

「高温超電導実用化促進技術開発」

研究開発項目：運輸分野への高温超電導適用
基盤技術開発（鉄道総研）

研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネット
システム技術開発（三菱電機、産総研）
（事後評価）

（2016年度～2020年度 5年間）

プロジェクトの概要（公開）

NEDO

省エネルギー部

2021年10月26日

1. 背景・目的

◆事業実施の背景と事業の目的

■ 社会的背景

- ・都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高める送電技術の確立が重要。
- ・MRI診断装置でヘリウムの供給不足リスクに備え、液体ヘリウムを必要としない超電導応用技術開発を行うことが資源セキュリティの観点からも重要。
- ・これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果は、実用化へ向けた開発へ移行可能な段階にある。



■ 事業の目的

高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される分野（鉄道き電線、MRI用高磁場マグネット）において、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。

◆NEDOが関与する意義

NEDOの第4期中長期目標におけるミッション

「**成果の社会実装によりエネルギーの安定的・効率的な供給の確保**
及び**経済・産業の発展に資する**研究開発プロジェクトを推進」

本プロジェクトの狙い

- これまでの高温超電導の要素技術開発の成果は、**実用化開発へ移行可能な段階**にあり、実用化促進の対象として分野をしぼりこみ
- **省エネルギーの実現と電力等の安定供給**を目指す。
- **鉄道き電線では輸送力増強、MRIコイルでは我が国の産業競争力の強化**を狙う



NEDOの関与が妥当かつ効果的な事業

2. 関連する上位施策

◆政策的位置付け

■ エネルギー・環境イノベーション戦略（2016年4月）

「**新しい超電導材料**の更なる研究や生産技術開発を行うとともに、**線材の低コスト化、冷却システムの革新的な小型化・コンパクト化・軽量化・低コスト化**を実現する研究開発を強力に推進し、**送電線や産業用モーター、発電機等への適用**が可能となる技術を確立することで、**抜本的なエネルギー消費効率の向上**や、それを統合する**新たなエネルギー・システムの創出**につなげる。」

■ 第5次 エネルギー基本計画（2018年7月）

高温超電導技術は、以下の政策対応に関連

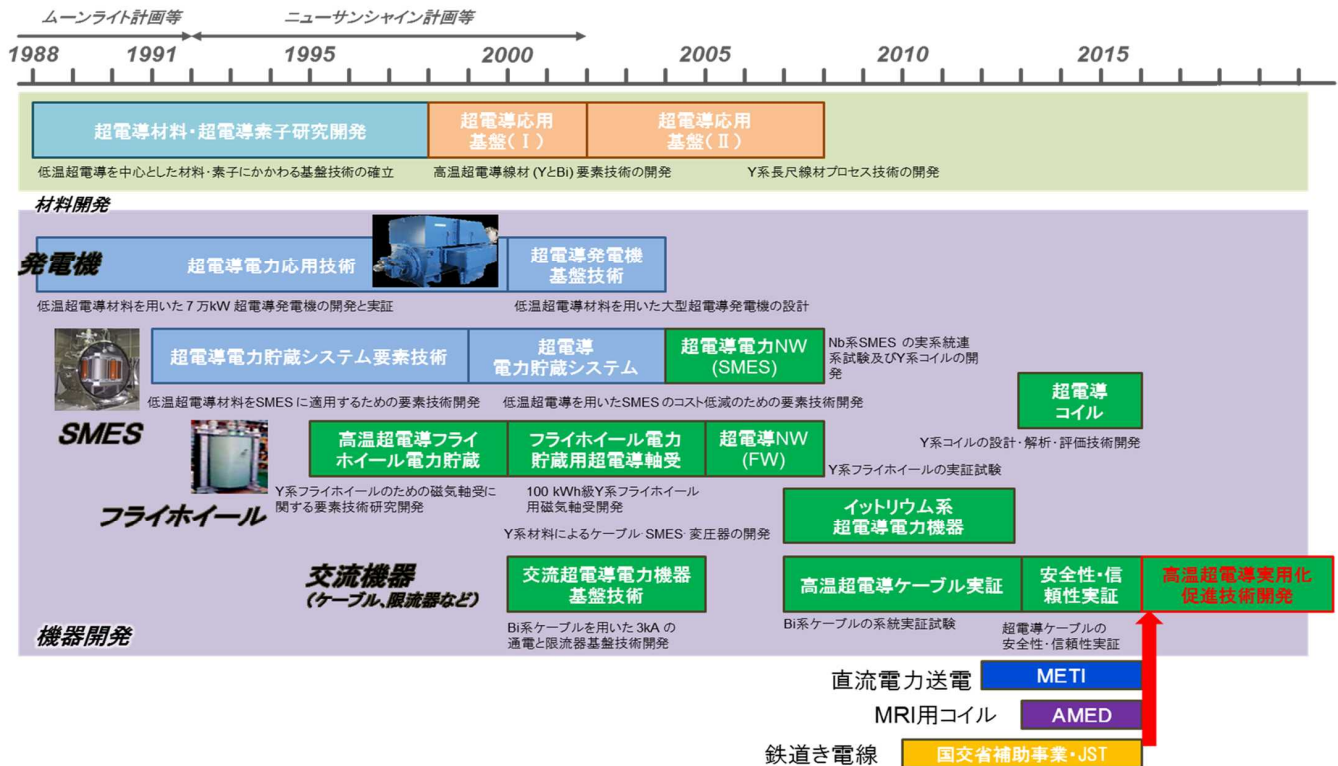
「第2節 2030年に向けた政策対応 2. 徹底した**省エネルギー社会**の実現、3. **再生可能エネルギー**の主力電源化に向けた取組」

■ 省エネルギー技術戦略（2016年9月、2019年7月）

超電導ケーブルが「**次世代送配電技術**」として、エネルギー転換・供給部門の重要技術に位置づけられている

2. 関連する上位施策

◆技術戦略上の位置付け



3. 目標

◆事業の目標

本プロジェクトでは、これまで実施してきた**高温超電導の要素技術開発の成果を、実用化へ向けた開発へ移行させるための研究開発を行う。**
 高温超電導技術の適用により、**大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等**が期待される**送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ(FS)開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。**

【研究開発項目 分類】

- 高温超電導送配電技術開発
- 高温超電導高磁場マグネットシステム開発

3. 目標

◆本事業の全容と今回の事後評価の対象

□ : 今回の評価対象

分類	研究開発項目	実施者	スケジュール				
			'16	'17	'18	'19	'20
高温超電導送配電技術開発	①電力送電用高温超電導ケーブルシステムの实用化開発	交流	東京電力 住友電工 古河電工 前川製作所	安全性評価 冷却システム 系統連系 他	設計仕様 評価基準 作成	事後評価終了 (‘19/7)	
			石狩超電導 技術組合	ガイドライ ン策定	中間評価 (‘18/9)		
高温超電導送配電技術開発	②運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発	直流	鉄道総研	コンパクト冷凍機開発 LN2循環ポンプ開発 断熱管開発	長距離冷却 システム構築・ 評価		
高磁場マグネットシステム開発	③高温超電導高安定磁場マグネットシステムの技術開発	マグネットシステム開発	三菱電機 産総研	1/2アクティブシールド型 3T マグネットシステム開発	高電流密度 コイル開発		
		超電導 接続開発	古河電工	超電導接続技術開発、コイル保護技術開発			
高磁場マグネットシステム開発	④高温超電導高磁場コイル用線材の实用化技術開発	磁場特性 改善	フジクラ 産総研	高磁場臨界電流密度高性能化 長尺材料の均一性向上 低損失構造線材の研究開発	事後評価終了 (‘19/7)		
		生産性 向上	フジクラ	生産性向上技術開発			

