

高速実験炉「常陽」
MK-III 総合機能試験結果報告書
-1次補助冷却系試験-
(試験報告)

2004年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

高速実験炉「常陽」
MK - III 総合機能試験結果報告書
— 1 次補助冷却系試験 —
(試験報告)

軽部 浩二 赤城 慎二 寺野 壽洋
小貫 修 伊東 秀明 青木 裕
大戸 敏弘

要 旨

本報告書は MK-III 総合機能試験として実施した、1 次補助冷却系設備の試験結果について記すものである。

本試験は MK-III 炉心における 1 次補助冷却系循環ポンプの機能及びサイフォンブレーク機能等が満足していることを確認するものであり、以下の 3 項目から成っている。

試験番号	試験内容
(1)SKS-117	流動特性試験（通常起動試験）
(2)SKS-118-1	ポニーモータ 1 台運転時補助系起動試験
(3)SKS-121	サイフォンブレーク機能確認試験

試験結果はいずれも判定基準を満足し、MK-III 炉心における 1 次補助冷却系設備の機能及びサイフォンブレーク機能等が十分であることを確認できた。

Experimental Fast Reacter JOYO MK-III Functional Test
—Primary Auxiliary Cooling System Test—
(Function Test Report)

K.Karube, S.Akagi, T.Terano
O.Onuki, H.Ito, H.Aoki
T.Odo

Abstract

This paper describes the results of primary auxiliary cooling system ,which were done as a part of JOYO MK-III function test.

The aim of the tests was to confirm the operational performance of primary auxiliary EMP and the protection system including siphon breaker of primary auxiliary cooling system.

The items of the tests were :

(Test No.)	(Test item)
1) SKS-117	EMP start up test
2) SKS-118-1	EMP start up test when pony mortor running
3) SKS-121	Function test of siphon breaker

The results of the tests satisfied the required performance , and demonstrated successful operation of primary auxiliary cooling system.

*JOYO Operation Section,Experimental Reacter Division ,O-arai Engineering Center.

目 次

1. 緒言 -----	1
2. MK - III総合機能試験の全体構成及び工程 -----	2
3. 設備概要 -----	10
4. 試験内容 -----	13
4.1 流動特性試験、ポンーモータ1台運転時補助系起動試験 -----	13
4.1.1 試験目的 -----	13
4.1.2 試験方法 -----	13
4.1.3 試験結果 -----	14
4.1.4 評価・考察 -----	14
4.2 サイフォンブレーク機能確認試験 -----	15
4.2.1 試験目的 -----	15
4.2.2 試験方法 -----	15
4.2.3 試験結果 -----	15
4.2.4 評価・考察 -----	17
5. 結言 -----	28
6. 参考文献 -----	29

表 目 次

表 2.1 総合機能試験項目及び試験概要	-----	4
表 4.1-1 流動特性試験(補助系手動起動)ボニーモータ停止	-----	19
表 4.1-2 流動特性試験(補助系自動起動)ボニーモータ B 運転中	-----	20

図 目 次

図 2.1	総合機能試験 その 1 実績工程	7
図 2.2	総合機能試験 その 1 (残分) 実績工程	8
図 2.3	総合機能試験 その 2 実績工程	9
図 3.1-1	1 次補助冷却系系統図	12
図 4.1-1	手動起動時の循環ポンプ電圧一吐出圧力特性	21
図 4.2-1	1 次補助冷却系予熱ヒータ検出位置図	22
図 4.2-2	サイフォンブレーキ機能確認試験(サイフォンブレーキ確認不可)	23
図 4.2-3	サイフォンブレーキ機能確認試験(サイフォンブレーキ確認可)	24
図 4.2-4	サイフォンブレーキ機能確認試験(サイフォンブレーキ確認可)	25
図 4.2-5	原子炉容器と主中間熱交換器の位置関係	26
図 4.2-6	原子炉容器出口配管と主中間熱交換器内窓の位置関係	27

1. 緒 言

「常陽」 MK-III 総合機能試験の一環として、MK-III 炉心において 1 次補助冷却系統設備に関わる以下の 3 項目の試験を実施した。

1. 流動特性試験 (SKS-117)

1 次主循環ポンプが全て停止した状態から、1 次補助冷却系循環ポンプを手動起動し、定格流量で運転できることを確認する。

2. ポニーモータ 1 台運転時補助系起動試験 (SKS-118-1)

1 次主循環ポンプ 2 台をポニーモータで運転している状態から、一方のポニーモータを停止することで 1 次補助冷却系循環ポンプが自動起動し、定格流量で運転できることを確認する。

3. サイフォンブレーク機能確認試験 (SKS-121)

ポニーモータ Q-H 特性測定結果により設定された回転数でのポニーモータ運転状態から、補助系のナトリウムドレン弁を開として、Na 漏洩を模擬し、補助系サイフォンブレークが正常に行われることを確認する。

2. MK-III総合機能試験の全体構成及び工程

2.1 MK-III総合機能試験の試験項目

「常陽」MK-III計画は、照射性能の向上を図ることを目的としたものであり、炉心では炉内の高速中性子束を従来の1.3倍に増加させるため、燃料領域の拡大、制御棒の移設及び遮へい体の装荷等の炉心改造を実施した。これに伴い、原子炉熱出力が140MWに増加したことに対応して、1次主冷却系、2次主冷却系の冷却材流量を増加させるとともに、原子炉入口温度を低下させ、さらに、主中間熱交換器2基、主冷却機4機を交換した。

また、照射運転時間を増加させるために、原子炉停止期間中に実施する燃料交換期間の短縮を図った。

これらの改造に対する総合機能試験の実施項目の検討は、実験炉部内の第17特別部会の下に設けたワーキンググループにおいて実施した。

この検討に際しては、MK-I、MK-II炉心での各種試験⁽¹⁾の経験を踏まえ、試験範囲を改造によって影響を受ける系統に絞り込んだ。

表2.1に総合機能試験の実施項目概要を示す。

2.2 試験工程概要

総合機能試験は、更新あるいは改造された各系統の設備や機器の据付・調整が終了した2001年8月末から2003年3月までの間に実施した。

工程全体の構成は、1次冷却系の系統圧力損失等に影響を与えるMK-III性能試験用の炉心構成前のその1(SKS-1)と炉心構成後のその2(SKS-2)に分けて計画した。

しかし、SKS-1実施中の2001年10月12日に2次主循環ポンプのモータが故障したため、その時点で未実施であった試験項目は、2002年4月に実施した。

これらの実績工程概要を図2.1~2.3に示す。

本書にて報告する1次補助冷却系流動特性試験、ポンニーモータ1台運転時補助系起動試験及びサイフォンブレーキ機能確認試験は、試験結果が炉心の圧力損失に影響されるため、MK-III炉心構成後のその2(SKS-2)で実施した。

また、1次補助冷却系流動特性試験のうち、手動起動試験を2003年1月24日に実施し、自動起動試験及びポンニーモータ1台運転時補助系起動試験は、SKS-101-2「主モータ速度制御試験」、SKS-103-1「ポンニーモータ引継試験」と合わせて2003年1月27日に実施した。

サイフォンブレーク機能確認試験は、2003年2月12日に実施したが、予熱設備に係わる不具合が生じたため、再度20日に実施した。

表2.1 総合機能試験項目及び試験概要

No.	試験項目	試験番号	試験名称		試験概要	プラント状態
1 次 主 冷 却 系 試 験	SKS-101	1	主モータ速度制御試験	予備試験 (252m ³ /hまで)	マスター・コントローラ設置に伴い、主循環ポンプ起動/停止・流量変更操作等の制御性を確認する。	MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		2		通常試験		
	SKS-102		ランバック制御試験		原子炉スクラム信号によりランバック運転に引継がれ、所定の回転数でランバック運転が行われることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-103	1	ボニー・モータ引継試験	予備試験 (252m ³ /hまで)	定格流量時及び燃料取扱モード流量時から主循環ポンプトリップによりボニー・モータに引継がれることを確認する。	MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		2		通常試験		
	SKS-104	1	主循環ポンプ特性試験	主モータによる特性	主循環ポンプのQ-H特性、新セルビウス制御装置の制御性を確認するとともに、主循環ポンプ吐出圧、消費電力等を測定し、予想された性能が得られることを確認する。また、主モータの最低回転数まで円滑に制御できることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
		2		フローコーストダウンによる特性	定格流量の主循環ポンプをトリップさせ、そのフローコーストダウンの様子（流量の時間的変化）を見て、時定数が10sec以上あることを確認する。	
		3		ランバック運転	ランバック運転状態において、主循環ポンプ吐出圧、消費電力等を測定し、予想された性能が得られることを確認する。	
		4		ボニー・モータ運転（然交流量運転から）	主循環ポンプをボニー・モータ駆動に移行し、回転数、ポンプ吐出圧、流量、消費電力等を測定し、予想された性能が得られることを確認する。	MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		5		ボニー・モータ運転（定格運転から）	主循環ポンプをボニー・モータ駆動に移行し、回転数、ポンプ吐出圧、流量、消費電力等を測定し、予想された性能が得られることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-105		連続運転特性試験		定格流量の主循環ポンプにより、24時間の連続運転を行い、異常のないことを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-106		インターロック試験		スクラム信号を発生させ、1次主循環ポンプがランバック制御に正常に移行することを確認する。また、2次系インターロック試験と合わせ冷却系相互間のインターロック確認を行う。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-107		主循環ポンプ回転数計		校正用回転数計と主循環ポンプ回転数の指示の比較により、回転数指示が正常であることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-110		モータ冷却空気入口温度測定		主循環ポンプ冷却用空気ダクト入口に風量計及び温度計を取り付け、主循環ポンプ定格運転時における風量及び温度を測定し、主循環ポンプのコイルが冷却されていることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-111		配管支持装置調整試験		配管改造について、交換したスプリングハンガ等の支持装置のストローク調整を行う。	充填前、MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
	SKS-113		各部液面測定		主モータによる特性試験時に炉容器、主循環ポンプ、オーバーフローカラムの液面を測定し配管の圧損より推定した値との比較を行う。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-114		主中間熱交換器昇温特性試験		系統予熱時に主中間熱交換器内部温度計により、温度分布を測定し正常に予熱されていることの確認を行い、予熱時間短縮化の評価を行う。	充填前、MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
	SKS-115		瞬停再起動試験		瞬停を模擬して、1次主循環ポンプが所定の瞬停再起動動作を行うこと及び再起動抵抗投入時間を確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
	SKS-116		電源喪失試験		電源喪失模擬により、安全保護系のスクラム動作、1次主循環ポンプのボニー・モータ引継、2次主循環ポンプ及び主送風機のトリップ動作等が正常に行われることを確認する。	
2 次 補助 冷卻系試 験	SKS-117		流動特性試験（通常起動試験）		炉容器液面を約0mmに保ち、1次主循環ポンプが停止している状態で、補助電磁ポンプの起動が支障なく行えることを確認する。また、各起動試験の流量を測定し、定格流量が得られていることを確認する。	MK-III改工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
	SKS-118	1	ボニー・モータ逆転時起動試験	ボニー・モータ1台運転	炉容器液面を約0mmに保ち、1次主循環ポンプ2台をボニー・モータで運転している状態で一方のボニー・モータをトリップさせ、補助電磁ポンプの自動起動が行われることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)

