

「6.1-3 冷却システムの設計・構築」 (公開)

平成26年9月3日

株式会社前川製作所 町田 明登

6.1-3 冷却システムの設計・構築

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	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	要素技術データ収集・提供	要素技術データ収集・提供	実証データ収集・提供	実証データ収集・提供	実証データ収集・提供

事業目標の達成度

基本計画：冷却システムの設計・製造・実証試験の実施から送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを確立する。

事業目標(実施計画書)			達成度
項目	内容		
冷却システムの設計・構築	冷却システムの設計・検証試験	【1】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 【2】前川製作所守谷工場にて冷却システム検証試験を実施し、各特性を評価	○ ○
	実証用冷却システムの建設・事前検証	【3】実証用冷却システムの建設 【4】冷却システム機器性能確認 【5】冷却システム信頼性検証 【6】実証ケーブルとの接続、及び組み合わせ後の運転特性確認	○ ○ ○ ○

主要成果 【1】冷却システムの検討(仕様)

実証試験用冷却システムの開発方針

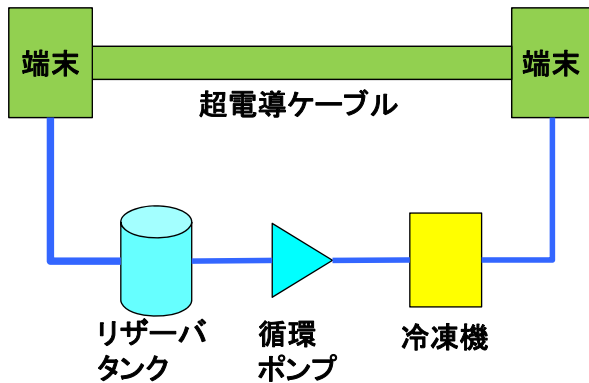
運転を中断しない技術の検証(高信頼性)、負荷変動等に追従した運用

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、ポンプ等の主要機器は冗長性を持たせ、連続運転可能とする ・故障機器からの切替は自動で行うこと
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、圧力を制御してサブクール状態を維持し、LN2無補給運転を可能とすること 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 【1】冷却システムの検討(構成)

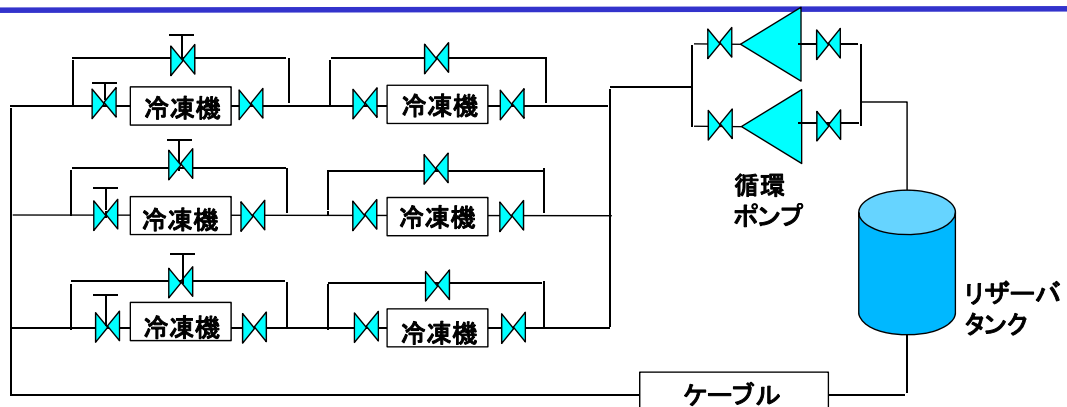
- ・冷却方式: 運転実績と応答性の良さから超電導ケーブルと冷凍機がシリーズにつながる**冷凍機直接冷却方式**を採用
- ・冷凍機: 過去の実績から**1kW級スターリング冷凍機**を採用
- ・冷凍機台数: 系統運転での必要台数は5台。故障時の冗長性を考慮し、**予備機1台を含めた6台構成**



