

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

臨界試験(NT-12)/初期炉心構成(NT-13)

1980年4月

動力炉・核燃料開発事業団

1980年 4月

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

臨界試験(NT-12)/初期炉心構成(NT-13)

山本 寿* 関口善之* 三田敏男***

池上哲雄** 妹尾 誠*** 石井愛典**

要 旨

臨界試験

高速実験炉「常陽」は昭和52年4月24日初臨界を達成した後、初期炉心を構成するために必要なデータを得るための下記の臨界試験を行った。

- (1) 調整棒No.2について、ペリオド法及び未臨界法を用いて全ストロークの反応度曲線を求めた。
- (2) 冷却材ナトリウム温度、170℃から250℃の範囲の等温反応度係数を測定した。
- (3) 炉心周辺の燃料1体の持つ反応度値を測定した。

上記の他に中性子源効果等の臨界測定に関する基礎的な試験を行った。上記の結果はいずれも設計計算値と良く一致し、これらをもとに、初期炉心に必要な追加すべき燃料本数を8本と決定した。

初期炉心構成

初期炉心への炉心燃料装荷は3ステップに分けて行ない、それぞれのステップで炉心の余剰反応度を確認して、最終段階に於いて炉心燃料本数70本の、50MW定格出力上昇のための初期炉心を構成した。本炉心の持つ余剰反応度は250℃に於いて2.2% $\Delta K/K$ で、設計通りの性能を持つものと予想される。

* 大洗工務センター高速実験炉部技術課

** 同 上 (現・FBR本部)

*** 同 上 (現・日立エネルギー研究所)

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

Apr., 1980

JOYO Start up Test Report
Measurement of the Critical Core and
Full Core Loading Test

Hisashi Yamamoto, Yoshiyuki Sekiguchi,
Toshio Sanda, Testuo Ikegami,
Makoto Senoh and Yoshinori Ishii

Abstract

Measurement of the Minimum critical Core

Following initial criticality, the reactivities necessary for determining the excess reactivity of the power-up core were measured. Only those measurements necessary to provide the minimum required information were made as follows:

- (1) One regulating control rod worth was measured by using both the period and subcritical multiplication techniques.
- (2) The isothermal temperature coefficient was measured between 170°C and 250°C.
- (3) Reactivity worth measurements of one core edge fuel assembly were made.

In addition to these measurements, the neutron source effects which affect the determination of true critical control rod position were measured. All the measured reactivity worths described above were in good agreement with design calculations.

Full Core Loading Test

Based on the reactivity worths described above, the number of fuel assemblies to be added for the desired excess reactivity was determined. Five fuel assemblies were added to the existing core with 65 fuel assemblies (one fuel assembly had already been added to the minimum critical core to measure the edge fuel worth). The initial power-up core with 70 fuel assemblies was achieved after the five assemblies were loaded in three steps, with confirmation of the additional reactivity worth measured after each step. The excess reactivity of the core was measured as 2.2%Δk/k at 250°C.

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

目次

1. まえがき	1
2. 試験目的	1
3. 設備概要	2
4. 試験概要	7
4.1 試験計画	7
4.2 試験工程	8
5. 試験の方法と結果	11
5.1 調整棒仮校正	11
5.2 周辺燃料反応度値	23
5.3 等温係数	24
5.4 初期炉心構成	35
5.5 その他の試験	40
6. 評価と検討	53
7. 結 言	56
8. 謝 辞	56
参考文献	57
付 録	58
1. ダブリングタイム・反応度変換対応曲線	58
2. 中性子検出器の配置と感度	62
3. 中性子源引抜装置	65

表 リ ス ト

- 4-1 臨界試験全体工程表
- 4-2 初期炉心構成全体工程表
- 5-1 ペリオド法による測定結果(I)
- 5-2 " (II)
- 5-3 中性子源増倍法による結果(I)
- 5-4 " (II)
- 5-5 " (III)
- 5-6 等温係数測定時の温度・流量
- 5-7 等温反応度測定結果
- 5-8 制御棒延長管の熱膨張効果測定結果
- 5-9 冷却材温度変化による中性子検出系の感度
- 5-10 初期炉心構成時の反応度効果
- 5-11 中性子源効果(ガンマ線源部入り)
- 5-12 " (ガンマ線源部引抜)
- 5-13 ガンマ線源部引抜時中性子源強度測定結果
- 5-14 中性子源効果補正(1)
- 5-15 " (2)
- 5-16 計数率測定結果
- 5-17 計数率規格化データ
- 5-18 不感時間の結果
- 5-19 炉内燃料移送時の中性子係数率の結果
- 5-20 炉心燃料装荷時の中性子計数率の結果
- 5-21 炉内ラックの燃料が起動系に与える効果
- 6-1 試験結果と設計計算値との対比
- 6-2 制御棒効果の結果

図 リ ス ト

- 3-1 原子炉垂直断面図
- 3-2 最小臨界炉心図
- 3-3 炉容器断面図
- 5-1 ベリオド法によるRR-2校正曲線
- 5-2 置換法によるSR-3校正曲線
- 5-3 調整棒No.2校正曲線
- 5-4 制御棒校正結果
- 5-5 等温係数測定時の冷却材温度変化
- 5-6 等温反応度係数測定結果
- 5-7 調整棒No.2延長管収縮効果
- 5-8 中性子係数率に及ぼす効果
- 5-9 初期炉心構成試験フロー
- 5-10 初期炉心構成図
- 5-11 中性子源効果
- 5-12 中性子源効果の原子炉出力・反応度差・相対図

1. ま え が き

本報告書は、高速実験炉「常陽」が初期臨界を達成した後、昭和52年4月26日より同年5月19日迄に実施された臨界試験と出力上昇のための炉心（初期炉心）構成に関するものである。

高速実験炉「常陽」は昭和52年4月23日に臨界達成後、引き続いて、計画の通り臨界試験（NT-12）を行った。本試験は、50MW出力上昇のための余剰反応度を持った初期炉心を決定するための最小限度の基礎的な反応度に関する試験である。この試験の結果に基づいて、最小臨界炉心に追加すべき燃料本数を決定し引き続いて3ステップに分けて炉心燃料装荷を行い、各ステップに於いて余剰反応度を確認しつつ初期炉心構成（NT-13）を行った。

本報告書では、これらの試験と結果及び設計計算との関係について述べる。

2. 試 験 目 的

制御棒を校正して最小臨界量を決定する。次に燃料等価反応度及び等温係数を測定して、初期炉心構成のために必要な追加燃料本数を決定して、定格出力運転に必要な余剰反応度を持つ炉心を構成する。

3. 設備概要

3.1 原子炉本体

原子炉本体は、第2-1図に示す様に、原子炉容器、その上部に配置した回転プラグ、及び炉心部より構成される。

原子炉容器は、炉心を収容する堅型円筒形の二重容器で、内部には炉心を支える炉心構造物が設けられ、上部には回転プラグで蓋がされている。

回転プラグは、大回転プラグと大回転プラグに偏心して設けられた小回転プラグにより成る二重回転方式であり、小回転プラグには燃料交換機制御棒駆動機構が据付けられる炉心上部機構等を備えている。

3.2 炉心部の構造

炉心部は、第2-2図に示す様に、炉心燃料集合体と、その周囲をとり囲む半径方向ブランケット燃料集合体及び反射体によって構成され、これらの炉心構成要素は、炉心構造物の炉心支持板によって位置決めされ、ハイドロリックホールドダウン機構によって保持される。更に、炉心構造物は第2-3図に示す様に、原子炉容器内の一次冷却材の流路の形成及び各炉心構成要素への流量配分を行う機能を有している。

炉心支持板は、炉心領域毎に連結管と炉心構成要素のエントランスノズルとの嵌合部の寸法を変化させて、炉心構成要素の誤装荷防止の機能も有している。

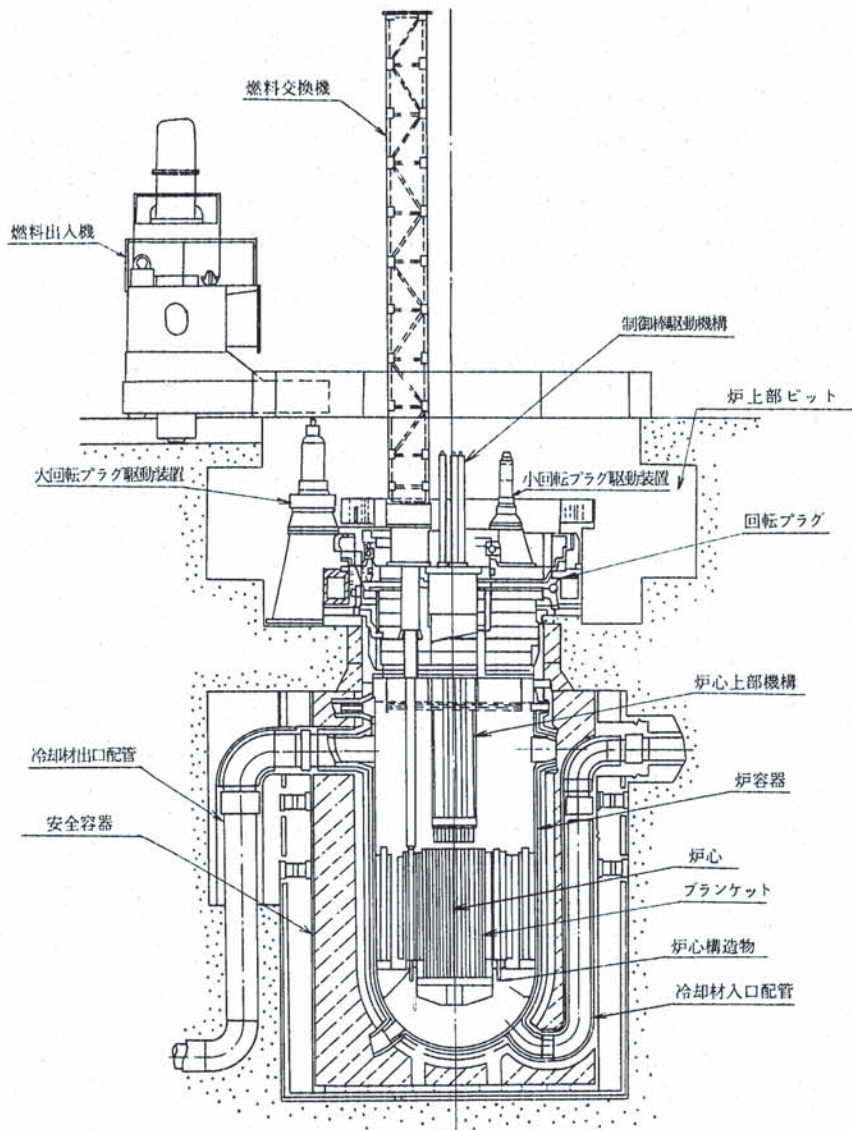
炉心部を構成する燃料集合体は、六角形状のラッパ管内にウラン・プルトニウム混合酸化物ペレットを収納した9本の燃料要素を内蔵する炉心燃料集合体と劣化ウラン酸化物ペレットを収納した19本の燃料要素を内蔵する半径方向ブランケット燃料集合体より成る。反射体は、半径方向ブランケット燃料集合体の外側に配置され、炉心より漏れる中性子を反射する機能と高圧プレナムより導入される冷却材を低圧プレナムへ送る際の圧力調整の機能を有している。中性子源は、Sb-Be型で放射性Sbを内蔵した γ 線源部とそれを収納するBeを内蔵した受入集合体より構成される。

3.3 炉心特性

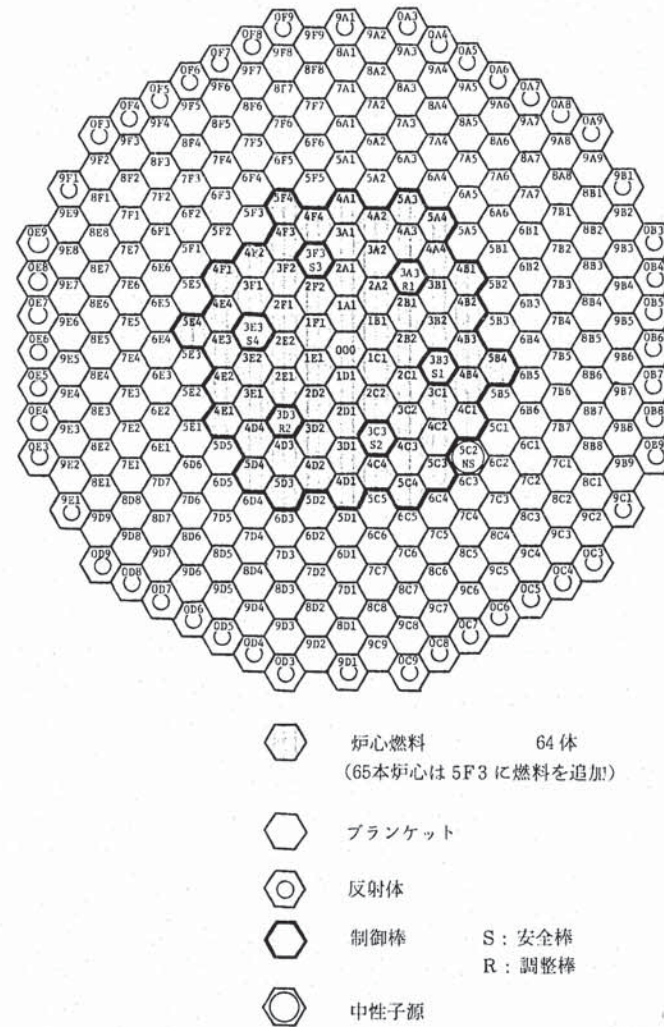
炉心設計計算では「常陽」の最小臨界炉心における燃料装荷本数は約61本（於250℃）と予想されている。初期炉心は約67本（於250℃）であり、この時の余剰反応度は約2.3% $\Delta K/K$ で、一次冷却材温度250℃から定格運転への温度補償0.8% $\Delta K/K$ 、燃焼余裕1.0% $\Delta K/K$ の他、運転余裕0.5% $\Delta K/K$ が見込まれている。

制御棒は、調整棒2本、安全棒4本より成り、1本の反応度値は1.4% $\Delta K/K$ 以上もつ様に設計されている。初期炉心における制御棒値は調整棒1.90% $\Delta K/K$ 、安全棒1.98% $\Delta K/K$ と推定されている。

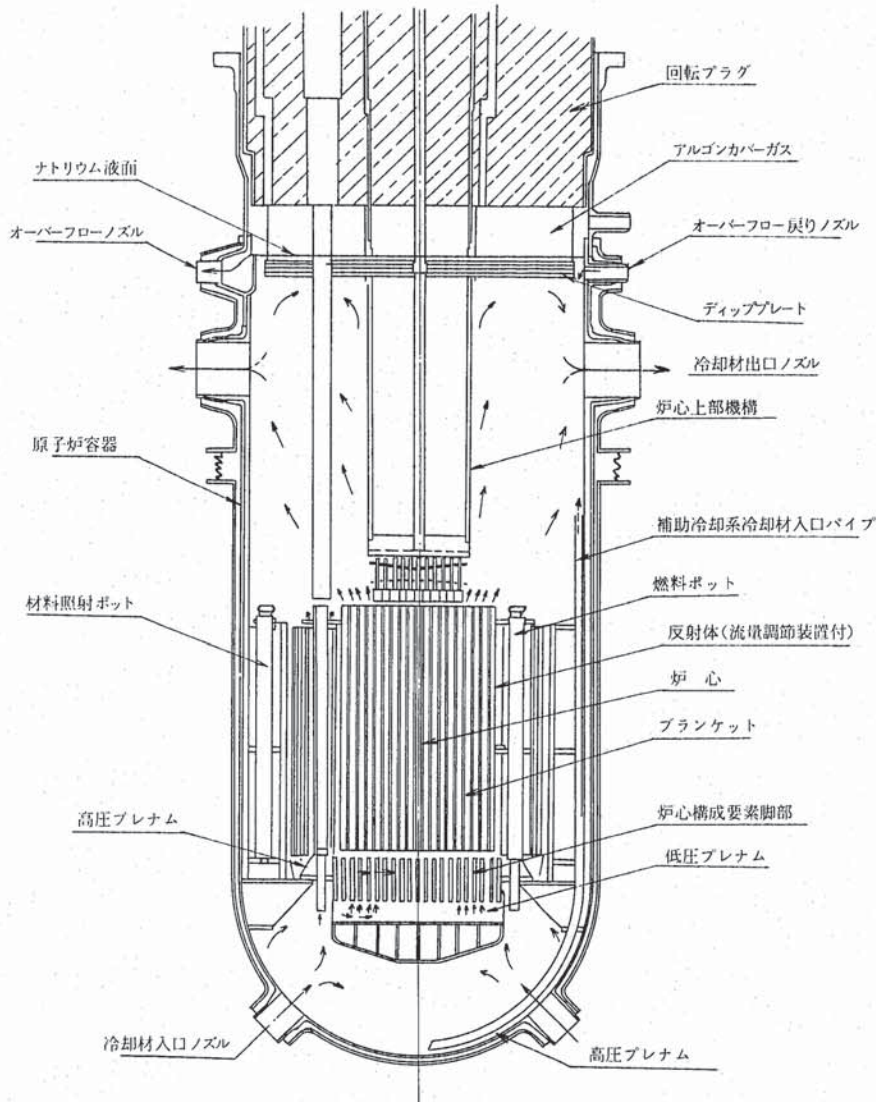
周辺燃料値は0.35% $\Delta K/K$ （ブランケットと置換）である。



