

# 「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

省エネルギー一部

2021年10月26日

# 発表内容

---

## 1. 事業の位置づけ・必要性

- (1)事業の目的の妥当性
- (2)NEDOの事業としての妥当性

## 2. 研究開発マネジメント

- (1)研究開発目標の妥当性
- (2)研究開発計画の妥当性
- (3)研究開発の実施体制の妥当性
- (4)研究開発の進捗管理の妥当性
- (5)知的財産等に関する戦略の妥当性

## 3. 研究開発成果

- (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義
- (2)成果の普及
- (3)知的財産権の確保に向けた取組

## 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

- (1)成果の実用化・事業化に向けた戦略
- (2)成果の実用化・事業化に向けた具体的取組
- (3)成果の実用化・事業化の見通し

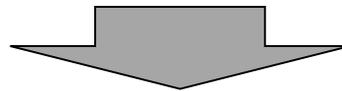
# 1. 事業の位置づけ・必要性

# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 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。

# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆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

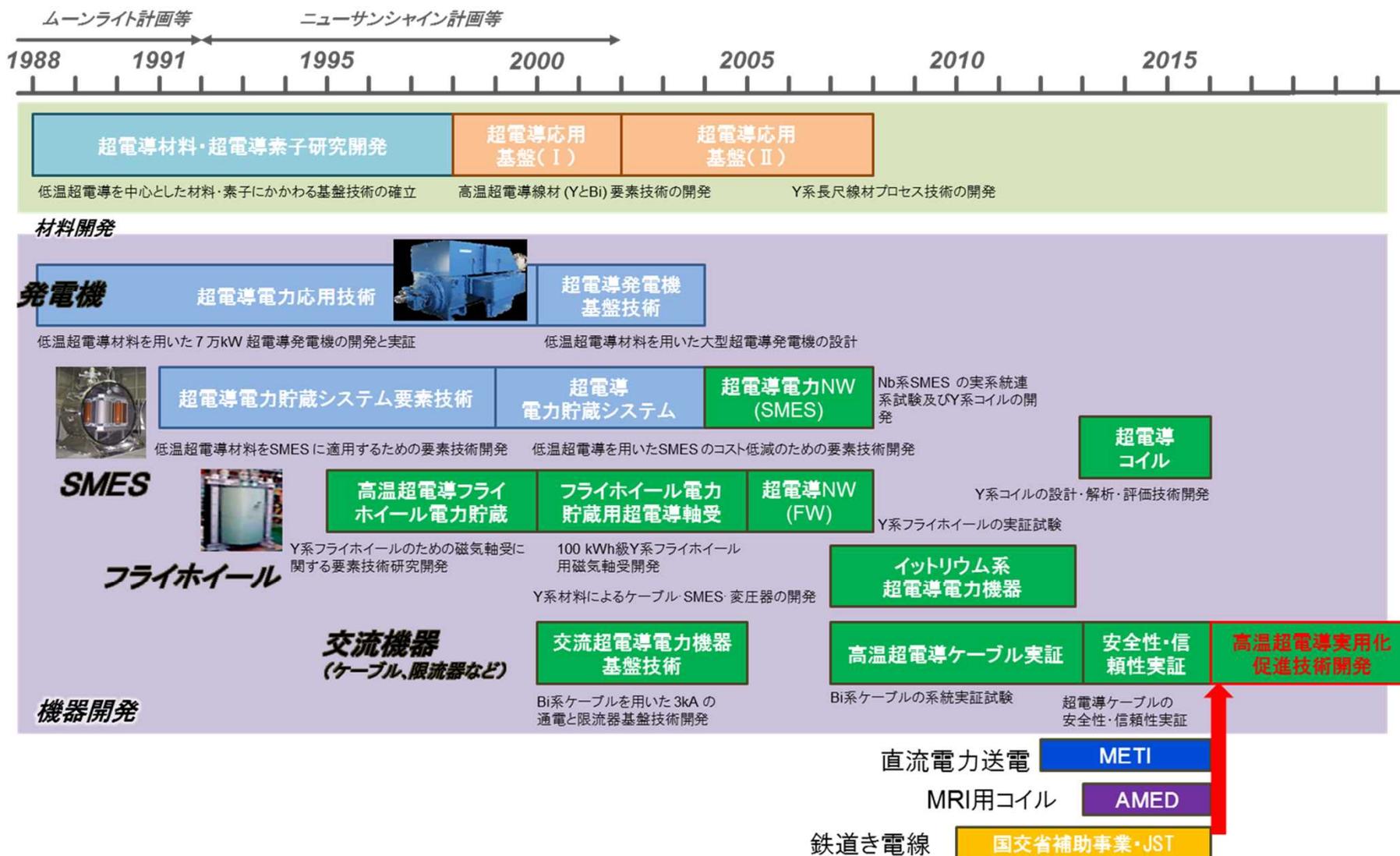
「第2節 2030年に向けた政策対応 2. 徹底した**省エネルギー社会**の実現、3. **再生可能エネルギー**の主力電源化に向けた取組」

### ■ 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

# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 技術戦略上の位置付け



# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 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<br>住友電工<br>古河電工<br>前川製作所 | 安全性評価<br>冷却システム<br>系統連系 他                   | 設計仕様<br>評価基準<br>作成 | 事後評価終了<br>(‘19/7) |     |  |
|                |                            | 直流          | 石狩超電導技術組合                     | ガイドライン策定                                    | 中間評価<br>(‘18/9)    |                   |     |  |
| 高磁場マグネットシステム開発 | 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<br>LN2循環ポンプ開発<br>断熱管開発           | 長距離冷却システム構築・評価     |                   |     |  |
|                |                            | 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                     |   |                    |                   |     |  |
|                | 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<br>長尺材料の均一性向上<br>低損失構造線材の研究開発 | 事後評価終了<br>(‘19/7)  |                   |     |  |
| 生産性向上          |                            | フジクラ        | 生産性向上技術開発                     |   |                    |                   |     |  |

# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 国内外の研究開発の動向と比較

### ■ 世界の取組

- 鉄道き電線における、諸外国の取組は現在のところ報告されていない。鉄道の運行状況等から高温超電導化の効果は日本で顕著であり、鉄道総研が世界的にも研究開発の最先端である。
- 高温超電導のMRI用マグネットに関しては、各国で主に、高磁場化が困難なBi系、 $MgB_2$ 線材を用いた小型(四肢用)コイルの開発が進められている。GE等のMRIメーカーはY系線材による高磁場マグネットの開発を進めていると考えられるが、それに関する情報は極めて少ない。
- 超電導接続技術については、超電導マグネットメーカーが独自の技術開発を進めていると考えられ、韓国でのY系線材同士の直接接合技術に関する発表や、Bruker社が自社のNMRにおいて超電導接続技術を用いていると発表している他は、国内からの発信以外ほとんど情報がない。

# 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 他事業との関係

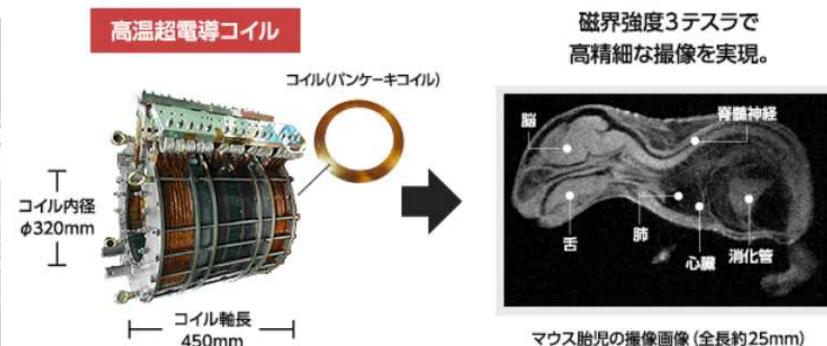
- 鉄道き電線については、**科学技術振興機構**による「戦略的イノベーション創出推進プログラム」及び**国土交通省**による鉄道技術開発費補助事業の一環として推進し、2015年に**伊豆箱根鉄道・駿豆線**において、国内外で初めての**営業線での超電導送電**による列車走行実験に成功。2018年には**東京都交通局・荒川線**、**東京メトロ・丸ノ内線**において、2019年には**JR東日本・中央線**において、列車走行実験を実施。
- **日本医療研究開発機構**が「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」(2013～2015年度)により実施し、高温超電導線材(Y系線材)による高安定かつ高均一磁場を発生する高磁場コイル実現の可能性を検証。
- 超電導接続技術開発については、**科学技術振興機構**「未来社会創造創造事業」をはじめ、大学等を中心に、Y系線材同士の直接接合技術や、Bi系・金属系超電導線材の接続技術が開発されている。



写真1 敷設した超電導き電ケーブル



写真2 列車走行試験の様子



# 1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDO事業としての妥当性

## ◆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**

# 1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDO事業としての妥当性

---

## ◆実施の効果 (費用対効果)

プロジェクト費用の総額  
(他テーマ含む)

事業費54億円  
NEDO負担額47億円

### ■ 省エネルギー効果

- ・鉄道き電線では、年間69GWhの省エネルギー効果(2030年度)
- ・MRIマグネットでは、年間65GWh省エネルギー効果(2030年度)

### ■ MRI市場

- ・3T機で、国際競争力確立。なお、高温超電導MRIの国内市場規模は、2030年において年間965億円程度と見込まれる。

## 2. 研究開発マネジメント

## 2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

---

### ◆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】

- a. 高温超電導送配電技術開発
- b. 高温超電導高磁場マグネットシステム開発

## 2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 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<br>住友電工<br>古河電工<br>前川製作所 | 安全性評価<br>冷却システム<br>系統連系 他                   | 設計仕様<br>評価基準<br>作成     | 事後評価終了<br>( '19/7 ) |     |  |
|                |                            | 直流                  | 石狩超電導<br>技術組合                 | ガイドライ<br>ン策定                                | 中間評価<br>( '18/9 )      |                     |     |  |
| 高磁場マグネットシステム開発 | 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<br>LN2循環ポンプ開発<br>断熱管開発           | 長距離冷却<br>システム構築・<br>評価 |                     |     |  |
|                |                            | マグネット<br>システム<br>開発 | 三菱電機<br>産総研                   | 1/2アクティブシールド型<br>3T マグネットシステム開発             | 高電流密度<br>コイル開発         |                     |     |  |
|                | 超電導<br>接続開発                | 古河電工                | 超電導接続技術開発                     | 超電導接続技術開発、コイル保護技術開発                         |                        |                     |     |  |
|                | 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<br>改善          | フジクラ<br>産総研                   | 高磁場臨界電流密度高性能化<br>長尺材料の均一性向上<br>低損失構造線材の研究開発 | 事後評価終了<br>( '19/7 )    |                     |     |  |
| 生産性<br>向上      |                            | フジクラ                | 生産性向上技術開発                     |   |                        |                     |     |  |

## 2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

### ◆ 研究開発目標と根拠

| 研究開発項目                                      | 研究開発目標  | 根拠   |
|---|---|--|
| <p>運輸分野への超電導適用基盤技術開発<br/>(鉄道総研)</p>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>超電導ケーブルの長距離冷却技術開発</li> <li>長距離冷却システム構築・評価</li> </ul>   | <p>鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの<b>実用化</b>へ向けては、超電導ケーブルの<b>長距離冷却技術開発が必須</b>。</p>   |
| <p>高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発<br/>(三菱電機・産総研)</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>高温超電導マグネットによる小領域イメージング実証</li> <li>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</li> <li>高温超電導接続として、<math>10^{-12}\Omega</math>以下の接続を実現</li> </ul> | <p>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<b>3T級以上のMRIへの適用</b>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。</p> |

