

# 高速実験炉「常陽」運転特性試験報告書

ステップ応答法による反応度フィードバック特性の監視

1985年10月

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN941 85-146
決裁年月日	平成10年3月26日

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため限られた関係者だけに配布するものです。  
したがってその取扱いには充分注意を払って下さい。なお この資料の供覧、複製、転載  
引用等には事業団の承認が必要です。

## 高速実験炉「常陽」運転特性試験報告書

### ステップ応答法による反応度フィードバック特性の監視

庄 野 彰, 玉 山 清 志  
池 上 哲 雄, 溝 尾 宣 辰

#### 要 旨

原子炉運転中に、制御棒操作によってステップ状の反応度を投入し、中性子束や集合体出口温度の応答を測定することにより、反応度フィードバック特性の経時変化を監視した。本測定手法は、炉出力変動量が小さく、かつ所要時間が短いという特長を有するため、定格運転中（100 MW熱出力）に随時実施可能である。本報告は、1983年2月のMK-II性能試験開始時以来、1985年3月に終了した定格第7サイクルまでの期間（炉心平均燃焼度の範囲は、 $2.2 \times 10^4$  MWD/T以下）に測定されたデータを整理し、経時変化の傾向ならびにその発生原因を考察したものである。解析に際しては、炉心動特性解析コード「SPIDER」を使用した。主要な結果は以下の通りである。

- (1) 燃焼の進行に伴ない、反応度フィードバック特性は徐々に弱くなる傾向を示した。
- (2) 単位投入反応度に対する中性子束及び集合体出口温度の変化量は、炉心平均燃焼度 $2.2 \times 10^4$  MWD/T時点では、燃焼初期の値の約2倍に増大した。
- (3) 「SPIDER」を用いたパラメータスタディの結果、燃焼に伴なう反応度フィードバック特性の変化は、燃料軸方向膨張によるフィードバック反応度の寄与が減少することが原因であると推定された。

Experimental Fast Reactor "JOYO" Operational Characteristics Test Report  
---Monitoring Results of Feedback Reactivity Characteristics by Step Response Method---

Akira Shono, Kiyoshi Tamayama,  
Tetsuo Ikegami, and Nobutatsu Mizoo

Abstract

Feedback reactivity characteristics can be monitored on operating reactor by measuring the response of sub-assembly outlet temperature as well as of neutron flux signal against the step-like reactivity change by control rod operation. Merits of step response method are little power change and short test time. Therefore, this test can be conducted at any time during reactor full power operation (100MW thermal power). This report deals with data measured during the period from February of 1983 (MK-II performance test) to March of 1985 (7th duty cycle). Consideration is given on the change of feedback reactivity characteristics following fuel burn-up and its cause. Analysis is made by "SPIDER", which is a core kinetics analysis code.

Main results are as follows.

- (1) Feedback reactivity characteristics have been gradually weakened according to fuel burn-up increase.
- (2) In the condition of  $2.2 \times 10^4$  MWD/T fuel burn-up, changes of both neutron flux and sub-assembly outlet temperature vs. unit reactivity change are increased to about twice of the value measured in the beginning of fuel burn-up.
- (3) By the parameter study analysis using "SPIDER", it is estimated that change of feedback reactivity characteristics may be caused by decrease of contribution of feedback effect of axial fuel stack expansion.

## 目 次

1. まえがき	1
2. 系統設備の概要	2
2.1 照射用炉心への移行	2
2.2 炉心構成	2
2.3 制御棒及び制御棒駆動機構	2
2.4 炉心計装	3
2.4.1 中性子計装	3
2.4.2 集合体出口温度計装	3
3. 測定系及び解析方法	13
3.1 測定系	13
3.2 解析方法	13
3.2.1 データ整理方法	13
3.2.2 炉心動特性解析コード「SPIDER」	13
4. 試験内容	19
4.1 試験実施時期	19
4.2 試験方法	19
5. 試験結果	24
5.1 MK-II性能試験における測定結果	24
5.2 定格出力における測定結果	24
5.2.1 各定格サイクルにおける反応度フィードバック特性の経時変化	24
5.2.2 燃焼度と反応度フィードバック特性の関係	25
6. 考察	54
6.1 反応度フィードバック特性変化の発生原因	54
6.1.1 燃焼の進行に伴なう中性子束ステップ応答形状の変化	54
6.1.2 炉心動特性パラメータと出力係数の関係	54
6.1.3 炉心動特性パラメータと中性子束ステップ応答形状の関係	55
6.1.4 今後の課題	55
7. 結言	65
8. 参考文献	66
9. 謝辞	67

## 1. ま え が き

1983年2月の「常陽」照射用炉心（以下MK-II炉心と書く）の性能試験以来、1985年3月に終了したMK-II定格第7サイクルまでの期間（炉心平均燃焼度の範囲は、 $2.2 \times 10^4$  MWD/T以下）に測定したステップ応答試験結果を整理し、反応度フィードバック特性の経時変化傾向をまとめた。さらに、炉心動特性解析コード「SPIDER」でパラメータスタディを実施することにより、上記経時変化の発生原因の推定を試みた。

「常陽」においては、定格サイクル初期の出力上昇時、末期の出力降下時に5 MW毎に炉出力を安定させることにより測定される出力係数によって、反応度フィードバック特性を評価しているが、この方法（以下通常測定手法と書く）では、5 MW毎に測定した3点のデータからそれらの平均炉出力における出力係数を算出しているため、定格出力での出力係数を直接測定することにはならない。そこで約45日間の定格出力運転中の反応度フィードバック特性を把握するために本報告書で述べる「制御棒操作によるステップ応答試験」を実施した。この手法は、炉出力変動量が3～4 MWと小さく、試験時間が復旧時間も含めて約30分間と短いため、定格運転中に随時実施することができるという特長がある。定格運転中の本試験の実施頻度は1週間に1回であり、炉心平均燃焼度1000～2000 MWD/T毎の反応度フィードバック特性を測定できた。

## 2. 系統設備の概要

### 2.1 照射用炉心への移行

「常陽」照射用炉心（MK-II 炉心）は、燃料材料等の照射試験を効率的に実施できるように、運転用燃料等の構造・組成、更には炉心構成が改造された。その主な点をあげると、

- ① 高速中性子密度の増大
- ② 炉心出力密度の増大
- ③ 中性子束分布の平坦化

である。上記三項目を達成するために、炉心構成要素は以下に示す改造がなされた。

#### 炉心燃料集合体

- Pu 富化度を増加する。
- 燃料ピン直径を小さくし、一集合体あたりの燃料ピン本数を増やす。
- 炉心部軸方向長を小さくする。
- 燃料部上・下部の軸方向ブランケットをステンレス反射体に変更する。

#### ブランケット燃料集合体

- すべて二種類の反射体に変更する。

#### 制御棒および制御棒駆動機構

- 調整棒（2体）と安全棒（4体）の使い分けをせず、6体とも出力調整と安全炉停止の両機能を合わせ持つように変更し、出力分布平坦化を図る。
- 制御棒要素の寿命延長のためにベント型を採用する。

以上の炉心改造の結果を増殖用炉心（MK-I 炉心）諸特性との比較として、Table 2.1 に示す。Fig. 2.1 および Fig. 2.2 には、炉心構成要素の比較図を示す。また、Fig. 2.3 に炉容器内部の構造及び冷却材流路を示す。

### 2.2 炉心構成

Fig. 2.4 に MK-II 出力上昇試験時の炉心構成を示す。炉心燃料集合体は64体であり、中心領域に装荷される。その周囲は3種類の反射体によって取り囲まれる。炉心第1列には炉心燃料集合体に比べて反応度値の低いB型特殊燃料集合体2体、燃料材料集合体（CMIR）1体が照射用集合体として装荷された。制御棒は第3列に6体が60°対称に配置されている。

各定格サイクル終了後の燃料交換作業により、数体の炉心燃料が新燃料に交換される。また、特殊燃料集合体や材料照射用反射体が、照射計画にもとづいて装荷される。Fig. 2.5 に定格第7サイクルにおける炉心構成を示す。

### 2.3 制御棒および制御棒駆動機構

制御棒は6体あり、それらの構造はすべて同一であり、反応度調整およびスクラムの両機能を合わせ持

つ。Fig. 2.6 に制御棒の構造を示す。制御棒は、 $^{10}\text{B}$ 濃縮（90%） $\text{B}_4\text{C}$ ペレットをSUS316鋼管で被覆した制御要素7本を、円形断面を有するSUS316鋼製保護管内に三角形格子状に配列固定した構造をもち、上端にハンドリングヘッド、下端にスクラム時減速用のダッシュラムを有し、その全長は約2250mmである。6本の制御棒は、通常CR1～6と番号で呼ばれており、炉心アドレスとの対応は下記の通りである。

炉心アドレス	CRNo.	炉心アドレス	CRNo.
3A3	1	3D3	4
3B3	2	3E3	5
3C3	3	3F3	6

制御棒駆動機構をFig. 2.7に示す。制御棒駆動機構は、炉心上部機構を貫通して設置され、電動機駆動により制御棒の引抜、挿入動作を行なう。通常時の制御棒引抜、挿入速度は一定であり、120～130mm/分である。制御棒のスクラム動作は、保持電磁石の消磁により駆動装置に連結されている制御棒を解放し、スプリング力と自重により急速落下させる。駆動電動機に減速歯車を介して結合されたシンクロ発信器は、制御棒の位置信号を中央制御室の位置指示計に伝送し表示する。延長管は、駆動機構と制御棒を連結するための管で、内側延長管の下端にフィンガー動作棒が、外側延長管の下端にラッチフィンガーが結合している。内側、外側延長管の相対的な動きによって、制御棒ハンドリングヘッド部でラッチフィンガーが動作して制御棒の着脱を行う。

## 2.4 炉心計装

### 2.4.1 中性子計装

中性子計装設備は、広範囲の出力領域を確保するため起動系、中間系、線形出力系の3系統から構成されており、安全確保のためそれぞれ2または3の独立した計測系を持っている。検出器は、起動系、中間系が核分裂計数管で、線形出力計は、7線補償型電離箱（CIC）である。Fig. 2.8に中性子計装設備の配置を示す。

### 2.4.2 集合体出口温度計装

炉心はFig. 2.4, Fig. 2.5に示すような313体の集合体で構成されているが、中心の115体の集合体に対して出口温度計装が設置されている。（以下S/A出口温度計装と書く。）クロメル・アルメル型熱電対（3.2mm径）がウェル内に挿入された構造であり、測定部は集合体頂部より55mm上方の位置である。



表 2.1 「常陽」炉心比較表（照射用炉心改造前後）

Table 2.1 Comparison of Core Characteristics between MK-I and MK-II

	MK-I		MK-II
	第 1 期	第 2 期	
原子炉熱出力 (MWt)	50	75	100
1次冷却材流量 (t/h)	約 2,200	約 2,200	約 2,200
原子炉入口温度 (°C)	370	370	370
原子炉出口温度 (°C)	約 435	約 470	約 500
炉心高さ (cm)	60	60	55
炉心体積 (最大) (ℓ)	約 294	約 304	約 250
燃料単位長出力 (定格最大) (W/cm)	約 210	約 320	約 400
燃料要素外径 (mm)	6.3	6.3	5.5
燃料要素本数 (本)	91	91	127
軸方向ブランケット高さ (cm)	上部 40 下部 40	上部 40 下部 40	—
軸方向反射体高さ (cm)	—	—	30
プルトニウム富化度 (W/O)	約 18	約 18	約 30
ウラン <sup>235</sup> 濃縮度 (W/O)	約 23	約 23	約 12
ブランケット燃料集合体位置	5～9列目	5～9列目	なし
反射体位置	10列目	10列目	内側 5～6列目 外側(A)7～9列目 (B) 10列目
全中性子束 (最大) (n/cm <sup>2</sup> ·sec)	2.1 × 10 <sup>15</sup>	3.2 × 10 <sup>15</sup>	5.1 × 10 <sup>15</sup>
高速中性子束 (≥ 0.1 MeV, 最大) (n/cm <sup>2</sup> ·sec)	1.4 × 10 <sup>15</sup>	2.0 × 10 <sup>15</sup>	3.7 × 10 <sup>15</sup>
最大余剰反応度 (% Δk/k) (本)	4.5以下 (100°C) 安全棒 4 調整棒 2	4.5以下 (100°C) 安全棒 4 調整棒 2	5.5以下 制御棒 6
制御要素形式	密封型	密封型	ベント型
制御棒反応度 (% Δk/k)	安全棒 5.6以上 (4本) 調整棒 2.8以上 (2本)	安全棒 5.6以上 (4本) 調整棒 2.8以上 (2本)	9.0以上 (6本)
最高燃焼度 (要素平均) (MWD/T)	約 25,000	約 42,000	約 50,000
運転サイクル	45日運転 15日停止	45日運転 15日停止	45日運転 15日停止

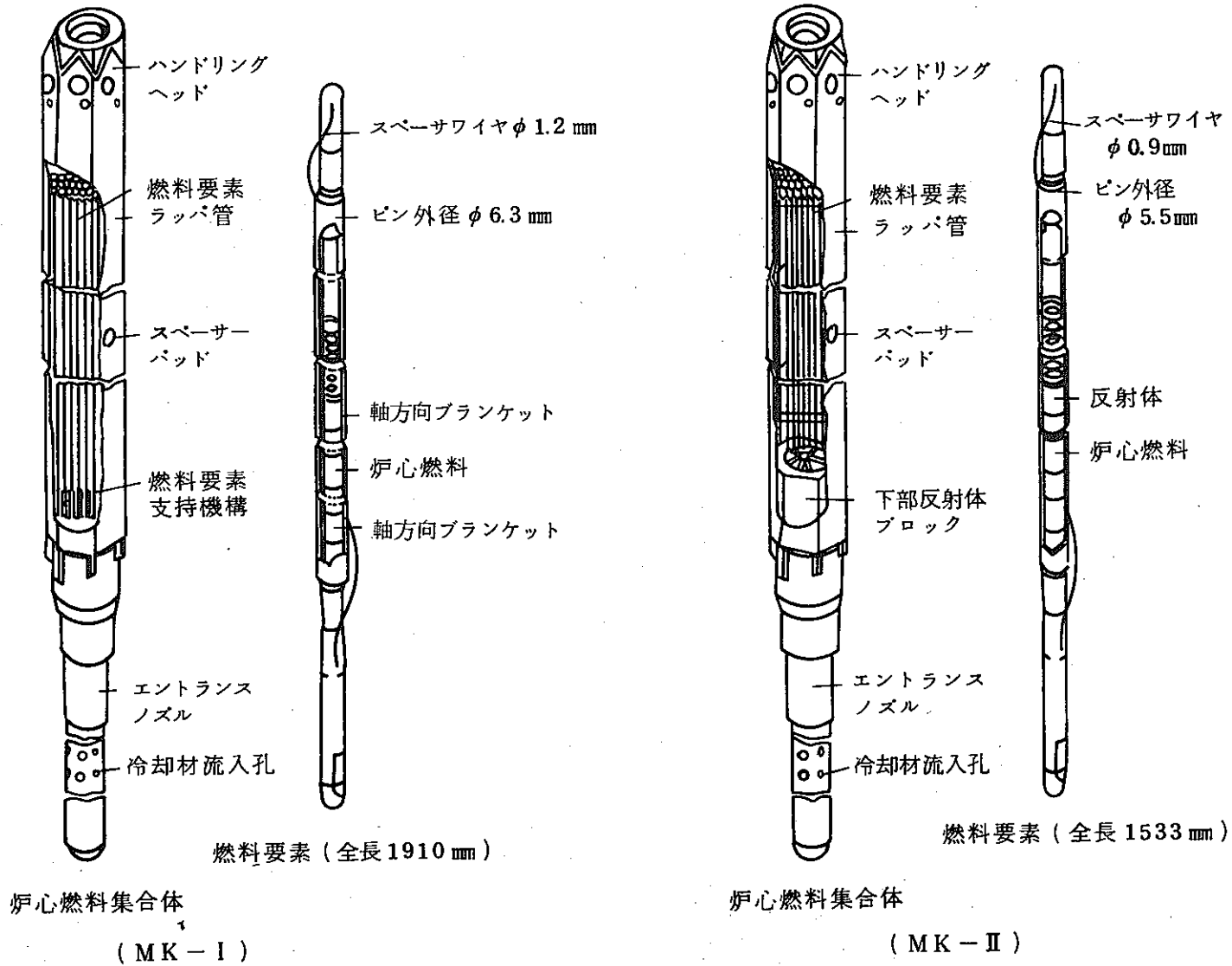


図 2.1 炉心燃料比較図

Fig.2.1 Comparison of Driver Fuel between MK-I and MK-II

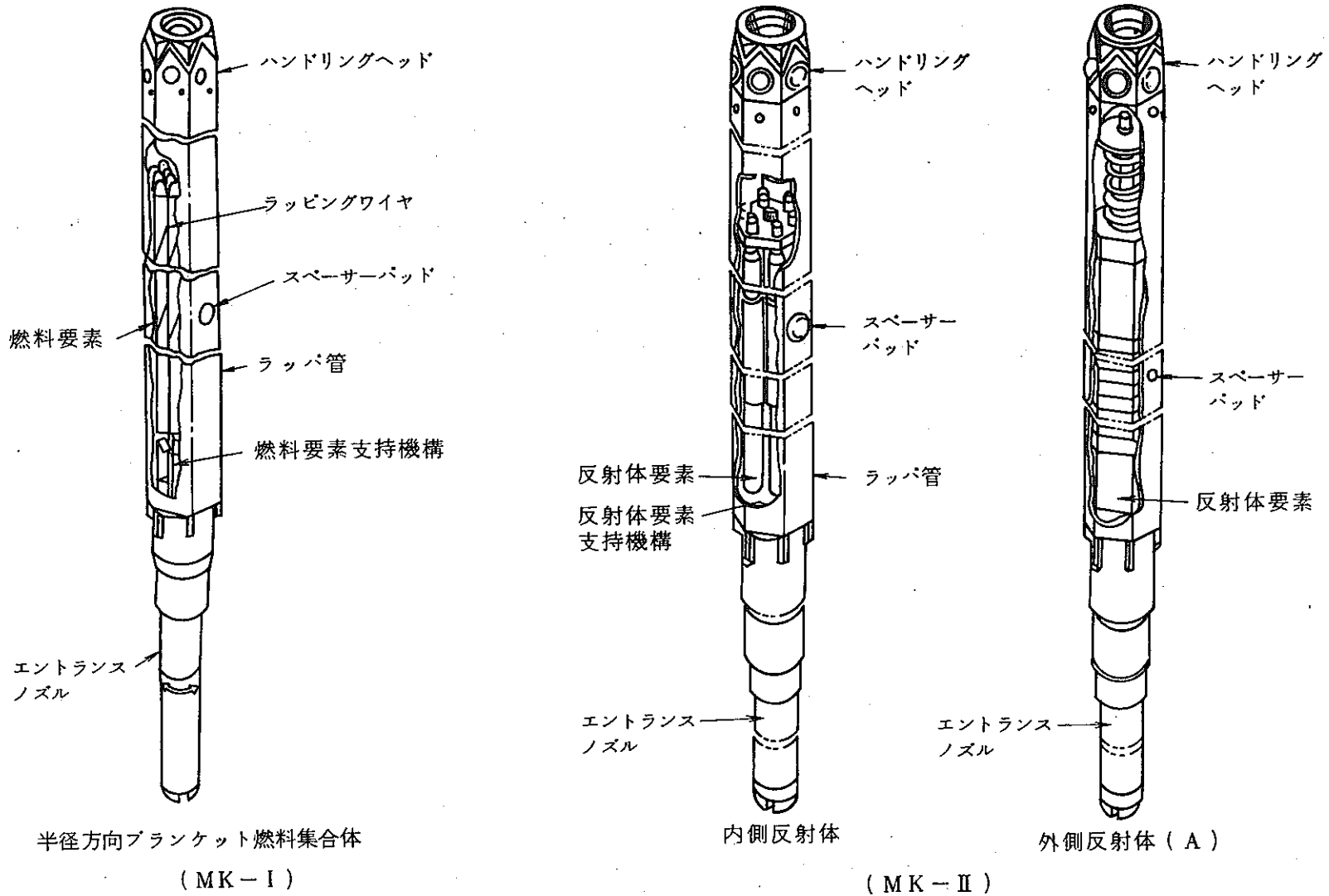


図 2.2 炉心構成要素比較図

Fig. 2.2 Configuration of MK-I Blanket Assembly and MK-II Reflector

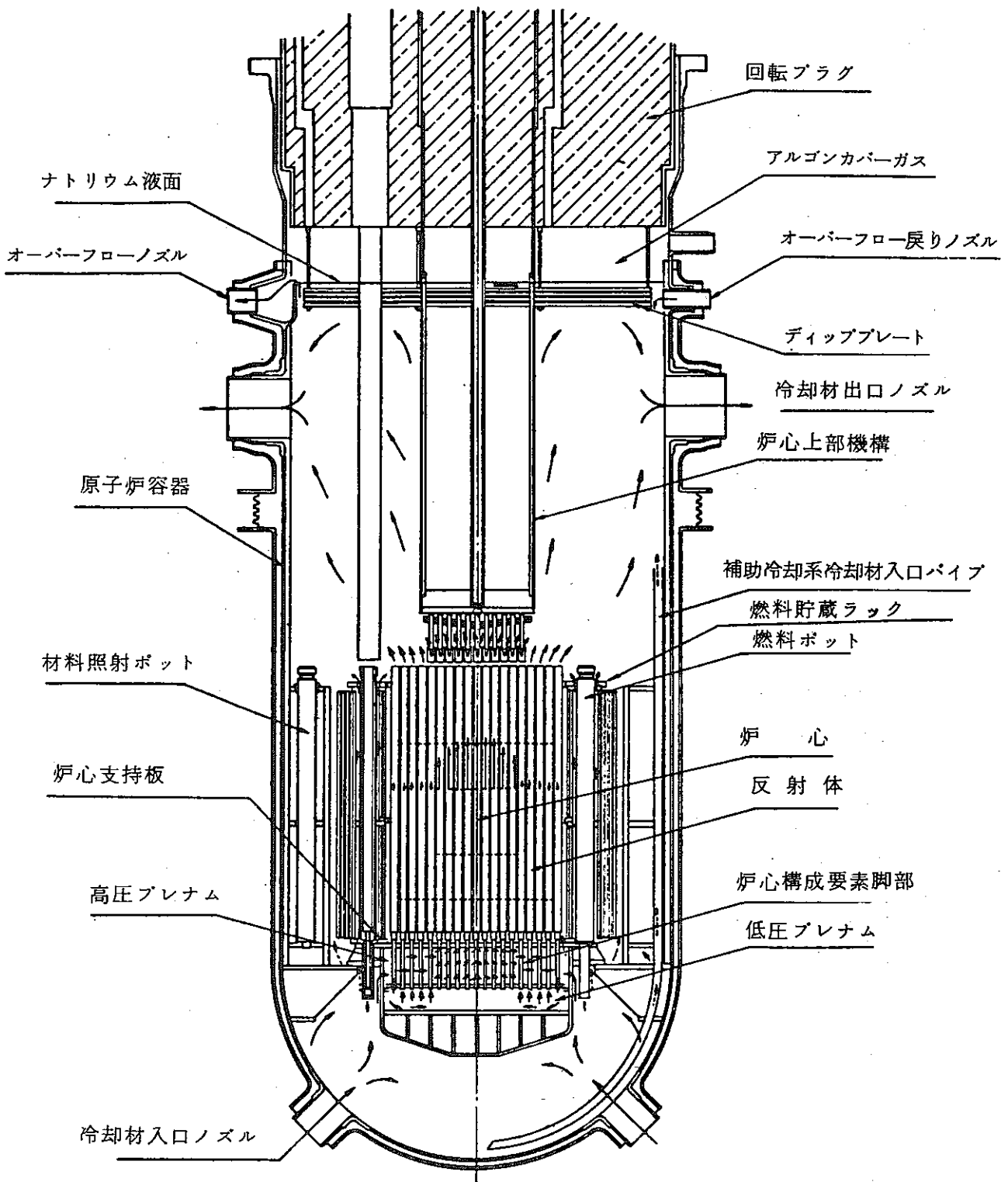
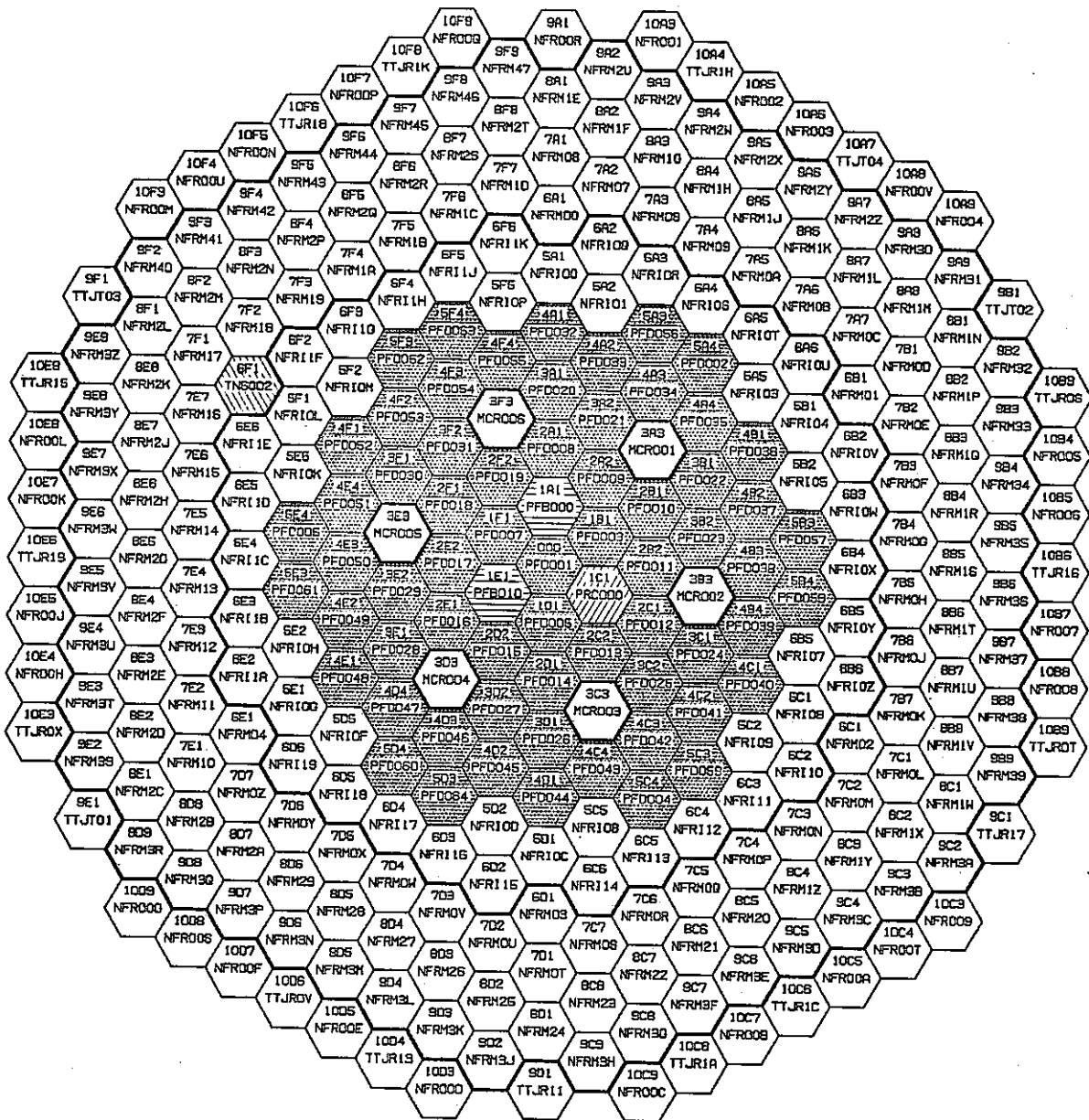


