

「6.1-2 高温超電導ケーブルの設計・構築 ①重要要素技術の検証」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
 増田 孝人

6.1-2 ①重要要素技術の検証

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計 平常時運転指針 関連法令手続き	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)		交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)		システム 総合試験(旭)	
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性能 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供				実証データ収集・提供

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。

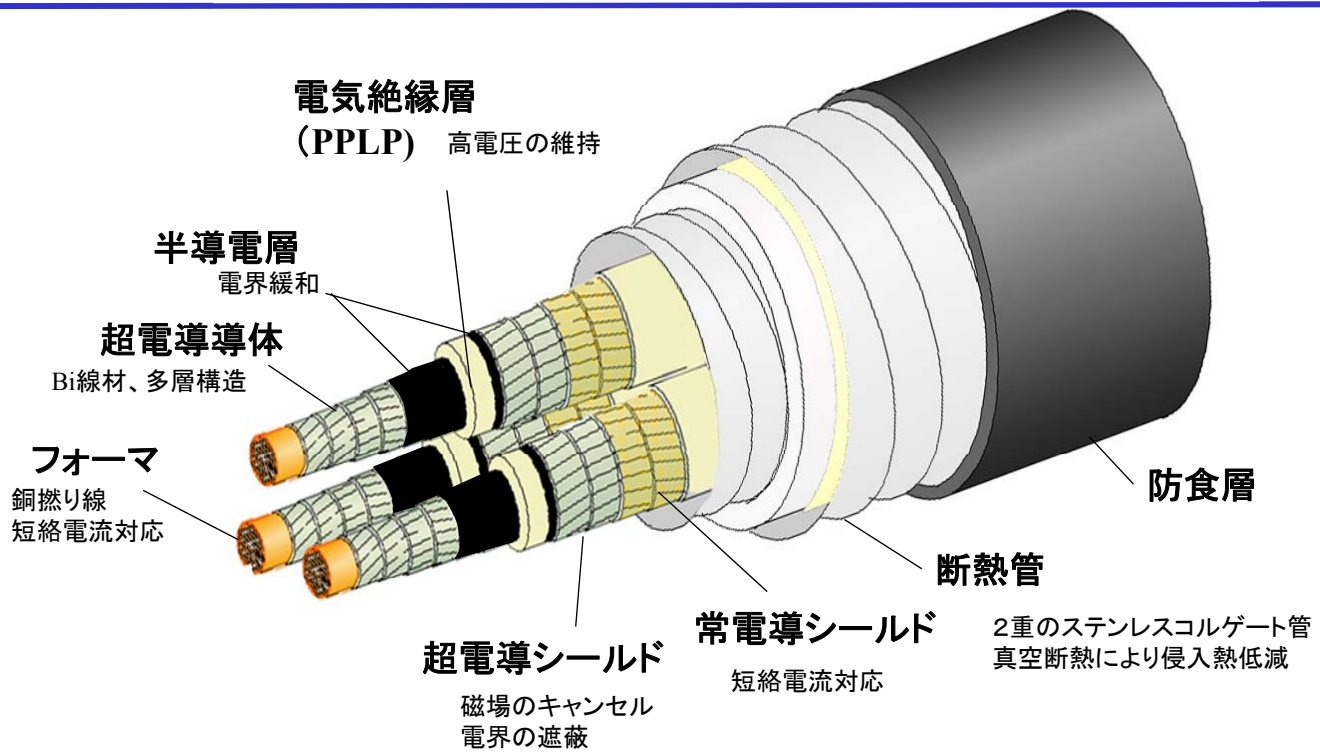
項目		開発目標	達成度
要素技術 開発	(a) 低交流損失化	【1】<1 W/m/ph @ 2kA (中間) <1W/m/ph @ 3kA(最終)	○ ○
	(b) 対短絡電流	【2】31.5kA @ 2secでダメージなし 【3】10kA@2sec通過後、定格課通電可	○ ○
	(c) 接続部の接続抵抗	【4】<1μΩ/箇所 @ 3kA	○
システム	(d) 30m検証用システムの構築	【5】30m級ケーブルの設計、製造 【6】接続部の設計、製造 【7】検証システム建設	○ ○ ○
	(e) 30m検証用システムの評価	【8】定格性能の検証 【9】ヒートサイクルの影響確認 【10】限界性能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

達成度：◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発目標の根拠・意義

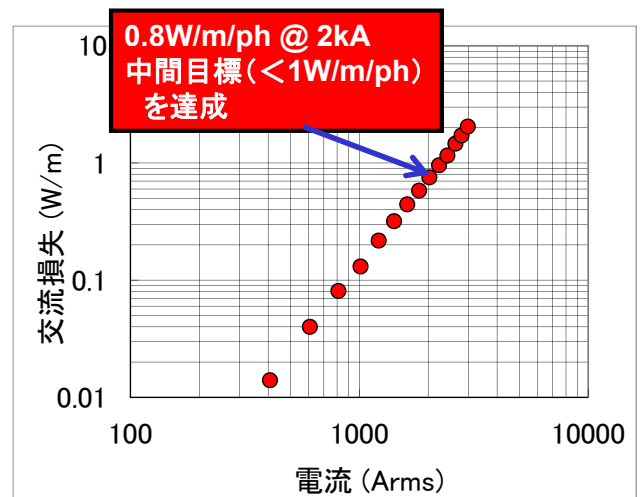
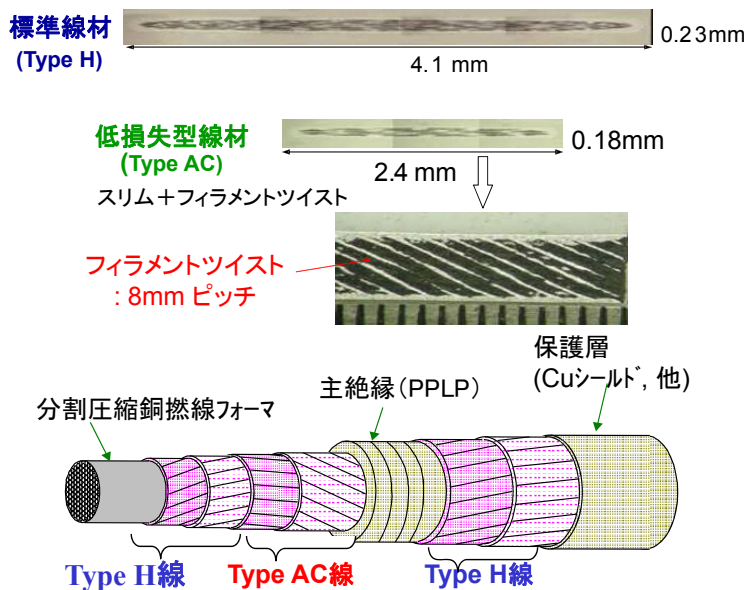
主な開発目標	根拠
最終目標値： 定格 66kV/3kA 容量 350MVA	既存275kVケーブルの代表的ケーブル容量350MVAを66kV超電導ケーブルで実現するために必要な目標値
中間目標値： 定格 66kV/2kA 容量 200MVA	66kV系統における代表的な送電容量 (154kV/66kV変圧器の2次側定格容量に相当)
交流損失： 1W/m/相	超電導ケーブルの冷却に必要なエネルギーを考慮しても、送電損失が既存ケーブルの1/2以下となる損失レベル
短絡電流： 31.5kA、2sec	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
1年間の実証試験	<ul style="list-style-type: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