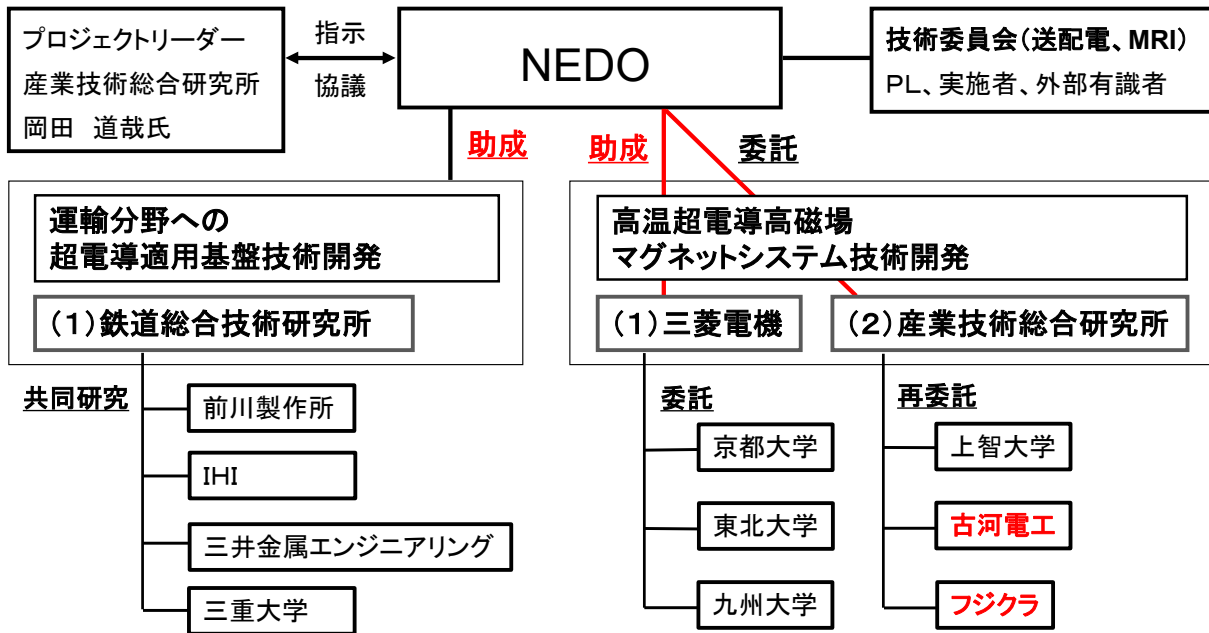
3. 目標

◆今回対象となる研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
運輸分野への超電導適用基盤技術開発 (鉄道総研)	<ul style="list-style-type: none"> 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発 長距離冷却システム構築・評価 	鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの 実用化 へ向けては、超電導ケーブルの 長距離冷却技術開発が必須 。
高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発 (三菱電機・産総研)	<ul style="list-style-type: none"> 1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作 高温超電導マグネットによる小領域イメージング実証 マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証 高温超電導接続として、$10^{-12}\Omega$以下の接続を実現 	高温超電導マグネットシステムの市場展開時期を2026年に設定し、投入時期にMRI市場拡大が予測される 3T級以上のMRIへの適用 を主眼とした伝導冷却方式のマグネットシステムの実現に向け本技術開発が必要。

4. 実施体制

◆研究開発の実施体制（2019～2020）



5. 予算

◆プロジェクト費用(実績)

◆費用

(単位:百万円)

研究開発項目		2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	合計
運輸分野への超電導適用基盤技術開発	鉄道総研	434.6	308.8	370.0	100.0	115.0	1,328.4
	三菱電機	230.6	393.6	359.1	26.1	12.1	1,021.5
高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発	産総研	146.2	188.2	224.9	43.1	43.1	645.5
	合計	811.4	890.6	954.0	169.3	170.3	2,995.4

『運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発』

研究開発項目	目標	成果	達成度
運輸分野への 高温超電導適用基盤技術開発 超電導ケーブルの 長距離冷却技術開発 システム 構築・評価	冷凍機 単体試験による ・設置寸法2 m ³ /kW以下	✓ 容積10 m ³ の冷凍機製作 ✓ 冷凍能力5 kWを確保	○
	液体窒素循環ポンプ 単体試験による ・吐出圧: 0.6 MPa ・流量: 50 L/min以上	✓ 液体窒素循環ポンプ製作 ✓ 吐出圧0.6 Mpaを達成 ✓ 流量50 L/minを達成	○
	断熱管 ・長尺断熱管の試作 ・熱侵入: 2W/m以下	✓ 長尺断熱管の試作 ✓ 長距離冷却システムで2 W/mの熱侵入を確認	○
	km級長距離 冷却システムの開発	✓ 1565mのシステムで循環性能確認	◎

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

◆コンパクト冷凍機の開発

従来機

設置容積: 60 m³

NEDO事業「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」
「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の開発品

鉄道現場への設置は現実的でない...

コンパクト冷凍機の開発(目標: 2 m³/kW)

コールドボックス内の配置の最適化 熱交換器の小型化 バッファータンクの分割等

本研究開発品

設置容積: 10 m³

容積: 10 m³(従来比約1/6)

冷凍能力: 5 kW以上

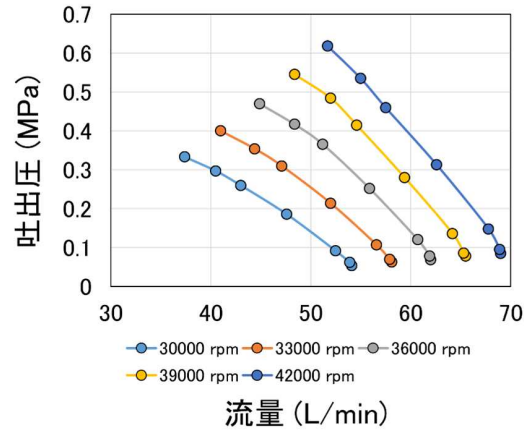
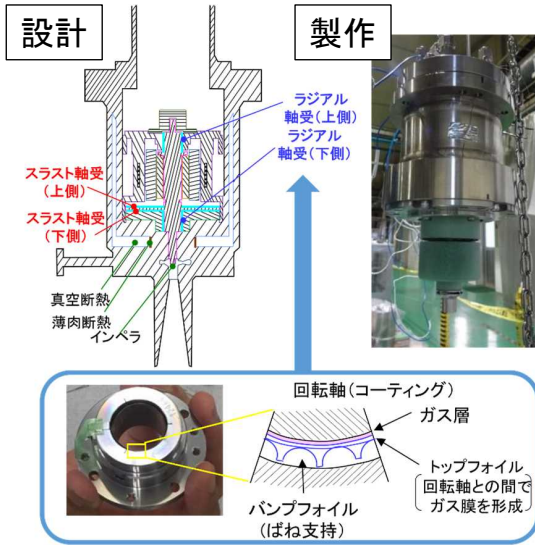
鉄道現場に設置可能なコンパクト冷凍機を開発 (2 m³/kWを達成)

◆高吐出圧液体窒素循環ポンプの開発

ガス軸受方式の液体窒素循環ポンプの開発(目標:吐出圧0.6 MPa、流量50 L/min)

ガス軸受方式:

回転によりガス膜を形成し、軸が浮上(制御機器不要で低コスト)
高速回転によりインペラ径の小型化が可能



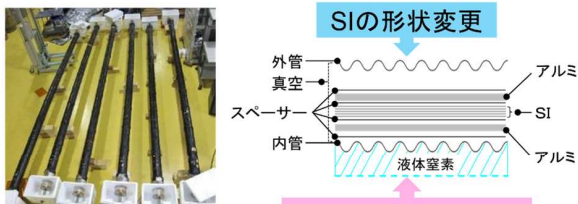
吐出圧0.6 MPa、流量 50 L/minを達成

◆低熱侵入な長尺断熱管の開発

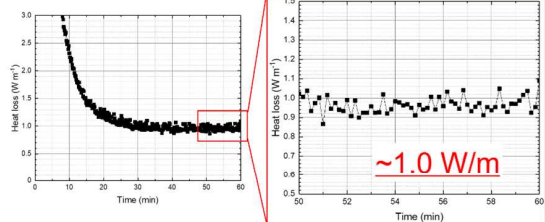
低熱侵入な長尺断熱管を開発(目標:2W/m以下)

