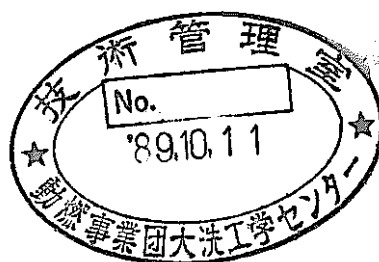


燃料性能試験基準化の為の計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1989年 3 月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
T	TJ9214 89-001
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

三菱原子力工業株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

燃料性能試験基準化の為の計算

館野 徹** 森井 正** 清野 俊***
多田尚子*** 千歳敬子**

要 旨

高速炉用燃料の高性能化、炉心設計の高度化を目的として、高速実験炉「常陽」による燃料性能実証試験の計画（試験用要素に封入されている試料の中心部を熔融させ、高速炉用燃料の高線出力密度化のためのデータを得る高線出力試験及び試験用要素の被覆管が開孔するまで照射し、高速炉用燃料の長寿命化のためのデータを得る高燃焼度試験）が動燃殿により進められている。本研究では、最初に高燃焼度試験の変更申請に必要な事故解析として試験ピンの開孔に「運転時の異常な過渡変化」6事象並びに「事故」8事象をそれぞれ重ね合わせた時の隣接予備試験用要素FPガスブランケティング解析を実施し、試料最高温度及び被覆管肉厚中心最高温度は、それぞれ健全性判断準である2630℃、890℃を下回っていることを確認した。さらに、試料片が集合体流路に放出され局所的に閉塞した時の安全評価を実施した。次に、現申請書添付試料十に記載の「事故」について、被ばく線量の評価を実施し、被ばく線量は十分小さい値に修まっていることを確認した。

* 本報告書は三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

** 三菱原子力工業株式会社 制御安全設計部

*** 三菱原子力工業株式会社 東海研究所

Analysis for High-Power and High-Burnup Capability Test of LMFBR fuel pins*

Tooru Tachino**, Tadashi Morii**, Shun Seino *** ,
Hisako Tada**** , Keiko Chitose**

Abstract

In the experimental fast reactor "JOYO", PNC (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) schedules two new tests programs in near future in order to verify high-power and high burn-up capability of LMFBR fuel pins : PTM (Power-to Melt) test and RTCB (Run-to-Cladding Breach) test. Firstly, in the present study, the temperature rises of the spare pin adjacent to the RTCB test pin due to FP gas blanketing have been calculated with superposition of the anticipated transients and accident of the plant. The calculated results have shown that the fuel center and cladding middle temperature of the spare pins are lower than the limited values (fuel : 2630 °C, cladding : 890°C). Secondary, the radiation dose to population due to the accidents described in the present application of license has been calculated to be sufficiently lower than the limited values.

* Work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

** Control & Safety Analysis Department, Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

*** Tokai Technical Institute, Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

燃料性能試験基準化の為の計算

目 次

要 旨	.....	(i)
Abstract	.....	(ii)
List of Tables	.....	(iv)
List of Figures	.....	(vi)
1. 序 論	.....	1
2. 高燃焼度試験用集合体の事故解析	.....	1
2.1 「運転時の異常な過渡変化」における試験用要素および予備試験用要素の 温度計算	.....	1
2.2 「事故」時における試験用要素および予備試験用要素の温度計算	.....	57
2.3 高燃焼度試験時の局所閉塞事象の計算	.....	122
3. 「事故」時の被ばく計算	.....	148
3.1 評価手法	.....	148
3.2 評価条件	.....	150
3.3 評価結果	.....	150
4. 結 論	.....	154
4.1 高燃焼度試験用集合体の事故解析	.....	154
4.2 「事故」時の被ばく計算	.....	155
5. 謝 辞	.....	156
6. 参考文献	.....	157
《添付資料A》 2次冷却材流量急上昇事故時の炉心入り口ナトリウム温度	.....	158

List of Tables

表 2.1 - 1	HARHO-INコード入力データ	9
表 2.1 - 2	高燃焼度試験用要素の軸方向出力分布	10
表 2.1 - 3	解析主要条件 (運転時の異常な過渡変化)	11
表 2.1 - 4	炉心流量変化 (1次冷却材流量減少)	12
表 2.1 - 5	炉心流量変化 (外部電源喪失)	13
表 2.1 - 6	炉心入口温度変化 (2次冷却材流量減少)	14
表 2.1 - 7	炉心入口温度変化 (主冷却器空気風量減少)	15
表 2.1 - 8	解析結果のまとめ (運転時の異常な過渡変化)	16
表 2.2 - 1	解析主要条件 (事故)	66
表 2.2 - 2	炉心入口温度変化 (1次冷却材流量急上昇事故)	67
表 2.2 - 3	炉心入口温度変化 (主冷却器風量急上昇事故)	68
表 2.2 - 4	炉心流量変化 (1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故)	69
表 2.2 - 5	炉心入口温度変化 (2次主冷却系循環ポンプ軸固着事故)	70
表 2.2 - 6	炉心入口温度変化 (主冷却器送風器軸固着事故)	71
表 2.2 - 7	炉心入口温度変化 (2次冷却材漏洩事故)	72
表 2.2 - 8	解析結果のまとめ (事故)	73
表 2.3 - 1	高燃焼度試験用集合体仕様	131
表 2.3 - 2	高燃焼度試験用要素の軸方向出力分布	133
表 2.3 - 3	閉塞時コンパートメント流量	134
表 2.3 - 4	閉塞時コンパートメント内試験用要素束圧力損失	134
表 2.3 - 5	閉塞時の冷却材最高温度	135
表 2.3 - 6	閉塞時の被覆管肉厚中心温度	135
表 2.3 - 7	閉塞時のコンパートメント内管最高温度	136
表 2.3 - 8	閉塞時の閉塞物中心温度	136
表 2.3 - 9	閉塞時の被覆管肉厚中心温度勾配	137
表 2.3 - 10	閉塞時のコンパートメント内管肉厚内温度勾配	137
表 2.3 - 11	閉塞時の被覆管肉厚内温度勾配による応力	138
表 2.3 - 12	閉塞時のコンパートメント内管肉厚内温度勾配による応力	138

表 2.3-13	閉塞時の被覆管軸方向温度勾配による応力	139
表 2.3-14	閉塞時のコンパートメント内管軸方向温度勾配による応力	140
表 3-1	よう素吸入による甲状腺（成人）組織線量当量換算係数	151
表 3-2	被ばく評価に用いる相対濃度（ X/Q ）および相対線量（ D/Q ）	151
表 3-3	事故時の大気放出量	152
表 3-4	r 線外部被ばくによる実効線量当量	152
表 3-5	甲状腺（小児）組織線量当量	153
表 3-6	実効線量当量	153

List of Figures

図2.1-1	高燃焼度試験用集合体軸方向出力分布	17
図2.1-2	高燃焼度試験用集合体内コンパートメント形状	18
図2.1-3	スクラム反応度曲線(1)ー原子炉スクラムー	19
図2.1-4	スクラム反応度曲線(2)ー制御棒一斉挿入：反応度挿入率一定ー	20
図2.1-5	スクラム反応度曲線(3)ー制御棒一斉挿入：制御棒挿入速度一定ー	20
図2.1-6	高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー原子炉出力及び炉心流量ー	21
図2.1-7	高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー反応度ー	22
図2.1-8	高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度ー	23
図2.1-9	高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度ー	24
図2.1-10	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴 〔事象：未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き〕	25
図2.1-11	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：26.38秒〕 〔事象：未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き〕	26
図2.1-12	高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー原子炉出力及び炉心流量ー	27
図2.1-13	高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー反応度ー	28
図2.1-14	高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度ー	29
図2.1-15	高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN) ー試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度ー	30
図2.1-16	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴 〔事象：出力運転中の制御棒の異常な引き抜き〕	31

図2.1-17	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：2.13秒〕	
	〔事象：出力運転中の制御棒の異常な引き抜き〕	32
図2.1-18	高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	33
図2.1-19	高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－反応度－	34
図2.1-20	高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	35
図2.1-21	高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	36
図2.1-22	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：1次冷却材流量減少〕	37
図2.1-23	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：0.6秒〕	
	〔事象：1次冷却材流量減少〕	38
図2.1-24	高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	39
図2.1-25	高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)	
	－反応度－	40
図2.1-26	高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	41
図2.1-27	高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	42
図2.1-28	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：外部電源喪失〕	43
図2.1-29	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：1.6秒〕	
	〔事象：外部電源喪失〕	44
図2.1-30	高燃焼度試験時、2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	45
図2.1-31	高燃焼度試験時、2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－反応度－	46

図2.1-32	高燃焼度試験時、2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	47
図2.1-33	高燃焼度試験時、2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	48
図2.1-34	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：2次冷却材流量減少〕	49
図2.1-35	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：0.2秒〕	
	〔事象：2次冷却材流量減少〕	50
図2.1-36	高燃焼度試験時、主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	51
図2.1-37	高燃焼度試験時、主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)	
	－反応度－	52
図2.1-38	高燃焼度試験時、主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	53
図2.1-39	高燃焼度試験時、主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	54
図2.1-40	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：主冷却器空気風量減少〕	55
図2.1-41	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：113秒〕	
	〔事象：主冷却器空気風量減少〕	56
図2.2-1	高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	74
図2.2-2	高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)	
	－反応度－	75
図2.2-3	高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	76
図2.2-4	高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	77
図2.2-5	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：燃料スランピング〕	78

図2.2-6	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：0.59秒〕	
	〔事象：燃料スランピング〕	79
図2.2-7	高燃焼度試験時、1次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－原子炉出力及び炉心流量－	80
図2.2-8	高燃焼度試験時、1次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－反応度－	81
図2.2-9	高燃焼度試験時、1次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	82
図2.2-10	高燃焼度試験時、1次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	83
図2.2-11	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：1次冷却材流量急上昇〕	84
図2.2-12	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：0.01秒〕	
	〔事象：1次冷却材流量急上昇〕	85
図2.2-13	高燃焼度試験時、2次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－原子炉出力及び炉心流量－	86
図2.2-14	高燃焼度試験時、2次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－反応度－	87
図2.2-15	高燃焼度試験時、2次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	88
図2.2-16	高燃焼度試験時、2次冷却材流量急上昇（HARHO-IN）	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	89
図2.2-17	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：2次冷却材流量急上昇〕	90
図2.2-18	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：43.5秒〕	
	〔事象：2次冷却材流量急上昇〕	91
図2.2-19	高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇（HARHO-IN）	
	－原子炉出力及び炉心流量－	92
図2.2-20	高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇（HARHO-IN）	
	－反応度－	93

図2.2-21	高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	94
図2.2-22	高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	95
図2.2-23	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：主冷却器風量急上昇〕	96
図2.2-24	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：208秒〕	
	〔事象：主冷却器風量急上昇〕	97
図2.2-25	高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	98
図2.2-26	高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－反応度－	99
図2.2-27	高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	100
図2.2-28	高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	101
図2.2-29	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：1次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕	102
図2.2-30	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：1.57秒〕	
	〔事象：1次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕	103
図2.2-31	高燃焼度試験時、2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－原子炉出力及び炉心流量－	104
図2.2-32	高燃焼度試験時、2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－反応度－	105
図2.2-33	高燃焼度試験時、2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	106
図2.2-34	高燃焼度試験時、2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	107
図2.2-35	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：2次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕	108

図2.2-36	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：1.36秒〕	
	〔事象：2次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕	109
図2.2-37	高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故（HARHO-IN）	
	－原子炉出力及び炉心流量－	110
図2.2-38	高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故（HARHO-IN）	
	－反応度－	111
図2.2-39	高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故（HARHO-IN）	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	112
図2.2-40	高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故（HARHO-IN）	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	113
図2.2-41	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：主冷却器送風器軸固着事故〕	114
図2.2-42	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：77秒〕	
	〔事象：主冷却器送風器軸固着事故〕	115
図2.2-43	高燃焼度試験時、2次冷却材漏洩事故（HARHO-IN）	
	－原子炉出力及び炉心流量－	116
図2.2-44	高燃焼度試験時、2次冷却材漏洩事故（HARHO-IN）	
	－反応度－	117
図2.2-45	高燃焼度試験時、2次冷却材漏洩事故（HARHO-IN）	
	－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－	118
図2.2-46	高燃焼度試験時、2次冷却材漏洩事故（HARHO-IN）	
	－試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－	119
図2.2-47	ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴	
	〔事象：2次冷却材漏洩事故〕	120
図2.2-48	周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：56.5秒〕	
	〔事象：2次冷却材漏洩事故〕	121
図2.3-1	解析対象コンパートメント横断面図	141
図2.3-2	冷却材熱流動計算用サブチャンネル分割（COBRA-IV-I）	142
図2.3-3	冷却材熱流動計算用中心チャンネル閉塞時体系（COBRA-IV-I）	142
図2.3-4	構造材温度計算領域（HEATING-3）	143

図2.3-5	構造材温度計算用中心チャンネル閉塞時モデル (HEATING-3)	144
図2.3-6	構造材温度計算用全チャンネル閉塞時モデル (HEATING-3)	145
図2.3-7	被覆管肉厚中心温度の軸方向分布	146
図2.3-8	冷却材温度と冷却材圧力の軸方向分布	147

1. 序 論

高速炉用燃料の高性能化、炉心設計の高度化を目的として、高速実験炉「常陽」による燃料性能実証試験の計画が動燃殿により進められている。具体的には、試験用要素に封入されている試料の中心部を溶融させ、高速炉用燃料の高線出力密度化のためのデータを得る高線出力試験、及び試験用要素の被覆管が開孔するまで照射し、高速炉用燃料の寿命化のためのデータを得る高燃焼度試験が計画されている。

前年度では¹⁾燃料性能実証試験用集合体の設計と変更申請に必要な許認可用の事故解析を実施した。本作業は、前年度の作業を踏まえて、特に高燃焼度試験の変更申請に必要な事故解析及び現設置許可申請書に記載されていない「事故」時の被ばく計算を行った。

第2章では、高燃焼度試験の事故解析として試験ピンの開孔に「運転時の異常な過渡変化」6事象並びに「事故」8事象をそれぞれ重ね合わせた時の隣接予備試験用要素のFPガスブラッキング解析を実施する。さらに、試験時になんなかの原因で試料片が集合体流路に放出され局所的に閉塞した時の安全評価を実施する。

第3章では、「事故」として想定される以下の事象について被ばく線量計算を実施する。

- (1) 原子炉停止中における1次冷却系破損事故
- (2) 原子炉サービス系の破損事故
- (3) 廃棄物処理設備の破損事故

2. 高燃焼度試験用集合体の事故解析

2.1 「運転時の異常な過渡変化」における試験用要素及び予備試験用要素の温度計算

「運転時の異常な過渡変化」による原子炉出力変化、試験用要素の各部（ペレット、被覆管）の温度及び冷却材ナトリウムの温度変化の経過は、HARHO-INコードを用いて解析する。その後、「もんじゅ」の冷却材流路閉塞事故解析で用いられたガスインピジメントモデルを用い、THERMOSTコードにより、予備試験用要素各部（ペレット、被覆管）の温度を計算する（FEM解析、非定常計算）。

THERMOSTコードの解析条件は前年度と同じである。即ち、ガス熱伝達係数は、 $1\text{ W/cm}^2\text{℃}$ 、被覆管ガス衝突角度 90℃ 、ガス放出位置は、炉心上部の被覆管温度が最も高くなる位置とし、ガス放出時間は80秒とする。HARHO-INコードの入力データについては表2.1-1にまとめる。

予備試験用要素の健全性判断基準は以下の通りである。

まず、被覆管は試験用要素の開孔によるガスインピジメントによっても、機械的に破損しないこと（被覆管肉厚中心温度は 890℃以下であること、参考までに炉心燃料は 810℃以下）、冷却材が沸騰しないこと（冷却材最高温度は 910℃以下であること）、試料の最高温度が熔融温度を下回ることである（ペレット最高温度は申請書記載の特殊燃料スペックであるところの2680℃以下であること）。

次に、試験用要素に関しては、試料の最高温度が熔融温度を下回ることを確認する。

（ペレット最高温度は2620℃以下であること、参考までに炉心燃料は2650℃以下）

2.1.1 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き

(1) 解析条件

主な条件を、表 2.1－3 にまとめる。

- (a) 原子炉の初期出力は、1.0Wとし、また、反応度付加率は制御棒の配列及び位置を考慮に入れて最大と計算される値約 $4\ \phi/s$ とする。さらに、試料ペレット冷却材等の初期温度は、運転方式から考えて最も余裕の少ない温度 370℃ とする。
- (b) 原子炉は、起動領域及び中間領域における「中性子束高」及び「炉周期短」によるスクラムを無視して、出力領域における「中性子束高」（定格値の107%）によりスクラムするものとし、その遅れ時間を 200ms とする。
- (c) スクラム時にそう入される反応度値は、最大の反応度値を有する制御棒 1 本が全引き抜き位置に固着してそう入されない場合のものとする。
- (d) 1 次冷却材流量及び 2 次冷却材流量は、定格流量とする。
- (e) 燃料集合体出力が最大となる炉心中心の炉心燃料集合体の軸方向出力分布は、制御棒の配置による歪みが微小であるので、これを出力ピーキング係数に含めるものとする。
- (f) ペレット－被覆管間隙のギャップ熱伝達率は、定格運転時よりも小さい値 500Btu/h·ft²°F とする。
- (g) 反応度係数は、ドップラー定数、構造材膨張係数及び冷却材膨張係数を考慮し、原子炉出力のピーク値が最大となるよう、それぞれの最大値（絶対値が最少の負の値）とする。
- (h) 試験用要素のギャップ熱伝達率は、1000Btu/h·ft²°F とする。

(2) 解析結果

図2.1-6に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-7に反応度、図2.1-8、図2.1-9に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-10に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.1-11に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

原子炉出力（中性子束）は約26秒後にスクラム設定点（107%）に達し、その最高（ピーク出力）は、約 311MWに達する。その後、原子炉出力は原子炉停止により急激に低下する。事象が収束するまでの放出エネルギー量は、約178MWsである。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。（予備試験用要素の、冷却材温度はHARHO-INの結果である。以下同様）予備試験用要素のペレット最高温度は1318℃、被覆管最高温度は 628℃、冷却材最高温度は 519℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しており、この過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は1303℃で、これは溶融温度を下回っている。

2.1.2 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

(1) 解析条件

主な条件を、表2.1-3にまとめる。

- (a) 原子炉は、定格で運転されているものとする。
- (b) 反応度付加率は、制御棒の配列及び位置を考慮に入れて最大と計算される値約 $4\ \text{¢}/\text{s}$ とする。
- (c) 原子炉は、出力領域の「中性子束高」（定格値の107%）によりすくれむするものとし、その遅れ時間を 200msとする。
- (d) スクラム時にそう入される反応度値は、最大の反応度値を有する制御棒1本が全引き抜き位置に固着してそう入されない場合のものとする。
- (e) 反応度係数は、ドップラー定数、構造材膨張係数及び冷却材膨張係数を考慮し原子炉出力のピーク値が最大となるよう、それぞれの最大値（絶対値が最少

の負の値) とする。

(2) 解析結果

図2.1-12に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-13に反応度、図2.1-14、図2.1-15に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-16に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.1-17に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

原子炉出力の上昇は極めて緩慢であり、約2秒後のスクラム設定点(107%)に達し、その後のオーバーシュートも殆どない。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2532℃、被覆管最高温度は783℃、冷却材最高温度は656℃でありそれらはすべて健全性判断基準を満足しており、この過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。また、試験用要素のペレット最高温度は2510℃で、これは熔融温度を下回っている。

2.1.3 1次冷却材流量減少

(1) 解析条件

主な条件を、表2.1-3にまとめる。

- (a) 原子炉は、定格で運転されているものとする。
- (b) 1次冷却材流量が減少する場合として、1次主冷却系循環ポンプ2台だトリップするものとする。
- (c) 原子炉は「1次主冷却系循環ポンプトリップ」により自動停止し、その遅れは0.2秒とする。
- (d) 過渡期における原子炉出力を最大に評価するために、反応度係数としては被覆管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数は最大値(絶対値が最小の負の値)を、また、ドップラー定数及び燃料軸方向膨張係数は最小値(絶対値が最大の負の値)を用いる。

(2) 解析結果

図2.1-18に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-19に反応度、図2.1-20、

図2.1-21に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-22に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管内厚中心温度時刻歴を、図2.1-23に被覆管内厚中心温度の周方向分布を示す。

1回路のポンプトリップ事象により、炉心流量は約6秒後に定格の50%まで減少する。出力は約2秒後に定格の10%まで減少し、その後緩やかに減少し続け、200秒の時点では定格の3%となる。各部の温度はスクラムにより一旦低下するがその後流量の減少速度が出力の減少速度を上回るため、約100秒で2次ピークをむかえることになる。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は732℃、冷却材最高温度は658℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度であり、これは溶融温度を下回っている。

2.1.4 外部電源喪失

(1) 解析条件

主な条件を、表2.1-3にまとめる。

- (a) 外部電源喪失により原子炉はスクラムされ、その遅れは1.2秒とする。
- (b) 1次系の流量は時定数にして10秒で減少し、ポンプの羽根車の慣性による寄与が期待できなくなった後は、既にボニーモータが駆動しているので5%の流量を保持できると仮定する。
- (c) 原子炉は電源喪失により自動停止し、その遅れは1.2秒とする。
- (d) 過渡期における原子炉出力を最大に評価するために、反応度係数としては被覆管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数は最大値（絶対値が最小の負の値）を、また、ドップラー定数及び燃料軸方向膨張係数は最小値（絶対値が最大の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図2.1-24に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-25に反応度、図2.1-26、図2.1-27に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-28に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.1-29に被覆管肉厚中心温度の周方向分布をしめす。

外部電源喪失事象により、炉心流量は約6秒後に定格の50%まで減少する。出力は約3秒後に定格の10%まで減少し、その後緩やかに減少し続け200秒の時点では定格の3%となる。各部の温度はスクラムにより一旦低下するが、その後流量の減少速度が出力の減少速度を上回るため、約100秒で2次ピークをむかえることになる。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は756℃、冷却材最高温度は689℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度であり、これは熔融温度を下回っている。

2.1.5 2次冷却材流量減少

(1) 解析条件

主な条件を、表2.1-3にまとめる。

- (a) 原子炉は、定格で運転されているものとする。
- (b) 2次冷却材流量が減少する場合として、2次主冷却材循環ポンプ1台がトリップするものとする。
- (c) 原子炉は「2次主冷却系循環ポンプトリップ」の信号により制御棒一斉そう入動作が行われ、その遅れは0.2秒とする。
- (d) 反応度係数は原子炉出力を最大に評価するよう各反応度係数の最小値（絶対値が最大の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図2.1-30に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-31に反応度、図2.1-32、図2.1-33に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-34に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.1-35に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

冷却回路2系統中、1系統の2次冷却回路の冷却材流量が失われると、その系統の1次冷却材は中間熱交換器で十分に冷却されず、原子炉へもどることになる。これにより炉心入口冷却材温度は約50℃上昇する。しかし、原子炉は「2次主冷却系循環ポンプトリップ」により制御棒が一斉そう入されるので、出力及び試験用要素のペレット温度及び冷却材温度等、いずれも初期温度以上にはならない。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度2501℃、被覆管最高温度は727℃、冷却材最高温度は初期温度であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しており、この過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度であり、これは溶融温度を下回っている。

2.1.6 主冷却器空気風量減少

(1) 解析条件

主な条件を、表2.1-3にまとめる。

- (a) 原子炉は出力100%、各系の流量は定格の100%とする。
- (b) 主冷却器空気流量が減少する場合として、送風器がトリップするものとする。
- (c) 原子炉は「原子炉入口冷却材温度高」により制御棒一斉そう入動作が行われその遅れは10秒とする。
- (d) 原子炉出力を最大に評価するために、反応度係数としては、被覆管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数は最大値（絶対値が最大の負の値）を、またドップラー定数及び燃料軸方向膨張係数は最小値（絶対値が最大の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図2.1-36に原子炉出力及び炉心流量、図2.1-37に反応度、図2.1-38、図2.1-39に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.1-40に、ガスインピンジメントモデルを用いた場合の予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.1-41に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

空気流量の低下により、2次冷却材の温度が上昇し、中間熱交換器を介して1次冷却材温度が上昇する。原子炉出力は、主に冷却材膨張効果による負の反応度のため、ごくわずかづつ減少し、120秒後に「原子炉入口冷却材温度高」による制御棒一斉そう入のため急減する。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.1-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は729℃、冷却材最高温度は652℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの過渡変化においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度であり、これは溶融温度を下回っている。

表2.1-1 HARHO-IN コード入力データ

軸方向同出力分布	表2.1-2, 図2.1-1
最大線出力	4 0 0 (W/cm) *2)
ギャップ熱伝達率	1 0 0 0 (Btu/h-ft ^{2.0} ・°F) *2)
組織変化	表2.1-3 *1)
流路断面積	0. 4 3 9 (cm ²) *1)
等価流力直径 (注1)	0. 7 5 6 (cm)
被覆管外径	6. 5 (mm) *1)
被覆管内径	5. 5 6 (mm) *1)
ペレット直径	5. 4 (mm) *1)
ペレット密度	8 5 %TD *1)
O/M比	1. 9 7 *1)
試料長さ	5 5 0 (mm) *1)
冷却材流速 (注2)	1 4 1 (cm/sec)
燃料熱伝導等修正係数 (注2)	0. 7 1 7 9

(注1) 等価流力直径 = $4 * (\text{流路断面積}) / (\text{ぬれぶち長さ})$ (図2.1-2)

ぬれぶち長さ = (試料ピン周) + (中心ロッド周) * (1/5)

よって

等価流力直径 = $4 * 0.439 / (\pi * 0.65 + \pi * 0.446 * 0.2)$
= 0.756

(注2) HARHO-INコードの定常計算結果を下記の設計値に合わせるために任意に操作する量

試料ペレット中心最高温度 2,480 °C

被覆管肉厚中心最高温度 675 °C (表2.1-2)

添付資料A高燃焼度試験用要素のペレット最高温度の初期条件に詳述する。

表2.1-2 高燃焼度試験用要素の軸方向出力分布

	高さ*[cm]	出力**[-]	被覆管温度 [℃]
1	0.00000E+00	4.90000E-02	3.73000E+02
2	1.20000E+00	5.70000E-02	3.74000E+02
3	1.20000E+00	5.99000E-01	3.97000E+02
4	4.62000E+00	6.57000E-01	4.13000E+02
5	8.06000E+00	7.41000E-01	4.30000E+02
6	1.15000E+01	8.22000E-01	4.49000E+02
7	1.49400E+01	8.93000E-01	4.68000E+02
8	1.83800E+01	9.31000E-01	4.88000E+02
9	2.18200E+01	9.72000E-01	5.10000E+02
10	2.52500E+01	9.96000E-01	5.31000E+02
11	2.87000E+01	1.00000E+00	5.52000E+02
12	3.21300E+01	9.91000E-01	5.73000E+02
13	3.55700E+01	9.69000E-01	5.91000E+02
14	3.90000E+01	9.28000E-01	6.09000E+02
15	4.24500E+01	8.71000E-01	6.26000E+02
16	4.58900E+01	8.16000E-01	6.41000E+02
17	4.93300E+01	7.32000E-01	6.54000E+02
18	5.27700E+01	6.41000E-01	6.65000E+02
19	5.62000E+01	5.54000E-01	6.75000E+02
20	5.62000E+01	5.60000E-02	6.56000E+02
21	5.74000E+01	4.90000E-02	6.56000E+02

* 下部インシュレータよりの高さ

**最大値に対する相対値

表 2.1 - 3 解析主要条件 (運転時の異常な過渡変化)

解析条件 \ 解析事象		未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き	出力運転中の制御棒の異常な引き抜き	1 次冷却材流量減少	外部電源喪失	2 次冷却材流量減少	主冷却器空気風量減少
初期運転状態		1.0 W	定格	定格	定格	定格	定格
反応度係数	ドップラー	最大 -0.30×10^{-3}	最大 -0.30×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}
	冷却材	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}
	構造材	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}
	燃料			最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}
	被覆管	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}
	炉心支持板						
原子炉トリップ	スクラム信号	中性子束高 107%	中性子束高 107%	1 次主冷却系循環ポンプトリップ	外部電源喪失	2 次主冷却系循環ポンプトリップ	冷却材入口温度高 385℃
	スクラム方法	図 2.1 - 3	図 2.1 - 3	図 2.1 - 3	図 2.1 - 3	図 2.1 - 4	図 2.1 - 5
	スクラム時刻 (秒) *1	26.1	1.8	0.2	1.2	0.2	120.0
挿入反応度		約 4¢/S	約 4¢/S				
解析時間		30 秒	5 秒	200 秒	200 秒	200 秒	300 秒
ギャップコンダクタンス		500 Btu/h.ft ² .°F	1000 Btu/h.ft ² .°F	1000 Btu/h.ft ² .°F	1000 Btu/h.ft ² .°F	1000 Btu/h.ft ² .°F	1000 Btu/h.ft ² .°F
炉心流量		一定	一定	表 2.1 - 4	表 2.1 - 5	一定	一定
炉心入口温度		一定	一定	一定	一定	表 2.1 - 6	表 2.1 - 7
炉心各部温度		370℃	定格	定格	定格	定格	定格
THERMOST 解析条件	ガス温度	炉心部上端での Na 温度 時間に関して一定	←	炉心部上端での Na 温度 HARHO-IN の結果	←	←	←
	Na 温度	時間に関して一定	←	HARHO-IN の結果	←	←	←
	Na レイノルズ数	一定	←	Na 流速の関数	←	←	←
	ペレット発熱量	HARHO-IN の結果	←	←	←	←	←

*1 検出器おくれを含む時刻

表2.1-4 炉心流量变化 (1次冷却材流量减少)

時刻 (sec)	流 量 比	時刻 (sec)	流 量 比
0. 0	1. 000 0	30. 0	0. 168 0
0. 2	0. 994 1	35. 0	0. 147 1
0. 6	0. 953 2	40. 0	0. 127 8
0. 8	0. 929 1	45. 0	0. 109 7
1. 0	0. 905 1	50. 0	0. 099 57
1. 4	0. 859 1	55. 0	0. 089 72
1. 8	0. 816 1	60. 0	0. 080 43
2. 0	0. 795 9	65. 0	0. 070 20
2. 4	0. 757 4	70. 0	0. 064 26
2. 8	0. 721 5	75. 0	0. 059 62
3. 0	0. 704 5	80. 0	0. 056 59
4. 0	0. 627 9	84. 0	0. 054 48
5. 0	0. 563 1	90. 0	0. 052 98
6. 0	0. 516 5	100. 0	0. 051 79
7. 0	0. 469 2	150. 0	0. 051 59
8. 0	0. 428 5	200. 0	0. 051 39
9. 0	0. 393 1	300. 0	0. 051 00
10. 0	0. 362 3	420. 0	0. 051 00
11. 0	0. 335 2		
12. 0	0. 311 4		
16. 0	0. 257 3		
20. 0	0. 220 0		
25. 0	0. 192 1		

表2.1-5 炉心流量变化 (外部电源丧失)

時 刻 (s e c)	流 量 比	時 刻 (s e c)	流 量 比
0. 0	1. 0 0 0	3 0. 0	0. 1 6 8 0
0. 2	0. 9 9 4 1	3 5. 0	0. 1 4 7 1
0. 6	0. 9 5 3 2	4 0. 0	0. 1 2 7 8
0. 8	0. 9 2 9 1	4 5. 0	0. 1 0 9 7
1. 0	0. 9 0 5 1	5 0. 0	0. 0 9 9 5 7
1. 4	0. 8 5 9 1	5 5. 0	0. 0 8 9 7 2
1. 8	0. 8 1 6 1	6 0. 0	0. 0 8 0 4 3
2. 0	0. 7 9 5 9	6 5. 0	0. 0 7 0 2 0
2. 4	0. 7 5 7 4	7 0. 0	0. 0 6 4 2 6
2. 8	0. 7 2 1 5	7 5. 0	0. 0 5 9 6 2
3. 0	0. 7 0 4 5	8 0. 0	0. 0 5 6 5 9
4. 0	0. 6 2 7 9	8 4. 0	0. 0 5 4 4 8
5. 0	0. 5 6 3 1	9 0. 0	0. 0 5 2 9 8
6. 0	0. 5 1 6 5	1 0 0. 0	0. 0 5 1 7 9
7. 0	0. 4 6 9 2	1 5 0. 0	0. 0 5 1 5 9
8. 0	0. 4 2 8 5	2 0 0. 0	0. 0 5 1 3 9
9. 0	0. 3 9 3 1	3 0 0. 0	0. 0 5 1 0 0
1 0. 0	0. 3 6 2 3	4 2 0. 0	0. 0 5 1 0 0
1 1. 0	0. 3 3 5 2		
1 2. 0	0. 3 1 1 4		
1 6. 0	0. 2 5 7 3		
2 0. 0	0. 2 2 0 0		
2 5. 0	0. 1 9 2 1		

表2.1-6 炉心入口温度变化 (2次冷却材流量减少)

時刻 (sec)	温度 (℃)	時刻 (sec)	温度 (℃)
0.000	370.00	470.00	358.13
10.000	370.00	480.00	358.62
20.000	370.06	490.00	359.00
30.000	371.05	500.00	359.18
40.000	375.66	510.00	359.14
50.000	384.64	520.00	358.89
60.000	395.08	530.00	358.50
70.000	403.98	540.00	358.01
80.000	409.95	550.00	357.49
90.000	412.56	560.00	356.98
100.00	411.89	570.00	356.53
110.00	408.58	580.00	356.13
120.00	403.66	590.00	355.79
130.00	398.24	600.00	355.49
140.00	393.22		
150.00	389.16		
160.00	386.27		
170.00	384.48		
180.00	383.49		
190.00	382.91		
200.00	382.35		
210.00	381.44		
220.00	379.96		
230.00	377.87		
240.00	375.29		
250.00	372.49		
260.00	369.78		
270.00	367.50		
280.00	365.84		
290.00	364.90		
300.00	364.61		
310.00	364.78		
320.00	365.19		
330.00	365.58		
340.00	365.76		
350.00	365.59		
360.00	365.01		
370.00	364.06		
380.00	362.80		
390.00	361.39		
400.00	359.97		
410.00	358.72		
420.00	357.77		
430.00	357.20		
440.00	357.04		
450.00	357.21		
460.00	357.61		

表2.1-7 炉心入口温度変化 (主冷却器空気風量減少)

(炉上部プレナム瞬時混合モデル)

時 刻 (s e c)	温 度 (℃)	時 刻 (s e c)	温 度 (℃)
0. 000	370. 00	460. 00	359. 61
10. 000	370. 00	470. 00	358. 96
20. 000	370. 18	480. 00	358. 20
30. 000	370. 65	490. 00	357. 38
40. 000	371. 07	500. 00	356. 55
50. 000	371. 33	510. 00	355. 79
60. 000	371. 47	520. 00	355. 15
70. 000	371. 54	530. 00	354. 63
80. 000	371. 60	540. 00	354. 20
90. 000	371. 71	550. 00	353. 38
100. 00	371. 98	560. 00	353. 44
110. 00	372. 54	570. 00	352. 98
120. 00	373. 49	580. 00	352. 41
130. 00	374. 91	590. 00	351. 73
140. 00	376. 79	600. 00	350. 95
150. 00	379. 07		
160. 00	381. 67		
170. 00	384. 44		
180. 00	387. 23		
190. 00	389. 80		
200. 00	391. 93		
210. 00	393. 42		
220. 00	394. 18		
230. 00	394. 26		
240. 00	393. 81		
250. 00	392. 99		
260. 00	392. 00		
270. 00	391. 03		
280. 00	390. 16		
290. 00	389. 40		
300. 00	388. 63		
310. 00	387. 66		
320. 00	386. 29		
330. 00	384. 38		
340. 00	381. 90		
350. 00	378. 93		
360. 00	375. 67		
370. 00	372. 38		
380. 00	369. 31		
390. 00	366. 67		
400. 00	364. 58		
410. 00	363. 04		
420. 00	361. 97		
430. 00	361. 23		
440. 00	360. 67		
450. 00	360. 16		

表 2.1 - 8 解析結果のまとめ（運転時の異常な過渡変化）

ケースI.D.	事 象 名	スクラム時刻 〔検出器 おくれを 含む (sec)〕	炉心燃料温度（℃）			予備試験用要素温度（℃）		
			ペレット	被覆管	冷却材	ペレット	被覆管	冷却材*1
1	未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き	26.1	1681／ 370	529／ 370	521／ 370	1318／ 370	628／ 370	519／ 370
2	出力運転中の制御棒の異常な引抜き	1.8	2543／2500	659／ 650	643／ 635	2532／2490	783／ 675	656／ 650
3	1次冷却材流量減少 （1次ピーク）	0.2	なし*2	658／ 650	644／ 635	2501／2490	732／ 675	658／ 650
	1次冷却材流量減少 （2次ピーク）		582	551	551	584	560	560
4	外部電源喪失 （1次ピーク）	1.2	2500／2500	689／ 650	676／ 635	2501／2490	756／ 675	689／ 650
	外部電源喪失 （2次ピーク）		582	551	551	593	560	560
5	2次冷却材流量減少	0.2	なし*2	なし*2	なし*2	2501／2490	7271／ 675	なし*2
6	主冷却器空気流量減	120.0	なし*2	652／ 650	637／ 635	2501／2490	729／ 675	652／ 650

