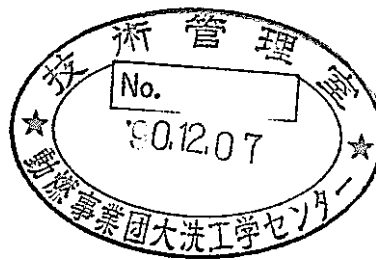


高燃焼度試験用要素の事故解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1990年6月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
T	J9214 90-003
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)

1990年 6月30日

高燃焼度試験用要素の事故解析*

千歳 敬子** 齊藤 好彦***

多田 尚子*** 森井 正** 清野 俊***

要旨

高速実験炉「常陽」による高速炉燃料の高燃焼度試験の実施が動燃殿により計画されている。本研究では、制御棒移設後の炉心における高燃焼度試験の設置変更許可の為の検討を行った。

最初に、変更申請に必要な事故解析として、「運転時の異常な過渡変化」事象並びに「事故」事象に試験用要素の開孔を重ね合わせた場合の隣接予備試験用要素のFPガスブランケット解析を行った。そして、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、2680℃、890℃を下回っていることを確認した。なお、試験用要素のペレット最高温度が健全性判断基準である、2620℃を下回っていることも確認した。

次に、高燃焼度試験用要素の破損時刻を予測するために、試験用要素の挙動評価を行った。試験用要素の被覆管破損の主要因は、プレナムガス内圧上昇であり、FCMIによる接触圧は弱いということが分かった。また、試験用要素の線出力の低下に伴い被覆管の温度も低下するという想定の下では、被覆管材質、照射条件に係わらず、CDFの観点からは、局所最大燃焼度26at%まで被覆管破損を生じないとの結果を得た。

* 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 新型炉統括部

*** ニュークリア・デベロップメント株式会社 第二研究部

JUNE 30, 1990

Accident Analysis of the RTCB(Run-to-Cladding Breach) Test Pins

Keiko Chitose,^{**} Yoshihiko Saito,^{***}
Hisako Tada,^{***} Tadashi Morii,^{**} Sun Seino^{***}

Abstract

In the experimental fast reactor "JOYO", PNC schedules to test the high-burnup capability of LMFBR. This study is performed for the license of the test at the shifted core (shift a control rod from the third row of core to the fifth row, for the expansion of irradiation space).

Firstly, we calculate the temperatures of the spare pins, which are adjacent to the RTCB test pin, at the anticipated transients and accident of the plant with the superposition of the FP gas blanketing released from pin failure. Then it proves that all of these maximum temperatures, that is, the fuel center and cladding middle temperature of the spare pins, and the fuel center temperature of the test pins are lower than the safety criteria (spare pin: pellet; 2680°C, cladding; 890 °C, and test pin: pellet; 2620°C).

Secondary, we analyze the performance of the test pin to forecast the time of pin failure. The main factor of the pin failure is high pressure of the plenum gas. Contact pressure of FCMI(fuel-cladding-mechanical-interaction) is low. From the view point of CDF(cumulative-damage-factor), the results show that the pins don't fail on the condition of local maximum burnup rate lower than 26at%.

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

** Advanced reactor division, Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

*** Reserch Department 2, Nuclear Development Corporation

高燃焼度試験用要素の事故解析

目次

要旨

Abstract

List of Tables

List of Figures

1. 序論

2. 「運転時の異常な過渡変化」事象の計算

2.1 制御棒移設に伴う炉心データの変化

2.2 各事象の解析

3. 「事故」事象の計算

3.1 制御棒移設に伴う炉心データの変化

3.2 各事象の解析

4. 高燃焼度試験の試験用要素の挙動評価

4.1 概要

4.2 評価に用いた燃料挙動解析コード (SIMPIN) の説明

4.3 評価条件

4.4 使用物性値

4.5 計算結果

4.6 結論

4.7 今後の課題

5. 結論

6. 謝辞

7. 参考文献

List of Tables

- 表2.1-1 動特性パラメータ
- 表2.2-1 解析主要条件 (運転時の異常な過渡変化)
- 表2.2-2 炉心流量変化 (1次冷却材流量減少)
- 表2.2-3 炉心流量変化 (外部電源喪失)
- 表2.2-4 解析結果のまとめ (運転時の異常な過渡変化)
- 表3.2-1 解析主要条件 (事故)
- 表3.2-2 炉心流量変化 (1次冷却系循環ポンプ軸固着事故)
- 表3.2-3 解析結果のまとめ (事故)
- 表4.2-1 検証例(1)の主な入力データ
- 表4.2-2 検証例(2)の主な入力データ
- 表4.3-1 入力データ
- 表4.3-2 解析ケース一覧
- 表4.3-3 線出力の時刻履歴
- 表4.3-4 線出力の軸方向分布 (60MS, 60MK, 最大線出力360W/cm)
- 表4.3-5 線出力の軸方向分布 (57MK4, 58MK6, 60AK2, 最大線出力415W/cm)
- 表4.3-6 高速中性子束の軸方向分布
- 表4.3-7 被覆管温度の軸方向分布 (360W/cm, 最大被覆管温度 610°C)
- 表4.3-8 被覆管温度の軸方向分布 (415W/cm, 最大被覆管温度 646°C)
- 表4.5-1 軸方向メッシュの破損時刻の計算結果 (解析No.1)
- 表4.5-2 軸方向メッシュの破損時刻の計算結果 (解析No.2)
- 表4.5-3 軸方向メッシュの破損時刻の計算結果 (解析No.3)
- 表4.5-4 軸方向メッシュの破損時刻の計算結果 (解析No.4)

List of Figures

- 図2.1-1 有限要素解析モデル(THERMOST)
- 図2.2-1 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—
- 図2.2-2 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—反応度—
- 図2.2-3 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(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2.2-4 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—
- 図2.2-5 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(THERMOST)
—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—
- 図2.2-6 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(THERMOST)
—周方向被覆管肉厚中心温度分布（時刻：26.4秒）—
- 図2.2-7 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—
- 図2.2-8 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—反応度—
- 図2.2-9 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(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2.2-10 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)
—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—
- 図2.2-11 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(THERMOST)
—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—
- 図2.2-12 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(THERMOST)
—周方向被覆管肉厚中心温度分布（時刻：2.0秒）—
- 図2.2-13 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2.2-14 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(HARHO-IN)
—反応度—

- 図2.2-15 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2.2-16 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2.2-17 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(THERMOST)
—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—
- 図2.2-18 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(THERMOST)
—周方向被覆管肉厚中心温度分布（時刻：0.39秒）—
- 図2.2-19 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2.2-20 高燃焼度試験時、外部電源喪失(HARHO-IN)
—反応度—
- 図2.2-21 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2.2-22 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2.2-23 高燃焼度試験時、外部電源喪失(THERMOST)
—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—
- 図2.2-24 高燃焼度試験時、外部電源喪失(THERMOST)
—周方向被覆管肉厚中心温度分布（時刻：1.6秒）—
- 図3.2-1 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)
—原子炉出力及び炉心流量—
- 図3.2-2 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)
—反応度—
- 図3.2-3 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(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3.2-4 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)
—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—
- 図3.2-5 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(THERMOST)
—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

- 図3.2-6 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(THERMOST)
 一周方向被覆管肉厚中心温度分布(時刻: 0.505秒) -
- 図3.2-7 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-
- 図3.2-8 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3.2-9 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3.2-10 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3.2-11 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(THERMOST)
 -ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴-
- 図3.2-12 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(THERMOST)
 一周方向被覆管肉厚中心温度分布(時刻: 1.35秒) -
- 図4.2-1 試験体系の概念図
- 図4.2-2 検証例(1)
- 図4.2-3 検証例(1)の線出力履歴
- 図4.2-4 検証例(2)
- 図4.3-1 ピーク線出力の時刻歴(各解析ケース共通)
- 図4.3-2 軸方向線出力分布(相対値)
- 図4.3-3 中性子束分布(15サイクルBOC)
- 図4.3-4 中性子束分布(15サイクルEOC)
- 図4.3-5 中性子束分布(16サイクルBOC)
- 図4.3-6 中性子束分布(16サイクルEOC)
- 図4.3-7 中性子束分布(17サイクルBOC)
- 図4.3-8 中性子束分布(17サイクルEOC)
- 図4.3-9 中性子束分布(18サイクルBOC)
- 図4.3-10 中性子束分布(18サイクルEOC)
- 図4.3-11 中性子束分布(19サイクルBOC)
- 図4.3-12 中性子束分布(19サイクルEOC)

- 図4.3-13 中性子束分布 (20サイクルBOC)
- 図4.3-14 中性子束分布 (20サイクルEOC)
- 図4.3-15 被覆管肉厚中心温度分布
- 図4.5-1 燃焼度軸方向分布 (解析No.1,47000時間)
- 図4.5-2 中性子照射量の軸方向分布 (解析No.1,47000時間)
- 図4.5-3 被覆管スエリングの軸方向分布 (解析No.1,47000時間)
- 図4.5-4 周方向照射クリープの軸方向分布 (解析No.1,47000時間)
- 図4.5-5 F C M I 接触圧 (kg/cm²) の軸方向分布 (解析No.1,47000時間)
- 図4.5-6 C D F の軸方向分布 (解析No.1,47000時間)

1. 序論

高速実験炉「常陽」において、高速炉用燃料の長寿命化の為のデータを得る為に、試験用要素の被覆管が開孔するまで照射する高燃焼度試験が計画されている。

本作業は、現行炉心の炉心第3列の制御棒1本を第5列に移設した、制御棒移設後の炉心における高燃焼度試験の変更申請時に必要とされる事故解析を行う。さらに高燃焼度試験用要素の破損時刻を予測するための、試験用要素の挙動解析を行う。

第2章では、「運転時の異常な過渡変化」事象のうちの4ケースを選び、試験用要素の開孔を重ね合わせた時の試験用要素の温度変化及び、隣接予備試験用要素のFPガスブランケット解析を実施する。

第3章では、「事故」事象のうちの2ケースを選び、試験用要素の開孔を重ね合わせた時の試験用要素の温度変化及び、隣接予備試験用要素のFPガスブラケット解析を実施する。

第4章では、試験用要素の破損時刻を予測するための、定常照射条件下での試験用要素の挙動評価を行う。ここでは、線出力が燃焼とともに減少する割合に比例して、被覆管温度も下がるという仮定のもとで、試験用要素のFPガスによる内圧上昇、被覆管ペレット機械的相互作用（FCMI）及び被覆管クリープ寿命分数和（CDF）の評価を行う。

2. 「運転時の異常な過渡変化」事象の計算

2.1 制御棒移設に伴う炉心データの変化

前年度、「燃料性能試験基準化の為の計算」²⁻¹⁾において、制御棒を移設する以前の炉心での、高燃焼度試験用集合体の事故解析を行った。本作業は、第3列の制御棒1本を第5列に移設した炉心において、同様の解析を行ったものである。

「運転時の異常な過渡変化」事象における、原子炉出力変化、試験用要素の各部（ペレット、被覆管）の温度及び冷却材の温度変化の経過を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ン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）。

HARHO-INコードの解析条件はほぼ前年度と同じであるが、先に実施された「制御棒移設炉心の炉心特性計算」²⁻²⁾の結果に基づき、移設後の炉心の値としての核データの見直しを行った。その結果、動特性データ、スクラム反応度値以外の炉心核データは、現申請書の範囲に入っていることが確認されている。なお、熱流力データは、移設前と変わっていない。動特性パラメータは、表2.1-1に示す様に、移設後の炉心に対する核計算値を使用することとする。スクラム反応度値は、変更申請書には移設前と同じ値が記載されるが、その核計算値に対する補正係数が不確定要素を含んでいることから、安全審査時の説明のバックアップ用として、変更申請書記載値（7.4%ΔK/K）よりも小さい値6.7%ΔK/Kとして解析を行う²⁻³⁾。

図2.1-1にTHERMOSTコードで使用したの有限要素解析モデルを示す。THERMOSTコードの解析条件は前年度²⁻¹⁾と同じである。即ち、ガス熱伝達係数は、1 W/cm²°C、被覆管ガス衝突角度90°、ガス衝突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。

2.2 各事象の解析

主な解析条件を表2.2-1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ン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°C以下であること）、冷却材が沸騰しないこと（冷却材最高温度は910°C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、試料の最高温度が溶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）。

2.2.1 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き

(1) 解析条件

(a)原子炉の初期出力は、1.0 W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、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200ミリ秒とする。

(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 $500\text{Btu/h ft}^2\text{ }^\circ\text{F}$ 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（絶対値が最小の負の値）とする。

(2) 解析結果

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及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

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 に被覆管肉厚中心最高温度の

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310MWに達する。その後、原子炉出力は原子炉スクラム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189MWsである。

炉心及び予備試験用要素の、ペレット、被覆管、冷却材最高温度の比較を表2.2-4に示す（予備試験用要素の冷却材温度は、HARHO-INによる解析結果である。以下のケースも同様）。予備試験用要素のペレット最高温度は1380℃、被覆管肉厚中心最高温度は618℃、冷却材最高温度は527℃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1358℃で、これは熔融温度を下回っている。

2.2.2 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

(1) 解析条件

- (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¢/sとする。
- (c)原子炉は、出力領域の「中性子束高」（定格値の107%）によりスクラムするものとし、その遅れ時間を200ミリ秒とする。
- (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（絶対値が最小の負の値）とする。

(2) 解析結果

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及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

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、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図2.2-12に被覆管肉厚中心最高温度の周方向分布を示す。

原子炉出力の上昇は緩慢であり、約2秒後にスクラム設定点(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、冷却材最高温度の比較を表2.2-4に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2535℃、被覆管肉厚中心最高温度は737℃、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2511℃で、これは溶融温度を下回っている。

2.2.3 1次冷却材流量減少

(1) 解析条件

(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台がトリップするものとする。

(c)原子炉は、「1次冷却材循環ポンプトリップ」により自動停止し、その遅れは200ミリ秒とする。

(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2.2-13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及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

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に被覆管肉厚中心最高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、冷却材最高温度の比較を表2.2-4に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2504℃、被覆管肉厚中心最高温度は729℃、冷却材最高温度は659℃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。

2.2.4 外部電源喪失

(1) 解析条件

- (a)外部電源の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2.2-19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及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

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に被覆管肉厚中心最高温度の周方向分布を示す。

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、冷却材最高温度の比較を表2.2-4に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2503℃、被覆管肉厚中心最高温度は752℃、冷却材最高温度は691℃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。

表2.1-1 動特性パラメータ

	現 行 炉 心	移 設 後 の 炉 心
実効遅発中性子割合 β_{eff}	$4.47 * 10^{-3}$	同 左
β_1	$1.29 * 10^{-4}$	同 左
β_2	$9.65 * 10^{-4}$	同 左
β_3	$8.36 * 10^{-4}$	同 左
β_4	$1.70 * 10^{-3}$	$1.71 * 10^{-3}$
β_5	$6.71 * 10^{-4}$	同 左
β_6	$1.67 * 10^{-4}$	$1.68 * 10^{-4}$
遅発中性子崩壊定数 λ_1	$1.28 * 10^{-2}$	} 同 左
λ_2	$3.13 * 10^{-2}$	
λ_3	$1.26 * 10^{-2}$	
λ_4	$3.31 * 10^{-1}$	
λ_5	$1.41 * 10^0$	
λ_6	$3.78 * 10^0$	
既発中性子寿命 ($* 10^{-8}$)	0.374	0.364

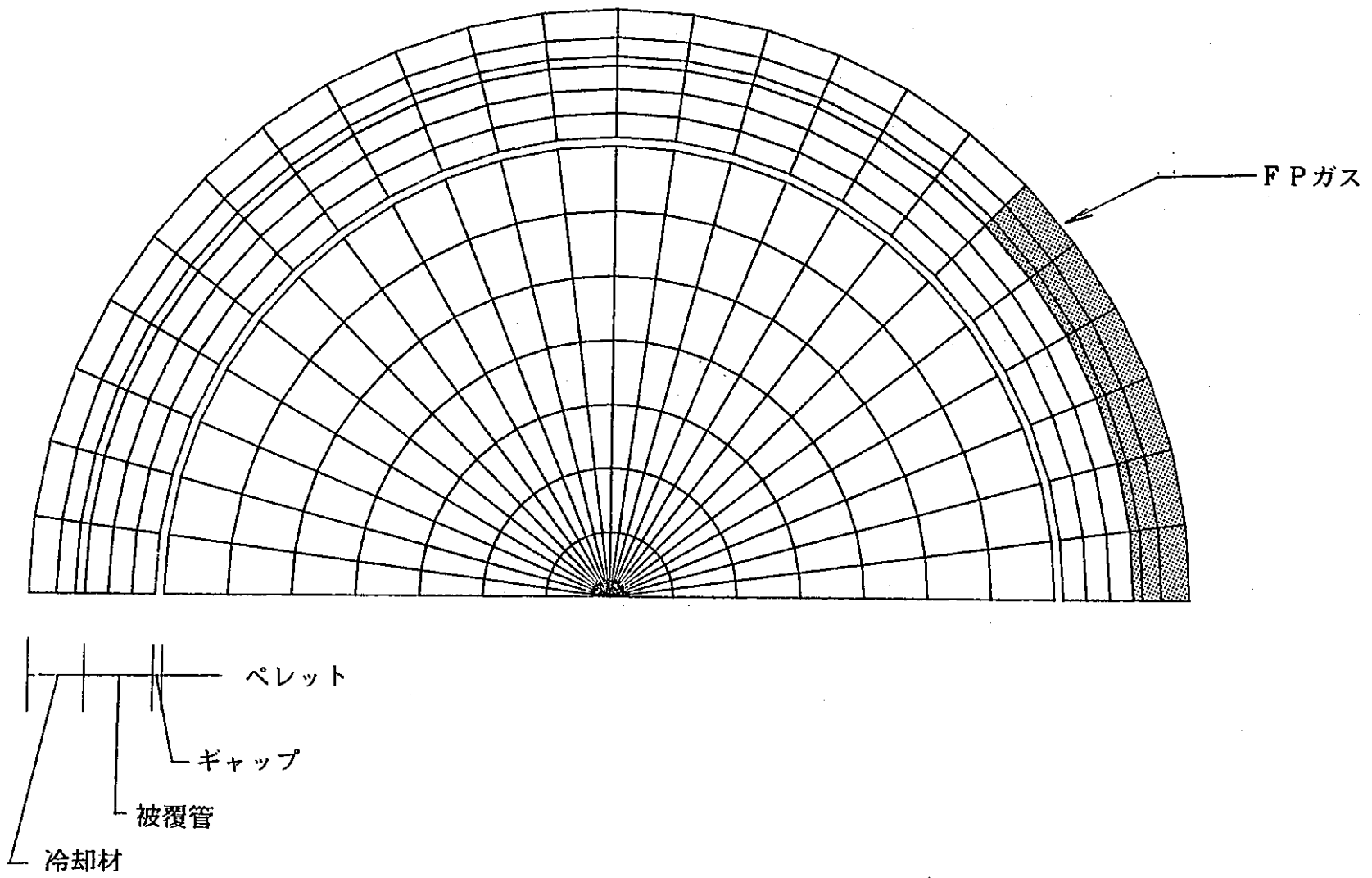


図2.1-1 有限要素解析モデル(THERMOST)

表2.2-1 解析主要条件 (運転時の異常な過渡変化)

		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
初期運転状態		1.0W	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}
	燃 料	—	—	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}
	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}
	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}
原子炉 トリップ	信 号	出力領域中性子束高	出力領域中性子束高	1次主冷却系循環	外部電源喪失
		107%	107%	ポンプトリップ	ポンプトリップ
	遅れ時間	0.2秒	0.2秒	0.2秒	1.2秒
単一故障重ね合わせ		1ロッドスタック	1ロッドスタック	1ロッドスタック	1ロッドスタック
解析時間		30秒	5 秒	200秒	200秒
キップオンゲインス		500Btu/h-ft ² ・°F	1000Btu/h-ft ² ・°F	1000Btu/h-ft ² ・°F	1000Btu/h-ft ² ・°F
挿入反応度		約4φ/s	約4φ/s	な し	な し
炉心流量		一 定	一 定	表2.2-2	表2.2-3
炉心入口温度		一 定	一 定	一 定	一 定
炉心各部温度		370℃	定 格	定 格	定 格
T H E R M O S T	ガ ス 温 度	炉心部上端のNa温度 時間に関して一定	←	炉心上部での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	←
	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	←	←	←

表2.2-2 炉心流量变化(1次冷却材流量减少)

時刻 (s e c)	流 量 比	時刻 (s e c)	流 量 比
0.0	1.000	30.0	0.1680
0.2	0.9941	35.0	0.1471
0.6	0.9532	40.0	0.1278
0.8	0.9291	45.0	0.1097
1.0	0.9051	50.0	0.09957
1.4	0.8591	55.0	0.08972
1.8	0.8161	60.0	0.08043
2.0	0.7959	65.0	0.07020
2.4	0.7574	70.0	0.06426
2.8	0.7215	75.0	0.05962
3.0	0.7045	80.0	0.05659
4.0	0.6279	84.0	0.05448
5.0	0.5631	90.0	0.05298
6.0	0.5165	100.0	0.05179
7.0	0.4692	150.0	0.05159
8.0	0.4285	200.0	0.05139
9.0	0.3931	300.0	0.05100
10.0	0.3623	420.0	0.05100
11.0	0.3352		
12.0	0.3114		
16.0	0.2573		
20.0	0.2200		
25.0	0.1921		

表 2.2 - 3 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	30. 0	0. 1 6 8 0
0. 2	0. 9 9 4 1	35. 0	0. 1 4 7 1
0. 6	0. 9 5 3 2	40. 0	0. 1 2 7 8
0. 8	0. 9 2 9 1	45. 0	0. 1 0 9 7
1. 0	0. 9 0 5 1	50. 0	0. 0 9 9 5 7
1. 4	0. 8 5 9 1	55. 0	0. 0 8 9 7 2
1. 8	0. 8 1 6 1	60. 0	0. 0 8 0 4 3
2. 0	0. 7 9 5 9	65. 0	0. 0 7 0 2 0
2. 4	0. 7 5 7 4	70. 0	0. 0 6 4 2 6
2. 8	0. 7 2 1 5	75. 0	0. 0 5 9 6 2
3. 0	0. 7 0 4 5	80. 0	0. 0 5 6 5 9
4. 0	0. 6 2 7 9	84. 0	0. 0 5 4 4 8
5. 0	0. 5 6 3 1	90. 0	0. 0 5 2 9 8
6. 0	0. 5 1 6 5	100. 0	0. 0 5 1 7 9
7. 0	0. 4 6 9 2	150. 0	0. 0 5 1 5 9
8. 0	0. 4 2 8 5	200. 0	0. 0 5 1 3 9
9. 0	0. 3 9 3 1	300. 0	0. 0 5 1 0 0
10. 0	0. 3 6 2 3	420. 0	0. 0 5 1 0 0
11. 0	0. 3 3 5 2		
12. 0	0. 3 1 1 4		
16. 0	0. 2 5 7 3		
20. 0	0. 2 2 0 0		
25. 0	0. 1 9 2 1		

表 2.2-4 解析結果のまとめ（運転時の異常な過渡変化）

事 象 名	炉 心 燃 料 温 度 (°C)			予 備 試 験 用 要 素 温 度 (°C)			試 験 用 要 素 ペレット 温 度 (°C)
	ペレット	被 覆 管	冷 却 材	ペレット*	被 覆 管*	冷 却 材	
未臨界状態からの 制御棒の異常な 引き抜き	1 7 5 0	5 3 8	5 3 0	1 3 8 0	6 1 8	5 2 7	1 3 5 8
	3 7 0	3 7 0	3 7 0	3 7 0	3 7 0	3 7 0	3 7 0
出力運転中の 制御棒の異常な 引き抜き	2 5 4 4	6 5 9	6 4 3	2 5 3 5	7 3 7	6 5 9	2 5 1 1
	2 5 0 0	6 5 0	6 3 5	2 4 9 0	6 7 5	6 5 0	2 4 8 0
1 次 冷 却 材 流 量 減 少	2 5 0 0	6 5 9	6 4 4	2 5 0 4	7 2 9	6 5 9	2 4 8 0
	2 5 0 0	6 5 0	6 3 5	2 4 9 0	6 7 5	6 5 0	2 4 8 0
外 部 電 源 喪 失	2 5 0 0	6 9 0	6 7 8	2 5 0 3	7 5 2	6 9 1	2 4 8 0
	2 5 0 0	6 5 0	6 3 5	2 4 9 0	6 7 5	6 5 0	2 4 8 0

* THERMOSTによる結果を記載

□-□ 原子炉出力
○-○ 炉心流量

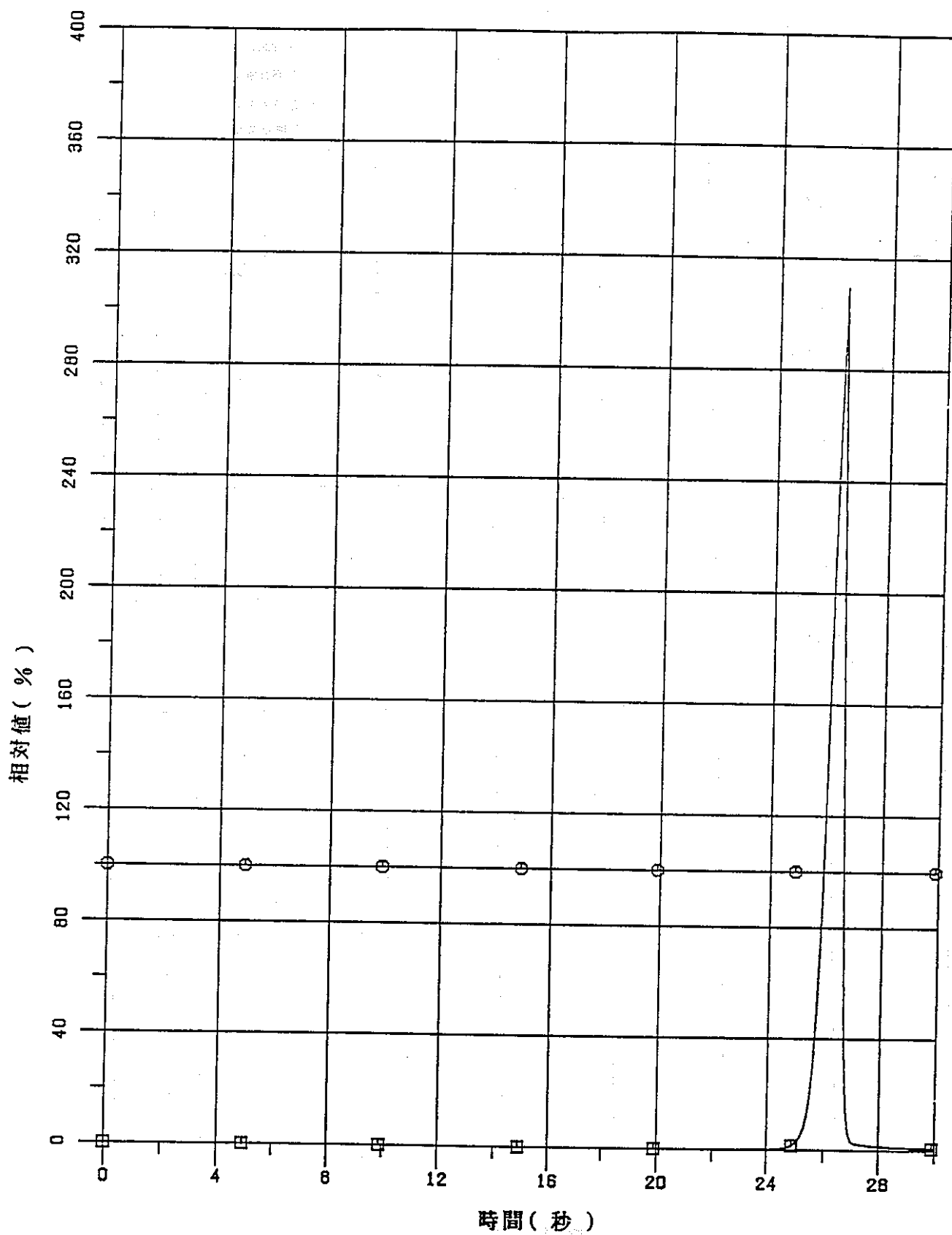


図2.2-1 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

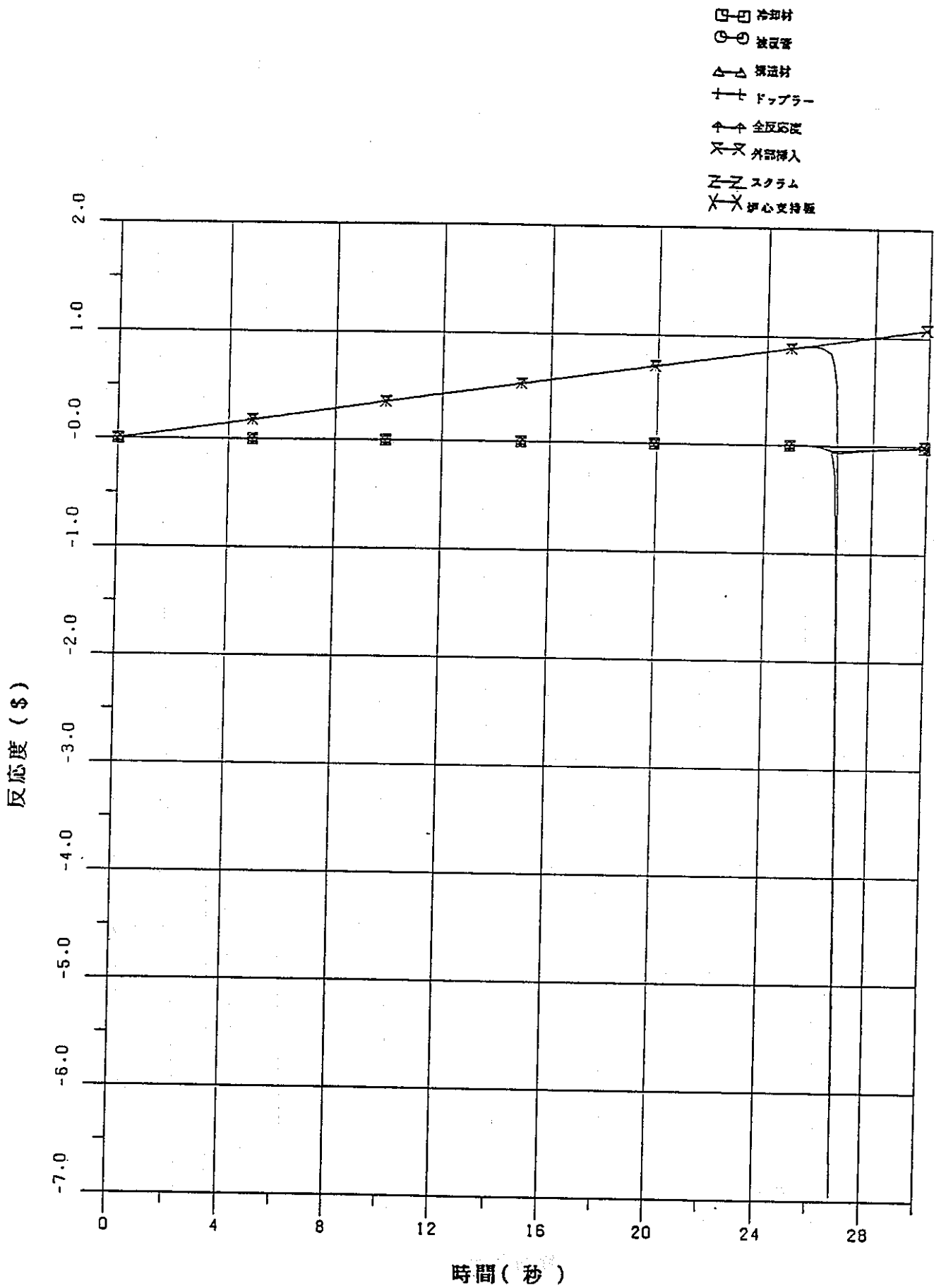


図2.2-2 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-1N)