## 2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

### ◆ 研究開発のスケジュール

■ : 委託事業    ■ : 助成事業

| 分類               | 研究開発項目                            | 実施者  | 主なアウトプット目標  | スケジュール                            |                           |      |                    |     |
|------------------|-----------------------------------|------|---|-----------------------------------|---------------------------|------|--------------------|-----|
|                  |                                   |      |   | '16                               | '17                       | '18  | '19                | '20 |
| 高温超電導<br>送配電技術開発 | ② 運輸分野の高温超電導適用基盤技術開発              | 鉄道総研 | <ul style="list-style-type: none"> <li>超電導ケーブルの長距離冷却技術開発<br/>冷凍機サイズ: 2m<sup>3</sup>/kW以下<br/>ポンプ: 0.6MPa、流量50L/分<br/>熱侵入2W/m以下</li> <li>長距離冷却システム構築・評価<br/>km級長距離冷却システムの開発</li> </ul> | コンパクト冷凍機開発<br>LN2循環ポンプ開発<br>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<br>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技術開発 | 三菱電機 | 1/2 3T マグネットシステム開発 |     |
| 産総研              | 超電導接続技術開発 (10 <sup>-12</sup> Ω以下) |      |   |                                   |                           |      |                    |     |
|                  |                                   |      |   | コイル保護技術開発 (永久電流モード)               |                           |      |                    |     |

## 2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

### ◆プロジェクト費用(実績)

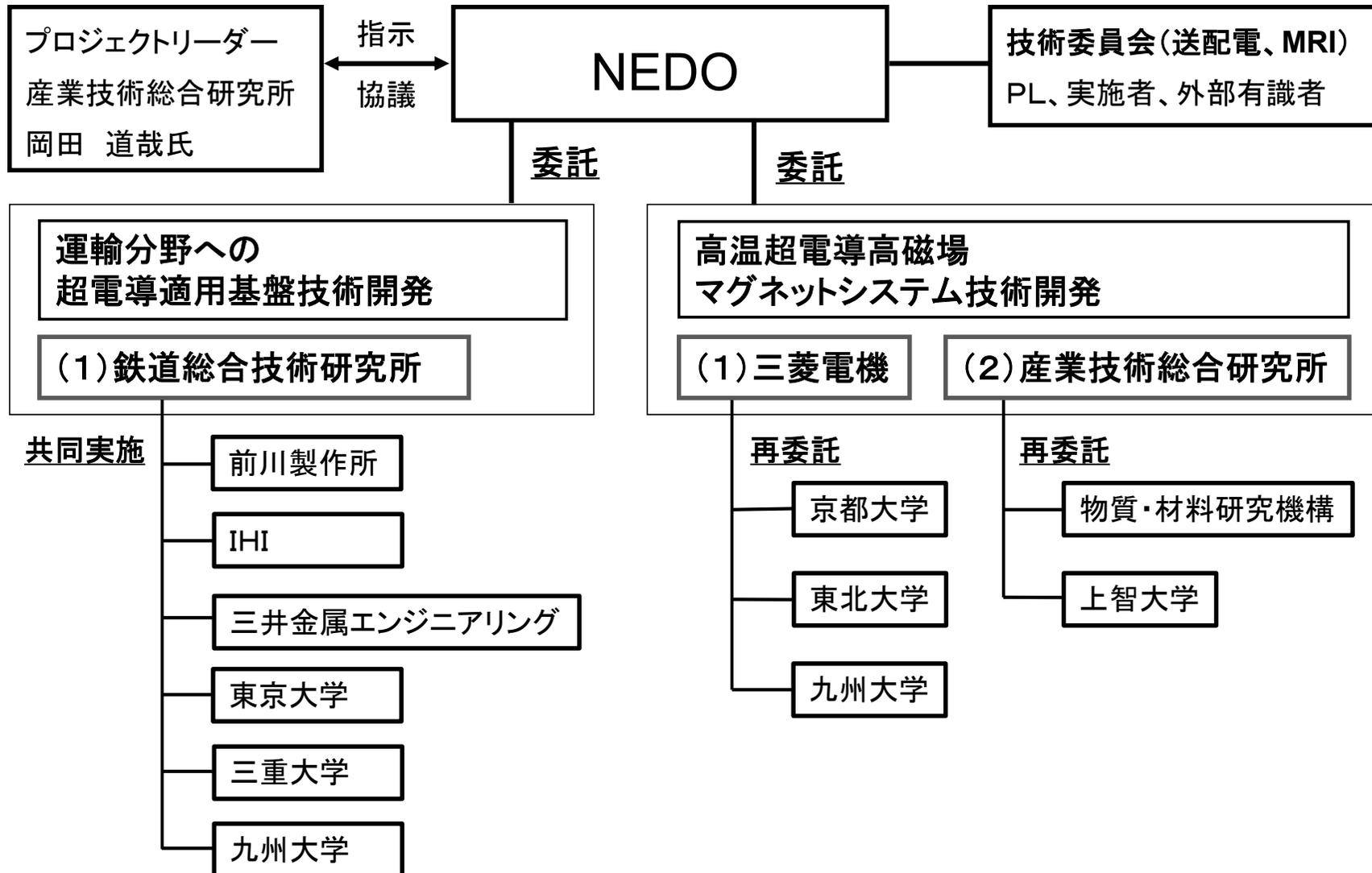
### ◆費用

(単位:百万円)

| 研究開発項目                        |      | 2016<br>年度 | 2017<br>年度 | 2018<br>年度 | 2019<br>年度 | 2020<br>年度 | 合計      |
|-------------------------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| 運輸分野への<br>超電導適用<br>基盤技術開発     | 鉄道総研 | 434.6      | 308.8      | 370.0      | 100.0      | 115.0      | 1,328.4 |
| 高温超電導高磁場<br>マグネット<br>システム技術開発 | 三菱電機 | 230.6      | 393.6      | 359.1      | 26.1       | 12.1       | 1,021.5 |
|                               | 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 |

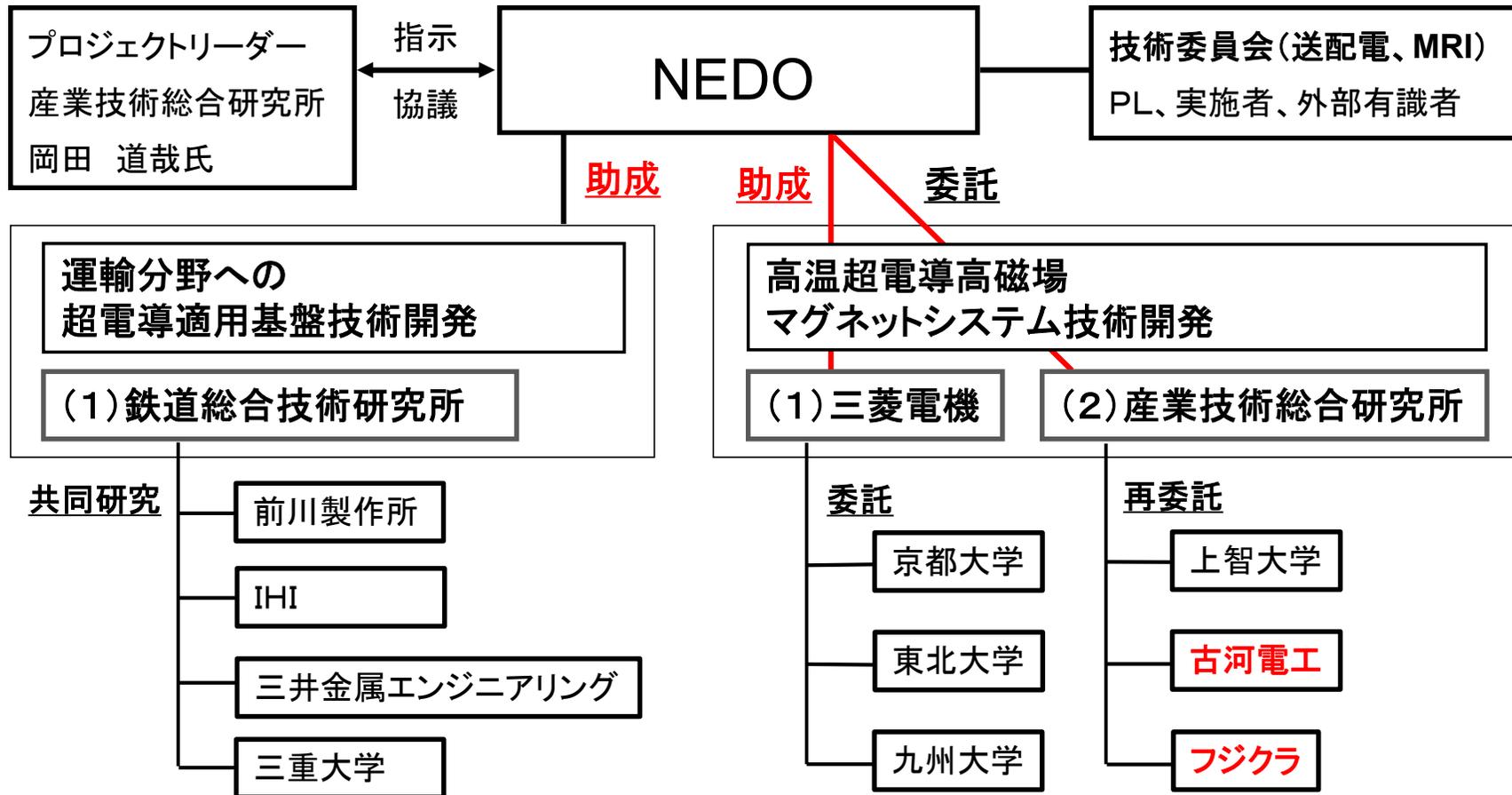
## 2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

### ◆ 研究開発の実施体制 (2016~2018)



## 2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

### ◆ 研究開発の実施体制 (2019~2020)



## 2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

---

### ◆ 研究開発の進捗管理

#### 進捗管理及び研究開発項目間の連携

それぞれ、**技術委員会(送配電・MRI個別)**を各年2回開催(それぞれ10回ずつ開催)し、学識経験者等により進捗状況の確認・技術的なアドバイスを実施。また、NEDOによる**定期的(基本的には四半期毎)な進捗確認・現地現物調査・意見交換**を踏まえて、**コイル不良原因追究等について加速**を実施。

関係の深い**MRIコイルと線材**については、研究開発項目を超えた情報交換のために、2016年度から**MRI技術ミーティング**を4回開催。

**超電導接続技術**については、関連する実施者である**産総研と古河電工の情報交換会**を2019年度に実施。

線材メーカーである古河電工、フジクラの事業終了後には、**産総研の再委託先として、超電導接続の実用化に向けた技術開発を推進**。

## 2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

---

### ◆ 動向・情勢の把握と対応

- 鉄道き電線

国内外の鉄道路線の省エネ問題や変電所事情の動向における調査を行い、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かったため、対応事例無し。

- MRI用高磁場コイル技術

海外MRIメーカーの動向(学会発表・展示会)を注視し、必要に応じて、研究の加速等を予定していたが、特段の情勢変化はなかったため、対応事例無し。

- 超電導接続技術

国内外の技術開発動向を注視し、情報の入手に努めたが、Y系線材同士の直接接続技術以外の成功事例はなく、特段の情勢変化はなかったため、対応事例無し。

## 2. 研究開発マネジメント (5) 知的財産権等に関する戦略の妥当性

### ◆ 知的財産権等に関する戦略

#### ■ オープン／クローズ戦略の考え方

|     | 非競争域         | 競争域                |           |
|-----|--------------|--------------------|-----------|
| 公開  | 機器診断技術等      | 材料組成システム構成         | 積極的に権利化   |
| 非公開 | コイル保護・焼損対策技術 | 超電導接続技術<br>製造・生産技術 | ノウハウとして秘匿 |

