

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3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3年4月1日～令和4年3月31日

## § 1. 研究開発実施体制

### 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 (青山学院大学理工学部物理・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

- ・ 補強材付き Bi-2223 超電導線材間の接合形成のための基礎研究
- ・ 補強材付き Bi-2223 超電導線材間の接合開発とその特性評価
- ・ 補強材付き Bi-2223 超電導長尺線材の間の接合開発と技術移管準備

#### 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生命機能科学研究センター、ユニットリーダー)
- 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

- ・ 永久電流 1.3 GHz NMR マグネットの開発
  - 詳細設計・解析・追加技術検証
  - 高温超電導 (HTS) 線材調達 (REBCO、Bi 系)
  - 希土類系高温超電導 (REBCO) 系永久電流 HTS コイル製造・接合処理・単体コイル評価
  - ビスマス系高温超電導 (Bi-2223) 永久電流 HTS コイル製造・接合処理・単体コイル評価
  - 低温超電導 (LTS) 線材・外層コイル製作
- ・ 900 MHz 超級 NMR マグネットの完成と運転

#### 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 超級と 1.3 GHz 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 と 1.3 GHz NMR の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・低温研究室、室長)
- ② 研究項目  
中間接合部を有する超電導き電ケーブルの開発および「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
  - ・低抵抗接合を有する超電導き電ケーブルの開発と実証

### 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 兼 「精密超高磁場形成 POC 共同研究」グループ (住友電工)

- ① 共同研究者: 小林 慎一 (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
  - ・低温磁場中特性評価用の IBAD ベース REBCO 線材超電導接合の作製
  - ・ REBCO/REBCO 接合(以下 RR 接合)の再現性(成功率)の確認
  - ・精密超高磁場形成 POC 共同研究グループへの技術移管の推進

#### 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 系高温超電導線材間の接合層の結晶配向評価
- ・ Bi-2223 高温超電導線材間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
- ・ 高温超伝導線材の広い電界領域での  $E$ - $J$  特性の評価と解析
- ・ 低抵抗接合の技術と電流分布の評価および解析

### 3.6. 「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、准教授)

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

### 3.7. 「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

1.3 GHz NMR マグネット実現のための技術開発と本体の設計・製造

- ・ 永久電流 1.3 GHz NMR マグネットの開発
  - 詳細設計・解析・追加技術検証
  - REBCO 系永久電流 HTS コイル製造・接合処理・単体コイル評価
  - Bi 系永久電流 HTS コイル製造・接合処理・単体コイル評価
  - LTS 線材・外層コイル製作
- ・ 900 MHz 超級 NMR マグネットの製作

### 3.8. 「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学術研究院自然科学学域、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 マグネットの遮蔽電流効果を含む構造解析

3.9. 「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/1.3 GHz 新規 NMR 分光計のモデル機の作成と評価
- ・ 900 MHz 超級/1.3 GHz 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/1.3 GHz NMR プローブやその他のアクセサリーの試作と性能評価

3.10. 「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: 石井 佳誉 (国立研究開発法人理化学研究所生命機能科学研究センター、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、900 MHz 超級/1.3 GHz 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

3.11. 「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

超電導線材の実用的接合技術の開発

- ・ 高温超電導線材の接合面における電流の評価
- ・ 有限要素法を用いた接合部の電磁解析、構造解析

3.12. 「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ 兼 「接合基盤技術共同研究」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

