

# 「イットリウム系超電導電力機器技術開発」 (事後評価)

2008年度～2012年度 5年間

## -プロジェクトの概要-(公開) 中間評価後の技術開発に関して

研究成果、目標達成度、成果の意義・国際比較、  
実用化・事業化の見通し、シナリオ、成果の普及

平成25年8月9日

プロジェクトリーダー  
(公財)国際超電導産業技術研究センター  
超電導工学研究所  
所長 塩原 融

1/46

3. 研究開発成果について (1) 目標の達成度と成果の意義

公開

### プロジェクトの概要説明

I. 事業の位置づけ・必要性  
事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント  
事業の目標 (目標設定の根拠) ・計画内容・情勢変化への対応

III. 研究成果、目標達成度  
成果の意義・国際比較

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み  
成果の普及

2/46

**超電導電力貯蔵装置の最終目標達成のまとめ**

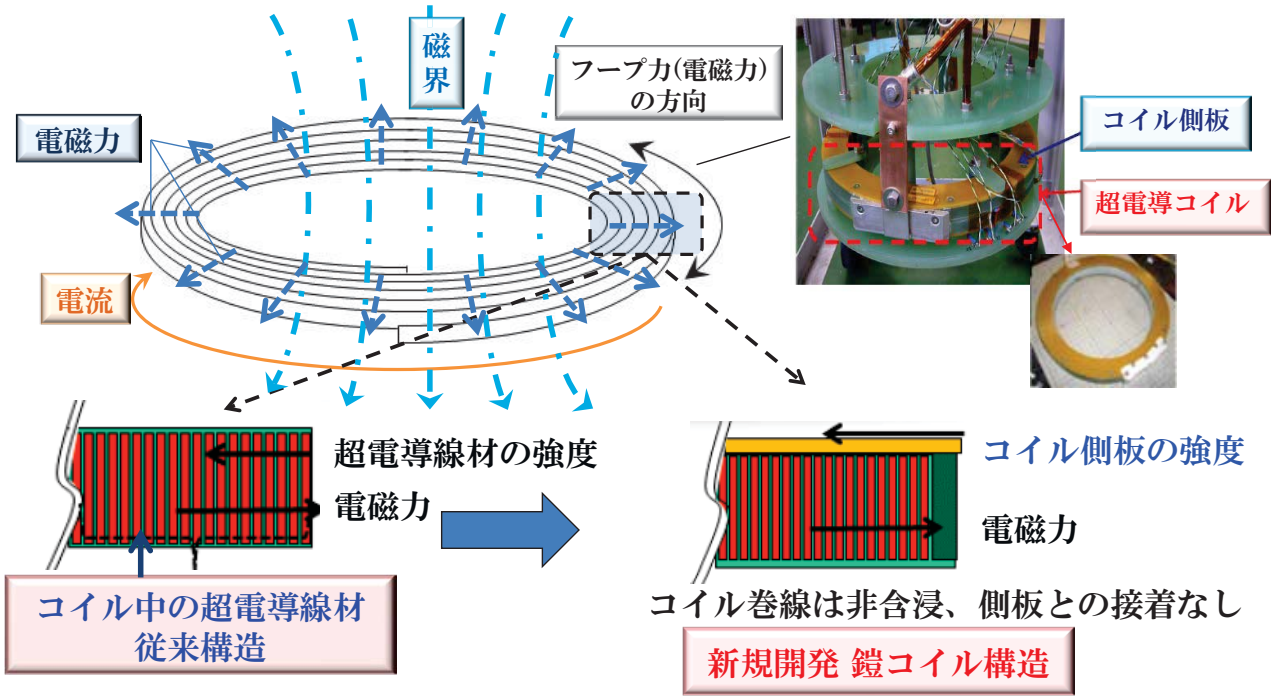
サブテーマ	最終目標(H24末)	成果	達成度
(1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フープ応力600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つSMES コイルによるモデル検証	φ650 mm 級の4 束導体コイルを作製し、3.5 T 級大口径マグネット中で繰り返しフープ応力試験を実施することで、最終目標を達成した。	○ 達成
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	繰り返し充放電試験における20-40 K、2 kV 以上の冷却システムの検証	模擬発熱体を用いてコイル発熱量(3 W/m <sup>2</sup> )の7 倍(21 W/m <sup>2</sup> )の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証した。絶縁性能においては2 kV の3 倍(6 kV)の電圧に対し設計は完了しており、性能を確認した。φ650 mm 級コイルにおいて伝導冷却と電気絶縁性能を検証し、最終目標を達成した。	○ 達成
(3) SMES 対応線材安定製造技術開発	下記仕様例を満足する線材の安定製造による2 MJ 級モデルコイルへの線材供給 仕様例: I <sub>c</sub> =20 A/cm-w @77K, 3 T で強度1 GPa を有する100 m に相当する線材	中間層の欠陥抑制、基板平滑化および原料供給系の温度適正化によって、線材の歩留りが向上し、線材作製技術の安定化を達成した。モデルコイル用の線材作製を行い供給目標・安定製造を達成した。	○ 達成
(4) 高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	①2 GJ 級SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁場コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。 ②SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。	具体的支持構造検討により2GJ級SMES コイル基本システムの最適化を検討し、評価用試験モデルの内、伝導冷却試験システムの設計・製作を実施した。クエンチ検出・コイル保護方法の検証等の試験計画立案に必要なコイル特性を取得した。	○ 達成
(5) 高信頼性・高耐久性SMES コイル要素技術開発	実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、コイルの径方向応力に耐える構造の設計手法を確立し、2 万回繰返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。	<b>高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造(Yoroi-coil)を開発し、剥離やフープ応力耐性に対する課題解決が図られた。</b> さらに伝導冷却適用性の検証やクエンチ検出技術評価によって、実使用に必要な要素技術を開発した。	○ 達成

事業原簿 III-1.6~III-1.7

◎:大幅達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達成

3/46

**Yoroi-coil (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil) コイル巻線への応力の低減 : 非含浸コイル、応力をコイル側板で支持する**



事業原簿 III-2.1-139~140

4/46

超電導電力貯蔵装置SMES 開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
(1) 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フランス(規模不明) 韓国(最終目標2.5 MJ)	(中間目標) ・外径650 mm、4 束導体のY 系コイル ・600 MPa 以上の耐フープ応力 ・2.6 kA 通電  ↓ 世界最大・最高性能のコイル開発
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	フランス、韓国 (伝導冷却技術)	(中間目標) ・伝導冷却 ・6 kV 以上の絶縁性能 ・実システムでの実証試験実施  ↓ 世界最高水準の冷却技術確立
(3) 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証	フランス(規模不明) 韓国(最終目標2.5 MJ)	(中間目標) ・偏流現象を利用するクエンチ保護システムの考案  ↓ 世界初
(4) 高信頼性・高耐久性 SMESコイル要素技術開発	米国 (3.4MJ 30T, 4.2K)	(最終目標) ・コイルの径方向応力に耐える構造の設計手法を確立  ↓ 外部構造による応力分担により、2GPa級の高応力にも耐えられる世界最大・最高性能のコイル化技術を開発

ケーブル化技術の開発 最終目標・成果・達成度

	項目	最終目標(平成24年度末)	成果(H23~24年度)	達成度
大電流ケーブル	大電流・低交流損失	さらなる交流損失の低減に向けたケーブル構造の検討・設計	・Hybrid構造にて1.5 W/m-相を確認 ・全て2 mm幅線材を用いた導体にて0.4W/m-相を確認 ・高LのIBAD-PLD線材を用いたケーブルにて0.95W/m-相の低交流損失を確認	◎
	大容量接続技術の開発	中間接続部を有する大電流ケーブルコアの作製、課電及び機械強度特性評価	電気絶縁試験及び機械特性試験により設計の妥当性を検証	○
	66kV大電流ケーブルシステム検証	検証システム作製・課通電試験実施(66kV/三心一括/5kA,15m長) ・150mmφの管路に収納可能 ・ケーブル損失2.1W/m-相@5kA以下	これまでの要素技術開発の成果を用いてケーブルシステムを製造し、課通電試験等を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証	○
高電圧ケーブル	高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	ケーブル損失(交流損失、誘電体損失)0.8W/m-相@3kA以下	・3mm幅導体にて交流損失0.124W/m-相を確認 ・導体層とシールド層を合わせて0.2 W/m ・誘電体損失0.6W/m-相と合わせて、目標値以下を達成	○
	超電導電力ケーブル電気絶縁特性の評価	短尺ケーブルコアモデルを作製・評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証、ケーブルシステムに反映	・過電流による温度上昇を抑えるために、中空銅フォーマ400mm <sup>2</sup> の通電・伝熱特性を解析、試験により評価 その結果、温度上昇の抑制を70Kから20Kに、復帰時間特性も2時間から10分以内に改善	○
	275kV高電圧ケーブルシステム検証	検証システム作製・課通電試験実施(275kV/単心/3kA、30m長) ・ケーブル外径150 mmφ以下 ・ケーブル損失0.8 W/m-相@3 kA以下	これまで蓄積してきた設計データ、要素技術を用いることでケーブルの健全性を確保して、成功裡にすべての試験を完了	○

ケーブル対応線材の安定製造技術開発 最終目標・成果・達成度

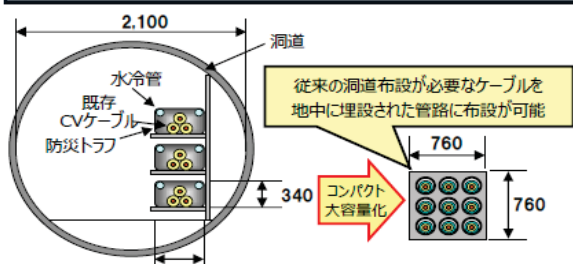
項目	最終目標(H24年度末)	成果(H23~24年度)	達成度
大電流用ケーブル対応線材安定製造技術開発	大電流ケーブルシステム検証用線材総長2kmを提供	計画通り提供を実施(実績:3.4km)	○
基板・中間層テープの開発	・IBAD中間層基板・線材6 km提供	計画通り提供を実施(実績:6.9km)	○
MODプロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発	高電圧ケーブルシステム用線材供給1.3 km(30m長)及び短尺導体評価用0.3km提供	計画通り提供を実施(実績:1.3km、0.3km)	○
IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発	極低交流損失用の300 A/cm-w (@77K, s.f.)級IBAD-PLD線材を作製・提供	500A/cm-w(@77K, s.f.)級の超電導線材を作製・提供した。作製したケーブル導体にて、0.6W/m-相@5kAの低交流損失を確認	○
線材の評価技術の開発	開発された評価技術を用いてケーブルシステム検証用線材に対して各種評価を行い、それらの効率・効果を検証	高電圧ケーブルシステム検証に使用される線材に対して、評価技術を組み合わせることで、効率的かつ効果的な評価が可能であることを検証	○

