

高温超電導の実用化に向けた 技術開発成果の紹介

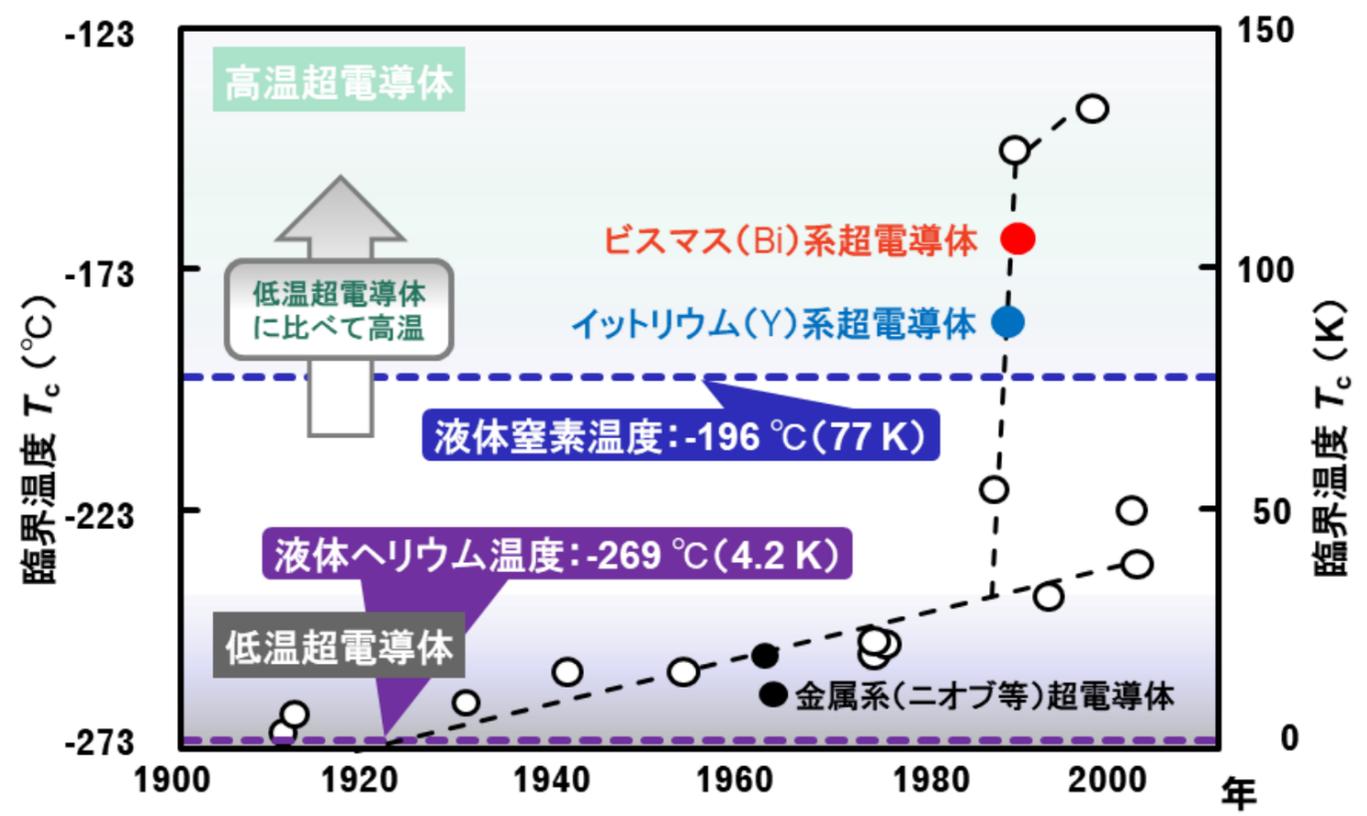
プロジェクト名： 高温超電導実用化促進技術開発
戦略的省エネルギー技術革新プログラム

プロジェクト実施者： 東京電力ホールディングス株式会社
公益財団法人鉄道総合技術研究所
三菱電機株式会社
国立研究開発法人産業技術総合研究所
古河電気工業株式会社
株式会社フジクラ
昭和電線ケーブルシステム株式会社
(戦略的省エネルギー技術革新プログラム)

プロジェクト実施期間： 2016年5月～2021年2月

- 超電導とは**非常に低い温度で電気抵抗がゼロ**となる現象。
- 極低温(-269°C(4K)/**液体ヘリウムの沸点**)付近で超電導状態となるものを**低温超電導**、-253°C(20K/**液体水素の沸点**)より**高温**で超電導状態となるものを**高温超電導**という。 ※ 液体窒素の沸点:-196°C、K(ケルビン):絶対温度
- 超電導状態になると、**大容量の電気**(電圧を低くしても)が流せ、大きな磁場を発生させることなどができる。
- エネルギー・環境イノベーション戦略**(平成28年4月19日決定)では超電導技術の有用性や技術開発を加速することの必要性等が記載されている。

超電導材料臨界温度(T_c)向上の変遷

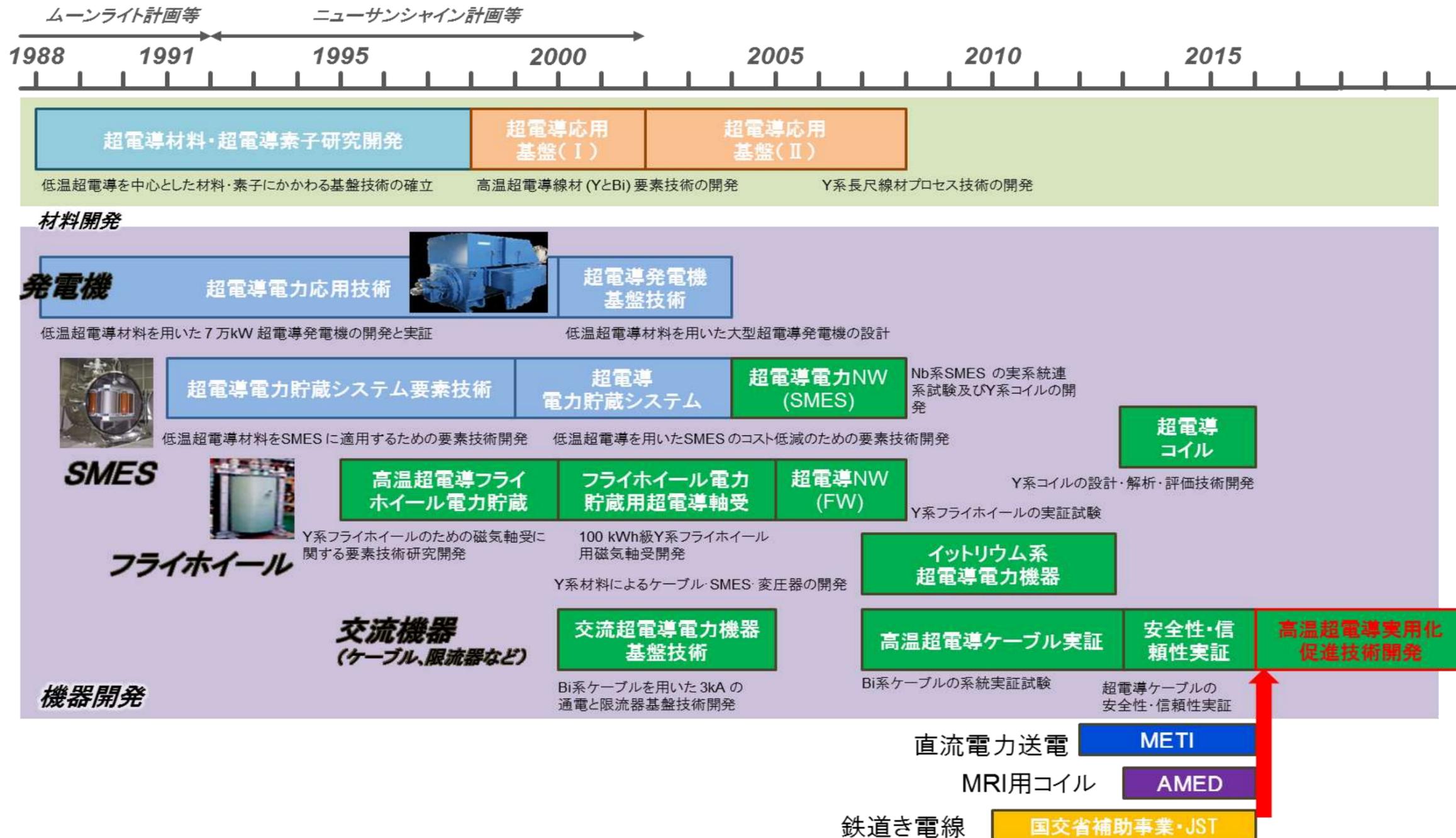


超電導技術の重要性

エネルギー基本計画
 (2014年4月閣議決定)
 p.74

「...電気を最終消費者に分配する要となる送配電網を高度化するため、変動電源が今後増加することに対応して、高度なシミュレーションに基づく系統運用技術や**超電導技術**などの基盤技術の開発を加速する。」

ムーンライト計画やニューサンシャイン計画において、低温超電導体の応用技術開発を実施。
25年前から高温超電導線材・電力機器を中心に切れ目なく技術開発を行ってきたものの、市場が確立されていない。



本PJでの狙い

- 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**にある。
- 実用化促進対象として、**送配電分野**と**高磁場コイル分野**を選定。
- 理由は、**大きな省エネ効果**、**送配電システム高度化**、**ヘリウム供給リスクへの対応**、**大きな市場創出効果**。
- 事業化に進むための適切な技術開発を行う。
- 送配電分野は、**電力送電（交流）**、**電力送電（直流）**、**鉄道き電線**。
- 高磁場コイル分野は、**MRI用コイルの技術実証**、**コイル用超電導線材の高性能化**、**生産性向上**。

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 ・超電導ケーブルシステム 安全性評価基準確立 ・高効率冷却システム確立 COP:0.11以上、点検間隔:4万H	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	予定どおり 事業終了		
		直流	石狩超電導 技術組合 ・超電導直流送電 設計・運用ガイドライン策定	ガイドラ イン策定				
	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 ・長距離冷却システム構築と評価 冷凍機サイズ:2m ³ /kW ポンプ:0.6MPa、流量50L/分 ・システム保全の技術指針の確立	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			
		交流						
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技術開発	マグネットシステム開発	三菱電機 産総研 ・1/2 3Tマグネット撮像実証 磁場均一度10ppm以下、 磁場安定度1ppm/hr以下 ・3T MRIコイル形状、冷凍能力、 クライオスタットなどの設計確立	1/2 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 ・超電導接続の技術開発 (10 ⁻¹² Ω以下)	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 ・高磁場特性の改善 平均電流密度400A/mm ² 以上 @30K, 7T、1kmでのIc低下率 0.15未満	超電導接続技術開発	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			
		生産性 向上	フジクラ ・単位時間生産長50m/hr以上 (現状の約2倍)	生産性向上技術開発	予定どおり 事業終了			
戦略省 エネP G	プラント内利用のための 低コスト型三相同軸超電導 ケーブルシステムの開発	昭和電線	・LN2等冷却媒体を有するプラント 向けの冷却システムを含む、安価な ケーブルシステムの実用化開発	ケーブルシステム、 冷却システム開発	実プラントでの 実証試験			

高温超電導
实用化促進
技術開発

戦略的
省エネルギー
技術革新
プログラム

助成事業者 東京電力ホールディングス株式会社、住友電気工業株式会社
古河電気工業株式会社、株式会社前川製作所

助成事業期間 2016年7月5日～2019年2月28日（3年間）

<背景>

- ・「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」における実系統への連系試験によって、通常運転時の超電導ケーブルの安定性・信頼性が検証された。
- ・「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」では、電力系統適用に向け、地絡・短絡などの事故時の安全性の基礎評価を進めてきた。

<課題>

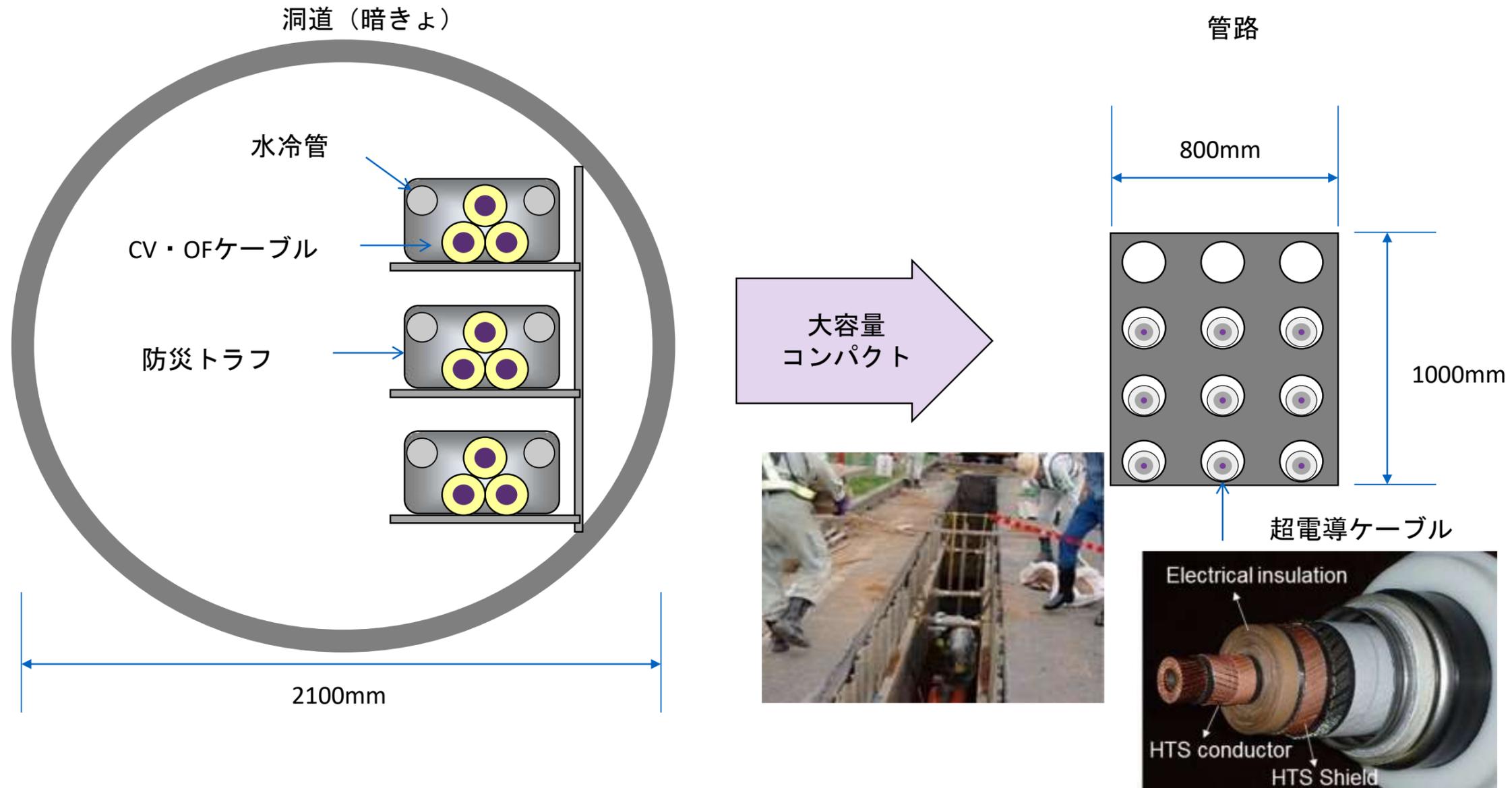
- ・ケーブルシステムについては、これまで実施した基礎評価を基に、実運用時における事故時の現象把握が必要。
- ・冷却システムについては、超電導ケーブルの特徴を最大限に生かすために、冷却システム効率のさらなる向上と耐久性の評価が必要。

<最終目標>

- ・交流高温超電導ケーブルシステムの実運用ガイドラインの作成及び高品質システムの確立

◆ 超電導ケーブルのメリット

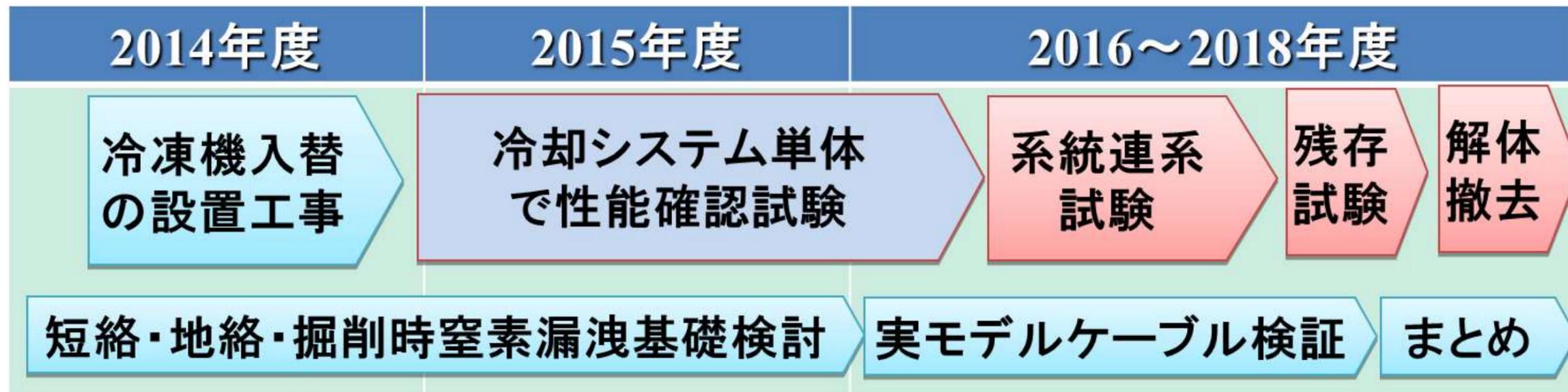
- ・送電損失の低減（銅ケーブルの約1/2）
- ・大容量かつコンパクト（銅ケーブル1kA/cct ⇒ 3kA/cct）
⇒ 建設コスト削減により都内系統への適用が期待



