

「6.1-4 実システムにおける総合的な信頼性検証」 (公開)

平成26年9月3日

東京電力株式会社
 本庄 昇一

6.1-4 実システムにおける総合的な信頼性検証

公開

Ⅲ p.13-17

2

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	平常時運転指	警報・遮断システムの設計 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. 実システム運転							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

システム連系試験における検証項目一覧

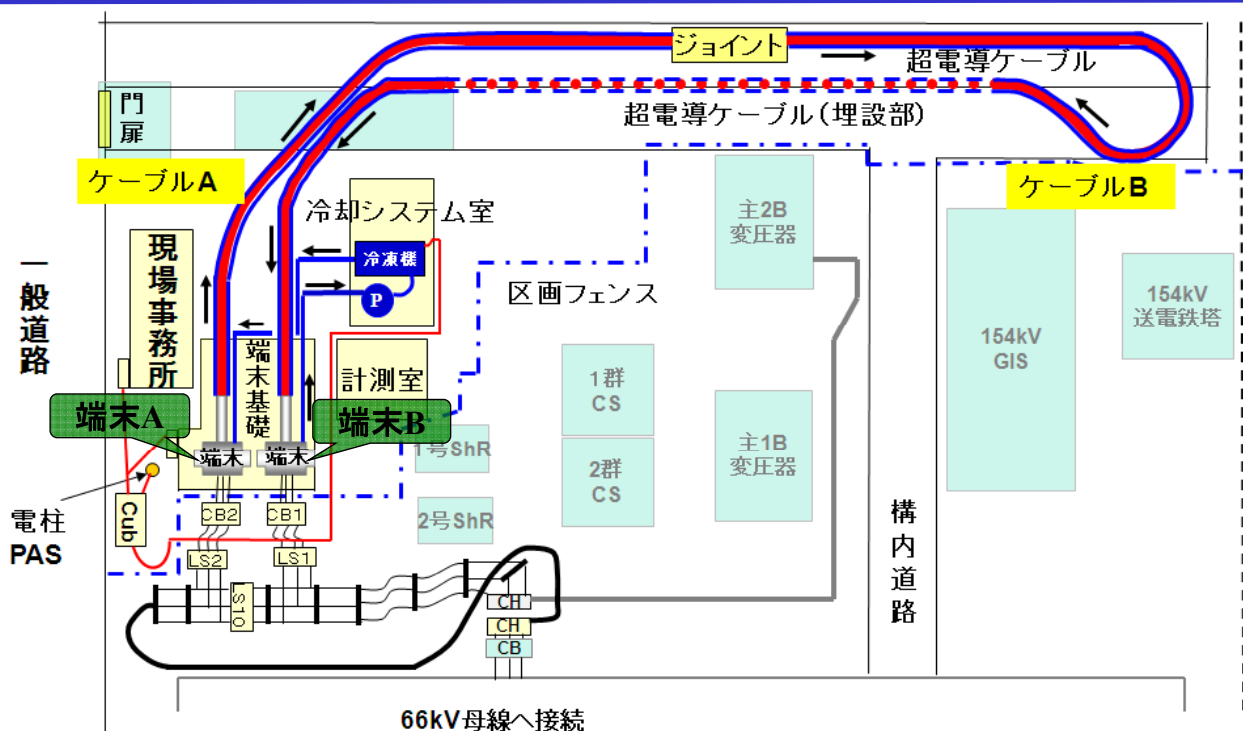
検証項目		主な実施内容	達成度
システム機能検証	初期冷却	✓ケーブル単体初期冷却方法 ✓循環冷却立上げ方法	○
	【1】ケーブル電気特性	✓臨界電流 ✓部分放電測定 ✓ケーブル定数 ✓シールド特性 ✓交流損失	○
	【2】ケーブル熱機械特性	✓初期冷却時機械応力 ✓ケーブル各部熱損失（無負荷時、通電時）	○
	【3】冷却特性	✓冷凍機・循環ポンプ性能 ✓熱損失・圧力損失 ✓ケーブル各部冷却反応時間 ✓冷却システム効率（COP）	○
制御性	温度・圧力制御	✓温度制御特性 ✓圧力制御特性	○
	冷却系機器切替	✓台数制御方式 ✓ローテーション制御 ✓故障時の冗長性 ✓ポンプ並列運転	○
信頼性	【4】長期運転性能	✓負荷変動 ✓日射の影響評価 ✓熱負荷経時変化 ✓運転温度上昇時の特性 ✓冷却能力の運転温度依存性 ✓冷却能力経時変化 ✓系統運転実績 ✓警報発生実績	○
保守性	メンテ技術	✓運転状態での主要機器メンテ方法検証	○