図 2.3 炉内ナトリウム流路図  
 Fig.2.3 In-core Sodium Flow Pass









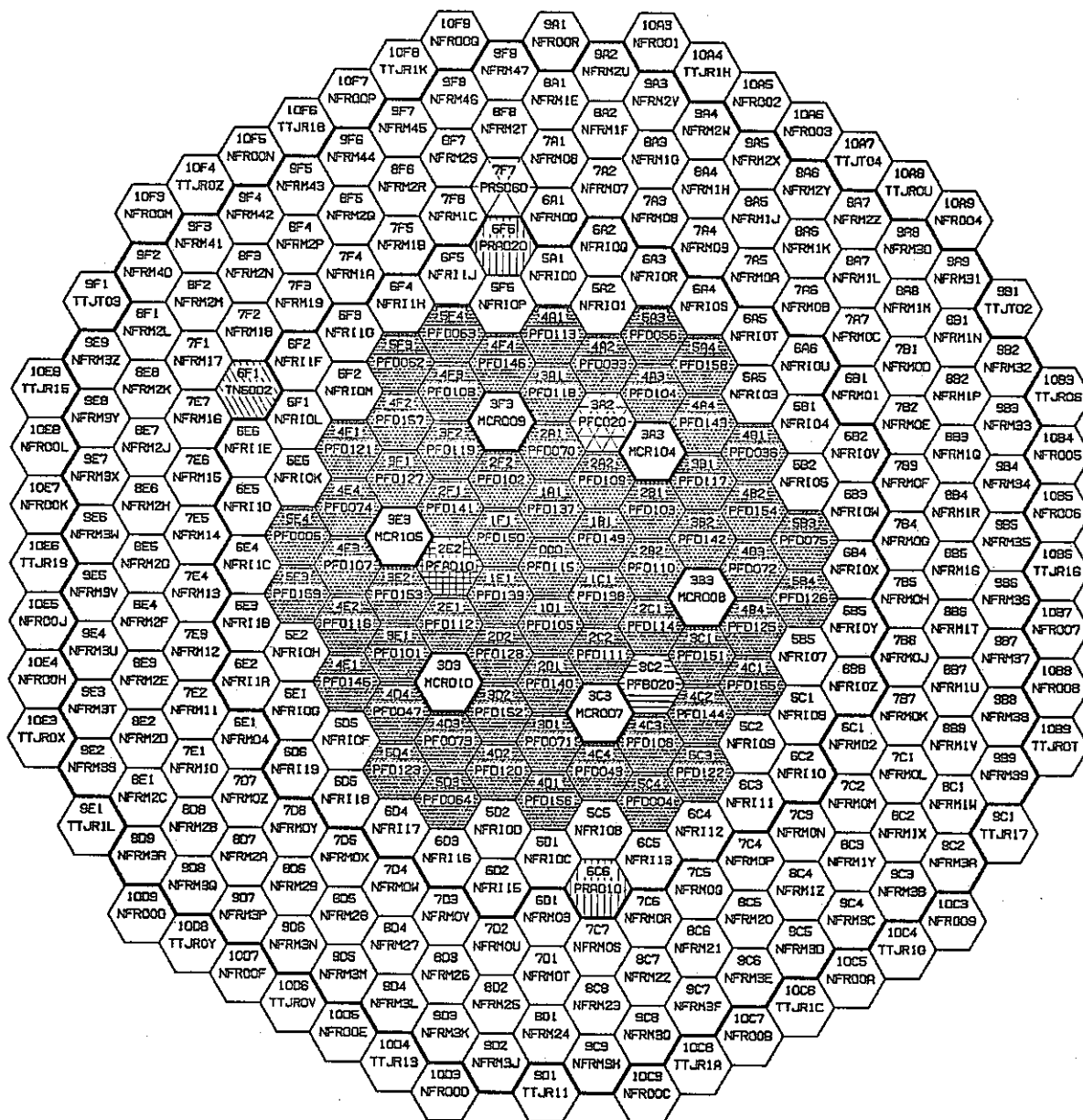
-  炉心燃料集合体 (64体)
-  炉心材料照射用反射体 (1体)  
(CMIR)
-  中性子源 (1体)
-  B型特殊燃料集合体 (2体)
-  制御棒 (6体)
-  反射体 (239体)

Fig. 2.4 MK-II第0サイクル炉心体系図












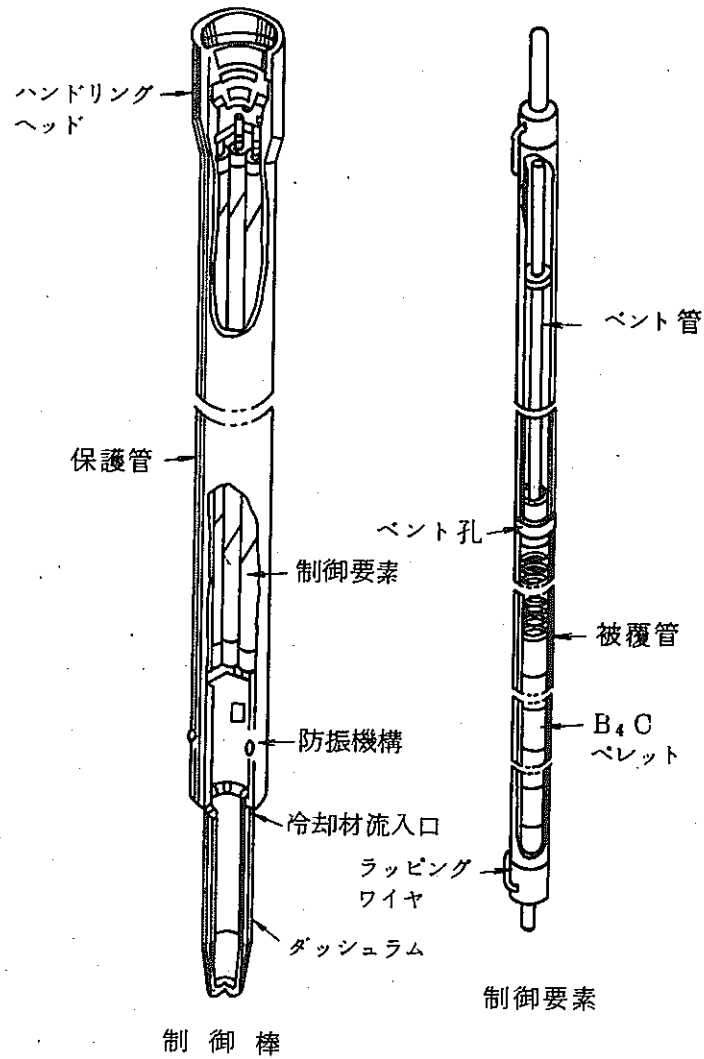
-  炉心燃料集合体 (64体)
-  C型特殊燃料集合体 (1体)
-  構造材料照射用反射体 (1体)  
(SMIR)
-  制御棒材料照射用反射体 (2体)  
(AMIR)
-  中性子源 (1体)
-  制御棒 (6体)
-  A型特殊燃料集合体 (1体)
-  反射体 (236体)
-  B型特殊燃料集合体 (1体)

Fig. 2.5 MK-II第7サイクル炉心体系図



(MK-II)

図 2.6 制御棒および制御要素

Fig.2.6 Control Rod and Control Element

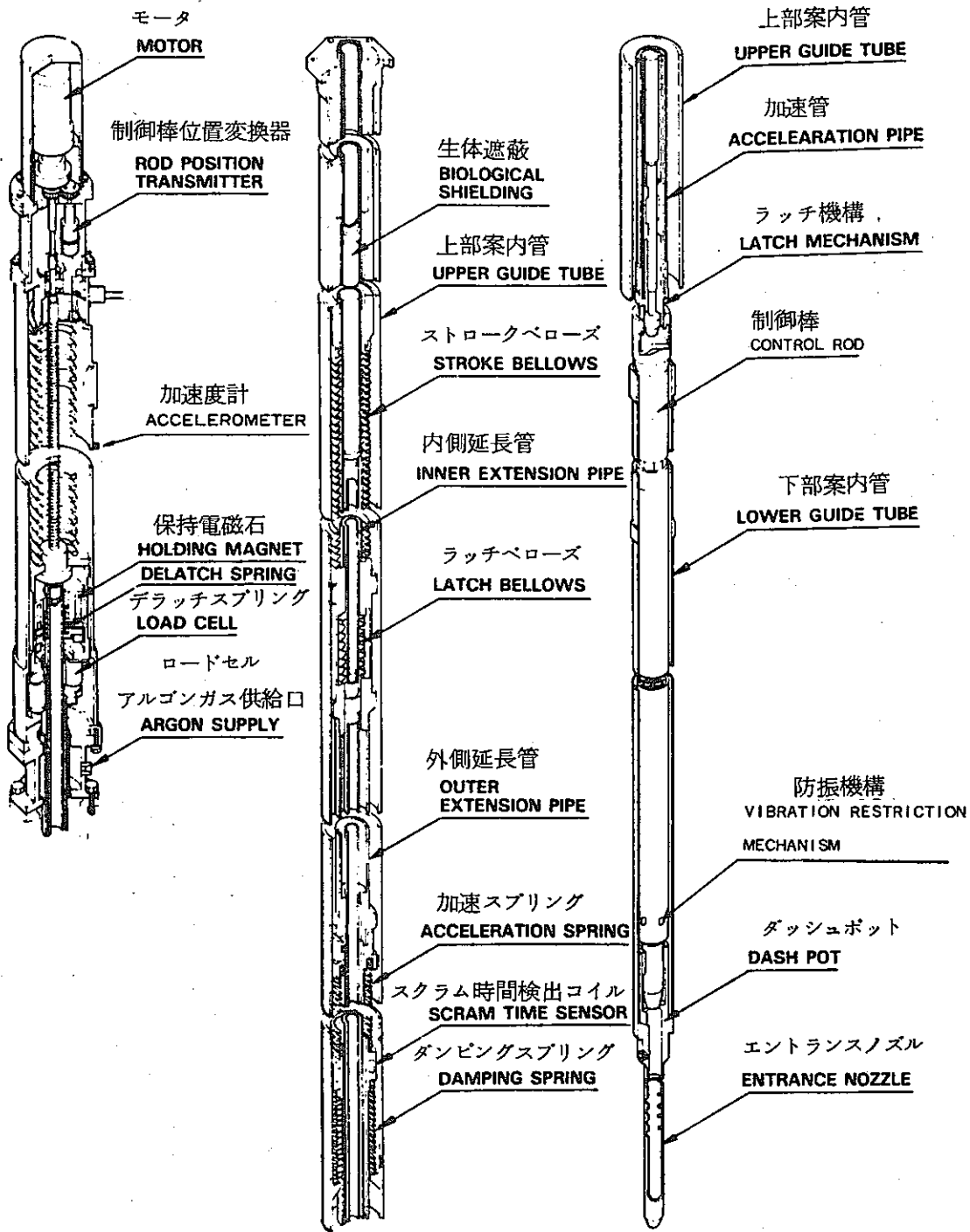
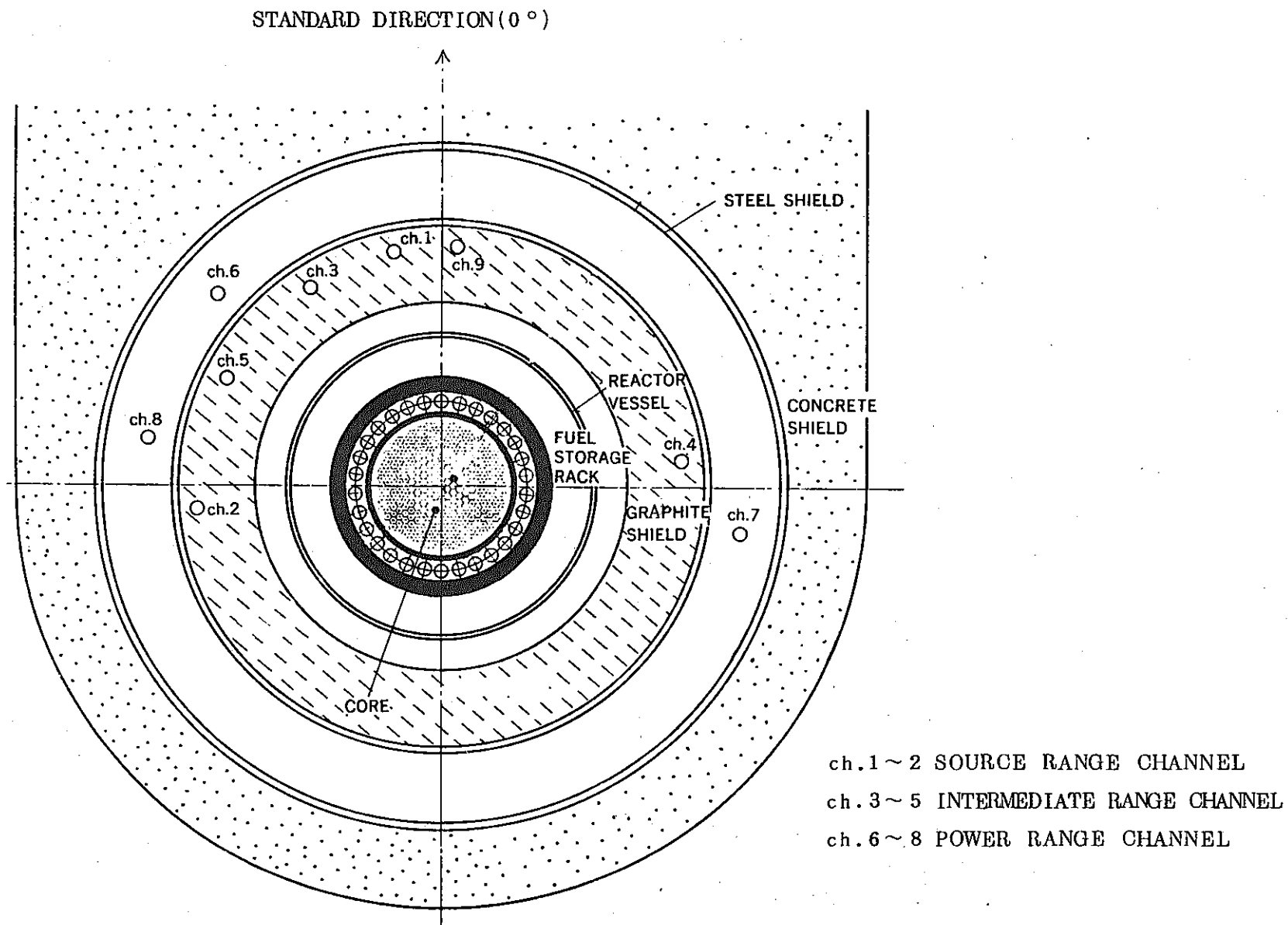


図 2.7 制御棒駆動機構  
 Fig. 2.7 Control Rod Driving Mechanism





2.8 中性子計装配置図

Fig.2.8 Neutron Counter Location

### 3. 測定系及び解析方法

#### 3.1 測定系

測定系のブロック図をFig. 3.1に示す。炉出力変動量を測定するために、出力系中性子束信号 (ch. 7, ch. 8) を用いた。炉出力変動に伴なう温度変動量を測定するためにS/A 出口温度信号を4点測定した。原子炉入口温度は、その変動が炉出力に影響を与えるので、試験前の安定状態判別、ならびに試験中に大きな反応度外乱が入らないことの確認を目的として測定した。以上の信号はいずれも電圧発生器と直流増幅器によって構成される回路により、初期値からの変動量を精度良く測定できるようにしている。

反応度信号は、出力系中性子束信号 (ch. 6) を入力とするアナログ型反応度計の出力である。反応度計は、6群の遅発中性子定数をコンデンサ、抵抗の組み合わせでシミュレートしたアナログ回路であり、中性子束信号を反応度信号に変換する機能を持つ。これらの信号を9ペンレコーダで記録した。各信号の感度及び信号処理系の設定値をTable 3.1に示す。

その他、試験実施前のプラント状態初期値の測定は、熱出力測定システムで行なった。また、試験実施前後の制御棒位置は、中央制御室原子炉制御盤の制御棒位置指示計により読み取った。

#### 3.2 解析方法

##### 3.2.1 データ整理方法

###### (1) 出力係数及び規格化S/A出口温度変化量の算出

「常陽」では、反応度フィードバック特性の強弱を示す量として出力係数で整理している。出力係数の定義は、「原子炉出力を1 MW増加させた時に、炉心体系から失なわれる反応度」であり、符号は負、単位は $\% \Delta k/k/MW$ である。ステップ応答試験では、試験時の制御棒操作量から投入反応度 $\rho_0$ を算出した。制御棒値曲線は、各定格サイクルの初期に実施される制御棒校正試験の結果を採用した。Fig. 3.2に制御棒値曲線の一例を示す。この制御棒値曲線を表わす5次式にステップ応答試験前後での制御棒位置を代入し、両者の差をとることにより、投入反応度が算出される。

炉出力変化量は、ステップ応答試験前後での出力系中性子束信号の変化量 $\Delta P$ をペンレコーダ記録より読み取ることにより測定した。出力系中性子の熱出力に対する感度は、中性子検出器周囲の温度条件によって影響を受けることが判明している (文献〔1〕)、試験実施直前には毎回、熱出力測定システムによって熱出力と出力系中性子束信号の換算係数を求めた。このようにして求めた $\rho_0$ と $\Delta P$ の比をとることにより、出力係数を算出した。すなわち、

$$\text{出力係数 } \alpha_p = \frac{\rho_0}{\Delta P} \quad (\% \Delta k/k/MW, \text{ 符号は負})$$

規格化S/A 出口温度変化量も同様にして、試験実施前後での変化量をペンレコーダ記録より読みとった値 $\Delta T_{S/A}$ を投入反応度 $\rho_0$ で割った値として定義した。なお、 $\rho_0$ の単位は $\text{¢}$  (セント) とした。すなわち

$$\text{規格化S/A出口温度変化量 } \Delta T_N = \frac{\Delta T_{S/A}}{\rho_0} \quad (\text{°C}/\text{¢})$$

なお、試験実施後のデータとしては、制御棒操作後 120 ～ 150 sec 時点での値を採用した。その理由は、原子炉入口温度が 150 sec 経過時点ぐらいから変化し始めることと、「SPIDER」を用いた解析により、150 sec 経過時点では制御棒操作によって投入される反応度に対して 95% 以上のフィードバック反応度が発生することが確認されていることによる。

反応度フィードバック特性が弱くなった場合、単位投入反応度に対する中性子束及び S/A 出口温度の変化量が增大する。したがって、上記定義より、出力係数  $\alpha_p$  は減少し、規格化 S/A 出口温度変化量  $\Delta T_N$  は増加する。逆に反応度フィードバック特性が強くなった場合には、単位投入反応度に対する中性子束及び S/A 出口温度の変化量が減少し、 $\alpha_p$  が増加、 $\Delta T_N$  が減少する。したがって、 $\alpha_p$ 、 $\Delta T_N$  の経時変化を整理することにより、反応度フィードバック特性の経時変化を把握出来る。

## (2) ステップ応答信号の規格化

定格運転時の試験においては、試験条件として制御棒操作量を 6 mm としたが、試験実施毎に制御棒位置が異なるため、投入反応度が試験毎に異なる。このため、試験毎の中性子束信号や S/A 出口温度のステップ応答形状の比較を行なうために、初期状態からの変動量を投入反応度で割ることにより規格化を行なった。したがって、上記 2 信号の単位は、それぞれ、MW /  $\text{C}$ 、 $^{\circ}\text{C} / \text{C}$  となる。

### 3.2.2 炉心動特性解析コード「SPIDER」

ステップ応答試験結果の解析、評価のために、炉心動特性解析コード「SPIDER」(Simulation Program for Incore Dynamics Evaluation and Research) を作成し、種々のパラメータスタディを行なった。「SPIDER」の詳細については付録に示すので、ここでは機能の概要と特長についてまとめる。

「SPIDER」は、反応度フィードバックを持つ炉心動特性モデルを取扱っており、初期状態(一定出力)に種々の外乱を与えた場合の中性子束、炉心各部温度の応答を計算し、グラフ出力する機能を備えている。主な特徴を以下にまとめる。

#### 核特性

- 一点炉近似
- 即発跳躍近似
- 遅発中性子 6 群

#### 熱特性

- 集中定数モデル(単ピンモデル)
- 領域(燃料、被覆管、冷却材、炉入口、S/A 出口、炉出口)

#### フィードバック反応度成分

- 燃料軸方向膨張
- 燃料ドップラー
- 被覆管膨張
- 冷却材膨張

- ラッパ管膨張
- 炉心支持板膨張

特長

- シミュレーション用言語 SLCS-IV (文献〔2〕,〔3〕)を使用
- 微分方程式の記述が容易
- 積分法の選択可能
- シミュレーション条件の設定が容易
- シミュレーションに適した各種関数が整備されている。

以上のことから、種々のモデルによる検討が容易に出来る。

Table. 3.1 信号感度及び信号処理系設定値(100 MW出力時)

No.	信号名	感度	サプレッション 電圧 (V)	アンプゲイン
1	反応度	2 $\phi$ /V	-	-
2	中性子束 ch. 7	12.5MW/V	7.8	5
3	中性子束 ch. 8	同上	7.8	5
4	S/A 出口温度 [000]	150 $^{\circ}$ C/V	4.65	10
5	" [1E1]	同上	4.65	10
6	" [3C2]	同上	4.12	10
7	" [5E5]	同上	4.10	10
8	原子炉入口温度 (Aループ)	同上	3.47	50
9	" (Bループ)	同上	3.43	50

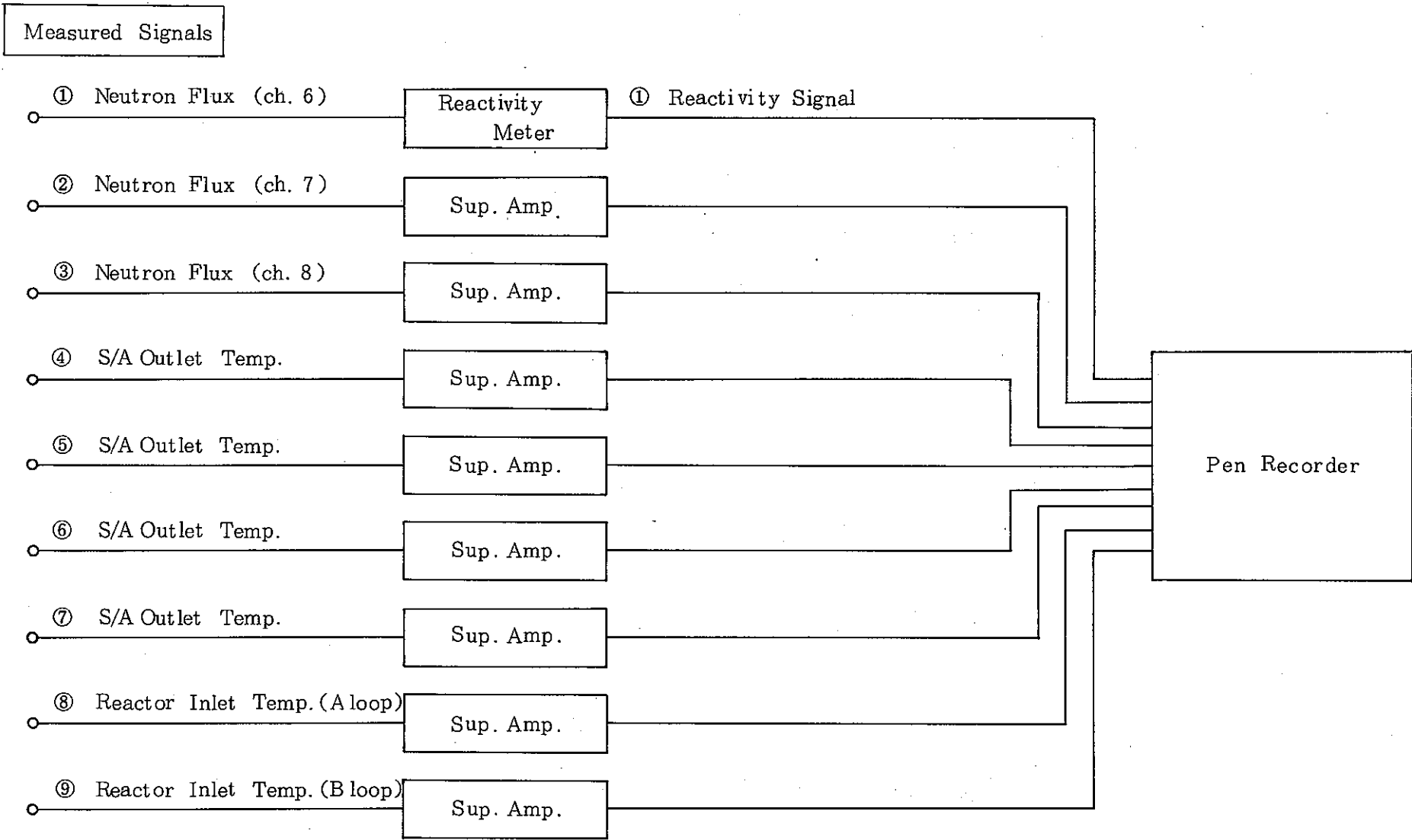


Fig. 3.1 Block Diagram of Measured Signals in Step Response Test

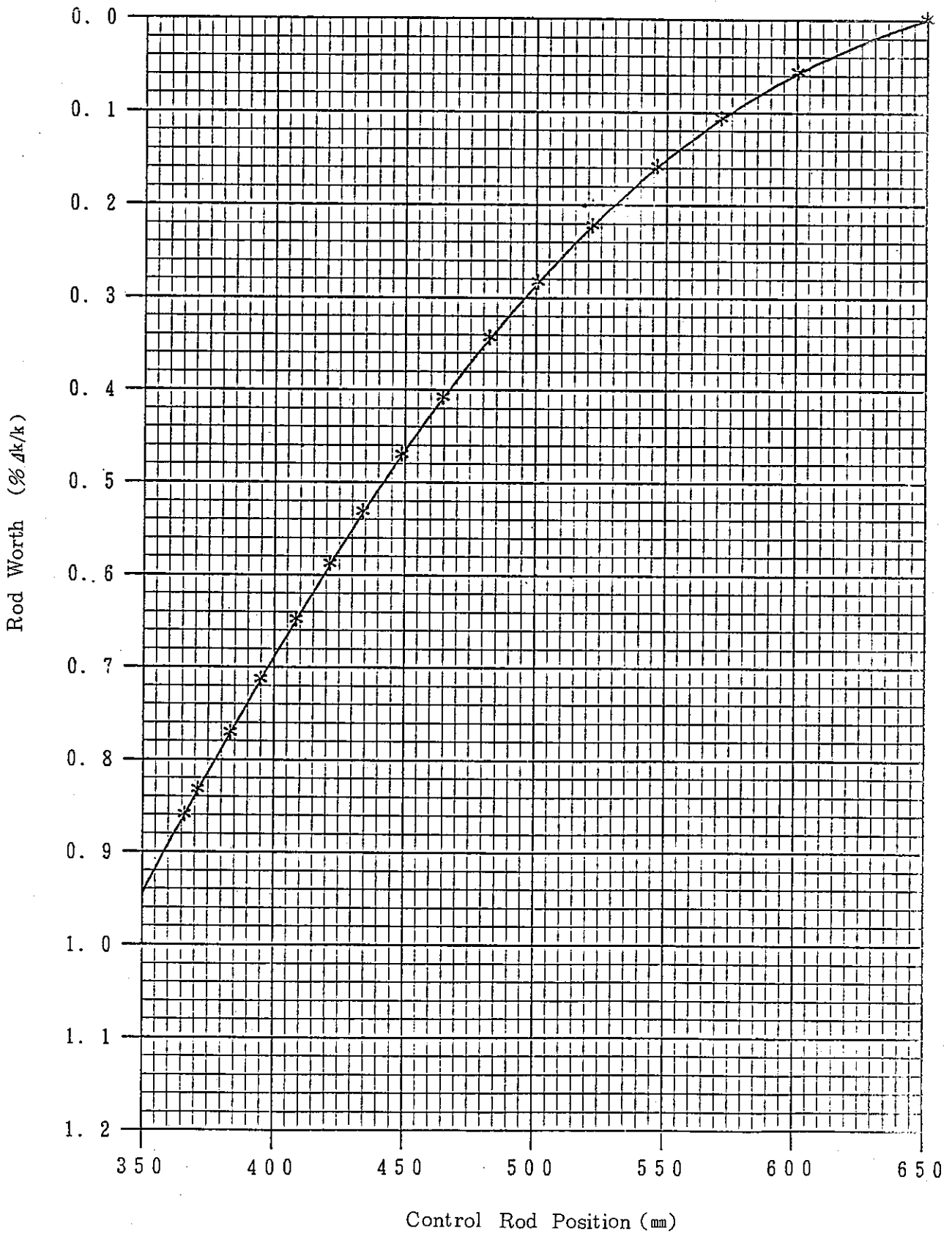


Fig. 3.2 An Example of Control Rod Worth Curve  
(Measured at MK-II 7th Duty Cycle for Control Rod No.1)

## 4. 試験内容

### 4.1 試験実施時期

Fig. 4.1 にMK-II 性能試験から定格第7サイクルまでの期間の「常陽」熱出力履歴を示す。期間は1983年2月から1985年3月までであり、炉心平均燃焼度としては、処女炉心から約 $2.2 \times 10^4$  MWD/Tまでの範囲である。

MK-II 性能試験では、25MWから100 MWまでの出力上昇時に、25MW毎に試験を実施し、得られた出力係数を通常測定手法により得られた値と比較した。この比較結果によって、ステップ応答法によって反応度フィードバック特性を把握することの妥当性を確認した。さらに、100 MW定格運転中は、1日1回の試験を実施して、処女炉心の特性を測定した。定格第1～第7サイクルの定格運転中は、1週間に1回の試験を実施した。また、各定格サイクル初期の出力上昇時、末期の出力下降時には5 MW毎に試験を実施した。

### 4.2 試験方法

炉出力一定状態にて、制御棒を操作することにより、正又は負の反応度を投入する。制御棒を引抜いた時には正、挿入した時には負の反応度が炉心に投入される。制御棒操作量は3～6 mmである。試験実施時の制御棒位置は、Table 5.1, Table 5.2に示す通り450～580 mmの範囲である。この範囲での微分反応度は、Fig. 4.2に示すように、 $1.7 \sim 4.0 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/mm$ すなわち、 $0.4 \sim 1.0 \text{ } \text{C}/mm$ である。制御棒駆動速度は約125 mm/minであるから、反応度投入時間は1.5～3.0 sec、反応度投入率は $0.8 \sim 2.1 \text{ } \text{C}/sec$ である。

Fig. 4.3に100 MW出力で本試験を実施した時の各信号の挙動を示す。制御棒操作開始時点をと $t = 0$ とし、 $t = -10 \sim 210$  (sec)での各信号の挙動を示した。制御棒を6 mm挿入したときに、中性子束は約4 MW、S/A出口温度は約5.5 °C変化したことがわかる。反応度計信号は、制御棒操作終了時点( $t = \sim 3$  sec)で負のピークを持ち、その直後急激に正のフィードバック反応度がかかり、時間の経過とともに、なだらかに臨界状態(反応度0 °C)に復帰することがわかる。中性子束は制御棒挿入時は直線的に減少し、その後さらになだらかに減少して安定状態に到達する。S/A出口温度は $t = 5$  sec時点あたりから減少し始め、約80 sec間減少し続けた後に安定状態に到達する。中性子束信号に比べてS/A出口温度の応答が遅い理由としては、発熱部(燃料ペレット)からS/A出口温度測定位置までの熱輸送遅れ時間、ならびにS/A出口温度計の時定数(約8秒;文献〔4〕)の影響であると考えられる。

