$$

$I_{CB}(B_i, T_{CB})$ は磁界 B_i 、温度 T_{CB} における臨界電流である。n 値と I_{CB} の温度・磁界依存性は、先行研究により行われた I_c 測定の結果をもとに算出している。 $V_i(x, t)$ は線材を構成する Hastelloy、銅、銀の抵抗率から線材の抵抗率を算出した $R_{SC}(T_i)$ を用いて以下のように表し、

$$V_i(x, t) = I_{cui}(x, t) R_{SC}(T_i) \quad \text{式 2.4.2-9}$$

これらの式を連立させることで $V_i(x, t)$ が求められる。

4.2 最小伝搬領域 (MPZ) と最大許容欠陥 (MAD)

高温超電導コイルにおける熱暴走の原因は、コイルを構成する線材に欠陥が生じることであるが、欠陥のある線材を含むコイルが必ずしも熱暴走を起こすとは限らない。通電電流が欠陥部分の I_c 値を超える場合、そこから発熱して層方向及び長手方向に熱が伝わっていく。この熱により、電流が超電導線材の安定化層に分流し始める温度よりも高い温度の部分（抵抗領域）が広がっていく。抵抗領域の大きさには臨界値が存在し、領域の大きさが臨界値を超えると、常電導部分での発熱量が冷却量を上回り、熱暴走する。一方で臨界値を下回る場合には、発熱量と冷却量が等しくなり、通電し続けても熱暴走を起こさず平衡状態になる。この抵抗領域の臨界値を最小伝搬領域 (Minimum propagating zone : MPZ) といい、その時の欠陥部分の大きさを最大許容欠陥 (Maximum allowable defect : MAD) という。

たとえば、欠陥部分の長さを変えて数値解析を行うと、欠陥部分の長さ $l_d = 1.4\text{cm}$ とした場合、 $t = 5\text{s}$ ごろから温度は平衡状態になり、熱暴走は生じなかった。一方、 $l_d = 1.5\text{cm}$ とした場合、 $t = 27.4\text{s}$ でホットスポット温度が 300K を超えて熱暴走に至った。この結果よりこの例における MAD は $l_d = 1.4 \sim 1.5\text{cm}$ である。

高温超電導線の銅層の厚みを変化させ、MAD 長さ と MAD における電圧をそれぞれ求めた。解析の結果、通電する電流が大きいほど MAD は短くなる。また、電流密度を一定にした場合、MAD の長さが最も長くなる銅の厚みがあることがわかった。これは、銅の厚みが薄い場合には抵抗領域でのジュール発熱が大きくなり、短い欠陥であっても熱暴走が生じること、また銅の厚みが大きすぎる場合は、巻線パック電流密度が一定であることから、線材の負荷率 (I/I_c) が大きくなり、やはり短い欠陥であっても熱暴走が生じるためである。

4.3 ホットスポット温度限界と検出閾値電圧の安全限界

本解析においてはホットスポット温度 T_{HS} が 300K を超えるとコイルが損傷すると想定し、その時の検出閾値電圧を安全限界とした。

冷却温度 $T_{CB} = 25\text{K}$ 、欠陥部分長さ $l_d = 2\text{cm}$ 、劣化部分 $I_c = 0\text{A}$ とし、REBCO 高温超電導線材の銅安定化層の厚みを変化させて、通電電流に対する検出閾値電圧の安全限界と、絶縁層を含めた線材の電流密度に対する検出閾値電圧の安全限界を求めた。

REBCO 高温超電導線材は、一般に、コイル化した際の電流密度を高めるため銅安定化層を薄くすることがよいとされる。しかし計算結果からは、銅安定化層の厚い線材ほど熱容量が大きく抵抗領域での発熱量が減るので、許容できる通電電流は大きくなることが示された。

検出電圧を一定とし、REBCO 高温超電導線材の銅安定化層の厚さを変えた場合の許容電流密度限界を計算すると、許容できる通電電流密度は 80mm 付近で最大値を取ることがわかった。これは、銅安定化層を厚くした方が許容できる通電電流が大きくなるため、結果として電流密度を向上させることができるからである。しかし過剰な銅安定化層は安定性向上効果が下がるため、銅安定化層の厚さは極大値を持つ。

5. 抵抗ショート法によるコイル保護

5.1 抵抗ショート法の原理とシミュレーション実験による検証

一般的に高温超電導マグネットシステムは、高温超電導線材がテープ形状であることもあり、複数のパンケーキ型コイルで構成される。何らかの異常によりホットスポットが生じ、その温度が限界値を超えると、コイルが損傷、焼損する。複数のサブコイルで構成されたマグネットシステムにおいて、このホットスポット温度を抑制する保護法として抵抗ショート法を考案した。

一般的な超電導マグネット保護法である Detect-and-Dump 法では、クエンチが生じるとマグネットを電源から切り離し、ダンプ抵抗にマグネットの蓄積エネルギーを消費させる。抵抗ショート法では、マグネットを構成するサブコイルの一つで異常が検出された際、マグネット全体を電源から切り離した上で、異常が検出されたサブコイル以外のサブコイルを抵抗で短絡する。

図 2.4.2-4 に示すモデルコイルでケーススタディを行う。このモデルコイルは REBCO 高温超電導線により構成された 8 つのダブルパンケーキコイル（上からサブコイル 1～8）にて構成されている。こうしたマルチパンケーキコイルの場合、高温超電導テープ線のテープ面に対して垂直な方向の成分の磁場は、一番上または下のサブコイルで最も大きくなるため、これらのサブコイルの臨界電流値は他のサブコイルに比べて小さくなる。ゆえに最も異常が発生しやすいのは一番上と下に位置するサブコイルである。そこで、サブコイル 1 または 8 に抵抗領域 R_5 が生じ、検出閾値電圧 V_q を超える電圧 V_d が検出されたとき、スイッチ S_1 を開いて永久電流ループを開くと同時に、スイッチ S_2 を閉じて抵抗 R_2 によりサブコイル 2～7 を短絡する。サブコイル 1, 8 と、サブコイル 2～7 の磁気結合により、サブコイル 1, 8 の電流は急速に減衰し、抵抗領域での温度上昇が抑えられる。サブコイル 2～7 の電流 I_m はこの過程において増加するが、抵抗 R_2 の値を適切に調整することで、コイル 2～7 での抵抗領域発生を起こさせないことが可能である。これにより、コイル全体の焼損のリスクを減らすことができる。

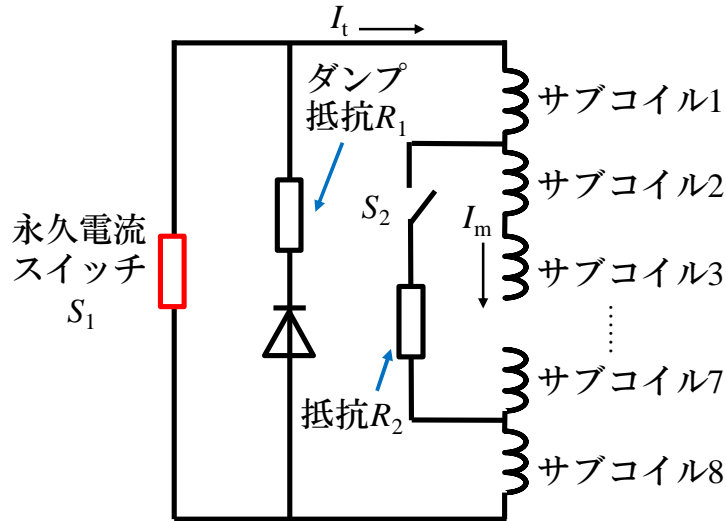


図 2. 4. 2-4 抵抗ショート法によるモデルコイルの保護回路

図 2. 4. 2-4 の回路の回路方程式を解き、保護シーケンス中において抵抗ショートした場合としなかった場合の全電流 I_t 、抵抗ショートしたコイルの電流 I_m 、モデルコイル両端全電圧 V_0 、サブコイル 1 の両端電圧 V_1 、抵抗ショートしたサブコイル群の両端電圧 V_m の時間変化を求め、抵抗短ートの効果を確認した。抵抗短ートをしない場合、すなわち、時刻 $t = 0$ でスイッチ S_1 を開き、スイッチ S_2 を開いたままにした場合の電流の時間変化は、式 2. 4. 2-10 であらわすことができる。

$$I_t(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{式 2. 4. 2-10}$$

I_0 は $t = 0$ における電流値、 $\tau = L/R_1$ である。

抵抗ショート法の場合、すなわち、 $t = 0$ でスイッチ S_1 が開き、 S_2 を閉じた場合の電流変化の式は以下の通りである。

$$I_t(t) = I_0 \left\{ A \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + (1 - A) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right\}$$

$$I_m(t) = I_0 \left\{ B \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + (1 - B) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right\}$$

$$\tau_1, \tau_2 = \frac{(1+\alpha\beta)\frac{\tau}{2} \pm \sqrt{(1+\alpha\beta)^2 L^2 - 4C\alpha}}{2R_1}$$

$$A = \frac{-C\frac{\alpha}{\tau_1} + LR_1}{R_1 \sqrt{(1+\alpha\beta)^2 L^2 - 4C\alpha}}$$

$$B = \frac{-C\frac{\alpha}{\tau_1} + R_1 \{(1+\alpha\beta) + 2M_{1m}\alpha\}}{R_1 \sqrt{(1+\alpha\beta)^2 L^2 - 4C\alpha}}$$

$$C = \beta L (2L_e + 2M_{18}) - 4M_{1m}^2$$

$$\alpha = R_2/R_1$$

$$\beta = L_m/L \quad \text{式 2. 4. 2-11}$$

抵抗ショート法の場合、 I_t と I_m は 2 つの時定数 τ_1 と τ_2 であらわされる。また α は抵抗の比である。

通電電流 140A、電流減衰時定数 $\tau = 90\text{s}$ とし、抵抗比 $\alpha = 2$ または 4 とした場合の電流と電圧の時間変化を計算した結果、抵抗領域が検出されると、サブコイル 1, 8 に流れている電流 I_t はサブコイル 2~7 に移され、抵抗ショートをしな場合と比べ急速に減衰した。一方でサブコイル 2~7 の電流は、抵抗ショートをしな場合と比べて大きくなった。また抵抗ショート法でのコイル電圧は、抵抗ショートなしの場合の電圧をこえることはない。さらに、抵抗ショートをした場合としな場合とでサブコイル 1, 8 とサブコイル 2, 7 の垂直磁場の時間変化をみると、サブコイル 2~7 の電流が増えてもなお、垂直磁場の極大値は、サブコイル 1, 8 の垂直磁場の最大値を超えることはなかつた。この結果から、サブコイル 2~7 で異常が起きる可能性は依然として低いということがわかる。したがって、 α の値を適切に選べばサブコイル 2~7 で異常は起こらない。

抵抗ショート法による保護効果を検証するため、REBCO 高温超電導線で作られたテストコイルでシミュレーション実験を行った。コイルの磁場分布は上記数値解析のモデルコイルと一致はしていないが、ホットスポットの挙動を模擬することができる。

シミュレーション実験に用いたテストコイルは、抵抗領域検出のため、REBCO 高温超電導線と共に絶縁した銅テープを巻いている。12 層目の REBCO 高温超電導線と銅テープの間に、厚さ 75mm、幅 4mm のハステロイのヒータと、銅-コンスタントンの熱電対を銅片にはんだ付けしたものを挟んだ。熱電対の基準点は冷却板に取り付けた。抵抗性電圧 V_s は、高温超電導コイルと共巻きコイルをまたぐターミナルの電圧 V_{acw} を見ることにより求めた (図 2.4.2-3 参照)。高温超電導コイルに流れる電流 $I_t(t)$ は、PC からの信号により操作可能な電源で制御した。抵抗性電圧 V_s も PC に送られている。電圧 V_s が検出閾値電圧 V_q を超えたとき、誤検出防止機構を想定して 0.2s 遅れて電源に対し、抵抗ショートなしの場合は式 2.4.2-10、抵抗ショートありの場合には式 2.4.2-11 に従って通電するよう信号を送った。

電流、電圧とともに、熱電対で測ったホットスポット温度の時間変化を PC で記録し、保護シーケンス中の温度の最大値を最高ホットスポット温度 T_{HS} とした。抵抗ショートなしの場合では、 $\tau = 8\text{s}$ の条件で $V_q = 10\text{mV}$ としたとき、373K の最高ホットスポット温度を観測し、コイルが損傷を受け、その後低い通電電流でも電圧が発生するようになった。抵抗ショートありの場合のシミュレーション実験では、 $\tau = 90\text{s}$ とし、 $\alpha = 2$ または 4 として式 2.4.2-11 で求められる電流波形を与えた。 $\alpha = 4$ において $\tau = 90\text{s}$ 、 $V_q = 100\text{mV}$ としても、 T_{HS} は低いままで熱暴走を起こさなかつた。 $\alpha = 2$ においては、 T_{HS} は $V_q = 30\text{mV}$ でも低いままであつた。

このシミュレーション実験で使用した高温超電導コイルは小さいものだが、高温超電導コイルで起こる熱暴走はコイルの規模によらず、コイルを構成する線材でのわずかな温度上昇がきっかけとなるため、大規模コイルの保護についても同様に考えることができる。この前提で上記のシミュレーション実験の結果を考察する。抵抗ショートをしなかつた場合、コイル電流が 140A で τ が 14.6s よりも大きくなると、コイルの端子電圧 V_0 は 1kV を超える。しかし、前述の通り、検出閾値電圧 V_q がわずか 10mV であっても $\tau = 8\text{s}$ ではコイルが損傷してしまう。その際、 $V_0 = 1.83\text{kV}$ に達するコイル電圧が発生しており、一般的なマグネットシステムの耐電圧である $V_{Ws} = 1\text{kV}$ を越えている。一方