短尺サンプルによる測定結果

真空多層断熱構造の最適化



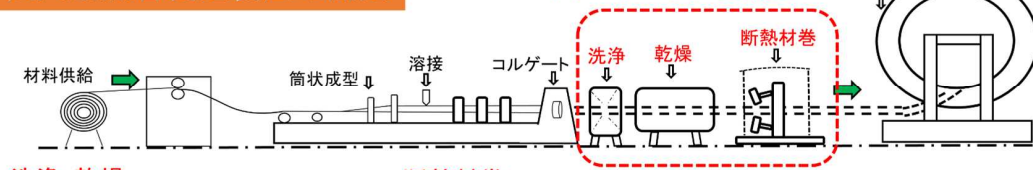
複数のサンプル製作、性能比較による断熱構造の最適化



熱侵入: 1.0W/mを達成

長尺断熱管製造装置の開発

本プロジェクトで開発



洗浄・乾燥



洗浄液の選定

断熱材巻

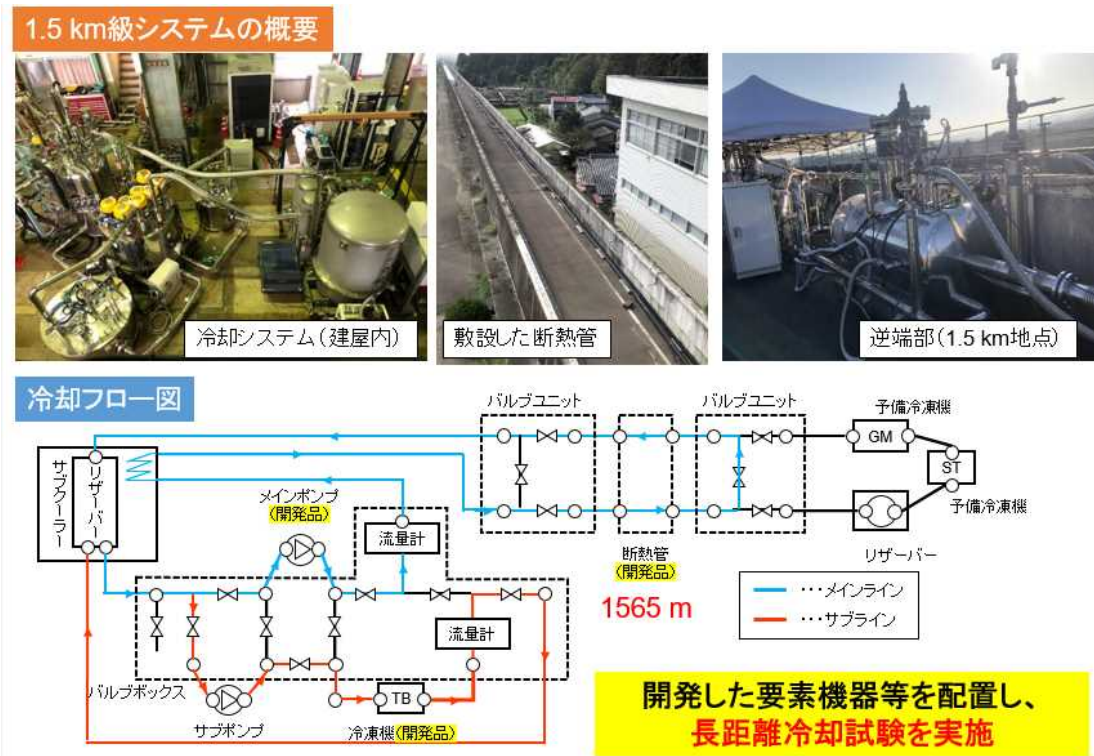


SI形状変更



開発した装置で長尺断熱管を製造

◆ 1.5 km級システムの構築



◆ 1.5 km級システムの構築



『高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発』

◆ 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

最終目標: 1/2アクティブシールド型3Tマグネット製作・撮像実証、コイル平均電流密度 200A/mm²超の実証、大口径コイル製作の劣化抑制、信頼性向上

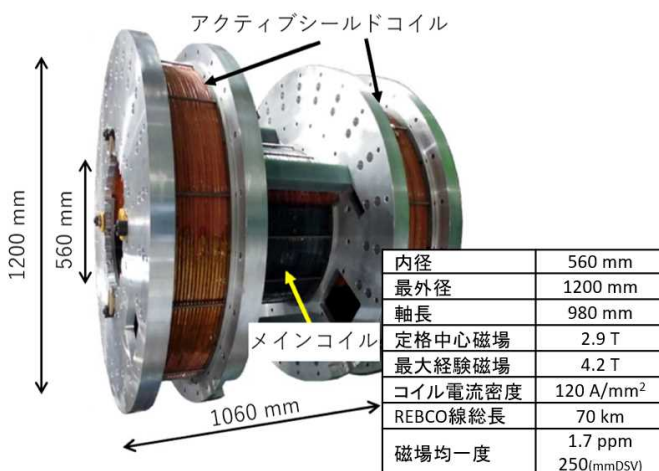
要素技術	要素技術目標	主な成果	達成度
① コイル・マグネット製作技術 (三菱電機)	1/2サイズ3Tマグネットの製作・撮像実証 10ppm/250mmDSV	超電導劣化により目標の3Tに対し 0.3Tでのマウス(~5 cm)の撮像 を実施 磁場均一度: 36 ppm / 50mmDSV 達成	△
	高電流密度コイル(7T検証コイル)の製作 平均電流密度200 A/mm ² 超	各コイルの単体試験を完了。単体コイルを積層し、励磁試験を実施、 最大磁場6.5T、平均電流密度209A/mm² を実証	○
② 磁場安定化技術 (白井研、中村研、津田研)	磁化を考慮した磁場解析手法の確立 磁場安定度:1 ppm/hr.	2Tコイルおよび3Tマグネットでオーバーシュート法、高温励磁法の併用による 磁化安定化手法の効果を確認 磁場安定度:2ppm/hr. ※3T換算 1ppm/hr 達成見込み	○

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

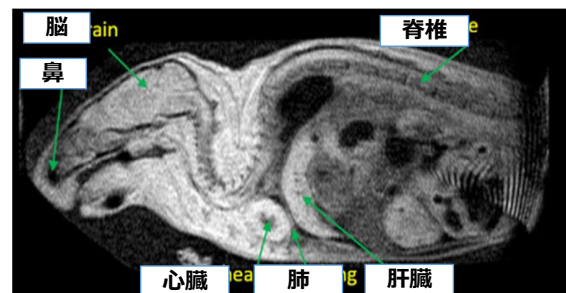
◆ 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

① コイル・マグネット製作技術

1/2サイズアクティブシールド型3Tマグネットの製作



1/2サイズ3Tマグネットを製作



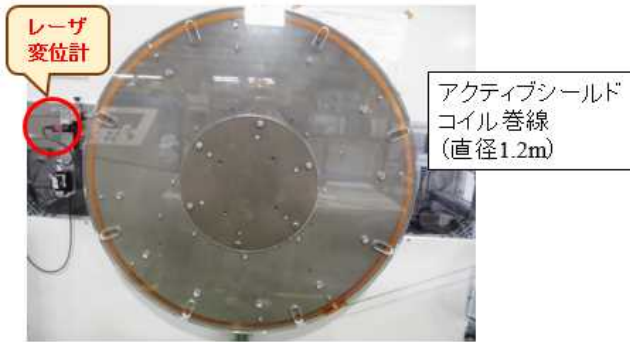
マウス撮像 (0.3T励磁)

- 1/2サイズアクティブシールド型3Tマグネットの製作完了
- マウス(~5cm)の撮像に成功 ※コイルに抵抗が発生し、目標未達の0.3T で撮像

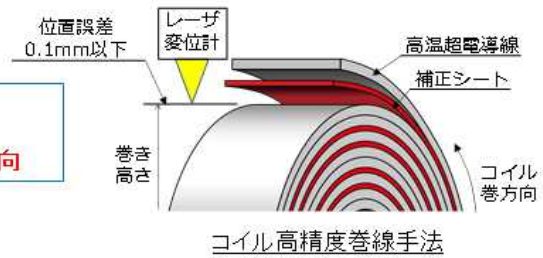
◆ 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