- 反応度 -

炉心ホットチャンネル

- 燃料
- 被覆管
- △-△ 冷却材

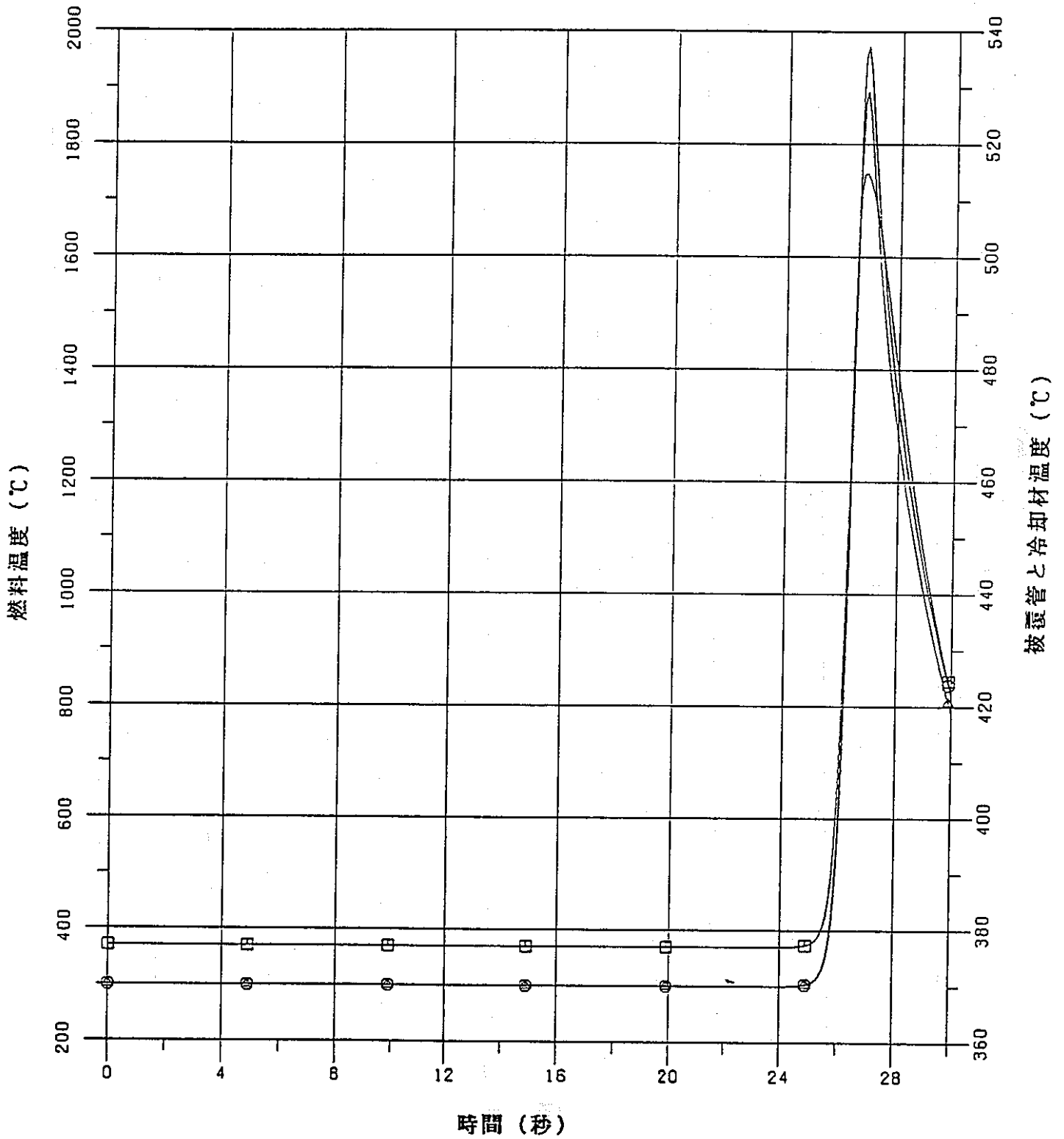


図2.2-3 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

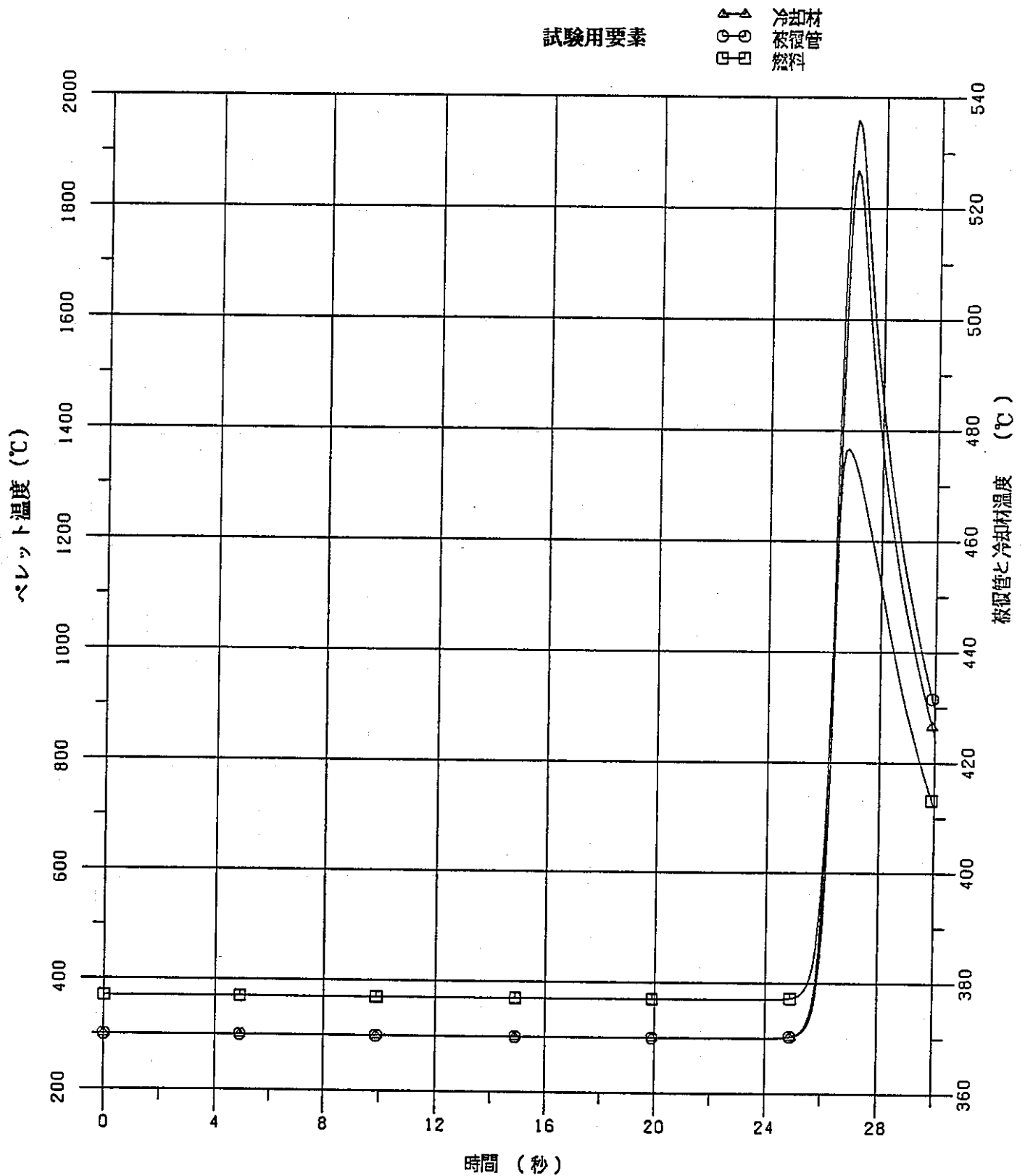


図2.2-4 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—

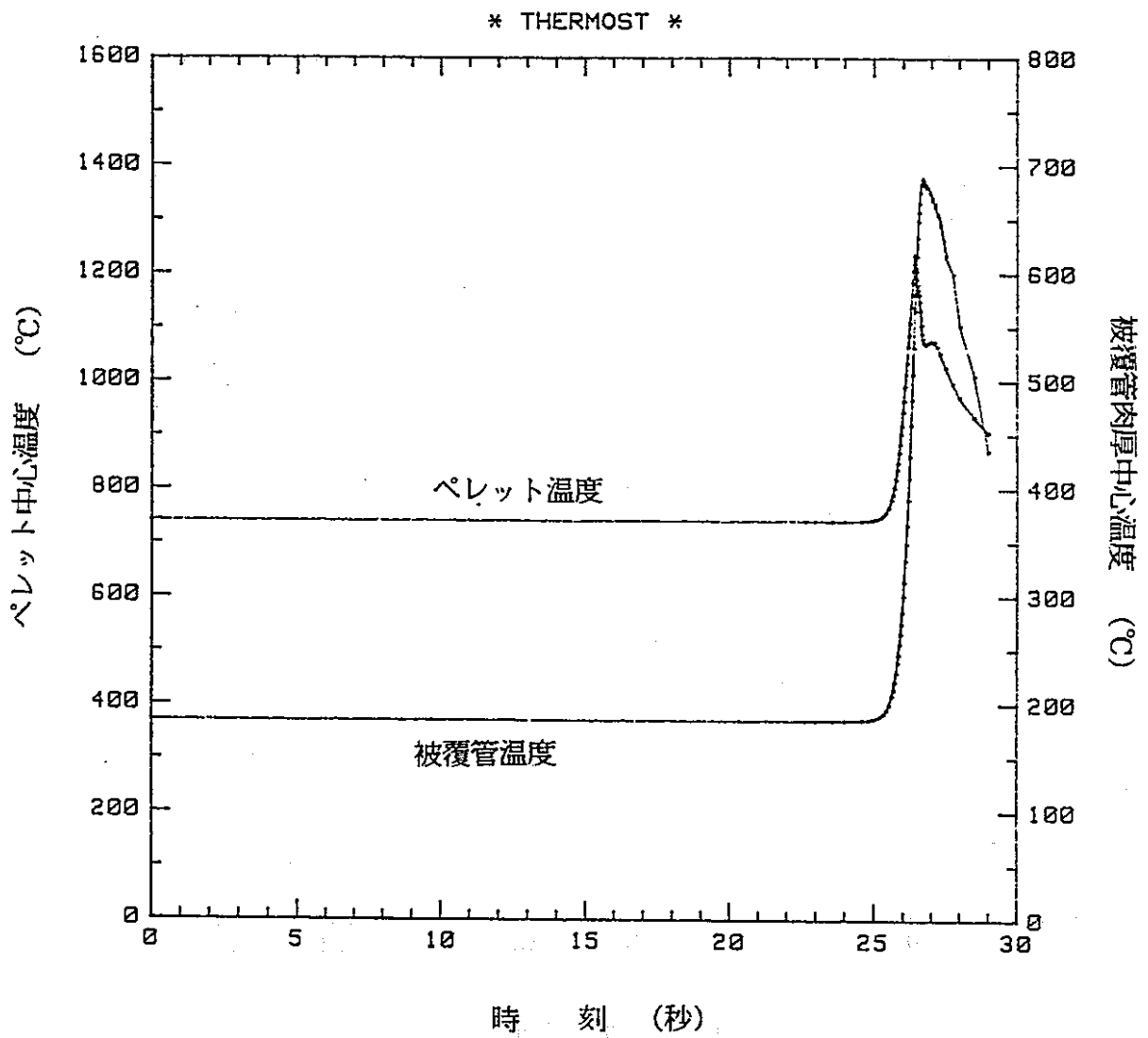


図2.2-5 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

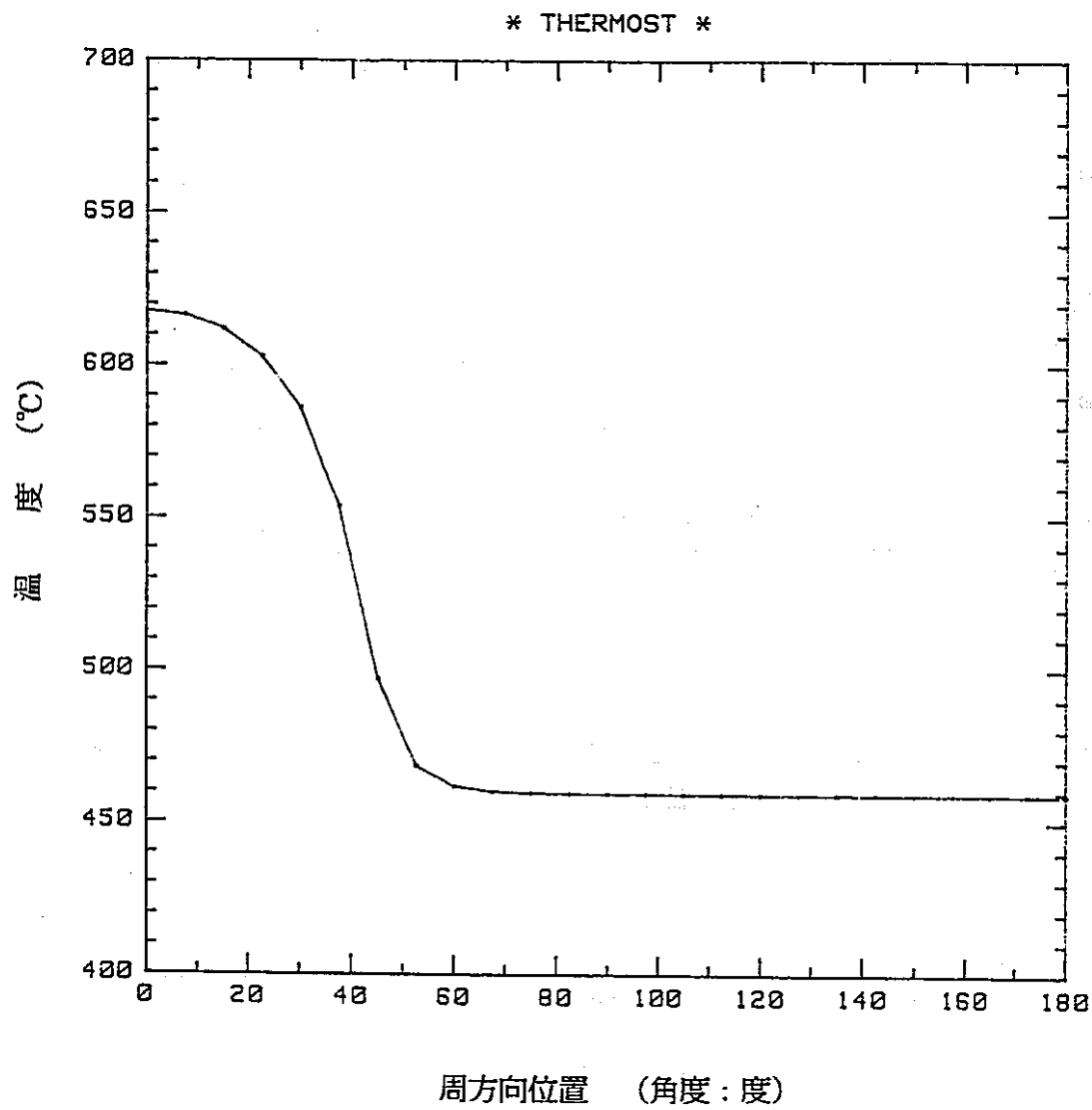


図2.2-6 高燃焼度試験時、未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き(THERMOST)

—周方向被覆管肉厚中心温度分布(時刻:26.4秒)—

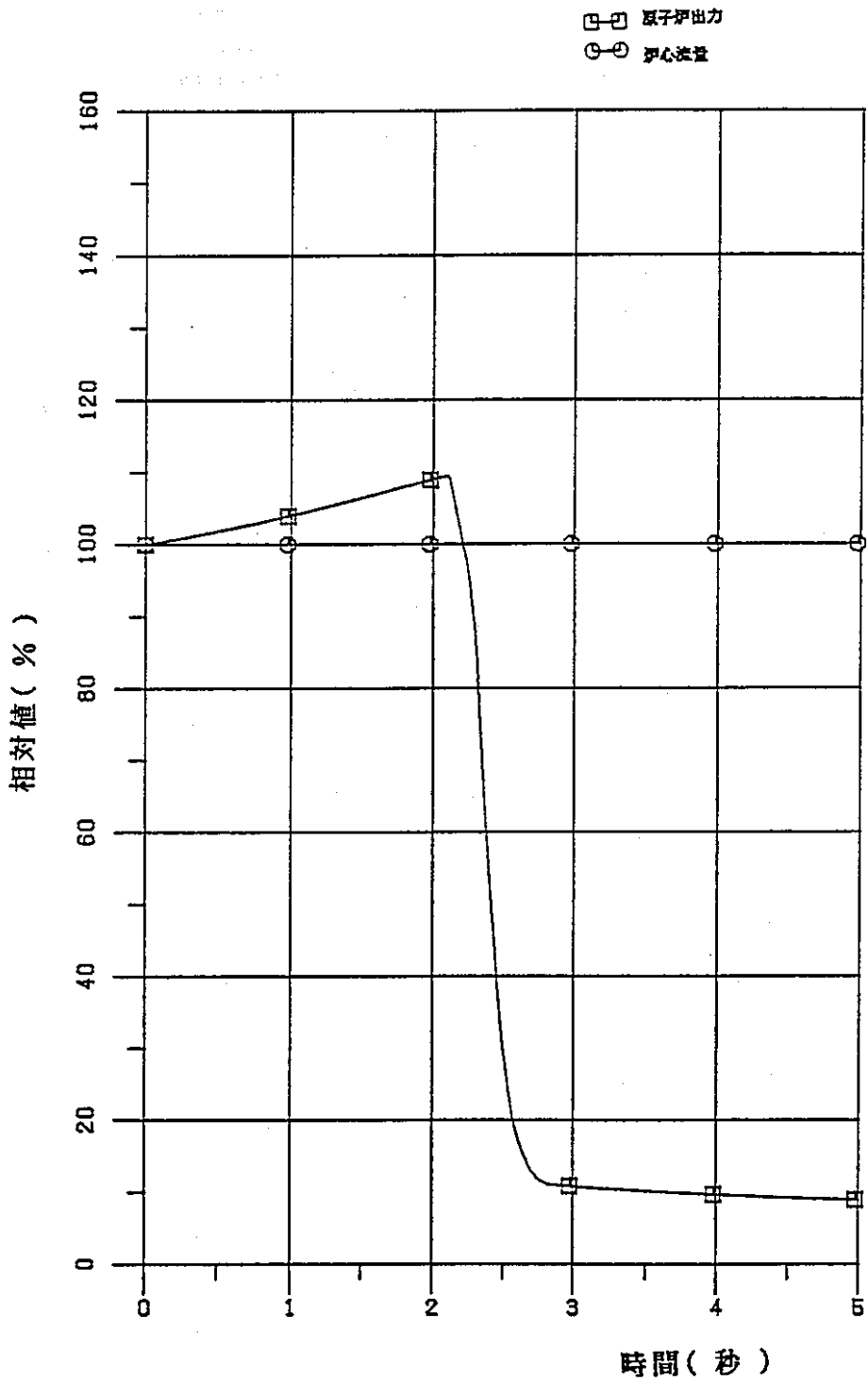


図2.2-7 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

— 原子炉出力及び炉心流量 —

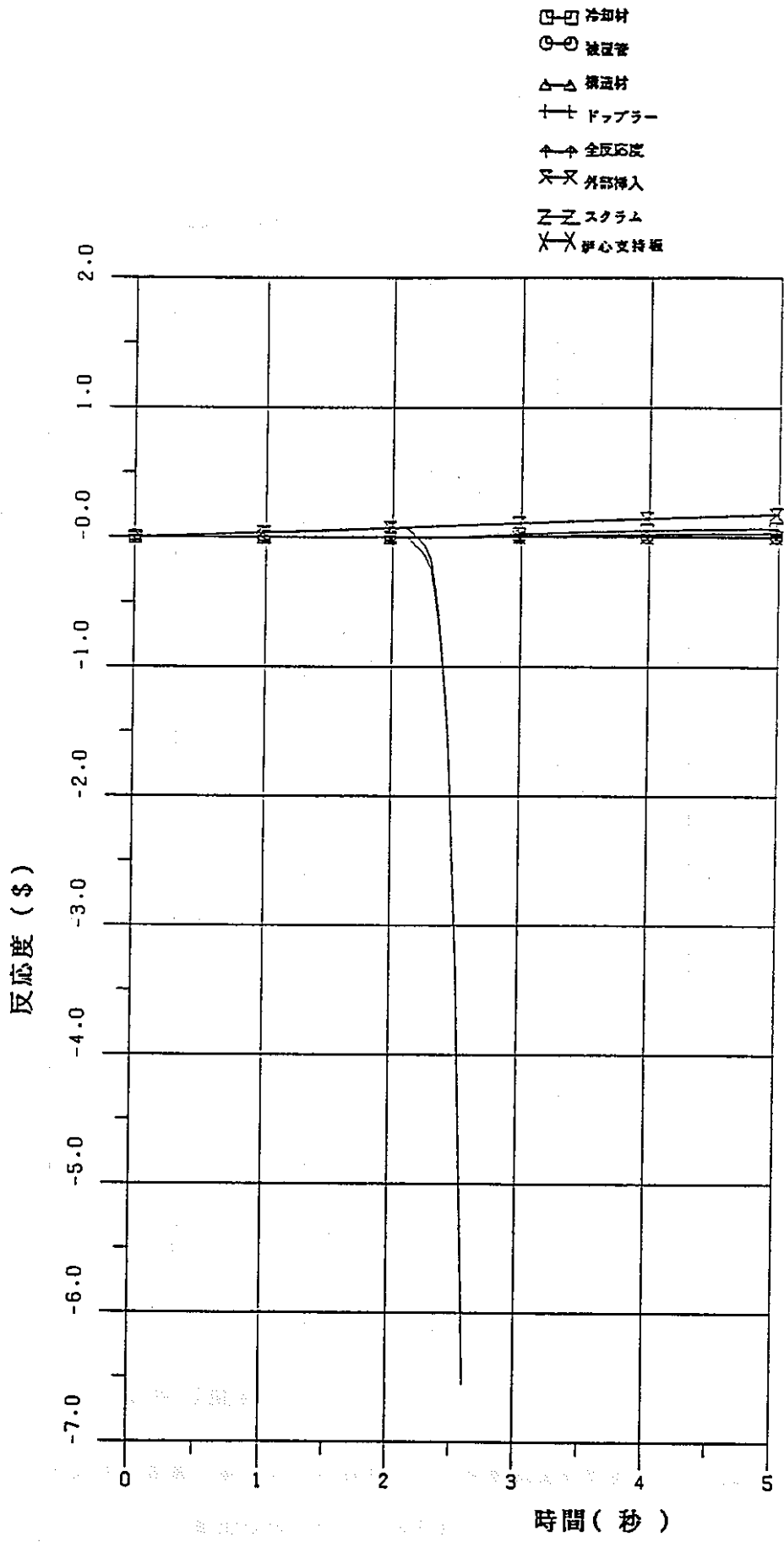


図2.2-8 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

- 反応度 -

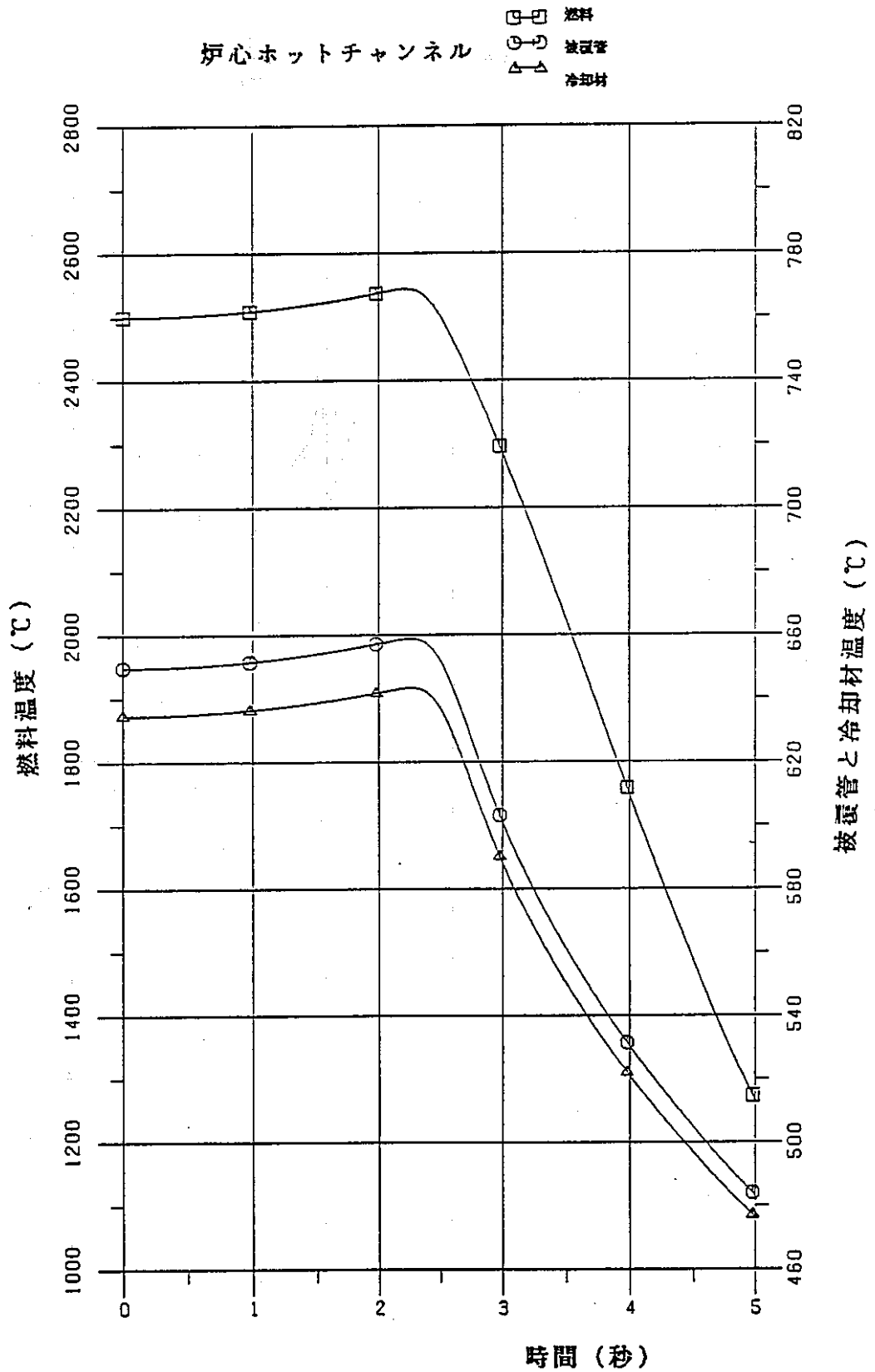


図2.2-9 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

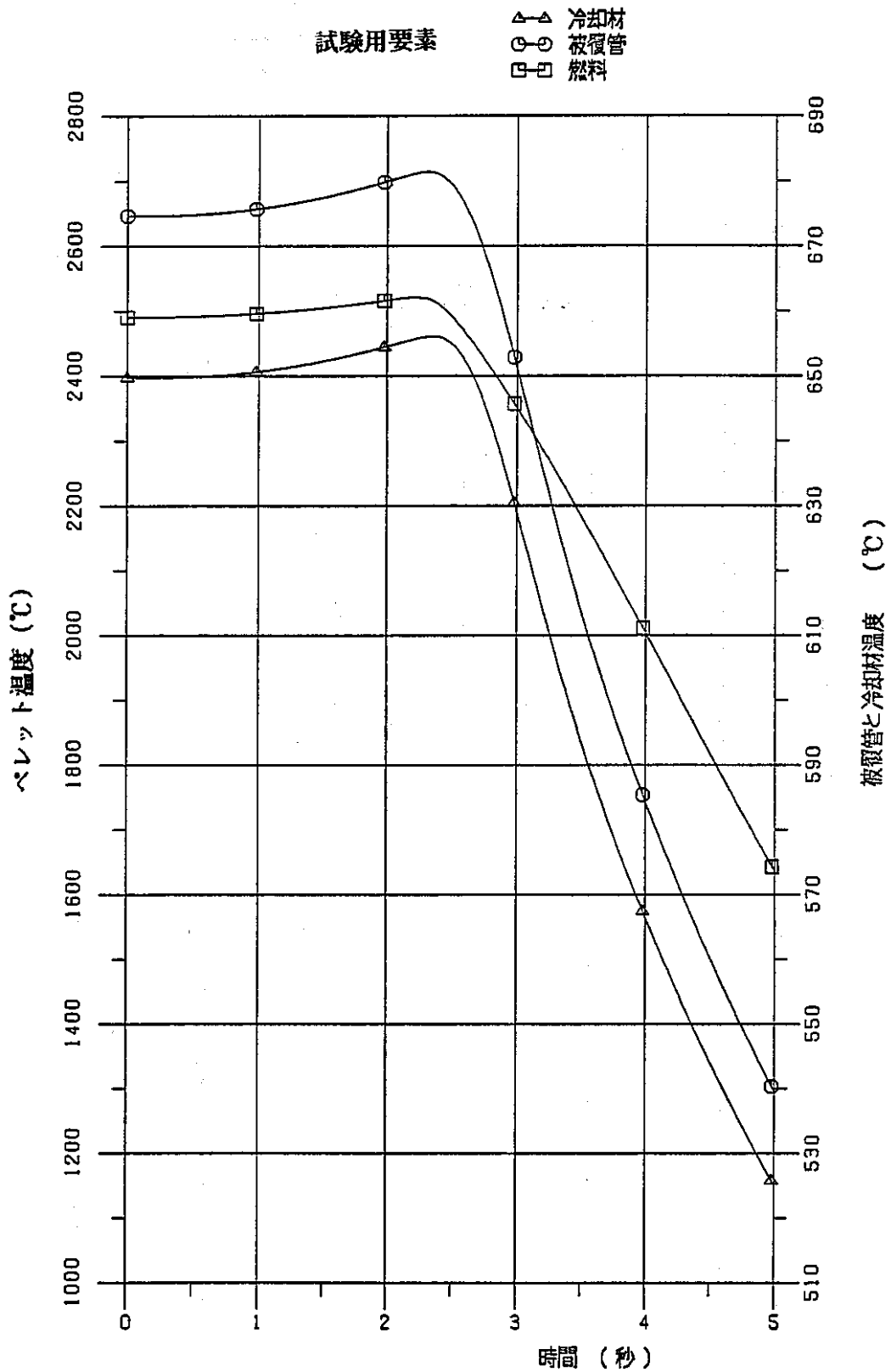


図2.2-10 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(HARHO-IN)

—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—

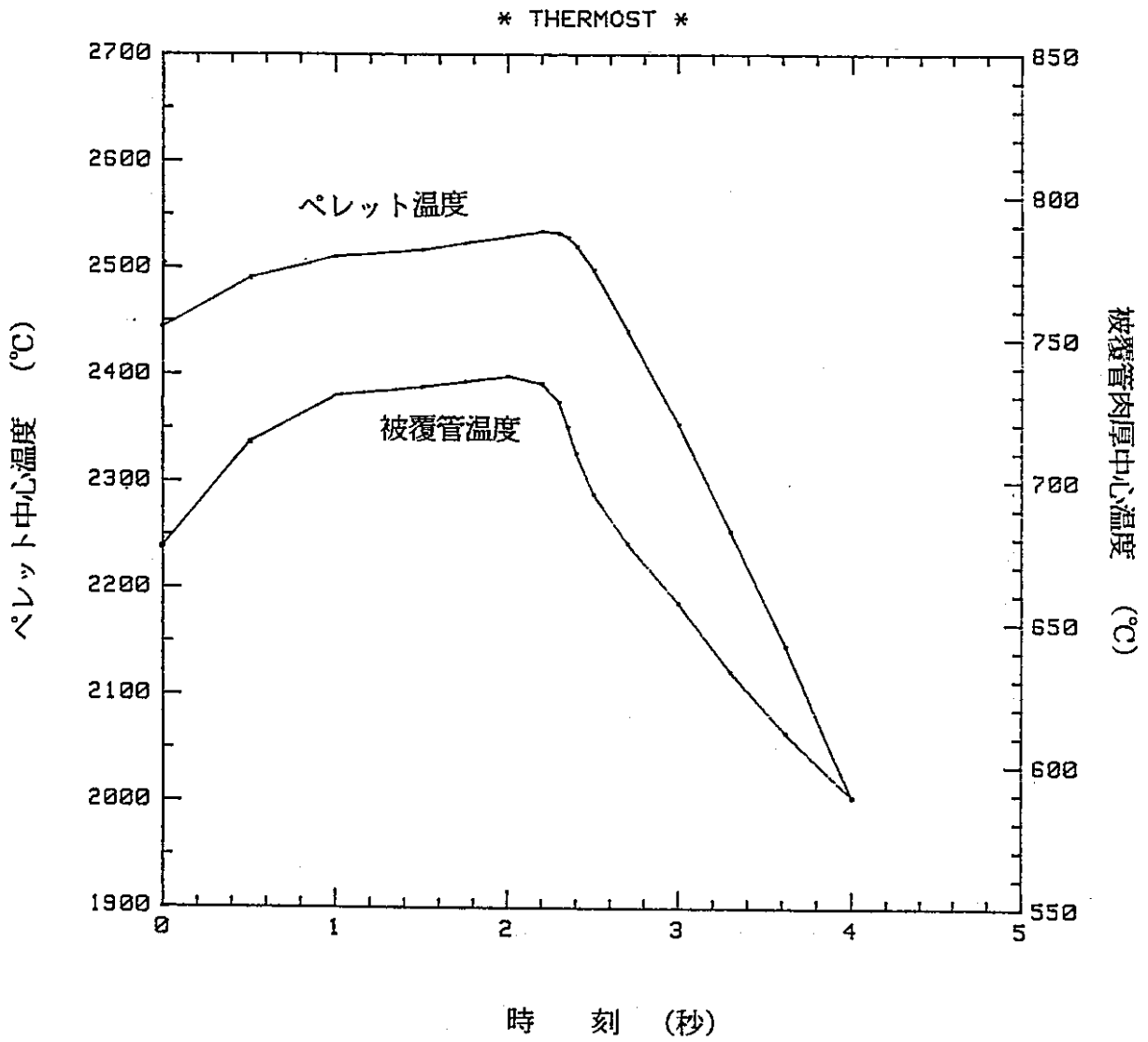


図2.2-11 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

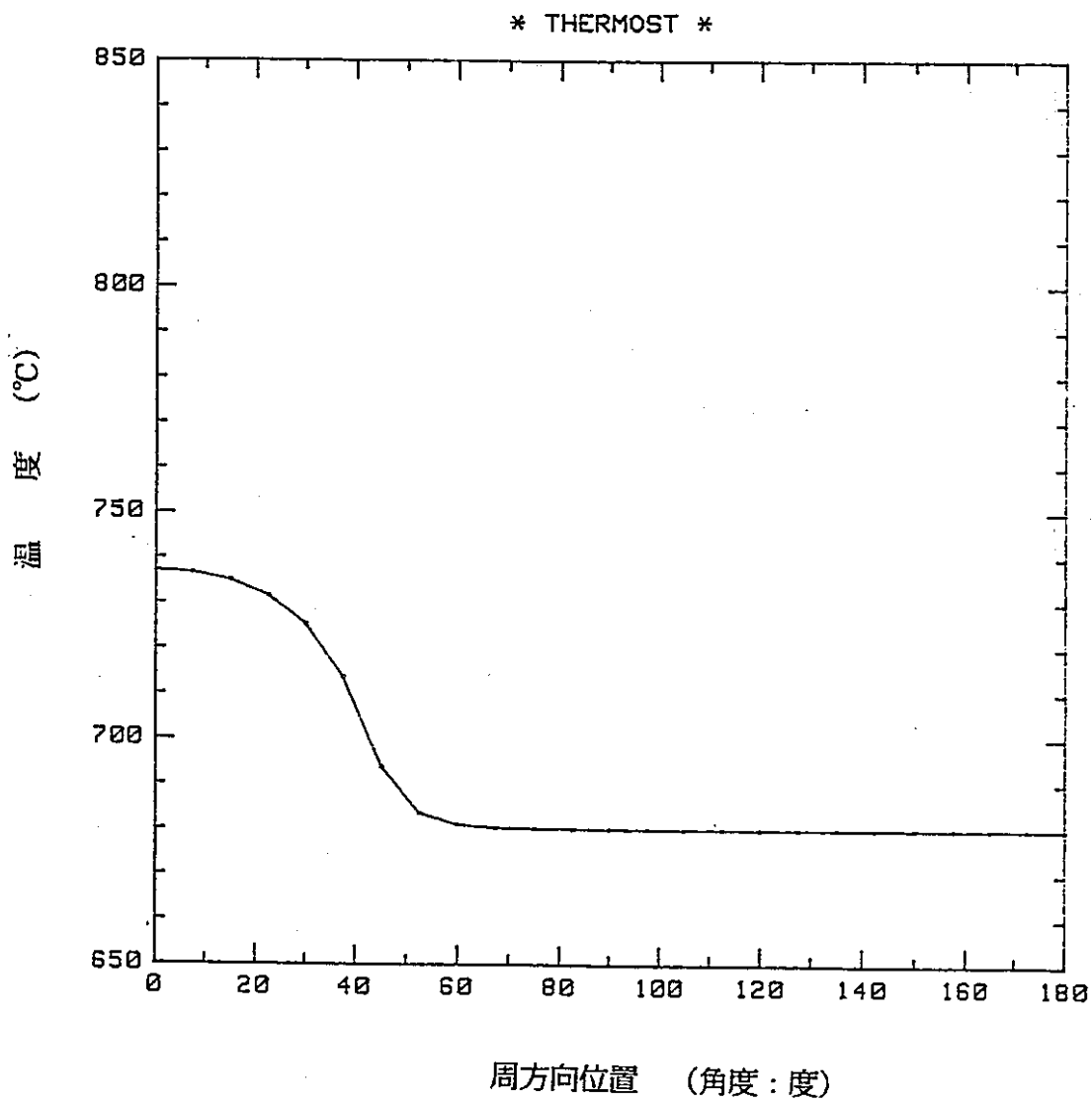


図2.2-12 高燃焼度試験時、出力運転中の制御棒の異常な引抜き(THERMOST)

