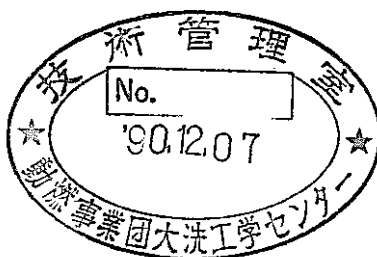


制御棒移設後の仮想事故の計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1990年 4 月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
T	J9214 90-002
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 4月27日

制御棒移設後の仮想事故の計算*

森井 正** 池田一三**

要 旨

次年度初から予定している高速実験炉「常陽」の制御棒移設に係わる設置変更許可申請の為に必要な変更後の原子炉施設の安全性の確認解析を実施した。ここでは、2つの項目について評価を実施した。最初に、設置許可申請書添付資料十に記載されている「仮想事故」をVENUSコードにより解析を行った。その結果、制御棒1本を炉心3列から5列に移設することにより、仮想事故による有効破壊エネルギーは、移設前よりも約8%増加し、約78MJとなることが分かった。しかしながら、この値は現設置許可申請書記載値120MJを下回っており、制御棒移設後の炉心に対し、仮想事故の観点からは、申請書を変更する必要が無い事が分かった。次に、2本の制御棒の種々のスタックパターンにおける炉停止余裕を確認するとともに、申請書添十記載の想定事故の代表事象について、2本の制御棒がスタックした場合について、制御棒移設の影響を評価した。

* 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 新型炉統括部

April 27, 1990

Analysis of Hypothetical Disruptive Accident of the Core
after the Shift of Control rod*

Tadashi Morii,** Kazumi Ikeda**

Abstract

In the experimental fast reactor "JOYO", PNC (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) schedules to move one control rod from the inner third row of the core to the outer fifth row. Two topics have been studied in order to get a license for the shift of control rod. Firstly, the work energy generated from expansion of the disruptive core material after the hypothetical core disruptive accident have been calculated by the VENUS code. The results show that the work energy of the core after the shift of one control rod increase by about 5MJ to 78 MJ compared with that of the core before the shift, but is still smaller than 120 MJ of the work energy described in the present documentation for petition of a license. Secondary, the effect of the reactor scram under the condition of the two rods stuck has been analyzed to examine a decrease of the safety margin of the scram worth. The calculated results of the HARHO-IN code shows that the consequences of the representative 4 accidents which are described in the present documentation for petition of a license are acceptably small.

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

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

制御棒移設後の仮想事故の計算

目次

1. 序論
2. 仮想事故の計算
 - 2.1 起因事故過程
 - 2.2 再臨界事故解析
3. 制御棒移設と安全裕度との関係
 - 3.1 概要
 - 3.2 制御棒配置
 - 3.3 制御棒反応度値の見直し
 - 3.4 2本スタック時の原子炉停止余裕
 - 3.5 2本スタックと想定事象との重ね合わせ
 - 3.6 まとめ
4. 結論
5. 謝辞
6. 参考文献

List of Tables

- 表2.1 起因事故解析手順
- 表2.2 起因事故解析条件（制御棒移設前／後：基準組成2）
- 表2.3 再臨界事故解析入力条件
- 表2.4 炉心部出力分布（制御棒移設後、基準組成2、ボイド炉心）
- 表2.5 炉心部出力分布（JFS ライブラリー、基準組成ケース2、ボイド炉心）
- 表2.6 物質反応度値分布（制御棒移設後、基準組成2、ボイド炉心）
- 表2.7 単位体積当たりの物質反応度値分布（制御棒移設後：VENUSインプット）
- 表2.8 物質反応度値分布（基準組成2、ボイド炉心）
- 表2.9 制御棒移設により変化する核的データの有効仕事量に与える影響
- 表3.3-1 制御棒移設前の制御棒反応度値
- 表3.3-2 制御棒移設後の制御棒反応度値
- 表3.3-3 移設前の炉心の制御棒反応度値の補正係数
- 表3.3-4 移設後の炉心の制御棒反応度値の補正係数
- 表3.4-1 軽水炉安全設計審査指針の指針2 1及び指針2 3
- 表3.5-1 解析主要条件
- 表3.5-2 2本スタックを重ね合せた想定事象の解析結果のまとめ

List of Figures

- 図2.1 炉心溶融再臨界事故（起因事象）解析概念図
- 図2.2 全炉心溶融による反応度投入（制御棒移設後）
- 図2.3 炉心溶融による反応度挿入率（制御棒移設後）
- 図2.4 VENUSコード用のR-Z 2次元解析メッシュ体系図
- 図2.5(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
(ドップラー係数を変えたケース)
- 図2.5(2) 炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図（ドップラー係数を変えたケース）
- 図2.5(3) 炉心最終変形図（ドップラー係数を変えたケース）
- 図2.6(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
(即発中性子寿命を変えたケース)
- 図2.6(2) 炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図（即発中性子寿命を変えたケース）
- 図2.6(3) 炉心最終変形図（即発中性子寿命を変えたケース）
- 図2.7(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
(物質反応度値を変えたケース)
- 図2.7(2) 炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図（物質反応度値を変えたケース）
- 図2.7(3) 炉心最終変形図（物質反応度値を変えたケース）
- 図2.8(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
(炉心出力分布を変えたケース)
- 図2.8(2) 炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図（炉心出力分布を変えたケース）
- 図2.8(3) 炉心最終変形図（炉心出力分布を変えたケース）
- 図2.9(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図（制御棒移設後）
- 図2.9(2) 炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図（制御棒移設後）
- 図2.9(3) 炉心最終変形図（制御棒移設後）
- 図3.2-1 制御棒移設前標準平衡炉心の装荷パターン
- 図3.2-2 制御棒移設後標準平衡炉心の装荷パターン
- 図3.3-1 軸方向バックリングの計算体系
- 図3.3-2 制御棒値計算の流れ

図3.3-3 2次元XY3角メッシュ計算体系

図3.5-1 スクラム反応度曲線 -原子炉スクラム-

図3.5-2 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-原子炉出力及び炉心流量-

図3.5-3 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-反応度-

図3.5-4 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-5 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-6 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)

-原子炉出力及び炉心流量-

図3.5-7 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)

-反応度-

図3.5-8 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)

-炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-9 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)

-炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-10出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-原子炉出力及び炉心流量-

図3.5-11出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-反応度-

図3.5-12出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-13出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)

-炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

図3.5-14出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)

-原子炉出力及び炉心流量-

図3.5-15出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）

－反応度－

図3.5-16出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）

－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-17出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）

－炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-18燃料スランピング事故（制御棒移設前）

－原子炉出力及び炉心流量－

図3.5-19燃料スランピング事故（制御棒移設前）

－反応度－

図3.5-20燃料スランピング事故（制御棒移設前）

－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-21燃料スランピング事故（制御棒移設前）

－炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-22燃料スランピング事故（制御棒移設後）

－原子炉出力及び炉心流量－

図3.5-23燃料スランピング事故（制御棒移設後）

－反応度－

図3.5-24燃料スランピング事故（制御棒移設後）

－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-25燃料スランピング事故（制御棒移設後）

－炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-26 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）

－原子炉出力及び炉心流量－

図3.5-27 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）

－反応度－

図3.5-28 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）

－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-29 1 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）

－炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-30 1 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）

－原子炉出力及び炉心流量－

図3.5-31 1 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）

－反応度－

図3.5-32 1 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）

－炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度－

図3.5-33 1 次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）

－炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度－

1. 序論

次年度初から予定している高速実験炉「常陽」の制御棒移設に係わる設置変更許可申請の為に、変更後の原子炉施設の安全性の確認を行う必要がある。実施内容は以下の通りである。

(1) 仮想事故の計算

(2) 制御棒移設と安全裕度との関係

第2章では、「高速増殖炉の安全性の評価の考え方について」に基づき、制御棒移設前及び移設後の炉心について「炉心溶融再臨界事故」の事象の計算を行う。具体的には、1) 全炉心スランピングによる挿入反応度率の評価、2) VENUSコードによる炉心溶融再臨界時の核暴走事象の評価、である。

第3章では、「常陽」の第3列6本の制御棒のうち、1本を第5列に移設した炉心について、その安全性を移設前の炉心と比較するために、2本の制御棒の種々のスタックパターンにおける炉停止余裕を確認する。さらに、申請書の添付資料十の想定事故の代表事象について、2本の制御棒がスタックした場合について、制御棒移設の影響を評価する。

2. 仮想事故の計算

2.1 起因事故過程

ここでの評価の目的は、後述するVENUSコードによる再臨界事故核的暴走事象の解析評価において、重要な入力である事故時反応度挿入速度を計算することである。以下本節に示す起因事故過程の評価手法は、現申請書及び制御棒移設前の燃料組成変更時の評価手法¹⁾と全く同じである(表2.1及び図2.1を参照の事)。まず事故想定として全炉心からナトリウムが瞬時になくなった状態を採用する。本来ならばナトリウムボイド係数が負であり、約 $-5\% \Delta k/k$ の負の反応度が入るために急激に出力は低下して炉心溶融には到らないはずであるが、安全側の見積もりをする意味で出力は定格の100MWのまま保たれたとして解析を行う。また発生エネルギーは事故開始と同時に全て燃料に与えられると考える。こうして炉心の各領域の溶融開始時刻と溶融開始遅れ時間が求まる。次に、溶融開始と同時に燃料ピンは重力落下し始め、最終的には100%理論密度の燃料と被覆材とが均質に混ざり合った状態になる。溶融落下に伴う反応度挿入を計算するために、全炉心が径方向に関して一様に溶融落下した場合の反応度挿入曲線を求める。そして径方向各領域の溶融落下に伴う反応度挿入曲線も全体溶融のそれに比例すると考えれば、反応度挿入が求まる。ただし径方向のある領域の溶融落下に伴う挿入反応度は炉心全体溶融の反応度に出力量分担率を乗じた値と考える。以上の手順を実行する。炉心初期温度は一様に1100℃とし、軸方向最高出力点(炉心中央面)に於いて燃料平均温度が2600℃となった時間をもってその領域の溶融開始時間とする。発生したエネルギーは全て燃料に与えられるとし、燃料の融解熱は考慮しない。燃料の比熱は $C_p = 21.4 \text{ cal/mol}^\circ\text{C} = 0.332 \text{ W} \cdot \text{sec/g}^\circ\text{C}$ とする。炉心部の出力密度は、

$$100 \times 10^6 / 2.365 \times 10^5 = 422.8 \text{ (W/cm}^3\text{)}$$

となる。ここで236.5ℓは炉心体積である。これは燃料、冷却材、構造材全てを含んだ意味での出力密度である。燃料のみの出力密度は、炉心部での燃料の体積比が0.377であるから、

$$422.8 / 0.377 = 1121.5 \text{ (W/cm}^3\text{)}$$

である。燃料1gあたりの出力密度は、

$$1121.5 / 10.33 = 108.57 \text{ (W/g)}$$

である。

次に炉心中心のピーキングファクターが表2-2 に示す通り、1.748であるから炉心中心（第1領域）の出力密度は、

$$108.57 \times 1.748 = 189.78 \text{ (W/g)}$$

である。燃料比熱が0.332 J/g°Cであるから、炉心中心での溶融開始時刻 T_1 は、

$$(2600 - 1100) \times 0.332 / 189.78 = 2.624 \text{ (sec)}$$

となる。一方、各領域の溶融開始時刻 T_i は、その場所の出力ピーキング係数 P_i に反比例するので、

$$T_i = T_1 \times P_1 / P_i$$

として求められる。従って中心領域が溶融を開始した時点を起点とした溶融遅れ時間 ΔT_i は $(T_i - T_1)$ として求められる。結果を表2.2に示す。表には参考として上の段に今回の解析を、下段に制御棒移設前の評価結果を比較して示す¹⁾。表から分かるように、制御棒移設に伴う影響は殆ど無い。

次に燃料の溶融落下に伴う投入反応度を計算する。燃料ペレットの理論密度比は94%であるから溶融して理論密度になり、かつ、構造材も溶融して、炉心が縮合したとすると、縮合炉心の高さは、

$$h = h_0 \cdot (V_s + V_f \cdot D) = 0.582 h_0 = 32.03 \text{ (cm)}$$

- ここで、
- h : 縮合後の炉心高さ
 - h₀ : 縮合前の炉心高さ (55 cm)
 - V_s : 構造材の体積比 (0.228)
 - V_f : 燃料の体積比 (0.377)
 - D : 燃料の理論密度比 (0.94)

となる。重力落下を仮定すると、落下に要する時間は、

$$\sqrt{2 \times (55 - 32.03) / 980} = 0.217 \text{ (sec)}$$

である。全炉心溶融状態での投入反応度 ρ_r は、核計算によると、0.1465 Δk/k (32.6%)である。炉心が半分縮合した状態での投入反応度（但し、全炉心一様の溶融落下）は核計算によると、0.0732 Δk/kであり、それらを基に、重力落下による投入反応度の時間変化が評価される。計算結果を図2.2に示す。

以上で求めた溶融遅れ時間 ΔT_i 、流量領域 i の完全溶融落下に伴う投入反応度 ρ_i と図2.2の反応度投入曲線 $f(t)$ とを用いることにより、炉心中心が溶融を開始して以降の炉心での反応度変化 $\Delta K(t)$ を、以下の様に評価する。

$$\Delta K(t) = \sum_{i=1}^6 W(t - \Delta T_i) \cdot \rho_i \cdot f(t - \Delta T_i)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} W(t) &:= 0 & t < 0 \\ &:= 1 & t > 0 \end{aligned}$$

各領域の ρ_i は全投入反応度 ρ_T に関し、出力分担率に比例するものと仮定する。

計算結果を図2.3に示す。図から、溶融落下開始後約0.132秒で炉心は即発臨界となり、その時点での反応度挿入率は約19 \$/secである。参考として、制御棒移設前の結果¹⁾を示すと、約0.13秒後で約19 \$/secであり、制御棒移設前後で評価結果に変化はないことが分かる。

2.2再臨界事故解析

2.2.1解析条件

前節の起因事故解析の結果、反応度挿入率は約19 \$/secとなった。燃料組成を変えた時の変更申請時の解析においても、得られた結果は約19 (\$/sec)であり¹⁾、申請書記載の30 (\$/sec)を充分に下回ったため、後述のVENUSコードによる再臨界事故の解析では、事故時挿入反応度率として申請書記載の30 (\$/sec)を使用した。従って、今回も同じ扱いとする。その他の主要な解析条件を制御棒移設前と比較して表2.3及び表2.4,5,6,7,8に纏めて示す。

2.2.2解析コード

使用コードはVENUSとする。VENUSは2次元圧縮性流体計算と1点近似核動特性計算をカップリングした計算コードである。計算体系を図2.4に示す。

2.2.3解析結果

解析条件表2.3 から分かるように、制御棒移設により変化するデータは次の4つである。1)ドップラー係数、2)即発中性子寿命、3)物質反応度値分布、4)炉心出力分布。ここでは、これらのデータの変化がVENUSの解析結果に及ぼす影響を把握するために、各データを個別に変えて計算を行った。図2.5 にドップラー係数を変えた結果を（図2.5(1)に原子炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図、図2.5(2)に炉心中心付近における温度圧力の時間変化図、図2.5(3)に炉心最終変形図を示す。以下同様。）、図2.6 に即発中性子寿命を変えた結果を、図2.7 に物質反応度値分布を変えた結果を、図2.8 に炉心出力分布を変えた結果を、図2.8 に4つの全てを変えた結果すなわち制御棒移設後の炉心に対する再臨界事故解析結果をそれぞれ示す。さらに、表2.9 に主要な解析結果を纏めた。表2.9 を基に、制御棒移設により変化する核的データの、変更申請に記載する必要のある数値である有効破壊エネルギーに与える影響を整理すると以下ようになる。

- ・4つのデータのうちドップラー係数の変化（絶対値で約4.4%小さくなった）による影響が一番大きく、移設前に比べて、有効破壊エネルギーが約7.4%増加する。
- ・その他のデータによる影響は小さく、移設前に比べて、有効破壊エネルギーが高々2%変動する程度である。
- ・最終的に、制御棒移設後の炉心は、移設前に比べて、有効破壊エネルギーが約7.8%増加し、約78 MW・secとなる。この値は申請書記載の約120 MW・secを下回っている。

2.2.4結論

制御棒1本を炉心3列から5列に移設することにより、仮想事故において発生する有効破壊エネルギーは、移設前よりも約7.8%増加し、約78 MW・secとなった。しかしながら、この値は現申請書記載値約120 MW・secを下回っており、制御棒移設後の炉心に対し、仮想事故の観点からは、申請書を変更する必要が無い事が分かった。

表2.1 起因事故解析手順

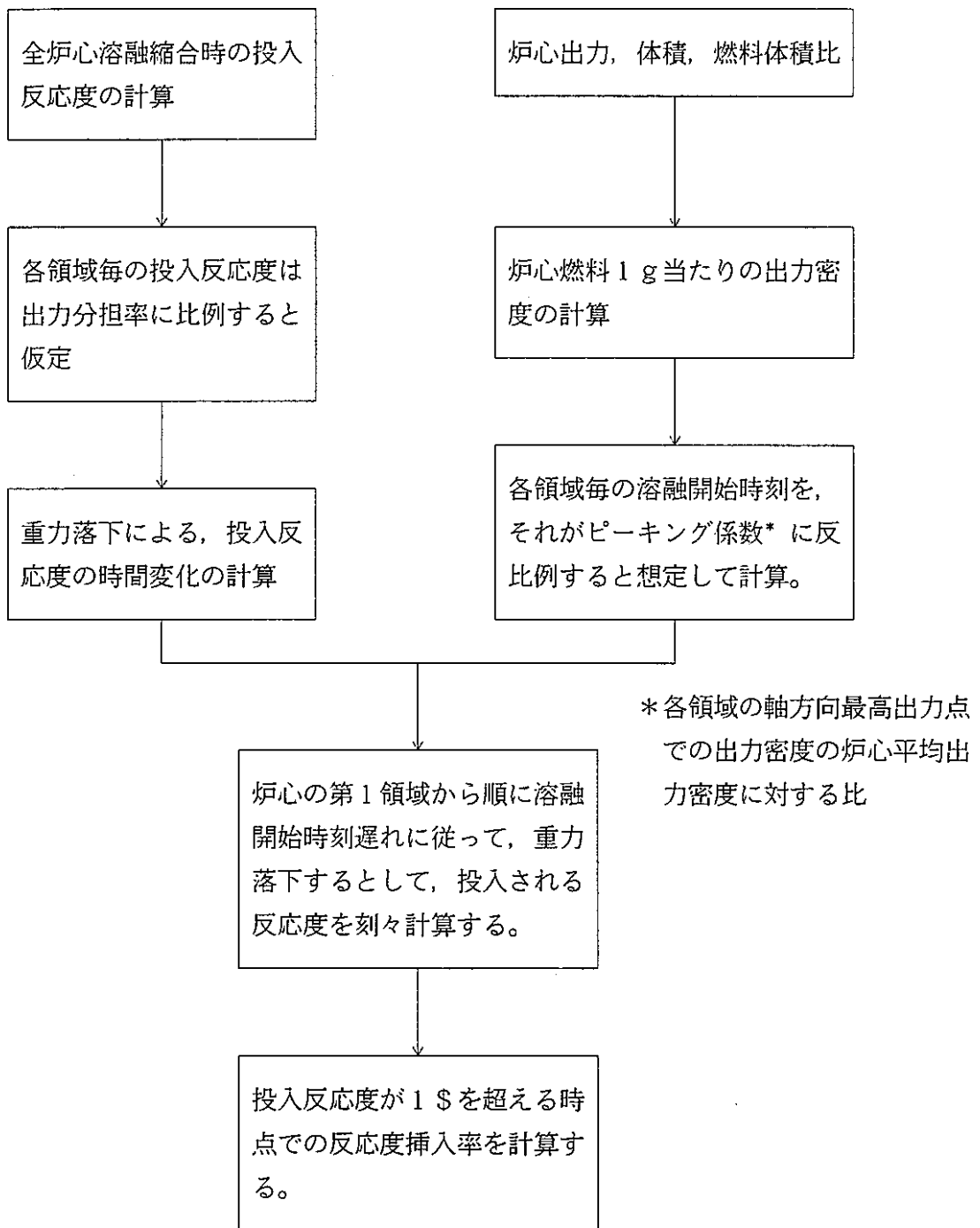


表2.2 起因事故解析条件 (制御棒移設前/後:基準組成2)

領域	出力ピーキング係数 P_i	出力分担率 Q_i	溶融遅れ ΔT_i (秒)	溶融開始時刻 T_i (秒)
1	1.748	0.0214	0.0	2.62419
	1.746	0.0214	0.0	2.62719
2	1.725	0.1123	0.03499	2.65918
	1.723	0.1122	0.03507	2.66226
3	1.588	0.2236	0.2644	2.88859
	1.583	0.2229	0.27052	2.89771
4	1.391	0.2120	0.6735	3.29769
	1.383	0.1956	0.68957	3.31676
5	1.168	0.2948	1.30311	3.92730
	1.176	0.2980	1.27338	3.90057
6	0.952	0.1336	2.19418	4.81837
	0.963	0.1475	2.13613	4.76332

○炉心部を径方向に6個の領域に分割する。

○出力ピーキング係数は軸方向炉心中心位置での値

上段	制御棒移設後
下段	制御棒移設前

表2.3 再臨界事故解析入力条件

	項目	制御棒移設後	制御棒移設前	単位
核データ	反応度挿入率	30	30	\$/sec
	初期反応度	1	1	\$
	初期出力	10	10	MW
	ドップラー係数 (ノミナル)	-1.31×10^{-3}	-1.37×10^{-3}	T dK/dT
	ドップラー係数 (誤差25%考慮)	-9.825×10^{-4}	-1.028×10^{-3}	T dK/dT
	即発中性子寿命	3.23×10^{-7}	3.34×10^{-7}	sec
	実効遅発中性子割合	4.50×10^{-3}	4.50×10^{-3}	-
	出力分布	表2.4	表2.5	
	物質反応度価値分布* (ノミナル値)	表2.6, 2.7*	表2.8	$\Delta K/K / \Delta \rho / \rho$
熱データ (初期温度)	炉心平均温度	2800	2800	°C
	反射体平均温度	500	500	°C
物性値	燃料状態方程式	Threshold型	同左	
	燃料熔融温度	2650	2650	°C
	燃料熔融潜熱	273.8	273.8	J/g
	燃料比熱	21.4	21.4	cal/mol°C
炉心部 体積比	燃料/構造材/ボイド	0.377/0.228/0.395	0.377/0.228/0.395	-

* VENUSコード内では、表2.5, 2.6の値をそれぞれ各メッシュの体積で割って $\Delta K/K/cm^3$ の単位で使用する。
さらに、ノミナル値に誤差30%を考慮する。

第2.4表 炉心部出力分布（制御棒移設後，基準組成2，ボイド炉心）

径方向 軸方向	第 0 列	第 1 列 (TYPE-Iを含む)	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 5 列
	炉 心 部 (8 等 分 割)	2. 6 5 8 E-0 3	2. 3 3 5 E-0 3	2. 3 2 6 E-0 3	2. 0 5 8 E-0 3	1. 7 8 4 E-0 3
4. 9 2 5 E-0 2		2. 5 9 6 E-0 1	5. 1 7 2 E-0 1	4. 9 5 8 E-0 1	6. 9 4 2 E-0 1	3. 2 1 5 E-0 1
3. 3 4 9 E-0 3		2. 9 3 9 E-0 3	2. 9 0 8 E-0 3	2. 5 3 8 E-0 3	2. 1 7 1 E-0 3	1. 8 6 6 E-0 3
6. 2 0 5 E-0 2		3. 2 6 7 E-0 1	6. 4 6 6 E-0 1	6. 1 1 4 E-0 1	8. 4 4 7 E-0 1	3. 8 0 3 E-0 1
3. 8 2 7 E-0 3		3. 3 5 5 E-0 3	3. 3 0 9 E-0 3	2. 8 7 3 E-0 3	2. 4 4 3 E-0 3	2. 0 7 8 E-0 3
7. 0 9 1 E-0 2		3. 7 3 0 E-0 1	7. 3 5 6 E-0 1	6. 9 1 9 E-0 1	9. 5 0 7 E-0 1	4. 2 3 6 E-0 1
4. 0 4 2 E-0 3		3. 5 4 3 E-0 3	3. 4 9 0 E-0 3	3. 0 2 6 E-0 3	2. 5 7 0 E-0 3	2. 1 8 0 E-0 3
7. 4 8 9 E-0 2		3. 9 3 9 E-0 1	7. 7 5 9 E-0 1	7. 2 8 8 E-0 1	1. 0 0 0 E+0 0	4. 4 4 3 E-0 1
4. 0 3 9 E-0 3		3. 5 1 2 E-0 3	3. 4 9 1 E-0 3	3. 0 2 0 E-0 3	2. 5 6 8 E-0 3	2. 1 7 9 E-0 3
7. 4 8 3 E-0 2		3. 9 0 4 E-0 1	7. 7 6 2 E-0 1	7. 2 7 5 E-0 1	9. 9 9 4 E-0 1	4. 4 4 2 E-0 1
3. 6 8 1 E-0 3		3. 2 0 4 E-0 3	3. 1 9 6 E-0 3	2. 7 7 9 E-0 3	2. 3 8 1 E-0 3	2. 0 4 0 E-0 3
6. 8 2 0 E-0 2		3. 5 6 2 E-0 1	7. 1 0 5 E-0 1	6. 6 9 5 E-0 1	9. 2 6 4 E-0 1	4. 1 5 7 E-0 1
3. 0 5 4 E-0 3		2. 6 6 5 E-0 3	2. 6 7 8 E-0 3	2. 3 6 0 E-0 3	2. 0 5 5 E-0 3	1. 8 0 1 E-0 3
5. 6 5 9 E-0 2		2. 9 6 3 E-0 1	5. 9 5 5 E-0 1	5. 6 8 4 E-0 1	7. 9 9 8 E-0 1	3. 6 7 2 E-0 1
2. 2 2 5 E-0 3		1. 9 5 6 E-0 3	2. 0 0 4 E-0 3	1. 8 2 7 E-0 3	1. 6 5 7 E-0 3	1. 5 3 3 E-0 3
4. 1 2 2 E-0 2		2. 1 7 5 E-0 1	4. 4 5 7 E-0 1	4. 4 0 1 E-0 1	6. 4 4 8 E-0 1	3. 1 2 4 E-0 1

(注) 各値は、各領域の積分出力の最大値を1. 0とした各領域の積分出力の相対値である。

$$\text{平均出力} = 94.83802 \text{ (MW)} \div 2.1635 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{)} = 4.383 \times 10^{-4}$$

上段の数値は単位体積当りの出力相対値

下段の数値は積分出力の相対値

第2.5表 炉心部出力分布* (JFSライブラリ, 基準組成ケース2, ボイド炉心)

径方向 軸方向	第 0 列	第 1 列 (TYPE-Iを含む)	第 2 列	第 3 列	第 4 列 (TYPE-IIを含む)	第 5 列
炉 心 部 (8 等 分 割)	2. 6 2 2 E-0 3	2. 3 0 2 E-0 3	2. 2 9 4 E-0 3	2. 0 4 2 E-0 3	1. 7 9 9 E-0 3	1. 5 9 6 E-0 3
	4. 8 5 7 E-0 2	2. 5 5 9 E-0 1	5. 0 9 9 E-0 1	4. 5 3 9 E-0 1	6. 9 9 9 E-0 1	3. 5 4 8 E-0 1
	3. 3 0 3 E-0 3	2. 8 9 9 E-0 3	2. 8 6 3 E-0 3	2. 5 0 7 E-0 3	2. 1 7 7 E-0 3	1. 8 6 6 E-0 3
	6. 1 1 8 E-0 2	3. 2 2 2 E-0 1	6. 3 6 4 E-0 1	5. 5 7 3 E-0 1	8. 4 6 9 E-0 1	4. 1 4 8 E-0 1
	3. 7 7 4 E-0 3	3. 3 0 7 E-0 3	3. 2 5 4 E-0 3	2. 8 3 2 E-0 3	2. 4 4 5 E-0 3	2. 0 7 6 E-0 3
	6. 9 9 2 E-0 2	3. 6 7 6 E-0 1	7. 2 3 3 E-0 1	6. 2 9 5 E-0 1	9. 5 1 3 E-0 1	4. 6 1 6 E-0 1
	3. 9 8 5 E-0 3	3. 4 9 2 E-0 3	3. 4 3 1 E-0 3	2. 9 8 1 E-0 3	2. 5 1 4 E-0 3	2. 1 7 4 E-0 3
	7. 3 8 3 E-0 2	3. 8 8 1 E-0 1	7. 6 2 7 E-0 1	6. 6 2 7 E-0 1	9. 7 8 2 E-0 1	4. 8 3 3 E-0 1
	3. 9 8 3 E-0 3	3. 4 6 0 E-0 3	3. 4 3 2 E-0 3	2. 9 7 6 E-0 3	2. 5 7 0 E-0 3	2. 1 7 6 E-0 3
	7. 3 7 8 E-0 2	3. 8 4 6 E-0 1	7. 6 3 0 E-0 1	6. 6 1 6 E-0 1	1. 0 0 0 E+0 0	4. 8 3 7 E-0 1
	3. 6 3 4 E-0 3	3. 1 6 1 E-0 3	3. 1 4 4 E-0 3	2. 7 4 0 E-0 3	2. 3 8 2 E-0 3	2. 0 3 6 E-0 3
	6. 7 3 2 E-0 2	3. 5 1 3 E-0 1	6. 9 9 0 E-0 1	6. 0 9 2 E-0 1	9. 2 6 8 E-0 1	4. 5 2 5 E-0 1
	3. 0 1 8 E-0 3	2. 6 3 2 E-0 3	2. 6 4 0 E-0 3	2. 3 3 1 E-0 3	2. 0 5 9 E-0 3	1. 7 9 9 E-0 3
	5. 5 9 1 E-0 2	2. 9 2 5 E-0 1	5. 8 6 9 E-0 1	5. 1 8 1 E-0 1	8. 0 1 0 E-0 1	3. 9 9 9 E-0 1
	2. 2 0 4 E-0 3	1. 9 3 7 E-0 3	1. 9 8 5 E-0 3	1. 8 1 3 E-0 3	1. 6 6 0 E-0 3	1. 5 3 0 E-0 3
	4. 0 8 2 E-0 2	2. 1 5 3 E-0 1	4. 4 1 3 E-0 1	4. 0 3 1 E-0 1	6. 4 5 9 E-0 1	3. 4 0 2 E-0 1

*最大値を1. 0に規格化した積分出力値

上段の数値は単位体積当りの出力相対値(VENUSへの入力)

下段の数値は積分出力の相対値

第2.6表 物質反応度係数分布 (制御棒移設後, 基準組成2, ボイド炉心)
($\Delta k / k k^0 / \Delta \rho / \rho$)

径方向 軸方向	第0列	第1列 (type-1含む)	第2列	第3列	第4列 (type-2含む)	第5列	半径方向反射体				
上部 反射体	9.131E-05	5.095E-04	8.401E-04	8.972E-05	8.237E-04	6.192E-04	-9.479E-05	2.459E-04	2.660E-04	1.805E-04	7.672E-05
	3.836E-04	2.226E-03	4.245E-03	3.700E-04	4.446E-03	8.474E-04	1.778E-03	1.201E-03	1.369E-03	7.709E-04	3.060E-04
	2.340E-04	1.346E-03	2.321E-03	3.934E-03	2.833E-03	9.333E-04	1.092E-03	7.195E-04	8.299E-04	4.112E-04	1.556E-04
炉 心 部 (8 分割)	1.849E-03	9.804E-03	1.735E-02	1.801E-02	1.829E-02	6.791E-03	3.443E-03	2.134E-03	2.438E-03	1.147E-03	4.245E-04
	2.318E-03	1.214E-02	2.232E-02	2.078E-02	2.408E-02	9.341E-03	4.337E-03	2.579E-03	2.958E-03	1.345E-03	4.900E-04
	2.717E-03	1.411E-02	2.649E-02	2.287E-02	2.892E-02	1.134E-02	5.183E-03	3.079E-03	3.595E-03	1.620E-03	5.880E-04
	2.917E-03	1.511E-02	2.857E-02	2.389E-02	3.121E-02	1.288E-02	5.563E-03	3.308E-03	3.909E-03	1.769E-03	6.434E-04
	2.916E-03	1.496E-02	2.848E-02	2.390E-02	3.083E-02	1.273E-02	5.429E-03	3.228E-03	3.831E-03	1.758E-03	6.442E-04
	2.605E-03	1.346E-02	2.525E-02	2.233E-02	2.710E-02	1.112E-02	4.754E-03	2.839E-03	3.377E-03	1.594E-03	5.924E-04
	2.143E-03	1.122E-02	2.040E-02	2.011E-02	2.127E-02	8.547E-03	3.604E-03	2.188E-03	2.656E-03	1.326E-03	5.036E-04
	1.697E-03	9.036E-03	1.545E-02	1.844E-02	1.508E-02	5.673E-03	1.993E-03	1.391E-03	1.874E-03	1.024E-03	3.991E-04
	2.147E-04	1.280E-03	2.506E-03	5.347E-03	4.193E-03	1.662E-03	2.467E-03	1.864E-03	2.551E-03	1.467E-03	5.837E-04
	3.054E-05	1.777E-04	3.390E-04	1.119E-03	1.146E-03	4.578E-04	5.617E-04	2.432E-04	2.458E-04	1.501E-04	5.910E-05
下部 空 隔 部	1.619E-04	9.379E-04	1.693E-03	7.116E-03	4.221E-03	1.164E-03	1.774E-03	1.212E-03	1.163E-03	5.430E-04	1.900E-04
下部 反 射 体											

MAX POSITIVE WORTH = 9.345E-01

CORE = 7.417E-01
UPPER.REFLCT = 2.737E-02
DOWN .REFLCT = 1.667E-02
RADIAL.REFLC = 1.204E-01
DOWN SPACE = 1.471E-02

表2.7 単位体積当たりの物質反応度値分布 (制御棒移設後: VENUSインプット)

VENUS INPUT WORTH MAP DATA						
REGION NO. = 1						
H	R=> 1	R=> 2	R=> 3	R=> 4	R=> 5	R=> 6
12	7.49279E-07	7.19649E-07	6.18765E-07	6.99823E-07	3.77974E-07	2.49043E-07
13	4.39413E-07	4.25763E-07	4.04851E-07	2.35463E-08	2.12203E-07	8.08926E-08
14	1.44730E-07	1.34844E-07	1.10865E-07	7.90051E-09	5.43997E-08	8.17894E-08
REGION NO. = 2						
H	R=> 1	R=> 2	R=> 3	R=> 4	R=> 5	R=> 6
4	4.18983E-06	3.72510E-06	3.17589E-06	2.52930E-06	1.55133E-06	1.16722E-06
5	5.29098E-06	4.62546E-06	4.19341E-06	2.75837E-06	2.18811E-06	1.75855E-06
6	6.43154E-06	5.54882E-06	5.19029E-06	3.06283E-06	2.78782E-06	2.28791E-06
7	7.24174E-06	6.20347E-06	5.88868E-06	3.29746E-06	3.19019E-06	2.63457E-06
8	7.16018E-06	6.19298E-06	5.83876E-06	3.25784E-06	3.19204E-06	2.63469E-06
9	6.70815E-06	5.81685E-06	5.44525E-06	3.13694E-06	2.97508E-06	2.33320E-06
10	5.72305E-06	5.00473E-06	4.58808E-06	2.85027E-06	2.47718E-06	1.92191E-06
11	4.56504E-06	4.04165E-06	3.56640E-06	2.47029E-06	1.88152E-06	1.39723E-06
REGION NO. = 3						
H	R=> 1	R=> 2	R=> 3	R=> 4	R=> 5	R=> 6
1	8.73705E-08	8.45128E-08	7.60672E-08	2.13344E-07	9.49119E-08	5.23476E-08
2	1.66040E-07	1.61317E-07	1.53450E-07	3.37987E-07	2.59607E-07	2.07825E-07
3	2.14424E-07	2.13451E-07	2.08375E-07	2.96672E-07	1.74483E-07	1.38324E-07
REGION NO. = 4						
H	R=> 7	R=> 8	R=> 9	R=> 10	R=> 11	
1	4.25643E-08	2.56413E-08	9.65072E-09	3.71086E-09	2.13615E-09	
2	1.35776E-07	5.18354E-08	2.05488E-08	1.03343E-08	6.69408E-09	
3	1.09543E-07	7.29803E-08	3.91754E-08	1.85536E-08	1.21448E-08	
4	2.18774E-07	1.34636E-07	7.11452E-08	3.20163E-08	2.05284E-08	
5	3.95615E-07	2.11778E-07	1.00833E-07	4.14586E-08	2.59036E-08	
6	5.21844E-07	2.74784E-07	1.28204E-07	4.98371E-08	3.04707E-08	
7	5.99445E-07	3.14274E-07	1.46295E-07	5.52881E-08	3.33300E-08	
8	6.07115E-07	3.18326E-07	1.47542E-07	5.49886E-08	3.29025E-08	
9	5.68943E-07	2.98018E-07	1.36481E-07	5.06507E-08	3.02448E-08	
10	4.76078E-07	2.49623E-07	1.12298E-07	4.20527E-08	2.52040E-08	
11	3.77936E-07	2.06548E-07	9.25556E-08	3.58615E-08	2.18346E-08	
12	1.55462E-07	9.03187E-08	4.08616E-08	1.66739E-08	1.03800E-08	
13	9.05525E-08	5.39332E-08	2.41135E-08	1.11828E-08	7.30256E-09	
14	6.68000E-09	1.52798E-08	6.48311E-09	3.62305E-09	2.53343E-09	