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

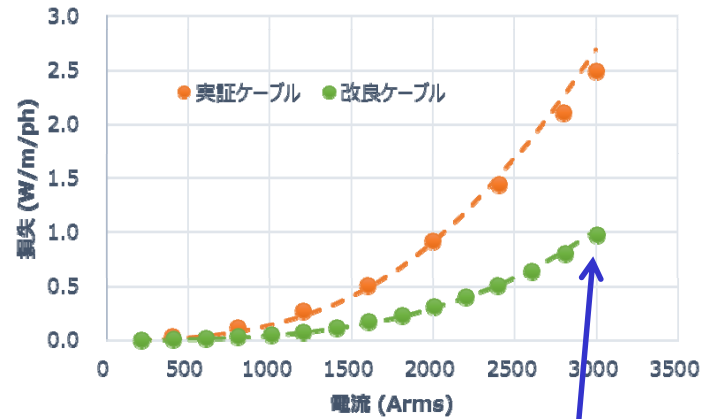


主要成果 【1】低交流損失化(2)

導体構造・サイズの見直しと線材特性の向上で1W/m/ph@3kA達成

層	諸元
フォーム	フォーム + クッション層
超電導導体層	4層構造 Type AC線使用
絶縁層	主絶縁 PPLP 6mm厚 (<7mm)
超電導シールド層	2層構造 Type H線使用
保護層	銅シールド、クラフト紙、不織布

	線材Ic (A)	
	H22	H24
AC線	75	85
標準線	175	200



2m級サンプル
大気圧液体窒素下で測定

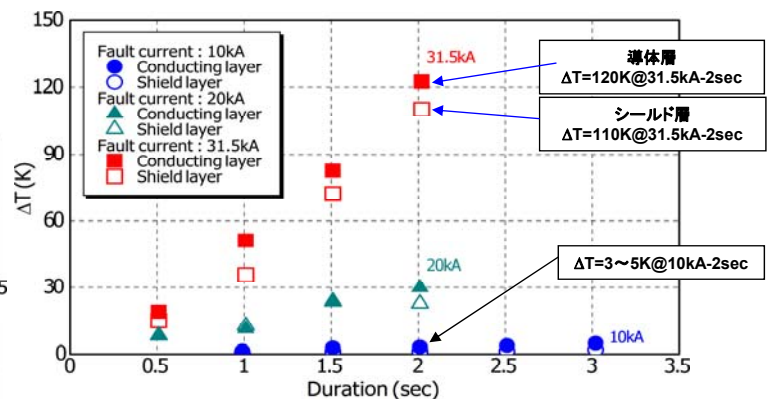
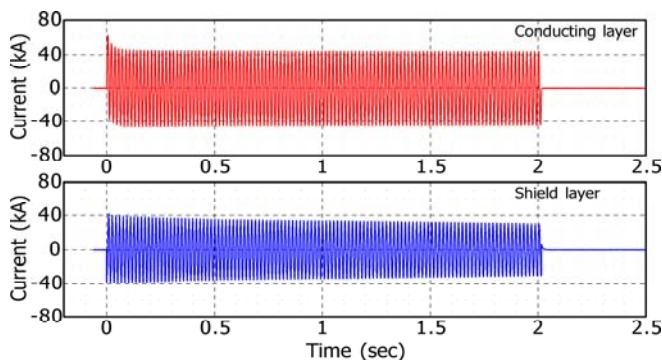
最終目標
1 W/m/ph @ 3kA達成

超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価



主要成果 【2】短絡電流対応(31.5kA)

最大短絡電流 31.5kA、2secにおいて、ケーブルにダメージがないことを確認



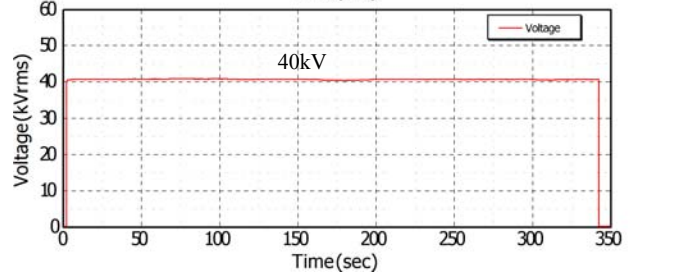
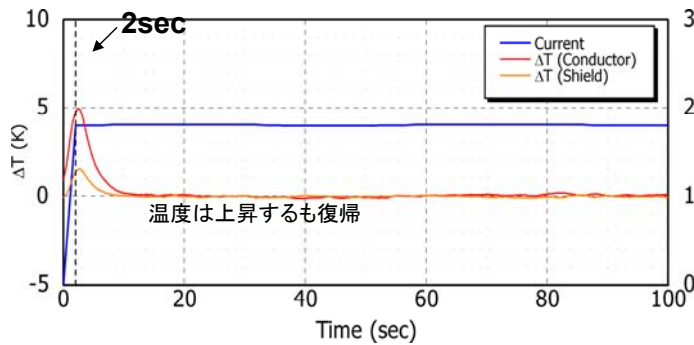
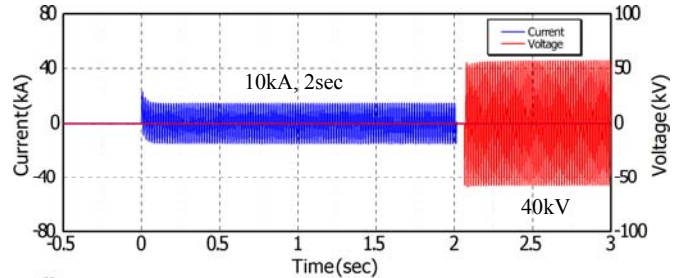
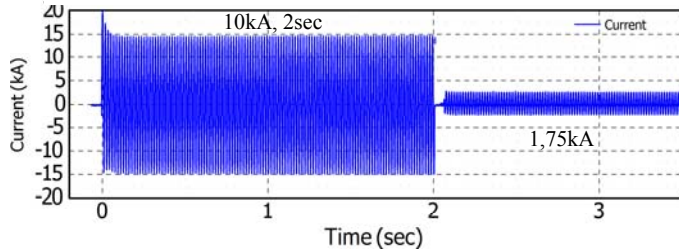
Ic 特性 : 短絡試験前後(最大31.5kA/2sec)で
Ic特性に変化なし →ダメージなしを確認