で、抵抗ショート法を適用した場合、 $\alpha = 4$ で $V_q = 100\text{mV}$ 、 $\alpha = 2$ で $V_q = 30\text{mV}$ としても、コイルを損傷から保護することができ、コイルの端子電圧 V_0 はどちらも 160 V 程度であった。この V_0 はコイルの耐電圧 V_{Ws} を十分下回っている。

複数のサブコイルから構成されるマルチパンケーキコイルにおいて、異常が発生したサブコイルの電流をほかのサブコイルに移す方法は、ホットスポット温度を抑え、安全に保護できる検出閾値電圧を高くすることができ、また保護シーケンス中のコイルの端子電圧を低くできることが明らかとなった。

5.2 共巻き法と抵抗ショート法を組合せた保護シーケンスの実証試験

さらに、パンケーキコイルを組合せたマグネットシステムを模擬した小規模モデルに対して、実際に抵抗ショート法を適用し、異常が発生したコイルの電流が他のコイルに転流され、ホットスポット温度が低減されることを検証するための実験を行った。

実験に用いたコイルは、最上部（一段目）、最下部（四段目）にシングルパンケーキコイル、中間部の二段目と三段目にダブルパンケーキコイルを組み合わせたものである。この組合せコイルと、抵抗ショート用のリレーおよび抵抗（それぞれ図 2.4.2-4 に示す S_2 および R_2 に相当）は真空容器に納められ、極低温冷凍機による伝導冷却により極低温に保たれる。なお、エネルギー放出抵抗（図 2.4.2-4 の R_1 に相当）は室温域に置かれている。本実験では、一段目のシングルパンケーキコイルに異常が発生することを想定しており、一段目のシングルパンケーキコイルの 25 層目に加熱用の長さ 2cm ヒータが入っている。このヒータに通電することにより常電導部を誘起する。REBCO 高温超電導線の加熱部における温度を測るため、熱電対を挿入した。このシングルパンケーキコイルには銅テープが共巻きされており、クエンチ検出に用いる。なお本実験ではエネルギー放出抵抗は組合せコイルに常時接続してある。

実験手順は以下のとおりである。

1. リレー S_2 は開いた状態で、直流電源（可制御電源）から直流電流を供給する。
2. 試験コイルの通電電流が所定の値 I_{test} に達した後、ヒータに電流を流し、一段目のシングルパンケーキコイルに常電導部を発生させる。常電導部は共巻きコイル電圧と一段目コイル端子線圧の差電圧から抵抗性電圧 V_s とし、その値が検出閾値電圧を超えたらクエンチと判断する。
3. クエンチが検出されたら、直流電流を解列し、以下のいずれかの保護シーケンスに入る。
 - －抵抗ショート無し：リレー S_2 を開いたまま。（通常の Detect-and-Dump 法）
 - －抵抗ショート有り：リレー S_2 をクエンチ検出と同時に閉じる。（抵抗ショート法）

クエンチ保護シーケンス時のコイル電流 I_t 、抵抗ショートの抵抗に流れる電流 I_m 、ダンプ抵抗に流れる電流 I_{tR} 、ヒータ加熱部の温度 T_{HS} （すなわちホットスポット温度）を記録し、抵抗ショート有り、無しの場合について保護特性を調べた。なお、組合せコイルの温度は、臨界電流値に対する負荷率を上げるため、50K とした。

電源より定常電流 $I_{test} = 85\text{ A}$ を通電し、ヒータを炊かずに電流を遮断したときの、ダンプ抵抗の電流 I_{tR} の変化の様子を抵抗ショート有り、無しについて比較すると、抵抗ショートがない場合は、コイル電流遮断後にダンプ抵抗の電流は 85 A まで立ち上が

った後、組合せコイルのインダクタンスとダンブ抵抗 R_1 の値で決まる時定数（このとき、5.4sであった）で減衰する。一方、抵抗ショートがある場合、電流遮断後抵抗ショート回路にも電流が流れ、その分だけ I_{LR} が減少する。すなわち、一段目のパンケーキコイルの電流が、二段目、三段目のパンケーキコイルに転送されていることが示された。

今度は定常通電時にヒータを炊いてクエンチを起し、検出閾値電圧 $V_q = 13\text{mV}$ でクエンチ検出とした。この場合の抵抗ショート有り、無しの場合の電流を比較すると、抵抗ショート有りの場合は抵抗ショートなしに比べ、電流遮断後の I_{LR} のピーク値は、電流が二段目および三段目コイルに転送されたため、低くなった。また電流の減衰時定数は1.3sと、前述のヒータを炊かずに行った試験の時に比べて短くなった。これは、一段目のコイルに常電導部が発生したとき、その抵抗が $R_1 = 1.5\text{m}\Omega$ に比べて大きく（8.2mW程度と見積られる）、実験に使われた組合せコイルのインダクタンスが8.1 mH（計算値）とかなり小さいからである。クエンチ時の抵抗領域での抵抗の値はコイルの容量にはよらないことから、インダクタンスが数H以上のコイルでは、このような常電導部の抵抗が保護シーケンスの電流減衰に影響を及ぼすことはない。ホットスポット温度 T_{HS} をみても、抵抗ショート法有りの場合は無しの場合よりも低くなったが、その違いは想定していた量より少なかった。

そこで、組合せコイルの一段目のシングルパンケーキコイルのみを用いて、これが大型マグネットシステムの一部であると想定したシミュレーション実験を行った。すなわち、100Hのマグネットの一部であるこのシングルパンケーキに異常が起きたとき、抵抗ショート有りの場合は他の健全なコイルを抵抗ショートして、抵抗ショート無しの場合は外部抵抗にダンブするとして、シングルパンケーキコイルに流れる電流波形をあらかじめ計算しておく。そしてシングルパンケーキコイルに電源により定常電流85Aを通電しているときにヒータにより常電導部を発生させ、検出電圧が検出閾値電圧 V_q を超えたとき、電源の出力電流をあらかじめ計算された電流波形に従い制御する。この試験の結果、抵抗ショート法無しの場合は検出閾値電圧 V_q が数mVであってもホットスポット温度 T_{HS} が急上昇してコイルが焼損する可能性があるのに対して、抵抗ショート法有りの場合は同様の条件でもホットスポット温度 T_{HS} が百数十 K 程度に抑えられることを、実験的に確認した。

以上の結果より、インダクタンスが十分に大きく、発生する常電導部の抵抗が無視できるような大型マグネットでは、抵抗ショート法が優れたホットスポット抑制効果を発揮することが示された。また抵抗ショート法を用いれば、検出電圧をよりノイズの影響が少ない数mV以上まで拡大でき、コイル両端電圧を小さく保ちつつエネルギー回収の時定数を長くできるというメリットがある。通常のDetect-and-Dump法では保護が間に合わない大型マグネットシステムでも余裕を持った保護が可能であり、小規模から大規模まであらゆるマグネットシステムにおいて適用可能な保護技術であると言える。

5.3 共巻きコイルを用いた保護方法の検討

異常検出に用いる共巻きコイルは、高温超電導コイルと密に結合しているため、相互の電流の転流が容易である。そこで共巻きコイルを異常検出だけでなく、保護にも積極的に活用する方法について、その可能性を検討した。

製作した共巻きコイル（Cu-CWコイル）付きのREBCO高温超電導線材シングルパンケ

一キコイル（以下、試験コイルという）は、巻線中にヒータが挿入されており、長さ 2cm に渡って加熱して常電導部を誘起することができる。Cu-CW コイルに用いた銅テープは、幅 3mm、厚さ 35mm である。試験コイルのヒータ部に熱電対を挿入し、コイルの温度（ホットスポット温度）を測定した。試験コイルの REBCO コイル側と Cu-CW コイル側にはそれぞれ別の制御電源をつなぎ、それぞれのコイルの電流 I_1 および I_2 を、PC で演算した波形に沿って独立に制御した。この電流波形は、総インダクタンス 100H 級のマグネットを想定し、保護シーケンス時に試験コイルに流れる電流をあらかじめ計算しておいたものである。すなわち、この試験コイルで異常を検出したあと、Cu-CW コイルを抵抗ショートしたとき、REBCO コイルと Cu-CW コイルに流れる電流は、

$$I_1(t) = I_0 \left\{ A \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + (1 - A) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right\}$$

$$I_2(t) = I_0 \left\{ -B \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right\}$$

$$\tau_1, \tau_2 = \frac{\tau}{2\alpha} \left\{ (1 + \alpha) \mp \sqrt{(1 - \alpha)^2 + 4\alpha k^2} \right\}$$

$$\alpha = (R_{cw} + R_2) / R_1$$

$$A = \left\{ \frac{\alpha}{\tau(1-k^2)} - \frac{1}{\tau_1} \right\} \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + 4\alpha k^2}} \quad \text{式 2.4.2-12}$$

ここに、 R_{cw} は Cu-CW コイルの抵抗、 R_2 は Cu-CW コイルをショートする抵抗、 R_1 は外部ダンプ抵抗である。また Cu-CW コイルを抵抗ショートせず、通常の外部ダンプ抵抗へのダンプのみであれば、

$$I_1(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{式 2.4.2-13}$$

である。これらの式に従って、2 台の電源の出力電流を制御して実験を行った。試験コイルの運転温度は 50K とした。

Cu-CW コイルショート無しの場合、 $I_0 = 100\text{A}$ 、 $\tau = 17\text{s}$ の条件で、クエンチ閾値電圧 $V_q = 8\text{mV}$ および 10mV としてホットスポット温度 T_{HS} を測定したところ、 $V_q = 8\text{mV}$ まではコイルは保護され、 $V_q = 10\text{mV}$ では熱暴走が生じた。次に Cu-CW コイルショート有りの場合については、 $\alpha = 11$ として、その他の条件は Cu-CW コイルショート無しの場合と同じとして試験を行うと、 $V_q = 19\text{mV}$ まで試験コイルは安全に保護された。 α の値については、Cu-CW コイルへの電流の転流量により、ホットスポット温度の抑制効果と、Cu-CW コイル自身のジュール発熱の関係から、最適値が存在し、今回の試験では 11 が最もホットスポット温度が低かった。銅テープの過熱を避けた最適設計を行えば、保護技術として有効であることが示された。

ウ) 結果

REBCO 高温超電導マグネットにおける保護の必要性と、永久電流モード運転時における課題を明らかにした。コイル内に生じる抵抗電圧の高感度の検出方法として「共巻き法」と、その後の蓄積エネルギーの速やかな放出によるホットスポットの抑制方法として「抵抗ショート法」を開発し、それぞれ原理検証試験を通じ、その有効性を示した。実際に REBCO 高温超電導線材に銅テープを共巻きした試験コイルを複数接続した小規模モデルコイルを用いて、共巻き法による異常検出から、回路切り替えによる抵抗ショート法までの一連の保護動作の実証試験を行った。その結果、ホットスポットを大幅に抑制可能であること、また保護にかかる電圧検出の尤度やエネルギーダンプの時定数を長く取れるなど、保護に有利な効果が得られること、大規模コイルほどそれらの効果が得やすいことが明らかになった。さらに共巻き法で異常検出に使われる共巻きコイルに電流を移して保護安定化する方法についても数値解析および小コイルによる検証実験により検討を行った。

なお、本章における詳細な解析・実験条件およびその結果については、以下の文献を参照されたい。

- [1] H. Toriyama et al., “Quench Protection of HTS Magnet Composed of Multiple Pancake-coils by Forming Auxiliary Dump Resistor Loop,” IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 29, No. 5, 4702606 (2019)
- [2] T. Ichikawa et al., “Experimental Study on Quench Protection of HTS Magnet Composed of Multiple Pancake-Coils by Use of Auxiliary Resistive Shunt Loop Method,” IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 30, No. 4, 4703806 (2020)
- [3] Y. Fuchida et al., “Reduction of Hot-Spot Temperature of REBCO Coils by Use of Stabilizing Cu Strips on REBCO-Coated Wire,” IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 29, No. 5, 4603104 (2019)
- [4] H. Toriyama et al., “Quench protection system for an HTS coil that uses Cu tape co-wound with an HTS tape,” Supercond. Sci. Technol. 32 115016 (2019)
- [5] 尾上雄海 他、「銅テープ共巻きコイルショート法による HTS コイルのクエンチ保護特製向上の検討」令和 2 年電気学会全国大会予稿

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 運輸分野への高温超電導適用基盤技術

(1) 超電導き電線

本研究開発テーマにて、km級の長距離冷却基盤技術が確立することで、直流電気鉄道への超電導技術導入が加速される。鉄道き電線を超電導化することで、回生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの大きな効果が期待できる。電気鉄道の直流路線は、き電電圧は異なるが、国内で11,843km、国外で94,880kmにおよび市場規模は大きい。

(2) 冷凍機

鉄道用の冷却設備として、限られた設置スペースに大きな工事コストを必要とすることなくコンパクト冷凍機の設置が可能である。またブレイトンサイクルを採用した冷凍機であることから、冷凍能力kWあたりの消費電力が小さく、省エネ化・ランニングコスト削減を図ることが事業化のメリットとして期待できる。

