

「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係る設計条件の整備
— 機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定（最終版） —
(技術報告)



2001年7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

Inquires 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)
2001

「常陽」MK-III冷却系改造に係わる設計条件の整備

一 機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定（最終版）一

（技術報告）

磯崎 和則*、富田 直樹*

要 旨

MK-III冷却系改造の製作設計を行うにあたって、機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定（最終版）を行った。なお、策定には、プラント動特性解析コード“MIMIR-N2”のMK-IIIバージョンによる解析データを用いた。

（熱過渡策定条件）

(1) ΔT 及び $\Delta T/t$ 補正係数（余裕係数）の算出

補正係数は、パラメータ補正係数と同種熱過渡挙動補正係数から算出した。

① パラメータ補正係数

パラメータ補正係数は、不確定幅を持っているプラントパラメータを対象に、外部電源喪失事象を代表事象としたパラメータ解析を行い算出した。

② 同種熱過渡挙動補正係数

同種熱過渡挙動補正係数は、ほぼ同様の熱過渡挙動を示すグループの熱過渡条件を一つの事象に統一するため、各事象の解析結果を用いて算出した。

(2) 熱過渡折れ線図の作成

① 各熱過渡の温度変化が大きい部分（ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上）は、基準温度と最も厳しい温度変化率の直線との接点を基準（温度及び時間）として、 20°C 以内の幅で分割し、折れ線化した。温度変化が緩慢になった部分（ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 未満）は、 100sec 以内の幅で分割し、折れ線化した。

② 折れ線化した解析データに補正係数を乗じて熱過渡条件を策定した。

(3) 準定常状態以降の条件

熱過渡条件は、各事象開始後 $3,600\text{sec}$ 程度で準定常状態となるため、この時間まで条件化した。また、これ以降の時間については、その時間から系統温度 250°C まで、 $-50^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ で均一に系統降温するものとした。

上記より設定した構造設計用熱過渡条件は、MK-III用IHX及びDHX等の製作設計及びこれまで行ってきた既設機器・配管に係わる構造健全性の再評価に用いた。

*：実験炉部原子炉第二課

Providing of Design Condition for MK—III Cooling System Remodeling for JOYO
— Establishment of the Thermal Transient Condition for
the Structural Design of Equipment and Piping —
(The Final Edition)

K.Isozaki*、 N.Tomita*

Abstract

The thermal transient conditions for the structural design are established in order to perform manufacture design of MK-III cooling system remodeling. The calculated data by MK-III version of the analysis code "MIMIR-N2" are used for establishing.

(Establishing Conditions of the thermal transient)

(1) Calculation of ΔT and $\Delta T/t$ safety factor

The safety factors are calculated with the parameter safety factor and the thermal conditions safety factor of the same kind.

① The parameter safety factor

The parameter safety factors are calculated to perform analysis by uncertainty range of plant parameter.

② The thermal transient safety factor of the same kind

The thermal transient safety factor of the same kind are unified

(2) Making of fold line figure

① For each thermal transient, the fold line graph is drawn through the fiducially points which are the intersections of the datum temperature lines and the large temperature change rate lines and drawn in each part divided as the temperature range is less than 20°C at the large temperature change rate (more than 0.2 °C/sec) range. And it is drawn in each part divided as the time range is less than 100sec at the little temperature change rate (less than 0.2 °C/sec) range.

② Making of thermal transient condition are multiplied the safety factor on the calculated data.

(3) Condition of the associate steady state

Temperature fluctuation usually abates within 2000~3600sec from the start of the transient, and thermal transient analysis is conducted for the time range. So the part of the fold time after the abatement of the temperature fluctuation is drawn as the temperature uniformly drops to 250°C at the rate of -50°C/h.

The thermal transient conditions established above shall be used for the basic design of MK-III cooling system remodeling.

* : Maintenance Engineering Section, Experimental Reactor Division, OEC

目 次

1. はじめに	1
2. 構造設計	2
3. 運転状態分類	3
4. 熱過渡事象及び回数の設定	6
4.1 熱過渡事象の設定	6
4.2 プラント運転時間の設定	8
4.3 熱過渡回数設定	9
5. 熱過渡解析	16
5.1 解析パラメータ条件	16
5.2 熱過渡解析結果	21
6. 熱過渡条件の策定	32
6.1 熱過渡条件事象の折れ線図作成	32
6.2 熱過渡条件事象の折れ線図補正係数	33
6.3 熱過渡条件の策定	36
7. 考 察	40
8. おわりに	41
9. 謝 辞	42
10. 参考文献	43
添付資料	
添付資料1.1 熱過渡解析結果	44
添付資料1.2 IHX内部熱過渡解析結果	69
添付資料1.3 熱過渡条件	80
添付資料1.4 IHX内部熱過渡条件	121
添付資料1.5 各パラメータ解析結果の比較	163
添付資料1.6 各パラメータの ΔT 及び $\Delta T/t$ の補正係数一覧	171

図 リ ス ト

図5.1.1 「常陽」MK-Ⅲ炉心の崩壊熱カーブ	20
図6.1.1 熱過渡の基準折れ線図化(例)	32
図6.3.1 熱過渡条件の策定方法(例)	37
添付資料1.1 (熱過渡解析結果)	
添付図1.1 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉入口温度	45
添付図1.2 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉出口温度	45
添付図1.3 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側入口温度	46
添付図1.4 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側出口温度	46
添付図1.5 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側入口温度	47
添付図1.6 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側出口温度	47
添付図1.7 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX入口温度	48
添付図1.8 外部電源喪失(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX出口温度	48
添付図1.9 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉入口温度	49
添付図1.10 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉出口温度	49
添付図1.11 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側入口温度	50
添付図1.12 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側出口温度	50
添付図1.13 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側入口温度	51
添付図1.14 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側出口温度	51
添付図1.15 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX入口温度	52
添付図1.16 手動スクラム(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX出口温度	52
添付図1.17 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉入口温度	53
添付図1.18 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)原子炉出口温度	53
添付図1.19 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側入口温度	54
添付図1.20 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX1次側出口温度	54
添付図1.21 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側入口温度	55
添付図1.22 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)IHX2次側出口温度	55
添付図1.23 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX入口温度	56
添付図1.24 1次主循環ポンプ軸固着事故(MK-Ⅲ熱過渡解析)DHX出口温度	56

添付図1.25	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	原子炉入口温度	57
添付図1.26	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	原子炉出口温度	57
添付図1.27	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側入口温度	58
添付図1.28	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側出口温度	58
添付図1.29	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側入口温度	59
添付図1.30	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側出口温度	59
添付図1.31	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	DHX入口温度	60
添付図1.32	1次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	DHX出口温度	60
添付図1.33	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	原子炉入口温度	61
添付図1.34	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	原子炉出口温度	61
添付図1.35	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側入口温度	62
添付図1.36	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側出口温度	62
添付図1.37	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側入口温度	63
添付図1.38	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側出口温度	63
添付図1.39	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	DHX入口温度	64
添付図1.40	2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析)	DHX出口温度	64
添付図1.41	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	原子炉入口温度	65
添付図1.42	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	原子炉出口温度	65
添付図1.43	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側入口温度	66
添付図1.44	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	IHX1次側出口温度	66
添付図1.45	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側入口温度	67
添付図1.46	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	IHX2次側出口温度	67
添付図1.47	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	DHX入口温度	68
添付図1.48	1次冷却材流量増大 (MK-III熱過渡解析)	DHX出口温度	68
添付資料1.2 (IHX内部熱過渡解析結果)			
添付図1.49	外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析)	IHX内部1次側入口温度	70
添付図1.50	外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析)	IHX内部1次側出口温度	70
添付図1.51	外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析)	IHX内部2次側入口温度	71
添付図1.52	外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析)	IHX内部2次側出口温度	71
添付図1.53	手動スクラム (MK-III熱過渡解析)	IHX内部1次側入口温度	72

添付図1.54	手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側出口温度	72
添付図1.55	手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側入口温度	73
添付図1.56	手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側出口温度	73
添付図1.57	1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側入口温度	74
添付図1.58	1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側出口温度	74
添付図1.59	1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側入口温度	75
添付図1.60	1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側出口温度	75
添付図1.61	1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側入口温度	76
添付図1.62	1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側出口温度	76
添付図1.63	1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側入口温度	77
添付図1.64	1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側出口温度	77
添付図1.65	2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側入口温度	78
添付図1.66	2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部1次側出口温度	78
添付図1.67	2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側入口温度	79
添付図1.68	2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側出口温度	79
添付資料1.3 (熱過渡条件)		
添付図1.69	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) 炉容器入口温度	81
添付図1.70	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) 炉容器出口温度	82
添付図1.71	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) IHX1次側入口温度	83
添付図1.72	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) IHX1次側出口温度	84
添付図1.73	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) IHX2次側入口温度	85
添付図1.74	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) IHX2次側出口温度	86
添付図1.75	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) DHX入口温度	87
添付図1.76	外部電源喪失 (熱過渡条件代表事象) DHX出口温度	88
添付図1.77	手動スクラム (熱過渡条件代表事象) 炉容器入口温度	89
添付図1.78	手動スクラム (熱過渡条件代表事象) 炉容器出口温度	90

添付図1.79	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） IHX1次側入口温度	91
添付図1.80	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） IHX1次側出口温度	92
添付図1.81	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） IHX2次側入口温度	93
添付図1.82	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） IHX2次側出口温度	94
添付図1.83	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） DHX入口温度	95
添付図1.84	手動スクラム（熱過渡条件代表事象） DHX出口温度	96
添付図1.85	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） 炉容器入口温度	97
添付図1.86	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） 炉容器出口温度	98
添付図1.87	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） IHX1次側入口温度	99
添付図1.88	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） IHX1次側出口温度	100
添付図1.89	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） IHX2次側入口温度	101
添付図1.90	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） IHX2次側出口温度	102
添付図1.91	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） DHX入口温度	103
添付図1.92	1次主循環ポンプ軸固着事故（熱過渡条件） DHX出口温度	104
添付図1.93	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） 炉容器入口温度	105
添付図1.94	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） 炉容器出口温度	106
添付図1.95	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX1次側入口温度	107
添付図1.96	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX1次側出口温度	108
添付図1.97	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX2次側入口温度	109
添付図1.98	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX2次側出口温度	110
添付図1.99	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） DHX入口温度	111
添付図1.100	1次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） DHX出口温度	112
添付図1.101	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） 炉容器入口温度	113
添付図1.102	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） 炉容器出口温度	114
添付図1.103	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX1次側入口温度	115
添付図1.104	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX1次側出口温度	116
添付図1.105	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX2次側入口温度	117
添付図1.106	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX2次側出口温度	118
添付図1.107	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） DHX入口温度	119
添付図1.108	2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） DHX出口温度	120

添付資料1.4 (IHX内部熱過渡条件)

添付図1.109	IHX熱過渡解析モデル及び内部熱過渡条件化位置関係	122
添付図1.110	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側入口温度	123
添付図1.111	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側伝熱管上端温度	124
添付図1.112	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側出口温度	125
添付図1.113	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側伝熱管下端温度	126
添付図1.114	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側入口温度	127
添付図1.115	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側伝熱管下端温度	128
添付図1.116	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側出口温度	129
添付図1.117	外部電源喪失(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側伝熱管上端温度	130
添付図1.118	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側入口温度	131
添付図1.119	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側伝熱管上端温度	132
添付図1.120	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側出口温度	133
添付図1.121	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部1次側伝熱管下端温度	134
添付図1.122	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側入口温度	135
添付図1.123	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側伝熱管下端温度	136
添付図1.124	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側出口温度	137
添付図1.125	手動スクラム(熱過渡条件代表事象) IHX内部2次側伝熱管上端温度	138
添付図1.126	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部1次側入口温度	139
添付図1.127	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部1次側伝熱管上端温度	140
添付図1.128	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部1次側出口温度	141
添付図1.129	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部1次側伝熱管下端温度	142
添付図1.130	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部2次側入口温度	143
添付図1.131	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部2次側伝熱管下端温度	144
添付図1.132	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部2次側出口温度	145
添付図1.133	1次主循環ポンプ軸固着事故(熱過渡条件) IHX内部2次側伝熱管上端温度	146
添付図1.134	1次冷却材漏洩事故(熱過渡条件) IHX内部1次側入口温度	147
添付図1.135	1次冷却材漏洩事故(熱過渡条件) IHX内部1次側伝熱管上端温度	148
添付図1.136	1次冷却材漏洩事故(熱過渡条件) IHX内部1次側出口温度	149
添付図1.137	1次冷却材漏洩事故(熱過渡条件) IHX内部1次側伝熱管下端温度	150

添付図1.138	1次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側入口温度	.....	151
添付図1.139	1次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側伝熱管下端温度	.....	152
添付図1.140	1次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側出口温度	.....	153
添付図1.141	1次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側伝熱管上端温度	.....	154
添付図1.142	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部1次側入口温度	.....	155
添付図1.143	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部1次側伝熱管上端温度	.....	156
添付図1.144	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部1次側出口温度	.....	157
添付図1.145	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部1次側伝熱管下端温度	.....	158
添付図1.146	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側入口温度	.....	159
添付図1.147	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側伝熱管下端温度	.....	160
添付図1.148	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側出口温度	.....	161
添付図1.149	2次冷却材漏洩事故 (熱過渡条件)	IHX内部2次側伝熱管上端温度	.....	162

表 リ ス ト

表3.1.1	MK-Ⅲ設計と原設計との運転状態分類比較 (1/2)	4
	MK-Ⅲ設計と原設計との運転状態分類比較 (2/2)	5
表4.3.1	MK-I、Ⅱにおける熱過渡事象の実績及び想定回数	11
表4.3.2	MK-I、Ⅱにおける実績熱過渡事象の一覧表 (1/2)	12
	MK-I、Ⅱにおける実績熱過渡事象の一覧表 (2/2)	13
表4.3.3	MK-Ⅲにおける熱過渡事象及び想定回数 (運転状態Ⅰ)	14
表4.3.4	MK-Ⅲにおける熱過渡事象及び想定回数 (運転状態Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)	15
表5.1.1	パラメータ解析ケース	17
表5.1.2	熱過渡解析条件	18
表5.1.3	パラメータ解析による補正係数	19
表5.2.1	外部電源喪失と同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較	29
表5.2.2	手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較 (1/2)	30
	手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較 (2/2)	31
表6.2.1	熱過渡条件事象の折れ線図補正係数 (外部電源喪失) (1/2)	34
	熱過渡条件事象の折れ線図補正係数 (手動スクラム) (2/2)	35
表6.3.2	各熱過渡条件の最大温度変化率と原設工認値	38
表6.3.3	各熱過渡条件の最高温度と原設工認値	39
添付資料1.5 (各パラメータ解析結果の比較)		
添付表1.1	スクラム反応度のパラメータ解析結果の比較	164
添付表1.2	崩壊熱のパラメータ解析結果の比較	165
添付表1.3	炉心圧損のパラメータ解析結果の比較	166
添付表1.4	空気風量追従遅れのパラメータ解析結果の比較	167
添付表1.5	ベーンヒステリシスのパラメータ解析結果の比較	168
添付表1.6	ポニーモータ回転数のパラメータ解析結果の比較	169
添付表1.7	ベーン開度制限値のパラメータ解析結果の比較	170
添付資料1.6 (各パラメータの ΔT 及び $\Delta T/t$ の補正係数一覧)		
添付表1.8	パラメータ解析による ΔT の補正係数	172
添付表1.9	パラメータ解析による $\Delta T/t$ の補正係数	173

1. はじめに

高速実験炉「常陽」では、照射能力の高度化に向けたプロジェクト（MK-Ⅲ計画）を進めている。MK-Ⅲ計画は、炉心の高中性子束を高める、照射運転時間を増やす、照射技術を向上させることを目的としている。MK-Ⅲでは、炉心の高中性子束を高めることで熱出力が現状（MK-Ⅱ）の100MWtから140MWtに増大するため、その除熱能力を高めるため原子炉冷却系機器のうち、主中間熱交換器及び主冷却機をはじめとした冷却系機器を交換するための改造工事を行っている。これら交換機器の設計にあたっては、その構造健全性を評価するため、プラント異常時の熱過渡条件、地震荷重条件をはじめとした荷重条件を設定する必要がある。

このうち、熱過渡条件については、これまで『「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に係わる設計条件の整備機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定（Ⅰ）』⁽¹⁾で報告報告してきた。しかし、この熱過渡条件は、解析に用いたプラント動特性解析コード“MIMIR-N2”の諸条件をMK-Ⅲの炉出力及びNa流量等を仮に修正した条件で算出したものであった。したがって、本報告では、MK-Ⅲ熱過渡条件の最終版として、“MIMIR-N2”コードのモデル条件（IHX、DHX、一部配管および温度制御系等）及び入力条件のすべてをMK-Ⅲ仕様に変更するとともに、従来、解析が不可能であった一部熱過渡事象にも対応できるようにコードの改良を実施した上で熱過渡条件を策定したものである。なお、本熱過渡条件は、MK-Ⅲ冷却系改造工事で交換しているIHX、DHX等の製作設計及びこれまで行ってきた既設機器・配管に係る構造健全性の再評価に用いられてきたものである。

2. 構造設計

原子炉施設の設備設計では、安全性を確保しつつ、プラント全体としていかに合理的に構造上の設計余裕度を配分していくかという点がポイントとなる。

この第1ステップとして、プラントを構成する機器を重要度に応じて区分し、特に重要な機器に対しては、プラント寿命中に発生が予想される種々のプラント事象の中から構造評価用の事象を選び、これをその想定回数（予定回数または予想発生頻度）に応じた運転状態に分類する。現在、「常陽」における運転状態分類は、『「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針』⁽²⁾に基づき定められたものである。しかし、MK-Ⅲ冷却系改造にあたっては、「もんじゅ」で用いられた高温構造設計指針（BDS）^{(3),(4)}に基づき構造設計を行うため、本方針による運転状態分類を行っている。

第2ステップとしては、プラント機器に加わる動的荷重（内圧、地震力、熱応力）及び静的荷重（自重、ボルト締め付け力等の外力）と、第1ステップで定められた想定回数を考慮して、発生しやすい運転状態に対しては、厳しい応力強さ限界を、また、発生頻度が十分低い、もしくはほとんど考えられない運転状態に対しては、ゆるやかな応力強さ限界を構造健全性評価の設計基準として与え、設計余裕配分の最適化を図る必要がある。

上記のことから、3章以降に運転状態分類、実績回数、想定回数及び第2ステップに用いる熱過渡条件の設定等についてまとめた。

3. 運転状態分類

2.章に記述したように、現在「常陽」の運転状態分類は、『「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針』⁽²⁾に基づき定められており、その分類は、通常条件、異常条件、緊急条件及び損傷条件である。一方、MK-IIIにおいては、BDS^{(3),(4)}に基づき定めたため、その分類は、運転状態Ⅰ、運転状態Ⅱ、運転状態Ⅲ、運転状態Ⅳ及び試験状態となる。ここで、MK-IIIにおける運転状態分類を原設計の分類と比較すると表3.1.1に示す通りとなる。

表3.1.1 MK-III設計と原設計との運転状態分類比較 (1/2)

MK-III設計 (高速原型炉高温構造設計指針)	原設計 (「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針)
<p>1. 運転状態Ⅰ 原子炉施設の通常運転時の状態をいう (計画的な運転状態またはこれらの間の計画的移行をいう)。</p> <p>① 通常起動 50°C/h (250°C→500°C) ② 通常停止 50°C/h (500°C→250°C) ③ 停止後再起動 50°C/h (250°C→500°C)</p>	<p>1. 通常条件 通常条件は、起動、出力運転、高温待機及び停止の状態より定める。</p> <p>① 通常起動 50°C/h (250°C→500°C) ② 通常停止 50°C/h (500°C→250°C) ③ 停止後再起動 50°C/h (250°C→500°C)</p>
<p>2. 運転状態Ⅱ 運転状態Ⅰ、運転状態Ⅲ、運転状態Ⅳ及び試験状態以外の状態をいう (設備の寿命程度の期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一誤操作等の事象によって、原子炉が通常運転状態からはずれるような状態をいう)</p> <p>① 外部電源喪失 ② 中性子束高 (未臨界状態から及び出力運転中の制御棒の異常な引抜きを含む (原設計の③-a)) ③ 手動スクラム (原設計の③-c、e~k、④-c、d、gを含む) ④ 1次冷却材流量減少 (原設計の④-aを含む) ⑤ 1次主循環ポンプトリップ ⑥ 1次冷却材流量増大 ⑦ 2次冷却材流量減少 ⑧ 2次主循環ポンプトリップ ⑨ 2次冷却材流量増大 ⑩ 主冷却器空気流量の減少 (原設計の④-bを含む) ⑪ 主冷却器空気流量の増大</p>	<p>2. 異常条件 異常条件は、通常運転よりしばしば逸脱する運転に対して定められる。具体的には、単一ミスや故障の結果生ずる過渡条件等を含めて定める。装置はこの条件に対して運転上支障がないように設計される。</p> <p>① 外部電源喪失 ② 原子炉スクラム (中性子束高) ③ その他の原子炉スクラム a 炉周期短、b 1次冷却材流量低、c 炉内ナトリウム液面低、d 1次主循環ポンプトリップ、e 格納容器床上放射能レベル高、f 格納容器内床上温度高、g 格納容器内床下温度高、h 格納容器内床上圧力高、i 格納容器内床下圧力高、j 地震、k 手動アイソレーション、l 手動スクラム ④ 制御棒一斉挿入 a 原子炉出口ナトリウム温度高、b 原子炉入口ナトリウム温度高、c 炉内ナトリウム液面高、d オーバフロー系電磁ポンプトリップ、e 2次冷却材流量低、f 2次主循環ポンプトリップ、g 手動制御棒一斉挿入</p>

表3.1.1 MK-III設計と原設計との運転状態分類比較 (2/2)

MK-III設計 (高速原型炉高温構造設計指針)	原設計 (「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針)
<p>3. 運転状態Ⅲ 原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる状態をいう(発生頻度が十分に低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち、運転状態Ⅱでいう機器の単一故障、運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち、その発生頻度が十分低いと考えられるものをいう)。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 1次主循環ポンプ軸固着事故 ② 1ループ1次・2次系の同時ポンプトリップ ③ 2次主循環ポンプ軸固着事故 ④ 主冷却器送風機軸固着事故 	<p>3. 緊急条件 緊急条件は、通常運転よりの逸脱で生ずる可能性の少ないものとして定められる。この状態では、原子炉の停止はやむをえない。但し、全体の大きな損傷は起こさないように設計される。この条件は、全部で寿命中25回以下とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 1次主循環ポンプ軸固着事故 ② 1ループ1次・2次系の同時ポンプトリップ ③ 2次主循環ポンプ軸固着事故 ④ 主冷却器1ループ全数停止
<p>4. 運転状態Ⅳ 原子炉施設の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう(発生頻度が極めて低く、設備の寿命中に起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが、万一発生した場合の設計の妥当性を評価するために特に設けたものいう)。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 1次冷却材漏洩事故 ② 2次冷却材漏洩事故、1次主循環ポンプ他ループ軸固着 ③ 燃料スランピング事故 	<p>4. 損傷条件 損傷条件は、生ずる確率は極度に小さいが考えられる事故に対して定める。この状態になった場合も炉の安全(公衆災害等)は確保しなければならない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 2次系1ループ破断、1次系他ループ軸固着
<p>5. 試験状態 耐圧試験により原子炉施設に最高使用圧力を超える圧力が加えられている状態をいう(燃料装荷後に行う運転圧力の1.1倍の試験状態、定期検査時に行う漏洩試験等最高使用圧力以下の圧力で行う試験状態を含まず、それぞれの試験状態は運転状態Ⅱと解される)。</p>	

4. 熱過渡事象及び回数の設定

4.1 熱過渡事象の設定

4.1.1 運転状態Ⅰ

MK-Ⅲでは、原設工認において設定されている事象と同一の事象を運転状態Ⅰとして設定した。また、温度変化（変化幅、変化率）は、既に原設工認と同一とすることで決定し、構造物の温度分布及び応力解析を行っている。（表4.3.3参照）

4.1.2 運転状態Ⅱ、Ⅲ及びⅣ

MK-Ⅲでは、原設工認で設定している異常条件、緊急条件及び損傷条件と同一の事象と、これ以外に安全解析で行っている解析事象を追加し、運転状態Ⅱ、Ⅲ及びⅣを設定した。ただし、解析においては、安全解析のように単一故障等は考慮せず、すべてのインターロック及び安全保護系が動作するものとしている。（表4.3.4参照）運転状態Ⅱのうち以下の熱過渡は、「常陽」のスクラム項目のうち、以下に示したスクラム項目を代表する事象である。

(1) 中性子束高（定格出力運転中からの制御棒の異常な引抜き）

スクラム項目： 炉周期短（起動、中間領域）、中性子束高（起動、中間、出力領域）

炉周期短に該当する事象としては、「未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き」がある。本事象は、安全解析で単一故障を想定した解析を行っているが、この場合でも出力領域中性子束高でスクラムとなり、その時の挙動として燃料等の急激な温度上昇はあるものの、プラント熱過渡に影響を与えるような系統温度の上昇はない。また、中間領域においても同様である。

(2) 手動スクラム

スクラム項目： 制御棒の落下、 炉内ナトリウム液面低
炉内ナトリウム液面高、オーバフローEMPトリップ
格納容器床上放射能高、格納容器床上温度高
格納容器床下温度高、 格納容器床上圧力高
格納容器床下圧力高、 手動アイソレーション
地震、 手動制御棒一斉挿入

制御棒の落下は、MK-Ⅱ異常事象の実績において励磁断によって1本落下したこ

とがあり、出力は急激に低下する。しかし、手動スクラムの場合、全数励磁断となることからその温度変化は1本励磁断より大きい。よって、手動スクラムと何ら変わるものではない。なお、「もんじゅ」では、制御棒の落下が生じると減少した原子炉出力を補償するために他の制御棒が引き抜かれ、過渡変化の生じる前の原子炉出力近傍に復帰する挙動を示す。

現在、炉内ナトリウム液面低、炉内ナトリウム液面高及びオーバフローEMPトリップが発生した場合、原子炉スクラムあるいは制御棒一斉挿入となる。これらの異常事象は、原子炉液面状態が異なるだけで、その温度変化は、手動スクラム時の挙動と何ら変わるものではない。また、MK-IIIでは、制御棒一斉挿入に該当する異常事象をスクラムに統一する。

格納容器関係及び手動アイソレーションについても、系統ナトリウム温度に影響を与えるようなスクラム項目でないことから、その挙動は、手動スクラムと何ら変わるものではない。

(3) 1次冷却材流量減少

スクラム項目 : 原子炉出口ナトリウム温度高

原子炉出口ナトリウム温度高は、何らかの異常が生じて2次的に発生する異常事象である。たとえば、1次系の流量が低下して炉心が冷却不足となり、原子炉出口ナトリウム温度が上昇する。あるいは、定格出力運転中からの制御棒の異常な引抜きによって中性子束が上昇して炉心が冷却不足となり、原子炉出口ナトリウム温度が上昇するなどである。ただし、定格出力運転中からの制御棒の異常な引抜きの場合は、誤操作により連続的に制御棒が引抜かれたことを想定しているため、原子炉出口ナトリウム温度高に至る前に中性子束高で原子炉はスクラムする。

(4) 主冷却器空気流量減少及び2次冷却材流量減少

スクラム項目 : 原子炉入口ナトリウム温度高

原子炉入口ナトリウム温度高は、原子炉出口ナトリウム温度高と同様、何らかの異常が生じて2次的に発生する異常事象である。たとえば、主冷却器空気流量減少によって主冷却器出口ナトリウム温度が上昇し、原子炉入口ナトリウム温度が上昇する。あるいは、2次冷却材流量減少によるIHXの流量ミスマッチによる温度上昇などである。

4.2 プラント運転時間の設定

4.2.1 MK-I、IIの実績及び想定運転時間

(1) MK-I、II実績運転時間 (MK-I～MK-II第29サイクルまで)

MK-I、II (MK-I～MK-II第29サイクルまで) における運転時間実績は、下記の通りである。

① MK-I 運転時間実績	50MW	4,819 Hr
	75MW	8,149 Hr
小計		12,968 Hr
② MK-II (第29サイクルまで) 運転時間実績		38,071 Hr
合計		51,039 Hr

(2) MK-II想定運転時間 (第30サイクル～33サイクルまで)

今後のMK-II (第30サイクル～33サイクルまで) における想定運転時間は、1サイクル70日運転するとして算出した。

① MK-II (第30サイクル～33サイクルまで) 想定運転時間	6,720 Hr
-----------------------------------	----------

上記より、MK-I、II実績及びMK-II想定総運転時間は、57,759Hrである。

4.2.2 MK-IIIの想定運転時間

MK-IIIにおける想定運転時間は、MK-I、II及びIIIを通して、現設計で設定している「常陽」の設計寿命131,500Hrを越えないものとして設定する。よって、MK-III想定運転時間は、MK-I、IIの実績運転時間及び想定運転時間の合計を設計寿命時間から差し引いたものとした。

① MK-III想定運転時間	73,741 Hr
----------------	-----------

(但し、設計上MK-II運転時間の変更に備えて80,000Hrとする)

4.3 熱過渡回数の設定

4.3.1 MK-I、IIの実績回数（MK-I～MK-II第29サイクルまで）

(1) 通常起動・停止回数

表4.3.1に構造健全性評価に用いるMK-I、II（MK-I～MK-II第29サイクルまで）の実績通常起動・停止回数を示す。起動回数には、各実績異常事象発生後の再起動回数も含めるものとした。また、9MW以下における起動・停止は、系統温度が約380℃以下と低いため、回数算出から除外した。

(2) 異常事象回数

表4.3.1に構造健全性評価に用いるMK-I、II（MK-I～MK-II第29サイクルまで）の実績熱過渡事象を示す。また、その発生日時及び熱出力を表4.3.2に示す。

熱過渡実績は、大きく3つの事象（電源喪失、原子炉スクラム、制御棒一斉挿入）に分けることができる。また、出力的には、9MWt～50MWt以下と51MWt～100MWtに分けることができる。

出力9MWt～50MWtの中には、告示の適用温度範囲である425℃未満（出力約40MWt未満）のものが多数含まれている。しかし、実績回数としては、9MWt～50MWtのものはすべて50MWtから事象が発生したものと、51MWt～100MWtのものは、100MWtから事象が発生したものととした。但し、2次主循環ポンプトリップ（A）については、1回のみ86MWtから発生していることから86MWtとした。

4.3.2 MK-IIの想定回数（第28サイクル～35サイクルまで）

(1) 通常起動・停止回数

表4.3.1に構造健全性評価に用いるMK-I、II（MK-II第28サイクル～第35サイクルまで）の想定通常起動・停止回数を示す。また、起動回数には、各想定異常事象発生後の再起動回数も含めるものとした。

(2) 熱過渡事象の想定回数

表4.3.1に構造健全性評価に用いるMK-II（第30サイクル～33サイクルまで）の想定熱過渡事象を示す。

想定熱過渡及び想定回数は、MK-I～MK-II第29サイクルまでに発生した性能試験以外の回数（9MWt～100MWt）及びMK-I～MK-II第29サイクルまでの運転時間とMK-II第30サイクル～33サイクルまでの想定運転時間を基に下式より算出した。性能試験以外の回数を算定回数としたのは、既に、MK-IIにおける異常事象

に対する性能試験は終了しており、今後MK-IIにおいて行われる予定がないためである。この結果、MK-IIにおける外部電源喪失の想定回数が、これまで設定していた3回から1回に減少することになる。よって、保守的にMK-II想定回数を従来設定していた値と同一とした。

$$\text{想定回数} = \text{性能試験以外の各事象回数} \times 0.13 = \frac{\text{MK-II 第30サイクル} \sim \text{33サイクル 運転時間}}{\text{MK-I} \sim \text{MK-II 第29サイクル 運転時間}}$$

4.3.3 MK-III想定回数

(1) 通常起動・停止

表4.3.3に構造健全性評価に用いるMK-IIIの想定通常起動・停止回数を示す。なお、この起動・停止回数は、現在MK-IIIで予定されている1サイクル60日と想定運転時間から算出した値(56回)に、MK-IIまでの実績及び想定通常停止回数(66回)を加えた場合に、現状の設計起動・停止250回を上回らない様、回数設定を行った。その結果、MK-IIIの通常停止は、184回、通常起動(異常後の起動も含む)は、408回(通常起動停止184回、異常後起動224回)とした。

(2) 熱過渡事象の想定回数

表4.3.4に構造健全性評価に用いるMK-IIIの想定熱過渡事象を示す。

MK-IIIにおいては、性能試験を含めたMK-I～MK-II(第33サイクルまで)の実績、想定回数及び運転時間とMK-IIIの想定運転時間を基に下式より算出した。なお、少数点以下は安全裕度として切り上げとした。

下式より求めた想定回数は、運転状態IIの想定回数である。よって、この想定回数に、MK-III運転状態III及びIVの想定回数(運転状態III:25回、運転状態IV:1回)を原設工認と同様の回数であるとして加えるものとした。

$$\begin{aligned} \text{想定回数} &= \text{MK-I} \sim \text{MK-II の各事象実績} \cdot \text{想定回数} \\ &\quad \times 1.39 \frac{\text{MK-III 想定運転時間}}{\text{MK-I} \sim \text{MK-II 実績} \cdot \text{想定運転時間}} \times 2.0 \text{ [安全余裕係数]} = 198 \text{回} \end{aligned}$$

表4.3.1 MK-I、IIにおける熱過渡事象の実績及び想定回数

No	事象	MK-I, II					MK-II 熱過渡 合計	原設工認 設計熱過渡 回数 (参考)	
		~MK-II 第29サイクルまで		第30~33 サイクル	小計				
		9~*1 50MWt	51*1 ~ 100MWt	100MWt	9MWt~*1 50MWt	51MWt*1 ~ 100MWt			
運転 状態 I	通常起動	35	87	15	35	102	137	750	
	通常停止	5	55	6	5	61	66	250	
運転 状態 II	電源喪失	電源喪失	10 (6)	9 (4)	3	10 (6)	12 (4)	22 (10)	100
		自然循環 試験	2 (2)	3 (3)	0	2 (2)	3 (3)	5 (5)	
		小計	12 (8)	12 (7)	3	12 (8)	15 (7)	27 (15)	
	原子 炉 スク ラム	手動スクラム	7 (7)	5 (3)	1	7 (7)	6 (3)	13 (10)	195
		CR励磁 断	1 (0)	0 (0)	1	1 (0)	1 (0)	2 (0)	
		手動CR一 斉挿入	2 (2)	3 (3)	0	2 (2)	3 (3)	5 (5)	
		O/FEMP トリップ	1 (0)	1 (0)	1	1 (0)	2 (0)	3 (0)	
		1次主ポン プトリップ	2 (2)	8*2 (0)	1	2 (2)	9 (0)	11 (2)	
		小計	13 (11)	17 (6)	4	13 (11)	21 (6)	34 (17)	
	C R 一 斉 挿 入	2次主ポン プトリップ	2 (1)	1 (0)	1	2 (1)	2 (0)	4 (1)	180
		主送風機 トリップ	3 (2)	2 (0)	1	3 (2)	3 (0)	6 (2)	
		小計	5 (3)	3 (0)	2	5 (3)	5 (0)	10 (3)	
	異常事象合計		30 (22)	32 (13)	9	30 (22)	41 (13)	71 (35)	475

*1 : カッコ内は性能試験により発生した回数を示す。

*2 : 瞬停による1次主冷却材流量減少7回を含めた(この事象は、1次主ポンプトリップに至らず瞬停再起動しているが、MK-IIIの想定回数が保守的になるように考慮したものである)。

表4.3.2 MK-I、IIにおける実績熱過渡事象の一覧表 (51MWt~100MWt) (1/2)

No	事 象		発 生 年 月 日	熱出力 (MWt)	分 類	
1	電源喪失	性能試験	電源喪失	S54. 7.30	75	
2				S54. 8.13	75	
3				S58. 3.18	100	
4				S58. 3.23	100	
5		自然循環試験	S56.12.23	75		
6			S61. 3.31	75		
7			S61.10.29	100		
8		その他	電源喪失	S54. 8.18	70	
9				S59. 7. 5	98	
10				S61. 3.23	100	
11				H5. 3. 7	99	
12				H6. 9. 1	98	
13	原子炉スクラム	性能試験	手動スクラム	S54. 7.24	75	
14				S54. 8. 7	75	
15				S58.11.30	100	
16		その他	手動スクラム	H4. 6.17	99	PTM-2試験停止
17			1次冷却材流量低	S54. 8. 2	65.5	
18			1次主ポンプトリップ (炉容器Na液面低)	S62. 9. 7	100	
19	制御棒一斉挿入	性能試験	手動CR一斉挿入	S54. 8.23	75	
20				S55. 4.15	55	
21				S56. 5.29	75	
22		その他	O/F ポンプトリップ	S56. 7.26	75	
23			2次主ポンプトリップ(A)	S58. 3. 8	86	
24			主送風機トリップ	S56. 7. 1	75	
25			原子炉入口温度高	H6. 9.20	98	主送風機停止による

表4.3.2 MK-I、IIにおける実績熱過渡事象の一覧表 (9MWt~50MWt) (2/2)

No	事 象		発 生 年 月 日	熱出力 (Mwt)	分 類	
1	電 源 喪 失	そ の 他	電 源 喪 失	S53. 7.23	10	
2				S54. 2.17	50	
3				S54. 7.25	10	
4				S58. 2.18	50	
5	電 源 喪 失	性 能 試 験	自 然 循 環 試 験	S56. 12.15	30	
6				S60. 4.27	30	
7		電 源 喪 失	性 能 試 験	S53. 4.27	9	
8				S53. 5. 9	9	
9				S53. 6.19	25	
10				S54. 2.26	50	
11				S58. 2.17	25	
12				S58. 2.28	50	
13		原 子 炉 ス ク ラ ム	性 能 試 験	手 動 ス ク ラ ム	S53. 6. 2	25
14					S53. 7.14	50
15					S53. 7.26	50
16					S56. 5. 7	50
17	S58. 2.14				25	
18	S58. 2.24				50	
19	S58. 9.30				45	
20	1次主ポンプトリップ		S53. 6. 7	25		
21			S53. 7.31	50		
22	他		C R 励 磁 断	S55. 6.22	50	
23	制 御 棒 一 斉 挿 入	性 能 試 験	手 動 CR 一 斉 挿 入	S53. 7.22	50	
24				S53. 7.27	50	
25			2次主ポンプトリップ(A)(B)	S53. 6.10	25	
26		主送風機トリップ 手動CR一斉挿入	S53. 6.14	25		
27			S55. 3. 3	37		
28		そ の 他	O/F ポンプトリップ	S55. 6.24	50	
29	2次主ポンプトリップ(B)		S53. 5. 8	9		
30	主送風機トリップ 手動CR一斉挿入		S53. 7. 4	40		

表4.3.3 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数（運転状態 I）

事象No.		熱過渡解析事象	MK-III時想定回数		備考
運 転 状 態 I	I-1	通常起動	184	408	
	I-2	停止後再起動	224		*1
	I-3	通常停止	184		

*1：停止後再起動の想定回数の内訳は、運転状態Ⅱが生じた後の起動198回、運転状態Ⅲが生じた後の起動25回、運転状態Ⅳが生じた後の起動1回の合計224回である。

表4.3.4 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数（運転状態Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ）