第2.8表 物質反応度値分布 (基準組成ケース2, ボイド炉心)

$[(\Delta k/k')/(\Delta\rho/\rho)]^*$

軸方向	徑方向	第0列	第1列 (TYPE-I組合)	第2列	第3列	第4列 (TYPE-II組合)	第5列	徑方向反射体				
	J/I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
上部反射体	1	9.120E-05	5.083E-04	8.346E-04	-2.952E-05	8.858E-04	3.140E-04	3.759E-04	2.681E-04	2.899E-04	1.952E-04	8.272E-05
	2	3.866E-04	2.240E-03	4.337E-03	-1.701E-04	4.480E-03	1.604E-03	1.818E-03	1.253E-03	1.445E-03	8.173E-04	3.247E-04
	3	2.356E-04	1.352E-03	2.315E-03	4.099E-03	2.842E-03	8.981E-04	1.044E-03	7.290E-04	8.615E-04	4.313E-04	1.636E-04
炉心部 (8等分割)	4	1.872E-03	9.904E-03	1.745E-02	1.755E-02	1.869E-02	7.324E-03	3.530E-03	2.196E-03	2.529E-03	1.199E-03	4.447E-04
	5	2.349E-03	1.220E-02	2.251E-02	1.975E-02	2.442E-02	1.017E-02	4.492E-03	2.671E-03	3.070E-03	1.402E-03	5.119E-04
	6	2.756E-03	1.430E-02	2.676E-02	2.130E-02	2.923E-02	1.242E-02	5.363E-03	3.190E-03	3.731E-03	1.687E-03	6.133E-04
	7	2.960E-03	1.531E-02	2.808E-02	2.205E-02	3.162E-02	1.354E-02	5.753E-03	3.427E-03	4.057E-03	1.842E-03	6.707E-04
	8	2.959E-03	1.517E-02	2.879E-02	2.212E-02	3.120E-02	1.336E-02	5.615E-03	3.345E-03	3.977E-03	1.830E-03	6.713E-04
	9	2.643E-03	1.363E-02	2.551E-02	2.099E-02	2.752E-02	1.168E-02	4.919E-03	2.944E-03	3.509E-03	1.660E-03	6.173E-04
	10	2.171E-03	1.134E-02	2.056E-02	1.945E-02	2.165E-02	8.989E-03	3.731E-03	2.271E-03	2.763E-03	1.381E-03	5.247E-04
	11	1.714E-03	9.101E-03	1.549E-02	1.850E-02	1.541E-02	5.957E-03	2.076E-03	1.450E-03	1.955E-03	1.067E-03	4.158E-04
下部空層部	12	2.162E-04	1.288E-03	2.530E-03	5.784E-03	3.078E-03	1.608E-03	2.633E-03	1.964E-03	2.671E-03	1.527E-03	6.064E-04
下部反射体	13	3.092E-05	1.800E-04	3.453E-04	1.255E-03	7.057E-04	5.454E-04	6.160E-04	2.613E-04	2.565E-04	1.552E-04	6.103E-05
	14	1.654E-04	9.578E-04	1.724E-03	8.225E-03	3.054E-03	1.204E-03	1.792E-03	1.232E-03	1.180E-03	5.543E-04	1.944E-04

* ρ : 密度

CORE = 7.514E-01
 UPPER.REFLCT = 2.719E-02
 DOWN.REFLCT = 1.855E-02
 RADIAL.REFLC = 1.249E-01
 DOWN SPACE = 1.530E-02

表 2.9 制御棒移設により変化する核的データの有効仕事量に与える影響

ケース ID	制御棒移設前	制御棒移設後	ピーク出力 *2 (MW)	全放出 エネルギー (MW・sec)	平均 炉心温度 (K)	運動 *3 エネルギー (MW・sec)	内部 *3 エネルギー (MW・sec)	有効仕事*4 エネルギー (MW・sec)	制御棒移設 前に対する増減 (%)
制御棒移設前	——	——	1.36(7.2)	2241	7198	12.1	61.2	73.2	——
ドップラー (Tdk/dT) (ミカル)	*1 -1.37×10^{-3}	*1 -1.31×10^{-3}	1.41(7.2)	2257	7232	12.5	66.1	78.6	+7.40
即発中性子寿命 (sec)	3.34×10^{-7}	3.23×10^{-7}	1.36(7.1)	2237	7188	11.9	59.8	71.7	-2.05
物質反応度価値分布	表 2.8	表 2.6	1.36(7.2)	2243	7202	12.0	61.9	73.9	+0.90
炉心出力分布	表 2.5	表 2.4	1.36(7.2)	2231	7173	12.1	61.9	74.0	+1.09
制御棒移設後	——	——	1.41(7.1)	2244	7203	12.3	66.3	78.3	+7.78

*1 実際の計算には
25% の誤差を考慮
する。

*2 () 内の数値は到達時間
(msec)

*3 各エネルギーの定義
は現申請書添付書類十
2.2 節仮想事故の(2.
2.16), (2.2.17)の式を
参照のこと

*4 有効仕事エネルギー
= 運動エネルギー +
内部エネルギー

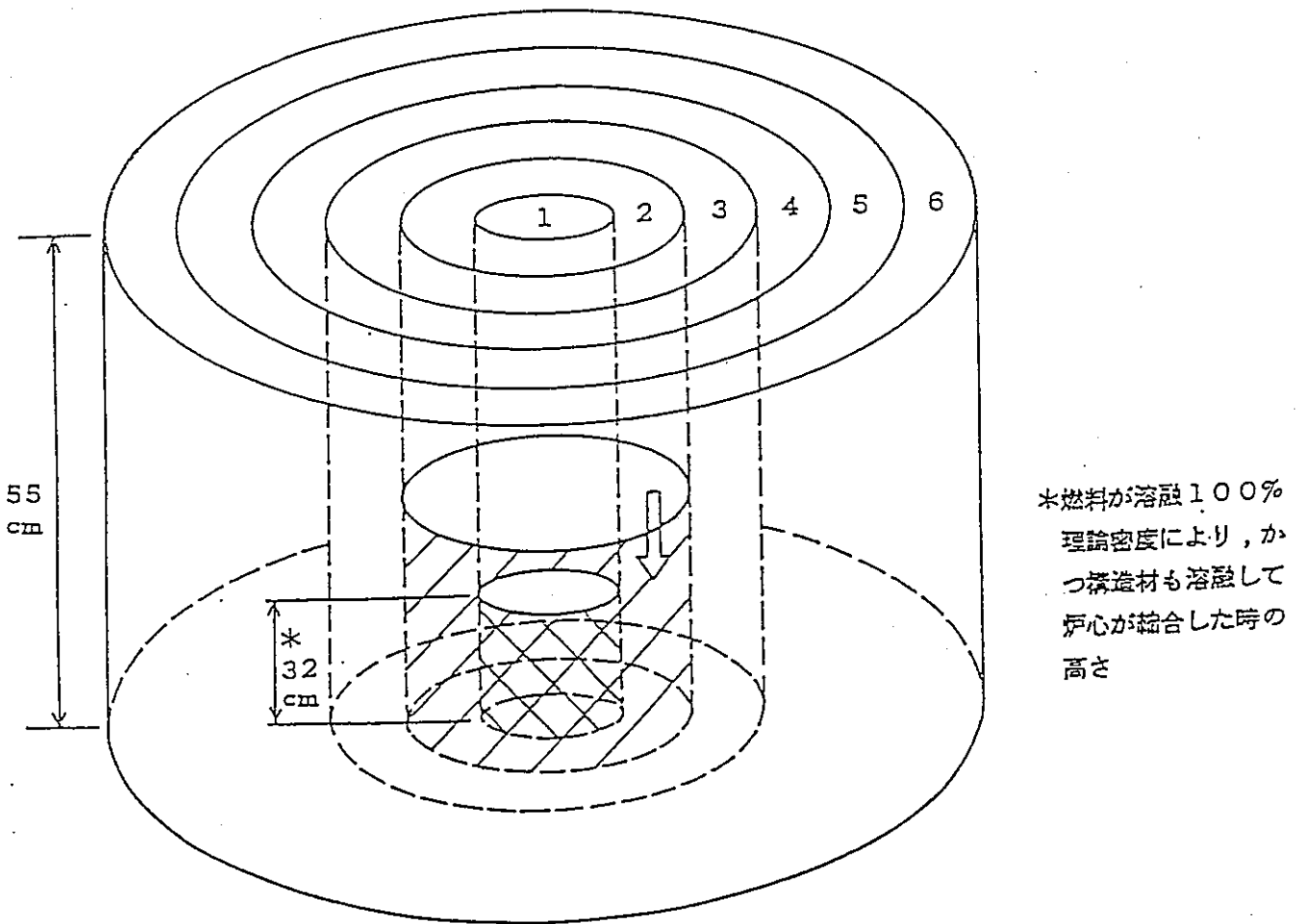
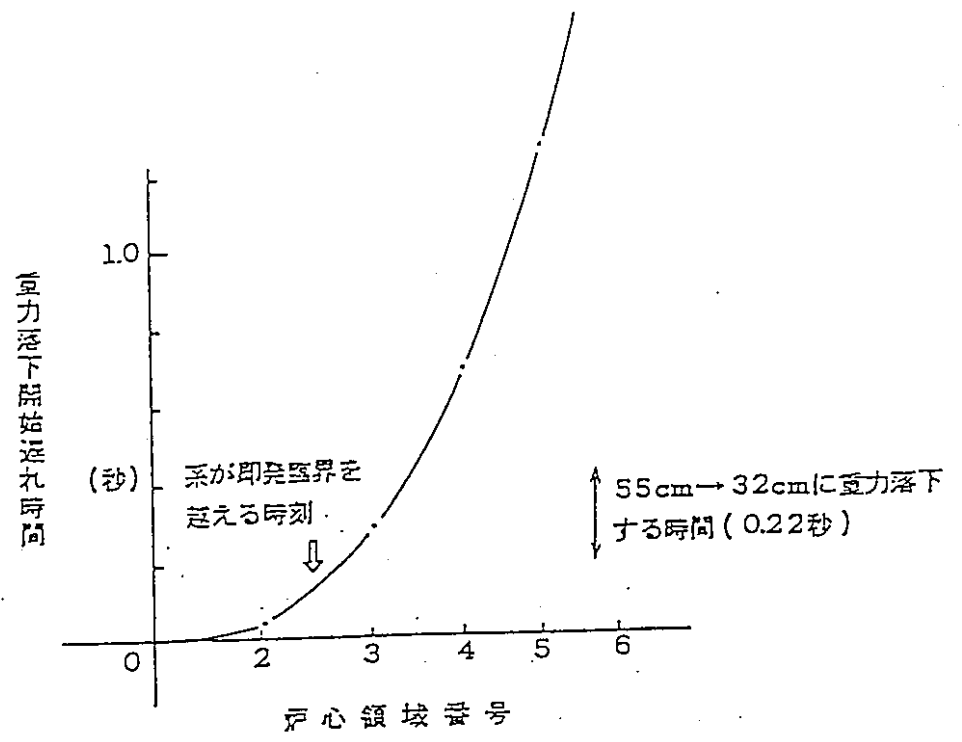


図2.1 炉心溶融再臨界事故（起因事象）解析概念図

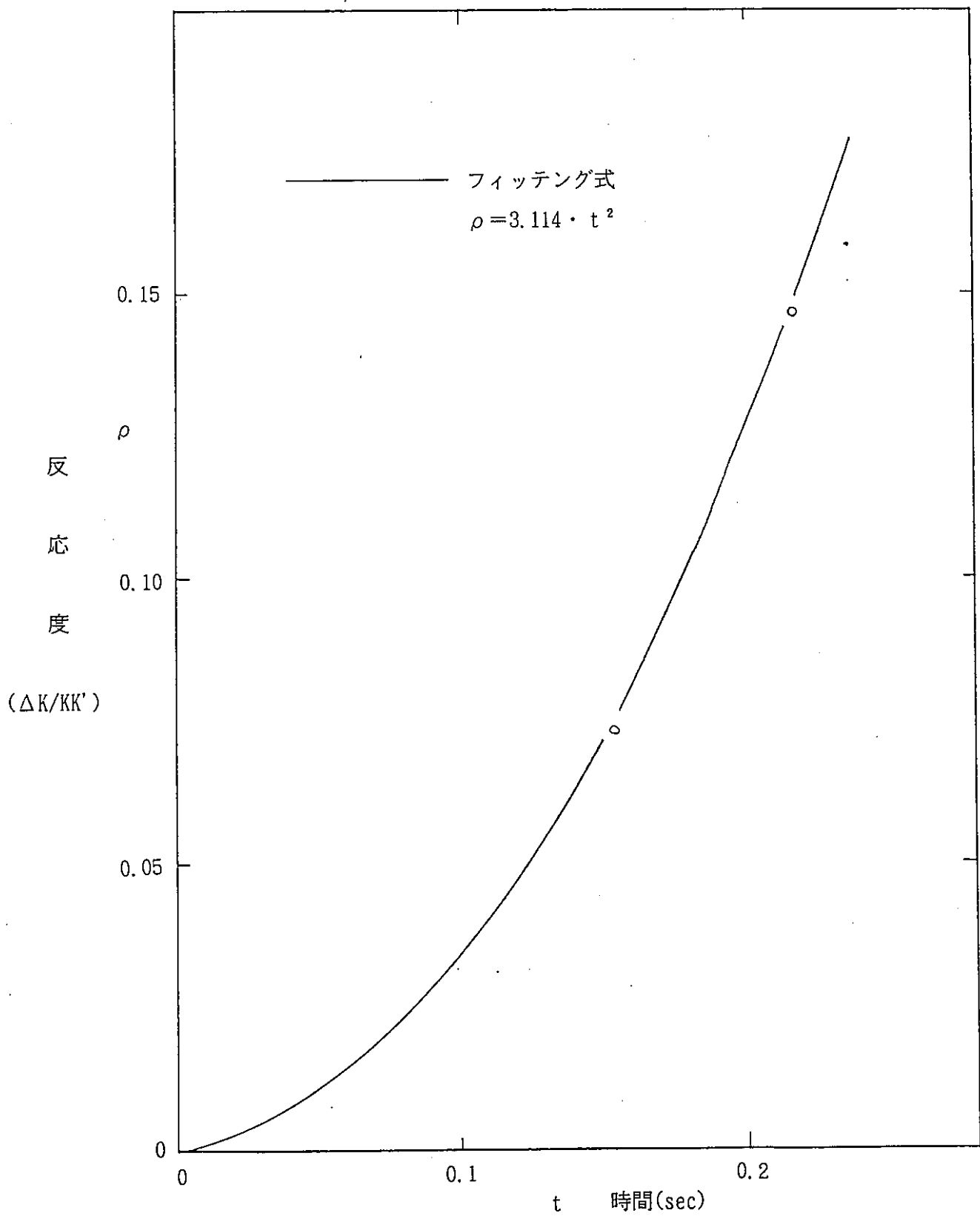


図2.2 全炉心溶融による反応度投入（制御棒移設後）

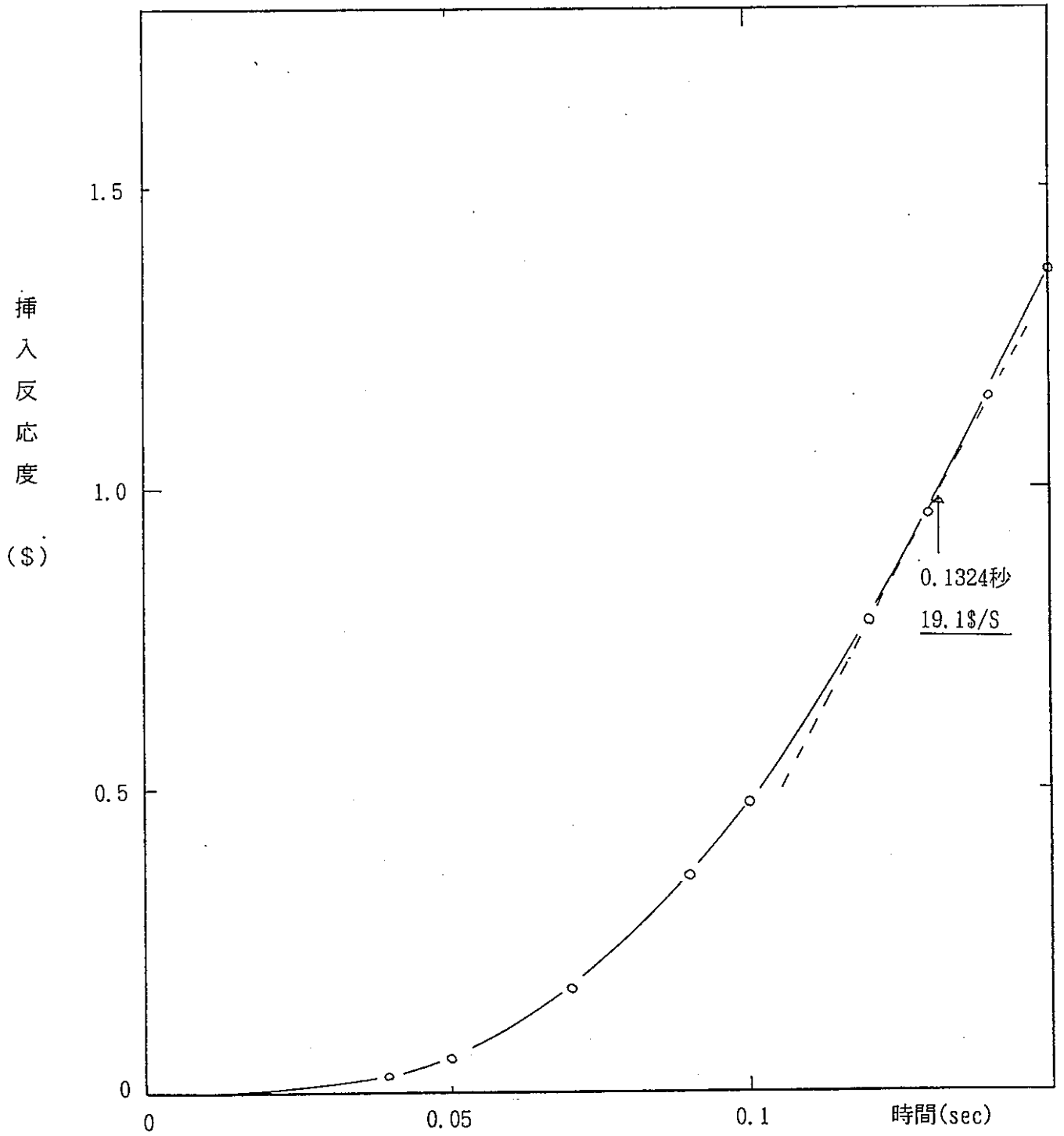


図2.3 炉心溶融による反応度挿入率 (制御棒移設後)

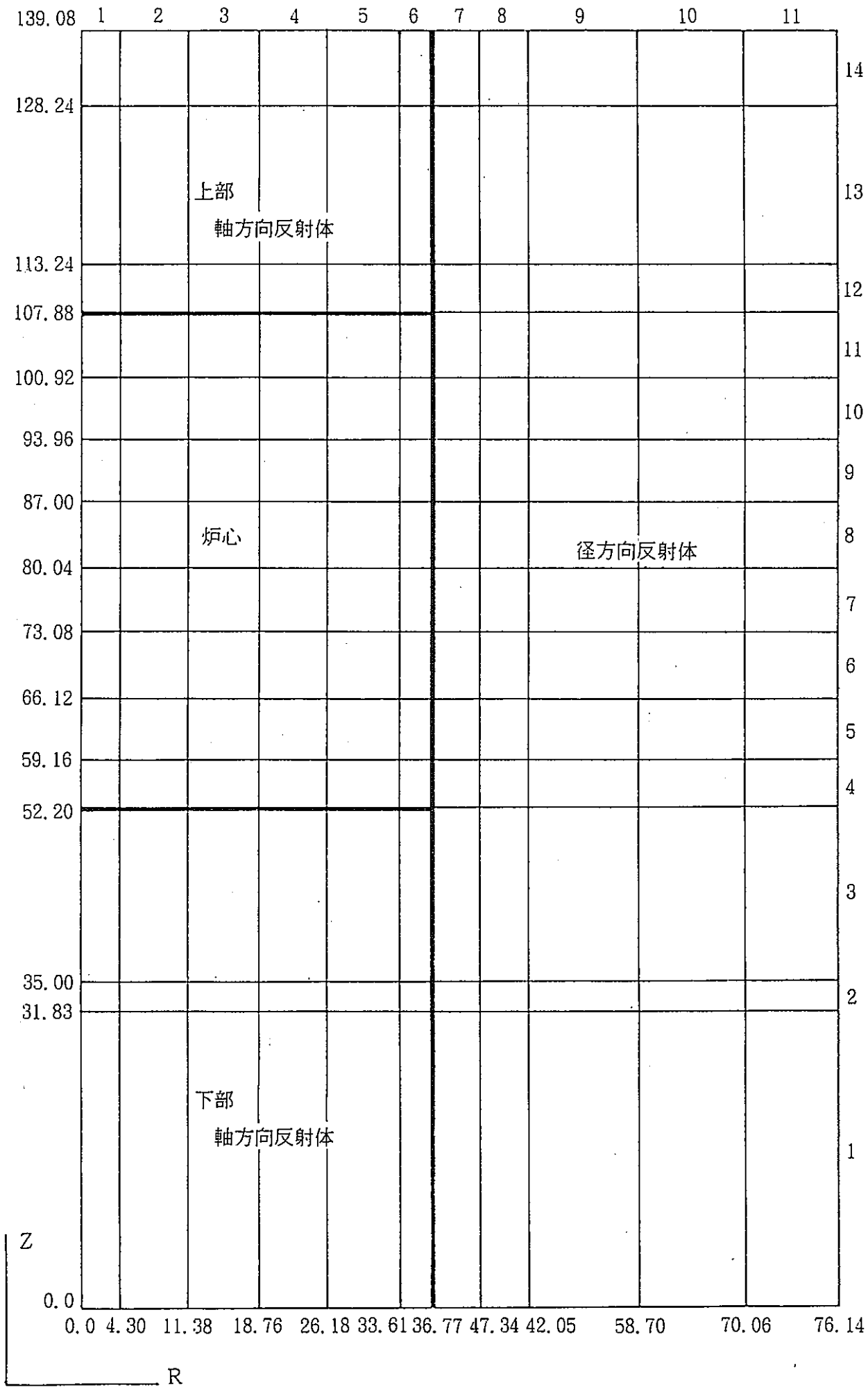


図2.4 VENUSコード用のR-Z 2次元解析メッシュ体系図

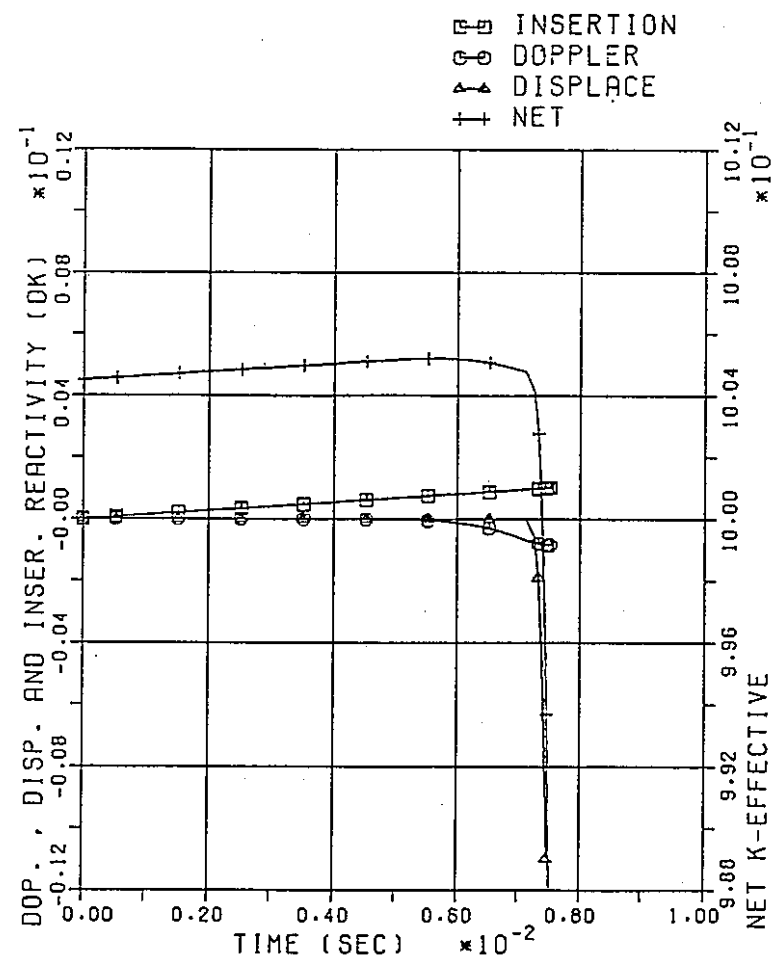
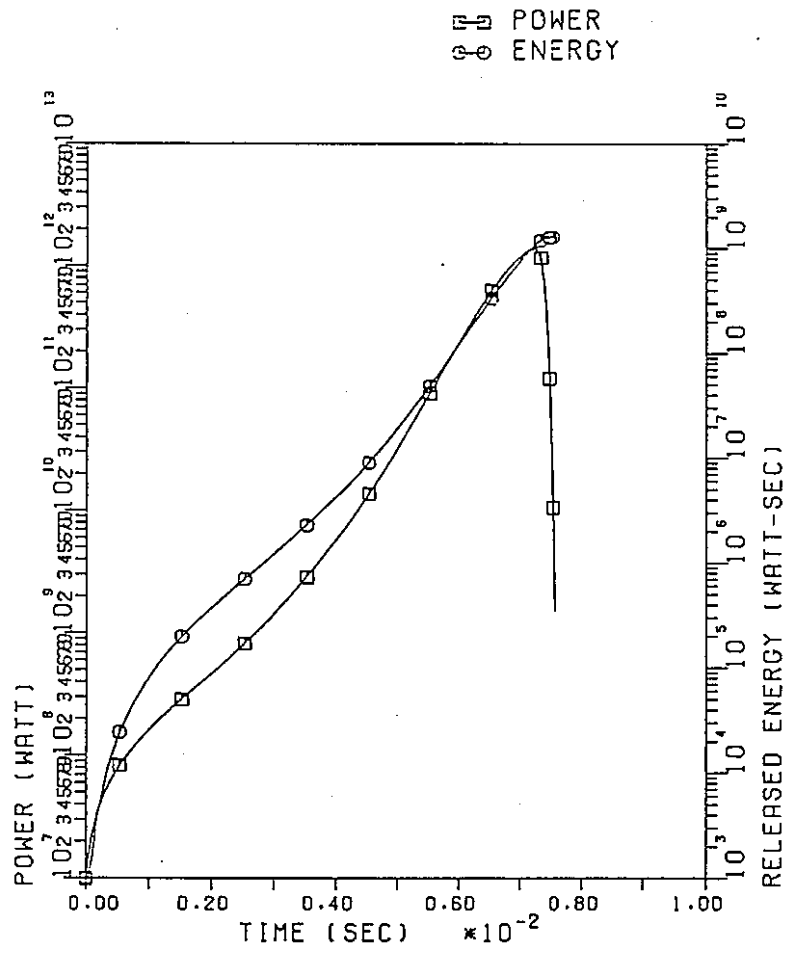
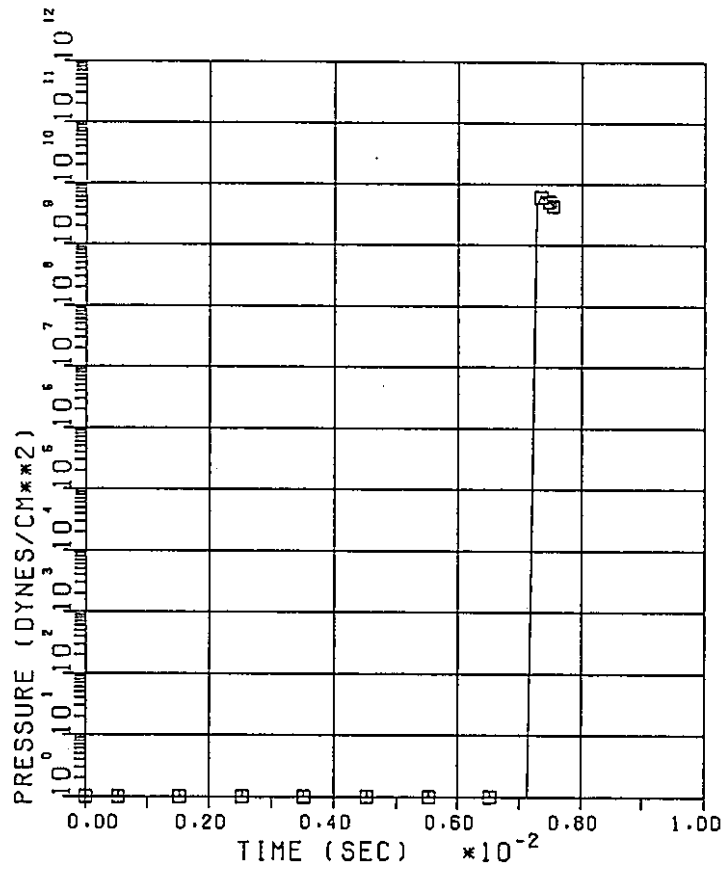


図2.5(1)炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
 (ドップラー係数を変えたケース)

□-□ PRESSURE



□-□ TEMPERATURE

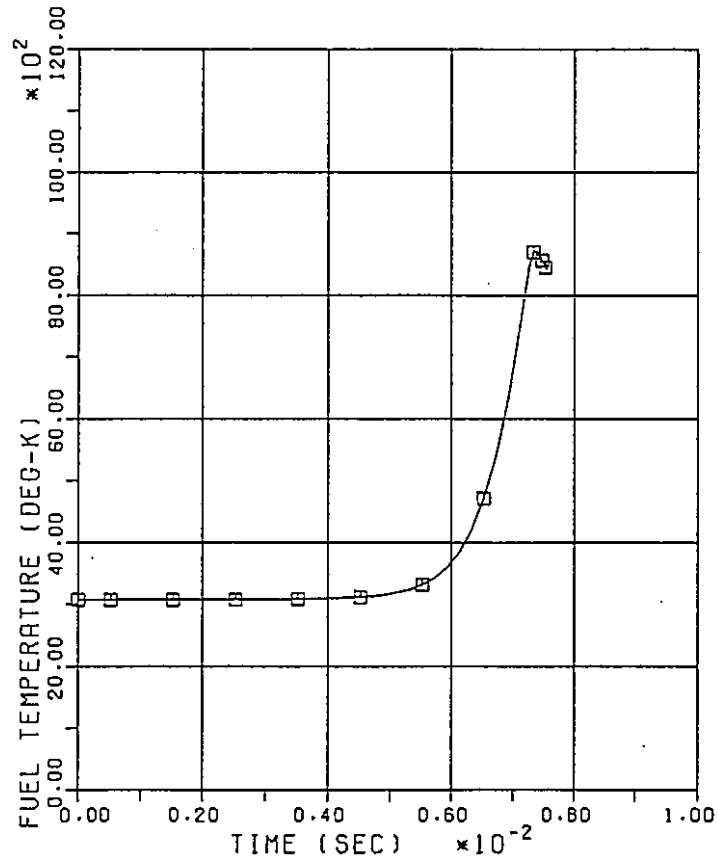


図2.5(2)炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図 (ドップラー係数を変えたケース)

