

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

(中間評価) 分科会

資料7

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

プロジェクトの詳細説明資料【公開】

**(1) 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究****① 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証**

平成21年11月25日

住友電気工業株式会社  
増田 孝人

## 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

**開発目標**

●基本計画 : 高温超電導ケーブルの重要要素に関して実系統に適用しうる所定の性能、機能を有し、送電システムが構築できることをモデルシステムによって検証する。

項目	中間目標(H21年度)	最終目標(H24年度)	
要素技術 開発	低交流損失化	<b>【1】&lt;1 W/m/ph @ 2kA</b>	<b>&lt;1W/m/ph @ 3kA</b>
	対短絡電流	<b>【2】31.5kA @ 2secでダメージなし</b> <b>【3】10kA@2sec通過後、定格課通電可</b>	同左
	中間接続部の接続抵抗	<b>【4】&lt;1μΩ/箇所 @ 2kA</b>	<b>&lt;1μΩ/箇所 @ 3kA</b>
システム	30m検証用システムの構築	<b>【5】30m級ケーブルの設計、製造</b> <b>【6】接続部の設計、製造</b> <b>【7】検証システム建設</b>	—
	30m検証用システムの評価	<b>【8】定格性能の検証</b> <b>【9】ヒートサイクルの影響確認</b> <b>【10】限界性能の確認</b>	—

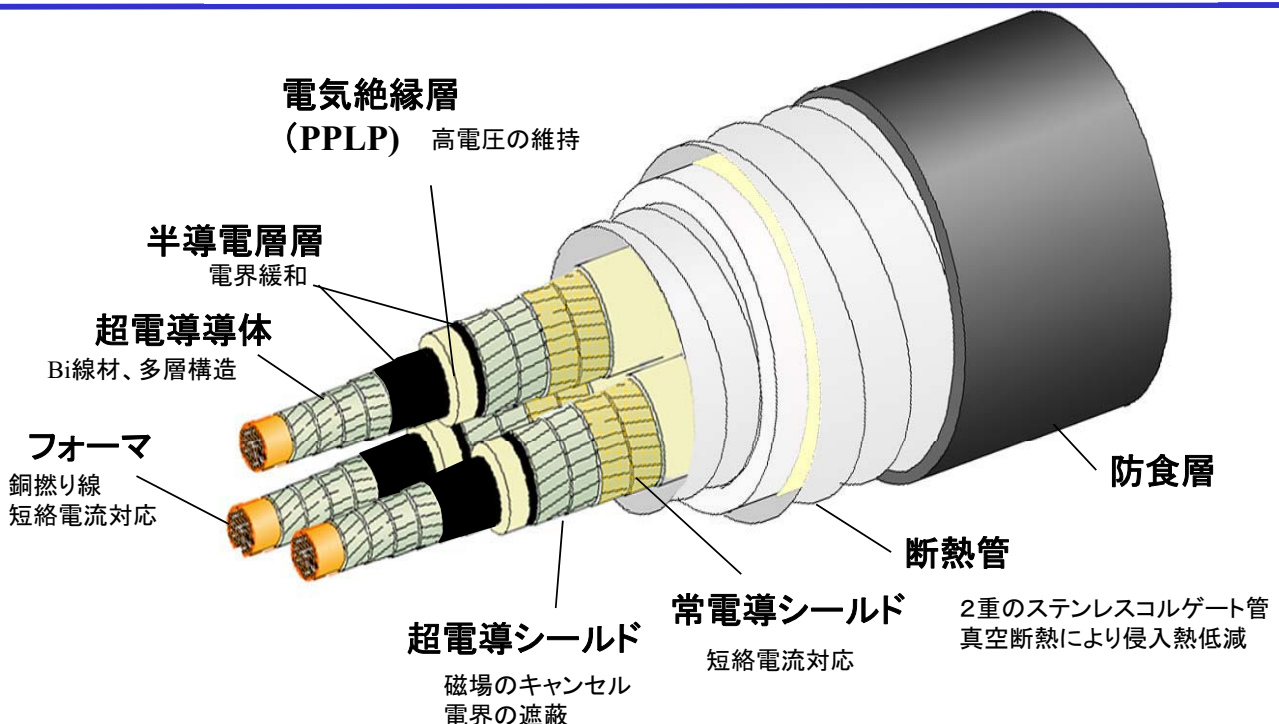
赤字: 基本計画記載事項、青字: 実施計画書記載事項

# 研究開発目標の根拠・意義

主な開発目標	根拠
最終目標値： 定格 66kV/3kA 容量 350MVA	既存275kVケーブルの代表的ケーブル容量350MVAを66kV超電導ケーブルで実現するために必要な目標値
中間目標値： 定格 66kV/2kA 容量 200MVA	66kV系統における代表的な送電容量 (154kV/66kV変圧器の2次側定格容量に相当)
交流損失： 1W/m/相	超電導ケーブルの冷却に必要なエネルギーを考慮しても、送電損失が既存ケーブルの1/2以下となる損失レベル
短絡電流： 31.5kA、2sec	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
ケーブルサイズ： φ150mm管路収容可能	66kV既存ケーブル用の代表的な管路サイズ
1年間の実証試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対環境性を考えた場合、四季を経験させる最小の期間</li> <li>・ 従来ケーブルにおける開発試験の期間は半年～1年</li> <li>・ 冷却システムのメンテナンス間隔の最低期間</li> </ul>

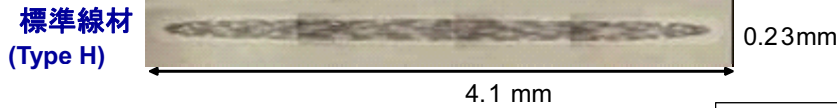
## 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

# 三心一括型超電導ケーブル構造

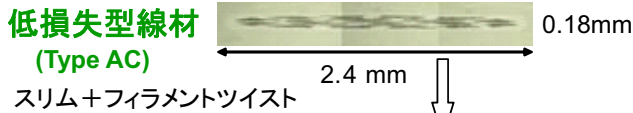


# 主要成果 【1】低交流損失化(1)

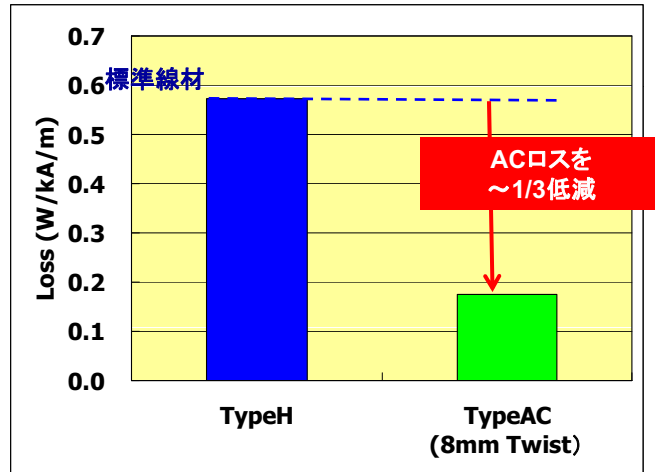
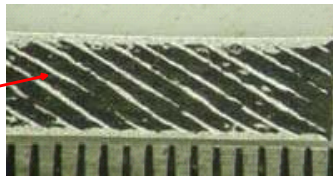
低損失型DI-BSCCO線材 (TypeAC) 開発 [住友独自開発]  
 TypeAC “スリム + フィラメントツイスト” → ACロス低減可能



@ Parallel Field 0.07T, 50Hz



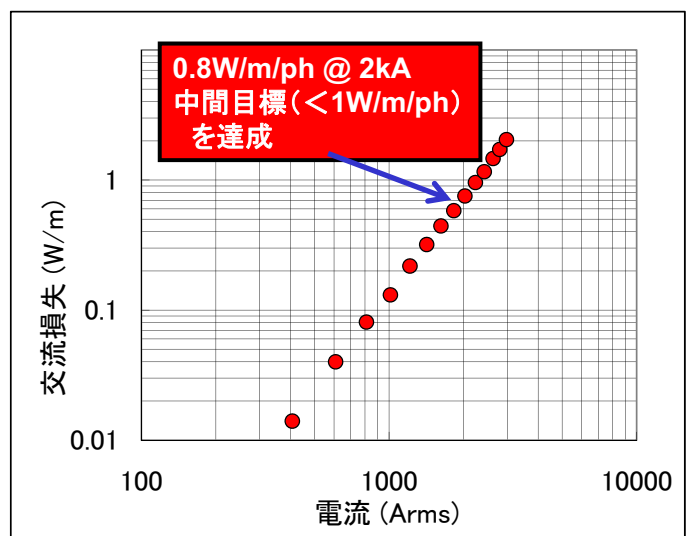
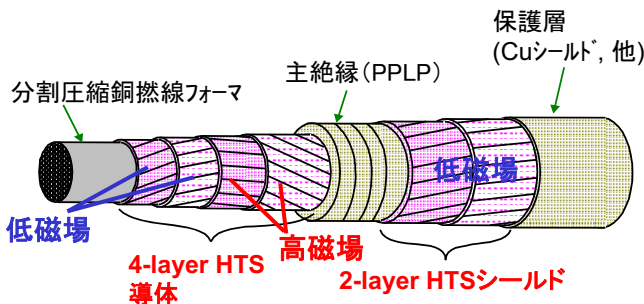
フィラメントツイスト  
: 8mm ピッチ



# 主要成果 【1】低交流損失化(2)

低損失線材と標準線材を組合わせて使うケーブル導体構造を開発

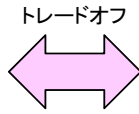
高磁場部: 導体3, 4層目 → 低損失線材適用  
 低磁場部: 導体1, 2層目、シールド  
 → 標準線材適用



# 主要成果 【2】短絡電流対応 対応方針

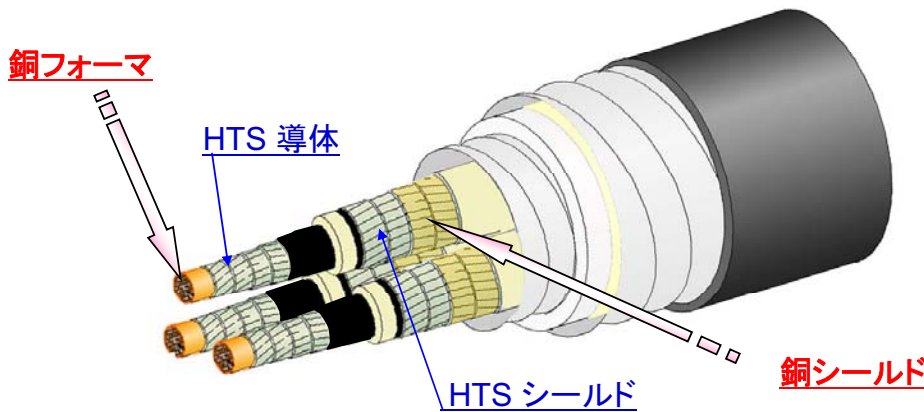
III p.27-28

過電流をフォーマ、銅シールドに流し、  
温度上昇を抑制する。



サイズ制限  
(Φ150mm管路適用)

→ フォーマ140mm<sup>2</sup>、銅シールド80mm<sup>2</sup>を選択

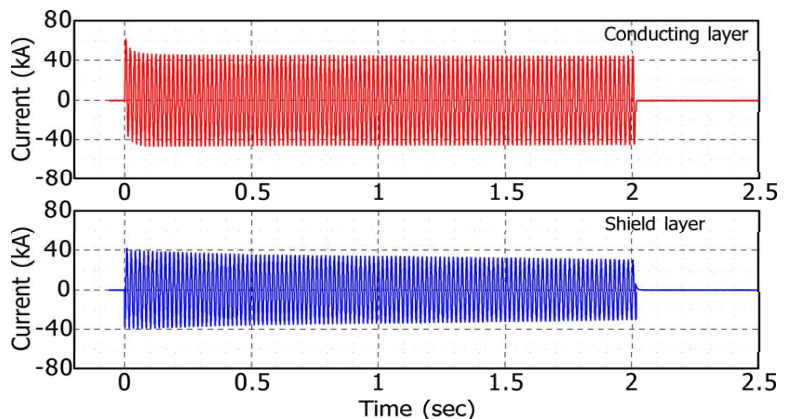
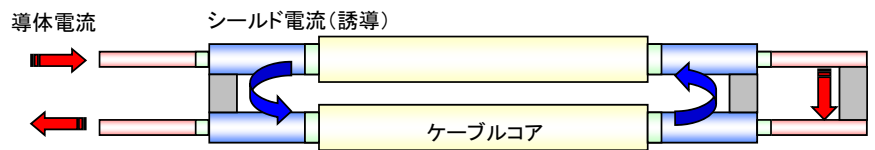