技術の優位性アピールのために、早期に学会発表

#### 【戦略の基本】

- 技術の優位性アピールに向けて、**学術的成果など公表すべき情報は早期に学会等で発表。**
- 標準になり得る技術は、速やかに特許出願を行う。

## 2. 研究開発マネジメント (5) 知的財産権等に関する戦略の妥当性

---

### ◆ 知的財産管理

- 「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に基づき事業者毎に、**知財合意書策定、知財運営委員会設定、推進**
- 知的財産管理指針の策定
  - ・バックグラウンド知的財産権の取扱い
  - ・本事業により得られた知的財産権の帰属
- サンプル提供の取扱い
  - ・プロジェクト参加者間での取扱い等

特に、本プロジェクトでは、**MRIコイルにおいて、線材メーカーとコイルメーカーの連携が不可欠**であることから、研究開発項目間の知財連携に関する覚え書に関するマネジメント(情報交換会実を行った。

## 2. 研究開発マネジメント 中間評価への対応

### ◆ 中間評価でのご指摘事項と対応 (1/2)

|   | ご指摘   | 対応   |
|---|---|--|
| 1 | 知的財産に関する戦略は十分であるが、その取り扱い、特にその管理方法および活用方法などについては、実施者の努力のみに任せるのではなく、NEDOも積極的に関与し、サポートすることが望まれる。 | <ul style="list-style-type: none"><li>• NEDO主催でMRI技術ミーティングを行い(4回)その中で、知的財産に関する管理方法、活用方法を議論、調整を図った。</li></ul>   |
| 2 | 運輸分野への応用について、発表論文が極めて少ない。特許も無い。   | <ul style="list-style-type: none"><li>• 成果を順次論文としてまとめ、9件の論文を発表、2件の特許を出願。</li></ul>   |
| 3 | 今後は、海外への発信を主体的に進めるべきである。特許についても海外への出願を積極的に進めていただきたい。  | <ul style="list-style-type: none"><li>• 鉄道き電線については、海外発信のため、鉄道に関する国際会議で技術紹介をした。海外特許について、その後出願中である。</li><li>• MRIでは、海外への発信を積極的に行うため、本技術開発で得た成果を積極的に国際会議で発表、18件の発信を行った。</li></ul> |

## 2. 研究開発マネジメント 中間評価への対応

### ◆ 中間評価でのご指摘事項と対応 (2/2)

|   | ご指摘   | 対応  |
|---|---|---|
| 4 | 本プロジェクトで得られる成果を規格、基準にも反映させることを念頭に研究開発を推進して欲しい。特に、国際規格への反映を目指して欲しい。        | <ul style="list-style-type: none"><li>• 鉄道き電線については、戦略的に鉄道関係の国際標準化に取り組む<b>鉄道国際規格センター(鉄道総研内)</b>と協力し、<b>対応を開始</b>。</li><li>• MRI高温超電導コイルに関して、具体的な国際規格への反映は、<b>今後の事業化に向けて検討</b>する。</li></ul> |
| 5 | 鉄道き電線についてはいつ頃を目処に開発し、市場に投入するかのマイルストーンが明確に示されていない。                         | <ul style="list-style-type: none"><li>• 非公開版で示す。</li></ul>  |
| 6 | 早期実用化に向け、例えばDC/DCコンバータによるき電線電圧の昇圧方式との得失の比較を行うなど、既存技術に対する優位性のアピールにも努めて欲しい。 | <ul style="list-style-type: none"><li>• 非公開版で示す。</li></ul>  |
| 7 | 両技術とも国内市場だけでなく、海外市場の可能性も調査すべきである。   | <ul style="list-style-type: none"><li>• 鉄道き電線については、<b>海外市場調査中</b>。</li><li>• MRIでは、<b>海外市場も含めた今後の販売予想</b>を設定。</li></ul>   |

### 3. 研究開発成果

### 3. 研究開発成果 (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

#### ◆研究開発項目毎の目標と達成状況【鉄道総研】

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

# 【鉄道総研】コンパクト冷凍機の開発

T-1

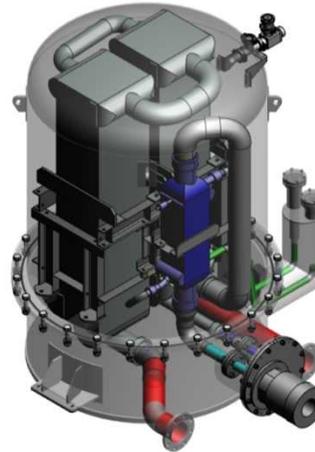
従来機



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 m<sup>3</sup>/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

設置容積

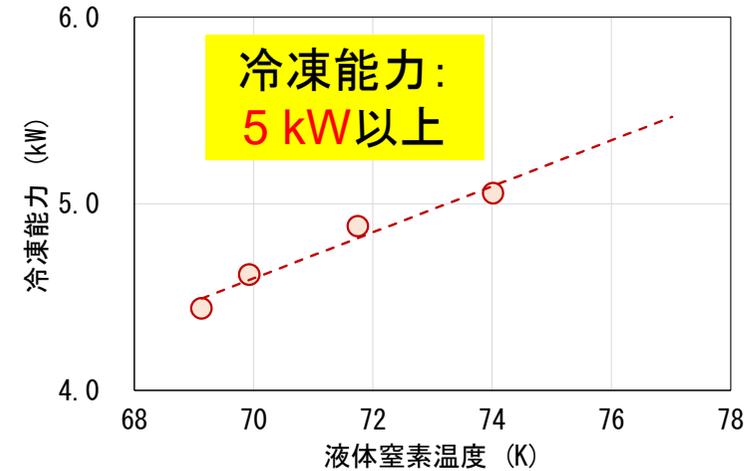
60 m<sup>3</sup>

10 m<sup>3</sup>

本研究開発品



容積: 10 m<sup>3</sup> (従来比約1/6)

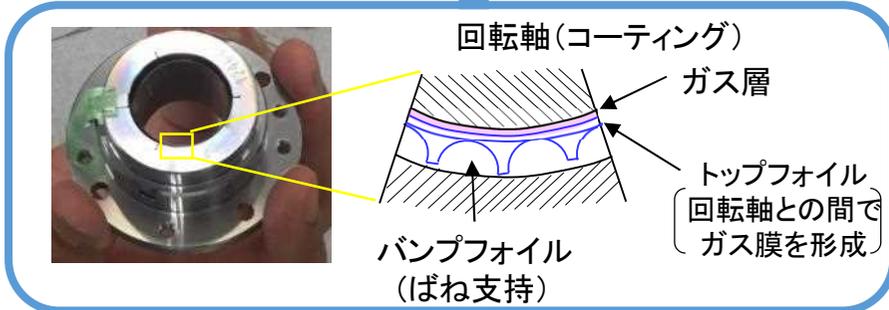
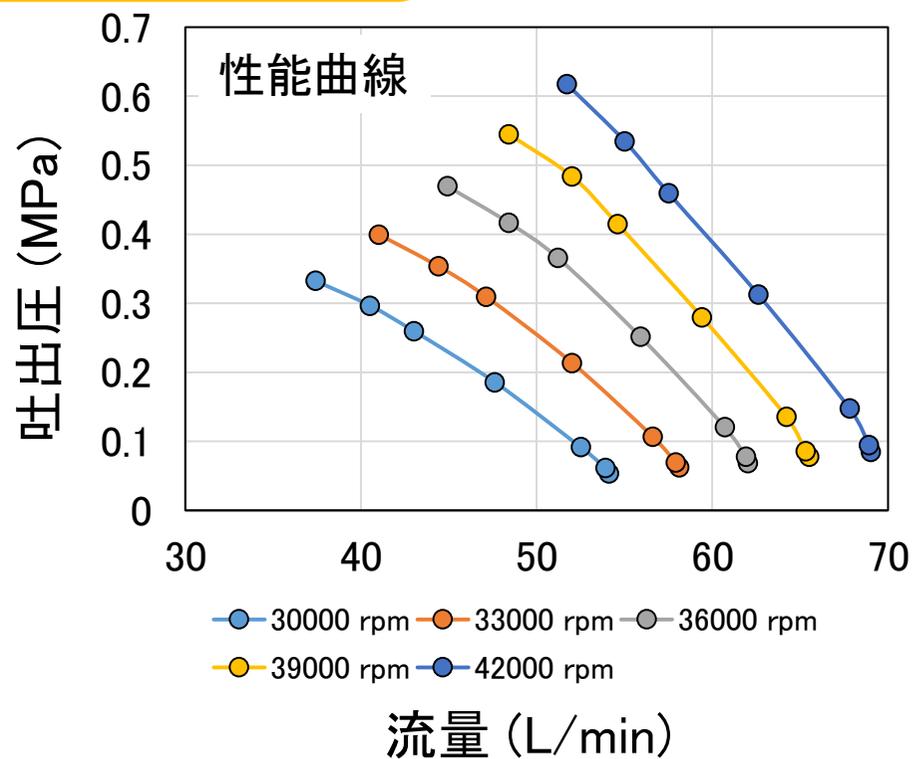
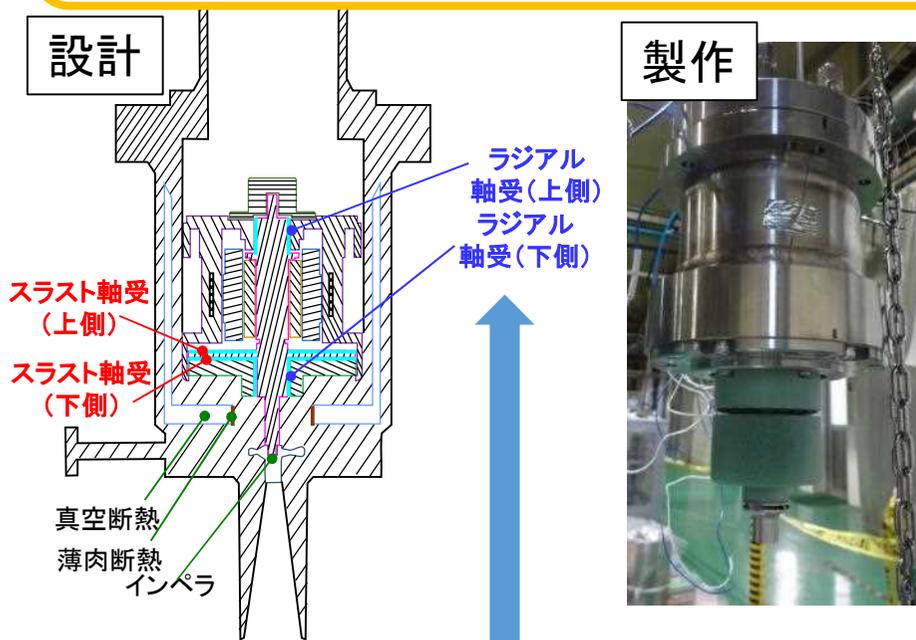


鉄道現場に設置可能なコンパクト冷凍機を開発  
(2 m<sup>3</sup>/kWを達成)

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

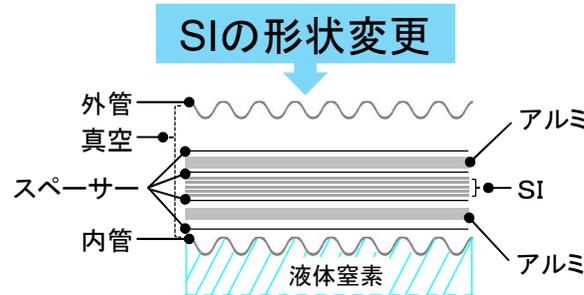


**吐出圧0.6 MPa、流量 50 L/minを達成**

低熱侵入な長尺断熱管を開発(目標:2W/m以下)

