

JAERI - M
86-179

未臨界度モニターに関する実験

1986年12月

辻 延昌*・大杉 俊隆・大野 秋男

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 髙野高速印刷

未臨界度モニターに関する実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

辻 延昌*・大杉 俊隆・大野 秋男

(1986年11月18日受理)

高速炉臨界実験装置 (FCA) を用いて、中性子エネルギーに対して異った感度を有する2つの検出器 (対検出器) を使う未臨界度モニターに関する実験を行なった。検出器として ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U 核分裂計数管, ^3He 比例計数管を用い, これらを組合せて対検出器とした。XII-1 および XIII-1 炉心において, 体系の未臨界度を変えて対検出器の計数率比 R を測定した。測定の結果, 計数率比 R が未臨界度に対して滑らかに変化するような対検出器の組合せと設定位置が存在することを確認した。

Experiments on Subcriticality Monitor

Nobumasa TSUJI*, Toshitaka OSUGI and Akio OHNO

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken
(Received November 18, 1986)

Measurements of count rate ratio R of pair detectors were done at different subcritical states in the FCA XII-1 and XIII-1 cores. Fission counters of ^{235}U , ^{237}Np and ^{238}U , and ^3He proportional counter were coupled and were used as pair detectors in which each detector has different energy sensitivity for neutron energy.

As a result, it was demonstrated that there exist some detector combinations and setting points for pair detector of which count rate ratio R changes smoothly versus subcriticality.

Keywords: Subcriticality Monitor, FCA, ^{235}U Fission Counter, ^{237}Np Fission Counter, ^{238}U Fission Counter, ^3He Proportional Counter, Reaction Rate Ratio R

* On leave from Fuji Electric. Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験の概要	2
2.1 実験の目的	2
2.2 実験体系	2
2.3 測定方法	3
3. 実験と計算	20
3.1 実験	20
3.2 計算	21
4. 実験結果及び検討	28
4.1 実験結果	28
4.2 実験と計算の比較	29
4.3 実験結果のまとめ	30
5. 今後の課題	42
謝 辞	42
参考文献	43

Contents

1. Introduction	1
2. General Description of Experiment	2
2.1 Purpose of Experiment	2
2.2 Experimental System	2
2.3 Experimental Method	3
3. Experiment and Calculation	20
3.1 Experiment	20
3.2 Calculation	21
4. Experimental Result and Discussion	28
4.1 Experimental Result	28
4.2 Comparison between Experiment and Calculation	29
4.3 Concluding Remarks	30
5. Further Discussion	42
Acknowledgement	42
Reference	43

1. はじめに

核燃料を扱う設備においては、臨界安全の立場から、体系の未臨界度^{*}を常時監視する未臨界度モニターの必要性が高まっている。従来、適当な未臨界度測定法がないことから、臨界安全確保のために設備の設計及び運用において実情とかけはなれた大幅な安全余裕を考慮せざるを得ない状況にあった。

未臨界度モニターは、その使用目的を考えると、操作及びメンテナンスが容易で、かつリアルタイムに監視出来ることが要求される。この要求を満たす可能性を持つものとして、未臨界度による体系のスペクトル変化に着目する方法が、最近提案されている。¹⁾

この方法では、体系内の同一位置にエネルギー感度特性の相異なる2個の中性子検出器（対検出器）を設定し、各々の計数率を同時に測定する。対検出器により測定される計数率比 R は、体系の中性子束レベルの変化に対しては不変で、スペクトル変化に対してのみ変化することが期待される。体系の未臨界度は、計数率比 R が未臨界度によって変化することを利用して推定される。その基本となる方法は以下の通りである。

- ① 計算により、未臨界度に対する R の予測曲線をつくる。
- ② 対検出器により R を測定する。
- ③ R の測定値を、臨界状態で測定値と計算値が一致するように規格化する。
- ④ 規格化した R の測定値を使い R の予測曲線を修正し、新しい体系の未臨界度を推定する。

体系が更新される毎に、②～④が繰返され、R の測定値が蓄積されて推定精度が向上する。

推定手順③、④には様々な手法が考えられているが、少なくとも推定の基本となる R の測定値に対しては推定精度の観点より次のような条件を満たさなければ、推定方法の有効性が失われる。

- 1) R の測定精度が十分であること。
- 2) 未臨界度に対して R が滑らかに変化すること。

従来、このような観点から体系の未臨界度を変えて計数率比 R を測定した例はなかった。従って、上記の R に対する条件を満たすような対検出器の組合せと設定位置が可能か否かを実験的に確認することが不可欠となる。

本実験は、対検出器の計数率比 R の測定実験を高速炉臨界実験装置 FCA を用いて行ない、上記の R に対する条件が満足され得るか否かを検討したものである。

本報告書では、第2章で実験の概要、第3章で実験と計算の方法を説明し、第4章で実験結果を説明し、かつ、実験と計算の一致の程度を検討し、R の条件が満たされるか否かを評価する。

*本報告書においては、未臨界度 ρ を次式にて定義する。

$$\rho = -(1 - 1/k), \text{ 但し, } k \text{ は実効増倍率}$$

2. 実験の概要

2.1 実験の目的

一般に核燃料を扱う設備は、実効増倍率 k が0.95以下であることが要求されている。さらに、設計計算では k を0.90以下とするのが普通であることを考えると、未臨界度モニターが臨界安全上有効である為には、

- 1) k が0.95まで十分適用可能であること。
- 2) k が0.90～0.95の範囲で、 k の推定精度は2%以内であること。

が要求される。

そこで、対検出器の計数率比 R を k が0.90～0.95の範囲で $2\% \Delta k / k$ 以上の誤差をもたらさないように十分な統計精度で計測することが必要である。従って、体系内に対検出器を設定し、体系の未臨界度を変えながら計数率比 R を測定して

- 1) 計数率比 R の測定精度、
- 2) 未臨界度変化に対して R がなめらかに変化すること、また、計算で予測された位置で、測定値が計算値と同じ傾向となるか否か、

を検討することにより、未臨界度モニターの有効性を確認することが出来る。

FCAにおいて体系の未臨界度を変えるには、次の2つの方法がある。

- 1) 集合体間隔を変化させる方法。
- 2) 燃料引出しを装荷する方法。

1)は、固定側/移動側集合体の間隔を変えることにより、 $-20 \sim -40\% \Delta k / k$ までの未臨界体系を容易に実現出来る。2)は、集合体に燃料引出しを順次装荷していく方法であり、実際の燃料貯蔵体系の状況に近い実験が出来る。但し、未臨界度を $1\% \Delta k / k$ 変える為には10本以上の燃料引出しを追加する必要があり実験には長時間を要する。

今回の実験では、推定方法自体の有効性の確認を目的として、1)の方法を用いてXII-1炉心とXIII-1炉心で実験を行なった。さらに、実際の未臨界度モニターの使用状況を想定した場合の推定方法の適用可能性を検討することを目的として、2)の方法による実験をXIII-1炉心の臨界近接作業を利用して行なった。

2.2 実験体系

実験を行なった、XII-1炉心²⁾、XIII-1炉心³⁾、及びXIII-1炉心変更体系について簡単に説明する。

XII-1炉心

XII-1炉心は、軸方向非均質模擬炉心で、炉心内部に厚さ約20cm、半径約40cmの内部ブランケットを持つ円柱状炉心である。Pu燃料領域は内部ブランケットを中央にはさんだ形で分布しており、半径方向外側を取巻く濃縮ウラン燃料領域も加えた炉心の大きさは、等価半径約50cm、高

さ約90 cmである。さらに、炉心の外周には約25 cmの幅で径方向ブランケット領域として劣化ウランブロックが装荷されている。Fig. 2.1に炉心体系を示す。

XIII-1 炉心

XIII-1 炉心は、セクター状の炉心を持つ軸方向非均質模擬炉心で、内部ブランケットは厚さ約30 cm、半径約35 cmである。Pu 燃料領域は内部ブランケットをはさむ円柱状領域とセクター領域に偏在している。濃縮ウラン燃料領域は Pu 燃料領域の半径方向外側を取り巻いており、炉心の大きさは、等価半径約65 cm、高さ約80 cmである。Fig. 2.2に炉心体系を示す。

XIII-1 炉心変更体系

XIII-1 炉心装荷変更作業は、FCA 集合体から一担、全ての燃料引出しを取りはずし、約1週間を要して燃料引出しを装荷しXIII-1 炉心を作成する作業である。装荷作業は、体系中心部から外側に向かって燃料引出しの装荷が行なわれる。その作業の過程で作られる体系を利用して計数率比Rの測定を行なった。各ステップにおける燃料の装荷状態をFig. 2.3-1からFig. 2.3-10に示す。ステップ5/15sとステップ5/17sではプルトニウム燃料と濃縮ウラン燃料が新たに装荷され、それ以降のステップは濃縮ウラン燃料が新たに装荷されている。

2.3 測定方法

対検出器として使う中性子検出器は、低エネルギー中性子に感度をもつ

- 1) ^{235}U 核分裂計数管 (^{235}Ufc),
- 2) ^3He 比例計数管 ($^3\text{He pc}$),

と、高エネルギー中性子 ($\sim 0.5\text{ MeV}$ 以上) に感度をもつ

- 3) ^{238}U 核分裂計数管 (^{238}Ufc),
- 4) ^{237}Np 核分裂計数管 ($^{237}\text{Npfc}$),

を使用した。また、1)と2)では2)の方がより低いエネルギーの中性子に感度をもち、3)と4)では3)の方がより高いエネルギーの中性子 ($\sim 0.8\text{ MeV}$ 以上) に感度をもつ。低エネルギー中性子に感度をもつ検出器の計数率を分子に、高エネルギー中性子に感度をもつ検出器の計数率を分母として計数率比Rを測定すれば、中性子スペクトルの軟化、硬化によってRはそれぞれ増加、減少することが期待される。

対検出器の設定位置は、計数率比Rが未臨界度変化に対してなめらかに変化し、かつ、Rの変化が比較的大きな点を予め計算により求めておき決定した。密着状態と分離状態とでRがどの程度変化するかをXIII-1 炉心およびXIII-1 炉心について計算し、それぞれFig. 2.4, Fig. 2.5に示す。

^{235}U と ^{237}Np との核分裂比をみると、分離状態では密着状態と比較して炉心領域の中心で両炉心共0.7~0.8と小さくなることが判る。

実験に用いた対検出器の基本的な測定回路をFig. 2.6に示す。核分裂計数管では α 崩壊、 ^3He 比例計数管では γ 線入射により小波高のパルスが発生するが、今回の実験では中性子計数が1 cps以下の領域でも測定するために、中性子だけを区別して計数する波高弁別レベルを実験体系中最も中性子数の少ない(小波高パルスの影響が大きい)体系で設定した。さらに、測定の前後にパルス発生器を

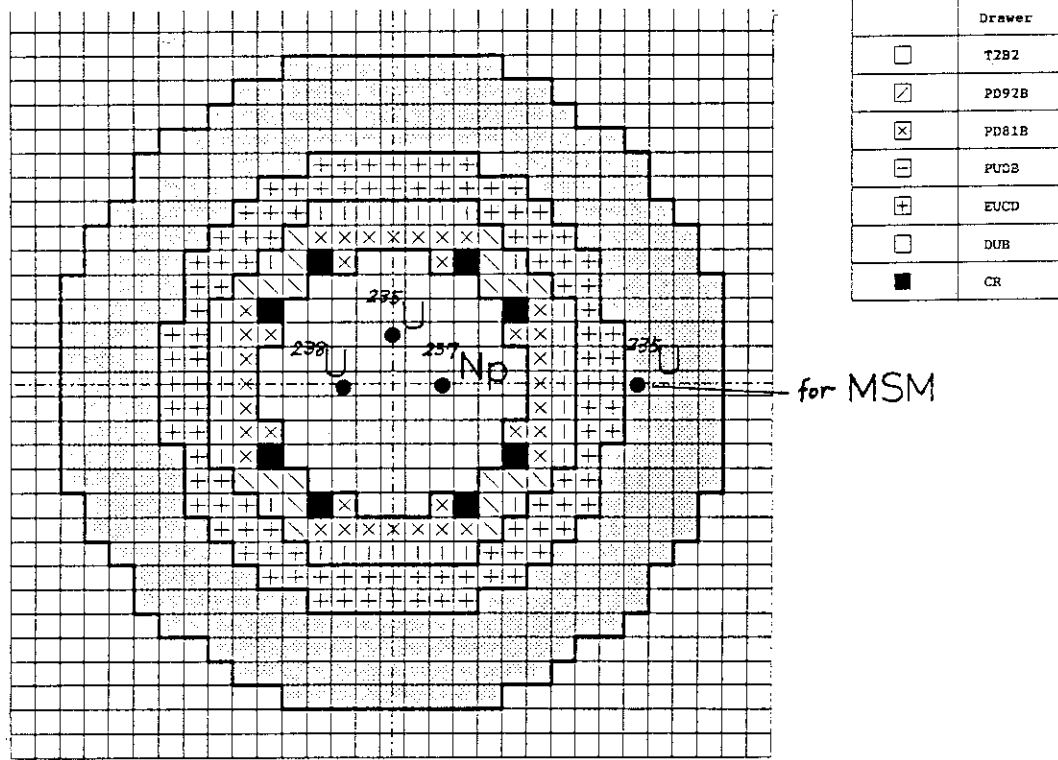
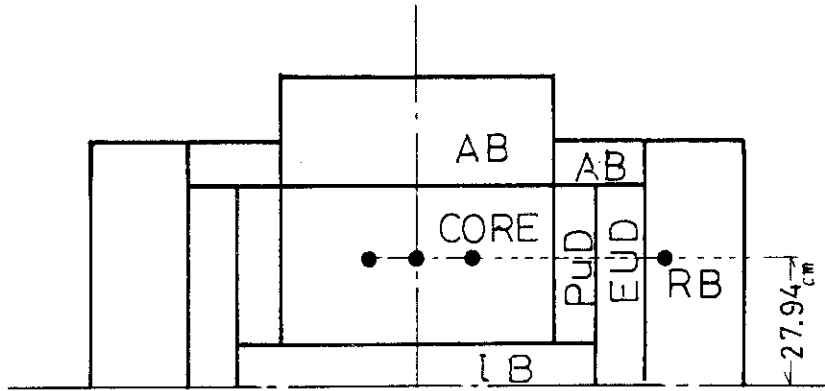
使って測定系が安定しているかどうかを確認した。

測定した計数率比R に対する補正及び測定誤差は次のように考慮した。

検出効率の大きい ^{235}U 核分裂計数管, ^3He 比例計数管の計数率に対して, 不感時間の補正を加えた。対検出器の計数は, 等しい測定時間で複数回繰り返し, その平均値を測定値とした。測定誤差は, 平均操作をした際の統計誤差のみを考え, 標準偏差で示した。

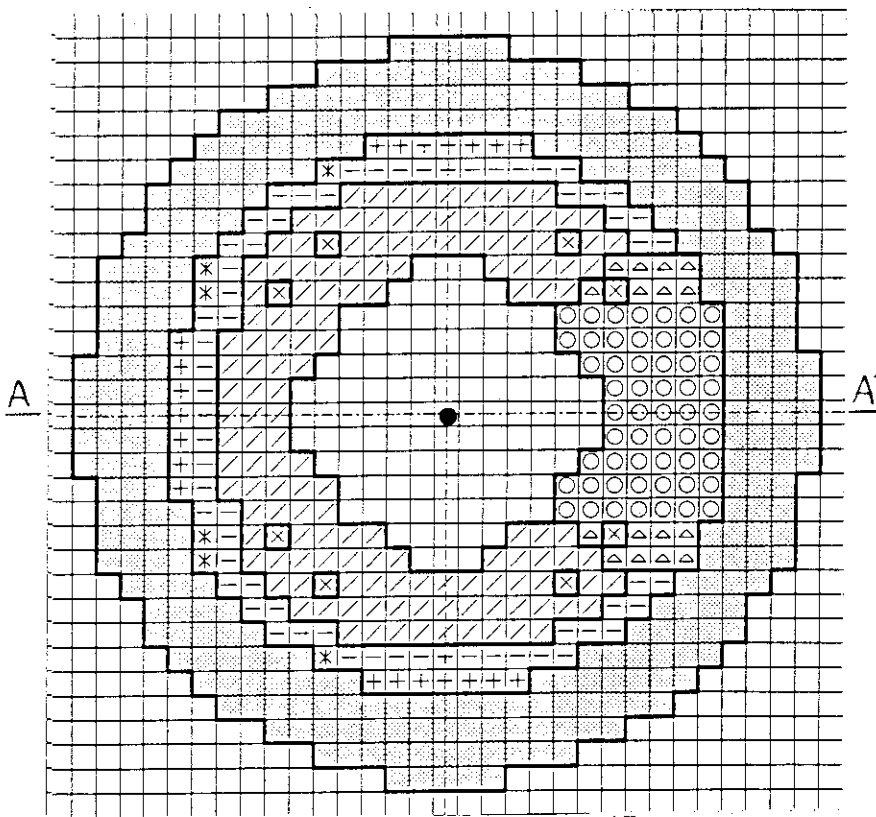
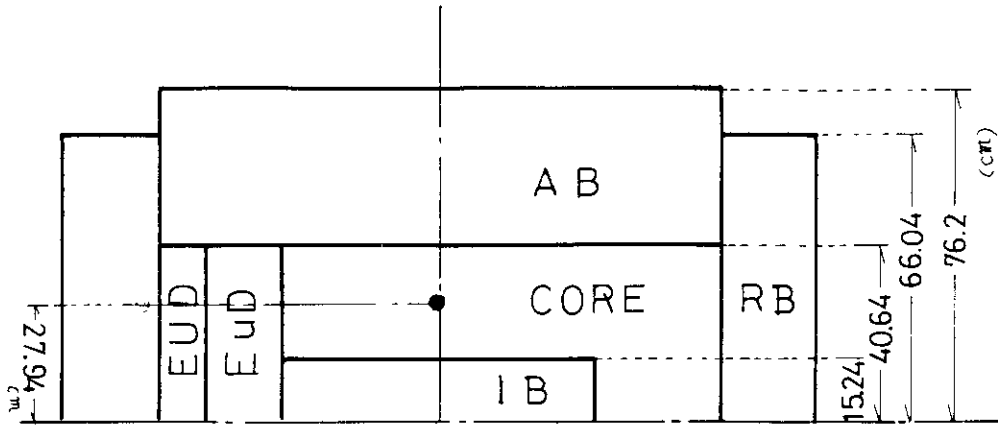
測定時間と繰り返し回数は, 各実験データの測定誤差が同程度になるように選んだ。