# 主要成果 【2】短絡電流対応 試験方法

III p.28-31

## 試験条件

- 試験電流 : ~ 31.5kA
- 通電時間 : ~ 3sec
- 冷却条件 : open bath (77K)
- サンプル長 : 2.4 meter

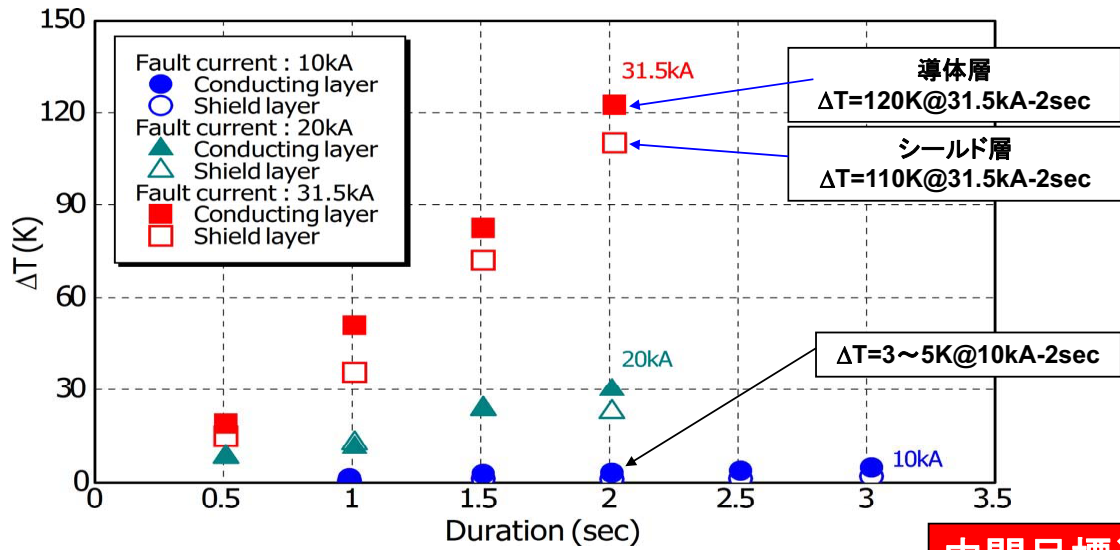


試験波形の例 (31.5kA<sub>rms</sub>(44kA<sub>p</sub>), 2sec)



# 主要成果 【2】短絡電流対応 試験結果

IIIp.28-31

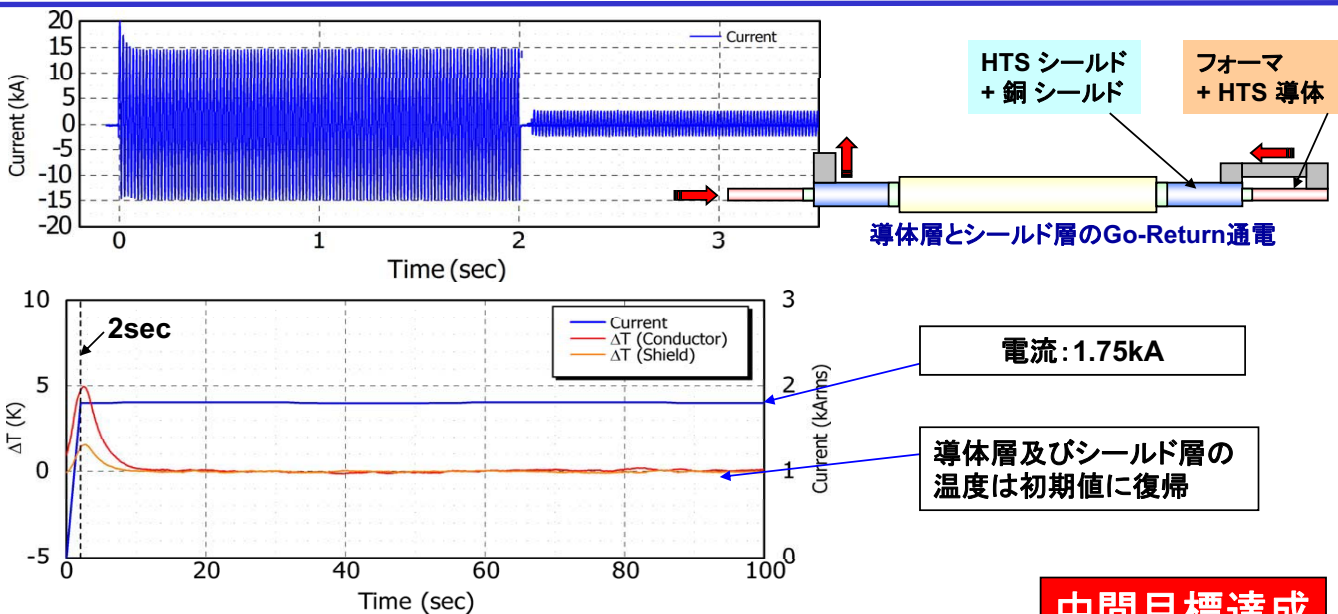


中間目標達成

Ic 特性 : 短絡試験前後でIc特性に変化なし(ダメージなし)

# 主要成果 【3】短絡電流対応 もらい事故通電試験

IIIp.31-33

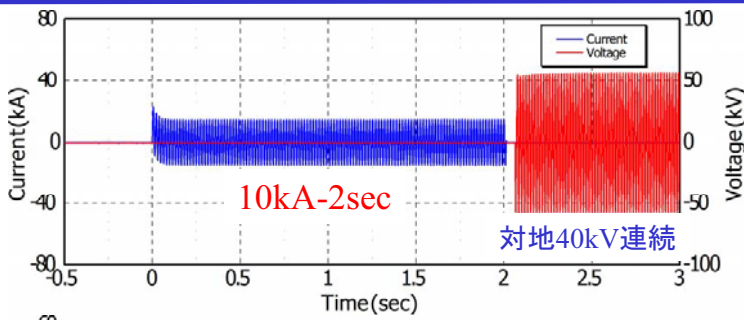


中間目標達成

● 10kA-2secの短絡電流印加後に1.75kAを安定に連続通電可能

# 主要成果 【3】短絡電流対応 もらい事故課電試験

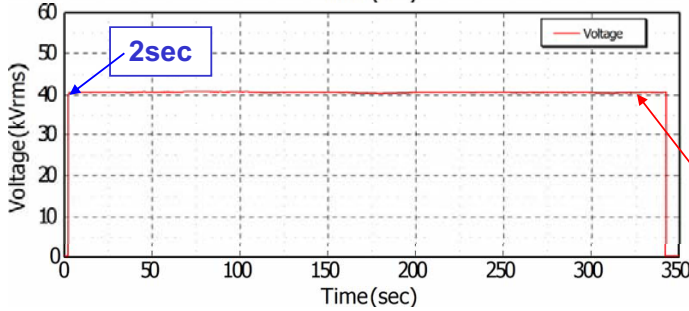
III p.33 -36



冷却 : Open Bath (77 K)

Ic : 導体層 4800 A

『ジョイント込み』のサンプルの導体層に過電流通電を行った直後に課電



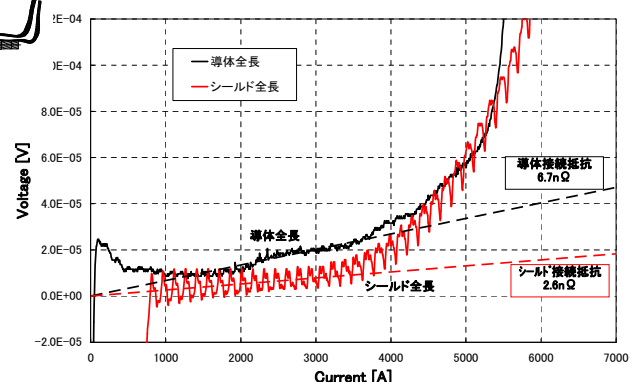
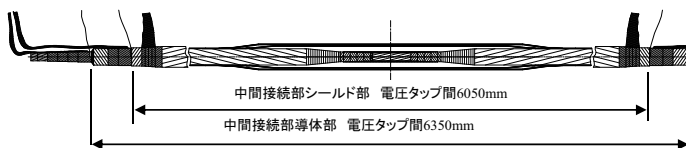
**中間目標達成**

10kA-2secの短絡電流通過後に対地40kV課電可能なことを確認

# 主要成果 【4】中間接続部の接続抵抗

III p.41 -42

導体・シールド接続部のDC抵抗測定結果



測定箇所	接続抵抗/相
HTS導体ブリッジ部	6.7nΩ
HTSシールドブリッジ部	2.5 nΩ

**中間目標達成**

# 主要成果 【5】検証用30mケーブル(設計)

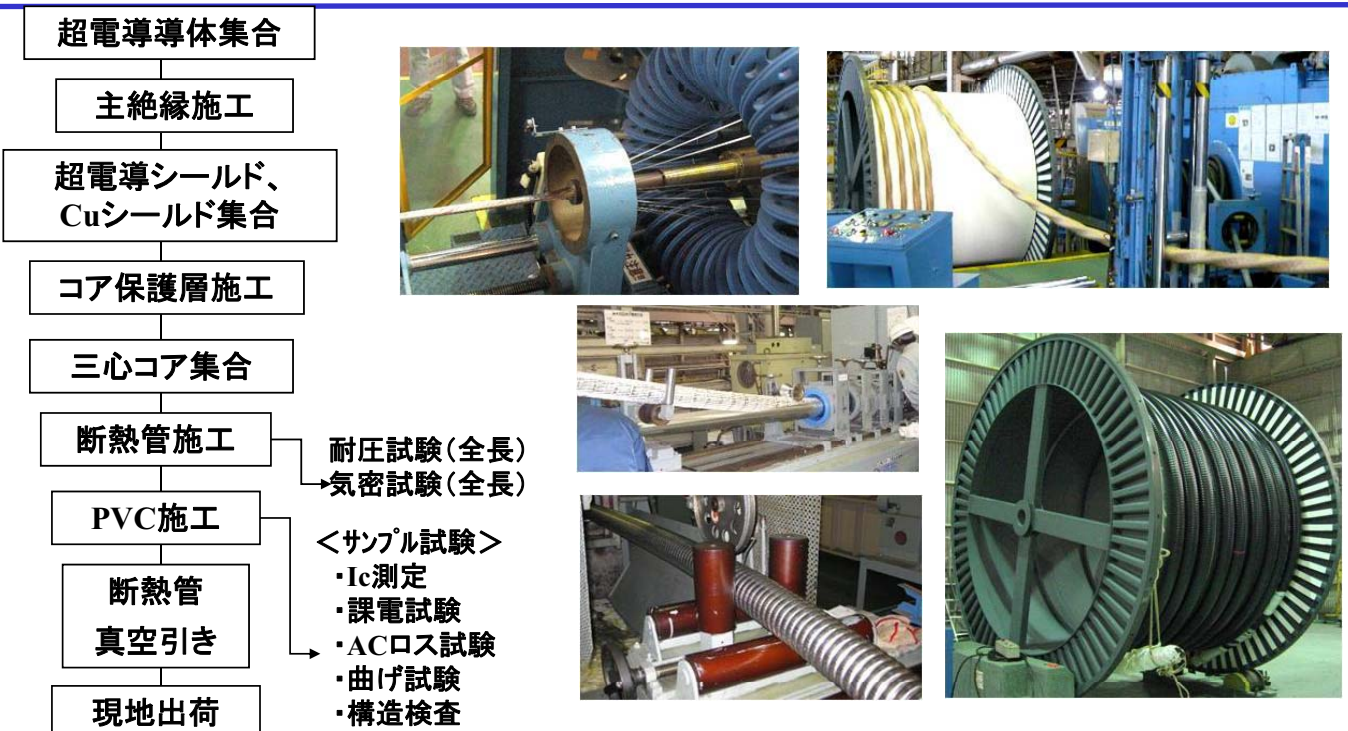
III p.71-77

項目	設計諸元	補足
フォーマ	素絶分割集合導体(140mm <sup>2</sup> )	短絡試験結果より選定
HTS導体	4層(線材:HT/HT/ACT/ACT) 素線のIc総和: 約6100A	設計交流損失 0.5W/m/ph @ 2kArms
主絶縁	PPLP-7mm厚	(6mm厚でスペッククリア) 今回は実績と裕度を考え7mm厚を採用
HTSシールド	2層(線材:HT/HT) 設計Ic: 約7000A	設計交流損失 0.3W/m/ph @ 2kArms
保護層	Cuシールド(80mm <sup>2</sup> )、保護紙&布テープ	Cuシールドは短絡試験結果より決定
三心コア	撚りピッチ: 約1200mm	従来実績準拠(ケーブル試作で確認済)
断熱管	SUSコルゲート二重管	東電-住友100mと同等構造を採用
防食層	PVC-3.5mm厚	従来ケーブル規格準拠

※3心コアのうち 2心:超電導コア、1心:ダミーコア(絶縁厚6mm)