第3-1図 原子炉垂直断面図



第3-2図 最小臨界炉心図



第 3-3 図 炉容器断面図

4. 試験概要

4.1 試験計画

初期臨界達成で得られた最小臨界炉心に於いて、下記のステップで初期炉心決定に必要な反応度を得よう計画した。ここで計画した試験の主なものは初期炉心構成後に再度詳細測定を計画して実施した。

(イ) 調整棒仮校正

引き続いて行う試験のために、反応度の校正用基準とすることを目的に、必要にして最小限の制御棒の反応度を得る。ここでは臨界調整用に使う調整棒No.2, (CR 2)について、ベリオド法を基準にして、必要に応じて、未臨界増倍法を並用する。

また、炉停止余裕を確認し時間的に可能ならば他の制御棒についても、ラフに全反応度を推定する。

(ロ) 周辺燃料反応度価値

炉心に追加する燃料集合体1体当りの持つ反応度を測定するため、及び、以下に続く試験に必要な、若干の余剰反応度を加えるために、最小臨界炉心に燃料集合体1体を装荷する。

炉心の余剰反応度は、臨界制御棒位置と(イ)で得られた制御棒校正曲線から得る。

(ハ) 等温反応度係数

1次冷却材の温度を下降または上昇させることにより、炉心部の温度を変え、温度変化に伴なう臨界時調整棒位置を読み炉心の余剰反応度を求める。温度の変化範囲は約170℃から250℃までとする。反応度は(イ)の調整棒校正曲線より得る。

また制御棒延長管が熱ばう張により伸縮する効果は別に測定する。

(ニ) その他の効果

臨界試験に関係して、下記の測定を計画した。

- i) 中性子源効果
- ii) 制御棒延長管の熱膨張効果
- iii) 中性子検出系感度の冷却材温度変化による効果
- iv) 中性子検出系の不感時間

(ホ) 初期炉心構成

炉心への燃料装荷本数は6体(うち1体は周辺燃料反応度測定のため装荷用)と予想され、これを2本、2本及び1本と3ステップに分けて、各段階で炉心の持つ余剰反応度を確認しつつ行う。

初期炉心の持つ余剰反応度及びその他の諸特性は引き続き行われる低出力試験で測定する。

4.2 試験の工程（実績）

昭和52年4月23日の初臨界達成の後、下記の順序で試験を行った、実施工程の詳細を第4-1表に示す。

- 1. 制御棒仮校正（1/2） 1日
- 2. 周辺燃料反応度値 1日
- 3. 等温係数 6日※
- 4. 中性子源効果/制御棒仮校正（2/2） 1日

※昼夜延べ日数 注(ロ)参照

上記試験終了後、試験は初期炉心構成（NT-13）に引き続いた。

注 試験の順序は当初、臨界試験（NT-12）実施要領書記載に上記を①→④→③→②と計画した、しかしながら下記理由により、実際は上記の順序に変えた。

(イ) 最小臨界炉心の余剰反応度は温度200℃に於いて、わずか0.08%ΔK/Kであり、等温係数試験で温度250℃にした場合、若干余剰反応度が不足する可能性がある。

従って、等温係数試験の前に、燃料1本を追加して炉心の余剰反応度を増す方が試験を遂行し易い。

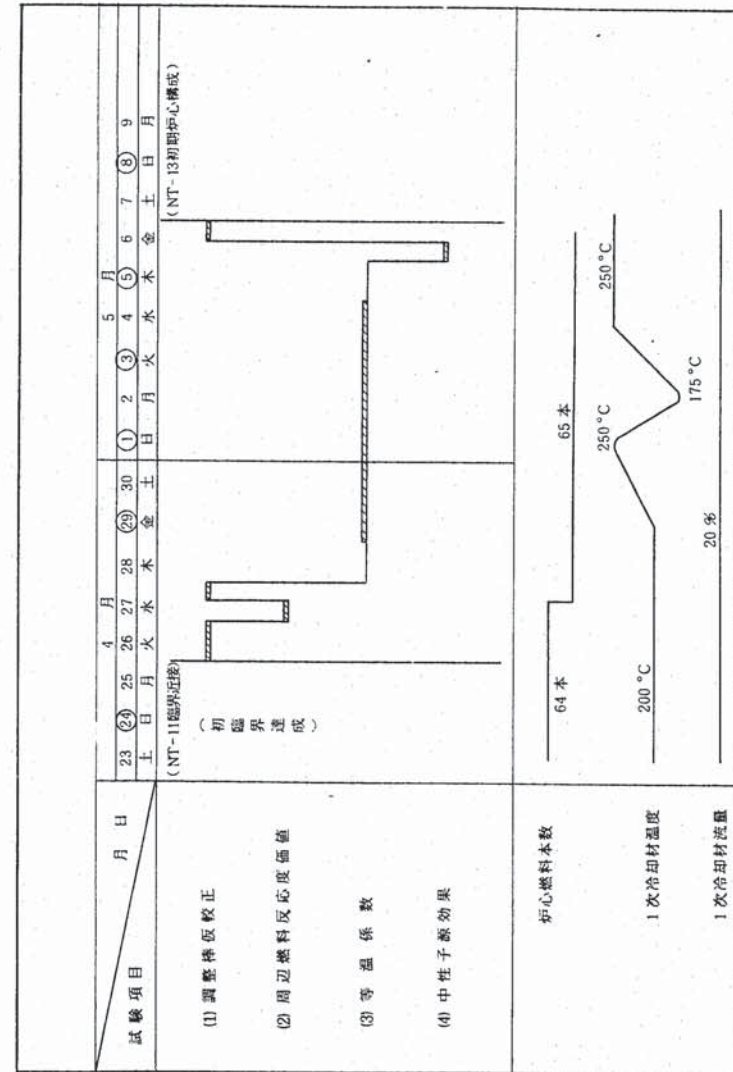
(ロ) おりしも丁度試験が5月のゴールデンウィークにかかり、かつ又、運転員、試験員共々末だ不馴れなため複雑な操作が必要な試験をこの期間からはずすべく、等温係数の如き操作の少ない試験を行うのが良い、とした。

(ハ) 中性子源効果は、それまでの数回の臨界の結果から、ある程度影響がない原子炉出力の見当がついたため工程的に後で行って良いと判断した。

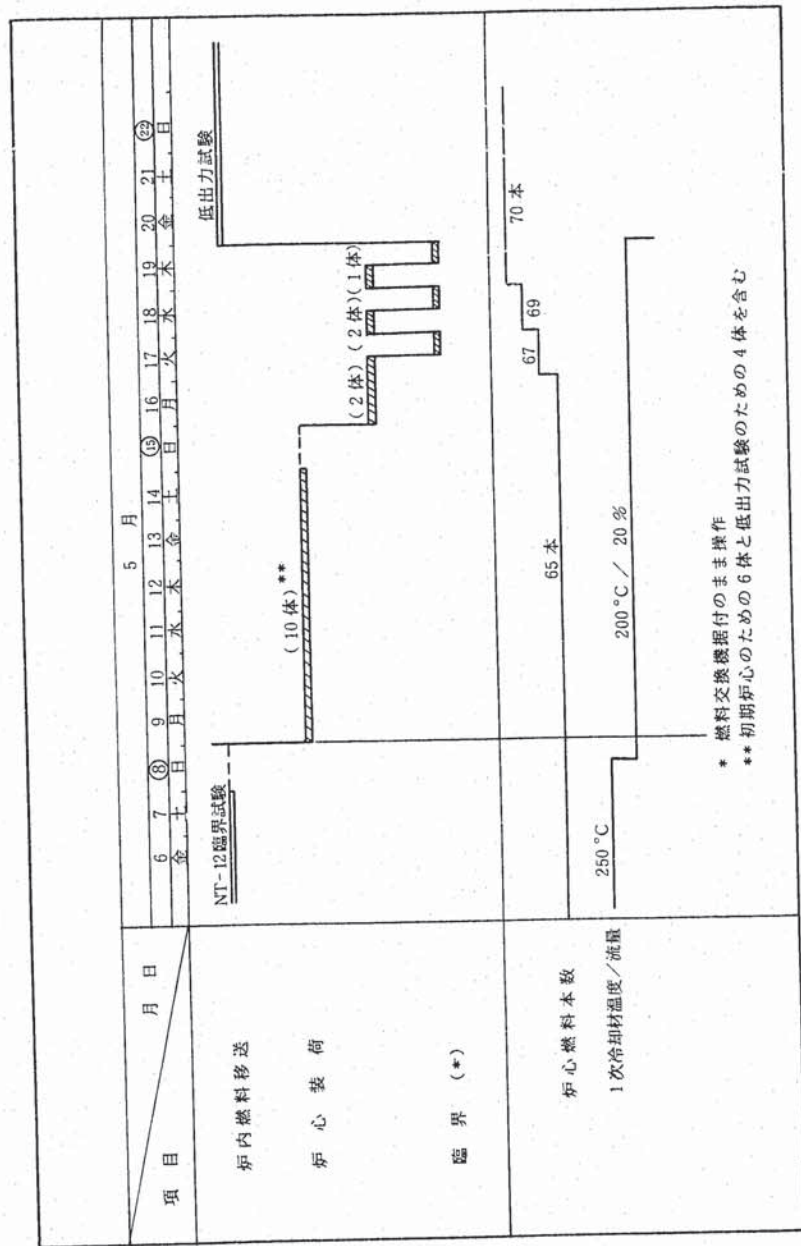
初期炉心構成時の実施工程を第4-2表に示す。

はじめに初期炉心構成に必要な6体注の燃料（それに加えて引き続き行われた低出力試験に必要な特殊燃料（3体）と中性子源（1体）を炉内に移送した。炉心への燃料装荷は3回（3ステップ）に分けて、各ステップで余剰反応度を確認しつつ行った。

第4-1表 臨界試験全体工程表（昭和45年4月25日～5月6日）
(NT-12)



第 4-2 表 初期炉心構成全体工程表 (昭和 52 年 5 月 9 日 ~ 5 月 19 日)
(NT-13)



* 燃料交換機据付のまま操作
** 初期炉心のための 4 体を含む

5. 試験の方法の結果

5.1 調整棒仮校正

5.1.1 炉心及びプラント状態

試験開始前及び試験中の炉心 (図 3-2) 及びプラント状態は次の通り。

炉心燃料本数	Case 1 64 体	Case 2 65 体
中性子源位置	5C 2	
1 次冷却材ナトリウム温度	Case 1 約 200 °C	Case 2 250 °C
1 次冷却材ナトリウム流量	約 20% [250 m ³ /min]	

5.1.2 試験手順

Case 1-1

最小臨界炉心 (64 体) に於いて、調整棒 No 2 (以下 RR 2 と記す) について、臨界時に炉心に挿入されている部分について、ベリオド法 (付録 1) により反応度値を求めた。

各ベリオドの測定段階に於ける RR 2 引き抜きに対する反応度の補償は SR-3 により行った。安全棒 No 3 (SR-3) を選択した理由は、この制御棒 (RR-1 も同等) が RR 2 に対して反応度の干渉効果が最も少ないと予想されていたからである [参考文献 2]。ベリオド法で測定された制御棒のストローク範囲は次の通り。

RR 2 : 534.1 mm ~ 700.0 (上限) mm

SR 3 : 900.5 mm (上限) ~ 562.9 mm

ベリオド測定に用いた中性子検出器は、臨界近接時から用いた特設チャンネルのうちチャンネル B (B-10 検出器) 及びチャンネル D を用いた。(付録 2)

ベリオドの測定は、ダブリングタイムが約 60 秒程度になるよう、制御棒の引抜き量を選んだ。又臨界点のレベルは ch1 で 1×10^2 cps (後日核出力校正により約 10 watt と推定) から出発して、ダブリングタイム測定のために制御棒小引抜き後、はじめの 100 秒程度経過の後ストップウォッチあるいは紙チャート上に書いた計数率のカーブから、ダブリングタイムを求めた。

この測定では、中性子源のガンマ線源部を引き抜き中性子源の影響を少なくして行った。(中性子源の臨界点に及ぼす効果は 5.4 章を参照のこと。)

Case 1-2

最小臨界炉心(64体)に於いて、RR2について臨界時に炉心から引き抜かれている部分即ち0mm~534.1mmについて、中性子源増倍法(Source Multiplication Method以下SMM法と記す)により、反応度値を求めた。SMM法の反応度の規格化は、すべてベリオド法で求めた部分(534.1mm~660.0mm)により得た。

測定に使用した中性子検出器は特設予備チャンネルのchA,Bを用いた。

又、測定のステップは、制御棒の中心部の"ききのよい部分"では30mmおきに、その他は40mmおきに行った。

Case 2

最小臨界炉心に1体燃料を追加した炉心(65体)に於いてRR2についてベリオド法により反応度値を求めた。ベリオド測定時の反応度の補償は、SR-3によった。測定されたストローク範囲は次の通り。

RR2 : 477.0mm ~ 700mm (上限)

SR3 : 900.6mm (上限) ~ 492.8mm

尚この時用いた中性子検出系はチャンネルDと本設計測設備のチャンネル1及び予備チャンネルB(B-10検出器)であった。

注 Case 1-1の結果から、バルス型検出系の不感時間が心配された結果、ch1、及びchDの使用が最適であるとした。

5.1.3 試験結果

i) ベリオド法による測定結果(I) Case 1-1

ベリオド法により64本炉心200℃に於いて測定したRR-2の全結果を表5-1に示す。ダブリングタイムの反応度への変換は付録1による。

表5-1中の②未臨界補正值は、下記の臨界データより得た。

RUN	RR2位置 (mm)	SR3位置 (mm)	臨界レベル (ch1計数率 cps)
A	534.1	900.5	1×10^2
B	537.8	900.5	1×10^4 ※

※ 1×10^4 cps は中性子源に関係しない出力レベル

上表よりベリオド測定開始時の出力レベル(ch1: 1×10^2 cps)は真の臨界点より、中性子源の影響をうけて、実際より制御棒RR2を若干挿入した点から行っていたとしてこの分

の反応度差を、制御棒校正曲線(設計値)より得て補正した。補正の方法は次の通り。

上記臨界点の差を反応度に換算するためはじめに、設計計算による制御棒校正曲線より求めた。

$$\frac{1.95 (\% \Delta K / K)}{860 (\text{mm})} \times (537.8 - 534.1) (\text{mm}) = 0.0084 \% \Delta K / K$$

この値を表5-1①項に反応度として加えて、第1近似としての反応度を求め、この反応度により、表5-3及び表5-4のベリオド法との反応度対応を求めた結果により最終反応度を求めた。方法は次の通り。

この第1近似の反応度曲線の、RR2が534.1mm付近の測定値を用いて(前後3点を2次式に最小2乗フィットした)真の臨界点のずれの補正值を求めた。

$$Y (\% \Delta K / K) = 7.0217 (E-6) X^2 - 1.04602 (E-2) X + 3.88692$$

ここで $X_1 = 537.8$ mm 及び $X_2 = 534.1$ mm の反応度差を求めると

$$Y = 0.0108 \% \Delta K / K$$

この反応度を最終的な未臨界補正值として用いて表5-1に示す最終結果を得た。

ii) ベリオド法による測定結果(II) Case 2

ベリオド法により65本炉心250℃に於いて測定したRR2の結果を表5-2に示す。

ベリオド測定開始前の臨界点の測定は、この試験の直前に行った中性子源効果(第5.4章参照)の結果より、中性子源のガンマ線源部を引き抜いた状態でch1にて 1×10^3 cps で行った。本出力レベルは、臨界点に影響ない。(5.4.1章参照)

iii) 中性子源増倍法による結果(I) RR2の校正

燃料集合体数64本の最小臨界炉心の200℃に於ける未臨界法は、ベリオド法の試験結果により反応度の規格化を行った。測定結果を第5-3表、5-4表に示す。

表中③の反応度は表5-1及び5-2のベリオド法による測定結果によった。

この結果から、チャンネルA及びB各々に対して、下記の計数率と反応度との関係を得た。

$$\text{チャンネルA : } 496 \times 10^4 \text{ cpm} \cdot \% \Delta K / K (\pm 5.0 \%)$$

$$\text{チャンネルB : } 4.31 \times 10^4 \text{ cpm} \cdot \% \Delta K / K (\pm 2.6 \%)$$