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



実証システムレイアウト



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】系統連系前後の臨界電流特性

○Ic測定 系統接続前

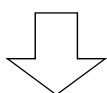
- 1回目: 冷却後1回目 (H24.4) → 昇温
- 2回目: 冷却後2回目 (H24.6) → 昇温
- 3回目: 冷却後3回目 (H24.9)

○Ic測定 系統接続後 中間評価

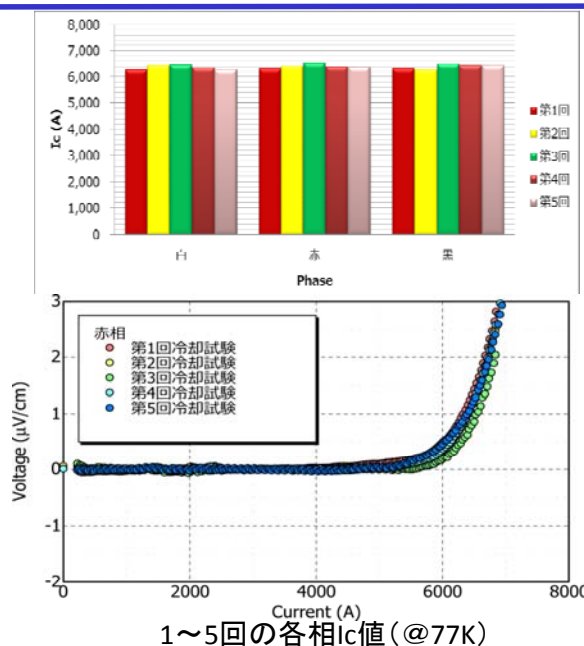
- 4回目: 実系統接続 9ヶ月後 (H25.7)

○Ic測定 系統接続終了後 最終評価

- 5回目: 実系統接続 14ヶ月後 (H26.1)

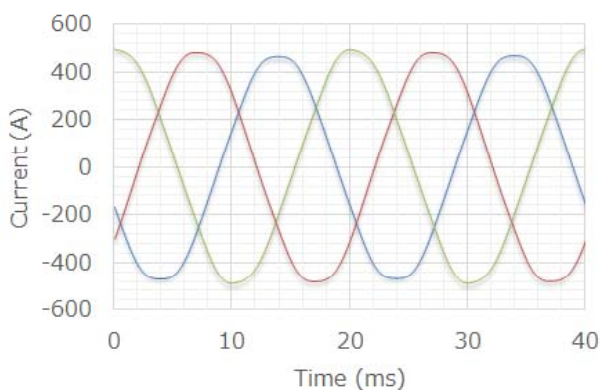


臨界電流値の性能劣化無しを確認。

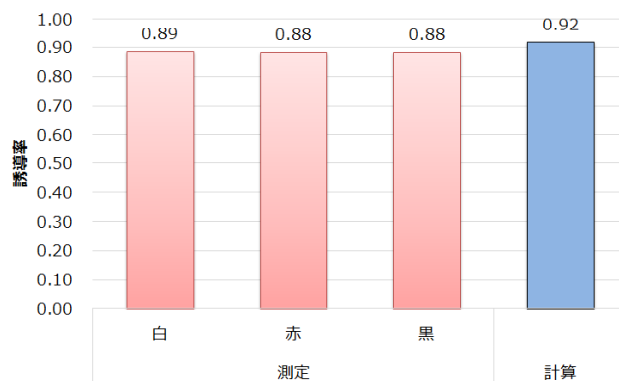


■その他試験(C・tan δ 測定、部分放電試験、ケーブルコア移動X線撮影)においても劣化・異常は見られず、運転後のケーブル健全性を確認。

主要成果 【1】シールド特性



シールド電流波形



シールド電流測定値・計算値

- シールド層三相短絡部にロゴスキーコイルを取り付け、波形を計測
- シールド電流の誘導率の実測は88%
→ケーブル内磁界分布や不平衡電流を考慮した解析に概ね一致