*1 HARHO-INによる結果を記載してある。

*2 初期温度以上にならない。

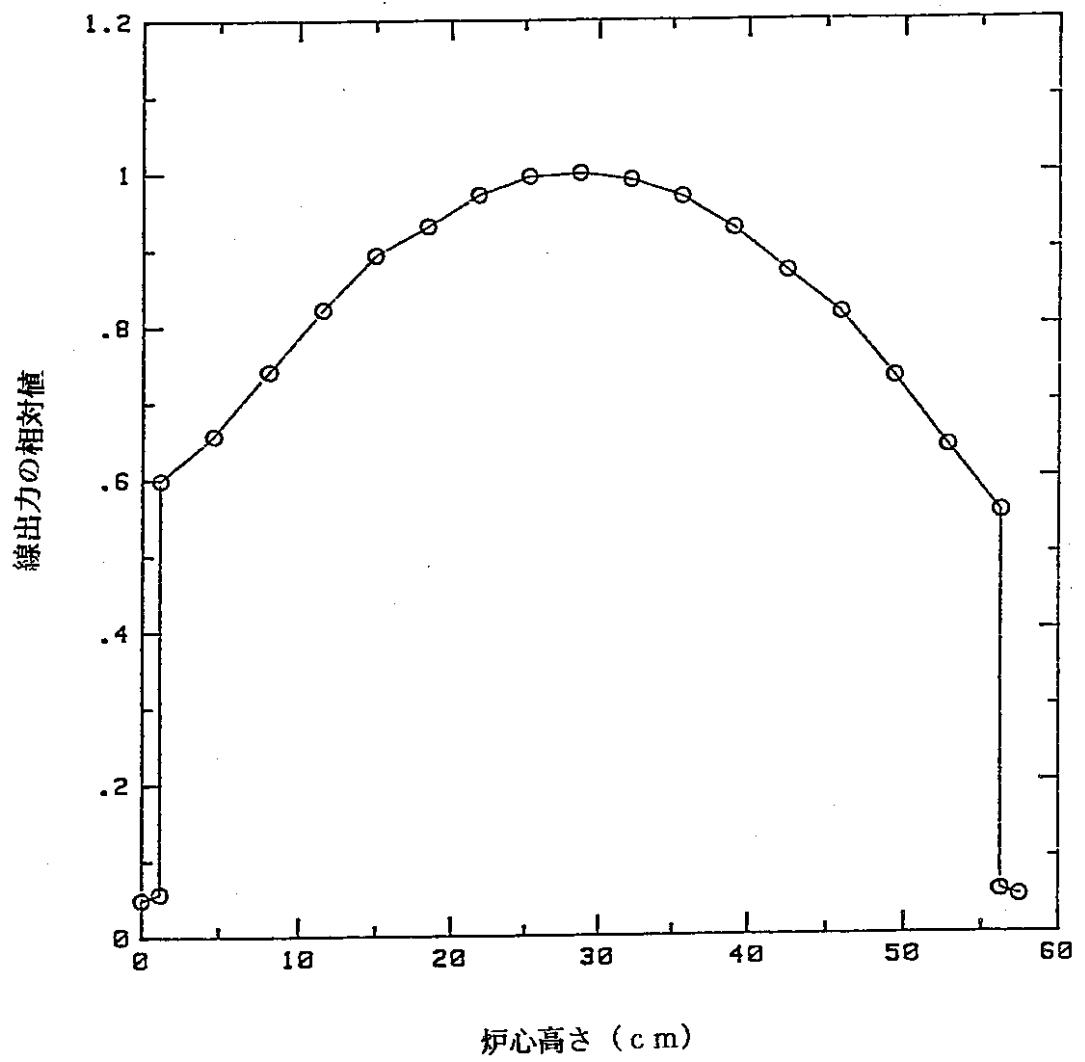


図2.1-1 高燃焼度試験用集合体軸方向出力分布

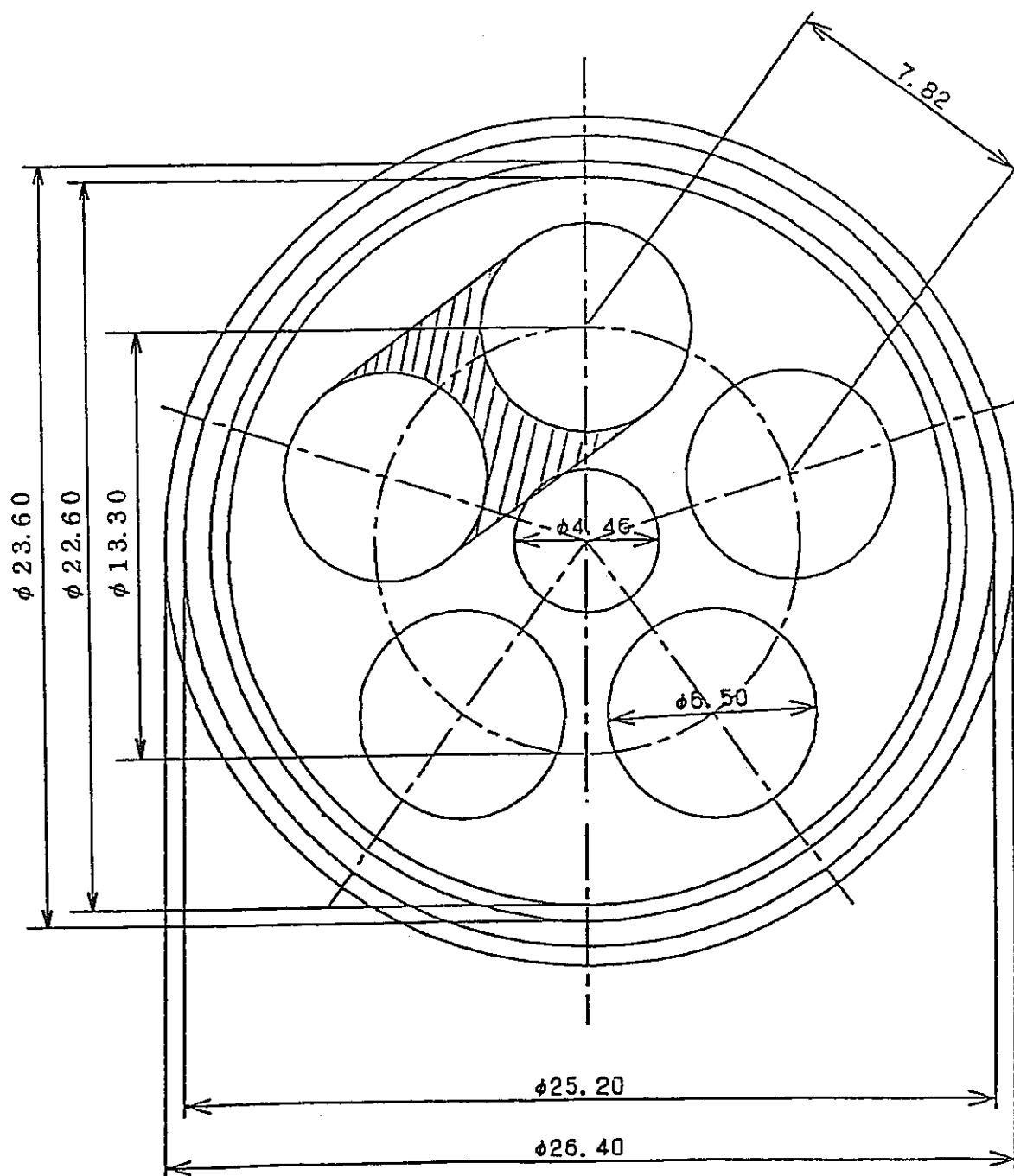


図2.1-2 高燃焼度試験用集合体内コンパートメント形状

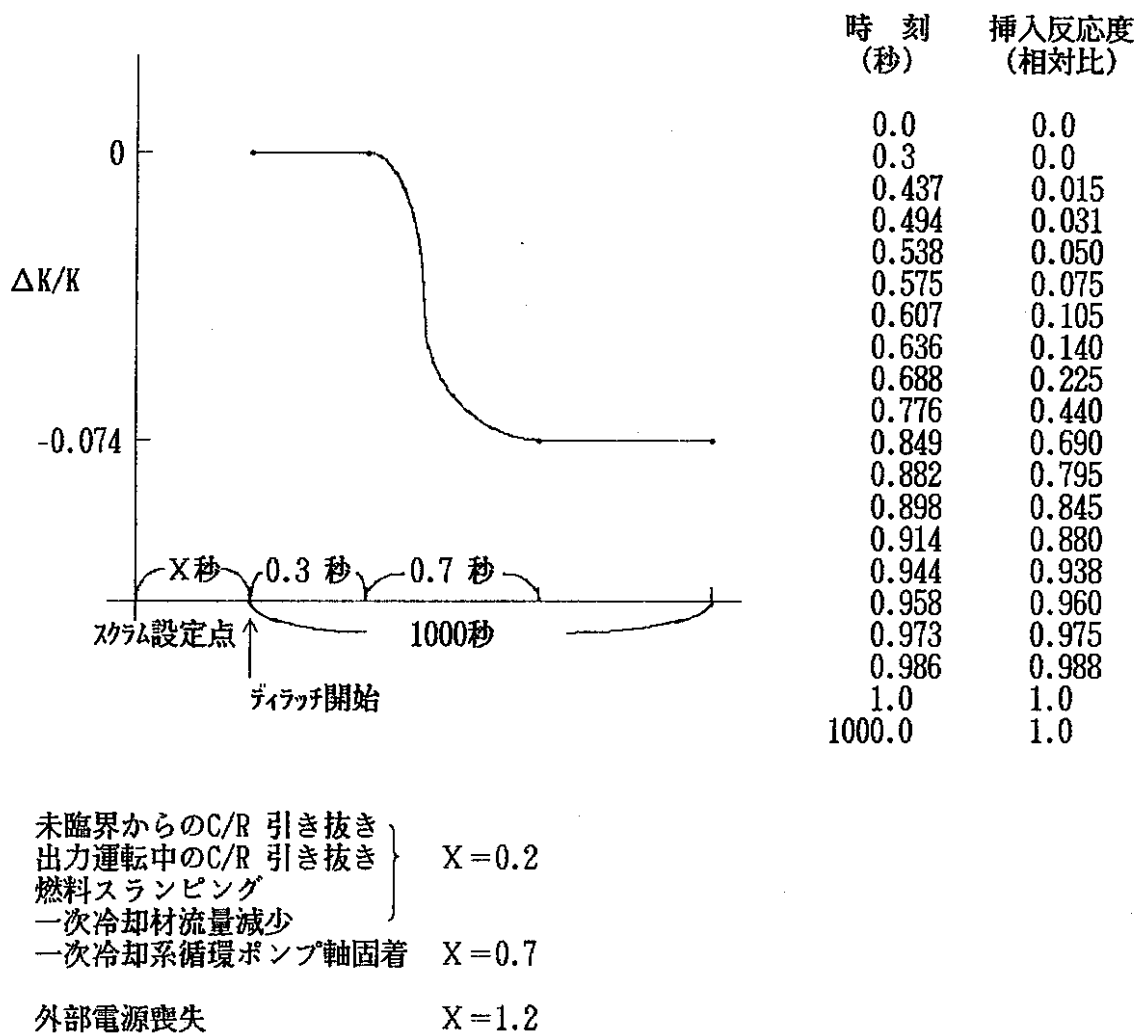


図2.1-3 スクラム反応度曲線(1) — 原子炉スクラム —

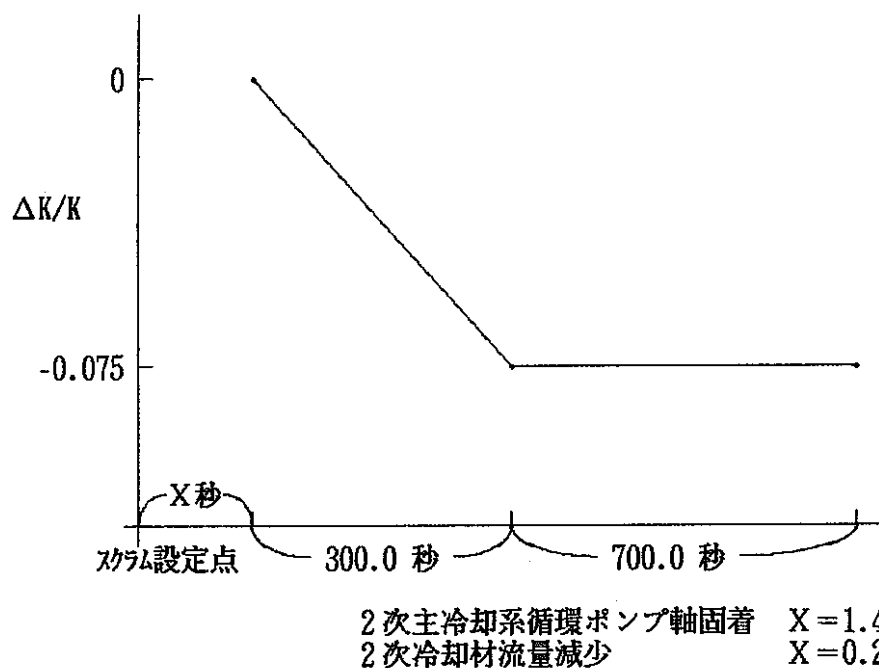


図2.1-4 スクラム反応度曲線(2) — 制御棒一斉挿入：反応度挿入率一定

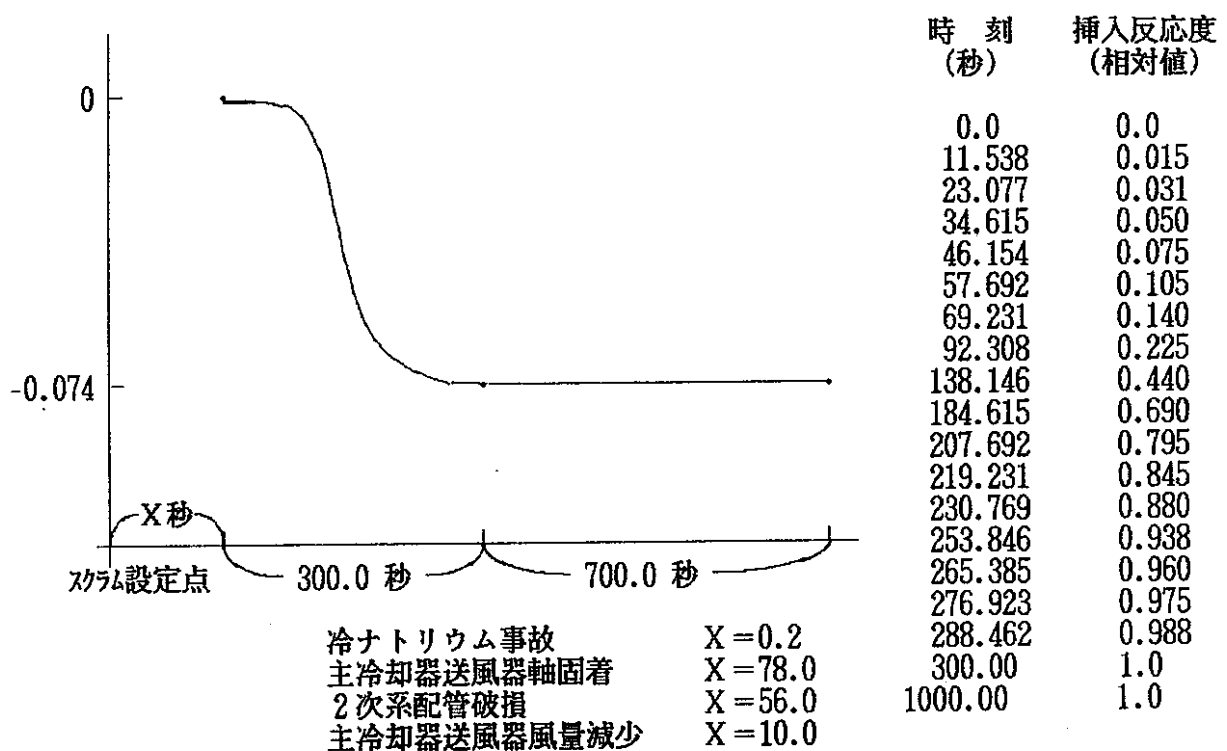


図2.1-5 スクラム反応度曲線(3) — 制御棒一斉挿入：制御棒挿入速度一定

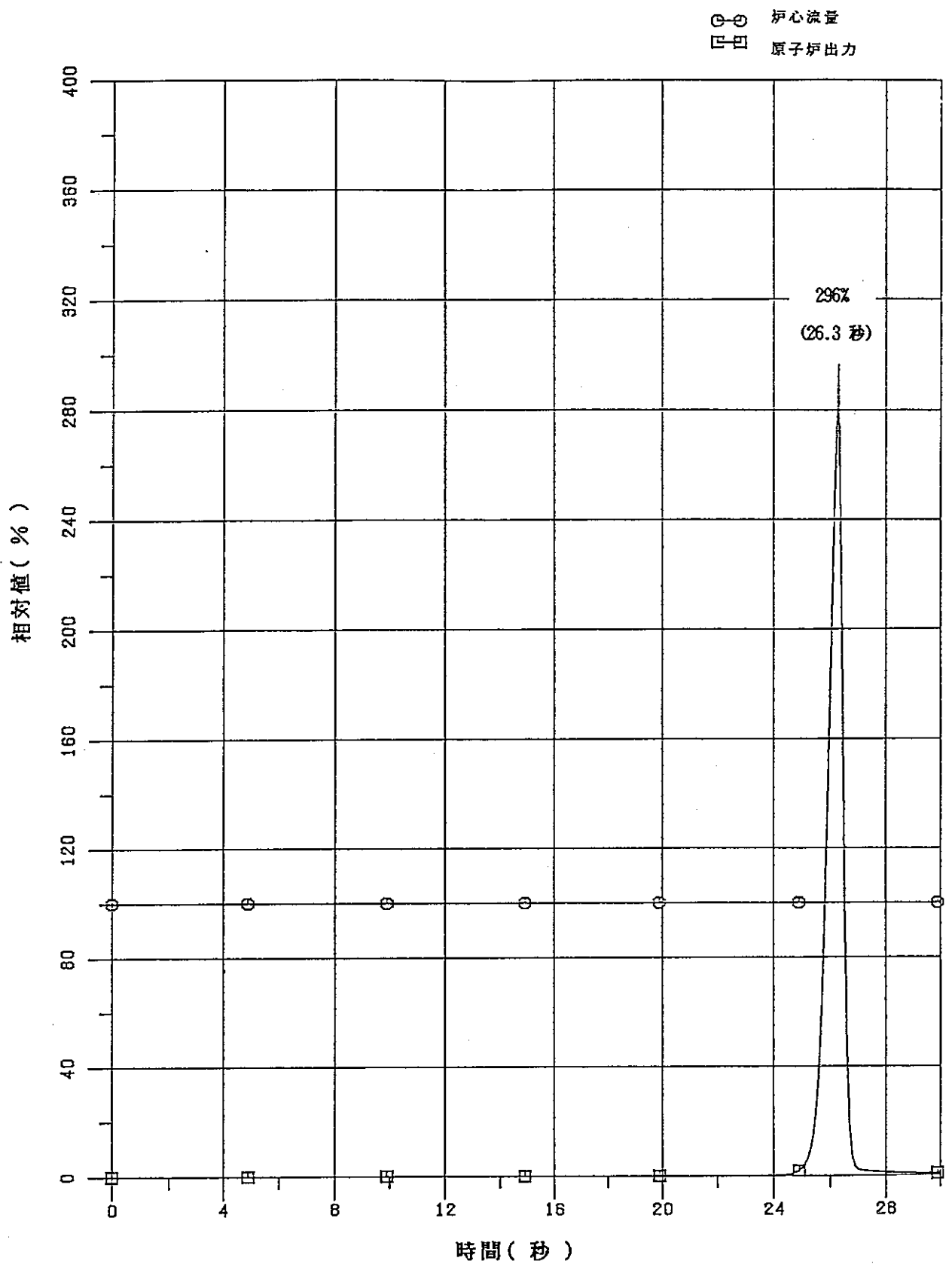


図2.1-6 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

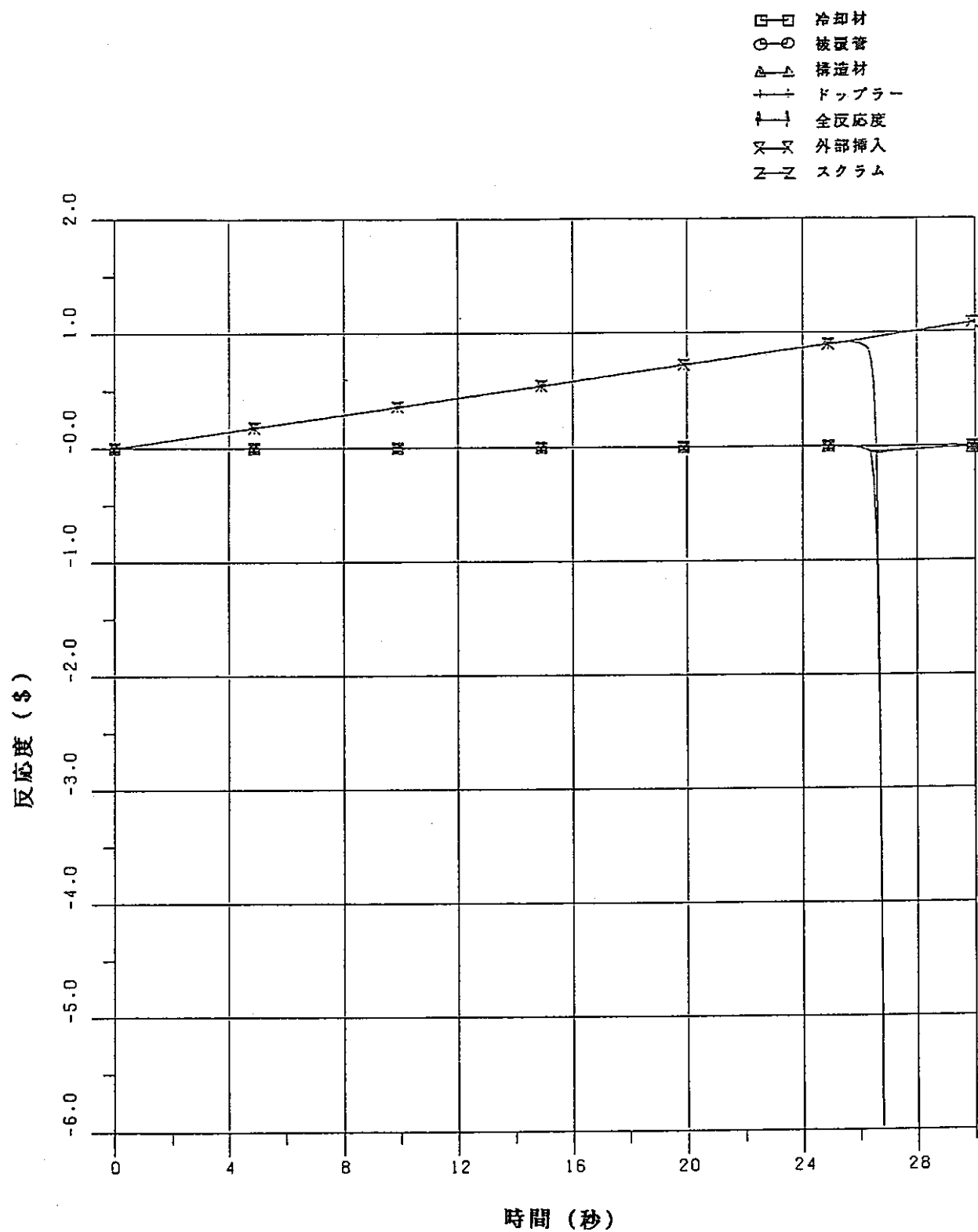


図2.1-7 高燃焼度試験時，未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—反応度—

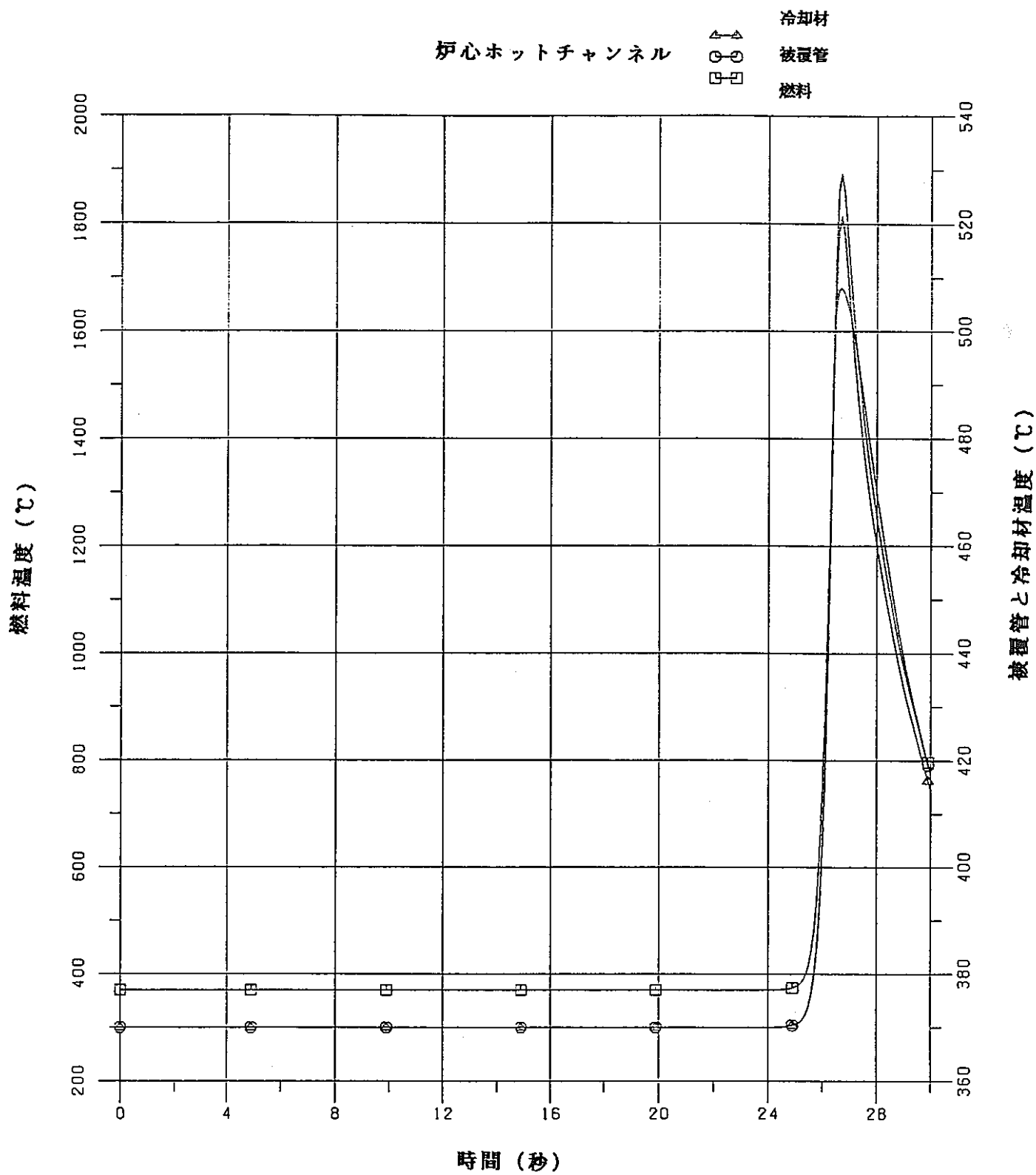


図2.1-8 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

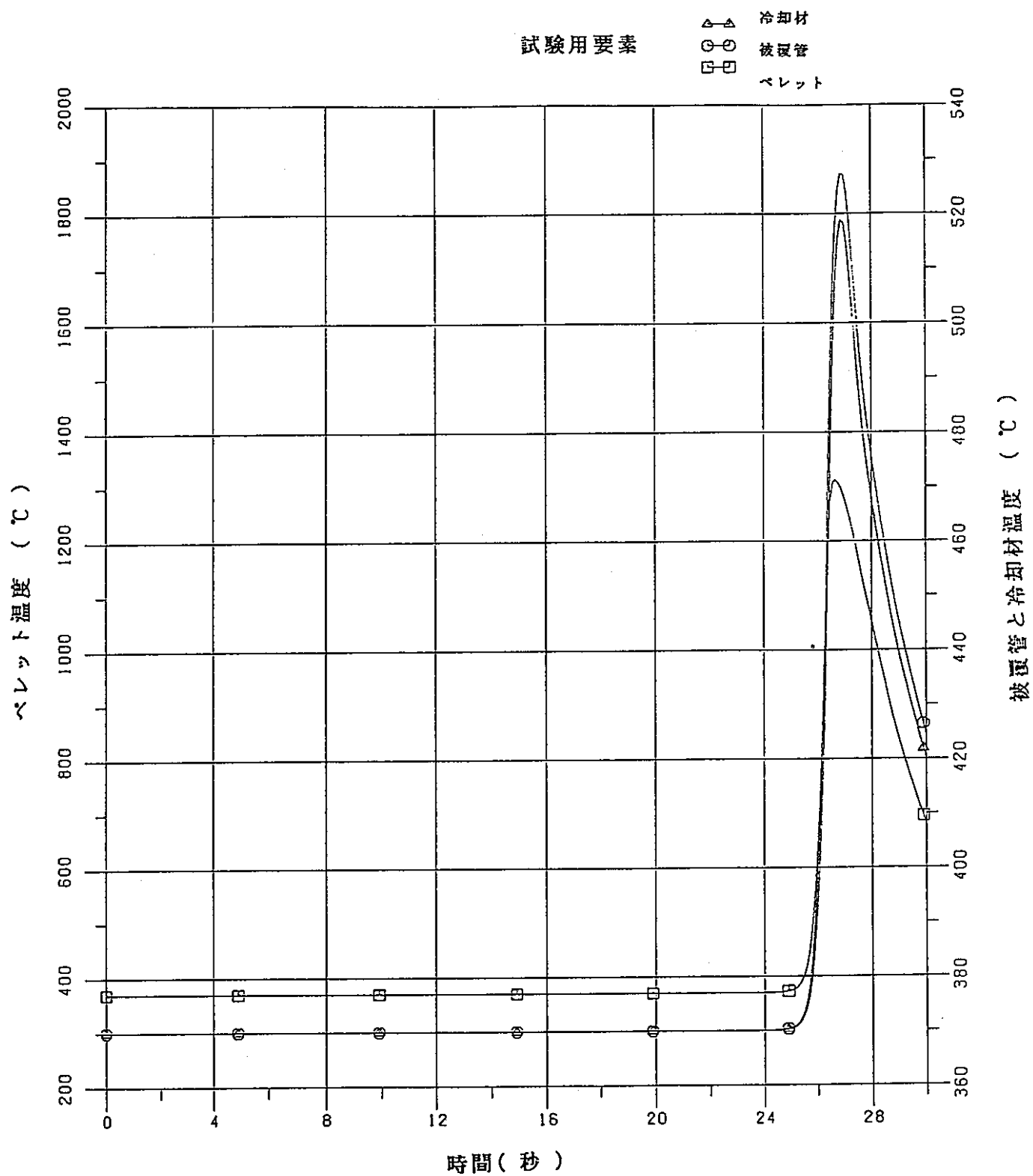


図2.1-9 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

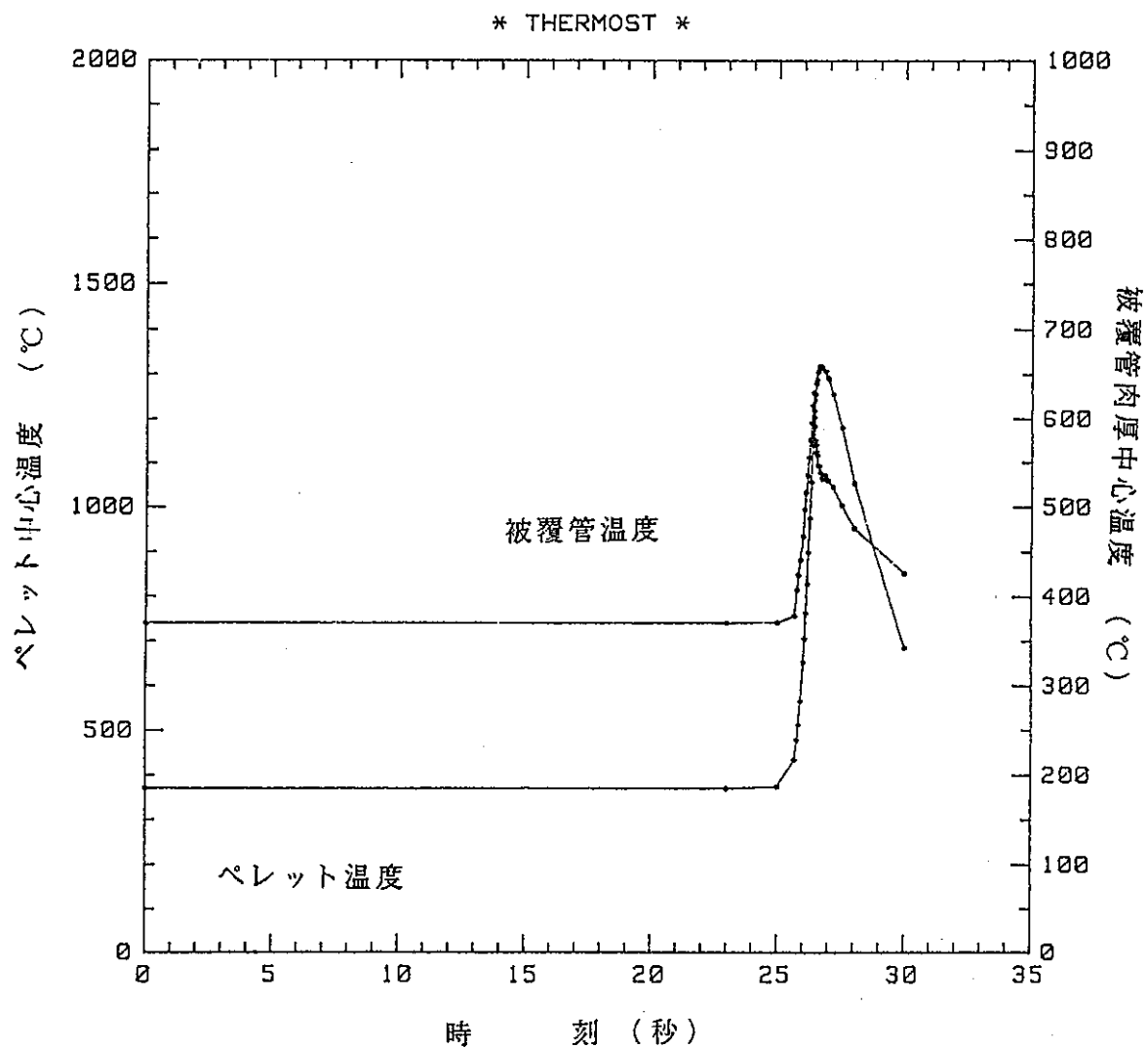


図 2.1-10

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象：未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き]

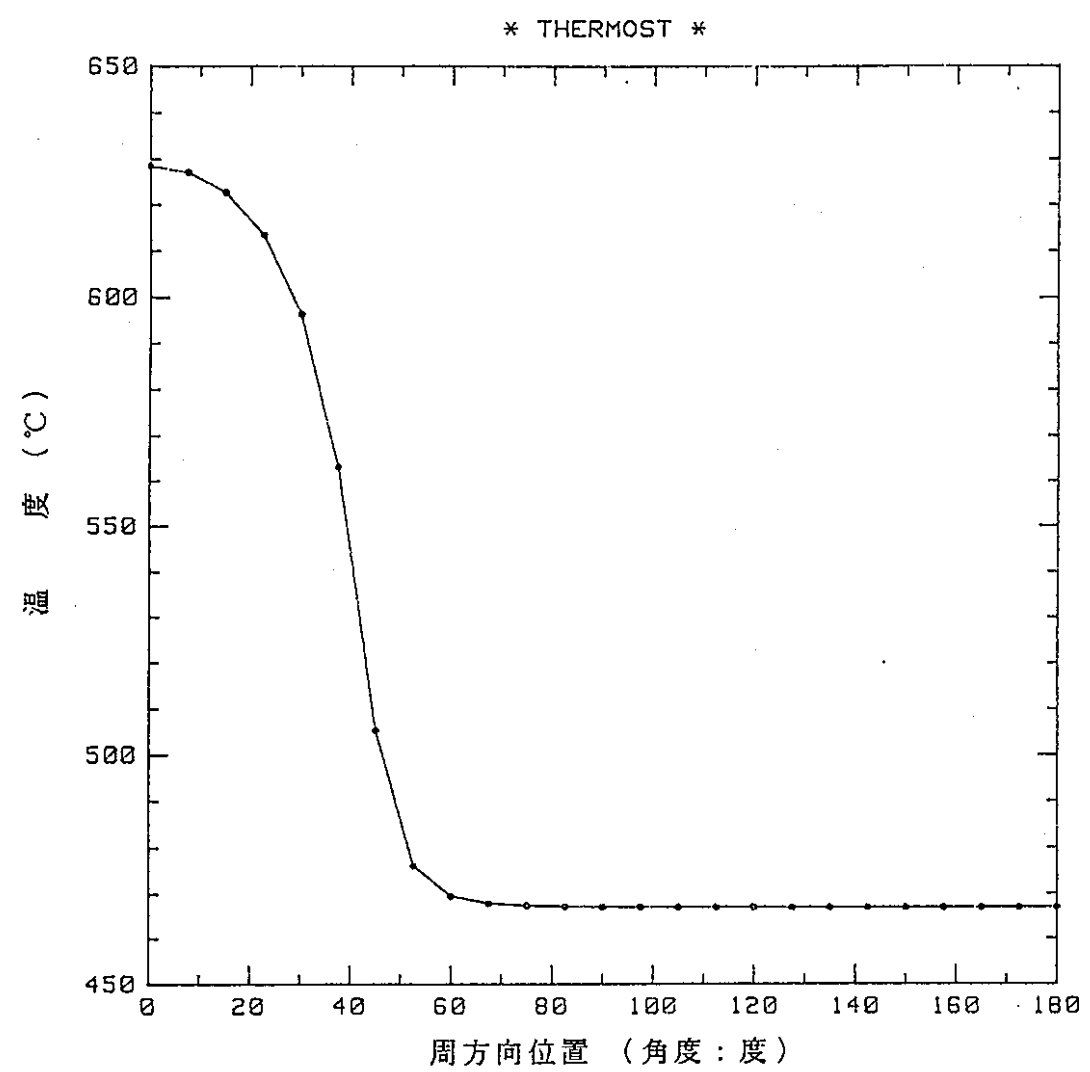


図 2.1-11 周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：26.38秒〕
〔事象：未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き〕

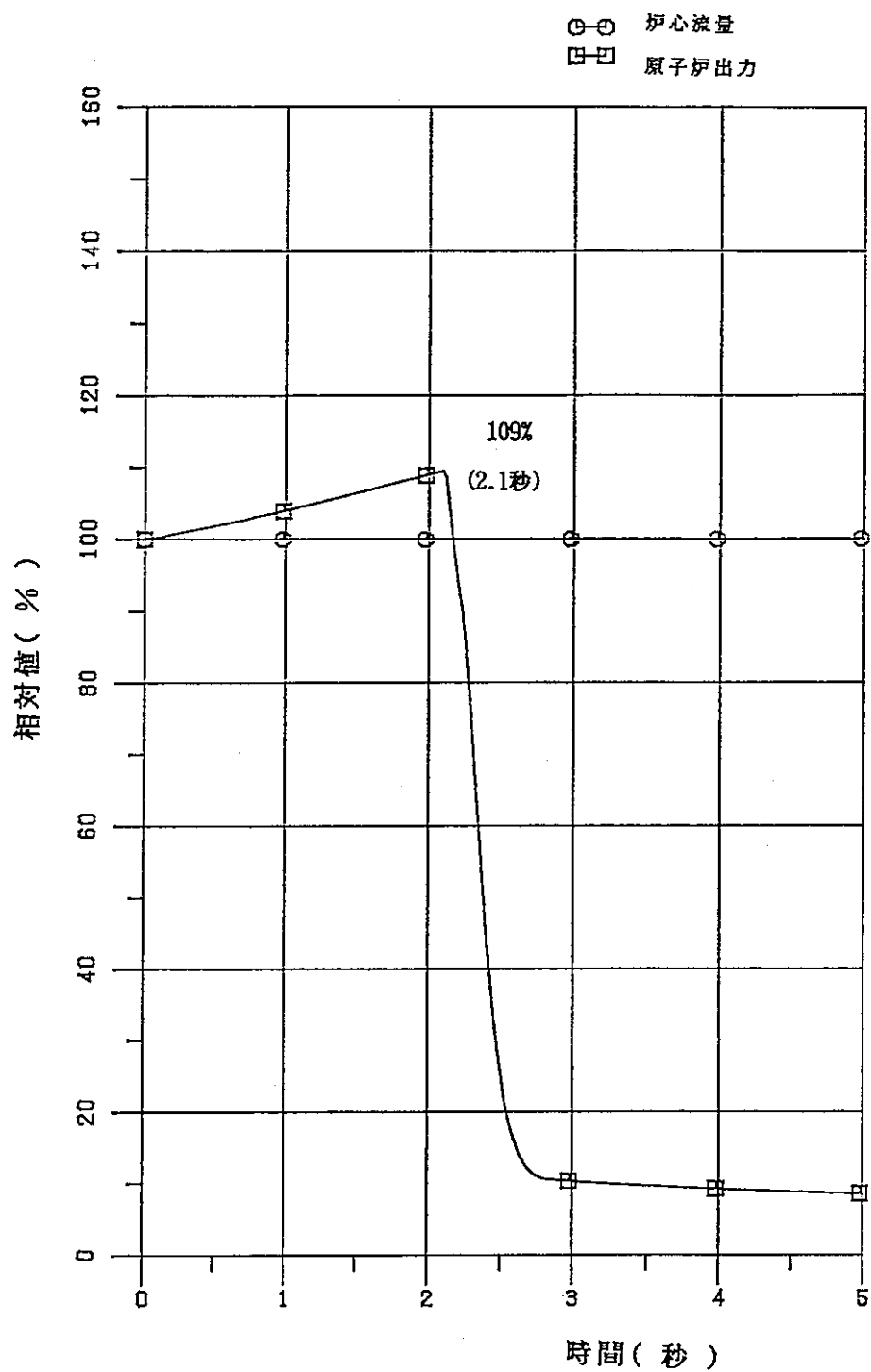


図 2.1 - 12 高燃焼度試験時，出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)
 —原子炉出力及び炉心流量—

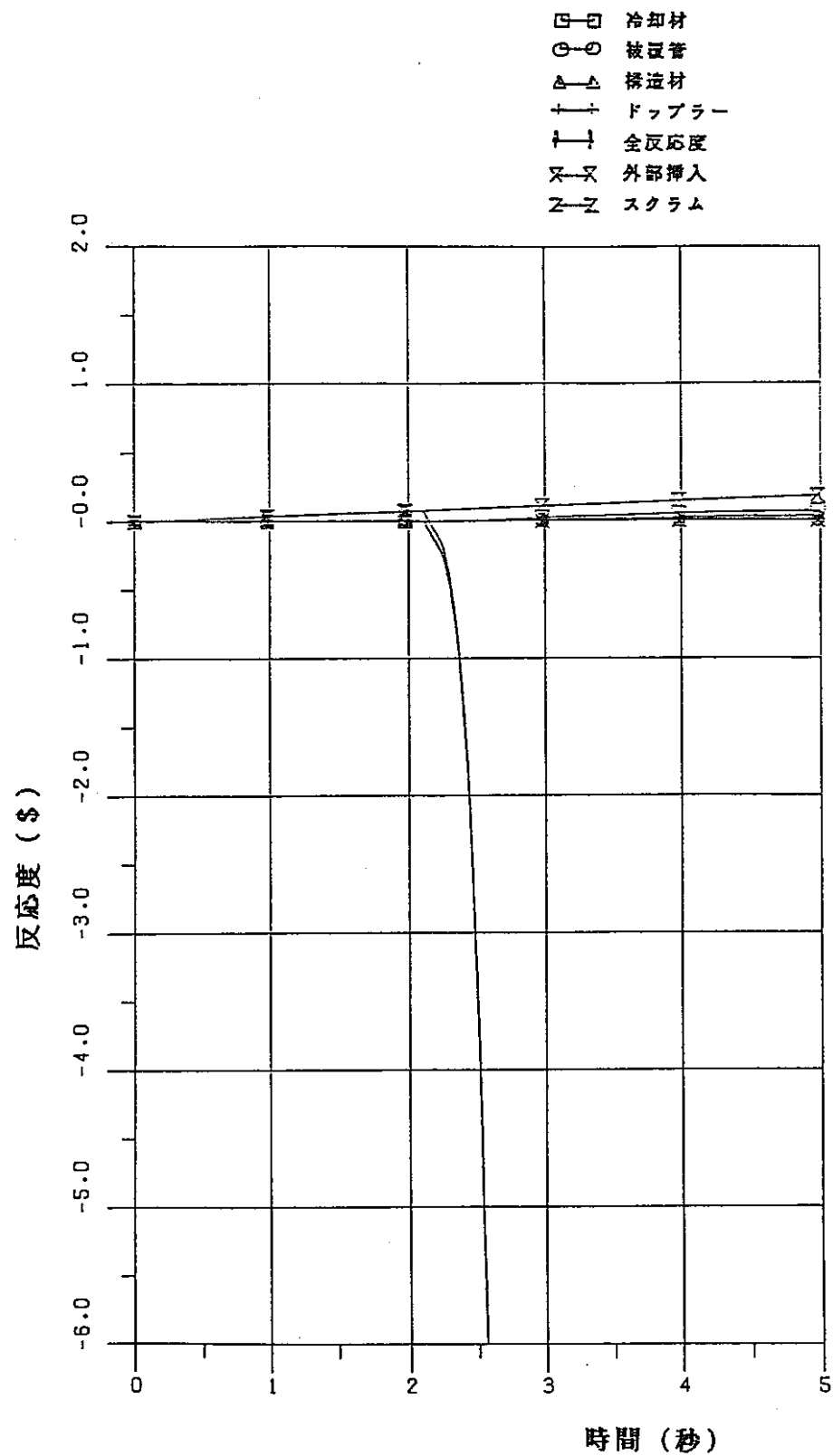


図2.1-13 高燃焼度試験時，出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—反応度—

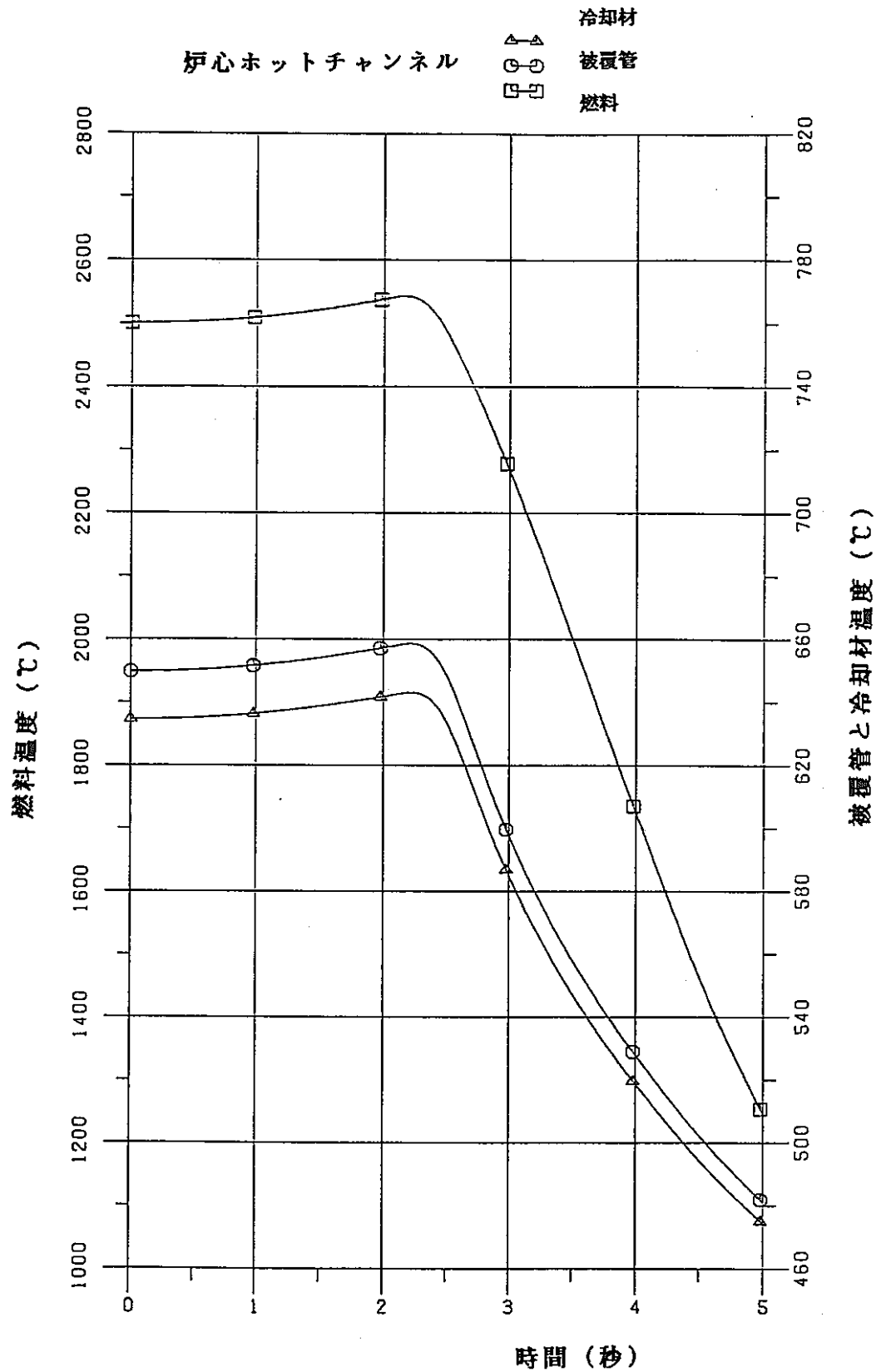


図2.1-14 高燃焼度試験時，出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

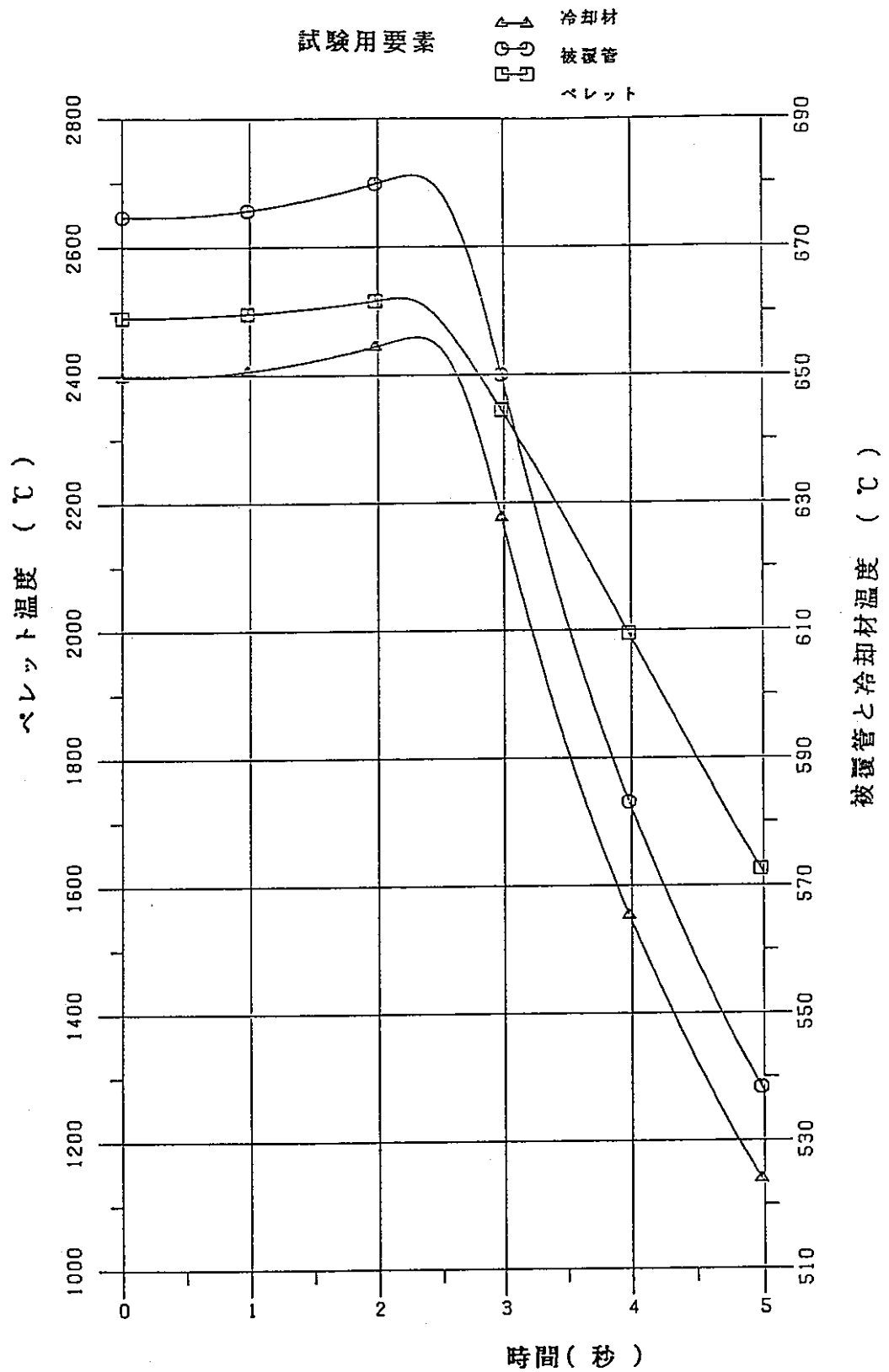


図2.1-15 高燃焼度試験時，出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (HARHO-IN)

—試験用要素：ぺレット，被覆管，冷却材最高温度—

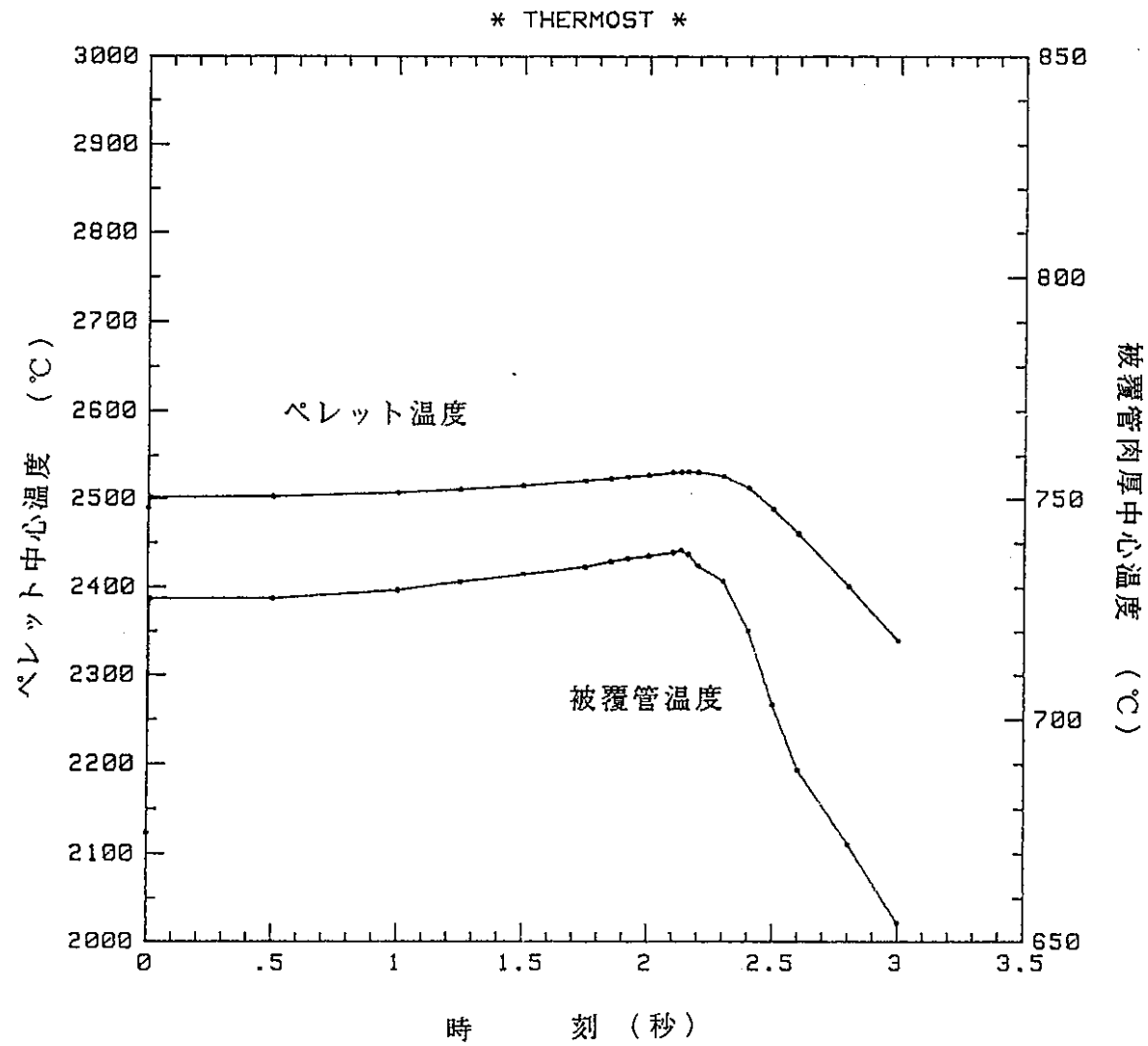


図2.1-16

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象：出力運転中の制御棒の異常な引抜き]

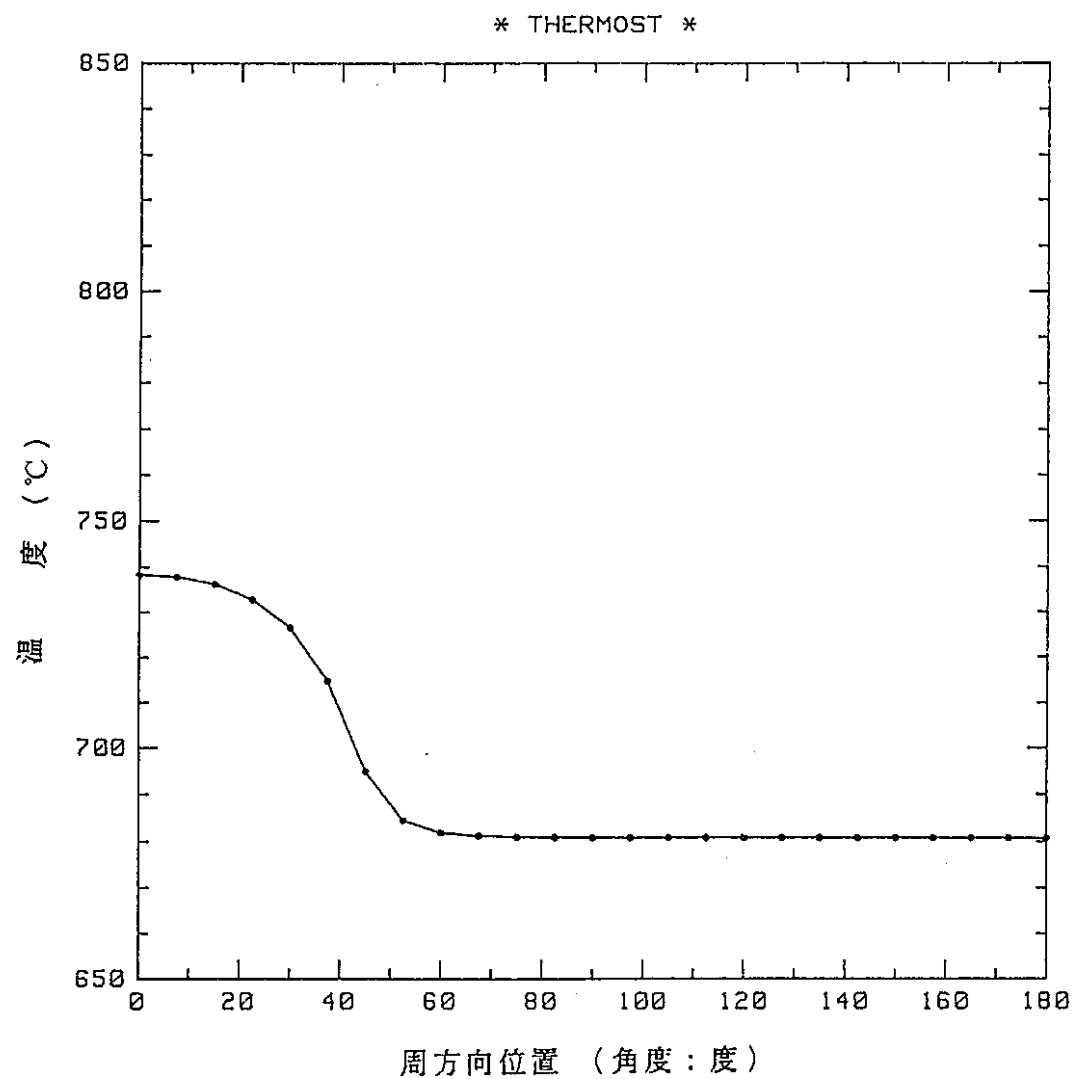


図 2.1-17

周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 2. 1 3 秒〕
〔事象: 出力運転中の制御棒の異常な引抜き〕

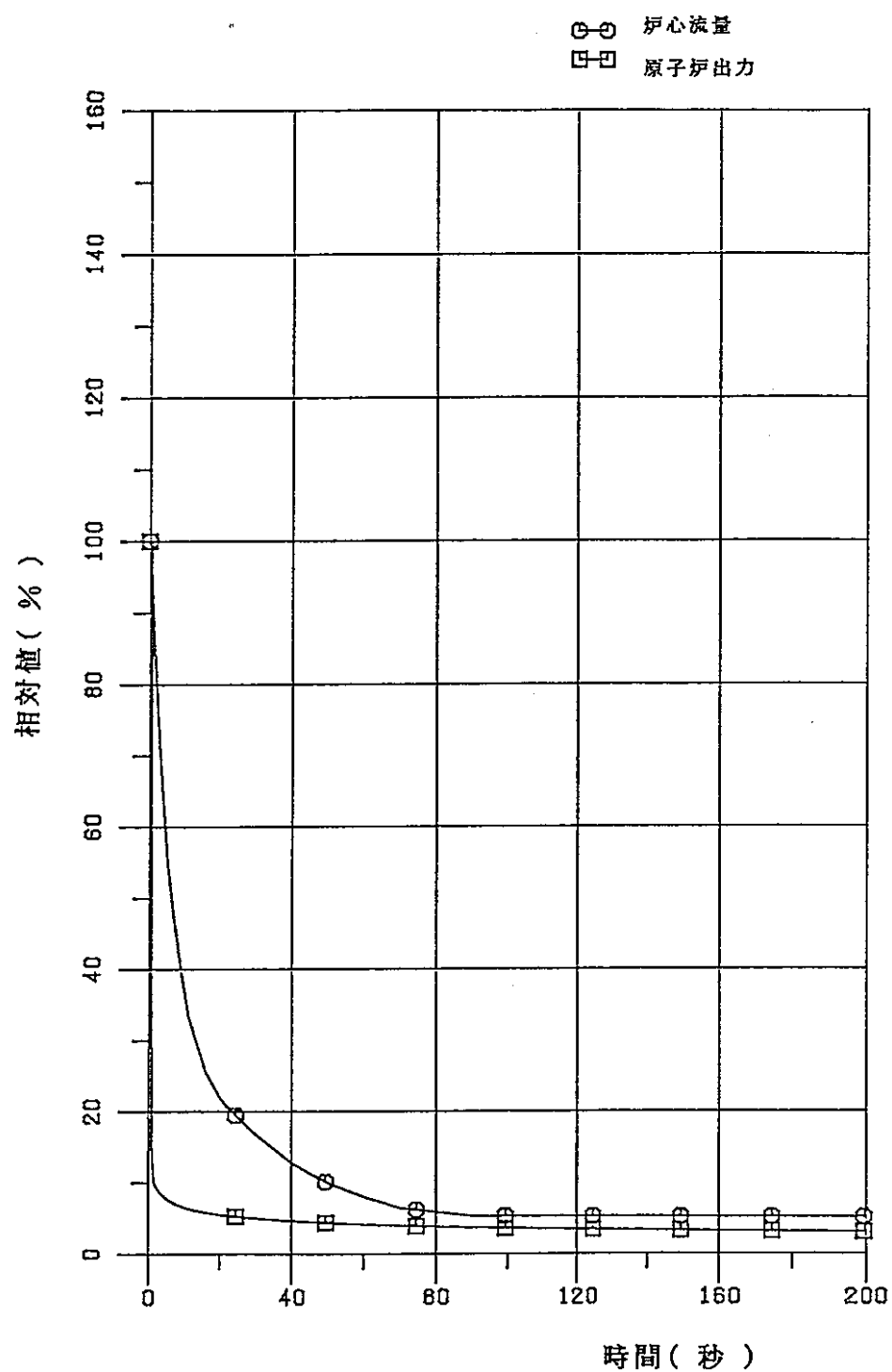


図2.1-18 高燃焼度試験時，1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

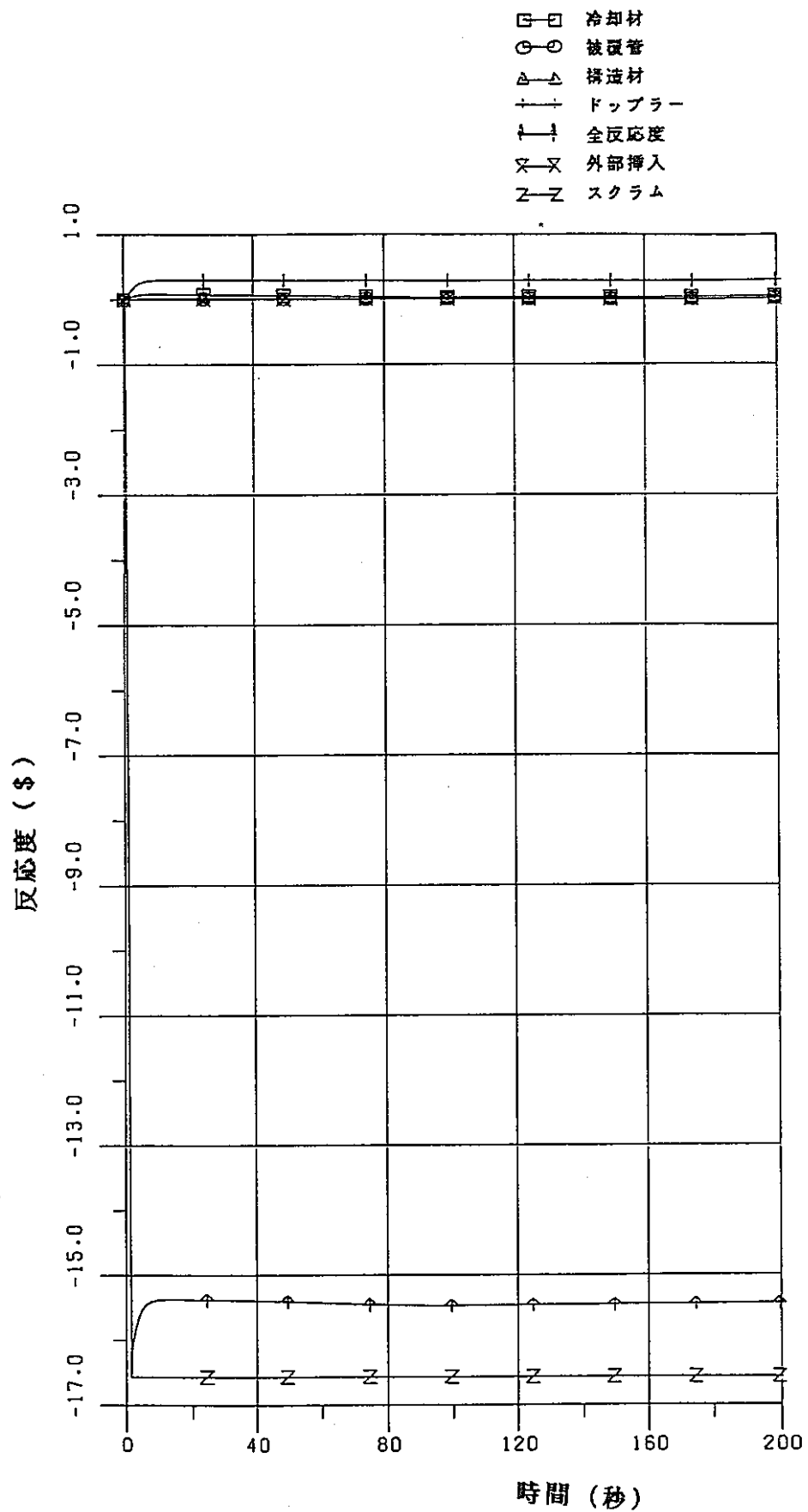


図2.1-19 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—反応度—

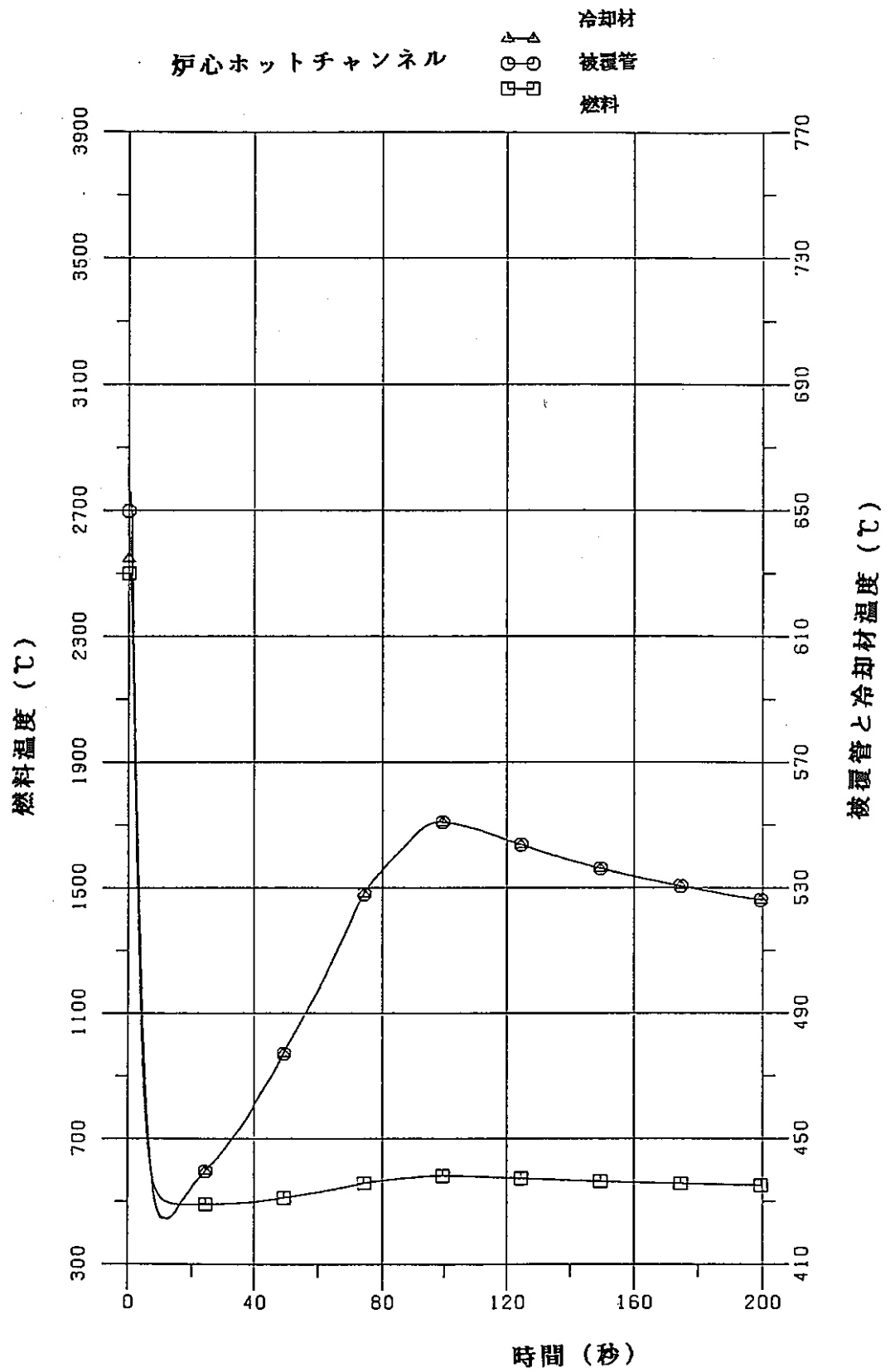


図2.1-20 高燃焼度試験時, 1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル: 燃料, 被覆管, 冷却材最高温度—

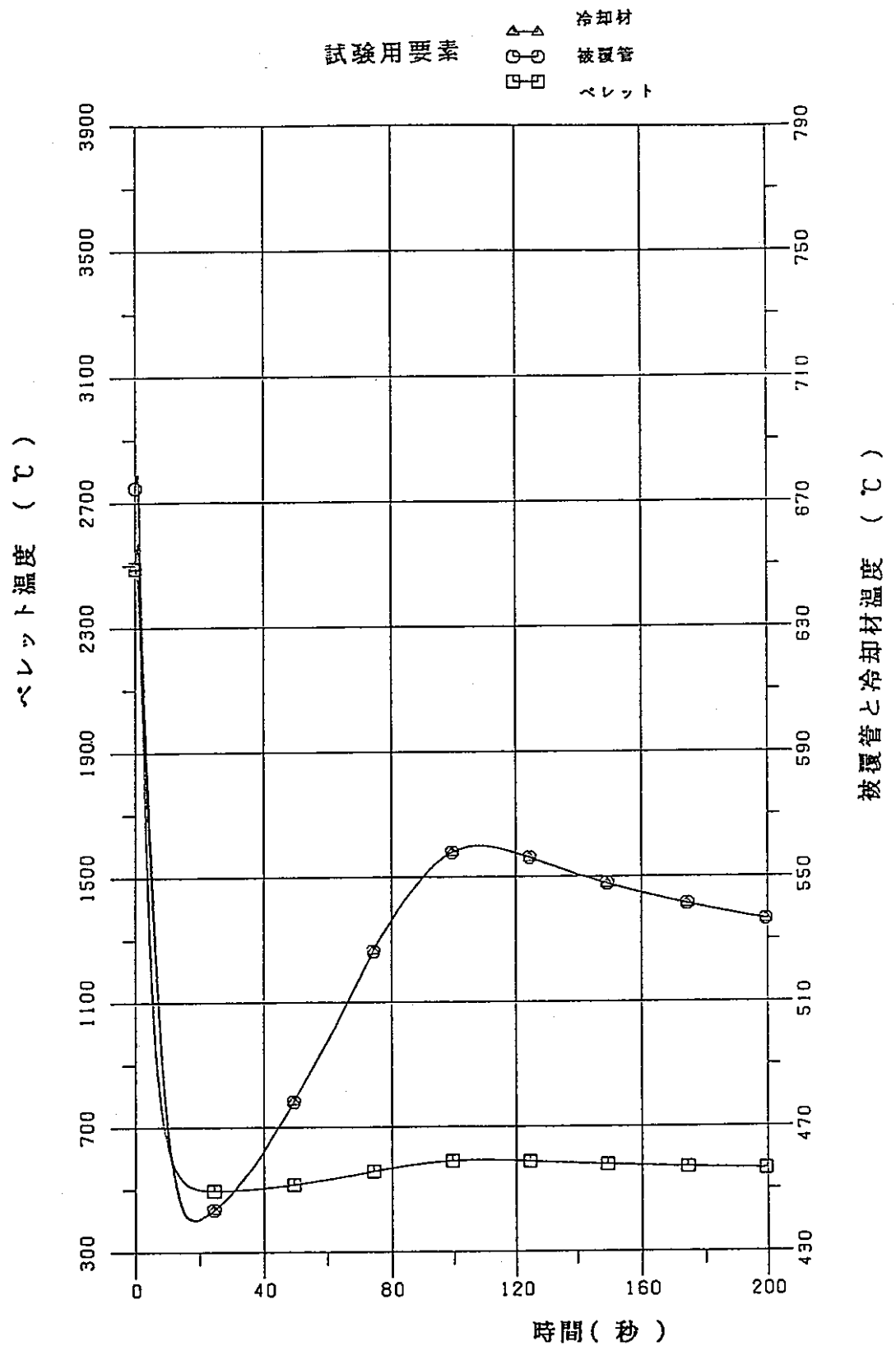


図2.1-21 高燃焼度試験時，1次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

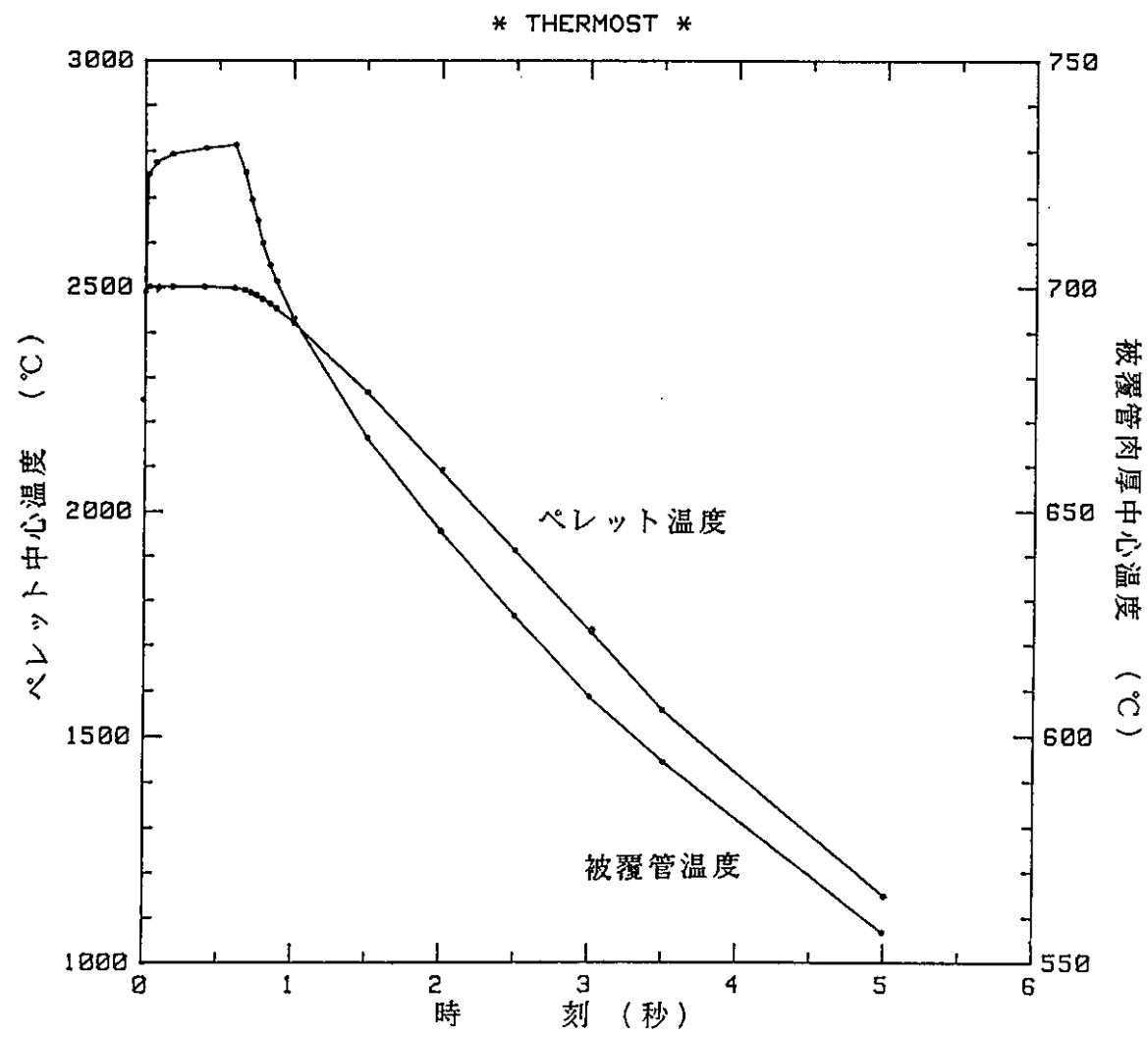


図 2.1-22 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：1次冷却材流量減少]