表2.1 総合機能試験項目及び試験概要

No.	試験項目	試験番号	試験名称	試験概要	プラント状態
2	1次辅助冷却系試験	SKS-121	サイフォンブレーキ機能確認試験	ボニーモータのQ-H特性測定を行い、補助系サイフォンブレーキ可能なボニーモータ回転数を決定する。また、補助系ドレン弁を開にすることにより、補助系からのナトリウム漏えいを模擬し、補助系サイフォンブレーキが正常に行われることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施 (SKS-2)
3	1次Na純化系試験	SKS-122	純度測定試験	コールドトラップによる純化運転を一定時間行い、純化前後のブレーキング温度より不純物を測定する。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
4	2次主冷却系試験	SKS-201	空気流路の定常性能試験	主送風機の実際の空気流路における性能を確認する。 ・送風機インレットペーンを変化させた時の風量特性。 ・空気冷却器入口ダンバを変化させた時の風量特性	充填前 (SKS-1)
		SKS-202	1 入口ダンバ閉止試験 2	主冷却器出入口ダンバ全閉、主送風機定格風量運転状態にて、2次冷却系制御盤空気冷却器温度制御回路にポンプトリップ又は主冷却器出口ナトリウム温度低の模擬信号を入れ、主送風機トリップと入口ダンバ閉止による風量の変化を測定する。	
		SKS-203	主送風機騒音測定試験	主送風機本体の温度、排気ダクトの排出口及び外部にて騒音を測定する。	充填前 (SKS-1)
		SKS-204	2次主循環ポンプ手回しトルク測定	2次主循環ポンプの手回しトルク測定を行う。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		SKS-205	1 流量制御試験 2 フローコーストグラン特性試験 3 連続運転試験 4 振動測定試験	2次主循環ポンプの運転点の測定、速度制御装置の制御性を確認する。また、速度制御器の回転数を下げていき、最低の回転数タップに到るまで中間回転数タップにおける流量を測定する。 2次主循環ポンプ定格運転状態からポンプ駆動用モータ電源を切り、2次主冷却系流量の減少特性を測定する。 設定したタップにて連続運転を行い、異常のないことを確認する。 2次主循環ポンプ連続運転中に、ポンプ及び駆動用モータの主要部の振動を測定し、著しい振動が認められないことを確認する。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		SKS-207	主冷却器昇温特性試験	系統予熱時に主冷却器昇温時間、温度分布等を測定し正常に予熱されていることを確認する。	
		SKS-208	配管熱変位試験	交換又は追加したスプリングハンガ等の支持装置のストローク調整を行う。	
		SKS-210	インターロック試験	スクラム信号で2次主循環ポンプトリップ及び主送風機トリップインターロックが正常に作動することを確認する。また、2次主循環ポンプトリップ信号で原子炉スクラムインターロックが正常に作動することを確認する。	
		SKS-211	純度測定試験	コールドトラップによる純化運転を一定時間行い、純化前後のブレーキング温度により不純物量を測定する。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
		SKS-212	電磁ポンプ流量制御試験	2次主循環ポンプの吸込み圧力変化に対し、定格流量に調整できること及び2次主循環ポンプがトリップした時の影響を確認する。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施 (SKS-1)
5	2次Na純化系試験	SKS-213	圧力制御試験	2次主循環ポンプNPSH(有効吸込ヘッド)確保のために変更となった圧力制御性の確認を行う。	MK-III改造工事終了後の充填前、初期充填後に実施 (SKS-1)
7	2次Arガス系試験	SKS-214	アキュームレータ容量確認試験	一般系電源喪失より非常系受電までの間、アキュームレータ内に蓄積された計装用圧縮空気により、入口ダンバを操作するのに十分な蓄積容量であることを確認する。	充填前 (SKS-1)

表2.1 総合機能試験項目及び試験概要

No.	試験項目	試験番号	試験名称	試験概要	プラント状態
8	冷却系組合せ試験	SKS-301	1次系全体予熱試験	予熱窒素ガス系統設備及び電気ヒータ予熱設備を使用し、1次冷却系の機器、配管及び炉容器をナトリウム充填に必要な温度まで加熱し、保持できることを確認する。また、予熱窒素ガス系にて、各ループへの窒素ガスの流量配分が所定となる弁開度を設定し流量を決定する。	充填前、MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施(SKS-1)
		SKS-302	2次系全体予熱試験	電気ヒータ予熱設備を使用し、2次系全体をナトリウム充填に必要な温度に加熱し保持できることを確認する。	充填前、MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施(SKS-1)
9	炉心関係	SKS-401	炉心内流量分布測定試験	燃料集合体、照射用燃料集合体、反射体、遮へい体等の炉心構成要素に供給される流量を測定し、必要な流量が確保されていることを確認する。	MK-III炉心構成完了後に実施(SKS-2)
		SKS-402	系統圧損測定試験	1次循環ポンプの安定運転が確保されていることを1次冷却系の系統圧損を測定することにより確認する。	
10	燃料取扱設備	SKS-501	炉内移送自動運転試験	燃料取扱制御室（新設）からの自動運転操作により、燃料交換機・回転プラグによる炉内燃料取扱が円滑に行われることを確認する。	MK-III改造工事終了後の初期充填後に実施(SKS-1)
		SKS-502	炉外移送自動運転試験	燃料取扱制御室（新設）からの自動運転操作により、炉内燃料貯蔵ラックから使用済燃料貯蔵設備への使用済反射体の移送と新燃料貯蔵設備から炉内燃料貯蔵ラックへの新燃料の移送を行い、炉外移送が円滑に行われるこことを確認する。	