—周方向被覆管肉厚中心温度分布(時刻: 2.0秒)—

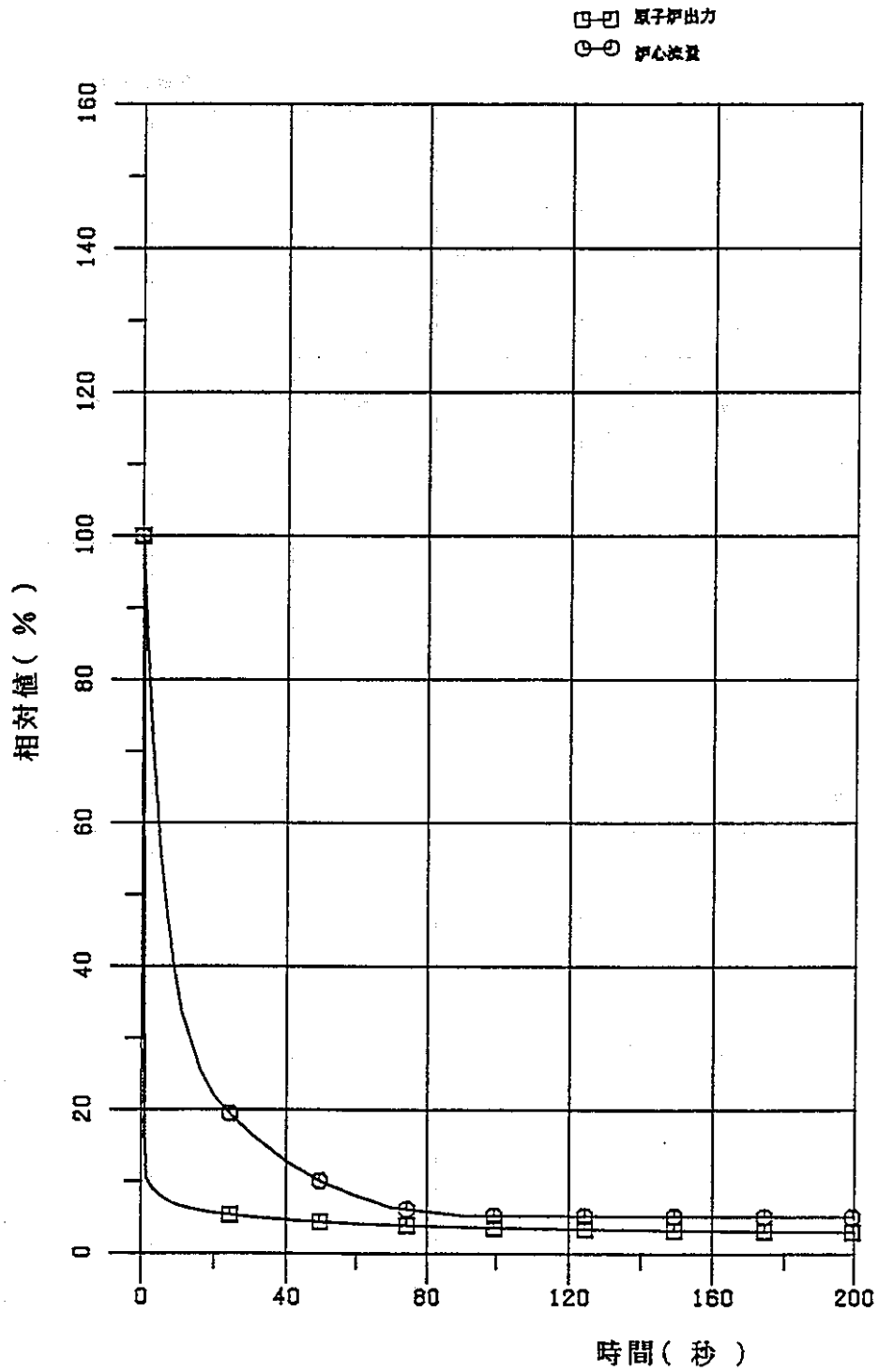


図2.2-13 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

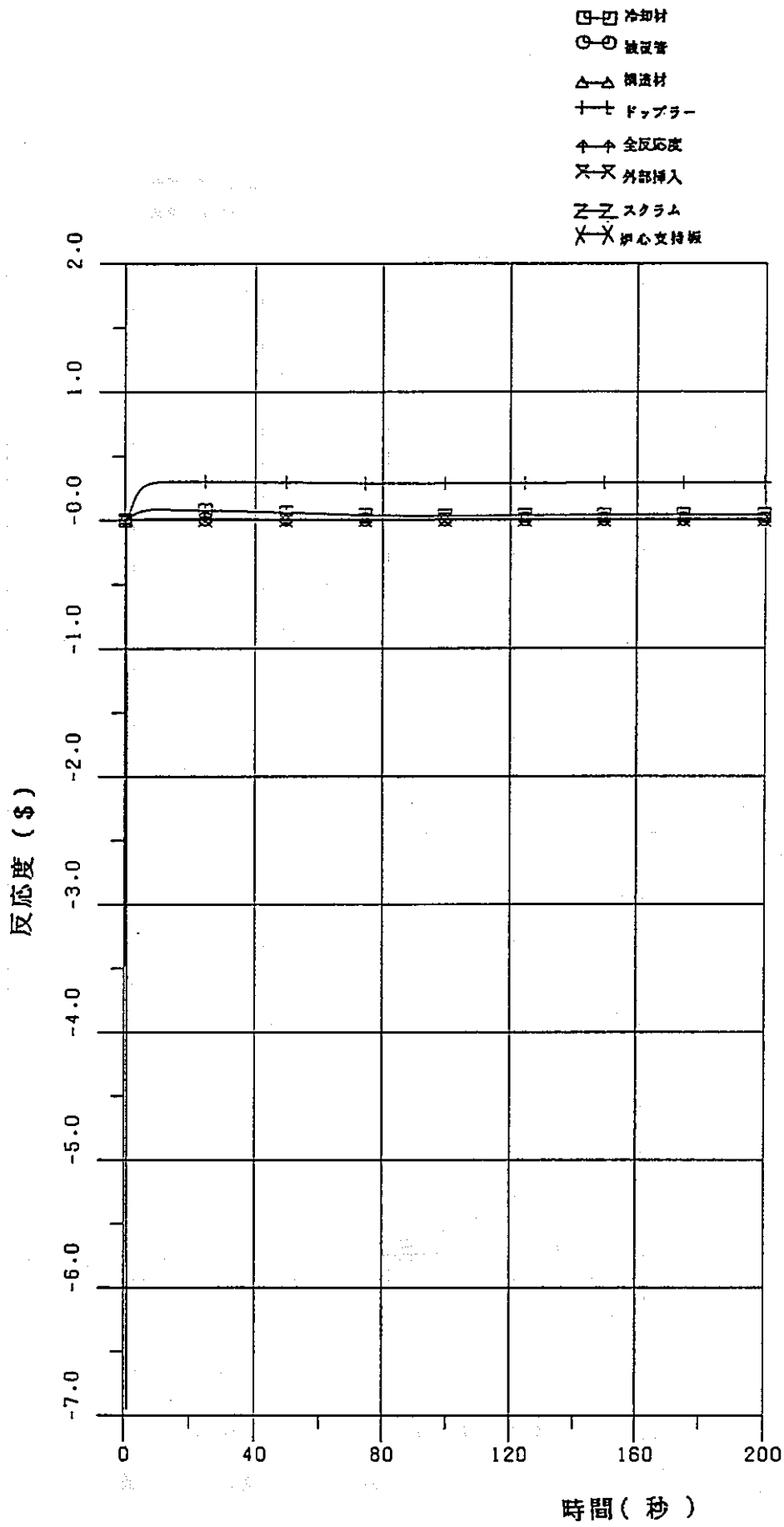


図2.2-14 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(HARHO-IN)

-反応度-

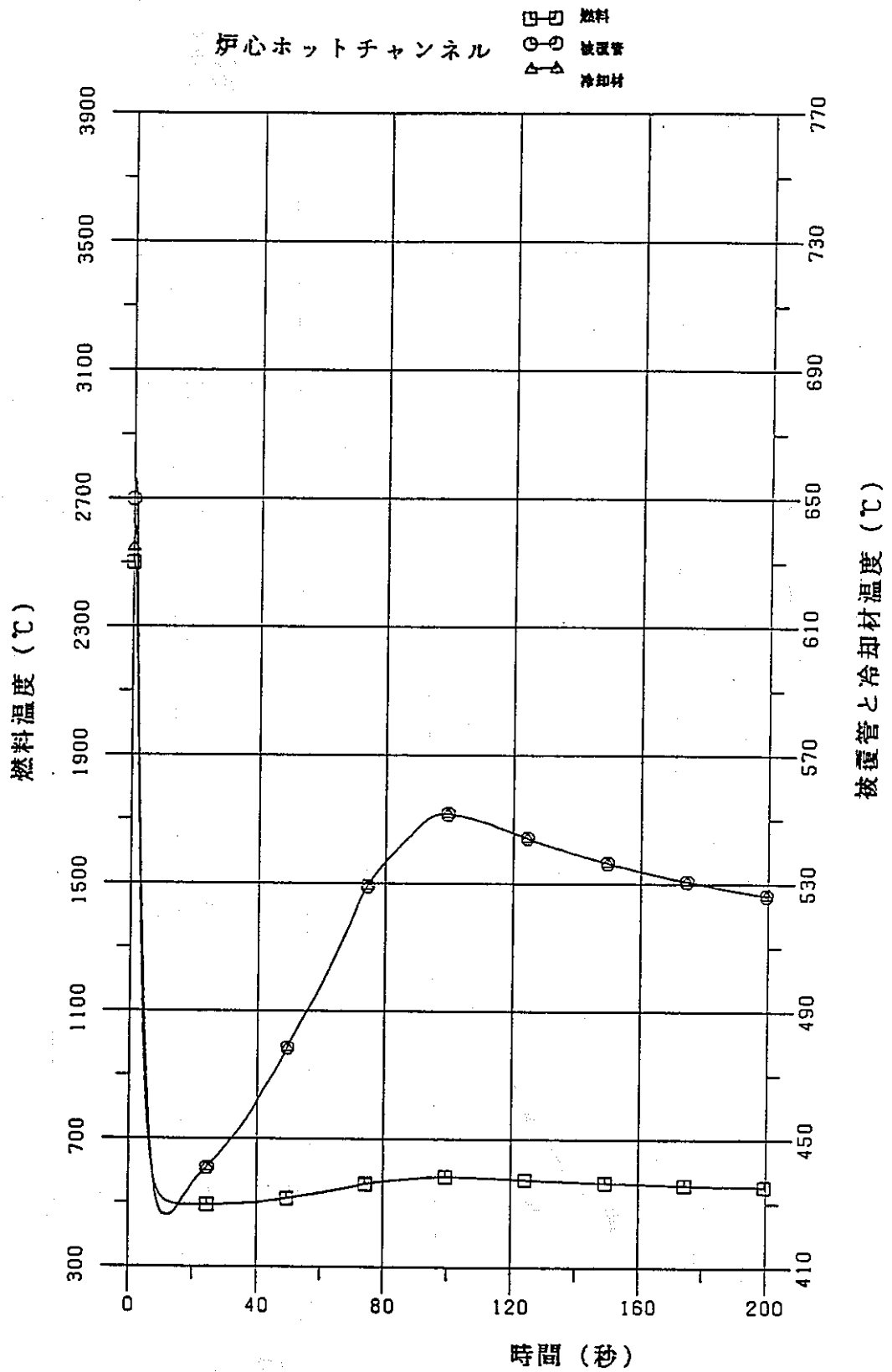


図2.2-15 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

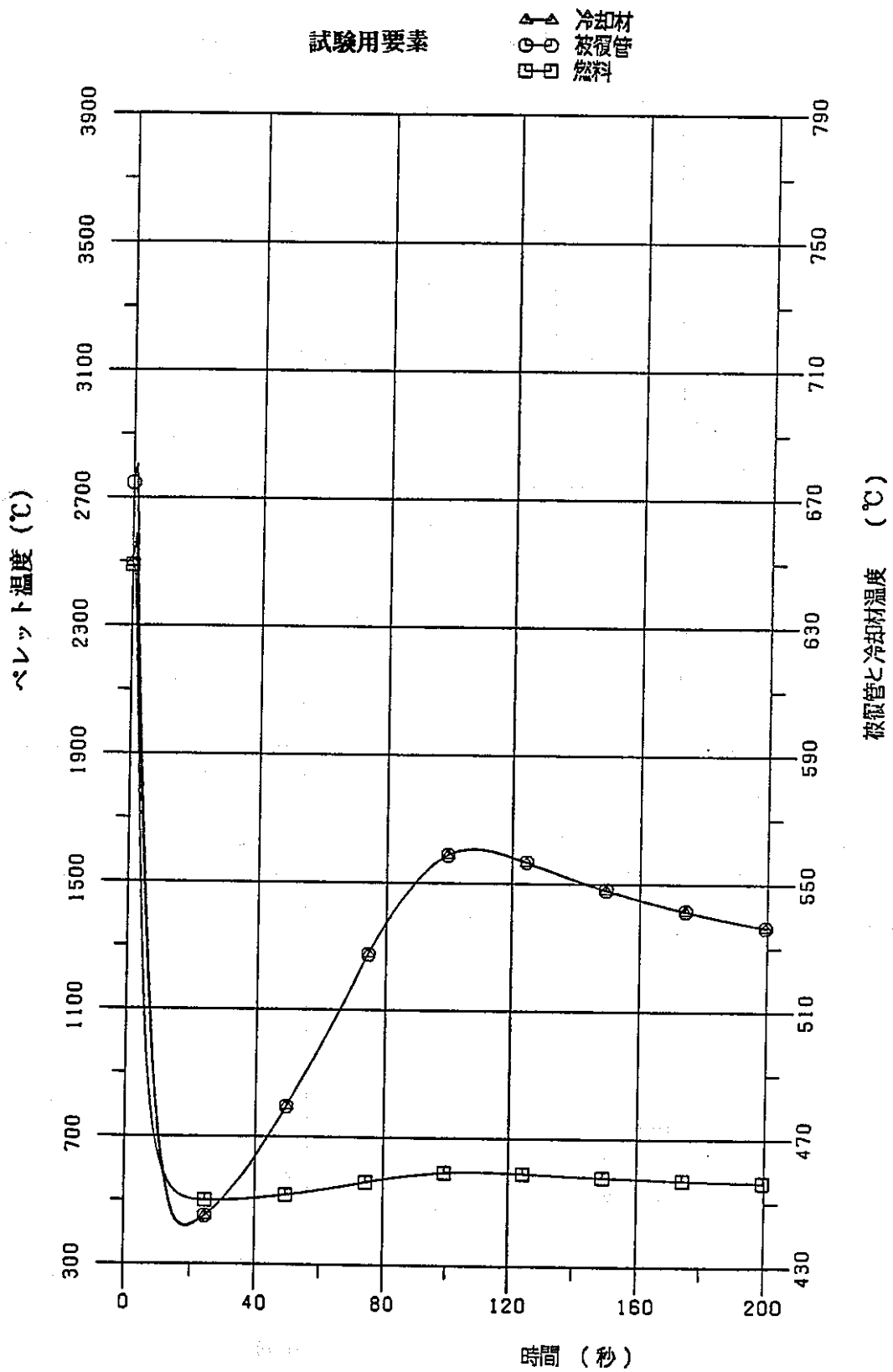


図2.2-16 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(HARHO-1N)

—試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度—

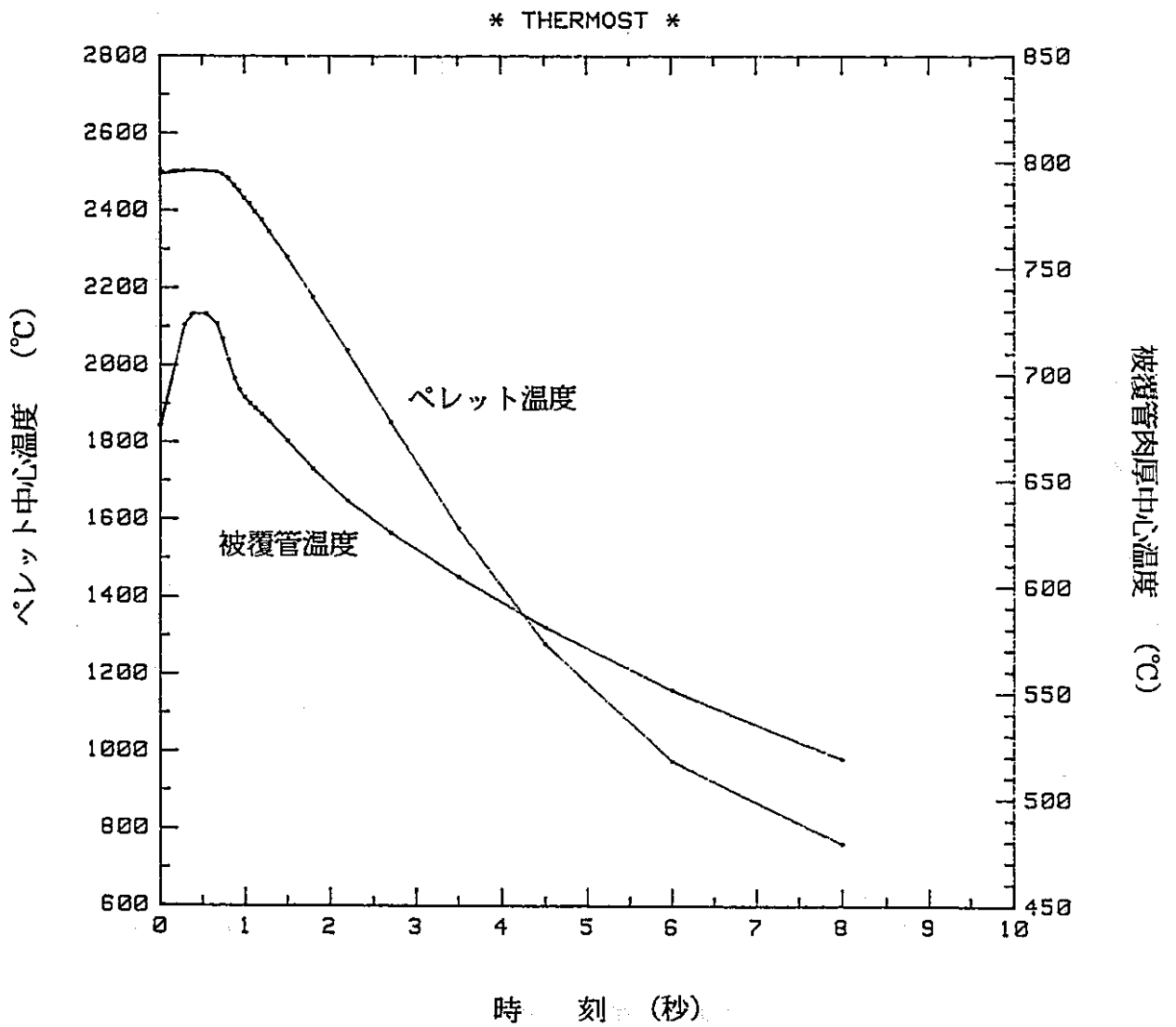


図2.2-17 高燃焼度試験時、1次冷却材流量減少(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

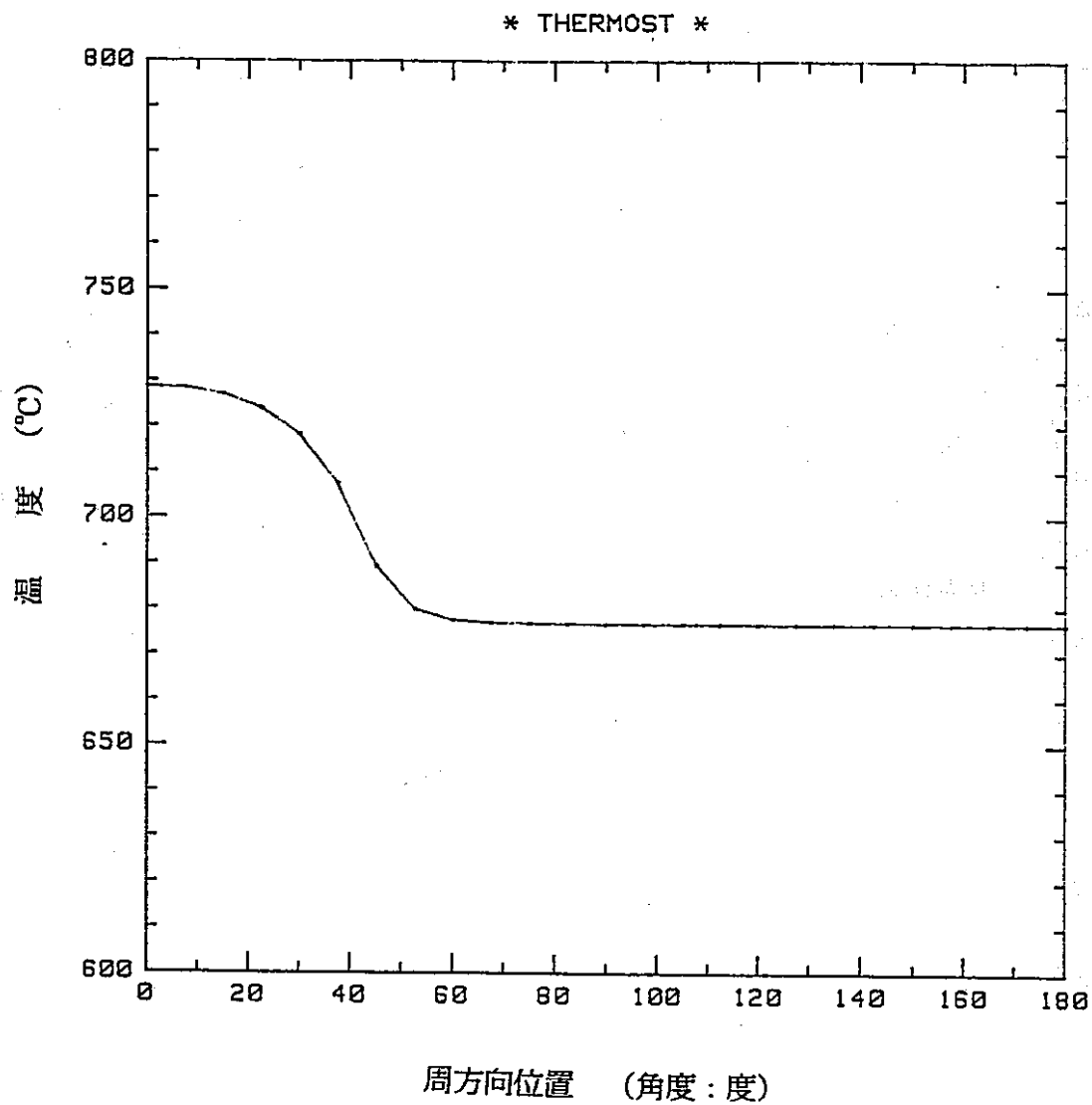


圖2.2-18 高燃燒度試驗時、1次冷却材流量減少(THERMOST)

— 一周方向被覆管肉厚中心温度分布 (時刻: 0.39秒) —

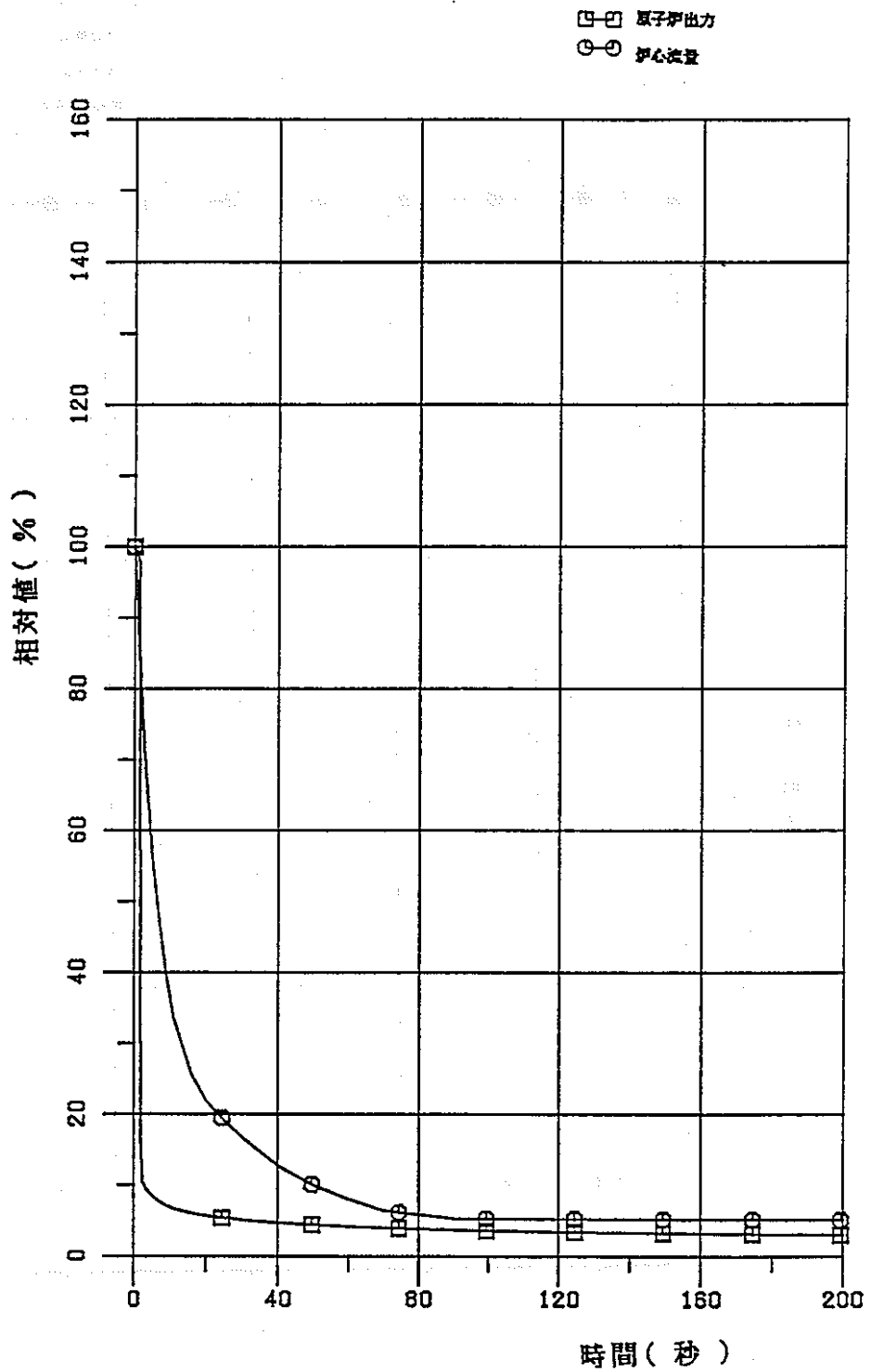


図2.2-19 高燃焼度試験時、外部電源喪失(HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

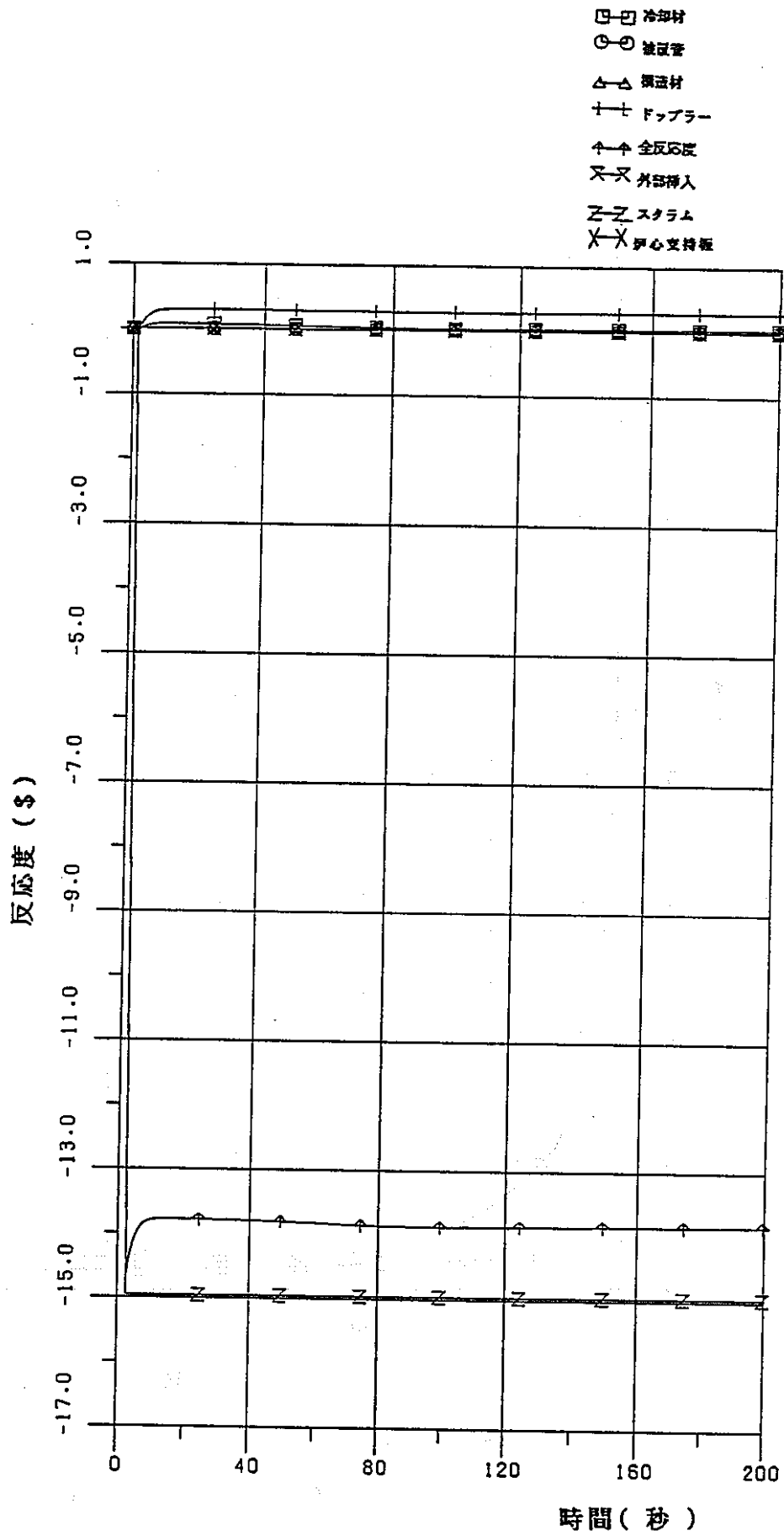


図2.2-20 高燃焼度試験時、外部電源喪失(HARHO-IN)

- 反応度 -

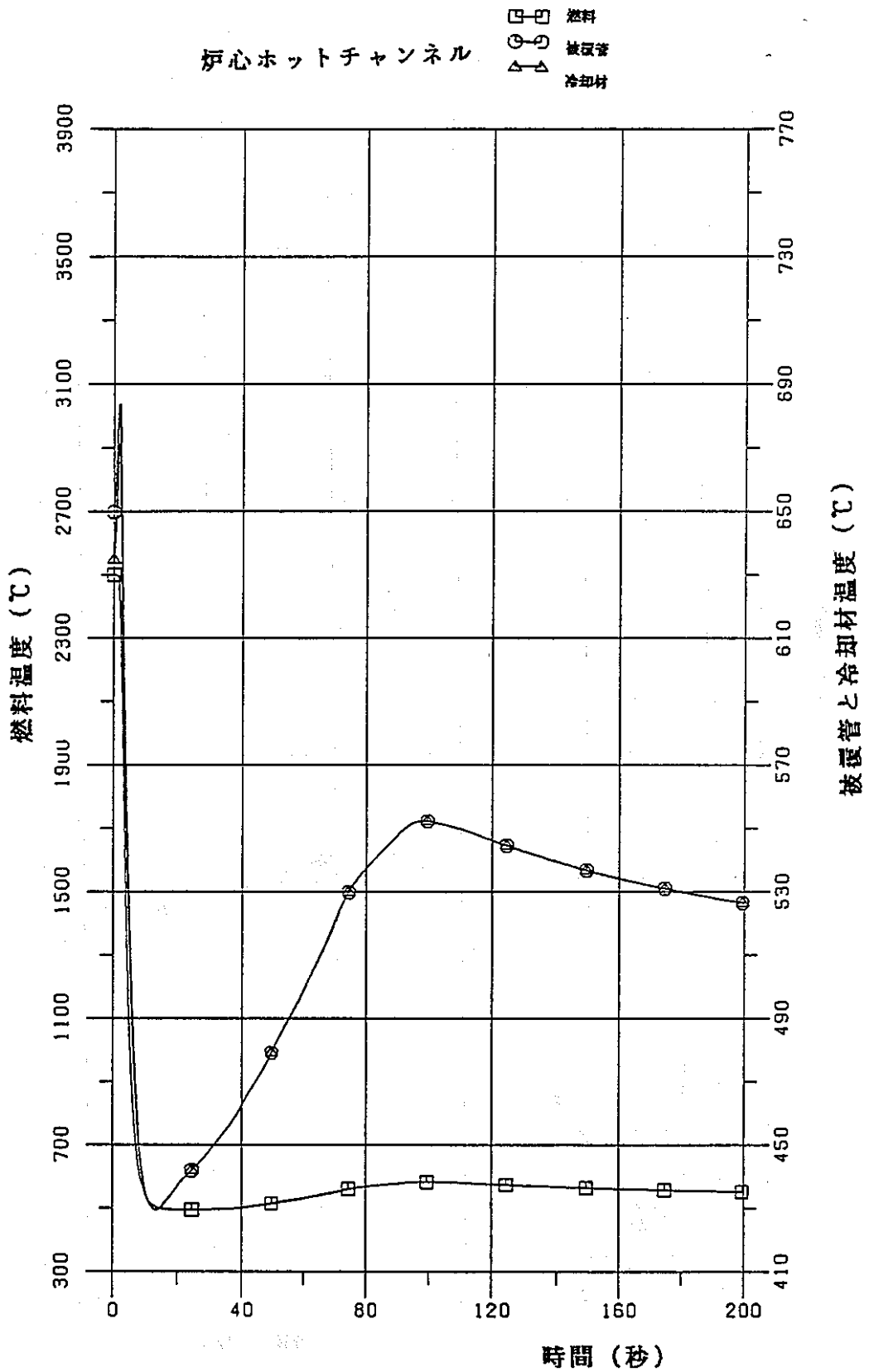


図2.2-21 高燃焼度試験時、外部電源喪失(HARHO-1N)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

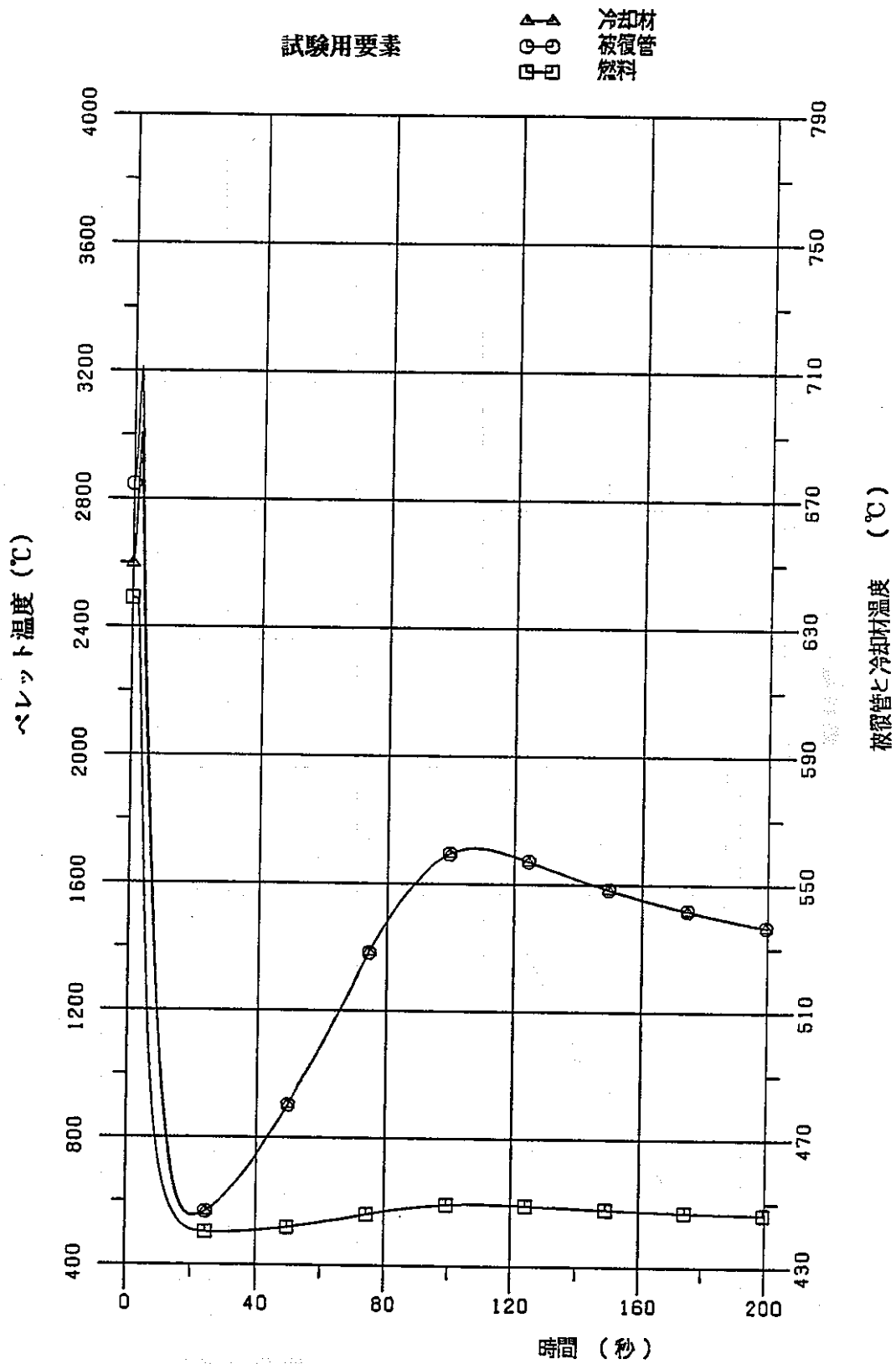


図2.2-22 高燃焼度試験時、外部電源喪失(HARHO-IN)

