

「常陽」MK-III性能試験

—異常時過渡応答試験関係—

(技 術 報 告)

2005年2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)

2005

「常陽」MK-III性能試験

— 異常時過渡応答試験関係 —

(技術報告)

川原 啓孝*1、暦本 雅史*2、城 隆久*2

石田 公一*1、有吉 昌彦*1、磯崎 和則*3

要 旨

MK-III性能試験に係るプラント特性試験のうち、異常時過渡応答関係（手動スクラム試験、外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）の各試験は、原子炉熱出力 70MWt（50%出力）、140MWt（定格熱出力）、35MWt（原子炉通常停止時における主冷却系による崩壊熱除去試験のみ）にて実施した。主な試験結果は、以下のとおりであった。

(1) 手動スクラム試験及び外部電源喪失試験

- ① 主中間熱交換器及び主冷却機の交換等により大幅に改造した冷却系設備が、過大な熱過渡を生じることなく原子炉停止後の崩壊熱を除去できることを確認した。
- ② 1次主循環ポンプのランバック制御導入を含めたMK-III用機器インターロックは、スクラム時の熱過渡をMK-IIと比べて大幅に緩和でき、その有効性が確認できた。
- ③ ①及び②から、過渡時の機器インターロック及び原子炉冷却材温度制御設備の制御定数等は、主冷却器出口 Na 温度に温度振動が見られるが熱過渡特性が設計範囲内であり、妥当であることが確認できた。

(2) 主冷却系による崩壊熱除去試験

- ① 主冷却機インレットベーン・ダンパ開度を調節することにより、温度降下率 $-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以下で系統温度を約 250°C に降温できることを確認した。
- ② 系統降温操作後から系統温度が約 250°C に到達するまでに要する時間は、各試験とも温度降下率約 $-35^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で約3時間であった。

*1：実験炉部 技術課

*2：もんじゅ建設所 技術課

*3：実験炉部 原子炉第二課

MK-III Performance Tests in JOYO

— Transient Response Tests —

(Technical Report)

Hiroataka Kawahara*¹, Masafumi Rekimoto*², Takahisa Jou*²,
Koichi Ishida*¹, Masahiko Ariyoshi*¹, Kazunori Isozaki*³

Abstract

The manual shutdown tests and loss of external electric power supply tests were carried out as the transient response test on anomaly condition at 70MWt and 140MWt operation. The decay heat removal tests by main cooling system were carried out after each transient response tests. The major results of the transient response tests are shown as follows:

(1) Manual shutdown tests and loss of external electric power supply tests

- ① The plant protection system operates properly and the reactor can be shut down safely. The thermal transients are less severe than the design conditions.
- ② The validity of the interlock of MK-III plant components was confirmed. The interlock includes the introduction of the primary pump controlled coast down (Runback Control) that can substantially mitigate the thermal transient in comparison with MK- II plant.
- ③ It was confirmed that the validity of the modification of the interlock and the control values of the reactor coolant temperature control system.

(2) Decay heat removal tests by main cooling system

- ① By manual operation of DHX vane and dampers, the reactor removes the decay heat after shut down without excess of the maximum allowable cool down rate of $-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$.
- ② It took about three hours for the coolant temperature to reach about 250°C on each tests were by cool down rate of $-35^{\circ}\text{C}/\text{h}$.

*1 : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center

*2 : Technology Section, Fast Breeder Reactor MONJU Construction Place

*3 : Maintenance Engineering Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center

目 次

1. はじめに	1
2. MK-Ⅲ冷却系改造の概要	2
2.1 冷却系機器の改造	2
2.2 計測制御系統設備の改造	2
3. 試験の目的	5
3.1 手動スクラム試験の目的	5
3.2 外部電源喪失試験の目的	5
3.3 主冷却系による崩壊熱除去試験の目的	6
4. 試験方法	7
4.1 手動スクラム試験の方法	7
4.2 外部電源喪失試験の方法	9
4.3 主冷却系による崩壊熱除去試験の方法	11
5. 試験結果	14
5.1 試験経過	14
5.2 70MWt 試験（手動スクラム試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）	15
5.3 70MWt 試験（外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）	17
5.4 140MWt 試験（手動スクラム試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）	18
5.5 140MWt 試験（外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）	20
5.6 35MWt 試験（主冷却系による崩壊熱除去試験）	23
5.7 プラント各部のプロセス量変化	23
5.8 燃料集合体出口 Na 温度変化	23
5.9 原子炉容器ナトリウム液面の変動	24
5.10 実測データに基づく簡易応力評価	24
5.11 原子炉冷却材温度制御設備の最終設定値	26
6. 予測解析及び原子炉冷却材温度制御設備の制御定数等の検討	27
6.1 MK-Ⅲ性能試験（過渡応答試験）の予測解析	27
6.2 140MWt 過渡応答試験時のスクラム時の主冷却器出口 Na 温度設定値	28
6.3 原子炉冷却材温度制御設備の固定ゲインをパラメータとした解析	28
6.4 過渡応答試験の予測解析と実測データの比較	28

7. 考 察	30
7.1 冷却系機器インターロック変更による熱過渡緩和対策	30
7.2 スクラム時の冷却材温度制御と主冷却器出口 Na 温度振動の関係について	30
8. おわりに	33
9. 謝 辞	34
10. 参考文献	35

表リスト

表 2-1	MK-III炉心とMK-II炉心の主要目の比較	36
表 4.1-1	ペンレコーダによる記録リスト	37
表 4.1-2	デジタルデータ記録装置による記録リスト	38
表 4.1-3	手動スクラム試験の試験手順	39
表 4.1-4	プロセス量測定項目一覧表（手動スクラム試験及び外部電源喪失試験）	40～41
表 4.1-5	手動スクラム試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表	42
表 4.2-1	外部電源喪失試験の試験手順	43
表 4.2-2	外部電源喪失試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表	44
表 4.3-1	主冷却系による崩壊熱除去試験の試験手順	45
表 5.1-1	高速実験炉「常陽」MK-III性能試験実績工程表（平成15年）	46
表 5.1-2	MK-III異常時過渡応答試験の時系列	47
表 5.1-3	MK-III過渡試験時におけるプラント状態のまとめ	48
表 5.2-1	手動スクラム試験時熱過渡特性（70MWt）	49～50
表 5.3-1	外部電源喪失試験時熱過渡特性（70MWt）	51～52
表 5.4-1	手動スクラム試験時熱過渡特性（140MWt）	53～54
表 5.5-1	外部電源喪失試験時熱過渡特性（140MWt）	55～56
表 5.5-2	外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較（1次主循環流量の変動）	57
表 5.5-3	外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較（2次主循環流量の変動）	58
表 5.7-1	手動スクラム試験（70MWt）におけるプラント各部のプロセス量	59～61
表 5.7-2	外部電源喪失試験（70MWt）におけるプラント各部のプロセス量	62～64
表 5.7-3	手動スクラム試験（140MWt）におけるプラント各部のプロセス量	65～67
表 5.7-4	外部電源喪失試験（140MWt）におけるプラント各部のプロセス量	68～70
表 5.10-1	主中間熱交換器及び主冷却器の簡易応力評価結果	71
表 5.11-1	原子炉冷却材温度制御設備の最終設定一覧（MK-IIIとMK-IIの比較）	72
表 6.1-1	MK-III性能試験予測解析のためのMimir-N2入力データの見直し一覧表	73
表 6.1-2	MK-III性能試験（過渡応答試験）の予測解析条件	74
表 7.2-1	スクラム時のベーン開度最大・最小値、入口ダンパ開度最小値（実績値）	75

図リスト

図 2-1	MK-III性能試験用炉心構成	76
図 2-2	MK-III冷却系改造の概要と範囲	77
図 2-3	「常陽」冷却系系統図	78
図 2.1-1	MK-III用主中間熱交換器の構造	79
図 2.1-2	MK-III用主冷却機の構造	80
図 2.2-1	過渡時の機器インターロック (MK-IIとMK-IIIとの比較)	81
図 2.2-2	1次主循環ポンプのランバック制御概念図	82
図 2.2-3	手動スクラム時及び外部電源喪失時の主冷却系機器動作フロー	83
図 2.2-4	原子炉冷却材温度制御設備の機能構成	84
図 2.2-5	原子炉冷却材温度制御設備の異常時動作フロー図	85
図 4.1-1	ペンレコーダ及びデジタルデータ記録装置のデータ処理フロー	86
図 4.1-2	熱出力測定システムのデータ処理フロー	87
図 4.1-3	プラント各部の温度変化率及び温度変化幅の作成方法	88
図 5.2-1	70MWt からの手動スクラム試験における各部温度特性	89
図 5.2-2	70MWt からの手動スクラム試験における流量特性	90
図 5.2-3	2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (70MWt 手動スクラム試験後)	91
図 5.2-4	手動スクラム試験 (70MWt) 後の崩壊熱除去特性	92
図 5.3-1	70MWt からの外部電源喪失試験における各部温度特性	93
図 5.3-2	70MWt からの外部電源喪失試験における流量特性	94
図 5.3-3	2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (70MWt 外部電源喪失試験後)	95
図 5.3-4	外部電源喪失試験 (70MWt) 後の崩壊熱除去特性	96
図 5.4-1	140MWt からの手動スクラム試験における各部温度特性	97
図 5.4-2	140MWt からの手動スクラム試験における流量特性	98
図 5.4-3	手動スクラム試験 (140MWt) における温度整定時間	99
図 5.4-4	手動スクラム試験 (140MWt) における原子炉入口 Na 温度	99
図 5.4-5	過渡応答試験結果と設計用熱過渡条件との比較	100
図 5.4-6	2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (140MWt 手動スクラム試験後)	101
図 5.4-7	手動スクラム試験 (140MWt) 後の崩壊熱除去特性	102
図 5.5-1	140MWt からの外部電源喪失試験における各部温度特性	103
図 5.5-2	140MWt からの外部電源喪失試験における流量特性	104
図 5.5-3	外部電源喪失試験 (140MWt) における原子炉入口 Na 温度特性	105

図 5.5-4	外部電源喪失試験 (140MWt) の Na 温度整定時間	105
図 5.5-5	外部電源喪失試験時の MK-II と MK-III の比較 (DHX 廻り A ループ)	106
図 5.5-6	外部電源喪失試験時の MK-II と MK-III の比較 (DHX 廻り B ループ)	107
図 5.5-7	外部電源喪失試験時の MK-II と MK-III の比較 (原子炉出入口 Na 温度)	108
図 5.5-8	外部電源喪失試験時の MK-II と MK-III の比較 (主 IHX2 次側出入口 Na 温度)	109
図 5.5-9	外部電源喪失試験時の MK-II と MK-III の比較 (1 次・2 次主循環流量)	110
図 5.5-10	2 次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (140MWt 外部電源喪失試験後)	111
図 5.5-11	外部電源喪失試験 (140MWt) 後の崩壊熱除去特性	112
図 5.6-1	35MWt からの原子炉停止後の崩壊熱除去特性	113
図 5.8-1	燃料集合体 (1A1) 出口 Na 温度の変化	114
図 5.9-1	原子炉容器ナトリウム液面の変動	115
図 6-1	Mimir-N2 を用いた過渡応答試験検討フローチャート	116
図 6.1-1	「常陽」原子炉冷却材温度制御設備の比例ゲイン	117
図 6.1-2	Mimir-N2 による予測解析結果の代表例 (試験開始前)	118
図 6.2-1	140MWt における DHX 出入口 Na 温度の解析結果 (手動スクラム試験・温度設定値変更前後)	119
図 6.2-2	140MWt における DHX 出入口 Na 温度の解析結果 (外部電源喪失試験・温度設定値変更前後)	120
図 6.3-1	140MWt における DHX 出口 Na 温度の解析結果 (手動スクラム試験・固定ゲインをパラメータとした解析)	121
図 6.3-2	140MWt における DHX 出口 Na 温度の解析結果 (外部電源喪失試験・固定ゲインをパラメータとした解析)	122
図 6.4-1	140MWt 過渡応答試験の予測解析と実測データの比較	123
図 7.1-1	MK-II と MK-III の手動スクラム時熱過渡比較	124
図 7.1-2	MK-II と MK-III の手動スクラム時 1 次主循環流量変化の比較	125
図 7.2-1	スクラム時のベーン開度と DHX 出口 Na 温度のゆらぎの関係	126

1. はじめに

MK-III性能試験では、異常時を想定した過渡応答試験として「PT-332 手動スクラム試験」及び「PT-336 外部電源喪失試験」を実施した。手動スクラム試験は、1次主循環ポンプのランバック制御を作動させる場合の代表事象とし、外部電源喪失試験は、ランバック制御を作動させない場合の代表事象として選定した。また、原子炉停止後における崩壊熱除去能力確認のための「PT-341 主冷却系による崩壊熱除去試験」を実施した。

手動スクラム試験及び外部電源喪失試験は、共に50%熱出力(70MWt)、定格熱出力(140MWt)の2段階で実施することとし、各出力において最初に手動スクラム試験を行い、原子炉保護系をはじめとしたプラント各部の基本的な機能が正常に動作し、原子炉を安全に停止できることを確認したのち、外的要因を考慮した外部電源喪失試験を行うという手順で実施した。

また、主冷却系による崩壊熱除去試験は、手動スクラム試験及び外部電源喪失試験後の試験に加えて、原子炉通常停止後における試験を実施した。

試験の結果、主中間熱交換器及び主冷却機の交換等により大幅に改造した冷却系設備が、過大な熱過渡を生じることなく原子炉停止後の崩壊熱を除去できることを確認した。本報告書は、これらの異常時過渡応答試験に係る結果についてまとめたものである。

2. MK-Ⅲ冷却系改造の概要

「常陽」MK-Ⅲ計画では、原子炉熱出力がMK-Ⅱ炉心の100MWtから140MWtに増加する。冷却系の改造では、原子炉熱出力の増大に伴う冷却系除熱能力の向上を目的として設計、製作した主中間熱交換器、主冷却機をはじめとした冷却系機器の交換を実施した。表2-1にMK-Ⅲ炉心とMK-Ⅱ炉心の主要目の比較を示す。図2-1にMK-Ⅲ性能試験用炉心構成図を示す。図2-2にMK-Ⅲ冷却系改造の概要と範囲を示す。図2-3に「常陽」冷却系系統図を示す。

2.1 冷却系機器の改造

冷却系機器の改造では、原子炉熱出力の増加とのバランスを図り、かつ冷却系機器の改造範囲と規模を可能な限り小さくするため、プラントヒートバランス、主要機器の改造方策、建物側の制約、付帯工事量等様々な視点から検討を行った。

その結果、1次主冷却系については、原子炉出入口温度差をMK-Ⅱ炉心の130℃から150℃とし、冷却材流量を現行の122%とした。これに合わせて、主中間熱交換器は、除熱能力を40%向上したものに交換することとし、主要構造材には、クリープ特性の改良を目指し開発が進められてきた高速炉構造用316(316FR鋼)を先駆的に採用した。図2.1-1にMK-Ⅲ用主中間熱交換器の構造を示す。1次主循環ポンプについては、既設ポンプの運転可能範囲内にあることから、制御系のみ改造とし、駆動モータについては老朽化対策の観点から交換した。

一方、2次主冷却系については、主中間熱交換器出入口温度差を170℃、冷却材流量はMK-Ⅱ炉心の107%とした。これにより、主冷却機の除熱能力を25MWt/基から35MWt/基に向上させる必要があるが、配置上の制約があるため、主冷却機自体の外形寸法を変えずに、伝熱管の配置を従来のU型からΣ型として伝熱面積を約2倍に増加させるとともに送風機、モータ、ベーン、ダンパ等を交換することとした。図2.1-2にMK-Ⅲ用主冷却機の構造を示す。2次主循環ポンプについては、主冷却機伝熱管の交換に伴う圧力損失の増加により、運転点が既設ポンプの運転範囲をわずかに超えるため駆動モータを交換した。

2.2 計測制御系統設備の改造

2.2.1 冷却系機器インターロックの変更

原子炉スクラム時は、原子炉出口温度が低下するが、1次系機器配管の降温は原子炉出口

温度の降温よりも遅いため、冷却材と構造材の温度差による熱過渡が生じる。MK-Ⅲ炉心では、MK-Ⅱ炉心よりも原子炉出入口温度差と冷却材流量が大きくなり、この熱過渡がMK-Ⅱ炉心よりも厳しくなるため、原子炉の緊急停止時の熱過渡を緩和するよう、冷却系機器の動作等について検討した。図 2.2-1 に過渡時の機器インターロック (MK-ⅡとMK-Ⅲとの比較) を示す。

その結果、原子炉スクラム時 (外部電源喪失及び1次主循環ポンプトリップの場合を除く) において、1次主冷却系は1次主循環ポンプのランバック制御で一定の低流量に制御するとともに、2次主冷却系は2次主循環ポンプ及び主送風機を停止させて自然循環運転による除熱を行うこととした。図 2.2-2 に1次主循環ポンプのランバック制御概念図を示す。ランバック制御は、炉心冷却の多様性を確保するために1次主循環ポンプのフリーフローコーストダウンを経て、同ポンプ主駆動モータを低速運転に移行させ、原子炉停止後の炉心崩壊熱除去に必要な1次冷却材流量を保持するものであり、MK-Ⅲ冷却系改造にて新たに取り入れたものである。ランバック制御引継失敗時にはポニーモータに引き継がれ、同モータにて炉心崩壊熱除去が可能である。なお、外部電源喪失又は1次主循環ポンプトリップによる原子炉スクラムの場合は、1次主循環ポンプをMK-Ⅱと同じポニーモータ運転とし炉心崩壊熱を除去する。

その他、MK-Ⅱにおいて制御棒一斉挿入により対応していた事象については、原子炉停止の迅速化とともに安全保護系及び制御信号の簡素化を図る観点から、全てを原子炉スクラムによる緊急停止に統一した。以上から、本報告書で述べる過渡事象である手動スクラム及び外部電源喪失が発生した場合のプラント機器動作は、図 2.2-3 に示すようになる。

2.2.2 原子炉冷却材温度制御設備

図 2.2-4 に原子炉冷却材温度制御設備の機能構成を示す。原子炉冷却材温度制御設備は、原子炉入口温度を 350℃ (MK-Ⅱでは 370℃) の一定温度に維持するように、主送風機の冷却空気流量を自動制御するものである。空気流量の制御は主冷却器出口 Na 温度設定値に追従するインレットベーン及び入口ダンパにより行われ、設定値は手動 (オートモード) 又は原子炉出口 Na 温度により自動的に変更 (カスケードモード) される。MK-Ⅲにおける原子炉冷却材温度制御設備は、基本的な機器構成はMK-Ⅱと同じであるが、原子炉出入口温度差をMK-Ⅱ炉心の 130℃から 150℃に増加したことから、原子炉出力上昇・降下時に用いるカスケードモード機能の制御設定範囲の拡大が必要となった。また、主送風機の風量増加に伴う非線形補償ゲイン機能の詳細化が必要となった。以上から、原子炉冷却材温度制

御設備を交換するとともに、MK-Ⅲ冷却系に対応した各設定値の検討を行い、性能試験開始前に設定するとともに、各種試験結果を踏まえて見直しを行った。

図 2.2-5 に原子炉冷却材温度制御設備の異常時動作フロー図を示す。原子炉スクラム時は、MK-Ⅲ機器インターロックにより、2次主循環ポンプを停止する。これにより、原子炉冷却材温度制御設備は、2次主循環ポンプの停止信号を受けて異常時のシーケンス動作に移行する。スクラム直後は、2次主循環ポンプトリップによる過冷却を防止するため、主送風機をブレーキにより急速停止させて自然通風とし、合わせてインレットベーンを全閉とする。その後、インレットベーン開度を 0～約 10%の範囲で冷却空気流量を自動制御する。異常時動作フローは基本的にMK-Ⅱにおける2次主循環ポンプトリップ時と同様であるが、PI制御定数等の設定値はMK-Ⅲ冷却系に対応した値に設定する必要がある。このため、過渡応答試験により異常時動作フロー及び各種設定値の妥当性について検討した。

3. 試験の目的

性能試験では、異常時を想定した過渡応答試験として「手動スクラム試験」及び「外部電源喪失試験」を実施した。手動スクラム試験は、1次主循環ポンプのランバック制御を作動させる場合の代表事象とし、外部電源喪失試験は、ランバック制御を作動させない場合の代表事象として選定した。また、原子炉停止後における崩壊熱除去能力確認のための「主冷却系による崩壊熱除去試験」を実施した。

手動スクラム試験及び外部電源喪失試験は、共に50%熱出力(70MWt)、定格熱出力(140MWt)の2段階で実施することとし、各出力において最初に手動スクラム試験を行い、原子炉保護系をはじめとしたプラント各部の基本的な機能が正常に動作し、原子炉を安全に停止できることを確認したのち、外的要因を考慮した外部電源喪失試験を行うという手順で実施した。

また、主冷却系による崩壊熱除去試験は、手動スクラム試験及び外部電源喪失試験後の試験に加えて、原子炉通常停止後における試験を実施した。

3.1 手動スクラム試験の目的

手動スクラム試験の目的は、原子炉を手動でスクラムさせた場合、MK-Ⅲで改造した冷却系機器及び原子炉保護系、ランバック制御機能をはじめとした計測制御系統設備の動作が正常に行われ、原子炉を安全に停止できることを実証するものである。

また、スクラム後の1次・2次主冷却材温度等のプラント過渡応答データを収録し、MK-Ⅲ機器設計用熱過渡条件⁽¹⁾と比較、検討することにより、過大な熱過渡を生じていないことを確認するとともに、原子炉冷却材温度制御系の異常時におけるPI制御定数等の各種設定値について、妥当性の確認及び見直しの必要性の検討を行い、最終的な設定値を確定する。なお、手動スクラム試験に先立ち、プラント動特性解析コード“Mimir-N2”（第6章参照）を用いた動特性解析を行い、スクラム時のプラント応答特性を予測するとともに、試験結果との比較、評価等を行う。

その他、試験結果を踏まえて、試験時のプラント操作を運転マニュアルに反映させる。

3.2 外部電源喪失試験の目的

外部電源喪失試験の目的は、外部電源が喪失した場合に非常系電源が系統に併入されるとともに、MK-Ⅲで改造した冷却系機器及び原子炉保護系をはじめとした計測制御系統設備

の動作が正常に行われ、原子炉を安全に停止できることを実証するものである。その他は、手動スクラム試験と同様に、プラント過渡応答データの収録、過大な熱過渡を生じていないことを確認、原子炉冷却材温度制御系の各種設定値の妥当性の確認、試験結果を踏まえた運転マニュアルへの反映等を行う

3.3 主冷却系による崩壊熱除去試験の目的

主冷却系による崩壊熱除去試験の目的は、主冷却系により原子炉停止後の崩壊熱を温度変化率 $-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の制限値を超えることなく除去し、温態待機状態（系統温度 250°C ）に移行できることを実証するものである。

4. 試験方法

本章では、手動スクラム試験、外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験の試験方法について述べる。

4.1 手動スクラム試験の方法

手動スクラム試験における、試験の概要、試験前のプラント状態、試験に使用する測定機器・測定項目及び試験方法を以下に示す。

4.1.1 試験の概要

原子炉熱出力（約 70MWt、定格熱出力）において以下の手順で実施する。

- ① 原子炉熱出力（約 70MWt、定格熱出力）が定常状態であることを確認する。
- ② 原子炉制御盤上の「手動スクラム釦」を操作することにより原子炉をスクラムする。
- ③ プラント各部の温度、流量、液面、主冷却機インレットベーン及びダンパ開度等の信号を記録し、温度変化率等の過渡特性を求める。

4.1.2 試験前のプラント状態

- ① 原子炉熱出力 : 70MWt、定格熱出力
- ② 原子炉入口冷却材温度 : 約 350℃
- ③ 原子炉出口冷却材温度 : 約 425℃（約 70MWt）、約 500℃（定格熱出力）
- ④ 1次主冷却系流量 : 定格流量
- ⑤ 2次主冷却系流量 : 定格流量

4.1.3 試験に使用する測定機器及び測定項目

本試験では、過渡時のプラント挙動をリアルタイムで監視するとともに、プラント各部の挙動のデジタル値を記録するため、以下の測定機器を用いた。

① ペンレコーダ

ペンレコーダは、試験中の過渡時におけるプラント主要部の監視に用いた。燃料集合体出口冷却材温度は、MK-Ⅲ性能試験炉心構成において、炉心中心（アドレス 000）に材料照射用反射体を装荷していることから、代表点として第 1 列に装荷した燃料集合体（アドレス 1A1）の出口冷却材温度を測定した。表 4.1-1 に記録リストを示す。図 4.1-1 にペンレコーダ及びデジタルデータ記録装置のデータ処理フローを示す。

② デジタルデータ記録装置

デジタルデータ記録装置は、試験中の過渡時におけるプラント各部のデジタル値を記録するために用いた。燃料集合体出口冷却材温度は、ペンレコーダと同様に代表点としてアドレス 1A1 の温度を記録した。また、記録したデータは、熱過渡特性の算出に用いた。表 4.1-2 にデジタルデータ記録装置による記録リストを示す。

③ 熱出力測定システム

熱出力測定システムは、試験開始前における原子炉熱出力を記録するために用いた。図 4.1-2 に熱出力測定システムのデータ処理フローを示す。

④ 「常陽」データ処理装置 (JOYDAS (JOYO Data Acquisition System))

JOYDAS は、トレンド画面によるプラント主要部の監視及びデジタル値の記録に用いることとし、デジタル値は上記②の補助的位置付けとして用いた。

4.1.4 試験方法

(1) 試験手順及び確認項目

表 4.1-3 に手動スクラム試験の試験手順を示す。表 4.1-4 にプロセス量測定項目一覧表を示す。また、表 4.1-5 に手動スクラム試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表を示す。

本試験は、表 4.1-3 に示す手順で実施し、MK-III で改造した冷却系機器及び原子炉保護系、ランバック制御機能をはじめとした計測制御系統設備の動作が正常に行われ、原子炉を安全に停止できることを確認する。本試験中における主な確認項目は以下のとおりである。

- ① プラント動特性解析コード“ Mimir-N2” を用いた予測解析結果を参照しながら、手動スクラム試験開始後のプラント各部の温度変化を確認する。
- ② 表 4.1-4 に示すプラント各部のプロセス量について、試験開始前と試験後のプラント安定時に測定、記録する。本プロセス量は、今後の運転に役立つとの観点から、主にプラント本設計器の指示値を読み取り、記録する。
- ③ 表 4.1-5 に示す機器・警報動作項目を確認し、MK-II から変更となった機器・警報動作が正常に行われたことを確認する。

(2) 試験体制

試験体制は、試験班長 1 名をはじめ、ペンレコーダによるプラント監視に 2 名 (デジタルデータ記録装置によるデータ保存・管理、熱出力システムによるデータ印字を含む)、

JOYDASによるプラント監視、画面ハードコピーに2名、機器・警報動作確認（中央制御室）に2名、現場における機器動作確認（試験前後プロセス量測定を含む）に2名及び試験指導・班長補助に1名の計10名で行うこととした。

(3) 試験終了後のプラント状態

プラント各部が安定した後、温態待機への移行操作（系統降温）を行う。

(4) 試験結果の評価等

デジタルデータで記録した温度データは、図 4.1-3 に示す方法により整理した後、設計用熱過渡条件と比較し、過大な熱過渡を生じていないことを確認する。この熱過渡条件は、MK-III冷却系改造機器・配管の設計用として策定された熱過渡条件⁽¹⁾を用いる。本熱過渡条件は、プラント動特性解析コード“Mimir-N2”による各事象の熱過渡解析結果に補正係数（外部電源喪失を代表事象とし、崩壊熱、炉心圧損等の不確定要素のパラメータ解析（各パラメータの最大値及び最小値を用いた解析）によって求めた係数）を乗じることにより策定されている。解析に用いた Mimir-N2 は、「常陽」における運転特性試験、自然循環試験等の試験結果が十分に反映されており、実績熱過渡挙動に近い解析結果が得られていることから、熱過渡条件は過大になりすぎないように策定されている。

また、原子炉冷却材温度制御系の温度制御性について分析し、プラント動特性解析コード“Mimir-N2”を用いた解析等により、PI 制御定数等の各種設定値の妥当性確認及び見直しの必要性の検討を行い、最終的な設定値を設定する。

その他、試験結果を踏まえて、試験時のプラント操作を運転マニュアルに反映させる。

4.2 外部電源喪失試験の方法

外部電源喪失試験における、試験の概要、試験前のプラント状態、試験に使用する測定機器・測定項目及び試験方法を以下に示す。

4.2.1 試験の概要

原子炉熱出力（約 70MWt、定格熱出力）において以下の手順で実施する。

- ① 原子炉熱出力(約 70MWt、定格熱出力)が定常状態であることを確認する。
- ② 電源監視盤の「遮断器 (352R)」を「切」にすることにより外部電源を遮断する。
- ③ 原子炉スクラム、非常系電源の自動起動及び系統併入等、プラントの動作が正常に行われることを確認する。
- ④ プラント各部の温度、流量、液面等の信号を記録し、温度変化率等の過渡時制御特性

を求める。

4.2.2 試験前のプラント状態

- ① 原子炉熱出力 : 約 70MWt、定格熱出力
- ② 原子炉入口冷却材温度 : 約 350℃
- ③ 原子炉出口冷却材温度 : 約 425℃ (約 70MWt)、約 500℃ (定格熱出力)
- ④ 1次主冷却系流量 : 定格流量
- ⑤ 2次主冷却系流量 : 定格流量

4.2.3 試験に使用する測定機器及び測定項目

測定機器及び測定項目は、手動スクラム試験と同じであるため、4.1.3項を参照されたい。

4.2.4 試験方法

(1) 試験手順及び確認項目

表 4.2-1 に外部電源喪失試験の試験手順を示す。表 4.2-2 に外部電源喪失試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表を示す。

本試験は、表 4.2-1 に示す手順で実施し、MK-Ⅲで改造した冷却系機器及び原子炉保護系をはじめとした計測制御系統設備の動作が正常に行われ、原子炉を安全に停止できることを確認する。本試験中における主な確認項目は以下のとおりである。

- ① プラント動特性解析コード“Mimir-N2”を用いた予測解析結果を参照しながら、外部電源喪失試験開始後のプラント各部の温度変化を確認する。
- ② 手動スクラム試験と同様に、表 4.1-4 に示すプラント各部のプロセス量について試験開始前と試験後のプラント安定時に測定、記録する。
- ③ 表 4.2-2 に示す機器・警報動作項目を確認し、MK-Ⅱから変更となった機器・警報動作が正常に行われたことを確認する。

(2) 試験体制

外部電源喪失試験の体制は、手動スクラム試験の体制と同様とした。なお、外部電源喪失試験では、試験中の照明を確保するため、必要な場所への立入り時は懐中電灯を携帯することとした。

(3) 試験終了後のプラント状態

プラント各部が安定した後、温態待機への移行操作（系統降温）を行う。

(4) 試験結果の評価等

手動スクラム試験と同様に、デジタルデータで記録した温度データを整理した後、設計

用熱過渡条件と比較し、過大な熱過渡を生じていないことを確認する。

また、原子炉冷却材温度制御系の温度制御性について分析し、プラント動特性解析コード“Mimir-N2”を用いた解析等により、PI 制御定数等の各種設定値の妥当性確認及び見直しの必要性の検討を行い、最終的な設定値を設定する。

その他、試験結果を踏まえて、試験時のプラント操作を運転マニュアルに反映させる。

4.3 主冷却系による崩壊熱除去試験の方法

主冷却系による崩壊熱除去試験における、試験の概要、試験前のプラント状態、試験に使用する測定機器・測定項目及び試験方法を以下に示す。

4.3.1 試験の概要

- ① 約 70MWt、定格熱出力の手動スクラム試験、外部電源喪失試験、もしくは定格熱出力からの原子炉通常停止操作が終了していることを確認する。
- ② 主冷却機インレットベーン・ダンパにより自然通風量を調整し、系統温度を徐々に降下させ（系統温度の降下率 -50°C/h 以下）、このときの原子炉出入口冷却材温度等のプラント各部の変化を確認し、記録する。
- ③ 系統温度が約 250°C （温態待機状態）に到達することを確認する。

4.3.2 試験前のプラント状態

(1) 約 70MWt における手動スクラム試験後

- ① 原子炉熱出力 : 約 70MWt 運転からの原子炉停止後
- ② 1 次主冷却系流量 : ランバック制御（手動スクラムによる原子炉停止時）
- ③ 2 次主冷却系流量 : 主冷却器出入口温度が安定した後、本試験開始時に 2 次主循環ポンプを起動し、定格流量とする。

(2) 約 70MWt における外部電源喪失試験後

- ① 原子炉熱出力 : 約 70MWt 運転からの原子炉停止後
- ② 1 次主冷却系流量 : ポニーモータ運転（外部電源喪失による原子炉停止時）
- ③ 2 次主冷却系流量 : 主冷却器出入口温度が安定した後、本試験開始時に 2 次主循環ポンプを起動し、定格流量とする。

(3) 定格熱出力における手動スクラム試験後

- ① 原子炉熱出力 : 定格熱出力からの原子炉停止後
- ② 1 次主冷却系流量 : ランバック制御（手動スクラムによる原子炉停止時）

- ③ 2次主冷却系流量 : 主冷却器出入口温度が安定した後、本試験開始時に2次主循環ポンプを起動し、定格流量とする。
- (4) 定格熱出力における外部電源喪失試験後
 - ① 原子炉熱出力 : 定格熱出力からの原子炉停止後
 - ② 1次主冷却系流量 : ポニーモータ運転（外部電源喪失による原子炉停止時）
 - ③ 2次主冷却系流量 : 主冷却器出入口温度が安定した後、本試験開始時に2次主循環ポンプを起動し、定格流量とする。
- (5) 35MWtからの制御棒2本同時挿入による原子炉停止後
 - ① 原子炉熱出力 : 35MWtからの原子炉停止後
 - ② 1次主冷却系流量 : 定格流量
 - ③ 2次主冷却系流量 : 定格流量

4.3.3 試験に使用する測定機器及び測定項目

測定機器及び測定項目は、手動スクラム試験と同様であるため、4.1.3項を参照されたい。

4.3.4 試験方法

(1) 試験手順及び確認項目

本試験は、表4.3-1に示す手順で実施し、各プラント状態において、原子炉停止後の崩壊熱を、主冷却系により正常に除去できることを確認する。

本試験中における主な確認項目は以下のとおりである。

- ① インレットベーン・入口ダンパの操作が円滑に行われ、 $-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以下の温度低下率により温態待機（系統温度約 250°C ）への移行操作を行えることを確認する。また、温態待機状態までに要した時間を確認する。
- ② 2次主循環ポンプ起動時に過大な熱過渡が生じていないことを確認する。
- ③ 温態待機への移行中にプラント各部に過渡な温度変化がないことを確認する。

(2) 試験体制

試験体制は、試験班長1名をはじめ、ペンレコーダによるプラント監視に2名（デジタルデータ記録装置によるデータ保存を含む）、JOYDASによるプラント監視、画面ハードコピーに1名の計4名で行うこととした。

(3) 試験終了後のプラント状態

- ① 原子炉熱出力 : 0MWt
- ② 原子炉入口冷却材温度 : 約 250°C

- ③ 原子炉出口冷却材温度 : 約 250℃
- ④ 1次主冷却系流量 : ランバック制御 (手動スクラムによる原子炉停止時)
ポニーモータ運転 (外部電源喪失による原子炉停止時)
定格流量 (原子炉通常停止時)
- ⑤ 2次主冷却系流量 : 定格流量

(4) 試験結果の評価等

デジタルデータで記録したデータを基に、2次主循環ポンプ起動時の熱過渡、及び温態待機への移行中におけるプラント各部の温度変化状態について検討、評価し、温度変化制限値を満足することを確認すると共に、プラント操作の妥当性について検討する。

5. 試験結果

手動スクラム試験、外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験の各試験は、段階的に出力を上昇させて試験を行う「出力上昇試験」(35MWtからの通常停止試験を含む)、及び各原子炉熱出力の段階で行う「定常伝熱特性試験」が終了し、問題なく運転できることが確認された時点の原子炉熱出力から試験を行った。「出力上昇試験」及び「定常伝熱特性試験」の試験結果は、MK-Ⅲ性能試験総合報告書⁽²⁾を参照されたい。

本報告書で述べる各試験は、70MWt (50%出力)、140MWt (定格熱出力) へと段階を踏んで試験を行ったことから、本項の試験結果は、試験経過にそって試験実施日ごとに述べていき、その都度次のステップの試験への反映事項について併せて述べるものとする。

5.1 試験経過

手動スクラム試験、外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験の各試験は、下記のステップで実施した。

試験実施年月日	試験開始時刻 ～試験終了時刻	試験名称	
平成 15 年 9 月 26 日	13 : 30～19 : 29	70MWt 試験	手動スクラム試験
			主冷却系による崩壊熱除去試験
平成 15 年 10 月 6 日	13 : 30～18 : 36	70MWt 試験	外部電源喪失試験
			主冷却系による崩壊熱除去試験
平成 15 年 10 月 31 日	13 : 30～19 : 30	140MWt 試験	手動スクラム試験
			主冷却系による崩壊熱除去試験
平成 15 年 11 月 11 日	13 : 30～19 : 55	140MWt 試験	外部電源喪失試験
			主冷却系による崩壊熱除去試験
平成 15 年 11 月 21 日	11 : 00～14 : 05	35MWt 試験	主冷却系による崩壊熱除去試験

70MWt 及び 140MWt における「主冷却系による崩壊熱除去試験」は、手動スクラム試験及び外部電源喪失試験後、引き続き実施した。各試験とも順調に行われ、MK-Ⅲ性能試験の一環として計画通り試験データを採取できた。表 5.1-1 にMK-Ⅲ性能試験実績工程表、表 5.1-2 に各試験の時系列を示す。また、表 5.1-3 にMK-Ⅲ過渡試験時におけるプラント状態のまとめを示す。5.2 項以降に各試験結果を示すが、その際に表 5.1-3 を参照されたい。

5.2 70MWt 試験（手動スクラム試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）[9月26日]

5.2.1 手動スクラム試験

本試験は、原子炉熱出力 70MWt において、試験前における所定の準備作業及び初期データ採取等を行った後、原子炉制御盤上の「手動スクラム釦」を操作し、原子炉を手動スクラムさせることにより開始した。試験開始後、先ず機器インターロック・冷却材温度制御設備が正常に動作することを確認し、ランバック制御、冷却材温度制御設備及びプラント保護動作が正常に行われ、原子炉を停止できることを確認した。

図 5.2-1 及び図 5.2-2 に 70MWt からの手動スクラム試験における各部温度特性及び流量特性を示す。図 5.2-2 に示すように、1 次主循環ポンプはフリーフローコーストダウンからランバック制御により約 15% 流量の低速運転に移行した。

冷却材温度制御設備は、2 次主循環ポンプトリップ信号により異常時シーケンスが動作し、主送風機がブレーキ作動により急速停止するとともに、制御モードがオートモードからマニュアルモードに切り替わり、インレットベーン「全閉」となるなど正常に動作した。その後、主冷却器出口 Na 温度が制御モード切換条件である温度設定値 300°C 以上に対し十分高い温度であったことから、速やかにオートモードに切り替わり、主送風機インレットベーンが開度制限値 0%～約 10% による自然通風制御となった。なお、異常時の主冷却器出口 Na 温度制御設定値「300°C」は、原子炉熱出力に関係なく一定の値（定格運転時の設計ヒートバランスにおける主冷却器出口 Na 温度と同じ値）としている。

手動スクラム後、図 5.2-1 に示すように主冷却器出口 Na 温度に±20°C 程度の温度振動が確認された。この温度振動は、MK-II における外部電源喪失時の実績及び予測解析においても見られており、主送風機インレットベーン微開動作による自然通風制御の影響によるものである。

スクラム開始後、1 次・2 次主冷却系各部の温度が徐々に低下し、主冷却器出口 Na 温度の温度振動が制御設定値の 300°C あたりに整定するとともに、主系統全体の温度が整定したのは約 1 時間 50 分後であった。なお、主冷却器出口 Na 温度の温度振動が整定した時点は、主冷却器入口 Na 温度が約 330°C まで低下し、主冷却器出入口 Na 温度差が約 40°C 程度まで小さくなった時点であり、予測解析結果の約 40 分よりも長くかかった。

この結果を受けて主冷却器出口 Na 温度の温度振動の継続時間を極力短縮させる方法について検討した。検討の結果、スクラム後、主冷却器入口 Na 温度が約 350°C 以下（主冷却器

出入口 Na 温度差 50℃以下) となった時点で、冷却材温度制御設備の制御モードをオートモードからマニュアルモードに切り替えて、インレットベーンを徐々に「全閉」まで操作し、温度振動を安定させた後、系統降温のための 2 次主循環ポンプ起動のステップに移ることとした。本方法は、70MWt からの外部電源喪失試験において試みることにした。

手動スクラム時における主要部位の熱過渡特性については、温度変化幅・温度変化率の実測値と設計熱過渡条件を用いて次の方法*で簡易的に評価した。

*簡易評価方法：

プラント各部における、温度変化幅 ΔT の設計熱過渡条件に対する実測温度の比 ($\Delta T_{E/C}$) と、温度変化率 ($\Delta T/t$) の設計熱過渡条件に対する実測温度の比 ($[\Delta T/t]_{E/C}$) をそれぞれ算出する。その各々が 1 以下の場合には設計熱過渡条件を満足するものとし、1 を超える場合は機器設計時の熱過渡応力を用いて簡易的に応力評価を行う。

なお、主冷却器出口 Na 温度及び主中間熱交換器 2 次側入口 Na 温度は、温度振動が顕著であることから、熱過渡評価を「①スクラム直後の熱過渡」、「②温度振動領域での熱過渡」及び「③スクラム直後から温度振動領域での熱過渡（スクラム直後の熱過渡条件と温度振動領域実測値とで比較）」の 3 つに分けて評価した。評価の結果一部厳しい部位があったが、機器設計時の熱過渡応力を用いた簡易応力評価を行い問題ないことを確認した(5.10 項参照)。表 5.2-1 に手動スクラム試験時熱過渡特性 (70MWt) を示す。

5.2.2 主冷却系による崩壊熱除去試験

70MWt からの手動スクラムによる原子炉停止後の崩壊熱除去 (主冷却系冷却材温度 250℃までの系統降温) は、1 次系は主循環ポンプのランバック制御による低流量、2 次系は主循環ポンプを起動して定格流量にした状態で行った。

2 次主循環ポンプは、手動スクラム後、約 2 時間 20 分後に A 号機を起動し、約 2 時間 30 分後に B 号機を起動した。起動時の主冷却器出口 Na 温度は約 290℃であり、主冷却器入口 Na 温度及び原子炉入口 Na 温度は約 320℃であった。図 5.2-3 に示すように 2 次主循環ポンプ起動後、主冷却器出口 Na 温度は約 290℃から約 315℃に上昇し、主冷却器入口 Na 温度及び原子炉入口 Na 温度は約 320℃から約 300℃に降下した。その後、主冷却器出入口 Na 温度、原子炉入口 Na 温度とも約 310℃で安定し、系統降温操作のステップに移った。なお、70MWt からの外部電源喪失試験における 2 次主循環ポンプの起動は、起動時の熱過渡を緩和するため、インレットベーンを「全閉」として主冷却器出口 Na 温度の変動を収束させ、主冷却器出入口 Na 温度が安定した自然循環が形成されてから約 30 分(2 次主冷却系が自然循環によ

り一巡する時間) 経過した後に行うこととした。

図 5.2-4 に 70MWt からの手動スクラム試験後の崩壊熱除去特性を示す。図に示すように、主冷却機インレットベーン、出入口ダンパ開度を調整することにより、運転マニュアルで定めている降温率約 $-35^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で系統温度が約 250°C に到達できることを確認した。本試験では、系統降温を開始してから約 140 分後に主冷却器出入口 Na 温度及び原子炉入口 Na 温度が 250°C を下回り、原子炉出口 Na 温度が約 253°C まで降温した。この時点で、最終的に原子炉出入口 Na 温度が約 250°C で安定するよう主冷却機インレットベーンを全閉にした。以上の操作により、系統降温を開始してから約 3 時間後に系統温度が約 250°C に到達した。

5.3 70MWt 試験 (外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験) [10月6日]

5.3.1 外部電源喪失試験

原子炉熱出力 70MWt において、試験前における所定の準備作業及び初期データ採取等を行った後、電源監視盤の遮断器 352R を「切」とし、原子炉をスクラムさせることにより開始した。試験開始後、先ず機器インターロック・冷却材温度制御設備が正常に動作することを確認し、1 次主循環ポンプのポニーモータへの引継ぎ、冷却材温度制御設備及びプラント保護動作、非常系電源の自動起動が正常に行われ、原子炉を停止できることを確認した。

図 5.3-1 及び図 5.3-2 に 70MWt からの外部電源喪失試験における各部温度及び 1 次系流量の特性を示す。図 5.3-2 に示すように、1 次主循環ポンプはフリーフローコーストダウンからポニーモータへ引き継がれ、約 15% 流量での運転に移行した。

冷却材温度制御設備は、70MWt からの手動スクラム試験と同様に異常時シーケンスが正常に動作した。

スクラム後、手動スクラム試験結果と同様に、図 5.3-1 に示すように主冷却器出口 Na 温度の温度振動が確認された。本試験では、手動スクラム試験結果からの反映事項として、主冷却器出口 Na 温度の振動継続時間の短縮化をはかるため、主冷却器入口 Na 温度が 350°C まで低下した時点で主送風機インレットベーンをマニュアルモードで全閉とすることにより温度振動を安定させた結果、スクラムから温度安定までに要した時間は、手動スクラム試験時の約 1 時間 50 分に対し、約 1 時間 10 分に短縮できた。

主要部位の熱過渡特性については、70MWt 手動スクラム試験と同様に一部厳しい部位があったが、機器設計時の熱過渡応力を用いた簡易応力評価を行い問題ないことを確認した (5.10 項参照)。表 5.3-1 に外部電源喪失試験時熱過渡特性 (70MWt) を示す。

5.3.2 主冷却系による崩壊熱除去試験

70MWt からの電源喪失による原子炉停止後の崩壊熱除去（主冷却系冷却材温度 250℃までの系統降温）は、1 次系は主循環ポンプのポニーモータ運転による低流量、2 次系は主循環ポンプを起動して定格流量にした状態で行った。

2 次主循環ポンプは、電源喪失後、約 1 時間 31 分後に A 号機を起動し、約 1 時間 32 分後に B 号機を起動した。図 5.3-3 に示すように 2 次主循環ポンプ起動時における主冷却器出入口 Na 温度変化及び原子炉入口 Na 温度変化は、手動スクラム試験結果を踏まえた運用方法変更の結果、約 10℃程度に減少させることができた。

図 5.3-4 に 70MWt からの外部電源喪失試験後の崩壊熱除去特性を示す。図に示すように、主冷却機インレットベーン、出入口ダンパ開度を調整することにより、降温率約 -35℃/h（運転マニュアルによる）で系統温度が約 250℃に到達できることを確認した。本試験における系統降温操作開始から系統温度約 250℃到達までの系統温度降下状況及び到達時間は、手動スクラム試験時とほぼ同様であることを確認した。

5.4 140MWt 試験（手動スクラム試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）[10 月 31 日]

5.4.1 手動スクラム試験

異常時の主冷却器出口 Na 温度制御設定値は、設計における 140MWt 時の主冷却器出口 Na 温度 300℃と同一としていたが、出力上昇試験における 140MWt ヒートバランスでは主冷却器出口 Na 温度が 300℃まで低下しなかった。よって、異常時の温度設定値をパラメータとした解析による検討を行った結果、設定値を高めにした方がスクラム後の熱過渡が厳しくないことを確認した（70MWt からのスクラム時も同様）。このため、異常時の主冷却器出口 Na 温度制御設定値を 300℃から、実際の 140MWt 時の主冷却器出口 Na 温度（A ループ 308.6℃、B ループ 314.6℃）に 2℃程度の余裕分をプラスした A ループ 311℃、B ループ 317℃に変更することとした。これに伴い、スクラム後のベーン全閉操作のタイミングについて、主冷却器入口 Na 温度 350℃に 10℃上乗せし、360℃到達時（主冷却器出入口 Na 温度差 50℃以下）とした。なお、異常時の主冷却器出口 Na 温度設定値は、140MWt からの手動スクラム試験前に変更した。以上の解析による検討の詳細は 6 章に示す。

原子炉熱出力 140MWt の試験は、10 月 28 日に初めて定格熱出力 140MWt に到達した後、定格時の定常伝熱試験等の性能試験を経て、10 月 31 日の 13:30 から開始した。

定格熱出力 140MWt からの手動スクラム試験を行った結果、機器インターロックが正常に

作動するとともに、全てのプラント保護動作が正常に行われ、原子炉を停止できることを確認した。

図 5.4-1 及び図 5.4-2 に 140MWt からの手動スクラム試験における各部温度及び 1 次系流量の特性を示す。スクラム後、70MWt からの試験と同様に、主冷却器出口 Na 温度に温度振動（周期約 400～700sec）が確認された。この温度振動レンジは 60℃以内（位相のずれによる主冷却器機器間の出口 Na 温度差も 60℃以内）であった。この時に発生する熱過渡応力は、汎用構造解析システム“FINAS”を用いて解析した結果、2 次系配管の最大口径の 12B 配管（板厚 10.3mm）で約 5N/mm²（約 0.5kg/mm²）程度で小さい。このような緩慢な温度振動ではナトリウム温度変化に構造材温度も追従し、構造材の板厚方向に大きな温度差が発生しないため、発生応力は小さく構造材の健全性に影響を与えることはないと考えられる。また、スクラムから温度整定までに要した時間は、約 1 時間 44 分であった（図 5.4-3 参照）。

140MWt からの試験結果において、図 5.4-4 に示すように原子炉入口 Na 温度の A ループと B ループの間に、約 10℃程度の温度差がついていた。これは、異常時の主冷却器出口 Na 温度の設定値を、A ループと B ループとで異なった値（A 側：311℃，B 側：317℃）としていたことによる。

主要部位の熱過渡特性については、一部厳しい部位があったが、機器設計時の熱過渡応力を用いた簡易応力評価を行い問題ないことを確認した（5.10 項参照）。表 5.4-1 に手動スクラム試験時熱過渡特性（140MWt）を示す。また、図 5.4-5 に代表例として原子炉出口 Na 温度の過渡応答試験結果と設計熱過渡条件との比較を示す。

5.4.2 主冷却系による崩壊熱除去試験

140MWt からの手動スクラムによる原子炉停止後の崩壊熱除去（主冷却系冷却材温度 250℃までの系統降温）は、1 次系は主循環ポンプのランバック制御による低流量、2 次系は主循環ポンプを起動して定格流量にした状態で行った。

図 5.4-6 に示すように 2 次主循環ポンプ起動時における主冷却器出入口 Na 温度変化及び原子炉入口 Na 温度変化は、異常時の主冷却器出口 Na 温度設定値の見直しに伴う主送風機インレットベーン全閉のタイミングの変更の結果、15～20℃程度に抑えることができた。

図 5.4-7 に 140MWt からの手動スクラム試験後の崩壊熱除去特性を示す。140MWt からの手動スクラム後においても、降温率約 -35℃/h で系統温度が約 250℃に到達できることを確認した。系統降温操作後から系統温度が約 250℃に到達するまでに要する時間は、系統降温を開始した時の系統温度が 70MWt での試験時より高かったため長くなったが、系統降温

時の温度変化は特に問題なかった。

5.5 140MWt 試験（外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験）[11月11日]

5.5.1 外部電源喪失試験

140MWt からの外部電源喪失試験に先立ち、140MWt からの手動スクラム試験の実測値を基に異常時の主冷却器出口 Na 温度設定値の妥当性の検討を行った。10月31日の140MWt からの手動スクラム試験では、異常時の主冷却器出口 Na 温度設定値を 300℃から、A ループ 311℃、B ループ 317℃に変更して実施した。この設定値にて試験を実施した結果、原子炉スクラム後の原子炉入口 Na 温度が A ループと B ループの間に約 10℃の偏差（図 5.4-4 参照）を生じていることを確認した。スクラム後のプラント挙動においても、原子炉入口 Na 温度に偏差が存在するのは望ましくないと考えられるので、その差を縮小するための検討を行った。

定格熱出力 140MWt では、原子炉入口 Na 温度が A、B ループとも約 350℃になるように主冷却器出口 Na 温度設定値を設定しているが、定格熱出力（1次・2次主循環ポンプ定格流量）での温度設定値はヒートバランス上 A、B ループ間で異なる値となっている。これはループ間での流量計測誤差の違いが主な要因である。一方、スクラム後のヒートバランス（流量バランス）では、1次系が低流量、2次系が自然循環流量となり、定格熱出力時と比べて2次系流量を制御していないため、上記の温度設定では原子炉入口温度に偏差がつく。このため、A ループと B ループの主冷却器出口 Na 温度設定値を同じ値にする必要があるが、次に示すように「スクラム直後」と「スクラム後の継続温度振動時」の熱過渡影響を考慮し、A ループの主冷却器出口 Na 温度設定を上げて B ループと同じ値（317℃）とした。