① コイル・マグネット製作技術
大口径コイル製作技術の確立

製作要求精度)
○巻線線材位置 : $\leq 0.1\text{mm}$ R方向
○パンケーキコイル位置 : $\leq 0.5\text{mm}$ R、Z方向



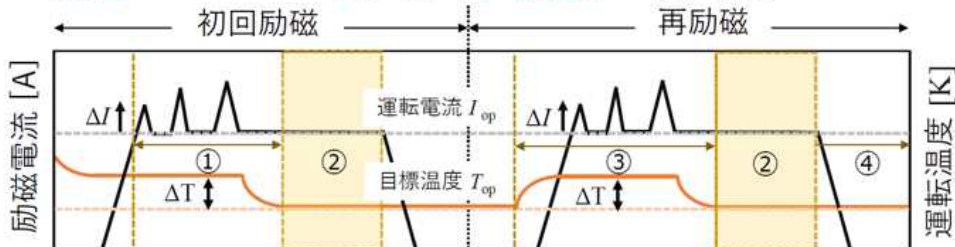
○レーザー変位計により誤差を測量し、補正シートを用いることで1m超大口径コイルにおける、高精度製作技術を確立



◆ 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

② 磁場安定化技術
遮蔽電流を考慮した磁場安定化技術のための励磁方法を検討

繰り返しオーバーシュート法(OS法)と高温励磁法(HTM法)の併用



- ① 併用法で磁場変動抑制(15~20 ppm/h. まで抑制後, $\Delta T = 5$ K)
- ② 磁場変動率 ≤ 1 ppm/h. 区間(MRIではこの区間で撮像)
- ③ 併用法で磁場変動抑制 ($\Delta T = 3$ K 昇温後OS法により5 ppm/h. まで抑制後, $\Delta T = 3$ K)
- ④ 以後、再励磁の度に③を繰り返す

○積層型高温超電導コイルの励磁方法として、短時間での磁場安定化と高精度な磁場変動抑制を両立したOS法+HTM法を提案

◆2) マグネットのシステム最適化技術開発

最終目標: 全身撮像用3T-MRIマグネット実用機の基本設計
 中間目標: 1/2アクティブシールド型5Tコイル設計完了、励磁システムの低コスト、省エネ化の提案

要素技術	要素技術目標	主な成果	達成度
① 高磁場・高電流密度コイル設計技術 (三菱電機)	全身用3Tコイルの概略設計	・1/2サイズアクティブシールド型5Tコイルの設計。全身用高温超電導マグネットの概念設計	○
	熱スイッチの効果検証	・冷却効率を最適化する熱スイッチの導入により、冷却時間を40%短縮することに成功	○
② 省エネ・低コストシステムの開発 (白井研、中村研)	省エネ、低コスト励磁システムの提案	・大容量の励磁電源と小型の磁場保持電源を組合せた省エネシステム、スイッチング式電源による撮像実証 ・免疫遺伝的アルゴリズムによる磁場均一度と漏洩磁場低減を両立させる最適化手法の確立	○

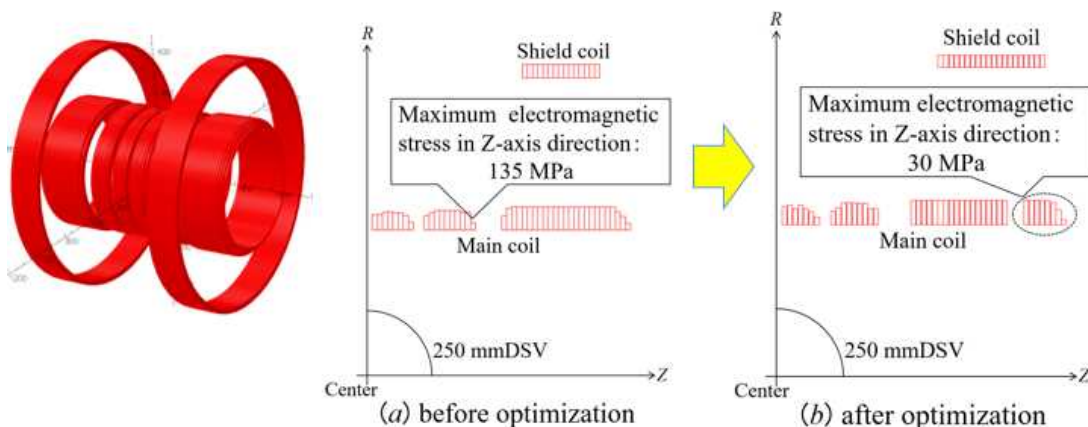
◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部達成、× 未達

◆2) マグネットのシステム最適化技術開発

① 高磁場・高電流密度コイル設計技術

1/2サイズアクティブシールド型5Tコイルの設計

積層型の高磁場用コイルでは軸方向の圧縮応力が問題となる



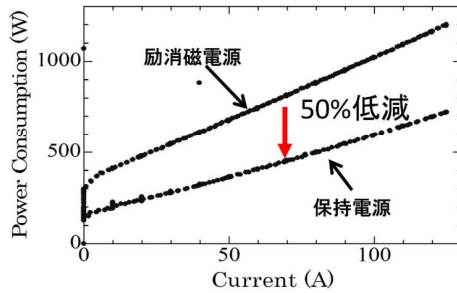
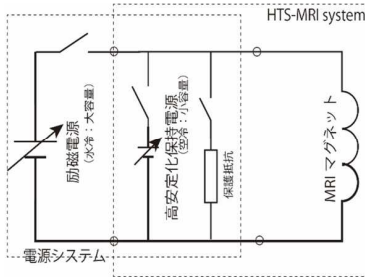
1/2サイズアクティブシールド型5Tコイルの最適化

○ コイル群の分割により、軸方向電磁力を大幅に低減できることを提案

◆ 2) マグネットのシステム最適化技術開発

② 省エネ・低コストシステムの開発

実用化のための高安定磁場マグネットの励磁システムの提案・検証



MRI用

省電力高安定励磁電源システム

各電源の消費電力比較

励磁電源(左) 保持電源(右)

- 実用化省エネ励磁電源システムを設計製作
 - * 励消磁時用着脱式の水冷大容量励磁電源
 - * 定常運用小容量空冷磁場保持用高安定化電源
 - 50%以下の省エネ性を確認
- 励磁運転で動作を確認

項目	励消磁電源	保持電源
出力電流	1000A	300A
出力電圧	±15V	±2V
電流安定度	100ppm/h	1ppm/h
電流リップル	100ppmp-p	10ppmp-p
冷却方式	水冷・強制空冷併用	強制空冷

◆ 3) 超電導接続技術開発、コイル保護・焼損対策手法の開発

1. 高温超電導線材の超電導接続技術開発

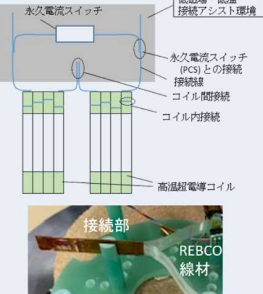
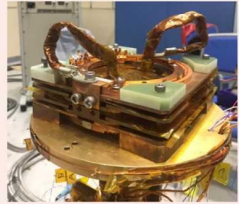
目標	成果	達成度
接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下の接続技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・銀保護層の上からPbBi系はんだで長尺均一に接続することにより、接続抵抗 $10^{-12}\Omega$ 以下を見通す技術を確認。実際に $10^{-12}\Omega$ オーダーの接続を実証(新線材)。 ・2台の冷凍機により、接続部のみを極低温にすることで、冷凍機冷却マグネットにおいても超電導はんだ接続が適用可能であることを実証。 	○

2. コイル保護・焼損対策手法の開発(永久電流モード)

目標	成果	達成度
永久電流モード高温超電導コイルの保護・焼損対策手法の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル内に生じた常電導部を高感度に検出できる「共巻き法」と、抵抗性電圧が検出されたコイルの電流を他の健全なコイルに転流させることによりホットスポットの成長を抑制する「抵抗ショート法」を確認。 ・小規模モデルコイルを用い、2つを組み合わせた一連の保護スキームを実証。また大規模のマグネットほど効果が高いことを確認し、汎用保護技術として確立。 	○