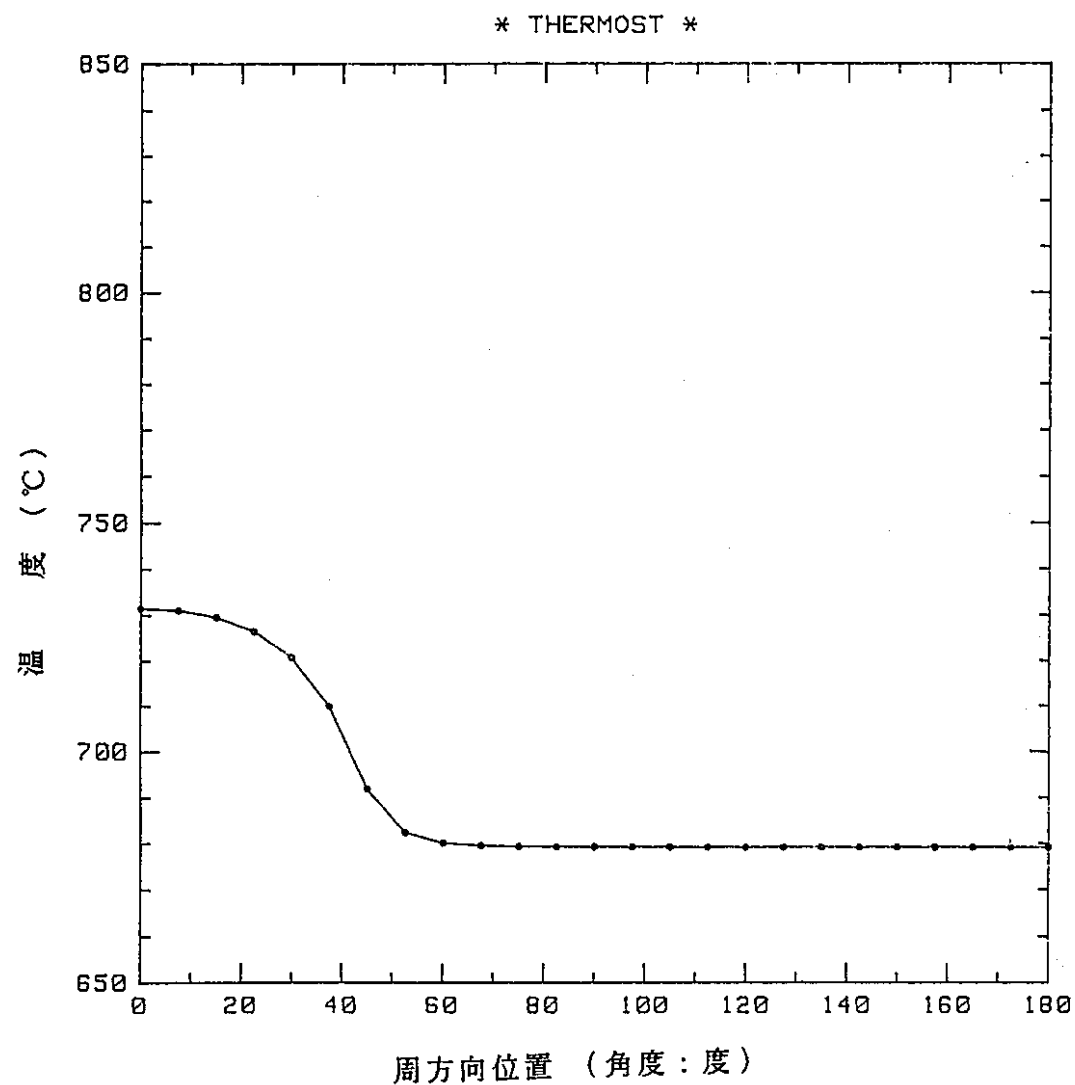


図2.1-23 周方向被覆管肉厚中心温度分布 [時刻: 0.6 秒]
[事象: 1 次冷却材流量減少]

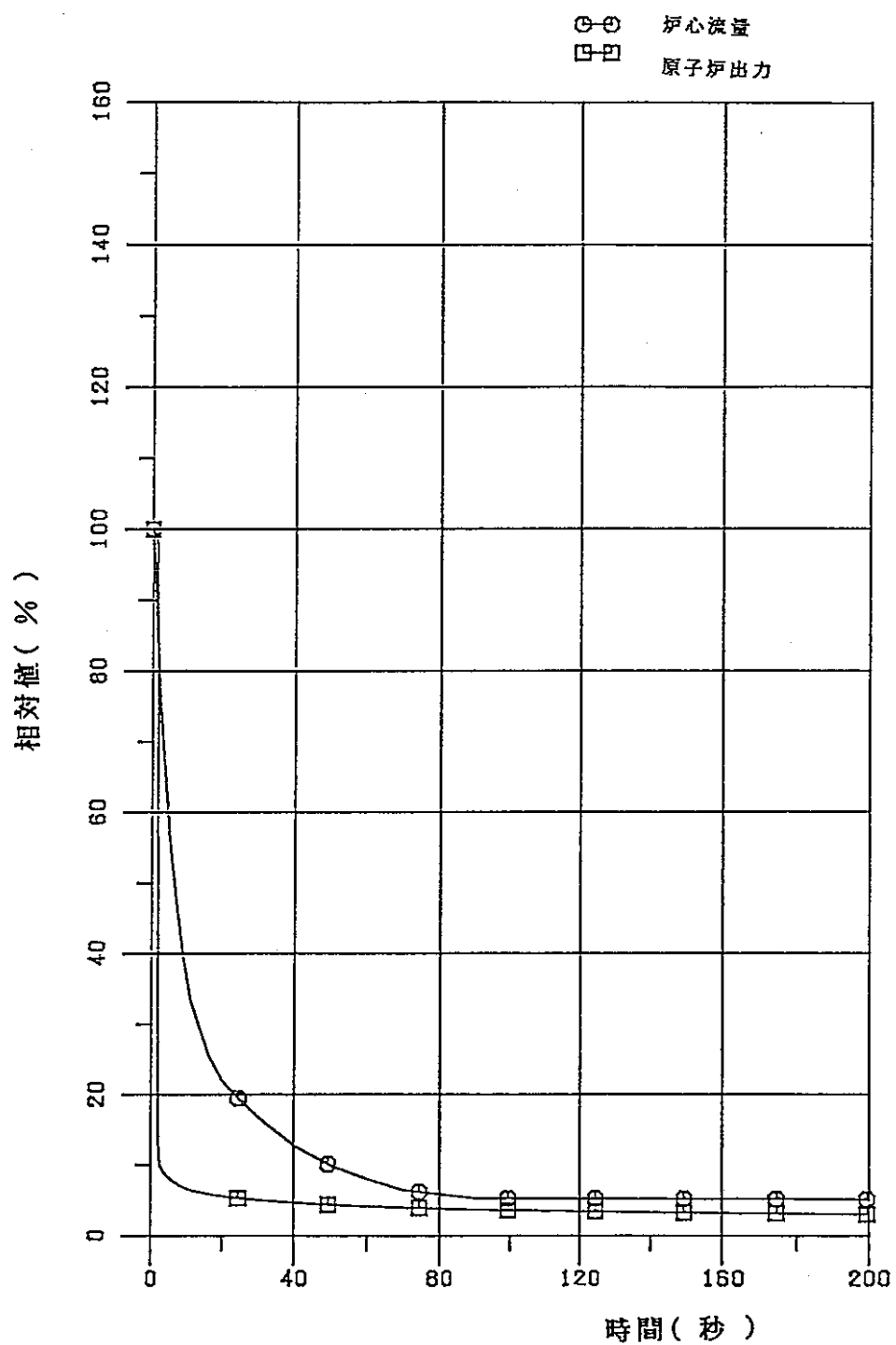


図2.1-24 高燃焼度試験時，外部電源喪失 (HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

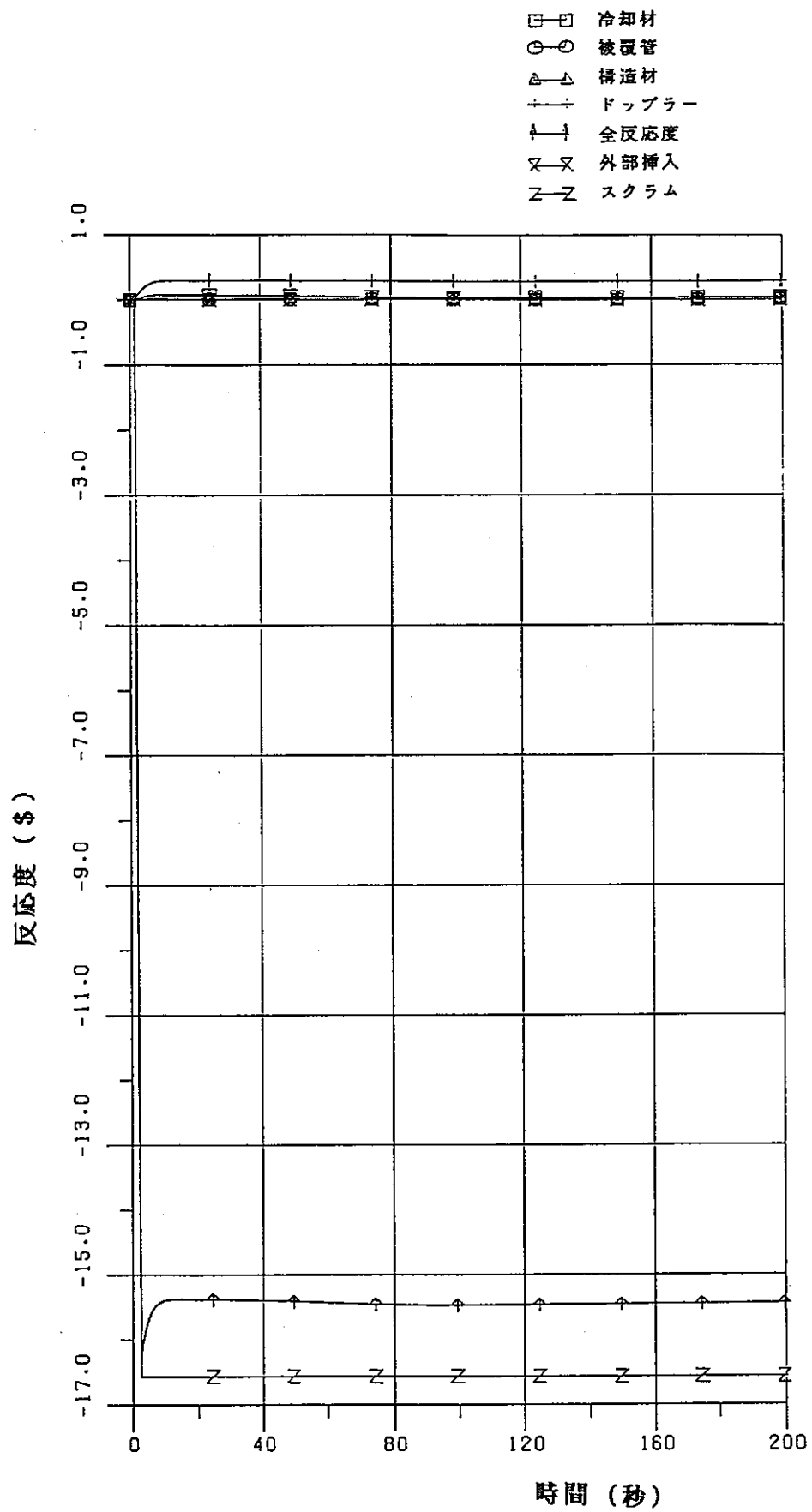


図2.1-25 高燃焼度試験時，外部電源喪失 (HARHO-IN)

—反応度—

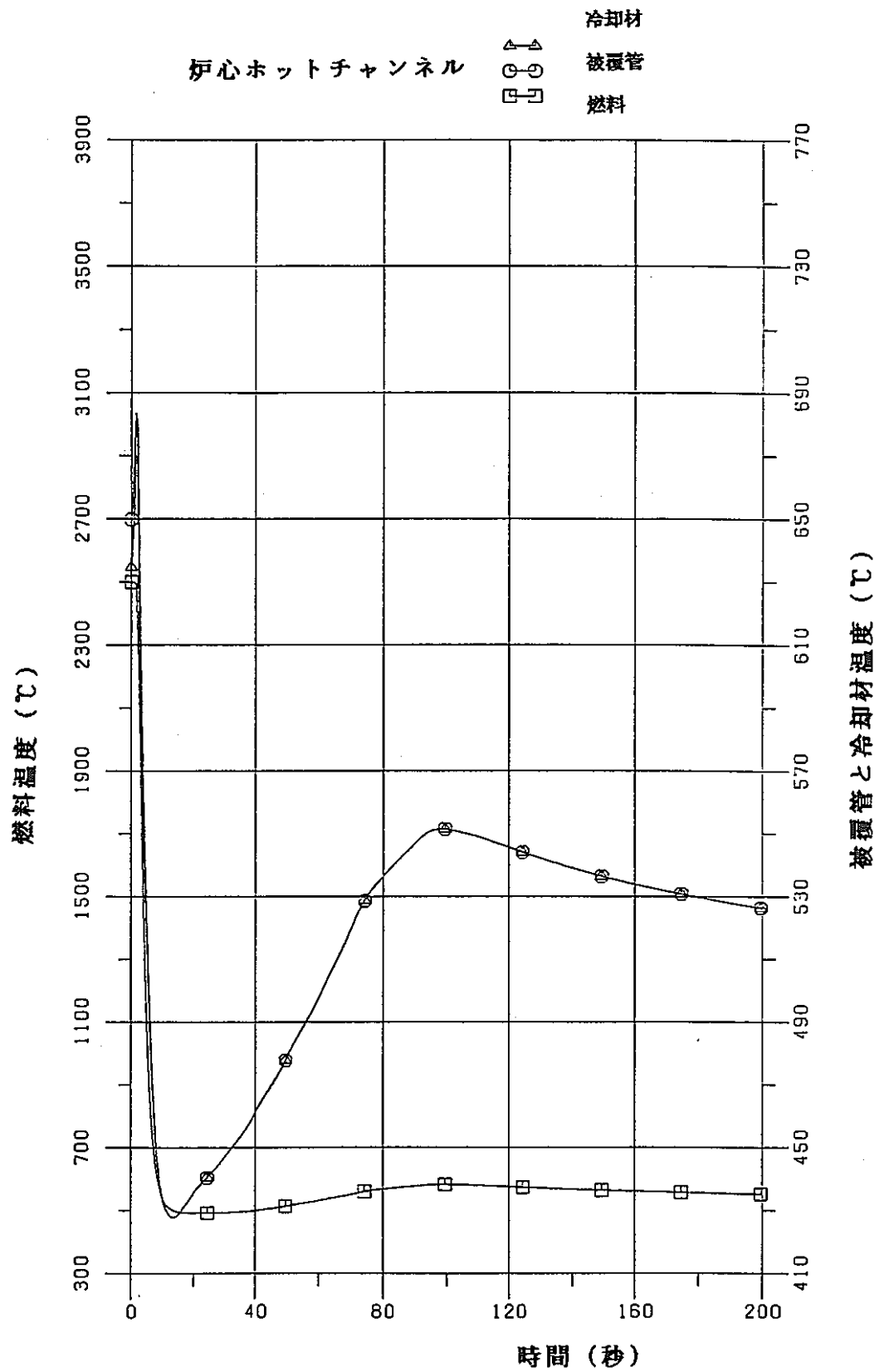


図2.1-26 高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

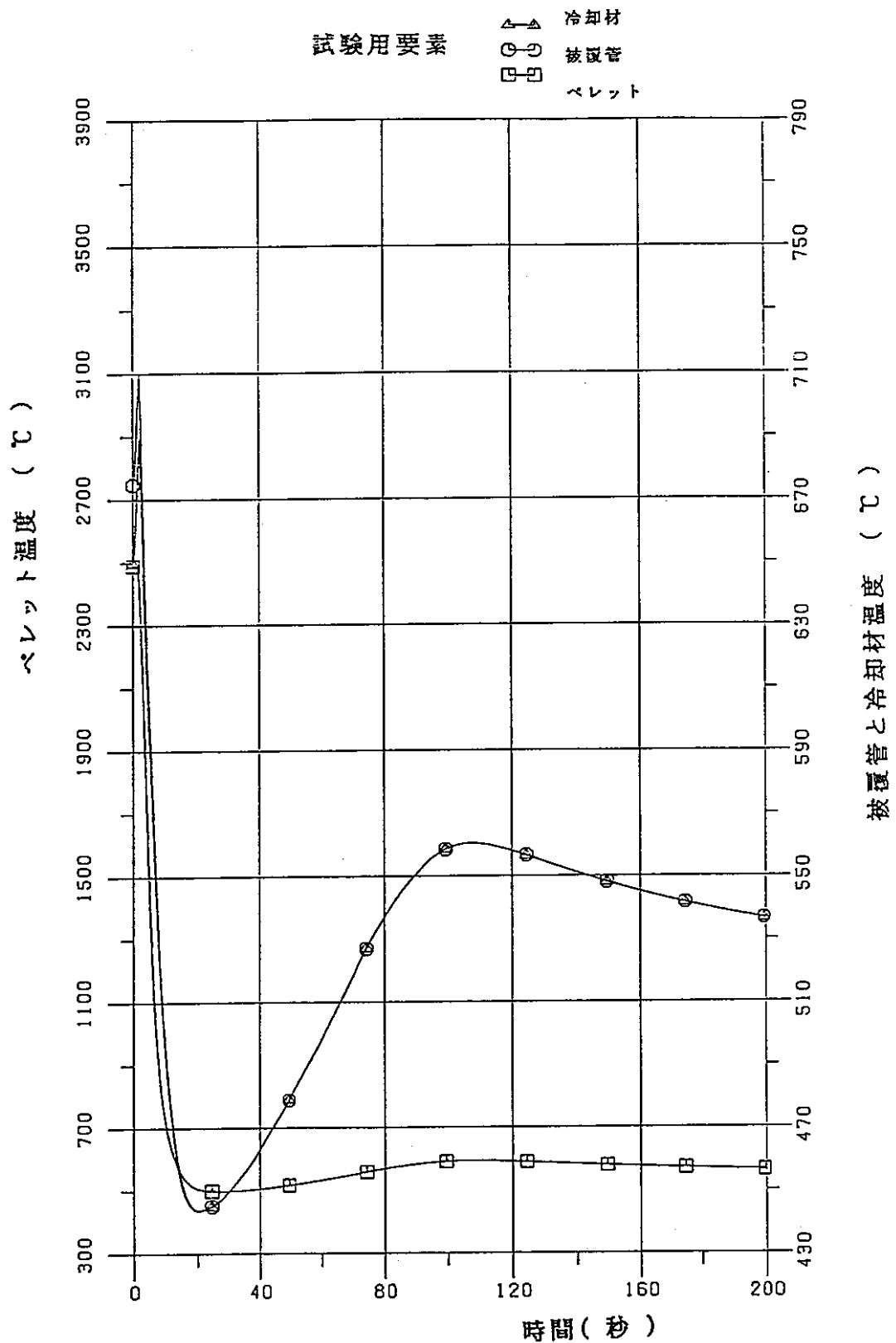


図2.1-27 高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

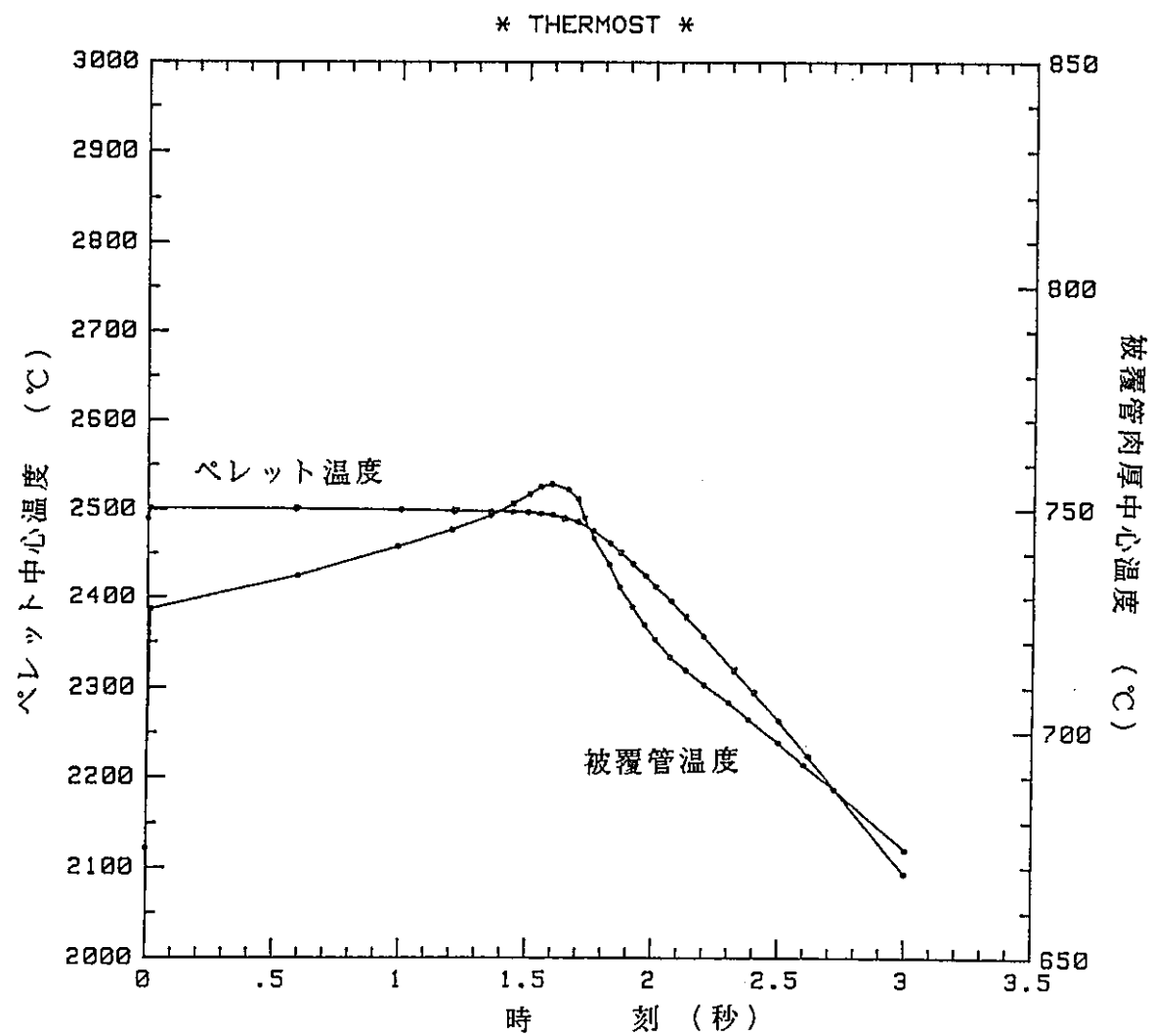


図2.1-28 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：外部電源喪失]

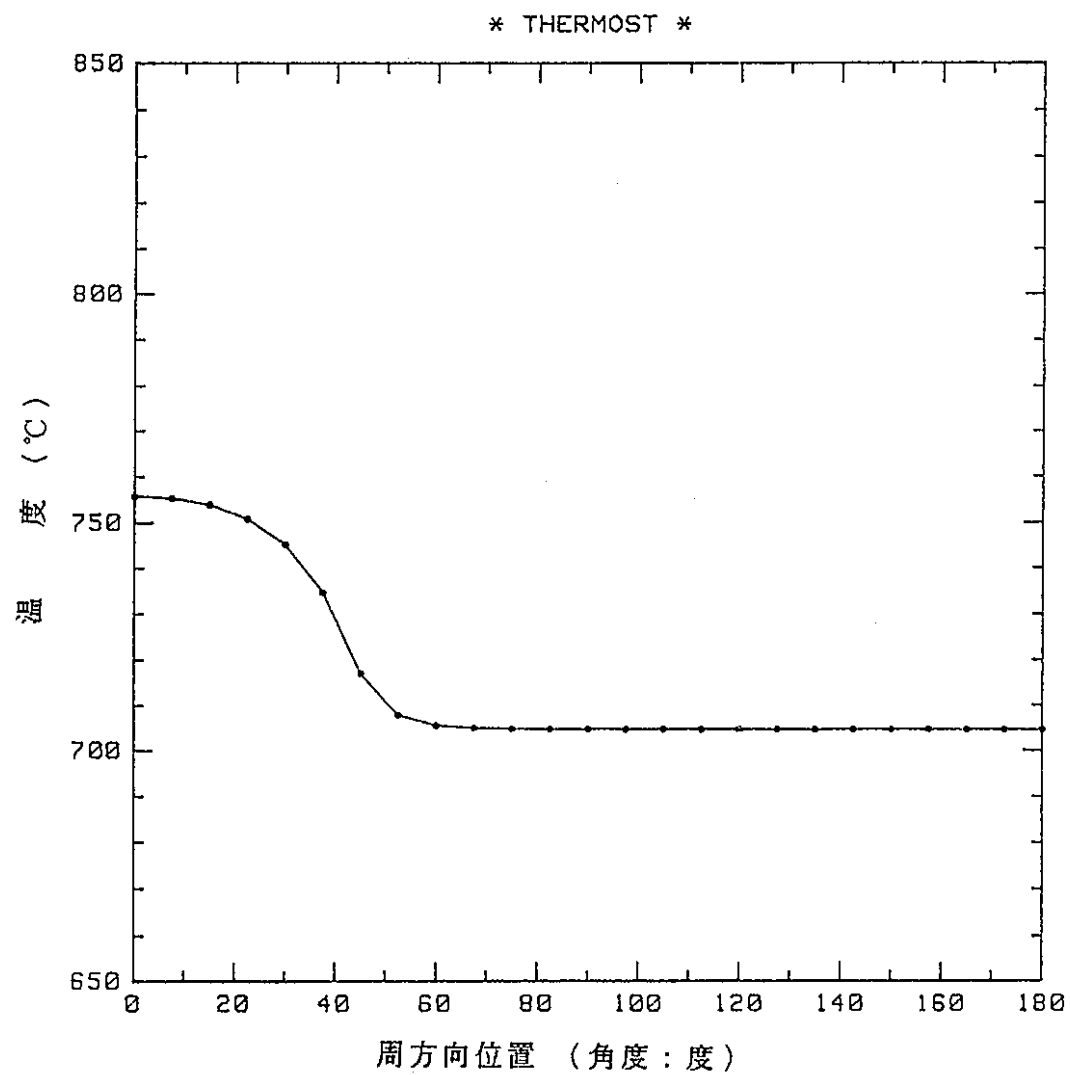


図2.1-29 周方向被覆管肉厚中心温度分布 [時刻: 1.6 秒]

[事象: 外部電源喪失]

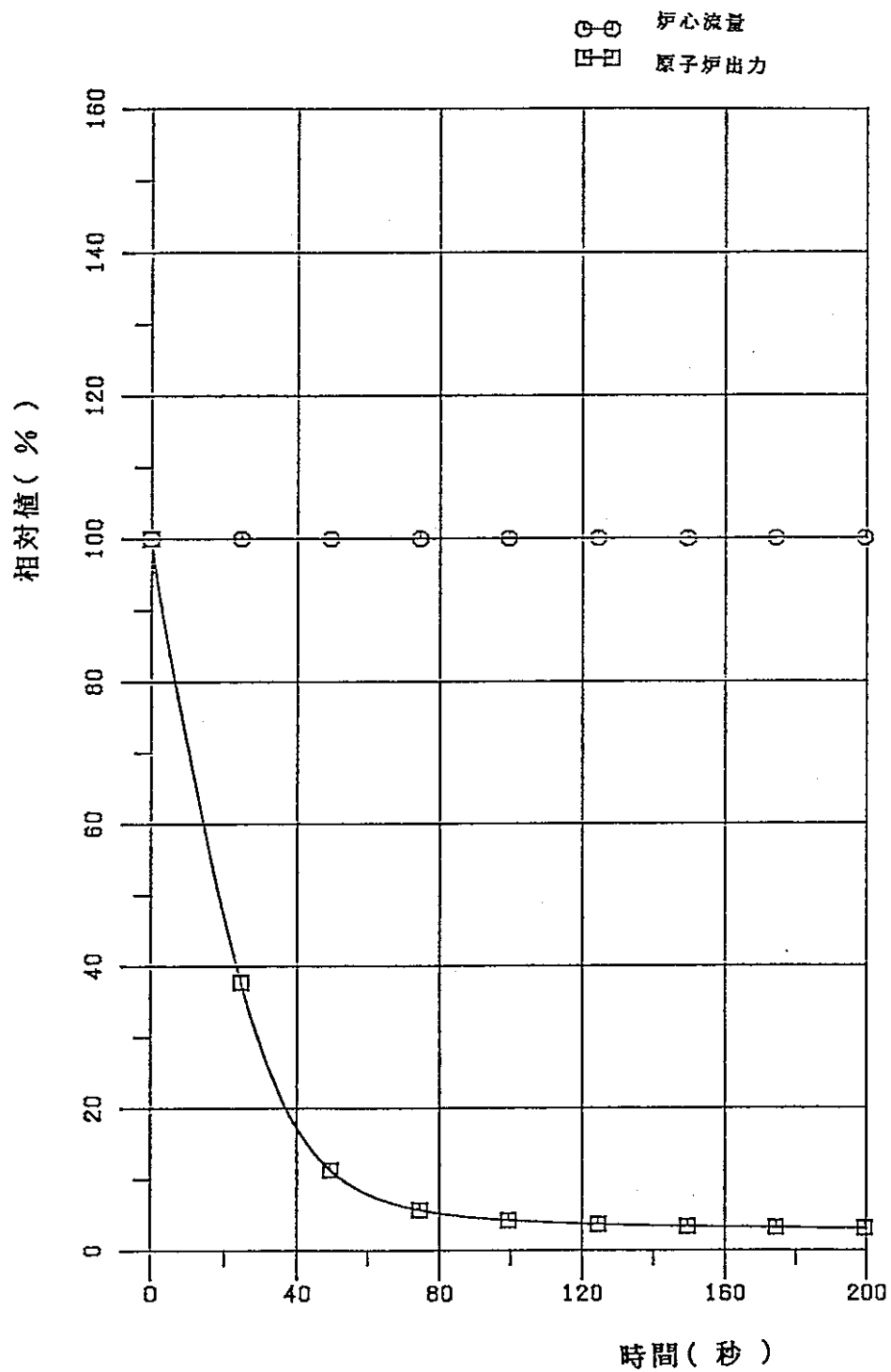


図2.1-30 高燃焼度試験時、外部電源喪失 (HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

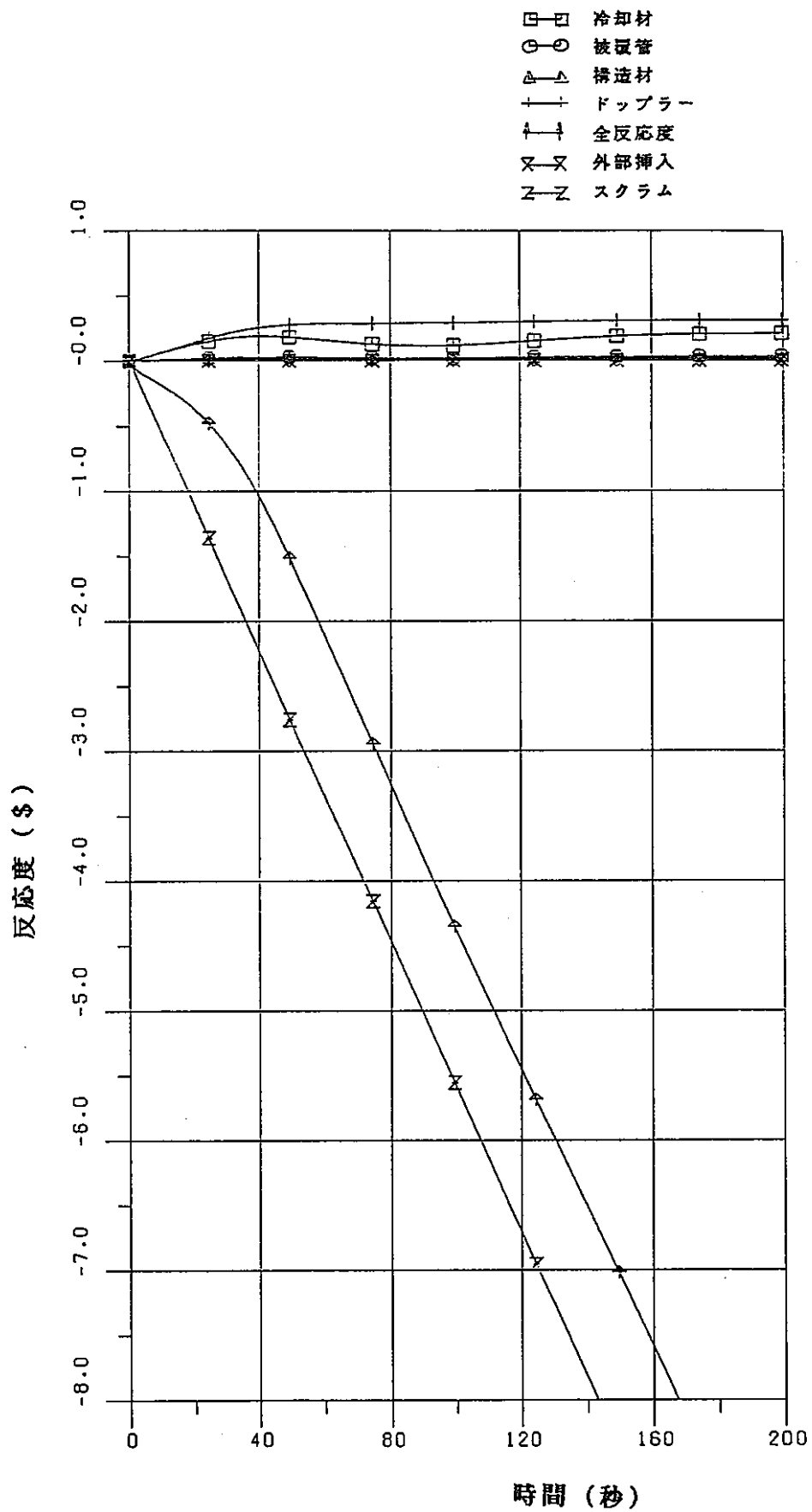


図2.1-31 高燃焼度試験時, 2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—反応度—

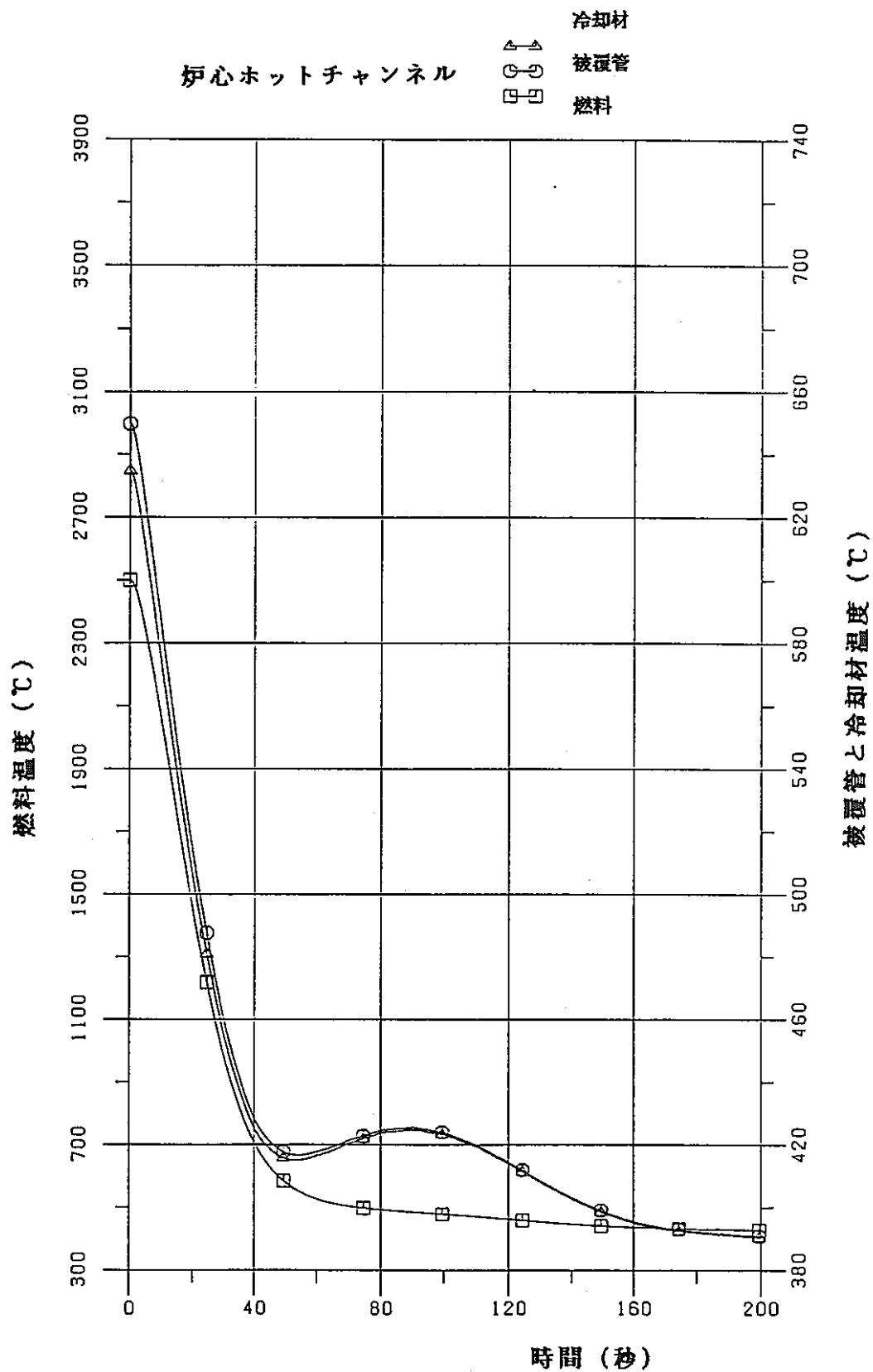


図2.1-32 高燃焼度試験時, 2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル: 燃料, 被覆管, 冷却材最高温度—

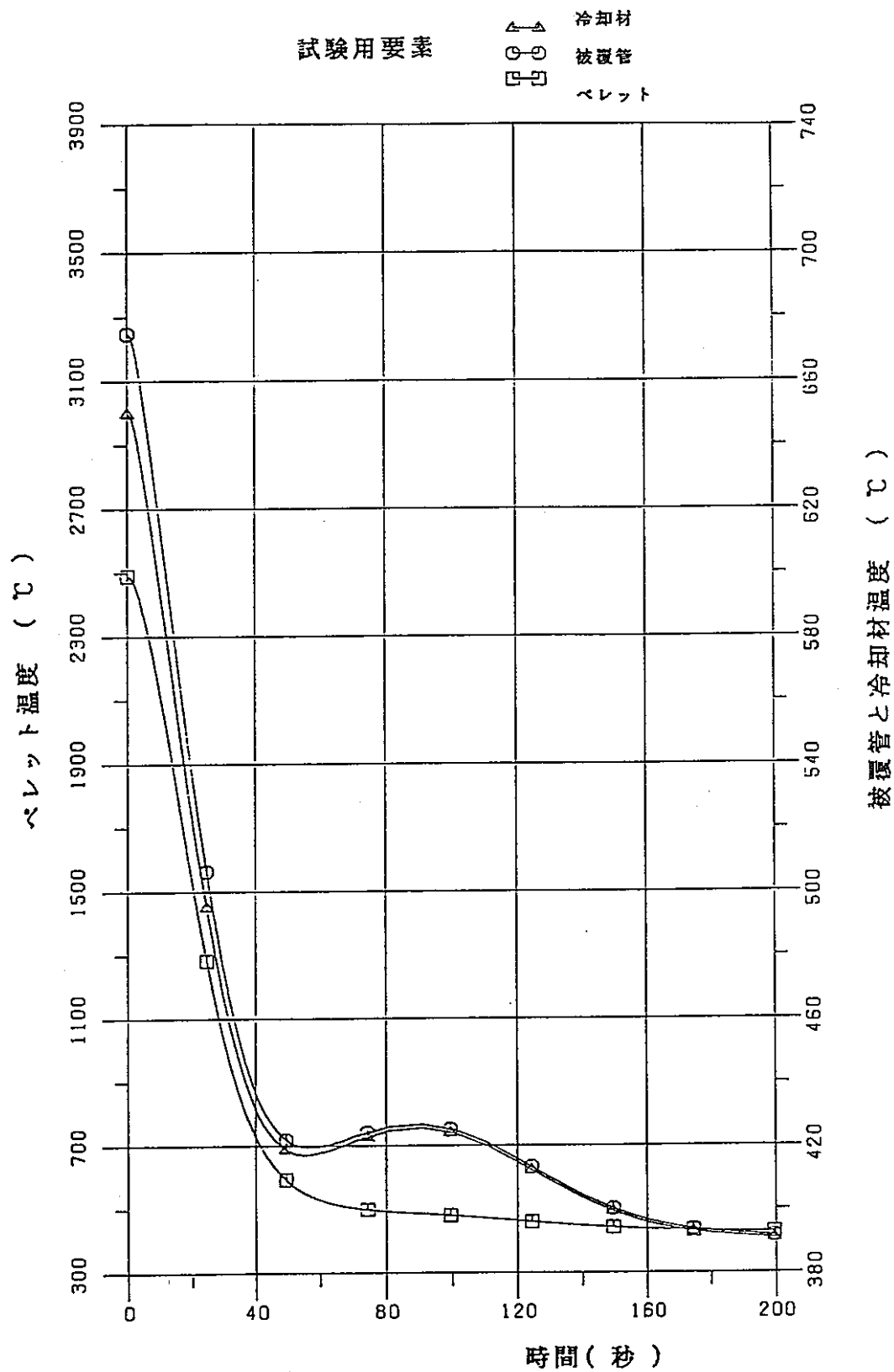


図2.1-33 高燃焼度試験時, 2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—試験用要素: ペレット, 被覆管, 冷却材最高温度—

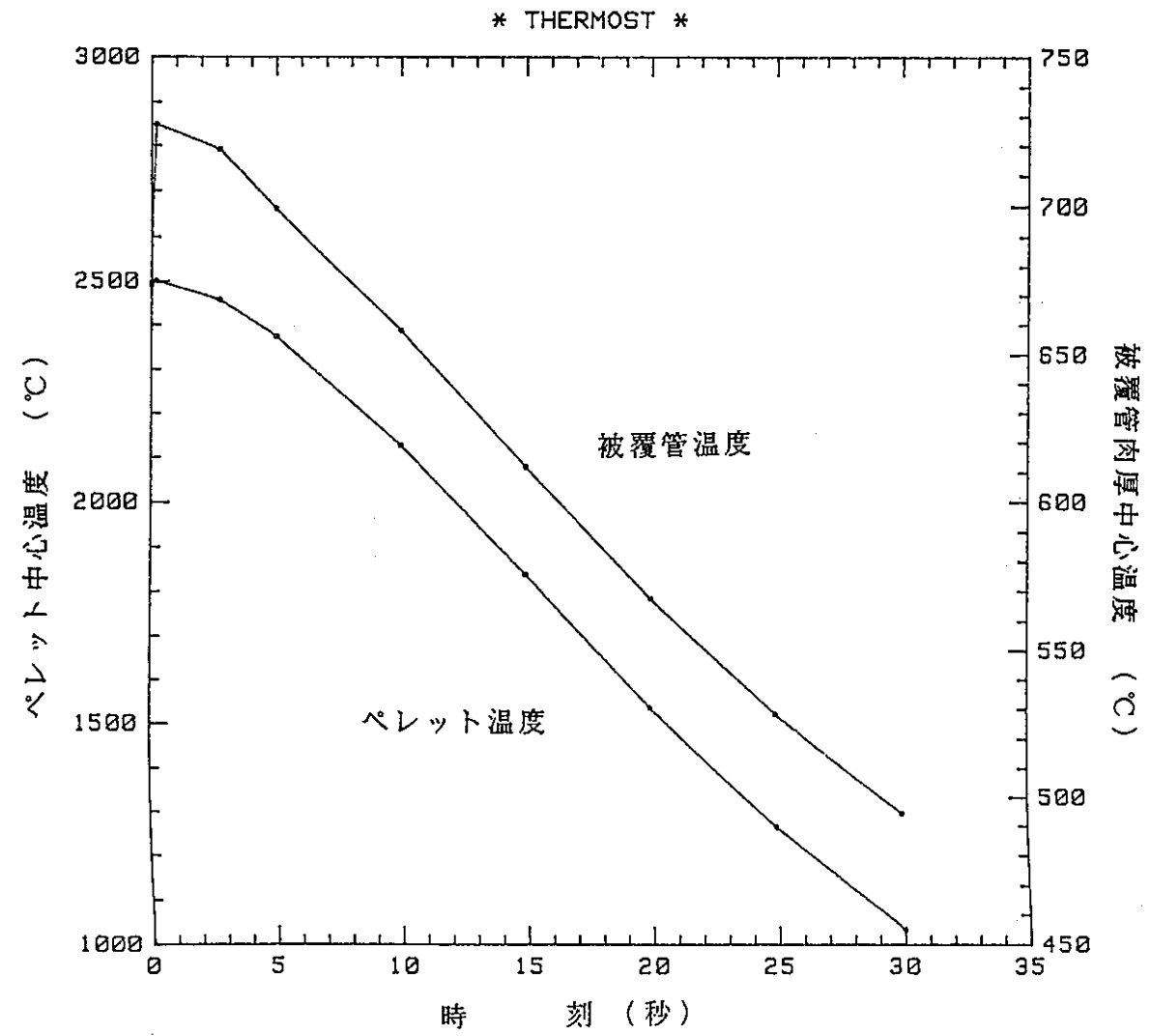


図 2.1-34 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：2次冷却材流量減少]

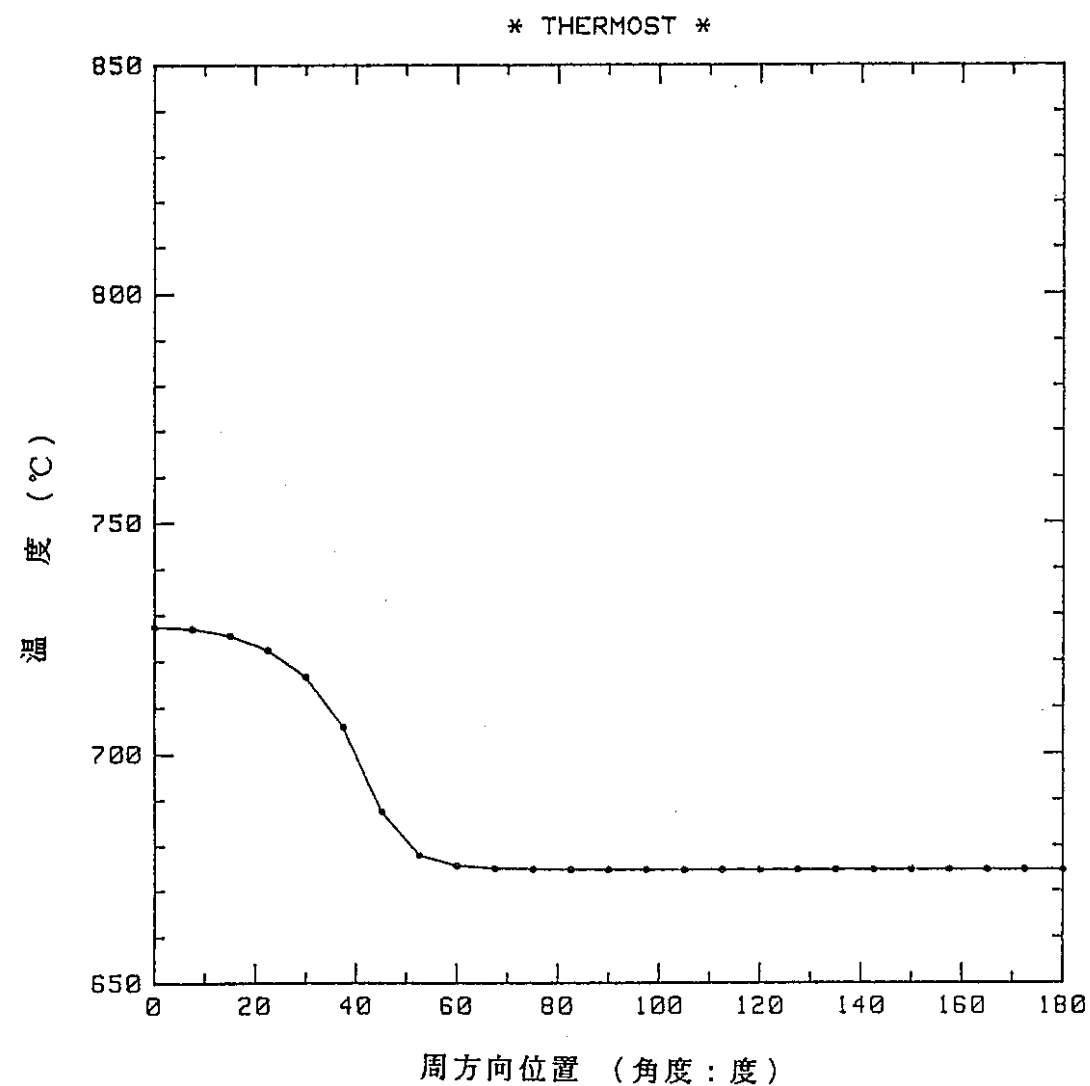


图 2.1-35 周方向被覆管肉厚中心温度分布 [時刻: 0.2 秒]
[事象: 2 次冷却材流量減少]

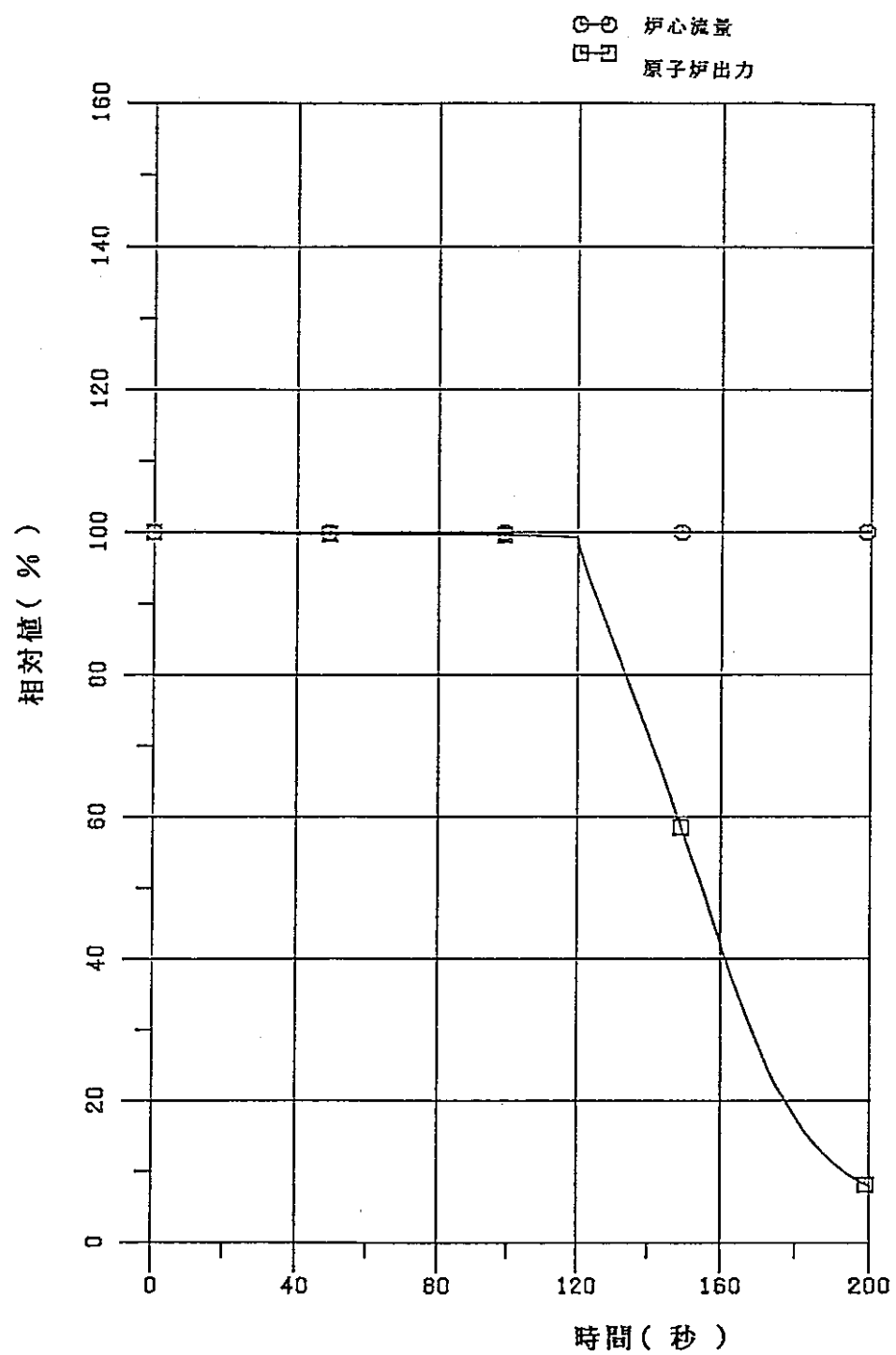


図2.1-36 高燃焼度試験時, 2次冷却材流量減少 (HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

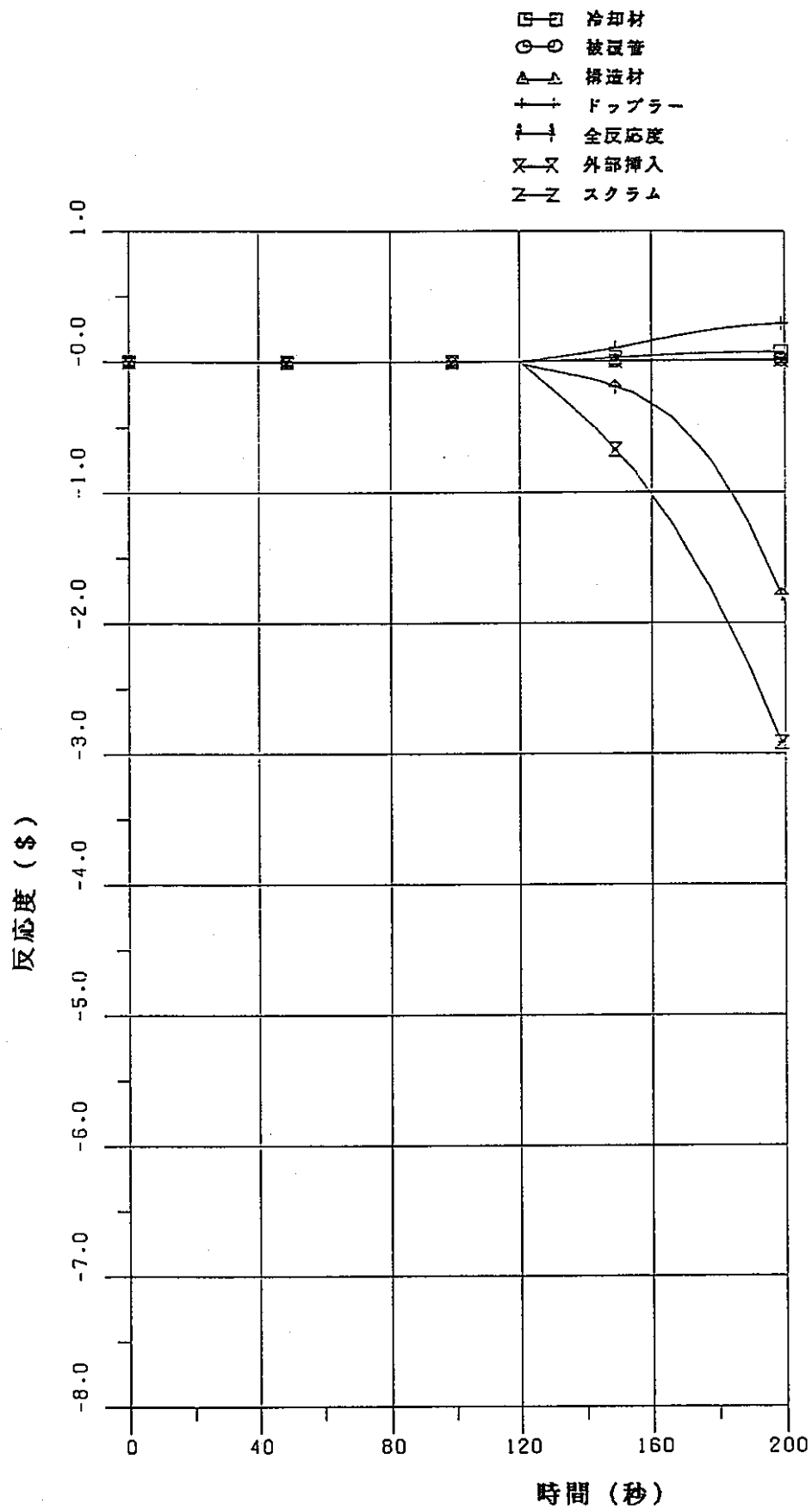


図2.1-37 高燃焼度試験時, 主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)