— 試験用要素： pellets、被覆管、冷却材最高温度 —

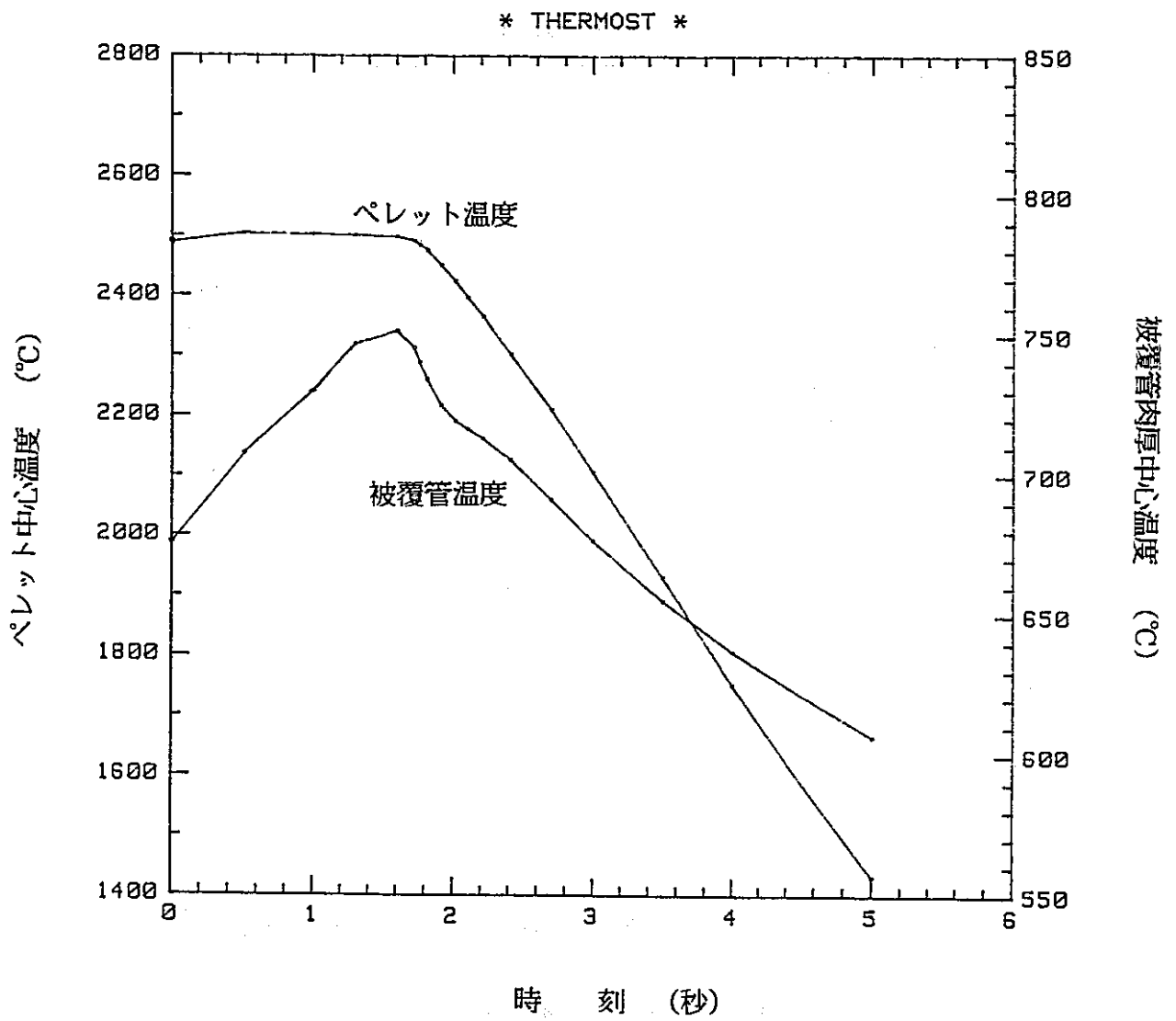


図2.2-23 高燃焼度試験時、外部電源喪失(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

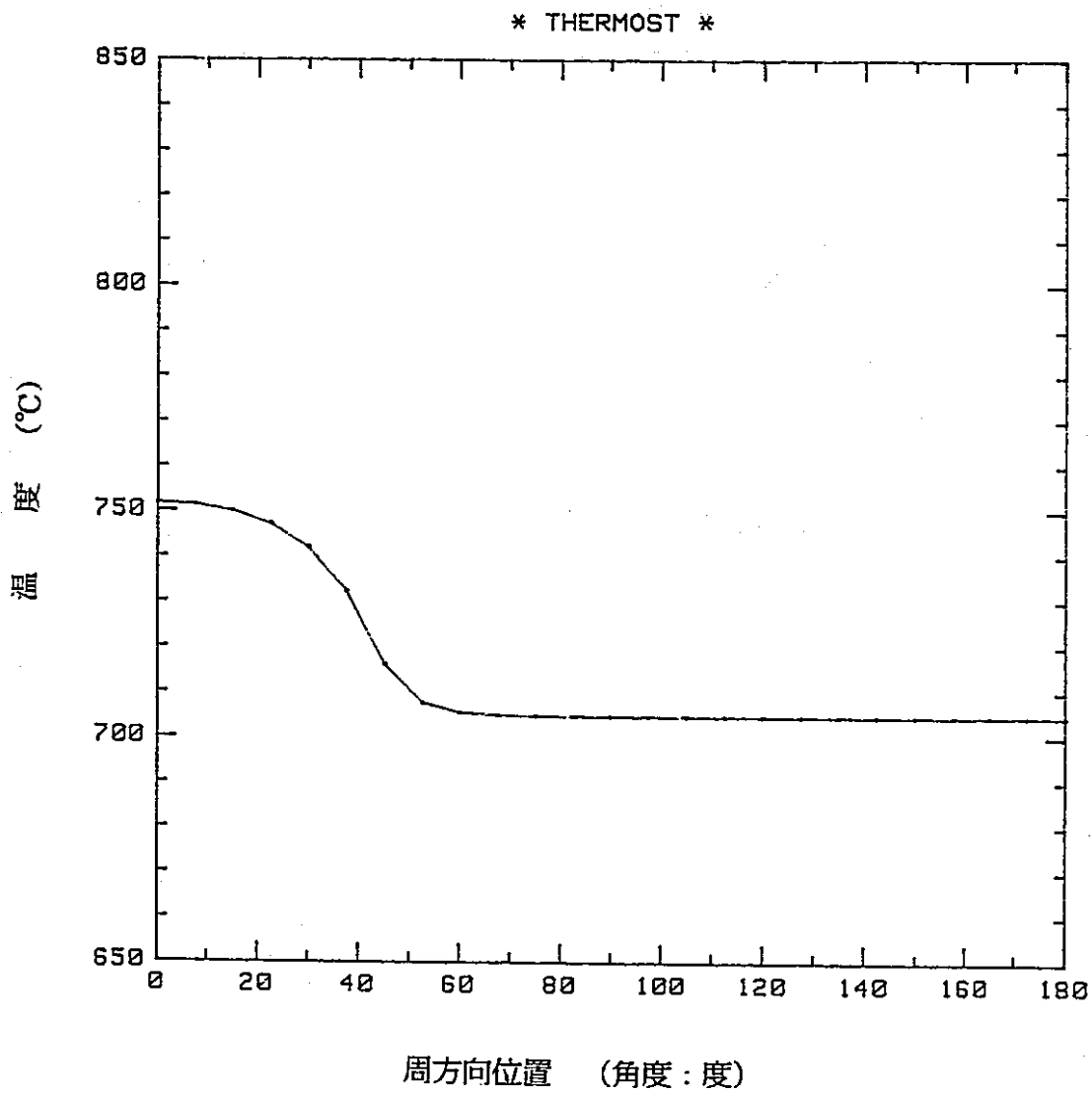


图2.2-24 高燃烧度试验时、外部电源丧失(THERMOST)

一周方向被覆管肉厚中心温度分布 (时刻: 1.6秒) -

3. 「事故」事象の計算

3.1 制御棒移設に伴う炉心データの変化

前 2.1節の「運転時の異常な過渡変化」と同じである。

3.2 各事象の解析

主な解析条件を表3.2-1 にまとめる。

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、2.2節「運転時の異常な過渡変化」のそれを準用する。

2.3.1 燃料スランピング事故

(1) 解析条件

(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200ミリ秒とする。

(f)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。

(g)反応度温度係数としてはドップラー係数、被覆管膨張係数、ナトリウム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の最大値（絶対値が最小の負の値）を用いる。

(2) 解析結果

図3.2-1 に原子炉出力及び炉心流量、図3.2-2 に反応度、図3.2-3、図3.2-4 に炉心ホットチャンネル及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

図3.2-5 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3.2-6 に被覆管肉厚中心最高温度の周方向分布を示す。

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¢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 ¢となる。27¢の正の反応度のステップ挿入により、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定格の約140%にまで上昇する。

炉心及び予備試験用要素の、ペレット、被覆管、冷却材最高温度の比較を表3.2-3 に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2581℃、被覆管肉厚中心最高温度は761℃、冷却材最高温度は667℃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2556℃で、これは溶融温度を下回っている。

3.2.2 1次冷却系循環ポンプ軸固着事故

(1) 解析条件

- (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、反応度温度係数としては被覆管膨張係数、ナトリウム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、ドップラー係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3.2-7 に原子炉出力及び炉心流量、図3.2-8 に反応度、図3.2-9、図3.2-10に炉心ホットチャンネル及び試験用要素の、ペレット、被覆管肉厚中心、冷却材の最高温度をそれぞれ示す。

図3.2-11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、被覆管肉厚中心温度時刻歴を、図3.2-12に被覆管肉厚中心最高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%にまで減少する。0.2秒で、「故障側冷却系回路流量低信号」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、冷却材最高温度の比較を表3.2-3に示す。予備試験用要素のペレット最高温度は2496℃、被覆管肉厚中心最高温度は842℃、冷却材最高温度は807℃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3.2-1 解析主要条件 (事故)

		燃料スランピング 事故	1次冷却系 循環ポンプ 軸固着事故
初期運転状態		定 格	定 格
反 応 度 係 数	ドップラー	最大 -0.30×10^{-3}	最小 -1.78×10^{-3}
	燃 料	—	最小 -0.45×10^{-3}
	被 覆 管	最大 -0.63×10^{-6}	最大 -0.63×10^{-6}
	冷 却 材	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}
原子炉 トリップ	信 号	出力領域中性子束高	1次冷却材流量低
		107%	80%
	遅れ時間	0.2秒	0.7秒
単一故障重ね合わせ		1ロッドスタック	1ロッドスタック
解析時間		3 秒	4 秒
キップコングケタス		1000Btu/h・ft ² ・°F	1000Btu/h・ft ² ・°F
挿入反応度		27φステップ	な し
炉心流量		一 定	表3.2-2
炉心入口温度		一 定	一 定
炉心各部温度		定 格	定 格
T H E R M O S T	ガ ス 温 度	炉心部上端のNa温度 時間に関して一定	炉心上端でのNa温度 HARHO-IN も結果
	N a 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	←—————

表3.2-2 炉心流量変化（1次冷却系循環ポンプ軸固着事故）

時間 (s e c)	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	0.58740
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 3.2-3 解析結果のまとめ (事故)

事 象 名	炉 心 燃 料 温 度 (℃)			予 備 試 験 用 要 素 温 度 (℃)			試 験 用 要 素 ペレット 温 度 (℃)
	ペレット	被覆管	冷却材	ペレット*	被覆管*	冷却材	
燃 料 ス ラ ン ピ ン グ	2 6 0 9	6 7 7	6 6 1	2 5 8 1	7 6 1	6 6 7	2 5 5 6
	2 5 0 0	6 5 0	6 3 5	2 4 9 0	6 7 5	6 5 0	2 4 8 0
1 次 冷 却 系 循 環 ポ ン プ 軸 固 着 事 故	2 5 0 0	8 0 5	7 9 6	2 4 9 6	8 4 2	6 6 7	2 4 8 0
	2 5 0 0	6 5 0	6 3 5	2 4 9 0	6 7 5	6 5 0	2 4 8 0

* THERMOSTによる結果を記載

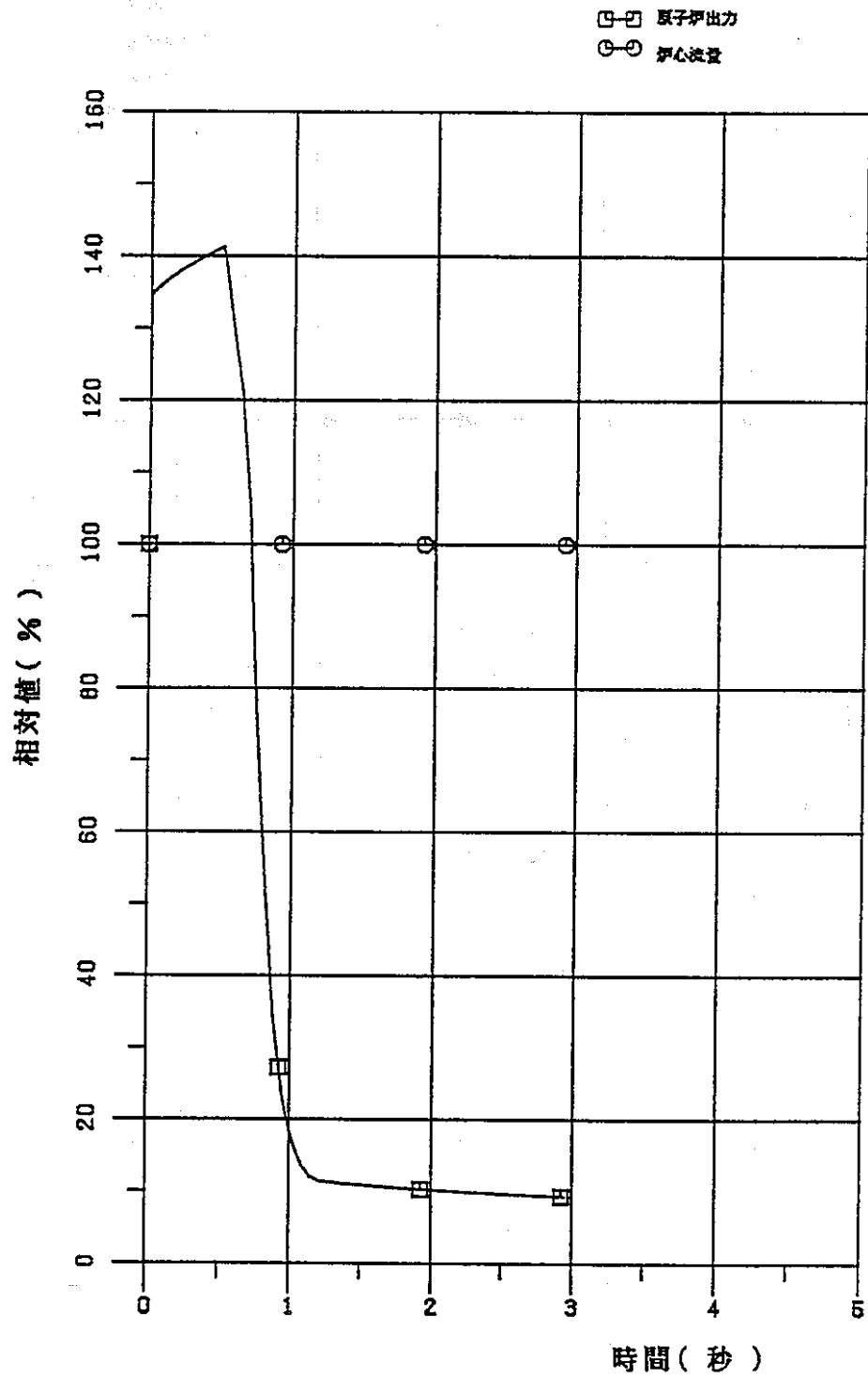


図3.2-1 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

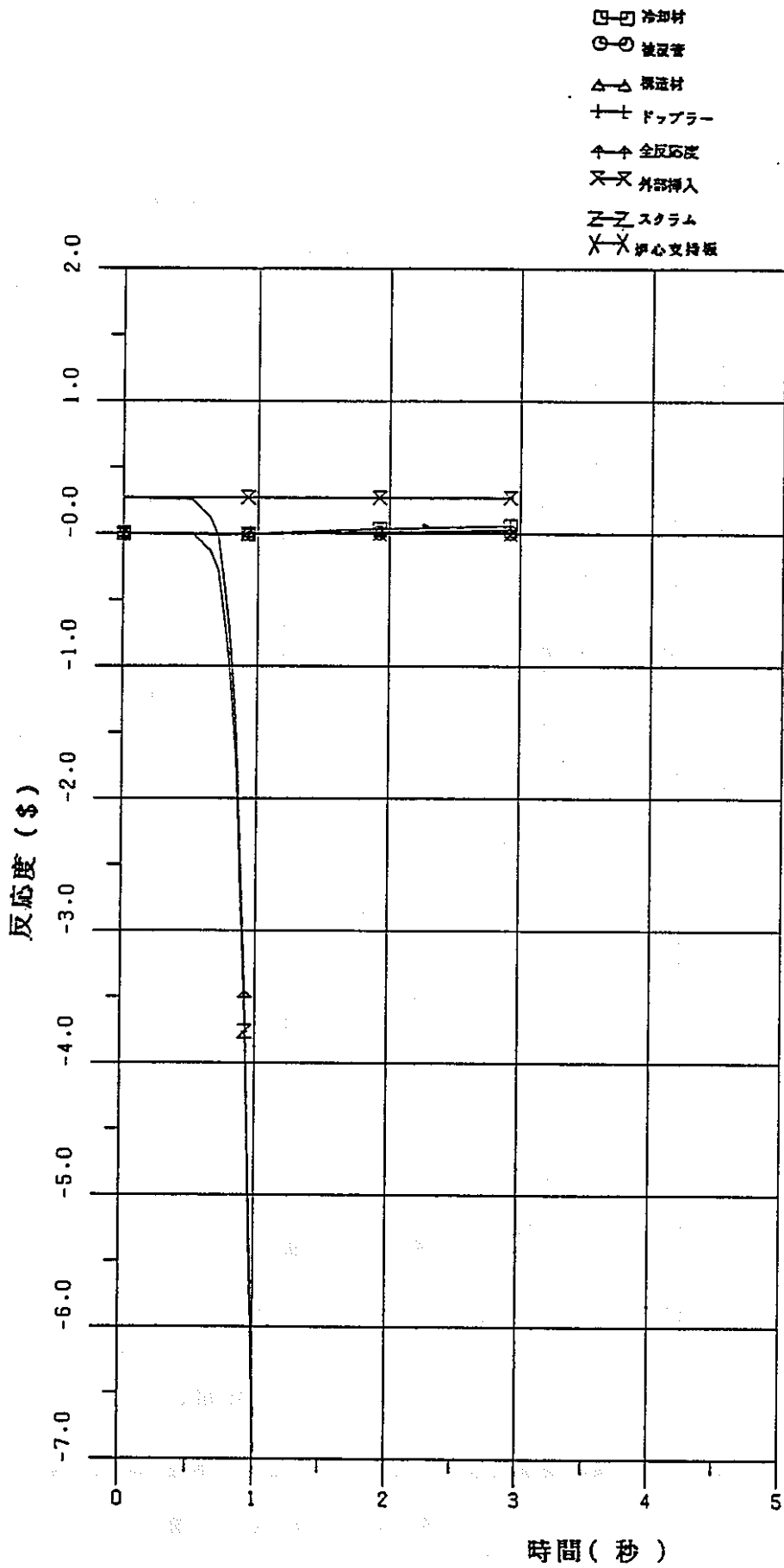


図3.2-2 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)

- 反応度 -

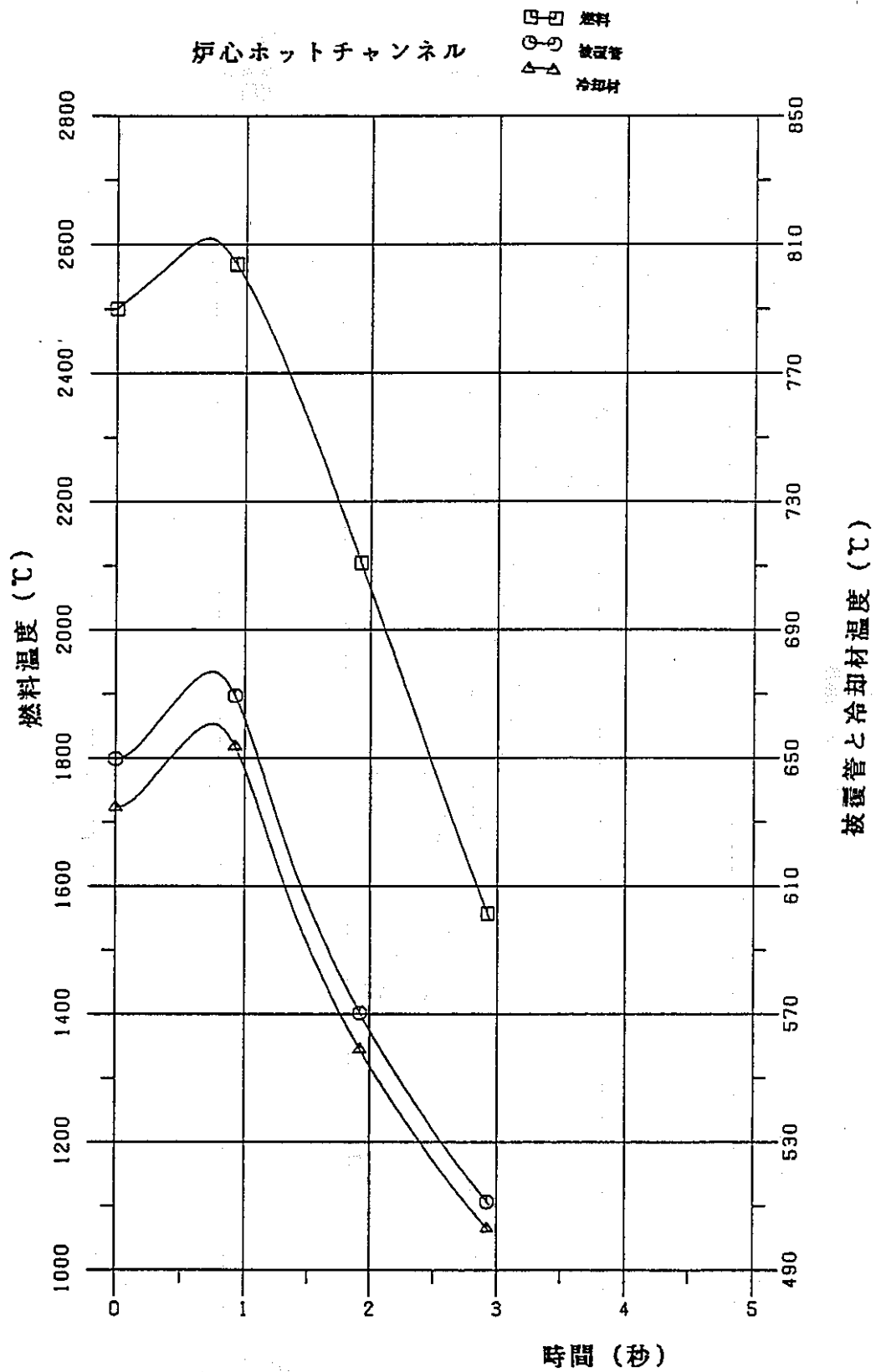


図3.2-3 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-IN)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

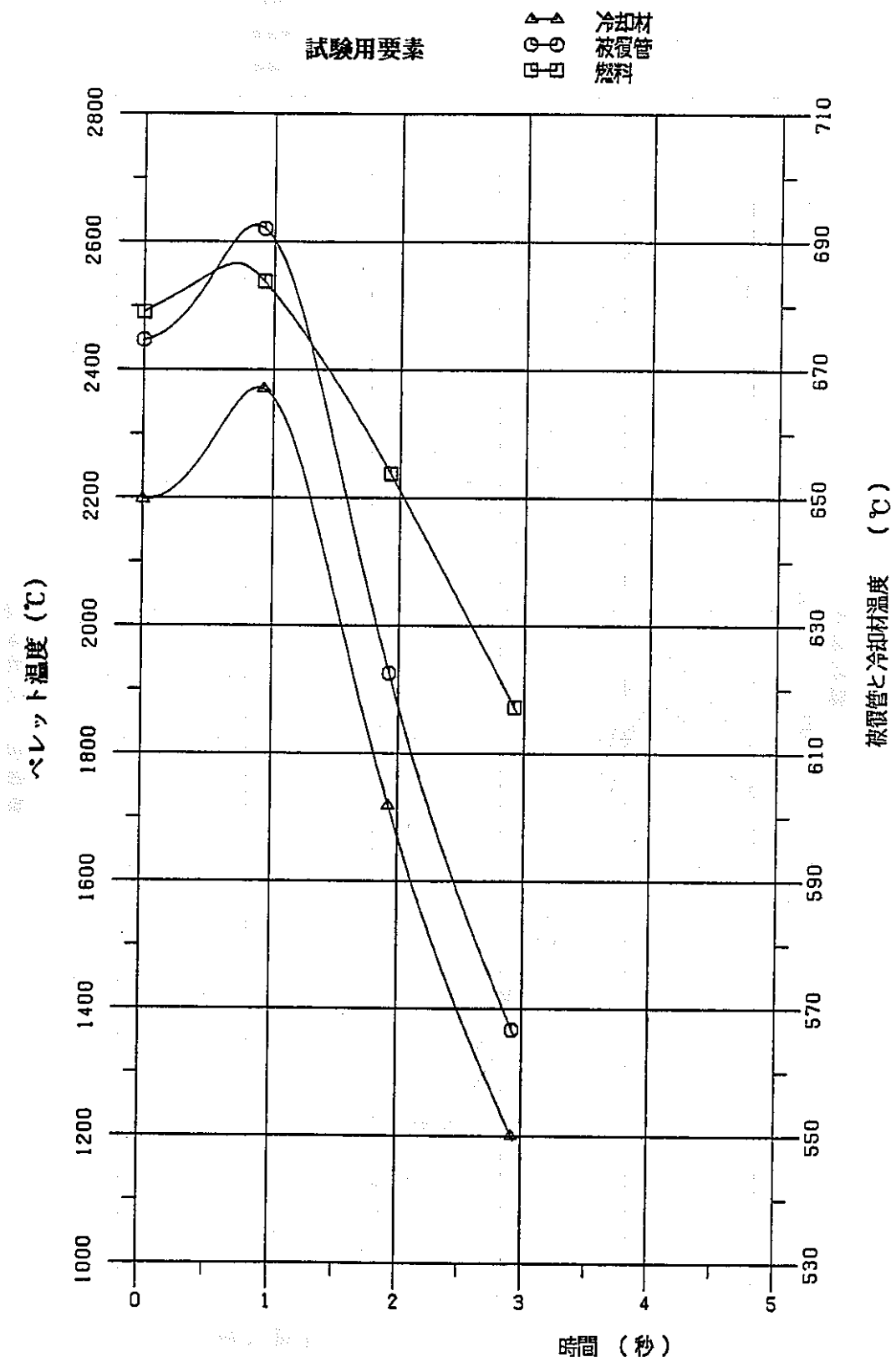


図3.2-4 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(HARHO-1N)

— 試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度 —

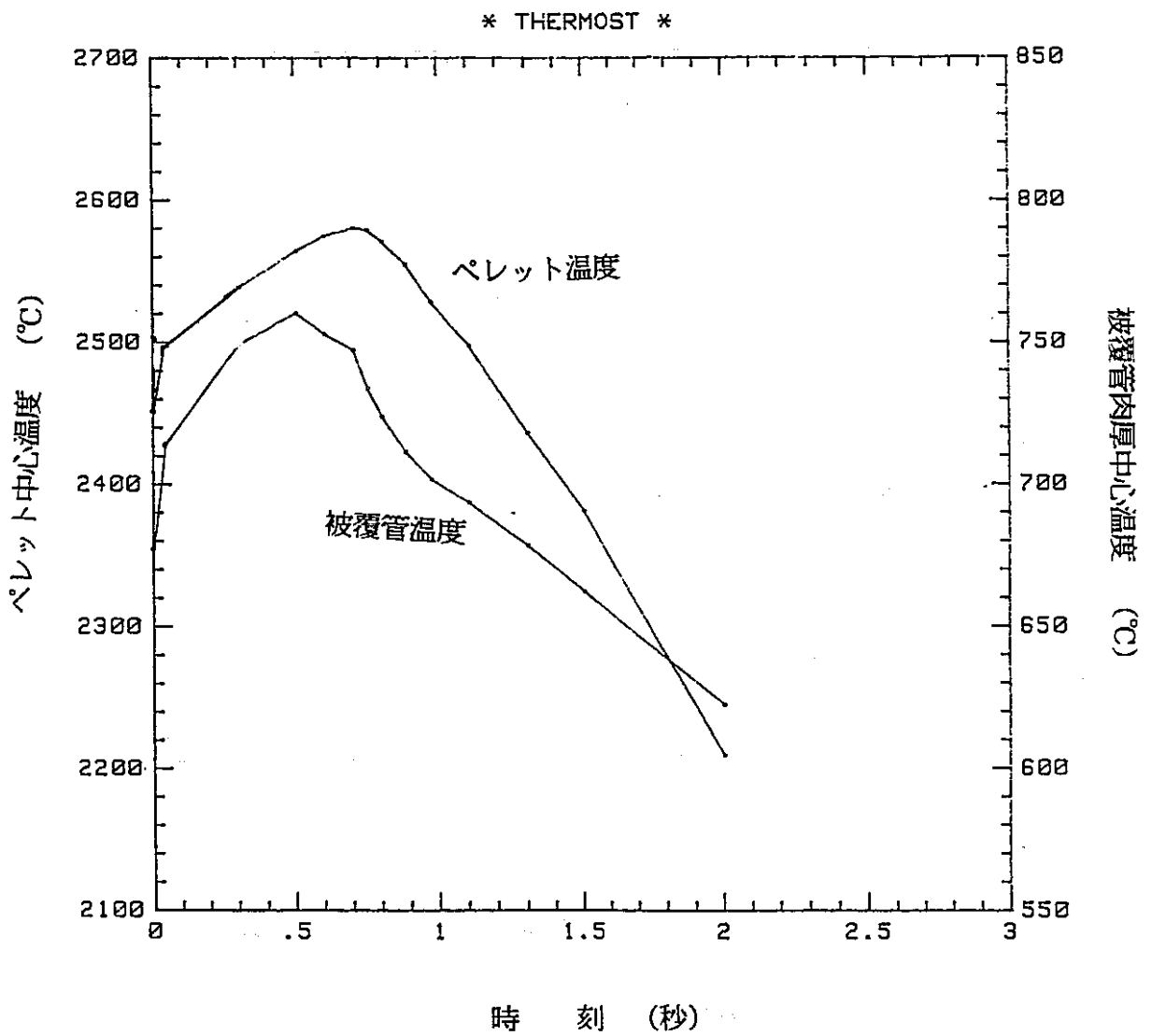


図3.2-5 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

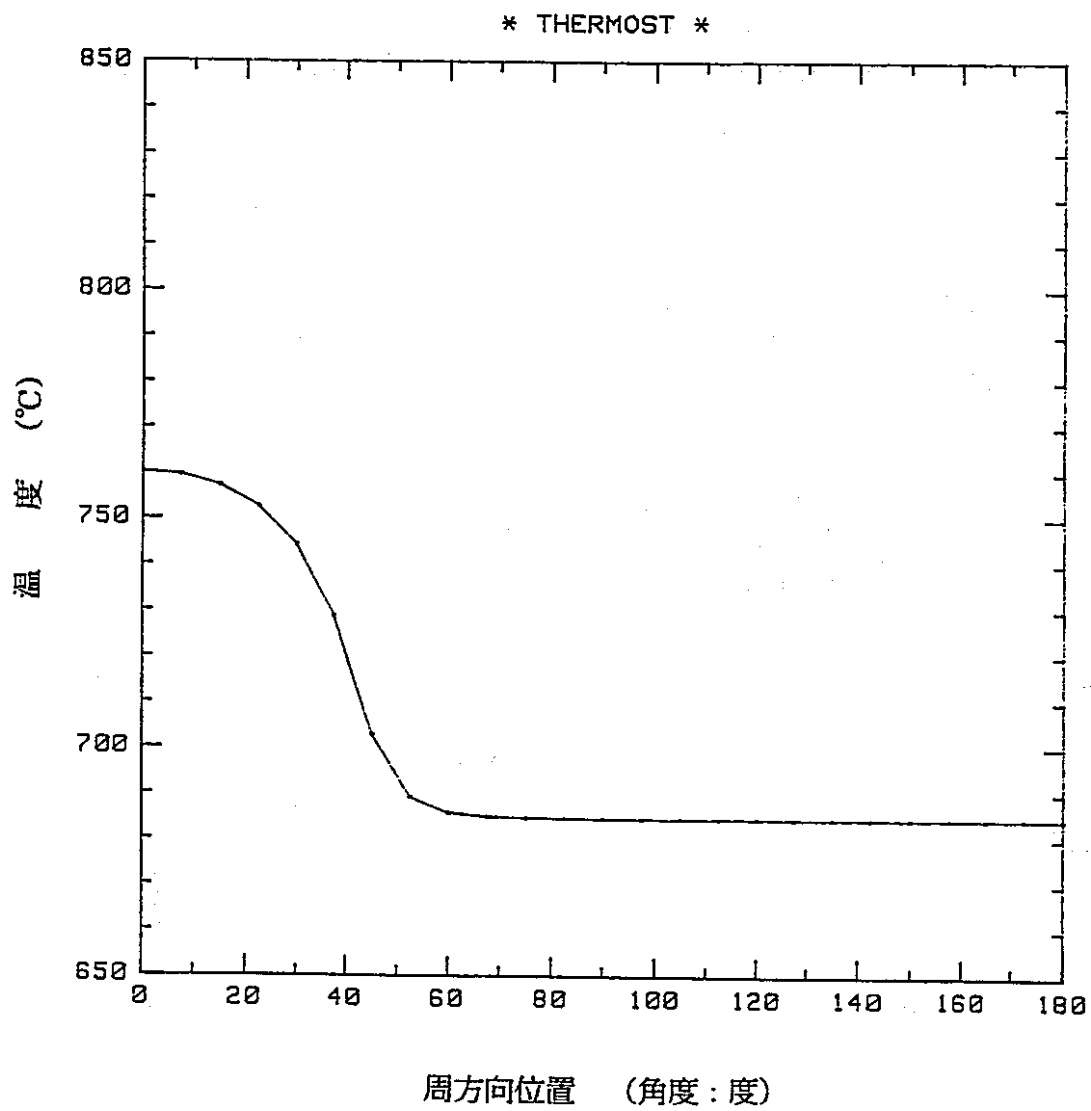


図3.2-6 高燃焼度試験時、燃料スランピング事故(THERMOST)

一周方向被覆管肉厚中心温度分布 (時刻: 0.505秒) -

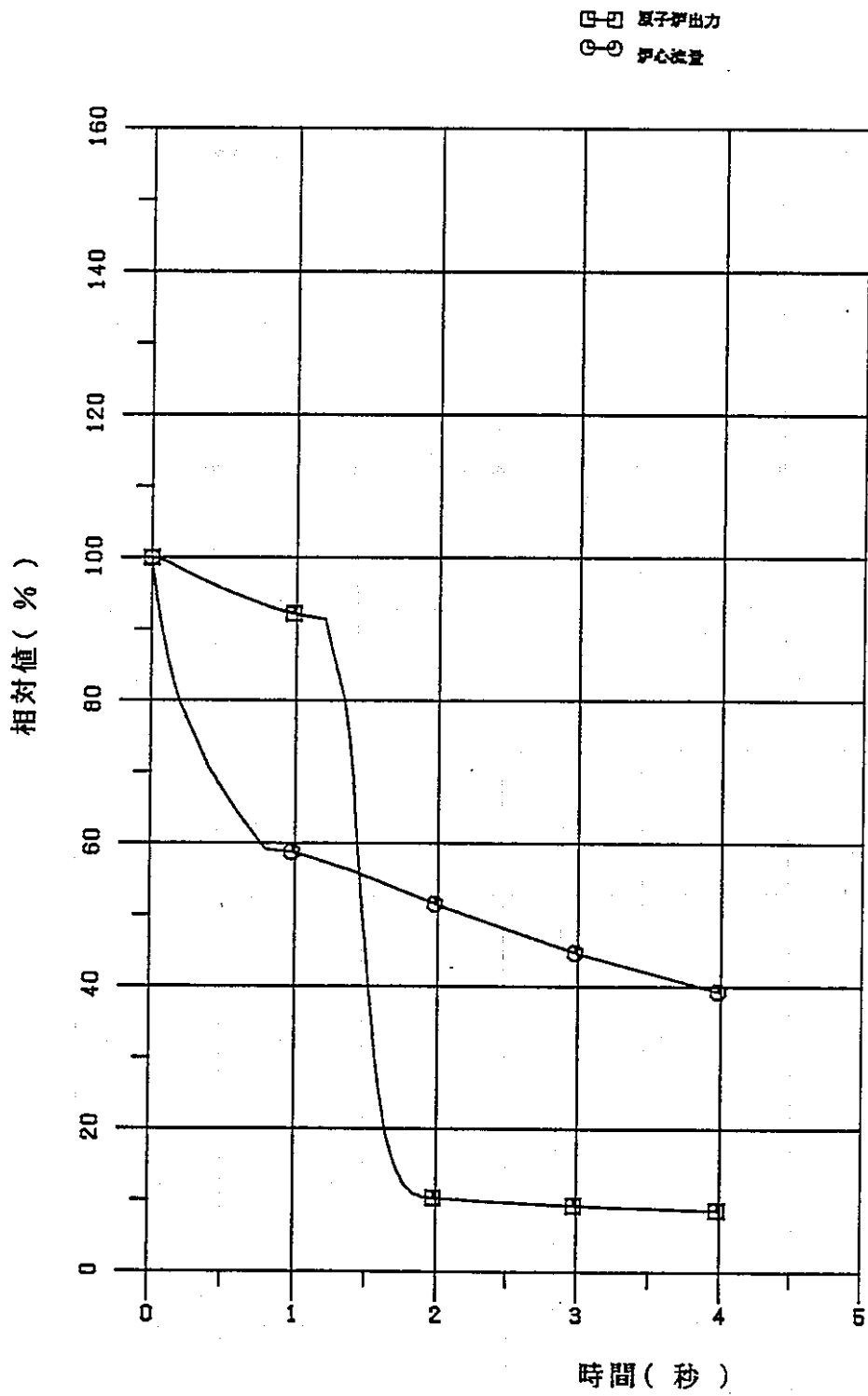


図3.2-7 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(HARHO-IN)