事象No.	熱過渡事象		～MK-Ⅱ 実績想定 回数	MK-Ⅲ時想定回数	
	熱過渡事象	代表事象			
運 転 状 態 Ⅱ	Ⅱ-1	外部電源喪失		27	外部電源喪失108 手動スクラム 90
	Ⅱ-2	中性子束高	手動スクラム	0	
	Ⅱ-3	手動スクラム		23	
	Ⅱ-4	1次主循環ポンプトリップ	外部電源喪失	3	
	Ⅱ-5	2次主循環ポンプトリップ	手動スクラム	4	
	Ⅱ-6	1次冷却材流量減少	外部電源喪失	*1 8	
	Ⅱ-7	2次冷却材流量減少	手動スクラム	0	
	Ⅱ-8	1次冷却材流量増大	外部電源喪失	0	
	Ⅱ-9	2次冷却材流量増大		0	
	Ⅱ-10	主冷却器空気流量減少	手動スクラム	6	
	Ⅱ-11	主冷却器空気流量増大		0	
小 計			71	198	
運 転 状 態 Ⅲ	Ⅲ-1	1次主循環ポンプ軸固着事故		0	10
	Ⅲ-2	1ループ1・2次系同時ポンプトリップ	外部電源喪失	0	3
	Ⅲ-3	2次主循環ポンプ軸固着事故	手動スクラム	0	10
	Ⅲ-4	主冷却器送風機軸固着事故		0	2
	小 計			0	25
運 転 状 態 Ⅳ	Ⅳ-1	1次冷却材Na漏洩（内管のみ）事故（1ループ） （1次冷却材漏洩事故）		0	2次冷却材漏洩事故 1 （最も厳しい熱過渡 を与える事象につき 1回考慮する）
	Ⅳ-2	2次冷却材Na漏洩事故、1次系健全ループポン プ軸固着（事故ループ） （2次冷却材漏洩事故）		0	
	Ⅳ-3	（燃料スランピング事故）	手動スクラム	0	
合 計			71	224	

*1：瞬停による1次主冷却材流量減少7回を含めた（この事象は、1次主循環ポンプトリップに至らず瞬停再起動しているが、MK-Ⅲの想定回数が保守的になるように考慮したものである。）

5. 熱過渡解析

MK-Ⅲの熱過渡解析条件及び熱過渡解析結果を以下に示す。なお、MK-I、Ⅱの実績及び想定熱過渡条件については、既にその条件を決定している。⁽¹⁾

5.1 解析パラメータ条件

熱過渡解析に用いるパラメータには、核熱、流動抵抗、流動伝熱、機器構造等、数多くの誤差要因がある。よって、熱過渡解析を行う前に、これらの誤差幅を考慮したパラメータ解析を行い、最も厳しい熱過渡解析条件（パラメータ解析ケース⑨）の設定を行った。表5.1.1にパラメータ解析ケースを示す。表5.1.2に熱過渡解析に用いた各解析条件を示す。また、ポンプフローコーストダウン特性、主送風機ブレーキ動作時間、温度制御系は以下の値を使用した。

(1) ポンプフローコーストダウン特性

MK-Ⅲでは、1次及び2次主循環ポンプとも交換しないため、MK-Ⅱと同一仕様である。よって、フローコーストダウン特性は、MK-Ⅱで用いてきたものを使用することとし、フローコーストダウンが開始する定格回転数のみ変更するものとした。なお、圧損によるフローコーストダウン特性への影響は、別途圧損のパラメータ解析でその影響を考慮している。

(2) 主送風機ブレーキ動作時間

MK-Ⅲでは、MK-Ⅱ仕様の主送風機で必要風量を満足しないため交換することになっているが、ブレーキはMK-Ⅱと同一仕様のブレーキを採用するため、その動作時間が長くなり、風量遅れ時間が長くなる。よって、ブレーキ動作時間は、MK-Ⅱの12sec から13.6sec に変更したものを採用した。なお、“MIMIR-N2”では、風量追従遅れをブレーキ動作時間ではなく別に設けてある風量追従遅れ時間で制御している。

(3) 温度制御系

MK-Ⅲでは、外部電源喪失以外のインターロックを基本的に外部電源喪失とほぼ同様となる1次主循環ポンプランバック制御に統一されるため、温度制御系も基本的に外部電源喪失と同様になる。よって、MK-Ⅱで最適と考えられるPI制御定数をMK-Ⅲでも同様に使用するものとしたが、異常時のPI制御定数切替え不良を考慮して通常定格運転時におけるPI制御定数（ $P=1.0$ 、 $I=80\text{sec}$ ）を用いた。なお、通常定格運転時におけるPI制御定数を用いた場合の方が熱過渡的に厳しくなる。パラ

メータ解析結果は、以下の通りであった。

最も厳しい熱過渡解析条件（パラメータ解析ケース⑨）でも一部の挙動に対しては、解析ケース⑨に用いたパラメータより、熱過渡が厳しくなるパラメータがあった。したがって、これらについては、MK-Ⅲ熱過渡条件を保守的にするため、各パラメータ比較において算出したC/E（C：各パラメータにおいてE以外の解析ケース、E：各パラメータにおいて総合的に厳しい解析ケース）から、C/EのEが1.0より大きい場合、これらをすべて乗じた補正係数を折れ線化した熱過渡解析結果に乗じることで熱過渡条件の策定を行った。表5.1.3にパラメータ解析による補正係数を示す。なお、添付表1.1～添付表1.7に各パラメータ解析結果の比較を示す。また、添付表1.8～添付表1.9に ΔT 及び $\Delta T/t$ の補正係数一覧表を示す。

表5.1.1 パラメータ解析ケース

項目 ケース	スクラム 反応度	崩壊熱	炉心圧損	DHX風量追 従遅れ	ベーン ヒステリシス	ポニーモ ータ流量	ベーン開 度制限値
基 本	最大	最小	最大	最大	最大	最大	最大
ケース ①	最小	同上	同上	同上	同上	同上	同上
ケース ⑧	最大	最大	同上	同上	同上	同上	同上
ケース ⑨	同上	最小	最小	同上	同上	同上	同上
ケース ⑪	同上	同上	同上	最小	同上	同上	同上
ケース ⑫	同上	同上	同上	最大	最小	同上	同上
ケース ⑩	同上	同上	同上	同上	最大	最小	同上
ケース ⑬	同上	同上	同上	同上	同上	最大	最小

■印は、熱過渡解析条件を示す。

表5.1.2 熱過渡解析条件

	熱過渡解析条件	最小値	最大値
①	スクラム反応度 MK-III標準炉心の詳細核熱計算(II) ⁽⁵⁾ より算出 最小値 : 制御棒全数挿入反応度11.81% Δk/k × 補正係数0.676 = 7.98 最大値 : 制御棒全数挿入反応度11.81% Δk/k × 補正係数1.180 = 13.94 熱過渡解析では、通常動作する機器動作、インターロック動作及び安全保護系動作を考慮し、単一故障等は想定しないため制御棒全数挿入の反応度とした。	7.98% Δk/k	13.94 % Δk/k
②	崩壊熱 平成4年度炉心設計データに基づくMK-III炉心の崩壊熱評価における値を採用 最小値は、12.6Hrで出力90% (126MW) まで出力上昇し、スクラムした時の崩壊熱を採用した。 最大値は、全炉心の燃焼度がMK-III燃料の最大値である90,000MWD/tに達するまで、出力140MWt一定運転が継続した時の崩壊熱を採用した。 図5.1.1に採用した崩壊熱カーブを示す。	最小値	最大値
③	炉心圧損 最小値は、1次主循環ポンプの運転制限値(ポニーモータ1台運転時も考慮)から採用した。 最大値は、MK-III炉心圧損を3.7kg/cm ² 以下で検討をしていることから、これ以上大きくはならないと考えて採用した。	2.5kg/cm ²	3.7kg/cm ²
④	1次系ポニーモータ運転時流量 現状、ポニーモータ運転時流量は、保安規定上1台あたり5%流量を確保しなければならない。MK-IIIにおけるポニーモータ最低可能流量は、10%である。また、MK-IIIにおけるポニーモータ最大可能流量は、15%である	10%	15%
⑤	主送風機ブレーキ作動時風量追従遅れ MK-IIIのDHXは、フロアの定格回転数及びGD ² がMK-IIより大きくなるため、主送風機ブレーキ作動時風量追従遅れも増加する。MK-IIとMK-IIIのスクラム後におけるフロア停止までに要する時間は、ブレーキ仕様の変更がないため、MK-IIIの方が1sec多く要することが判明した。よって、最大値は、MK-IIで用いていた5secに1secの遅れを考慮した6secを採用した。	0sec	6sec
⑥	ベーンヒステリシス 最小値は、ヒステリシスを全く考慮しない0.0%を採用した。 最大値は、3.5%とした。これは、MK-IIIの熱過渡をMK-IIの熱過渡と同程度以下にすることでDHXの設計を行っており、その結果、ベーンヒステリシスは3.5%以下にすることでDHXを製作することにしたためである。	0.0%	3.5%
⑦	スクラム後のベーン開度制限値 ベーンの開度制限値の検討では、MK-IIで採用していた6.5%±1.0%から7.5%±1.0%に変更した方が熱過渡緩和を行う上で最適であるとの結果を得ている。したがって、最小値は6.5%を採用し、最大値は、8.5%を採用した。	6.5%	8.5%

印は、熱過渡解析に使用した条件を示す。

表5.1.3 パラメータ解析による補正係数

部 位	補正係数		部 位	補正係数	
	ΔT	$\Delta T/t$		ΔT	$\Delta T/t$
原子炉入口	1.10	—	I H X 2 次側入口	1.02	—
	1.83	1.25		1.19	1.14
	5.90	3.54		1.26	—
	1.03	—		1.01	—
	1.52	—	I H X 2 次側出口	—	—
原子炉出口	1.01	—		—	—
I H X 1 次側入口	1.01	—	D H X 入口	—	—
I H X 1 次側出口	1.09	1.14		1.01	—
	1.81	1.89	—	—	
	5.02	2.50	D H X 出口	—	—
	1.03	—		—	1.03
	1.78	2.00		1.02	—
		1.01		1.05	
			1.01	1.10	

—印は、補正係数1.00を示す。

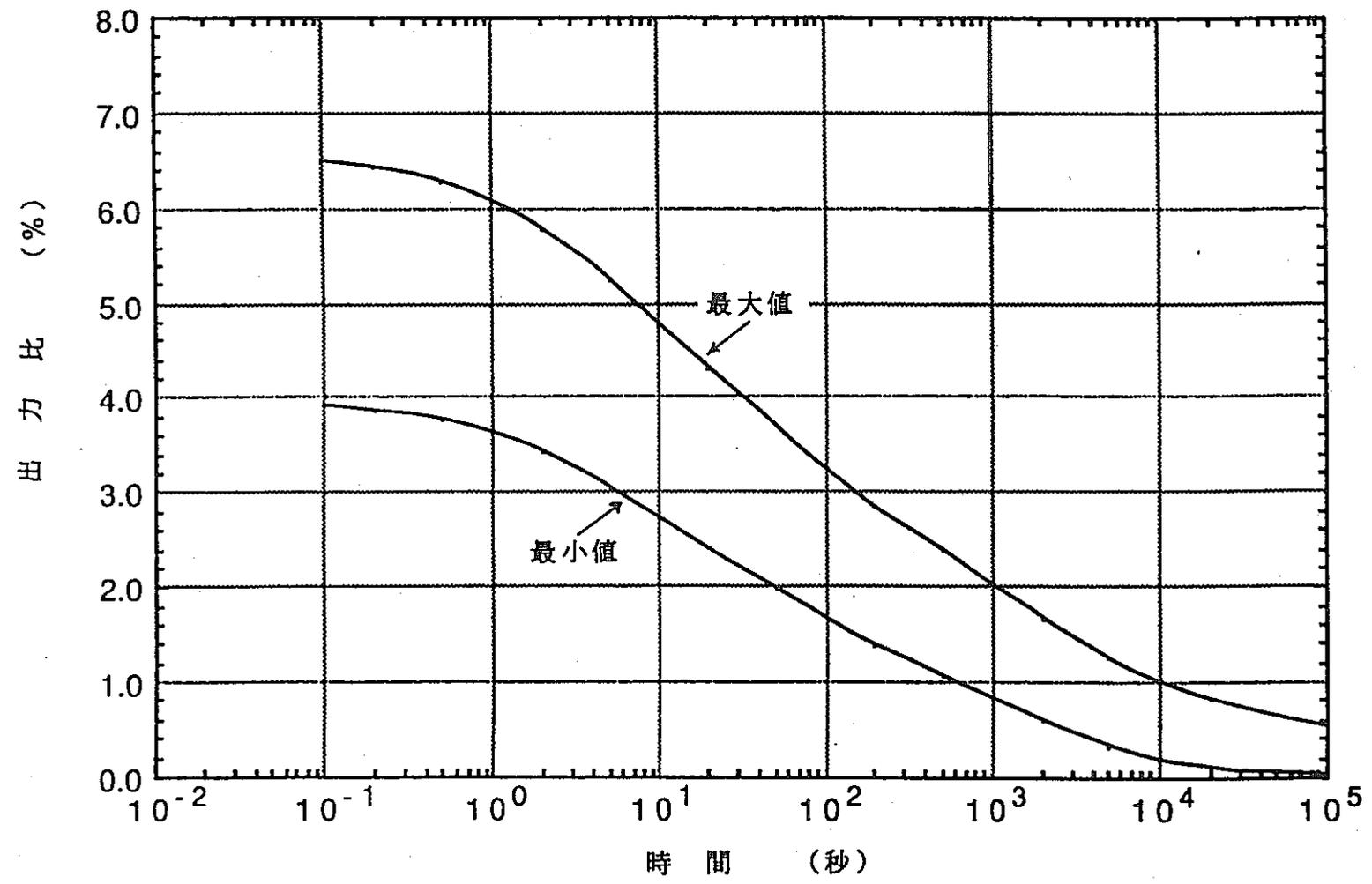


図5.1.1 「常陽」MK-III炉心の崩壊熱カーブ

5.2 熱過渡解析結果

熱過渡解析は、すべて異常事象がAループに発生したものとして解析を実施した。よって、以下に記述した解析結果はAループの挙動を示したものである。

5.2.1 外部電源喪失と同種の熱過渡挙動を示す事象の解析結果

表5.2.1に外部電源喪失と同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較を示す。また、添付図1.1～添付図1.8に外部電源喪失及び同種の熱過渡事象の解析結果を示す。外部電源喪失（運転状態Ⅱ）と同種の熱過渡挙動を示す事象は、外部電源喪失を含めると以下の4事象である。

(1) 外部電源喪失 (運転状態Ⅱ)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に一般系の電源がすべて喪失し、原子炉がスクラムするものとした。

(2) 1次主循環ポンプトリップ (同上)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に流量増大及び流量減少を伴わないポンプトリップ項目によりポンプがトリップし、原子炉がスクラムするものとした。

(3) 1次冷却材流量減少 (同上)

事象原因 : 流量が減少する原因としては、プロセス制御器の故障、セルビウス制御装置の故障及びブラシの欠損が考えられるが、ブラシの欠損では他のブラシの負荷が増大するだけで、基本的に流量減少は発生しない。また、「もんじゅ」においては、その原因としてプロセス制御器の故障のみを考えていることから、「常陽」においても同様の故障を想定することとした。したがって、原子炉定格出力運転中にプロセス制御器又はセルビウス制御装置の故障が発生し、流量が約95%まで低下した時点でポンプ回転数差過大(45rpm)でポンプがトリップし、原子炉はスクラムするものとした。また、制御系の故障を想定しているため、ランバック制御が不可能となり、ポニーモータに引き継がれるものとした。

(4) 1ループ1次系および2次系同時ポンプトリップ (運転状態Ⅲ)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に1ループの1次系及び2次系の主循環ポンプが何らかの原因で同時にトリップし、原子炉がスクラムするものとした。

これらの事象は、異常事象発生後に1次主循環ポンプからポニーモータに引き継がれるもので、流量挙動がほぼ同一となるものである。また、1次系と2次系との流量ミスマッチも少ない(手動スクラム(ランバック制御)より)ため、ホットレ

グ温度の温度変化が緩やかで、かつ、IHX 1 次側の無効熱伝達量も少ないため、原子炉入口ナトリウム温度の初期ホットショックも小さい。

これら熱過渡事象のうち、1 次冷却材流量減少については、事象発生初期の挙動がわずかに異なり、原子炉出口ナトリウム温度が定格運転温度 (500.0°C) をわずかに上回る 501.6°C になる。これは、流量減少の原因であるプロセス制御器の故障またはセルピウス制御装置の故障が発生した場合、制御出力が急激に低下して流量減少が生じるため、スクラムするまでのわずかな時間だけ炉心が冷却不足になるためである。

しかし、流量が約 95% (健全側 100%) まで低下した時点で、ポンプの回転数差過大 (45rpm) のインターロックが動作して 1 次主循環ポンプがトリップするとともに、原子炉はスクラムし、1 次系は主循環ポンプからポニーモータに引き継がれる (制御装置等の故障のためランバック制御できないため) ため、その後の挙動は外部電源喪失と同様な挙動となる。

上記のように、一部の熱過渡事象において、事象発生初期にわずかな違いが見られるものの、事象推移に大きな違いはなく、外部電源喪失事象に統一できる。また、構造健全性評価を煩雑化しない上でも統一できる事象はできるだけまとめることが必要である。したがって、外部電源喪失に統一する上で外部電源喪失事象より厳しい熱過渡挙動を示す箇所については、熱過渡条件の策定時に補正係数を、パラメータ解析における補正係数と併せて乗じるものとした。

5.2.2 手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の解析結果

表 5.2.2 に手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較を示す。また、添付図 1.9～添付図 1.16 に手動スクラム及び同種の熱過渡事象の解析結果を示す。手動スクラム (運転状態 II) と同種の熱過渡挙動を示す事象は、手動スクラムを含めると以下の 9 事象である。

(1) 手動スクラム (運転状態 II)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に手動で原子炉をスクラムさせたものとした。

(2) 中性子束高 (同上)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に誤操作により制御棒を連続的に引き抜き、出力領域中性子束高で原子炉がスクラムするものとした。

(3) 2次主循環ポンプトリップ (同上)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に流量増大及び流量減少を伴わないポンプトリップ項目によりポンプがトリップし、原子炉がスクラムするものとした。

(4) 2次冷却材流量減少 (同上)

事象原因 : 流量が減少する原因としては、抵抗タップ切替装置の故障及びブラシの欠損が考えられるが、ブラシの欠損では他のブラシの負荷が増大するだけで、基本的に流量減少は発生しない。また、「もんじゅ」においては、その原因としてプロセス制御器の故障のみを考えている。なお、「常陽」においては、ブラシの欠損でブラシ保持装置の金属まで欠損し、流量が若干減少したことがあるが、制御棒一斉挿入には至らなかった(この場合は、熱過渡が小さく他の事象で包絡できる)。よって、原因としては、ブラシ欠損ではなく抵抗タップ切替装置が故障したことを想定することとした。したがって、原子炉定格出力運転中に抵抗タップ切替装置の故障が発生し、流量が80%まで低下した時点でポンプがトリップし、原子炉はスクラムするものとした。

(5) 主冷却器空気流量減少 (同上)

事象原因 : 空気流量減少の原因としては、電氣的故障による主送風機停止及び制御系の故障が考えられるが、制御系の故障はCPU及びシーケンサーを二重化することによって防止するため除外することとして、ここでは電氣的故障による主送風機停止を考える(過去に電氣的故障ではないが主送風機停止による事象は発生している)。したがって、原子炉定格出力運転中に主送風機1台が停止して、相互インターロックにより他の主送風機もトリップし、1次及び2次主循環ポンプがトリップし、原子炉がスクラムするものとした。

(6) 主冷却器空気流量増大 (同上)

事象原因 : 空気流量増大の原因としては、制御系の故障によるベーン全開信号の発生による増大が考えられるが、制御系の故障はCPU及びシーケンサーを二重化することによって防止するため除外することができる。また、本事象は過去に発生したことがないことから、MK-IIIの熱過渡事象からも除外してもよいと考えるが、ここでは、仮にベーンが全開信号を発生したことを想定している。したがって、原子炉定格出力運転中にベーン全開により空気流量が増大し、それに伴って原子炉入口温度が低下することで中性子束高が発生し、原子炉がスクラムするものとした。

(7) 2次冷却材流量増大 (同上)

事象原因 : 流量が増大する原因としては、抵抗タップ切替装置の故障及び主電動機の短絡が考えられる。これらの事象が発生するとポンプの回転数は定格回転数(1,070rpm)から最大回転数(1,500rpm)まで上昇することになり、この回転数はポンプの危険回転数領域となる。よって、これらの防止対策として、流量増大を制限するポンプトリップ項目の追加及びタップリミッタの追加を実施する計画であり、その設定値は原子炉スクラムに至らず、熱過渡が手動スクラムと同様となる範囲内で設定する。したがって、原子炉定格出力運転中に抵抗タップ切替装置の故障が発生し、流量が120%(1,284rpm)まで上昇した時点でポンプがトリップし、原子炉はスクラムするものとした。

(8) 2次主循環ポンプ軸固着事故 (運転状態Ⅲ)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に何らかの機械的原因により1台のポンプの軸が固着し、2次冷却系流量が減少するとともに、原子炉がスクラムするものとした。

(9) 主冷却器送風機軸固着事故 (同上)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に何らかの機械的原因により1台の主送風機の軸が固着し、空気流量が減少するとともに、相互インターロックにより他の主送風機もトリップし、1次及び2次主循環ポンプがトリップし、原子炉がスクラムするものとした。

(10) 燃料スランピング (運転状態Ⅳ)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に何らかの熱的あるいは機械的原因により、燃料ペレットが被覆管内で下方に密に詰まり、炉心に異常な正の反応度が付加され、出力領域中性子束高により原子炉がスクラムするものとした。これらの事象は、異常事象発生後に1次主ポンプが定格回転数による運転からランバック制御に移行されるもので、流量がほぼ同一となるものである。また、外部電源喪失(ポニーモータ引継ぎ)に比べて、1次系と2次系との流量ミスマッチが多くなるため、ホットレグ温度の温度変化が厳しく、かつ、IHX1次側の無効熱伝達量も多くなるため、原子炉入口ナトリウム温度の初期ホットショックも大きい。

これら熱過渡事象のうち、主冷却器空気流量増大及び2次主循環ポンプ軸固着事故については、事象発生初期の挙動が他の熱過渡事象とわずかに異なる。

主冷却器空気流量増大は、片ループ2台ある主送風機のうち1台のベーン開度を全開とした事象を想定している。よって、事象発生後、DHX(A)出口において過冷却状態となり、DHX(A)出口ナトリウム温度が低下（約284℃まで）する。また、この挙動がIHX 2次側入口、1次側出口及び原子炉入口ナトリウム温度の初期挙動に影響を与え、同様に温度を低下させる。これにより、原子炉出力がスクラム設定値(107%)に到達し、中性子束高でスクラムする。なお、スクラム後の挙動は、手動スクラムとほぼ同様な挙動を示して推移していく。

2次主循環ポンプ軸固着事故は、事象発生初期のフローコーストダウン時における流量ミスマッチがわずかに大きくなるため、この影響を受けて原子炉入口ナトリウム温度の初期ホットショックも他の事象に比べて大きくなる。しかし、その挙動は手動スクラムとほぼ同様な挙動を示している。

上記のように、一部熱過渡事象において、事象発生初期にわずかな違いが見られるものの、事象推移に大きな違いはなく、手動スクラムに統一できる。また、構造健全性評価を煩雑化しない上でも統一できる事象はできるだけまとめことが必要である。したがって、手動スクラムに統一する上で手動スクラム事象より厳しい熱過渡挙動を示す箇所については、熱過渡条件の策定時に補正係数を、パラメータ解析における補正係数と併せて乗じるものとした。

5.2.3 独自の熱過渡挙動を示す事象の解析結果

独自の熱過渡挙動を示す事象は、以下の5事象である。

(1) 1次冷却材流量増大（運転状態Ⅱ） → 外部電源喪失で代表

事象原因：流量が増大する原因としては、プロセス制御器の故障、セルビウス制御装置の故障及び主電動機の短絡が考えられるが、主電動機の短絡では遮断器の保護回路が動作し、ポンプはトリップし外部電源喪失と同様の挙動を示す。また、「もんじゅ」においては、その原因としてプロセス制御器の故障のみを考えていることから、「常陽」においても同様の故障を想定することとした。したがって、原子炉定格出力運転中にプロセス制御器又はセルビウス制御装置の故障が発生し、ポンプが定格回転数(860rpm)から最大回転数(930rpm)で上昇するため、流量は100%から108%まで上昇するものとした。なお、本事象では原子炉はスクラムに至らない。

(2) 1次主ポンプ軸固着（運転状態Ⅲ）

事象原因：原子炉定格出力運転中に何らかの機械的原因により1台のポン

プの軸が固着し、1次冷却系流量が減少するとともに、原子炉がスクラムするものとした。

(3) 1次冷却材漏洩 (運転状態IV)

事象原因 : 原子炉定格出力運転中に内管のみの破断(1次主ポンプ～原子炉容器間の2Bドレン配管の破断を想定(ポンプ定格運転時は、38.1kg/secで漏洩。ポンプモータ運転時は、15.6kg/secで漏洩))によって流量低下が生じ、事象発生から43secで炉容器液面低により原子炉はスクラムすることを想定している。この間、オーバーフロー電磁ポンプによる汲み上げは、定格12m³/h(2.9kg/sec)で行われているものとしている。また、炉心流量は、漏洩したナトリウムがアニユラス部を充填するまで(事象発生から1,110secまで)漏洩流量分だけ低下しているものとし、アニユラス部が充填した後、再び通常ポンプモータ運転時炉心流量に戻ることを想定している。

(4) 2次冷却材漏洩 (同上)

事象原因 : Aループ破断(主配管の1Bドレン配管の漏洩を想定(ポンプ定格運転時は、14.1kg/secで漏洩。自然循環運転時は、6.8kg/secで漏洩))が生じて配管内の流量低下が生じ、事象発生から14secで2次主循環ポンプ液面低によりポンプがトリップし、液面が2次主循環ポンプ出口配管部上面まで低下した時点(事象発生から128sec)で、自然循環が途絶え、その後、Aループは断熱状態になることを想定している。また、1次系は、Bループのポンプ軸固着を想定している。

添付図1.41～添付図1.48に1次冷却材流量増大の解析結果を示す。

1次冷却材流量増大は、プロセス制御器の故障又はセルビウス制御装置の故障により、最大回転数まで上昇(860rpm→930rpm(MK-III定格流量の約108%))したことを想定している。したがって、事象発生後、流量ミスマッチによるIHX(A)1次側の無効熱伝達量が多くなり、原子炉入口ナトリウム温度は上昇(約364℃まで)し、逆に原子炉出口ナトリウム温度は反応度の温度係数による炉出力低下に伴って低下(約495℃まで)する。しかし、流量増大は、原子炉入口ナトリウム温度をスクラム設定値(365℃)まで上昇させるようなものでないことから、その後安定状態を保持し、その状態を継続する。

上記のような、スクラムに至らず、その温度変化も小さい事象については熱過渡事象として外部電源喪失または手動スクラムで代表しておけば、温度変化幅および温度変化率とも厳しいため十分と考えられる。また、MK-II実績においても1次

冷却材流量増大事象は一度も発生したことがない。これらのことから、本事象は、仮にスクラムに至った場合に同様の挙動を示す外部電源喪失で代表させる。

添付図1.17～添付図1.24に1次主ポンプ軸固着事故の解析結果を示す。

1次主循環ポンプ軸固着事故は、何らかの異常によって主循環ポンプが軸固着を生じ、瞬時に流量がゼロになることを想定している。これにより、軸固着したループの逆止弁開度は、逆止弁自体の自重により7%開度となり、それ以後は健全ループのポニーモータ吐出圧力による背圧によって全閉になる。これにより、健全ループのポニーモータ流量は、原子炉容器下部プレナム合流時圧損の低下によって上昇し、炉心に流れる流量は、通常ポニーモータ運転時の1ループ流量より上昇する。よって、熱交換は、IHX(A)内に滞留している1次冷却材とのみ行われ、炉容器出口及びIHX(A)1次側出入口においては、定格運転温度をほぼ保持した状態で推移している。一方、IHX(A)の内部では、逆流がないため滞留している1次冷却材が2次冷却材によってIHX(A)2次側入口温度まで急激に低下する。

添付図1.25～添付図1.32に1次冷却材漏洩事故の解析結果を示す。

1次冷却材漏洩事故は、内管のみの破断によって流量低下が生じ、炉容器液面低で原子炉はスクラムすることを想定している。この結果、Aループは1次系より2次系流量が多い逆流量ミスマッチが生じ、BループはAループの炉心流量が低下した分、原子炉容器下部プレナム合流圧損が低下して流量が増加するため、Aループとは逆の流量ミスマッチが生じる。よって、Aループは、事象発生初期に過冷却によって原子炉入口ナトリウム温度が低下し、原子炉出口ナトリウム温度は反応度の温度係数の影響による炉出力上昇に伴って上昇（約505℃まで）するが、その後、炉容器液面低により原子炉はスクラムするため、温度は低下していく。一方、Bループは、無効伝達量が増大し原子炉入口ナトリウム温度挙動は手動スクラムより厳しくなり、原子炉出口ナトリウム温度はAループの流量減少の影響を受けて初期にAループと同様に温度上昇する。

添付図1.33～添付図1.40に2次冷却材漏洩事故の解析結果を示す。

2次冷却材漏洩事故は、Aループ破断が生じて配管内の流量低下が生じ、2次主循環ポンプ液面低によって2次主循環ポンプがトリップし、液面が2次主循環ポンプ出口配管部上面まで低下した時点で、自然循環が途絶え、その後、Aループは断熱状態になることを想定している。また、1次系は、Bループのポンプ軸固着を想定して

いる。これにより、AループはIHXでの熱交換が無効となり、原子炉出口ナトリウム温度がコールドレグ側に貫通してくるため、急激なホットショックが原子炉入口に生じる。その後、原子炉出入口とも約440°Cで安定する。一方、Bループは1次系Aループのポンプモータによって自然循環が阻害され、ほぼMK-Ⅲ定格運転状態の温度を保持し、その後徐々に温度低下していく。なお、2次系AループのDHX出口において200°C以下になっているが、これは、解析上予熱ヒータを考慮できないためであり、実際には、予熱ヒータが作動して約200°Cを保持することになるため、熱過渡条件上200°Cに到達した時点で一定状態とする。

表5.2.1 外部電源喪失と同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較

ケース	①		②		③		④		補正係数	
部位	外部電源喪失		1次主循環ポンプトリップ		1次冷却材流量減少		1、2次系同時ポンプトリップ		最大熱過渡事象	
	運転状態Ⅱ						運転状態Ⅲ		①	
	ΔT °C	$\Delta T/t$ °C/sec	ΔT °C	$\Delta T/t$ °C/sec	ΔT °C	$\Delta T/t$ °C/sec	ΔT °C	$\Delta T/t$ °C/sec	ΔT	$\Delta T/t$
R/V入口	5.0	0.03	5.2	0.04	5.3	0.03	5.1	0.03	1.06	1.33
	-14.9	-0.07	-14.5	-0.07	-15.6	-0.07	-14.9	-0.07	1.05	
	6.2	0.03	6.0	0.03	6.3	0.03	6.1	0.03	1.02	
	-21.0	-0.04	-20.9	-0.04	-19.7	-0.04	-20.9	-0.04		
	1.6	0.01	1.7	0.01	1.5	0.01	1.6	0.01	1.06	
R/V出口	-178.0	-0.31	-178.0	-0.31	-179.0	-0.34	-178.0	-0.31	1.01	1.10
IHX1次側入口	-177.8	-0.30	-177.8	-0.30	-178.6	-0.32	-177.8	-0.30	—	1.07
IHX1次側出口	6.2	0.04	6.6	0.05	6.6	0.05	6.1	0.04	1.06	1.25
	-16.6	-0.08	-16.3	-0.08	-17.3	-0.08	-16.5	-0.08	1.04	
	7.6	0.04	7.5	0.04	7.7	0.04	7.6	0.04	1.01	
	-21.7	-0.04	-21.7	-0.04	-20.4	-0.04	-21.7	-0.04		
	2.2	0.01	2.2	0.01	2.1	0.01	2.2	0.01		
IHX2次側入口	-15.0	-0.09	-14.7	-0.09	-14.8	-0.09	-15.0	-0.09		
	32.1	0.16	31.8	0.15	31.8	0.15	32.1	0.16		
	-27.1	-0.05	-27.1	-0.06	-26.9	-0.06	-27.1	-0.05		1.20
	12.0	0.07	12.1	0.07	12.2	0.07	12.1	0.07	1.02	
IHX2次側出口	24.6	0.53	24.4	0.52	25.7	0.53	24.5	0.52	1.04	—
	-171.6	-0.26	-171.4	-0.26	-172.1	-0.28	-171.5	-0.26	—	1.08
DHX入口	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01		
	17.4	0.10	17.1	0.10	17.9	0.11	17.3	0.10	1.03	1.10
	-161.0	-0.18	-160.7	-0.18	-161.2	-0.19	-160.9	-0.18		1.06
DHX出口	-23.8	-0.84	-23.4	-0.75	-23.4	-0.77	-23.8	-0.83		
	51.7	0.29	51.4	0.29	51.4	0.29	51.1	0.29		
	-39.3	-0.08	-39.5	-0.08	-39.5	-0.08	-38.7	-0.08	1.01	
	30.2	0.20	30.4	0.20	30.4	0.20	30.3	0.20	1.01	
	-39.9	-0.19	-40.1	-0.19	-39.9	-0.19	-40.1	-0.19	1.01	

印は、同種の熱過渡挙動を示す事象の中で最も厳しいケース（同一値も含む）を示す。

表5.2.2 手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較(1/2)

ケース	①		②		③		④		⑤	
部位	手動スクラム		中性子束高		2次冷却材 流量減少		2次主ポンプトリップ または流量増大		主冷却器 空気流量減少	
	運転状態Ⅱ									
	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec
R/V入口	16.9	0.10	17.0	0.10	17.4	0.08	17.0	0.09	17.3	0.09
	-21.7	-0.09	-21.3	-0.09	-22.6	-0.10	-21.9	-0.09	-21.8	-0.09
	4.1	0.03	3.8	0.02	4.4	0.03	4.1	0.03	3.6	0.02
	-19.4	-0.04	-19.5	-0.04	-19.5	-0.04	-19.4	-0.04	-19.2	-0.04
	1.2	0.01	1.2	0.01	1.2	0.01	1.2	0.01	1.2	0.01
R/V出口	-177.4	-0.35	-177.3	-0.35	-178.1	-0.35	-177.3	-0.35	-177.3	-0.35
IHX1次側入口	-177.1	-0.34	-177.0	-0.34	-177.8	-0.34	-177.0	-0.34	-177.0	-0.34
IHX1次側出口	18.5	0.14	18.6	0.14	18.9	0.19	18.5	0.12	18.8	0.12
	-23.6	-0.10	-23.3	-0.10	-24.5	-0.11	-23.8	-0.10	-23.6	-0.10
	5.2	0.03	4.9	0.03	5.6	0.03	5.2	0.03	4.6	0.03
	-20.0	-0.04	-20.1	-0.04	-20.0	-0.04	-20.0	-0.04	-19.8	-0.05
	1.6	0.01	1.7	0.01	1.6	0.01	1.6	0.01	1.6	0.01
IHX2次側入口	-14.8	-0.09	-13.8	-0.08	-15.8	-0.10	-15.0	-0.09	-11.8	-0.07
	31.5	0.15	30.9	0.15	32.2	0.15	31.7	0.15	28.6	0.14
	-26.6	-0.06	-27.0	-0.06	-26.3	-0.06	-26.6	-0.06	-26.7	-0.06
	12.5	0.07	12.5	0.07	12.4	0.07	12.4	0.07	12.5	0.07
IHX2次側出口	26.1	0.53	26.1	0.56	26.5	0.72	26.3	0.58	26.3	0.57
	-172.3	-0.30	-172.2	-0.30	-173.3	-0.30	-172.5	-0.30	-172.4	-0.30
DHX入口	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01
	17.6	0.11	17.6	0.11	18.2	0.11	17.8	0.11	17.7	0.11
	-161.2	-0.20	-161.1	-0.20	-162.5	-0.20	-161.4	-0.20	-161.2	-0.20
DHX出口	-23.5	-0.79	-21.9	-0.50	-25.0	-1.05	-23.7	-0.84	-18.7	-0.27
	51.4	0.29	50.3	0.30	52.5	0.29	51.6	0.29	46.6	0.29
	-39.6	-0.08	-40.1	-0.08	-39.1	-0.08	-39.6	-0.08	-39.7	-0.07
	31.3	0.20	31.4	0.20	31.1	0.20	31.2	0.20	31.6	0.21
	-40.5	-0.19	-40.6	-0.19	-40.4	-0.19	-40.4	-0.19	-40.8	-0.19

印は、同種の熱過渡挙動を示す事象の中で最も厳しいケース（同一値も含む）を示す。

表5.2.2 手動スクラムと同種の熱過渡挙動を示す事象の熱過渡比較(2/2)

ケース	⑥		⑦		⑧		⑨		補正係数	
部位	主冷却器 空気流量増大		2次主ポンプ 軸固着		主送風機軸固着		燃料 スランピング		最大熱過渡事象	
	運転状態Ⅱ		運転状態Ⅲ				運転状態Ⅳ		①	
	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT ℃	$\Delta T/t$ ℃/sec	ΔT	$\Delta T/t$
R/V入口	16.4	0.10	18.1	0.13	16.9	0.10	17.0	0.10	1.07	1.30
	-13.5	-0.07	-23.9	-0.10	-21.8	-0.09	-21.4	-0.09	1.10	1.11
	8.4	0.04	5.0	0.03	4.1	0.03	3.9	0.02	2.05	1.33
	-20.1	-0.05	-19.6	-0.04	-19.4	-0.04	-19.5	-0.04	1.04	1.25
	1.6	0.01	1.2	0.01	1.2	0.01	1.1	0.01	1.33	
R/V出口	-178.4	-0.38	-177.3	-0.35	-177.3	-0.35	-177.3	-0.35	1.01	1.09
IHX1次側入口	-178.1	-0.36	-177.0	-0.34	-177.0	-0.34	-177.0	-0.34	1.01	1.06
IHX1次側出口	17.8	0.13	19.4	0.29	18.4	0.12	18.6	0.14	1.05	2.07
	-15.4	-0.08	-25.6	-0.11	-23.7	-0.10	-23.3	-0.10	1.08	1.10
	9.6	0.05	6.2	0.04	5.2	0.03	5.0	0.03	1.85	1.67
	-20.8	-0.05	-20.1	-0.04	-20.0	-0.04	-20.1	-0.04	1.04	1.25
	2.1	0.01	1.5	0.01	1.6	0.01	1.6	0.01	1.31	
IHX2次側入口	-25.4	-0.22	-16.8	-0.11	-14.8	-0.09	-14.7	-0.09	1.72	2.44
	46.3	0.19	33.2	0.16	31.5	0.15	31.5	0.15	1.47	1.27
	-30.7	-0.07	-26.3	-0.06	-26.6	-0.06	-26.7	-0.06	1.15	1.17
	13.2	0.08	12.2	0.07	12.4	0.07	12.4	0.07	1.06	1.14
IHX2次側出口	29.8	0.68	27.0	0.64	26.2	0.55	26.2	0.53	1.14	1.36
	-172.8	-0.32	-173.2	-0.30	-172.4	-0.30	-172.3	-0.30	1.01	1.07
DHX入口	-4.0	-0.03	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	-1.9	-0.01	2.11	3.00
	20.7	0.12	18.5	0.11	17.7	0.11	17.9	0.11	1.18	1.09
	-159.7	-0.21	-162.0	-0.20	-161.3	-0.20	-161.4	-0.20	1.01	1.05
DHX出口	-34.7	-0.68	-27.1	-1.14	-23.4	-0.79	-23.4	-0.77	1.48	1.44
	68.7	0.32	54.5	0.29	51.3	0.29	51.4	0.29	1.34	1.10
	-46.6	-0.11	-39.0	-0.08	-39.6	-0.08	-39.7	-0.08	1.18	1.38
	34.7	0.23	30.8	0.20	31.3	0.20	31.2	0.20	1.11	1.15
	-43.2	-0.20	-40.2	-0.19	-40.5	-0.19	-40.4	-0.19	1.07	1.05