これらの値は表5-1の測定値4点の平均値である。上記の値を用いて得たRR-2の反応度を表5-5に示す。これらの全結果を図5-3に示した。

チャンネルA及びBにより若干結果が異なる。この原因は後で第6章に考察することにして、ここでは両チャンネルの平均値をRR2の測定結果とする。この結果と設計時の校正曲線を第5-4図に示した。両者には炉心の条件に若干のちがいがあり、これらについても後で考察する。

表 5 - 1 ベリオド法による測定結果 (I)

測定	RR-2 位置 (mm)	SR-3 位置 (mm)	ダブリングタイム ※※ (秒)	①反応度 (% ΔK/K)	②未境界補正※ (% ΔK/K)	① + ② (% ΔK/K)
I-1	534.1	90.05				
	↕	↕	431.8	0.0563	0.0108	0.0771
I-2	560.0	678.1				
	↕	↕	438.4	0.0655	0.0108	0.0763
I-3	590.0	620.6				
	↕	↕	639.6	0.0494	0.0108	0.0602
I-4	620.0	58.96				
	↕	↕	61.93	0.0507	0.0108	0.0615
I-5	660.0	562.9				
	↕	↕	126.98	0.0282	0.0108	0.0390
	700.0					

※ ②の未境界補正は、中性子源効果による臨界点の補正で第1近似補正後の値を2次式に最小2乗フィットして、534.1 mmと537.8 mmとの反応度差として求めた。

※ チャンネルB (B-10)検出系を使用

表 5 - 2 ベリオド法による測定結果 (II) 6 5 本炉心 / 250 °C

測定	RR-2 位置 (mm)	SR 3 位置 (mm)	ダブリングタイム ※ (秒)	反応度 (% ΔK/K)
II-1	477.0	900.6		
	↕	↕	30.24	0.0843
II-2	500.0	673.7		
	↕	↕	42.62	0.0668
II-3	520.0	624.0		
	↕	↕	47.29	0.0622
II-4	540.0	591.1		
	↕	↕	31.15	0.0827
II-5	570.0	557.1		
	↕	↕	41.75	0.0677
II-6	600.0	533.9		
	↕	↕	39.05	0.0709
II-7	640.0	510.2		
	↕	↕	48.40	0.0611
	700.0	492.8		

※ チャンネルD 検出系を使用

表5-3 中性子源増倍法による結果 (I)

(その1) ベリオド法との対応測定 (ch A)

RR 2 位置 (mm)	(1)	(2) 注	(3)	(4)
	計 数 率 ch A (cpm)	①の逆数の差 ($\times 10^{-6} \text{cpm}^{-1}$)	ベリオド法による 反応度(% ΔK/K)	③ / ② (% ΔK/K · cpm)
534.1	136.123			
		1.552	0.0771	49680
560.0	172.668			
		1.486	0.0763	51340
590.0	232.246			
		1.312	0.0602	47260
620.0	334.166			
		1.228	0.0615	50080
660.0	567.959			

平均 49590

注 dead time を 8 μSec として補正済

表5-4 中性子源増倍法による結果 (II)

(その2) ベリオド法との対応測定 (ch B)

RR 2 位置 (mm)	①	(2) 注	(3)	(4)
	計 数 率 ch B (cpm)	①の逆数の差 ($\times 10^{-6} \text{cpm}^{-1}$)	ベリオド法による 反応度(% ΔK/K)	③ / ② (% ΔK/K · cpm)
534.1	123.262			
		1.731	0.0771	44540
560.0	156.710			
		1.673	0.0763	45610
590.0	212.528			
		1.445	0.0602	41660
620.0	306.741			
		1.523	0.0615	40380
660.0	577.139			

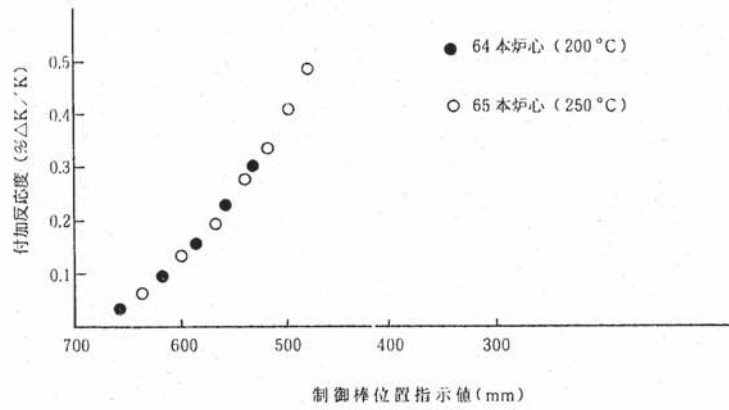
平均 43050

注 dead time を 8 μsec として補正済

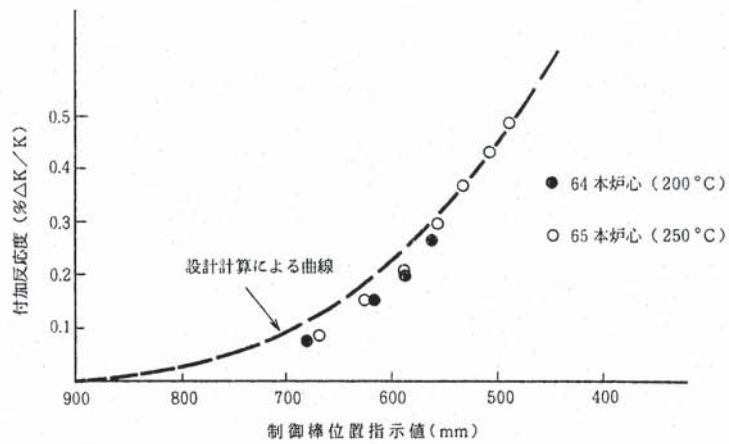
表5-5 中性子源増倍法による測定結果 (III)

RR 2 位置 (mm)	Ch A 計数率による 反応度(% ΔK/K)	Ch B 計数率による 反応度(% ΔK/K)	左の平均 (% ΔK/K)
700.0	0.0	0	0
660.0	[0.0390]	[0.0390]	0.039
620.0	0.0999	0.1046	0.102
590.0	0.1649	0.1667	0.166
560.0	0.2386	0.2388	0.239
534.1	0.3156	0.3133	0.314
500.0	0.4298	0.4278	0.429
470.0	0.5467	0.5408	0.544
440.0	0.6654	0.6589	0.662
410.0	0.8022	0.7963	0.799
380.0	0.9378	0.9346	0.936
350.0	1.0662	1.0788	1.073
320.0	1.2144	1.2234	1.219
290.0	1.3428	1.3745	1.361
260.0	1.4840	1.5159	1.500
230.0	1.6090	1.6346	1.622
200.0	1.7180	1.7862	1.752
160.0	1.8432	1.9033	1.873
120.0	1.9381	2.0104	1.921
80.0	2.0079	2.0762	2.0401
40.0	2.0654	2.1149	2.0902
-1.0	2.0796	2.1598	2.1197

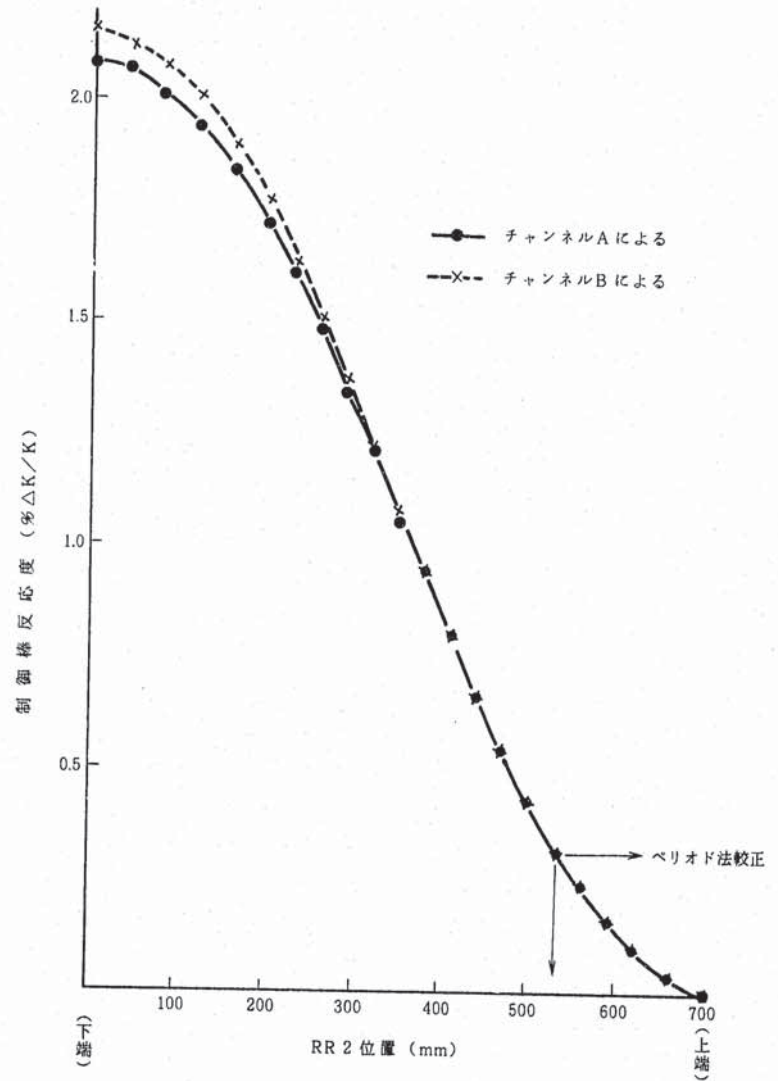
() の値はベリオド法による値, SR-3 位置 548.5 mm



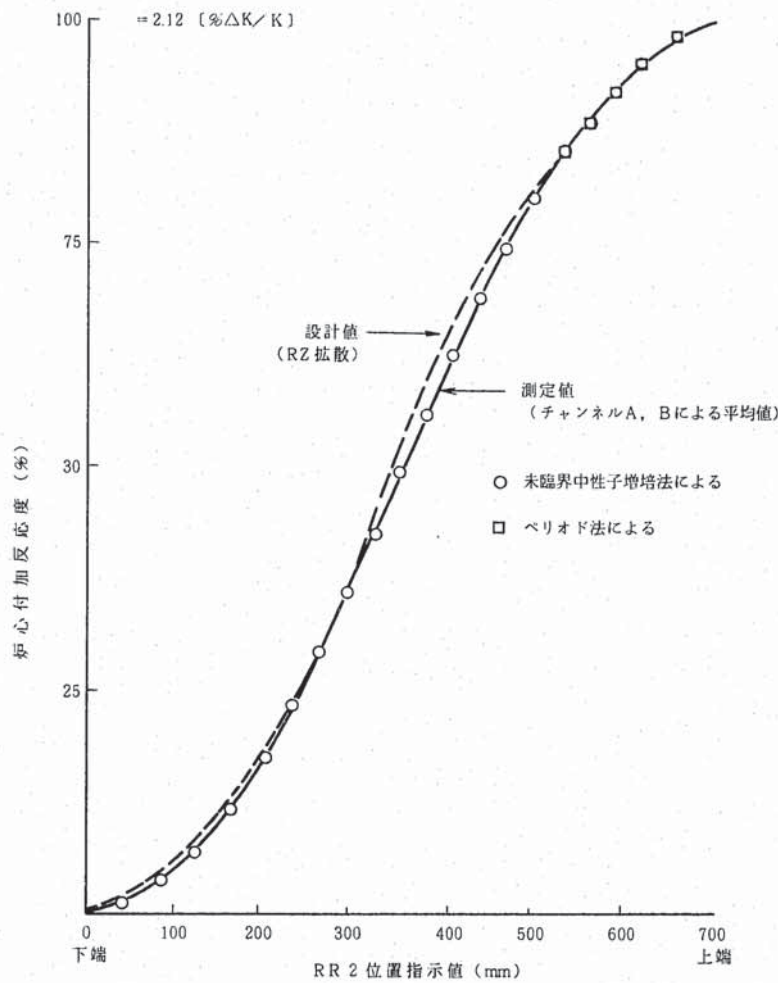
第 5-1 図 ペリオド法によるRR2校正曲線



第 5-2 図 置換法によるSR3校正曲線



第 5-3 図 調整棒 No. 2 校正曲線



第5-4図 制御棒校正結果

iv) 中性子源増倍法による測定 (iii) …… 1体の持つ反応度

6本の制御棒各々を1体ずつ炉心に挿入した時に得たチャンネルA及びBの計数率(表5-6)のうち、すでに iii) で校正された RR 2 の反応度を基準にしてその他の制御棒の反応度を求める。

RR 2 による臨界位置は 545.0 mm であり、この制御棒が 545.0 mm から 700.0 mm (上端) までに持つ反応度値は、第 5-3 図の計測系毎に異なる(実際の結果は同じ)反応度曲線より得る。この値は 0.28 % ΔK/K であり、全体の各々 0.135, 0.130 (それぞれチャンネルA, B) である。従ってその残りの反応度が RR 2 の計数率に対応するとして、他の制御棒反応度を得た。

これらの結果を表5-6に示す。

表5-6 各制御棒反応度値

	計数率 (cpm)		反応度 (% ΔK/K)		平均値
	チャンネルA	チャンネルB	チャンネルA	チャンネルB	
RR 1	26063	25406	2.25	2.02	2.14
RR 2	28540	23550	2.08*	2.16*	2.12
SR 1	22930	21580	2.52	2.33	2.43
SR 2	22907	20121	2.52	2.48	2.50
SR 3	26420	24985	2.23	2.05	2.14
SR 4	28598	23549	2.08	2.16	2.12

*表5-5記載結果による。

5.1.4 結果の考察

i) 反応度校正曲線

(イ) 64本炉心(200℃)と65本(250℃)で測定したベリオド法による結果は、よく一致した。炉心の大きさにより制御棒反応度は異なる(注)といえども、本質的にはほとんど反応度にちがいが無いことから良い結果といえる。

(注) 設計計算によると両者のちがいは約0.25%と評価されている。

(ロ) 64本炉心と65本炉心では、ベリオド測定時に若干のちがいがあった。測定に用いた中性子検出器がちがう他に、64本炉心時には真の臨界点からのずれがあった。この点の補正により両者の結果はよく一致した。

(ハ) ベリオド測定に用いた中性子検出系はパルス系であった。このため不感時間の影響が心配されたが、ベリオド測定開始前の臨界が約15cpsであり、ベリオドは約数100cpsから数1000cpsまでの範囲で測定されたので、計数の数え落しは無視できる。

- (ニ) 未臨界法による測定の結果は、64本炉心でのベリオド測定の結果により反応度への換算を行った。反応度への換算の誤差は、そのまま全体反応度誤差にきいてくる。この点から考えると図5-3に示した2本の曲線は誤差の範囲で一致していると云える。
- (ホ) 前記(ニ)の結果にも拘らず、チャンネルAとBによる曲線は次のように、ちがいの説明が可能である。はじめに、350mmより上部については両者の結果は良い一致を示している。これは、この部分の測定時の未臨界度が浅いため、中性子検出器と炉心内制御棒位置及び中性子源の位置関係にほとんど関係せずほぼ理想的な体系に近い測定ができたためと云える。次に中心部より下部については、RR2に近い方の炉心内の中性子束歪が大きくなり、この効果がかいていていると考えると、見かけ上チャンネルAの反応度が小さくなるはずである。この意味から制御棒1本の反応度曲線はチャンネルBによるものが近いと云うことができる。
- (ヘ) RR-2反応度校正曲線のプロファイルは設計値と若干のずれがある。これは設計計算の炉心燃料本数のちがいでなく、むしろ設計計算時のモデルが必ずしも正しく取扱われていないためであろう。〔参考文献6〕

ii) 制御棒反応度値

- (イ) 設計計算〔参考文献6〕によると燃料本数67の時の制御棒1本の持つ反応度は次の通り。

干渉効果なしの場合	1.91 % ΔK/K
最大の干渉効果（はなれた2本）のある場合	2.02 ± 0.37 % ΔK/K

表5-6に示した測定値はいずれも1本の干渉効果のない場合の反応度に当ると考えると、SR1及び2の結果は大き過ぎる結果となっているが他の4本については比較的良い結果となっている。SR1及び2については中性子源側に近いために、中性子源を遮蔽する効果が大ききいて見かけ上反応度が大きくなってしまっている。いづれにしてもSRの4本は仕様並びに炉心内の位置的關係は同じであるので、当然はほぼ同じ反応度にならねばならない。