—原子炉出力及び炉心流量—

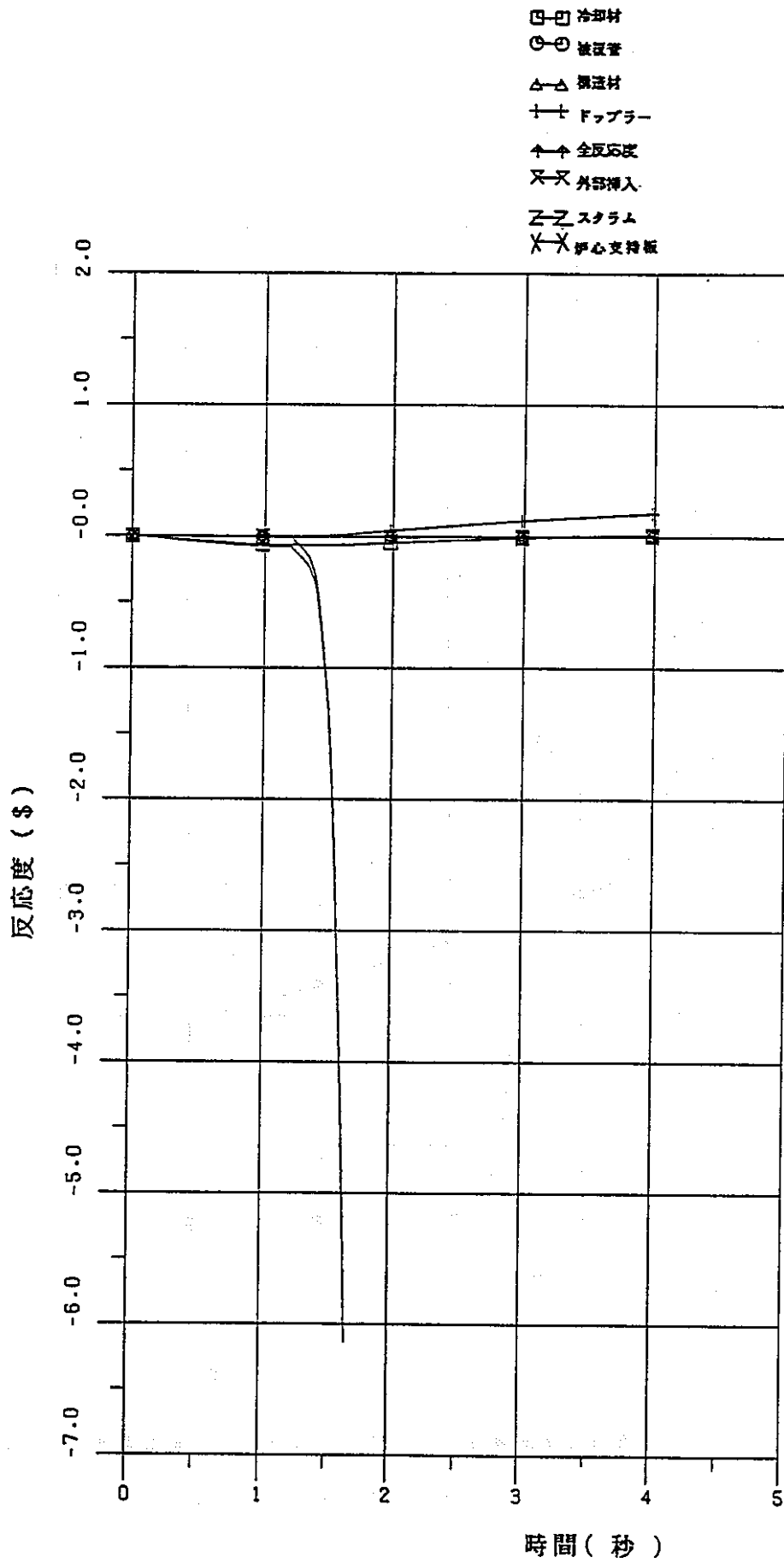


図3.2-8 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(HARHO-1N)

- 反応度 -

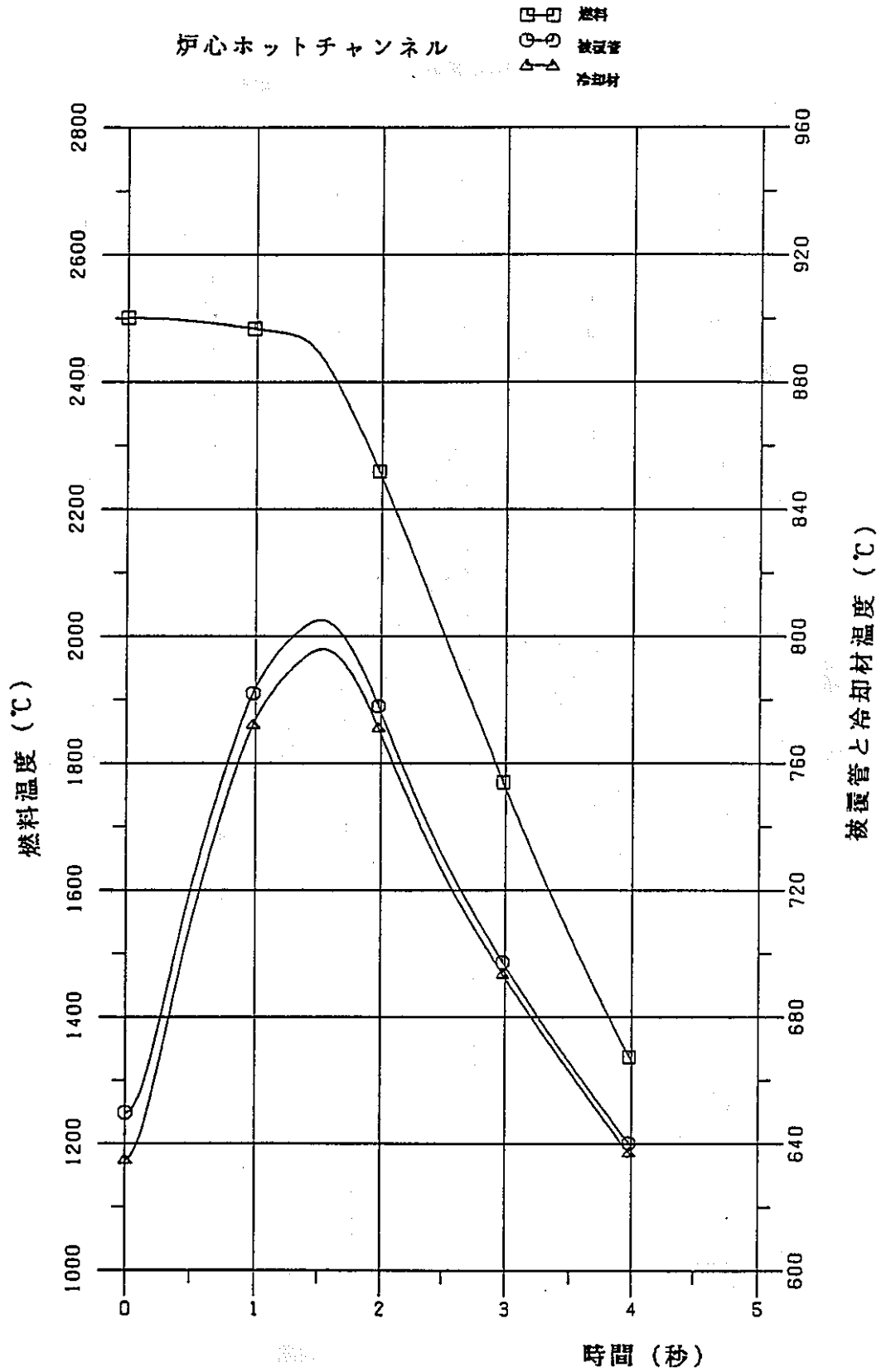


図3.2-9 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(HARHO-1N)

—炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度—

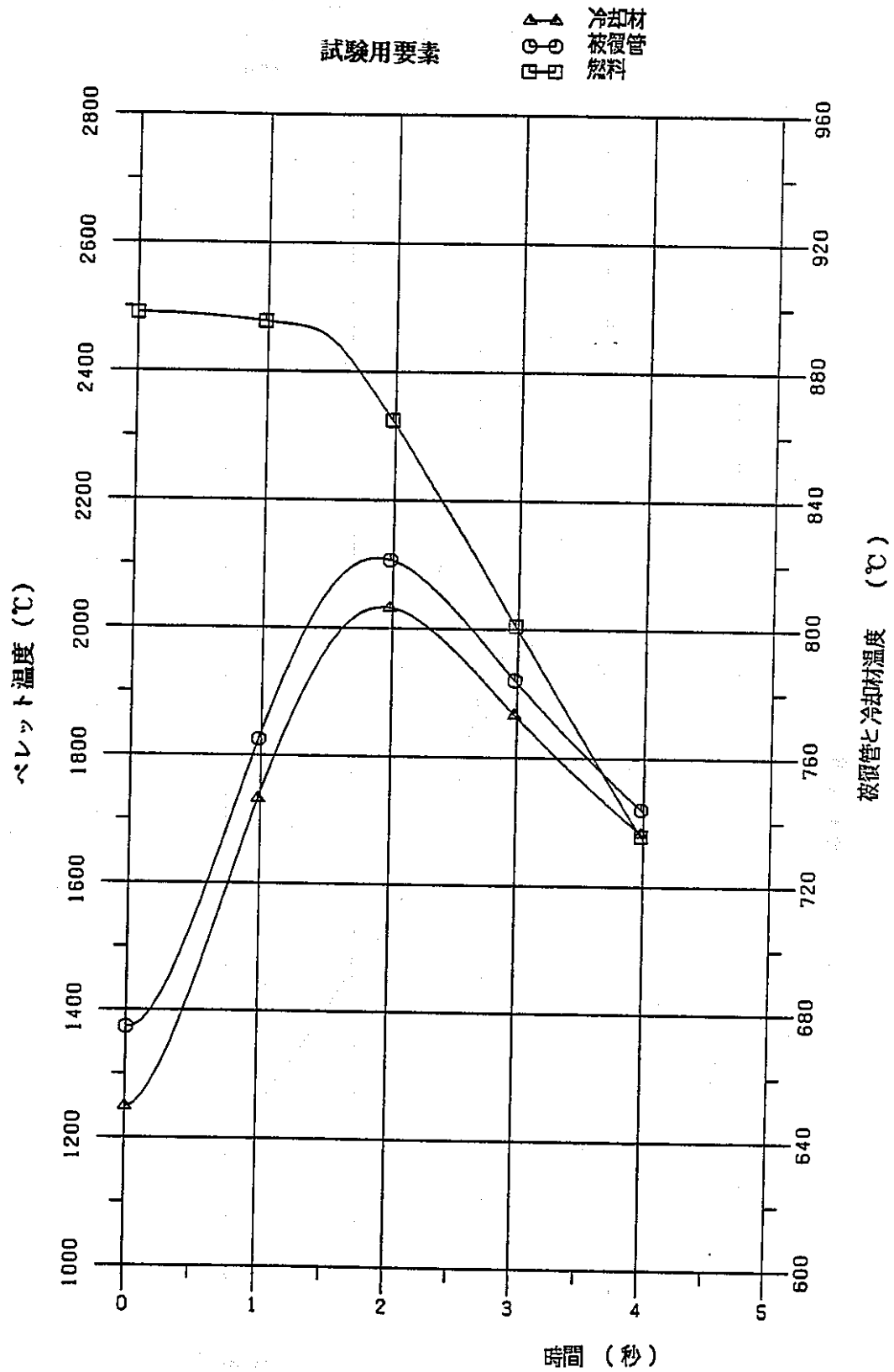


図3.2-10 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(HARHO-1N)

— 試験用要素：ペレット、被覆管、冷却材最高温度 —

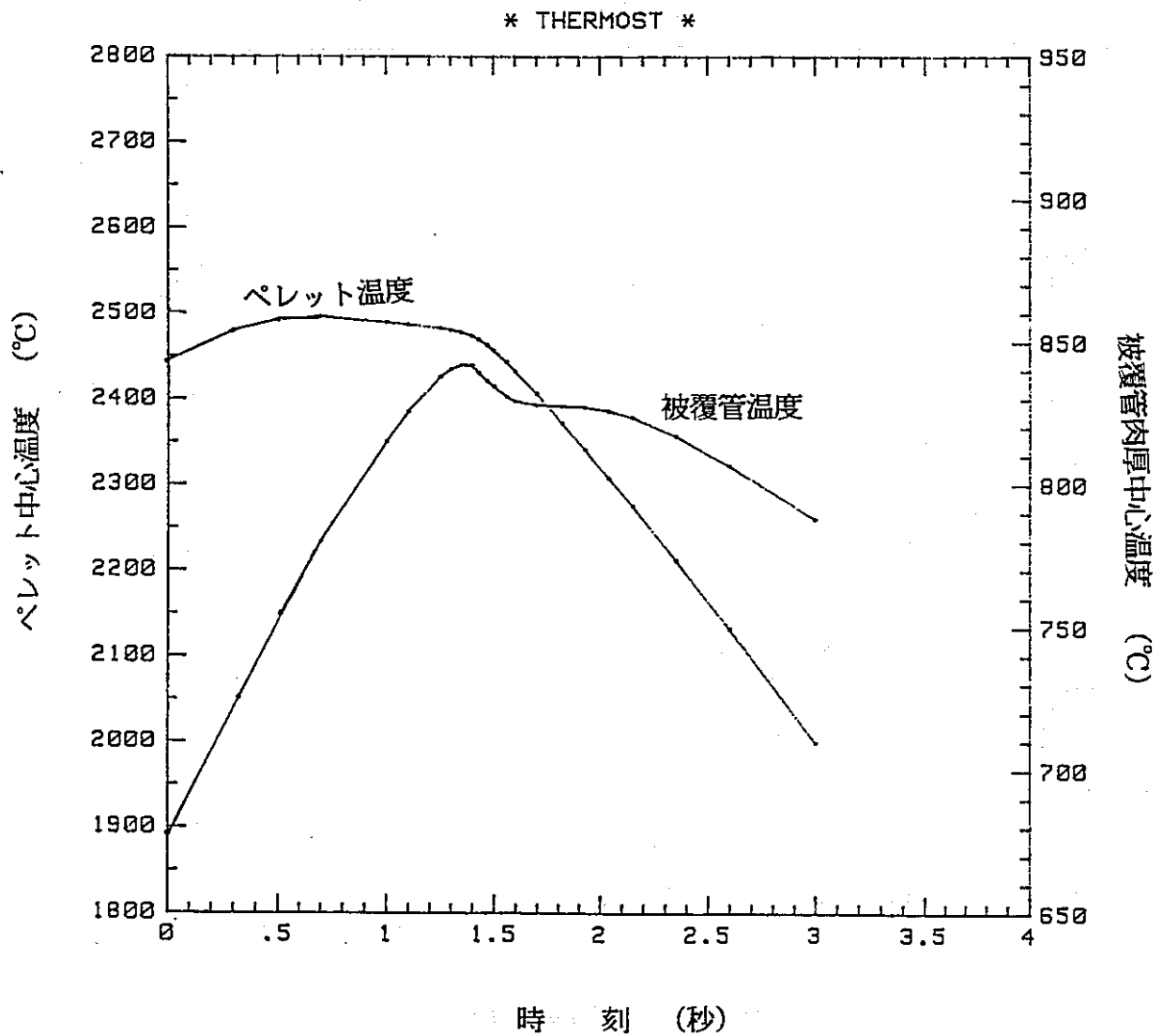


図3.2-11 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(THERMOST)

—ペレット中心温度、被覆管肉厚中心温度時刻歴—

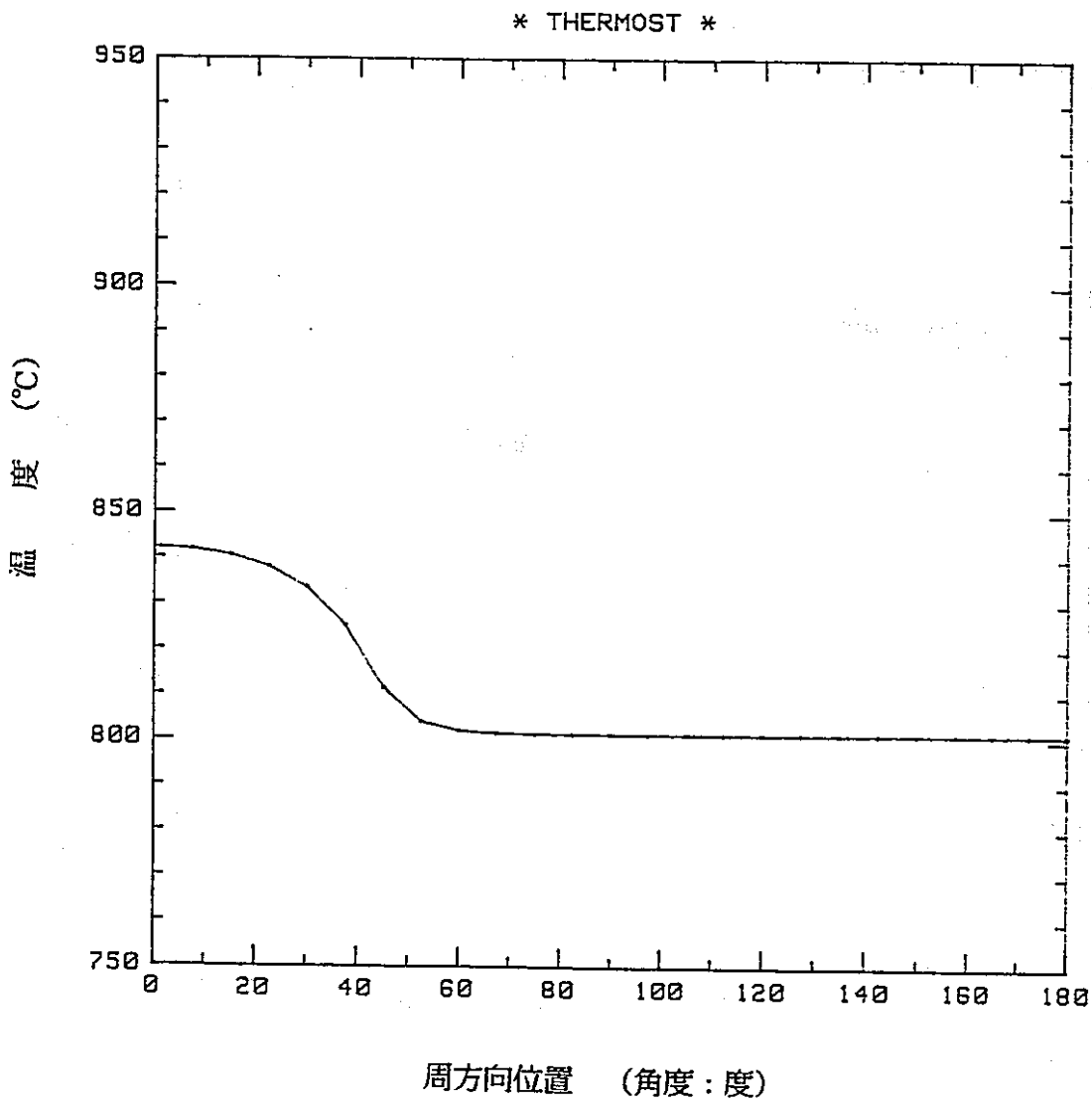


図3.2-12 高燃焼度試験時、1次冷却系循環ポンプ軸固着事故(THERMOST)

—周方向被覆管内厚中心温度分布 (時刻: 1.35秒) —

4. 高燃焼度試験の試験用要素の挙動評価

4.1 概 要

FBRコスト低減化研究の一つとして、燃料の高燃焼度化の研究が行われている。その一環として、及び安全性の研究として被覆管材にSUS316相当鋼と改良オーステナイト鋼を用いた試験要素を用い、実験炉「常陽」において、高燃焼度試験が予定されている。そこで、燃料要素のFPガスによる内圧、被覆管ペレット機械的相互作用（FCMI）及び被覆管クリープ寿命分数和（CDF）を定常照射条件下で評価した。ここで、被覆管温度は線出力が燃焼とともに減少する割合に比例して下がると仮定した。

被覆管材料をSUS316相当鋼とし、最大線出力を360w/cmとしたケース、同様に最大線出力を415w/cmとしたケース及び被覆管材料を改良オーステナイト鋼とし、最大線出力を415w/cmとしたケースの計算を実施した。そのいずれのケースでも要素平均燃焼度20at%を越えた時点においてもCDFの観点からは、破損は生じないとの結果が得られた。CDF計算値ではFPガス内圧による被覆管クリープが支配的で、FCMIによる接触圧はFPガス内圧に比較して小さい値であることがわかった。

4.2 評価に用いた燃料挙動解析コード（SIMPIN）の説明

4.2.1 計算モデルの概要及び計算体系

SIMPIN（SIMple empirical fuel PIN performance code）コードは、FBR混合酸化物（MOX）燃料の高燃焼領域* における定常照射時のプレナムガス圧及びFCMIを計算する。そして、計算モデルはCDF及び被覆管応力に対して支配的な挙動のみを扱っている。

計算体系は図4.2-1に示すように径方向に、被覆管、ペレットとも各々1メッシュをとり、軸方向に5メッシュ（上端メッシュは炉心上端点）にとった。温度点としては、被覆管内外面、ペレット表面及び中心であり、被覆管肉厚中心温度を入力データとして与える。照射初期のペレット温度に主として影響するペレットのクラック及びリロケーション等は考慮しない。

高燃焼度試験要素のCDF及びFCMI接触圧への依存度が小さい挙動として寿

* 計算結果の適用範囲は約10at%の燃焼度以上。

命前期のFPガス内圧、ペレットガススエリングがあげられる。一方、CDF及びFCMI挙動に対して、支配的挙動として、寿命後期の固体FPによるペレットスエリング及び被覆管温度があげられる。SIMPINコードでは、ペレット・被覆管のギャップ閉塞以後のペレット固体スエリング、ペレットクリープ、被覆管クリープ、被覆管スエリングの力学バランスを解いている。被覆管の周方向応力 (σ_{θ}) は以下に示す薄肉近似で計算する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{(P_1 + P_2 - P_0) \times R}{t}$$

ここで P_1 : プレナム圧
 P_2 : PCMIによる接触圧
 P_0 : 冷却材圧力
 R : 被覆管平均半径
 t : 被覆管肉厚

$$t = t_0 - t_1 - t_2$$

ここで t_0 : 製造時データ
 t_1 : Naによる外面腐食量
 t_2 : FPによる内面腐食量

軸力 σ_z は以下の式で計算する。

$$\sigma_z = 0.5 \sigma_{\theta}$$

4.2.2 検 証

SIMPINコードは、CDF及びFCMI挙動の支配的要因のみを抽出し計算しているため、詳細挙動解析コード（米国DOE向けにウェスティングハウス社が開発したLIFE-IV¹⁾）で検証確認した。²⁾

(1) 検証例 (1)

20% CWSUS 316材を被覆管に用い、線出力415w/cmで3年照射し、ピーク燃焼度15at%となる検証例の入力を表4.2-1に示す。そして、SIMPIN及びLIFE-IVコードの計算結果の比較をCDFと被覆管全クリープ歪について図4.2-2に示す。最大被覆管表面温度に対し、CDF10⁻¹及び全クリープ歪1.5%となる。ピーク燃焼度をLIFE-IVは実線で、SIMPINは●印で

ロットしている。SIMPINとLIFE-IVの計算結果は良く一致していることがわかる。

尚、本検証では線出力履歴は、BOLで1に対して、EOL(2172実効照射日数E.F.P.D)で0.88に相対的に減少すると設定している。線出力履歴を図4.2-3に示す。(2) 検証例(2)

酸化物分散強化型(ODS)フェライト網を被覆管に用い、線出力310w/cmで6年運転し、ピーク燃焼度18at%となるケースの入力を表4.2-2に示す。CDFと被覆管全クリープ歪について、図4.2-4にSIMPINとLIFE-IVの計算結果の比較を示す。

このように、物性値を取り換えてもSIMPINとLIFEの計算結果は高燃焼度照射末期で良く一致している。検証例(1)及び(2)とも高燃焼度時のCDFは、SIMPINコードの方がLIFE-IVよりも保守側の値を示している。

尚、SIMPINコードを要素平均燃焼度20at%(ピークでは24at%)以上に適用した場合は、検証例(1)(2)に基づいてさらに高燃焼度側に外挿計算を実施したことになる。

4.3 評価条件

入力データを表4.3-1に示す。パラメータは、被覆管材質、ペレット密度及び照射条件(Mk-II炉心及びMk-III炉心)である。ペレット及び被覆管の形状寸法データ及び重量データは製造時の実測データ³⁾を用いた。尚、タグガスの組成の差違は計算結果に有意な影響を与えないことを確認し、考慮しないことにした。

① 線出力

MAGIコードの計算値に基づき、線出力履歴の入力データを作成した。ピーク線出力の時間履歴を相対値³⁾で図4.3-1に示しそのデジタル値を表4.3-3に示す。

「常陽」Mk-IIの15サイクルより照射し、36サイクルから、Mk-IIIサイクル(140 MW)に入る場合と、そのままMk-IIサイクル(100 MW)照射の場合について計算した。線出力の低下、すなわち反応度の低下は、17~20サイクルの線出力低

下割合の平均をとった。* 36サイクル以降のMk-Ⅲ炉心のケースは、Mk-Ⅱ継続サイクルの場合の線出力及び高速中性子束に1.25を乗じて計算した。

線出力の軸方向分布（相対比）を図4. 3-2に示した。この相対的な軸方向分布は、照射により変化しないと仮定した。また、表4. 3-4及び表4. 3-5に15～20サイクルの線出力デジタル値を示す。

② 中性子フラックス分布

照射サイクル初期（BOC）及び末期（EOC）の軸方向位置における相対的な中性子束分布を15サイクルから20サイクルについて、図4. 3-3から図4. 3-13に示す。

21サイクル以降は、15サイクルから20サイクルの平均値を用いた。×印のデータ³⁾を滑らかな曲線で結び、▲印の点をSIMPINコードの入力データとした。

表4. 3-6に中性子フラックス軸方向分布のデジタル値を示す。

尚、×印の計算結果は、MAGIコードによる計算値である。

③ 被覆管温度

被覆管肉厚中心温度の軸方向分布は、図4. 3-14に示すように、基準分布³⁾（×印）に対して、そのプロファイルが相似形となるように、SIMPINコードの入力データ（▲印）を設定した。最大被覆管肉厚中心温度は、炉心上端において、最大線出力が360w/cmのケースでは610℃に、415w/cmのケースでは646℃と設定した。³⁾ デジタル値を表4. 3-7及び表4. 3-8に示す。

* 15、16サイクルは特殊な場合として、平均操作よりはずした。線出力履歴の燃焼による減少割合は検証例(1)に比べて、非常に大きい設定となっている。

4.4 使用物性値

以下に示す設計ベースの物性式を用いて計算を実施した。

4.4-1 SUS316相当鋼の耐放射線データ

(1) スエリング

$$\left[\frac{\Delta D}{D} \right]_{cw} = 3 \times 10^{-35} (\phi t)^{1.5} (4.028 - 3.712 \times 10^{-2} T + 1.0145 \times 10^{-4} T^2 - 7.879 \times 10^{-8} T^3) \quad \text{①式}$$

(WARD-4135-11(1970))

ここで $\left[\frac{\Delta D}{D} \right]_{cw}$: 20%冷間加工材の径スエリング (%)
 ϕt : 中性子照射量 (n/cm²) [E ≥ 0.1 MeV]
 T : 温度 (°C)

(2) 照射クリープ

$$\left[\frac{\Delta D}{D} \right] = 10^{-4} \sigma \left[0.67 F + 5.8 \times 10^4 \exp \left(- \frac{16000}{RT} \right) \left(F - 8.5 \tanh \left(\frac{F}{8.5} \right) \right) \right] \quad \text{②式}$$

(Gilbert, J. Nucl. Mat. 65(1977) 204-209による)

ここで $\left[\frac{\Delta D}{D} \right]$: 照射クリープ歪 (%)
 σ : 周方向応力 (MPa)
 F : 中性子照射量 (dpa)
 R : 気体定数 (cal/K · mol)
 T : 温度 (K)

4.4-2 改良オーステナイト鋼の耐放射線データ

(1) スエリング

$$\left[\frac{\Delta D}{D} \right] = \frac{1.25}{3} \cdot \exp \left\{ A(T - T_p)^2 \right\} \cdot \left[\phi t + \frac{1}{\alpha} \ln \right]$$

$$\left\{ \frac{1 + \exp(\alpha (\tau - \phi t))}{1 + \exp(\alpha \tau)} \right\}$$

————— ③式

ここで $\left[\frac{\Delta D}{D} \right]$: 改良オーステナイト鋼15Cr-20Ni-Ti-Nb(冷間加工材)
の径スエリング (%)

T : 温度 (°C)

ϕt : 中性子照射量 ($\times 10^{22}$ n/cm²、E \geq 0.1 MeV)

A : 定数 ($= -4.34 \times 10^{-5}$)

T_p : 定数 (=450 °C)

α : 定数 ($= 0.75 (10^{22} \text{ n/cm}^2)^{-1}$)

τ : 定数 ($= 19 (10^{22} \text{ n/cm}^2)$)

(2) 照射クリープ

SUS316相当鋼の評価式と同じ

4.4-3 SUS316相当鋼及び改良オーステナイト鋼の耐腐食性データ

(1) Naによる腐食データ

$$C_{Na} = \sum \frac{t_i}{8760} \cdot CR_i$$

t_i : 接液面温度T_iにおける使用時間 (h)

CR_i : 接液面温度T_iに対して定める腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{年}$)

CR_i = $1.75 \times 10^9 \exp(-1.647 \times 10^4 / T)$ (Na流速 3.2m/s)

T_i : 接液面温度 (K)

CR_i = $1.79 \times 10^9 \exp(-1.647 \times 10^4 / T_i)$ (Na流速 6.6m/s)

(2) FP等による内面腐食 (全要素共通)

480 < T < 600

0 < B < 15 C_{FP} = 35 (μm)

15 < B < 60 C_{FP} = $1.2 \times 10^{-2} \cdot (T - 480) \cdot (B - 15) \div 35$ (μm)

$$60 < B < 140 \quad C_{FP} = 1.2 \times 10^{-2} \cdot (T - 480) \cdot (60 - 15) \div 35 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$600 < T < 700$$

$$0 < B < 15 \quad C_{FP} = 35 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$15 < B < 60 \quad C_{FP} = 1.2 \times 10^{-2} \cdot (600 - 480) \cdot (B - 15) \div 35 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$60 < B < 140 \quad C_{FP} = 100 \text{ (}\mu\text{m)}$$

T : 被覆管内面温度 (°C)

B : 燃 焼 度 (GWd/t)

4.5 計 算 結 果

(1) 解析ケース No.1 (360w/cm)

解析ケースNo.1 (表4.3-2)は、SUS316相当鋼製被覆管で最大線出力360w/cm、ペレット密度85%TD、36サイクル以降もMk-II炉心を継続するケースである。47000時間照射後(45サイクル)の最大局所燃焼度は28at%、最大高速中性子照射量は 2.7×10^{23} n/cmとなる。これらの軸方向分布を図4.5-1、図4.5-2に示す。計算結果としての被覆管スエリング、照射クリープ、FCMI接触圧、CDF値を表4.5-1及び図4.5-3から図4.5-6に示す。FPガスによるプレナム内圧は82kgf/cm²となる。FCMI接触圧は、炉心上端のみ5.7kgf/cm²であり、それより下方の軸方向ノードは、0.03kgf/cm²と非常に小さな値となっている。

この理由は被覆管のクリープ及びスエリングにより、内径が増加し、ペレットの固体FPによるスエリングによるFCMIを緩和しているためである。CDFの値は、軸方向で炉心上端が相対的に最も大きな値となり、 0.7×10^{-4} となった。これは、照射初期の被覆管温度610°Cが、照射末期には、447°Cまで低下することによる。被覆管スエリングの最大値はノード4で3.8% ($\Delta D/D$)、周方向クリープ(照射及び熱)の最大値は、炉心中心(ノード3)で27%となった。

計算により、最大局所燃焼度が28at%となっても、試験要素は、CDFの観点からは、破損は生じないとの結果が得られた。また、FCMI接触圧は、プレナムの内圧に比較して、小さい結果が得られた。

(2) 解析ケース No. 2 (360w/cm)

解析ケースNo. 2は、No. 1と同様の計算条件で、36サイクル以降はMk-III炉心となり、線出力及び中性子束がそれまでの1.25倍となるケースである。47000時間照射後(45サイクル)の最大局所燃焼度は29at%、最大高速中性子照射量は、 3.0×10^{23} となる。計算結果を表4.5-2に示す。FPガスによるプレナム内圧は、83kgf/cm²となった。FCMI接触圧は炉心上端で2.7kgf/cm²、他のノードは、0.01kgf/cm²と小さな値となった。解析ケースNo. 1よりも、FCMI接触圧はいくぶん小さくなっている。これは、被覆管温度がMk-IIIに移行し、上昇した分だけ、被覆管クリープ及びスエリングが増加し、内径が相対的に大きくなりFCMIが緩和されたためである。炉心上端のCDFの値は、解析ケースNo. 1とほぼ同じ値 0.7×10^{-4} をとっている。サイクル36でMk-III炉心に移行する時に線出力の相対値は、最大線出力360w/cmを1.とすると、0.52まで低下しており、1.25倍に増加する効果はCDFに有意な影響を与えていない。被覆管スエリングはノード4で最大4.6%、周方向クリープ(照射及び熱)は炉心中央で最大34%の結果が得られた。

解析ケースNo. 1と同様に解析ケースNo. 2でも燃焼度29at%までCDFの観点からは破損しないとの結果が得られた。

(3) 解析ケース No. 3 (410w/cm)

解析ケースNo. 3は、SUS316相当鋼製被覆管で最大線出力410w/cm、ペレット密度93.5%である。34000時間照射後(35サイクル終了時、Mk-III移行直前)の最大局所燃焼度は、28at%、最大高速中性子照射量は 2.8×10^{23} となる。計算結果としての被覆管スエリング、照射クリープ、FCMI接触圧、CDF値を表4.5-3に示す。FPガスによるプレナム内圧は83kgf/cm²となった。

FCMI接触圧は、炉心上端で7.8kgf/cm²であり、それより下方の軸方向ノードは0.04kgf/cm²となった。これらの値は解析ケースNo. 1より大きい。これは線出力が360w/cmから410w/cmに増加しているからである。炉心上端のCDF値は、 0.7×10^{-3} である。解析ケースNo. 1の計算結果は47000時間後に 0.7×10^{-4} であるから、34000時間で、約10倍のCDF値となる。これは、線出力が360w/cmから410w/cmに増加したためである。被覆管スエリングはノード4で最大5.0%、

周方向クリープ（照射及び熱）は炉心中心で最大29%の結果が得られた。

Mk-Ⅲ炉心に移行する直前（最大局所燃焼度 28at%）まで解析ケースNo.3の被覆管はCDFの観点からは破損しないとの結果が得られた。

(4) 解析ケース No.4 (410w/cm)

解析ケースNo.4は改良オーステナイト鋼製被覆管で、最大線出力 410w/cm、ペレット密度93.5である。30000時間照射後の最大局所燃焼度は26at%、最大高速中性子照射量 2.6×10^{23} n/cm²となる。計算結果としての被覆管スエリング、周方向クリープ、FCMI接触圧、CDF値を表4.5-4に示す。FPガスによるプレナム内圧は、78kgf/cm²となった。FCMI接触圧は、30000時間で8.5kgf/cm²で34000時間の解析ケース3（SUS316相当鋼）の7.8kgf/cm²を上回っている。

これは、改良オーステナイト鋼のスエリングがSUS316鋼のスエリングより小さく、炉心上端でのFCMIが相対的に強まるからである。それでも、プレナム内圧よりFCMI接触圧の方が約1/10程度小さい。CDFの最大値は炉心上端で 0.7×10^{-4} となった。被覆管スエリングは炉心中心で最大2.5%、周方向クリープ（照射及び熱）は炉心中心で最大24%の結果が得られた。

以上より、定常照射において最大局所燃焼度26at%まで、解析ケースNo.4の被覆管はCDFの観点からは破損しないとの結果が得られた。

4.6 結論

高燃焼度試験における被覆管破損への主要因は、プレナムガス内圧であり、FCMIは比較的弱く発生することがわかった。被覆管材質、照射条件にかかわらず、本評価条件においてCDFの観点からは局所最大燃焼度26at%まで被覆管破損を生じないとの結果が得られた。

4.7 今後の課題

被覆管外径はクリープ歪及びスエリングで約30%程増加するので冷却材流路の減少及び試験要素の曲りによる高温点の発生の可能性がある。

表4. 2-1 検証例(1)の主な入力データ

項 目	入 力 デ ー タ
被 覆 管 材 質	20%CW、 SUS316 (+Ti)
ピーク線出力 (ピーク燃焼度)	415W/cm 15at%
被 覆 管 外 径	7.50mm
被 覆 管 内 径	6.70mm
ペレット外径	6.54mm
ペレット密度	92%TD
Pu富化度	15.4wt%
炉 心 長	1000mm
下部プレナム長さ	950mm
照 射 期 間	3 年

表4. 2-2 検証例(2)の主な入力データ

項 目	入 力 デ ー タ
被 覆 管 材 質	酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼
ピーク線出力 (ピーク燃焼度	310W/cm 18at%)
被 覆 管 外 径	7.50mm
被 覆 管 内 径	6.70mm
ペレット外径	6.54mm
ペレット密度	92%TD
Pu 富化度	15.3wt%
炉 心 長	1200mm
下部プレナム長さ	1300mm
照 射 期 間	6 年

表4.3-1 入 力 デ ー タ

項 目	入 力 デ ー タ
プレナム体積	15.0cm ³
炉心燃料長	550mm
ペレット外直径	5.4mm
被覆管内直径	5.56mm
被覆管肉厚	0.47mm
充填Heガス	常温、1atm分
最大線出力	360w/cm、415w/cm
冷却材入口温度	370℃ 一定
ペレット密度	85%TD、93.5%TD
Pu 富化度	26.43wt%、 15.56wt%
O/M 比	1.97、1.98 (-)
U ²³⁵ 富化度	8.13wt% 22.93wt%
ペレット重量比	9.41g/cm ³ 10.30g/cm ³
線出力分布	図4.3-1、図4.3-2、 表4.3-3~表4.3-5
高速中性子束分布	図4.3-3~図4.3-13 表4.3-6

表4.3-2 解析ケース一覧

解析ケース No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
要素番号	60 MS 60 MK	同 左	57MK4 58MK6	60AK2
36サイクル以降の 照射条件	Mk-II	Mk-III	—	—
最大線出力 (w/cm)	360	360	415	415
最大被覆管肉厚 中心温度(°C)	610	610	646	464
被覆管材質	SUS316 相当鋼	同 左	同 左	改良オーステ ナイト鋼
ペレット密度 (%TD)	85	85	93.5	93.5
Pu 富化度 (wt%)	26.43	26.43	15.56	15.56
O / M 比 (-)	1.97	1.97	1.98	1.98
²³⁵ U 濃縮度 (wt%)	8.13	8.13	22.93	22.93

表4.3-3 線出力の時刻履歴

サイクル数		時刻 (E.F.P.D)	ピーク線出力 相 対 比	平均線出力 (w/cm)	
				低線出力	高線出力
15	BOC	69.40	1.00	302.	348.
	EOC		0.989	302.	352.
16	BOC	100.99	0.988	300.	345.
	EOC		0.983	301.	347.
17	BOC	169.34	0.983	298.	344.
	EOC		0.971	297.	343.
18	BOC	237.70	0.952	288.	332.
	EOC		0.941	287.	331.
19	BOC	306.40	0.919	276.	319.
	EOC		0.909	278.	320.
20	BOC	346.39	0.900	275.	337.
	EOC		0.895	273.	315.
35 (Mk-II)	BOC	1396.39	0.535	162.	187.
	EOC		0.524	158.	182.
35 (Mk-III)	BOC	1396.39	0.669	202.	233.
	EOC		0.655	198.	228.