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【3】短絡電流対応 もらい事故通電試験

もらい事故時の最大短絡電流 10 kA、2secにおいて、短絡電流通過後直後の定格課電・通電可能



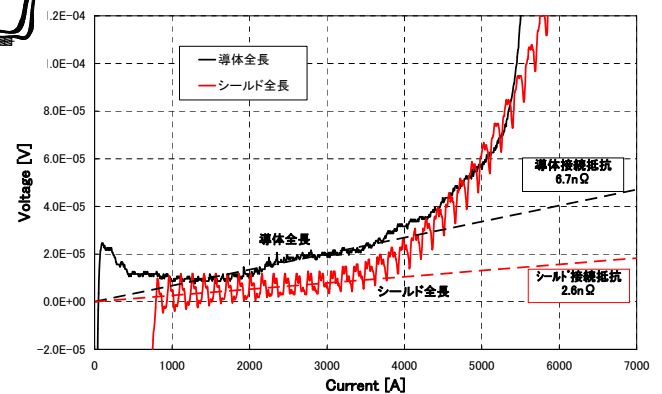
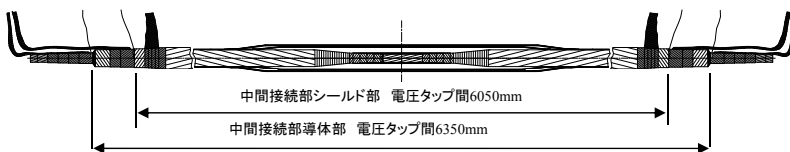
高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【4】中間接続部の接続抵抗

中間接続部において、接続抵抗が $< 1 \mu\Omega$ /箇所であることを確認

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	2.6 nΩ

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【5】検証用30mケーブル(設計)

項目	設計諸元	補足
フォーム	素絶分割集合導体(140mm ²)	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 ²)、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 【7】検証システムの構築



