

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
年次報告書

令和元年度
研究開発年次報告書

平成 29 年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：前田 秀明]

[国立研究開発法人科学技術振興機構・プログラムマネージャー]

[研究開発課題名：高温超電導線材接合技術の
超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装]

実施期間：平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 3 月 31 日

§1. 研究実施体制

1 研究開発代表者

(1) 研究開発代表者 (JST/理研)

① 研究開発代表者: 前田 秀明 (国立研究開発法人科学技術振興機構/国立研究開発法人理化学研究所、プログラムマネージャー/客員主管研究員)

② 研究項目

課題管理および研究開発全体の統括

2 主たる共同研究者

(2) 「接合基盤技術共同研究」グループ (青山学院大学)

① 主たる共同研究者: 下山 淳一 (青山学院大学理工学部物理・数理学科、教授)

② 研究項目

Bi 系高温超電導線材間の超電導接合の開発および「接合基盤技術共同研究」グループのとりまとめ

- ・ Bi 系超電導電導体間の接合形成のための基礎研究
- ・ Bi 系高温超電導線材の間の接合開発とその特性評価

(3) 「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループ (理研)

① 主たる共同研究者: 柳澤 吉紀 (国立研究開発法人理化学研究所放射光科学研究センター、チームリーダー/上級研究員)

② 研究項目

精密超高磁場形成技術の開発と実証および「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループのとりまとめ

- ・ 中磁場永久電流コイル技術に関する基礎検討と実験評価
- ・ 30 T 級超高磁場発生実証試験のための要素技術開発と実験評価
- ・ 永久電流 1.3 GHz NMR モデルマグネットの基本設計

(4) 「高磁場社会インパクト実証共同研究」グループ (東工大)

① 主たる共同研究者: 石井 佳誉 (国立大学法人東京工業大学生命理工学院、教授)

② 研究項目

次世代 NMR 計測系と次世代 NMR 計測技術の構築と応用および「高磁場社会インパクト実証共同研究」グループのとりまとめ

- ・ 次世代 NMR 計測系の構築
900 MHz 超級の NMR 磁石に用いる新規分光計モデル機の作成と評価、磁石の評価と HTS 特有の磁場の時間変動と空間不均一性に対応するためのシステムの作成、900 MHz 超級 NMR プローブやその他のアクセサリーの試作と性能評価
- ・ 次世代 NMR 計測技術開発
微量試料測定用の NMR プローブの試作・評価と微量生体試料への応用、感度と分解能を向上させる測定法の開発と多次元 NMR への応用、材料系の NMR や四極子核への応用

(5) 「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ (鉄道総研)

①主たる共同研究者:富田 優 (公益財団法人鉄道総合技術研究所、研究開発推進部、担当部長 兼材料技術研究部超電導応用研究室、室長)

②研究項目

鉄道用の超電導き電ケーブルの社会実装に必要な高温超電導ケーブルの中間接合部の開発および「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループのとりまとめ

- ・ 高温超電導テープ線材同士の超低抵抗接合技術の開発
- ・ 大容量ケーブル接合のための中間接合部の開発

3 共同研究者

(6)「接合基盤技術共同研究」グループ(ティーイーピー)

①共同研究者:内藤 恭吾 (ティーイーピー株式会社東京本社・東京工場、社長)

②研究項目

Bi 系高温超電導線材間の超電導接合用冶具、粉末の開発

- ・ Bi 系高温超電導線材間接合形成用の厚膜の原料粉末の調製
- ・ 接合形成用炉内冶具の開発
- ・ Bi 系高温超電導線材間の超電導接合の微細組織観察

(7)「接合基盤技術共同研究」グループ 兼 「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループ(NIMS)

①共同研究者:北口 仁 (国立研究開発法人物質・材料研究機構機能性材料研究拠点、副拠点長)

②研究項目

超電導線材接合と超低抵抗接合の基盤技術開発

- ・ 異種線材間超電導接合技術開発
- ・ 超電導線材間超低抵抗接合技術開発
- ・ 接合特性評価
- ・ 高磁場発生コイル実証試験

(8)「接合基盤技術共同研究」グループ(住友電工)

①共同研究者:永石 竜起 (住友電気工業株式会社パワーシステム研究開発センター次世代超電導開発室、室長)

②研究項目

REBCO 系高温超電導線材間の超電導接合技術の開発

- ・ 高強度 Hastelloy® ベース基材を用いた REBCO 系高温超電導線材開発
- ・ 超電導接合形成時の線材余長短縮技術の開発
- ・ 超電導接合形成時間短縮のための技術開発
- ・ REBCO 系高温超電導線材を用いた永久電流スイッチの特性改善(入力低減、スイッチ時間短縮)

(9)「接合基盤技術共同研究」グループ(JFCC)

①共同研究者:加藤 丈晴 (一般財団法人ファインセラミックスセンターナノ構造研究所、グループ長/主任)

研究員)