- (ロ) 表5-6に示されたように、各制御棒の反応度測定値は、チャンネルAとBで得たものと異なる。これはi) (ホ)に記したように検出器と炉心との位置関係によるもので、各々、挿入された制御棒附近の中性子束が下がると考えて定性的に説明できる。この意味から、これらの効果を考慮した解析（修正中性子源増倍法（SMS法））が期待される。

いづれにしてもRR1及びRR2に関しては配置上A、B、両チャンネルの結果の平均値が比較的良好な値を示していると期待してよい。

5.2 周辺燃料反応度値

5.2.1 炉心及びプラント状態

試験開始前は燃料集合体64本の最小臨界炉心で、冷却材ナトリウム温度は200℃、流量は20%であった。

炉心図は第3-2図の通りである。

5.2.2 試験手順

燃料集合体数64本の最小臨界炉心を基準にしてこの炉心に、さらに燃料集合体1体を5F3位置に追加装荷して、炉心の余剰反応度を測定した。冷却材ナトリウム温度は約200℃で、流量は20%で行った。

臨界はすでに校正されたRR-2により行い、他の4本の安全棒RR1は全引き抜きで行った。臨界の出力レベルはch1で 1×10^4 cps（約1kw）で中性子源は挿入のまま行った。この臨界出力レベルは中性子源挿入のまま臨界点に影響を与えない。（5.4.1章参照）

5.2.3 試験結果

炉心燃料本数64本と65本の臨界のデータを次に記す。

	炉心燃料本数 (本)	RR 2 位置 (mm)	ナトリウム温度
(1)	64	545.0	204.7
(2)	65	446.7	205.3

上記の2ケースの臨界データは、温度が等しいので、反応度はすでに得たRR2の校正曲線より、炉心余剰反応度の差として得る。第5-4図より、

$$545.0 \text{ mm} \rightarrow 0.280 \% \Delta K/K$$

$$446.7 \text{ mm} \rightarrow 0.635 \% \Delta K/K$$

上記より① 355 % ΔK/Kを得た。

上記の測定値に含まれる誤差は、①制御棒の反応度校正曲線に含まれる誤差と②臨界点の再現性に含まれる誤差であり、両者の和は約0.01 % ΔK/K ~ 0.02 % ΔK/K程度と予想される。

5.2.4 結果の考察

設計計算によると、RZ小数群拡散計算により炉心燃料本数59体から67体の平均値として1体当たり0.348 % ΔK/Kとなっている。

本測定でのデータは64本炉心であり、炉心の大きさのちがいは約0.5%程度と見積られる〔参考文献6〕のでこの値と測定値の一致はたいへん良いと云える。

尚別途、設計計算手法による67本炉心、XY2次元拡散6群の摂動計算による値は0.35 % ΔK/Kで良い一致である。

燃料集合体反応度係数については、NT-13 初期炉心構成試験及びNT-31 燃料等価反応度では、さらに詳しい試験が行われたので、詳細はそちらの報告書を参照されたい。

5.3 等温係数

5.3.1 炉心及びプラント状態

燃料集合体数65体の炉心に於いて、1次冷却材ナトリウム温度変化を、2次冷却系からの入熱・除熱により行った。この試験開始時の1次冷却材ナトリウム温度は、臨界近接、制御棒の仮校正試験時より200℃、流量は燃料交換時の流量20%に保たれた。

5.3.2 試験手順

等温係数試験のための冷却材温度変化に関連して、反応度効果の他に中性子検出器感度、制御棒延長管の熱的变化の測定も行った。

1) 等温反応度効果

次の3回の温度変化時に、臨界制御棒位置指示値のよみから炉心余剰反応度の変化として測定を行った。

- ① 200℃ → 250℃
- ② 250℃ → 175℃
- ③ 175℃ → 250℃

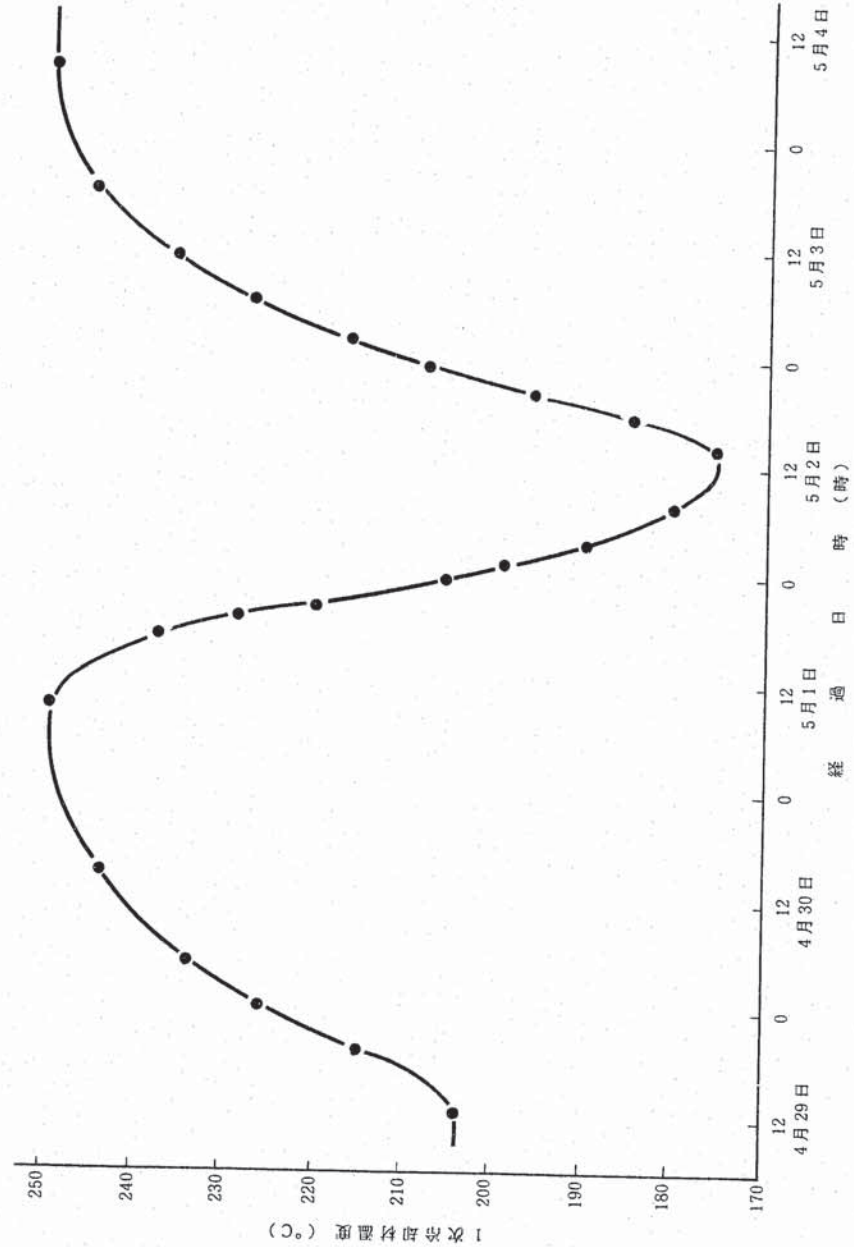
臨界点の測定は、安全棒4本共全引抜、調整棒No1 350.0mm(固定)にして、調整棒No2(RR2)を調整することにより行った。臨界操作の方法は、冷却材温度約20℃変化する毎に行い、他の温度変化時は、RR2を全挿入して待機状態とした。

臨界は中性子源挿入のまま行い、出力レベルは中性子源効果のない 1×10^4 cps(ch1)とした。

温度変化は連続的に行い、温度変化率は速い場合でも約6℃/hrと、非常に遅い割合であったため、特に臨界操作のために一定温度にすることは行わなかったが、十分正確な測定ができた。なお温度上昇時の2次冷却系の余熱ヒータは約半数の投入であった。

試験時の温度変化の様子を図5-5に示す。

測定に供した温度計は、燃料集合体出口温度(CA熱電対)の5点(炉心アドレス1A1, 2A1, 3A1, 4A1, 5A1)のデータ処理装置の指示値の平均値とした。各温度のばらつきは±1℃程度であった。結果を表5-6に示す。



第5-5図 等温係数測定時の冷却材温度変化

表5-6 等温係数測定時温度、流量

日 時	冷却材温度 (°C)											流量(m ³ /h)	
	燃料集合体出口						炉 入 口		炉 出 口				1次系
	1A1	2A1	3A1	4A1	5A1	平均	A/B	平均	A/B	平均	A/B		
4 ²⁹ 12:34	204	204	205	204	204	204.2	$\frac{205}{203}$	204	$\frac{203}{203}$	203	$\frac{214}{211}$	425	
19:37	215	215	215	216	215	215.2	$\frac{216}{215}$	215.5	$\frac{214}{214}$	214	$\frac{213}{213}$	426	
19:50	217	216	217	217	217	216.8	$\frac{217}{216}$	216.5	$\frac{215}{215}$	215	$\frac{214}{213}$	427	
4 ³⁰ 0:00	226	225	226	226	226	225.8	$\frac{226}{225}$	225.5	$\frac{224}{224}$	224	$\frac{214}{212}$	426	
5:45	234	234	234	234	235	234.2	$\frac{235}{234}$	234.5	$\frac{233}{232}$	232.5	$\frac{214}{213}$	427	
15:05	244	244	245	244	245	244.4	$\frac{245}{244}$	244.5	$\frac{243}{242}$	242.5	$\frac{215}{212}$	427	
5 ¹ 9:32	249	250	250	249	250	249.6	$\frac{251}{249}$	250	$\frac{248}{248}$	248	$\frac{212}{213}$	425	
17:24	237	238	238	237	238	237.6	$\frac{238}{238}$	238	$\frac{238}{235}$	238	$\frac{214}{211}$	425	
19:02	229	229	229	229	229	229	$\frac{229}{227}$	228	$\frac{229}{228}$	228.5	$\frac{214}{211}$	425	
20:25	221	220	220	220	221	220.4	$\frac{221}{219}$	220	$\frac{221}{221}$	221	$\frac{211}{217}$	428	
23:32	206	206	206	206	206	206	$\frac{206}{205}$	205.5	$\frac{207}{206}$	206.5	$\frac{215}{210}$	425	
5 ² 01:15	199	199	200	199	200	199.4	$\frac{200}{199}$	199.5	$\frac{199}{201}$	200	$\frac{216}{208}$	424	
3:50	189	190	190	190	191	190	$\frac{190}{189}$	189.5	$\frac{190}{190}$	190	$\frac{211}{216}$	427	
7:42	181	180	180	180	182	180.6	$\frac{181}{180}$	180.5	$\frac{180}{180}$	180	$\frac{210}{213}$	423	
13:57	176	175	176	176	177	176	$\frac{176}{176}$	176	$\frac{175}{176}$	175.5	$\frac{214}{202}$	416	
17:32	185	185	185	185	185	185	$\frac{187}{185}$	186	$\frac{184}{184}$	184	$\frac{217}{208}$	425	
19:55	196	196	196	196	197	196.2	$\frac{197}{196}$	196.5	$\frac{194}{195}$	194.5	$\frac{214}{212}$	426	
22:50	208	208	208	208	208	208	$\frac{208}{208}$	208	$\frac{206}{206}$	206	$\frac{212}{209}$	421	
5 ³ 1:50	217	216	216	217	216	216.4	$\frac{218}{216}$	217	$\frac{214}{216}$	205	$\frac{216}{211}$	427	
6:05	227	227	227	227	228	227.2	$\frac{228}{227}$	227.5	$\frac{225}{225}$	225	$\frac{216}{209}$	425	
10:51	236	236	236	237	237	236.4	$\frac{237}{236}$	236.5	$\frac{235}{234}$	234.5	$\frac{213}{213}$	426	
18:21	246	245	245	245	246	245.4	$\frac{246}{246}$	246	$\frac{244}{243}$	243.5	$\frac{210}{213}$	423	
5 ⁴ 8:07	250	250	250	250	250	250	$\frac{251}{250}$	250.5	$\frac{248}{248}$	248	$\frac{214}{213}$	427	

ii) 制御棒延長管の熱膨張効果

等温反応度効果測定に関連して、1次冷却材の温度を変えることにより原子炉容器を含めて制御棒と駆動部を結んでる延長棒の熱膨長により位置指示値に変化が生じる可能性がある。

この効果は、次の2つに分けて考えられる。その1つは延長管そのものの伸び率と、炉容器全体の伸び率のちがいで生じる位置指示値の変化であり、さらにもう1つは制御棒を動かすことにより、延長管の温度分布、特に回転プラグ内とナトリウムにある部分がちがうことによって生ずる全長の変化である。

前者は、等温変化時に、制御棒の下端と下限位置を各温度でチェックすることにより行い約0.2mm以上の有意な差は生じなかった。(参考文献〔4〕)

後者については、ナトリウム温度が約240°Cの時にRR2について、全挿入時から引き抜いて臨界位置まで持ってゆき、その後、約10時間にわたって、臨界点を正しく保った時の位置指示値の変化として測定した。

iii) 中性子検出器感度の変化

原子炉容器の外側に置かれた中性子検出器は、原子炉容器内の1次冷却材の温度変化により生ずる中性子透過率の変化によって検出感度が異なることが予想される。本効果は、温度を変えた簡単な透過計算(参考文献〔6〕)により100°Cの温度変化で検出効果が約8%変ると予測された。本効果は中性子検出器を炉心に装着して行った出力較正試験(NT-41)(参考文献〔7〕)で詳しく測定したが、ここでは炉心部の炉心に近い検出器としてチャンネルDと、他の炉容器外の検出器との関係を調べた。

測定は各温度の臨界時のチャンネルD及び1, 2, B, の計数率について行った。他のチャンネルについては計数率が不適当で有用なデータとならなかった。

5.3.3 試験結果と考察

i) 等温反応度効果

臨界点の確認は、前記の200°Cから250°Cへの上昇時に6点、250°Cから175°Cへの下降時に8点、さらに175°Cから250°Cへの上昇時に7点行った。それらの結果を表5-7に示す。図5-6に全結果を示す。

等温係数としては $3.81 \times 10^{-5} \Delta K / K / ^\circ C$ が得られた。

測定値は、温度上昇時に於いても、下降時に於いても測定誤差の範囲で良い一致をみた。温度上昇率は最大で約3°C/hr、下降率は約6°C/hrであり、この範囲で炉心は十分一定な温度に達していたと云える。

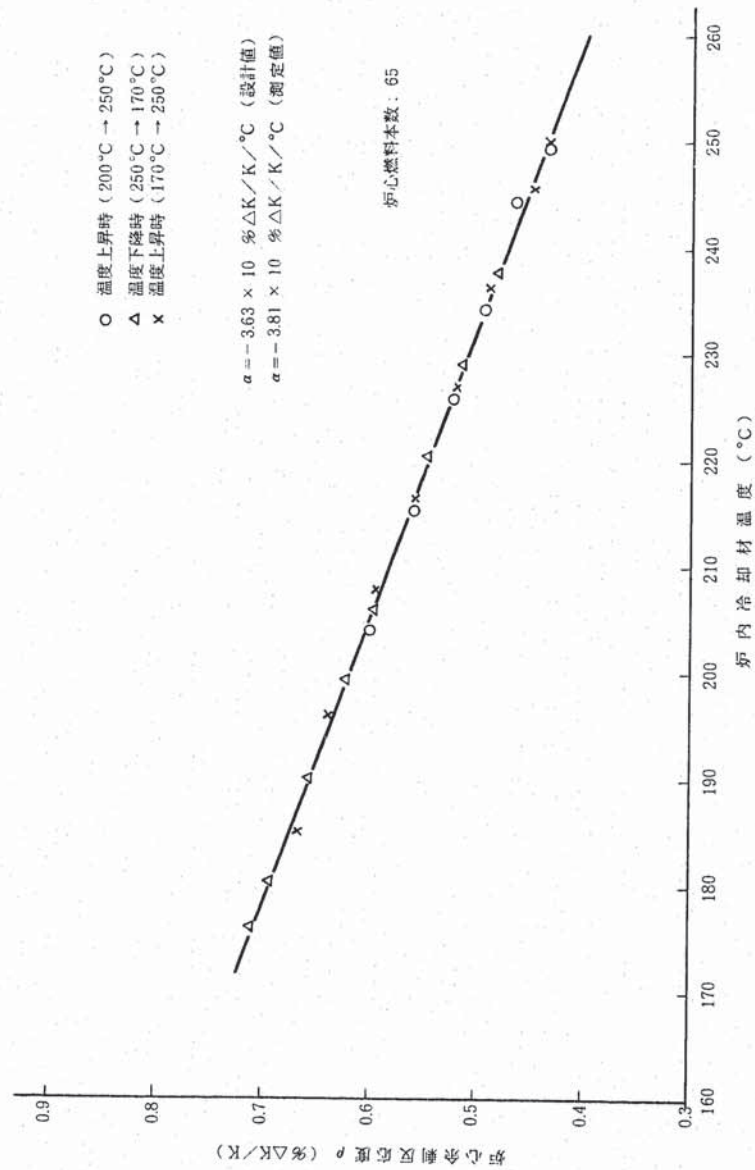
得られた測定値は $3.81 \times 10^{-5} \Delta K / K / ^\circ C$ であるが、本値の持つ誤差の評価は参考文献〔4〕にゆずるが、ここでは大ざっぱに、制御棒較正值からの約5%の誤差があると考えてよいだろう。