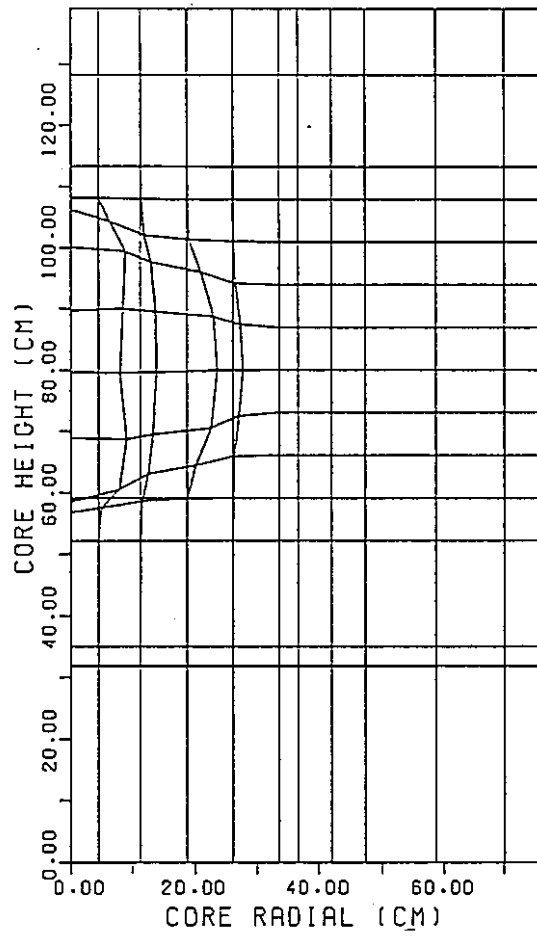


図2.5(3)炉心最終変形図（ドップラー係数を変えたケース）

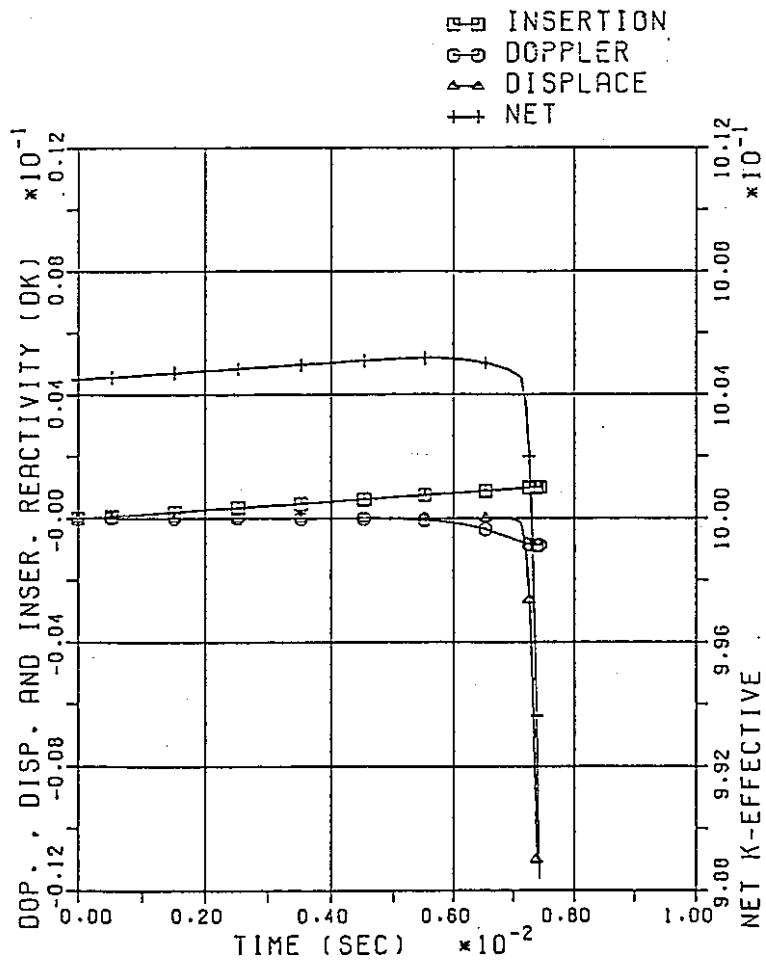
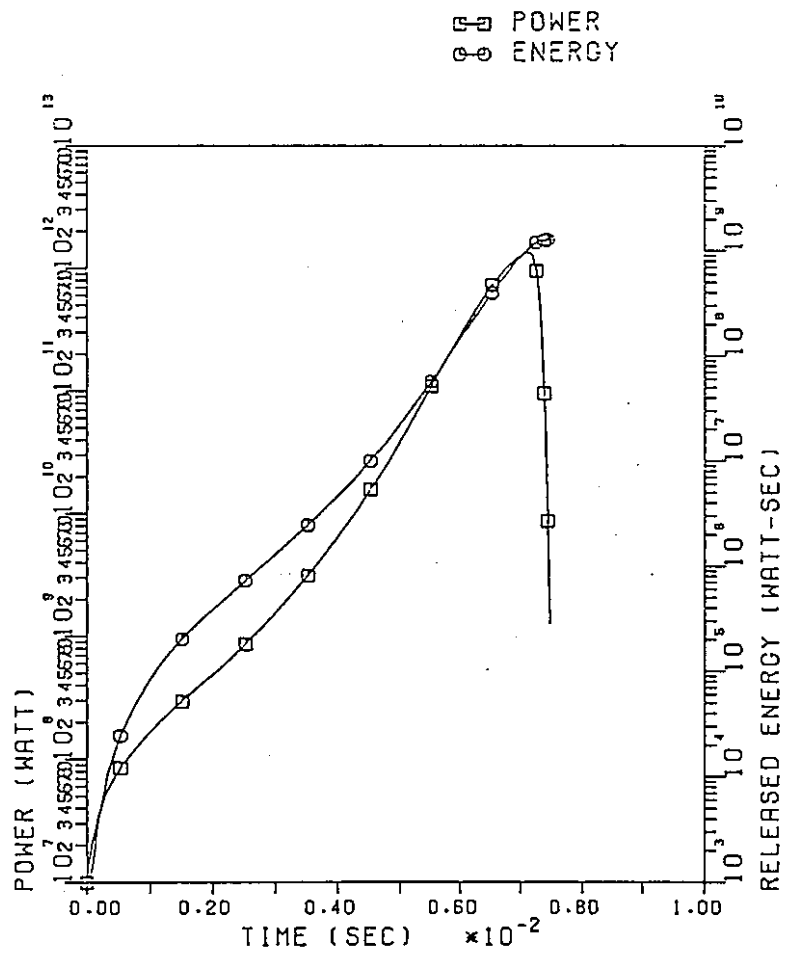
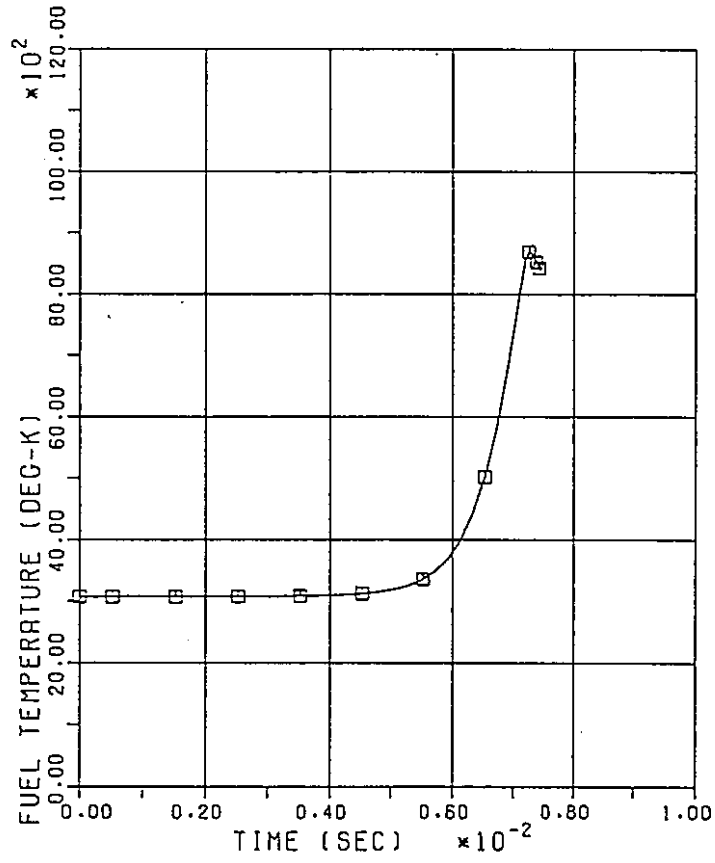


図2.6(1)炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
 (即発中性子寿命を変えたケース)



PRESSURE

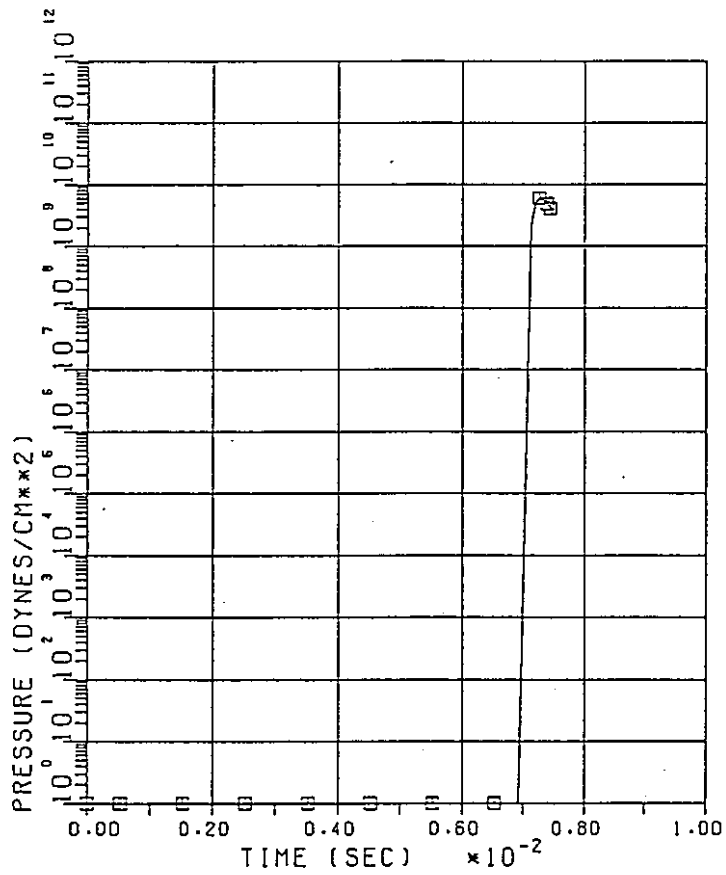


図2.6(2)炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図 (即発中性子寿命を変えたケース)

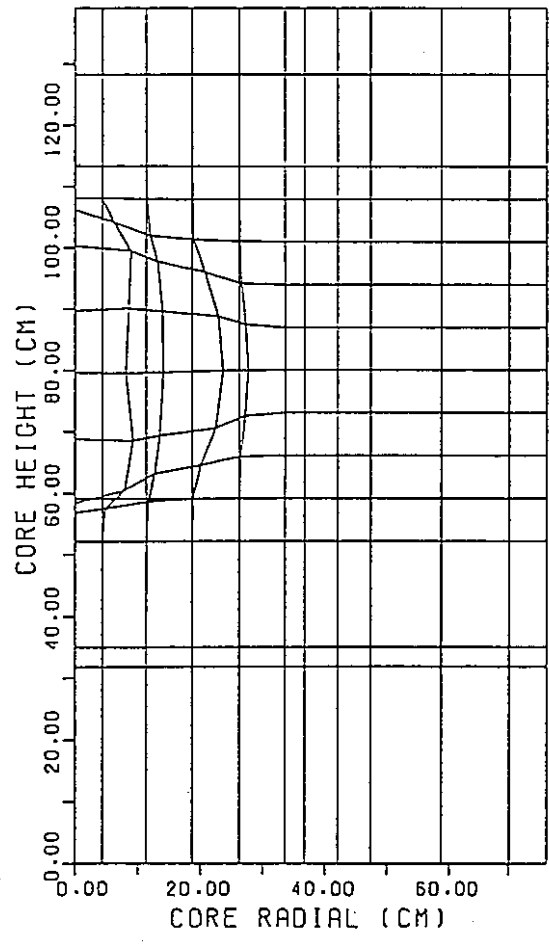


図2.6(3) 炉心最終変形図 (即発中性子寿命を変えたケース)

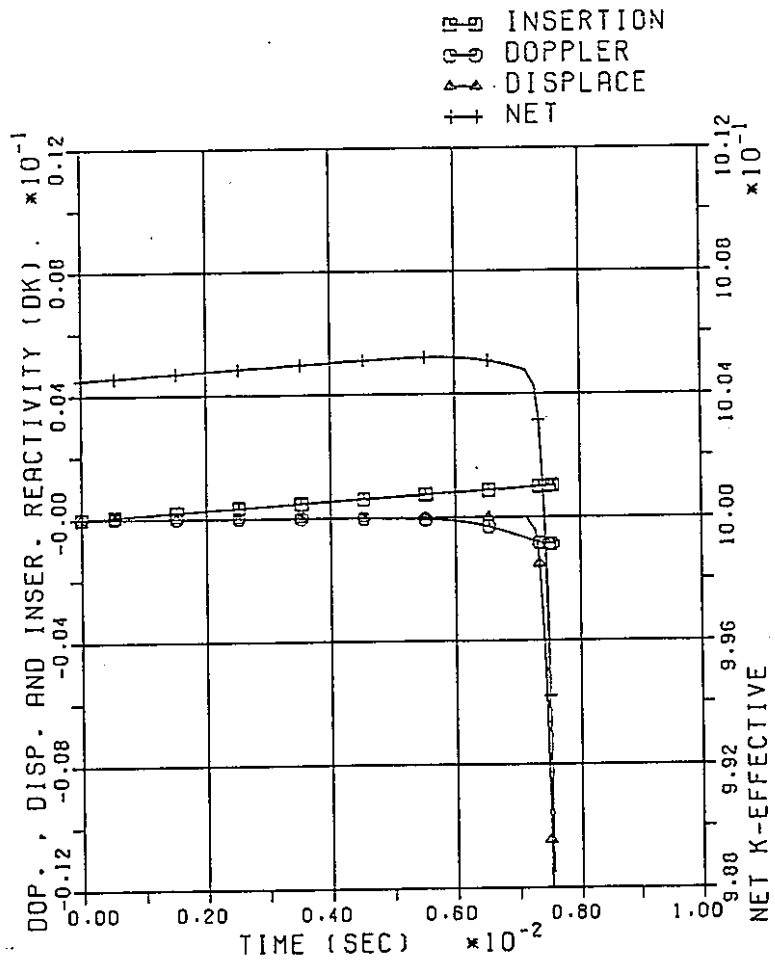
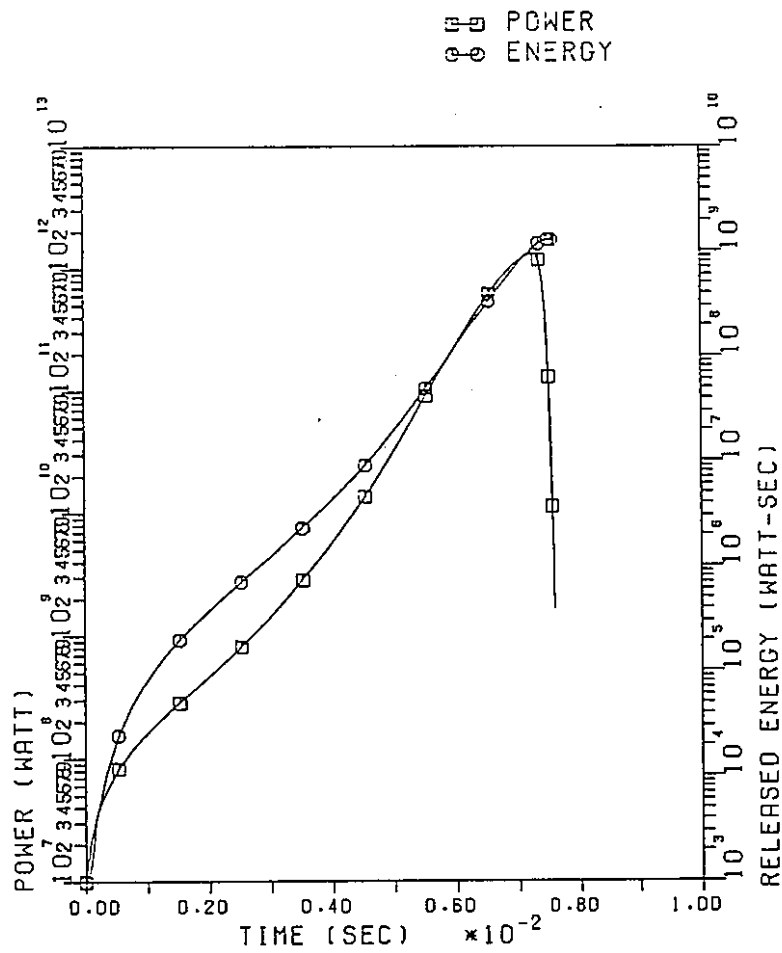
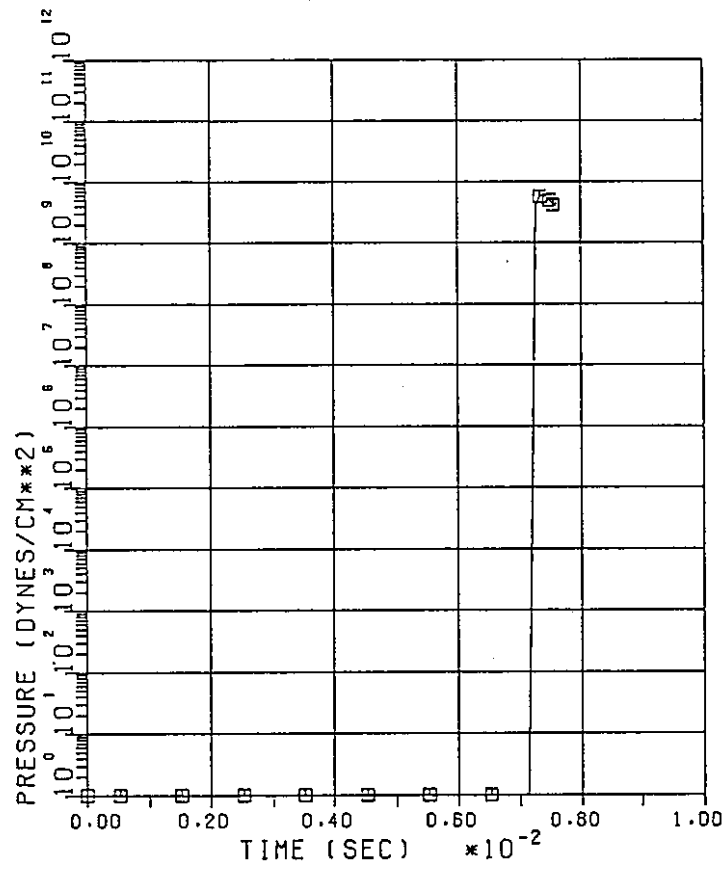


図2.7(1)炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
 (物質反応度値を変えたケース)

PRESSURE



TEMPERATURE

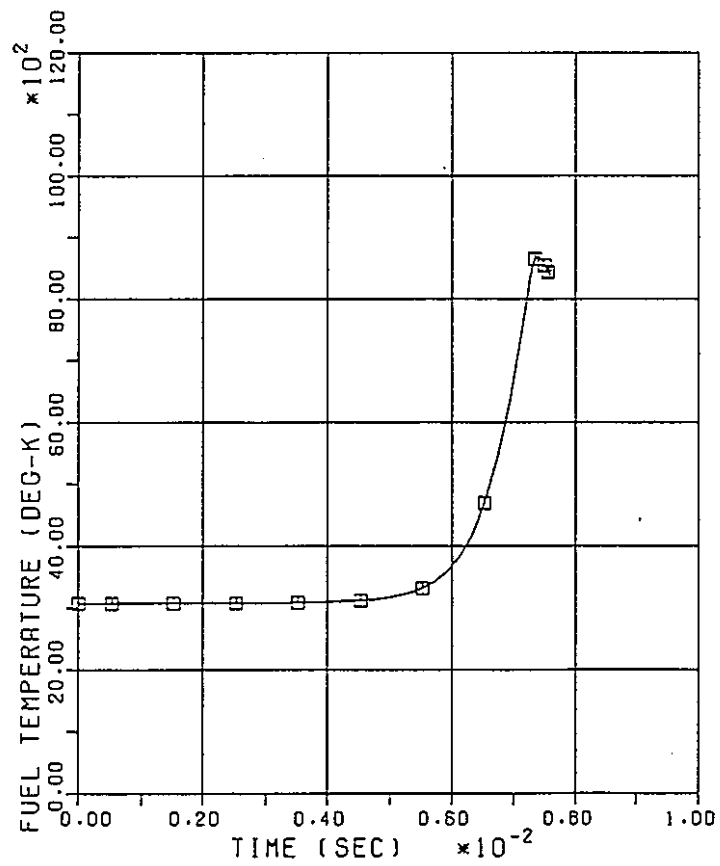


図2.7(2)炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図 (物質反応度値を変えたケース)

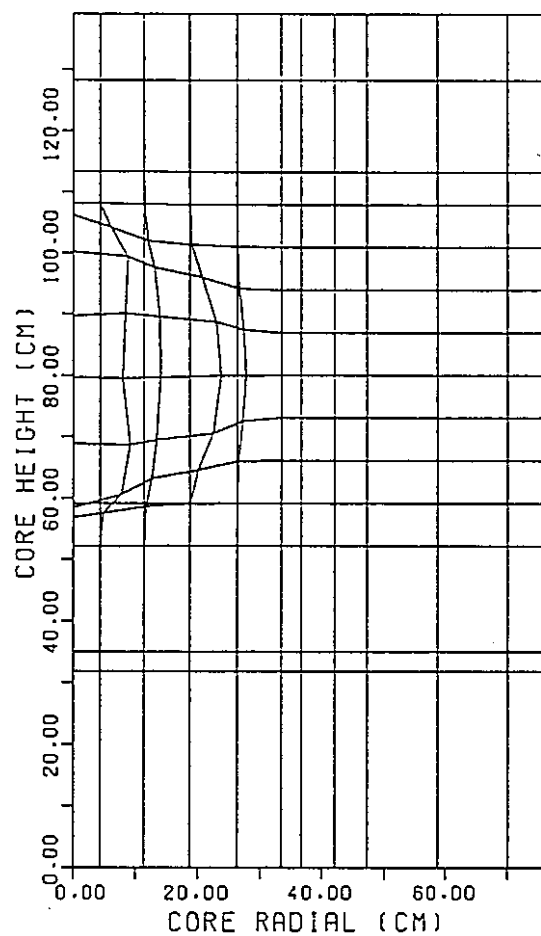


図2.7(3) 炉心最終変形図 (物質反応度値を変えたケース)

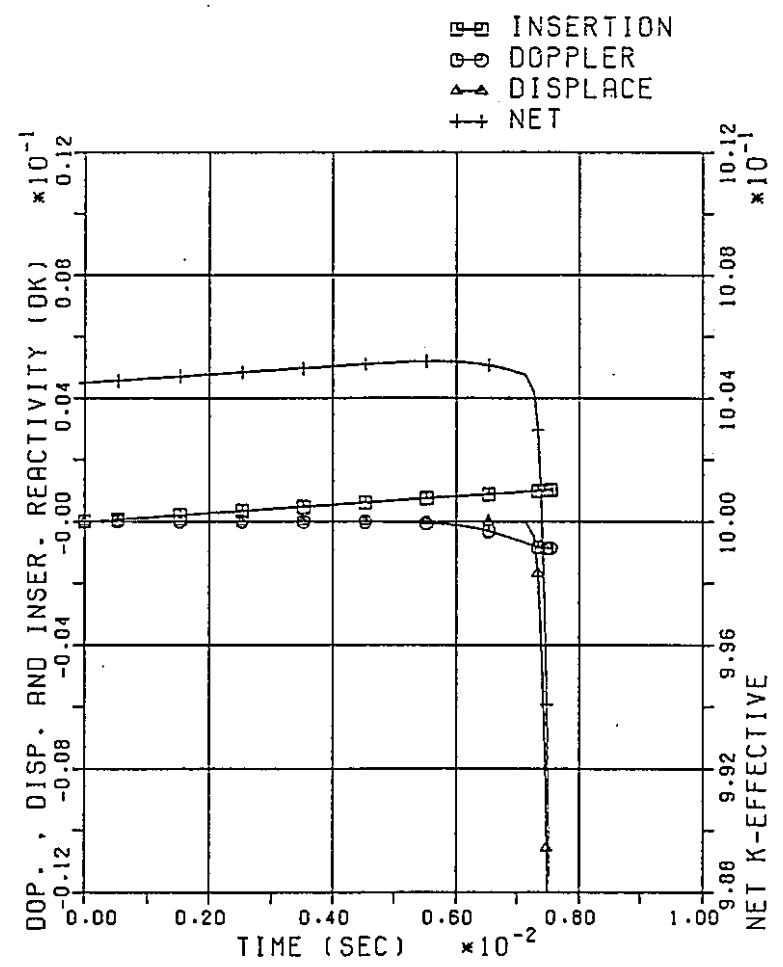
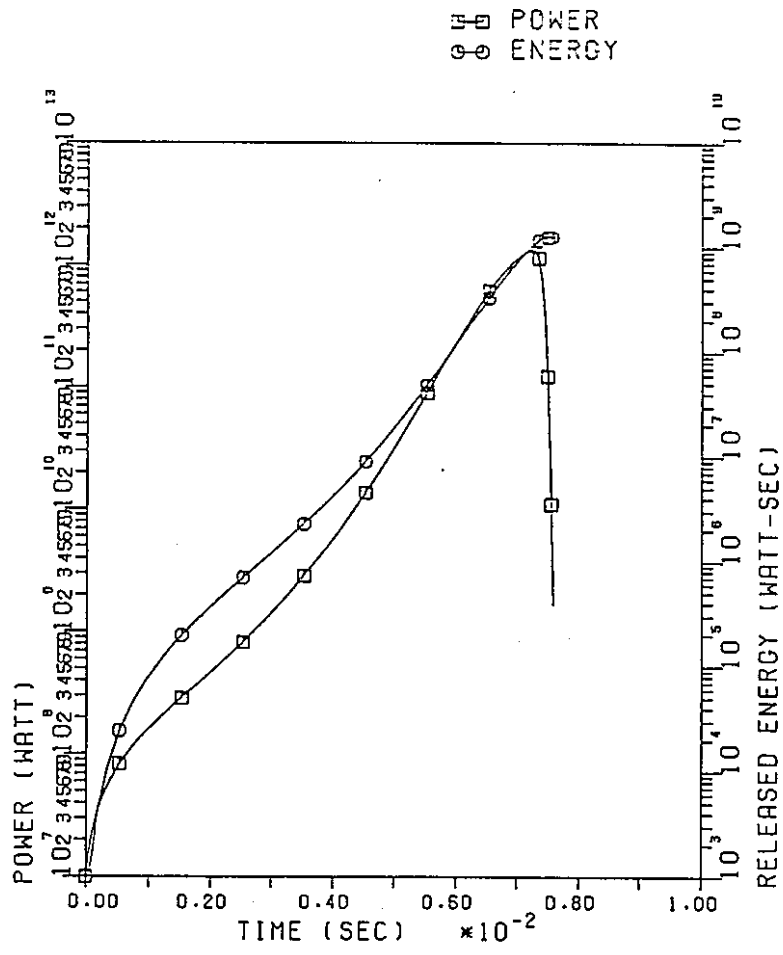
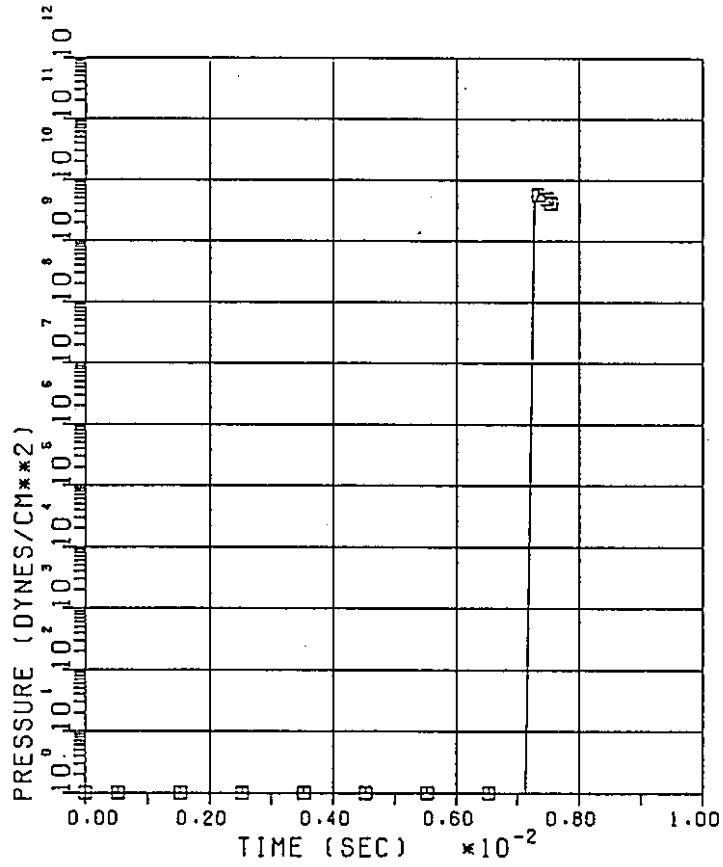


図2.8(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図
 (炉心出力分布を変えたケース)

PRESSURE



TEMPERATURE

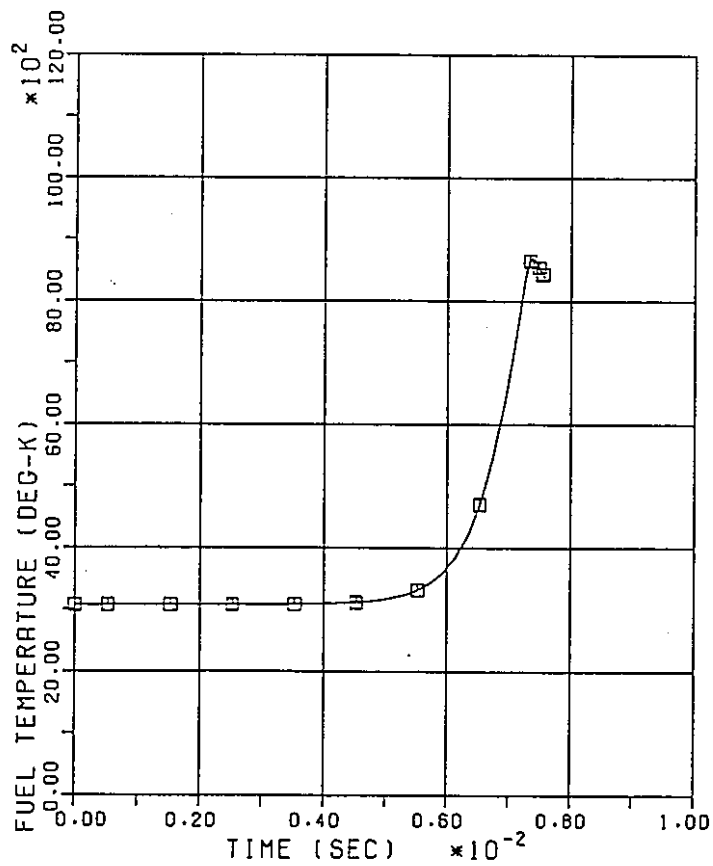


図2.8(2)炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図 (炉心出力分布を変えたケース)

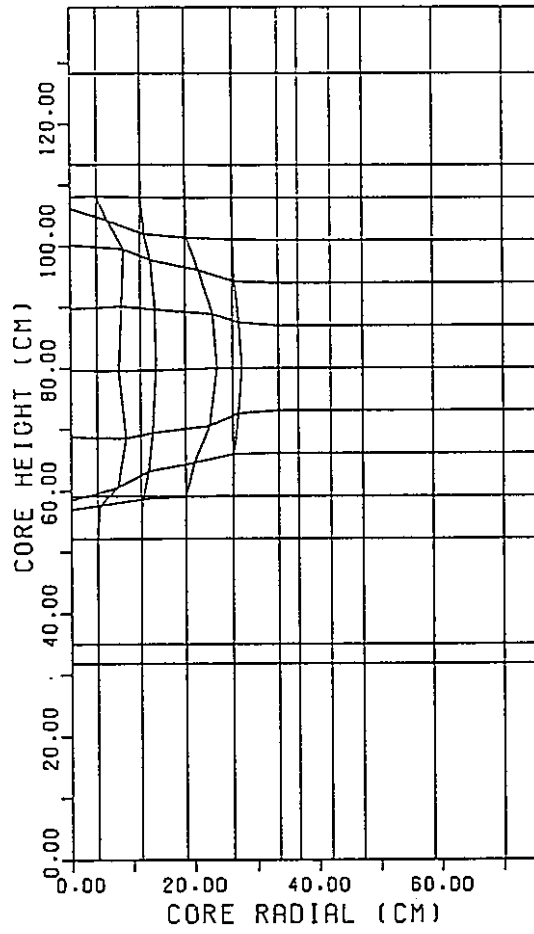


図2.8(3)炉心最終変形図 (炉心出力分布を変えたケース)

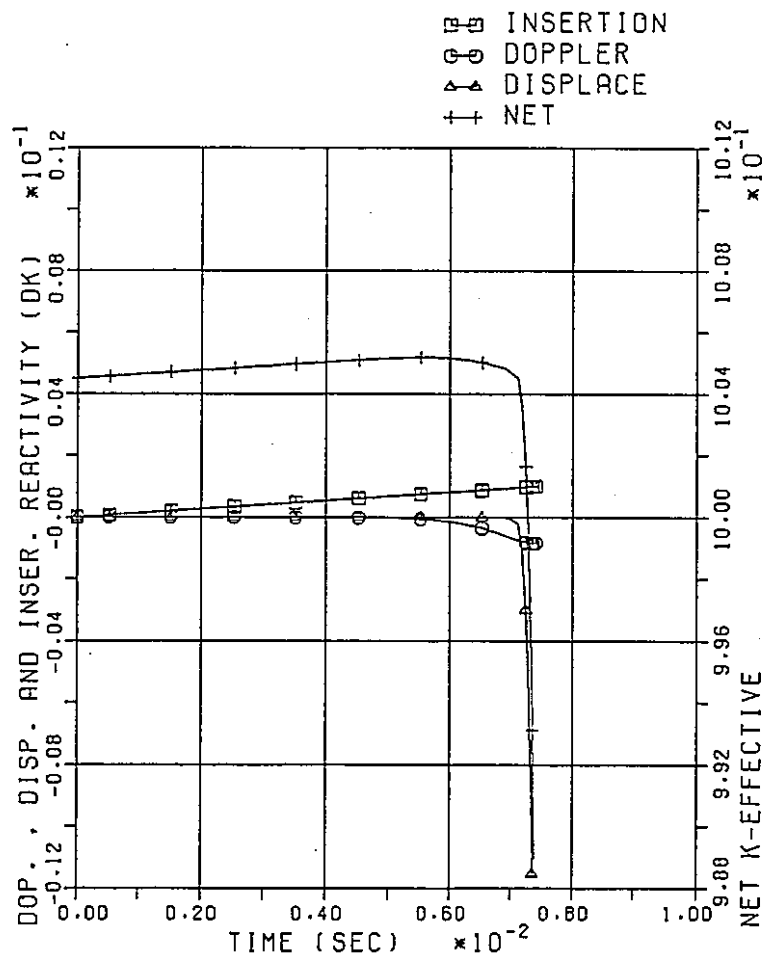
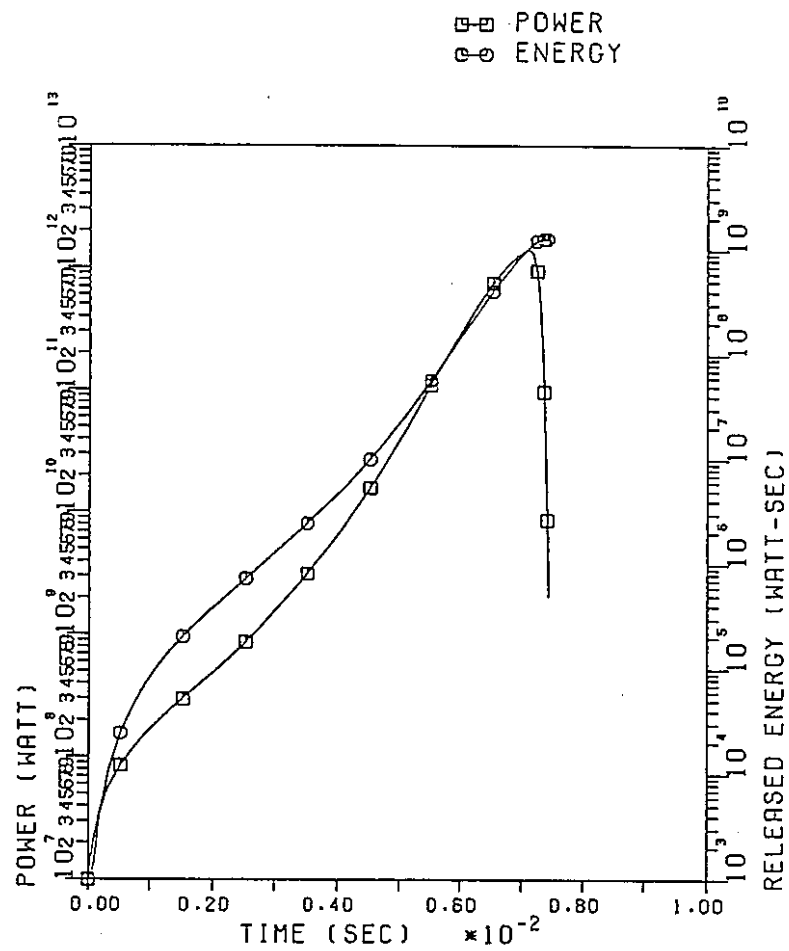
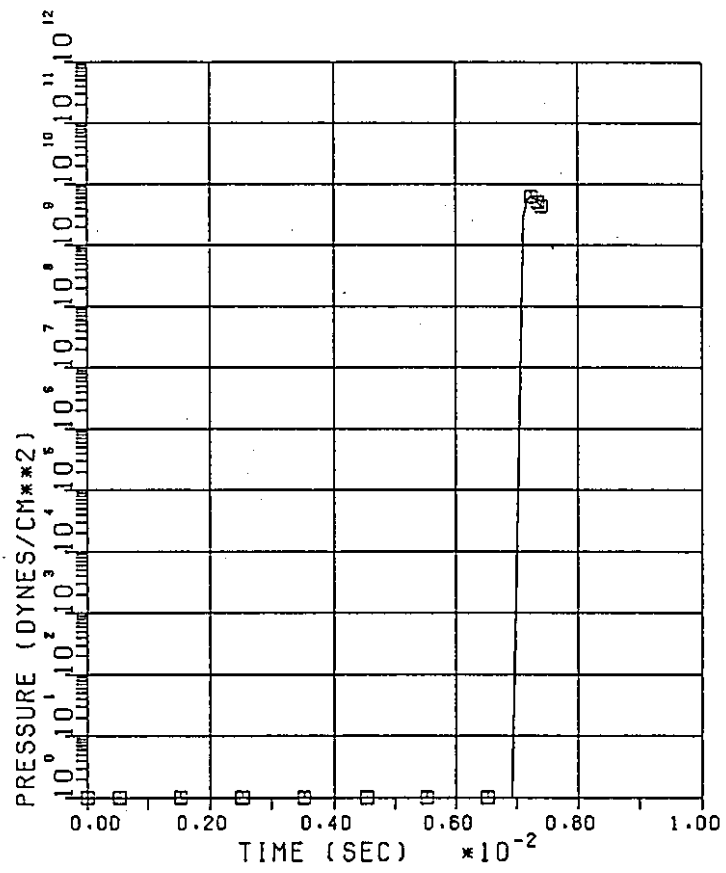