窒素温度領域の冷凍機は超電導分野に限らず食品分野や細胞凍結等の医療分野、更には希土類元素回収用の凍結粉碎リサイクル技術などの新産業分野に幅広く利用可能である。しかし、産業用冷凍機は長時間の連続運転、高効率、小さな設置空間が常に求められる。本開発品であるブレイトン冷凍機はこれらの条件を全て満足し、新しい極低温産業を興す事ができる。世界初のコンパクト・ブレイトン冷凍機は我が国がこの分野で戦うための重要な武器となる。

(3) 液体窒素循環ポンプ

現在、日本国内で使用されている極低温循環ポンプは、海外からの輸入、かつ玉軸受を採用したものが大部分である。よって、動圧式ガス軸受を採用した本開発品は、玉軸受方式ポンプの課題解決を目指し、高信頼性、高性能化、低コスト化を図っているため、国内外の市場に受け入れられる可能性が高く、波及効果は大きいと考えられる。

開発された窒素循環ポンプは、動圧式ガス軸受を採用することで、競合技術である従来の玉軸受方式のポンプに比べ、高信頼化、高性能化、低コスト化を図ることができ、超電導き電ケーブルほか、国内外の超電導応用機器の冷媒循環用ポンプとしての活用が期待される。

(4) 断熱管技術開発

超電導き電線向け断熱管に必要とされる性能や長期信頼性を有する長尺断熱管の製造技術が確立されることで、当該市場向け断熱管供給の事業化が期待できる。また、極低温状態を保持できる断熱管として、例えば液体窒素や液化天然ガスなどの配管としても需要が期待できる。

2. 高温超伝導高安定磁場マグネットシステム技術開発

MRI 市場（生産台数）は図 4.2-1 に示すように 2015 年の時点では約 2500 台であったが、その後、約 5% の年率で伸びている。特に、欧米、日本および中国を中心に市場が拡大している。特に、3T-MRI の生産台数は現在、約 1000 台/年程度であるが、10 年後には 1.5T-MRI の生産台数を越える可能性もある。これは、画像診断医療の高度化により、より解像度の高い高磁場 MRI マグネットの需要が増えつつあるため、と考えられる。一方で、昨今の液体ヘリウムの供給不安の懸念から、液体ヘリウムを使用しない高温超電導マグネットへの期待が高まっている。高温超電導は高磁場、高電流密度化により小型、軽量化また漏れ磁場領域低減が可能になる。表 4.2-1 に示すように、現行の 1.5T-MRI 並みの漏れ磁場領域と形状が高温超電導マグネットで 3T-MRI が実現できる可能性がある。これは、1.5T-MRI から 3T-MRI への置き換えにおいて、シールドルームの改造或いは増設が不要である可能性を意味する。従って、既設の 1.5T-MRI の置き換え需要が高まる時期に、多くの施設において高温超電導 3T-MRI への置き換えが進むことが期待される。またさらに、この MRI 高温超電導マグネットが実現すると当然、液体ヘリウムが不要となる。つまり、電源があれば MRI 画像診断が可能となる。これまでヘリウムの流通が困難であった地域での MRI 画像診断が可能となり、世界中の多くの人々の医療に貢献できる。また、小型・軽量、漏れ磁場領域低減により健診車への搭載が容易になり、地域診療の向上も期待できる。さらに、高温超電導コイルの特長である高磁場発生により 3T を越える高磁場 MRI が実現できれば高精細画像が短時間で取得できるようになり、ガンやアルツハイマー病などの中枢神経系の疾患等、多くの疾患に対する MRI 画像診断への貢献が期待できる。昨今研究開発が盛んな他の機能性断層画像診断技術と併用することで、その活用の方は更に広がり、診断技術の高度化に大きく貢献する。



図 4-1 MRI システムの生産予想（BCC Research Report より外挿）

表 4-1 MRI 超電導マグネットの諸元（設計例）

| | 現 1.5T | 現 3T | HTS-3T |
|---------------------------------|---------|---------|----------------|
| 中心磁場 (T) | 1.5 | 2.9 | 2.9 |
| 軸長 (m) | 1.4 | 1.7 | 1.6 |
| 重量 (ton) | 4 | 6 | 4.5 |
| 漏れ磁場 (m) | 3.8x2.4 | 4.5x2.8 | 3.8x2.4 |
| コイル電流密度 (A/mm ²) | 180 | 120 | 200 |
| 最大経験磁場 (T) | 5.5 | 5.5 | 7.0 |

しかしながら現状において、高温超電導線材の価格が低温超電導線材の価格と比較して、通電性能価格比（円/A m比）でおよそ 20 倍近く高価であるため、コスト面で不利である。今後、線材の量産化技術開発により高温超電導価格の価格低下が必要であるが、現在主流の低温超電導線材 (NbTi 線材) と比較して、1.5~2 倍程度の価格帯に入ってくれば、事業成立が視野に入ってくると考えられる。従って、これらの状況を勘案しつつ高温超電導 3T-MRI の市場投入時期を決定していく。高温超電導 3T-MRI が市場投入された後には量産体制へ移行、高温超電導線材の価格はさらに低下していくと見込まれる。結果、小型・軽量化のアドバンテージを活かし、1.5T-MRI からの置き換え需要が喚起され、市場がさらに伸びることが期待できる。上記のような事業戦略を想定し、高温超電導コイル製造技術を深化すべく開発を継続、適切な時期に市場投入する。

一方、省エネ性については、高温超電導のメリットである冷却温度がこれまでの液体ヘリウム温度 (4.2K) から 20~30K に上がり、中間温度も 55K から 70K 程度に上げることができる。これにより冷凍機の性能を低減できることから消費電力が現行の 7kW から 5kW 程度の 30%低減が可能となる。1 台あたりの省エネ効果は、年 17MWh となる。例えば、MRI マグネットの年間生産台数が 3800 台とし 10 年間で生産される 3.8 万台のうち 10%の 3800 台が高温超電導マグネットになると、65GWh/年の省エネ効果となり、更に 20 年後には、稼働数が 10 万台程度になると見込まれるが、このうち 20%の 2 万台が高温超電導マグネットになると、340GWh/年の省エネ効果が期待できる。将来、線材や冷凍機の性能が向上することで上記の 2~3 倍の省エネ効果がある可能性がある。

高温超電導接続技術と永久電流モードマグネットに対する保護・焼損対策技術は、ドライブモード高温超電導 MRI の次の世代の機種で活用される技術であ

り、高温超電導 MRI の一層の高機能化に寄与する。高温超電導でも低温超電導のような永久電流運転が可能になれば、広く普及している低温超電導 MRI の完全な上位互換となり得る。

開発した高温超電導線材の接続技術は、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を示すものである。しかし、MRI マグネットで求められる接続抵抗（最終目標である接続 1 箇所あたり $10^{-12} \Omega$ ）を実現するために、現状では高コストの高温超電導線材を長尺にわたって接続する必要がある。これは、REBCO 高温超電導線材の REBCO 層と金属保護層との間にもともと存在する抵抗に起因している。これを改善し、接続抵抗を 1/10 にする新型線材の開発も行った。現状では臨界電流密度が一桁近く低下してしまっているが、この点については解決策が考案されている。しかし線材製造における工程の追加は、コスト増と、場合によっては生産速度低下の要因となるため、ユーザーのニーズに合わせた開発が必要となる。本事業終了後も、産業技術総合研究所と株式会社フジクラの共同研究により開発が継続されている。REBCO 層と異種超電導材料が超電導接続する Indirect 超電導接続は、本事業においては、直流通電による電流電圧特性評価、断面観察、減衰法による抵抗評価、の 3 つの証拠がすべて揃った接続は確認できなかったが、可能性は残されており、引き続きの研究開発が望まれる。産業技術総合研究所をはじめ、国立研究開発法人や大学、一部企業において研究開発が継続されている。

保護・焼損対策技術については、高磁場高温超電導コイルの焼損の問題が多く報告・議論されている中、従来にない新しい保護方法を開発した。大規模マグネットほど保護効果が高いことがシミュレーション等で示されているが、実用化には様々な規模の高温超電導マグネットシステムでの採用実績を重ねていき、信頼性を高めていくことが肝要である。引き続き産業技術総合研究所および上智大学にて研究開発を継続する。

高温超電導接続技術および保護・焼損対策技術は、MRI 以外の高温超電導機器にも適用可能で、波及効果が高い汎用の技術である。積極的に様々なアプリケーションへの適用を進めることにより、高温超電導機器の実用化促進に貢献することが期待される。具体的な技術移転の対象として、高温超電導接続技術については、マグネットメーカーのみならず高温超電導線材メーカーも対象であり、株式会社フジクラと新型線材の開発を進めつつ、移転先を検討する。本事業において開発した超電導ペーストについては、接続以外にエレクトロニクス応用等のさまざまな用途が期待されるため、引き続き改良を進め、アプリケーションを模索する。保護技術は、基礎技術を研究する国内外の大学から実用機を開発するマグネットメーカーまで幅広い層に対して、学会発表等を通じて成果をアピールし、実績を重ねることで普及を目指す。

「高温超電導実用化促進技術開発」基本計画

省エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

再生可能エネルギー利用を更に向上させるため分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロス無く送電を行う送電技術や、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高めるための送電技術を確立することは重要な課題である。これらの課題解決のために、大電流・高磁場を発生可能で、電気抵抗による損失なく電気を送れる超電導技術が期待されている。このような背景のもと、エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）では超電導技術などの基盤技術の開発を加速することが必要とされている。

一方で、平成24年末、超電導状態にするために冷媒として用いられるヘリウムが世界的に供給不足となる「ヘリウムショック」により、磁気共鳴画像装置（以下「MRI」(Magnetic Resonance Imaging) という。）、核磁気共鳴装置（以下「NMR」(Nuclear Magnetic Resonance) という。）等の停止を余儀なくされた。世界の商用ヘリウムの約8割を生産する米国では、平成27年までの期限付きでの民間へのヘリウム放出抑制を平成32年まで延長することとなったが、それまでに備蓄が底をつく可能性があると言われている。そのためヘリウムの供給不足リスクに備え、液体ヘリウムを必要としない超電導応用技術開発を行うことが資源セキュリティの観点からも急務となっている。

② 我が国の状況

超電導交流送電ケーブルシステム¹の開発に関し、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）は「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（平成19年度～平成25年度）において、66kV／200MVA級三心一括型超電導ケーブルシステムの一年間以上の実系統連系試験を行い、電力システムの一部として利用可能な信頼性を有することを検証するとともに、冷却システム²に関しては、数kW級のブレイトン冷凍機開発を実施し冷凍機単独でCOP (Coefficient of Performance) ³0.10を達成した。その後、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」（平成26

¹本文書中において、超電導ケーブルシステムとは、高温超電導線材を用いた超電導ケーブル、液体窒素循環による冷却システム及び電力等制御システムからなるシステム全体を指す。

²本文書中において、冷却システムとは、液体窒素等の循環により超電導ケーブルを所定の温度以下に保つことを目的としたシステムを指す。

³本文書中において、COPは次の様に定義する。冷却システムの定格運転条件における、1時間当たりの、(冷却能力) / (冷凍機動力+ポンプ動力)

年度～平成27年度)において実際の電力系統へ導入するため、地絡・短絡などの事故時の安全性評価と対応策の構築、ブレイトン冷凍機の耐久性評価を進めている。

また、経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」(平成24年度～平成27年度)では、データセンターへの直流送電実用線路及び長距離(1 km)直流送電実験線路を敷設し、超電導直流送電の実証試験等を行っている。

鉄道き電線へ適用可能な超電導直流送電ケーブルシステムの開発に関しては、公益財団法人鉄道総合技術研究所(以下「鉄道総研」という。)等が、国立研究開発法人科学技術振興機構による研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」及び国土交通省による鉄道技術開発費補助事業の一環として推進し、平成27年に伊豆箱根鉄道・駿豆線において、国内外で初めての営業線での超電導送電による列車走行実験に成功しており、実用化に向けた基礎技術開発が開始された段階にある。

一方、我が国の高温超電導マグネット(コイル)の研究開発に関しては、特にMRI及びNMRに対して、ヘリウム冷媒を使用しないこと、システムのコンパクト化や高解像度化などが期待されている。更なる高磁場実現により高解像度化や、従来の水素に加え、炭素、窒素、酸素及びリン等の計測核種の拡大を狙った高温超電導高磁場・高安定コイル開発を経済産業省、国立研究開発法人日本医療研究開発機構が「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」(平成25年度～平成27年度)により実施し、高温超電導線材(Y系線材)による高安定かつ高均一磁場を発生する高磁場コイル実現の可能性を検証している。

超電導線材に関しては、その電気特性、線材製造要素技術ともに世界を先導してきた。Bi系線材は、被覆材として銀を用いるため線材のコスト高が懸念されているものの、線材自体は量産化が可能な技術水準に達している。Y系線材は、高磁場中でも高い臨界特性を示すほか、線材に使用される銀の使用量が少ないため材料コストはBi系線材に比べて有利になると期待されている。日本はこれまで、性能向上を重視して技術開発を進め、初期には米国と、近年は韓国と競いつつ世界の先頭を走ってきた。

③ 世界の取組状況

韓国は、平成23年からGENIプロジェクトで、Y系線材を用いた22.9 kV/50 MVA級、長さ410 mの三心一括型超電導ケーブルの実系統実証試験を実施している。また、JEJUプロジェクトにおいて、80 kV/500 MVA級、長さ500 mの超電導直流ケーブル及び154 kV/500 MVA級、長さ1 kmの超電導交流ケーブルを開発して、実系統にて実証する計画を発表している。

ドイツは、Ampacityプロジェクトで、Bi系線材を用いた10 kV/40 MVA級、長さ1 kmの三相同軸型超電導交流ケーブルを開発し、平成26年春には超電導限流器と組み合わせて実系統試験を実施する計画を、発表してい