又設計計算による等温反応度係数は炉心燃料本数67本にて $3.63 \times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ であり、測定値より約5%小さいが、有意な差とは考えられない。

なお参考として、炉心燃料本数70本の炉心に対して JAERI FAST SET による拡散計算の値は $3.76 \times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ を得ている。〔参考文献6〕

表5-7 等温反応度測定結果

日 時	冷却材温度 T (°C)	RR-2 指示値 Z ₂ (mm)	付加反応度 ρ_2 (% $\Delta K/K$)
4/29 12:34	204.2	446.0	0.623
19:37	215.2	457.0	0.581
0:00	225.8	466.7	0.542
5:45	234.2	475.9	0.513
15:05	244.4	486.7	0.483
5/1 9:32	249.6	492.7	0.451
17:24	237.6	479.1	0.498
19:02	229.0	469.8	0.536
20:25	220.4	461.8	0.566
23:32	206.0	447.0	0.619
5/2 1:15	199.4	440.0	0.645
3:50	190.0	432.0	0.681
7:42	180.6	422.5	0.720
13:57	176.0	418.5	0.736
17:32	185.0	427.1	0.692
19:55	196.2	437.1	0.664
22:50	208.0	448.4	0.617
5/3 1:50	216.4	457.0	0.579
6:05	227.2	468.0	0.540
10:51	236.4	478.5	0.509
18:21	245.4	488.2	0.466
5/4 8:07	250.0	492.8	0.449



第5-6図 等温反応度係数測定結果

ii) 制御棒延長管の熱膨脹効果

1次ナトリウム冷却材の温度変化により、調整棒下端位置の位置指示値は、ラッチ位置を各温度でチェックした結果、約0.2 mm以上の有意な差は認められなかった。

また、調整棒No.2を全挿入状態から、臨界点まで引き抜き、臨界出力レベルを一定に保った時の調整棒No.2の位置指示値の結果を表5-8及び第5-7図に示す。図よりわかるように調整棒を引抜いた時に生じる調整棒延長管の収縮は約1時間程度でおさまることがわかる。また収縮の量は480 mmの位置で約0.7 mmであり、1本の全ストローク(700 mm)が同様に収縮したと仮定すると約1.0 mm程度収縮すると推定される。

なお本値は制御棒の中心部の反応度に換算すると約 $4.6 \times 10^{-5} \Delta K / K$ であり、この効果により臨界点の測定は最大この程度の大きさの誤差を持つことが予想される。

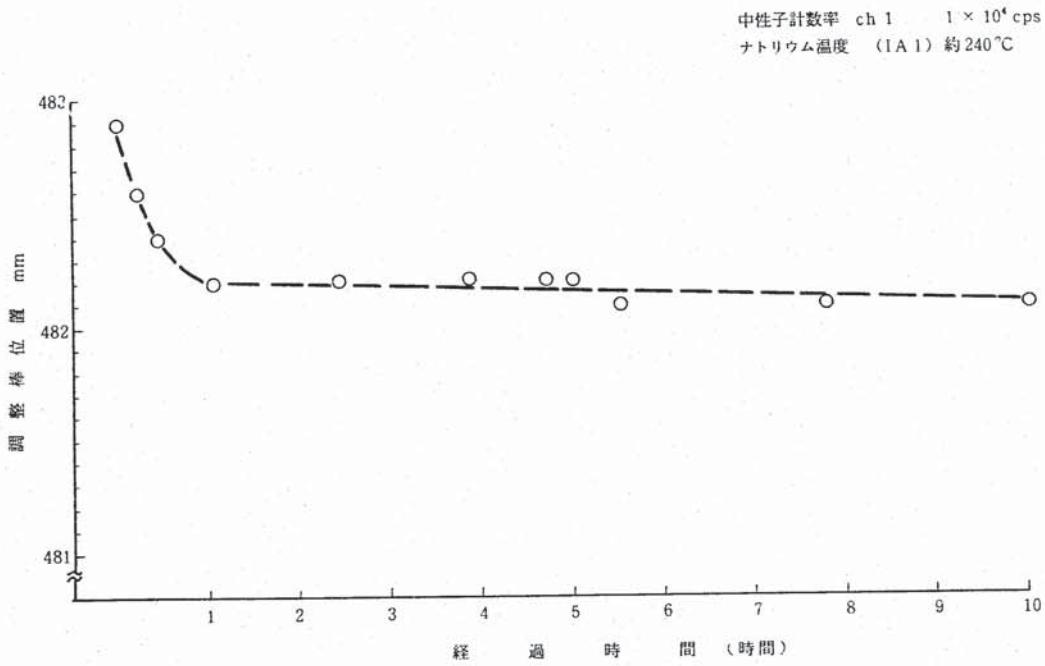
表5-8 制御棒延長管の熱膨脹効果測定結果

時刻	燃料集合体 1A1(°C)	出口温度 5A1(°C)	起動系CH-1 計数率(cps)	調整棒RR-2 位置(mm)
5/5 9:11	240	241	10942	482.9
9:24	240	241	10821	482.6
9:38	241	241	10341	482.4
10:14	240	241	10120	482.2
11:38	241	241	10558	482.2
12:57	241	241	10515	482.2
13:51	241	241	11088	482.2
14:15	242	243	10375	482.2
14:43	241	242	10642	482.1
17:00	241	241	10842	482.1
19:11	240	241	10096	482.1

iii) 中性子検出器感度の変化

等温反応度効果測定時に得られた、臨界に於ける各温度のch1, ch2及びchB(B-10検出器)の計数率のデータを表5-9に示す。この結果を、250°Cで100に規格化した値について、第5-8図に示した。ch1の結果はch2の結果にはほとんど同じなので省略した。

冷却材ナトリウム温度変化による炉容器の外の中性子検出器の感度変化は、温度を変えた拡散計算を行った結果、100°Cの変化に対して、約8%計数率が異なることが示された。本値がそのままchDとの比になるとは考えられないが参考のため、第5-8図にはその値も記した。chDの計数率も若干冷却材の温度効果を受けていると考えられるが、計算値と測定値は一致の傾向が見られる。

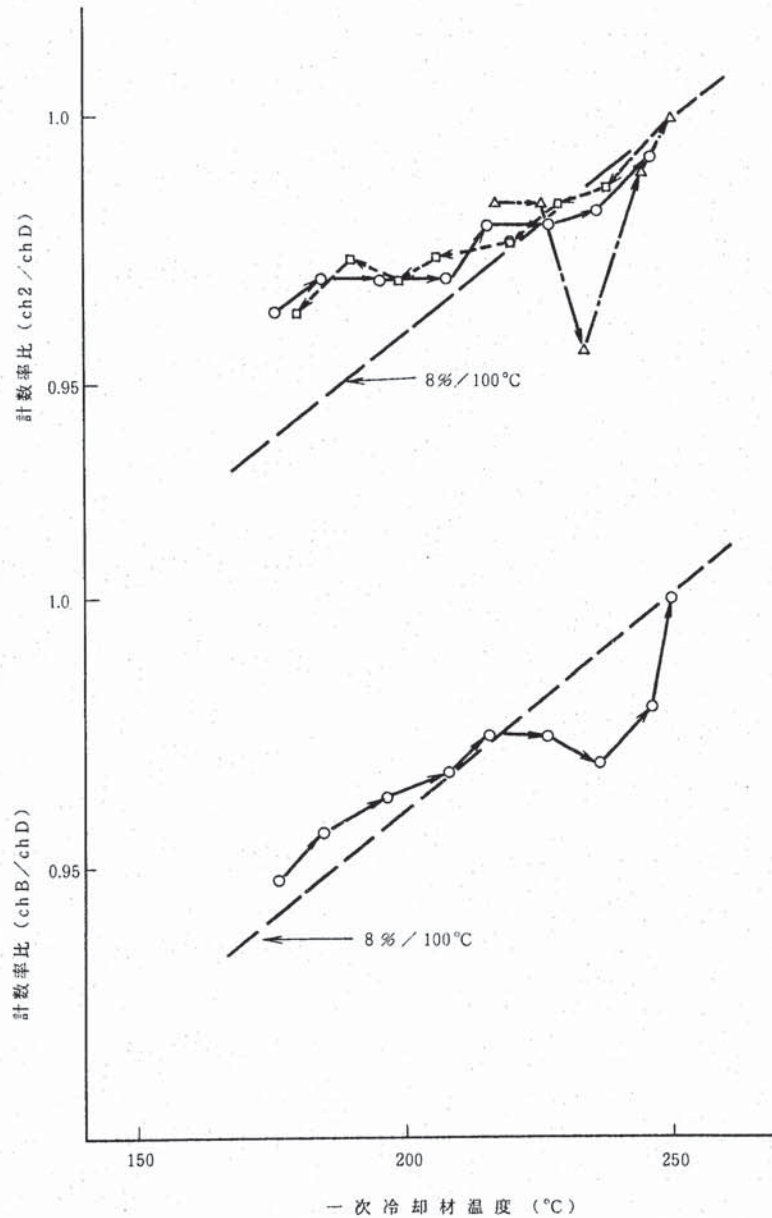


第 5-7 図 調整棒 No 2 延長管収縮効果

表 5-9 冷却材温度変化による中性子検出系の感度

日時	1次冷却材 温度 (°C)	CH-D計数率 A (cps)	起動系CH-1		起動系CH-2		予備チャンネルCH-B(B-10)	
			B ₁ (cps)	B ₁ /A	B ₂ (cps)	B ₂ /A	C ₁ (cps)	C ₁ /A
4/29	217	241	9026	37.5	6982	30.0	1214	5.04
4/30	226	304	11831	38.9	9149	30.0	1535	5.05
	234	291	10993	37.8	8486	29.2	1471	5.05
	244.5	296	11481	38.8	8930	30.2	1515	5.12
5/1	250	270	10614	39.3	8237	30.5	1391	5.15
	238	290	11296	39.0	8716	30.1	366*	1.26*
	229	330	12838	39.9	9893	30.0	417	1.26
	220	260	10076	38.8	7739	29.8	333	1.28
	206	290	11248	38.8	8612	29.7	368	1.27
5/2	199	244	9445	38.7	7213	29.6	316	1.30
	190	289	11218	38.8	8590	29.7	370	1.28
	180	278	10744	38.6	8177	29.4	356	1.28
	176	360	13755	38.2	10488	29.1	1918*	5.33*
	185	267	10250	38.4	7815	29.3	1437	5.38
	196	261.1	10001.1	38.3	7644.5	29.28	1412.8	5.41
	208	279	10695	38.3	8186	29.3	1517	5.44
	216	261	10088	38.7	7727	29.6	1431	5.48
5/3	227	271	10447	38.5	8010	29.6	1486	5.48
	236	294	11345	38.6	8724	29.7	1601	5.45
	246	320	12432	38.9	9588	30.0	1762	5.51
5/4	250	238	9315	39.1	7193	30.2	1337	5.62

* エレクトロニクス系の接続をかえたため絶対値がずれた。



第 5-8 図 中性子計数率に及ぼす効果

5.4 初期炉心構成

5.4.1 炉心及びプラント状態

初期炉心構成の前は臨界試験のうち中性子源効果試験終了の状態であり、冷却材温度は約 250°C であった。これを燃料交換と臨界操作をくりかえす本試験のために冷却材温度、流量は、臨界近接と同じように各々 200°C、20% とした。また、プラント稼働率を良くするために、燃料交換機は、臨界操作の間も回転プラグに据付けたままで試験を行なった。

5.4.2 試験手順

初期炉心構成試験全体のフローを第 5-9 図に示す。試験ははじめに炉心に装荷すべき燃料本数を決定して、必要な燃料を炉心移送し、以下 3 つのステップに分けて、炉心の過剰反応度を確認しつつ初期炉心を構成した。

【STEP O-1】炉心へ追加して装荷する燃料本数の決定

5-1 ~ 5-3 章に記した試験の結果より、初期炉心を構成するために追加して装荷する燃料本数を下記により決定した。

- (A) 燃料本数 65 本の炉心が持つ過剰反応度は 5.3.3 表 5-7 の等温反応度測定結果より 250°C において 0.450% ΔK/K である。
- (B) 一方、炉心周辺燃料 1 体の持つ反応度は 5.2.3 より、0.355% ΔK/K である。
- (C) 初期炉心 (50MW 出力上昇炉心) の持たねはならない過剰反応度は、設計計算上 2.3% ΔK/K である。

この内訳は

1 サイクル燃焼分	1.0% ΔK/K
250°C から 50MW まで上昇分	0.8% ΔK/K
運転のための余裕分	0.5% ΔK/K

上記のうち出力上昇のために必要な 0.8% ΔK/K の反応度は等温係数の測定値が設計計算値とよく一致していたことから十分な信頼性があり、又燃焼分の反応度も設計計算値の信頼性は高い。

以上の結果から 65 本の炉心に追加すべき燃料本数は次のように求まる。

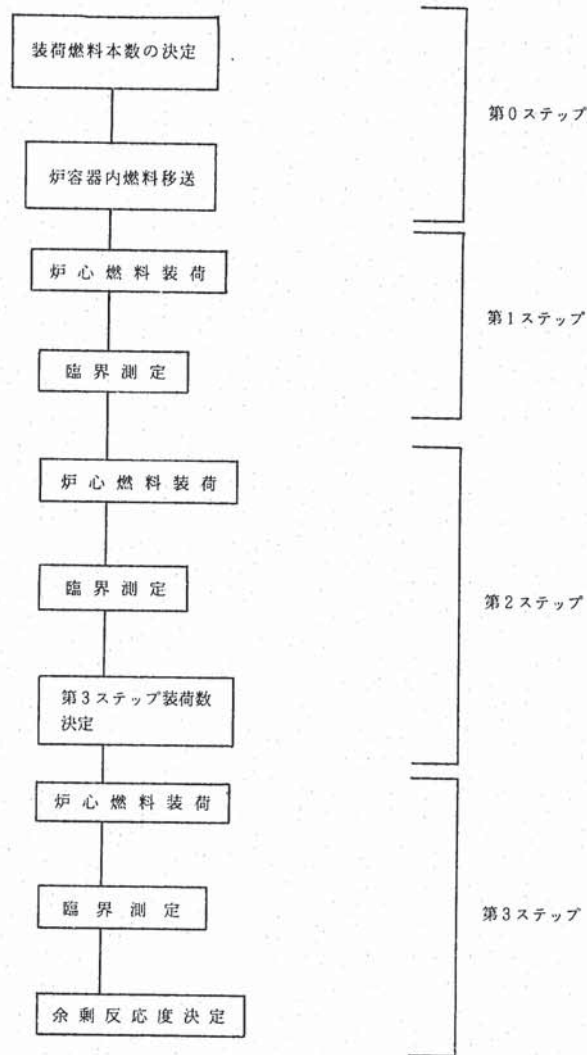
$$\frac{2.3 - 0.450}{0.355} = 5.2 \text{ 本}$$

従って炉心に 5 本の燃料を追加して、70 本の燃料の炉心を構成することにした。

【STEP O-2】炉容器内への燃料集合体の移送

前記結果にもとづき、1 体の余裕をみて 6 体の燃料集合体を炉内燃料ラックに移送した。さらに後に続く試験のための特殊燃料集合体 (4 体) をこの炉内移送に合わせて行なった。

また、この炉内燃料移送の間中性子計装系の監視を行ない、臨界近接 (NT-11) [参考文献 8] 時に注目された燃料ラック内の燃料が及ぼす中性子計数の変化を測定した。



第5-9図 初期炉心構成試験フロー

〔STEP 1〕 67本炉心の構成

炉心に2体の燃料をブランケット燃料と置換して装荷して、67本の燃料の炉心を構成して、この炉心の臨界点を測定することにより余剰反応度を求めた。

〔STEP 2〕 69本炉心の構成

ステップ1と同じ操作により69本炉心の余剰反応度を求めた。

〔STEP 3〕

前ステップまでの炉心の余剰反応度と周辺燃料反応度値より、最終ステップとして炉心に装荷する燃料が1体であることを確認して、これを炉心に装荷し、70本炉心の余剰反応度の暫定値を求めた。この炉心の正しい余剰反応度は本炉心構成の後に引き続いて行なわれた詳細な諸反応度試験〔参考文献3〕により求める。