図2.9(1) 炉出力・放出エネルギー及び反応度の時間変化図 (制御棒移設後)

□ PRESSURE



□ TEMPERATURE

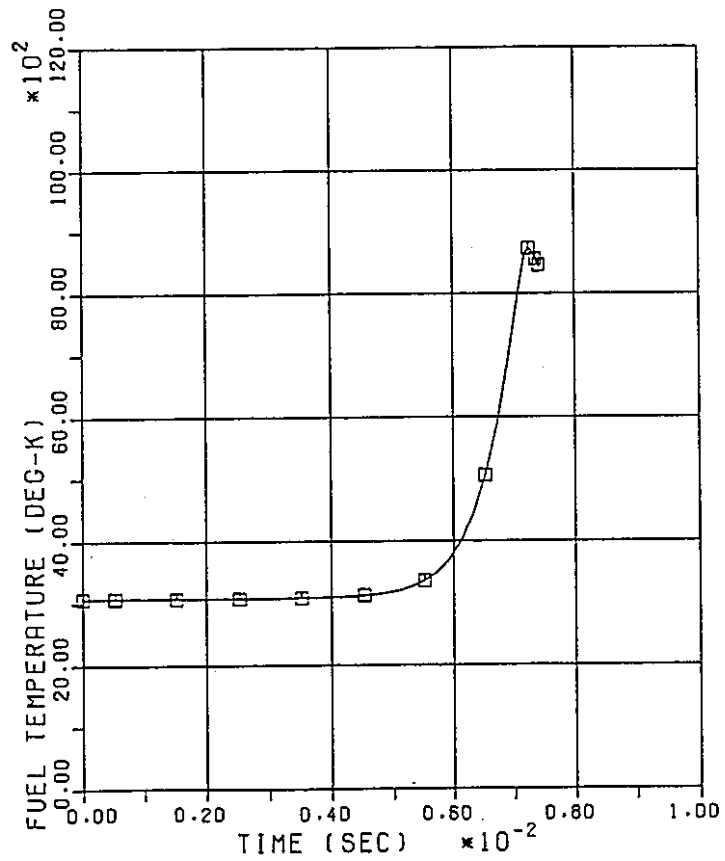


図2.9(2)炉心中心付近での温度・圧力の時間変化図 (制御棒移設後)

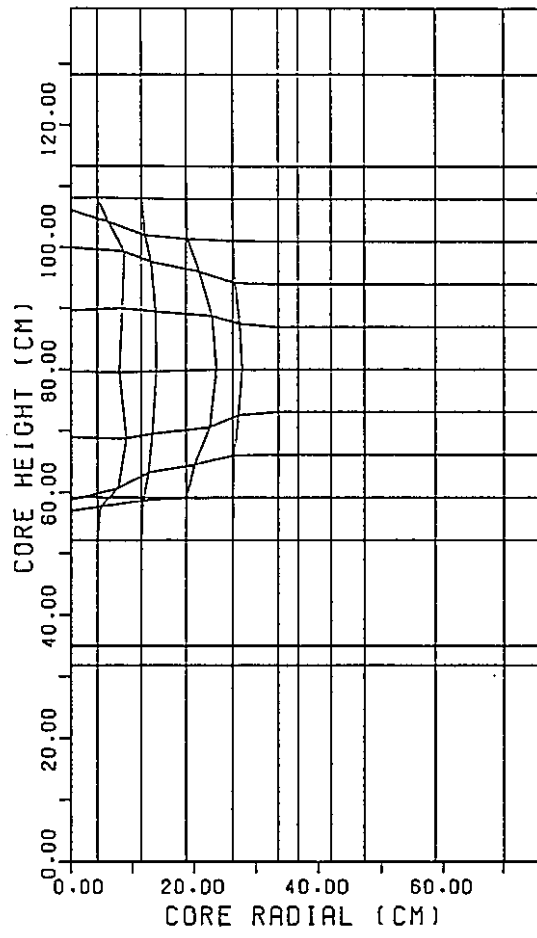


図2.9(3) 炉心最終変形図 (制御棒移設後)

3. 制御棒移設と安全裕度との関係

3.1 概要

本章において高速実験炉「常陽」の制御棒移設後の炉心の安全性を、移設前の炉心と設計基準を超える範囲でその安全裕度を比較することにより、明らかにする。

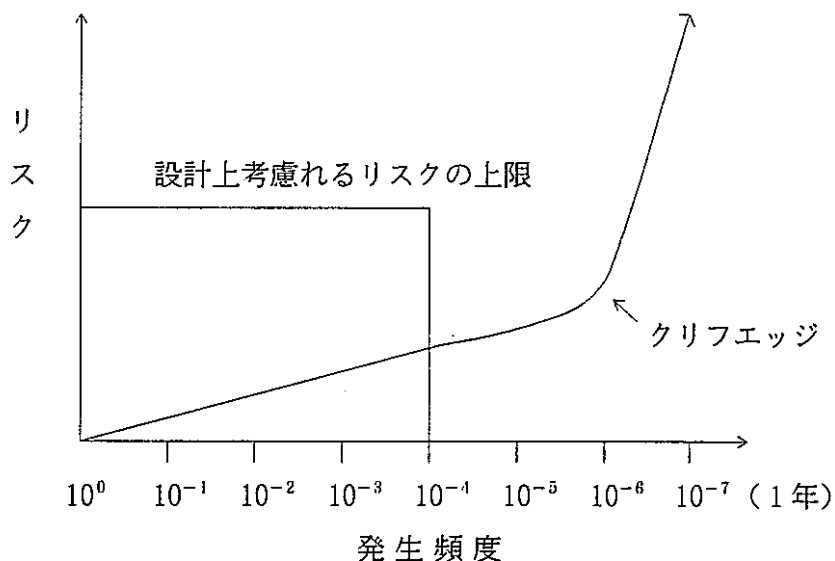
設計基準内の範囲については、別途評価しており、次のことが明らかになっている。

- (1) 最小制御棒反応度値は、性能試験の成果を反映して見直した結果、全挿入時に $9.0\Delta\%K/K'$ 、ワンロッドスタック時に $7.4\Delta\%K/K'$ を有し、最大過剰反応度 $5.5\Delta\%K/K'$ をいづれも上まわる。⁽¹⁾
- (2) 制御棒移設後の炉心特性は、移設前の炉心に比べ、特に厳しくなることはなく、従来の申請書添付書類への記載値の範囲内であり、核的制限値及び熱的制限値を超えない。⁽¹⁾
- (3) 制御棒移設後の炉心特性は、従来の申請書の記載値の範囲であり、当然、制御棒移設後の事故解析も申請書の記載値の範囲内である。

以上より、原子炉の安全設計及び安全評価の観点からは、制御棒の1本の3列から5列への移設は妥当なものであることが確認された。

本章で、あえて、設計基準を超える範囲の比較を行う目的は、次のとおりである。

- (1) 高速実験炉「常陽」の原子炉停止系が、軽水炉等で要求されている原子炉停止系の独立性（指針21⁽²⁾）を軽水炉と同じレベルでは満たしていないことから、原子炉停止系の反応度停止余裕（指針23⁽²⁾）で要求されているワンロッドスタックを超える条件のもとで、制御棒移設後の原子炉停止系の安全裕度を確認する。
- (2) 近年、深層防護の観点から、原子炉の安全性を設計基準外事象も視野に入れ、いわゆる、事故のもたらすリスクと事故の発生頻度の相関にクリフエッジがないことを確認するという考えが一般化しつつある。



以上の観点から設計基準を超える範囲の結果と前述の設計基準ベースでの結果から、制御棒移設がリスクの顕著な増加をあらゆる事故の発生頻度の範囲にわたってもたらすものでないことを示す。

前年度⁽³⁾には、予備解析として次の技術的知見が得られた。

- ① 暫定値ベースの2本スタック時制御棒反応度価値（動燃御支給値，67体炉心）は、スクラム反応度として十分であり，制御棒移設後の原子炉停止系も高い信頼性が確保される見通しを得た。
- ② スクラム反応度が1% $\Delta K/K'$ 以上あるとき，以下の4つの代表事象の「常陽」設置変更許可申請記載の解析結果に大きな変動は無い。
 - (i) 未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
 - (iii) 燃料スランピング事故
 - (iv) 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

この為，今年度は，標準平衡炉心のもとで2本スタックの制御棒反応度価値を設計ベースの方法で，移設前及び移設後のケースについて計算し，移設前については，従来の補正係数を用い，移設後については，新しい補正係数により，制御棒反応度価値の最小値をそれぞれ評価し，原子炉停止余裕及び想定事象時の影響がわずかであることを確認する。

3.2 制御棒配置

制御棒移設前の制御棒配置を図3.2-1に，制御棒移設後の配置を図3.2-2に示す。従来，3列に6本配置されていた制御棒配置を3列に5本，5列に1本配置されるように変更する。

3.3 制御棒反応度価値の見直し

設計ベースの方法で，申請書記載の標準平衡炉心と制御棒1本を3列から5列に移設した炉心とについて，2本スタック時の制御棒反応度価値を評価する。

3.3.1 計算条件

(1) 核データファイル

日本原子炉研究所作成のA B B N型70群群定数ライブラリー

「Jaeri-Fast-Set-II-70」（動燃殿御支給）

(2) 炉心寸法及び組成

核計算に用いる炉心寸法及び温度分布は，原設計⁽⁴⁾と同じとする。組成は，J2炉心の基準組成2の標準平衡炉心初期のもの⁽⁴⁾を移設前，移設後とも用いる。

(3) 縮約定数

縮約7群マイクロ断面積は、J2炉心の基準組成2の標準初期のもとで作成したものをを用いる。

各集合体のマイクロ定数には、制御棒全引抜き時の多群中性子束により縮約したものと制御棒全挿入時のものがあり、それぞれ以下のように使い分ける。

引抜かれた制御棒
及びその隣接する
集合体

: 制御棒全引抜き時のもの

上記以外のもの

: 制御棒全挿入時のもの

但し、制御棒全引抜きの計算では、制御棒全引抜き時のものをを用いる。

(4) バックリング

バックリングは、2次元RZ計算により、炉心中心面上で求めたJ2炉心のものをを用いる。

バックリングには、制御棒挿入時と制御棒引抜き時のものがあり、縮約定数と同様に使い分ける。

計算体系を図3.3-1に示す。

(5) 制御棒反応度価値

2次元三角メッシュ拡散コード“TRIANGLE”により、図3.3-2の流れに基づき図3.3-3の計算体系で計算する。

3.3.2 計算結果

(1) 補正前の制御棒反応度価値

各制御棒挿入パターンの制御棒反応度価値を移設前のケースは表3.3-1に、移設後のケースは表3.3-2に示す。

なお、反応度価値は、設計ベースの扱いと同じに次式で定義する。

(移設前)

$$\Delta \rho \equiv - \frac{K - K_0}{K_0} \quad (3.3-1)$$

(移設後)

$$\Delta \rho \equiv - \frac{K - K_0}{K_0 K} \quad (3.3-2)$$

ここで

K_0 : 制御棒全引抜き状態の実効増倍率

K : 制御棒挿入状態の実効増倍率

$\Delta \rho$: 制御棒反応度価値

(2) 補正係数

FCAモックアップ実験に基づく移設前の補正係数を表3.3-3に示す。MK-

Ⅱ炉心性能試験解析に基づく補正係数を表3.3-4に示す。

両者を比較すると次のような違いがある。

- ① 最確値（標準値）ベースでの補正係数は、FCAモックアップに基づく場合で0.866であるのに対し、MK-Ⅱ炉心性能試験解析に基づくもので0.892であり、両者の違いは、約3%以内であり、よく一致している。
- ② 最小値評価用の補正係数は、C/E値の考慮のしかたの違いにより、FCAモックアップ実験解析にもとづくものが0.623、MK-Ⅱ炉心性能試験解析に基づくものが0.694と約10%違う。

以上、補正係数の違いの主な原因が、その導びきかたに原因する。MK-Ⅱ炉心のC/E補正は、実機ベースの評価であり、C/E値自身の不確かさは削減されることから、大概妥当である。

(3) 補正後の制御棒反応度価値

(1)、(2)に基づき、制御棒反応度価値を求めた。結果を移設前は表3.3-1に、移設後は表3.3-2に示す。

以上より、2本スタック時の制御棒反応度価値の最小値は、移設前で5.8% $\Delta K/KK'$ 、移設後で5.3% $\Delta K/KK'$ と約10%小さくなる。

3.4 2本スタック時の原子炉停止余裕

「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針について」（原子力安全委員会、平成元年3月27日一部改訂）の考え方から、2本スタック時の原子炉停止余裕の位置付け及びその想定を述べるとともに、第3章第3節の結果から、その適合性を明らかにする。

3.4.1 指針の考え方と2本スタックの想定

表3.4-1に軽水炉安全設計指針の指針21「原子炉停止系の独立性」と指針23「原子炉停止系の反応度停止余裕」の記述を示す。

指針21は、原子炉停止系の多様性独立性を述べたものであり、軽水炉は、制御棒と可溶性毒物系の原子炉停止系を有しており、これに適合する。「もんじゅ」は、主炉停止系と後備系の2系統の有していることから、その原理が同じであること及びスクラム信号系の共有の点を除き満足している。

他方、「常陽」の場合、制御棒は1系統であり、指針21本文には適合しない。

しかしながら、（解説）の以下の記述、

「なお、原子炉停止系自身が独立した複数個の停止機能をもち、その数が高温停止に必要な数に比し十分な余裕をもっている場合には、実質的にいくつかの独立した停止系とみなせる。」

により、高温以上に必要な制御棒にくらべ十分な余裕があれば適合すると見なせる。

「常陽」の安全設計では、ワンロッドスタック時の制御棒反応度値が、最大過剰反応度を上回ることが確認されているが、ワンロッドスタックは、以下の理由で十分な余裕にあたらないと考える。

- (1) 指針23において、制御棒による原子炉停止系は、ワンロッドスタック時に低温停止できることを要求されており、ワンロッドスタックで十分な余裕であるとする。指針21の解説は、自動的に包絡され、死文になることから、当然にこのようなことは、指針の意図するところでない。
- (2) 軽水炉では、可溶性毒物系によることなく、ワンロッドスタックで原子炉停止できる。また、「もんじゅ」では、主炉停止系のみでワンロッドスタック時に低温停止でき、後備炉停止系のみでも低温停止できる。以上より、指針21本文に適合している他の原子炉（軽水炉、もんじゅ等）では、他の原子炉停止系の作動を期待することなく、ワンロッドスタック時に炉心を臨界未満にすることができるように設計されており、ワンロッドスタックは、指針21の解説の言う“十分な余裕”にあたらない。

次に2本スタックの裕度が十分な余裕であることについて述べる。

「常陽」の制御棒のスタックの発生頻度は検討していないことから、暫定的にスタックの発生確率を挿入要求回数を分母として、 10^{-1} /回とする。また要求の頻度を最も発生頻度の高い「電源喪失事故」のプラント設計上の想定1回/年の2倍とすると、各スタック本数の発生頻度は、次のとおりである。

1本スタック

$$6 \times 10^{-1} / \text{回} \times 2 (\text{回} / \text{年}) = 1.2 \times 10^{-3} / \text{年}$$

2本スタック

$$\frac{6 \times 5}{2} \times (10^{-1})^2 / \text{回} \times 2 (\text{回} / \text{年}) = 3.0 \times 10^{-7} / \text{年}$$

以上より、ワンロッドスタックそのものの発生する頻度は、設計上考慮されるべき発生頻度 10^{-1} /年にくらべ大きく、他方、2本スタックは「事故」を超えるが、安全上考慮される設計基準外事象の発生頻度の目安 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ /年程度である。

これより、2本スタックは、十分な余裕と言える。

3.4.2 2本スタック時の原子炉停止余裕

2本スタック時の原子炉停止余裕を第3章第2節で評価した制御棒反応度値と別途評価した原子炉の過剰反応度⁽¹⁾から評価する。

(1) 炉心の過剰反応度

制御棒移設後の炉心を含め、最も過剰反応度の大きな炉心は、標準初期炉心であり、その内訳は、以下のとおりである。

定格出力時の過剰反応度	3.5% $\Delta K/KK'$
反応度変化	
370 °C～定格出力時	0.64% $\Delta K/KK'$
250 °C～370 °C	0.44% $\Delta K/KK'$
100 °C～250 °C	0.55% $\Delta K/KK'$
最大過剰反応度	5.1 % $\Delta K/KK'$

(2) 事故時の挿入反応度

制御棒の引抜きによるものを除き、最大の挿入反応度は、燃料スランピング事故の 0.105% $\Delta K/KK'$ である。制御棒の引抜きによるものは、スクラム時のスタックの想定の中で包絡されており、スタック以外の挿入反応度として考慮する必要はない。

(3) 2本スタック時の原子炉停止余裕

表3.3-1 及び表3.3-2 の制御棒反応度値と、前述の過剰反応度から、原子炉停止余裕を評価した。制御棒移設前の結果を表3.4-2 に、制御棒移設後の結果を表3.4-3 に示す。これより、以下のことが分った。

① 高温状態(370°C零出力時)に制御棒移設前で2.3% $\Delta K/KK'$ 、移設後で1.8% $\Delta K/KK'$ の炉停止余裕を有する。燃料スランピング事故時の挿入反応度(0.105% $\Delta K/KK'$) を考慮しても、2.2% $\Delta K/KK'$ 、1.7% $\Delta K/KK'$ の炉停止余裕を有する。

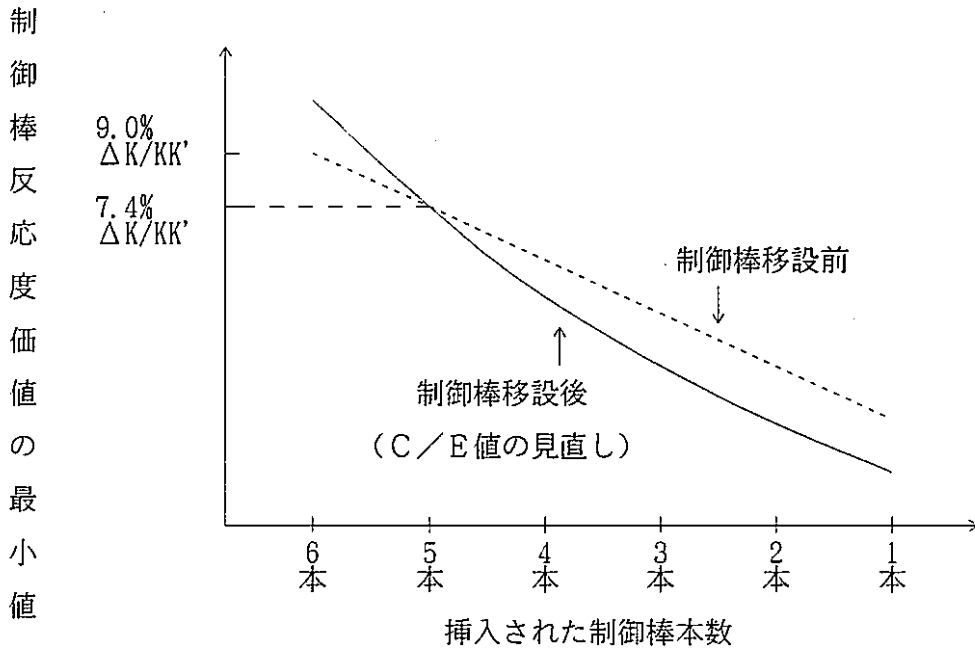
② 制御棒移設前、制御棒移設後ともに 100°C零出力時にも、炉心を臨界未満に維持できる。

以上より、指針21の解説に言う要件を満たすとともに、燃料交換可能な 250°C零出力時に臨界未満に維持できることから原子炉停止系は十分な安全裕度を持って設計されている。

3.5 2本スタックと想定事故との重ね合せ

制御棒移設に伴う制御棒反応度値の変動が、その発生頻度は小さいが結果が厳しくなると考えられる設計基準を超える事象の場合にも急激なリスクの増加(クリフェッジ)をもたらさないことを安全評価の観点から明らかにする。

制御棒移設に伴う制御棒反応度値は、C/E値の見直しにより、大概以下のように変化した。



これは、別途行なった設計ベースでの評価及び第3表第4節の結果からも明らかである。

3.5.1 想定事象の選定

「常陽」の申請書に記載された想定事象のうち、スクラム反応度の大きさが事象解析結果に比較的大きな影響を与えと考えられる次の4つの代表事象を重ね合せの事象として、想定する。

- (a) 「運転時の異常な過渡変化」
 - (i) 未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き
 - (ii) 出力運転中の制御棒の異常な引抜き
- (b) 「事故」
 - (i) 燃料スランピング事故
 - (ii) 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

これらについて、制御棒のスクラム反応度を移設前と移設後の各値を用いて比較する。

3.5.2 2本スタック時の未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き

(1) 解析条件

- (a) 原子炉初期出力 1 W
- (b) 原子炉初期温度 370°C等温
- (c) スクラム条件 「中性子束高」 (107%)
- (d) スクラム遅れ
 - 検出器の遅れ 200msec
 - 機械器な遅れ 300msec

(e) ギャップ熱伝達率	500Btu/hft ² ·° F
(f) 反応度係数等	表3.5-1 参照
(g) スクラム反応度	
移設前	5.8% ΔK/K
移設後	5.3% ΔK/K

(2) 解析結果

制御棒移設前と制御棒移設後でその過渡変化は大きく変わることなく、原子炉出力は約26秒後にスクラム設定値の107 %出力に達し、スクラム後もオーバーシュートにより、約 311MWに到達する。その後原子炉出力は急速に低下する。放出エネルギーは、約30秒後までで制御棒移設前で約185MWS、制御棒移設後で約187MWSである。

制御棒移設前の各部の最高温度は、燃料で1716°C、被覆管で 533°C、冷却材で 525°Cであるのに対し、制御棒移設後の場合には、ペレットで1730°C、被覆管で 535°C、冷却材で 527°Cである。すなわち、制御棒の移設よりペレット最高温度は14°C、被覆管最高温度及び冷却材最高温度は2°C上昇する。

各特性値の過渡変化を、次に示す。

(a) 制御棒移設前

- ① 原子炉出力 図3.5-2
- ② 反応度変化 図3.5-3
- ③ 炉心ホットチャンネル 図3.5-4
の各部最高温度
- ④ 炉心平均チャンネル 図3.5-5
の各部最高温度

(b) 制御棒移設後

- ① 原子炉出力 図3.5-6
- ② 反応度変化 図3.5-7
- ③ 炉心ホットチャンネル 図3.5-8
の各部最高温度
- ④ 炉心平均チャンネル 図3.5-9
の各部最高温度

以上より、「2本スタック時の未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き」の事象の燃料最高温度、被覆管最高温度及び冷却材最高温度は、制御棒移設後の場合にも熱設計基準値を超えることはなく、スクラム反応度の低下による最高温度の上昇も、温度上昇分の1%にすぎない。

3.5.3 2本スタック時の出力運転中の制御棒の異常な引抜き

(1) 解析条件

- | | |
|--------------|-------------------------------|
| (a) 原子炉初期出力 | 定格出力 |
| (b) 原子炉初期温度 | |
| 燃料最高温度 | 2500°C |
| 被覆管最高温度 | 650°C |
| 冷却材最高温度 | 635°C |
| (c) ギャップ熱伝達率 | 1000Btu/hft ² ・° F |

上記以外は、「2本スタック時の未臨界状態からの制御棒の異常な引抜き」に同じ。

(2) 解析結果

制御棒移設前と制御棒移設後とで事象解析結果は、各部温度で1°C未満の違いで一致する。

制御棒引抜きにより、反応度が投入されるのに伴い、原子炉出力は、緩慢に上昇し、約2秒後にスクラム設定値(107%)に達し、その後のオーバーシュートにより、110%に到達する。

スクラムにより、急速に原子炉出力は低下し、その後崩壊熱相当の出力に収束する。

各部の最高温度は、制御棒の移設に関わりなく、燃料最高温度が2543°C、被覆管最高温度が659°C、冷却材最高温度が643°Cとなった。

各特性値の過渡変化を、次に示す。

(a) 制御棒移設前

- | | |
|-------------------------|---------|
| ① 原子炉出力 | 図3.5-10 |
| ② 反応度変化 | 図3.5-11 |
| ③ 炉心ホットチャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-12 |
| ④ 炉心平均チャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-13 |

(b) 制御棒移設後

- | | |
|-------------------------|---------|
| ① 原子炉出力 | 図3.5-14 |
| ② 反応度変化 | 図3.5-15 |
| ③ 炉心ホットチャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-16 |
| ④ 炉心平均チャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-17 |

以上より、「2本スタック時の出力運転中の制御棒の異常な引抜き」事象では、燃料最高温度、被覆管最高温度及び冷却材最高温度は、熱設計基準値を超えることなく、よって燃料の破損を生じることなく、事象は収束する。

3.5.4 2本スタック時の燃料スランピング事故

(1) 解析条件

(a) スランピング反応度 27ϕ ($0.105\% \Delta K/KK'$)

上記以外は、「2本スタック時の出力運転中の制御棒の異常な引抜き」に同じ。

(2) 解析結果

炉心中心列の集合体の全ピンがスランピングを生じ、 27ϕ のスラップ反応度が投入され、原子炉出力は瞬時に定格の130%に上昇し、「中性子束高」のスクラム設定値(107%)を超え、原子炉はスクラムする。しかし、スクラム遅れのため、141.4%まで上昇する。ここまでは、制御棒移設前後で変わらない。

制御棒移設前後でスクラム反応度の違いにより、原子炉出力の低下にはわずかな違いがあり、このため、制御棒移設前の燃料最高温度が 2604°C であるのに対し、制御棒移設後の値は 2605°C であった。被害管最高温度は 676°C 、冷却材最高温度は 660°C で両ケースの結果は一致した。

各特性値の過渡変化を、次に示す。

(a) 制御棒移設前

- ① 原子炉出力 図3.5-18
- ② 反応度変化 図3.5-19
- ③ 炉心ホットチャンネル 図3.5-20
の各部最高温度
- ④ 炉心平均チャンネル 図3.5-21
の各部最高温度

(b) 制御棒移設後

- ① 原子炉出力 図3.5-22
- ② 反応度変化 図3.5-23
- ③ 炉心ホットチャンネル 図3.5-24
の各部最高温度
- ④ 炉心平均チャンネル 図3.5-25
の各部最高温度

以上より、「2本スタック時の燃料スランピング事故」の事象では、両ケースとも各部最高温度の熱設計基準値を超えることはなく、その最高温度の違いも燃料で約 1°C 、被覆管及び冷却材で 1°C 未満である。

3.5.5 2本スタック時の1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

(1) 解析条件

- | | |
|-------------|--------------------------------|
| (a) 原子炉初期流量 | 定格流量 |
| (b) 軸固着側ポンプ | 片側1ループのポンプが固着し、
瞬時に回転を停止する。 |
| (c) 健全側ポンプ | トリップ信号により、トリップする。 |
| (d) スクラム条件 | 「1次冷却材流量低」
(80%流量) |
| (e) スクラム遅れ | |
| 検出器 | 0.2sec |
| デラッチ | 0.3sec |
| (f) 反応度係数等 | 表3.5-1 参照 |

(2) 解析結果

1系統の主冷却系ポンプが機械的に軸固着を生じ、瞬時にポンプは回転を停止する。これと同時に、健全側のポンプもトリップし、約0.2秒後に炉心流量はスクラム設定値（定格流量の80%）に達し、事故発生後0.7秒後にスクラム信号が制御棒保持機構に達する。更に、その0.3秒後に制御棒の挿入が始まる。

制御棒移設前のケースでは、被覆管最高温度が805℃、冷却材最高温度が795℃であった。制御棒移設後は、0.3℃上記の側よりそれぞれ高かった。

なお、燃料最高温度は初期温度2500℃を超えない。

各特性値の過渡変化を、次のとおりに示す。

(a) 制御棒移設前

- | | |
|-------------------------|---------|
| ① 原子炉出力 | 図3.5-26 |
| ② 反応度変化 | 図3.5-27 |
| ③ 炉心ホットチャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-28 |
| ④ 炉心平均チャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-29 |

(b) 制御棒移設後

- | | |
|-------------------------|---------|
| ① 原子炉出力 | 図3.5-30 |
| ② 反応度変化 | 図3.5-31 |
| ③ 炉心ホットチャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-32 |
| ④ 炉心平均チャンネル
の各部最高温度 | 図3.5-33 |

以上より、制御棒移設後にも「2本スタック時の1次主冷却系循環ポンプ軸固

着事故」の事象において各部最高温度は熱設計基準値を超えることはなく、燃料破損は生じない。

3.6 まとめ

上記の検討より、制御棒移設による原子炉施設の安全性への影響について次の知見を得た。

- (1) 「常陽」の原子炉停止系は、軽水炉に設置されている独立な2系統の設備を持たないが、独立した駆動系を持つ6本の制御棒のうち、最大の反応度価値を有する2本がスタックした場合にも低温状態で臨界未満を維持できる。

これにより、LMFBRの安全審査にも参考とされる（「高速増殖炉の安全評価の考え方について」原子力安全委員会 平成元年3月27日改訂）軽水炉安全設計審査指針の指針21に適合していると言える。

- (2) 「制御棒2本スタック」という発生頻度の十分に小さい事象と「常陽」申請書記載の設計基準事象を重ね合せた場合にも、燃料最高温度、被覆管最高温度及び冷却材最高温度は、熱設計基準値を上まわることなく、燃料の破損は生じない。

これにより、制御棒移設の変更は設計基準外事象においても原子炉施設の安全に顕著なリスクの増大はもたらさないと判断される。

表3.3-1 制御棒移設前の制御棒反応度価値

制御棒挿入パターン						制御棒反応度価値 (% $\Delta K/KK'$)	
1	2	3	4	5	6	補正前	補正後
○	○					9.26	5.77
○		○				9.68	6.03
○			○			9.83	6.12

(注) ○ は引き抜きを示す。それ以外のものは挿入を示す。

各制御棒位置を図3.2-1 に示す。

表3.3-2 制御棒移設前の制御棒反応度値

制御棒挿入パターン						制御棒反応度値 (% $\Delta K/KK'$)	
1	2	3	4	5	6	補正前	補正後
○	○					9.84	6.83
	○	○				9.80	6.80
	○		○			10.56	7.33
	○			○		10.65	7.39
	○				○	10.57	7.33
○		○				7.87	5.46
○			○			8.58	5.96
○				○		8.58	5.96
○					○	8.03	5.58
		○	○			7.65	5.31
		○		○		8.26	5.74
		○			○	8.35	5.80
			○	○		8.42	5.84
			○		○	8.85	6.14
				○	○	8.44	5.86

(注) ○ は引き抜きを示す。それ以外のものは挿入を示す。

各制御棒位置を図3.2-2 に示す。

表3.3-3 移設前の炉心の制御棒反応度値の補正係数

補正項目 (内容)		補正係数		
		最小値	標準値	最大値
計算上の補正	輸送 (S4)	0.91	0.91	0.91
	非均質 (マスランピング)	0.93	0.93	0.93
	残留反応度 (軸方向バックリングの影響)	1.00	1.00	1.01
	メッシュ効果	1.03	1.03	1.03
	FCAモックアップ実験に基づく補正	1.00	1.08	1.08
	小計 (積)	0.872	0.941	0.951
B ¹⁰ 燃焼効果 (1/4挿入, 100%出力730日運転)		0.85	0.92	1.00
果計 (積)		0.741	0.866	0.951
設計余裕	炉心サイズの不確かさ (F/A数±5本)	0.99	1.00	1.01
	設計余裕 (±15%)	0.85	1.00	1.15
合計 (積)		0.623	0.866	1.105

表3.3-4 移設後の炉心の制御棒反応度値の補正係数

補 正 項 目		補 正 係 数		
		最小値	標準値	最大値
計 算 上 の 補 正	『常陽』照射用炉心性能試験 解析に基づく補正	0.97	0.97	1.00
	B ¹⁰ 燃焼効果(1/4挿入,100%出力730日運転)	0.85	0.92	1.00
	累 計 (積)	0.825	0.892	1.00
設 計 余 裕 量	炉心サイズの不確かさ(F/A数±5本)	0.99	1.00	1.01
	設 計 余 裕(±15%)	0.85	1.00	1.15
	合 計 (積)	0.694	0.892	1.162

表3.4-1 軽水炉安全設計審査指針⁽²⁾の指針21及び指針23

指針21 原子炉停止系の独立性

原子炉停止系は、高温待機状態又は高温運転状態から、燃料の許容設計限界を超えることなく炉心を臨界未満にでき、かつ、高温状態で臨界未満を維持できる少なくとも二つの独立した系を有する設計であること。

(解説)

現在軽水炉で採用されている制御棒と可溶性毒物系（BWRの液体毒物注入系、PWRのケミカルシム等）は、その性能からみてこの条項を満足する原子炉停止系と考える。

なお、原子炉停止系自身が独立した複数個の停止機能をもち、その数が高温停止に必要な数に比し十分な余裕をもっている場合には、実質的にいくつかの独立した停止系とみなせる。

指針23 原子炉停止系の反応度停止余裕

制御棒による原子炉停止系は、高温状態及び低温状態において、反応度効果の最も大きい制御棒が完全に炉心の外に引抜かれ固着して挿入できない時でも、炉心を臨界未満にできる設計であること。

(解説)

なし

表3.5-1 解析主要条件

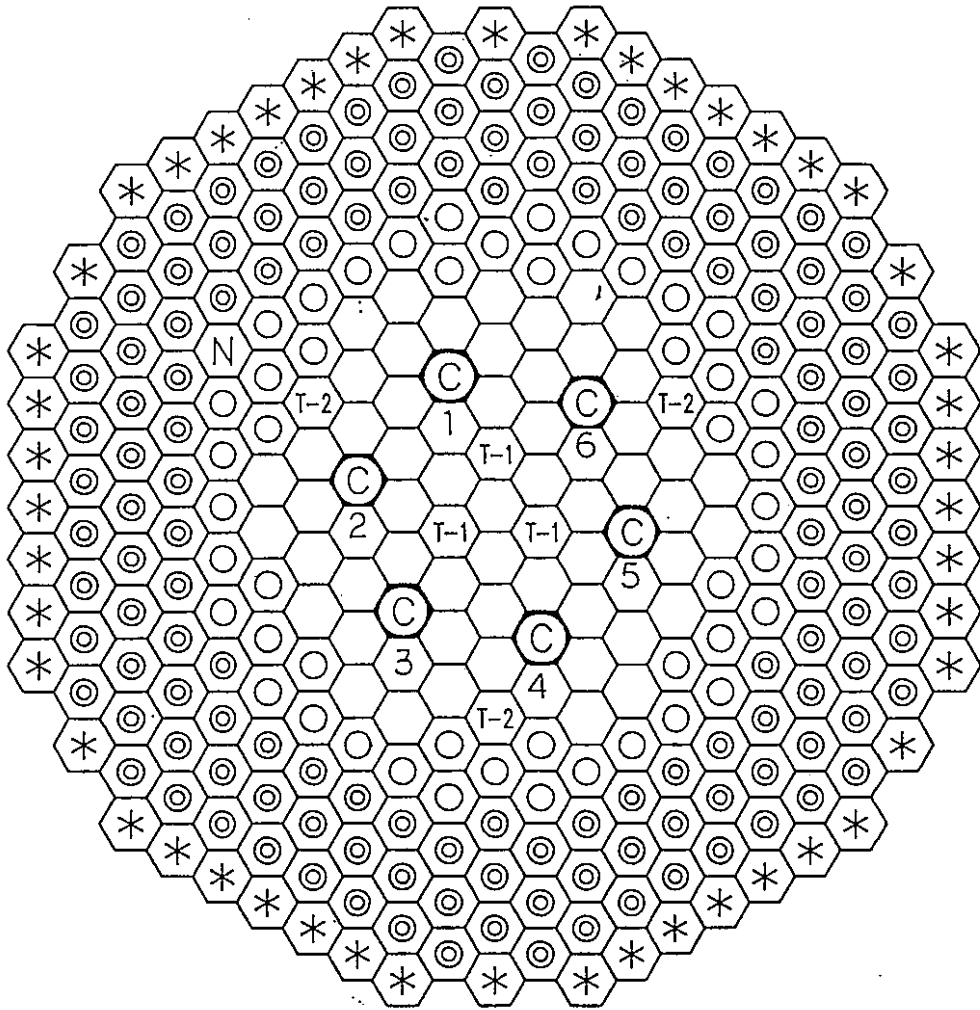
解析事象		未臨界状態からの 制御棒の異常な引き抜き	出力運転中の 制御棒の異常な引き抜き	燃料スランピング事故	1次主冷却系 循環ポンプ軸固着事故
解析条件					
初期運転状態		1.0W	定格	定格	定格
反応度 係数	ドブラー	最大 -3.0×10^{-4}	最大 -3.0×10^{-4}	最大 -3.0×10^{-4}	最小 -1.78×10^{-3}
	冷却材	最大 -5.6×10^{-6}	最大 -5.6×10^{-6}	最大 -5.6×10^{-6}	最大 -5.6×10^{-6}
	構造物	最大 -3.9×10^{-7}	最大 -3.9×10^{-7}	最大 -3.9×10^{-7}	最大 -3.9×10^{-7}
	燃料				最小 -4.5×10^{-6}
	被覆管	最大 -6.3×10^{-7}	最大 -6.3×10^{-7}	最大 -6.3×10^{-7}	最大 -6.3×10^{-7}
	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%	中性子束高 107%	1次冷却材流量低 80%
	スクラム方法	図3.5-1	図3.5-1	図3.5-1	図3.5-1
	時刻(秒)*1	26.1秒	1.8秒	0.2秒	0.9秒
挿入反応度		0.00016 Δ K/K/sec 約 3.6 ϕ /S	0.00016 Δ K/K/sec 約 3.6 ϕ /S	0.00011 Δ K/K 27 ϕ ステップ	
解析時間		30秒	5秒	3秒	4秒
ギャップ・コンダクタンス		500Btu/h \cdot ft ² \cdot F	1000Btu/h \cdot ft ² \cdot F	1000Btu/h \cdot ft ² \cdot F	1000Btu/h \cdot ft ² \cdot F
炉心流量		一定	一定	一定	表3.4-2
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