$4P$ ,  $4T_{S/A}$ の測定を、 $t = 120 \sim 150$  secで中性子束、S/A出口温度が安定した時点で行なった。その後は、炉出力の減少による影響が一次系ループを一巡して原子炉入口温度の低下となって現われる。(  $t = \text{約} 170$  sec以後)炉入口温度の低下は、炉心に正の反応度を加える要因となるため、投入反応度を制御棒操作による反応度のみとみなすことができなくなる。

定格出力において実施する場合には、まず上記のように制御棒を挿入して1回目の測定を行なった後、約15分間かけて原子炉入口温度その他の各部温度が安定するのを待ち、次に制御棒を挿入時と同等量だ



け引抜いて2回目のデータ測定を行った。

なお、冷却材温度制御系のモードとしては、定格運転中の試験はAUTO モード、出力上昇・下降時の試験はCASCADE モードにて実施した。MK-II 性能試験の25 MW毎での試験は、AUTO、CASCADE、MANUALの3モードにてそれぞれ実施した。

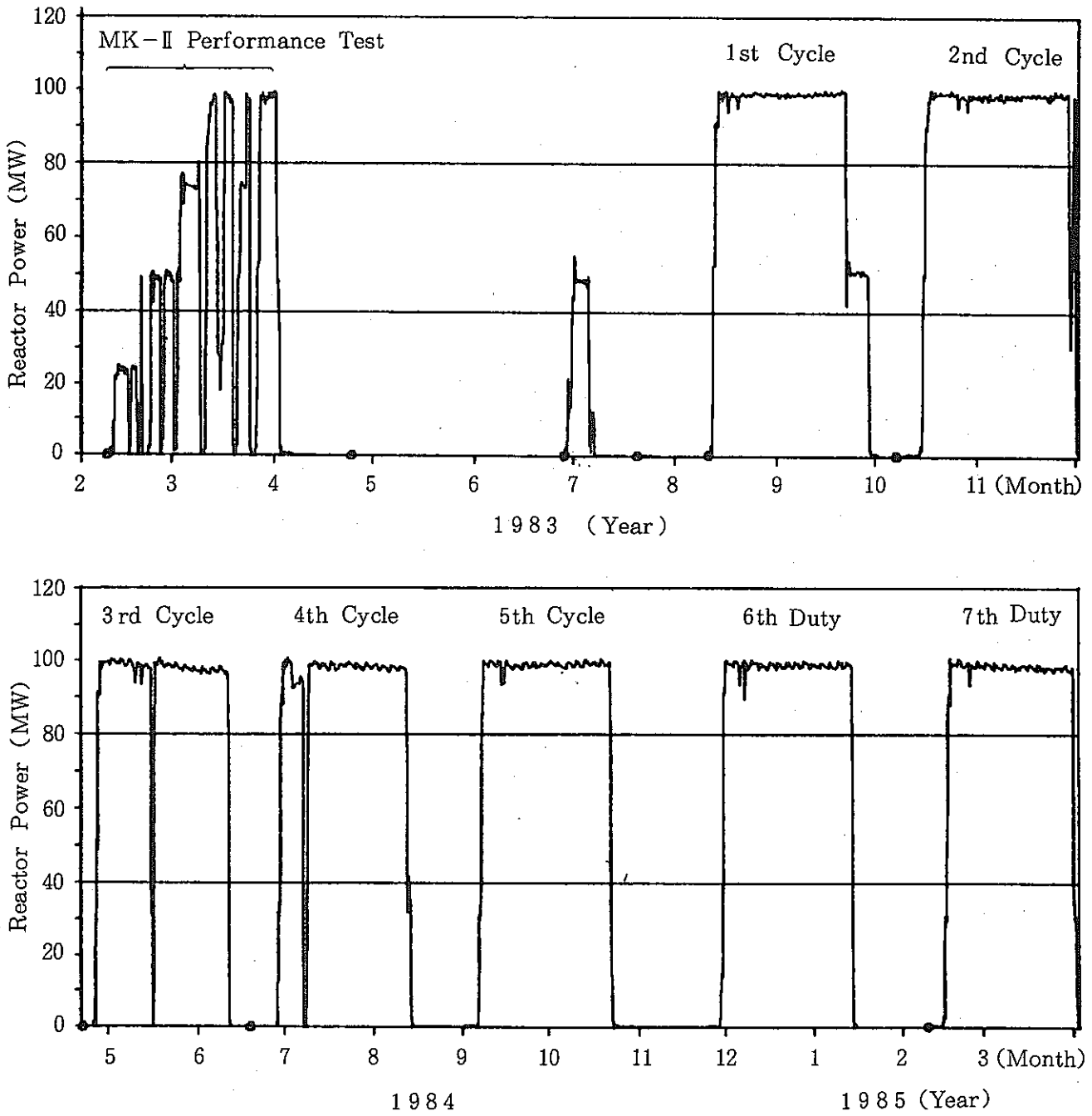


Fig. 4.1 Reactor Thermal Power History in JOYO Operation  
(1983.2 ~ 1985.3)

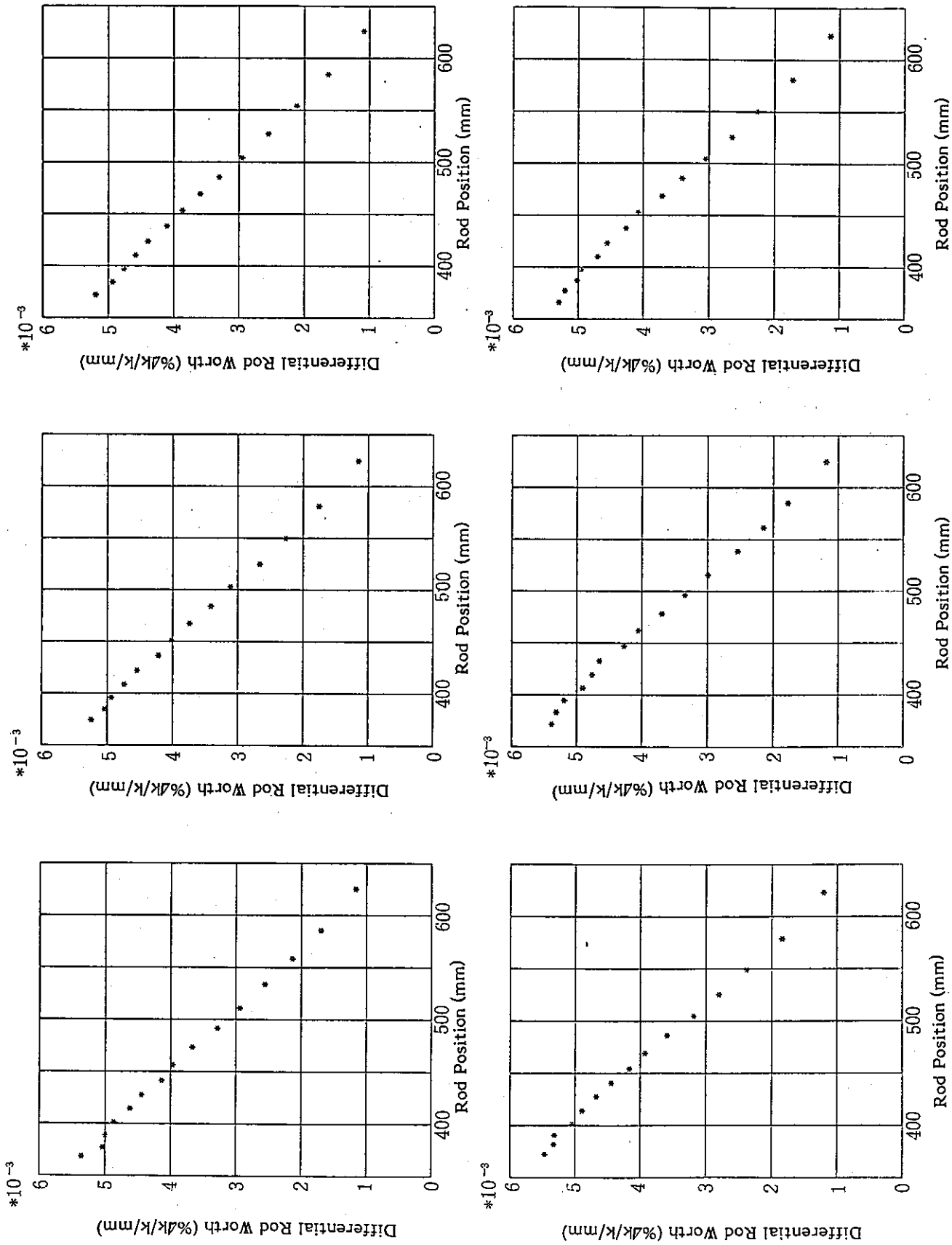


Fig. 4.2 Differential Rod Worth Measured at MK - II 7th Duty Cycle

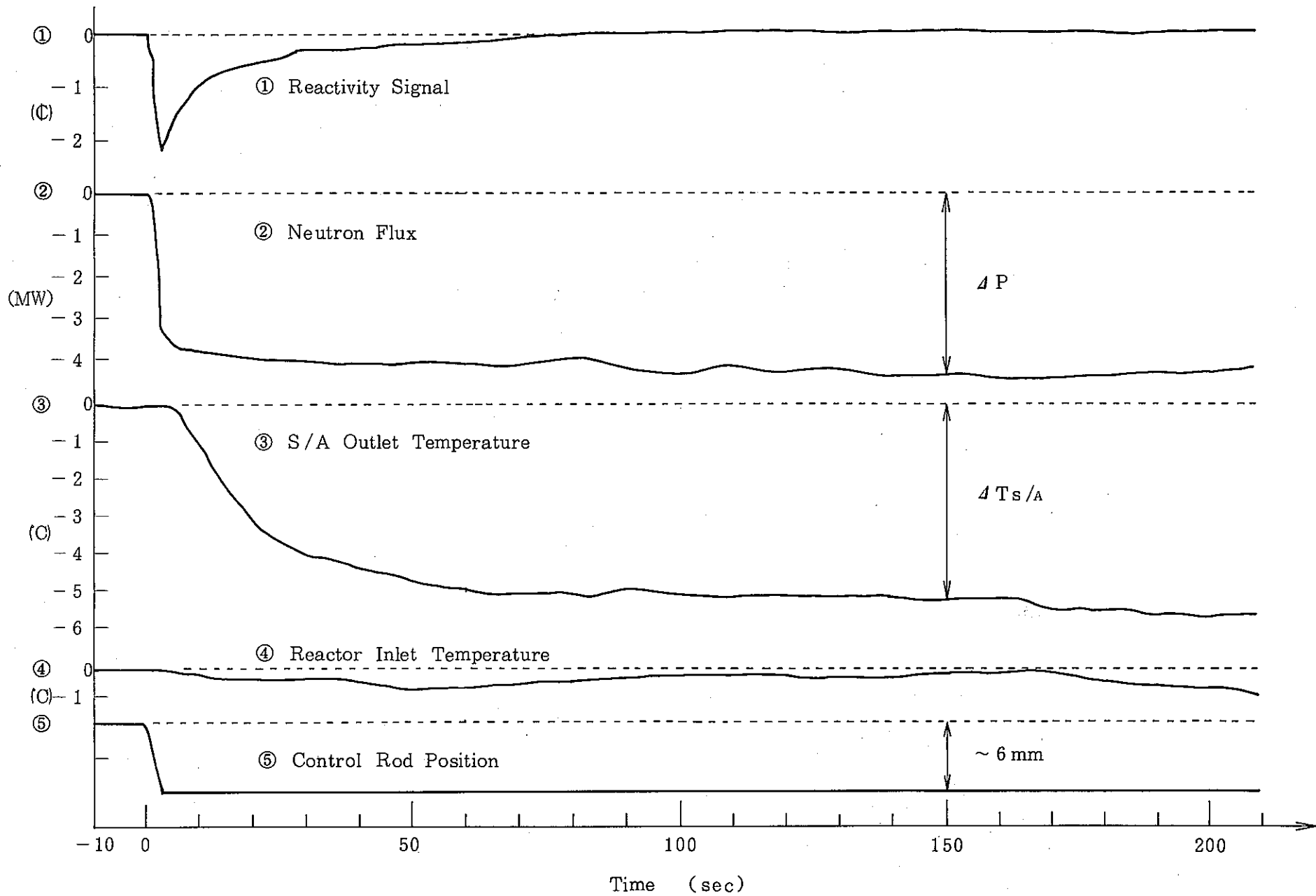


Fig. 4.3 Example of Step Response Test Result measured at 100 MW Reactor Power

## 5. 試験結果

### 5.1 MK-II 性能試験における測定結果

MK-II 性能試験では、燃焼初期の処女炉心において25MW毎にステップ応答試験を実施し、算出された出力係数を通常測定手法によって得られた値と比較した。各炉出力でのステップ応答試験結果を Table 5.1-(a)~(d)に、通常測定手法による出力係数との比較を Table 5.2 に示した。Table 5.2 中のステップ応答法測定値は、各炉出力での全データ（6~12ケース）の算術平均と標準偏差  $1\sigma$  で表わした。通常測定手法による値は、ステップ応答試験実施時に最も近い時期に測定された値を採用した。

Table 5.1 の一連の結果より、中性子束検出器による差異は小さく、最大7%程度であることがわかる。また、Table 5.2 より、通常測定手法による出力係数は、ステップ応答法による測定値と誤差範囲（ $1\sigma$  値）内で良く一致していることがわかる。これらの結果より、本ステップ応答法によって反応度フィードバック特性を把握することの妥当性を確認した。

### 5.2 定格出力における測定結果

定格出力における試験は、MK-II 性能試験期間は1日1回、定格第1~第7サイクルの期間は週に1回の頻度で実施した。Table 5.3-(a)~(d)に制御棒挿入時のデータを、Table 5.4-(a)~(d)に制御棒引抜時のデータを示す。

#### 5.2.1 各定格サイクルにおける反応度フィードバック特性の経時変化

定格第1サイクルから第7サイクルのサイクル毎のデータを Fig. 5.1~5.7 に示す。各グラフの(a)には定格運転継続日数と出力係数との関係を、(b)には定格運転継続日数と S/A 出口温度変化量の関係をそれぞれ示した。いずれの定格サイクルにおいても、定格運転継続に伴って、出力係数が減少し、S/A 出口温度変化量が増加する傾向を示すこと、ならびにサイクルが進むにつれて各値の絶対値が出力係数については減少、S/A 出口温度変化量については増大することがわかる。これらの傾向は、制御棒挿入時データ及び引抜時データいずれについても同様に見られる。また、上記傾向は第1から第3サイクルまでが顕著であるが、第4サイクル以後は弱くなってきている。

次に中性子束信号及び S/A 出口温度信号のステップ応答形状の経時変化を各サイクル毎に3ケースずつ重ね書きした図を Fig. 5.8~5.14 に示す。初期状態からの変化量は、いずれも、試験毎にその値が異なる投入反応度によって規格化してある。なお、データはいずれも制御棒挿入時に測定されたものを示した。これらのグラフより明らかなように、各サイクルにおいて、中性子束信号、S/A 出口温度ともに EOC の方が BOC に比べて単位投入反応度に対する変化量が大きくなっていることが確認される。また、この傾向は、サイクルが進むことによっても発生していることがわかる。

以上の整理結果より、反応度フィードバック特性の経時変化について下記のことがわかる。

- ① 各定格サイクルにおいて、定格出力運転期間中に、反応度フィードバック特性が徐々に弱くなる傾向が見られた。

- ② 上記①の傾向は、第1～第3サイクルにおいて顕著であり、第4サイクル以後は弱くなってきている。
- ③ 反応度フィードバック特性が弱くなる現象は、定格サイクル運転を繰返すことによっても進行しているが、第4サイクル以後はこの効果は顕著ではない。

#### 5.2.2 燃焼度と反応度フィードバック特性の関係

前項で示した反応度フィードバック特性の変化傾向を考えると、定格運転による燃焼 (burn-up) の進行が上記特性と何らかの関連を持つことが推測される。そこで、ステップ応答試験実施時の炉心平均燃焼度 (単位MWD/T) と出力係数及びS/A出口温度変化量の関係をそれぞれ整理した。炉心平均燃焼度は、「常陽」炉心管理コード“MAGI”によって計算されるサイクル毎燃焼度と、「常陽」データ処理装置 (JOYDAS) で測定される試験実施時の積算熱出力を用いて算出した値であり、Table 5.3及びTable 5.4に示した。

Table 5.5に、炉心平均燃焼度と出力係数及びS/A出口温度変化量の各定格サイクル毎の変化範囲を整理した。これらの値のサイクル毎の平均値をFig. 5.15に示す。また、出力係数及びS/A出口温度変化量と炉心平均燃焼度との関係を、測定された全データについて、Fig. 5.16に示した。これらの結果より以下のことがわかる。

- ① 炉心平均燃焼度が15000 MWD/T以下の範囲では、燃焼の進行に伴ってほぼ直線的に出力係数が減少し、S/A出口温度変化量が増加する傾向を示す。すなわち、徐々に反応度フィードバック特性が弱くなることがわかる。
- ② 炉心平均燃焼度15000MWD/T以上の範囲では、上記の傾向がやや弱まっている。第4サイクル以後の出力係数、S/A出口温度変化量のサイクル毎平均値はほぼ一定となった。これはTable 5.5からわかるように、第4サイクル以後は炉心平均燃焼度がほぼ一定であり平衡炉心に達していることによるものと推定される。

Table 5.1 - (a) MK-II 性能試験時のステップ応答試験結果  
(1983.2.16 炉出力 25 MW)

No.	操作 CR	操作前	操作後	投入反応度 $\rho_0$ ( $\times 10^{-3} \% \Delta k/k$ )	中性子 検出器	炉出力変化量 $\Delta P$ (MW)	出力係数 $\alpha_p$ ( $(-1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$ )	制御系モード
		CR 位置 (mm)	CR 位置 (mm)					
1	1	480.1	482.7	9.55	ch. 6	1.012	9.49	AUTO
					ch. 7	0.991		
					ch. 8			
2	1	482.7	480.0	- 9.92	ch. 6	1.012	9.62	AUTO
					ch. 7	1.067		
					ch. 8	1.016		
3	1	480.0	483.0	11.00	ch. 6	1.214	8.91	CASCADE
					ch. 7	1.270		
					ch. 8	1.219		
4	1	483.0	480.0	- 11.00	ch. 6	1.189	9.10	CASCADE
					ch. 7	1.219		
					ch. 8	1.219		
5	1	480.0	483.2	11.70	ch. 6	1.306	8.96	MANUAL
6	1	483.2	480.1	- 11.40	ch. 6	1.242	9.18	MANUAL

Table 5.1 -(b) MK-II 性能試験時のステップ応答試験結果  
(1983.2.27 炉出力 50 MW)

No.	操作	操作前 CR 位置	操作後 CR 位置	投入反応度 $\rho_0$ ( $\times 10^{-3}\%$ $\Delta k/k$ )	中性子 検出器	炉出力変化量 $\Delta P$ (MW)	出力係数 $\alpha_p$ ( $(-1)\times 10^{-3}\%$ $\Delta k/k/MW$ )	制御系モード
	CR	(mm)	(mm)					
1	4	489.0	483.2	- 20.75	ch. 6	- 2.43	8.57	AUTO
					ch. 7	- 2.36		
					ch. 8	- 2.47		
2	4	483.2	488.9	20.38	ch. 6	2.38	8.67	AUTO
					ch. 7	2.36		
					ch. 8	2.31		
3	4	488.9	483.0	- 21.12	ch. 6	- 2.44	8.54	CASCADE
					ch. 7	- 2.55		
					ch. 8	- 2.43		
4	4	483.0	489.0	21.48	ch. 6	2.62	8.20	CASCADE
					ch. 7	2.55		
					ch. 8	2.69		
5	4	489.0	482.9	- 21.84	ch. 6	- 2.49	8.61	MANUAL
					ch. 7	- 2.55		
					ch. 8	- 2.57		
6	4	482.9	489.1	22.19	ch. 6	2.55	8.68	MANUAL
					ch. 7	2.55		
					ch. 8	2.57		



Table 5.1-(c) MK-II 性能試験時のステップ応答試験結果  
(1983.3.5~6 炉出力 75 MW)

No.	操作	操作前 CR 位置	操作後 CR 位置	投入反応度 $\rho_0$	中性子 検出器	炉出力変化量 $\Delta P$	出力係数 $\alpha_p$	制御系モード
	CR	(mm)	(mm)	( $\times 10^{-3}\%$ $\Delta k/k$ )		(MW)	( $(-1)\times 10^{-3}\%$ $\Delta k/k/MW$ )	
1	5	499.0	493.0	- 20.54	ch. 7	- 2.52	8.22	AUTO
					ch. 8	- 2.48		
2	5	493.0	499.0	20.54	ch. 7	2.93	7.13	AUTO
					ch. 8	2.83		
3	5	499.0	492.8	- 21.24	ch. 7	- 2.70	7.87	AUTO
					ch. 8	- 2.70		
4	5	492.8	500.1	24.92	ch. 7	3.28	7.52	AUTO
					ch. 8	3.35		
5	5	500.1	493.8	- 21.44	ch. 7	- 2.87	7.39	AUTO
					ch. 8	- 2.93		
6	5	493.8	500.1	21.44	ch. 7	2.81	7.55	AUTO
					ch. 8	2.87		
7	5	500.1	493.7	- 21.79	ch. 7	- 2.56	8.32	CASCADE
					ch. 8	- 2.68		
8	5	493.7	500.0	21.46	ch. 7	2.55	8.22	CASCADE
					ch. 8	2.67		
9	5	500.0	493.8	- 21.11	ch. 7	- 2.62	7.98	MANUAL
					ch. 8	- 2.67		
10	5	493.8	500.0	21.11	ch. 7	2.49	8.60	MANUAL
					ch. 8	2.42		
11	5	500.0	493.9	- 20.76	ch. 7	- 2.49	8.24	CASCADE
					ch. 8	- 2.55		
12	5	493.9	500.0	20.76	ch. 7	2.55	8.24	CASCADE
					ch. 8	2.49		

Table 5.1 - (d) MK-II 性能試験時のステップ応答試験結果  
(1983.3.17 炉出力 100 MW)

No.	操作 CR	操作前 CR 位置 (mm)	操作後 CR 位置 (mm)	投入反応度 $\rho_0$ ( $\times 10^{-3} \% \Delta k/k$ )	中性子 検出器	炉出力変化量 $\Delta P$ (MW)	出力係数 $\alpha_p$ ( $(-1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$ )	制御系モード
1	1	512.3	506.0	- 19.76	ch. 7	- 2.76	7.24	AUTO
					ch. 8	- 2.70		
2	1	506.0	510.0	12.63	ch. 7	1.69	7.22	AUTO
					ch. 8	1.81		
3	1	512.2	506.2	- 18.81	ch. 7	- 2.76	6.98	CASCADE
					ch. 8	- 2.63		
4	1	506.2	510.0	11.99	ch. 7	1.63	7.22	CASCADE
					ch. 8	1.69		
5	1	512.1	506.0	- 19.14	ch. 7	- 2.82	6.86	MANUAL
					ch. 8	- 2.76		
6	1	506.0	510.0	12.63	ch. 7	1.76	6.94	MANUAL
					ch. 8	1.88		
7	1	512.1	506.0	- 19.14	ch. 7	- 2.70	7.18	CASCADE
					ch. 8	- 2.63		
8	1	506.0	510.0	12.63	ch. 7	1.88	6.72	CASCADE
					ch. 8	1.88		

Table 5.2 MK-II 性能試験時の出力係数測定結果

炉出力 (MW)	出力係数 $(-1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$	
	ステップ応答法	通常測定手法
25	$9.21 \pm 0.29$	9.36 *1
50	$8.55 \pm 0.18$	8.54 *2
75	$7.94 \pm 0.45$	8.21 *3
100	$7.05 \pm 0.20$	6.92 *4

\* 1 ' 83. 2. 18 の測定値

\* 2 ' 83. 2. 25 と ' 83. 3. 1 各測定値の平均値

\* 3 ' 83. 3. 2 , 3. 7 , 3. 10 , 3. 13 各測定値の平均値

\* 4 ' 83. 3. 15 , 3. 22 各測定値の平均値

Table 5.3 - (a) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒挿入時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置 (mm)	操作後 CR位置 (mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 ( $(-1) \times 10^{-3} \Delta k/k/MW$ )	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A 出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'83. 3. 12	MK-II 性能試験	3	511.0	507.1	- 3.05	- 2.02	6.01	1650	- 3.45	1.13
'83. 3. 13	"	3	511.0	506.8	- 3.29	- 2.20	5.96	1730	- 3.45	1.05
"	"	3	511.0	507.1	- 3.13	- 1.94	6.42	1740	- 3.30	1.05
'83. 3. 17	"	1	512.3	506.0	- 4.96	- 2.75	7.17	2100	- 4.65	0.94
"	"	1	512.2	506.2	- 4.73	- 2.77	6.80	2100	- 4.20	0.89
"	"	1	512.1	506.0	- 4.81	- 2.84	6.75	2110	- 4.20	0.87
"	"	1	512.1	506.0	- 4.81	- 2.67	7.17	2120	- 4.50	0.94
'83. 3. 18	"	3	512.1	507.9	- 3.27	- 1.69	7.71	2220	-	-
'83. 3. 22	"	1	514.1	508.1	- 4.67	- 2.67	6.95	2530	- 5.10	1.09
'83. 3. 23	"	4	516.0	512.1	- 3.02	- 1.73	6.93	2620	- 3.15	1.04
'83. 3. 28	"	4	515.0	511.0	- 3.12	- 1.97	6.31	2840	- 3.30	1.06
'83. 3. 29	"	6	517.0	513.4	- 2.74	- 1.70	6.43	3110	-	-
'83. 3. 30	"	3	518.0	514.4	- 2.70	- 1.71	6.27	3250	- 3.15	1.17
'83. 3. 31	"	1	520.1	516.0	- 3.06	- 2.13	5.71	3420	- 3.45	1.13
'83. 8. 16	定格第1サイクル	1	452.0	446.0	- 5.82	- 3.04	7.61	4220	- 5.55	0.95
'83. 8. 23	"	1	457.4	451.4	- 5.69	- 3.46	6.55	5190	- 6.75	1.19
'83. 8. 30	"	1	464.0	458.0	- 5.54	- 3.66	6.02	6170	- 7.20	1.30
'83. 9. 6	"	1	471.0	465.0	- 5.38	- 4.14	5.17	7140	- 6.94	1.29
'83. 9. 14	"	1	479.8	473.7	- 5.26	- 3.88	5.40	8250	- 7.50	1.43
'83. 9. 20	"	1	487.0	480.9	- 5.08	- 4.39	4.61	9090	- 7.35	1.45

Table 5.3-(b) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒挿入時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置(mm)	操作後 CR位置(mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 ( $(-1) \times 10^{-3} \Delta k/k/MW$ )	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'83. 10. 17	定格第2サイクル	2	467.9	462.0	- 5.73	- 4.12	5.54	8840	- 7.05	1.23
'83. 10. 26	"	1	477.1	471.1	- 5.59	- 4.51	4.93	10070	- 8.10	1.45
'83. 11. 8	"	4	491.0	485.0	- 5.15	- 4.63	4.43	11830	- 7.80	1.51
'83. 11. 17	"	6	501.0	495.0	- 5.21	- 4.68	4.43	13050	- 9.45	1.82
'83. 11. 25	"	1	512.1	506.3	- 4.52	- 4.98	3.61	14130	- 8.25	1.84
'83. 11. 28	"	2	516.0	511.8	- 3.21	- 3.23	3.96	14500	- 5.40	1.68
'84. 4. 27	定格第3サイクル	5	515.0	508.6	- 5.20	- 4.16	4.98	12420	- 6.75	1.30
'84. 5. 7	"	1	530.0	524.0	- 4.52	- 4.57	3.94	13810	- 7.35	1.63
'84. 5. 21	"	1	549.1	543.4	- 3.77	- 4.11	3.65	15630	- 6.75	1.79
'84. 5. 28	"	1	560.0	554.0	- 3.66	- 4.32	3.37	16590	- 7.50	2.05
'84. 6. 4	"	1	572.0	566.1	- 3.26	- 3.73	3.48	17540	- 6.60	1.99
'84. 6. 9	"	3	582.0	578.0	- 1.79	- 2.31	3.09	18170	- 5.10	2.85
'84. 7. 2	定格第4サイクル	1	522.1	515.9	- 4.82	- 4.28	4.48	15520	- 7.65	1.59
'84. 7. 9	"	1	530.0	523.8	- 4.59	- 4.16	4.39	16280	- 7.20	1.57
'84. 7. 16	"	1	540.0	534.0	- 4.17	- 4.46	3.72	17230	- 7.35	1.76
'84. 7. 23	"	1	551.0	544.9	- 3.93	- 4.26	3.67	18190	- 7.80	1.98
'84. 7. 30	"	1	561.5	555.8	- 3.40	- 3.93	3.44	19150	- 6.75	1.99
'84. 8. 6	"	1	574.0	568.1	- 3.19	- 3.65	3.48	20100	- 6.60	2.07
'84. 8. 10	"	1	581.0	577.0	- 2.03	- 2.43	3.32	20550	- 4.50	2.22