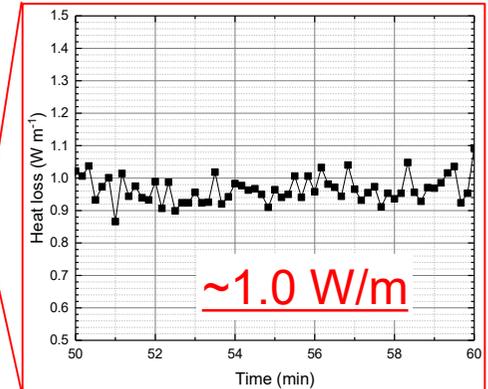
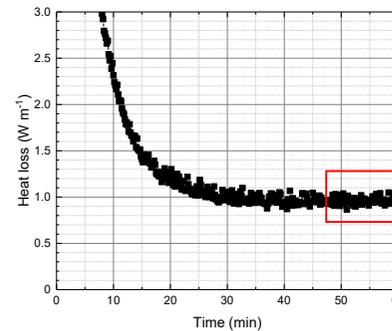
短尺サンプルによる測定結果

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

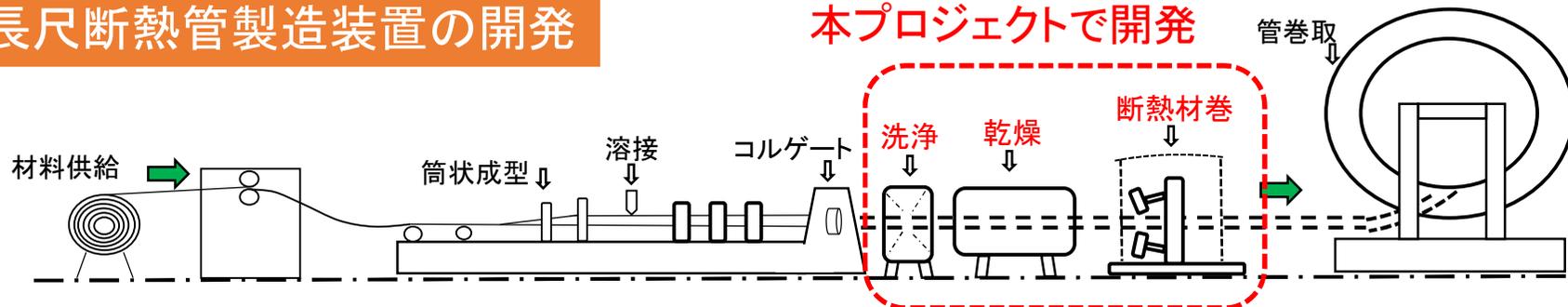
真空層の厚み拡大



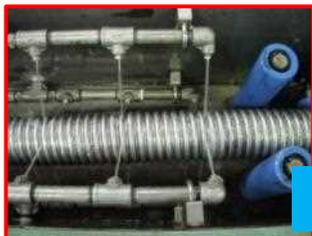
熱侵入:1.0W/mを達成

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

冷却システム



冷凍機



液体窒素  
循環ポンプ

開発した要素機器を集約、冷却システムを構築

断熱管敷設



断熱管ドラムの荷上げ



断熱管の繰り出し



敷設完了

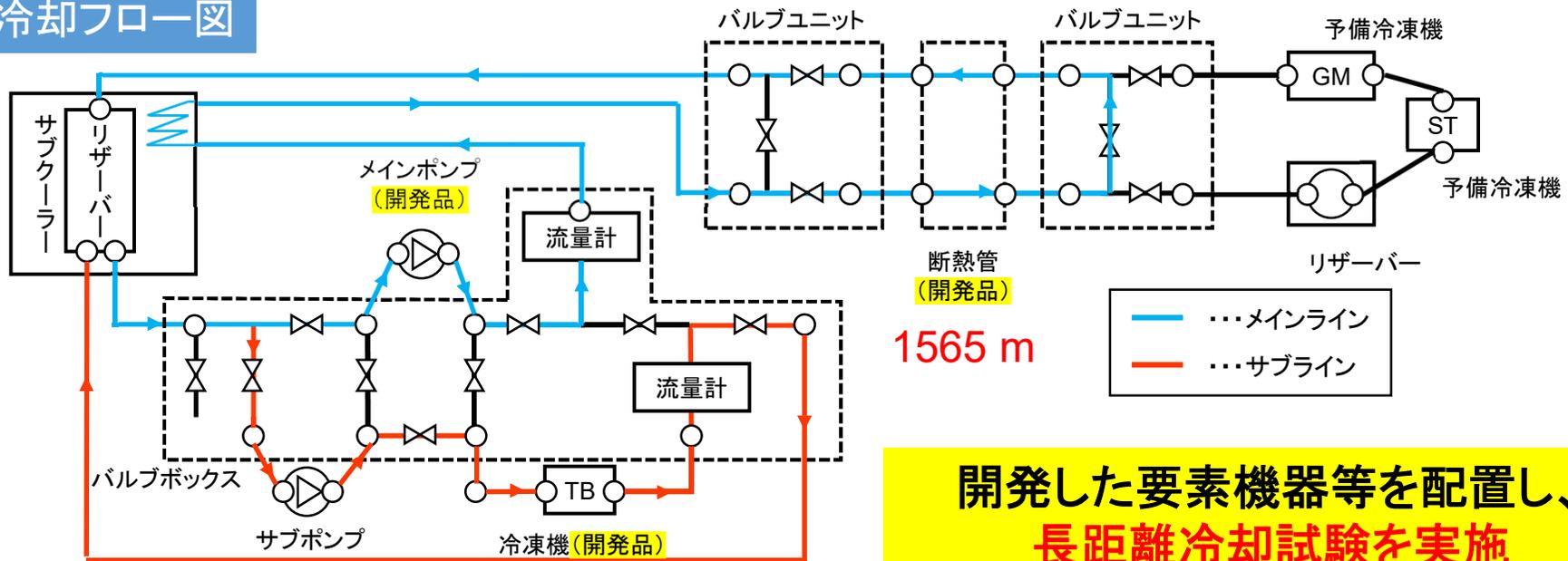
総長**1565 m**の断熱管を敷設

冷却システムと断熱管を接続し、**1.5 km級システムを構築**

## 1.5 km級システムの概要

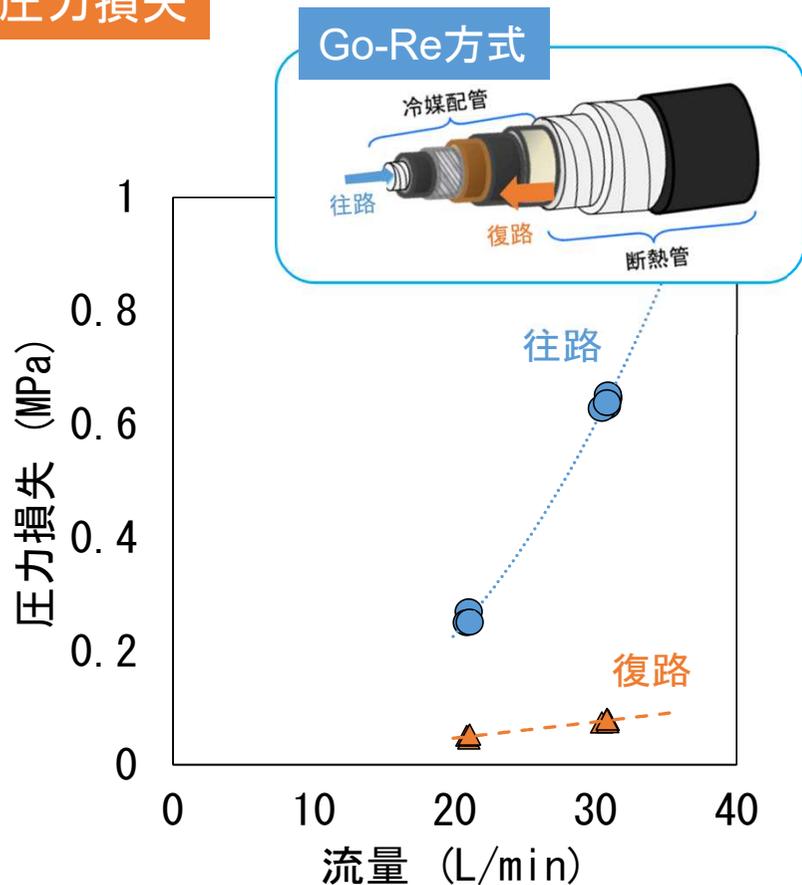


## 冷却フロー図



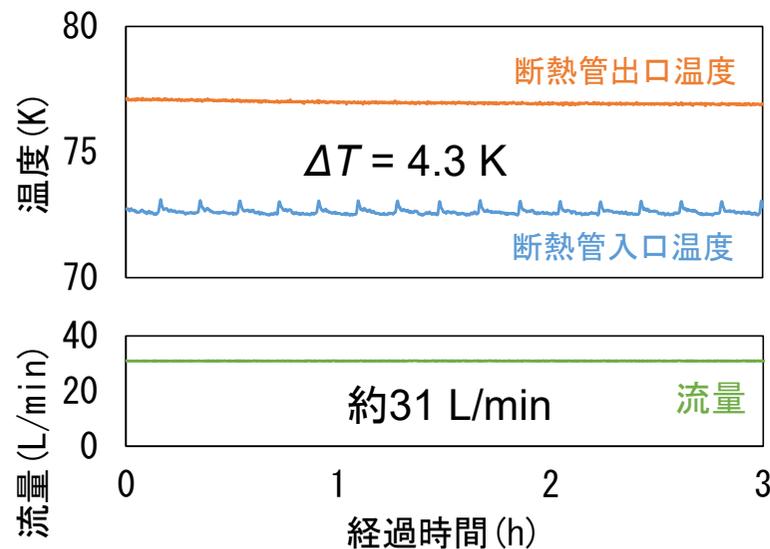
**開発した要素機器等を配置し、  
長距離冷却試験を実施**

## 圧力損失



長距離冷却システムの設計に活用できる基礎データを取得

## 冷却安定時の温度と流量



熱侵入量: 3800 W

|                |      |
|----------------|------|
| 電流端末(2基分)      | 100  |
| 電流リード(2本分)     | 150  |
| 冷却システム接続配管     | 60   |
| $\Delta PV$ ロス | 370  |
| 断熱管(1565 m)    | 3120 |
| 合計             | 3800 |

全長に亘り、  
2 W/m以下の熱侵入

内訳(単位:W)