主要成果 【2】各部の熱損失評価

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。

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: 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。

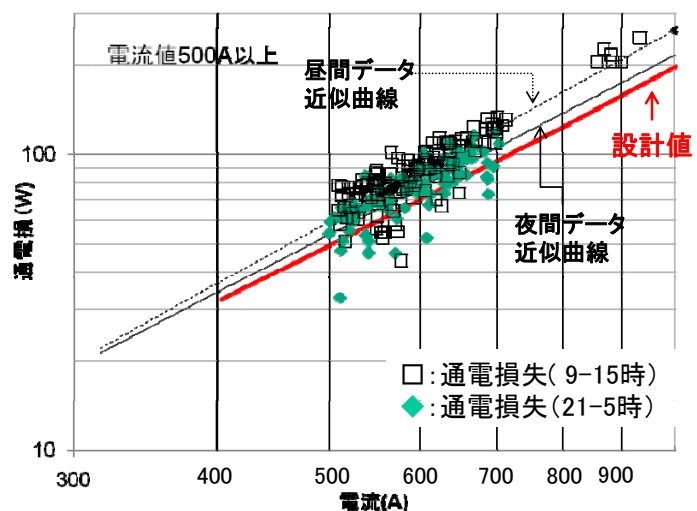
測定時条件: 外気温23°C、液温(入口)69K、流量40L/min、夜間

主要成果 【2】ケーブル部通電損

■通電損算出

通電損 = ①ケーブル部全熱損失
- ②侵入熱 - ③誘電損

- ①: 出口-入口温度の ΔT より算出
- ②: 夜間・無負荷時の実測値より算出
- ③: C、 $\tan \delta$ より算出

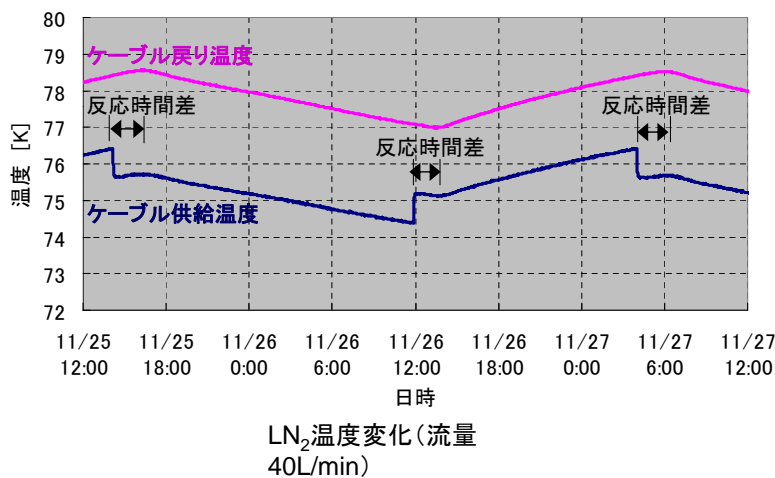


通電損の電流依存性(2012/12~2013/1)

- ・通電損の夜間データは設計値とほぼ一致。
- ・昼間データは、日射の影響により設計値より増加。 →日射影響対策へ反映

主要成果 【3】ケーブル各部冷却反応時間

ケーブル各部冷却反応時間差 (@40L/min)



要素	実測反応時間差	流量・容積から計算した反応時間
端末A	9分	105分
ケーブルA	8分	7.1分
ジョイント	5分	6.3分
ケーブルB	22分	15.4分
端末B	98分	105分
合計	142分	