印は、同種の熱過渡挙動を示す事象の中で最も厳しいケース（同一値も含む）を示す。

6. 熱過渡条件の策定

6.1 熱過渡条件事象の折れ線図作成

折れ線化の方法は、「もんじゅ熱過渡解析評価」⁽⁶⁾を参考に行った。

6.1.1 熱過渡状態の折れ線化（基準折れ線図の作成）

各熱過渡の温度変化が大きい部分（ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上）は、図6.1.1の熱過渡の基準折れ線図化（例）に示す基準温度と最も厳しい温度変化率の直線との接点を基準（温度及び時間）として、 20°C 以内の幅で分割して折れ線化する。但し、温度変化が緩慢になった部分（ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以下）は 100sec 以内の幅で分割する。基準接点の時間以外は、基本的に解析値を使用するものとするが、熱過渡が最も厳しい温度変化率の直線と重なっていない初期においては、最も厳しい温度変化率を使用するものとした。

なお、降下上昇混在型の熱過渡に対しては、基準温度（A）を境に折れ線化を行う。

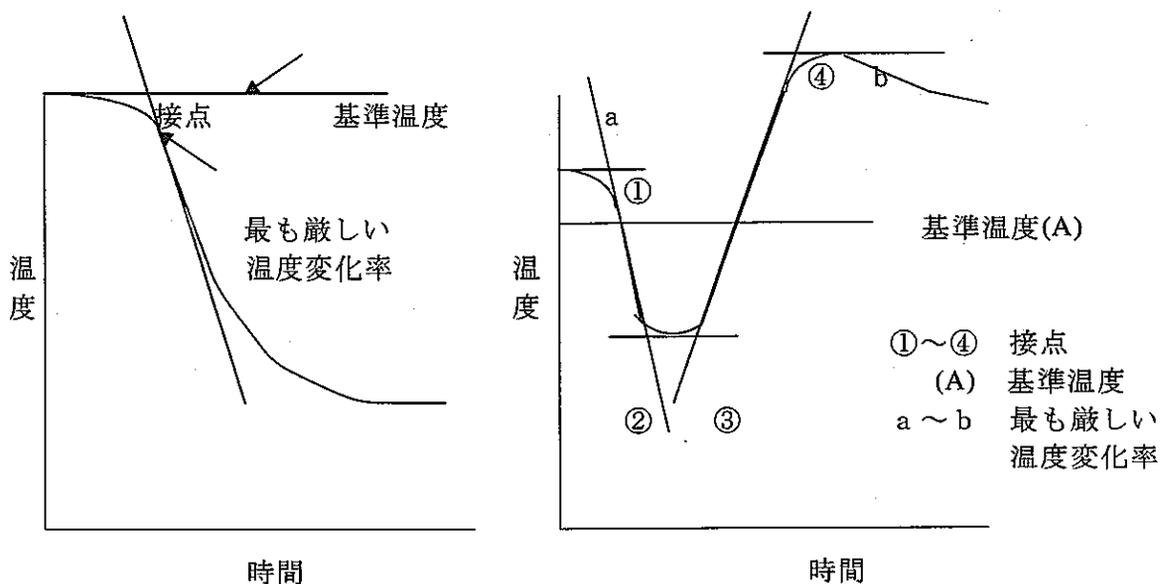


図6.1.1 熱過渡の基準折れ線図化（例）

6.2 熱過渡条件事象の折れ線図補正係数

表6.2.1～表6.2.2に熱過渡条件事象の折れ線図補正係数を示す。

熱過渡条件事象の折れ線図補正係数は、熱過渡解析用パラメータの検討結果⁽⁶⁾で得られたパラメータ解析による補正係数と、熱過渡解析で得られた表6.2.1 (1/2～2/2)の同種の熱過渡事象に対する補正係数(外部電源喪失および手動スクラムに対する包絡係数)とを乗じたものとした。ただし、独自の熱過渡挙動を示す事象(8事象)に対しては、表6.2.1 (1/2～2/2)に示すパラメータ解析による補正係数のみ乗じるものとした。

表6.2.1 熱過渡条件事象の折れ線図補正係数（外部電源喪失）(1/2)

部 位	熱過渡種類	ΔT		$\Delta T/t$		折れ線図補正係数	
		パラメータ補正係数	同種熱過渡事象補正係数	パラメータ補正係数	同種熱過渡事象補正係数	ΔT	$\Delta T/t$
原子炉入口	ホット	1.10	1.06		1.33	1.17	1.33
	コールド	1.83	1.05	1.25		1.92	1.25
	ホット	5.90	1.02	3.54		6.02	3.54
	コールド	1.03				1.03	
	ホット	1.52	1.06			1.61	
原子炉出口	コールド	1.01	1.01	—	1.10	1.02	1.10
IHX1次側入口	コールド	1.01	—	—	1.07	1.01	1.07
IHX1次側出口	ホット	1.09	1.06	1.14	1.25	1.16	1.43
	コールド	1.81	1.04	1.89		1.88	1.89
	ホット	5.02	1.01	2.50		5.07	2.50
	コールド	1.03				1.03	
	ホット	1.78		2.00		1.78	2.00
IHX2次側入口	コールド	1.02				1.02	
	ホット	1.19		1.14		1.19	1.14
	コールド	1.26			1.20	1.26	1.20
	ホット	1.01	1.02			1.03	
IHX2次側出口	ホット	—	1.04	—	—	1.04	—
	コールド	—	—	—	1.08	—	1.08
DHX入口	コールド	—	—	—	—	—	—
	ホット	1.01	1.03	—	1.10	1.04	1.10
	コールド	—	—	—	1.06	—	1.06
DHX出口	コールド						
	ホット			1.03			1.03
	コールド	1.02	1.01			1.03	
	ホット	1.01	1.01	1.05		1.02	1.05
	コールド	1.01	1.01	1.10		1.02	1.05

表6.2.1 熱過渡条件事象の折れ線図補正係数（手動スクラム）(2/2)

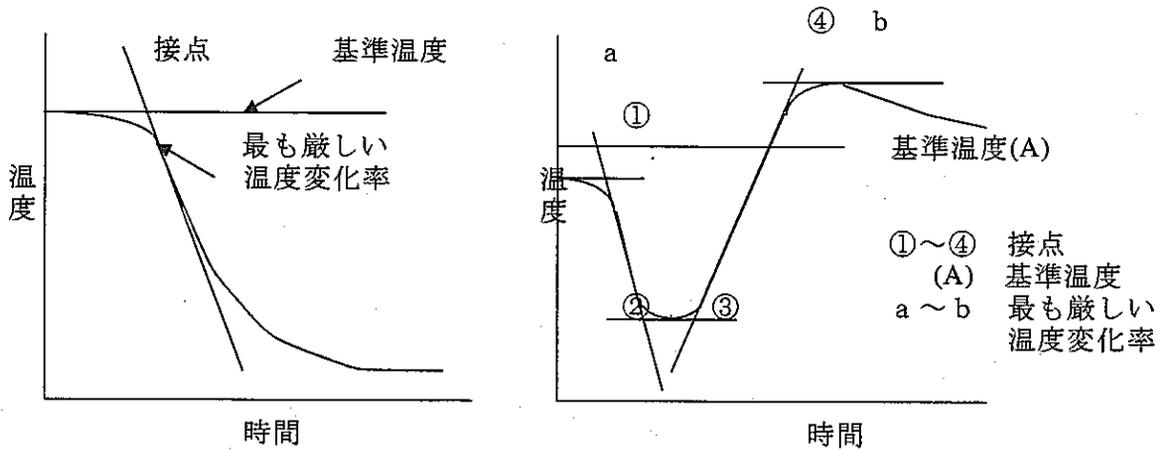
部 位	熱過渡種類	ΔT		$\Delta T/t$		折れ線図補正係数	
		パラメータ補正係数	同種熱過渡事象補正係数	パラメータ補正係数	同種熱過渡事象補正係数	ΔT	$\Delta T/t$
原子炉入口	ホット	1.10	1.07		1.30	1.18	1.30
	コールド	1.83	1.10	1.25	1.11	2.01	1.39
	ホット	5.90	2.05	3.54	1.33	12.10	4.71
	コールド	1.03	1.04		1.25	1.07	1.25
	ホット	1.52	1.33			2.02	
原子炉出口	コールド	1.01	1.01	—	1.09	1.02	1.09
IHX1次側入口	コールド	1.01	1.01	—	1.06	1.02	1.06
IHX1次側出口	ホット	1.09	1.05	1.14	2.07	1.14	2.36
	コールド	1.81	1.08	1.89	1.10	1.95	2.08
	ホット	5.02	1.85	2.50	1.67	9.29	4.18
	コールド	1.03	1.04		1.25	1.07	1.25
	ホット	1.78	1.31	2.00		2.33	2.00
IHX2次側入口	コールド	1.02	1.72		2.44	1.75	2.44
	ホット	1.19	1.47	1.14	1.27	1.75	1.45
	コールド	1.26	1.15		1.17	1.45	1.17
	ホット	1.01	1.06		1.14	1.07	1.14
IHX2次側出口	ホット		1.14		1.36	1.14	1.36
	コールド		1.01		1.07	1.01	1.07
DHX入口	コールド		2.11		3.00	2.11	3.00
	ホット	1.01	1.18		1.09	1.19	1.09
	コールド		1.01		1.05	1.01	1.05
DHX出口	コールド		1.48		1.44	1.48	1.44
	ホット		1.34	1.03	1.10	1.34	1.13
	コールド	1.02	1.18		1.38	1.20	1.38
	ホット	1.01	1.11	1.05	1.15	1.12	1.21
	コールド	1.01	1.07	1.10	1.05	1.08	1.16

6.3 熱過渡条件の策定

熱過渡条件の策定は、6.1項に記述した方法で作成した熱過渡条件事象の折れ線図と6.2項で示した補正係数を用いて行った。詳細な方法は、図6.3.1の熱過渡条件の策定方法に示す。

策定した各熱過渡事象は、以下に記述した添付図に示す。また、表6.3.2にMK-III熱過渡条件の最大温度変化率と原設工認における変化率とを比較したもの、表6.3.3にMK-III熱過渡条件の最高温度と原設工認における温度とを比較したものをそれぞれ示す。

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| (1) 外部電源喪失 (代表事象) | (運転状態Ⅱ) → 添付図1.69～添付図1.76 |
| 1次主循環ポンプトリップ | (運転状態Ⅱ) |
| 1次冷却材流量減少 | (同上) |
| 1ループ1・2次系同時ポンプトリップ | (運転状態Ⅲ) |
| (2) 手動スクラム (代表事象) | (運転状態Ⅱ) → 添付図1.77～添付図1.84 |
| 中性子束高 | (同上) |
| 2次主循環ポンプトリップ | (同上) |
| 2次冷却材流量減少 | (同上) |
| 主冷却材器空気流量減少 | (同上) |
| 主冷却材器空気流量増大 | (同上) |
| 1次冷却材流量増大 | (同上) |
| 2次冷却材流量増大 | (同上) |
| 2次主循環ポンプ軸固着事故 | (運転状態Ⅲ) |
| 主冷却器送風機軸固着事故 | (同上) |
| 燃料スランピング事故 | (運転状態Ⅳ) |
| (3) 1次主循環ポンプ軸固着事故 (運転状態Ⅲ) | → 添付図1.85～添付図1.92 |
| (4) 1次冷却材漏洩事故 (運転状態Ⅳ) | → 添付図1.93～添付図1.100 |
| (5) 2次冷却材漏洩事故 (運転状態Ⅳ) | → 添付図1.102～添付図1.108 |
| (6) IHX内部熱過渡条件 | → 添付図1.109～添付図1.149 |



単調降下型の場合（左図）

- (1) 基準折れ線図に温度変化率補正係数を乗じる

各折れ線間の温度変化率 ($\Delta T/t$) に温度変化率補正係数を乗じる。算出された各補正後温度変化率 ($\Delta T/t'$) を用いて、各折れ線間の温度変化幅 (ΔT) を除して各折れ線間の補正後経過時間 (t') を算出する。

- (2) 基準折れ線図に温度変化幅補正係数を乗じる

(1)で算出した各折れ線間の温度変化幅 (ΔT) 及び経過時間 (t') に温度変化幅補正係数を乗じることで、各折れ線間温度変化幅の拡幅 ($\Delta T'$) を行うとともに、各折れ線間の温度変化率を(1)で算出した値に維持する。

- (3) 準定常状態以降の処置

準定常状態となった以降については、その温度から 250°Cまで-50°C/hで均一に系統降温するものとする。

降下上昇混在型の場合（右図）

- (1) 異常事象開始温度を基準温度 (A) とする。

- (2) 基準折れ線図に温度変化率補正係数を乗じる

基準温度 (A) を境に各折れ線間のホットショック及びコールドショックに相当する温度変化率 ($\Delta T/t$) に温度変化率補正係数を乗じる。算出された各補正後温度変化率 ($\Delta T/t'$) を用いて、各折れ線間の温度変化幅 (ΔT) を除して各折れ線間の補正後経過時間 (t') を算出する。

- (3) 基準折れ線図に温度変化幅補正係数を乗じる

①で算出した各折れ線間の温度変化幅 (ΔT) 及び経過時間 (t') に温度変化幅補正係数を乗じて、温度変化幅の拡幅 ($\Delta T'$) を行うとともに、温度変化率は②で算出した値にする。ただし、基準温度 (A) を境にした各熱過渡の山の最初の挙動に相当するホットショックまたはコールドショックの温度変化幅補正係数を基準温度 (A) を境にした各熱過渡の山の温度変化幅 (ΔT) 及び補正後経過時間 (t') に乗じるものとする。

- (4) 準定常状態以降の処置

準定常状態となった以降については、その温度から 250°Cまで-50°C/hで均一に系統降温するものとする。

図6.3.1 熱過渡条件の策定方法 (例)

表6.3.2 各熱過渡条件の最大温度変化率と原設工認値

(単位 : °C/sec)

部 位 熱過渡事象		原子炉		I H X 1 次側		I H X 2 次側		D H X		
		入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口	
運 転 状 態 II	外部電源喪失	MK-III	-0.09 0.13	0.08 -0.33	0.03 -0.30	-0.14 0.11	0.17 -0.07	0.62 -0.30	0.11 -0.20	-0.80 0.28
		原設工認	-0.20	-1.30	-1.30	-0.20	-3.00	-0.40	-0.40	-3.00
	手動スクラム	MK-III	-0.13 0.13	0.02 -0.38	0.03 -0.36	0.32 -0.22	-0.23 0.22	0.56 -0.35	0.11 -0.23	-0.59 0.30
		原設工認	1.00	-3.00	-3.00	1.00	1.70	-2.00	-2.00	1.70
運 転 状 態 III	1次主ポンプ 軸固着事故	MK-III	0.15	-1.22	-1.32	0.14	-0.07	-2.38	-0.44	-0.93
		原設工認	—	—	—	—	—	—	—	—
	1ループ 1・2 次系 同時ポンプトリップ (外部電源喪失 と同様)	MK-III	-0.09 0.13	-0.33	-0.30	-0.24 0.11	0.17 -0.09	0.67 -0.30	0.11 -0.20	-0.80 0.28
		原設工認	—	—	—	—	—	—	—	—
	2次主ポンプ 軸固着事故 (手動スクラム と同様)	MK-III	-0.13 0.13	-0.38	-0.36	-0.22 0.32	-0.23 0.22	0.73 -0.35	0.12 -0.23	-0.59 0.30
		原設工認	—	—	—	—	—	—	—	—
	主冷却器送風機 軸固着事故 (手動スクラム と同様)	MK-III	-0.13 0.13	-0.38	-0.36	-0.22 0.32	-0.23 0.22	0.73 -0.35	0.12 -0.23	-0.59 0.30
		原設工認	—	—	—	—	—	—	—	—
運 転 状 態 IV	1次冷却材漏洩事故		-0.42 0.08	-0.30	-0.30	-0.36 0.15	-0.11 0.19	0.63 -0.23	0.10 -0.17	-0.77 0.29
	2次冷却材漏洩事故		0.67 -0.17	-0.17	-0.17	1.34 -0.27	-0.01	0.41	-0.02	-0.54
	燃料スランピング事故 (手動スクラムと同様)		-0.13 0.13	-0.38	-0.36	-0.22 0.32	-0.23 0.22	0.73 -0.35	0.12 -0.23	-0.59 0.30
	原設工認値		—	—	—	—	—	—	—	—

表6.3.3 各熱過渡条件の最高温度と原設工認値

(単位：℃/sec)

部 位 熱過渡事象 設計条件			原子炉		I H X 1 次側		I H X 2 次側		D H X		
			入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口	
			450.0	550.0	550.0	450.0	400.0	520.0	520.0	400.0	
運 転 状 態 II	外部電源喪失	MK-III	367.7	501.6	501.4	367.7	320.6	495.4	485.6	328.5	
		原設工認	370.0	500.0	500.0	370.0	376.0	488.0	488.0	376.0	
	手動スクラム	MK-III	389.4	501.9	501.8	387.5	329.4	499.6	488.1	338.0	
		原設工認	370.0	500.0	500.0	370.0	376.0	488.0	488.0	376.0	
運 転 状 態 III	1次主ポンプ 軸固着事故	MK-III	390.1	500.0	500.0	390.6	305.5	469.8	469.4	325.0	
		原設工認	370.0	502.0	502.0	370.0	447.0	496.0	496.0	447.0	
	1ループ 1・2次系 同時ポンプトリップ (外部電源喪失 と同様)	MK-III	367.7	501.6	501.4	367.7	320.6	495.4	485.6	328.5	
		原設工認	370.0	502.0	502.0	370.0	447.0	496.0	496.0	447.0	
	2次主ポンプ 軸固着事故 (手動スクラム と同様)	MK-III	389.4	501.9	501.8	387.5	329.4	499.6	488.1	338.0	
		原設工認	470.0	500.0	500.0	470.0	447.0	496.0	496.0	447.0	
	主冷却器送風機 軸固着事故 (手動スクラム と同様)	MK-III	389.4	501.9	501.8	387.5	329.4	499.6	488.1	338.0	
		原設工認	447.0	503.0	503.0	447.0	447.0	496.0	496.0	447.0	
	運 転 状 態 IV	1次冷却材漏洩事故		352.3	504.7	504.6	355.3	321.7	488.5	479.8	327.5
		2次冷却材漏洩事故		495.0	500.0	500.0	497.0	300.2	498.5	469.4	300.6
燃料スランピング事故 (手動スクラムと同様)		389.4	501.9	501.8	387.5	329.4	499.6	488.1	338.0		
原設工認値		550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0		

7. 考 察

通常、熱過渡解析は、5.1項に示した解析パラメータ条件のパラメータ毎に熱過渡事象の解析を行い、それらの中から最も厳しい熱過渡事象を選定して熱過渡条件を策定することになる。しかし、このような方法を採用した場合、その解析ケースは下記に示すように膨大なものとなると共に、その評価には多大な時間を要することになる。

$$\begin{aligned} \text{解析ケース数} &= \text{解析パラメータ数} \times \text{各パラメータのケース数 (最確値、最大値、最小値)} \\ &\times \text{想定熱過渡事象数} = 7 \times 3 \times 18 = 378 \end{aligned}$$

よって、本熱過渡解析では、各事象による熱過渡解析を行う前に外部電源喪失事象を代表としたパラメータ解析を各パラメータの最大値及び最小値を用いて行い、これらの結果から各パラメータによる温度変化幅補正係数及び温度変化率補正係数を算出し、各事象の熱過渡解析結果に乗じる方法を考えた。この方法は、解析ケース数を減少させるのに大きな効果があったと共に、各事象の熱過渡条件を保守的（通常手法より過大になる）に設定することも可能性とした。なお、解析に用いたプラント動特性解析コード“MIMIR-N2”は、「常陽」における特殊試験及び特性試験結果が十分反映されており、その解析結果は精度が高く、実績熱過渡挙動に近い解析結果が得られるため、上記のような方法で算出した補正係数に乗じても熱過渡挙動が過大になり過ぎることはないと思われる。また、MK-Ⅲでは、外部電源喪失事象及びそれと同種の事象以外の事象においては1次主循環ポンプにランバック制御を導入するため、各事象における熱過渡挙動が熱過渡の大小差はあるものの外部電源喪失事象と同様な挙動を示すものが多いことも本手法を採用した大きな要因である。

本熱過渡解析で行った解析ケースは、下記のように通常行うべき解析ケース数の1/10であり、このケースで熱過渡条件の策定を可能としている。

$$\begin{aligned} \text{解析ケース数} &= \text{解析パラメータ数} \times \text{各パラメータのケース数 (最大値、最小値)} \\ &+ \text{想定熱過渡事象数} = 7 \times 2 + 18 = 32 \end{aligned}$$

熱過渡解析を行った結果では、一部の熱過渡事象において事象発生初期にわずかな違いが見られるものの、大きく3つの事象パターン（外部電源喪失と同種の熱過渡事象、手動スクラムと同種の熱過渡事象、独自の熱過渡挙動を示す事象）に分類することが可能であった。また、熱過渡条件は、構造健全性評価を行う上で必要な構造解析ケースを削減させると共に、評価を煩雑化させない上でも統一できる事象はできるだけまとめることで熱過渡条件の策定を行うことが必要であり、その結果、全18ケースの想定熱過渡事象に対して、熱過渡条件は5ケースにまとめることを可能とした。

8. おわりに

本熱過渡条件の策定では、“MIMIR-N2”コードのモデル条件（IHX、DHX、一部配管および温度制御系等）及び入力条件のすべてをMK-III仕様に変更すると共に、これまで現状の“MIMIR-N2”コードでは解析が不可能であった一部熱過渡事象に対してコード改良を実施し、MK-IIIの運転状態Ⅱ、Ⅲ及びⅣの熱過渡解析を行った。また、熱過渡条件は、得られた熱過渡解析結果に、予め電源喪失事象で代表した各プラントの不確定パラメータの上下限值解析によって求めた熱過渡条件の補正係数を乗じることで策定を行った。

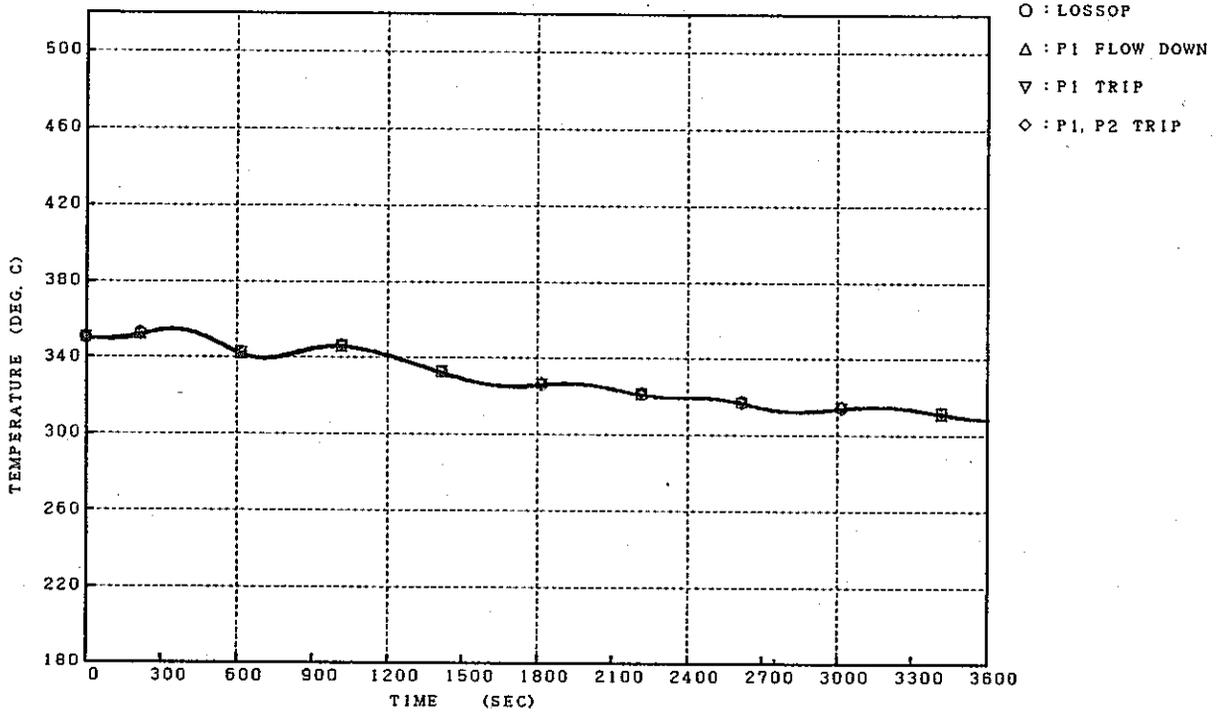
本熱過渡条件の策定によって、MK-III冷却系改造に係る主IHX及びDHXの製作構造設計に用いるMK-IIIの運転状態Ⅱ、Ⅲ及びⅣに渡る一連の熱的条件を整備することができた。

9. 謝 辞

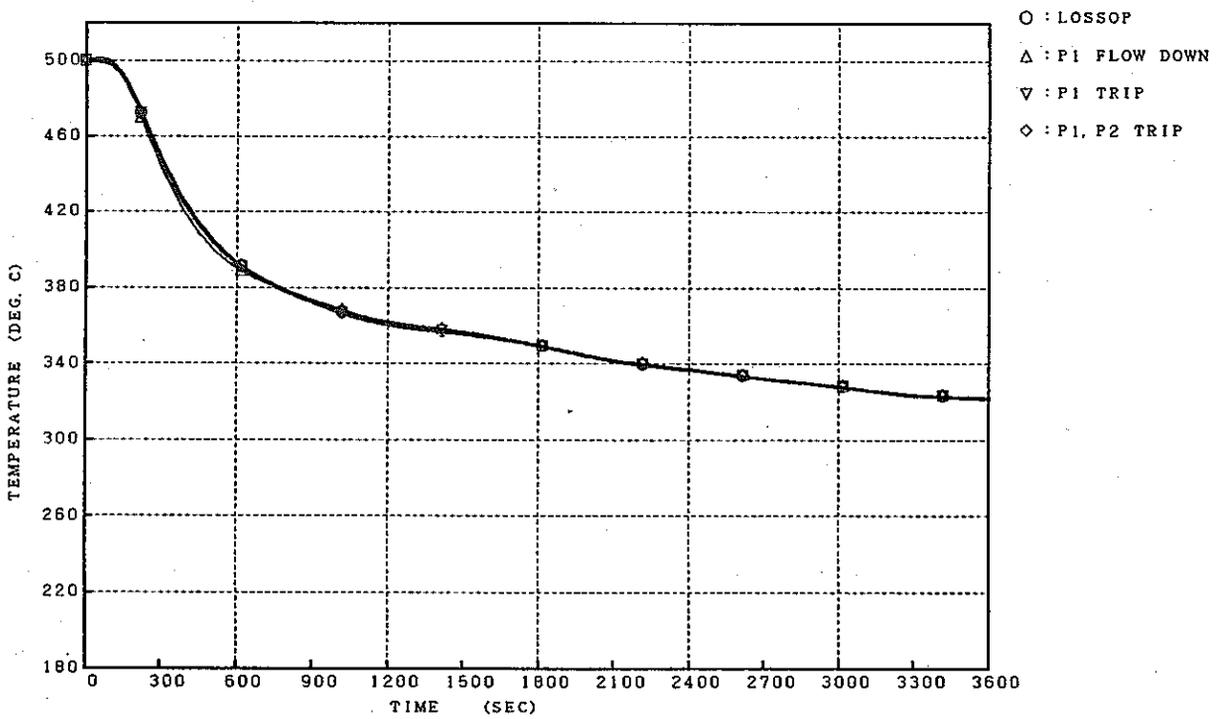
本熱過渡条件の策定（最終版）にあたっては、その熱過渡解析及びデータ整理においてアイ・ティ・ジェイ㈱の古小高健一氏に多大な御助勢を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

10. 参考文献

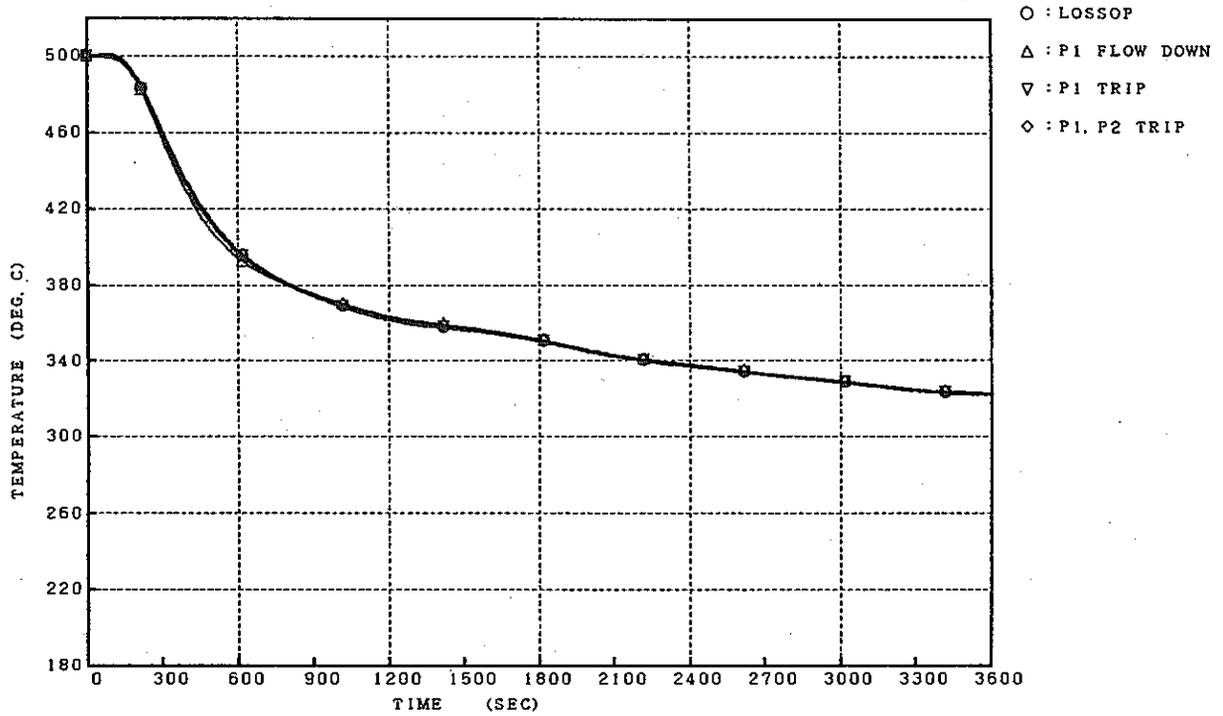
- (1) 磯崎和則、他著、「常陽」MK-III冷却系改造に係わる設計条件の整備 — 機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定 (I) — : PNC ZN9410 91-313 1991年9月
- (2) 動力炉・核燃料開発事業団, 「常陽」ナトリウム機器の構造設計指針: 昭和47年3月
- (3) 動力炉・核燃料開発事業団, 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針: PNC N241 84-08(1) 昭和59年9月
- (4) 動力炉・核燃料開発事業団, 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等: PNC N241 84-08(2) 昭和59年9月
- (5) 池田一三、他著, MK-III標準炉心の詳細核熱計算 (II) : PNC ZJ9214 93-002 1993年3月
- (6) 猪瀬 明、他著, もんじゅ熱過渡解析評価: PNC ZN2410 89-019 平成元年10月



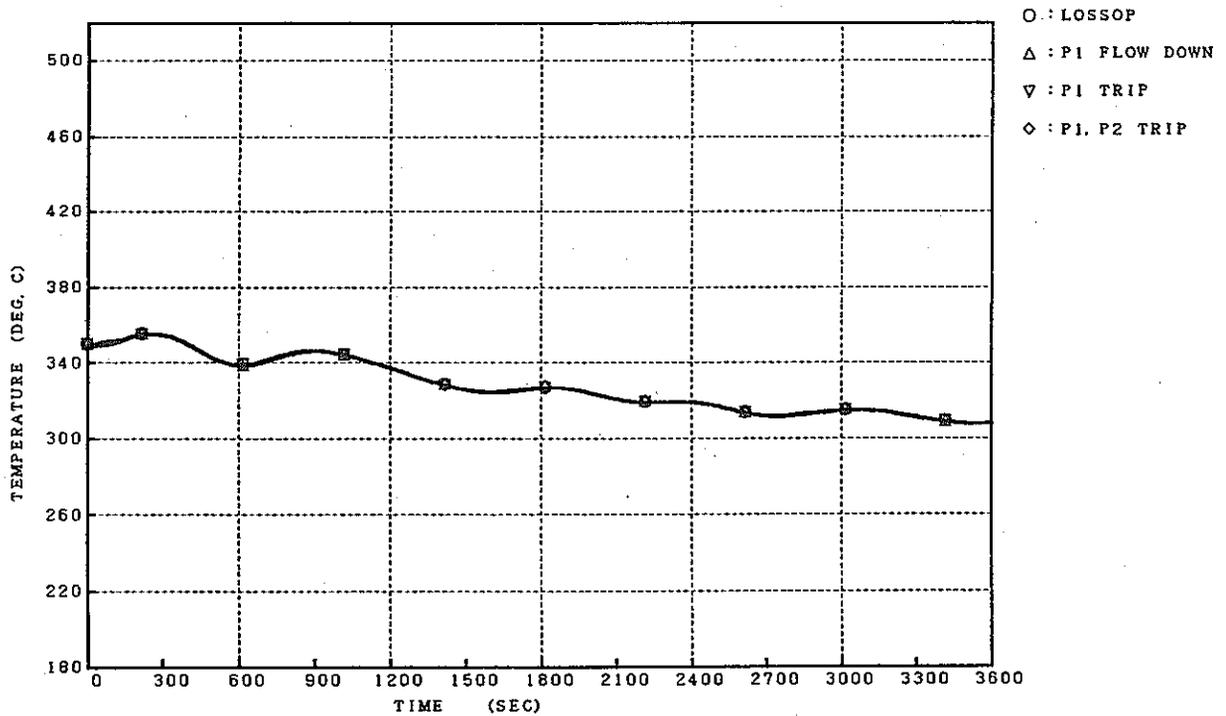
添付図 1.1 外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析) 原子炉入口温度



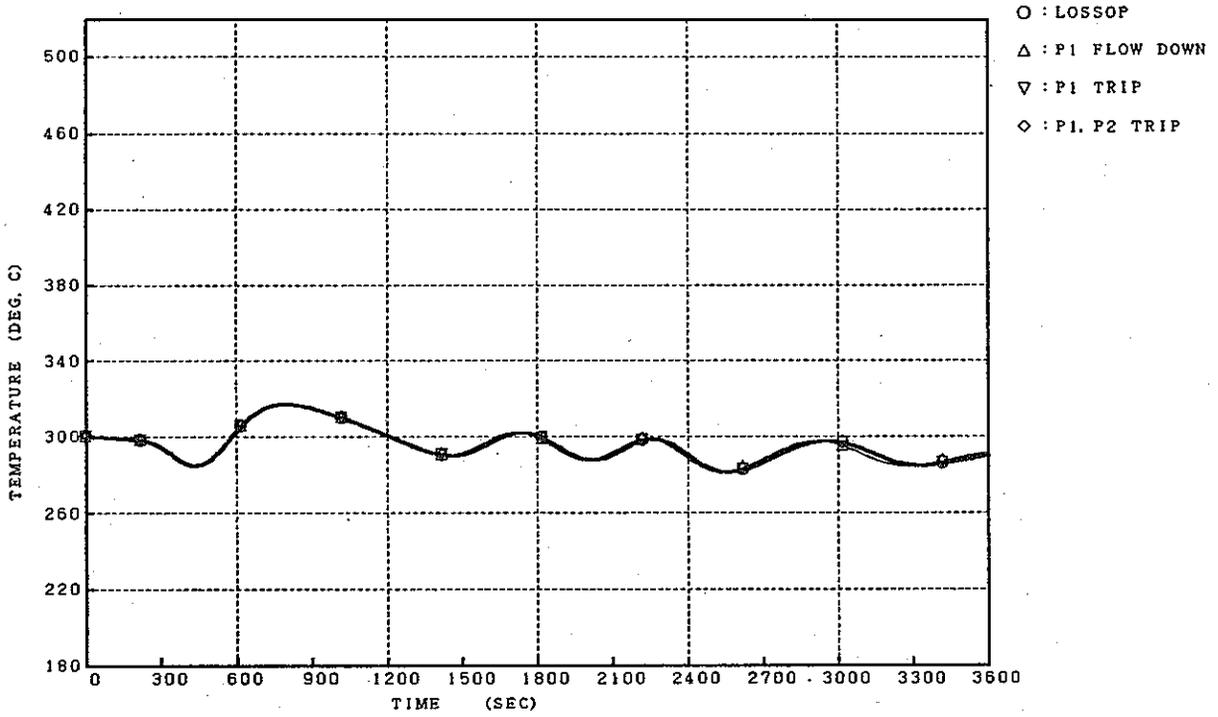
添付図 1.2 外部電源喪失 (MK-III熱過渡解析) 原子炉出口温度



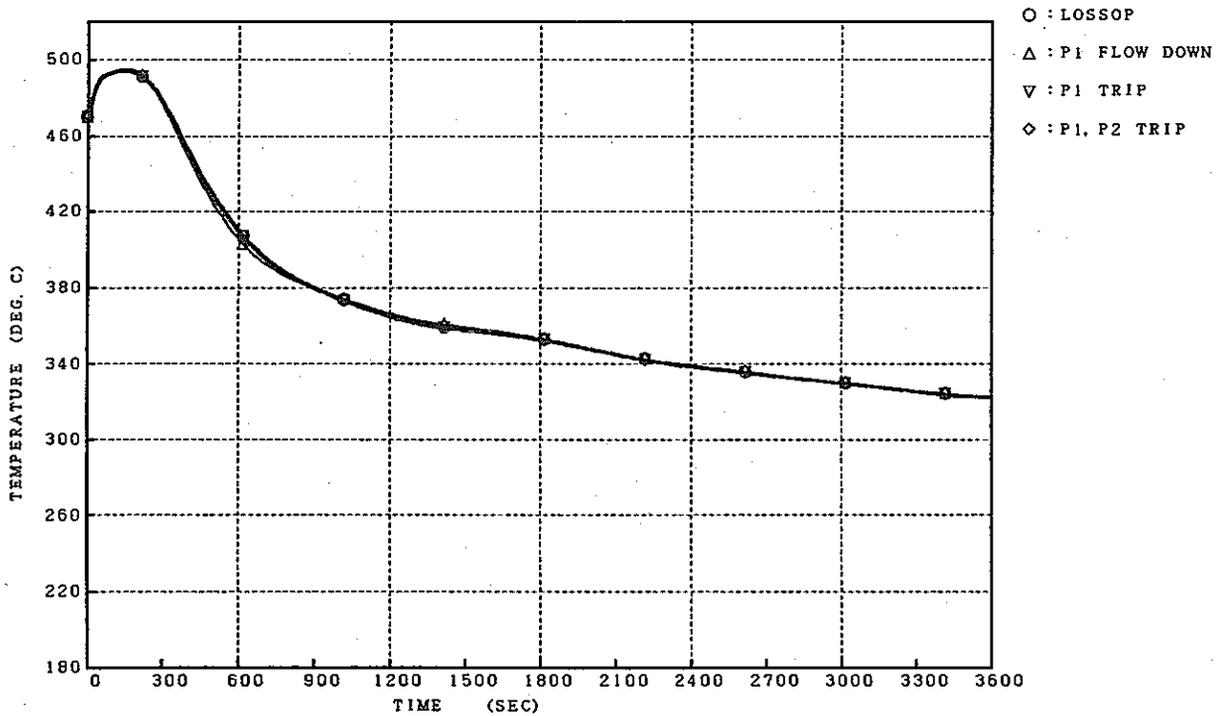
添付図 1.3 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1 次側入口温度