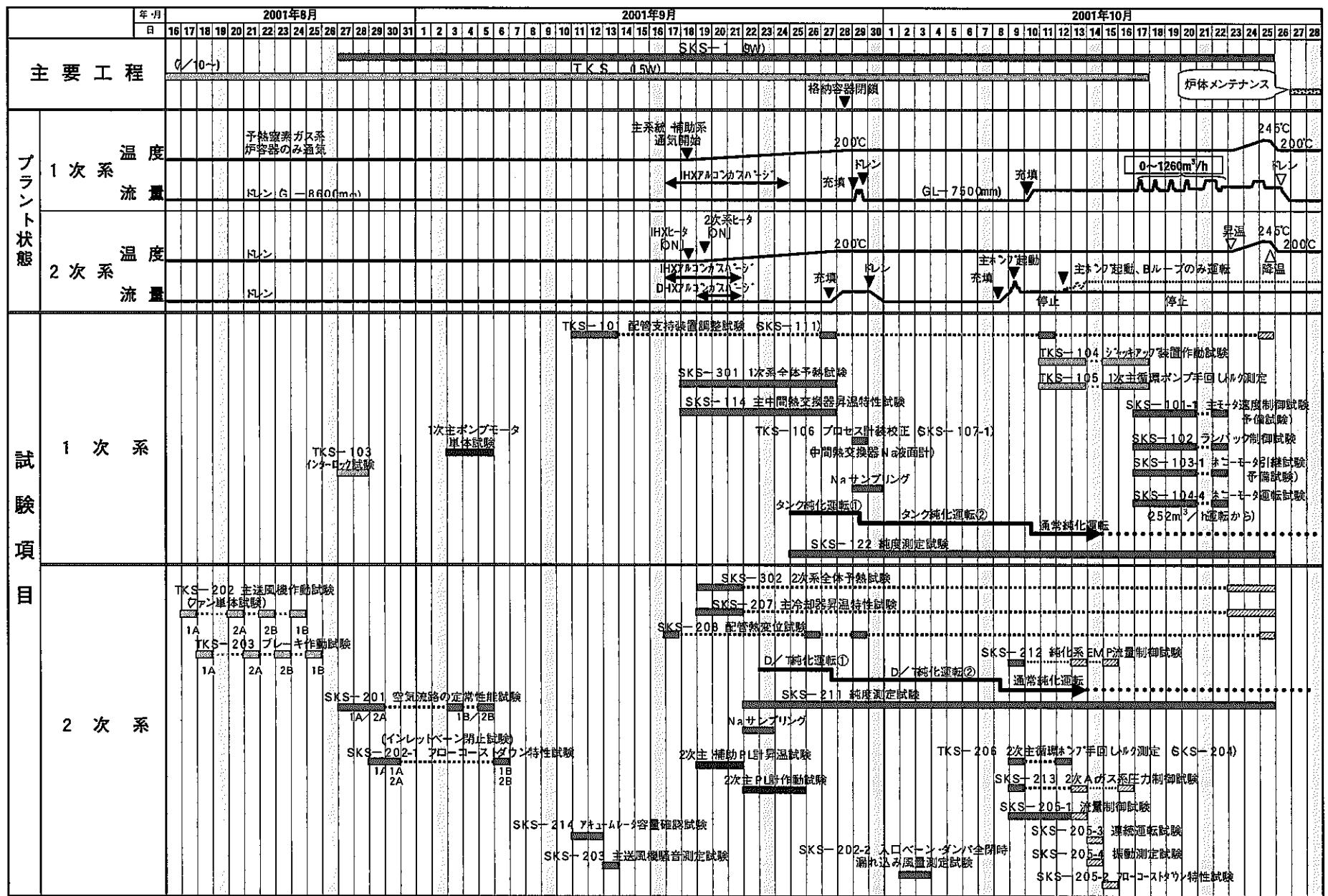


図2.1 総合機能試験 その1 実績工程

■ 10月12日の2次主循環ポンプモータ故障に伴い実施を
遅らせた項目を示す。

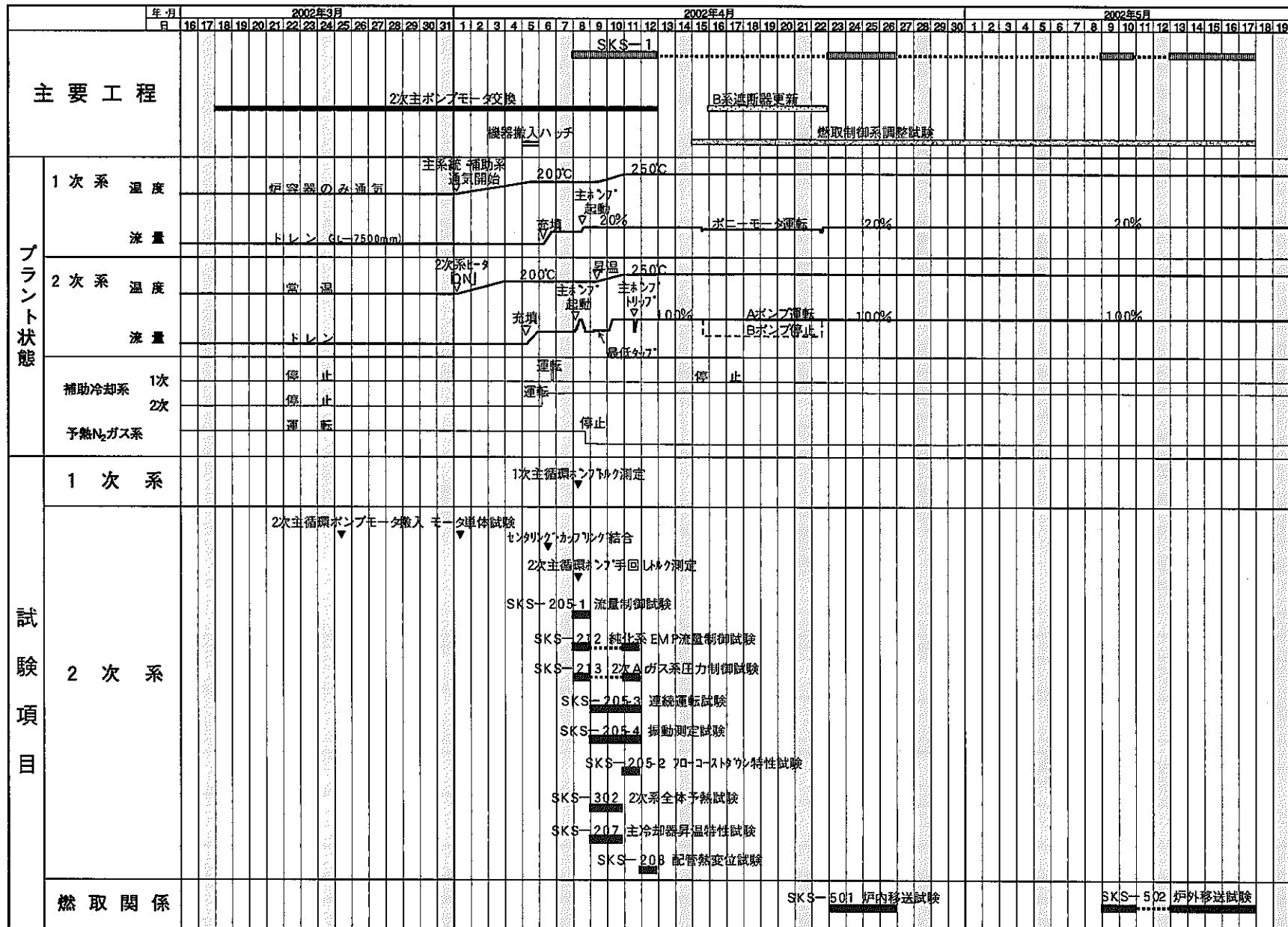


図2.2 総合機能試験 その1 残分) 実績工程

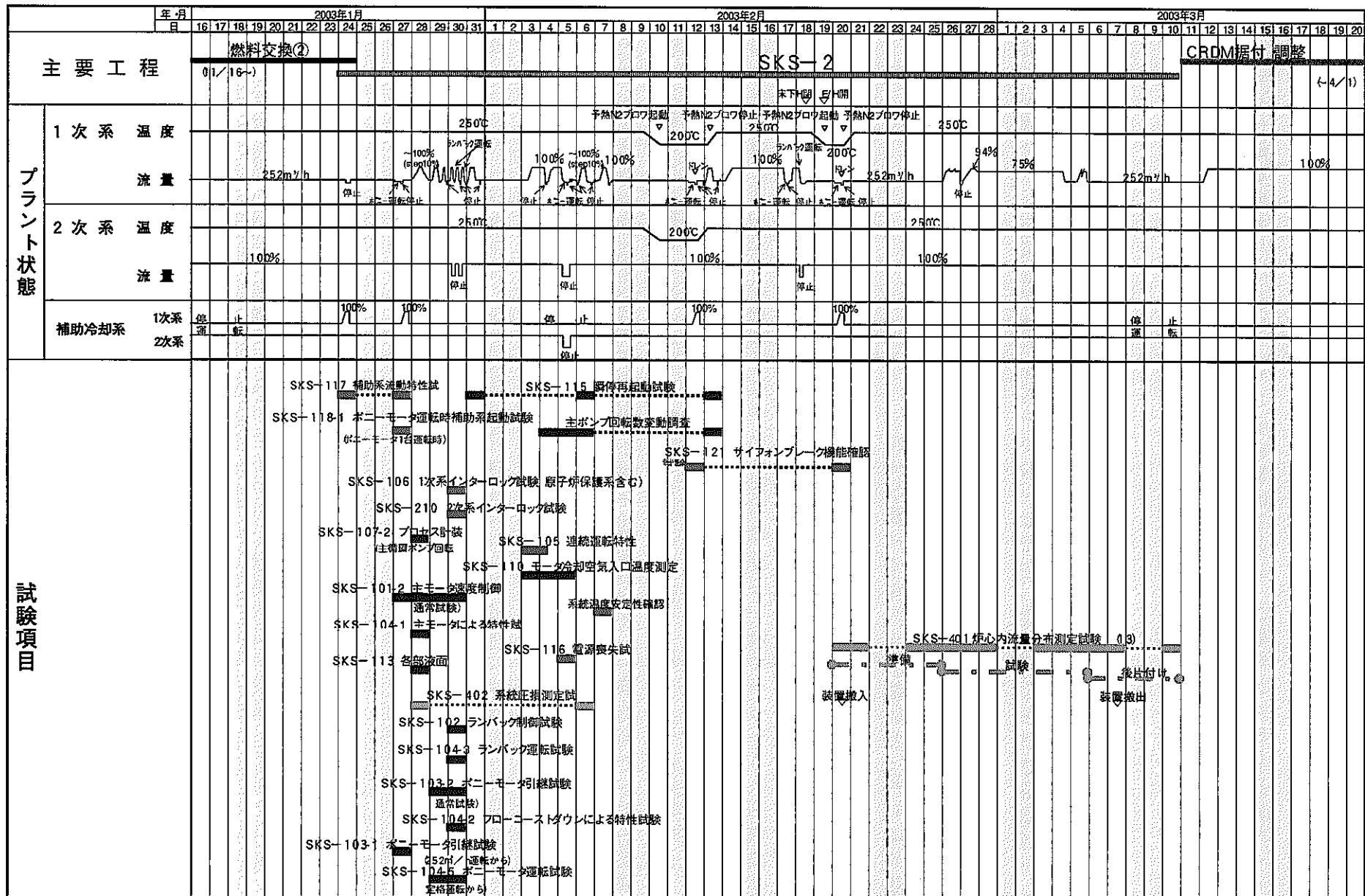


図2.3 総合機能試験 その2 実績工程

3. 設 備 概 要

1次補助冷却系統設備は、主冷却系統設備によって炉心の崩壊熱除去が出来なくなった緊急炉心冷却時、原子炉容器内ナトリウム（以下 Na と略す。）液面を低くして行う原子炉容器内検査時及び原子炉容器内の Na 液面を主冷却系配管より低くして行うメンテナンス時において、2次補助冷却系と併せて炉心崩壊熱除去を行うことを目的として設置されている。

1次補助冷却系の運転時、冷却材である 1次系 Na は電磁ポンプで昇圧された後、原子炉容器下部プレナムに入る。炉心を冷却し昇温された Na は、補助中間熱交換器を介して 2次補助冷却系に熱を伝達する。補助中間熱交換器を通り降温された Na は電磁ポンプ吸込み側に入る。