- 端末A内冷媒は温度反応時間にほとんど寄与せず。逆に端末Bはほぼ全量が寄与。
- ケーブル部は流量から計算した反応時間より若干の遅れあり。

主要成果 【3】システム冷却効率(COP)の測定

$$\text{システムCOP} = \text{ケーブル負荷} / \text{全消費電力}$$

$$\text{システムCOP} = 0.04$$

※ケーブル入口温度 69±1 K
冷凍機4-5台運転

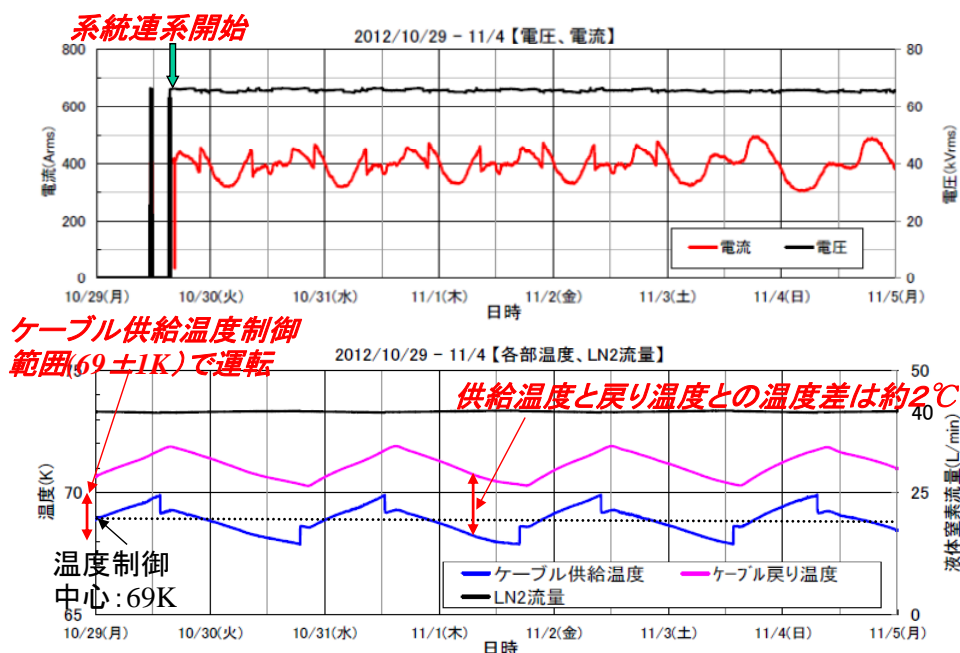
cf. 冷凍機単体 COP=0.06 @ 69K

1. ケーブル負荷	2.53 kW (415Arms)
2. 全消費電力	60.32 kW
冷凍機	55.38 kW
循環ポンプ	0.28 kW
冷却水設備	4.66 kW

(測定期間: 2012/11/12~19の平均値)

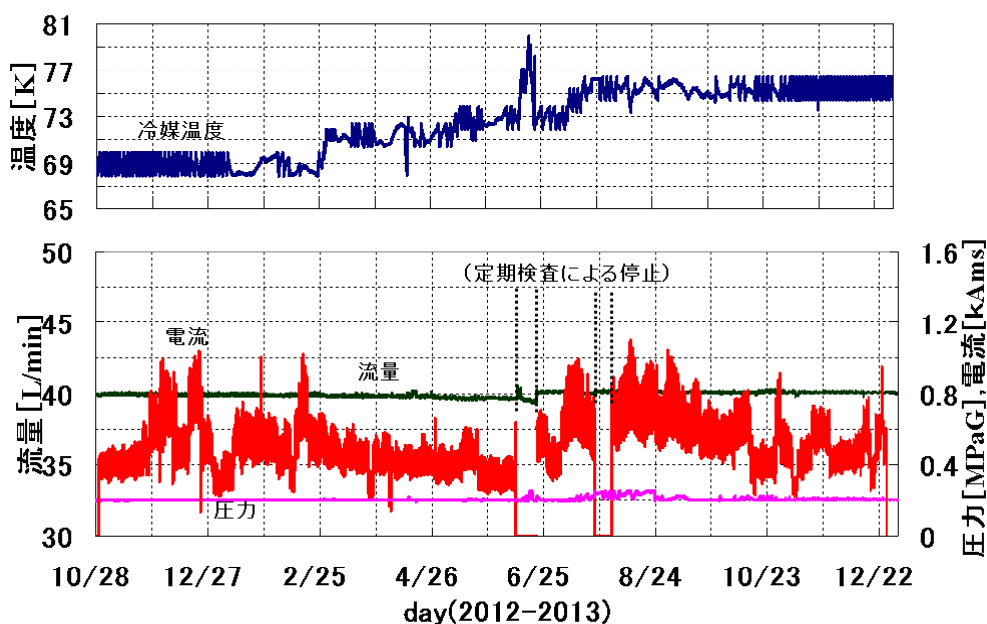
- 機器の複数台配置により、配管・バルブ等の熱損失が増加しCOP低下
→ 実証試験で顕在化した課題として、大容量・高効率冷却システムの開発へフィードバック