*1 検出器おくれを含む。

表3.5-2 2本スタックを重ね合せた想定事象の解析結果のまとめ

想定事象		原子炉出力 (%)	燃料最高温度 (°C)	被覆管最高温度 (°C)	冷却材最高温度 (°C)
未臨界状態からの 制御棒の異常な引抜き	制御棒移設前	310.8/100	1716.4/370.0	533.3/370.0	525.3/370.0
	制御棒移設後	310.8/100	1730.0/370.0	534.9/370.0	526.8/370.0
出力運転中の 制御棒の異常な引抜き	制御棒移設前	109.6/100	2543.2/2500	658.7/650	643.2/635
	制御棒移設後	109.6/100	2543.3/2500	658.7/650	643.2/635
燃料スランピング事故	制御棒移設前	141.4/100	2604.9/2500	676.1/650	659.9/635
	制御棒移設後	141.4/100	2606.1/2500	676.3/650	660.1/635
1次主冷却系 循環ポンプ軸固着事故	制御棒移設前	100.0*/100.0	2500* /2500	804.5/650	795.4/635
	制御棒移設後	100.0*/100.0	2500* /2500	804.8/650	795.7/635

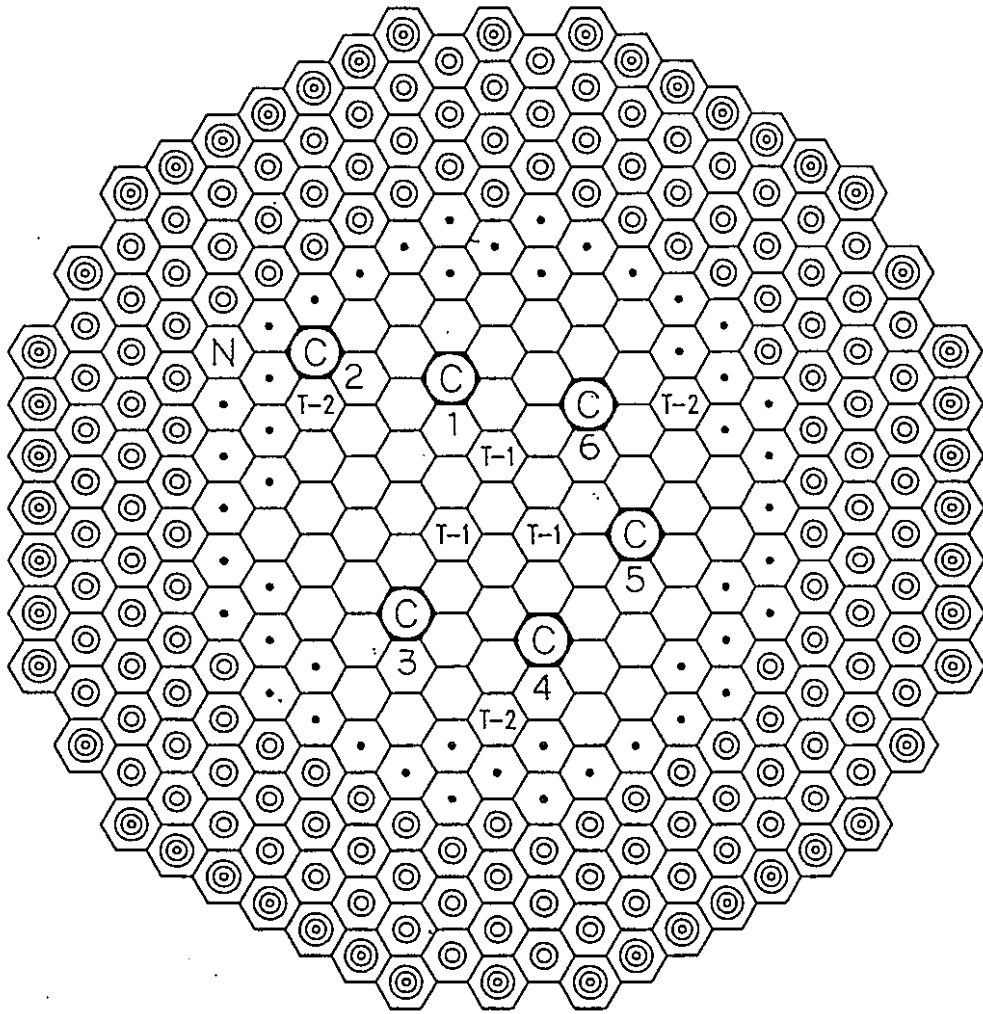
(注) 最高値/初期値。* 初期値を超えない。










- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  : 炉心燃料 (61体) |  : 外側 (B) 反射体 |
|  : 制御棒 (6体) |  : TYPE-1 照射用集合体 (3体) |
|  : 内側反射体 |  : TYPE-2 照射用集合体 (3体) |
|  : 外側 (A) 反射体 |  : 中性子源 |

(注) 番号は表3.3-1の制御棒の位置を示す。

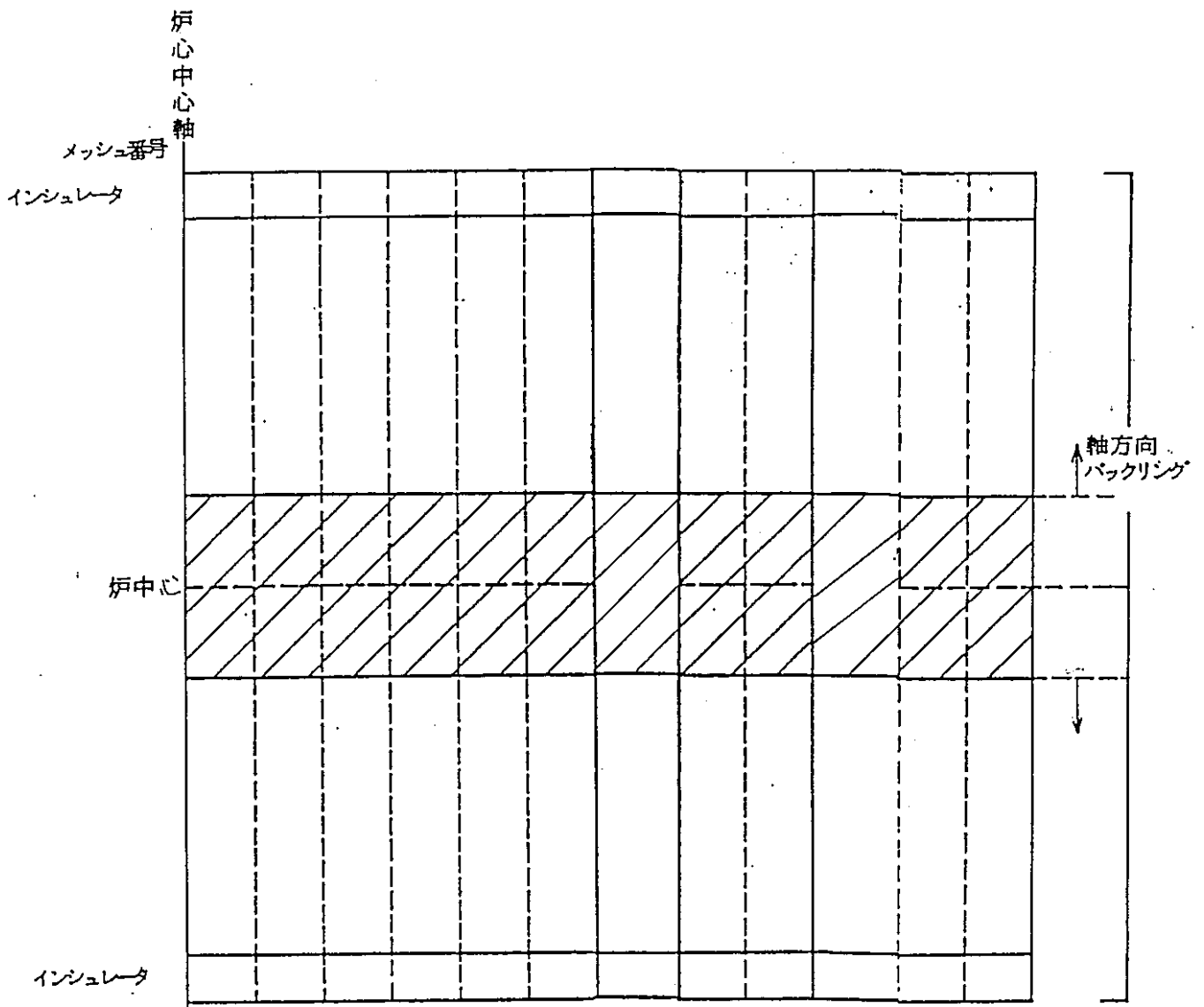
図3.2-1 制御棒移設前標準平衡炉心の装荷パターン



- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  : 炉心燃料 (61体) |  : 外側 (B) 反射体 |
|  : 制御棒 (6体) |  : TYPE-1 照射用集合体 (3体) |
|  : 内側反射体 |  : TYPE-2 照射用集合体 (3体) |
|  : 外側 (A) 反射体 |  : 中性子源 |

(注) 番号は表3.3-2の制御棒の位置を示す。

図3.2-2 制御棒移設後標準平衡炉心の装荷パターン



斜線部：軸方向バックリング
の計算領域

図3.3-1 軸方向バックリングの計算体系

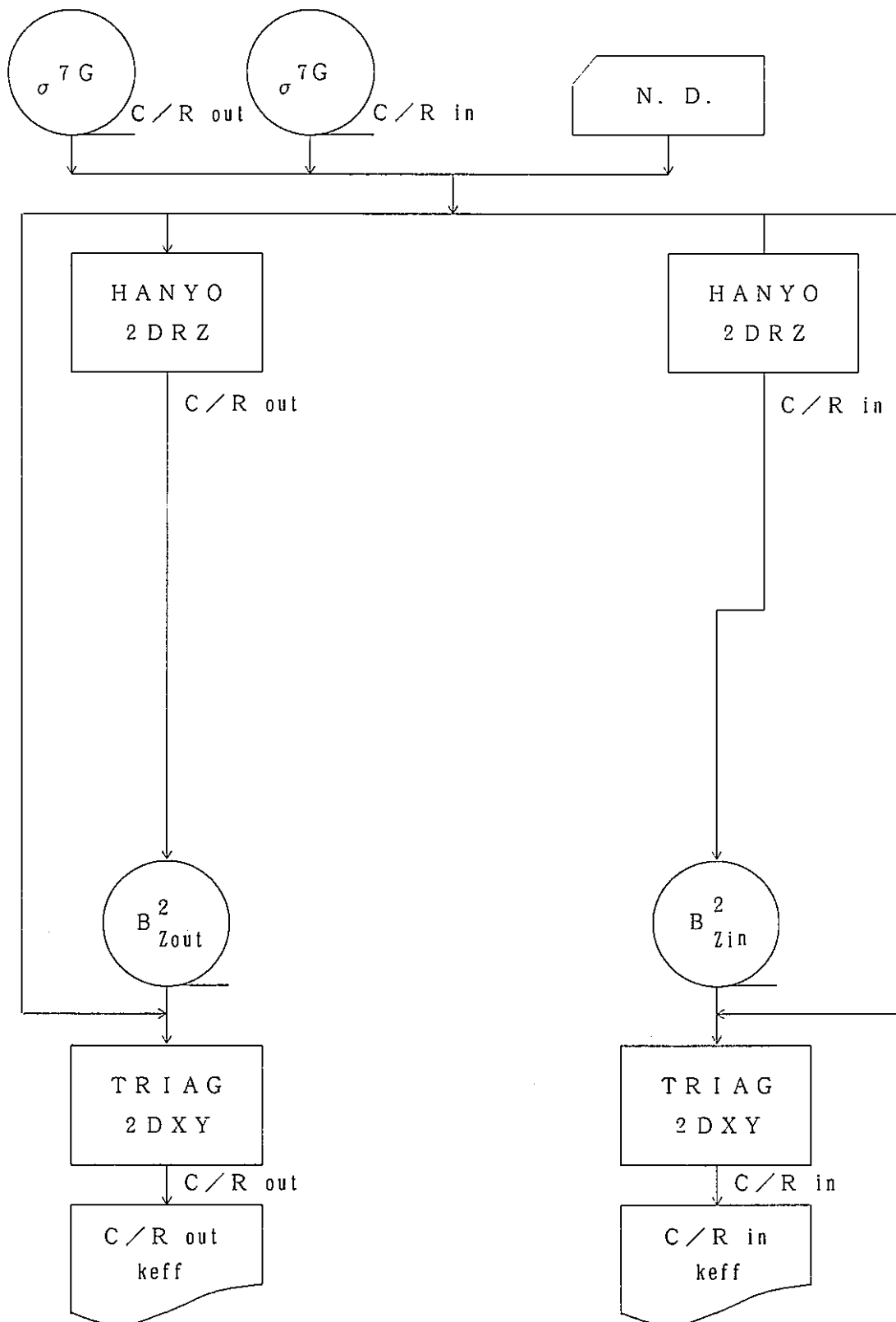
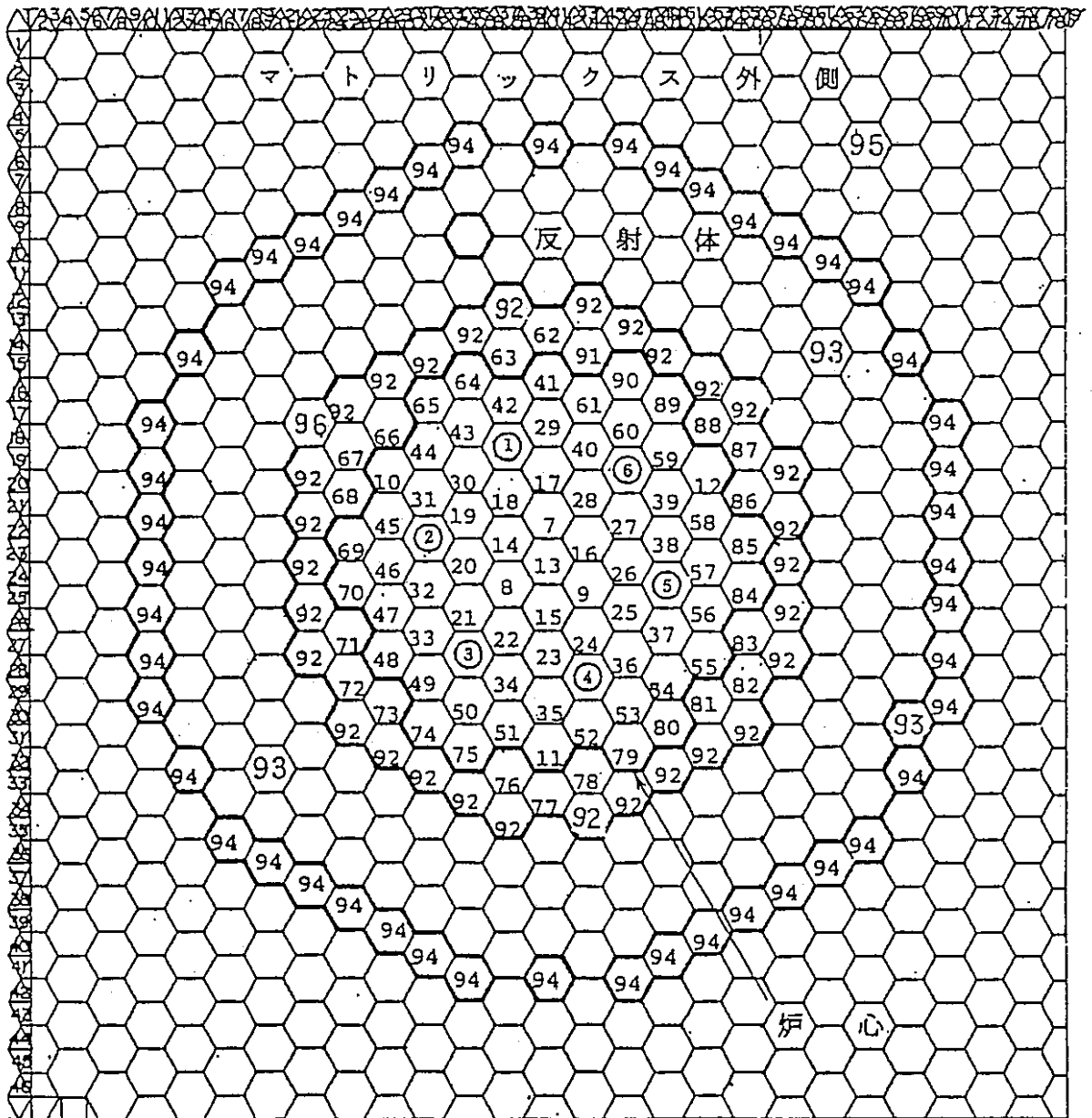


図3.3-2 制御棒価値計算の流れ



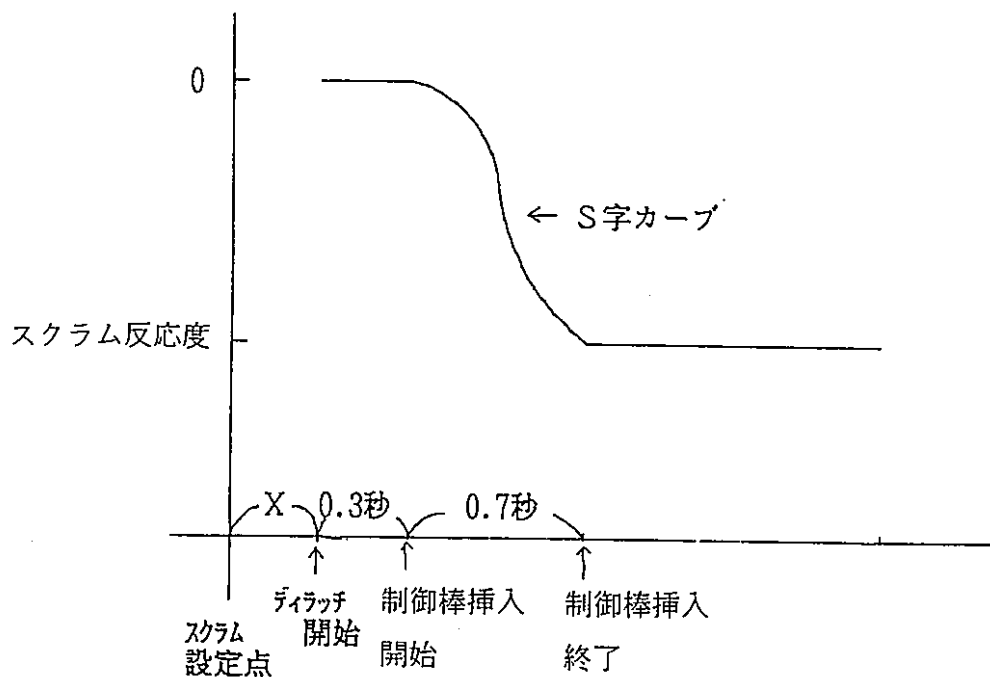
領域数：96

← 4.732944 cm

○ 制御棒

(注) 中性子源は考慮しない。

図3.3-3 2次元x y 3角メッシュ計算体系



X=0.2 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
燃料スランピング事故

X=0.7 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故

図3.5-1 スクラム反応度曲線 -原子炉スクラム-

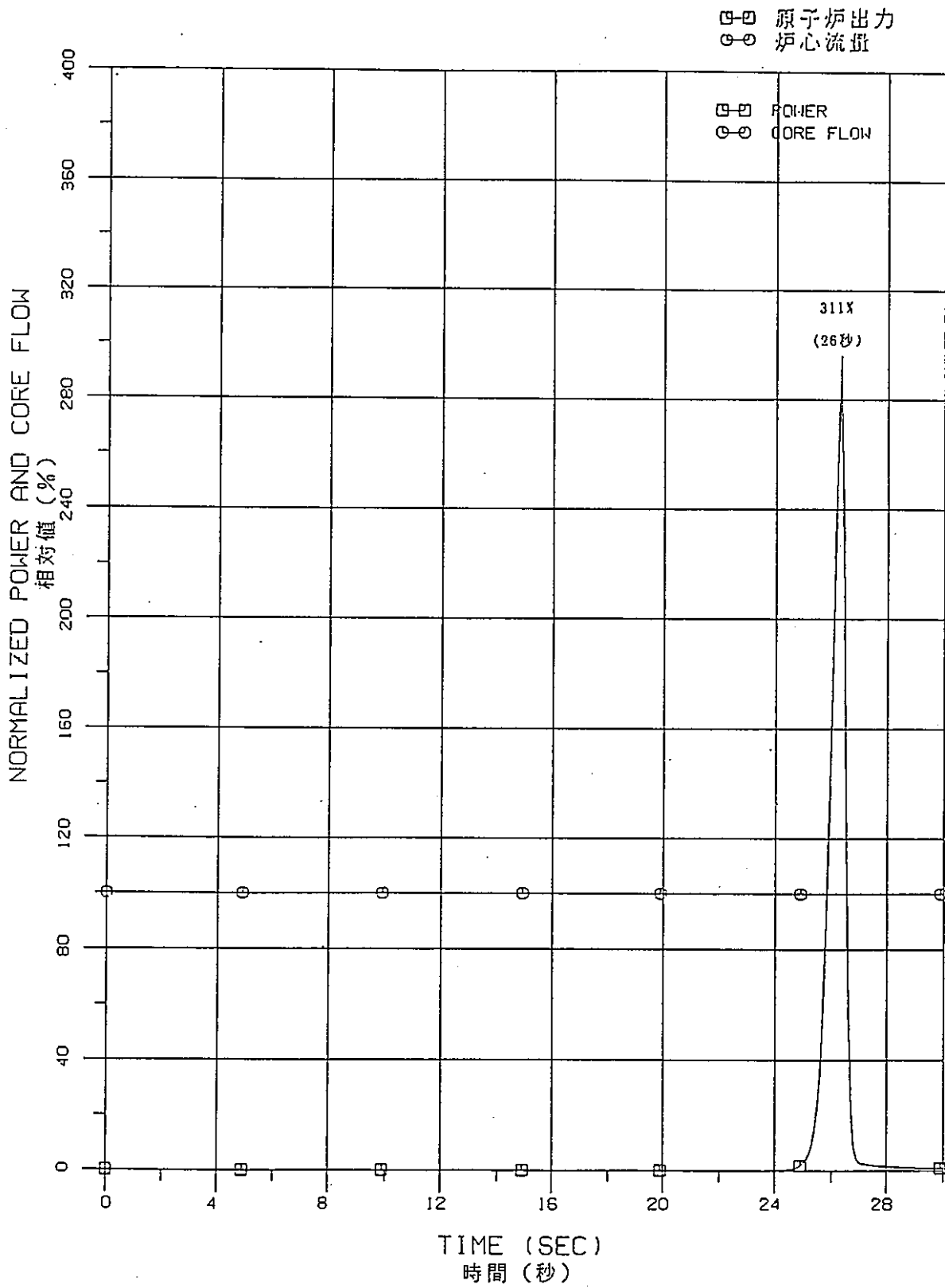


図3.5-2 示臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 -原子炉出力及び炉心流量-

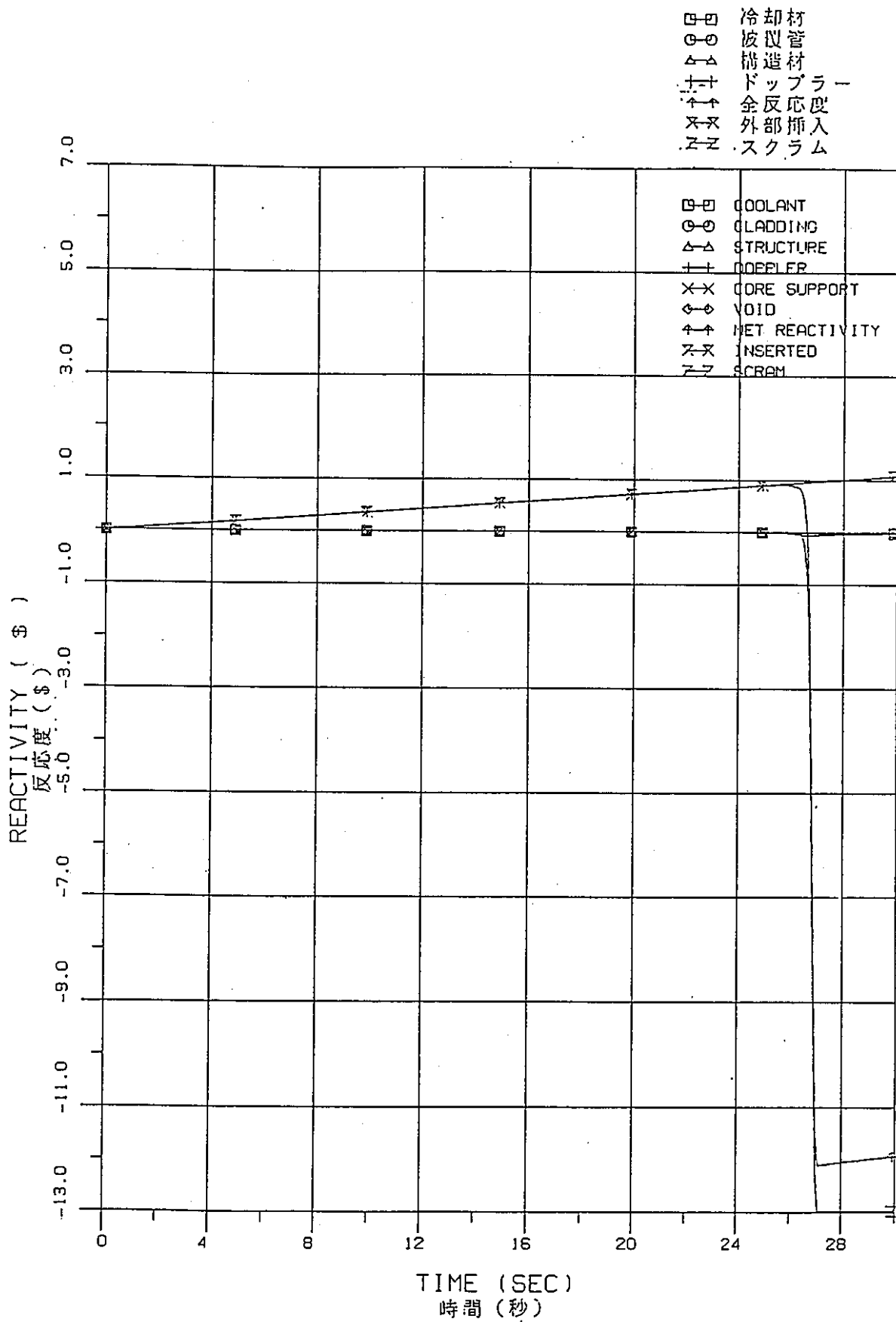


図3.5-3 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設前)
- 反応度 -

炉心ホットチャンネル

燃料
 被覆管
 冷却材

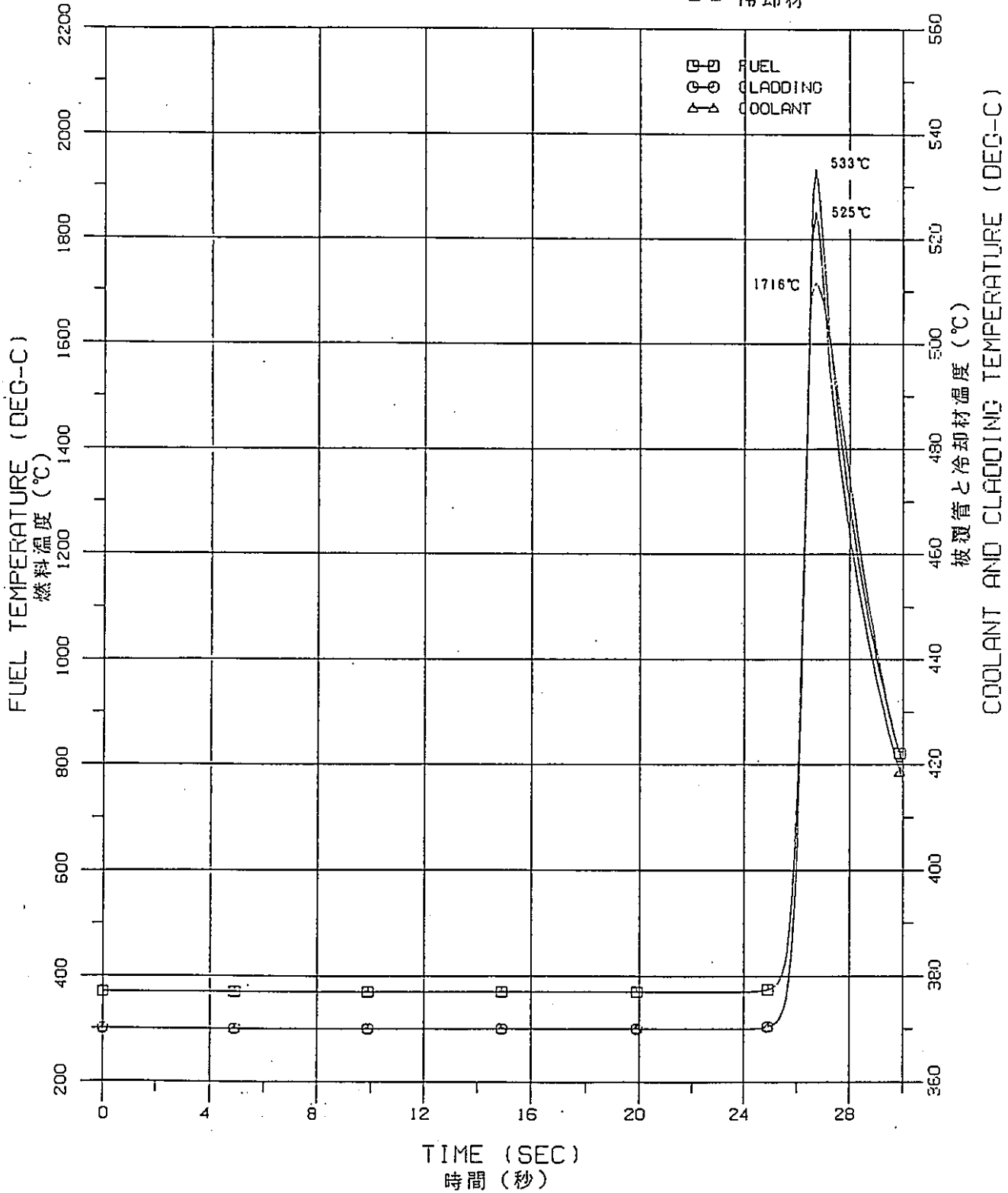


図3.5-4 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 -炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

炉心平均チャンネル

□ □ 燃料
 ⊖ ⊖ 被覆管
 ▲ ▲ 冷却材

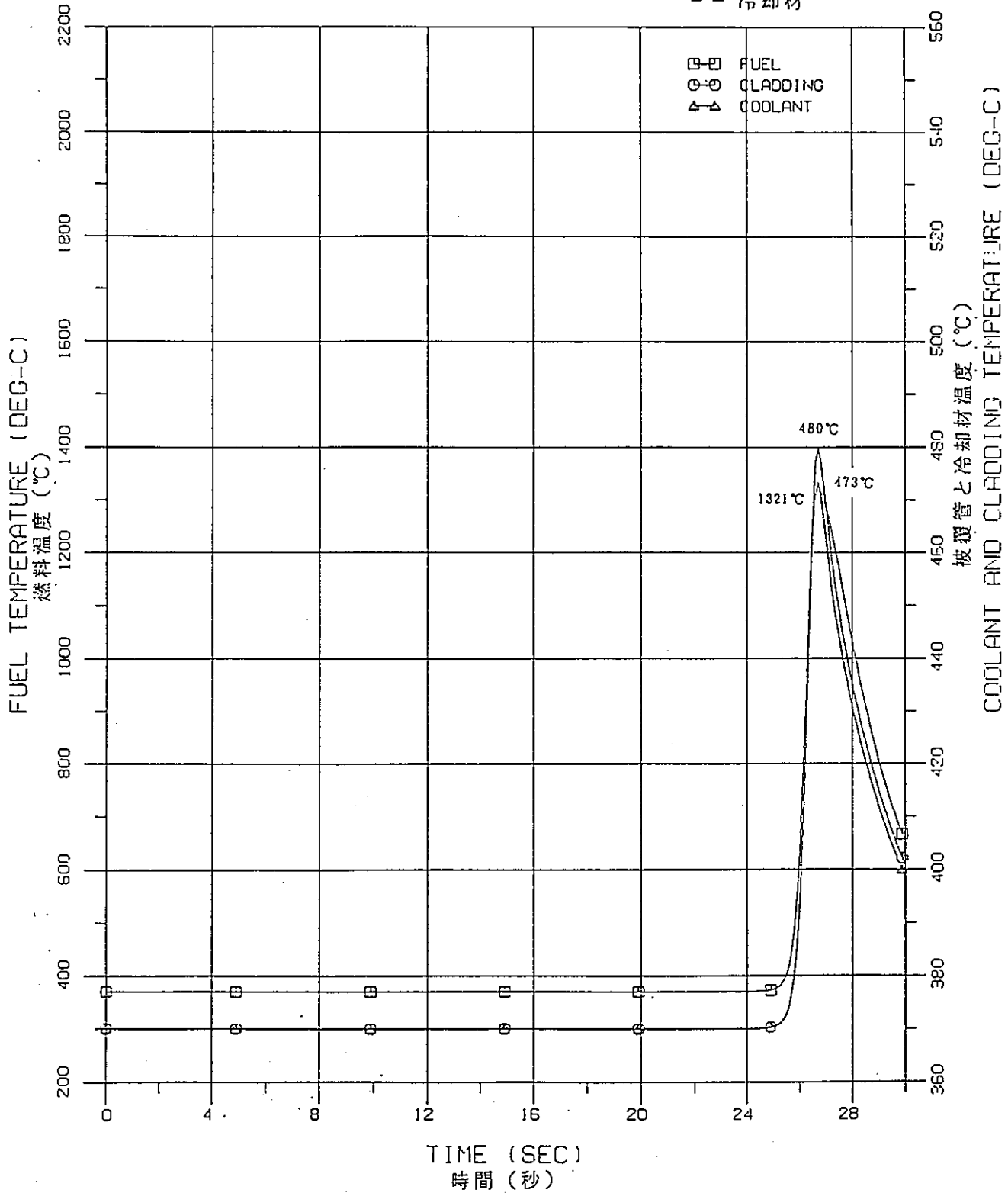


図3.5-5 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 - 炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度 -