なお、原子炉通常運転時には炉心の熱除去は主冷却系にて行い、補助冷却系による熱除去は行わない。1次補助冷却系統内 Na は定格流量の約 33% にて原子炉容器高圧プレナムより原子炉容器上部プレナムへ逆流し、系統内の温度保持を行っている。

原子炉容器内から Na を吸込み補助中間熱交換器へ送る配管の下端部は、燃料頂部よりも下に位置し、Na 液面低下時においても炉心の熱除去が行える点は主冷却系と異なる。

また、本系統設備全体は、1次主冷却系と同じく 2重管となっており、このリーケージケット外管は漏洩 Na の検知及び保持を行う。2重管のアニュラス部には、機器配管の予熱のために加熱窒素ガスを循環できるようになっている。

原子炉の熱除去は通常、主モータによる主循環ポンプによって行うが、停電その他の原因により主モータによる運転が出来なくなった場合、ボニーモータに引継がれ、炉心崩壊熱除去を行う。

ボニーモータが何らかの原因によりトリップした場合または、Na 漏洩によって原子炉容器内 Na 液面が -320mm(GL-6420) に低下した場合は、インターロックにより 1次補助冷却系循環ポンプが自動起動する。この時、Na 流量は誘導電圧調整器 (IVR) により定格流量まで自動的に増加され、補助冷却系による崩壊熱除去を行う。

1次補助冷却系統設備の主要目は次の通りである。

ループ数	1 ループ
冷却容量	2.6MWt
定格流量	64m ³ /h (Na 温度 250°C)
定格運転温度	
原子炉出口	500°C
原子炉入口	350°C

系統は次の各部により構成されている。

- 1) 補助中間熱交換器
- 2) 1次補助冷却系循環ポンプ
- 3) 1次補助冷却系電磁流量計
- 4) 1次補助冷却系配管及び弁類

図 3.1 - 1 に 1次補助冷却系系統図を示す。

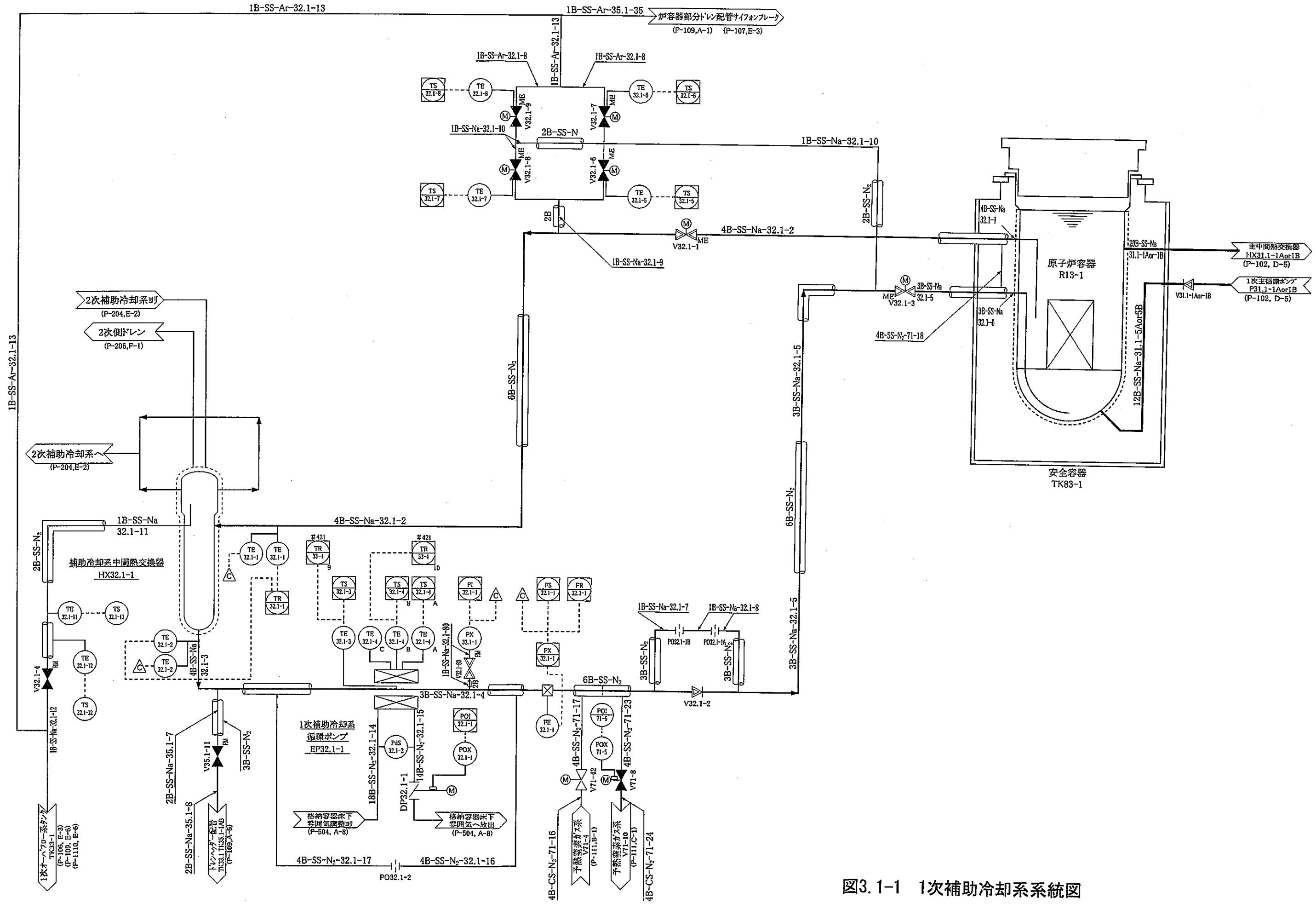


図3.1-1 1次補助冷却系系統図

4. 試験内容

4.1 流動特性試験(SKS - 117)、ポニーモータ 1 台運転時補助系起動試験(SKS - 118 - 1)

4.1.1 試験目的

MK-III炉心において、1 次主循環ポンプが全て停止した状態または、ポニーモータ 1 台運転状態における 1 次補助冷却系循環ポンプの流動特性を把握するため、循環ポンプ起動時に電圧－流量特性及び定格流量到達時間を測定する。また、ポニーモータ 2 台運転時に一方のポニーモータを停止させることにより 1 次補助冷却系循環ポンプが自動起動することを確認する。

4.1.2 試験方法

(1) 流動特性試験

<手動起動>

- ① 1 次冷却系 Na が充填され、原子炉容器の通常液位状態(GL-6100)において、ポニーモータ(A 及び B)の操作スイッチを「切引保持」とした後、1 次主循環ポンプを停止する。
- ② 1 次補助冷却系循環ポンプを手動起動した後、手動操作にて IVR を昇圧して、段階的に流量を変更し、電圧－流量特性に係るデータを採取する。また、定格流量が得られることを確認する。

<自動起動>

- ① ポニーモータ 2 台運転状態からポニーモータ(B)を停止する。
- ② 1 次補助冷却系循環ポンプが自動起動し、IVR 上限まで自動昇圧され、定格流量以上が確保されることを確認する。
- ③ 定格流量到達及び IVR 上限到達までの時間を測定し、IVR 上限位置での運動データを採取する。

(2) ポニーモータ 1 台運転時補助系起動試験

上記、(1)流動特性試験の<自動起動>に同じ。

<試験結果の判定基準>

(1) 流動特性試験

- ① 手動起動時に 1 次補助冷却系定格流量の $64\text{m}^3/\text{h}$ (Na 温度 250°C) が確保で

きること。

- ②自動起動時に1次補助冷却系定格流量の $64\text{m}^3/\text{h}$ 以上(Na温度 250°C)が確保できること。

(2)ポニーモータ1台運転時補助系起動試験

- ①ポニーモータ1台停止により、1次補助冷却系循環ポンプが自動起動し、IVR上限まで自動昇圧されること。

- ②1次補助冷却系定格流量の $64\text{m}^3/\text{h}$ 以上(Na温度 250°C)に到達し、安定運転できること。

4.1.3 試験結果

表4.1-1、2に採取データを、図4.1-1に手動起動時の電磁ポンプ電圧-吐出圧力特性図を示す。

(1)流動特性試験

ポニーモータ2台停止状態で、1次補助冷却系循環ポンプを手動起動し、手動にてIVRを昇圧して、 $20\text{m}^3/\text{h}$ 、 $40\text{m}^3/\text{h}$ 、定格流量($64\text{m}^3/\text{h}$)、IVR上限と段階的に流量変更し、データ採取すると共に、定格流量で安定運転できることを確認した。手動によるIVR昇降圧操作は問題なく実施できた。

(2)ポニーモータ1台運転時補助系起動試験

ポニーモータ(B)停止による1次補助冷却系循環ポンプ自動起動時、IVR上限位置まで自動昇圧され、定格流量($64\text{m}^3/\text{h}$)以上確保でき、安定運転できることを確認した。IVR上限位置での1次補助冷却系流量は $65.3\text{m}^3/\text{h}$ であった。1次補助冷却系循環ポンプ自動起動から定格流量到達及びIVR上限位置到達までの時間はほぼ同時であり、4分38秒であった。

1次補助冷却系循環ポンプ自動起動による2次補助冷却系IVR自動昇圧等のインターロックは正常に作動した。

4.1.4 評価・考察

MK-III炉心において、1次主循環ポンプ停止状態での1次補助冷却系循環ポンプの手動起動、ポニーモータ1台停止による自動起動が問題なく行われ、定格流量が得られることを確認した。これにより、崩壊熱除去手段としての機能が確保されていることを確認できた。

4.2 サイフォンブレーク機能確認試験(SKS - 121)

4.2.1 試験目的

ポニーモータ Q-H 特性測定結果から、設定された補助系サイフォンブレーク可能なポニーモータ回転数において、補助系サイフォンブレークが正常に行われることを確認する。