表4.3-4 線出力の軸方向分布

(60MS, 60Mk, 最大線出力 360w/cm)

(w/cm)

照射サイクル	軸ノード	炉心中心				
		1.	2.	3.	4.	5.
15	BOC	220.5	315.7	360.0	343.6	200.8
15	EOC	236.7	320.8	356.0	335.3	198.5
16	BOC	226.2	317.5	355.7	337.0	198.4
16	EOC	238.4	320.3	353.9	332.8	197.4
17	BOC	221.7	315.3	353.9	336.9	197.4
17	EOC	239.8	319.7	349.6	328.0	195.0
18	BOC	215.0	301.9	342.7	326.8	191.1
18	EOC	227.1	307.7	338.8	318.8	188.9
19	BOC	202.1	287.4	330.8	315.9	184.5
19	EOC	220.4	298.7	327.2	307.2	182.5
20	BOC	206.2	297.2	324.0	308.1	180.7
20	EOC	214.1	293.2	322.2	303.5	179.7

表4. 3-5 線出力の軸方向分布
 (57Mk4, 58Mk6, 60Ak2, 最大線出力 415w/cm)
 (w/cm)

照射サイクル	軸ノード	炉心中心				
		1.	2.	3.	4.	5.
15	BOC	254.2	363.9	415.0	396.1	231.4
15	EOC	277.2	375.6	410.4	392.6	228.9
16	BOC	260.7	366.0	410.0	388.4	228.6
16	EOC	274.8	369.2	407.9	383.6	227.5
17	BOC	255.5	363.5	407.9	388.3	227.5
17	EOC	276.4	368.6	403.0	378.1	224.7
18	BOC	247.8	348.1	395.1	376.8	220.3
18	EOC	261.8	354.6	390.5	367.4	217.8
19	BOC	233.0	331.4	381.4	364.2	212.7
19	EOC	254.0	344.3	377.2	354.2	210.4
20	BOC	237.7	342.6	373.5	355.2	208.3
20	EOC	246.8	338.0	371.4	349.8	207.1

表4. 3-6 高速中性子束の軸方向分布

($\times 10^{15}$ n/cm²・s)

照 射 サイクル	軸ノード	1.	2.	炉心中心	4.	5. 炉心上端
	平均 中性子束			3.		
15 BOC	1. 8 8	1. 3 7 4	1. 9 6 7	2. 2 4 3	2. 1 4 1	1. 3 2 3
15 EOC	1. 9 1 3	1. 4 9 8	2. 0 3 0	2. 2 5 3	2. 1 2 2	1. 3 1 6
16 BOC	1. 9 3 1	1. 4 3 9	2. 0 2 0	2. 2 6 3	2. 1 4 4	1. 3 1 9
16 EOC	1. 9 3 1	1. 5 2 7	2. 0 5 2	2. 2 6 7	2. 1 3 2	1. 3 1 7
17 BOC	1. 9 5	1. 4 4 9	2. 0 6 1	2. 3 1 3	2. 2 0 2	1. 3 7 5
17 EOC	1. 9 7	1. 5 8 9	2. 1 1 9	2. 3 1 7	2. 1 7 4	1. 3 1 7
18 BOC	1. 9 4 3	1. 4 4 9	2. 0 3 5	2. 3 1 0	2. 2 0 3	1. 3 5 8
18 EOC	1. 9 6 6	1. 5 5 4	2. 1 0 5	2. 3 1 8	2. 1 8 1	1. 3 3 5
19 BOC	1. 9 1 1	1. 3 9 8	1. 9 8 8	2. 2 8 8	2. 1 8 5	1. 3 5 9
19 EOC	1. 9 7 4	1. 5 4 5	2. 0 9 4	2. 2 9 4	2. 1 5 4	1. 3 2 5
20 BOC	1. 9 3 7	1. 4 5 5	2. 0 9 7	2. 2 8 6	2. 1 7 4	1. 3 4 2
20 EOC	1. 9 4 1	1. 5 2 2	2. 0 8 4	2. 2 9 0	2. 1 5 7	1. 3 2 0

表4. 3-7 被覆管温度の軸方向分布
 (360 w/cm, 最大被覆管温度 610°C)

(°C)

照射サイクル	軸ノード	軸方向				
		1.	2.	炉心中心 3.	4.	炉心上端 5.
15	BOC	399.	450.	508.	560.	610.
15	EOC	399.	449.	506.	558.	607.
16	BOC	399.	449.	506.	558.	607.
16	EOC	399.	449.	506.	557.	606.
17	BOC	399.	449.	506.	557.	606.
17	EOC	398.	448.	504.	554.	603.
18	BOC	398.	446.	501.	551.	598.
18	EOC	397.	445.	500.	549.	596.
19	BOC	397.	444.	497.	545.	591.
19	EOC	396.	443.	495.	543.	588.
20	BOC	396.	442.	494.	541.	586.
20	EOC	396.	442.	494.	540.	585.

表4. 3-8 被覆管温度の軸方向分布

(4 1 5 w/cm, 最大被覆管温度 6 4 6 °C)

(°C)

照射サイクル \ 軸ノード	軸ノード				
	1.	2.	炉心中心 3.	4.	炉心上端 5.
15 BOC	4 1 3.	4 6 4.	5 2 8.	5 9 2.	6 4 6.
15 EOC	4 1 3.	4 6 3.	5 2 6.	5 9 0.	6 4 3.
16 BOC	4 1 3.	4 6 3.	5 2 6.	5 9 8.	6 4 3.
16 EOC	4 1 2.	4 6 2.	5 2 5.	5 8 8.	6 4 1.
17 BOC	4 1 2.	4 6 2.	5 2 5.	5 8 8.	6 4 1.
17 EOC	4 1 2.	4 6 1.	5 2 3.	5 8 6.	6 3 8.
18 BOC	4 1 1.	4 6 0.	5 2 0.	5 8 1.	6 3 3.
18 EOC	4 1 1.	4 5 9.	5 1 9.	5 7 9.	6 3 0.
19 BOC	4 1 0.	4 6 5.	5 1 5.	5 7 4.	6 2 4.
19 EOC	4 0 9.	4 5 5.	5 1 4.	5 7 2.	6 2 1.
20 BOC	4 0 9.	4 5 5.	5 1 2.	5 7 0.	6 1 8.
20 EOC	4 0 9.	4 5 4.	5 1 1.	5 6 9.	6 1 7.

表4. 5-1 軸方向各メッシュの破損時刻の計算結果 (CDF=1) (45サイクル開始後, 16h) 時刻 47441h

(解析 No.1, 360w/cm, Mk-II継続, SUS316相当鋼), (プレナム内圧 82.1kgf/cm²)

軸方向ノード 項目	ノード1	ノード2	ノード3	ノード4	ノード5 (炉心上端)
局所燃焼度 (at%)	20.56	25.64	27.75	25.66	15.48
高速中性子 照射量 (n/cm ²)	1.81×10^{23}	2.45×10^{23}	2.71×10^{23}	2.55×10^{23}	1.57×10^{23}
被覆管スエリング $\frac{\Delta D}{D}$ (%)	0.74	1.97	3.31	3.79	2.11
照射及び熱クリープ (周方向) %	15.9	23.2	27.4	26.8	23.6
F C M I 接触圧 (kgf/cm ²)	0.0281	0.0276	0.0270	0.0270	5.67
C D F 値	0.12×10^{-9}	0.29×10^{-8}	0.58×10^{-7}	0.65×10^{-6}	0.72×10^{-4}
照射初期の被覆管 温度 (°C)	399.	450.	508.	560.	610.
照射末期の被覆管 温度 (°C)	378.	395.	414.	431.	447.

表4. 5-2 軸方向各メッシュの破損時刻の計算結果 (CDF=1) (45サイクル開始後, 16h) 時刻 47441h

(解析 No.2, 360w/cm, Mk-IIIへ移行, SUS316相当鋼), (プレナム内圧 82.8kgf/cm²)

項目 \ 軸方向ノード	ノード1	ノード2	ノード3	ノード4	ノード5 (炉心上端)
局所燃焼度 (at%)	21.47	26.78	28.99	26.81	16.17
高速中性子 照射量 (n/cm ²)	1.995×10^{23}	2.714×10^{23}	2.993×10^{23}	2.818×10^{23}	1.732×10^{23}
被覆管スエリング $\frac{\Delta D}{D}$ (%)	0.889	2.389	4.03	4.59	2.52
照射及び熱クリープ (周方向) %	19.1	28.6	33.9	33.2	26.6
F C M I 接触圧 (kgf/cm ²)	0.0133	0.0131	0.0128	0.0128	2.69
C D F 値	0.24×10^{-9}	0.94×10^{-8}	0.23×10^{-6}	0.25×10^{-5}	0.69×10^{-4}
照射初期の被覆管 温度 (°C)	399.	450.	508.	560.	610.
照射末期の被覆管 温度 (°C)	379.	396.	415.	432.	448.

表4. 5-3 軸方向各メッシュの破損時刻の計算結果 (CDF=1) (35サイクル終了時) 時刻 33513h

(解析 No.3, 415w/cm, SUS316相当鋼), (プレナム内圧 83.3kgf/cm²)

軸方向ノード 項目	ノード1	ノード2	ノード3	ノード4	ノード5 (炉心上端)
局所燃焼度 (at%)	20.96	26.14	28.30	26.17	15.78
高速中性子 照射量 (n/cm ²)	1.809×10^{23}	2.495×10^{23}	2.779×10^{23}	2.629×10^{23}	1.606×10^{23}
被覆管スエリング (%) $\frac{\Delta D}{D}$	1.01	2.70	4.53	4.95	2.43
照射及び熱クリープ (周方向) %	16.1	24.3	29.3	28.6	28.3
F C M I 接触圧 (kgf/cm ²)	0.0389	0.0373	0.0373	0.0373	7.84
C D F 値	0.14×10^{-9}	0.23×10^{-8}	0.25×10^{-7}	0.19×10^{-6}	0.68×10^{-3}
照射初期の被覆管 温度 (°C)	413.	464.	528.	592.	646.
照射末期の被覆管 温度 (°C)	398.	431.	473.	515.	551.

表4. 5-4 軸方向各メッシュの破損時刻の計算結果 (CDF=1) (33サイクル開始後 1468)時間後) (時刻 29941h)

(解析 No.4, 415w/cm, 改良オーステナイト鋼) (プレナム内圧 78.3kgf/cm²)

項目 \ 軸方向ノード	ノード1	ノード2	ノード3	ノード4	ノード5 (炉心上端)
局所燃焼度 (at%)	19.43	24.23	26.22	24.25	14.62
高速中性子 照射量 (n/cm ²)	0.168×10^{24}	0.231×10^{24}	0.258×10^{24}	0.244×10^{24}	0.149×10^{24}
被覆管スエリング (%) $\frac{\Delta D}{D}$	0.090	1.73	2.48	1.33	0.009
照射及び熱クリープ (周方向) %	13.6	20.3	24.4	24.3	21.7
F C M I 接触圧 (kgf/cm ²)	0.0421	0.0405	0.0405	0.0405	8.50
C D F 値	0.62×10^{-10}	0.10×10^{-8}	0.13×10^{-7}	0.12×10^{-6}	0.73×10^{-4}
照射初期の被覆管 温度 (°C)	413.	464.	528.	592.	646.
照射末期の被覆管 温度 (°C)	401.	438.	483.	529.	568.

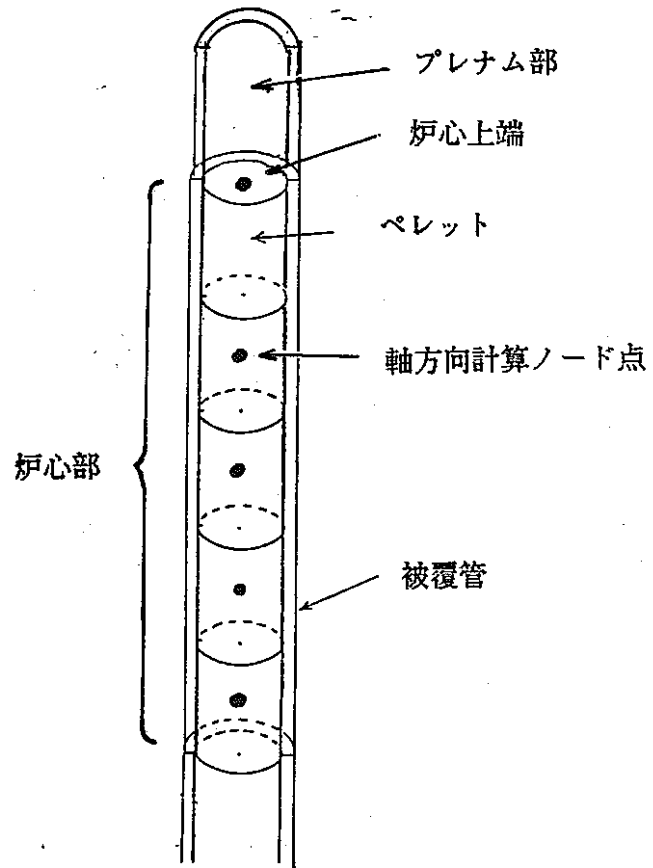


図4. 2-1 計算体系の概念図

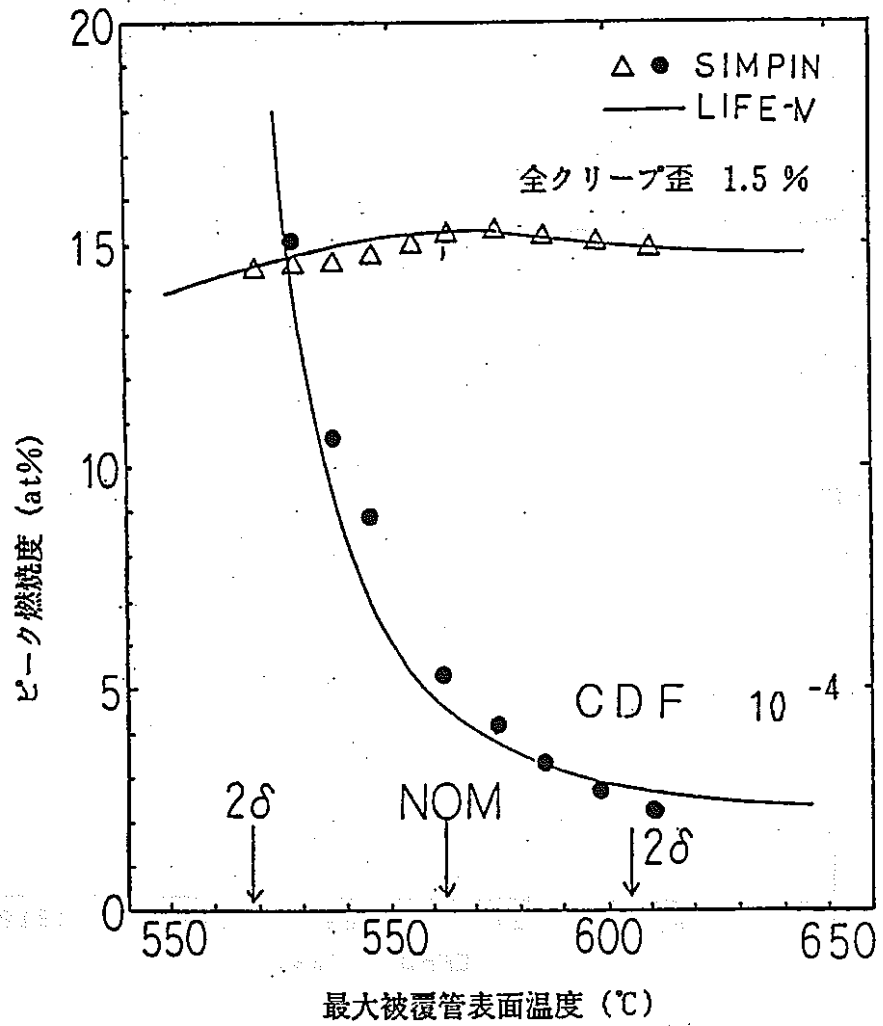


図4. 2-2 検証例 (1)

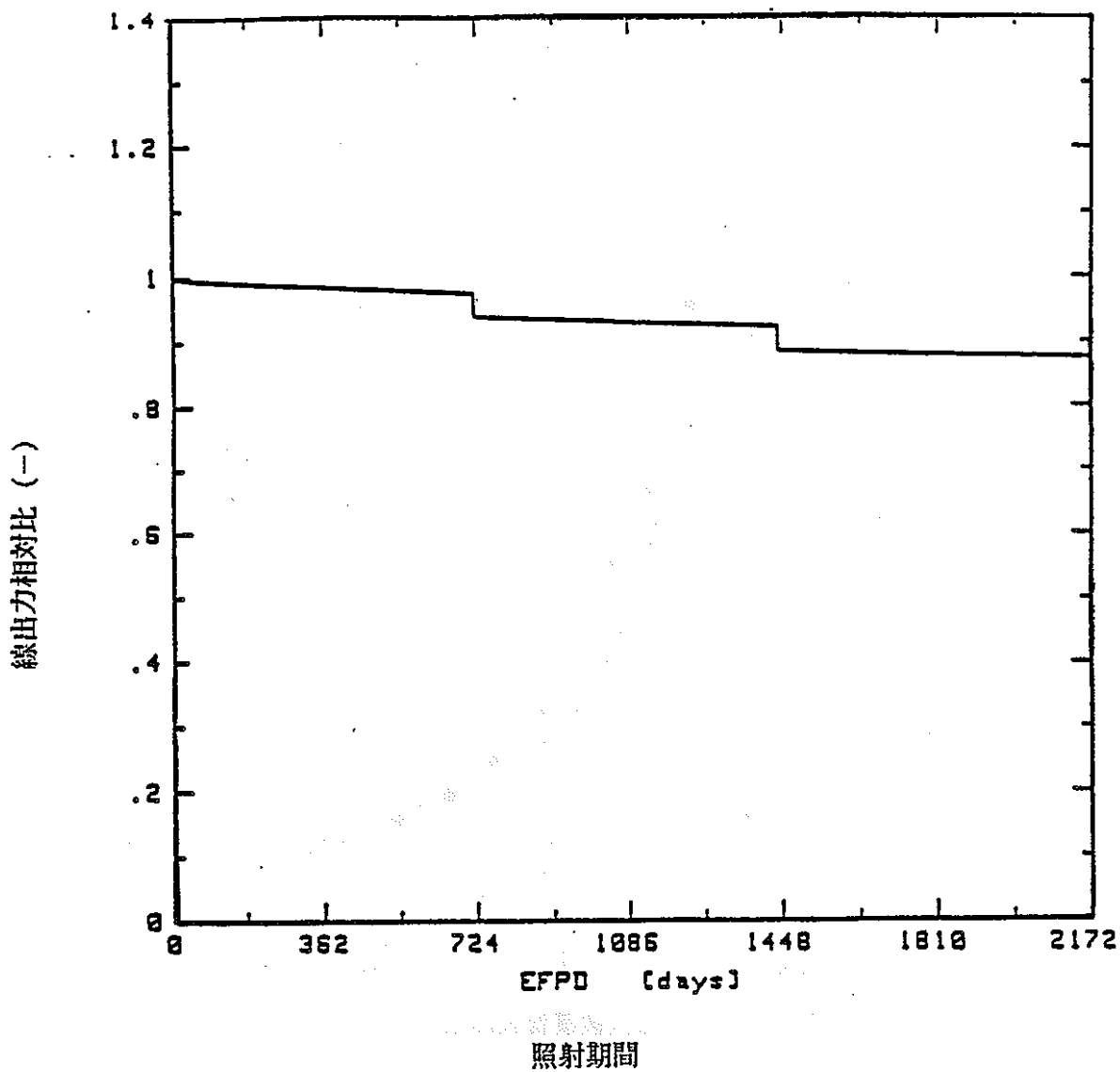


図4. 2-3 検証例(1)の線出力履歴

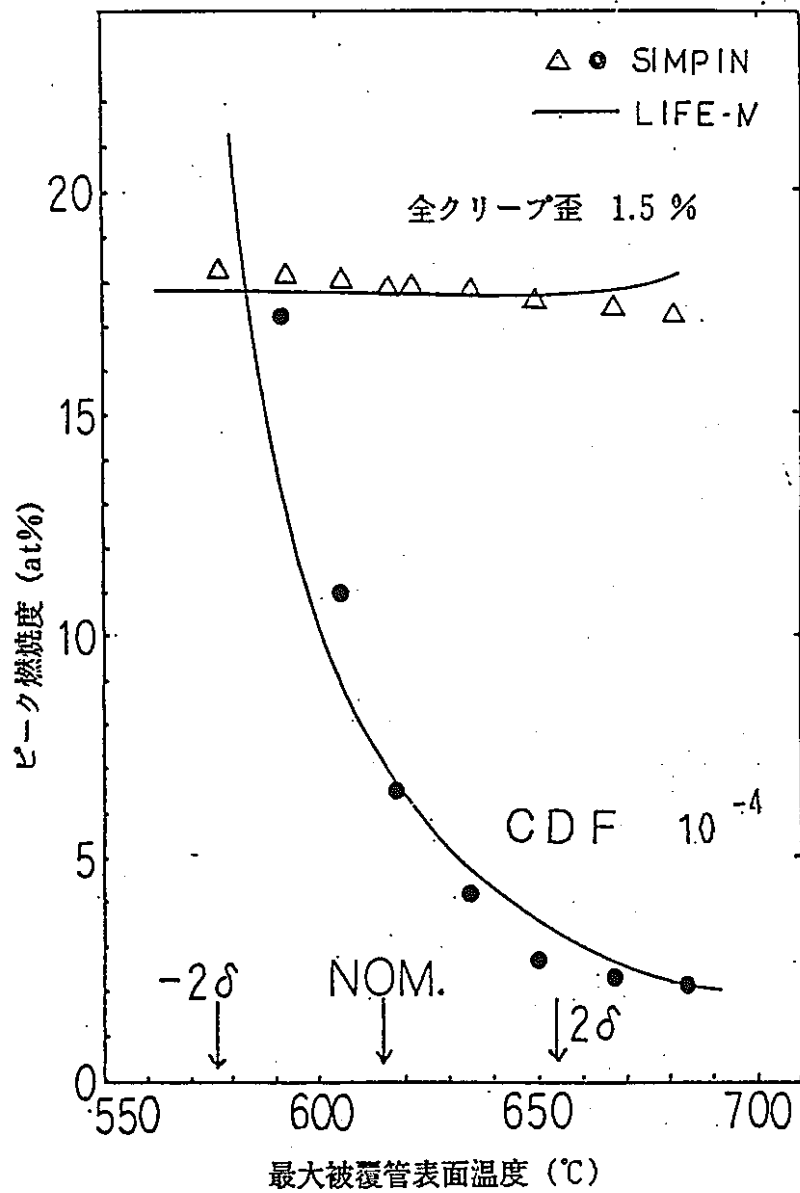


図4. 2-4 検証例 (2)

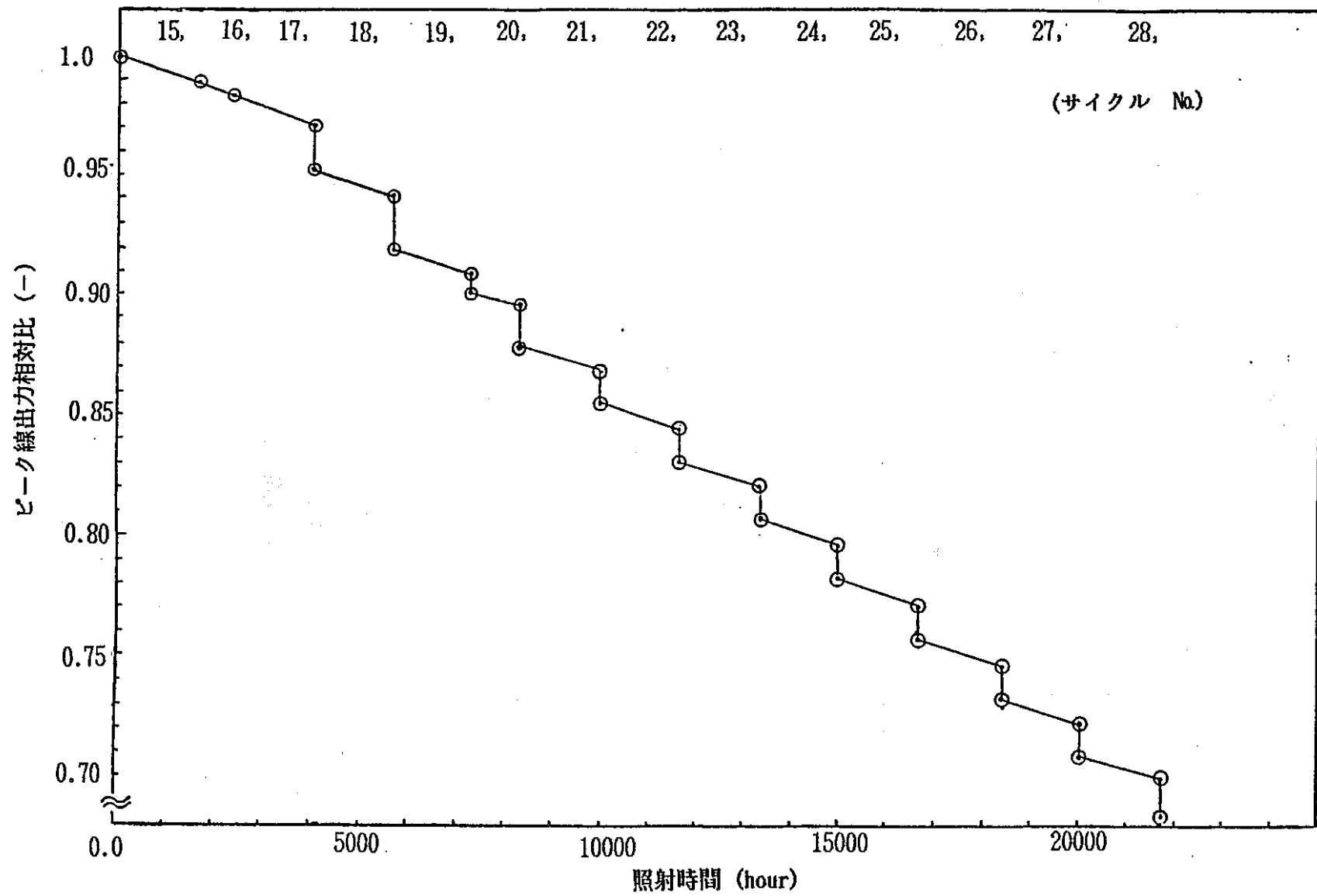


図4. 3-1 ピーク線出力の時間履歴 (各解析ケース共通)

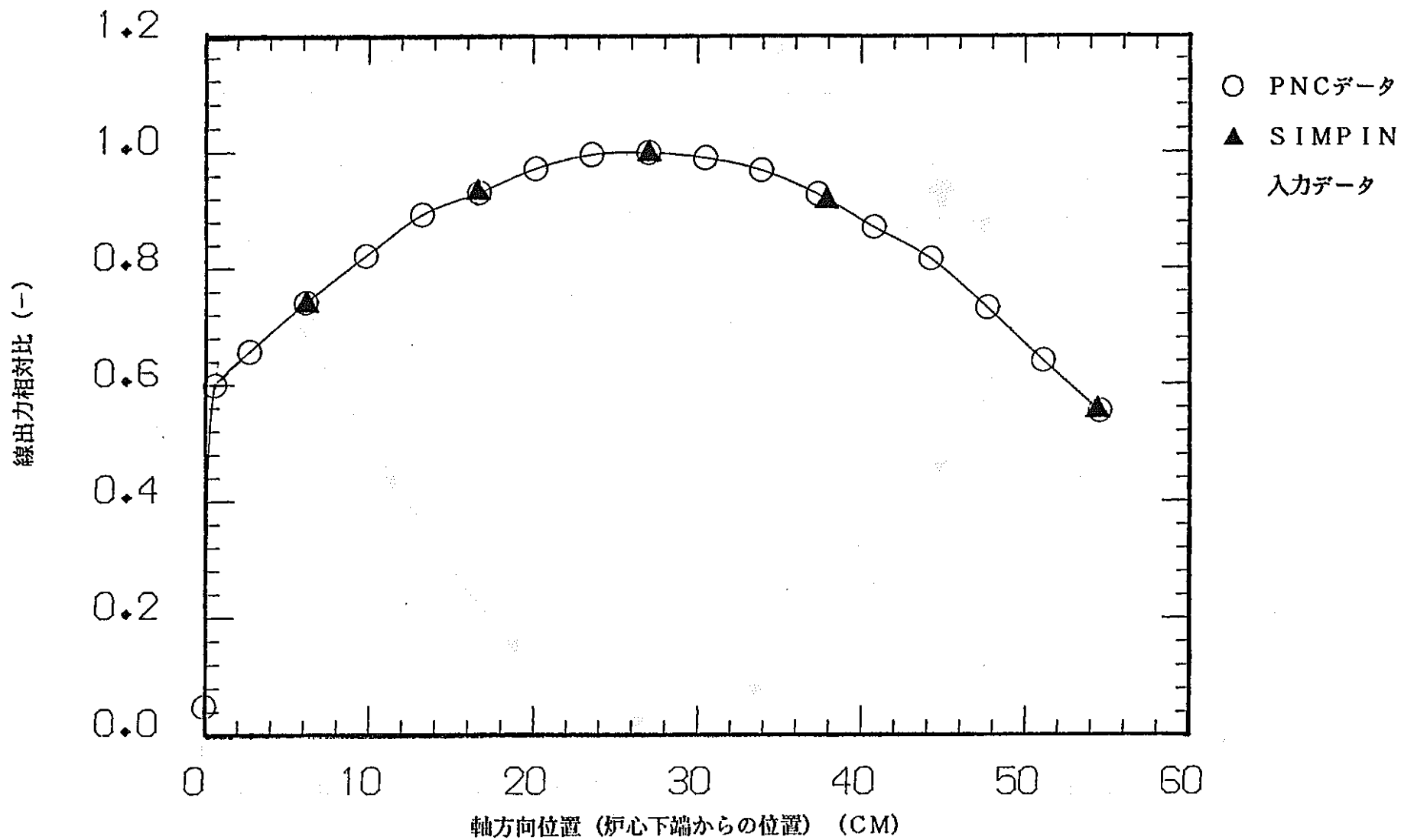


図4.3-2 軸方向出力分布 (相対比)

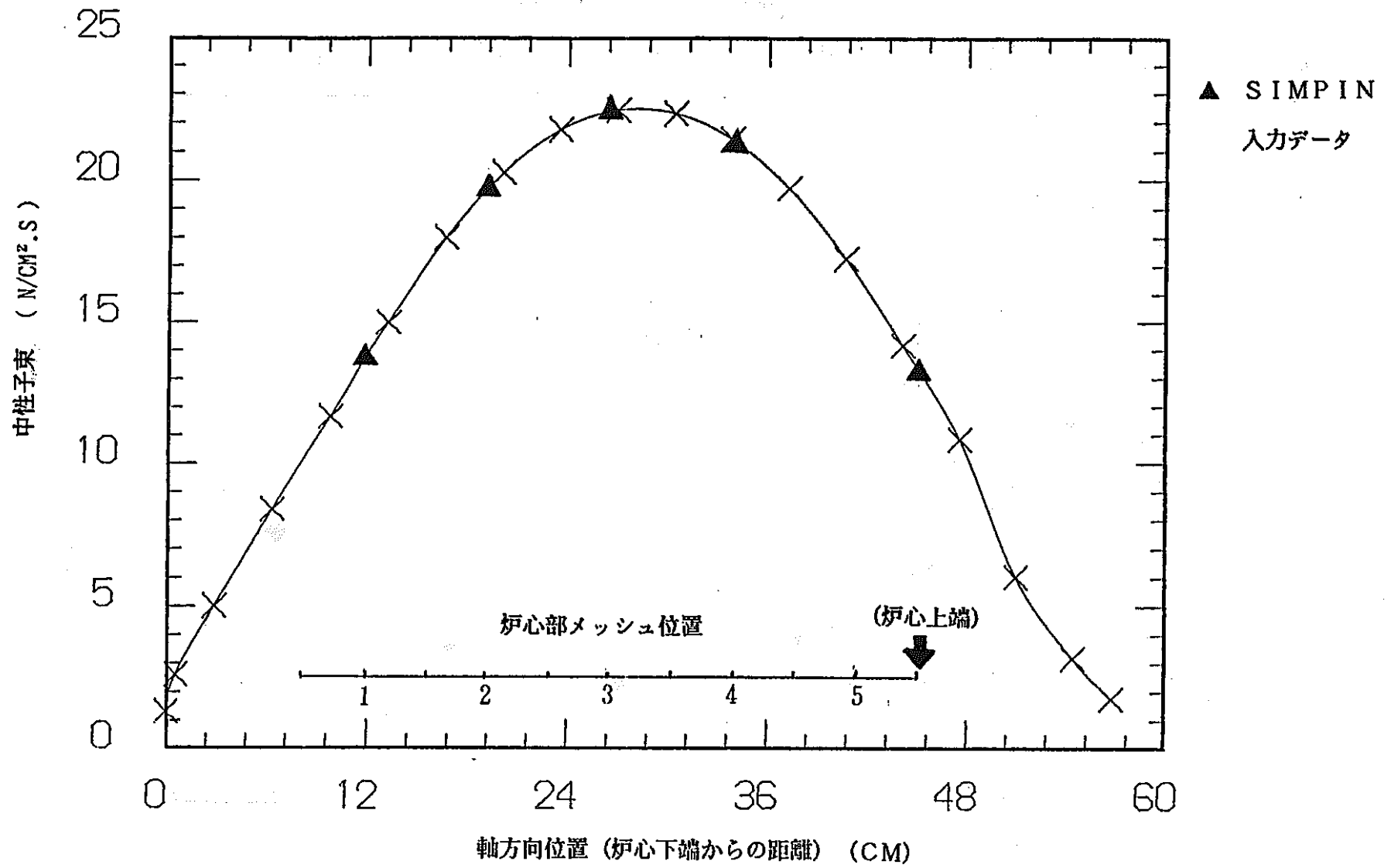


図4. 3-3 中性子束分布 (15サイクル BOC)