HTSケーブル



ジョイント部



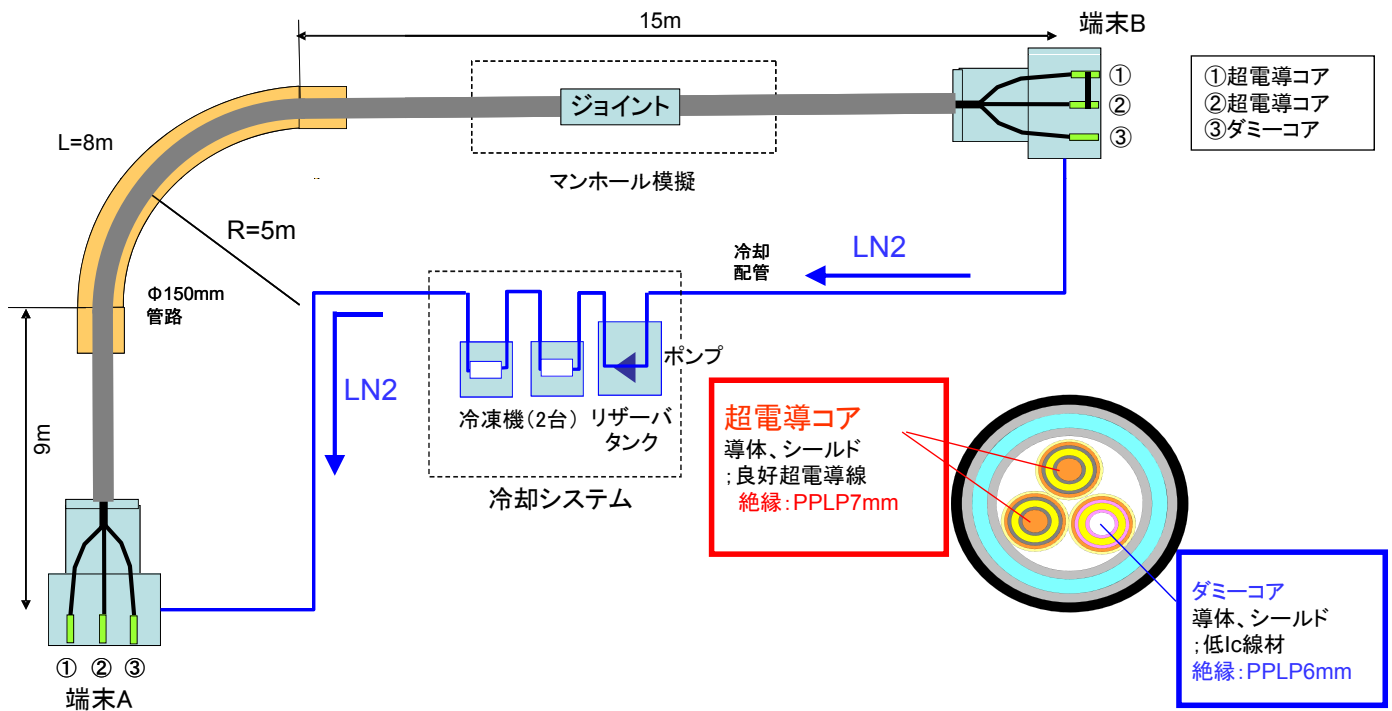
端末部



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】【9】【10】検証用システムの評価

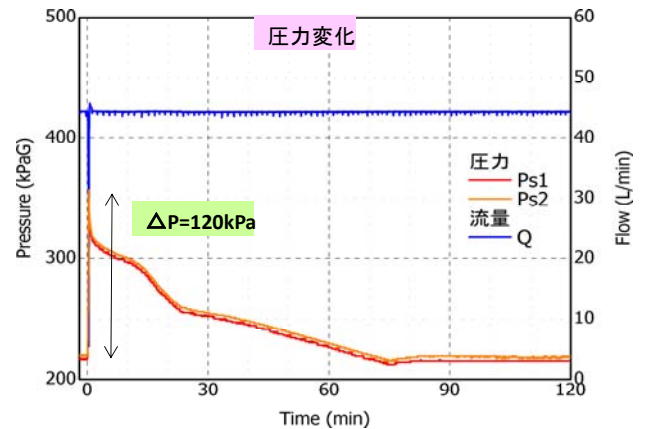
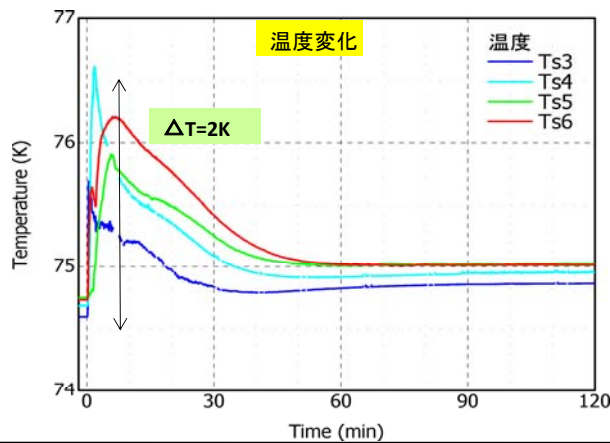
設計した超電導ケーブル含む各機器の送電システムとしての機能確認

試験項目・内容		結果	判定
電気特性	Ic測定	Ic測定: 導体6kA(導体部)	設計通り
	課電試験	対地AC 76kV@10分間、対地DC -152kV@10分間	良好
	長期課通電試験	対地AC51kV、2kA(8H-on、16H-off)、1ヶ月間 (30年相当)	良好
機械特性	張力測定	冷却時のケーブル張力 最大 3ton(@端末端)	許容値以下
熱的特性	熱損失	ケーブル熱損失 140~180W @ 0A, 180~220W@1.75kA	設計通り
ヒートサイクル試験		室温⇄LN2温度の繰り返し(4回)により、Ic、課電特性、張力などに大きな変化なし	良好
限界性能試験	過負荷試験	過負荷 2.75kA @ 8 時間実施 (旭変電所での過負荷条件)	良好
	短絡電流模擬試験	10kAの短絡電流模擬試験を実施(旭変電所での短絡条件 20kA-2sec相当以上のエネルギー投入条件で試験)	残存性能評価良好
	冷却システム停止試験	①冷凍機 OFF、ポンプON @1.75kA 3時間実施 ②冷凍機 OFF、ポンプ OFF @ 1.75kA 2時間実施	残存性能評価良好

主要成果 【10】限界性能試験(短絡電流試験)

10kA/18secの短絡電流(20kA/2sec以上)に耐える性能を確認

- ・20kA/2secは旭変電所で予想される最大短絡電流
- ・液体窒素温度上昇最大 $\Delta T=2K$ 、圧量上昇最大 $\Delta P=120kPa$
- ・ケーブルシステムにダメージなし。残存性能良好
- ・温度、圧力の復帰時間は60～80分。

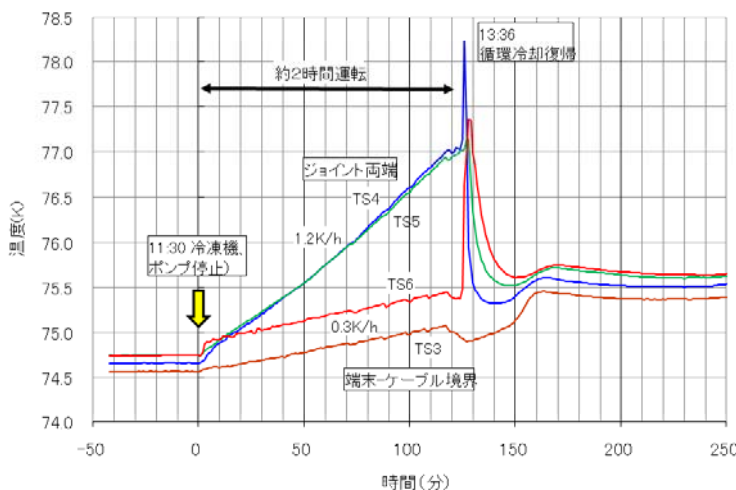


高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【10】限界性能試験(冷凍機故障模擬試験)

冷凍機、ポンプが停止した状態でも、定格1.75kA通電で2時間以上の運転を確認



ケーブル・端末(Ts3, Ts6)は計算値とよく一致。
 ⇒ ほぼ計算通りの温度上昇をしていると推定

- ・ケーブル曲り部の温度上昇は、6K/h
 $74.5K + 12K = 86.5K$ まで上昇したと推定
 →1750A時の臨界温度付近

各部の温度上昇率 計算値

ジョイント両端(Ts4, Ts5)	0.7K/h
ケーブル-端末境界(Ts3, Ts6)	0.3K/h
ケーブル直線部	2 K/h
ケーブル曲り部	6K/h

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



成果のまとめ

	項目	開発成果	達成度
要素技術 開発	(a) 低交流損失化	交流損失 <1W/m/ph @ 3kAを短尺ケーブルにて確認	○
	(b) 対短絡電流	66kV規格である、31.5kA @ 2secでダメージなし 現地もらい事故時の最悪条件10kA@2secにて、直後の 定格課通電が可能であることを確認	○
	(c) 接続部の接続 抵抗	接続抵抗<1 $\mu\Omega$ /箇所 @ 3kAを確認	○
システム	(d) 30m検証用シ ステムの構築	事前検証用の30m級ケーブルシステムの設計、製造、 構築を実施	○
	(e) 30m検証用シ ステムの評価	所定の通電特性、長期課電特性を有することを確認ヒート サイクル試験、過電流試験、冷凍機停止試験にて、運 用上問題ないことを確認	○

「6.1-2 高温超電導ケーブルの設計・構築 ②実証用ケーブルシステムの構築」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
増田 孝人

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)	ケーブル 製造・布設	交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)			
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理	要素技術データ収集・提供				実証データ収集・提供	

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

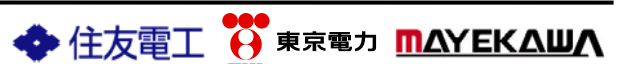


開発目標

項目	開発目標	達成度	
実証用ケー ブルシステ ムの製造	ケーブル・ 機器の製 造	【1】実証用ケーブルの設計、製造 【2】ケーブル出荷試験の合格 【3】ジョイント、端末の設計及び出荷検査の合格	○ ○ ○
	現地布設、 組立	【4】ケーブルにダメージのない現地布設の実施 【5】端末、ジョイントの組立施工の完工	○ ○
	系統接続 前試験	【6】実系統接続前の試験項目の確定 【7】初期冷却にて、ケーブルにダメージがないこと 【8】所定の通電特性を有することの確認 【9】所定の電圧を良好に印加できることの確認 部分放電がないことの確認	○ ○ ○ ○