—反応度—

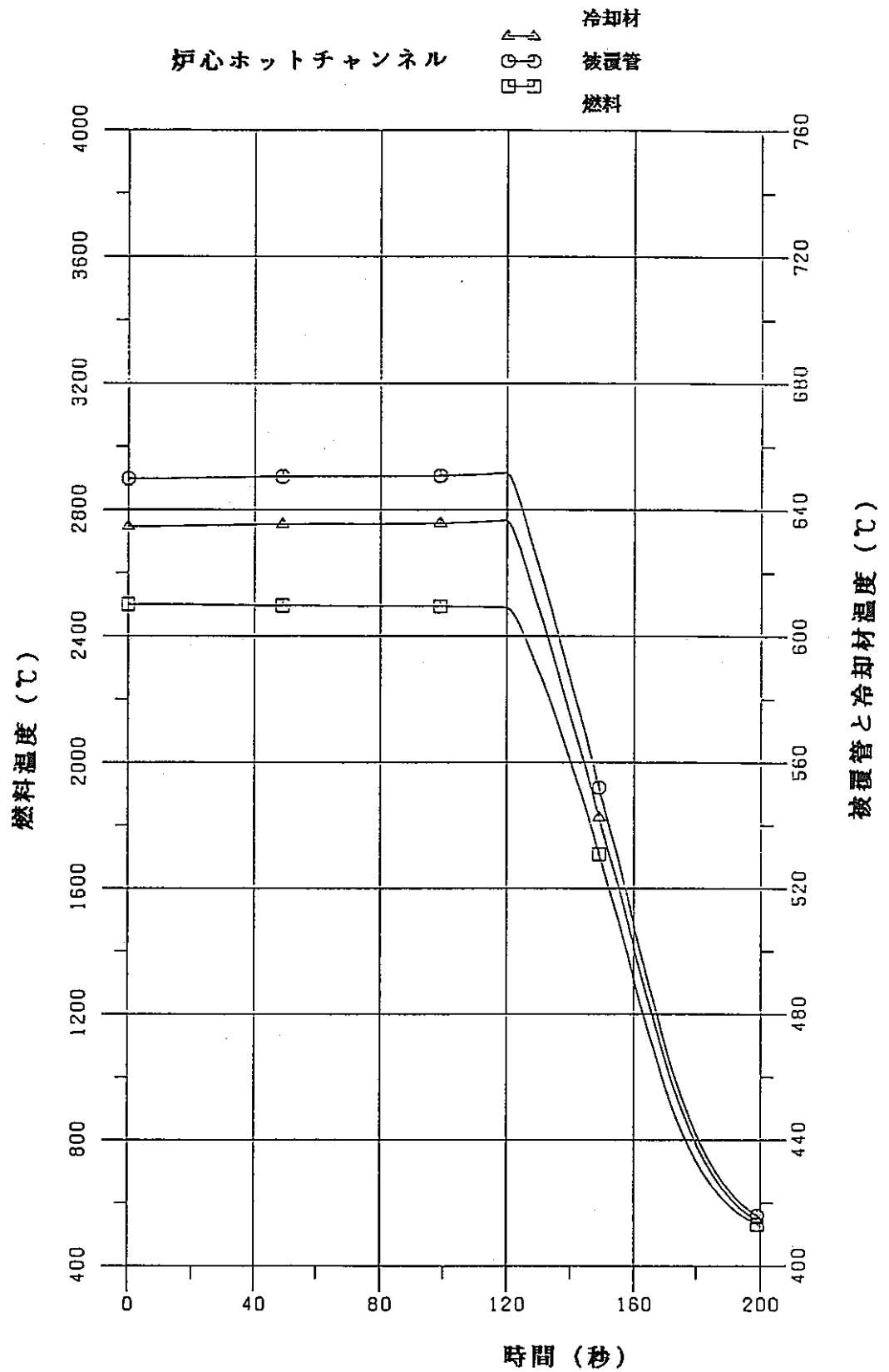


図2.1-38 高燃焼度試験時，主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

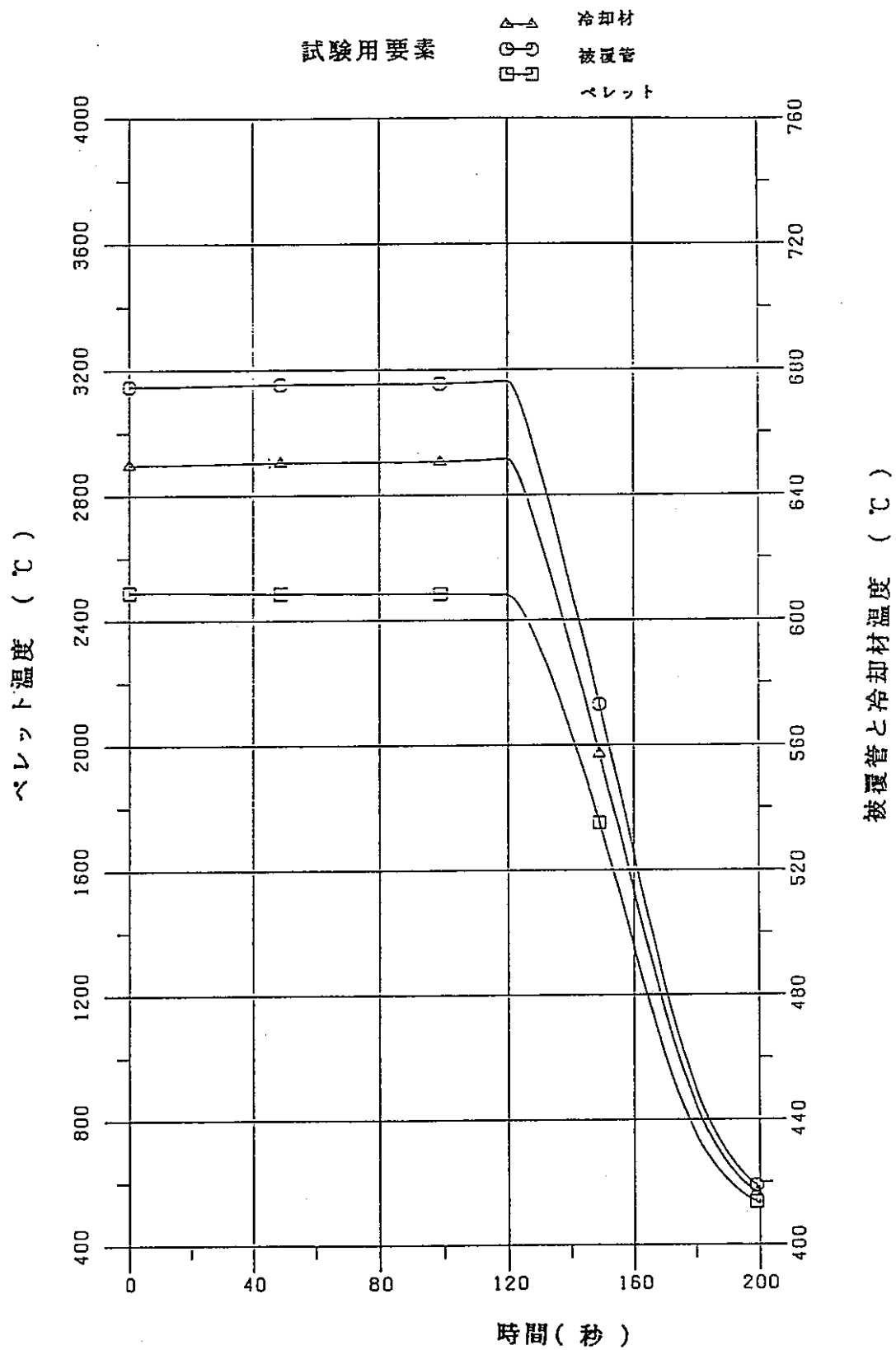


図2.1-39 高燃焼度試験時，主冷却器空気風量減少 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

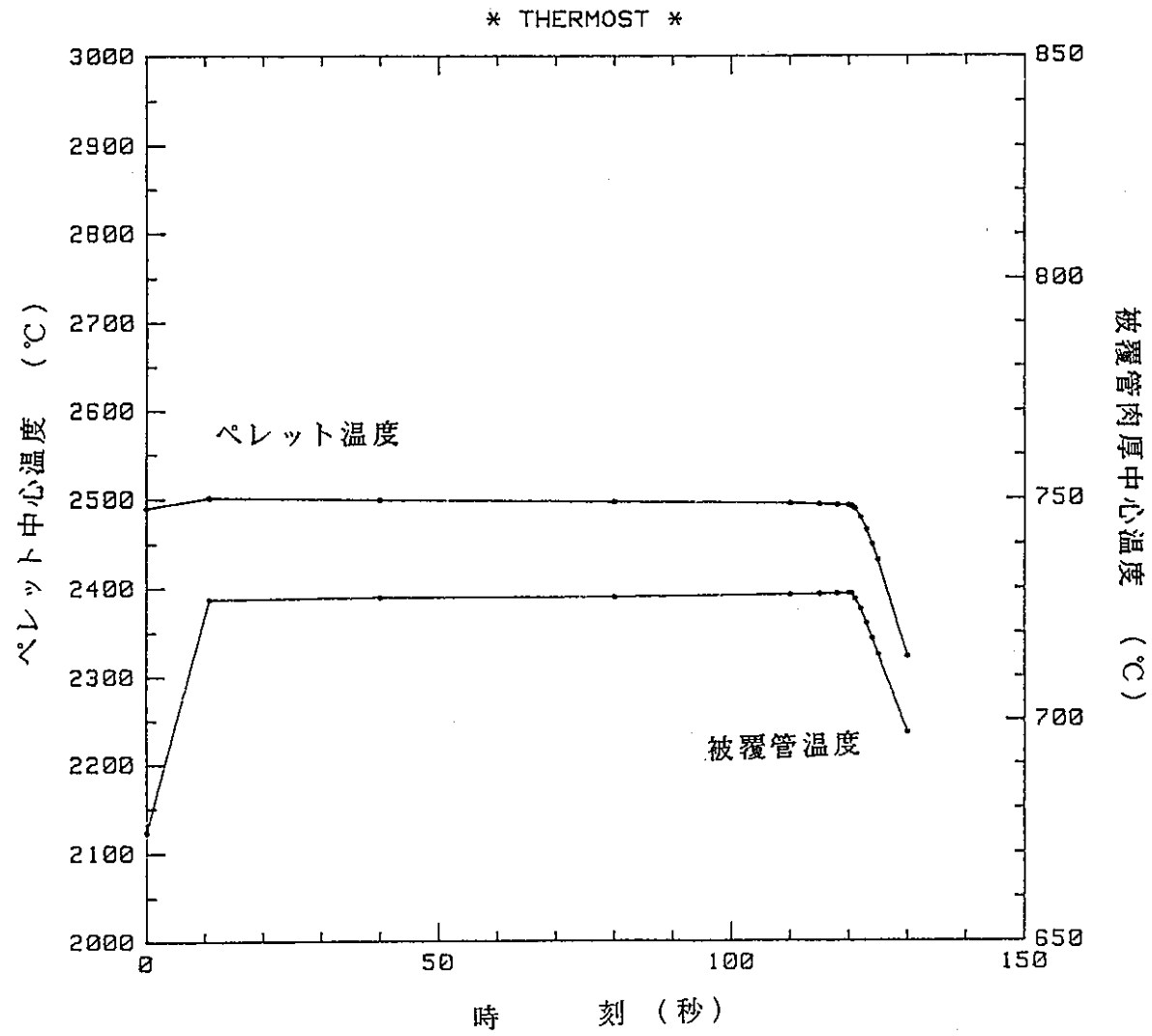


図 2.1-40

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象 : 主冷却器空気流量減少]

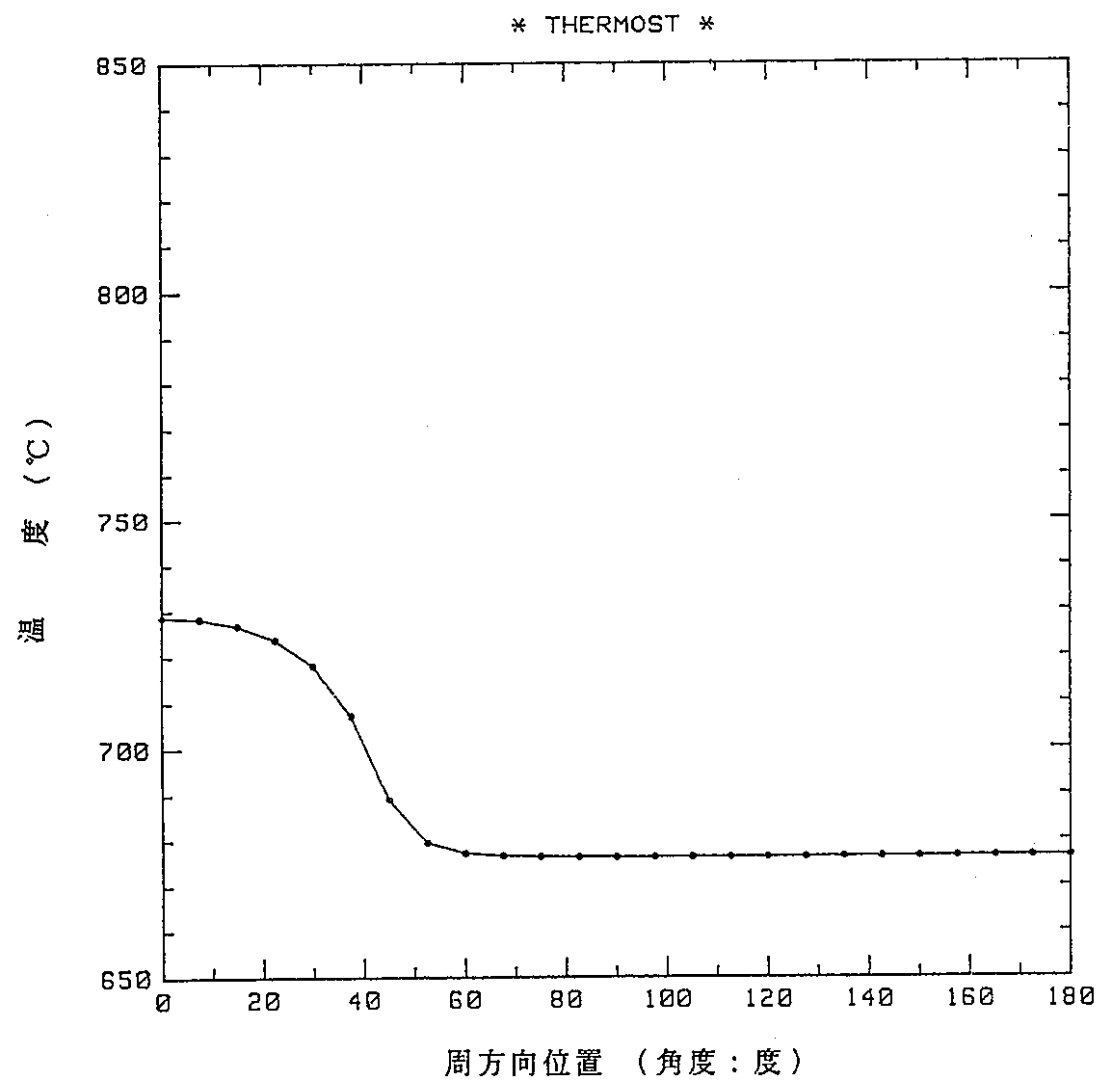


图 2.1-41 周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 1 1 3 秒〕
〔事象: 主冷却器空氣流量減少〕

2.2 「事故」時における試験用要素及び予備試験用要素の温度計算

解析手法、モデル、及び使用する解析コード (HARHO-IN, THERMOST) は前節 2.1 の「運転時の異常な過渡変化」と同じである。

健全性判断基準は以下の通りである。

試験用集合体内に生じた事象が当該集合体内部のみで収束すること。

試験用要素が十分に冷却可能であること。

なお、具体的な基準値としては、2.1 節「運転時の異常な過渡変化」のそれを準用する。

2.2.1 燃料スランピング事故

(1) 解析条件

主な条件を、表 2.2 - 1 にまとめる。

- (a) スランピング現象は同時には最大の 1 燃料集合体で起こるとする。
- (b) スランピングにより燃料は理論密度の 100% になり炉心下部に落下するとする。
上部軸方向反射体については密度変化はなく炉心燃料の上に落下する。
- (c) スランピングによる反応度付加はステップ状とする。
- (d) 原子炉は出力 100% で運転され、冷却材流量は定格流量とする。
- (e) 中性子束定格値の 107% で原子炉はスクラムすると仮定し、その遅れ時間は 200ms とする。
- (f) スクラム時にそう入される反応度価値は、最大の反応度価値を有する制御棒 1 本が全引き抜き位置に固着してそう入されない場合のものとする。
- (g) 反応度係数としてはドップラー定数、被覆管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数を考え、その値としては、原子炉出力のピーク値が最大に評価されるよう各々最大値（絶対値が最小の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

1 燃料集合体のスランピングによる反応度付加は炉心中心において約 27 ϕ で半径方向外側に向かうほど小さくなり、炉心最外列で約 9 ϕ となる。

27 ϕ のステップ状反応度を投入した場合の解析結果として、図 2.2 - 1 に原子炉出力及び炉心流量、図 2.2 - 2 に反応度、図 2.2 - 3、図 2.2 - 4 に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示

す。

図2.2-5にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-6に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.2-8に示す（予備試験用要素の冷却材温度は、HARHO-INの結果である。以下同様）。

27φの正の反応度のステップ挿入より、原子炉出力は瞬時に定格の130%に上昇し、「中性子束高」信号により、原子炉はスクラムする。しかしスクラム遅れのため原子炉出力は最大定格の141.4%まで上昇する。各部温度も同様に上昇し予備試験用要素のペレット最高温度は2570℃、被覆管最高温度は765℃、冷却材最高温度は666℃となるが、それらはすべて健全性判断基準を満足しており、この事故においては予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は2561℃でありペレット溶融温度2630℃を下回っている。

2.2.2 冷ナトリウム事故

次の3事象の解析を行った。

ケースA：1次冷却材流量の急上昇事故

ケースB：2次冷却材流量の急上昇事故

ケースC：主冷却器風量の急上昇事故

(1) 解析条件

主な条件を、表2.2-1にまとめる。

事故の経過を実際よりも十分に厳しい結果を得るために、各ケースについてそれぞれ解析条件を次のように仮定する。

(a) 原子炉は出力100%とする。

(b) 1次系及び2次系流量は定格流量とする。

(c) 中性子束定格値の107%にスクラムレベルを仮定し、スクラム遅れは200msとする。

(d) スクラム時にそう入される反応度価値は、最大の反応度価値を有する制御棒1本が全引き抜き位置に固着してそう入されないものとする。

(e) 反応度係数としては原子炉出力のピーク値が最大に評価されるように、被覆

管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数は、各々の最小値（絶対値が最大の負の値）を考え、ドップラー定数については最大値（絶対値が最小の負の値）を用いる。

(f) 流量の上昇は次のように仮定する。

ケースA：1次冷却材流量の急上昇は瞬時に起こるものとする。

ケースB：2次冷却材流量の急上昇は瞬時に起こるものとする。

ケースC：主冷却器風量の急上昇は瞬時に起こるものとする。

(2) 解析結果

(a) ケースA：1次冷却材流量の急上昇事故

図2.2-7に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-8に反応度、図2.2-9、図2.2-10に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.2-11にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心時刻歴を、図2.2-12に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

定格流量で運転されている1次系のポンプの駆動モータが短絡をおこすと、1次系流量は炉心部で約10%増加する。そのため冷却材温度が低下し、これによる反応度付加のため出力は上昇するが、約54秒後にスクラム設定点（107%）に達する。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.2-8に示す。冷却材及び被覆管は初期には1次冷却材流量が増加するため温度は低下する。その後原子炉出力の上昇に伴いペレット温度は上昇し、その結果、冷却材被覆管の温度も上昇する。予備試験用要素のペレット最高温度は2609℃、被覆管最高温度は727℃、冷却材最高温度は初期温度であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しており、この事故においては予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は2588℃でありペレット溶融温度は2630℃を下回っている。

(b) ケースB：2次冷却材流量の急上昇事故

図2.2-13に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-14に反応度、図2.2-15、

図2.2-16に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.2-17にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-18に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

定格流量で運転されている2次系ポンプの駆動モータが短絡を起こすと、2次系流量は約20%上昇する。これによる炉心入口ナトリウムの温度低下は約4℃であり、炉心支持板の収縮により $(19.0 \times 10^{-6} \times 4 / 4.47 \times 10^{-3} = 1.7 \phi$ 、及び冷却材の収縮により約1φの、合計2.7φの反応度付加のため出力は上昇する。そして、約43秒後にスクラム設定点(107%)に達する。(現行申請書では原子炉出力はスクラム設定点に到達していないが、J1燃料からJ2燃料へ変更したため、ドップラー定数の負の絶対値が20%減少したことにより $(3.7 \times 10^{-4}$ から $3.0 \times 10^{-4})$ 過渡変化時の反応度が増加したためであると考えられる。)

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.2-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2619℃、被覆管最高温度は748℃、冷却材最高温度は665℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの事故においては予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は2597℃でありペレット熔融温度2630℃を下回っている。

* 冷却材膨張係数は、殆ど変化なし $(-5.7 \times 10^{-6}$ から $-5.6 \times 10^{-6})$ 、他の係数は同じ

(c) ケースC：主冷却器風量急上昇事故

図2.2-19に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-20に反応度、図2.2-21、図2.2-22に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.2-23にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-24に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

100%出力運転時に風量制御系の誤動作により、風量が上昇する。これにより原子炉部分で冷却材入口温度が、約1℃/40秒の割合で低下し、炉心支持板

及び冷却材の温度低下にともなう正の反応度挿入により出力が上昇するが、約 208秒でスクラム設定点 (107%) に達する。(現行申請書では原子炉出力はスクラム設定点に到達していないが、前項「2次冷却材流量の急上昇事故」と同じくJ1燃料からJ2燃料への変更に伴う反応度係数の変化(主にドップラー定数)によるものと考えられる。)

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表 2.2-8 に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2620℃、被覆管最高温度は747℃、冷却材最高温度は664℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの事故においては予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は2598℃でありペレット溶融温度2630℃を下回っている。

2.2.3 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

(1) 解析条件

主な条件を、表 2.2-1 にまとめる。

- (a) 原子炉は出力100%で運転され、冷却材流量は定格流量とする。
- (b) 事故を想定する冷却回路の1次主冷却系循環ポンプは最も厳しい場合を想定して瞬時に回転を停止するものとする。
- (c) 原子炉は故障側冷却系回路流量80%により自動停止し、その遅れは 0.7秒とする。
- (d) 単一故障の仮定として1回路のポンプスティックと同時に、他の1回路のポンプもトリップするものとする。
- (e) 過渡期における原子炉出力を最大に評価するために、反応度係数としては被覆管膨張係数、冷却材膨張係数及び構造材膨張係数は最大値(絶対値が最小の負の値)を、また、ドップラー定数及び燃料軸方向膨張係数は最小値(絶対値が最大の負の値)を用いる。

(2) 解析結果

図 2.2-25に原子炉出力及び炉心流量、図 2.2-26に反応度、図 2.2-27、図 2.2-28に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図 2.2-29にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素の

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-30に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

1回路のポンプスティック事故により炉心流量は2秒後に定格の約50%まで減少する。0.2秒で、故障側冷却系回路流量80%により、原子炉はスクラムする。原子炉出力は1.2秒間で91%にまで減少し、その後スクラム反応度が大きく効くため10%にまで低下する。被覆管、冷却材最高温度は、流量の減少速度が出力の減少速度を上回るため、一旦は上昇するが、スクラムによって低下する。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.2-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は844℃、冷却材最高温度は805℃でありそれらはすべて健全性判断基準を満足しており、この事故においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度でありペレット熔融温度2630℃を下回っている。

2.2.4 2次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

(1) 解析条件

主な条件を、表2.2-1にまとめる。

事故の経過を実際よりも十分に厳しい結果を得るために、解析条件を次のように仮定する。

- (a) 原子炉は出力100%で運転され、冷却材流量は定格流量とする。
- (b) 事故を想定する冷却回路の2次主冷却系循環ポンプは最も厳しい場合を仮定して瞬時に回転を停止するものとする。
- (c) 原子炉は故障側2次冷却系回路の「2次冷却材流量低」の信号により制御棒一斉そう入動作が行われ、その遅れは0.4秒とする。
- (d) 単一故障の仮定として1回路のポンプスティックと同時に、他の1回路のポンプもトリップするものとする。
- (e) 反応度係数は原子炉出力を最大に評価するように各反応度係数の最小値（絶対値が最大の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図2.2-31に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-32に反応度、図2.2-33、図2.2-34に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管

冷却材最高温度を示す。

図2.2-35にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-36に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

原子炉出力は「2次冷却材流量低」の信号による制御棒一斉挿入でゆるやかに減少し、120秒の時点では、定格の3.7%となる。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を表2.2-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は727℃、冷却材最高温度は初期温度であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの事故においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また、試験用要素のペレット最高温度は初期温度でありペレット溶融温度2630℃を下回っている。

2.2.5 主冷却器送風器軸固着事故

(1) 解析条件

主な条件を、表2.2-1にまとめる。

事故の経過を実際よりも十分に厳しい結果を得るために、解析条件を次のように仮定する。

- (a) 原子炉は出力100%、各系の流量は定格の100%とする。
- (b) 事故により空気流量が0%に低下したとする。
- (c) 原子炉は「原子炉入口冷却材温度高」により自動停止され、その遅れは10秒とする。
- (d) 単一故障の仮定として1回路の送風器スティックと同時に、他の1回路の送風器もトリップするものとする。
- (e) 反応度係数は原子炉出力を最大に評価するように各反応度係数の最小値（絶対値が最大の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図2.2-37に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-38に反応度、図2.2-39、図2.2-40に炉心ホットチャンネル、試験用要素それぞれの、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.2-41にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素の

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-42に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

原子炉出力は、炉心入口温度が上昇するにつれ冷却材の負の反応度が挿入されるので、徐々に低下し、約78秒後に「原子炉入口冷却材温度高」によるスクラムで急激に減少し、200秒後には4%で落ち着く。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を表2.2-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は730℃、冷却材最高温度は653℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しており、この事故においては、予備試験用要素の健全性が損なわれていることはない。

また試験用要素のペレット最高温度は、初期温度でありペレット熔融温度2630℃を下回っている。

2.2.6 2次冷却材漏洩事故

(1) 解析条件

主な条件を、表2.2-1にまとめる。

事故の経過を実際よりも十分に厳しい結果を得るために、解析条件を次のように仮定する。

(a) 原子炉は出力100%、冷却材流量は定格流量とする。

(b) 小規模な漏洩事故が発生すれば漏洩検出器により検出され運転員に注意を喚起し、原子炉停止等の適切な処理がとられるので直接原子炉に影響を与えることはない。そこで、ここでは2次主冷却系2ループのうち1ループ配管が万一瞬時に破断した場合を想定する。

(2) 解析結果

図2.2-43に原子炉出力及び炉心流量、図2.2-44に反応度、図2.2-45、図2.2-46に炉心ホットチャンネル、試験用要素の、ペレット、被覆管、冷却材最高温度を示す。

図2.2-47にガスインピンジメントモデルを用いた場合の、予備試験用要素のペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-48に被覆管肉厚中心温度の周方向分布を示す。

原子炉出力は、炉心入口温度が上昇するにつれ冷却材の負の反応度が挿入されるので徐々に低下する。約27秒で炉心入口温度がさらに上昇するため、原子炉出

力も低下し、約56秒後に「原子炉入口冷却材温度高」によるスクラムで、急激に減少し、200秒後に3.5%で落ち着く。

炉心及び予備試験用要素のペレット、被覆管、冷却材最高温度を、表2.2-8に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2501℃、被覆管最高温度は751℃、冷却材最高温度は681℃であり、それらはすべて健全性判断基準を満足しておりこの事故においては、予備試験用要素の健全性が損なわれることはない。

また試験用要素のペレット最高温度は、初期温度でありペレット熔融温度2630℃を下回っている。

表 2.2 - 1 解析主要条件 (事故)

解析条件		解析事故 燃料スランピング	冷ナトリウム 1次冷却材流量急上昇	冷ナトリウム 2次冷却材流量急上昇	冷ナトリウム 主冷却器風量急上昇	1次主冷却系 循環ポンプ軸固着事故	2次主冷却系 循環ポンプ軸固着事故	主冷却器送風器 軸固着事故	2次冷却材漏えい事故
初期運転状態		定格	定格	定格	定格	定格	定格	定格	定格
反応度係数	ド ッ プ ラ ー	最大 -0.30×10^{-3}	最大 -0.30×10^{-3}	最大 -0.30×10^{-3}	最大 -0.30×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}
	冷 却 材	最大 -5.60×10^{-6}	最小 -1.37×10^{-6}	最小 -1.37×10^{-6}	最小 -1.37×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最小 -1.37×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}	最大 -5.60×10^{-6}
	構 造 材	最大 -0.39×10^{-6}	最小 -0.98×10^{-6}	最小 -0.98×10^{-6}	最小 -0.98×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最小 -0.98×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}	最大 -0.39×10^{-6}
	燃 料					最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}	最小 -0.45×10^{-5}
	被 覆 管	最大 -0.63×10^{-6}	最小 -1.60×10^{-6}	最小 -1.60×10^{-6}	最小 -1.60×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最小 -1.60×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}
	炉 心 支 持 板		最小 -19.0×10^{-6}	最小 -19.0×10^{-6}	-11.0×10^{-6} *3				
原子炉 トリップ	スクラム信号	中性子束高 107%	中性子束高 107%	中性子束高 107%	中性子束高 107%	1次冷却材流量低80%	2次冷却材流量低80%	原子炉入口温度高	原子炉入口温度高
	スクラム方法	図2.1-3	図2.1-5	図2.1-5	図2.1-5	図2.1-3	図2.1-4	図2.1-5	図2.1-5
	スクラム時刻 (秒) *1	0.2	53.7	43.3	208.0	0.9	1.4	78.0	56.0
挿入反応度		27¢ステップ							
解析時間		3.0秒	100秒	100秒	300秒	4.0秒	120秒	200秒	200秒
ギャップコンダクタンス		1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F	1000Btu/h-ft ² -°F
炉心流量		一定	100%→110%	一定	一定	表2.2-4	一定	一定	一定
炉心入口温度		一定	表2.2-2	瞬時に4℃下げる*2	表2.2-3	一定	表2.2-5	表2.2-6	表2.2-7
炉心各部温度		定格	定格	定格	定格	定格	定格	定格	定格
THERMOST 解析条件	ガ ス 温 度	炉心部上端でのNa温度 時間に関して一定	←	←	←	炉心部上端でのNa温度 HARHO-INの結果	←	炉心部上端でのNa温度 HARHO-INの結果	←
	N a 温 度	時間に関して一定	←	←	←	HARHO-INの結果	←	HARHO-INの結果	←
	Naレイノルズ数	一定	←	←	←	Na流速の関数	←	Na流速の関数	←
	ペレット発熱量	HARHO-INの結果	←	←	←	←	←	HARHO-INの結果	←

*1 検出器おくれを含む *2 詳細は添付資料A 2次冷却材流量急上昇事故時炉心入り口ナトリウム温度 *3 動燃殿指示

表 2.2 - 2 炉心入口温度变化 (1 次冷却材流量急上昇事故) *1)

時 間 (sec)	温 度 (℃)
0.0	370.0
20.0	369.9
40.0	370.0
53.0	369.9
80.0	371.3
100.0	373.7
120.0	374.9
140.0	372.9
160.0	367.7
180.0	361.7
200.0	656.5
240.0	348.0
260.0	341.0
280.0	331.5
300.0	323.0
327.0	318.3
340.0	319.4
360.0	323.8
380.0	328.7
420.0	333.5

表 2.2 - 3 炉心入口温度变化 (主冷却器风量急上昇事故) *1)

時 間 (sec)	温 度 (℃)
0.0	370.0
20.0	369.7
40.0	369.1
60.0	368.9
80.0	368.5
100.0	367.8
120.0	366.9
140.0	366.4
160.0	366.0
180.0	365.8
200.0	365.6
220.0	365.5
240.0	365.4
260.0	365.3
280.0	365.3
300.0	365.2
320.0	365.2
350.0	365.2
380.0	365.3
420.0	365.3

表2.2－4 炉心入口温度変化（1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故）*1)

時 間 (sec)	流 量 比
0.00	1.00000
0.04	0.93950
0.08	0.89185
0.12	0.85360
0.16	0.82237
0.20	0.79644
0.40	0.70663
0.60	0.64473
0.80	0.59162
1.00	0.58710
1.40	0.56155
2.00	0.51368
3.00	0.44598
4.00	0.39189
5.00	0.34815
6.00	0.31268
7.00	0.28320
8.00	0.25819
9.00	0.23715
9.96	0.21963

表 2.2 - 5 炉心入口温度変化（2 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故）*1)

時 間 (sec)	温 度 (℃)
0.0	370.00
6.0	370.01
12.0	369.97
18.0	370.01
24.0	371.50
30.0	376.36
36.0	384.92
42.0	395.34
48.0	405.09
54.0	412.63
60.0	417.70
66.0	420.78
72.0	422.49
78.0	423.23
81.0	423.31
84.0	423.21
90.0	422.50
100.0	419.72
110.0	415.10
120.0	409.24

表 2.2 - 6 炉心入口温度变化 (主冷却器送風器軸固着事故) *1)

時 間 (sec)	温 度 (℃)
0.0	370.00
10.0	370.04
20.0	370.04
30.0	371.22
40.0	371.30
50.0	371.28
70.0	372.54
80.0	375.56
100.0	388.42
110.0	396.15
120.0	402.88
130.0	407.84
140.0	410.88
150.0	412.22
155.0	412.39
160.0	412.29
170.0	411.50
180.0	410.16
190.0	408.54
200.0	406.93

表2.2-7 炉心入口温度变化（2次冷却材漏洩事故）*1)

時 間 (sec)	温 度 (℃)
0.0	370.0
27.0	380.8
40.0	407.3
56.0	426.8
60.0	428.8
70.0	431.3
80.0	432.1
90.0	432.4
100.0	432.6
110.0	432.9
120.0	433.6
130.0	434.8
140.0	436.2
150.0	437.2
154.0	437.3
160.0	437.1
170.0	435.7
180.0	433.1
190.0	429.5
200.0	425.2

表 2. 2 - 8 解析結果のまとめ（事故）

ケースI.D.	事 象 名	スクラム時刻 〔検出器 おくれを 含む〕 (sec)	炉心燃料温度（℃）			予備試験用要素温度（℃）		
			ペレット	被覆管	冷却材	ペレット	被覆管	冷却材*2
1	燃料スランピング 事故	0.2	2602/2500	676/ 650	659/ 635	2570/2490	765/ 675	666/ 650
2 - a	冷ナトリウム事故 1次冷却材流量急上昇	53.7	2611/2500	なし*1	なし*1	2609/2490	727/ 675	なし*1
2 - b	冷ナトリウム事故 2次冷却材流量急上昇	43.3	2620/2500	665/ 650	649/ 635	2619/2490	748/ 675	665/ 650
2 - c	冷ナトリウム事故 主冷却器風量急上昇	208.0	2621/2500	664/ 650	648/ 635	2620/2490	747/ 675	664/ 650
3	1次主冷却系循環 ポンプ軸固着事故 (2次ピーク)	0.9	なし*1	804/ 650	795/ 635	2501/2490	844/ 675	805/ 650
4	2次主冷却系循環 ポンプ軸固着事故	1.4	なし*1	なし*1	なし*1	2501/2490	727/ 675	な し
5	主冷却器送風機 軸固着事故	78.0	なし*1	653/ 650	638/ 635	2501/2490	730/ 675	653/ 650
6	2次冷却材漏えい 事故	56.0	なし*1	681/ 650	668/ 635	2501/2490	751/ 675	681/ 650

*1 初期温度以上にならない。

*2 HARHO-INによる結果を記載してある。

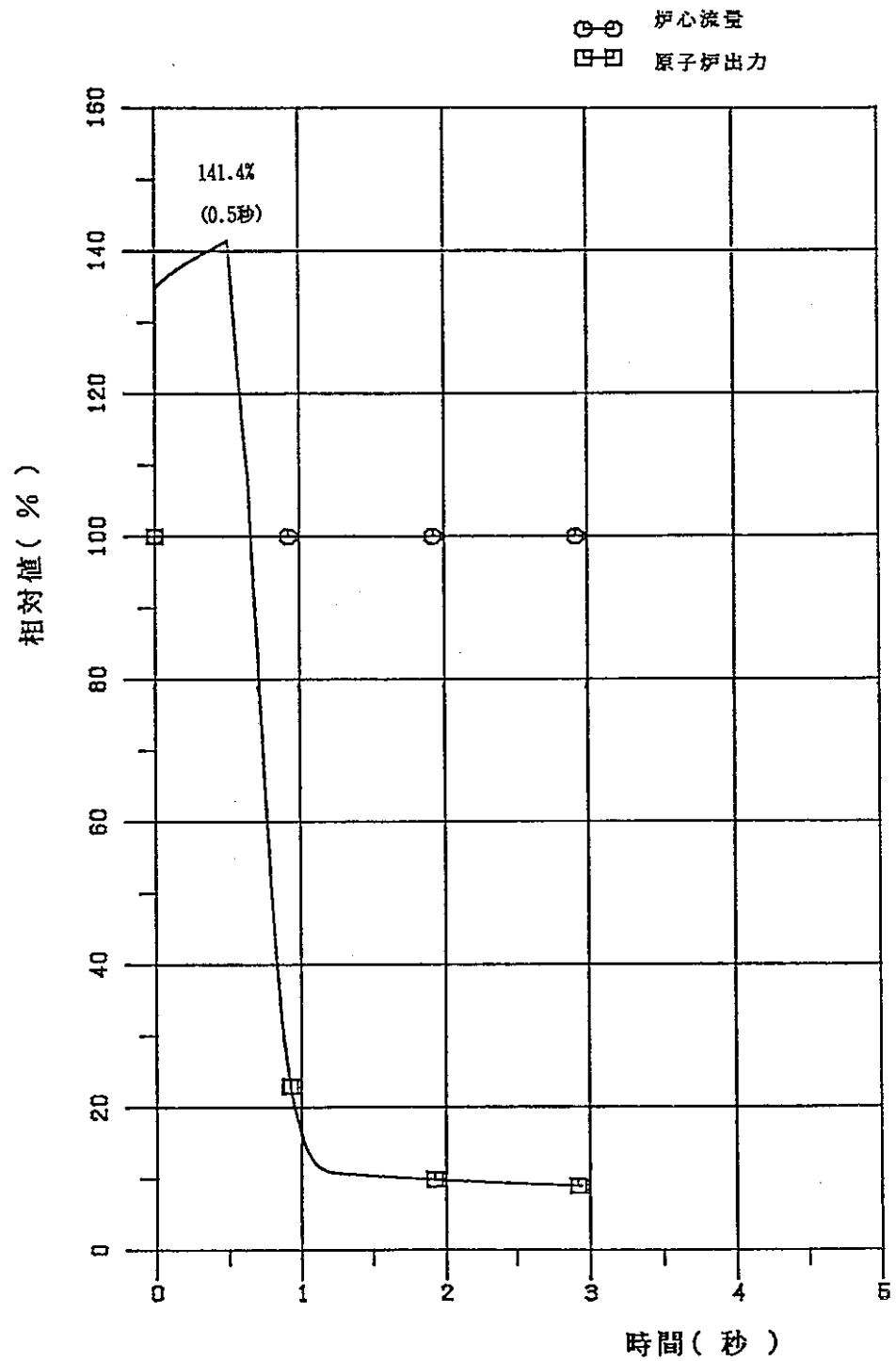


図2.2-1 高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

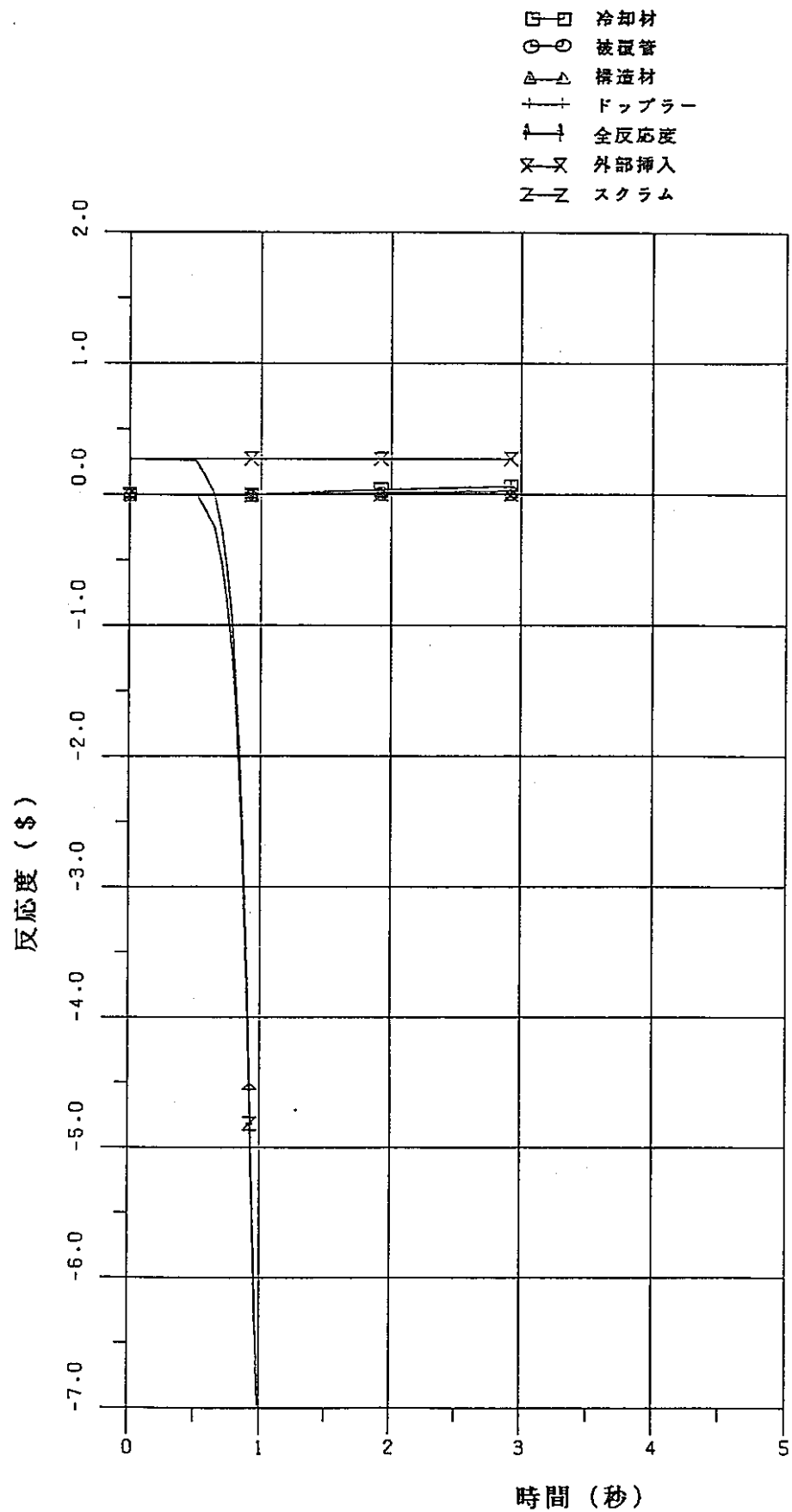


図2.2-2 高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)

—反応度—

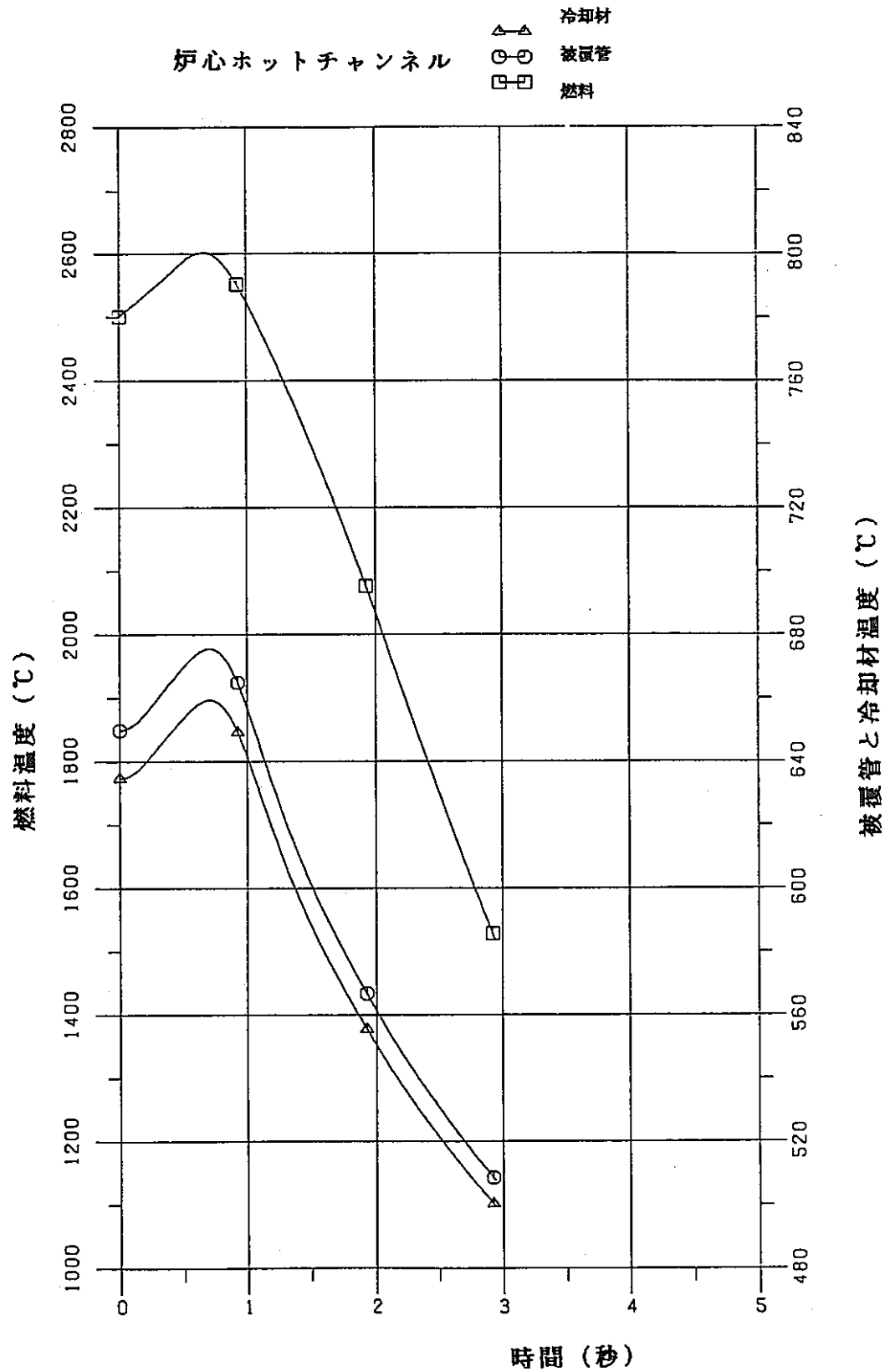


図2.2-3 高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

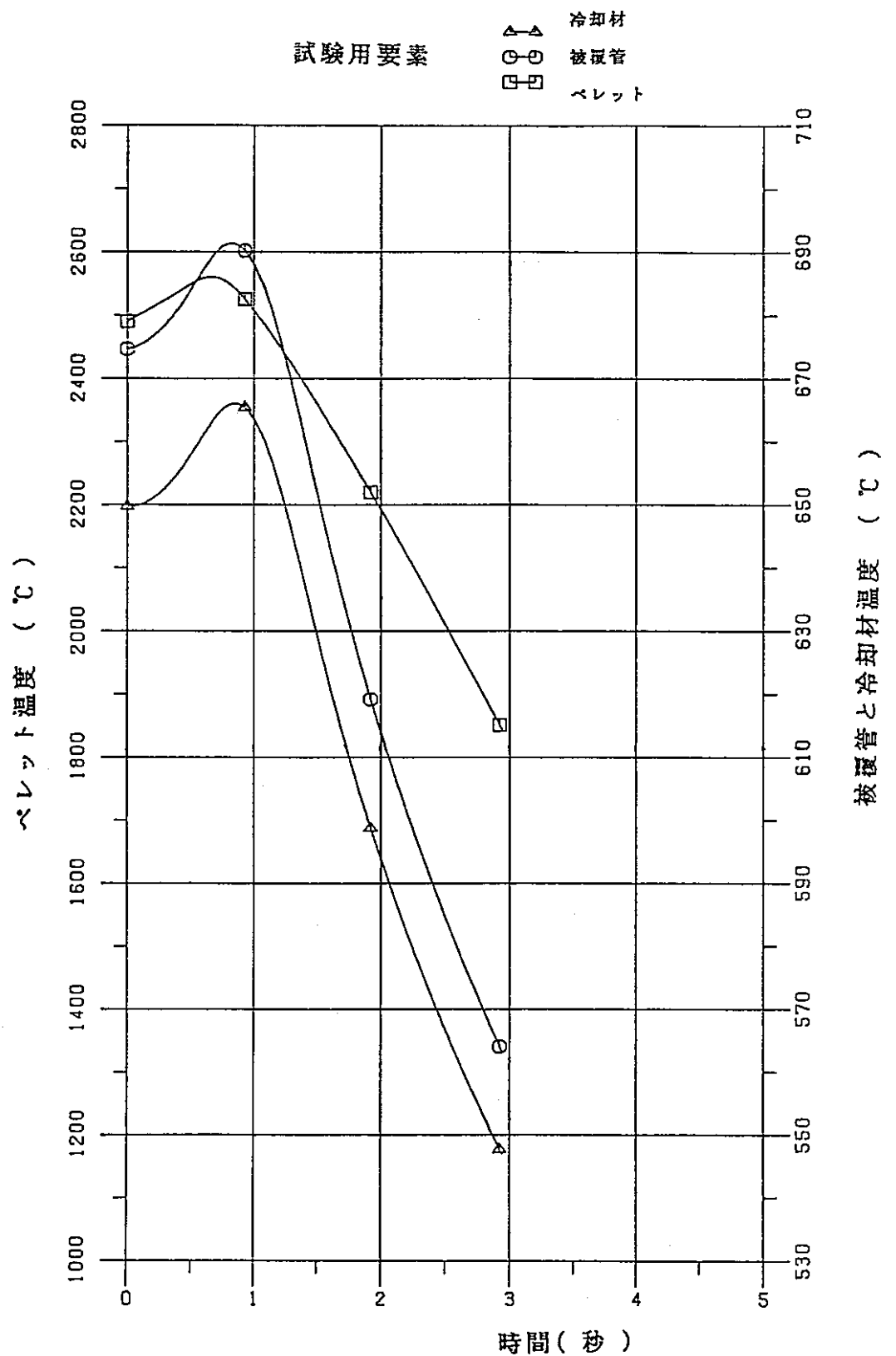


図2.2-4 高燃焼度試験時、燃料スランピング (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

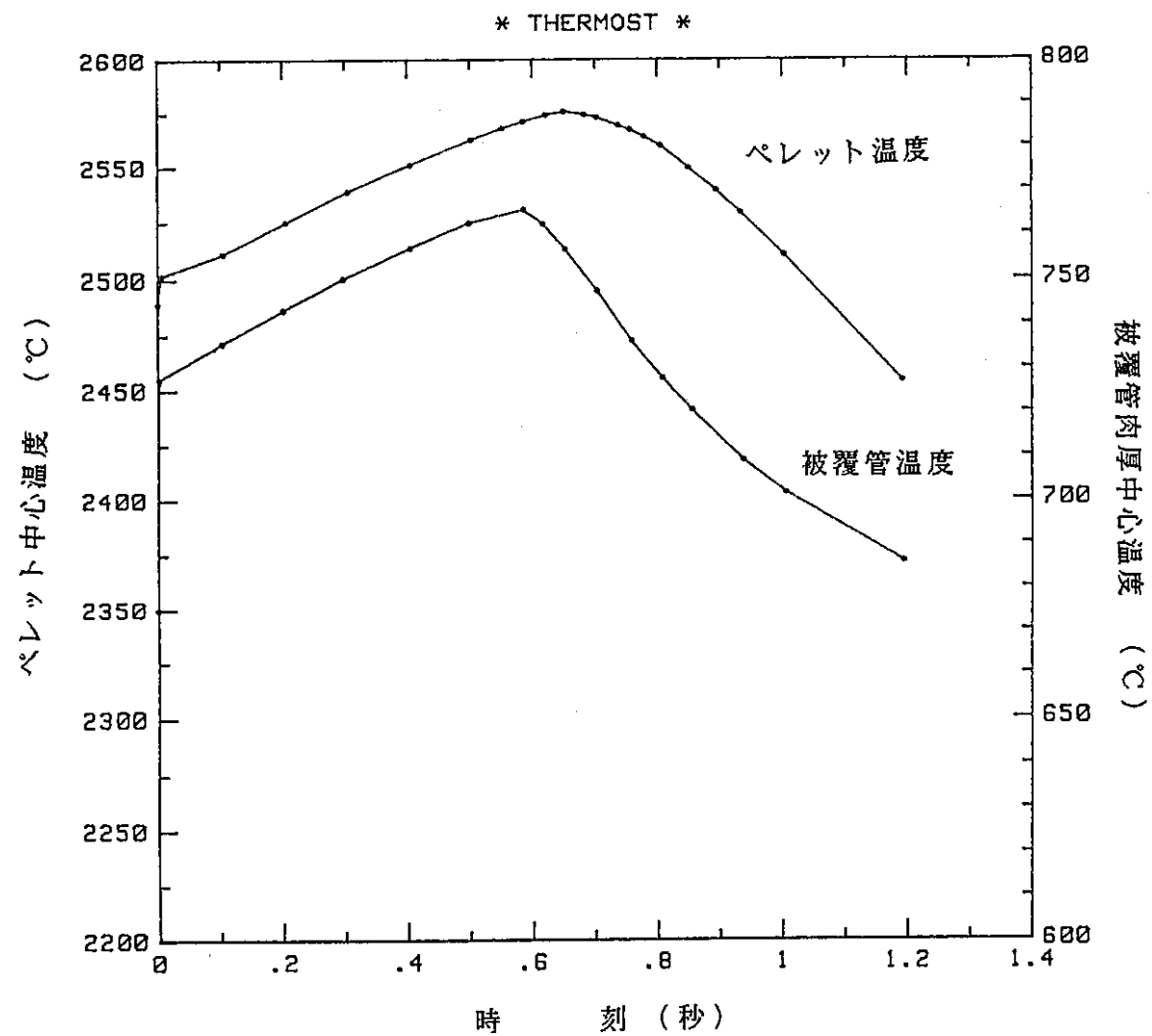


図 2.2-5 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：燃料スランピング事故]

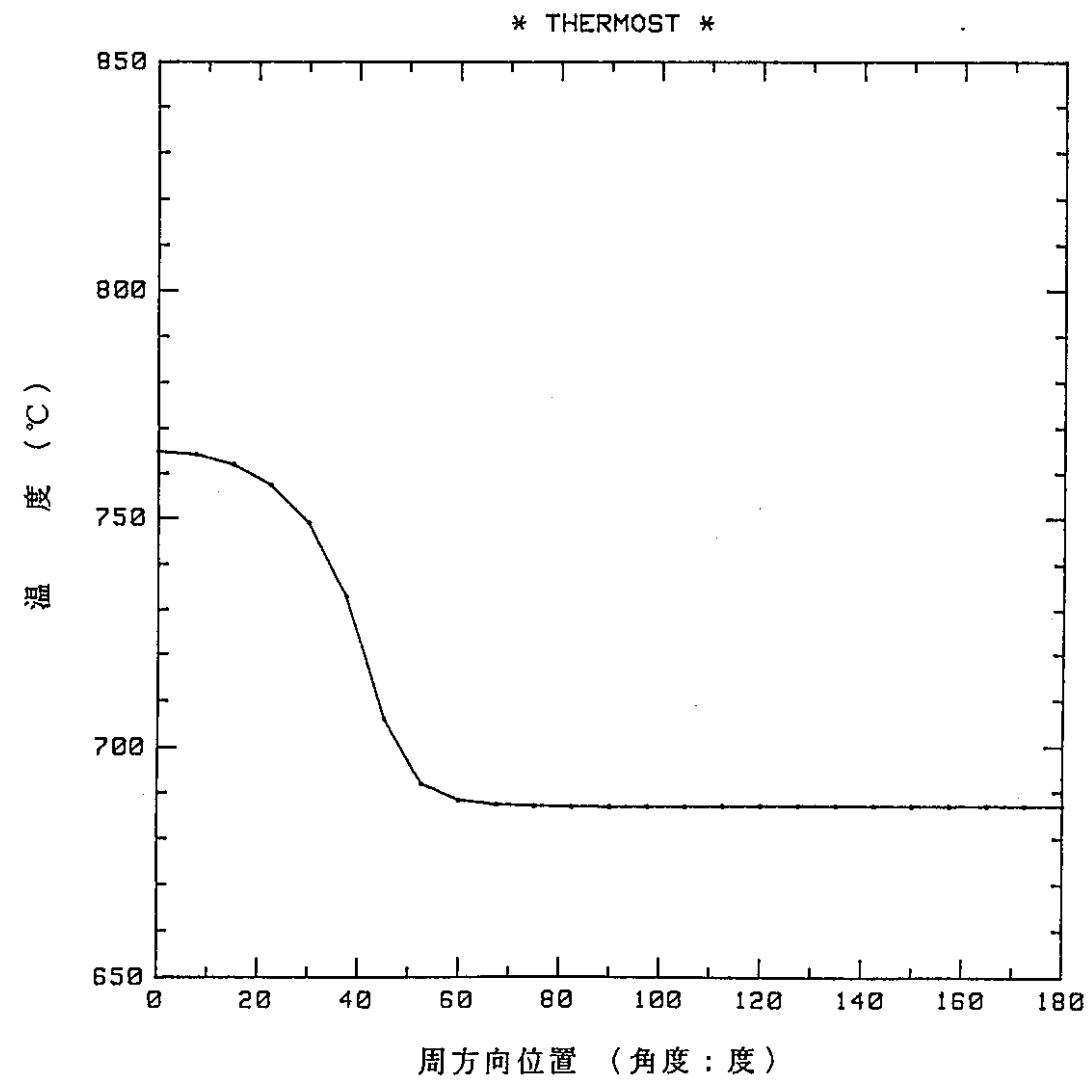


図 2.2-6 周方向被覆管肉厚中心温度分布 [時刻: 0.59 秒]
[事象: 燃料スランピング事故]