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

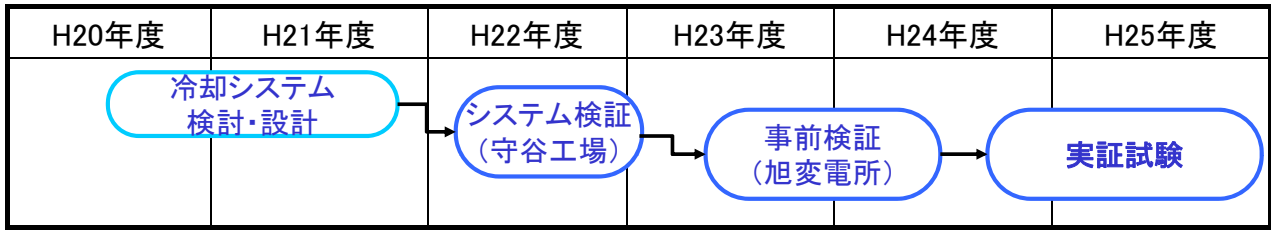
予備機1台を含め6台構成を採用

主要成果 【1】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。
異常時	ポンプ異常時はもう一台と切替。故障ポンプは切り離し、修理。 冷凍機異常時はOFF冷凍機と切替。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。

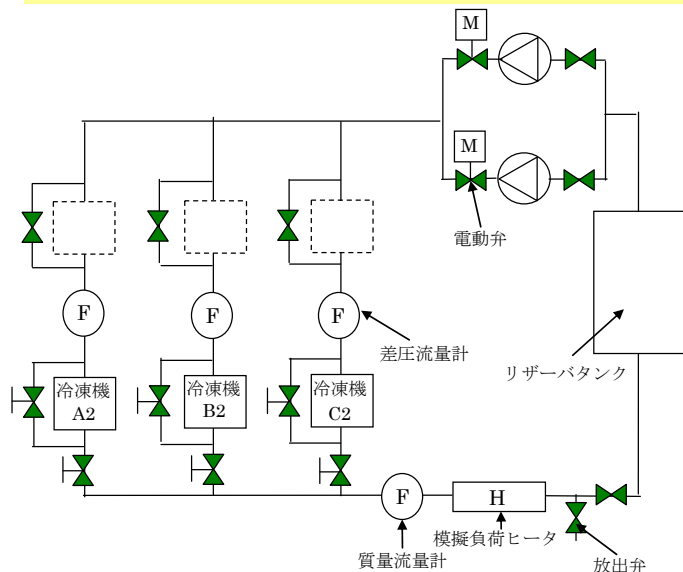
主要成果 【1】冷却システム検証スケジュール



主要機器		システム検証	事前検証
冷凍機	スターリング冷凍機	1台×3並列(計3台)	2台×3並列(計6台)
循環ポンプ	遠心式ポンプ	260mケーブル用. 並列2台	260mケーブル用. 並列2台
リザーバタンク	液の膨張代吸収	容積1,000ℓ	容積1,000ℓ
ケーブル		模擬	260m級
試験場所		前川製作所守谷工場	東京電力旭変電所
装置イメージ図			
塗りつぶし(水色): 設置 白抜き: 未設置			

主要成果 【2】冷却システム検証試験(概要)