ケーブルの熱収支に関する評価研究 最終目標・成果・達成度

項目	最終目標(H24年度末)	成果(H23~24年度)	達成度
定常通電時および事故時の伝熱特性検討	システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立	ケーブルシステム検証における、温度上昇解析・短絡電流通電時の電磁力解析を行うことで目標を達成	○
スラッシュ窒素の研究	スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証	製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握した。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施	○
超電導電力機器の冷却設備の調査研究	超電導ケーブルの冷却特性に関する調査	平成23年度以降には、超電導ケーブル及び端末における定常通電時及び過電流通電後の復帰特性に関する調査を実施	○

◎超電導ケーブルのメリット、特徴

- ・送電ロス低減(従来地中送電線の1/3)
- ・省エネルギー、CO<sub>2</sub>削減
- ・コンパクトで大容量送電が可能



現用ケーブルと超電導電力ケーブルの布設サイズ例の比較

◎66kV 大電流ケーブル

リプレース 大容量化

154 kV/700 A級 x3回載 → 66kV/5 kA級 x1回載

154kV/CV or OF ケーブル → 66kV/5kA 570 MVA

◎275kV 高電圧ケーブル

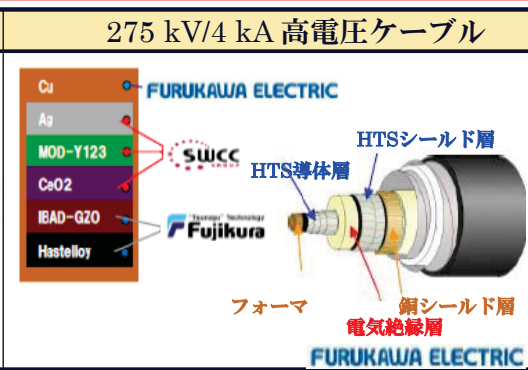
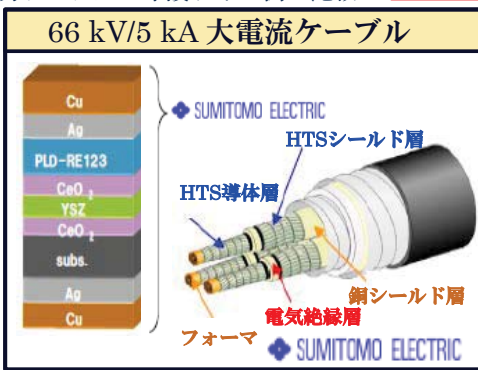
大容量化

275 kV/1 kA級 x3回載(CV) → 275 kV/3 kA級 x1回載

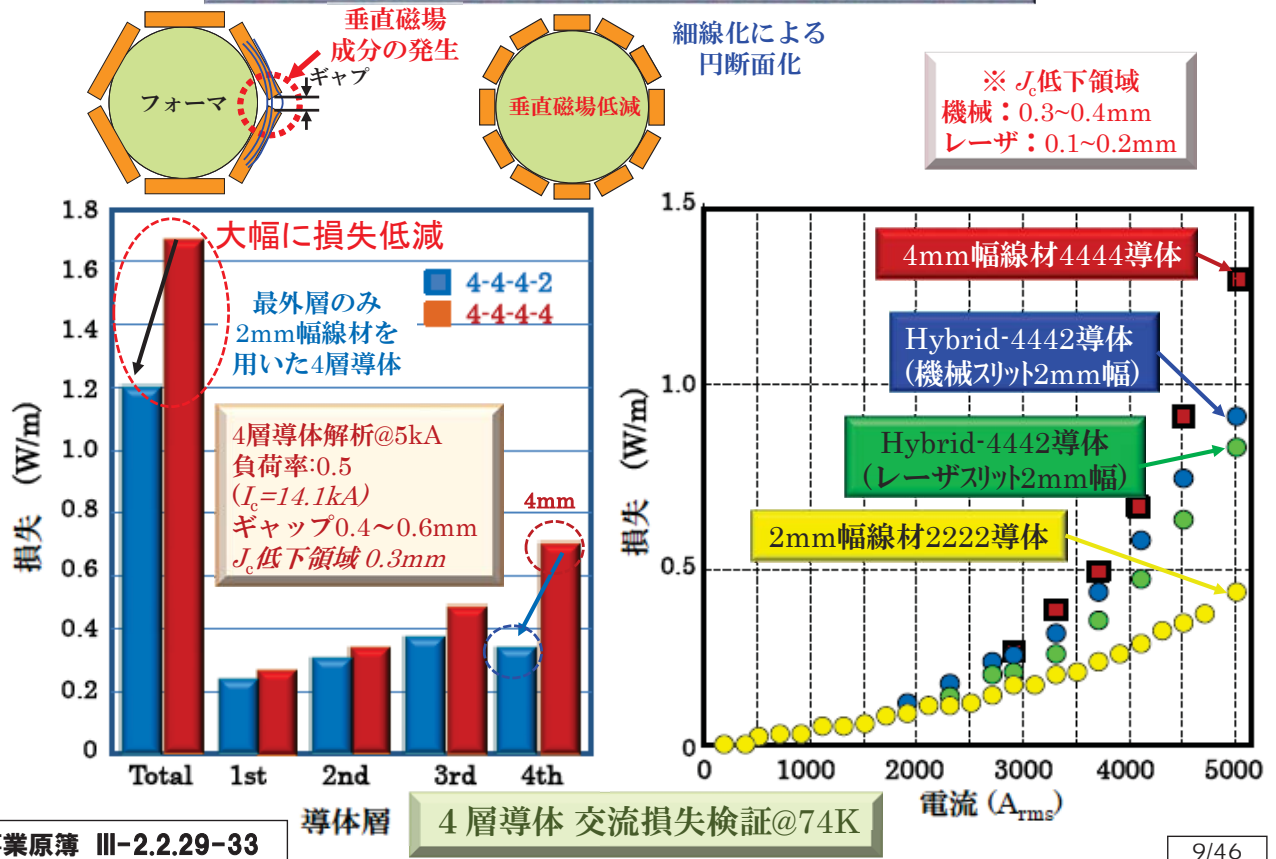
275kV 架空ケーブル → 275kV/3kA 1420 MVA

◎Y系超電導ケーブルのメリット

- 低コスト化
- 大容量化
  - ・66kV/5kA級(570MVA)
  - ・275kV/3kA級(1420MVA)
- 低ロス化
  - ・66kV/5kA級 損失:2.1W/m



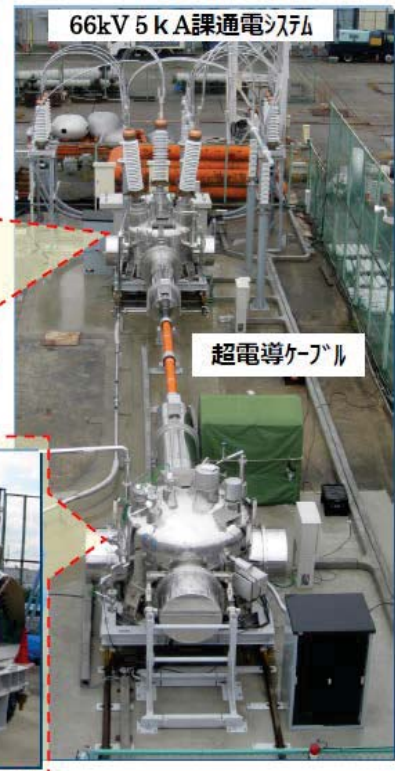
大電流・低交流損失技術 5kA級導体 低交流損失検証



66kV -5kA大電流ケーブルシステム検証試験

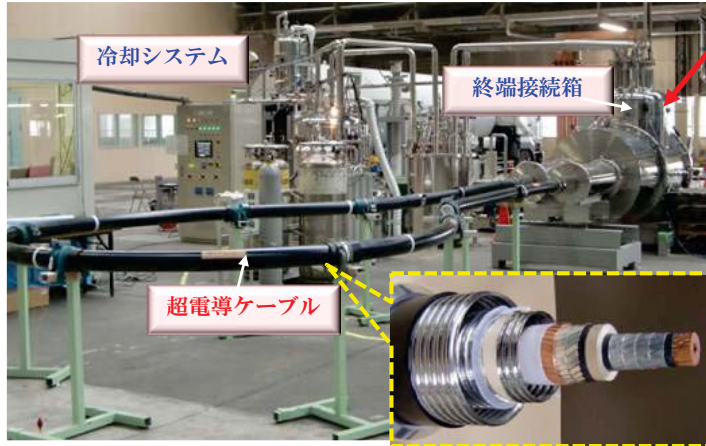
■ 検証試験

目的：15mのシステムで、損失検証と課通電試験などの試験項目を満足することを検証  
 期間：H24年12月~H25年2月  
 場所：住友電工 熊取試験場

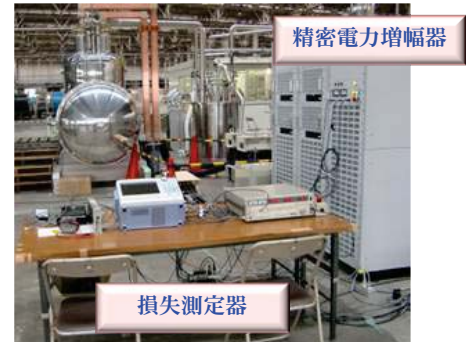
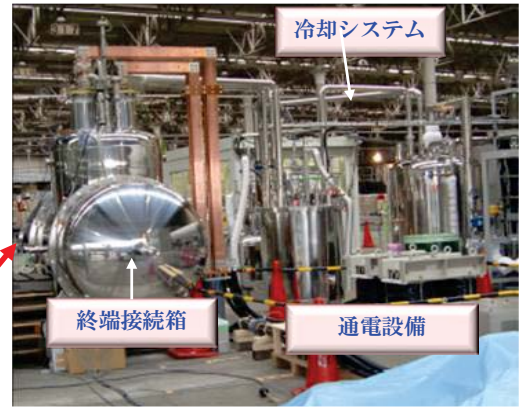


高 $I_c$ 線材による66kV-5kA大電流ケーブルシステム検証試験

- ・対象 : 66kV10m級ケーブル1相分コア
- ・損失目標 : 2W/m-相@5kA 運転温度75~77K
- ・試験条件 : 通電試験 (非課電)  
20サイクル(1 サイクル=8h ON / 16h OFF)
- ・試験項目 : 交流損失測定、臨界電流測定、電流分布測定



<長期試験線路全景>



<終端接続部・通電設備>

275kV-3kA超電導ケーブル設計

設計コンセプト

- ・運転時に想定されるAC電圧で、部分放電を発生させない。  
→系統異常電圧310kVDPフリー  
→絶縁厚 22 mm
- ・雷インパルスで破壊しない。  
→1155 kV  
→絶縁厚 21.5 mm