(1) 「スクラム直後」の熱過渡影響

A 側について、主冷却器出口 Na 温度設定値を 311℃から 317℃に変更(上昇)した場合、スクラム直後の温度上昇幅が大きくなる可能性がある。140MWt 時における手動スクラム試験の結果より、スクラム直後の A ループの温度上昇幅の最大値*は、2A の約 48℃であり、主冷却器出口 Na 温度の設計熱過渡条件（72℃）に対して 20℃以上余裕がある（MK-II では 5.5.2 項に示すように B ループで約 80℃の温度上昇幅であり、これと比べても十分小さい）。今回の変更においては、設定値を 6℃上昇させることとしており、設計熱過渡条件に対して十分余裕がある（14℃以上）といえる。

*140MWt スクラム直後の温度上昇幅

A ループ (主冷却器出口 Na 温度設定値 311℃) : 約 39℃ (1A)、約 48℃ (2A)

B ループ (主冷却器出口 Na 温度設定値 317℃) : 約 41℃ (1B)、約 51℃ (2B)

(2) 「スクラム後の継続温度振動」に対する熱過渡影響

温度振動については、温度変化幅がスクラム直後よりも大きいこと (140MWt 手動スクラム試験時の ΔT が最大 54℃) 及び各主冷却器出口での Na 温度変化の位相のずれによる主冷却器出口合流部での温度差を考慮する必要がある。そこで、A ループの設定値を B ループの 317℃に上げるとともに、主送風機インレットベーン全閉操作のタイミングを 140MWt 手動スクラム試験時の「主冷却器入口 Na 温度が 360℃以下となった時点」から、「主冷却器入口 Na 温度が 365℃以下となった時点 (B ループ設定値 317℃+50℃ (主冷却器出入口 Na 温度差分) =367℃を保守側にまるめた値)」に変更することにより、整定時間を早めることができ、温度振動回数を減少させることができる。

以上から、異常時の主冷却器出口 Na 温度の設定値を A、B ループとも 317℃とし、これに合わせて、系統降温時における主送風機インレットベーン全閉操作を、主冷却器入口 Na 温度が 365℃以下となった時点で行なうこととした。

定格熱出力 140MWt からの外部電源喪失試験を行った結果、非常系電源の自動起動等、プラントの動作が正常に行われ、原子炉を停止できることを確認した。

図 5.5-1 及び図 5.5-2 に 140MWt からの外部電源喪失試験における各部温度及び 1 次系流量の特性を示す。スクラム後、図 5.5-1 に示すように手動スクラム時と同様に主冷却器出口 Na 温度に温度振動が確認された。

A、B ループ間の温度差については、上記検討に基づきスクラム時の主冷却器出口 Na 温度設定値を A、B 系とも同じ値(317℃)とした結果、図 5.5-3 に示すようにスクラム後における原子炉入口 Na 温度の差は 4℃程度に減少した。合わせて、系統降温時における主送風機インレットベーン全閉操作を、主冷却器出口 Na 温度が 365℃ (手動スクラム試験時では 360℃) に到達した時点で実施した結果、スクラムから温度整定までに要した時間は、図 5.5-4 に示すように約 1 時間 24 分 (手動スクラム試験時は約 1 時間 44 分) に短縮でき、主冷却器出口 Na 出口温度の温度振動を、より早く収束させることができた。

主要部位の熱過渡特性については、140MWt 手動スクラム試験と同様に一部厳しい部位が

あったが、機器設計時の熱過渡応力を用いた簡易応力評価を行い問題ないことを確認した(5.10項参照)。表 5.5-1 に外部電源喪失試験時熱過渡特性(140MWt)を示す。また、図 5.4-5 に代表例として原子炉出口 Na 温度の過渡応答試験結果と設計熱過渡条件との比較を示す。

5.5.2 外部電源喪失試験時におけるプラント挙動のMK-IIとMK-IIIの比較

外部電源喪失時は、MK-IIIでもMK-IIと同様に1次主冷却系をポニーモータ運転、2次主冷却系を自然循環運転としている。本項では両者のプラント挙動の比較を行った。

図 5.5-5～図 5.5-8 に外部電源喪失試験時のプラント各部温度及びインレットベーン開度のMK-IIとMK-IIIの比較を示す(MK-IIのデータは、100MW性能試験-2(昭和58年3月23日実施)のデータを示す⁽³⁾)。MK-IIでは、外部電源喪失時の主冷却器出口 Na 温度制御設定値を定格熱出力時(100MWt)の原子炉入口 Na 温度 370℃と同一としていたが、MK-IIIでは電喪直後の主冷却器出口 Na 温度上昇による熱過渡を低減するため、定格熱出力時(140MWt)の主冷却器出口 Na 温度を基に設定(最終設定値 317℃)した。これにより、図 5.5-6 及び図 5.5-7 に示すようにインレットベーンの開動作開始時間の差により、電喪直後の主冷却器出口 Na 温度上昇幅 ΔT は、MK-IIの A ループ約 65℃、B ループ約 80℃からMK-IIIでは最大で 54.5℃以下に大幅に低減できた。一方、MK-IIでは温度設定値が 370℃と高めであるため、電源喪失の約 25 分後にはインレットベーンが全閉でも主冷却器出口 Na 温度が設定値 370℃を超えなくなり、約 30 分後にほぼ温度が安定し緩やかに下降する(温度の振動も少ない)。これに対し、MK-IIIでは電喪直後の ΔT は 54.5℃以下に低減したが、その後温度の振動(ΔT : 60℃以下)が約 50 分継続し安定まで約 1 時間 24 分かかる。温度振動については、 ΔT が電喪直後よりも大きいこと及び各主冷却器出口での Na 温度変化の位相のずれによる主冷却器出口合流部での温度差を考慮する必要があるため、先に述べたようにインレットベーンをマニュアルモードで全閉操作するなどの対策をとり、振動継続時間・継続回数を低減化した。

図 5.5-9、表 5.5-2 及び表 5.5-3 に外部電源喪失試験時の1次・2次主循環流量のMK-IIとMK-IIIの比較を示す(MK-IIのデータは 100MW性能試験-2のデータを示す)。1次主循環流量は、MK-II、MK-IIIともポニーモータ運転により定格流量に対して 15%前後の流量で保持している。2次系の自然循環流量は、MK-IIIでは主冷却器出入口 Na 温度差の増加によりMK-IIと比べて約 1.2 倍(10分経過時点で約 10.5%)に増加した。

5.5.3 主冷却系による崩壊熱除去試験

140MWt からの外部電源喪失による原子炉停止後の崩壊熱除去（主冷却系冷却材温度 250°C までの系統降温）は、1 次系は主循環ポンプのポニーモータ運転による低流量、2 次系は主循環ポンプを起動して定格流量にした状態で行った。

図 5.5-10 に示すように 2 次主循環ポンプ起動時における主冷却器出入口 Na 温度変化及び原子炉入口 Na 温度変化は、手動スクラム試験結果を踏まえた主送風機インレットベーン全閉のタイミングの見直し（主冷却器入口 Na 温度 360°C→365°C）の結果更に改善され、10～15°C 程度に減少させることができた。

図 5.5-11 に 140MWt からの外部電源喪失試験後の崩壊熱除去特性を示す。140MWt からの手動スクラム試験後と同様に降温率約 -35°C/h で系統温度が約 250°C に到達できることを確認した。

5.6 35MWt 試験（主冷却系による崩壊熱除去試験）[11 月 21 日]

通常運転サイクル終了時の原子炉停止方法は、運転操作簡略化及び熱過渡を極力小さくする観点から停止時の原子炉熱出力等を検討した結果、35MWt から制御棒 2 本同時挿入により停止する方法を採用することとなった。本試験は、35MWt からの原子炉停止後、図 5.6-1 に示すように原子炉出入口 Na 温度約 340°C から系統降温操作を開始し、降温率約 -35°C/h、約 3 時間で系統温度が約 250°C に到達できることを確認した。なお、系統降温操作中の 1 次系流量、2 次系流量は、共に定格流量である。

5.7 プラント各部のプロセス量変化

表 5.7-1～表 5.7-4 に試験開始前と試験後のプラント安定時に測定、記録したプラント各部のプロセス量を示す。このデータは、今後の運転に参考にするとの観点で測定したものである。

5.8 燃料集合体出口 Na 温度変化

図 5.8-1 に各試験についての燃料集合体出口 Na 温度変化（代表点として第 1 列に装荷した燃料集合体（アドレス 1A1）の温度）を示す。図に示すように、原子炉スクラム直後の温度降下は、70MWt 試験では約 70°C、140MWt 試験では約 140°C 低下した時点で収束し、その後温度は緩やかに推移していくことを確認した。

5.9 原子炉容器ナトリウム液面の変動

図 5.9-1 に各試験における原子炉容器ナトリウム液面の変動を示す。各試験におけるスクラム直後のナトリウム液面の最低値は以下のとおりである。

試験項目	Na 液面 (GL-6100 基準)
70MWt 手動スクラム	-23.2cm
70MWt 外部電源喪失試験	-22.6cm
140MWt 手動スクラム試験	-24.0cm
140MWt 外部電源喪失試験	-25.5cm

スクラム直後の Na 温度低下により一時的に液面が低下するが、オーバフローポンプによる Na 汲み上げにより Na 液面は回復し、液面が -5cm に回復した時点でオーバフローポンプは自動停止（オーバフロー戻りラインの熱衝撃防止のためのインターロック）し、液面変動が収束している。

5.10 実測データに基づく簡易応力評価

各手動スクラムと外部電源喪失の熱過渡評価については、プラント各部の温度変化幅 ΔT 、温度変化率 ($\Delta T/t$) について設計熱過渡条件と実測データとの比較をすることにより評価している。ここでは、これらの比較結果を用いて機器設計時の応力評価に対する簡易評価を行った。

プラント各部において、温度変化幅 ΔT の設計熱過渡条件に対する実測温度の比 ($\Delta T_{E/C}$) と温度変化率 ($\Delta T/t$) の設計熱過渡条件に対する実測温度の比 ($[\Delta T/t]_{E/C}$) が 1.0 を越える部位は次の箇所である（表 5.2-1~5.5-1 参照）。

- ① 主中間熱交換器 2 次側入口 Na 温度（温度上昇側・降下側）の温度変化幅 ΔT 及び温度変化率 $\Delta T/t$
 - ② 主冷却器出口 Na 温度の（温度上昇側・降下側）の温度変化幅 ΔT 及び温度変化率 $\Delta T/t$
- よって、上記の部位について MK-III 改造機器である主中間熱交換器及び主冷却器を対象に簡易応力評価を行った。

(1) 簡易応力評価の方法

主中間熱交換器及び主冷却器の設計時の応力評価結果から、①主中間熱交換器 2 次側入口 Na 温度及び②主冷却器出口 Na 温度の挙動が応力発生に影響している部位を選定する。

この選定部位に対し、設計熱過渡条件と実測温度との比を割増係数として設計熱過渡応力に乗じて簡易熱過渡応力を算出し、その他の荷重と組み合わせて一次+二次応力強さの範囲が制限値を満足していることを確認する。ここで、設計熱過渡条件と実測温度との比は、温度変化幅の比率と温度変化率の比率の大きい方の比率を用いる*。

以上により選定した部位及び熱過渡割増係数は次のとおりである。主中間熱交換器の割増係数は、手動スクラム試験及び外部電源喪失試験（共に 70MWt 試験）の主中間熱交換器(B)2次側入口 Na 温度（温度降下側）、主冷却器の割増係数は、外部電源喪失試験

（140MWt）の主冷却器(1A)出口 Na 温度（温度降下側）の値である。

- ① 主中間熱交換器の上部サポートリング（熱過渡割増係数：1.31）
- ② 主中間熱交換器の2次側上部鏡板（熱過渡割増係数：1.31）
- ③ 主中間熱交換器の2次側入口ノズル（熱過渡割増係数：1.31）
- ④ 主冷却器の出口集合管スタブ（熱過渡割増係数：1.66）
- ⑤ 主冷却器の出口集合管ドレン管付根（熱過渡割増係数：1.66）

(2) 簡易応力評価結果

表 5.10-1 に主中間熱交換器及び主冷却器の簡易応力評価結果を示す。表に示す応力割増係数は、熱過渡割増係数を熱過渡応力に乗じて、他の荷重との組み合わせを考慮して求めた設計時応力に対する係数である。評価の結果、いずれの部位も一次+二次応力強さの制限であるシェイクダウン領域 $3\overline{S_m}$ 又は $3S_m$ を十分満足していることを確認した。

*補足説明：

熱過渡評価では、温度変化幅 ΔT (°C) と温度変化率 $\Delta T/t$ (°C/sec) に着目している。これは、熱応力が肉厚内の温度勾配により発生し、この温度勾配は ΔT と $\Delta T/t$ に依存するからである。

肉厚が同じ配管構造等の場合の肉厚内の温度勾配は、ある瞬間の温度変化つまり $\Delta T/t$ に依存する。一方、構造物に肉厚の異なる部位等、熱容量が異なる部位が存在する場合は、肉厚の薄い部分と厚い部分の間で温度勾配が異なり、この部分の間の温度差による熱応力が温度変化幅 ΔT に依存することから、 ΔT も考慮する必要がある。

よって、基準となる熱過渡と実測温度との相対的な関係で評価する場合は、 ΔT の比率と $\Delta T/t$ の比率のうち大きい方の比率を考慮し、最大発生応力を推定している。

5.11 原子炉冷却材温度制御設備の最終設定値

表 5.11-1 に本試験結果を踏まえて最終的に設定した原子炉冷却材温度制御設備の設定一覧を示す。本表ではMK-IIの設定値を合わせて示した。

6. 予測解析及び原子炉冷却材温度制御設備の制御定数等の検討

過渡応答試験を行うにあたり、事前にプラント動特性解析コード“Mimir-N2”を用いた予測解析を行い、異常時の原子炉冷却材温度制御設備の制御定数を決定した。また、性能試験結果を踏まえて、温度設定値、制御定数の検討のための解析、評価を行った。

Mimir-N2 は、MK-II 炉心で実施した運転特性試験、自然循環試験等に基づき、その整備・検証を行った他、MK-III プラントの設計、熱過渡評価、安全解析等を通じ、整備されてきた解析コード^{(4)～(5)}である。

本章では、Mimir-N2 を用いた手動スクラム試験及び外部電源喪失試験の予測解析、温度設定値・制御定数の検討のための解析及び実測データとの比較結果について示す。なお、MK-III 性能試験結果の実測値を基にした Mimir-N2 の冷却系モデルの整備・評価は、別途報告されている技術報告書⁽⁶⁾を参照されたい。図 6-1 に Mimir-N2 を用いた過渡応答試験の検討のフローチャートを示す。

6.1 MK-III 性能試験（過渡応答試験）の予測解析

6.1.1 解析条件

MK-III 性能試験のプラント動特性解析にあたり、機器据付後に行われた総合機能試験等で得られた主送風機インレットベーン及び入口ダンパのヒステリシスの実機データ等を Mimir-N2 の入力データに反映した。表 6.1-1 に Mimir-N2 入力データの見直し一覧表を示す。また、表 6.1-2 に予測解析条件を示す。なお、解析条件のうち温度制御設備の固定ゲインは、Mimir-N2 を用いたサーベイ解析を行い決定した（固定ゲインを「1.0」、「1.2」及び「1.4」とした 3 ケースについて解析し、その中で設計熱過渡条件に対して最も裕度がある「1.2」を採用した）。

6.1.2 解析結果

図 6.1-2 に予測解析結果の代表例を示す。MK-II での実績と同様に過渡時の主冷却器出口 Na 温度は、プラント各部の中で挙動が最も複雑であり、変化を開始してから整定するまでの間に周期的温度振動を繰り返す。また、70MWt 時は、140MWt 時と比べて初期の温度振動の幅が小さく、かつ、全体的な温度振動の形態が異なる。これは、温度振動を極力抑えるために設けているベーンの微開制御の上限設定値が原子炉熱出力及びベーン開度と除熱量のバランスに関係なく一定値であるために生じている。ベーン微開制御時の上限設定値は、

スクラム直後の主冷却器出口 Na 温度の初期温度上昇が熱過渡条件を満足し、かつその後の温度制御性が比較的よい値となるように設定する必要がある。なお、ベーンの微開制御と主冷却器出口 Na 温度振動の関係の詳細は、7.2 項にて考察した。

6.2 140MWt 過渡応答試験時のスクラム時の主冷却器出口 Na 温度設定値

105MWt までの出力上昇試験結果から、定格熱出力 140MWt における主冷却器出口 Na 温度は、A ループが約 305℃、B ループが約 310℃（主冷却器入口 Na 温度は A ループが約 470℃、B ループが約 467℃）となり、設計値まで下がらないことが予想された。このため、予想された運転温度（A ループ:305℃、B ループ:310℃）を設定値とした解析を行い、設計値（300℃）の場合との比較を行った。図 6.2-1 及び図 6.2-2 に解析結果を示す。この結果から、設定値を定格運転時の温度により近づけるように設定した方がスクラム後の熱過渡が厳しくないことが確認できた（70MW 時も同様になるものと考えられる）。この解析結果を踏まえて、5.5.1 項に示すように定格熱出力到達時の主冷却器出口 Na 温度を基に設定した（最終的な設定値は 317℃）。

6.3 原子炉冷却材温度制御設備の固定ゲインをパラメータとした解析

原子炉冷却材温度制御設備の制御定数の妥当性を確認するため、スクラム時の主冷却器出口 Na 温度の設定値を最終設定値の 317℃とし、固定ゲインをパラメータとした解析を行った。図 6.3-1 及び図 6.3-2 に解析結果を示す。この結果、現状の設定値「1.2」に対し、固定ゲインを大きくするほど温度変動の周期が短く（温度変化率が大きく）なり、固定ゲインを小さくすると、ピーク温度が大きく（温度変化幅が大きく）なる傾向がある。また、5 章で述べたように、試験の結果、プラント各部の熱過渡特性に問題がないことが確認できたことから、固定ゲインの設定値は「1.2」が妥当であると判断した。

6.4 過渡応答試験の予測解析と実測データの比較

図 6.4-1 に原子炉熱出力 140MWt 手動スクラム試験の予測解析と実測データの比較を示す。図 6.4-2 に原子炉熱出力 140MWt 外部電源喪失試験の予測解析と実測データの比較を示す。予測解析と実測データを比較した結果、プラント各部の温度挙動は概ね一致するものの、次の示すような違いが見られた。

(1) 主冷却器入口 Na 温度は、スクラム後から約 500 秒までは他の温度と比べてよく一致し

ているが、その後、解析結果の温度低下率の方が大きい。

(2) 原子炉出口 Na 温度は、解析結果の方がスクラム後の温度変化率が大きい。

(3) 主冷却器出口 Na 温度は、解析結果の方がスクラム直後の温度低下幅が大きく、その後の温度変化に、実測値と比べて時間遅れが見られる。

これらの違いを改善するため、性能試験以降 Mimir-N2 の冷却系モデルの整備が行われている⁶⁾。

7. 考 察

7.1 冷却系機器インターロック変更による熱過渡緩和対策

図 7.1-1 及び図 7.1-2 にMK-II 及びMK-IIIの手動スクラム試験における過渡時特性を示す。MK-IIIでは、プラント熱過渡緩和を目的として、異常時の冷却系機器動作等の見直しが行われ、1次主循環ポンプのランバック制御導入などの対策を行った。これにより、外部電源喪失及び1次主循環ポンプトリップ以外の事象発生時は、ランバック制御により、1次主循環ポンプ主駆動モータを低速運転に移行させ、原子炉停止後の炉心崩壊熱除去に必要な1次冷却材流量を保持するようにした。なお、MK-IIでは、同事象発生時は冷却材流量を定格流量に保持した。

図に示すように、MK-IIIでのインターロック変更により、MK-IIプラントに比べ原子炉熱出力が100MWtから140MWtへ増大したにもかかわらず、スクラム時の温度変化率は緩やかとなり、MK-III用機器インターロックが妥当であったことが確認できた。

7.2 スクラム時の冷却材温度制御と主冷却器出口 Na 温度振動の関係について

スクラム時には、主冷却器出口 Na 温度に温度振動が生じている。ここでは、本事象の発生形態を明らかにするため、スクラム時のベーン開度と主冷却器出入口 Na 温度のデータを比較・整理した。なお、スクラム時はベーンの微開動作による自然通風制御であり、6.2項のMimir-N2による解析結果からPI定数の調整では温度振動の低減に対して有効でないことが明らかであることから、ベーンの開度制限値に着目して検討した。

(1) ベーン開度制限値の目的

スクラム時は、2次主循環ポンプ及び主送風機を停止し、自然循環による崩壊熱除去を行う。この条件においてベーン開度調節により自然通風量制御を行う場合、ベーン開度を開け過ぎると過冷却となり、それが基となって温度振動が発生する。このため、過冷却と温度振動を極力抑えるためにベーン開度制限値を設けている。この制限値は上限値を約10%、下限値を0%として0～約10%の範囲としており、スクラム時は機器ごとに設定(スクラム発生から事故信号リセットまで、プラントの温度変化に関わらず一定)している。なお、ベーンと入口ダンパ間の制御においてオーバーラップ領域を設けているため、ベーン開度0%時は入口ダンパが60～80%まで閉となる。

(2) スクラム時のベーン開度と主冷却器出口 Na 温度変化の関係

表 7.2-1 にスクラム時のベーン開度最大・最小値等を示す。スクラム時のベーン開度上限値は、当初 Mimir-N2 の解析を基に 8.5%としていたが、実試験では表 7.2-1 に示すように機器間及び各試験で 8.4~10.2%のバラツキがあった。このため、ベーン開度が小さい場合と大きい場合の温度制御性について比較した。

図 7.2-1 にスクラム時のベーン開度と主冷却器出口 Na 温度振動の関係を示す。図 7.2-1 の上図に代表例としてベーン開度上限値が比較的大きい主冷却器(1B)の場合を、下図にベーン開度上限値が比較的小さい主冷却器(2B)場合のデータを示す。両者のスクラム時の挙動を整理すると次のようになる。なお、両者ともスクラム時の温度設定値は 317℃である。

- ① ベーン開度上限値が比較的大きい主冷却器(1B)の場合：開度上限値 10.2%
 - イ) スクラム直後の最初の温度上昇時 → 温度上昇幅が比較的小さく抑えられている。
 - ロ) その後温度振動が開始するまで
 - 温度設定値近傍で安定（この時のベーン開度は 6%）。
 - ハ) 温度振動が発生し始めた後
 - 比較的設定値に対する温度低下幅が大きく、温度変化率も大きい。
- ② ベーン開度上限値が比較的小さい主冷却器(2B)場合：開度上限値 8.4%
 - イ) スクラム直後の最初の温度上昇時 → 温度上昇幅が上記①より 10℃程度大きい。
 - ロ) その後温度振動が開始するまで
 - 温度設定値に向かって徐々に低下（この時のベーン開度は上限値の 8.4%）
 - ハ) 温度振動が発生し始めた後
 - 比較的設定値に対する温度低下幅が小さく、温度変化も緩やか。

次に両者を比較すると次のことが分かる。

- ① スクラム直後の最初の温度上昇時は、温度設定値に対する必要除熱量が大きいため「ベーン開度上限値による除熱量」 < 「必要除熱量」の関係となり、ベーン開度は極力大きい方が温度上昇による熱過渡を低減できる（10.2%以上の方がよい）
- ② その後温度振動が開始するまで（主冷却器入口 Na 温度が約 430℃まで低下）は、ベーン開度は 6~8.4%程度（ベーン開度上限値による除熱量と必要除熱量のバランスがよい状態）がよい。
- ③ 温度振動が発生し始めた後は、主冷却器入口 Na 温度の低下により「ベーン開度上限

値による除熱量」 > 「必要除熱量」の関係となるため、ベーン開度は極力小さい方が温度低下量を小さくし、温度変化を緩やかにできる（主冷却器(2B)の 8.4%の方がよい）

以上をまとめると、スクラム後のベーン開度上限値は、最初は 10.2%以上として温度上昇幅を低減し、その後は必要除熱量の低下（主冷却器入口 Na 温度の低下）に対応し、必要除熱量に見合った開度になるように徐々に小さくしていくのがよいものと考えられる。

しかしながら、ベーン開度制限値を上記のように変更する機能を冷却材温度制御設備に追加する場合、主冷却器入口 Na 温度を入力値として追加するとともに必要除熱量に見合ったベーン開度に設定する機能を付加させることになり、設備が複雑になり不必要な不具合を招く恐れが考えられること、及び現状の制御方法で熱過渡に対し構造健全性上問題ないことから、特に機能追加は行わないこととした。なお、ベーン開度上限設定値は、本試験結果を踏まえて最小値（8.4%）と最大値（10.2%）のほぼ中間である「9.5%」を基準とし、原子炉サイクル運転の開始前に確認することとする。

8. おわりに

プラント特性に係る性能試験のうち、手動スクラム試験、外部電源喪失試験及び主冷却系による崩壊熱除去試験の各試験は、原子炉熱出力 70MWt (50%出力)、140MWt (定格熱出力)、35MWt (原子炉通常停止時における主冷却系による崩壊熱除去試験のみ) にて実施し、以下の結論を得た。

(1) 手動スクラム試験及び外部電源喪失試験

- ① 主中間熱交換器及び主冷却機の交換等により大幅に改造した冷却系設備が、過大な熱過渡を生じることなく原子炉停止後の崩壊熱を除去できることを確認した。
- ② 1次主循環ポンプのランバック制御導入を含めたMK-III用機器インターロックは、原子炉スクラム時の熱過渡をMK-IIと比べて大幅に緩和でき、その有効性が確認できた。
- ③ ①及び②から、過渡時の機器インターロック及び原子炉冷却材温度制御設備の制御定数等は、主冷却器出口 Na 温度に温度振動が見られるが熱過渡特性が設計範囲内であり、妥当であることが確認できた。
- ④ 原子炉スクラム後において主冷却系を早期に整定させるため、主冷却器入口 Na 温度が 365℃まで低下した時点で主送風機インレットベーンをマニュアルモードで全閉する方法を採用した結果、スクラムから整定するまでの時間は、70MWt 手動スクラム試験時の約 1 時間 50 分に対し、最終試験の 140MWt 外部電源喪失試験時で約 1 時間 24 分に短縮できた。
- ⑤ 140MWt 手動スクラム試験で主冷却器出口 Na 温度設定値を A ループ 311℃、B ループ 317℃とした結果、原子炉入口 Na 温度の A、B ループ間に約 10℃の差が生じた。このため、温度設定値を A、B ループとも同一設定値(317℃)とした結果、温度差を約 4℃に減少できた。
- ⑥ 原子炉スクラム時の主冷却機インレットベーン開度上限値は、本試験時の実測データを踏まえて、熱過渡特性が設計範囲内となることが確認された最小値 (主冷却機(2B)の 8.4%) と最大値 (主冷却機(1B)の 10.2%) のほぼ中間である「9.5%」とした。

(2) 主冷却系による崩壊熱除去試験

- ① 主冷却機インレットベーン・ダンパ開度を調節することにより、温度降下率 $-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以下で系統温度を約 250℃に降温できることを確認した。
- ② 系統降温操作後から系統温度が約 250℃に到達するまでに要する時間は、各試験とも温度降下率約 $-35^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で、約 3 時間であった。

9. 謝 辞

異常時過渡応答試験の実施にあたっては、測定機器準備・データ採取・解析を行って頂いた(株) NESI の菅谷 和司氏、深見 明弘氏、黒羽 隆也氏、プラント操作・監視を行っていた頂いた原子炉第一課、実験炉部各課の方々、並びに大洗工学センター内関係部署、敦賀本部のご協力を頂き、無事完了することができた。ここに深く感謝の意を表します。

10. 参考文献

- (1) 磯崎和則、他 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係わる設計条件の整備 ー機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定(最終版)ー、JNC TN9410 2001-016 (2001)
- (2) 前田幸基、他 : 高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ性能試験 総合報告書、JNC TN9410 2003-011 (2004)
- (3) 高橋秀治、他 : 高速実験炉「常陽」100MW出力上昇試験結果報告書 外部電源喪失試験 (PT-236)、PNC TN941 85-118 (1985)
- (4) 吉田昌宏、他 : 「常陽」実機データに基づくプラント動特性解析コードの検証 サイクル機構技術報告、JNC TN1340 2002-001 (2002)
- (5) M.Sawada,et al. : Experimental and Analysis on Natural Convection Characteristics in the Experimental Fast Reactor Joyo, Nuclear Engineering Design 120, p341-347(1990)
- (6) 高松 操、他 : 「常陽」MK-Ⅲ性能試験結果に基づくプラント動特性解析コードの整備、JNC TN9410 2004-005 (2004)

表 2-1 MK-III炉心と MK-II炉心の主要目の比較

項 目	MK-III炉心 (内側/外側)	MK-II炉心	
原子炉熱出力 (MWt)	<u>140</u>	100	
最大燃料集合体数 (体)	<u>85</u> *4	67*1	
炉心等価直径 (cm)	<u>80</u>	73	
炉心高さ (cm)	<u>50</u>	55	
燃料ペレット外径 (mm)	4.63	4.63	
燃料ペレット密度 (% T.D.)	94	94	
²³⁵ U濃縮度 (wt%)	18	18	
Pu 富化度 (wt%)	~30	~30	
(²³⁹ Pu + ²⁴¹ Pu)/(Pu + U) (wt%)	<u>16/21</u>	20	
被覆管外径 (mm)	5.5	5.5	
集合体内ピン本数 (本)	127	127	
集合体ピッチ (cm)	8.15	8.15	
最大線出力 (W/cm)	<u>420</u>	400	
最大燃焼度 (要素平均) (GWd/t)	<u>90</u>	75	
制御棒配置 第3列 (本)	<u>4</u>	6*2	5*3
第5列 (本)	<u>2</u>	0	1
反射体/遮蔽集合体	SUS/B ₄ C	SUS/なし	
1次冷却系流量 (t/h)	<u>2,700</u>	2,200	
定格運転日数 (d)	<u>60</u>	70	

※下線は、MK-II炉心から変更した項目

(*1)第31サイクルまで。移行炉心(第32サイクル以降)では、85体。

(*2)第23サイクルまで。

(*3)第24サイクルより、1体を5列に移設。

(*4)性能試験時の燃料集合体数は75体(内側燃料:21体、外側燃料:54体)。

なお、外側燃料54体のうち20体は、MK-III移行炉心である第32~35サイクルで燃料領域を段階的に拡大するため先行して装荷。

表4.1-1 ペンレコーダによる記録リスト

記録チャンネル	信号名称
1-1	主送風機インレットベーン制御信号(1A)
1-2	主送風機インレットベーン制御信号(2A)
1-3	主送風機インレットベーン開度(1A)
1-4	主送風機インレットベーン開度(2A)
1-5	主冷却器出口冷却材温度(1A)
1-6	主冷却器出口冷却材温度(2A)
2-1	主送風機インレットベーン制御信号(1B)
2-2	主送風機インレットベーン制御信号(2B)
2-3	主送風機インレットベーン開度(1B)
2-4	主送風機インレットベーン開度(2B)
2-5	主冷却器出口冷却材温度(1B)
2-6	主冷却器出口冷却材温度(2B)
3-1	主冷却器入口ダンパ開度(1A)
3-2	主冷却器入口ダンパ開度(2A)
3-3	主冷却器入口ダンパ開度(1B)
3-4	主冷却器入口ダンパ開度(2B)
3-5	主冷却器入口冷却材温度(A)
3-6	主冷却器入口冷却材温度(B)
4-1	原子炉入口冷却材温度(A)
4-2	原子炉入口冷却材温度(B)
4-3	原子炉出口冷却材温度(A)
4-4	原子炉出口冷却材温度(B)
5-1	線形出力系 Ch. 6
5-2	燃料集合体出口冷却材温度[アドレスNo.1A1 (第1列)]

ペンレコーダの仕様

- ・メーカー：横河電機
- ・型式：LR8100E
- ・精度（直流電圧）：±（読み値の0.05% + レンジの0.03% + 1.0 μ V）

表4.1-2 デジタルデータ記録装置による記録リスト

Ch.	信号名称	Ch.	信号名称	Ch.	信号名称
1-1	反応度	2-1	主IHX 2次入口冷却材温度(A)	3-1	インレットベーン制御信号(1A)
1-2	線形出力系 Ch. 6	2-2	主IHX 2次入口冷却材温度(B)	3-2	インレットベーン制御信号(2A)
1-3	線形出力系 Ch. 7	2-3	主IHX 2次出口冷却材温度(A)	3-3	インレットベーン制御信号(1B)
1-4	線形出力系 Ch. 8	2-4	主IHX 2次出口冷却材温度(B)	3-4	インレットベーン制御信号(2B)
1-5	炉容器冷却材液位	2-5	主冷却器入口冷却材温度(A)	3-5	入口ダンパ制御信号(1A)
1-6	集合体出口冷却材温度[IAI]	2-6	主冷却器入口冷却材温度(B)	3-6	入口ダンパ制御信号(2A)
1-7	原子炉入口冷却材温度(A)	2-7	主冷却器出口冷却材温度(1A)	3-7	入口ダンパ制御信号(1B)
1-8	原子炉入口冷却材温度(B)	2-8	主冷却器出口冷却材温度(2A)	3-8	入口ダンパ制御信号(2B)
1-9	原子炉出口冷却材温度(A)	2-9	主冷却器出口冷却材温度(1B)	3-9	インレットベーン開度(1A)
1-10	原子炉出口冷却材温度(B)	2-10	主冷却器出口冷却材温度(2B)	3-10	インレットベーン開度(2A)
1-11	1次主循環流量(A)	2-11	主冷却器出口合流点冷却材温度(A)	3-11	インレットベーン開度(1B)
1-12	1次主循環流量(B)	2-12	主冷却器出口合流点冷却材温度(B)	3-12	インレットベーン開度(2B)
1-13	サイフォンブレイク流量(A)	2-13	主冷却器出口空気温度(1A)	3-13	入口ダンパ開度(1A)
1-14	サイフォンブレイク流量(B)	2-14	主冷却器出口空気温度(2A)	3-14	入口ダンパ開度(2A)
1-15	2次主循環流量(A)	2-15	主冷却器出口空気温度(1B)	3-15	入口ダンパ開度(1B)
1-16	2次主循環流量(B)	2-16	主冷却器出口空気温度(2B)	3-16	入口ダンパ開度(2B)

表 4.1-3 手動スクラム試験の試験手順

No.	内 容	備考
1	<p>(試験準備)</p> <p>プラント状態が、以下の条件で安定していることを確認する。</p> <p>① 原子炉熱出力 : 約 70MWt、定格熱出力</p> <p>② 原子炉入口冷却材温度 : 約 350℃</p> <p>③ 原子炉出口冷却材温度 : 約 425℃ (約 70MWt)、 約 500℃ (定格熱出力)</p> <p>④ 1次主冷却系流量 : 定格流量</p> <p>⑤ 2次主冷却系流量 : 定格流量</p> <p>2 測定機器等の動作が正常であることを確認する。</p> <p>3 試験開始時刻を放送により周知する。</p> <p>4 試験開始前のプラント各部のプロセス量を確認・記録する(確認項目は表 4.1-4 参照)。</p> <p>5 デジタルデータ記録装置及びペンレコーダの記録を開始する。また、試験開始前の熱出力システムのデータ印字、JOYDAS 画面のハードコピーを行う。</p> <p>(試験開始)</p> <p>6 原子炉制御盤の手動スクラム釦を押し、原子炉をスクラムする。</p> <p>7 ペンレコーダ及び JOYDAS によりプラント各部の状態変化を監視すると同時に、機器・警報動作を確認する(確認項目は表 4.1-5 参照)。</p> <p>8 原子炉が停止していることを確認する。</p> <p>9 プラント状態を監視し、各プロセス量がほぼ定常になった時点で、デジタルデータ記録装置及びペンレコーダの記録を終了する。</p> <p>10 試験終了時のプラント各部のプロセス量を確認・記録する。</p> <p>11 手動スクラム試験の終了</p>	<p>制御棒駆動機構の「下端位置」、及び原子炉運転モードスイッチの「停止」により原子炉停止を確認する。</p>

表4.1-4(1/2) プロセス量測定項目一覧表 (手動スクラム試験及び外部電源喪失試験)

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位
1	原子炉熱出力 指示警報計 熱出力測定システム	—	A-712	423	MW
		—	A-710	—	MW
2	線形出力系 Ch.6	—	A-712	423	%
3	線形出力系 Ch.7	—	A-712	423	%
4	線形出力系 Ch.8	—	A-712	423	%
5	制御棒位置(CR1)	—	A-712	423	mm
6	制御棒位置(CR2)	—	A-712	423	mm
7	制御棒位置(CR3)	—	A-712	423	mm
8	制御棒位置(CR4)	—	A-712	423	mm
9	制御棒位置(CR5)	—	A-712	423	mm
10	制御棒位置(CR6)	—	A-712	423	mm
11	原子炉入口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C
12	原子炉出口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C
13	原子炉入口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C
14	原子炉出口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C
15	1次主冷却系流量(A)	FR31.1-1A	A-712	424	m ³ /h
16	1次主冷却系流量(B)	FR31.1-1B	A-712	424	m ³ /h
17	1次主循環ポンプ回転数(A)	—	A-712	424	rpm
18	1次主循環ポンプ回転数(B)	—	A-712	424	rpm
19	1次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TR31.1-100A	A-504	214	°C
20	1次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TR31.1-100B	A-504	214	°C
21	原子炉カバーガス圧力	PR36.1-7	A-712	424	kPa
22	炉容器Na液位(長尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm
23	炉容器Na液位(短尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm
24	1次主循環ポンプNa液位(A)	LIS31.1-4A	A-712	424	cm
25	1次主循環ポンプNa液位(B)	LIS31.1-4B	A-712	424	cm
26	オーバーフローカラムNa液位(A)	LIS31.1-5A	A-712	424	cm
27	オーバーフローカラムNa液位(B)	LIS31.1-5B	A-712	424	cm
28	主冷却器入口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C
29	主冷却器出口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C
30	主冷却器出口Na温度(1A) 指示記録計 μ XL画面	TRA31.2-2A	A-712	425	°C
		—	A-712	458	°C
31	主冷却器出口Na温度(2A) 指示記録計 μ XL画面	TRA31.2-2A	A-712	425	°C
		—	A-712	458	°C
32	主冷却器入口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C
33	主冷却器出口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C
34	主冷却器出口Na温度(1B) 指示記録計 μ XL画面	TRA31.2-2B	A-712	425	°C
		—	A-712	458	°C

表4.1-4(2/2) プロセス量測定項目一覧表 (手動スクラム試験及び外部電源喪失試験)

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位
35	主冷却器出口Na温度(2B) 指示記録計 μ XL画面	TRA31.2-2B	A-712	425	°C
		—	A-712	458	°C
36	2次主冷却系流量(A)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h
37	2次主冷却系流量(B)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h
38	2次主循環ポンプ回転数(A)	—	A-712	425	rpm
39	2次主循環ポンプ回転数(B)	—	A-712	425	rpm
40	2次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TI31.2-6A	A-712	425	°C
41	2次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TI31.2-6B	A-712	425	°C
42	主送風機ベーン開度(1A) 指示計 μ XL画面	A05-θ-V	A-712	425	%
		—	A-712	458	%
43	主送風機ベーン開度(2A) 指示計 μ XL画面	A05-θ-V	A-712	425	%
		—	A-712	458	%
44	主送風機ベーン開度(1B) 指示計 μ XL画面	A05-θ-V	A-712	425	%
		—	A-712	458	%
45	主送風機ベーン開度(2B) 指示計 μ XL画面	A05-θ-V	A-712	425	%
		—	A-712	458	%
46	主冷却器入口空気温度(1A)	—	A-712	JOYDAS	°C
47	主冷却器入口空気温度(2A)	—	A-712	JOYDAS	°C
48	主冷却器入口空気温度(1B)	—	A-712	JOYDAS	°C
49	主冷却器入口空気温度(2B)	—	A-712	JOYDAS	°C
50	主冷却器出口空気温度(1A)	—	A-712	JOYDAS	°C
51	主冷却器出口空気温度(2A)	—	A-712	JOYDAS	°C
52	主冷却器出口空気温度(1B)	—	A-712	JOYDAS	°C
53	主冷却器出口空気温度(2B)	—	A-712	JOYDAS	°C
54	主冷却機室(A)周囲温度	—	S-403	687	°C
55	主冷却機室(B)周囲温度	—	S-419	688	°C

表 4.1-5 手動スクラム試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表

系統名	確認項目
原子炉制御系	①「手動スクラム」ANN点灯確認 ②制御棒No.1～6 デラッチランプ点灯確認 ③線形出力系 (Ch.6～8) による原子炉出力の降下確認
1次冷却系	①1次主循環ポンプのランバック制御運転への引継ぎ確認 (a)マスターステーションの「ストップ」表示ランプ点灯確認 (b)流量ステーションの「ランバック指令」及び「ランバック完了」表示ランプ点灯確認 ②オーバーフロー系 EMP の自動停止確認 (a)原子炉容器Na 液位-5cm で EMP が自動停止することの確認
2次冷却系	①「2次主ポンプトリップ」ANN点灯確認 ②「主送風機トリップ」ANN点灯確認 ③「主送風機ブレーキ動作」ANN点灯確認 ④冷却材温度制御系動作確認 (手動スクラム直後) (a)制御モード「AUTO」→「MAN」 (b)主送風機インレットベーン「全閉」 (c)主冷却器入口ダンパ「全開」 (d)主冷却器出口温度設定値が異常時設定値に切換 (e)PI定数が異常時の設定値に切換 ⑤冷却材温度制御系動作確認 (主冷却器出口 Na 温度が 300℃以上で下記動作) (a)制御モード「MAN」→「AUTO」 (b)主送風機インレットベーン開度 0～9.5%で制御

表 4.2-1 外部電源喪失試験の試験手順

No.	内 容	備考
1	<p>(試験準備)</p> <p>プラント状態が、以下の条件で安定していることを確認する。</p> <p>① 原子炉熱出力 : 約 70MWt、定格熱出力</p> <p>② 原子炉入口冷却材温度 : 約 350℃</p> <p>③ 原子炉出口冷却材温度 : 約 425℃ (約 70MWt)、 約 500℃ (定格熱出力)</p> <p>④ 1次主冷却系流量 : 定格流量</p> <p>⑤ 2次主冷却系流量 : 定格流量</p>	
2	測定機器等の動作が正常であることを確認する。	
3	試験開始時刻を放送により周知する。	
4	試験開始前のプラント各部のプロセス量を確認・記録する(確認項目は表 4.1-4 参照)。	
5	デジタルデータ記録装置及びペンレコーダの記録を開始する。また、試験開始前の熱出カシステムのデータ印字、JOYDAS 画面のハードコピーを行う。	
6	<p>(試験開始)</p> <p>電源監視盤の遮断器 352R を「切」にする。</p>	
7	ペンレコーダ及び JOYDAS によりプラント各部の状態変化を監視すると同時に、機器・警報動作を確認する(確認項目は表 4.2-2 参照)。	喪失させた外部電源は、約5分後に復旧させる。
8	原子炉が停止していることを確認する。	
9	プラント状態を監視し、各プロセス量がほぼ定常になった時点で、デジタルデータ記録装置及びペンレコーダの記録を終了する。	制御棒駆動機構の「下端位置」、及び
10	試験終了時のプラント各部のプロセス量を確認・記録する。	原子炉運転モード
11	外部電源喪失試験の終了	スイッチの「停止」により原子炉停止を確認する。

表 4.2-2 外部電源喪失試験における主要な機器・警報動作確認項目一覧表

系統名	確認項目
原子炉制御系	①スクラム警報確認 ②制御棒No.1～6 デラッチランプ点灯確認 ③線形出力系 (Ch.6～8) による原子炉出力の降下確認
電源設備	①「電源喪失 1A 母線」、「電源喪失 1B 母線」ランプ点灯 ②1号 DG「起動」、2号 DG「起動」ランプ点灯 ③1号 DG「電圧確立」、2号 DG「電圧確立」ランプ点灯 ④遮断器 152C4 ランプ G→R ⑤遮断器 152D4 ランプ G→R
1次冷却系	①1次主循環ポンプトリップ→ポニーモータへの引継ぎ ②オーバーフロー系 EMP の自動停止確認 原子炉容器Na 液位-5cm で EMP が自動停止することの確認
2次冷却系	①「2次主ポンプトリップ」ANN点灯確認 ②「主送風機トリップ」ANN点灯確認 ③「主送風機ブレーキ動作」ANN点灯確認 ④冷却材温度制御系動作確認 (手動スクラム直後) (a)制御モード「AUTO」→「MAN」 (b)主送風機インレットベーン「全閉」 (c)主冷却器入口ダンパ「全開」 (d)主冷却器出口温度設定値が異常時設定値に切換 (e)PI 定数が異常時の設定値に切換 ⑤冷却材温度制御系動作確認 (主冷却器出口 Na 温度が 300℃以上で下記動作) (a)制御モード「MAN」→「AUTO」 (b)主送風機インレットベーン開度 0～9.5%で制御

表 5.1-1 高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ性能試験実績工程表（平成 15 年）

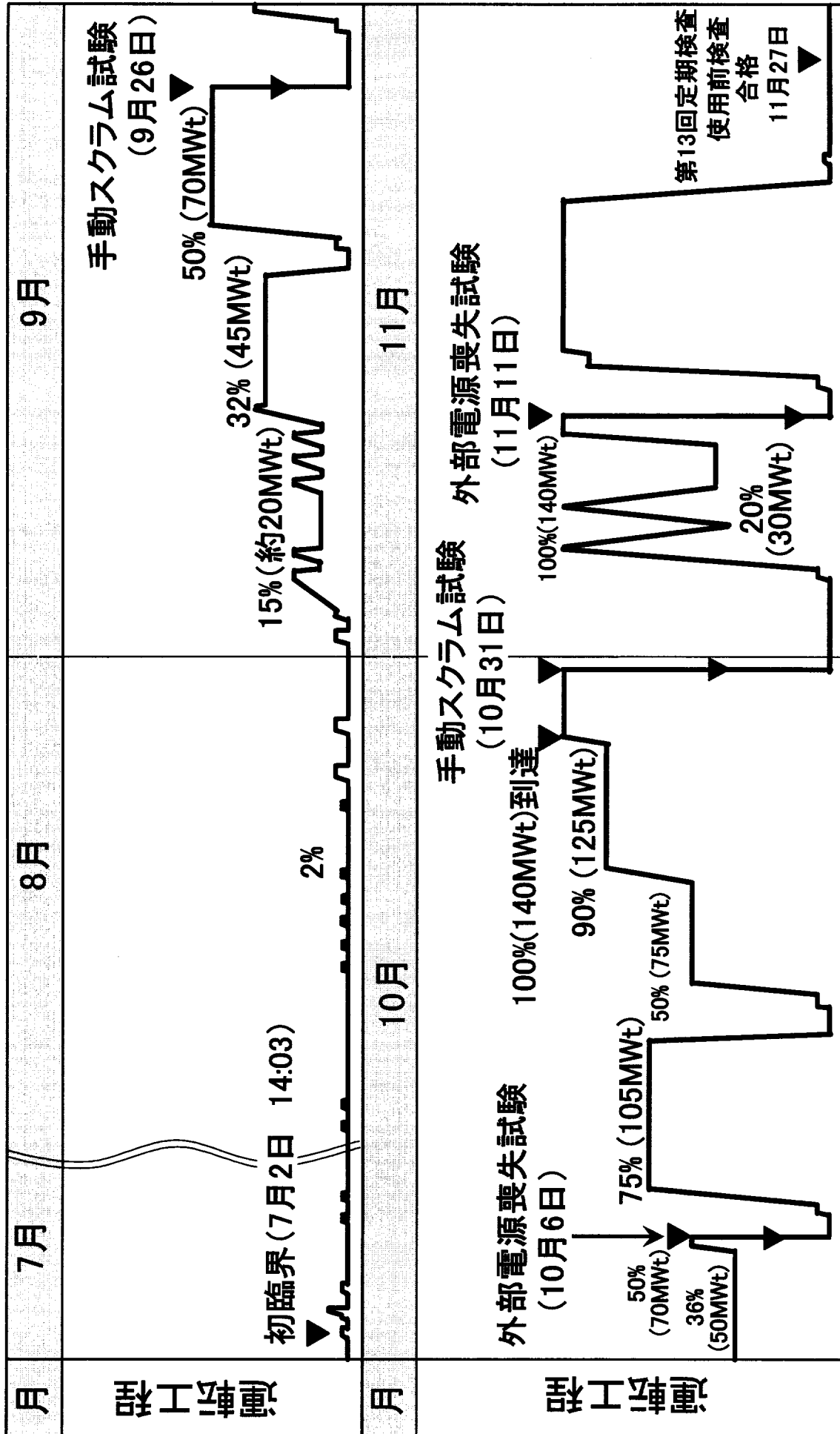


表 5.1-2 MK-III 異常時過渡応答試験の時系列

試験実施日時：平成 15 年 9 月 26 日
手動スクラム試験(70MWt)及び崩壊熱除去試験

時刻	試験内容
13:30	原子炉手動スクラム操作(70MWt)
15:23	プラント状態整理
15:49	2次主循環ポンプA号機 起動
15:58	2次主循環ポンプB号機 起動
16:34	系統降溫操作開始
19:27	系統降溫操作終了(約 250°C)
19:29	試験終了

試験実施日時：平成 15 年 10 月 6 日
外部電源喪失試験(70MWt)及び崩壊熱除去試験

時刻	試験内容
13:30	外部電源遮断操作・スクラム(70MWt)
14:27	送風機入口ベーンマニュアル・全閉
14:40	プラント状態整理
15:01	2次主循環ポンプA号機 起動
15:02	2次主循環ポンプB号機 起動
15:40	系統降溫操作開始
18:29	系統降溫操作終了(約 250°C)
18:36	試験終了

試験実施日時：平成 15 年 10 月 31 日
手動スクラム試験(140MWt)及び崩壊熱除去試験

時刻	試験内容
13:30	原子炉手動スクラム操作(140MWt)
14:58	送風機入口ベーンマニュアル・全閉
15:14	プラント状態整理
15:53	2次主循環ポンプA号機 起動
15:55	2次主循環ポンプB号機 起動
16:41	系統降溫操作開始
19:22	系統降溫操作終了(約 250°C)
19:30	試験終了

試験実施日時：平成 15 年 11 月 11 日
外部電源喪失試験(140MWt)及び崩壊熱除去試験

時刻	試験内容
13:30	外部電源遮断操作・スクラム(140MWt)
14:39	主送風機入口ベーンマニュアル・全閉
14:54	プラント状態整理
15:14	2次主循環ポンプA号機 起動
15:15	2次主循環ポンプB号機 起動
15:51	系統降溫操作開始
19:51	系統降溫操作終了(約 250°C)
19:55	試験終了

試験実施日時：平成 15 年 11 月 21 日
35MWt 制御棒 2 本同時挿入による原子炉停止後の崩壊熱除去試験

時刻	試験内容
11:00	系統降溫操作開始
13:57	系統降溫操作終了(約 250°C)
14:05	試験終了

表5.1-3 MK-III 過渡試験時におけるプラント状態のまとめ

項目		70MWt		140MWt	
		手動スクラム試験	外部電源喪失試験	手動スクラム試験	外部電源喪失試験
スクラム後の プラント状態	主冷却器出口Na温度設定値	Aループ 300°C Bループ 300°C	300°C	311°C	317°C
	スクラム直後の主冷却器 出口Na温度上昇幅	Aループ 18.5°C(1A) 37.6°C(2A) Bループ 20.9°C(1B) 35.7°C(2B)	19.5°C(1A) 37.5°C(2A) 28.6°C(1B) 41.0°C(2B)	38.5°C(1A) 47.3°C(2A) 40.5°C(1B) 50.9°C(2B)	46.9°C(1A) 54.5°C(2A) 43.6°C(1B) 48.0°C(2B)
	温度ゆらぎ整理のための操作	主冷却器入口Na温度 300°C以下(主冷却器出 入口Na温度差50°C以 下)で安定するまでベ ーンをオート制御	主冷却器入口Na温度 が350°C以下となった時 点でベーンをマニユ ール「全閉」	主冷却器入口Na温度 が360°C以下となった時 点でベーンをマニユ ール「全閉」	主冷却器入口Na温度 が365°C以下となった時 点でベーンをマニユ ール「全閉」
	原子炉入口Na温度変化	A、Bループ間の温度差 は約5°C	A、Bループ間の温度差 は約4°C	A、Bループ間の温度差 が約10°C(主冷却器出 口Na温度設定値をA、B ループで異なる値にし たため)	A、Bループ間の温度差 が約4°Cに低減(主冷却 器出口Na温度設定値を A、Bループで同じ値とし たため)
2次主循環ポンプ 再起動時の プラント状態	スクラムからプラント温度安定までの時間	約1時間50分	約1時間10分	約1時間44分	約1時間24分
	起動タイミング*	A号機 手動スクラム後、2時間 20分経過した時点	電源喪失後、1時間31 分経過した時点	手動スクラム後、2時間 23分経過した時点	電源喪失後、1時間44 分経過した時点
		B号機 手動スクラム後、2時間 30分経過した時点	電源喪失後、1時間32 分経過した時点	手動スクラム後、2時間 25分経過した時点	電源喪失後、1時間45 分経過した時点
	プラント温度変化	主冷却器出口Na温度 約25°C上昇 主冷却器入口Na温度 約15°C降下 原子炉入口Na温度 約13°C降下	約10°C上昇 約12°C降下 約10°C降下	約20°C上昇 約15°C降下 約15°C降下	約15°C上昇 約10°C降下 約10°C降下