計数率比R の測定と同時に, 体系の未臨界度を修正中性子源増倍法 (MSM)^{4), 5)} によって測定した。測定には, 検出効率の大きい ^{235}U 核分裂計数管の計数率を用いた。補正係数を求めるために使う中性子束は第 3.2 節に説明する体系計算より得た。求めた未臨界度に対する誤差は, 反応度較正体系と反応度測定体系の計数率に対する統計誤差のみを考え, その標準偏差により示した。ここで, 反応度較正体系において制安棒により較正される反応度自体の測定誤差は 0.1 % 以下であるので無視した。



● detector

Fig. 2.1 Loading Pattern of XII-1 Core



	Drawer
□	T3B3
○	T3
△	T3D81
▨	HEUCD
▤	EUCDA
⊕	EUCDB
⊗	EUCDC
⊗	CR
▨	DUB

● detector

Fig. 2.2 Loading Pattern of XIII-1 Core

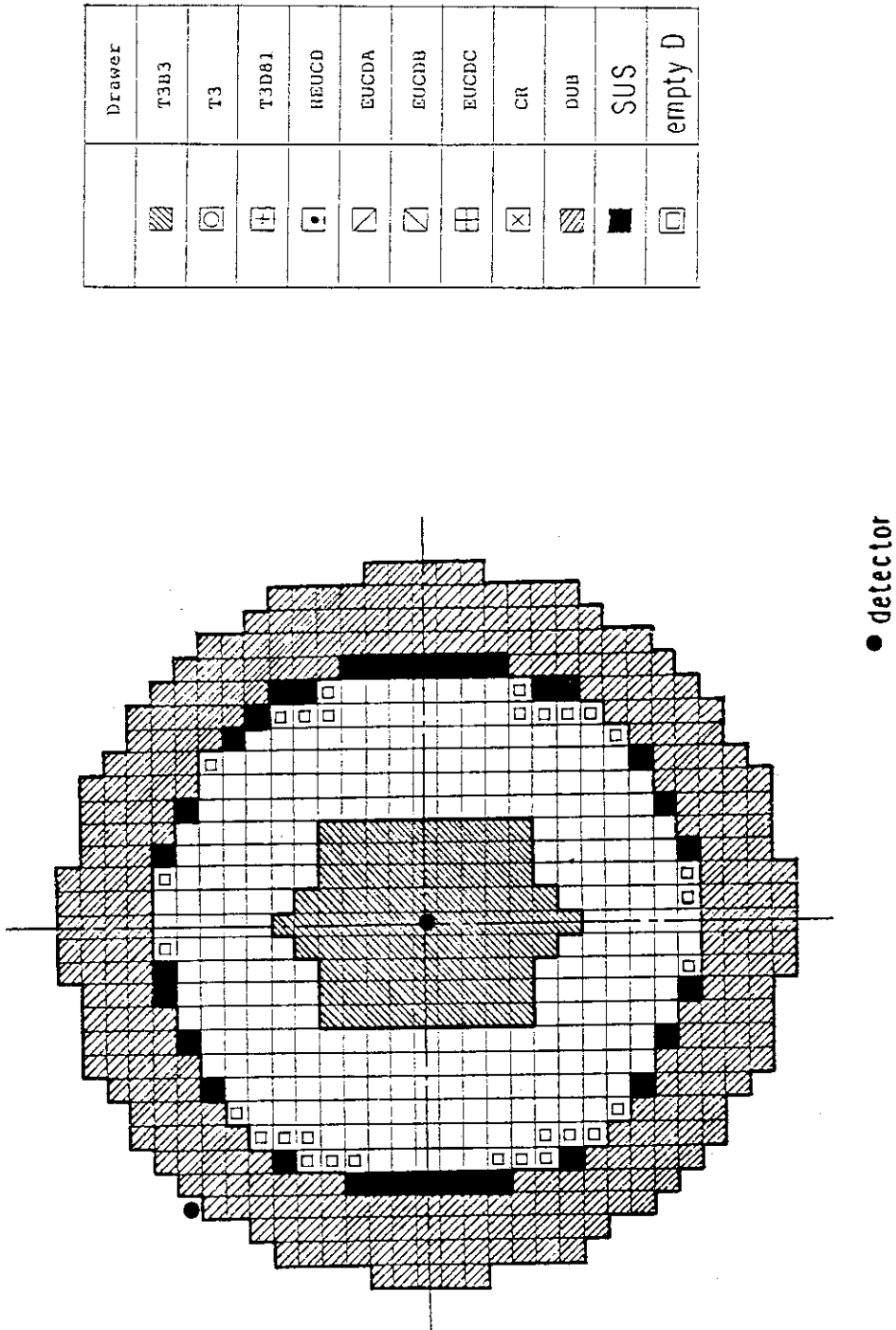


Fig. 2.3-1 Loading Pattern of Step 5/15s

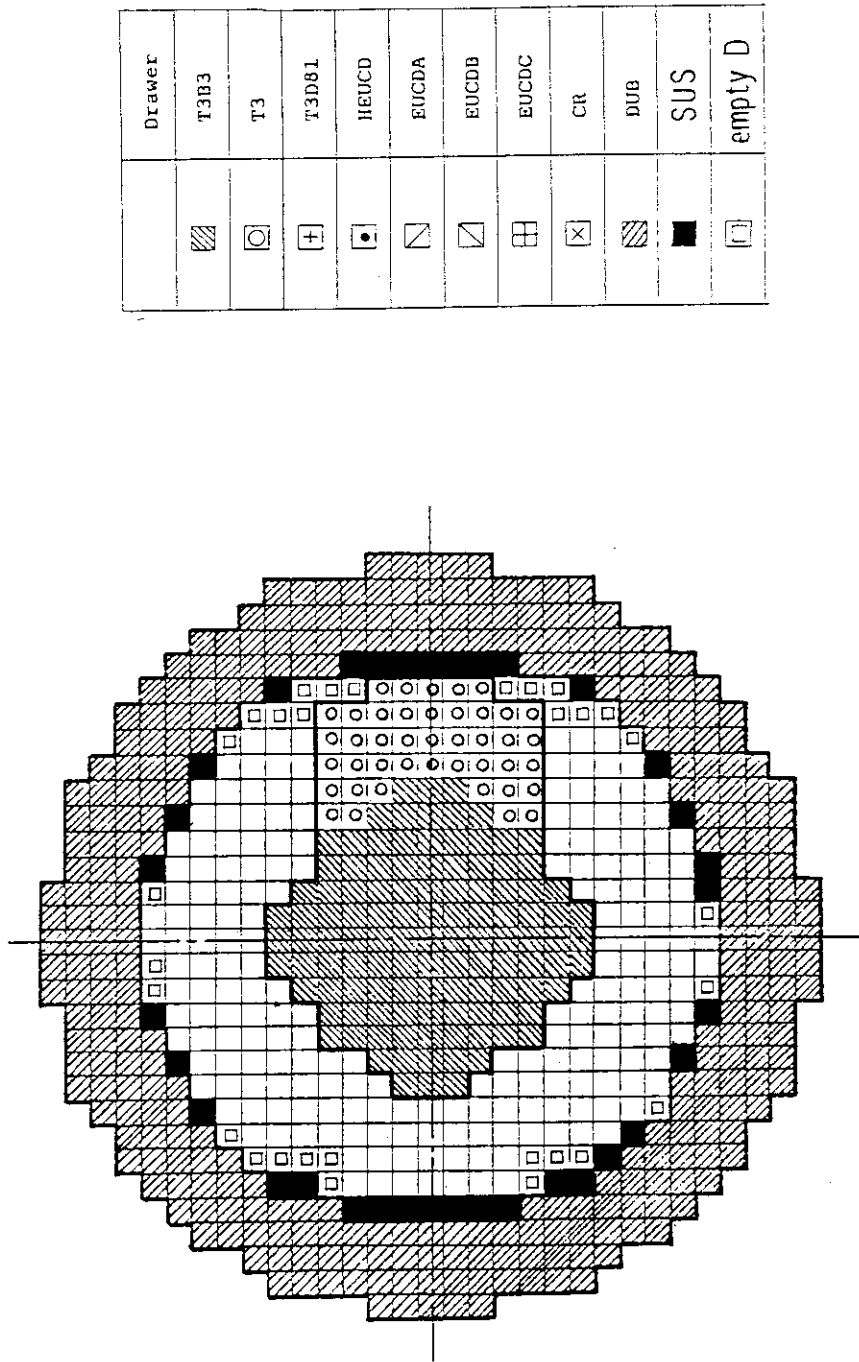


Fig. 2.3-2 Loading Pattern of Step 5/16s

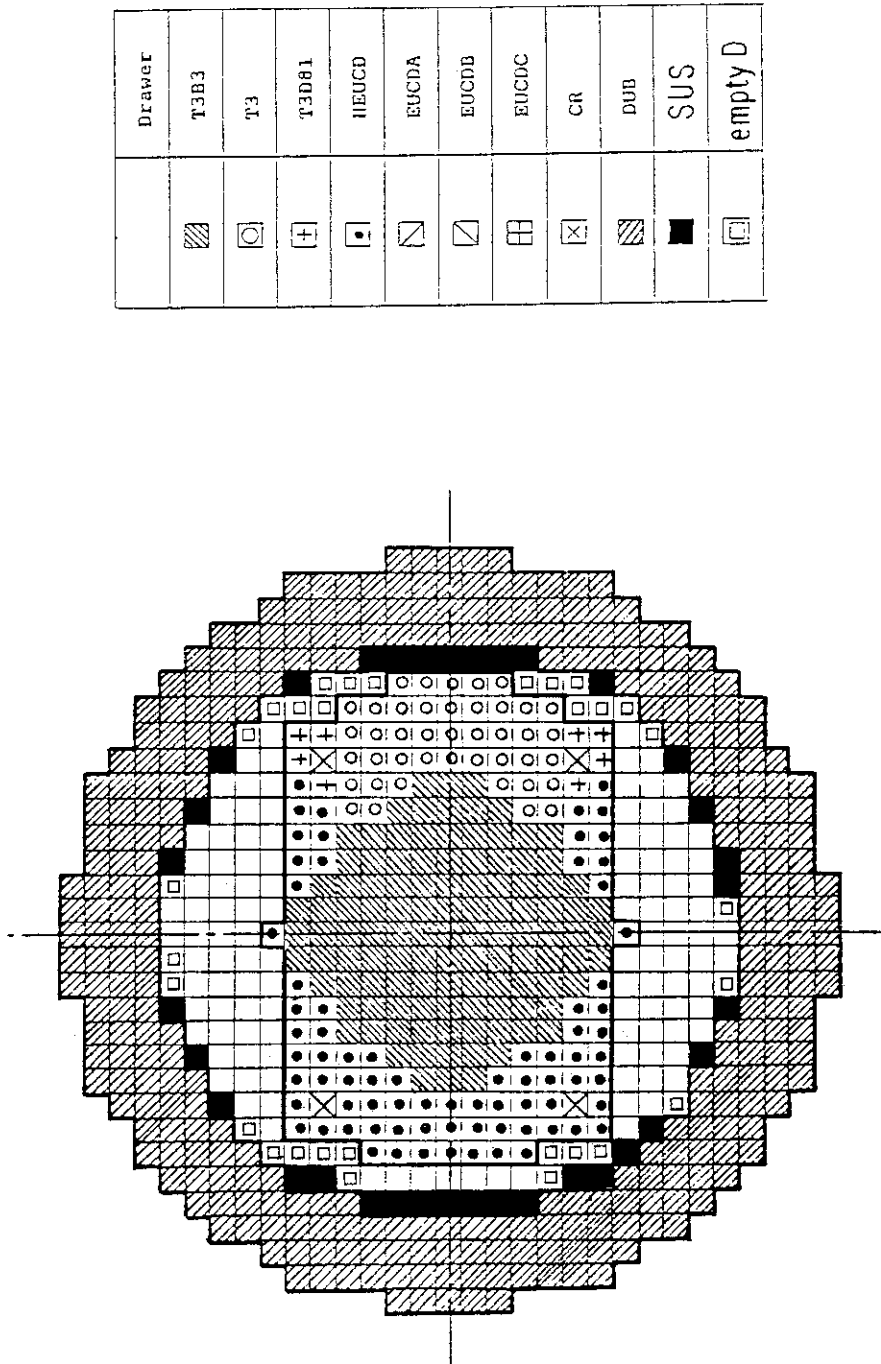


Fig. 2.3-3 Loading Pattern of Step 5/17s

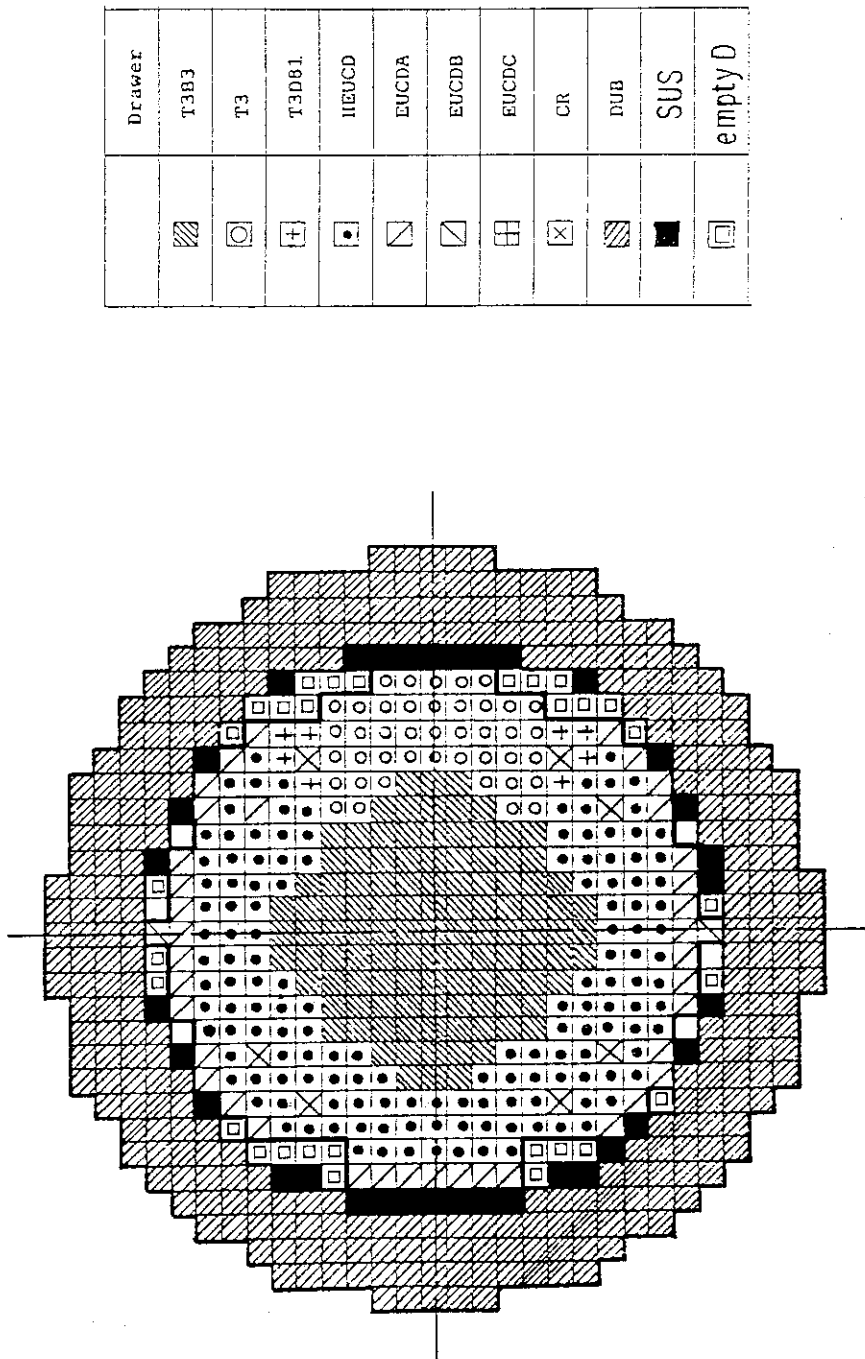


Fig. 2.3-4 Loading Pattern of Step 5/20s

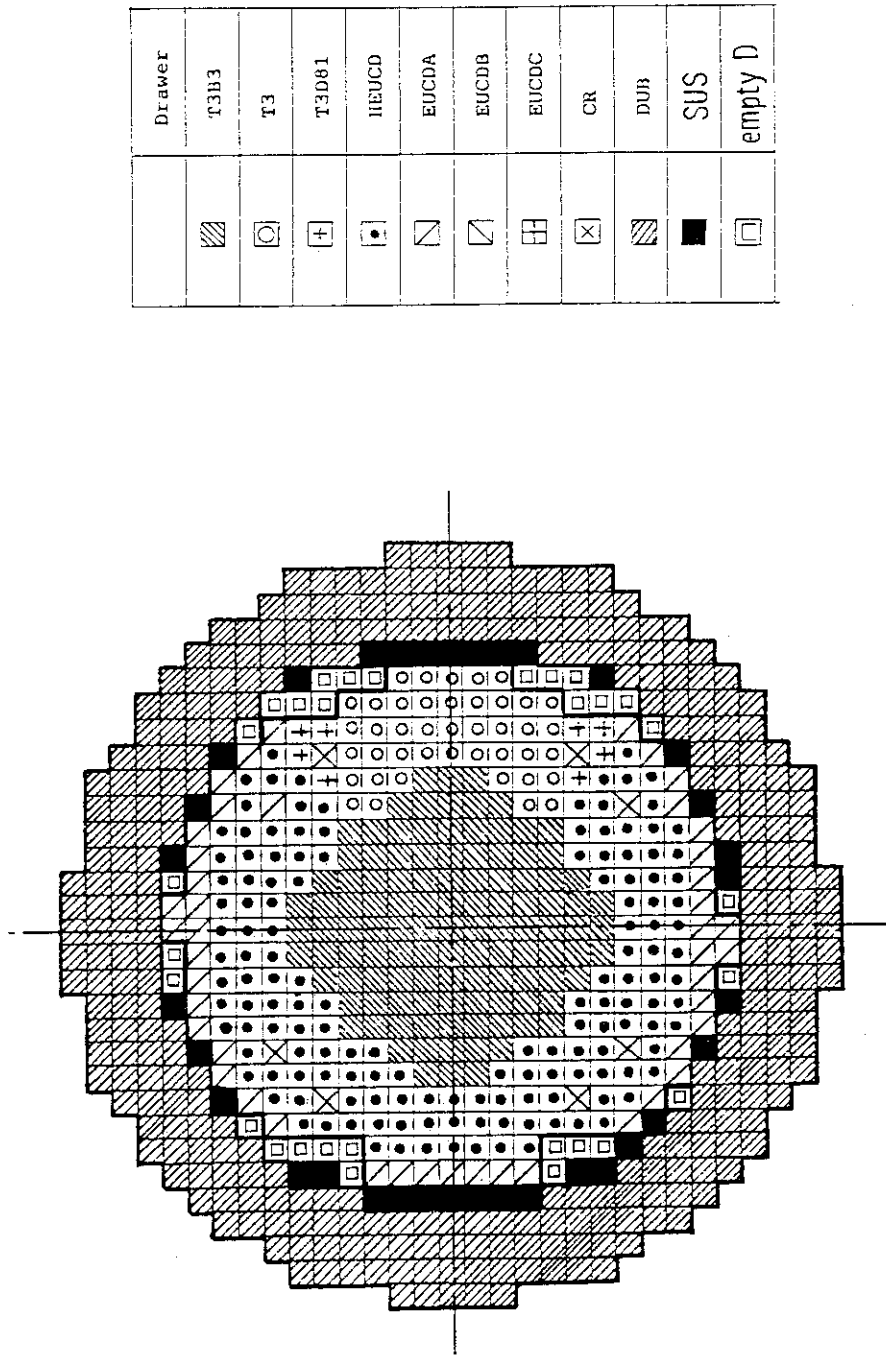


Fig. 2.3-5 Loading Pattern of Step 1

Drawer	
T3B3	
T3	
T3B01	
HEUCD	
EUCDA	
EUCDB	