Table 5.3 - (c) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒挿入時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置 (mm)	操作後 CR位置 (mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 ( $(-1) \times 10^{-3} \text{ k/k/MW}$ )	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A 出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'84. 9. 10	定格第5サイクル	1	518.0	512.0	- 4.58	- 4.45	4.10	17070	- 7.05	1.54
'84. 9. 17	"	1	526.8	520.6	- 4.49	- 4.05	4.41	18080	- 7.80	1.74
'84. 9. 25	"	1	538.0	532.1	- 3.98	- 4.13	3.84	19230	- 6.75	1.70
'84. 10. 1	"	1	546.7	540.9	- 3.69	- 4.00	3.67	20100	- 7.05	1.91
'84. 10. 8	"	1	558.1	552.2	- 3.47	- 3.96	3.49	21120	- 6.75	1.95
'84. 10. 15	"	1	569.7	563.6	- 3.30	- 4.25	3.09	22130	- 6.30	1.91
'84. 12. 10	定格第6サイクル	1	515.1	509.1	- 4.68	- 4.16	4.48	17851	- 7.80	1.67
'84. 12. 17	"	1	524.1	517.9	- 4.59	- 4.39	4.16	18810	- 8.70	1.90
'84. 12. 24	"	1	534.4	528.3	- 4.25	- 4.22	4.01	19780	- 7.50	1.76
'85. 1. 7	"	1	555.0	548.8	- 3.79	- 4.59	3.29	21712	- 8.25	2.18
'85. 1. 12	"	5	563.0	558.9	- 2.34	- 3.07	3.03	22361	- 5.85	2.50
'85. 2. 18	定格第7サイクル	1	508.0	502.0	- 4.79	- 4.57	4.17	16742	- 8.55	1.78
'85. 2. 25	"	1	517.0	510.9	- 4.64	- 4.59	4.02	17660	- 8.55	1.84
'85. 3. 4	"	1	526.1	520.0	- 4.41	- 4.43	3.96	18616	- 7.50	1.69
'85. 3. 11	"	1	535.8	530.2	- 3.81	- 3.74	4.05	19568	- 6.75	1.77
'85. 3. 18	"	1	546.0	540.1	- 3.77	- 3.68	4.08	20519	- 6.90	1.83
'85. 3. 25	"	1	556.0	550.0	- 3.58	- 3.87	3.68	21468	- 7.20	2.01

Table 5.4 - (a) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒引抜時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置(mm)	操作後 CR位置(mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 $(-1) \times 10^{-3} \Delta k/k/MW$	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A 出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'83. 3. 12	MK-II 性能試験	3	507.1	511.1	3.13	1.91	6.52	1650	2.85	0.91
'83. 3. 13	"	3	506.8	511.0	3.29	2.33	5.62	1730	3.45	1.05
'83. 3. 16	"	5	506.6	510.8	3.35	2.32	5.74	1930	2.85	0.85
'83. 3. 17	"	1	506.0	510.0	3.17	1.75	7.22	2100	2.55	0.80
"	"	1	506.2	510.0	3.01	1.66	7.22	2100	2.55	0.85
"	"	1	506.0	510.0	3.17	1.82	6.94	2110	3.30	1.04
"	"	1	506.0	510.0	3.17	1.88	6.72	2120	2.55	0.80
'83. 3. 18	"	3	507.9	512.2	3.35	1.93	6.90	2220	2.70	0.81
'83. 3. 23	"	4	512.1	516.0	3.02	1.91	6.29	2620	3.45	1.14
'83. 3. 28	"	4	511.0	515.0	3.12	2.43	5.10	2840	3.90	1.25
'83. 3. 29	"	6	513.4	517.0	2.74	1.75	6.23	3110	2.55	0.93
'83. 3. 30	"	3	514.4	518.0	2.70	1.93	5.56	3250	3.30	1.22
'83. 3. 31	"	3	515.2	518.9	2.76	2.13	5.15	3420	3.45	1.25
'83. 8. 16	定格第1サイクル	1	446.0	452.0	5.82	3.05	7.64	4220	5.85	1.01
'83. 8. 23	"	1	451.4	457.6	5.88	3.26	7.18	5190	6.15	1.05
'83. 8. 30	"	1	458.0	464.0	5.54	3.39	6.51	6170	7.20	1.30
'83. 9. 6	"	1	465.0	470.8	5.20	3.52	5.88	7140	6.38	1.23
'83. 9. 14	"	1	473.7	479.9	5.34	4.14	5.14	8250	7.65	1.43
'83. 9. 20	"	1	480.9	486.9	5.00	3.78	5.26	9090	-	-

Table 5.4 - (b) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒引抜時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置 (mm)	操作後 CR位置 (mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 ( $(-1) \times 10^{-3} \Delta k/k/MW$ )	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A 出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'83.10.17	定格第2サイクル	2	462.0	467.9	5.73	4.16	5.49	8840	7.05	1.23
'83.10.26	"	1	471.1	477.0	5.50	3.95	5.54	10070	7.20	1.26
'83.11.8	"	4	485.0	490.9	5.06	4.49	4.49	11830	7.65	1.51
'83.11.17	"	6	495.0	500.7	4.95	4.48	4.40	13050	8.25	1.67
'83.11.25	"	1	506.3	512.2	4.60	4.26	4.30	14130	7.65	1.66
'84.4.27	定格第3サイクル	5	508.6	515.0	5.20	4.15	4.98	12420	7.20	1.39
'84.5.7	"	1	524.0	530.0	4.52	4.00	4.49	13810	6.90	1.53
'84.5.15	"	5	536.5	540.7	2.87	2.47	4.62	14930	4.05	1.41
'84.5.21	"	1	543.4	549.0	3.70	3.57	4.12	15630	5.70	1.54
'84.5.28	"	1	554.0	560.0	3.66	3.97	3.67	16590	7.05	1.93
'84.6.4	"	1	566.1	572.1	3.32	3.89	3.40	17540	6.75	2.03
'84.7.2	定格第4サイクル	1	515.9	522.0	4.75	4.43	4.27	15520	8.25	1.74
'84.7.9	"	1	523.8	529.9	4.52	3.99	4.51	16280	7.05	1.56
'84.7.16	"	1	534.0	540.0	4.17	3.97	4.18	17230	6.90	1.65
'84.7.23	"	1	545.0	551.0	3.86	3.84	4.00	18190	6.45	1.67
'84.7.30	"	1	555.8	561.8	3.58	3.77	3.78	19150	6.30	1.76
'84.8.6	"	1	568.1	574.0	3.19	3.37	3.77	20100	6.30	1.97



Table 5.4-(c) 制御棒操作によるステップ応答試験結果 (定格出力からの制御棒引抜時)

測定年月日	サイクル名	制御棒 No.	操作前 CR位置(mm)	操作後 CR位置(mm)	投入反応度 (%)	炉出力変化量 (MW)	出力係数 $(-1) \times 10^{-3} \Delta k/k/MW$	炉心平均燃焼度 (MWD/T)	S/A 出口温度変化量	
									(°C)	(°C/%)
'84. 9. 10	定格第5サイクル	1	512.0	517.9	4.50	4.45	4.02	17070	6.75	1.50
'84. 9. 17	"	1	520.6	526.8	4.49	3.80	4.70	18080	7.20	1.60
'84. 9. 25	"	1	532.1	538.0	3.98	4.13	3.84	19230	6.75	1.70
'84. 10. 1	"	1	540.9	546.9	3.82	4.00	3.80	20100	5.40	1.41
'84. 10. 8	"	1	552.2	557.9	3.36	3.78	3.54	21120	6.15	1.83
'84. 10. 15	"	1	563.6	569.1	2.98	3.25	3.65	22130	6.45	2.16
'84. 12. 10	定格第6サイクル	1	509.1	515.0	4.60	4.04	4.53	17851	7.95	1.73
'84. 12. 17	"	1	517.9	524.1	4.59	4.02	4.54	18810	7.50	1.63
'84. 12. 24	"	1	528.3	534.4	4.25	3.91	4.33	19780	7.80	1.84
'85. 1. 7	"	1	548.8	555.0	3.79	4.27	3.53	21712	7.35	1.94
'85. 2. 18	定格第7サイクル	1	502.0	507.9	4.71	4.32	4.34	16742	9.15	1.94
'85. 2. 25	"	1	510.9	516.9	4.56	4.15	4.37	17660	8.10	1.78
'85. 3. 4	"	1	520.0	526.0	4.33	4.00	4.31	18616	6.90	1.59
'85. 3. 11	"	1	530.2	535.9	3.88	3.93	3.93	19568	7.50	1.97
'85. 3. 18	"	1	540.1	545.9	3.70	3.99	3.69	20519	6.60	1.78
'85. 3. 25	"	1	550.0	555.9	3.53	3.93	3.57	21468	6.75	1.91

Table 5.5 Relation between Fuel Burn-up and Power Coefficient,  
S/A Outlet Temp. Difference

Cycle No.	Fuel Burn-up (MWD/T)	Power Coefficient $((-1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW)$	S/A Outlet Temp Difference (C/°C)
0 (Performance Test)	1650 ~ 3420 ( 2398 )*	5.10 ~ 7.71 ( 6.44 )	0.80 ~ 1.25 ( 1.01 )
1st	4220 ~ 9090 ( 6677 )	4.61 ~ 7.64 ( 6.08 )	0.95 ~ 1.45 ( 1.24 )
2nd	8840 ~ 14500 ( 11849 )	3.61 ~ 5.54 ( 4.65 )	1.23 ~ 1.84 ( 1.53 )
3rd	12420 ~ 18170 ( 15423 )	3.09 ~ 4.98 ( 3.98 )	1.30 ~ 2.85 ( 1.79 )
4th	15520 ~ 20550 ( 17961 )	3.32 ~ 4.51 ( 3.92 )	1.56 ~ 2.22 ( 1.81 )
5th	17070 ~ 22130 ( 19622 )	3.09 ~ 4.70 ( 3.85 )	1.41 ~ 2.16 ( 1.75 )
6th	17851 ~ 22361 ( 19852 )	3.03 ~ 4.54 ( 3.99 )	1.63 ~ 2.50 ( 1.91 )
7th	16742 ~ 21468 ( 19096 )	3.68 ~ 4.37 ( 4.01 )	1.59 ~ 2.01 ( 1.82 )

\* Mean Value of all data in One Cycle

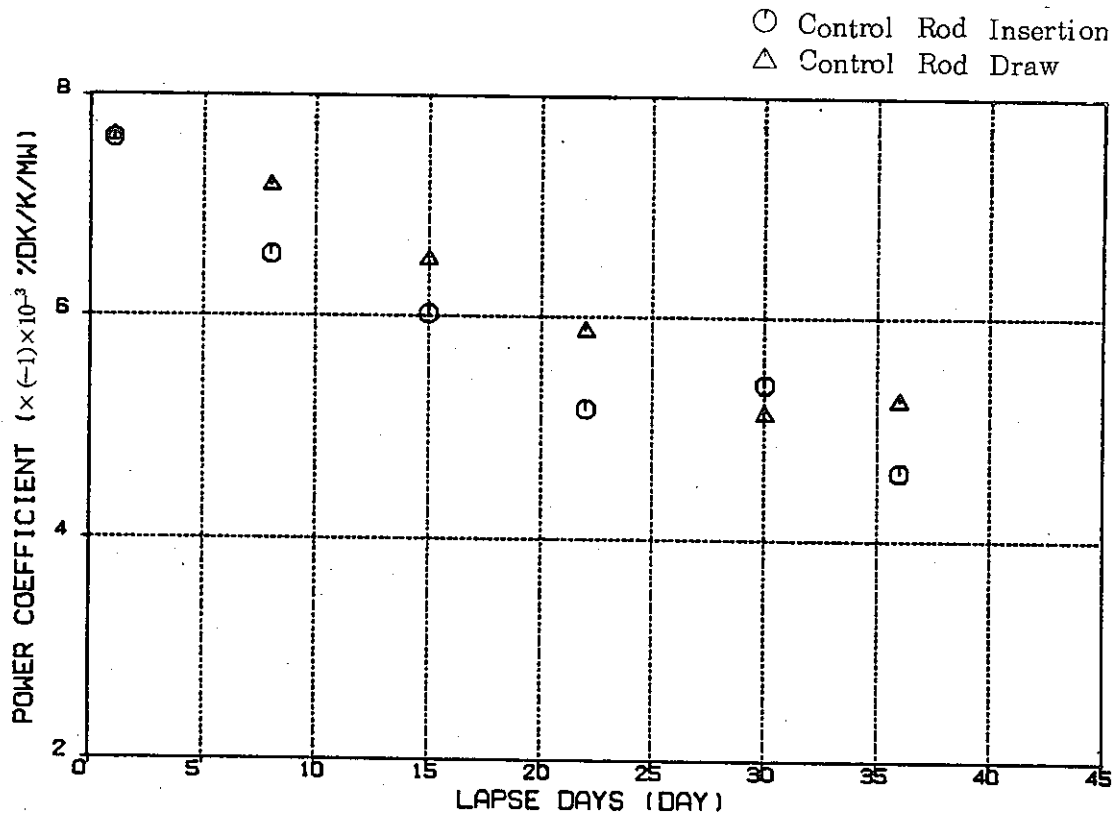


Fig 5.1-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle  
(MK - II 1st Cycle)

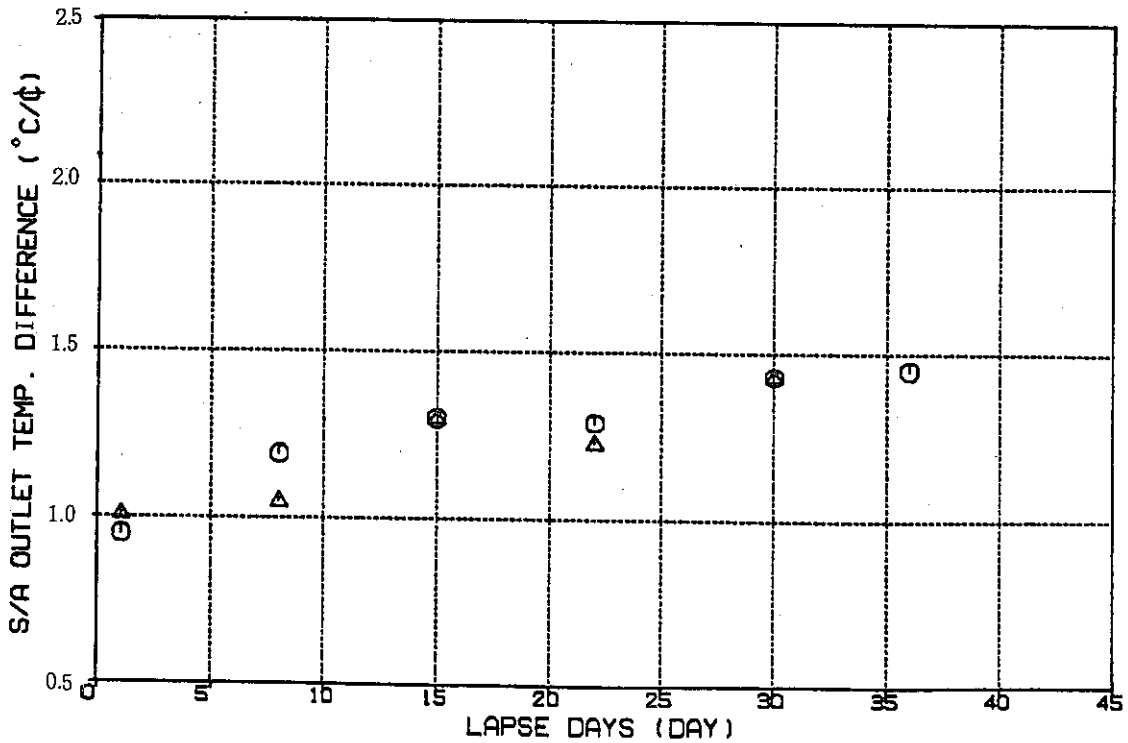


Fig 5.1 -(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle  
(MK - II 1st Cycle)

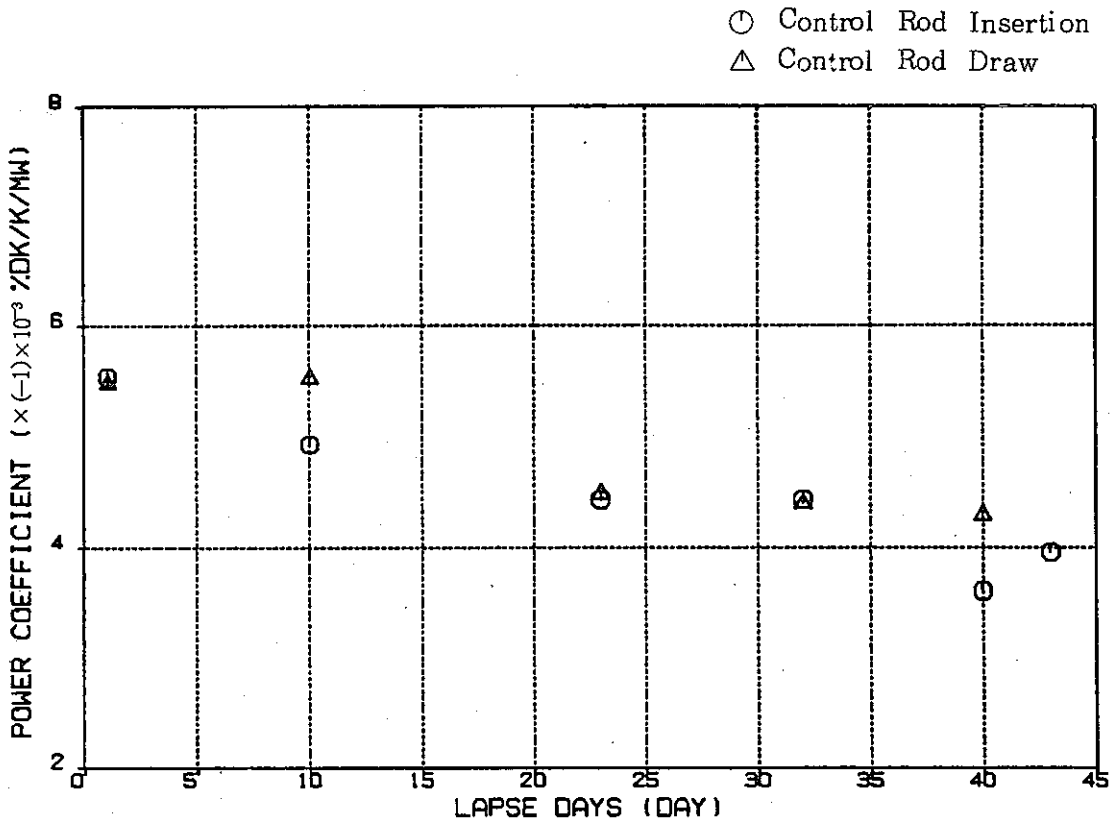


Fig. 5.2-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle  
 (MK-II 2nd Cycle)

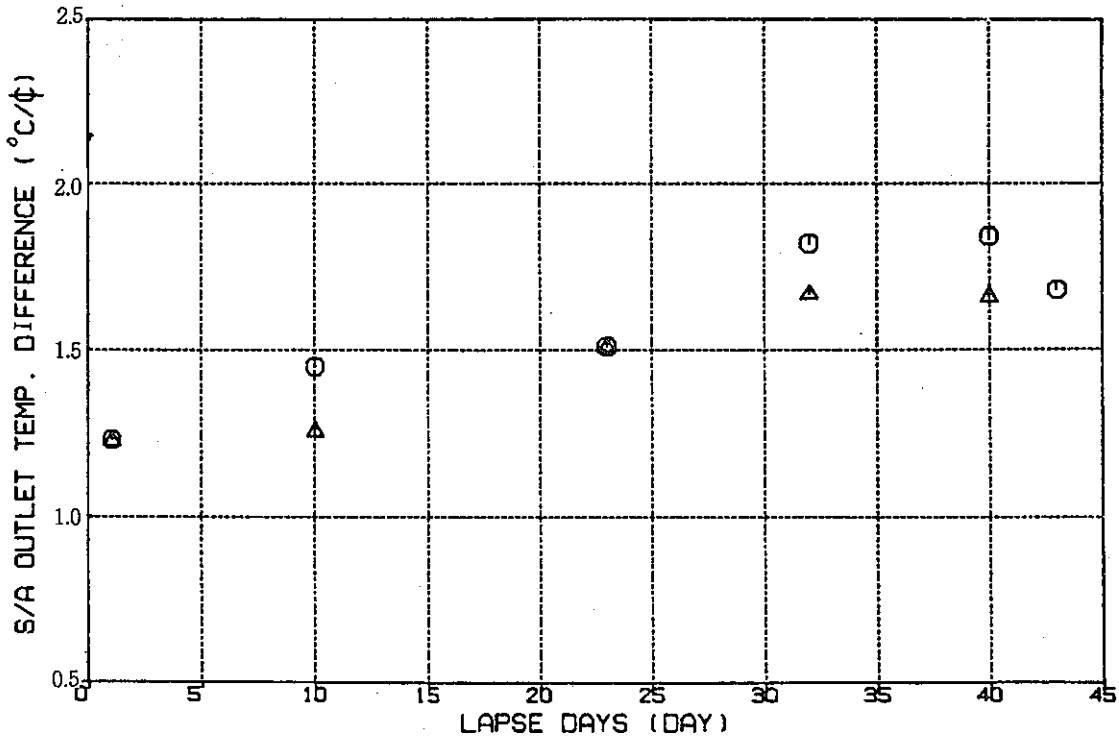


Fig. 5.2-(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle  
 (MK-II 2nd Cycle)

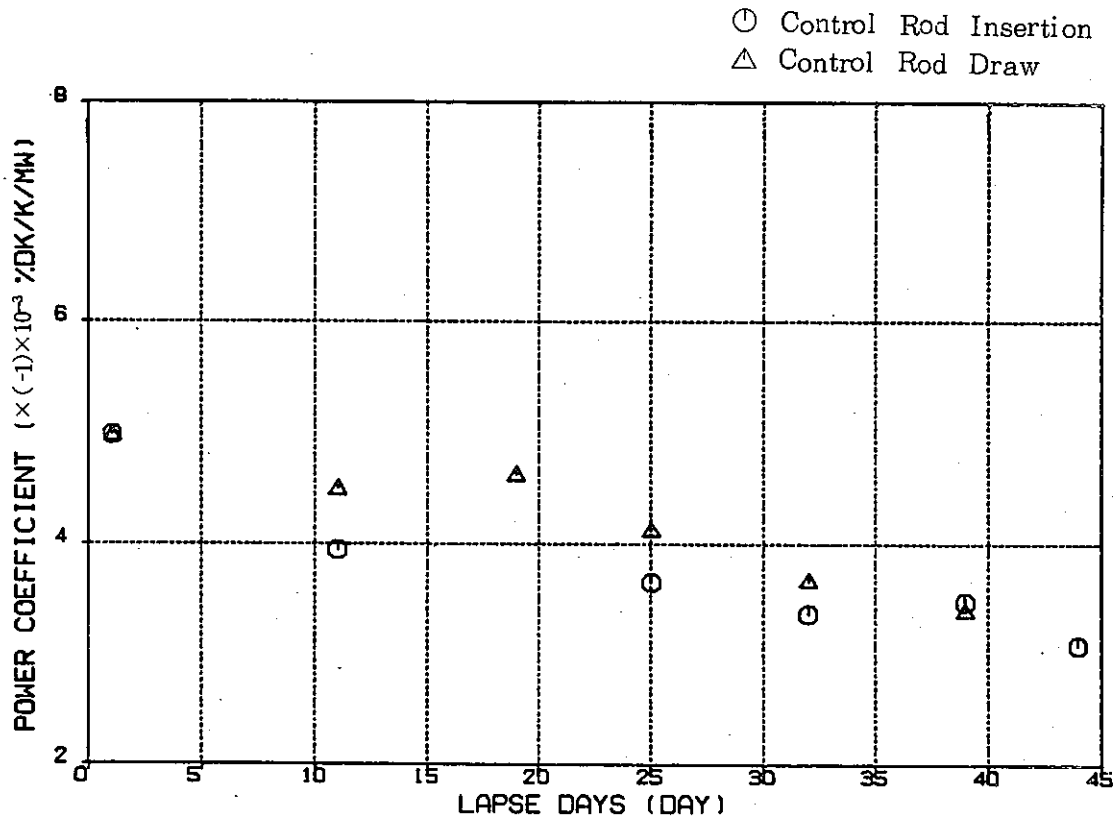


Fig. 5.3-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle (MK-II 3rd Cycle)

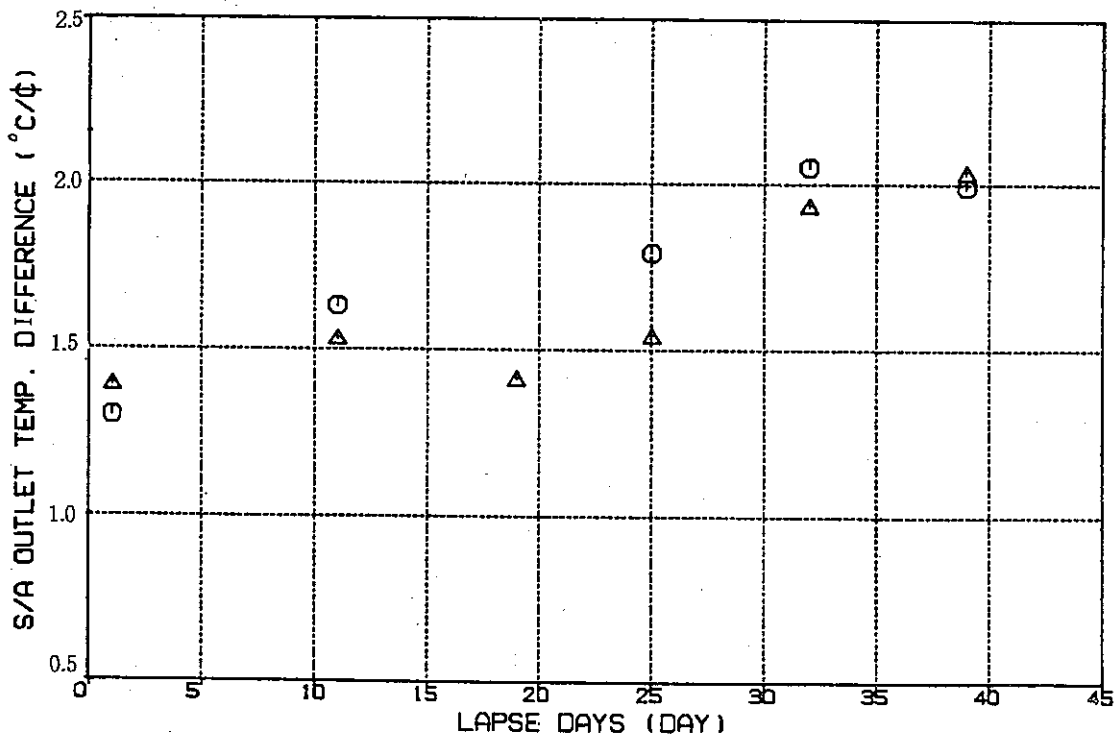


Fig. 5.3-(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle (MK-II 3rd Cycle)

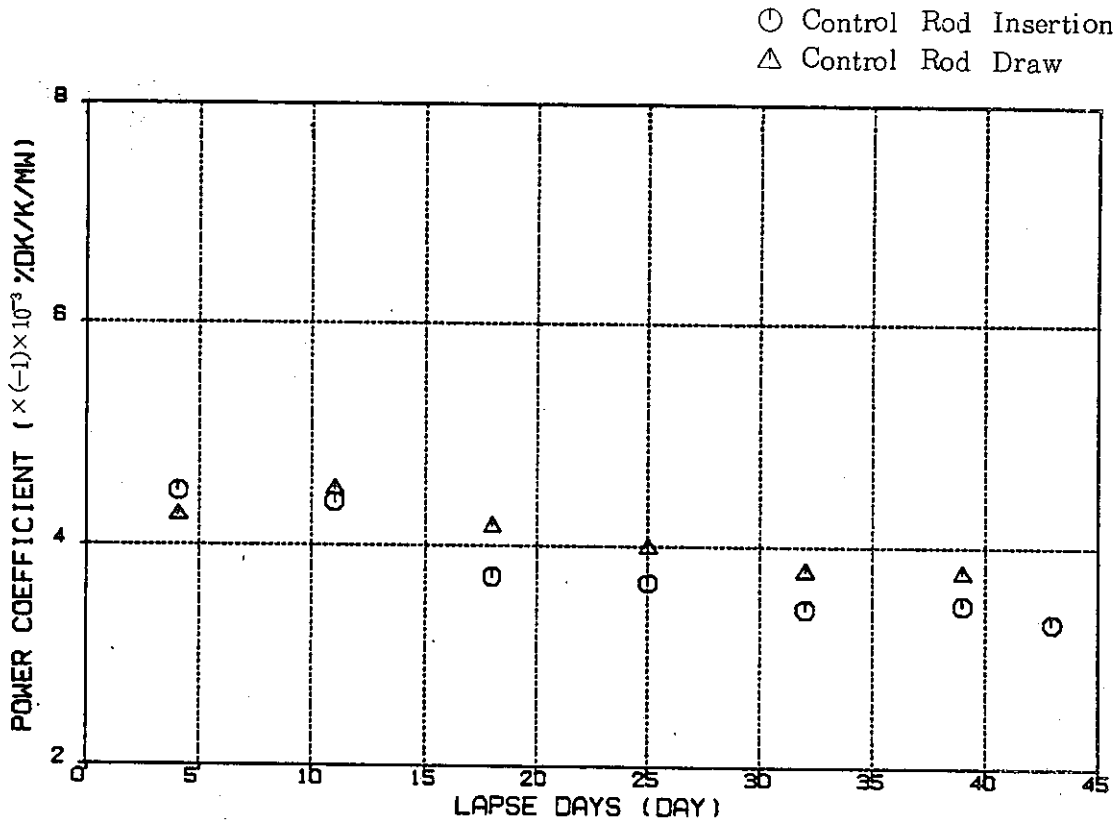


Fig. 5.4-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle  
 (MK-II 4th Cycle)