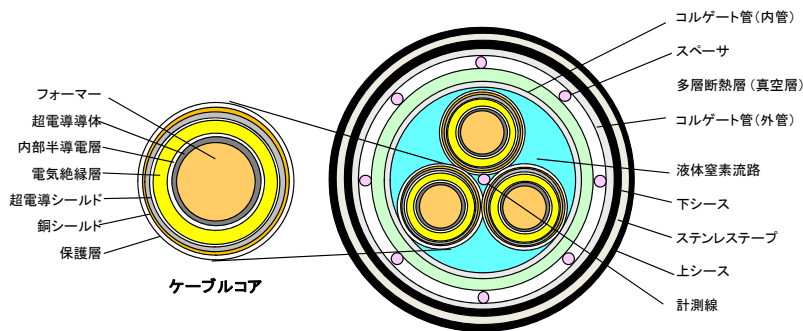
達成度：◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

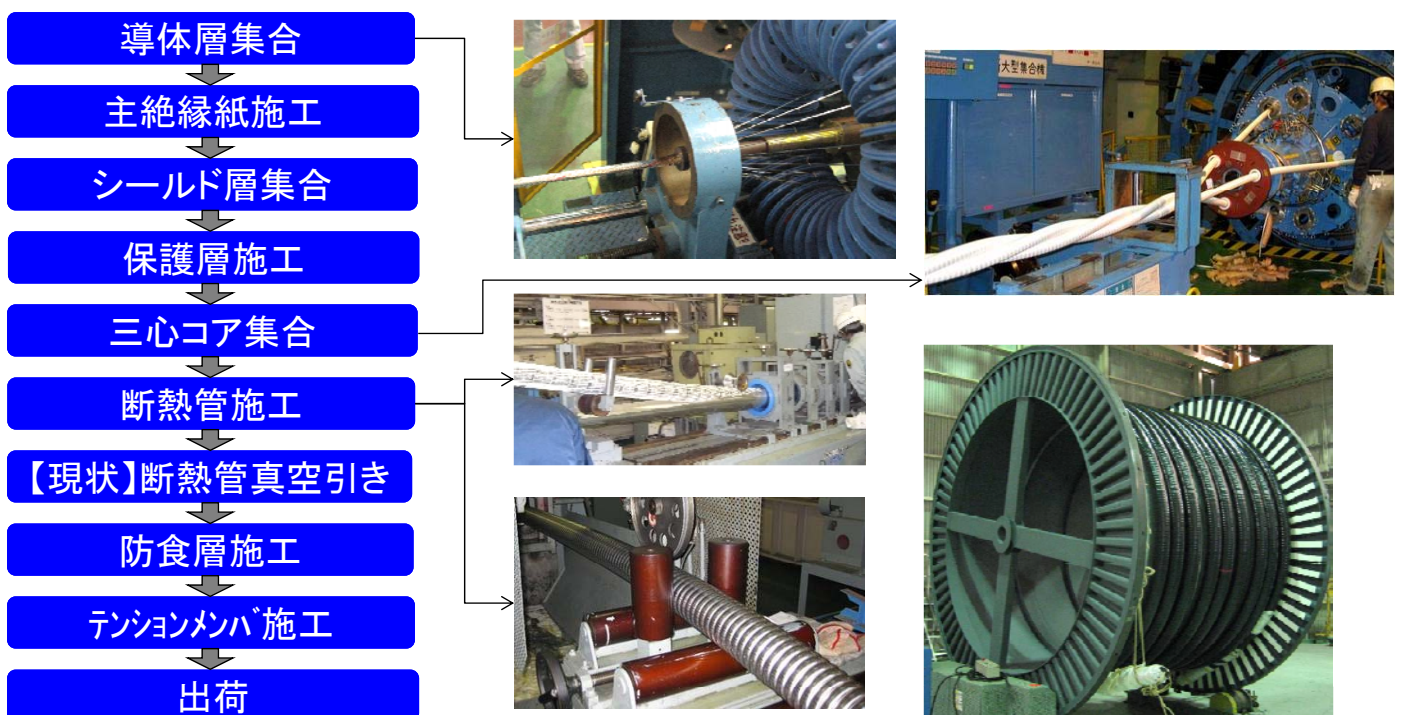


主要成果 【1】実証ケーブルの設計製造

項目	諸元
構造	三心一括型
定格電圧	66 kV
送電容量	200 MVA
導体構造	ビスマス系超電導線材 (Cu燃線フォーマに巻きつけ)
絶縁構造	PPLP+LN2、厚み7 mm (PPLP層)
シールド構造	ビスマス系超電導線材+Cuテープ線
断熱管構造	ステンレス製2重コルゲート管, 真空多層断熱構造
シース	下シース(PVC)+抑えテープ(ステンレス製)+上シース(PVC)
計測線*	テフロンチューブ(φ4 mm)内に光ファイバー(2本)、4心線(2本)配置
長さ(出荷時)	ケーブルA 78 m, ケーブルB 160 m