EUCDC	
CR	
DUB	
SUS	
empty D	

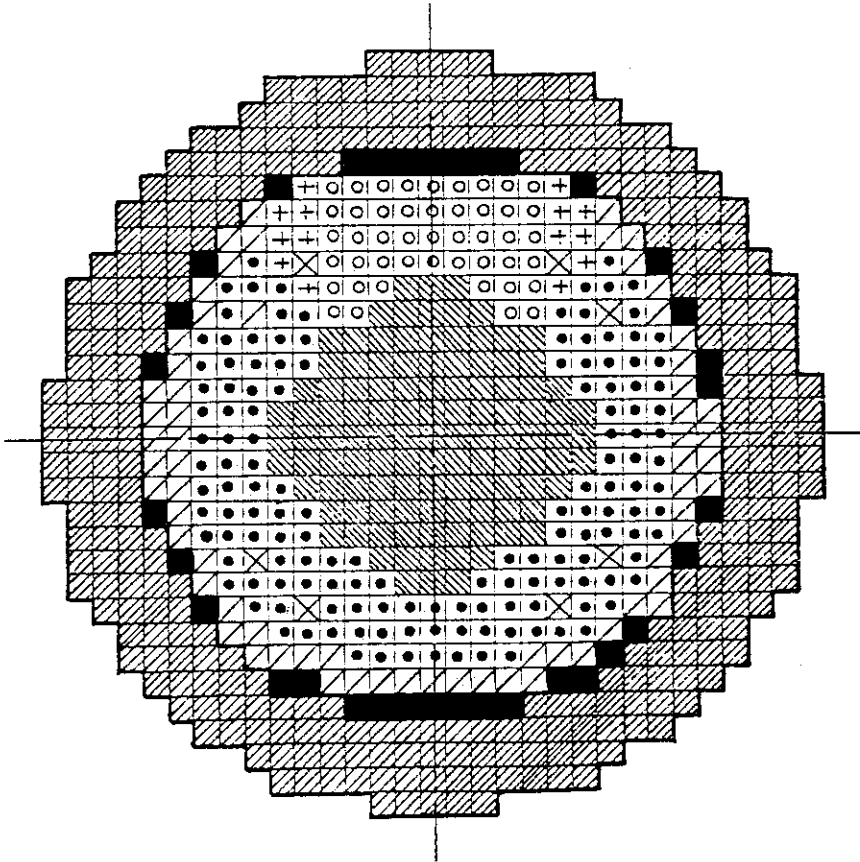


Fig. 2.3-6 Loading Pattern of Step 2

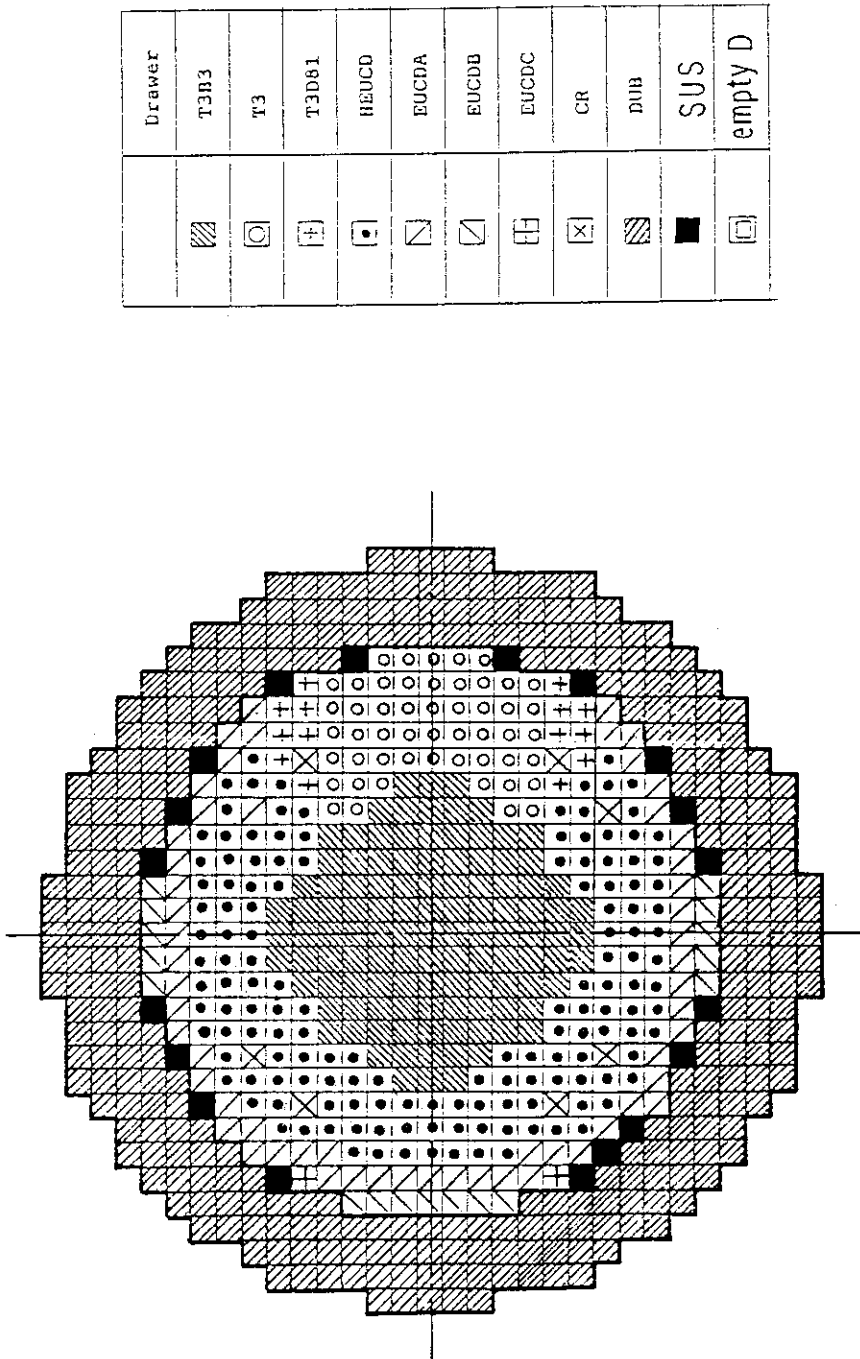


Fig. 2.3-7 Loading Pattern of Step 3

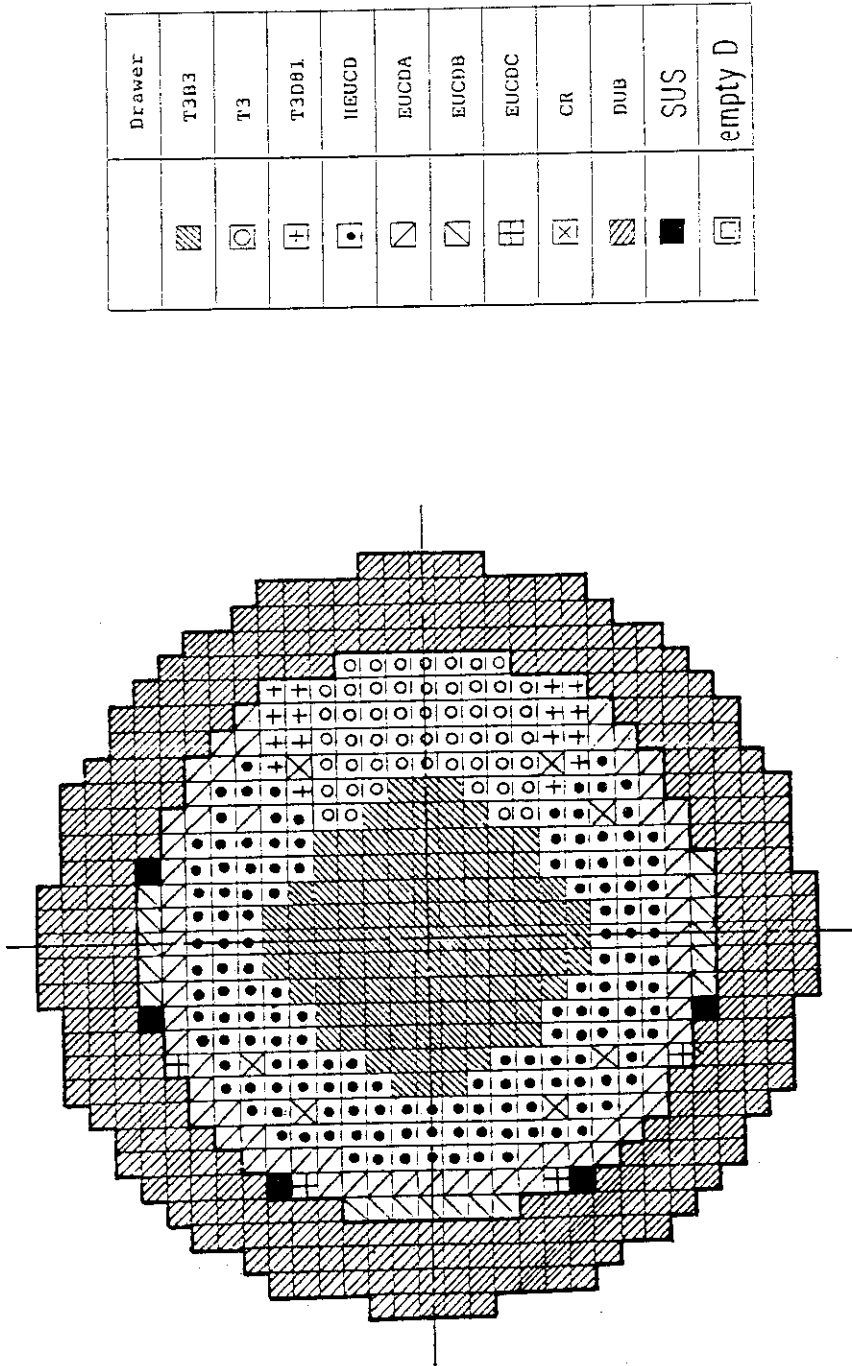


Fig. 2.3-8 Loading Pattern of Step 4

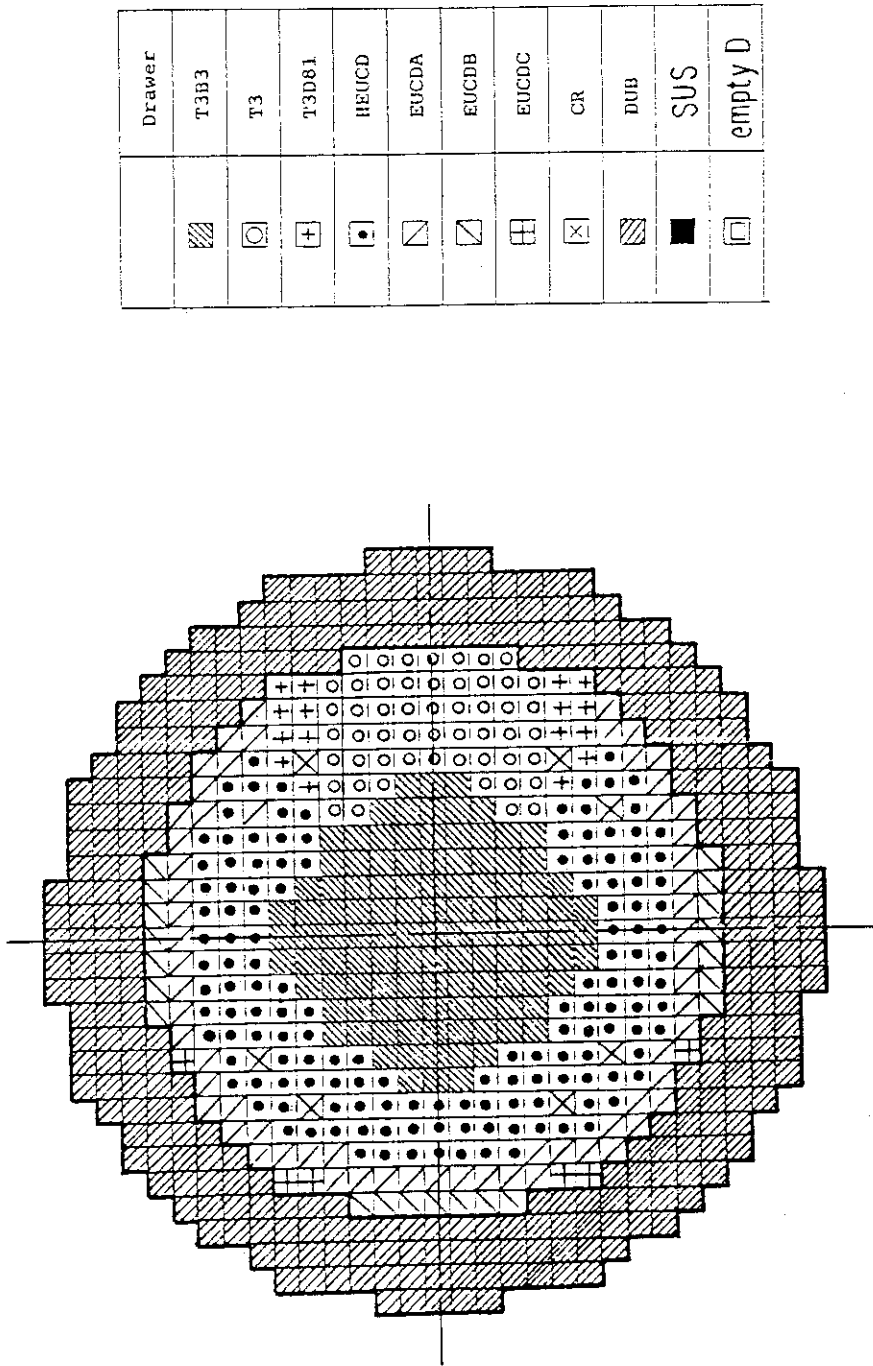


Fig. 2.3-9 Loading Pattern of Step 5

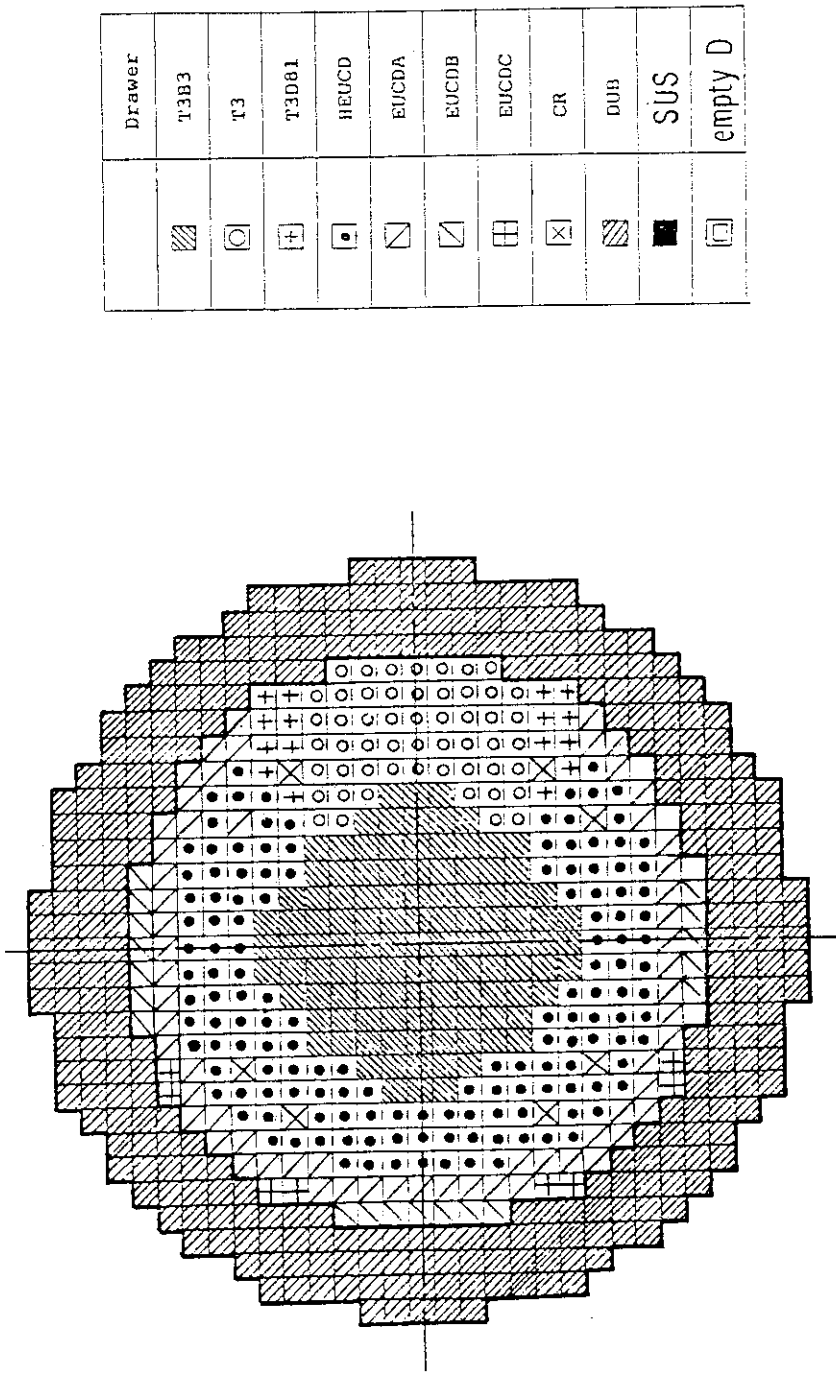


Fig. 2.3-10 Loading Pattern of Step 6

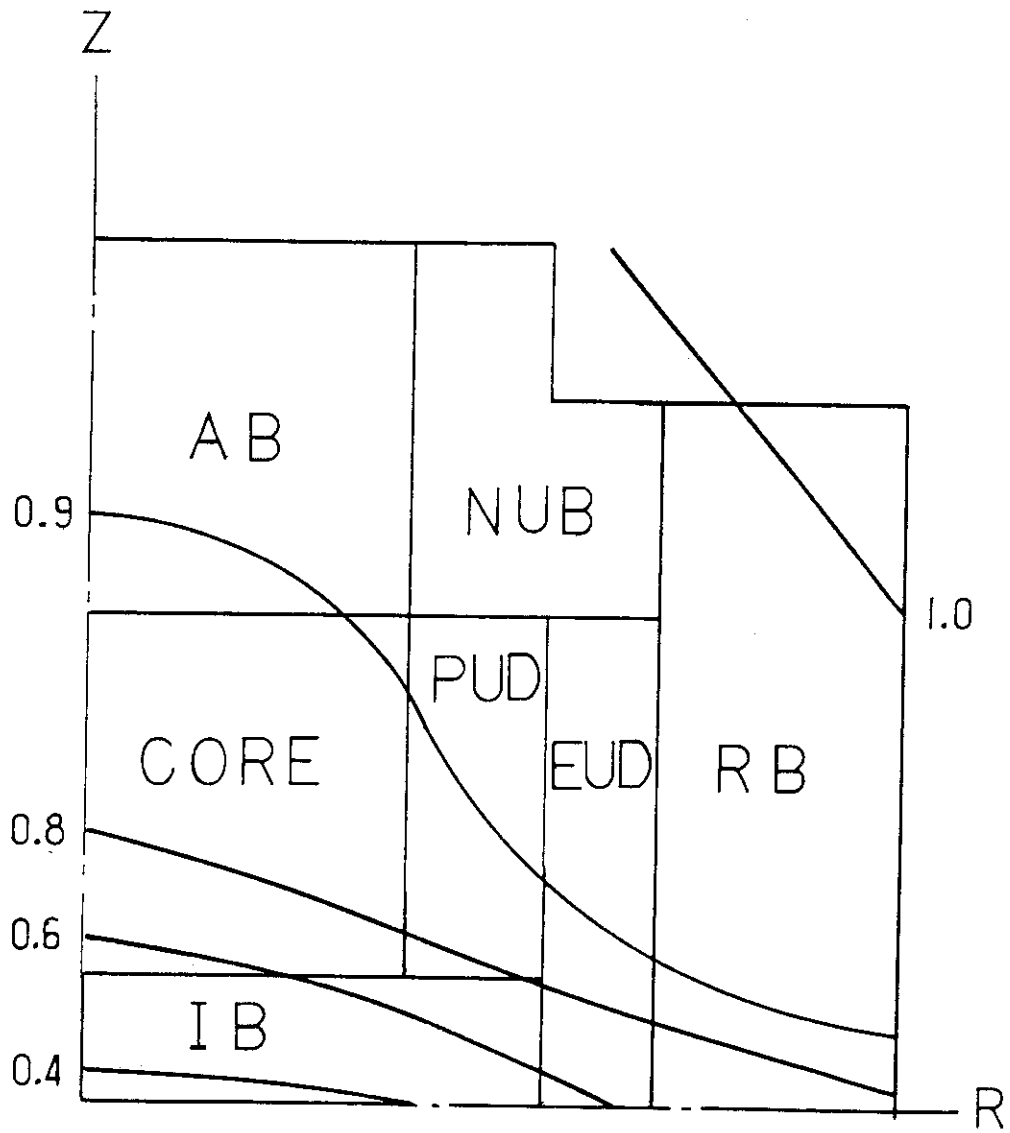


Fig. 2.4 Comparison of the calculated count rate ratio R ($^{235}\text{U}_{fc} / ^{237}\text{Np}_{fc}$) between the separated and contact conditions (FCA XII-1 Core)

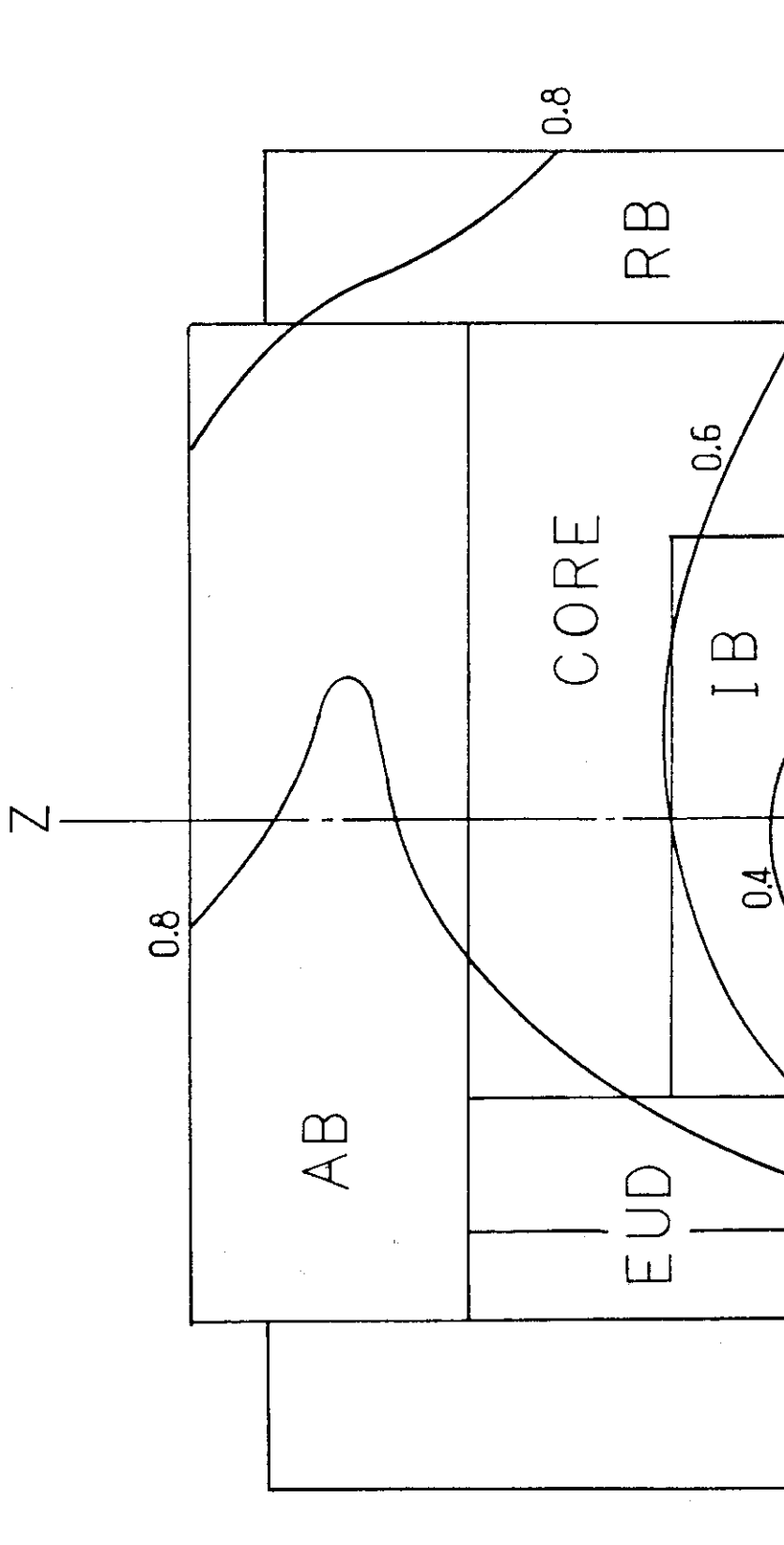


Fig. 2.5 Comparison of the calculated count rate ratio R ($^{235}\text{Ufc} / ^{237}\text{Npfc}$) between the separated and contact conditions (FCA XIII-1 Core)

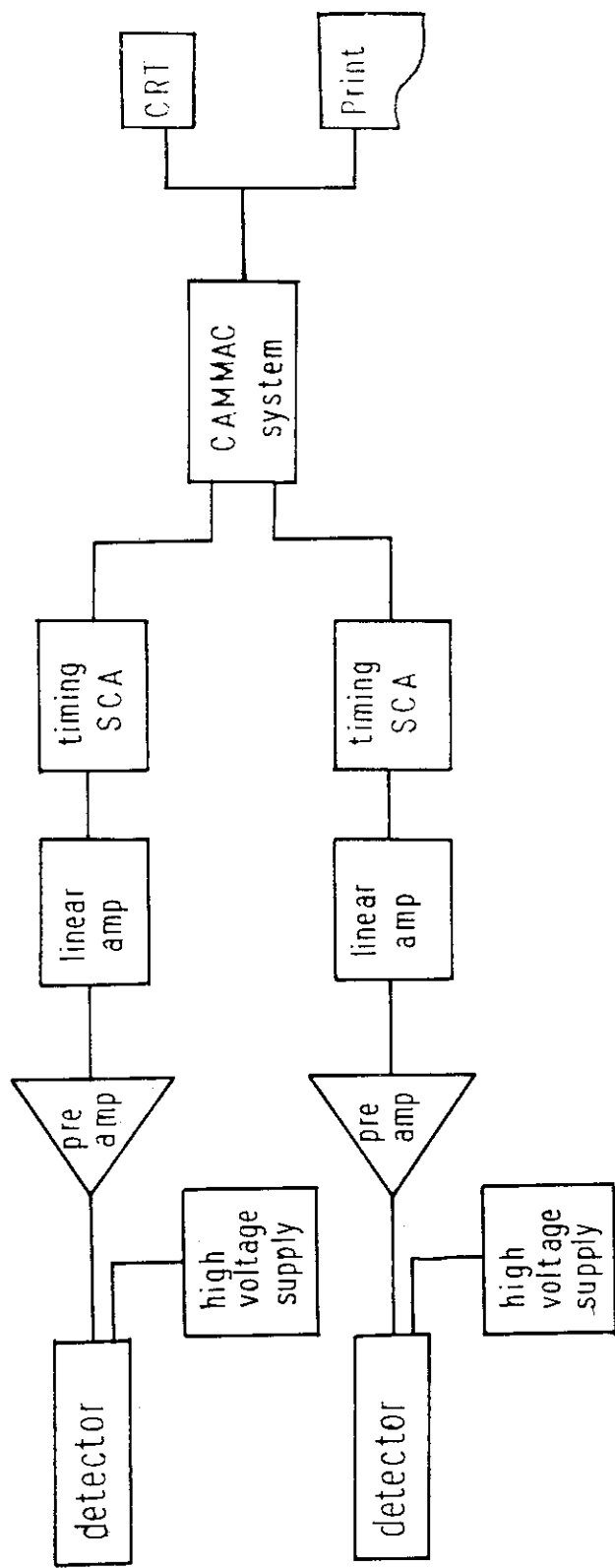