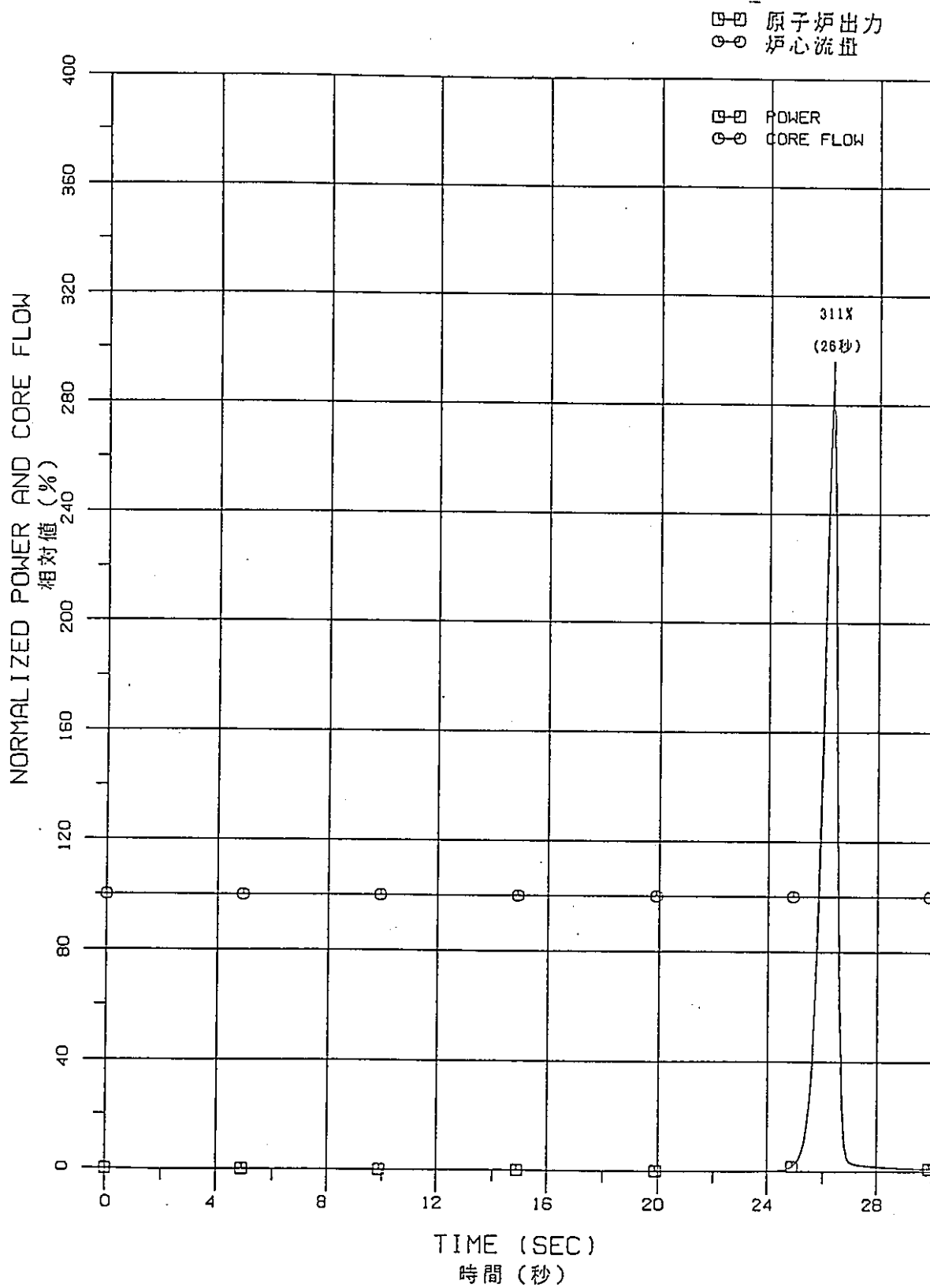


図3.5-6 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 -原子炉出力及び炉心流量-

- □ 冷却材
- ○ 波紋管
- △ △ 構造材
- ++ Doppler
- ↑ ↑ 全反応度
- × × 外部挿入
- ≡ ≡ スクラム

- □ COOLANT
- ○ CLADDING
- △ △ STRUCTURE
- ++ DOPLER
- × × CORE SUPPORT
- ◇ ◇ VOID
- ↑ ↑ NET REACTIVITY
- × × INSERTED
- ≡ ≡ SCRAM

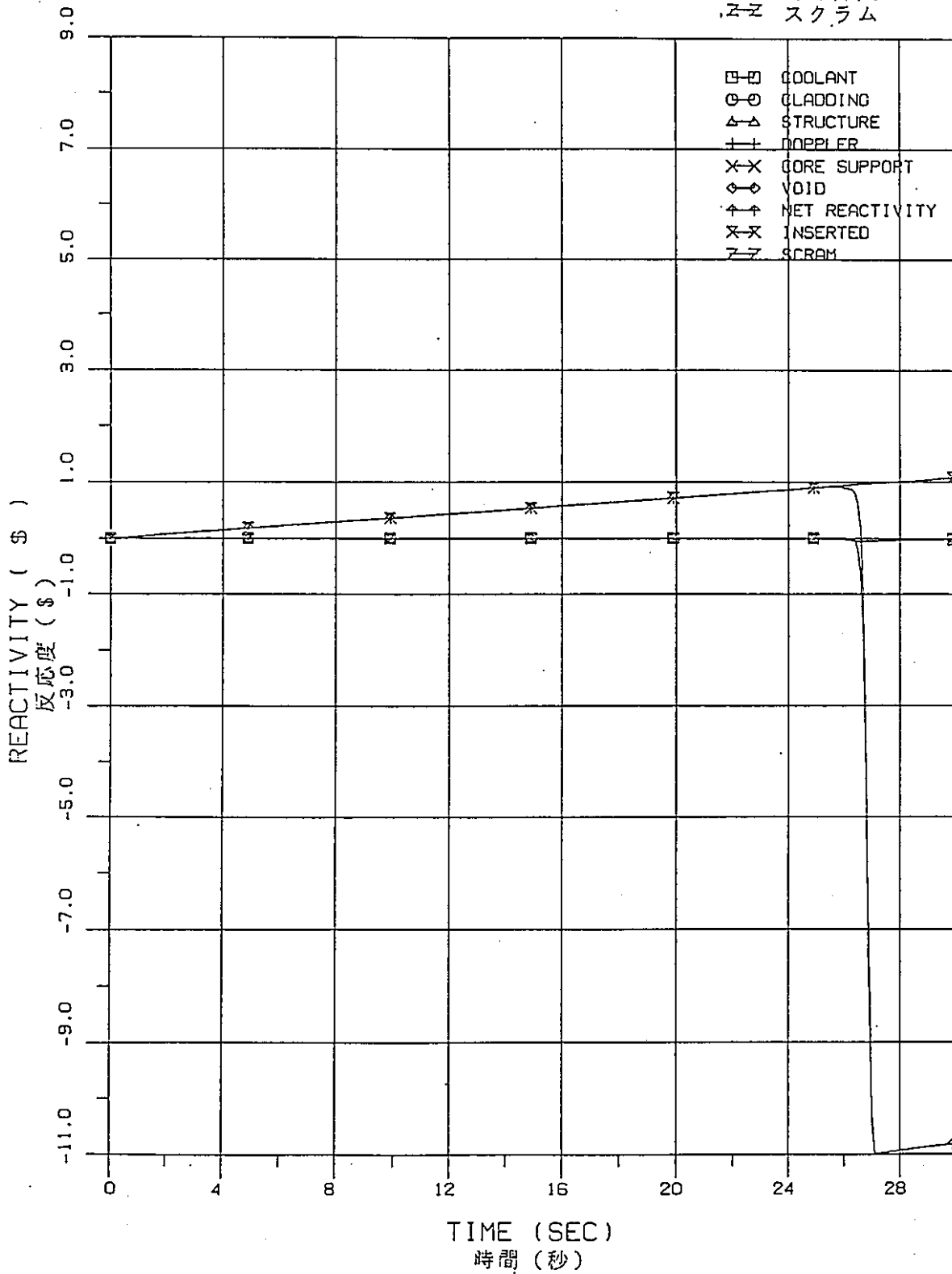


図3.5-7 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)
 - 反応度 -

炉心ホットチャンネル

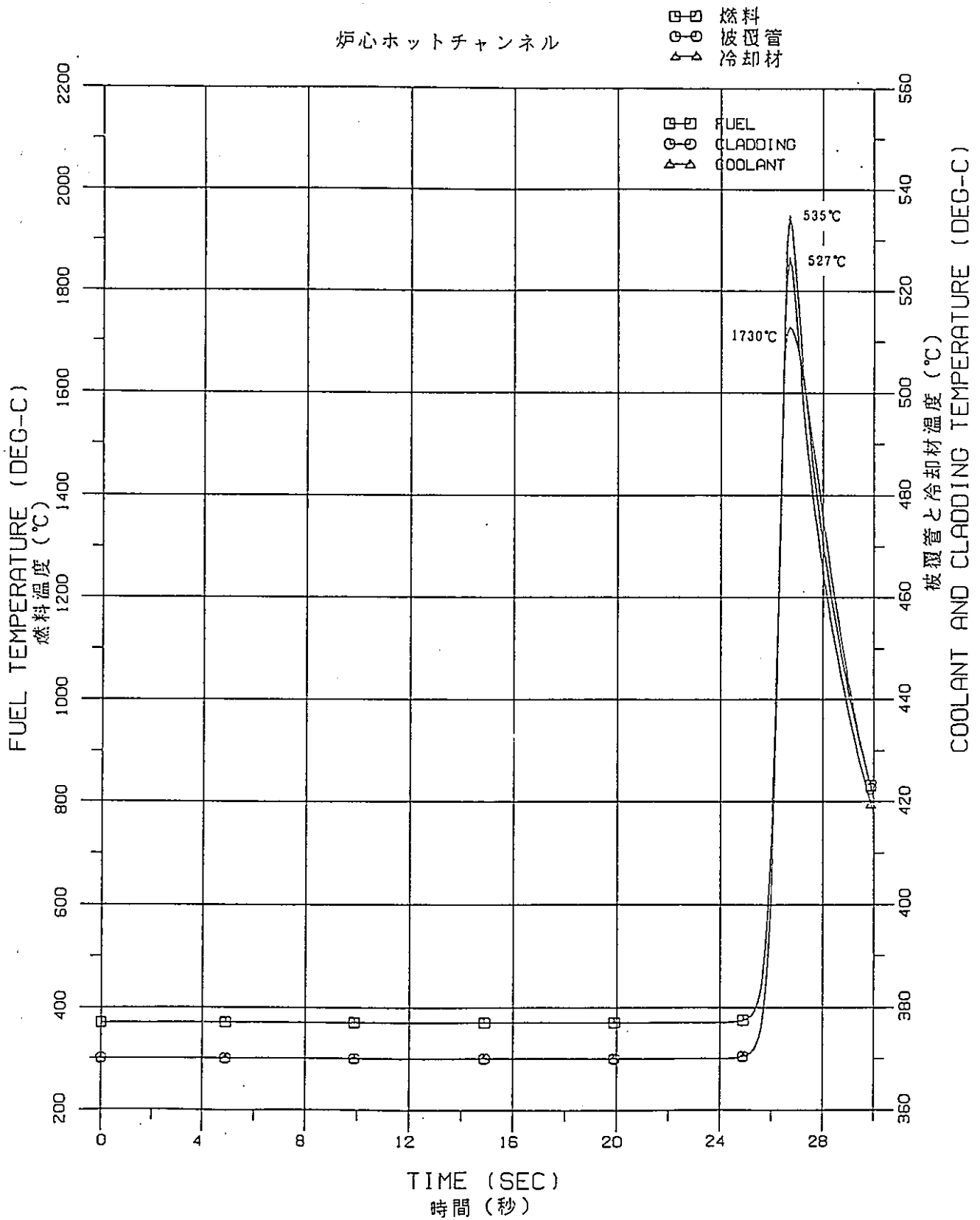


図3.5-8 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 -炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

炉心平均チャンネル

□-□ 燃料
 ○-○ 被覆管
 △-△ 冷却材

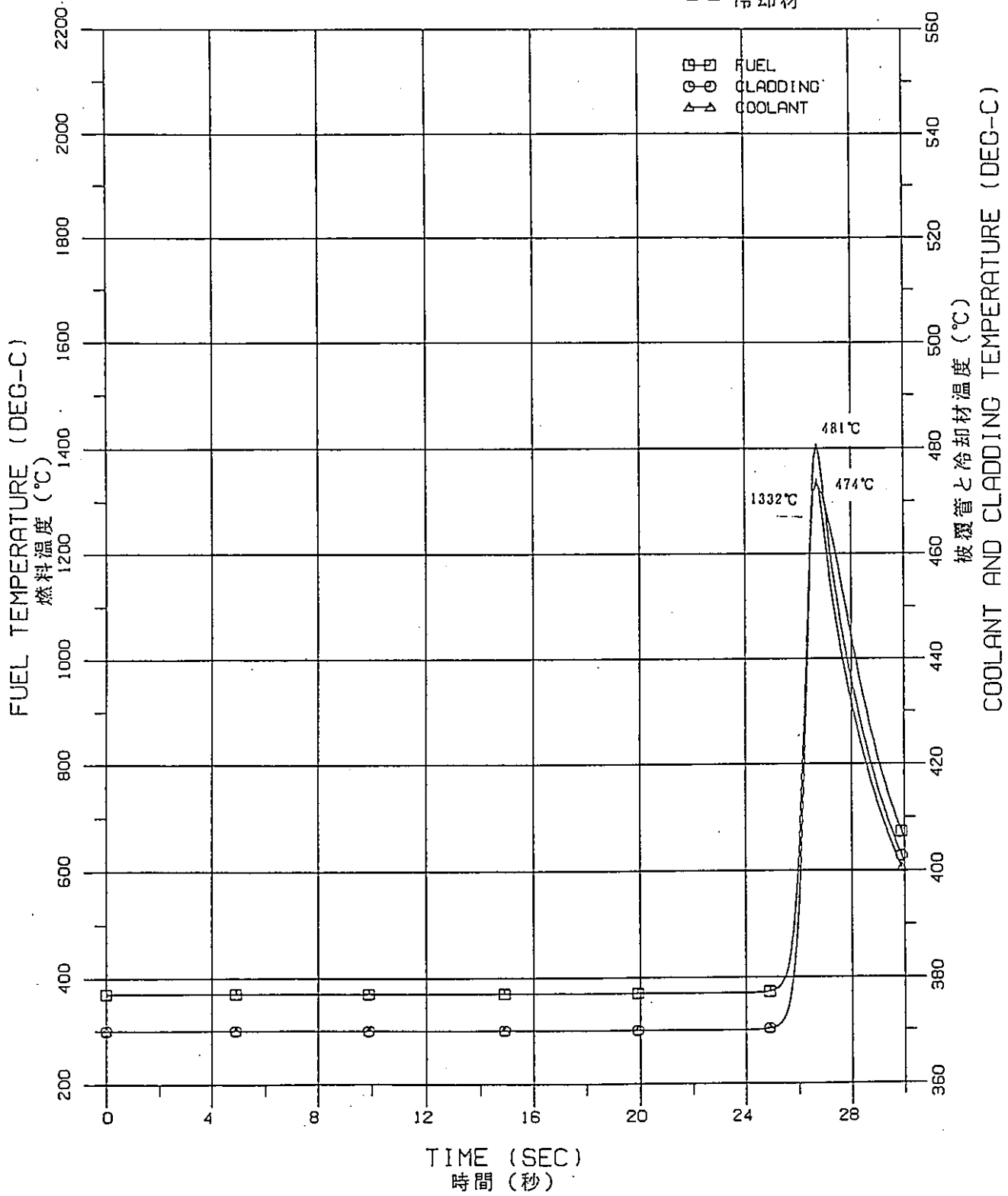


図3.5-9 未臨界状態からの制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 - 炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度 -

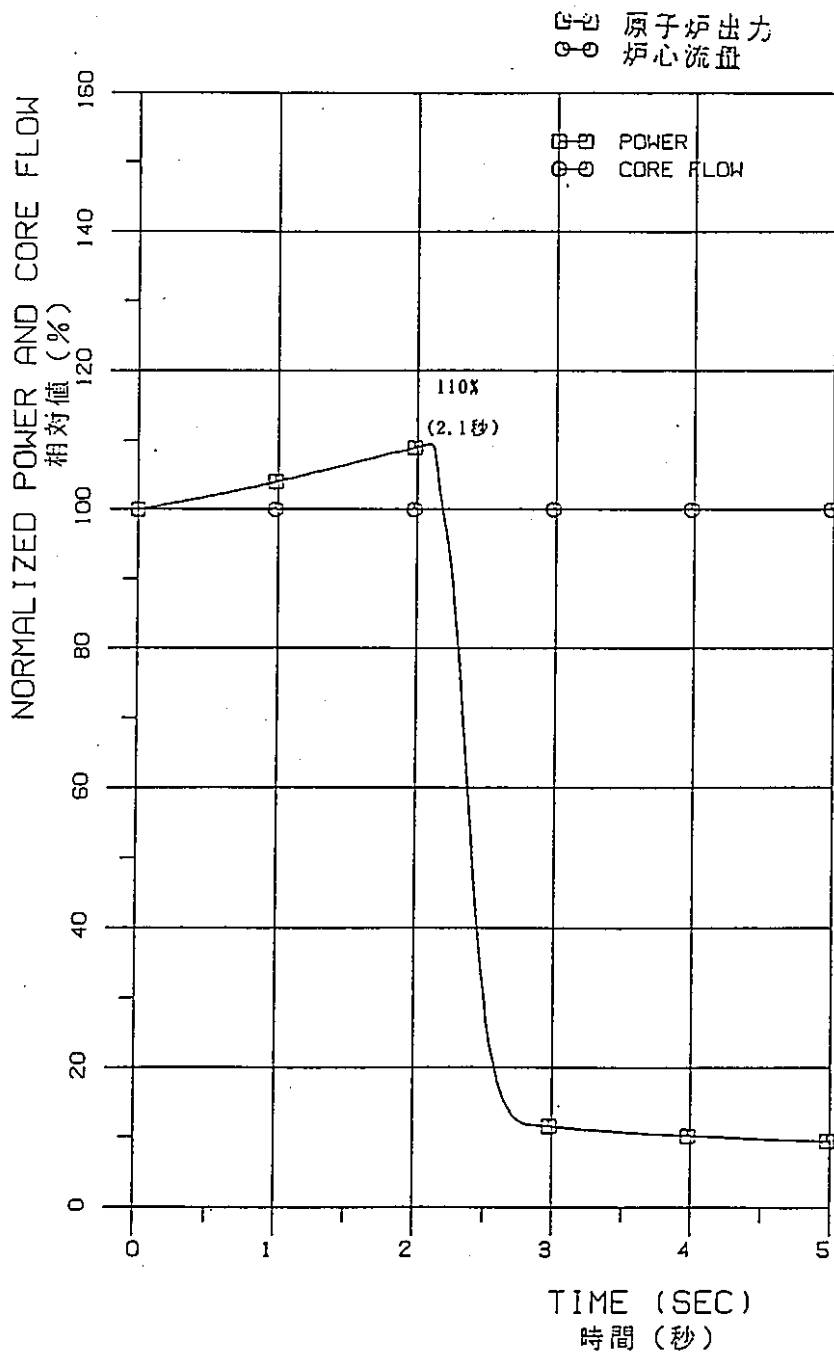


図3.5-10 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 —原子炉出力及び炉心流量—

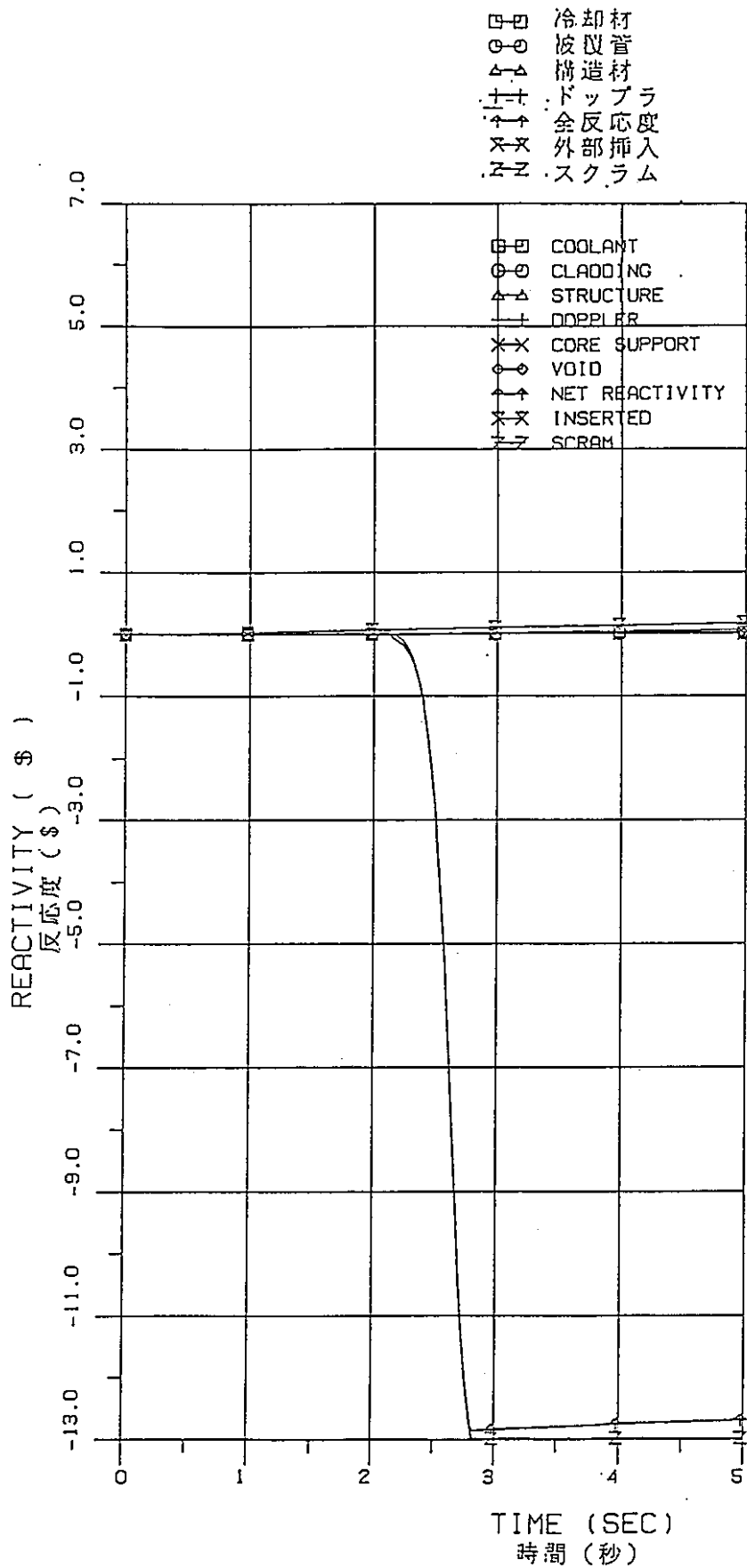


図3.5-11 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 - 反応度 -

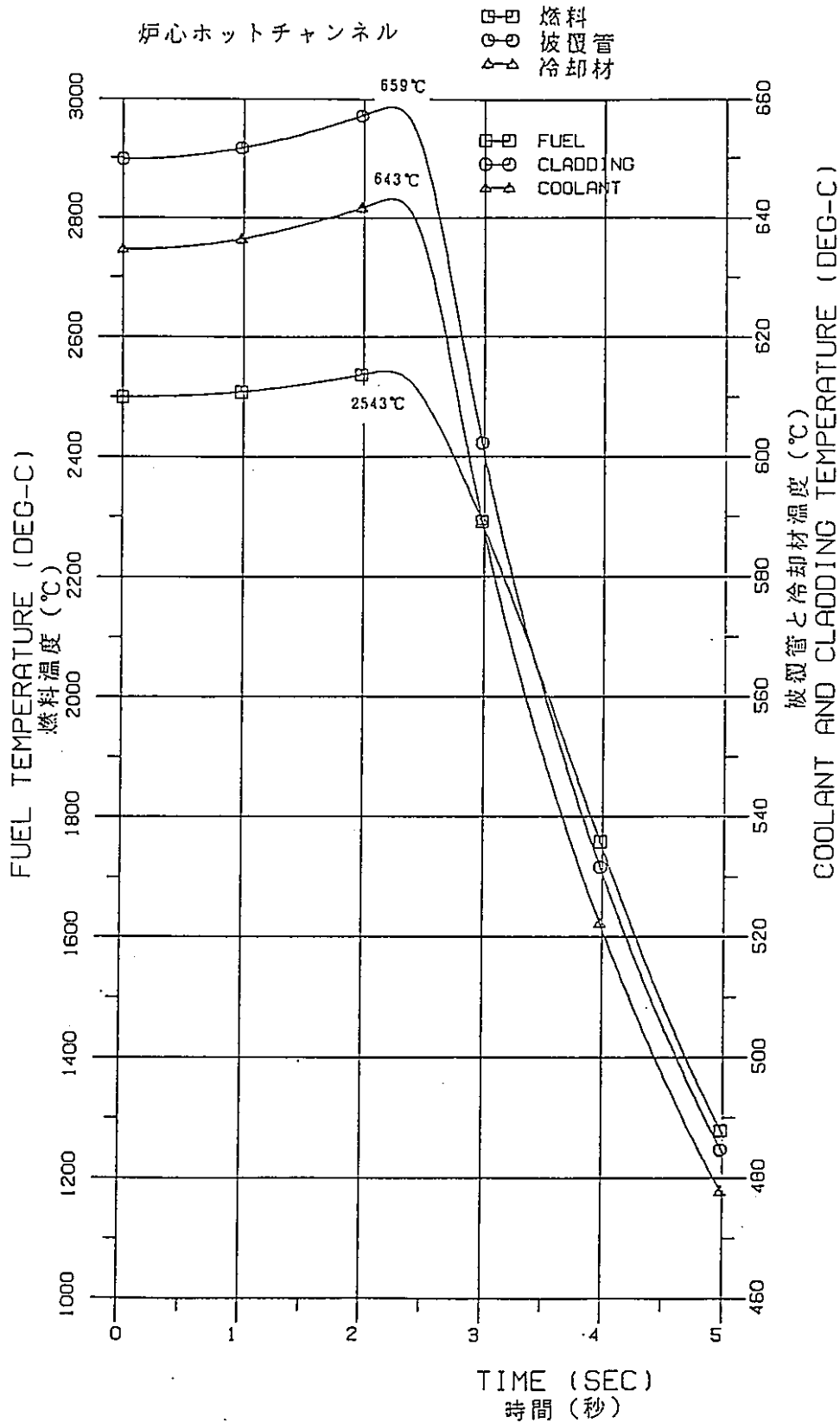


図3.5-12 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 -炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

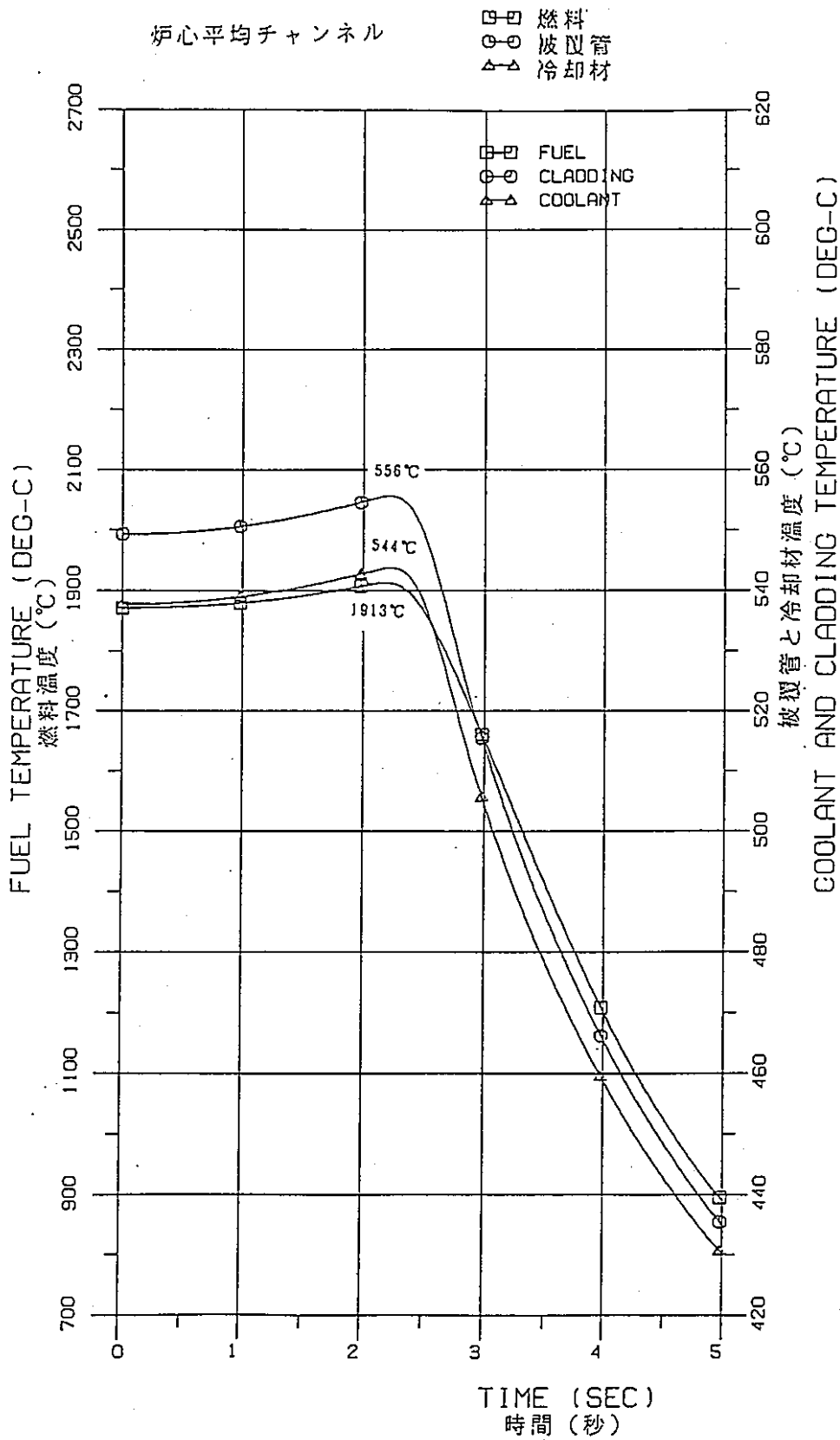


図3.5-13 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設前）
 -炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