実証試験用冷却システムと同様構成(冷凍機は3台)の冷却システムを製作し、冷却システムの基本的な性能、制御性を確認



検証項目の一例

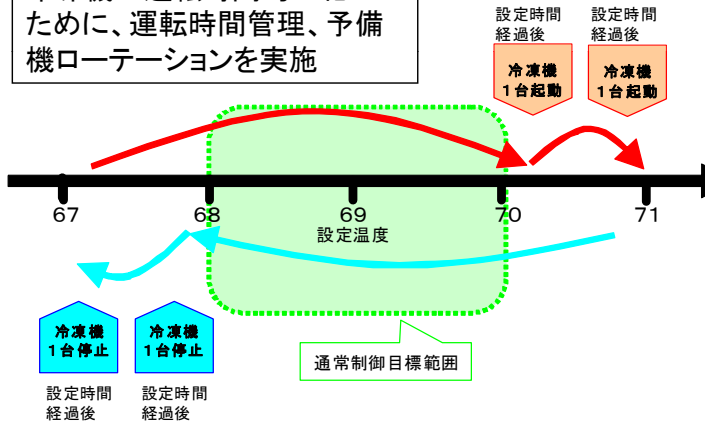
- ・機器性能:
冷却能力、循環ポンプ性能確認
- ・制御性: 温度、圧力、流量制御確認
- ・信頼性:
故障切替試験(冷凍機、循環ポンプ)
メンテナンス方法確認(冷凍機、循環ポンプ)

システム検証試験装置レイアウト

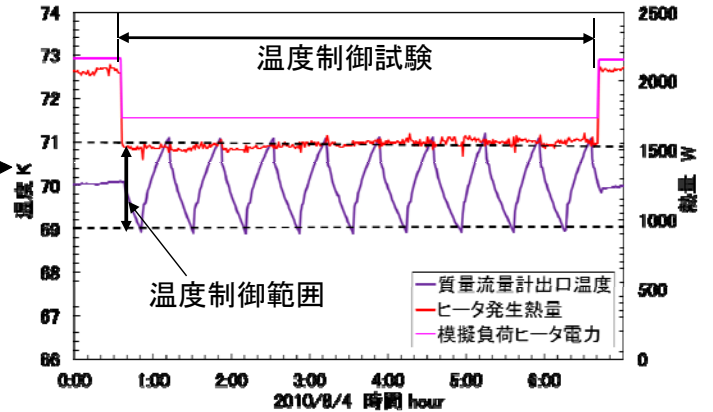
主要成果 【2】冷却システム検証試験(温度制御)

温度制御方式(冷凍機台数制御)の制御性を確認

冷凍機の運転時間均一化のために、運転時間管理、予備機ローテーションを実施



冷凍機台数制御概念図

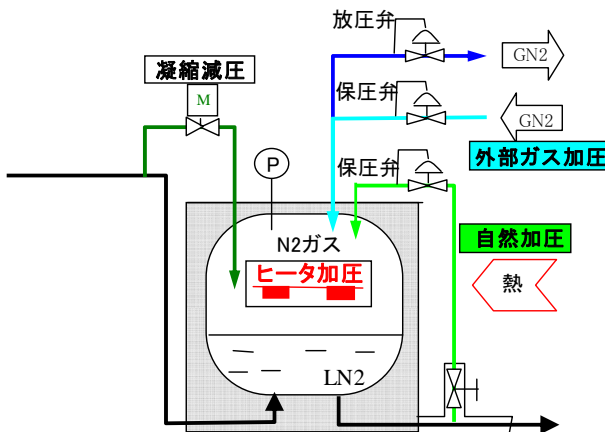


温度制御中の温度トレンド

冷凍機の台数制御により制御範囲内での温度制御が可能であることを確認

主要成果 【2】冷却システム検証試験(圧力制御)