Fig. 2.6 Measuring System of Pair Detector

3. 実験と計算

3.1 実験

まず、集合体間隔を変化する方法による実験について説明する。この方法による実験は、XII-1 炉心、XIII-1 炉心で行なった。以下に、各々の炉心で行なった実験について述べる。

XII-1 炉心

1) 測定ステップ

固定側/移動側集合体間隔を、0 mm ~ 2000 mm まで段階的に変え、合計 12 ステップの未臨界状態を実現した。

2) 対検出器の設定

対検出器としては、次の 3 個の中性子検出器を用いた。

- 1) ^{235}U 核分裂計数管 (FC-144^{*1})
- 2) ^{237}Np 核分裂計数管 (FC-165^{*2})
- 3) ^{238}U 核分裂計数管 (FC-144^{*3})

対検出器の設定位置は、第 1 章の R に対する条件を考慮し、炉心領域を選んだ。対検出器の設定位置を、Fig. 2.1 に示す。集合体の装荷パターンが密着面に向かって 1/4 対称になっているため、固定側集合体の互に対称なる箇所位置に検出器を設定し、残り 1 箇所は対称性を保つために検出器引出しと同じプレート配列とした。検出器引出しは、密着面から 2 パック (約 10 cm) までを内部ブランケット組成とし、後方部に、有感部中心が 6 パック目 (密着面から 28 cm) に一致するように検出器を設定した。

この他に、修正中性子源増倍法 (MSM) による未臨界度測定用として ^{235}U 核分裂計数管^{*4} を径方向ブランケットに設定した。

XIII-1 炉心

1) 測定ステップ

固定側/移動側集合体間隔を、0 mm ~ 2000 mm まで段階的に変え、合計 8 ステップの未臨界状態を実現した。

2) 対検出器の設定

対検出器としては、次の 2 個の中性子検出器を用いた。

- i) ^{235}U 核分裂計数管 (FC-144)

* 1 CENTRONICS 製 FC-144 (有感長 8.3 cm)