* 起動時のプラント条件

① 70MWt手動スクラム試験

スクラム後約40分が経過し主冷却器入口Na温度300°C以下、主冷却器出入口Na温度差40~50°C以下の状態で安定した自然循環が形成されていること。

② 70MWt手動スクラム試験以外の試験(70MWt手動スクラム試験結果を反映)

主冷却器出口Na温度の変動が収束し、主冷却器出入口Na温度差50°C以下の状態で安定した自然循環が形成されてから、約30分経過していること。

表5.2-1(1/2) 手動スクラム試験時熱透過特性(70MWt)

<温度上昇側>

評価部位	熱透過条件(ΔT _C)		温度変化幅		温度変化率		
	熱透過条件(ΔT _C)	試験結果(ΔT _E)	ΔT _{E/C} (=ΔT _E /ΔT _C)	熱透過条件(ΔT/t) _C	試験結果(ΔT/t) _E	[ΔT/t] _{E/C} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _C)	
R/V	入口	49.7	15.5	0.31	0.12	0.06	0.51
	出口	1.9	0.0	0.00	0.02	0.00	0.00
IHX	2次側入口*1	55.1	12.0	0.22	0.22	0.08	0.38
	2次側入口*2	17.2	16.1	0.94	0.08	0.10	1.20
	2次側入口*3	55.1	16.2	0.29	0.22	0.06	0.75
	2次側出口	29.8	10.2	0.34	0.73	0.57	0.44
	入口	22.7	6.2	0.27	0.12	0.02	0.27
	出口*1	72.2	18.5	0.26	0.30	0.13	0.43
DHX	2A	40.0	37.6	0.52	0.24	0.21	0.70
	1B	40.0	20.9	0.29	0.30	0.13	0.43
	2B	40.0	35.7	0.49	0.30	0.19	0.63
	1A	40.0	44.8	1.12	0.30	0.31	1.29
	2A	40.0	45.9	1.15	0.30	0.27	1.13
	1B	40.0	45.7	1.14	0.30	0.30	1.25
出口*3	2B	72.2	45.0	1.13	0.30	0.19	0.79
	1A	72.2	44.8	0.62	0.30	0.31	1.03
	2A	72.2	45.9	0.64	0.30	0.27	0.90
	1B	72.2	45.7	0.63	0.30	0.30	1.00
			45.0	0.62	0.30	0.19	0.63

単位 : 温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{E/C}又は[ΔT/t]_{E/C}が1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱透過能力に乘じて応力評価を行う。

* 1: スクラム直後の熱透過条件と実測値との比較

* 2: 温度変動領域での熱透過条件と実測値との比較

* 3: スクラム直後の熱透過条件と温度変動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度変動の影響が顕著であることから、熱透過評価を「スクラム直後の熱透過条件」、「温度変動領域での熱透過条件」及び「スクラム直後から温度変動領域での熱透過条件」の3つに分けて評価した。

表5.2-1(2/2) 手動スクラム試験時熱通過渡特性(70MWt)

評価部位		熱通過渡条件(ΔT _c)		温度変化幅		温度変化率	
		熱通過渡条件(ΔT _c)	試験結果(ΔT _E)	ΔT _{ErC} (=ΔT _E /ΔT _c)	熱通過渡条件(ΔT/t) _c	試験結果(ΔT/t) _E	[ΔT/t] _{E/c} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _c)
R/V	入口	-29.9	-20.9	0.70	-0.13	-0.04	0.33
	B		-22.5	0.75		-0.05	0.36
	出口	-146.5	-44.3	0.30	-0.38	-0.09	0.23
	B		-43.7	0.30		-0.09	0.23
IHX	2次側入口*1	-22.4	-27.6	1.23	-0.23	-0.07	0.30
	B		-29.4	1.31		-0.07	0.32
	2次側入口*2	-17.0	-17.0	1.00	-0.10	-0.09	0.93
	B		-19.9	1.17		-0.07	0.69
	2次側入口*3	-22.4	-17.0	0.76	-0.23	-0.09	0.40
	B		-19.9	0.89		-0.07	0.30
	2次側出口	-128.6	-43.5	0.34	-0.35	-0.08	0.22
	B		-35.1	0.27		-0.08	0.23
	入口	-118.6	-33.2	0.28	-0.23	-0.05	0.23
	B		-32.9	0.28		-0.05	0.23
DHX	1A		-27.3	0.78		-0.32	0.54
	2A		-16.4	0.47		-0.28	0.47
	1B	-34.8	-25.9	0.74	-0.59	-0.24	0.41
	2B		-17.0	0.49		-0.20	0.34
	1A		-48.5	1.04		-0.39	1.26
	2A		-48.7	1.05		-0.32	1.03
	1B	-46.6	-50.2	1.08	-0.31	-0.33	1.06
	2B		-45.0	0.97		-0.29	0.94
	1A		-48.5	1.39		-0.39	0.66
	2A		-48.7	1.40		-0.32	0.54
	1B	-34.8	-50.2	1.44	-0.59	-0.33	0.56
	2B		-45.0	1.29		-0.29	0.49

単位：温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{ErC}又は[ΔT/t]_{E/c}が1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱通過渡応力に乘じて応力評価を行う。

*1:スクラム直後の熱通過渡条件と実測値との比較

*2:温度振動領域での熱通過渡条件と実測値との比較

*3:スクラム直後の熱通過渡条件と温度振動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱通過渡評価を「スクラム直後の熱通過渡条件」、「温度振動領域での熱通過渡条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱通過渡条件」の3つに分けて評価した。

表5.3-1(1/2) 外部電源喪失試験時熱通過特性(70MWt)

<温度上昇側>

評価部位	熱通過条件(ΔT _C)		温度変化幅 試験結果(ΔT _E)		ΔT _{E/CG} (=ΔT _E /ΔT _C)		熱通過条件(ΔT/t _{CG})		温度変化率 試験結果(ΔT/t _E)		[ΔT/t] _{E/CG} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _{CG})	
	A	B	試験結果(ΔT _E)	ΔT _{E/CG} (=ΔT _E /ΔT _C)	熱通過条件(ΔT/t _{CG})	試験結果(ΔT/t _E)	[ΔT/t] _{E/CG} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _{CG})					
R/V	入口		49.7	19.8	0.40		0.12	0.08	0.70			
	出口		1.9	0.0	0.00		0.02	0.00	0.92			
IHX	2次側入口*1	A	55.1	14.2	0.26		0.22	0.10	0.44			
		B		15.5	0.28			0.09	0.40			
	2次側入口*2	A	17.2	16.1	0.94		0.08	0.10	1.20			
		B		14.1	0.82			0.07	0.93			
	2次側入口*3	A	55.1	16.1	0.29		0.22	0.10	0.44			
		B		14.1	0.26			0.07	0.34			
2次側出口	A	29.8	9.3	0.31		0.73	0.09	0.12				
	B		10.0	0.34			0.06	0.08				
DHX	入口	A	22.7	6.8	0.30		0.12	0.04	0.29			
		B		7.9	0.35			0.04	0.31			
	出口*1	1A		19.5	0.27			0.12	0.40			
		2A		72.2	37.5	0.52		0.30	0.63			
出口*2	1B			28.6	0.40			0.09	0.31			
	2B			41.0	0.57			0.22	0.73			
	1A			44.8	1.12			0.31	1.29			
	2A		40.0	45.9	1.15		0.24	0.27	1.13			
出口*3	1B			45.7	1.14			0.30	1.25			
	2B			45.0	1.13			0.19	0.79			
	1A			44.8	0.62			0.31	1.03			
	2A		72.2	45.9	0.64		0.30	0.27	0.90			
				45.7	0.63			0.30	1.00			
				45.0	0.62			0.19	0.63			

単位：温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{E/CG}又は[ΔT/t]_{E/CG}1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱通過能力に乘じて応力評価を行う。なお、熱通過条件は設計上厳しい条件となる手動スクラムの値を用いている。

*1:スクラム直後の熱通過条件と実測値との比較

*2:温度振動領域での熱通過条件と実測値との比較

*3:スクラム直後の熱通過条件と温度振動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱通過評価を「スクラム直後の熱通過条件」、「温度振動領域での熱通過条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱通過条件」の3に分けて評価した。

表 5.3-1(2/2) 外部電源喪失試験時熱過渡特性 (70MWe)

<温度降下側>

評価部位	熱過渡条件 (ΔT_c)		温度変化幅		温度変化率		
	熱過渡条件 (ΔT_c)	試験結果 (ΔT_e)	$\Delta T_{e/c} (= \Delta T_e / \Delta T_c)$	熱過渡条件 ($\Delta T/c_c$)	試験結果 ($\Delta T/c_e$)	$[\Delta T/c]_{e/c} (= [\Delta T/c]_e / [\Delta T/c]_c)$	
R/V	A	-29.9	-23.1	0.77	-0.13	-0.06	0.45
	B		-23.5	0.79		-0.08	0.58
出口	A	-146.5	-43.7	0.30	-0.38	-0.10	0.26
	B		-45.6	0.31		-0.09	0.24
2次側入口 *1	A	-22.4	-17.6	0.79	-0.23	-0.09	0.37
	B		-29.4	1.31		-0.07	0.32
2次側入口 *2	A	-17.0	-17.0	1.00	-0.10	-0.09	0.93
	B		-17.6	1.04		-0.07	0.71
2次側入口 *3	A	-22.4	-17.0	0.76	-0.23	-0.09	0.40
	B		-17.6	0.79		-0.07	0.31
2次側出口	A	-128.6	-46.2	0.36	-0.35	-0.07	0.20
	B		-39.1	0.30		-0.07	0.21
入口	A	-118.6	-25.0	0.21	-0.23	-0.05	0.23
	B		-35.4	0.30		-0.05	0.23
出口 *1	1A		-28.3	0.81		-0.30	0.51
	2A		-24.8	0.71		-0.19	0.32
	1B	-34.8	-20.3	0.58	-0.59	-0.11	0.19
	2B		-17.5	0.50		-0.24	0.41
DHX	1A		-48.5	1.04		-0.39	1.26
	2A		-48.7	1.05		-0.32	1.03
	1B	-46.6	-50.2	1.08	-0.31	-0.33	1.06
	2B		-45.0	0.97		-0.29	0.94
出口 *3	1A		-48.5	1.39		-0.39	0.66
	2A		-48.7	1.40		-0.32	0.54
	1B	-34.8	-50.2	1.44	-0.59	-0.33	0.56
	2B		-45.0	1.29		-0.29	0.49

単位 : 温度変化幅 ΔT (°C)、温度変化率 $\Delta T/t$ (°C/秒)

$\Delta T_{e/c}$ 又は $[\Delta T/t]_{e/c}$ が1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱過渡応力に乗じて応力評価を行う。なお、熱過渡条件は設計上厳しい条件となる手動スクラムの値を用いている。

* 1: スクラム直後の熱過渡条件と実測値との比較

* 2: 温度振動領域での熱過渡条件と実測値との比較

* 3: スクラム直後の熱過渡条件と温度振動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱過渡評価を「スクラム直後の熱過渡条件」、「温度振動領域での熱過渡条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱過渡条件」の3つに分けて評価した。

表 5.4-1(1/2) 手動スクラム試験時熱通過特性 (140MWt)

<温度上昇側>

評価部位	熱通過条件			温度変化幅		$\Delta T_{E/C} (= \Delta T_E / \Delta T_C)$	熱通過条件 ($\Delta T / t_{E/C}$)	温度変化率	
	ΔT_C	試験結果 (ΔT_E)	ΔT_E	試験結果 ($\Delta T / t_{E/C}$)	試験結果 ($\Delta T / t_{E/C}$)			$[\Delta T / t_{E/C}]_E = [\Delta T / t]_E / [\Delta T / t]_C$	
R/V	入口	49.7	15.6	0.31	0.12		0.07	0.54	
	出口	1.9	12.8	0.26	0.02		0.06	0.53	
IHX	2次側入口 *1	A	55.1	26.0	0.47	0.22	0.12	0.12	0.55
		B		27.5	0.50		0.12	0.12	0.55
	2次側入口 *2	A	17.2	16.7	0.97	0.08		0.09	1.13
		B		14.4	0.84		0.08	0.08	1.00
	2次側入口 *3	A	55.1	16.7	0.30	0.22		0.09	0.41
		B		14.4	0.26		0.08	0.08	0.36
	2次側出口	A	29.8	16.2	0.54	0.73		0.19	0.26
		B		18.5	0.62		0.16	0.16	0.22
	入口	A	22.7	13.5	0.59	0.12		0.06	0.53
		B		15.6	0.69		0.06	0.06	0.51
出口 *1	1A		38.5	0.53			0.20	0.67	
	2A		47.3	0.66			0.21	0.70	
	1B	72.2	40.5	0.56	0.30		0.18	0.60	
	2B		50.9	0.70			0.19	0.63	
出口 *2	1A		49.3	1.23			0.35	1.46	
	2A		43.9	1.10			0.28	1.17	
	1B	40.0	48.8	1.22	0.24		0.31	1.29	
	2B		39.7	0.99			0.15	0.63	
出口 *3	1A		49.3	0.68			0.35	1.17	
	2A		43.9	0.61			0.28	0.93	
	1B	72.2	48.8	0.68	0.30		0.31	1.03	
	2B		39.7	0.55			0.15	0.50	

単位：温度変化幅 ΔT (°C)、温度変化率 $\Delta T / t$ (°C/秒)

$\Delta T_{E/C}$ 又は $[\Delta T / t]_{E/C} > 1.0$ を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱通過能力に乗じて応力評価を行う。

* 1: スクラム直後の熱通過条件と実測値との比較

* 2: 温度振動領域での熱通過条件と実測値との比較

* 3: スクラム直後の熱通過条件と温度振動領域の実測値との比較

IHX 2次側入口温度及び DHX 出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱通過評価を「スクラム直後の熱通過条件」、「温度振動領域での熱通過条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱通過条件」の3つに分けて評価した。

表5.4-1(2/2) 手動スクラム試験時熱過渡特性(140MWt)

<温度降下側>

評価部位	熱過渡条件(ΔT _C)		温度変化幅		温度変化率	
	試験結果(ΔT _C)	試験結果(ΔT _E)	ΔT _{E/C} (=ΔT _E /ΔT _C)	熱過渡条件(ΔT/t) _C	試験結果(ΔT/t) _E	[ΔT/t] _{E/C} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _C)
R/V	A	-29.9	-12.0	0.40	-0.09	0.68
	B		-7.9	0.26	-0.07	0.55
出口	A	-146.5	-108.0	0.74	-0.23	0.61
	B		-114.8	0.78	-0.21	0.55
2次側入口*1	A	-22.4	-11.0	0.49	-0.09	0.37
	B		-11.0	0.49	-0.09	0.38
2次側入口*2	A	-17.0	-18.5	1.09	-0.10	1.00
	B		-17.4	1.02	-0.09	0.87
2次側入口*3	A	-22.4	-18.5	0.83	-0.10	0.43
	B		-17.4	0.78	-0.09	0.38
2次側出口	A	-128.6	-102.4	0.80	-0.13	0.37
	B		-103.0	0.80	-0.13	0.37
入口	A	-118.6	-96.0	0.81	-0.10	0.43
	B		-96.0	0.81	-0.10	0.43
出口*1	1A		-18.2	0.52	-0.44	0.75
	2A		-17.8	0.51	-0.40	0.68
	1B	-34.8	-18.3	0.53	-0.33	0.56
	2B		-18.7	0.54	-0.29	0.49
出口*2	1A		-54.0	1.16	-0.42	1.35
	2A		-53.1	1.14	-0.35	1.13
	1B	-46.6	-53.8	1.15	-0.36	1.16
	2B		-45.2	0.97	-0.22	0.71
出口*3	1A		-54.0	1.55	-0.42	0.71
	2A		-53.1	1.53	-0.35	0.59
	1B	-34.8	-53.8	1.55	-0.36	0.61
	2B		-45.2	1.30	-0.22	0.37

単位：温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{E/C}又は[ΔT/t]_{E/C}が1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱過渡応力に乗じて応力評価を行う。

*1:スクラム直後の熱過渡条件と実測値との比較

*2:温度変動領域での熱過渡条件と実測値との比較

*3:スクラム直後の熱過渡条件と温度変動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度変動の影響が顕著であることから、熱過渡評価を「スクラム直後の熱過渡条件」、「温度変動領域での熱過渡条件」及び「スクラム直後から温度変動領域での熱過渡条件」の3つに分けて評価した。

表5.5-1(1/2) 外部電源喪失試験時熱通過渡特性(140MWt)

<温度上昇側>

評価部位	温度変化幅			温度変化率		
	熱通過条件(ΔT _C)	試験結果(ΔT _E)	ΔT _{E/C} (=ΔT _E /ΔT _C)	熱通過条件(ΔT/t _C)	試験結果(ΔT/t _E)	[ΔT/t] _{E/C} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _C)
R/V	入口	49.7	19.8	0.40	0.12	0.08
	出口	1.9	0.0	0.00	0.02	0.00
IHX	2次側入口*1	55.1	32.1	0.58	0.22	0.14
	2次側入口*2	17.2	20.4	1.19	0.08	0.07
	2次側入口*3	55.1	17.9	1.04	0.22	0.08
	2次側入口	29.8	16.3	0.55	0.73	0.13
	入口	22.7	15.7	0.69	0.12	0.07
	出口*1	72.2	46.9	0.65	0.30	0.20
DHX	1A	48.0	43.6	0.60	0.19	0.19
	2A	40.0	48.0	0.66	0.22	0.22
	1B	40.0	53.6	1.34	0.24	0.33
	2B	40.0	47.1	1.18	0.24	0.29
	1A	72.2	49.5	1.24	0.30	0.32
	2B	72.2	39.6	0.99	0.30	0.22
出口*2	40.0	53.6	0.74	0.30	0.33	
出口*3	1A	72.2	47.1	0.65	0.29	0.29
	2B	72.2	49.5	0.69	0.30	0.32
			39.6	0.55	0.22	0.73

単位：温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{E/C}又は[ΔT/t]_{E/C}>1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱通過能力に乗じて応力評価を行う。なお、熱通過条件は設計上厳しい条件となる手動スクラムの値を用いている。

*1:スクラム直後の熱通過条件と実測値との比較

*2:温度振動領域での熱通過条件と実測値との比較

*3:スクラム直後の熱通過条件と温度振動領域の実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱通過評価を「スクラム直後の熱通過条件」、「温度振動領域での熱通過条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱通過条件」の3つに分けて評価した。

表5.5-1(2/2) 外部電源喪失試験時熱通過特性(140MWt)

<温度降下側>

評価部位	熱通過条件(ΔT _C)		温度変化幅 試験結果(ΔT _E)		ΔT _{E/C} (=ΔT _E /ΔT _C)		熱通過条件(ΔT/t) _C		温度変化率 試験結果(ΔT/t) _E		[ΔT/t] _{E/C} (=[ΔT/t] _E /[ΔT/t] _C)	
	A	B	-13.1	-9.7	0.44	-0.13	-0.13	-0.13	-0.10	-0.24	-0.08	-0.09
R/V	入口	-29.9	-13.1	-9.7	0.44	-0.13	-0.13	-0.10	-0.24	-0.08	-0.09	1.00
	出口	-146.5	-117.4	-116.0	0.80	-0.38	-0.38	-0.22	-0.22	-0.08	-0.09	0.77
IHX	2次側入口*1	A	-22.4	-11.7	0.52	-0.23	-0.23	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	0.63
		B	-22.4	-11.8	0.53	-0.23	-0.23	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	0.58
	2次側入口*2	A	-17.0	-20.1	1.18	-0.10	-0.10	-0.10	-0.09	-0.09	-0.10	1.00
		B	-17.0	-19.2	1.13	-0.10	-0.10	-0.10	-0.09	-0.09	-0.10	0.94
	2次側入口*3	A	-22.4	-20.1	0.90	-0.23	-0.23	-0.23	-0.09	-0.09	-0.10	0.43
		B	-22.4	-19.2	0.86	-0.23	-0.23	-0.23	-0.09	-0.09	-0.10	0.41
2次側出口	A	-128.6	-103.5	0.80	-0.35	-0.35	-0.35	-0.14	-0.14	-0.14	0.40	
	B	-128.6	-103.3	0.80	-0.35	-0.35	-0.35	-0.14	-0.14	-0.14	0.40	
DHX	入口	A	-118.6	-97.6	0.82	-0.23	-0.23	-0.23	-0.11	-0.11	-0.11	0.48
		B	-118.6	-97.8	0.82	-0.23	-0.23	-0.23	-0.10	-0.10	-0.10	0.43
	出口*1	1A		-19.7	0.57				-0.53	-0.53	-0.53	0.90
		2A		-19.1	0.55				-0.38	-0.38	-0.38	0.64
		1B		-20.2	0.58				-0.37	-0.37	-0.37	0.63
		2B		-19.9	0.57				-0.39	-0.39	-0.39	0.66
出口*2	1A		-57.6	1.24				-0.43	-0.43	-0.43	1.39	
	2A		-55.9	1.20				-0.40	-0.40	-0.40	1.29	
出口*3	1B		-54.8	1.18				-0.45	-0.45	-0.45	1.45	
	2B		-45.2	0.97				-0.26	-0.26	-0.26	0.84	
	1A		-57.6	1.66				-0.43	-0.43	-0.43	0.73	
	2A		-55.9	1.61				-0.40	-0.40	-0.40	0.68	
	1B		-54.8	1.57				-0.45	-0.45	-0.45	0.76	
	2B		-45.2	1.30				-0.26	-0.26	-0.26	0.44	

単位：温度変化幅ΔT(°C)、温度変化率ΔT/t(°C/秒)

ΔT_{E/C}又は[ΔT/t]_{E/C}>1.0を超えた部位は、その値を割増係数とし、設計熱通過係数に乘じて応力評価を行う。なお、熱通過条件は設計上厳しい条件となる手動スクラムの値を用いている。

* 1:スクラム直後の熱通過条件と実測値との比較

* 2:温度振動領域での熱通過条件と実測値との比較

* 3:スクラム直後の熱通過条件と実測値との比較

IHX2次側入口温度及びDHX出口温度については、温度振動の影響が顕著であることから、熱通過評価を「スクラム直後の熱通過条件」、「温度振動領域での熱通過条件」及び「スクラム直後から温度振動領域での熱通過条件」の3つに分けて評価した。

表 5.5-2 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較 (1次主循環流量の変動)

経過時間 (秒)	1次主循環流量 (ポンプモータ運転) (%)					
	100MW-2試験 (MK-II性能試験)			140MW試験 (MK-III性能試験)		
	Aグループ	Bグループ		Aグループ	Bグループ	
1	99.83	99.65		88.20		89.41
2	96.56	96.11		78.93		78.86
4	79.24	80.31		64.42		65.57
6	66.25	67.33		55.08		55.42
8	56.25	57.78		47.78		48.38
10	48.82	50.56		42.09		42.71
15	36.81	38.26		33.13		33.53
20	29.03	30.24		31.56		31.99
25	23.33	24.17		21.72		22.66
30	19.06	19.69		18.41		19.39
60	15.00	17.26		16.33		17.01
120	13.96	17.74		16.03		16.91
240	14.41	17.12		15.35		16.46
600	14.27	17.01		15.20		16.18

* 定格流量 (MK-II : 1260 m³/h、MK-III : 1538m³/h) を100%とした値を示す。

表 5.5-3 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較 (2次主循環流量の変動)

経過時間 (分)	2次主冷却系自然循環流量 (%)					
	100MW-2試験 (MK-II性能試験)		140MW試験 (MK-III性能試験)			
	Aグループ	Bグループ	Aグループ	Bグループ	Aグループ	Bグループ
1	10.03	9.65	11.63	11.43		
2	9.49	9.21	11.08	11.11		
4	9.68	9.43	11.25	11.41		
6	10.19	10.00	11.33	11.54		
8	10.48	10.19	11.08	11.09		
10	9.78	9.27	10.41	10.48		
15	7.43	7.81	9.00	9.08		
20	6.67	6.73	7.98	7.80		
25	5.49	5.52	6.88	7.10		
30	5.68	5.58	6.33	6.56		

* 定格流量 (MK-II : 1260 m³/h、MK-III : 1348m³/h) を100%とした値を示す。

表5.7-1(1/3) 手動スクラム試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

試験年月日:平成15年9月26日

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
1	原子炉熱出力 指示記録計 熱出力測定システム	-	A-712	423	MW	13:04	71	15:25	1
2	線形出力系 Ch.6	-	A-710	-	MW	13:03	69.16	15:24	0.58
3	線形出力系 Ch.7	-	A-712	423	%	13:04	49	15:25	0
4	線形出力系 Ch.8	-	A-712	423	%	13:04	49	15:25	0
5	制御棒位置(CR1)	-	A-712	423	mm	13:04	464.0	15:25	0
6	制御棒位置(CR2)	-	A-712	423	mm	13:04	464.0	15:25	0
7	制御棒位置(CR3)	-	A-712	423	mm	13:04	464.0	15:25	0
8	制御棒位置(CR4)	-	A-712	423	mm	13:04	464.1	15:25	0
9	制御棒位置(CR5)	-	A-712	423	mm	13:04	464.0	15:25	0
10	制御棒位置(CR6)	-	A-712	423	mm	13:04	463.0	15:25	0
11	原子炉入口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:04	349.1	15:25	318.8
12	原子炉出口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:04	422.5	15:25	326.2
13	原子炉入口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:04	349.1	15:25	321.1
14	原子炉出口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:04	421.8	15:25	326.0
15	1次主冷却系流量(A)	FR31.1-1A	A-712	424	m ³ /h	13:04	1550	15:25	175
16	1次主冷却系流量(B)	FR31.1-1B	A-712	424	m ³ /h	13:04	1539	15:25	204
17	1次主循環ポンプ回転数(A)	-	A-712	424	rpm	13:04	905	15:25	120
18	1次主循環ポンプ回転数(B)	-	A-712	424	rpm	13:04	890	15:25	122
19	1次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TR31.1-100A	A-504	214	°C	13:07	352.7	15:26	321.8
20	1次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TR31.1-100B	A-504	214	°C	13:07	350.6	15:26	322.7
21	原子炉カバ-ガス圧力	PR36.1-7	A-712	424	kPa	13:04	1.92	15:25	1.71
22	炉容器Na液位(長尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:04	-2.4	15:25	-21.4
23	炉容器Na液位(短尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:04	1.4	15:25	-18.4
24	1次主循環ポンプNa液位(A)	LIS31.1-4A	A-712	424	cm	13:04	-10	15:25	-14
25	1次主循環ポンプNa液位(B)	LIS31.1-4B	A-712	424	cm	13:04	-6	15:25	-16

表5.7-1(2/3) 手動スクラム試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
26	オハープローガラムNa液位(A)	LIS31.1-5A	A-712	424	cm	13:04	-158	15:25	-20
27	オハープローガラムNa液位(B)	LIS31.1-5B	A-712	424	cm	13:04	-165	15:25	-25
28	主冷却器入口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:04	405	15:25	325
29	主冷却器出口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	290
30	主冷却器出口Na温度(1A)	指示記録計	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	295
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	322.6	15:42	289.3
31	主冷却器出口Na温度(2A)	指示記録計	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	295
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	324.0	15:42	291.8
32	主冷却器入口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:04	402	15:25	325
33	主冷却器出口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	295
34	主冷却器出口Na温度(1B)	指示記録計	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	295
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	326.7	15:42	294.4
35	主冷却器出口Na温度(2B)	指示記録計	A-712	425	°C	13:04	325	15:25	295
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	327.0	15:42	293.6
36	2次主冷却系流量(A)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:04	1330	15:25	40
37	2次主冷却系流量(B)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:04	1330	15:25	40
38	2次主循環ポンプ回転数(A)	—	A-712	425	rpm	13:04	960	15:25	0
39	2次主循環ポンプ回転数(B)	—	A-712	425	rpm	13:04	970	15:25	0
40	2次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TI31.2-6A	A-712	425	°C	13:04	330	15:25	305
	2次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TI31.2-6B	A-712	425	°C	13:04	335	15:25	305
42	主送風機ベーン開度(1A)	指示計	A-712	425	%	13:04	11.5	15:25	0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	10.8	15:42	0.1
43	主送風機ベーン開度(2A)	指示計	A-712	425	%	13:04	13.0	15:25	1.0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	12.4	15:42	1.0
44	主送風機ベーン開度(1B)	指示計	A-712	425	%	13:04	10.0	15:25	0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:08	9.7	15:42	0.4

表5.7-1(3/3) 手動スクラム試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称		Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
							時刻	測定値	時刻	測定値
45	主送風機ベーン開度(2B)	指示計	A05-θ-V	A-712	425	%	13:04	11.0	15:25	0
		μXL画面	-	-	A-712	458	°C	13:08	11.0	15:42
46	主冷却器入口空気温度(1A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	26.5	15:30	31
47	主冷却器入口空気温度(2A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	27.1	15:30	32
48	主冷却器入口空気温度(1B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	26.5	15:30	32
49	主冷却器入口空気温度(2B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	28.4	15:30	33
50	主冷却器出口空気温度(1A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	340.9	15:30	225
51	主冷却器出口空気温度(2A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	340.1	15:30	212
52	主冷却器出口空気温度(1B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	342.4	15:30	233
53	主冷却器出口空気温度(2B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:05	340.9	15:30	224
54	主冷却器室(A)周囲温度		-	S-403	687	°C	13:09	22.0	15:28	21.6
55	主冷却器室(B)周囲温度		-	S-419	688	°C	13:11	22.9	15:29	21.8

表5.7-2(1/3) 外部電源喪失試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

試験年月日:平成15年10月6日

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
1	原子炉熱出力 指示記録計 熱出力測定システム	-	A-712	423	MW	13:03	70	14:40	1.4
2	線形出力系 Ch.6	-	A-710	-	MW	13:14	68.89	14:40	1.23
3	線形出力系 Ch.7	-	A-712	423	%	13:04	47.5	14:43	0
4	線形出力系 Ch.8	-	A-712	423	%	13:04	48.5	14:43	0
5	制御棒位置(CR1)	-	A-712	423	mm	13:05	466.1	14:44	0
6	制御棒位置(CR2)	-	A-712	423	mm	13:05	467.0	14:44	0
7	制御棒位置(CR3)	-	A-712	423	mm	13:06	467.0	14:44	0
8	制御棒位置(CR4)	-	A-712	423	mm	13:06	467.0	14:44	0
9	制御棒位置(CR5)	-	A-712	423	mm	13:06	467.0	14:44	0
10	制御棒位置(CR6)	-	A-712	423	mm	13:06	467.2	14:44	0
11	原子炉入口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:06	349.1	14:44	325.6
12	原子炉出口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:06	422.4	14:44	337.3
13	原子炉入口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:06	349.3	14:44	326.6
14	原子炉出口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:06	421.3	14:44	337.3
15	1次主冷却系流量(A)	FR31.1-1A	A-712	424	m ³ /h	13:07	1555	14:44	180
16	1次主冷却系流量(B)	FR31.1-1B	A-712	424	m ³ /h	13:07	1551	14:44	200
17	1次主循環ポンプ回転数(A)	-	A-712	424	rpm	13:07	900	14:45	120
18	1次主循環ポンプ回転数(B)	-	A-712	424	rpm	13:07	885	14:45	125
19	1次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TR31.1-100A	A-504	214	°C	13:07	352.7	14:45	331.2
20	1次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TR31.1-100B	A-504	214	°C	13:07	350.6	14:45	332.4
21	原子炉カバ-ガス圧力	PR36.1-7	A-712	424	kPa	13:07	1.59	14:45	1.82
22	炉容器Na液位(長尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:08	1.1	14:45	-18.3
23	炉容器Na液位(短尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:08	-2.5	14:45	-15.1
24	1次主循環ポンプNa液位(A)	LIS31.1-4A	A-712	424	cm	13:08	-9	14:45	-15.0
25	1次主循環ポンプNa液位(B)	LIS31.1-4B	A-712	424	cm	13:08	-6	14:45	-16.0

表5.7-2(2/3) 外部電源喪失試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
26	オハローローカラムNa液位(A)	LIS31.1-5A	A-712	424	cm	13:09	-143	14:46	-17
27	オハローローカラムNa液位(B)	LIS31.1-5B	A-712	424	cm	13:09	-135	14:46	-20
28	主冷却器入口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:09	406	14:47	340
29	主冷却器出口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
30	主冷却器出口Na温度(1A)	指示記録計	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	323.7	14:50	317.3
31	主冷却器出口Na温度(2A)	指示記録計	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	323.7	14:50	319.9
32	主冷却器入口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:10	402	14:47	340
33	主冷却器出口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
34	主冷却器出口Na温度(1B)	指示記録計	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	326.7	14:50	318.5
35	主冷却器出口Na温度(2B)	指示記録計	A-712	425	°C	13:10	325	14:47	315
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	326.5	14:50	316.8
36	2次主冷却系流量(A)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:11	1350	14:48	50
37	2次主冷却系流量(B)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:11	1350	14:48	50
38	2次主循環ポンプ回転数(A)	—	A-712	425	rpm	13:12	950	14:50	0
39	2次主循環ポンプ回転数(B)	—	A-712	425	rpm	13:12	970	14:50	0
40	2次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TI31.2-6A	A-712	425	°C	13:13	330	14:50	315
	2次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TI31.2-6B	A-712	425	°C	13:13	335	14:50	315
42	主送風機ベーン開度(1A)	指示計	A-712	425	%	13:13	11.0	14:50	0
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	10.2	14:50	0.1
43	主送風機ベーン開度(2A)	指示計	A-712	425	%	13:13	11.0	14:50	0
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	11.4	14:50	0.3
44	主送風機ベーン開度(1B)	指示計	A-712	425	%	13:13	9.0	14:50	0
	μXL画面		A-712	458	°C	13:12	9.0	14:50	0.4

表5.7-2(3/3) 外部電源喪失試験(70MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
45	主送風機ベーン開度(2B) 指示計 μXL画面	A05-θ-V	A-712	425	%	13:13	10.0	14:50	0
46	主冷却器入口空気温度(1A)	-	A-712	458	°C	13:12	10.2	14:50	0.5
47	主冷却器入口空気温度(2A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	23.1	14:50	28.4
48	主冷却器入口空気温度(1B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	22.5	14:50	29.0
49	主冷却器入口空気温度(2B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	23.1	14:50	29.0
50	主冷却器出口空気温度(1A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	24.4	14:50	29.0
51	主冷却器出口空気温度(2A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	340.3	14:50	230.3
52	主冷却器出口空気温度(1B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	339.6	14:50	206.3
53	主冷却器出口空気温度(2B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:13	342.9	14:50	219.0
54	主冷却機室(A)周囲温度	-	S-403	687	°C	13:13	342.9	14:50	213.0
55	主冷却機室(B)周囲温度	-	S-419	688	°C	13:13	18.6	14:50	17.6
					°C	13:13	18.6	14:50	17.5

表5.7-3(1/3) 手動スクラム試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

試験年月日:平成15年10月31日

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
1	原子炉熱出力 指示記録計 熱出力測定システム	-	A-712	423	MW	13:02	140	15:14	1.5
2	線形出力系 Ch.6	-	A-710	-	MW	13:02		15:14	
3	線形出力系 Ch.7	-	A-712	423	%	13:02	99	15:14	0
4	線形出力系 Ch.8	-	A-712	423	%	13:02	99	15:14	0
5	制御棒位置(CR1)	-	A-712	423	mm	13:05	515.2	15:14	0
6	制御棒位置(CR2)	-	A-712	423	mm	13:05	514.9	15:14	0
7	制御棒位置(CR3)	-	A-712	423	mm	13:05	514.9	15:14	0
8	制御棒位置(CR4)	-	A-712	423	mm	13:05	515.0	15:14	0
9	制御棒位置(CR5)	-	A-712	423	mm	13:05	514.9	15:14	0
10	制御棒位置(CR6)	-	A-712	423	mm	13:05	514.9	15:14	0
11	原子炉入口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:05	351.7	15:14	333.1
12	原子炉出口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:05	497.3	15:14	350.4
13	原子炉入口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:05	352.0	15:14	341.3
14	原子炉出口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:05	496.0	15:14	349.8
15	1次主冷却系流量(A)	FR31.1-1A	A-712	424	m ³ /h	13:05	1523	15:14	171
16	1次主冷却系流量(B)	FR31.1-1B	A-712	424	m ³ /h	13:05	1532	15:14	201
17	1次主循環ポンプ回転数(A)	-	A-712	424	rpm	13:05	905	15:14	120
18	1次主循環ポンプ回転数(B)	-	A-712	424	rpm	13:05	885	15:14	120
19	1次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TR31.1-100A	A-504	214	°C	13:06	354.7	15:15	338.3
20	1次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TR31.1-100B	A-504	214	°C	13:06	353.1	15:15	341.6
21	原子炉カバークラス圧力	PR36.1-7	A-712	424	kPa	13:06	2.03	15:15	1.24
22	炉容器Na液位(長尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:06	-3.5	15:15	-17.6
23	炉容器Na液位(短尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:06	0.2	15:15	-13.8
24	1次主循環ポンプNa液位(A)	LIS31.1-4A	A-712	424	cm	13:06	-10	15:15	-15
25	1次主循環ポンプNa液位(B)	LIS31.1-4B	A-712	424	cm	13:06	-7	15:15	-16

表5.7-3(2/3) 手動スクラム試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
26	オ-ハ-712-カラムNa液位(A)	LIS31.1-5A	A-712	424	cm	13:06	-150	15:15	-20
27	オ-ハ-712-カラムNa液位(B)	LIS31.1-5B	A-712	424	cm	13:06	-140	15:15	-20
28	主冷却器入口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:08	470	15:15	350
29	主冷却器出口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:08	310	15:15	340
30	主冷却器出口Na温度(1A)	指示記録計	TRA31.2-2A	425	°C	13:08	310	15:15	340
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	308.7	15:14	337.3
31	主冷却器出口Na温度(2A)	指示記録計	TRA31.2-2A	425	°C	13:08	310	15:15	340
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	308.6	15:14	337.1
32	主冷却器入口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:08	470	15:15	350
33	主冷却器出口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:08	310	15:15	340
34	主冷却器出口Na温度(1B)	指示記録計	TRA31.2-2B	425	°C	13:08	310	15:15	340
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	314.4	15:14	337.1
35	主冷却器出口Na温度(2B)	指示記録計	TRA31.2-2B	425	°C	13:08	310	15:15	340
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	314.4	15:14	336.8
36	2次主冷却系流量(A)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:08	1330	15:15	30
37	2次主冷却系流量(B)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:08	1330	15:15	30
38	2次主循環ポンプ回転数(A)	—	A-712	425	rpm	13:08	960	15:15	0
39	2次主循環ポンプ回転数(B)	—	A-712	425	rpm	13:08	970	15:15	0
40	2次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TI31.2-6A	A-712	425	°C	13:08	315	15:15	310
41	2次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TI31.2-6B	A-712	425	°C	13:08	322	15:15	318
42	主送風機ベーン開度(1A)	指示計	A05-θ-V	425	%	13:08	34	15:15	0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	33.9	15:14	0.2
43	主送風機ベーン開度(2A)	指示計	A05-θ-V	425	%	13:08	34	15:15	0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	33.8	15:14	0.3
44	主送風機ベーン開度(1B)	指示計	A05-θ-V	425	%	13:08	31	15:15	0
		μXL画面	A-712	458	°C	13:11	30.9	15:14	0.4

表5.7-3(3/3) 手動スクラム試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
45	主送風機ベーン開度(2B) 指示計 μXL画面	A05-θ-V	A-712	425	%	13:08	32	15:15	0
						13:11	31.2	15:14	0.5
46	主冷却器入口空気温度(1A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	21.3	15:15	37.9
47	主冷却器入口空気温度(2A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	20.7	15:15	39.7
48	主冷却器入口空気温度(1B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	20.7	15:15	40.3
49	主冷却器入口空気温度(2B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	21.3	15:15	41.6
50	主冷却器出口空気温度(1A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	311.5	15:15	223.5
51	主冷却器出口空気温度(2A)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	310.0	15:15	219.8
52	主冷却器出口空気温度(1B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	317.2	15:15	213.4
53	主冷却器出口空気温度(2B)	-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	314.9	15:15	217.5
54	主冷却機室(A)周囲温度	-	S-403	687	°C	13:10	16.6	15:10	16.5
55	主冷却機室(B)周囲温度	-	S-419	688	°C	13:10	16.8	15:10	16.7

表5.7-4(1/3) 外部電源喪失試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

試験年月日:平成15年11月11日

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
1	原子炉熱出力 指示記録計 熱出力測定システム	-	A-712	423	MW	13:04	139	14:55	1.4
2	線形出力系 Ch.6	-	A-710	-	MW	13:12	138.65	14:54	1.57
3	線形出力系 Ch.7	-	A-712	423	%	13:04	98.5	14:55	2
4	線形出力系 Ch.8	-	A-712	423	%	13:04	98.5	14:55	1
5	制御棒位置(CR1)	-	A-712	423	mm	13:04	513.9	14:55	0
6	制御棒位置(CR2)	-	A-712	423	mm	13:04	514.1	14:55	0
7	制御棒位置(CR3)	-	A-712	423	mm	13:04	513.9	14:55	0
8	制御棒位置(CR4)	-	A-712	423	mm	13:04	513.8	14:55	0
9	制御棒位置(CR5)	-	A-712	423	mm	13:04	513.2	14:55	0
10	制御棒位置(CR6)	-	A-712	423	mm	13:04	513.8	14:55	0
11	原子炉炉入口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:04	350.1	14:55	338.5
12	原子炉炉出口冷却材温度(A)	TR31.1-5A/8A	A-712	424	°C	13:04	496.0	14:55	354.7
13	原子炉炉入口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:04	350.6	14:55	343.1
14	原子炉炉出口冷却材温度(B)	TR31.1-5B/8B	A-712	424	°C	13:04	494.9	14:55	354.2
15	1次主冷却系流量(A)	FR31.1-1A	A-712	424	m ³ /h	13:04	1547	14:55	177
16	1次主冷却系流量(B)	FR31.1-1B	A-712	424	m ³ /h	13:04	1549	14:55	202
17	1次主循環ポンプ回転数(A)	-	A-712	424	rpm	13:04	900	14:55	120
18	1次主循環ポンプ回転数(B)	-	A-712	424	rpm	13:04	880	14:55	120
19	1次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TR31.1-100A	A-504	214	°C	13:07	354.1	14:56	344.6
20	1次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TR31.1-100B	A-504	214	°C	13:07	351.9	14:56	345.6
21	原子炉炉力バーガス圧力	PR36.1-7	A-712	424	kPa	13:04	1.9	14:55	1.8
22	炉容器Na液位(長尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:04	-4.5	14:55	-15.3
23	炉容器Na液位(短尺)	LR31.1-1	A-712	424	cm	13:04	-0.1	14:55	-11.2
24	1次主循環ポンプNa液位(A)	LIS31.1-4A	A-712	424	cm	13:08	-10	14:58	-15
25	1次主循環ポンプNa液位(B)	LIS31.1-4B	A-712	424	cm	13:08	-7	14:58	-16

表5.7-4(2/3) 外部電源喪失試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称	Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
						時刻	測定値	時刻	測定値
26	オーバーフローガラムNa液位(A)	LIS31.1-5A	A-712	424	cm	13:08	-148	14:58	-20
27	オーバーフローガラムNa液位(B)	LIS31.1-5B	A-712	424	cm	13:08	-140	14:58	-20
28	主冷却器入口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:08	470	14:58	358
29	主冷却器出口Na温度(A)	TR31.2-3A	A-712	425	°C	13:08	310	14:58	343
30	主冷却器出口Na温度(1A)	TRA31.2-2A	A-712	425	°C	13:08	310	14:58	342
	指示記録計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	309.1	14:56	344.2
31	主冷却器出口Na温度(2A)	TRA31.2-2A	A-712	425	°C	13:08	310	14:58	342
	指示記録計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	308.5	14:56	344.4
32	主冷却器入口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:08	470	14:58	358
33	主冷却器出口Na温度(B)	TR31.2-3B	A-712	425	°C	13:08	315	14:58	342
34	主冷却器出口Na温度(1B)	TRA31.2-2B	A-712	425	°C	13:08	315	14:58	341
	指示記録計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	314.6	14:56	342.7
35	主冷却器出口Na温度(2B)	TRA31.2-2B	A-712	425	°C	13:08	315	14:58	341
	指示記録計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	314.3	14:56	342.8
36	2次主冷却系流量(A)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:08	1340	14:58	40
37	2次主冷却系流量(B)	FR31.2-1	A-712	425	m ³ /h	13:08	1340	14:58	40
38	2次主循環ポンプ回転数(A)	-	A-712	425	rpm	13:08	960	14:58	0
39	2次主循環ポンプ回転数(B)	-	A-712	425	rpm	13:08	970	14:58	0
40	2次主循環ポンプNa軸受温度(A)	TI31.2-6A	A-712	425	°C	13:08	315	14:58	320
	2次主循環ポンプNa軸受温度(B)	TI31.2-6B	A-712	425	°C	13:08	322	14:58	320
42	主送風機ベーン開度(1A)	A05-θ-V	A-712	425	%	13:08	33.0	14:58	0
	指示計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	32.1	14:56	0.3
43	主送風機ベーン開度(2A)	A05-θ-V	A-712	425	%	13:08	33.0	14:58	0
	指示計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	32.4	14:56	0.5
44	主送風機ベーン開度(1B)	A05-θ-V	A-712	425	%	13:08	29.0	14:58	0
	指示計 μXL画面	-	A-712	458	°C	13:11	28.9	14:56	0.6

表5.7-4(3/3) 外部電源喪失試験(140MWt)におけるプラント各部のプロセス量

No.	名称		Tag No.	場所	盤番号	単位	試験開始前		試験終了時	
							時刻	測定値	時刻	測定値
45	主送風機ベーン開度(2B)	指示計	A05-θ-V	A-712	425	%	13:08	30.0	14:58	0
		μXL画面	-	-	A-712	458	°C	13:11	29.5	14:56
46	主冷却器入口空気温度(1A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	15.0	14:58	33.9
47	主冷却器入口空気温度(2A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	15.7	14:58	36.3
48	主冷却器入口空気温度(1B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	14.4	14:58	33.9
49	主冷却器入口空気温度(2B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	15.7	14:58	40.0
50	主冷却器出口空気温度(1A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	309.3	14:58	241.4
51	主冷却器出口空気温度(2A)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	308.5	14:58	225.7
52	主冷却器出口空気温度(1B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	317.2	14:58	234.3
53	主冷却器出口空気温度(2B)		-	A-712	JOYDAS	°C	13:08	315.7	14:58	232.4
54	主冷却器室(A)周囲温度		-	S-403	687	°C	13:09	11.4	14:58	12.4
55	主冷却器室(B)周囲温度		-	S-419	688	°C	13:11	11.5	15:00	12.8

表5.10-1 主中間熱交換器及び主冷却器の簡易応力評価結果

(1) ホットレグ (高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針による評価)

評価部位	設計時評価												MK-III性能試験実測データに基づく評価					
	ひずみの制限						ひずみの制限						応力増倍係数			ひずみの制限		
	1次+2次応力の制限			累積非弾性ひずみの制限			Saの制限			累積非弾性ひずみの制限			Saの制限			累積非弾性ひずみの制限		
	Sn* (35mH)	Sn (35m)	Sn' (2.5(35m))	P+Q' (Sa)	$\epsilon_{BC} + \epsilon_{mBF} + \epsilon_{bBF}$ (0.01)	領域(E, S1, S2, P)	Sn* (35mH)	Sn (35m)	Sn' (35m)	P+Q' (Sa)	$\epsilon_{BC} + \epsilon_{mBF} + \epsilon_{bBF}$ (0.01)	領域(E, S1, S2, P)	Sn* (35mH)	Sn (35m)	Sn' (35m)	P+Q' (Sa)	$\epsilon_{BC} + \epsilon_{mBF} + \epsilon_{bBF}$ (0.02)	領域(E, S1, S2, P)
主中間熱交換器 上節サポートリング	-	32.7 (28.2)	32.7 (70.7)	14.1 (28.2)	-	-	-	42.9 (28.2)	18.5 (28.2)	-	-	-	-	42.9 (70.7)	18.5 (28.2)	-	-	-
主中間熱交換器 2次側上部隔壁	-	18.0 (34.5)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注: Sn ≤ 2.5(35m)及びSn' ≤ 35mを満足すれば、Sn ≤ 35mを満足することを要しない。よって、主中間熱交換器上部サポートリングは、1次+2次応力の制限を満足している。

(2) コールドレグ (試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準による評価)

評価部位	設計時評価												MK-III性能試験実測データに基づく評価					
	1次+2次応力の制限						1次+2次応力の制限						応力増倍係数			1次+2次応力の制限		
	I _A , II _A		III _{AS}		IV _{AS}		I _A , II _A		III _{AS}		IV _{AS}		I _A , II _A			III _{AS}		
	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	Sn' (35m)	Sn (35m)	
主中間熱交換器 2次入口ノズル	12.2 (37.0)	-	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	1.2 (36.3)	
主冷却器 出口集合スタブ	7.2 (48.4)	-	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	1.8 (48.3)	
主冷却器 出口集合管 ドレン管付根	15.5 (48.3)	-	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	0.3 (48.2)	

カッコ内は許容値

表 5.11-1 原子炉冷却材温度制御設備の最終設定一覧 (MK-ⅢとMK-Ⅱの比較)

項目	MK-Ⅲ設定値	MK-Ⅱ設定値	備考
比例ゲイン*	主送風機運転中	1.0	図 6.1-1 参照
	主送風機停止中	3.0	
	スクラム時	3.3	
非線形補償ゲイン	0.45~1.86	0.45~3.00	
積分時間	80 秒	80 秒	
スクラム時温度設定値	317℃	370℃	
インレットベーン 開度制限値	上限値	6.5%	
	下限値	0%	

*比例ゲイン=固定ゲイン×非線形補償ゲイン

表6.1-1 MK-Ⅲ性能試験予測解析のためのMimir-N2入力データの見直し一覧表

No.	入力項目	単位	見直し前	見直し後	備考
1	ベーン制御信号ヒステリシス	mA	0.56	0.50	単体機能試験結果を反映 (下図の①)
2		mA	0.28	0.25	単体機能試験結果を反映 (下図の②)
3	主送風機ブレーキ時間(ブレーキ作動開始～主送風機停止)	sec	13.6	8.7	総合機能試験結果を反映
4	ベーン閉鎖時間(0～100%)	sec	7.0	8.0	単体機能試験結果
5	ダンパ閉鎖時間(0～100%)	sec	36.0	11.7	単体機能試験結果

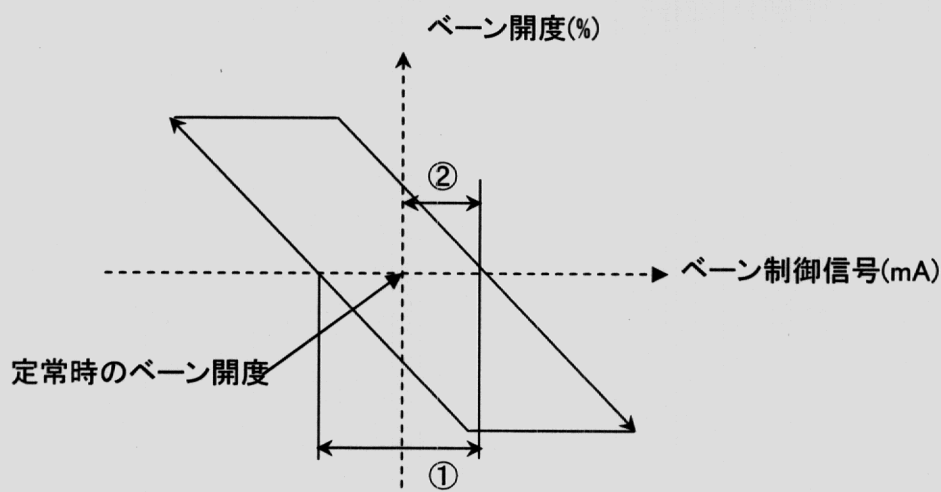


表 6.1-2 MK-III性能試験（過渡応答試験）の予測解析条件

項目		解析条件	備考
スクラム事象		外部電源喪失及び手動スクラム	性能試験と同じ
原子炉熱出力		70MW、140MW	
外気温		20℃	性能試験時の予想値
原子炉冷却材温度制御設備の設定条件	比例ゲイン* ¹	固定ゲイン：1.2* ²	図 6.1-1 参照
		非線形補償ゲイン：0.45～1.86	
	積分時間	80 秒	
	ベーン開度制限値	0～8.5%* ³	
	異常時温度設定値	300℃	定格運転時の設計温度