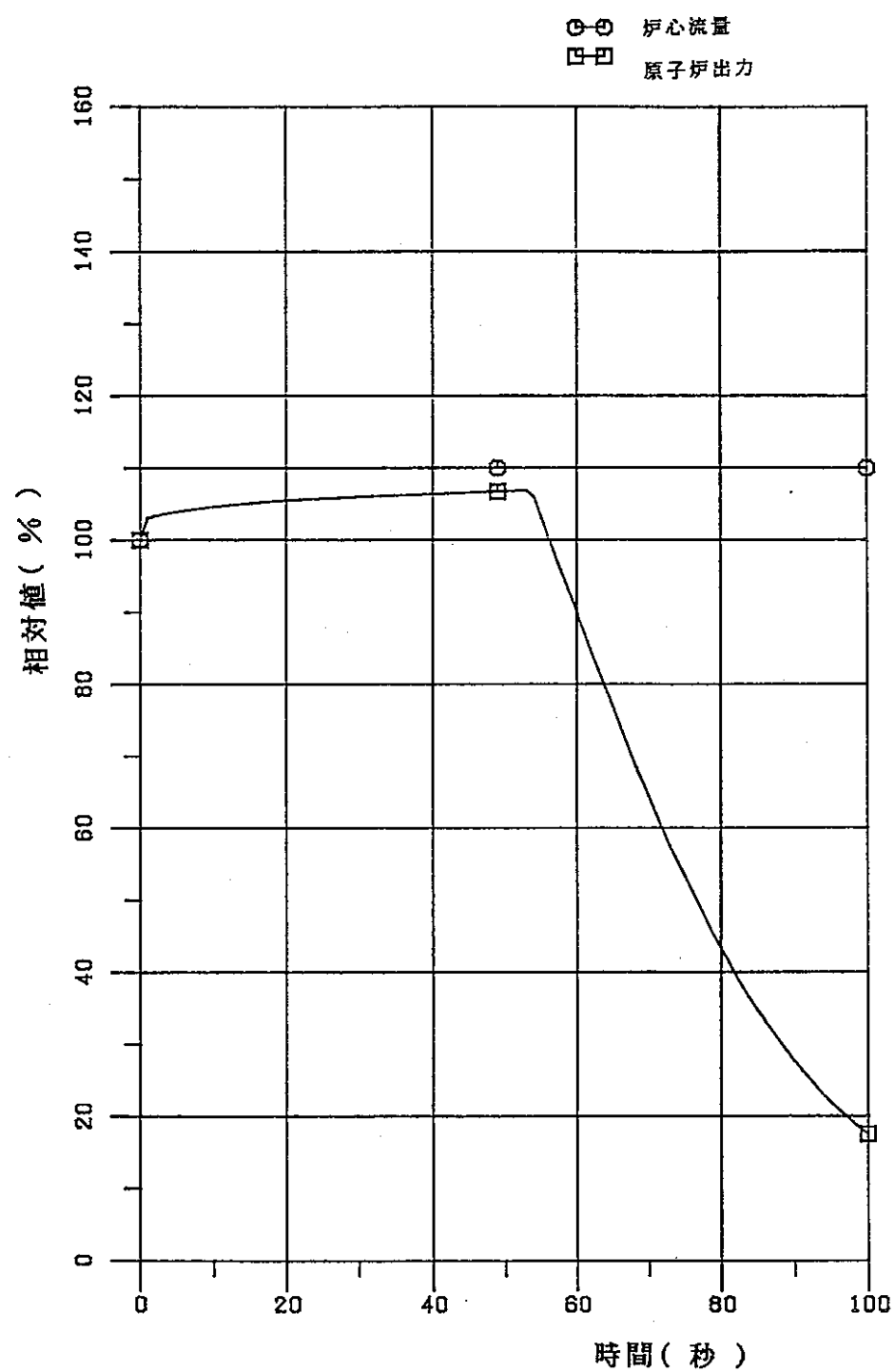


図2.2-7 高燃焼度試験時、1次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

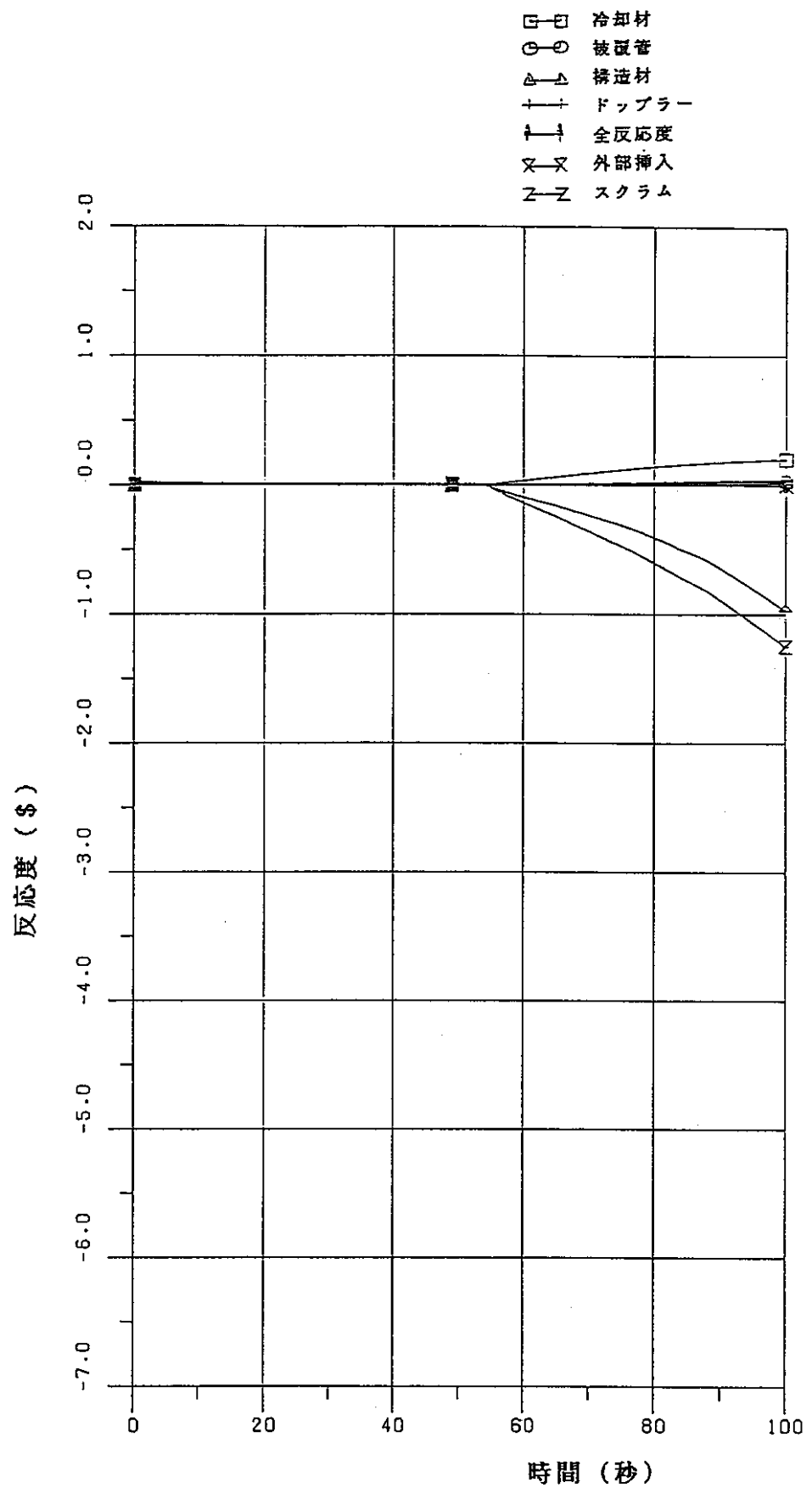


図2.2-8 高燃焼度試験時, 1次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)

—反応度—

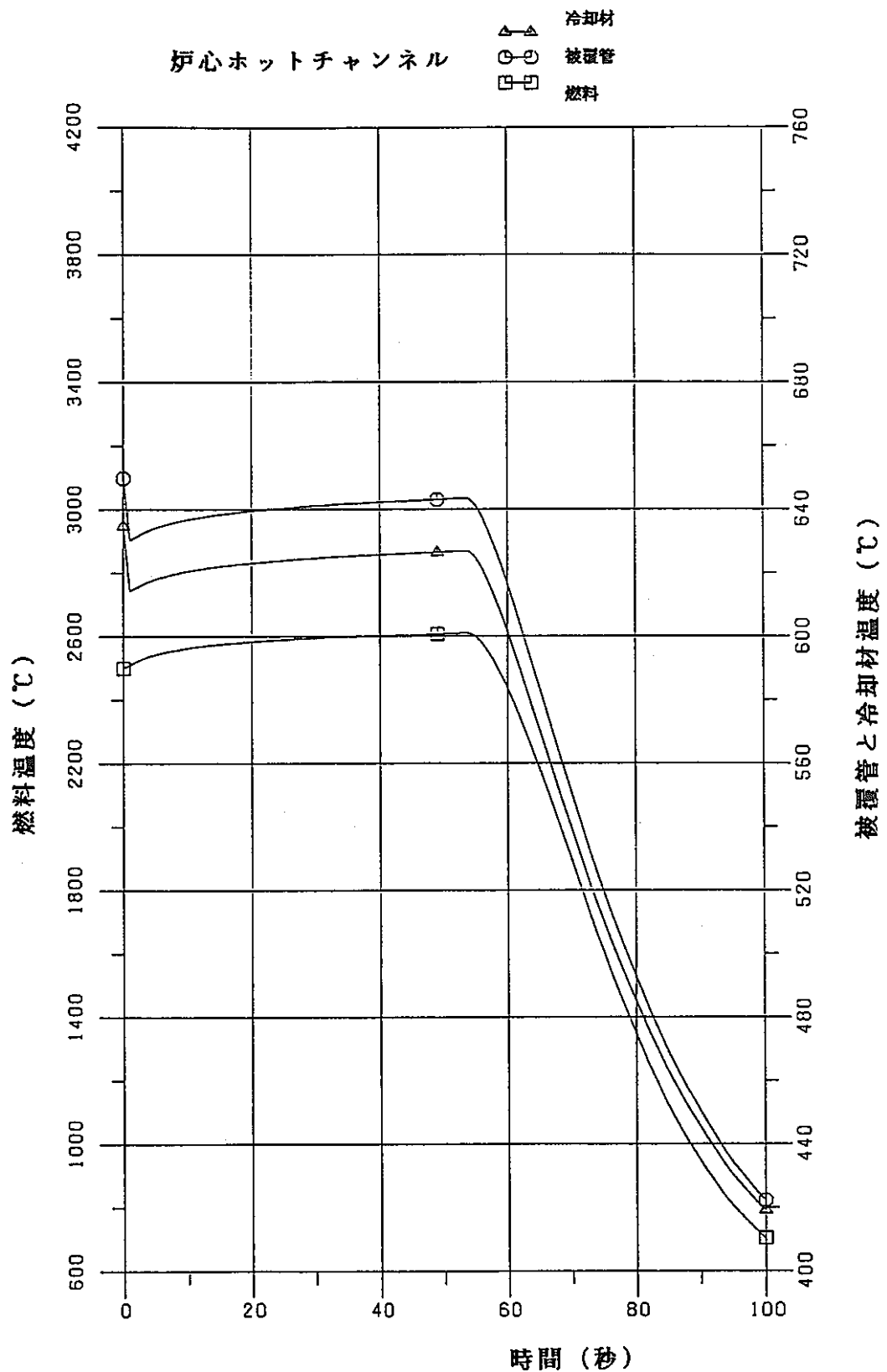


図2.2-9 高燃焼度試験時，1次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

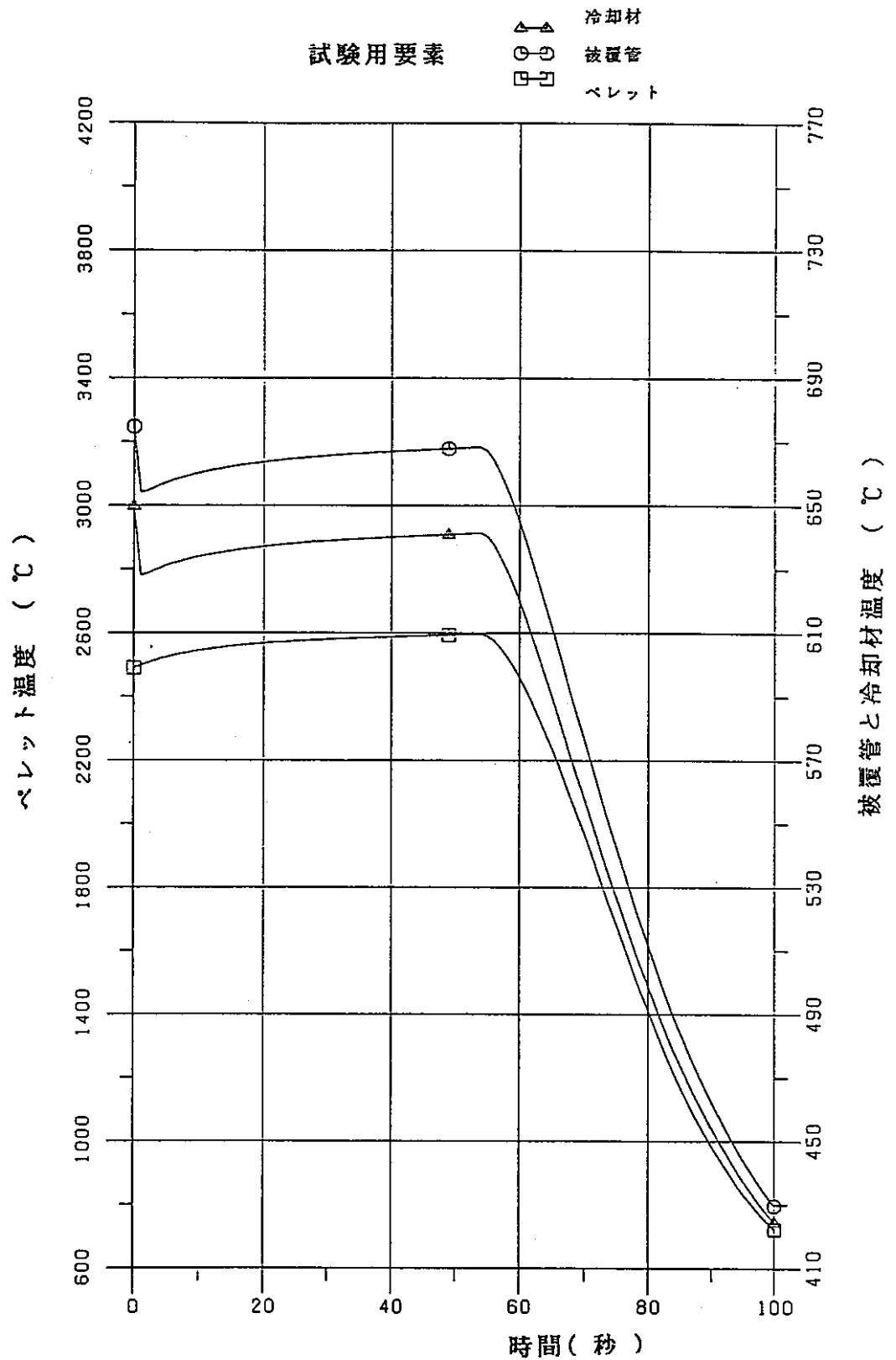


図2.2-10 高燃焼度試験時，1次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

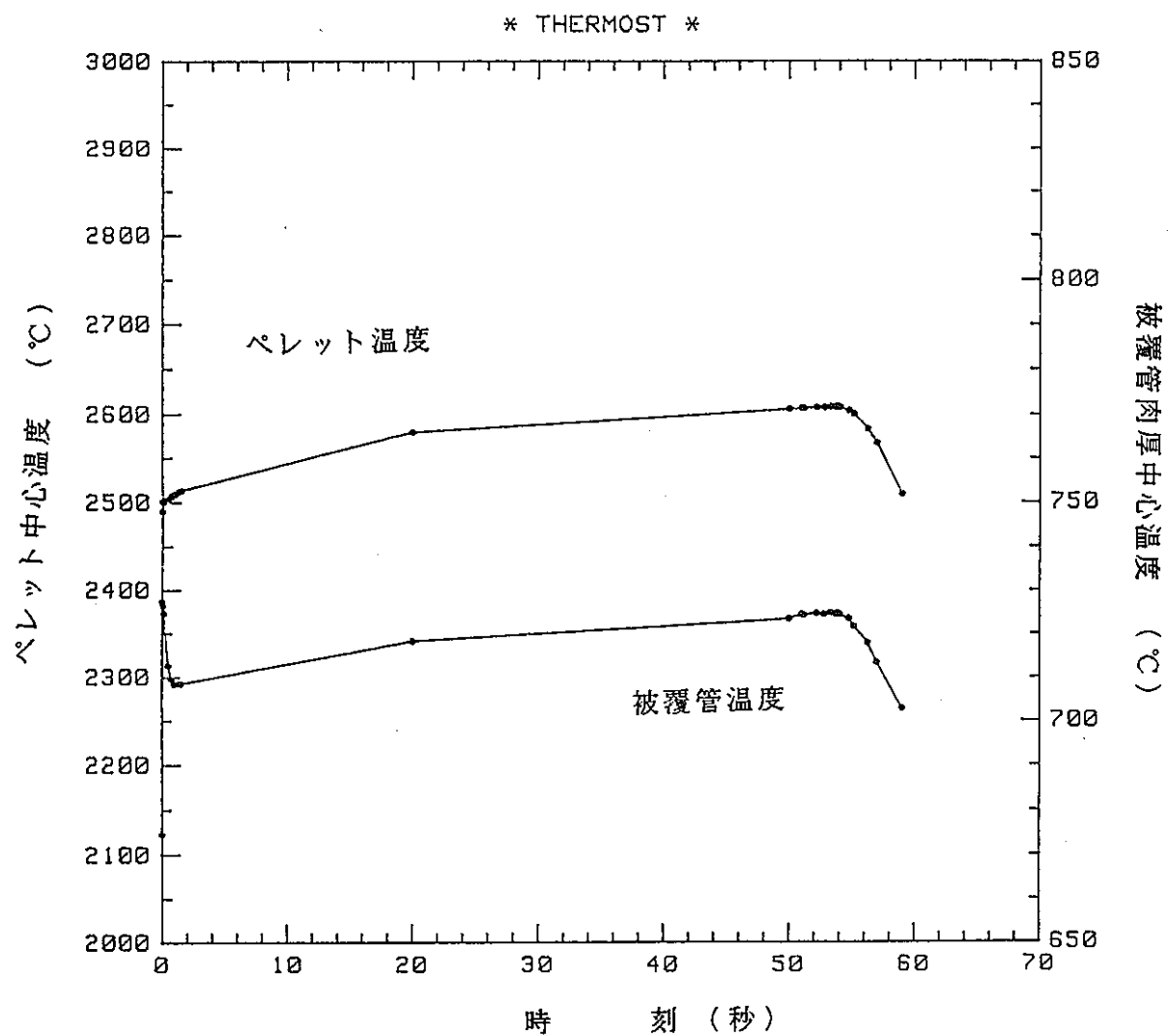


図2.2-11 ペレット中心温度、被覆管内厚中心温度時刻歴

〔事象：1次冷却材流量急上昇〕

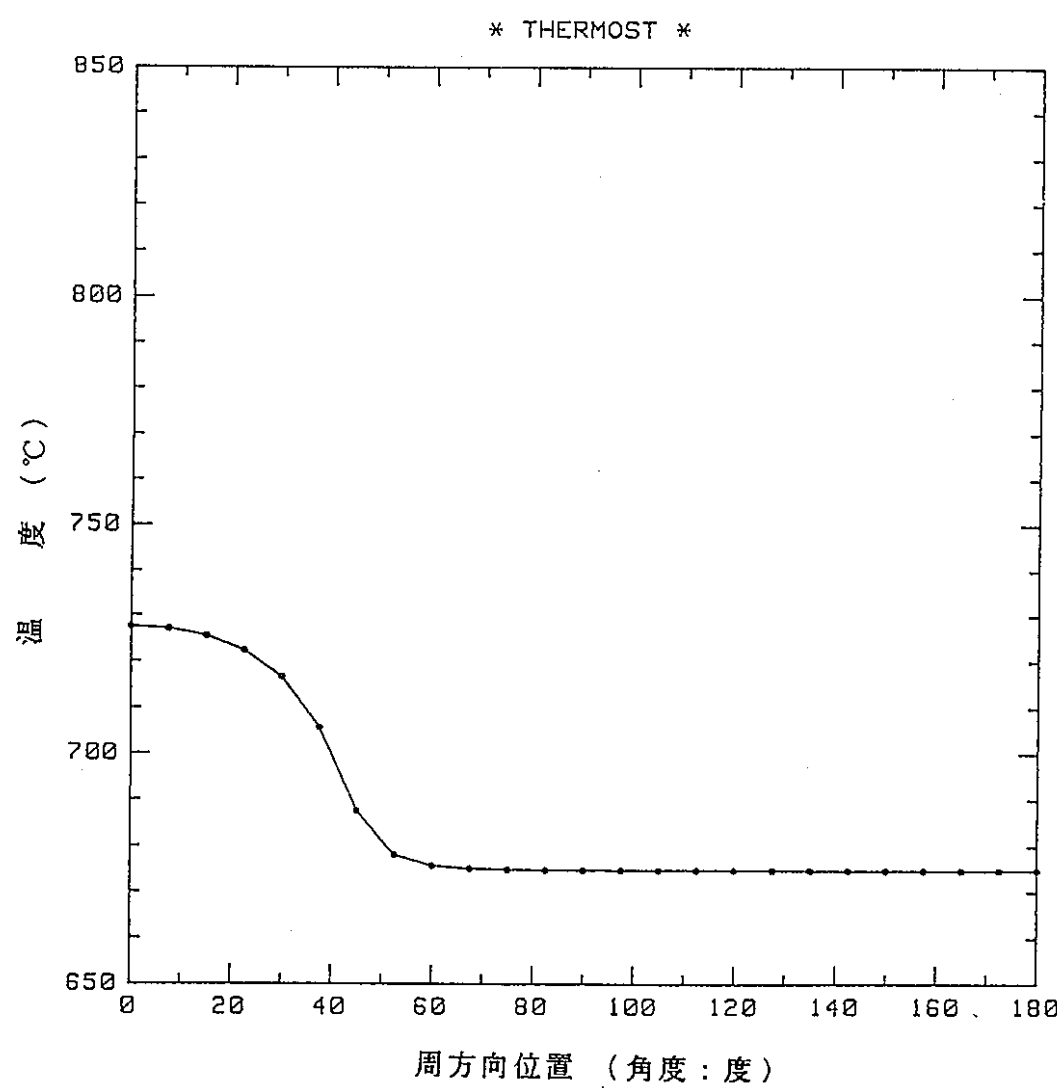


図2.2-12 周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 0.01秒〕
〔事象: 1次冷却材流量急上昇〕

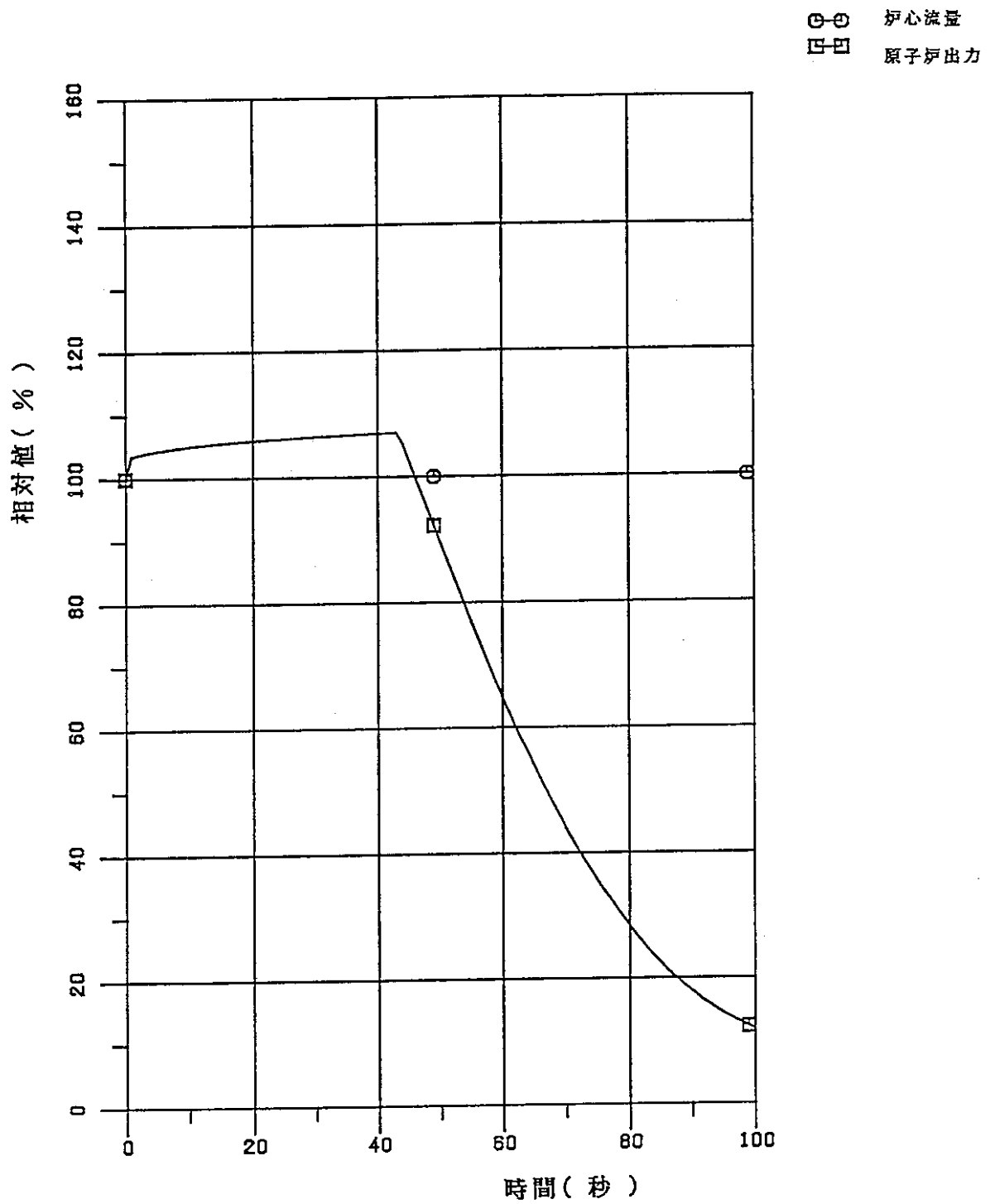


図2.2-13 高燃焼度試験時、2次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)
 —原子炉出力及び炉心流量—

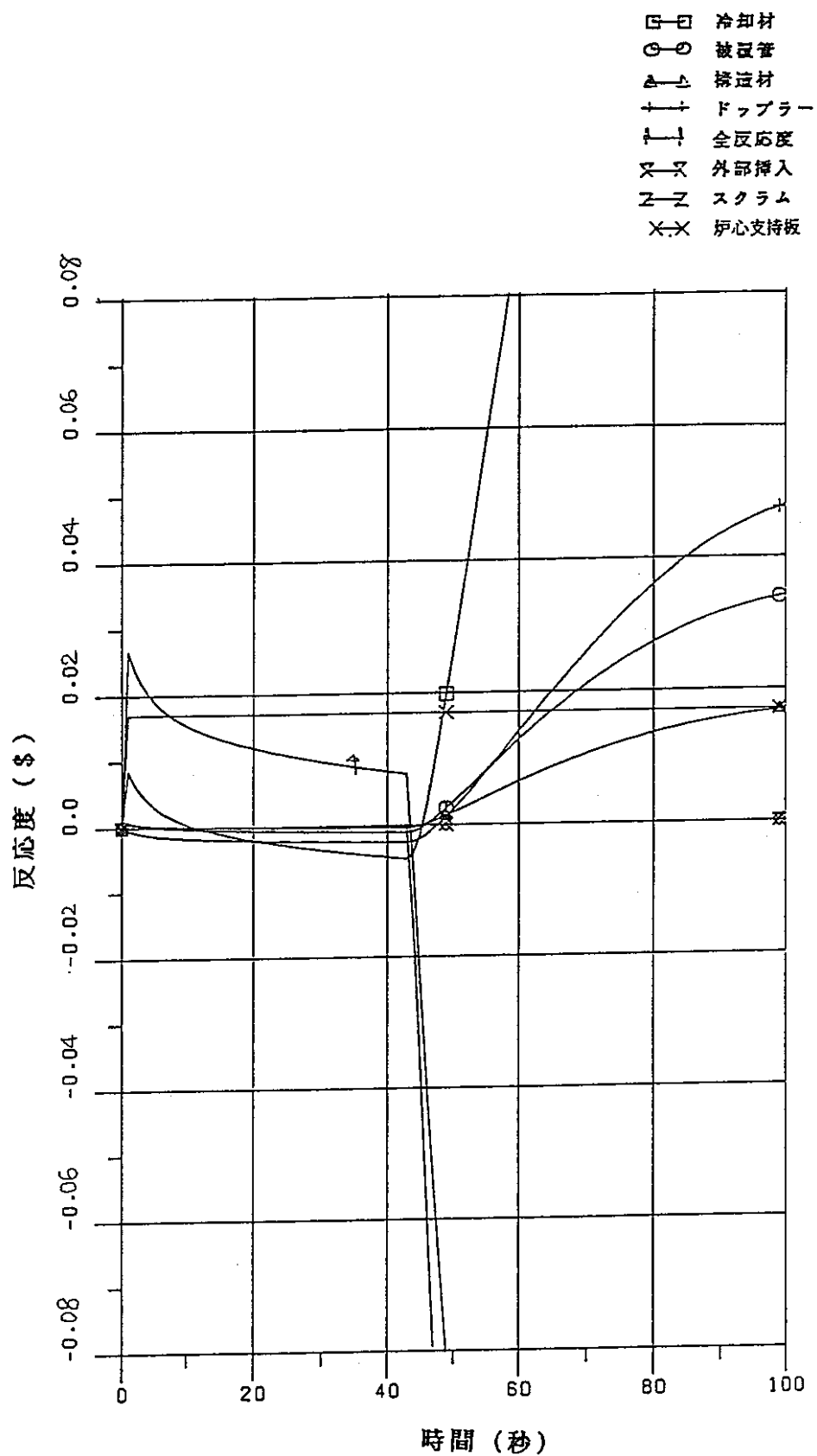


図2.2-14 高燃焼度試験時，2次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)
—反応度—

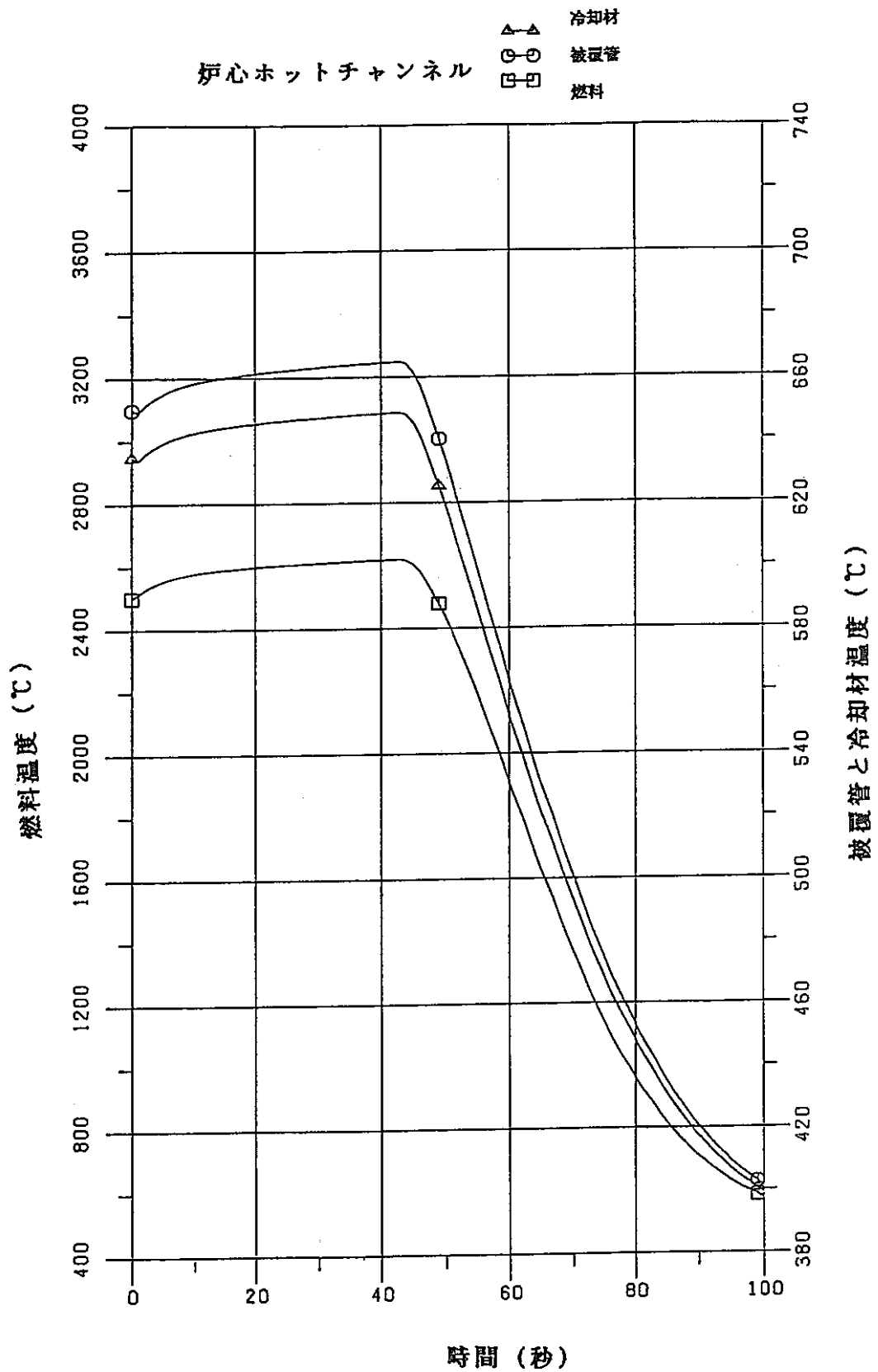


図2.2-15 高燃焼度試験時，2次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

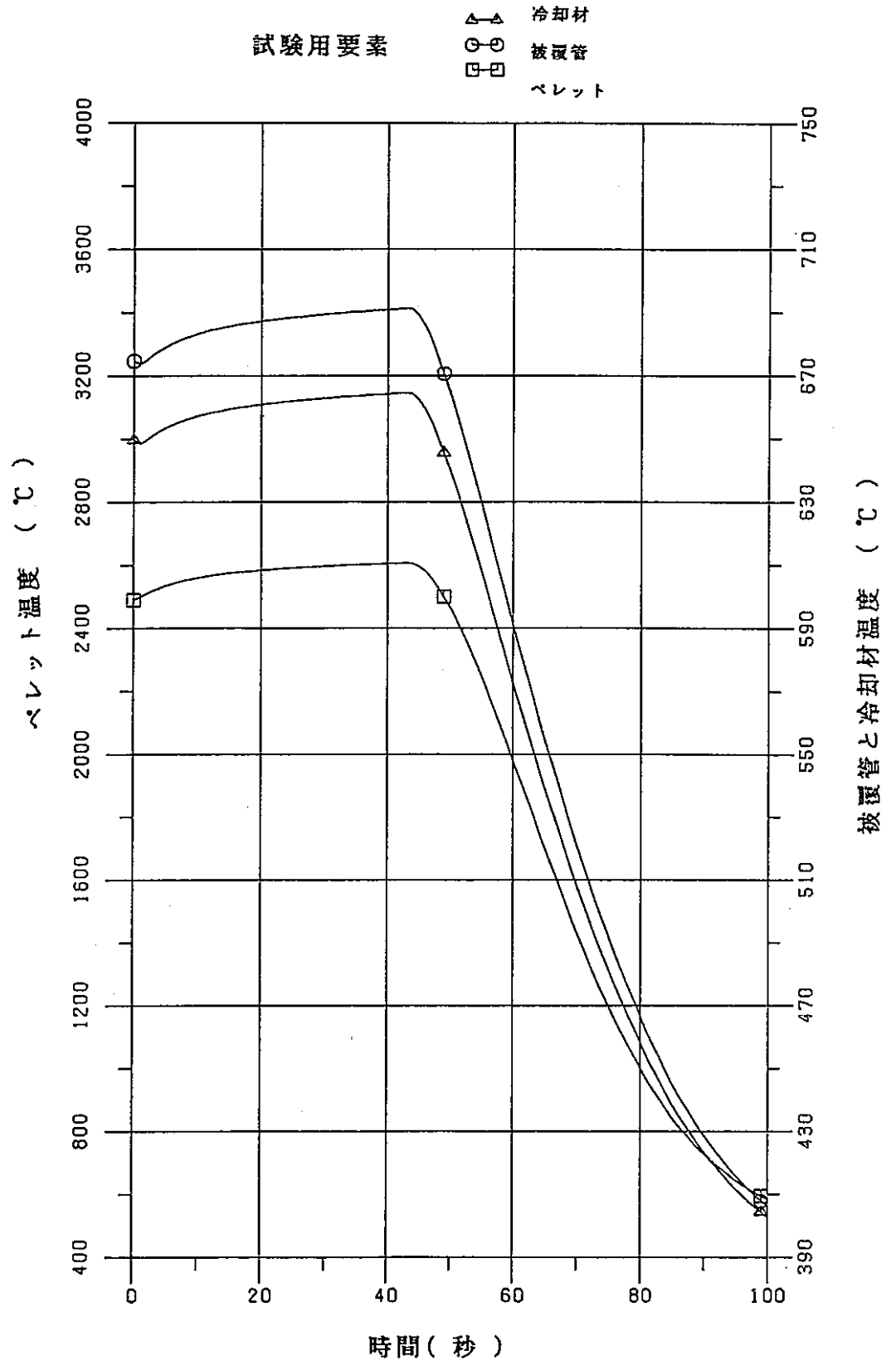


図2.2-16 高燃焼度試験時, 2次冷却材流量急上昇 (HARHO-IN)

—試験用要素: ペレット, 被覆管, 冷却材最高温度—

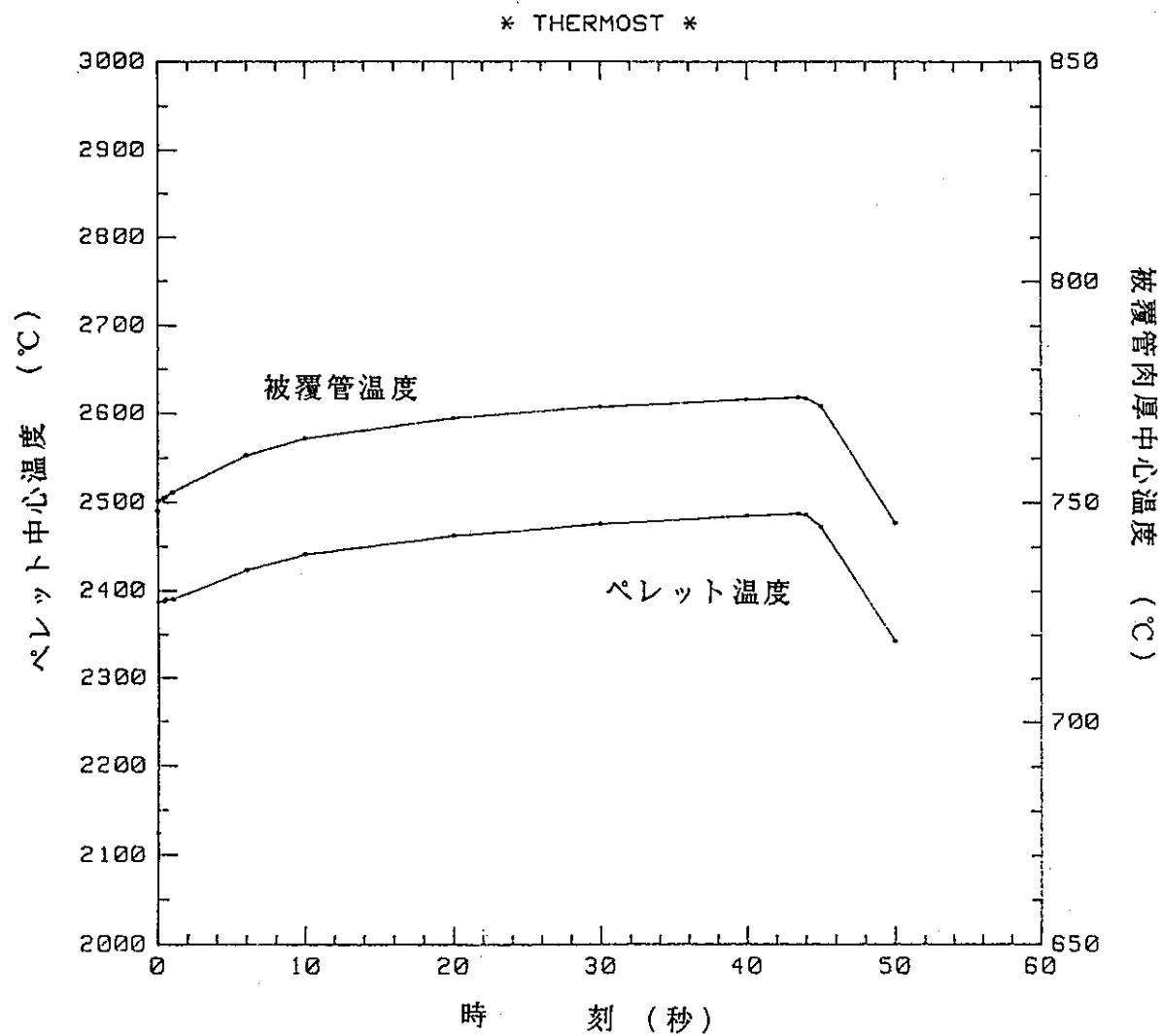


図 2.2-17 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：2次冷却材流量急上昇]

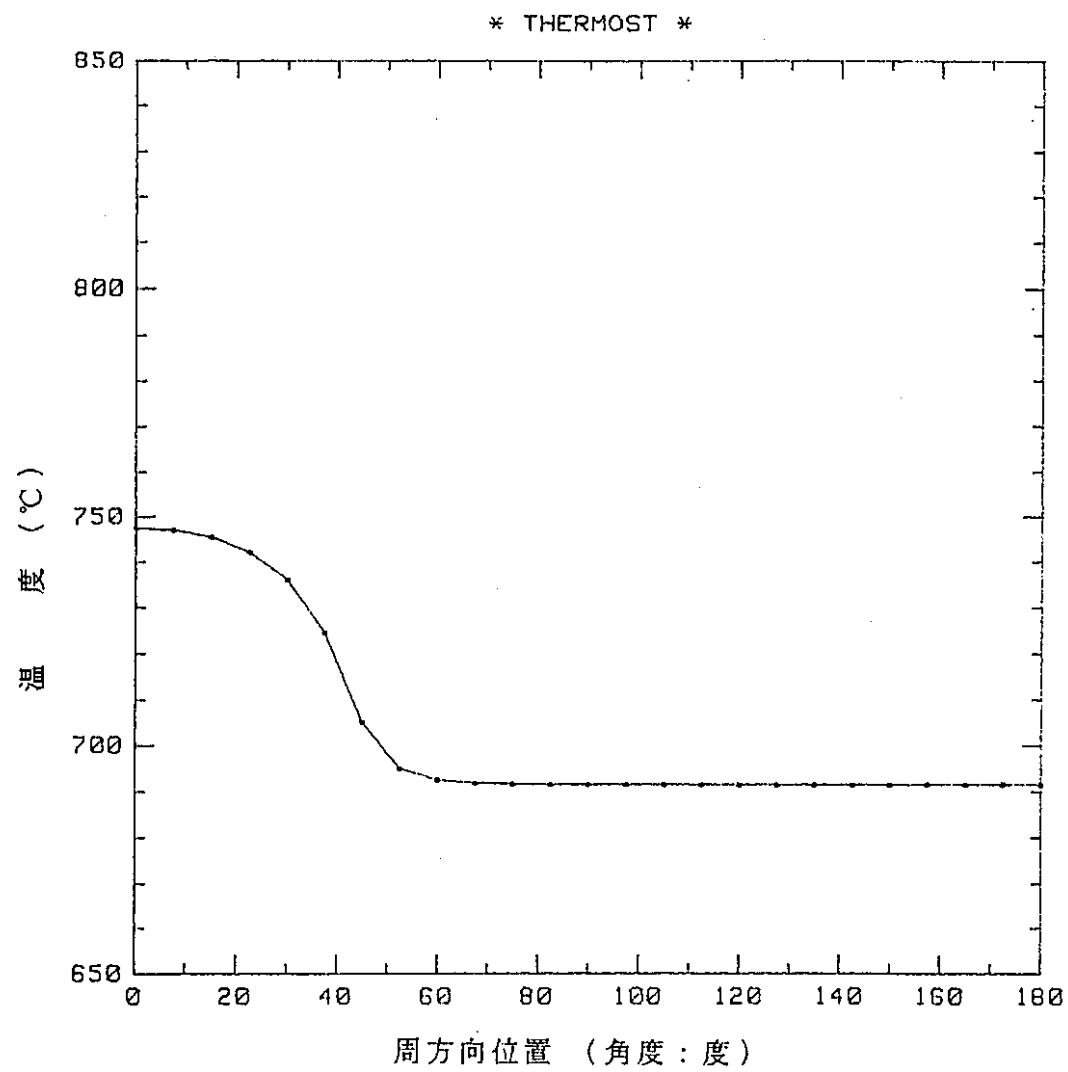


图 2.2-18 周方向被覆管肉厚中心温度分布 [時刻: 43.5 秒]
[事象: 2 次冷却材流量急上昇]

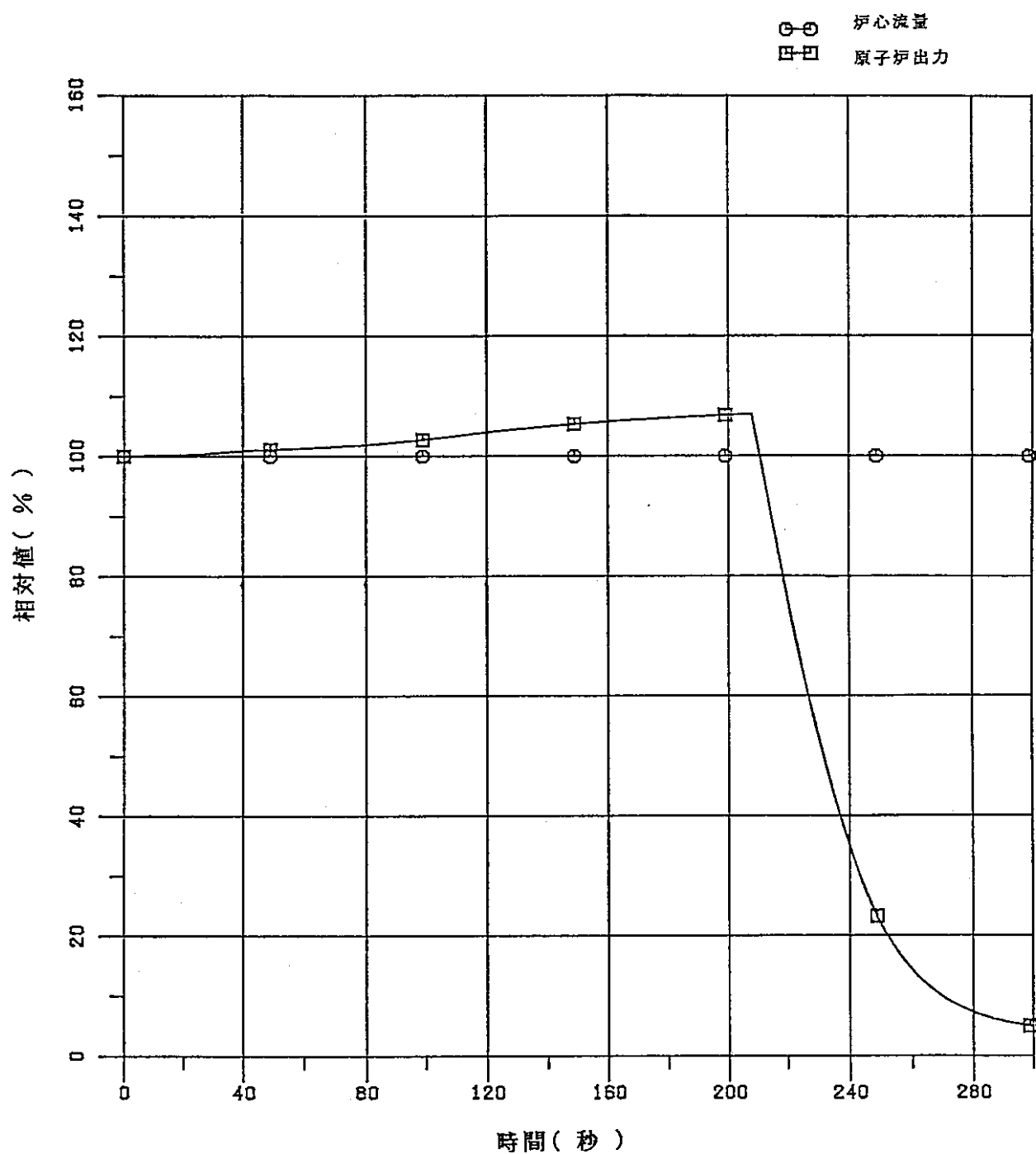


図2.2-19 高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

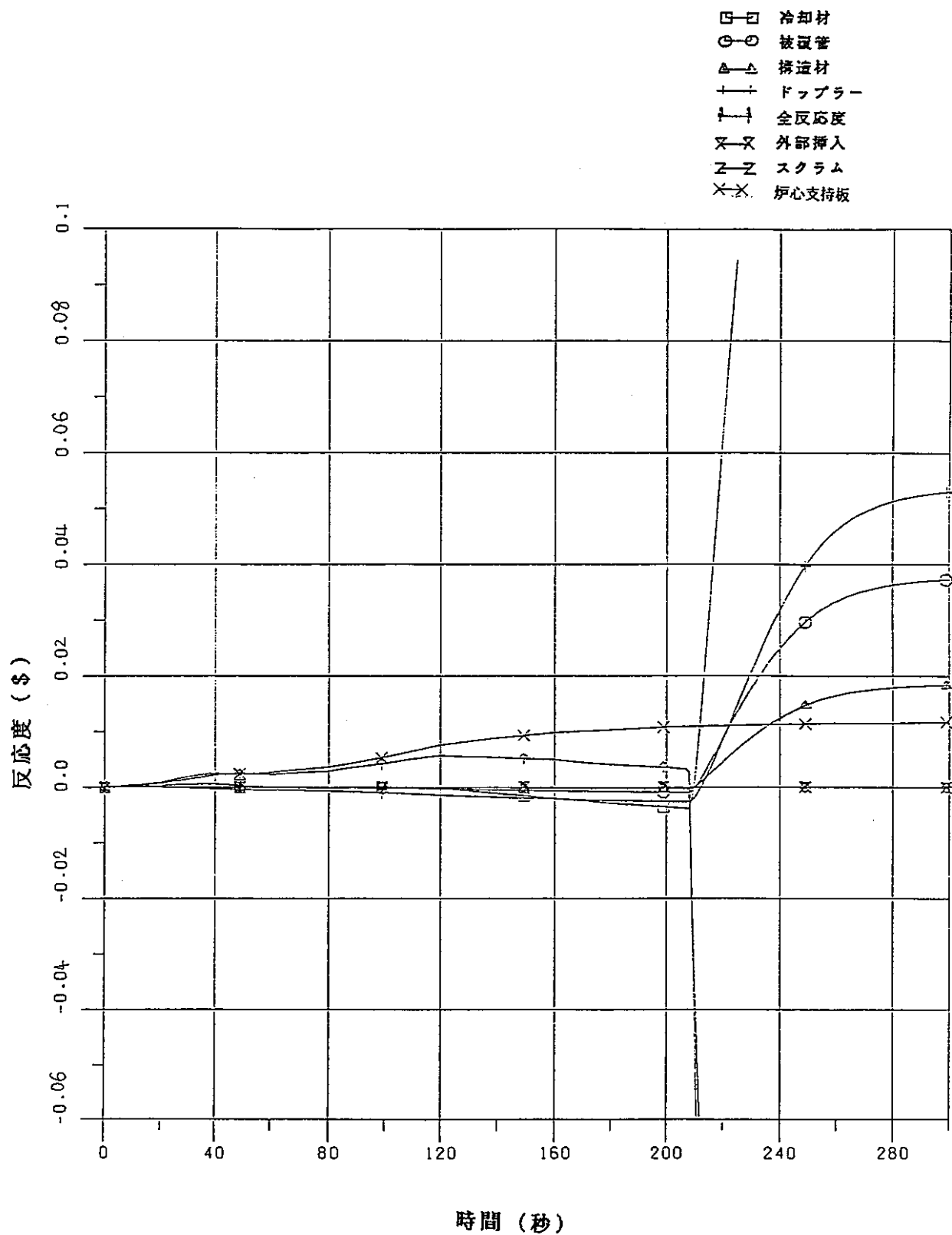


図2.2-20 高燃焼度試験時、主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)