* 2 " FC-165 (有感長 5.7 cm)

* 3 " FC-144 (有感長 8.3 cm)

* 4 Westing House 製 (有感長 12.2 cm)

ii) ^{237}Np 核分裂計数管 (FC-165)

対検出器の設定位置は、R が未臨界度に対してなめらかに変化する炉心中心とした。

検出器引出しは、検出器を有感部中心が全て6パック目(密着面から約28 cm)に一致するように装填し、密着面から3パック(約15.3 cm)までを内部ブランケット組成とした。

また、MSMによる未臨界度測定には、炉心中心の ^{235}U 核分裂計数管の計数率を使った。検出器の設定位置を Fig. 2.2 に示す。

次に、燃料引出しを装荷する方法による実験について述べる。この方法による実験は、XIII-1 炉心変更作業を利用して行なった。

1) 測定ステップ

XIII-1 炉心装荷変更作業では、外側の径方向ブランケット以外の燃料引出しを全て取りはずし、中心部から外側へ向かって、6日間にわたって引出しを装荷しXIII-1 炉心を作る。この作業を利用し、合計12ステップの未臨界体系について測定を行なった。

2) 対検出器の設定

対検出器の設定位置は、固定側集合体の炉心中心と体系外側とした。用いた検出器は、各々、炉心中心には、

- 1) ^3He 比例計数管
- 2) ^{235}U 核分裂計数管 (FC-144)
- 3) ^{237}Np 核分裂計数管 (FC-165)

体系外側には、

- 1) ^3He 比例計数管
- 2) ^{237}Np 核分裂計数管

である。検出器の有感部中心は、全て、6パック目になるように引出しに装填し、炉心中心の方は密着面から3パックを内部ブランケット、体系外側の方は密着面から4パックを劣化ウランブロックにより、各々充填した。

MSMによる未臨界度測定には、炉心中心の ^{235}U 核分裂計数管の計数率を使った。Fig. 2.3-1 に検出器の設定位置を示す。

3.2 計算

実験結果と比較するために、対検出器の計数率比R と未臨界度の関係を計算により求める。また、MSMにおける補正係数 f_{MSM} の計算を行なう。

中性子束計算条件

計数率比R および MSMの補正係数 f_{MSM} の計算に用いる中性子束は、実験体系毎に以下の条件で計算する。

- i) XII-1 炉心
 - a) 体系 2次元円柱体系 (Fig. 3.1)
 - b) 断面積^{*1} JFS-3-J2 70群⁶⁾

*1 燃料領域については、セル中性子束を重みとしてセル均質化する。

c) 計算手法 非等方拡散近似

集合体間の空気層は、計算の収束性を考え、空格子管の断面積で代用する。Table 3.1 に計算に用いる領域毎の原子数密度を示す。計算メッシュは 2.5 cm/mesh とする。

ii) XIII-1 炉心

a) 体系 3次元 XYZ 体系 (Fig. 2.2)

b) 断面積^{*1} JFS-3-J2 縮約 25 群

集合体間の空気層は、XII-1 炉心と同様に、空格子管の断面積で代用する。Table 3.3 に計算に用いる領域毎の原子数密度を示す。計算メッシュは 5 cm/mesh とする。但し密着状態で計算上臨界となるように、濃縮ウラン燃料引出し本数を調整する。

iii) XIII-1 炉心変更体系

計算条件はXIII-1 炉心と同様である。体系については、Fig. 2.3-1 ~ Fig. 2.3-10 を変更せずに入力する。

R の計算

対検出器の計数率比R は、次式により計算する。

$$R = \frac{\langle \Sigma_{d1} \phi \rangle}{\langle \Sigma_{d2} \phi \rangle} \quad (3.1)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は全ての独立変数についての積分を実行する内積を表わし、 Σ_{d1} 、 Σ_{d2} は対検出器を構成する 2 個の中性子検出器の各検出断面積である。 ϕ は中性子束であり、固定中性子源が存在する未臨界体系を記述する以下の原子炉方程式を前述の計算条件の下で解いて求める。

$$L \phi(\mu) - M \phi(\mu) = S(\mu), \quad (3.2)$$

ここで、
 L : 中性子消滅の演算子、
 M : 中性子生成の演算子、
 S : 固定中性子源^{*2}、
 μ : 全ての独立変数。

各検出器の検出断面積 $\Sigma_{d1}(2)$ は、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{237}Np 核分裂計数管については JFS-3-J2 より処理した核分裂断面積、 ^3He 比例計数管については ENDF/B-M より処理した ^3He (n, p) 断面積を使う。

 f_{MSM} の計算

中性子源増倍法では、未臨界度 ρ と中性子検出器の計数率C とを以下の式にて関係づける。

$$\rho = \frac{A}{C} \quad (3.3)$$

*1 燃料領域については、セル中性子束を重みとしてセル均質化する。

*2 固定中性子源は、Pu 領域に含まれる ^{240}Pu の自発核分裂による発生中性子とする。

ここで、 A は固定中性子源強度、中性子の生成寿命、検出器の検出効率等を含む項である。通常の中性子源増倍法では、中性子束が基本モードで分布しているとの仮定の下に A を定数とみなす。そして、反応度が既知の体系で A を定め、反応度が未知の体系での検出器の計数率 C_1 から以下の式にて反応度 ρ_1 を求める。

$$\rho_1 = \frac{A_0}{C_1} \quad , \quad (3.4)$$

$$A_0 = \rho_0 C_0 \quad . \quad (3.5)$$

ここで、 ρ_0 は較正体系での未臨界度、 C_0 は較正体系での中性子検出器の計数率である。(3.4)式は、未臨界度が浅い体系で、検出器の位置を適切に選べばほぼ成立する。しかしながら、未臨界度が深い体系では中性子束高調波の存在により(3.4)式は有効でなくなる。また、固定中性子源の分布、検出器の位置などにより高調波の影響の度合は異なってくる。これら高調波の影響を計算によって求め(3.4)式を補正しようとする方法が修正中性子源増倍法である。

修正中性子源増倍法(MSM)では(3.5)式の A を、検出効率 ϵ と実効的外部中性子源強度 S_{eff} とを用いて以下の式で表わす。

$$A = \epsilon \cdot S_{\text{eff}} \quad , \quad (3.6)$$

$$\epsilon = \frac{\langle \Sigma_d \phi \rangle}{\langle \phi^+ M \phi \rangle} \quad , \quad (3.7)$$

$$S_{\text{eff}} = \langle S \phi^+ \rangle \quad . \quad (3.8)$$

ϕ^+ は固有値方程式の随伴方程式(3.9)式を解くことにより得られる。

$$L^+ \phi^+ (\mu) - \lambda M^+ \phi^+ (\mu) = 0 \quad . \quad (3.9)$$

ただし、 $\lambda = \rho - 1$.

以上の如く(3.6)式にて A を定義したとき、未知の未臨界体系の反応度 ρ_1^{MSM} は(3.4)式の代わりに以下の式にて表わされる。

$$\rho_1^{\text{MSM}} = \frac{A_0}{C_1} \cdot f_{\text{MSM}} = \rho_1^{\text{SM}} \cdot f_{\text{MSM}} \quad , \quad (3.10)$$

$$\text{ただし、} f_{\text{MSM}} = f_{\epsilon 1} \cdot f_{S 1} \quad , \quad (3.11)$$

$$f_{\epsilon 1} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} = \frac{\langle \Sigma_d \phi_1 \rangle / \langle \phi^+ M_1 \phi_1 \rangle}{\langle \Sigma_d \phi_0 \rangle / \langle \phi_0^+ M_0 \phi_0 \rangle} \quad ,$$

$$f_{S1} = \frac{S_{\text{eff},1}}{S_{\text{eff},0}} = \frac{\langle S_1 \varphi_1^+ \rangle}{\langle S_0 \varphi_0^+ \rangle} .$$

ここで、添字0は反応度 ρ_0 が既知の較正体系を、1は未知の未臨界体系を示すものとする。(3.10)式は、通常の中性子源増倍法による反応度 ρ^{SM} と修正中性子源増倍法による反応度 ρ^{MSM} との関係を与えるものであり、補正係数 f_{MSM} は計算によって求められる。

Table 3.1 Regionwise Atomic Densities of XII-1 Core
 ($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Region Nuclide	CORE	IB	AB	NUB	PuD	EUD	RB	Empty Matrix
Pu-239	0.10455	—	—	—	0.1738	—	—	—
Pu-240	0.00922	—	—	—	0.0182	—	—	—
Pu-241	0.000865	—	—	—	0.00200	—	—	—
U-235	0.00140	0.00316	0.00316	0.0289	0.0766	0.2845	0.0084	—
U-238	0.6869	0.9307	0.9307	3.9889	0.6353	0.6892	4.0174	—
O	1.7038	1.7038	1.7038	—	1.6164	1.3623	—	—
Na	0.7656	0.7656	0.7656	—	0.7018	—	—	—
Al	0.2319	0.2169	0.2169	—	0.2602	0.9082	—	—
Cr	0.3347	0.3076	0.3076	0.1864	0.3507	0.1772	0.1846	0.1229
Fe	1.2351	1.1304	1.1304	0.6722	1.2974	0.6452	0.6722	0.4473
Ni	0.1530	0.1396	0.1396	0.0804	0.1939	0.0772	0.0804	0.0535
C	—	—	—	—	—	3.5969	—	—

Table 3.2 Regionwise Atomic Densities of XIII-1 Core

($\times 10^{22}$ atoms/cm³)

Region Nuclide	CORE		HEUCD	EUCD " A " B " C	I B	A B	C R			R B	Empty Matrix
	T 3	T 3D81					CORE (N)	CORE (O)	A B		
Pu-239	0.1568	0.15568	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu-240	0.0138	0.0210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu-241	0.000679	0.001372	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu-242	—	0.000283	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Am-241	0.000619	0.001403	—	—	—	—	—	—	—	—	—
U-235	0.001395	0.001395	0.1865	0.1960	0.003163	0.003163	0.59912	0.4521	0.02890	0.00840	—
U-238	0.6869	0.6869	0.3002	0.7779	0.9307	0.9307	0.61765	0.03418	3.9889	4.01740	—
O	1.5400	1.5400	1.3623	1.3623	1.7038	1.7038	—	—	—	—	—
Na	0.7656	0.7656	0.7656	0.5742	0.7656	0.7656	—	—	—	—	—
Al	0.1309	0.1317	0.9082	0.9082	0.2169	0.2169	1.4126	1.8364	—	—	—
Cr	0.3481	0.3490	0.3079	0.2753	0.3079	0.3079	0.2936	0.2936	0.1846	0.1846	0.1229
Fe	1.2874	1.2908	1.1304	1.0091	1.1304	1.1304	1.0684	1.0684	0.6722	0.6722	0.4473
Ni	0.1597	0.1599	0.1396	0.1240	0.1396	0.1396	0.5275	0.5275	0.0804	0.0804	0.0535
C	—	—	0.8992	0.8992	—	—	—	—	—	—	—

*1 used for gap experiment

*2 used for loading change experiment

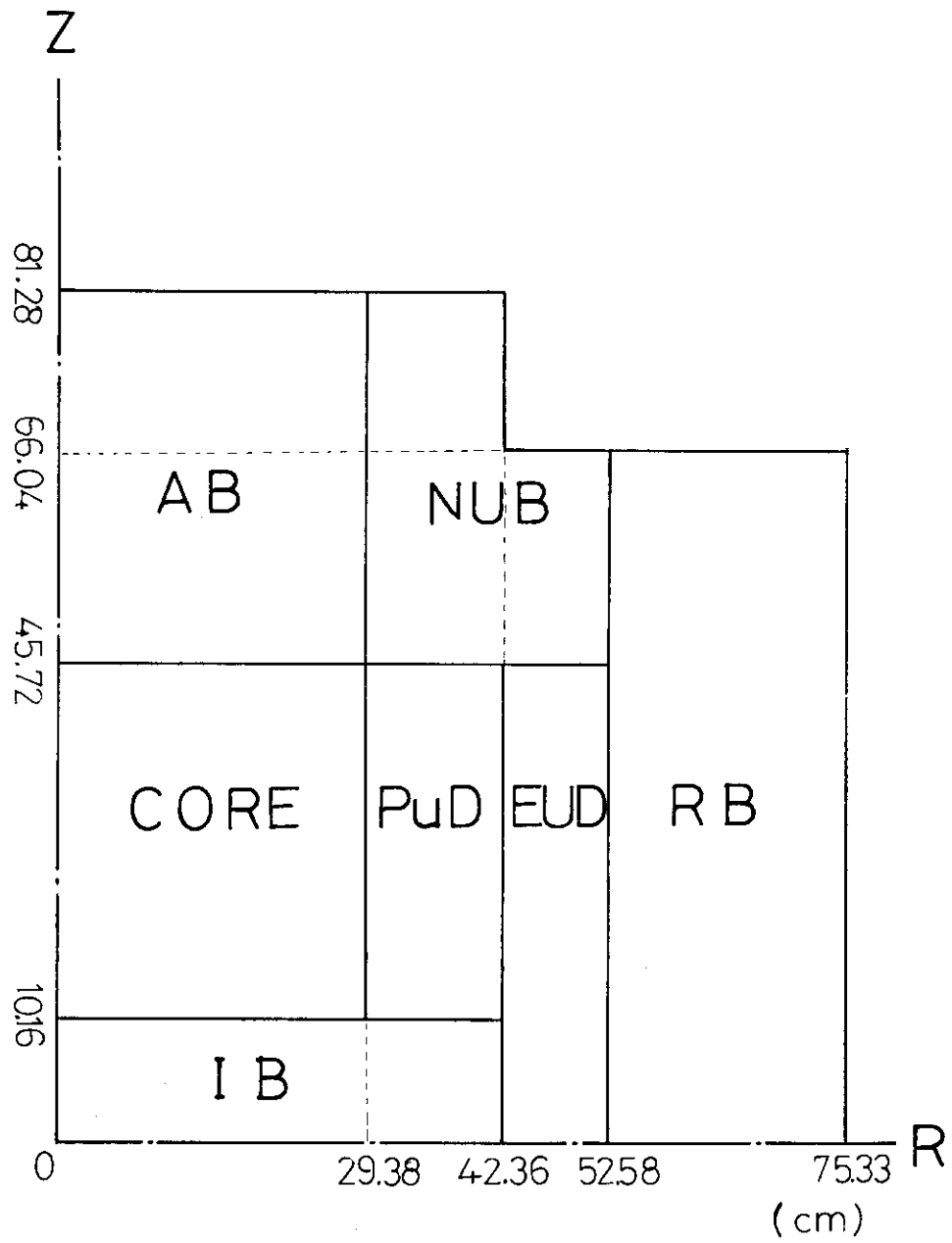


Fig. 3.1 Calculation Model of XII-1 Core

4. 実験結果及び検討

本章では、4.1節でMSMによる未臨界度測定結果と、対検出器の計数率比Rの測定精度と測定時間について述べる。4.2節では未臨界度、およびRと未臨界度の関係について、それぞれ実験と計算との比較を行ない、未臨界度推定が十分な精度で可能か否かを議論する。

Rの実験と計算の比較を行う場合、未臨界度に対するRの変化を見るためには、臨界状態において両者におけるRを一致させる必要がある。今回の実験では、いずれの実験体系においても未臨界度が0.1～0.2% $\Delta k/k$ と非常に臨界に近いステップでRが測定されているので、そのステップを臨界状態における測定とみなして実験値を規格化する。また臨界状態に相当するRの計算値は、固有値問題の体系計算を行なって得る。

4.1 実験結果

まず、集合体間隔を変える方法による実験結果について述べる。

XII-1 炉心

1) MSMによる未臨界度測定結果

Table 4.1に各ステップにおけるMSMによる未臨界度測定結果を示す。体系の未臨界度は0～17% $\Delta k/k$ の範囲で変化しているが、集合体間隔が小さい範囲で未臨界度変化が大きく、集合体間隔が35 cmで未臨界度は10% $\Delta k/k$ を超えている。

2) 計数率比R測定結果

Table 4.2に各ステップにおける計数率比Rの測定結果を示す。

ステップ1で規格化した計数率比Rの測定誤差(1 σ)は完全分離状態で、 $^{235}\text{Ufc}/^{238}\text{Ufc}$ で2%以内、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で1%以内である。Rの変化率が1% $\Delta k/k$ 当り約1%であることから、各々の測定誤差を未臨界度の不確かさに換算すると $^{235}\text{Ufc}/^{238}\text{Ufc}$ で2% $\Delta k/k$ 以内、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で1% $\Delta k/k$ 以内となる。なお、測定に要した時間はステップ当り最大2時間程度である。

XIII-1 炉心

1) MSMによる未臨界度測定結果

Table 4.3に各ステップにおけるMSMによる未臨界度測定結果を示す。体系の未臨界度は0～36% $\Delta k/k$ の範囲で変化している。XII-1炉心より完全分離状態の未臨界度が大きくなったのは、密着面の面積が大きくなったことと、中性子の漏洩を防ぐ役目をする内部ブランケットの密着面に占める面積割合が減少したために、両者の効果により密着面からの中性子の漏洩割合が増大したことが原因と考えられる。集合体間隔が10 cmで未臨界度は10% $\Delta k/k$ に達している。

