

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

制御棒特性 (NT-21, NT-22, NT-23)

1979年10月

動力炉・核燃料開発事業団

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

制御棒特性 (NT-21, NT-22, NT-23)

三田 敏男*** 池上 哲雄**** 網島 幹泰*
山口幸四郎*** 佐野 健一* 牧戸 正紀**
関口 耕之*

要 旨

高速実験炉「常陽」の初期炉心において、各制御棒が十分な反応度制御能力があることを確認するため、また以後の各種反応度測定的基础として制御棒特性試験を行った。

主な試験結果は以下の通りである。

- (1) 制御棒静止曲線を測定したが、ほぼ設計曲線と一致した。全制御棒価値に関しては、測定値が設計値より約10%大き目であった。
- (2) 安全棒に対するワンロード・スタック基準及び制御棒に対するワンロード・スタック基準を十分満足していることを確認した。
- (3) ロッドロップ法 (Inverse Kinetics 法) によりスクラム時の安全棒の落下時間とそれに伴う炉心挿入反応度曲線を測定した結果、スクラム時間は平均0.657秒であり、全安全棒に関して設計条件 (1秒以下) 満足していた。このうち、実際に反応度が挿入され始めてから全挿入されるまでの時間は約0.4秒であった。
- (4) 制御棒間の干渉効果を各種方法で測定した結果、測定した干渉係数は設計値と比較的よく一致した。

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)

* 大洗工学センター高速実験炉部技術課

** 現, 三菱電機

*** 現, 三菱重工

**** 現, 日立製作所

***** 現, 高速増殖炉開発本部実験炉計画

目 次

1. 緒 言 1

2. 試 験 目 的 2

3. 系統設備の概要 3

3.1 制 御 棒 3

3.2 制御棒駆動機構 3

3.3 原子炉出力制御設備 4

4. 試験の概要 10

4.1 試験の概要 10

4.2 試験の経過 11

5. 試験の方法 12

5.1 試験条件 12

5.2 制御棒校正 (NT-21) 12

5.3 炉停止余裕 (NT-22) 14

5.4 スクラム反応度 (NT-23) 14

6. 試験結果 19

6.1 制御棒校正 (NT-21) 19

6.2 炉停止余裕 (NT-22) 20

6.3 スクラム反応度 (NT-23) 21

6.4 誤差評価 22

7. 検 討 54

7.1 制御棒校正曲線について 54

7.2 検出器位置の影響について 55

7.3 干渉効果について 55

8. 結 言 57

9. 謝 辞 58

付 録

(I) Inverse Kinetics 法について 59

(II) ベリオド法による反応度計算プログラムについて 63

JOYO Start-Up Test Report

Control Rod Worth

*****, Tetsuo Ikegami,
 Toshio Sanda, Tetsuo Ikegami, ****
 Mikiyasu Tsunashima, Koushiro Yamaguchi, ***
 Kenichi Sano, Masanori Makido, **
 and Yoshiyuki Sekiguchi*

Abstract

For the initial core (70-fuel subassembly core), control rod worths for 6 rods were measured by means of critical methods (period and substitution methods). And rod worths of safety rods were measured with a rod drop method.

As consequences,

- (1) Obtained reactivity stroke curves for 6 control rods were in good agreement with design curve. The total worth of 6 control rods was 10% greater than design worth.
- (2) It was confirmed that one rod stuck margin is sufficient.
- (3) Scram time of safety rod and reactivity change on scram was observed with a rod drop method (an inverse kinetics method), and scram time of 0.66sec was obtained. Reactivity change was completed within 0.4sec, from beginning to the end.
- (4) Interference of rod worth due to adjacent other control rod pattern was observed and found to be in good agreement with design value.

* Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Mitsubishi Electric Ltd, at the present.

*** Mitsubishi Heavy Industry, do.

**** Hitachi Ltd, do.

***** FER Development Project, do.

1. 緒 言

本報告は、高速実験炉「常陽」の初期炉心の初期炉心において、各制御棒が十分な反応度制御能力があることを確認するためと、以後の各種反応度測定的基础として、制御棒特性試験を行った試験結果についての報告である。

本試験は、「常陽」が昭和52年4月24日臨界達成後、初期炉心(70本炉心)が構成されそれに基づいて5月23日から5月28日にかけて行った。

2. 試験目的

本試験の主目的は、以下の通りである。

- (1) 原子炉の運転・制御に必要な制御棒の校正曲線の校正曲線を求めること。
- (2) 安全棒・調整棒の反応度制御能力が十分であることを確認すること。
- (3) スクラム時の安全棒の落下時間とそれに伴う炉心挿入反応度曲線を測定して規定値を満足していることを確認すること。
- (4) 制御棒間の干渉効果を測定すること。

3. 系統設備の概要

3.1 制御棒

高速実験炉の制御棒は6本で構成され、その内訳は安全棒4本、調整棒2本である（設営場所を図3.1、図3.2に示す）。そして、次の機能を有する。

- (1) 調整棒は、起動時および運転時の出力レベルの変更、燃料の燃焼に伴う反応度変化および燃料集合体の熱湾曲等による反応度変化を制御する。
- (2) 安全棒は、全て運転中引抜かれた状態にあり、原子炉およびプラントの異常状態の検出信号によって急速かつ安全に原子炉を停止（スクラム）する。
- (3) いかかなる運転状態からでも原子炉を100℃で未臨界にできること。

安全棒と調整棒は、等量のB、C吸収棒を内蔵し、保護管の内厚および外径寸法が異なる以外は全く同一の構造を有している。

制御棒は、B¹⁰濃縮B₄CペレットをSUS316ステンレス鋼管で被覆した制御棒要素7本を円形断面を有するSUS316ステンレス鋼製保護管内に三角形格子状に配列して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。安全棒用冷却材は低圧ブレナムより、調整棒用冷却材は高圧ブレナムより導入する。

3.2 制御棒駆動機構

制御棒駆動機構には、安全棒駆動機構および調整棒駆動機構があり、安全棒駆動機構は、緊急時に安全棒を炉に急速挿入し原子炉を緊急停止させ、調整棒駆動機構は、原子炉通常運転時に調整棒を炉心へ挿入・引抜および保持を行うことにより原子炉出力を制御することを目的としている。

制御棒駆動機構は、小回転プラグ中に挿入される炉心上部機構中に組まれ、

- (1) 駆動部 (2) 上部案内管 (3) 延長管 (4) 位置検出器 (4) 下部案内管
- (5) アルゴンガス系設備 (6) 加速管 (7) スクラム時間検出装置（但し、(6)、(7)は安全棒駆動機構のみ）

などにより構成されている。（図3.3、図3.4、図3.5参照）

制御棒駆動機構は、炉心上部機構を貫通して6基配置される。その内訳は安全棒駆動機構4基、調整棒駆動機構2基である。

制御棒駆動機構は、電動機駆動により通常速度で制御棒の挿入・引抜動作を行い、安全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安全棒を解放し、スプリング力で急速落下させることにより行われる。

燃料交換時には、制御棒を炉心に挿けられている下部案内管内へ全挿入して切離し、延長管を引上げることにより回転プラグの回転操作を可能にする。

3.3 原子炉出力制御設備

原子炉出力制御設備は、(1)原子炉制御盤、(2)駆動電動機制御器、(3)ロードセル計装盤および(4)補助電圧盤より構成される。

原子炉制御盤には制御棒位置指示計、中性子束指示計および記録計、炉周期指示計および記録計などが取り付けられている。また、制御棒駆動機構および中性子検出器駆動装置を操作するための操作スイッチも取付けられる。制御棒は原子炉制御盤に取り付けの制御棒操作スイッチにより手動で制御される。

制御棒および制御棒駆動機構の設計主要目

- | | |
|-----------------|--|
| (1) 制御棒個数 | 6 |
| (2) 吸収材の種類 | { 安全棒 4
調整棒 2 |
| (3) 吸収材の有効長さ | B-10 濃縮 B ₁ C
約 700 mm |
| (4) 挿入時間および駆動速度 | 安全棒 1 sec 以下
スクラム時間
通常挿入引放速度
130 mm/min 以下 |
| (5) 駆動距離 | 安全棒 約 900 mm
調整棒 約 700 mm |
| (6) 反応度制御能力 | 安全棒 0.056 ΔK/K 以上
調整棒 0.028 ΔK/K 以上
0.00015 ΔK/K _{sec} 以下 |
| (7) ワンロードスタック基準 | 反応度付加率最大 |

- i) 最大の制御棒効果をもつ安全棒が1本挿入されなくとも、残りの安全棒を挿入することにより原子炉を停止し、体系の温度 250 °C において未臨界に保てること。
- ii) 最大の制御棒効果をもつ制御棒が1本挿入されなくとも、残りの制御棒を挿入することにより、体系の温度 100 °C において未臨界に保てること。