全損失 0.80 W/m

	設計ケーブル
フォーマ (銅撚り線)	銅撚り線(中空)400 mm <sup>2</sup> (計算断面積412 mm <sup>2</sup> ) φ30.6(mm)
超電導導体の外径	φ 35.4
2層 超電導導体 Expected $I_c$	φ 33 3 mm-幅 線材 30本 φ 34 3 mm-幅 線材 30本 5400 A ( $I_c=300 \text{ Acm}^{-1}$ at 77 K) <b>0.15 W/m以下 <math>I_c=10 \text{ kA at } 70 \text{ K}</math></b>
絶縁厚設計	22 mm(設計ストレス AC 22.0 kV/mm IMP 83.0 kV/mm)
絶縁外径	φ 79.4
1層 超電導 シールド	φ 80.0 5 mm-幅 線材 43本 6450 A ( $I_c=300 \text{ Acm}^{-1}$ at 77 K) <b>0.05 W/m以下 <math>I_c=11 \text{ kA at } 70 \text{ K}</math></b>
2層 銅シールド No.2 超電導コア外径	φ 81.0 w 6×t1(3.5 mm <sup>2</sup> ) 30本 φ 83.0 w 6×t1(3.5 mm <sup>2</sup> ) 30本 断面積210 mm <sup>2</sup> φ 86.5
誘電体損失	<b>0.60 W/m</b>

275 kV - 3 kA 高電圧ケーブルシステム長期課通電試験

■ 30mケーブル  $I_c$  (@77.3 K)

導体：測定値 6800 A (設計5400 A)

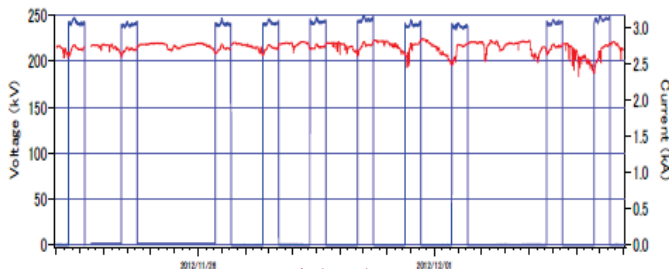
シールド：測定値 7000 A (設計6450 A)

■ 長期課通電試験

(11/18:スイッチON ~ 12月末)

運転温度	72K
冷却能力	> 3 kW
電圧	200 kV (対地)
電流	3 kA
サイクル	> 20 (8 h ON, 16 h OFF)

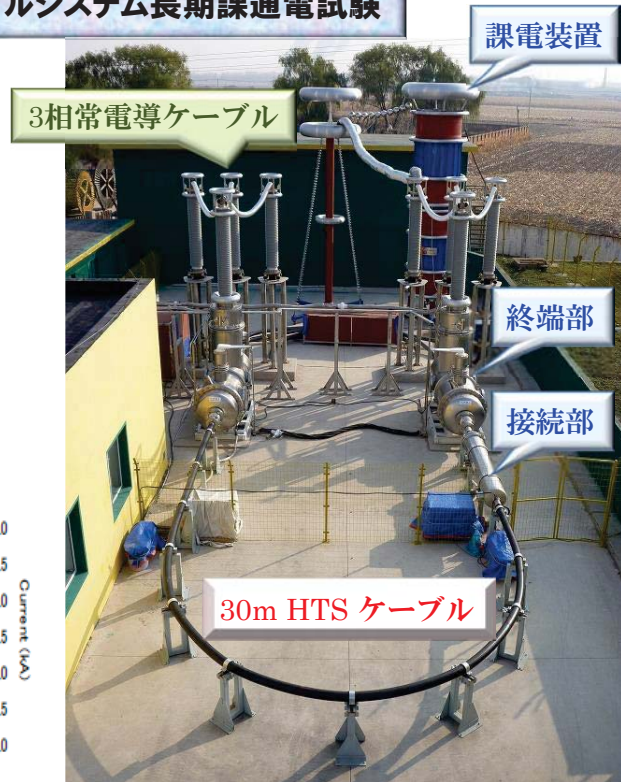
※200kV 3kA 8h on- 16h off



■ 商用周波耐電圧試験(PD)

長期課通電試験後、310kV-10min で部分放電無し確認。

事業原簿 III-2.2.194-198



試験場所：瀋陽古河電纜

超電導電力ケーブル開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
(1) 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発 (a) 送電容量 送電容量密度について	LIPA ケーブル(米国) 送電容量:570 MVA 級 (現状世界最大) 送電容量密度: 約10000 MVA/m <sup>2</sup>	本プロジェクト: 送電容量:570 MVA 級、送電容量密度:約37000 MVA/m <sup>2</sup> ↓ 送電容量も世界最大級といえるが、コンパクトな三心一括型であるため、送電密度はLIPA の約4 倍であり世界最高である。
(1) 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発 (b) 交流損失について	Albany Project (米国) ・Albany ケーブル 0.35W/m-相@0.8 kA DAPAS プロジェクト(韓国) ・LS ケーブル 1.14 W/m @ 1.4 kA	本プロジェクト: 2.1w/m-相@5 kA 以下 ↓ Albany ケーブルの約1/7 に相当 LS ケーブルの約1/7 に相当 大容量・コンパクト、低損失といった観点から考えて、世界最高のケーブル開発に成功した。
(2) 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発 (a) 送電電圧、送電容量	DAPAS プロジェクト(韓国) ※開発中 154 kV /3.75 kA	本プロジェクト: 275 kV/3 kA、 ↓ 世界最大の電圧、送電容量、ケーブル損失0.8 W/m-相@3 kA これまで架空送電線、管路気中ケーブルでしか送電できなかった1GV A級の送電が、地中送電設備において実績の豊富な275 kV の電圧階級で実現可能
(2) 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発 (b) 交流損失について	・LANL, ORNL (米) の最新情報(2010peer review) 1 W/m@3 kA (導体)	本プロジェクト: 導体損失 0.235 W/m-相(LANL,ORNL の1/4 以下) ケーブル外径150 mmφ以下(管路布設可) ↓ 世界でもトップの低損失・コンパクトなケーブルを実現した。 CO <sub>2</sub> 削減可能な高効率送電、建設コスト低減による低コスト送電の実現の見込みを得ることができた。

**超電導変圧器の成果の最終目標達成のまとめ**

項目	最終目標	研究開発成果	達成度
①超電導変圧器巻線技術開発	・2 kA級巻線技術の確立 ・巻線の低交流損失 ≤1/3(対細線化なし線材)	・鉄心付大電流巻線モデルを設計、製作し、電流分 流率が±10%以内で2kA通電を確認 ・100m級3分割線材を用いた低損失巻線モデルにて 交流損失を測定し、1/3に低減できることを確認	○ 達成
②冷却システム技術開発	・冷凍能力: 2 kW@65 K ・冷凍効率(COP): 0.06@80 K	・ネオン冷凍機を試作し、冷凍能力2.17 kW@65 K、 COP 0.06@80 Kを確認	○ 達成
③限流機能付加技術開発	・数百kVA級限流機能付加変圧器に よる機能検証(過大電流を定格電流 の3倍以下に抑制)	・保護銅層を最適化した巻線構成の400 kVA級限流 機能付加単相変圧器モデルを試作し、短絡電流を 定格電流の3倍以下に抑制する限流性能を確認 ※当初計画から1年前倒しで達成(H24⇒H23)	◎ 大幅 達成
④超電導変圧器対応線材開発	・安定製造、加工技術の向上	・安定製造や加工技術の改良により線材の長手・幅 方向の $\mu$ 特性向上技術を開発	○ 達成
⑤2 MVA級超電導変圧器モデル検証	・66kV/6.9 kV-2MVA級超電導変圧 器モデルの課通電試験による性能 検証	・66kV/6.9 kV-2MVA級超電導変圧器モデルを試作、 冷却システムと組み合わせ試験を実施し、変圧器 システムの性能を確認	○ 達成

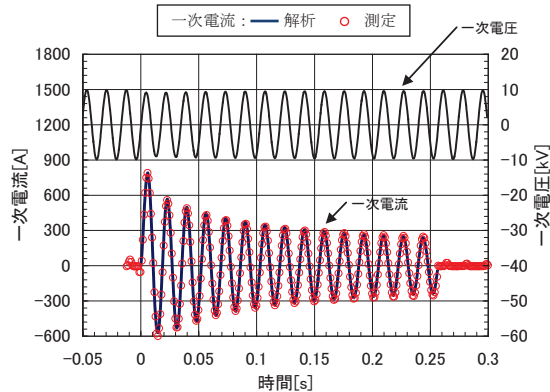
◎:大幅達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達成

**限流機能付加技術開発**

400kVA級単相変圧器モデルで限流機能(短絡電流を定格電流の3倍以下に抑制)を検証

**400kVA級単相変圧器モデル諸元**

定格容量、相数	400kVA 単相
定格電圧、電流	6.9kV/2.3kV、58A/174A
%インピーダンス	10% (400kVA基準)
導体構成	1枚/3枚
巻線数	6層/2層



定格電流の  
3倍以下への  
抑制を確認



**2MVA級超電導変圧器モデル検証**

**2MVA級超電導変圧器モデルの課通電試験で性能を検証**

課通電試験はJEC-2200-1995変圧器に準拠し変圧器基本性能、絶縁性能、熱的性能を検証

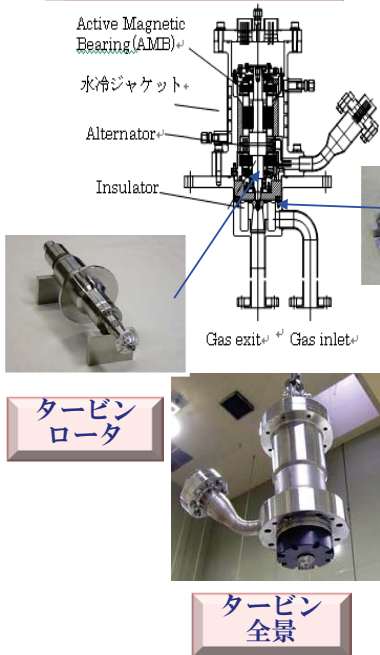
**全項目で判定基準を満たすことを確認**



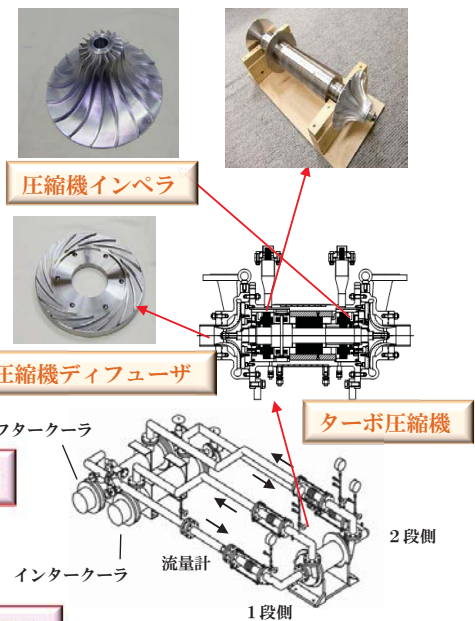
項目	判定基準	結果
直流I-V特性 (二次側)	260A (定格電流×1.1)	270A
変圧比	9.5652 (仕様値) ±0.5%	9.559 (U-V) 9.562 (V-W) 9.552 (W-U)
%インピーダンス	3% (仕様値) ±7.5%	2.99%
無負荷損	8kW (仕様値) +15%以下	7.92kW
負荷損	32W (計算値)	26.9W
短時間交流耐電圧	140kV (50Hz)、1分間の印加に耐えること	絶縁破壊無し
雷インパルス耐電圧	全波-350kV、裁断波-385kVに耐えること	絶縁破壊無し
熱侵入量	447W (計算値)	464W