各圧力制御方式において設定圧力で制御可能なことを確認

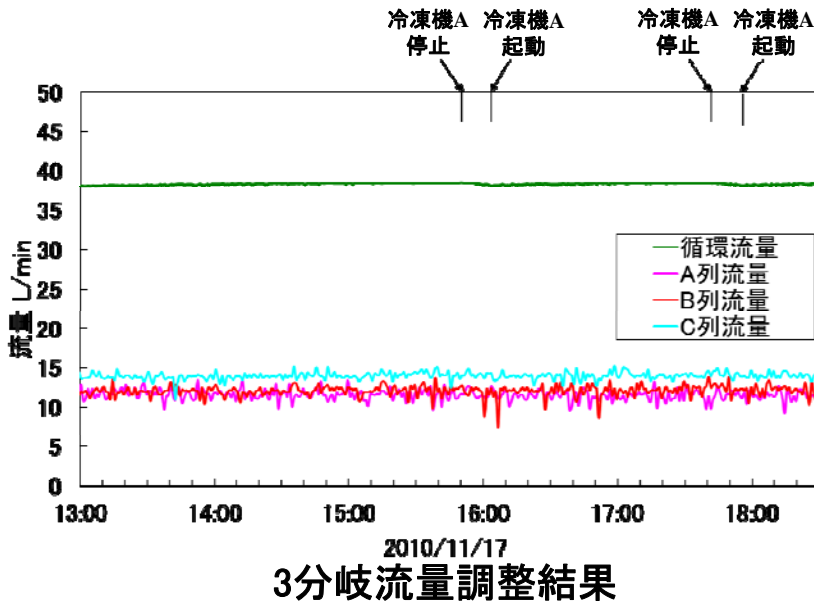


制御方式	制御方法
自然加压	循環液体窒素の一部を外気でガス化させて加压する
ヒータ加压	タンク内部に設置したヒータでタンク内液体窒素表面温度を上げて加压する
外部ガス加压	外部から窒素ガスをリザーバタンクへ供給して加压する
凝縮減圧	リザーバタンク内の窒素ガス層を循環液体窒素と接触させることで液化させて減圧する

各圧力制御共に制御性に問題なし。窒素ガス補給が必要なく無人長期運転に向いている自然加压を常時使用し、他制御はバックアップとする

主要成果 【2】冷却システム検証試験(流量制御)

循環ポンプの運転周波数を固定した状態において循環流量が一定となること、3分岐の流量調整が可能であることを確認

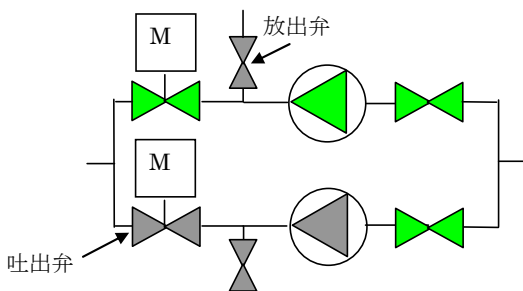


- ・循環流量は常に一定である
- ・3流路へほぼ均等に流すことが可能である
- ・冷凍機運転状態変動による流量への影響はない

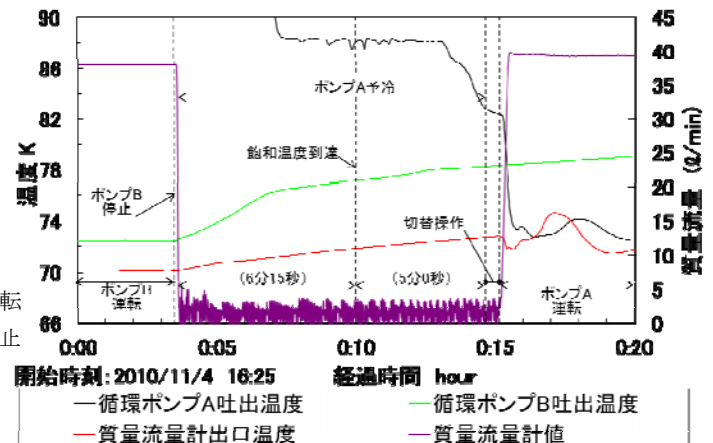
循環ポンプ2台、3分岐の構成で運用可能であることを確認

主要成果 【2】冷却システム検証試験(故障切替)