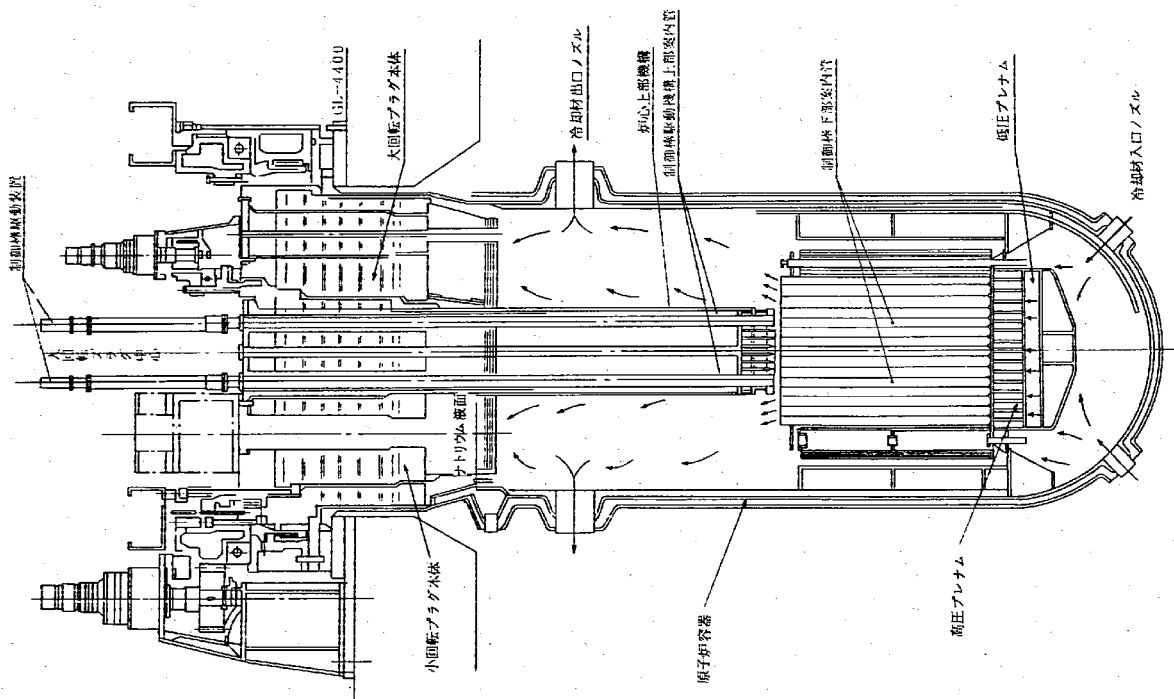


図 3.1 原子炉断面図

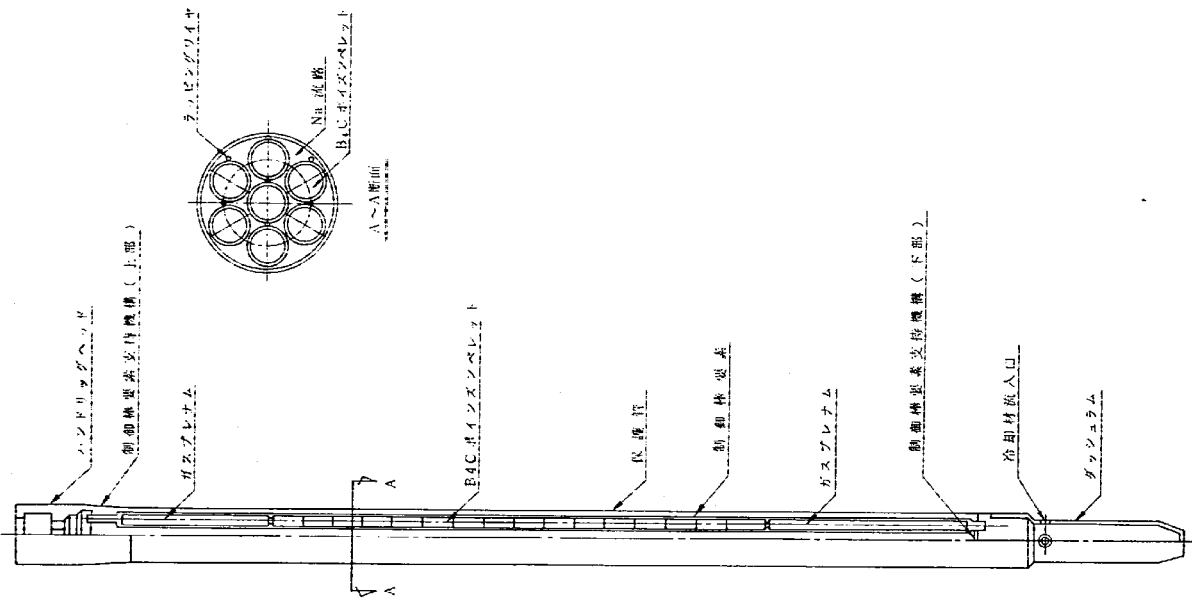


図 3.3 制御棒構造概図

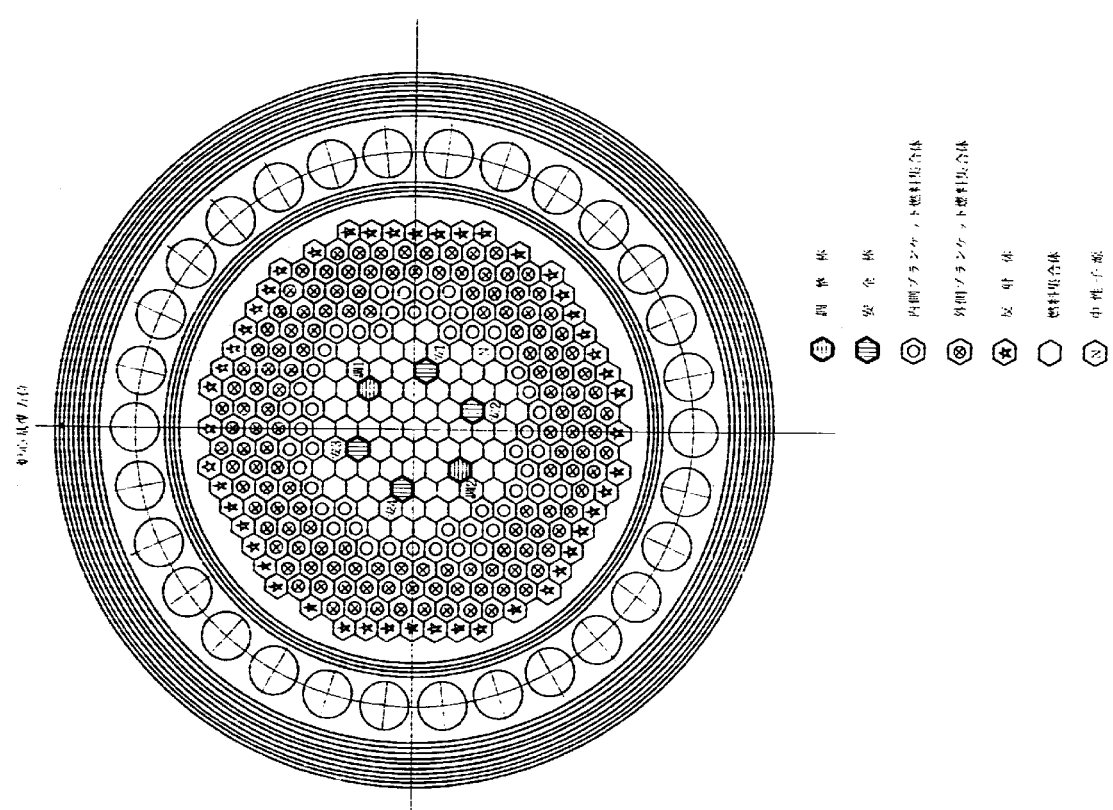


図 3.2 炉心部構成図

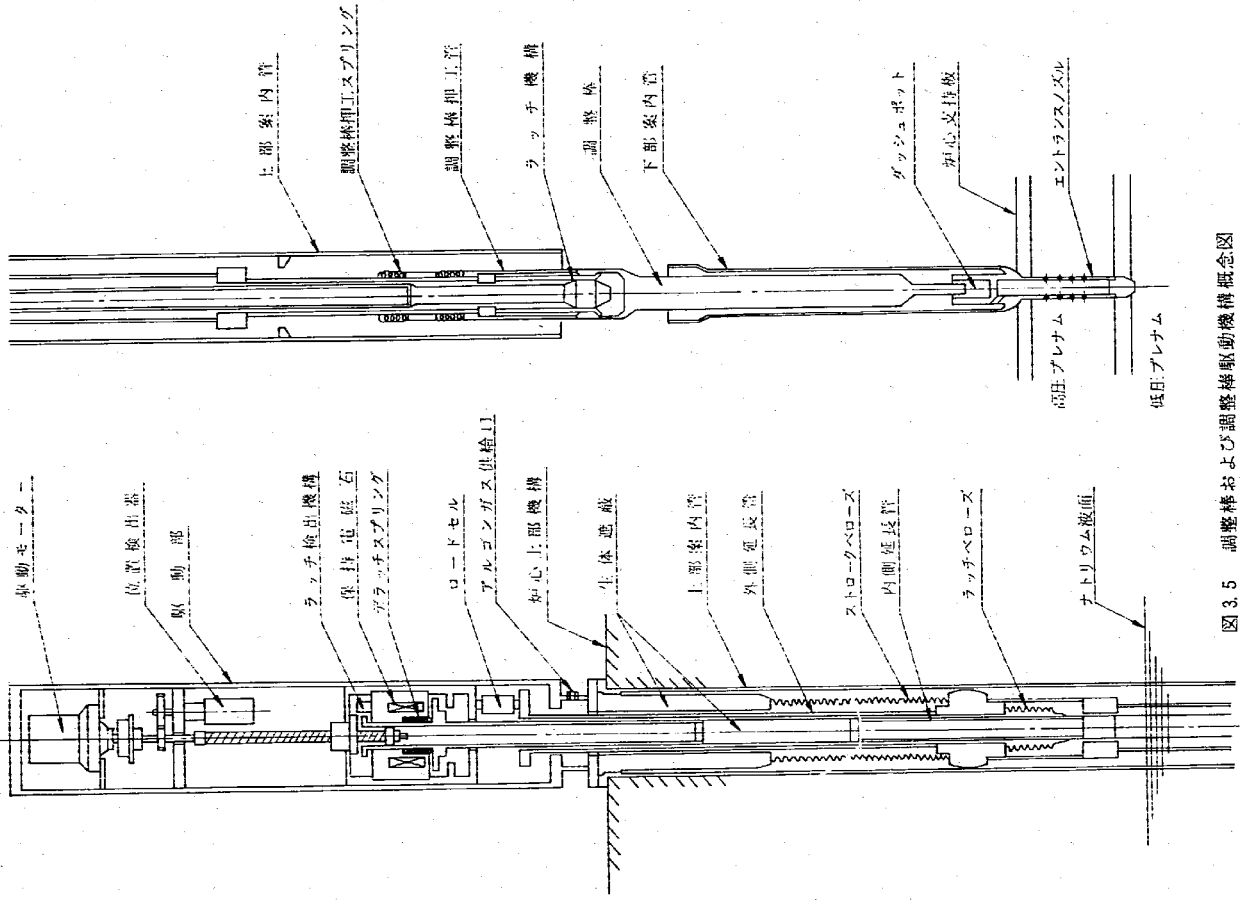


図 3.5 調整棒および調整棒駆動機構概念図

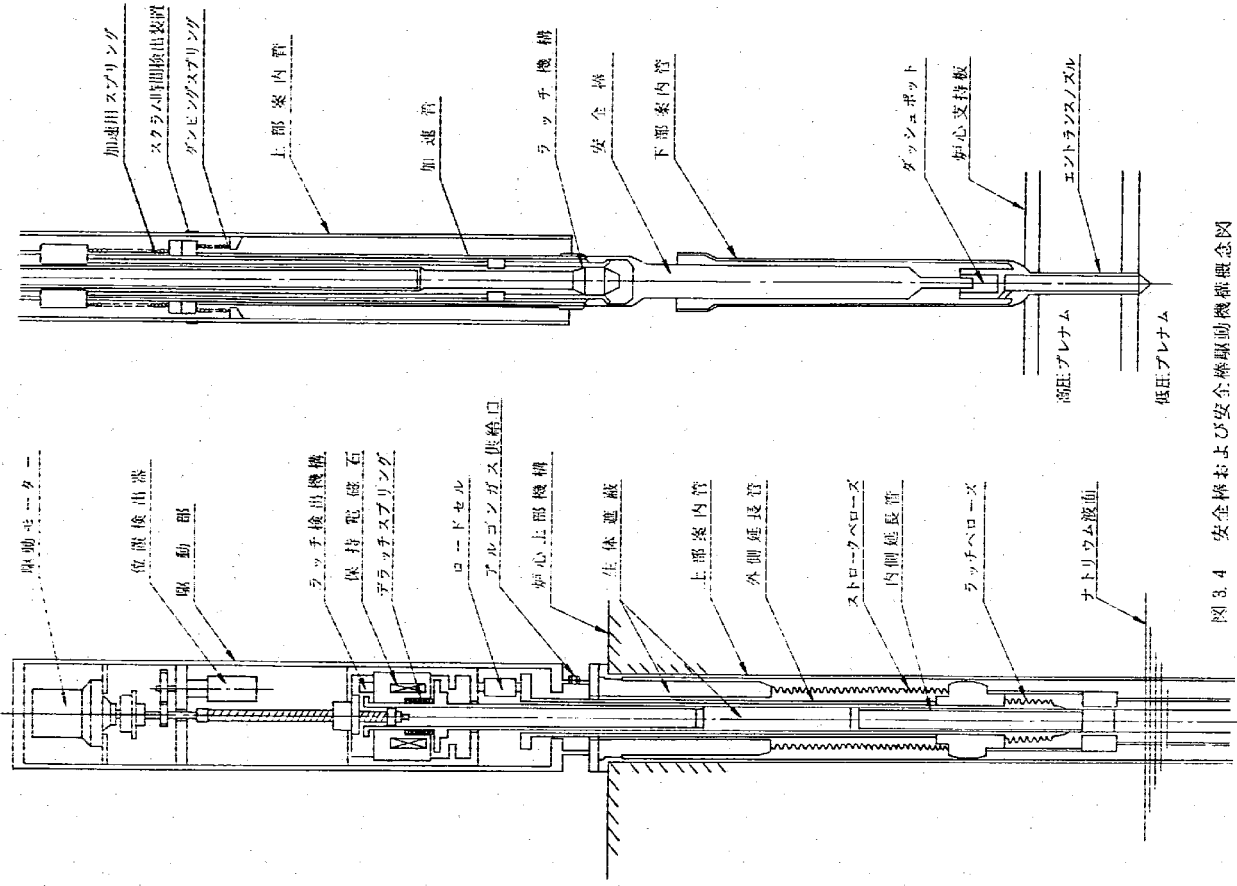


図 3.4 安全棒および安全棒駆動機構概念図

4. 試験の概要

制御棒特性試験は、下記の3つの試験よりなる。

- NT-21 制御棒校正
- NT-22 炉停止余裕
- NT-23 スクラム反応度

各試験とも中性子計表系は、起動系又は臨界近接予備計測系を使用した。

4.1 試験の概要

以下に各試験の主なる目的と試験方法の概要を記す。

4.1.1 制御棒校正 (NT-21)

制御棒の校正曲線を求めることと、制御棒間の干渉効果を測定することを目的とした。調整棒1の校正曲線は、全ストロークを33ヶースに分けて全点ベリオド法で求めた。調整棒2は、調整棒1との置換法で求め、上端付近の2点については、ベリオド法で求めた。安全棒については、100mm間隔で既に校正された調整棒との置換法で求めた。

干渉効果測定は、調整棒1に関する調整棒2、安全棒3、4の干渉効果を測定するために補償制御棒を交換して調整棒1のベリオドを測定した。また、中性子源増倍法、ロッドロップ法によっても干渉効果の測定の可能性を検討した。

4.1.2 炉停止余裕 (NT-22)

安全棒に対するワンロード・スタック基準及び制御棒に対するワンロード・スタック基準を満足していることを確認するために、臨界法(又はベリオド法)で求めた制御棒位置から各炉停止余裕を求めた。

4.1.3 スクラム反応度 (NT-23)

安全棒を落下させた時の反応度の時間変化を求め、スクラム時の反応度種入の挙動を調べるとともに、複数本同時落下の反応度から干渉効果を求めた。測定は、安全棒落下後の中性子束の時間変化を30msecマルチケータに測定記録し、これより、「外挿法」と「Inverse Kinetics法」の2法によりスクラム反応度を求めた。

また、中性子源増倍法による測定も合わせて行った。

4.2 試験の経過

本試験の経過を以下に記す。

5月23日	調整棒1, 2 安全棒1	校正曲線 校正曲線
5月24日	調整棒1, 2 安全棒2	校正曲線 校正曲線
5月25日	スクラム反応度 炉停止余裕	
5月26日	干渉効果 (ベリオド法) 安全棒3	校正曲線
5月27日	科学技術庁立会検査	
5月28日	科学技術庁立会検査 安全棒4	校正曲線
10月29日	干渉効果 (臨界法)	

5. 試験の方法

5.1 試験条件

本試験は下記の試験条件で行った。

- (1) 1次系温度 約25.0℃
 (2) 1次系流量 100%
 (ただし、10月29日の干渉効果測定時は20%)
 (3) 炉出力

(i) ペリオド測定時	起動系 ch1	1×10^3 cps (約100w)
	(中性子源 引抜状態)	
(ii) 臨界法による測定	起動系 ch1	1×10^4 cps (約1kw)
	(中性子源 挿入状態)	
(iii) ロッドドロップ法による測定	起動系 ch1	1×10^5 cps (約10kw)
	(中性子源 引抜状態)	

5.2 制御棒校正 (NT-21)

5.2.1 制御棒校正

(1) 調整棒1 (RR1)校正

RR1の校正曲線は全ストロークを3ケースに分けて、全点ペリオド法により求めた。このとき補償制御棒としてRR2を採用した。

測定は、起動系ch1, ch2(炉容器外部位置, 核分裂計数管)と予備チャンネルD(炉心上部位置, 核分裂計数管)の3信号を計数率計を通した後、ペンレコーダに記録し、一方ch1とchDの2信号は1秒の時間間隔でマルチケータ(CANBERA製 4,000 ch)に取り込み紙テープ出力した。この紙テープに出力した中性子計数を測定系の不感時間を補正して数小2乗法により処理して反応度を計算し、校正曲線を求めた。図5.1に測定系ブロック図を示す。

(2) 調整棒2 (RR2)校正

RR2の校正曲線は、制御棒の上端付近の2点を除いてRR1との置換法で求め、上端付近の2点についてはペリオド法で求めた。

(3) 安全棒1 (SR1)校正

SR1の校正曲線は、制御棒上端付近の3点を除いて補償制御棒RR2の置換法により求め、上端付近3点についてはRR1の置換法により求めた。(このときRR2全挿入状態)

(4) 安全棒2 (SR2)校正

SR2の校正曲線は、制御棒下端の1点を除いて補償制御棒RR1の置換法により求め、下端の1点については、RR2の置換法で求めた。(このときRR1全挿入状態)

(6) 安全棒3 (SR3), 安全棒4 (SR4)校正

SR3, SR4の制御棒位置をRR1およびRR2との置換法で求め、最大反応度付加率を与える3.50mm付近の3点についてのみ校正曲線を求めた。

5.2.2 最大反応度付加率

上記方法で求めた校正曲線の3.50mm付近から、最大付加反応度変化 ($\% \Delta K_{eff}/mm$) を求め、本値を制御棒引抜時に求めた制御棒駆動速度 (mm/min) で割って最大反応度付加率 ($\% \Delta K_{eff}/min$) を求めた。

5.2.3 干渉効果

制御棒間の干渉効果の測定は、下記の4方法で行った。

(1) ペリオド法による測定

調整棒1に対する調整棒2, 安全棒3と安全棒4の干渉効果を求めるために、調整棒1のペリオドを補償制御棒を上記の3本と交換して測定した。このとき調整棒1の引抜き位置は各パターンとも同一とし、測定時のペリオドを反応度に換算した。各パターンでの上記反応度の相異が干渉効果の相異によるものである。

(2) 置換法による測定

正の干渉効果が最大となる制御棒パターン (SR1とSR4) において、2本の制御棒を同位置にして臨界した。次に、他の制御棒パターン (SR1とSR2, SR2とSR4) にて、2本の制御棒を上記パターン同位置として、調整棒にて臨界とした。

調整棒で補償した反応度をペリオド法で測定した。この反応度が、パターン間での干渉効果分の違いに相当する。

(3) 中性子源増倍法による測定

中性子源を挿入した状態で、調整棒1, 360mm位置で調整棒2で臨界とし (調整棒2 352.2mm), 次に、調整棒2位置は固定して調整棒1を345mm, 300mm, 240mmと挿入して未臨界状態とし、中性子計数系 (chA:BF₃検出器, chB:B-10検出器, 図5.2参照) で、中性子計数率を測定した。各パターンでの未臨界度は、既に測定した調整棒1の校正曲線から求め、未臨界度と計数率の関係を求めた。このとき、計数率は不感時間の補正を行った。再び、調整棒1:360mm, 調整棒2:352.5mm位置で臨界とし、安全棒の挿入パターンを変更して、各パターンでの中性子計数率を測定し、先に求めた未臨界度と計数率の関係から各パターンでの未臨界度を求めた。各パターンでの未臨界度の相異が干渉効果の相異によるものである。

(4) ロッドロッド法による測定

スクラム反応度 (NT-23) の項で記すが、干渉効果が異なる各種安全棒の組合せで制御棒を同時落下させ、そのときの反応度変化を求めた。

5.3 炉停止余裕 (NT-22)

炉停止余裕としては、(NT-21) で求めた修正曲線の結果をもとに計算により求めた。

5.4 スクラム反応度 (NT-23)

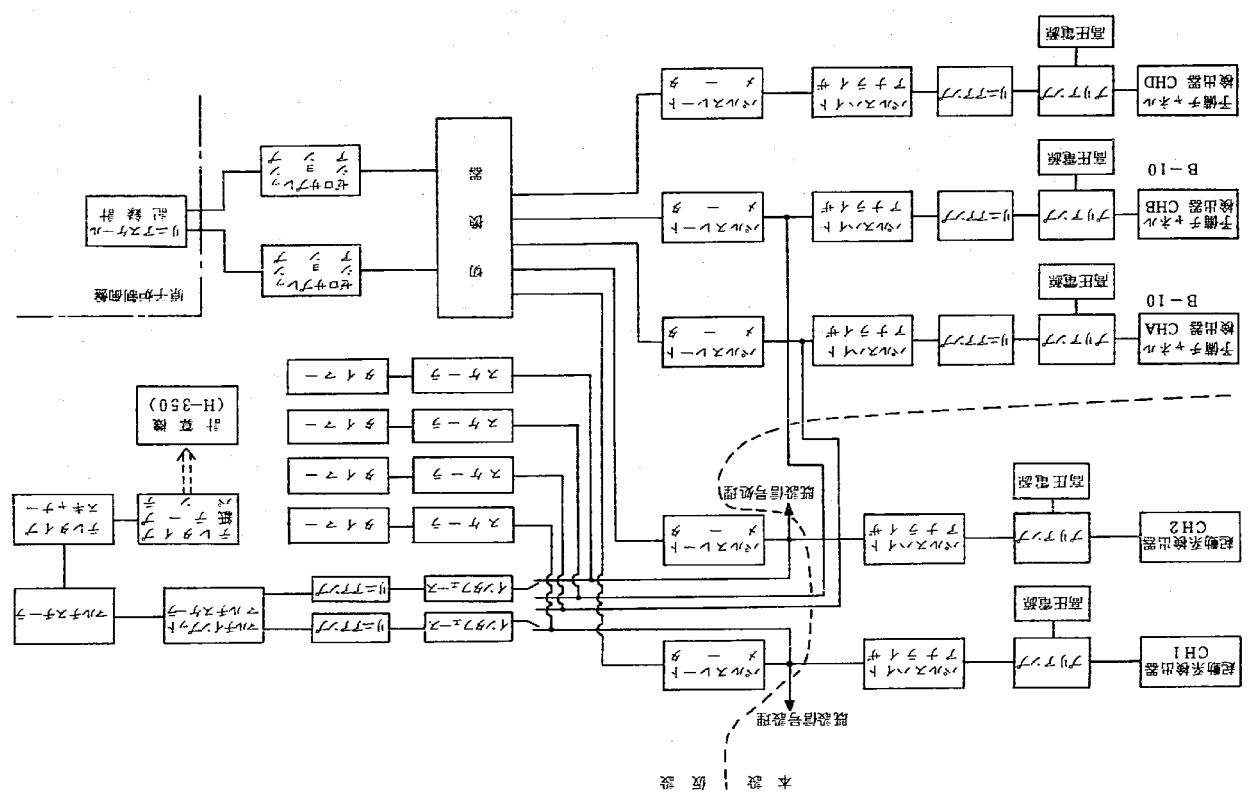
各種パターンで安全棒を落下させ、落下に伴って変化する中性子束 (中性子計装系は起動系) を 30 msec の時間間隔でマルチスケラレーで計測した。この中性子束の時間変化から動特性方程式を逆解くことにより反応度の時間変化を求めた (Inverse Kinetics 法)。外部中性子源の影響を押えるため、中性子源を引きぬき、約 10 kw で測定を開始した。測定系のブロック図を図 5.3 に示す。

起動系 ch1, ch2 の検出器は、核分裂計数管でパルス系であり、マルチケラレーに取込み後紙テープ出力した。この紙テープ出力を計算機に人力し、Inverse Kinetics 法で反応度の時間変化を求めた。また、落下時間を求めるために、制御棒駆動機構の「励磁断」ラッチOFF「デラッチON」スクラム時間検出装置 (位置検出コイル) の 4 信号を電磁オシロに取り込み、各信号間の時間関係を調べた。安全棒の単独落下は、原子炉制御盤の励磁 SW を「切」にすることにより行った。複数本の安全棒の同時落下のために図 5.4 に示す仮設の回路を使用した。(他の安全棒を上端にとどめ、調整棒が挿入されぬため)

マルチスケラレーで取り込んだ中性子束の時間変化のデータから外挿法でも反応度変化を求めた。これは、臨界状態 (この時の計数率 n_0 とする) から制御棒を落下させた後の中性子束の時間変化を記録し、これを落下の時間まで外挿して (この外挿した計数率を n_1 とする) 次の式によりもとめる。

$$\frac{\rho}{\beta} = \frac{n_0}{n_1} - 1 \quad \dots\dots (5.1)$$

図 5.1 制御棒特性試験時の中性子計装ブロック図



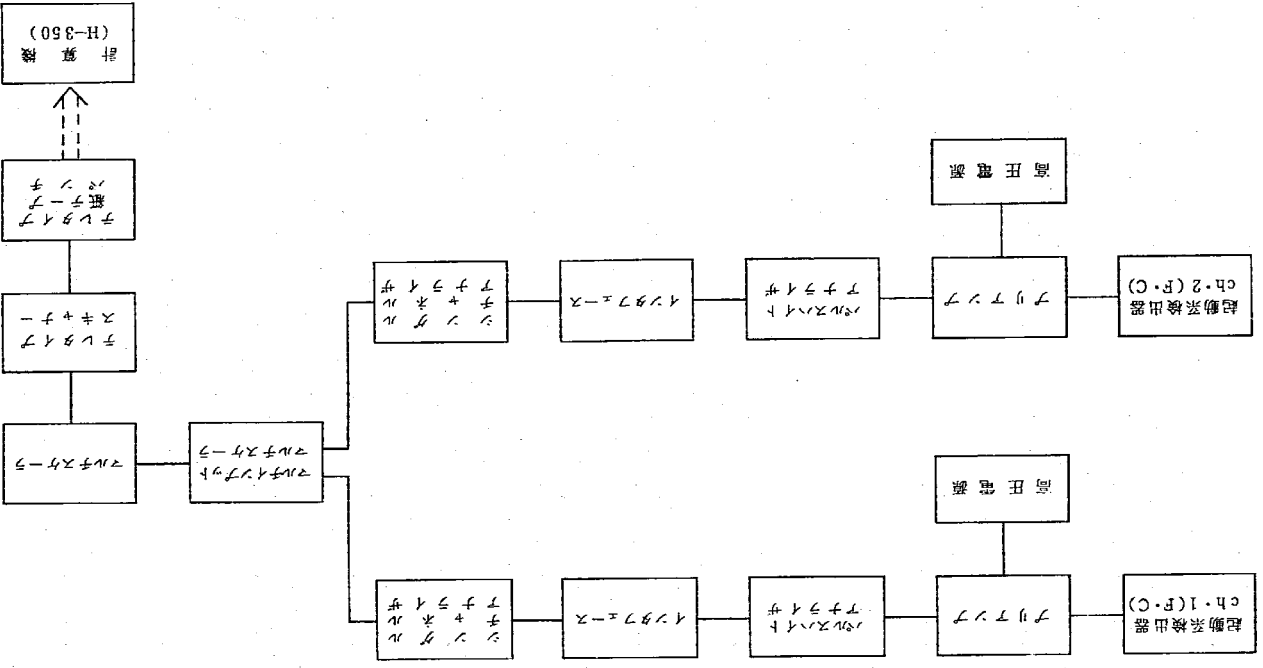


図 5.3 スケラム反応度測定ブロック図

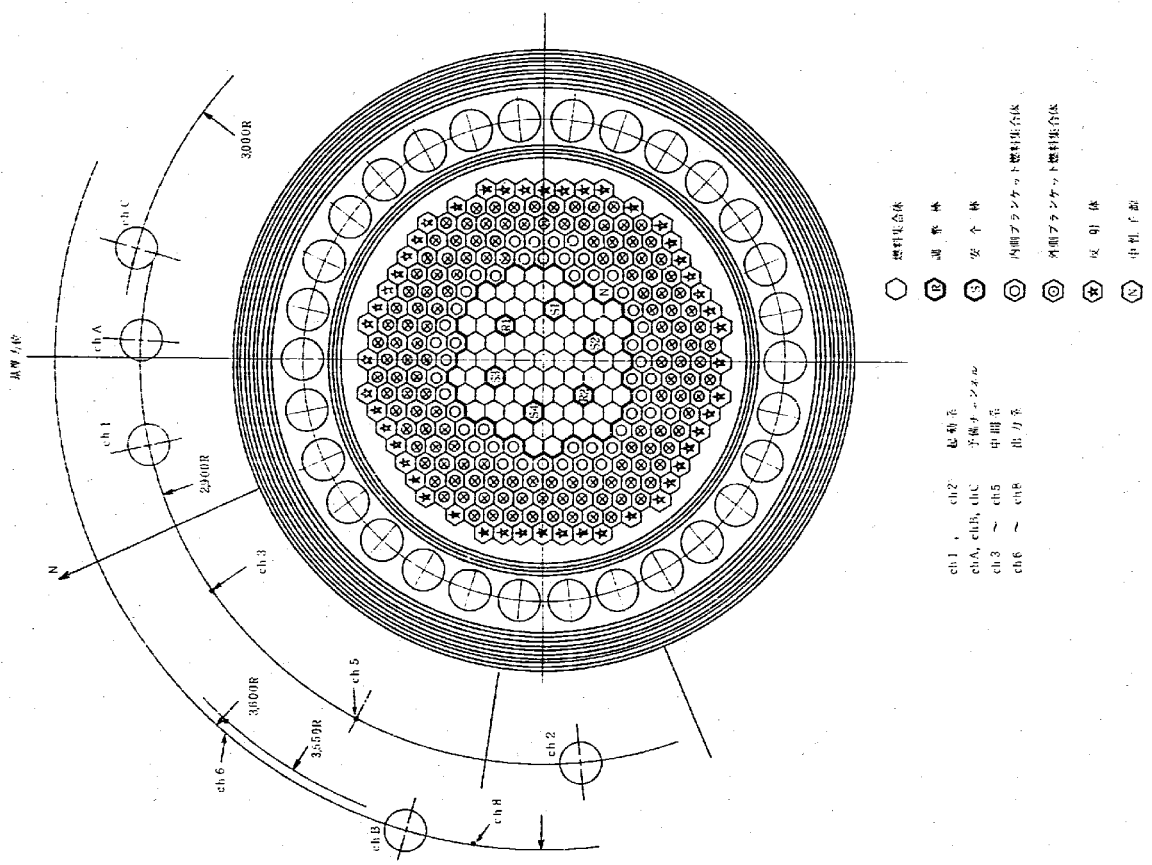


図 5.2 検出器配置図

6. 試験結果

6.1 制御棒校正 (NT-21)

6.1.1 制御棒校正

表 6.1 にベリオド法で求めた調整棒 1 の制御棒校正曲線の測定値を示す。各反応度は、 chl と chD から求めた値の相加平均値とし、 chl は不感時間補正を行っている。本表には、調整棒 1 の引抜ストロークに対応する調整棒 2 の挿入ストロークも示す。表 6.2, 表 6.3 は置換法で求めた調整棒 2 及び 4 本の安全棒の測定値を示す。