**冷凍機 (膨張タービン、ターボ圧縮機 & 熱交換器) 開発**

**膨張タービン**



**ターボ圧縮機**

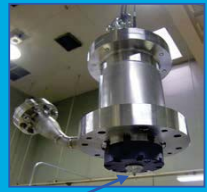


**熱交換器**




Neターボブレイトン冷凍機の事業化(大陽日酸)

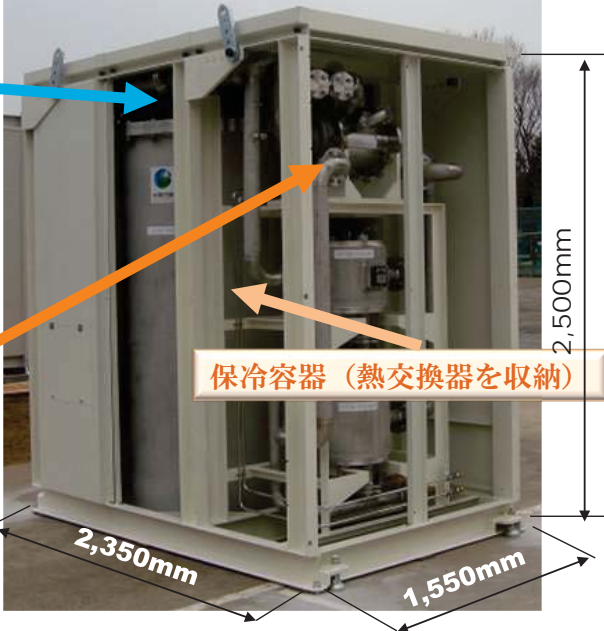
膨張タービン



φ32mm  
インペラ

ターボ圧縮機





保冷容器 (熱交換器を収納)

**仕様**  
 冷却能力: 2kW @ 65 K  
 冷凍効率: 0.06 @ 80K

- プロジェクト終了後販売開始 -

超電導変圧器開発に関する世界動向との比較

項目	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
①超電導変圧器巻線技術開発	・低損失化はNZ プロジェクト等におけるRoebel導体の採用。	・大電流化と低損失化は細線化及び転位巻線構造の最適化により達成。耐短絡強度技術は400 kVA 短絡変圧器モデルで実証。 ↓ 世界初のY系変圧器巻線技術 (大電流化、低損失化、耐短絡強度)を実証
②冷却システム技術開発	・タービン方式冷却システムは、米国の限流器開発プロジェクトで適用計画あり。	・メンテナンスフリーの膨張タービン及びターボ圧縮機の断熱効率> 65%達成。 ・ブレイトン冷凍機で2 kW 級@65 K, 冷凍機効率0.06@80 K を達成。 ↓ 世界に先駆けメンテナンスフリー高効率小型タービン方式冷却システムを開発
③限流機能付加技術開発	・変圧器巻線による限流機能開発は数カ国の変圧器プロジェクトで開発中。	・Y系線材の4巻線モデルにより限流特性を実証。さらに400 kVA 限流機能付加単相変圧器モデルで実証。 ↓ 世界初のY系変圧器の限流特性を実証
④超電導変圧器対応線材開発	・低損失化対応細線化線材は米国で開発中。	・3分割100 m 長線材 (50 A / 5 mm-w @ 65 K, 0.01 T) の製造・加工技術の開発。 ↓ 世界に先駆け細線化線材加工技術を開発
⑤2MVA級変圧器モデル検証	・Y系変圧器の開発は数カ国のプロジェクトで開発中。	・上記技術開発の成果をもとに2 MVA 級超電導変圧器モデルを製作、検証。 ↓ 世界に先駆けY系変圧器を開発

超電導電力機器用線材の技術開発成果の最終目標達成のまとめ

テーマ	最終目標	主要成果(赤文字は目標達成成果)	達成度
①線材特性の把握	各種機器環境に対する耐久性を評価	・剥離現象機構解明⇒低中強度原因除去 ・分割線材耐久性評価	◎ 新たな課題(剥離)の解決
②磁場中高Ic線材作製技術	50A/cm-w @77K,3T-200m	・PLD線材:BHO添加 141A@77K,3T(短尺) 54A@77K,3T-200m ・MOD線材:YGdBCO+BZO 50A@77K,3T-124m	◎ 目標値の約2倍の成果達成
	400A/cm-w @65K,0.1T-100m	・PLD線材:770A/cm-w@65K,0.1T-158m ・MOD線材:524A/cm-w@65K,0.1T-100m	
③低損失線材作製技術	2~4mm幅 500A/cm-w-200m	・PLD線材:2mm幅 540A/cm-w-200m ・MOD線材:4mm幅 590A/cm-w-80m ・RABiTS線材:2mm幅 400A/cm-w-72m	○
	5mm幅10分割-100m -無分割に対し損失1/10	・PLD線材:5mm幅-10分割-100m-損失1/10 ・MOD線材:5mm幅-10分割-100m-損失1/10	
④高強度高Je線材製作技術	Je=50kA/cm <sup>2</sup> -200m	・PLD線材 Je>52kA/cm <sup>2</sup> -200m (70μmt基板) ・RABiTS線材:Je>52kA/cm <sup>2</sup> (短尺)	○
	500A/cm-w -1GPa-200m	・PLD線材 >500A/cm-w - 1GPa - 200m	
⑤低コスト・歩留向上技術	技術コスト2円/Am実証	・PLD線材:604A/cm幅-35m@30m/h⇒1.6円/Am ・MOD線材:605A/cm幅-30m@5,10m/h⇒1.6円/Am ・RABiTS線材:1600A/3cm幅@2.2m/h⇒2.7円/Am	◎ 1年前倒しの目標達成
	中間目標技術の安定製造技術	・全ての線材種:線材メーカー各社が各々数km以上の線材に対して歩留まりの評価を実施	

事業原簿 III-1.51

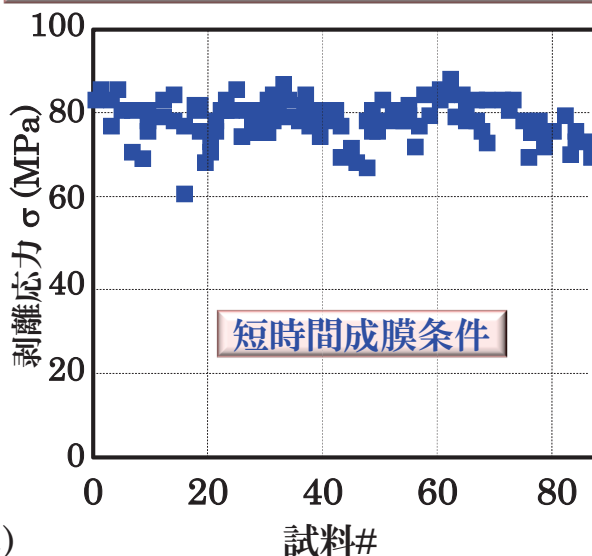
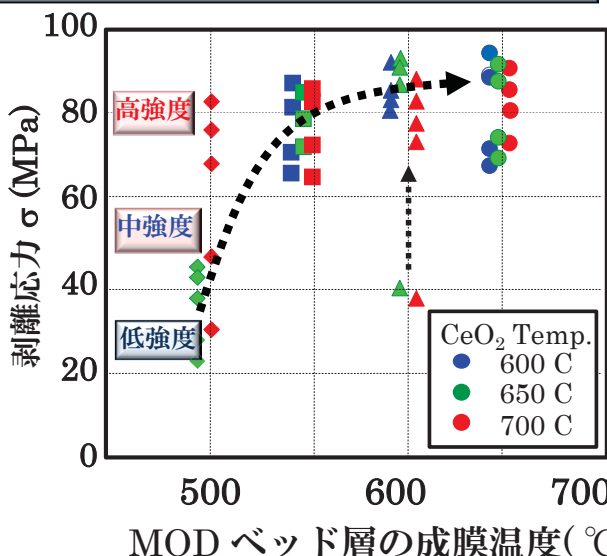
◎:大幅達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達成

21/46

耐剥離強度改善技術

[低強度(<20MPa)起点除去]  
MODベッド層形成条件適正化

[中強度(~40MPa)起点除去]  
超電導層形成条件適正化



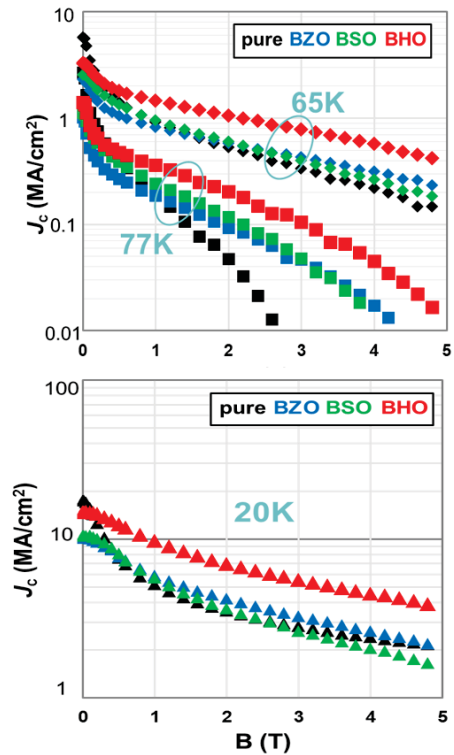
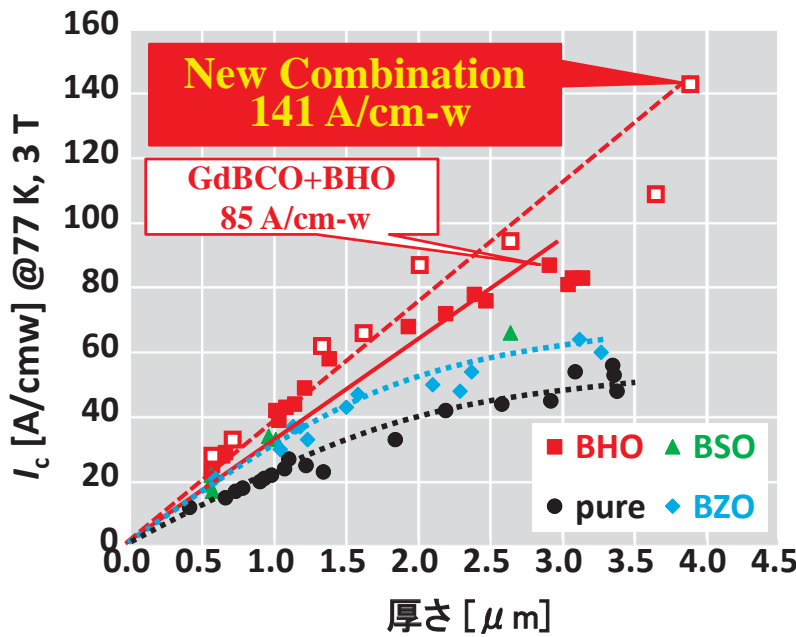
低・中強度起点の除去に成功、剥離強度は60~90MPaに改善

