

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]

[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/
国立研究開発法人理化学研究所・高度研究支援専門職]

[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 5 年 4 月 1 日～令和 6 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、プログラムマネージャー/
国立研究開発法人理化学研究所、高度研究支援専門職)

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、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
- ・ 高温超電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(日本電子)

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: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

- ・ 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(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簡略化

3.13 「鉄道用超電導き電ケーブル POC 共同研究」グループ(東京大)

① 共同研究者:大崎 博之 (国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科、教授)

② 研究項目

超電導き電ケーブル接合箇所の電界評価

- ・ 超電導ケーブル接合箇所の電界評価



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

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」に関して次の成果を得た。超電導接合技術に関しては、2022年度までに目標特性をクリアしている。2023年度のBi-2223線材間の超電導接合に関しては、歩留まり向上に力点をおいた開発を実施した。しかしながら、POCの先の事業性を考慮した結果、Bi-2223系線材をNMRマグネットに使用しないことが決定されたため、マグネット製造担当機関のJASTEC社への技術移管は12月に中断した。REBCO系線材間の超電導接合については、前年度を上回る高再現性(短尺接合95%、長尺接合100%)を実現し、JASTECへの技術移管もほぼ完了した。他方、接合部を持つ閉ループREBCO線材の通電特性の系統的評価や、異種線材(Nb系とBi-2223系またはREBCO線材)間の極低抵抗接合($10^{-10} \Omega$)の開発を進めるとともに、接合技術全体に関連する接合組織の観察技術、電磁特性の評価技術などの高度化も進めた。

マグネット技術に関しては、複数接合部を持つREBCOとBi-2223の永久電流テストコイルを作成・評価し、設計・施工における課題抽出と対策検討を実施した。また、遮蔽電流磁場解析、遮蔽電流を含む構造解析、クエンチ解析と保護回路の検討を実施して、1.3 GHz NMR マグネットの詳細設計を進めた。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。さらに当初計画のマグネット設計に則り、REBCO線材とBi-2223線材の仕様を決め調達して、LTSコイルについては製造を進めた。他方、900 MHz 超級NMR マグネットについては1010 MHzでの長期運転を行い、1.3 GHz NMR マグネットに資する知見を得た。なお、これは世界一コンパクトな超1 GHz NMR マグネットである(2022年10月プレスリリース)。

NMR計測に関しては、900 MHz 超級NMR磁石の励磁成功後に、磁場変動や不均一性への対策を備えるNMR分光計を使用して様々なテストと改良を行い、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。また、日本電子と理研、東工大が共同開発した超高速サンプル駆動回転機構により、世界最高速である180 kHzの回転でのNMR計測が可能であることを示した(2023年7月プレスリリース)。開発中の微量試料の構造測定法と1.3 GHz NMRと組み合わせることで感度や応用のインパクトをさらに高めることが可能となる。他方、超高磁場NMRを社会インパクトの高い試料へと応用するために、アミロイドβのオリゴマーやフィブリル、天然には存在しない構造を持つ人工タンパク質などの微量試料調製も進めた。さらに、上述の世界一コンパクトな超1 GHz NMRと新規の構造測定法を用いて、コロナウイルスRNAが取る特殊な構造を解明することに成功した(2024年4月プレスリリース)。

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)接合を施したケーブルを用いて、鉄道に向けたインパルス耐電圧試験及び絶縁抵抗測定を実施し、十分耐え得ることを確認した。(ii)音波接合によるREBCO線材間の接合について、作製条件に対する接合特性の依存性を詳細に調査し、REBCO線材の特性劣化なく、これまでの最小値となる接合抵抗率 $17.3 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$ を実現するとともに、接合抵抗率の制御性を確立した。(iii)30 m級の中間接合部検証システムにおいて、インジウムと錫による積層金属を用いたボルトナット形式の加圧治具によるオンサイト接合を実施し、これまでのはんだによる接合と同等であることを確認した。(iv)長尺超電導き電ケーブルを用いた検証試験に向けボルトナット形式の加圧治具によるオンサイト接合を施した。

【代表的な原著論文情報】

1. T. Ohyama, T. Osawa, S.I. Sekine and Y. Ishii "NMR Studies of Genomic RNA in 3' Untranslated Region Unveil Pseudoknot Structure that Initiates Viral RNA Replication in SARS-CoV-2" *JACS Au* **4** [4] (2024) 1323–1333.
2. K. Sakuma, N. Kobayashi, T. Sugiki, T. Nagashima, T. Fujiwara, K. Suzuki, N. Kobayashi, T. Murata, T. Kosugi, R. Tatsumi-Koga and N. Koga "Design of complicated all-alpha protein structures" *Nat. Struct. Mol. Biol.* **31** (2024) 275–282.
3. T. Akasaka, Y. Fukumoto, A. Ishihara, Y. Kobayashi, T. Onji, M. Tomita "Development of joint technology on superconducting cables for feeder" *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* **34** [3] (2023) 3344064.