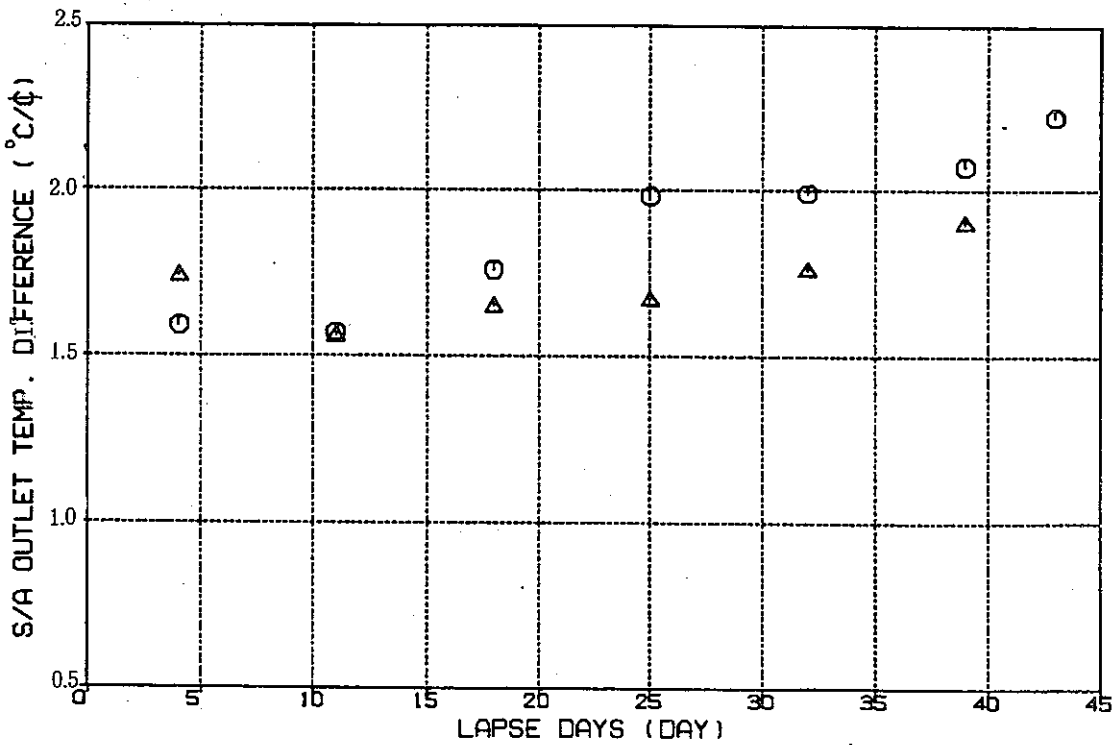


Fig. 5.4-(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle  
 (MK-II 4th Cycle)

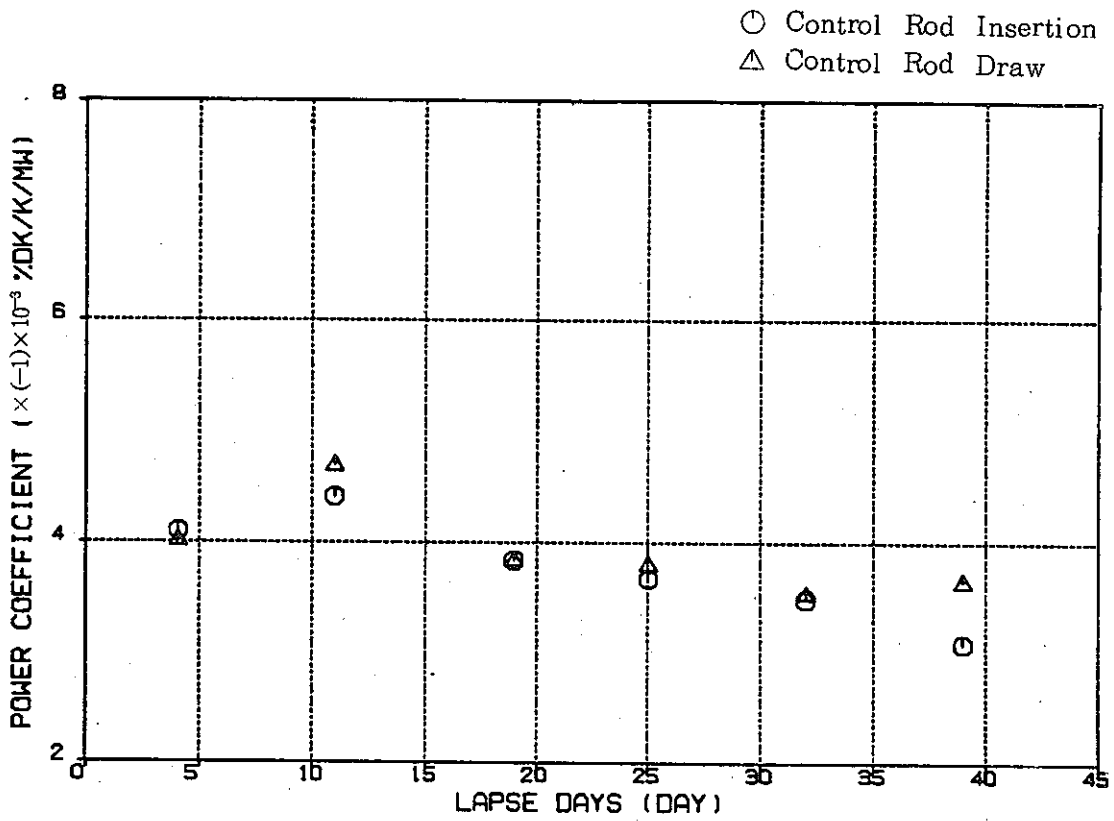


Fig. 5.5 (a) Power Coefficient Change in Duty Cycle (MK-II 5th Cycle)

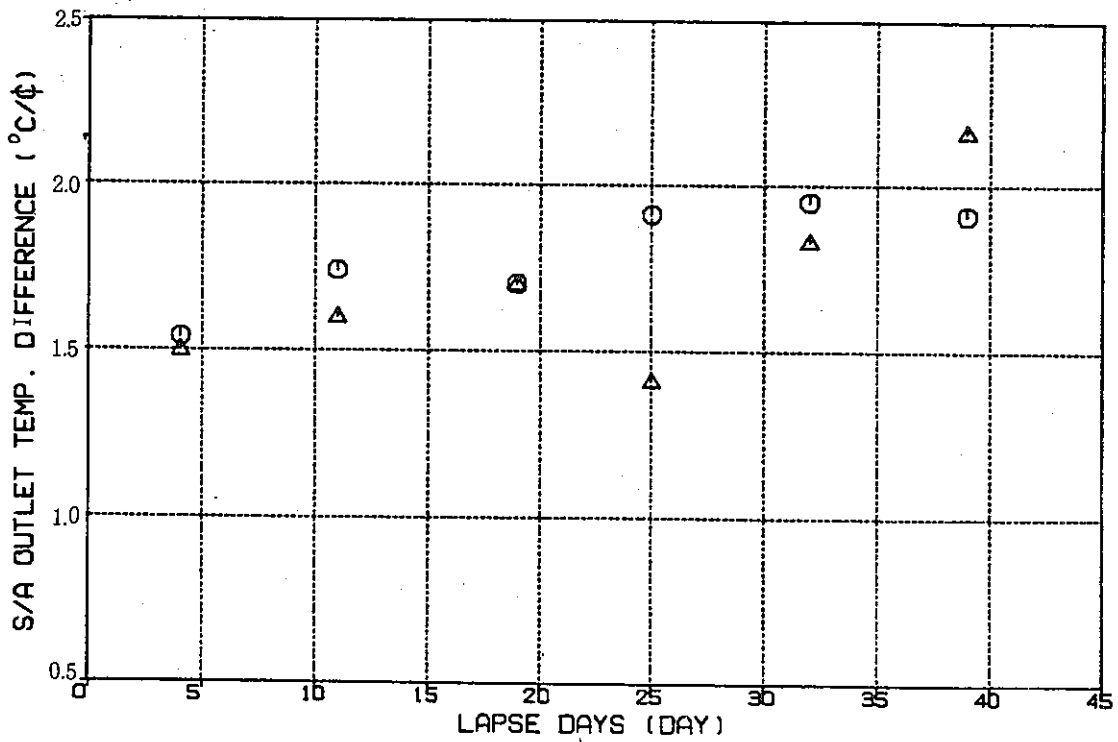


Fig. 5.5 (b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle (MK-II 5th Cycle)

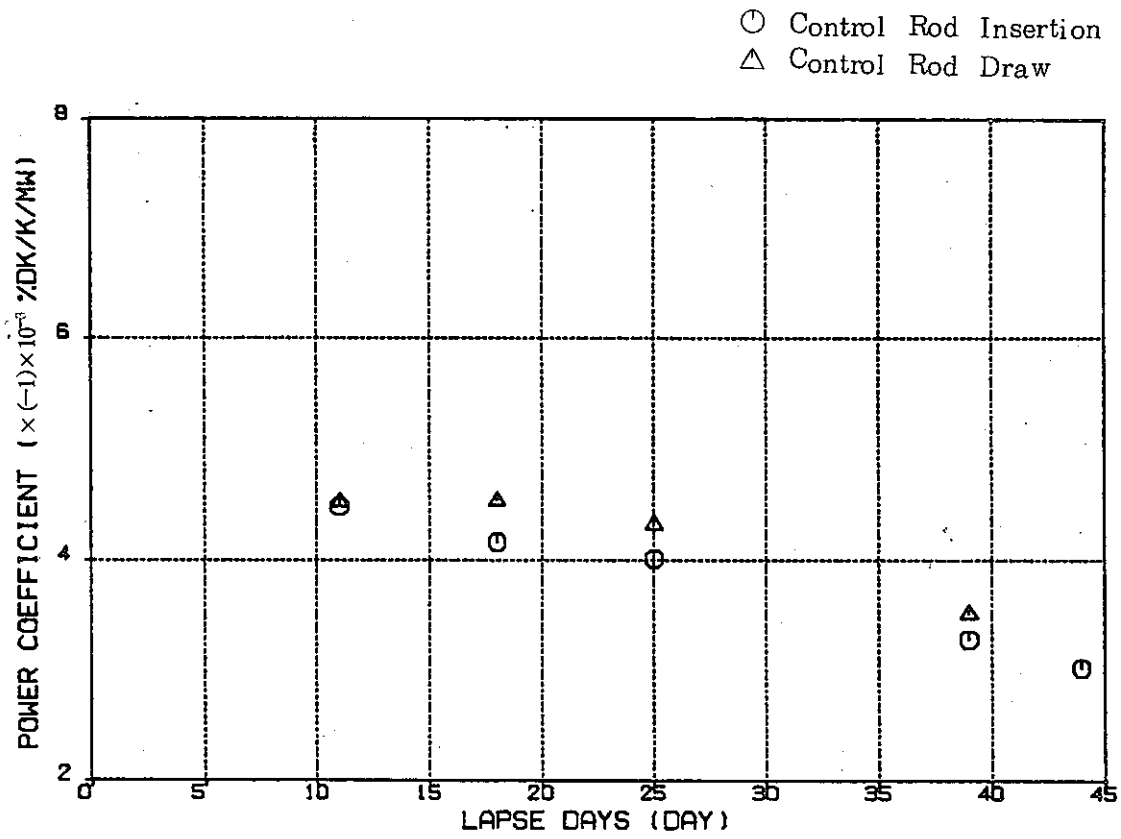


Fig. 5.6-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle  
 (MK-II 6th Cycle)

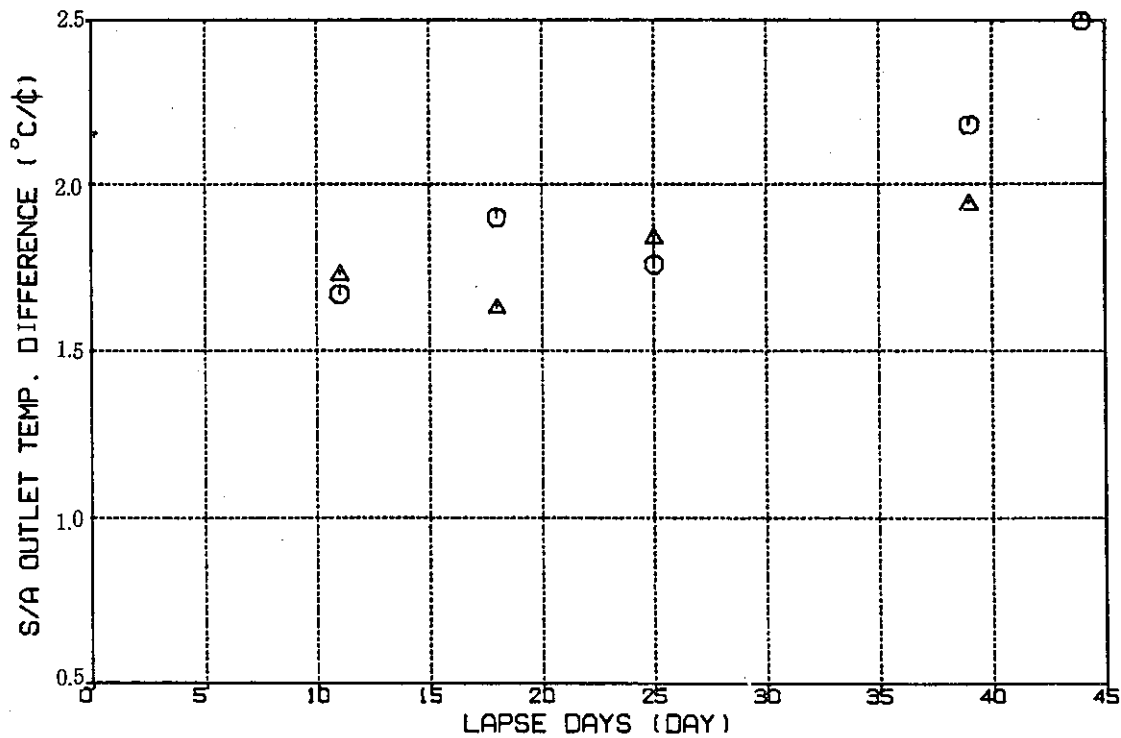


Fig. 5.6-(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle  
 (MK-II 6th Cycle)



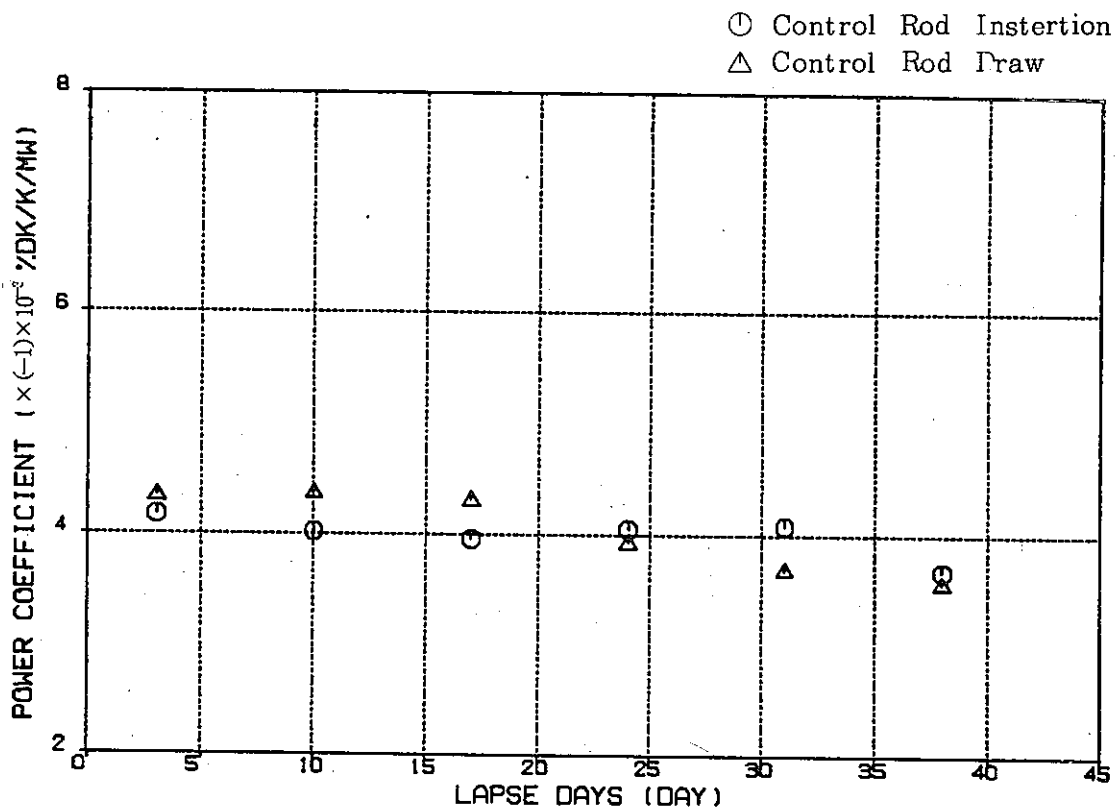


Fig. 5.7-(a) Power Coefficient Change in Duty Cycle (MK-II 7th Cycle)

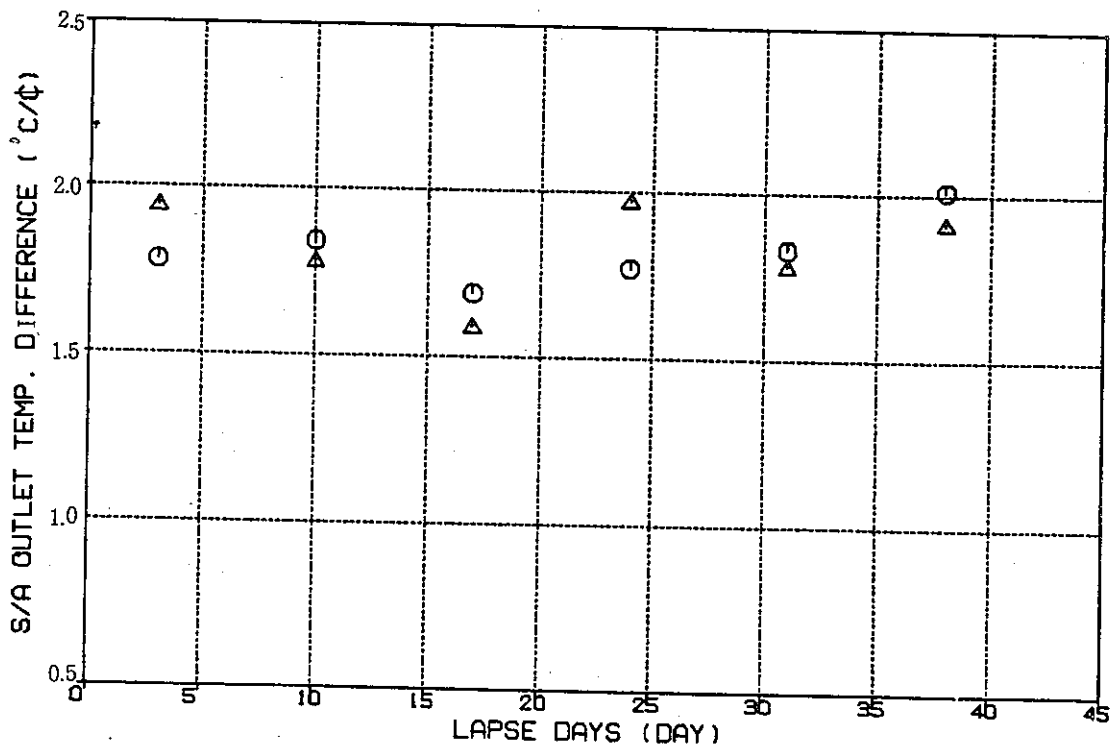


Fig. 5.7-(b) S/A Outlet Temp. Difference Change in Duty Cycle (MK-II 7th Cycle)

