

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型  
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：小野 通隆／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4年4月1日～令和5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: 小野 通隆 (国立研究開発法人科学技術振興機構、プログラマネージャー/  
国立研究開発法人理化学研究所、高度研究支援専門職) / 前田 秀明 (国立研究開発法人科学技術振興機構、プログラマネージャー/国立研究開発法人理化学研究所、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
  - ・ 補強材付き Bi-2223 超電導線材間の強固な接合形成、接合臨界電流特性向上のための基礎研究
  - ・ 補強材付き Bi-2223 超電導線材間の長尺接合開発とその通電特性評価
  - ・ 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開始

#### 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 コイル設計
    - ビスマス系高温超電導 (Bi-2223) 永久電流 HTS コイル設計
    - 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・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治具、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
- ・ 接合形成用炉内治具の開発
- ・ 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、特命研究員)

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

- ・ 超電導線材間超低抵抗接合技術開発
- ・ 接合特性評価(磁場印加方向依存性、電流減衰試験)
- ・ 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

- ・ REBCO/REBCO 接合(以下 RR 接合)の再現性(成功率)の確認とテストコイル作製
- ・ 精密超高磁場形成 POC 共同研究グループへの技術移管の継続

### 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および歪の評価
- ・ 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熔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熔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熔融による接合を含む永久電流コイルの開発と評価

### 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 コイル設計
  - Bi 系永久電流 HTS コイル設計
  - 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

- ・ 1.3 GHz HTS コイルの遮蔽電流効果を含む磁場解析
- ・ 1.3 GHz HTS コイル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(JEOL)

① 共同研究者:蜂谷 健一 (日本電子株式会社NM事業ユニットNM開発部第1グループ、グループ長)