2) 計数率比R測定結果

Table 4.4に各ステップにおける計数率比Rの測定結果を示す。

ステップ1で規格化した計数率比 R の測定誤差 (1σ) は、炉心中心の $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ に対して、完全分離状態で2%以内、未臨界度 $10\% \Delta k/k$ 以下^{*1}で1.5%以内である。 R の変化率が $1\% \Delta k/k$ 当り約1%であることから、各々の測定誤差を未臨界度の不確かさに換算すると、各々、完全分離状態で $2\% \Delta k/k$ 以内、未臨界度 $10\% \Delta k/k$ 以下で $1.5\% \Delta k/k$ 以内となる。なお、測定に要した時間はステップ当り最大1時間程度である。

次に燃料引出しを装荷する方法による実験結果について述べる。

1) MSMによる未臨界度測定結果

Table 4.5 に各ステップにおけるMSMによる未臨界度測定結果を示す。体系の未臨界度は、完全分離状態で $30 \sim 110\% \Delta k/k$ 、密着状態で $0 \sim 6\% \Delta k/k$ の範囲で変化している。

2) 計数率比 R 測定結果

Table 4.6 に各ステップにおける計数率比 R の測定結果を示す。

ステップ6で規格化した計数率比 R の測定誤差 (1σ) は全ステップを通して、炉心中心の $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で約3%以内、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ で約1%以内であるが、体系外側の $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ では40%となり精度的に不十分である。これは ^{237}Np 核分裂計数管は検出効率が小さく、体系外側では十分な計数率が得られなかったためである。さらに、完全分離状態と密着状態に分けて考えると、完全分離状態のステップでは R の測定誤差 (1σ) は、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で約3%、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ で1%以内であり、密着状態では、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ でステップ3を除いて2%以内、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ でステップ2を除いて0.5%程度である。未臨界度の不確かさに換算すると、完全分離状態では、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で約 $7\% \Delta k/k$ 、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ で $6\% \Delta k/k$ 以内となり、密着状態では $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ で $1.5\% \Delta k/k$ 以内、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ で $1\% \Delta k/k$ 程度である。測定に要した時間はステップ当り、完全分離状態で10時間、密着状態で最大1時間である。但し、ステップ2とステップ3は作業工程上の理由により十分な測定時間が確保できなかった。

4.2 実験と計算の比較

まず、集合体間隔を変える方法による実験について計算との比較を行なう。

1) 未臨界度

未臨界度に対するMSMによる測定結果と計算結果との比較をXII-1炉心について Fig. 4.1, XIII-1炉心について Fig. 4.2 に示す。両炉心における測定値と計算値の比較はいずれも同じ傾向となっており、集合体間隔が約40cmを境として、それより未臨界度の小さい領域で計算が未臨界度を過大評価、未臨界度の大きい領域で計算が過小評価している。これは計算が拡散近似であることと、解の収束性を保つために集合体間に空格子管を仮定した効果によると考えられる。

2) 計数率比 R と未臨界度

XII-1炉心に対する実験と計算の比較を $^{235}\text{Ufc}/^{238}\text{Ufc}$ について Fig. 4.3, $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ について Fig. 4.4 に示す。いずれの場合においても計算は計数率比変化を大き目に予測してい

*1 未臨界度が $10\% \Delta k/k$ より浅い未臨界状態。

るが、測定結果は測定精度の範囲内で計算と同様に未臨界度に対してなめらかに変化していると言える。

XIII-1 炉心に対する実験と計算の比較を $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ について Fig. 4.5 に示す。測定結果は計算と良好な一致を示しており、未臨界度に対してなめらかに変化している。

従って、計数率比 R に対する条件から判断すると、XII-1 炉心・XIII-1 炉心の測定結果は、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ に対しては、対検出器による未臨界度推定法が精度的に適用できることを示していると考えられる。

次に、燃料引出しを装荷する方法による実験について計算との比較を行なう。

1) 未臨界度

未臨界度に対する MSM による測定結果と計算結果との比較を Fig. 4.6 に示す。計算は測定結果とよく一致している。

2) 計数率比 R と未臨界度

実験と計算の比較を、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ について Fig. 4.7 に、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ について Fig. 4.8 に示す。いずれも、測定結果は、分離状態のステップではバラツキが見られるが、密着状態のステップでは測定精度の範囲内で未臨界度に対してなめらかに変化していると言える。密着状態のステップに対する実験と計算の比較を、 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ について Fig. 4.9 に、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ について Fig. 4.10 に示す。 $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ の測定結果において、ステップ 5 のデータだけが大きく離れているが、これは他データから判断すると、 ^{237}Np 核分裂計数管の測定回路に変動が生じたためと考えられる。

以上の測定結果より、密着状態のステップに対しては $^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$ 、 $^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$ のいずれの対検出器においても推定手法は精度的に適用可能であると考えられる。

4.3 実験結果のまとめ

未臨界度モニターに用いる対検出器を FCA 炉心体系内に設定して行なった一連の実験結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 集合体間隔を変化させて未臨界度を変える実験により、炉心領域に設定した対検出器について未臨界度モニターの推定方法が有効であることが示された。
- 2) 実際の使用状況に近い、燃料引出しを装荷して未臨界度を変える実験においても密着状態のステップについては炉心領域に設定した対検出器で推定方法が有効であることが示された。
- 3) しかしながら、1)、2)の結果は体系中心の対検出器によるものであり、計数率の低い体系周辺に設定した対検出器では R の測定精度が不十分であることが明らかとなった。これは、高エネルギーの中性子に感度をもつ検出器として用いた ^{238}U 、 ^{237}Np 核分裂計数管の検出効率が低かったことが原因である。

Table 4.1 Subcritical Reactivity by MSM of each step - gap experiment of XII-1 Core

Step	Gap mm	Count Rate ^{*1} cps	ρ_{SM} % $\Delta k/k$	f_{MSM}	ρ_{MSM} ^{*2} % $\Delta k/k$
1 ^{*3}	0	2476.0 (0.23) ^{*4}	0.140	—	0.140
2	10.19	727.3 (0.36)	0.477	1.00	0.477 (0.43) ^{*4}
3	36.10	223.4 (0.62)	1.55	1.01	1.57 (0.67)
4	54.46	154.1 (0.87)	2.25	1.02	2.30 (0.90)
5	81.73	102.2 (1.1)	3.39	1.03	3.49 (1.2)
6	100.12	88.01 (1.2)	3.94	1.04	4.10 (1.3)
7	144.2	63.44 (0.92)	5.46	1.04	5.68 (0.95)
8	212.6	49.78 (0.64)	6.97	1.05	7.32 (0.68)
9	353.0	35.72 (1.1)	9.71	1.09	10.6 (1.2)
10	472.0	32.17 (1.5)	10.8	1.10	11.9 (1.6)
11	991.5	25.20 (1.4)	13.8	1.13	15.6 (1.5)
12	2001.1	22.69 (1.4)	15.3	1.14	17.4 (1.5)

*1 measured by ^{235}Ufc in RB

*2 $\rho_{MSM} = -(1 - 1/k) = f_{MSM} \cdot \rho_{SM}$

*3 step for reactivity calibration

*4 values in parenthesis are relative error 1σ (%)

Table 4.2 Count Rate Ratio of each step — gap experiment of XII-1 Core

Step	Gap mm	ρ_{MSM} % $\Delta k/k$	CR Ratio ($^{235}\text{Ufc}/^{238}\text{Ufc}$)		CR Ratio ($^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$)	
			in core	normalized *2	in core	normalized *2
1	0	0.140	4.240+1 ^{*3} (0.36) ^{*1}	1.0	1.815+1 (0.28) ^{*1}	1.0
2	10.19	0.477	4.178+1 (0.58)	0.985 (0.69)	1.806+1 (0.32)	0.995 (0.43)
3	36.10	1.57	4.060+1 (0.66)	0.958 (0.76)	1.775+1 (0.66)	0.978 (0.72)
4	54.46	2.30	4.087+1 (0.90)	0.964 (0.97)	1.773+1 (1.1)	0.977 (1.2)
5	81.73	3.49	4.088+1 (1.1)	0.964 (1.3)	1.744+1 (0.62)	0.961 (0.68)
6	100.21	4.10	4.023+1 (1.2)	0.949 (1.4)	1.719+1 (0.50)	0.947 (0.58)
7	144.2	5.68	3.954+1 (1.9)	0.933 (2.0)	1.677+1 (0.80)	0.924 (0.85)
8	212.6	7.32	3.843+1 (1.4)	0.906 (1.6)	1.648+1 (0.69)	0.908 (0.75)
9	353.0	10.6	3.804+1 (2.1)	0.897 (2.2)	1.599+1 (1.3)	0.881 (1.4)
10	472.0	11.9	3.743+1 (1.5)	0.883 (1.7)	1.605+1 (1.5)	0.884 (1.7)
11	991.5	15.6	3.648+1 (1.2)	0.860 (1.4)	1.536+1 (1.3)	0.846 (1.4)
12	2001.1	17.4	3.542+1 (1.6)	0.835 (1.8)	1.517+1 (0.95)	0.836 (0.99)

*1 Values in parenthesis are relative error 1σ (%).

*2 normalized by CR Ratio of Step 1.

*3 4.240×10^4 .

Table 4.3 Subcritical Reactivity by MSM of each
step — gap experiment of XIII-1 Core

Step	Gap mm	Count Rate ^{*3}		ρ_{SM} % $\Delta k/k$	f_{MSM}	ρ_{MSM} ^{*4}	
		cps	() ^{*6}			% $\Delta k/k$	() ^{*6}
1 ^{*5}	0	1407.	(0.11) ^{*6}	0.194	—	0.194	
2	0 ^{*1}	422.9	(0.054)	0.645	1.02	0.658	(0.13) ^{*6}
3	0 ^{*2}	101.1	(0.43)	2.70	1.09	2.94	(0.45)
4	13.09	82.13	(0.35)	3.32	1.11	3.69	(0.37)
5	49.8	51.30	(0.32)	5.27	1.18	6.22	(0.34)
6	104.7	34.59	(0.30)	7.89	1.27	10.0	(0.32)
7	500.1	16.97	(0.40)	16.1	1.59	25.6	(0.42)
8	2000.0	13.44	(0.60)	20.3	1.77	35.9	(0.61)

*1 S/R in, C/R out

*2 S/R out, C/R out

*3 measured by ²³⁵Ufc at core center

*4 $\rho_{MSM} = - (1 - 1/k) = f_{MSM} \cdot \rho_{SM}$

*5 step for reactivity calibration

*6 values in parenthesis are relative error 1σ (%)

Table 4.4 Count Rate Ratio of each step — gap experiment of XIII-1 Core

Step	Gap mm	ρ_{MSM} % $\Delta k/k$	CR Ratio ($^{235}Ufc / ^{237}Npfc$)		CR Ratio ($^{235}Ufc / ^{235}Ufc - poly.$)	
			normalized *4	normalized *4	normalized *4	normalized *4
1	0	0.194	1.485+1 (0.37)*3	1.0	2.914-2 (0.12)*3	1.0
2	0 *1	0.658	1.483+1 (1.0)	0.999 (1.1)*3	2.703-2 (0.37)	0.928 (0.39)*3
3	0 *2	2.94	1.453+1 (1.3)	0.978 (1.4)	2.777-2 (0.57)	0.953 (0.59)
4	13.09	3.69	1.385+1 (0.97)	0.933 (1.1)	2.781-2 (0.41)	0.954 (0.43)
5	49.8	6.22	1.372+1 (1.2)	0.924 (1.3)	2.817-2 (0.47)	0.967 (0.49)
6	104.7	10.0	1.312+1 (0.93)	0.884 (1.0)	2.858-2 (0.87)	0.981 (0.88)
7	500.1	25.6	1.163+1 (1.6)	0.783 (1.7)	2.894-2 (0.90)	0.993 (0.91)
8	2000.	35.9	1.098+1 (1.7)	0.739 (1.8)	2.740-2 (0.91)	0.940 (0.92)

*1 S/R in, C/R out

*2 S/R out, C/R out

*3 Values in parenthesis are relative error 1σ (%)

*4 normalized by CR Ratio of Step 1

Table 4.5 Subcritical Reactivity by MSM of each step
 — loading change experiment of XIII-1 Core

Step	Count Rate ^{*1}		ρ_{SM} % $\Delta k/k$	f_{MSM}	ρ_{MSM} ^{*2}	
	cps				% $\Delta k/k$	
6 ^{*4}	2036.	(0.29) ^{*5}	0.127	—	0.127	
5	1436.	(0.19)	0.180	1.01	0.181	(0.35) ^{*5}
4	522.2	(0.35)	0.495	1.03	0.510	(0.46)
3	180.2	(0.29)	1.435	1.05	1.68	(0.41)
2	111.5	(0.99)	2.32	1.08	2.51	(1.1)
1	49.32	(0.25)	5.24	1.18	6.18	(0.39)
5 s ^{*3}	14.02	(0.20)	18.4	1.65	30.4	(0.36)
2 s	13.07	(0.44)	19.8	1.71	33.9	(0.53)
5/20 s	11.99	(0.62)	21.6	1.80	38.9	(0.69)
5/17 s	10.28	(0.81)	25.2	2.09	52.7	(0.86)
5/16 s	8.112	(0.54)	31.9	2.20	70.2	(0.62)
5/15 s	5.112	(0.54)	50.6	2.13	108.	(0.62)

*1 measured by ^{235}Ufc at core center

*2 $\rho_{MSM} = - (1 - 1/k) = f_{MSM} \cdot \rho_{SM}$

*3 suffix s indicates separated step

*4 step for reactivity calibration

*5 values in parenthesis are relative error 1σ (%)

Table 4.6 Count Rate Ratio of each step — loading change experiment of XIII-1 Core

Step	ρ_{MSM} % $\Delta k/k$	CR Ratio ($^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc}$)		CR Ratio ($^3\text{He pc}/^{235}\text{Ufc}$)		CR Ratio ($^3\text{He pc}/^{237}\text{Npfc}$)	
		at core center	normalized*2	at core center	normalized*2	outside of RB	normalized*2
6	0.127	1.503+1*3(0.97)*1	1.0	4.313+0 (0.34)*1	1.0	5.484+2 (9.5)*1	1.0
5	0.181	1.618+1 (0.53)	1.077 (1.1)*1	4.295+0 (0.24)	0.996 (0.42)*1	5.506+2 (15)	1.004 (24)*1
4	0.510	1.492+1 (0.37)	0.993 (1.1)	4.307+0 (0.37)	0.999 (0.51)	6.281+2 (5.8)	1.145 (12)
3	1.68	1.497+1 (3.1)	0.996 (3.3)	4.282+0 (0.39)	0.993 (0.52)	6.020+2 (23)	1.098 (25)
2	2.51	1.447+1 (1.2)	0.963 (1.6)	4.274+0 (1.1)	0.991 (1.2)	5.291+2 (17)	0.965 (20)
1	6.18	1.384+1 (1.9)	0.897 (2.2)	4.209+0 (0.39)	0.976 (0.52)	5.405+2 (12)	0.986 (16)
5s	30.4	1.236+1 (0.53)	0.822 (1.2)	3.810+0 (0.22)	0.883 (0.41)	7.191+2 (21)	1.311 (24)
2s	33.9	1.108+1 (2.5)	0.737 (2.7)	3.849+0 (0.45)	0.892 (0.57)	5.643+2 (32)	1.029 (34)
5/20s	38.9	1.088+1 (3.1)	0.724 (3.3)	3.819+0 (0.63)	0.885 (0.72)	5.054+2 (33)	0.922 (35)
5/17s	52.7	1.049+1 (2.3)	0.698 (2.5)	3.795+0 (0.82)	0.880 (0.89)	5.104+2 (43)	0.931 (44)
5/16s	70.2	9.821+0 (1.8)	0.617 (2.1)	3.697+0 (0.55)	0.857 (0.65)	4.772+2 (32)	0.870 (34)
5/15s	108.	9.048+0 (2.9)	0.602 (3.1)	3.564+0 (0.57)	0.826 (0.67)	2.660+2 (35)	0.485 (37)

*1 Values in parenthesis are relative error 1 σ (%)