1.5 km級システムの安定冷却を実証

### 3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

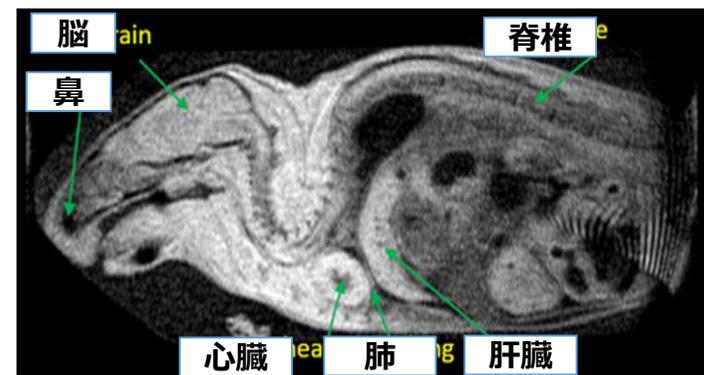
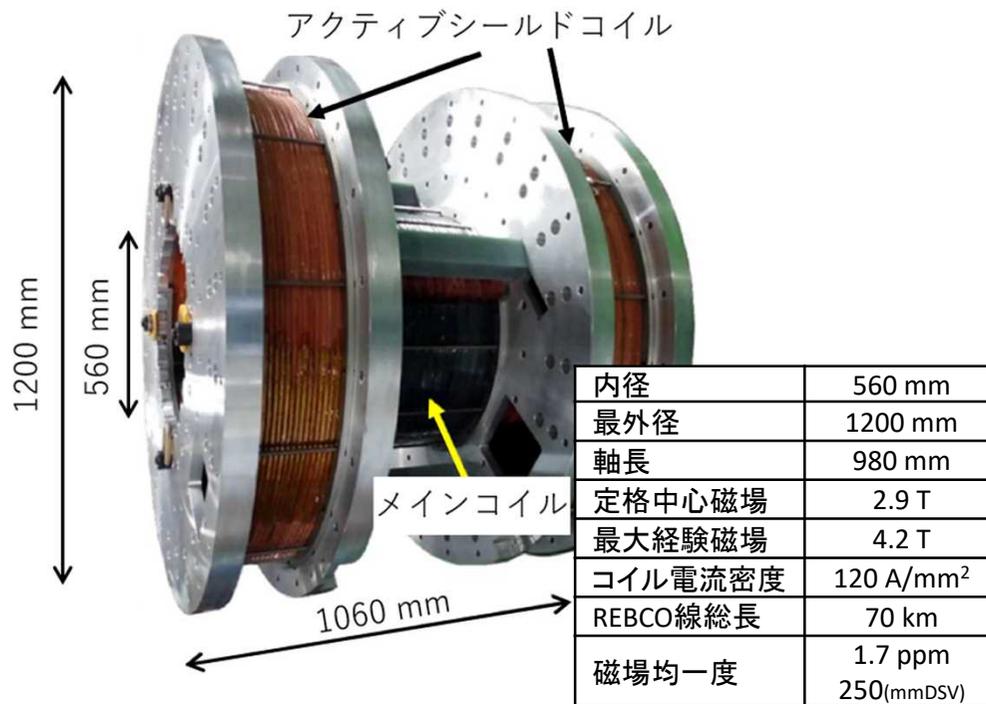
#### ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況【三菱電機】 委託 2016-2018年度

| 研究開発項目  | 目標  | 成果  | 達成度 |
|---|---|---|-----|
| 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発<br>① コイル・マグネット製作技術<br>② 超電導線材の要求仕様          | ① 1/2アクティブシールド型3Tマグネット製作及び、1/2サイズ5Tコイルの製作開始<br>② 高温超電導線材に要求される仕様導出の目途 | ① 1/2アクティブシールド型3Tマグネットのコイルを製作、コイルのクライオ装置への組込み完了(2018年度)。1/2サイズ5Tコイルは、必要な高電流密度を短期間で検証できる7T検証コイルの製作に変更<br>② 高温超電導線材の要求仕様となる機械特性の評価手法を確立 | ○   |
| 2) マグネットのシステム最適化技術開発<br>① 高磁場・高電流密度コイル設計技術<br>② 省エネ・低コストシステムの開発 | ① 1/2アクティブシールド型5T-マグネット設計<br>② 励磁システムの低コスト、省エネ化の提案                    | ① 1/2アクティブシールド型5Tマグネット設計完了<br>② 低コスト・省エネを実現可能な分離型磁場保持電源の動作実証完了  | ○   |
| 3) コイル保護・焼損対策手法の開発<br>① コイル保護手法の開発                              | ドライブモードに対する保護・焼損対策技術  | ① 高温超電導コイルのドライブモードにおける焼損挙動を評価、 <b>通電電流の焼損限界を確認</b>  | ○   |

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

### 3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

| ◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況【三菱電機】 助成 2019-2020年度  |   |  |     |  |
|---|---|--|-----|--|
| 研究開発項目  | 目標  | 成果   | 達成度 | 今後の課題と解決方針   |
| 1) 高温超電導コイルの実用化技術開発<br>①コイル・マグネット製作技術<br>②磁場安定化技術<br>③高温超電導線材の要求仕様導出<br>④コイル保護手法の開発 | ①1/2アクティブシールド型 <b>3T</b> マグネット製作・ <b>撮像実証</b> (磁場均一度: 10ppm/250mmDSV)。高電流密度コイル(200A/mm <sup>2</sup> 超)の試作・検証<br>②磁化を考慮した磁場解析手法により <b>磁化安定化手法</b> を確立(磁場安定度: 1ppm/hr.)<br>③超電導線材に要求される機械特性の導出<br>④ドライブモードのコイル保護システムの確立 | ①超電導コイルの劣化により目標未達の <b>0.3T</b> での成体マウス撮像を実証(磁場均一度: 36 ppm / 50mmDSV)。小型の高電流密度コイルで最大磁場6.5T下、約200A/mm <sup>2</sup> を確認<br>② <b>オーバーシュート法による磁化安定化手法の効果を確認</b> (磁場安定度: 約 2 ppm/hr. ※3T換算で、1ppm/hr.達成見込み)<br>③ <b>コイル劣化部位評価法の確立</b> 、要求機械特性の導出<br>④コイル保護のための新構造コイルの提案 | △   | ①コイル劣化要因をふまえた、大型高温超電導コイルの安定化製作技術の確立<br>②実機に即した励磁法、時間マッチングの検証<br>③劣化を防ぐ要求仕様の明確化、線材ロットの受入検査方法の確立<br>④超電導特性劣化時のコイル焼損を防ぐためのコイル巻線方法開発 |
| 2) マグネットのシステム最適化技術開発<br>①高磁場・高電流密度コイル設計技術<br>②省エネ・低コストシステムの開発                       | ①全身用3Tコイルの概略設計及び、 <b>熱スイッチ</b> の効果検証<br>②システム最適化及び、高安定磁場マグネットの励磁システムの開発   | ①全身用マグネットの概念設計、 <b>熱スイッチによる冷却効率の上昇</b> を確認<br>② <b>免疫遺伝的アルゴリズムによる最適化手法</b> を確立。省エネ・低コストな <b>スイッチング式電源での画像取得</b> に成功(磁場安定度: 約2ppm/hr. ※3T換算で、1ppm/hr. 達成見込み)  | ○   | ①線材特性や価格、冷凍機の効率を考慮した最適条件算出<br>②線材使用量の最小化、冷凍機消費電力最小化を目的とする最適システムの設計開発   |



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

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/mm<sup>2</sup>超の実証、大口径コイル製作の劣化抑制、信頼性向上

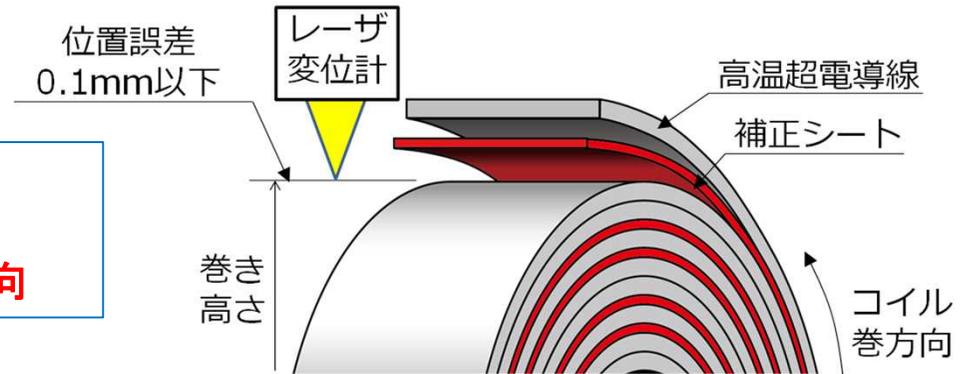
| 要素技術                          | 要素技術目標  | 主な成果  | 達成度 |
|-------------------------------|---|---|-----|
| ① コイル・マグネット製作技術<br>(三菱電機)     | 1/2サイズ3Tマグネットの製作・撮像実証<br>10ppm/250mmDSV               | 超電導劣化により目標の3Tに対し <b>0.3Tでのマウス(~5 cm)の撮像</b> を実施<br>磁場均一度: 36 ppm / 50mmDSV 達成                     | △   |
|                               | 高電流密度コイル(7T検証コイル)の製作<br>平均電流密度200 A/mm <sup>2</sup> 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、 <b>最大磁場6.5T、平均電流密度209A/mm<sup>2</sup></b> を実証                     | ○   |
| ② 磁場安定化技術<br>(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<br>磁場安定度: 1ppm/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 <b>磁化安定化手法の効果を確認</b><br>磁場安定度: 2ppm/hr. ※3T換算 1ppm/hr.達成見込み | ○   |
| ③ 高温超電導線材の要求仕様導出<br>(木須研、津田研) | 超電導線材に要求される機械特性の導出                                    | 軸方向応力の限界特性<br>磁気顕微鏡を用いた素線・コイルの <b>評価手法を確立し、劣化要因の特定に成功</b>   | ○   |
| ④ コイル保護手法の開発<br>(三菱電機、津田研)    | ドライブモードのコイル保護システムの確立                                  | <b>絶縁無し</b> の複数テープ線で構成される導体を用いたコイル化方法や励磁方法の提案   | ○   |

## ① コイル・マグネット製作技術 大口徑コイル製作技術の確立

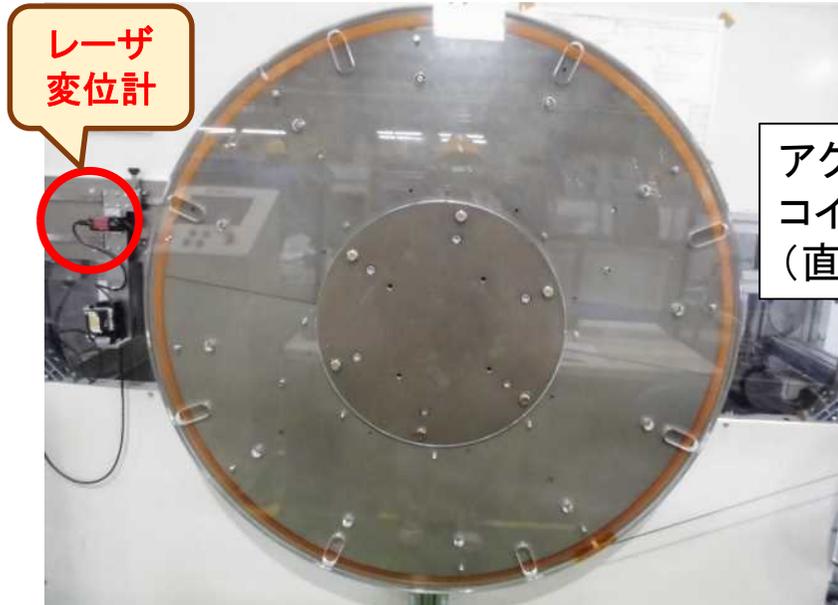
製作要求精度)

○巻線線材位置 : **<0.1mm R方向**

○パンケーキコイル位置 : **<0.5mm R、Z方向**



コイル高精度巻線手法



アクティブシールド  
コイル巻線  
(直径1.2m)

