

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]

[科学技術振興機構・プログラムマネージャー/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 6 年 4 月 1 日～令和 7 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
 - ・ BSCCO 線材非使用による PJ の大幅な研究計画の見直しと追加研究予算の確保

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科学科、教授)
- ② 研究項目

長尺の REBCO 線材間の超電導接合量産技術開発(RR 接合)、REBCO 線材補修に関する基盤技術開発および「接合基盤技術共同研究」グループのとりまとめ

 - ・ 様々なメーカー、仕様の REBCO 線材間超伝導接合のための基礎研究
 - ・ 低濃度溶液の塗布、乾燥法を適用した高汎用性超伝導接合のための基礎研究

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
 - 高温超電導 (HTS) コイルに関する追加技術検証
 - 高温超電導 (HTS) 線材調達
 - 高温超電導 (HTS) 内層/中層コイル設計
 - ・ 900 MHz 超級 NMR マグネットの運転

2.3 「高磁場社会インパクト実証共同研究」グループ(東京科学大)

- ① 主たる共同研究者:石井 佳誉 (国立大学法人東京科学大学生命理工学院、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)

- ② 研究項目

RE 系超電導き電ケーブルの検証および「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

- ・ RE 系線材の接合技術検証
- ・ RE 系線材の複合導体化
- ・ RE 系超電導き電ケーブルの試作・評価

2.5「接合技術汎用化検討」グループ(九州大)

- ① 主たる共同研究者: 宮崎 寛史 (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

REBCO 線材の劣化対策と汎用化に向けての検討および「接合技術汎用化検討」グループのとりまとめ

- ・ REBCO 線材の劣化原因調査と対策方法の検討、REBCO コイル内劣化に対する対策方法の検討

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: 浅野 久志 (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

REBCO 高温超電導線材間の超電導接合用治具、粉末の開発

- ・ REBCO 高温超電導線材間接合中間層用の原料粉末の調製
- ・ 接合形成用炉内治具の開発
- ・ REBCO 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製作・評価技術開発と JASTEC への接合体提供
- ・ REBCO 線材間接合特性評価(磁場印加方向依存性、電流減衰試験)

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新領域技術研究所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

- ・ 磁石 Gr へのジョイントストラップ提供完了と技術サポート

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
- ・ 高温超電導線材間の超低抵抗接合の微細構造解析
- ・ 高温超伝導線材低 I_c 部の原因解明

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
- ・ 高温超伝導線材低 I_c 部の原因解明
- ・ 許容曲げ歪以内での長尺線材劣化に関する評価と解析
- ・ 低抵抗接合の技術と電流分布の評価および解析

3.6 「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
 - － 高温超電導 (HTS) コイルに関する追加技術検証
 - － 高温超電導 (HTS) 内層/中層コイルの設計・製作
 - － 低温超電導 (LTS) 外層コイルの製作

・

3.7 「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環境生命自然科学学域、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
- ・ R&D(軸圧縮評価)コイルの試験結果と構造解析の比較および解析精度の向上

3.8「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

3.9「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

- ・ 東京科学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、モデル機の実成と評価
- ・ 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