運転中ポンプ故障時に待機側ポンプへの短時間切替を確認



循環ポンプフロー



循環ポンプ故障切替中トレンド

切替完了までの循環停止時間が長くなるため2台同時運転に変更

主要成果 【3】冷却システムの建設

検証試験で性能・機能の健全性が確認出来たため、旭変電所へ冷却システムの移設および周辺設備建設を実施

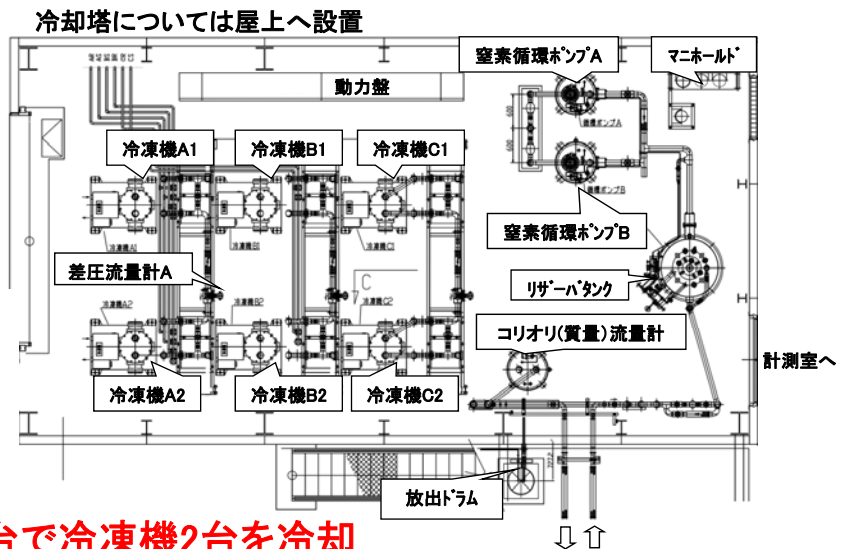


冷却システム建屋

冷却水系統

3台の冷却塔を使用。冷却塔1台で冷凍機2台を冷却

冷却塔故障時には残り2台の冷却塔で対応可能(自動切替)



主要成果 【3】冷却システムの建設



冷却システム外観



冷凍機



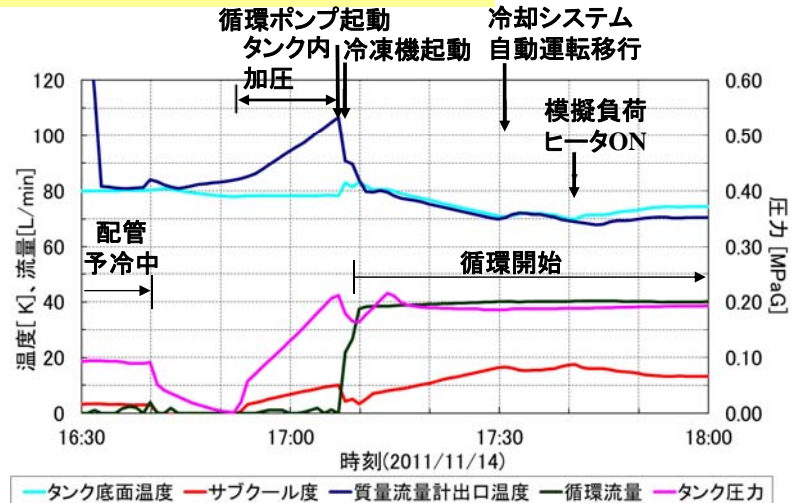
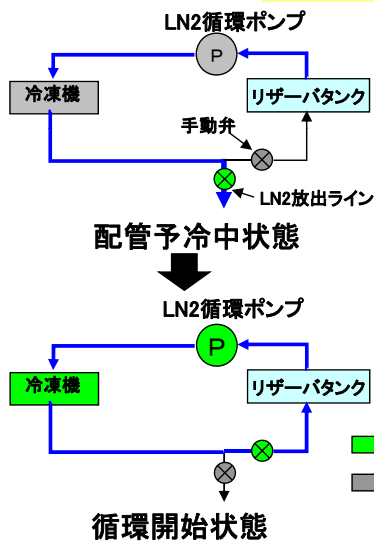
循環ポンプ



リザーバタンク

主要成果【4】事前検証(初期冷却試験)

冷却システムの初期冷却手順を確認



初期冷却作業中トレンド

冷凍機熱交換器部での凍結を防ぐ初期冷却方法を確立
移設後の機器・システムの健全性、動作確認を実施

主要成果【5】事前検証(故障切替)