本試験における各ステップの炉心装荷の状態を第5-10図に示す。ステップ1で66、67の集合体を、ステップ2で68、69、ステップ3で70を装荷した。

5.4.3 試験の結果

各ステップに於ける臨界点の測定結果を第5-10表に示す。合わせて64本の炉心及び250℃70本炉心についても記した。

表に記した余剰反応度の等温反応度係数の測定値 $3.8 \times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ を用いて、200℃の値に規格化した。

炉心余剰反応度については5-1章の調整棒反応度曲線をRR1にも同じであるとして用いた。

i) 燃料等価反応度

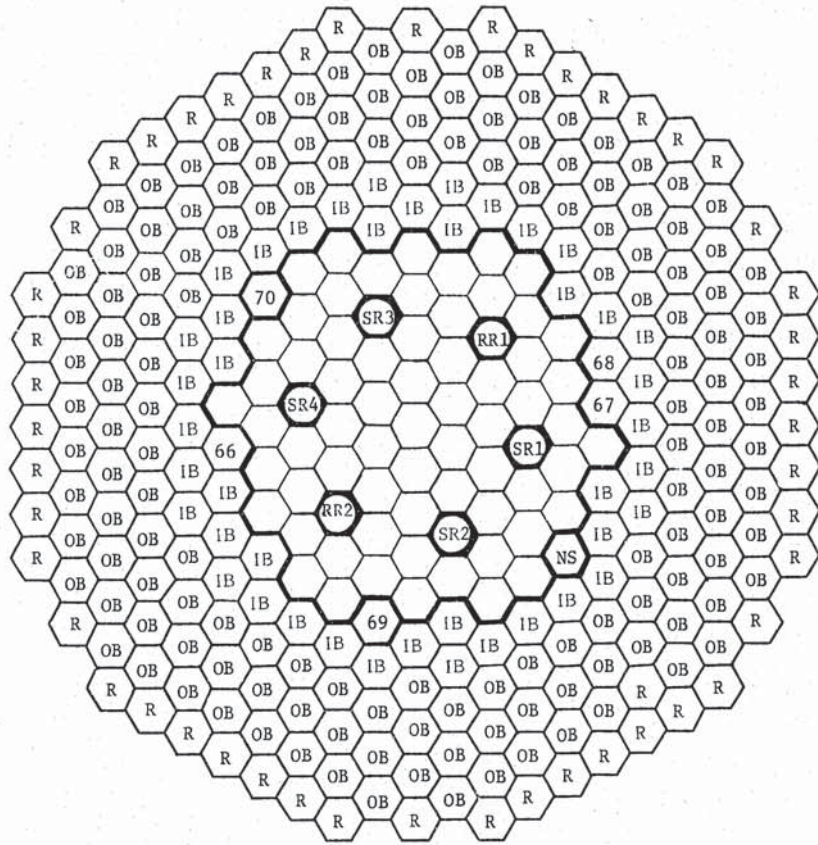
67本炉心構成のために加えた燃料等価反応度は1本当たり0.36% $\Delta K/K$ で65本炉心構成時と同じ位置関係にあるので、良い結果と云える。

しかし、この時の臨界は調整棒2本の操作によっているため、制御棒反応度の干渉効果のない、RR2の仮校正曲線による反応度は過少評価すると考えられる。この意味から69本炉心、70本炉心構成時の等価反応度も各々0.30、0.33% $\Delta K/K$ と前の67本炉心時の値に比べて良い値を示していると云えるが、制御棒の干渉効果があると考えると、さらにもう少し大きな値となりうる。

ii) 炉心余剰反応度

第5-18表に示したように制御棒仮校正曲線から求めた70本炉心200℃の余剰反応度は2.32% $\Delta K/K$ である。この値は同表記載のその後の校正による値より約0.1% $\Delta K/K$ 小さい。しかしながらこのちがいは燃料等価反応度の関係にも記した通り制御棒反応度の干渉効果と考えてよい。

この結果得た250℃に於ける初期炉心の余剰反応度は2.13% $\Delta K/K$ となり5-4-2記載の2.3%より若干小さいものの、追加装荷燃料本数5.2本のところ5本装荷であり、予想通りの結果を得たことになる。



-  内側ブランケット
-  外側ブランケット
-  反射体
-  制御棒
-  中性子源

第5-10図 初期炉心構成図
(燃料集合体本数70)

第5-10表 初期炉心構成時反応度結果

炉心燃料本数	臨界調整棒位置		冷却材温度 (°C)	炉心余剰反応度 at 200°C (%ΔK/K)	燃料等価反応度 1本当り (%ΔK/K)	備考
	RR1 (mm)	RR2 (mm)				
64	7000	5433	200.0	0.320	—	最小臨界炉心の250°Cに於ける 余剰反応度 0.13%ΔK/K 5-2章記載燃料等価反応度 0.355%ΔK/K
65	7000	4400	199.0	0.670	0.35	
67	5370	3500	196.5	1.385	0.36	
69	3845	3500	201.0	1.985	0.30	
70	3500	3170	200.0	2.32	0.33	
70	3500	361.1	200.0	2.423*	—	250°Cに於ける余剰反応度： 2.13%ΔK/K * 252.8°Cに於ける余剰反応度 2.223%ΔK/K

※ 52年5月31日の等温係数計算時データで、NT-21の調整棒本校正試験結果及びNT-33等温係数 $3.8 \times 10^{-5} \Delta K/K/^\circ C$ を用いて得た値

5.5 その他の試験

臨界試験の期間に、その後の試験のために必要な基本的な情報として、中性子源の臨界に及ぼす効果及び検出系の不感時間の測定を行なった。又初期炉心構成時の燃料炉内移送時のデータより炉内ラック内燃料の中性子計装への影響をしらべた。

5.5.1 中性子源効果

中性子源が臨界点の測定に及ぼす効果として次の2つが考えられる。

- (a) 中性子源からの中性子束レベルが臨界点に及ぼす効果
- (b) 中性子源が持つ反応度

i) 試験の方法

中性子源のガンマ線源部が中性子源受入集合体 (Be)にある場合及び中性子源引張装置 (付録 3)により γ 線源部を引き抜いた場合の両者に対して原子炉出力レベルを変えてその時の出力を維持できる制御棒の位置を測定した。また、中性子源効果がない、十分高い原子炉出力レベルに於いて、ガンマ線源部を引き抜いてこれの持つ反応度値を求めた。さらに原子炉が停止の状態 (全制御棒挿入及びRR 2のみ全挿入状態)に於いて、ガンマ線源部の挿入状態による中性子源強度の変化も測定した。

ii) 試験の結果

ガンマ線源部挿入状態に於ける結果を第5-11表に示す。

原子炉はRR-2を除いて他の制御棒は全引抜状態にある。測定時の冷却材ナトリウム温度は242°C~246°Cで、等温係数及び制御棒校正曲線の測定値を用いて、調整棒No. 2の位置を補正した。

第5-11表 中性子源効果 (γ 線源部入り)

原子炉出力 ch 計数率 (cps)	調整棒 No. 2 位置 (mm)
115	389.7
228	435.1
326	448.5
505	461.
1220	476.3
2140	480.1
5780	483.8
11700	484.6
19700	484.8
47400	485.4
86800	484.7

次に第5-12表にガンマ線源部全引抜状態に於ける測定結果を示す。本測定時は冷却材温度は243±1°Cで安定していた。

第5-12表 中性子源効果 (γ 線源部引抜)

原子炉出力 ch 計数率 (cps)	調整棒 No. 2 位置 (mm)
68	472.3
122	474.8
240	476.3
567	477.4
1190	478.2
2200	478.2
4580	478.6
8920	478.5
17400	478.7

これらの結果を第5-1図に示した。

(A) 臨界レベルに及ぼす効果

図からわかる通り、通常のガンマ線源部が挿入された状態に於ける、線源効果によらない原子炉出力は約1kw (ch 1で 1×10^4 cps)であり、ガンマ線源部を引き抜いた状態では、約1桁下の100w程度であった。

(B) γ 線源部の反応度値

次にガンマ線源部の反応度値として、中性子源レベルによらない原子炉出力・ch 1計数率 2×10^4 cpsで線源部引抜と挿入状態の調整棒No. 2位置データを次に示す。

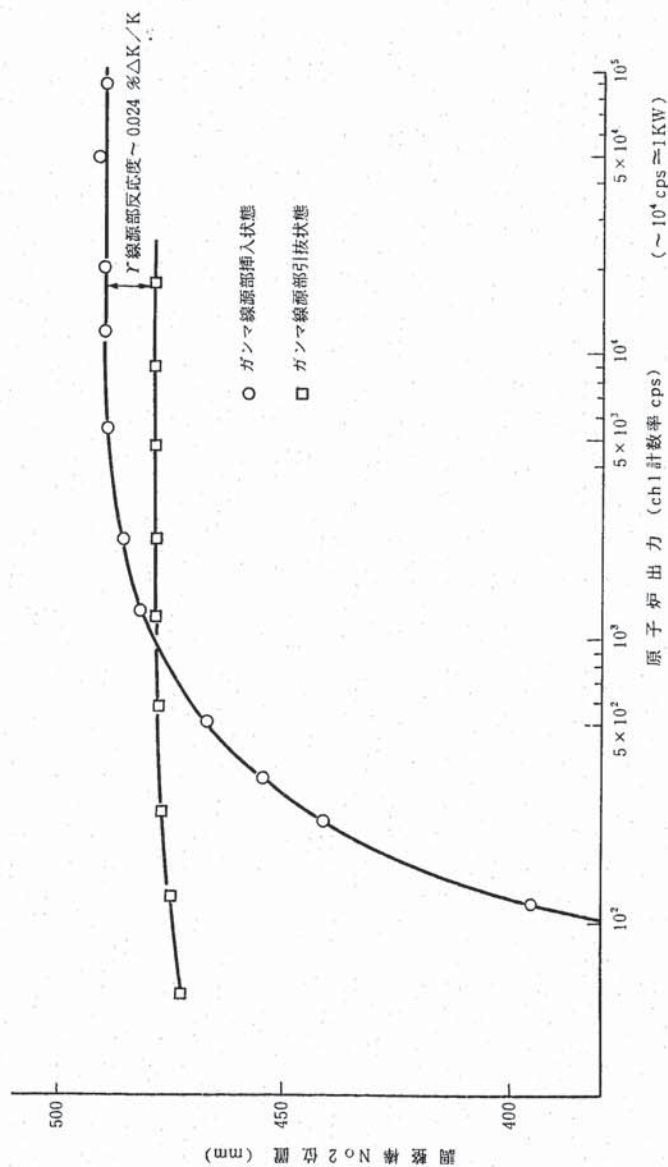
RR 2 位置 (mm)

γ 線源部引抜時	478.7
γ 線源部挿入時	484.8

上記データから調整棒No. 2の校正曲線を用いて、反応度を求めると0.024% $\Delta K/K$ となる。なお上の測定は引き続いて行なった試験で、冷却材の温度変化等もなく測定誤差はたいへん少なく約10%程度と予想される。

(C) ガンマ線源部引抜きによる中性子源強度

原子炉が未臨界の2つの状態で、測定した予備チャンネルの計数率の結果を第5-12表に示す。



第5-11図 中性子源効果

第5-13表 γ線源部引抜時中性子源強度測定結果

	停止時			RR-2全挿入, 他全引抜時	
	40.5	73.5	329	677	544
γ線源部	(0.030)	(0.032)	(0.035)	(0.029)	(0.028)
全引抜	-	-	-	13572	11308
300 mm (50%引抜)	-	-	-	(0.58)	(0.58)
全挿入時	1135 (1)	2264 (1)	9389 (1)	23300 (1)	19606 (1)

単位 cpm, ()内は全挿入時を1としたときの比

表よりわかる通り, 各々2つの未臨界の状態, γ線源部引抜時と挿入時とは約30倍計数率がちがうことがわかる。又未臨界度によるちがいは, 測定誤差の範囲内で一致しているといえる。又, 線源部を50%引き抜いた状態では強度は約1/2より若干多い値となっており予想通りの結果である。また, 全引抜時の計数率の比約30は(A)に記した臨界点に及ぼす効果の結果とも矛盾していない。

iii) 考察

(A) 中性子源が臨界点に及ぼす効果として測定した結果から, γ線源部の引抜時と挿入時において各出力レベルの未臨界度の補正係数を求める。

中性子源の影響がない出力レベルに於ける調整棒位置を基準として, これからの反応度差を制御棒反応度校正曲線より求めて, この未臨界度反応度と原子炉出力の積を, 各出力レベルで求めた結果を第5-14表と第5-15表に示す。これらの関係を第5-11図に合わせて示した。

これらの結果より, 次の補正係数が求まる。

i) γ線源部引抜時

$$P \times \Delta K = 2.2 \text{ (CPS} \times \% \Delta K / K \text{)}$$

ii) γ線源部挿入時

$$P \times \Delta K = 46.2 \text{ (CPS} \times \% \Delta K / K \text{)}$$

ここで P : ch 1の計数率による原子炉出力

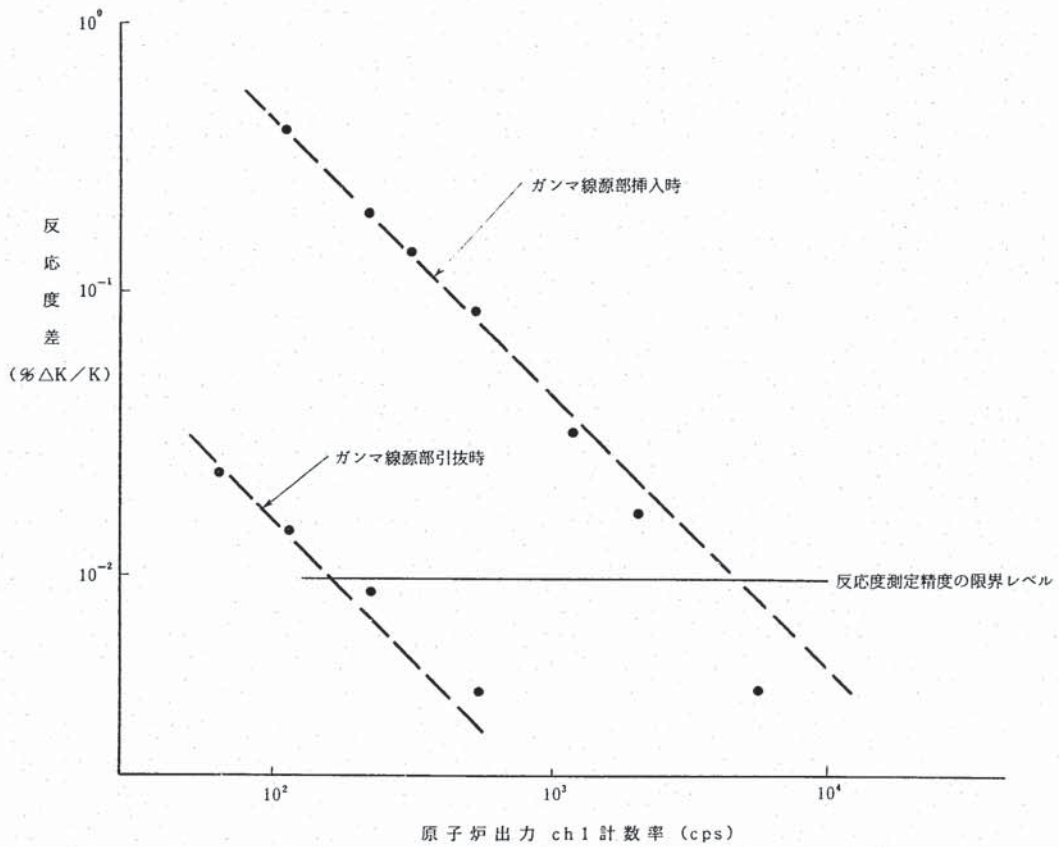
ΔK : 臨界点からのづれ反応度

第5-14表 中性子源効果補正 (1)
(ガンマ線源引抜時)

原子炉出力 ch 1 計数率 (cps)	反応度差 (%ΔK/K)	原子炉出力×反応度差 (cps × %ΔK/K)
68	0.024	1.6
122	0.015	1.83
240	0.009	3.10
567	0.004	2.27
1190	0.002	2.38
2200	0.002	—
4580	0	—
8920	0	—
17400	0	—

第5-15表 中性子源効果補正 (2)
(ガンマ線源挿入時)