* 1 : 「常陽」原子炉冷却材温度制御設備はPI制御方式（比例ゲイン+積分要素）を採用している。比例ゲインは、固定ゲインと非線形補償ゲインを掛け合わせたものとなっており、原子炉スクラム等のプラント状態に応じて固定ゲインが自動的に切り替わる（通常運転時：0.8、スクラム時：1.2（スクラム時はDHXが強制通風制御から自然通風制御に切り替わるため、応答性を上げるために比例ゲインを大きくしている））。

* 2 : MK-IIIでは、DHXの除熱能力を向上させたことからMK-IIと同じ比例ゲインでは温度応答特性（応答速度）が大きくなり過ぎてしまう可能性があるため、「Mimir-N2」を用いて比例ゲインのサーベイ解析を行い、固定ゲインをMK-IIの3.3から1.2に変更した。

* 3 : スクラム時（自然通風制御時）の制御性改善のため、ベーン開度制限値を設けている。

表 7.2-1 スクラム時のベーン開度最大・最小値、入口ダンパ開度最小値（実績値）

項目	D H X (1A)		D H X (2A)	D H X (1B)		D H X (2B)
	上限値	下限値		上限値	下限値	
70MW _t 手動スクラム試験	ベーン開度	9.2%	9.5%	9.7%	8.7%	
	入口ダンパ開度	0.1%	0.3%	0.4%	0.5%	
70MW _t 外部電源喪失試験	ベーン開度	71.0%*1	74.0%	76.5%	59.0%	
	入口ダンパ開度	9.2%	9.4%	9.5%	8.9%	
140MW _t 手動スクラム試験	ベーン開度	0.1%	0.3%	0.4%	0.5%	
	入口ダンパ開度	71.0%*1	74.5%	78.3	59.0%	
140MW _t 外部電源喪失試験	ベーン開度	9.2%	10.0%	9.9%	8.4%	
	入口ダンパ開度	0.1%	0.3%	0.4%	0.5%	
140MW _t 外部電源喪失試験	ベーン開度	71.5%*1	76.0%	78.5%	60.5%	
	入口ダンパ開度	9.2%	9.9%	10.2%	9.1%	
140MW _t 外部電源喪失試験	ベーン開度	0.3%	0.5%	0.6%	0.7%	
	入口ダンパ開度	71.5%*1	76.0%	78.0%	0.5%*2	

* 1 : スクラム時ではベーンによる微開制御を行うため、ベーン全閉時はダンパ領域に入りすぎないようにベーン全閉を下限值としている。ベーン全閉時は、ベーンとダンパ間にオーバーラップ領域を設けているため、入口ダンパは 60～80%程度まで閉となる。

* 2 : 本試験時 2B 入口ダンパは、温度制御設備のソフト上の問題により開度下限設定が働かず全閉となっている。

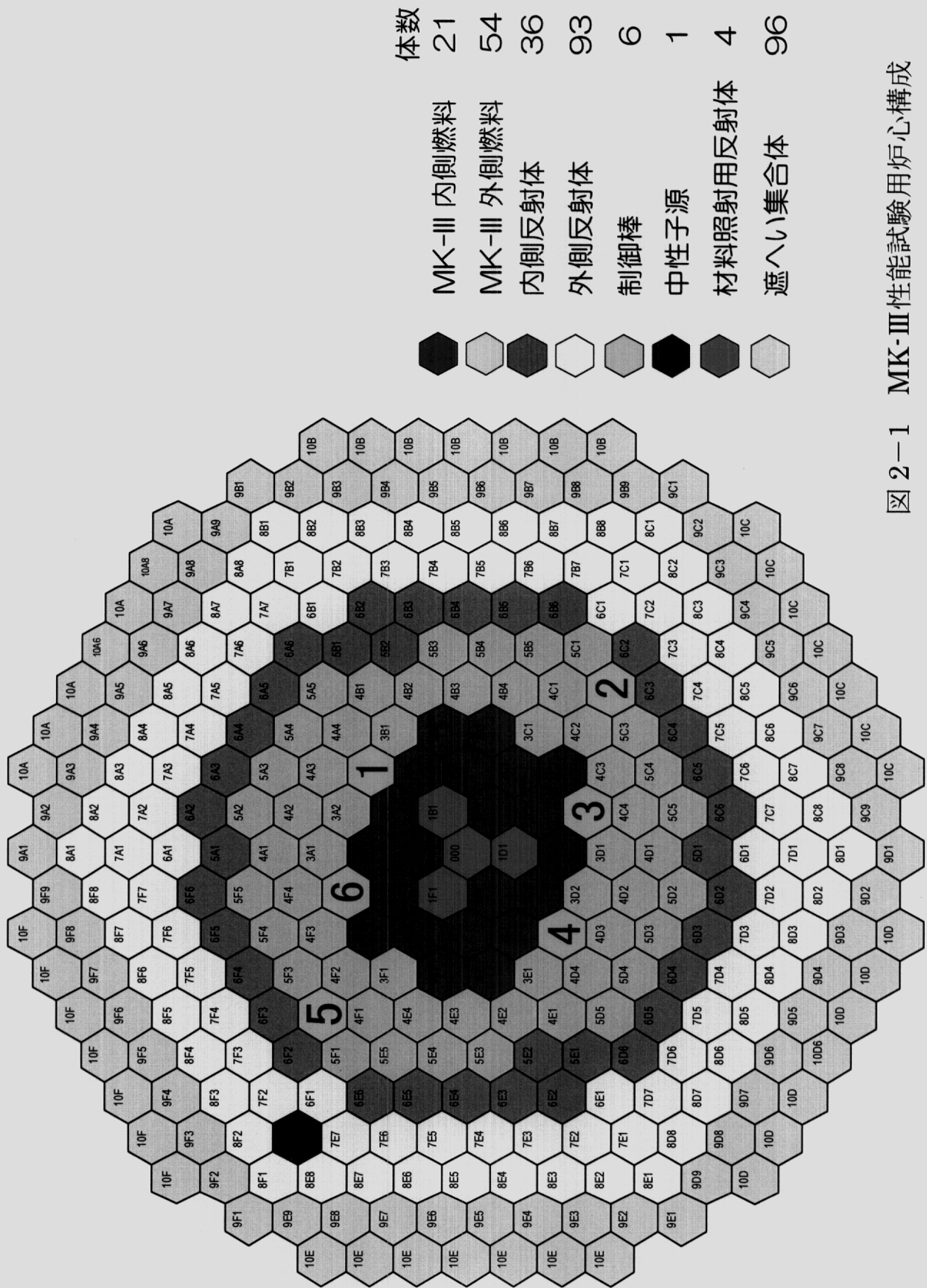


図 2-1 MK-III性能試験用炉心構成

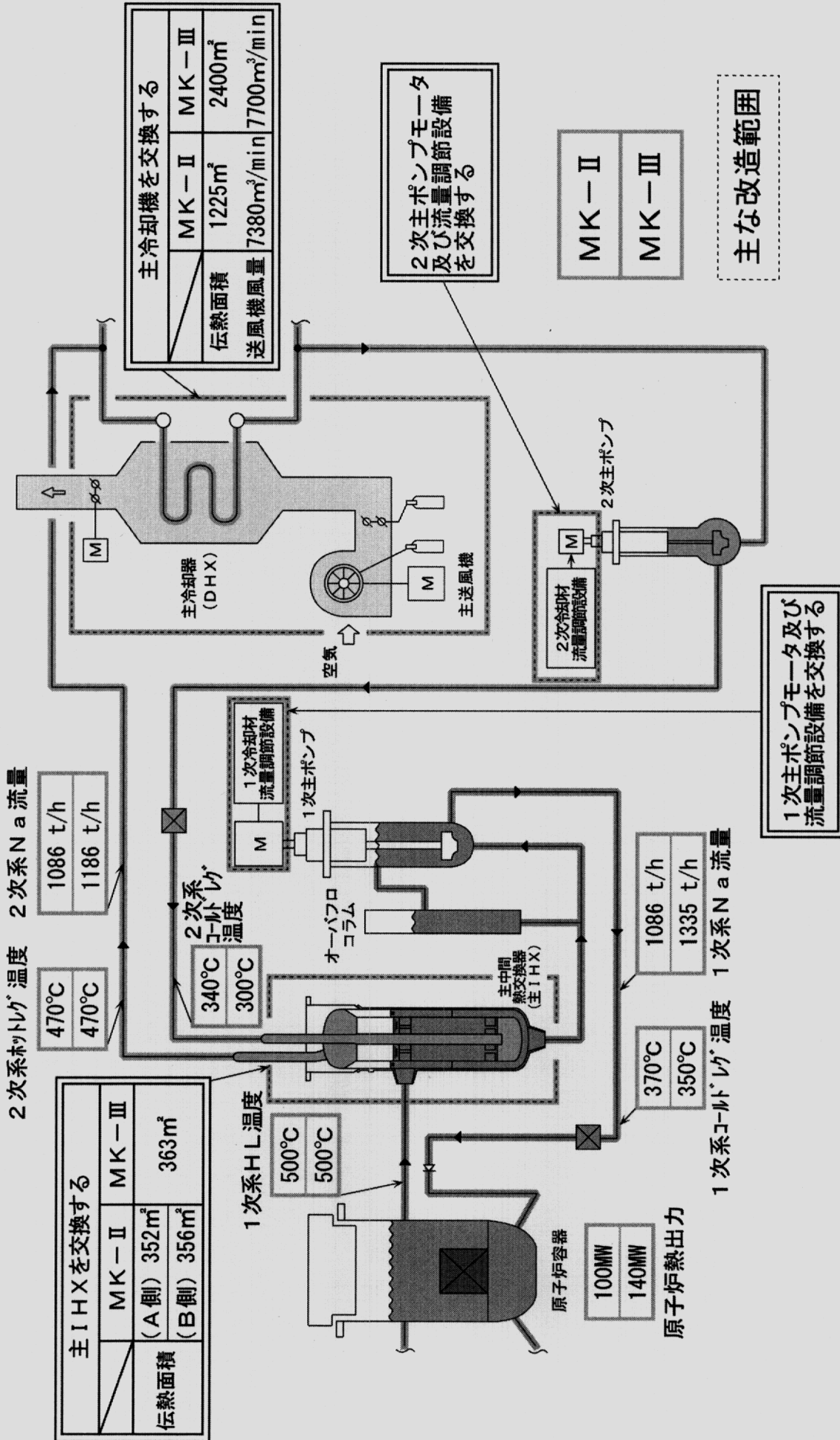


図2-2 MK-III冷却系改造の概要と範囲

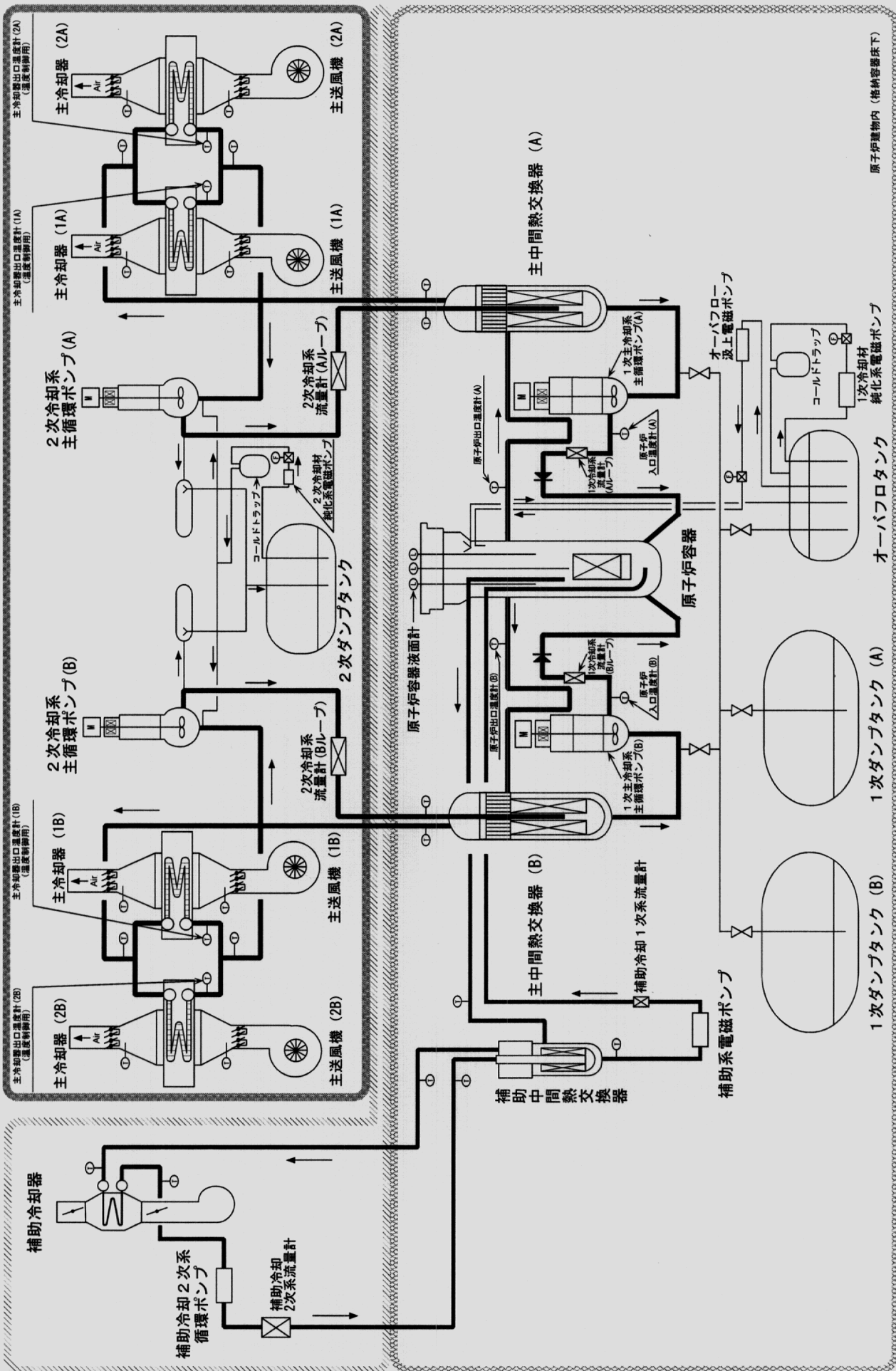


図2-3 「常陽」冷却系系統図

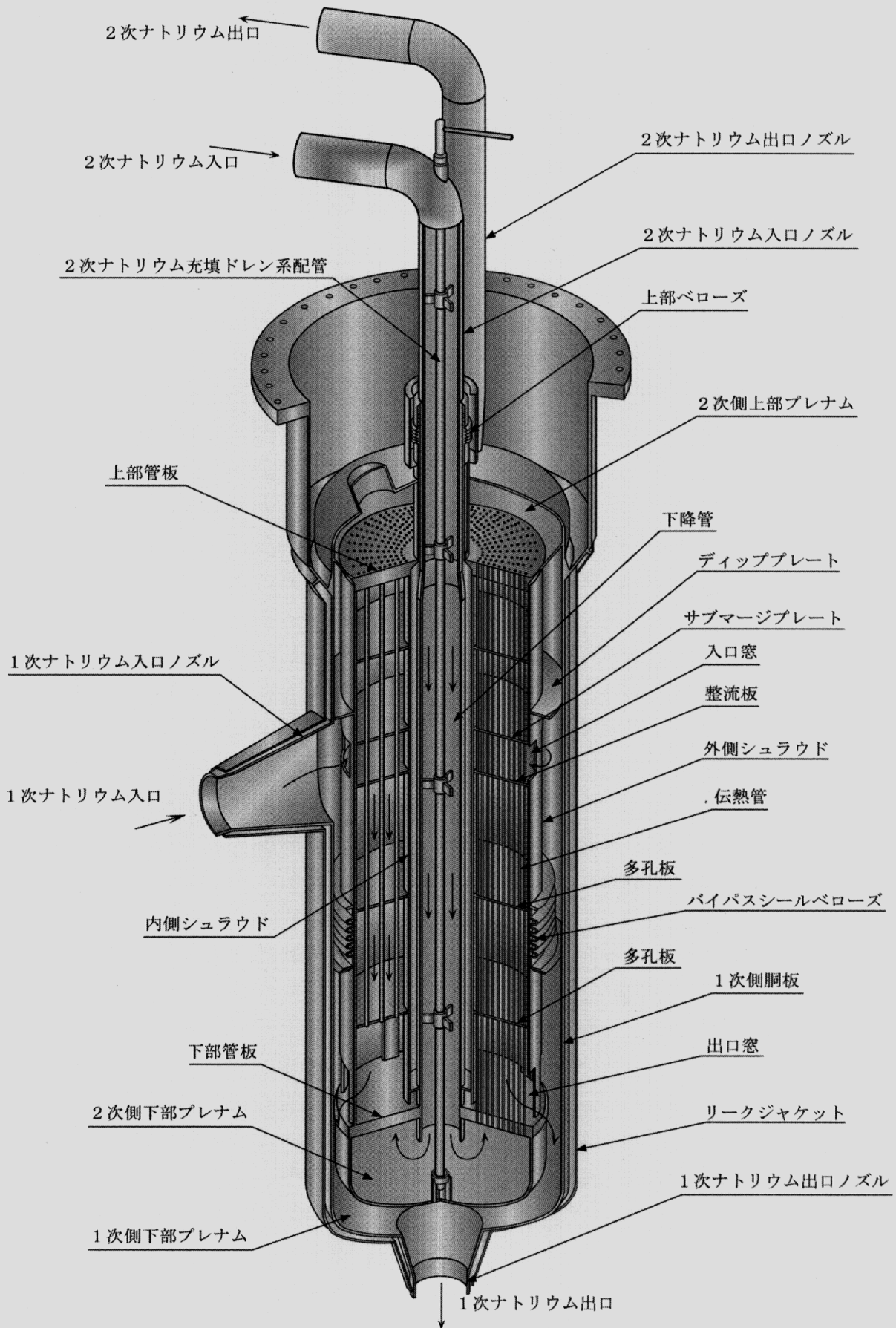


図 2.1-1 MK-III用主中間熱交換器の構造

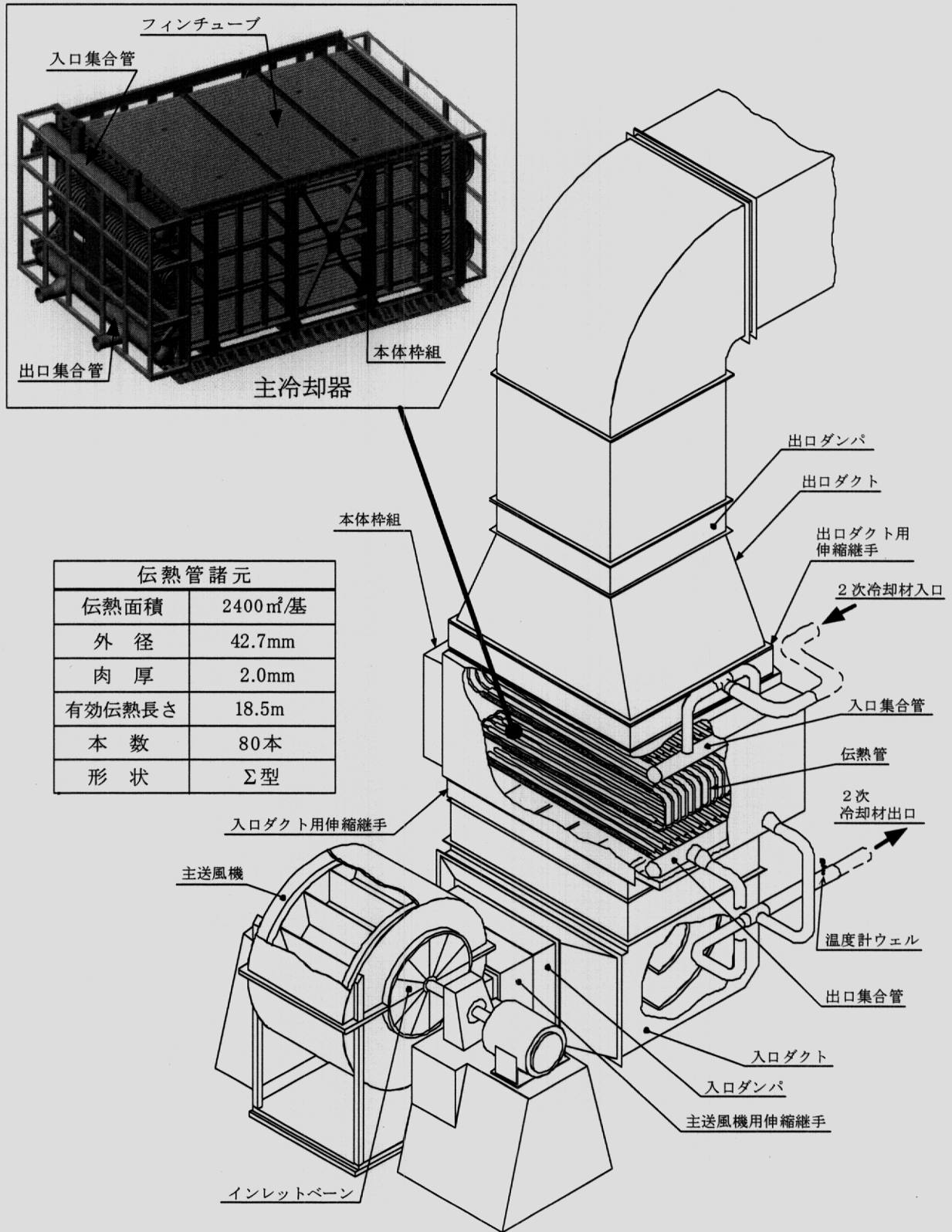


図 2.1-2 MK-III用主冷却機の構造

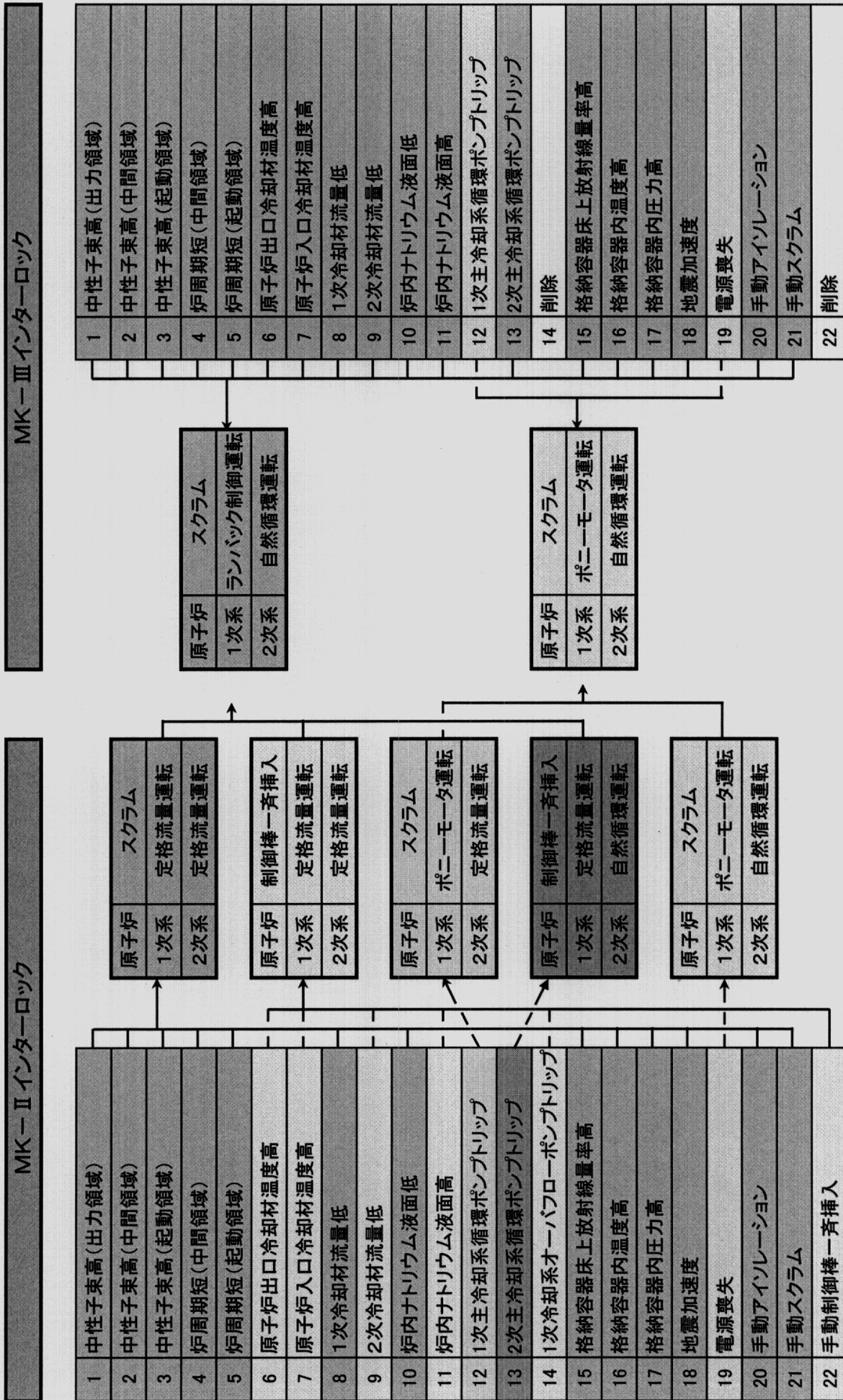


図2.2-1 過渡時の機器インターロック (MK-IIとMK-IIIとの比較)

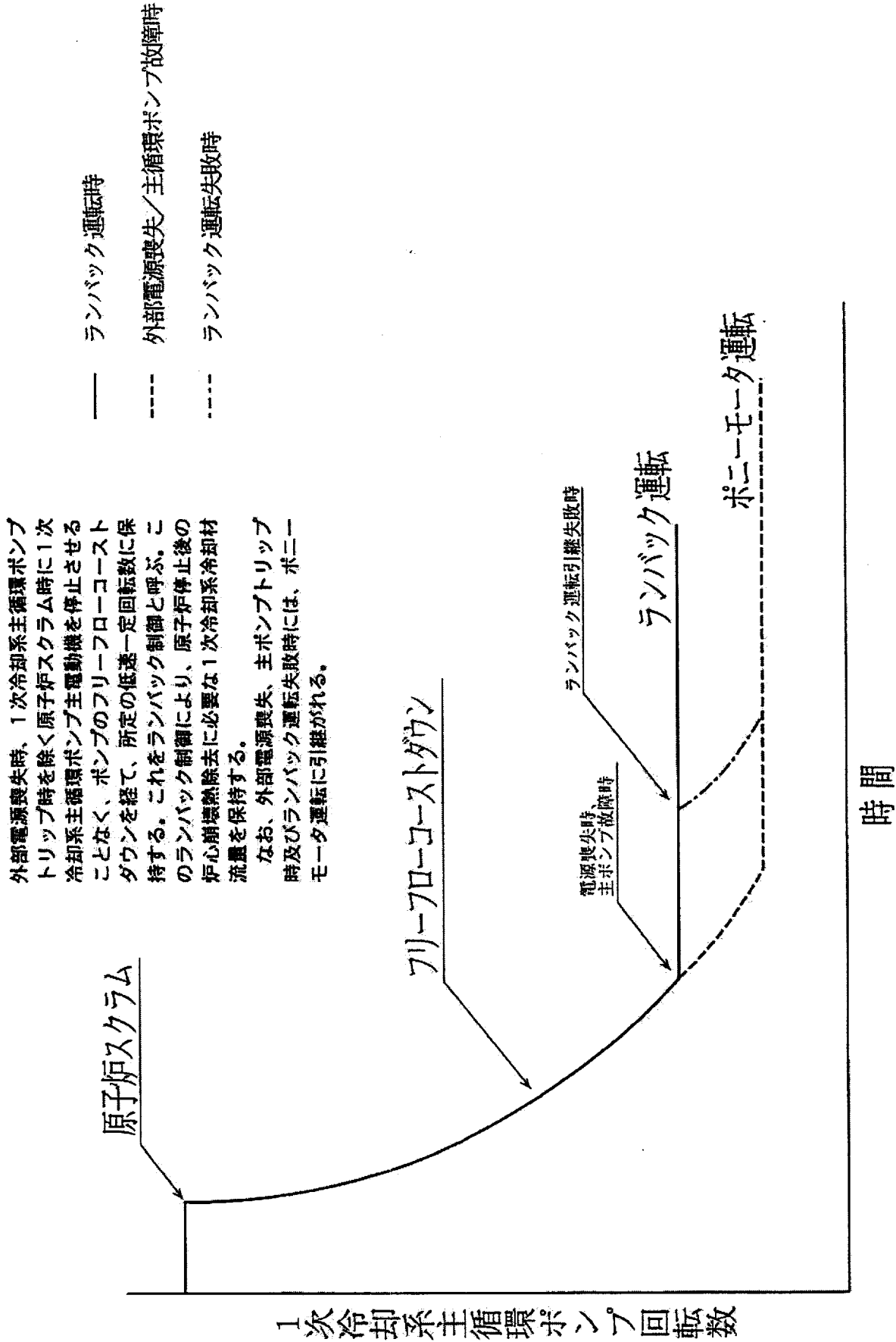
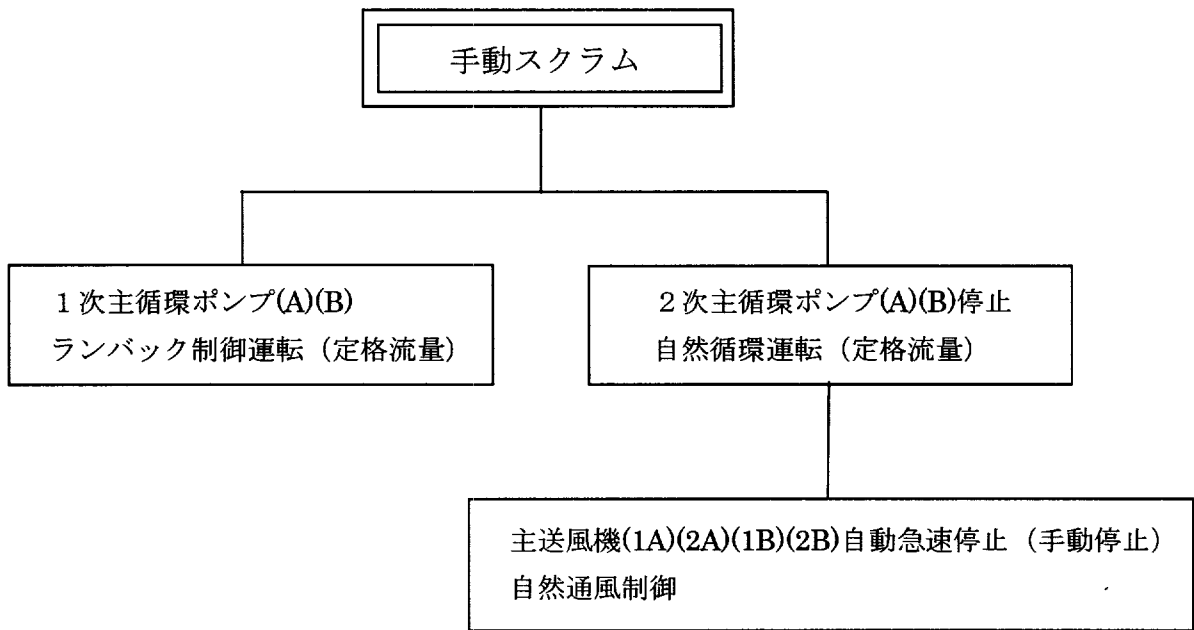
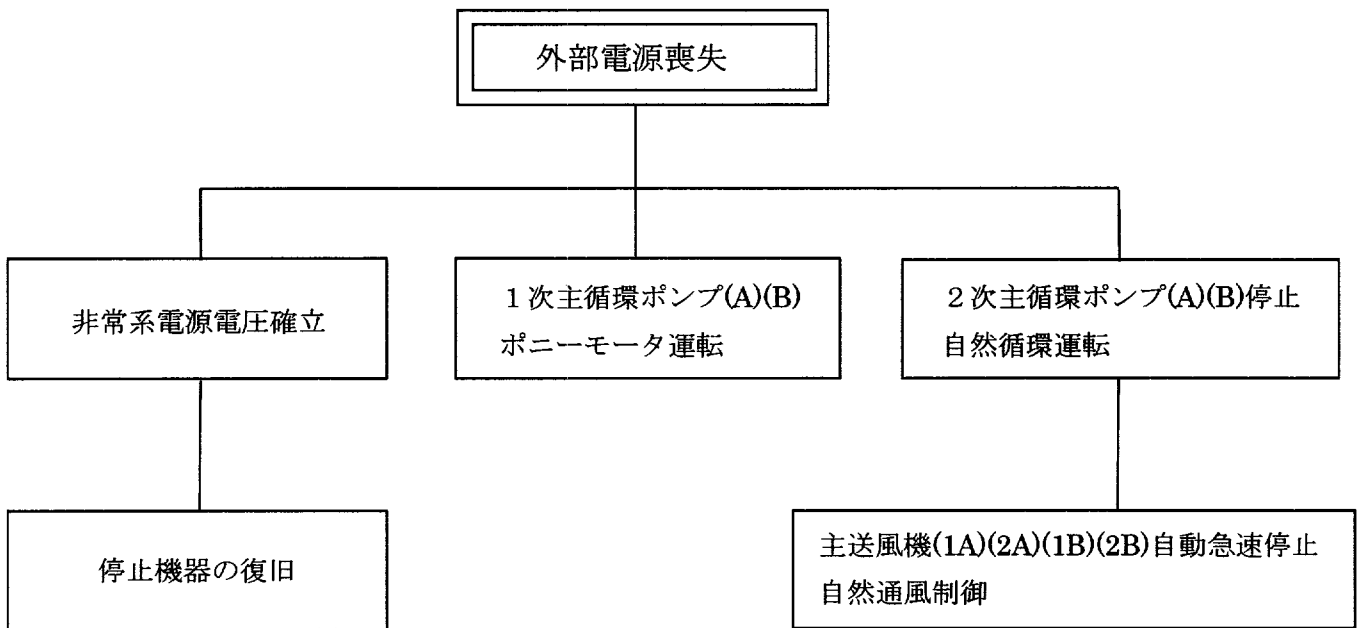


図 2.2-2 1次主循環ポンプのランバック制御概念図

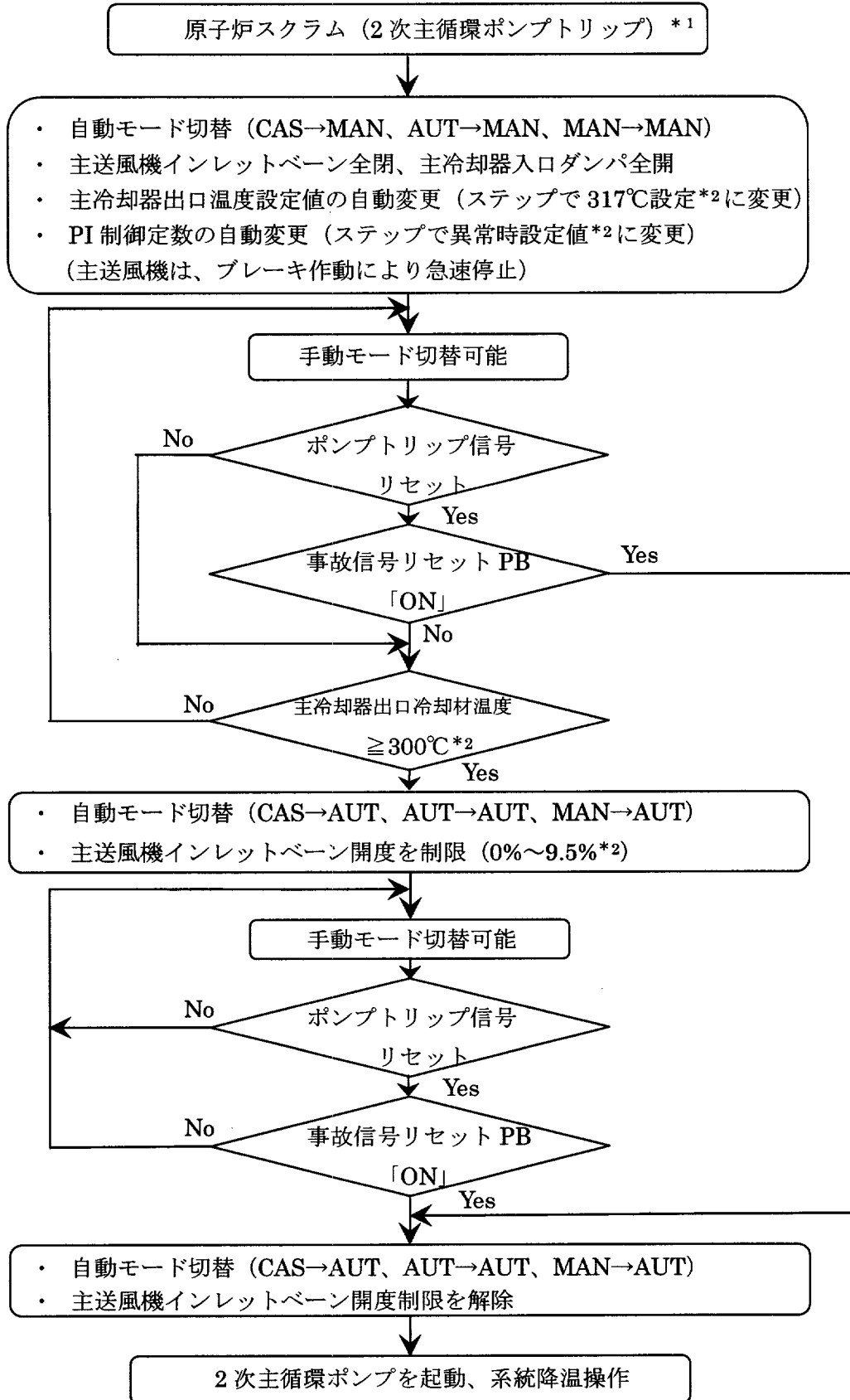


() 内は、MK-IIの場合を示す。



外部電源喪失時の機器動作はMK-IIから変更なし

図 2.2-3 手動スクラム時及び外部電源喪失時の主冷却系機器動作フロー



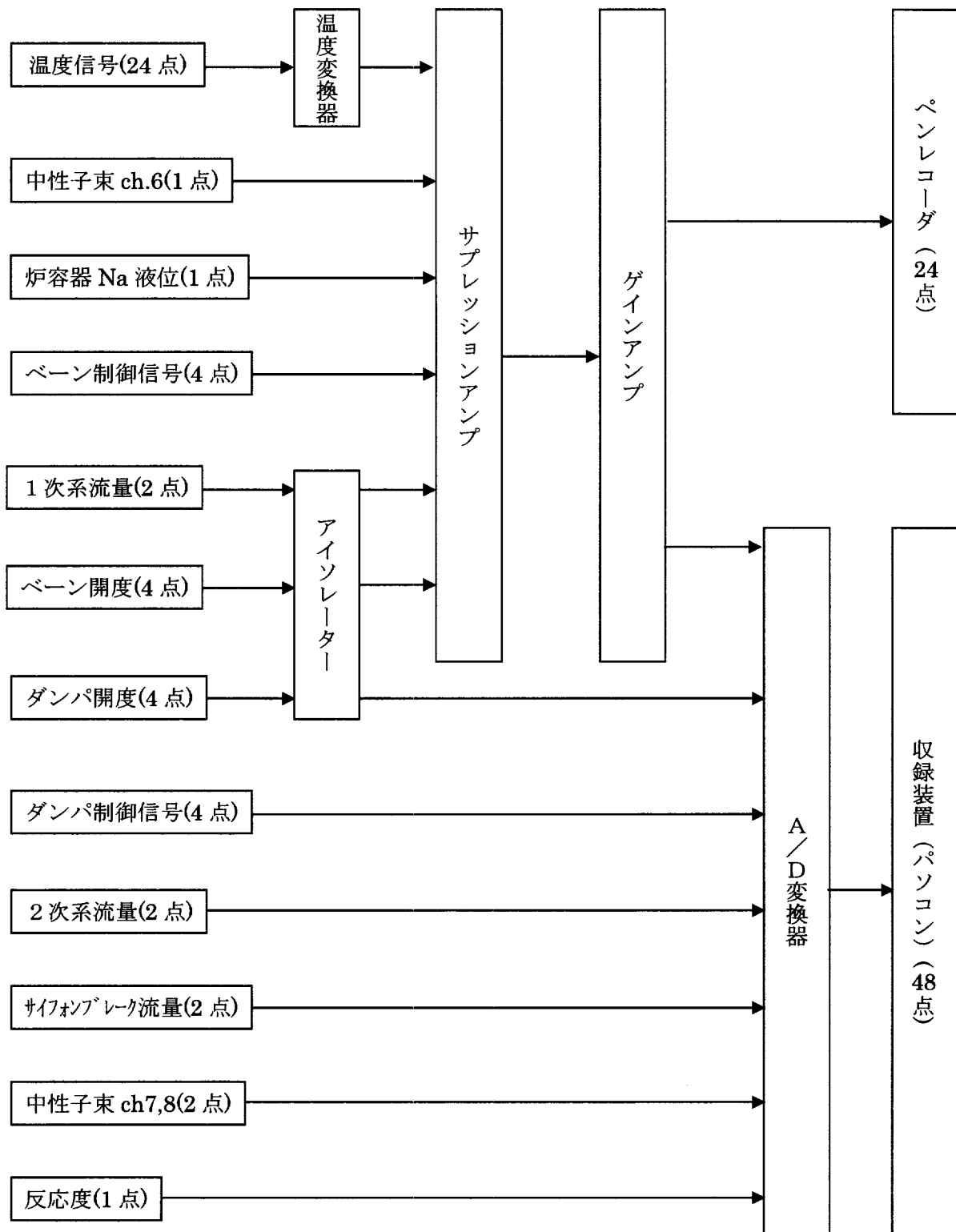
*1：2次主循環ポンプトリップによる機器インターロックは図 2.2-1 参照。

*2：MK-III性能試験結果を踏まえた最終設定値を示す (表 5.10-1 参照)。

注1：本冷却材温度制御の動作フローは、*2のMK-III用設定値を除いてMK-IIと同じである。

注2：CAS：カスケードモード、AUT：オートモード、MAN：マニュアルモード

図 2.2-5 原子炉冷却材温度制御設備の異常時動作フロー図



プロセス量測定項目は表 4.1-4 参照

図 4.1-1 ペンレコーダ及びデジタルデータ記録装置のデータ処理フロー

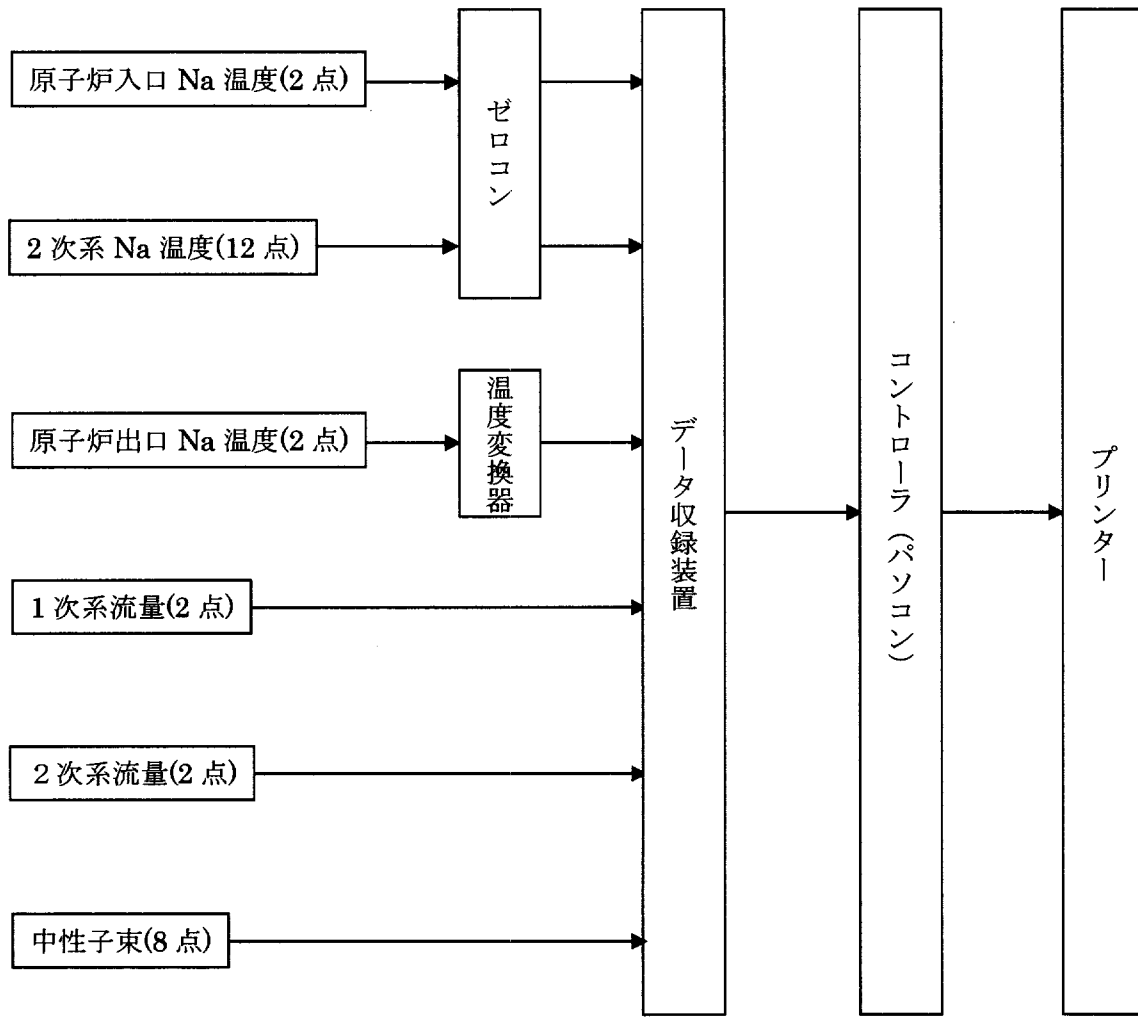
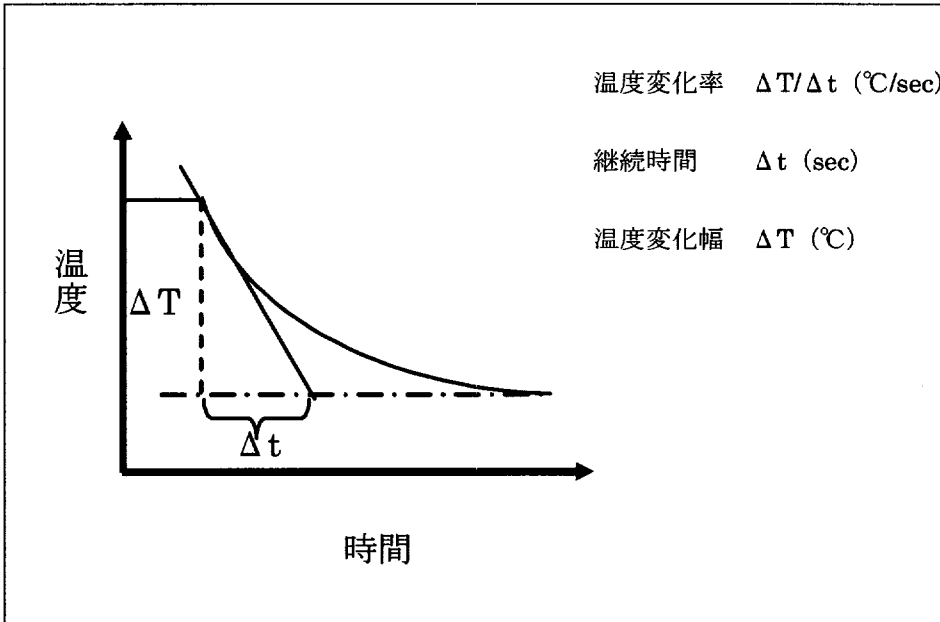


図 4.1-2 熱出力測定システムのデータ処理フロー

デジタルデータ記録装置に収録した過渡データから、下図に示す方法で温度変化率 $\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}\text{C}/\text{sec}$) 及び温度変化幅 ΔT ($^{\circ}\text{C}$) を求める。