＜Phase 1＞ 2007～2013 : ケーブルシステムの系統連系での運転性能確認

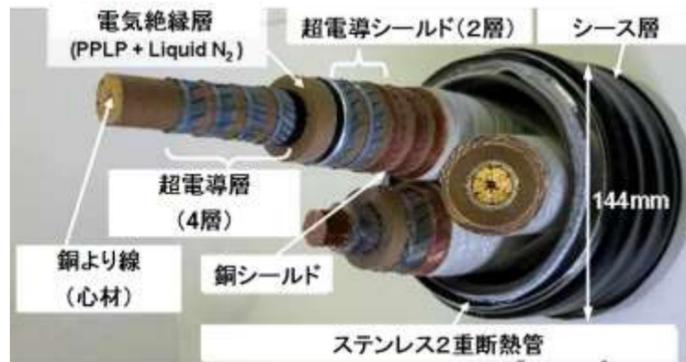


＜Phase 2＞ 2014～2018 : 高効率大容量冷凍機の検証@旭、系統事故対策検証

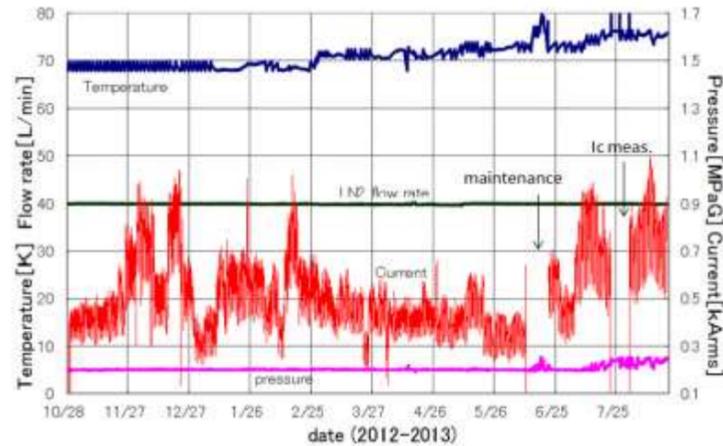


Phase1：高温超電導ケーブル実証プロジェクト（2007～2013）

青色：住友電気工業(株) 緑：(株)前川製作所



超電導ケーブル構造



系統連系試験(1回目)

2007年

系統連系試験 1回目

スターリング冷凍機

2014年

系統連系試験 2回目

ブレイトン冷凍機

超電導ケーブル 66kV 200MW 230m

端末

ケーブル

➡ 日本で最初の実系統連系試験を実施。約1年半の運転実績を得た。短絡、地絡等の安全性検証や冷凍機の性能向上に関する課題あり。

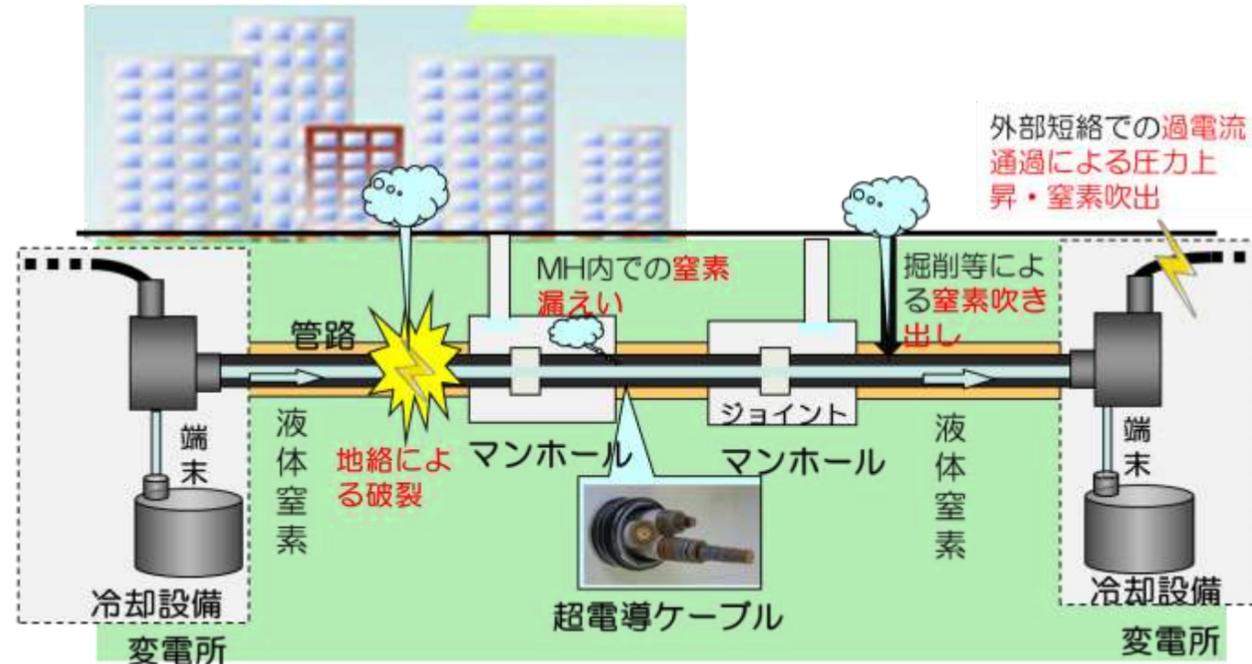
【Phase2実施項目】

- ①「超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発」
- ②「高効率・高耐久冷却システムの開発」
- ③「早期復旧等の実用性向上のための対策検討」



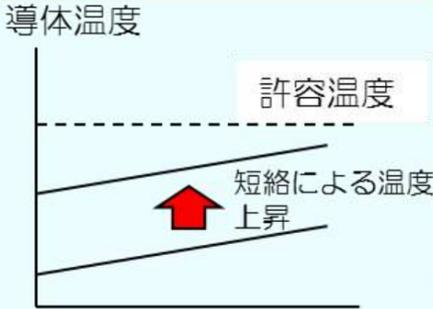
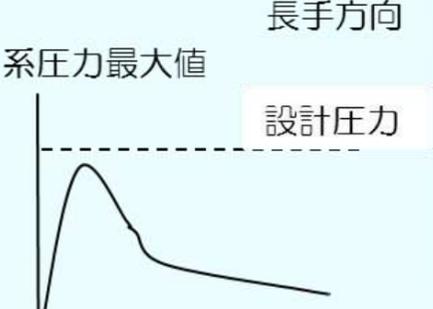
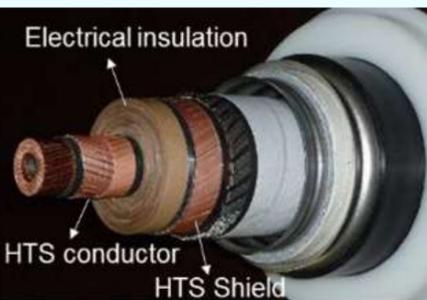
高効率ブレイトン冷凍機

ケーブル実適用時に想定されるリスク



人的被害	健康被害なし	周囲からの苦情	関係者負傷	関係者死傷	不特定多数死傷	影響度大
設備被害						
なし		冷凍機騒音				
補機故障 (軽微)	真空漏れ(軽)	測定センサー異常	配管他からLN2漏れ 白煙、凍傷、酸欠	メンテ中の作業ミス		実証プロ(~H25) 他で検証済み
機器故障 (重度の故障)	主要機器故障	監視・計測故障	温度 圧力 異常			本プロで 実施予定
送電停止 系統切替	電源断(停電)		LN2噴出(外傷)	高圧部感電		従来ケー ブルで検討
電力設備破損 (周囲設備)	真空漏れ(重)	Ic低下 →焼損事故	絶縁破壊・短絡・地絡			
周囲公共設備 破損			ケーブル・端末・容器破裂 LN2異常噴出		天災(地震・竜巻) 人災(火災)	

超電導ケーブルの安全性検証内容

従来（2013年）までの検証内容	本プロジェクトでの検証内容		
	短絡電流関連	地絡対策関連	漏えい対策・その他
<p>66kV 超電導ケーブル</p>  <p>1(a)短絡電流事故検証関連 ⇒・31.5kA/2sでケーブル健全性 ・10kA/2sもらい短絡の健全性 地絡、掘削等は未検討</p>	<p>◎長尺3kmケーブルでのもらい短絡に対する耐性確認（温度・圧力）</p> <p>導体温度</p>  <p>許容温度</p> <p>短絡による温度上昇</p> <p>長手方向</p> <p>系圧力最大値</p>  <p>設計圧力</p> <p>時間</p>	<p>◎地絡防護対策方針策定 (1) シート/コアでの検証による地絡時様相確認 (2) 防護対策効果確認</p>  <p>275kV地絡状況</p>  <p>保護層 66kV防護対策</p>	<p>◎マンホール、トンネル内でのケーブルからの窒素漏えい時影響・リスク検討 (1) 酸素濃度 (2) 他設備健全性</p>  <p>模擬マンホール</p>  <p>併設CVケーブル表面温度測定</p>
<p>275kV 超電導ケーブル</p>  <p>Electrical insulation HTS conductor HTS Shield</p> <p>1(a)短絡電流事故検証関連 ⇒・63kA/0.6sでケーブル健全性 地絡、掘削等は未検討</p>	<p>◎長尺3kmシミュレーションによる設計の汎用化を目指す。</p>	<p>◎地絡防護対策が外径拡大・コストアップにつながるため、漏えい対策にて安全性確保</p>	<p>安全性ガイドラインに反映</p>



リスク検討に伴う安全性検証データをほぼ取得。これらの結果に基づいた超電導ケーブルの運転に関するガイドラインを策定。

【冷凍機に関する目標】

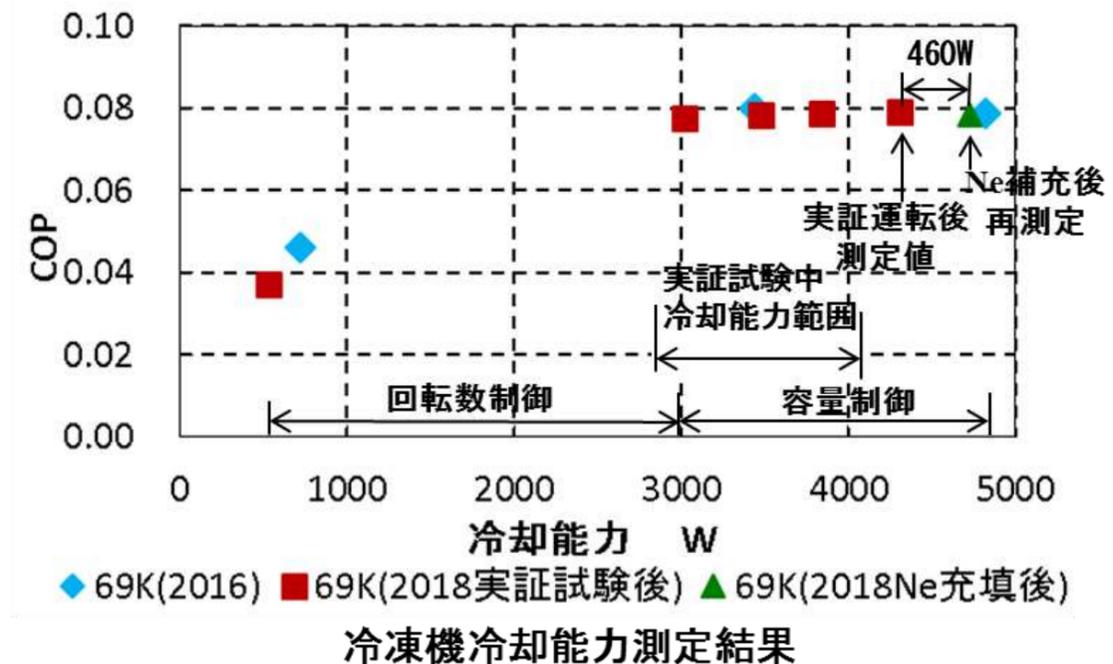
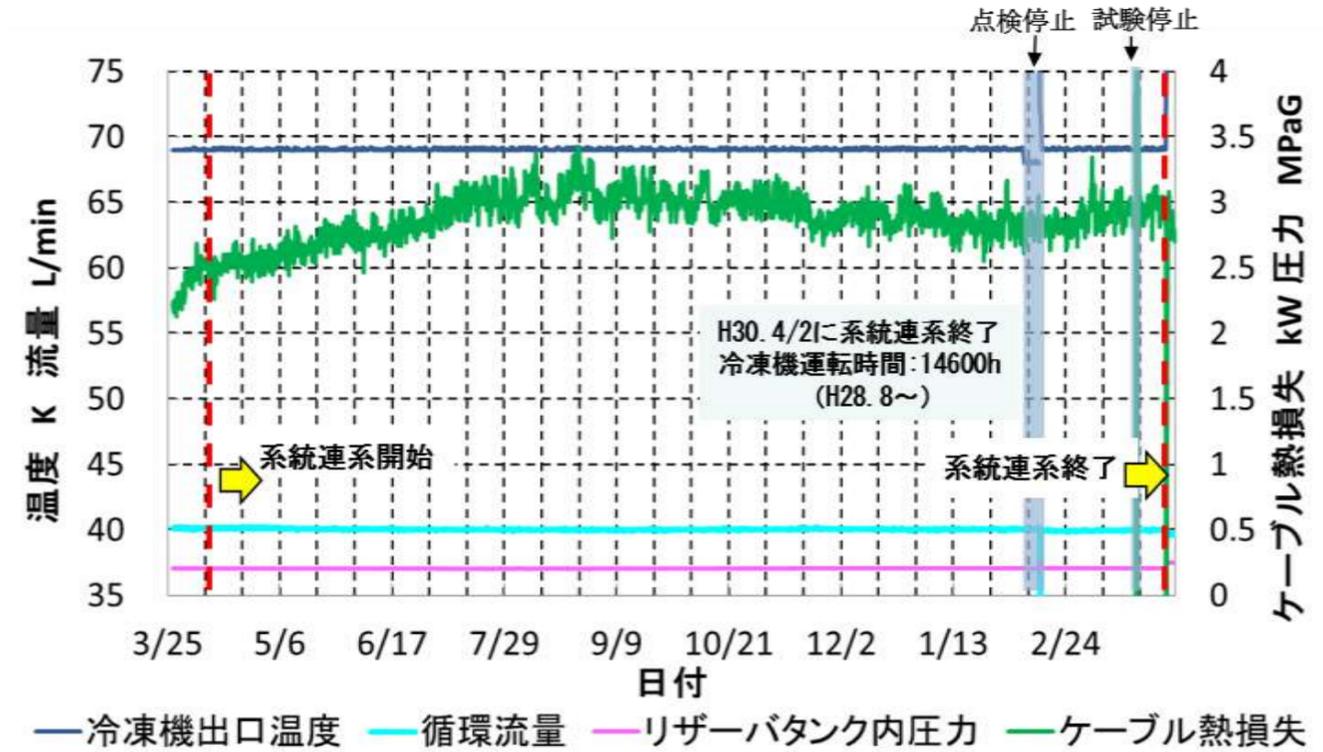
- ・高耐久性：メンテナンス
インターバル 40000時間
- ・高効率性：COP 0.11



・高耐久性：約15000時間の稼働実績。その間ノーメンテ交換部品インターバルからの推測であるが4万時間稼働の見込みを得た。

・高効率性：実運転：0.08程度
定格負荷時には0.01の上積みが可能。

圧縮機組み合わせ変更他により、0.11レベルの達成見込みを得た。



助成事業者 鉄道総合技術研究所
 共同研究先 前川製作所、IHI、三井金属エンジニアリング、三重大学
 助成事業期間 2019年6月7日～2020年2月28日（2年間）
 ※2016～2018年度（3年間）は委託事業で実施（計5年間）

<背景>

- ・ 鉄道用超電導き電ケーブルは、回生失効及び送電損失低減による省エネ、電圧補償効果や変電所の集約化、変電所の負荷平準化、レール電食の抑制等の大きな効果が期待できる。
- ・ しかしながら、km級の冷媒圧送は実現できておらず、また、大型で鉄道現場への設置が難しかった。

<課題>

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ◆超電導ケーブルの長距離冷却技術開発 <ul style="list-style-type: none"> ・コンパクト冷凍機技術開発 ・液体窒素循環ポンプ技術開発 ・断熱管技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ◆長距離冷却システムの構築・評価 <ul style="list-style-type: none"> ・冷却システム構成・評価 ・km級長距離冷却システム構成・評価 |
|---|--|

<最終目標>

- ・ 鉄道き電用のコンパクトなkm級長距離冷却システムの実現

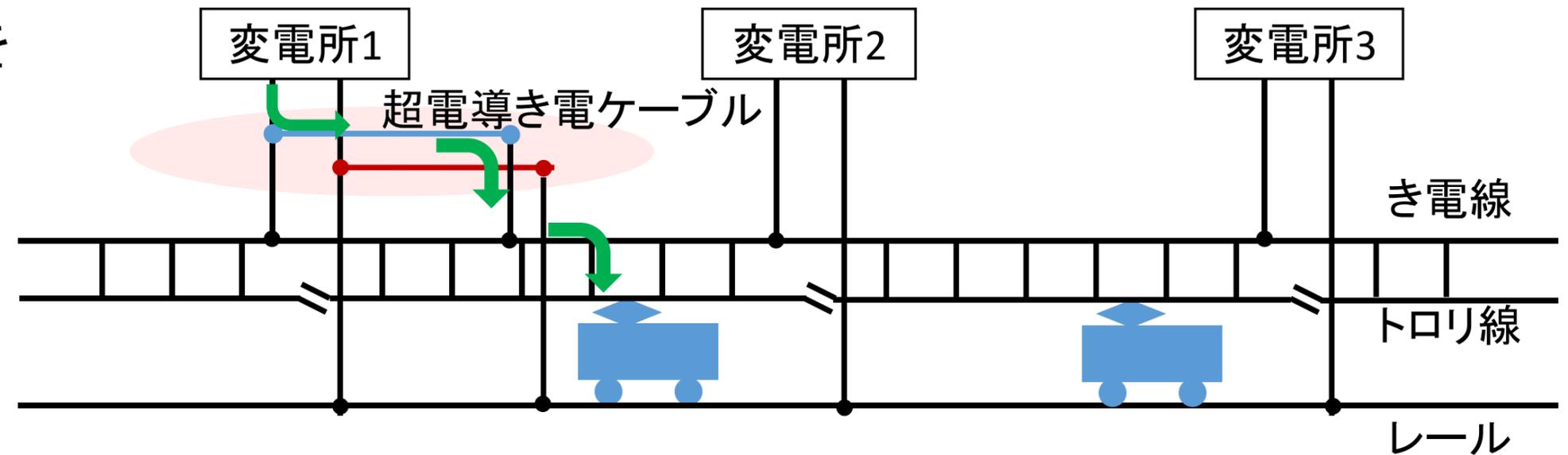
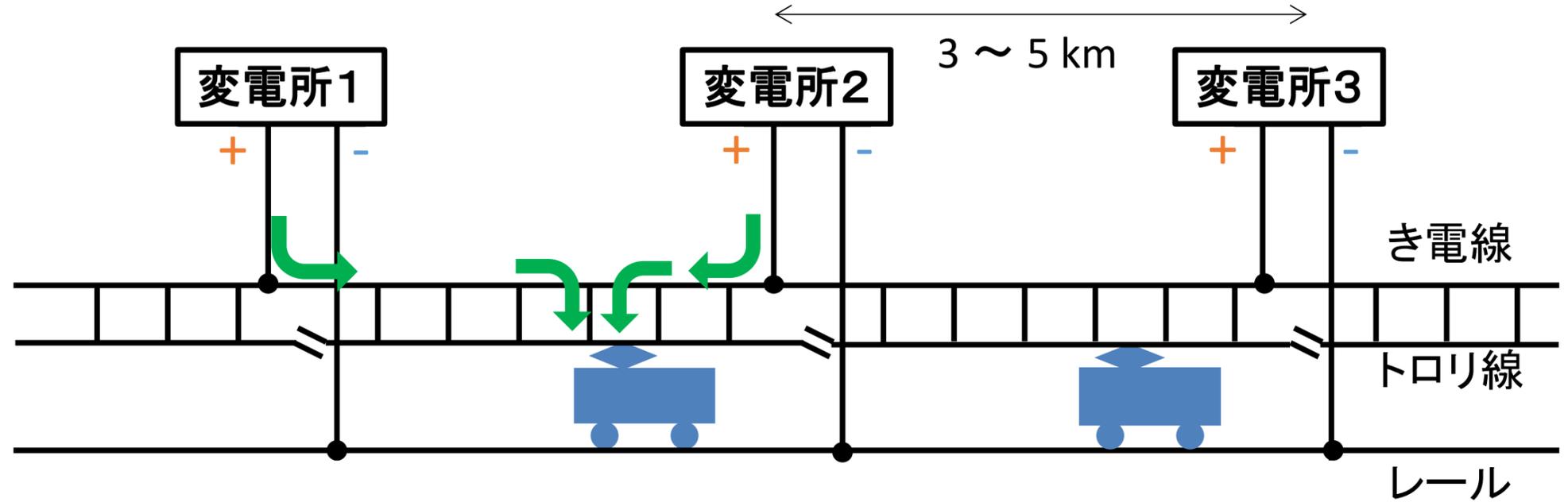
直流電気鉄道の課題