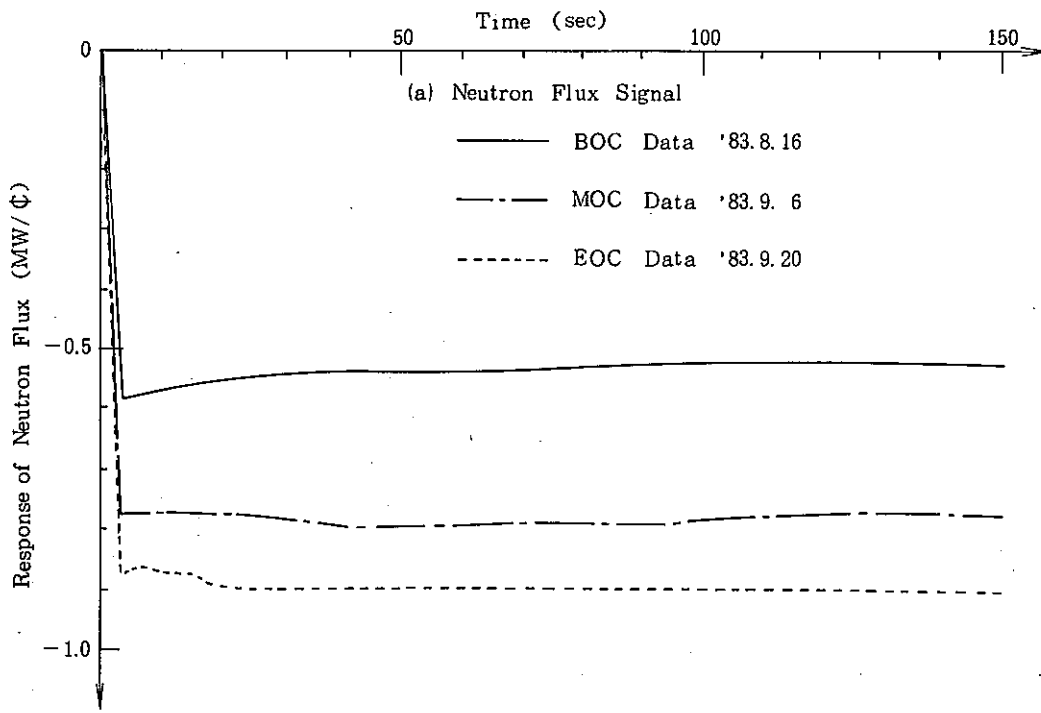


Fig.5.8 Change of Step Response in MK - II 1st Cycle

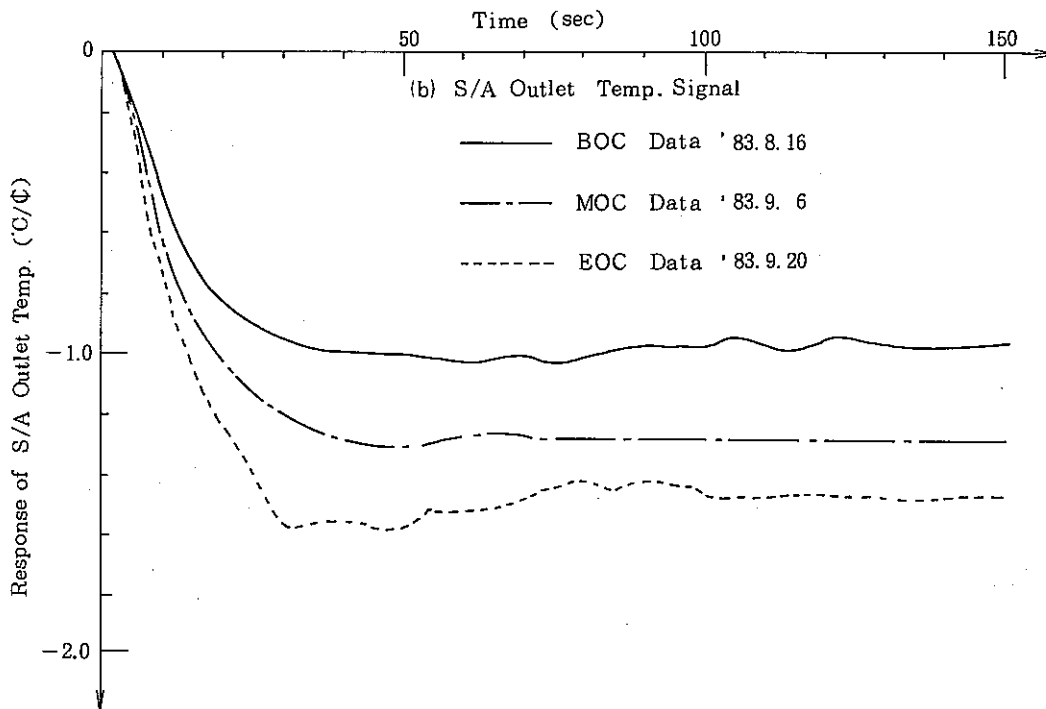


Fig. 5.8 Change of Step Response in MK - II 1st Cycle

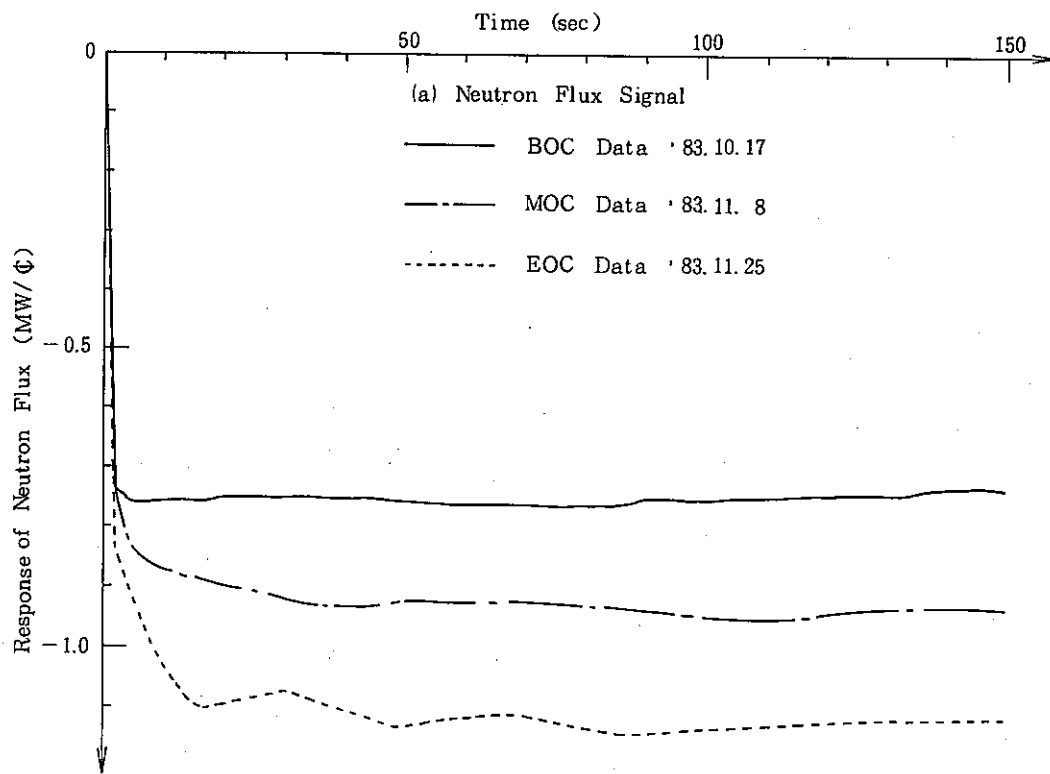


Fig. 5.9 Change of Step Response in MK-II 2nd Cycle

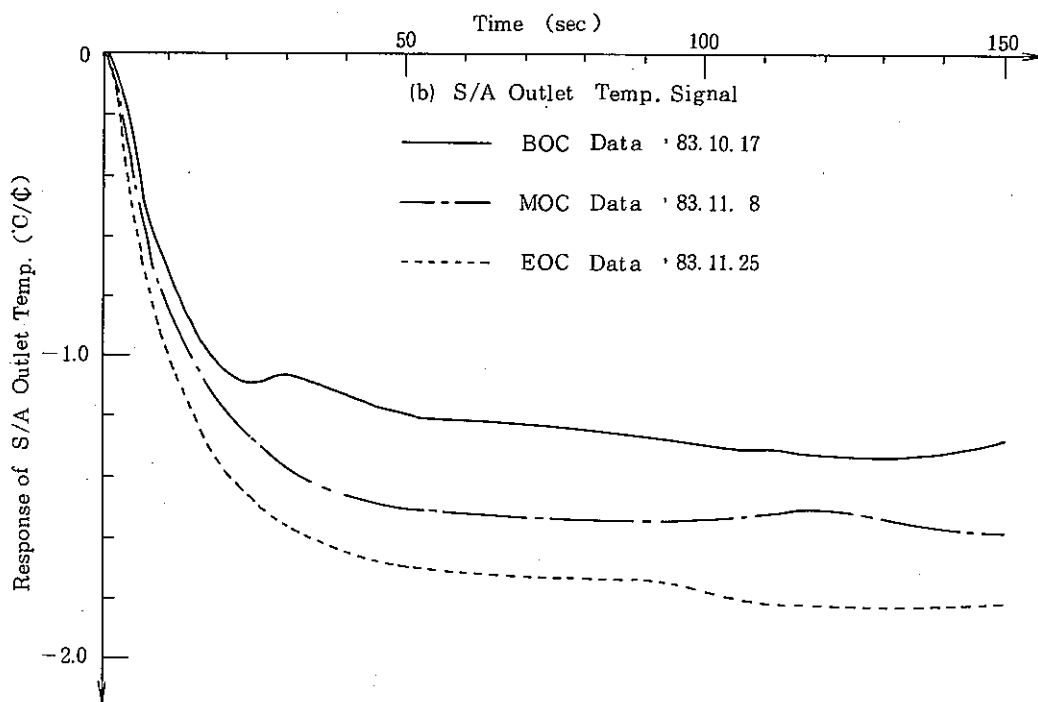


Fig. 5.9 Change of Step Response in MK-II 2nd Cycle

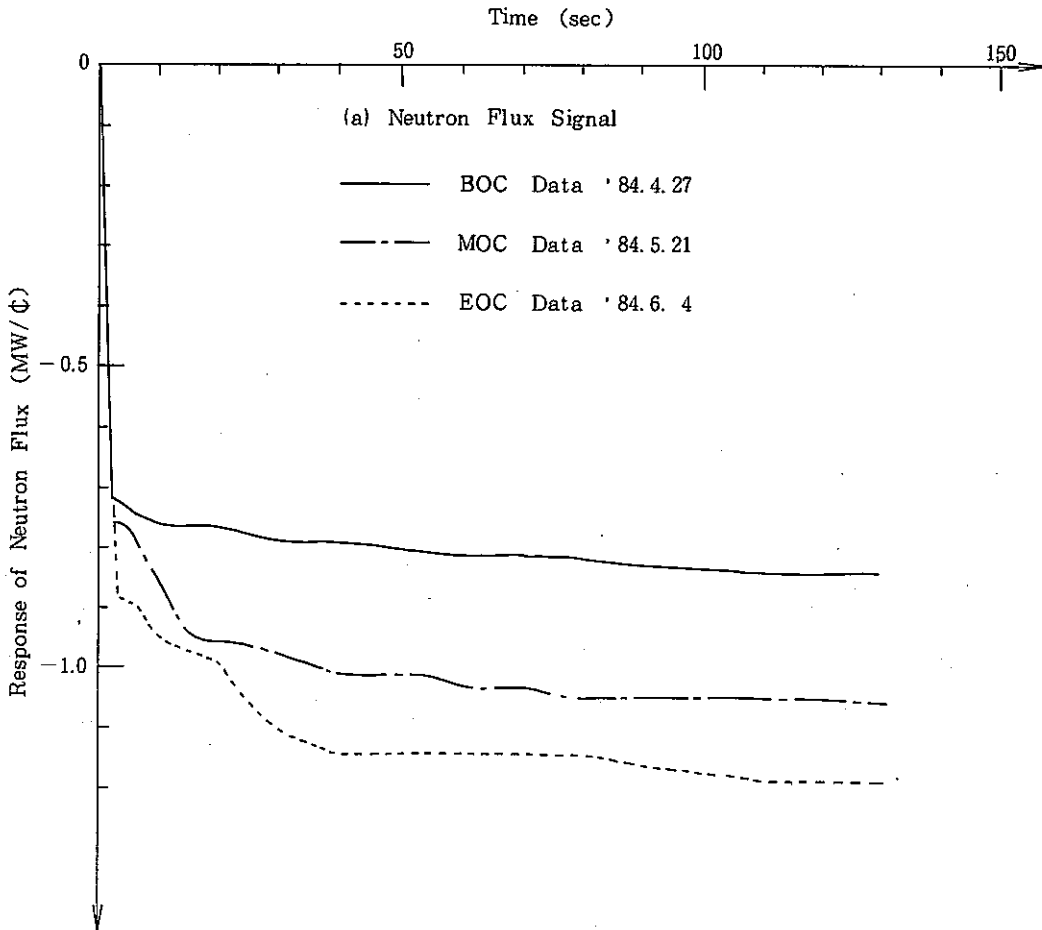


Fig. 5.10 Change of Step Response in MK - II 3rd Cycle

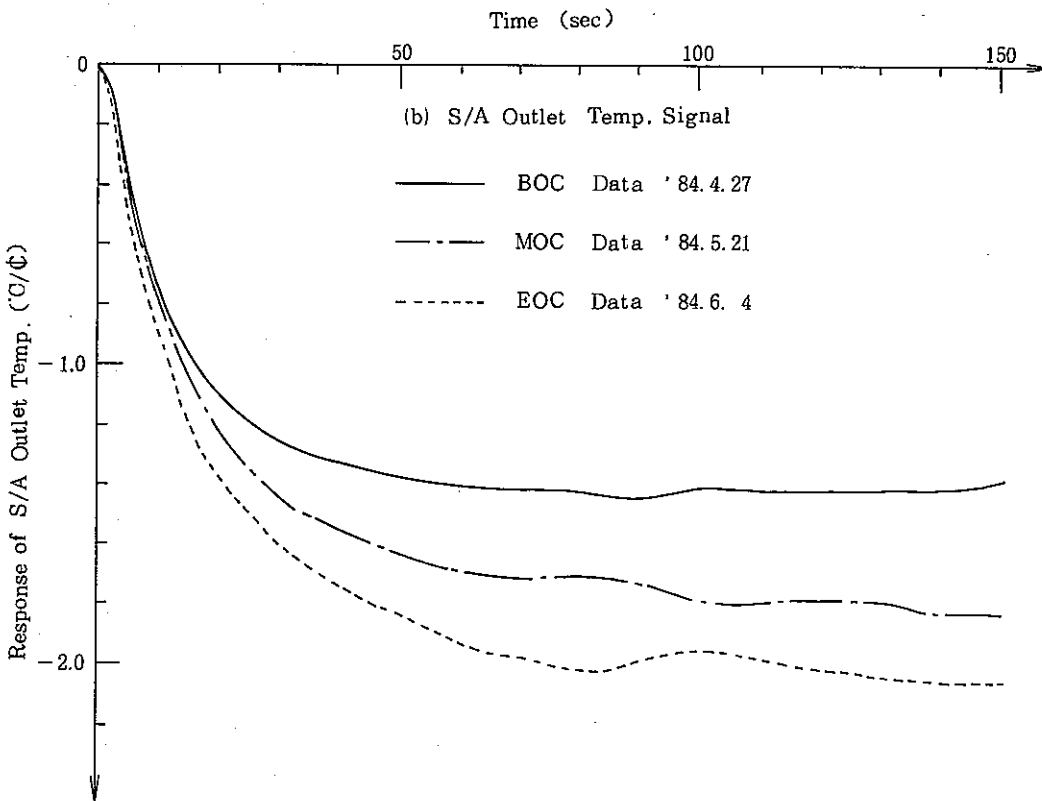


Fig. 5.10 Change of Step Response in MK - II 3rd Cycle

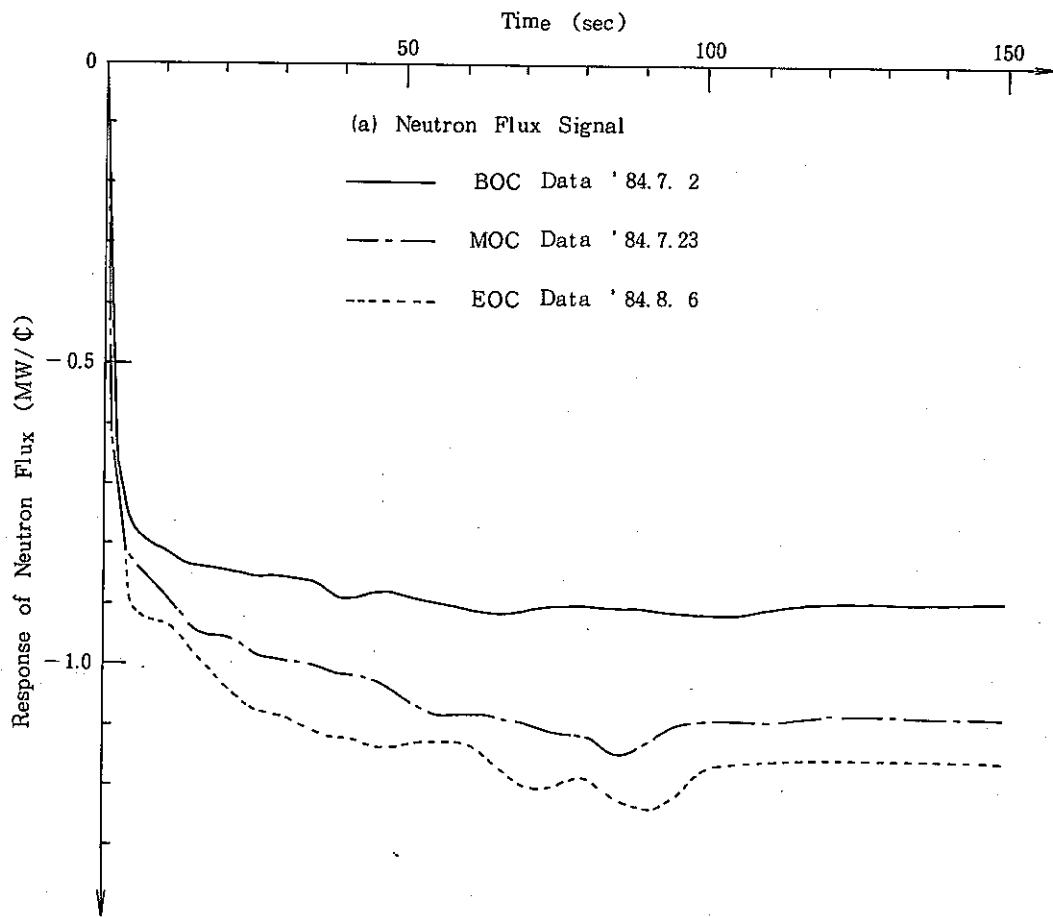


Fig. 5.11 Change of Step Response in MK-II 4th Cycle

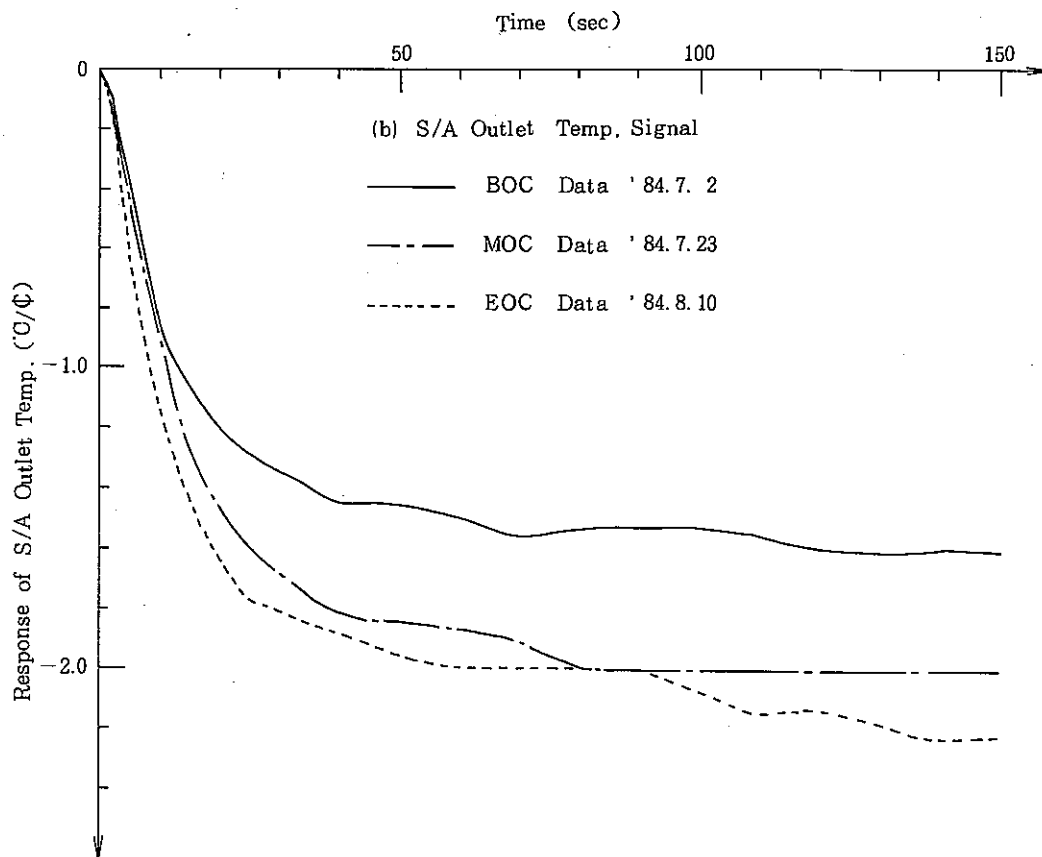


Fig. 5.11 Change of Step Response in MK-II 4th Cycle

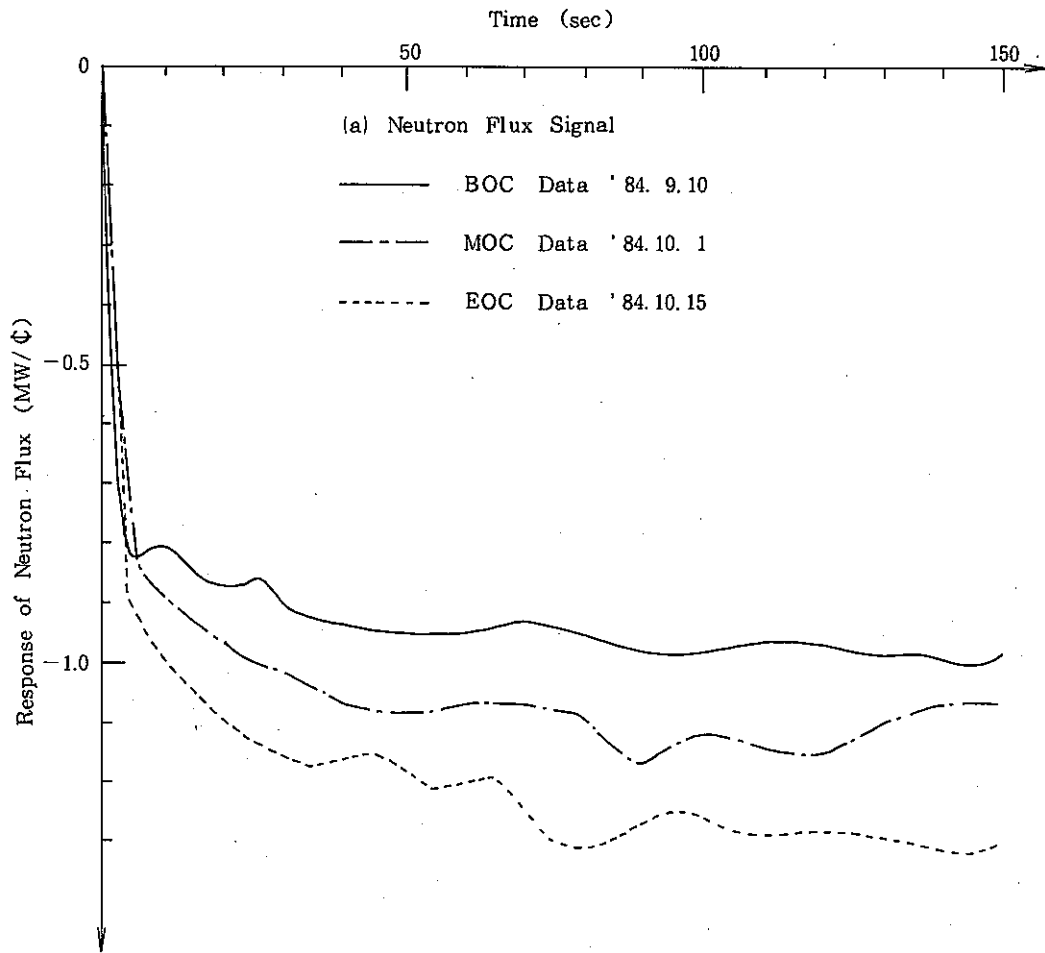


Fig. 5.12 Change of Step Response in MK-II 5th Cycle

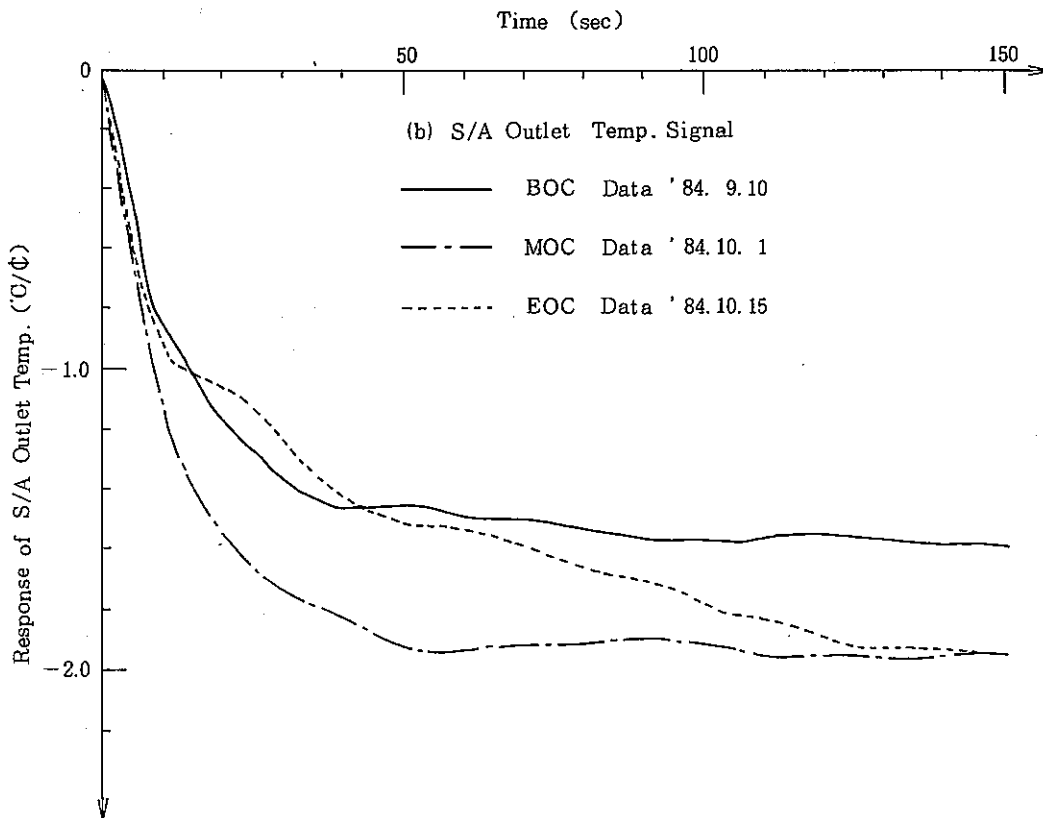


Fig. 5.12 Change of Step Response in MK-II 5th Cycle

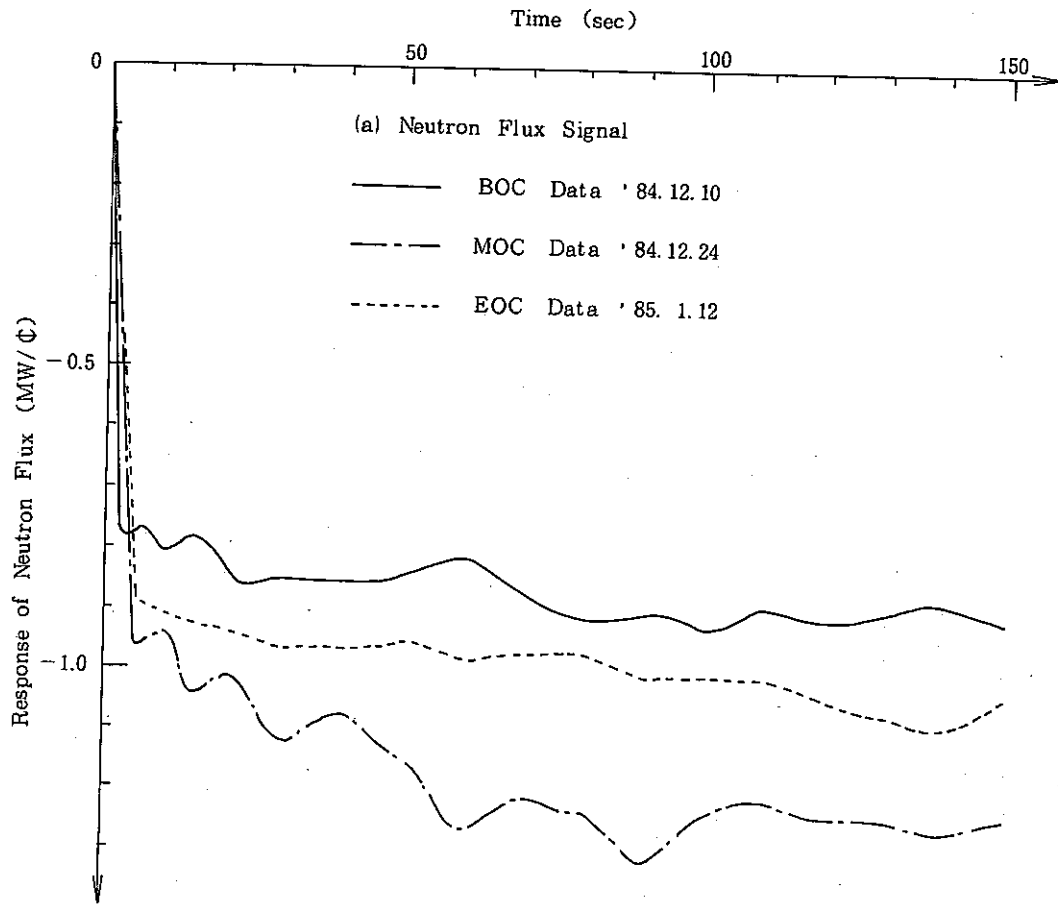


Fig. 5.13 Change of Step Response in MK-II 6th Cycle

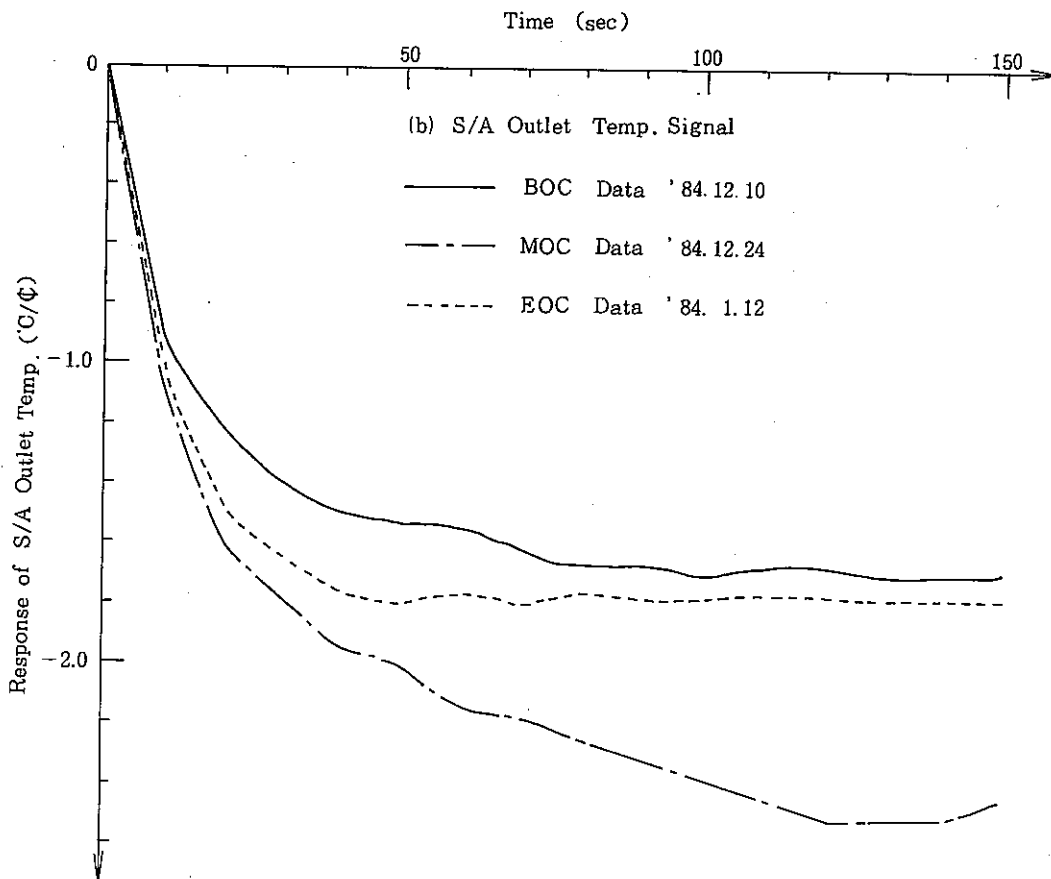


Fig. 5.13 Change of Step Response in MK-II 6th Cycle

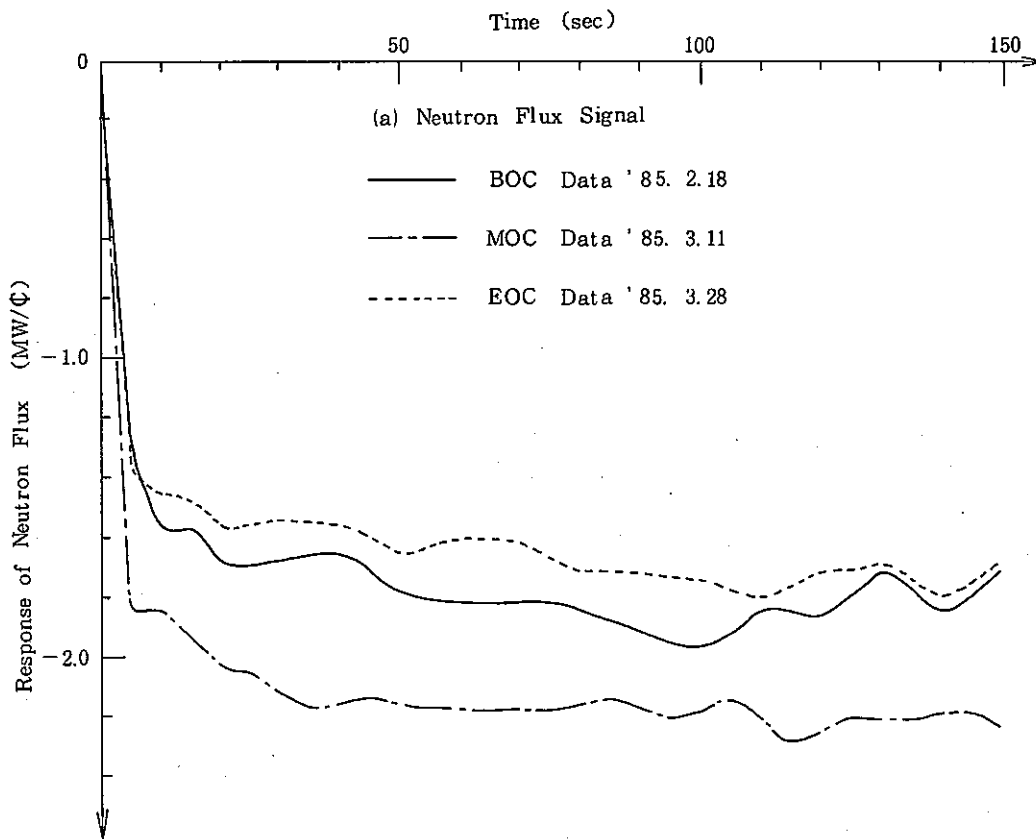


Fig. 5.14 Change of Step Response in MK-II 7th Cycle

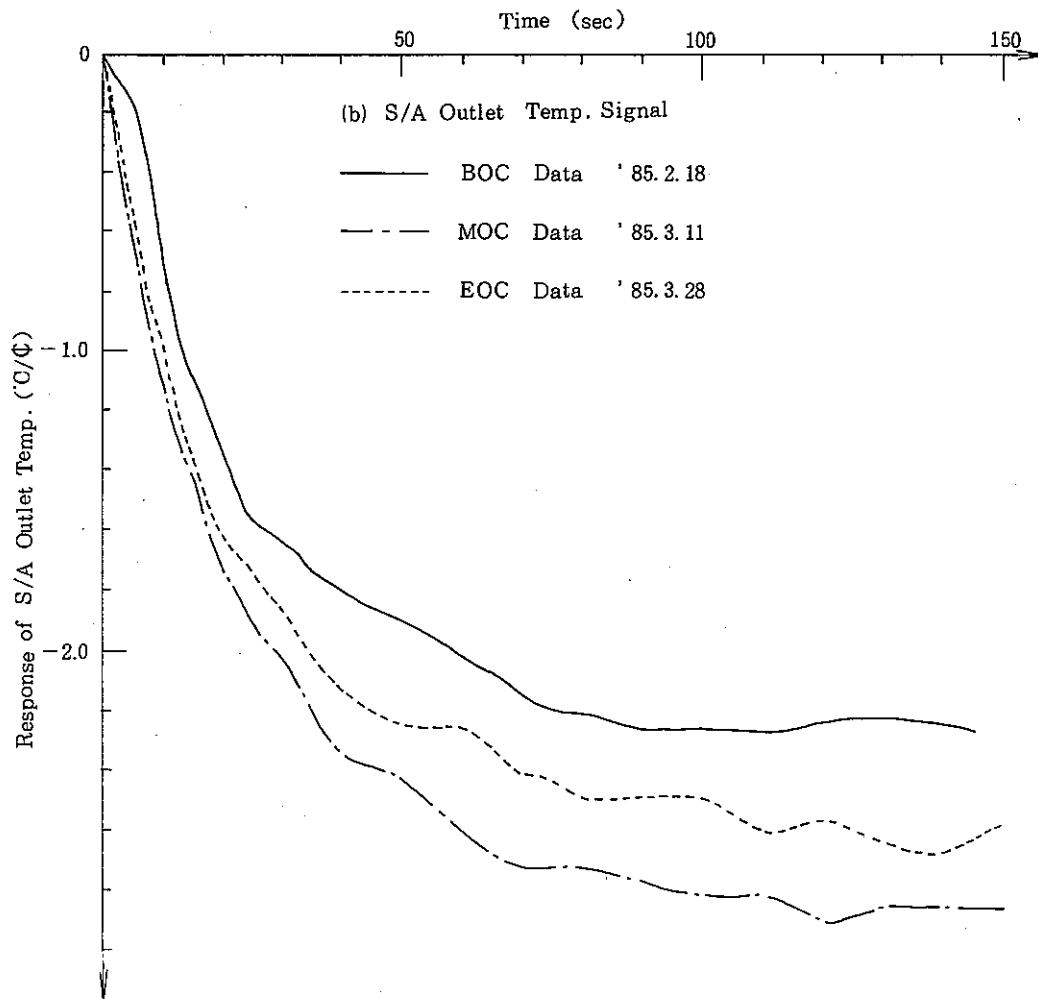
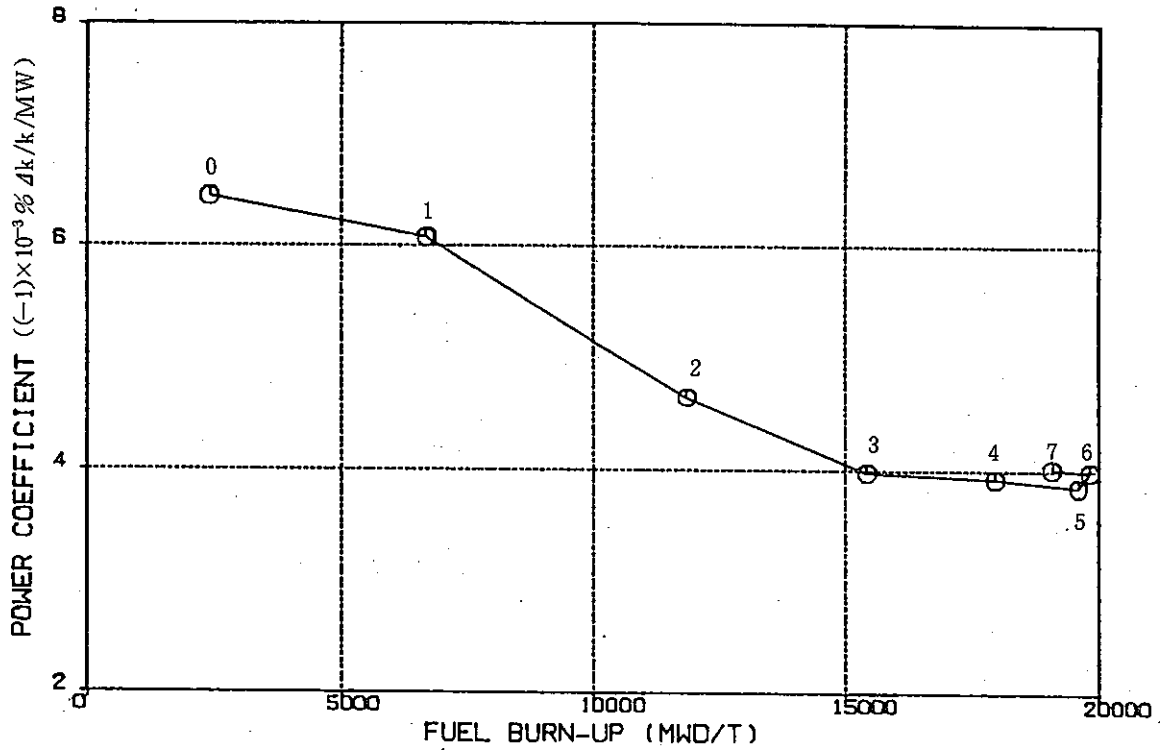
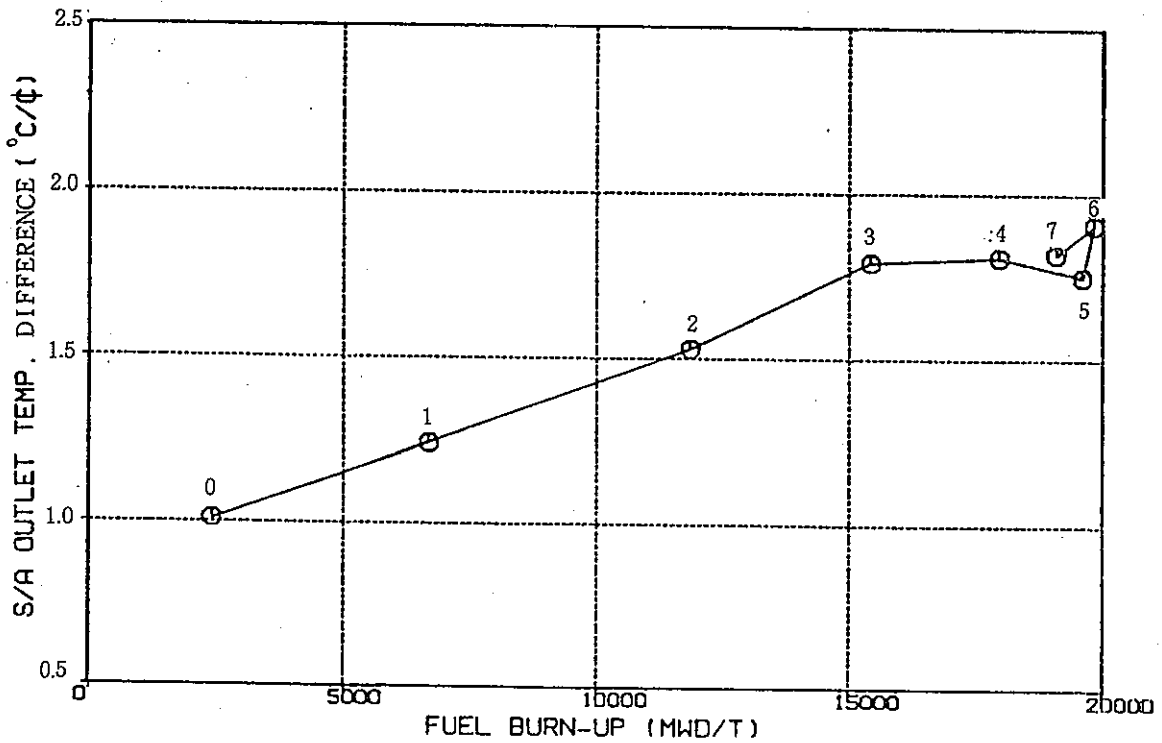


Fig. 5.14 Change of Step Response in MK-II 7th Cycle



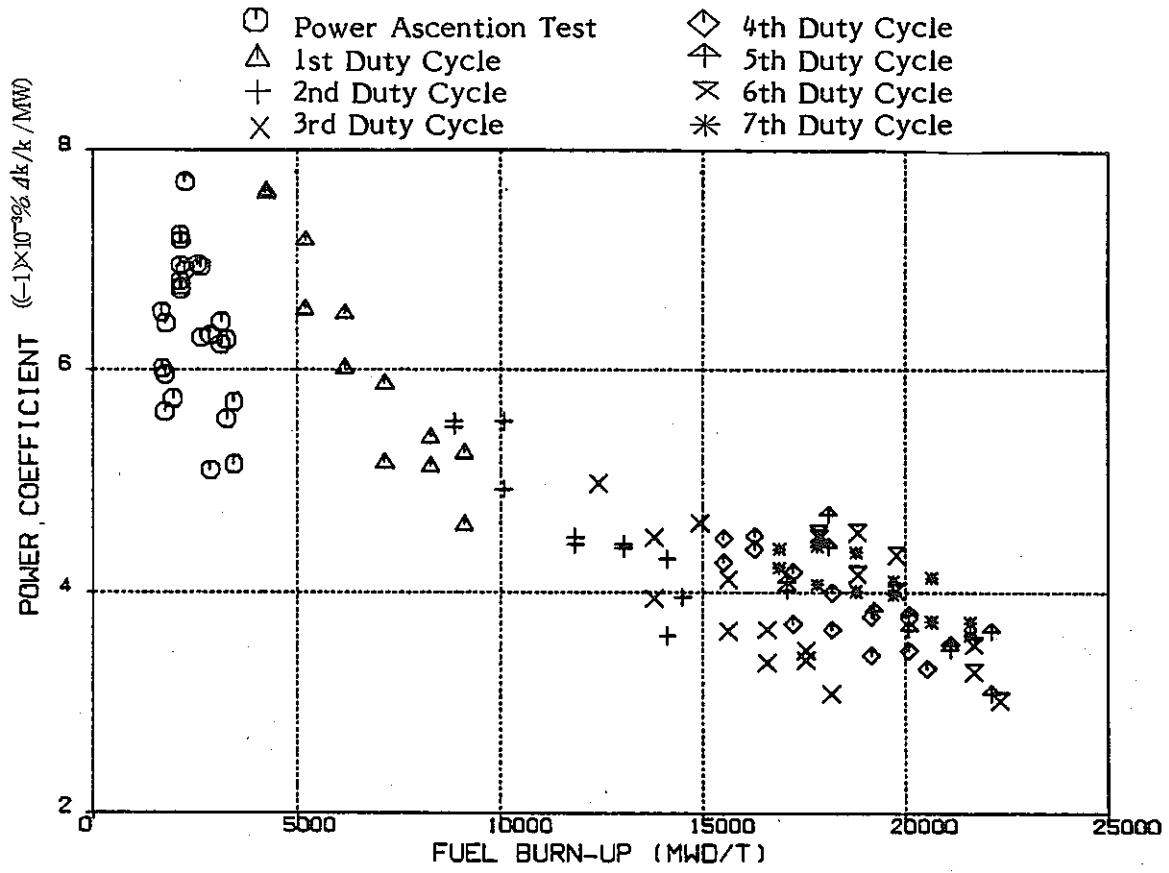


(a) CYCLIC CHANGE OF POWER COEFFICIENT

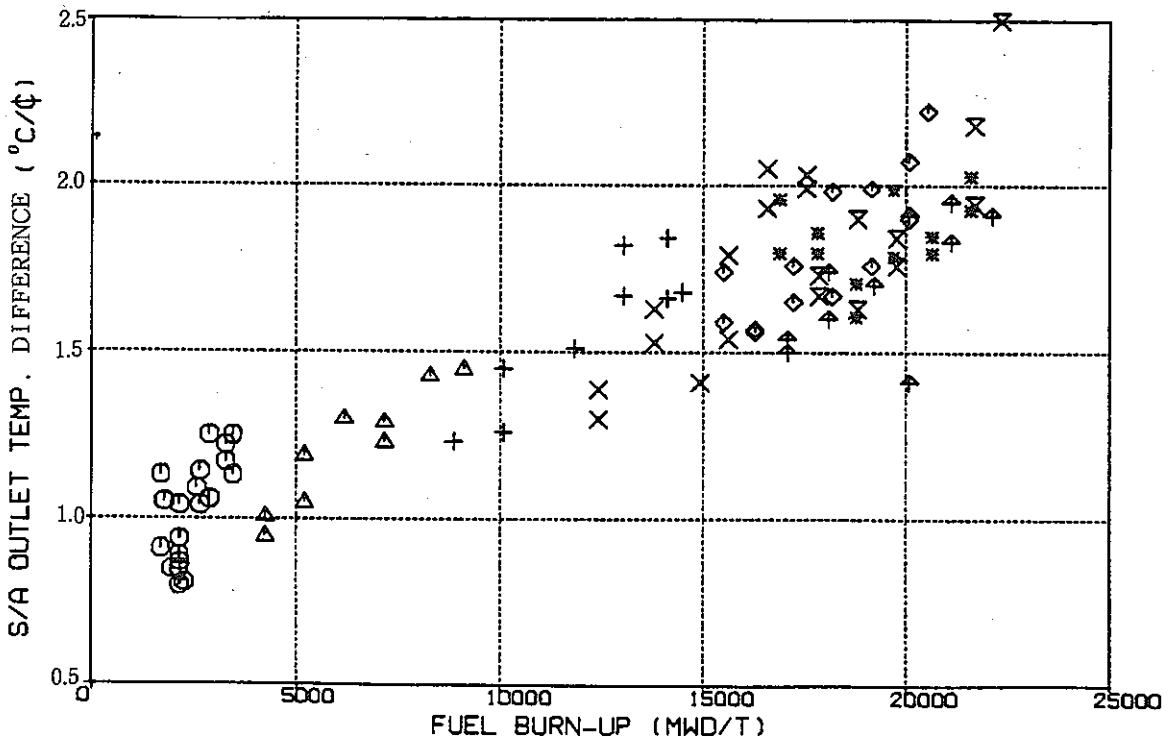


(b) CYCLIC CHANGE OF S/A OUTLET TEMP. DIFFERENCE

Fig. 5.15 Change of Feedback Reactivity Characteristics through Rated Cycle Operation  
(subscript ; Cycle No.)



(a) CHANGE OF POWER COEFFICIENT



(b) CHANGE OF S/A OUTLET TEMP. DIFFERENCE

Fig 5.16 Relation between Fuel Burn-up and Feedback Reactivity Characteristics

## 6. 考 察

### 6.1 反応度フィードバック 特性変化の発生原因の検討

前章で示した反応度フィードバック特性変化の発生原因を推定するために、種々の燃焼度における中性子束ステップ応答形状を比較し、その差異を炉心動特性解析コード「SPIDER」でパラメータスタディを行なうことによりシミュレートすることを試みた。

#### 6.1.1 燃焼の進行に伴う中性子束ステップ応答形状の変化

Fig. 6.1に燃焼の進行に伴う中性子束ステップ応答形状の変化を示す。(2100～19150 MWD/T) 前章で述べたように、燃焼の進行に伴って、制御棒操作後約150秒時点での中性子束変化量が徐々に増大する傾向が明瞭に現れている。形状における最も大きな差異は、制御棒操作終了時点(2～3秒時点)の直後に見られる。すなわち、燃焼度の最も小さい時点(2100 MWD/T)では、制御棒操作終了時点まで直線的に減少した後、急激に増加し、その後に安定状態に到達する。この制御棒操作終了後に中性子束が急増する傾向は、燃焼の進行に伴って目立たなくなり、10070 MWD/Tにおいては、全く見られなくなる。さらに燃焼度が増加すると、制御棒操作終了後に徐々に減少する傾向が顕著になる。最も燃焼の進行した時点(19150 MWD/T)では、制御棒操作終了時点での変化量に対して約50%だけさらに中性子束が減少するような形状となった。

#### 6.1.2 炉心動特性パラメータと出力係数の関係

Table 6.1に、「常陽」MK-II炉心の定格出力におけるフィードバック反応度の構成因子を示す。燃料部で発生するフィードバック反応度(燃料軸方向膨張反応度とドップラー効果による反応度との和)が全体の86%を占めており、残りの14%は冷却材・ラップ管膨張ならびに被覆管膨張によるものである。これらの評価はすべて設計計算(文献〔5〕)によるものであるが、MK-II性能試験において実測された出力係数、等温係数が設計値と良い一致を示すことから、燃料初期のフィードバック反応度の分担率を表わした値とみなせると判断した。

次に、燃焼の進行に伴って発生する反応度フィードバック特性の変化の原因を検討する。

まず、被覆管膨張反応度については、その値が小さいことから無視した。冷却材・ラップ管膨張反応度については、燃焼初期(MK-II性能試験期間の出力上昇前'82.12.26)と12000 MWD/T時点(MK-II定格第3サイクル前,'84.4.20～21)の二時点で測定された等温係数が、それぞれ $-4.1 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ 、 $-4.3 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ と大きく変化していないことから $\alpha_c$ の変化は小さいと判断した。ちなみに、等温係数に占める $\alpha_c$ の寄与はTable 6.2に示すように約40%である。(文献〔5〕より)

ドップラー効果については、UやPu等の核分裂性物質の組成比によって変化する可能性が考えられるが、本報告書で扱う燃焼範囲ではこの変化は小さいとみなし、無視した。燃料軸方向膨張反応度は出力係数に対する寄与が最も大きく、かつ、燃料ペレット塑性変形やクラック発生等によって顕著

に変化する可能性があるので、 $\alpha_F$  をパラメータとして「SPIDER」による計算を実施した。