図 6.1~6.6 は、各制御棒の校正曲線の測定値を示す。調整棒 1, 2 に関しては、最小自乗法により 6 次多項式にフィッティングしたので、その係数も図 6.1, 6.2 に示す。安全棒 3, 4 に関しては測定点が少ないので、校正曲線の形は、安全棒 1 と同じ S 字カーブで近似した。

表 6.4 に各制御棒の反応度値の測定値を設計値と共に示すが、測定値が約 10% 大き目である。測定誤差に関しては、本章の最後にまとめて評価する。図 6.7, 6.8 は調整棒の校正曲線をストロークに関して微分したものである。

図 6.9, 6.10 は、全体を 1 に規格した制御棒校正曲線の測定値と設計値である。

6.1.2 最大反応度付加率

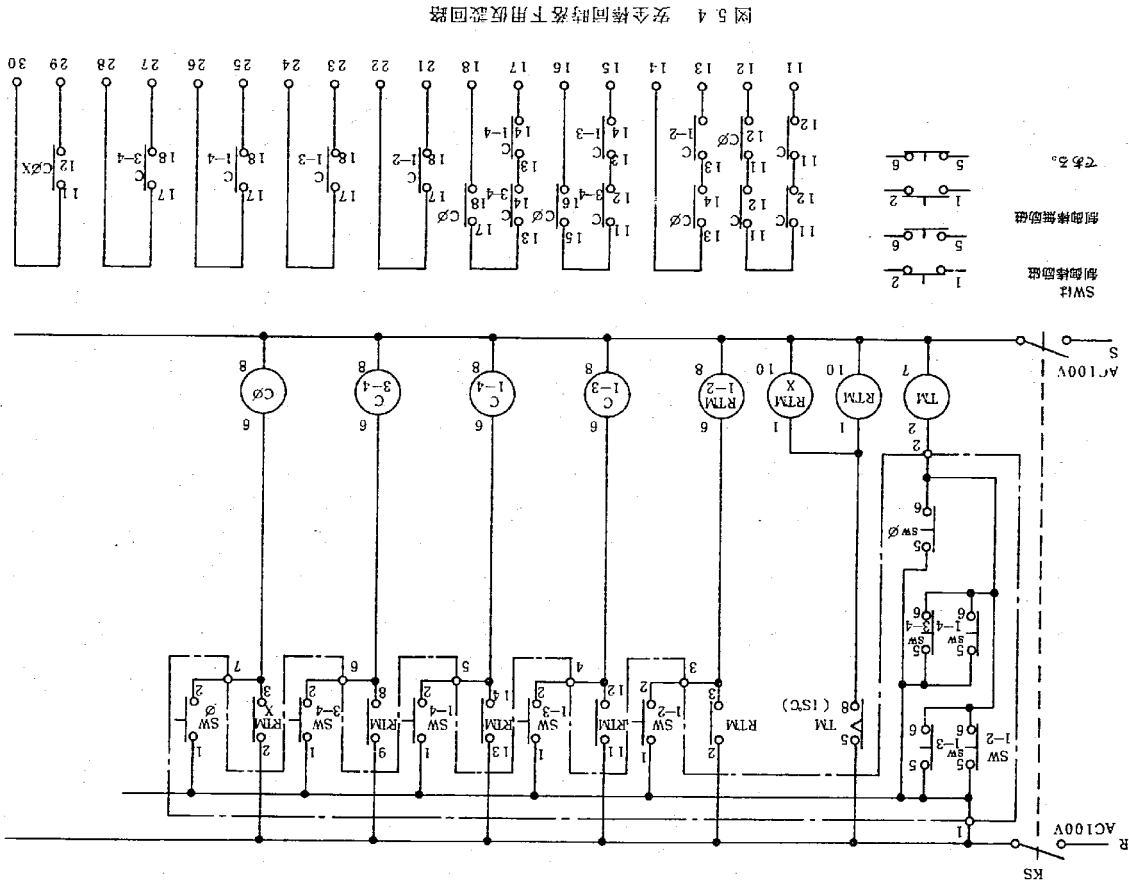
測定結果を表 6.5 に設計値とともに示すが、設計値とよく一致しており、設計条件 ($0.015\% \Delta K / K / \text{sec}$ 以下) を十分満足している。

6.1.3 干渉効果

複数体の制御棒について、干渉効果のため、かたまって挿入されると、1 本当りの値置が単独挿入に比べ減少し、分散して挿入すると増加する。表 6.6 に干渉係数の設計値を示すが、計算上は各パターンで制御棒全挿入の状態での実効増倍率の変化から計算している。

(1) ベリオド法による測定結果

表 6.7, 図 6.11, 6.12 は、ベリオド法による干渉効果の測定結果である。本測定では、補償制御棒を変化させた場合の調整棒 1 の反応度の変化から干渉効果を求めたもので、設計値と直接比較はできないが、補償制御棒が安全棒 4 の場合のパターン (120° 位置) の干渉係数を設計値 1.02 として規格化すると、測定値がやや大き目である。図 6.12 は、測定精度を上げるため測定点を増した測定結果であり、実線は両パターンとも 5 次多項式フィッティングしたカーブである。図 6.12 の下側のプロットは、両パターンでの微分反応度測定値の比であり、実線は上記 5 次多項式同士の比である。補償制御棒が挿入されるほど、干渉効果が大きくなる傾向があり、補償制御棒が全挿入の場合 R R 1 の制御棒反応度として、R R 2 相手 (180° 位置) の場合 S R 2 相手 (120° 位置) の場合より約 6% 程度の干渉効果を生じている。



(c) 置換法による測定結果

表 6.18 は置換法による干渉効果の測定結果である。

本測定では、2本の制御棒がほぼ半挿入の状態での干渉効果であり、全挿入状態での設計値と直接比較できないが、測定値は設計値の約半分の値となっている。

(d) 中性子源増倍法およびロッド・ドロップ法による測定結果

表 6.9 に中性子源増倍法およびロッド・ドロップ法による測定結果を示す。中性子源増倍法では、測定系 (chA:BF₃検出器, chB:B-10検出器) の不感時間 8 μsec として測定計数率を補正した。また、ロッド・ドロップ法による測定では、測定系 (ch1, ch2:核分裂計数管) の不感時間 3.79 μsec として全データに補正を加えた。この値は、ペリオド測定時に最小乗法により求めた値である。中性子源増倍法による測定値は、制御棒と中性子源と検出器の位置関係の影響が大きく干渉効果は、うまく測定されていない。

ロッド・ドロップ法 (Inverse Kinetics 法) の測定結果は、臨界を保つために調整棒 2本がほぼ中間点まで挿入されているので直接設計値と比較はできないが、一応の目安として設計値と比較すると設計値よりやや大きいのが比較的良好に一致している。

なお、ロッド・ドロップ法のうち外挿法による解析は、落下後の中性子束の外挿がむづかしく測定精度が悪いので参考値とする。

6.2 炉停止余裕 (NT-2.2)

(i) 安全棒に対するロッドスタック条件

臨界点から安全棒を 3本 (SR-2, SR-3, SR-4) を全挿入したときの未臨界度 ρ_s (250°C) で定義される。

$$\rho_s = \rho_{SR2} + \rho_{SR3} + \rho_{SR4} = 6.55 \% \Delta K/K$$

(ii) 制御棒に対するロッドスタック条件

制御棒 5本 (RR-1, RR-2, SR-2, SR-3, SR-4) を全挿入したときの未臨界度 ρ_c (100°C) で定義される。

$$\rho_c = \rho_s + \rho_{RR1} + \rho_{RR2} = \rho_{250 \rightarrow 100} = 7.99 \% \Delta K/K$$

ここで、

($\rho_{RR1} + \rho_{RR2}$): 調整棒 2本が臨界点にある位置から全挿入されたときの反応度価値

$$(2.01 \% \Delta K/K)$$

$\rho_{250 \rightarrow 100}$: 等温係数 $-3.77 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$ 使用 (0.57 $\% \Delta K/K$)

(f) 250°Cにおけるジャットダウンマージン

制御棒 6本全挿入したときの未臨界度 ρ_{6D} (250°C) で定義される

$$\rho_{6D} = \rho_s + \rho_{RR1} + \rho_{RR2} + \rho_{SR1} = 10.78 \% \Delta K/K$$

6.3 スクラム反応度 (NT-2.3)

(1) スクラム時間

表 6.10 にスクラム時間の測定結果を示すが、本表は安全棒の保持電磁石励磁「断」からラッチリミットスイッチ「OFF」、アラッチリミットスイッチ「ON」、スクラム時間検出コイル感知までの時間を電磁石励磁「断」からスクラム時間検出コイル感知までの時間である。ここでスクラム時間とは保持電磁石励磁「断」からスクラム時間検出コイル感知までの時間である。

スクラム時間はすべて 1秒以下で設計条件を満足しており、この結果は先に行われた総合機能試験の結果とよく一致している。

(2) スクラム反応度

図 6.13~図 6.16 に Inverse Kinetics 法で計算した結果の 1列を示すが、これは起動系 ch1 で計数したもので安全棒の単独落下したものである。起動系 ch2 で計数した結果及び安全棒同時落下の結果も同様である。また、これらの図には電磁石励磁「断」を示した。ラッチ OFF、アラッチ ON、検出コイルの各信号の時間関係、中性子束の時間変化も示した。

図 6.13~図 6.16 から次のことがわかる。

- (i) スクラム時間検出コイル (下端より 120mm 上) 位置は、反応度的には約 93 秒挿入された位置である。
- (ii) 保持電磁石励磁断から実際に反応度が挿入されるまでの時間は約 0.3 秒である。
- (iii) 実際に反応度が挿入され始めから全挿入されるまでの時間は約 0.4 秒である。

図 6.17 に安全棒 1 の落下後の反応度変化に重点を置いて図示したものを示すが、実線を示した 2.045 $\% \Delta K/K$ の線が落下後の反応度の平均値であり、安全棒 1 の制御棒価値を与える。落下後の反応度は平均値のまわりに大きくばらついていて、これは落下後の中性子束の値が小さいため、その変化から求めた反応度には大きく影響を与えたと思われる。そこで、落下後の中性子束の値を大きくし、中性子束の測定上のばらつきを小さくするために 1桁上の出力から制御棒を巻き下させ、サンプリング間隔も 80msec から 50msec に長くした結果を図 6.18 に示すが、落下後の反応度のばらつきが小さくなっていて、なお、この反応度のゆらぎから落下後の制御棒の縦振動 (ダッシュラムがダッシュラムポットに入り切り切りの振動) は、顕著

には測定されていない。

表 6.9 に各種測定法によって求めた制御棒反応度を示すが、Inverse Kinetics 法によりもとめた結果は、安全棒に関しては 4 本の平均をとると ch1 での測定値は $2.17\% \Delta K/K$ 、ch2 での測定値は $2.17\% \Delta K/K$ であり、臨界法での 4 本の平均値 $2.20\% \Delta K/K$ とよく一致している。各安全棒の反応度の平均値からのズレは最高で 1.0% 程度であり、また換出器位置により差があるが、これについては第 7 章で検討する。

6.4 誤差評価

6.4.1 ペリオド法及び置換法における誤差

制御棒校正で求めた制御棒位置の誤差を評価する。その誤差の要因と大きさは以下の通りである。

イ) 制御棒位置指示計の精度

制御棒位置は、実際の位置と指示の間には読み取り誤差を含めて各制御棒で下表のごとき誤差があり、制御棒位置によって異なるが、反応度誤差としては下表のようになる。

制 御 棒	指示計の誤差	反 応 度 誤 差
調 整 棒 1	$\pm 0.2 \text{ mm}$	$\pm 1 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$
調 整 棒 2	$\pm 0.6 \text{ mm}$	$\pm 3 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$
安 全 棒 1~4	$\pm 1.2 \text{ mm}$	$\pm 6 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$

注1) 技術課メモ 制御棒位置指示計の精度と再現性 (技-(51)-170)

ロ) 臨界点位置のずれ

臨界であることの認定のあいまいさの誤差であり、臨界点のずれは $\pm 0.2 \text{ mm}$ と推定され、制御棒位置によって異なるが反応度誤差としては、 $\pm 1 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$ となる。

ハ) 計算機処理上の誤差

ペリオド法で求めた反応度の計算誤差であり、測定系の不感時間についても計算機処理の過程で考慮されている。

計算誤差は、ペリオド法の 3.3 ケースの最大値 $\pm 1.42 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$ である。

ニ) 校正曲線からの読み取り誤差

臨界法において、校正曲線から反応度を読みとる場合の誤差であり、 $\pm 5 \times 10^{-3} \% \Delta K/K$ と推定する。

以上の誤差の要因から、各制御棒の全反応度位置の誤差を以下に求める。

1) 調整棒 1 の反応度誤差

調整棒 1 の校正は全ストロークを 3.3 ケースに分割して、各ケースごとにペリオド測定した。1 ケース当りの誤差 $\Delta \rho_{R1}$ は、イ), ロ), ハ) の誤差が加算されて、

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{R1} &= \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 1.42^2} \times 10^{-3} \% \Delta K/K \\ &= 2.24 \times 10^{-3} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

となる。

全反応度位置 ρ_{R1} の誤差 $\Delta \rho_{R1}$ は、

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{R1} &= \sqrt{\sum_{i=1}^3 \Delta \rho_i^2} \\ &= 1.29 \times 10^{-2} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

となる。

よって、調整棒 1 の制御棒位置は、 $2.13 \pm 0.02 \% \Delta K/K$ となる。

ii) 調整棒 2 の反応度誤差

調整棒 2 の校正は、調整棒 1 との置換法と、ペリオド法 (2 点) を組合せて測定した。置換法による誤差 $\Delta \rho_{21}$ は、イ) ロ) ニ) の誤差と、調整棒 1 自身の誤差が加算されて、

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{21} &= \sqrt{3^2 + 3^2 + 1^2 + 1^2 + 5^2 + 12.9^2} \times 10^{-3} \% \Delta K/K \\ &= 1.54 \times 10^{-2} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

ペリオド法による誤差 $\Delta \rho_{21}$ は、調整棒 1 の場合と同様に

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{22} &= \sqrt{2.24^2} \times 2 \times 10^{-3} \% \Delta K/K \\ &= 3.2 \times 10^{-3} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

全反応度位置 ρ_{R2} の誤差 $\Delta \rho_{R2}$ は、

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{R2} &= \sqrt{1.54^2 + 3.2^2} \times 10^{-3} \% \Delta K/K \\ &= 1.58 \times 10^{-2} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

よって、調整棒 2 の制御棒位置は、 $2.12 \pm 0.02 \% \Delta K/K$ となる。

iii) 安全棒 1~4 の反応度誤差

安全棒の校正は、調整棒 1 との置換法と調整棒 2 との置換法を組合せて測定した。調整棒 1, 2 との置換法による誤差 $\Delta \rho_{31}$, $\Delta \rho_{32}$ は、(安全棒 1 の場合)

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{31} &= \sqrt{6^2 + 6^2 + 1^2 + 1^2 + 5^2 + 5^2} \times 10^{-3} \% \Delta K/K \\ &= 1.94 \times 10^{-2} \% \Delta K/K \end{aligned}$$

$$\Delta P_{91} = \sqrt{6^2 + 6^2 + 1^2 + 1^2 + 5^2 + 5^2 + (1.29 \times \frac{0.1}{2.13})^2} \times 10^{-3} \% \Delta K/K$$

$$= 1.12 \times 10^{-2} \% \Delta K/K$$

安全棒の反応度係数の誤差 ΔP_{9R} は、

$$\Delta P_{9R} = \sqrt{1.94^2 + 1.12^2} \times 10^{-2} \% \Delta K/K$$

$$= 2.24 \times 10^{-2} \% \Delta K/K$$

よって、安全棒 1~4 の制御棒係数は、以下ようになる。

- 安全棒 1 : $2.23 \pm 0.03 \% \Delta K/K$
- 安全棒 2 : $2.21 \pm 0.03 \% \Delta K/K$
- 安全棒 3 : $2.17 \pm 0.03 \% \Delta K/K$
- 安全棒 4 : $2.17 \pm 0.03 \% \Delta K/K$

6.4.2 Inverse Kinetics 法における誤差

Inverse Kinetics における誤差としては、

- (1) データ取り込み上の誤差 { • データのパラツキに起因する誤差
- 不感時間による誤差

- (2) 計算誤差 { • 使用定数 λ , β_1 の不確かさに起因する誤差
- 計算モデルに起因する誤差

が考えられる。

- (4) データのパラツキに起因する誤差

図 6.1.3~図 6.1.7 にみられるとおり、中性子計数率の測定値にはバラツキがある。このバラツキに起因する誤差を調べるために制御棒落下後の反応度について、標準偏差をまとめたものが表 6.1.1 である。

表 6.1.1 よりデータのパラツキに起因する誤差は最高で $\pm 4.1\%$ 、安全棒の単独落下の場合は、 $\pm 3.7\%$ 以下である。

- (6) 不感時間の不確かさによる誤差

今回の測定はパルス系を使用したため、測定された中性子計数には測定系の不感時間の影響がある。使用した測定系は制御棒校正試験 (NT-21) の時と同じであるから、制御棒校正試験で最小 2 乗法によりもとめた不感時間を使用した。

但し、制御棒校正試験では、ch1 の不感時間しかもとめていないため、ここでは ch2 の不感時間は ch1 と同じとした。

また、マルチスケーラーには計数率により不感時間変る性格がある。制御棒校正試験

では 4×10^4 cps 以下の計数率で不感時間をもとめたが、今回の試験は 8×10^4 cps 以下で行っており、今回の不感時間が若干大きめと思われが同じとした。

制御棒校正試験での不感時間は ch1 で $3.79 \pm 0.6 \mu\text{sec}$ であった。この $0.6 \mu\text{sec}$ の差により Inverse Kinetics 法によりもとめた反応度係数にどの程度の影響が出るかを示したのが表 6.1.2 である。

表 6.1.2 より不感時間の不確かさに起因する誤差は約 6% である。

- (4) 動特性パラメータを一定とすることに起因する誤差

制御棒落下の場合、落下前の臨界状態と落下後では原子炉の動特性パラメータ (A , β_1) が変る。

Inverse Kinetics 法では、動特性方程式を逆に解くにあたり、これら動特性パラメータは定数として扱っている (臨界状態の値を使用)。これに起因する誤差を調べるために、動特性パラメータとして付録 (I) 表 1.1 の標準値を使用した場合と、全制御棒挿入の値を使用した場合とを示したものが表 6.1.1 である。

両者の差は 2% であるが、制御棒落下の途中では両者の中間的な値であるはずであり、また、安全棒の単独落下の場合は、全制御棒挿入の場合より標準値に近いはずである。このため、安全棒の単独落下の場合、動特性パラメータを一定としていることに起因する誤差は 1% 以下である。

- (5) 計算モデルに起因する誤差

計算モデルに起因する誤差としては、

- エネルギー 1 群、1 点近似による誤差

- Δt 間での中性子束変化を指数関数とすることに起因する誤差

が考えられるが、これを確認するためにはエネルギー多群の空間動特性方程式を解かねばならず、ここでは未検討である。

1 点近似による誤差は、中性子検出器の位置関係にも関係することであり、これについては第 7 章で述べるが $\pm 1.0\%$ 程度である。

Δt 間での中性子束変化を指数関数とすることに起因する誤差は 1 点近似による誤差に比べれば小さく、ほとんど無視できると思われる。

計算モデルに起因する誤差を除けば、今回の Inverse Kinetics 法の誤差は、安全棒単独落下では

$$+ (\sqrt{3.7^2 + 5.9^2} - 1.0) = +6.0\%$$

$$- (\sqrt{3.7^2 + 5.3^2} - 1.0) = -7.5\%$$

よって $\pm 6.0\%$ である。

表 6.1 調整棒 1, 校正曲線測定値

Reg-Rod 1 ストローク	反応度計算値 ρ'	炉心付加反応度 ρ	$\frac{\rho}{\rho^*} \times 100$ (%)	*1 (%)	Reg-Rod 2 ストローク
0~50	0.0214	0.0214	1.01	1.01	620.4~609.8
50~90	0.0470	0.0684	3.22	3.22	609.8~589.2
90~120	0.0520	0.1204	5.66	5.66	589.2~569.4
120~145	0.0562	0.1766	8.30	8.30	569.4~550.6
145~170	0.0681	0.2447	11.50	11.50	550.6~529.8
170~190	0.0621	0.3068	14.42	14.42	529.8~511.9
190~210	0.0582	0.3750	17.63	17.63	511.9~493.7
210~225	0.0542	0.4292	20.17	20.17	493.7~480.1
225~240	0.0582	0.4874	22.91	22.91	480.1~466.0
240~255	0.0612	0.5486	25.79	25.79	466.0~451.8
255~270	0.0664	0.6150	28.91	28.91	451.8~436.7
270~285	0.0662	0.6812	32.02	32.02	436.7~422.2
285~300	0.0694	0.7506	35.28	35.28	422.2~407.4
300~315	0.0675	0.8201	38.55	38.55	407.4~392.4
315~330	0.0701	0.8902	41.84	41.84	392.4~377.8
330~345	0.0734	0.9636	45.29	45.29	377.8~362.2
345~360	0.0722	1.0358	48.69	48.69	362.2~347.2
360~375	0.0717	1.1075	52.06	52.06	347.2~332.0
375~390	0.0720	1.1795	55.44	55.44	332.0~316.6
390~405	0.0695	1.2490	58.71	58.71	316.6~301.6
405~420	0.0700	1.3190	62.00	62.00	301.6~286.0
420~435	0.0672	1.3862	65.16	65.16	286.0~272.4
435~450	0.0662	1.4524	68.27	68.27	272.4~257.0
450~465	0.0646	1.5170	71.30	71.30	257.0~240.8
465~480	0.0602	1.5772	74.13	74.13	240.8~225.5
480~495	0.0616	1.6388	77.03	77.03	225.5~208.2
495~510	0.0544	1.6932	79.59	79.59	208.2~192.6
510~535	0.0913	1.7845	83.88	83.88	192.6~163.7
535~560	0.0798	1.8643	87.63	87.63	163.7~132.1
560~585	0.0693	1.9336	90.89	90.89	132.1~95.9
585~615	0.0699	2.0035	94.17	94.17	95.9~32.1
615~650	0.0623	2.0658	97.10	97.10	32.1~0.2*2
650~700	0.0617	2.1275	100	100	*3