主要成果 【1】実証ケーブルの製造



主要成果 【2】ケーブル出荷試験

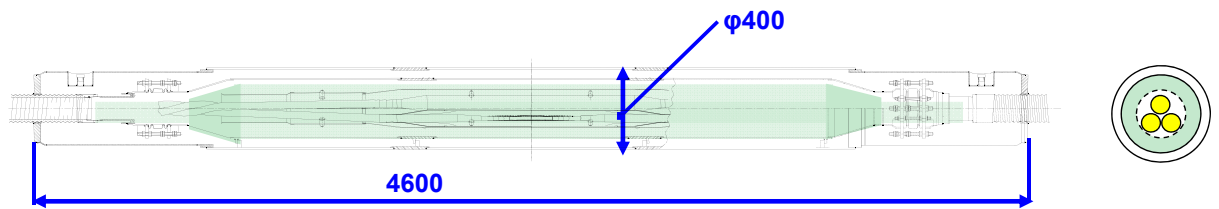
項目	試験条件、設計値	サンプル	試験結果	判定
耐圧力試験	試験圧力：0.75MPaG 使用ガス：N2ガス (設計圧力0.5+0.1)MPaG×1.25	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
気密試験	試験圧力：0.6MPaG 使用ガス：N2ガス 設計圧力0.5+0.1MPaG	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
Heリーク試験	測定感度レベルでリークが検出されないこと	ケーブル全長 (内管製造後及び外管施工後)	断熱管を巻き付けたドラムに目張りをし、ドラム～目張り間にHeガスを50kPa×5分注入、断熱管からのHeリーク量を3時間測定	<1E-8Pam ³ /s 良好
曲げ試験	180相当曲げでダメージなきこと	ケーブル(8m)	直径2.7m(18.90相当)の両曲げ×2サイクルで、Ic低下なし 解体後の絶縁部他に異常なし	合格
Ic特性	導体 Ic>8850A/相 シールド Ic>7330A/相	三心コア(2.5m) (最終PVC工程後に採取)	導体(赤相) Ic=7090A 導体(黒相) Ic=7200A 導体(白相) Ic=7180A シールド(赤相) Ic=7850A シールド(黒相) Ic=7720A シールド(白相) Ic=7720A	良好(設計値以上を確認)
ACロス特性	<1W/m/ph@2kA	単心コア(2.5m)	測定値:0.91W/m/ph@2kA	合格
インダクタンス特性	設計値L=0.121μH/m	単心コア(2.5m)	測定値：0.124μH/m	良好
課電特性	AC：90kV/3時間 AC：100kV/10分 PD観測されないこと Imp ±385kV/3回	単心コア(6m) (曲げ試験後ケーブルより採取)	AC課電試験：90kV×3時間→良好 100kV×10分間→良好 (PD観測されず@感度60pC) Imp課電試験：±385kV/3回→良好	合格