鉄道用超電導き電ケーブルの簡易接続技術の研究、および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

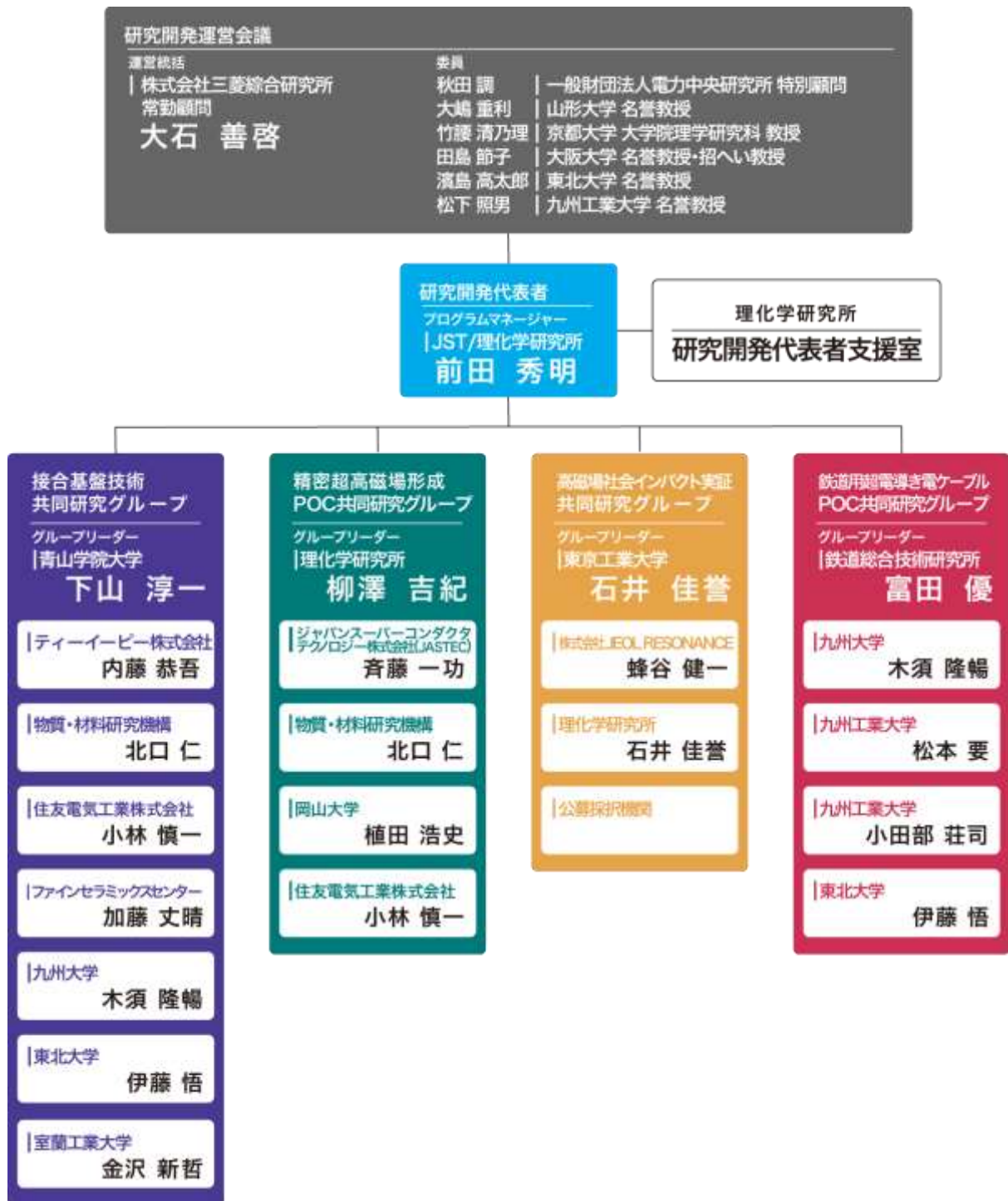


図 1.1 「高温超電導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」研究実施体制

## § 2. 研究開発成果の概要

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、高強度 Bi 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、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は目標以上の特性を高再現性(短尺接合 95%、長尺接合 100%)でクリアした。両接合とも技術移管の準備を開始した。異種線材間では超電導接合の代替技術として極低抵抗化( $10^{-10} \Omega$  以下)を進め、実装可能な接合体サイズで達成できる見通しを得た。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ケーブル導体接合における有効性を実証した。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、次の成果を得た。ステージ 1 からの継続として、超電導接合を実装した Bi-2223 内層コイルを持つ 400 MHz (9.39 T) NMR の 7 カ月に亙る永久電流運転に成功し、1.3 GHz NMR マグネットの基本設計を確定した。これをもとに、線材の仕様策定・手配を進めつつ、遮蔽電流と応力・クエンチに関する連成解析を実施し、さらに 1.3 GHz NMR 用の HTS コイルの詳細構造を模擬した REBCO/Bi-2223 テストコイル検証に着手した。また、900 MHz 超級 NMR マグネットの保護回路の改善を施しつつ、補修と再組立を完了した。

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 超級 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。他方で磁場の長期の時間変動に対する対応には今後の NMR 測定を通したテストが必要である。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、アミロイド $\beta$ のフィブリルに対して2次元固体 NMR での実用性を示した。また、昨年度開発した高磁場 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への応用なども進めている。更に、アミロイド $\beta$ 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) 低温熱処理機械的接合においては、鉄道現場における接合を想定し、簡易な形式の加圧治具を試作、それを用いてケーブルを接合し、 $10^{-7} \Omega$  級の接合抵抗であることを確認した。  
(ii) 低抵抗接合技術を長尺接合の作製へと展開し、10 m 級の導体を特性の劣化なく製造可能であることを実証した。さらに、その曲げ試験によって、素線の特性を凌駕する、最小曲げ直径 6 mm において 95 %以上の  $I_c$  値を保持する優れた可撓性を有することを検証した。  
(iii) 超電導層を多層巻きした超電導き電ケーブルを対象に、事前に準備した一括接合パーツを使用した半田による一括螺旋接合を施し、各層の接合部の通電試験を実施、いずれの層においても  $10^{-8} \Omega$  級の接続抵抗であることを確認した。  
(iv) 長尺化ケーブルによる検証試験に向け、超電導き電ケーブル構成部材の準備を進めるとともに、固定式中間接合末端の設計検討を進めた。

【代表的な原著論文情報】

1. Y. Takeda, K. Kobayashi, A. Uchida, H. Kitaguchi, G. Nishijima, Y. Yanagisawa, T. Nakashima, S. Yamade, S. Kobayashi, T. Kato, S. Nakamura, T. Motoki and J. Shimoyama "Critical current improvement and resistance evaluation of superconducting joint between Bi2223 tapes" *Supercond. Sci. Technol.* **35** [2] (2022) 02LT02-1~6
2. Y. Yanagisawa, R. Piao, Y. Suetomi, T. Yamazaki, K. Yamagishi, T. Ueno, T. Takao, K. Ohki, T. Yamaguchi, T. Nagaishi, H. Kitaguchi, Y. Miyoshi, M. Yoshikawa, M. Hamada, K. Saito, K. Hachitani, Y. Ishii and H. Maeda "Development of a persistent-mode NMR magnet with superconducting joints between high-temperature superconductors" *Supercond. Sci. Technol.* **34** [11] (2021) 115006-1~14
3. A. Wickramasinghe, Y. Xiao, N. Kobayashi, S. Wang, K. P. Scherpelz, S. C. Meredith and Y. Ishii "Sensitivity-Enhanced Solid-State NMR Detection of Structural Differences and Unique Polymorphs in Pico- to Nanomolar Amounts of Brain-Derived and Synthetic 42-Residue Amyloid- $\beta$  Fibrils" *J. Am. Chem. Soc.* **143** [30] (2021) 11462-11472