る。

鉄道き電線における、諸外国の取組は現在のところ報告されていない。

高温超電導のMRI用マグネットに関する海外の研究開発に関しては、イタリアでMgB₂線材を用いた0.5テスラ（テスラ：磁束密度単位、以下「T」という。）マグネットが、ドイツではBi系線材による全身用0.2Tマグネットが開発された。米国ではBi系線材による四肢用1.5Tマグネット開発を進めている。またニュージーランドではY系線材による1.5T四肢用マグネットを、中国ではBi系線材による1.5Tマグネットが開発され、現在は3T、7Tマグネットの研究開発が進められている。

Y系線材の研究開発に関しては、韓国SUNAMや米国AMSC、Super Power（古河電気工業）が、線材性能の向上や低コスト化に向けた長尺線材の高速製造等に関する開発を実施している。

④ 本プロジェクトのねらい

これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果は、実用化へ向けた開発へ移行可能な段階にある。本プロジェクトでは高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ（FS）開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。このため本プロジェクトにおいては、a. 高温超電導送配電技術開発、b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発を総合的に推進する。

a. 高温超電導送配電技術開発においては、電力分野及び運輸分野への技術開発を実施する。

電力分野においては、今後再生可能エネルギー利用を更に向上させるため、分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロスを最小限に抑えて送電を行う送電技術の確立が必要となる。このため本プロジェクトでは、超電導ケーブルシステム実用へ不可欠な安全性能の確保、事故・故障発生時の復旧方法策定を実施する。また、平成24年度から経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」の研究開発成果を共有し、超電導直流送電技術の実証を行い、設計・建設方法及び運用・保守・障害復旧などの基準案策定を「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」として実施する。

運輸分野においては、低損失・大容量送電が可能な鉄道き電線システム開発と安全性及び信頼性の実証を総合的に実施することにより、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高める送電技術の確立を目指し、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」を実施する。

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発はその応用分野は多岐に渡

るが、ヘリウムレス及び省エネルギー並びに競争力強化のための実用化共通基盤技術として更に実用完成度を高めるため、MRI分野への適用を狙いとした高温超電導高安定磁場マグネットシステムの技術開発を「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」として実施する。

高温超電導高安定磁場マグネットシステムの市場展開時期を平成38年に設定し、投入時期にMRI市場拡大が予測される3T級以上のMRIへの適用を主眼とした伝導冷却方式の超電導マグネットシステムの実現に向けた技術開発及び実証を行う。具体的には、コイル化技術、発生磁場の整形技術、マグネット小型化技術などを確立し、高温超電導を適用したMRIの技術実証を行う。なお、マグネット開発における高電流密度化などによる高磁場発生技術、線材使用量最少化を実現するためのマグネット小型化技術の開発により製造コストの低減を図る。

さらに、超電導応用商品実現のための基盤技術開発として、超電導マグネット用途の要求を満たす磁場特性の向上及びコスト低減を目指す高温超電導線材の技術開発を「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」として実施する。

「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」はこれまでの研究開発成果を基に、実証を通して実用化への仕上げを実施する実用化促進実証技術開発として、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」、「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」及び「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」は実用への基盤技術を確立するため研究開発を実施する実用化促進基盤技術開発として実施する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

a. 高温超電導送配電技術開発

a-1 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発

今後、超電導ケーブルシステムを電力系統へ導入するために、通常時の信頼性だけでなく、ケーブルに対する外部からの電氣的・機械的な損傷等による不測の事故（地絡・短絡・外傷等）時に生じる現象と影響を把握し、その結果を踏まえて安全性、信頼性を検討する必要がある。また、冷却システムの大きさ、効率と耐久性及びコストを更に改善する必要もある。加えて、事故・故障等を早期に検知するとともに、その影響を最小限に抑える等、実用性を向上させるための対策も重要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【最終目標（平成30年度）】

1) 安全性評価試験による影響検証に係る最終目標

- ・送電用及び配電用超電導ケーブル仕様案の決定
- ・超電導ケーブルシステム安全性評価試験方法の作成

- ・作成した安全性評価試験方法の国際標準化活動への反映
- ・安全性評価の対象となる事象による超電導ケーブルシステムへの影響を、実用上信頼できる評価を行うためのシミュレーション技術の完成
- 2) 早期復旧等の実用化のための対策検討に係る最終目標
 - ・リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加すべき要素の決定
 - ・復旧方法等の検討結果を反映した、運転管理に係るガイドライン作成
- 3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発に係る最終目標
 - ・実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さ当たりの熱侵入量を 1.8 W/m/条 以下
- 4) 冷却システムの高効率化技術の開発に係る最終目標
 - ・系統連系試験の実施
 - ・実運用を想定した条件で、冷却システム全体の COP を 0.11 以上とすること、及び冷凍機本体並びに主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を 40,000 時間以上とすること
- 5) 超電導直流送電システムの実用化開発に係る最終目標
 - ・実用線路での運転試験を実施
 - ・設計、運用、保守ガイドライン作成等

a-2 運輸分野への超電導適用基盤技術開発

今後、鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの実用化へ向けては超電導ケーブルの長距離冷却技術開発が必要である。

本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【中間目標（平成30年度）】

- 1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築
 - ・サイズ 2 m³/kW の冷凍機の開発
 - ・揚程 0.6 MPa、流量 50 L/min 以上の極低温循環ポンプの開発
 - ・2 W/m 以下、真空維持 1 年以上を見通せる断熱管の開発
 - ・システム保全技術の検証
- 2) 2 km 級長距離冷却システムの構築及び検証

【最終目標（平成32年度）】

- 1) 路線環境に対応した信頼性評価
- 2) 鉄道き電線用長距離冷却システムの設計・評価基準、保全基準の策定

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発

b-1 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

本開発では、「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」における技術開発の残課題を踏まえて、ヘリウムレス、省エネルギー及びシェア拡大に資する 3 T

級MRI用を主眼とした高温超電導高磁場マグネットシステムの開発を行う必要がある。さらに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のため、超電導接続技術の実現に向けた研究開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【中間目標（平成30年度）】

- 1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作（直径500mmボア、3T、漏れ磁場（2.5m×3m））
- 2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価（安定度、均一度）。高温超電導マグネットによる小領域（30mmDSV (Diameter of Spherical Volume)）イメージング実証
- 3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証
- 4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討

【最終目標（平成32年度）】

- 1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3Tマグネットによるイメージング実証（150mmDSV）。磁場均一度10ppm（250mmDSV）未満、磁場安定度1ppm/hr未満性能を達成。
- 2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5Tマグネットの試作（コイル平均電流密度200A/mm²（7T）超、低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場均一度10ppm（250mmDSV）、磁場安定度0.1ppm/hr未満）
- 3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化実施
- 4) コイル保護として、焼損対策手法の確立
- 5) 高温超電導接続として、接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下の接続を実現

b-2 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発

高温超電導線材（Y系線材及びMgB₂線材など）はコスト面、材料面また冷媒としての液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されている。しかし、低価格化実現が遅れており、超電導応用機器開発を推進する上で大きな課題となっている。加えて、更なる高磁場特性の向上が求められている。

この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善と、工法改善による生産性向上を実現するための研究開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。

【最終目標（平成30年度）】

- 1) 高磁場コイル用線材として、以下を開発目標とする。
 - ・ Y系線材の場合、温度 30 K、磁場 7 T 条件にて平均電流密度 400 A/mm^2 以上。MgB₂線材の場合、温度 20 K、磁場 2 T 条件にて平均電流密度 250 A/mm^2 以上
 - ・ 1 km における臨界電流の低下率（(全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値) / 全長の臨界電流平均値）を 0.15 未満
- 2) 生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を 50 m/hr 以上

②アウトカム目標

a. 高温超電導送配電技術開発

大都市圏での局所的な電力需要の伸びや電力インフラ機器の経年による置き換えが予想される中、電力インフラの拡充・ケーブル交換には、共同溝の使用制約や送電網の用地買収条件を考慮すると、従来の銅ケーブルに比べ、高効率で送電容量の大きい超電導ケーブルの実用化が必要である。超電導ケーブルは、導入初期時には、揚水発電所の発電機引出線や都市部の地中ケーブルへの適用が見込まれている。超電導ケーブルは、従来の地中ケーブルに対して送電損失を 1 / 2 程度に抑えられることから、例えば、110 kV 以上 275 kV 以下の地中ケーブルのうち 20% が超電導ケーブルに置き換わり、ケーブルの年間平均利用率を 50% と仮定した場合、年間 51 GWh 省エネルギー効果が得られると見込まれる。なお、超電導ケーブルを用いた送電システムの国内の市場規模は、平成 42 年において首都圏を中心に年間 105 億円程度見込まれる。

鉄道き電線への超電導ケーブルシステム適用では、大幅な電圧降下ロス削減、回生電力の利用により、平成 42 年度において年間 69 GWh 省エネルギー効果が得られると見込まれる。加えて、電圧降下抑制により運行間隔の短縮、変電所間隔の拡大などが図れる。なお、超電導ケーブルを用いた鉄道き電線システムの国内の市場規模は、平成 42 年において年間 50 億円程度見込まれる。

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発

MR I 用途を主眼とした高温超電導マグネットは 30 K 程度での運転を想定する。現行の低温超電導 MR I マグネットの温度が 4.2 K であるため、消費電力は 30% 低減 (2 kW/台)。年間 17 MWh/台の省エネ効果が期待できる。平成 42 年度において年間 65 GWh 省エネルギー効果が得られると見込まれる。

また、高温超電導 MR I マグネットは、現行の低温超電導マグネットと同一サイズでの高磁場化が可能となる。これにより、現在広く医療現場で使用されている。1.5 T 低温超電導 MR I システムの寿命によるシステム置き換えの際、3 T 高温超電導マグネットが採用される可能性が高くなる。この 3 T 高温超電導 MR I システムが医療現場に浸透することにより、現行よりも高解像度な医療画像取得が可能になり、脳梗塞などの微小領域疾患の診断が期待できる。さらに、高磁場 MR I システムの実現により、神経系や細胞レベルでの診断に向けた医療情報の提供が可能になることも期待されている。また、いち早く世界市場に高温超電導

技術による小型 3 T マグネットを浸透させることができれば、これまで立ち後れていた我が国の MRI の世界シェアを拡大することができる。なお、高温超電導マグネットを用いた MRI の国内の市場規模は、平成 42 年において年間 965 億円程度見込まれる。

③アウトカム目標達成に向けての取り組み

NEDO は、ケーブル、冷却システムの製造段階等で冷却に用いる液体窒素等が高圧ガス保安法の適用を受ける可能性があるため、規制緩和等に向けた働きかけを必要に応じて実施する。また、先端分野での国際標準化活動を積極的に進め、将来の海外市場展開を円滑に行う。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【助成事業】

< a. 高温超電導送配電技術開発 >

研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」

(実施期間：平成 28 年度～平成 30 年度)

これら研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施、中小企業の場合には NEDO 負担率 2/3、その他の場合には NEDO 負担率 1/2 とする。

【委託事業】

< a. 高温超電導送配電技術開発 >

研究開発項目②「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」

(実施期間：平成 28 年度～平成 32 年度)

本研究開発は、公共性の高い事業設備に関する技術開発で、実用化に向けハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

< b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発 >

研究開発項目③「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

(実施期間：平成 28 年度～平成 32 年度)

本研究開発は、ヘリウム調達リスクに備え、実用化に長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

【委託事業+助成事業】

< b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発 >

研究開発項目④「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

(実施期間：平成28年度～平成30年度)

本研究開発項目の中で、研究開発項目③を実施上不可欠な高磁場特性改善は、「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する必要がある研究開発であり、委託事業として実施。その他の研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施、中小企業の場合にはNEDO負担率2/3、その他の場合にはNEDO負担率1/2とする。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（候補）にNEDO 省エネルギー部 主任研究員 菱谷清を指名して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外での団体と連携して実施することができるものとする。

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な対策を講じるものとする。運営管理にあたっては、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

プロジェクトマネージャー（以下「PM」という）は、プロジェクトリーダーや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術委員会を組織し、定期的に技術評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、必要に応じて内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を行う場合、委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

本事業の期間は、平成28年度から平成32年度までの5年間とする。

なお、研究開発項目①及び④においては、平成28年度から平成30年度までの3年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、中間評価を平成30年度、事後評価を平成33年度に実施し、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果等を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発成果のうち共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

②標準化施策等との連携

得られた研究開発成果については、標準化等との連携を図ることとし、標準化に向けて開発する評価手法の提案、データの提供等を積極的に行う。具体的には、超電導ケーブルシステム安全性評価試験方法の国際標準化活動への反映等を行う。なお、先端分野での国際標準化活動を重要視する観点から、NEDOは、研究開発成果の国際標準化を戦略的に推進する仕組みを構築する。

③ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、本プロジェクトの当初から、事業化を見据えた知財戦略を検討・構築し、適切な知財管理を実施する。

(2) 「プロジェクト基本計画」の変更

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構法」第15条第1項第一号ニ、第三号及び第九号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成28年2月、制定。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」

1. 研究開発の必要性

安定供給が要求される電力系統に超電導ケーブルシステムを実運用行うためには、安全性・信頼性の確保と合わせて、事故・故障等が発生した場合の影響最小化、早期復旧方法の事前確立が必要である。これまで「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」にて、このような超電導ケーブルシステムとしての研究開発を実施したが、継続して実用化に向けた検討と検証を行い、評価試験方法を普及させる必要がある。