冷凍機・循環ポンプ故障の際に予備機が動作し、循環温度が維持されることを確認

冷凍機故障時の動作

1. 予備機起動
2. 故障機列に起動冷凍機がある場合は2台目が起動
3. 温度制御に従い台数制御

模擬的に故障停止を行い、シーケンス通りの動作を確認

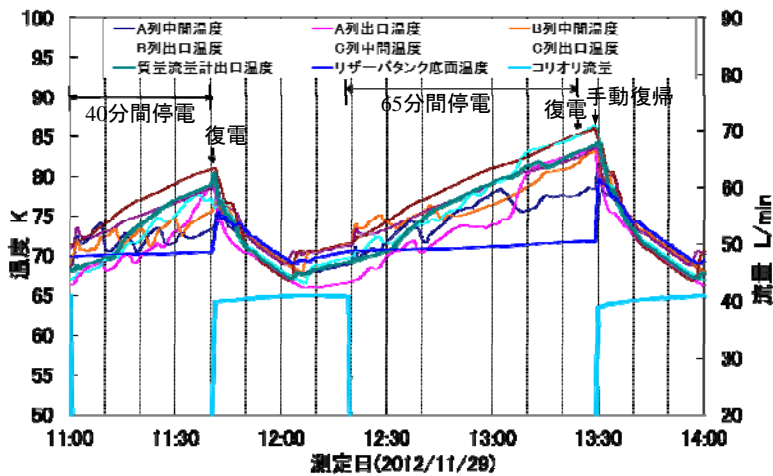
循環ポンプ故障時の動作

1. もう一方のポンプにて運転
2. 一時的に流量は低下するが循環運転は継続

循環運転を停止させることなく故障時切替可能なことを確認

主要成果【5】事前検証(停電試験)

停電時の液体窒素の温度状態、復電時の復帰状況を確認



停電模擬時の液体窒素の温度状態

停電時の動作設定

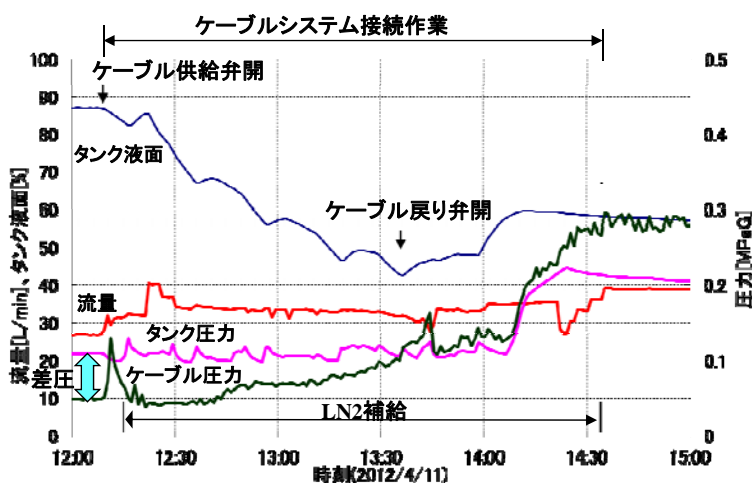
- 1分: 復電後も停電から3分経過までは再起動なし
- 3-60分: 復電後すぐに自動で再起動
- 60分以上: 自動での再起動なし