事業原簿 III-2.4.20-21

22/46

<PLD> SMES対応線材開発 (人工ピン導入)

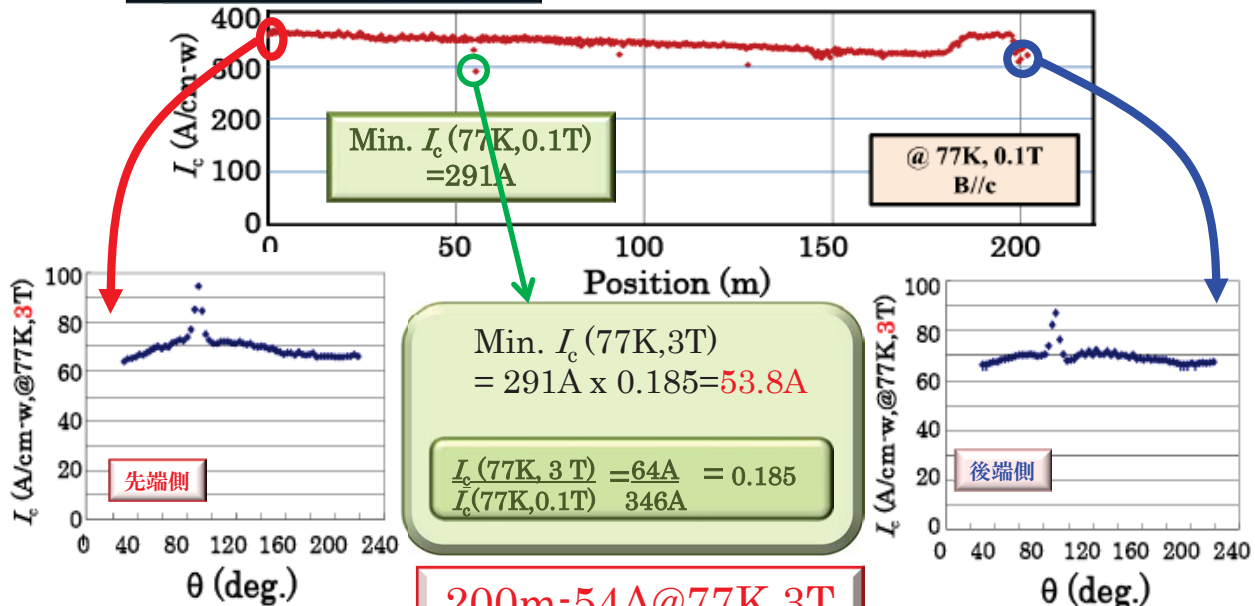
最終目標50A-200m @77K, 3T



<PLD> 人工ピン導入線材長尺化

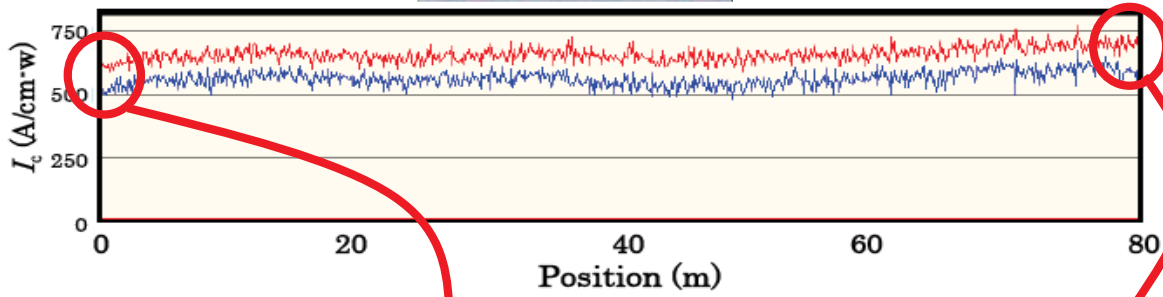
[基板仕様]  
構造: CeO<sub>2</sub>/LMO/IBAD-MgO/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GZO/Hatelloy™  
配向度:  $\Delta\phi$  (CeO<sub>2</sub>) ~ 1.8°  
長さ: 200m

[成膜仕様]  
成膜方法: PLD法 膜厚: 1.7  $\mu$ m  
ターゲット: New Combination



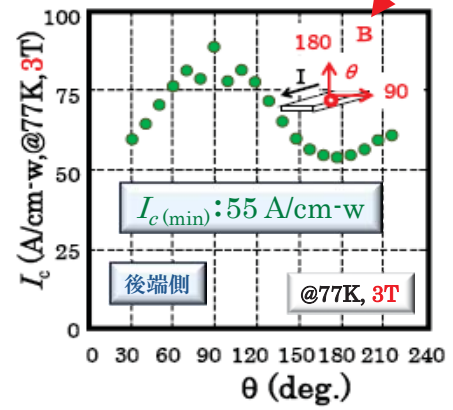
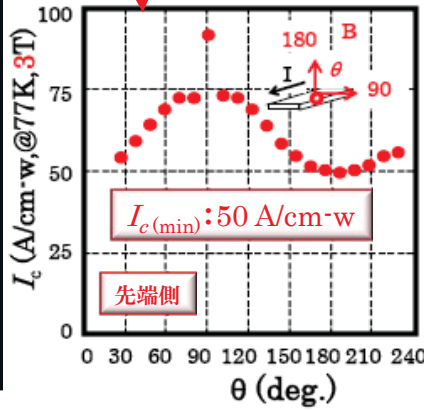
200m-54A@77K, 3T

<MOD> 長尺線材



作製仕様

長さ：～80m  
 超電導層：YGdBCO  
 +BZO(20mML)  
 膜厚：2.5 $\mu\text{m}^t$   
 中間熱処理：有  
 本焼成：バッチ炉

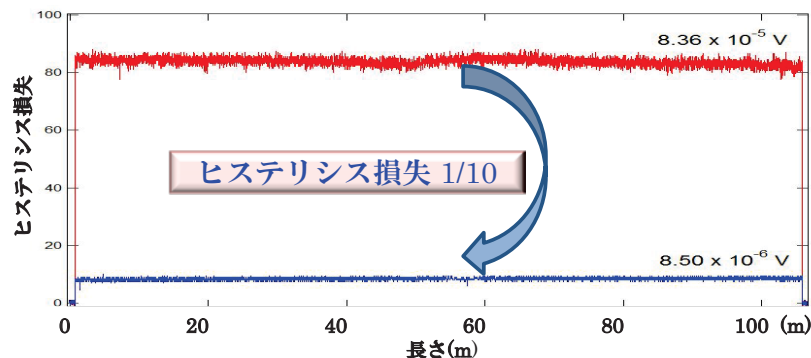
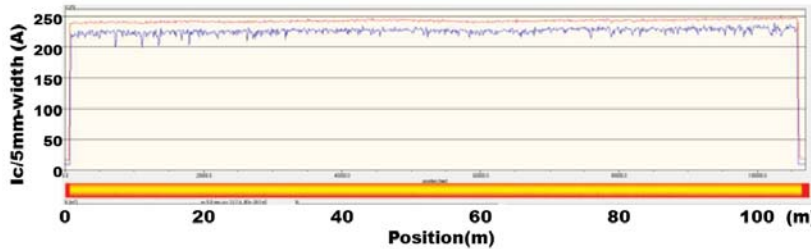


80m-55A/cm-w@77K,3T

<PLD> 長尺10分割スクライビング

5mm幅10分割-100m 分割無比較流損失1/10

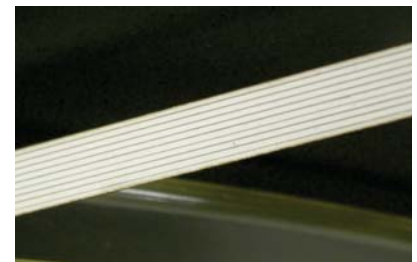
PLD線材：5mm幅10分割特性-100m



CeO<sub>2</sub>成膜後の洗浄処理

PLD-GdBCO成膜  
30m/h 1.6 $\mu\text{m}$

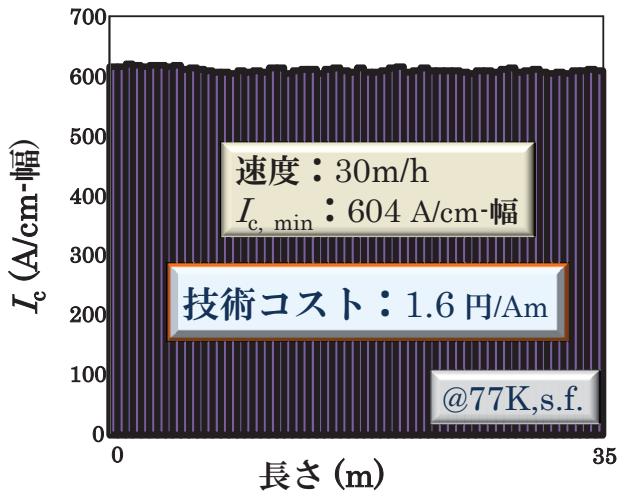
レーザー溝加工



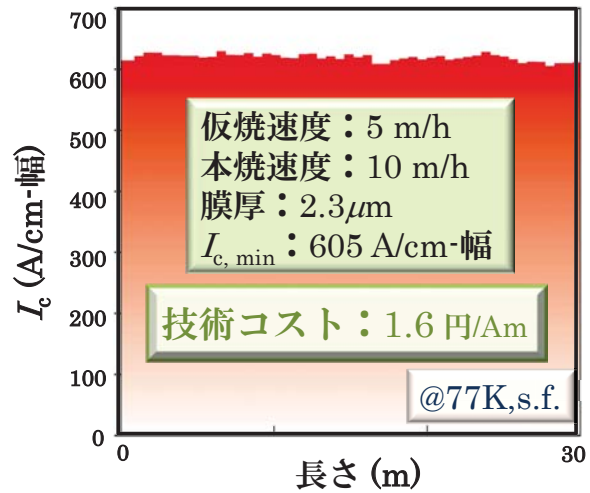
<PLD & MOD> 極低コスト線材開発

最終目標：技術コスト2円/Am以下の実証

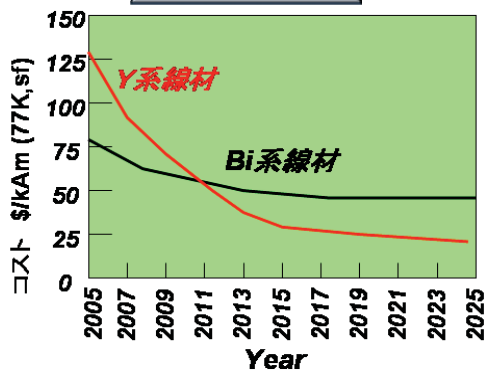
PLD線材 (高エネルギー、プルーム制御)