*2 normalized by CR Ratio of Step 6

*3 1.503×10^4

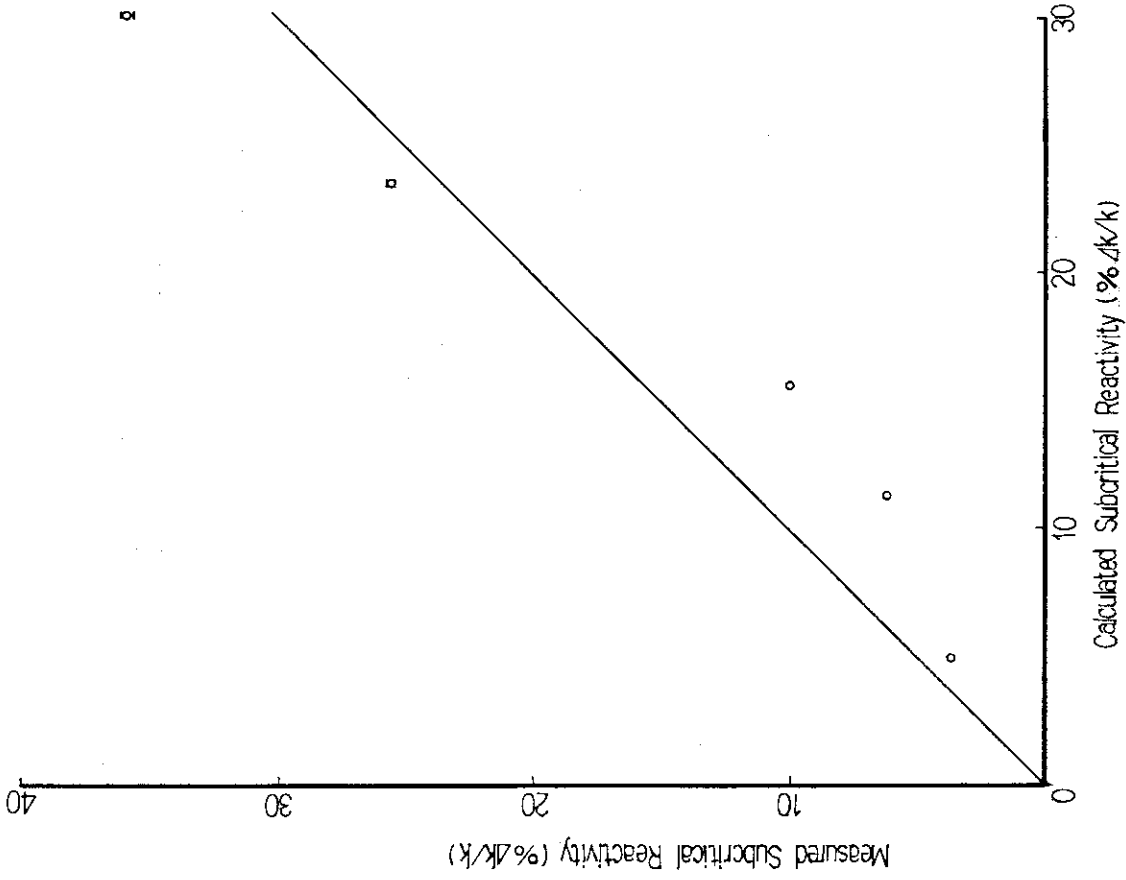


Fig.4.2 Comparison of Measured and Calculated Subcritical Reactivities-gap experiment of XIII-1 Core

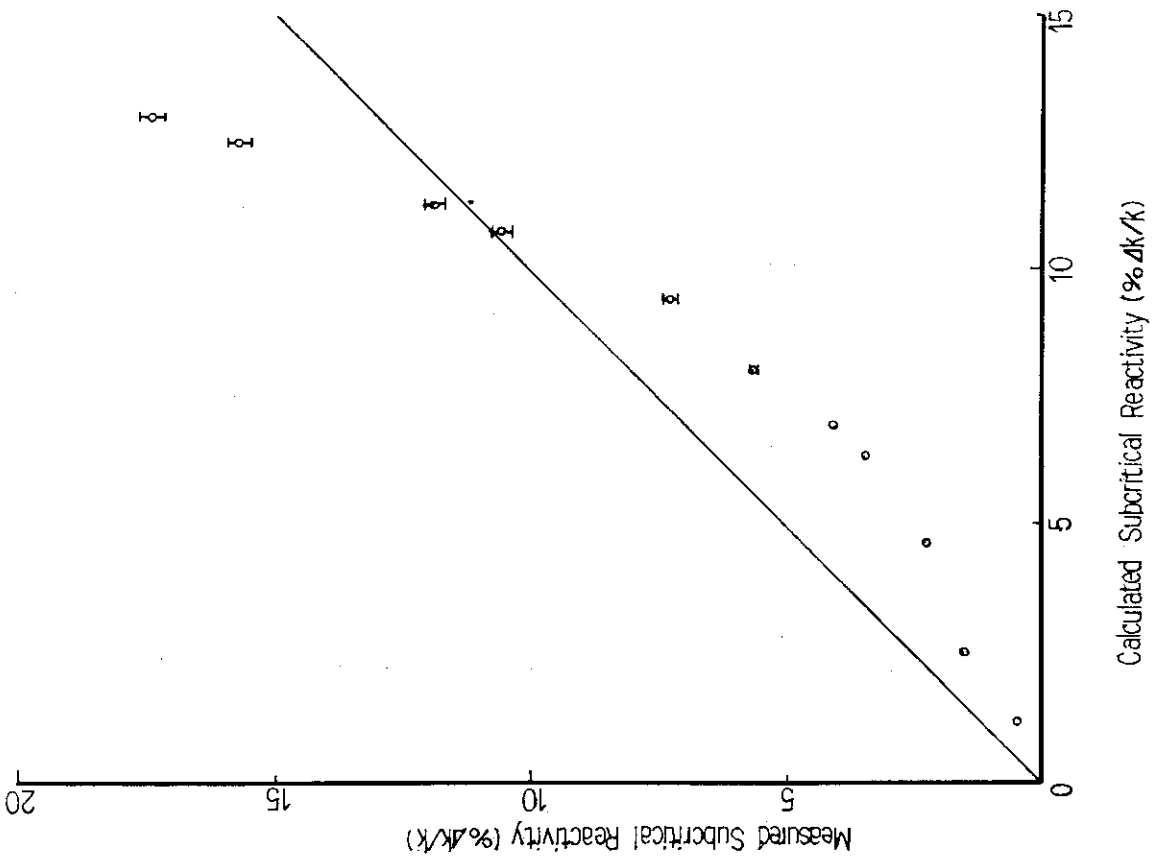


Fig.4.1 Comparison of Measured and Calculated Subcritical Reactivities-gap experiment of XII-1 Core

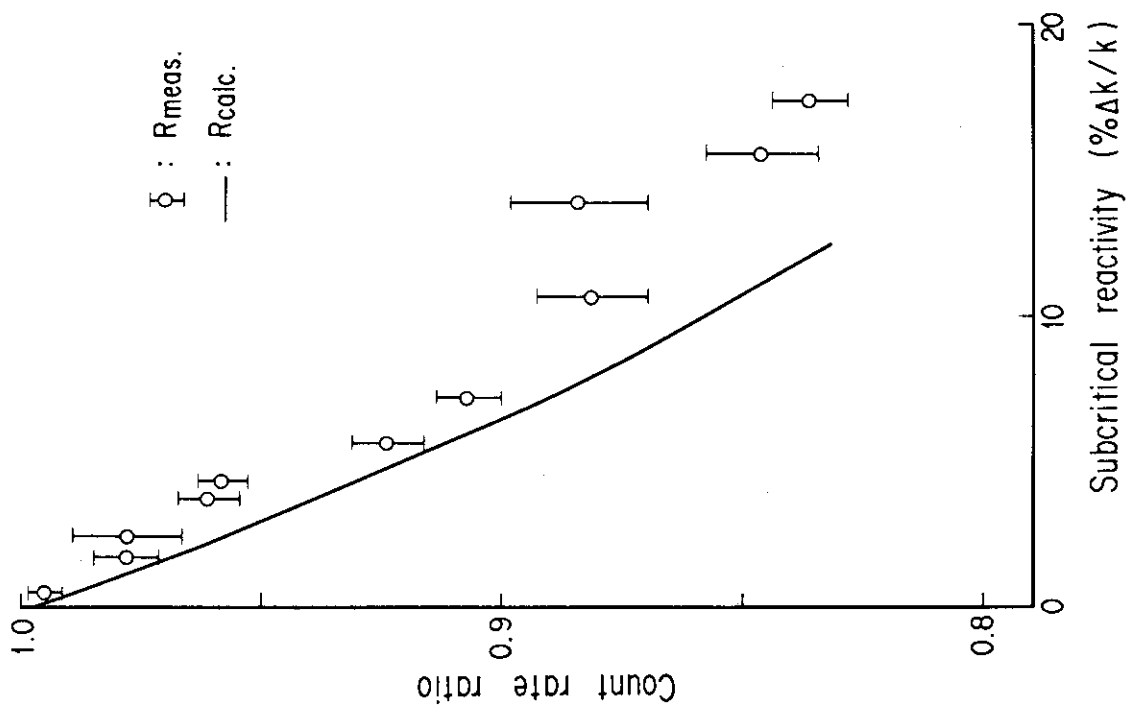


Fig.4.4 Count ratio R(²³⁵Ufc/²³⁷Npfc) vs. Subcritical Reactivity-gap experiment of XII-1 Core

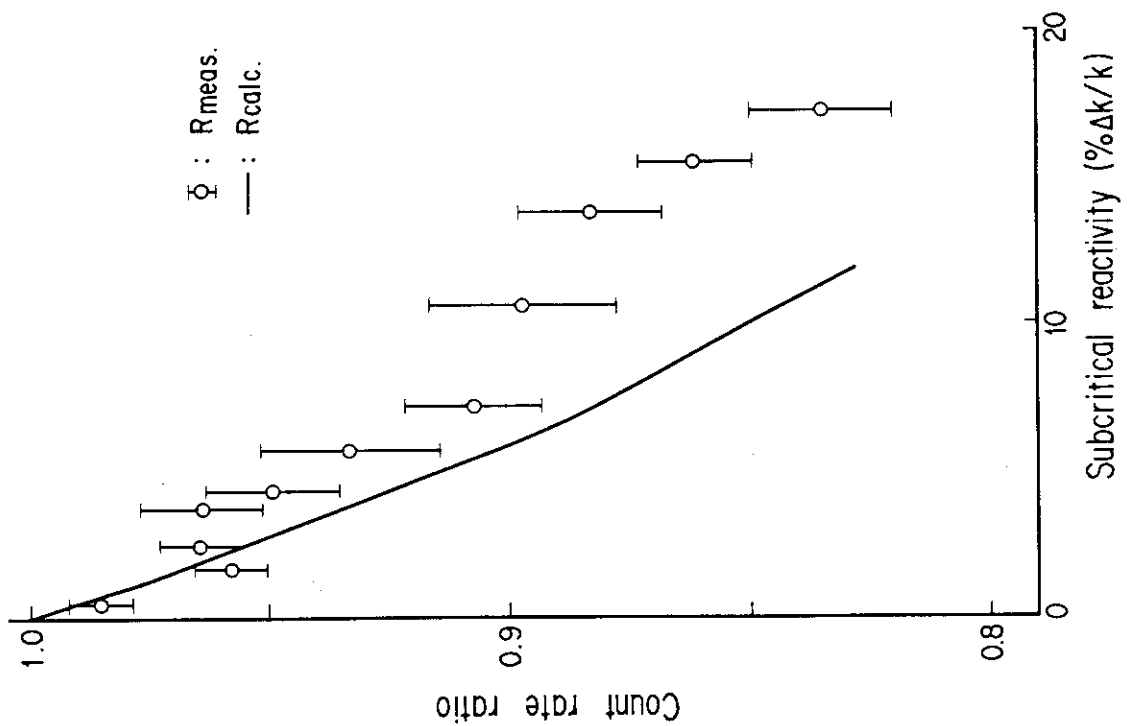


Fig.4.3 Count ratio R(²³⁵Ufc/²³⁸Ufc) vs. Subcritical Reactivity-gap experiment of XII-1 Core

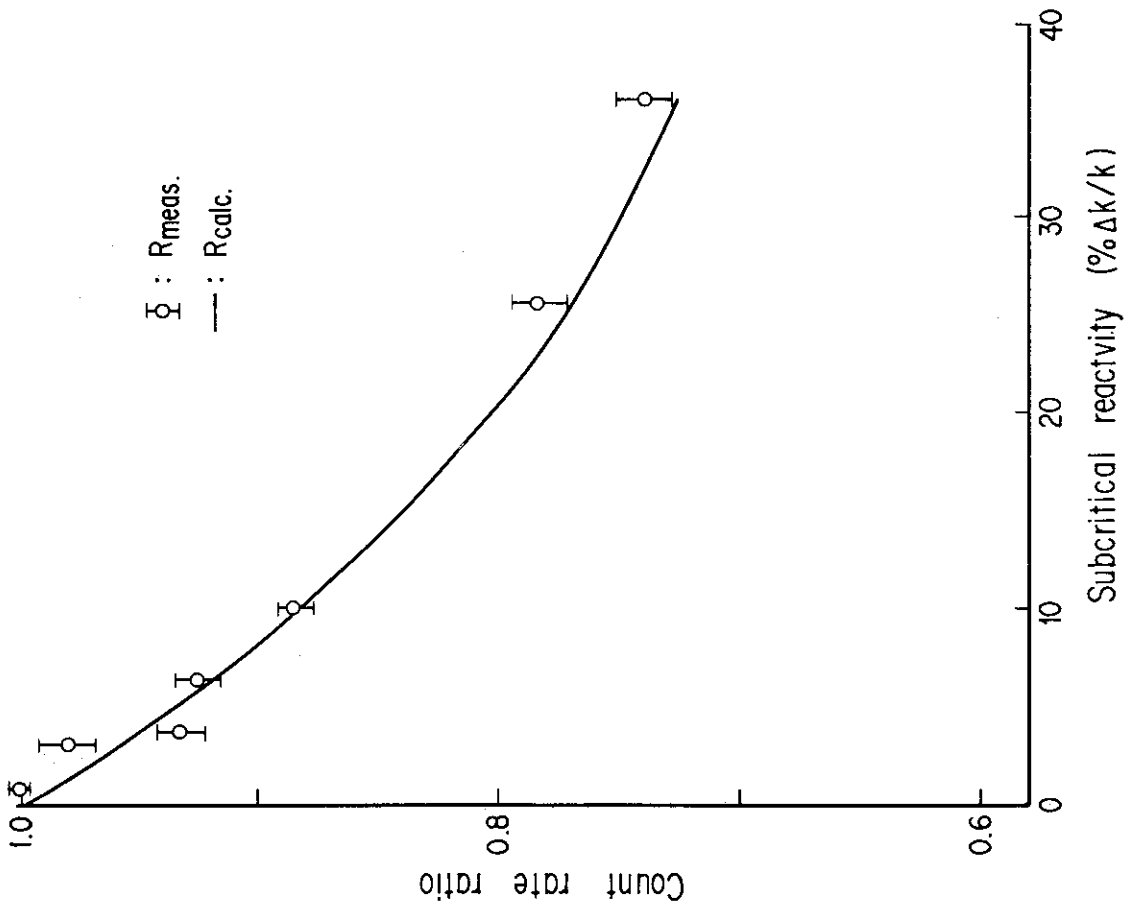


Fig.4.5 Count rate ratio $R(^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc})$ vs. Subcritical Reactivity-gap experiment of XIII-1 Core

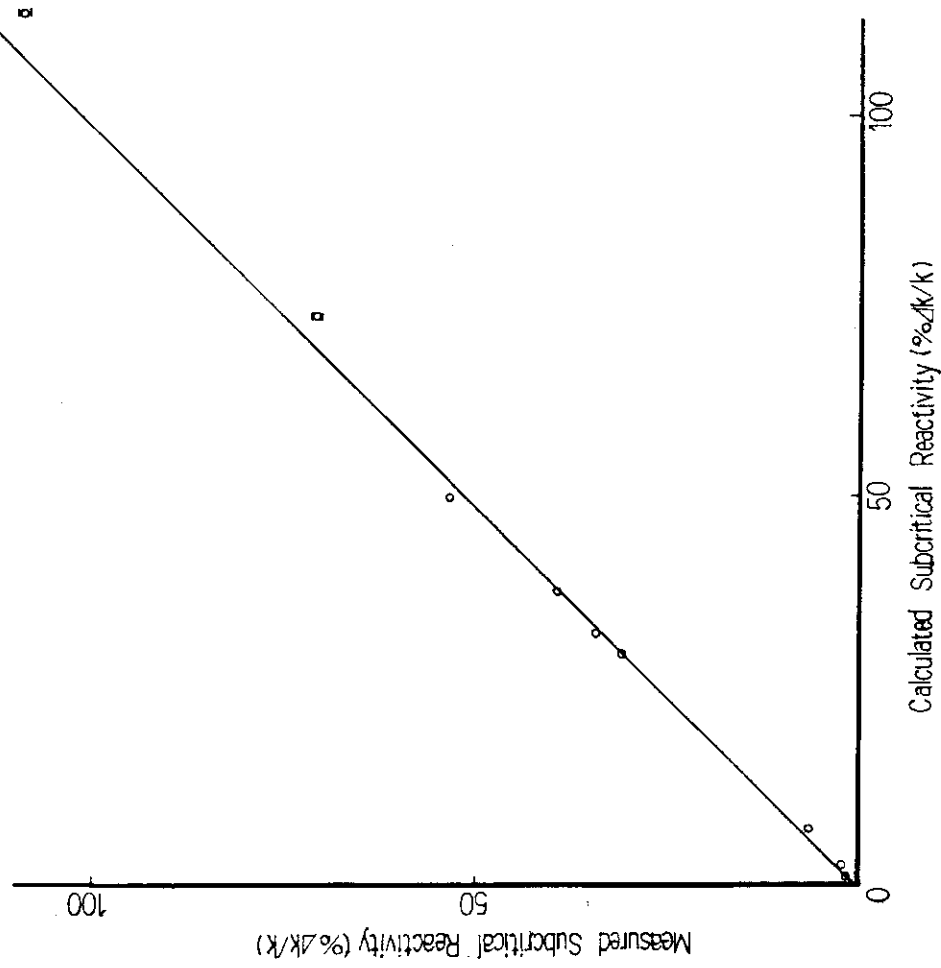


Fig.4.6 Comparison of Measured and Calculated Subcritical Reactivities-loading change experiment of XIII-1 Core