# 主要成果 【5】検証用30mケーブル(製造)

III p.78





# 主要成果 【5】検証用30mケーブル(出荷試験)

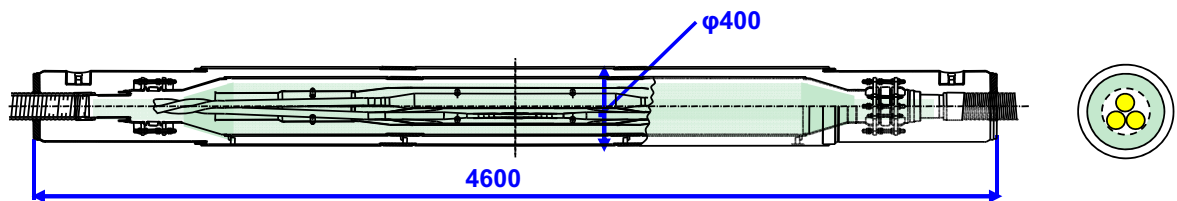
試験No	試験項目	サンプル	試験結果	備考
No.19	Ic測定	三心コア:6m	■ 導体:6100A(赤相)、6080A(青相) ■ シールド:7090A(赤相)、7080A(青相)	素線Icからの計算値と一致
No.20	ACロス測定	単心コア:2m	■ 0.83W/m/コア@2kArms	目標達成(≦1W/m/コア@2kA)
No.33	インダクタンス測定	単心コア:2m	■ 0.12μH/m	計算値(0.12μH/m)と一致
No.1 No.4 No.7 No.8	課電試験	単心コア:5m (ジョイント含)	【試験条件】 77K, 0.2MPaG ■ AC耐電圧試験 : AC 90kV-3hr : 良好 AC 150kV-10min : 良好 ※PDなし(PD感度 60pC) ■ 雷インパルス試験 : ±385kV/各3回 : 良好 ±475kV/各3回 : 良好 ■ DC耐電圧試験 : DC 152kV-10min : 良好	スペックを満足する良好な結果を得た
No.16	曲げ試験	ケーブル:6m	【試験条件】 直径2.4m(16.7D相当), 180度曲げ2回 ■ 導体およびシールドIcに変化なし(健全) ■ 解体調査で、超電導線&絶縁層に有害な異常なし	出荷ドラム径:2.6m
No.15	構造検査	ケーブル:1m	■ 各部寸法(サイズ、ピッチ)等が設計に対し許容範囲	製造に問題なきことを確認

これらのデータはCIGREで検討するケーブル標準化のための基礎データとして活用する。

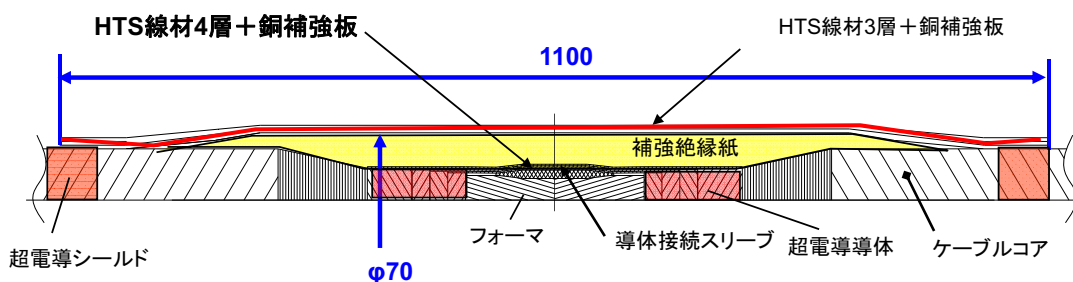
中間目標達成

# 主要成果 【6】中間接続部の構築(設計)

## 3心一括型 ジョイント全体構造



## ジョイント接続部



# 主要成果 【6】中間接続部の構築(設計検証)

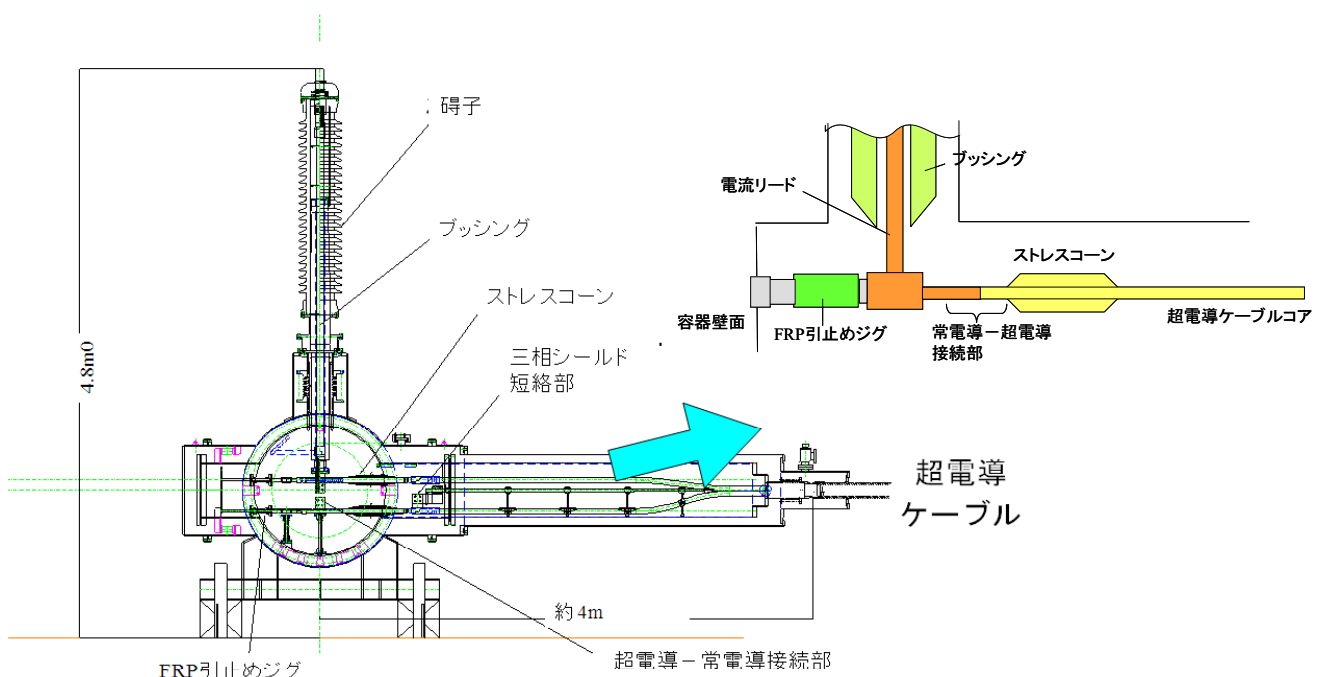
IIIp.38-51

項目	要求仕様	要素試験内容・状況
構造・寸法	省スペース施工可能なこと (~7mマンホール目標)	構造: 7mマンホール対応 組立・施工性を確認済み
電気特性	耐電圧特性	実証HTSケーブルに準拠 AC 90kV/3h, 150kV/10min, OK Imp ±475kV, OK
	通電特性	①DC抵抗 1μΩ/相以下@3kA ②AC 3kArms連続通電で安定 運転可能 2.75kA連続通電(大気圧LN2浸漬条件)確認 → 中間目標(2kArms連続通電)達成 → 過冷却条件で3kA通電試験を計画
	短絡電流特性	①31.5kA, 2secでダメージなし ②10kA, 2secで再送電可能 ①31.5kA, 2secでIcに変化なし ②10kA, 2sec直後に、1.75kA通電・40kV課電 可能
機械特性	ケーブル 応力対応	引っ張り : 最大 3ton/3相 圧縮 : 0.5ton/3相 三心ジョイントサンプルにて、 引っ張り: 最大3.8ton/3相でIc低下なく良好 圧縮 : 0.5ton/3相でIc低下なく良好
	圧力設計	最大圧力 : 0.6MPaG 気密試験(0.6MPaG)を良好に完了

**中間目標達成**

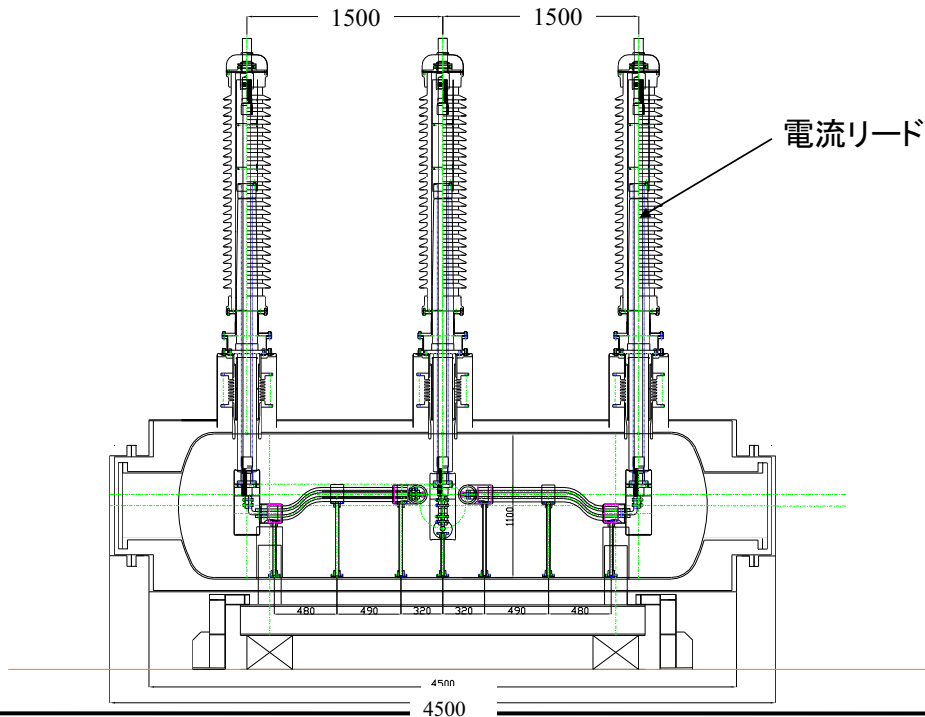
# 主要成果 【6】終端接続部の構築(設計)

IIIp.54-55



# 主要成果 【6】終端接続部の構築(設計)

IIIp.54 -55



超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価

公開



# 主要成果 【6】終端接続部の構築(設計検証)

IIIp.56 -68

検討項目		要求特性	要素試験内容・状況
電気特性	耐電圧	実証HTSケーブルに準拠	端末接続部および容器単体で耐電圧試験を実施 AC : 90kV/3h, 150kV/10min, OK Imp : ±475kV, OK
	通電	定格1.75kA、最大電流 3kA	端末接続部モデルサンプルで3kA×8時間通電、良好
	短絡電流	①31.5kA/2secでダメージなし ②10kA/2secで再送電可能	ストコン部モデルサンプルにて ①31.5kA/2secでIcに変化なし ②10kA/2sec直後に定格1.75kA通電可能
機械特性	ケーブル熱伸縮	引張り最大3ton/3相 圧縮 0.5ton/3相	FRP引留治具、コア接続部 引張1.5ton/相、圧縮0.3ton/相を確認済み
	耐圧	最大圧力 0.6MPaG	気密試験(0.6MPaG)を良好に完了
	電磁力	短絡電流通過時に発生する電磁力に耐える構造	電磁力解析を実施済み(最大:約200kgf/m@31.5kA) モデルサンプルにより試験を実施、Ic低下なく良好 電磁力は最大約230kgf/mと解析値とほぼ同等レベル
	耐震性	垂直:0.15G 水平:0.3G	LN2槽断熱支持固定設計&端末容器の大地固定設計, 完了
熱的特性	電流リード損失	コンパクト化と低損失をバランス	モデル試験で約170W/本 → 設計/実測と良く一致