- ・電圧降下が発生する
→ダイヤが増やせない
- ・送電損失、回生失効が発生する

超電導き電ケーブルの適用

電気抵抗ゼロの超電導き電ケーブルを導入することで、

- ・電圧降下を抑制
→ダイヤの増強が可能
→変電所の集約化が可能
- ・送電損失、回生失効の抑制
→省エネルギー効果



超電導き電ケーブルの実用化に向け、km級の冷媒圧送を実証する

① 超電導ケーブルの長距離冷却技術

(1) コンパクト冷凍機技術開発

＜目標＞設置寸法 $2 \text{ m}^3/\text{kW}$

＜実施内容＞a) 熱交換器、周辺機器の小型化
b) 回転機の高効率化



2.0 m

2.70 m

1.86 m

コンパクト冷凍機の開発

(2) 液体窒素循環ポンプ技術開発

＜目標＞揚程 0.6 MPa 、流量 50 L/min

＜実施内容＞a) 動圧式ガス軸受の開発
b) 構成部品の最適化



液体窒素循環ポンプの開発

(3) 断熱管技術開発

＜目標＞熱侵入 2 W/m 、真空維持1年以上の見通し

＜実施内容＞断熱構造、ベーキング条件の最適化



長尺断熱管の開発

②長距離冷却システムの構築・評価

(1) 冷却システム構成・評価

＜実施内容＞a) 各要素機器を鉄道総研宮崎実験センターに移設、集約し、**冷却システムを構築**

b) 動作確認

(2) km級長距離冷却システム構成・評価

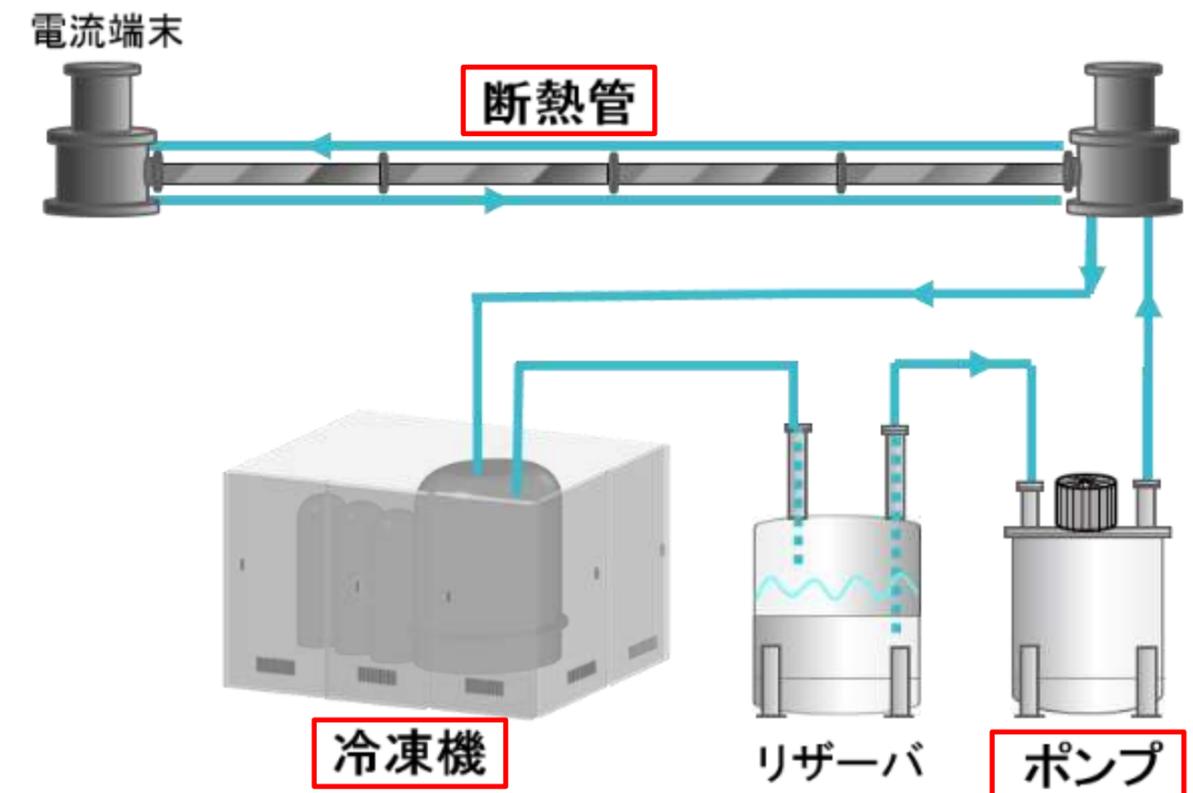
＜目標＞ **km級のシステムを構築し、循環性能を確認**

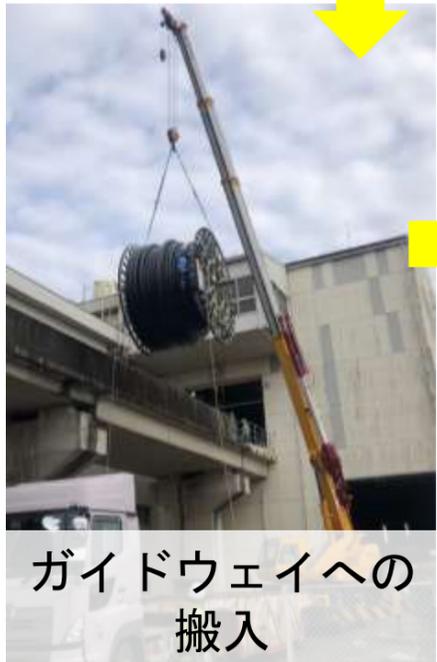
＜実施内容＞a) 敷設手法の検討

b) 冷却試験・運転手法の検討



km級長距離冷却システムの構築





ガイドウェイへの搬入



敷設の様子



ガイドウェイ上に1.2 kmの断熱管を敷設し、**km級の冷媒圧送を実現**

事業者	三菱電機株式会社(助成)、国立研究開発法人産業技術総合研究所(委託)
共同研究先	京都大学、東北大学、九州大学
再委託先	上智大学、株式会社フジクラ、古河電気工業株式会社
助成事業期間	2016年7月5日～2021年2月28日（5年間）

<背景>

- ・超電導マグネットの最も大きい市場である医療用MRIでは、画像診断の高度化の要求に応えるべく、マグネットの高磁場化が進んでいる。
- ・現行MRIの冷却に使われるヘリウム資源の枯渇、価格高騰が深刻化しており、高温超電導によるヘリウムフリー化が期待されている。

<課題>

- ・剥離に弱い高温超電導線材による大口徑コイルの製作技術開発、均一磁場発生を阻害する超電導線材磁化の影響の評価が必要。
- ・高安定磁場を実現するシステム（電源ドライブモード、永久電流モード）の要素技術開発が必要
- ・高温超電導コイルの高電流密度化に伴う、コイル異常時の保護技術開発が必要

<最終目標>

- ・高電流密度コイルの実証、及び全身撮像用3T-MRI用高温超電導コイルの基本設計の完了
- ・高温超電導接続として、接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下の接続を実現

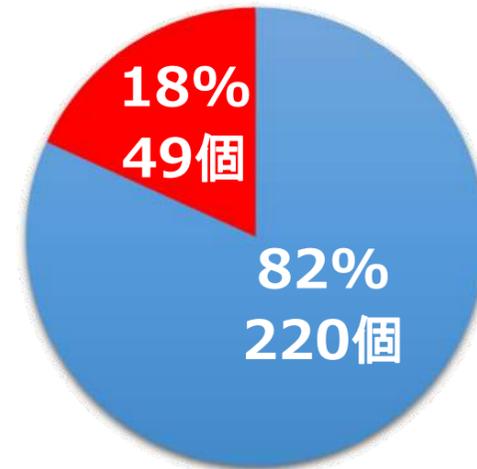
1- ① 高温超電導コイルの実用化技術開発（三菱電機）

目標：アクティブシールド型5 T-マグネットの製作

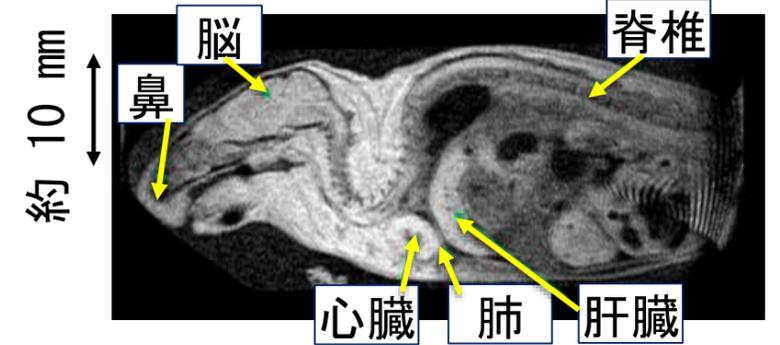
- ・コイル平均電流密度200 A/mm²超（7 T）
- ・低温超電導コイル比線材量30%以上低減
- ・磁場均一度10ppm未満、磁場安定度0.1ppm/hr未満

<実施内容>

- ①大口径高温超電導コイルの製作・評価技術
- ②超電導線材の磁化による磁場影響の計測技術に関する研究
- ③高温超電導磁化による磁場安定性の影響に関する研究
- ④高温超電導磁化による磁場均一度の影響に関する研究



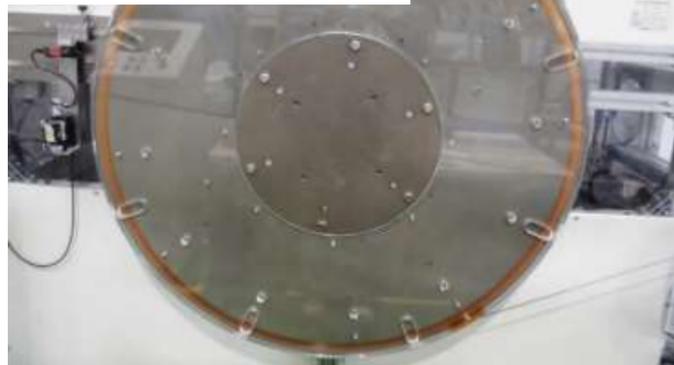
1/2サイズ3Tコイルの良品コイル・不良の内訳



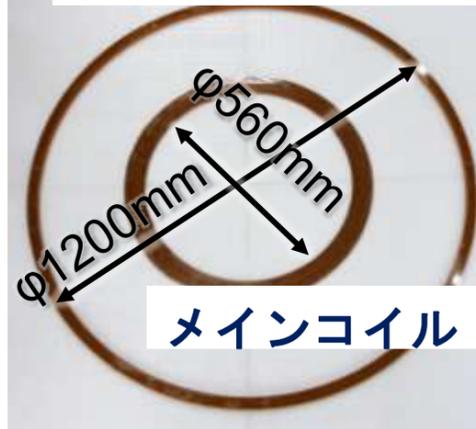
1/2サイズ高温超電導マグネットを用いて撮像したマウス成体の撮像写真
※画像は中心磁場約0.3 Tで取得

大口径コイルの製作技術

シールドコイル
巻線機

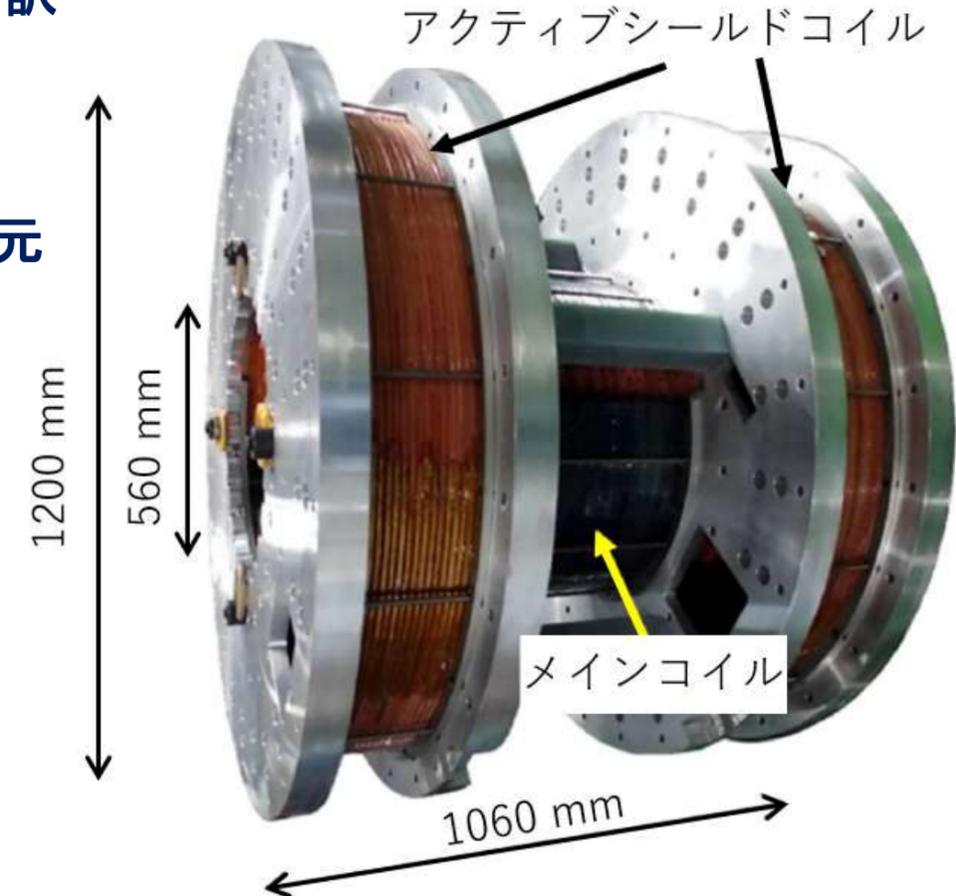


シールドコイル



1/2サイズ3T高温超電導コイルの設計諸元

内径	560 mm
最外径	1200 mm
軸長	980 mm
定格中心磁場	2.9 T
最大経験磁場	4.2 T
コイル電流密度	120 A/mm ²
REBCO線総長	70 km
磁場均一度	1.7 ppm 250 (mmDSV)



完成した3T高温超電導コイル

1- ① 高温超電導コイルの実用化技術開発（三菱電機）

目標：アクティブシールド型5 T-マグネットの製作

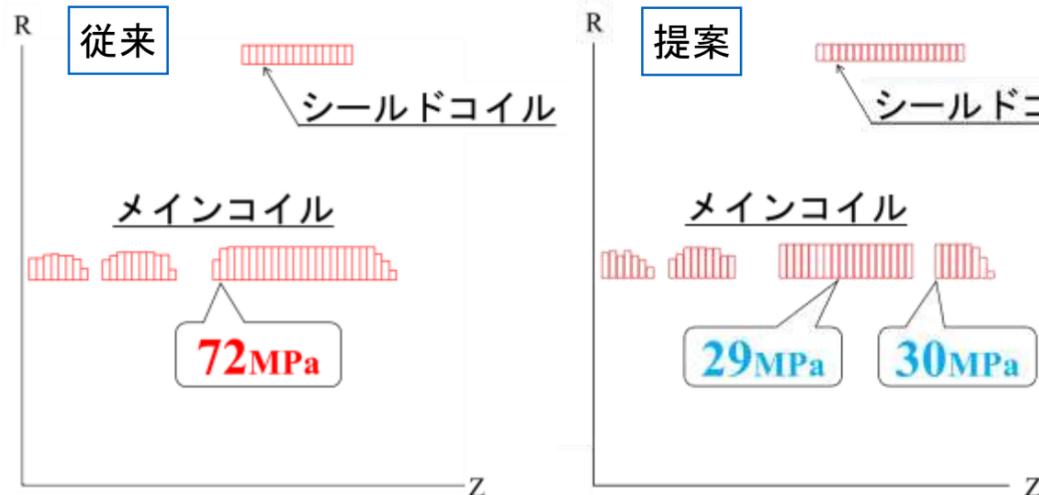
- ・ コイル平均電流密度 200 A/mm²超（7 T）
- ・ 低温超電導コイル比線材量 30%以上低減
- ・ 磁場均一度10ppm未満、磁場安定度0.1ppm/hr未満

<実施内容>

- ①大口径高温超電導コイルの製作・評価技術
- ②超電導線材の磁化による磁場影響の計測技術に関する研究
- ③高温超電導磁化による磁場安定性の影響に関する研究
- ④高温超電導磁化による磁場均一度の影響に関する研究