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

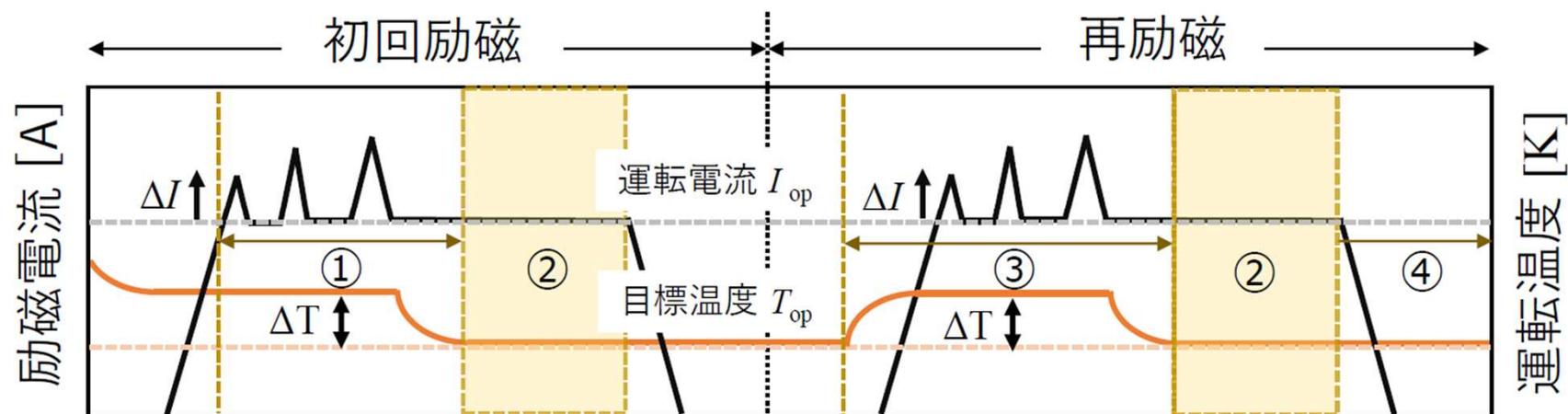


マグネット外観写真

## 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

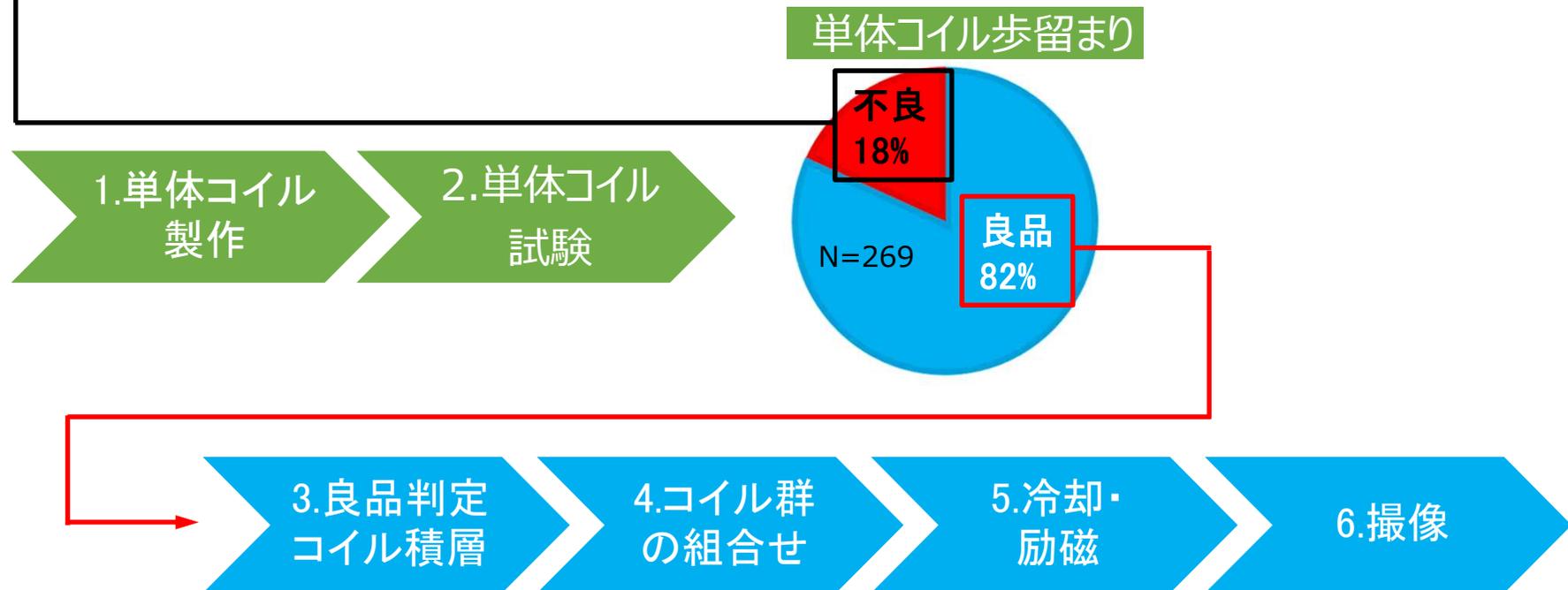


- ① 併用法で磁場変動抑制(15~20 ppm/h. まで抑制後,  $\Delta T = 5$  K)
- ② 磁場変動率  $\leq 1$  ppm/h. 区間 (MRIではこの区間で撮像)
- ③ 併用法で磁場変動抑制  
( $\Delta T = 3$  K 昇温後OS法により5 ppm/h. まで抑制後,  $\Delta T = 3$  K)
- ④ 以後, 再励磁の度に③を繰り返す

○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

## ③ 高温超電導線材の要求仕様導出 超電導特性の劣化要因の検討

269個の単体コイル製作時ですでに20%近くの劣化  
⇒ 良品と判断し、積層に用いたコイルにも潜在的に本劣化が残存し、組立・冷却・励磁までに症状が悪化した可能性  
⇒ 単体コイルが劣化した要因について精査（九州大学、三菱電機）

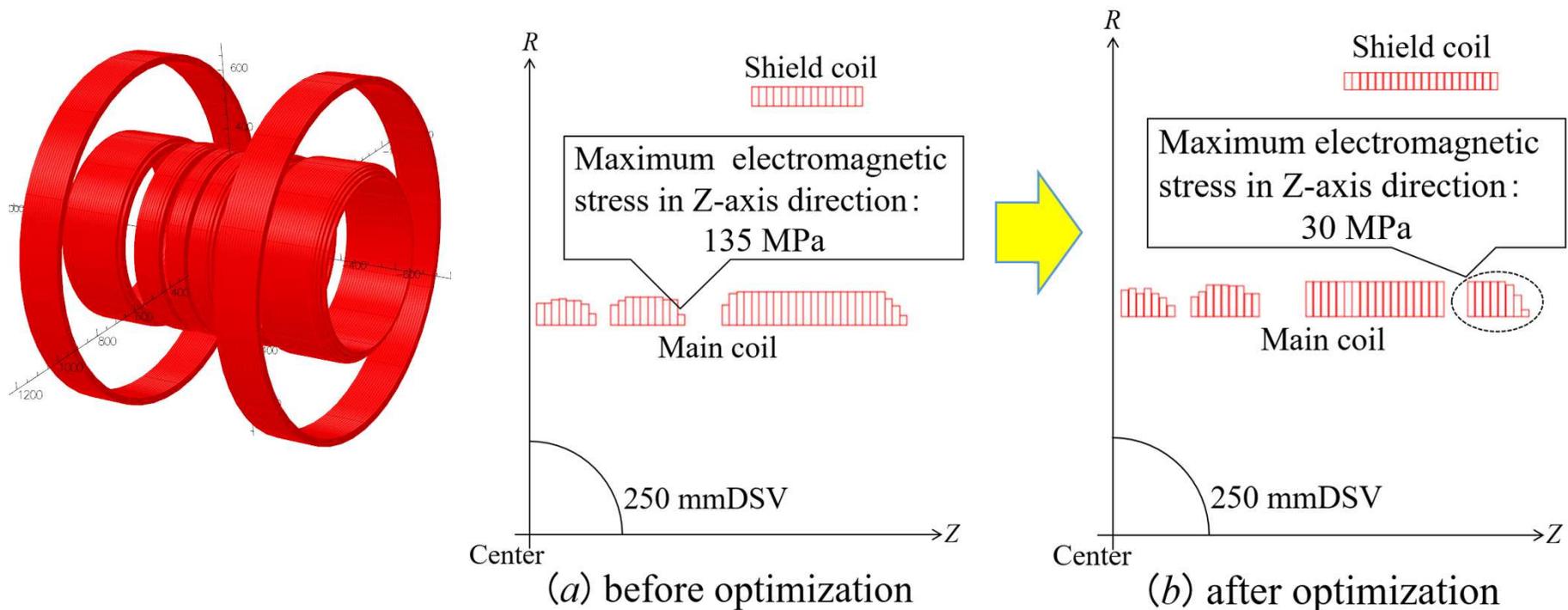


最終目標：全身撮像用3T-MRIマグネット実用機の基本設計  
 中間目標：1/2アクティブシールド型5T-コイル設計完了、励磁システムの低コスト、省エネ化の提案

| 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<br>(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<br>(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<br>・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 | ○   |

## ◆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



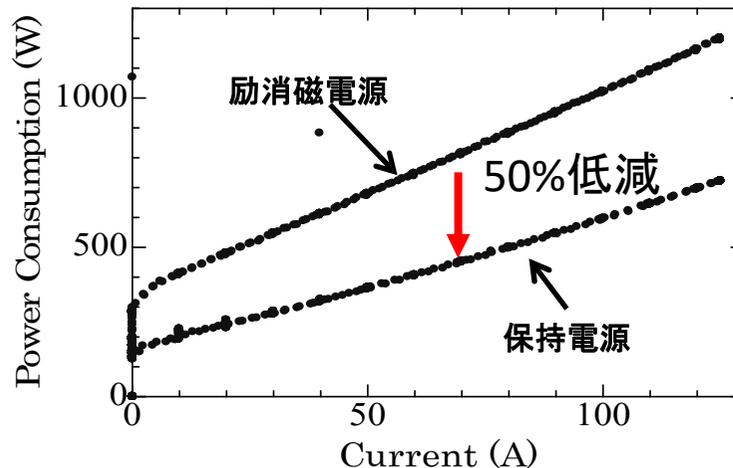
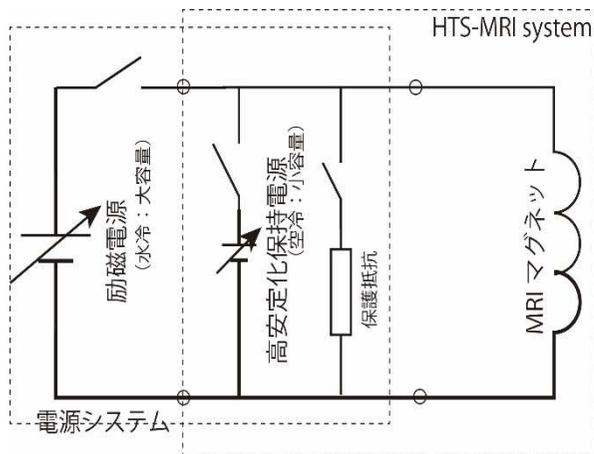
1/2サイズアクティブシールド型5Tコイルの最適化

○ 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

京都大学白井研

## 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)

- 実用化省エネ化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. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

#### ◆研究開発項目毎の目標と達成状況 【産総研】

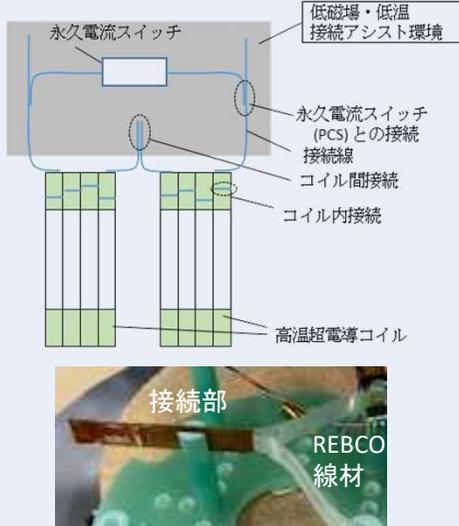
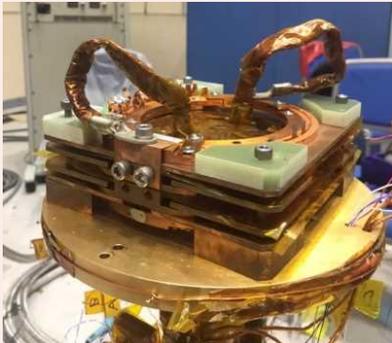
##### 1. 高温超電導線材の超電導接続技術開発

| 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"> <li>・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、<b>接続抵抗 <math>10^{-12}\Omega</math> 以下を見通す技術を確立。実際に <math>10^{-12}\Omega</math> オーダーの接続を実証(新線材)。</b></li> <li>・2台の冷凍機により、<b>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。</b></li> </ul> | ○   |