なお、平成24年度から経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」の研究開発成果を共有し超電導直流送電技術の実証を行い、設計・建設方法及び運用・保守・障害復旧などの基準案策定を実施する。

2. 研究開発の具体的な内容

(1) 安全性評価試験による影響検証

- 超電導ケーブルシステムでの絶縁破壊等の電氣的事故、機械的故障や損傷、並びに、冷却システムの故障等、超電導ケーブルシステムで想定される各種の事故・故障を、海外での適用も考慮に入れて、抽出・分類し、発生頻度及び損害レベルを考慮して、安全性評価試験を行うべき項目を選定する。また、試験条件及び試験方法等、安全性評価試験の実施に係る細目を決定する。
- 安全性評価試験に用いる超電導ケーブルサンプルを基礎検討も含め想定する用途に応じて作製する。当該ケーブルサンプルを用いて、安全性評価試験を実施する。また、安全性評価の対象とする事象による超電導ケーブルシステムへの影響について、実用的な信頼性で評価するシミュレーション技術を開発する。その試験結果及びシミュレーションにより、超電導ケーブルシステムに及ぼす影響を検証する。
- 決定した安全性評価試験方法を、IEA、ISO等の場を通じて、国際的に共有し普及・標準化を目指す。

(2) 早期復旧等の実用化のための対策検討

- 試験結果及びシミュレーションによって示された影響の度合いに応じて、超電導ケーブルシステムとしての、事故・故障発生頻度の低減、損害の低減、及び事故・故障からの復旧方法等を検討する。
- 検討の結果、事故・故障発生頻度及び損害の低減のために、超電導ケーブルに付加すべき要素が明確になった場合は、安全性評価試験におけるケーブルサンプルの試作に反映する。
- 復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして取りまとめる。

(3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

- 超電導ケーブルの断熱に係る構造・材質を改良して、2種類以上の電圧階級

について試作した超電導ケーブルの改善効果を実験によって確認する。

- (4) 冷却システムの高効率化技術の開発
- ・ 冷却システムを小型化するとともに、効率を向上させる技術開発を行う。
 - ・ 開発した冷却システムと超電導ケーブルを組み合わせ、系統連系長期運転試験を行い、性能及び耐久性の評価、各種データを蓄積、超電導ケーブル設計・冷却システム設計・運転管理ガイドラインに反映させる。
 - ・ 長期試験終了後の装置の残存性能検証、寿命40,000時間を担保する加速試験方法を確立する。
- (5) 超電導直流送電システムの実用化開発
- ・ 実用線路での運転試験を実施する。
 - ・ 超電導直流送電システムを実用化するために必要なガイドラインの策定等を実施する。

3. 達成目標

【最終目標】

- (1) 安全性評価試験による影響検証に係る最終目標
- ・ 送電用及び配電用超電導ケーブルの仕様案の決定
 - ・ 超電導ケーブルシステムの安全性評価試験方法の作成
 - ・ 作成した安全性評価試験方法を国際標準化活動に反映
 - ・ 安全性評価の対象となる事象による超電導ケーブルシステムへの影響を、実用上信頼できる評価を行うためのシミュレーション技術の完成
- (2) 早期復旧等の実用化のための対策検討に係る最終目標
- ・ リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加すべき要素の決定
 - ・ 復旧方法等の検討結果を反映した、運転管理に係るガイドライン作成
- (3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発に係る最終目標
- ・ 実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さ当たりの熱侵入量が1.8 W/m/条以下
- (4) 冷却システムの高効率化技術の開発に係る最終目標
- ・ 系統連系試験の実施
 - ・ 実運用を想定した条件で、冷却システム全体のCOPを0.11以上とすること、及び冷凍機本体並びに主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を40,000時間以上とすること
- (5) 超電導直流送電システムの実用化開発に係る最終目標
- ・ 実用線路での運転試験を実施
 - ・ 設計、運用、保守ガイドライン作成等

4. 研究開発スケジュール

| | 平成 28 年度 | 平成 29 年度 | 平成 30 年度 |
|------------------------------|-------------|------------------|------------|
| 電力送電用高温超電導 ケーブルシステムの実用化開発 | | | |
| (1) 超電導ケーブル 安全性検証と基準策定 | ケーブルサンプル作成 | | |
| | メーカー試験・ | 分析評価 | ケーブル設計仕様策定 |
| | | | 安全性評価試験案作成 |
| | | 評価試験方法の普及・国際準化 | |
| (2) 早期復旧ガイドライン策定 | 復旧方法の検討 | | |
| | | 早期復旧ガイドラインの作成 | |
| (3) 超電導ケーブルの侵入熱低減 | 冷却循環による長尺評価 | 断熱設計仕様の確立 | |
| (4) 冷却システムの高効率化 | 系統連系運転 | | |
| | | 残存性能試験 解体撤去 | ケーブル解体調査 |
| (5) 超電導直流送電システム ガイドライン策定 | 系統運転評価 | | |
| | | 設計・運用・保守ガイドライン策定 | |

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目②「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

超電導技術は、直流電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により、送電ケーブルへの適用が期待されている。特に、鉄道等社会インフラへ導入できれば波及効果が極めて大きいと考えられるが、長距離冷却技術などの重要な課題が解決されておらず、普及段階への大きな足枷となっている。

この課題解決に向け、必要な冷凍機、極低温循環ポンプ、断熱管などの基盤技術の開発を行うとともに、数km級の長距離冷却システムを構築し、安定性、信頼性及び実用性の確保を目指す。

2. 具体的研究内容

実用化の重要な課題である長距離冷却技術の開発を行う。

(1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築

- ・小型冷凍機の開発
- ・液体窒素循環ポンプの開発
- ・断熱管の開発

(2) 長距離冷却システムの構築及び評価

- ・窒素冷却による超電導動作確認
- ・システム保全技術の構築

3. 達成目標

【中間目標（平成30年度）】

(1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築

- ・小型冷凍機（設置寸法 2 m³/kW）の開発
- ・揚程0.6 MPa、流量50 L/min以上の液体窒素循環ポンプの開発
- ・2 W/m以下、真空維持1年以上を見通せる断熱管技術
- ・システム保全技術の検証

(2) 2 km級長距離冷却システムの構築及び検証

【最終目標（平成32年度）】

- ・路線環境に対応した信頼性評価
- ・鉄道き電線用長距離冷却システム設計・評価基準及び保全基準の策定

4. 研究開発スケジュール

| | 平成28年度 | 平成29年度 | 平成30年度 | 平成31年度 | 平成32年度 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| (1) 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発 | | | | | |
| ①コンパクト冷凍機技術開発 | | | | | |
| ②液体窒素循環ポンプ技術開発 | | | | | |
| ③断熱管技術開発 | | | | | |
| (2) 長距離冷却システム構築・評価 | | | | | |
| ①実環境下での評価実施 | | | | | |
| ②システム保全技術 | | | | | |

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目③「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

1. 研究開発の必要性

次世代高磁場MRI用のコイルとして、コスト面、材料面又は液体ヘリウムレスの観点からY系線材の適用が期待されている。

しかし、Y系線材には、機械応力に対する超電導特性劣化や循環電流が原因となる磁場の乱れなどの課題があり、コイル化技術及び設計技術の向上に向けた研究開発が求められている。

さらに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のためには、超電導接続技術の実現に向けた研究開発が求められている。

2. 具体的研究内容

(1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

- ・ コイル・マグネット製作技術として、コイルの巻線などの加工時、冷却時及び励磁時に生じる超電導特性の劣化を防ぐ構造、製造方法及び品質管理法を確立する。
- ・ 線材の磁化による磁場乱れ対策として、線材の磁化による磁場の乱れ及び安定性の影響を解析・実測両面から定量化し、対策技術を確立する。
- ・ コイル保護手法の検討として、コイルに異常が発生した場合のコイル焼損を防止する保護手法を開発する。

(2) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

- ・ 高磁場・高電流密度コイル設計技術の開発として、実機コイルの高磁場化と小型化に対応した磁気設計、構造設計、冷却設計技術を確立する。
- ・ 省エネ・低コストシステムの開発として、励磁用と定常運転用で電源を分割する省エネシステムや運転条件（冷却温度、電流等）最適化等による低コスト化を検討する。

(3) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

- ・ 実用的永久電流マグネットに必要な高温超電導接続技術を確立する。

3. 達成目標

【中間目標（平成30年度）】

- (1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作（直径500mmボア、3T、漏れ磁場（2.5m×3m））
- (2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価（安定度、均一度）。高温超電導マグネットによる小領域（30mm球）イメージング実証
- (3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証

(4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討

【最終目標（平成32年度）】

- (1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3 Tマグネットによるイメージング実証（150 mm 球）。磁場均一度10 ppm未満（250 mmDSV）、磁場安定度1 ppm / hr 未満。
- (2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5 Tマグネットの試作（コイル平均電流密度200 A/mm²超（7 T）、低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場均一度10 ppm未満（250 mmDSV）、磁場安定度0.1 ppm / hr 未満）
- (3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化
- (4) コイル保護として、焼損対策手法の確立
- (5) 高温超電導接続として、接続点での抵抗値10⁻¹² Ω以下の接続を実現

4. 開発スケジュール

| | 平成28年度 | 平成29年度 | 平成30年度 | 平成31年度 | 平成32年度 |
|------------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| マイルストーン | | | ■ 3T-1/2マグネット 撮像評価 | | ■ 5T-1/2マグネット 撮像評価 |
| (1) 高温超電導コイルの 実用化技術開発 | | | | | |
| ①コイル・マグネット製作技術 | | 3T-1/2マグネット試作 | 磁場評価・撮像 | 5T-1/2マグネット試作 | 磁場評価・撮像 |
| ②磁化による磁場乱れ対策 | 磁場変動、磁化解析 | | 磁場変動、磁化解析 | | |
| ③コイル保護手法の検討 | コイル保護方式検討 | | コイル保護実用化検討 | | |
| (2) 高温超電導マグネットの システム最適化開発 | | | | | |
| ①高磁場・高電流密度コイル設計技術 | 3T-1/2マグネット設計 | 5T-1/2マグネット 基本設計 | 5T-1/2マグネット設計 | 3T実機マグネット小型化 | |
| ②省エネ・低コストシステムの開発 | | システム省エネ・低コスト検討 | | | |
| (3) 超電導接続技術開発 | | 高温超電導線材の超電導接続技術検討 | | | コイル試作・評価 |

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目④「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

1. 研究開発の必要性

高温超電導線材（Y系線材及びMgB₂線材など）はコスト面、材料面また液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されているが、このためには高磁場特性の向上、及び低価格化の実現が必要である。

この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善と、工法改善による生産性向上を実現するための研究開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。

2. 具体的研究内容

- (1) 高磁場コイル用途線材として、高磁場での臨界電流密度の向上、及び全長に渡る均一性能の向上を図る
- (2) 製造各プロセス改善により、スループットを上げる

3. 達成目標

【最終目標】

- (1) 高磁場コイル用線材として、以下を開発目標とする。
 - ・ Y系線材の場合、温度30K、磁場7T条件にて平均電流密度400A/mm²以上。MgB₂線材の場合、温度20K、磁場2T条件にて平均電流密度250A/mm²以上。
 - ・ 1kmにおける臨界電流の低下率（(全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)／全長の臨界電流平均値）を0.15未満
- (2) 生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を50m/hr以上

4. 開発スケジュール

| | 平成28年度 | 平成29年度 | 平成30年度 |
|-----------------|--------|--------|--------|
| ①高磁場特性改善 | | | |
| ・高磁場臨界電流密度の向上 | ————— | | |
| ・全長に渡る磁場安定特性の向上 | ————— | | |
| ②生産性改善 | ————— | | |

「高温超電導実用化促進技術開発基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成28年3月1日
NEDO
省エネルギー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
貴重なご意見をいただき、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間
平成28年2月3日～平成28年2月16日
2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
計1件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

| ご意見の概要 | ご意見に対する考え方 | 基本計画・技術開発課題への反映 |
|--|--|-----------------|
| 1. 研究開発の内容 | | |
| MRI 3T機の国内市場の94%は海外企業の3社の製品で占められている。税金を使う以上、国内企業に対する育成の戦略的なプランの提示が必要と考える。中国を含めた新興国でのコスト戦略を強みとした開発意欲も強くなっており、この動きに対する対応も要求される。 | 社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応してまいります。 | 特になし。 |
| Bi系高温酸化物超電導線材を利用した3Tレベル設計のMRIによるMRI画像撮影に京都大学のグループが成功させている。 （JST先端計測分析技術・機器開発プログラムによる開発、H20～H24）この開発成果、ノウハウをベースに、大学発の国内ベンチャー企業でHeレス高温酸化超電導型3T並びに7Tの医療機器の開発、製品化（2019年頃を想定）が計画されているため、平成38年（2026年）を市場展開時期とした開発は国の取り組みとしては遅すぎると思われます。 | 量産化に向けて、高磁場コイルに対する線材の高性能化、コイル設計、冷却システム設計等技術確立する要素が多くあることから平成38年度を市場展開できる時期と考えておりますが、今後さらに加速化を進めてまいります。 | 特になし。 |

| | | |
|--|---|--------------|
| <p>高磁場NMR (1.3GHz) については、電子顕微鏡市場の取り組みの失敗で国内企業が大幅に市場喪失した経験を踏まえ、欧州、米国、中国等具体的に動き出している観点から、積極的支援されることを期待します。</p> | <p>本プロジェクトは、今までの基礎研究から応用研究までを行うプロジェクトと異なり、高温超電導研究の中で実用化に近いと考えられ、かつ大きな市場規模とともに省エネルギー効果が大きいと見込める項目に対して研究費を集中投入し、早期の量産化を目指すものであります。このためNMRは、本プロジェクトの対象と致しておりません。</p> | <p>特になし。</p> |
| <p>2. その他重要事項</p> | | |
| <p>Y系超電導の線材については特許的リスクがあり、対策面等記載すべきかと思いません。</p> | <p>知的財産に関する取扱いについては、基本計画に記載しており、事業化を見据えた知財戦略を検討・構築し、適切な知財管理を実施します。</p> | <p>特になし。</p> |