アクティブシールド型5 T-マグネットの設計

コイルに印加される電磁応力を低減するために、コイル配置を最適化



コイルに印加される電磁応力を半分以下に低減できるコイル配置を導出

アクティブシールド型5T-マグネットのコイル配置

7T検証コイルの設計・製作

小型・軽量の3T-MRI実現に向け、高磁場中(7T)で高電流密度(200A/mm²超)を実証

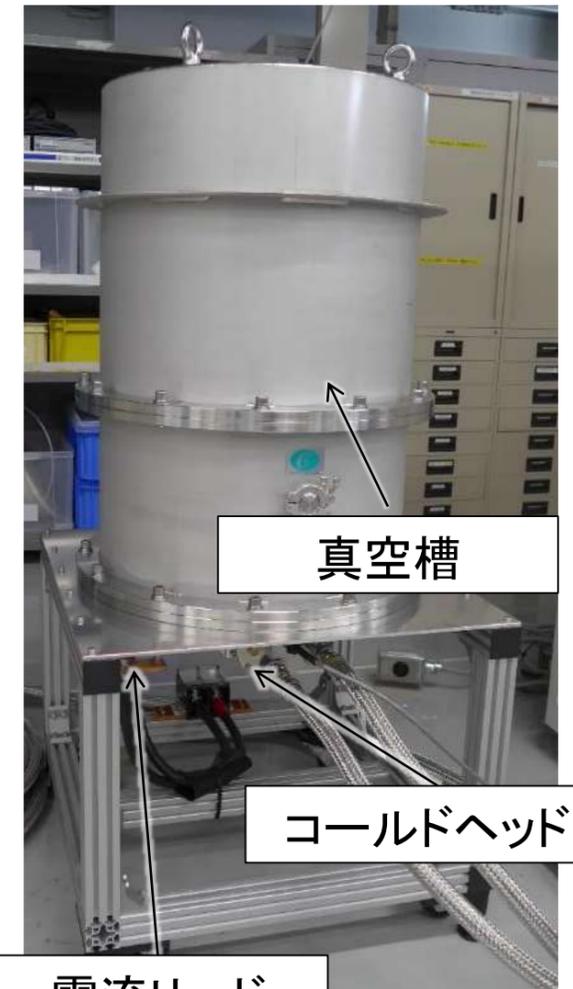
人工ピン導入線材の適用

7T検証コイルの設計諸元

内径	130 mm
外径	206 mm
コイル電流密度	200 A/mm ² 超
シングルパンケーキコイル数	24
REBCO線総長	約 3 km



試作したコイル



7T検証コイル用のクライオスタット

1- ② マグネットのシステム最適化技術開発 (三菱電機)

目標：3T-MRI超電導マグネット実用機の基本設計の完了

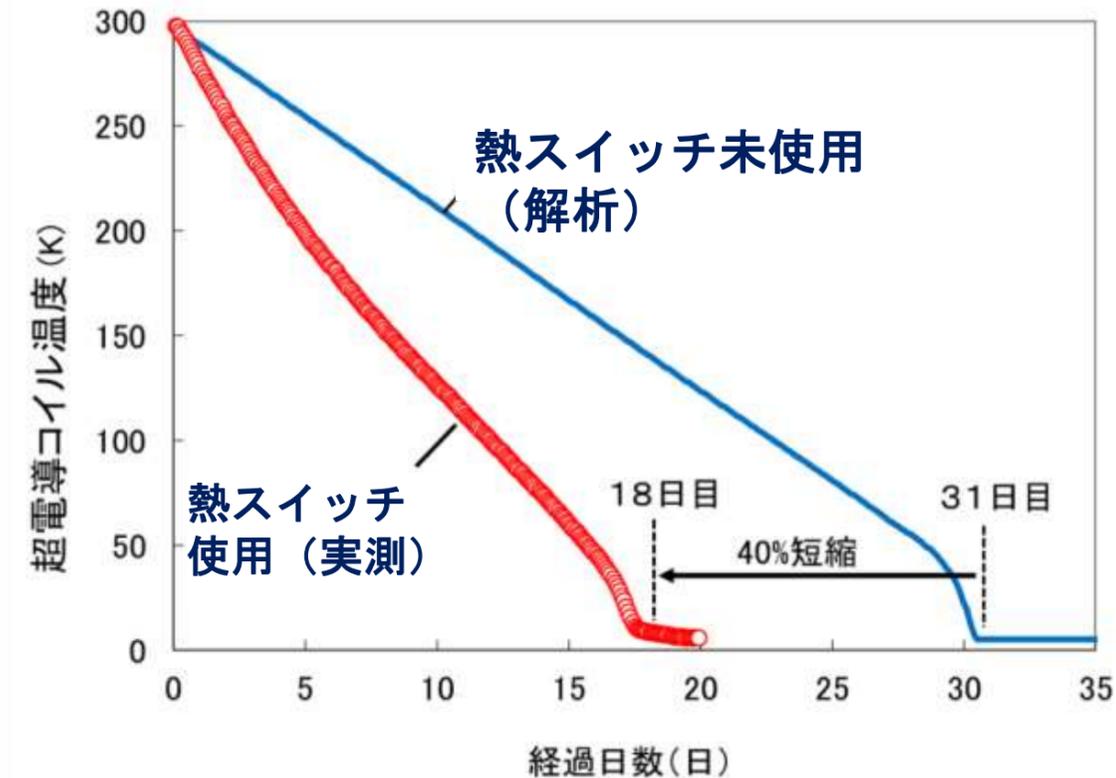
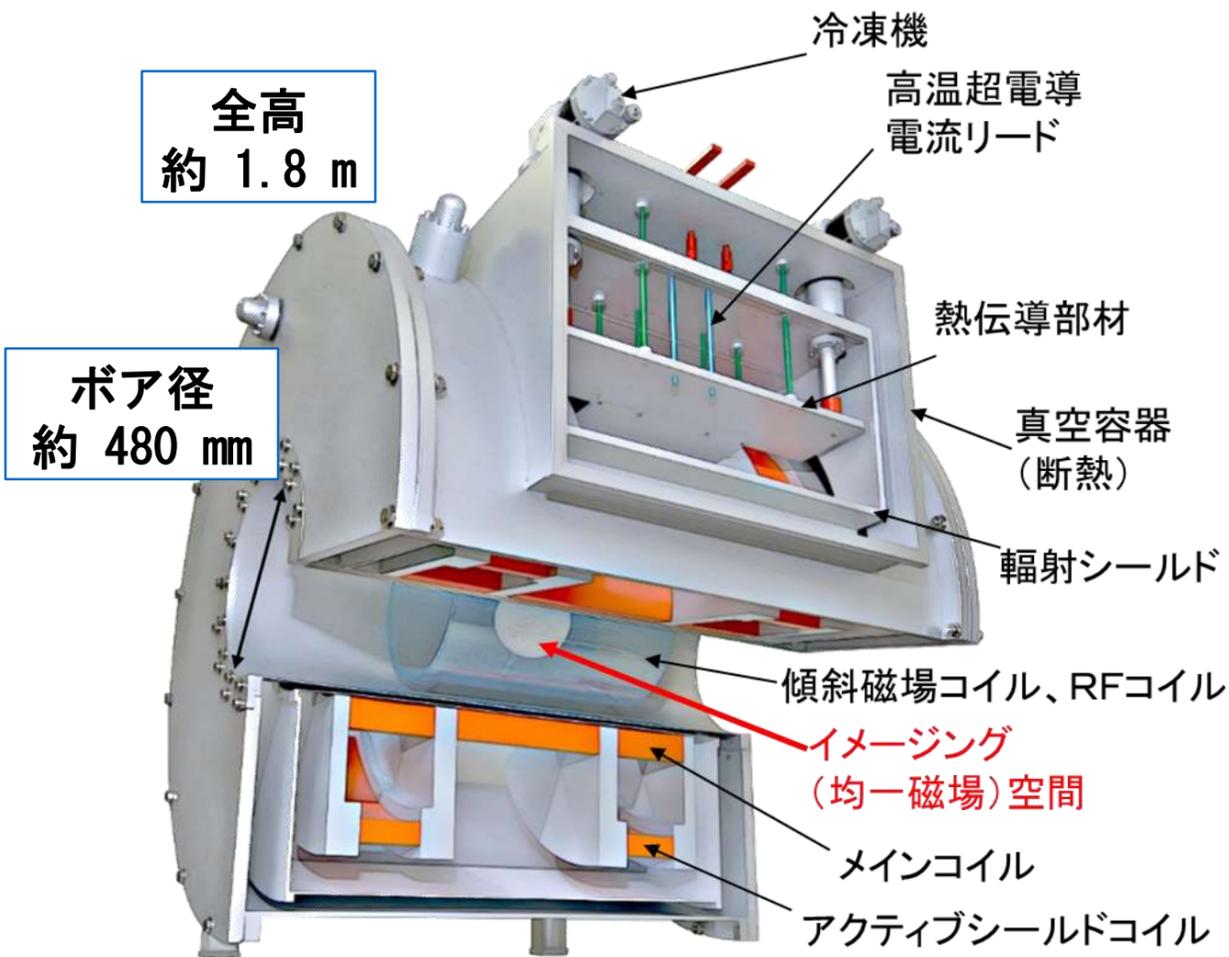
＜実施内容＞

- ①高温超電導マグネット最適化設計技術
- ②高安定磁場マグネットの励磁システムの開発
- ③MRI高温超電導マグネットのシステム最適化の検討

コイルの大型化に伴う初期冷却時間の増大
 1/2サイズアクティブシールド型3T高温超電導
 コイルの初期冷却時間は31日間要

⇒1stステージの寒冷を利用するため熱スイッチを使用する
 ⇒ 18日間に低減

* 熱スイッチは、機械式：1組、機械式+固体式：1組の並列使用



マグネットの初期冷却特性
 熱スイッチの適用で40%短縮

1/2サイズアクティブシールド 3Tマグネット構成図

冷凍容器 (クライオスタット) 写真

<高温超電導線材の超電導接続技術開発>

- 永久電流モードのMRIマグネットにおける3種類の接続（コイル内・コイル間・PCS）を想定し、マグネット製作現場で施工が容易な接続技術を開発する。
- 永久電流スイッチを含む閉ループモデルにより、超電導接続と永久電流モードを実証する。

開発目標：

接続点での抵抗値 $10^{-12}\Omega$ 以下の接続を実現

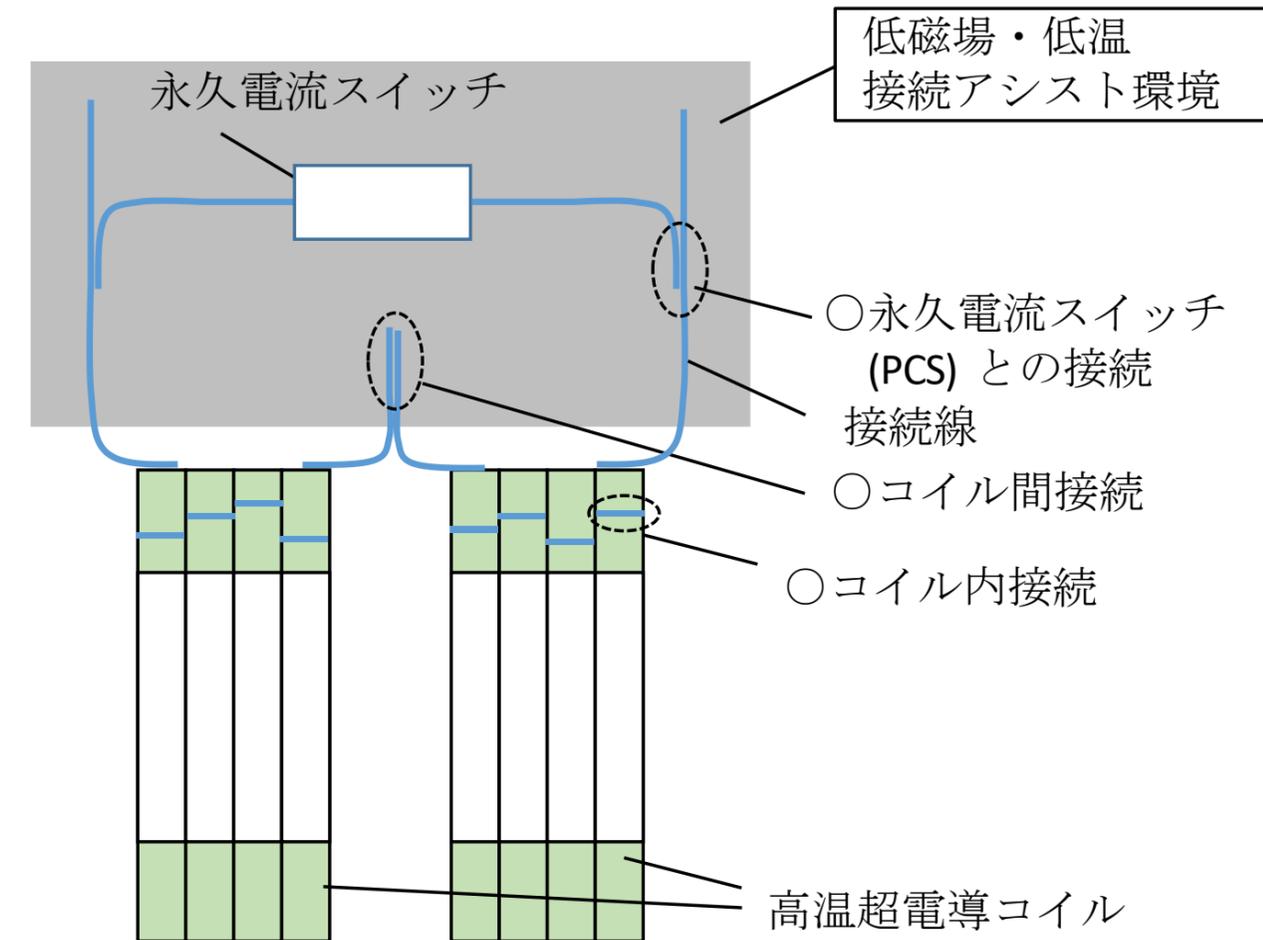
実施内容：

- 接続部を、接続に適した「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。
- イットリウム系高温超電導線材どうしを、異種超電導材料を介して接続。（Indirect接続）

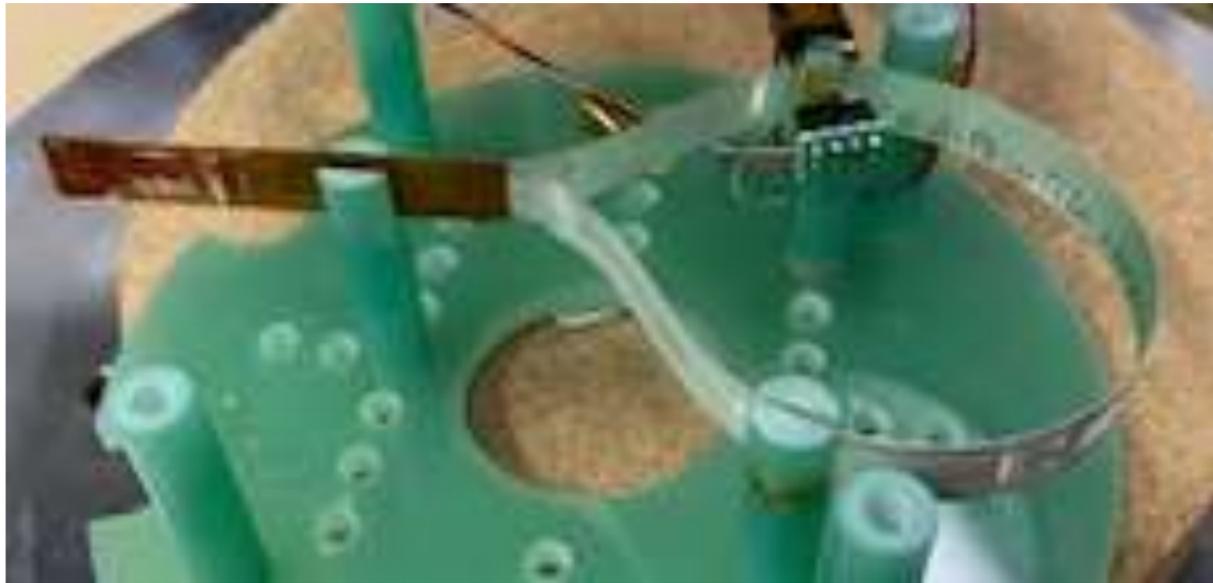
再委託先：

株式会社フジクラ 高温超電導層表面を接続に適した状態にする技術の開発、接続部の機械的強度評価

古河電気工業株式会社 NbTi等低温金属系超電導線材との接続技術開発、永久電流スイッチと組み合わせた永久電流の実証



高温超電導コイルの接続構成

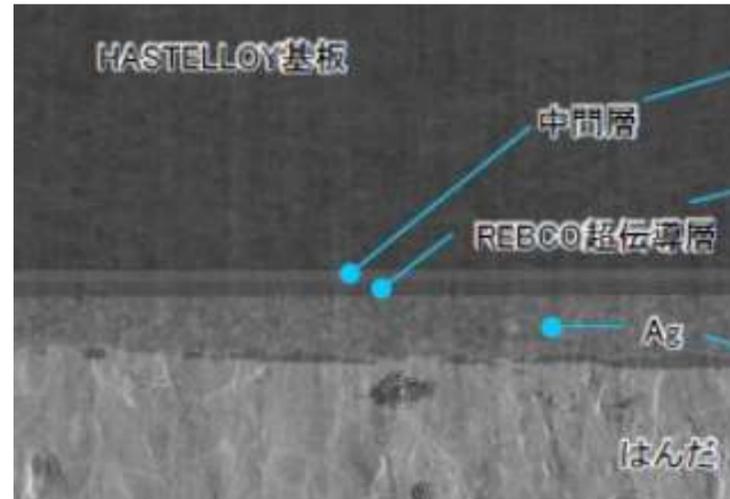
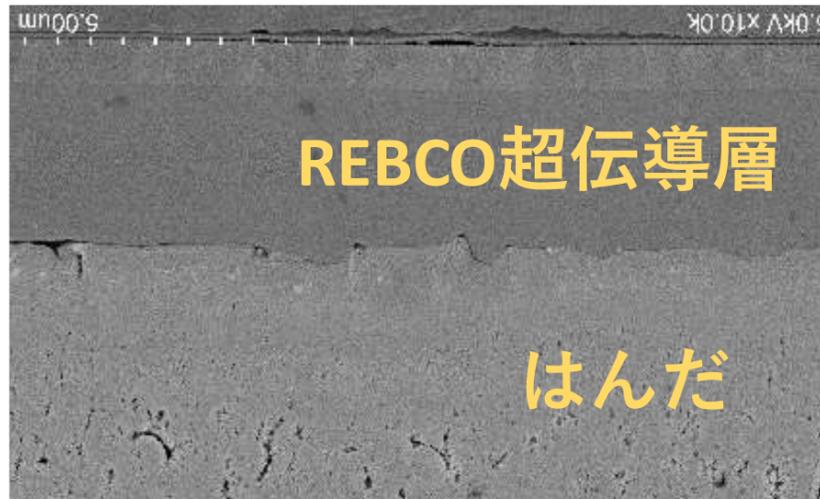
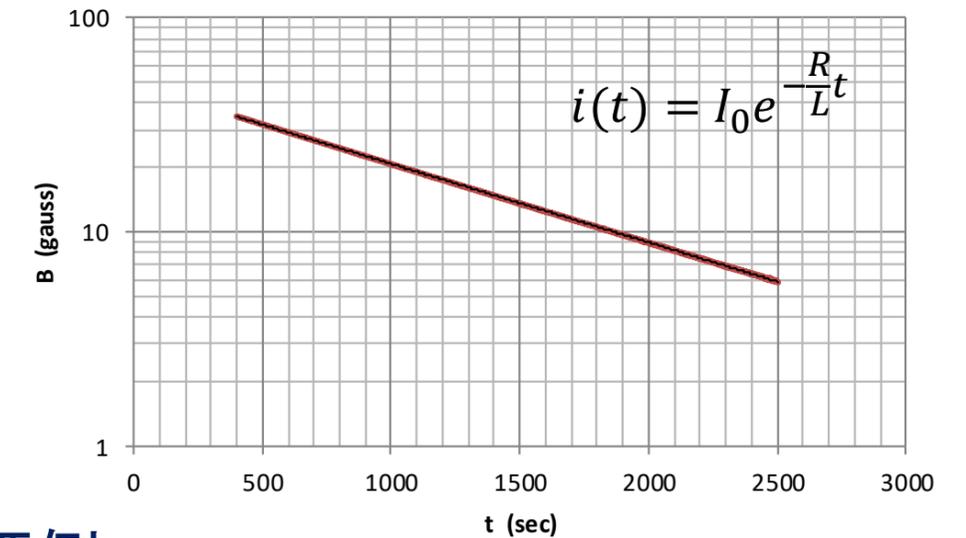