中間目標達成

超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価

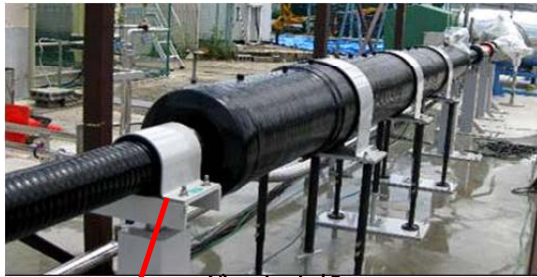
公開



# 主要成果 【7】検証システムの構築



HTSケーブル



ジョイント部



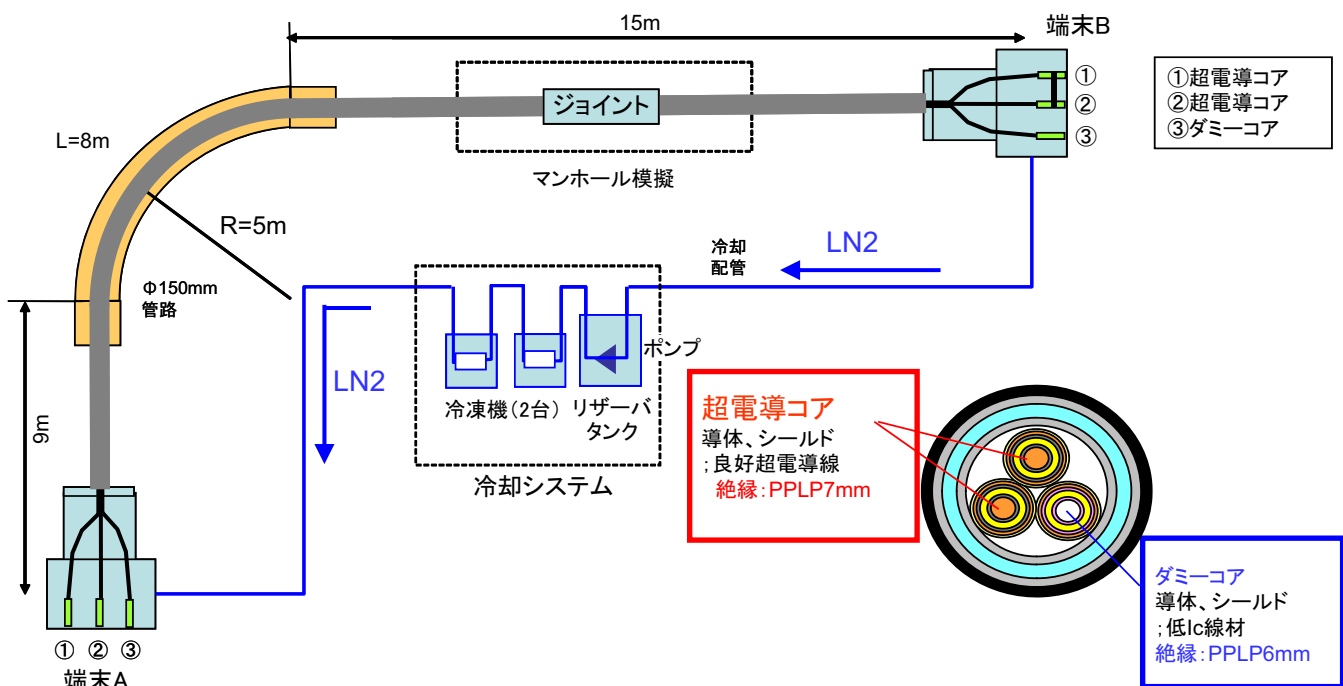
端末部



冷却システム室

**中間目標達成**

# 主要成果 【7】検証システムの構築



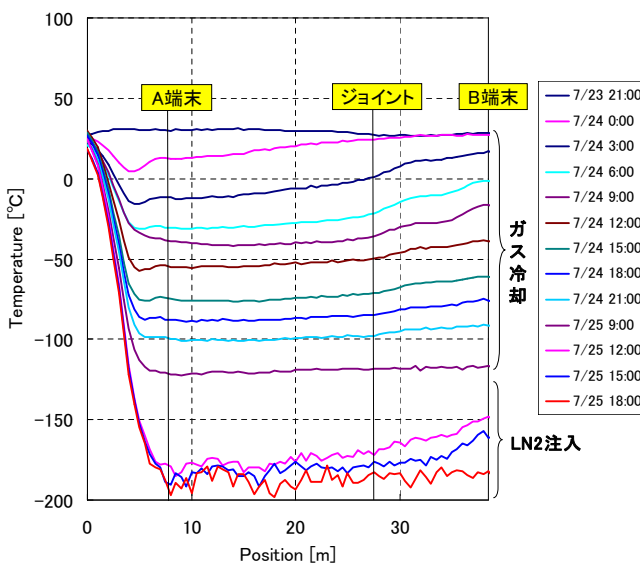


主要成果 【8】検証用システムの評価(試験計画)

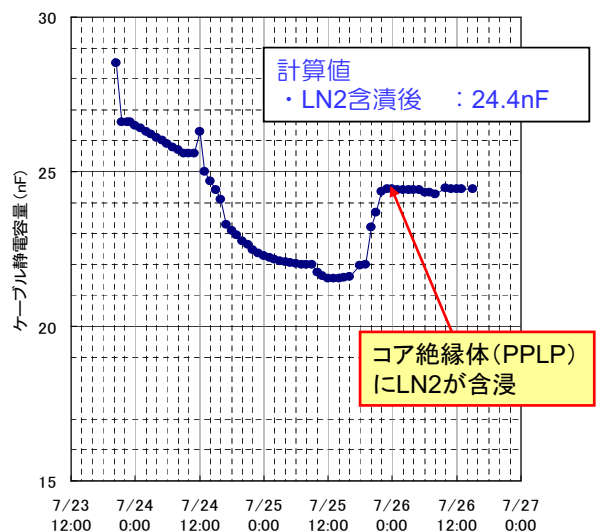
試験目的: 設計した超電導ケーブル含む各機器の送電システムとしての機能確認

試験名	予定	試験項目・内容	
① 定格確認試験	H21/7 ~9	電気特性試験	Ic測定(導体部)、シールド誘導電流計測 C・tanδ特性確認、定格課通電(対地40kV, 2kA)
		機械特性試験	冷却時の張力測定
		熱的特性試験	ACロス測定、断熱管侵入熱測定
		長期課通電試験	対地51kV-連続、 通電2kA-8hrON/16hOFF、1ヶ月
② ヒートサイクル試験	H21/9 ~10	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
③ 限界性能確認試験	H21/11 ~H22/1	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
		限界性能試験	短絡電流模擬試験(～10kA)、 過電流通電(～3kA)試験、冷凍機故障模擬試験

主要成果 【8】検証用システムの評価(定格確認試験)



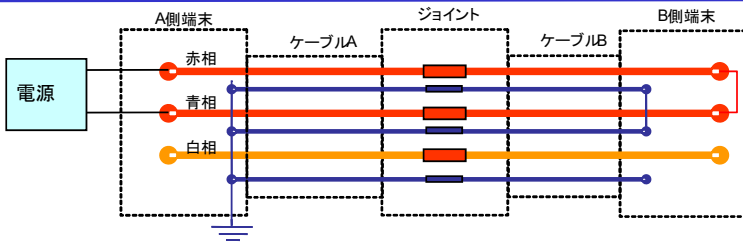
【ケーブル初期冷却時の温度プロファイル】



【冷却に伴うケーブル静電容量の変化】

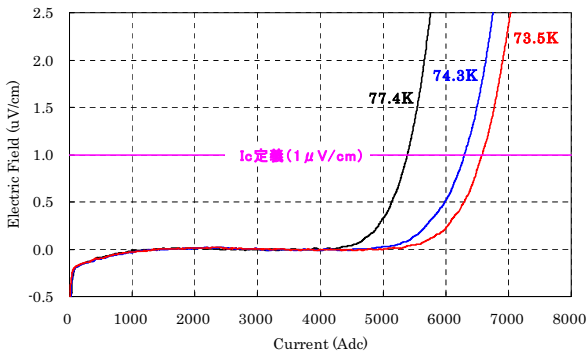
主要成果 【8】検証用システムの評価(定格確認試験)

IIIp.96-98



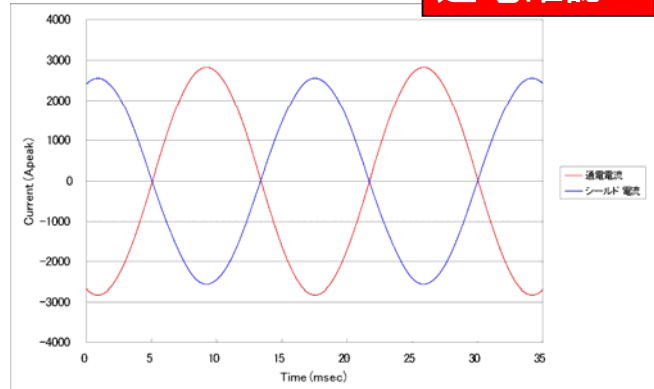
超電導ケーブルコア2相を用いて、  
Ic測定、AC通電試験を実施。

- Ic測定結果: 導体のIcは5.4kA~6.5kA  
→ 磁場、温度を考慮した設計値とよく一致  
→ 製造、冷却を通じてケーブルダメージなし



- AC通電試験結果:  
定格2kAの連続運転に成功

設計通りの  
通電確認



主要成果 【8】検証用システムの評価(定格確認試験)

IIIp.100-101



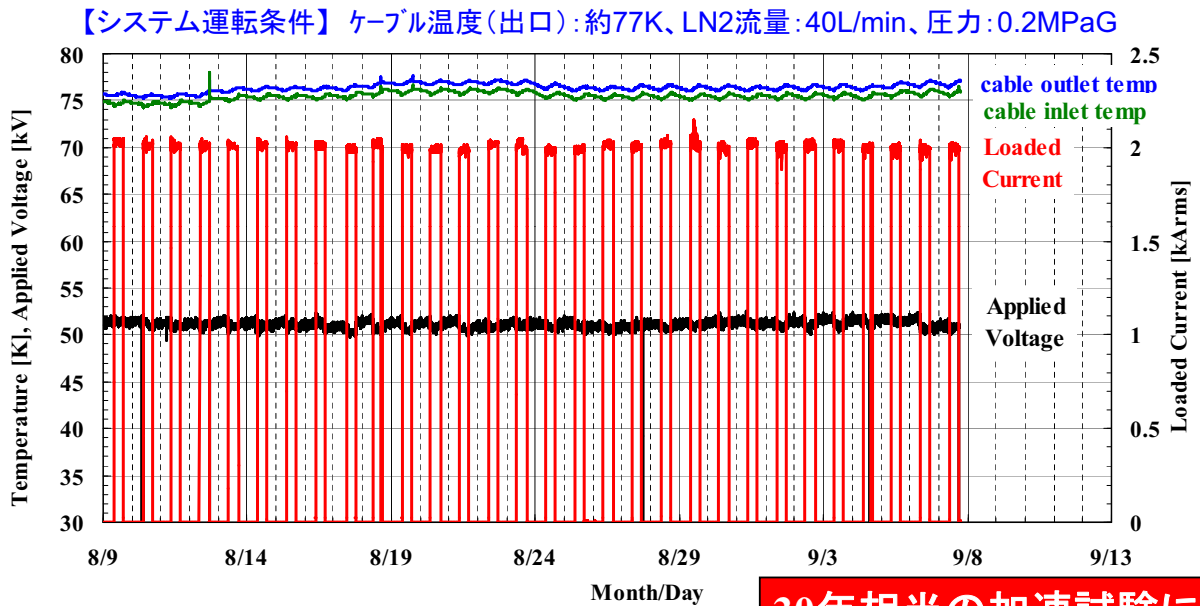
【定格課通電および長期課通電条件】

- 電圧: 51kVrms (対地、単相)
- 電流: 2kArms / 8時間ON - 16時間OFF
- ケーブル温度(出口): 約77K
- 試験期間: 約1ヶ月

- ◆ 超電導コア導体(2相)にCTで通電
- ◆ 超電導シールド(2相)は誘導でシールド電流が流れる
- ◆ 超電導コア導体(2相) & ダミーコア導体(1相)、すなわち3相に電圧が印加される

主要成果 【8】検証用システムの評価(定格確認試験)

長期課通電試験 (51kV/連続, 2kArms通電—8時間ON/16時間OFF)



30年相当の加速試験に成功

開発目標(中間)の達成度

項目	中間目標(H21年度)	達成度	
要素技術 開発	低交流損失化	<b>【1】&lt;1 W/m/ph @ 2kA</b>	達成
	対短絡電流	<b>【2】31.5kA @ 2secでダメージなし</b> <b>【3】10kA@2sec通過後、定格課通電可</b>	達成 達成
	中間接続部の接続抵抗	<b>【4】&lt;1μΩ/箇所 @ 2kA</b>	達成
システム	30m検証用システムの構築	<b>【5】30m級ケーブルの設計、製造</b> <b>【6】接続部の設計、製造</b> <b>【7】検証システム建設</b>	達成 達成 達成
	30m検証用システムの評価	<b>【8】定格性能の検証</b> <b>【9】ヒートサイクルの影響確認</b> <b>【10】限界性能の確認</b>	達成 <b>【8, 9】 達成見込み (H22/3)</b>

赤字:基本計画記載事項、青字:実施計画書記載事項

# 知的財産権、成果の普及

## 知的財産権 <出願状況>

出願年	要素技術・製造技術	施工・運用技術	冷却システム
H19年度	9	0	0
H20年度	7	4	0
H21年度 (11月現在)	0	4	1

「重要要素技術  
の検証」テーマ  
対象特許

※本PJ推進のために、受託者費用で実施した関連研究に基づく特許出願を含む

## 研究発表数（論文・講演など）

年度	論文（査読付き）	論文（その他）	その他外部発表
H19年度	0	4	2
H20年度	3	16	3
H21年度 (11月現在)	3	6	2

# 最終目標達成の見込み

### ●実証ケーブルの設計、構築

現在までの検証試験の結果、ケーブル、接続部は所定の性能を示している。今後、ヒートサイクル試験、限界性能試験を実施し、その結果をシステム設計にフィードバックするが、予定通り、H22年に製造を行える見込み。