②研究項目

- ・ 高温超電導線材超電導接合部および接合部周辺の微細組織解析
REBCO 系高温超電導線材の接合層の結晶配向評価
Bi 系高温超電導線材の接合部の微細構造解析
- ・ 高温超電導線材間の超低抵抗接合の微細構造解析

(10)「接合基盤技術共同研究」グループ 兼 「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ(九州大)

①共同研究者:木須 隆暢 (国立大学法人九州大学大学院システム情報科学研究院、教授)

②研究項目

接合部を含む超電導線材の臨界電流特性評価技術の開発と評価基準の検討、および低抵抗接合技術を用いた鉄道き電システム用導体化技術

- ・ 超電導接合試料の局所電流分布の評価と解析
- ・ 超低抵抗接合試料の局所電流分布の評価と解析

(11)「接合基盤技術共同研究」グループ(京都大)

①共同研究者:土井 俊哉 (国立大学法人京都大学大学院エネルギー科学研究科、教授)

②研究項目

集合組織 Ag テープを用いることで酸素アニールを簡便にした REBCO 線材接合技術の開発

- ・ 集合組織 Ag テープの開発
- ・ 集合組織 Ag テープを基材とした REBCO 線材接合パッチの開発
- ・ 開発酸素アニールを簡便にした REBCO 線材接合の特性評価

(12)「接合基盤技術共同研究」グループ(島根大)

①共同研究者:舩木 修平 (国立大学法人島根大学大学院自然科学研究科、助教)

②研究項目

酸素欠損を生じない REBCO 超電導線材の超電導接合

- ・ REBCO 系超電導線材の超電導接合に向けた基礎研究
- ・ 超電導接合に用いる反応助剤の検討

(13)「接合基盤技術共同研究」グループ(JAEA)

①共同研究者:社本 真一 (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター、研究主席)

②研究項目

はんだ複合材料と接合法の開発

- ・ 各種超低抵抗複合はんだの開発(カーボンナノチューブなど)
- ・ 複合はんだ接合の特性評価

(14)「接合基盤技術共同研究」グループ(室工大)

① 共同研究者:金沢 新哲 (国立大学法人室蘭工業大学大学院工学研究科、助教)

② 研究項目

Bi-2223 系高温超電導線材間の分解熔融による超電導直接接合法の開発

- ・ Bi 系高温超電導体の分解熔融により形成された接合界面に関する基礎研究
- ・ Bi 系高温超電導線材間の分解熔融による接合体の開発と評価

(15)「接合基盤技術共同研究」グループ 兼 「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ(東北大)

① 共同研究者:伊藤 悟 (国立大学法人東北大学大学院工学研究科、准教授)

② 研究項目

高温超電導線材の超低抵抗接合の開発

- ・ 低温熱処理による機械的接合の開発と特性評価
- ・ 超音波接合による機械的接合の特性評価
- ・ 鉄道用超電導き電ケーブルの簡易接合技術の開発

(16)「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループ(JASTEC)

① 共同研究者:斉藤 一功 (ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社企画管理部、技術総括部長)

② 研究項目

1.3 GHz NMR モデルマグネット製作のための技術開発と本体の設計

- ・ 400 MHz NMR 向けの各種内層モデルコイルの設計と製作
- ・ 30 T 級超高磁場発生マグネットの設計
- ・ 永久電流 1.3GHz NMR モデルマグネットの設計

(17)「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループ(岡山大)

① 共同研究者:植田 浩史 (国立大学法人岡山大学大学院自然科学研究科、准教授)

② 研究項目

高精度高磁場マグネットの実現に向けた電磁解析・評価技術の開発

- ・ Bi-2223 高温超電導線材コイルの遮蔽電流解析モデル構築と妥当性の検証
- ・ 500 MHz LTS/REBCO NMR マグネット(プロジェクト外で製作済み)の遮蔽電流磁場解析

(18)「高磁場社会インパクト実証共同研究」グループ(JRI)

① 共同研究者:蜂谷 健一 (株式会社 JEOL RESONANCE 技術部開発グループ第 1 チーム、リーダー)

② 研究項目

次世代 NMR 計測系の構築

- ・ 900 MHz 超級の新規 NMR 分光計のモデル機の作成と評価
- ・ 900 MHz 超級 NMR 磁石の評価と HTS 特有の磁場の時間変動と空間不均一性に対応するための計測システムの作成
- ・ 900 MHz 超級 NMR プローブやその他のアクセサリーの試作と性能評価

(19)「高磁場社会インパクト実証共同研究」グループ(理研)

① 共同研究者:山崎 俊夫 (国立研究開発法人理化学研究所放射光科学研究センター、チームリーダー)

② 研究項目

次世代 NMR 計測系の構築と応用

- ・ 東工大グループと連携して、NMR 計測系の構築と応用、モデル機の作成と評価
- ・ 溶液 NMR を用いて超電導磁石の特性評価、磁場の変動に対応するためのシステムの作成

(20)「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ(九州工大)

① 共同研究者:松本 要 (国立大学法人九州工業大学大学院工学研究院、教授)

小田部 荘司 (国立大学法人九州工業大学大学院情報工学研究院、教授)