*1: ρ : Total worth 21275%K/K

*2: Saf-Rod 4, 900→711.4

*3: Saf-Rod 4, 711.4→6466

表 6.2 調整棒 2, 校正曲線測定値

Reg-Rod 2 ストローク	置換反応度 ρ' (%ΔK/K)	炉心付加反応度 ρ (%ΔK/K)	$\frac{\rho}{\rho^*} \times 100$ (%)
-0.2~32.1	0.0049 *1	0.0049	0.23
32.1~95.9	0.0699	0.0748	3.53
95.9~132.1	0.0693	0.1441	6.79
132.1~163.7	0.0798	0.2239	10.6
163.7~192.6	0.0913	0.3152	14.9
192.6~208.2	0.0544	0.3596	17.4
208.2~225.5	0.0616	0.4312	20.3
225.5~240.8	0.0602	0.4914	23.2
240.8~257.0	0.0646	0.5560	26.2
257.0~272.4	0.0662	0.6222	29.3
272.4~286.0	0.0672	0.6894	32.5
286.0~301.6	0.0700	0.7594	35.8
301.6~316.6	0.0695	0.8289	39.1
316.6~332.0	0.0720	0.9009	42.5
332.0~347.2	0.0717	0.9726	45.8
347.2~362.2	0.0722	1.0448	49.3
362.2~377.8	0.0734	1.1182	52.7
377.8~392.4	0.0701	1.1883	56.0
392.4~407.4	0.0695	1.2578	59.3
407.4~422.2	0.0694	1.3272	62.6
422.2~436.7	0.0662	1.3934	65.7
436.7~451.8	0.0664	1.4598	68.8
451.8~466.0	0.0612	1.5210	71.7
466.0~480.1	0.0582	1.5792	74.4
480.1~493.7	0.0542	1.6334	77.0
493.7~511.9	0.0682	1.7016	80.2
511.9~529.8	0.0621	1.7637	83.1
529.8~550.6	0.0681	1.8318	86.4
550.6~569.4	0.0562	1.8880	89.0
569.4~589.2	0.0520	1.9400	91.5
589.2~609.8	0.0470	1.9870	93.7
609.8~620.4	0.0214	2.0084	94.7
620.4~650.0	0.0526	2.0610	97.2
650.0~700.0	0.0603	2.1213	100

*1 $\rho = \rho_{R1} (615 \sim 650) - \rho_{R2} (900 \sim 711.4)$

$= \rho_{R1} (615 \sim 650) - \rho_{R1} (0.3 \sim 82.7)$

$= 0.0623 - 0.0574$

$= 0.0049$

表 6.3 安全棒校正曲線測定値

校正安全棒	安全棒ストローク (mm)	置換制御棒ストローク (mm)	置換反応度 (%ΔK/K)	炉心付加反応度 (%ΔK/K)
安全棒 1	0~20	RR2 700	0.0088	0.0088
	20~100	700 ~6323	0.0918	0.1006
	100~200	6323~5292	0.2657	0.3663
	200~300	5292~4249	0.4242	0.7905
	300~400	4249~3225	0.4830	1.2735
	400~500	3225~2235	0.4324	1.7059
	500~600	2235~1212	0.3009	2.0068
	600~700	RR2 1212~-01 RR1 700 ~6768	0.1518	2.1586
	700~800	RR1 6768~640	0.0509	2.2095
	800~900	640 ~631 RR2 6918~6333 RR1 700.9~6787	0.0160	2.2255
安全棒 2	0~100	RR1 687.1~545.6	0.2829	0.3893
	100~200	545.6~438.1	0.4184	0.8077
	200~300	438.1~337.0	0.4754	1.2831
	300~400	337.0~242.9	0.4253	1.7083
	400~500	242.9~156.3	0.2918	2.0001
	500~600	156.3~87.4	0.1421	2.1422
安全棒 3	600~700	87.4~41.5	0.0475	2.1897
	700~800	41.5~0	0.0178	2.2075
	800~900	RR1 658.4~630.0 RR2 700.1~-0.3	2.1670	2.1670
	0~900	RR2 416.7~366.5	0.2364	-
安全棒 4	300~350	366.5~317.2	0.2333	-
	350~400	RR1 700 ~1231 RR2 661.2~631.7	2.0471	2.0471
	0~646.6	RR1 123.1~82.7	0.0569	2.1140
安全棒 4	646.6~711.4	82.7~0.3	0.0595	2.1735
	711.4~900	RR1 421~370.5	0.2375	-
	300~350	370.5~320.7	0.2382	-
	350~400			-

表 6.4 制御棒節距の測定値と設計値

単位 (%ΔK/K)

	調整棒 1	調整棒 2	安全棒 1	安全棒 2	安全棒 3	安全棒 4
測定値	2.13±0.02	2.12±0.02	2.23±0.03	2.21±0.03	2.17±0.03	2.17±0.03
設計値	1.90±0.38 *					

*設計値は67本炉心である。

表 6.5 最大反応度付加率

制御棒	制御棒駆動速度 (mm/min)	単位ストローク当りの最大反応度付加率 (%ΔK/K/mm)	単位時間当りの最大反応度付加率 (%ΔK/K/sec)
Reg - Rod 1	124	0.00476	0.00985
Reg - Rod 2	123	0.00473	0.00970
Saf - Rod 1	122.6	0.00483	0.00985
Saf - Rod 2	123.0	0.00475	0.00974
Saf - Rod 3	122.8	0.00470	0.00964
Saf - Rod 4	123.8	0.00476	0.00980
設計値	130	0.0046	0.00997

注) 各制御棒ストローク300~400mm間の平均反応度付加率をもって最大値とする。

表 6.6 制御構置置干渉係数(設計値)

挿入本数	挿入パターン	干渉係数
1 本	#1	1.00
	#1-2	0.93
	#1-3	1.02
2 本	#1-4	1.05
	#1-2-3	0.93
3 本	#1-2-4	1.01
	#1-3-5	1.06
	#1-2-3-4	0.95
4 本	#1-2-3-5	1.01
	#1-2-4-5	0.99
5 本	#1-2-3-4-5	1.00
6 本	#1~6	1.00

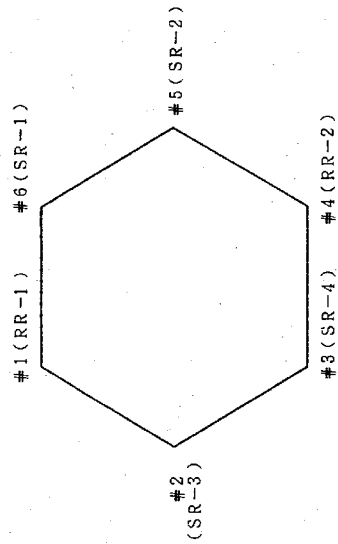


表 6.7 ペリオッド法による干渉係数測定値

引抜制御ストローク (mm)	補償制御棒位置 (mm)	ペリオッド法による反応度 ρ (% Δ K/K)	干渉係数 (ρ/ρ_{max})
RR1 345~360	RR2 362.4	0.0748 \pm 0.0023	1 (1.06)
	SR3 344.5	0.0653 \pm 0.0023	0.87 (0.93)
	SR4 372.4	0.0720 \pm 0.0023	0.96 (1.02)
	RR2 256.2	0.0650 \pm 0.0023	1 (1.08)
RR1 450~465	SR3 240.5	0.0552 \pm 0.0023	0.85 (0.92)
	SR4 267.2	0.0612 \pm 0.0023	0.94 (1.02)
	RR2 163.0	0.0782 \pm 0.0023	1 (1.06)
	SR3 158.5	0.0666 \pm 0.0023	0.85 (0.90)
RR1 535~560	SR4 175.6	0.0752 \pm 0.0023	0.96 (1.02)
	RR2		1 (1.07)
	SR3		0.86 (0.92)
上記3ケースの平均値	SR4		0.96 (1.02)

注) ()内の数値は、120°位置のパターンの干渉係数を設計値1.02に規格化した場合の値である。

表 6.8 置換法による干渉係数測定値

制御棒パターン	臨界時制御棒位置 (mm)	ペリオド測定による 反応度 (%ΔK/K)	パターンによる 反応度 (注1) (%ΔK/K)	干渉係数 $\frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0}$ (注2)	(注3)	備 考
					設計値	
SR1-SR4 (180°)	SR1 360.0 SR4 360.1	—	—	1.0	1.05 (1.0)	測定時炉心温度 242.75℃
SR1-SR2 (60°)	SR1 360.1 SR2 360.1 RR2 598.1	0.1270 (RR2 598.1→640.0 640.0→700)	0.1407	0.94	0.93 (0.89)	241.88℃
SR2-SR4 (120°)	SR2 360.0 SR4 360.2 RR1 647.6	0.0563 (RR1 647.6→700)	0.0393	0.98	1.02 (0.97)	240.63℃

(注1) 測定時の炉心温度の違いの補正と各安全棒の全制御棒値の差の補正を行った。

(注2) ρ_0 はSR1-SR4パターンで250℃の余剰反応度2.255%ΔK/Kを使用した。

(注3) ()内はSR1-SR4パターンの干渉係数を1に規格化した値である。

表 6.9 各種測定法による制御棒反応度

(単位 %ΔK/K)

挿入 制御棒	臨界法 (単純和× 干渉係数)	中性子源増倍法		外挿法		Inverse Kinetics法				設計値	備 考
		chA (B-10)	chB (BF ₃)	ch1	ch2	ch1	ch2	同時落下と単純和との比			
								chl	ch		
SR-1	2.23	2.34	2.34	2.38	2.29	2.05	2.02			1.98	
SR-2	2.21			2.39	2.47	2.07	2.10			1.98	
SR-3	2.17			2.67	2.68	2.39	2.19			1.98	
SR-4	2.17	1.99	2.23	2.24	2.27	2.21	2.38			1.98	
SR-1 SR-2	4.13	5.22	5.20	5.41	4.83	3.80	3.88	0.92	0.94	3.68	干渉係数 0.93
SR-1 SR-3	4.49	5.24	4.96	5.04	4.71	4.78	4.26	1.08	1.01	4.04	1.02
SR-1 SR-4	4.62	5.07	5.34	4.76	5.33	4.53	4.81	1.06	1.09	4.16	1.05
SR-3 SR-4	4.04	4.12	4.51	5.43	5.28	4.70	4.57	1.02	1.00	3.68	0.93
SR-1.2 3.4	8.69			9.94	10.07	9.33	9.57	1.07	1.10	7.84	0.99

ペリオド法、臨界法による調整棒反応度 RR1: 2.13%ΔK/K RR2: 2.12%ΔK/K (設計値 1.90%ΔK/K)

表 6.1.0 スクラム時間 (ビジコングより)

No	安全機	保持電磁石「断」からの時間 (10 ⁻³ sec)			総合機能 試験データ
		ラッチ OFF	デラッチ ON	検出コイル感知	
1	SR-1	87.2	132.9	666.4	658
2	SR-2	74.0	114.3	638.0	639
3	SR-3	84.3	123.5	658.3	655
4	SR-4	84.8	120.4	660.6	657
5	SR-1	81.2	122.0	667.2	
	SR-2	-	-	635.6	
6	SR-1	79.8	120.2	658.7	
	SR-3	-	-	650.2	
7	SR-1	82.4	127.9	663.1	
	SR-4	-	-	666.0	
8	SR-3	-	-	653.3	
	SR-4	-	-	657.9	
9	SR-1	76.1	122.5	663.2	
	SR-2	-	-	-	
	SR-3	-	-	-	
	SR-4	-	-	659.1	
平均		81.2	123.0	657.0	(652)

1. 安全機4本共、スクラム時間は、1秒以下であった。

2. 安全機1に関する

5点のデータのバ
ラツキ市は右記の
通り

~ラッチ OFF 87.2- 76.1=11.1 (×10⁻³ sec)
Max/Min=146%

~デラッチ ON 132.9-120.2=12.7 (×10⁻³ sec)
=10.6%

スクラム時間 667.2-658.7= 8.5 (×10⁻³ sec)
= 1.3%

注) 検出コイル感知の時点は、(+)Peak -(+)Peakの中間位置とした。

表 6.1.1 データのパラツキによる誤差 (I.K.法)

	c h - 1		c h - 2	
	測定反応度と 標準偏差 %ΔK/K 2.045±0.054	バラツキによる 偏差 ±2.6%	測定反応度と 標準偏差 %ΔK/K 2.016±0.044	バラツキによる 偏差 ±2.2%
SR-1	2.065±0.068	±3.3%	2.104±0.063	±3.0%
SR-2	2.891±0.041	±1.7%	2.190±0.080	±3.7%
SR-3	2.205±0.040	±1.8%	2.380±0.081	±3.4%
SR-4	3.799±0.100	±2.6%	3.881±0.117	±3.0%
SR-1	4.780±0.142	±3.0%	4.256±0.113	±2.7%
SR-2	4.528±0.123	±2.6%	4.808±0.157	±3.3%
SR-3	4.698±0.130	±2.8%	4.566±0.072	±1.6%
SR-4	9.326±0.325	±3.5%	9.572±0.394	±4.1%

表 6.12 Inverse Kinetics 法における不感時間
及び動特性パラメータの影響

不感時間 動特性パラメータ	3.79 μ sec	3.19 μ sec (3.79-0.6) μ sec	4.39 μ sec (3.79+0.6) μ sec
標準値 (調整権 1/4 挿入)	2.045 % Δ K/K	1.937 % Δ K/K (-5.3%)*	2.165 % Δ K/K (+5.9%)*
全制御権挿入	2.004 % Δ K/K (-20%)*		