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

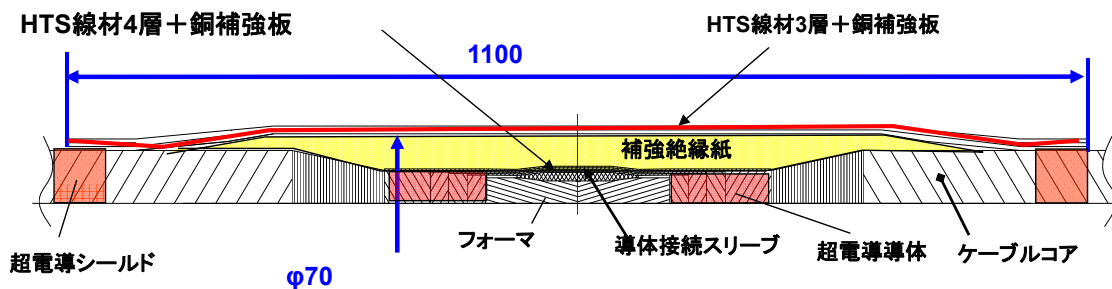


主要成果 【3】中間接続部の設計

3心一括型 ジョイント全体構造



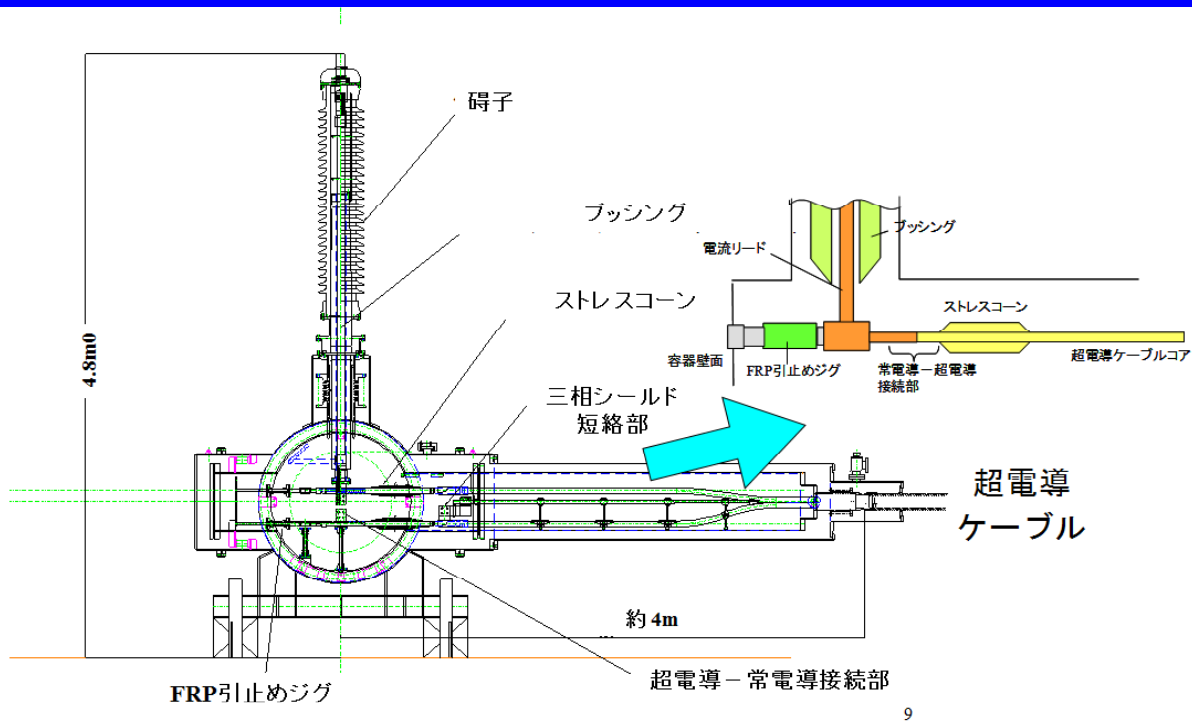
ジョイント接続部



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



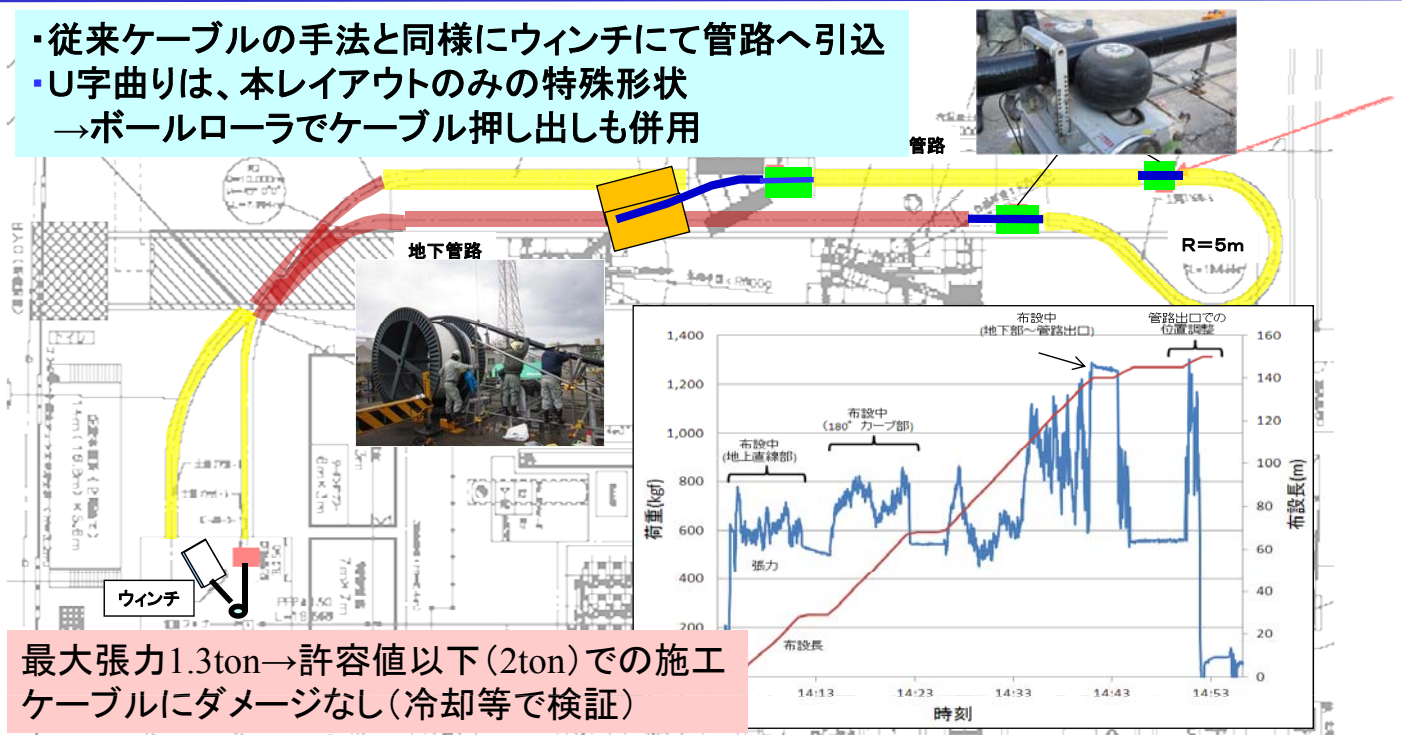
主要成果 【3】終端接続部の設計



9

主要成果 【4】ケーブルの現地布設

- ・従来ケーブルの手法と同様にウインチにて管路へ引込
- ・U字曲りは、本レイアウトのみの特殊形状
→ボールローラでケーブル押し出しも併用



主要成果 【5】中間接続部の組立施工

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	組立準備	作業スペース確認、レール確認	
2	ケーブル端部処理	真空槽等の端部部品挿入 切断位置確認～コア切断	切断位置
3	ケーブル導体接続	導体接続スリーブの圧着	圧縮力
		導体ブリッジHTS線材取り付け	超電導線取扱い
		加熱(半田モールド)	温度管理
4	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き	形状
5	電界シールド処理	ケーブル部遮蔽処理	
6	ケーブルシールド接続	シールドブリッジ取り付け	超電導線取扱い
		加熱(半田モールド)	温度管理
		ケーブル銅ダミー層接続処理	
7	計測線処理	光ファイバ接続、温度計取り付け	位置確認
8	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接	溶接管理
		窒素槽気密試験	気密性
9	真空槽組立	真空断熱材取付 真空槽組立、溶接	溶接管理
10	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度
11	防食処理	防食巻き付け処理	



3. ケーブル導体接続



4. ケーブル導体接続



8. 窒素層組立



9. 真空層組立

主要成果 【5】終端接続部の組立施工

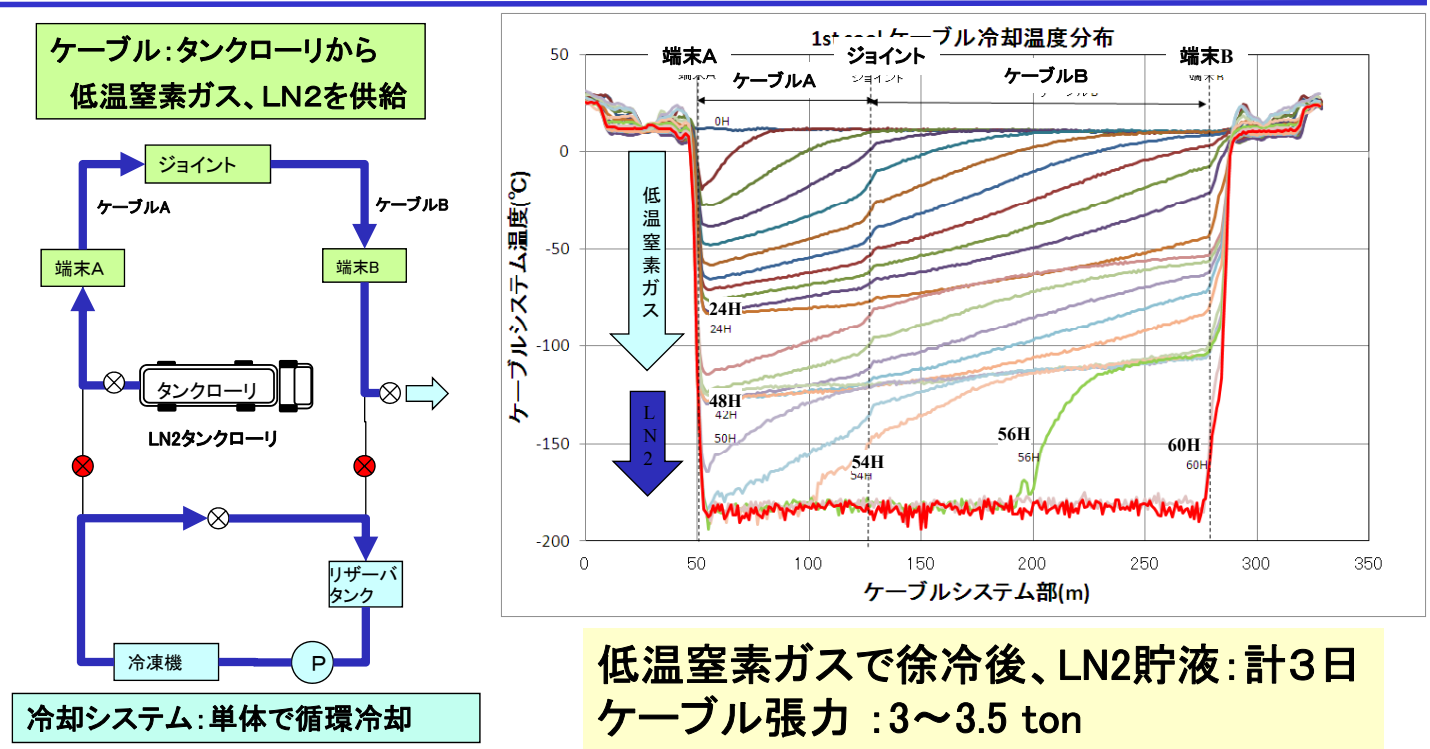
No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	事前準備	作業用テント組立、レール布設	
2	ケーブル部組立準備	容器・部品の挿入	部品の順番
3	三相分岐処理	三心コア燃り戻し、相合わせ	相の確認
4	ケーブルコア切断	位置確認、ケーブルコア切断	切断位置
5	シールド層処理	保護層、Cuシールド層の除去 超電導シールド層処理	超電導線取扱い 形状
6	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き 遮蔽処理	
7	導体処理	導体層の処理	
		導体接続金具の圧縮・取り付け 半田流し込み	圧縮力 挿入半田量(
8	シールド接続金具の接続	位置固定	
		半田流し込み	挿入半田量
9	導入部組立	サポート金具の取り付け	
10	ケーブル部・容器組立	容器の据付、ケーブル部との勘合	
11	容器内組立、配線	三相短絡 電流リード、高圧シールド組立 計測線、接地線取出し	健全性
12	液体窒素容器の組立	液体窒素容器の組立・溶接	溶接管理
13	液体窒素容器耐圧試験	液体窒素容器の気密試験	気密性
14	真空容器の組立	真空断熱材の取り付け	
		真空容器の組み立て・溶接	溶接管理
15	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度