—反応度—

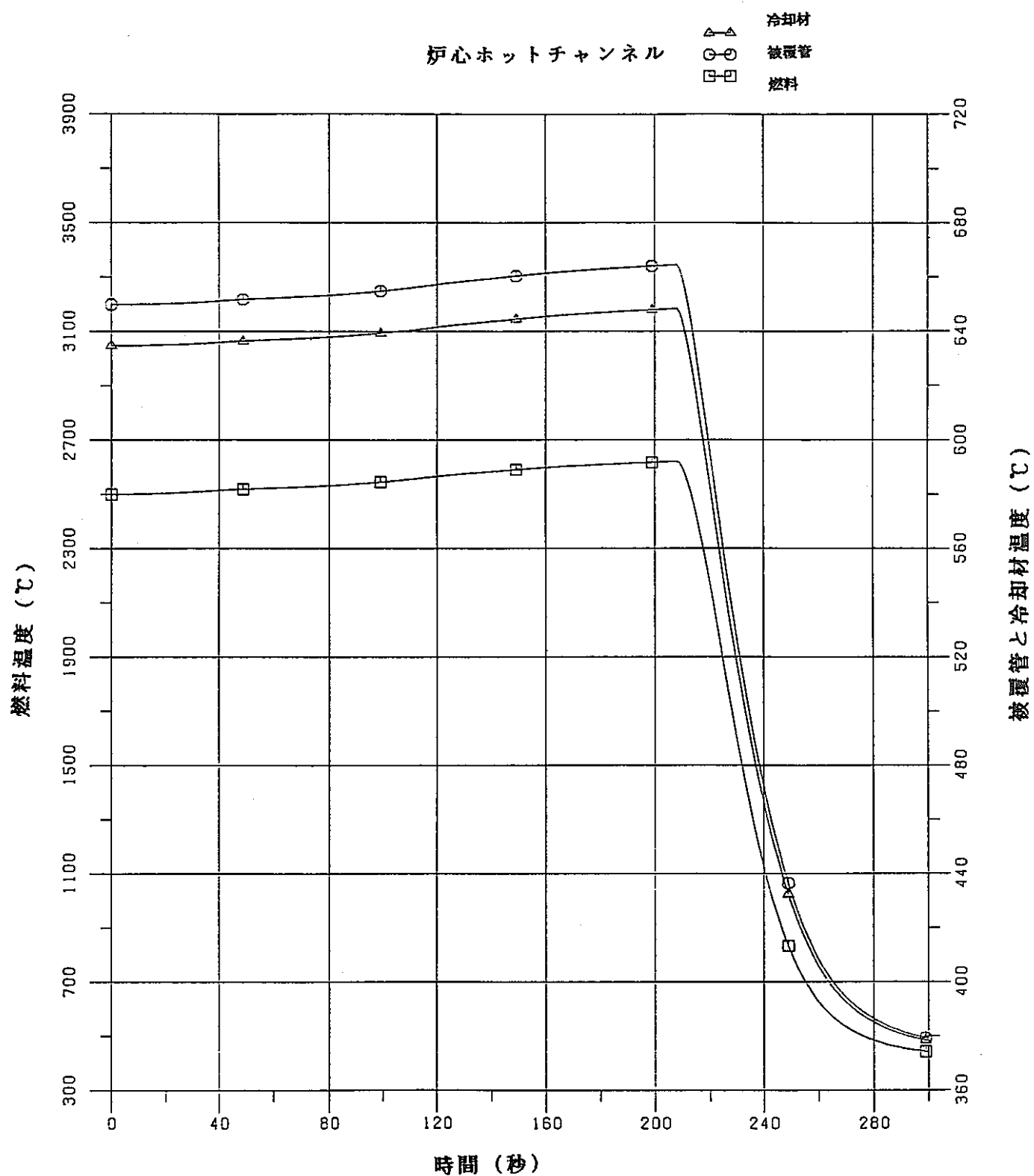


図2.2-21 高燃焼度試験時，主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

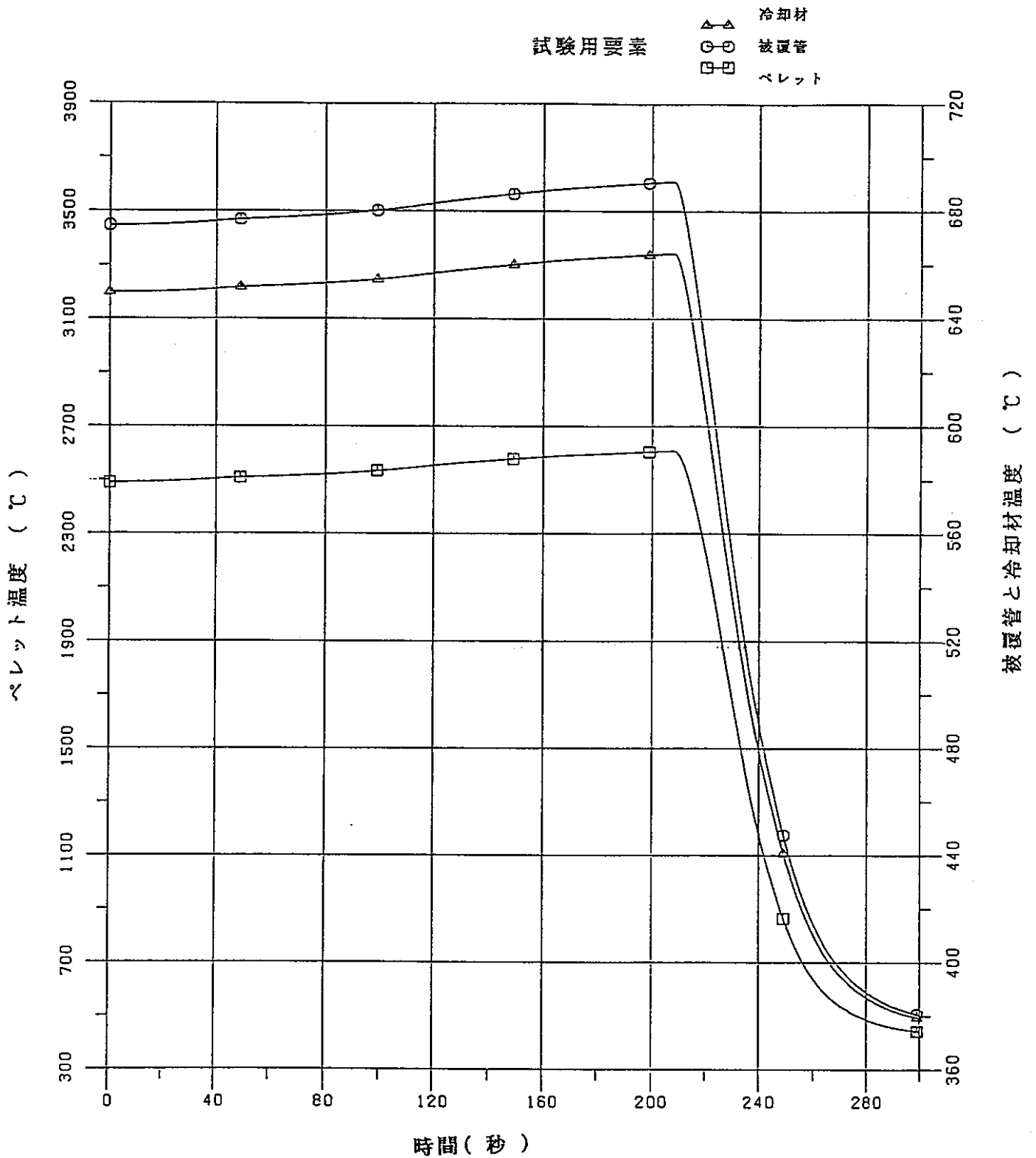


図2.2-22 高燃焼度試験時，主冷却器風量急上昇 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

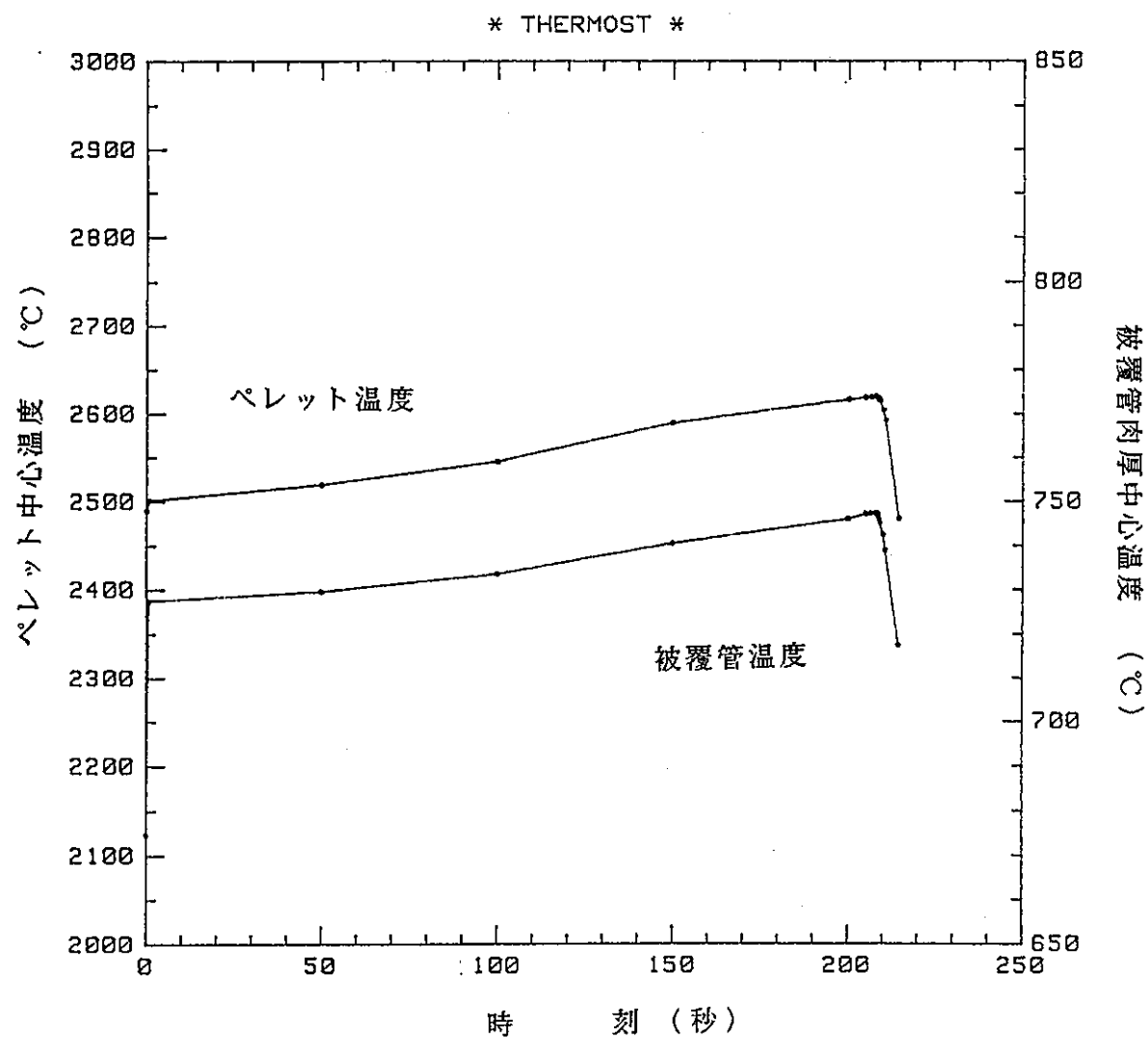


図 2.2-23 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象：主冷却器風量急上昇]

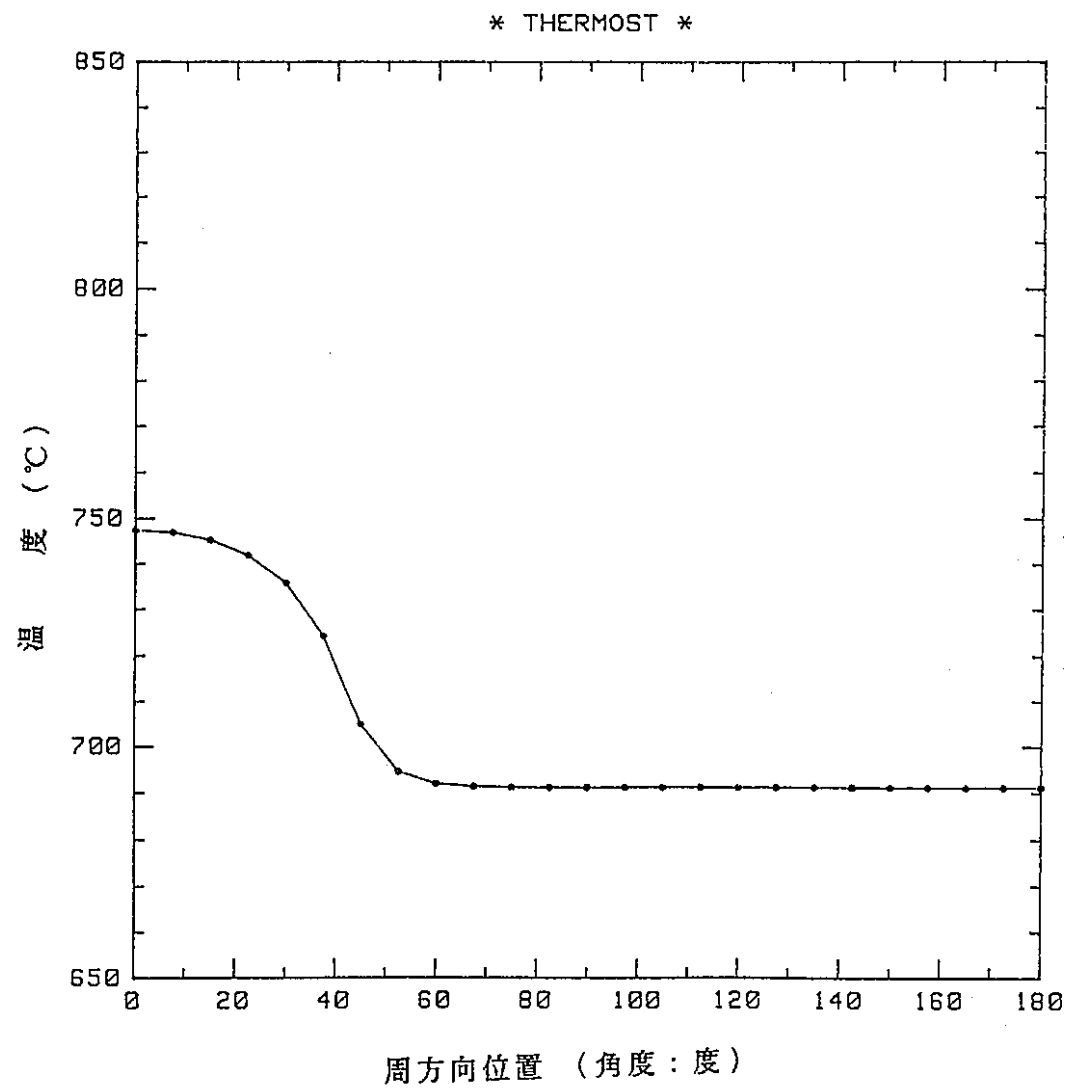


图 2.2-24

周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻：208秒〕

〔事象：主冷却器風量急上昇〕

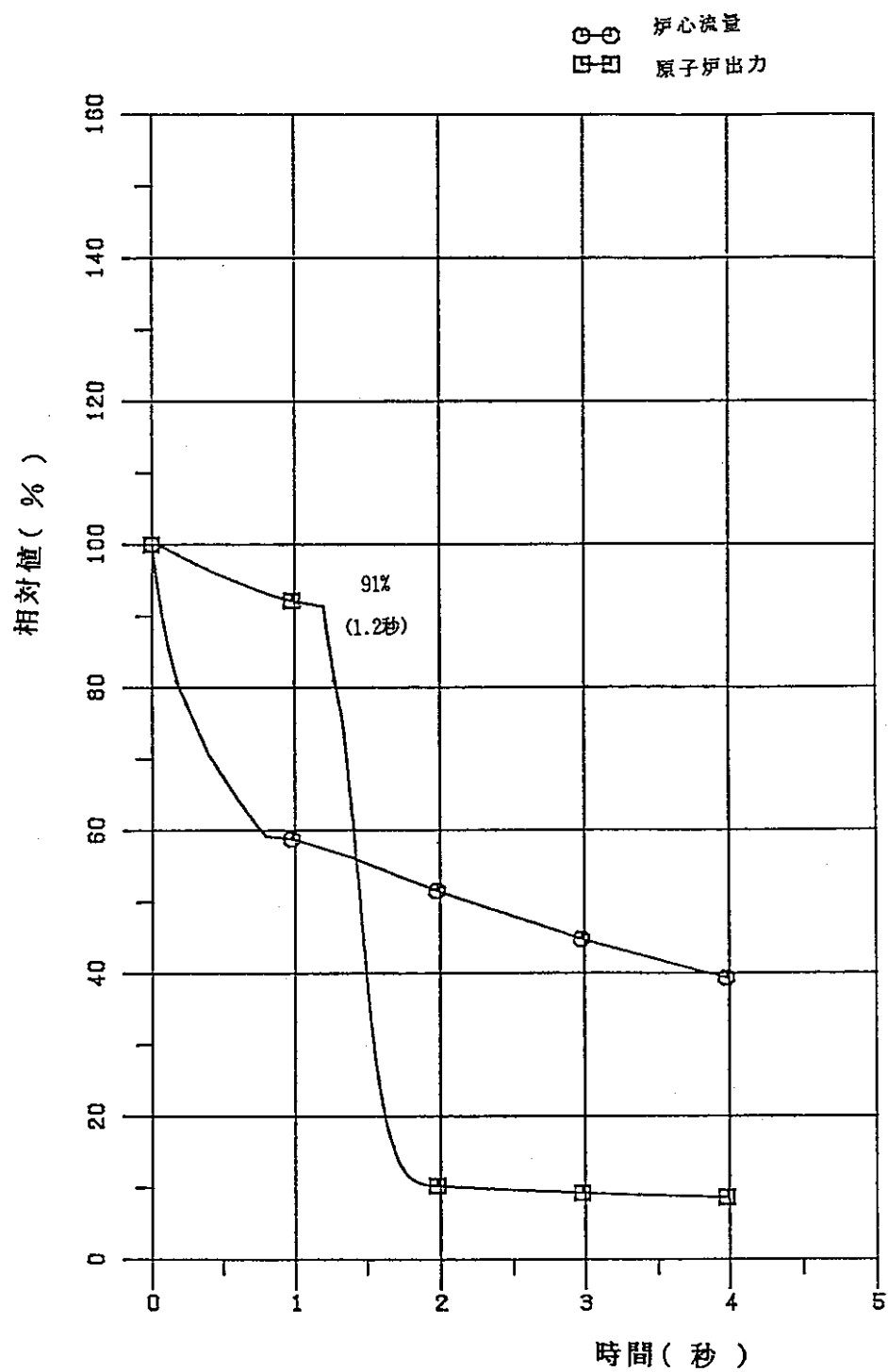


図 2.2 - 25 高燃焼度試験時, 1 次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-1N)

—原子炉出力及び炉心流量—

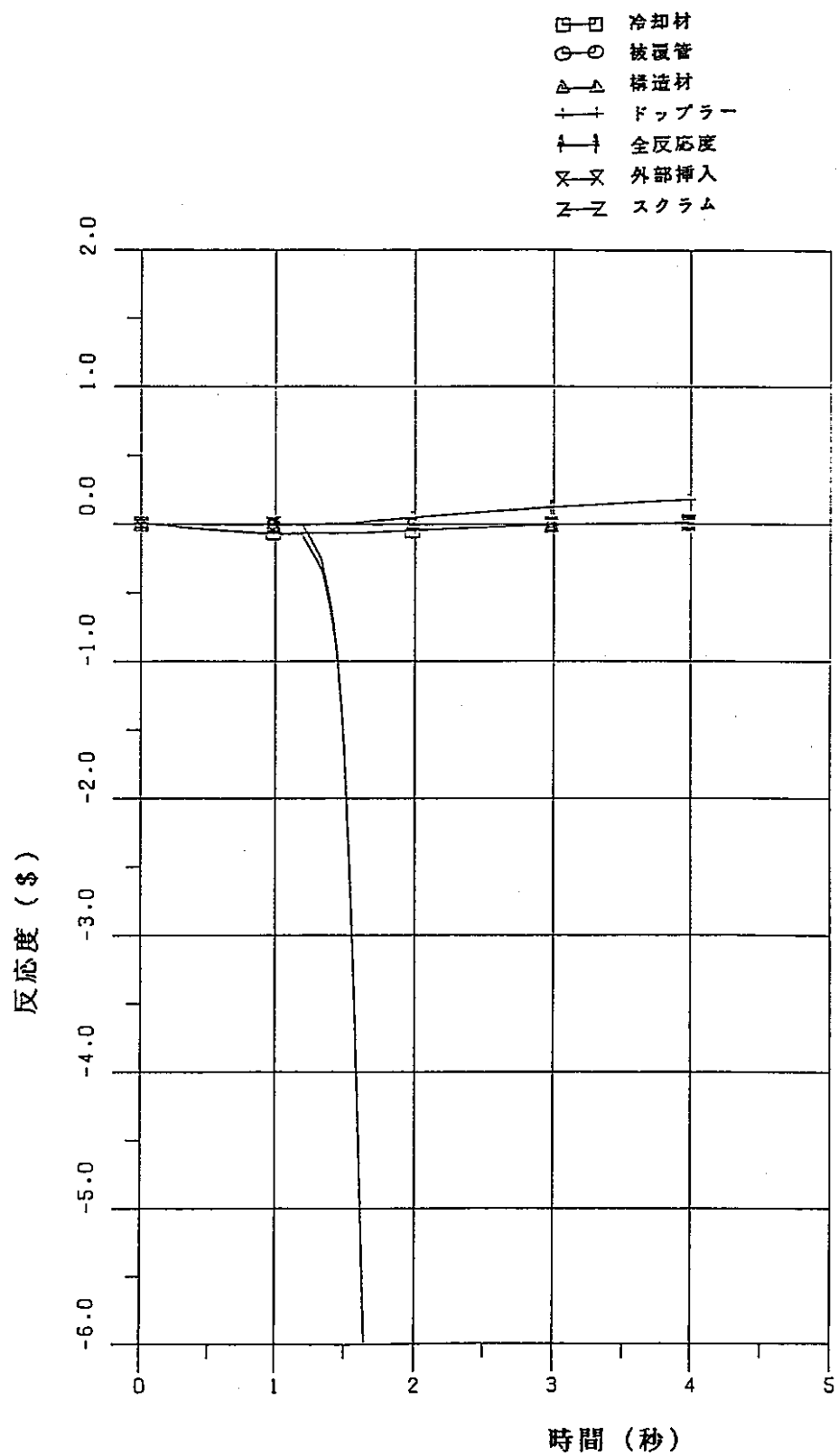


図2.2-26 高燃焼度試験時，1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—反応度—

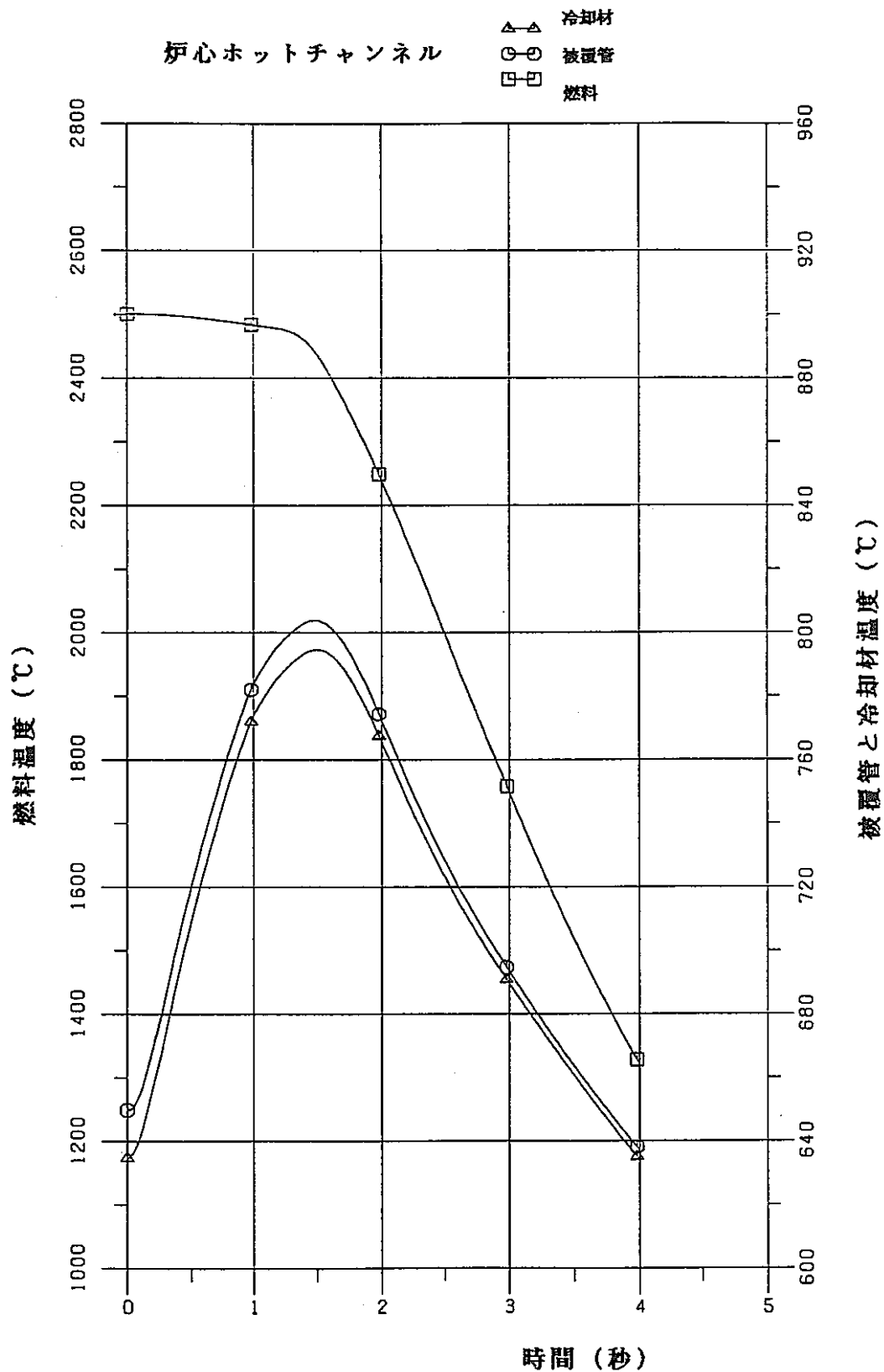


図2.2-27 高燃焼度試験時，1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

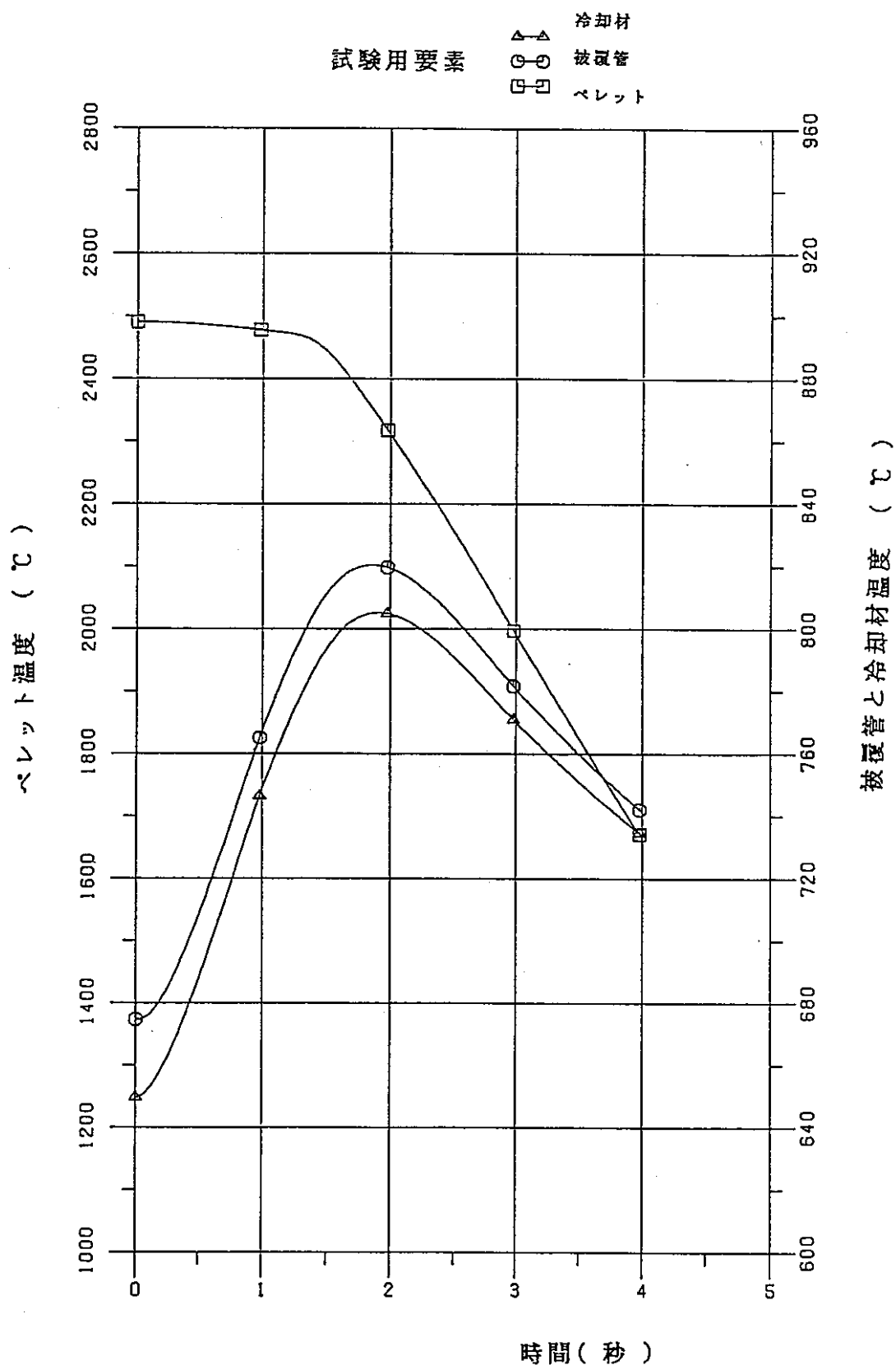


図2.2-28 高燃焼度試験時，1次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

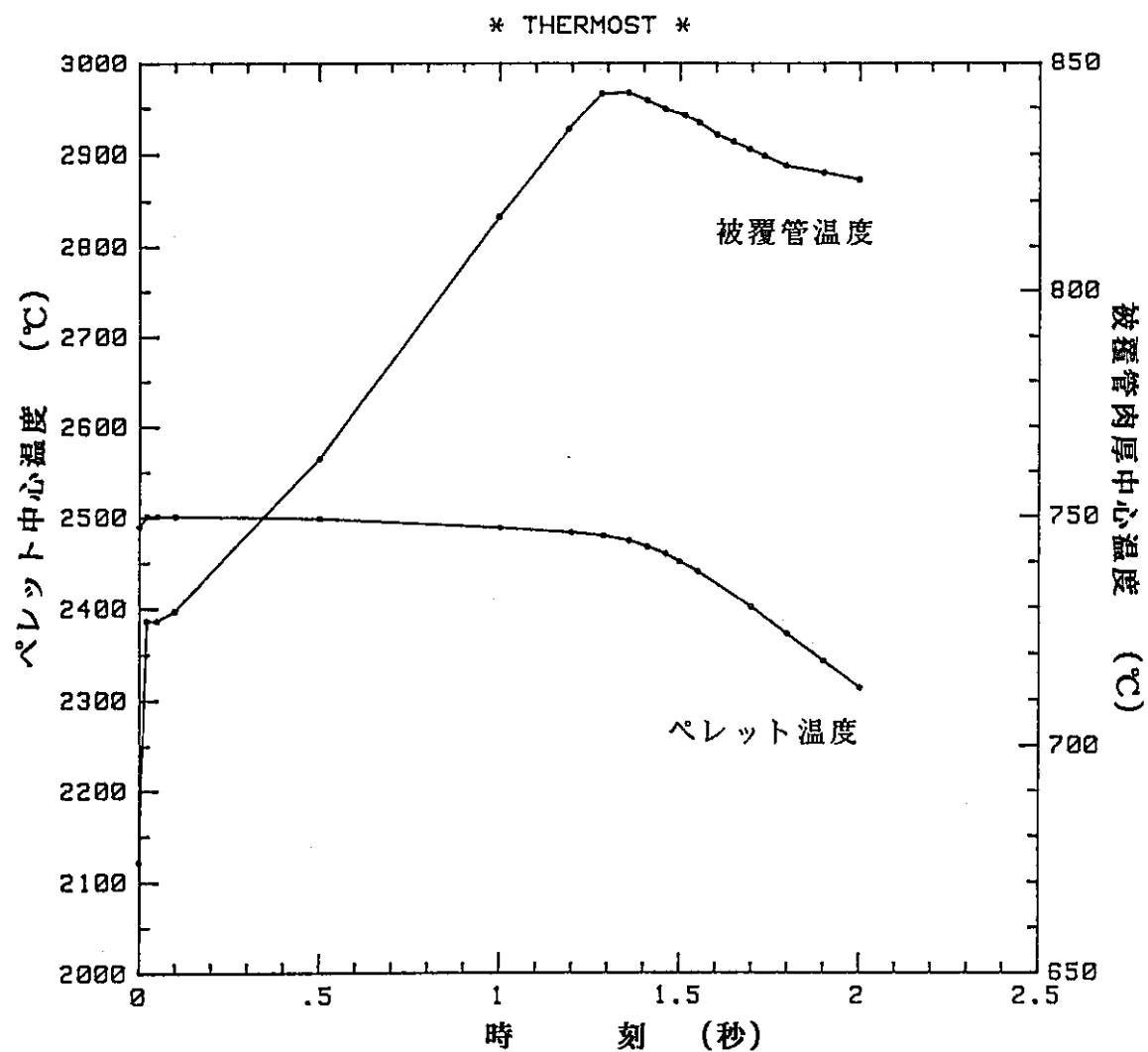


図 2.2-29

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象：一次冷却系循環ポンプ軸固着事故]

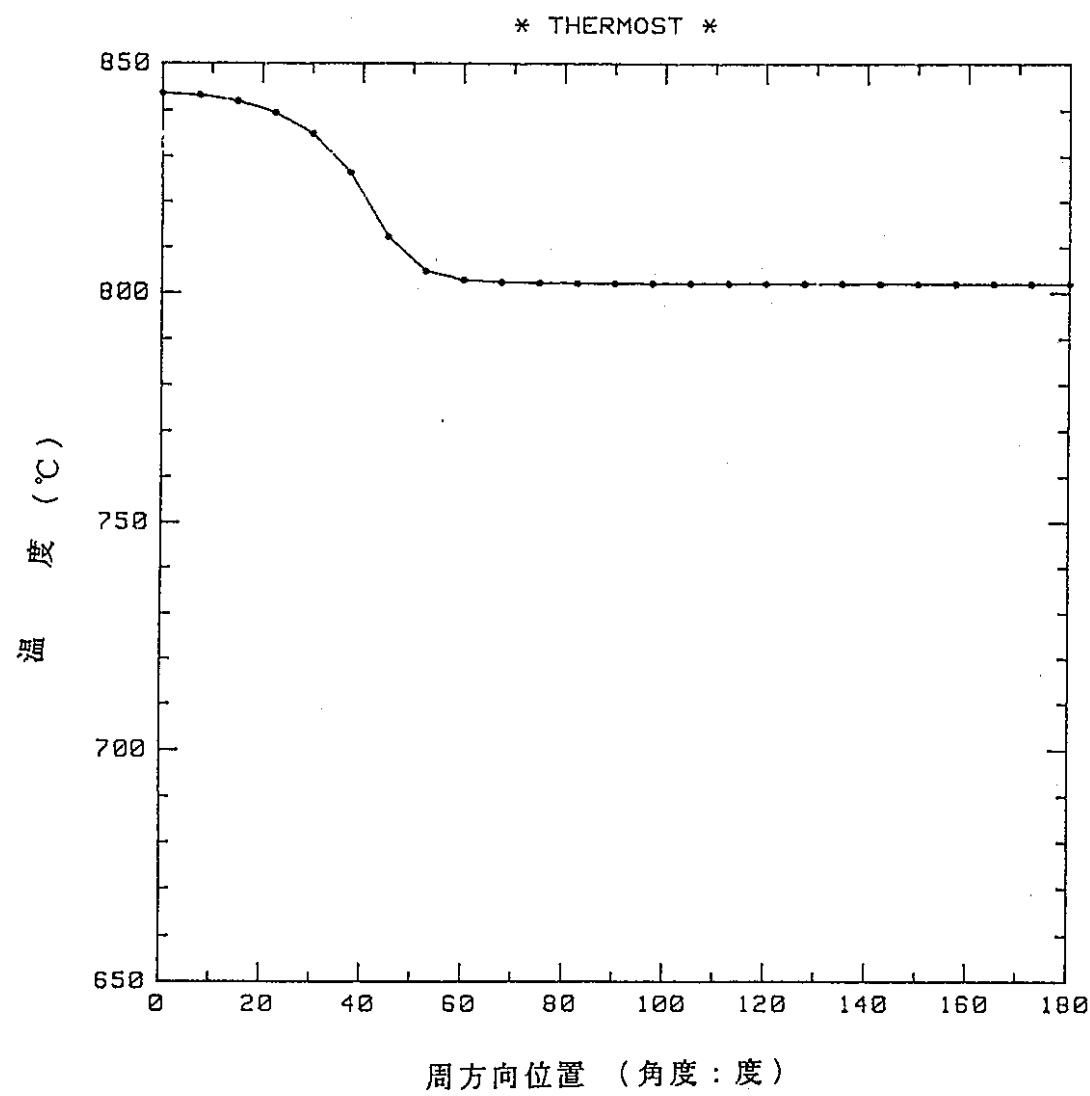


図 2.2-30 周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 1.57 秒〕
〔事象: 一次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕

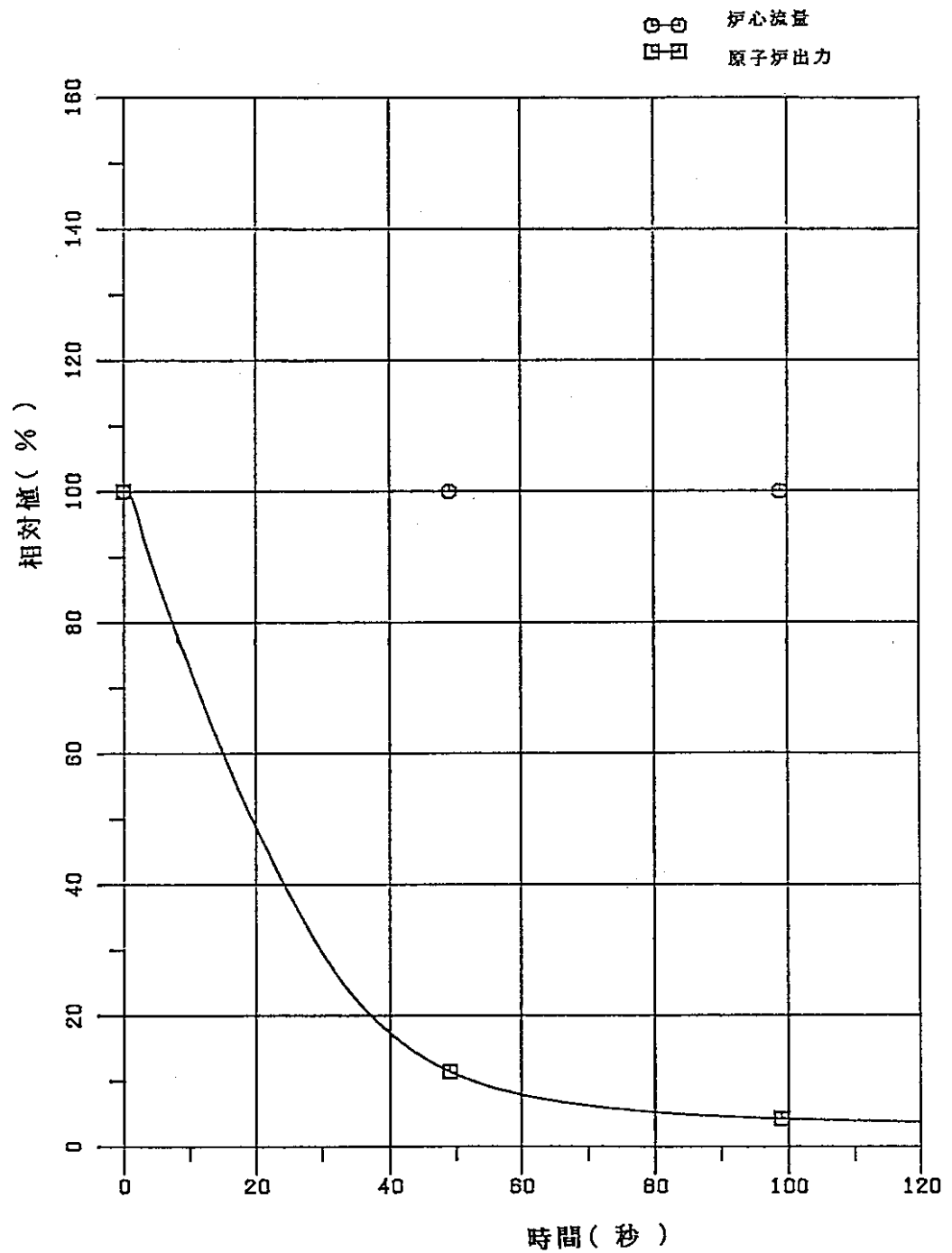


図2.2-31 高燃焼度試験時，2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)
 —原子炉出力及び炉心流量—

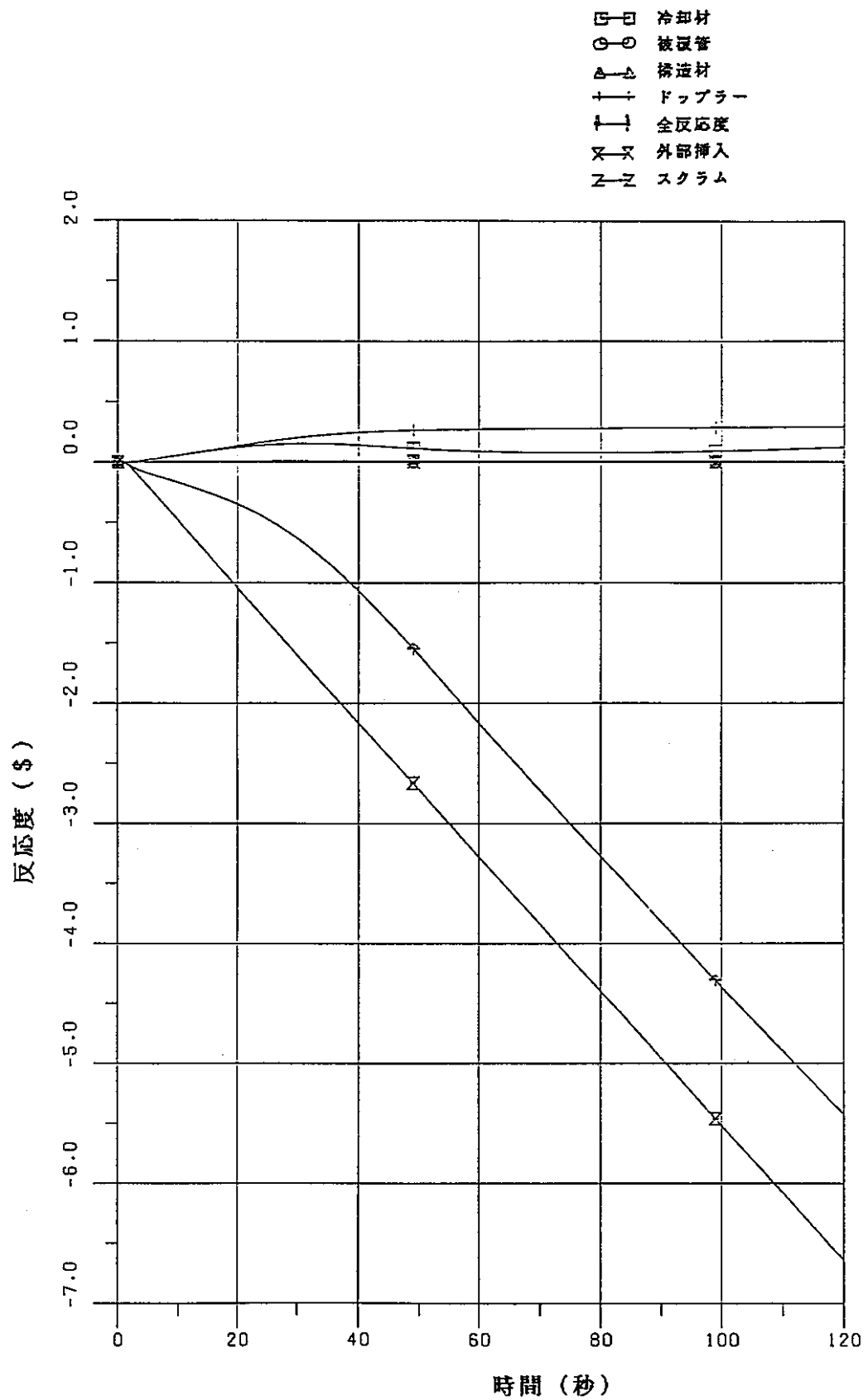


図2.2-32 高燃焼度試験時，2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—反応度—

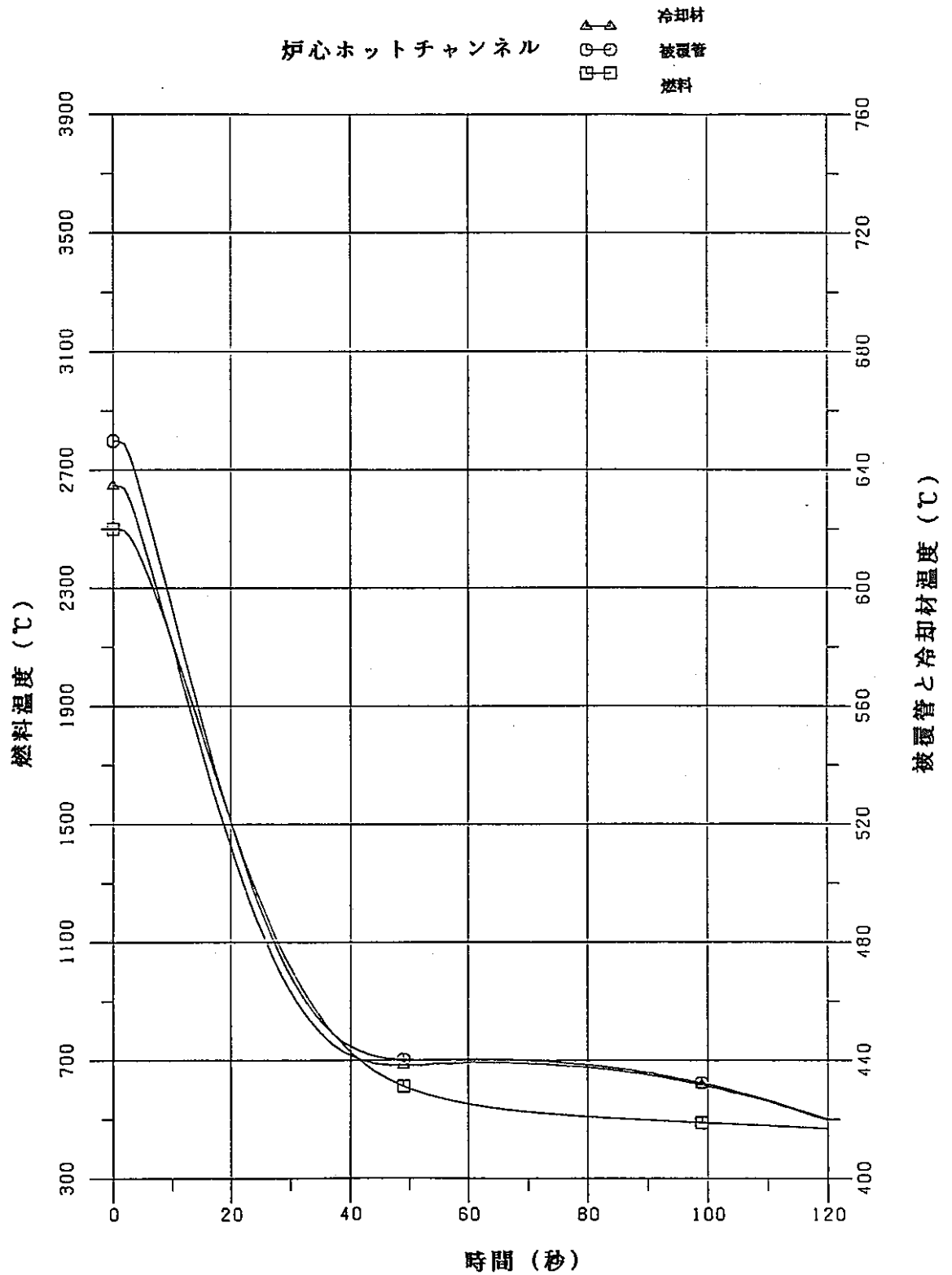


図 2.2-33 高燃焼度試験時，2 次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

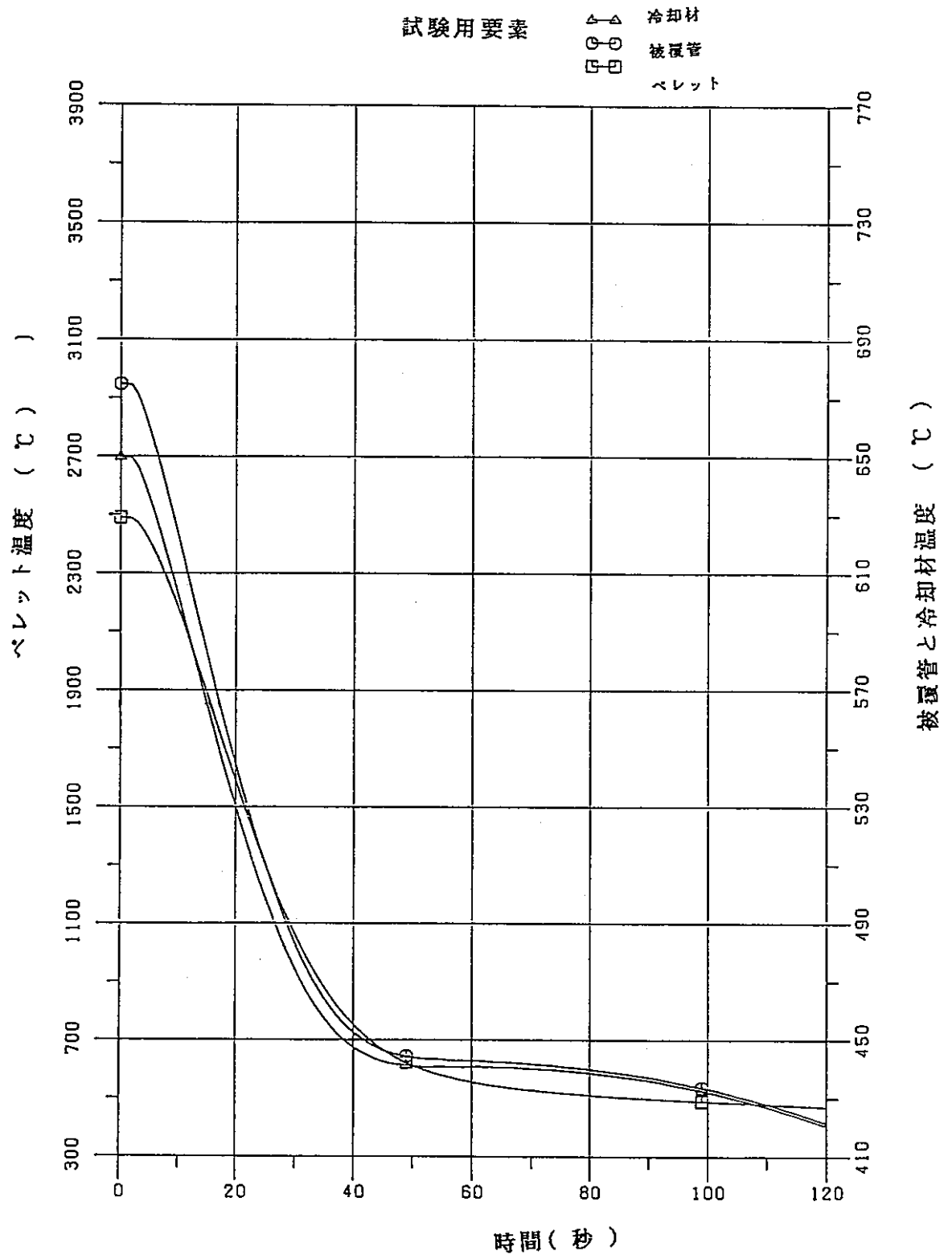


図2.2-34 高燃焼度試験時，2次冷却系循環ポンプ軸固着事故 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

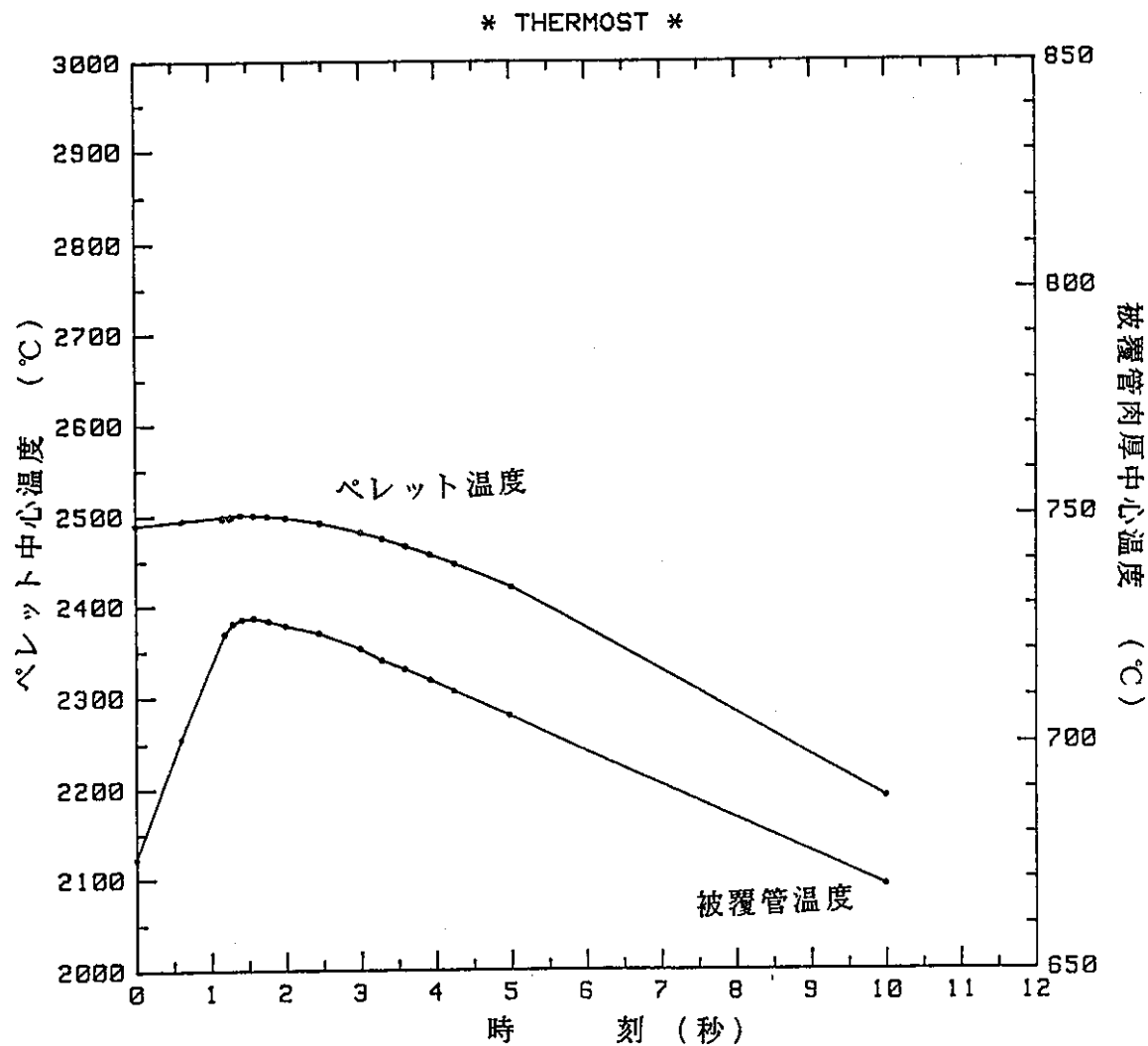


図 2.2-35

ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象：二次冷却系循環ポンプ軸固着事故]

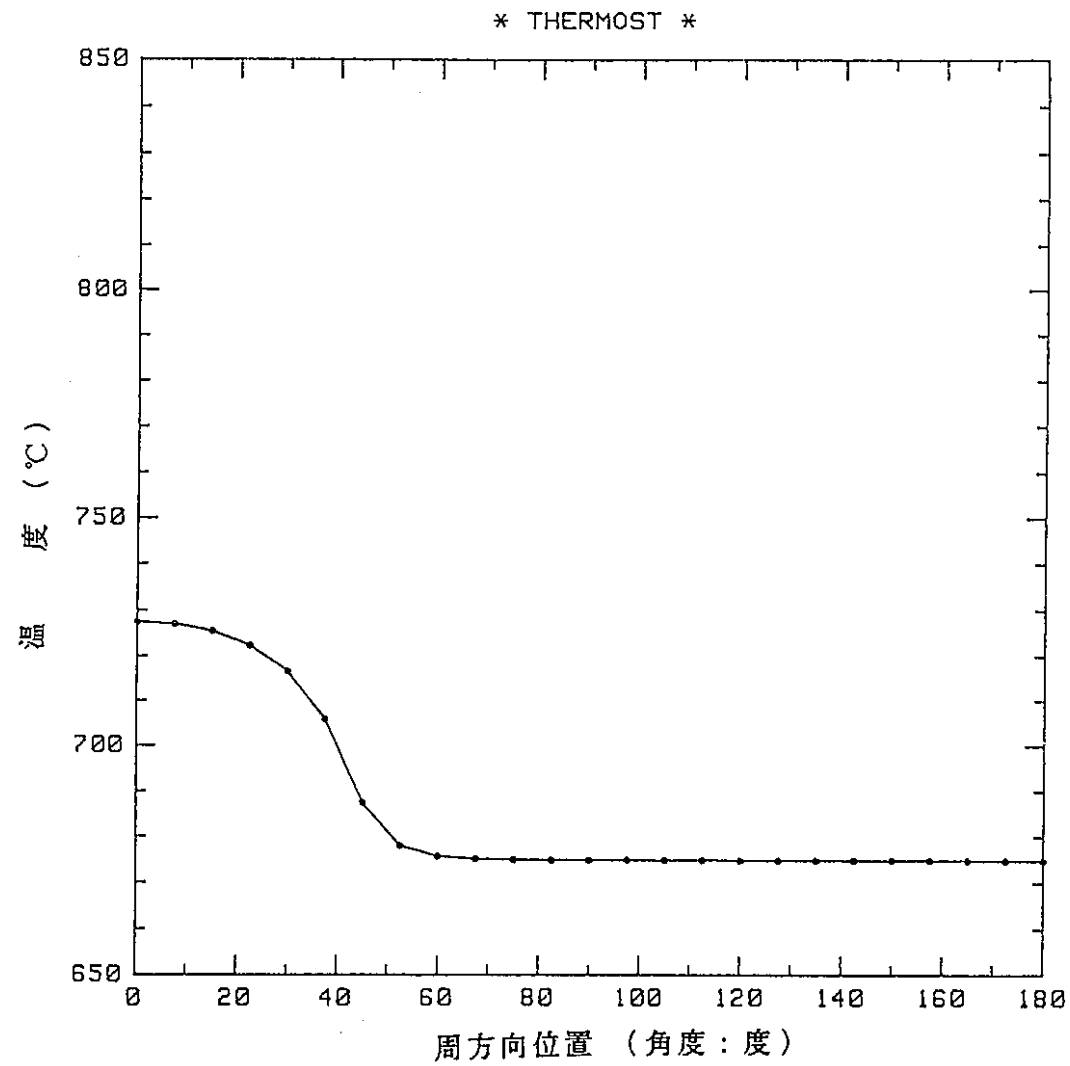


図 2.2-36 周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 1.36 秒〕
〔事象: 二次冷却系循環ポンプ軸固着事故〕