高温超電導線のループ接続試料
高温超電導層の面を貼り合わせるように接続



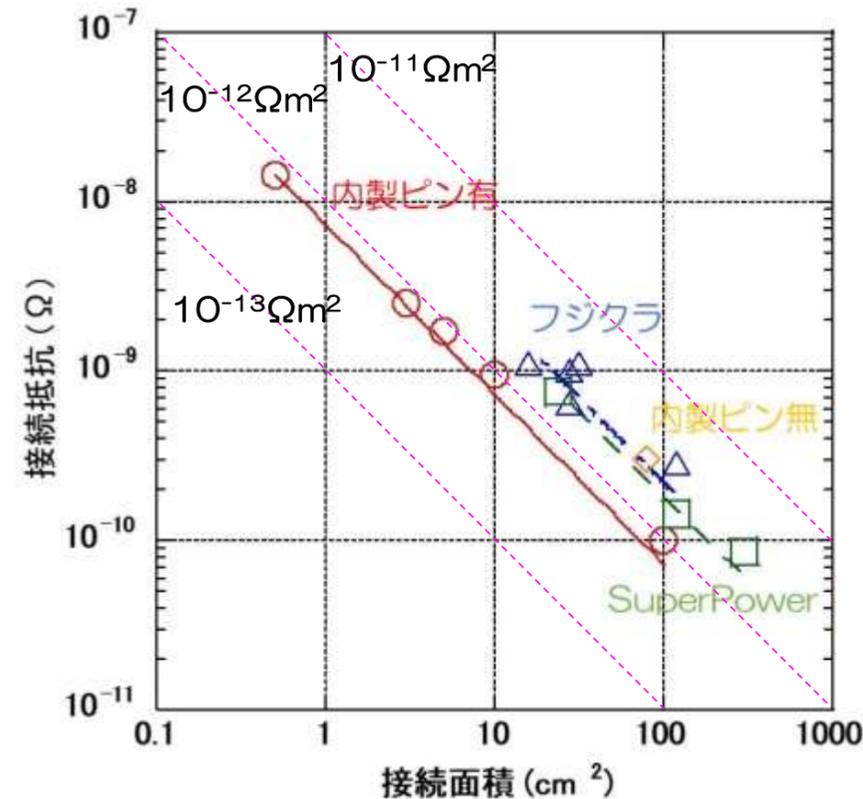
接続抵抗評価装置と評価例

ループ試料に誘導電流を誘起し、その減衰時定数から接続抵抗を評価



接続面の断面写真

左: REBCO超電導層とはんだの直接接合
右: 銀保護層を介したはんだ接続



← 各種高温超電導線材の接続抵抗評価例

長距離に渡って均一な接続が可能な装置を開発。線材の製法や種類によって接続抵抗が異なる

<高温超電導コイルの永久電流モードに対する保護・焼損対策技術の開発>

○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を開発する。

開発目標：

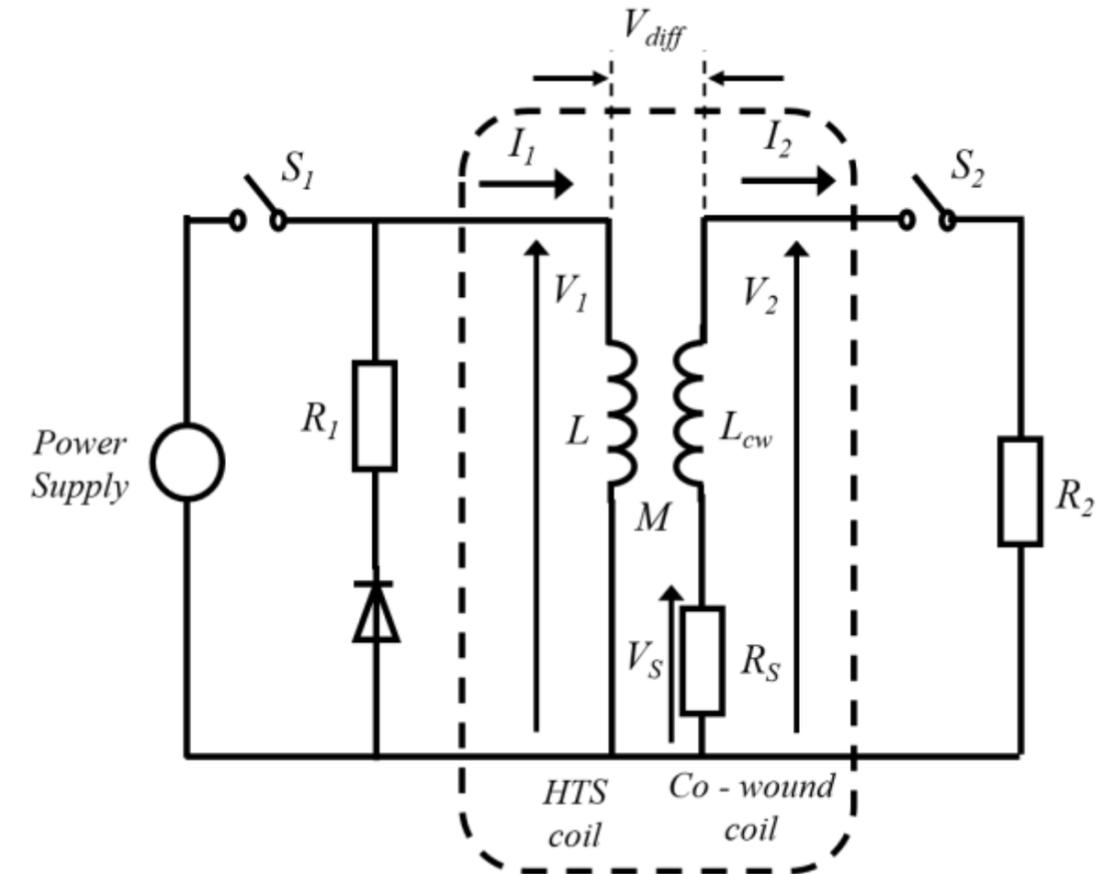
高温超電導コイルの汎用的な保護・焼損対策技術の確立

実施内容：

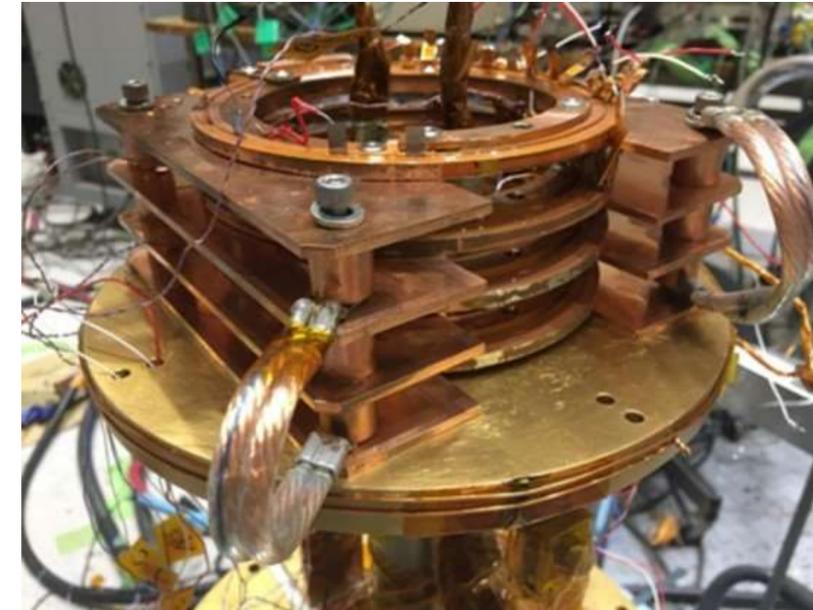
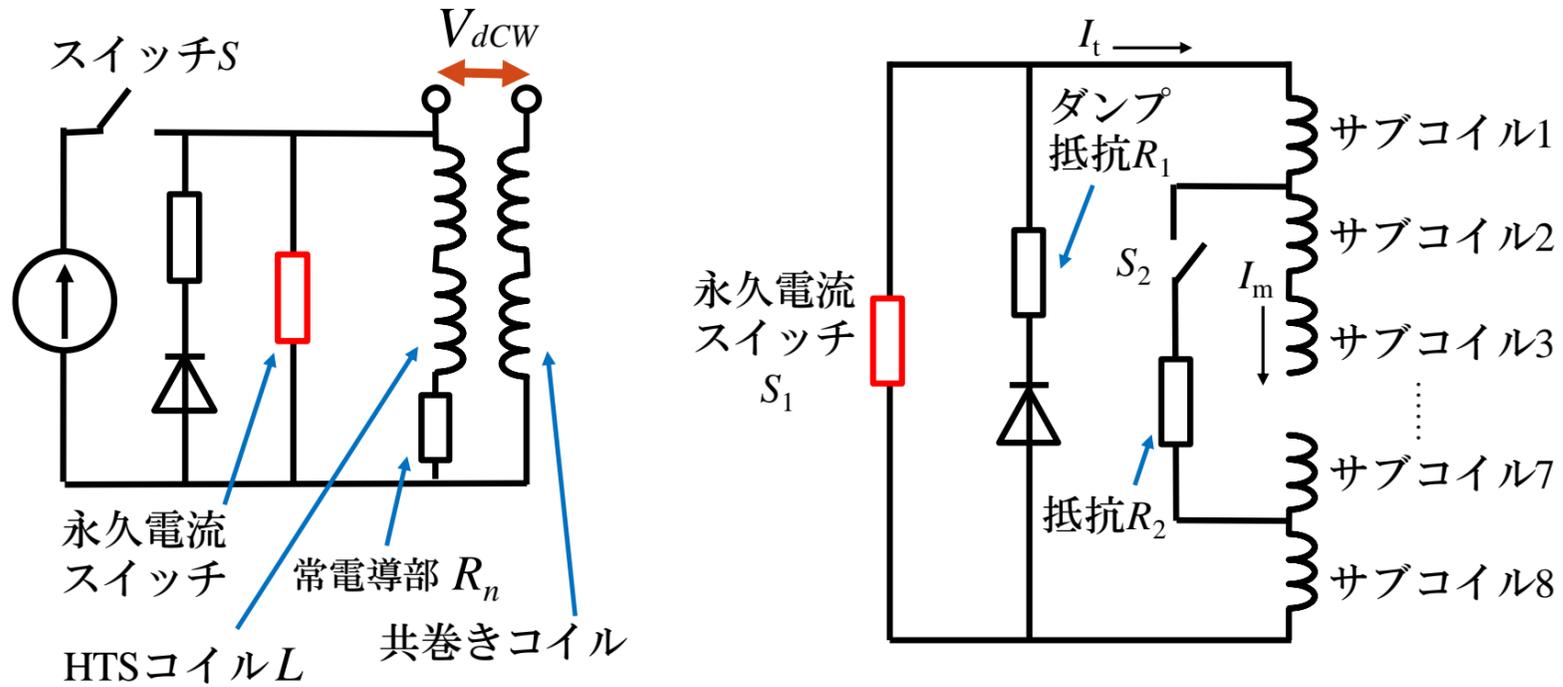
- 『共巻き法』 高温超電導線と共に電氣的に絶縁された銅テープを巻き込み、これを利用して高感度で異常検出を行う。
- 『抵抗ショート法』 異常検出後、異常が起きたコイルの電流を、回路切替により瞬時に他の健全なコイルに移し、ホットスポット（常電導部分）の成長を抑制する。

再委託先：

上智大学 異常検出・保護の実験的検討と数値解析



『共巻き法』と『抵抗ショート法』を組み合わせた保護回路図



← 原理検証用の高温超電導コイル

高温超電導線と薄い銅テープを共巻きしたコイルを積み重ね、極低温冷凍機により冷却。通電しながら、ヒーターを使って超電導状態を破り、異常を模擬。新しい保護技術の効果を検証。

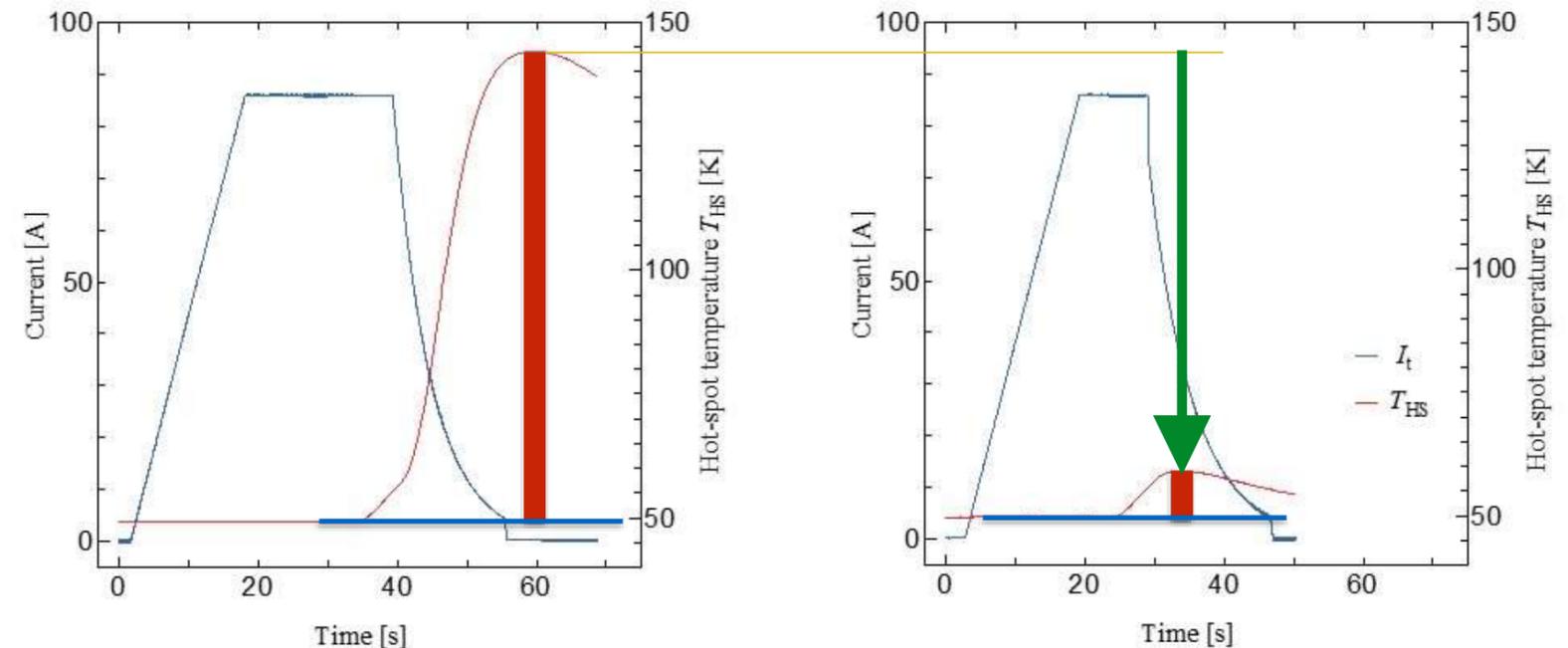
『共巻き法』と『抵抗ショート法』の原理

共巻き導体により誘導分をキャンセルし、常電導転移による微小抵抗成分を高精度に検知可能

高温超電導コイル間の高い電磁結合を利用して、異常が検出されたコイルの電流を速やかに他の健全なコイルに転流

ホットスポット抑制効果→

異常を検出後、従来法による保護では、電流減衰後も常電導部が成長し、高い温度のホットスポットが生じる。抵抗ショート法を用いると、ホットスポットの温度は大幅に抑制される



従来法

抵抗ショート法

委託事業者 古河電気工業株式会社
再委託先 国立研究開発法人物質・材料研究機構、
ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社
助成事業期間 2016年7月5日～2019年3月31日（3年間）

<背景>

- ・「ヘリウム危機」対策として、液体ヘリウムを使わない高温超電導MRIの開発が進められている。
- ・高温超電導MRIでは超電導線の超電導接続ができないために、従来のMRIで用いられている永久電流運転ができず、その開発が望まれている。

<課題>

- ・高温超電導MRIで使用される希土類系超電導線材（REBCO線材）の超電導接続の実現。
- ・マグネット製造現場で実現可能な超電導接続技術の確立、歩留まりの把握、劣化に関する評価が必要。

<最終目標>

- ・通電電流 100A、 $1 \times 10^{-12} \Omega$ 以下の超電導接続を安定的に実現する。

MRI マグネットシステム

MRI は電気抵抗ゼロのコイルに電流が流れ続け電源が不要な永久電流モードで運転される。

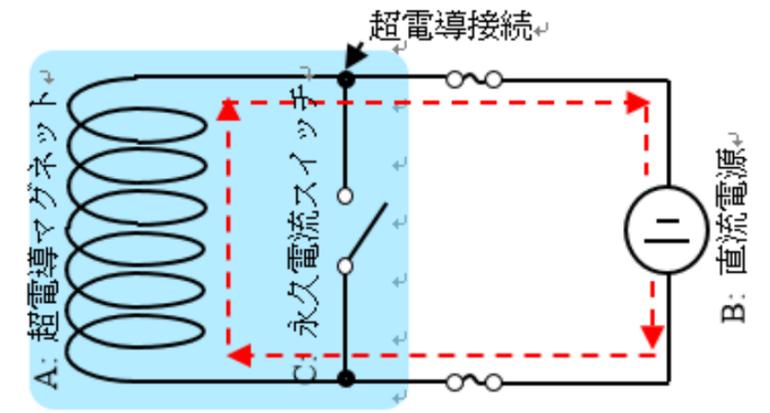


写真引用 : <http://www.photo-ac.com>

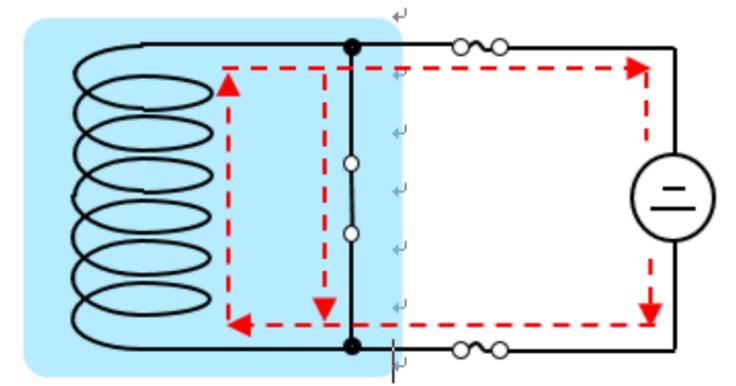
一般的なMRIマグネットの仕様

磁場	3 T
磁場減衰率	0.1 ppm/h
インダクタンス	114 H
接続数	12 個
電流	224 A
接続抵抗	$1 \times 10^{-12} \Omega$