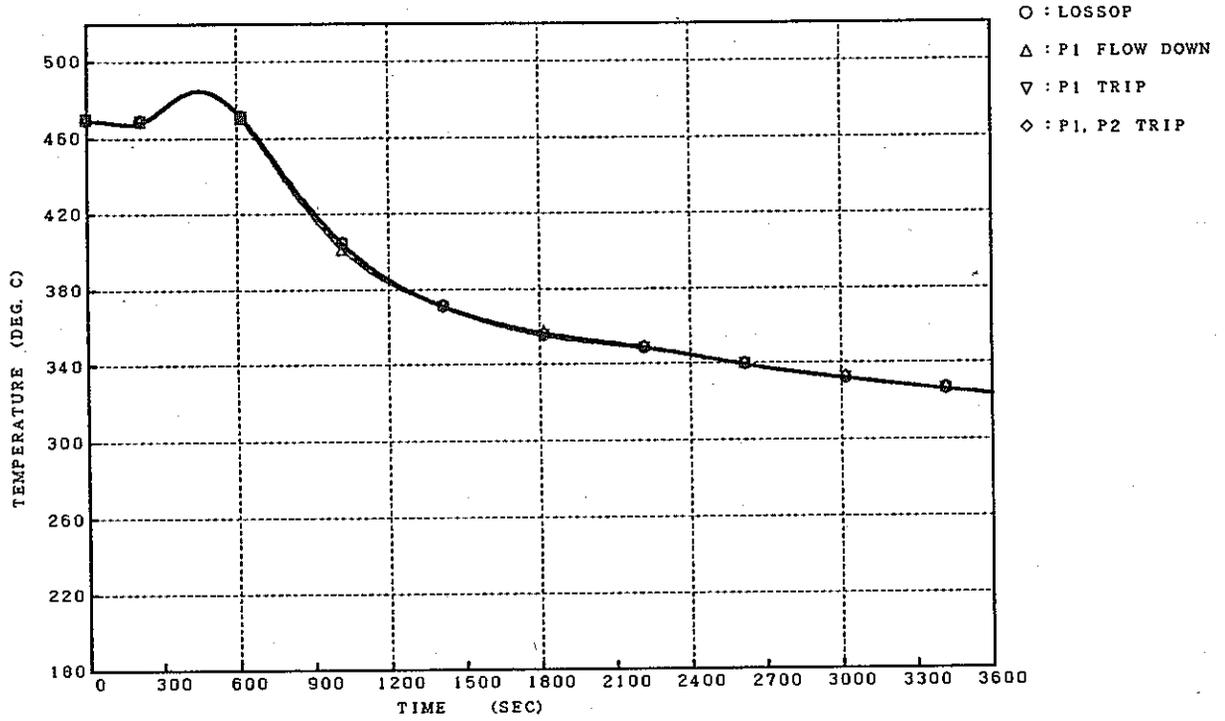
添付図 1.4 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1 次側出口温度



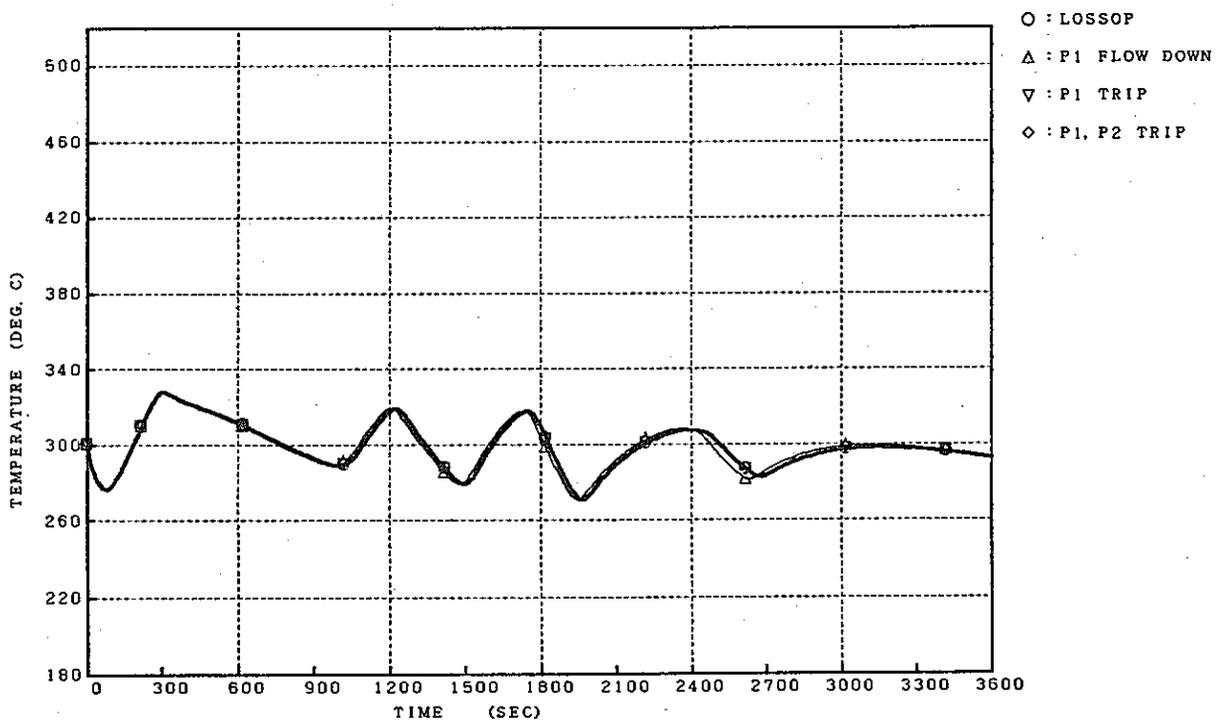
添付図 1.5 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側入口温度



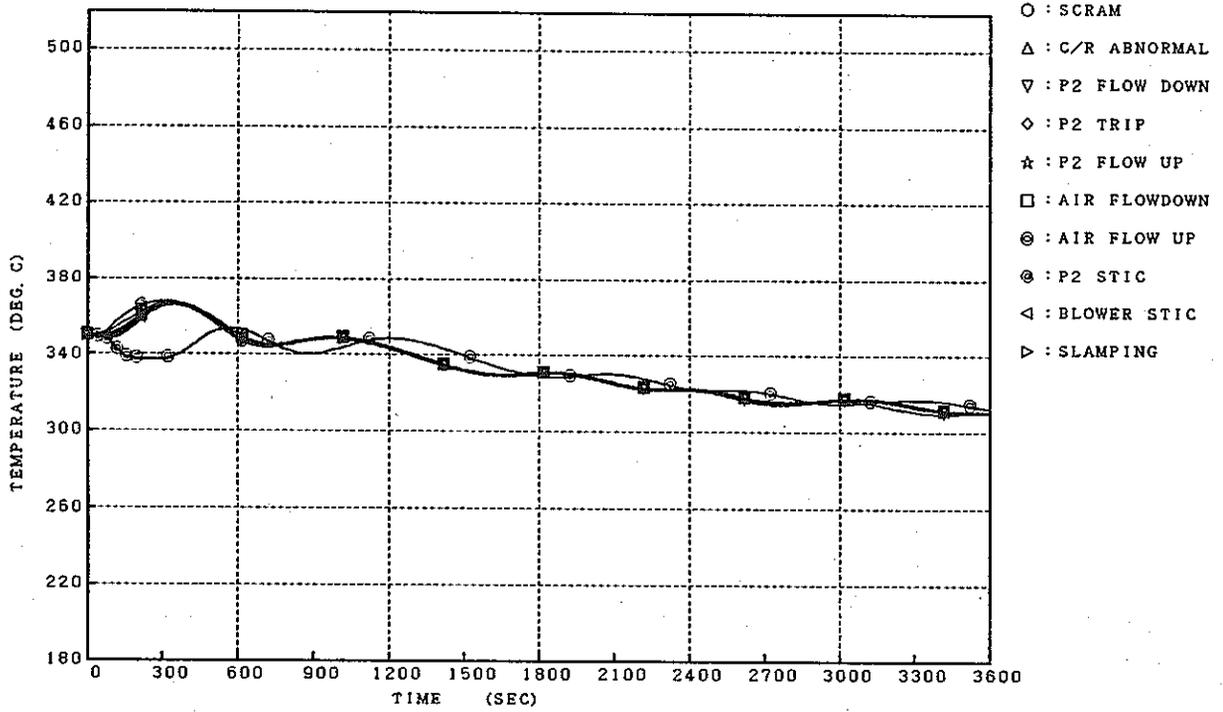
添付図 1.6 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側出口温度



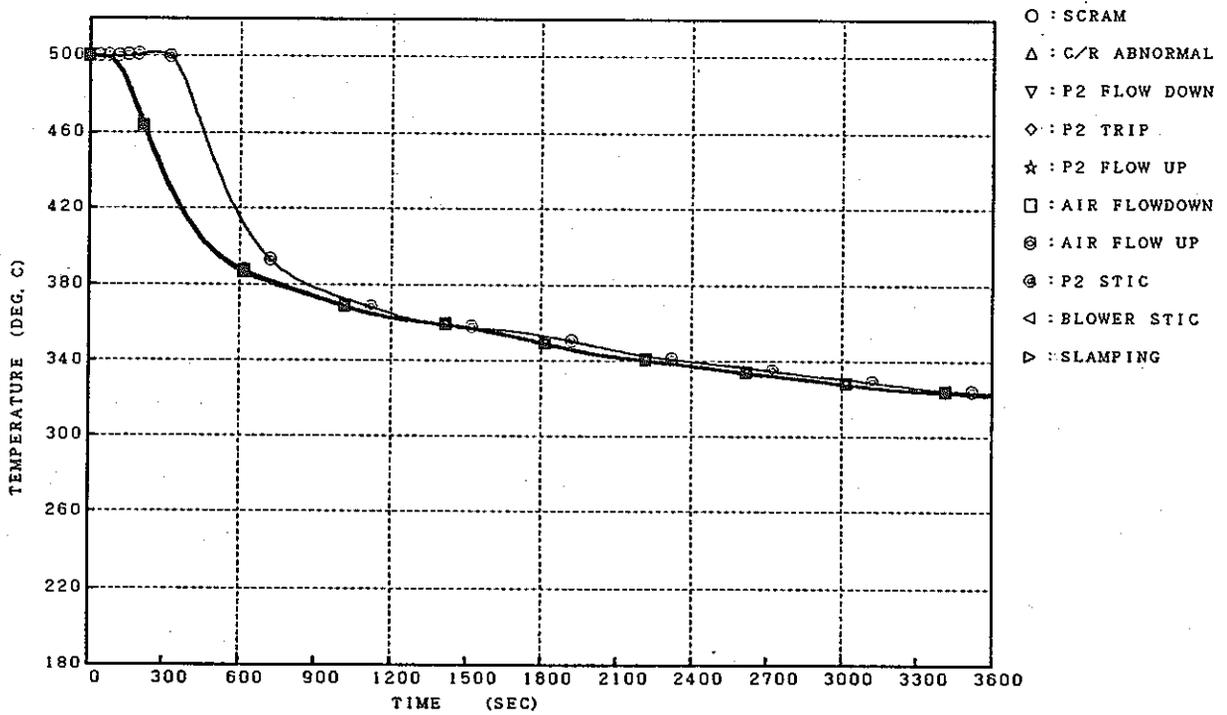
添付図 1.7 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX入口温度



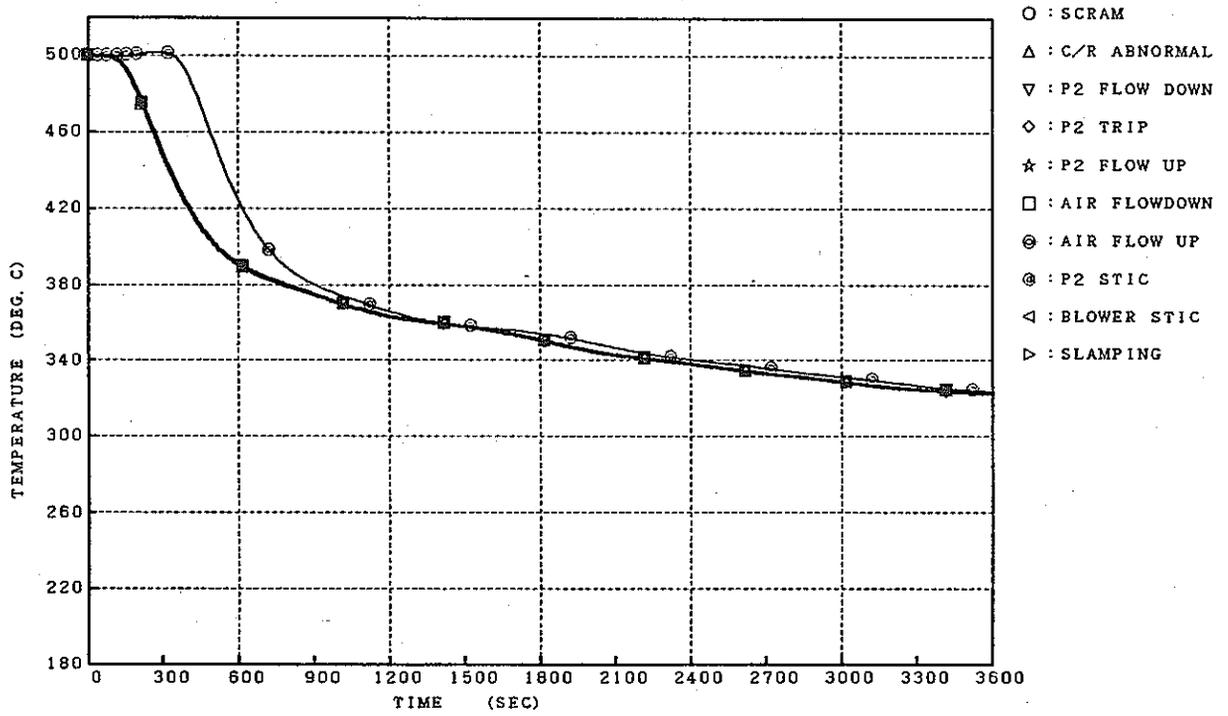
添付図 1.8 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX出口温度



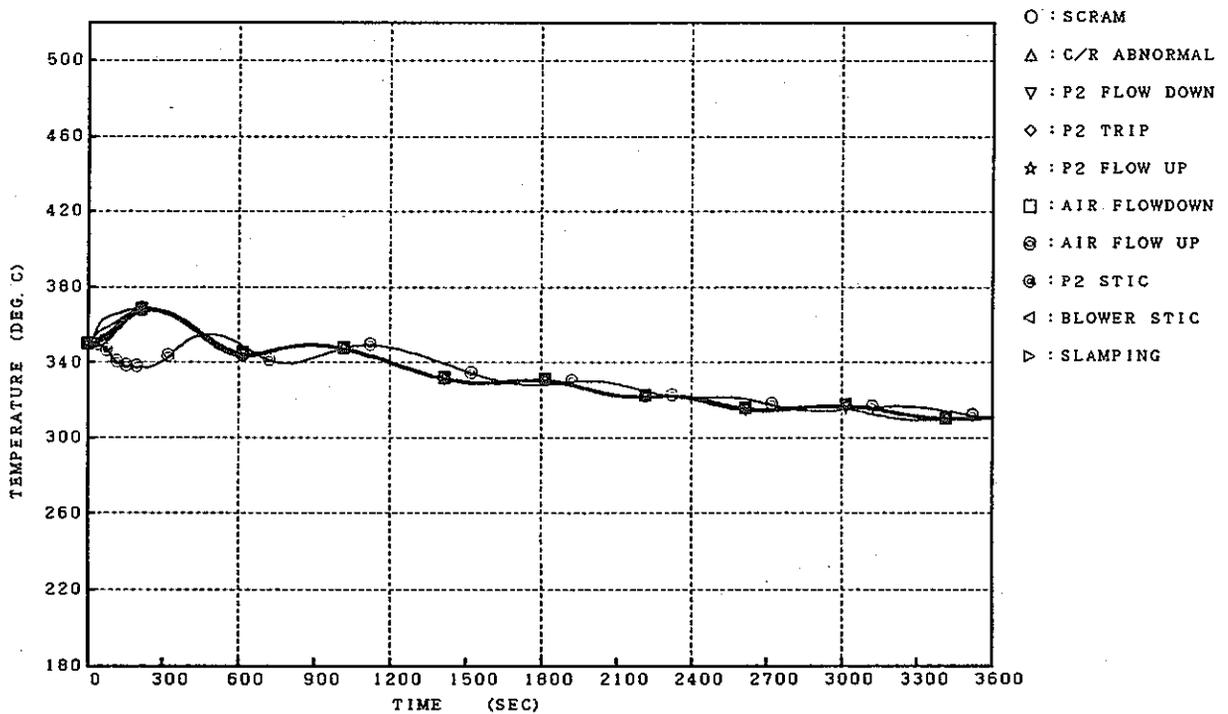
添付図1.9 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉入口温度



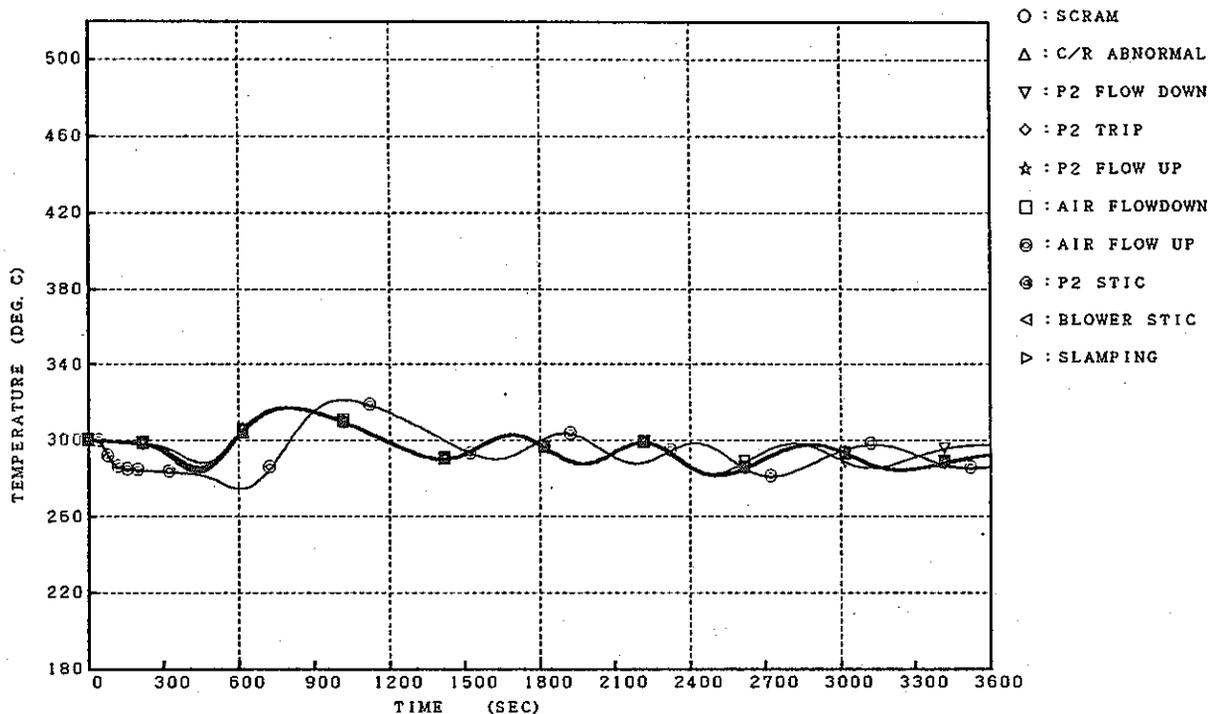
添付図1.10 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉出口温度



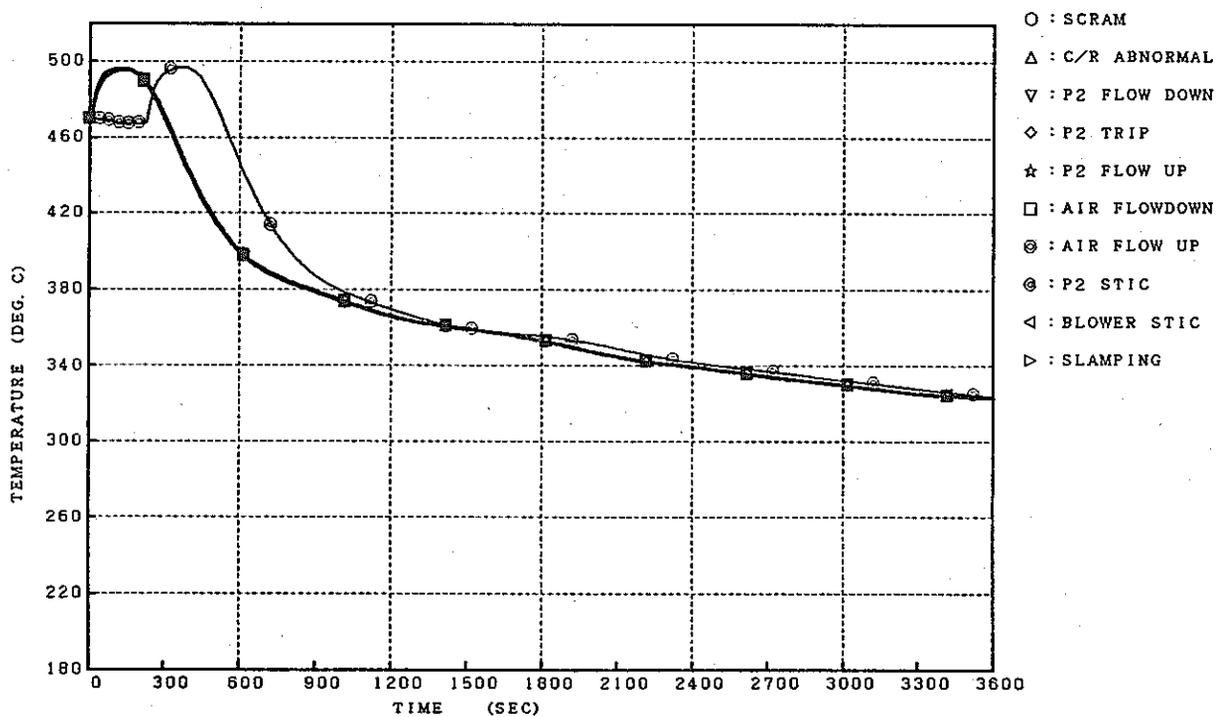
添付図 1.11 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | IHX 1次側入口温度



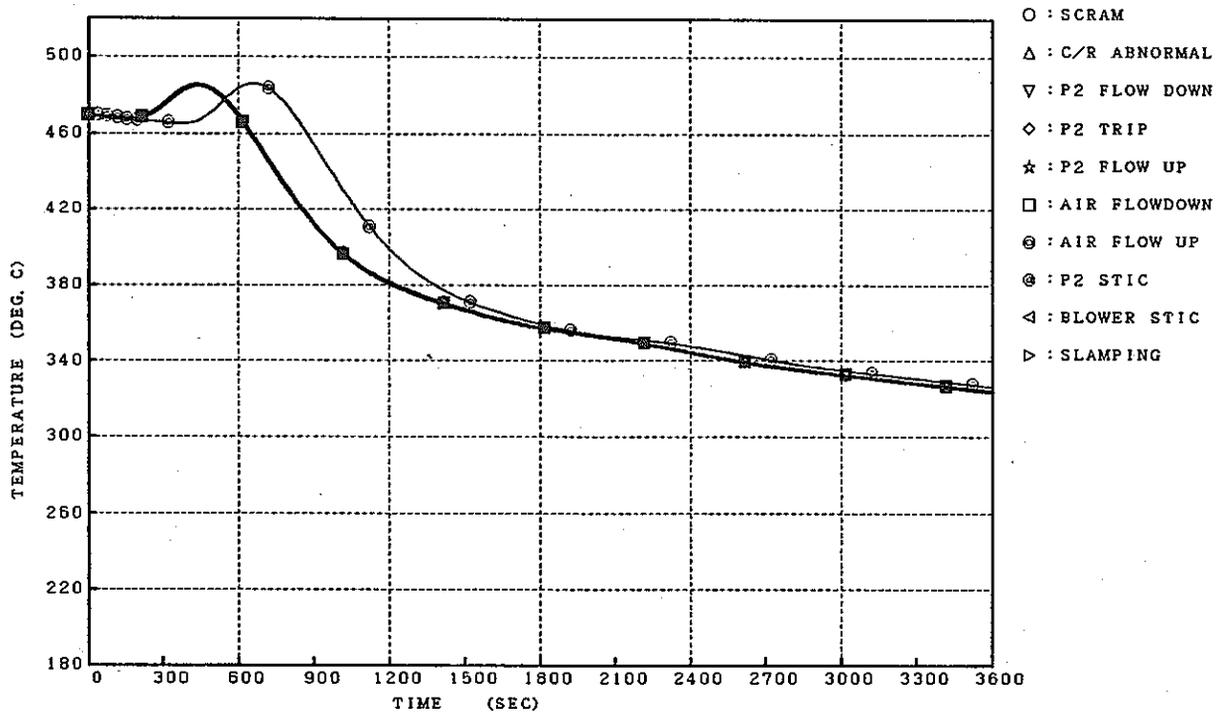
添付図 1.12 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | IHX 1次側出口温度



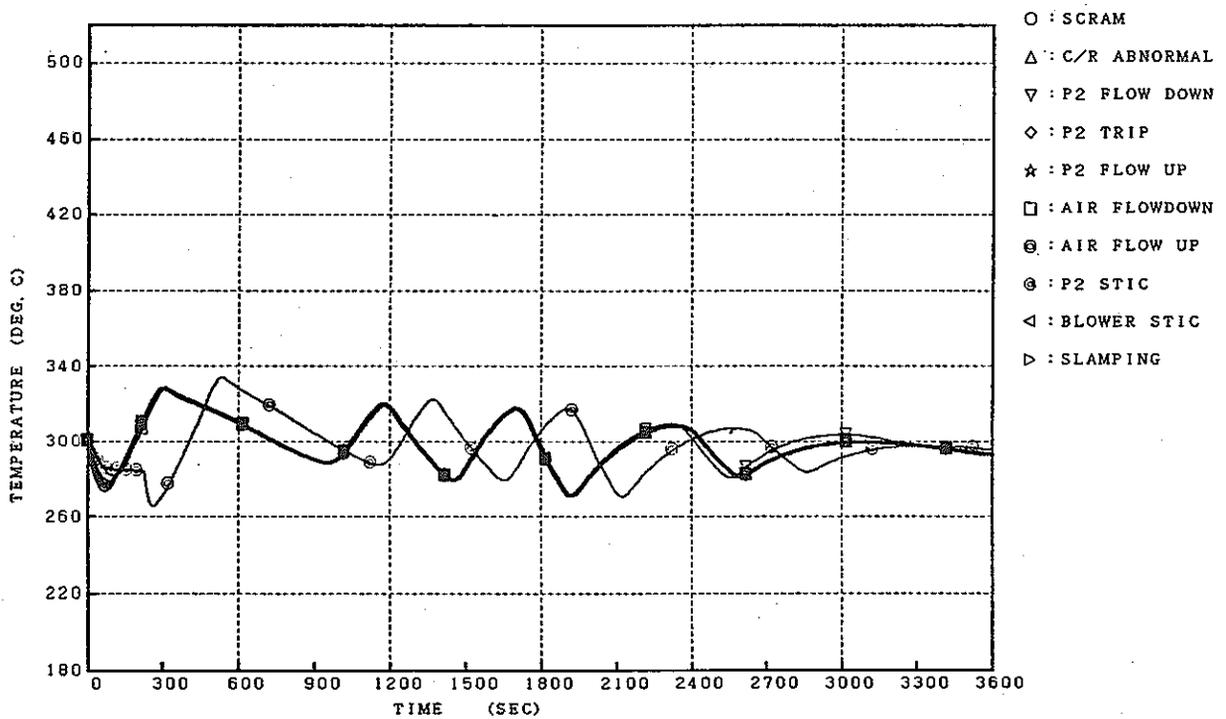
添付図 1.13 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側入口温度



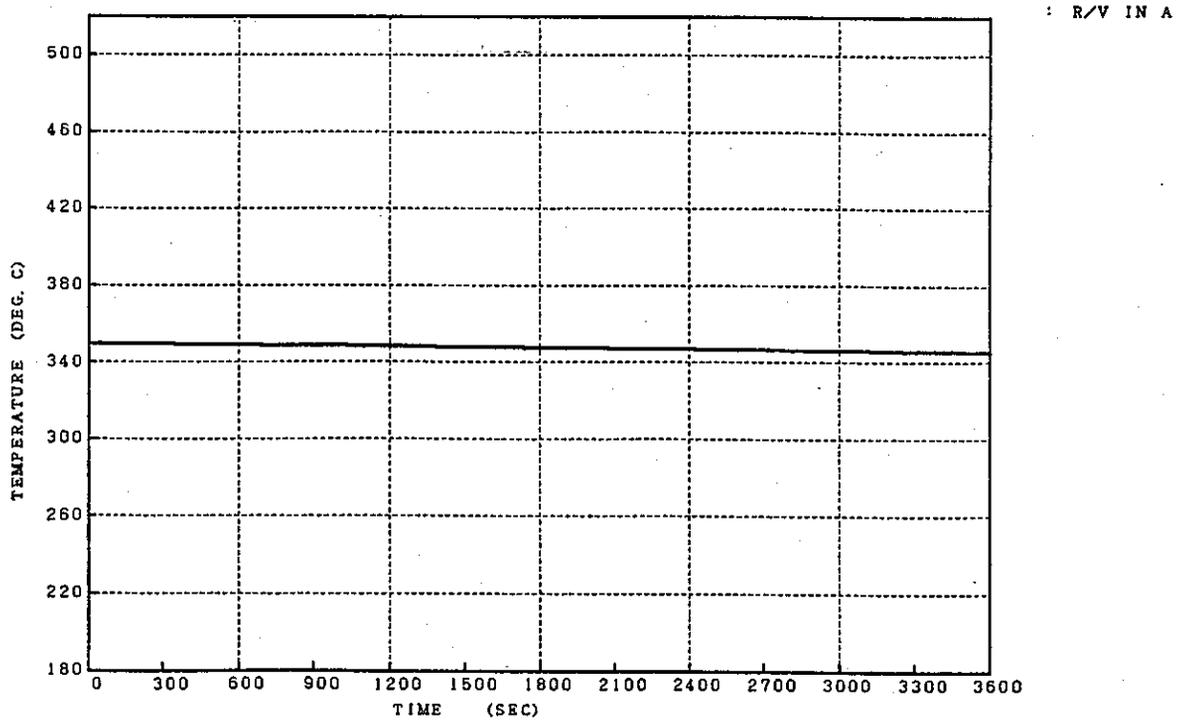
添付図 1.14 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側出口温度



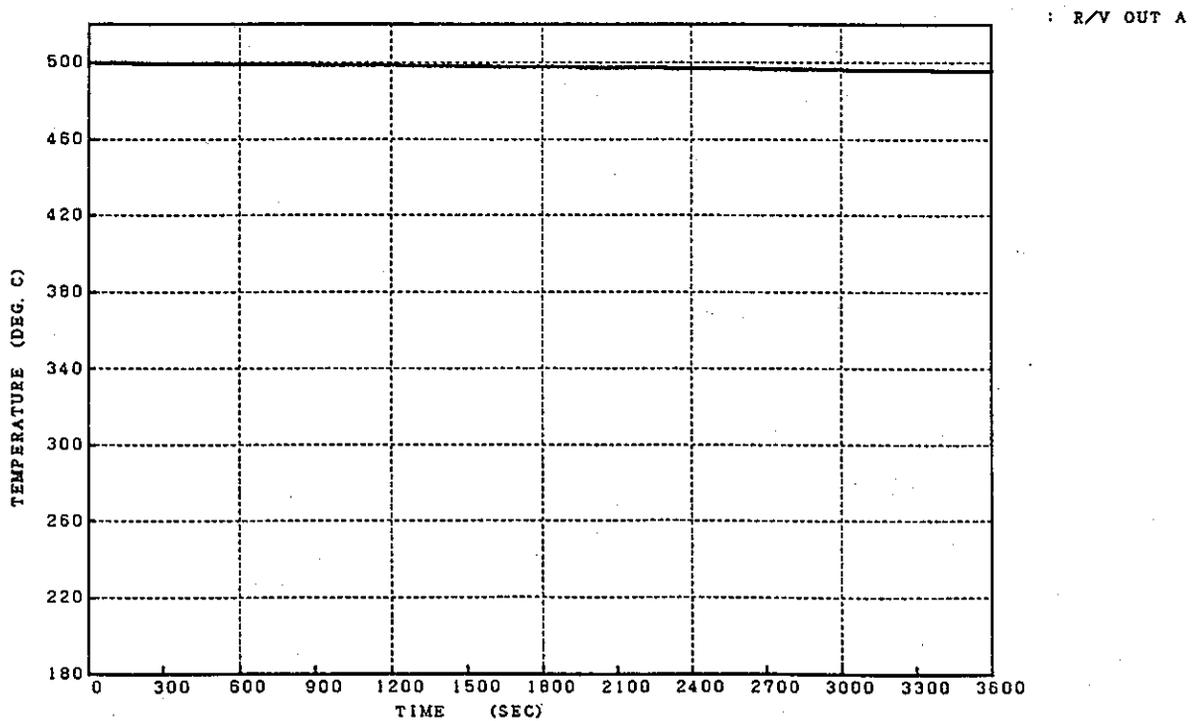
添付図 1.15 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX入口温度



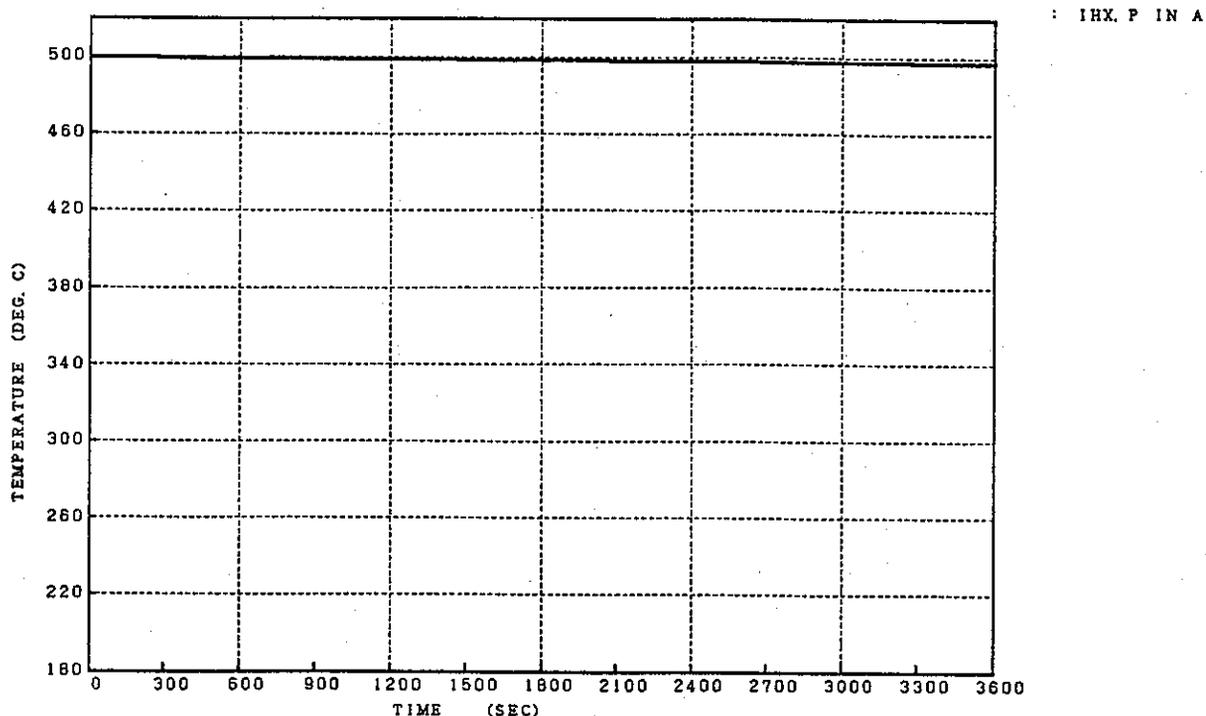
添付図 1.16 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX出口温度



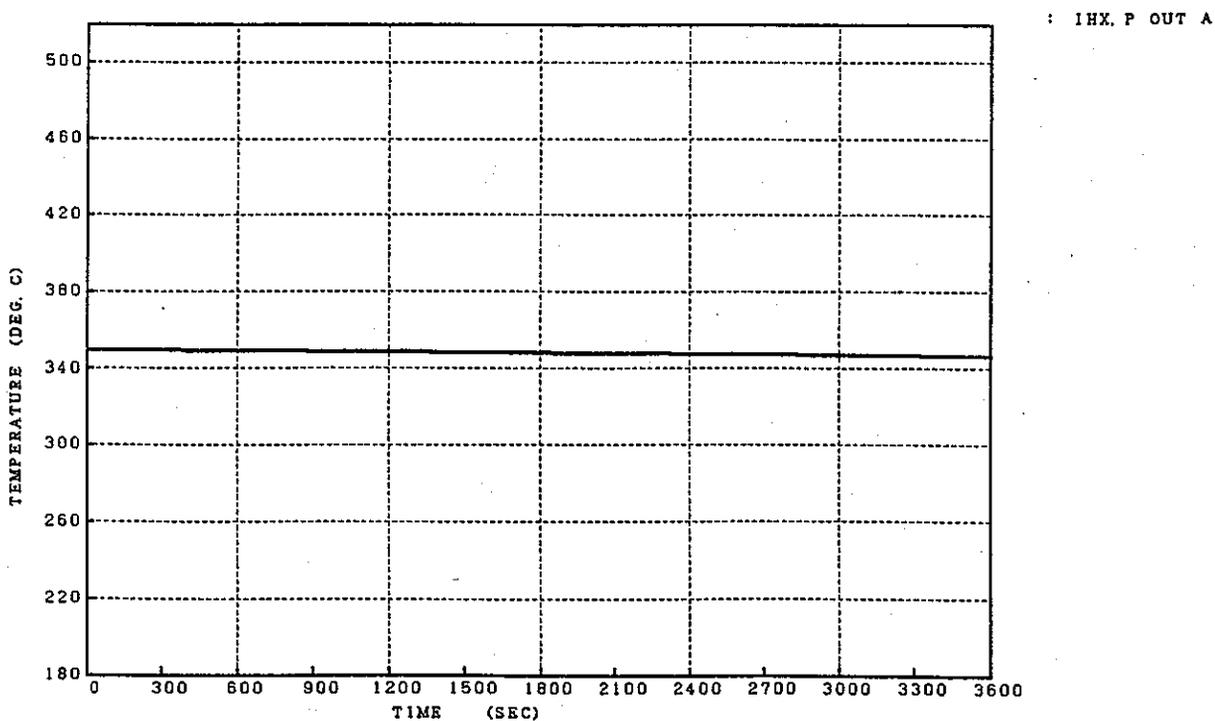
添付図1.17 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉入口温度