(この表は, SR-1をchiで測定した結果である。
* 2.045% Δ K/Kからのずれを示す。

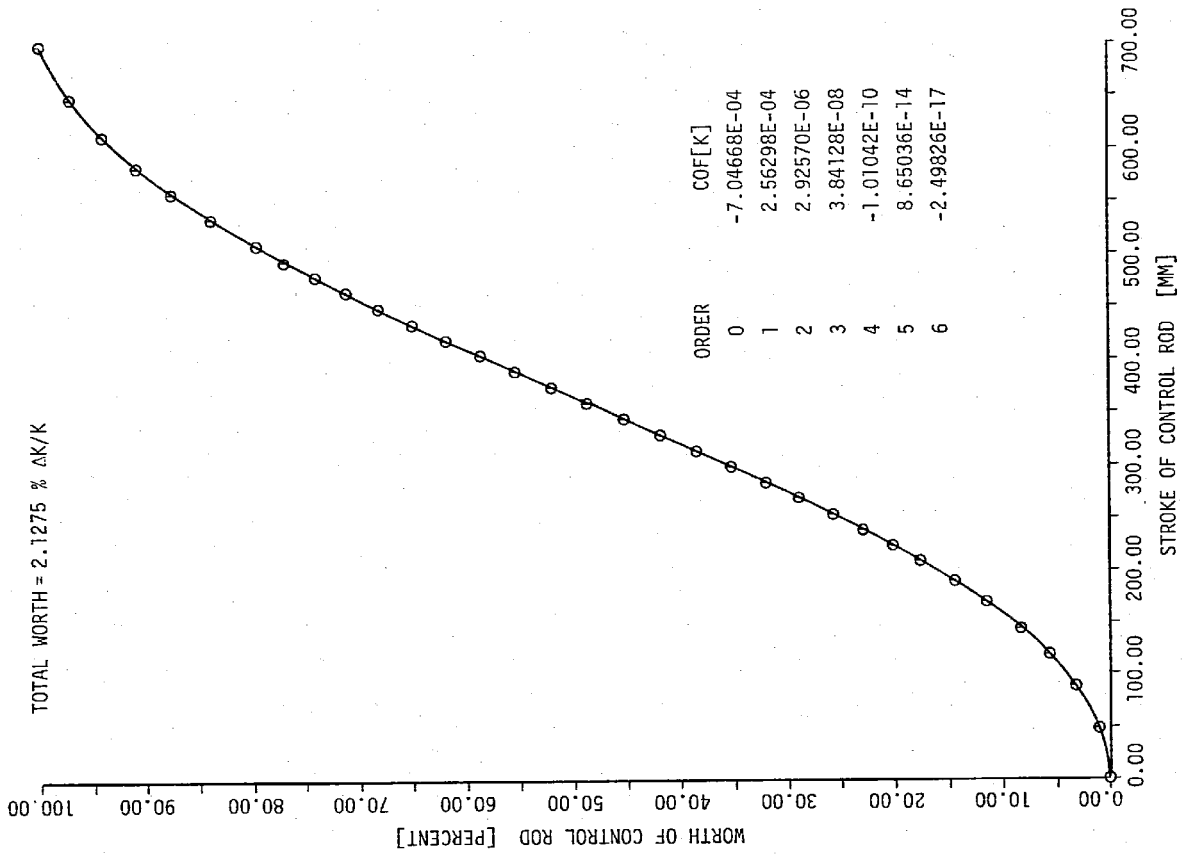


図 6.1 CALIBRATION CURVE OF THE REGULATING ROD #1

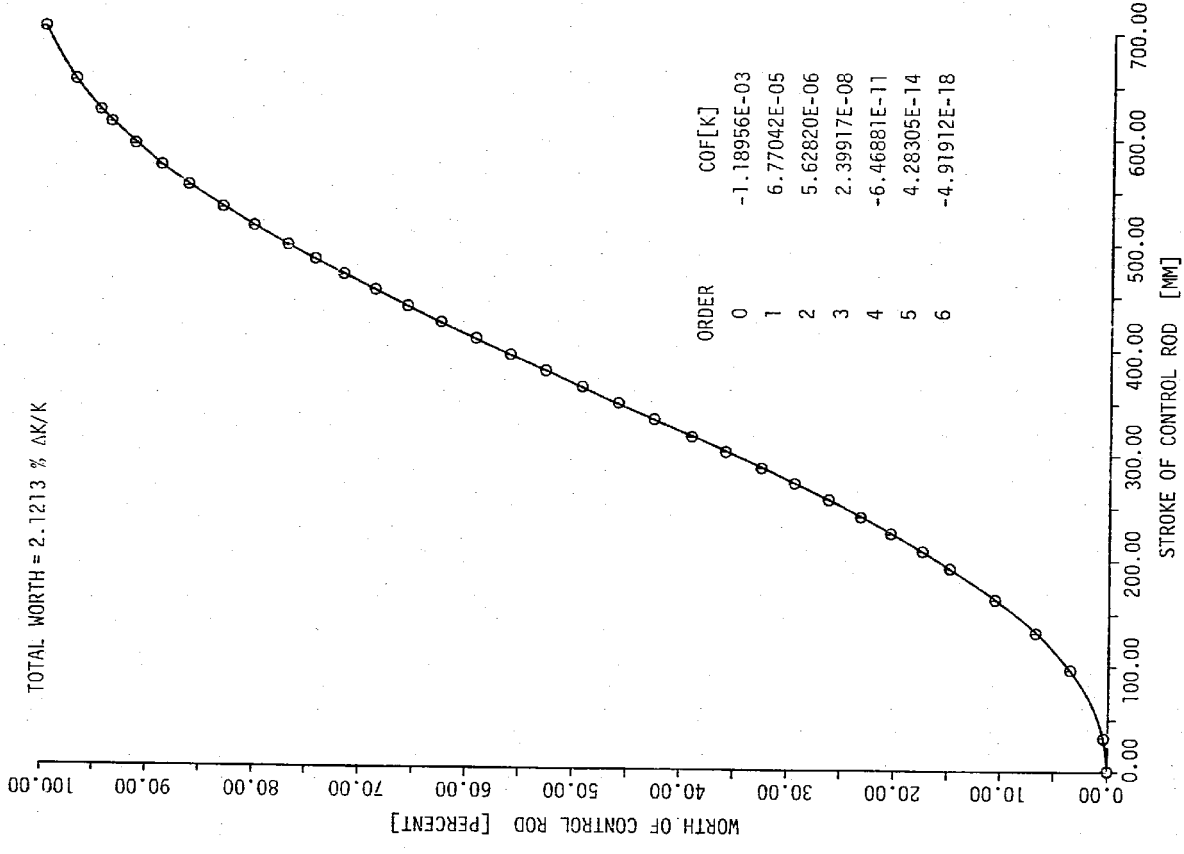


图 6.2 CALIBRATION CURVE OF THE REGULATING ROD #2

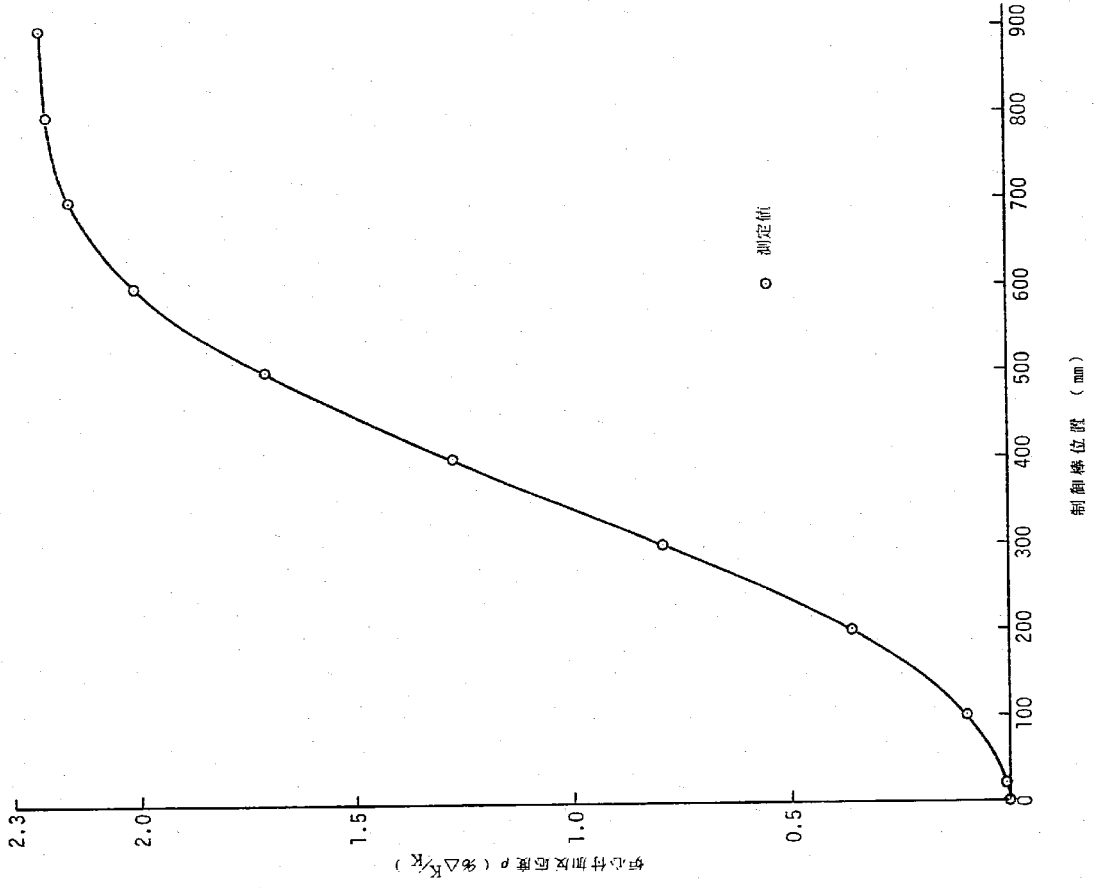


图 6.3 Saf-Rod 1 校正曲线

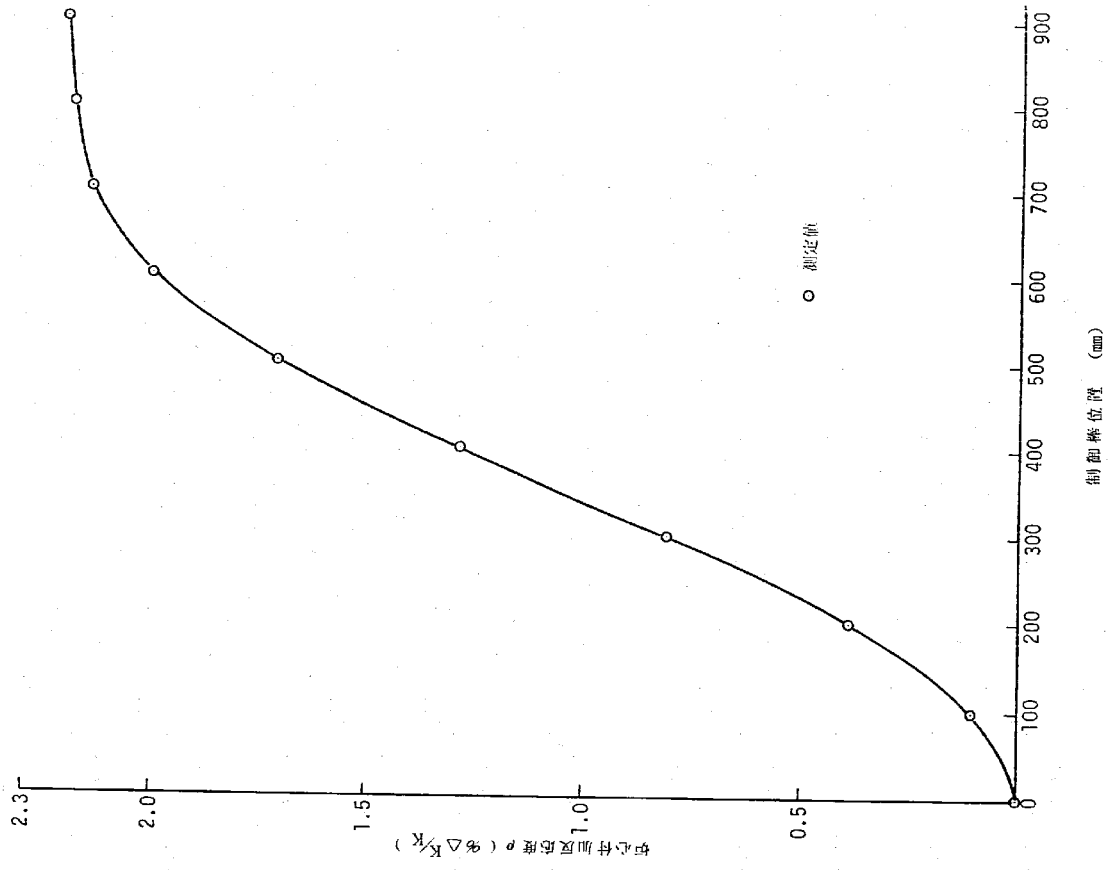


図 6.4 Saf-Rod 2 校正曲線

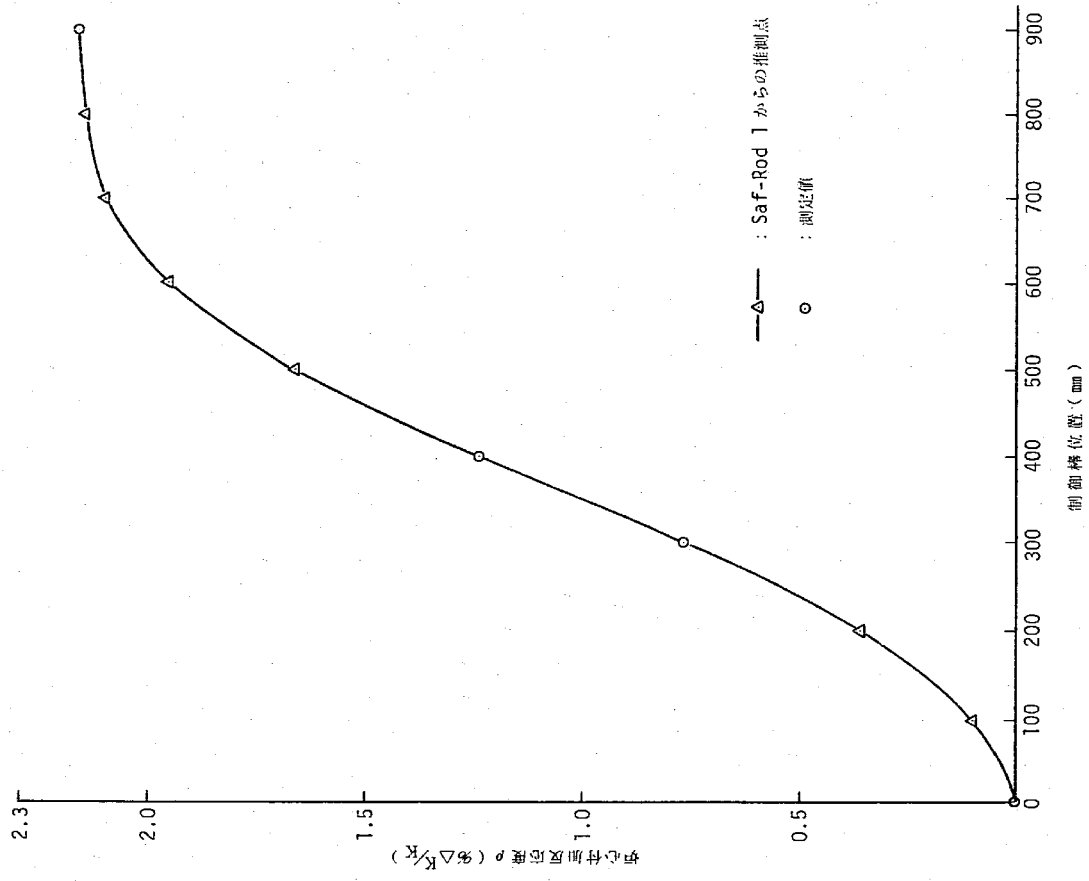


図 6.5 Saf-Rod 3 校正曲線

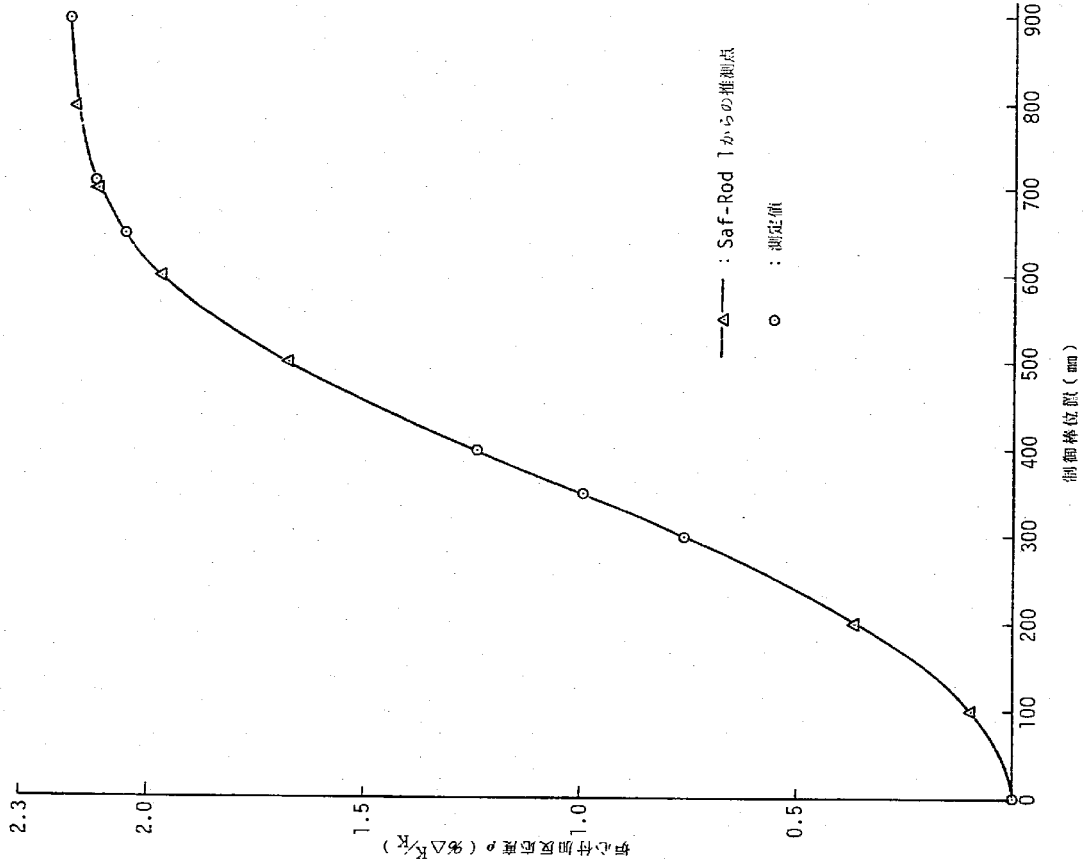


図 6.6 Saf-Rod 4 校正曲線

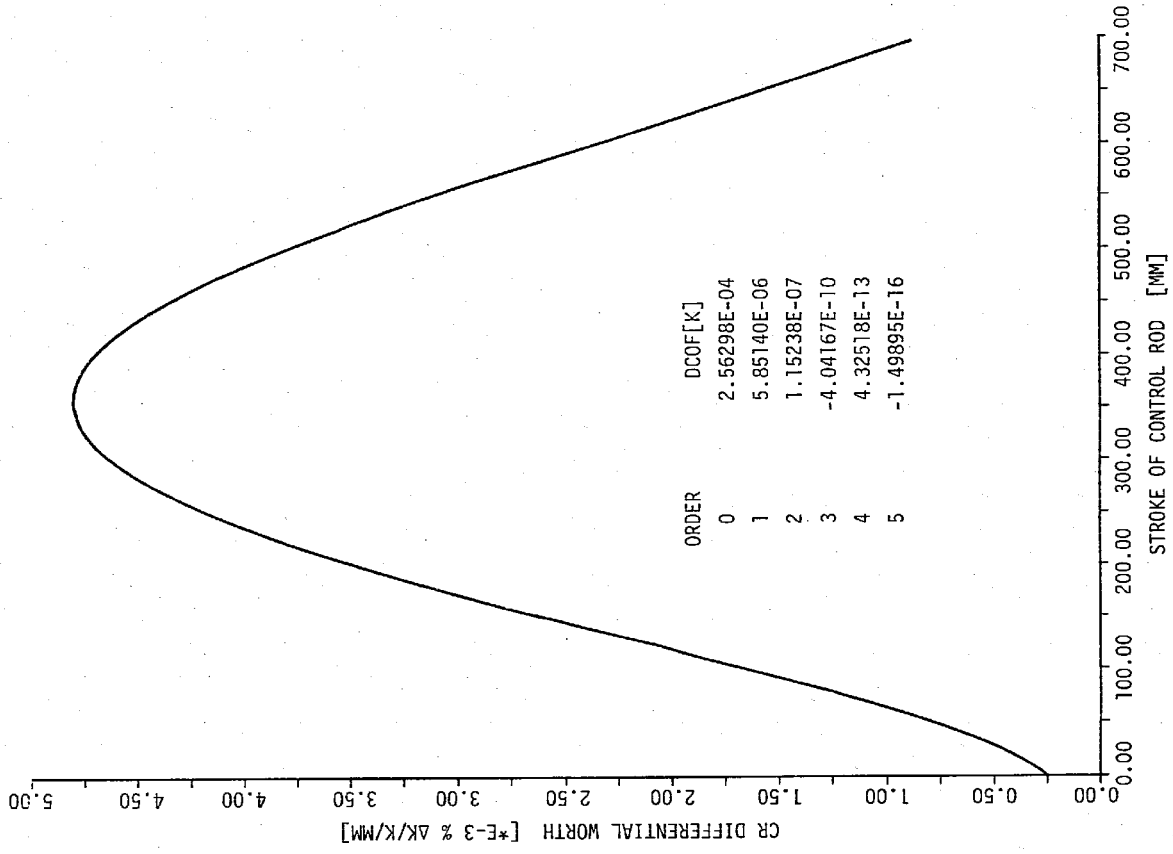


図 6.7 DIFFERENTIAL WORTH OF THE REGULATING ROD #1