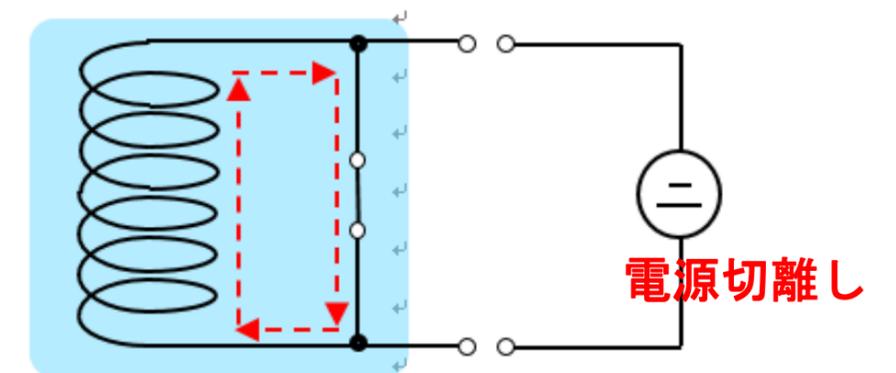
永久電流運転



(a) Current feeding from current source (PCS OFF)



(b) Current decreasing in current source (PCS ON)

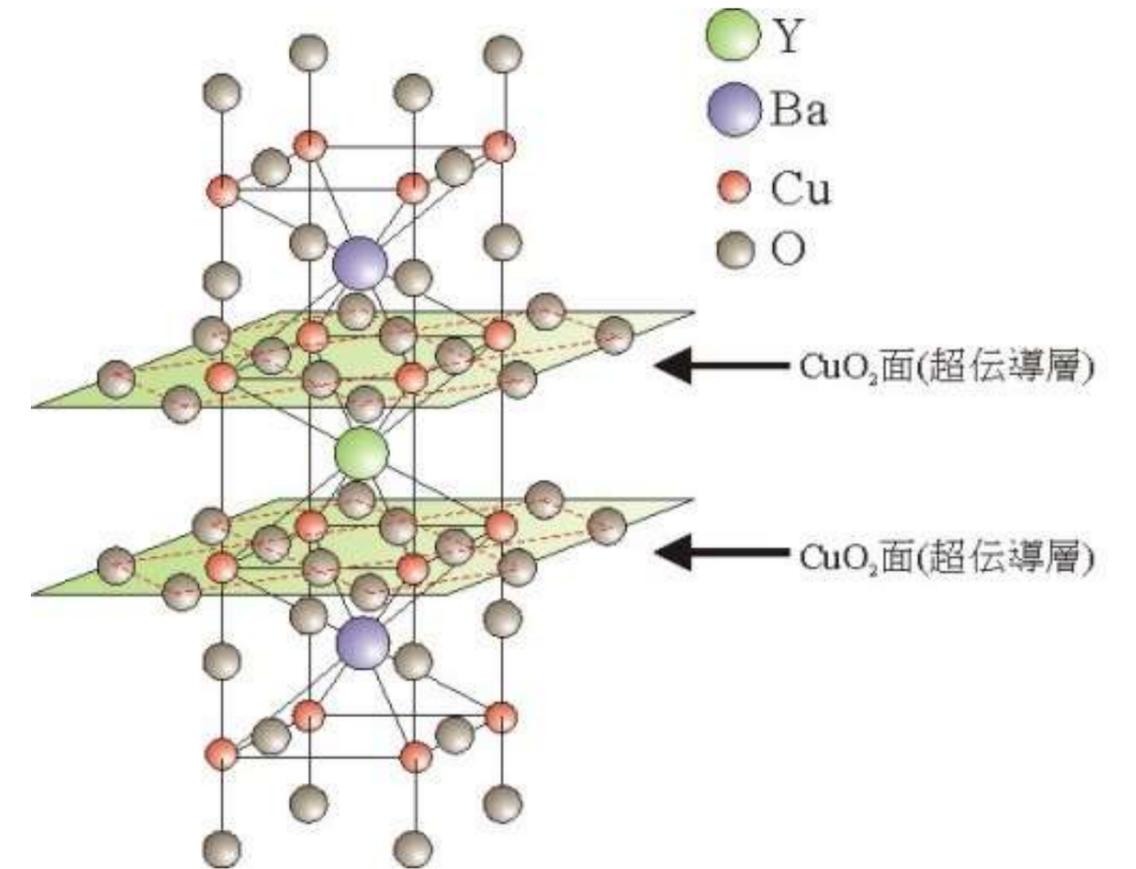
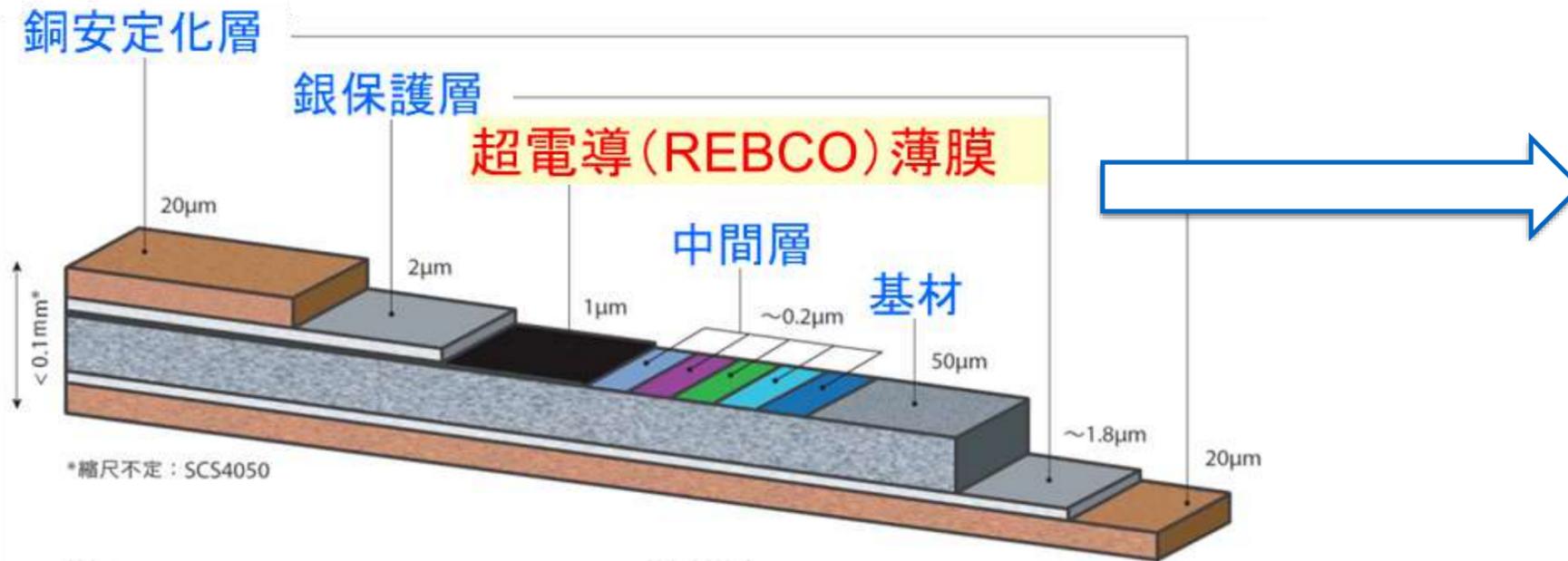


(c) Persistent current mode

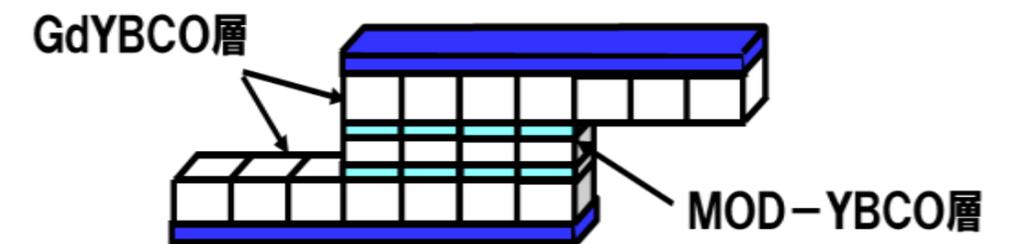
高温超電導線材（REBCO線材）の超電導接続技術開発

＜実施内容＞

- ① 超電導層を直接接続することで、低抵抗を実現する。
- ② 永久電流を小型コイルを用いて確認する。

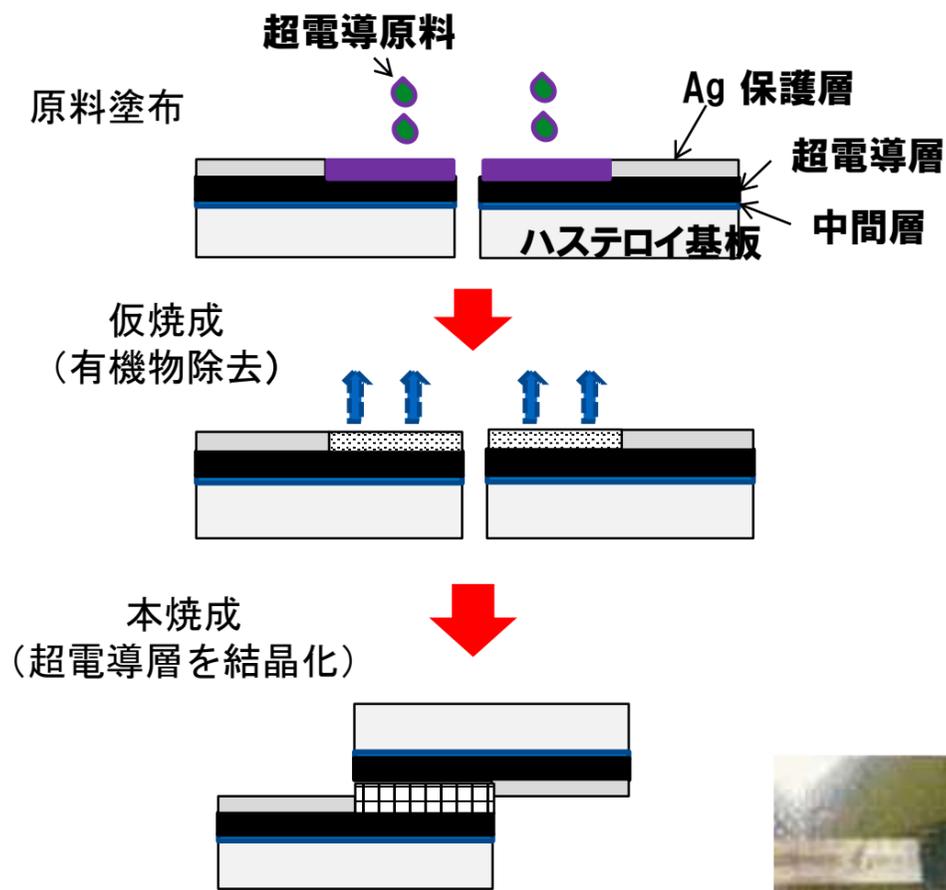


2つの超電導層の結晶を成長させて、結晶をつなげて接続する。



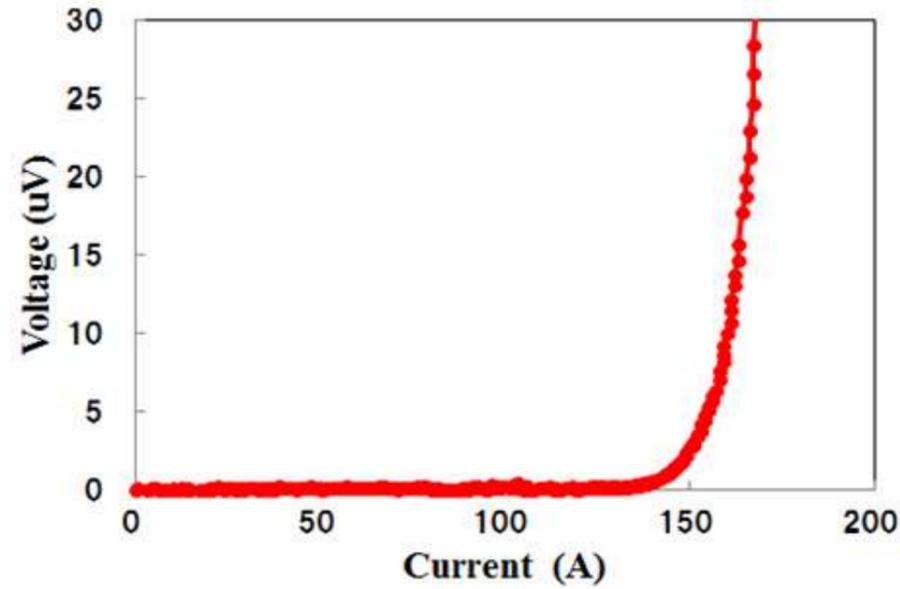
超電導接続技術の開発

◆高温超電導線の接続プロセス

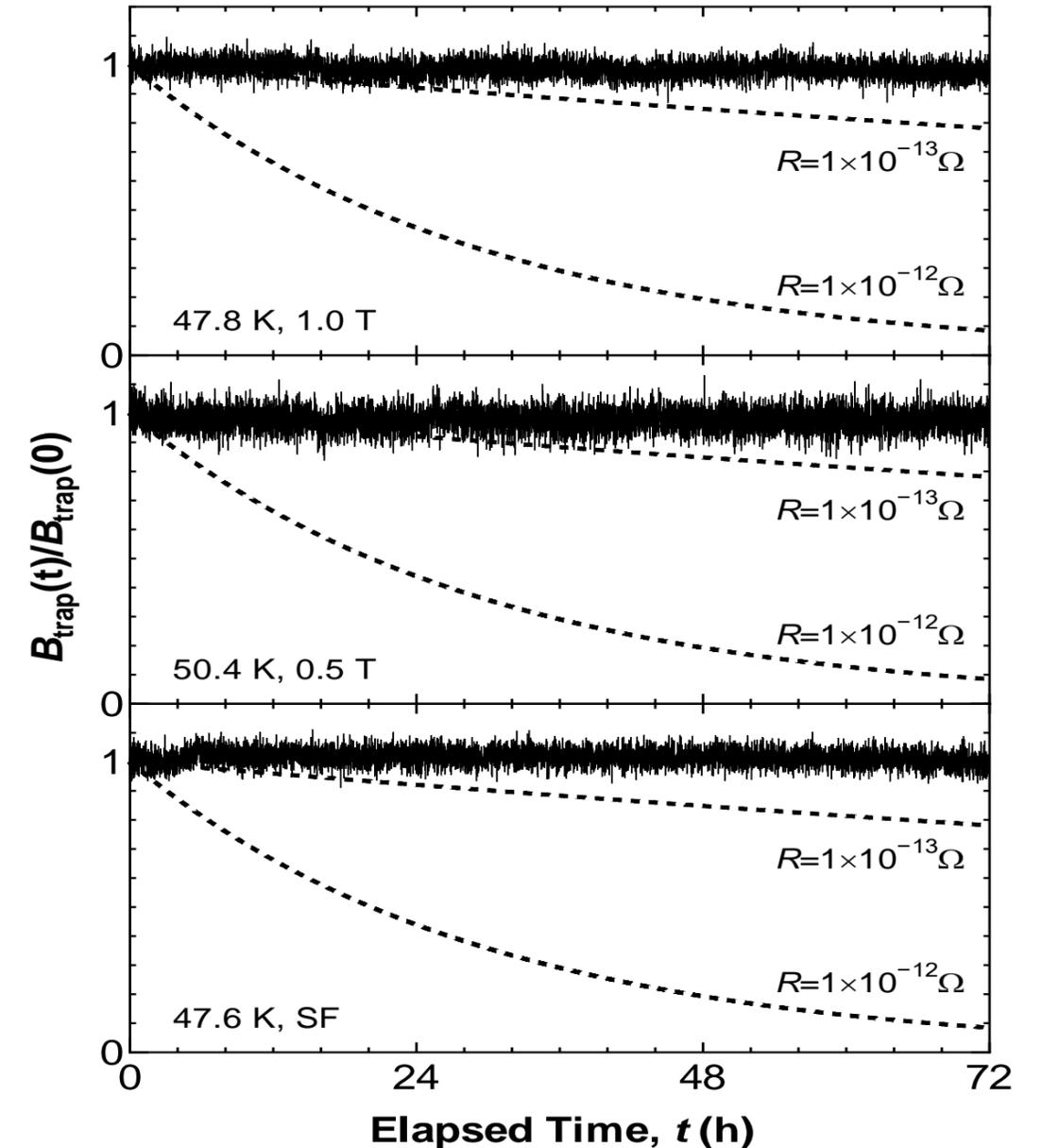


超電導接続

◆超電導接続技術の特性評価

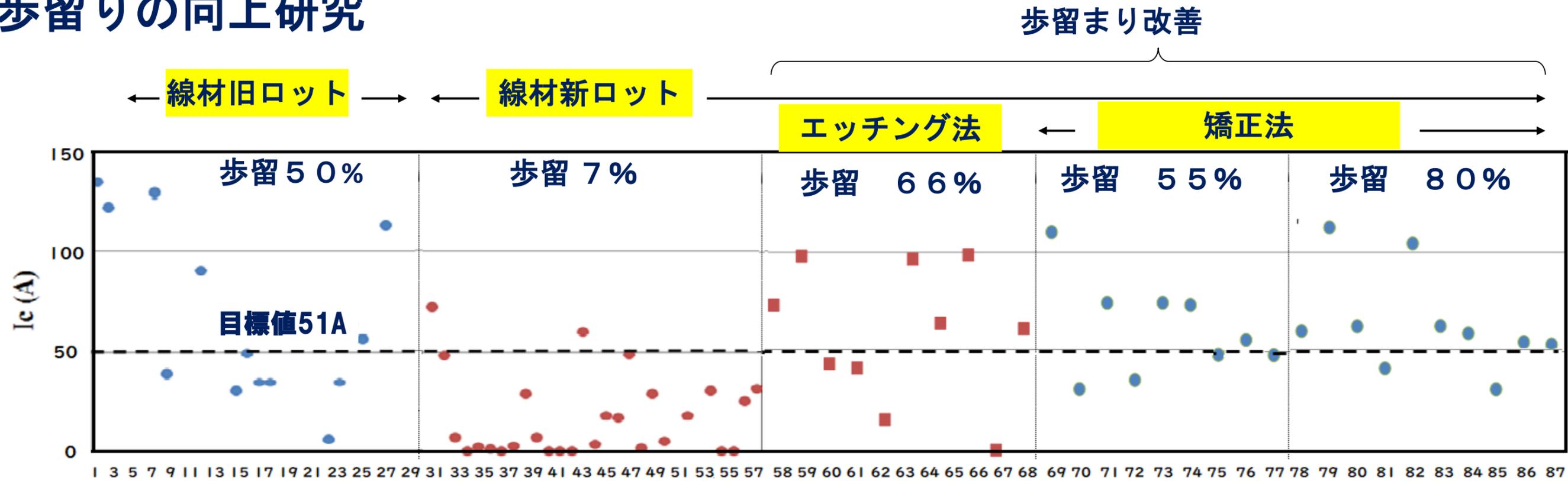


150A以上の通電特性を達成



50K, 1T, 100Aで $1 \times 10^{-13} \Omega$ 以下を達成

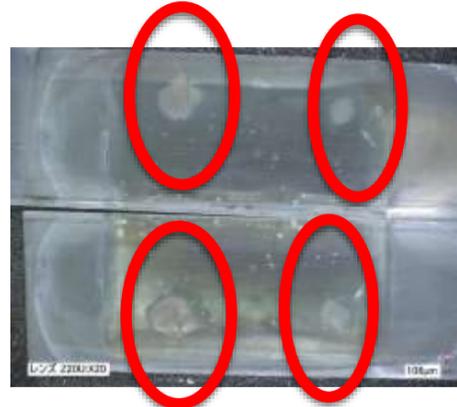
歩留りの向上研究



接続条件の最適化

- ・ 接触圧力
- ・ 処理温度・時間
- ・ 溶液濃度

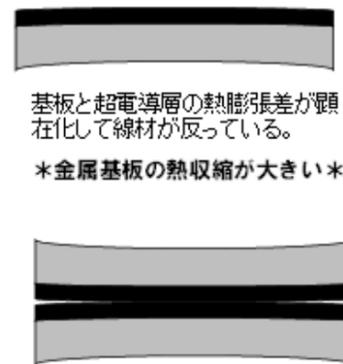
接続面の接触部分 (Ic = 16 A)