##### 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"> <li>・コイル内に生じた<b>常電導部を高感度に検出できる「共巻き法」と</b>、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<b>ホットスポットの成長を抑制する「抵抗ショート法」を確立。</b></li> <li>・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。</li> </ul> | ○   |

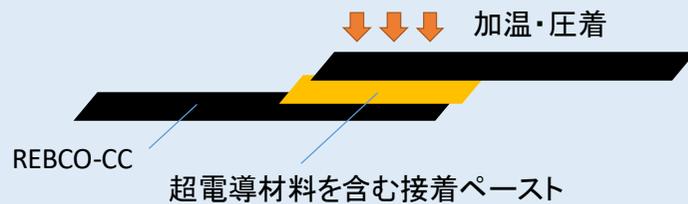
- ・ **マグネット製造現場で施工が容易な「はんだ接続」により、MRI用に十分な低抵抗の接続技術を開発した。また高温超電導マグネットの汎用の保護技術を確立した。**
- ・ **接続技術・保護技術ともに、MRIだけでなく、磁気浮上コイルや強磁場コイル等の様々な応用に適用可能であり、あらゆる高温超電導機器の実用化促進に貢献する。**

|            |  |  |
|------------|--|--|
| <p>テーマ</p> | <p>1. 高温超電導線材の超電導接続技術開発<br/>                 — 産総研、NIMS、フジクラ、古河電工</p>  | <p>2. コイル保護・焼損対策技術開発(永久電流モード)<br/>                 — 産総研、上智大</p>   |
| <p>概要</p>  | <p>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、<b>マグネット製作現場で施工が容易な接続技術</b>の開発</p>   | <p><b>永久電流モード</b>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<b>保護技術の開発</b></p>  |
| <p>手段</p>  | <p>接続部を「低磁場・低温環境」に置くことにより、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</p>  | <p>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</p>  |
| <p>目標</p>  | <p>接続点での<b>抵抗値<math>10^{-12}\Omega</math>以下の接続</b>を実現</p>  | <p>永久電流モード高温超電導コイルの<b>保護・焼損対策手法の確立</b></p>   |

(次世代)高温超電導永久電流モードMRIの実現

## ➤ 異種超電導材料による接続のアプローチ

a. REBCO層どうしを超電導材料を含む接着剤で接続

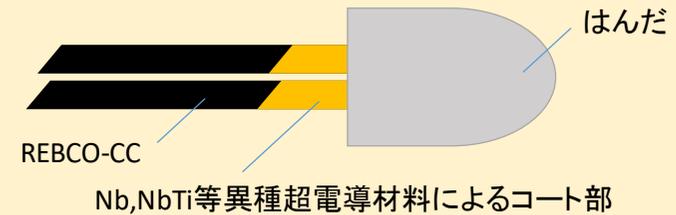


接着性の超電導ペーストを開発

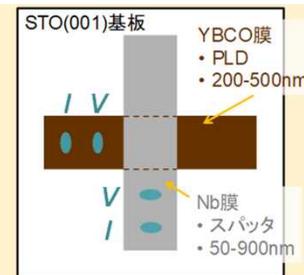


特許化検討中  
他用途への展開

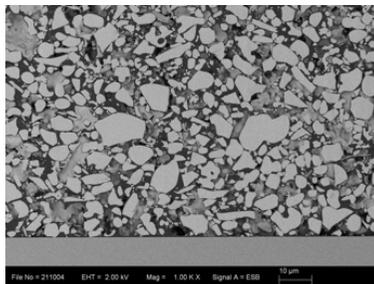
b. REBCO層を異種超電導材料でコーティングした後にはんだで接続



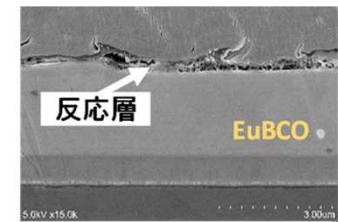
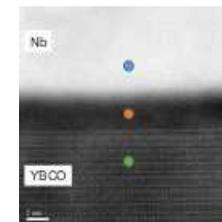
REBCO上へのNb/NbTiの室温成膜技術を開発



論文発表

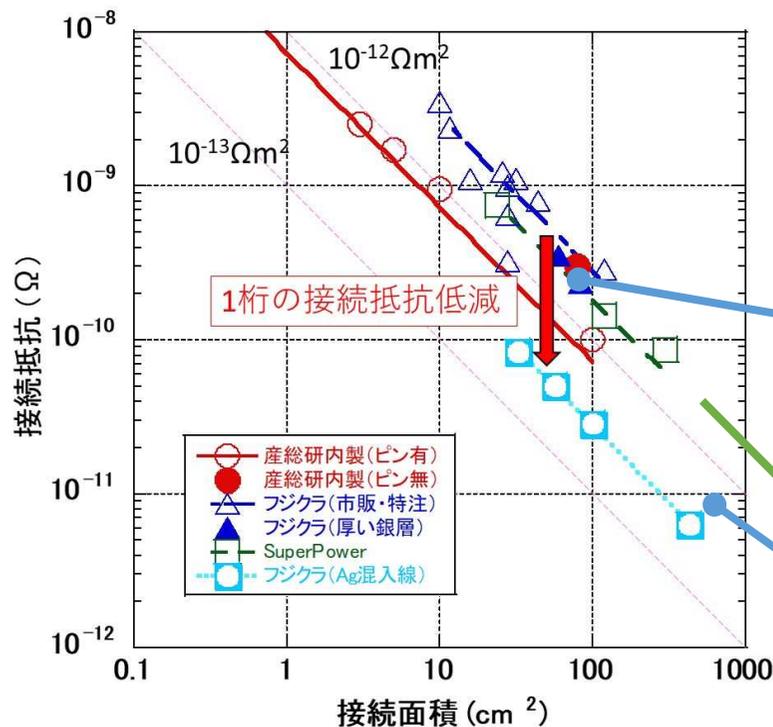


いずれの場合も、REBCO層と異種材料との間に生じる高抵抗層の抑制・除去ができず、目標の低抵抗接続は困難であることが明らかに。

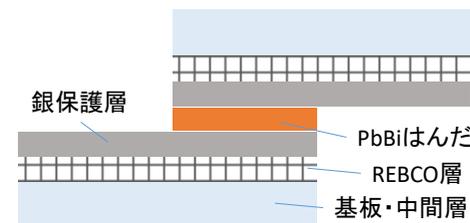


## ➤ 接続抵抗 $10^{-12}\Omega$ 実現に向けて

- 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



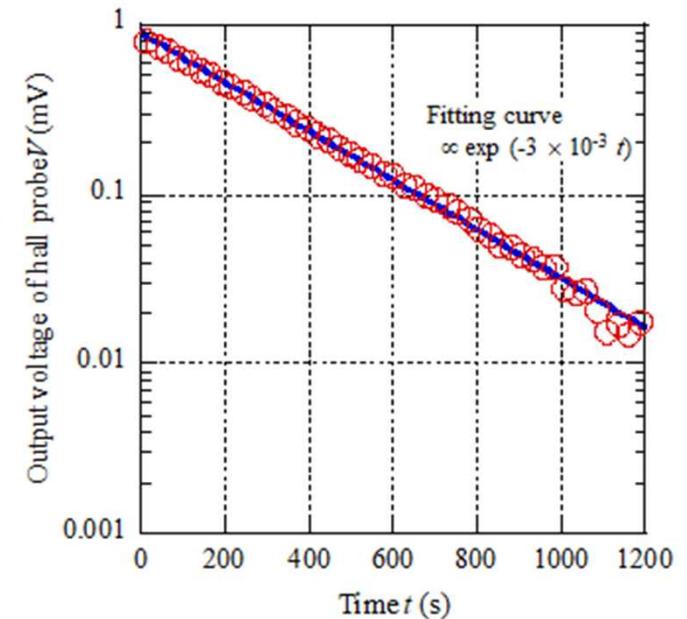
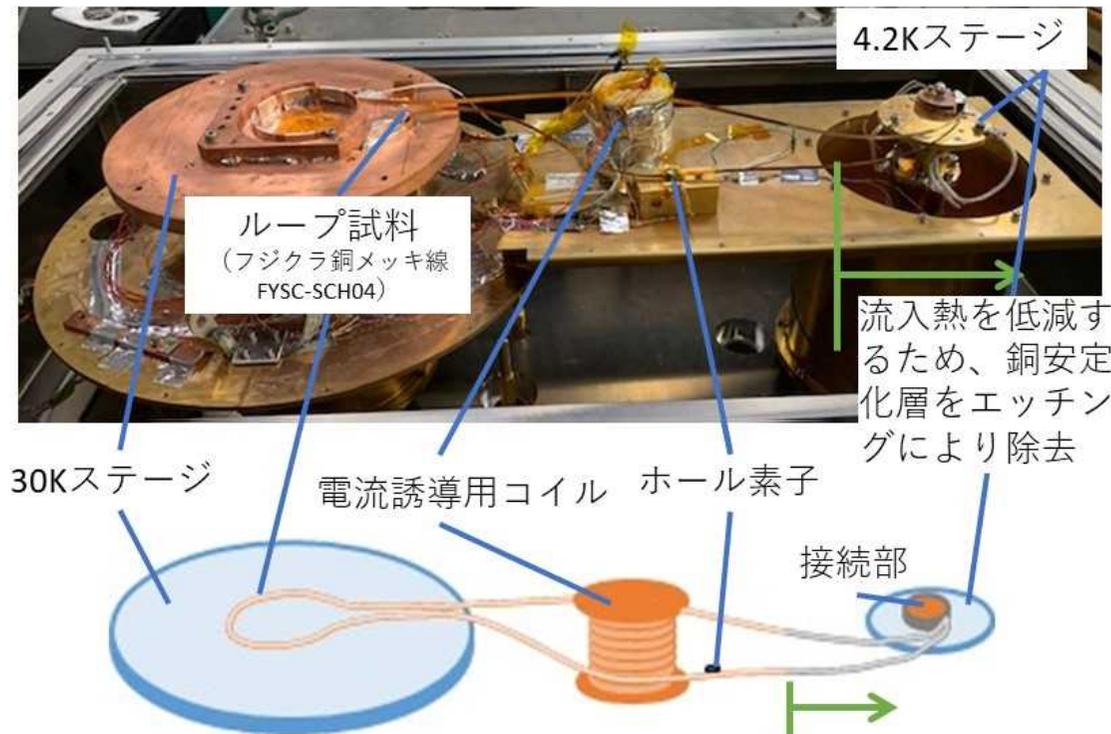
長尺接続のイメージ

- ✓ 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台の冷凍機を用い、コイル部を30K、接続部を6Kに維持。PbBiはんだを超電導状態にすることで、冷凍機冷却マグネットでも低抵抗接続が可能であることを実証。



- 接続部を含むループ試料に対し、中央のコイルで電流を誘導
- 誘導電流の減衰の様子をホール素子で測定 (右グラフ)