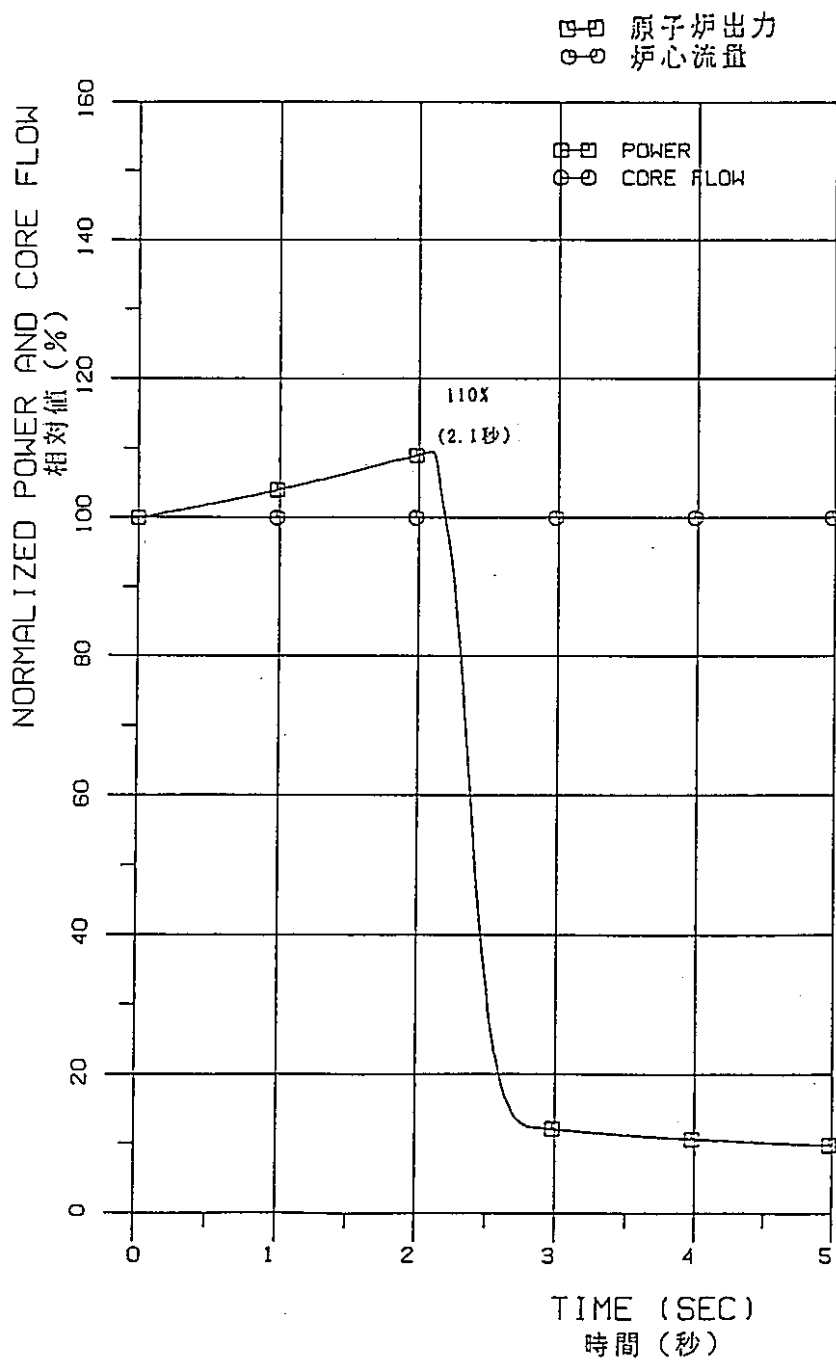


図3.5-14 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 - 原子炉出力及び炉心流量 -

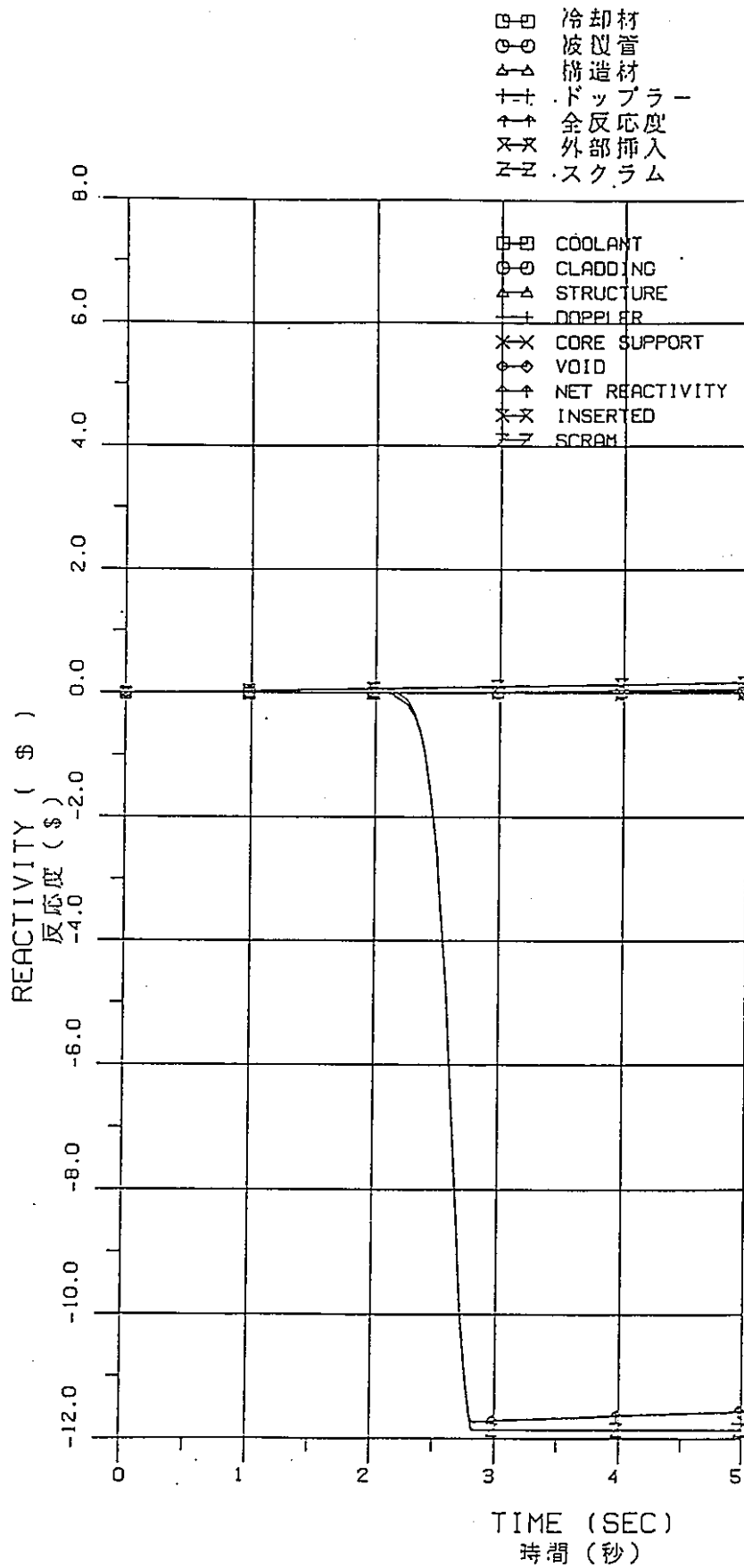


図3.5-15 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き (制御棒移設後)
- 反応度 -

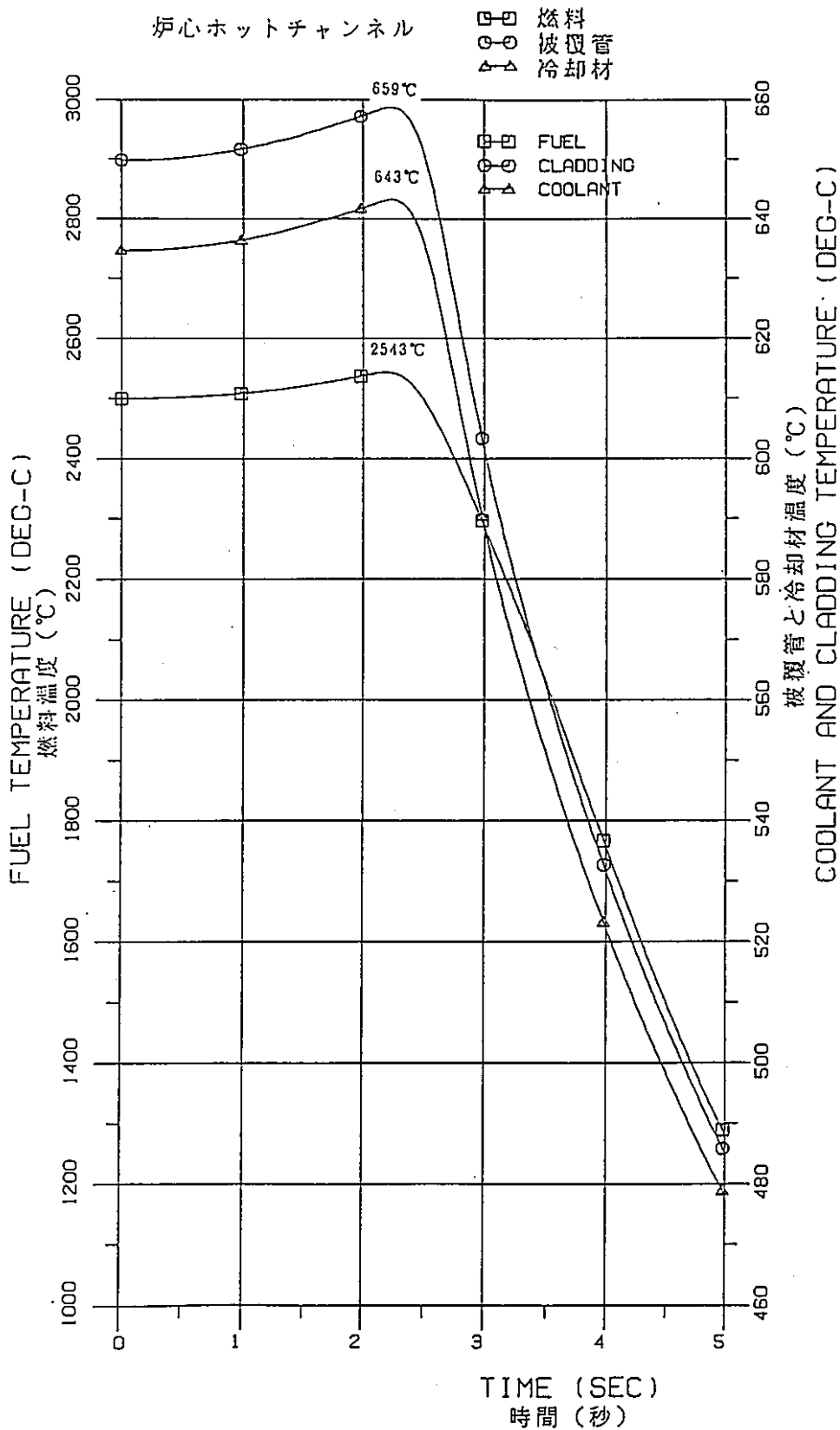


図3.5-16 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 - 炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度 -

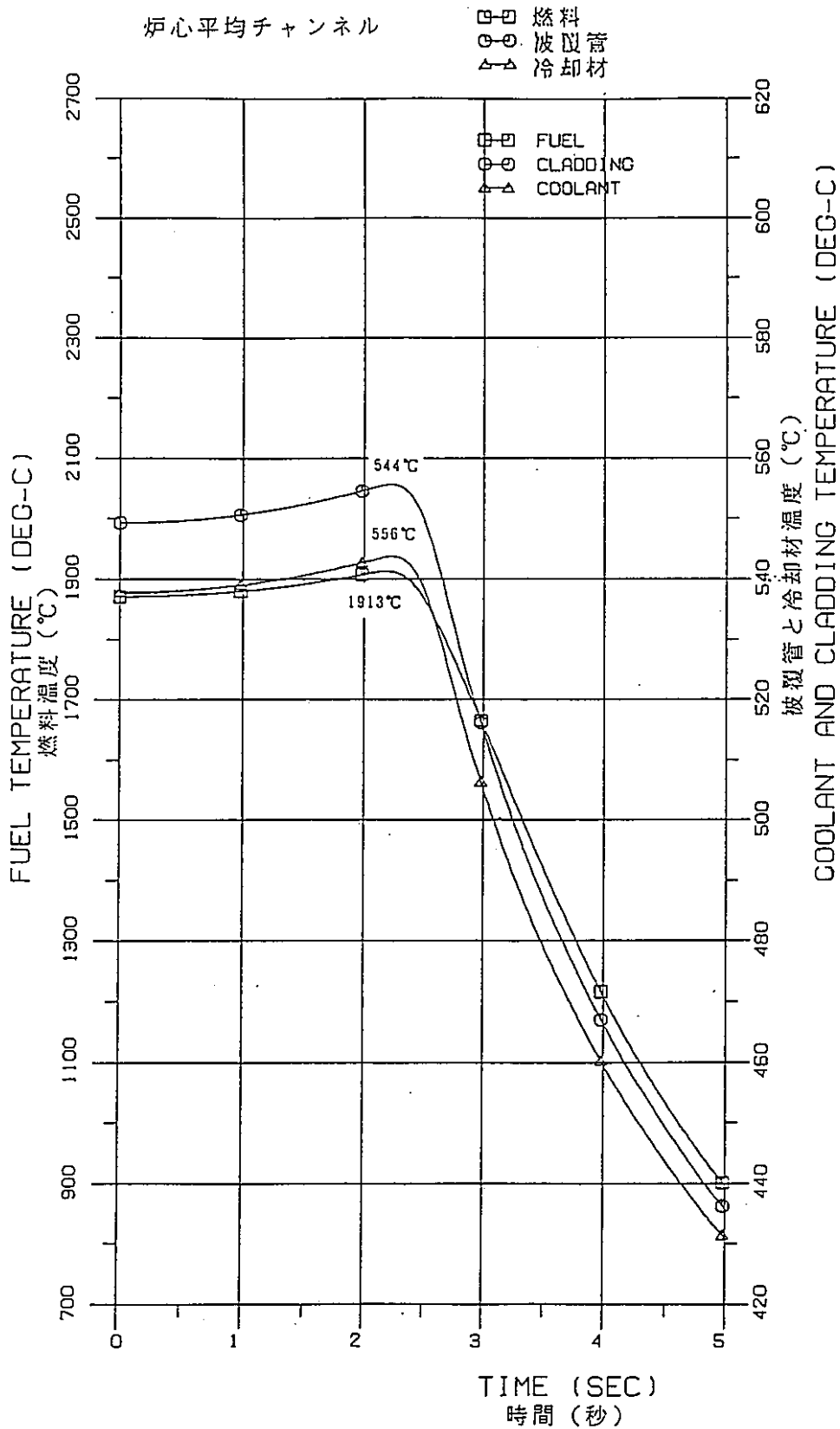


図3.5-17 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き（制御棒移設後）
 -炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

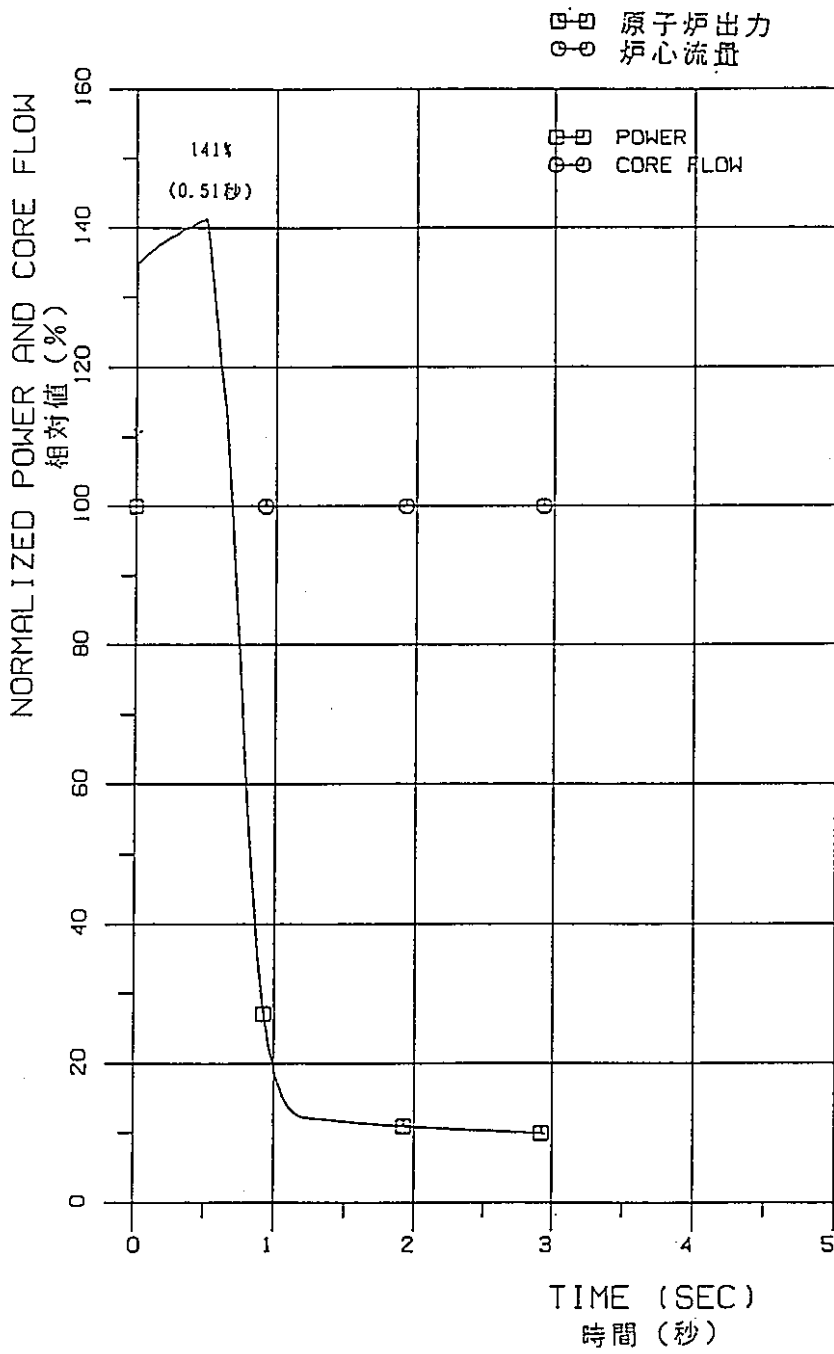


図3.5-18 燃料スランピング事故（制御棒移設前）
 -原子炉出力及び炉心流量-

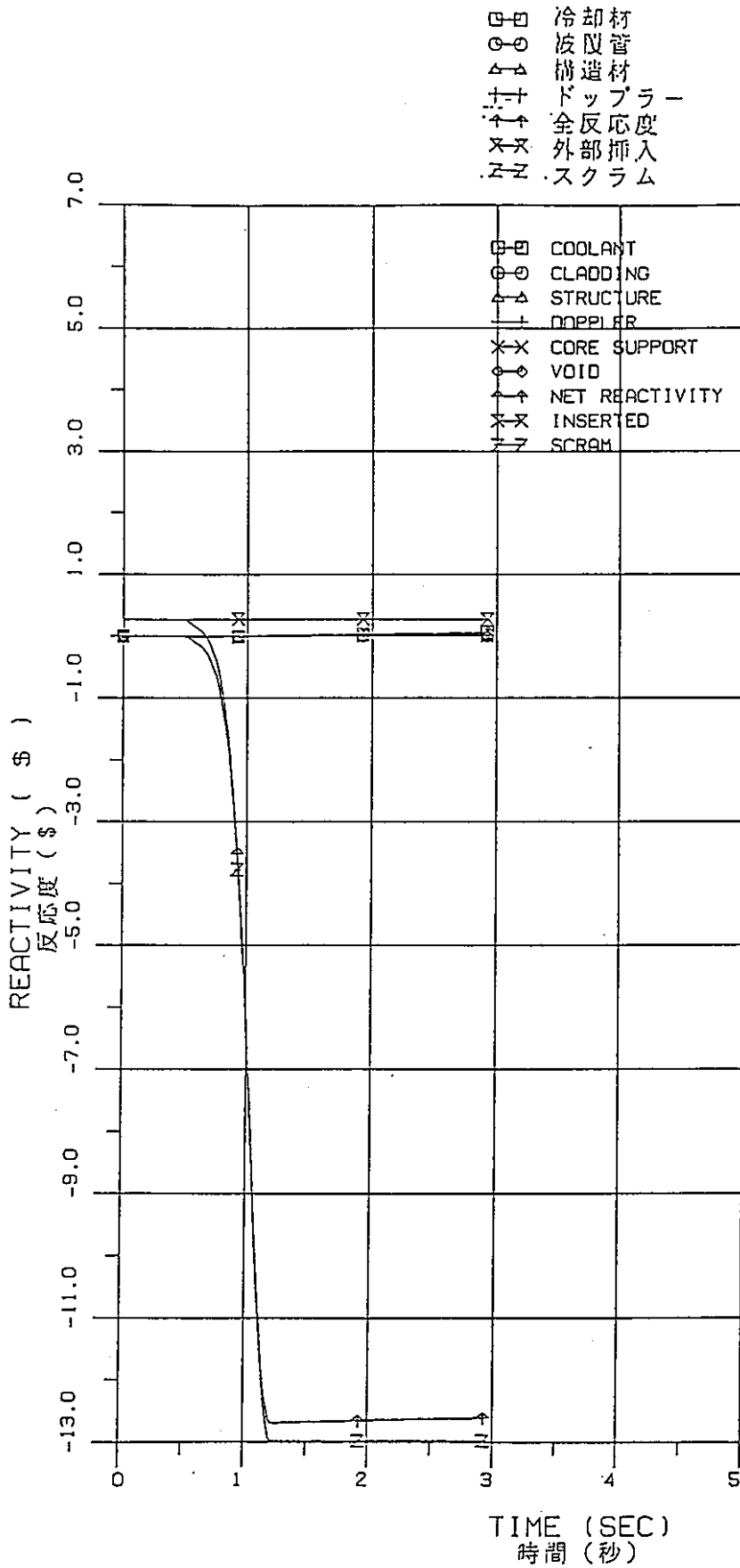


図3.5-19 燃料スランピング事故 (制御棒移設前)
- 反応度 -

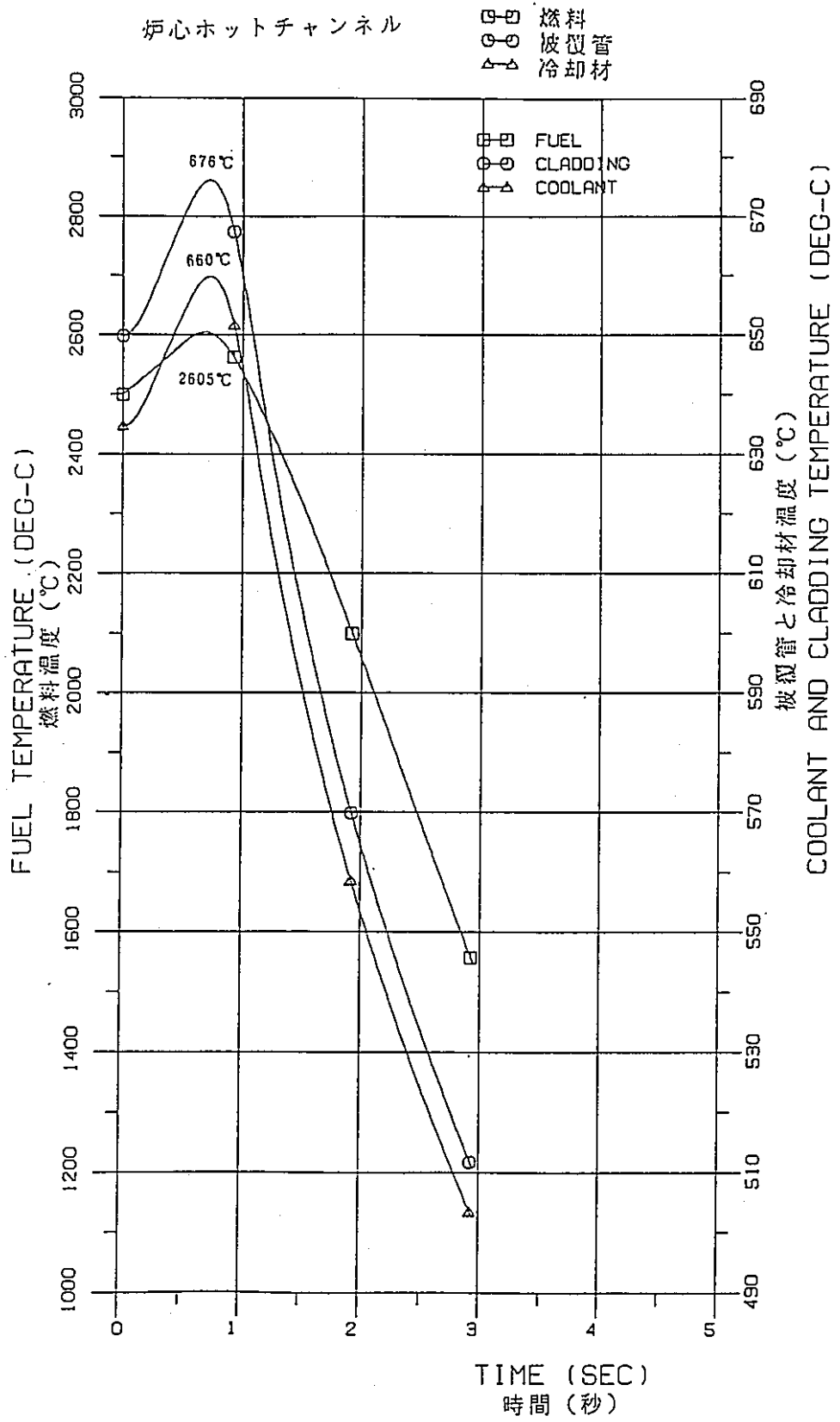


図3.5-20 燃料スランピング事故（制御棒移設前）
 -炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

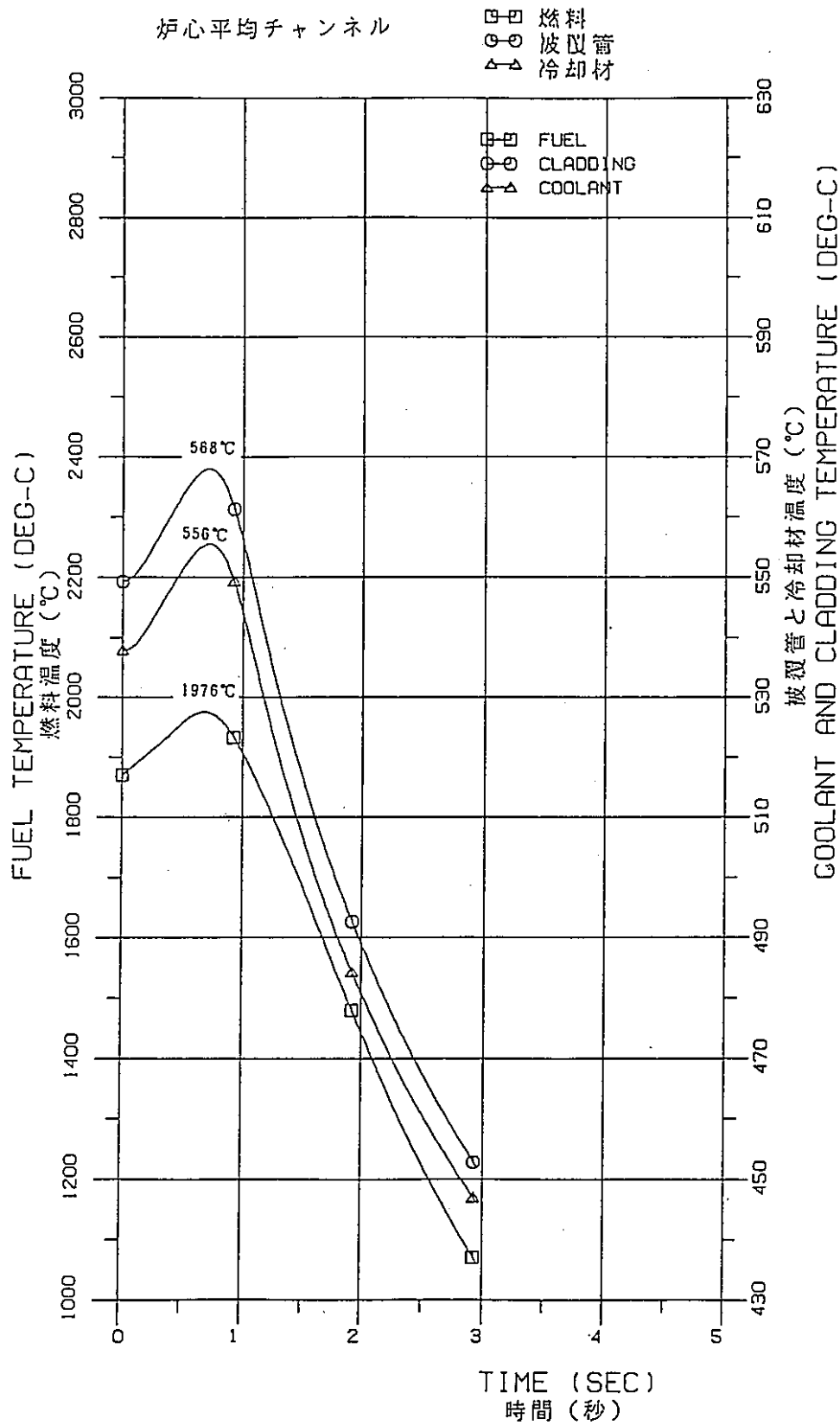


図3.5-21 燃料スランピング事故（制御棒移設前）
 -炉心平均チャンネル：ペリット、被覆管、冷却材最高温度-

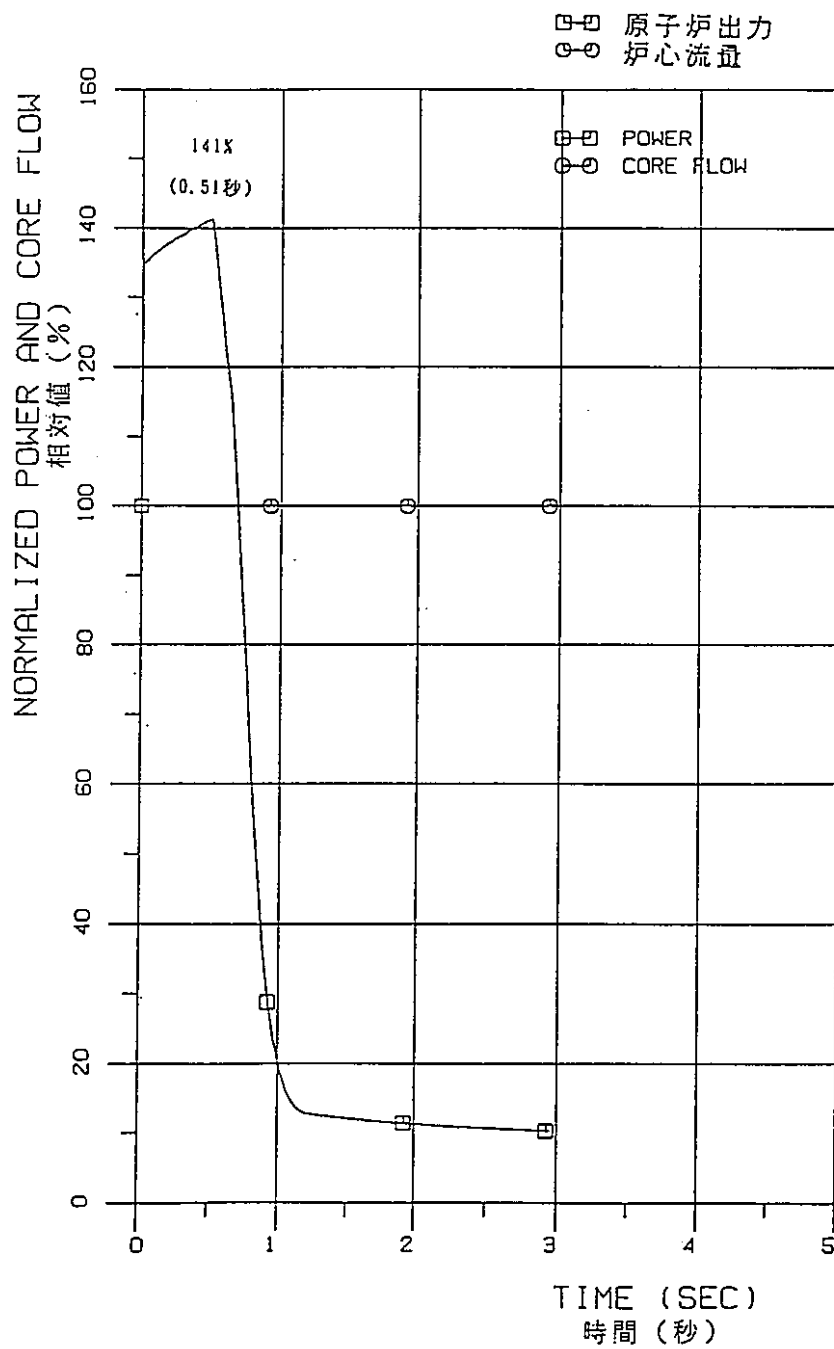


図3.5-22 燃料スランピング事故（制御棒移設後）
 - 原子炉出力及び炉心流量 -

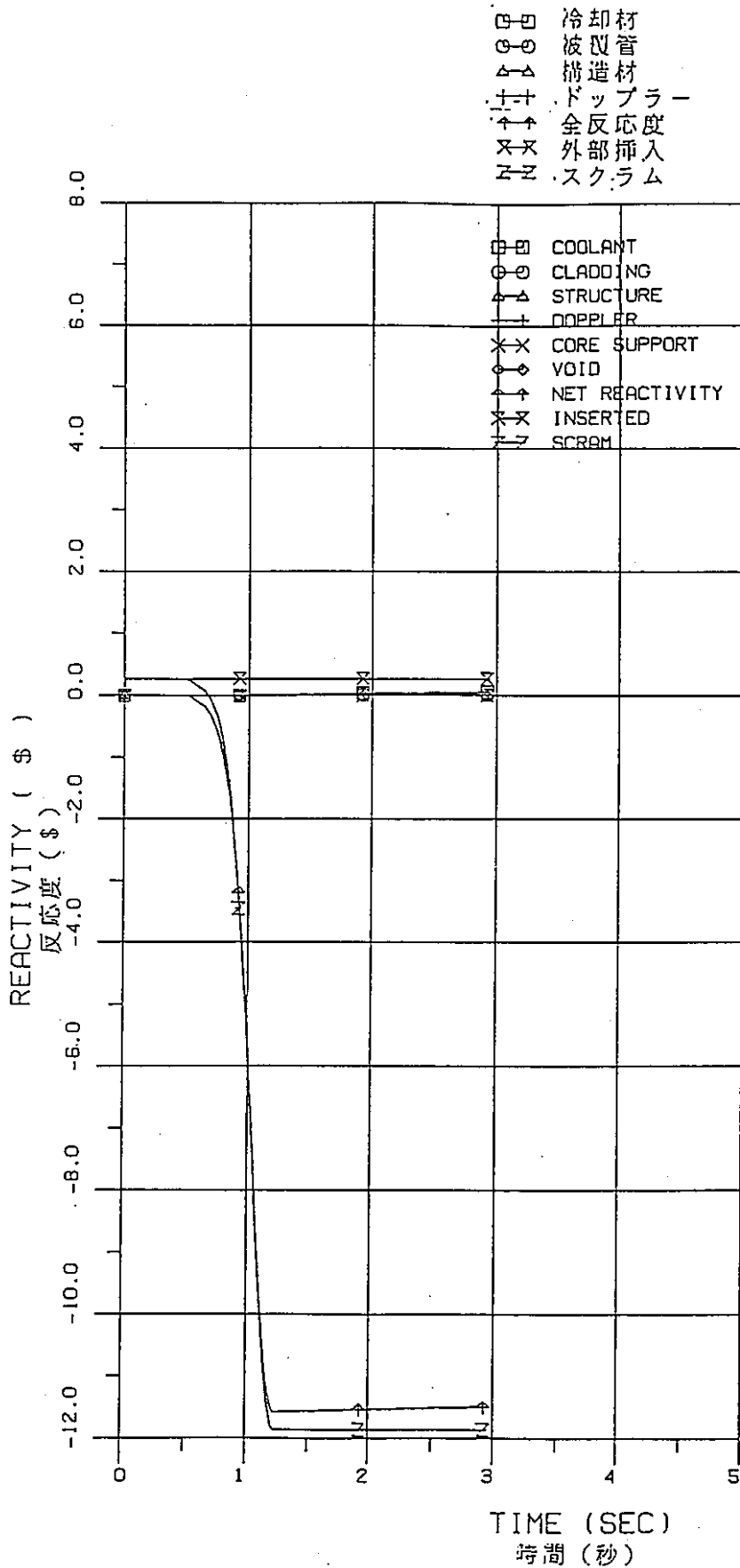


図3.5-23 燃料スランピング事故 (制御棒移設後)
 - 反応度 -

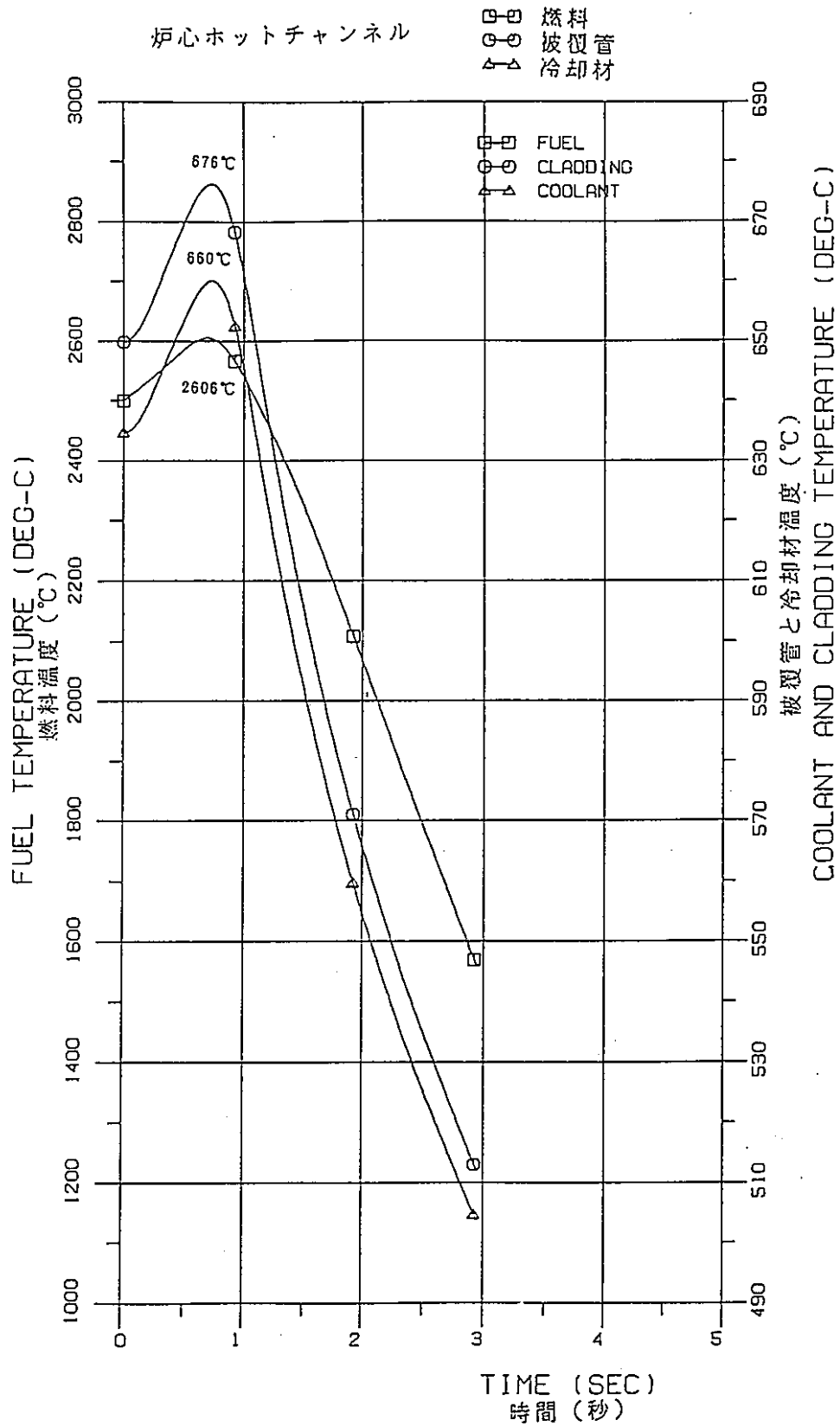
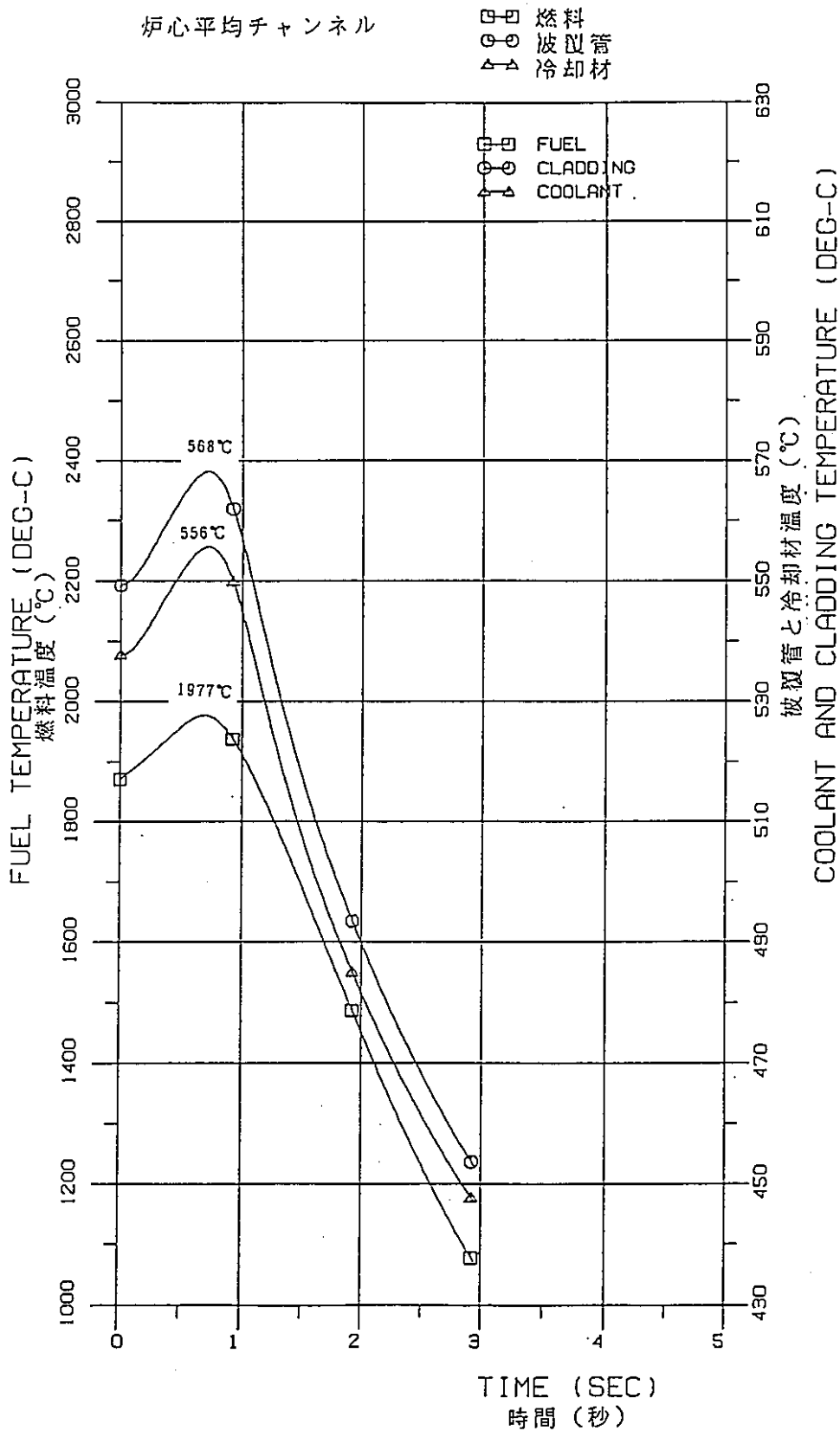