主要成果 【4】システム接続開始後の初期特性



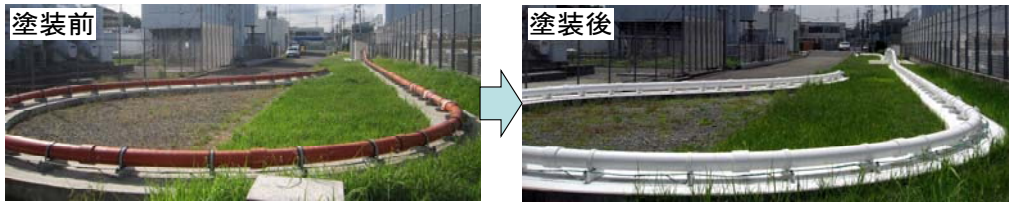
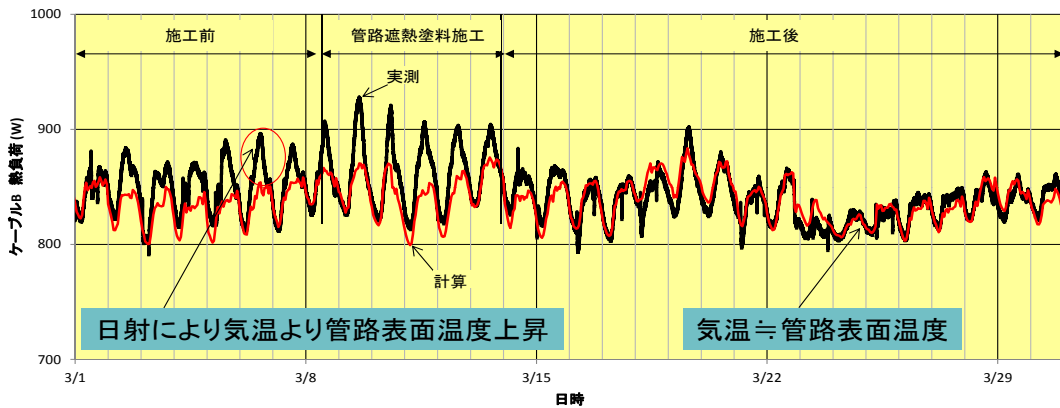
■システム連系接続後も温度差一定に維持されており、安定運転を確認。

主要成果 【4】全期間の運転状況推移



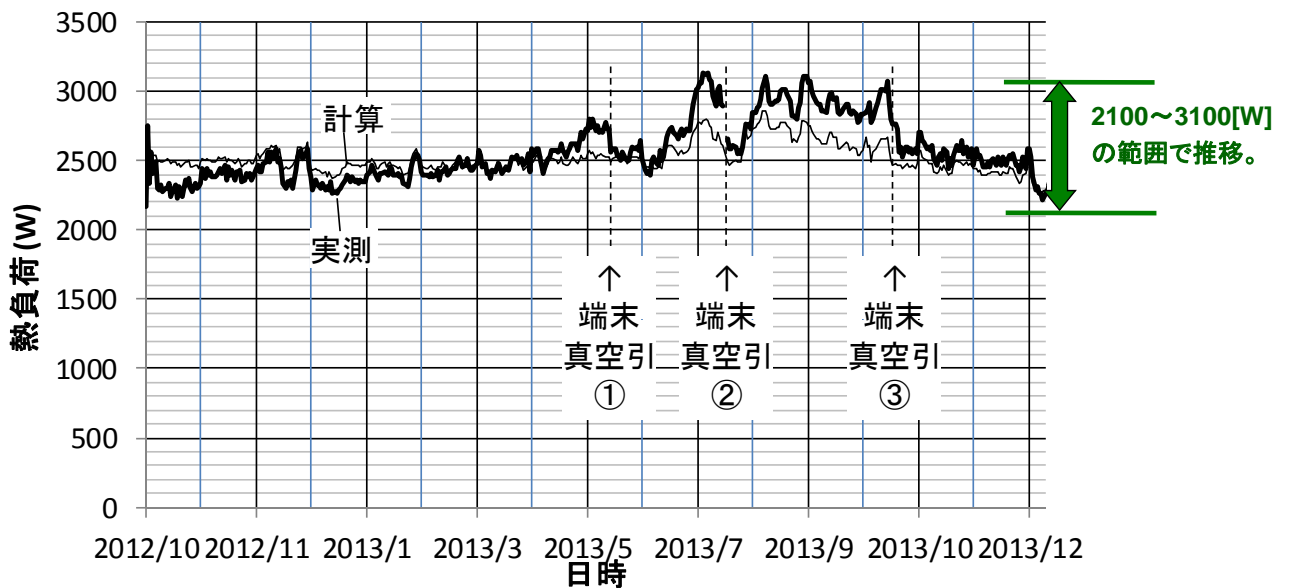
■運転温度変更: 最高77Kまで運転温度を変更し、冷凍機冷却能力、LN₂ 圧力上昇等の変動要因に対する安定運転維持を確認。