3.10「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

RE 系線材の接合技術検証、RE 系線材の複合導体化

- ・ 超電導ケーブルの有限要素法解析による電気特性評価

3.11「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

RE 系線材の接合技術検証、RE 系線材の複合導体化

- ・ 低温熱処理による機械的接合の簡略化

3.12「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

RE 系線材の接合技術検証、RE 系線材の複合導体化

- ・ 超電導き電ケーブル接合箇所の電界評価

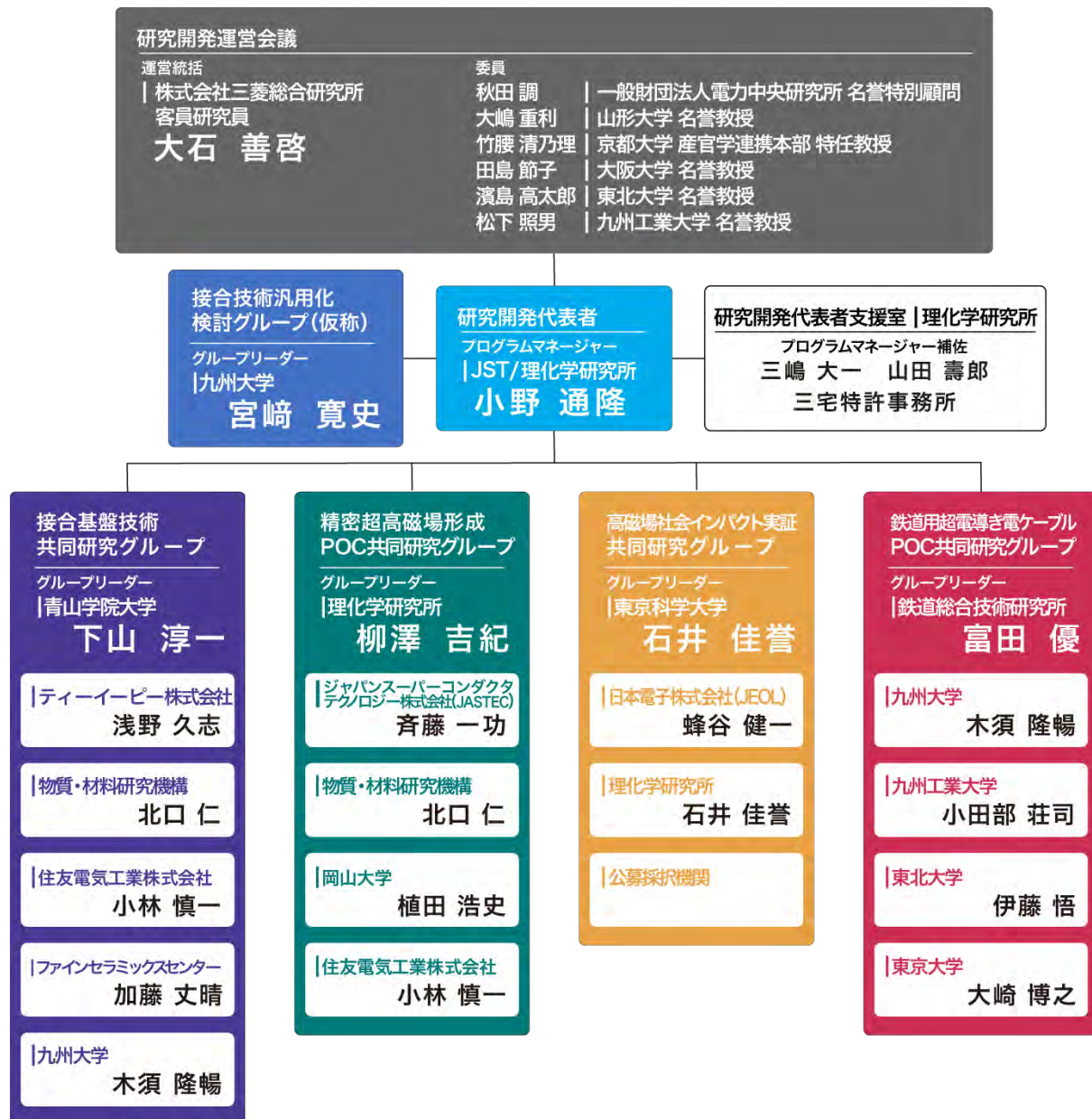


図 1.1 「高温超電導線材接合技術の超高磁場NMRと鉄道き電線への社会実装」研究実施体制

§ 2. 研究開発成果の概要

BSCCO 線材事業者の事業撤退を受け、本未来プロジェクト (PJ) の設計コンセプト (REBCO 高磁場、BSCCO 中磁場、 $\text{Nb}_3\text{Sn}+\text{NbTi}$ 低磁場 $\Rightarrow$ REBCO 中・高磁場、 $\text{Nb}_3\text{Sn}+\text{NbTi}$ 低磁場) を変更した。この設計コンセプトの変更では、これまで REBCO 線材の弱点と言われている複合歪みによる性能劣化の可能性に対処するための高温超電導コイルの大幅な設計変更、および追加 R&D の実施が最優先課題となった。このため、磁石 Gr をはじめ各 Gr の実施項目および研究計画の全面見直しを実施した。そのような状況の中、今年度は以下に示す研究成果が得られた。

(1) 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」

超電導接合 (RR 接合) は既に昨年度に性能目標をクリアしていたが、今年度は工業的にも実用可能な、即ち歩留まりが良く、接合作業が容易な製造技術を確立することを目標とし、それを実現した。RR 接合単体の歩留まりに関してはほぼ 100% を達成している。今後はその作業性を含め作業の標準化を進め複合歪みに敏感な REBCO 線材の弱点を克服する。

また、低抵抗接合 (RL 接合) に関しては、達成目標値 ($0.1 \text{ n}\Omega$) に対し現状は $0.5 \text{ n}\Omega$ 程度と目標未達であるが、更なる高性能化 ($0.1 \text{ n}\Omega$) に向け R&D を進める。因みに 1.3 GHz コイルの基本設計において必要となる Total の接続抵抗値 (全 RR 接合 + 全 RL 接合) は約 $2.7 \text{ n}\Omega$ であり、今回得られた値 ($2.05 \text{ n}\Omega$) でも仕様を満足する。