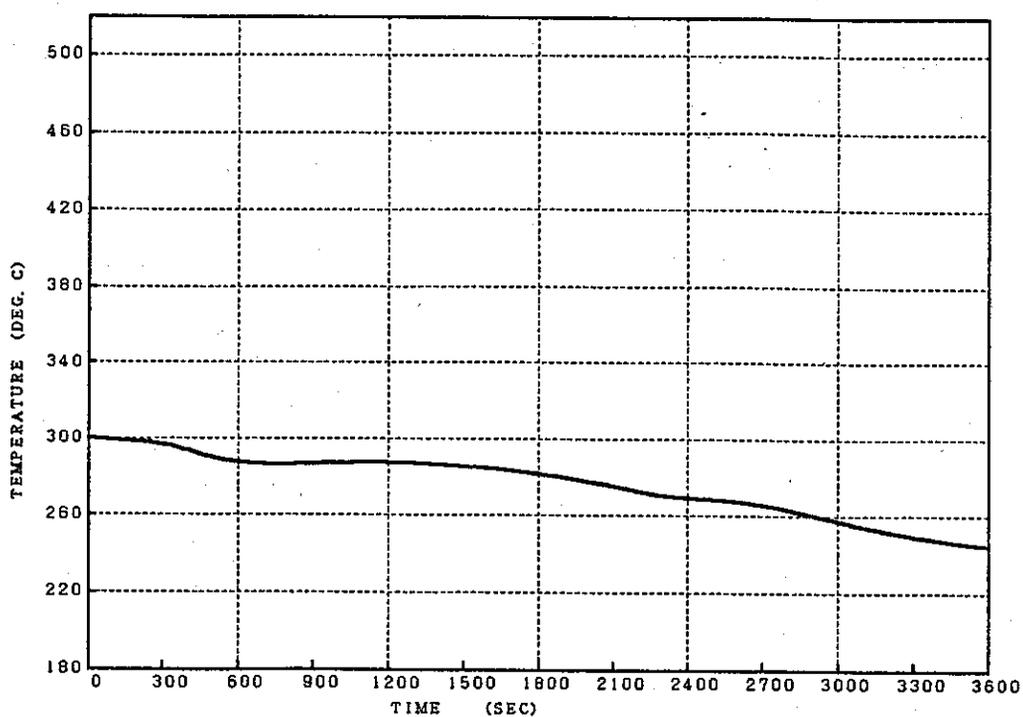
添付図1.18 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉出口温度



添付図1.19 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX 1次側入口温度

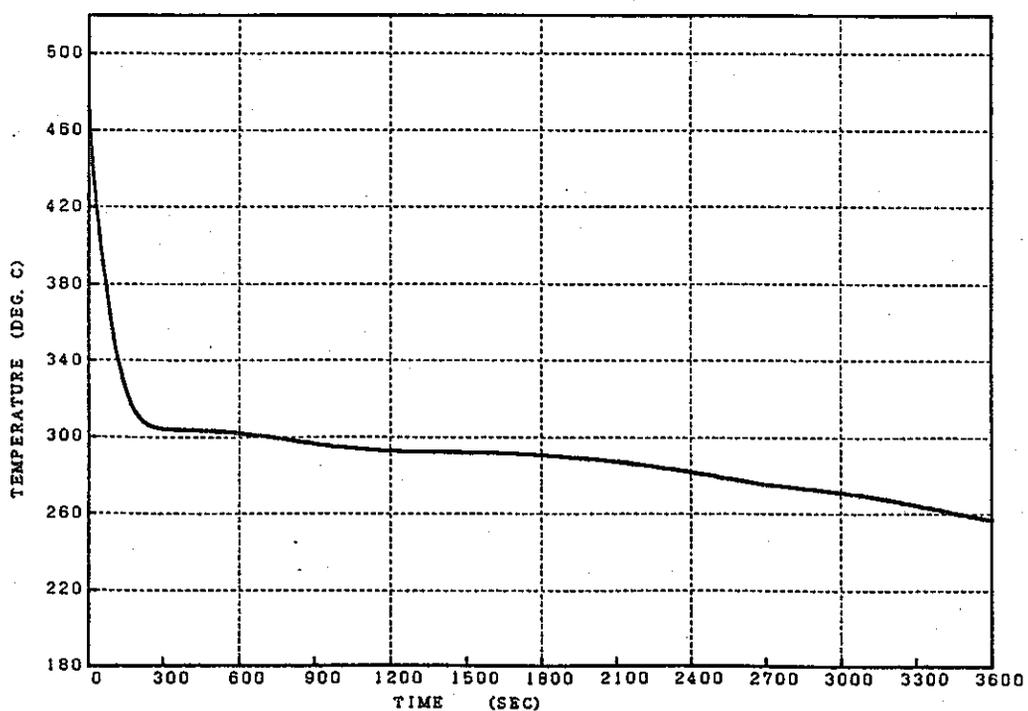


添付図1.20 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX 1次側出口温度



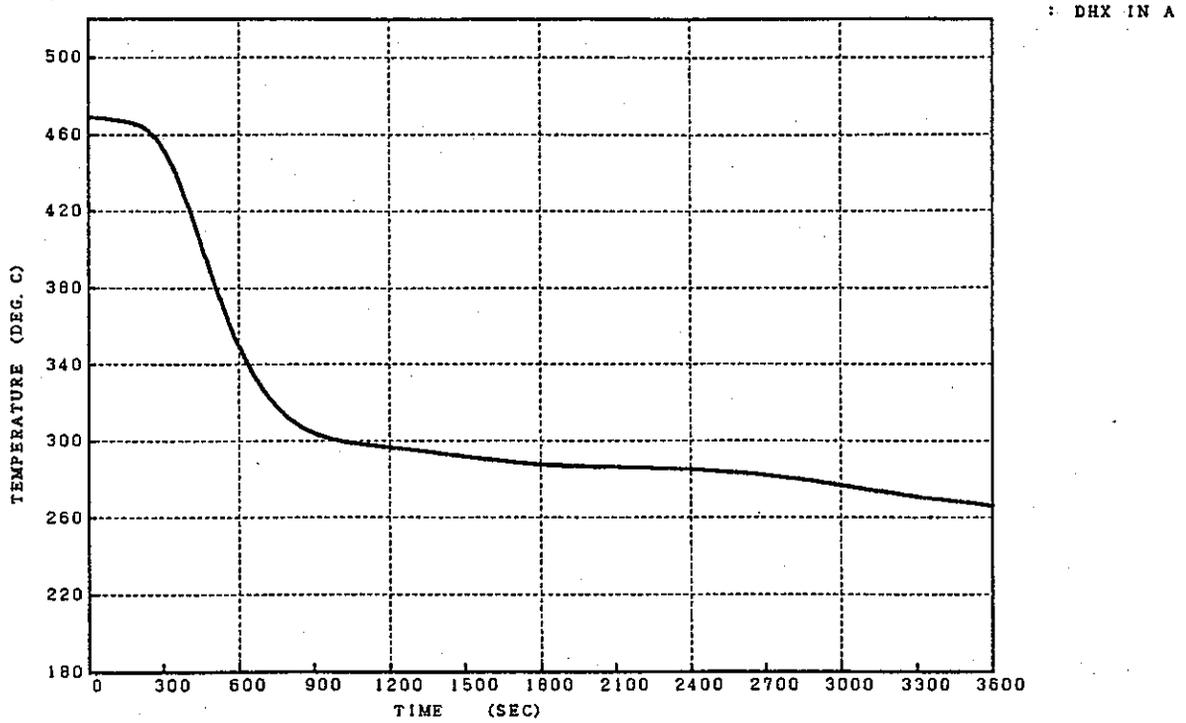
: IHX. S IN A

添付図1.2.1 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 2次側入口温度

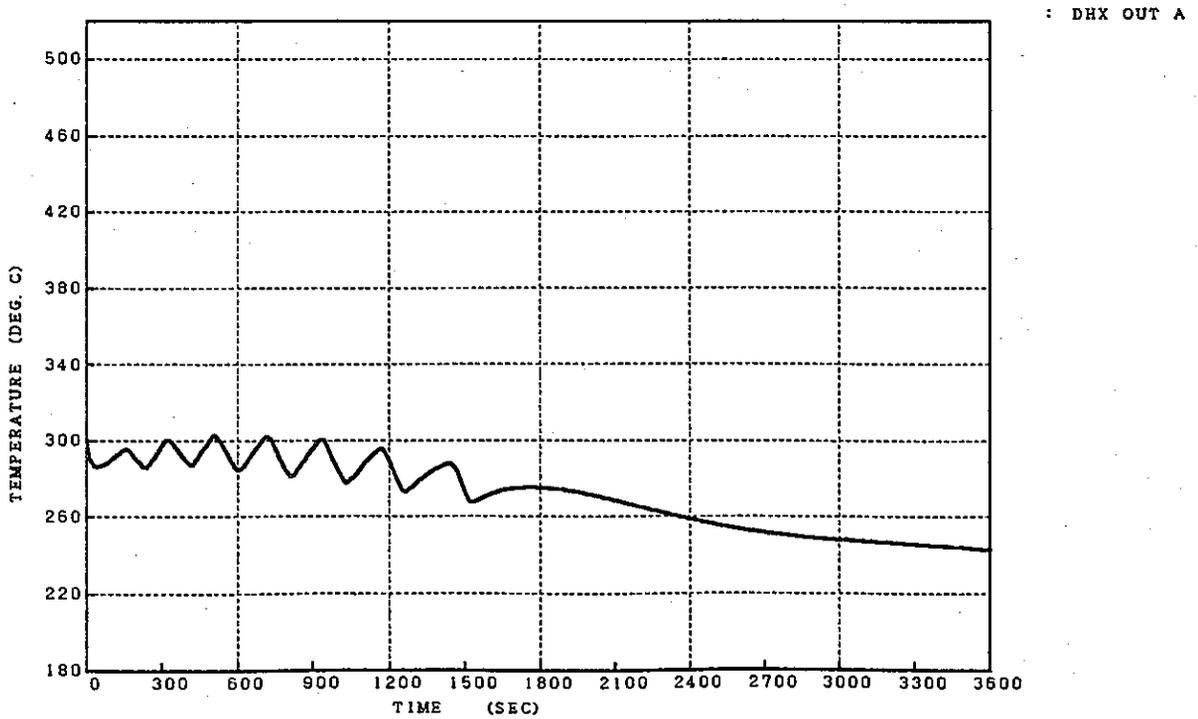


: IHX. S OUT A

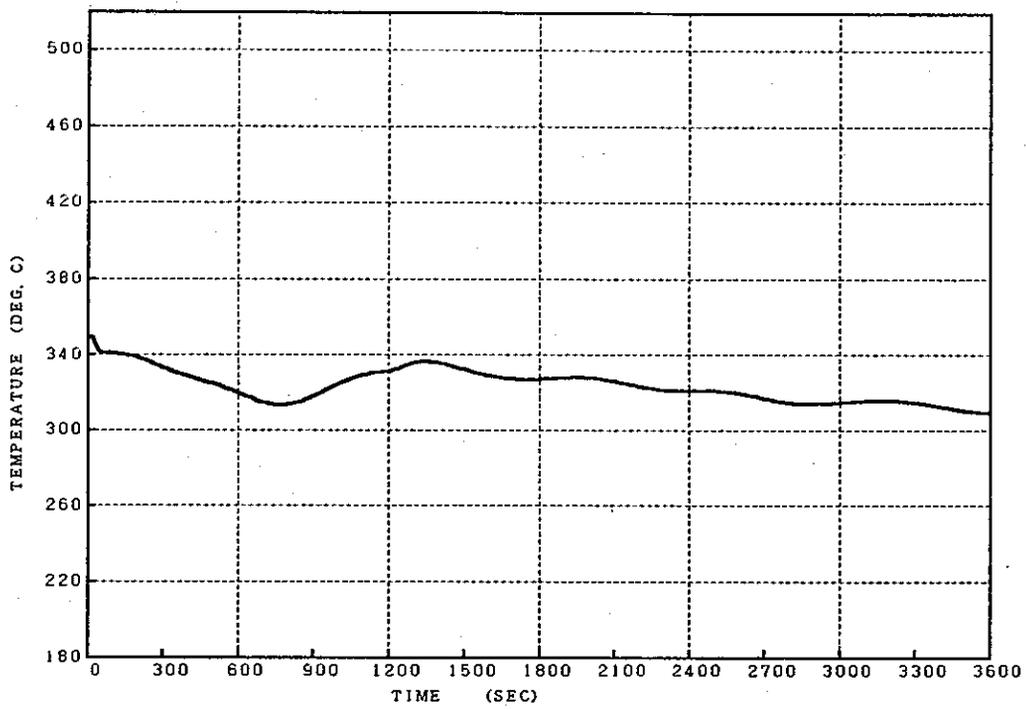
添付図1.2.2 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 2次側出口温度



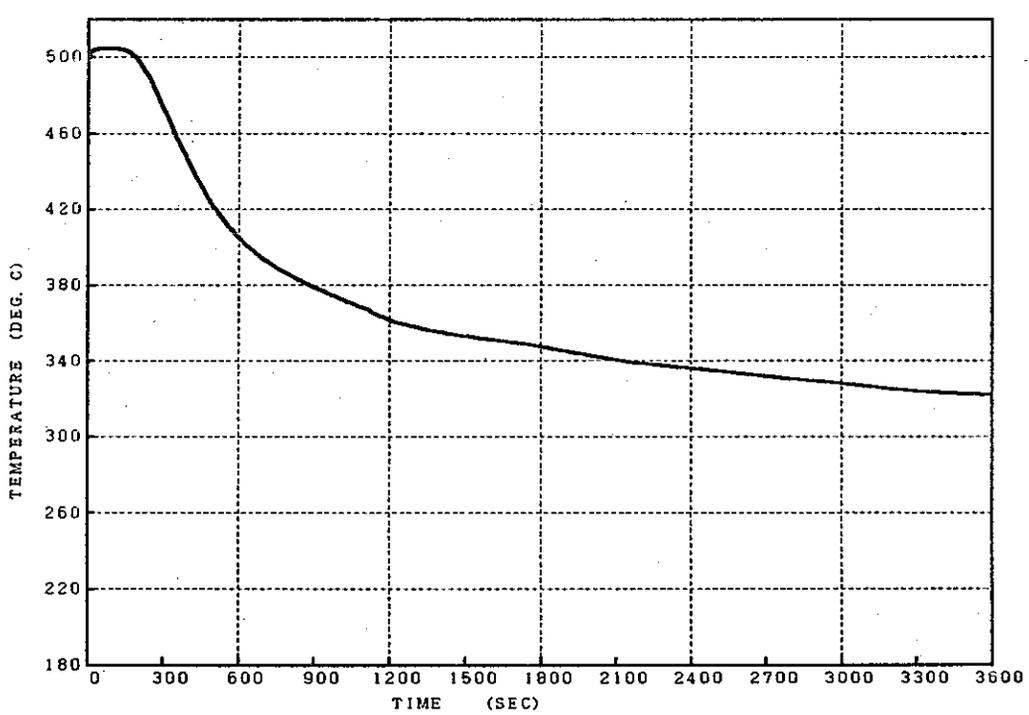
添付図1.23 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX入口温度



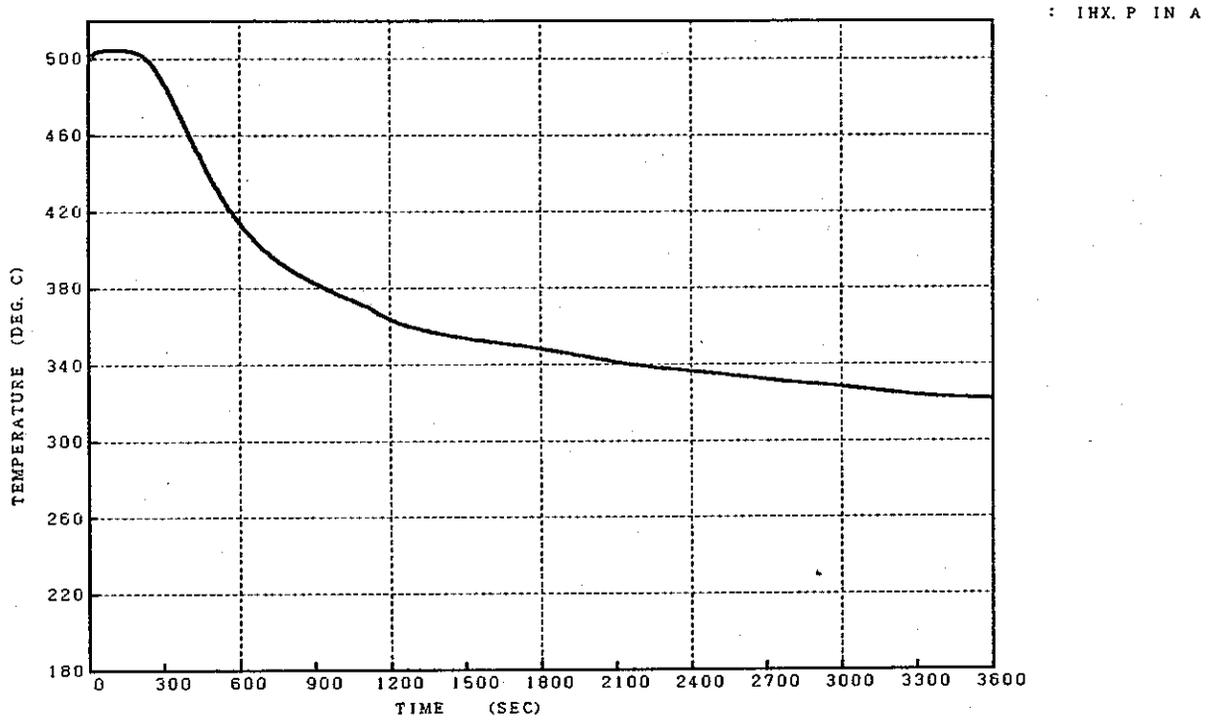
添付図1.24 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX出口温度



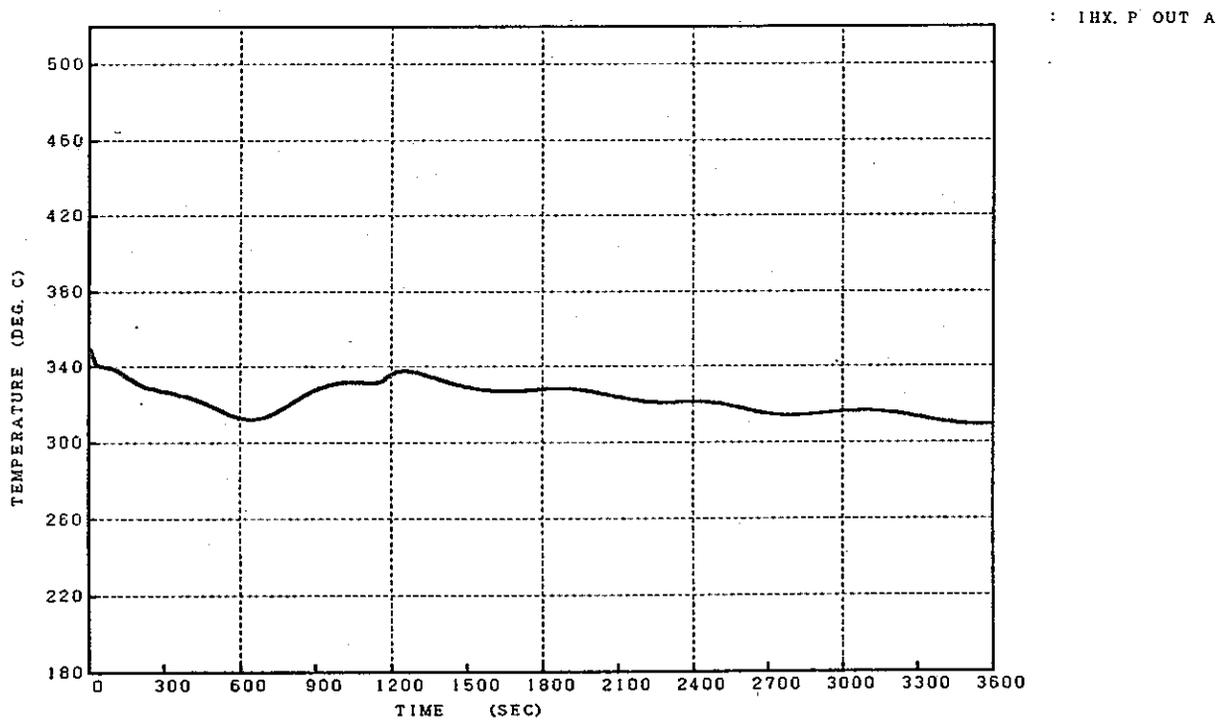
添付図 1.25 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉入口温度



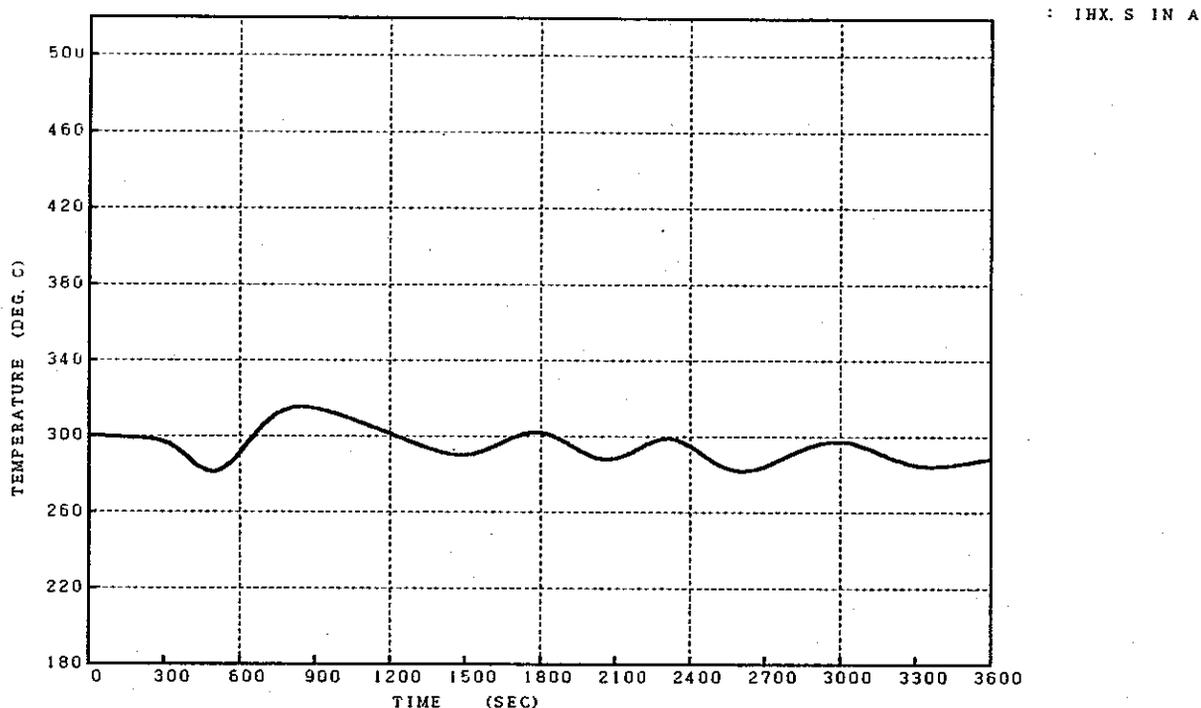
添付図 1.26 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉出口温度



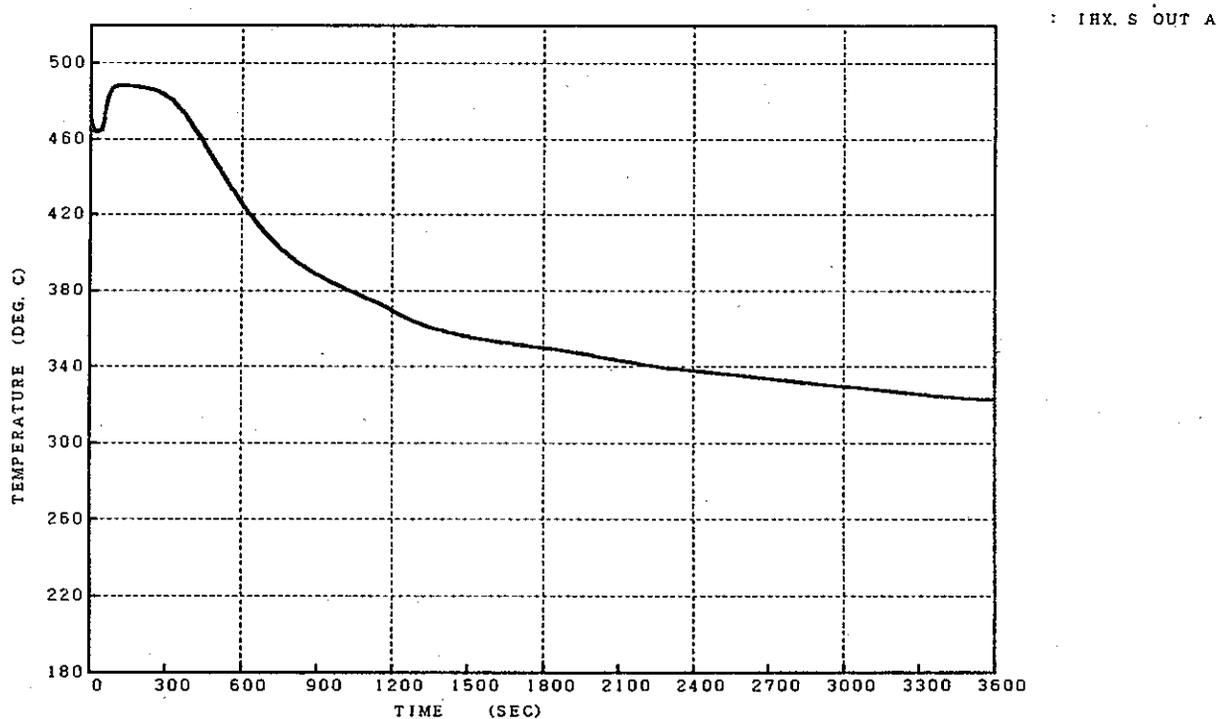
添付図1.27 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) | IHX 1次側入口温度



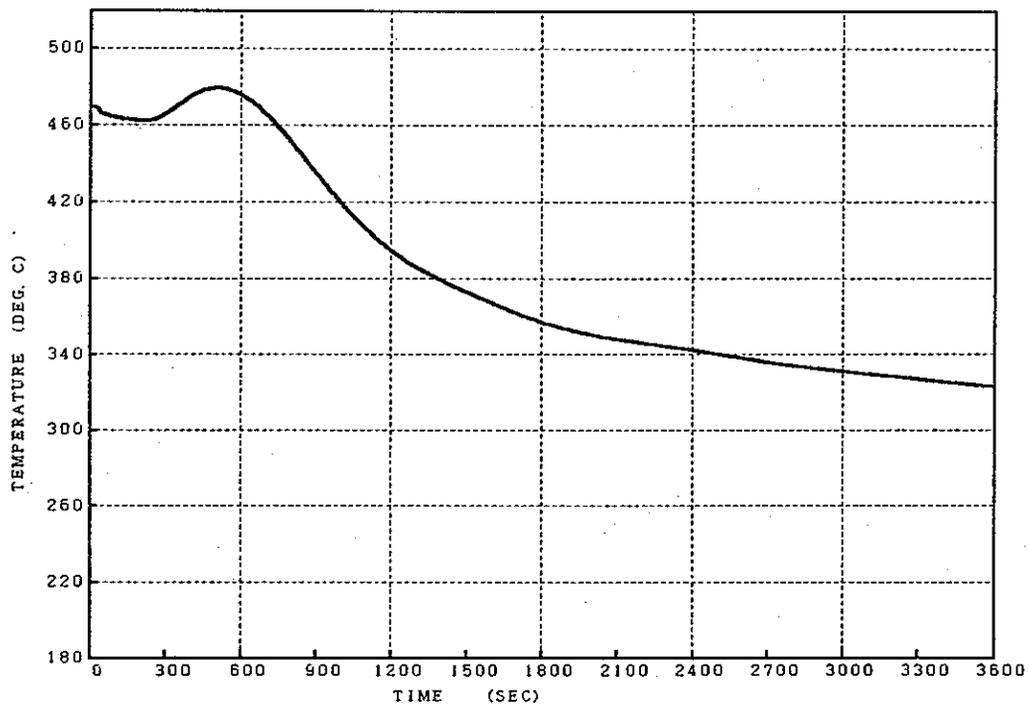
添付図1.28 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) | IHX 1次側出口温度



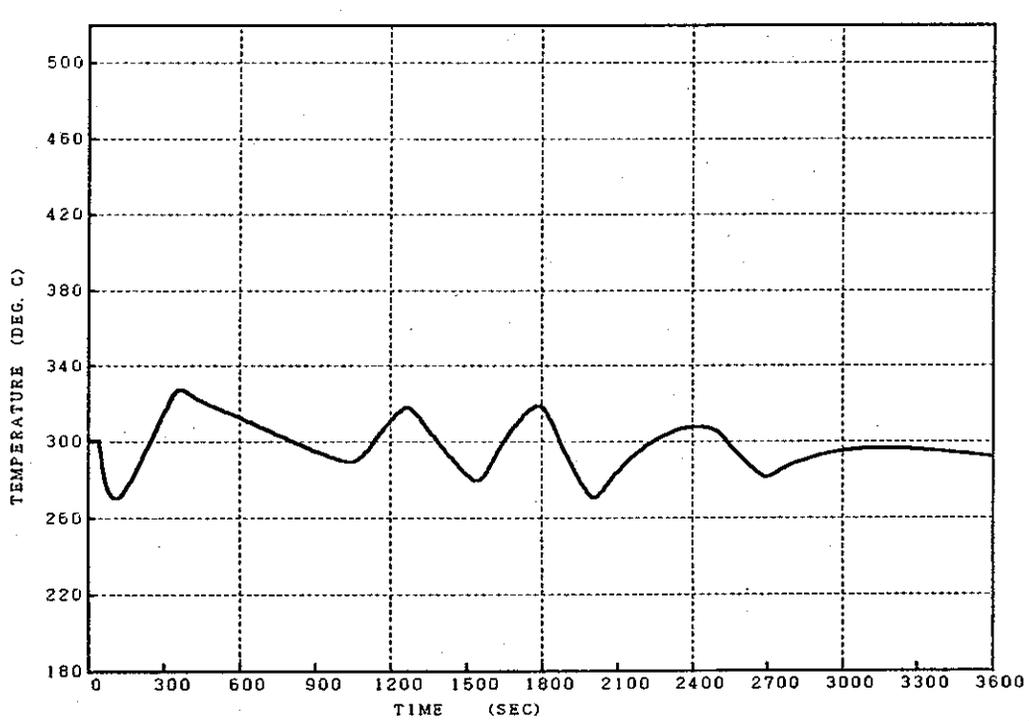
添付図1.29 1次冷却材漏洩事故(MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側入口温度



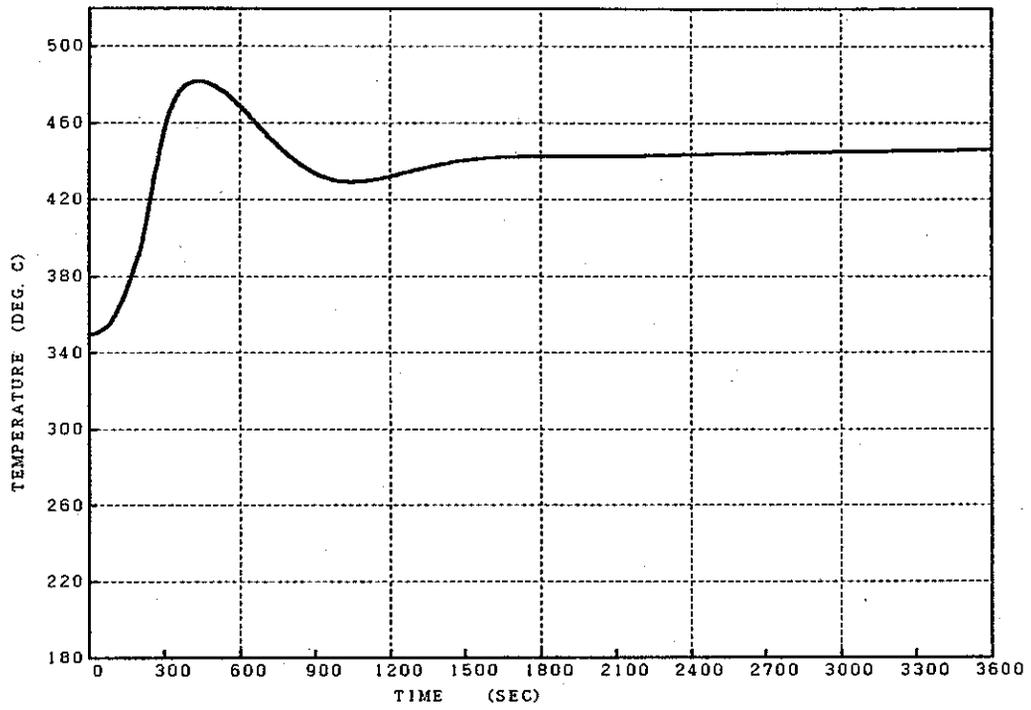
添付図1.30 1次冷却材漏洩事故(MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 2次側出口温度



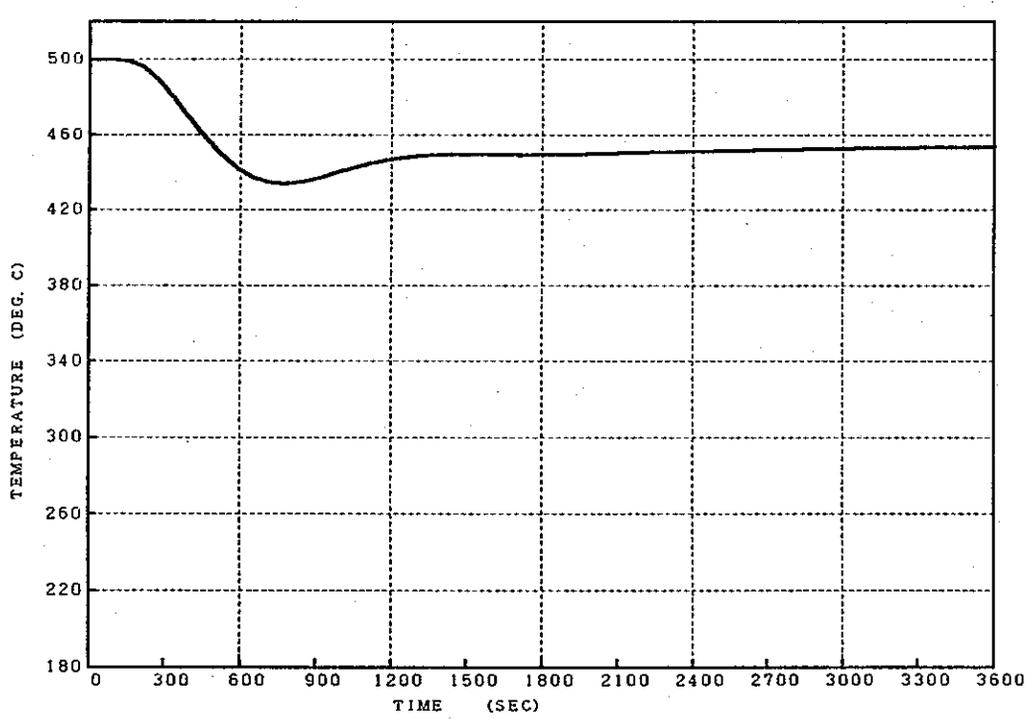
添付図1.31 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX入口温度



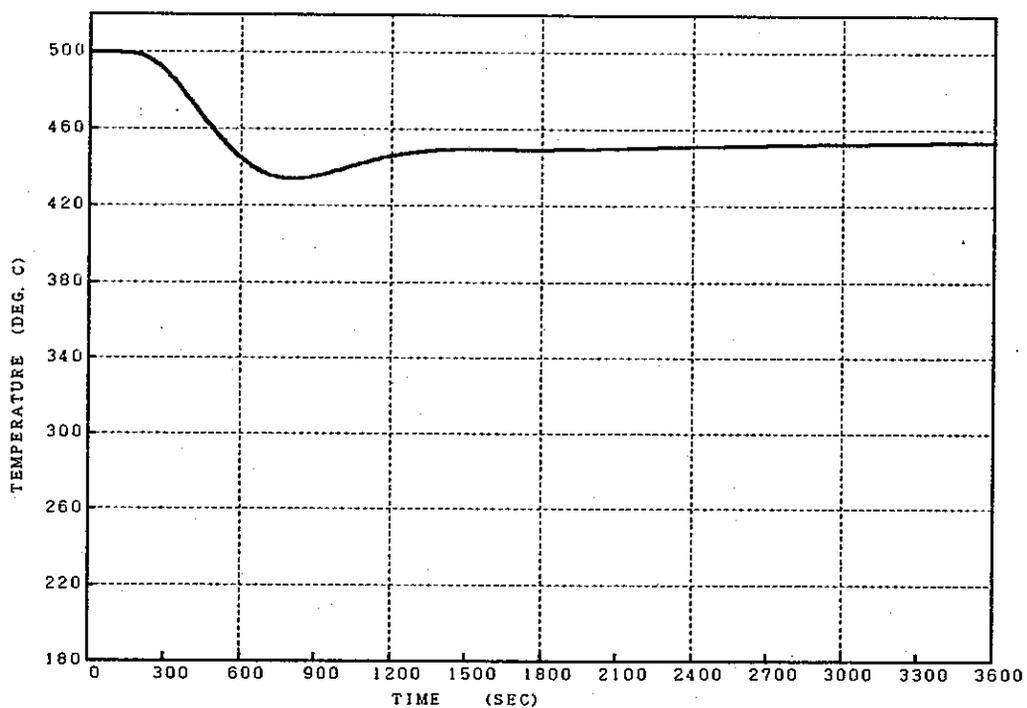
添付図1.32 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX出口温度