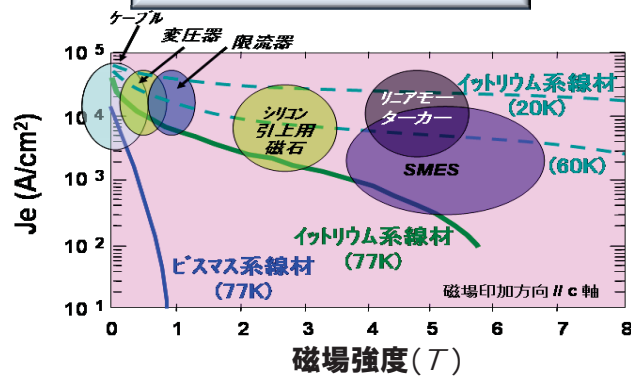
MOD線材(高配向基板、中間熱処理)



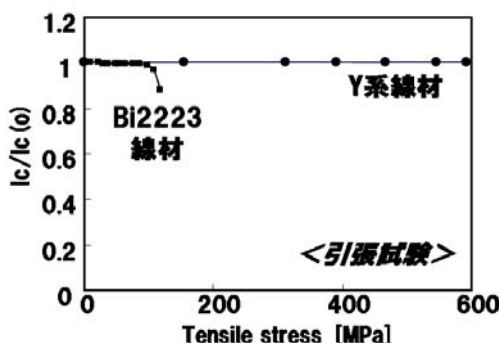
<低コスト>



<高臨界電流密度特性>



<高機械強度>



<低交流損失>

平行磁場の場合

アスペクト比  
Bi:Y=1:100

1/100低減

垂直磁場の場合

線材分割の容易性  
Y：層状構造⇒易  
Bi：シース材⇒難

分割による低減可能

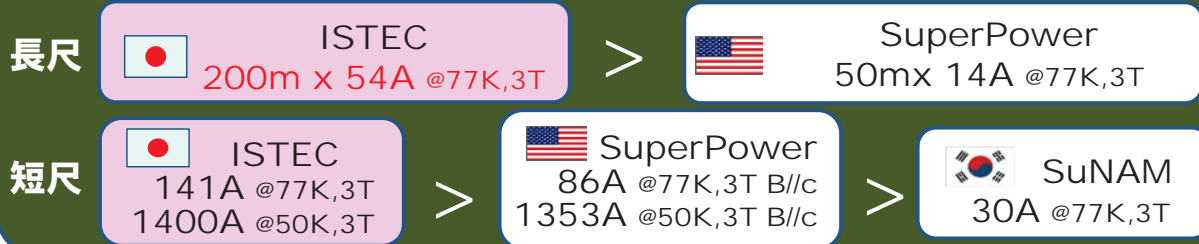
Y系超電導線材開発成果の意義(世界との比較等)

長尺線材作製技術(Ic x L)

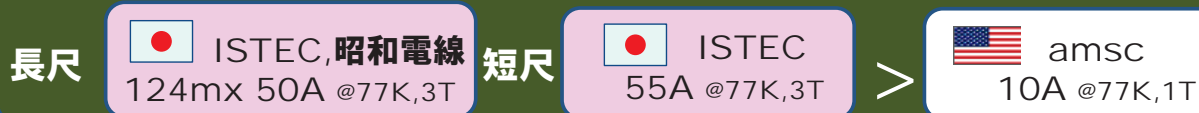


磁場中高Ic線材作製技術 最終目標 50A-200m @77K, 3T

磁場中特性(気相法)



磁場中特性(液相法)



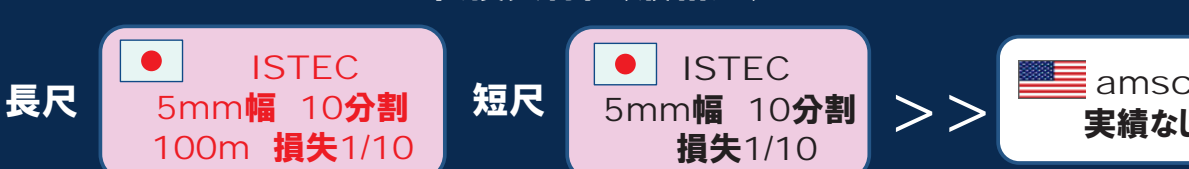
Y系超電導線材開発成果の意義(世界との比較等)

低損失線材作製技術 最終目標  
5mm幅10分割-100m 分割無比交流損失1/10

低損失特性(気相法)



低損失特性(液相法)



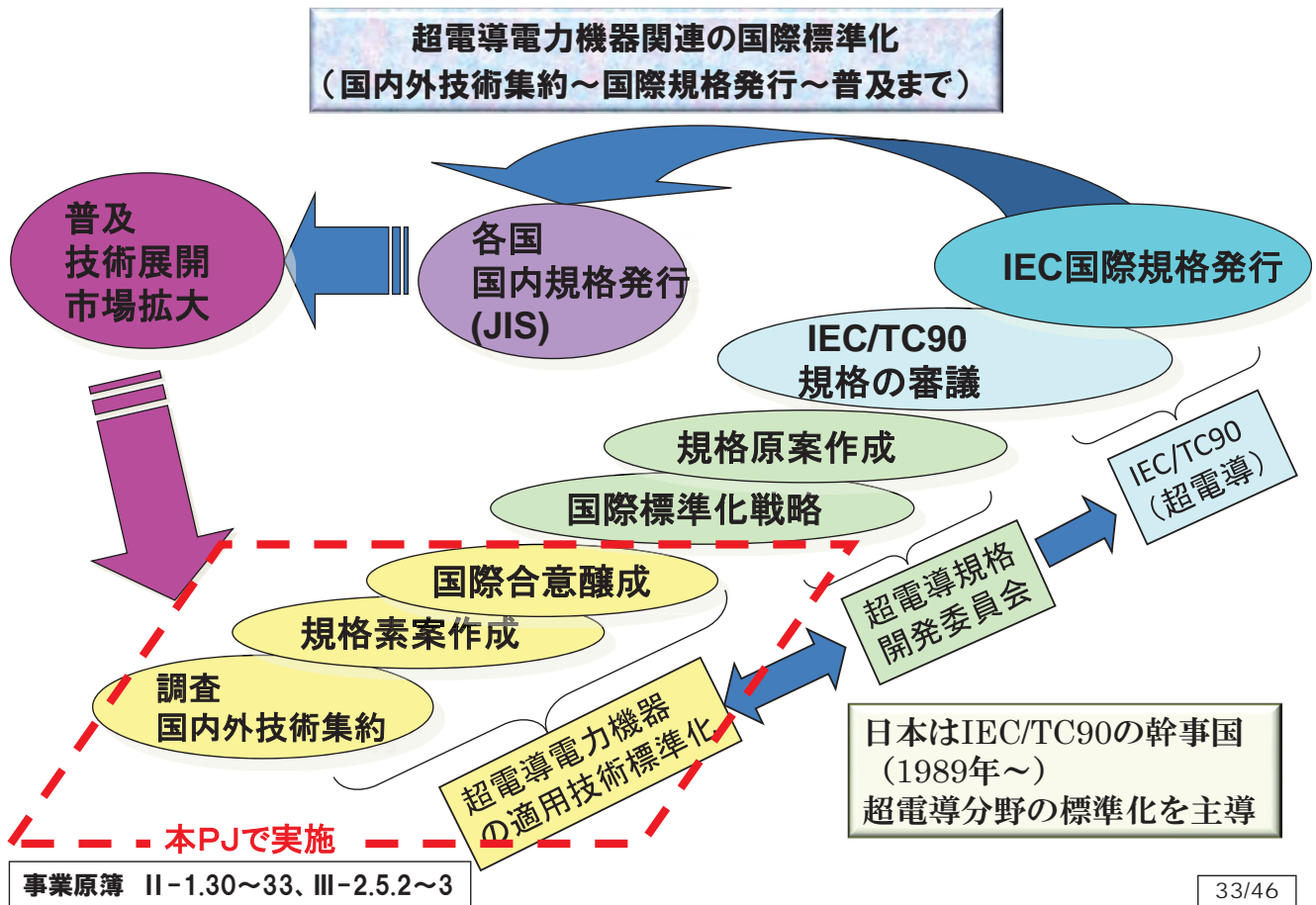
## Y系超電導線材開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
(1) 線材特性の把握	劣化挙動、剥離挙動については系統的に評価した例はない	必要な負荷に対する試験を実施 剥離機構解明及び解決策提案 ↓ 世界初の系統的な成果
(2) 磁場中高 $I_c$ 線材作製技術開発	LANL(米国):IBAD-PLD(短尺) $I_c = 234 \text{ A/cm-w}@75 \text{ K}, 1 \text{ T}$ SuperPower(米国):IBAD-MOCVD 短尺 $I_c = 1353 \text{ A/cm-w}@50 \text{ K}, 3 \text{ T}$ 50 m $I_c = 14 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ amsc(米国):RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c = 10 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$	短尺 $I_c = 141 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T(PLD)}$ → $I_c = 1400 \text{ A/cm-w}@50 \text{ K}, 3 \text{ T}$ 相当 200 m $I_c = 54 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T(PLD)}$ 短尺 $I_c = 56 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T(MOD)}$ 124 m $I_c = 50 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T(MOD)}$ ↓ 世界最高の磁場特性(特に長尺)
(3) 低損失線材作製技術開発	SuperPower(米国):IBAD-MOCVD 短尺12 mm-w 線材を12分割 長尺 報告なし	100 m-5 mm-w 10分割-損失1/10(PLD) 100 m-5mm-w10分割-損失1/10(MOD) ↓ 世界的に先行した技術