また、この他、反応度フィードバック特性に影響を与えるパラメータとして、燃料ペレットと被覆管の間のギャップコンダクタンス（以下GCと書く）も考慮した。GCはペレットのスウェリングやFPガスのペレット外放出によってその値が変り得る量である。

Fig. 6.2, Fig. 6.3 にそれぞれ、 $\alpha_F$  及びGCと出力係数の関係を示す。 $\alpha_F$  は、設計値に対して（0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0）倍として計算を行なった結果、当然のことながら  $\alpha_F$  を小さくするほど出力係数は小さくなり、その変化範囲は  $-(2.4 \sim 6.0) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$  と実測値に現われた変化範囲をほぼカバーすることがわかる。（Fig. 5.16(a) 参照のこと）一方、GCを700～10000 (BTU/hr·ft<sup>2</sup>·°F)の範囲で変化させた場合は、GCの増加と共に出力係数の絶対値が減少する傾向を示すが、 $-(5.1 \sim 7.7) \times 10^{-3} \% \Delta k/k/MW$  とその変化は小さく、実測値の変化範囲を説明できないことがわかる。

### 6.1.3 炉心動特性パラメータと中性子束ステップ応答形状の関係

前出の  $\alpha_F$  及びGCの変化が、中性子束のステップ応答形状に与える影響を炉心動特性解析コード「SPIDER」により解析した。 $\alpha_F$ 、GCをパラメータとした解析結果をFig. 6.4 及びFig. 6.5 に示す。制御棒操作終了後150秒時点での中性子束変化量は、 $\alpha_F$  を変化させた場合には、 $-0.6 \sim -1.6$  MW/¢と大きな変化範囲を示し、Fig. 6.1 に示す実測値の変化範囲を十分カバーしている。また、 $\alpha_F$  の減少につれて、制御棒操作終了時点での中性子束変化量が增大することや、制御棒操作終了後に中性子束が増加する傾向が徐々に弱くなり、 $\alpha_F$  が小さくなるとこの傾向が見られなくなることも、燃焼の進行に伴って見られた実測データの変化傾向に類似している。Fig. 6.6 に中性子束ステップ応答形状について、燃焼初期と18800 MWD/Tでの実測データと計算値の比較を行なった結果を示す。燃焼初期（2100 MWD/T）の実測データは、 $\alpha_F$  に設計値を採用することで十分良く模擬出来、18800 MWD/T での実測データは、 $\alpha_F$  を設計値の $\frac{1}{4}$ 程度の値にすることによって模擬出来ることがわかる。（GC = 2000 BTU/hr·ft<sup>2</sup>·°Fとした）これら2時点の間のデータも、 $\alpha_F$  を（0.25～1.0）×設計値の範囲内で設定することにより良く模擬出来る。

一方、Fig. 6.5 からわかるように、GCを700～10000 (BTU/hr·ft<sup>2</sup>·°F)の範囲で変化させた場合の中性子束変化量は最大で0.8 MW/¢以下であり、燃焼度10000 MWD/T以上での実測値に見られるような大きな値（Fig. 6.1 参照）を模擬出来ない。

以上の検討結果より、反応度フィードバック特性の経時変化発生原因について下記の推論を得た。

- ① 燃焼の進行に伴って中性子束ステップ応答試験結果に発生する経時変化は、軸方向膨張反応度係数  $\alpha_F$  の減少によって良く説明出来る。一方、燃料-被覆管間ギャップコンダクタンスを変化させても上記特性変化は説明出来ない。
- ② 燃料部ドブプレー効果や、冷却材・ラップ管膨張によるフィードバック反応度の経時変化は、本報告書で取扱った燃焼範囲では十分小さいとみなせる。

- ③ 上記①, ②の検討結果より, 燃焼の進行に伴う反応度フィードバック特性変化は, 燃料の軸方向膨張によるフィードバック反応度の寄与が小さくなることによって発生したものと推定できる。

#### 6.1.4 今後の課題

前項までの検討により, 反応度フィードバック特性の経時変化の発生原因についての推論を得たが, 今後はPIE結果や, 燃料照射挙動解析コード等を活用することにより, 燃料軸方向膨張によるフィードバック反応度の寄与が燃焼の進行に伴って小さくなる具体的メカニズムを明らかにする必要がある。もう一つの観点としては, ステップ応答実測値と「SPIDER」解析値を更に厳密にフィッティングすることにより, 炉心動特性モデルを実測ベースで改良し, オンライン異常反応度監視システムの開発に役立てることが考えられる。この目的のために, 昭和60年末に始まるMK-II定格第8サイクルから装荷される計測線付燃料集合体 (INTA)の信号も本試験実施時に測定し, 炉心動特性モデル確立に役立てる予定である。

なお, 本検討においては, 燃料集合体の湾曲によるフィードバック反応度を取扱わなかった。その理由は, 中性子束信号ステップ応答形状に見られる経時変化 (Fig. 6.1 参照) は, 反応度投入直後に顕著に見られていることによる。反応度フィードバック特性の経時変化に対する湾曲反応度の寄与が多ければ, むしろ反応度投入後約数十秒経過時点でのステップ応答形状に変化が現われるものと考えられる。

Table 6.1 Components of Power Coefficient in JOYO Core (100 MW Power, Design Value)

Symbol	Component of Feedback Reactivity	Power Coefficient	
		( $10^{-3}\% \Delta k/k/\text{MW}$ )	Ratio (%)
$\alpha_F$	Fuel Stack Expansion	- 4.30	58.0
$\alpha_D$	Dopplar	- 2.07	27.9
$\alpha_E$	Clad Expansion	- 0.15	2.0
$\alpha_C$	Coolant and Wrapper Tube Expansion	- 0.89	12.0
$\alpha_P$	Total	- 7.41	100.0

Table 6.2 Components of Temperature Coefficient in JOYO Core (100 MW Power, Design Value)

Symbol	Component of Feedback Reactivity	Temperature Coefficient	
		( $10^{-3} \% \Delta k/k/^{\circ}C$ )	Ratio (%)
$\alpha_F$	Fuel Stack Expansion	- 0.58	14.7
$\alpha_D$	Dopplar	- 0.14	3.6
$\alpha_E$	Clad Expansion	- 0.15	3.8
$\alpha_C$	Coolant and Wrapper Tube Expansion	- 1.47	37.3
$\alpha_S$	Core Support Plate Expansion	- 1.60	40.6
$\alpha_T$	Total	- 3.94	100.0

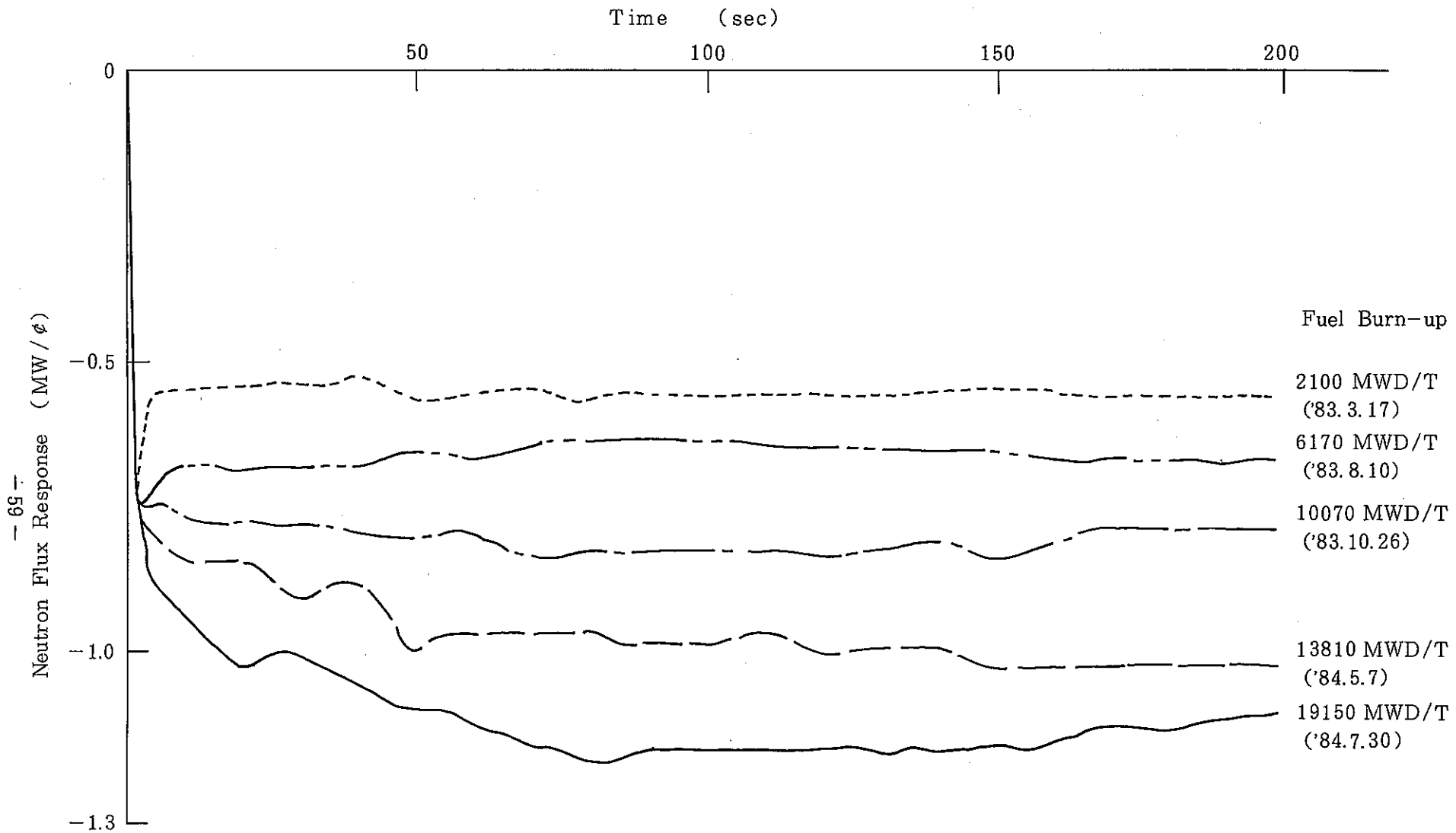


Fig. 6.1 Change of Neutron Flux Response according as Fuel Burn-up



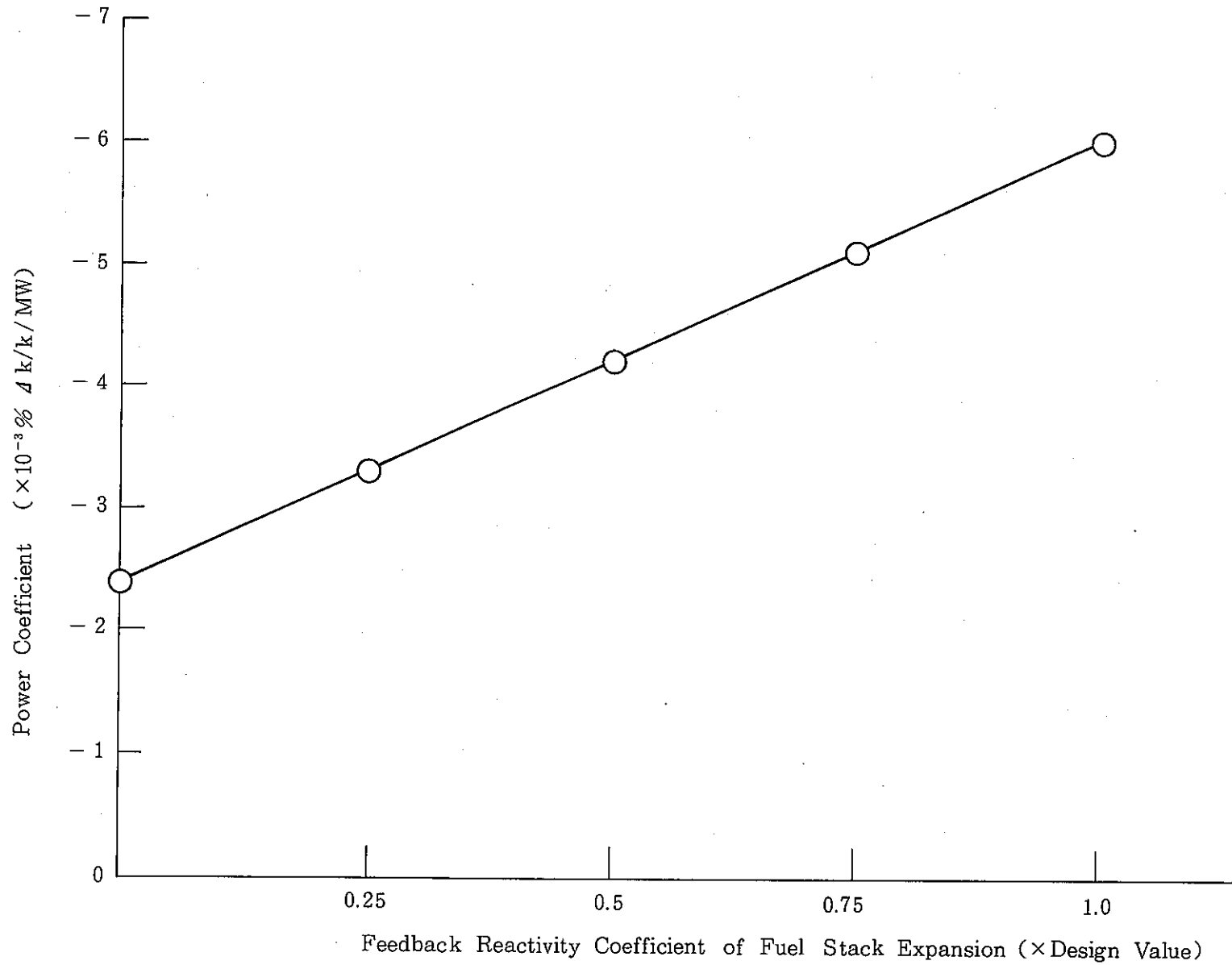


Fig. 6.2 Relation between Power Coefficient and Feedback Reactivity Coefficient of Fuel Stack Expansion