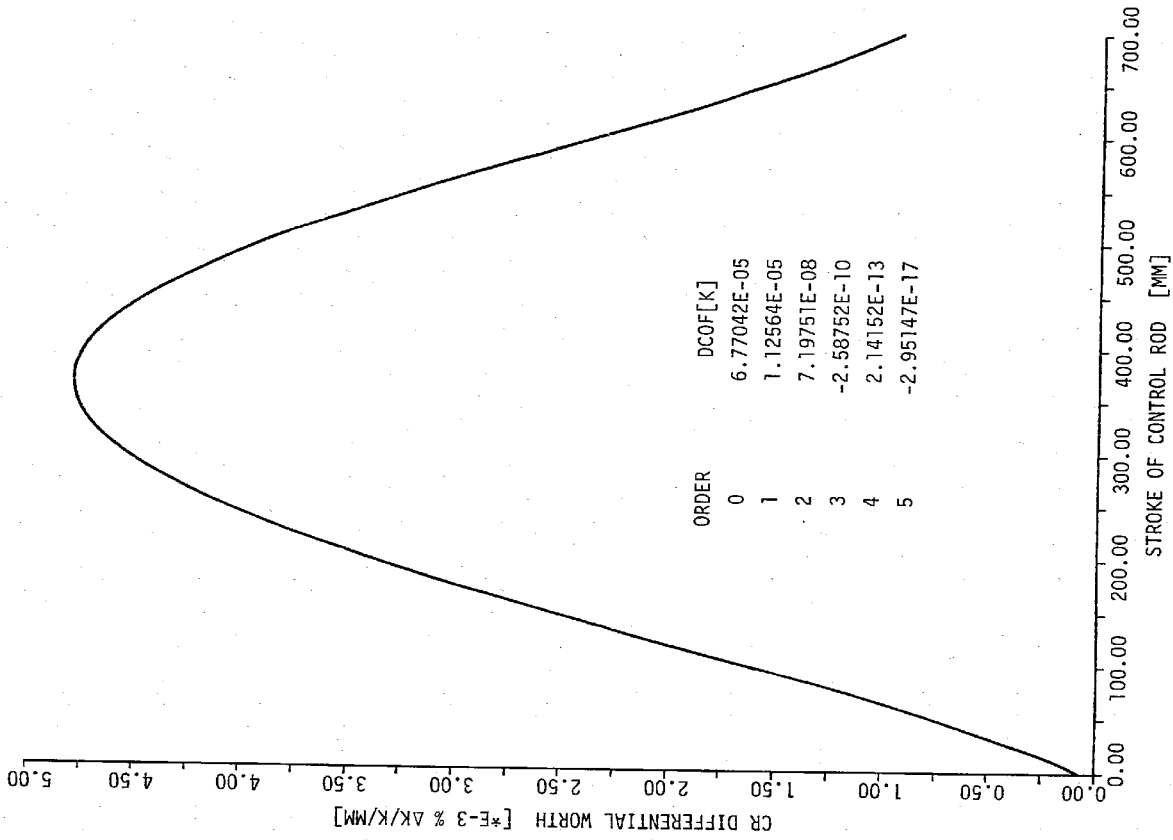


图 6.8 DIFFERENTIAL WORTH OF THE REGULATING ROD #2

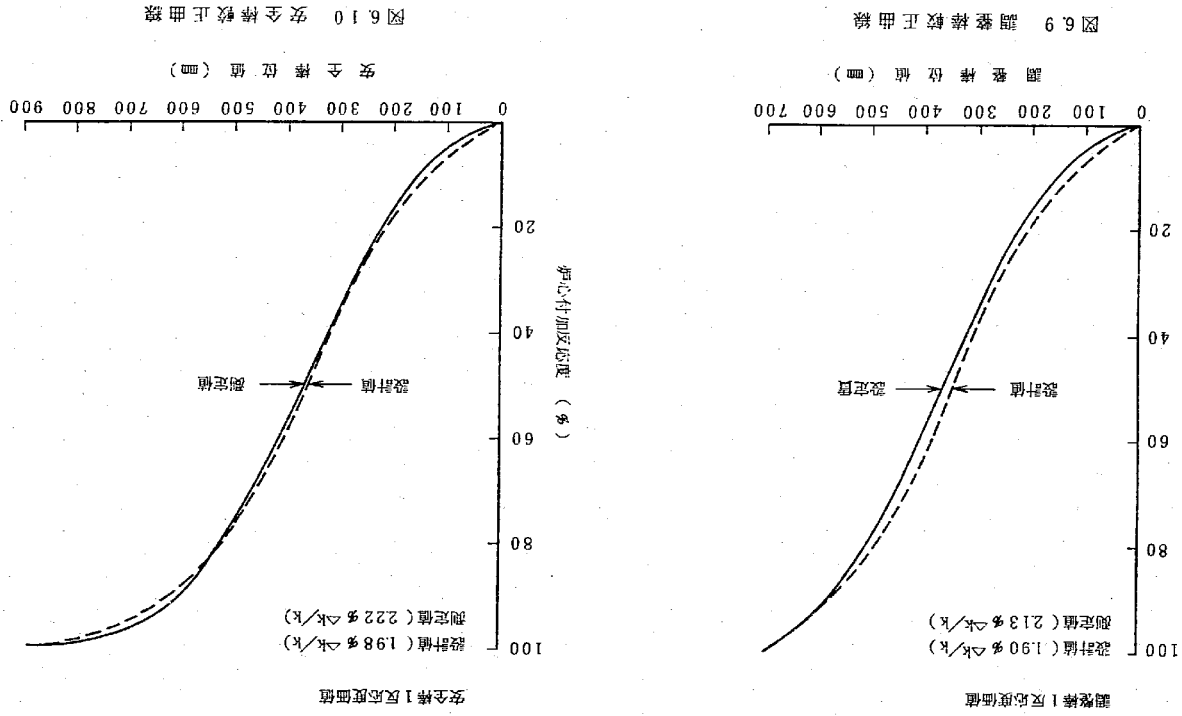


图 6.9 調整棒校正曲線

图 6.10 安全棒校正曲線

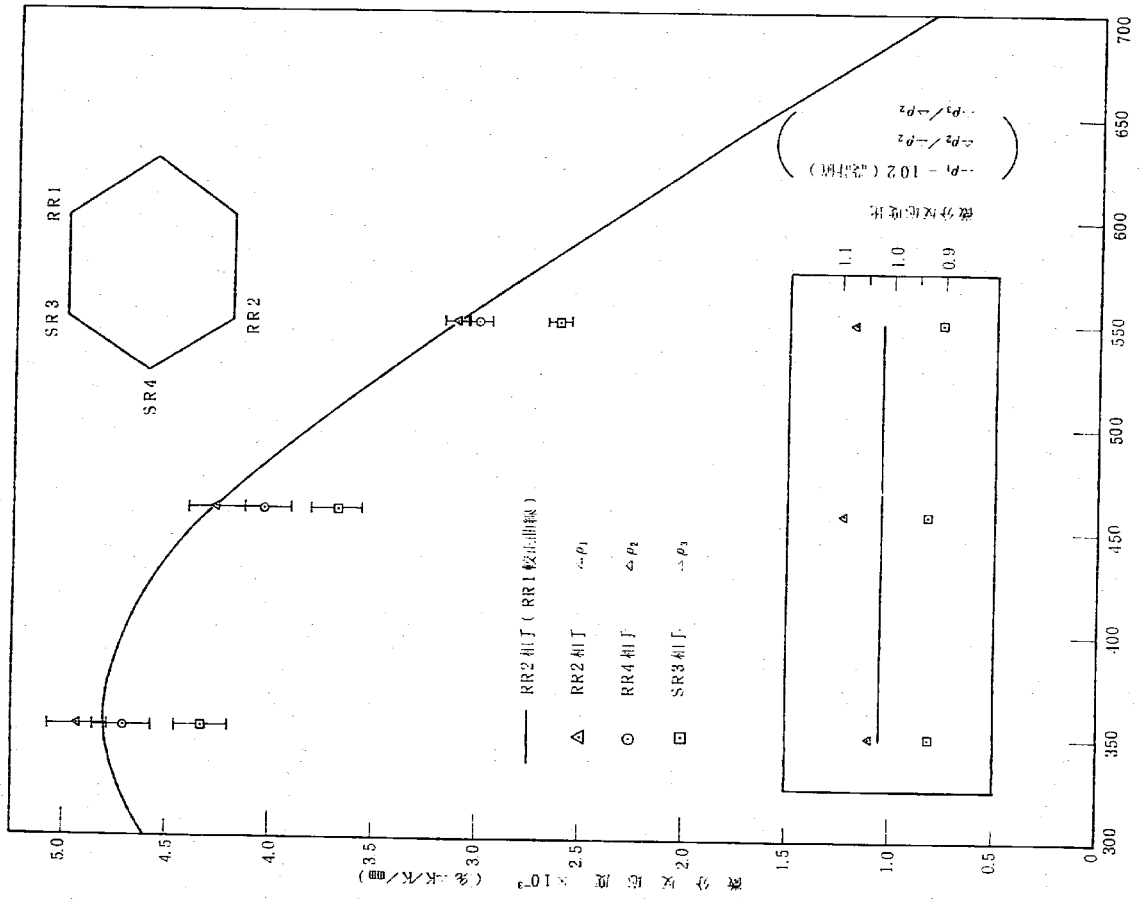


图 6.11 制御棒干涉効果(I)

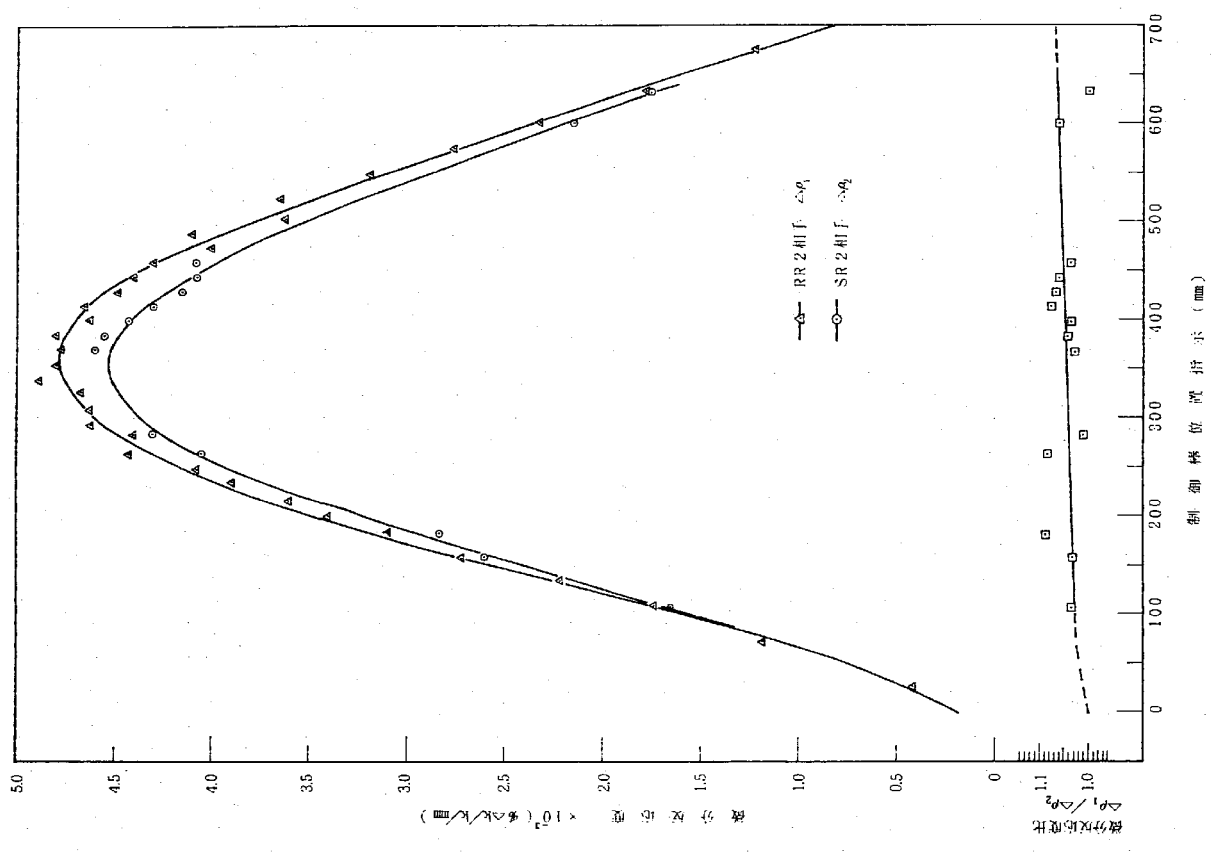


图 6.12 制御棒干涉効果(II)

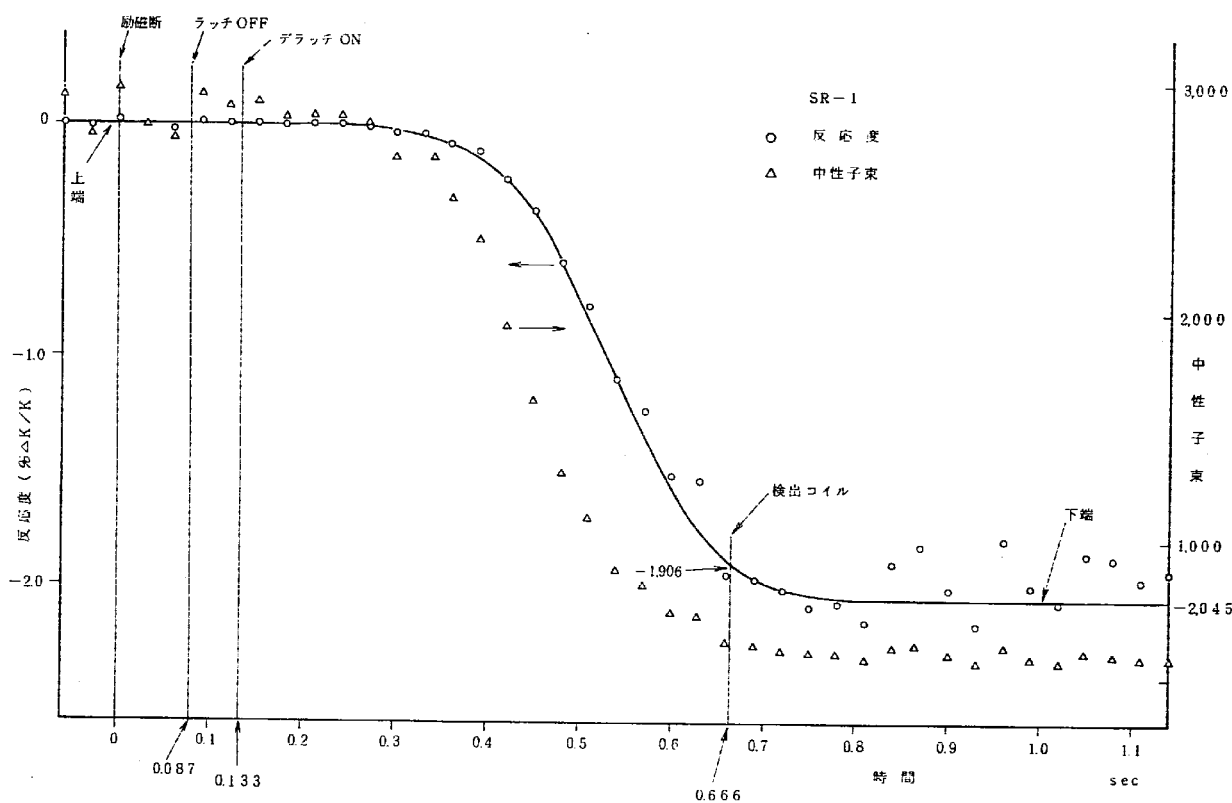


図 6.13 制御棒落下に伴う反応度変化 (ch-1)

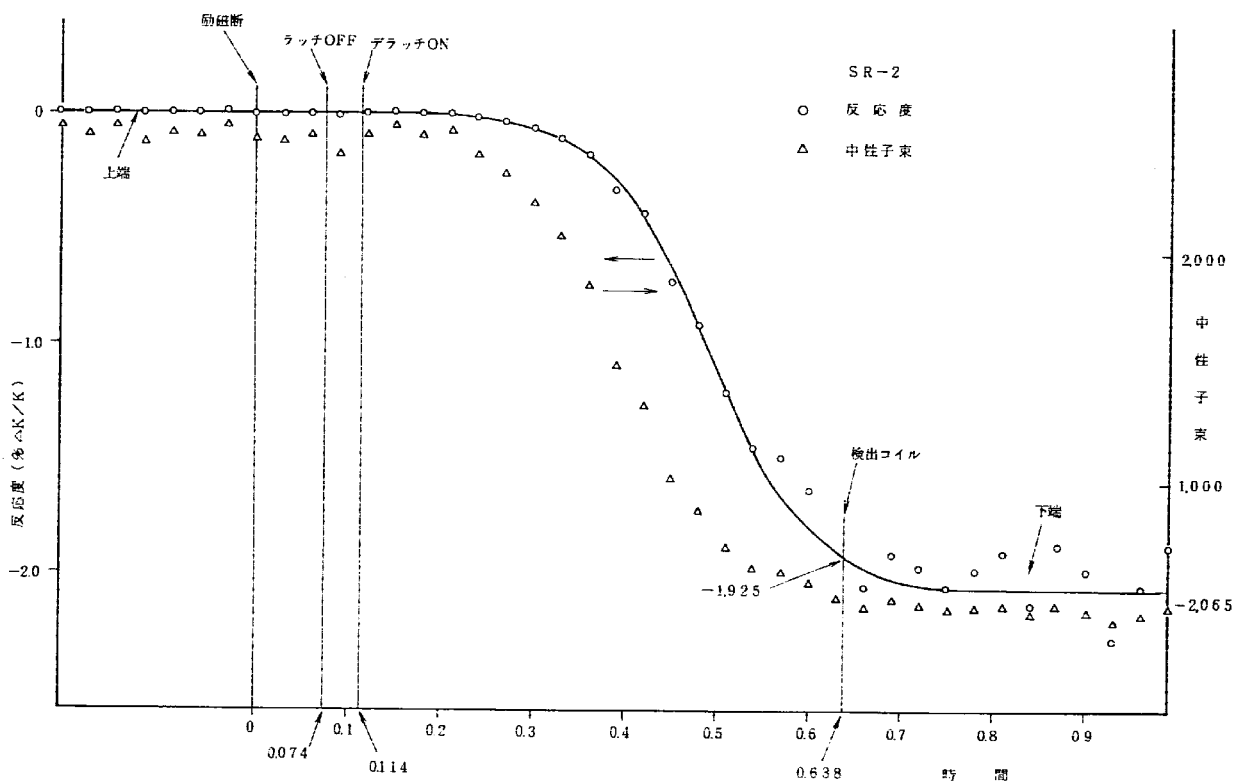


図 6.14 制御棒落下に伴う反応度変化 (ch-1)

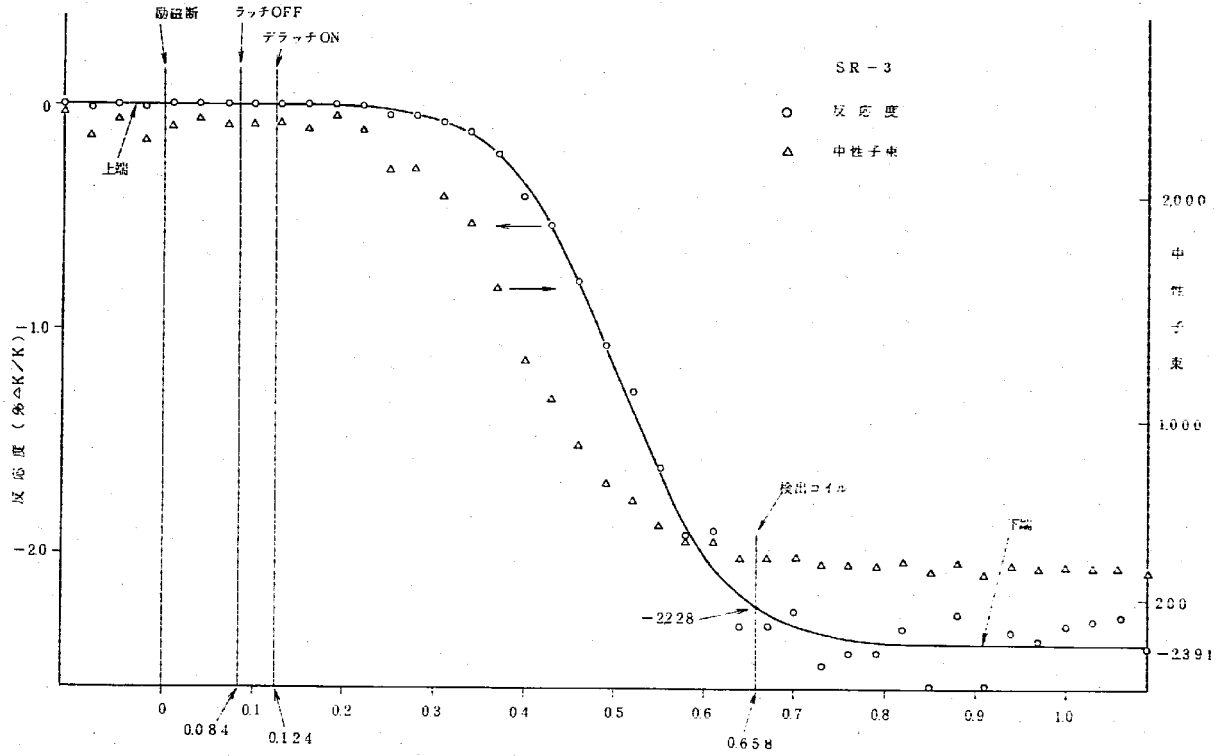


図6.15 制御棒落下に伴う反応度変化(ch-1)

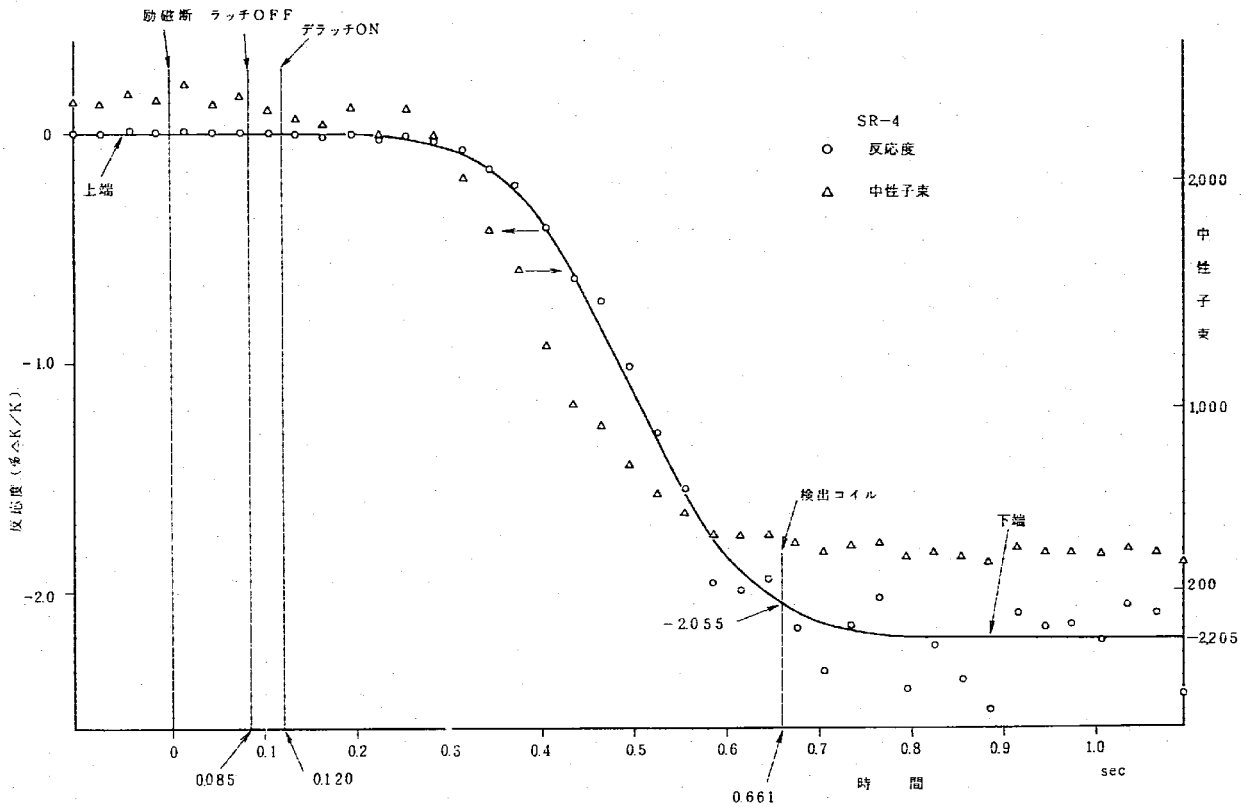


図6.16 制御棒落下に伴う反応度変化(ch-1)