添付図1.33 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) 原子炉入口温度

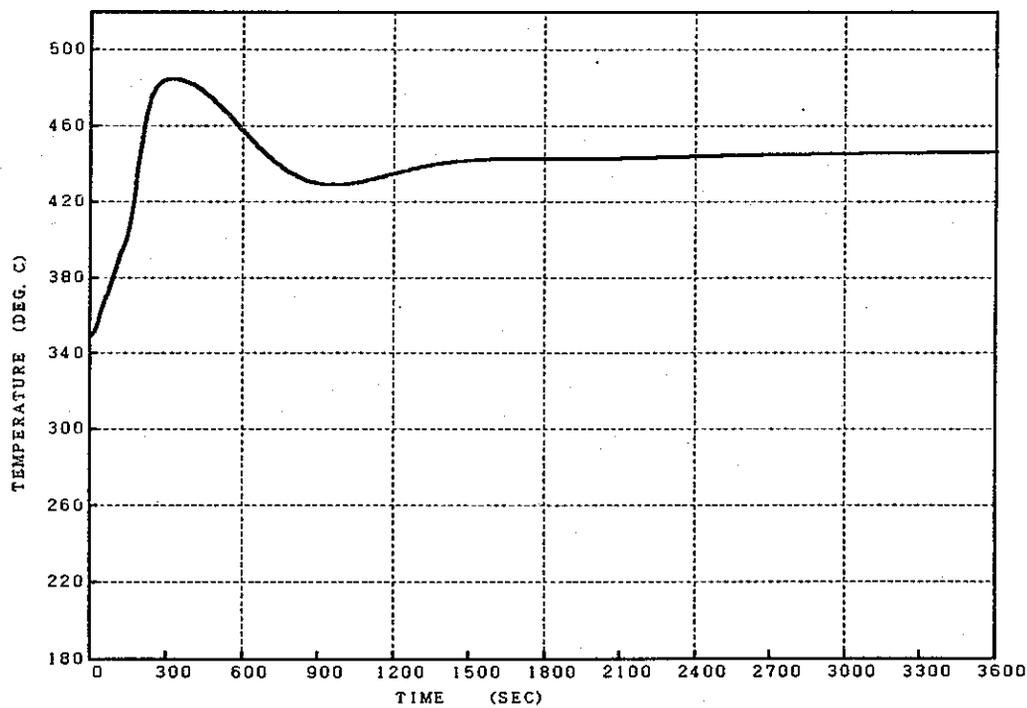


添付図1.34 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) 原子炉出口温度



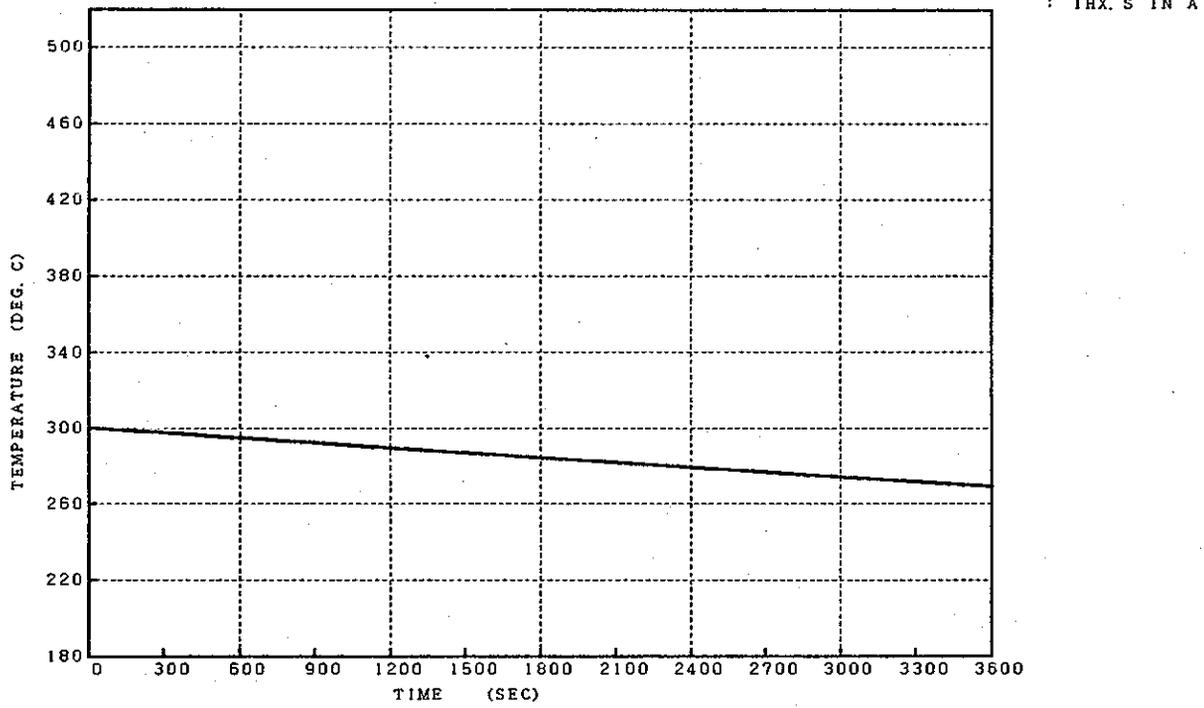
: IHX. P IN A

添付図 1.35 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1次側入口温度

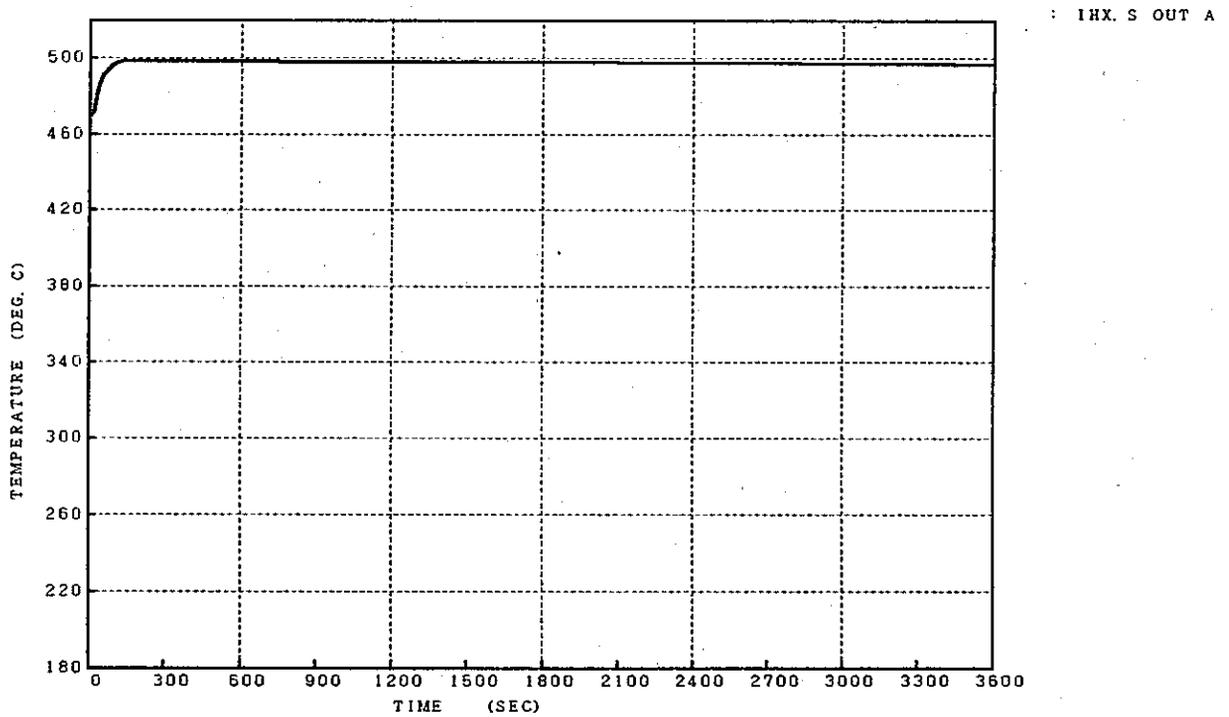


: IHX. P OUT A

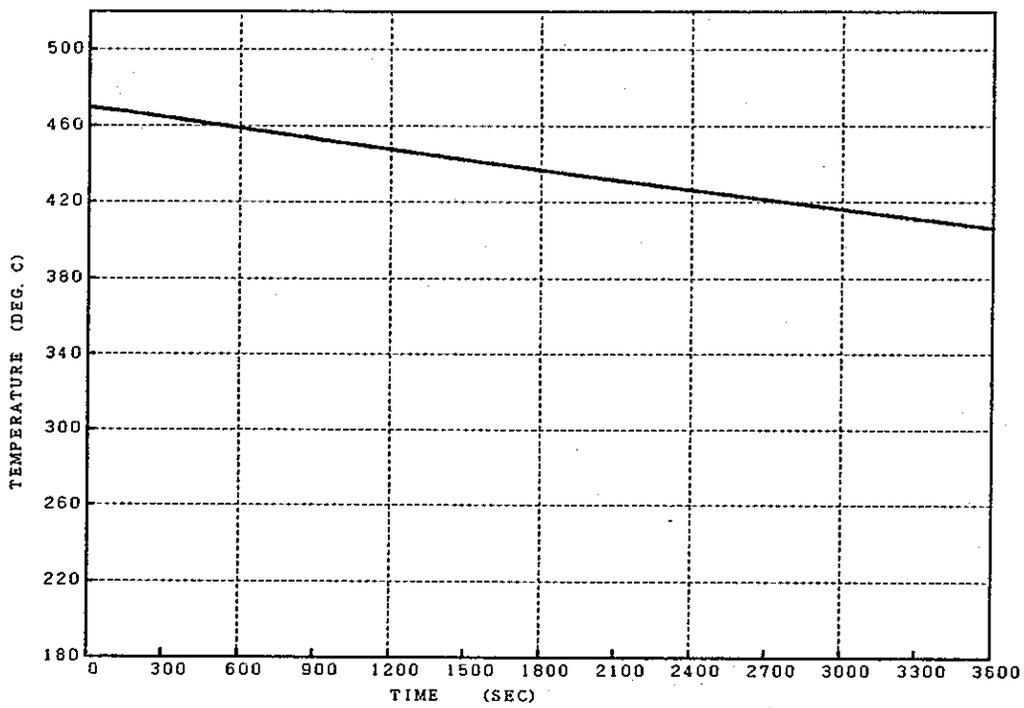
添付図 1.36 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1次側出口温度



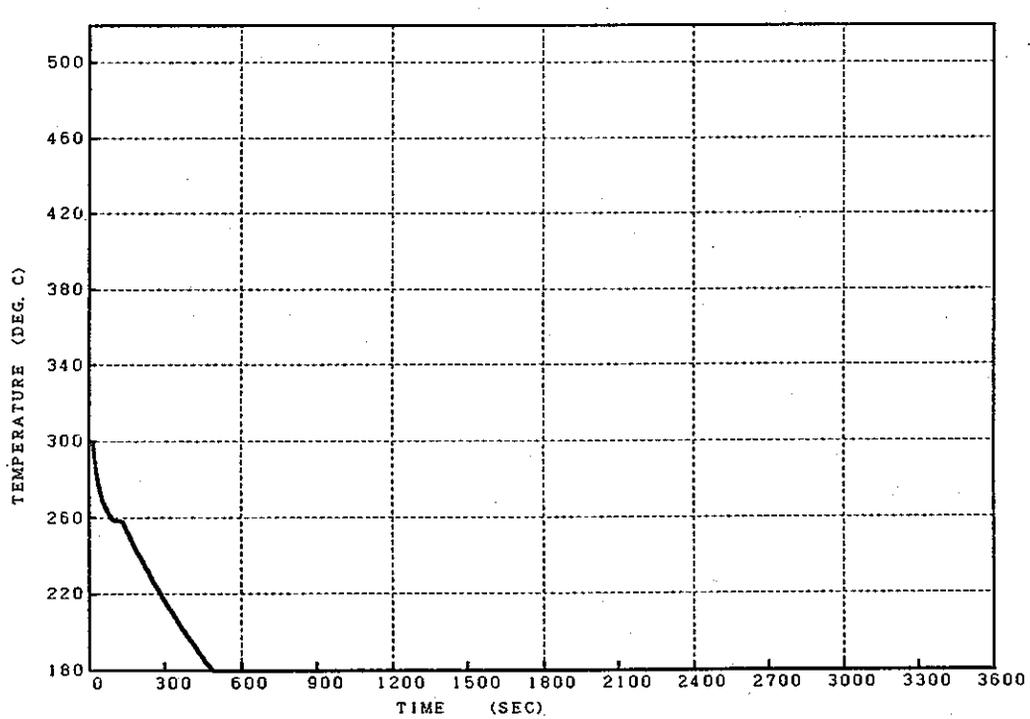
添付図 1.37 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) I H X 2次側入口温度



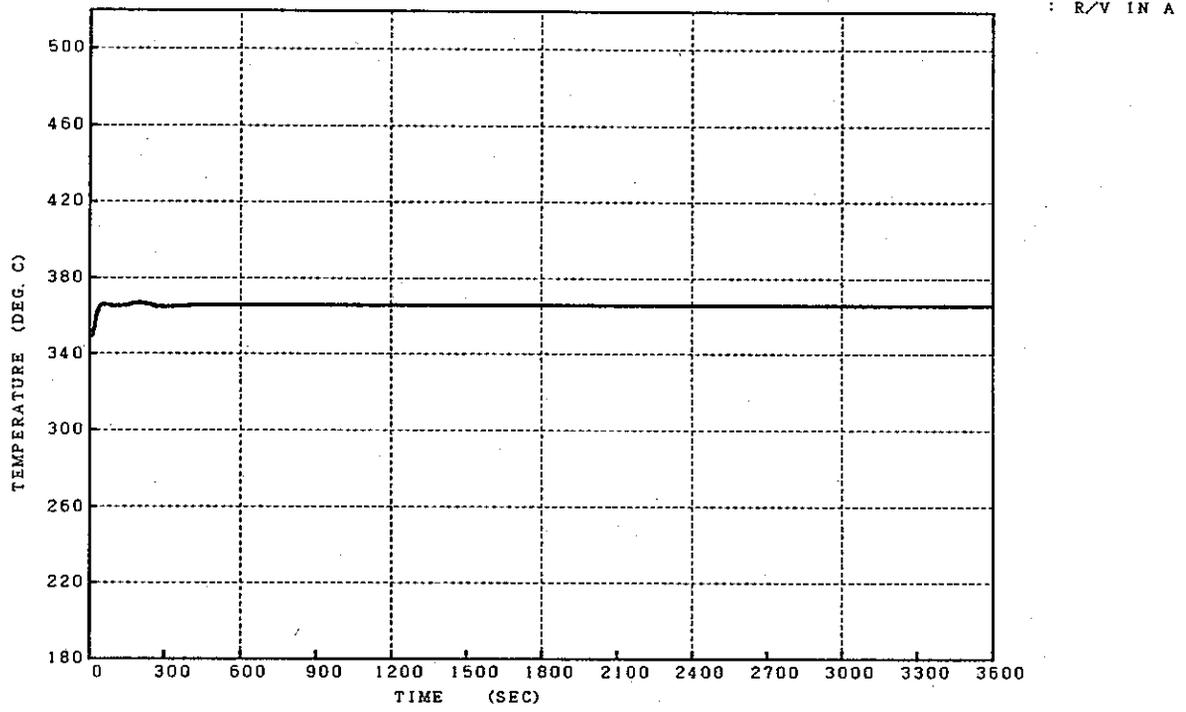
添付図 1.38 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) I H X 2次側出口温度



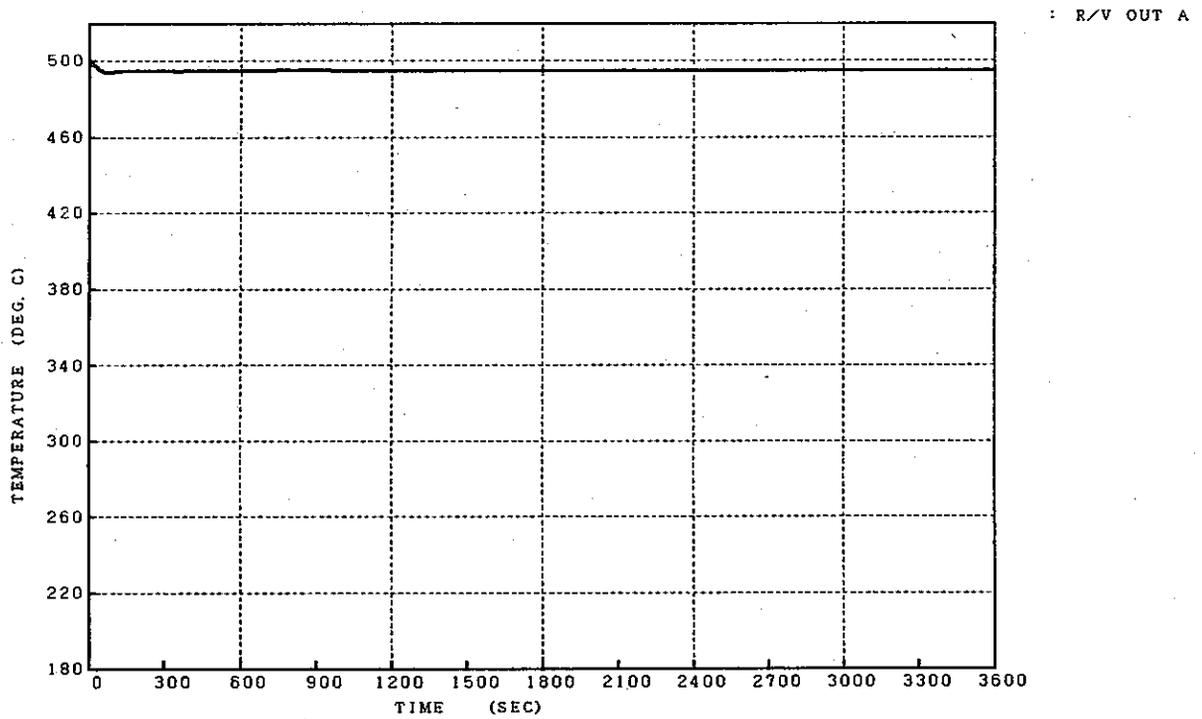
添付図1.39 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) DHX入口温度



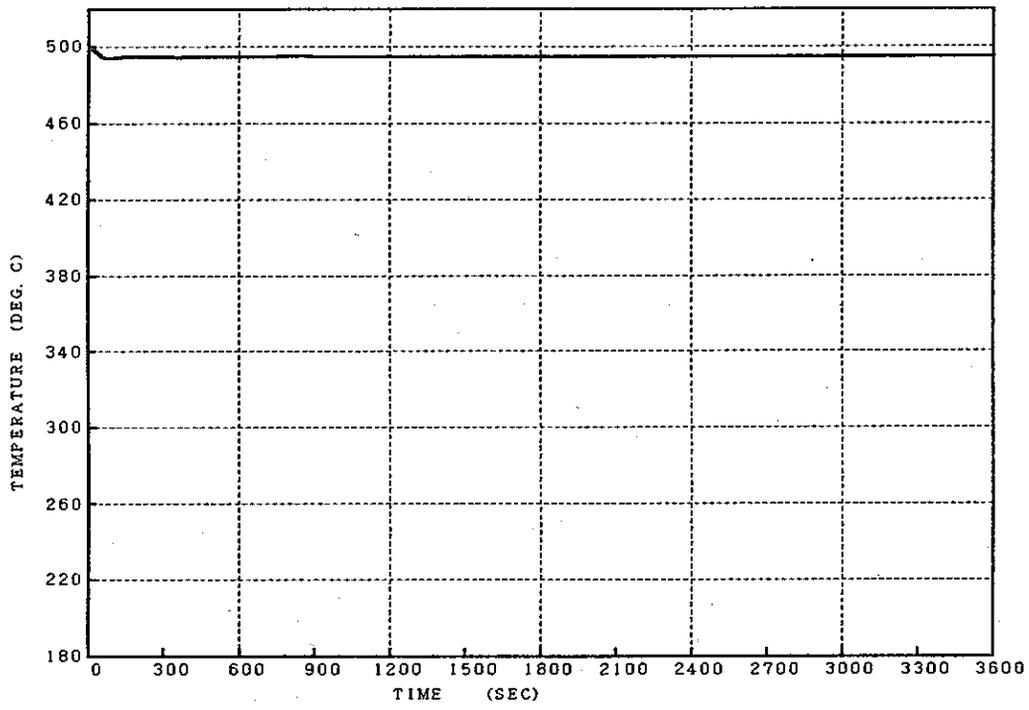
添付図1.40 2次冷却材漏洩事故 (MK-III熱過渡解析) DHX出口温度



添付図 1.41 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉入口温度

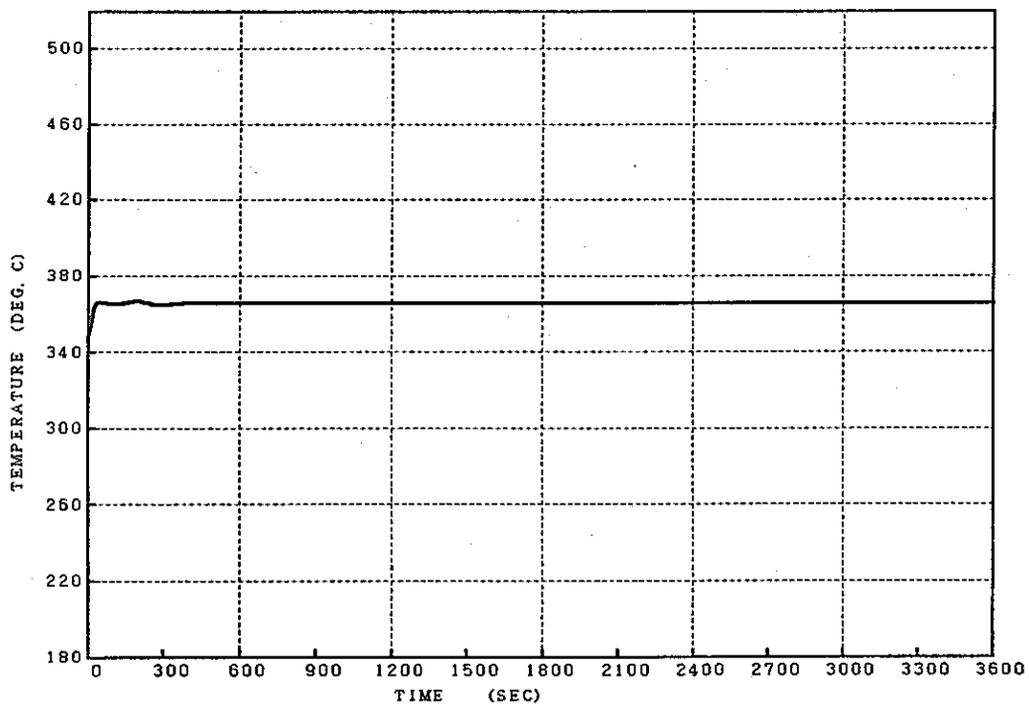


添付図 1.42 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) 原子炉出口温度



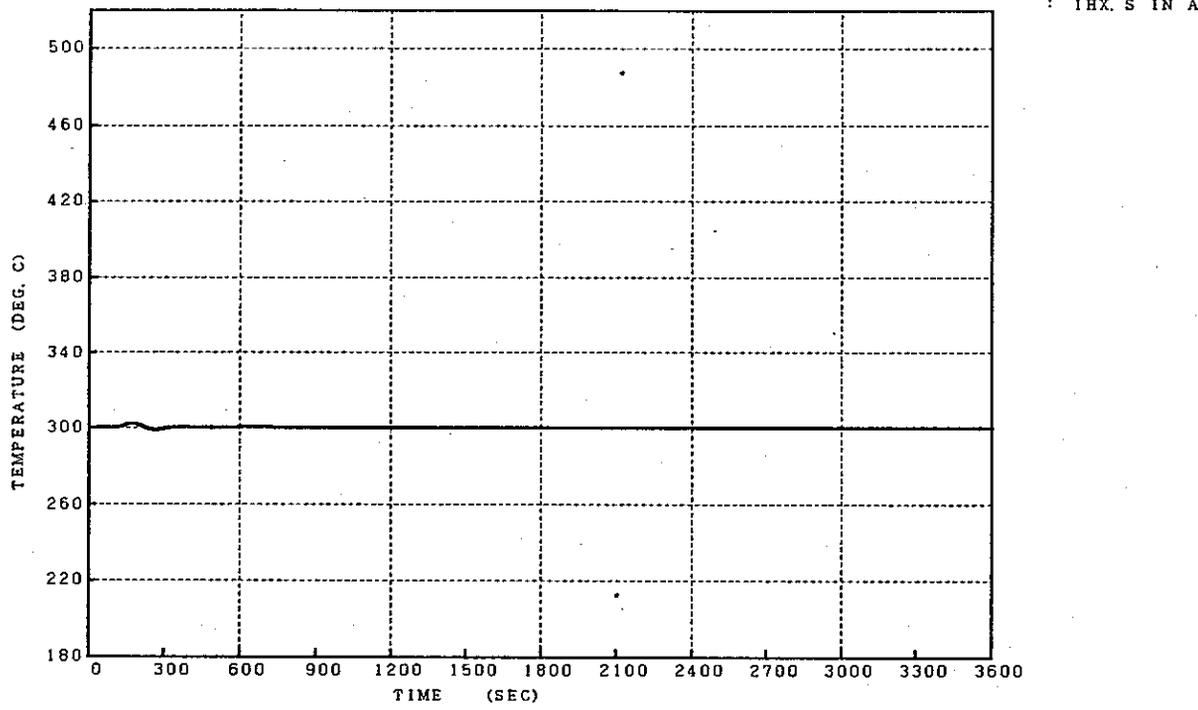
IHX. P IN A

添付図 1.43 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1次側入口温度

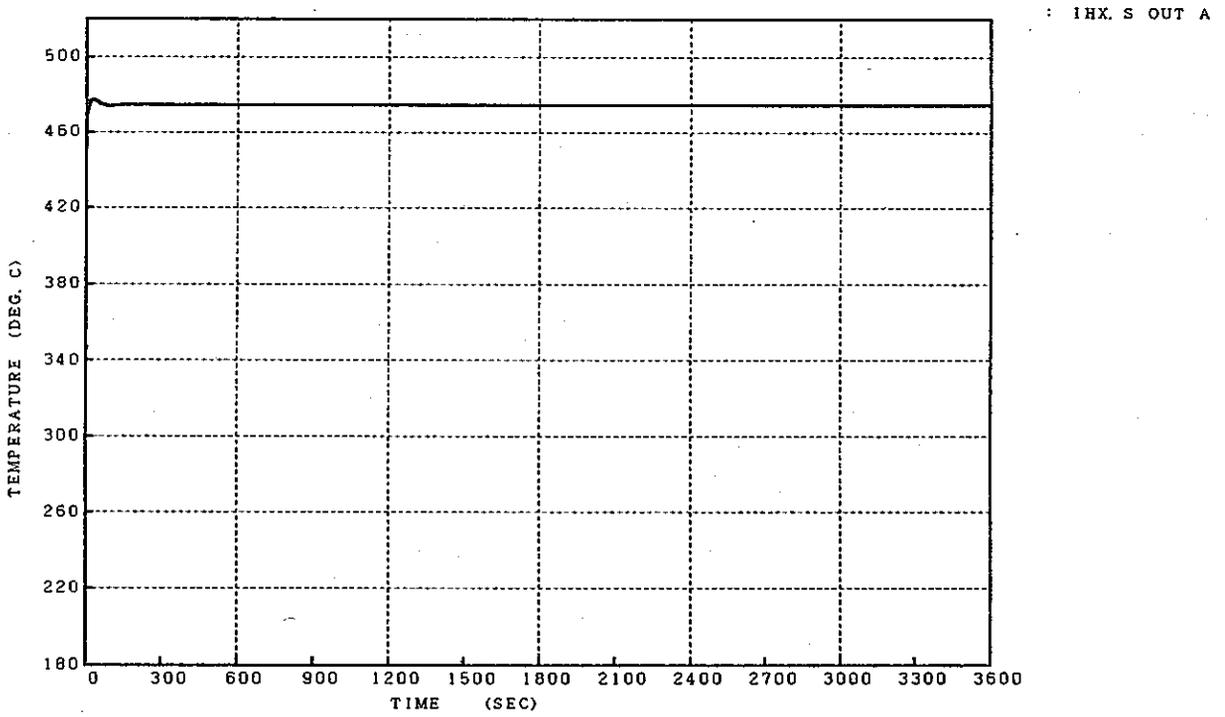


IHX. P OUT A

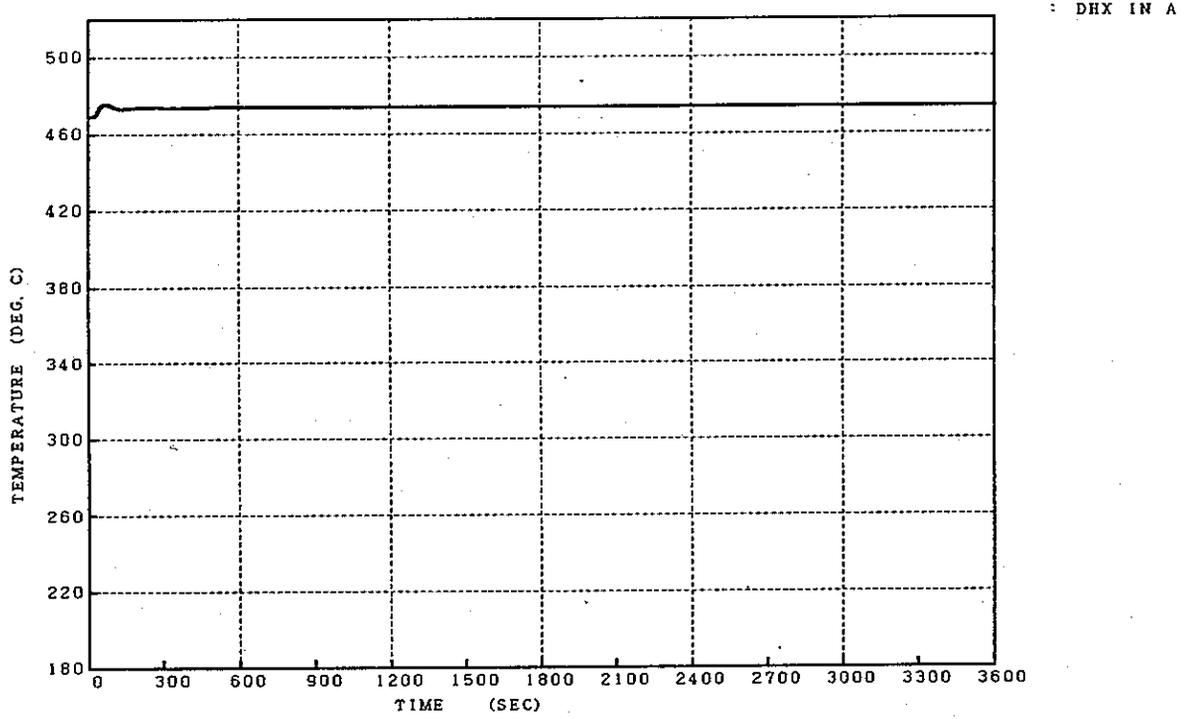
添付図 1.44 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 1次側出口温度



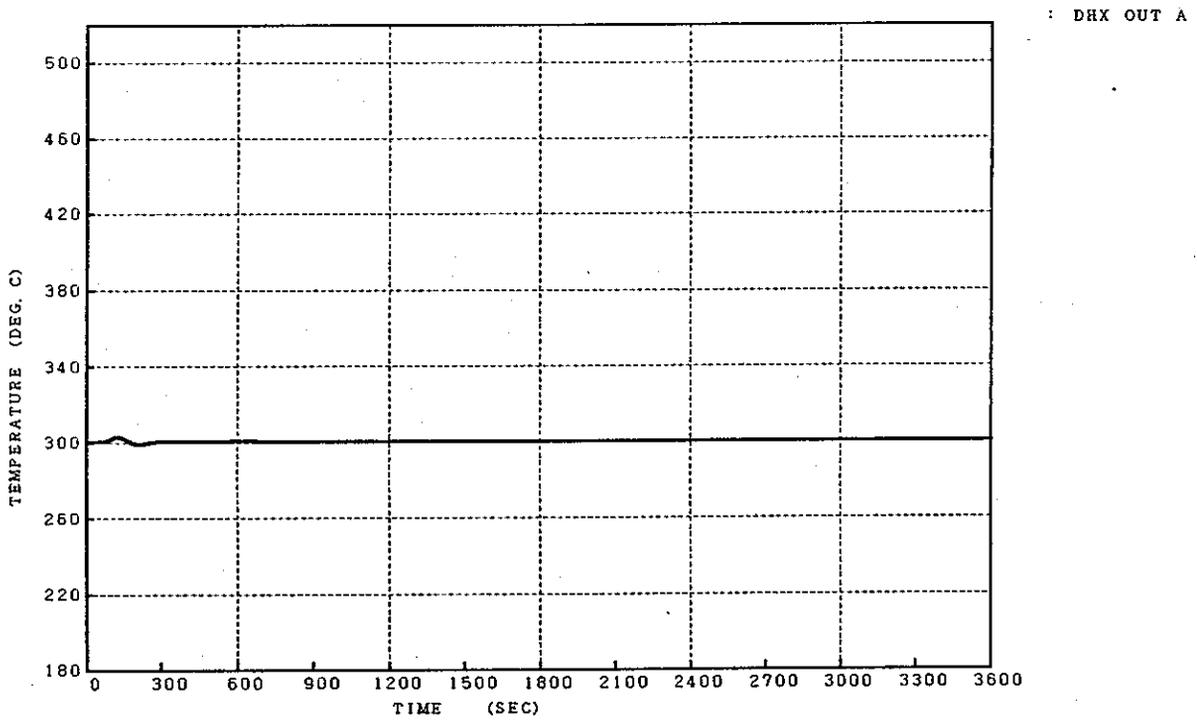
添付図 1.45 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 2次側入口温度



添付図 1.46 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 2次側出口温度



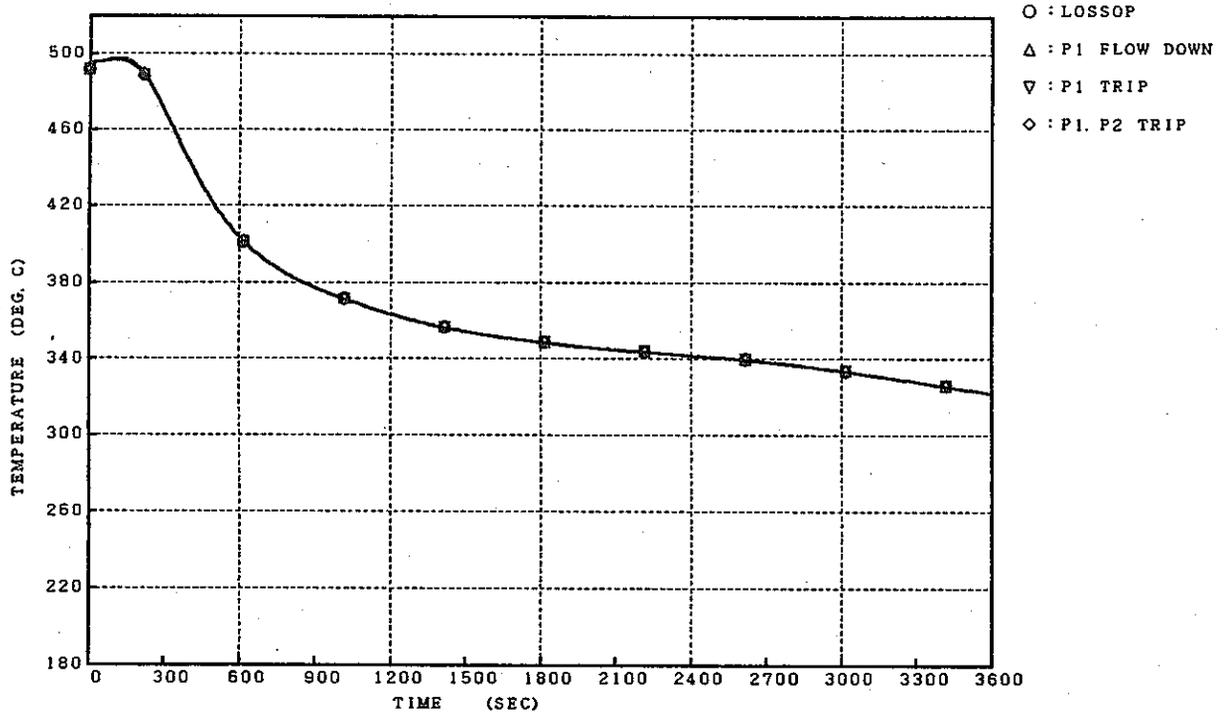
添付図1.47 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX入口温度



