

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2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・プログラママネージャー]

[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 : 令和2年4月1日～令和3年3月31日

§ 1. 研究実施体制

1. 研究開発代表者

1.1. 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

2.1. 「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 (青山学院大学工学部物理・数理学科、教授)

② 研究項目

Bi-2223 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-2223 超電導導体間の接合形成のための基礎研究
- ・ Bi-2223 高温超電導線材の間の接合開発とその特性評価

2.2. 「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概念設計
- ・ 900 MHz 超級 NMR マグネットの立ち上げと運転

2.3. 「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」
グループの取りまとめ

- ・ 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

2.4. 「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、浮上式鉄道技術研究部、部長兼超電導応用研究室、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

3.1. 「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-2223 高温超電導線材間の超電導接合用冶具、粉末の開発

- ・ Bi-2223 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-2223 高温超電導線材間の超電導接合の微細組織観察

3.2. 「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

3.3. 「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

- ・ 高強度ハステロイ®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)

3.4. 「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-2223 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

3.5. 「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

3.6. 「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

3.7. 「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

3.8. 「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

3.9. 「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溶融による超電導直接接合法の開発

- ・ Bi-2223 高温超電導体の分解溶融により形成された接合界面に関する基礎研究
- ・ Bi-2223 高温超電導線材間の分解溶融による接合体の開発と評価

3.10. 「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(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

3.11. 「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、取締役 CTO)

② 研究項目

- ・ 中磁場永久電流コイルの実証に関連してコイルの設計・製作を担当・評価への協力
- ・ 30T 級超高磁場発生の実証についての設計・製作・評価への協力
- ・ 永久電流 1.3 GHz NMR モデルマグネットについて、遮蔽電流解析・冷却技術・安全設計を含めた多角的な観点での設計最適化

3.12. 「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

- ・ レイヤー巻 REBCO コイルの応力解析
- ・ 1.3 GHz REBCO insert マグネットの遮蔽電流解析
- ・ 1.3 GHz REBCO insert マグネットの応力解析