- ・ マグネット製造現場で施工が容易な「はんだ接続」により、MRI用に十分な低抵抗の接続技術を開発した。また高温超電導マグネットの汎用の保護技術を確認した。
- ・ 接続技術・保護技術ともに、MRIだけでなく、磁気浮上コイルや強磁場コイル等の様々な応用に適用可能であり、あらゆる高温超電導機器の実用化促進に貢献する。

◆ 3) 超電導接続技術開発、コイル保護・焼損対策手法の開発

テーマ	1. 高温超電導線材の超電導接続技術開発 — 産総研、NIMS、フジクラ、古河電気	2. コイル保護・焼損対策技術開発(永久電流モード) — 産総研、上智大
概要	MRIマグネットシステムにおいて、REBCO高温超電導線材同士およびREBCO線と低温超電導線材を接続するための、 マグネット製作現場で施工が容易な接続技術の開発	永久電流モード運転中の高温超電導コイルに何らかの異常が発生した場合に、それを速やかに検知し、当該コイルの電流を減衰させて焼損を防止する 保護技術の開発
手段	接続部を「低磁場・低温環境」におくことにより、接続に用いる超電導材料の選択肢を拡大し、REBCO高温超電導線材を異なる種類の超電導材料を介して接続する 	コイル内に生じる抵抗性電圧の高精度な検出を行う「共巻き法」と、常電導の芽が生じたコイルの電流を速やかに他のコイルに移して減衰させる「抵抗ショート法」の組み合わせ 
目標	接続点での 抵抗値$10^{-12}\Omega$以下の接続を実現	永久電流モード高温超電導コイルの 保護・焼損対策手法の確立

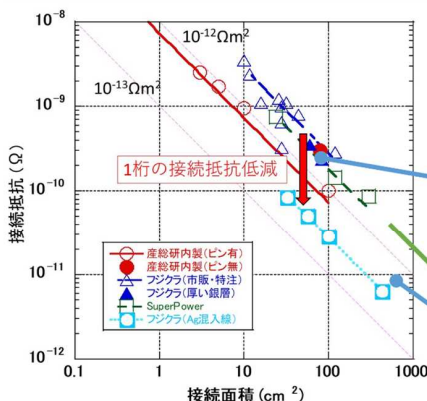
(次世代)高温超電導永久電流モードMRIの実現

1. 高温超電導線材の超電導接続技術開発

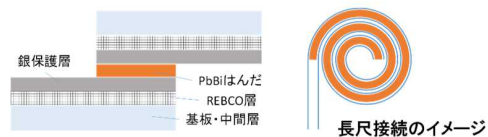
研究開発の概要

➤ 接続抵抗 $10^{-12}\Omega$ 実現に向けて

- 銀保護層の上から、**超電導はんだで長尺にわたり均一な接続部を形成する手法を確立**
- REBCO層と銀保護層の接触を改善した新線材を試作し、接続抵抗を従来線材の1/10に低減することに成功**



各種線材の接続抵抗評価結果



- ✓ 接続抵抗は線材種によらず、接続面積に反比例しており、均一な接続が実現できている
- ✓ 比例係数は $10^{-12}\Omega m^2$ で、 $1m^2$ の接続ができれば $10^{-12}\Omega$ が実現可能
- ✓ 新線材はさらに1桁小さい接続抵抗を実現

接続抵抗 $6.3 \times 10^{-12} \Omega$ を実証
(接続面積 $432cm^2$)

新線材は特許出願
接続技術はマグネットメーカー・線材メーカーへの技術移転予定

2. コイル保護・焼損対策手法の開発(永久電流モード)

- 永久電流モード運転中のコイルに生じた常電導部を高感度に検知する手法と、当該コイルの電流を減衰させて焼損を防止する手法を開発

a. 「共巻き法」
 高温超電導線と共に電氣的に絶縁された薄い銅テープを巻き込み、常電導転移検出や保護を行う

← 共巻きコイルと超電導コイルの間の電圧をモニターすることによりノイズがキャンセルされ、常電導部による電圧を高感度に検出可能

b. 「抵抗ショート法」
 回路切替により常電導転移を検出したコイルの電流を他のコイルに移し、ホットスポットの成長を抑制する

← 常電導を検出したコイル以外のコイルを抵抗で短絡することで、磁気カップリングを利用して瞬時に電流を健全なコイルに移すことができる

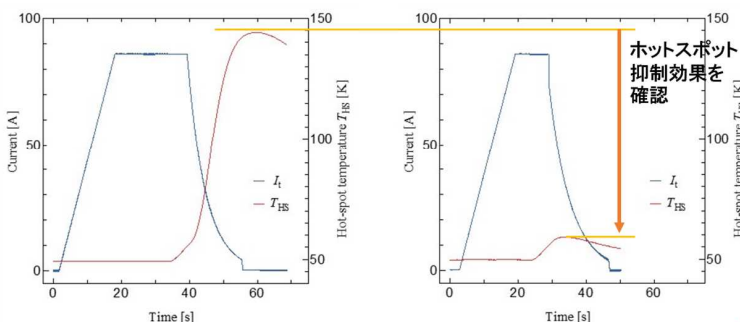
2. コイル保護・焼損対策手法の開発(永久電流モード)

- 「共巻き法」と「抵抗ショート法」を組み合わせた一連の保護スキームを、冷凍機冷却モデルコイルで実証

SP : Single pancake coil
 DP : Double pancake coil
 R_1 : 1.5 m Ω
 R_2 : 1.5 m Ω
 Contactor resistance of S_2 : 3.5 m Ω

← 共巻き検出電圧が閾値を超えたら、回路を切り替えて(抵抗ショート)保護動作を開始

回路切り替えには一般的な電磁接触器を使用。極低温域で動作することを確認。



- ✓ 大インダクタンスのマグネットシステムを模擬した実証試験結果
- ✓ あらゆる規模のマグネットシステムで有効であることを確認

新しい保護技術を確認

すべて論文発表

◆知的財産権の確保に向けた取組

戦略に沿った具体的取組

- 長距離冷却技術については、今後も更なる長距離化を目指した研究開発を進め、関連技術の特許取得を目指す。
- 高温超電導マグネットの設計、製造に関するキー技術の特許取得を目指す
- 超電導接続技術開発については、学術的価値のある成果については積極的に論文発表し、工業技術としてのノウハウは事業者への技術移転を行う
- 保護・焼損対策技術開発については、高温超電導コイル保護として汎用的で学術的価値も高いため、積極的に論文発表を行う

特許出願	事業者	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度~	計
	鉄道総研	0	0	0	1	1	2	4
	三菱電機	0	0	1	3	0	1	5
	産総研	0	1	0	0	1	1	3

※2021年度10月26日現在

		2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2020年度	計	総計
		論文	鉄道総研	0	1	1	5	2	
	三菱電機	0	2	4	4	3	0	13	
	産総研	0	2	2	4	2	3	10	
研究発表・講演	鉄道総研	3	6	5	4	1	0	19	121
	三菱電機	4	21	14	13	10	0	62	
	産総研	3	17	11	5	1	3	37	
展示会への出展	鉄道総研	1	1	1	1	1	0	5	11
	三菱電機	1	1	1	1	1	0	5	
	産総研	0	0	0	0	1	0	1	

※2021年度10月26日現在

鉄道き電線

- 鉄道き電線については、本PJでの長距離冷却技術の開発成果を活用し、**高温超電導鉄道き電線システムの実証試験を目指す。**
- 鉄道事業者をはじめ広く社会からの要請を受け、随時対応している。今後、**超電導き電線に関するシミュレーションや現地調査により、導入線区の選定を実施する。**
- 鉄道総研主催の展示会などでマーケティング活動を実施する。

MRI用マグネット

- 画像の高精細化要求により、**高磁場化が進行、新規導入MRIは超電導マグネット方式が主流**
- 超電導マグネットの適用先の中で、最大市場がMRI、**生産伸び率約5%/年、3Tの伸び大**
- 現行の超電導マグネットは、液体ヘリウム冷却が必須であるが、ヘリウム枯渇・高騰による供給不安
→**液体ヘリウムレス化、高磁場化、小型・軽量化**