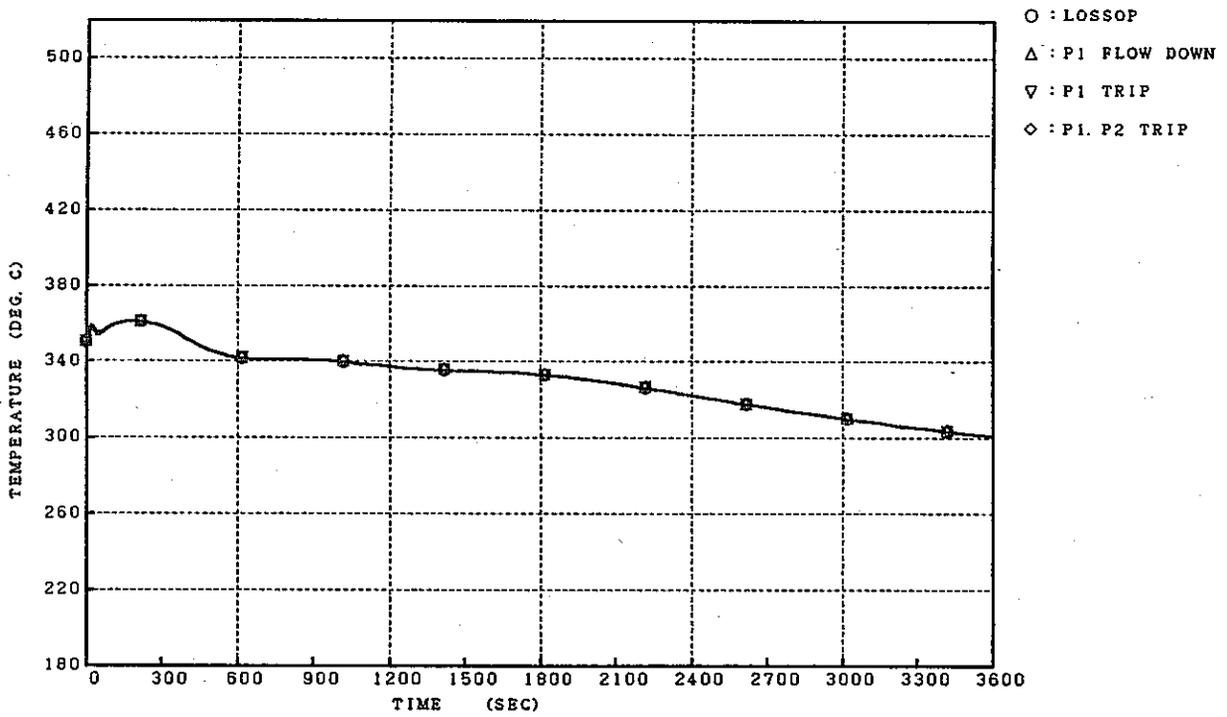
添付図1.48 1次冷却材流量増大 (MK-Ⅲ熱過渡解析) DHX出口温度

添付資料1.2

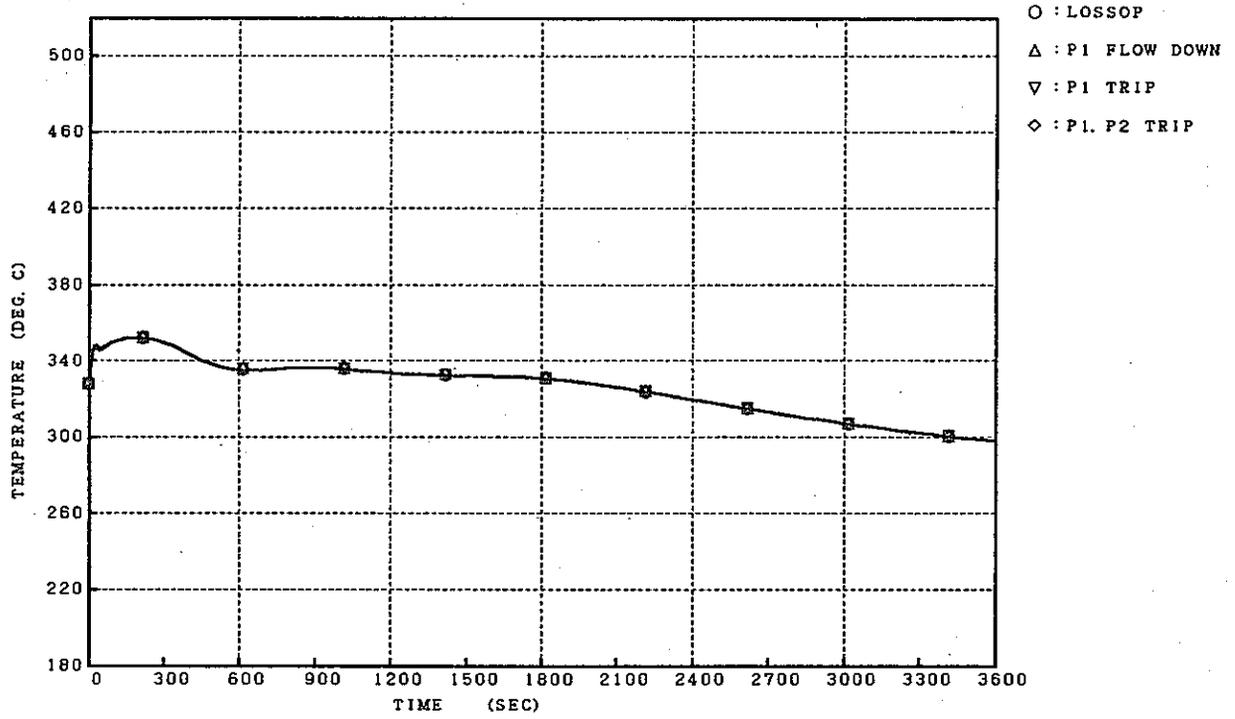
IHX内部熱過渡解析結果



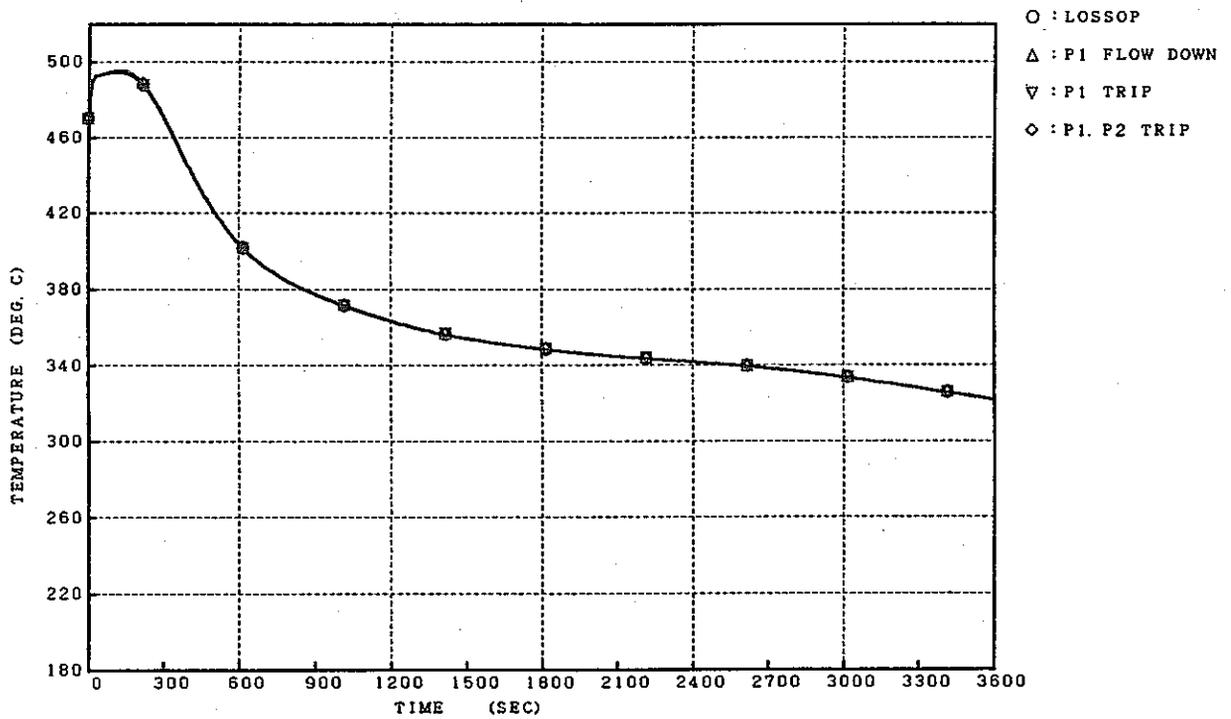
添付図 1.49 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 1 次側入口温度



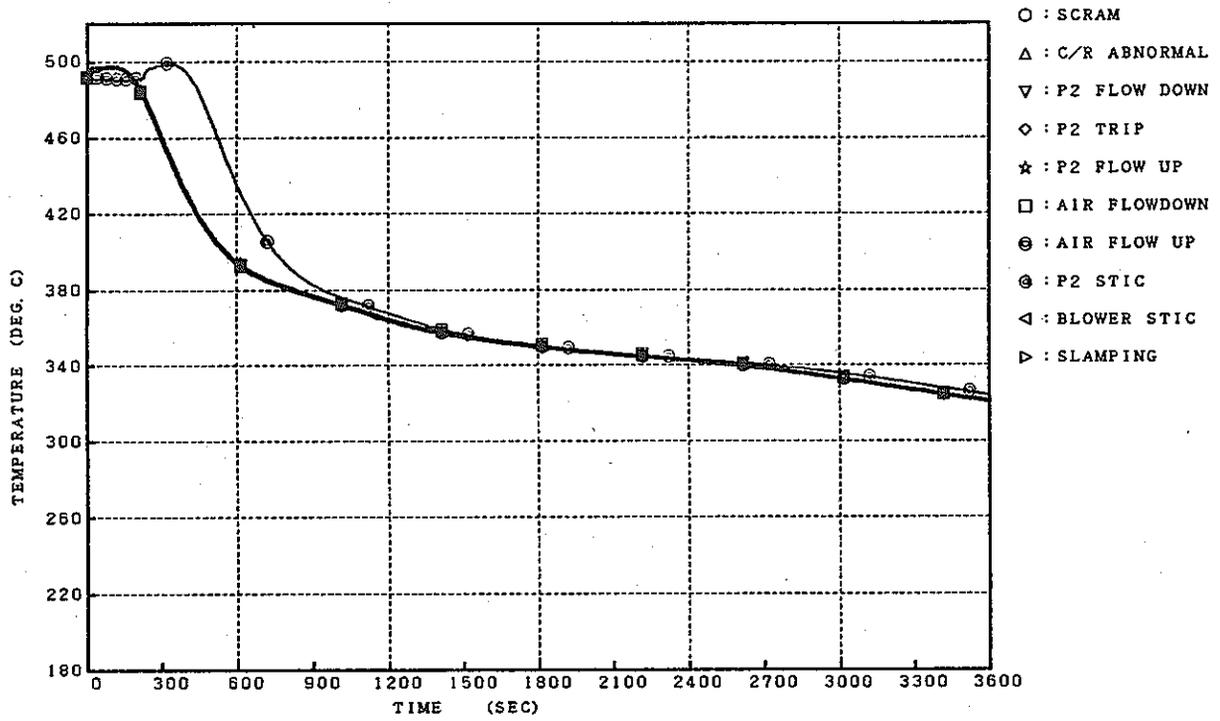
添付図 1.50 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 1 次側出口温度



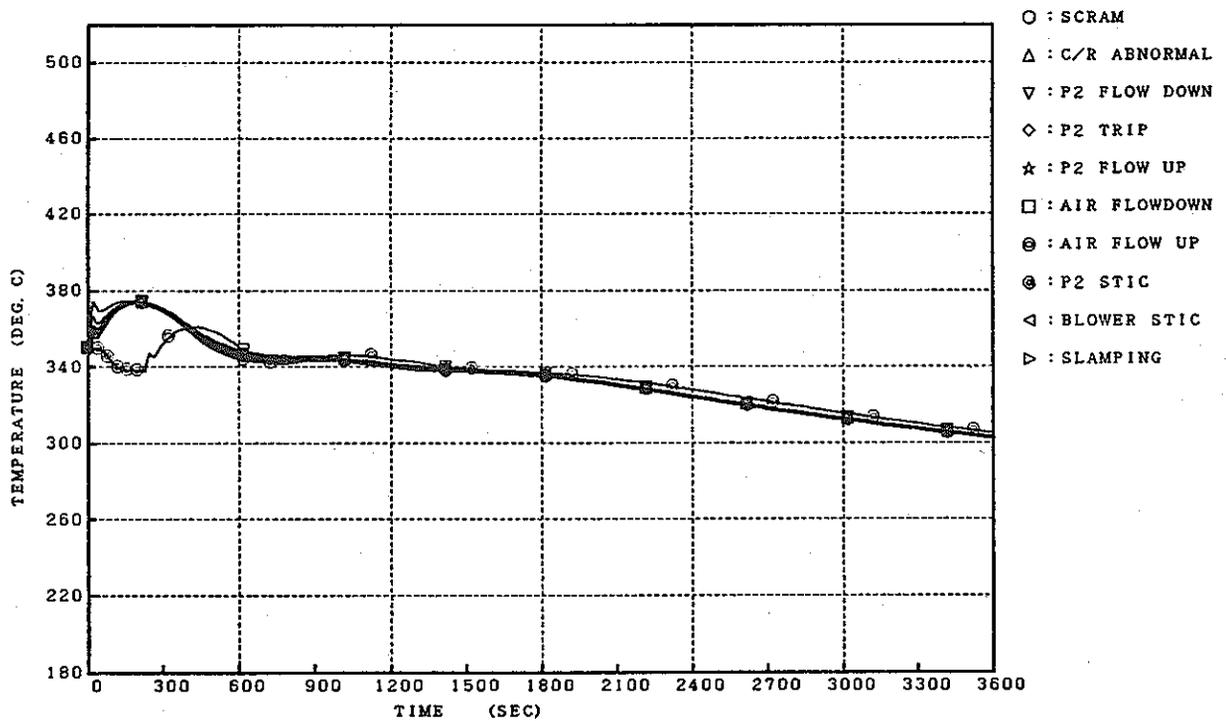
添付図 1.5.1 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 内部 2 次側入口温度



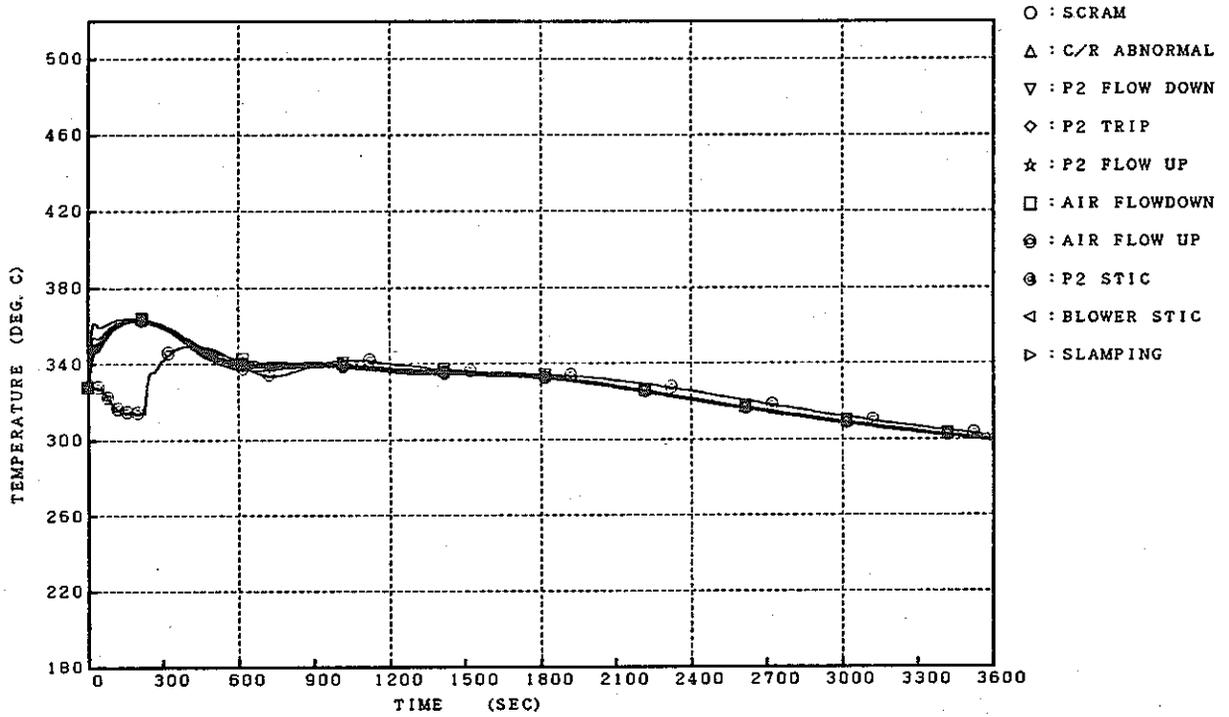
添付図 1.5.2 外部電源喪失 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX 内部 2 次側出口温度



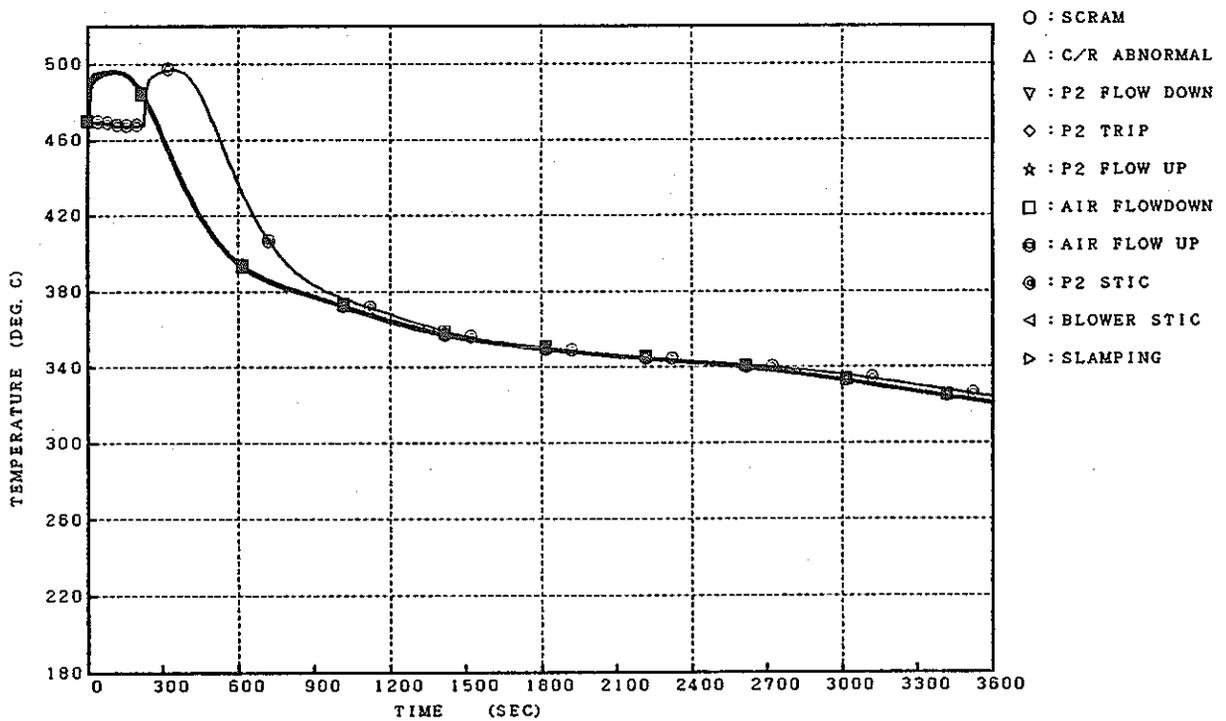
添付図 1.53 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX内部1次側入口温度



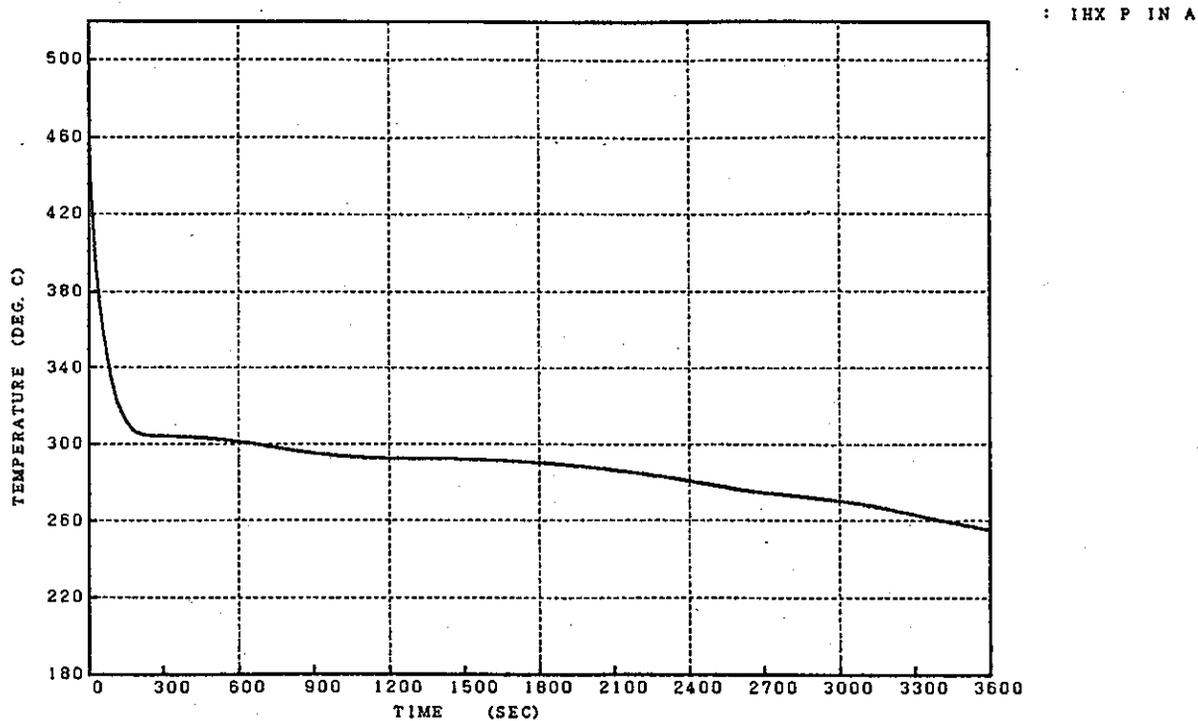
添付図 1.54 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX内部1次側出口温度



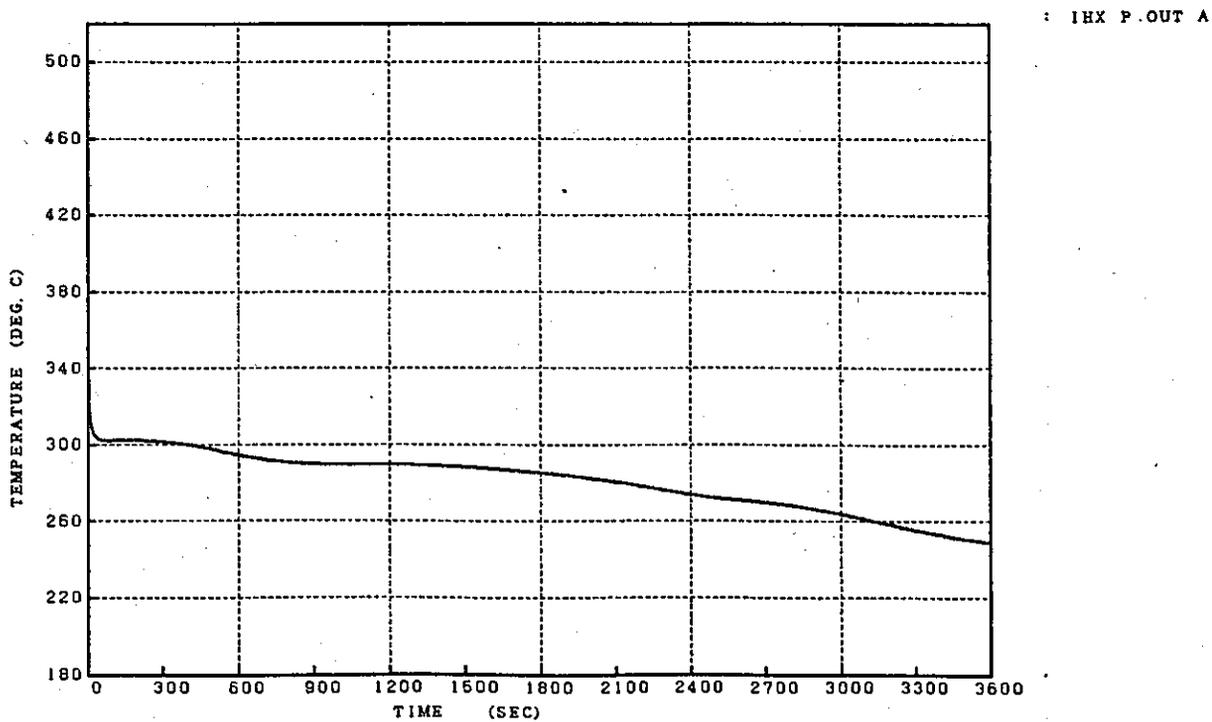
添付図 1.55 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX内部2次側入口温度



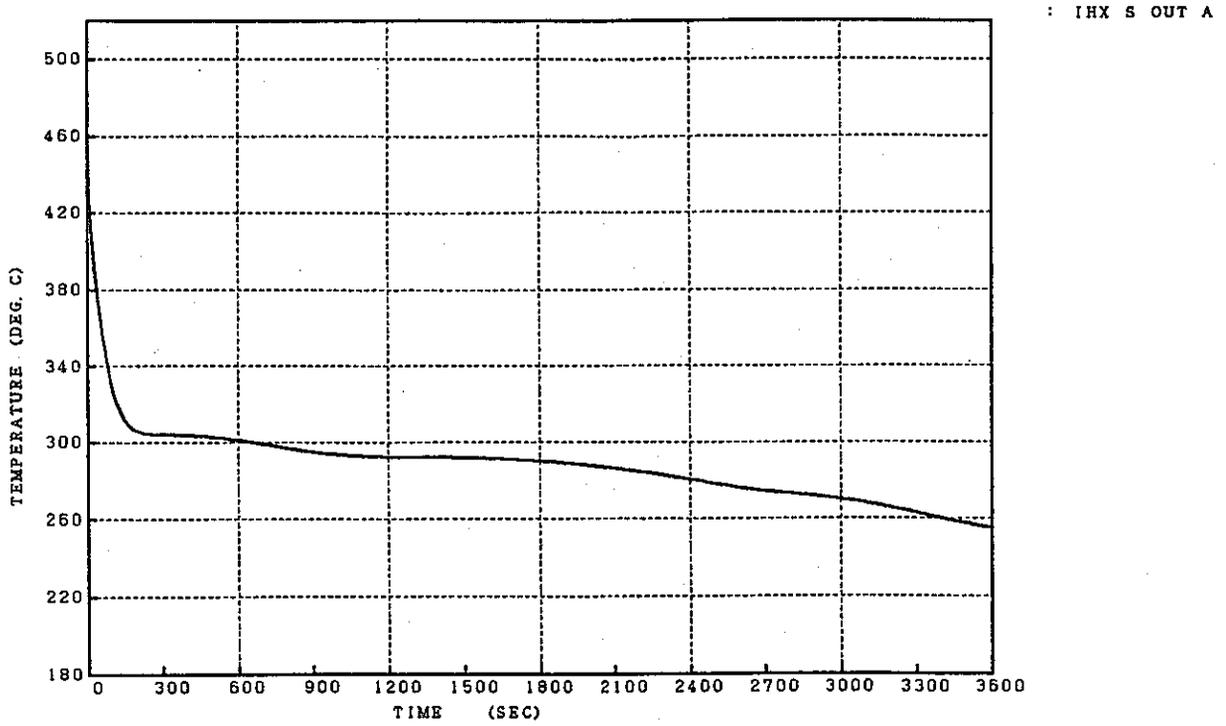
添付図 1.56 手動スクラム (MK-Ⅲ熱過渡解析) | HX内部2次側出口温度



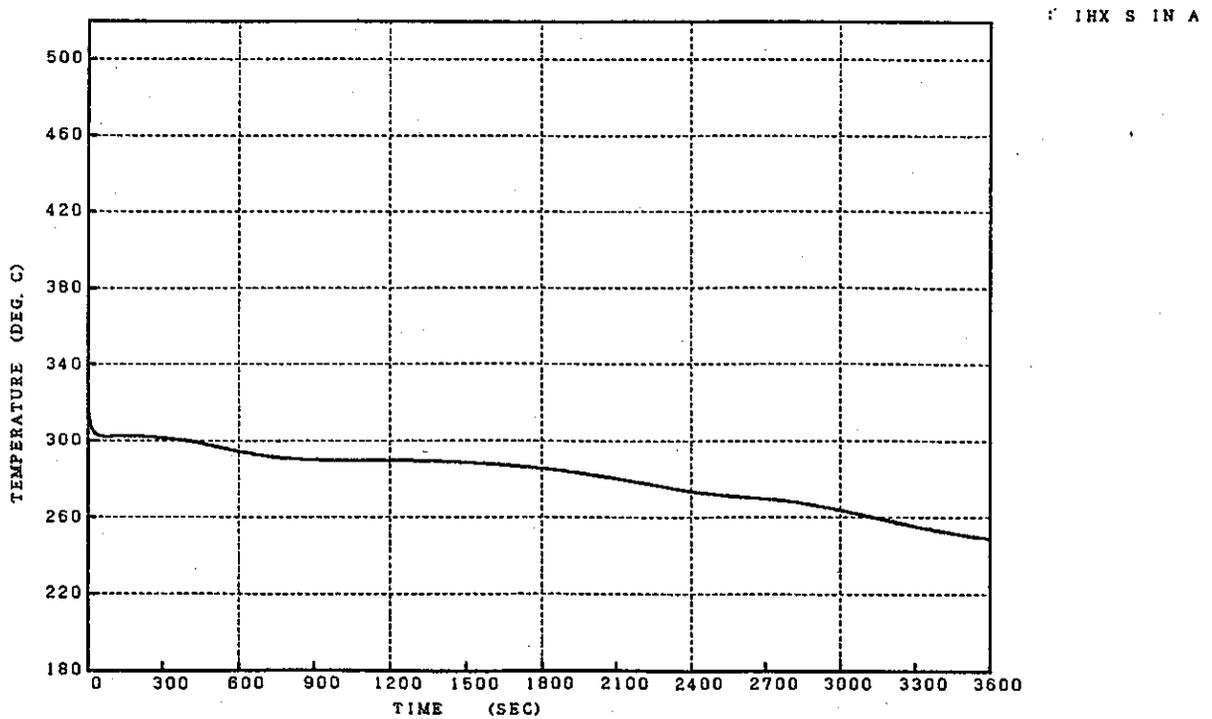
添付図1.57 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部1次側入口温度



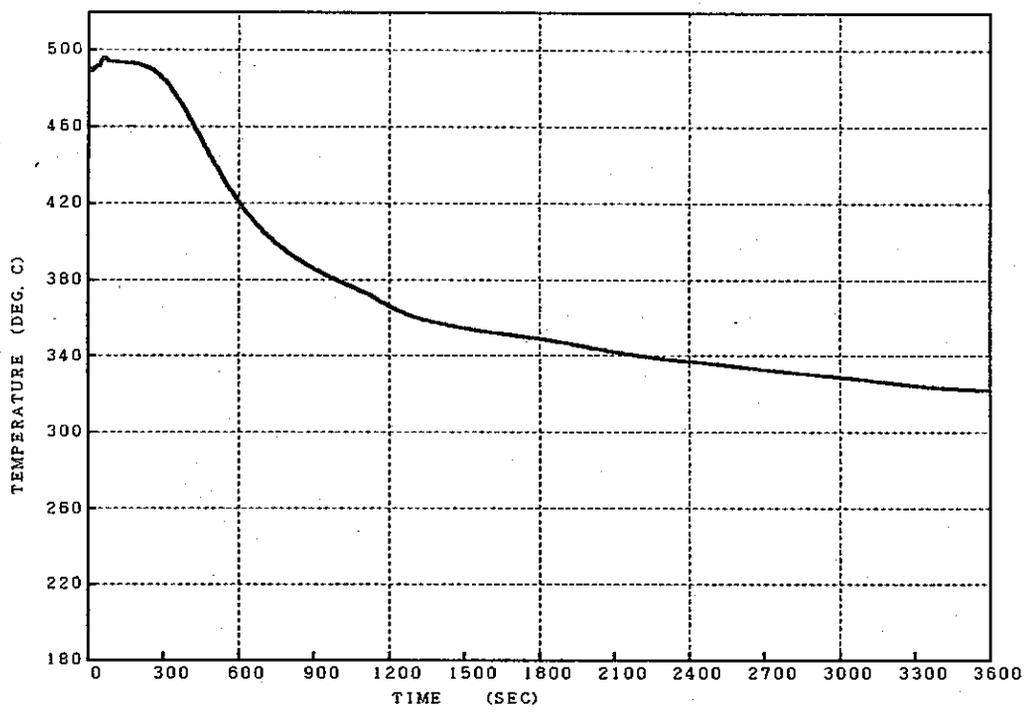
添付図1.58 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部1次側出口温度



添付図 1.59 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 2 次側入口温度

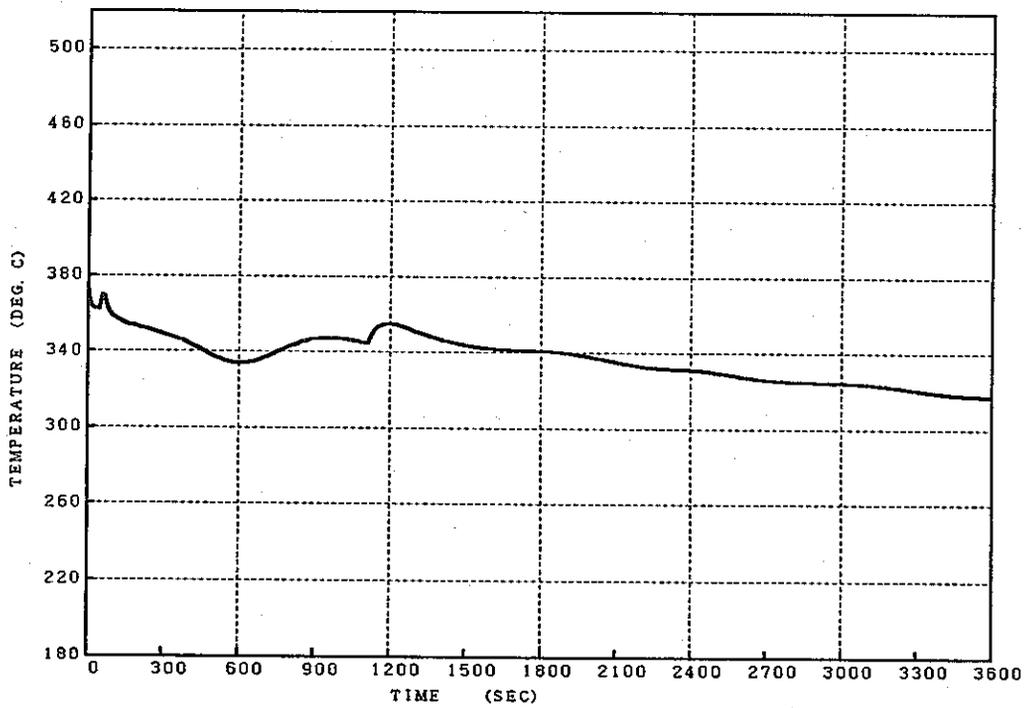


添付図 1.60 1次主循環ポンプ軸固着事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 2 次側出口温度



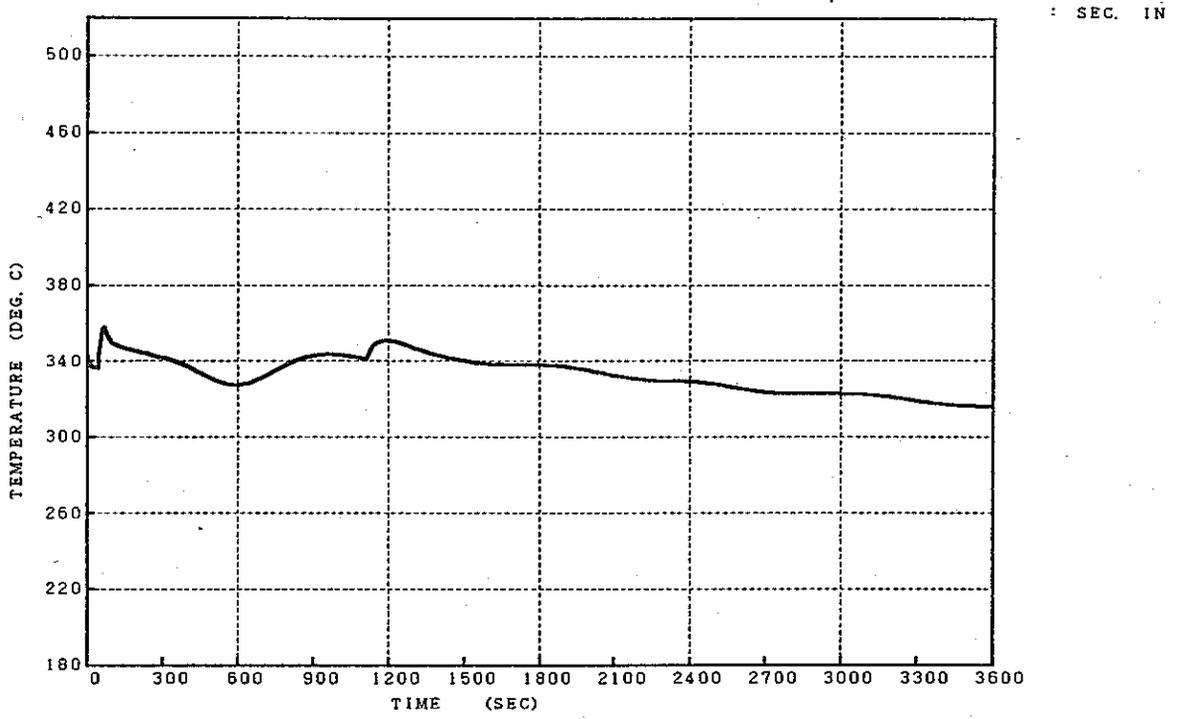
: PRI. IN

添付図 1.6 1 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 1次側入口温度

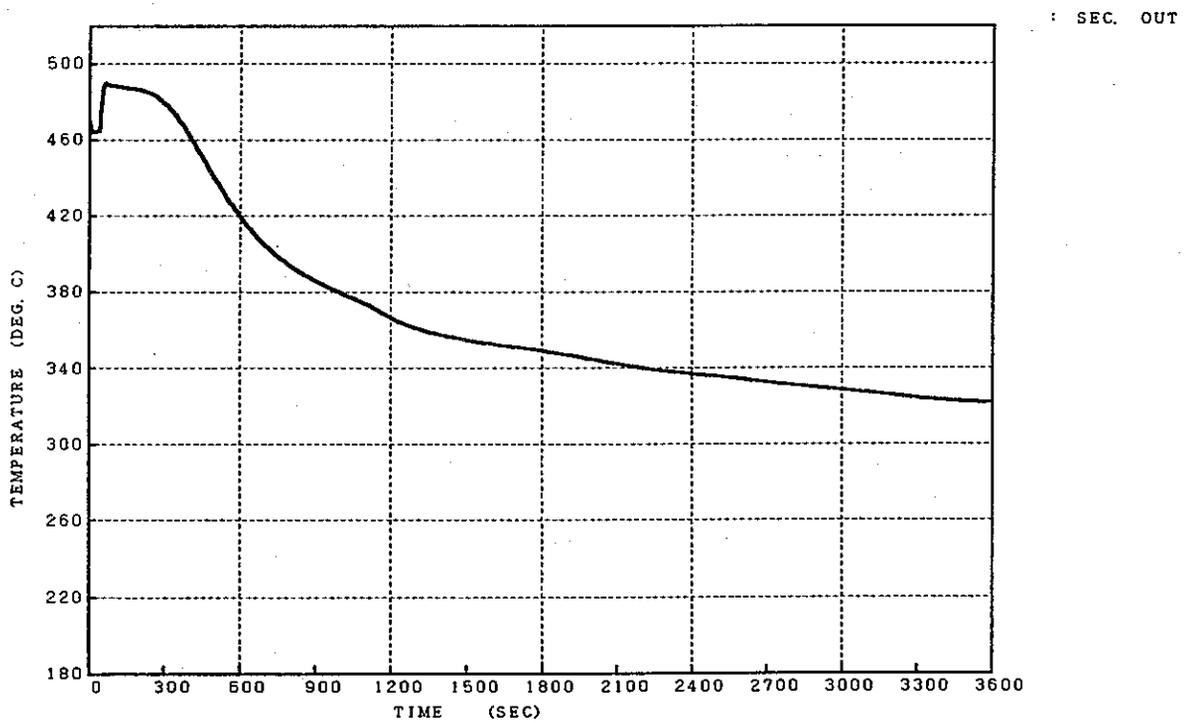


: PRI. OUT

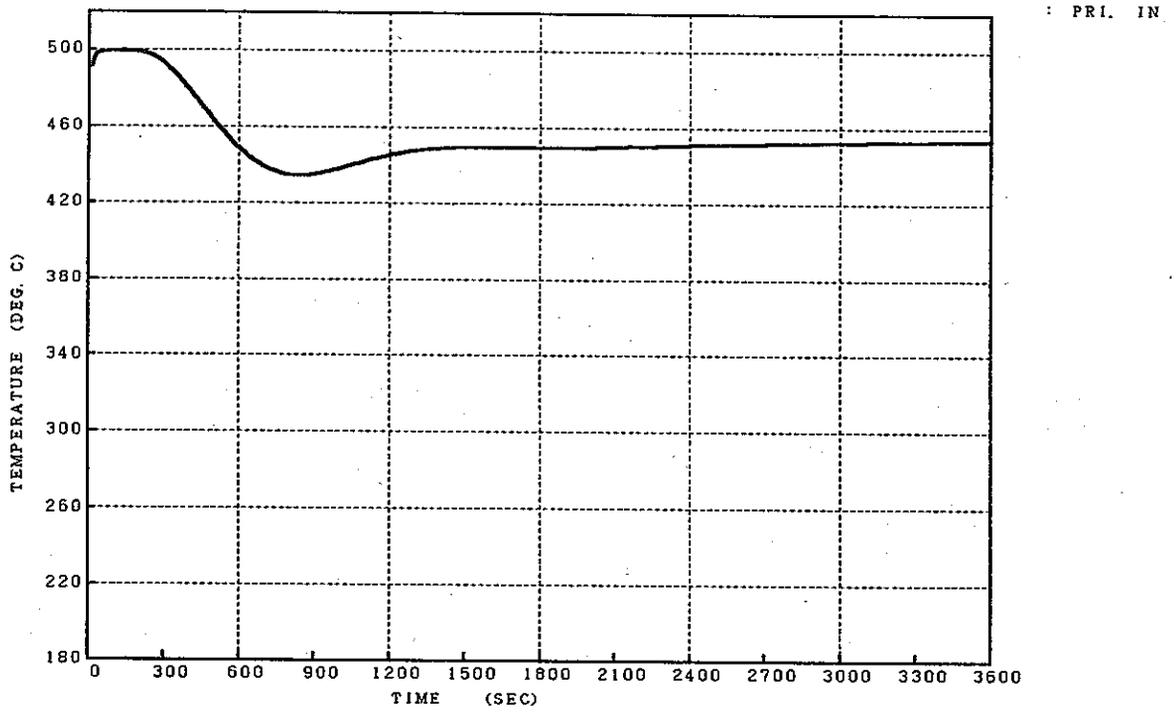
添付図 1.6 2 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X 内部 1次側出口温度