以上

付録資料 3

●特許論文等リスト

【特許】

| 番号 | 出願者 | 出願番号 | 国内 外国 PCT | 出願日 | 状態 | 名 称 | 発明者 |
|----|----------------|-----------------------|-----------------|-----------|----|----------------------------------|--------------|
| 1 | 前川製作所、 鉄道総研 | 特願 2019-174172 | PCT | 2019/9/25 | 出願 | 波形配管及び断熱 配管 | 玉田紀治、 富田優 |
| 2 | 鉄道総研 | 特願 2021-010878 | 国内 | 2021/1/27 | 出願 | 診断装置及び診断 方法 | 小林祐介他 |
| 3 | 三菱電機 | PCT/JP2018 /021014 | PCT | 2018/5/31 | 公開 | 超電導マグネット および超電導マグ ネットの製造方法 | 森田 友輔 他 |
| 4 | 三菱電機 | PCT/JP2019 /032814 | PCT | 2019/8/22 | 公開 | 超電導コイル装置 及びMRI装置 | 三浦 英明 他 |
| 5 | 三菱電機 | PCT/JP2020 /004336 | PCT | 2020/2/5 | 公開 | 超電導マグネット | 三浦 英明 他 |
| 6 | 三菱電機 | PCT/JP2020 /010867 | PCT | 2020/3/12 | 出願 | 超電導マグネット | 三浦 英明 他 |
| 7 | 学校法人上智 学院 | 特願 2018-059024 | 国内 | 2018/3/26 | 出願 | 超電導装置及び超 電導コイル保護方 法 | 塚本修巳他 |
| 8 | 株式会社フジ クラ | 特願 2020- 93241 | 国内 | 2020/5/28 | 出願 | 酸化物超電導線材 および酸化物超電 導線材の製造方法 | 柿本一臣他 |
| 9 | 株式会社フジ クラ | 特願 2021-074223 | 国内 | 2021/4/26 | 出願 | 酸化物超電導線材 | 棚井澄雄他 |

付録資料 4

●特許論文等リスト

【論文】

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|---|--|--|---|----|------------|
| 1 | 廖志強、左時倫、宋瀏陽、関照議、陳山鵬、富田優、小林祐介 | 三重大学大学院、鉄道総研 | ショートタイムFFT、周波数領域の特徴パラメータおよび正準判別分析法による軸受複合異常診断法 | 日本設備管理学会誌, Vol. 29, No. 2, 50-57 | 有 | 2017/7 |
| 2 | Yusuke KOBAYASHI, Masaru TOMITA, Liuyang SONG, Peng CHEN | RTRI, Mie University | Automatic Diagnosis Method for Rolling Bearing Using Measured Signal from Distant Points | Proceedings, France-Japan and Europe-Asia Congress on Mechatronics, 45-51 | 有 | 2018/9 |
| 3 | 小林祐介、富田優、宋瀏陽、陳山鵬 | 鉄道総研、三重大学大学院 | 異常軸受から離れた場所での自動診断法 | 日本設備管理学会誌, Vol. 31, No. 1, 14-22 | 有 | 2019/4 |
| 4 | Masaru Tomita, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Kenji Suzuki, Tomoyuki Akasaka, Herve Caron, Yusuke Kobayashi, Taiki Onji | RTRI, SNCF | Train Running Test Transmitted by Superconducting Feeder Cable and Study as an Example of Line in Japan and France | IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 30 Issue: 2 | 有 | 2019/7/11 |
| 5 | Yusuke Kobayashi, Liuyang Song, Masaru Tomita, Peng Chen | RTRI, Beijing University, Mie University | Automatic Fault Detection and Isolation Method for Roller Bearing Using Hybrid-GA and Sequential Fuzzy Inference | sensors, Vol. 19, Issue16, 3553 | 有 | 2019/8 |
| 6 | Masaru Tomita, Kenji Suzuki, | RTRI, Izuhakone | Development of superconducting | The World Congress on | 有 | 2019/10/30 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|---|--|--|--|----|---------------|
| | Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Yusuke Kobayashi, Takenori Torii , Keiji Ogose, Atsushi Maeda, Herve Caron, Toshiya Matsumoto ,Hiroyu ki Ito | Railway, Tokyo Metropolitan Bureau of Transportatio n, Tokyo Metro, SNCF, Hankyu Railway, Tokyu Railway | feeder cable systems and conducting running test | Railway Research (WCRR) 2019 | | |
| 7 | 唐海紅、廖志強、方子燁、尾崎弥生、富田優、小林祐介、陳山鵬 | 三重大学大学院、鉄道総研 | ディープラーニングによる設備診断法—画像コーディングに基づくCNN法による回転機械構造系異常精密診断— | 日本設備管理学会誌, Vol. 31, No. 4, 97-103 | 有 | 2020/2 |
| 8 | Masaru Tomita, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Kenji Suzuki, Tomoyuki Akasaka, Yusuke Kobayashi, Taiki Onji, Yuki Arai | RTRI | Energy analysis of superconducting power transmission installed on the commercial railway line | Energy, Volume 209, 15, 118318 | 有 | 2020/7/4 |
| 9 | Hai-hong Tang, Zhi-qiang Liao, Yusuke Kobayashi, Tomita Masaru, Peng Chen | Mie University, RTRI | Intelligent fault diagnosis for low-speed roller bearings based on stacked auto-encoder | INTERNATIONAL JOURNAL OF COMADEM, Vol. 22, No. 4, 45-50 | 有 | 2020/10 |
| 10 | 小林祐介、富田優、宋瀏陽、陳山鵬 | 鉄道総研、三重大学大学院 | DP マッチング、周波数領域のヒストグラム及び主成分分析法を用いたインバータ制御回転機械の自動診断法 | 保全学, Vol. 20, No. 3 | 有 | 2021/10 予定 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|----------|------|--|---|----|--------|
| 11 | 谷内田 貴之 他 | 京都大学 | Magnetic Field Stability Control of HTS-MRI Magnet by Use of Highly Stabilized Power Supply | IEEE transactions on Applied Superconductivity, VOL. 27, 4702905 | 有 | 2017/6 |
| 12 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | 高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発—MRI用REBCO高温超電導モデルマグネット— | 低温工学 52 巻 4 号 2017 年 | 有 | 2017/7 |
| 13 | 大屋 正義 他 | 三菱電機 | Design and Manufacture of Half-Size 3-T High-Temperature Superconducting Magnet for MRI | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 28, NO. 3, 4401205 | 有 | 2018/4 |
| 14 | 井出 桃愛 他 | 東北大学 | The Influence of Local Critical Current Degradation on the Quench Characteristics of GdBCO Tapes and Coils | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 28, NO. 3, 4701405 | 有 | 2018/4 |
| 15 | 三浦 英明 他 | 東北大学 | Estimation Method of Optimal Amount of Overshooting Current for Temporal Uniform Magnetic Field in Conduction- | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 28, NO. 3, 4401705 | 有 | 2018/4 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|---|----|--------|
| | | | Cooled HTS Coils | | | |
| 16 | 白井 康之 他 | 京都大学 | HTS-MRI の電源駆動運用とその励磁電源 | 低温工学 53 巻 4 号 2018 年 | 有 | 2018/7 |
| 17 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | Design of a half-size 3T REBCO superconducting magnet with active shielding coils for MRI | IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 502 (2019) 012101 | 有 | 2019/4 |
| 18 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | Magnetic Design of a Half-Size 5 T High-Temperature Superconducting Coil for MRI | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 29, NO. 5, 4400505 | 有 | 2019/4 |
| 19 | 長崎 陽 他 | 東北大学 | Influence of Pre-Excitation, High Temperature Magnetization and Combined Excitation Method on Screening Current Attenuation in Conduction-Cooled REBCO Coil | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 30, No. 5, 4401006 | 有 | 2020/2 |
| 20 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | Design and Cooling Properties of High Stable Field REBCO | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol.30, No. 4, 4400904 | 有 | 2020/2 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|---------|-----------|---|--|----|-----------|
| | | | Superconducting Magnet for MRI | | | |
| 21 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | Development of a Half-Size 3 T REBCO Superconducting Magnet for MRI | Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1559, 012125 | 有 | 2020/6 |
| 22 | 北田 悟史 他 | 京都大学 | Feedforward current control of MRI magnet with power supply driven operation | Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1559, 012123 | 有 | 2020/6 |
| 23 | 長崎 陽 他 | 東北大学 | Axial compressive stress dependence of critical current of REBCO double-pancake coil | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol. 31, No. 5, 8400405 | 有 | 2021/3 |
| 24 | 清水雄平 | 産業技術総合研究所 | Preparation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ Bilayer Structure for Superconducting Connection | IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 28, Issue 4, 7500104 | 有 | 2018/1/15 |
| 25 | 松尾竜太 | 上智大学 | Study on Hot-Spot Temperature Limits of Epoxy-Impregnated Coil Wound With Bi/Ag Sheathed Wire to be Safe From Damage Caused by Quenches | IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 28, Issue 4, 4703605 | 有 | 2018/3/8 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|-------|-----------|---|--|----|------------|
| 26 | 清水雄平 | 産業技術総合研究所 | Growth and superconductivity of niobium titanium alloy thin films on strontium titanate (001) single-crystal substrates for superconducting joint | Scientific Report 8、15135 | 有 | 2018/10/11 |
| 27 | 鳥山飛史 | 上智大学 | Quench Protection of HTS Magnet Composed of Multiple Pancake-coils by Forming Auxiliary Dump Resistor Loop | IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 29, Issue 5、4702606 | 有 | 2019/2/28 |
| 28 | 瀧田佳稀 | 上智大学 | Reduction of Hot-Spot Temperature of REBCO Coil by Use of Stabilizing Cu Strips on REBCO-Coated Wire | IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 29, Issue 5、4603104 | 有 | 2019/4/1 |
| 29 | 小島あかね | 上智大学 | Study on optimal thickness of copper layer of REBCO-coated wire for quench protection | IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 502、012180 | 有 | 2019/4/15 |
| 30 | 鳥山 飛史 | 上智大学 | Quench protection system for an HTS coil that | Superconductor Science and Technology Vol. 32, No. 11、115016 | 有 | 2019/10/14 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|------|-----------|--|--|----|-----------|
| | | | uses Cu tape co-wound with an HTS tape | | | |
| 31 | 市川拓磨 | 上智大学 | Experimental Study on Quench Protection of HTS Magnet Composed of Multiple Pancake-Coils by Use of Auxiliary Resistive Shunt Loop Method | IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 30, Issue 4, 4703806 | 有 | 2020/3/23 |
| 32 | 鳥山飛史 | 上智大学 | Study on conditions to reuse quenched HTS coil | Journal of Physics: Conference Series Vol. 1559, 012119 | 有 | 2020/6/19 |
| 33 | 高島浩 | 産業技術総合研究所 | NbTi エピタキシャル薄膜の室温成膜と超電導接続要素技術 | 低温工学、第55巻 第4号、280-286 | 有 | 2020/7/20 |
| 34 | 古瀬充穂 | 産業技術総合研究所 | Splice joint resistances of commercial REBCO-coated conductors and their reduction | Cryogenics | 有 | 投稿中 |
| 35 | 大杉正樹 | フジクラ | Low resistance soldered joint of REBCO coated conductors with novel Ag-dispersed structure | IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 有 | 投稿準備中 |
| 36 | 島田涼平 | 上智大学 | Experimental study on quench protection method for HTS | IEEE Transactions on Applied | 有 | 投稿準備中 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 発表誌名、ページ番号 | 査読 | 発表年月 |
|----|-----|----|---|-------------------|----|------|
| | | | coil that uses Cu tape co-wound with HTS tape | Superconductivity | | |