#### 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

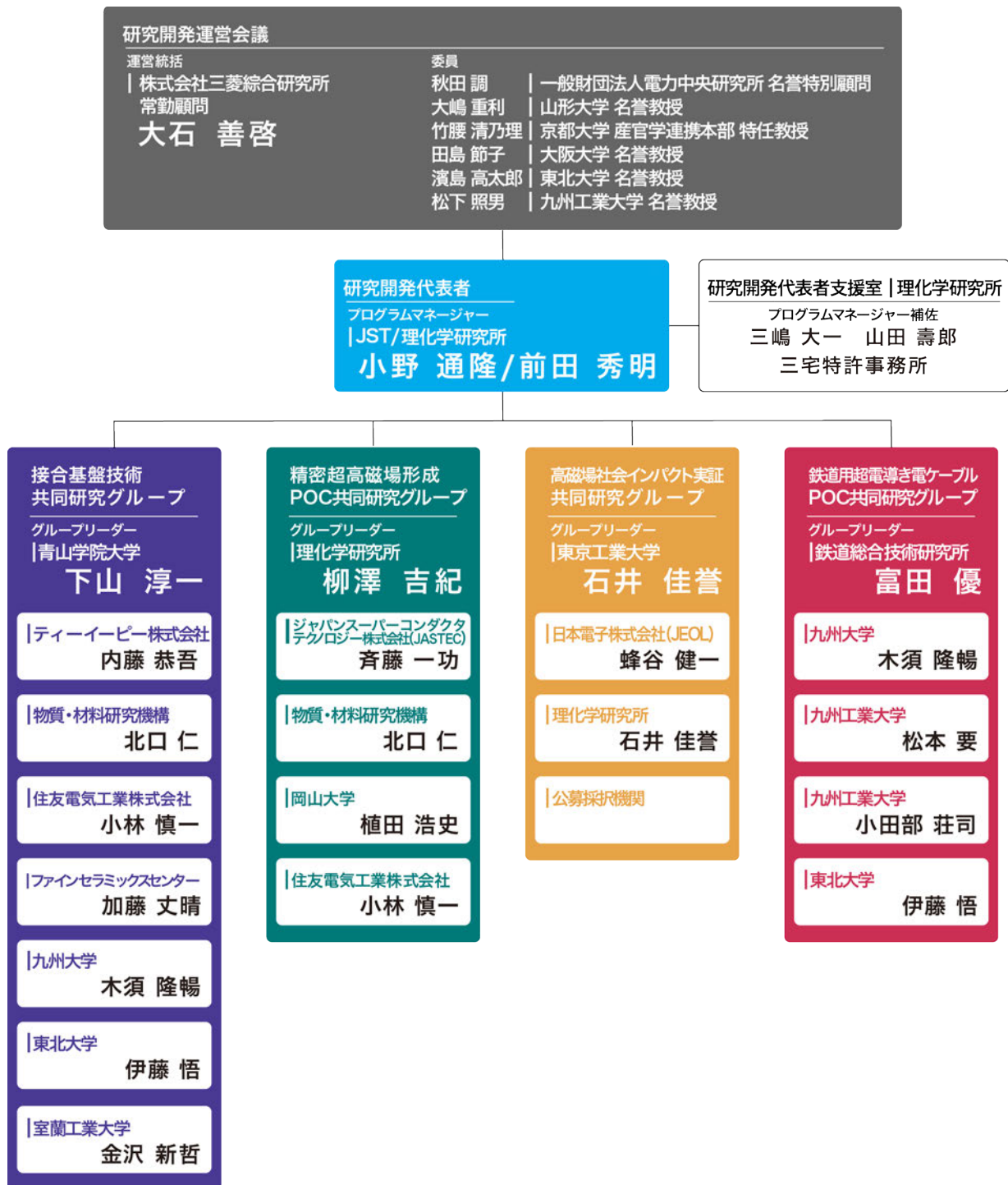


図1 「高温超電導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」研究実施体制

## § 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-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、目標特性をクリアした。今後は性能の若干の向上と、実装に向けた高再現性実現を進める。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。また、両接合ともマグネット製造担当機関の JASTEC への技術移管を進めた。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( $10^{-10} \Omega$ ) 研究を継続した。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。マルチジョイントを持つ REBCO と Bi-2223 の永久電流テストコイルを作成・評価し、設計・施工における課題を抽出した。1.3 GHz NMR マグネット詳細設計のために、遮蔽電流磁場解析、遮蔽電流を含む構造解析(巻線+冷却+電磁力)、クエンチ解析と保護回路の最適化などを実施した。REBCO 内層コイル・Bi-2223 中層コイル・LTS 外層コイルとも、設計を進めた。設計に則り、REBCO 線材と Bi-2223 線材の仕様を決め、調達した。LTS 線材も製造をおおむね完了し、巻枠の手配も進めた。また、900 MHz 超級 NMR マグネットについて、1010 MHz 運転に成功した。これは世界一コンパクトな超 1 GHz NMR マグネットである。

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。さらに立ち上げた磁石の磁場は 23.5 T を超えて、1.01 GHz での稼働を確認した。溶液と固体 NMR でタンパク質の NMR を測定し、2022 年 10 月にはプレスリリースをおこなった。他方で磁場の長期の時間変動や様々な測定ニーズに対する対応には今後の NMR 測定を通したテストが必要となる。このため、NMR プローブの試作と改良を引き続き進めている。さらに既設(理研)の超高磁場 NMR 装置を用いて、架橋天然ゴムの構造解析を固体 NMR と溶液 NMR により進め、新規部分構造の発見につながった (Biomacromolecule 2022)。過去30年以上に渡って様々な研究の取り組みがなされている物質に対しての新規構造の発見は、超高磁場 NMR の応用のポテンシャルの高さを示している。今後開発される 1.3 GHz NMR を用いた応用も含めて、ゴム製品の高性能化やリサイクル法開発への応用につながることを期待される。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 測定法の開発やアミロイドタンパク質などへの応用も引き続き行っている。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。RNA ウイルスであるコロナウイルス RNA の部分構造の解析にも応用を進めた。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) 鉄道現場における接合を想定し、積層金属を使用してボルトナット形式の加圧治具によるケーブル接合を施し、 $10^{-7} \Omega$  級の接合抵抗であることを確認した。(ii) 細い RE 系超電導線材 2 本の張り合わせた 10 m 級の導体を製作し、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) 30 m 級の中間接合部検証システムにおいて、機械的接合による超電導ケーブルのオンサイト接合を実施した。(iv) 長尺超電導き電ケーブルを用いた検証試験に向け、ケーブル構成部材の準備や固定式中間接合端末の検討を行った。

【代表的な原著論文情報】

1. K. Naito, R. Harada, R. Inoue, SB. Kim, H. Ueda, Y. Suetomi, Y. Yanagisawa and H. Maeda "Analyses of Deformation Due to Screening-Current-Induced Force in Layer-Wound REBCO Insert Coil for 1.3-GHz LTS/HTS NMR" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33** [5] (2023) 4300805
2. K. Kashihara, M. Oouchi, Y. Kodama, T. Arai, M. Horie, T. Kitaura and Y. Ishii "High-Field Nuclear Magnetic Resonance Studies Reveal New Structural Landscape of Sulfur-Vulcanized Natural Rubber" *Biomacromolecules* **23** [11] (2022) 4481–4492
3. S. Ito, L. E. Aparicio, Y. Atake, H. Yamamoto, T. Onji, M. Tomita "Initial Study on Press Welding With Indium Applied to High-Temperature Superconducting DC Feeder Cables" *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* **33** [5] (2022) 4800405

以上