3.13. 「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

3.14. 「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

3.15. 「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

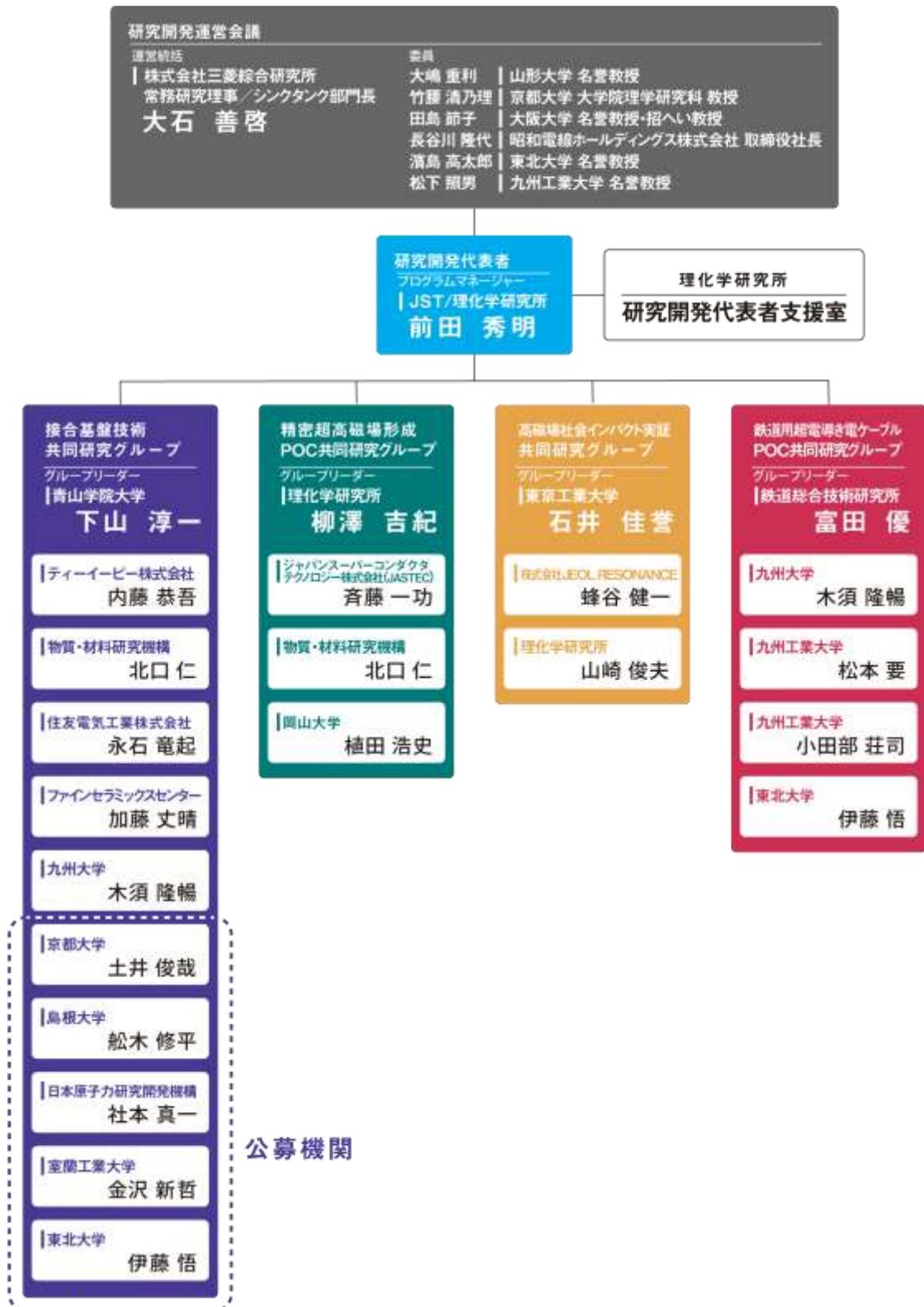


図 1.1 「高温超電導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」研究実施体制

§ 2. 研究実施の概要

接合技術開発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 マグネットの永久電流化」に関連する超電導接合技術に関しては、Bi-2223 系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 1 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でもステージ目標をクリアし、量産化や特性安定化の技術開発に着手した。異種線材間では超電導接合が困難であり、代替技術として極低抵抗化($10^{-10}\Omega$)を進め、達成の見通しを得た。次に、第 2 の POC「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」に関連する接合技術として、高温超電導線材間のはんだフリーの接合である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。接合技術全体に関連して、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 である「1.3 GHz (30.5 T) NMR マグネットの永久電流化」における磁石技術に関して、以下の成果を得た。(a) 超電導接合を実装した REBCO 内層コイルを持つ 400 MHz (9.39 T) NMR につき、2 年間にわたる長期永久電流運転を終了し、実用性を実証した。(b) Bi-2223 超電導接合を実装した NMR 用内層コイルについて 4 K 自己磁場での永久電流運転を実証した。(c) 30 T 級マグネットにむけてフープ応力を低減できる REBCO 内層コイルの電磁力補強方式を考案・検証した。また、非絶縁方式 REBCO 内層コイルの実験結果の解析に基づきクエンチ保護の支配パラメータを得た。(d) 900 MHz 超 NMR マグネットを励磁し、高温超電導内層コイルの層数が多い場合に、遮蔽電流が磁場安定度・均一度に与える影響を把握し、対策を得た。(e) 以上にに基づき、永久電流 1.3 GHz NMR マグネットの概念設計を完了した。

NMR 計測に関しては、磁場変動や不均一性への対策を備える NMR 分光計を、Bi-2223 高温超電導コイルを実装した 900 MHz 超 NMR 磁石の立ち上げ試験に利用した。分光計は問題なく使用できることを確認し、高温超電導コイルに起因する磁場の不均一性に対応できる見込みを得た。NMR プローブの設計・試作を引き続き進めた。既設(理研)の超高磁場 NMR 装置を用いて、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、短時間で多次元固体 NMR 解析を可能にする超高磁場固体 NMR 測定法を開発した。また、高磁場 NMR を用いて長鎖ノンコーディング RNA (lncRNA) の二次構造を決定する新規測定法を開発した。更に、アミロイドβのオリゴマーやフィブリルなど社会インパクトの高い微量試料への高磁場 NMR 応用を実現させるための試料作成も進めた。

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」に関して次の成果を得た。(i) REBCO 系及び Bi-2223 超電導線材間の低抵抗ラップ接合について、はんだ接合部の引張荷重や曲げ歪みに対する接合抵抗及び臨界電流値の依存性を明らかにし、接合がステージ目標を満たすことを実証した。(ii) はんだフリーの接合として、音波接合した超電導線材の通電、引張試験を実施し、接合抵抗率、引張強度を確認した。(iii) 超電導ケーブル間の接合時における超電導線材の接合ずれによる通電電流値の低下を緩和させるため、横渡しの線材を配置する手法を考案し、解析により、横渡し線材の枚数に応じて通電電流値を向上できることが分かった。(iv) はんだ中間接合部を有する短尺ケーブルを試作して大電流通電試験により $10^{-7}\Omega$ 以下の接合抵抗値であること、引張強度 30 kN で劣化がないことを明らかにしてステージ目標を満足することを実証した。(v) さらに、新技術として低温熱処理機械的接合に着目し、超電導ケーブルの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。

< 主要な論文 >

1. T. Kato, R. Yoshida, D. Yokoe, K. Ohki, T. Nagaishi, Y. Yanagisawa, T. Hirayama, Y. Ikuhara and H. Maeda, Nanostructural evolution of intermediate grown superconducting joint layers between $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors, *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (2020)105008-1~5
2. R. Zhang, Y. Kinoshita, E. S. Otabe, T. Akasaka, A. Ishihara and M. Tomita “Evaluation of Critical Current in Junction of Superconductors with Crack Using Finite Element Method”, *Physica C Supercond.*, **577** (2020) 1353733-1~6.
3. T. Ohyama, H. Takahashi, H. Sharma, T. Yamazaki, S. Gustincich, Y. Ishii and P. Carninci “An NMR-based approach reveals the core structure of the functional domain of SINEUP lncRNAs”, *Nucleic Acids Res.* **48** [16] (2020) 9346-9360.