## Y系超電導線材開発に関する世界動向との比較(続き)

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト達成と位置付け
(4) 高強度高工業的臨界電流密度 ( $J_c$ ) 線材作製技術開発	SuperPower(米国): 50 $\mu\text{m}$ 厚ハステロイ™ 金属基板 ⇒800 MPa amsc(米国): 結晶粒配向金属基板 ⇒426 MPa	70 $\mu\text{m}$ ハステロイ™ 基板線材 $I_{c,\text{min}} = 539 \text{ A/cm-w} - J_c > 52 \text{ kA/cm}^2 - 200 \text{ m}$ 100 $\mu\text{m}$ ハステロイ™ 基板線材 $I_{c,\text{min}} > 500 \text{ A/cm-w} - 1 \text{ GPa} - 200 \text{ m}$ (Ag 30 $\mu\text{m}$ 厚を想定) ↓ 世界最高強度
(5) 低コスト・歩留向上技術開発	SuNAM(韓国):IBAD-共蒸着法 1000 m - $I_c = 422 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, \text{s.f.}$ ( $I_c \times L = 422 \text{ kAm}$ ) SuperPower(米国):IBAD-MOCVD 1065 m 長- $I_c = 282 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, \text{s.f.}$ ( $I_c \times L = 300 \text{ kAm}$ ) amsc(米国):RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c = 10 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, 3 \text{ T}$	フジクラ:IBAD-PLD 816 m - $I_c = 572 \text{ A/cm-w}@77 \text{ K}, \text{s.f.}$ ( $I_c \times L = 467 \text{ kAm}$ ) ↓ 長尺特性でリード 長さは米韓が先行

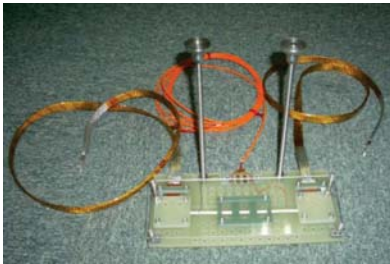




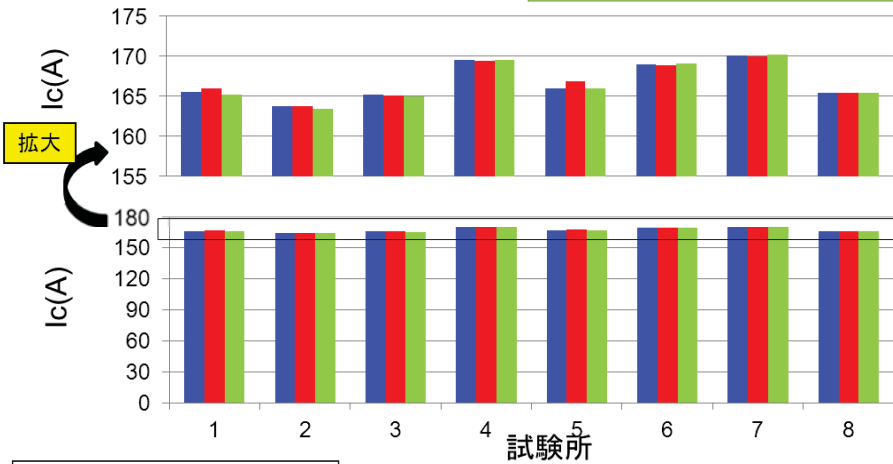
**超電導電力機器の適用技術標準化における最終目標と達成状況**

	最終目標	達成状況	達成度
①超電導線材関連技術標準化	超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成	○超電導線材の通則に関する規格素案を作成 ○イットリウム系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成	○
	国際合意を背景にIEC国際規格提案に資する	○イットリウム系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関する国内ラウンドロビンテスト(RRT)を実施、IEC/TC90のWGに技術情報を提供、国際規格提案に貢献	
②超電導電力ケーブル関連技術標準化	超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成	○超電導電力ケーブル並びにその試験方法に関する規格素案を作成	○
	国際合意を背景にIEC国際規格提案に資する	○CIGREの試験方法のガイドラインに関して検討し情報を提供 ○ジョイントアドホックタスクフォース (J ahTF) の設置承認、IEC国際規格化に向けた活動に貢献	
③超電導電力機器関連技術標準化等	超電導変圧器、SMESなどの機器仕様並びに試験方法の標準化素案を作成 国際合意の醸成を行う	○超電導変圧器、SMESの機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成 ○IEC/TC90とCIGRE D1との間でリエゾン関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動	○
	冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成	○最新の動向調査を行い、規制緩和に向けた提案資料を作成	

**イットリウム系超電導線材 短尺臨界電流試験  
ラウンドロビンテスト(RRT)結果**



- PLD法サンプル、10mm幅線材を3等分 (ISTEC)
- NEDOプロジェクトに参加している機関内で実施
- 測定条件 (第2シリーズ)
  - ・ 液体窒素中の4端子法、電界基準1 $\mu$ V/cm
  - ・ サンプルを治具に固定、巡回・測定
- 試験所間の偏りは2.6%程度
- 本格的な国際試験所間比較のプレ評価



IEC/TC90に情報を提供  
TC90の関連するWGから  
西安会議にて報告  
↓  
今後、市販の線材を使っ  
て国際的なRRTを行うこ  
とが確認

事業原簿 III-2.5.26~30

**プロジェクトの概要説明**

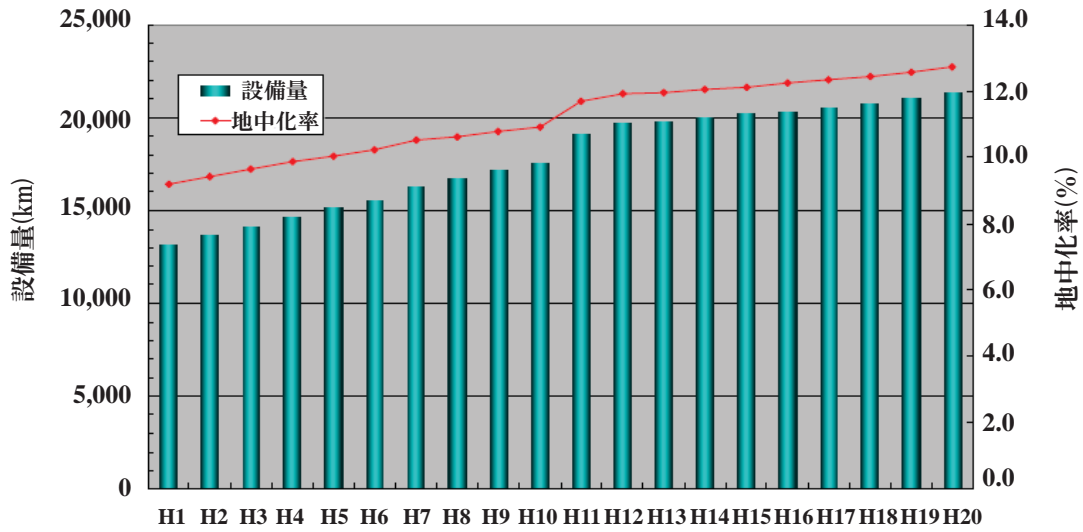
I. 事業の位置づけ・必要性  
事業の背景・目的・位置づけ

II. 研究開発マネジメント  
事業の目標 (目標設定の根拠) ・計画内容・情勢変化への対応

III. 研究成果、目標達成度  
成果の意義・国際比較

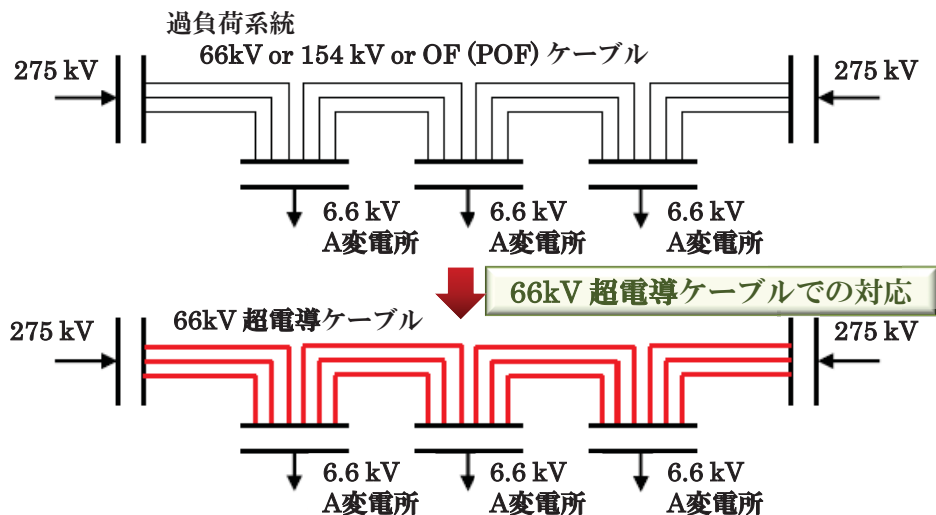
IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み  
成果の普及

(背景)現状の地中ケーブルの設備量及び地中化率の年推移



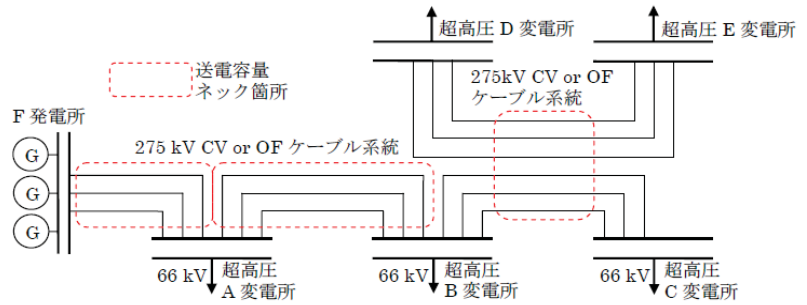
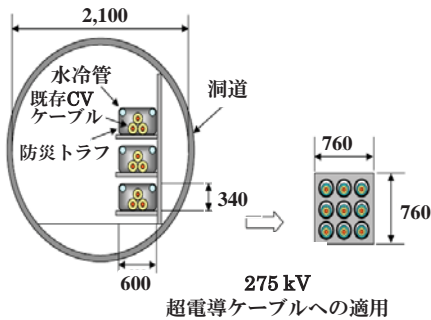
- 過負荷の66 kV または154 kV 系統設備への適用
- 経年化した66 kV または154 kV 系統設備への適用