低下原因
線材の「たわみ」で、2本の線の接触が不十分

劣化原因

厚い超電導層の場合



反りによって接続が阻害される

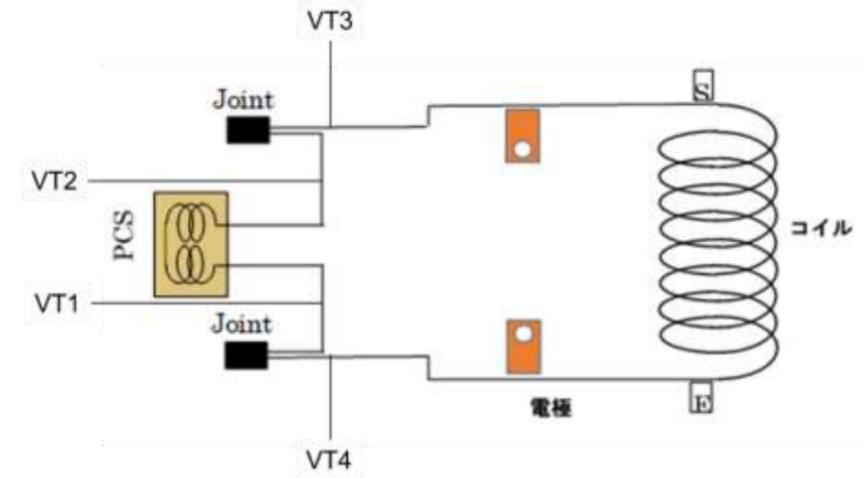
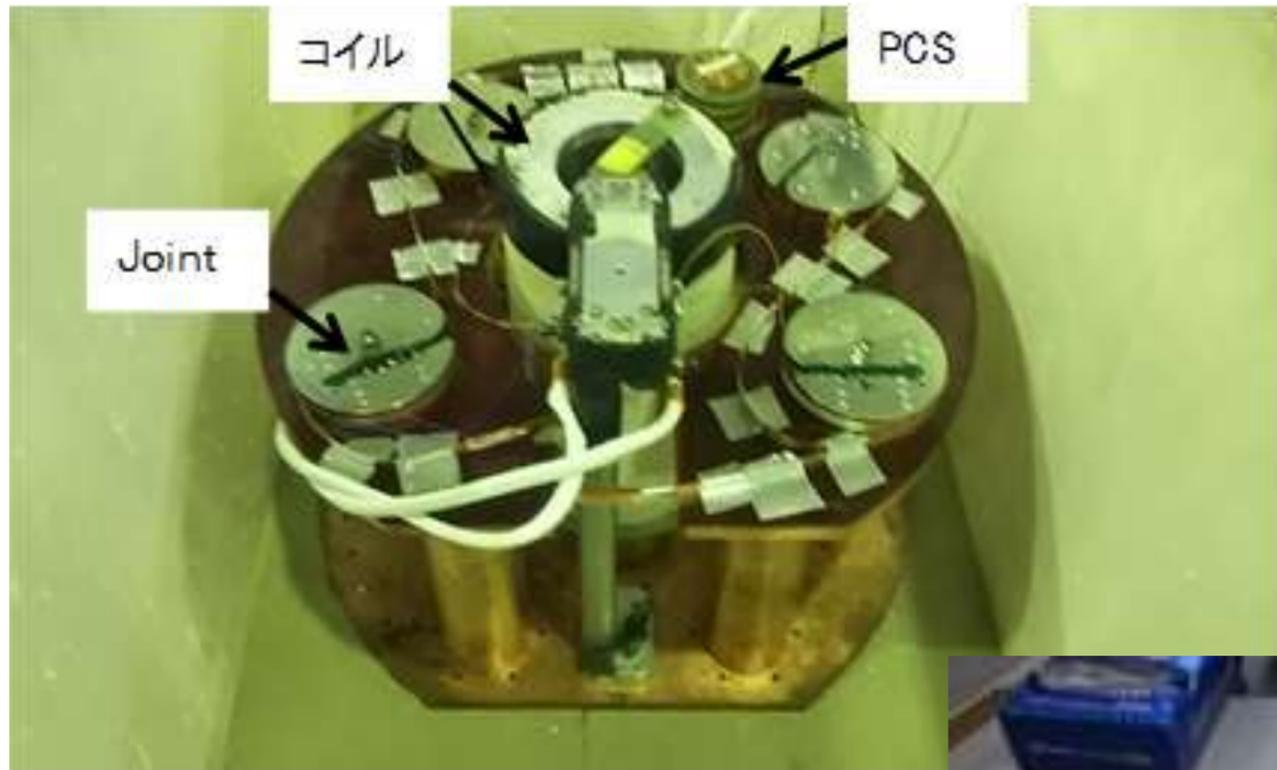
改善

線材の「たわみ」の矯正、接触の構造変更により、2本の線の接触面積向上

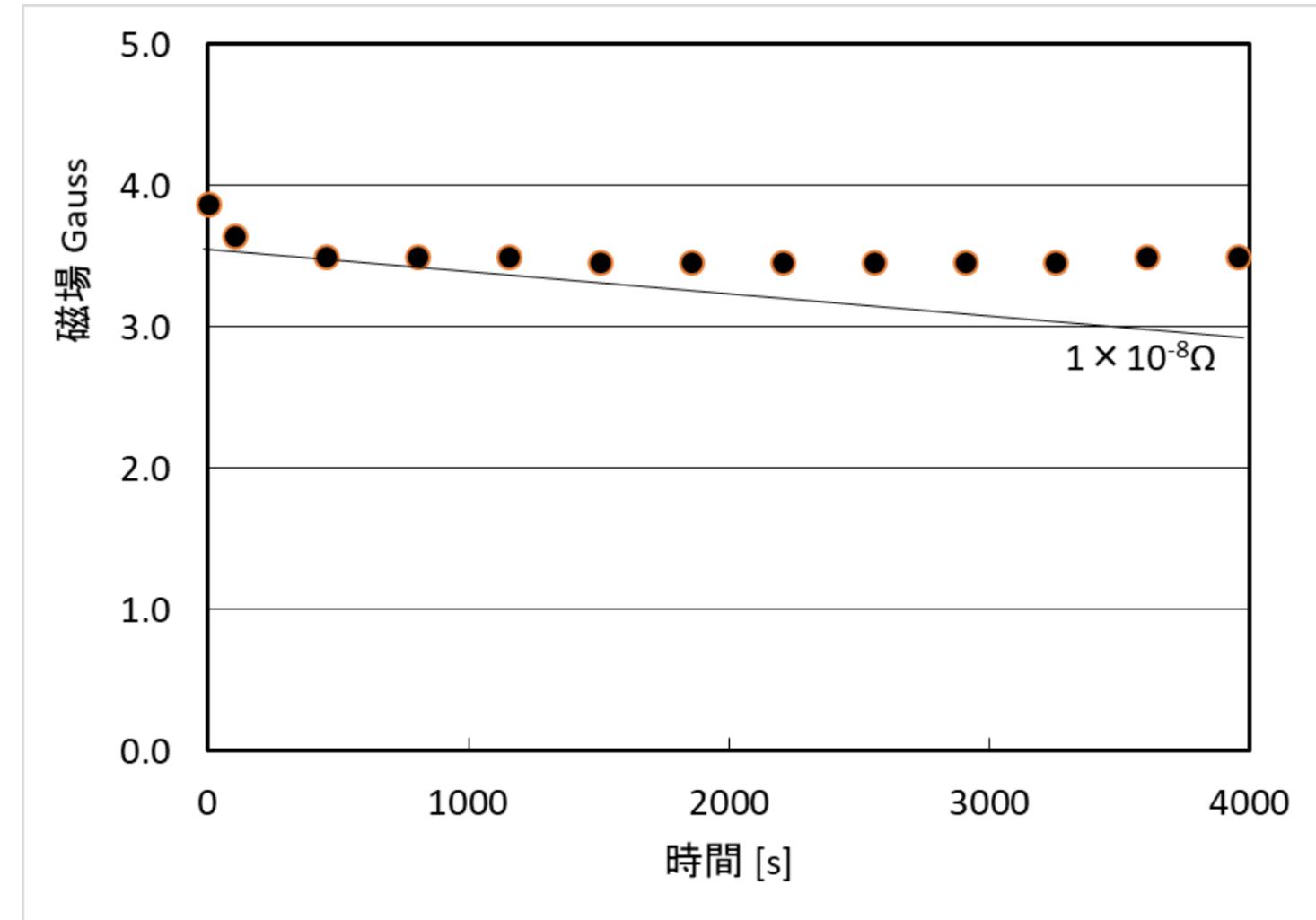


接続面の接触部分 (Ic = 134A)

超電導コイルを用いた超電導接続の検証



超電導接続時の実施



永久電流モード試験の結果

小型コイルを用いた永久電流システム

委託・助成事業者 株式会社フジクラ
 委託事業者 国立研究開発法人産業技術総合研究所
 共同実施先、委託先 九州大学（共同実施先、委託先）、東北大学（委託先）
 再委託先 京都大学
 助成事業期間 2016年7月5日～2019年2月28日（3年間）

<背景>

- ・超電導マグネット最大の市場である医療用MRI（国内メーカーシェア2割）において、高精細画像診断の需要に伴い高磁場化が進行し、小型軽量化ニーズがある。
- ・ヘリウム資源の逼迫に伴う資源セキュリティ問題がある。

<課題>

- ・ヘリウム冷媒フリーかつ省エネで熱安定性に優れる小型マグネットシステム実現のため、高温高磁場で高 J_c を発揮する線材が必要。（目標① $J_e > 400 \text{A/mm}^2$ @30K、7T）
- ・上記コイル巻線に十分に耐える長尺で特性均一かつ機械的信頼性を有する線材が必要。（目標② I_c 低下率 < 0.15 for 1km）
- ・高精度安定磁界発生のために低損失構造の検討が必要。（目標③ 損失1/10以下）
- ・高い生産性に基づく競争力ある線材が必要。（目標④ 製造線速50m/h）

<最終目標>

- ・伝導冷却30K運転でかつ1.5T級程度に小型化した競争力ある3.0T級ヒト全身MRI高精度マグネットを構成し得るREBCO系超電導線材の開発

目標と成果①②（委託事業）



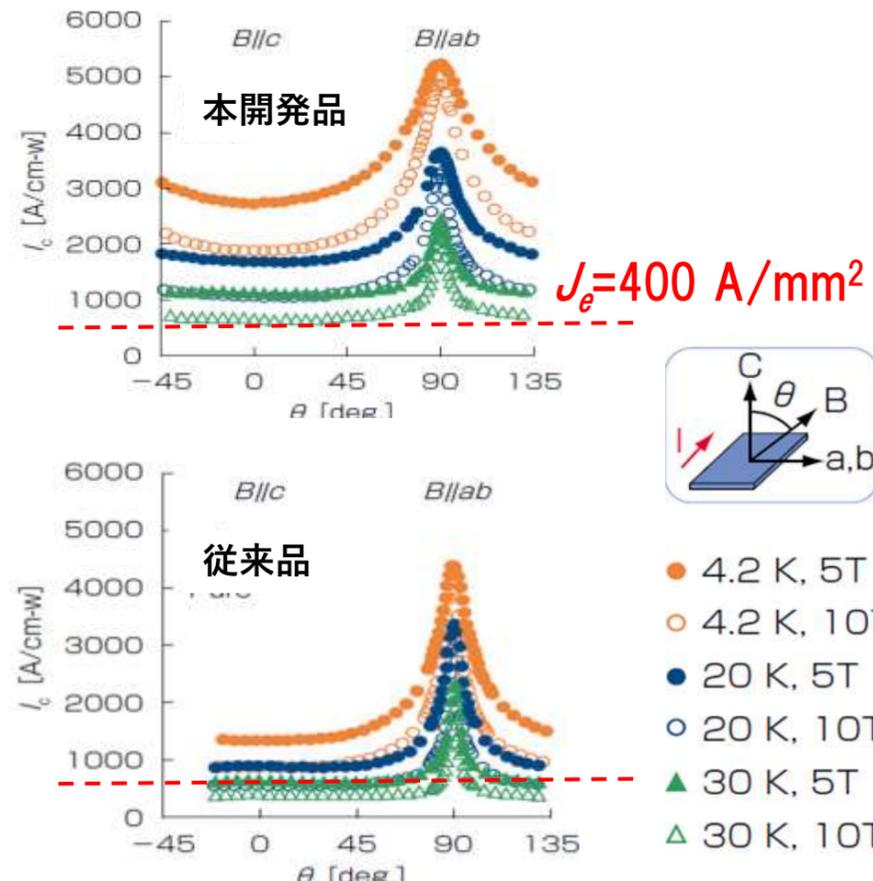
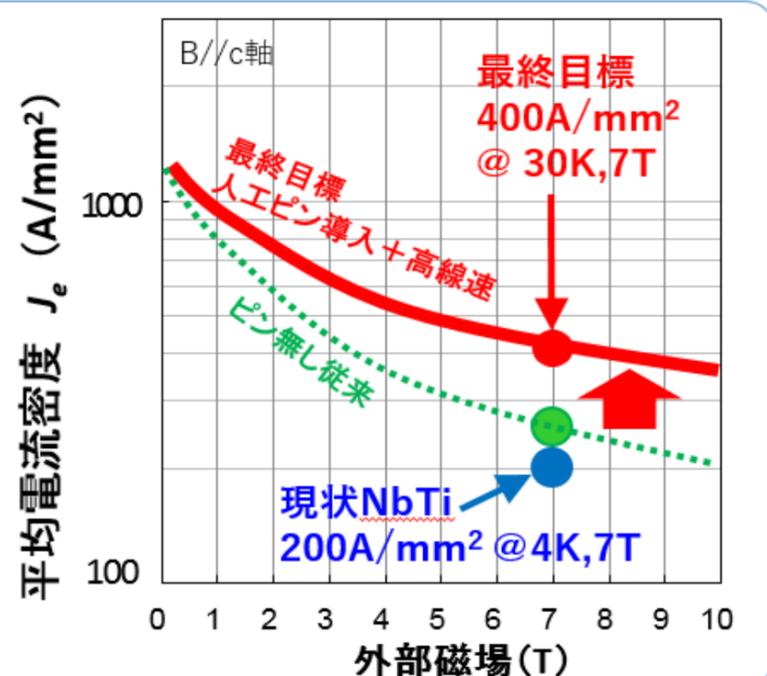
②長尺線材性能の均一性向上技術開発

①高磁場コイル用臨界電流密度向上技術の開発

最終目標	成果
温度30K、磁場7Tにて平均電流密度 400 A/mm² 以上	温度30K、磁場7Tにて平均電流密度 527 A/mm² を達成

目標達成の主要アプローチ

- ◆超電導層：人工ピン長尺均質導入

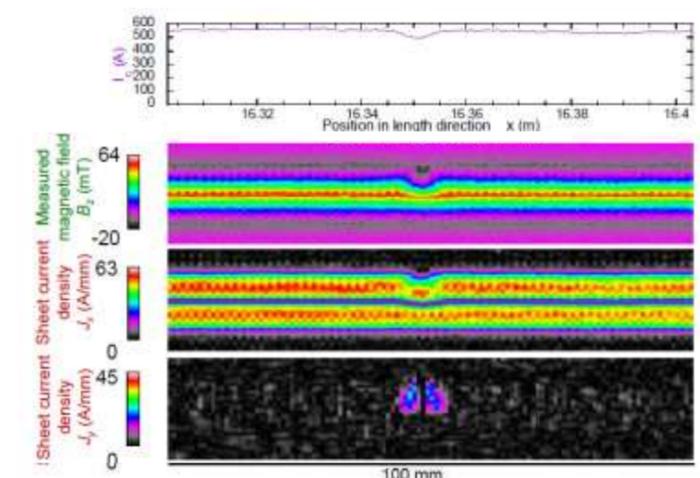
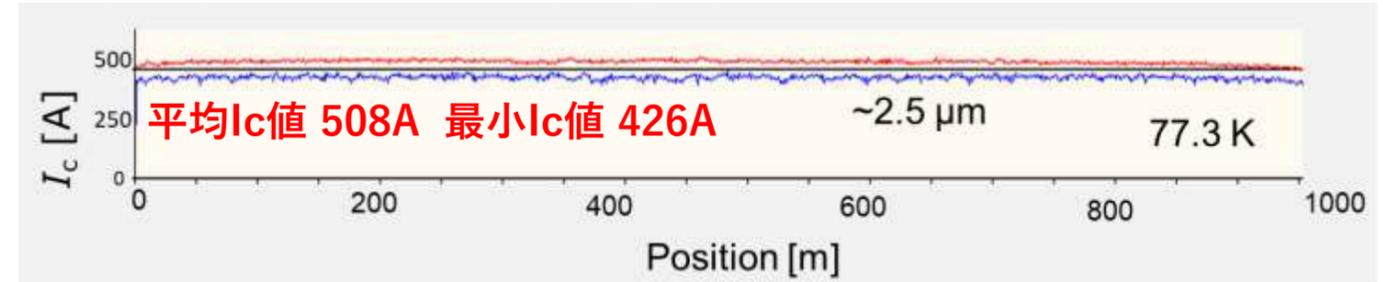