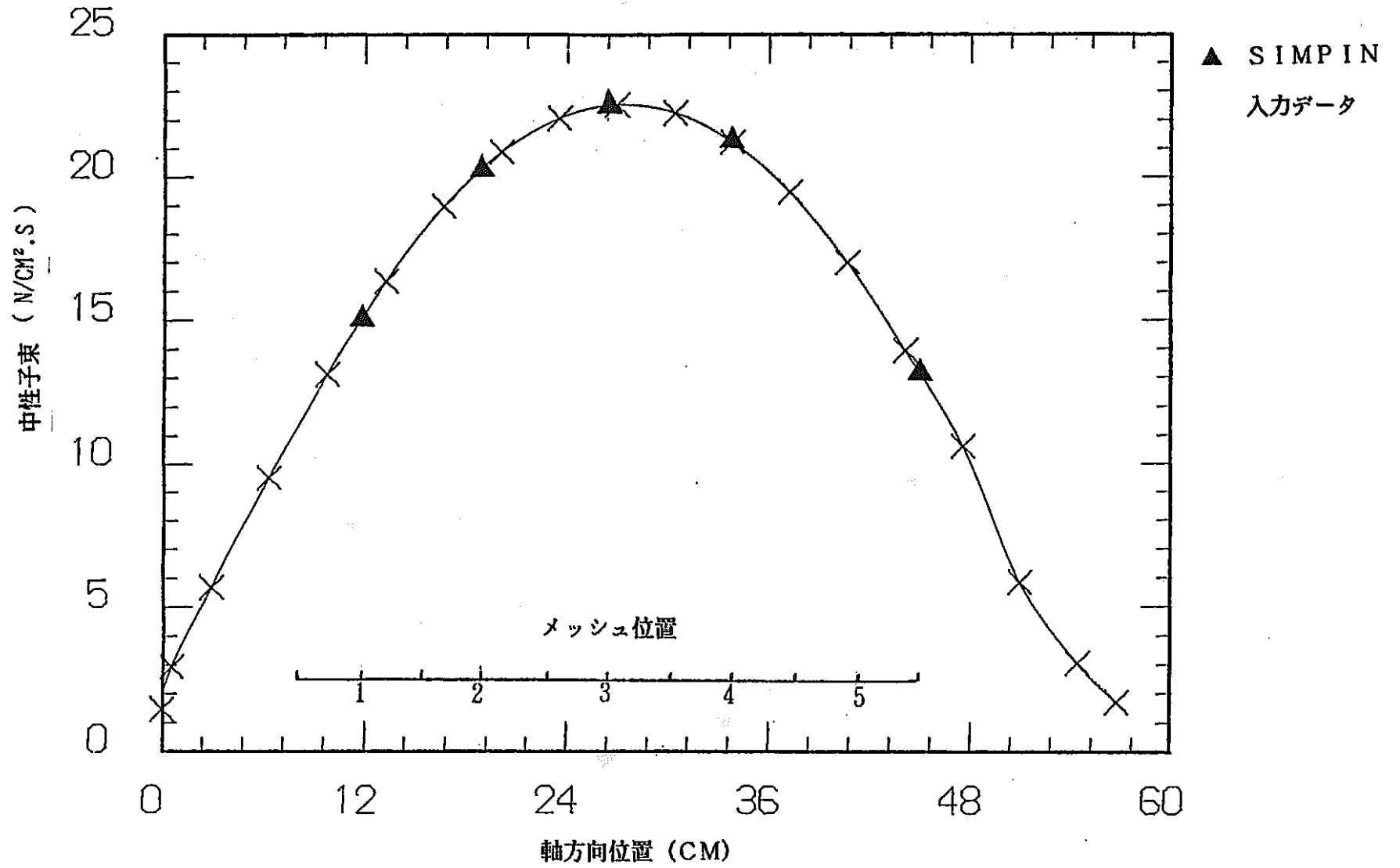


図4. 3-4 中性子束分布 (15サイクル EOC)

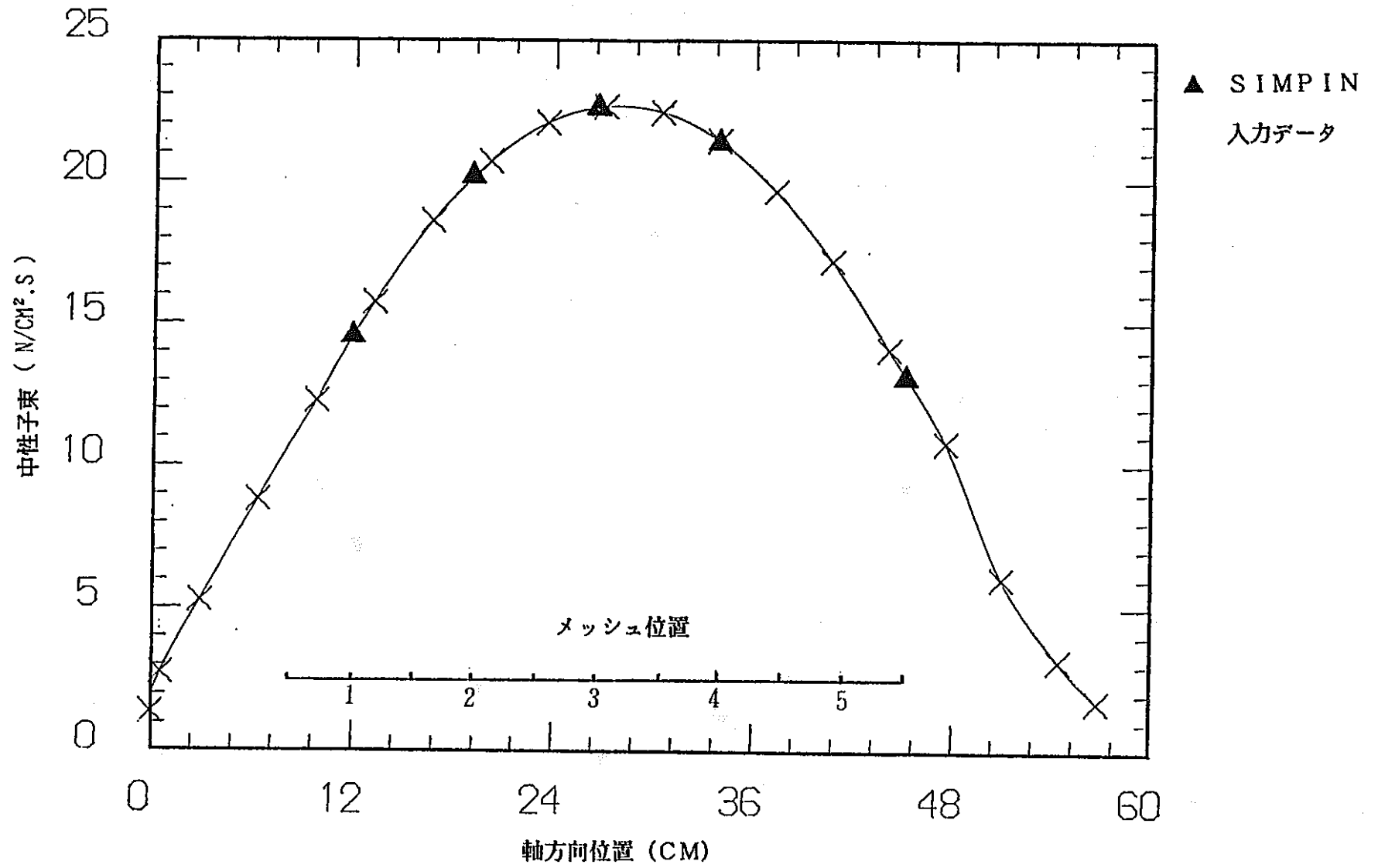


図4. 3-5 中性子束分布 (16サイクル BOC)

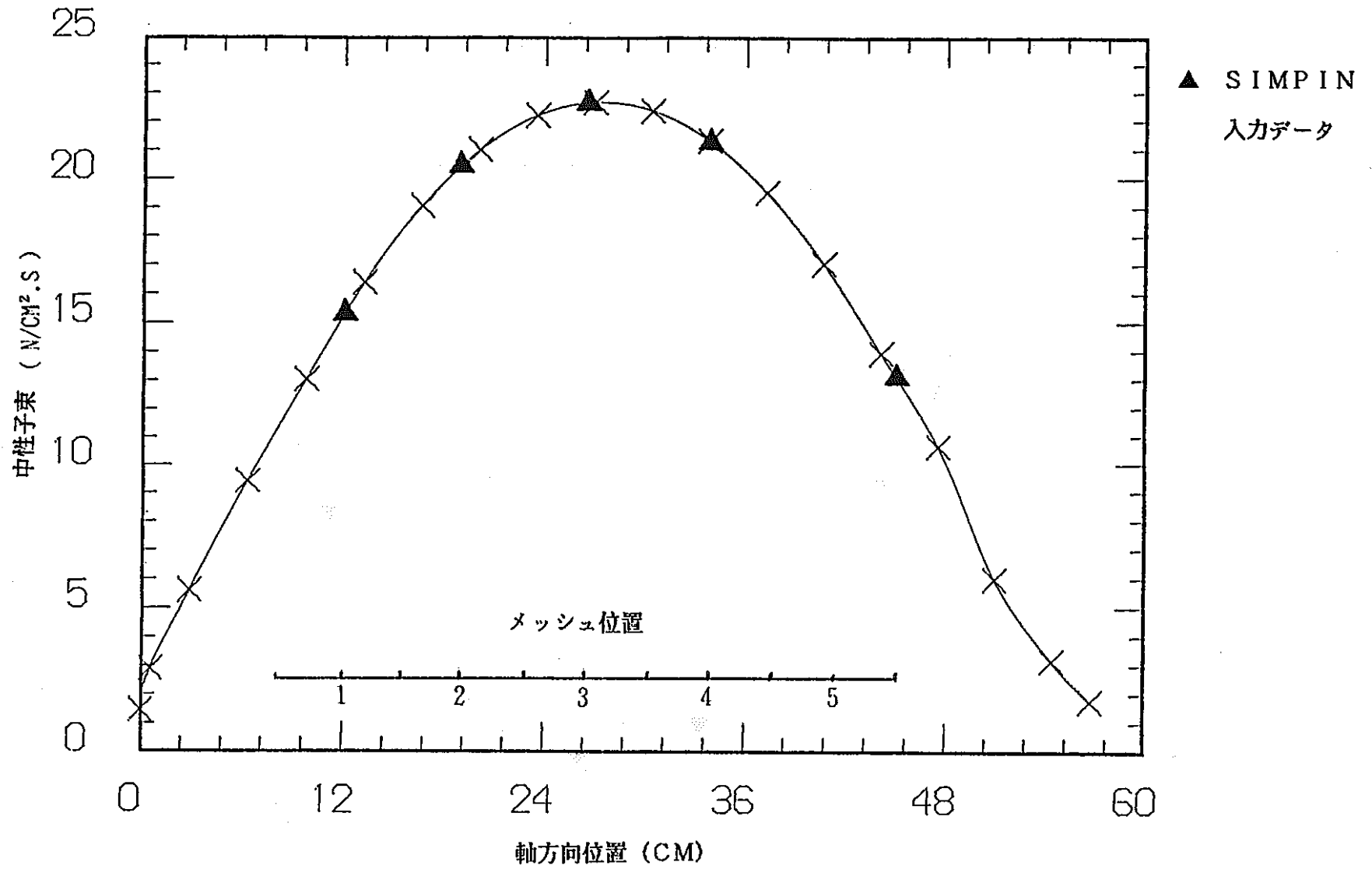


図4.3-6 中性子束分布 (16サイクル EOC)

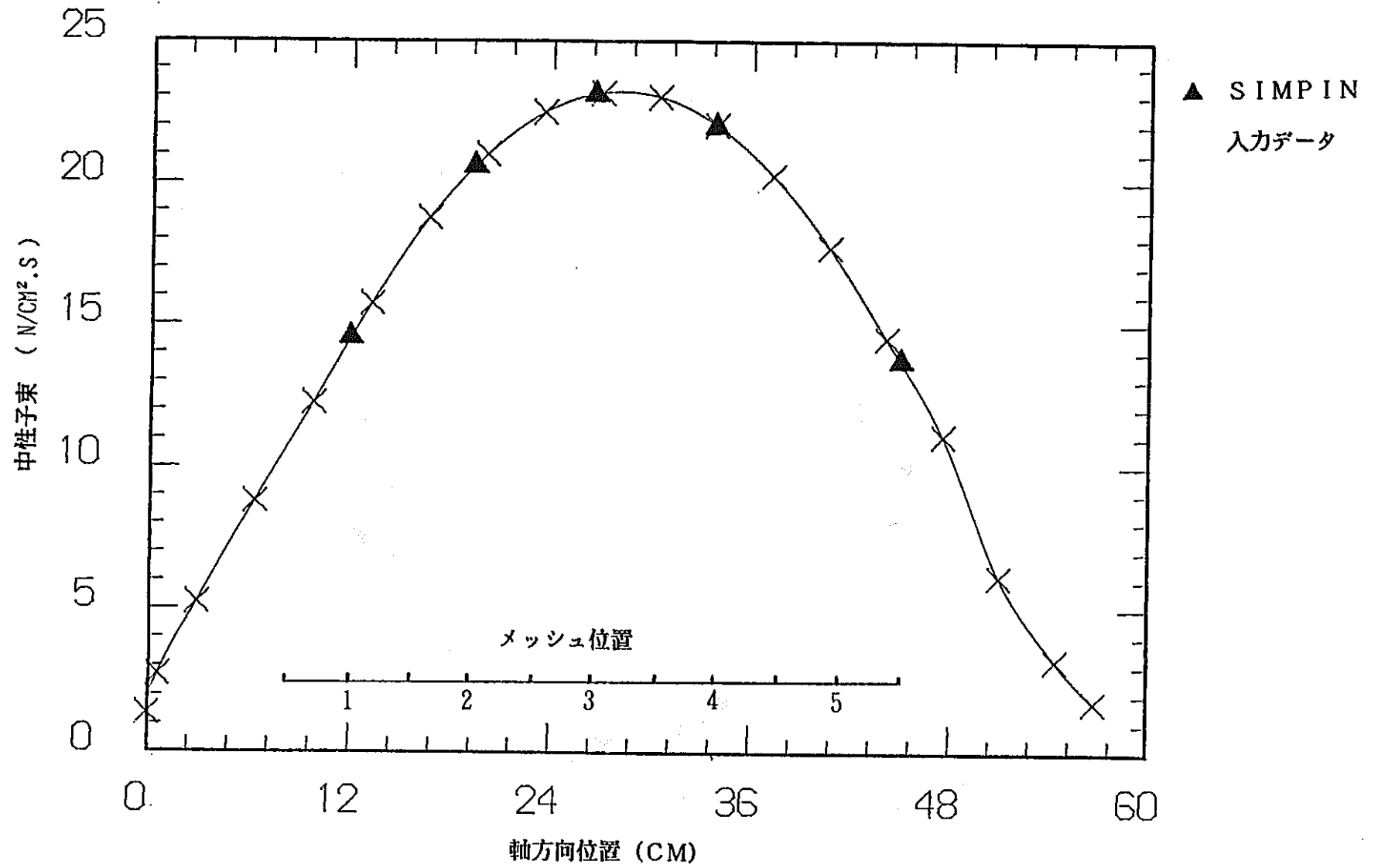


図4. 3-7 中性子束分布 (17サイクル BOC)

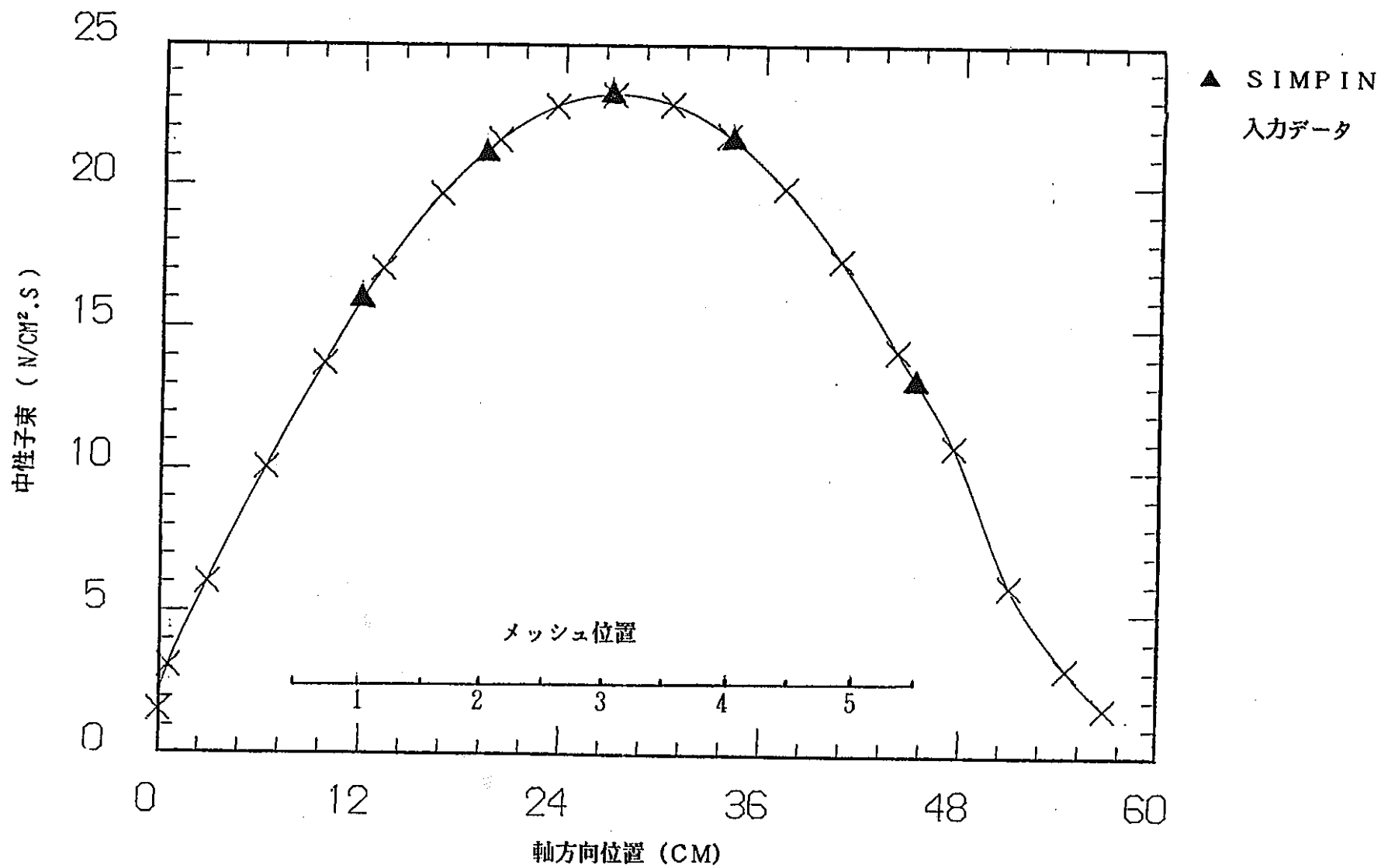


図4. 3-8 中性子束分布 (17サイクル EOC)

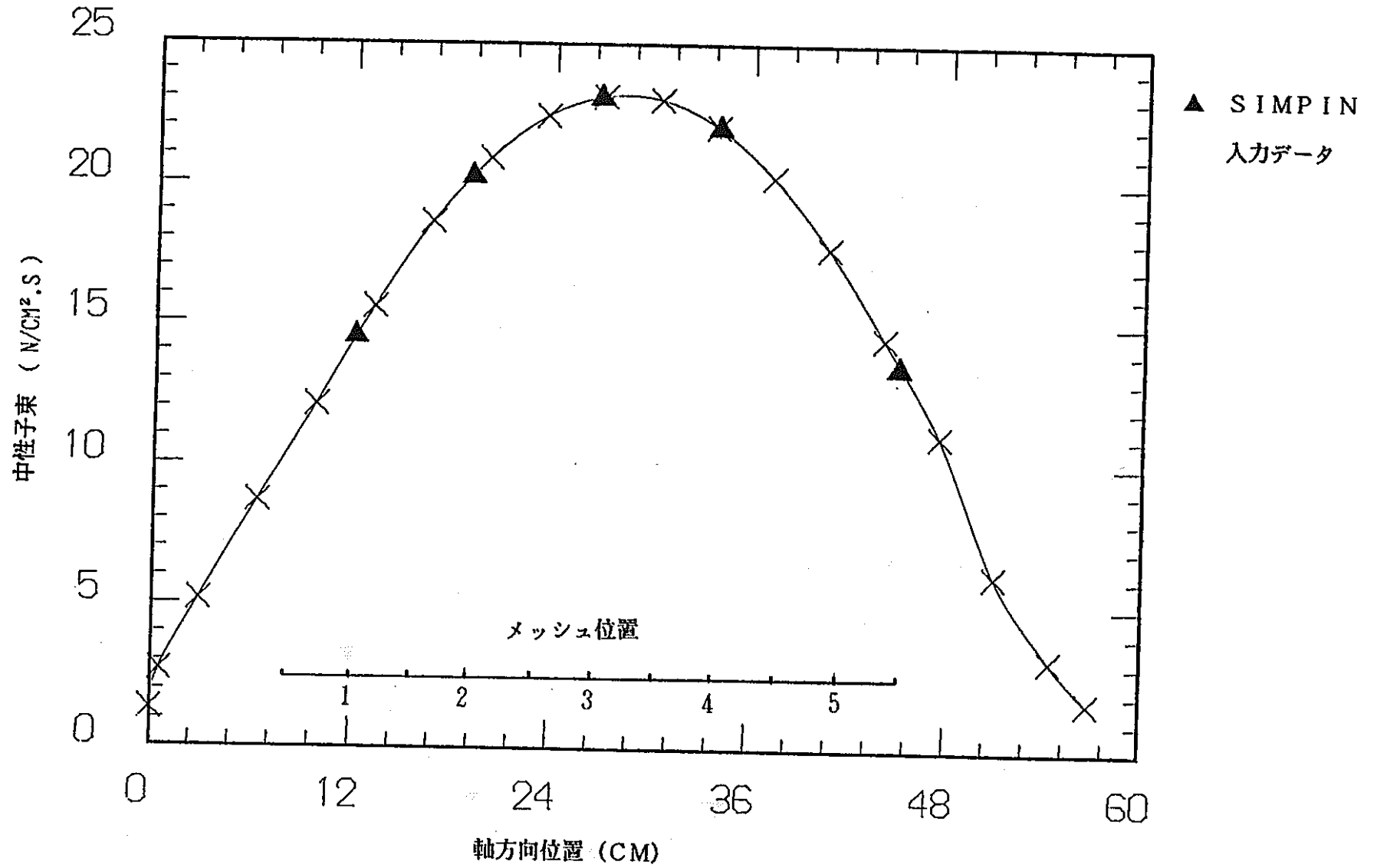


図4. 3-9 中性子束分布 (18サイクル BOC)

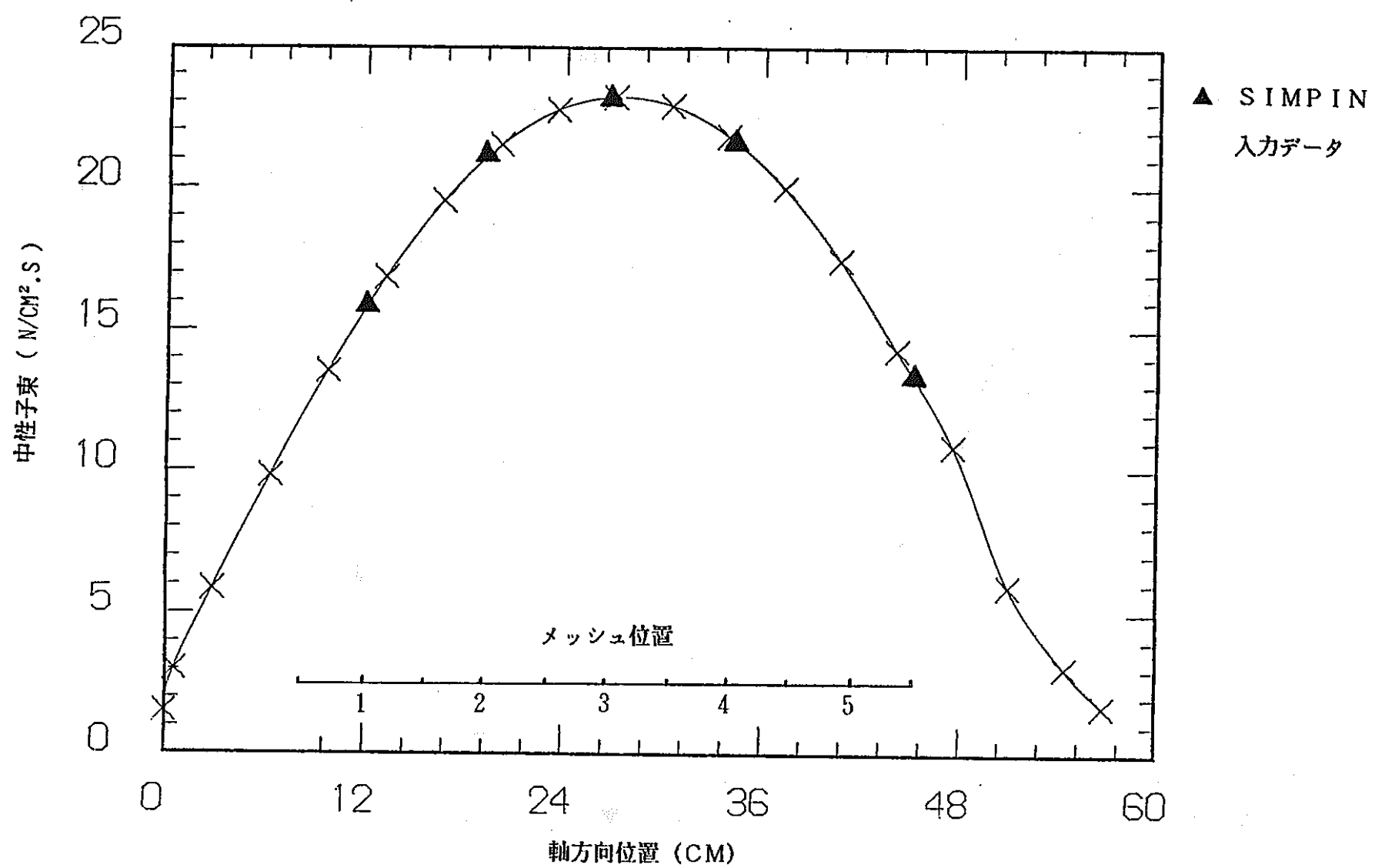


図4. 3-10 中性子束分布 (18サイクル EOC)

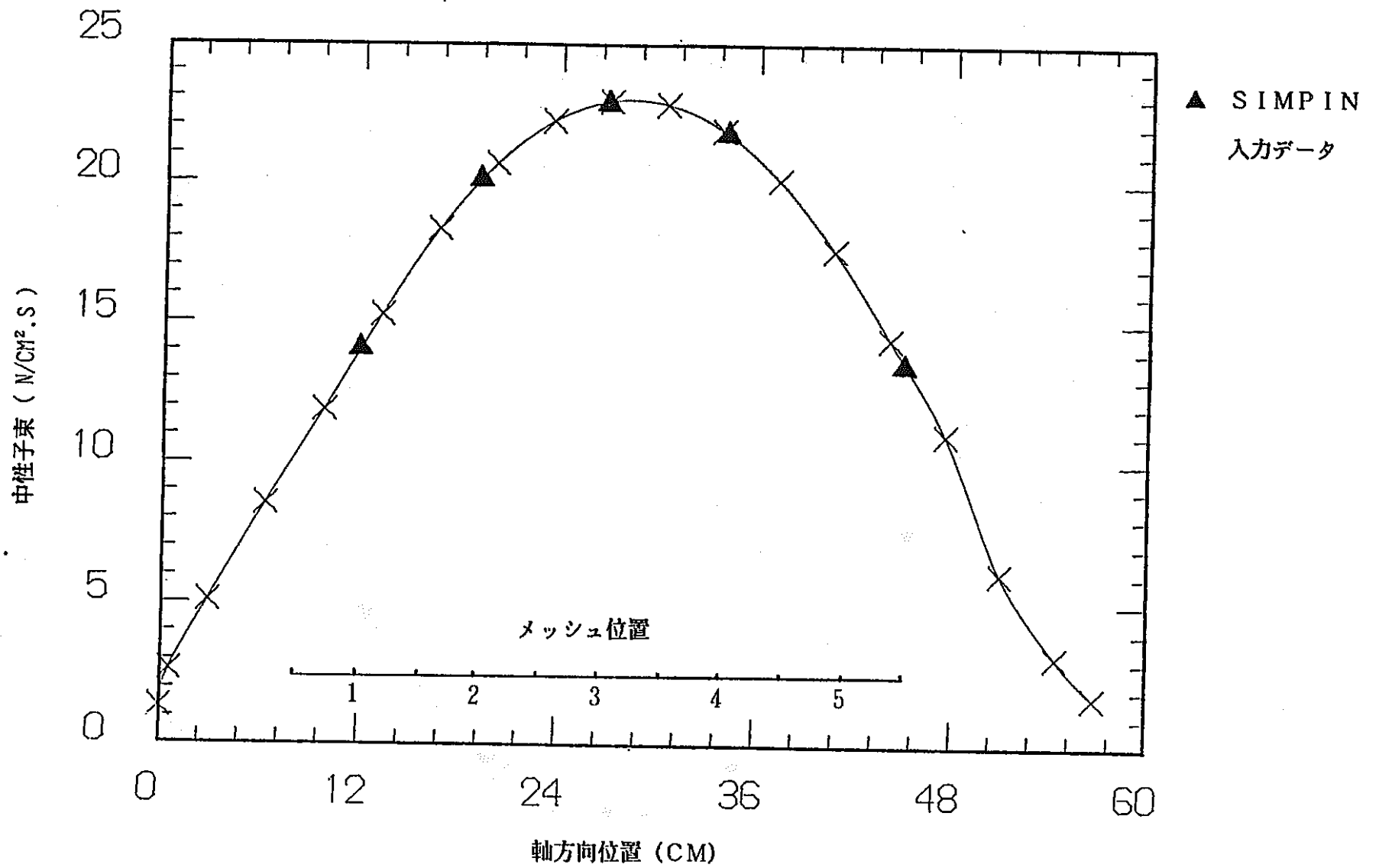


図4. 3-11 中性子束分布 (19サイクル BOC)

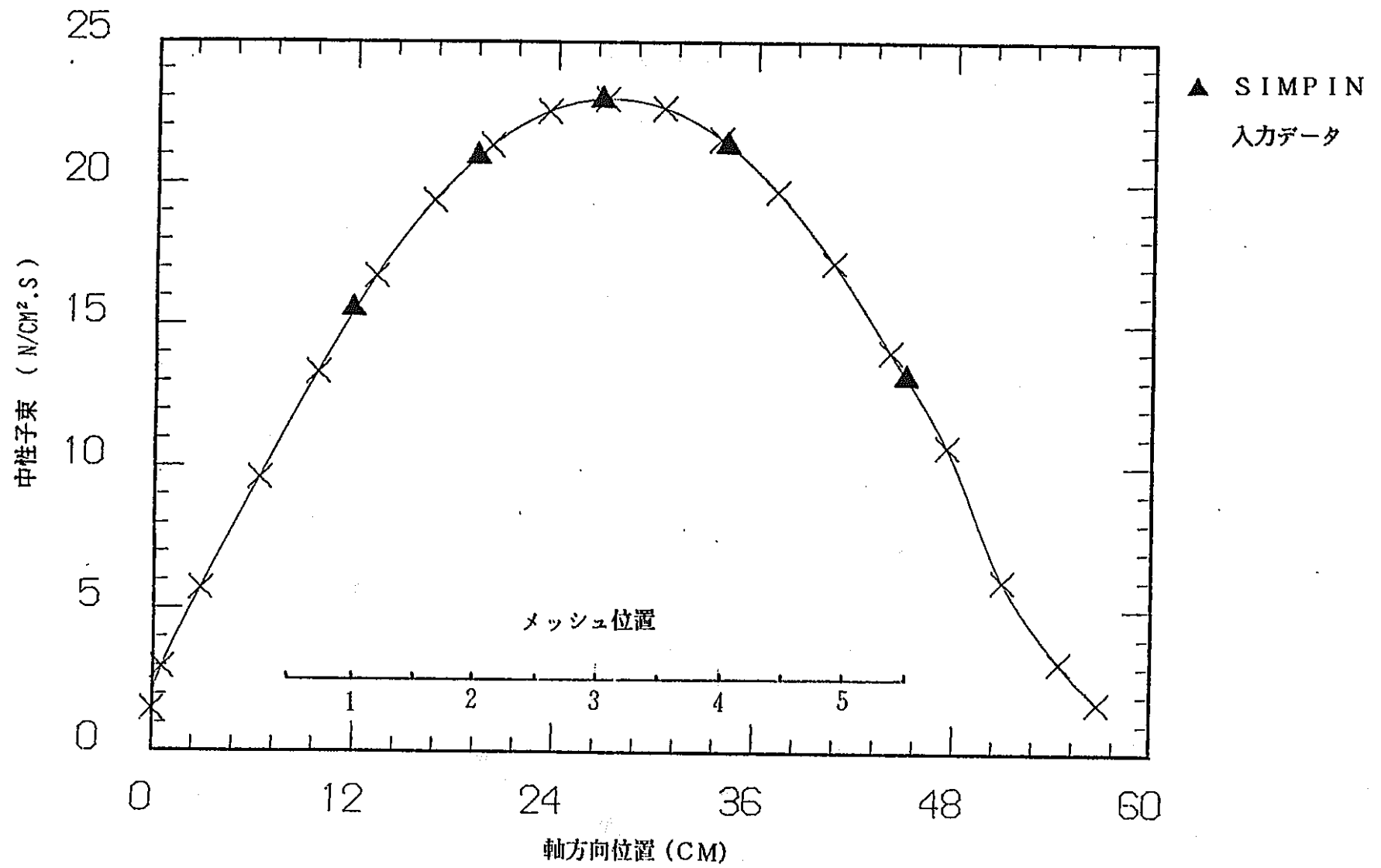


図4. 3-12 中性子束分布 (19サイクル EOC)