### ●交流損失 1W/m/ph @ 3kArms

これまでの成果で、線材損失からケーブル交流損失をシミュレーションできる見通しを得た。最終目標を達成するには、超電導線材のさらなる低損失化が必須である。ツイストピッチの短尺化、フィラメント間結合の高抵抗化、高Ic化などの手法を検討していく。



## 成果の実用化の可能性、波及効果

### ●66kV、三心一括型ケーブル

今回開発したケーブル、接続部は、66kV級系統に接続可能な所定の性能を満足した。これにより、実用化に向けての最初のステップをクリアしたと考えられる。今後、最終目標に向けて、さらなる性能向上、信頼性実証を進めていく。

### ●低損失化技術

低交流損失線材は、ケーブル以外にモータ、SMESなどの交流マグネットへの転用が可能である。

### ●ケーブル試験データ

ケーブル標準化のための基礎データ、並行して進んでいるY系プロジェクトのケーブル開発に活用できる。

# (1)高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究

## ②トータルシステム等の開発

平成21年11月25日

東京電力株式会社  
本庄 昇一

## ②トータルシステム等の開発

# 開発目標

**基本計画:**(中間目標)高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、保守方法等のトータルシステムとしての構築要領の作成**(最終目標)** 上記基本指針の作成、送電損失1/2の高効率送電システム設計技術確立

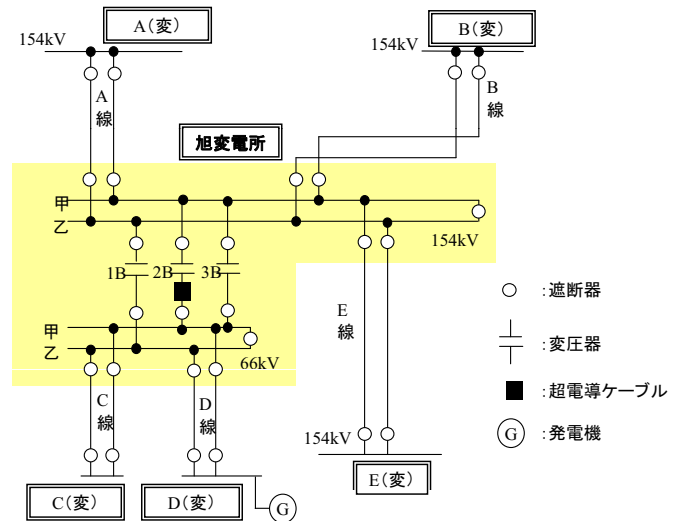
### 実施計画書での中間目標(H21年度まで)

項目	内容	
(a)実証ケーブルシステムの概念設計	実証ケーブルシステムの基本仕様	【1】実証場所の決定 【2】実証ケーブルシステムの基本仕様の整理
	付帯機器の基本設計	【3】運転・監視システム、保護・遮断システムの基本設計
	冷却システムの設計 保守・メンテナンスの基本計画作成	【4】実用化時をイメージした、実証用冷却システムの設計 基本計画の策定
(b)線路建設手法の開発	【5】実証場所での施工基本計画の立案	
(c)実証システムの設計	【6】実証場所レイアウト、実証用ケーブル、ジョイント、端末の設計	

# 主要成果 【1】実証場所の決定

- ・実証試験場所の選定にあたり、東京電力管内の30数か所の候補地から、送電容量、建設スペース等の観点から比較検討し、旭変電所(横浜市)に決定。
- ・旭変電所内での超電導ケーブル接続形態を検討。

154kV/66kV、200MVAの2号変圧器2次側の66kV端に接続



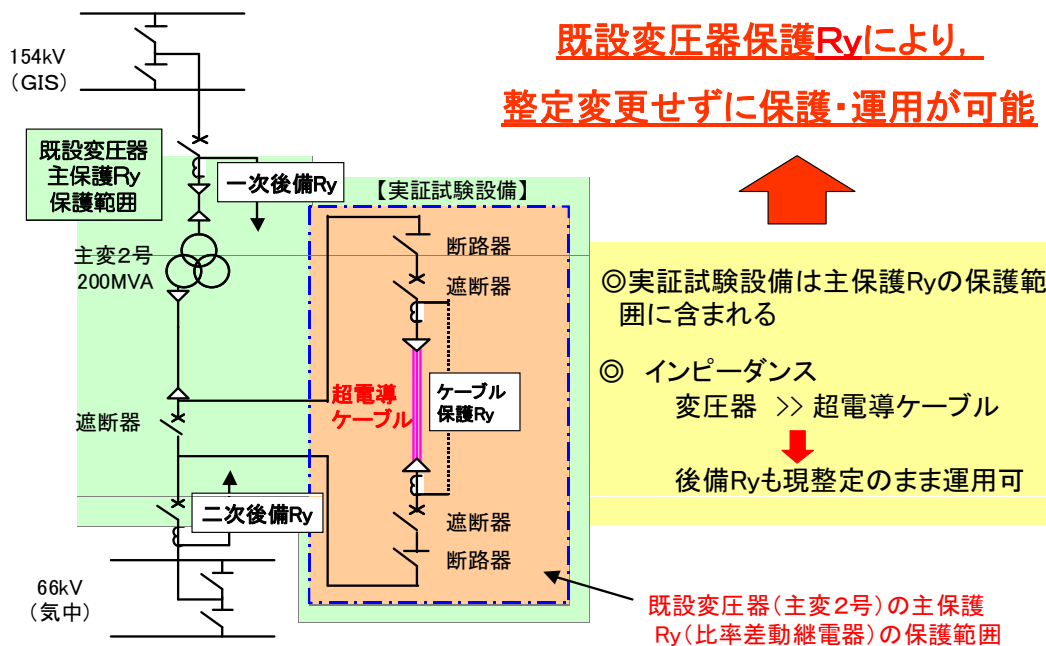
# 主要成果 【2】ケーブル基本仕様の整理

項目	要求事項
電圧階級	66kV(最高使用電圧72kV)
電流容量	1.75kA連続 (変圧器定格容量200MVA相当)
過負荷電流耐量	変圧器過負荷条件を満足(135%連続等)
短絡電流耐量	・31.5kA-2sec, 10kA-3secでケーブルにダメージなし (短絡電流通過後の課電通電なし)
	・10kA-2sec通過後の定格課電・通電が可能なこと。 (短絡電流通過後の課電通電あり)
	・短絡電流通電後の復帰時間明確化 (短絡電流通過後の課電通電あり・なしの双方で)
雷インパルス耐電圧	±350kV

③送電システムの  
運転技術にて  
詳述

➡ ケーブル設計へフィードバック

# 主要成果 【3】保護・遮断システムの検討



# 主要成果 【4】冷却システムの検討(仕様)

●実用化を想定した実証試験冷却システムの開発方針  
**運転を中断しない技術の検証(高信頼性)、負荷変動等に追随した運用**

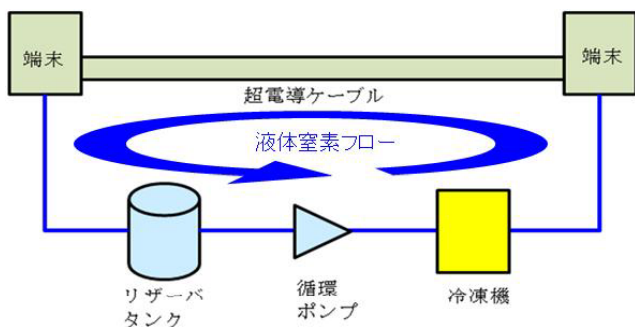
冷却システムへの要求事項

項目	要求事項	本プロジェクトでの対応方針
信頼性	・冷却システムの故障によりシステムの運転を止めないこと	・冷凍機、ポンプ等主要機器は冗長性を持たせ、連続運転可能とする。 ・故障機器からの切り替えは自動で行うこととする。
運転・制御	・長期安定運転が可能な制御システムであること ・異常検知、警報発信のシステムを備えていること	・温度: 入口温度を設定値に自動制御 ・圧力: 最低圧力以上に維持 ・警報システムの構築
保守・メンテナンス	・保守すべき管理項目が明確であること、メンテナンスが容易であること	・保守項目の明確化、メンテナンス方法の検討および検証
経済性	・高効率であること ・安価であること	・冷凍機の高効率化は対応せず ・信頼性とのバランスを考えた設計の実施



# 主要成果 【4】冷却システムの検討(構成)

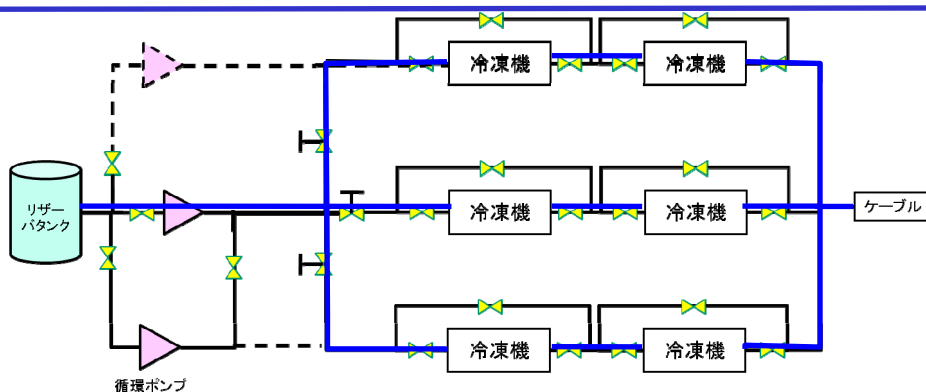
- ・**冷却方式**: 運転実績と応答性の良さから、超電導ケーブルと冷凍機がシリーズにつながる**冷凍機直接冷却方式**を採用
- ・**冷凍機**: 過去の実績と効率の良さから、**1kW級スターリング冷凍機**を採択
- ・**冷凍機台数**: 系統運転での必要台数は5台。故障時の冗長性を考慮し、**予備機1台を含めた6台構成**



通電	0A	1kA	定格 1.75kA
ケーブル総負荷	1746	2112	2780
冷凍機圧損	994		
全負荷	2740	3106	3774
冷凍機台数	3.7	4.1	5.0

予備機1台を含め6台構成を採用

# 主要成果 【4】冷却システムの検討(レイアウト)



項目	内容
常時運転	循環ポンプは交互運転。冷凍機は、2台直列×3並列構成で、バイパス以外のバルブは常時開。冷凍機は必要台数だけON/OFF運転。但し、OFF冷凍機は熱負荷となる。
異常時	ポンプ異常時は、もう一台と切り替え。故障ポンプは切り離し、修理。冷凍機異常時は、OFF冷凍機と切り替え。故障冷凍機はバイパスを使って切り離す。ポンプと冷凍機の故障は独立して扱える。
懸案事項	液体窒素の三分岐流量はバルブ、配管により決まり、能動的な制御は不可。安定性の検討必要。→バックアップとして並列パス毎にポンプ設置可能なレイアウトも考慮。(図点線)