3. 三相
分岐処理6. 補強
絶縁紙巻14. 真空
容器組立

主要成果 【6】実系統接続前の確認試験

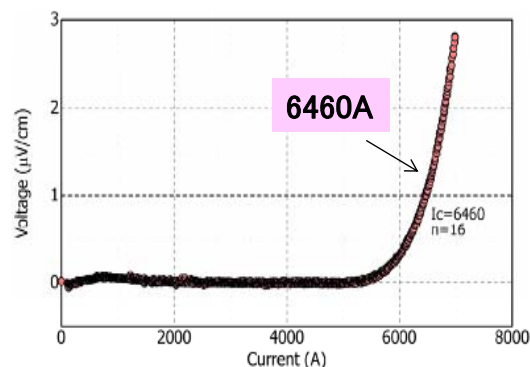
試験項目	試験内容	評価方法	
気密試験	0.5MPaG-30分間	圧力低下なきこと、リークなきこと	
初期冷却試験	冷却中および冷却後	C, tanδ測定 (AC 5kV以下)	計算値との比較
		各部真空度測定	リークなきこと
		端末発生荷重(コア張力)	予想値と比較
	冷却後	コアの動き(ジョイント部の動きで確認)	設計挙動範囲内のこと
冷却システム運転調整試験	冷却システム温度および圧力調整&追従性確認	所定範囲で追従・安定すること	
熱損失測定(無負荷時)	ケーブルシステム各部の熱損失測定(ΔT法)	設計値と比較	
圧力損失測定	ケーブル両端での圧力差を測定する		
臨界電流(Ic)測定	各相コア超電導導体のIc測定		
絶縁抵抗試験(メガー)	各相の高圧導体部と接地間の絶縁抵抗測定	絶縁抵抗に異常なきこと	
竣工耐電圧試験	DC 152kV-10分間	良好に課電できること	
警報リレー確認試験	各警報リレー動作確認	警報が確実に発信されること	
系統課電試験	系統電圧印加(通電なし)-10分間 部分放電(PD)測定	良好に課電できること PD検出されないこと	

主要成果 【7】系統接続前性能検証



主要成果 【8】【9】系統接続前性能検証

試験項目	試験結果	備考
臨界電流測定	約6500A@77K →他相の磁界、温度分布を考慮した計算値と一致	Ic定義: 1 μ V/cm
DC耐電圧試験	151.8kV@10分間 →良好に課電	電気設備技術基準より
熱損失測定	ケーブルシステム 2.4kW @69K、無負荷	冷却システム配管等損失:1kW
PD測定	片端を系統接続し、課電した状態でPD測定→PD観測されず	感度50pC



Ic測定時のI-V曲線(赤相)

- ・出荷、布設、初期冷却を通じてケーブルに損傷がなく、所定の性能を有していることを確認
- ・一旦昇温し、2回目、3回目冷却時も同様の性能を確認
→繰り返し熱応力による性能低下なし

主要成果 【8】【9】系統接続前性能検証

夜間・無負荷時のケーブル部・ジョイント・端末の損失(外部からの侵入熱)は、ほぼ設計通りの値が得られている。

夜間・無負荷時のケーブル各部侵入熱

部位	実測	設計
ケーブル部	A: 350 W B: 825 W	A: 341 W B: 858 W
ジョイント	20 W	40 W
端末	A: 595 W B: 608 W	A: 560 W B: 560 W
合計	2.398 kW	2.359kW

- ケーブル部の侵入熱
直線部: 2~3 W/m
曲り部: 10~11 W/m
(※側圧の影響)
→本レイアウトの内、U字等の曲り部は40%を占める。

測定時条件: 外気温23℃、液温(入口)69K、流量40L/min、夜間

成果のまとめ

項目		開発成果	達成度
実証用ケーブルシステムの製造	ケーブル・機器の製造	<ul style="list-style-type: none"> ・実証用ケーブルの設計、製造を行い、所定の出荷試験を行い、これに合格した。 ・ジョイント、端末の設計及び部品の製造を行い、各部品の出荷検査を行い合格であることを確認した。 	○ ○
	現地布設、組立	<ul style="list-style-type: none"> ・現地ケーブル布設を行い、所定の位置にダメージなく、ケーブル布設を完了した。 ・端末、ジョイントの組立施工を所定の管理を行い、完工した。 	○ ○
	系統接続前試験	<ul style="list-style-type: none"> ・実系統接続前の試験項目、内容について決定した。 ・初期冷却でケーブル冷却を行い、ダメージがないことを確認した。 ・所定のI_c特性を有することを確認した。 ・所定の課電試験(DC152kV)を良好に行えた。また、試充電にてPD発生がないことを確認した。 ・ケーブル熱負荷が想定内であることを確認した。 	○ ○ ○ ○ ○

達成度：◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達