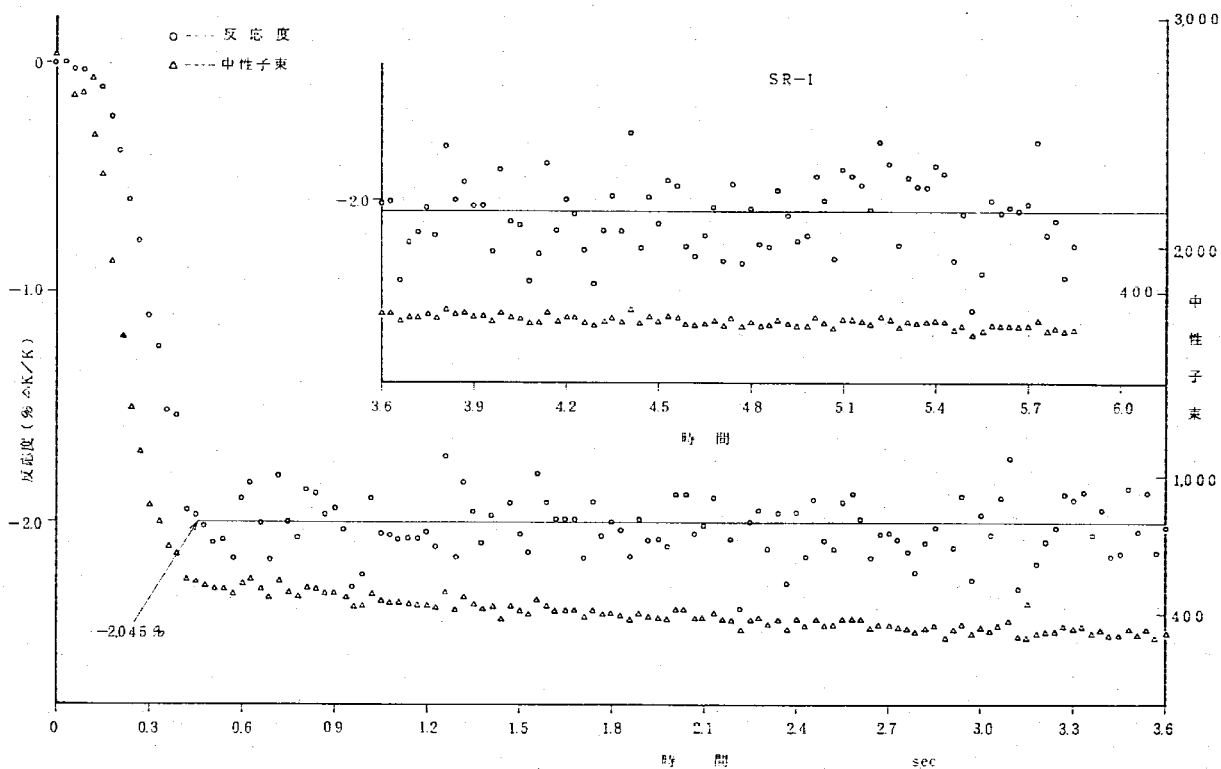


図6.17 制御棒落下に伴う反応度変化 (ch-1)

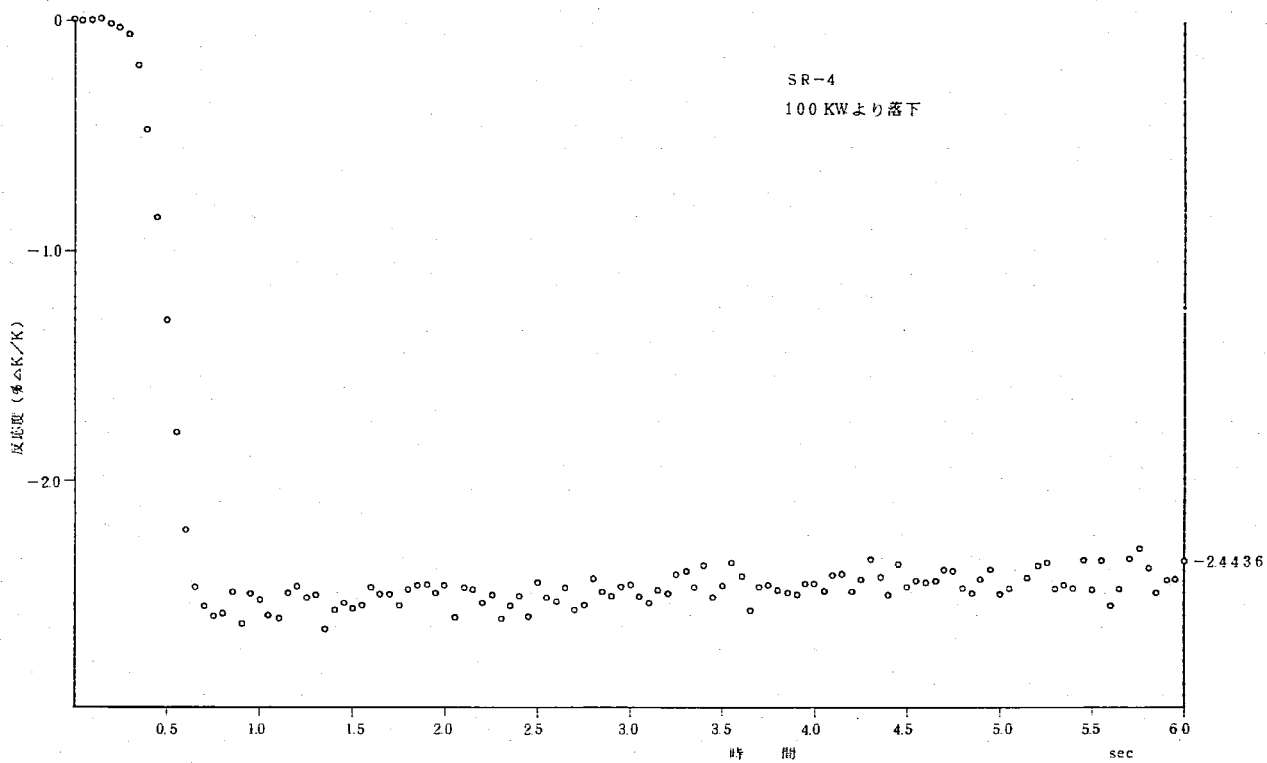


図6.18 制御棒落下に伴う反応度変化 (ch-2)

7. 検 討

7.1 制御棒校正曲線について

今回の測定では、調整棒1の補償制御棒として調整棒2を採用したので測定値は正の干渉効果を含みであり、これが測定値が設計値に比べて大きくなくなった原因の一つである。

図6.9及び図6.1-2からわかるとおり、調整棒1に関しては下端付近では補償制御棒がほぼ全引抜状態であるので干渉効果がほぼ0であり、調整棒1が上端に向うに従い、正の干渉効果が増していると思われる。調整棒2に関しては、ペリオド法で求めた調整棒1の反応度と置換して求めているので調整棒1とはほぼ同じ干渉効果の影響を受けている。

安全棒に関しては、ほぼ120°位置の調整棒との置換法で測定しているもので、4本ともほぼ等しい干渉効果を含んでいる。安全棒に関する干渉効果は、そのストロークに関して単調ではなく、図6.10の設計値と測定値が交差しているも、これが原因の一つであると思われるが、全ストロークにおける干渉係数の和は調整棒の干渉係数の和とほぼ同じであり、今回の測定における全制御棒位置はほぼ同じ正の干渉効果を含みと考えられる。

上記のことを説明するために簡単のためRR1, 2, SR1~4の全ての制御棒校正曲線、ストロークとも同一と仮定する。今回測定した調整棒の干渉係数 f_1 はストローク x に関して $f_1 = Ax + 1$ で表わされるとする。また、補償制御棒を120°位置の制御棒としてペリオド法で校正曲線を求めたとして、その干渉係数 f_2 を $f_2 = Bx + 1$ とする。

制御棒の全ストロークを x_0 とし、安全棒の校正曲線を120°位置の調整棒で求める場合、調整棒の現ストローク x 位置での Ax が安全棒の Ay に相当するとする。今回求めた調整棒の校正曲線を使用すると、 Ax だけ大きい値を与えるが、120°位置の安全棒の干渉効果 Bx を受けているので、 $(Ax - Bx)$ だけ大きくなる。又、安全棒の Ay は調整棒の干渉効果の影響を $(Bx_0 - Bx)$ 受けているので、 Bx の値に対して $(Ax - 2Bx + Bx_0)$ 大きい値を与えることになる。

今回測定した調整棒の干渉係数の和は $\int_0^{x_0} Ax dx = \frac{1}{2} Ax_0^2$ であり、安全棒の場合にも、 $\int_0^{x_0} (Ax - 2Bx + Bx_0) dx = \frac{1}{2} Ax_0^2$ となり同じ正の干渉効果となる。

7.2 検出器位置の影響について

(I) 中性子源増倍法による測定結果

中性子源増倍法による測定値は、制御棒と中性子源と検出器の位置関係の影響が大きく、干渉効果はうまく測定されていないが、全測定データについて次のことが言える。

- (I) 中性子源に近い制御棒ほど測定される反応度値は大きい。
- (II) 注目する検出器の方向にある制御棒ほど測定される反応度値は大きい。
- (III) 上記の傾向は未臨界度が深まるほど増長する。

(2) Inverse Kinetics 法による測定結果

干渉効果は、単独落下時に求めた各制御棒値の単純和と複数本同時落下時に求めた値の比をとっているため、検出器と制御棒との位置関係に起因する誤差はほぼキャンセルされたため設計値と比較的よく一致したと言える。

表6.9の結果から、安全棒の単独落下の場合、各安全棒の制御棒値のばらつきは $\pm 1.0\%$ であるが、これは制御棒と検出器の位置関係の影響と思われる。なお、これは中性子源増倍法における場合と同様であるが、今回の Inverse Kinetics 法では中性子源の影響の少ないところで測定しているため、中性子源増倍法よりはこれらの位置関係の影響は少ない。臨界体系での制御棒挿入パターンと検出器位置の熱中性子束の関係について予備解析(技術課メモ 技-52-40)では、制御棒1本の全挿入を対象とした場合、挿入する制御棒の位置によって検出器位置の熱中性子束は $\pm 1.0\%$ 程度変動する結果をえている。

今回の測定結果は、この予備解析の結果とよく一致している。

7.3 干渉効果について

制御棒の干渉効果は、複数本の制御棒が挿入されたときの中性子束の重みによる効果により起るものである。

2本の制御棒の場合、基準体系に2本の制御棒 i および j が同時に挿入された場合の制御棒反応度値を $\Delta\rho_{ij}$ は、それぞれの制御棒が単独で挿入された場合の反応度値 $\Delta\rho_i$ および $\Delta\rho_j$ をもとにして次のように書くことができる。

$$\Delta\rho_{ij} = f_i(j)\Delta\rho_i + f_j(i)\Delta\rho_j \quad \text{----- (1)}$$

上式の $f_i(j)$ がいわゆる干渉係数で、単一制御棒 i の反応度値 $\Delta\rho_i$ に対する制御棒 j の干渉の効果をあらわす補正係数である。

なお、設計計算における干渉係数 f は以下の式で定義される。

$$f = \frac{\Delta\rho_{ij}}{\Delta\rho_i + \Delta\rho_j} \quad \text{----- (2)}$$

これは(1)式で $f_1(t) = f_2(t)$ のとき成立つ、 $(\Delta \rho_1 \approx \Delta \rho_2)$

本試験において各種方法で、干渉効果の測定を行ったが、ここではそれらの測定結果を評価する。

ペリオド法による測定では、ペリオド法で求めた反応度の誤差が約3%程度あることを考慮すると、本測定結果で設計値を評価することは困難であり、また設計値と直接比較できる値もない。しかし、定性的にはよく設計値とよく一致していると言える。

置換法による測定では、制御棒2本が半挿入状態での測定値であり、設計値と直接比較できないが、干渉効果の差をペリオド法で求めているので精度がよく、定量的にも評価できる値であると言える。本結果は、設計値のほぼ半分程度であり、半挿入状態であることを考慮すると設計値の評価の正しさをうかがわせる。

ロッドロップ法による測定では、他の測定に比べると、設計値と直接比較できる量であり、検出器の位置依存性の影響を受けているが比較的よく設計値と一致している。

以上考察した結果、今回の測定値は設計値と比較的によく一致していると言える。

8. 結 言

以上の試験結果をまとめると以下の通りである。

(1) 制御棒修正曲線を測定したが、ほぼ設計曲線と一致した。制御棒位置に関しては、測定値が設計値より約10%大き目であった。これは本測定が正の干渉効果を含みで測定したことがその原因の一つである。

また、最大反応度付加率の測定値は設計値(0.00997% $\Delta K/K/sec$)よく一致しており、設計条件(0.015% $\Delta K/K/sec$ 以下)を十分満足している。

(2) 安全棒に対するワロンロッド・スタック基準及び制御棒に対するワロンロッド・スタック基準を十分満足していることを確認した。

- (イ) 安全棒に対するワロンロッド・スタック条件 -6.55% $\Delta K/K$
- (ロ) 制御棒に対するワロンロッド・スタック条件 -7.99% $\Delta K/K$
- (ハ) 25.0°Cにおけるシヤットダウンマージン 10.78% $\Delta K/K$

(3) ロッドロップ法(Inverse Kinetics法)によりスクラム時の安全棒の落下時間とそれに伴う炉心挿入反応度曲線を測定した結果以下のことがわかった。

(イ) スクラム時間は平均0.657secであり、全安全棒に関して設計条件(1秒以下)を満足している。

(ロ) スクラム時間検出コイル(下端より120mm上)位置は、反応度的には約93%挿入された位置である。

(ハ) 保持電磁石励磁断から実際に反応度が挿入されるまでの時間は約0.3秒である。

(ニ) 実際に反応度が挿入され始めてから全挿入されるまでの時間は約0.4秒である。

(4) 制御棒間の干渉効果を各種方法で求めた結果以下のことがわかった。

(イ) ペリオド法による測定では、設計値より大きい目の値であるが定性的にはよく合っている。

(ロ) 臨界法による測定では、制御棒半挿入状態の測定であるが、設計値のほぼ半分のものである。

(ハ) ロッドロップ法による測定では、検出器の位置依存性の影響を受けているが比較的よく設計値と一致している。

(ニ) 中性子源増倍法による測定では、検出器と中性子源との位置依存性の影響が大きく、干渉効果は分離して測定できなかった。

9. 謝 辞

本試験の実施にあたり、御協力を戴いた高速実験炉原子炉1 操運転員の諸氏に厚く感謝の意を表します。

付 録

- (I) Inverse Kinetics 法について
- (II) ペリオド法による反応度計算プログラムについて

付録 (I)

Inverse Kinetics 法について

Inverse Kinetics Equations について、以下に述べる。
原子炉を1点で扱った場合の動特性方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

②式をラプラス変換すると

$$\frac{dC_i(s)}{ds} = \frac{\beta_i}{\Lambda} (n(s) - \frac{1}{s} \lambda_i C_i(s)) = \frac{\beta_i}{\Lambda} (n(s) - \xi_i(s)) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\beta_i} \lambda_i C_i(s) = \xi_i(s) \quad (4)$$

④式を③式および①式に代入して整理すると

$$\frac{dn(s)}{ds} = \frac{\rho(s) - \beta}{\Lambda} n(s) + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\Lambda} \xi_i(s) + S \quad (5)$$

$$\frac{d\xi_i(s)}{ds} = \lambda_i n(s) - \lambda_i \xi_i(s) = -\lambda_i (\xi_i(s) - n(s)) \quad (6)$$

⑥式をラプラス変換する

$$S \xi_i(s) - \xi_{i0} = -\lambda_i (\xi_i(s) - n(s))$$

$$\therefore \xi_i(s) = \frac{\xi_{i0}}{s + \lambda_i} + \frac{\lambda_i n(s)}{s + \lambda_i} \quad (7)$$

⑦式を逆ラプラス変換して

$$\xi_i(t) = \xi_{i0} e^{-\lambda_i t} + \lambda_i \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_i (t-\tau)} d\tau \quad (8)$$

⑧式を⑤式に代入して

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\Lambda} \left\{ \xi_{i0} e^{-\lambda_i t} + \lambda_i \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_i (t-\tau)} d\tau \right\} + S \quad (9)$$

①式の両辺に $\frac{1}{n(t)}$ を乗じて整理すると

$$\rho(t) = \beta + A \frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} - \frac{1}{n(t)} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ \xi_{j0} e^{-\lambda_j t} + \lambda_j \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_j (t-\tau)} d\tau \right\} \quad (19)$$

$$-A \frac{S}{n(t)} \quad (20)$$

ここで、 $\xi_{j0} = n_{j0}$ とおくと (20)式において定常状態を仮定)

$$\rho(t) = \beta + A \frac{d}{dt} \left\{ \ln n(t) \right\} - \frac{1}{n(t)} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ n_0 e^{-\lambda_j t} + \lambda_j \int_0^t n(\tau) e^{-\lambda_j (t-\tau)} d\tau \right\} \quad (21)$$

$$- \frac{A \cdot S}{n(t)} \quad (22)$$

サンプリング間隔内での出力変動の正確な挙動は分らないが、この間では指数関数的に出力が変動するとする。

$$t_j \leq t < t_{j+1}$$

$$n(t) = n_j e^{\alpha_j (t-t_j)} \quad \alpha_j = \ln \left(\frac{n_{j+1}}{n_j} \right) / \Delta t_j$$

$$\Delta t_j = t_{j+1} - t_j \quad (23)$$

②式を①式に適用すると

$$\begin{aligned} \rho_j &= \beta + A \frac{1}{n_j} \frac{dn_j}{dt} - \frac{1}{n_j} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ n_0 e^{-\lambda_j t_j} + \lambda_j A_{1j} \right\} - \frac{A \cdot S}{n_j} \\ &= \beta + A \cdot \alpha_{j-1} - \frac{1}{n_j} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ n_0 e^{-\lambda_j t_j} + \lambda_j A_{1j} \right\} - \frac{A \cdot S}{n_j} \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{1j} &= \int_0^{t_j} n(\tau) e^{-\lambda_j (t-\tau)} d\tau \\ &= \int_0^{t_{j-1}} n(\tau) e^{-\lambda_j (t_j-\tau)} d\tau + \int_{t_{j-1}}^{t_j} n(\tau) e^{-\lambda_j (t_j-\tau)} d\tau \\ &= A_{1,j-1} \cdot e^{-\lambda_j \Delta t_{j-1}} + \frac{1}{\alpha_{j-1} + \lambda_j} (n_j - n_{j-1}) e^{-\lambda_j \Delta t_{j-1}} \quad (25) \end{aligned}$$

②式の最終項 $\frac{A \cdot S}{n_j}$ は実際上はほとんど無視できる項である。

以上をまとめて、計算機では結局次式を計算する。

$$\begin{cases} \rho_j = \beta + A \cdot \alpha_{j-1} - \frac{1}{n_j} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ n_0 e^{-\lambda_j t_j} + \lambda_j A_{1,j} \right\} \\ A_{1j} = A_{1,j-1} e^{-\lambda_j \Delta t_{j-1}} + \frac{1}{\alpha_{j-1} + \lambda_j} (n_j - n_{j-1}) e^{-\lambda_j \Delta t_{j-1}} \end{cases}$$

$$\alpha_j = \frac{\ln \left(\frac{n_{j+1}}{n_j} \right)}{\Delta t_j} \quad \Delta t_j = t_{j+1} - t_j$$

j=1のとき

$$\rho_1 = \beta + A \cdot \alpha_0 - \frac{1}{n_1} \sum_{j=0}^l \beta_j \left\{ n_0 e^{-\lambda_j t_1} + \lambda_j A_{1,1} \right\}$$

$$A_{11} = A_{10} e^{-\lambda_j \Delta t_0} + \frac{1}{\alpha_0 + \lambda_j} (n_1 - n_0) e^{-\lambda_j \Delta t_0}$$

$$\alpha_0 = \frac{\ln \left(\frac{n_1}{n_0} \right)}{\Delta t_0} \quad \Delta t_0 = t_1 - t_0$$

なお、計算に用いた遷移中性子生成割合 α 及び先行核崩壊定数を表1-1、表1-2に示す。

表 I-1 中性子生成時間及び遅発中性子生成割合

	標準値 (調整機 1/4 挿入)	全制御棒全挿入
λ	2.577×10^{-7} sec	2.053×10^{-7}
β_1	1.641×10^{-4}	1.514×10^{-4}
β_2	1.038×10^{-3}	1.036×10^{-3}
β_3	9.562×10^{-4}	9.418×10^{-4}
β_4	1.999×10^{-3}	1.973×10^{-3}
β_5	7.591×10^{-4}	7.634×10^{-4}
β_6	2.026×10^{-4}	2.069×10^{-4}
β	5.139×10^{-3}	5.073×10^{-3}

注) 計算に使用したのは標準値である。

付録 (II)