66 kV or 154 kV 過負荷系統への超電導ケーブルの適用例

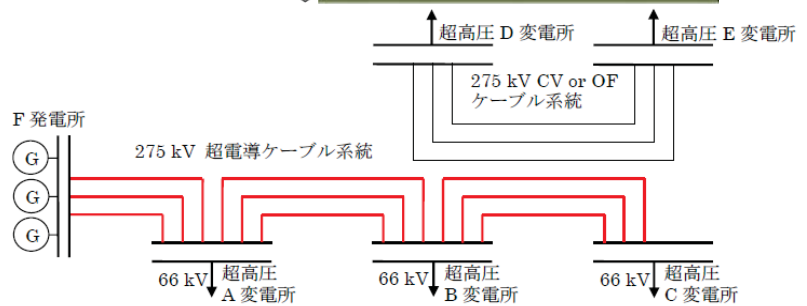


275 kV 系統 (電源系統、都心導入系統) への超電導ケーブルの適用例

275 kV 現用ケーブルと超電導ケーブルの布設サイズ例の比較



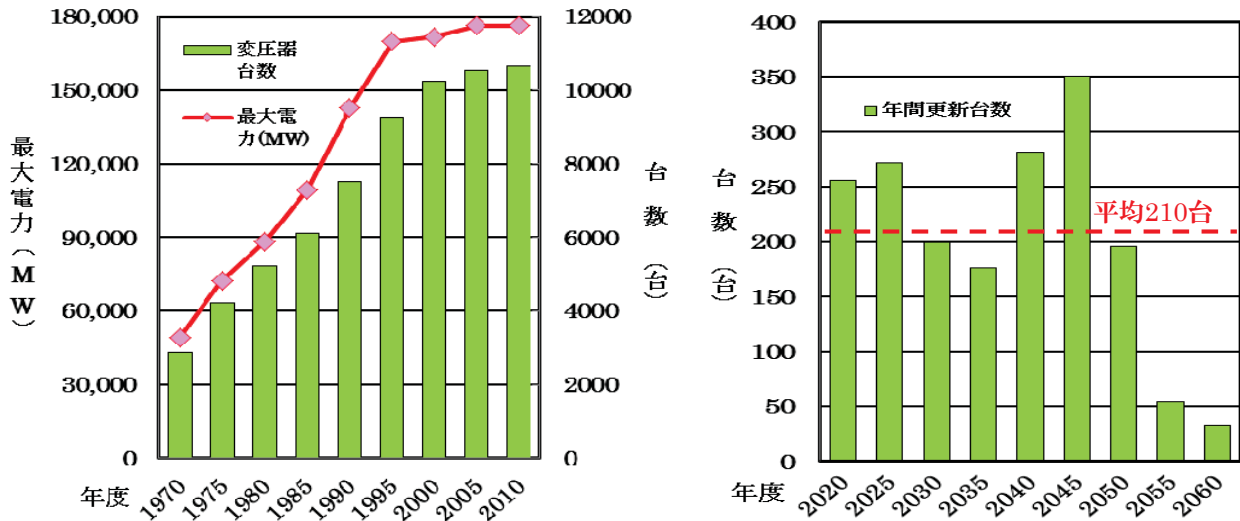
275kV 超電導ケーブルでの対応



超電導ケーブルの実用化のシナリオ

	住友電工	古河電工	フジクラ
実用化の可能性と適用効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>都内導入システムの拡充</li> <li>既存ケーブルのリプレース・増強</li> <li>発電所の発電端等</li> <li>建設コスト削減、工期短縮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存ケーブルのリプレース・増強</li> <li>超高压架空線の代替</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電所の引き出し線 (発電機～変圧器間: ~100m)</li> <li>直流ケーブル: 大電流用 (鉄道き電線)</li> </ul>
実用化の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>実システムでの長期信頼性・安定性の実証</li> <li>超電導線材の高性能化・低価格化</li> <li>ジョイント・端末のコンパクト化</li> <li>冷却システム系の高効率化・低コスト化の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実システムにおける超電導ケーブル及び冷却システムの長期信頼性の実証</li> <li>超電導ケーブル及び冷却システムのコスト低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実システムでの長期信頼性の検証</li> <li>線材の高性能化・低価格化</li> <li>冷却システムの大規模化、高効率化、低コスト化の開発</li> <li>端末・中間接続部の大容量・コンパクト化</li> <li>法規制の緩和</li> </ul>
実用化までのシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> <li>導入初期は比較的短距離 (100m程度) で運転実績の確認 (例: 水力発電所の引き出し線など)</li> <li>基幹系ケーブルシステムへの導入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実システムにおける長期信頼性の検証、信頼度の向上 (1~2km級の試験線路による長期信頼性検証)</li> <li>既存ケーブルのリプレース</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短距離・大容量の発電所引き出し線への導入</li> <li>鉄道用き電線補助線</li> <li>既設ケーブルの代替</li> </ul>
今後の展開	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電機引き出し線への適用に向けた技術課題の開発</li> <li>実規模レベルでの実証</li> <li>基幹系システムへの適用に向けた開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国瀋陽にて研究を継続し、ヒートサイクルによる超電導、絶縁性能の長期性能を評価</li> <li>海外に向けての技術発信を継続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>終端接続部を含めたケーブルシステムとしての熱機械特性の把握が基本となり、ヒートサイクル試験を継続研究で実施</li> </ul>

### 変圧器の市場規模



配電用変圧器の市場規模は、東日本大震災の発生により本プロジェクト開始時点に比べ、国内市場に関する見通しが変わった。このため、震災以降の節電等による需要の落込みを踏まえ、新設需要は考慮せず更新需要のみとした。「電力統計情報」から66 kV または77 kV の変電所出力(1989 年以前は最大電力)と変圧器出力20 MVAから変圧器台数を算定すると設置台数は約10,600 台となり、更新周期を平均50 年と仮定すると更新台数は年平均約210 台となる。しかしながら、震災以降の電力会社の経営状況を踏まえると、計画的更新からオーバーホールによる取替え時期の延伸やガス分析結果による不良変圧器のみの取替え等部分更新・修繕へ移行してしまう可能性もあり、電力用変圧器の将来市場は不透明な状況である。

### 本プロジェクト実施者の線材メーカー各社の実用化イメージと課題

	住友電工	古河電工	フジクラ	昭和電線
販売開始のイメージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FY2013～2015 開発</li> <li>・FY2016 (研究開発用,プロト用)</li> <li>・FY2018 (各種用途へ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サンプル提供から行い、市場のニーズにあうところ(性能、量、時期)の線材供給体制を検討。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既に小規模販売</li> <li>・FY2013～(生産規模を拡大)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FY2013～FY2014 (研究開発用,プロト用)</li> <li>・FY2014～(生産規模を拡大)</li> </ul>
販売分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既に小規模に販売</li> <li>・FY2013 (生産規模を拡大)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・送電ケーブル。</li> <li>・コイル等の応用機器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・送電ケーブル</li> <li>・回転機</li> <li>・高磁場発生用マグネット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・送電ケーブル</li> <li>・電流リード</li> <li>・母線</li> <li>・回転機系機器</li> </ul>
実用化への課題 (近未来)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長尺線材特性の局所低下部解消。</li> <li>・機器形状における機械的特性の把握。</li> <li>・市場の要請と熟成。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・更なる安定した線材特性の獲得に向けた量産技術の向上。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・信頼性の確保。</li> <li>・量産時均一性の確保。</li> <li>・製造歩留り向上。</li> <li>・コスト低減。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高性能線材の量産化に伴うコスト低減(原料費、歩留向上等)</li> <li>・基板製造技術の確立及び装置増強</li> </ul>
実用化への課題 (将来)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長単長化(1km 級)と品質安定化の両立。</li> <li>・量産プロセス確立した上でのコスト低減。</li> <li>・品質面の長期信頼性特性の把握。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・線材の更なる低コスト化。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現用常電導機器、金属超電導機器に対して優位性を持つことができる線材性能やコストの低減化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト化</li> <li>・生産量増</li> <li>・更なる高性能化</li> </ul>

国際標準化を目指した標準化事業の今後の積極的展開



開発項目	今後の展開
①超電導線材関連技術標準化	IEC/TC90において、 <b>超電導線材の通則</b> についてCD2(委員会原案の第2版)発行、平成26年度にCDV( <b>投票用委員会原案</b> )提案予定。 <b>Y系線材の国際RRT</b> により臨界電流試験方法に関する国際規格化が進められる。
②超電導電力ケーブル関連技術標準化	<b>ジョイントアドホックタスクフォース(J ahTF)</b> が設置、国際規格提案をめざしIEC/TC20主導で活動。
③超電導電力機器関連技術標準化等	IEC/TC90とCIGRE D1との間でリエゾン関係。材料、絶縁及び冷却技術分野における <b>高温超電導電力機器の共通事項</b> について連携して活動。
④超電導分野の国際標準化活動	従来、基盤的規格である超電導材料の試験方法規格を提案、今後は、 <b>超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大</b> の観点から、本プロジェクトで得られた成果を基に <b>高温超電導技術に関連した製品規格の標準化</b> を目指すことにシフトしていく必要がある。また、 <b>超電導エレクトロニクス素子</b> 等に関して国際標準化をめざした活動を継続。

知的財産権、成果の普及

	特許			論文			研究発表・講演	受賞実績	その他外部発表(プレス・展示等)
	国内	外国(パリルート)	PCT出願	査読有	その他	投稿中			
H20年度	7	0	0	25	2	13	70	1	6
H21年度	27	0	2	54	15		241	2	8
H22年度	14	1	4	44	4		203	3	6
H23年度	23	2	7	33	1		181	3	14
H24年度	31	0	5	24	8		224	0	25
合計	102	3	18	180	30	13	919	9	59

2013年6月24日集計

## 実用化につなげる戦略

### ○一般への普及啓発活動

毎年開催の「エコプロダクツ展」に出展

(約17～18万人の入場者)

2008：「超電導EXPO2008」

2009：「超電導パビリオン」

2010-2012：「スマートグリッド」



#### -内容-

超電導の未来イメージ(ジオラマ)、サンプル展示、具体的なパネル展示、磁気浮上等の実験・実演、アンケート調査等を実施

その他：各種学会で研究開発活動のパネル展示紹介

### ○研究開発成果の実用化に向けて対応

「産業用超電導線材・機器技術研究組合」(iSTERA)を設立。

新しい研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度：H21年9月24日設立)を活用。

#### -内容-

本プロジェクトの研究開発成果の早期実用化を目指し、ALL Japan 体制での超電導産業の育成とともに国際市場への進出も視野に入れている。

### ○超電導産業における国際協調・連携

毎年開催の国際超電導産業サミットの主催・共催

加盟団体：日本 (ISTEC)、米国 (CCAS)、欧州 (CONNECTUS)、ニュージーランド (NZHTSIA)、韓国、ロシア

#### -内容-

超電導技術の産業化、商業化の目標に向けて企業研究機関の経営幹部、マネージャー等が討議、結果はコミュニケを出し、新聞報道等を通じ周知を図る

### ○標準化事業の展開

国際標準化活動の主導的役割を果たしている

IEC/TC90の幹事国

ISTEC内にIEC/TC90超電導委員会を設置。



#### -内容-

これまで18件の規格を制定(超電導線材等の試験方法規格が主)

Y系超電導線材、電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化に資する調査研究、国際規格案のIEC/TC90への提案を経て、国際標準規格制定を目指している。また、NEDO事業の「Biケーブル実証プロジェクト」と緊密に連携して、「国際大電力システム会議:CIGRE」とも連携し、製品規格化の国際合意の醸成を目指している。

# 公開セッション

# END