(i) 応答が単調な場合



(ii) 応答が振動的な場合

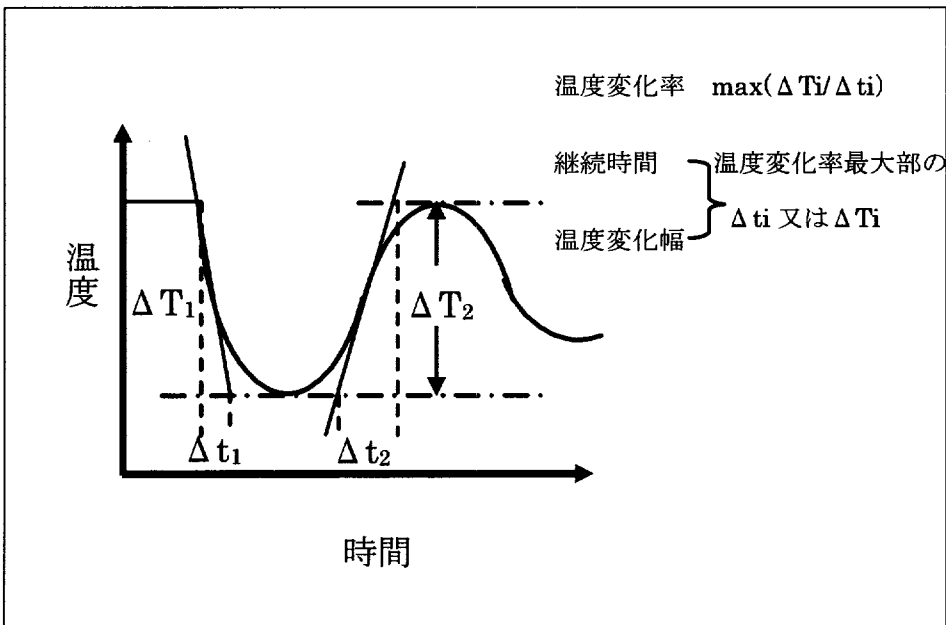


図 4.1-3 プラント各部の温度変化率及び温度変化幅の作成方法

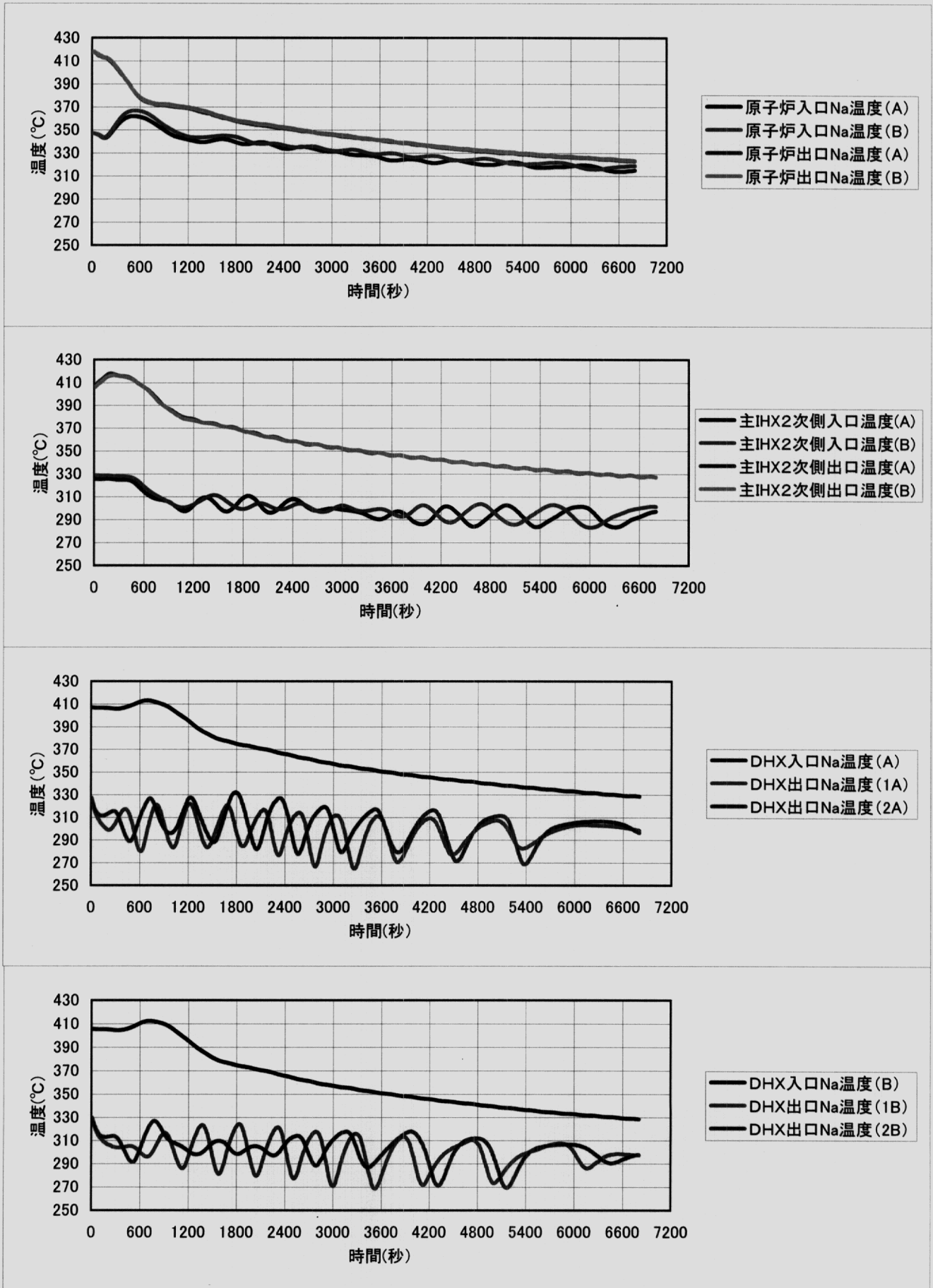


図5.2-1 70MWtからの手動スクラム試験における各部温度特性

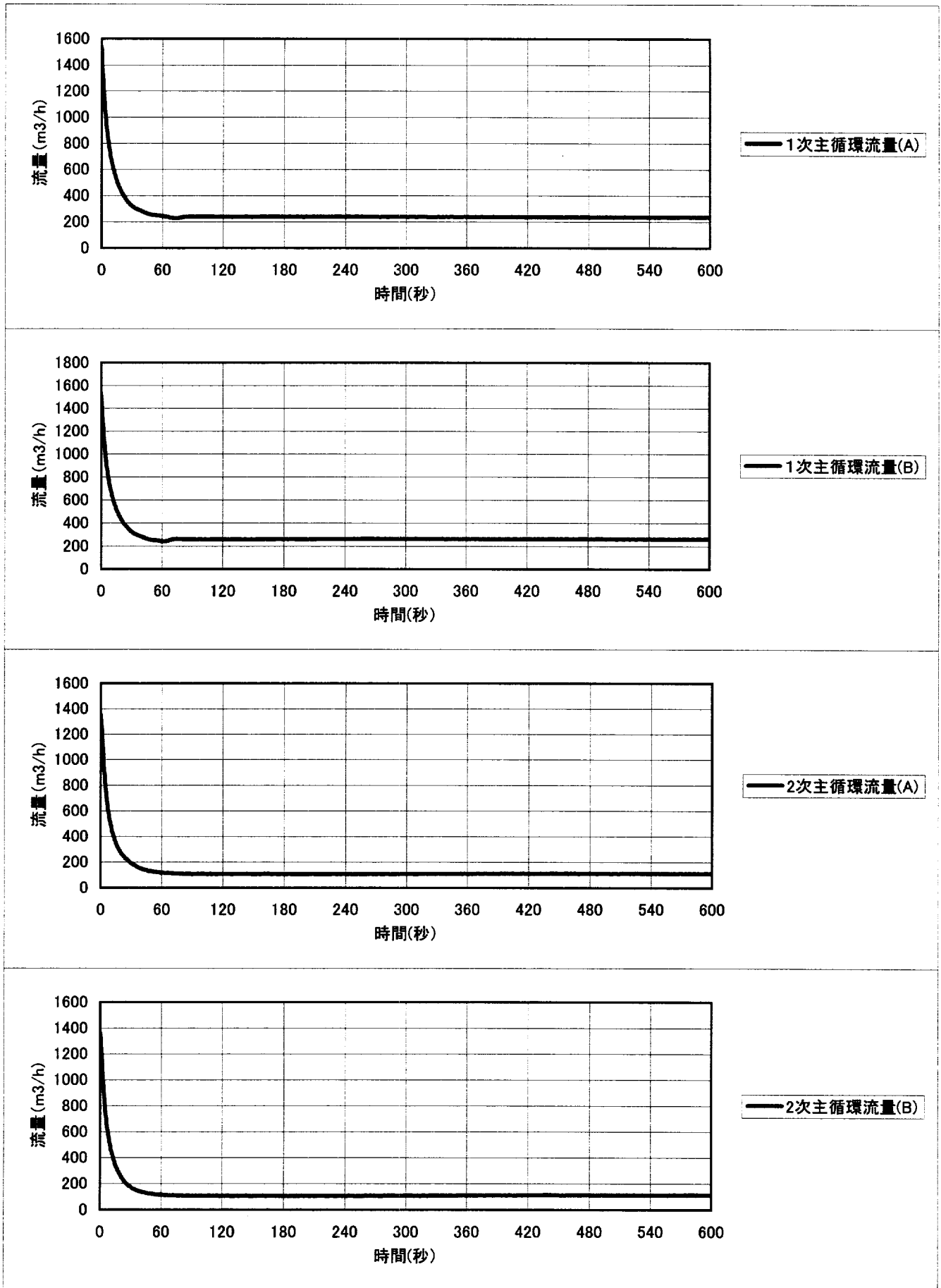


図5.2-2 70MWtからの手動スクラム試験における流量特性

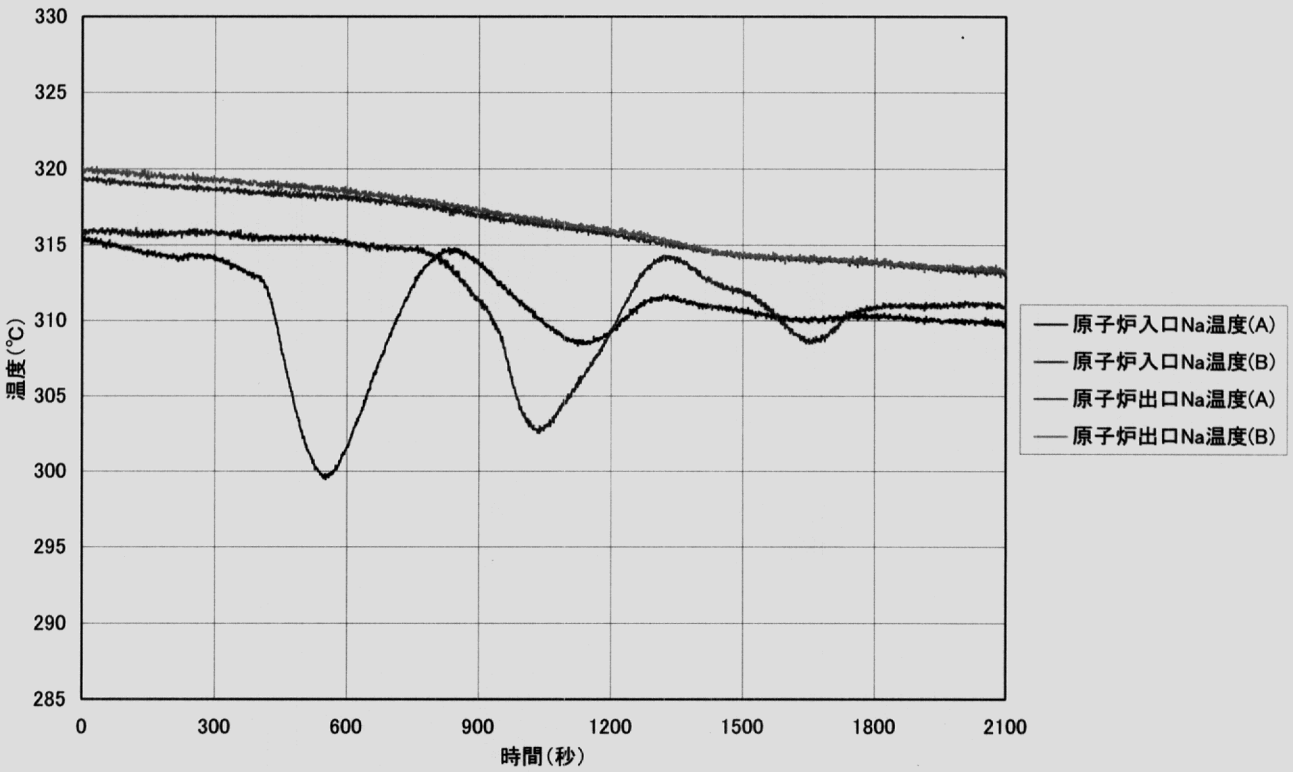
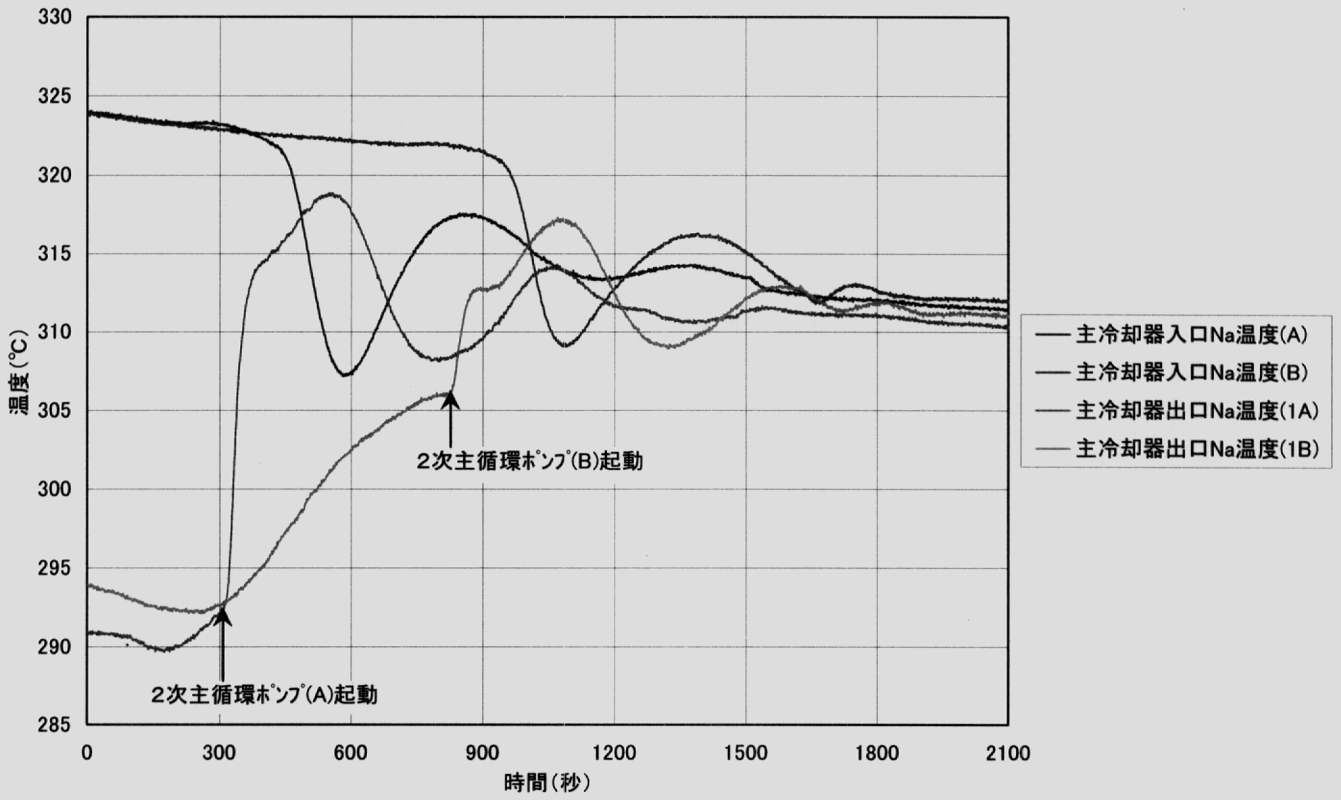
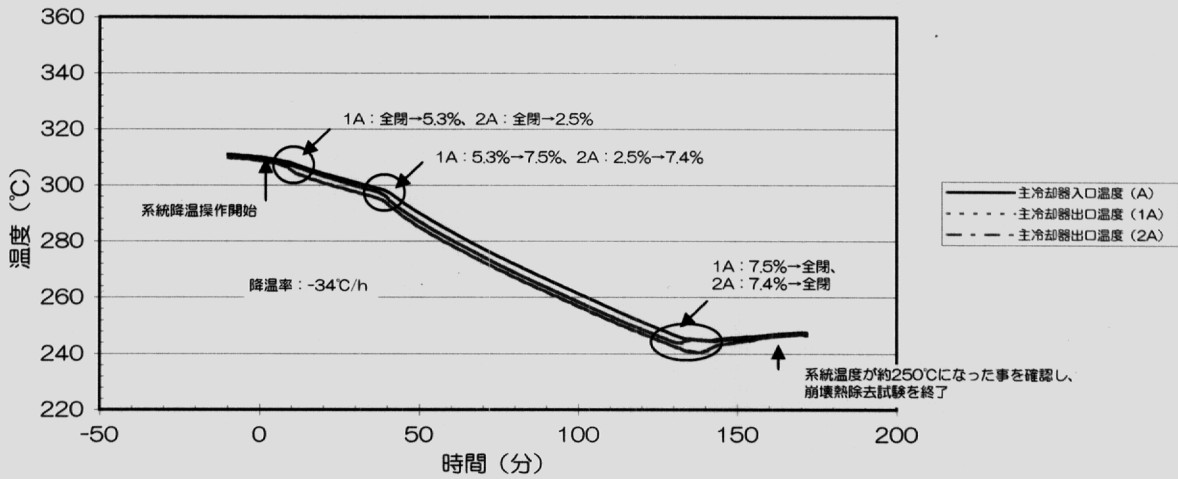
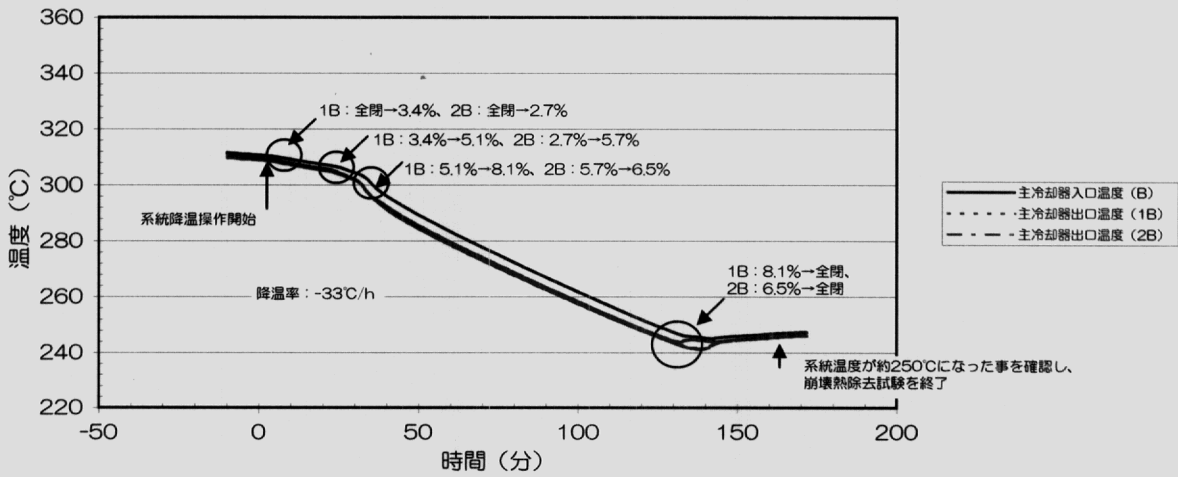


図 5.2-3 2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (70MWt 手動スクラム試験後)

主冷却器(Aループ) 出入口温度



主冷却器(Bループ) 出入口温度



原子炉 出入口温度

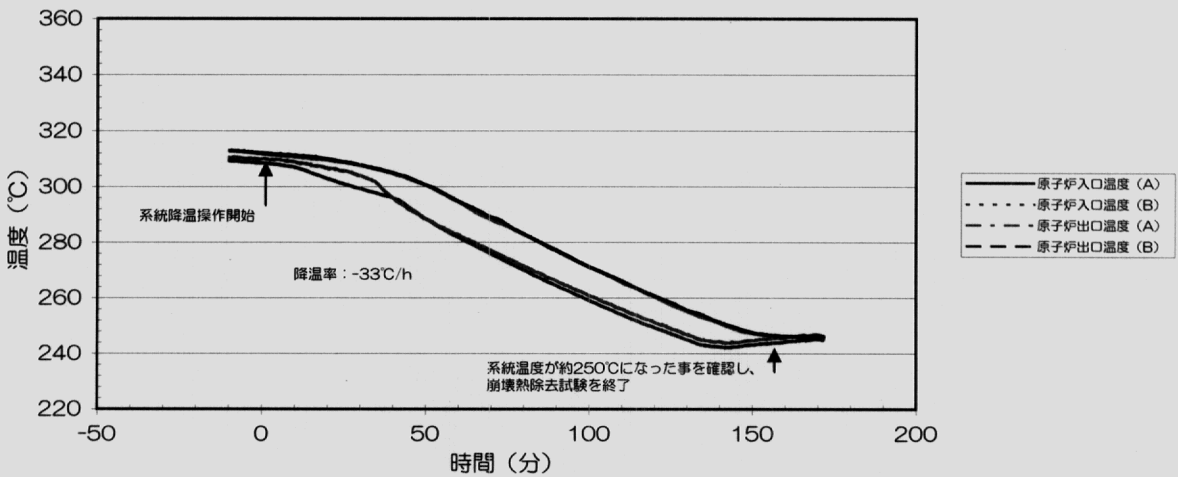


図5.2-4 手動スクラム試験 (70MWt) 後の崩壊熱除去特性

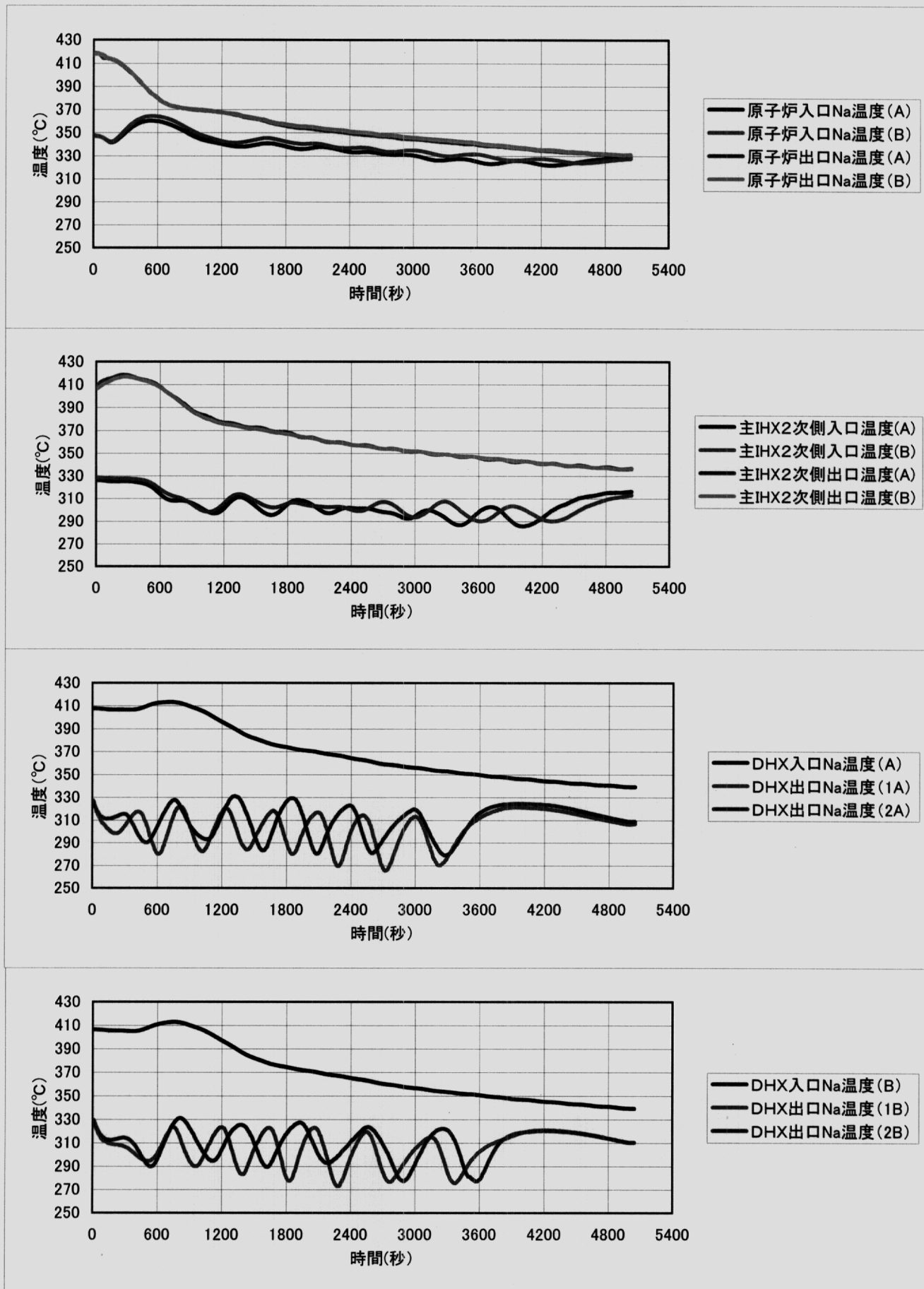
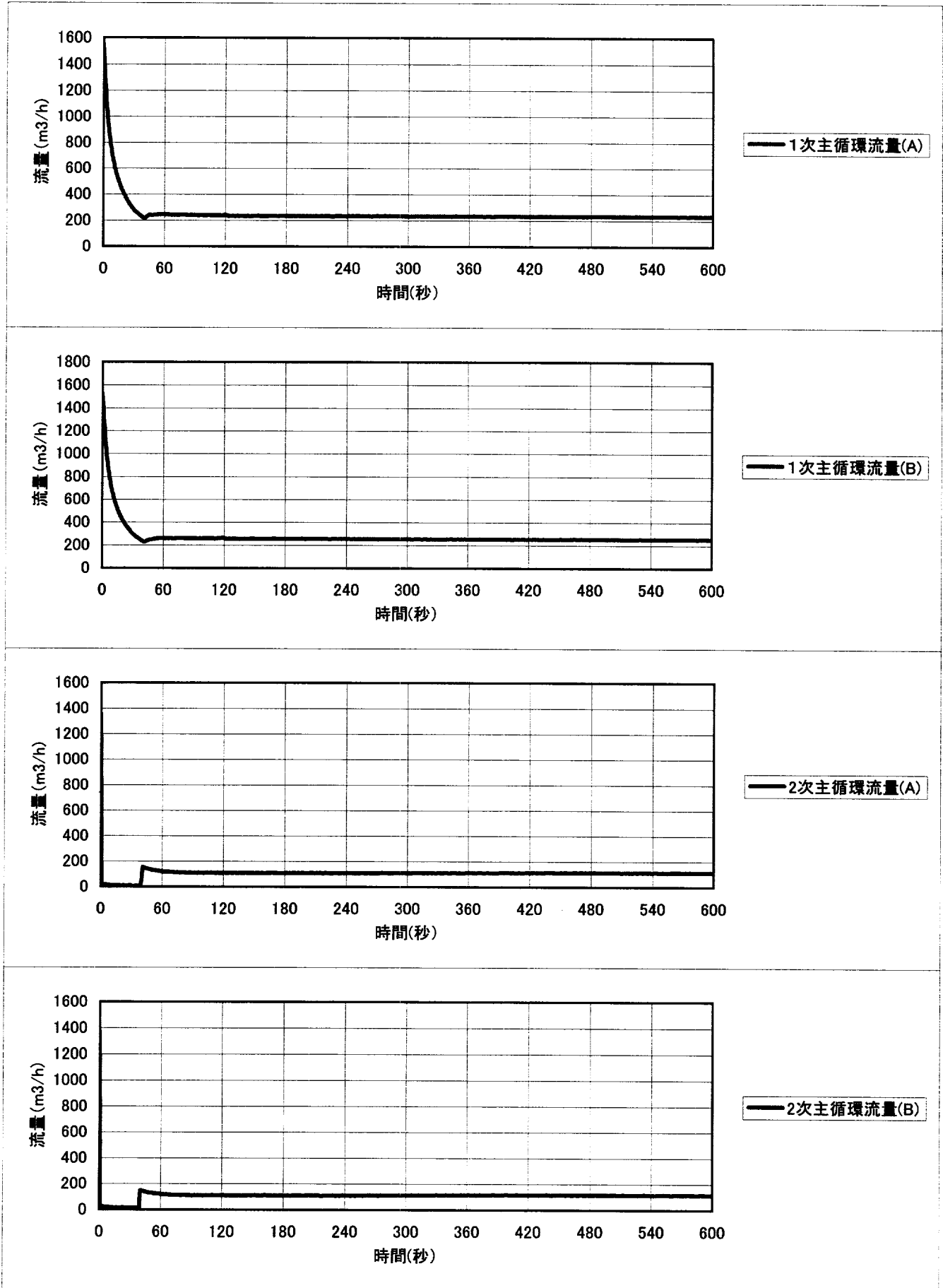


図5.3-1 70MWtからの外部電源喪失試験における各部温度特性



注: 2次主循環流量は、流量計励磁電源装置が非常系電源から供給しているため、ディーゼル発電機起動・非常系電源確立までの時間は指示が出ない。

図5.3-2 70MWtからの外部電源喪失試験における流量特性

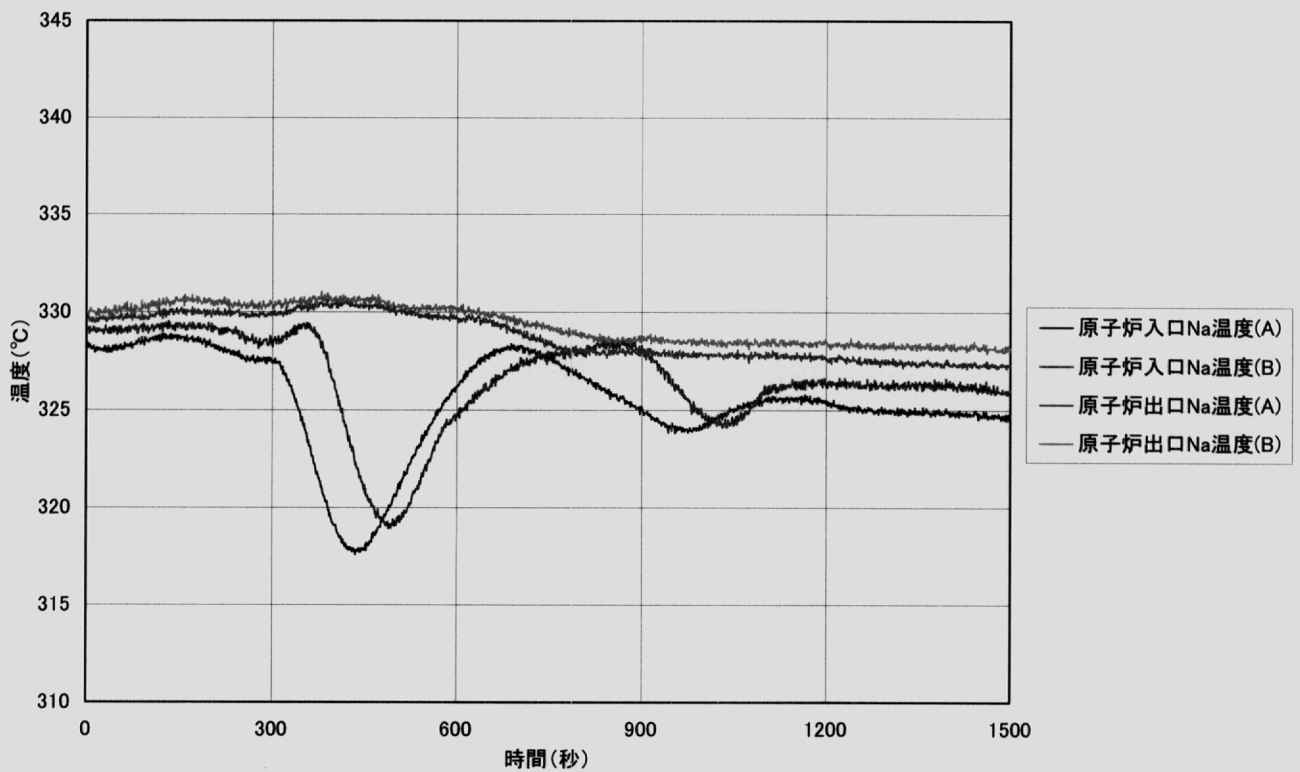
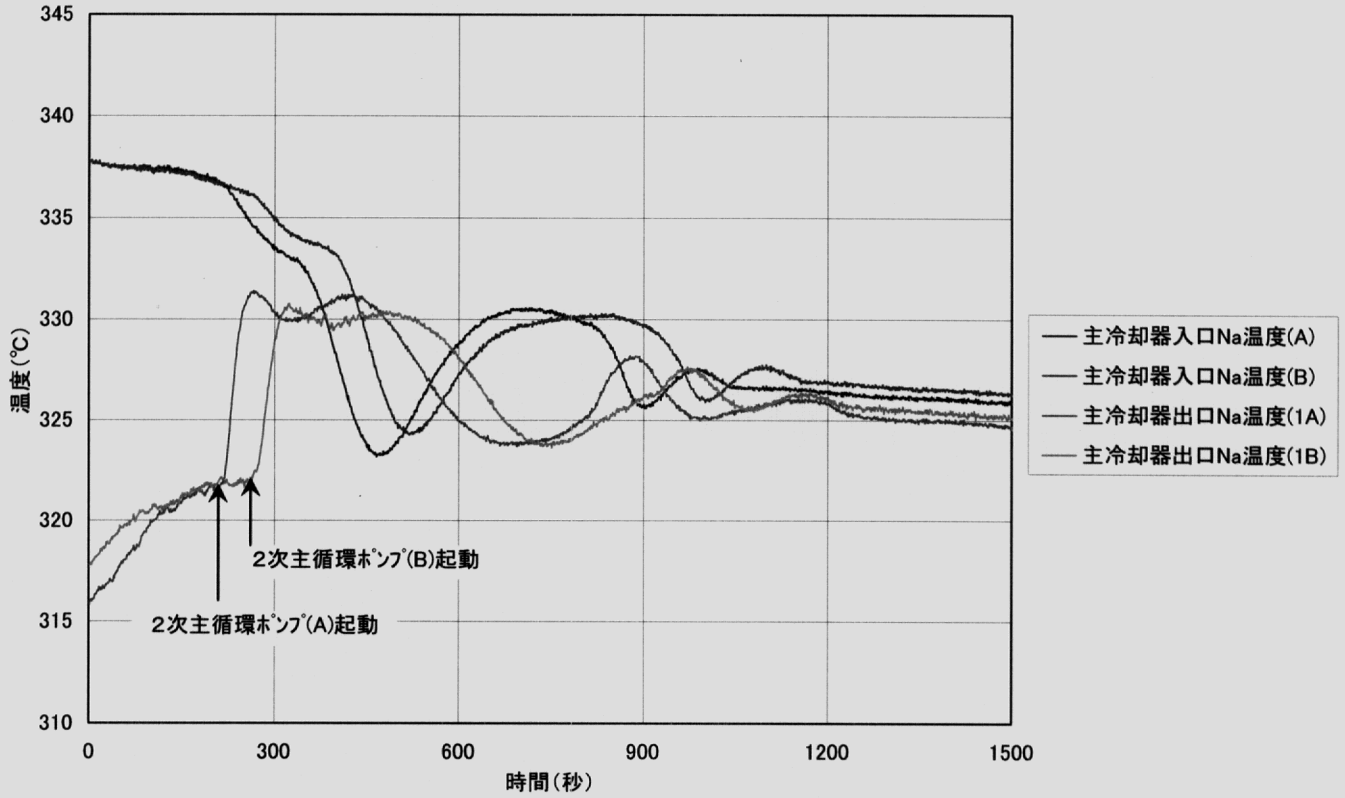
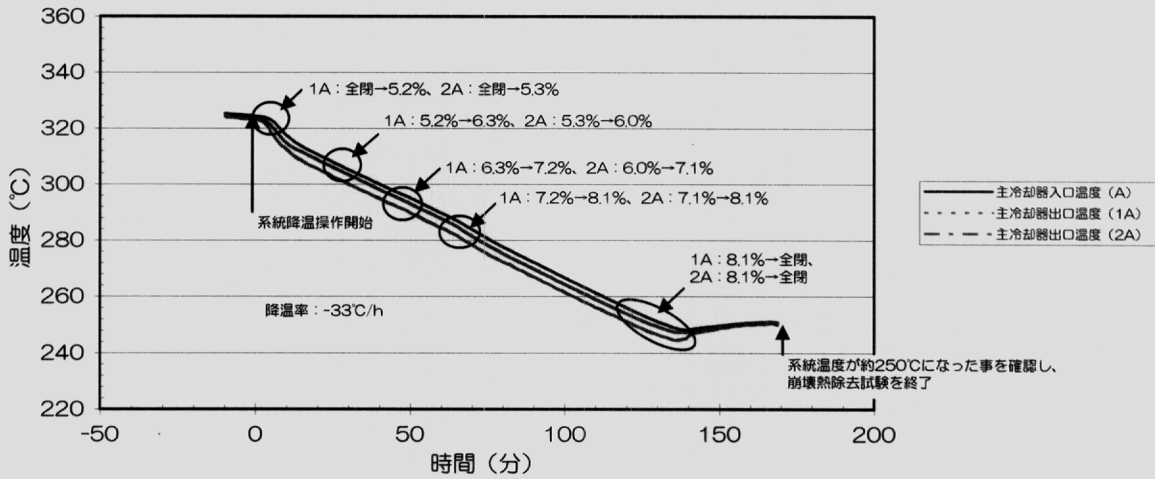
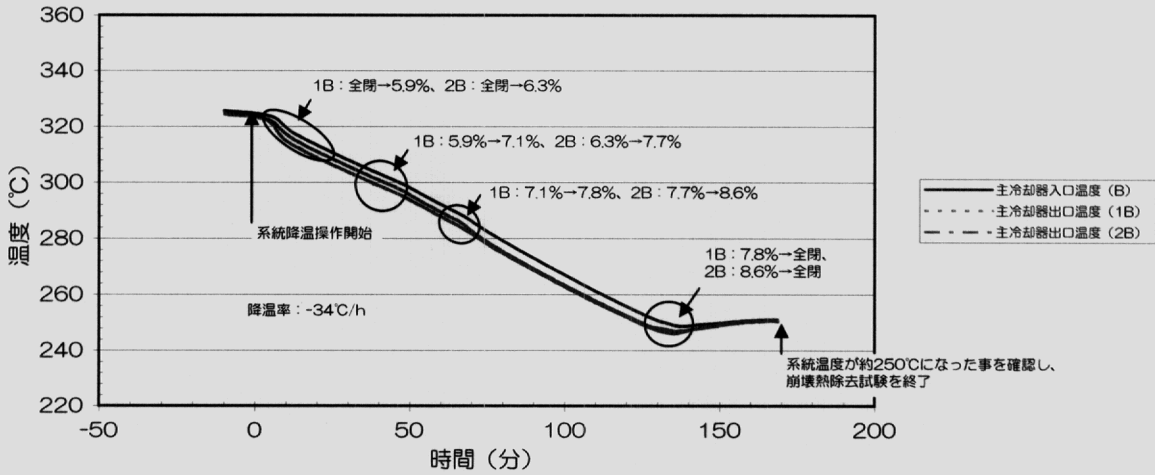


図 5.3-3 2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (70MWt 外部電源喪失試験後)

主冷却器(Aループ) 出入口温度



主冷却器(Bループ) 出入口温度



原子炉 出入口温度

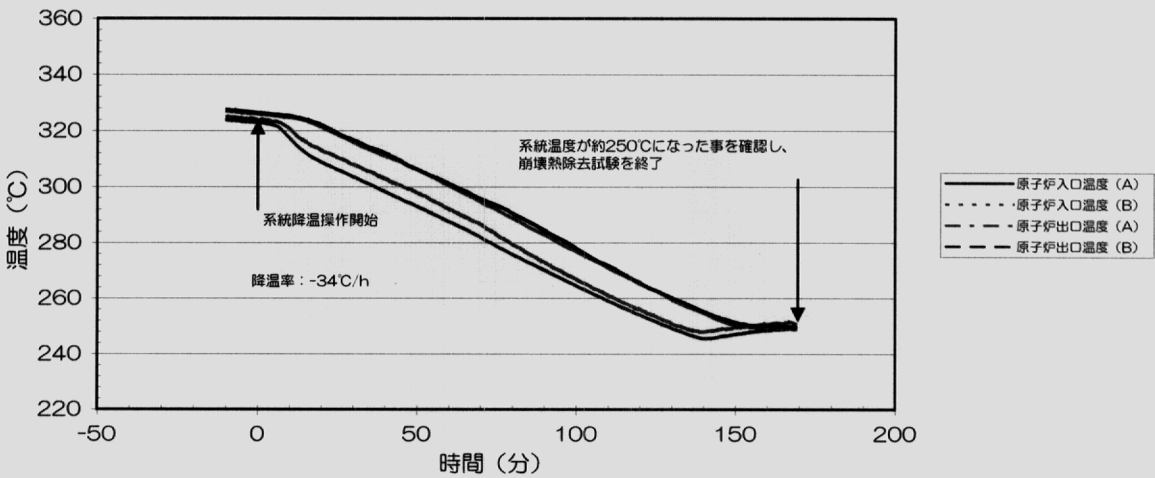


図5.3-4 外部電源喪失試験(70MWt)後の崩壊熱除去特性

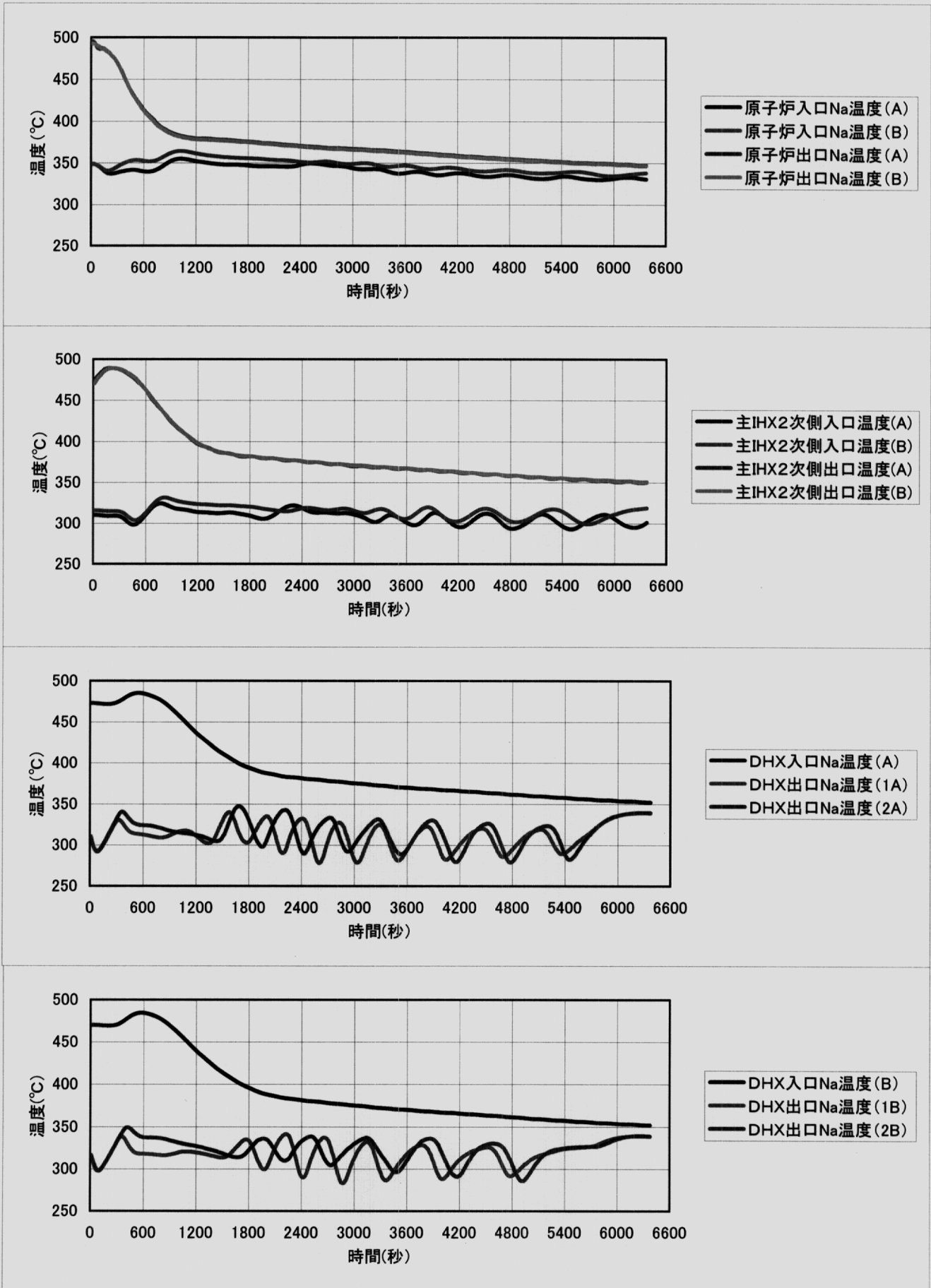


図5.4-1 140MWtからの手動スクラム試験における各部温度特性

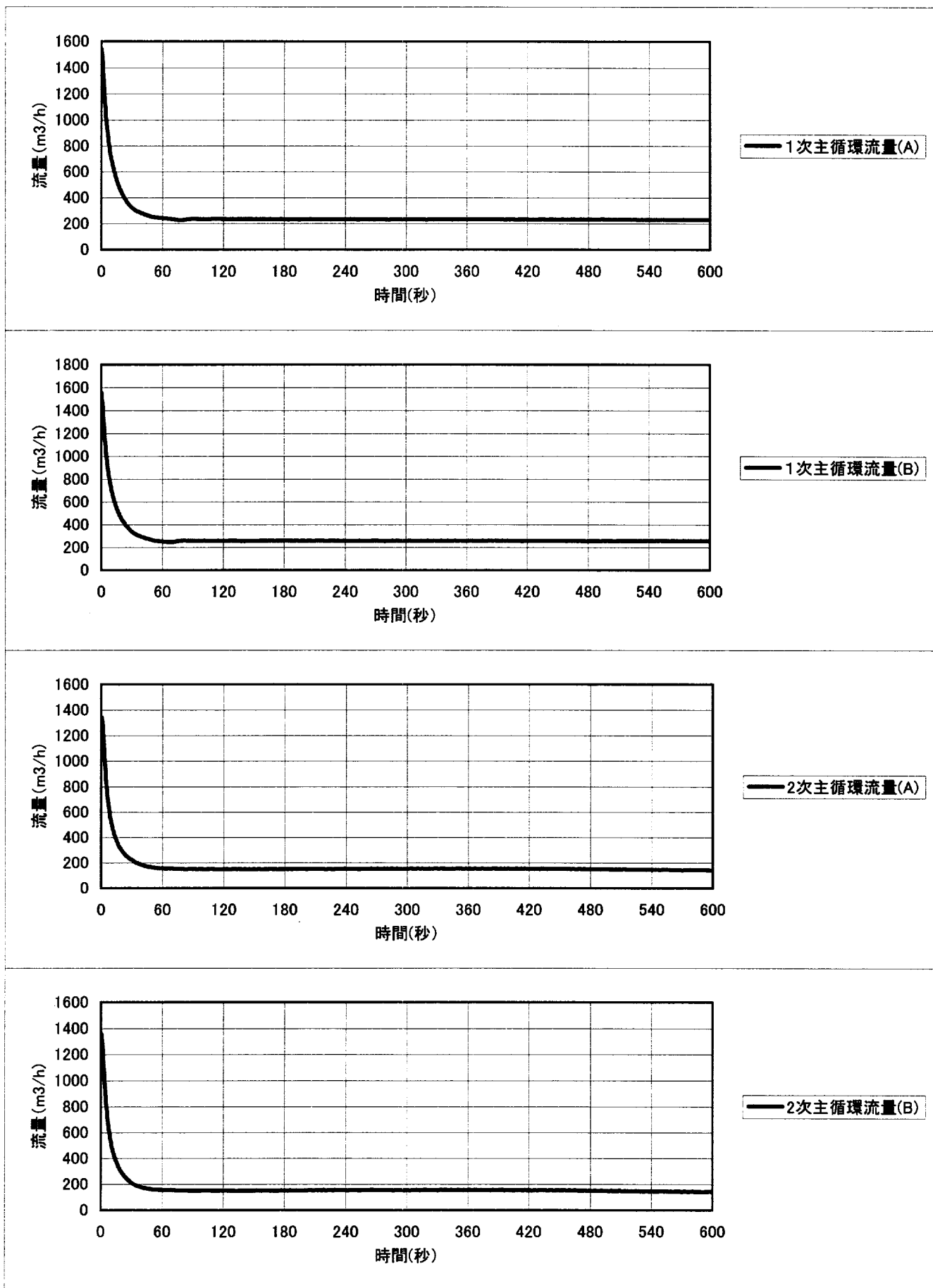


図5.4-2 140MWtからの手動スクラム試験における流量特性

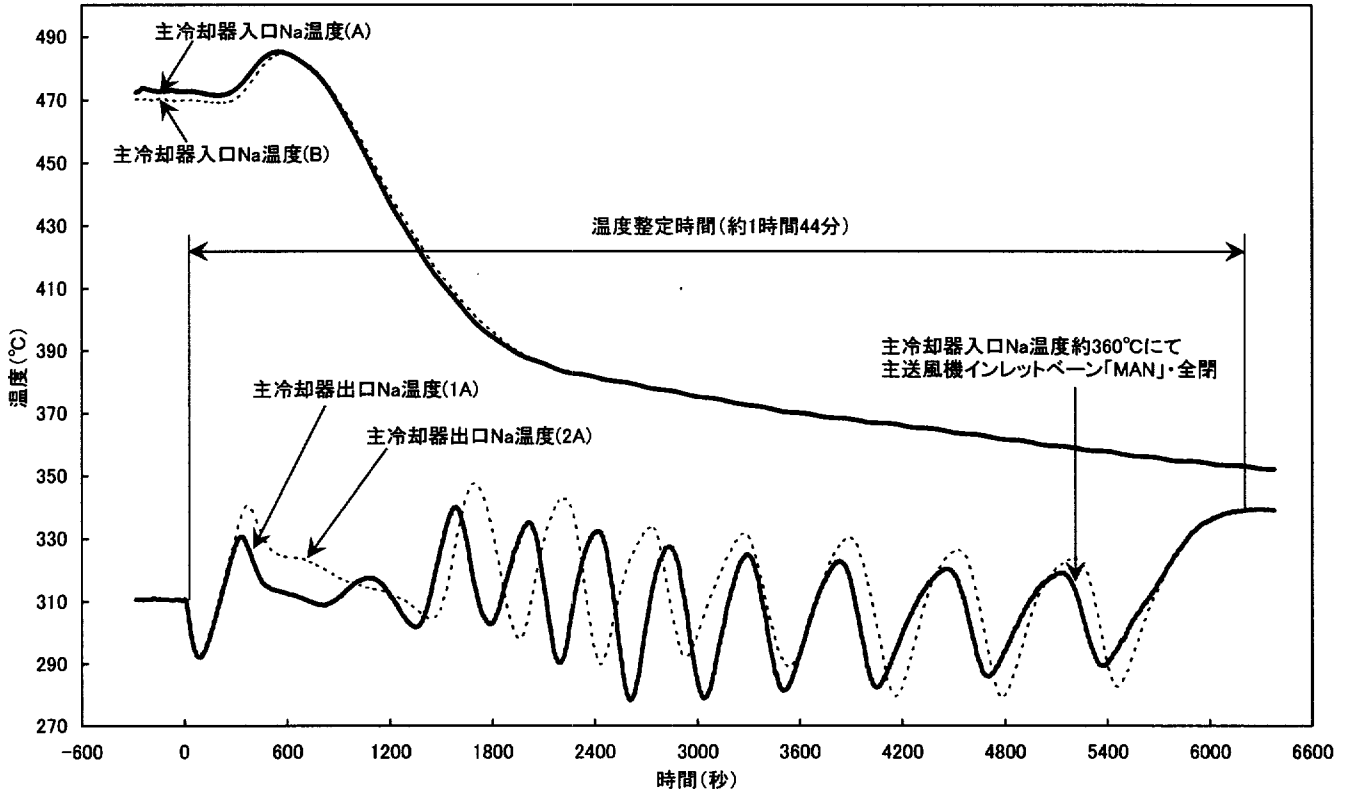


図 5.4-3 手動スクラム試験 (140MWt) における温度安定時間

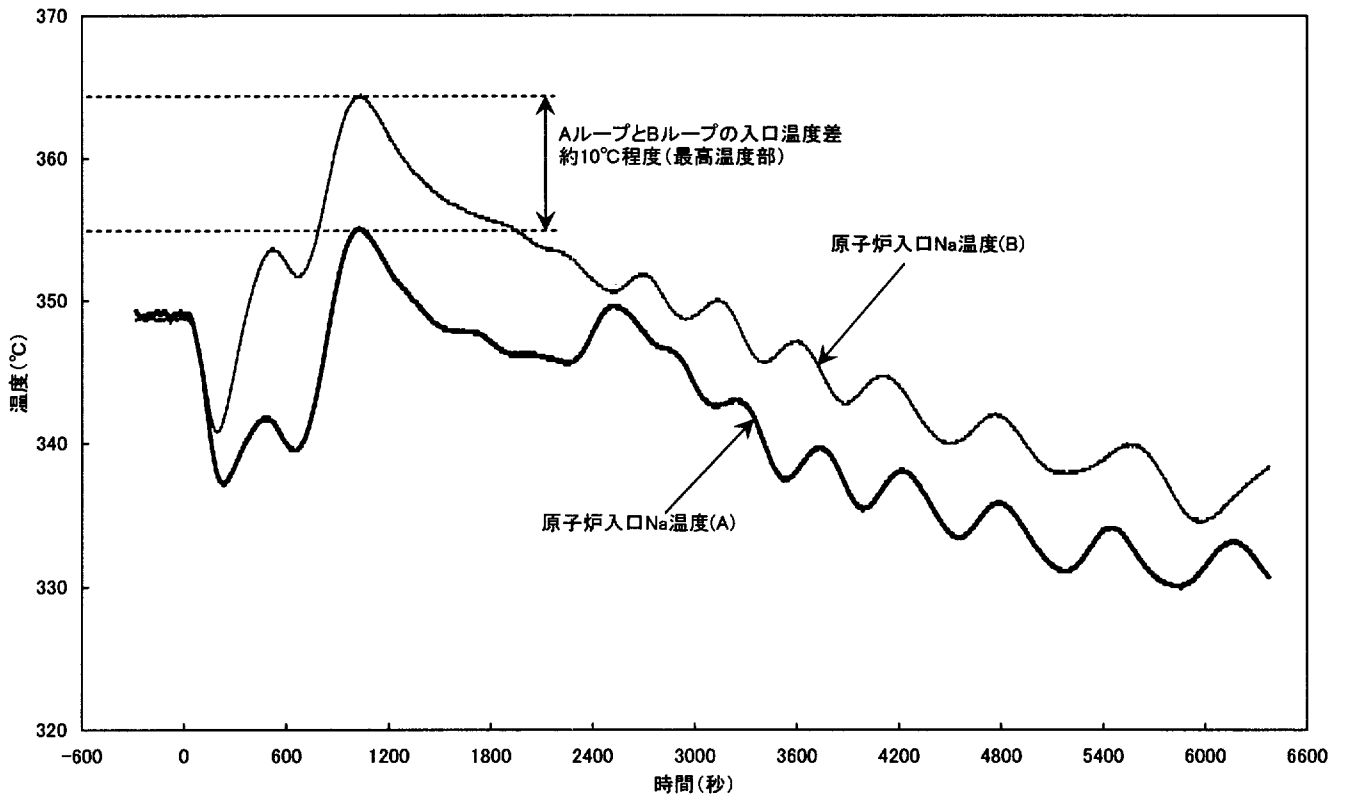
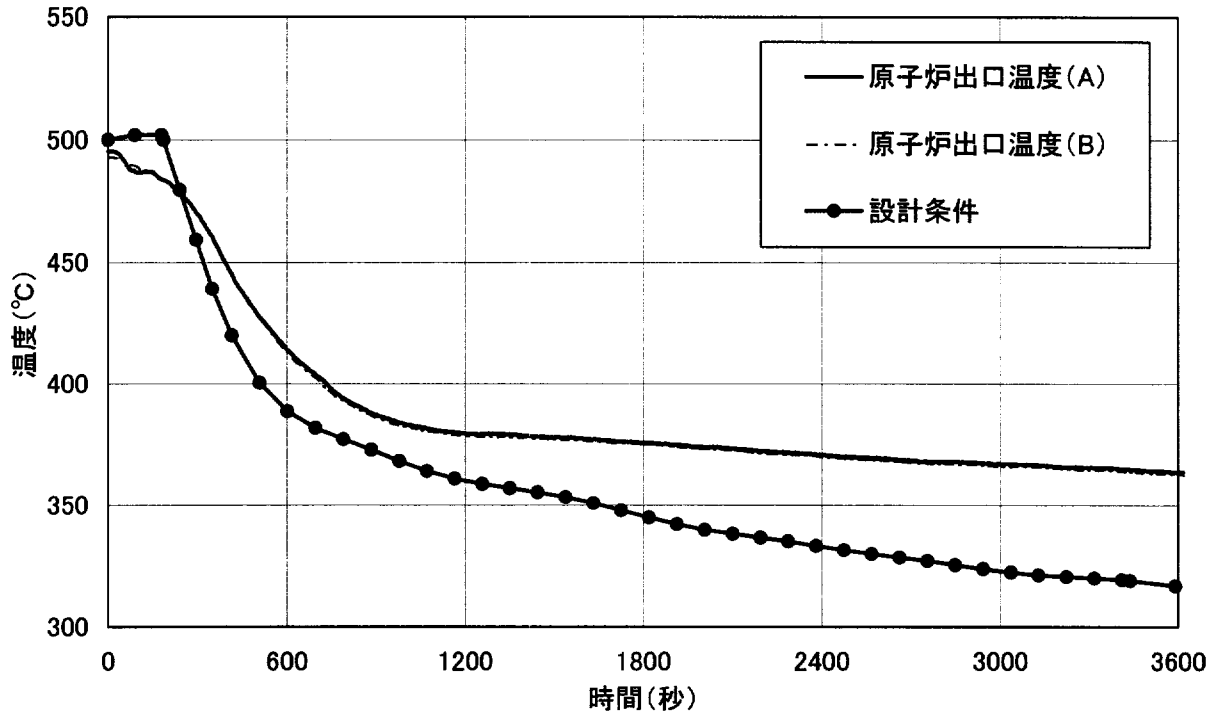
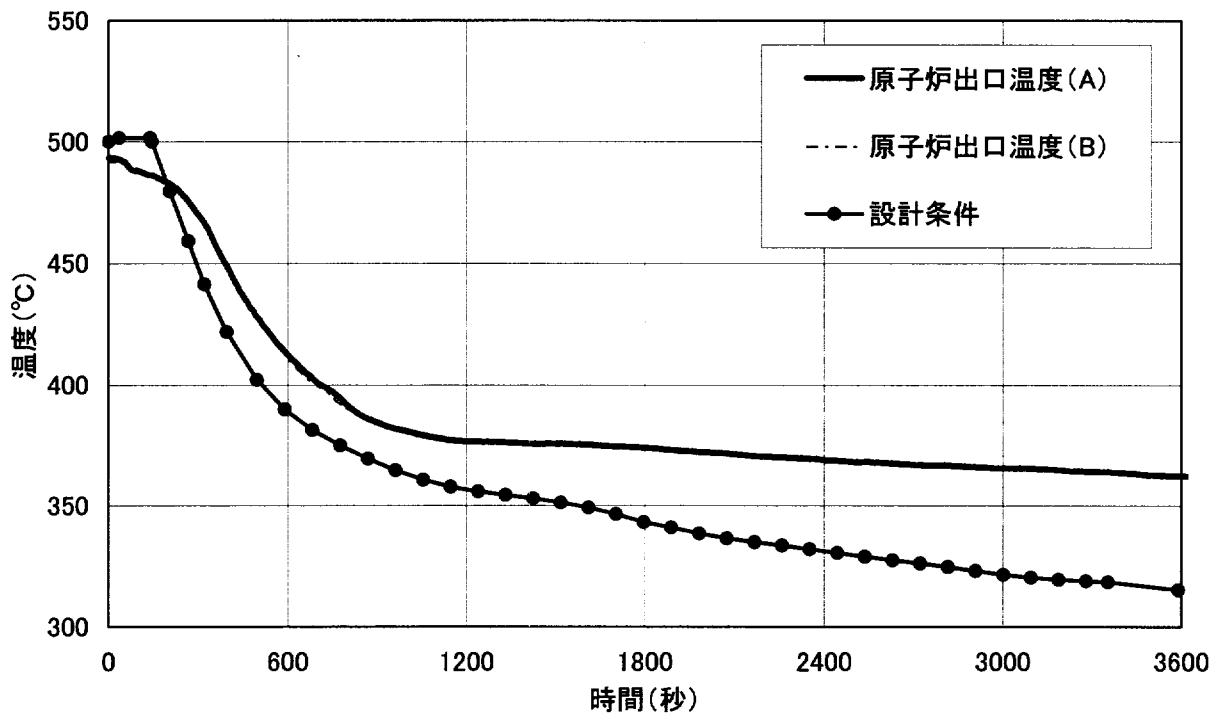