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------------------------------------|-------------------|---|--|------------|
| 1 | Kohei Higashikawa | Kyushu University | Review on Superconducting Electric Power Technology for Renewable Energy Society | Mongolian-Japanese 11th Traditional Seminar 2016 | 2016/08/22 |
| 2 | Kohei Higashikawa | Kyushu University | Introduction of Superconducting Cable and Related Joint Research with the Petroleum Institute | 4th Joint Research Workshop High Voltage Engineering and Power Systems | 2017/02/13 |
| 3 | 東川 甲平、木須 隆暢 | 九州大学 | 超電導応用技術の最近の動向と鉄道応用の可能性 | 平成 29 年電気学会全国大会 | 2017/03/15 |
| 4 | 富田優、鈴木賢次、福本祐介、荒井有気、石原篤、赤坂友幸、小林祐介、恩地太紀 | 鉄道総研 | Development of DC High Tc superconducting cable for railway systems | ExCo Meeting of the IEA Technology Collaborative Programme | 2017/07/04 |
| 5 | Takanobu Kiss | Kyushu University | Electrical Characterization | 2nd Asian Superconductivity Summer School | 2017/08/08 |
| 6 | 木須 隆暢 | 九州大学 | 高温超伝導技術の応用動向 | 艦船磁気・水中電界研究会 合同事業研究会 | 2017/09/11 |
| 7 | 三浦裕太、寺尾悠、大崎博之、 | 東大、鉄道総研 | 直流電気鉄道き電系用超電導 | 2017 年度秋季低温工学・超電導学会 | 2017/11/21 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|--|--|--|---|------------|
| | 石原篤, 福本祐介, 富田優 | | ケーブルのための小型電流リードの基礎検討 | | |
| 8 | 小林祐介, 富田優, 宋瀏陽, 陳山鵬 | 公益財団法人鉄道総合技術研究所、三重大学大学院 | 異常軸受から離れた場所での計測・診断法 | 日本設備管理学会 平成29年度 秋季研究発表大会 | 2017/11/21 |
| 9 | 三浦裕太, 寺尾悠, 大崎博之, 石原篤, 福本祐介, 富田優 | 東大、鉄道総研 | 熱解析に基づく熱侵入低減のための高温超電導ケーブル用電流リード形状の検討 | 平成30年電気学会 全国大会 | 2018/3 |
| 10 | 呂琳, 大藤大明, 西宮悠平, 熊谷征久, 東川甲平, 井上昌睦, 木須隆暢 | 九州大学 | 500 m長尺銅合金補強 Bi-2223 線材の局所臨界電流分布の評価 | 2018年度春季低温工学・超伝導学会 | 2018/05/28 |
| 11 | 富田優 | 鉄道総研 | 高温超電導実用化促進技術開発/高温超電導送配電技術開発/運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発 | 超電導応用における循環冷却システム調査研究会 | 2018/05/30 |
| 12 | Yusuke KOBAYASHI, Masaru TOMITA, Liuyang SONG, Peng CHEN | Railway Technical Research Institute, Mie University | Automatic Diagnosis Method for Rolling Bearing Using Measured Signal from Distant Points | 12th France-Japan Congress, 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics | 2018/9/11 |
| 13 | 大野隆介, 小松峻介, 植田翔太, 町田明登, 鈴木賢次, 赤坂友幸, 富田優 | 前川製作所、鉄道総研 | 超電導き電システムのコンパクトブレイトン冷凍機の開発 | 2018年度秋季低温工学・超電導学会 | 2018/11/20 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|--|--|---|---|------------|
| 14 | 鈴木 賢次, 富田 優, 関根 大地, 栗原 和昭, 吉永 誠一郎 | 鉄道総研、IHI | 超電導き電用液体窒素循環ポンプの開発 | 2018年度秋季低温工学・超電導学会 | 2018/11/21 |
| 15 | Masaru Tomita | RTRI | Railway systems based on superconducting DC transmission | 14th European Conference on Applied Superconductivity | 2019/9/2 |
| 16 | Masaru Tomita, Kenji Suzuki, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Yusuke Kobayashi, Takenori Torii, Keiji Ogose, Atsushi Maeda, Herve Caron, Toshiya Matsumoto, Hiroyuki Ito | RTRI, Izuhakone Railway, Tokyo Metropolitan Bureau of Transportation, Tokyo Metro, SNCF, Hankyu Railway, Tokyu Railway | Development of superconducting feeder cable systems and conducting running test | The World Congress on Railway Research (WCRR) 2019 | 2019/10/30 |
| 17 | 富田優 | 鉄道総研 | 超電導き電システムの開発と列車走行実験 | 第225回研究会/第51回強磁場応用専門研究会/第3階バイオマグネティックス専門研究会 | 2019/11/15 |
| 18 | Masaru Tomita, Yusuke Fukumoto, Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Kenji Suzuki | 鉄道総研 | Development of superconducting feeder cables for new railway systems | 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference | 2020/1/8 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|---|------------|
| 19 | 富田優 | 鉄道総研 | 鉄道用き電用の超電導ケーブル開発 | 第2回材料研究会/ 九州・西日本支部 合同研究会 | 2020/10/30 |
| 20 | 谷内田 貴之他 | 京都大学 | To Suppress Magnetic Field Fluctuation of HTS-MRI Magnet by Micro Current Control with High Stabilized Power Supply | Applied Superconductivity Conference 2016 | 2016/9/7 |
| 21 | 谷内田 貴之他 | 京都大学 | Magnetic Field Stability Improvement of HTS-MRI Magnet with High Stabilized Power Supply | 1st Asian ICMC | 2016/11/9 |
| 22 | 宮崎 純 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電 導コイルにおけ る残留磁化が遮 蔽電流磁場変動 に与える影響 | 平成29年電気学会 全国大会 | 2017/3/16 |
| 23 | 井出 桃愛 他 | 東北大学 | 局所的劣化を模 擬した Y 系高温 超電導線材のク ェンチ特性 | 平成29年電気学会 全国大会 | 2017/3/16 |
| 24 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (I-1) ～プロジェクト 概要～ | 2017 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2017/5/23 |
| 25 | 大屋 正義 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (I-2) ～1/2 サイズ 3T | 2017 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2017/5/23 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|----------------------|-----------|
| | | | コイル設計・試作～ | | |
| 26 | 川嶋 健之 他 | 京都大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-3) ～微少電流制御による磁場安定度向上～ | 2017 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2017/5/23 |
| 27 | 宮崎 純 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-4) ～残留磁化が場安定性に与える影響～ | 2017 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2017/5/23 |
| 28 | 三浦 英明 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-5) ～オーバーシュート法適用時の遮蔽電流磁場特性～ | 2017 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2017/5/23 |
| 29 | 井出 桃愛 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-6) ～局所的 I_c 劣化時の REBCO 線材のクエンチ特性～ | 2017 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2017/5/23 |
| 30 | 唐島 智治 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (I-7) ～Gd 系線材の異方的常電導伝搬特性～ | 2017 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2017/5/23 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|--|-----------|
| 31 | 大屋 正義 他 | 三菱電機 | MRI 向け 1/2 サイズ 3T 高温超電導コイルの設計および製作状況 | 電気学会、金属・セラミックス/超電導機器合同研究会 | 2017/7/20 |
| 32 | 宮崎 純 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導マグネットの通電履歴が磁場変動抑制に及ぼす影響 | 平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会 | 2017/8/24 |
| 33 | 大屋 正義 他 | 三菱電機 | Development of 3 T High-Temperature Superconducting Magnet for MRI | 25th International Conference on Magnet Technology | 2017/8/28 |
| 34 | 川嶋 健之 他 | 京都大学 | Magnetic Field Stability Improvement of HTS-MRI Magnet under Power Supply Driven Operation with a Micro Current Control | 25th International Conference on Magnet Technology | 2017/8/28 |
| 35 | 三浦 英明 他 | 東北大学 | Estimation Method of Optimal Amount of Overshooting Current for Temporal Uniform Magnetic Field in Conduction-Cooled HTS Coils for MRI Applications | 25th International Conference on Magnet Technology | 2017/8/28 |
| 36 | 井出 桃愛 他 | 東北大学 | Influence of local critical current degradation on quench | 25th International Conference on Magnet Technology | 2017/8/28 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|---|------------|
| | | | characteristics of a ReBCO coil | | |
| 37 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | Development of High Stable Magnetic Field HTS Magnet System for MRI | 13th European Conference on Applied Superconductivity | 2017/9/19 |
| 38 | 大屋 正義 他 | 三菱電機 | MRI 向け高温超電導コイルの開発 | 先端加速器科学技術推進協議会 第 53 回技術部会 | 2017/9/21 |
| 39 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | 三菱電機における超電導関連事業と研究開発の状況 | 低温工学超電導学会 関西支部 2017 年度第 3 回講演会 | 2017/9/29 |
| 40 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高温超電導コイルの基本設計 | 2017 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2017/11/21 |
| 41 | 唐島 智治 他 | 京都大学 | 3 T HTS-MRI コイルの設計プログラム開発と非線形電流輸送特性を適用した特性解析 | 2017 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2017/11/21 |
| 42 | 宮崎 純 他 | 東北大学 | MRI 用高温 REBCO コイルの遮蔽電流磁場の変動抑制に有効な残留磁化 | 2017 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2017/11/21 |
| 43 | 井出 桃愛 他 | 東北大学 | 局所的 I_c 低下が REBCO コイルのクエンチ特性に及ぼす影響 | 2017 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2017/11/21 |
| 44 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 5T 高 | 低温工学・超電導学会 関西支部 特別講演会 | 2017/12/1 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|--|------------------------------|-----------|
| | | | 温超電導コイル の基本設計 | | |
| 45 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (II-1) ～プロジェクト 概要～ | 2018 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2018/5/28 |
| 46 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (II-2) ～1/2 サイズ 3T コイル試作なら びに 5T コイル 設計～ | 2018 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2018/5/28 |
| 47 | 川嶋 健之 他 | 京都大学 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (II-3) ～高温超電導 MRI マグネット 励磁システム設 計のための等価 回路の検討 ～ | 2018 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2018/5/28 |
| 48 | 山田 祥子 他 | 京都大学 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (II-4) ～高温超電導線 材の断面形状が ボア内磁場分布 に与える影響の 検討～ | 2018 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2018/5/28 |
| 49 | 金丸 允駿 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (II-5) ～コイル励磁中 | 2018 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2018/5/28 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|---|------------|
| | | | の温度変化が磁場安定性に及ぼす影響～ | | |
| 50 | 木須 隆暢 他 | 九州大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (II-6) ～HTS パンケーキコイルの非破壊・非接触検査法に関する検討～ | 2018 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2018/5/28 |
| 51 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | Design of a half-size 3T REBCO superconducting magnet with active shielding coils for MRI | 27th International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference 2018 | 2018/9/5 |
| 52 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | Magnetic Design of a Half-size 5T High-Temperature Superconducting Coil for MRI | Applied Superconductivity Conference 2018 | 2018/10/29 |
| 53 | 白井 康之 他 | 京都大学 | Equivalent Circuit of HTS-MRI Magnet for Exciter Control Design | Applied Superconductivity Conference 2018 | 2018/10/29 |
| 54 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T REBCO 超電導マグネット | 2018 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2018/11/20 |
| 55 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用 1/2 サイズアクティブシールド型 5 T | 2018 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2018/11/20 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|-----------------------------------|------------|
| | | | 高温超電導コイルの最適磁気設計 | | |
| 56 | 金丸 允駿 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発～伝導冷却型 MRI マグネットにおける遮蔽電流特性評価～ | 2018 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2018/11/20 |
| 57 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電導マグネットの開発 | 中温度域超伝導材料の実用性能に関する調査研究会第 2 回調査研究会 | 2018/11/21 |
| 58 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | Development of HTS high stable magnetic field magnet system for MRI | ISS2018 | 2018/12/13 |
| 59 | 横山 彰一 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (Ⅲ-1) ～プロジェクト概要～ | 2019 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2019/5/30 |
| 60 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (Ⅲ-2) ～1/2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネットの開発～ | 2019 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2019/5/30 |
| 61 | 北田 悟史 他 | 京都大学 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (Ⅲ-3) ～磁場補正用微小電流電源を用 | 2019 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2019/5/30 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|----------|------|--|---|-----------|
| | | | いた磁場安定性 向上フィード フォワード制御 の検討～ | | |
| 62 | 魏 亮亮 他 | 京都大学 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (Ⅲ-4) ～線電流近似と 有限要素法を連 携した 3 T ホー ルボディマグ ネットの最適化 設計～ | 2019 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2019/5/30 |
| 63 | 木須 隆暢 他 | 九州大学 | MRI 用高温超電 導高安定磁場マ グネットシステ ム開発 (Ⅲ-5) ～大口径 REBCO パンケーキコイ ルの欠陥可視化 に関する検討～ | 2019 年度春季低温 工学超電導学会講 演 | 2019/5/30 |
| 64 | 佐々木 哲史 他 | 東北大学 | 高温超電導ダブル パンケーキコイ ルにおける軸 方向圧縮応力印 加時の通電特性 | 2019 年度電気関係 学会東北支部連合 大会 | 2019/8/22 |
| 65 | 旦尾 一樹 他 | 東北大学 | 2T 伝導冷却型高 温超電導 MRI マ グネットにおけ る磁場安定化 | 2019 年度電気関係 学会東北支部連合 大会 | 2019/8/22 |
| 66 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | Development of a Half-Size 3 T REBCO Superconducting Magnet for MRI | 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) | 2019/9/3 |
| 67 | 北田 悟史 他 | 京都大学 | Feedforward current control of MRI magnet with power | 14th European Conference on Applied | 2019/9/3 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|------|---|---|------------|
| | | | supply driven operation | Superconductivity (EUCAS2019) | |
| 68 | 長崎 陽 他 | 東北大学 | Suitable Excitation Method of REBCO MRI Magnet for Suppressing Screening Field Attenuation | International Conference on Magnet Technology (MT26) | 2019/9/24 |
| 69 | 木須 隆暢 他 | 九州大学 | Novel Characterization Technique to Visualize Local Defects in a REBCO Pancake Coil Winding | International Conference on Magnet Technology (MT26) | 2019/9/26 |
| 70 | 木須 隆暢 他 | 九州大学 | Superconducting Materials Research in MRS-Japan | 第 29 回日本 MRS 年次大会 | 2019/11/29 |
| 71 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | Development of a Half-Scale 3T REBCO Superconducting Magnet for MRI | 10th Asian-ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference | 2020/1/7 |
| 72 | 内田 勇斗 他 | 京都大学 | 電源駆動による MRI の磁場安定性評価 | 2020 年度春季低温工学超電導学会講演 | 2020/5/20 |
| 73 | 内田 勇斗 他 | 京都大学 | Magnetic field stability evaluation of power supply driven MRI magnet | ASC2020 | 2020/10 |
| 74 | 長崎 陽 他 | 東北大学 | Transverse compressive stress dependence of critical current of | ASC2020 | 2020/10 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|----------|------|---|------------------------|------------|
| | | | REBCO double-pancake coil | | |
| 75 | 重岡 駿 他 | 九州大学 | Mechanical Characterization of REBCO High-Temperature Superconducting Pancake Coils | 2020 年度応用物理学会九州支部学術講演会 | 2020/11/29 |
| 76 | 服部 泰佑 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (IV-1) ~ 1/2 サイズアクティブシールド型 3 T マグネットの開発 ~ | 2020 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2020/12/9 |
| 77 | 三浦 英明 他 | 三菱電機 | MRI 用高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発 (IV-2) ~ 高磁場高電流密度コイルの開発 ~ | 2020 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2020/12/9 |
| 78 | 西山 花名子 他 | 東北大学 | MRI 用高温超電導コイルの再励磁時における磁場安定化に適した励磁方法 | 2020 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2020/12/9 |
| 79 | 木戸 勇志 他 | 京都大学 | アクティブシールドを有する 3 T ホールボディ高温超電導 MRI マグネットの 5 ガウスライン最小化と磁場均一度を両立する最適化設計 | 2020 年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2020/12/9 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|---------|-----------|--|--|------------|
| 80 | 板橋 幸也 他 | 東北大学 | 軸方向圧縮応力低減のためのMRI用積層型高温超電導コイルの構成方法 | 2020年度秋季低温工学超電導学会講演 | 2020/12/9 |
| 81 | 服部 泰佑 | 三菱電機 | NEDOプロ 高温超電導MRIマグネットの開発 | 第3回 電気学会超電導関連技術の医療応用調査専門委員会 | 2020/12/12 |
| 82 | 松尾竜太 | 上智大学 | Quench protection of HTS coil by application of pulse current to coil conductor to accelerate propagation of normal zone | Applied Superconductivity Conference 2016 (ポスター発表) | 2016/9/6 |
| 83 | 松尾竜太 | 上智大学 | マルチパンケーキコイルで構成されるHTSコイルのクエンチ保護法の提案 | 電気学会超電導機器研究会(口頭発表) | 2017/1/19 |
| 84 | 小島あかね | 上智大学 | 永久電流モードHTSコイルの共巻き法によるクエンチ検出と保護の検討 | 平成29年電気学会全国大会(口頭発表) | 2017/3/5 |
| 85 | 町敬人 | 産業技術総合研究所 | 金属ナノペーストによるRE系超電導線材接続 | 2017年度春季低温工学・超電導学会(口頭発表) | 2017/5/22 |
| 86 | 小島あかね | 上智大学 | 高温超電導コイルのクエンチ保護と線の最大許容欠陥長さ(MAD) | 2017年度春季低温工学・超電導学会(口頭発表) | 2017/5/24 |
| 87 | 松尾竜太 | 上智大学 | マルチパンケーキコイルで構成されるHTSコイ | 電気学会超電導機器研究会(口頭発表) | 2017/7/20 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|------|-----------|--|--|-----------|
| | | | ルのクエンチ保護法 (2) | | |
| 88 | 松尾竜太 | 上智大学 | Quench protection of HTS coil composed of multiple sub-pancake-coils by changing current distribution in sub-coils | 25th International Conference on Magnet Technology (口頭発表) | 2017/8/30 |
| 89 | 清水雄平 | 産業技術総合研究所 | SrTiO ₃ 単結晶基板上の Nb 薄膜のエピタキシャル成長 | 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (口頭発表) | 2017/9/7 |
| 90 | 清水雄平 | 産業技術総合研究所 | Preparation of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} and La _{1.85} Sr _{0.15} CuO ₄ Bilayer Structure for Superconducting Connection | 13th European Conference on Applied Superconductivity (ポスター発表) | 2017/9/18 |
| 91 | 松尾竜太 | 上智大学 | Study on hot spot temperature limits for epoxy-impregnated coil wound of Bi/Ag sheathed wire to be safe from damages caused by quenches | 13th European Conference on Applied Superconductivity (ポスター発表) | 2017/9/20 |
| 92 | 松尾竜太 | 上智大学 | Experimental study on method to | 13th European Conference on Applied | 2017/9/20 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|----|-------|-----------|--|----------------------------------|------------|
| | | | suppress hot spot temperature of HTS coil by quick transfer of current of quenching coil | Superconductivity (ポスター) | |
| 93 | 町敬人 | 産業技術総合研究所 | 金属ナノペーストを用いた RE 系超電導線材の低抵抗接続 | 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 (口頭発表) | 2017/10/19 |
| 94 | 高島浩 | 産業技術総合研究所 | SrTiO ₃ 単結晶基板を用いた Nb 薄膜のエピタキシャル成長 | 2017 年秋季第 95 回 低温工学・超電導学会 (口頭発表) | 2017/11/22 |
| 95 | 小島あかね | 上智大学 | 高温超電導コイルの熱暴走と線の最小伝搬領域 | 2017 年秋季第 95 回 低温工学・超電導学会 (口頭発表) | 2017/11/23 |
| 96 | 町敬人 | 産業技術総合研究所 | 金属ナノペーストによる接合 | 2017 年秋季第 95 回 低温工学・超電導学会 (口頭発表) | 2017/11/24 |
| 97 | 町敬人 | 産業技術総合研究所 | 金属ナノペーストを用いた RE 系超電導線材の接続 | エネルギー技術シンポジウム (ポスター発表) | 2017/11/30 |
| 98 | 松尾竜太 | 上智大学 | マルチパンケーキコイルで構成される HTS コイルのクエンチ保護(3) -シミュレーション実験による有効性の検討- | 電気学会金属・セラミックス/超電導機器合同研究会 (口頭発表) | 2018/1/17 |
| 99 | 松田直大 | 上智大学 | エポキシ含浸した Bi2223 銀シースコイルのクエンチに伴うホットス | 電気学会金属・セラミックス/超電導機器合同研究会 (口頭発表) | 2018/1/17 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|-----|-------|-----------|--|--|-----------|
| | | | ポット限界の検討 | | |
| 100 | 野本 堯宏 | 上智大学 | 模擬実験による抵抗ショート法を用いたクエンチ保護法の有効性検討 | 平成 28 年電気学会全国大会(口頭発表) | 2018/3/5 |
| 101 | 鳥山飛史 | 上智大学 | マルチパンケーキコイルで構成される HTS マグネットの線の最大許容欠陥長さ MAD | 平成 28 年電気学会全国大会(口頭発表) | 2018/3/5 |
| 102 | 高島浩 | 産業技術総合研究所 | 超伝導接続のためのエピタキシャル NbTi 薄膜の成長と電気的特性 | 2018 年春季第 96 回低温工学・超電導学会(口頭発表) | 2018/5/29 |
| 103 | 小島あかね | 上智大学 | Study on optimal thickness of copper layer of REBCO-coated wire for quench protection | 27th International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic Materials Conference 2018 (ポスター発表) | 2018/9/6 |
| 104 | 北口仁 | 物質・材料研究機構 | Development of a joint resistance evaluation system (1) concept, design, and manufacture | Coated Conductors for Applications Workshop 2018 (口頭発表) | 2018/9/13 |
| 105 | 小林賢介 | 物質・材料研究機構 | Development of a joint resistance evaluation | Coated Conductors for Applications Workshop 2018 (口頭発表) | 2018/9/13 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|-----|------|---------------|--|---|----------------|
| | | | system (2) commissioning results | | |
| 106 | 鳥山飛史 | 上智大学 | Quench protection of HTS coil composed of multiple pancake-coils by use of auxiliary resistive shunt | Applied Superconductivity Conference 2018 (ポスター発表) | 2018/10/3 0 |
| 107 | 淵田佳稀 | 上智大学 | Reduction of hot-spot temperature of REBCO coil by use of copper strip co-wound with REBCO wire | Applied Superconductivity Conference 2018 (ポスター発表) | 2018/10/3 1 |
| 108 | 高島浩 | 産業技術総合研究所 | NbTi エピタキ シヤル薄膜の超 電導接続作製と 電気的特性 | 2018 年度秋季第 97 回低温工学・超電 導学会 (口頭発 表) | 2018/11/1 9 |
| 109 | 内田公 | 物質・材料研究機 構 | 超伝導線材接続 抵抗評価装置の 開発(1)ー装置設 計と冷却試験ー | 2018 年度秋季第 97 回低温工学・超電 導学会 (口頭発 表) | 2018/11/1 9 |
| 110 | 小林賢介 | 物質・材料研究機 構 | 超伝導線材接続 抵抗評価装置の 開発(2)ー抵抗測 定試験ー | 2018 年度秋季第 97 回低温工学・超電 導学会 (口頭発 表) | 2018/11/1 9 |
| 111 | 市川拓磨 | 上智大学 | 抵抗ショート法 を用いた YBCO マ グネットクエン チ保護法の模擬 実験による有効 性検討 | 平成 31 年電気学会 全国大会 (口頭発 表) | 2019/3/14 |
| 112 | 田口春華 | 上智大学 | Y 系線の MAD(最 大許容欠陥長)お よび MPZ(最小伝 | 平成 31 年電気学会 全国大会 (口頭発 表) | 2019/3/14 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|-----|------|-----------|---|--|-----------|
| | | | 搬領域)の温度・電流依存特性 | | |
| 113 | 吉田良行 | 産業技術総合研究所 | Preparation and characteristics of superconducting joints of NbTi thin films | 14th European Conference on Applied Superconductivity (ポスター発表) | 2019/9/2 |
| 114 | 塚本修巳 | 上智大学 | Study on conditions to reuse quenched HTS coil | 14th European Conference on Applied Superconductivity (ポスター発表) | 2019/9/4 |
| 115 | 塚本修巳 | 上智大学 | Experimental study on quench protection of HTS magnet composed of multiple pancake-coils by use of auxiliary resistive shunt loop (ARSL) method | International Magnet Technology Conference MT-26 (ポスター発表) | 2019/9/23 |
| 116 | 塚本修巳 | 上智大学 | Experimental study on quench protection of HTS magnet by use of auxiliary resistive shunt loop (ARSL) method | 10thACASC/2ndAsian-ICMC/CSSJ Joint Conference (ポスター発表) | 2020/1/7 |
| 117 | 塚本修巳 | 上智大学 | 銅テープ共巻きコイルショート法による HTS コイルのクエンチ保護特性向上の検討 | 令和2年電気学会全国大会 (口頭発表) | 2020/3/11 |