製品の事業化ターゲット)

- 液体ヘリウムレスのMRIマグネット
- 1.5T機から3T機への置き換え需要対応
→漏洩磁場領域と重量を1.5T相当に

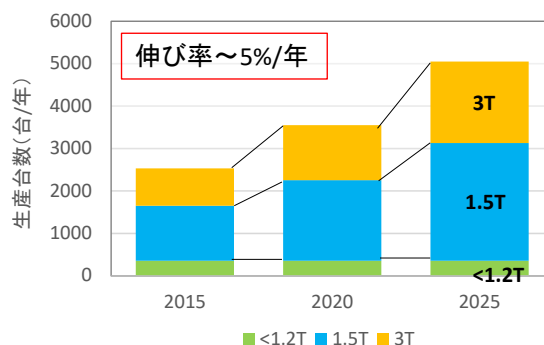


図1: MRIシステムの生産予想
BCC Research Reportからの外挿

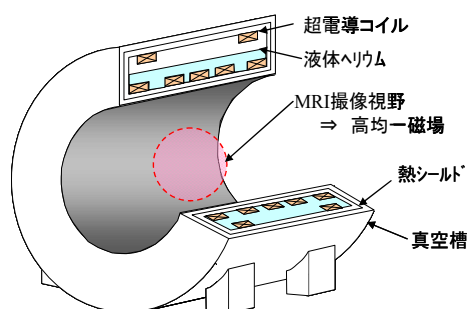


図2: MRI用超電導マグネット構成図
(現行機: 液体ヘリウム使用)

HTS-3T MRIマグネット

	現1.5T	現3T	HTS-3T
中心磁場(T)	1.5	2.9	2.9
軸長(m)	1.4	1.7	1.6
重量(ton)	4	6	4.5
漏れ磁場 (m)	3.8x2.4	4.5x2.8	3.8x2.4
コイル電流密度 (A/mm ²)	180	120	200
最大経験磁場(T)	5.5	5.5	7.0



MRIマグネットの漏れ磁場、形状の概要(HTS-3Tが現1.5T並みに)

- ・3Tマグネットを1.5T並みの漏れ磁場領域、形状にすることで、置き換えが容易
→超電導コイルの高電流密度化(200A/mm²、7T、30K)

・液体Heレス化、小型軽量化で3T-MRIシステムが広範囲に使用され、世界の人々の健康維持管理に貢献

・健診車への搭載も可能になり、地域診療の質の向上に期待

・3TマグネットおよびMRIシステムの市場拡大に期待

超電導接続技術

- REBCO層と銀保護層の接触を改善した新線材は、接続性を特に重視する超電導マグネットユースへの訴求が期待される
- 接続技術と保護技術の実績の積み重ねにより、ドライブモードに続く次世代の永久電流モード液体ヘリウムレス・小型軽量の高温超電導MRIの実現が期待される

概要

		最終更新日	2021年10月26日
プログラム (又は施策)名			
プロジェクト名	高温超電導実用化促進技術開発	プロジェクト番号	P16006
担当推進部/ PMまたは担当者	省エネルギー部 菱谷 清 (2016年4月～2016年4月) プロジェクトマネージャー、 岩坪 哲四郎 (2016年5月～2019年7月) プロジェクトマネージャー、 中原 裕司 (2016年4月～) プロジェクトマネージャー (2019年8月～)、 木下 晋 (2016年4月～) 赤城 協 (2019年5月～)		
0. 事業の概要	本プロジェクトでは、これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果を、実用化へ向けた開発へ移行させるための研究開発を行う。高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ (FS) 開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。		
1. 事業の位置 付け・必要性 について	我が国の成長戦略の鍵として、科学技術イノベーション総合戦略の推進が挙げられている。超電導送電技術は、その科学技術イノベーション総合戦略において取り組むべき課題、スキームの中で「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」の一つとして位置付けられており、温室効果ガスの排出を極力抑えたクリーンなエネルギー利用を達成した社会の確立に必要な技術とされている。また、エネルギー基本計画 (2018年7月) においても、2030年に向けた政策対応で、「徹底した省エネルギー社会の実現」がうたわれており、高温超電導技術による省エネルギーが寄与できる。		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」</p> <p>今後、鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの実用化へ向けては超電導ケーブルの長距離冷却技術開発が必要である。</p> <p>本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。</p> <p>【中間目標 (2018年度)】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築 <ul style="list-style-type: none"> ・サイズ2m³/kWの冷凍機の開発 ・揚程0.6MPa、流量50L/min以上の極低温循環ポンプの開発 ・2W/m以下、真空維持1年以上を見通せる断熱管の開発 ・システム保全技術の検証 2) 2km級長距離冷却システムの構築及び検証 <p>【最終目標 (2020年度)】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 路線環境に対応した信頼性評価 2) 鉄道き電線用長距離冷却システムの設計・評価基準、保全基準の策定 <p>研究開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」</p> <p>ヘリウムレス、省エネルギー及びシェア拡大に資する3T級MRI用を主眼とした高温超電導高磁場マグネットシステムの開発を行うとともに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のため、超電導接続技術の実現に向けた研究開発として、開発目標を以下のとおり定める。</p> <p>【中間目標 (2018年度)】</p>		

		<p>1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作(直径500mmボア、3T、漏れ磁場(2.5m×3m))</p> <p>2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価(安定度、均一度)。高温超電導マグネットによる小領域(30mmDSV(Diameter of Spherical Volume))イメージング実証</p> <p>3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証</p> <p>4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討</p> <p>【最終目標(2020年度)】</p> <p>1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3Tマグネットによるイメージング実証(150mmDSV)。磁場均一度10ppm(250mmDSV)未満、磁場安定度1ppm/hr未満性能を達成。</p> <p>2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5Tマグネットの試作(コイル平均電流密度200A/mm²(7T)超、低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場均一度10ppm(250mmDSV)、磁場安定度0.1ppm/hr未満)</p> <p>3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化実施</p> <p>4) コイル保護として、焼損対策手法の確立</p> <p>5) 高温超電導接続として、接続点での抵抗値10⁻¹²Ω以下の接続を実現</p>						
事業の計画内容	主な実施事項		2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	
	輸送分野への高温超電導適用基盤技術	コンパクト冷凍機技術開発	設計・製作		総合運転試験	運転手法検討		
		液体窒素循環ポンプ技術開発	設計・製作		評価試験	運転手法検討		
		断熱管技術開発	構造設計・試作、長尺製造技術開発		長尺管試作・評価	敷設装置開発		
		長距離冷却システムの開発				長距離冷却試験		
	高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発	コイル・マグネット製作技術	3Tマグネット製作			3Tイメージング		7T検証コイル評価
		マグネットのシステム最適化技術	3Tコイル設計	3Tマグネット設計	5Tコイル設計	システム省エネ低コスト検討		
		超電導接続技術	超電導接続技術の開発、接続抵抗評価技術の開発					
コイル保護・焼損対策技術		コイル保護方式検討			適用性評価			
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度		
	一般会計	—	—	—	—	—		
	特別会計(電源)	811.4	890.6	953.9	169.3	170.3		
	開発成果促進財源	—	—	—	—	—		