図 5.4-4 手動スクラム試験 (140MWt) における原子炉入口 Na 温度



140MWt 手動スクラム試験



140MWt 外部電源喪失試験

図 5.4-5 過渡応答試験結果と設計用熱過渡条件との比較

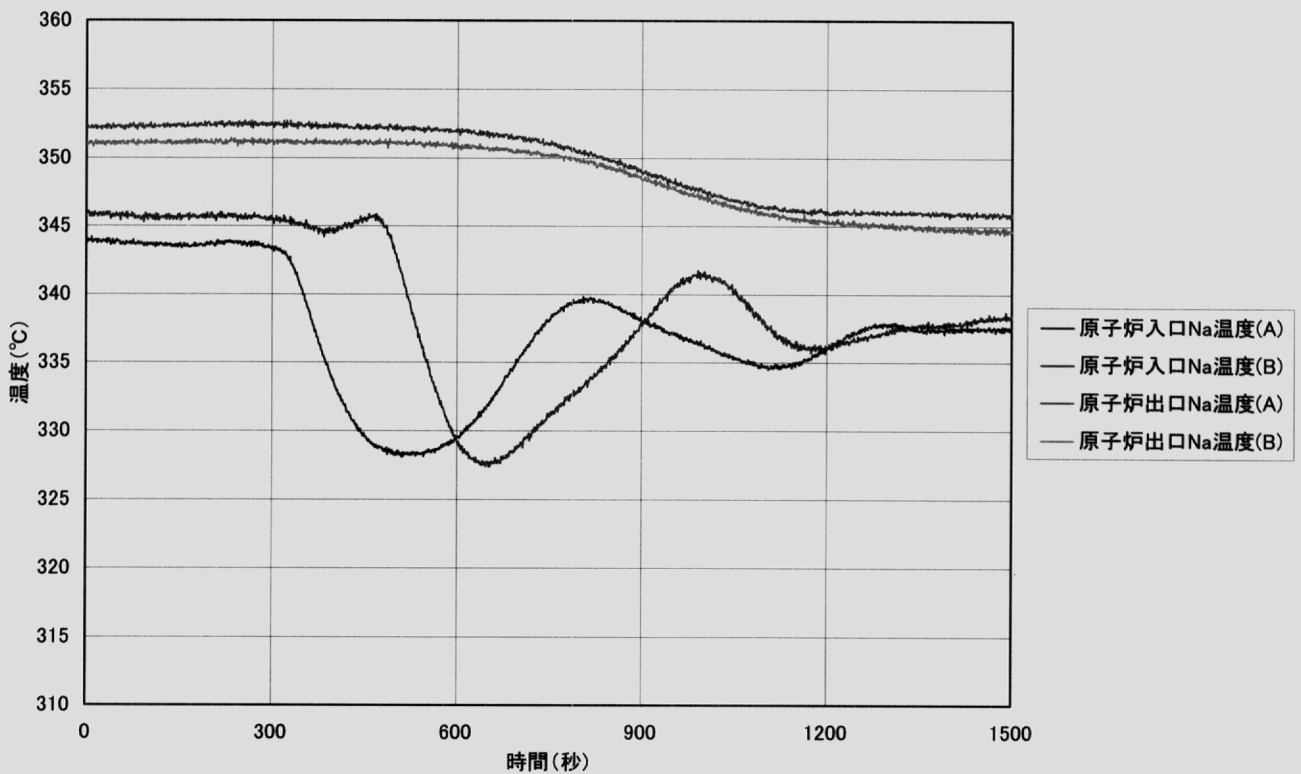
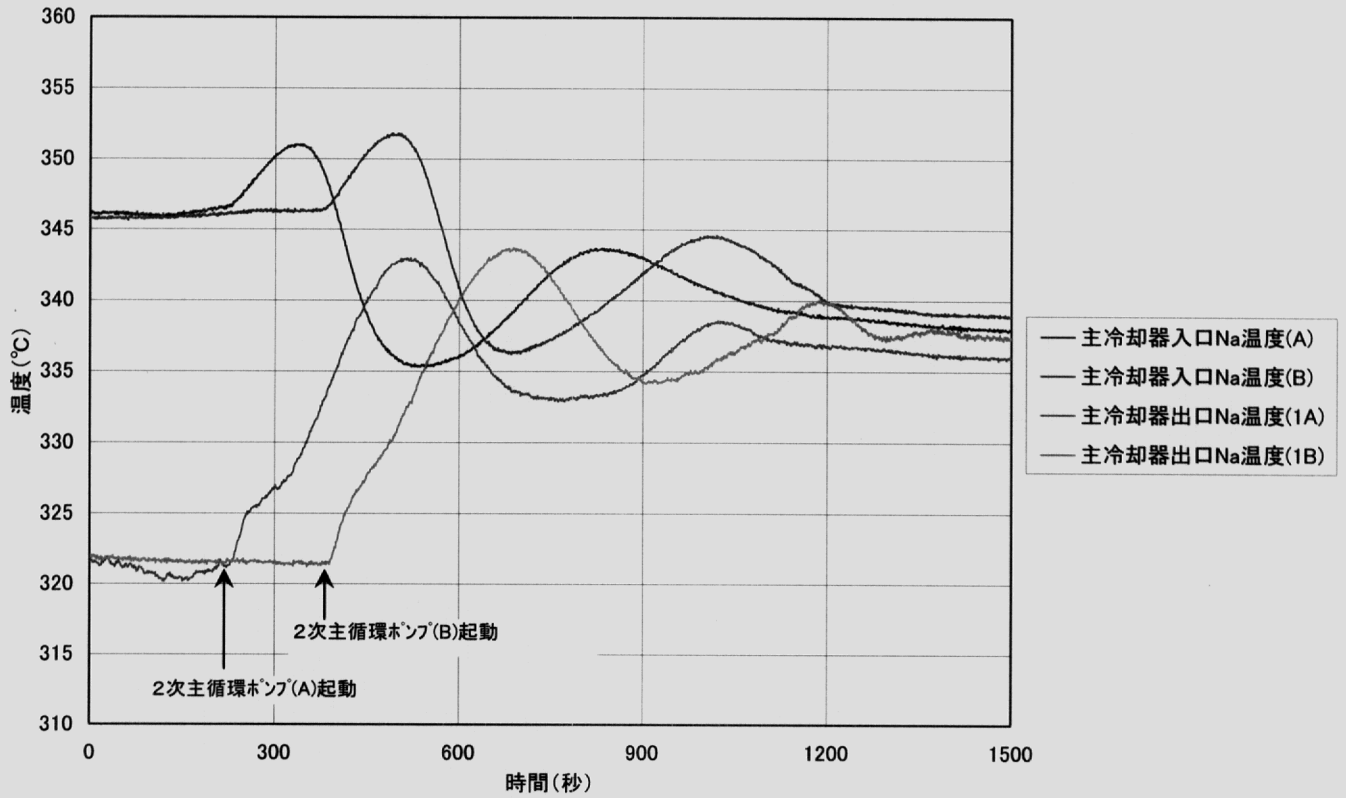
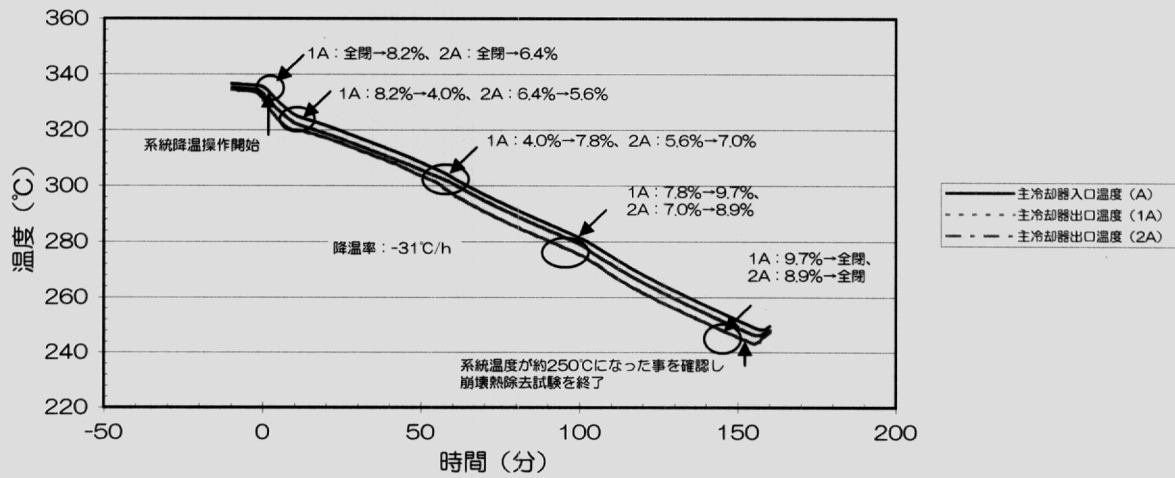
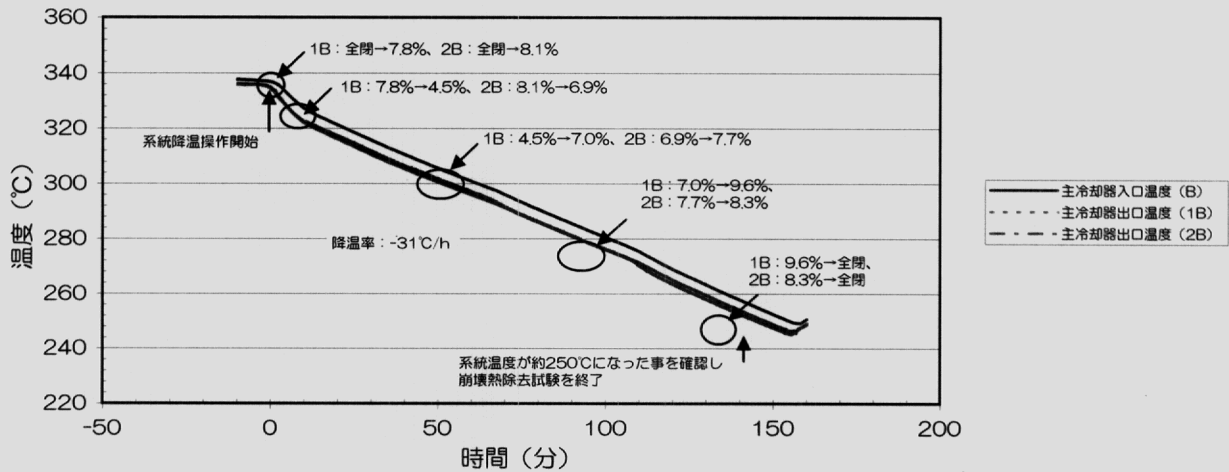


図 5.4-6 2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (140MWt 手動スクラム試験後)

主冷却器(Aループ) 出入口Na温度



主冷却器(Bループ) 出入口温度



原子炉 出入口温度

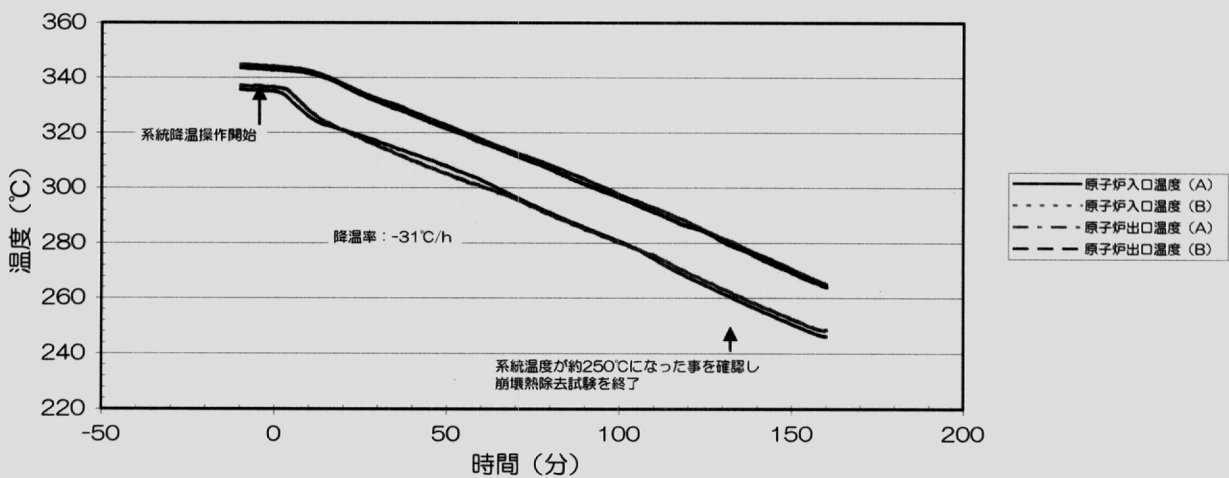


図5.4-7 手動スクラム試験(140MWt)後の崩壊熱除去特性

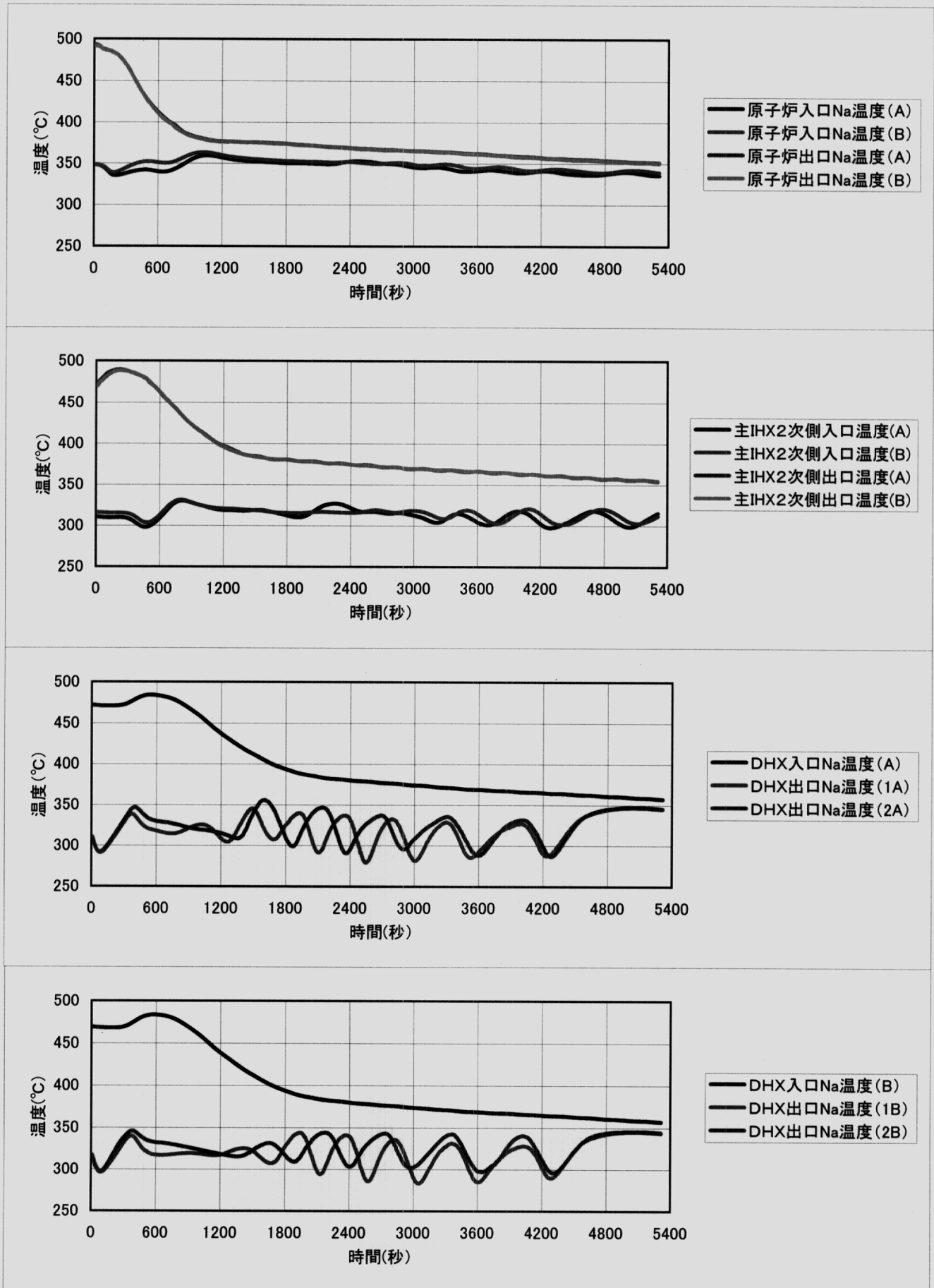
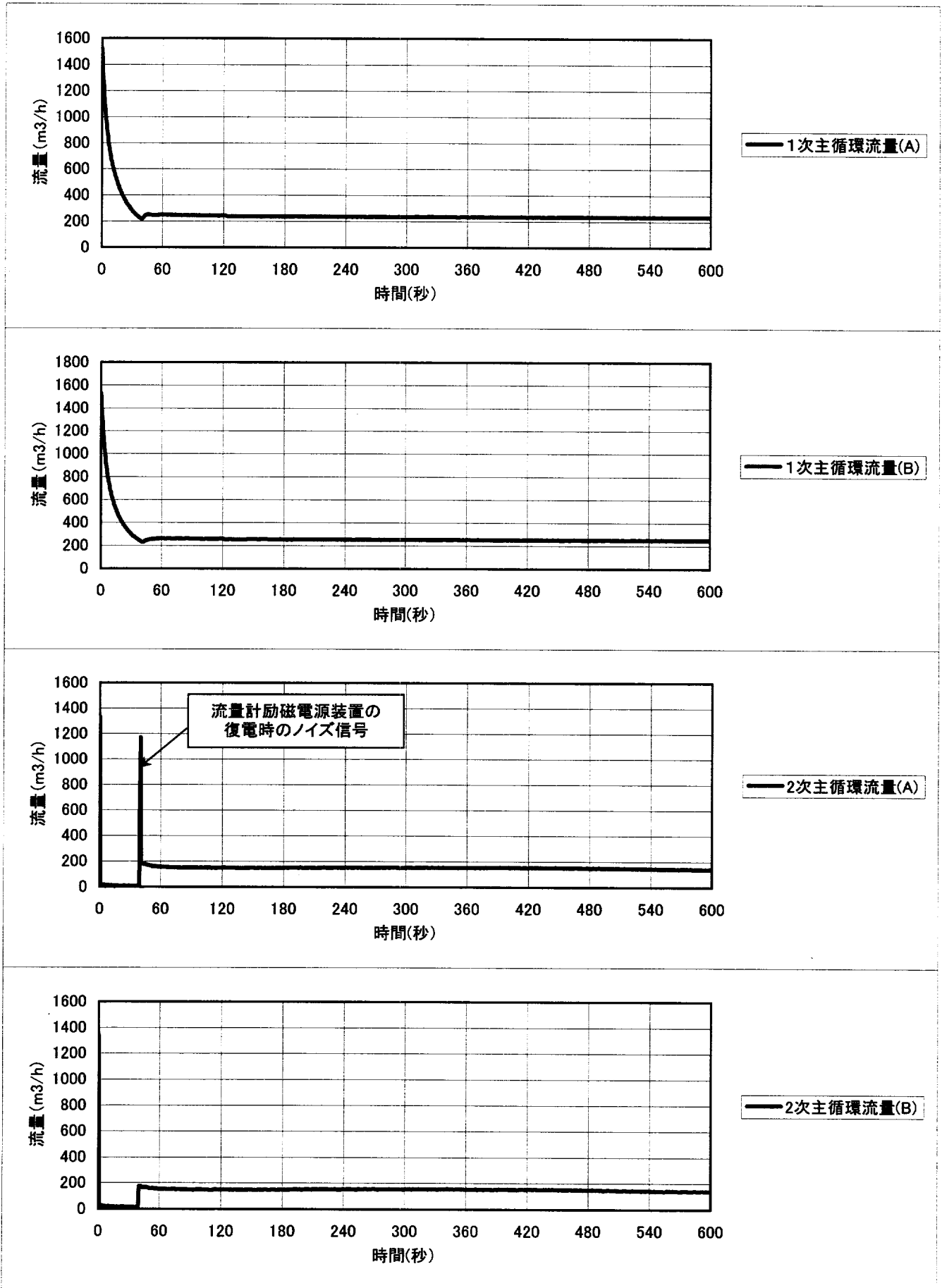


図5.5-1 140MWtからの外部電源喪失試験における各部温度特性



注: 2次主循環流量は、流量計励磁電源装置が非常系電源から供給しているため、ディーゼル発電機起動・非常系電源確立までの時間は指示が出ない。

図5.5-2 140MWtからの外部電源喪失試験における流量特性

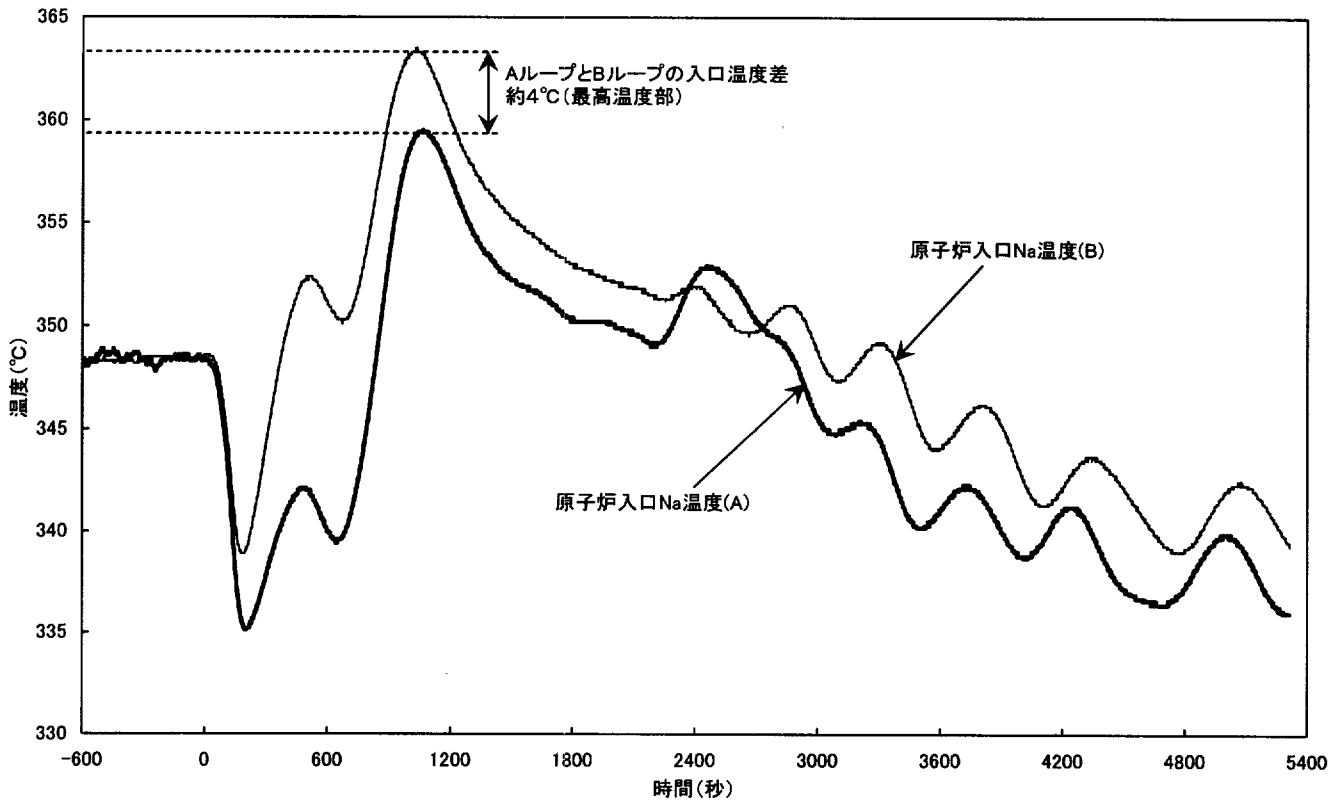


図 5.5-3 外部電源喪失試験 (140MWt) における原子炉入口 Na 温度特性

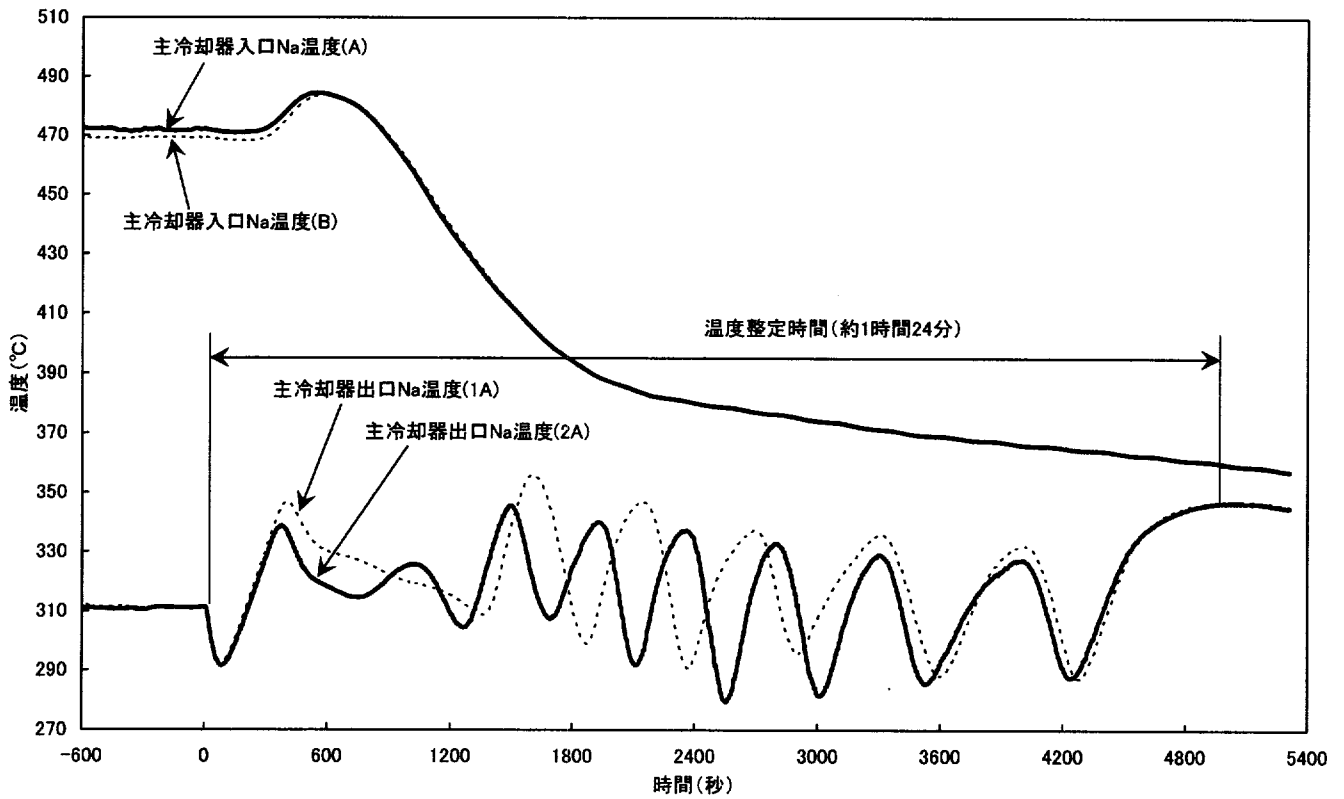


図 5.5-4 外部電源喪失試験 (140MWt) における温度安定時間

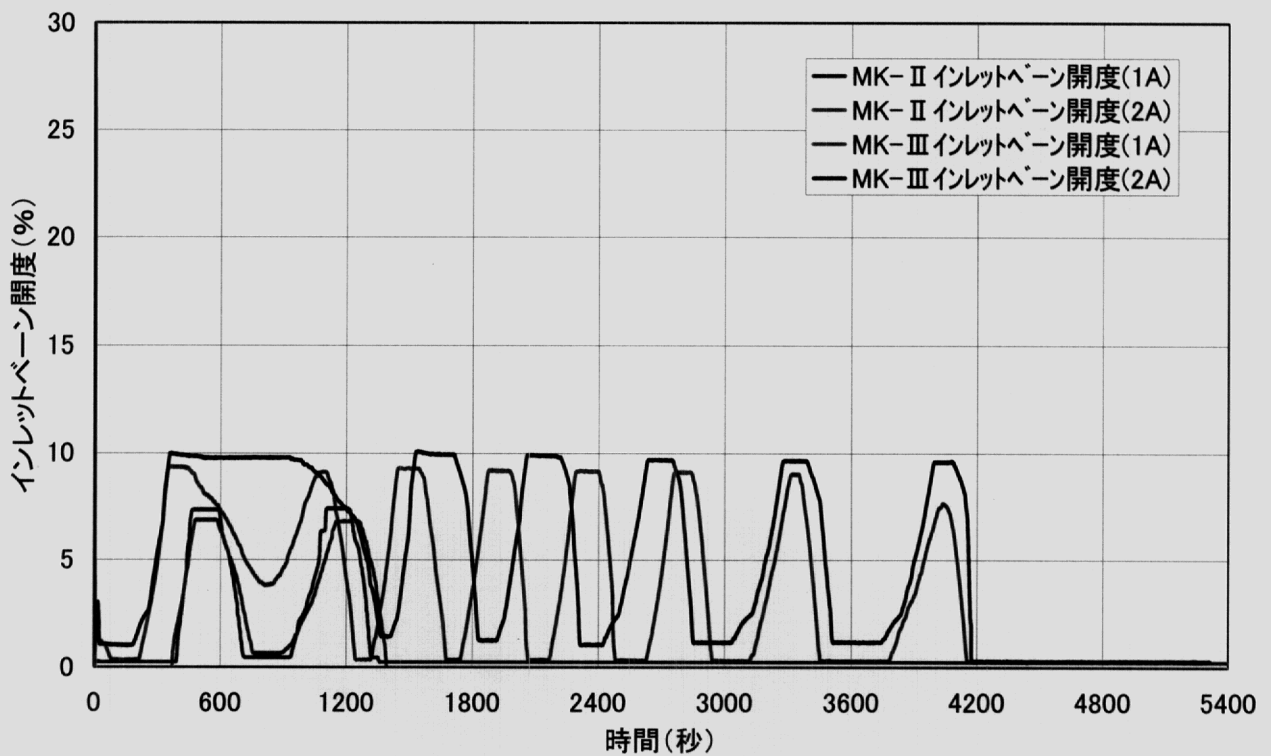
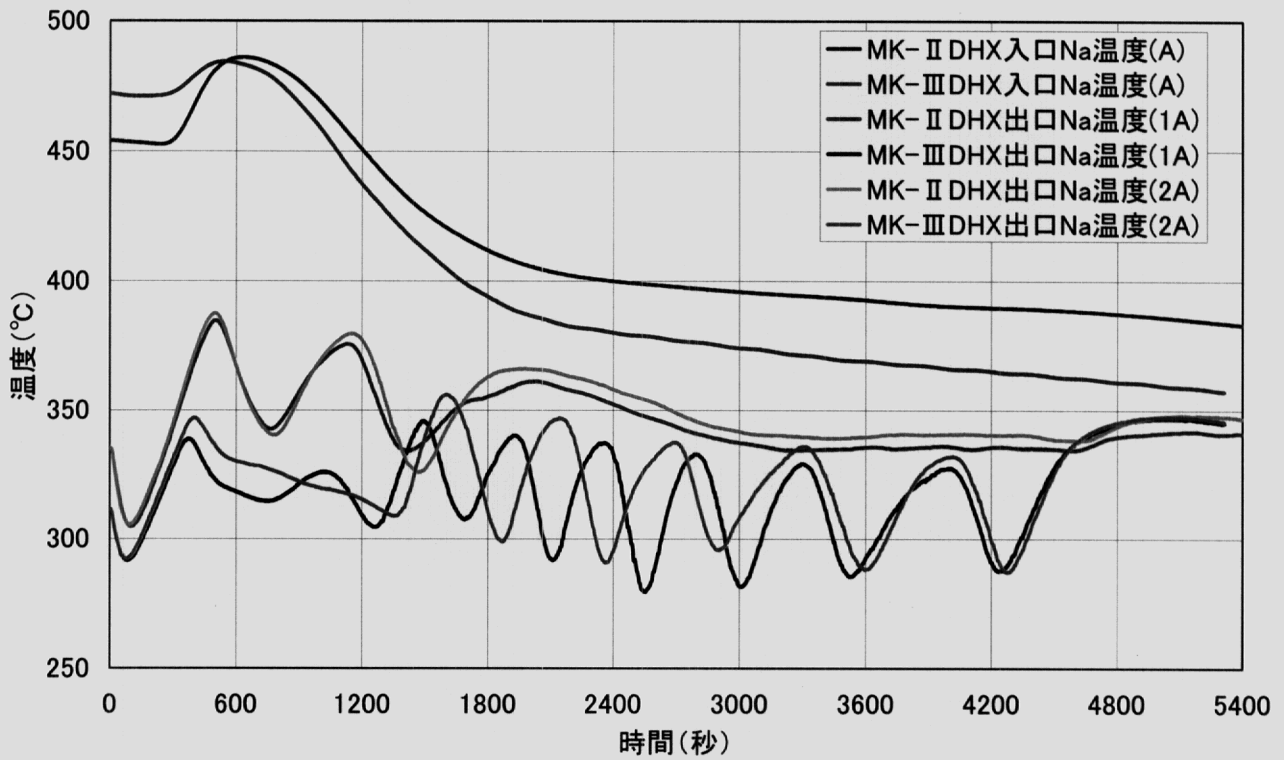


図 5.5-5 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較 (DHX廻り A ループ)

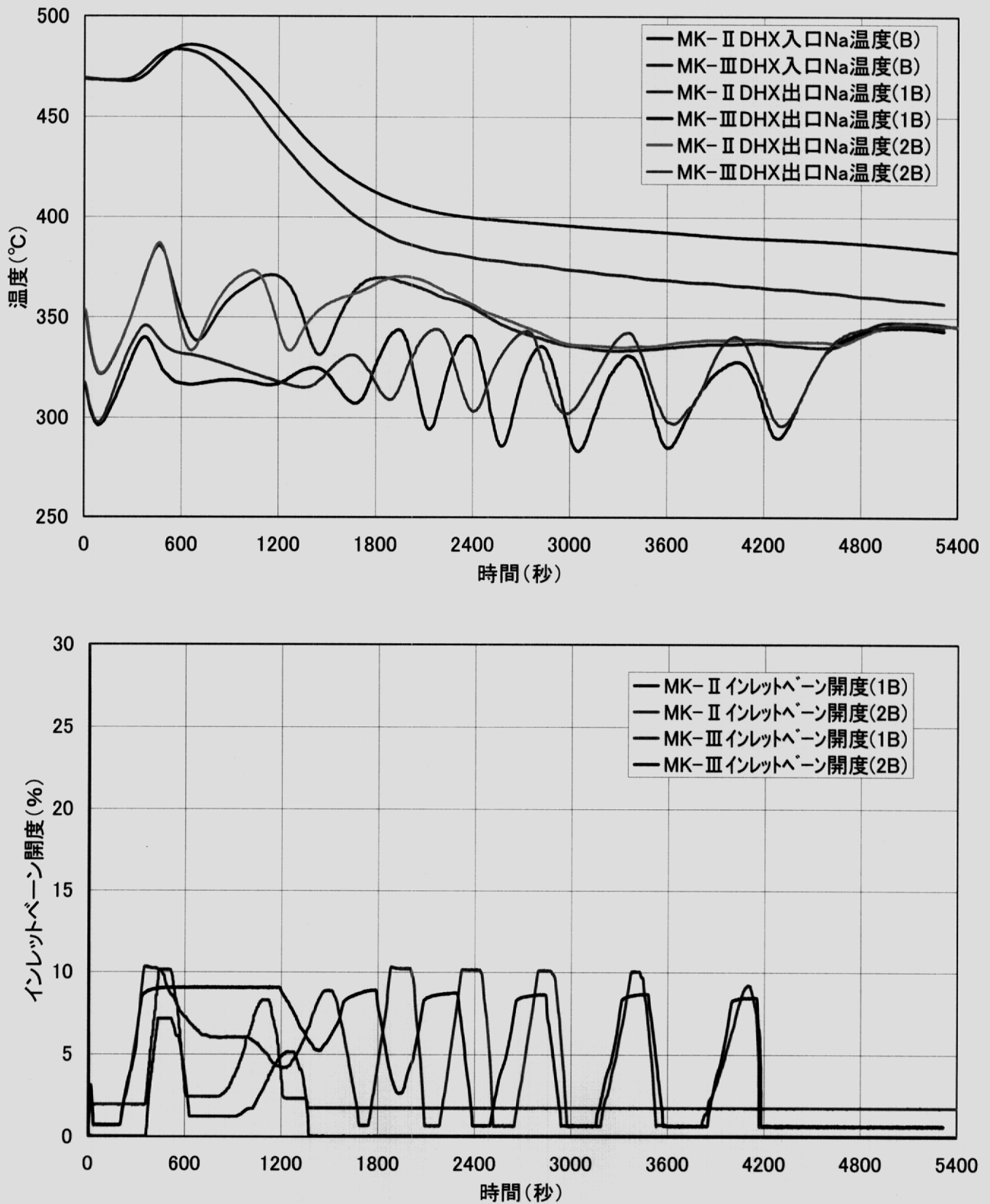


図 5.5-6 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較 (DHX廻り B ループ)

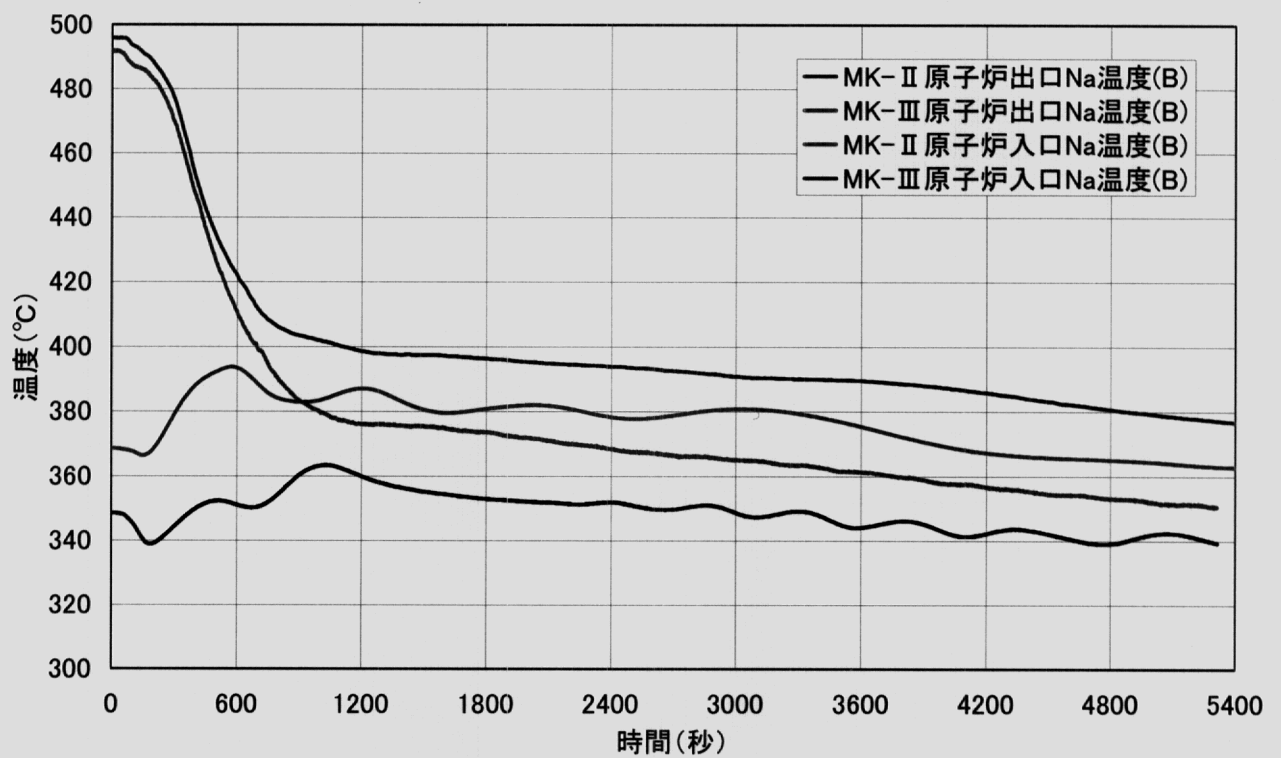
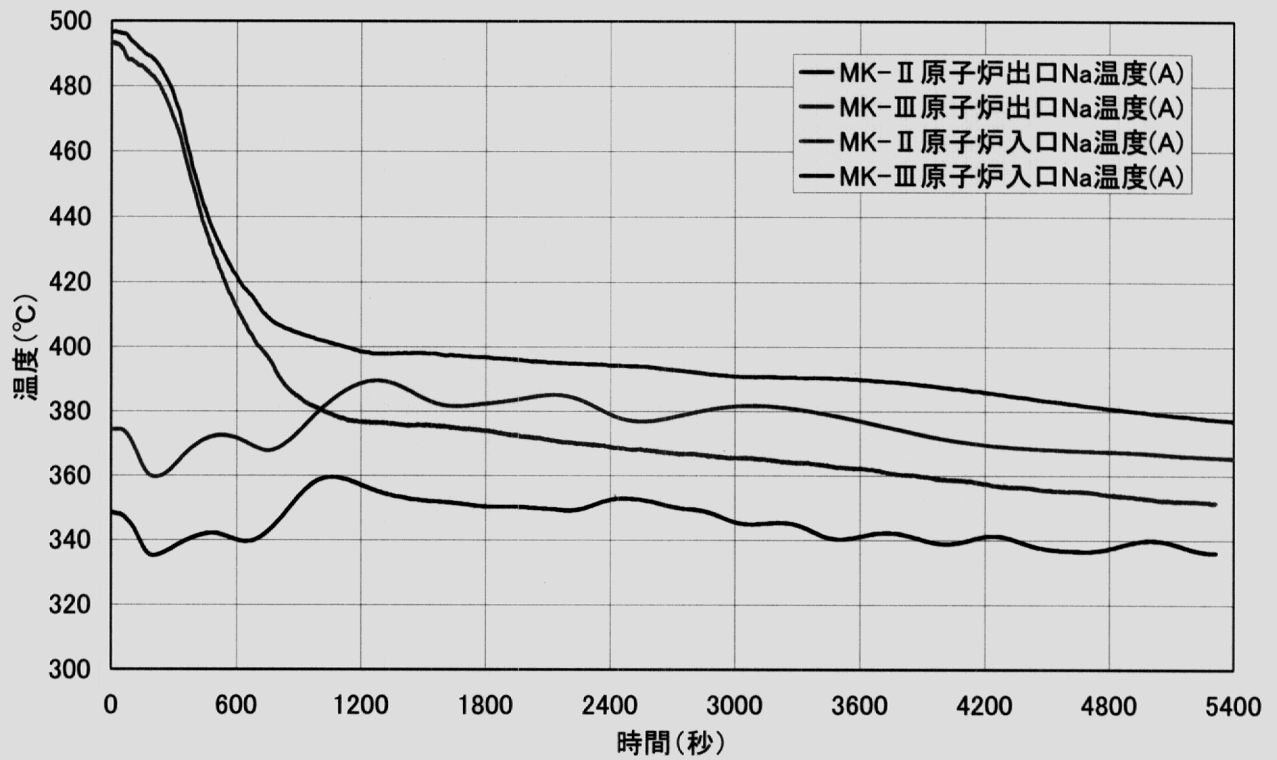


図 5.5-7 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較(原子炉出入口Na温度)