主要成果 【4】日射の影響評価と対策効果検証



■ 塗装前は昼間に急激な温度上昇があったが、塗装後は温度上昇が抑制され、計算でよくシュミレートできることを確認。

主要成果 【4】熱負荷経時変化の検証

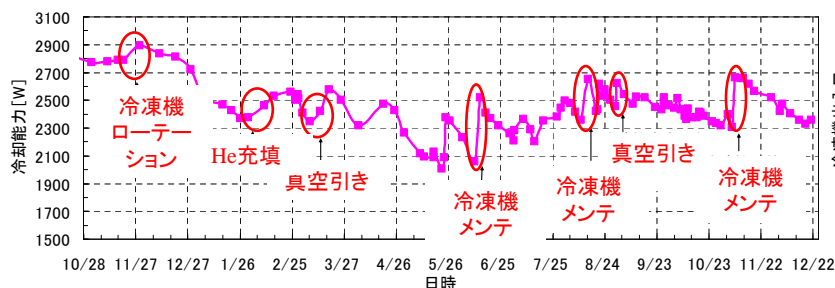


■ 5月以降、計算値に対し実測値の熱負荷増加を確認。

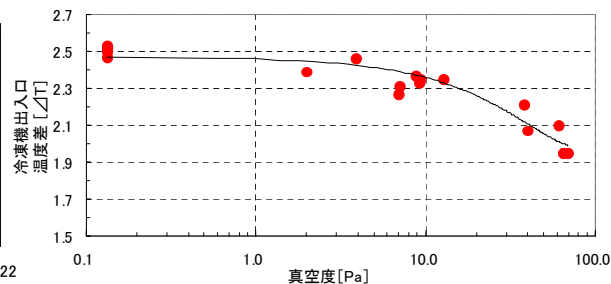
→ 真空引きによる改善効果が確認された為、真空度維持が課題であると判明。

主要成果 【4】冷却能力の経時変化検証

冷却能力は実システム運転開始から一ヶ月経過後、徐々に性能低下。



冷却能力推移



真空度低下による冷却能力低下

■対策1:「定期的な冷凍機真空引き」

効果:30~100 [W/台]

対策2:「冷媒He充填」

効果:40 [W/台]

対策3:「冷凍機メンテナンス(基準:8000[h]毎)」

効果:100~400 [W/台]

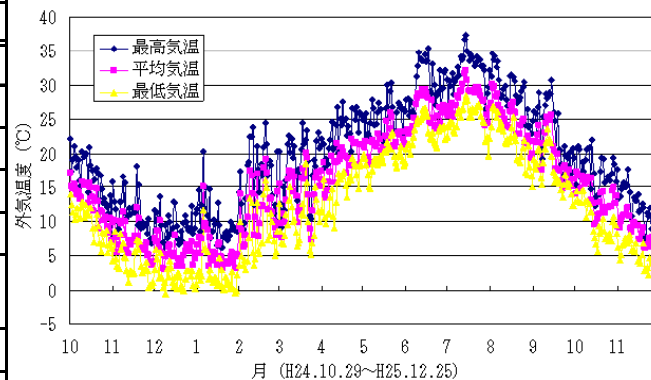
主要成果 【4】システム運転実績

項目	内容
実システム接続期間	H24.10.29~H25.12.25 (約400日間:定期検査期間除く)
定期検査期間	H25.6.10~6.21、H25.7.22~7.31
最大電流	1127A (H25.8.10)
系統電圧	63.9kV~67.1kV
通電電流不平衡率	6.9%程度
シールド電流率	88%程度
系統切替	50回以上
過負荷	無
インパルス有無	無
事故電流	1回