	総予算額	811.4	890.6	953.9	169.3	170.3
	(委託)	811.4	890.6	953.9	43.1	43.1
	(助成) : 助成率 2/3	—	—	—	126.1	127.1
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課 エネルギー・環境イノベーション戦略室				
	プロジェクト リーダー	岡田 道哉 (国立研究開発法人産業技術総合研究所 TIA 推進センター 副センター長)				
	委託先・助成先	【委託先】 ・公益財団法人 鉄道総合技術研究所 (2016～2018 年度) [共同実施：前川製作所、I H I、三井金属エンジニアリング、東北大学 (2016～2018 年度)、九州大学 (2016～2018 年度)、三重大学、] ・三菱電機株式会社 (2016～2018 年度) [再委託：京都大学、東北大学、九州大学] ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 [再委託：国立研究開発法人物質・材料研究機構 (2016～2018 年度)、上智大、古河電工 (2019～2020 年度)、フジクラ (2019～2020 年度)] 【助成先】 ・公益財団法人 鉄道総合技術研究所 (2019～2020 年度) [共同研究：前川製作所、I H I、三井金属エンジニアリング、東北大学、三重大学、九州大学] ・三菱電機株式会社 (2019～20208 年度) [委託：京都大学、東北大学、九州大学]				
情勢変化への 対応	<p>鉄道き電線については、鉄道国際会議で情報発信・収集を行ったが、特段の情勢変化はなく、対応は行わなかった。MR I コイルについては、競合する海外MR I システムメーカー (GE、フィリップス、シーメンス) の動向、高温超電導コイルの試作等の学会発表、実用化時期の公表に対応して、加速も含めて、研究開発内容を見直すなどの対応を準備していたが、特段の情勢変化はなく、対応は行わなかった。</p>					
評価に関する 事項	事前評価	2016 年度 (採択審査委員会)				
	中間評価	2018 年度				
	中間評価	2019 年度				
	事後評価	2021 年度				
3. 研究開発成果 について	<p>研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」</p> <p>1) 冷却システム構成・評価</p> <p>冷凍機・液体窒素循環ポンプ・断熱管などの要素機器と接続し、複数の断熱管を敷設・接続し、km 級長距離冷却システムを構成した。圧力 2 MPa 未満、流量 10 L/min 以上の液体窒素による冷却試験を実施し、長さ 1.2 km 以上の条件で循環性能を確認する目標に対し、総長 1.5 km 級 (1565 m) の冷却システムを構成し、流量約 30 L/min においても圧力損失約 0.7 MPa で循環冷却可能なことを確認した。また、低電圧電源による超電導動作を確認した。一連の試験を通じて、取得したデータをもとに、2 km 以上の長距離冷却システムの設計指針を確立した。</p> <p>2) コンパクト冷凍機技術開発・運転手法検討</p>					

鉄道現場への導入を想定し、 $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ 以下のコンパクトなブレイトン冷凍機実現を目指し、コールドボックス内配置の最適化・熱交換器の小型化・バッファタンクの分割・回転機の高効率化等を行い、設置容積 10 m^3 のブレイトン冷凍機を開発した。その後、模擬負荷を用いた閉ループ試験により、熱負荷と冷凍機を直列に接続して冷却する方式（直接冷却）と、熱負荷を冷却する回路と温まった窒素を冷凍機で冷却する回路を組み合わせ間接的に冷却する方式（間接冷却）について、ほぼ同等の熱負荷を冷却できることを確認した。運転手法として間接冷却を採用することで、故障時の冗長性を確保、設計圧力を低く設定できることから低コスト化（熱交換器の小型化等）が期待される。また、 5 kW 以上の冷凍能力を確認し、目標である $2 \text{ m}^3/\text{kW}$ を達成した。

3) 液体窒素循環ポンプ技術開発・運転手法検討

動圧式ガス軸受を用いた、ポンプヘッド 0.6 MPa 、流量 50 L/min 以上の液体窒素循環ポンプの開発を行った。設計・製作後、単体でのポンプ評価試験を行い、ポンプヘッド 0.6 MPa 、流量 50 L/min 以上を確認した。長距離冷却システムにおいて必要となる高ポンプヘッドの確保のため、複数ポンプによる直列（タンデム）運転の解析および試験を実施し、ポンプヘッドが加算され、拡大できることを確認した。これにより、適切な回転数で運転することで、タンデム運転によるポンプヘッドの向上が可能であることが言える。

4) 長尺断熱管技術開発・敷設手法検討

複数の短尺サンプル比較による真空多層断熱構造の最適化により、短尺で断熱性能 2 W/m 以下を確認した。また、断熱層内のアウトガス分析を実施、それらを除去する洗浄方法、吸着剤について検討を行い、真空維持 1 年以上の見通しを得た。それらを元に開発した装置で長尺断熱管を製作し、 km 級長距離冷却システムを構成するために敷設した。敷設は、断熱管を巻いたドラムの下にローラー配置し、モーターブレーキにより回転させるアンダーローラー方式の敷設装置を開発し、これにより行った。また、車両運搬可能な 1 ユニットの長さ（約 350 m ）を延長するため、胴径を小さくする等、構造を改良した特殊ドラムを試作した。これにより、 400 m の断熱管の巻き付けに成功するとともに、 450 m 程度まで延長可能な見込みを得た。なお、 1.5 km 級においても、長尺にわたり、 2 W/m 以下の低熱侵入が実現できていることを確認した。

5) 状態監視、診断技術の開発・適用

冷却システムの状態監視技術開発として、モータ等回転機械等の稼働部付近等に加速度センサを取り付け、データ蓄積を行った。蓄積したデータをもとに、相対判定基準を用いて、加速度の時間領域実効値、時間領域ピーク値、時間領域変動係数、時間領域歪度、時間領域尖度、時間領域波高率、時間領域波形率、周波数領域幾何平均、および上記パラメータの主成分から総合的に診断する方法の検証、評価を行い、 km 級長距離冷却システムに向けた状態監視・診断技術の健全性を確認した。

開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

①大口径コイルの製作技術では、MRI 高温超電導マグネットを実現するために大口径コイル $1/2$ サイズアクティブシールド型 3 T コイルを製作、検証する。超電導特性劣化の一部劣化により中心磁場は目標の 3 T に対して約 0.3 T に留まったが、成体マウスの撮像に成功した。超電導劣化の要因について F T A (Fault Tree Analysis) を用いた分析及び、1) ⑤劣

化部位における要因検討を実施、必要な対策を検討した。また、高温超電導コイルの特徴となる小型・軽量化を目指し小型 7 T 検証コイルを試作した。3 T マグネットの検討結果から得た対策を一部反映し、最大経験磁場約 6.5 T までの励磁に成功した。

②磁化による磁場影響の計測技術では、磁化を有するマグネットの磁場測定技術を確立する。NMR プローブを用いた高精度の磁場変動測定、磁場制御・等価回路手法の提案、安定化の実証に成功し、目標を達成。

③磁化による磁場安定性の影響では、磁化を有するマグネットの磁場安定性の評価を行う。オーバーシュート(OS)法による安定性改善や繰り返し OS 法や高温励磁法、両者の組み合わせを提案し、目標を達成。

④磁化による磁場均一度の影響では、磁化を有するマグネットの磁場均一度の評価を行う。磁化による磁場発生を解析可能にし、2 T 評価コイルを解析し遮蔽特性の時間変化も解析可能になり、目標を達成。

⑤高温超電導線材への要求仕様導出では、劣化コイルの部位特定手法を確立し、要求仕様を導出する。高温超電導コイル内欠陥の非破壊・非接触評価手法を提案し、劣化部位の画像取得に成功、劣化要因の検討を実施した。また、応力評価設備を導入し、特性劣化評価を完了した。目標を達成。

2) マグネットのシステム最適化技術開発

①高温超電導マグネット最適化設計技術では、実機に向けた設計技術として 1/2 サイズアクティブシールド型 5 T コイルの設計、次世代の高温超電導 MRI マグネットの概念設計を行う。1/2 サイズアクティブシールド型 5 T コイルの設計を行い、電磁力の分割低減構造を提案。全身撮像用ホールボディ高温超電導マグネットの概念設計を実施、初期冷却を時間短縮する冷却システムを検討し 3 T マグネットに適用、冷却時間を短縮した。目標を達成。

②高安定磁場励磁システムの開発では、省エネ、低コスト励磁システムを提案する。大容量の励磁電源と小型の磁場保持電源を組合せ励磁後に省エネの磁場保持電源で磁場保持できることを実証、更に省エネとなるスイッチング式電源での画像取得にも成功し、目標を達成。

③MRI マグネットのシステム最適化では、高温超電導マグネットシステムの最小コスト条件の導出方法を確立する。コイルの磁場設計で、より高精度、高速で計算する手法を検討し、全身 3 T コイルの磁気設計を実施、超電導線材の特性からコイル形状における電流-電圧特性の解析を可能にした。目標を達成。

3) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

高温超電導線材の接続技術として、接続点での抵抗値 $10^{-12} \Omega$ 以下の実現を目標とし、高温超電導 MRI マグネットシステムにおける各種接続のための、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を有する手法の開発を行った。REBCO 高温超電導線材の接続における抵抗の要因分析を行い、銀保護層の上から超電導はんだを用いて長尺にわたって均一に接続する技術を開発した。また、液体ヘリウム浸漬でない冷凍機冷却型の高温超電導マグネットにおいても、接続部専用の冷凍機を設けることにより、超電導材料を用いた低抵抗接続が可能であることを実証した。さらに、REBCO 層と銀保護層の接触を改善した、低接続抵抗の新線材を開発し、実際に $10^{-12} \Omega$ オーダーの接続抵抗を実証し、接続点での抵抗値 $10^{-12} \Omega$ 以下を見通す技術を確立した。また、開発の途上で、塗布して乾燥させる

と超電導体となる接着剤である超電導ペーストを開発した。これによる接続は成功しなかったが、エレクトロニクス応用等の他の用途への展開が期待される成果を得た。

4) コイル保護・焼損対策手法の開発

①ドライブモードに対する保護・焼損対策技術では、コストも考慮した実用的な高温超電導コイル保護方法を提案し、マグネットシステムとしての異常時の対応方法を提案する。コイルの劣化時の医療用MR I システムが人体に及ぼす影響を調査し、保護の指標を検討した。また、局所的劣化時の常電導転移現象への影響を明らかにし、常電導転移時や焼損直前のコイル両端電圧の増加に向けて両端電圧と安定化銅の配置方法やコイル冷却条件との関係を検討、高温超電導線材を用いた際の高安定なコイル構成方法の検討を行った。目標を達成。

②永久電流モードに対する保護・焼損対策技術では、永久電流モード運転の高温超電導コイルに対し、焼損を防ぐための異常検出と保護の技術を開発・確立することを目標とし、異常検出法として「共巻き法」を採用し、エネルギー回収保護法として「抵抗ショート法」を開発した。「共巻き法」は、REBCO 高温超電導線材とともに薄い銅箔を巻き込み、これを利用して高感度で高温超電導コイル内に発生する常電導転移を検出することができる。「抵抗ショート法」は、常電導転移を検出した後、回路を組み替えることで電流を他の健全なコイルに移し、ホットスポットの成長を抑制する技術である。マグネットシステムを模擬した複数の高温超電導コイルからなる小モデルを用い、「共巻き法」と「抵抗ショート法」を組み合わせた一連の保護動作の実証を行った。また大規模マグネットシステムでの保護効果についても、シミュレーション実験を通じて有効であることを示し、高温超電導マグネットの汎用の保護技術として確立させた。

投稿論文	「査読付き」 36件
特許	「出願済」 9件
その他の外部発表 (プレス発表等)	外部発表 121件、新聞雑誌等への掲載 5件、展示会等 6件

4. 実用化の見通しについて

研究開発項目①「輸送分野への高温超電導適用基盤技術」

(1) 超電導き電線

本研究開発テーマにて、km 級の長距離冷却基盤技術が確立することで、直流電気鉄道への超電導技術導入が加速される。鉄道き電線を超電導化することで、回生失効および送電損失の低減による省エネ効果のみならず、電圧補償による輸送力の増加や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制などの大きな効果が期待できる。電気鉄道の直流路線は、き電電圧は異なるが、国内で 11,843km、国外で 94,880km におよび市場規模は大きい。

今後は、さらなる長距離冷却を目指し、長距離化を継続するとともに実路線における実証試験を経て、事業化を目指す。

(2) 冷凍機

鉄道用の冷却設備として、限られた設置スペースに大きな工事コストを必要とすることなくコンパクト冷凍機の設置が可能である。またブレイトンサイクルを採用した冷凍機であることから、冷凍能力 kW あたりの消費電力が小さく、省エネ化・ランニングコスト削減を図ることが事業化のメリットとして期待できる。

窒素温度領域の冷凍機は超電導分野に限らず食品分野や細胞凍結等の医療分野、更には希土類元素回収用の凍結粉碎リサイクル技術などの新産業分野に幅広く利用可能である。しかし、産業用冷凍機は長時間の連続運転、高効率、小さな設置空間が常に求められる。本開発品であるブレイトン冷凍機はこれらの条件を全て満足し、新しい極低温産業を興す事ができる。世界初のコンパクト・ブレイトン冷凍機は我が国がこの分野で戦うための重要な武器となる。

(3)液体窒素循環ポンプ

現在、日本国内で使用されている極低温循環ポンプは、海外からの輸入、かつ玉軸受を採用したものが大部分である。よって、動圧式ガス軸受を採用した本開発品は、玉軸受方式ポンプの課題解決を目指し、高信頼性、高性能化、低コスト化を図っているため、国内外の市場に受け入れられる可能性が高く、波及効果は大きいと考えられる。

開発された窒素循環ポンプは、動圧式ガス軸受を採用することで、競合技術である従来の玉軸受方式のポンプに比べ、高信頼化、高性能化、低コスト化を図ることができ、超電導き電ケーブルほか、国内外の超電導応用機器の冷媒循環用ポンプとしての活用が期待される。

(4)断熱管技術開発

超電導き電線向け断熱管に必要とされる性能や長期信頼性を有する長尺断熱管の製造技術が確立されることで、当該市場向け断熱管供給の事業化が期待できる。また、極低温状態を保持できる断熱管として、例えば液体窒素や液化天然ガスなどの配管としても需要が期待できる

開発開発項目②「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

(1)マグネットシステム

高温超電導3T-MRI マグネットが実現することにより、液体ヘリウムが不要となり、小型・軽量かつ漏れ磁場低減により1.5T-MRI マグネットからの置き換えが容易になり、高性能の3T-MRI が広範囲に使用され、世界の人々の健康維持管理に貢献できる。また、健診車への搭載も可能になり、地域診療の質の向上に期待できる。現状で、高温超電導線材の価格は、通電性能価格比（円/A・m比）でおよそ20倍近いものの、今後線材の量産化技術開発により価格比が1.5~2倍程度の価格帯に入ってくれば、事業成立が視野に入ってくると考えられる。従って、これらの状況を勘案しつつ高温超電導3T-MRI の市場投入時期を決定していく。高温超電導3T-MRI が市場投入された後には量産体制へ移行、高温超電導線材の価格はさらに低下していくと見込まれる。結果、小型・軽量化のアドバンテージを活かし、1.5T-MRI からの置き換え需要が喚起され、市場がさらに伸びることが期待できる。上記のような事業戦略を想定し、高温超電導コイル製造技術を深化すべく開発を継続、適切な時期に市場投入する。

(2)超電導接続

超電導接続では、高温超電導層どうしの直接接合ではなく、マグネット製造現場で施工が容易で、かつ高い再現性を示す低抵抗接続技術を開発した。開発した接続技術は、高温超電導MRI マグネットシステムのみならず、あらゆる高温超電導機器に適用可能な汎用技術である。REBCO層と銀保護層の接触を改善した新型線材は、MRIのような 10^{-10} Ω級の超低抵抗接続が必須となるマグネット用としてのニーズが期待される。新型線材については特許の出願を行った。引き続き技術開発を継続し、マグネットメーカーおよび線材メーカーへの技術移転を行う。Nb系超電導薄膜の室温成膜技術、微小接続抵抗評価技術、冷凍機による接続アース技術は、学術的価値を重視し、論文発表を行った。

(3)永久電流モードコイル保護

	<p>永久電流モードに対する保護・焼損対策技術では、高い磁場安定性が求められ、NI（無絶縁）コイル技術が適用できないREBCO高温超電導マグネットに対しても有効な、汎用の保護技術を開発した。高温超電導マグネットの新しい保護方法として特許出願した。成果はすべて論文発表しており、今後様々なマグネットへの採用実績を積み重ね、信頼性を向上させることにより、開発成果の普及を目指す。</p>	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	制定：2016年3月 作成
	変更履歴	改訂：2018年9月
	変更履歴	改訂：2021年10月