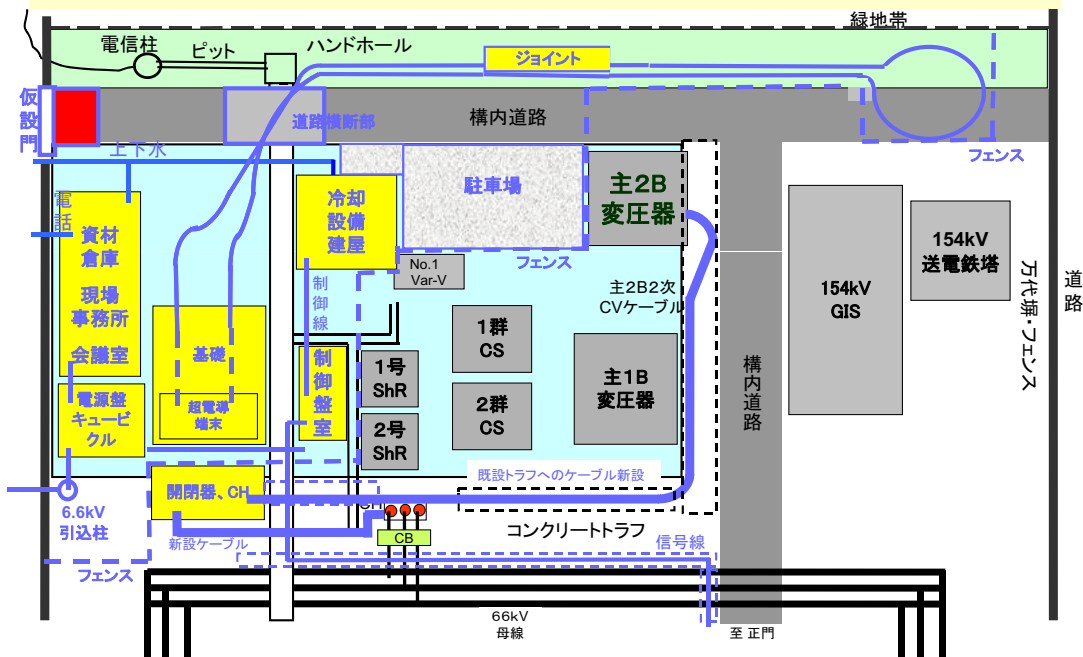
# 主要成果 【5】線路建設手法の開発

実証試験場所の布設条件を考慮した施工計画・スケジュールを策定

項目	時期	平成21年度			平成22年度				平成23年度				平成24年度			
		2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
設計(建築・土木・変電)		■■■■														
現地整備(整地・基礎・上下水・電話)					■■■■											
冷却建屋・工事事務所建設					■■■■											
開閉器基礎・超電導端末基礎・門扉									■■■■							
電源盤搬入・冷却システム搬入組立・試験									■■■■							
開閉器据付・試験													■■■■			
管路布設、超電導ケーブル布設・端末・ジョイント据付施工									■■■■							
超電導ケーブル用リレー設置・試験									■■■■							
ケーブル初期冷却・警報対向試験													■■■■			
既設主変2次ケーブル撤去・新ケーブル布設・CH端末													■■■■			
制御回路切替・シーケンス													■■■■			
給電対向試験・使用前自主検査													■■■■			
<b>実系統連系試験</b>													■■■■			
最終試験・冷却システム停止・昇温・撤去													■■■■			
撤去・復旧													■■■■			

# 主要成果 【6】実証システムの設計

旭変電所における超電導ケーブル布設レイアウトを決定



## 成果と達成度

実施計画書での中間目標(H21年度まで)			
項目		成果	達成度
(a)実証ケーブルシステムの概念設計	実証ケーブルシステムの基本仕様	実証場所の旭変電所に決定 実証ケーブルシステムの基本仕様の整理	達成
	付帯機器の基本設計	運転・監視システム、保護・遮断システムの基本構成を検討	達成
	冷却システムの設計 保守・メンテナンスの基本計画作成	実用化時をイメージした、実証用冷却システムの構成検討。詳細設計中 保守すべき項目と期間、処置法を検討・整理	達成見込み (H22/3予定)
(b)線路建設手法の開発		実証場所での施工手順、スケジュールを策定	達成
(c)実証システムの設計		30mケーブル検証試験の結果を反映し、各部の設計を終える予定。	達成見込み (H22/3予定)

## (1)高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究

### ③送電システム運転技術の開発

# 開発目標

基本計画:(中間目標)高温超電導ケーブルの運転技術が既存送電システムの運転技術と整合するための課題を整理  
 (最終目標)平常時/事故時及び障害復旧時等の送電システム運転技術指針の作成

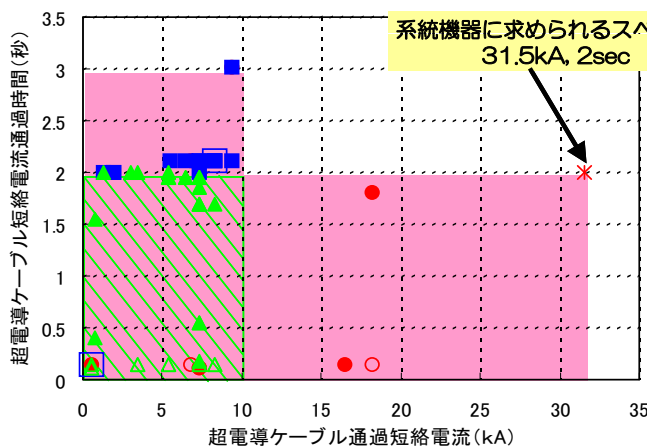
実施計画書での中間目標(H21年度まで)

項目	内容	
(a)高温超電導ケーブルの系統特性調査	系統特性調査	【1】実証場所での短絡電流の調査 【2】実証場所でのサージに対する影響調査
	系統側への影響調査	【3】系統インピーダンスの変化及びその影響検討
	(b)運転技術開発	平常時の運転技術開発
	事故時の運転技術開発	【7】事故時の故障モード分析と超電導ケーブル復帰条件の検討

# 主要成果 【1】短絡電流条件の検討

旭変電所にて想定される事故ケース(17パターン)での電流値・継続時間を算出

	主保護Ry動作	後備保護 Ry動作	備考
超電導ケーブル直近事故 (バンク保護リレー保護範囲内)	○	●	事故直後課電通電「無」
もらい事故(事故電流通過) (バンク保護リレー保護範囲外)	□	■	事故直後課電通電「無」
	△	▲	事故直後課電通電「有」



短絡試験条件

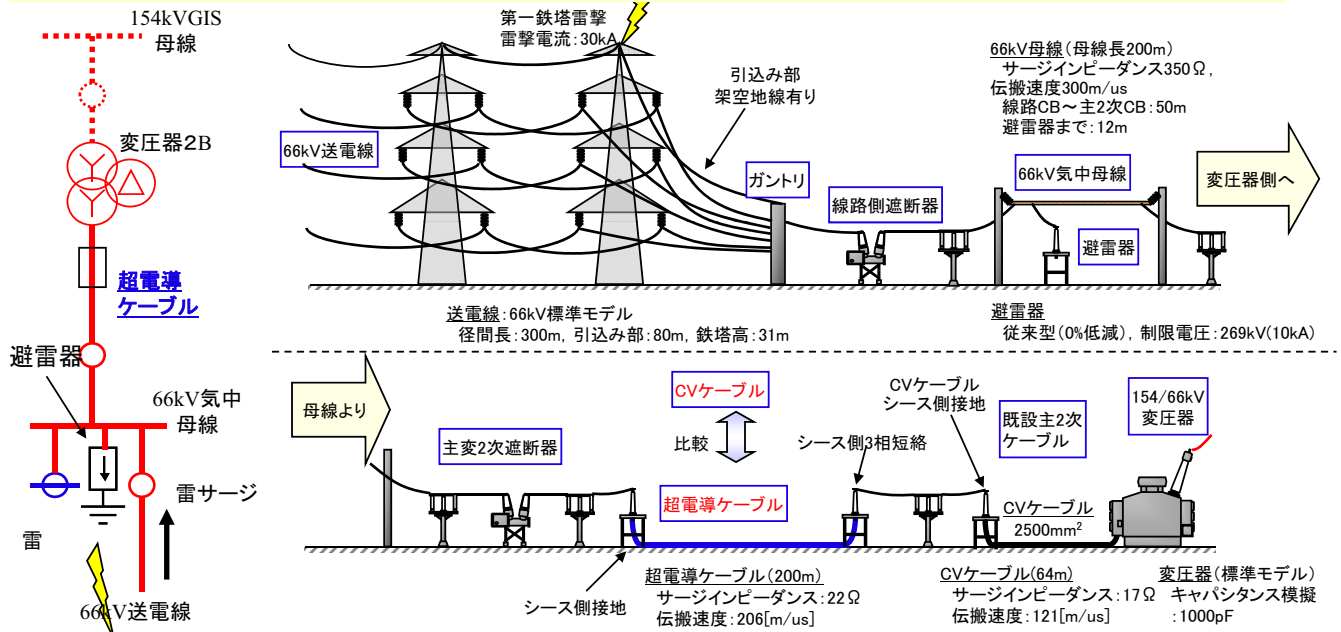
①事故直後課電通電「無」: 0~31.5kA, 2sec  
0~10kA, 3sec

②事故直後課電通電「有」: 0~10kA, 2sec  
(短絡電流直後の課電・通電への影響検討)

ケーブル設計へフィードバック

# 主要成果 【2】サージに対する影響調査

●雷サージ解析 超電導の低インピーダンス特性がサージに与える影響及び試験電圧の検討をEMTP解析を用いて実施



超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価

公開



# 主要成果 【2】サージに対する影響調査

発生過電圧値はCVケーブルのケースと同レベル

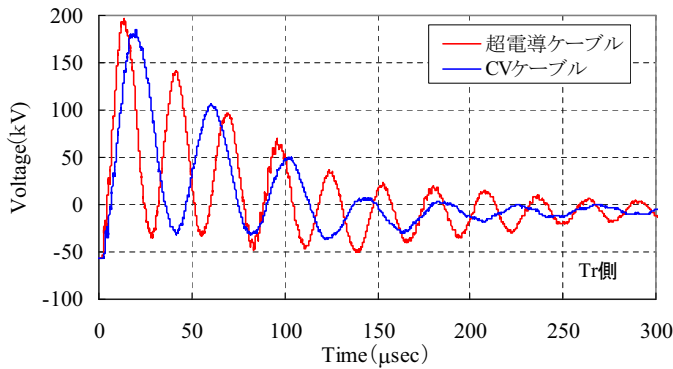


「超電導」の低抵抗特性は雷サージ伝搬特性に影響を与えないことが判明

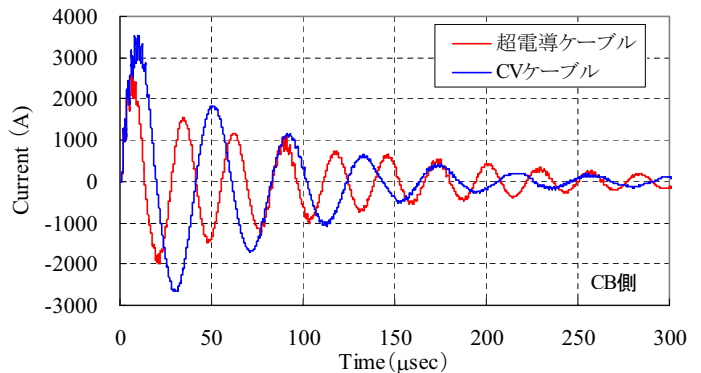
旭変電所での発生過電圧196kV



従来ケーブル規格の雷インパルス耐電圧(LIMV) 350kVを超えない→試験法へ



電圧波形



電流波形

図 雷サージ解析結果 (解析条件: 第一鉄塔、シース片端接地、30kA雷撃)

超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価

公開





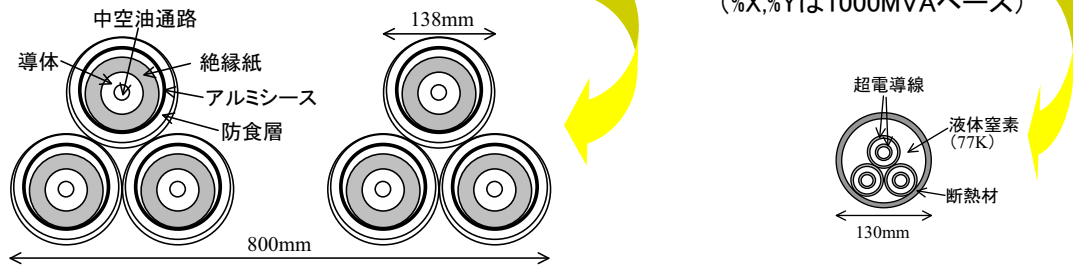
## 主要成果 【3】系統インピーダンスの変化とその影響

従来ケーブルと超電導ケーブルの系統インピーダンス、SIL値を比較・検討

- ・超電導ケーブルは、超電導シールド層の効果で、従来ケーブルよりリアクタンスが1桁以上小
- ・超電導ケーブルは、同電圧の従来ケーブルと比較してSIL値が大きく、大容量送電向き

	電圧	従来ケーブル		
		275kV (OF,CV)	66kV CV	高温超電導ケーブル
リアクタンス	V(V)	275	66	66
	X (Ω/km)	0.114	0.159	0.0165
	%X (%/km)	0.151	3.65	0.378
対地アドミタンス	Y (Ω <sup>-1</sup> /km)	1.19 × 10 <sup>-4</sup>	7.54 × 10 <sup>-5</sup>	1.53 × 10 <sup>-4</sup>
	%Y (%/km)	9.02 × 10 <sup>-1</sup>	3.28 × 10 <sup>-2</sup>	6.65 × 10 <sup>-2</sup>
サージインピーダンスローディング	SIL (MW)	2444	95	419