臨界電流値 I_c の磁場角度依存性

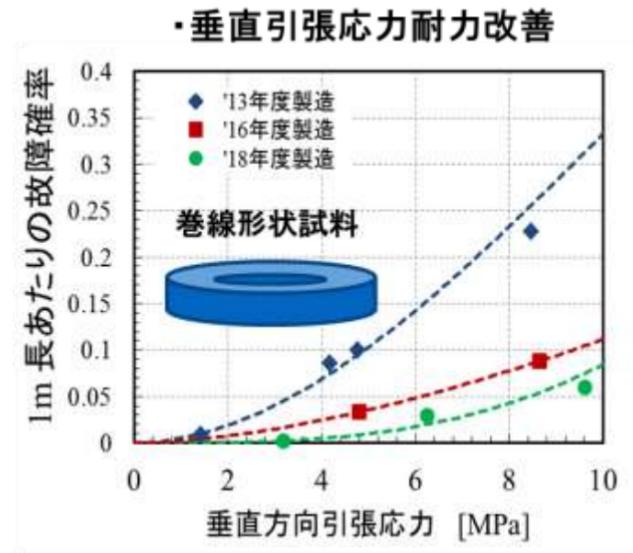
最終目標	成果
1kmにおける臨界流の低下率を0.15未満 機械的信頼性改善	1kmにおける臨界電流の低下率 0.15~0.16 達成 機械 強度バラツキ改善 等

目標達成の主要アプローチ

- ◆特性低下因子の解明
- ◆製造工程中的特異性低下因子排除
- ◆工程クリーン化等の施策



局所欠陥部 磁化分布測定（九州大学）



目標と成果④（助成事果）

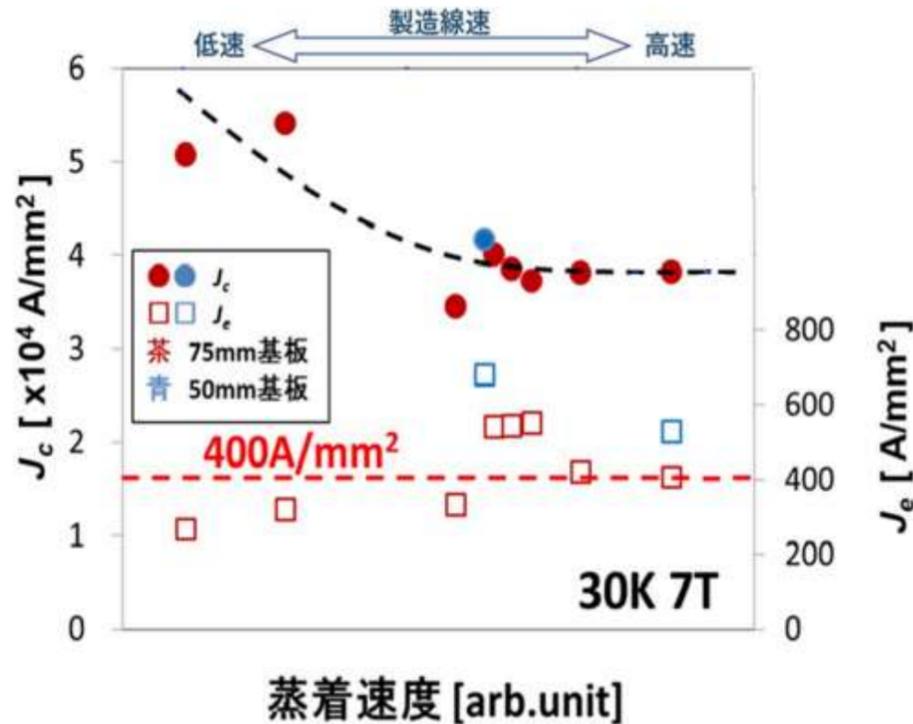


④高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発

最終目標	成果
完成品の単位時間あたり生産長を50m/hr以上	平均電流密度 > 400A/mm ² を維持し50m/hr達成

目標達成の
主要アプローチ

- ◆超電導層人工ピン形成条件改善
 - 超電導層成膜設備の温度分布制御
 - 高線速時に高特性維持



目標と成果③（委託事果）

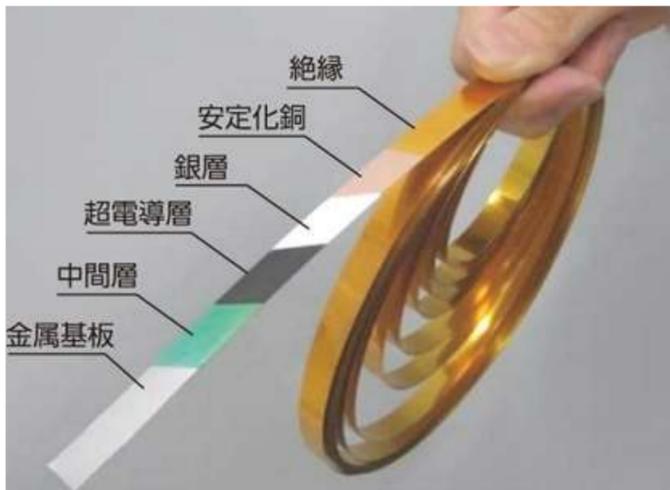
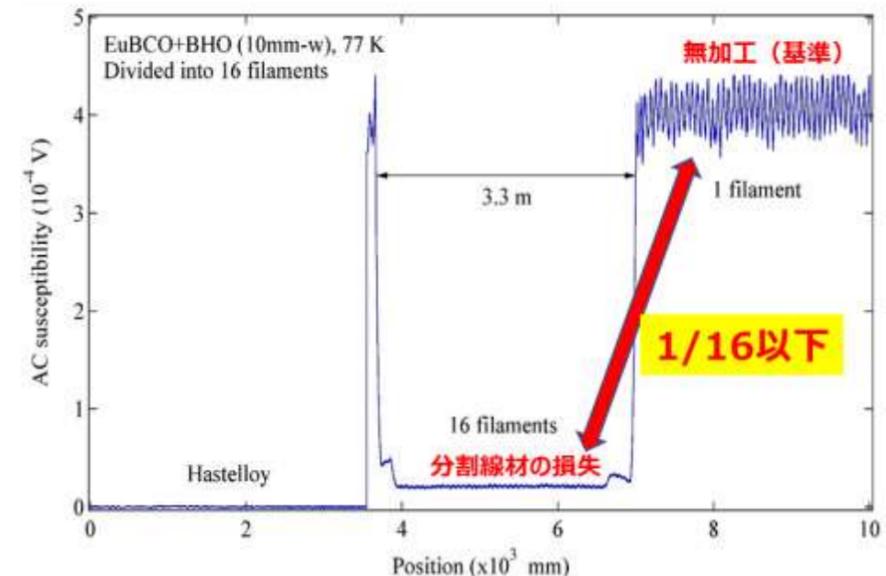
③高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発

（最終目標）	（成果）
安定化磁場発生用線材として交流損失の低減を達成（高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が1/10）	細線化及び撚り線加工による交流損失の低減を達成（高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が1/10を達成）

目標達成の
主要アプローチ

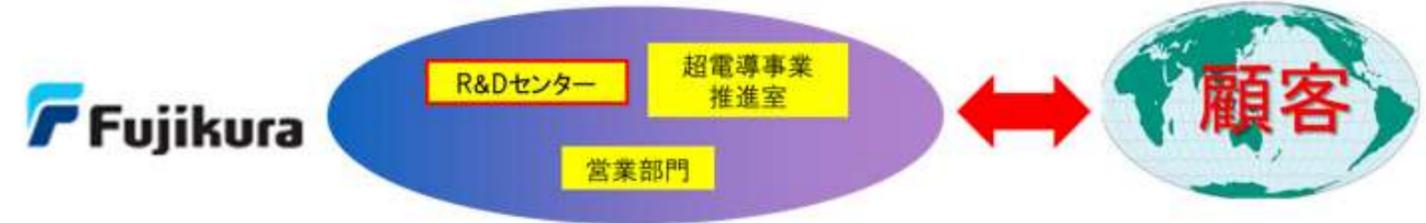
- ◆細線化加工技術の改善
- ◆シミュレーションと測定技術開発による撚線構造を含む損失評価

< 分割線材による交流損失評価 >



事業化の展望

- MRI等、均一性を要求されるDC用途を中心に広く展開
- 強磁界用途、ヘリウムフリー用途に強み
- 低損失化技術はマグネットの精度・安定性への要求度高さに応じ展開



事業化計画	2019年度	2020年度	~2025年度	~2030年度	~2040年度
高温超電導高磁場コイル用Y系超電導線材事業化	上市	販売拡大	販売拡大	販売拡大	販売拡大
参考* 高温超電導マグネットの実規模機開発計画(全身撮像)	1/2 3T撮像実証	構造設計 実証機製作	3T臨床実証機	▲薬事認可 ▲市場投入開始	▲量産開始
	低温超電導線材に比した通電性能価格比(円/A・m比)を2025年頃に大幅低減				

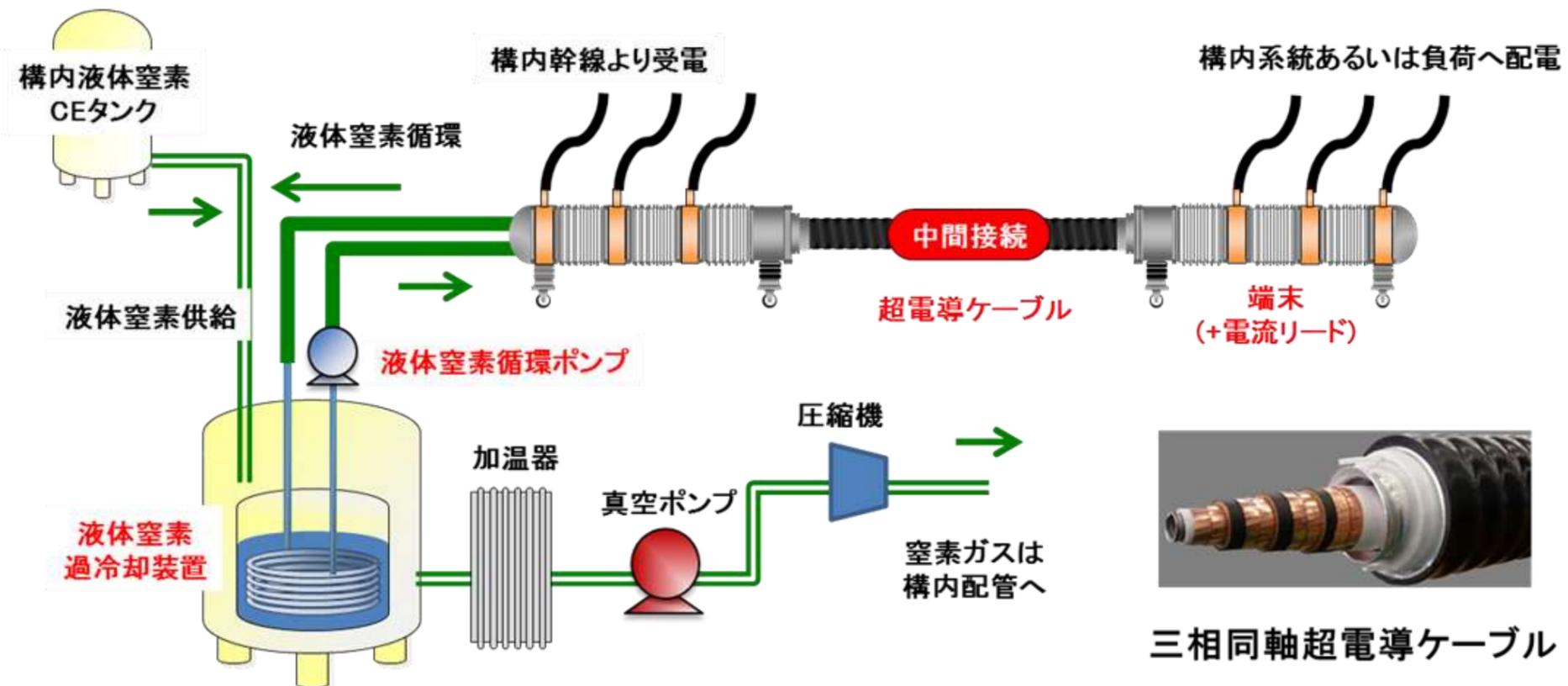
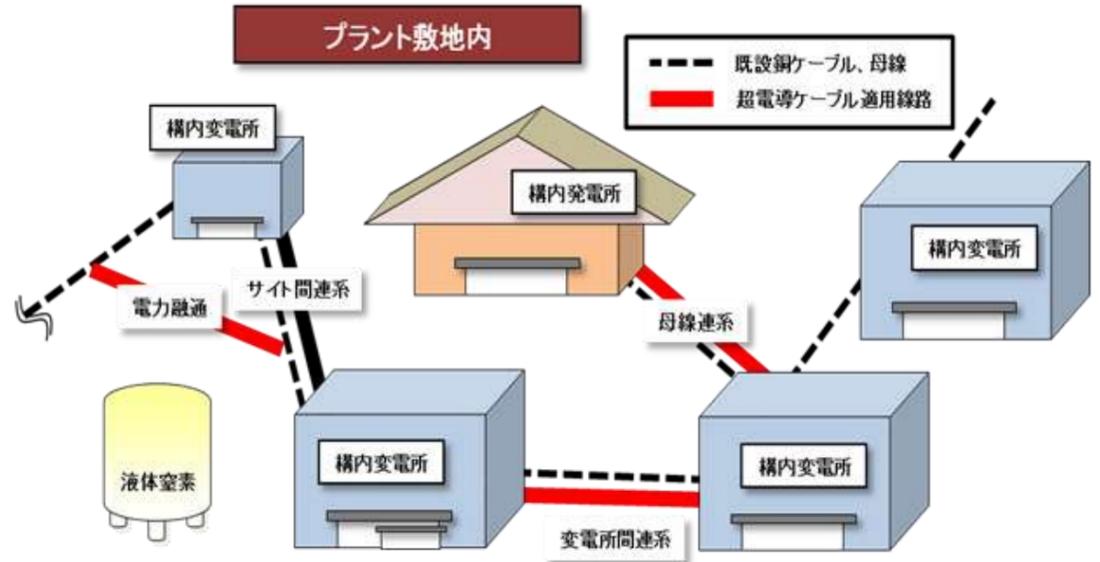
* 出典: 高温超電導実用化促進技術開発(中間評価)分科会 プロジェクトの概要説明資料(公開)



Heフリー・省エネルギー(30K運転)
高磁場・コンパクト(1.5T機の場合に設置可)

◇ 戦略的省エネルギー技術革新プログラム（2017～2020年度実施中） プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発

・既に液体窒素を利用している大規模プラント（製鉄、石油化学等）において、この液体窒素を冷却熱源として活用し、低熱負荷の三相同軸超電導ケーブルシステムを稼働させることで、初期投資、運用経費を削減し、省エネルギー化を達成する送電ケーブルシステムを開発する。



三相同軸超電導ケーブル

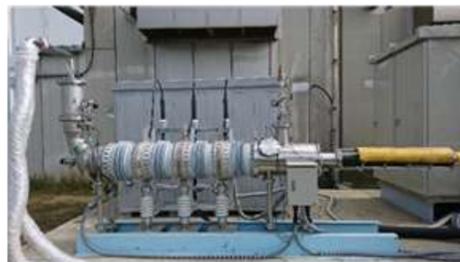
実証試験場所：神奈川県横浜市戸塚区 **BASFジャパン株式会社 戸塚工場**

敷設場所：構内高圧配電盤から研究開発試験建屋横の受電所まで

回線：6.6kV CVケーブル⇒三相同軸超電導ケーブルに置換え。 **ケーブル長：約200m**

今回の試験で取得するデータを基に対象となる工場における**ケーブルシステム性能や省エネルギー効果を検証。**

プロジェクト期間：2019年7月～2021年2月



BASFジャパン戸塚工場での
実証試験 動画での紹介



対象製品		代表事業者	状況	成果
送配電	電力ケーブル	東京電力	事業終了	<ul style="list-style-type: none"> ・系統連携による実証試験、事故時の安全性の基礎評価を実施し、交流高温超電導ケーブルシステムの高品質システムを確立、実運用ガイドラインを作成。
		昭和電線	現在実施中 (~2021年9月)	<ul style="list-style-type: none"> ・液体窒素等の冷媒を有するプラントにおける、低価格な超電導ケーブルシステム(冷却システムを含む)を開発。 ・実プラントでの実証試験を開始。
	鉄道き電線	鉄道総研	現在実施中 (~2021年2月)	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道き電線に適用可能なコンパクト冷凍機、高効率液体窒素循環ポンプ、高性能断熱管を開発。 ・1.2 kmの断熱管を敷設し、km級の冷媒圧送を実現。
MRI	MRI用マグネット	三菱電機	現在実施中 (~2021年2月)	<ul style="list-style-type: none"> ・アクティブシールド型 1/2サイズ 3T MRI用高温超電導コイルを製作。 ・中心磁場 0.3Tで撮像実施。
	超電導接続	古河電工産総研	現在実施中 (~2021年2月)	<ul style="list-style-type: none"> ・歩留まり80%以上で超電導接続($1 \times 10^{-12} \Omega$以下)を実現。 ・汎用性のある接続技術を開発中。
	高磁場用超電導線材	フジクラ	事業終了	<ul style="list-style-type: none"> ・MRIコイル用高磁場特性線材を開発。 ($J_c > 400 \text{ A/mm}^2$ @30K、7T) ・上記を実現しつつ製造速度50m/Hrを達成。

◆ 研究成果まとめ

- ナショナルプロジェクト「高温超電導実用化促進技術開発」では、ほぼ目標どおりの成果が得られ、実用化に向けた準備を完了。
- 戦略的省エネルギー技術革新プログラム「プラント内利用のための低コスト型三相同軸超電導ケーブルシステムの開発」では、現在実証試験を実施中。

◆ 今後の取り組み

- 現在新たな応用技術の開発に向け、調査事業を実施中。
- ロボット・AI部では、「航空機用先進システム実用化プロジェクト」で超電導技術の電動航空機への適用技術の開発を推進中。