4.2.2 試験方法

- (1) 系統温度 200°C の状態で 1 次主循環ポンプ(運転時流量 252m³/h)を停止し、ポニーモータへの引継ぎを確認する。
- (2) オーバフロー電磁ポンプを停止する。
- (3) サイフォンブレーク弁「開」のインターロックを成立させるため、補助系 Na 漏洩検出リレー「68AX」の補助接点 2-4 間をジャンパーし、Na 漏洩模擬信号を発生させる。
- (4) Na 漏洩を模擬するため、1 次補助冷却系 ドレンラインを形成した後、ドレン弁(V35・1-11)を徐々に開けて、「全開」とし、1 次補助冷却系内の Na をオーバフロータンクにドレンする。
- (5) 原子炉容器液位が低下し、原子炉容器液位 -320mm でポニーモータ(B)がトリップする。また、サイフォンブレーク弁(V32・1-6~9)が作動し全開となる。なお、原子炉容器液位 0mm は GL-6100mm に相当する。
- (6) ドレン中、原子炉容器、1 次主循環ポンプ、主中間熱交換器等の主循環系機器の Na 液面が低下し、逆にオーバフロータンク Na 液面は上昇するが、あるレベルに達すると図 4.2-5 に示す 1 次補助冷却系の原子炉容器入口配管部の Na はサイフォンブレークされ、各部の液面変化が停止することを確認する。

<試験結果の判定基準>

ポニーモータ 1 台運転状態かつ、原子炉容器液位 -790mm 以上でサイフォンブレークが成立すること。

4.2.3 試験結果

試験は以下の 5 ケース実施した。

<ケース 1 >

原子炉容器液位が-320mmまで低下して、ポニーモータ(B)トリップ、サイフォンブレーク弁は「開」となったが、サイフォンブレークできなかった。調査の結果、サイフォンブレーク配管予熱温度の挙動からサイフォンブレーク配管内のNa固化による閉塞が原因と考えられる。

<ケース 2 >

サイフォンブレーク配管のNa固化による閉塞を回避するため、予熱ヒータ制御温度(H32・1-3~9)を $200\pm30^{\circ}\text{C}$ → $230\pm10^{\circ}\text{C}$ に変更し昇温した。原子炉容器にNaを再充填(GL-6100)し、ポニーモータ2台停止状態で再確認したところ、原子炉容器液位-280mmでサイフォンブレークが確認できた。図4.2-1に制御設定値変更した予熱ヒータ検出位置図を示す。

<ケース 3 >

サイフォンブレーク配管のヒータ制御温度が $230\pm10^{\circ}\text{C}$ のままで、ポニーモータ1台運転状態での再試験を実施したが、原子炉容器液位が-710mmまで低下してもサイフォンブレークできなかった。この状態から、ポニーモータを2台共停止したところ、サイフォンブレークが確認できた。図4.2-2にサイフォンブレーク確認不可時のトレンドを示す。

<ケース 4 >

原子炉容器にNaを再充填(GL-6100)し、ケース2と同様の条件(サイフォンブレーク配管予熱ヒータ制御温度 $230\pm10^{\circ}\text{C}$ 、ポニーモータ2台停止状態)で再試験したところ、原子炉容器液位-260mmでサイフォンブレークが確認できた。

<ケース 5 >

原子炉容器にNaを再充填(GL-6100)し、再試験を実施した。原子炉容器液位-320mmでポニーモータ(B)トリップ、サイフォンブレーク弁「開」後、ポニーモータ(A)抵抗器タップをR-2(0.1Ω)から最低回転数のR-20(1.0Ω)に変更したところ、原子炉容器液位-700mmでサイフォンブレークが確認できた。図4.2-3、4にサイフォンブレーク確認時のトレンドを示す。

上記試験にて確認できた結果を以下にまとめて示す。

- (1) 系統温度 200°C におけるポニーモータ(A)1台運転でサイフォンブレークした原子炉容器液位は、-700mmであった。なお、この時ポニーモータ(A)が通常運転時の回転数(120min^{-1} , R-2)では、原子炉容器液位を-710mmまで低

下させてもサイフォンブレークできなかつたため、抵抗器タップの切替を実施し、回転数を運転下限値の 105min^{-1} (R-20)に下げてサイフォンブレークを確認した。

(2) ポニーモータ 2 台停止状態でサイフォンブレークした原子炉容器液位は -260mm であったことから、ポニーモータ 1 台運転時運転下限回転数(105min^{-1})での炉心圧損は 440mm (Na 比重約 0.9 として)と推定される。

また、ポニーモータ回転数低下によってポンプ吐出圧力が 0.001MPa 低下したことから、ポニーモータ通常回転数(120min^{-1})における炉心圧損は 550mm (Na 比重約 0.9 として)となる。これらを踏まえた計算上では、ポニーモータ通常回転数の運転状態でも、原子炉容器液位 -810mm でサイフォンブレークされるものと推定される。

(3) 本試験においてインターロックは正常に作動したが、4 台のサイフォンブレーク弁のうち 1 台(V32・1-8)が駆動トルクの関係で自動「開」しない事象が 2 回発生した。いずれも 30% 開程度まで手動にて「開」とした後、操作スイッチでの操作で全開とした。なお、サイフォンブレーク弁 1 台が自動開しまくとも、他の 3 台が自動開すれば、サイフォンブレーク機能上は問題ない。

(4) 場所は特定されていないが、試験当初にサイフォンブレークラインでコールドポイントが発生し、Na 固化による閉塞でガスが供給されず、ポニーモータ 2 台停止状態でもサイフォンブレークできない事象が発生した。この対応として、予熱温度制御設定を変更して閉塞を防止した。

後に原子炉第二課にて現場確認した結果、当該部配管保温材の不具合箇所が確認されたため、保温材の手直しを行った。

試験より得られた運転経験として、サイフォンブレーク配管予熱ヒータ制御設定値の変更(H32・1-3~9 : $200 \pm 30^\circ\text{C} \rightarrow 230 \pm 10^\circ\text{C}$)及びポニーモータ(A)抵抗器タップの変更(タップ 2 → 20)は異常時運転マニュアルにそれぞれ反映した。

4.2.4 評価、考察

試験結果から 1 次補助冷却系に Na 漏洩が発生した時の崩壊熱除去運転の成立性について以下の通り評価した。なお、Na 収縮については、保守的に定格運転温度でサイフォンブレークしたとして、定格運転から 250°C (温態待機モード)に降温した時の 1 次系 Na の熱収縮量約 3m^3 (MK-II 実績)を考慮した。

この結果、最悪の事態でもポニーモータ 1 台運転継続による崩壊熱除去は十分可能であると考えられる。

- ① 1 次補助系配管は 2 重管になっており、Na 漏洩が発生しても外管が健全である場合リーコンジケット出入口弁(V71-8,42)を「閉」として隔離する事により、漏洩量を 0.6m^3 以下に抑えられる。
- ② 2 重管の内外管破損が循環ラインの仕切弁(V32・1-1,3)より原子炉容器側にある場合を除き、仕切弁を「閉」とすることで原子炉容器液位の低下を防止できる。
- ③ サイフォンブレークは上記①②の措置が機能せず、且つ内管及び外管が同時に破損した場合を想定しているものである。この場合には、原子炉容器 Na 液位が -320mm でポニーモータが 1 台運転になり、サイフォンブレーク弁が「開」となる。ただし、ポニーモータの通常の流量ではサイフォンブレークできるまでに原子炉容器 Na 液位の低下が大きく、主中間熱交換器の Na 液位がポニーモータ運転限界となる Na 流入窓上端付近まで低下する。そこで、運転中のポニーモータ抵抗器タップを R-2(0.1Ω)から R-20(1.0Ω)に変更し、流量を下げることによって、原子炉容器 Na 液位が -700mm でサイフォンブレークできる。

- ④ 図 4.2-5 に原子炉容器と主中間熱交換器の位置関係を、図 4.2-6 に原子炉容器出口配管と主中間熱交換器内窓の位置関係を示す。

原子炉容器 Na 液位が -700mm (GL-6800)でサイフォンブレークが作動した状態において、オーバフロータンクから原子炉容器への Na の汲上げがない場合、原子炉容器の液位は、熱収縮により更に約 -300mm 低下し、 -1000mm (GL-7100)となる。この液位は主中間熱交換器では流入窓(上端： -810mm 、下端： -1160mm)のほぼ中間にあり、ポニーモータによる除熱の流路は確保できる。また、運転中のポニーモータのヘッド圧は炉心の圧力損失(約 440mm)以上であり、ポンプ液位は -560mm ($-1000 + 440\text{mm}$)以上となり、定格運転温度における圧力損失の低下を考慮しても、ポンプ静圧軸受上端部の -850mm より高く、十分運転できる。

- ⑤ サイフォンブレーク弁のうち、自動「閉」しなかった V32・1-8 については、トルク(締付)調整を実施した。今後はサーベイランステストとして、1 回 / 定検の頻度でサイフォンブレーク試験を実施して、機能を確認することとした。

表4.1-1 流動特性試験（補助系手動起動）ボニーモータ停止

測定項目	TagNo.	単位	場所	EMP停止	20m³/h	40m³/h	定格流量	IVR上限
補助系Na流量	FR32.1-1	m³/h	中制 #424	0	19.8	39.8	64.7	69.5
EMP電圧		V	中制 #424	0	86	158	225	240
EMP出口圧力	PI32.1-1	MPa	中制 #424	0.068	0.076	0.097	0.142	0.152
補助IHX入口Na温度	TR32.1-1	℃	中制 #424	251	250	250	250	250
補助IHX出口Na温度	TR32.1-1	℃	中制 #424	242	251	251	250	250
EMPダクト温度	TR33-4	℃	中制 #421	226.1	243.2	245.2	247.7	248.6
EMPコイル温度	TR33-4	℃	中制 #421	23.2	23.1	23.7	24.9	26.1
M. Tr 2次側電圧		kV	中制 #427	3.3	3.29	3.29	3.3	3.3
M. Tr 2次側電流		kA	中制 #427	0.56	0.64	0.63	0.56	0.63
M. Tr タップ位置			中制 #427	8	8	8	8	8
3DP/C電圧		V	A707 #334	212	212	212	211	211
3DP/C電流		A	A707 #334	0	51	78	140	157
IVR2次電圧		V	A403 #121-3	R-S 0	<100	150	218	234
				S-T 0	<100	150	220	236
				T-R 0	<100	158	236	250
IVR2次電流		A	A403 #121-3	R 0	91	151	228	241
				S 0	90	149	226	240
				T 0	91	151	230	244