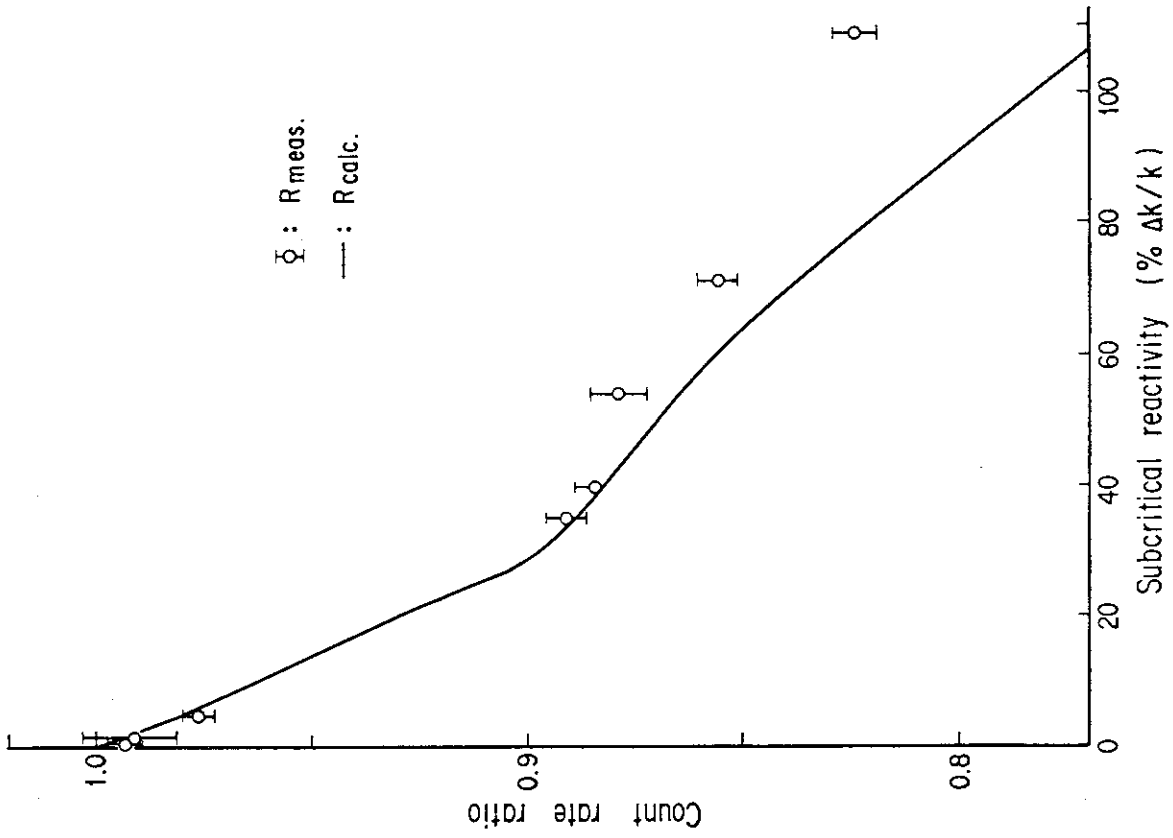


Fig.4.7 Count rate ratio $R(^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc})$ vs. Subcritical Reactivity-Loading change experiment of XIII-1 Core

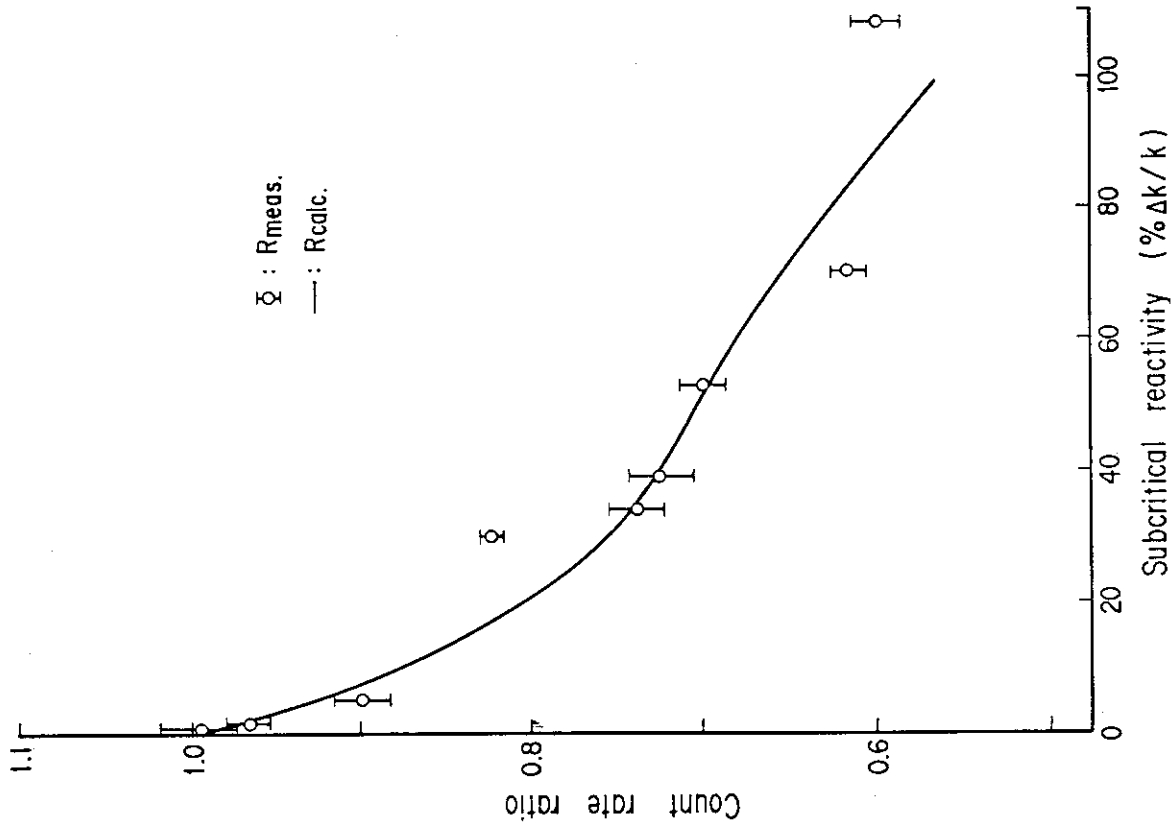


Fig.4.8 Count rate ratio $R(^{235}\text{Ufc}/^{235}\text{Ufc})$ vs. Subcritical Reactivity-Loading change experiment of XIII-1 Core

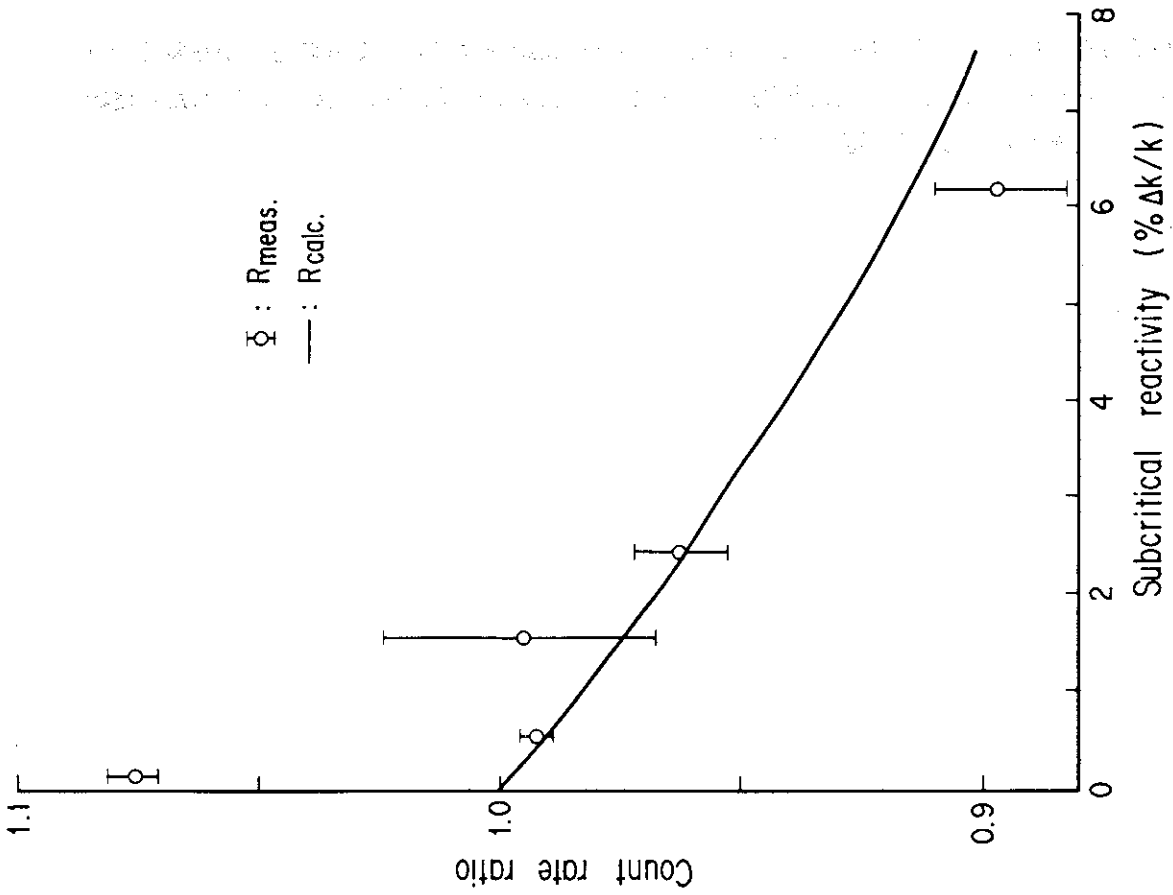


Fig.4.9 Count rate ratio $R(^{235}\text{Ufc}/^{237}\text{Npfc})$ vs. Subcritical Reactivity-loading change experiment of XIII-1 Core(contact step)

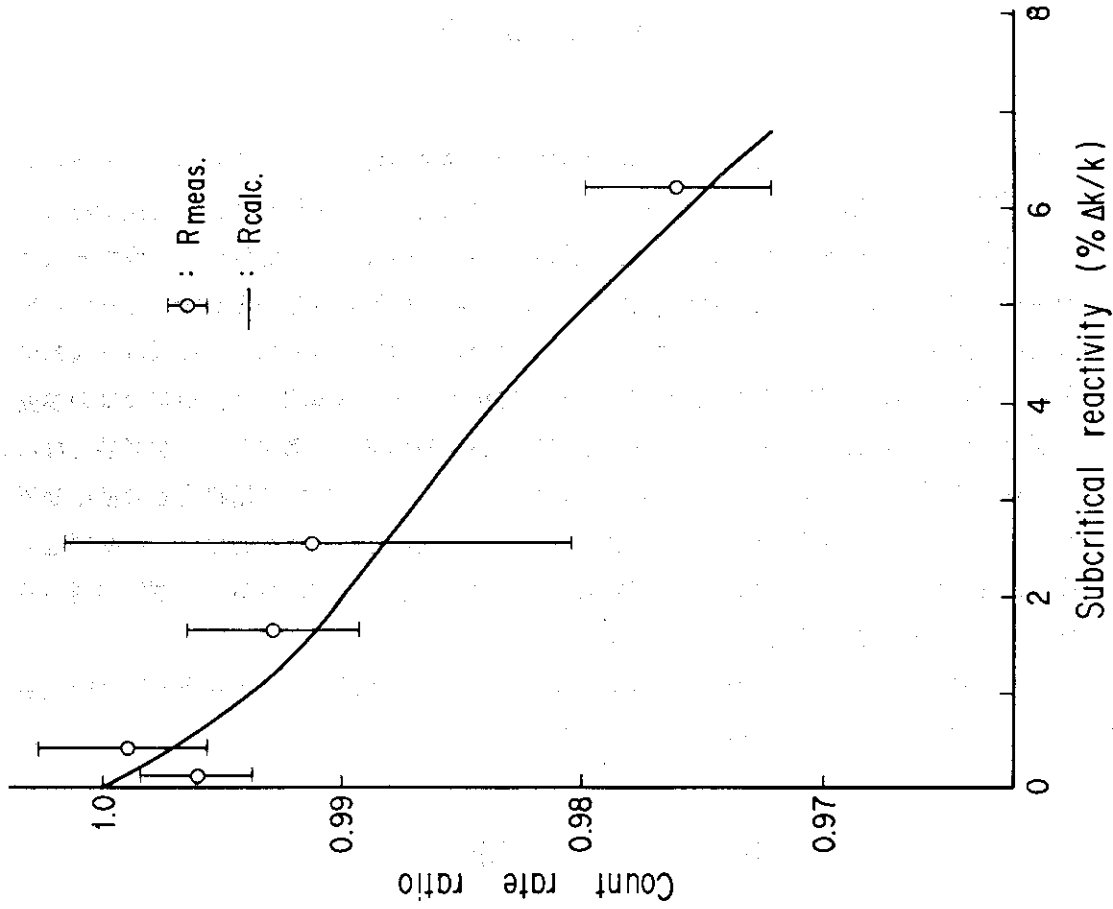


Fig.4.10 Count rate ratio $R(^3\text{Hepc}/^{235}\text{Ufc})$ vs. Subcritical Reactivity-loading change experiment of XIII-1 Core(contact step)

5. 今後の課題

未臨界度モニター開発における次の課題は、精度のよい未臨界度推定手法を確立することである。

現在の段階で推定手法上問題となると考えられるのは、対検出器のR測定値規格化の方法である。臨界近傍での未臨界度推定精度を上げるには、臨界状態においてRの計算値と測定値が一致するように測定値を規格化しなければならない。今回の実験では臨界に非常に近い状態のRが測定できたために、実験的に規格化因子を決めることができた。しかし、実際の設備では臨界に近い体系は一般的に実現困難であり、何らかの方法で規格化因子を推定する必要がある。具体的には、対象設備の模擬体系を使った臨界近傍の測定実験、あるいは、推定手法の改良等の解決策を講ずることが必要となる。

次に、測定手段上で問題となるのは、4.3節で指摘した、高エネルギー中性子用検出器の検出効率が不十分であることである。実際の設備では、対検出器は、他の機器との干渉を避けて、体系周辺部に設置されることを想定すれば計数率は今回の実験より低くなることも予想される。大型検出器あるいは、シンチレーション検出器等の導入が必要となる。

最後に、今回の実験はナトリウム中貯蔵に相当する体系であるが、今後さらに水中あるいは空気中貯蔵に相当する体系での測定データを蓄積していく必要がある。

謝 辞

この実験を行なうにあたって、炉物理施設管理室長中野正文氏をはじめ F C Aの方々から多くの助言や協力をいただきました。また、高速炉物理研究室長吉田弘幸氏には、F C Aの利用にあたり終始御支援をいただきました。心より感謝します。

5. 今後の課題

未臨界度モニター開発における次の課題は、精度のよい未臨界度推定手法を確立することである。

現在の段階で推定手法上問題となると考えられるのは、対検出器のR測定値規格化の方法である。臨界近傍での未臨界度推定精度を上げるには、臨界状態においてRの計算値と測定値が一致するように測定値を規格化しなければならない。今回の実験では臨界に非常に近い状態のRが測定できたために、実験的に規格化因子を決めることができた。しかし、実際の設備では臨界に近い体系は一般的に実現困難であり、何らかの方法で規格化因子を推定する必要がある。具体的には、対象設備の模擬体系を使った臨界近傍の測定実験、あるいは、推定手法の改良等の解決策を講ずることが必要となる。

次に、測定手段上で問題となるのは、4.3節で指摘した、高エネルギー中性子用検出器の検出効率が不十分であることである。実際の設備では、対検出器は、他の機器との干渉を避けて、体系周辺部に設置されることを想定すれば計数率は今回の実験より低くなることも予想される。大型検出器あるいは、シンチレーション検出器等の導入が必要となる。

最後に、今回の実験はナトリウム中貯蔵に相当する体系であるが、今後さらに水中あるいは空気中貯蔵に相当する体系での測定データを蓄積していく必要がある。

謝 辞

この実験を行なうにあたって、炉物理施設管理室長中野正文氏をはじめFCAの方々から多くの助言や協力をいただきました。また、高速炉物理研究室長吉田弘幸氏には、FCAの利用にあたり終始御支援をいただきました。心より感謝します。

参 考 文 献

- 1) 中村, 白川: "未臨界体系の反応度モニターに関する研究(II)", PNC SJ203 84-06, (1984).
- 2) 飯島 進, 他: "FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(III)", FCA XII-1集合体による実験と解析", JAERI-M 85-045 (1985).
- 3) 飯島 進, 他: "FCAによる大型軸方向非均質炉心の炉物理研究(V)", FCA XIII-1集合体による径方向核特性の測定とその解析", JAERI-M 86-065 (1986).
- 4) Mizoo, N. et al: "Reactivity Measurement on Far-Subcritical Fast Systems", Specialist Meeting on Control Rod Measurement Technique, Cadarache, April, 1976.
- 5) 溝尾宣辰: "中性子源増倍法に関する理論的補正の信頼性", JAERI-M 7135 (1977).
- 6) Takano H., et al.: "Production and benchmark tests of fast reactor group constants set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982).