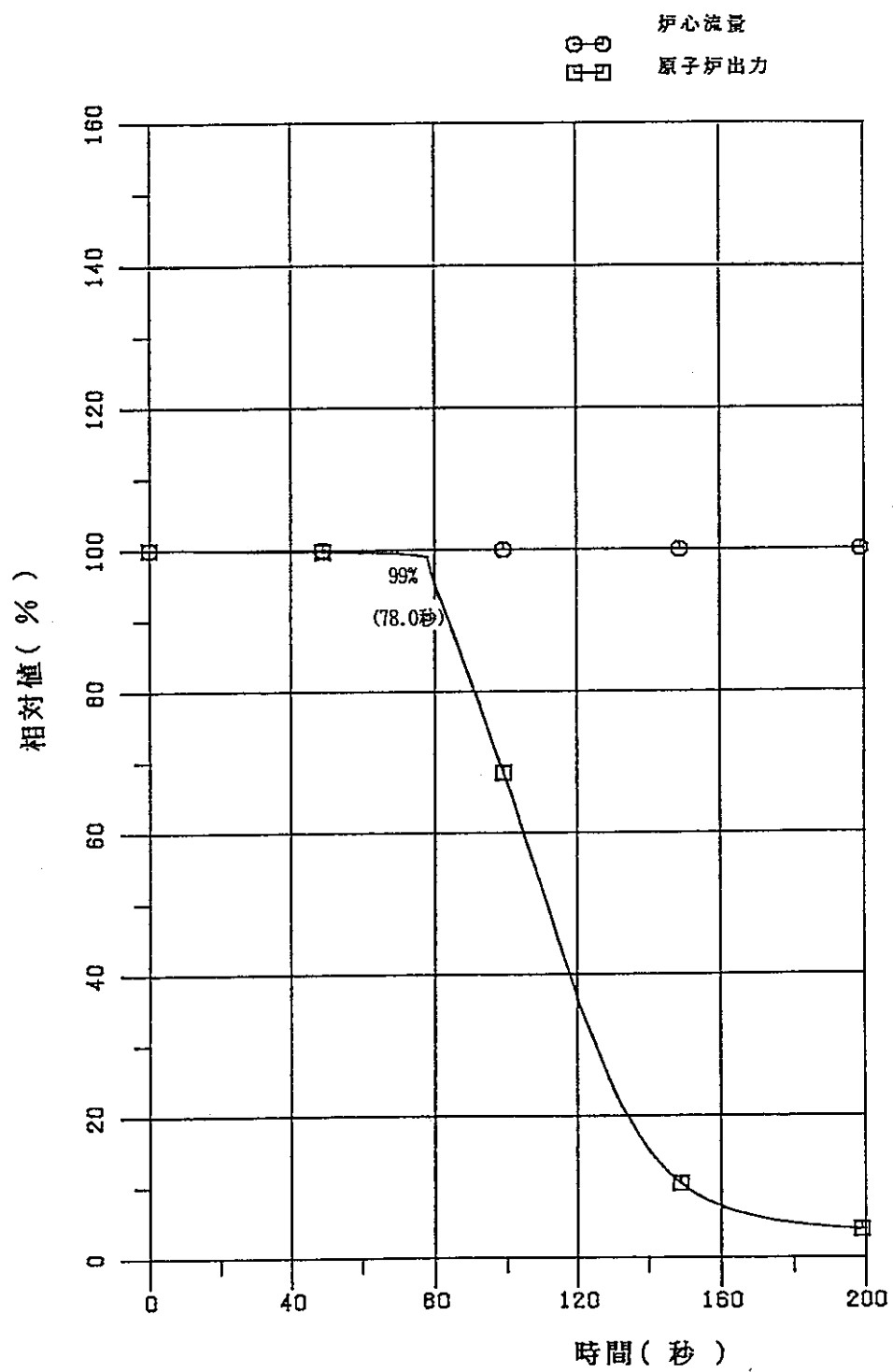


图2.2-37 高燃耗度試驗時，主冷却器送風器軸固着事故 (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

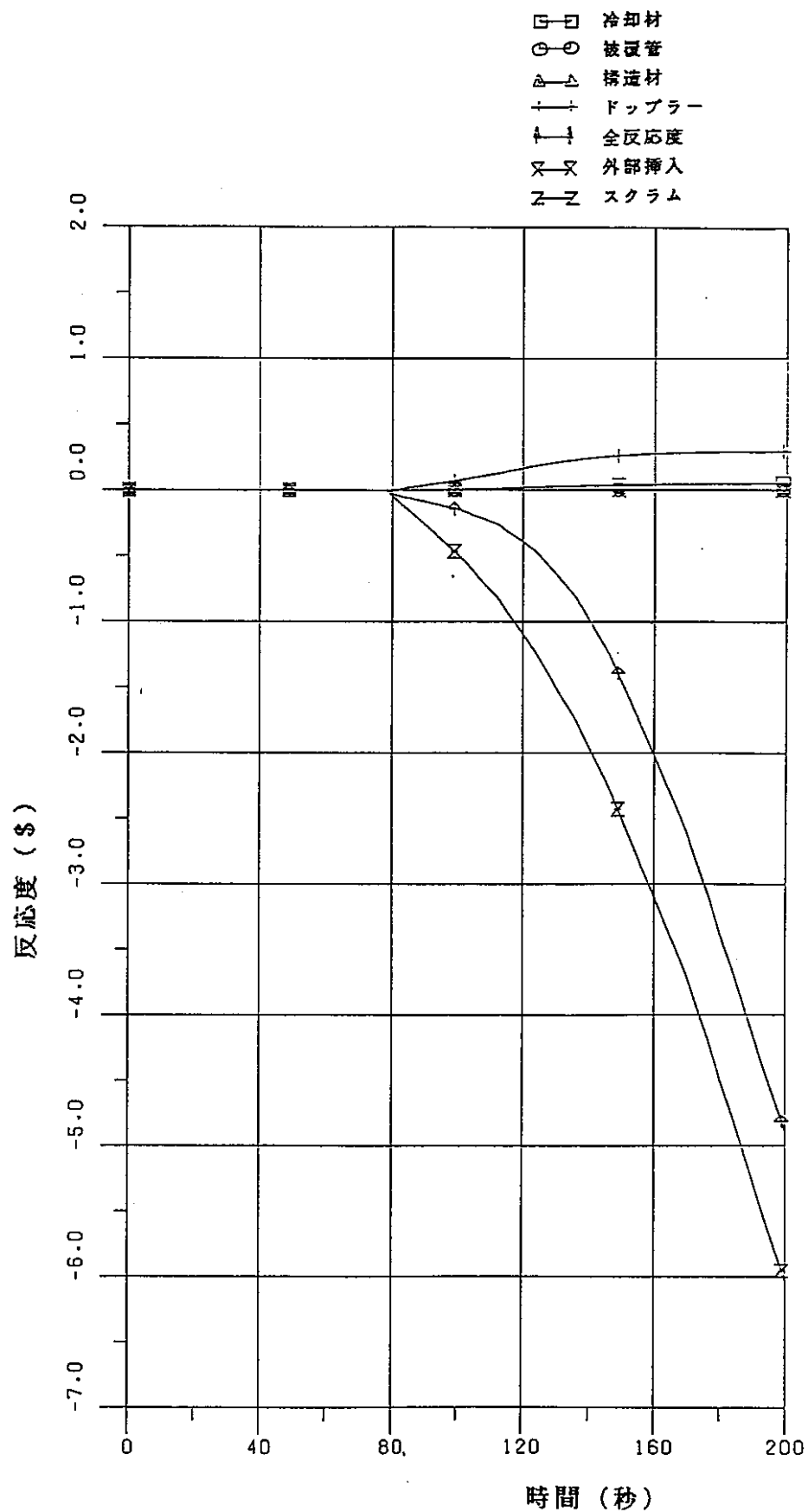


図2.2-38 高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故 (HARHO-IN)

—反応度—

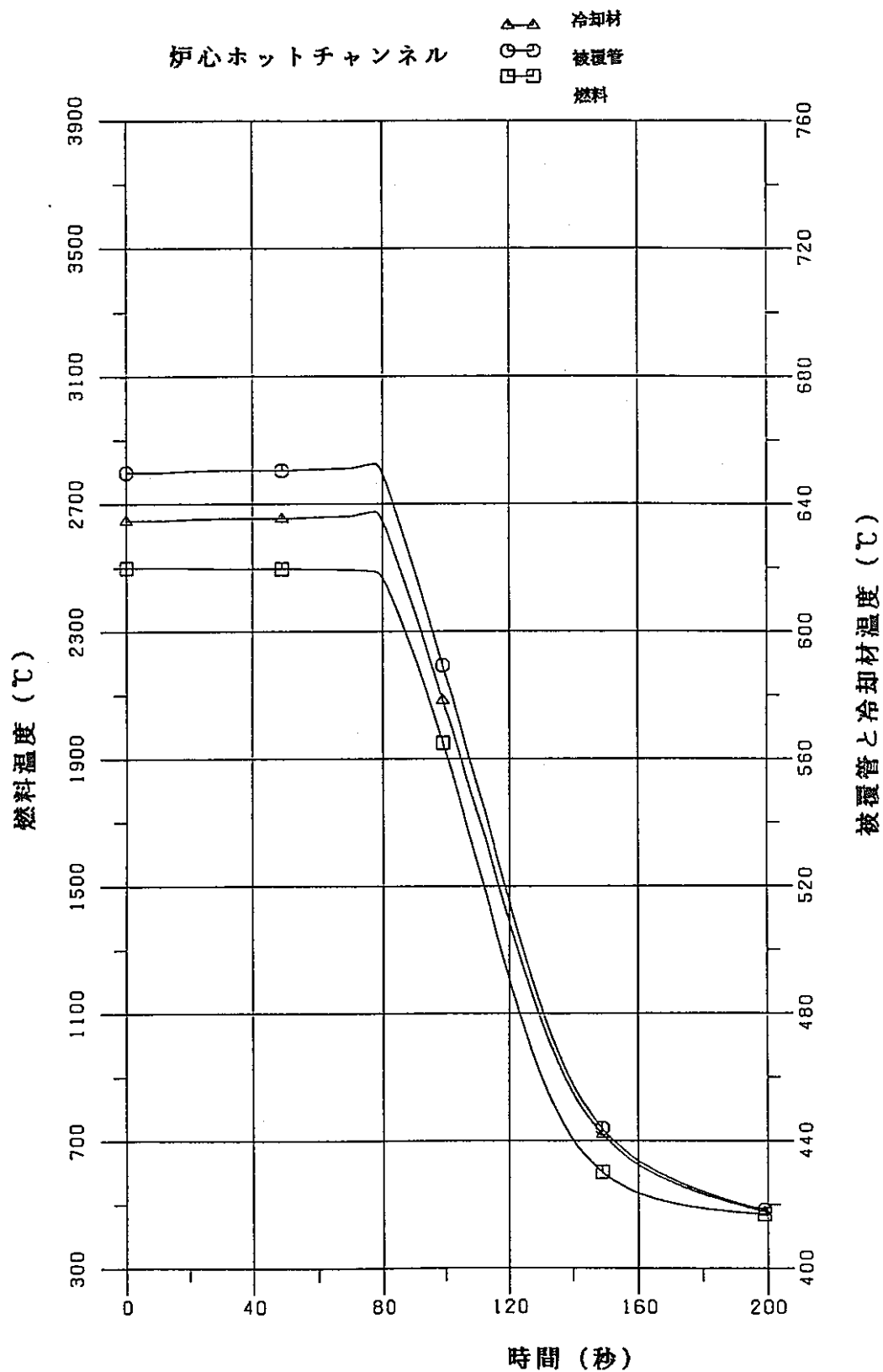


図2.2-39 高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故 (HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料，被覆管，冷却材最高温度—

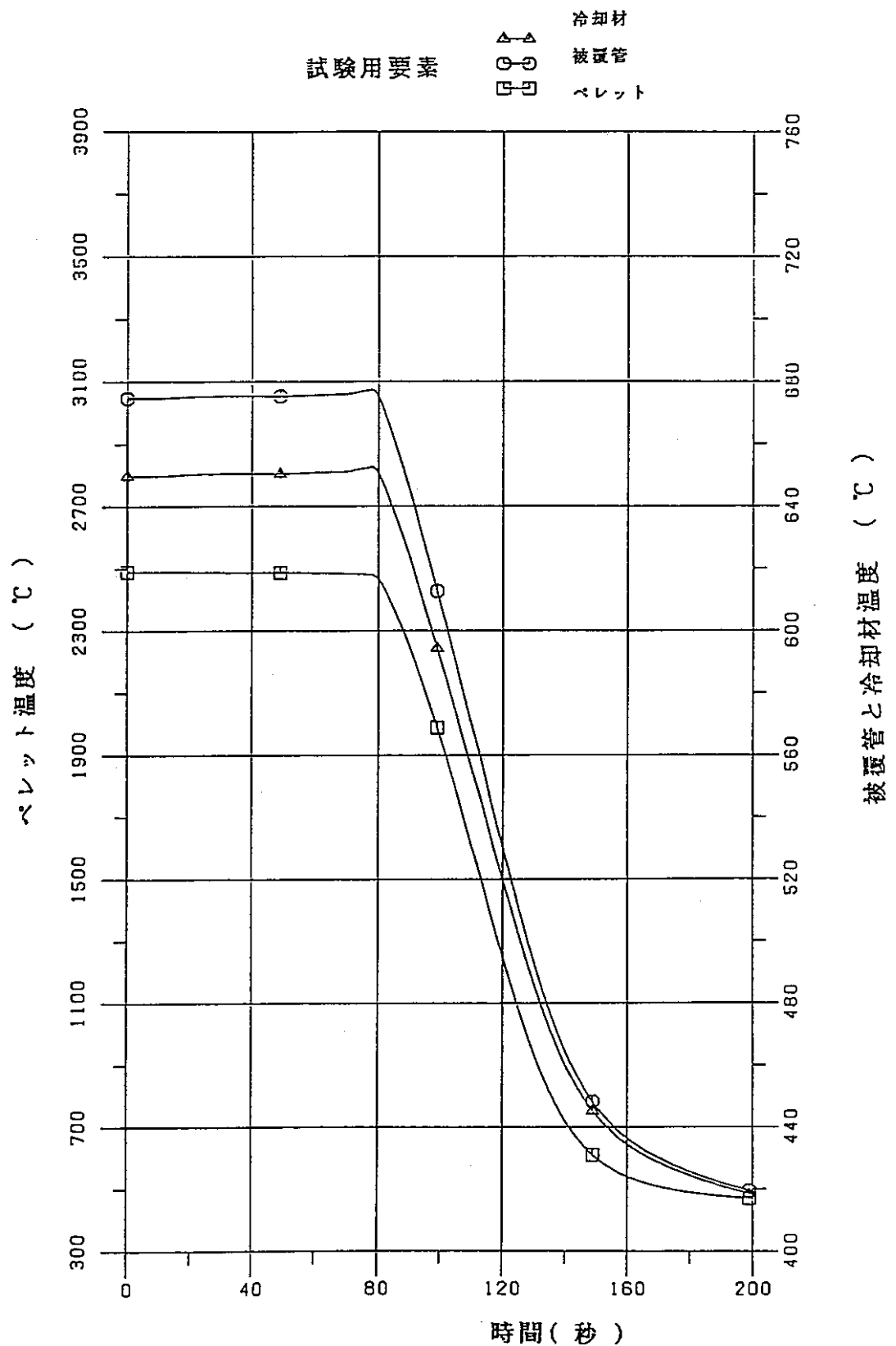


図2.2-40 高燃焼度試験時、主冷却器送風器軸固着事故 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

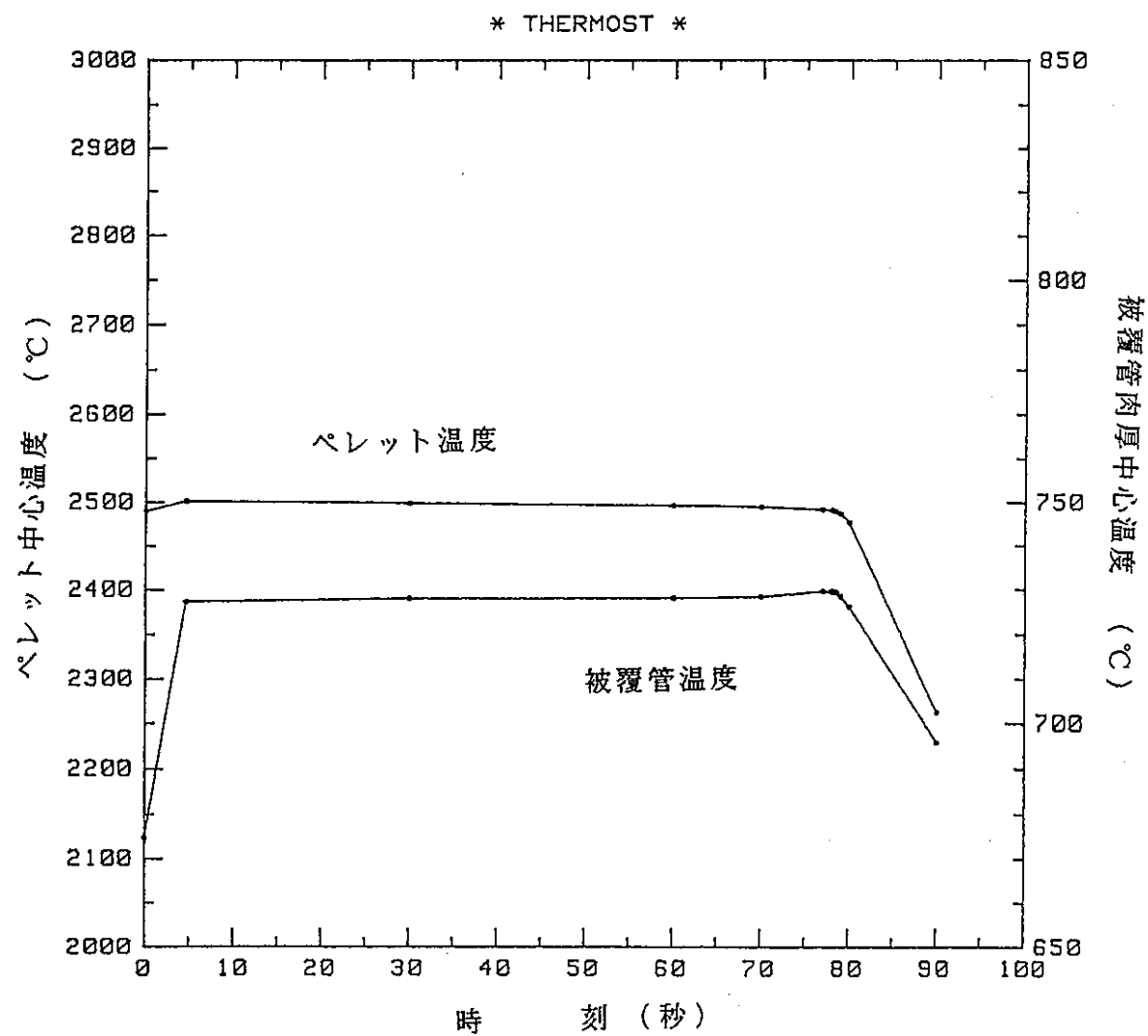


図 2.2-41 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴

[事象 : 主冷却器送風器軸固着事故]

* THERMOST *

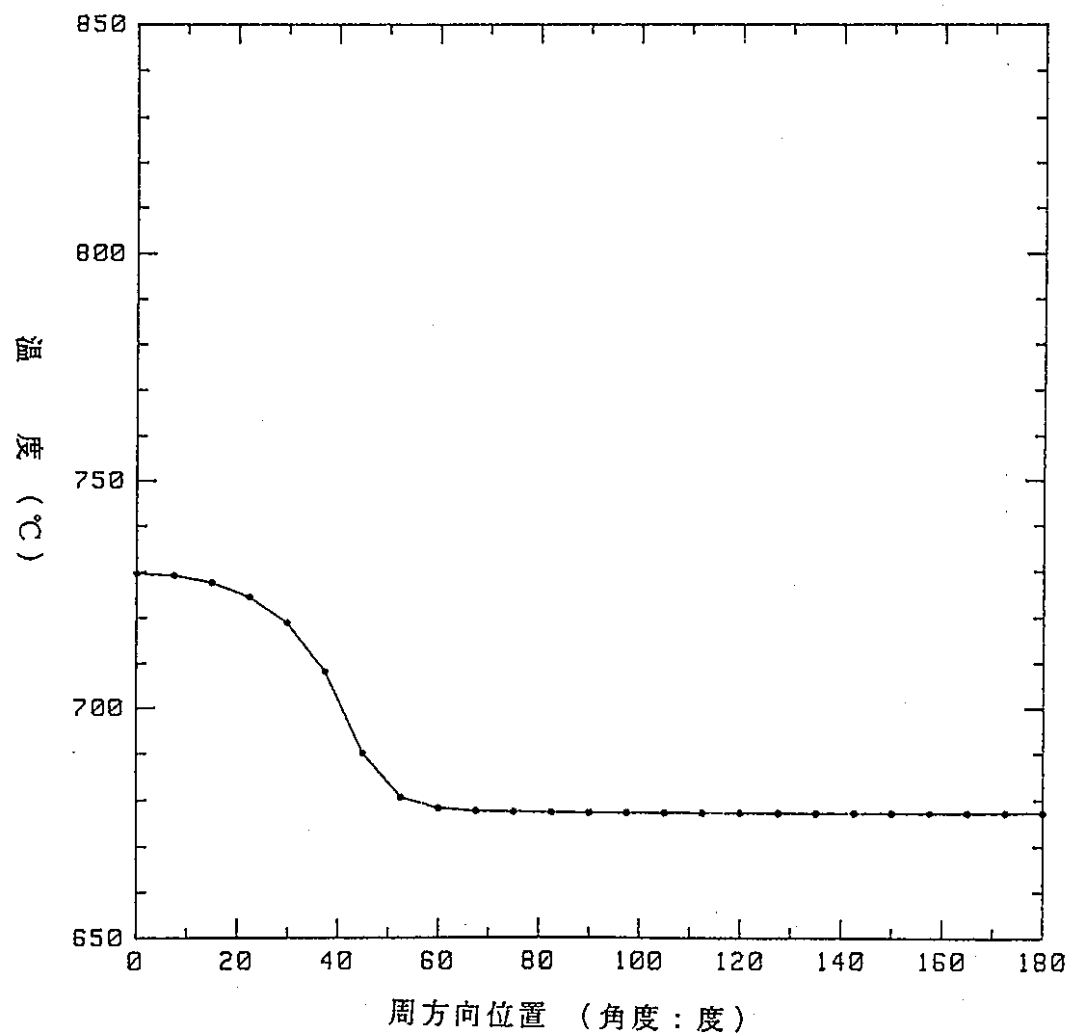


図 2.2-42

周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 7.7 秒〕

〔事象: 主冷却器送風器軸固着事故〕

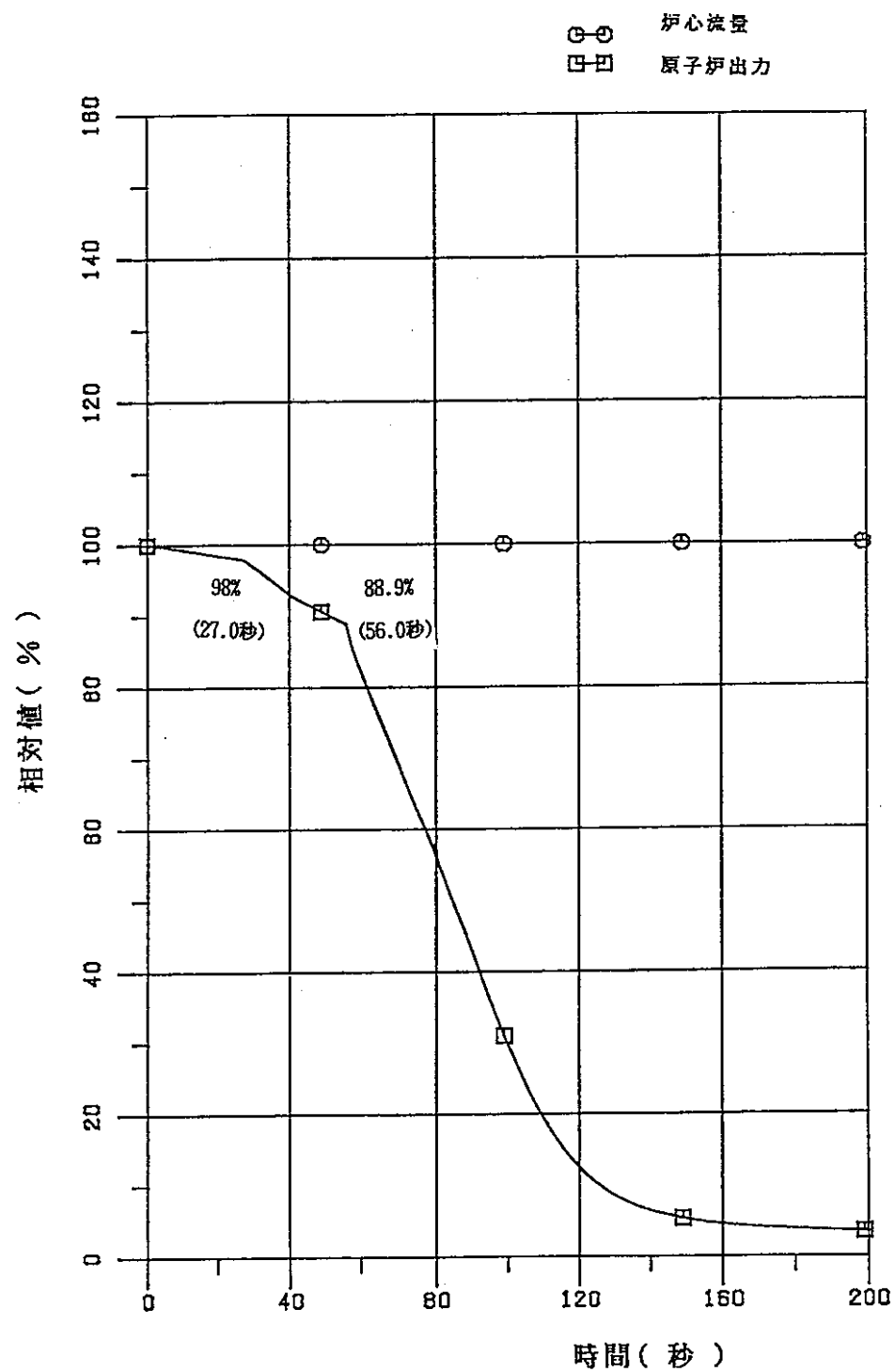


図2.2-43 高燃焼度試験時，2次冷却材漏洩事故 (HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—

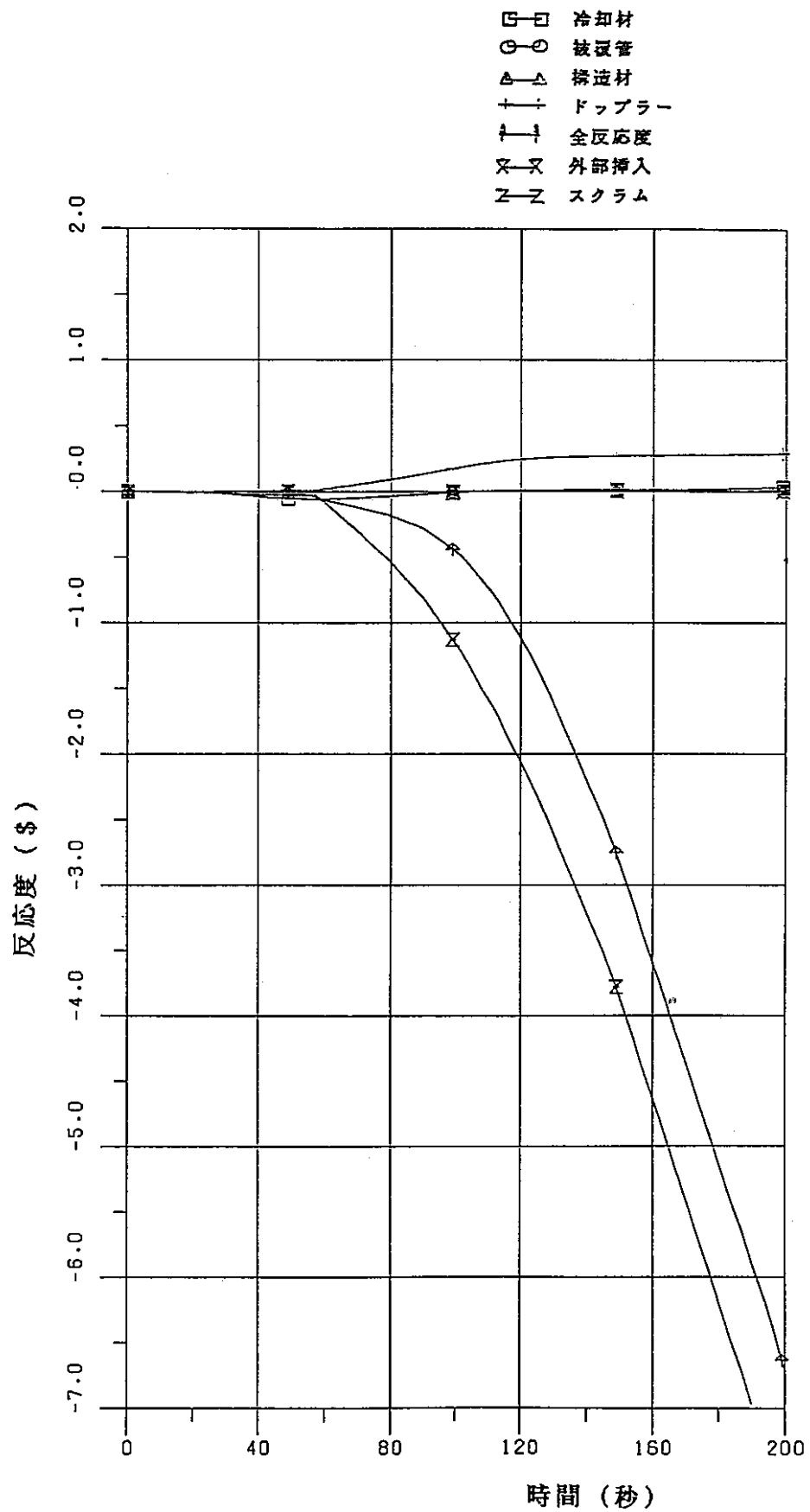


図2.2-44 高燃焼度試験時, 2次冷却材漏洩事故 (HARHO-IN)

—反応度—

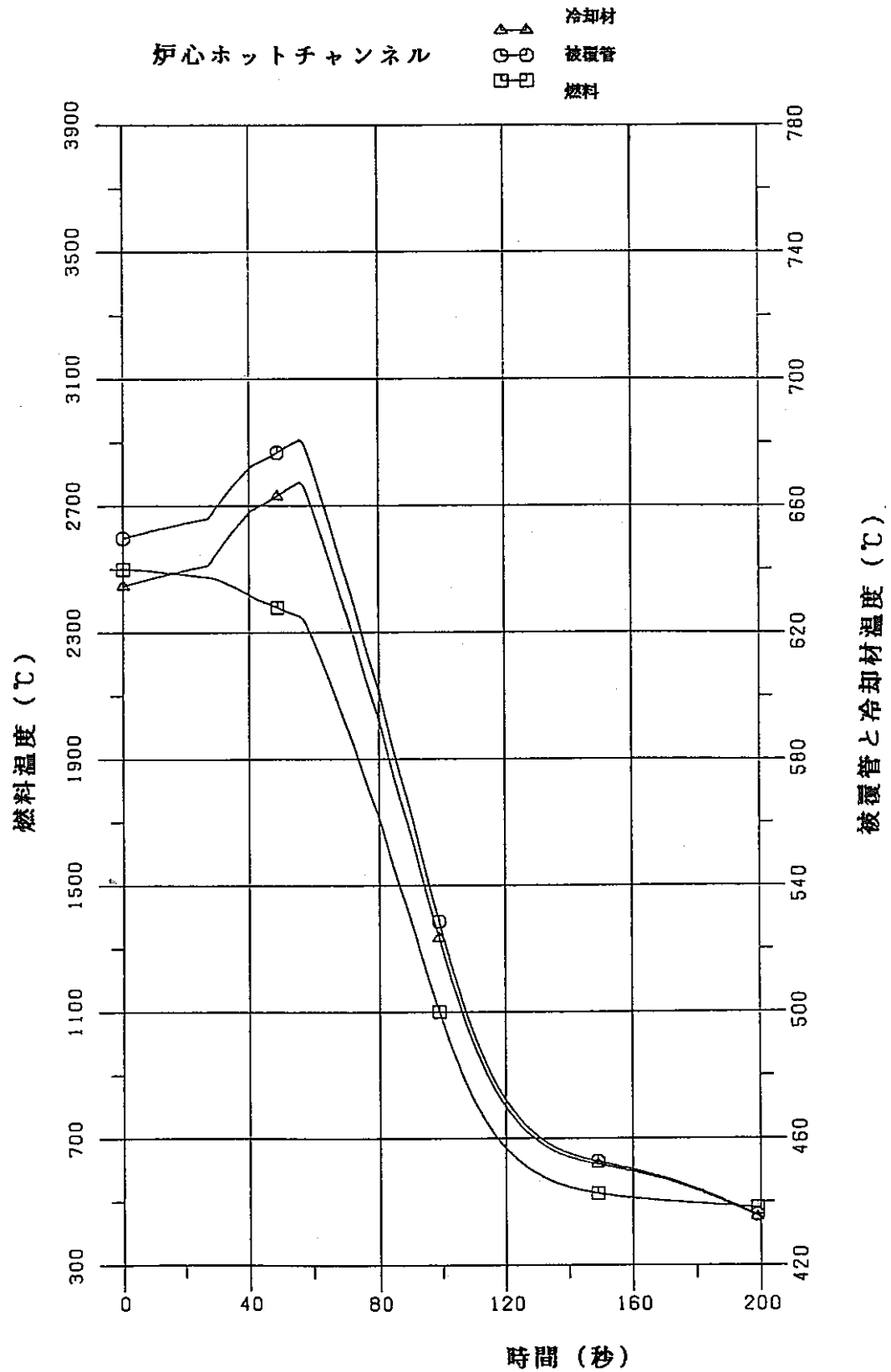


図 2.2 - 45 高燃焼度試験時, 2 次冷却材漏洩事故 (HARHO-IN)

— 炉心ホットチャンネル : 燃料, 被覆管, 冷却材最高温度 —

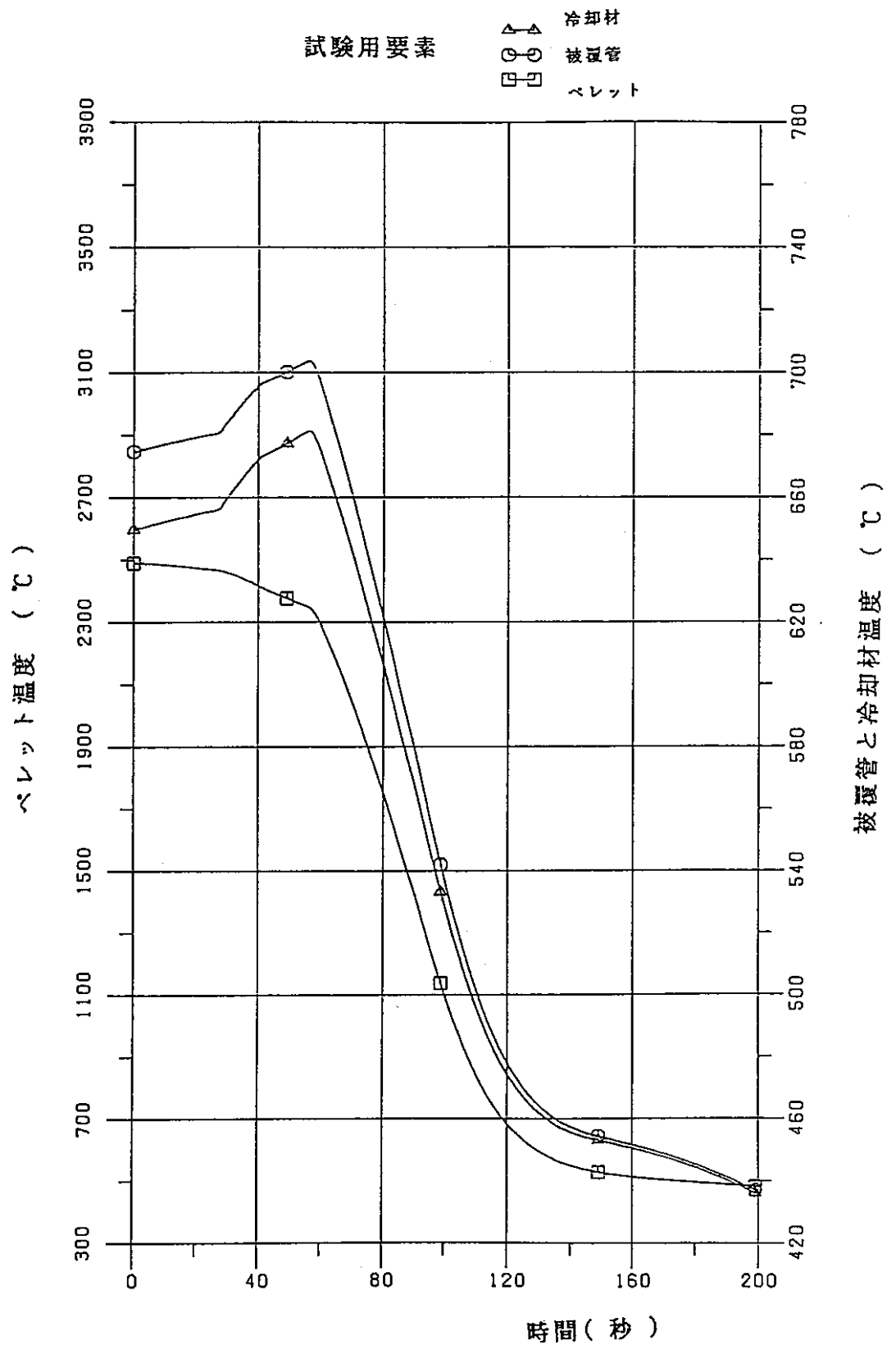


図2.2-46 高燃焼度試験時，2次冷却材漏洩事故 (HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット，被覆管，冷却材最高温度—

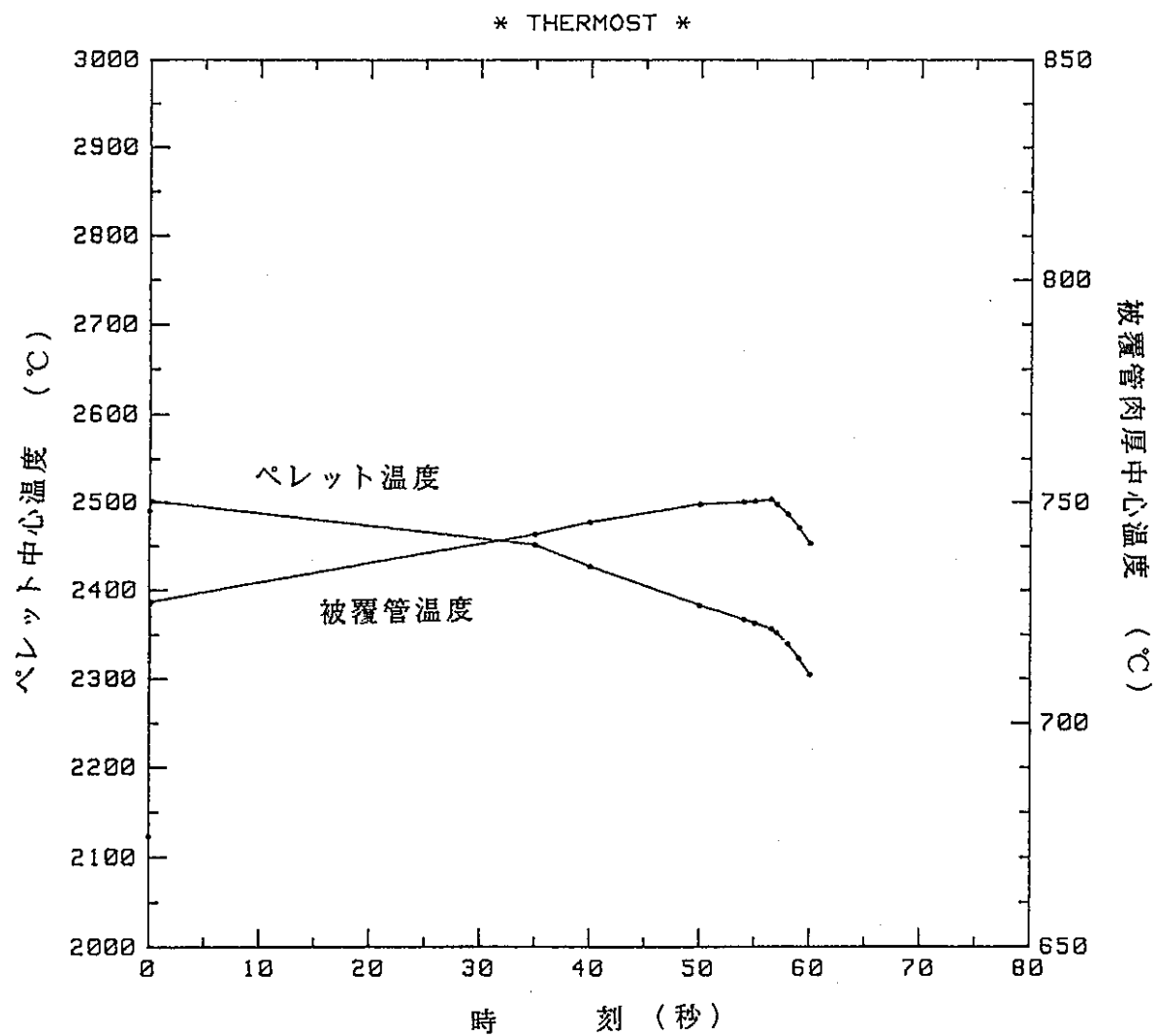


図 2.2-47 ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴
[事象：二次冷却材漏えい事故]

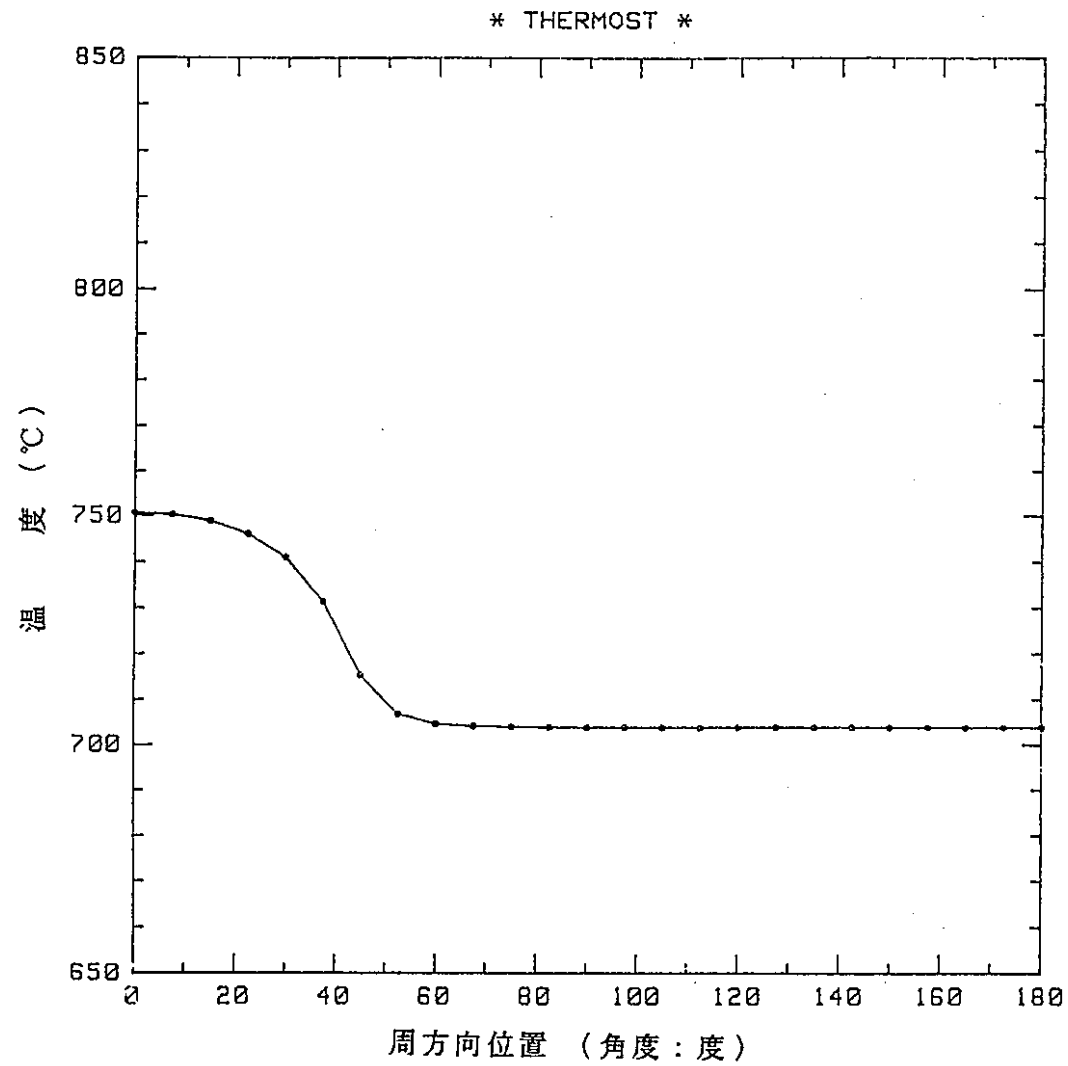


図 2.2-48

周方向被覆管肉厚中心温度分布〔時刻: 56.5 秒〕

〔事象: 二次冷却材漏えい事故〕

2.3 高燃焼度試験時の局所閉塞事象の計算

高燃焼度試験において種々の安全上の考慮にもかかわらず、試料が冷却材中に放出され、コンパートメント内で閉塞を起こすと想定し、隣接の予備試験用要素及びコンパートメントの温度等の計算を行うものとする。

計算項目は、

- (1) 閉塞時の予備試験用要素の冷却材温度、被覆管温度及び試料温度
- (2) 閉塞時のコンパートメントの壁面温度
- (3) 閉塞物の温度
- (4) 閉塞時の予備試験用要素及びコンパートメントの応力とする。

2.3.1 閉塞時の予備試験用要素・コンパートメント内管温度評価

(1) 基本方針

前年度実施した高線出力試験時の基本的な解析手法・モデルをベースとする。¹⁾

即ち、リファレンス計算としては、冷却材熱流動計算と閉塞物温度場計算の組合わせで実施する。冷却材熱流動計算はCOBRA-IVを使用し、閉塞物温度場計算はHEATING3を使用する。^{2) 3)}

計算の際、各種不確かさは考慮しないものとする。

(2) 解析条件

(a) 解析対象

前年度設計のコンパートメント内試験用要素束入口より出口までの構造を対象とする。基本仕様を表2.3-1に示す。

(b) 評価項目

- ・冷却材最高温度（閉塞物領域も含む）
- ・被覆管最高温度
- ・コンパートメント内管最高温度

(c) 発熱条件

- ・試験用要素最大線出力 : 400(W/cm)
- ・試験用要素軸方向出力分布 : 表2.3-2
- ・コンパートメント内径方向ビッキング係数 : 1.0
- ・閉塞物出力密度 (w/cm)
= (試験用要素最大線出力密度) × (流路閉塞割合)

(d) 流量条件

- ・健全時 試験用要素被覆管肉厚中心最高温度 675℃となるコンパートメント流量。
- ・閉塞時 閉塞に伴う実効的な抵抗係数の増加を考慮し、他の健全コンパートメントとの圧力バランスに基づいて設定。
- ・スーサの扱い 具体的な抵抗係数が未知のため、流路断面積比から算出される縮・拡流の抵抗係数を用いる。個数は、暫定的に7個とする。(約20cm等間隔)

(e) 境界条件

評価項目の温度を保守側に評価するために、コンパートメント内管外側を断熱とする。

(f) 流路閉塞に関する条件

- ・流路閉塞箇所 最大発熱部(炉心中心位置)
- ・流路閉塞位置 中心チャンネルと全チャンネル
- ・流路閉塞高さ 2.0cm及び5.0cm
- ・流路閉塞率 50%, 60%, 70%
- ・閉塞物熱伝導率 冷却材と燃料が均質に混合していると仮定し、燃料の含有率は閉塞率で表すものとする。

閉塞箇所は、軸方向で線出力が最も高い最大発熱部とする。

閉塞位置は、最も流路が狭い中心チャンネルとコンパートメント内管部の温度評価の観点から全チャンネルとする。

閉塞高さ・閉塞率は、現状において放出時の形態が不明なこと及び定量的な評価をするには短期間では困難なことから前年度¹⁾設定値を使用する。

ただし、全チャンネルのケースの閉塞高さ5cmについては、ペレットスタック長換算で約半分であり、過度想定となると判断する。これより、全チャンネル閉塞のケースは閉塞高さ2cmのみと設定する。しかし、昨年度の知見により全チャンネル閉塞の場合、ペレットの周方向への熱の逃げが無く熱除去が極端に悪化し、被覆管融点を超える可能性がある。このため、全チャンネル閉塞時の閉塞高さは、解析で見直すものとする。

設定値は、試験用要素1本のペレットスタックの量に換算した場合、以下に示

すような値となっている。ただし、ペレット径を 6.6mmとしている。

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率	ペレットスタック長換算長さ
中心チャンネル	2 cm	50%	1.9cm
		60%	2.3cm
		70%	2.6cm
中心チャンネル	5 cm	50%	4.7cm
		60%	5.7cm
		70%	6.6cm
全チャンネル	2 cm	50%	7.0cm
		60%	8.4cm
		70%	9.8cm

このように、中心チャンネル閉塞で高さ 5 cm、閉塞率70%で換算長さ約 7 cmであり、全チャンネル閉塞の場合約10cmの閉塞を設定することとなる。これは、試験用要素開孔時にどのように冷却材流路にペレットがどのような形態で放出されるかは現在未検討ではあるが想定しうる上限と現状考える。

(3) 解体体系

各計算体系は、製造時形状を基にモデル化する。対象は、炉心中心としその解析対象断面を図 2.3 - 1 に示す。

(a) 冷却材熱流動計算体系

図 2.3 - 2 に冷却材温度計算時のサブチャンネル分割を示す。

中心チャンネル閉塞時については、図 2.3 - 3 に示すように中心の 5 つのサブチャンネルを閉塞させて計算する。

解析は、COBRA-IV-I を使用する。

(b) 閉塞物温度場計算体系

構造材温度計算領域を図 2.3 - 4 に示す。解析は、HEATING-3 を使用するため、この領域を 2 次元 R-Z 軸対称モデルとして扱うものとする。

作成した中心チャンネル閉塞時の計算体系を図 2.3 - 5 に示す閉塞領域と断面積が同等となるように算出した値を用いるものとする。

ただし、結果の整理は冷却材熱流動計算体系の高さで表示する。

(4) 解析手順

以下に示す手順により温度特性評価を実施する。

(a) コンパートメント内流量評価

高燃焼度試験用集合体内のコンパートメントの流量を、閉塞していない体系で被覆管肉厚中心最高温度が 675℃となるよう COBRAコードで設定する。

この流量及び圧力損失を基準とし、流路閉塞時の流量を集合体内のフローネットワークモデルを作成し求める。この際、集合体内バイパス部の抵抗係数は、未知であることから下部の減圧機構の抵抗係数と同程度と仮定している。

(b) 冷却材温度評価

(a)で求められた流量を用い、閉塞時におけるコンパートメント内の冷却材温度を COBRAコードを用いて評価する。

(c) 構造材温度評価

(b)で算出した冷却材温度を境界条件とし、被覆管温度・コンパートメント内管温度及び閉塞物の温度を HEATING-3コードを用いて評価する。

(5) 閉塞物の取扱いに関する考え方

高燃焼度試験時における閉塞物はペレットの破片が考えられる。

そこで閉塞物を冷却材（ナトリウム）との反応を起こした $\text{Na}_3(\text{U}_{1-x}, \text{Pu}_x)\text{O}_4$ がほとんどを占めるものとする。 $\text{Na}_3(\text{U}_{1-x}, \text{Pu}_x)\text{O}_4$ は、 $(\text{Pu}, \text{U})\text{O}_2$ より密度が約半分であり、熱伝導度についても $(\text{Pu}, \text{U})\text{O}_2$ の約 3 割である。

本計算上では、流路閉塞時にはこの閉塞物が冷却材流路を閉塞する量を閉塞率で表すものと仮定した。

閉塞物中の熱伝導度 (k) は、冷却材（ナトリウム）と閉塞物が均質に混合しているという仮定で、次式より求めた値を使用する。

$$k(T) = f \cdot k_f(T) + (1-f) \cdot k_{na}(T)$$

ただし、

f : 閉塞割合 (—)

k_f : 閉塞物熱伝導度 (W/cm・℃)

k_{na} : ナトリウム熱伝導度 (W/cm・℃)

T : 温度 (℃)

閉塞物の熱伝導度は、実験的に求められた^{4) 5)} 値 1 kw/m℃を使用する。

閉塞物である $\text{Na}_3(\text{U}_{1-x}, \text{Pu}_x)\text{O}_4$ は、 1100°C 以上においては解離するが 1100°C 以上に閉塞物温度が上昇しても流路を閉塞しているという保守性を見込むものとする。

また、閉塞物の発熱密度に関しても実際は密度が約半分になることから前述した閉塞物出力密度（最大線出力密度×閉塞割合）の値も保守側に設定している。

閉塞物領域の圧力損失の扱は、解析コードのモデル上の制約により基本的に閉塞による流路断面積が減少するという扱いとする。

ただし、閉塞による流路の減少割合については実際にポーラス状の物質について実験的に算出されている圧力損失評価⁶⁾を参考とし、以下の式で表される圧力損失を考慮する。

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d\varepsilon^3} \rho v^2 + \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v}{d^2 \varepsilon^3}$$

ただし、

p : 圧 力

z : 軸方向位置

ε : ポロシティ

v : 流 速

μ : 動粘性係数

(6) 解析結果

冷却材熱流動計算及び閉塞物温度計算結果についてまとめて以下に示す。

閉塞していない状態（定常状態）では、被覆管肉厚最高温度が 675°C となるコンパートメント内流量はサーベイの結果、約 260 g/sec である。

その時の被覆管肉厚中心の軸方向温度分布を図2.3-7に示す。また、冷却材温度と冷却材圧力の軸方向分布を図2.3-8に示す。冷却材圧力が階段状になっているのはグリットの圧力損失によるものである。

閉塞時のコンパートメント冷却材流量及び圧力損失を各ケースについて表2.3-3、表2.3-4に示す。

中心チャンネル閉塞の場合は、冷却材流量へ与える影響は小さく、全チャンネル閉塞の場合は4/20%減少する。圧力損失については中心チャンネル閉塞で約10%増加し、全チャンネル閉塞の場合は最大で倍増する。

冷却材温度は、閉塞時においても発熱上端部が最も高くなる。表2.3-5に各閉塞時の冷却材最高温度を示す。最高温度は全チャンネル閉塞で閉塞率70%の場合約

740℃まで到達するが、冷却材の沸騰には至らない。(沸騰点約 900℃)

被覆管温度に関しては最高温度が閉塞位置に現れる。各閉塞時の被覆管最高温度(肉厚中心)を表2.3-6に示す。中心チャンネル閉塞の場合、閉塞率70%・閉塞高さ5 cmのケースで約1260℃まで被覆管温度が上昇するが、ステンレス鋼の溶融点1370℃以下であり、溶融貫通することはない。全チャンネル閉塞の場合は、閉塞率70%では被覆管溶融点を越えることがわかり、被覆管の融点1370℃となる閉塞高さをサーベイした。その結果、約1.1cmで融点に達することがわかった。ただし、サーベイ計算には閉塞高さ2 cm時の冷却材温度を境界条件として使用した。

コンパートメント内管の最高温度を表2.3-7に示す。中心チャンネル閉塞では、温度上昇はほとんどない。最高温度出現位置は、発熱上端である。全チャンネル閉塞時には最も厳しく、閉塞率70%の時に約1260℃となるがコンパートメント内管溶融点(被覆管と同値とする)に至らない。

本解析における閉塞物の中心温度を表2.3-8に示す。

(7) まとめ

- (a) コンパートメント内流量は中心チャンネル閉塞では、健全時と比較して大きな変動はない。全チャンネル閉塞では閉塞率60%までは変動はないが70%閉塞率では約20%減少する。
- (b) 被覆管最高温度は、中心チャンネル閉塞時に約1260℃まで上昇するが被覆管融点までは余裕がある。全チャンネル閉塞の場合では、閉塞高さが約1.1cm、閉塞率70%の時に溶融点を越えると予測される。
- (c) コンパートメント内管の最高温度は、最も厳しい全チャンネル70%閉塞率時で約1260℃となるが溶融点までには余裕があり、溶融貫通することはない。

昨年度及び本研究において使用した解析手法・解析モデルについて、今後3次元詳細解析コードによる手法を確立・評価して、本解析手法・モデルの問題点等を摘出して反映し、予測精度の向上を図る必要があると考えられる。

2.3.2 閉塞時の予備試験用要素及びコンパートメント内管応力評価

前述の温度特性結果をもとに、被覆管及びコンパートメント内管の肉厚内温度勾配による熱応力及び軸方向温度勾配によるもんじゅ燃料設計で使用している簡易評価式を用いて評価する。

(1) 肉厚内温度勾配

被覆管及びコンパートメント内管の肉厚内温度勾配による熱応力は、以下の式で求められる。

$$\sigma_{in\theta} = - \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2(1-\nu)}$$

$$\sigma_{out\theta} = - \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2(1-\nu)}$$

$$\sigma_{inZ} = \sigma_{in\theta}, \quad \sigma_{outZ} = \sigma_{out\theta}$$

ただし、

$\sigma_{in\theta}$: 内面周方向応力 (kg/mm²)

$\sigma_{out\theta}$: 外面周方向応力 (kg/mm²)

σ_{inZ} : 内面周方向応力 (kg/mm²)

σ_{outZ} : 外面周方向応力 (kg/mm²)

E : 縦弾性係数 (kg/mm²)

α : 熱膨張係数 (1/°C)

ΔT : 管壁温度差 (°C)

ν : ポアソン比 (-)

前項の解析により得られた被覆管及びコンパートメント内管の肉厚内の温度差を第2.3-9表、第2.3-10表に示した。

この結果を使用し、上記の簡易評価式で求められた閉塞時に発生する応力を第2.3-11表、第2.3-12に示した。内・外面及び周方向・軸方向は同一値なことから分類分けは省略した。

被覆管及びコンパートメント内管の温度は、高温になりそのため熱伝導率がよいことから肉厚内の温度勾配は最大で約28°Cである。

この温度差における応力は、被覆管で最大約5 kg/mm²である。

コンパートメント内管においては最大で約2 kg/mm²である。

(2) 軸方向温度勾配

被覆管及びコンパートメント内管で閉塞箇所との軸方向温度勾配により発生する応力は以下の式で求められる。

$$\sigma_{in\theta} = -0.1612E \cdot \alpha \cdot \Delta T + 0.1612\nu \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma_{out\theta} = -0.1612E \cdot \alpha \cdot \Delta T - 0.1612\nu \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma_{inZ} = 0.1612 \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma_{outZ} = -\sigma_{inZ}$$