原子炉出力 ch 1 計数率 (cps)	反応度差 (%ΔK/K)	原子炉出力×反応度差 (cps × %ΔK/K)
115	0.406	46.7
228	0.202	46.1
326	0.146	47.6
505	0.088	44.4
1220	0.033	40.3
2140	0.017	36.4
5780	0.004	23.1
11700	0.002	—
19700	0	—



第5-12図 中性子源効果の原子炉出力・反応度差相対図

(B) 中性子の線源強度

未臨界増培法に基づく次式により、中性子源実効強度 S_{eff} を求める。

$$S_{eff} = \Delta K \cdot \frac{N}{\ell} = 3.1 \times 10^{10} \times \nu \cdot \Delta K \cdot P$$

ここで $\Delta K = 1 - k_{eff}$: 未臨界度

ℓ : 中性子寿命

N : 炉心内の毎秒当りの全中性子数

P : 原子炉出力

ν : 1核分裂当りの中性子発生数

$n/\ell\nu$: 炉心内の毎秒当りの全核分裂数

ここで原子炉出力と ch1 計数率の関係は

$$n = 0.13 \text{ watt/cps}$$

(A)で求めた反応度と原子炉出力の関係は

$$\Delta K \times P = 46.2 \text{ (cps} \times \% \Delta K / K)$$

$$= 6.0 \text{ (\%} \Delta K \cdot \text{Watt)}$$

これを上の式に代入して S_{eff} を求めると、

$$S_{eff} = 4.7 \times 10^9 \text{ n/sec}$$

中性子源の強度 S は、炉心に対する中性子源の実効立体角 (約 0.5) を用いて、

$$S = \frac{S_{eff}}{\Omega} = 9.4 \times 10^9 \text{ n/sec}$$

一方ガンマ線源強度から求める中性子源強度 S_0 はガンマ線源強度の測定時 2900 (Ci) を用いて

$$S_0 = 3.2 \times 10^6 \text{ Sr} = 9.3 \times 10^9 \text{ n/sec}$$

故に実測値から予想される値と良く一致している。

5.5.2 中性子計装系の不感時間

制御棒校正のためのベリオド測定、あるいは未臨界時の計数率の測定等に用いた中性子計装系は、予備チャンネルの ABD とプラント本設計装の起動系第 1, 2 チャンネルがあるが、これらはいずれもパルス系であるので、その不感時間の測定を行なった。

i) 試験の方法

チャンネル D の感度は他の検出系にくらべて低いため、原子炉出力を段階的に変えた時の各チャンネルの計数率を測定して、チャンネル毎の計数率とその比を取ることで不感時間を求める。

試験は燃料本数 65 本の炉心に於いて、起動系 ch 1 で 10^2 cps まで原子炉出力を変化させた。

ii) 試験結果

パルス系の不感時間は下記により求めた。

$$C' = \frac{C}{1 + C\tau}$$

$$\tau = \frac{1}{C'} - \frac{1}{C}$$

ここで C : 真の計数率

C' : 実測の計数率

τ : 求める不感時間

チャンネル D の計数率は他チャンネルに比して十分低いとして求めるチャンネルの計数率の比をとり、この比率を用いて外挿された計数率との差の逆数を求めた。

チャンネル A, B およびチャンネル 1, 2 について試験時のデータを第 5-16 表に示す。

第 5-16 表 計数率計測結果 (cpm)

No.	チャンネルD	チャンネルA	チャンネルB	チャンネル1	チャンネル2
1	221	64412	1179	6911	6052
2	418	124899	2329	13693	12060
3	547	176638	3343	19583	17132
4	897	268748	5034	30330	26793
5	2157	587974	12273	73328	64512
6	3733	913851	21393	128554	103038
7	9303	1698819	53034	322557	284908
8	20213	2269358	112733	760244	618331
9	34485	2831429	186758	1182574	1050801
10	87326	4486296	413524	2845803	2563495
11	168007	5657107	660008	5297413	4789707
検出器	(F.C.)	(B-10)	(B-10)	(F.C.)	(F.C.)

次に第 5-16 表の結果より、各チャンネル計数率が約 2×10^5 cpm 以下の結果は不感時間にほとんど関係しないので、この部分のデータのチャンネル D との計数率の比をかけて規格化した結果を第 5-17 表に示す。(第 5-16 表の点線部より上部データによる規格化・唯し※印データを除く)

第5-17表に於いて、各チャンネルの規格化計数値をチャンネルDとくらべると、不感時間の影響がよくわかる。この結果より不感時間に関係しているデータを取り、ii)の式で求めた不感時間を第5-18表に示した。

もともとch Aとch B及びch 1とch 2は各々同種の検出器とエレクトロニクスで構成されているので不感時間も異なるはずはない。ch Bの不感時間が大きくなったのは、このチャンネルの計数率はch Dのそれに近く、比較したch Dの不感時間の影響を受けたためである。以上の結果よりch A, Bに対して不感時間は、ch Aの結果の平均値として15 μ sec、又ch 1, 2に対しては、これに関するデータの平均値として1.1 μ secとなる。

但しch 1及び2については第5-16表よりわかる通り、途中チャンネルDより計数率が多い部分がある。即ち、かえってch Dの方が数え落しがあると考えられ、従って不感時間もさらに小さな値である可能性がある。

5-4-3 炉内燃料貯蔵ラック内燃料の中性子計装に及ぼす効果

初期炉心構成のために必要な燃料6体とその後の低出力試験等に使用する特殊燃料集合体3体^(注)を炉内へ移送した時に、中性子計測系のうちch A, B及びch 1, 2の計数率の変化を測定した。この時の炉心は全制御棒挿入の未臨界状態である。又、初期炉心構成の各ステップの臨界時のデータより各計測チャンネルの計数率の比の変化をも調べた。

第5-19表及び第5-20表に炉内への燃料移送時及び炉心装荷のために燃料ラックから引き抜かれた時の中性子計数率の測定結果を示す。これらの結果の燃料移送時のデータを第5-13図に示した。図よりわかる通り注目する中性子計装系方向のラックにある燃料集合体は1体当たり約10~15%計数率を増加させることがわかる。

又、第5-21表の結果より炉心燃料本数が67本及び69本時はラック番号23, 24に燃料集合体があり、これの結果によりch 2の計数率が約33%増加していることがわかる。この結果も第5-19, 20表の結果とよく一致しており、この結果は臨界近接時(NT-11)に評価された結果とほぼ一致した。さらに低出力試験時に詳細測定が計画されている。(中性子計装系と炉内ラック番号は付録2, 第F-2-1図参照)

(注) ここで炉内移送した特殊燃料集合体は出力分布測定用のもので、91本の燃料ピンのうち中心の7ピンを除いたもので、ほぼ通常の燃料と同じと考えてよい【参考文献5】。

第5-17表 計数率規格化データ

No.	ch D	ch A	ch B	ch 1	ch 2
1	221	218	211	208	207
2	418	423	417	412	412
3	547	598	598	589	586
4	897	911	901	912	916
5	2157	1992	2197	2205	2205
6	3733	3096	3829	3866	3863
7	9303	5756	9492	9699	9738
8	20123	7689	20178	22860	21134
9	34485	9593	33428	35563	35915
10	87326	—	74018	85573	87617
11	168007	—	118137	156586	163706

第5-18表 不感時間の結果 (単位 μ sec)

No.	ch A	ch B	ch 1	ch 2
5	—	—	—	—
6	12.6	—	—	—
7	14.0	—	—	—
8	16.6	—	—	—
9	15.4	10.0	(0.73)	(0.49)
10	—	22.1	1.34	1.05
11	—	27.0	1.26	0.91

第5-19表 炉内燃料移送時の中性子計数率の結果

炉心燃料本数 : 65

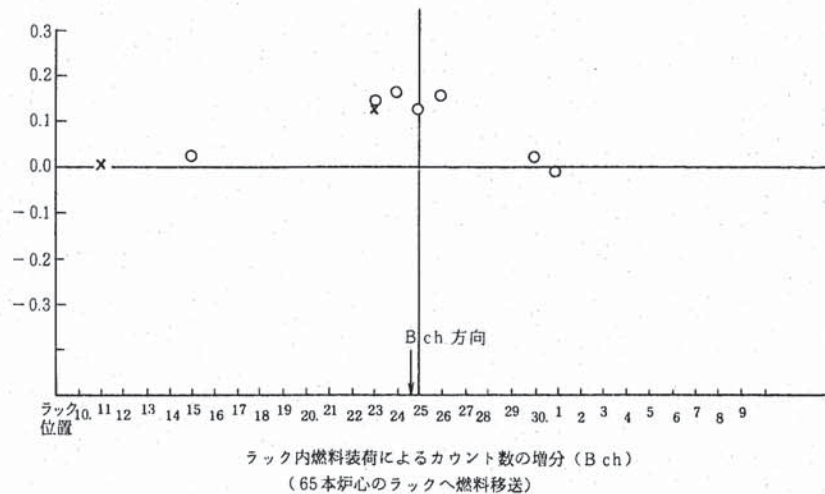
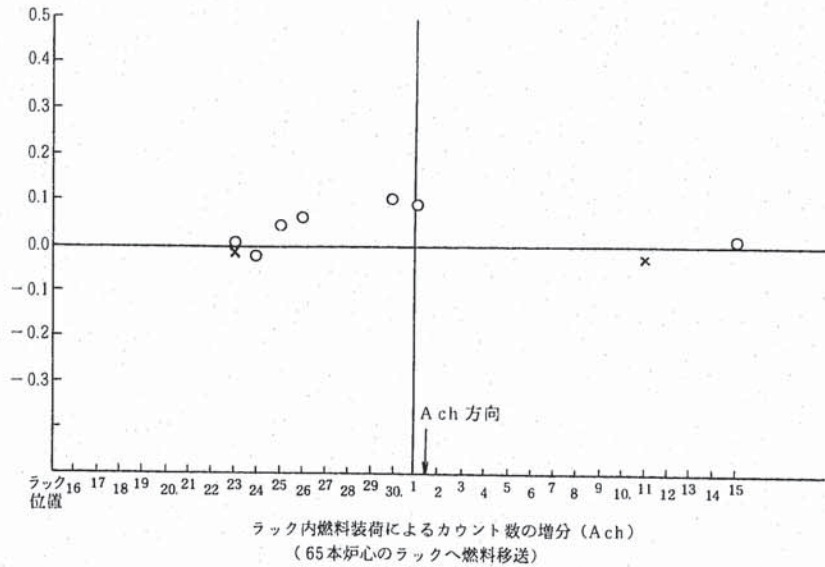
ラック番号	ch A (B-0)			ch B (BF ₃)		
	ni (cpm)	ni / no	ni + 1 - ni / no	ni (cpm)	ni / no	ni + 1 - ni / no
R-30	2456	1.1093		3670	1.01973	
R-26	2589	1.16938	0.06008	4232	1.17588	0.15615
R-25	2600	1.17435	0.00497	4697	1.30508	0.12920
R-24	2596	1.172538	0.00181	5285	1.46846	0.16338
R-23	2607	1.177507	0.00497	5812	1.61489	0.14643
R-15	2637	1.19106	0.01355	5902	1.63990	0.02501
R-1	2851	1.287714	0.09665	5869	1.63073	-0.00917

第5-20表 炉心燃料装荷時の中性子計数率の結果

燃料ラックNo.	引抜 挿入	炉心 本数	ch A (BI ₀)		ch B (BF ₃)	
			ni	ni/no	ni	ni/no
-	-	65	2755	-	6062	-
R-1	引抜	65	2574	0.936	6083	0.981
R-30	〃	66	2438	0.930	6254	0.984
R-26	〃	67	2420	0.961	5865	0.923
R-25	〃	68	2545	1.011	5630	0.942
R-24	〃	69	2700	1.015	5223	0.883
R-23	〃	70	2780	1.012	4671	0.865
R-11	挿入	70	2704	0.973	4700	1.006

第5-21表 炉内ラック内の燃料が起動系に与える効果

炉心体系	炉心燃料貯蔵ラック番号	ch 1 計数率 (cpm)	ch 2 計数率 (cpm)	ch 2 / ch 1
65		745940	575277	0.771
67	R-23, R-24 R-25, R-26(R-15)	1362118	1419659	1.042
69	R-23, R-24(R-15)	1424778	1483102	1.041
70	R-11 (R-15)	1772851	1383133	0.780



第 5-13 図 ラック内燃料の中性子計装に及ぼす効果

6. 評価と検討

6.1 試験結果の設計計算値との比較

臨界試験及び初期炉心構成で得られた実測値と設計計算値及び安全審査等に定められた基準値との対比を第 6-1 表に示す。

調整棒反応度に関しては、設計値より約 10 % 大きい設計計算値の許容巾の内に入っており、反応度が大きい方にずれているということで良好である。唯し設計値に於ける炉心燃料本数のちがいがから、反応度にも若干のちがいはある。安全棒の反応度値も調整棒と同様であるが、SR 1 及び 2 については測定値が相当過大評価となっており、SR 3, 4 が実際とはほぼ一致しやや過小評価となっている。(中性子源位置と中性子検出器の相対関係による) ことを考えると良い一致と云える。

燃料等価反応度、等温係数については設計計算値と良い一致を示しており、今後の炉心性能上の観点から明るい見通しを得た。

また炉心の余剰反応度についても、その後の詳細試験結果 2.22 % ΔK/K となり、最適な反応度になっていると云える。

6.2 最小臨界量

64 本炉心の臨界データは 5.2.3 記載より 204.7 °C に於いて RR. 2 が 545.0 mm で得られている。一方 RR. 2 較正曲線より 545.0 mm の反応度値は 0.28 % ΔK/K である。従って最小臨界の燃料本数は

$$64 - \frac{0.28}{0.355} = 63.21 \text{ (本)}$$

これを 250 °C の本数に換算すると

$$64 - \frac{0.28 - 0.173}{0.355} = 63.70 \text{ (本)}$$

一方設計計算による最小臨界量は 250 °C に於いて 61 ± 5 (本) [参考文献] とされており、実際の値は設計値の範囲にあるとは云え、2.7 本の違いとなった。

尚最小臨界量 (64 体) とそのウラン・プルトニウムの量は実計量値より次の通りである。

PuO ₂	824.91472 kg
(Pu metal	128.46015 kg)
(Pu fissile	102.79434 kg)

第6-1表 試験結果と設計計算値との対比

事項	実測値	制限値	設計値
調整棒反応度値 (%ΔK/K)	RR-2について 2.12	2本で2.8以上	67本炉心に於いて、1本当り 1.90±0.38
安全棒反応度値 (%ΔK/K)	SR1 : 2.43 2 : 2.50 3 : 2.14 4 : 2.12	同上	67本炉心に於いて 1.98±0.40
燃料等反応度(%ΔK/K)	0.355	-	0.35
等温係数(%ΔK/K)	180~250℃に 於いて -3.81×10 ⁻³	-	67本炉心200℃~250℃に於いて -3.7×10 ⁻³
炉心余剰反応度 (%ΔK/K)	250℃に於いて 2.13 100℃換算値 2.70	100℃に於いて 4.5%以下	250℃において2.3 (NT-21, NT-31, NT-33等試験の結果2.22)
初期炉心構成に必要な 追加燃料本数	6 (燃料反応度で1) 初期炉心構成で5)	-	6

²³⁵UO₂ 679.26751 kg
 (²³⁵U metal 137.58091 kg)
 アイソトープ・レシオ
 Pu²³⁹/Pu²⁴⁰/Pu²⁴¹ : 70/25/5 (%)
 U²³⁵/U²³⁸ : 0.25/99.7 (%)
 炉心体積(制御棒を含む) 241 (L)

6-3 制御棒効果

シャットダウンマージン、ワンロードスタックマージン及び最大反応度附加率の実測値及び設計値を第6-2表に記す。

第6-2表 制御棒効果の結果

	実測値	設計値*
シャットダウンマージン (%ΔK/K) (250℃に於ける6本制御棒全挿入時の未臨界度)	11.32 ⁽¹⁾	9.35
ワンロードスタックマージン (%ΔK/K) (安全棒3本全挿入時の未臨界度)	6.69 ⁽²⁾	3.54
最大反応度附加率 (%ΔK/K/sec)	0.010 ⁽³⁾	>0.015

* 参考文献

- (1) 5-1-3章の全制御棒6本の反応度の和
- (2) SR1, 3, 4の3本の反応度の和
- (3) RR-2の最大反応度勾配(中心部)と設計駆動速度130mm/分より求めた値

上記表より炉停止余裕は十分であり、また最大反応度附加率も設計値を満足することがわかる。これらの詳細については、続いて行なわれる測定NT-21, 22, 23を参照されたい。[参考文献2]