表4.1-2 流動特性試験（補助系自動起動）ボニーモータB運転中

測定項目	TagNo.	単位	場所	定格流量	IVR上限	備考
補助系Na流量	FR32.1-1	m ³ /h	中制 #424	_____	*) 65.3	
自動起動から定格流量及びIVR上限到達までの時間		分秒	中制	4分38秒	4分38秒	
EMP電圧		V	中制 #424	_____	230	
EMP出口圧力	PI32.1-1	MPa	中制 #424	_____	0.149	
補助IHX入口Na温度	TR32.1-1	℃	中制 #424	_____	250	
補助IHX出口Na温度	TR32.1-1	℃	中制 #424	_____	250	
EMPダクト温度	TR33-4	℃	中制 #421	_____	248.7	
EMPコイル温度	TR33-4	℃	中制 #421	_____	27	
M. Tr 2次側電圧		kV	中制 #427	_____	3.25	
M. Tr 2次側電流		kA	中制 #427	_____	0.78	
M. Tr タップ位置			中制 #427	_____	8	
3D P/C電圧		V	A707 #334	_____	208	
3D P/C電流		A	A707 #334	_____	148	
I VR 2次電圧		V	A403 #121-3	_____	R-S 212	
				_____	S-T 213	
				_____	T-R 220	
I VR 2次電流		A	A403 #121-3	_____	R 232	
				_____	S 231	
				_____	T 235	

*) ボニーモータ1台運転中のため、手動起動時（ボニーモータ2台停止）に比べ、高圧プレナム部の圧力が高く、IVR上限時の流量が手動起動時(69.5m³/h)に比べ少ない。