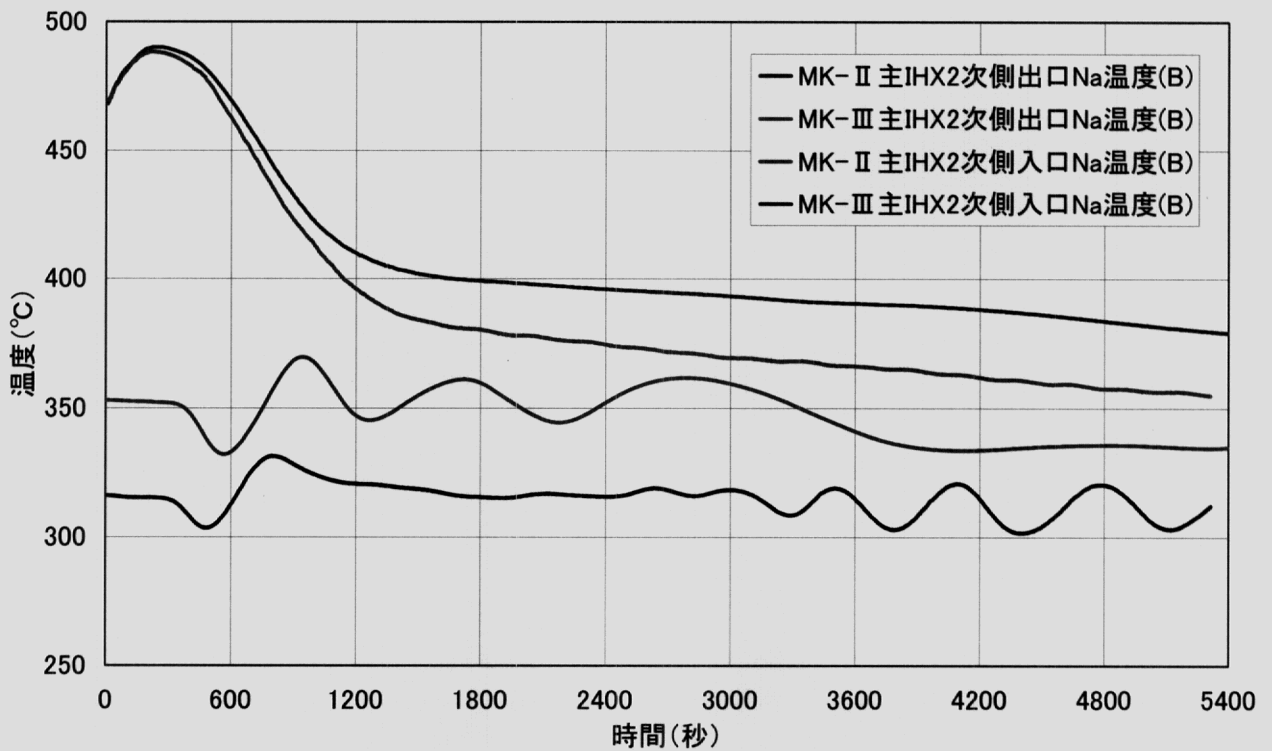
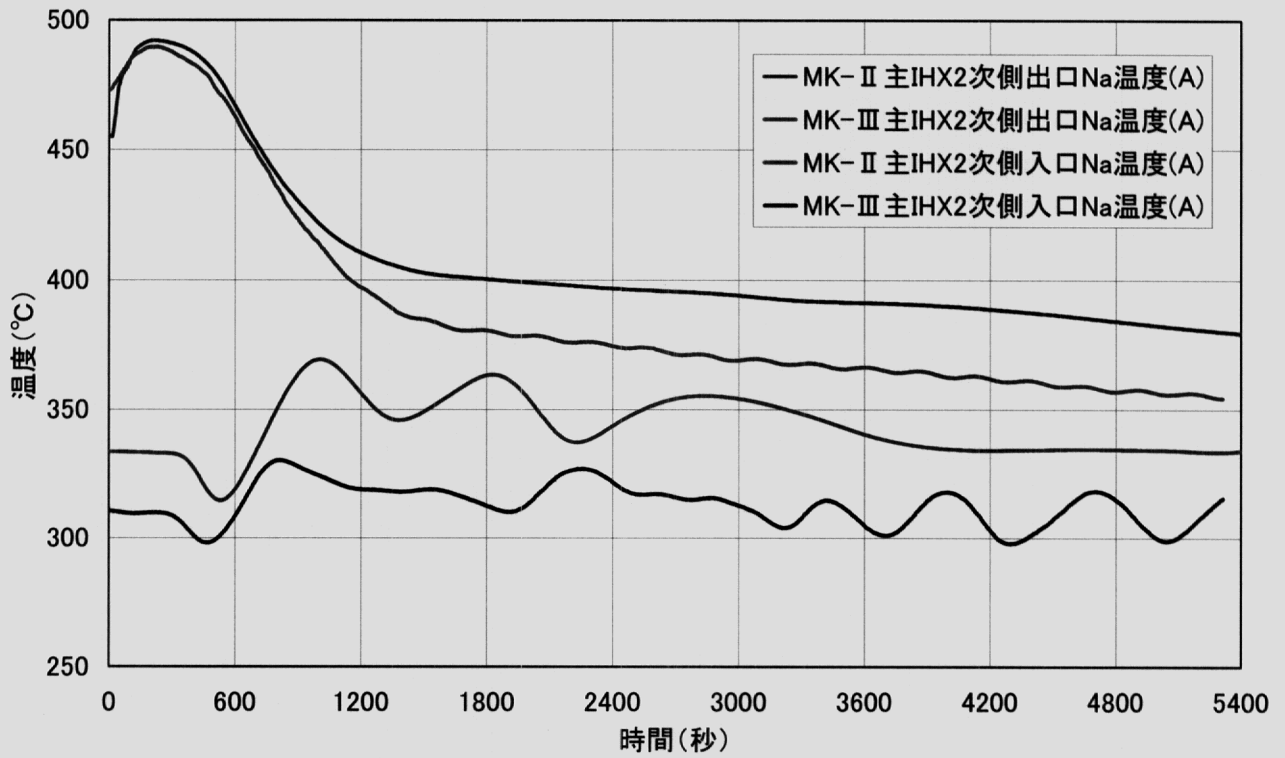


図 5.5-8 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較(主IHX2次側出入口Na温度)

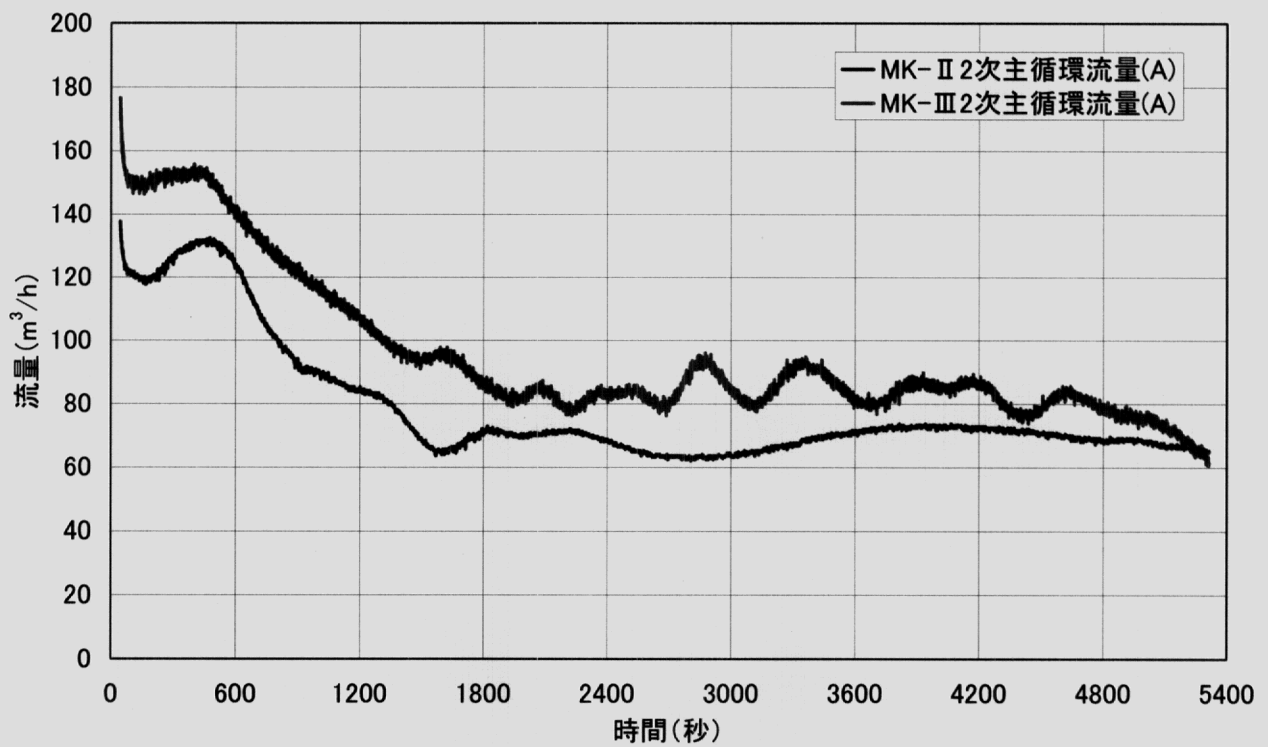
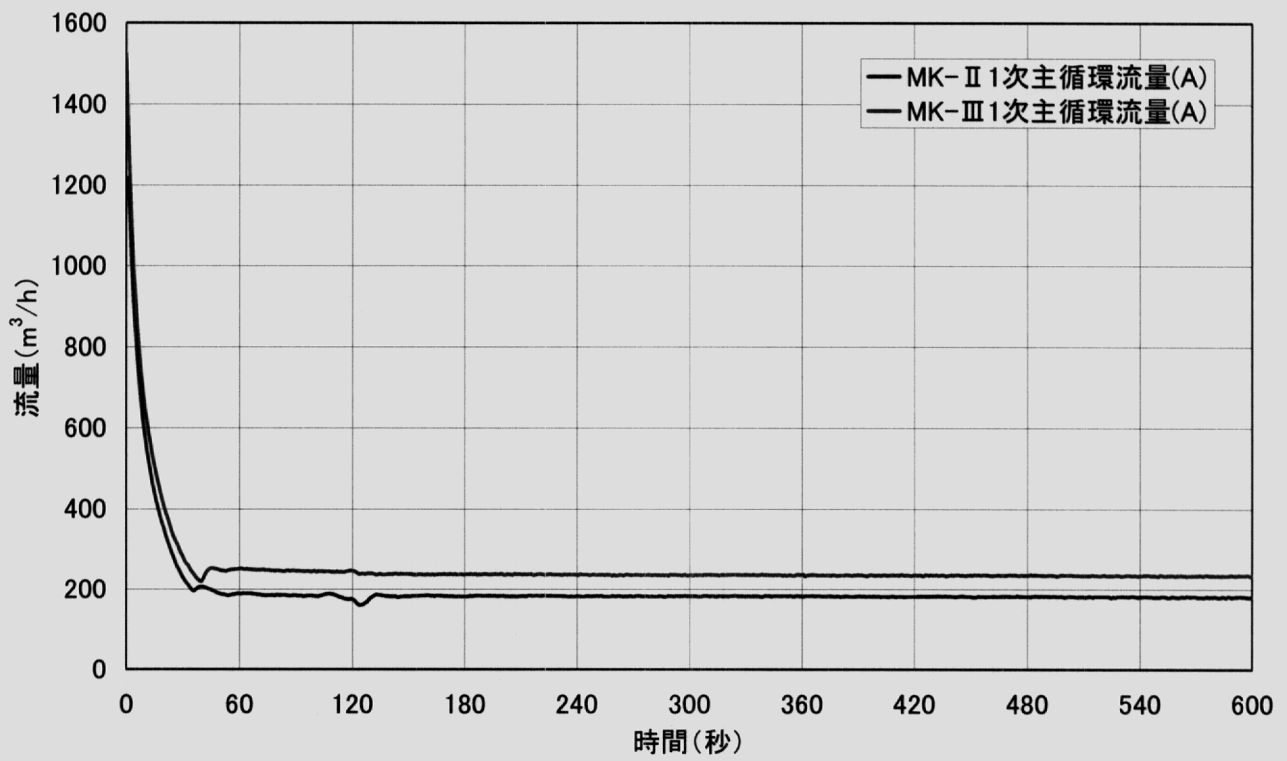


図 5.5-9 外部電源喪失試験時のMK-IIとMK-IIIの比較 (1次・2次主循環流量)

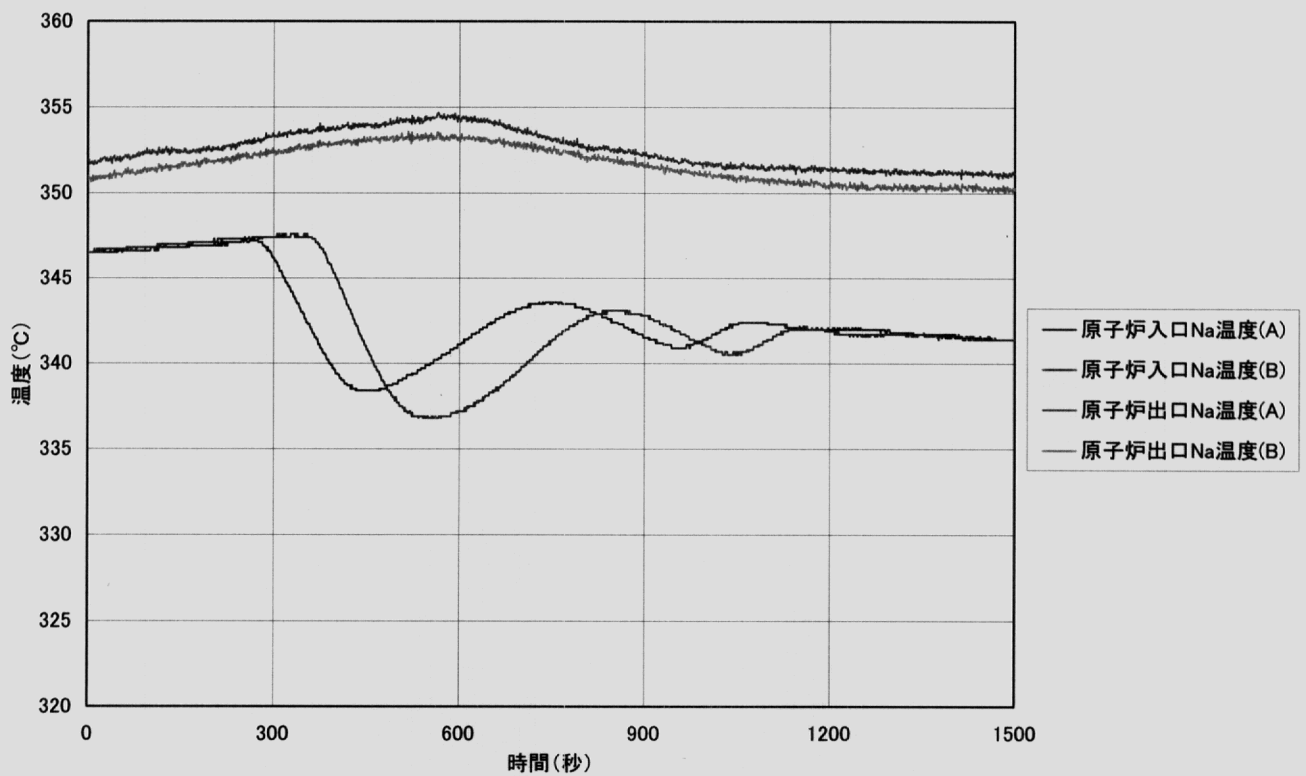
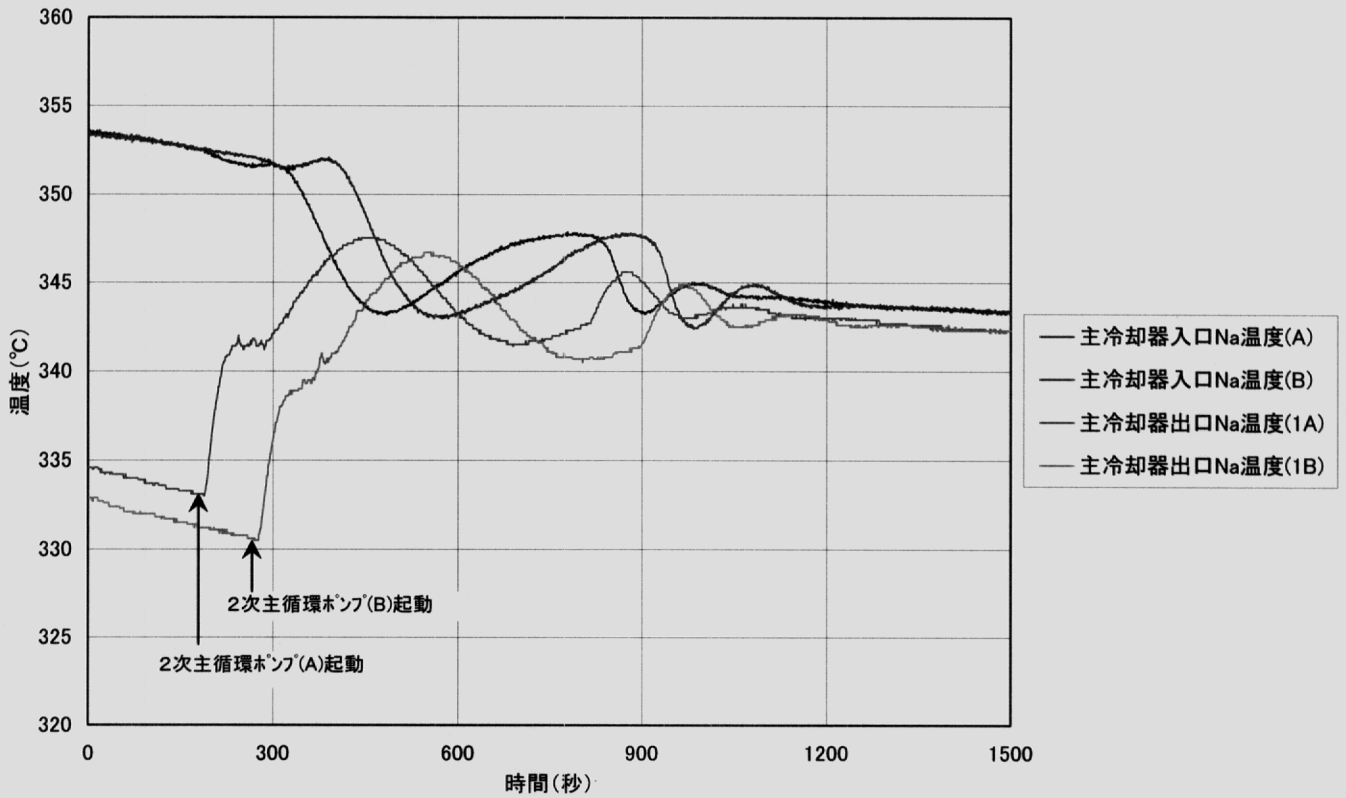
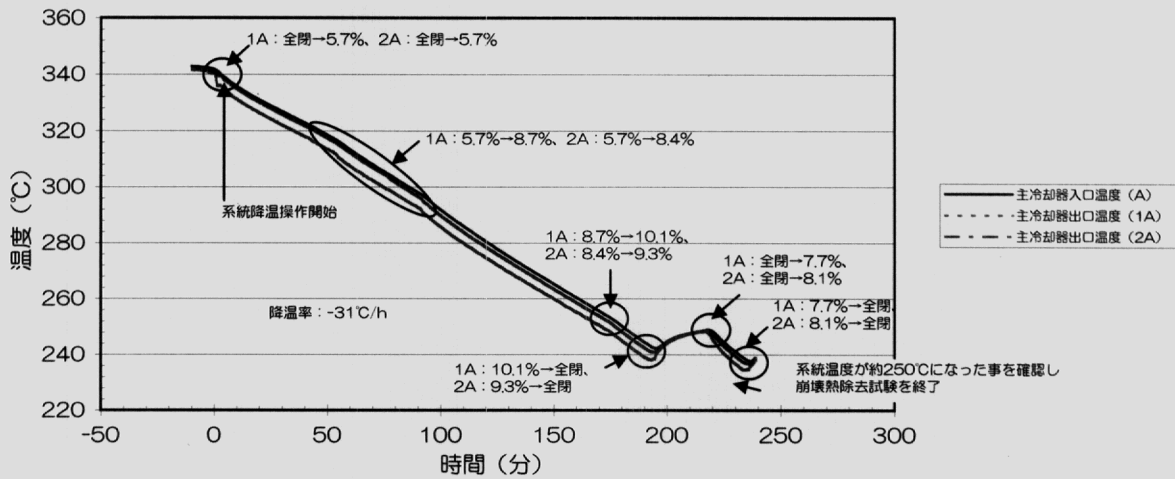
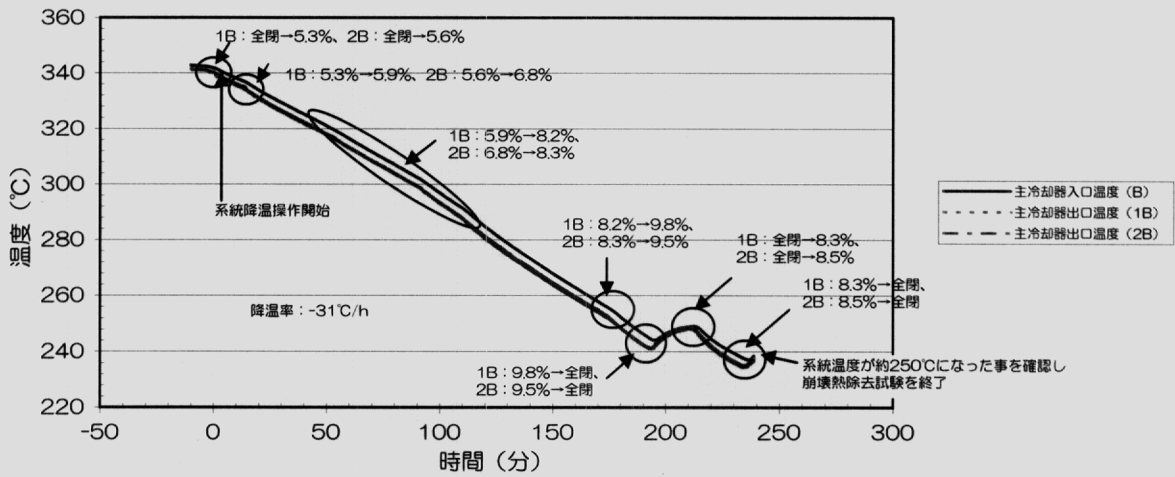


図 5.5-10 2次主循環ポンプ起動時の系統温度変化 (140MWt 外部電源喪失試験後)

主冷却器(Aループ)出入口温度



主冷却器(Bループ)出入口温度



原子炉出入口温度

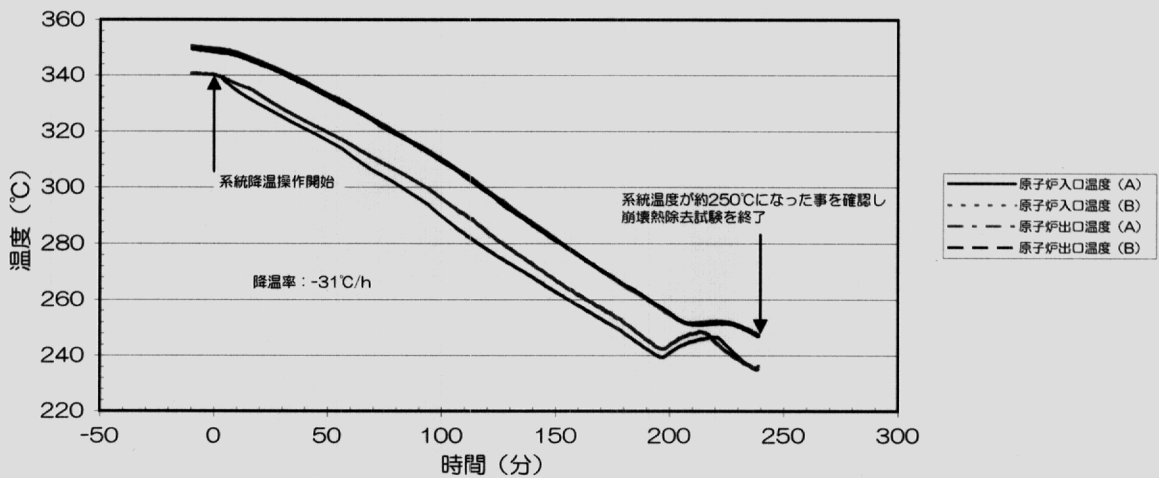


図5.5-11 外部電源喪失試験(140MWt)後の崩壊熱除去特性

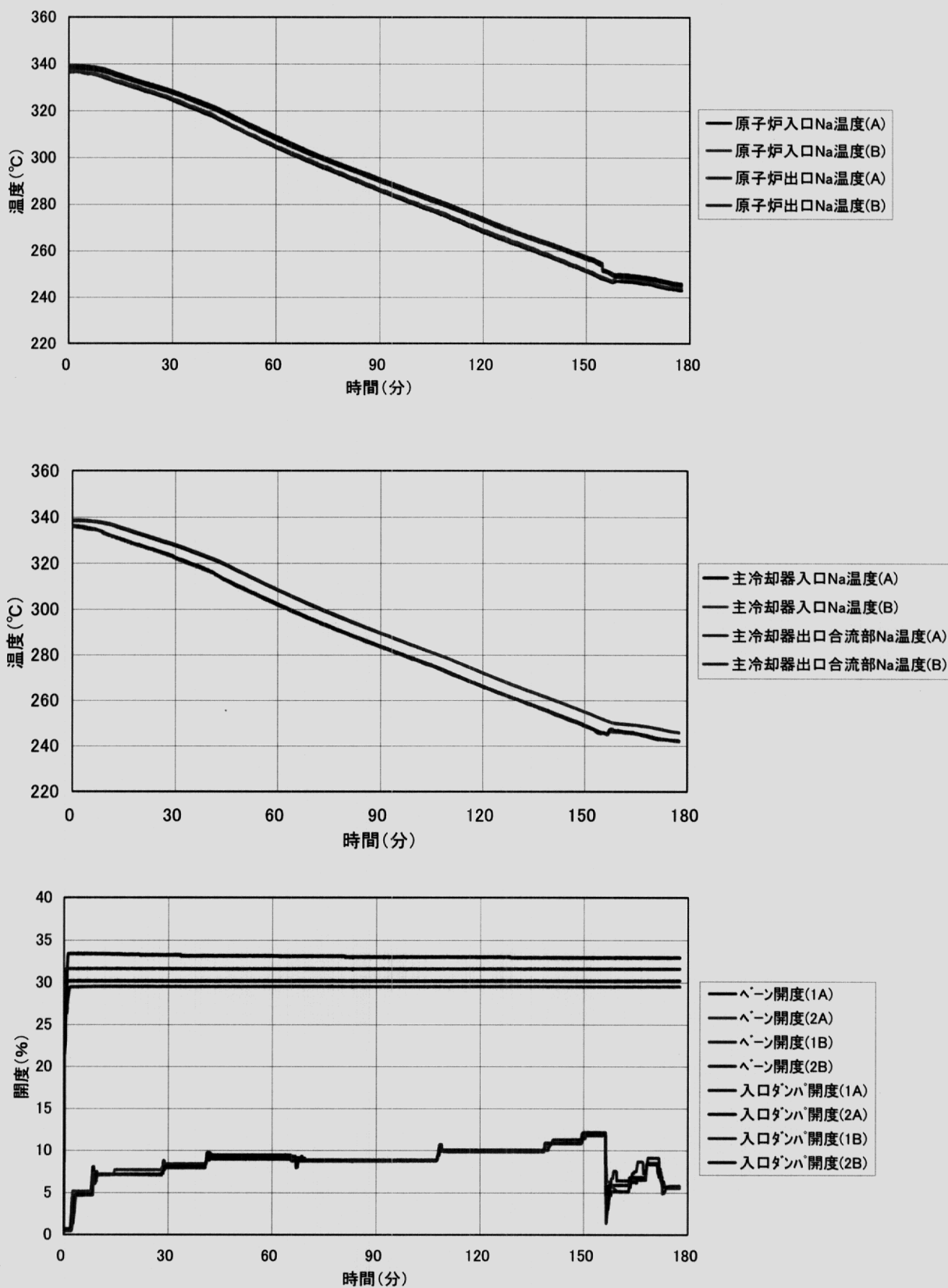
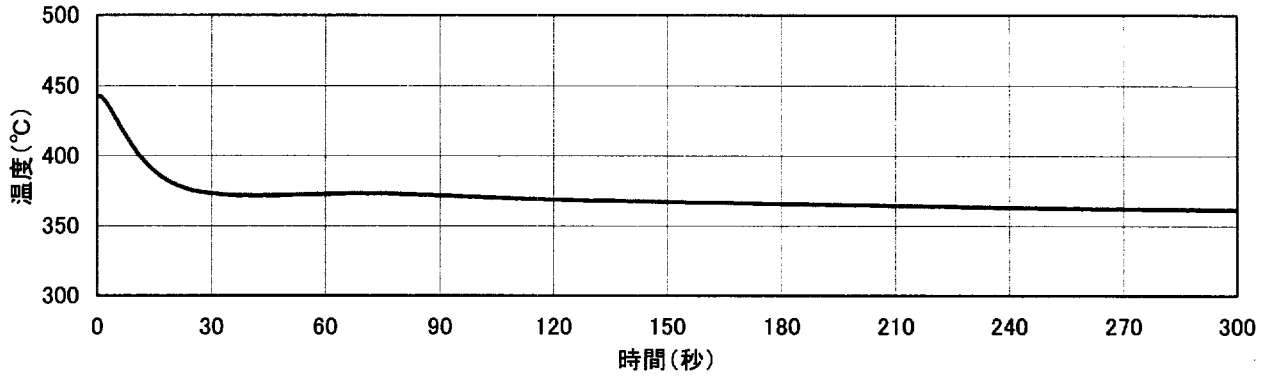
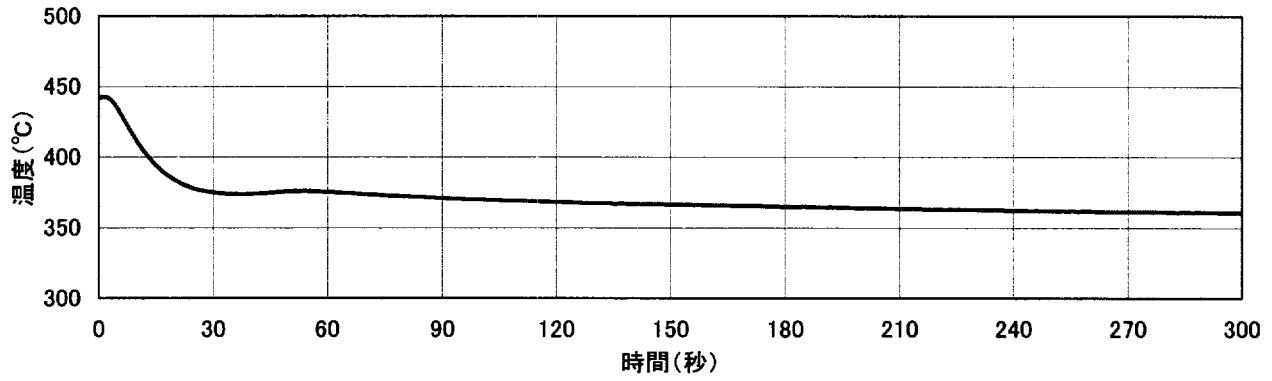


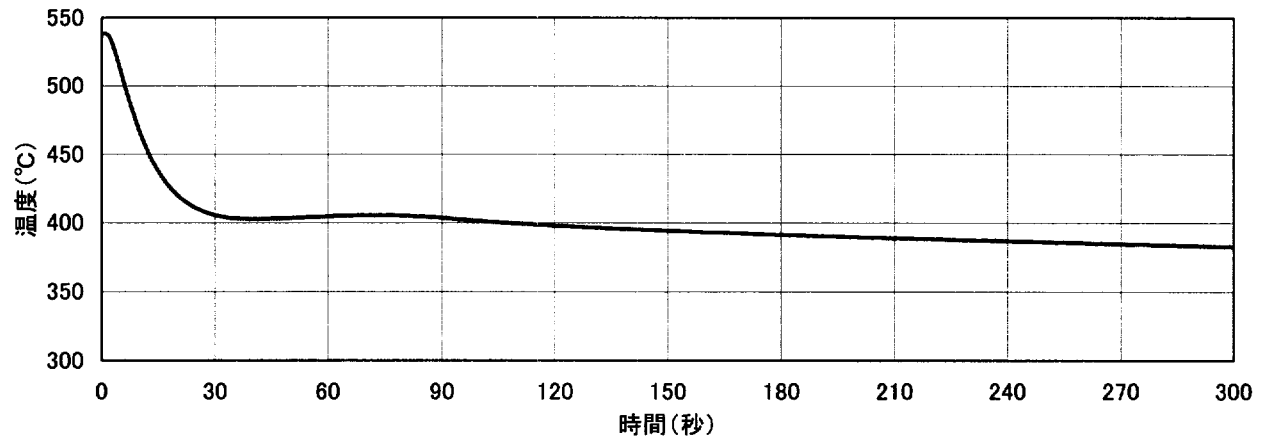
図 5.6-1 35MWt からの原子炉停止後の崩壊熱除去特性



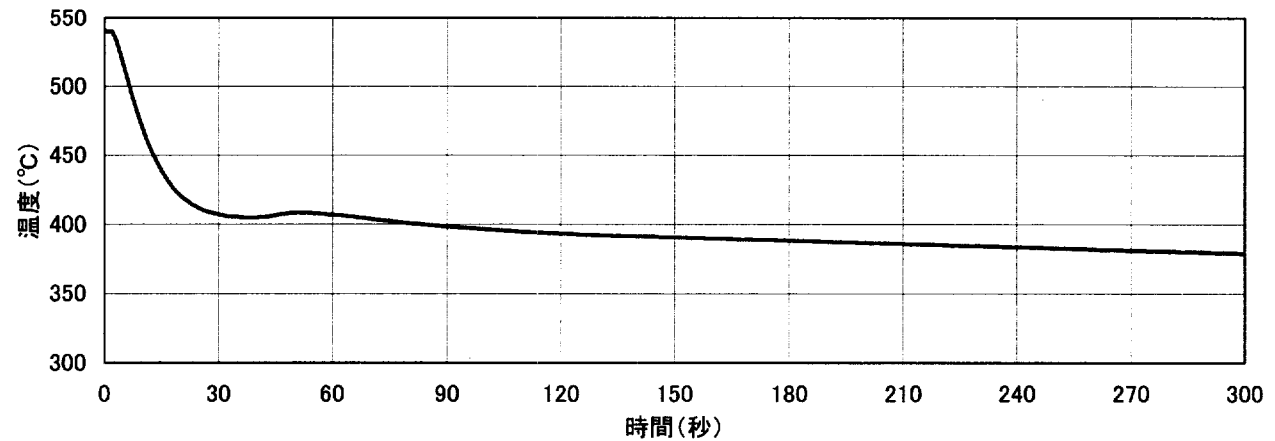
手動スクラム試験 (70MWt)



外部電源喪失試験 (70MWt)

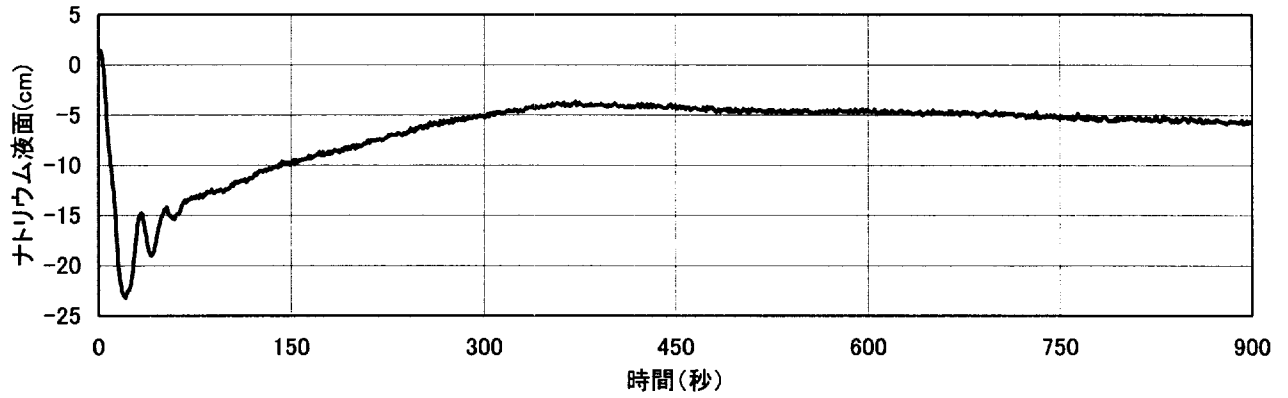


手動スクラム試験 (140MWt)

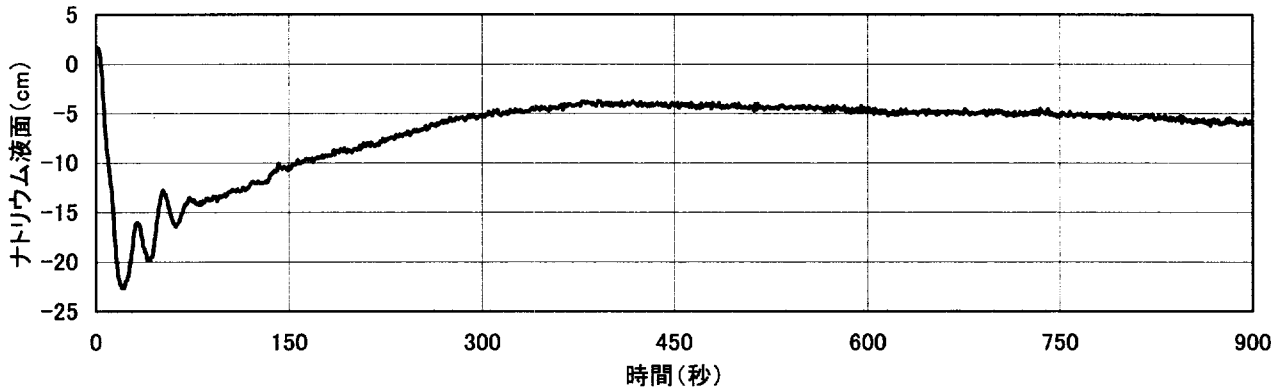


外部電源喪失試験 (140MWt)

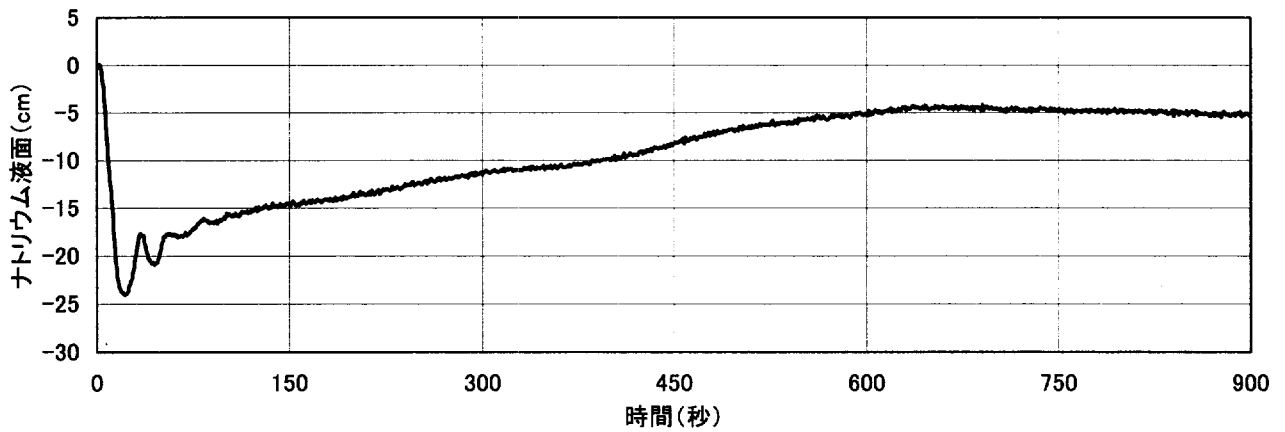
図 5.8-1 燃料集合体 (1A1) 出口 Na 温度の変化



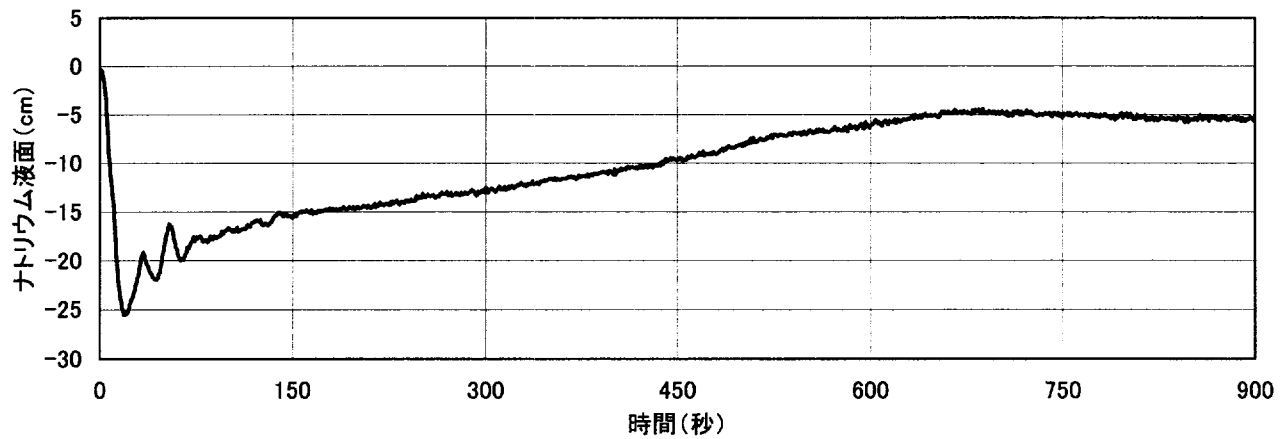
手動スクラム試験 (70MWt)



外部電源喪失試験 (70MWt)



手動スクラム試験 (140MWt)



外部電源喪失試験 (140MWt)

図 5.9-1 原子炉容器ナトリウム液面の変動

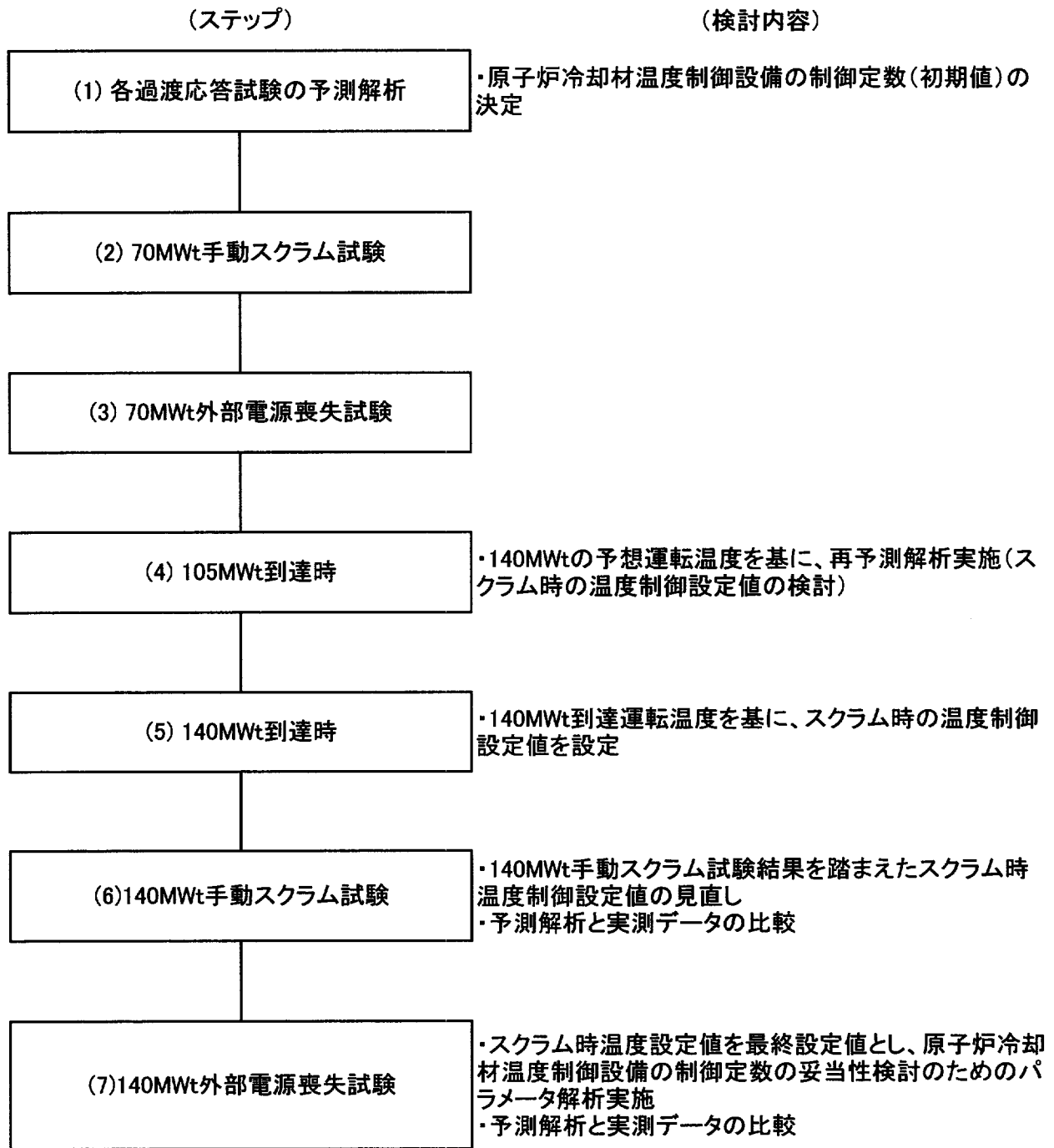
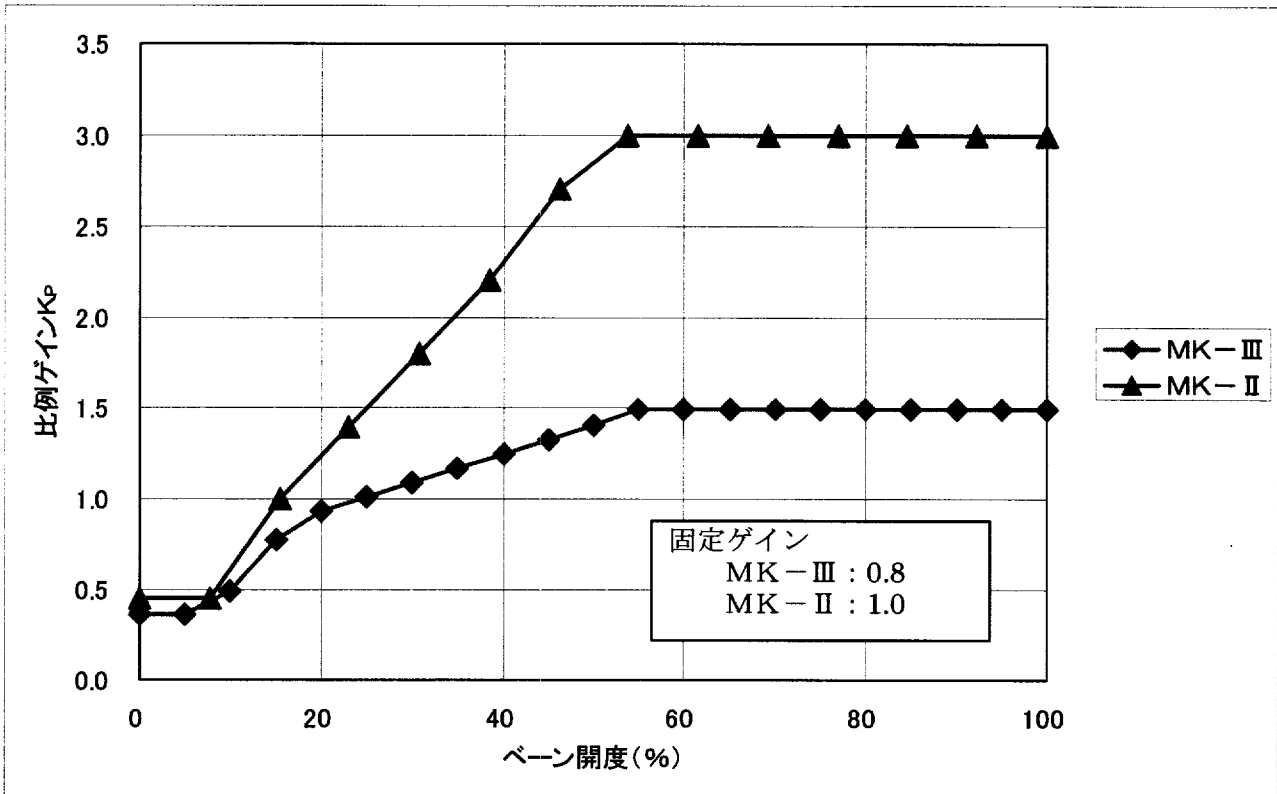
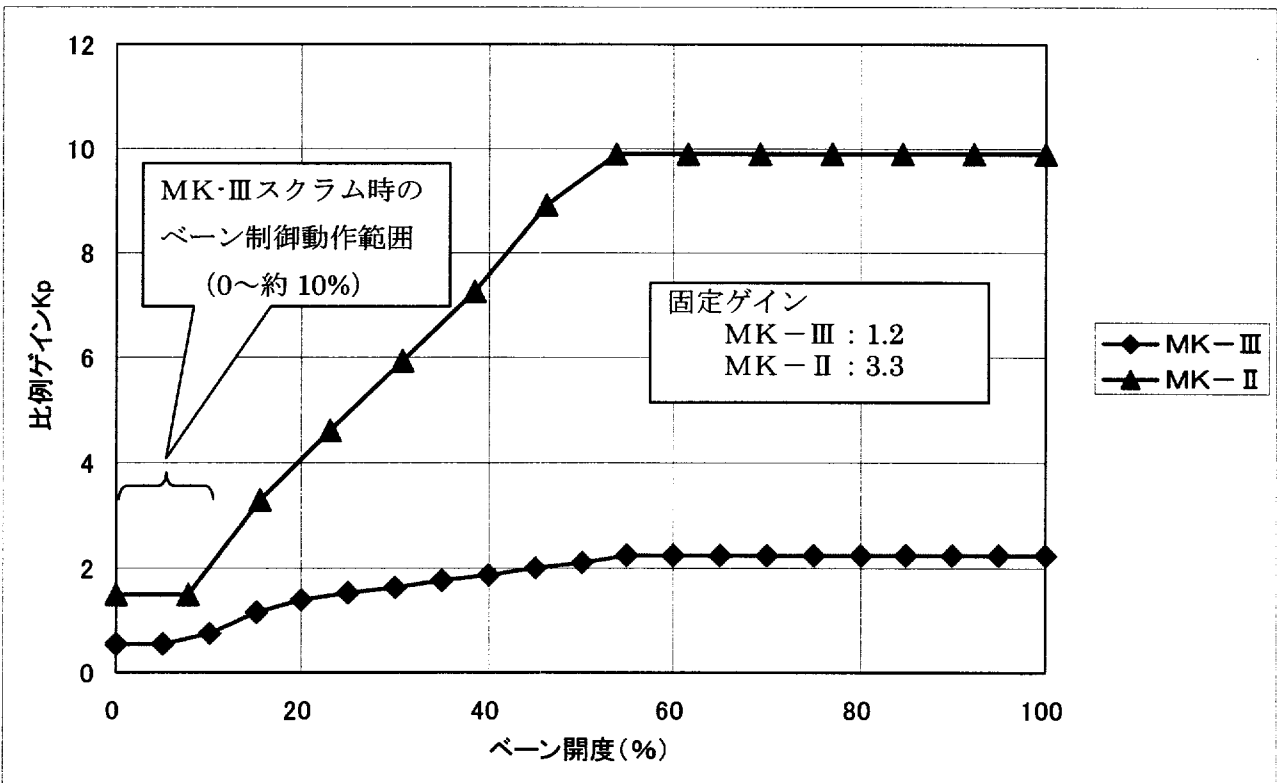