ただし、

$\sigma_{in\theta}$: 内面周方向応力 (kg/mm²)

$\sigma_{out\theta}$: 外面周方向応力 (kg/mm²)

σ_{inZ} : 内面周方向応力 (kg/mm²)

σ_{outZ} : 外面周方向応力 (kg/mm²)

E : 縦弾性係数 (kg/mm²)

α : 熱膨張係数 (1/℃)

ΔT : 軸方向高温側と低温側の温度差 (℃)

ν : ポアソン比 (-)

すでに求められている温度解析結果より軸方向の温度差を算出し、軸方向温度勾配により発生する応力を上式で計算した結果を第2.3-13表、第2.3-14表に被覆管とコンパートメントについて示した。

使用した物性値は、以下とした。

$$\text{熱膨張係数 } \alpha = 15.0113 + 0.8726 \times 10^{-2}T - 0.5872 \times 10^{-5}T^2 + 0.1931 \times 10^{-8}T^3$$

(×10⁻⁶mm/mm/℃)

$$\text{縦弾性係数 } E = 19989.96 - 5.4915T - 0.4081 \times 10^{-2}T^2 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

また、軸方向温度差は前述の第2.3-6表ならびに第2.3-7表に示した被覆管・コンパートメント温度より、定常時温度（それぞれ、675℃、646℃）を減じた値を使用した。

最大応力は、被覆管・コンパートメント内管とも全チャンネル閉塞で閉塞率70%で約7 kg/mm²である。

以上、閉塞時に被覆管及びコンパートメント内管が高温になることにより、発生する応力について管壁温度勾配、軸方向温度勾配に着目して評価した。

健全性については、通常状態の被覆管及びコンパートメント内管の応力状態を把握し応力評価表を作成し基準と比較・検討を行わなければならない。これは、現状閉塞事象の時期の条件等及び通常時の応力評価がなされていないことから、今後の検討課題とする。

また、高温下における簡易評価式の外挿性・妥当性を、有限要素法等により行う必要があることと、急速に温度上昇する時の使用分数和を計算し、予備試験用要素及びコンパートメント内管の健全性を確認する必要があると判断される。

表 2.3 - 1 高燃焼度試験用集合体仕様 (1/2)

項 目	仕 様
(1) 高燃焼度試験用集合体	
形 式	コンパートメント型
ラッパ管形状	正六角形
全 長	2,970mm
コンパートメント本数	6本
ラッパ管外対面距離	78.5mm
ラッパ管内対面距離	74.7mm
ラッパ管肉厚	1.9mm
上部バッド部外対面距離	80.3mm
下部バッド部外対面距離	81.2mm
(2) コンパートメント	
型 式	断熱二重壁型
形 状	円筒形
全 長	2,172mm
試験要素数	5本
要素配列ピッチ	7.5mm
二重壁内充填ガス	Ar(70%)+He(30%)
外管外径	26.4mm
外管内径	25.2mm
外管肉厚	0.6mm
内管外接円直径	23.2mm
内管内接円直径	17.2mm
内管肉厚	0.7mm
(3) 高燃焼度試験用要素	
型 式	ワイヤラッピング型密封式
全 長	1,765mm
被覆管外径	6.5mm
被覆管内径	5.56mm
被覆管肉厚	0.47mm
ベレット被覆管ギャップ (半径)	0.08mm

表2.3-1 高燃焼度試験用集合体仕様 (2/2)

項 目	仕 様
試験用要素寸法	
試料ペレット	550mm
インシュレータペレット (上・下)	8mm
要素反射体 (上)	35mm
要素反射体 (下)	366mm
ガスプレナム容積	14.7cc
ラッピングワイヤ径	1.1mm
ラッピングピッチ	285mm
(4) 試料ペレット	
種 類	ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレット
ペレット直径	5.4mm
ペレット高さ	8mm
ペレット密度	85%TD
プルトニウム富化度	30w/o
プルトニウム同位体組成比	72w/o
ウラン濃縮度	8w/o
O/M比	1.97
揮発性不純物	100 μ l/gMox以下
水分量	30ppm 以下
不純物 (total)	3,000ppm 以下
(5) インシュレータペレット	
種 類	劣化ウラン酸化物ペレット
ペレット直径	5.4mm
ペレット高さ	8mm
ペレット密度	94%TD
ウラン235含有量	0.2w/o
ウラン含有量	87.8w/o以上
O/U比	2.00~2.02
揮発性不純物	50 μ l/gUO ₂ 以下
水分量	30ppm 以下
不純物 (total)	3,000ppm 以下

表2.3-2 高燃焼度試験要素の軸方向出力分布

軸 方 向 位 置 [cm]		相 対 値 [—]
上部インシュレータ	57.40	0.049
	56.20	0.056
炉 心	56.20	0.554
	52.77	0.641
	49.33	0.732
	45.89	0.816
	42.45	0.871
	39.00	0.928
	35.57	0.959
	32.13	0.991
	28.70	1.000
	25.25	0.996
	21.82	0.972
	18.38	0.931
	14.94	0.893
	11.50	0.822
	8.06	0.741
	4.62	0.657
	1.20	0.599
下部インシュレータ	1.20	0.057
	0.0	0.049

表2.3-3 閉塞時コンパートメント流量*

[単位：％]

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50％	60％	70％
中心チャンネル	2 cm	99.9	99.9	99.8
	5 cm	99.9	99.4	98.9
全チャンネル	2 cm	96.0	93.1	83.8

* 値は閉塞していない場合の流量を 100％とした時の相対値。

表2.3-4 閉塞時コンパートメント内試験用要素束圧力損失*

[単位：％]

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50％	60％	70％
中心チャンネル	2 cm	109	110	111
	5 cm	110	112	114
全チャンネル	2 cm	127	149	204

* 値は閉塞していない場合の流量を 100％とした時の相対値。

表 2.3 - 5 閉塞時の冷却材最高温度*

〔単位：℃〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	664	664	666
	5 cm	667	668	673
全チャンネル	2 cm	690	707	742

* 冷却材最高温度は発熱上端位置の値。

表 2.3 - 6 閉塞時の被覆管内厚中心温度*

〔単位：℃〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	997	1074	1202
	5 cm	1010	1114	1259
全チャンネル	1.1cm**	1134	1257	1370

* 閉塞物位置の値（炉心中心）。

** 冷却材温度は 2 cm 時の値を使用。

表2.3-7 閉塞時のコンパートメント内管最高温度*

〔単位：℃〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	646	646	646
	5 cm	646	646	646
全チャンネル	1.1 cm	1038	1130	1263

* 閉塞物位置の値（炉心中心）。ただし，中心チャンネル閉塞ケースの温度は発熱上端位置の値。

表2.3-8 閉塞時の閉塞物中心温度*

〔単位：℃〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	996	1061	1186
	5 cm	998	1100	1239
全チャンネル	1.1 cm	1123	1244	1356

表2.3－9 閉塞時の被覆管肉厚内温度勾配

(単位：℃)

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	27.6	26.0	25.0
	5 cm	27.0	25.8	24.2
全チャンネル	1.1 cm	9.8	9.3	8.9

表2.3－10 閉塞時のコンパートメント内管肉厚内温度勾配

(単位：℃)

閉塞位置	閉塞高さ	閉塞率		
		50%	60%	70%
全チャンネル	1.1 cm	10.3	9.8	9.3

表2.3-11 閉塞時の被覆管肉厚内温度勾配による応力

〔単位：kg/mm²〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉 塞 率		
		50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	4.9	4.3	3.5
	5 cm	4.7	4.1	3.1
全チャンネル	1.1 cm	1.5	1.2	0.9

表2.3-12 閉塞時のコンパートメント内管肉厚内温度勾配

〔単位：kg/mm²〕

閉塞位置	閉塞高さ	閉 塞 率		
		50%	60%	70%
全チャンネル	1.1 cm	1.7	1.5	1.2

表 2.3 - 13 閉塞時の被覆管軸方向温度勾配による応力

(単位 : kg/mm^2)

閉塞位置	閉塞高さ	応力成分*	閉塞率		
			50%	60%	70%
中心チャンネル	2 cm	$Q_{in} \theta$	-0.90	-1.10	-1.25
		$Q_{out} \theta$	-3.85	-4.71	-5.35
		$Q_{in} Z$	4.92	6.02	6.83
		$Q_{out} Z$	-4.92	-6.02	-6.83
中心チャンネル	5 cm	$Q_{in} \theta$	-0.98	-1.16	-1.26
		$Q_{out} \theta$	-4.17	-4.98	-5.40
		$Q_{in} Z$	5.33	6.38	6.51
		$Q_{out} Z$	-5.33	-6.38	-6.51
全チャンネル	1.1 cm	$Q_{in} \theta$	-1.19	-1.26	-1.32
		$Q_{out} \theta$	-5.09	-5.41	-5.67
		$Q_{in} Z$	6.51	6.90	7.24
		$Q_{out} Z$	6.51	-6.90	-7.24

* 応力成分の説明

$Q_{in} \theta$: 内面周方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{out} \theta$: 外面周方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{in} Z$: 内面軸方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{out} Z$: 外面軸方向応力 (kg/mm^2)

表2.3-14 閉塞時のコンパートメント内管軸方向温度勾配による応力

(単位: kg/mm^2)

閉塞位置	閉塞高さ	応力成分*	閉塞率		
			50%	60%	70%
全チャンネル	1.1cm	$Q_{in} \theta$	-1.12	-1.26	-1.33
		$Q_{out} \theta$	-4.78	-5.40	-5.67
		$Q_{in} Z$	6.11	6.89	7.24
		$Q_{out} Z$	-6.11	6.89	-7.24

* 応力成分の説明

$Q_{in} \theta$: 内面周方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{out} \theta$: 外面周方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{in} Z$: 内面軸方向応力 (kg/mm^2)

$Q_{out} Z$: 外面軸方向応力 (kg/mm^2)

(単位: mm)

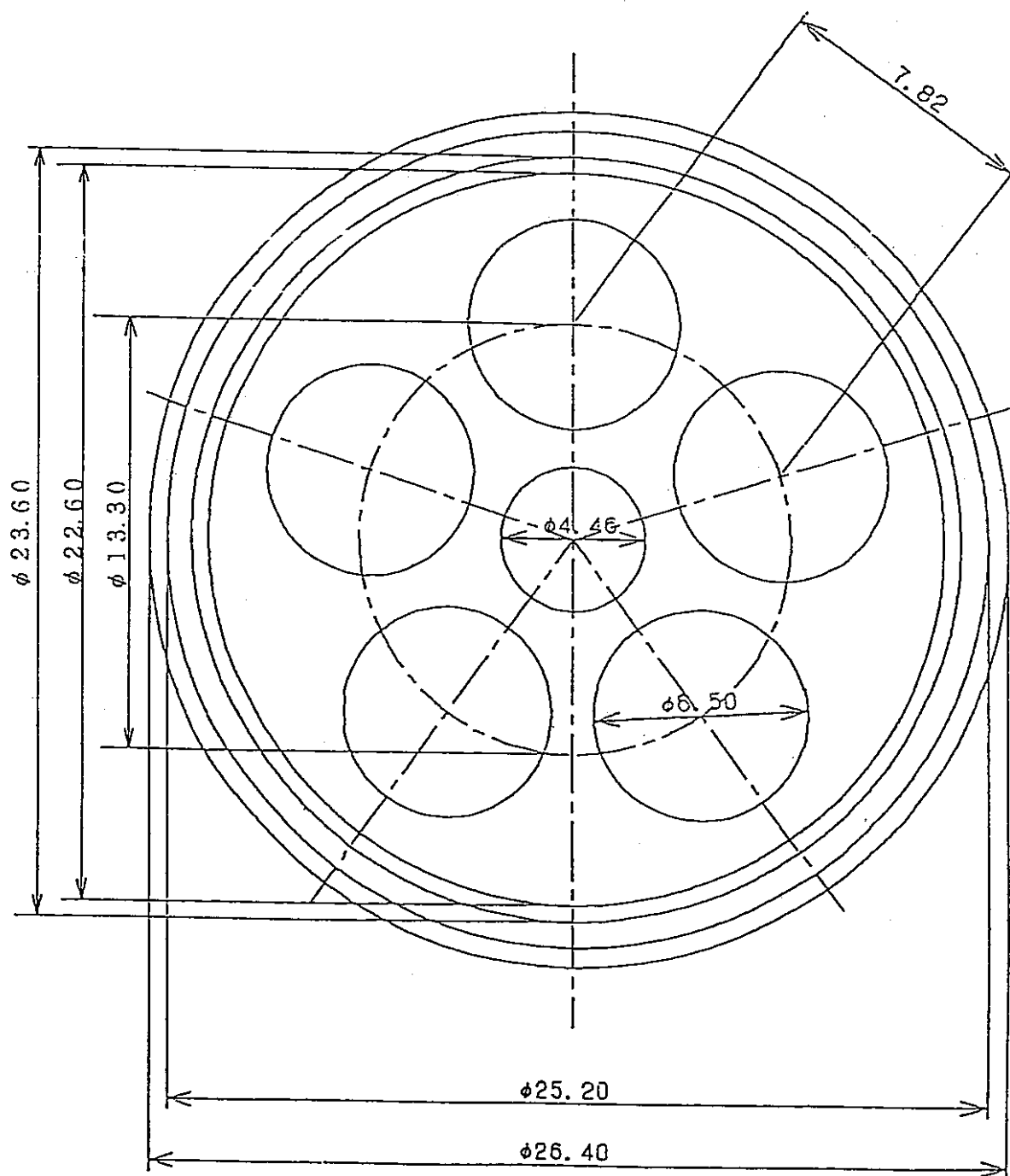


図2.3-1 解析対象コンパートメント横断面図

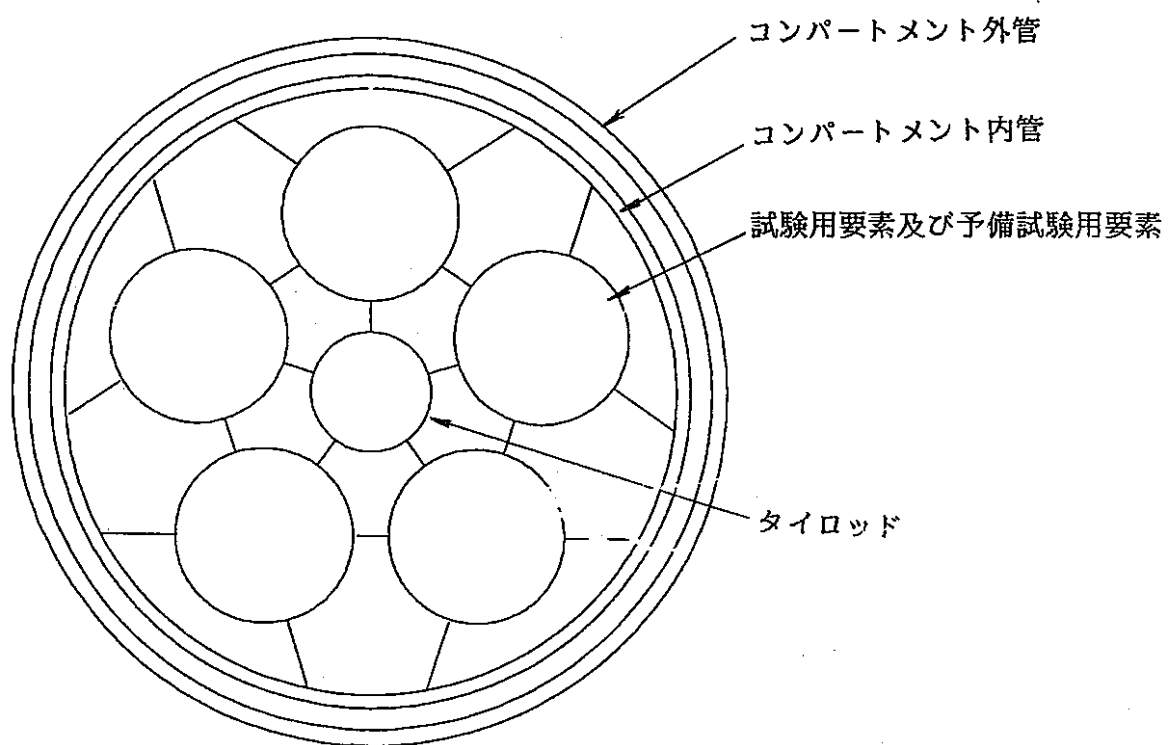


図2.3- 2 冷却材熱流動計算用サブチャンネル分割(COBRA-IV-I)

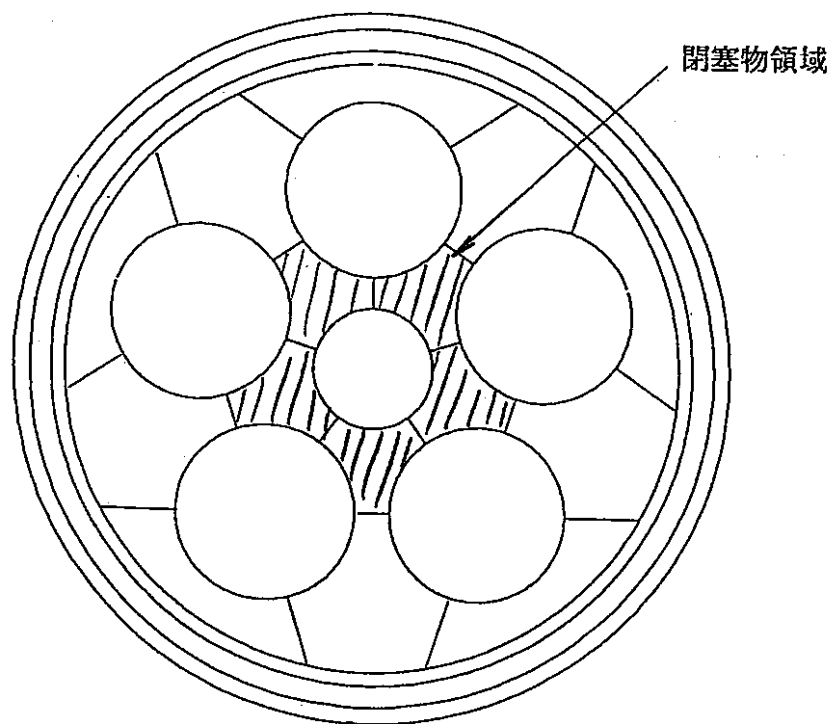


図2.3- 3 冷却材熱流動計算用中心チャンネル閉塞時体系(COBRA-IV-I)

 閉塞物領域

(単位: mm)

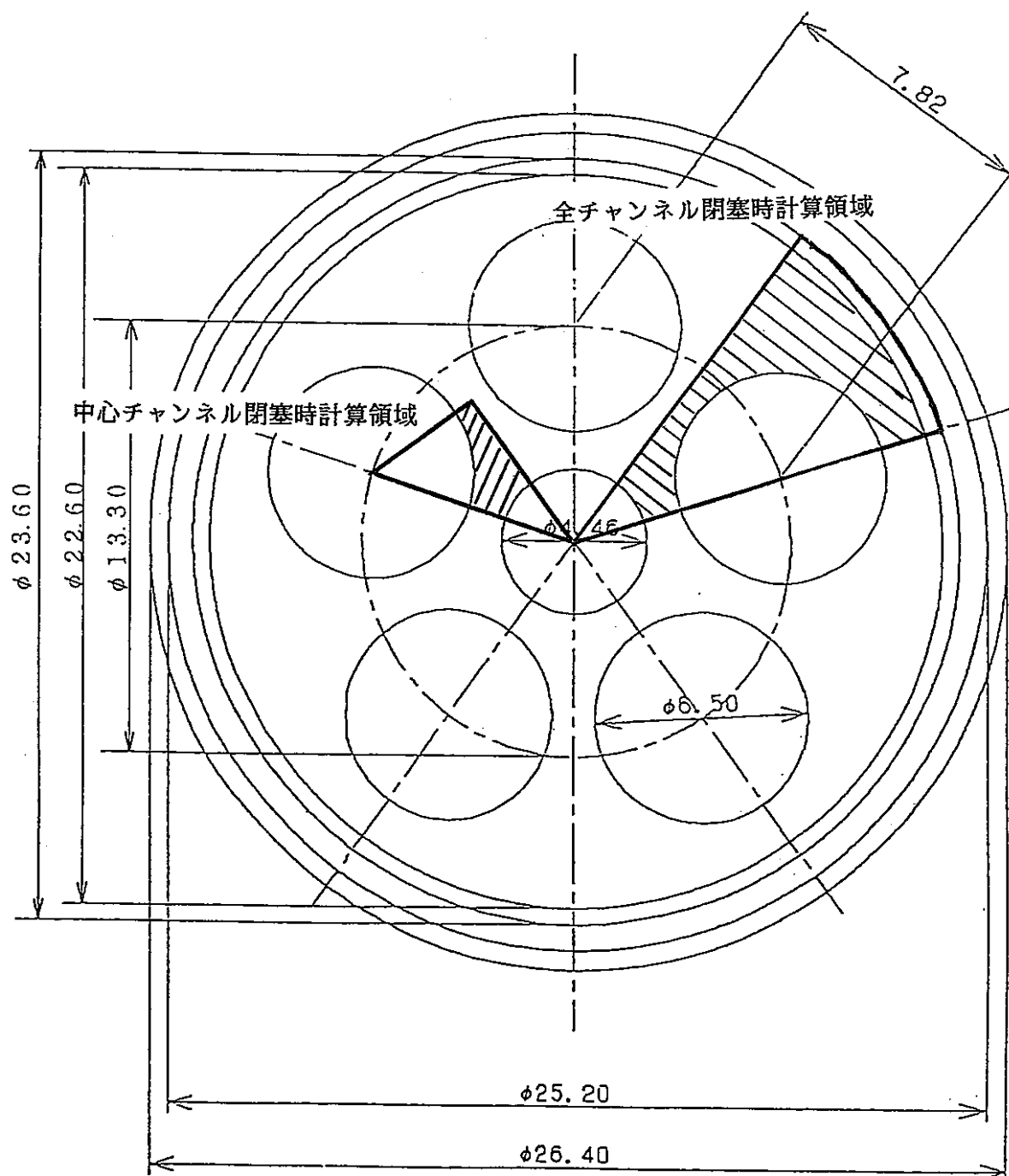


図2.3- 4 構造材温度計算領域 (HEATING-3)

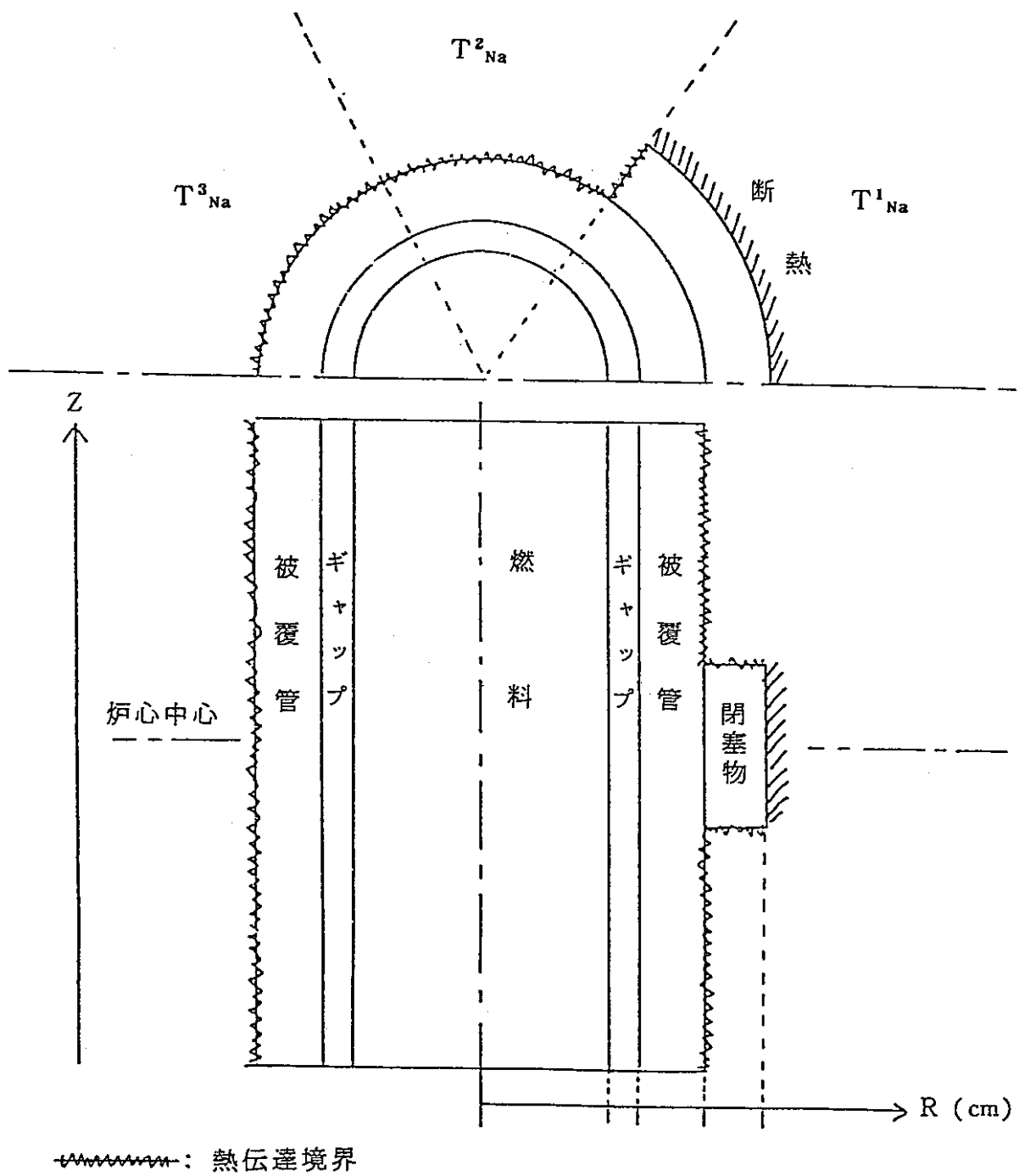


図2.3-5 構造材温度計算用中心チャンネル閉要時モデル (HEATING-3)

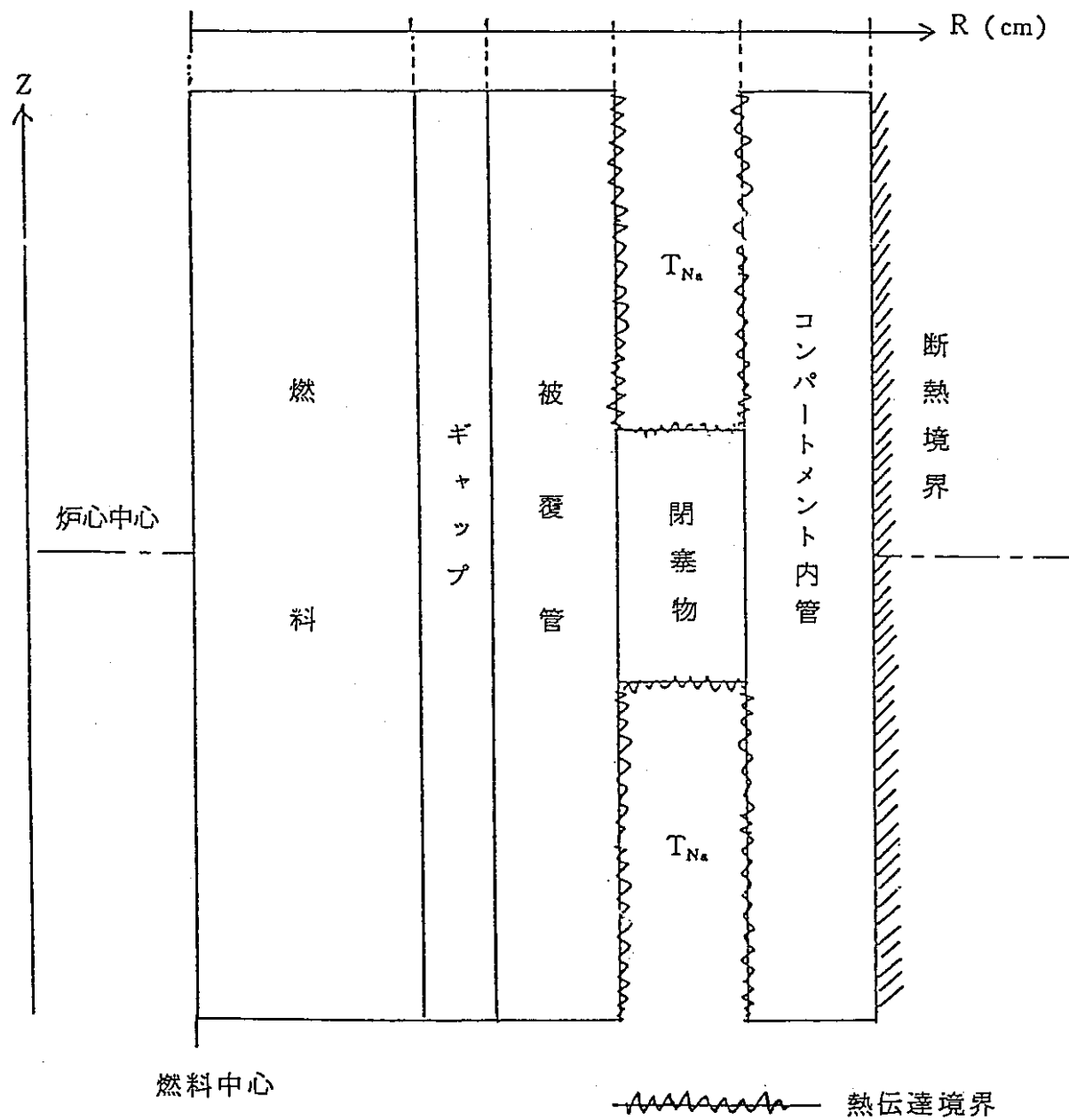


図2.3- 6 構造材温度計算用全チャンネル閉塞時モデル (HEATING-3)

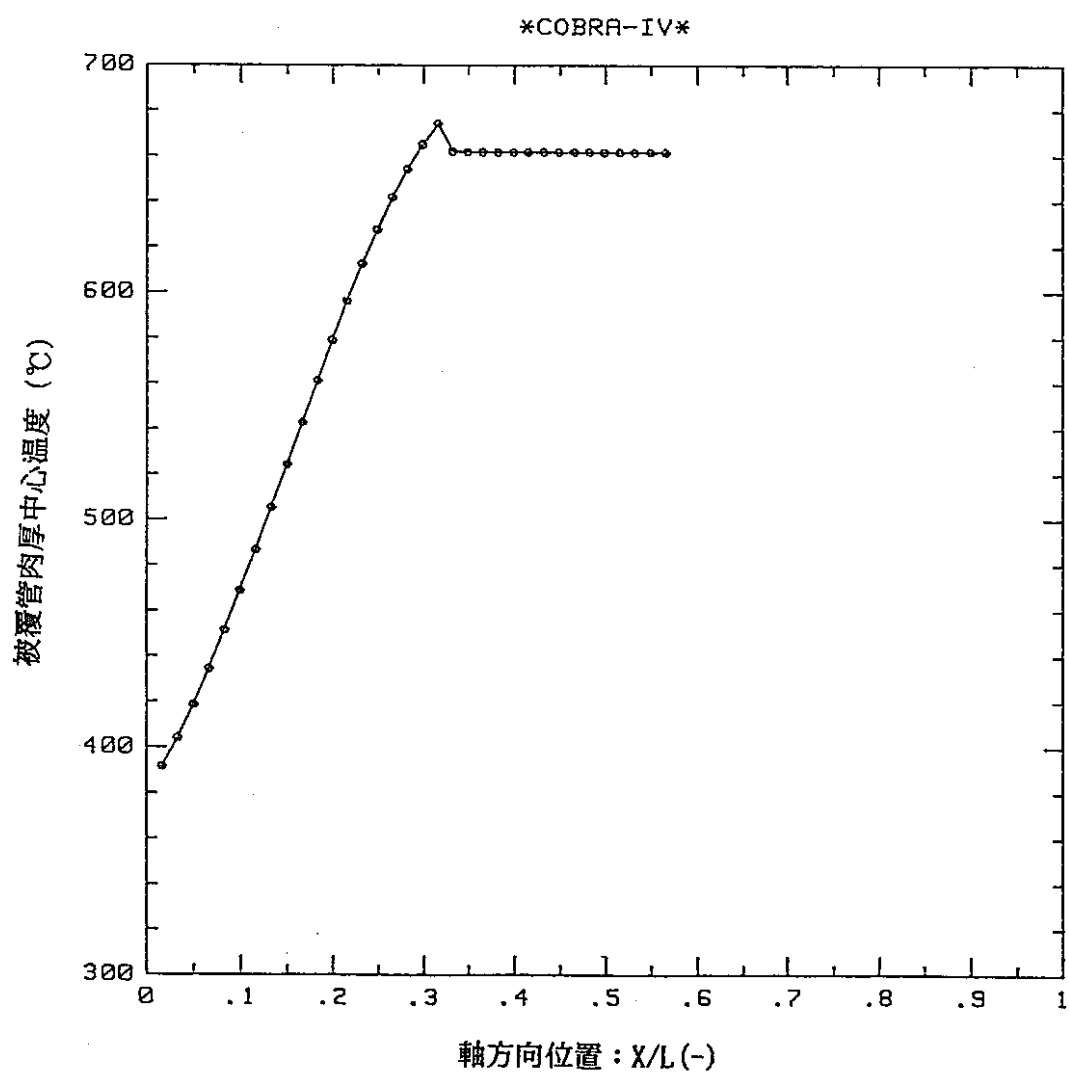


図2.3- 7 被覆管肉厚中心温度の軸方向分布

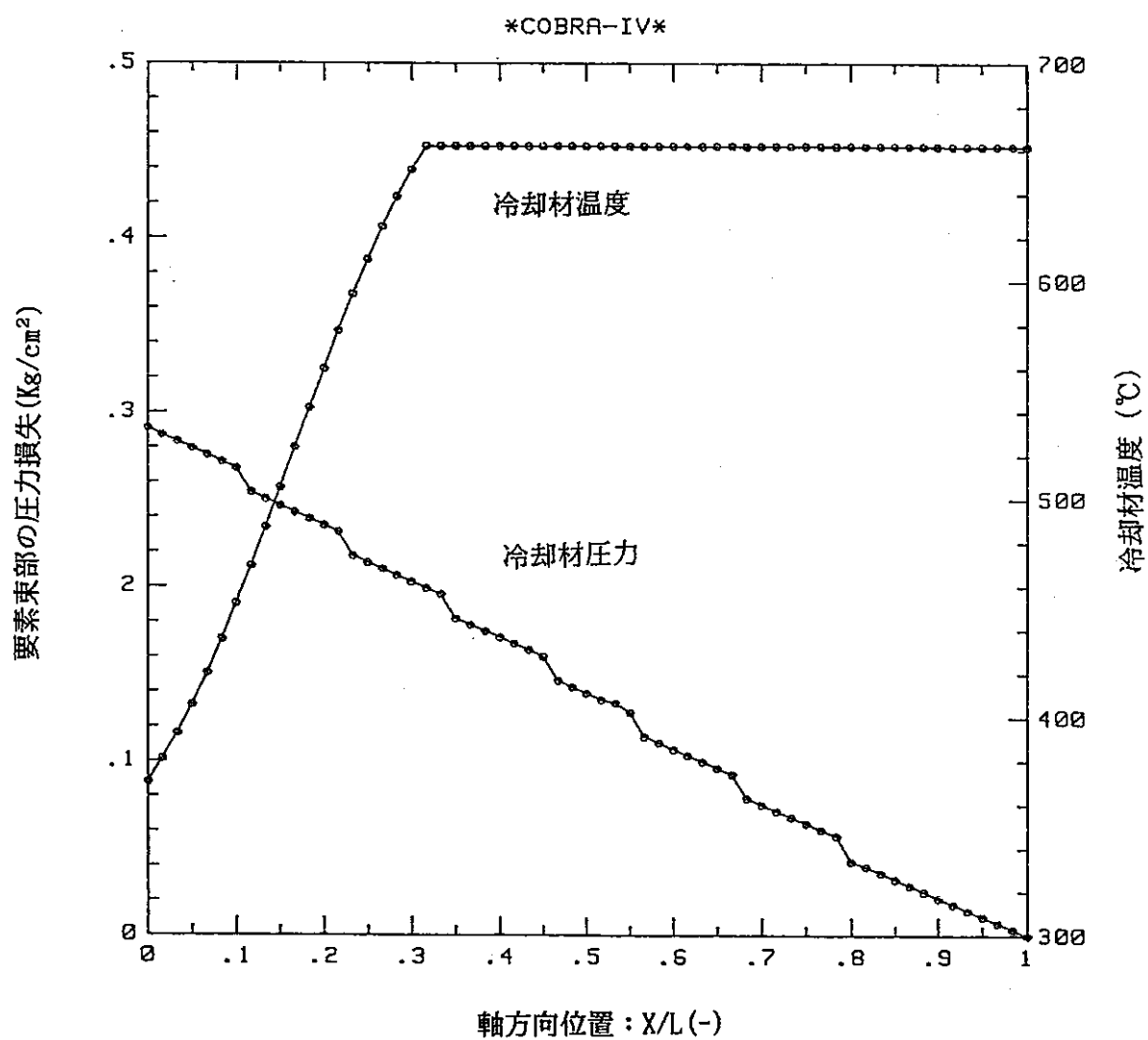


図2.3- 8 冷却材温度と冷却材圧力の軸方向分布

3. 「事故」時の被ばく計算

高速実験炉「常陽」の原子炉施設の「事故」として想定される以下の3事象について一般公衆の受ける線量当量評価を行う。

- i) 原子炉停止中における1次冷却系破損事故
- ii) 原子炉サービス系の破損事故
- iii) 廃棄物処理設備の破損事故

尚、線量当量は法令改正（平成元年4月1日から施行）に伴う新指針ベース及び新告示ベースの2通りについて評価する。

3.1 評価手法

3.1.1 新指針ベース

(1) γ 線外部被ばくによる実効線量当量

新法令に基づく「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」（改訂案）に従い、 γ 線による外部全身被ばく線量は実効線量当量を評価するものとする。敷地周辺の被ばく評価地点における照射形態は等方に近いため等方照射場を想定すると、照射線量から実効線量当量への換算係数は全エネルギー範囲において1以下となる。そこで、新指針ベースにおいては従来通り $1\text{ R} = 1\text{ rem} = 0.01\text{ Sv}$ として次式により γ 線外部被ばくによる実効線量当量 D_{γ} (Sv) を評価する。

$$D_{\gamma} = k \cdot (D/Q) \cdot Q_{\gamma}$$

ここで、

k : 照射線量から実効線量当量への換算係数 (0.01Sv/R)

(D/Q) : 相対線量 (R/MeV/Bq)

Q_{γ} : 事故期間中の希ガスの大気放出量 (MeV/Bq)

(2) 甲状腺組織線量当量

敷地周辺における放射性よう素の吸入による甲状腺（小児）組織線量当量 D_i (Sv) はICRP Pub30に基づいた線量換算係数を用いて次式で計算する。

$$D_i = (X/Q) \cdot Q_i \cdot B \cdot F \cdot n$$

ここで、

(X/Q) : 相対濃度 (hr/m³)

Q_i : 事故期間中のよう素の大気放出量 ($I^{131}\text{eq. Bq}$)

B : 人間の呼吸率 (m^3/hr)

短時間放出となる原子炉停止中における1次冷却系破損事故及び
廃棄物処理設備の破損事故について $1.25\text{m}^3/\text{hr}$; 長時間放出となる
原子炉サービス系の破損事故については $0.833\text{m}^3/\text{hr}$

F : I^{131} 単位Bq吸入による甲状腺(成人)組織線量当量
($2.9 \times 10^{-7}\text{Sv/Bq}$, 表3-1 参照)

n : 成人から小児への換算係数 (= 4)

(3) 実効線量当量

内部被ばくに係る実効線量当量の評価は、よう素吸入に伴う甲状腺組織線量当量に荷重係数0.03を掛けた値を用いる。 γ 線外部被ばくによる実効線量当量及び内部被ばくによる実効線量当量の和を実効線量当量とする。

3.1.2 新告示ベース

(1) γ 線外部被ばくによる実効線量当量

新告示15号においては外部被ばくによる実効線量当量は1cm線量当量とすることとあり、別表第4の第2欄に γ 線エネルギー(E_γ)別に空気吸収線量から線量当量への換算係数(Sv/Gy)がまとめられている。本表によると最大値は $E_\gamma = 0.060\text{MeV}$ における $1.74\text{Sv/Gy}(=\text{rem/rad})$ となる。そこで、ここでは照射線量から実効線量当量への換算係数を安全側に $1.74\text{rem/rad} \times 0.87\text{rad/R} = 1.51\text{rem/R}$ として新告示ベースにおける γ 線外部被ばくによる実効線量当量を評価する。

(2) 甲状腺組織線量当量

新告示ベースにおける甲状腺組織線量当量は、新告示15号別表第1の第3欄の年摂取限度に基づいた線量換算係数(Sv/Bq)を用いて評価する。表3-1に新告示ベースの線量換算係数等をまとめる。尚、 I^{134} については甲状腺に対する年摂取限度の記載が新告示にないため実効線量当量に対する年摂取限度を基に評価している。

(3) 実効線量当量

新指針ベースと同様に γ 線外部被ばくによる実効線量当量及び甲状腺組織線量当量に荷重係数0.03を掛けた内部被ばくによる実効線量当量の和を実効線量当量とする。

3.2 評価条件

表3-2に相対濃度(X/Q),相対線量(D/Q)を,表3-3に希ガス及びよう素の放出量を事故例,放出高さ別にまとめる。^{3-1),2)}

3.3 評価結果

表3-4に γ 線外部被ばくによる実効線量当量を,表3-5に甲状腺組織線量当量を,表3-6に実効線量当量をまとめる。海側評価点の方が陸側評価点に比べて線量当量は大きくなるが,各線量当量は新法令における公衆の年間線量当量限度(実効線量当量1mSvに比べて十分低い値に収まっており事故時において周辺の公衆に対して著しい放射線のリスクを与えることはない。

尚,現申請書に記載のある廃棄物処理設備の破損事故について被ばく線量を比較すると,

	現申請書	新指針ベース
γ 線による全身被ばく線量	約0.0006rem	約0.0008rem
小児甲状腺被ばく線量	約0.0014rem	約0.0015rem

となり,本評価における線量当量(新指針ベース,陸側評価点)の方が僅かに大きくなっている。これは(X/Q),(D/Q)が見直され増加しているためであり,現申請書の(X/Q),(D/Q)を用いると,全身被ばく線量は同じ値に,甲状腺被ばく線量は新指針ベースの方が現申請書の0.7倍に低下する。

表 3-1 よう素吸入による甲状腺（成人）組織線量当量換算係数

核種	新指針ベース		新告示ベース		
	換算係数 (Sv/Bq)	甲状腺 効果比	年摂取限度 (Bq)	換算係数* (Sv/Bq)	甲状腺 効果比
I ¹³¹	2.9×10^{-7}	1	1.7×10^6	2.9×10^{-7}	1
I ¹³²	1.7×10^{-9}	5.9×10^{-3}	2.9×10^8	1.7×10^{-9}	5.9×10^{-3}
I ¹³³	4.9×10^{-8}	1.7×10^{-1}	1.0×10^7	5.0×10^{-8}	1.7×10^{-1}
I ¹³⁴	2.9×10^{-10}	1.0×10^{-3}	4.9×10^8 ***	1.0×10^{-9}	3.5×10^{-3} **
I ¹³⁵	8.5×10^{-9}	2.9×10^{-2}	5.8×10^7	8.6×10^{-9}	2.9×10^{-2}

* 年摂取限度が 500mSv に相当するため 500mSv を年摂取限度で割った値

** 実効線量当量における I¹³¹ 等価係数

*** 実効線量当量における I¹³¹ 等価係数から設定した甲状腺組織線量当量に対する年摂取限度

表 3-2 被ばく評価に用いる相対濃度(X/Q) および相対線量(D/Q)

想定事故	実効放出 継続時間 (hr)	地上放出		排気筒放出	
		X/Q (hr/m ³)	D/Q (R/MeV/Bq)	X/Q (hr/m ³)	D/Q (R/MeV/Bq)
廃棄物処理設備の 破損事故	1	3.3×10^{-8}	2.3×10^{-16}	9.3×10^{-10}	3.2×10^{-17}
		3.6×10^{-7}	1.0×10^{-15}	2.5×10^{-10}	3.2×10^{-17}
原子炉停止中における 1次冷却系破損事故	2	3.9×10^{-8}	2.3×10^{-16}	8.9×10^{-10}	2.7×10^{-17}
		2.8×10^{-7}	8.1×10^{-16}	3.8×10^{-10}	2.7×10^{-17}
原子炉サービス系の 破損事故	10	3.7×10^{-8}	1.5×10^{-16}	5.9×10^{-10}	1.9×10^{-17}
		1.7×10^{-7}	4.9×10^{-16}	8.3×10^{-10}	2.5×10^{-17}

注) 上段：陸側評価点，下段：海側評価点

表 3-3 事故時の大気放出量

		排気筒放出	地上放出
原子炉停止中における 1次冷却系破損事故	希ガス (MeV・Bq)	4.8×10^{11}	8.5×10^8
	よう素 (I^{131} eq. Bq)	2.7×10^{10}	4.8×10^8
原子炉サービス系の 破損事故	希ガス (MeV・Bq)	1.7×10^{13}	3.0×10^{10}
	よう素 (I^{131} eq. Bq)	1.8×10^8	3.1×10^6
廃棄物処理設備の 破損事故	希ガス (MeV・Bq)	1.4×10^{13}	1.6×10^{12}
	よう素 (I^{131} eq. Bq)	2.8×10^8	3.1×10^8

注) よう素は I^{131} eq. Bqで表すと新指針ベース、新告示ベースとも同じ値となる。

表 3-4 γ 線外部被ばくによる実効線量当量

		陸側評価点		海側評価点	
		新指針 ベース	新告示 ベース	新指針 ベース	新告示 ベース
原子炉停止中における 1次冷却系破損事故	排気筒放出	1.30×10^{-7}	1.96×10^{-7}	1.30×10^{-7}	1.96×10^{-7}
	地上放出	1.96×10^{-9}	2.95×10^{-9}	6.89×10^{-9}	1.04×10^{-8}
	計	1.32×10^{-7}	1.99×10^{-7}	1.37×10^{-7}	2.06×10^{-7}
原子炉サービス系の 破損事故	排気筒放出	3.23×10^{-6}	4.88×10^{-6}	4.25×10^{-6}	6.42×10^{-6}
	地上放出	4.50×10^{-8}	6.80×10^{-8}	1.47×10^{-7}	2.22×10^{-7}
	計	3.28×10^{-6}	4.95×10^{-6}	4.40×10^{-6}	6.64×10^{-6}
廃棄物処理設備の 破損事故	排気筒放出	4.48×10^{-6}	6.76×10^{-6}	4.48×10^{-6}	6.76×10^{-6}
	地上放出	3.68×10^{-6}	5.56×10^{-6}	1.60×10^{-5}	2.42×10^{-5}
	計	8.16×10^{-6}	1.23×10^{-5}	2.05×10^{-5}	3.10×10^{-5}

(単位 : Sv)

表 3-5 甲状腺（小児）組織線量当量

		陸側評価点		海側評価点	
		新指針 ベース	新告示 ベース	新指針 ベース	新告示 ベース
原子炉停止中における 1次冷却系破損事故	排気筒放出	3.48×10^{-5}	3.48×10^{-5}	1.49×10^{-5}	1.49×10^{-5}
	地上放出	2.71×10^{-5}	2.71×10^{-5}	1.95×10^{-4}	1.95×10^{-4}
	計	6.19×10^{-5}	6.19×10^{-5}	2.10×10^{-4}	2.10×10^{-4}
原子炉サービス系の 破損事故	排気筒放出	1.03×10^{-7}	1.03×10^{-7}	1.44×10^{-7}	1.44×10^{-7}
	地上放出	1.11×10^{-7}	1.11×10^{-7}	5.09×10^{-7}	5.09×10^{-7}
	計	2.14×10^{-7}	2.14×10^{-7}	6.53×10^{-7}	6.53×10^{-7}
廃棄物処理設備の 破損事故	排気筒放出	3.78×10^{-7}	3.78×10^{-7}	1.02×10^{-7}	1.02×10^{-7}
	地上放出	1.48×10^{-5}	1.48×10^{-5}	1.62×10^{-4}	1.62×10^{-4}
	計	1.52×10^{-5}	1.52×10^{-5}	1.62×10^{-4}	1.62×10^{-4}

〔単位：Sv〕

表 3-6 実効線量当量

		陸側評価点		海側評価点	
		新指針 ベース	新告示 ベース	新指針 ベース	新告示 ベース
原子炉停止中における 1次冷却系破損事故	排気筒放出	1.17×10^{-6}	1.24×10^{-6}	5.77×10^{-7}	6.43×10^{-7}
	地上放出	8.15×10^{-7}	8.16×10^{-7}	5.86×10^{-6}	5.86×10^{-6}
	計	1.99×10^{-6}	2.06×10^{-6}	6.44×10^{-6}	6.51×10^{-6}
原子炉サービス系の 破損事故	排気筒放出	3.23×10^{-6}	4.88×10^{-6}	4.25×10^{-6}	6.42×10^{-6}
	地上放出	4.83×10^{-8}	7.13×10^{-8}	1.62×10^{-7}	2.37×10^{-7}
	計	3.29×10^{-6}	4.96×10^{-6}	4.42×10^{-6}	6.66×10^{-6}
廃棄物処理設備の 破損事故	排気筒放出	4.49×10^{-6}	6.77×10^{-6}	4.48×10^{-6}	6.76×10^{-6}
	地上放出	4.12×10^{-6}	6.00×10^{-6}	2.09×10^{-5}	2.91×10^{-5}
	計	8.62×10^{-6}	1.28×10^{-5}	2.54×10^{-5}	3.59×10^{-5}

〔単位：Sv〕

4. 結 論

本研究では、高燃焼度試験の変更申請に必要な事故解析及び現設置許可申請書に記載されていない「事故」時の被ばく計算を実施した。本研究の成果をまとめると次のようになる。

4.1 高燃焼度試験用集合体の事故解析

4.1.1 「運転時の異常な過渡変化」における予備試験用要素の温度計算

試験用要素ピン破損時放出FPガスによる隣接予備試験用要素の温度計算を、「もんじゅ」の冷却材流路事故解析で用いられたガスインピンジメントモデルを用いて実施した。重合わせる「運転時の異常な過渡変化」は以下の6ケースである。

- (1) 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き
- (2) 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き
- (3) 1次冷却材流量減少
- (4) 外部電源喪失
- (5) 2次冷却材流量減少
- (6) 主冷却器空気流量減少

解析の結果、予備試験用要素の試料最高温度及び被覆管肉厚中心最高温度は、それぞれ健全性判断基準である2630℃、890℃を下回っていることを確認した。

4.1.2 「事故」時における予備試験用要素の温度計算

4.1.1と同じモデルで以下の8ケースの「事故」を重合わせて予備試験用要素の温度計算を実施した。

- (1) 燃料スランピング
- (2) 冷ナトリウム事故 (a 1次冷却材流量急上昇、 b 2次冷却材流量急上昇、
c 空気冷却器風量急上昇)
- (3) 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故
- (4) 2次主冷却系循環ポンプ軸固着事故
- (5) 主冷却器循環ポンプ軸固着事故
- (6) 2次冷却材漏洩事故

解析の結果、予備試験用要素の試料最高温度及び被覆管肉厚中心最高温度は、それぞれ健全性判断基準である2630℃、890℃を下回っていることを確認した。

4.1.3 高燃焼度試験時の局所閉塞事象の計算

閉塞による試験用集合体の冷却材熱流動計算はサブチャンネルコードCOBRA-IVを使用し、閉塞物近傍の詳細な温度場計算は3次元熱伝導計算コードHEATING-IIIを使用して評価した。

4.2 「事故」時の被ばく計算

以下の3つの「事故」について、法令改正前の従来ベース及び改正後の新告示ベースの2通りについて、全身被ばく線量・甲状腺被ばく線量の評価を実施した。

- (1) 原子炉停止中における1次冷却系破損事故
- (2) 原子炉サービス系の破損事故
- (3) 廃棄物処理設備の破損事故

その結果、各被ばく線量は十分小さい値に収まっており、周辺の公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないことを確認した。

5.謝辞

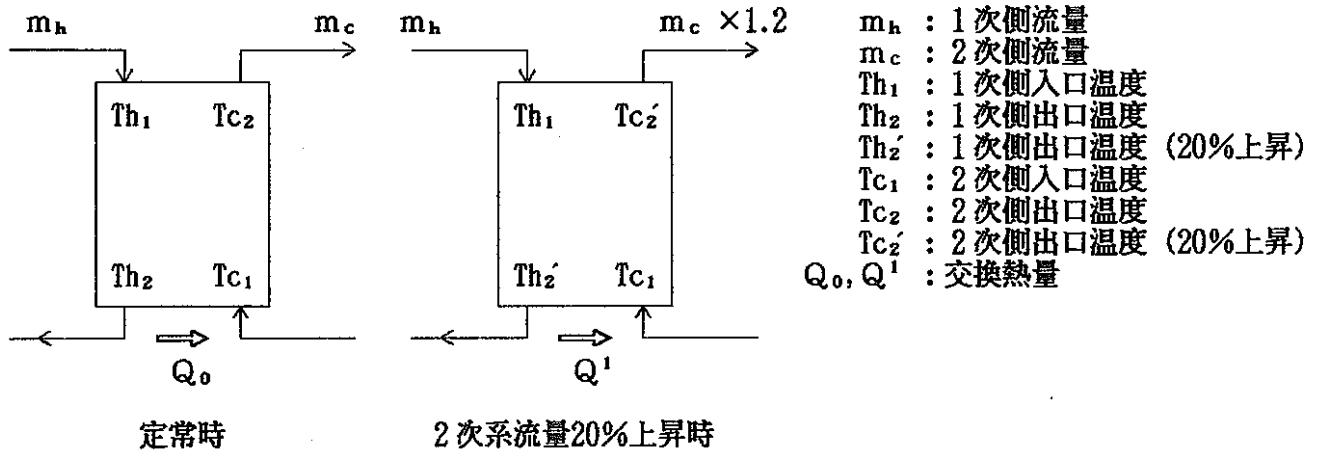
本研究の実施にあたって、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター実験炉部の溝尾宣辰課長、前田清彦課長代理並びに池田一三氏には数々の御指導並びに御助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

6 参考文献

- 1-1 PNC SJ9214 88-003, 「燃料性能実証試験用集合体の設計」, 三菱原子力工業
1988/6.
- 2.1-1 PNC SJ9214 88-003, 「燃料性能実証試験用集合体の設計」, 三菱原子力工業
1988/6.
- 2.1-2 J12-M0033 「作業進捗状況 (12/23) 打ち合わせ用」
- 2.2-1 J12-P057 「高燃焼度試験に係る事故解析条件の支給」
- 2.2-2 PNC SJ9214 88-003, 「燃料性能実証試験用集合体の設計」, 三菱原子力工業
1988/6.
- 2.3-1 PNC SJ9214 88-003, 「燃料性能実証試験用集合体の設計」, 三菱原子力工業
1988/6.
- 2.3-2 BNWL-1962, "COBRA-IV-I; An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic
Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores."
- 2.3-3 ORNL TM-3208, "HEATING-3; An IBM 360 Heat Conduction Program."
Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores.
- 2.3-4 G.L.Hofma et.al, "Thermal Conductivity and Thermal Expansion of H
Hot-Pressed Trisodium Uranate(Na_3UO_4)", Journal of Nuclear Material 139
(1986)
- 2.3-5 M.J.Lee, J.D.B.Lambert et.al, "Thermal Conductivity of $\text{Na}(\text{U} \text{ Pu})\text{O}$,
A Preliminary In-Pile Determination."
- 2.3-6 NUREG/CR-2646 SAND82-0765, "A Model for Boiling and Dryout in Particle
Beds."
- 3-1 J12-P062(訂) : 「事故時の被ばく評価に用いるX/Q, D/Q の計算」 (改訂)
- 3-2 J12-P056 : 「事故時被ばく計算の為のFP放出量」
- B-1 J12-P037 「設置変更 (その12) 準備データ支給 炉心、冷却系、計装データ」

《添付資料A》2次冷却流量急上昇事故時の炉心入り口ナトリウム温度

定格流量で運転されている2次系ポンプの駆動モータが短絡を起こすと、2次系流量は約20%上昇する。これによる炉心入り口ナトリウムの温度低下は約4℃であることを示す。



この時以下の①～⑤式が成り立つ。

① $Q_0 = (KA) \cdot (\Delta Tem)$

$$\left[(\Delta Tem) = \frac{(Th_1 - Tc_2) / (Th_2 - Tc_1)}{\ln \{ (Th_1 - Tc_2) / (Th_2 - Tc_1) \}} \quad KA : \text{熱通過率} \times \text{伝熱面積} \right]$$

② $Q_0 = C \cdot m_h \cdot (Th_1 - Tc_2) = C \cdot m_h \cdot (Th_2 - Tc_1)$ (C : Na比熱)

③ $Q' = (KA) \cdot (\Delta Tem)$

$$\left[(\Delta Tem) = \frac{(Th_1 - Tc_2) / (Th_2 - Tc_1)}{\ln \{ (Th_1 - Tc_2) / (Th_2 - Tc_1) \}} \right] \quad \text{ここでは、1次系入口温度 } Th_1, \text{ 2次系入口温度 } Tc_1 \text{ は変化しないものとする。}$$

④ $Q' = C \cdot m_h \cdot (Th_1 - Th_2')$

⑤ $Q' = C \cdot (m_c \times 1.2) \cdot (Th_2' - Th_1)$

ここで、

$$Th_1 = 500, Th_2 = 370, Tc_1 = 343.1, Tc_2 = 472.5^{*1)}$$

を代入して計算すると

$$Th_2' \approx 361.82$$

となる。

$$370.0 - 361.82 = 8.18$$

この値は、事故ループの I H X についてのものであり、全体で 2 ループであるから、

$$8.18 / 2 = 4.09$$

よって約 4℃ 温度が下がる。