② 研究項目

超電導テープ線材およびケーブルの実用的超低抵抗接合技術の開発

- ・ はんだ接合技術を適用した高温超電導線材の超低抵抗接合の開発
- ・ 有限要素法を用いた超電導線の接続の電磁解析、構造解析



図 1.1 「高温超電導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」研究体制

§ 2. 研究実施の概要

本年度は、超電導接合に関連して次の成果を得た。第 1 の POC である「1.3 GHz (30.5 T) NMR モデルマグネットの永久電流化」に関連する超電導接合に関しては、Bi-2223 高温超電導線材間の拌み合わせ接合方式(折り返し方式)の超電導接合を開発し、ステージの目標特性をクリアした。REBCO 系高温超電導線材間の超電導接合もステージ目標をクリアしたので、量産化や特性安定化の技術開発に着手した。異種線材間の超電導接合(高温超電導と低温超電導など)については、超電導状態での接合特性の実現が難しいことから、代替技術として NMR の永久電流回路形成に適するレベルまでの極低抵抗化($10^{-10} \Omega$)を進め、達成のめどが立った。次に、第 2 の POC である「極低抵抗接合による鉄道用超電導き電ケーブルの長尺化」に関連して、鉄道用ケーブル中間接合に用いる極低抵抗接合開発について、高温超電導線材間の超音波接合や低温熱処理機械的接合の有効性を実証した。接合技術全般に関連して、接合組織の観察技術、電磁特性の評価技術などを高度化した。

第 1 の POC に関連して、磁石技術について以下の成果を得た。REBCO 超電導接合を実装した内層コイルを持つ中磁場 400 MHz (9.39 T) 永久電流 NMR について、1 年半にわたる長期連続運転に成功し、磁場の時間的な安定性と NMR 計測への適用性を実証した。また、1.3 GHz NMR に必要な 30.5 T の高磁場の生成技術を開発するために、これと同じ構成の高磁場超電導マグネットを製作し、目標磁場をクリアできることを実証した。高温超電導内層コイルを持つ NMR マグネットでは、励磁中にコイル巻き線部にシールド電流が誘導され、その影響により磁場ドリフトや磁場不均一性が生じて、精密磁場の形成が困難になる。この種のシールド電流に関する数値解析の高度化を進め、設計に反映していく。以上の成果に基づき、超電導接合の種類や個数、線材の現実的な単長、トータルコスト等の検討などを加えて、1.3 GHz NMR マグネットの最適化設計を進めた。

NMR 計測に関しては、高温超電導コイルを実装した 900 MHz 超級 NMR を当面のターゲットにして磁場変動や不均一性への対策を備える NMR 分光計の製作を終えると共に、NMR プロブの設計・試作を進めた。既設(理研)の超高磁場 NMR により、微量なモデルタンパク質に対して、構造情報を得るために必要な多次元 NMR 解析を可能にする超高磁場固体 NMR 測定法を開発した。

第 2 の POC である「極低抵抗接合による鉄道用超電導き電ケーブルの長尺化」に関連して次の成果を得た。REBCO 系及び Bi 系超電導テープ線材間のラップ接合について、機械的強度と接合抵抗の測定、クラックなどの局所的な欠陥を有する線材の電流分布を解析するモデルの構築と数値シミュレーションを実施した。さらにブリッジ接合による超電導ケーブルの中間接合について、線材が幅方向にずれた場合や、接合部分に段差が生じた場合の接合を想定した線材間の臨界電流値の依存性を明らかにした。そして接合部を有する試作ケーブルについて通電試験を行い、10 kA においてステージ目標を満たすことを実証した。さらに、これに曲げ試験を実施し、曲げによる劣化を抑制できるケーブル接合法を開発した。また新技術として低温熱処理機械的接合に着目し、接合モジュールを用いた接合構造を提案するとともに、単層のモデルケーブルの試作を行った。

なお、本課題は 2020 年 1 月に沖縄で開催された超電導技術の国際学会である ACAS/Asian-ICMC/CSS2020 において PM が基調講演(Plenary Lecture)を行うとともに、成果が日刊紙に掲載されるなど幅広い注目を浴びた。

< 主要な論文 >

1. S. Takahashi, Y. Suetomi, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Maeda, Y. Takeda and J. Shimoyama. "Hoop Stress Modification, Stress Hysteresis and Degradation of a REBCO Coil Due to the Screening Current Under External Magnetic Field Cycling" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** [4] (2020) 4602607-1~7.
2. K. Kobayashi, G. Nishijima, A. Uchida, M. Amaya, N. Banno and H. Kitaguchi "Development of a Superconducting Joint Resistance Evaluation System" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** [4] (2020) 9000204-1~4.
3. Y. Xiao, I. Matsuda, M. Inoue, T. Sasahara, M. Hoshi, and Y. Ishii. "NMR-based site-resolved profiling of β -amyloid misfolding reveals structural transitions from pathologically relevant spherical oligomer to fibril" *Journal of Biological Chemistry* **295** [2] (2020) 458-467.