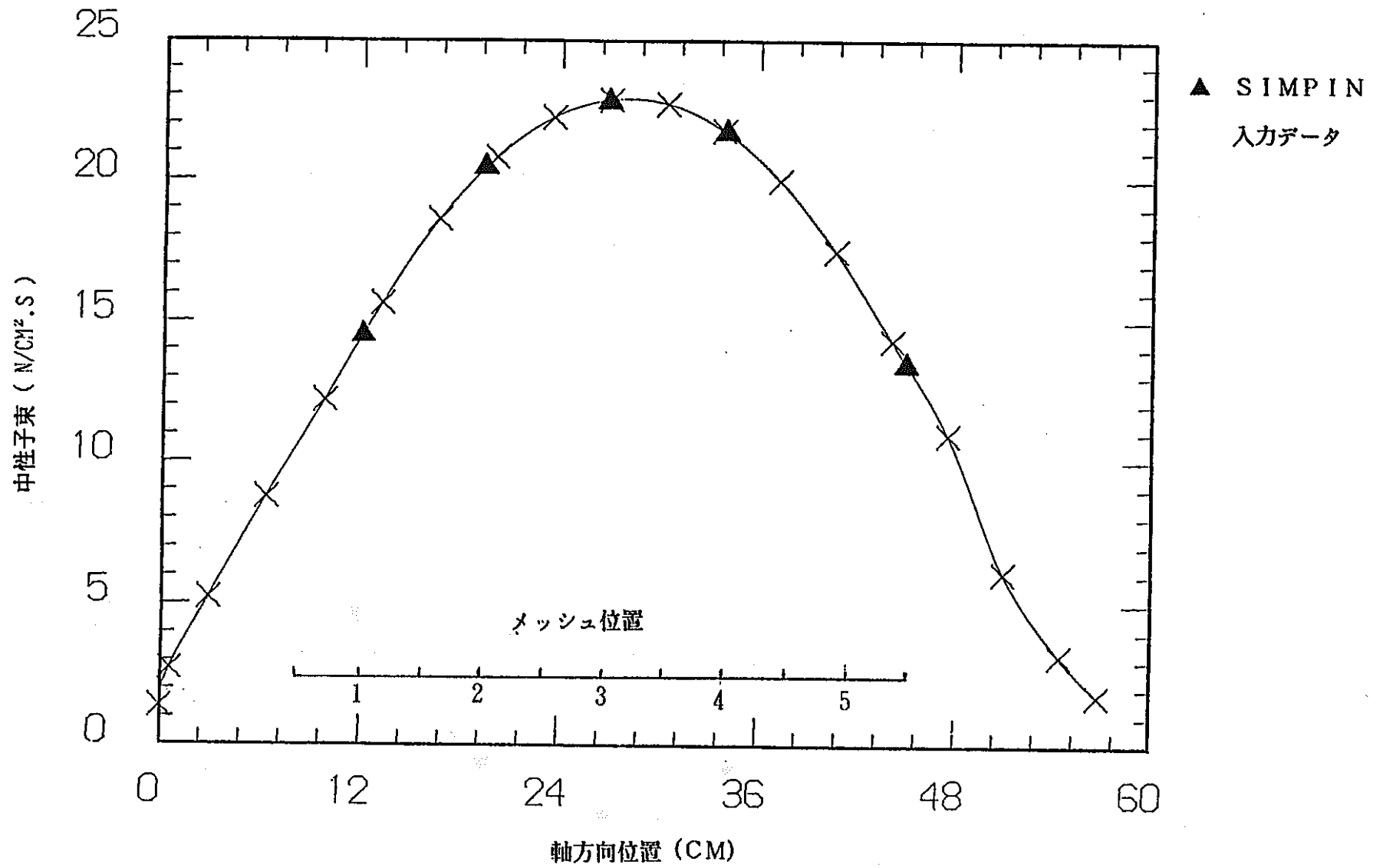


図4. 3-13 中性子束分布 (20サイクル BOC)

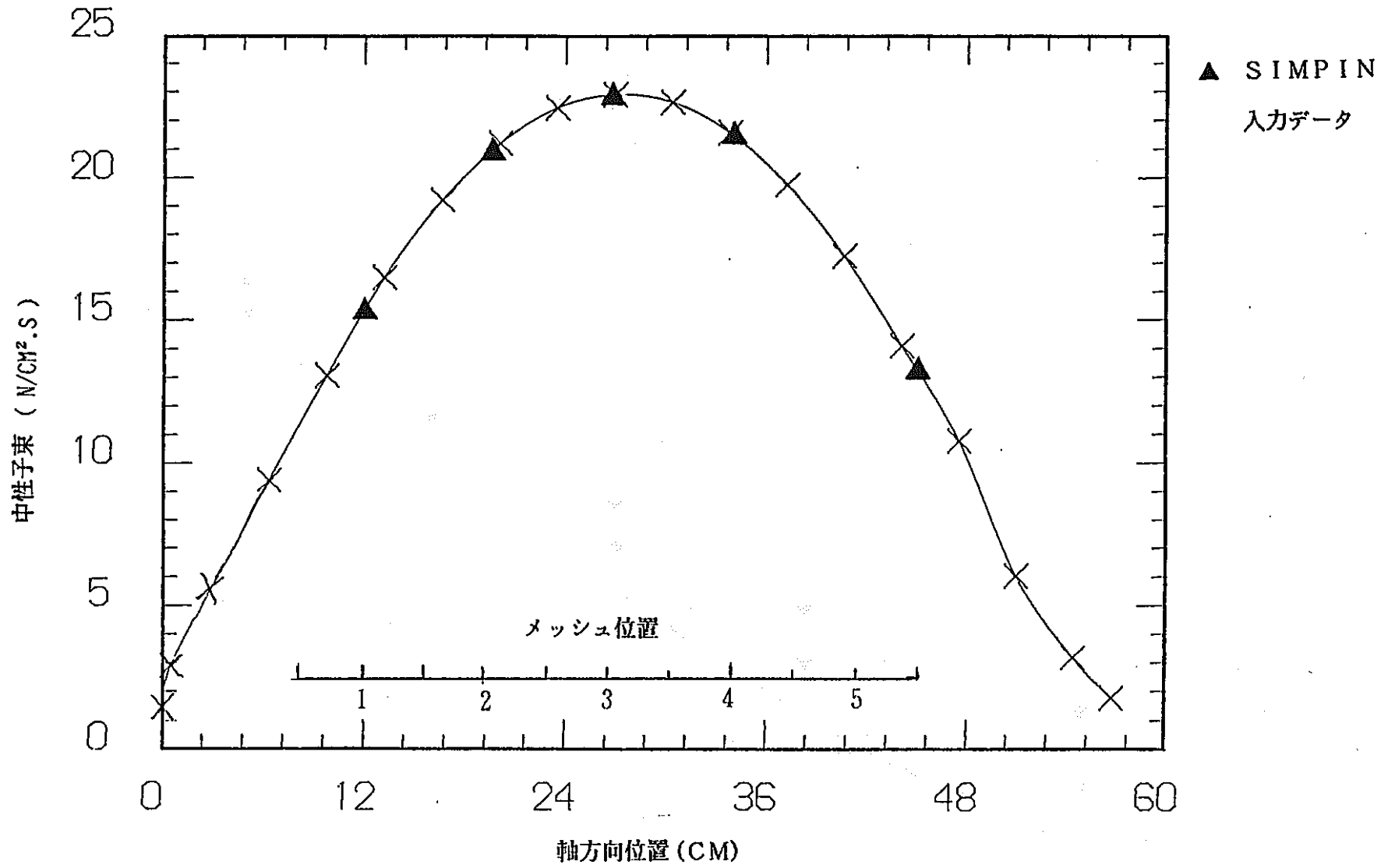


図4. 3-14 中性子束分布 (20サイクル EOC)

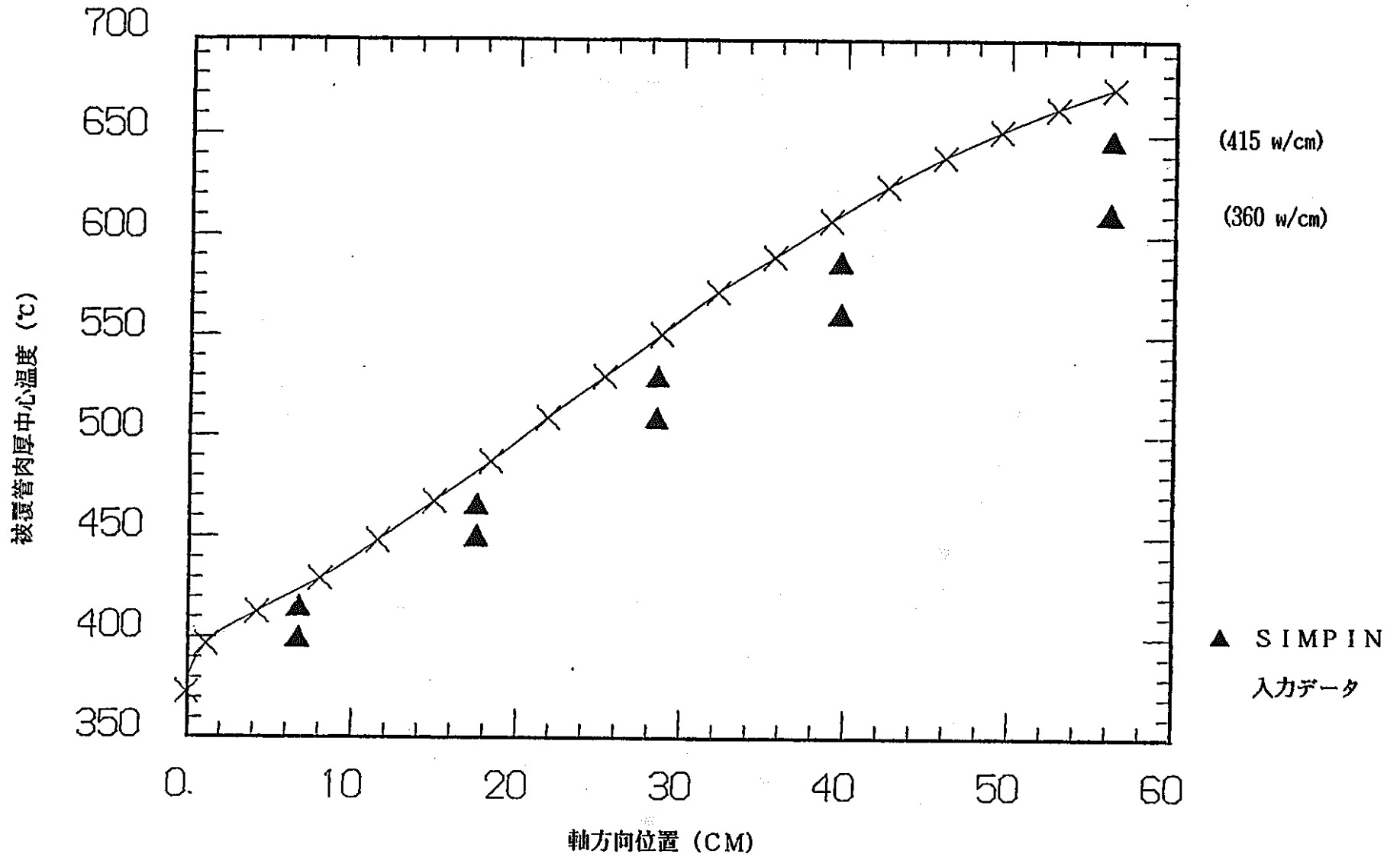


図4. 3-15 被覆管肉厚中心温度分布

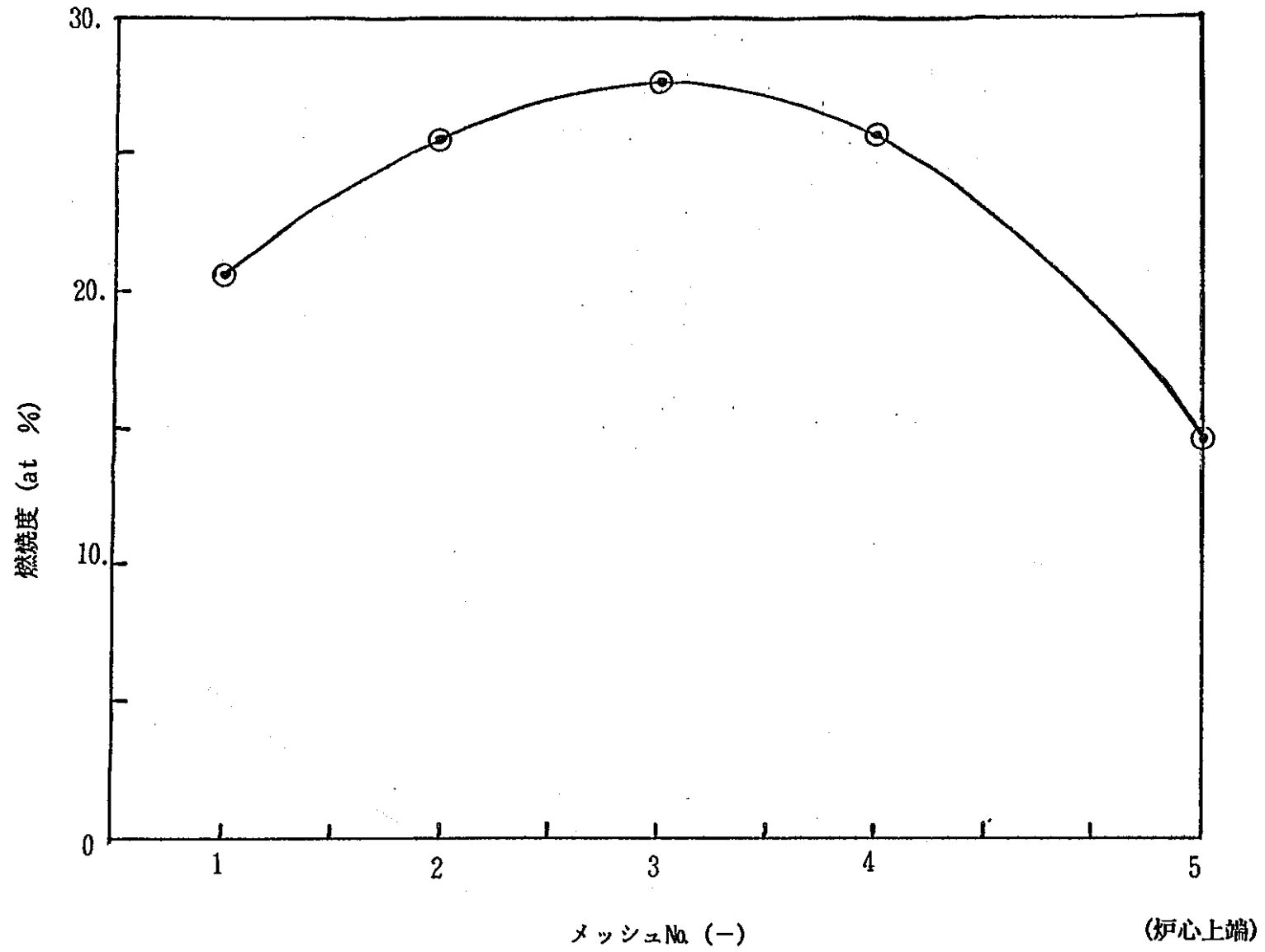


図4.5-1 燃焼度軸方向分布 (解析No.1, 47000時間)

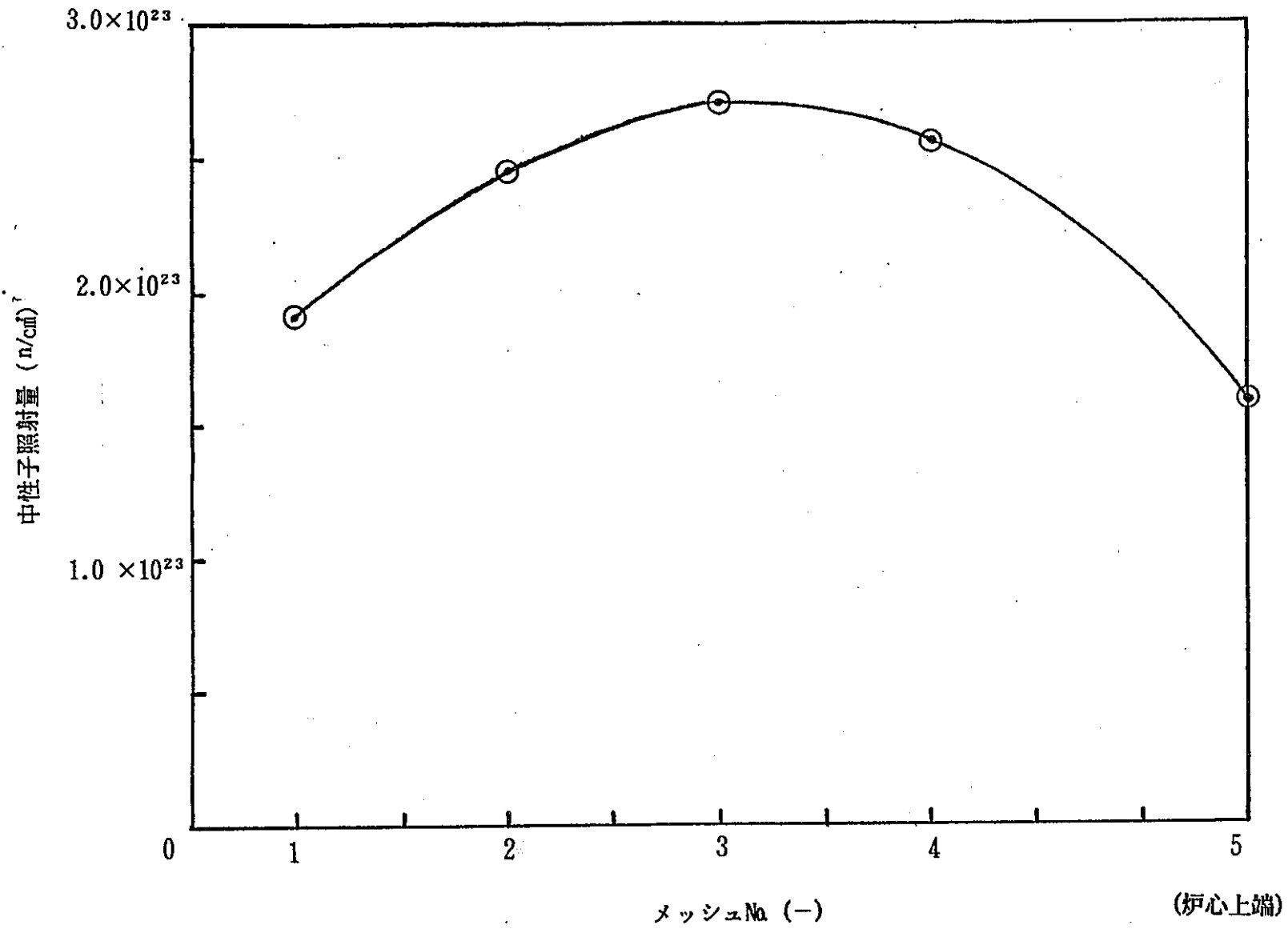


図4. 5-2 中性子照射量の軸方向分布 (解析No. 1, 47000時間)

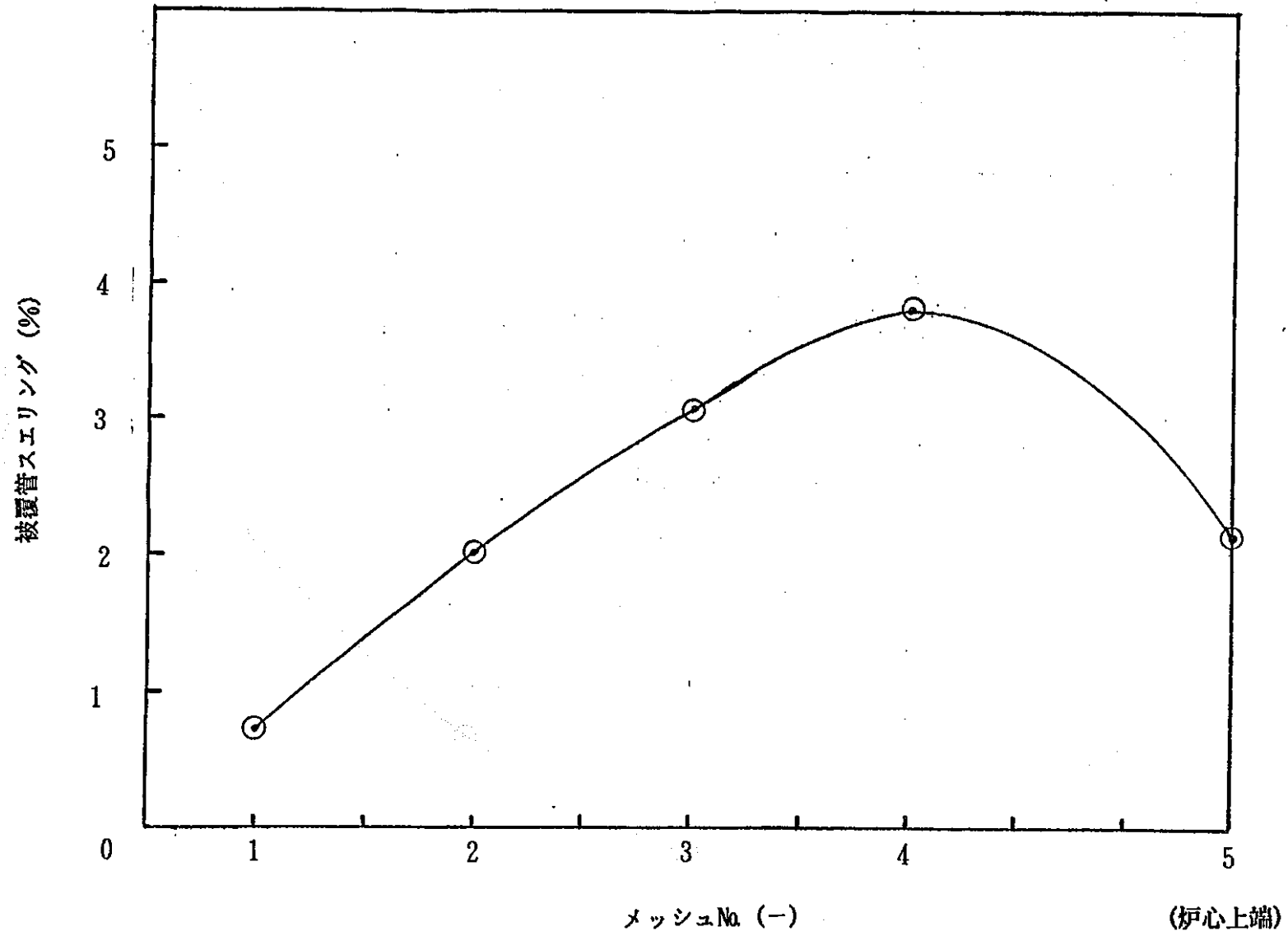


図4.5-3 被覆管スエリングの軸方向分布 (解析No.1, 47000時間)

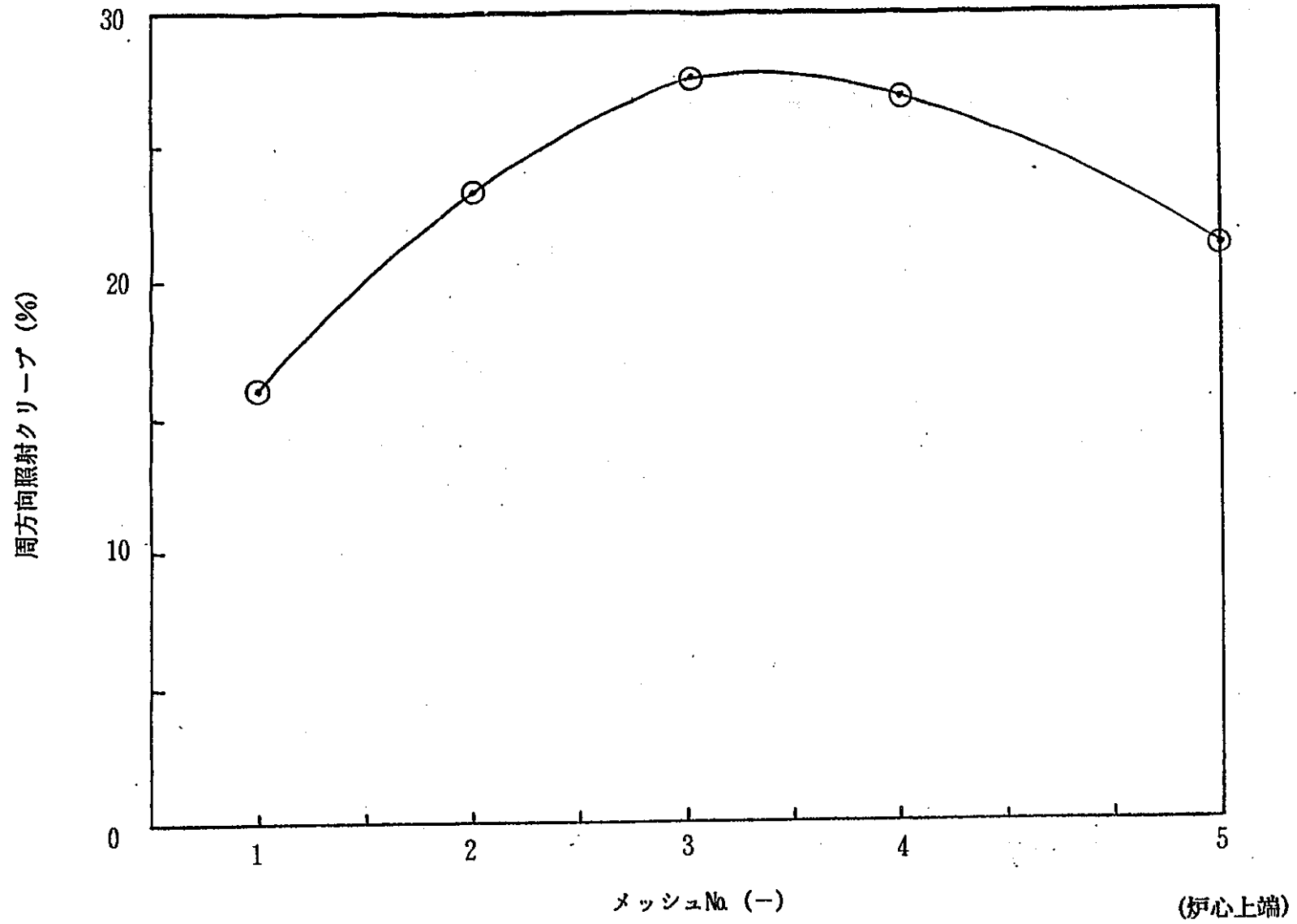
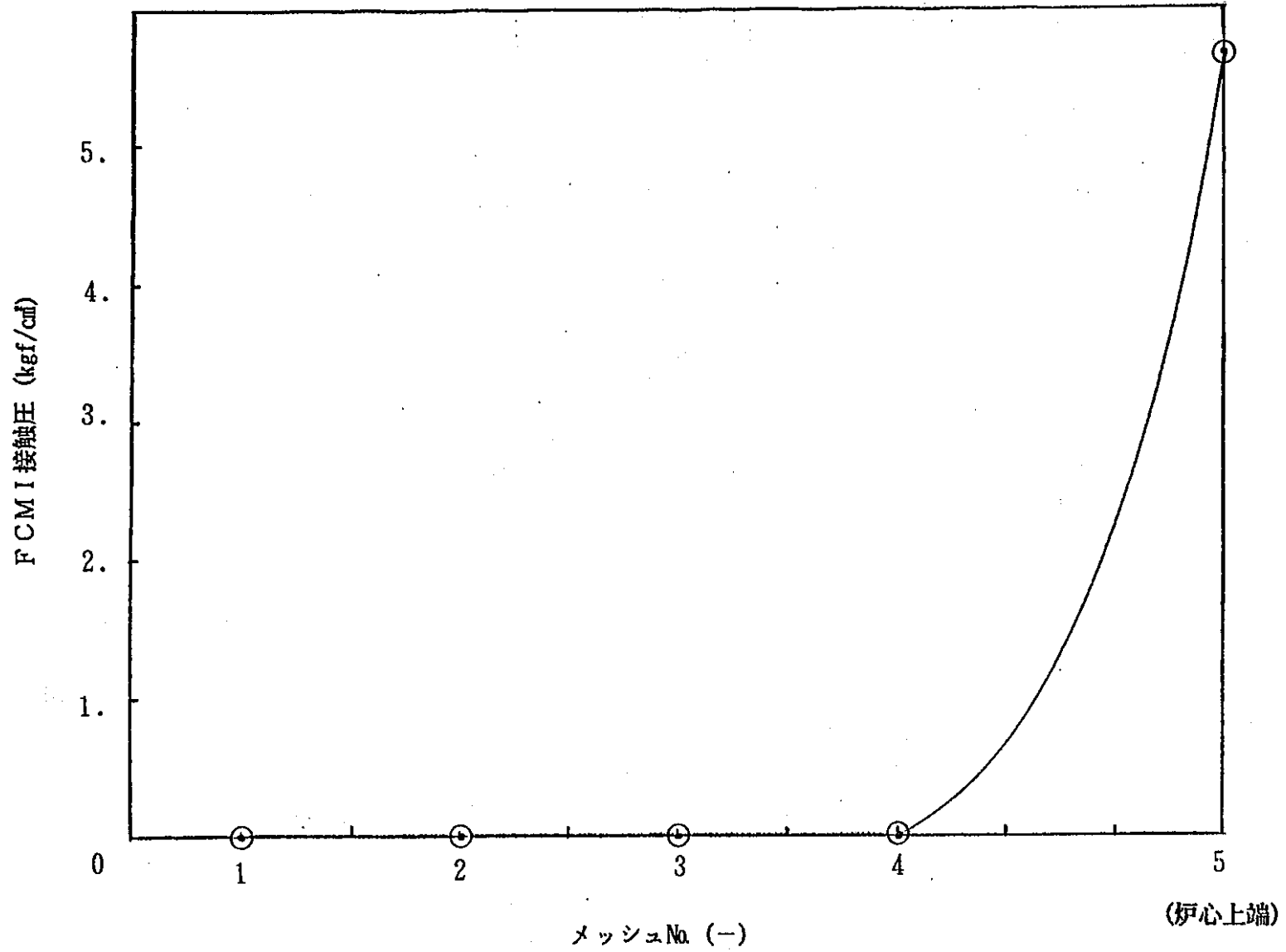


図4.5-4 周方向照射クリープの軸方向分布 (解析No.1, 47000時間)

図4. 5-5 FCM I 接触圧 (kgf/cm²) の軸方向分布 (解析No. 1, 47000時間)

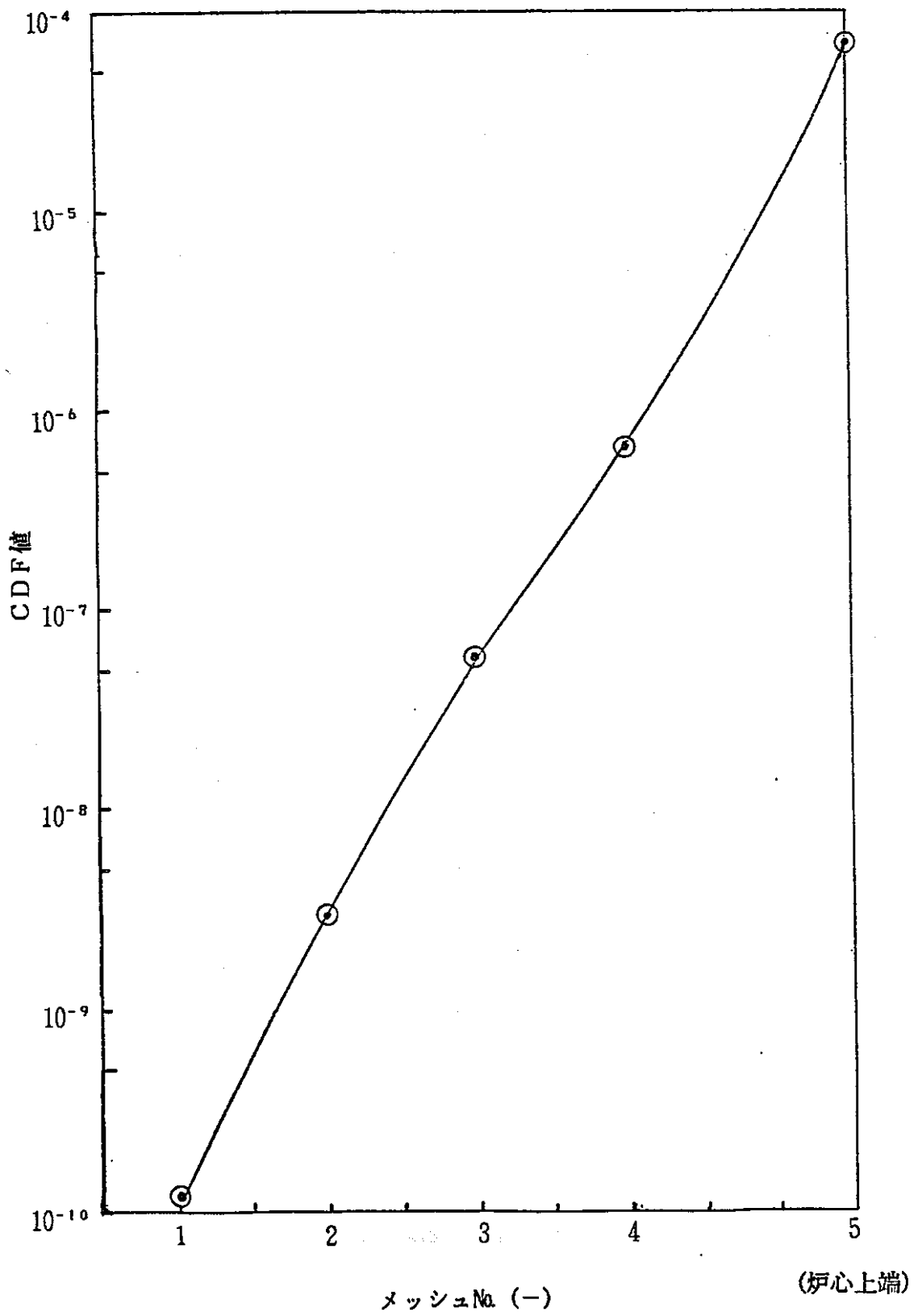


図4. 5-6 CDFの軸方向分布 (解析No.1, 47000時間)

5. 結論

本研究では、制御棒移設後の炉心において実施される予定の、高燃焼度試験の変更申請時に必要な事故解析を行った。さらに、高燃焼度試験用要素の破損時刻を予測する為に、定常照射条件下でのFPガスによるプレナム内圧上昇、被覆管試験用要素ペレット機械的相互作用（FCMI）及び被覆管クリープ寿命分数和（CDF）の評価を行った。

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

以下の「運転時の異常な過渡変化」事象4ケースに、試験用要素の開孔を重ね合わせた時の、試験用要素の温度変化と、試験用要素ピンの破損時に放出されるFPガスによる隣接予備試験用要素の温度変化を計算した。

- (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

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2680℃、890℃を下回っていることを確認した。また、試験用要素の試料最高温度がその判断基準である2620℃を下回っていることも確認した。

5.2 「事故」における予備試験用要素及び試験用要素の温度計算

5.1と同様に、以下の2ケースの事故に試験用要素の開孔を重ね合わせて、予備試験用要素及び試験用要素の温度変化を計算した。

- (1)燃料スランピング事故
- (2)1次冷却系循環ポンプ軸固着事故

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2680℃、890℃を下回っていることを確認した。また、試験用要素の試料最高温度がその判断基準である2620℃を下回っていることも確認した。

5.3 高燃焼度試験時の試験用要素の挙動

高燃焼度試験における試験用要素の被覆管が破損する主要因は、プレナムガス内圧上

昇であり、FCMIは比較的弱いことがわかった。試験用要素の線出力の低下にともない被覆管の温度も低下するという想定の下においては、被覆管材質、照射条件に係わらず、CDFの観点からは、局所最大燃焼度26at%まで被覆管破損を生じないとの結果を得た。

6. 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山下芳興課長、小林孝良副主研並びに青山卓史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。

7. 参考文献

2-1 PNC SJ9214 89-001 「燃料性能試験基準化の為の計算」

三菱原子力工業（株）、1989/3

2-2 PNC SJ9214 90-001 「『常陽』制御棒移設炉心の炉心特性計算」

三菱原子力工業（株）、1990/3

2-3 技-1-357 技術課メモ「制御棒移設後炉心の安全解析用データの支給」

動力炉・核燃料開発事業団、1990/3

4-1 伊藤 他、「長寿命FBR混合酸化物燃料の健全性評価」

日本原子力学会（1989年会）、D43、1989/4/4

4-2 斉藤 他、「FBR混合酸化物燃料の簡易挙動評価コードの開発」

日本原子力学会（1990年会）、G15、1990/4/2

4-3 技-2-023 技術課メモ「高燃焼度試験用要素の開孔の予測計算用データの支

給」 動力炉・核燃料開発事業団、1990/4