電流減衰時定数から、接続部のシート抵抗は $10^{-12} \Omega \text{ m}^2$ 級であり、PbBiが超電導転移していることを確認

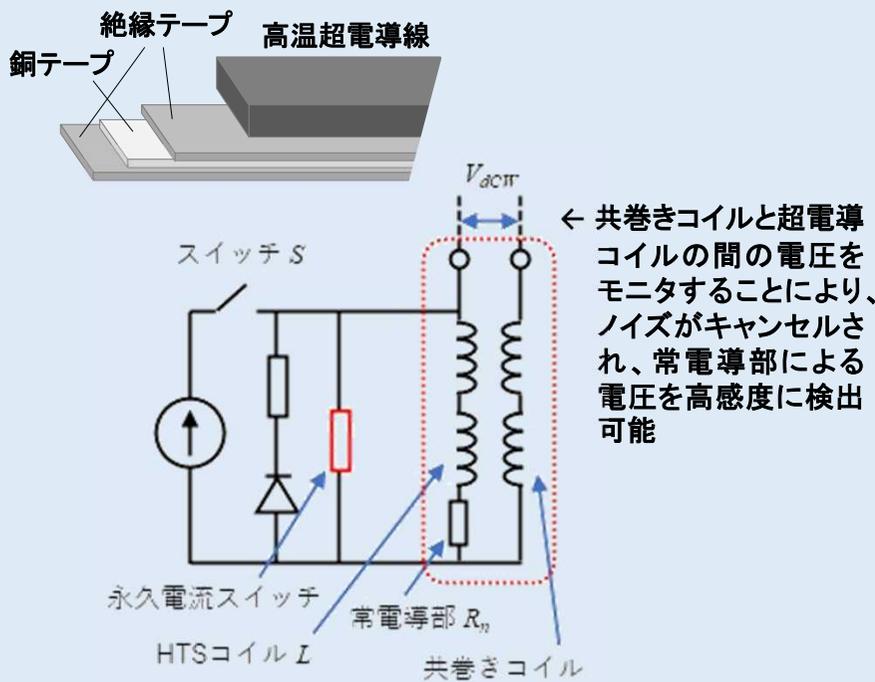
冷凍機による低抵抗接続アシストを実証

ノウハウを除き論文発表

- 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

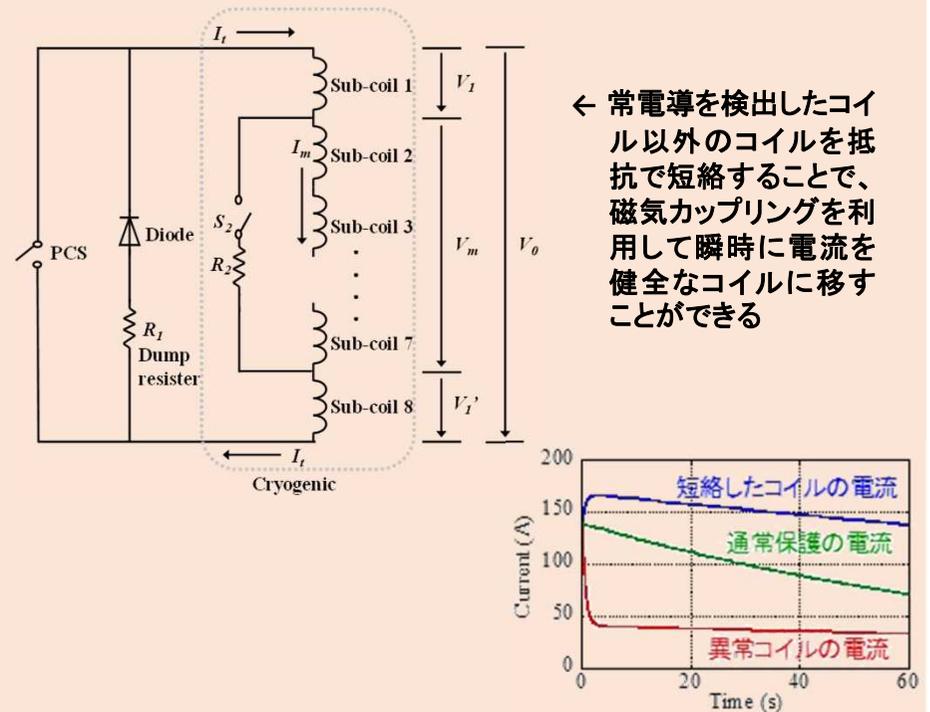
a. 「共巻き法」

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



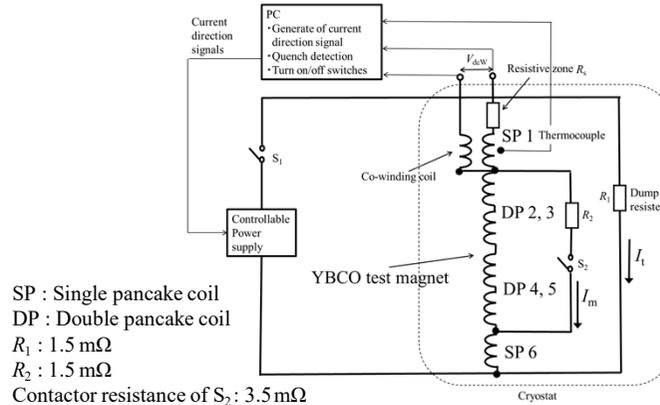
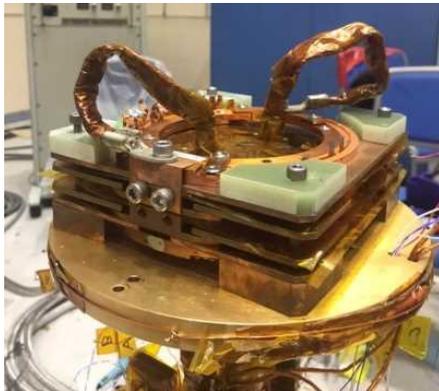
b. 「抵抗ショート法」

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



# 【産総研】2. コイル保護・焼損対策手法の開発(永久電流モード) S-6

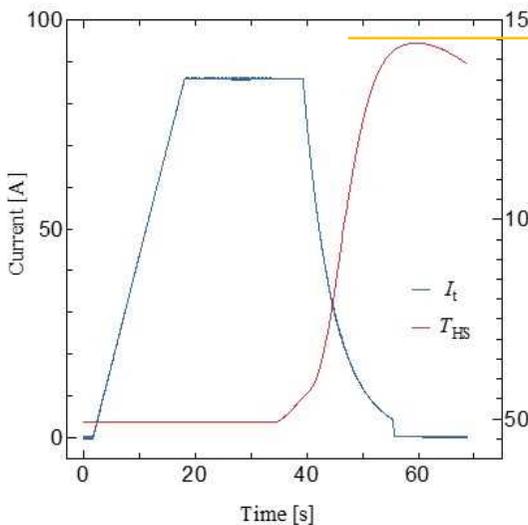
- 「共巻き法」と「抵抗ショート法」を組み合わせた一連の保護スキームを、冷凍機冷却モデルコイルで実証



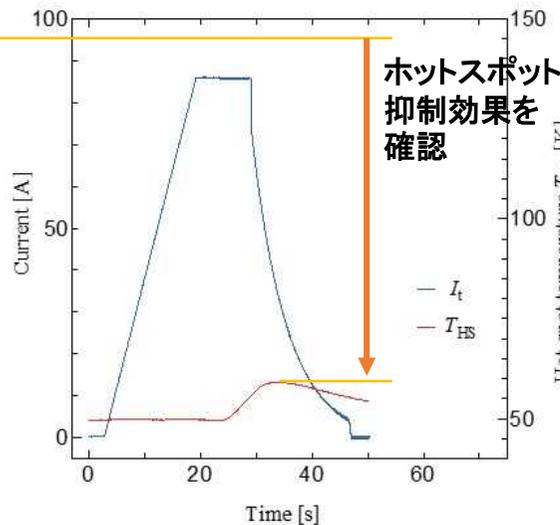
← 共巻き検出電圧が閾値を超えたら、回路を切り替えて(抵抗ショート)保護動作を開始



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。



Detect & Dump 法(従来法)



抵抗ショート法

- ✓ 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立

### 3. 研究開発成果 (2) 成果の普及

|             |      | 2016<br>年度 | 2017<br>年度 | 2018<br>年度 | 2019<br>年度 | 2020<br>年度 | 2020<br>年度 | 計  | 総計  |
|-------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|-----|
| 論文          | 鉄道総研 | 0          | 1          | 1          | 5          | 2          | 1          | 9  | 36  |
|             | 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<br>・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<br>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

### 3. 研究開発成果 (3) 知的財産権の確保に向けた取組

#### ◆ 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

|      | 事業者  | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度 | 2019年度 | 2020年度 | 2021年度~ | 計 |
|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---|
| 特許出願 | 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

## 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

## 4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

---

### ◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る製品(鉄道き電線・MRIマグネット等)の社会的利用(顧客等への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る製品の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

## 4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

---

### ◆ 鉄道総研

- 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。

＜ロードマップについては、非公開版で説明＞

## 4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

### ◆ 三菱電機

- ・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

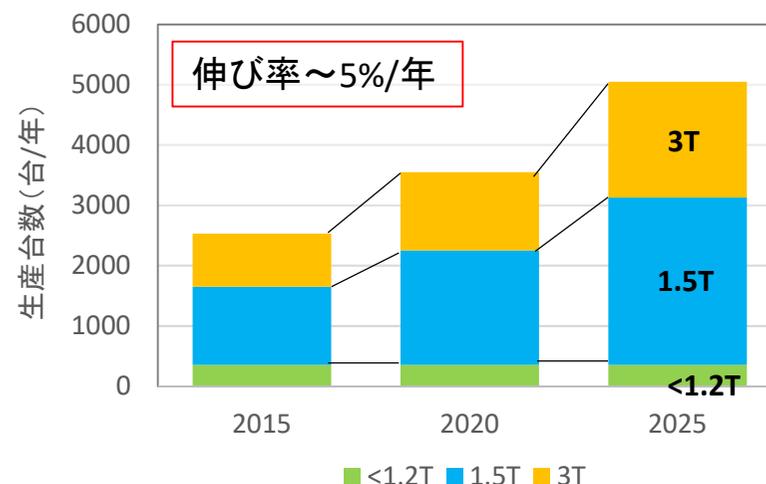


図1: MRIシステムの生産予想  
BCC Research Reportからの外挿

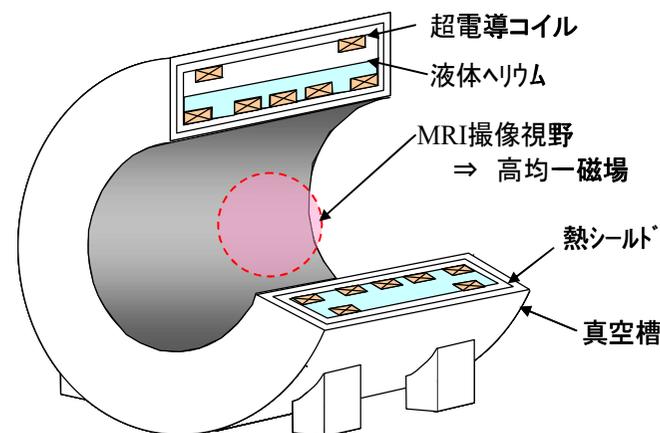
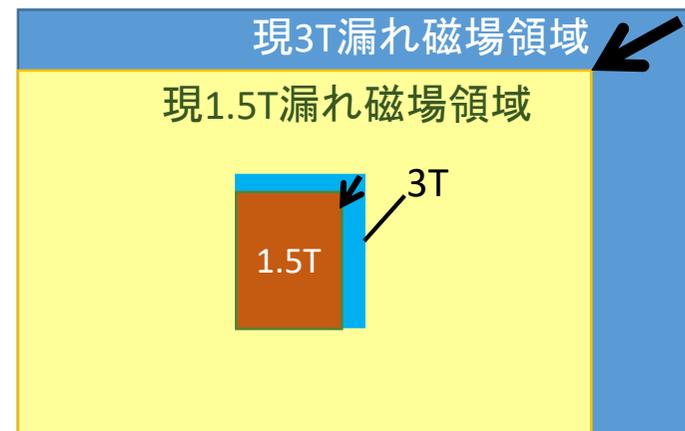


図2: MRI用超電導マグネット構成図  
(現行機: 液体ヘリウム使用)

## 4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

|                              | 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 <sup>2</sup> ) | 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/mm<sup>2</sup>、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

＜ロードマップについては、非公開版で説明＞

## 4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

---

### ◆ 産総研

- 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

<ロードマップについては、非公開版で説明>

ご清聴 ありがとうございます。