表 2.1 各接合部の接続抵抗値

	目標値 ($\text{n}\Omega$)	達成値 ($\text{n}\Omega$)	総抵抗値 ($\text{n}\Omega$)	昨年実績 ($\text{n}\Omega$)
RR接合	$<0.001 \text{ n}\Omega$ @4.2 K, 1 T	$<0.001 \text{ n}\Omega$ @4.2 K, 1 T	$<0.05 \text{ n}\Omega$ (50ヶ) @4.2 K, 1 T	同左 ($0.05 \text{ n}\Omega$) @4.2 K, 1 T
RL接合	$<0.1 \text{ n}\Omega$ @4.2 K, 1 T	$<0.5 \text{ n}\Omega$ @4.2 K, 1 T	$<2 \text{ n}\Omega$ (4ヶ) @4.2 K, 1 T	Min $2.8 \text{ n}\Omega$ @4.2 K, 1 T

なお、RR 接合に関しては、2024 年度の実施項目としては今回の設計御変更にともない REBCO 線材間接合箇所が大幅に増えたことにも十分対応できる数のジョイントパッドを JASTEC 社に提供した。さらに、REBCO 線材間の超電導接合の通電特性の系統的評価を実施し、接合部を介した磁場中での臨界電流特性が REBCO 線材と酷似していること、すなわち接合部の特性が超電導線そのものと同等であることを明らかにした。REBCO 線材間接合技術の汎用化に向けては、他社線材間の接合開発に着手した。Nb 系と REBCO 線材間の RL 接合開発では $10^{-10} \Omega$ 以下の極低抵抗化を目指した開発を継続した。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、REBCO 線材の劣化部位の原因究明にも貢献した。

マグネット技術に関しては、内層側の高温超電導 (HTS) コイルについて、長尺線材特性の評価、劣化の防止技術、電磁力に対する補強構造、接合実装技術、線材調達、コイルパラメータの修正に取り組んだ。外層側に設置し HTS コイルと直列接続される低温超電導 (LTS) コイルについては、クライオスタットの設計・製作を進め、来年度以降の組み立ての準備を行った。

さらに、これまで本 PJ で開発してきた各種接合技術、およびマグネット技術の汎用化においては、次の成果を得た。i) REBCO 線材を用いたコイル化技術における劣化原因を調査した結果、劣化箇所の一部は臨界電

流がゼロとなる範囲が線材長手方向に 5 mm 程度と広い箇所があることを確認した。(ii) コイル製作から試験までの履歴を確認しながら劣化のメカニズムを調査した結果、巻線時の線材に局所曲げが印加された可能性が示唆された。

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引き続き行い、高温超電導コイルに起因する磁場の不均一性に対応し、市販の 700 MHz 装置を大幅に上回る性能を発揮できる見込みを得た。また、日本電子と理研、東京科学大が共同開発した超高速サンプル駆動回転機構を用いて、回転の難しい水和状態のタンパク質試料でも世界最高速である 165 kHz の回転での NMR 計測が可能であることを示した(2024 年 10 月 NMR 討論会、2025 年 4 月 ENC-ISMAR で発表)。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などの微量試料調製も進めた。さらに、固体 NMR とクライオ電顕を組み合わせることで、家族性アルツハイマー病で観察される綿花状の老人斑を再現するアミロイド線維の構造解析に成功した(Nature Communications 2024; Impact Factor 14.7; 2024 年 8 月プレスリリース https://www.riken.jp/press/2024/20240830_2/index.html)。

(2) 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」

本 POC に関しては次の成果を得た。(i) RE 系線材の機械強度の評価を行い、複合導体化することでケーブル化に必要な許容張力を達成できることを確認した。(ii) RE 系線材へ銅材を付与することで、過電流特性が向上することを確認した。(iii) 接合部の電界分布の解析を実施し、螺旋形状の複合導体の接合部を含む超電導ケーブルモデルの 3 次元電界解析が可能になり、現状の構造において電気絶縁上の大きな問題がないことを確認した。(iv) RE 系線材を用いた超電導き電ケーブルの試作を行い、通電試験を実施し、RE 系ケーブルは n 値が高く、銅材の付与などによる過電流対策が必要であることを確認した。

【代表的な原著論文情報】

1. Y. Takeda, G. Nishijima and H. Kitaguchi "Resistance and Voltage-Current Characteristics of REBCO Superconducting Joint", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. **35** [5] (2025) 6604106–1~6; <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3550140>
2. M. J. Tehrani, I. Matsuda, A. Yamagata, Y. Kodama, T. Matsunaga, M. Sato, K. Toyooka, D. McElheny, N. Kobayashi, M. Shirouzu and Y. Ishii "E22G A β 40 fibril structure and kinetics illuminate how A β 40 rather than A β 42 triggers familial Alzheimer's" *Nat Commun* **15** (2024) 7045–1~15; <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51294-w>
3. S. Ito, R. Tamura, H. Yamamoto, T. Onji and M. Tomita "Press-Welding Between High-Temperature Superconducting Tape Conductors with Low-Temperature Solders Including Indium" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **35** [5] (2025) 4800305–1~5; <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3512512>