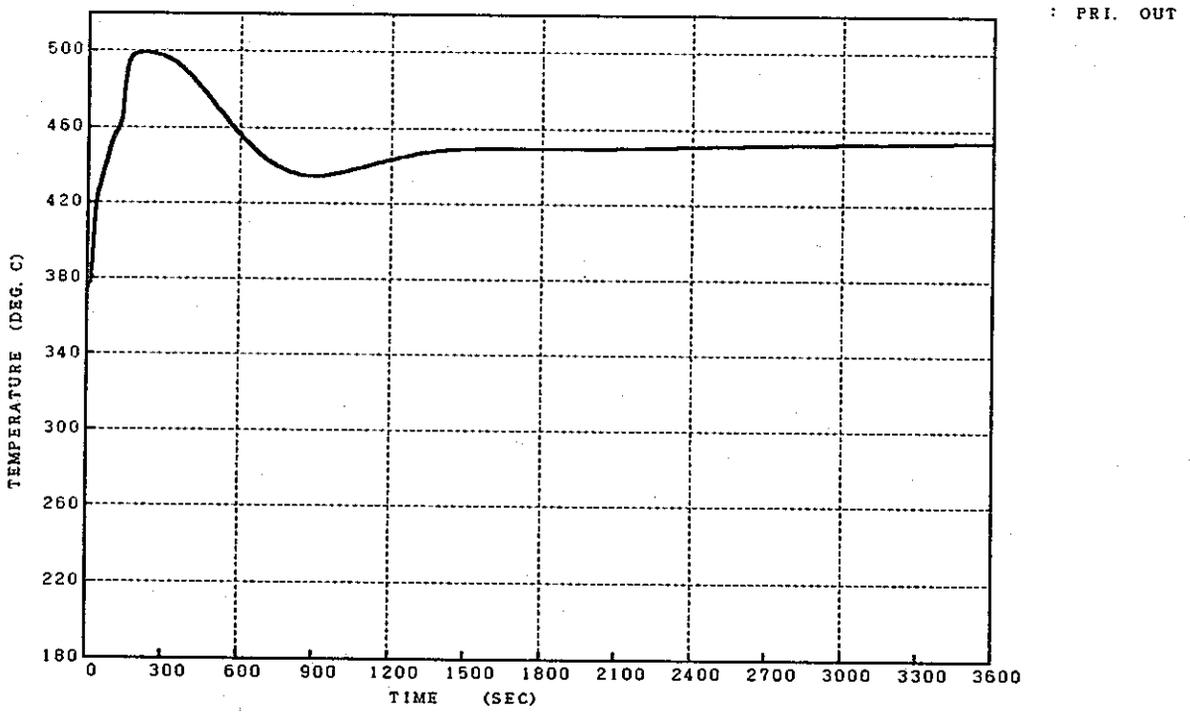
添付図1.63 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側入口温度



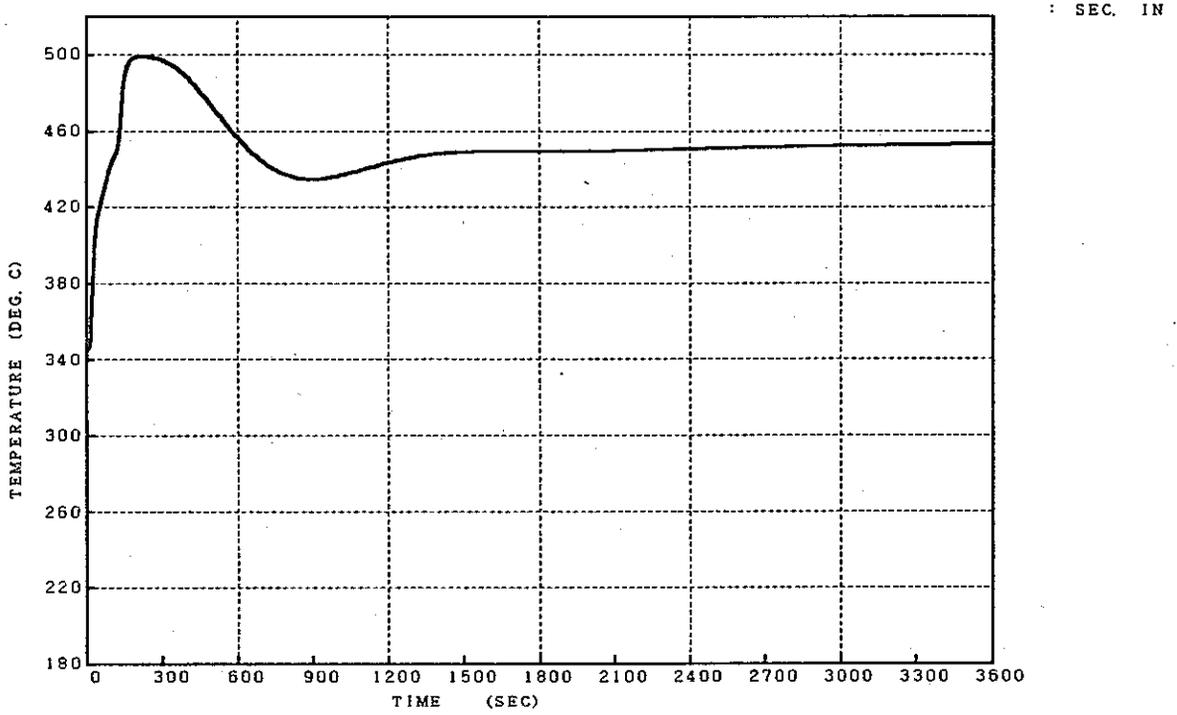
添付図1.64 1次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) IHX内部2次側出口温度



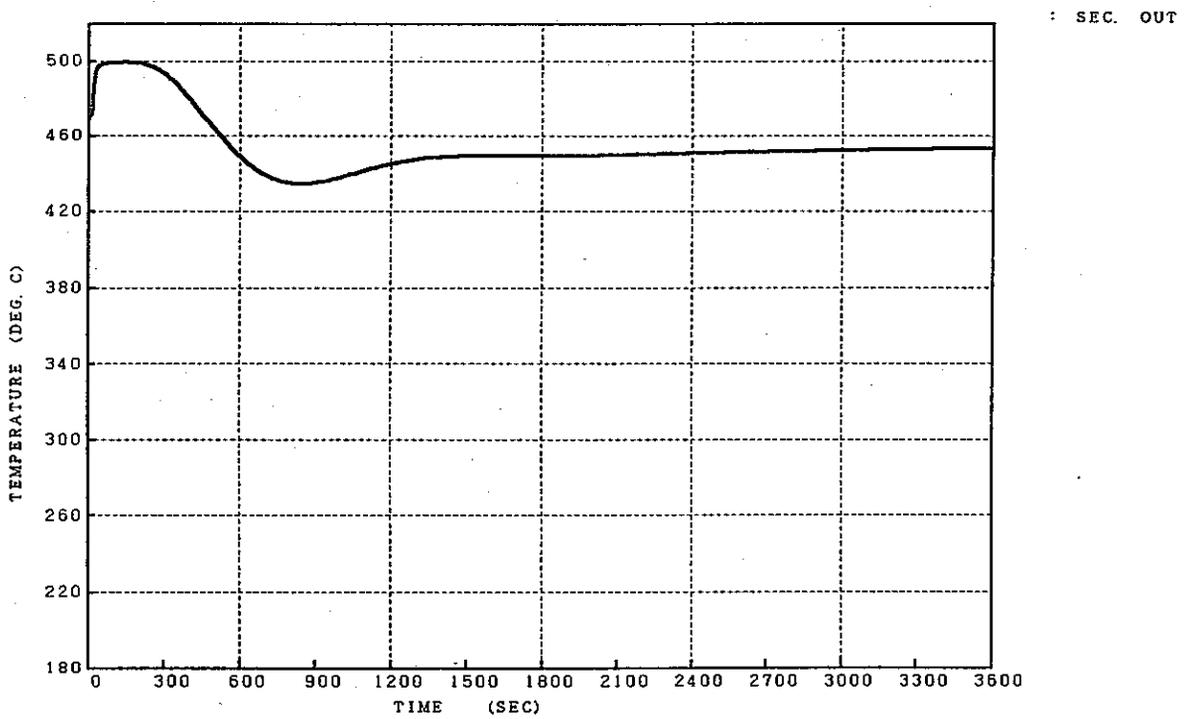
添付図 1.65 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I HX内部1次側入口温度



添付図 1.66 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I HX内部1次側出口温度



添付図 1.67 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X内部2次側入口温度



添付図 1.68 2次冷却材漏洩事故 (MK-Ⅲ熱過渡解析) I H X内部2次側出口温度

添付資料1.3

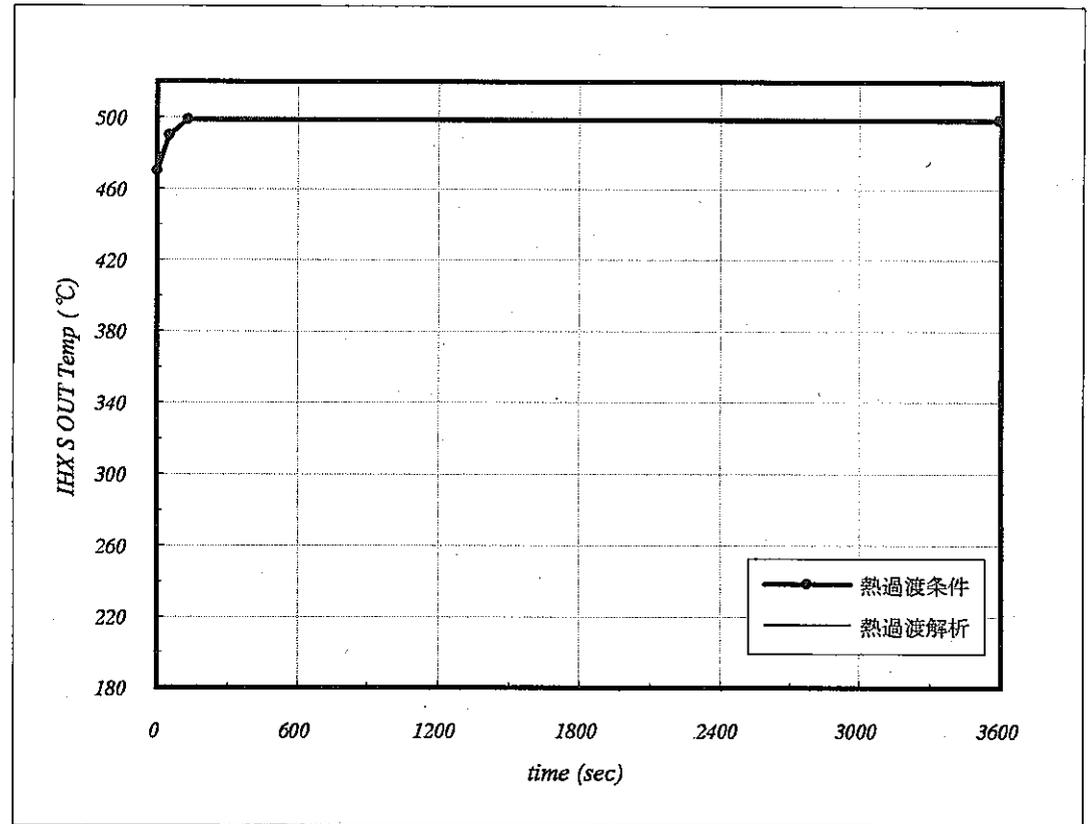
熱過渡条件

- ① 外部電源喪失（代表事象）
- ② 手動スクラム（代表事象）
- ③ 1次主循環ポンプ軸固着事故
- ④ 1次冷却材漏洩事故
- ⑤ 2次冷却材漏洩事故

熱過渡条件				
time	t	Temp	ΔT	$\Delta T/t$
0		469.8		
50	50	489.7	19.9	0.41
128	78	498.5	8.8	0.11
3588	3460	498.5	0.0	0.00
3590	2	498.5	0.0	-0.01

補正係数	
ΔT	$\Delta T/t$
1.00	1.02
1.00	1.02
1.00	1.00

	HOT	COLD
ΔT		
$\Delta T/t$	1.02	1.08

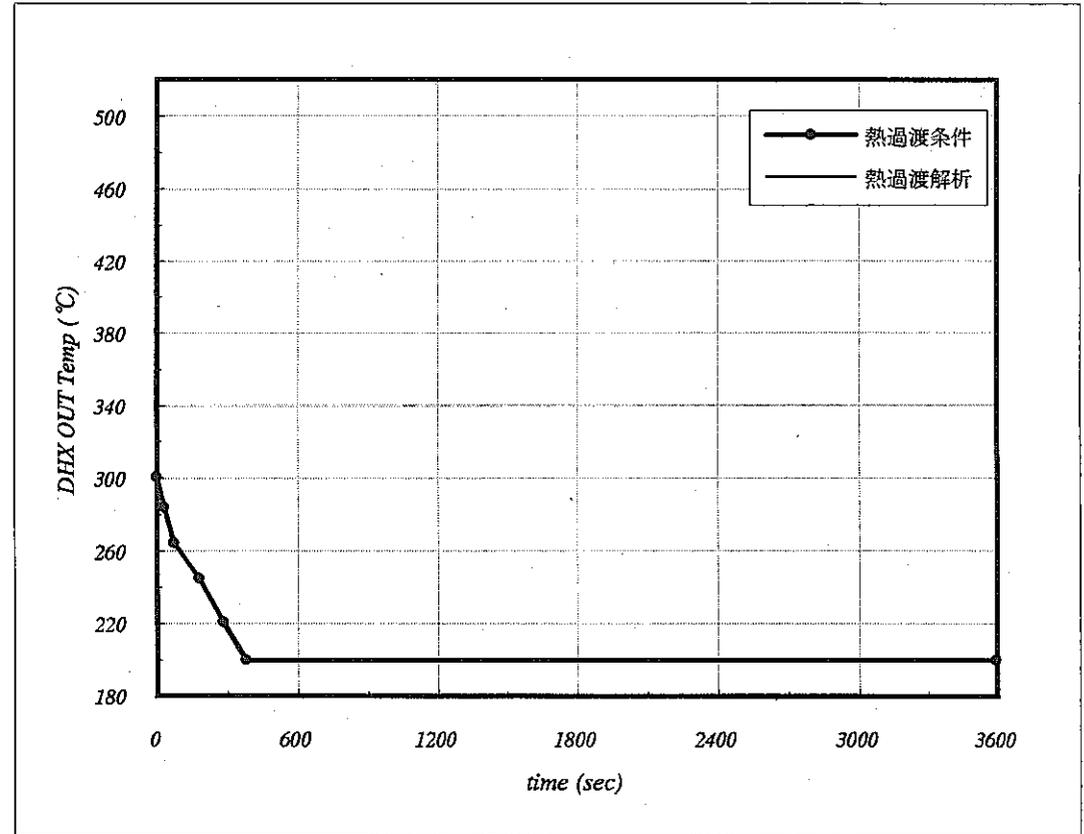


添付図1.106 2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） IHX 2次側出口温度

熱過渡条件				
time	t	Temp	ΔT	$\Delta T/t$
0		300.6		
30	30	284.5	-16.1	-0.54
70	40	264.5	-20.0	-0.50
180	110	245.0	-19.5	-0.18
280	100	220.7	-24.3	-0.24
378	98	200.0	-20.7	-0.21
3590	3212	200.0	0.0	0.00

補正係数	
ΔT	$\Delta T/t$
1.00	1.00
1.00	1.00
1.00	1.00
1.00	1.00
1.00	1.00
1.00	1.00

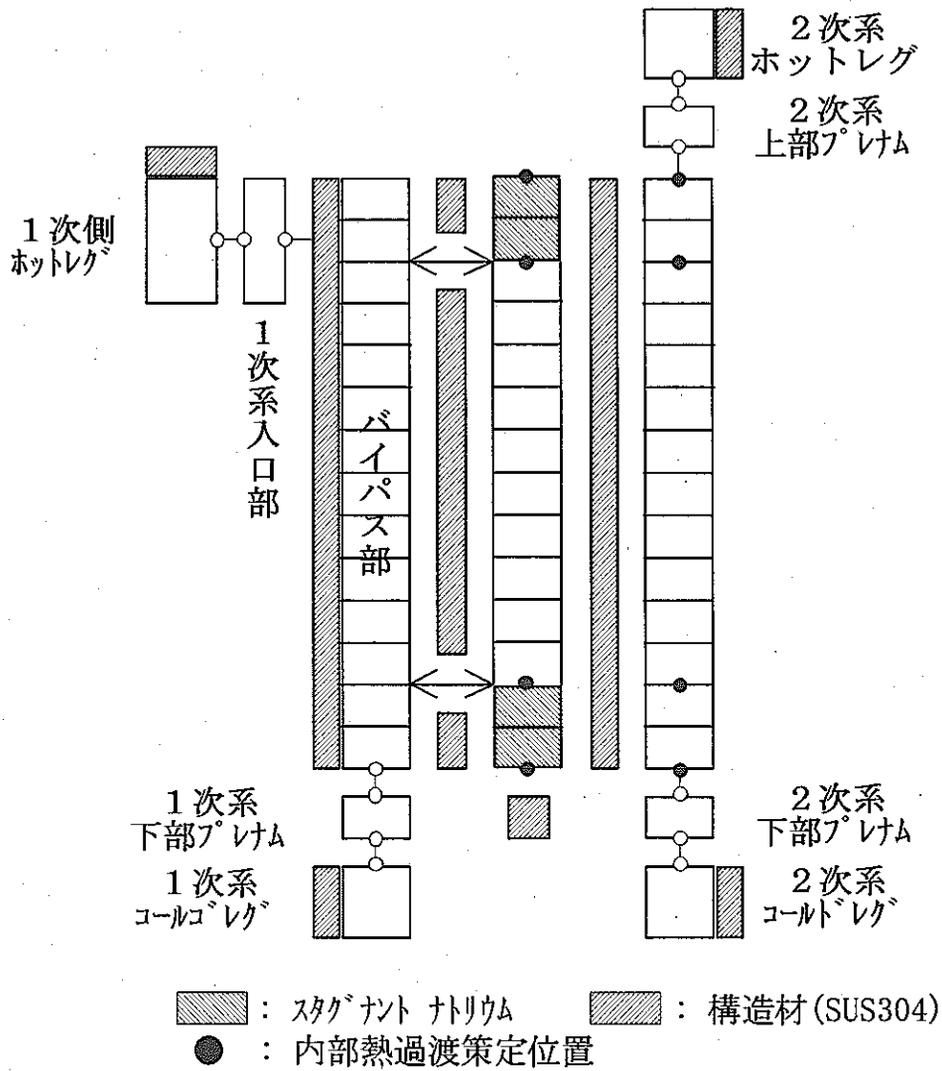
	COLD	HOT	COLD	HOT	COLD
ΔT			1.02	1.01	1.01
$\Delta T/t$		1.03		1.05	1.10



添付図1.108 2次冷却材漏洩事故（熱過渡条件） DHX出口温度

添付資料1.4

IHX内部熱過渡条件



添付図1.109 IHX熱過渡条件モデル及び内部熱過渡条件化位置関係

添付資料1.5

各パラメータ解析結果の比較

添付表1.1 スクラム反応度のパラメータ解析結果の比較

	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	基本ケース	ケース①	①/基	基本ケース	ケース①	①/基
スクラム反応度	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	5.4	5.4	1.00	0.03	0.03	1.00
	-17.5	-17.4	0.99	-0.07	-0.07	1.00
	6.6	6.6	1.00	0.03	0.03	1.00
	-20.0	-20.1	1.01	-0.04	-0.04	1.00
	1.6	1.5	0.94	0.01	0.01	1.00
炉容器出口	-178.8	-178.9	1.00	-0.31	-0.30	0.97
IHX1次側入口	-178.5	-178.6	1.00	-0.30	-0.29	0.97
IHX1次側出口	6.0	6.0	1.00	0.04	0.04	1.00
	-19.2	-19.1	0.99	-0.08	-0.08	1.00
	8.1	8.1	1.00	0.04	0.04	1.00
	-20.8	-21.0	1.01	-0.05	-0.05	1.00
	2.1	2.2	1.05	0.01	0.01	1.00
IHX2次側入口	-16.3	-16.3	1.00	-0.10	-0.10	1.00
	32.7	32.9	1.01	0.16	0.16	1.00
	-26.2	-26.2	1.00	-0.06	-0.06	1.00
	12.5	12.5	1.00	0.07	0.07	1.00
IHX2次側出口	26.3	26.3	1.00	0.55	0.55	1.00
	-172.5	-172.6	1.00	-0.26	-0.26	1.00
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.2	19.2	1.00	0.11	0.11	1.00
	-161.3	-161.4	1.00	-0.18	-0.18	1.00
DHX出口	-26.4	-26.4	1.00	-0.77	-0.77	1.00
	54.5	54.5	1.00	0.29	0.29	1.00
	-39.9	-39.8	1.00	-0.09	-0.09	1.00
	32.9	32.8	1.00	0.22	0.21	0.95
	-42.3	-42.3	1.00	-0.20	-0.20	1.00

注) 1.01, 1.05, 1.01 は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所
で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.3 炉心圧損のパラメータ解析結果の比較

	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	基本ケース	ケース⑨	⑨/基	基本ケース	ケース⑨	⑨/基
炉心圧損	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	5.2	9.7	0.54	0.03	0.05	0.60
	-17.5	-19.8	0.88	-0.07	-0.08	0.88
	6.6	5.8	1.14	0.04	0.03	1.33
	-20.0	-19.6	1.02	-0.04	-0.04	1.00
	1.6	1.4	1.14	0.01	0.01	1.00
炉容器出口	-178.8	-178.4	1.00	-0.31	-0.32	0.97
IHX1次側入口	-178.5	-178.2	1.00	-0.30	-0.31	0.97
IHX1次側出口	6.0	10.6	0.57	0.04	0.07	0.57
	-19.2	-21.5	0.89	-0.08	-0.09	0.89
	8.1	7.1	1.14	0.04	0.04	1.00
	-20.8	-20.3	1.02	-0.05	-0.05	1.00
	2.1	2.0	1.05	0.01	0.01	1.00
IHX2次側入口	-16.3	-16.2	1.01	-0.10	-0.10	1.00
	32.7	32.5	1.01	0.16	0.15	1.07
	-26.2	-26.1	1.00	-0.06	-0.06	1.00
	12.5	12.7	0.98	0.06	0.07	0.86
IHX2次側出口	26.3	27.0	0.97	0.55	0.56	0.98
	-172.5	-172.9	1.00	-0.26	-0.28	0.93
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.2	19.4	0.99	0.11	0.11	1.00
	-161.3	-161.4	1.00	-0.18	-0.19	0.95
DHX出口	-26.4	-26.3	1.00	-0.77	-0.77	1.00
	54.5	54.4	1.00	0.29	0.29	1.00
	-39.9	-40.0	1.00	-0.09	-0.09	1.00
	32.9	33.4	0.99	0.22	0.22	1.00
	-42.3	-42.6	0.99	-0.20	-0.20	1.00

注) ⑨は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所
で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.4 空気風量追従遅れのパラメータ解析結果の比較

空気風量追従遅れ	ΔT (°C)			$\Delta T / t$ (°C/sec)		
	ケース⑨	ケース⑩	⑩/⑨	ケース⑨	ケース⑩	⑩/⑨
	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	9.7	10.2	1.05	0.05	0.05	1.00
	-19.8	-18.6	0.94	-0.08	-0.07	0.88
	5.8	3.8	0.66	0.03	0.02	0.67
	-19.6	-18.8	0.96	-0.04	-0.04	1.00
	1.4	1.3	0.93	0.01	0.01	1.00
炉容器出口	-178.4	-178.2	1.00	-0.32	-0.32	1.00
IHX1次側入口	-178.2	-177.9	1.00	-0.31	-0.31	1.00
IHX1次側出口	10.6	11.0	1.04	0.07	0.08	1.14
	-21.5	-20.1	0.93	-0.09	-0.08	0.89
	7.1	5.0	0.70	0.04	0.03	0.75
	-20.3	-19.6	0.97	-0.05	-0.05	1.00
	2.0	2.0	1.00	0.01	0.01	1.00
IHX2次側入口	-16.2	-10.4	0.64	-0.10	-0.06	0.60
	32.5	26.6	0.82	0.15	0.13	0.87
	-26.1	-25.9	0.99	-0.06	-0.06	1.00
	12.7	12.8	1.01	0.07	0.07	1.00
IHX2次側出口	27.0	27.0	1.00	0.56	0.56	1.00
	-172.9	-172.5	1.00	-0.28	-0.28	1.00
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.4	19.4	1.00	0.11	0.11	1.00
	-161.4	-161.0	1.00	-0.19	-0.19	1.00
DHX出口	-26.3	-17.6	0.67	-0.77	-0.31	0.40
	54.4	45.7	0.84	0.29	0.30	1.03
	-40.0	-40.1	1.00	-0.09	-0.08	0.89
	33.4	33.8	1.01	0.22	0.23	1.05
	-42.6	-42.9	1.01	-0.20	-0.20	1.00

注) 〇は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.5 ベーンヒステリシスのパラメータ解析結果の比較

	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	ケース⑨	ケース⑫	⑫/⑨	ケース⑨	ケース⑫	⑫/⑨
ヒステリシス	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	9.7	9.8	1.01	0.05	0.05	1.00
	-19.8	-18.1	0.91	-0.08	-0.07	0.88
	5.8	2.8	0.48	0.03	0.02	0.67
	-19.6	—	—	-0.04	—	—
	1.4	—	—	0.01	—	—
炉容器出口	-178.4	-177.7	1.00	-0.32	-0.32	1.00
IHX1次側入口	-178.2	-177.4	1.00	-0.31	-0.31	1.00
IHX1次側出口	10.6	10.7	1.01	0.07	0.07	1.00
	-21.5	-19.7	0.92	-0.09	-0.08	0.89
	7.1	3.9	0.55	0.04	0.03	0.75
	-20.3	—	—	-0.05	—	—
	2.0	—	—	0.01	—	—
IHX2次側入口	-16.2	-13.3	0.82	-0.10	-0.08	0.80
	32.5	26.1	0.80	0.15	0.13	0.87
	-26.1	-18.8	0.72	-0.06	-0.05	0.83
	12.7	1.6	0.13	0.07	0.01	0.14
IHX2次側出口	27.0	27.0	1.00	0.56	0.56	1.00
	-172.9	-171.9	0.99	-0.28	-0.28	1.00
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.4	19.4	1.00	0.11	0.11	1.00
	-161.4	-161.6	1.00	-0.19	-0.19	1.00
DHX出口	-26.3	-22.0	0.84	-0.77	-0.76	0.99
	54.4	45.6	0.84	0.29	0.27	0.93
	-40.0	-29.2	0.73	-0.09	-0.08	0.89
	33.4	10.3	0.31	0.22	0.09	0.41
	-42.6	-12.7	0.30	-0.20	-0.09	0.45

注) 1.01は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所
で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.6 ポニーモータ回転数のパラメータ解析結果の比較

ポニーモータ回転数	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	ケース⑨	ケース⑩	⑩/⑨	ケース⑨	ケース⑩	⑩/⑨
	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	9.7	0.3	0.03	0.05	0.01	0.20
	-19.8	-36.2	1.83	-0.08	-0.10	1.25
	5.8	16.1	2.78	0.03	0.06	2.00
	-19.6	-18.7	0.95	-0.04	-0.04	1.00
	1.4	1.5	1.07	0.01	0.01	1.00
炉容器出口	-178.4	-180.5	1.01	-0.32	-0.21	0.66
IHX1次側入口	-178.2	-179.9	1.01	-0.31	-0.21	0.68
IHX1次側出口	10.6	1.5	0.14	0.07	0.05	0.71
	-21.5	-38.9	1.81	-0.09	-0.17	1.89
	7.1	18.8	2.65	0.04	0.08	2.00
	-20.3	-20.4	1.00	-0.05	-0.04	0.80
	2.0	2.6	1.30	0.01	0.01	1.00
IHX2次側入口	-16.2	-16.4	1.01	-0.10	-0.10	1.00
	32.5	32.3	0.99	0.15	0.16	1.07
	-26.1	-25.6	0.98	-0.06	-0.05	0.83
	12.7	11.0	0.85	0.07	0.06	0.86
IHX2次側出口	27.0	23.5	0.87	0.56	0.56	1.00
	-172.9	-169.9	0.98	-0.28	-0.16	0.57
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.4	14.7	0.76	0.11	0.09	0.82
	-161.4	-157.8	0.98	-0.19	-0.13	0.68
DHX出口	-26.3	-26.4	1.00	-0.77	-0.77	1.00
	54.4	54.2	1.00	0.29	0.28	0.97
	-40.0	-37.8	0.95	-0.09	-0.09	1.00
	33.4	26.5	0.79	0.22	0.17	0.77
	-42.6	-37.2	0.87	-0.20	-0.18	0.90

注) 〇は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所
で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.7 ベーン開度制限値のパラメータ解析結果の比較

	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	ケース⑨	ケース⑬	⑬/⑨	ケース⑨	ケース⑬	⑬/⑨
ベーン開度制限値	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	9.7	9.7	1.00	0.05	0.05	1.00
	-19.8	-18.1	0.91	-0.08	-0.08	1.00
	5.8	8.2	1.41	0.03	0.04	1.33
	-19.6	—	—	-0.04	—	—
	1.4	—	—	0.01	—	—
炉容器出口	-178.4	-176.1	0.99	-0.32	-0.32	1.00
IHX1次側入口	-178.2	-175.5	0.98	-0.31	-0.31	1.00
IHX1次側出口	10.6	10.7	1.01	0.07	0.07	1.00
	-21.5	-19.9	0.93	-0.09	-0.09	1.00
	7.1	9.4	1.32	0.04	0.04	1.00
	-20.3	—	—	-0.05	—	—
	2.0	—	—	0.01	—	—
IHX2次側入口	-16.2	-14.5	0.90	-0.10	-0.09	0.90
	32.5	38.1	1.17	0.15	0.15	1.00
	-26.1	-32.9	1.26	-0.06	-0.05	0.83
	12.7	10.9	0.86	0.07	0.06	0.86
IHX2次側出口	27.0	27.0	1.00	0.56	0.56	1.00
	-172.9	-169.4	0.98	-0.28	-0.28	1.00
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.4	19.4	1.00	0.11	0.11	1.00
	-161.4	-157.1	0.97	-0.19	-0.19	1.00
DHX出口	-26.3	-23.9	0.91	-0.77	-0.76	0.99
	54.4	52.9	0.97	0.29	0.28	0.97
	-40.0	-40.6	1.02	-0.09	-0.05	0.56
	33.4	32.4	0.97	0.22	0.22	1.00
	-42.6	-41.3	0.97	-0.20	-0.22	1.10

注) ⑬は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所で補正係数の算出に使用したものである。

添付資料1.6

各パラメータの ΔT 及び $\Delta T/t$ の補正係数一覧

添付表1.2 崩壊熱のパラメータ解析結果の比較

	ΔT (°C)			$\Delta T/t$ (°C/sec)		
	基本ケース	ケース⑧	⑧/基	基本ケース	ケース⑧	⑧/基
崩壊熱	最大	最小		最大	最小	
炉容器入口	5.2	5.4	1.04	0.03	0.03	1.00
	-17.5	-16.1	0.92	-0.07	-0.07	1.00
	6.6	8.7	1.32	0.04	0.04	1.00
	-20.0	-19.4	0.97	-0.04	-0.04	1.00
	1.6	2.0	1.25	0.01	0.01	1.00
炉容器出口	-178.8	-162.5	0.91	-0.31	-0.27	0.87
IHX1次側入口	-178.5	-162.1	0.91	-0.30	-0.26	0.87
IHX1次側出口	6.0	6.2	1.03	0.04	0.04	1.00
	-19.2	-17.8	0.93	-0.08	-0.08	1.00
	8.1	10.2	1.26	0.04	0.05	1.25
	-20.8	-20.2	0.97	-0.05	-0.04	0.80
	2.1	2.6	1.24	0.01	0.02	2.00
IHX2次側入口	-16.3	-16.2	0.99	-0.10	-0.10	1.00
	32.7	32.7	1.00	0.16	0.16	1.00
	-26.2	-26.1	1.00	-0.06	-0.05	0.83
	12.5	11.6	0.93	0.07	0.06	0.86
IHX2次側出口	26.3	26.3	1.00	0.55	0.55	1.00
	-172.5	-156.0	0.90	-0.26	-0.23	0.88
DHX入口	-1.9	-1.9	1.00	-0.01	-0.01	1.00
	19.2	19.4	1.01	0.11	0.11	1.00
	-161.3	-146.4	0.91	-0.18	-0.17	0.94
DHX出口	-26.4	-26.4	1.00	-0.77	-0.77	1.00
	54.5	54.5	1.00	0.29	0.29	1.00
	-39.9	-38.5	0.96	-0.09	-0.08	0.89
	32.9	28.0	0.85	0.22	0.18	0.82
	-42.3	-37.6	0.89	-0.20	-0.18	0.90

注) ⑧は、採用したパラメータ解析ケースより熱過渡上厳しい結果が得られた箇所
で補正係数の算出に使用したものである。

添付表1.8 パラメータ解析によるΔTの補正係数

パラメータ 部 位	スラム	崩壊熱	炉圧損	風量遅	ヒステリシス	回転数	開度	補正係数
	①/基	⑧/基	基/⑨	⑪/⑨	⑫/⑨	⑩/⑨	⑬/⑨	
炉容器入口	1.00	1.04	0.54	1.05	1.01	0.03	1.00	1.10
	0.99	0.92	0.88	0.94	0.91	1.83	0.91	1.83
	1.00	1.32	1.14	0.66	0.48	2.78	1.41	5.90
	1.01	0.97	1.02	0.96	—	0.95	—	1.03
	0.94	1.25	1.14	0.93	—	1.07	—	1.52
炉容器出口	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	1.01
IHX1次側入口	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	1.01	0.98	1.01
IHX1次側出口	1.00	1.03	0.57	1.04	1.01	0.14	1.01	1.09
	0.99	0.93	0.89	0.93	0.92	1.81	0.93	1.81
	1.00	1.26	1.14	0.70	0.55	2.65	1.32	5.02
	1.01	0.97	1.02	0.97	—	1.00	—	1.03
	1.05	1.24	1.05	1.00	—	1.30	—	1.78
IHX2次側入口	1.00	0.99	1.01	0.64	0.82	1.01	0.90	1.02
	1.01	1.00	1.01	0.82	0.80	0.99	1.17	1.19
	1.00	1.00	1.00	0.99	0.72	0.98	1.26	1.26
	1.00	0.93	0.98	1.01	0.13	0.85	0.86	1.01
IHX2次側出口	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	0.87	1.00	—
	1.00	0.90	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	—
DHX入口	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—
	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00	0.76	1.00	1.01
	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	—
DHX出口	1.00	1.00	1.00	0.67	0.84	1.00	0.91	—
	1.00	1.00	1.00	0.84	0.84	1.00	0.97	—
	1.00	0.96	1.00	1.00	0.73	0.95	1.02	1.02
	1.00	0.85	0.99	1.01	0.31	0.79	0.97	1.01
	1.00	0.89	0.99	1.01	0.30	0.87	0.97	1.01

注) 熱過渡上厳しくなるパラメータを用いることにしたが、各パラメータの代表ケースよりも一部熱過渡が厳しくなると判断された挙動()については、補正係数として熱過渡解析結果に乗じることとした。

添付表1.9 パラメータ解析によるΔT_tの補正係数

パラメータ 部 位	スラム	崩壊熱	炉圧損	風量遅	ヒステリシス	回転数	開度	補正係数
	①/基	⑧/基	基/⑨	⑪/⑨	⑫/⑨	⑩/⑨	⑬/⑨	
炉容器入口	1.00	1.00	0.60	1.00	1.00	0.20	1.00	—
	1.00	1.00	0.88	0.88	0.88	1.25	1.00	1.25
	1.00	1.00	1.33	0.67	0.67	2.00	1.33	3.54
	1.00	1.00	1.00	1.00	—	1.00	—	—
	1.00	1.00	1.00	1.00	—	1.00	—	—
炉容器出口	0.97	0.87	0.97	1.00	1.00	0.66	1.00	—
IHX1次側入口	0.97	0.87	0.97	1.00	1.00	0.68	1.00	—
IHX1次側出口	1.00	1.00	0.57	1.14	1.00	0.71	1.00	1.14
	1.00	1.00	0.89	0.89	0.89	1.89	1.00	1.89
	1.00	1.25	1.00	0.75	0.75	2.00	1.00	2.50
	1.00	0.80	1.00	1.00	—	0.80	—	—
	1.00	2.00	1.00	1.00	—	1.00	—	2.00
IHX2次側入口	1.00	1.00	1.00	0.60	0.80	1.00	0.90	—
	1.00	1.00	1.07	0.87	0.87	1.07	1.00	1.14
	1.00	0.83	1.00	1.00	0.83	0.83	0.83	—
	1.00	0.86	0.86	1.00	0.14	0.86	0.86	—
IHX2次側出口	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	—
	1.00	0.88	0.93	1.00	1.00	0.57	1.00	—
DHX入口	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	1.00	—
	1.00	0.94	0.95	1.00	1.00	0.68	1.00	—
DHX出口	1.00	1.00	1.00	0.40	0.99	1.00	0.99	—
	1.00	1.00	1.00	1.03	0.93	0.97	0.97	1.03
	1.00	0.89	1.00	0.89	0.89	1.00	0.56	—
	0.95	0.82	1.00	1.05	0.41	0.77	1.00	1.05
	1.00	0.90	1.00	1.00	0.45	0.90	1.10	1.10

注) 熱過渡が厳しくなるパラメータを用いることにしたが、各パラメータの代表ケースよりも一部熱過渡が厳しくなると判断された挙動()については、補正係数として熱過渡解析結果に乗じることとした。