主要成果 【4】実系統連系運転中の気象実績

項目	内容
平均外気温	15.8 °C
最低外気温	-0.5 °C (H25.1.6)
最大外気温	37.4 °C (H25.8.11)
台風接近・上陸	有(横浜市)
平均風速	3.7 m/s
最大風速	19.0 m/s ※台風26号接近時(H25.9.16)
最大震度	震度4 ※1回 (H24.11.24)
最大積雪	13 cm (H25.1.14)

実系統連系期間中の気象実績

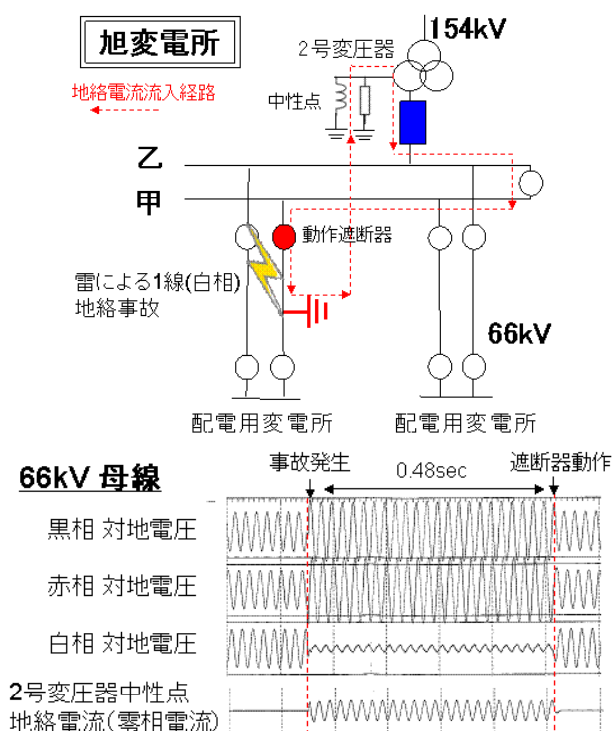


実系統連系期間中の外気温の推移

主要成果 【4】雷による1線地絡事故の影響

項目	内容
発生日時	H25年8月12日 19:36:38
事故箇所	66 kV 架空送電線 白相
事故内容	雷による1線地絡事故
事故時間	0.48 秒(24 サイクル)
動作遮断器	旭(変)66 kV送電線 遮断器 (10 秒後、再閉路成功)
対地電圧 (事故前→事故時)	黒:38.1 kV → 54.5 kV 赤:38.1 kV → 64.6 kV 白:38.1 kV → 7.2 kV
相間電圧	変化なし(66 kV)
地絡電流	415 A
負荷電流	約1000 A(各相)

- 健全相対地電圧の上昇、地絡電流流入を経験。
- ・超電導ケーブルの運転は安定を維持。
- 残存性能試験においても健全性を確認。



主要成果 【4】警報発生実績評価

- 【重故障】:なし
- 【軽故障】:軽微な故障のみ。

警報発生実績

区分	分類	発生警報項目	内容	対策
軽故障	機器故障	UPS装置故障	UPSバッテリーの経年劣化	UPS取替
軽故障	運用・設定値不備	給水圧力低下	作業に伴う給水圧力低下	警報設定値変更
軽故障	運用・設定値不備	冷凍機油圧低下	瞬時値が警報設定値より低下	時限タイマー設置
軽故障	運用・設定値不備	冷凍機冷却水温度異常	外気温上昇による吐出ガス温度上昇	冷却水の流量増加
軽故障	運用・設定値不備	リザーバタンク圧力上昇	警報設定値と凝縮減圧弁動作値を同値にしていた為、減圧弁正常動作時に発生	タンク内液面低減

■超電導ケーブルシステムに関わる故障は発生せず、安定運転を確認。

まとめ

「成果」

- ・実システムにおける安定的な1年以上の運転実績
- ・系統切替を含む急激な負荷変動に対する安定制御
- ・運転後を含む電気性能の健全性維持
- ・冷凍機メンテナンスを含む保守技術確立

「実証試験で確認できなかった点、今後の課題」

- ・過大な事故電流の流入無し(実証試験では地絡電流の流入のみ)
- ・重大トラブルの実証なし(事故時の挙動未検証)
- ・効率向上必要(COP改善、真空度維持、ACロス低減)