図6-1 Mimir-N2を用いた過渡応答試験検討フローチャート



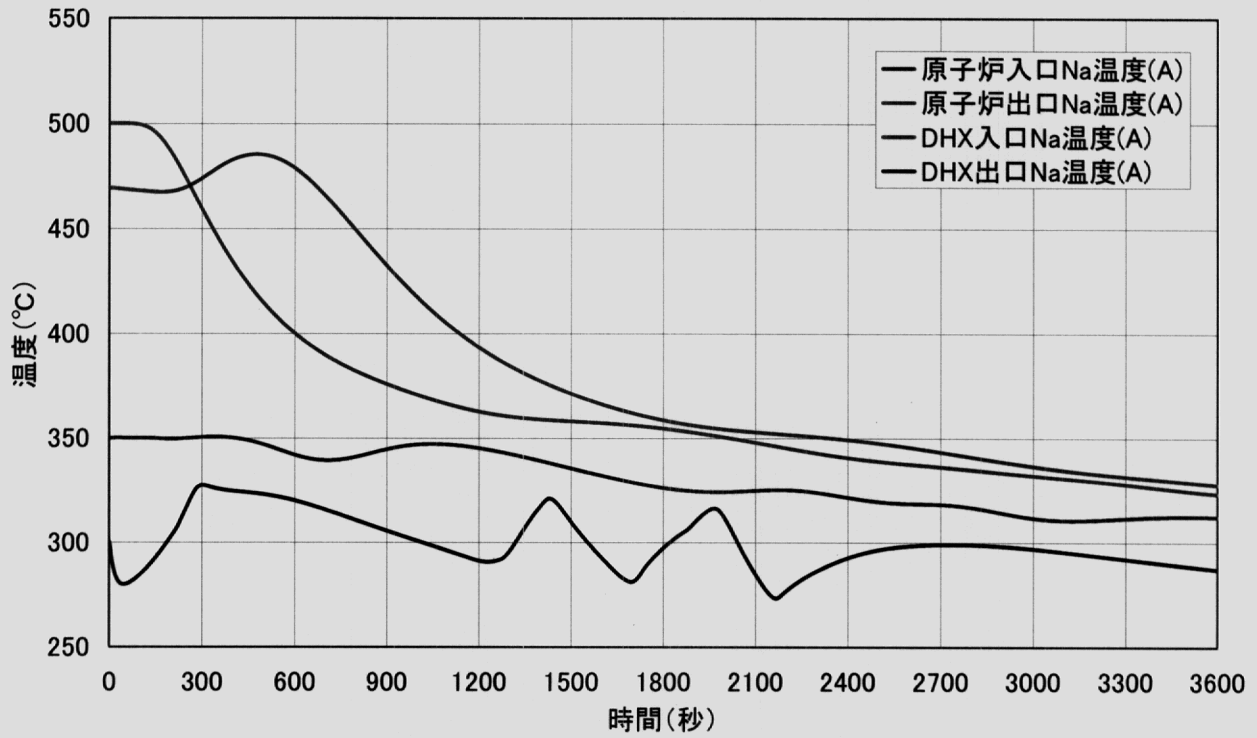
(1)通常運転時の比例ゲイン



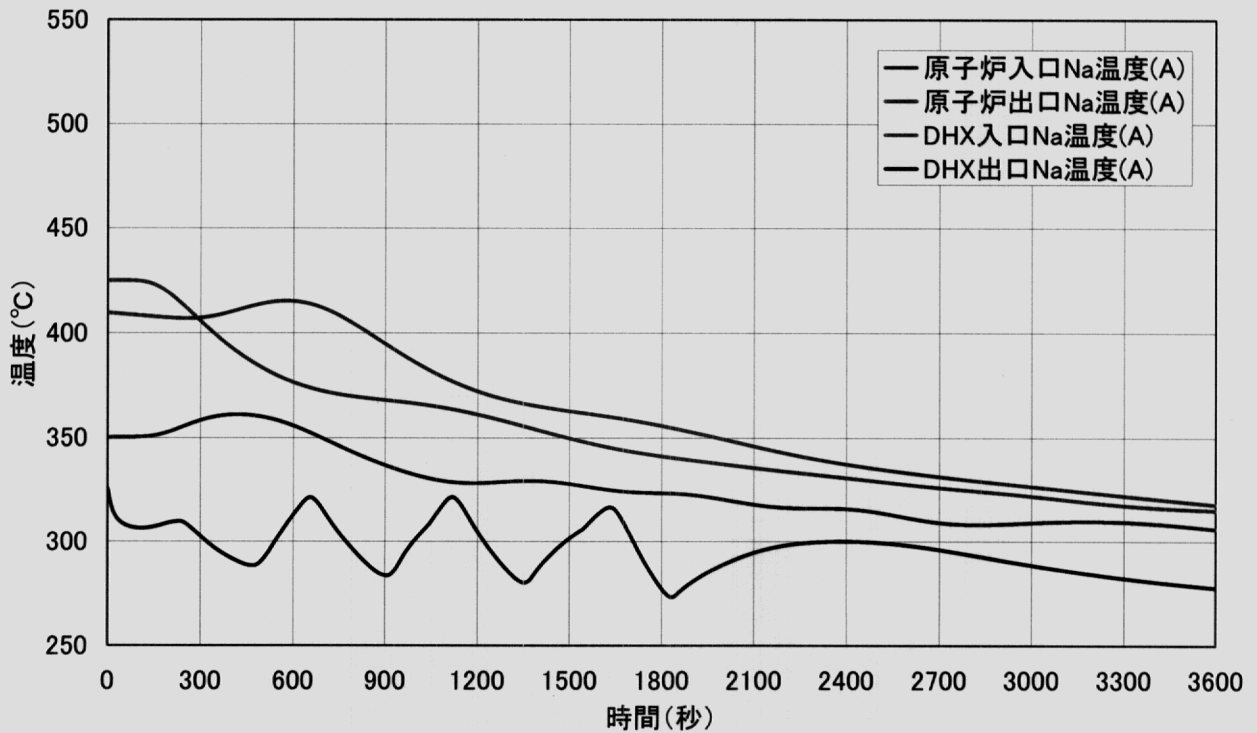
(2)スクラム時の比例ゲイン

注：比例ゲイン=固定ゲイン×非線形補償ゲイン

図 6.1-1 「常陽」原子炉冷却材温度制御設備の比例ゲイン



140MWt 外部電源喪失の予測解析



70MWt 外部電源喪失の予測解析

図 6.1-2 Mimir-N2 による予測解析結果の代表例 (試験開始前)

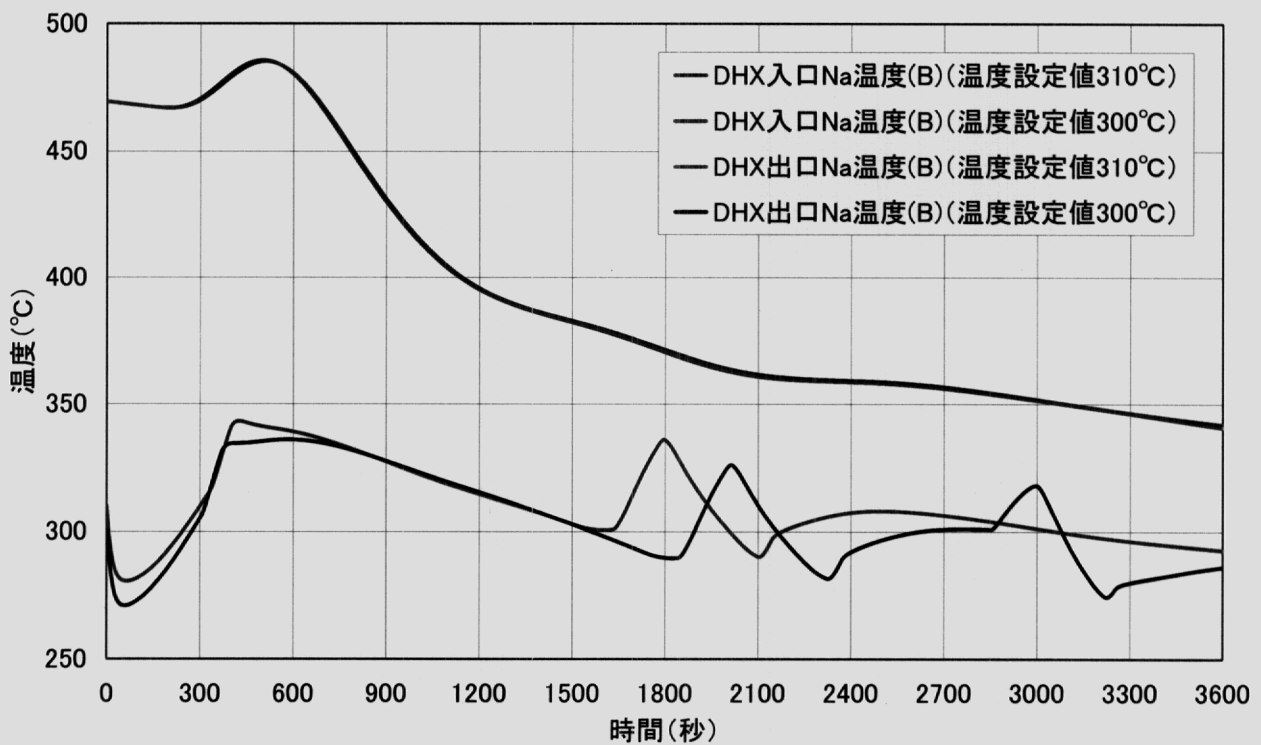
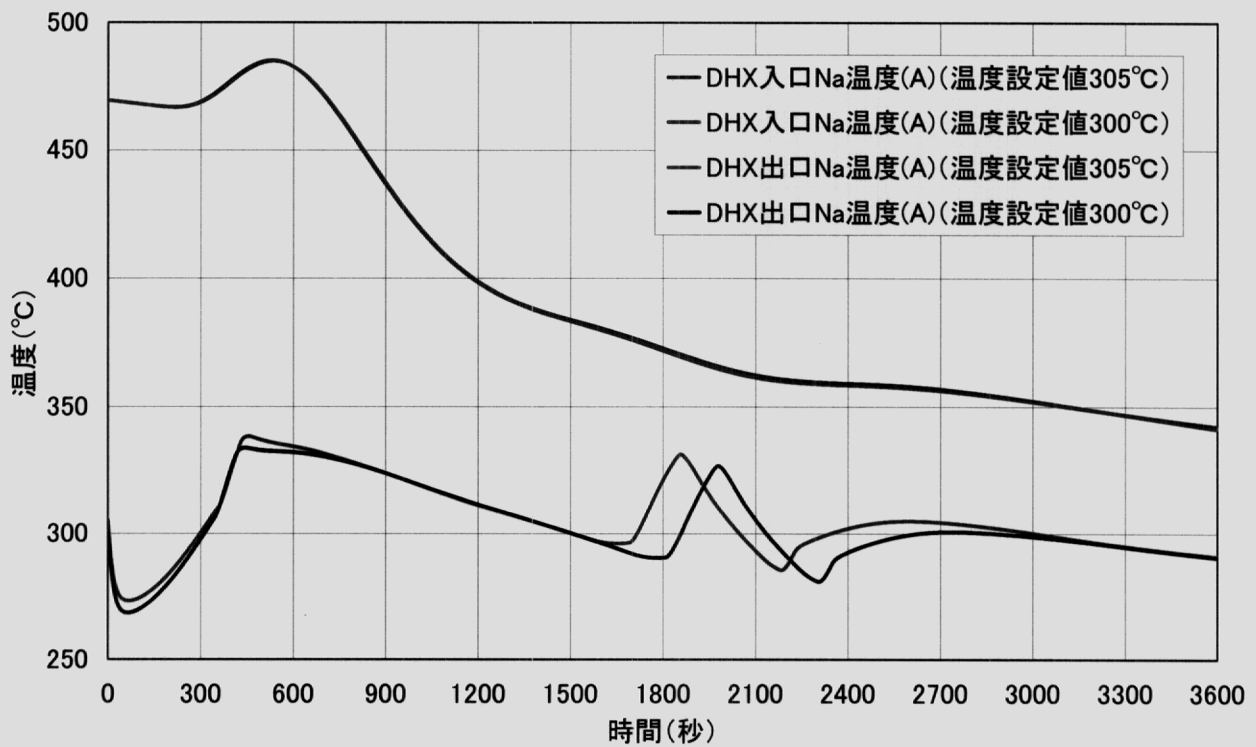


図 6.2-1 140MWtにおけるDHX出入口 Na 温度の解析結果
(手動スクラム試験・温度設定値変更前後)

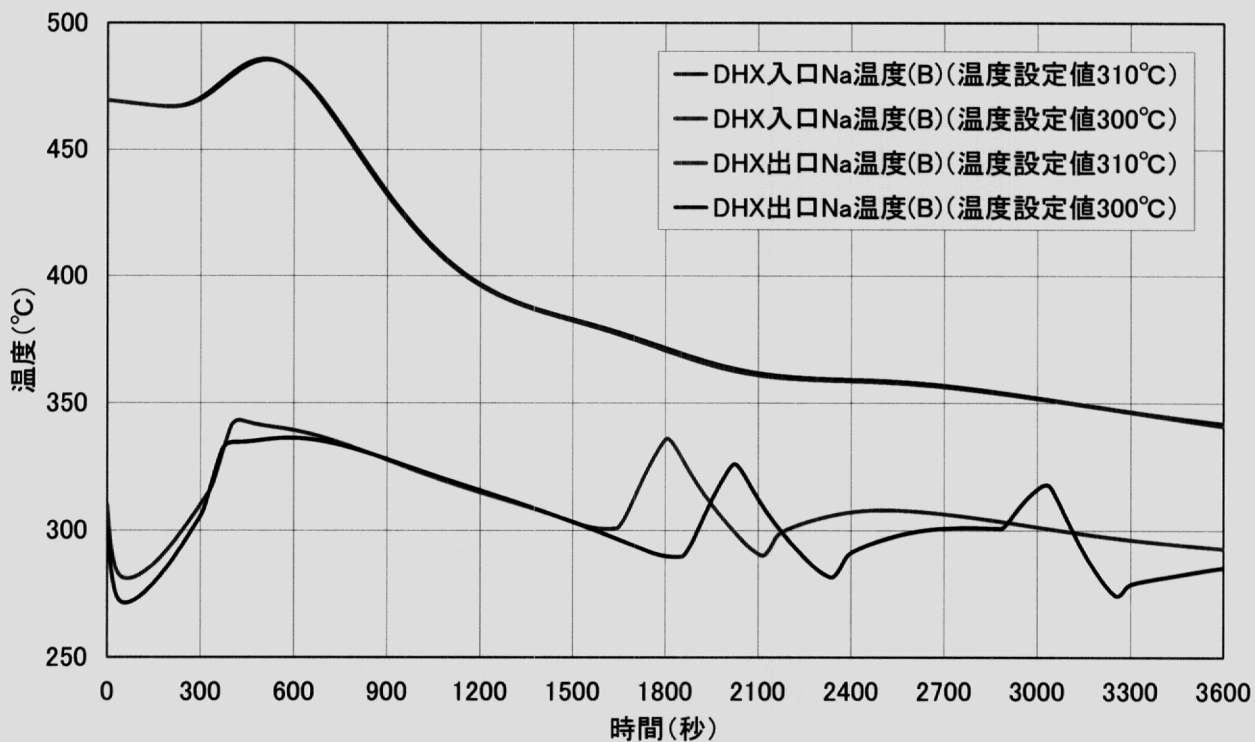
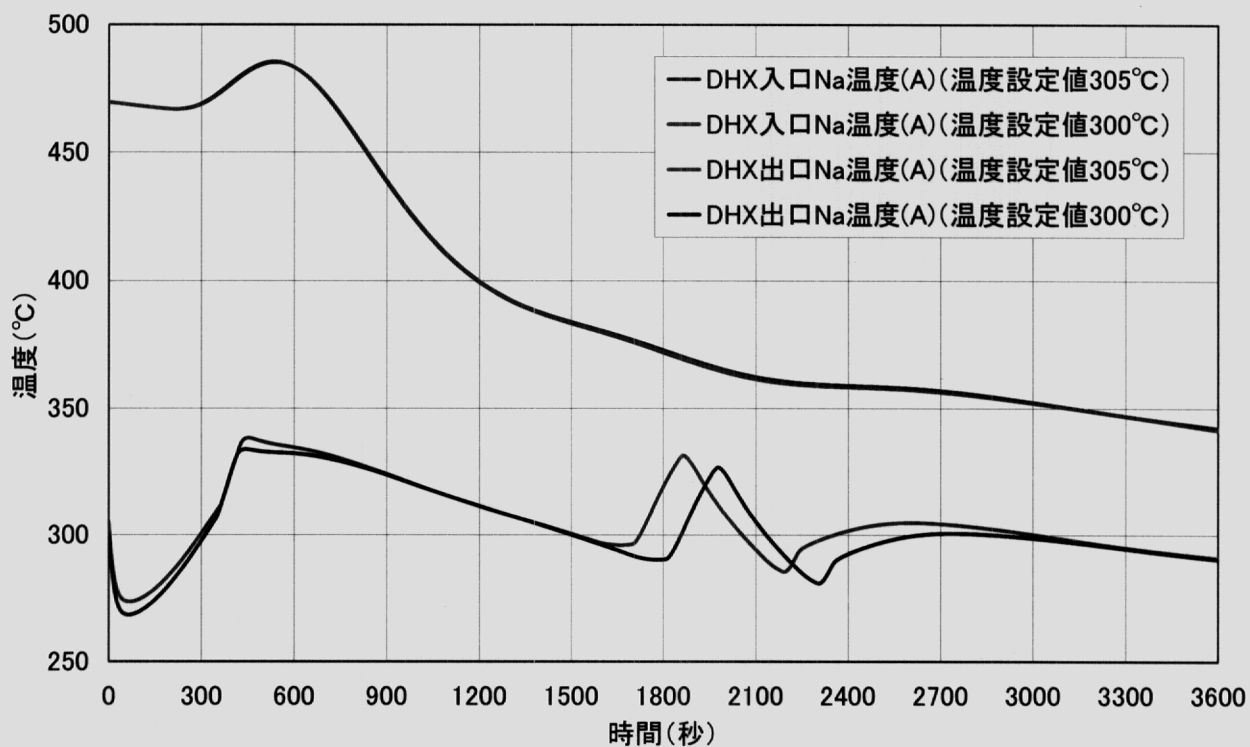


図 6.2-2 140MWt における DHX 出入口 Na 温度の解析結果
(外部電源喪失試験・温度設定値変更前後)

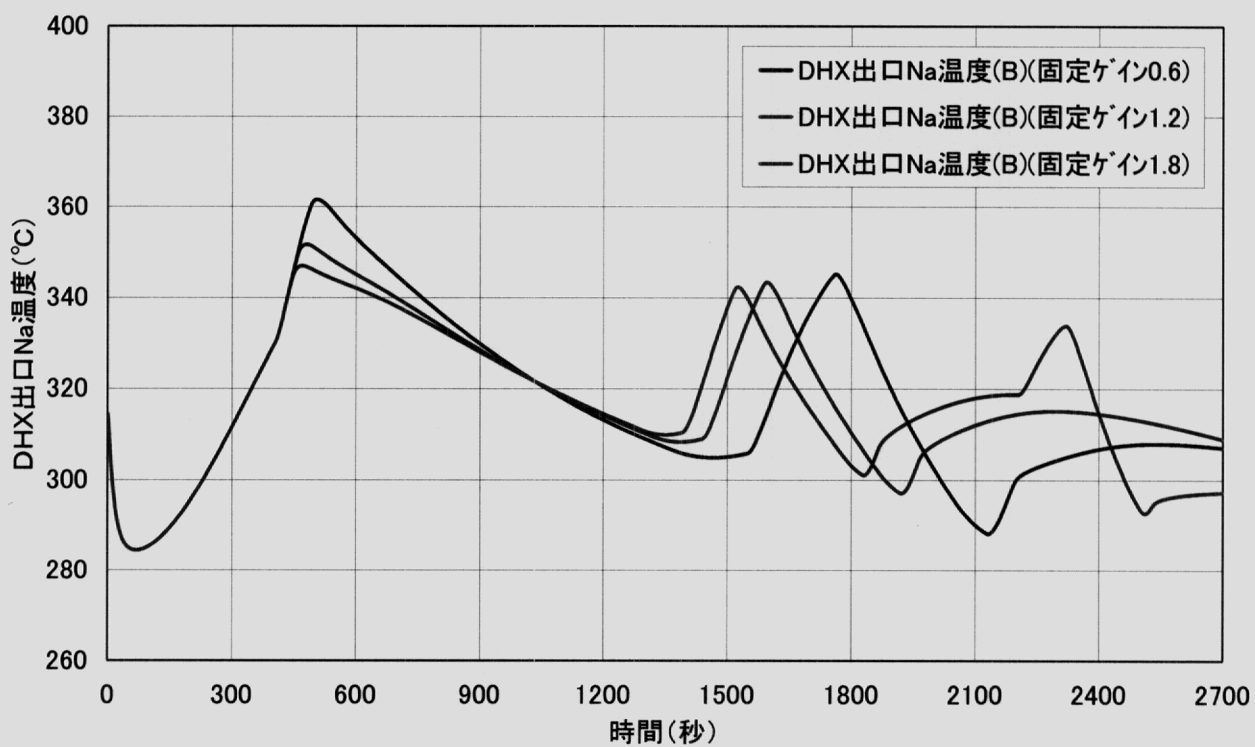
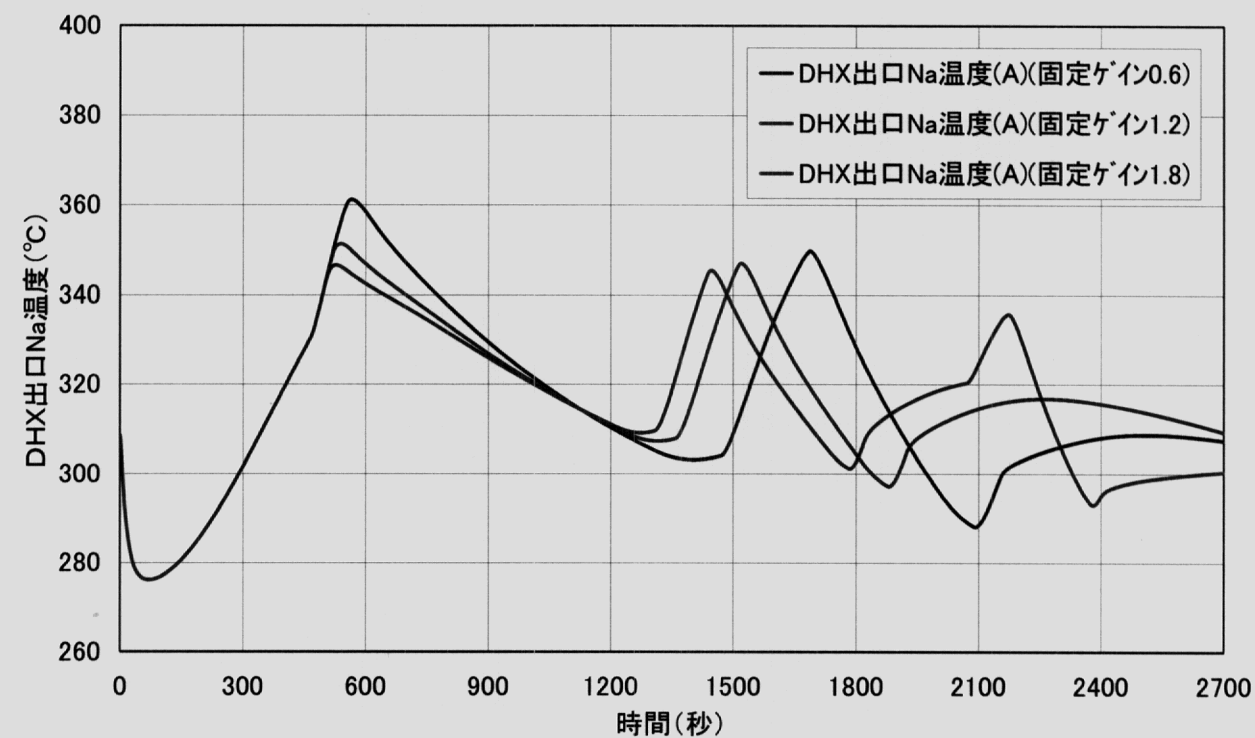


図 6.3-1 140MWt におけるDHX出口 Na 温度の解析結果
(手動スクラム試験・固定ゲインをパラメータとした解析)

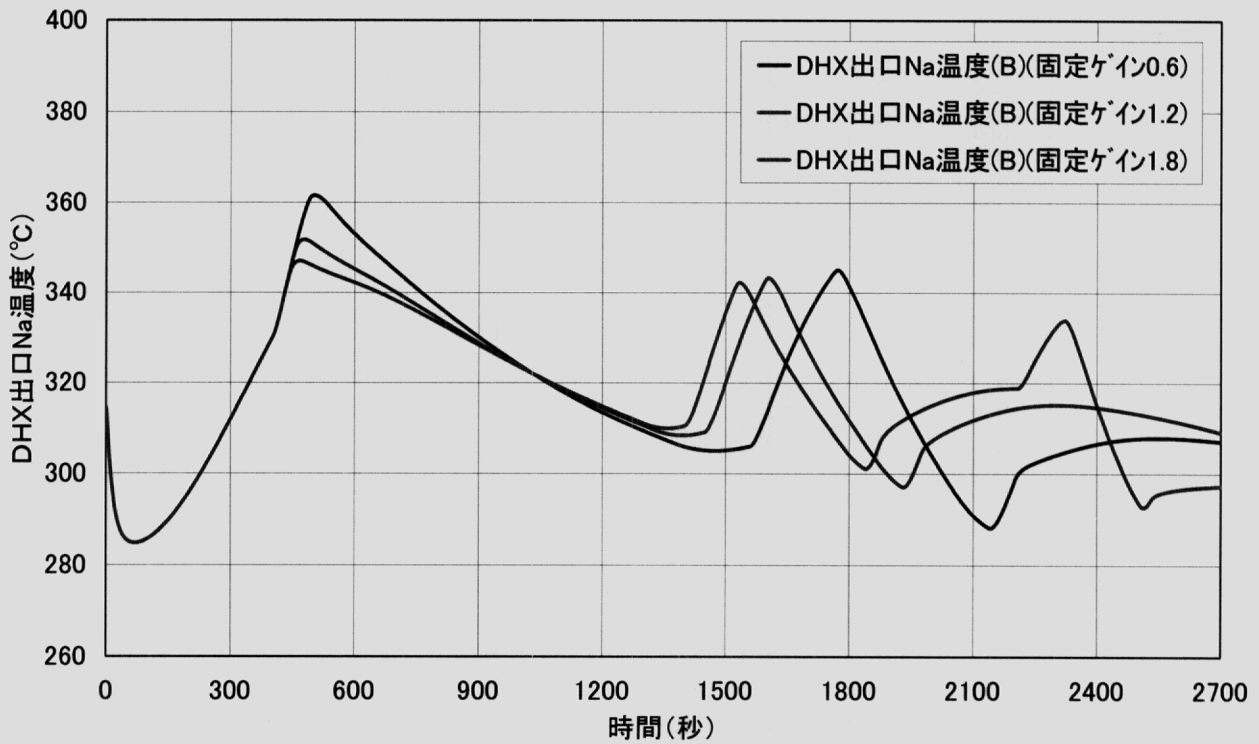
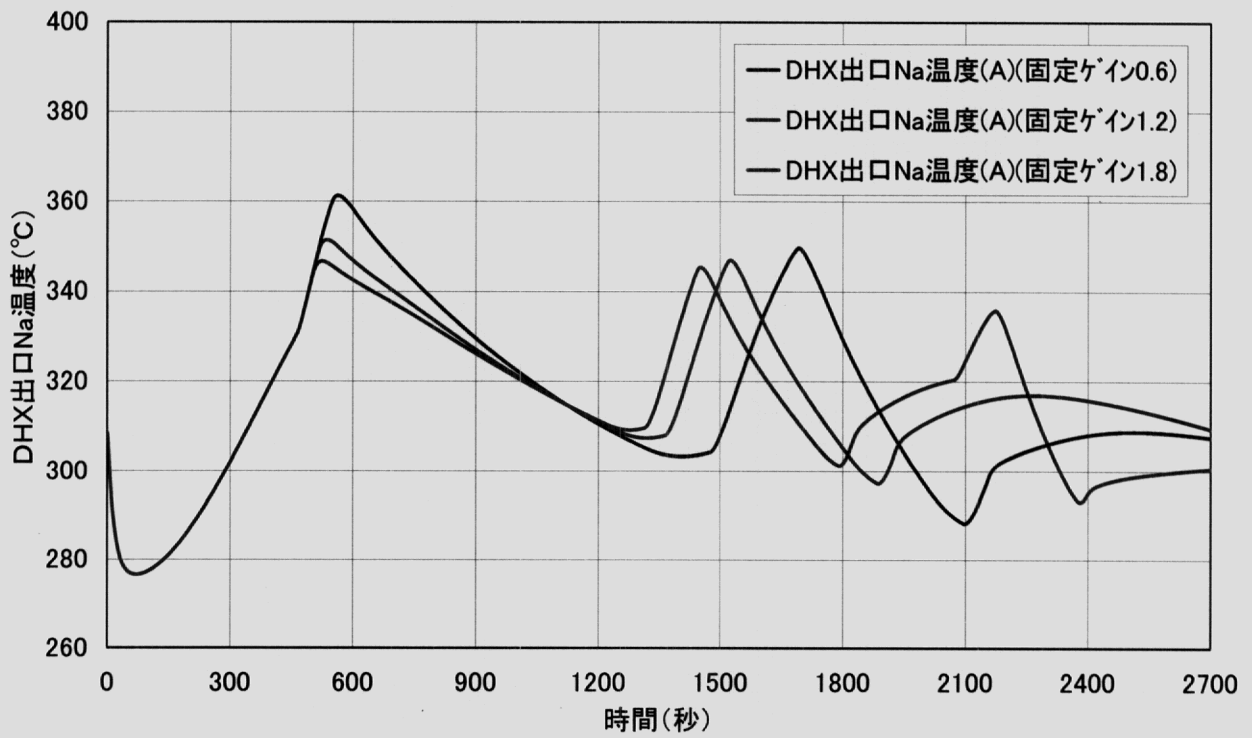
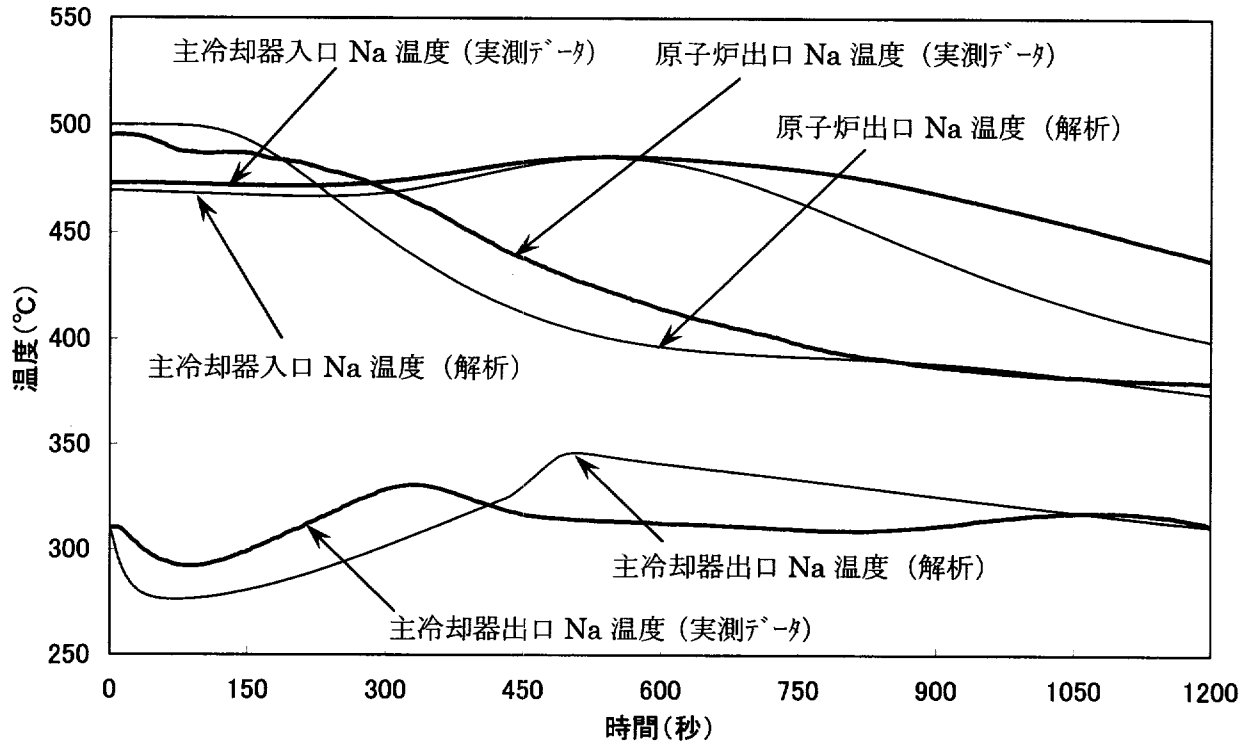
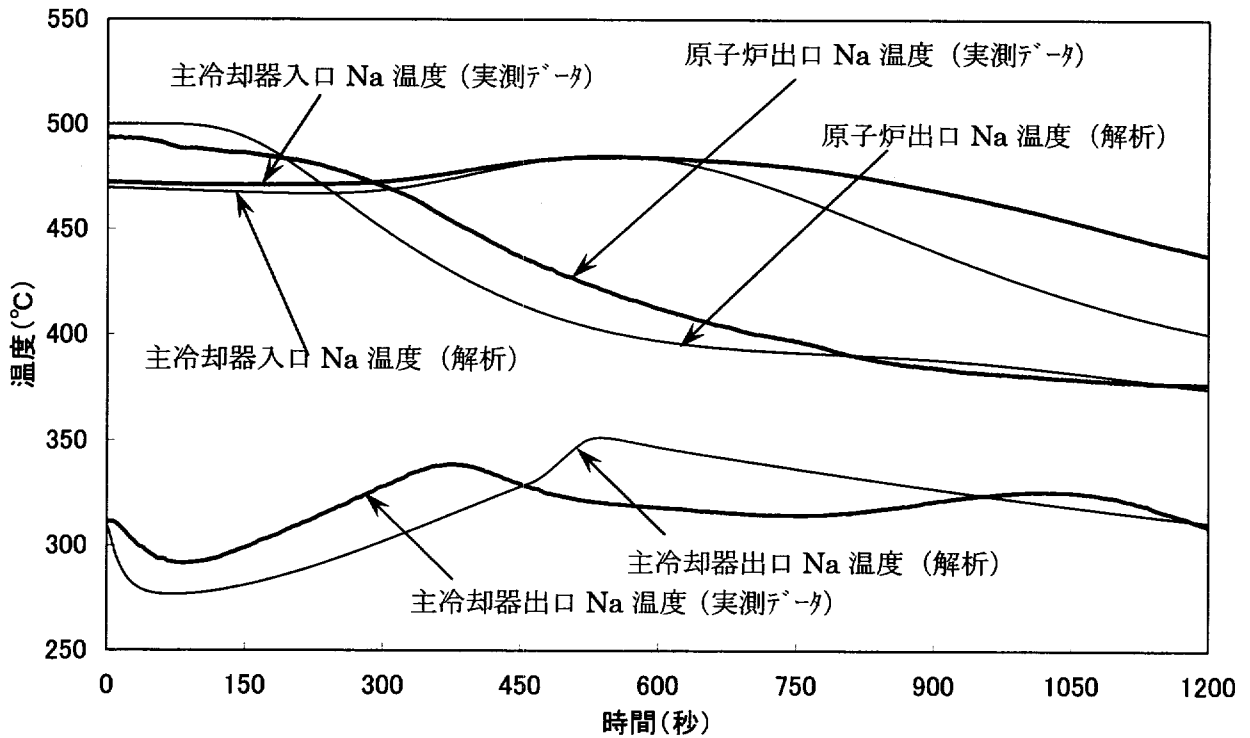


図 6.3-2 140MWt におけるDHX出口 Na 温度の解析結果
(外部電源喪失試験・固定ゲインをパラメータとした解析)

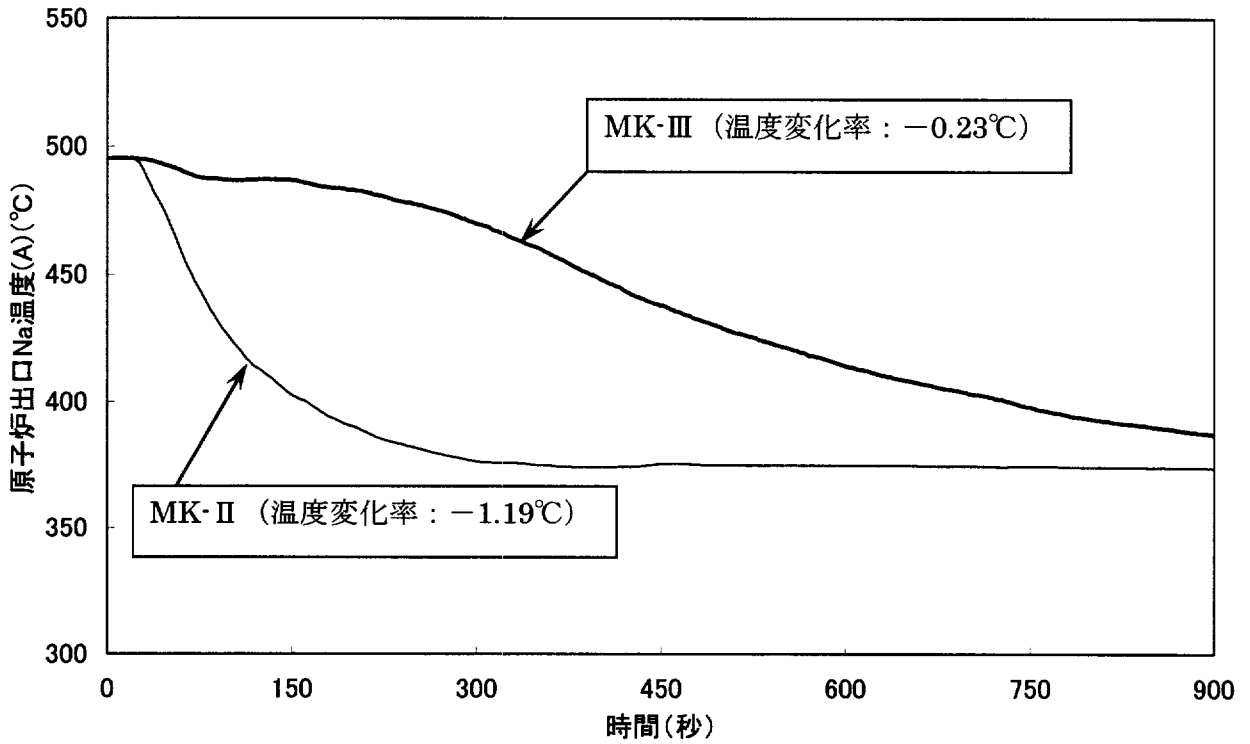


140MWt からの手動スクラム

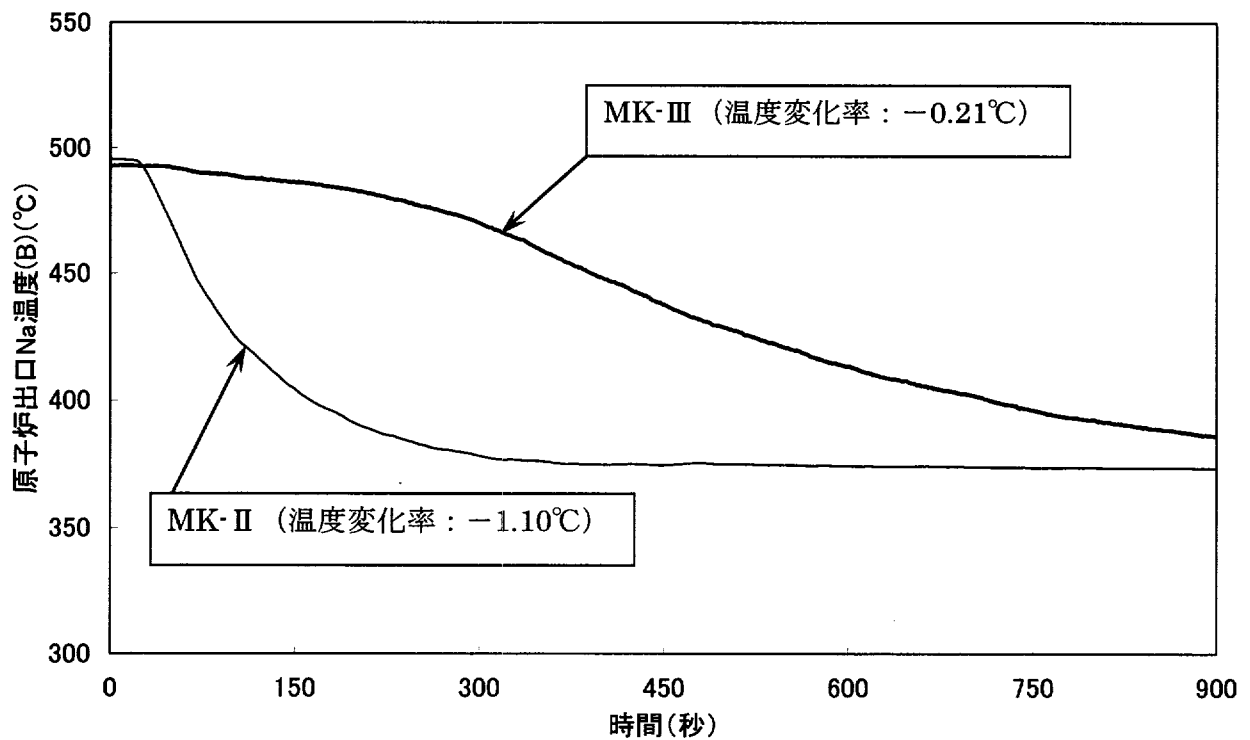


140MWt からの外部電源喪失

図 6.4-1 140MWt 過渡応答試験の予測解析と実測データの比較



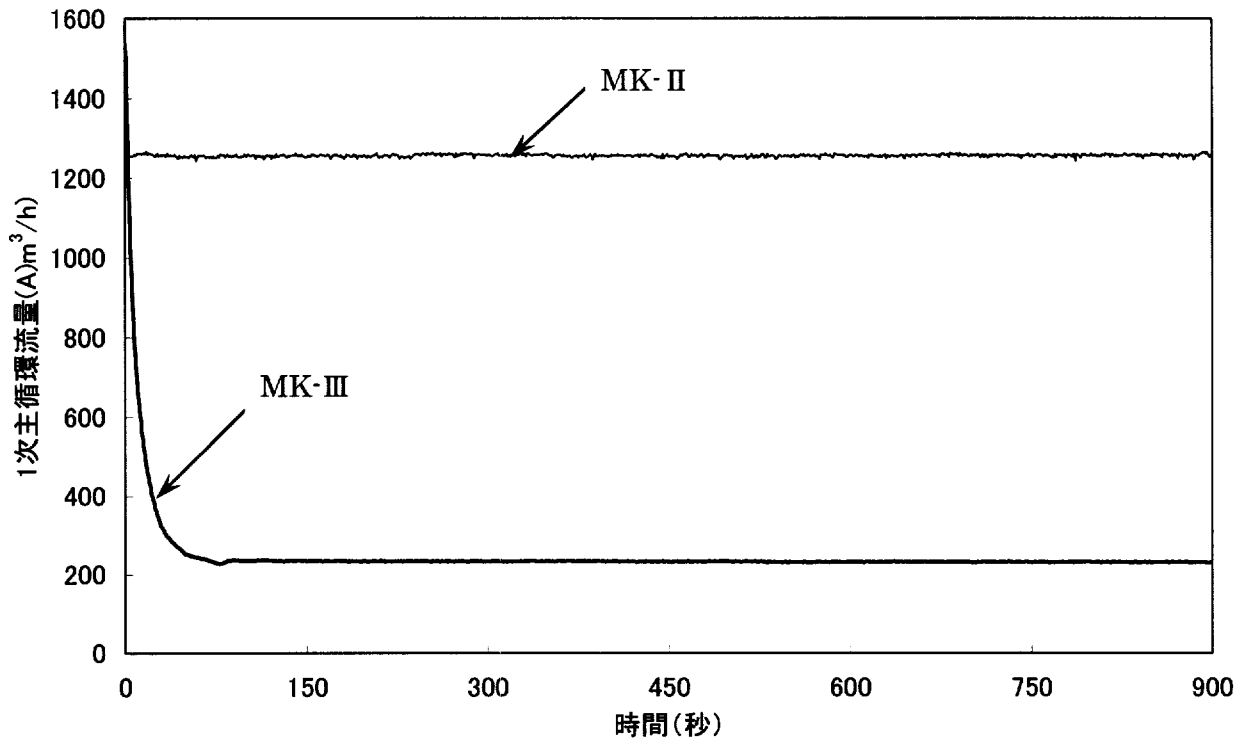
原子炉出口温度(A)



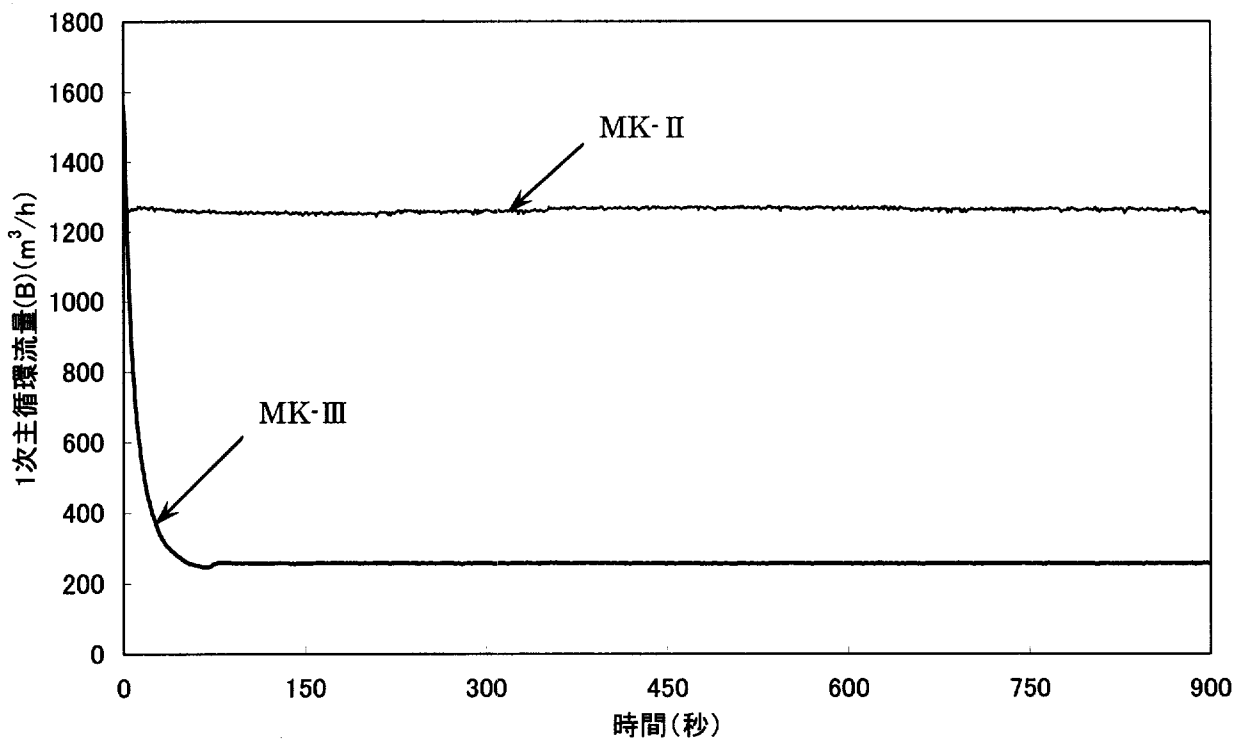
原子炉出口温度(B)

注：温度変化率は、図 4.1-3 に示す方法と同様の方法で求めた値

図 7.1-1 MK-II と MK-III の手動スクラム時熱過渡比較

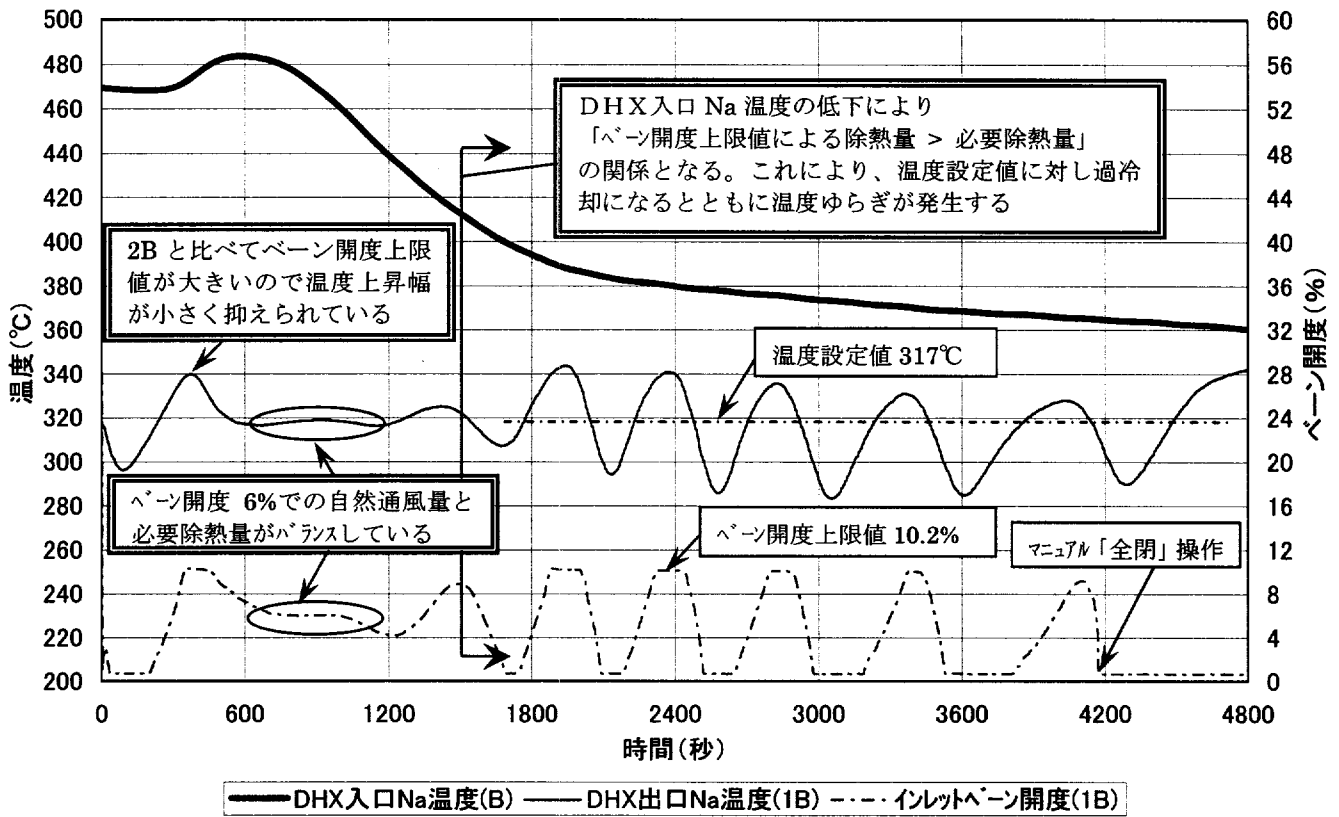


1次主循環流量(A)

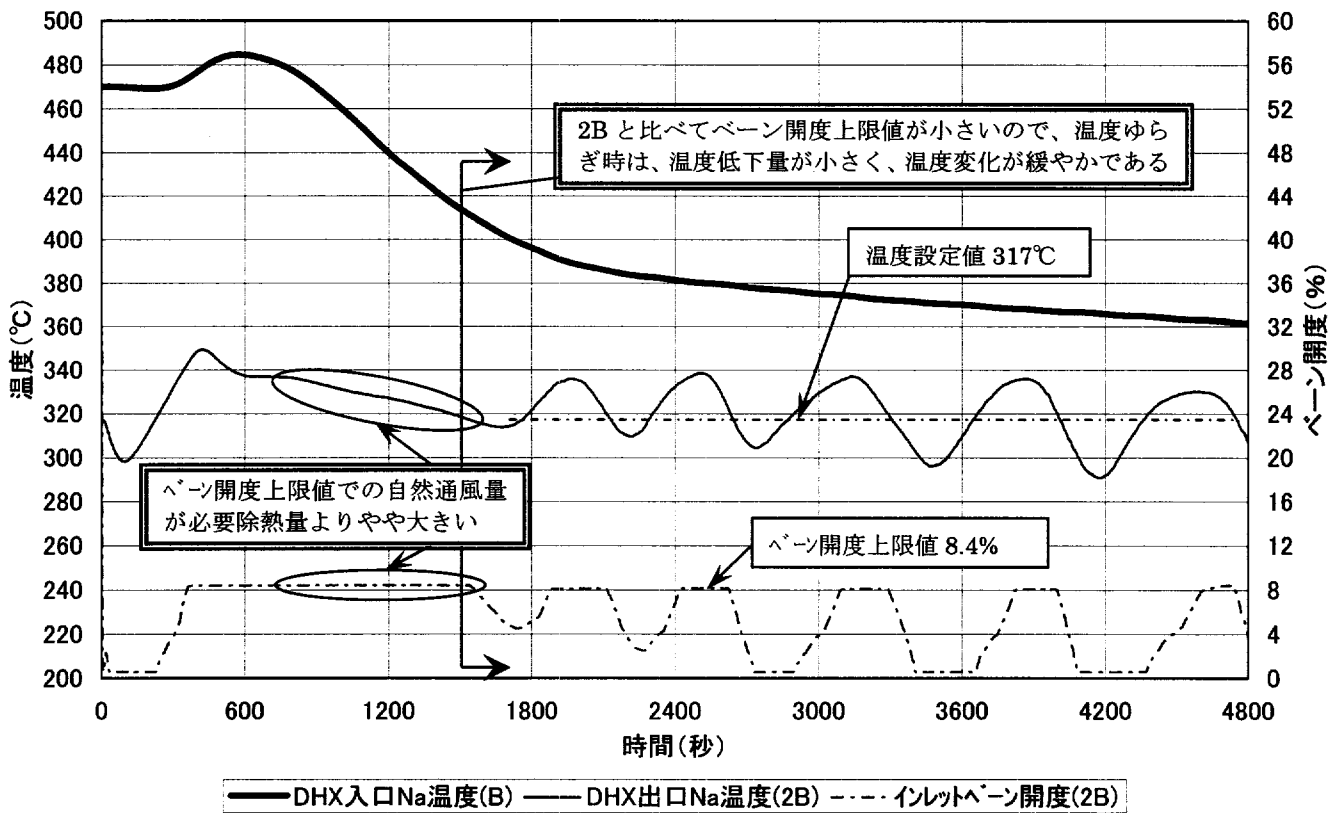


1次主循環流量(B)

図 7.1-2 MK-IIとMK-IIIの手動スクラム時1次主循環流量変化の比較



べん開度上限値が大きい場合の例 (DHX (1B)) (140MWt 外部電源喪失試験)



べん開度上限値が小さい場合の例 (DHX (2B)) (140MWt 手動スクラム試験)

図 7.2-1 スクラム時のべん開度と DHX 出口 Na 温度のゆらぎの関係