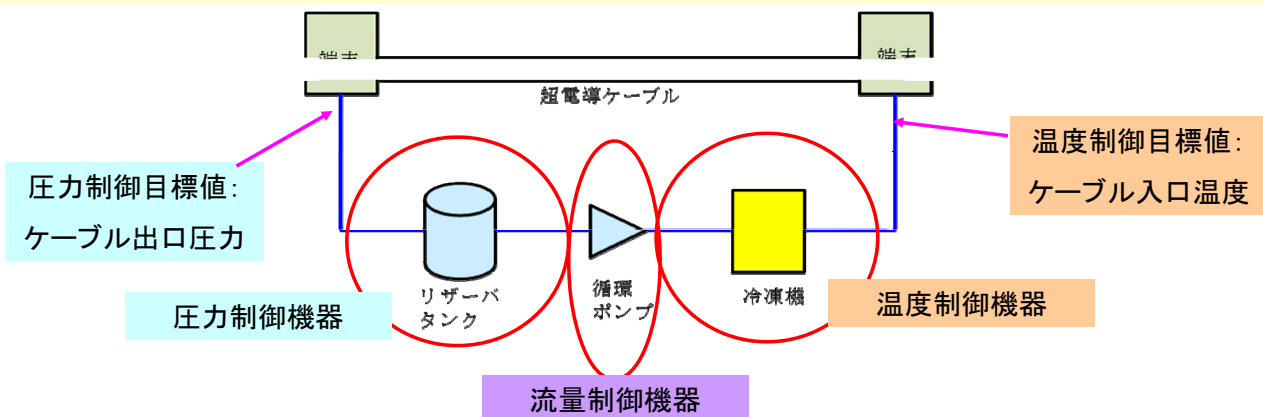
(%X,%Yは1000MVAベース)



## 主要成果 【4】冷却系制御パラメータの検討

平常時の運転技術開発として、液体窒素の運転・制御条件を検討

- ・制御対象: 温度、圧力、流量
- ・基本的な制御方法
  - <温度> 冷凍機の運転制御により実施
  - <圧力> リザーバタンクの圧力コントロールにより実施
  - <流量> 循環ポンプの出力調整により実施



## 主要成果 【4】冷却系制御パラメータの検討

制御対象	基本指針	実証ケーブルでの制御範囲	設定根拠
温度	ケーブル入口温度を所定の温度となるように一定制御する。	65~77 K	<ul style="list-style-type: none"> <li>液体窒素の固化温度:63.5K。裕度を考慮し入口下限を65Kに設定</li> <li>ケーブル臨界電流値の設計温度である77Kを出口上限として設定</li> </ul>
圧力	電気絶縁性能と、経済性を考慮した圧力範囲を設定する。	0.2~0.5 MPaG	<ul style="list-style-type: none"> <li>絶縁層の電気絶縁特性からの要求:0.2MPaG以上</li> <li>下記流量時のシステム圧力損失:0.15MPaG。裕度と経済性を考慮し上限を0.5MPaGに設定</li> </ul>
流量	流量を一定に制御する。	40 L/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量大→運転圧力増加、流量小→温度上昇大</li> <li>両者の兼ね合いから最適点選定</li> </ul>

## 主要成果 【5】温度制御方法の検討

＜温度制御は冷凍機の運転制御により実施＞

- ・制御対象をケーブル入口温度とし、一定温度に維持するように冷凍機出力を制御
- ・得失を考え、インバータ方式とON/OFF運転を採用

(詳細制御方法は冷却システム検証の中で実施予定)

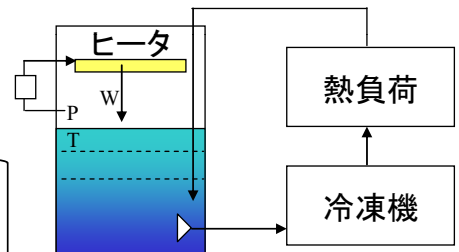
制御方式	内容	制御幅・範囲	デメリット	判断
インバータ	冷凍機の出力をインバータにより制御	60~100% ±0.1K	ノイズ対策の費用大	○
冷凍機内蔵ヒータ	冷凍機はフル運転し、ヒータで負荷調整	0~100% ±0.1K	負荷の増大 ヒータの信頼性	×
ON/OFF運転	負荷に応じた冷凍機台数のみ運転	0~100% ±1K	冷凍機の発停回数増→故障の要因	○

# 主要成果 【6】圧力制御方法の検討

<圧力制御はリザーバタンク内圧力調整で実施>

- ・リザーバタンク内圧力制御により、許容圧力以上(0.2MPa)に圧力維持
- ・N<sub>2</sub>ガス加圧方式とヒータ加熱方式を採用  
(N<sub>2</sub>ガス加圧方式とヒータ加熱方式を組み合わせ、お互いの課題を補う方法を検証中)

方式	特徴	課題	
Heガス加圧	Heガスで加圧。LN <sub>2</sub> 温度で液化せず安定した加圧が可能(実績あり)	HeガスがLN <sub>2</sub> に溶解し、絶縁性能に影響する危険性あり	×
N <sub>2</sub> ガス加圧	N <sub>2</sub> ガスで加圧。調圧バルブ等での制御が容易(実績あり)	N <sub>2</sub> ガスは液化するため、ガスの補給、液の排出など必要→補給量の低減が課題	○
ヒータ加熱(右図参照)	タンク内ヒータにより液をガス化し加圧。ガスの補給が不要	制御特性(応答性、安定性)ヒータ熱負荷の低減が課題	○



30m検証試験で加圧方式の検証中

# 主要成果 【7】事故時の故障モード分析

分類	機器	故障原因例	故障の結果生じる事象
超電導ケーブル	ケーブル断熱管・端末・中間接続部	機械的リーク、溶接不具合	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇、圧力上昇
機器・配管・容器	冷凍機	コールドヘッド凍結防止用ヒータ異常(断線)	冷凍機停止
	液体窒素循環ポンプ	短絡、地絡	液体窒素循環ポンプ停止
	極低温バルブ	シール劣化	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇、圧力上昇
	真空断熱配管		
	リザーバタンク		
計測器	質量流量計	ピックアップコイル断線	データ表示不能
	圧力計	ひずみゲージ断線	圧力制御不能
	温度計	断線、温度計素子故障	温度制御不能
	液面計	断線、変換器故障	液面不明
制御機器(制御盤)	コントローラー(温度、圧力)	コントローラCPU・I/O不調	冷凍機停止、圧力制御不能
	圧力制御用ヒータ	ヒータ断線	圧力制御不能
	リレー(冷凍機ヒータ用)	電源過電流	冷凍機停止
電源関係	UPS	制御系故障	停電時の制御系停止
冷凍機冷却用循環水	冷却塔、循環水ポンプ	過電流	冷却水温度上昇→冷凍機停止

## 開発目標と達成度

実施計画書での中間目標(H21年度まで)			達成度
項目	内容		
(a)高温超電導ケーブルの系統特性調査	系統特性調査	【1】実証場所での短絡電流の調査	達成
		【2】実証場所でのサージに対する影響調査	達成
	系統側への影響調査	【3】系統インピーダンスの変化及びその影響検討	達成
(b)運転技術開発	平常時の運転技術開発	【4】運転制御に必要なパラメータの制御方針	達成
		【5】温度制御方法のまとめ、検証試験での確認	達成
		【6】圧力制御方法のまとめ、検証試験での確認	達成見込み (H22/3)
	事故時の運転技術開発	【7】事故時の故障モード分析と超電導ケーブル復帰条件の検討	達成見込み (H22/3)

## (1)高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究

### ④実システムにおける総合的な信頼性の検証

# 開発目標

**基本計画:** (中間目標) 実システム連系試験の基本計画の作成  
 (最終目標) 実システムに連系した12か月以上の長期試験による総合的な信頼性評価を行う。

実施計画書での中間目標(H21年度まで)

項目	内容
(a)総合的な信頼性検証のための試験計画立案	【1】実システム接続前の確認試験の整理

## 主要成果 【1】試験項目の整理 (従来ケーブル項目)

No.	項目	要素試験	30m出荷試験	30m試験	実証出荷試験	実証竣工試験	残存性能試験
1	商用周波長時間耐電圧試験	●	●		●		●
2	長期課通電試験			○			
3	商用周波耐電圧試験	●		○(2の後)			
4	雷インパルス耐電圧試験(絶縁体)	●	●	●(2の後)	●		●
5	雷インパルス耐電圧試験(保護層)			●	●		●
6	出荷耐電圧試験		●		●		
7	部分放電試験	●	●	○	●		●
8	絶縁耐力試験			○		○	
9	外観点検	○	○	○	○	○	○
10	静電容量試験	●(室温、低温)	○(室温)、●	○	○(室温)、●	○	●
11	誘電正接試験	●	●	○	●	○	●
12	絶縁抵抗試験		●(室温)	○	○(室温)	○	○
13	直流耐電圧試験(シース)		○		○		○
14	導体抵抗試験(フォーマ)		●(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
15	構造試験		●		●		●
16	曲げ試験	●	●		●		
17	極度曲げ試験	●(参考)					
18	ブーリングアイ試験	●					

●サンプル or モデル試験

○全長試験

実施済みの項目

継続実施中の項目



## 主要成果 【1】試験項目の整理（超電導特有項目）

No.	項目	要素試験	30m出荷試験	30m試験	実証出荷試験	実証竣工試験	残存性能試験
19	Ic測定(導体、シールド)	●	●	○(導体のみ)	●	○(導体のみ)	●
20	交流損失測定	●	●	○(ΔT)	●		●
21	断熱管侵入熱測定	●(参考)		○(参考)		○(参考)	
22	断熱管側圧試験	●(参考)					
23	引張り、圧縮試験	●(参考)					
24	短絡試験(31.5kA)	●					
25	短絡通電試験	●					
26	短絡課電試験	●					
27	ケーブルコア側圧試験	●					
28	耐圧力試験		■(室温)	■(室温)	■(室温)	■(室温)	
29	気密試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
30	真空リーク試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
31	布設模擬試験	●					
32	圧力損失測定			○(参考)		○(参考)	
33	インダクタンス測定	●(参考)	●(参考)		●(参考)		
34	液体窒素性能検査						●(参考)

- サンプル or モデル試験
- 全長試験
- 部品での試験

■ 実施済みの項目

○ 継続実施中の項目

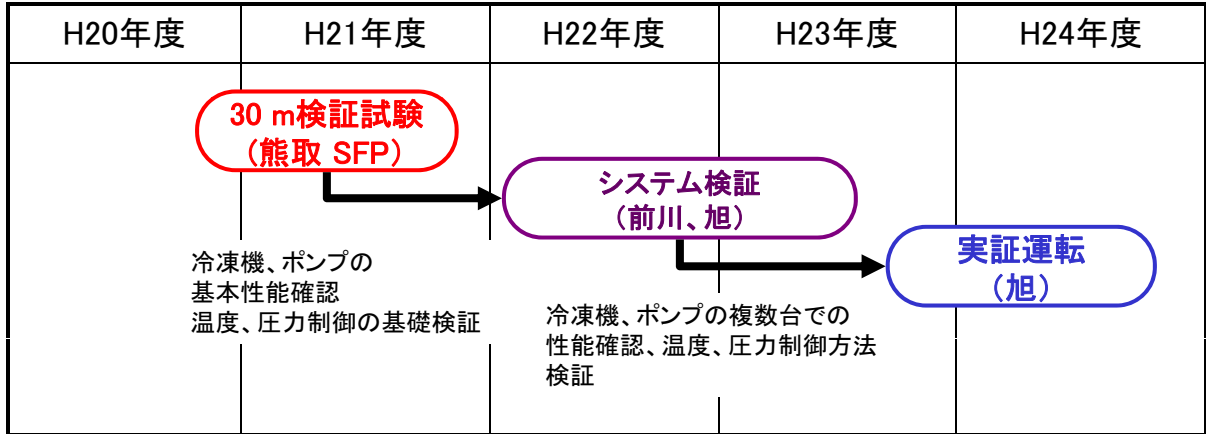
## 開発目標と達成度

実施計画書での中間目標(H21年度まで)		達成度
項目	内容	
(a)総合的な信頼性検証のための試験計画立案	【1】実系統接続前の確認試験の整理 ・試験項目の整理(従来ケーブル項目) ・試験項目の整理(超電導特有項目)	達成

# 計画の変更

実証プロジェクト推進委員会にて、冷凍機、ポンプの複数台での制御検証を事前に十分行うべしとの指摘を受けた。

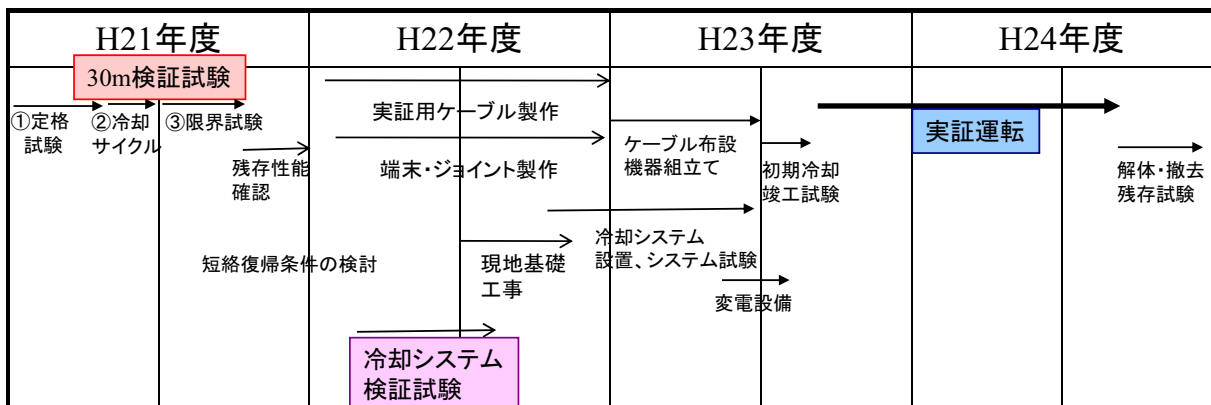
→全体計画を見直し、システム検証試験を旭変電所での運転前に計画する。



# 最終目標達成の見込み

- ✓ 実証ケーブル用超電導線材はH22/2月までに総量が製造完了予定 (HT線材：約60km、ACT線材：約45km)
- ✓ 旭変電所については、詳細レイアウト、工事手順を設計中
- ✓ 冷却システムは、冷却システム検証試験を経て、旭変電所に構築予定