図3.5-24 燃料スランピング事故（制御棒移設後）
 - 炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度 -



〔 図3.5-25 燃料スランピング事故（制御棒移設後）
 - 炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度 -

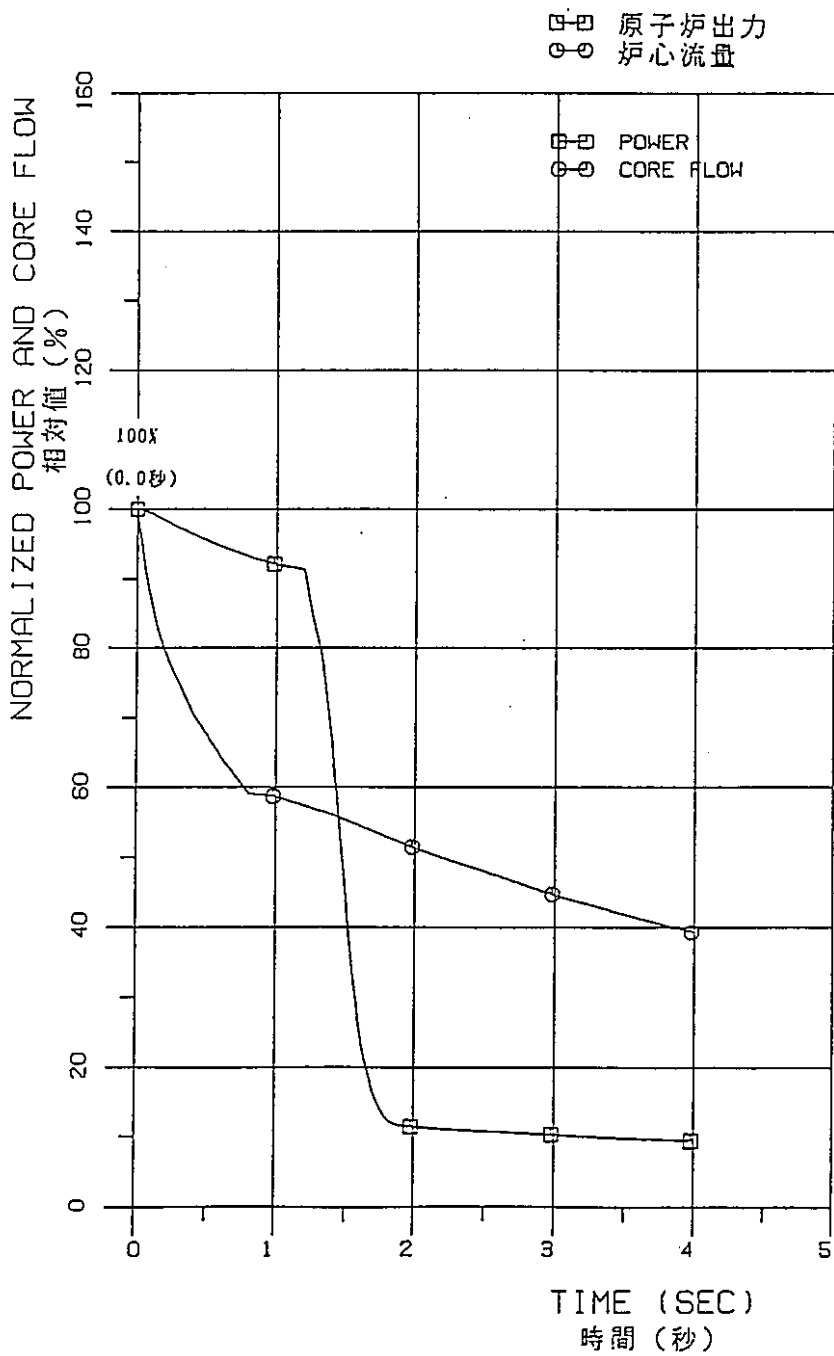


図3.5-26 J次主冷却系循環ポンプ軸固着事故(制御棒移設前)
 -原子炉出力及び炉心流量-

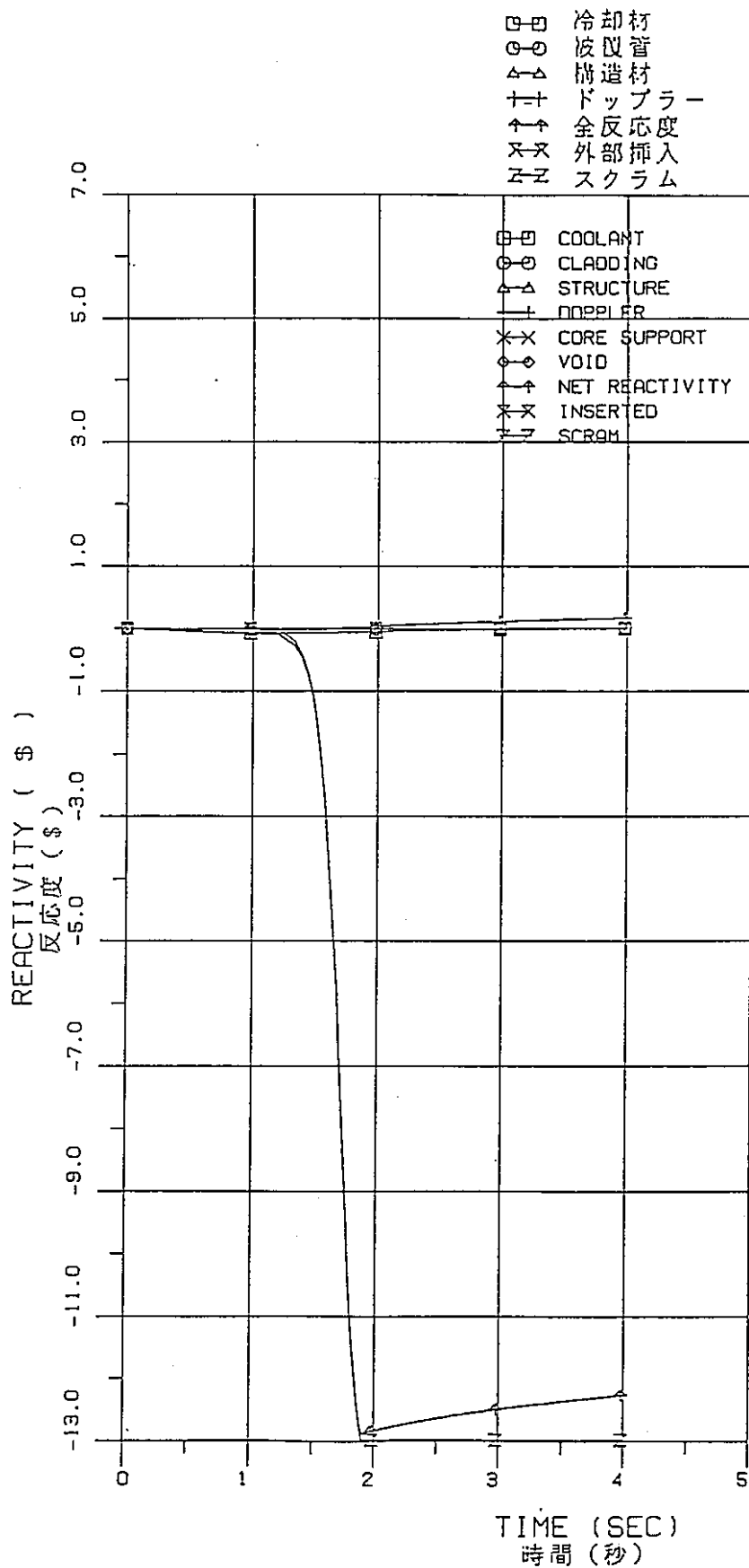


図3.5-27 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）
 - 反応度 -

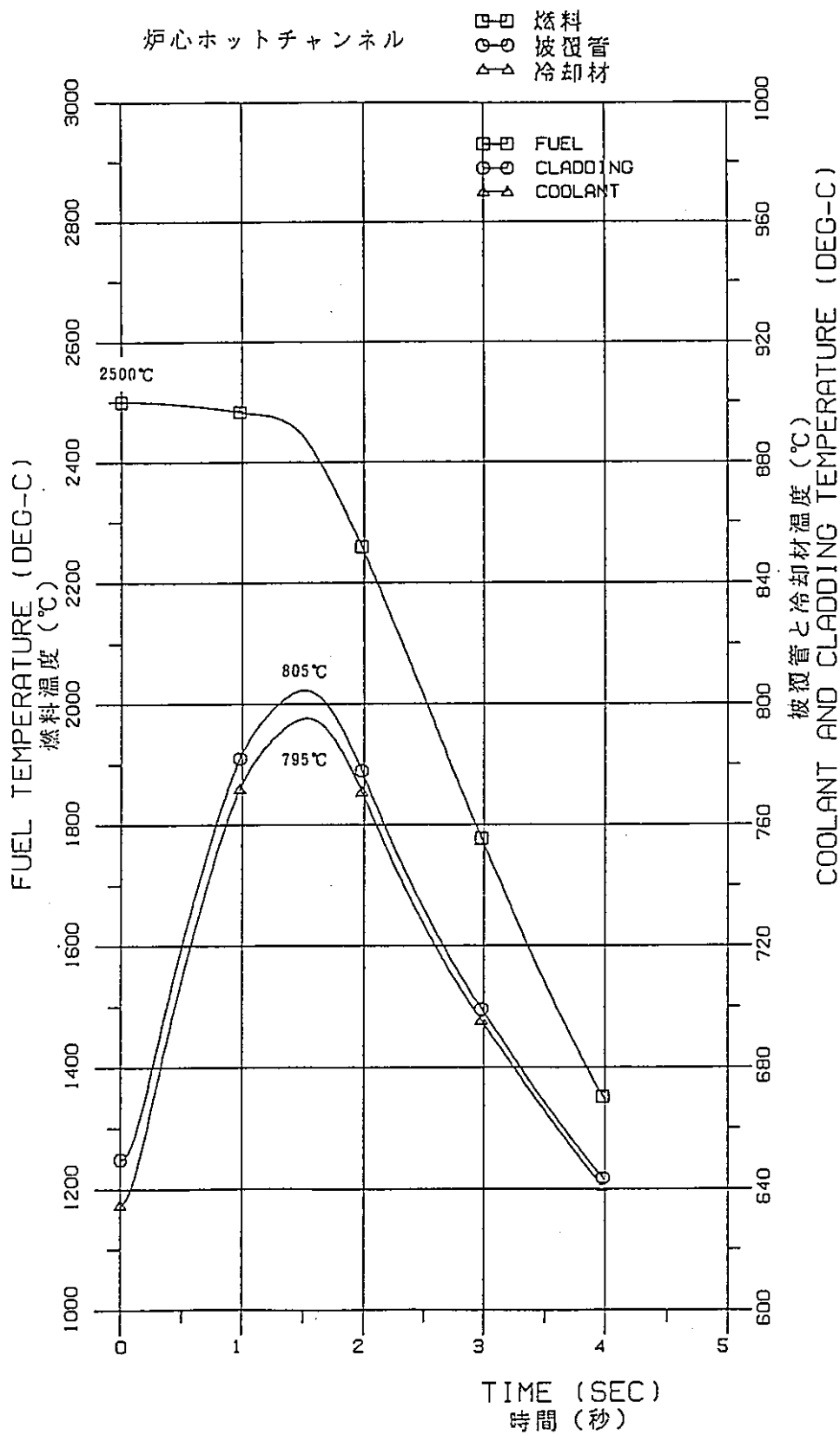


図3.5-28 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）
 -炉心ホットチャンネル：燃料、被覆管、冷却材最高温度-

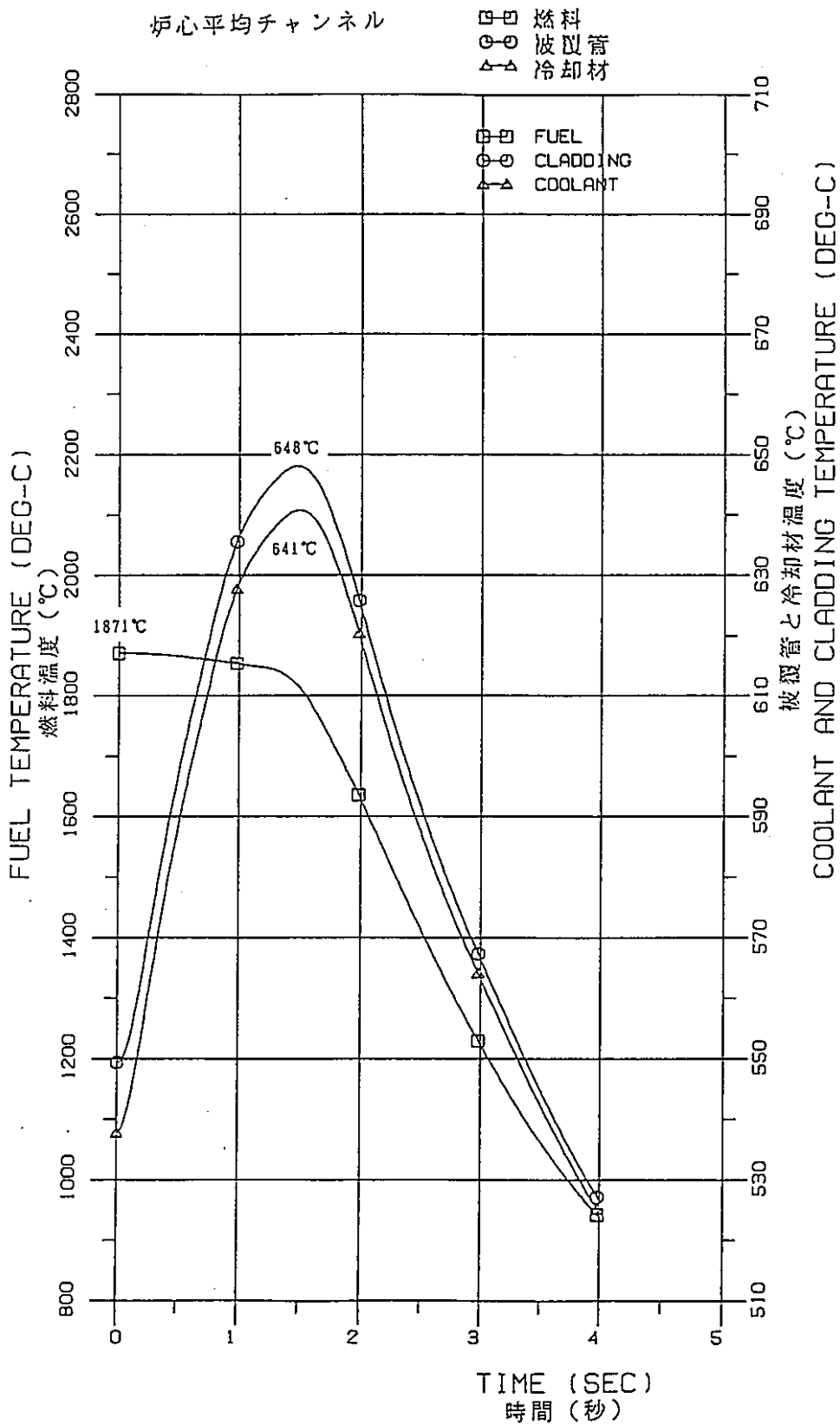


図3.5-29 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設前）
 -炉心平均チャンネル：ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

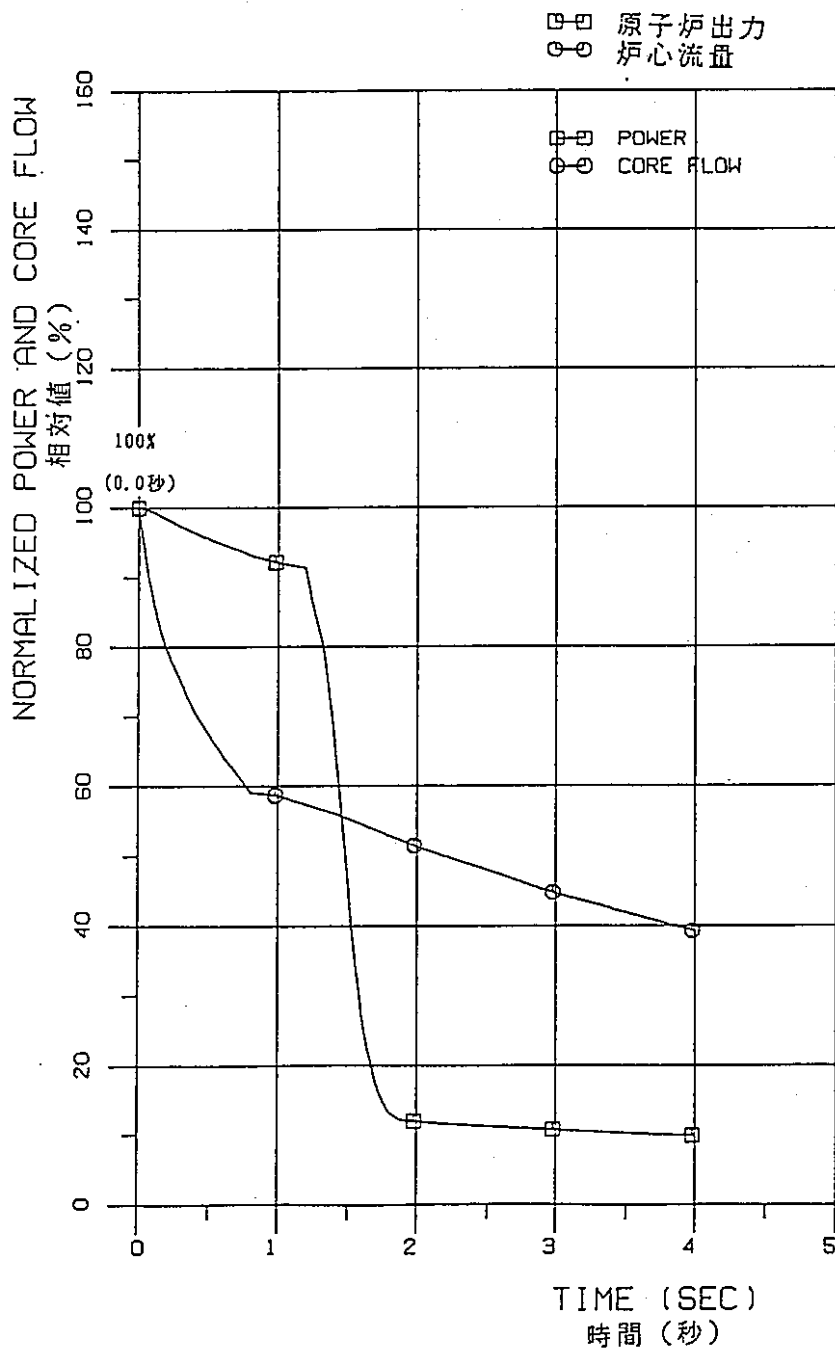


図3.5-30 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）
—原子炉出力及び炉心流量—

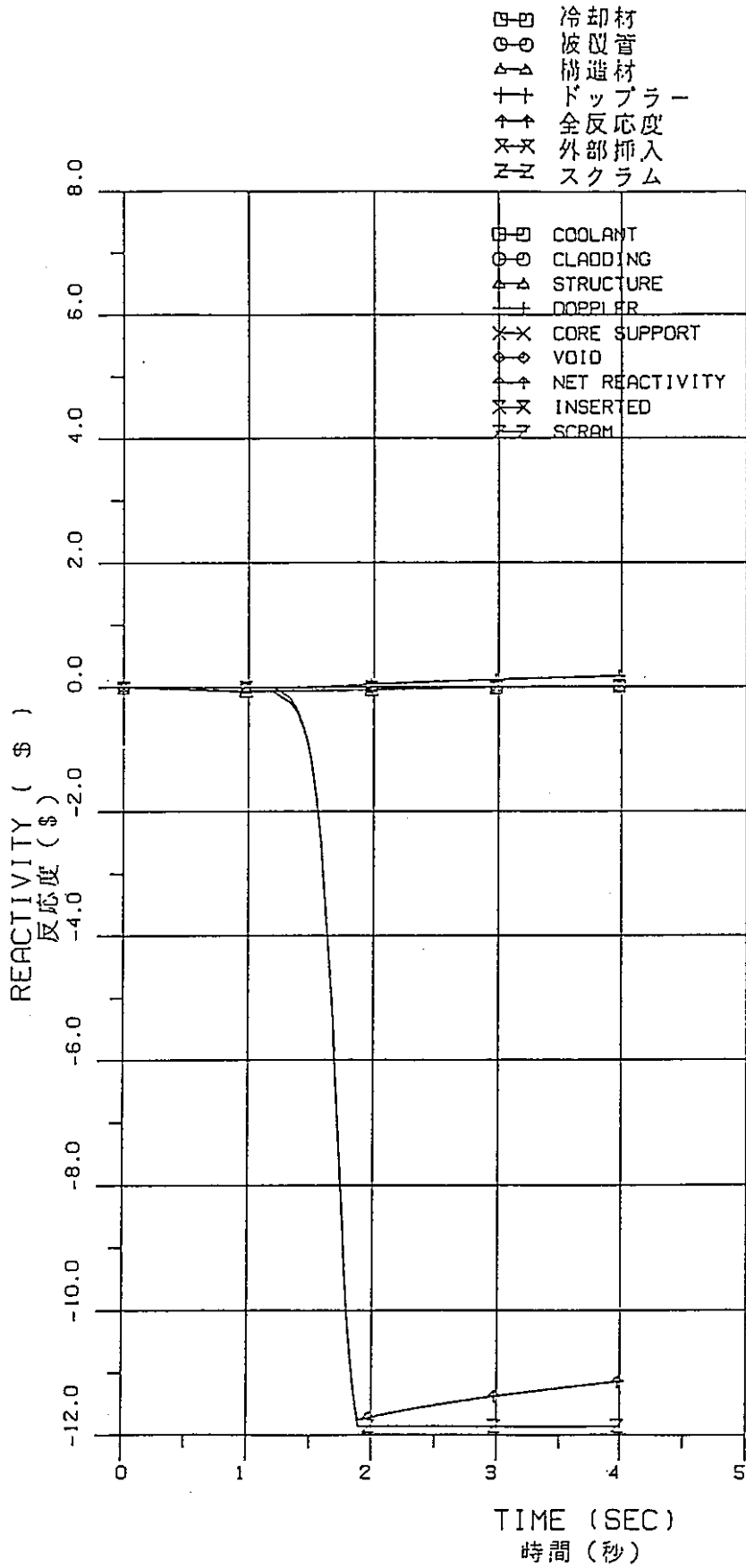


図3.5-31 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故（制御棒移設後）
-反応度-

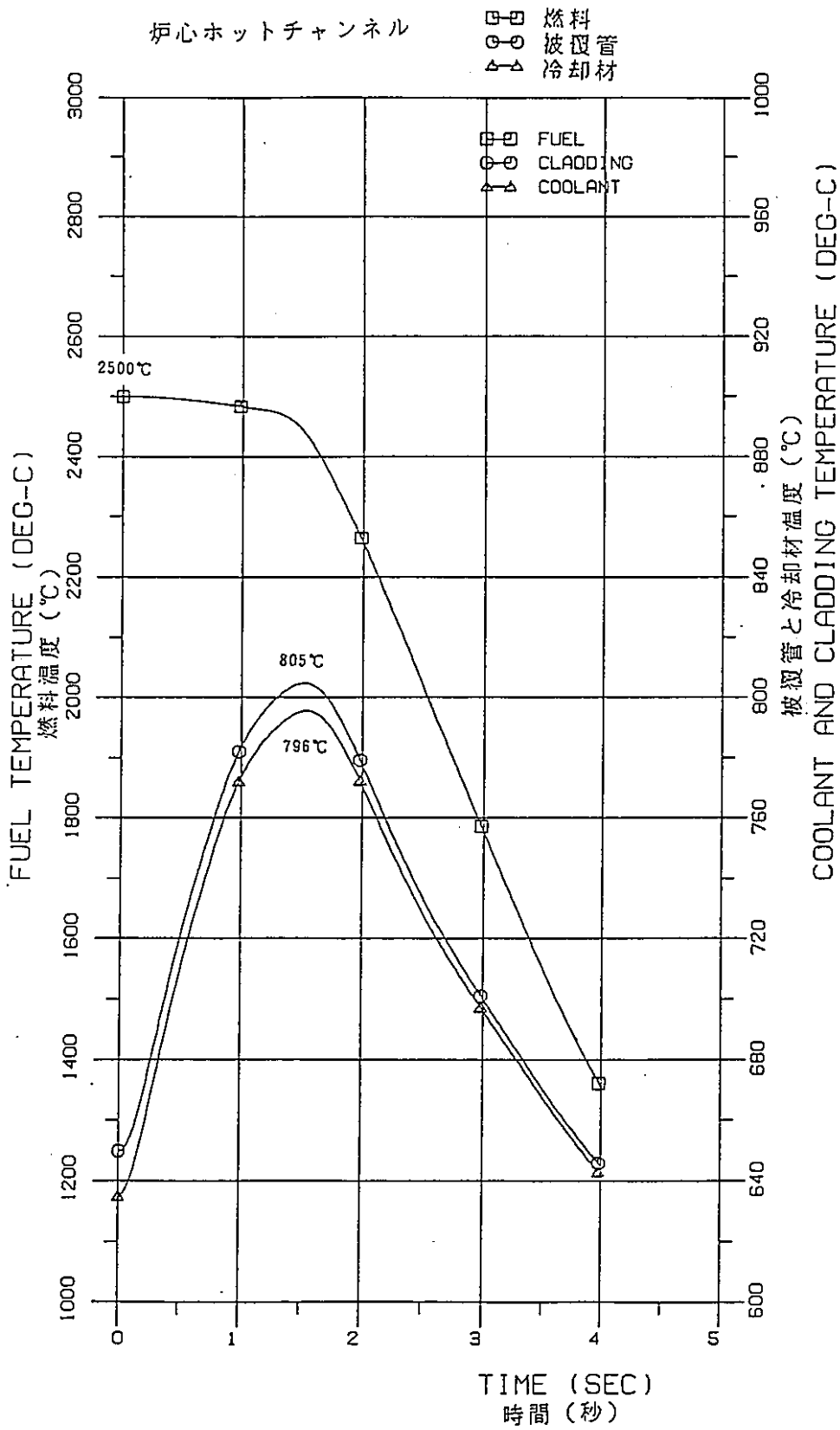


図3.5-32 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故(制御棒移設後)
 -炉心ホットチャンネル:燃料、被覆管、冷却材最高温度-

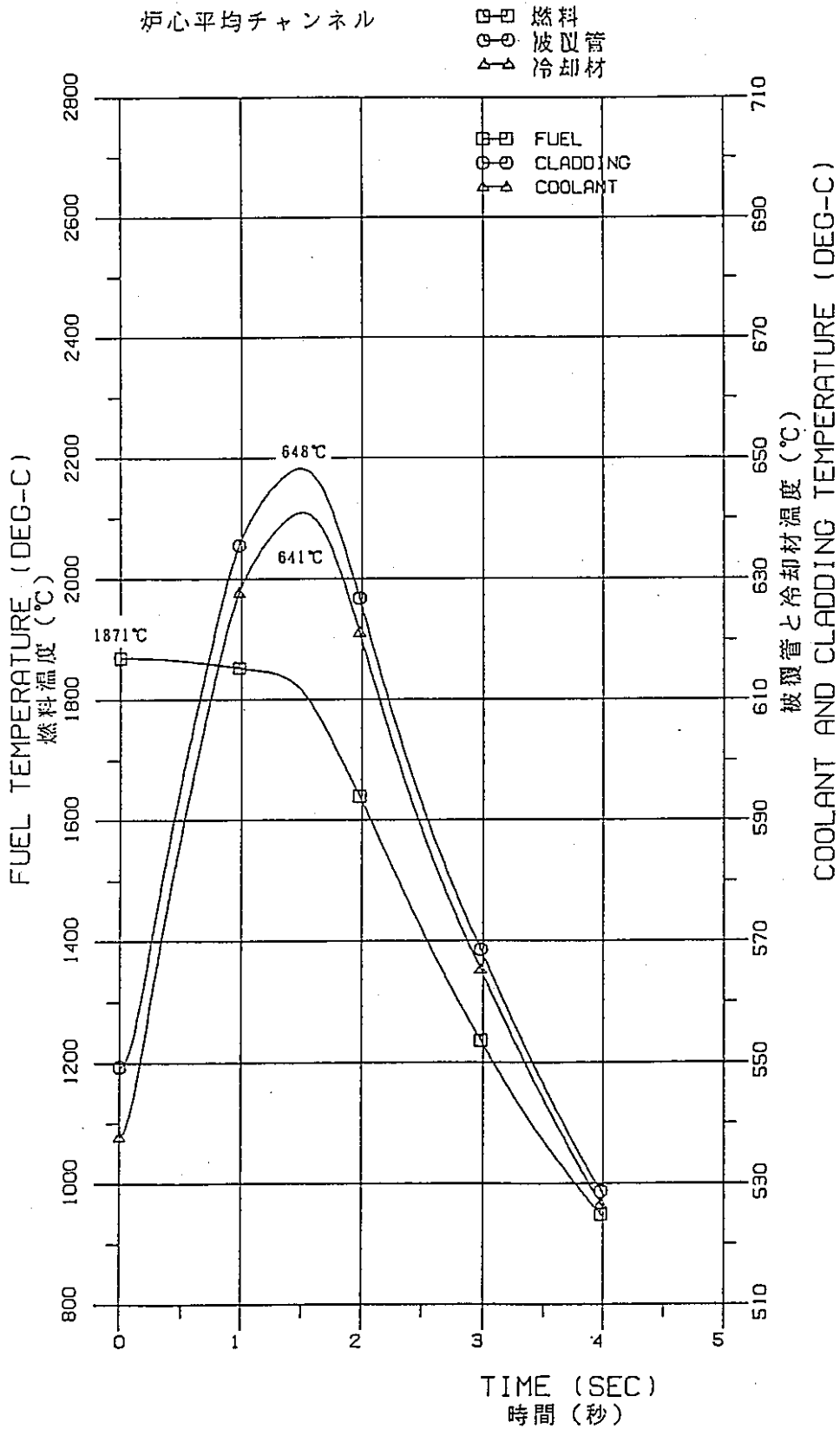


図3.5-33 1次主冷却系循環ポンプ軸固着事故(制御棒移設後)
 -炉心平均チャンネル:ペレット、被覆管、冷却材最高温度-

4. 結論

本研究では、制御棒移設に係わる設置変更許可申請に必要な解析として以下の作業を実施した。本研究の成果を纏めると次のようになる。

4.1 仮想事故の計算

申請書記載の評価手法により、仮想事故の起因過程における全炉心溶融スランピング事象において、溶融炉心が即発臨界を越える時点での、スランピングによる反応度挿入速度を計算した。その結果、制御棒移設後の炉心では、スランピング開始後約0.13秒で即発臨界を越え、その時点での反応度挿入速度は約19\$/sec になり、移設前の値と同じであることが分かった。引き続き、VENUS コードによる再臨界事故解析を行い、申請書に記載する必要のある有効破壊エネルギーについて、制御棒移設の影響を調べた。その結果、主にドブラー係数の変化（絶対値で約4.4%小さくなった）により、移設前に比べて、有効破壊エネルギーが約7.4%増加し、約78MW・sec となることが分かった。しかしながら、この値は現申請書記載値約 120MW・sec を下回っており、制御棒移設後の炉心に対し、仮想事故の観点からは、申請書を変更する必要が無い事が分かった。

4.2 制御棒移設と安全裕度との関係

本作業の結論を纏めると以下のようになる。

(1) 2本スタック時の原子炉停止余裕

炉スクラム時、制御棒6本のうち、2本が仮にスタックしたとしても、高温状態において制御棒移設前後とも臨界未滿に維持できる事を確認した。これより、指針21（解説）で述べるところの「高温停止に必要な数に比し十分な余裕をもっている」と言えるから、指針21に適合する。

(2) 2本スタック時の重ね合せ事象

主な4つの代表事象と2本スタックを重ね合せたが、燃料、及び冷却材の最高温度は、熱設計基準値を満足しており、燃料破損は生じないことから、制御棒移設後の原子炉施設は十分な安全裕度を有する事を確認した。

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。

6 参考文献

- 2-1 PNC SJ906 84-03, 「高速実験炉設置許可の変更申請のための検討評価」
三菱原子力工業（株）、1984/9
- 3-1 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
- 3-2 原子炉安全委員会安全審査指針集 改定5版。
監修 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室 1989/12 (大成出版社)
- 3-3 PNC SJ9214 89-005 「高性能炉心移行時の安全解析」
三菱原子力工業（株）、1989/7
- 3-4 PNC SJ906 84-03, 「高速実験炉設置許可の変更申請のための検討評価」
三菱原子力工業（株）、1984/9
- 3-5 「常陽」照射用炉心詳細設計 炉心核熱設計書
三菱原子力工業（株）、昭和50年 4月
- 3-6 PNC SJ9214 90-003 「制御棒移設後の想定事象の計算」
三菱原子力工業（株）、1990/6