| 番号 | 発表者 | 所属 | タイトル | 会議名 | 発表年月 |
|-----|------|------|---|--|-----------|
| 118 | 市川拓磨 | 上智大学 | Experimental study on quench protection method for HTS coil that uses Cu tape co-wound with HTS tape | Applied Superconductivity Conference 2020 (ポスター発表) | 2020/11/3 |
| 119 | 島田涼平 | 上智大学 | Experimental study on quench protection method for HTS coil that uses Cu tape co-wound with HTS tape | 27 th International Conference on Magnet Technology | 発表予定 |
| 120 | 大杉正樹 | フジクラ | Low resistance soldered joint of REBCO coated conductors with novel Ag-dispersed structure | 27 th International Conference on Magnet Technology | 発表予定 |
| 121 | 飯島康裕 | フジクラ | BMO-Doped REBCO Coated Conductor Development for Field Magnets with Novel Low Joint Resistance Approach by Using Hot-wall PLD Process | 34 th International Symposium on Superconductivity | 発表予定 |

(b) 新聞・雑誌等への掲載

| 番号 | 所属 氏名 | タイトル | 掲載誌名 | 発表年月 |
|----|-------|------------------------|--|------|
| 1 | RTRI | PROJECT UPDATES, JAPAN | IEA Technology Collaboration Program on High | |

| | | | | |
|---|---------------|-----------------------|---|----------|
| | | | Temperature Superconductivity, ANNUAL REPORT 2019 | |
| 2 | 鉄道総研 | 超電導き電システムによる列車走行試験 | JREA | 2020/1 |
| 3 | 鉄道総研 | 次世代鉄道システムを創る超電導技術 | エネルギー・資源 | 2020/1 |
| 4 | 鉄道総研 | 浮上式鉄道技術研究部における最新の研究開発 | JR ガゼット | 2021/8 |
| 5 | 三菱電機 横山 彰一 | 医療用 MRI 超電導マグネット | 月刊誌 OHM 2018 年 3 月号 (P44-49) | 2018/3/5 |

(c) その他

| 番号 | 件名 | タイトル | 年月 | 備考 |
|----|-------|--|---------------|-------------------------|
| 1 | 展示会出展 | NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2016 | 2016/10/26-28 | スマートエンジニアリング TOKYO 2016 |
| 2 | 展示会出展 | NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2017 | 2017/11/20-22 | INCHEM TOKYO 2017 |
| 3 | 展示会出展 | ENEX2019 第 43 回地球環境とエネルギーの調和展 | 2019/1/30-2/1 | 一般財団法人省エネルギーセンター |
| 4 | 動画 | 最新の省エネルギー技術 (NEDO プロジェクト紹介 Vol.7 高温超電導鉄道き電線) | 2019/7/31 | NEDO |
| 5 | 展示会出展 | ENEX2020 第 44 回地球環境とエネルギーの調和展 | 2020/1/29 | 一般財団法人省エネルギーセンター |
| 6 | 展示会出展 | ENEX2021 第 45 回地球環境とエネルギーの調和展 | 2020/12/9-11 | 一般財団法人省エネルギーセンター |