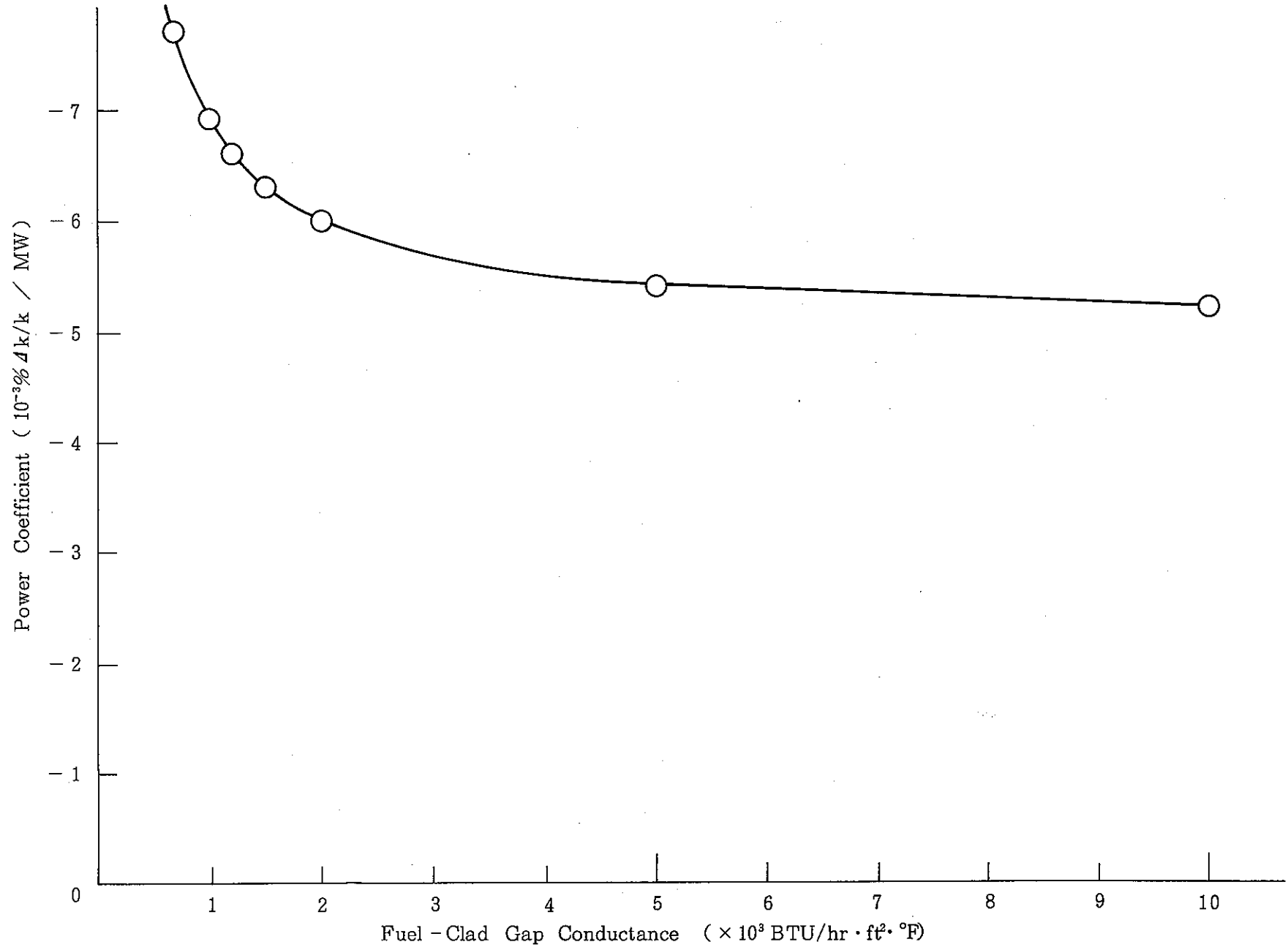
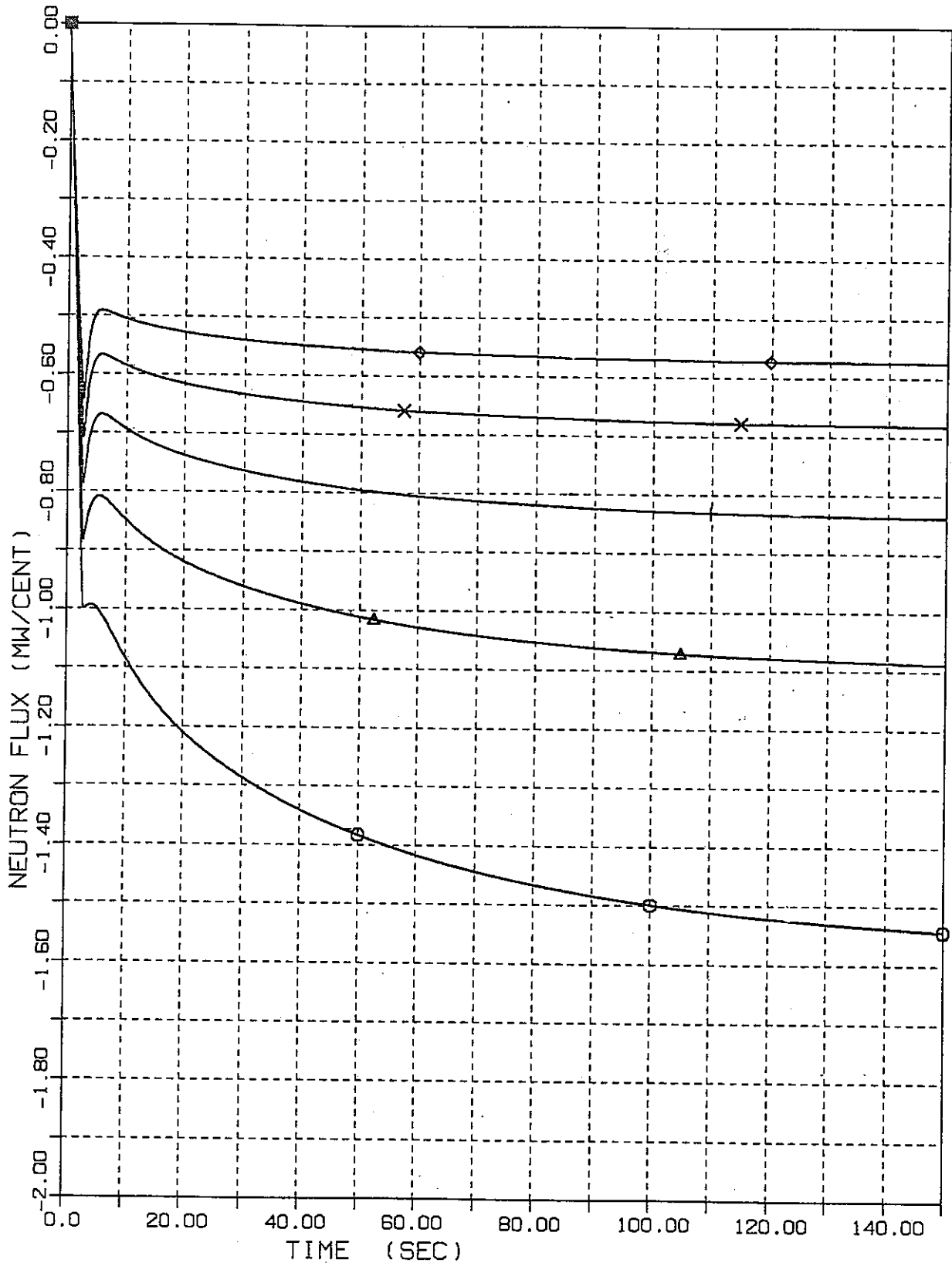


Fig. 6.3 Relation between Power Coefficient and Fuel - Clad Gap Conductance



- $\alpha_F = 0.0$
- △  $\alpha_F = \frac{1}{4} \times \text{D.V.}$
- +  $\alpha_F = \frac{1}{2} \times \text{D.V.}$

- ×  $\alpha_F = \frac{3}{4} \times \text{D.V.}$
- ◇  $\alpha_F = \text{D.V.}$

D.V.; Design Value

GC = 1000 BTU/hr·ft<sup>2</sup>·°F

Fig. 6.4 Step Response Simulation of Neutron Flux  
(100 MW Power, Parameter;  $\alpha_F$ )



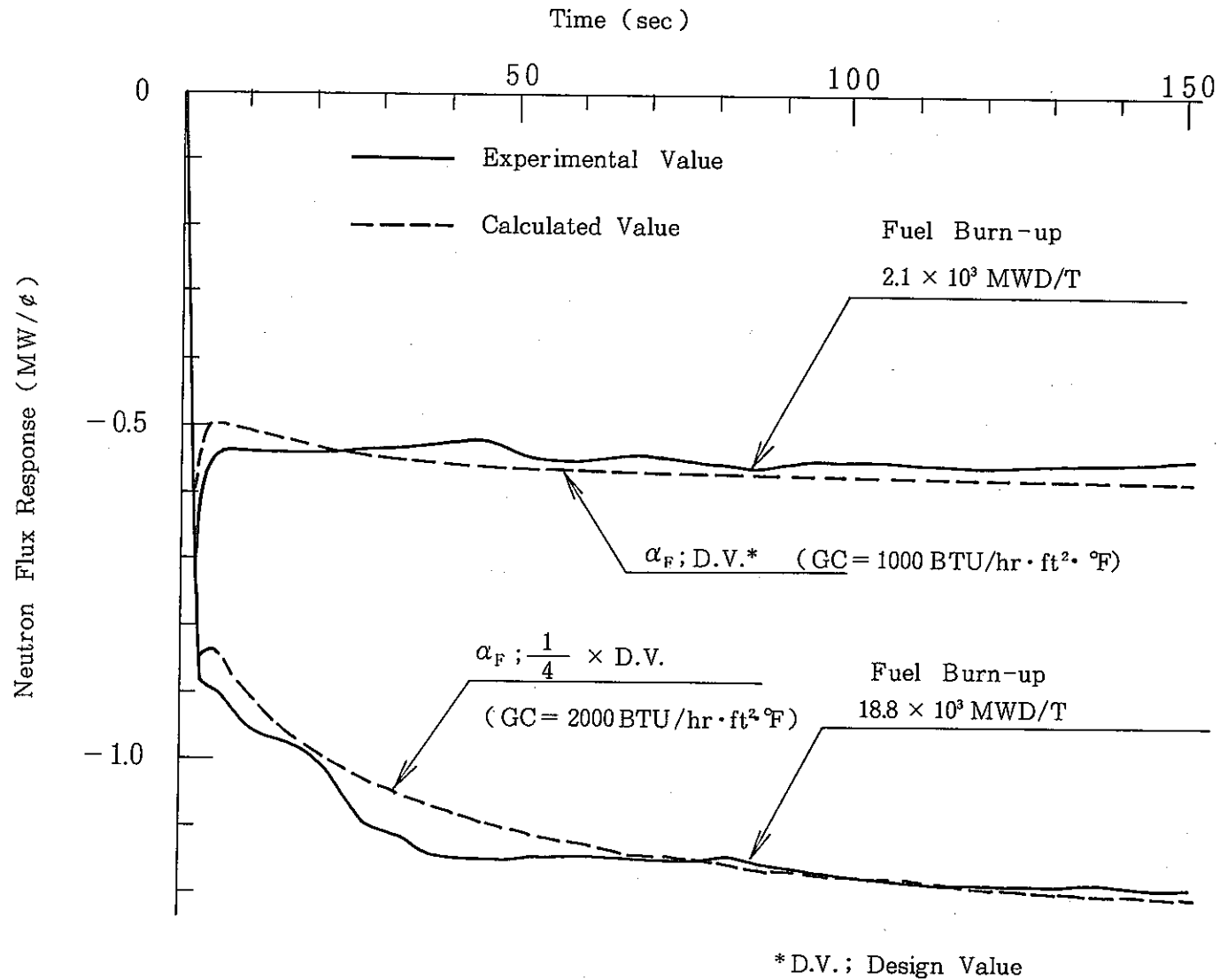


Fig. 6.6 Results of Neutron Flux Response Simulation

## 7. 結 言

MK-II 性能試験から定格第7サイクルまでの期間（1983.2月～1985年3月）で、制御棒操作によるステップ応答試験を実施し、測定結果をまとめた結果、下記の事項が判明した。

- (1) MK-II 性能試験の出力上昇時に25MW毎に本試験結果から得られる出力係数と通常測定手法による測定値との比較を実施し、両者が良く一致することを確認した。したがって本試験を定期的実施することにより、反応度フィードバック特性の経時変化を監視出来ることを確認した。
- (2) 定格出力において本試験を実施した場合の単位投入反応度に対する中性子束ならびにS/A出口温度の変化量が、定格サイクル期間内に徐々に増加する傾向が確認された。また、この現象は定格サイクル運転を繰返すことによっても進行することが確認されたが、第4サイクル以後はこの変化は目立たなくなった。
- (3) 本試験によって算出される出力係数ならびにS/A出口温度変化量と炉心平均燃焼度との関係を整理した結果、上記(2)の現象は、燃焼の進行によって発生したものであることが判明した。
- (4) 上記(2)、(3)の結果より、燃焼の進行に伴って反応度フィードバック特性が徐々に弱くなる現象が発生していることが明らかになった。
- (5) 炉心動特性解析コード「SPIDER」を用いたパラメータスタディ及びその他の検討により、上記(4)の現象は、燃料軸方向膨張によるフィードバック反応度の寄与が小さくなることによって発生するという推論を得た。
- (6) 今後、PIE結果の検討や燃料照射挙動解析コード等の活用により、上記(5)の具体的メカニズムを把握することを図る。

## 8. 参 考 文 献

- [1] 石川 他, “高速実験炉「常陽」性能試験報告書 PT-11 熱出力校正”  
PNC SN941 79-179 1979年10月
- [2] FACOM OS IV/F4 SLCS IV 使用手引書 (連続形シミュレーション言語)  
富士通 64AR-0140-1
- [3] FACOM OSV SLCS VI 解説書 (言語編)  
連続型シミュレーション言語  
富士通 70AR-0131-1
- [4] 中本 他, “熱電対応答特性試験 (II) 「常陽」および「もんじゅ」燃料集合体出口温度計 (ウェル型熱電対) の時定数測定と解析評価”  
PNC N941 82-168 1982年9月
- [5] 田中 他, “「常陽」照射用炉心初期サイクルに於ける核熱評価”  
三菱原子力工業 (株) PNC-SJ906 82-01 1982年3月

## 9. 謝 辞

本試験の実施にあたっては、実験炉部高速増殖炉第一課の運転員の方々に多大なる御協力をいただきました。ここに記し、厚く御礼申し上げます。



## 付 録

炉心動特性解析コード「SPIDER」について

## 付録 炉心動特性解析コード「SPIDER」について

本報告書の第6章で示したように、炉心動特性パラメータを変更した時の中性子束ステップ応答を評価する際に、炉心動特性解析コード「SPIDER」\*を使用した。本コードは、「常陽」MK-II炉心の動特性を下記のような簡易モデルで記述し、反応度、流量、温度等の外乱に対する応答を計算し、その結果をリスト出力及び図形出力する機能を備えたプログラムである。使用言語はSLCS-Mであり、その特長は第3章で示した通りである。以下に計算モデル及び使用した定数等を示す。

### 1. フローチャート

Fig. A. 1にSPIDERのフローチャートを示す。

### 2. 計算モデル

#### (1) 核計算

1点炉近似による動特性方程式を解く。遅発中性子は6群を考慮した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n(t)}{\partial t} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \dots\dots\dots \text{式①} \\ \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = -\frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \dots\dots\dots \text{式②} \end{array} \right.$$

初期条件 (t = 0) ;  $\frac{\partial n(t)}{\partial t}, \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = 0$

過渡状態 (t > 0) ;  $\frac{\partial n(t)}{\partial t} = 0$  (即発跳躍近似)\*\*

ただし、

- $\rho$  ; 反応度 ( $\Delta k/k$ )
- $n$  ; 中性子密度 (又は炉出力 (MW))
- $\beta$  ; 全遅発中性子割合
- $\beta_i$  ; 第i群遅発中性子割合
- $\lambda_i$  ; 第i群遅発中性子先行核崩壊定数 ( $\text{sec}^{-1}$ )
- $C_i$  ; 第i群遅発中性子先行核密度
- $\ell$  ; 即発中性子寿命(sec)

$\rho$  (反応度) を構成する因子は下記の5つの項である。

$$\rho = \rho_{\text{ROD}} + (\rho_F + \rho_E + \rho_C + \rho_D) \dots\dots\dots \text{式③}$$

ここで各項は次のように算出する。

$\rho_{\text{ROD}}$ ; 制御棒操作による投入反応度であり、制御棒駆動速度及び制御棒価値曲線から算出した反応度投入速度を用いてランプ関数とリミット関数を組み合わせて入力する。

#### (脚外注)

\* Simulation Program for Incore Dynamics Evaluation and Research の頭文字より命名

\*\* 即発跳躍近似は、原子炉動特性解析でしばしば用いられる。その適用範囲は、1点炉動特性方程式の数値解の場合、反応度を0.5 \$まで添加しても1%以内で妥当である。

$\rho_F, \rho_E, \rho_C$  ; それぞれ、燃料、被覆管、冷却材（ラップ管も含む）の膨張によるフィードバック反応度であり、下式により算出する。

$$\rho_j(t) = \alpha_j \cdot (T_j(t) - T_j(0)) \text{-----式④}$$

$j$  ; 領域名 (F ; 燃料, E ; 被覆管, C ; 冷却材)

$\alpha_j$  ; 領域  $j$  の膨張反応度係数 ( $\Delta k/k/^\circ C$ )

$T_j(t)$  ; 時刻  $t$  での領域  $j$  の温度 ( $^\circ C$ )

$t=0$  ; 制御棒操作が開始される時刻

$\rho_D$  ; 燃料部のドップラー効果によるフィードバック反応度であり、下式により算出する。

$$\rho_D = \alpha_D \cdot \ln((T_F(t) + 273.15) / (T_F(0) + 273.15)) \text{-----式⑤}$$

$\alpha_D$  ; ドップラー反応度係数 ( $\% \Delta k/k$ )

(2) 熱計算

燃料、被覆管、冷却材相互間の熱収支を以下の3式で表わす。

燃料部

$$\pi \cdot R_F^2 \cdot H \cdot D_F \cdot C_F \cdot \frac{dT_F(t)}{dt} = \pi \cdot R_F^2 \cdot H \cdot \alpha_P \cdot P(t) - 2 \pi \cdot H \cdot K_{F \rightarrow E}^* (T_F(t) - T_E(t)) \text{-----式⑥}$$

被覆管部

$$\pi \cdot (R_E^2 - R_e^2) \cdot H \cdot D_E \cdot C_E \cdot \frac{dT_E(t)}{dT} = 2 \pi \cdot H \cdot K_{F \rightarrow E}^* (T_F(t) - T_E(t)) - 2 \pi \cdot H \cdot K_{E \rightarrow C}^* (T_E(t) - T_c(t)) \text{-----式⑦}$$

冷却材部

$$\pi \cdot (R_C^2 - R_E^2) \cdot H \cdot D_C \cdot C_C \cdot \frac{dT_C(t)}{dT} = 2 \pi \cdot H \cdot K_{E \rightarrow C}^* (T_E(t) - T_c(t)) - 2 \pi (R_C^2 - R_E^2) \cdot C_C \cdot G_C \cdot (T_c(t) - T_{in}(t)) \text{-----式⑧}$$

式⑥～⑧で使用した記号の意味は下記の通りである。

$D_j$  ; 領域  $j$  の密度

$H$  ; 燃料部軸方向長

$C_j$  ; 領域  $j$  の比熱

$T_{in}(t)$  ; 原子炉入口温度 (通常は  $370^\circ C$  一定とする。)

$R_F$  ; 燃料ペレット半径

$R_e, R_E$  ; 被覆管内外半径

$R_C$  ; 冷却材通路内径

$K_{F \rightarrow E}^*$  ; 燃料-被覆管間熱通過率

$K_{E \rightarrow C}^*$  ; 被覆管-冷却材間熱通過率

ここで、熱通過率  $K_{F \rightarrow E}^*, K_{E \rightarrow C}^*$  は以下のように算出する。

$$K_{F \rightarrow E}^* = (RES_F + RES_{He} + RES_e)^{-1} \text{-----式⑨}$$

$$RES_F = (4 \lambda_F)^{-1} \text{-----式⑩}$$

$$RES_{He} = (R_F \cdot h_{He})^{-1} \text{-----式⑪}$$

$$RES_e = \frac{\ln \left( \frac{R_E + R_e}{2R_e} \right)}{\lambda_E} \dots\dots\dots \text{式⑫}$$

$$K_{E-c}^* = (RES_e + RES_c)^{-1} \dots\dots\dots \text{式⑬}$$

$$RES_E = \frac{\ln \left( \frac{2R_E}{R_E + R_e} \right)}{\lambda_E} \dots\dots\dots \text{式⑭}$$

$$RES_c = (R_e \cdot h_{Na})^{-1} \dots\dots\dots \text{式⑮}$$

RES ; 熱抵抗

添字 F ; 燃料

添字 He ; 燃料-被覆管 ギャップ部

添字 e ; 被覆管内側

添字 E ; 被覆管外側

添字 C ; 被覆管-冷却材間

$\lambda_F, \lambda_E$  ; 燃料, 被覆管熱伝導率

$h_{He}$  ; ギャップコンダクタンス

$h_{Na}$  ; 被覆管-冷却材熱伝達係数

( $Nu = 7.0 + 0.025 Pe^{0.8}$  より算出した。なお, 代表半径  $R_c$  はラッパ管内流路面積を燃料ピン)  
本数 (127 本) で割って算出した。)

使用した定数, 物性値等を Table A.1 ~ A.4 に示す。

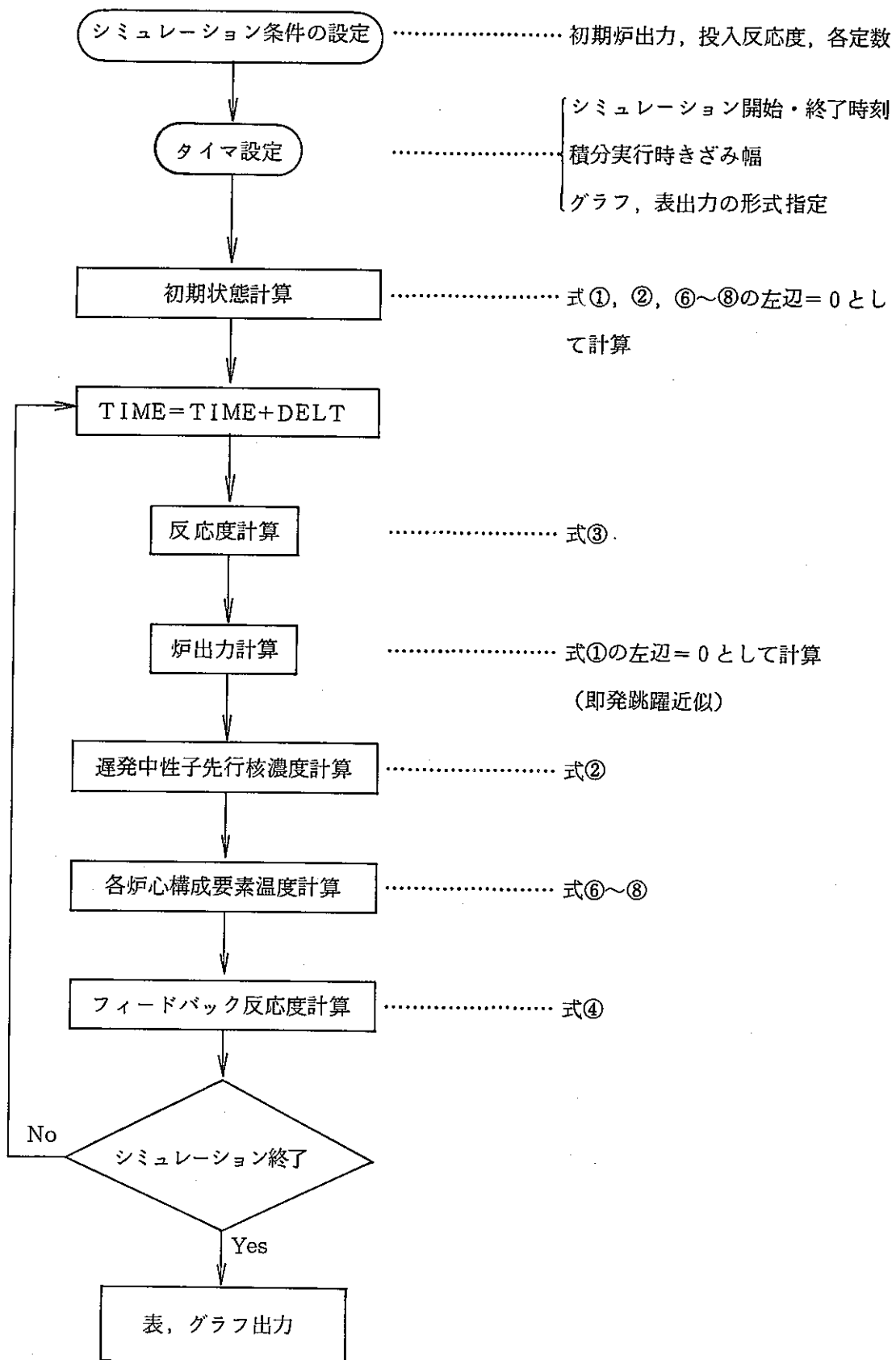


Fig.A.1 炉心動特性解析コード「SPIDER」の計算フロー

Table A.1 使用した定数及び物性値

記号	名 称	単 位	数 値	備 考
$\alpha_P$	燃料部発熱密度	kcal/m <sup>2</sup> ·sec·MW	$0.317 \times 10^{-4}$	燃料 64 体
$h_{He}$	燃料・被覆管ギャップ部熱伝達係数	kcal/m <sup>2</sup> ·sec·°C	1.356	1000Btu/hr·ft <sup>2</sup> ·°F
$h_{Na}$	被覆管・冷却材間熱伝達係数	"	88.83	
$\lambda_F$	燃料ペレット熱伝導率	kcal/m·sec·°C	出力依存	Table A. 2
$\lambda_E$	被 覆 管 "	"	$4.52 \times 10^{-3}$	440 °C
$D_F$	燃料ペレット 密度	kg/m <sup>3</sup>	$1.03 \times 10^{-4}$	93 % T·D
$D_E$	被 覆 管 "	"	$7.73 \times 10^{-3}$	440 °C
$D_C$	冷 却 材 "	"	$8.56 \times 10^{-2}$	400 °C
$C_F$	燃料ペレット 比熱	kcal/kg·°C	出力依存	Table A. 2
$C_E$	被 覆 管 "	"	0.137	
$C_C$	冷 却 材 "	"	0.316	400 °C
$R_F$	燃料ペレット 半径	m	$2.315 \times 10^{-3}$	
$R_E$	被 覆 管 外径	"	$2.75 \times 10^{-3}$	
$R_e$	" 内径	"	$2.40 \times 10^{-3}$	
$R_C$	冷却材流路径	"	$3.45 \times 10^{-3}$	
H	燃料部軸方向長	"	0.55	
$G_C$	冷却材質量流量	kg/m <sup>2</sup> ·sec	5431.9	
$\alpha_F$	燃料ペレット軸方向膨張反応度係数	$\Delta k/k/^\circ C$	出力依存	Table A. 2
$\alpha_D$	" ドップラー "	Tdk/dT	$-27.0 \times 10^{-4}$	370 ~ 1200 °C
$\alpha_E$	被覆管膨張反応度係数	$\Delta k/k/^\circ C$	出力依存	Table A. 2
$\alpha_C$	冷却材 "	"	"	Table A. 2

Table A.2 炉出力依存性を考慮した物性値

記号	炉出力(MW) 単位	25	50	75	100
		$\alpha_F$	$\Delta k/k/^\circ C$	$-4.77 \times 10^{-6}$	$-4.77 \times 10^{-6}$
$\alpha_E$	$\Delta k/k/^\circ C$	$-1.43 \times 10^{-6}$	$-1.43 \times 10^{-6}$	$-1.44 \times 10^{-6}$	$-1.45 \times 10^{-6}$
$\alpha_C^{*1}$	$\Delta k/k/^\circ C$	$-14.56 \times 10^{-6}$	$-14.56 \times 10^{-6}$	$-14.63 \times 10^{-6}$	$-14.71 \times 10^{-6}$
$\lambda_F$	kcal/m·sec·°C	$7.64 \times 10^{-4}$	$6.47 \times 10^{-4}$	$5.80 \times 10^{-4}$	$5.43 \times 10^{-4}$
$C_F$	kcal/kg·°C	$7.52 \times 10^{-2}$	$7.75 \times 10^{-2}$	$7.92 \times 10^{-2}$	$8.06 \times 10^{-2}$

\* 1  $\alpha_C$  にはラッパ管膨張反応度係数も含む

Table A.3  $\lambda_F, C_F$  算出に使用した燃料部温度及び使用式

炉出力 (MW)	燃料部温度 (°C)
25	555
50	740
75	930
100	1110

$$\lambda_F = 0.02389 \times \left\{ 0.01169 + 11.18 \times \frac{1}{T} + 7.214 \times 10^{-13} \times T^3 \right\}$$

$$\lambda_F ; \text{kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C} \quad T ; ^\circ\text{C}$$

$$C_F = 12.54 + 0.017 \times T - 1.17 \times 10^{-5} \times T^2 + 3.07 \times 10^{-9} \times T^3 \quad (298 \sim 300^\circ\text{K})$$

$$C_F ; \text{cal/mol}\cdot^\circ\text{K} \quad T ; \text{K}$$

計算に際しては  $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$  270.3 g/mol を使用した。

Table A.4 6群遅発中性子の崩壊定数  $\lambda$  及び発生割合  $\beta$ 

群番号(i)	崩壊定数 $\lambda_i$ (sec <sup>-1</sup> )	生成割合 $\beta_i$
1	0.0128	$1.19 \times 10^{-4}$
2	0.0314	$8.66 \times 10^{-4}$
3	0.128	$7.55 \times 10^{-4}$
4	0.332	$1.49 \times 10^{-3}$
5	1.38	$5.86 \times 10^{-4}$
6	3.75	$1.64 \times 10^{-4}$
計	—	$3.98 \times 10^{-3}$

(CR全引抜時)

文献〔5〕より引用