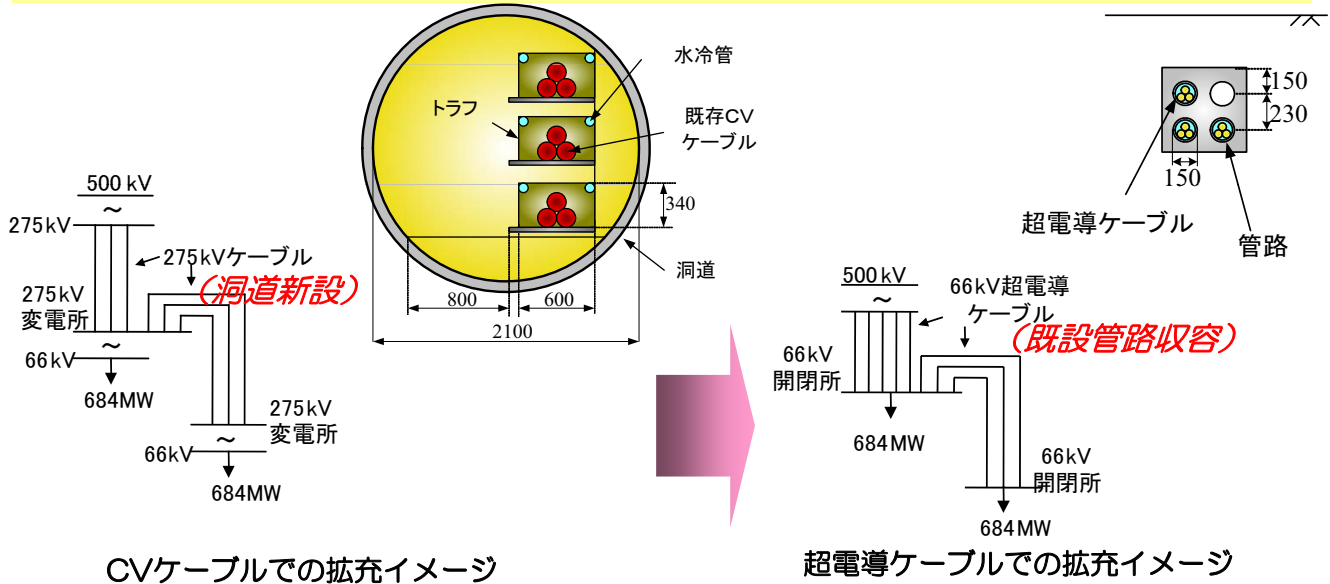
➡ **計画通り、実証試験をH23年度後半からスタートの予定**



# 成果の実用化の可能性、波及効果

## <都内導入系統>

✓ 洞道布設が必要な既存275kVケーブルの代わりに、既存管路に収容可能な三心一括型超電導ケーブルの活用

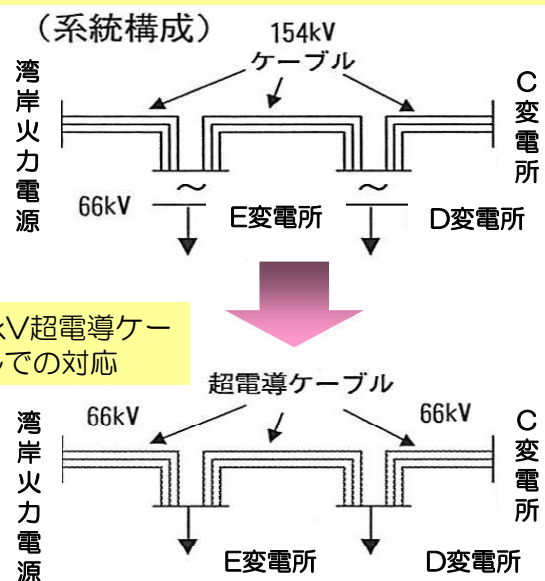
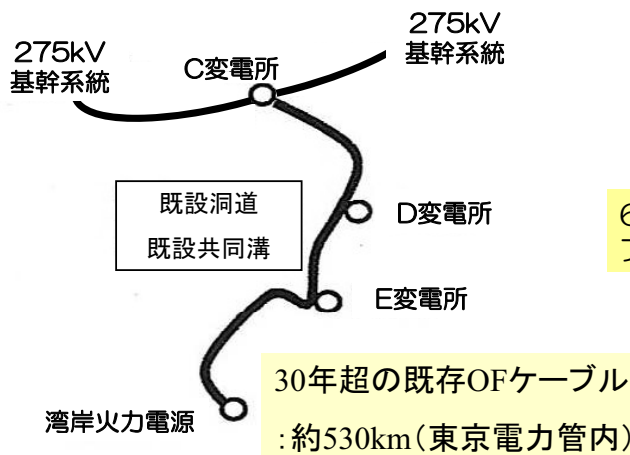


# 成果の実用化の可能性、波及効果

## <老朽化したOFケーブル代替>

✓ 154kV変電所・地中送電線の老朽化及び増容量対策として、66kV超電導ケーブルの活用。電圧階級の整理も同時に実現可能

導入箇所例：C～D～E変電所～湾岸火力電源間の154kV系統



# 成果の実用化の可能性、波及効果

## <適用箇所例>

○発電所引出口等の大電流ケーブル代替

例：内部水冷ケーブル

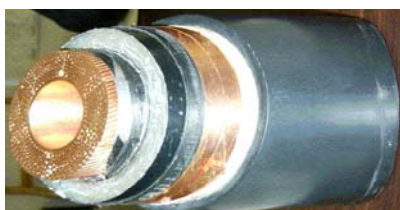
GIL (Gas Insulated Line)

POF (Pipe-type Oil Filled cable)

・発電所の引出口（発電機～変圧器間）は、低電圧・大電流のケーブル等での連係が必要

・大電流の内部水冷ケーブル等が適用されているが、コンパクト・大電流の超電導ケーブルが代替候補

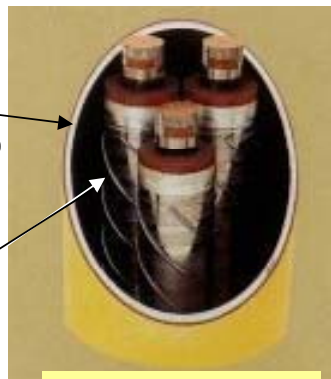
・大容量送電用のPOFケーブルは、東京電力管内だけで約250km存在。経年化による代替が必要



内部水冷ケーブル断面

鋼管  
(Φ250mm)

パイプ充填油  
(1MPa程度に加圧)



POFケーブル断面

# 知的財産権、成果の普及

## 知的財産権 <出願状況>

出願年	要素技術・製造技術	施工・運用技術	冷却システム
H19年度	9	0	0
H20年度	7	4	0
H21年度 (11月現在)	0	4	1

※本PJ推進のために、受託者費用で実施した関連研究に基づく特許出願を含む

## 研究発表数（論文・講演など）

年度	論文（査読付き）	論文（その他）	その他外部発表
H19年度	0	4	2
H20年度	3	16	3
H21年度 (11月現在)	3	6	2

## (2)超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

平成21年11月25日

住友電気工業株式会社  
増田 孝人

## (2)超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

II p.5-6

36

### 開発目標

- 基本計画:(中間目標)**
- ・超電導送電システムの国際標準化の項目作成
  - ・超電導ケーブルの適用技術の評価項目の作成
  - ・冷却設備の法規制のあり方の概要まとめ
- (最終目標)**
- ・超電導ケーブルの運転管理、評価・計測方法の国際規格への提案用データの整理
  - ・超電導ケーブル導入のシナリオ作成
  - ・冷却設備における法規制緩和に向けた提案資料の作成

#### 実施計画書での中間目標(H21年度まで)

項目	内容
(a)高温超電導ケーブルの標準化研究	【1】国際標準化を行うべき項目の整理、提案のための30mケーブル試験のデータ収集。
(b)高温超電導ケーブルの適用技術研究	【2】高温超電導ケーブルシステムの適用効果・導入効果の評価項目の整理
(c)関連法規への対応	【3】関連法規への対応プロセスを取りまとめる。



# 主要成果 【1】 国際標準化への貢献

我国が国際的イニシアティブを取るべく、産官学連携して、国際標準化へ取り組み中

### 【IEC関連活動】

- ・IEC国内委員会(TC20&90)を中心にアドホック委員会を設立(H19/5月)



CIGREに検討要請

### 【CIGREの活動】

- ・SC-B1内にTFを設置、依頼を取り上げるか否か検討(H20/10~H21/9)→賛成で可決
- ・超電導ケーブル試験法に関する可能性について、WG内で3年間検討する(H21/9月)



### 本プロジェクトの貢献内容

- ・試験法に関して整理
- ・30mケーブル試験での試験方法の検証、試験結果の妥当性の確認
- ・国内委員会、CIGRE委員会への情報提供



IEC内の審議を経て、国際標準化へ

# 主要成果 【2】 超電導ケーブル評価項目の整理

目的:超電導ケーブルの経済性を評価する際に検討すべき項目の整理

### ①線路建設コストの評価項目

分類	項目
構成要素の製造コスト	超電導ケーブル
	付属品(中間接続部、終端接続部)
	冷却システム
	計測、警報システム
送電線路の建設コスト	土木費(管路、洞道、マンホールなど)
	超電導ケーブル布設
	付属品組立
	冷却システム据え付け
竣工試験コスト	ケーブルシステム
	冷却システム

### ②運転コストの評価項目

$$\text{送電損失} = (Q_{ac} + Q_e + Q_h + Q_a + Q_c) / \eta$$

交流損失 $Q_{ac}$ 、誘電損失 $Q_e$ 、断熱管侵入熱 $Q_h$   
付属品熱損失 $Q_a$ 、冷却配管熱侵入 $Q_c$ 、冷凍機の効率 $\eta$

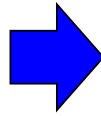
運転コスト:下表の送電損失、メンテコストの総和

分類	項目
送電損失コスト	送電損失×電力単価
ケーブルメンテナンス	真空維持(必要時)
保守・メンテナンス	冷凍機メンテナンス
	循環ポンプメンテナンス、他
補器類	計測、警報システム動力、他

CO2排出量低減効果を考慮すべき

# 主要成果 【3】 関連法規への対応

●旭変電所における法対応「電気事業法」と「高圧ガス保安法」との関係を整理



実証用超電導ケーブルは、変電のために設置する電気工作物である→高圧ガス保安法ではなく、電気事業法が適用される  
(H20.6.3に原子力安全・保安院関東東北産業保安監督部に確認)

## プロジェクトでの対応方針

電気事業法の遵守	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 運転マニュアル、事故・故障時の対応マニュアルを整備→保安規定の作成</li> <li>・ JEC、IECを参考に、電気設備性能試験の実施</li> </ul>
高圧ガス保安法の技術基準拠	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 使用材料、設計基準の遵守</li> <li>・ 気密、耐圧力試験の実施</li> <li>・ 検査、管理の準拠 (運転については無人運転技術の確立を目指す。)</li> </ul>

# 中間目標の達成度、最終目標への指針

実施計画書での中間目標(H21年度まで)			最終目標に向けての指針
項目	内容	達成度	
(a)高温超電導ケーブルの標準化研究	【1】国際標準化を行うべき項目の整理、提案のための30mケーブル試験のデータ収集。	達成見込み (H22/3) 30mデータ収集中	CIGRE WGの活動をサポート、情報を逐次提供
(b)高温超電導ケーブルの適用技術研究	【2】高温超電導ケーブルシステムの適用効果・導入効果の評価項目の整理	達成	整理した項目に従って、建設コスト、損失を予測。導入シナリオの作成
(c)関連法規への対応	【3】関連法規への対応プロセスの取りまとめ	達成	実証プロジェクトのプロセス、結果をまとめ、法的取扱いの提案書の作成を行う。