- ・正常動作を確認
- ・60分までは冷却システム再起動可能

主要成果【6】ケーブル循環冷却移行手順検証

冷却システムとケーブルシステムの接続、循環冷却移行手順を確認



ケーブル循環運転開始時の状態

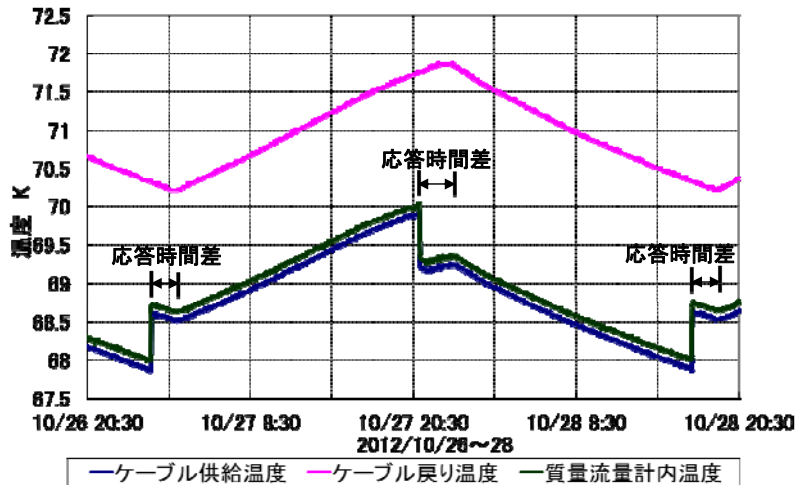
冷却システムの起動タイミングや冷却システム側とケーブルシステムの差圧等の条件を変更、手順を検証



- 冷却システムとケーブルシステムの差圧を抑えることでスムーズに移行出来ることが分かり、液体窒素のケーブル循環手順を確立

主要成果【6】ケーブル冷却時制御(温度)

冷凍機台数制御での温度制御性を確認



ケーブル入口・出口温度の状態

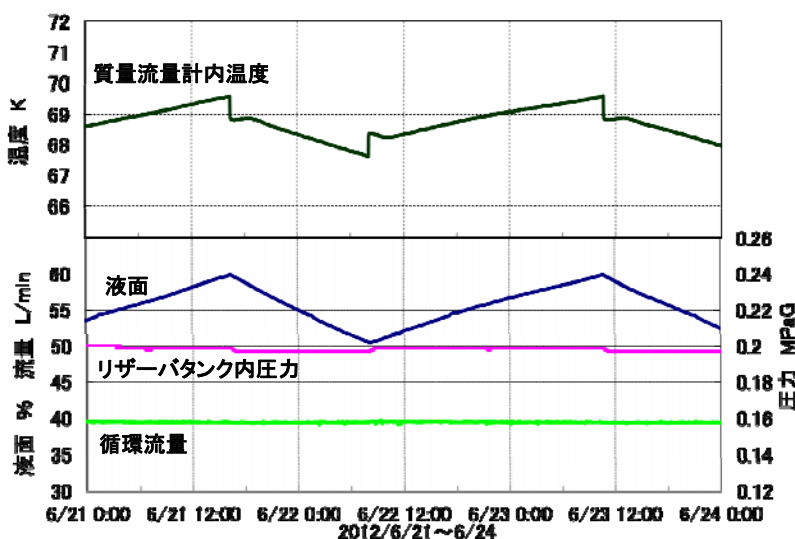
- ・ケーブル入口を設定温度範囲内(69±1K)で制御出来ることを確認
- ・冷凍機ON-OFF周期は負荷により異なる(左図では40時間)



ケーブル接続後も冷凍機台数制御で温度制御が可能であることを確認

主要成果【6】ケーブル冷却時制御(圧力・流量)

ケーブル循環運転時の流量、圧力の制御性を確認



循環流量・タンク内圧力の状態

- ・ケーブル接続後も圧力、流量の制御性に問題無いことを確認
- ・ケーブル部での温度変動による液体窒素体積変動によりリザーバタンク液面は変動するが、圧力、流量への影響は無い



ケーブル接続後も圧力、流量の安定制御が維持されることを確認

成果まとめと今後の課題

- システム検証試験(守谷工場)、事前検証試験(旭変電所)を実施し、冷却システム単体での性能・制御・信頼性に問題のないことを確認
- 冷凍機・循環ポンプの故障時に予備機が作動し、循環温度、圧力、流量を維持できることを確認
- ケーブルシステム、冷却システムを別々に初期冷却を行い、その後、スムーズに接続する方法を確立した
- ケーブルシステムとの接続後、温度・圧力・流量は安定した制御が行われることを確認し、本システムで実証試験を行うことが可能であることを検証した