7. 結 言

最小臨界達成後に引き続いて行なわれた臨界試験の結果は、設計値と良く一致し、その結果、燃料本数 70 本の初期炉心が構成された。この炉心は設計計算による 67 本より 3 本多い炉心であるが、このちがいは最小臨界量（設計値 61：実値 64）のちがいがそのまま引き継がれたものである。この炉心の持つ諸特性の確証は本試験後に、つづいて行なわれるが、臨界試験の結果が設計値ときわめて良い一致をしていたことから、見通しはきわめて明るい。即ち本初期炉心は諸特性試験の後に 50 MW の出力上昇を達成できると期待される。

8. 謝 辞

本試験は試験計画立案に当り、「常陽」性能試験専門委員会の委員の方々には有意義な助言をいただき、さらに試験の計画から遂行に当っては、関係メーカー（東京芝浦電気、日立製作所、三菱重工、原子力、及び富士電機製造株式会社）の助言並びに試験協力員の御協力をいただいた。本試験完遂に当り、御協力いただいた方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] G.R. KEEPIN, PHYSICS OF NUCLEAR KINETICS
ADDISON-WESLEY PUBLISHING Co. Inc. (1964)
- [2] 「常陽」性能試験結果報告書, 制御棒特性 (NT-21/22/23)
三田敏男他 社内報告書 PNC SN 941 79-191
- [3] 「常陽」性能試験結果報告書, 周辺燃料反応度係数 (NT-31)
山本 寿他 社内報告書 報告予定
- [4] 「常陽」性能試験結果報告書, 等温反応度係数 (NT-33)
広瀬正史他, 社内報告書 PNC SN 941 79-119
- [5] 高速実験炉「常陽」性能試験計画資料,
山本 寿他 社内報告書 PNC N908 78-04
- [6] 「常陽」性能試験のための予備解析と設計値のまとめ
石川 真他 社内報告書 PNC SN 941 79-197
- [7] 「常陽」性能試験結果報告書, 出力校正/出力分布
鈴木惣十他 社内報告書 PNC SN 941 79-112
- [8] 「常陽」性能試験結果報告書, 臨界近接
山本 寿他 社内報告書 PNC SN 941 80-04

付録1. ダブリングタイム・反応度変換対応曲線

ベリオド法による測定は、原子炉出力増加の割合を、中性子計数率のレコーダチャート又は計数率計のメータにより計数率が2倍になるダブリングタイムとして行なった。

ダブリングタイムと反応度の関係は原子炉の逆時間動特性方程式を計算機により解いて作成した〔参考文献2〕。この時に用いた遅発中性子のデータを表F1-1~F1-3に示す。これらの出典は参考文献〔9〕によった。なお β のデータは、炉心に制御棒が1/4挿入時の値を用いた。

上記により得た反応度対応曲線を図F1-1に示す。

表F1-1 核種別の遅発中性子の生成割合 β_i と先行核の崩壊定数 λ_i

核種 グループ 番号i	²³⁵ U		²³⁸ U		²³⁹ Pu		²⁴⁰ Pu		²⁴¹ Pu	
	$\beta_i \times 10^{-4}$	$\lambda_i \text{ sec}^{-1}$	$\beta_i \times 10^{-4}$	$\lambda_i \text{ sec}^{-1}$	$\beta_i \times 10^{-4}$	$\lambda_i \text{ sec}^{-1}$	$\beta_i \times 10^{-4}$	$\lambda_i \text{ sec}^{-1}$	$\beta_i \times 10^{-4}$	$\lambda_i \text{ sec}^{-1}$
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

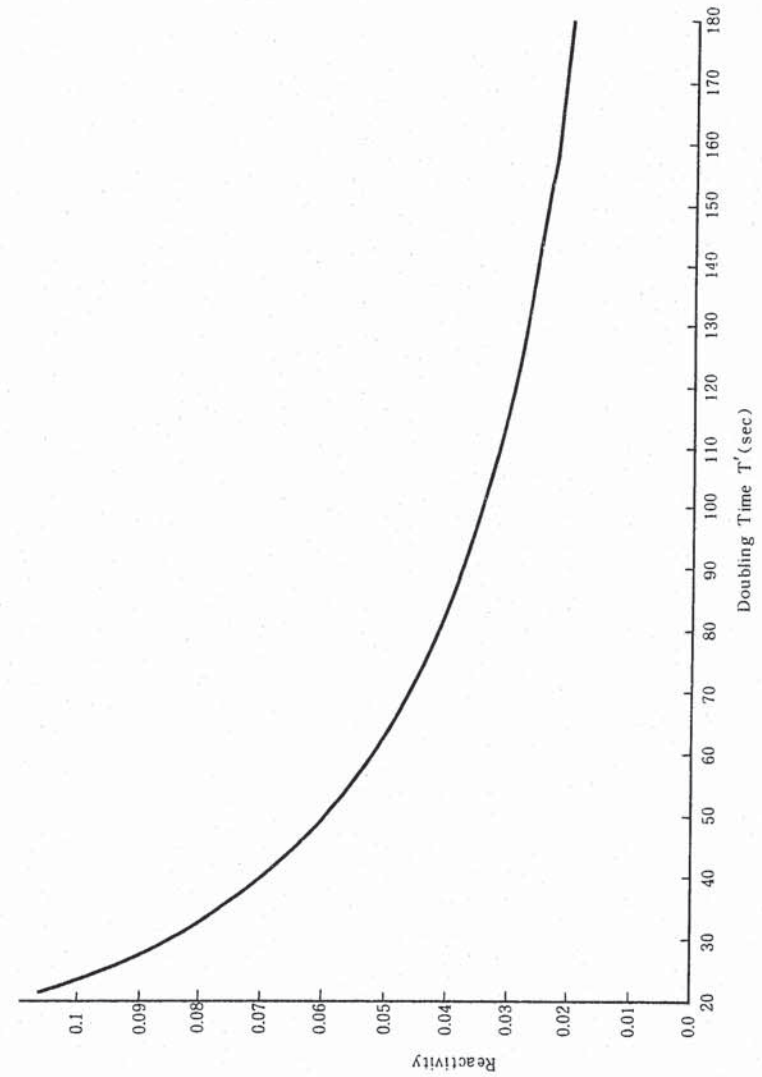
表 F 1-2 中性子生成時間及び遅発中性子生成割合

	標準値 (調整棒 1/4 挿入)	全制御棒全挿入
A	2.577×10^{-7} sec	2.053×10^{-7}
β_1	1.641×10^{-4}	1.514×10^{-4}
β_2	1.058×10^{-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。

表 F 1-3 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



第 F 1-1 図 Reactivity ρ - Doubling Time

付録2. 中性子検出器の配置と感度

「常陽」の中性子計装系の検出器の配置を図F2-1に示す。本設中性子チャンネルはch1~8まででその他臨界近接試験時から設置した予備チャンネルのchA, B, Cの3チャンネルがある。これらは、チャンネルAが核計装予備チャンネル(第9チャンネル)案内管, chBがマンホール(M-1)案内管, chCが原子炉安全容器サーベランス案内管に各々下記の検出器が挿入されている。

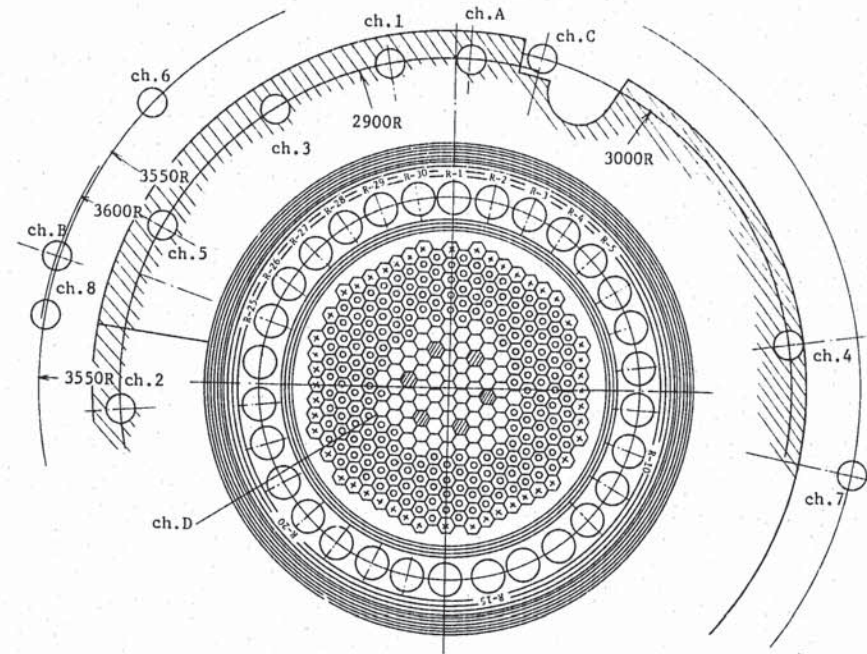
- ch・A BF₃ B-10
- ch・B BF₃ B-10
- ch・C BF₃
- ch・D F. C. (U²³⁵)

中性子感度

- BF₃ 60 cps/nv
- B-10 1 cps/nv
- F. C. 0.1 cps/nv

上記のうち原子炉が臨界を達成してから後の本試験の期間は中性子強度が十分なためchA, B共にB-10検出器を使用しておりch3は使用していない。

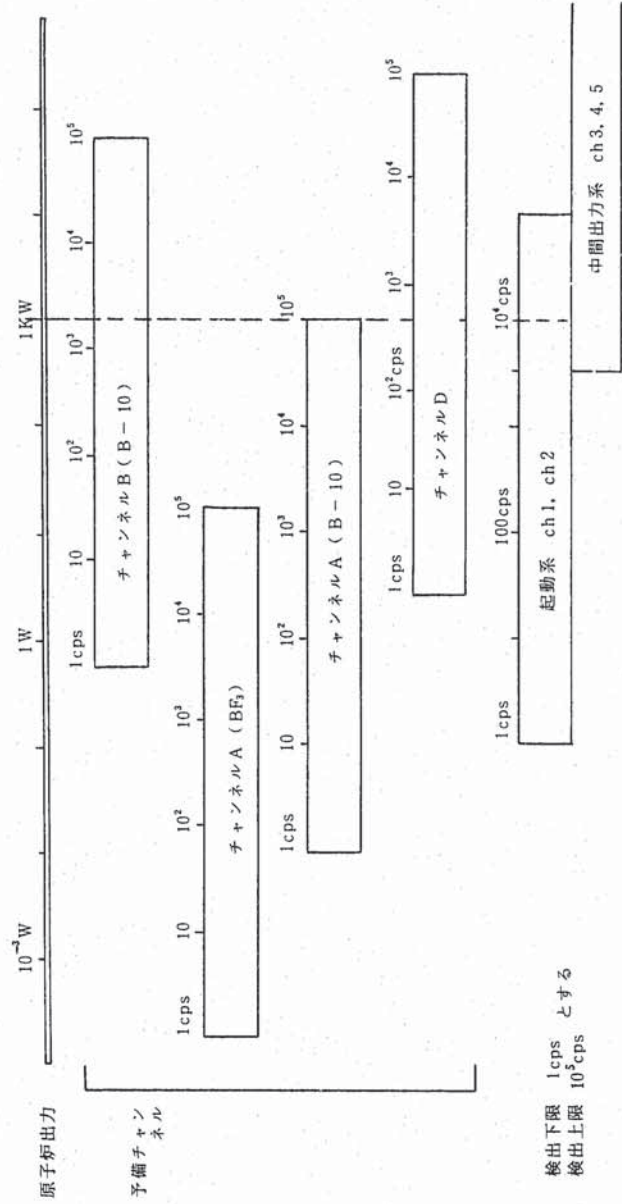
又チャンネルDは回転プラグの制御棒予備孔, 炉心マトリックスの5D2に位置し, 炉心上部に常陽の本設中性子計装系の起動系と同じ感度の検出器が挿入されている。本チャンネルは感度が低いため臨界達成後から使用された。



- ⬡ DUMMY FUEL S/A
- ⊙ BLANKET S/A
- ⊗ REFLECTOR
- ▨ CONTROL ROD
- ⊕ NEUTRON SOURCE
- IN-VESSEL STORAGE RACK
- ▨ GRAPHITE REGION

- ch.A~ch.C BF₃, B-10 ch.D F.C. TEMPORARY NEUTRON CHANNELS
- ch.1~ch.2 F.C. SOURCE RANGE CHANNELS
- ch.3~ch.5 F.C. INTERMEDIATE RANGE CHANNELS
- ch.6~ch.8 CIC POWER RANGE CHANNELS

図F2-1 中性子検出器配置図



第 F 2-2 図 中性子計表系・予備計表系測定範囲概念図

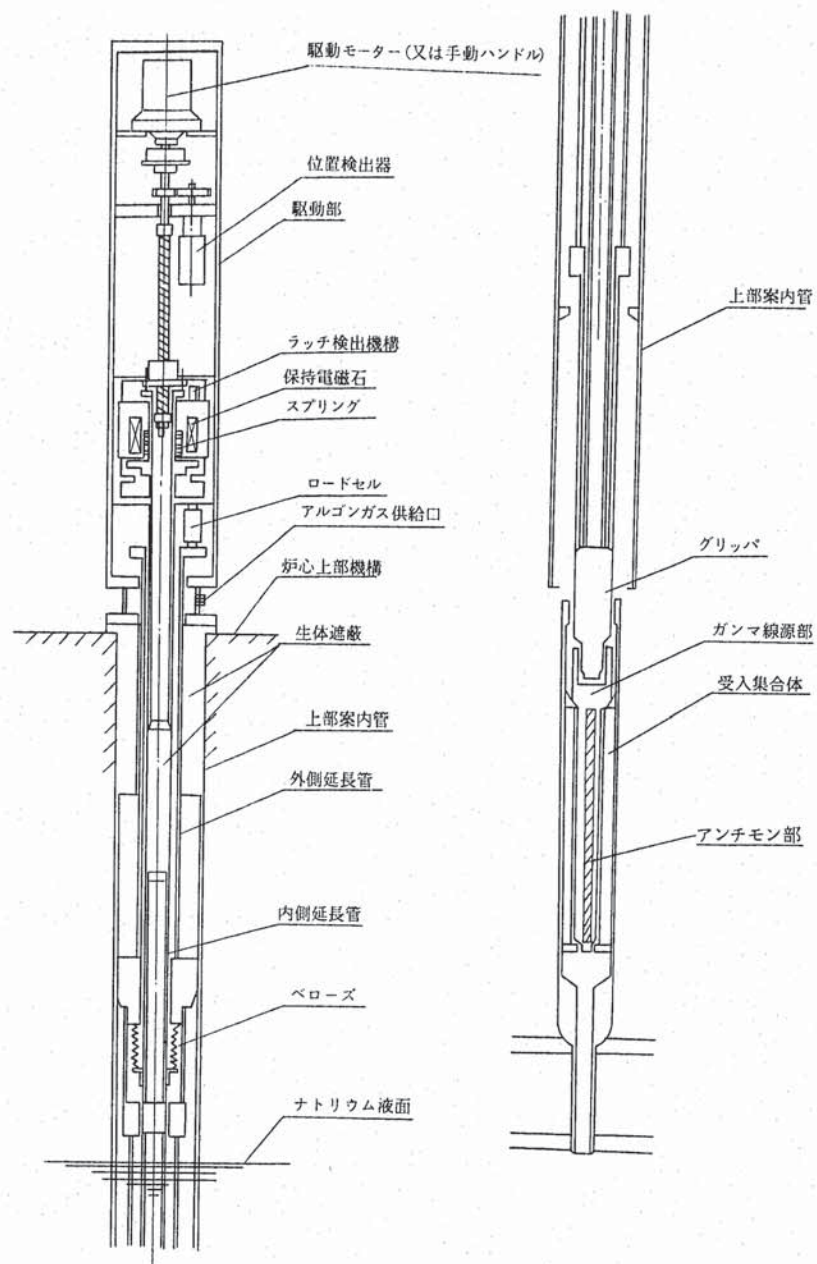
付録3. 中性子源引抜装置

中性子源引抜装置は、原子炉の正確な臨界点を確認するため、炉心に予じめ装荷されている中性子源のガンマ線源部を受入集合体から引抜くことによって中性子の発生を一時停止させる機能を持つ。

本装置は、低出力時に於て反応度測定試験に使用され、ガンマ線源部の炉心への引抜挿入は手動操作により行う。中性子源操作盤は、中央制御室に設置されており中性子源引抜装置の運転に必要なスイッチ類及び運転状態を監視するために必要な計器類が設けられている。

ガンマ線源部は 60 cm あり、炉心に装荷されている時は炉心中心に位置し、本装置のストロークは 60 cm であるので全引抜の状態ですぐガンマ線源部が中性子源受入集合体のベリリウム部の最上部に接した位置にあることになる。

従って、全引抜きと云えども中性子の発生は零になるわけではない。



第F3-1図 中性子源引抜装置概略図