ペリオド法による反応度計算プログラムについて

表 I-2 先行核，崩壊定数

λ_1	0.0128 sec ⁻¹
λ_2	0.0316
λ_3	0.125
λ_4	0.326
λ_5	1.385
λ_6	3.84

ペリオド法による反応度計算プログラムについて

ペリオド法による制御棒校正において、起動系 ch1 と予備系 chD の 2 チャンネルをマルチスケーラに取込み、そのデータを紙テープに記録し、計算機により反応度を求めた。

ch1 に関しては、計数率が高く不感時間の影響を受けているが、chD は計数率が低く、ほとんど不感時間の影響を受けていない。しかし、chD はデータのばらつきの際合が大きいため、反応度 ρ を求める計算方法として、2 通りの方法を採用した。

計算法(I)では、ch1 のデータに対して検出器の不感時間 ϵ の補正を取り入れた反応度計算式、また、計算法(II)では予備系 chD のデータに列して、不感時間がないとした反応度計算式を採用した。

なお、最終的な結果としては、上記 2 方法で求めた反応度の平均値を採用した。なお、起動系 ch1 の不感時間の最確値は $3.79 \mu\text{sec}$ であった。

以下に各プログラムの詳細について述べる。

反応度計算プログラム (CRK)

1. 反応度計算方法 (1)

1-1. ゼータの発生する母集団

Reg-Rod 1 を臨界点位置 x_j から x_{j+1} ($j=1, 2, \dots, 33$) ($0 \leq x_j \leq 70.0$) まで引抜いたときの中性子数数を $y_i(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) とすれば、 $y_i(t_i)$ の発生する母集団は次の (1-1) 式で定義する。

$$y_i(t_i) = \frac{h \cdot e^{pt}}{1 + \tau \cdot h \cdot e^{pt}} \quad (1-1)$$

ただし、

h : $t_i = 0$ のときの真の計数値

p : ペリオド T の逆数

τ : 測定系の不感時間

1-2. 近似式

いま、 h, p, τ を未知量、 y_i を N 個の直接に測定する量とする。未知量 h, p, τ を最小 2 乗法で決定するために式 (1-1) の近似式を求める。

ここで、未知量 h, p, τ の近似値をそれぞれ h^*, p^*, τ^* とし、その微小な補正量を h^*, p^*, τ^* とする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} h^* &= h_0 + h \\ p^* &= p_0 + p \\ \tau^* &= \tau_0 + \tau \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式 (1-2) を式 (1-1) に代入すると

$$y_i = \frac{(h_0 + h^*) \cdot e^{(p_0 + p^*) t_i}}{1 + (\tau_0 + \tau^*) \cdot (h_0 + h^*) \cdot e^{(p_0 + p^*) t_i}} \quad (1-3)$$

式 (1-3) を Taylor の定理で展開し、 h^*, p^*, τ^* の 2 次以上の項を省略すれば、

$$\left. \begin{aligned} y_i &= \frac{h_0 e^{p_0 t_i}}{1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i}} - \frac{h_0^2 e^2 p_0 t_i}{(1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i})^2} \cdot \tau^* - \frac{e^{p_0 t_i}}{(1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i})^2} \cdot h^* \\ &\quad - \frac{h_0 t_i e^{p_0 t_i}}{(1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i})^2} \cdot p^* \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

となる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= 1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i} \\ \beta_i &= \frac{e^{p_0 t_i}}{1 + \tau_0 h_0 e^{p_0 t_i}} \end{aligned} \right\} \quad (1-4')$$

とすれば、式 (1-4) は次のように整理される。

$$y_i = \beta_i h_0 + (\beta_i h_0)^2 \cdot \tau^* - \frac{\beta_i}{\alpha_i} h_0^2 \tau_0 + \beta_i h_0 \cdot t_i \cdot p^* \quad (= f_1(\tau^*, h^*, p^*)) \quad (1-5)$$

いま、

$$m_i = f_1(\tau^*, h^*, p^*) - y_i$$

とすると、

$$m_i = a_1 \cdot \tau^* + b_1 \cdot h^* + c_1 \cdot p^* - u_i \quad (1-6)$$

となり、 a_1, b_1, c_1, u_i はそれぞれ、

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= (\beta_i \cdot h_0)^2 \\ b_1 &= -\frac{\beta_i}{\alpha_i} \\ c_1 &= -\frac{\beta_i}{\alpha_i} h_0 t_i \\ u_i &= y_i - \beta_i \cdot h_0 \end{aligned} \right. \quad (1-7)$$

である。

1-3. 正規方程式

最小 2 乗法により、式 (1-6) の m_i の自乗和 ($M = \sum_{i=1}^N (m_i)^2$) を最小にする最確値 τ^*, h^*, p^* を決定する。最確値 τ^*, h^*, p^* は次の連立方程式を解くことにより求まる。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial \tau^*} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial h^*} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial p^*} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1-8)$$

よって、1-8式を整理すると

$$\begin{cases} \sum a_1^2 \cdot \tau^* + \sum a_1 \cdot b_1 \cdot h^* + \sum a_1 \cdot c_1 \cdot p^* = \sum a_1 \cdot u_1 \\ \sum a_1 b_1 \tau^* + \sum b_1^2 \cdot h^* + \sum b_1 \cdot c_1 \cdot p^* = \sum b_1 \cdot u_1 \\ \sum a_1 \cdot c_1 \cdot \tau^* + \sum b_1 \cdot c_1 \cdot h^* + \sum c_1^2 \cdot p^* = \sum c_1 \cdot u_1 \end{cases} \quad (1-9)$$

となり、最確値 τ^*, h^*, p^* を与える正規方程式が求まる。
式(1-9)を行列式で表わすと(1-10)式となる。

$$\begin{bmatrix} \sum a_1^2 & \sum a_1 \cdot b_1 & \sum a_1 \cdot c_1 \\ \sum a_1 \cdot b_1 & \sum b_1^2 & \sum b_1 \cdot c_1 \\ \sum a_1 \cdot c_1 & \sum b_1 \cdot c_1 & \sum c_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^* \\ h^* \\ p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum a_1 \cdot u_1 \\ \sum b_1 \cdot u_1 \\ \sum c_1 \cdot u_1 \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

$$A = \begin{bmatrix} \sum a_1^2 & \sum a_1 b_1 & \sum a_1 c_1 \\ \sum a_1 b_1 & \sum b_1^2 & \sum b_1 c_1 \\ \sum a_1 c_1 & \sum b_1 c_1 & \sum c_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

$$X = \begin{bmatrix} \tau^* \\ h^* \\ p^* \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

$$U = \begin{bmatrix} \sum a_1 u_1 \\ \sum b_1 u_1 \\ \sum c_1 u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

正規方程式 $A \cdot X = U$ (1-14)

$\therefore X = A^{-1} \cdot U$ (1-15)

よって最確値 τ^*, h^*, p^* は、

$$\tau^* = \frac{1}{d} \{ X \cdot (C \cdot E - E^2) + Y(D \cdot E - B \cdot F) + Z(B \cdot E - C \cdot D) \}$$

$$h^* = \frac{1}{d} \{ X \cdot (D \cdot E - B \cdot F) + Y(A \cdot F - D^2) + Z(B \cdot D - A \cdot E) \}$$

$$p^* = \frac{1}{d} \{ X \cdot (B \cdot E - C \cdot D) + Y(B \cdot D - A \cdot E) + Z(A \cdot C - B^2) \}$$

$$d = \{ A \cdot (C \cdot E - E^2) + B(D \cdot E - B \cdot F) + D(B \cdot E - C \cdot D) \} \quad (1-16)$$

となる。

いま、式(1-6)の測定値 m_1, m_2, \dots, m_n の重みをそれぞれ p_1, p_2, \dots, p_n とすれば、各測定値を単位重みに還元するためにそれぞれの測定値 m_i に重み p_i の平方根を乗ずれば、正規方程式は式(1-10)より、次の式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} \sum p_1 \cdot a_1 & \sum p_1 \cdot a_1 \cdot b_1 & \sum p_1 \cdot a_1 \cdot c_1 \\ \sum p_1 \cdot a_1 \cdot b_1 & \sum p_1 \cdot b_1^2 & \sum p_1 \cdot b_1 \cdot c_1 \\ \sum p_1 \cdot a_1 \cdot c_1 & \sum p_1 \cdot b_1 \cdot c_1 & \sum p_1 \cdot c_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^* \\ h^* \\ p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum p_1 \cdot a_1 \cdot u_1 \\ \sum p_1 \cdot b_1 \cdot u_1 \\ \sum p_1 \cdot c_1 \cdot u_1 \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

ただし、重み $p_i = \frac{1}{y_i}$ として与える。

また、式(1-11)、式(1-13)より、

$$A = \sum p_1 \cdot a_1^2 = \sum (\beta_1 \cdot h_0) \cdot \frac{1}{y_1}$$

$$B = \sum p_1 \cdot a_1 \cdot b_1 = \sum (\beta_1 \cdot h_0)^2 \left(-\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right) \cdot \frac{1}{y_1}$$

$$C = \sum p_1 \cdot b_1^2 = \sum \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{y_1}$$

$$D = \sum p_1 \cdot a_1 \cdot c_1 = -\sum (\beta_1 \cdot h_0)^2 \cdot t_1 \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot y_1}$$

$$E = \sum p_1 \cdot b_1 \cdot c_1 = \sum \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right)^2 \cdot h_0 \cdot t_1 \cdot \frac{1}{y_1}$$

$$F = \sum p_1 \cdot c_1^2 = \sum \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} \cdot h_1 \cdot t_1 \right)^2 \cdot \frac{1}{y_1}$$

$$X = \sum p_1 \cdot a_1 \cdot u_1 = \sum (\beta_1 \cdot h_0)^2 \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot h_0}{y_1} \right)$$

$$Y = \sum p_1 \cdot b_1 \cdot u_1 = \sum \left(-\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right) \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot h_0}{y_1} \right)$$

$$Z = \sum p_1 \cdot c_1 \cdot u_1 = \sum \left(-\frac{\beta_1}{\alpha_1} \cdot h_0 \cdot t_1 \right) \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot h_0}{y_1} \right) \quad (1-18)$$

α_1, β_1 は式(1-4)'による。

よって求める未知量 τ, h, p は式(1-2)より

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 - \tau^* \\ h = h_0 - h^* \\ p = p_0 - p^* \end{cases}$$

(1-19)

となる。ペリオド T は P の逆数なので

$$T = \frac{1}{p}$$

(1-20)

として求まる。

1-4 精度

測定値の分散 σ^2 の不偏推定値、すなわち、不偏分散 $\hat{\sigma}^2$ は

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{S}{n-q}$$

(1-20)

で、S は残差平方和、(n-q) は自由度で、式(1-17)では未知量が3つなので q=3 である。

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{\sqrt{p_i}} \right)^2 \quad (\text{式(1-6)参照})$$

(1-21)

式(1-20)の正の平方根をもって、測定値の標準偏差の推定値とすれば測定値の標準偏差 $\hat{\tau}$ の推定値 $\hat{\tau}$ は次の式で表わされる。

$$\hat{\tau} = 0.6745 \sqrt{\frac{S}{n-q}}$$

(1-22)

。最確値 p の精度の推定値 $\hat{\tau}_p$ は最確値 p の重みを p_x とすれば式(1-22)に対して次のように表わされる。

$$\hat{\tau}_p = 0.6745 \sqrt{\frac{S}{p_x(n-q)}}$$

(1-23)

最確値 p の重み p_x は次の計算方法によって導く。式1-17の正規方程式に対して、

$$\begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(1-24)

式(1-24)で w_3 の解の逆数が p_x となる。すなわち、

$$p_x = \frac{1}{w_3} = \frac{d}{(A \cdot C - B^2)}$$

(1-25)

として与えられる。

式(1-23)よりペリオド T の推定誤差 ΔT は $T = \frac{1}{p}$ の関係より求める。

$$\Delta T = \frac{\hat{\tau}_p}{p^2 - \hat{\tau}_p^2}$$

(1-26)

1-5. 近似値 τ_0, h_0, p_0 の計算
中性子検出器が数え落しがないと仮定すると式(1-1)は

$$y_i(t_i) = h e^{p t_i}$$

(1-27)

となり、 t_i と $t_i + \Delta t$ で測定される $y_i(t_i)$ と $y_i(t_i + \Delta t)$ とより未知量 h, p の初期値 h_0, p_0 が求まる。すなわち、

$$\begin{cases} p_0 = \frac{\ln y_i(t_i + \Delta t) - \ln y_i(t_i)}{\Delta t} \\ h_0 = y_i(t_i) \cdot e^{-p_0 t_i} \end{cases}$$

(1-28)

となる。なお、データのバラツキが大きいので、 $i=1, 2, \dots, 10$ と 10 ケースにわたって初期値 h_0, p_0 を計算し、そのうち最大と最小を除く値の平均をもって、 p, h の初期値 \hat{h}_0 とした。

不感時間 τ との初期値としては $\tau_0 = 1 \mu \text{sec}$ 一定とした。

1-6. 反応度 ρ

ペリオド T と反応度 ρ の関係を表わす逆時間方程式は次の式である。(図1-1 反応度 ρ とダブリングタイム T' との関係グラフを示す。)

$$\rho(T) = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T}$$

(1-29)

ただし、

$$\begin{cases} \beta_i : i \text{ 番目の遅発中性子の生成割合}^* \\ \lambda_i : i \text{ 番目の先行核の崩壊定数} \end{cases}$$

燃料の種類は²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Puである。各燃料に対する反応度をそれぞれ

$$\rho_s, \rho_0, \rho_0, \rho_0, \rho_1 \text{ とすれば、求める反応度 } \rho \text{ は}$$

$$\rho' = \rho_s + \rho_0 + \rho_0 + \rho_0 + \rho_1 \quad (1-30)$$

となる。

反応度の誤差の推定値 $\Delta\rho$ は $\Delta\rho = \rho(T + \Delta T) - \rho(T)$ として求める。

2. 反応度計算方法(II)

式(1-1)で不感時間 $\tau = 0$ としたとき、(1-1)式は次のようになる。

$$y_i(t_i) = h \cdot e^{-\lambda_i t_i} \quad (2-1)$$

式(2-1)の両方の自然対数をとる。

$$\ln y_i = \ln h + p \cdot t_i \quad (2-2)$$

$\ln h = r$ とし、未知数 r と p を最小2乗法により求める。そこで、

$$m_i = r + p \cdot t_i = \ln y_i \quad (2-3)$$

$$M = \sum_{i=1}^n (m_i)^2 \quad (2-4)$$

とし、 $\frac{\partial M}{\partial r} = 0, \frac{\partial M}{\partial p} = 0$ の連立方程式から正規方程式(2-5)を求める。

$$\begin{bmatrix} N & A \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ C \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

ただし、

$$N = \sum_{i=1}^n 1, A = \sum_{i=1}^n t_i, B = \sum_{i=1}^n t_i^2, C = \sum_{i=1}^n t_i \ln y_i, D = \sum_{i=1}^n \ln y_i \quad (2-6)$$

よって、最確値 r, p は

$$\begin{cases} r = \frac{1}{d} (B \cdot D - A \cdot C) \\ p = \frac{1}{d} (N \cdot C - A \cdot D) \end{cases} \quad (2-7)$$

$$d = N \cdot B - A^2$$

* β_i と λ_i の使用データの出典 (β_i, λ_i の各値は表II-1に示す。)

β_i 表(52)-73でKeepinのデータを使用

λ_i 性能試験計画考資料(分冊3) (Tuttle著)

[Delayed Neutron Data for Reactor-Physics Analysis]

となる。ペリオド T , および h は

$$T = \frac{1}{p}, \quad h = e^{-r}$$

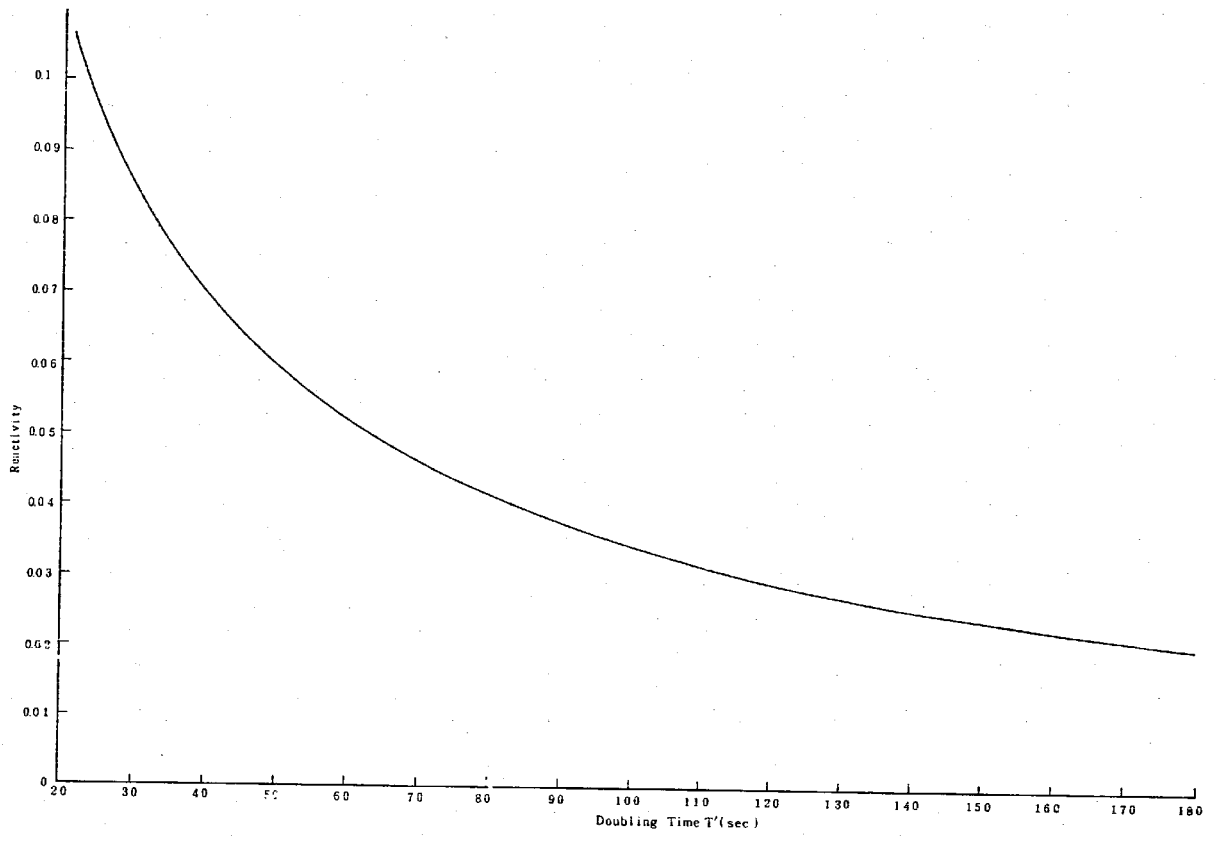
から求める。なお、最確値 p の誤差は、1-4節と同様の計算方法により

$$\Delta p = 0.6745 \sqrt{\frac{S}{(N-2)p_x}} \quad (2-8)$$

ただし、 $S = M = \sum_{i=1}^n (m_i)^2$

$$p_x = \frac{d}{N}$$

となる。



- 72 -

図 II - 1 Reactivity ρ - Doubling Time

表 II - 2 各種燃料別の遅発中性子の生成割合 β₁ と先行核の崩壊定数 λ₁

核種 グループ 番号 i	²³⁵ U		²³⁸ U		²³⁹ Pu		²⁴⁰ Pu		²⁴¹ Pu	
	β ₁ × 10 ⁻⁴	λ ₁ sec ⁻¹	β ₁ × 10 ⁻⁴	λ ₁ sec ⁻¹	β ₁ × 10 ⁻⁴	λ ₁ sec ⁻¹	β ₁ × 10 ⁻⁴	λ ₁ sec ⁻¹	β ₁ × 10 ⁻⁴	λ ₁ sec ⁻¹
1	1.103	0.0127	0.161	0.0132	0.308	0.0129	0.023	0.0129	0.044	0.0128
2	6.134	0.0317	1.719	0.0321	2.257	0.0311	0.222	0.0313	0.249	0.0299
3	5.413	0.1150	2.033	0.1390	1.740	0.1340	0.156	0.1350	0.219	0.1240
4	11.72	0.3110	4.866	0.3580	2.643	0.3310	0.285	0.3330	0.475	0.3520
5	3.685	1.4000	2.822	1.4100	0.830	1.2600	0.104	1.3600	0.149	1.6100
6	0.748	3.8700	0.941	4.0200	0.282	3.2100	0.023	4.0400	0.030	3.4700

*. データの出典 β₁ 技(52)-73で keepinのデータ使用

λ₁ 性能試験計画参考資料(分冊3)

Tuttle著 「Delayed Neutron Data for Reactor-Physics Analysis」

- 73 -