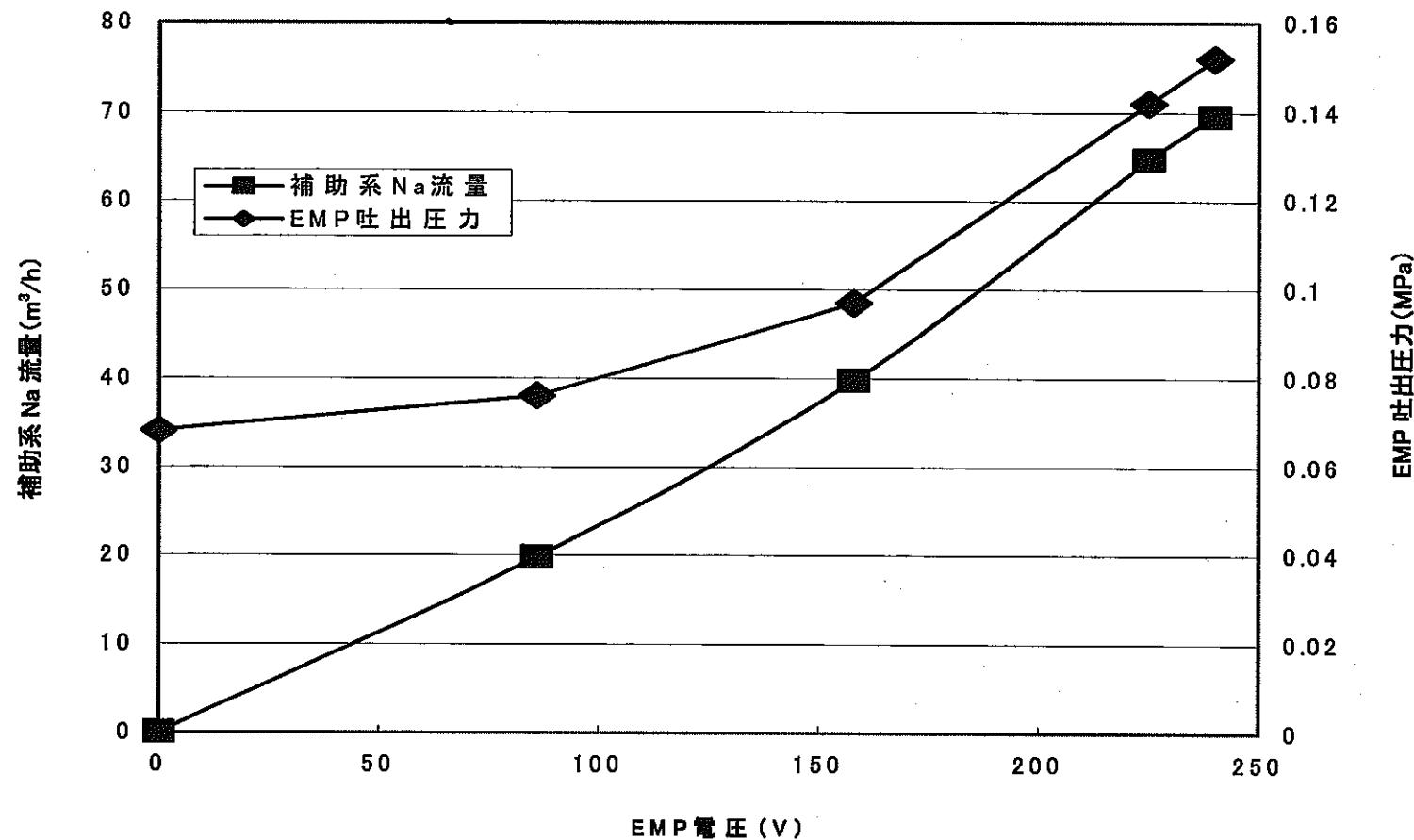


図 4.1-1 手動起動時の循環ポンプ電圧-吐出圧力特性

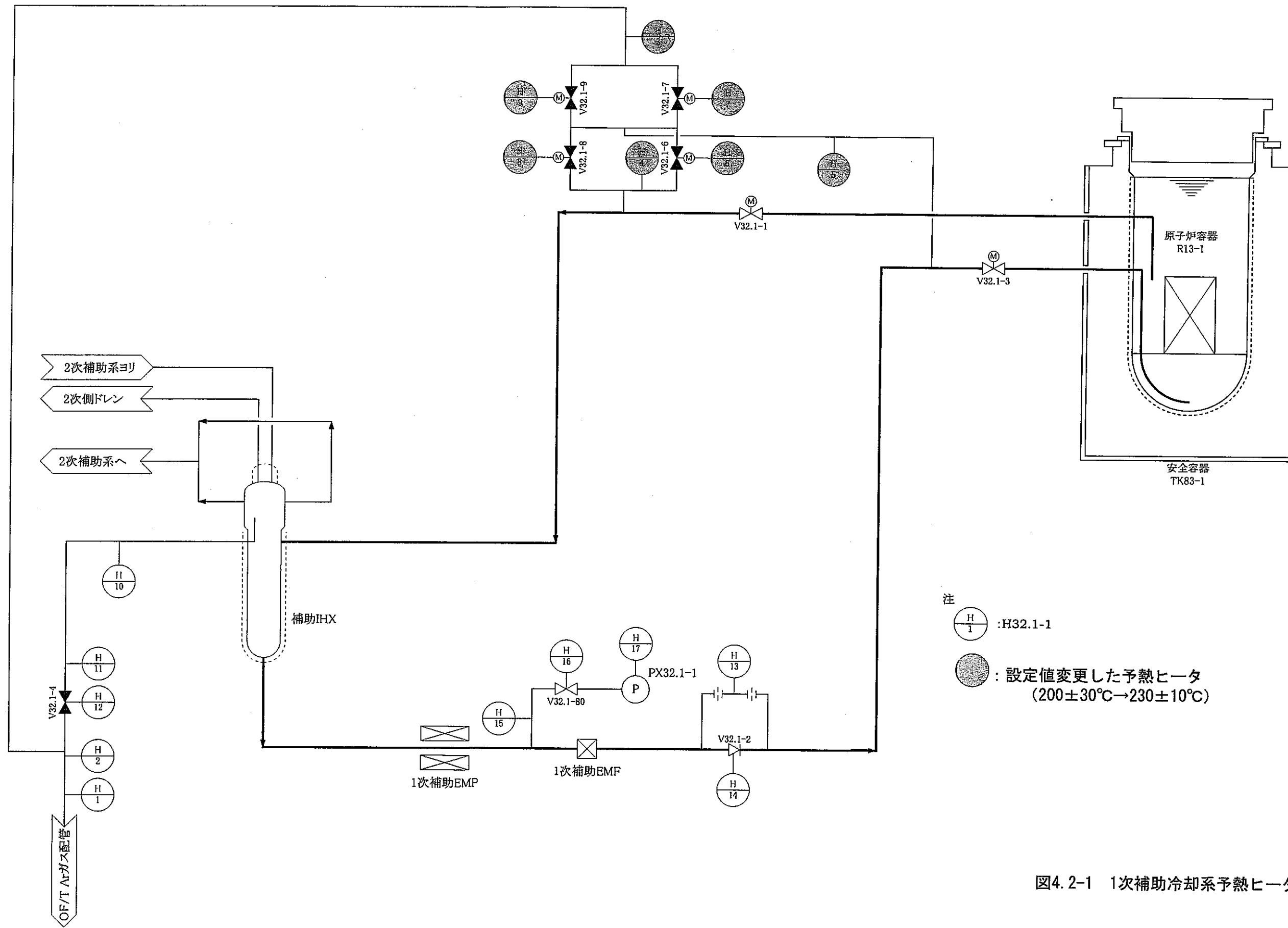


図4.2-1 1次補助冷却系予熱ヒータ検出位置図

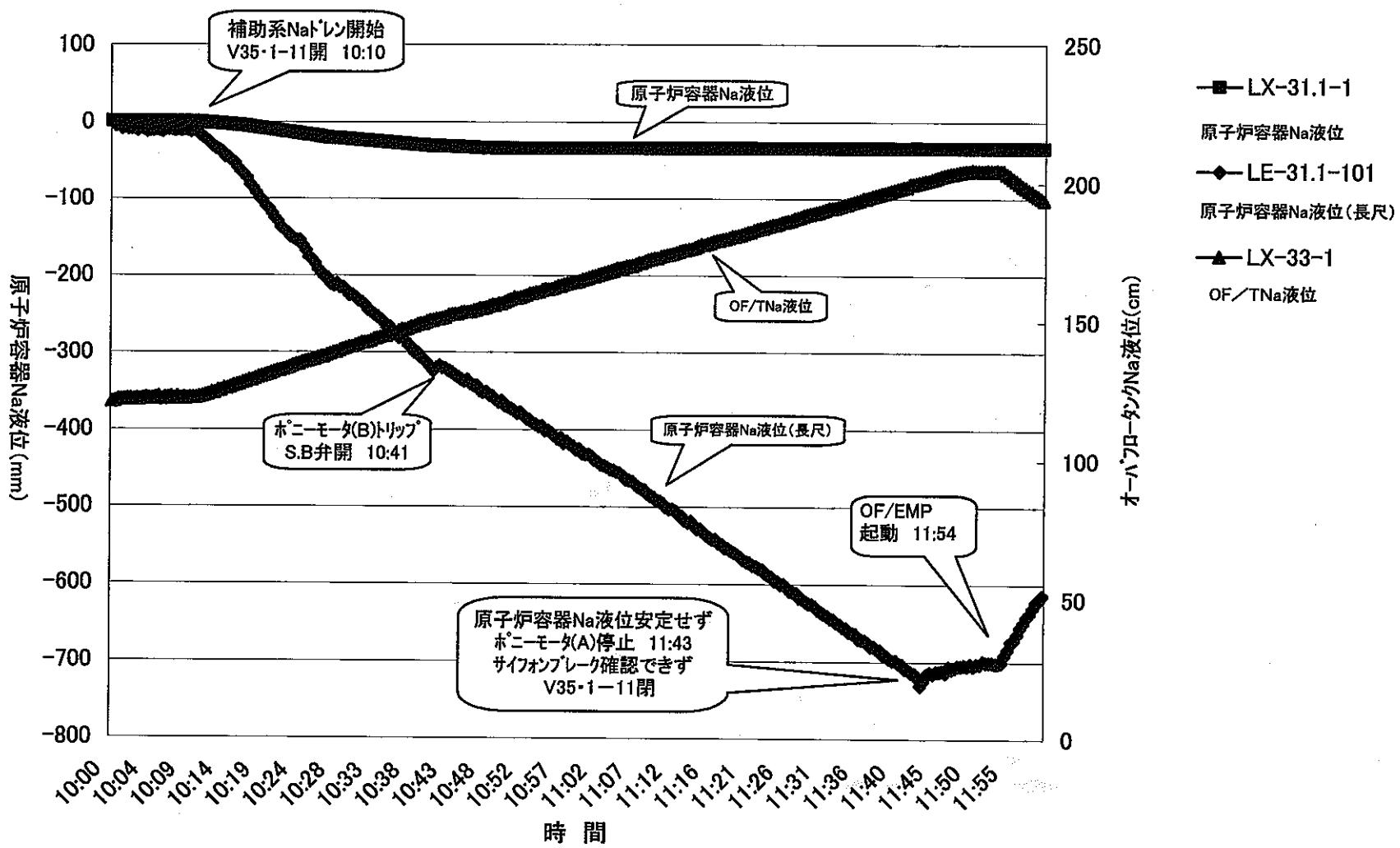


図4.2-2 サイフォンブレーク機能確認試験(サイフォンブレーク確認不可)
2003年2月20日

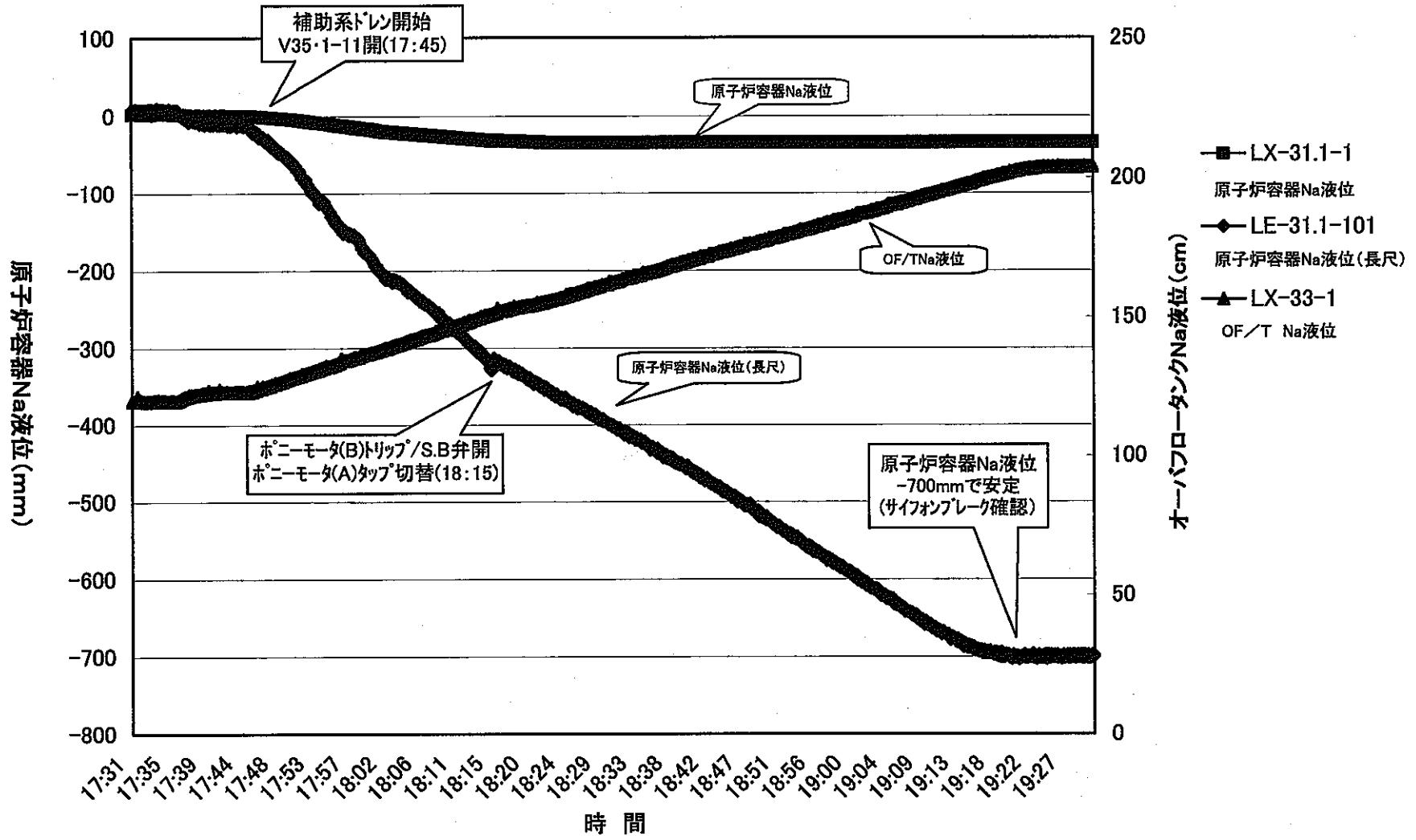


図4.2-3 サイフォンブレーク機能確認試験（サイフォンブレーク確認可）
2003年2月20日

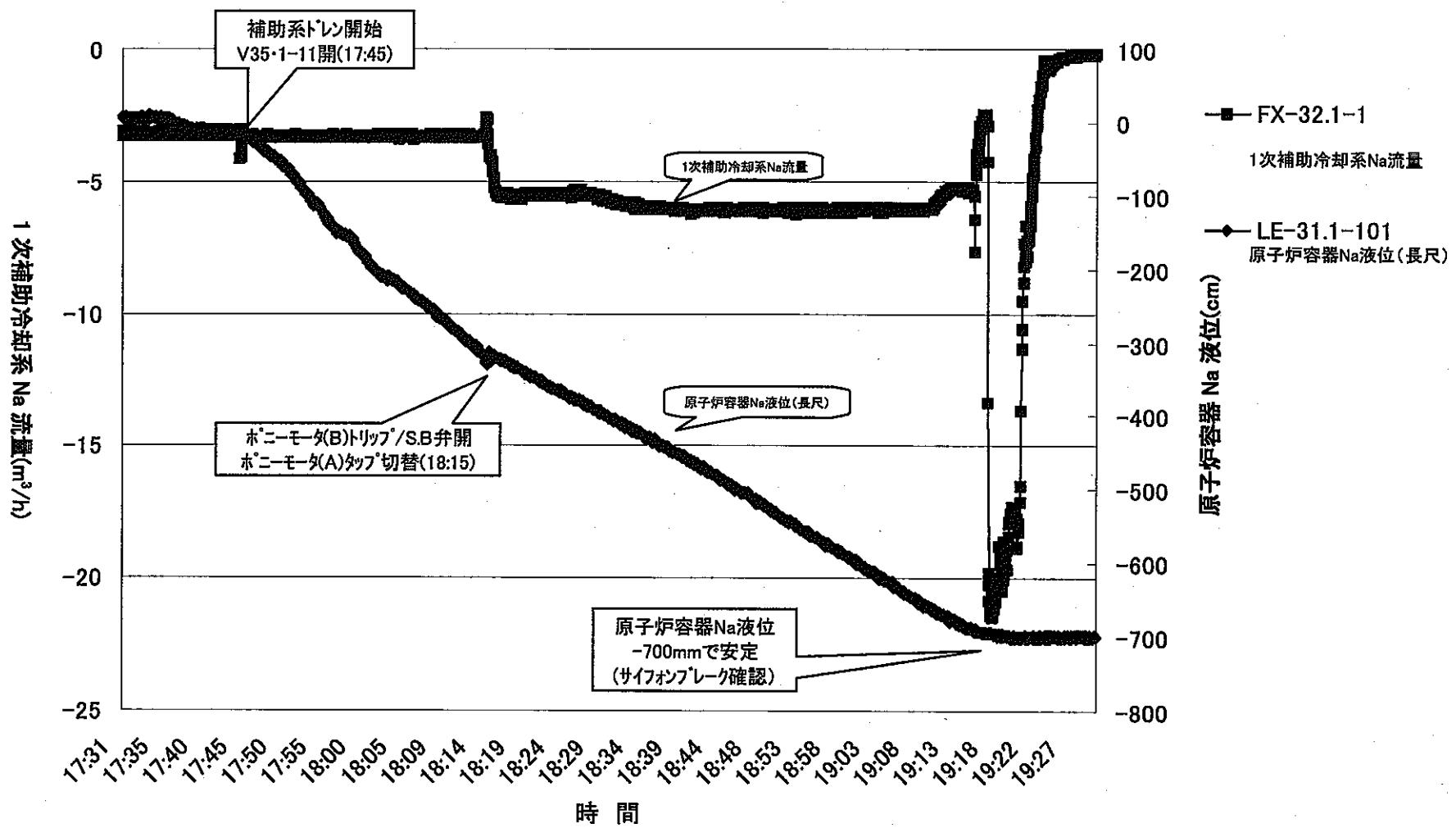


図4.2-4 サイフォンブレーク機能確認試験（サイフォンブレーク確認可）
2003年2月20日

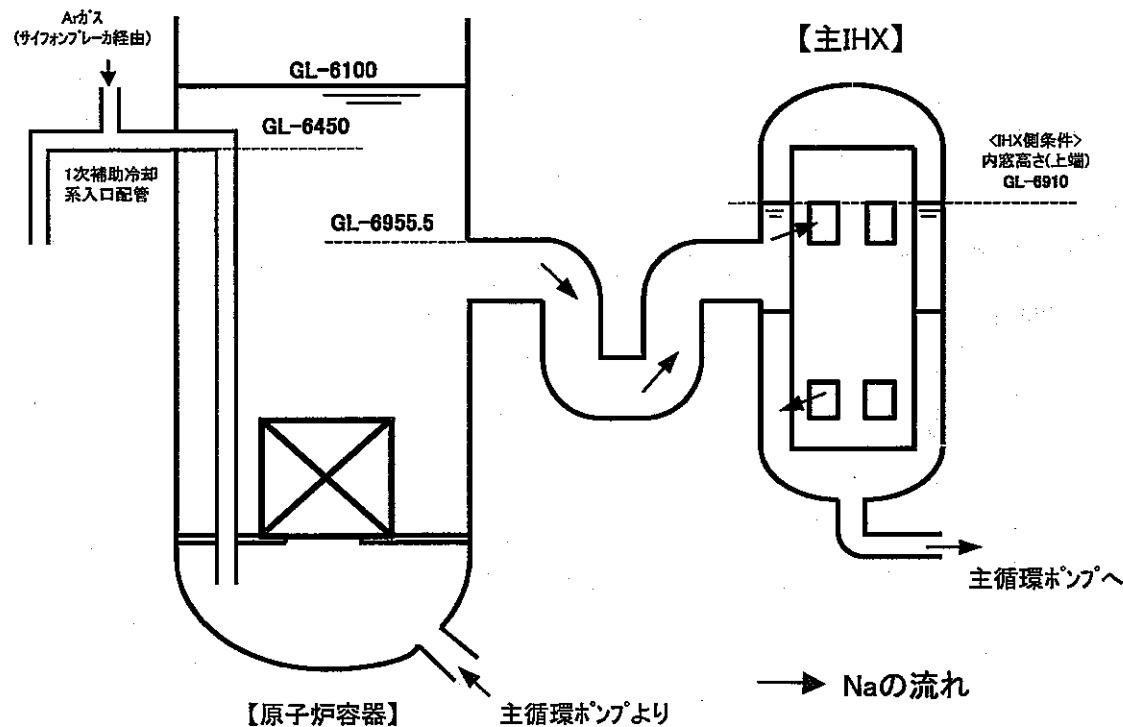


図4.2-5 原子炉容器と主中間熱交換器の位置関係

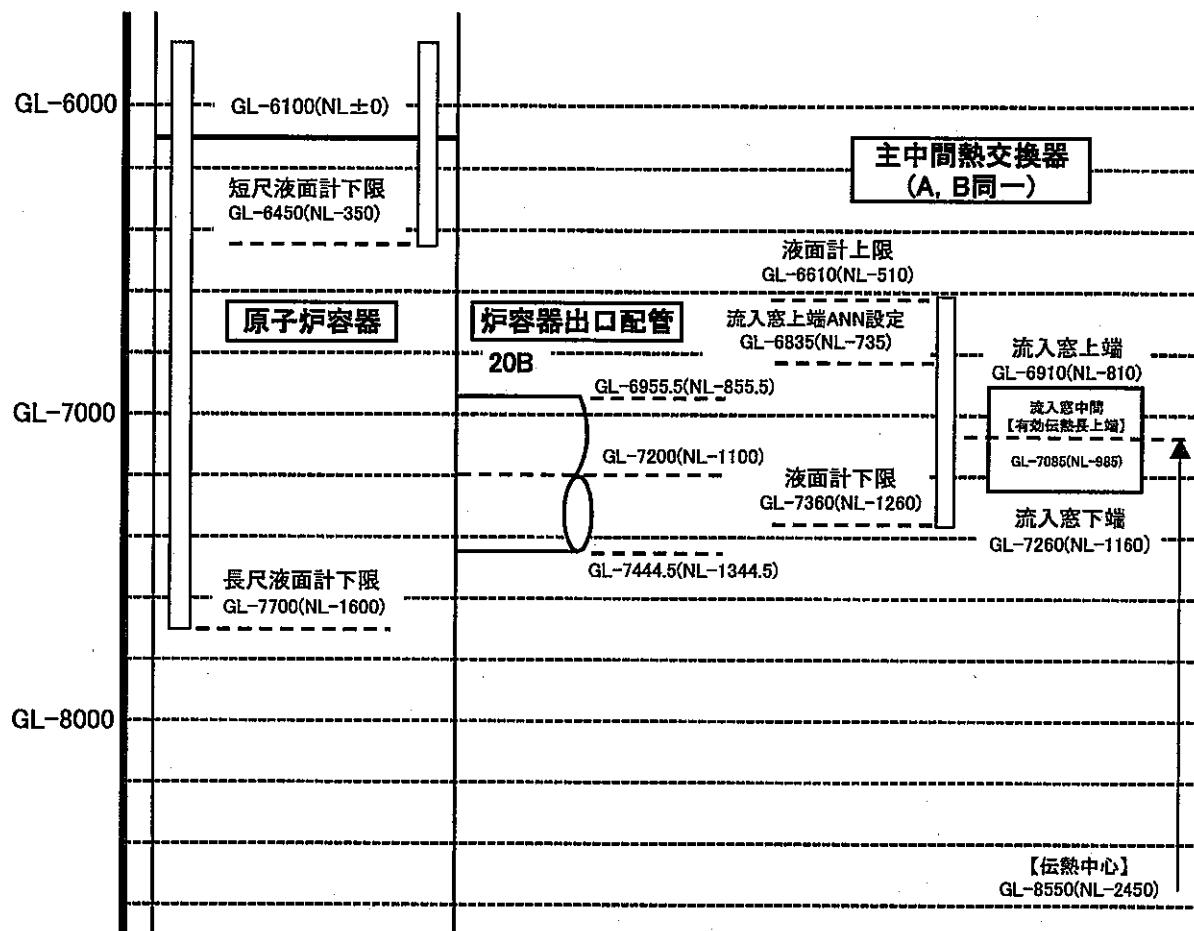


図4.2-6 原子炉容器出口配管と主中間熱交換器内窓の位置関係

5. 結 言

MK-III総合機能試験として実施された 1 次補助冷却系統設備の試験について以下の結果を得た。

- ①流動特性試験では、1 次補助冷却系循環ポンプの手動起動及び IVR の手動昇降圧操作により、定格流量が確保できることを確認した。
- ②ポニーモータ 1 台運転時補助系起動試験では、ポニーモータ 1 台停止時の 1 次補助冷却系循環ポンプの自動起動及び IVR 上限までの自動昇圧が問題なく行われ、定格流量が確保できた。
- ③サイフォンブレーク機能確認試験では、ポニーモータ 1 台運転時において、ポニーモータ(A)抵抗器タップを変更(タップ 2→20)することにより、原子炉容器液位 -700mm でサイフォンブレークすることを確認した。

試験結果はいずれも判定基準を満足し、MK-III炉心における 1 次補助冷却系統設備は、崩壊熱除去設備としての所期の機能が確保されていることを確認した。

6. 参考文献

- (1) 原田和義、他：高速実験炉「常陽」総合機能試験報告書 1次補助冷却系統試験（ナトリウム中）PNC ZN941 77-133 (1977)