

JAERI-M

7888

FCA VI-2集合体の臨界実験

(FCAによる高速原型炉模擬実験研究報告)

1978年10月

飯島 勉・弘田 実弥・溝尾 宣辰・白方 敬章  
藤崎 伸吾・渡辺 秀明・小川 弘伸・山岸耕二郎  
三田 敏男\*・趙 満\*\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

FCA VI-2 集合体の臨界実験  
(FCAによる高速原型炉模擬実験研究報告)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

飯島 勉<sup>+</sup>・弘田実弥・溝尾宣辰

白方敬章・藤崎伸吾・渡辺秀明

小川弘伸・山岸耕二郎・三田敏男<sup>\*</sup>

趙 満<sup>\*\*</sup>

(1978年9月4日受理)

FCA では高速原型炉「もんじゅ」の模擬実験が進行中である。FCA VI-2 集合体はVI-1 集合体に続くその物理的モックアップ炉心の一つで、VI-1が「もんじゅ」の外側炉心のモックアップであったのに対しVI-2は「もんじゅ」の内側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235を燃料とするドライバーで取り囲んだゾーン系である。VI-2集合体では昭和48年3月から49年4月まで1年以上にわたって種々の実験が行なわれたが、本報告はそれらのうち非均質臨界量特性試験、プルトニウム高次同位元素の効果、サンプル反応度値空間分布、核分裂比および核分裂率分布、燃料板バンチング効果、模擬ブランケット効果、ピン状燃料アッセンブリーによるピンプレートとの比較など主として臨界性に関する実験結果についてまとめたものである。

---

+ ) 現大型トカマク開発部    \* ) 動燃事業団    \*\* ) 韓国原研

本報告書は日本原子力研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託によって行なった研究の成果である。

FCA Assembly VI-2 Critical Experiment

Tsutomu IIJIMA<sup>+</sup>, Jitsuya HIROTA, Nobutatsu MIZOO,  
Keisho SHIRAKATA, Shingo FUJISAKI, Hideaki WATANABE,  
Hironobu OGAWA, Kojiro YAMAGISHI, Toshio SANDA<sup>\*</sup>  
and  
Mann CHO<sup>\*\*</sup>

Division of Reactor Engineering, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 4, 1978)

Mock-up experiments of the prototype fast breeder reactor MONJU proceeding with FCA. The assembly VI-2 is the second physics mock-up. It consists of a test region simulating the MONJU inner-core composition, a U-235 fueled driver and a uranium metal blanket, the assembly VI-1 is the MONJU outer-core mock-up. The experimental results are presented: critical mass, plutonium higher isotopes effect, sample reactivity worths, reaction rates, fuel bunching effect, axial blanket effect, and pin-plate comparison by using pin-fuel assemblies.

Keywords: FCA Assembly, Critical Experiment, Critical Mass, Mock-up Experiment, MONJU Reactor Core, Control Rod Calibration, Reactivity Worths

---

+ Division of Large Tokamak Development

\* PNC

\*\* Korea Atomic Energy Research Institute

The work performed under contracts between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation and JAERI.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. FCA VI-2集合体の概要 .....	1
3. VI-2集合体の非均質臨界量 .....	6
4. VI-2集合体における実験 .....	8
4.1 燃料組成密度係数による反応度スケールの校正 .....	8
4.2 プルトニウム高次同位元素効果 .....	8
4.3 サンプル反応度値空間分布 (EUO <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> C, およびMo) .....	10
4.4 核分裂比 .....	14
4.5 核分裂率空間分布 .....	14
4.6 バンチング効果 .....	15
4.7 模擬ブランケット効果 .....	18
4.8 ピン状燃料アッセンブリーによる実験 .....	20
4.8.1 置換反応度側定結果 .....	21
4.8.2 板状セルとピン状セルの非均質効果の差 .....	21
4.8.3 ピン状燃料アッセンブリー軸方向核分裂率分布 .....	23
参考文献 .....	24
付録 特性試験データおよび核計算 .....	25

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of FCA Assembly VI-2 .....	1
3. Heterogeneous Critical Mass of FCA Assembly VI-2 .....	6
4. Experiments on FCA Assembly VI-2 .....	8
4.1 Calibration of Reactivity Scale by Fuel Density Coefficient .	8
4.2 Effect of Pu Higher Isotopes .....	8
4.3 Reactivity Worth Distributions of EUO <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> C and Mo Samples .	10
4.4 Fission Ratios .....	14
4.5 Fission Rate Distributions .....	14
4.6 Bunching Effects .....	15
4.7 Effect of Mockup Blanket .....	18
4.8 Experiments with Pin-Fuel Assembly .....	20
4.8.1 Result of Replacement Reactivity Experiment .....	21
4.8.2 Difference of Heterogeneity Effect between Plate Cell and Pin Cell .....	21
4.8.3 Axial Fission Rate Distribution in Pin Fuel Assembly .....	23
References .....	24
Appendix Data on Critical Experiment and Theoretical Calculations .....	25

## 1. ま え が き

FCAでは高速原型炉「もんじゅ」の核設計法の検証と安全性の確認に資するための模擬実験が行なわれている。物理的な模擬実験としてVI-1およびVI-2炉心によって臨界性(プルトニウム富化度)、反応度係数、その他組成特性量に関する実験を行ない、ついで格子管集合体を現在の35行×35列から51行×51列に拡大した後、工学的な模擬実験を第VI炉心系で行なうという計画になっている。その最初のVI-1集合体<sup>1)</sup>は「もんじゅ」の外側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235燃料によるドライバーでとり囲んだゾーン型集合体であり昭和47年8月から48年2月まで6ヶ月間にわたって種々の実験が行なわれた。続くVI-2集合体は「もんじゅ」の内側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235によるドライバーでとり囲んだものであり48年3月に初臨界を達成して以来49年4月まで臨界性、反応率、反応度係数、中性子スペクトル、ナトリウムボイド効果、ドップラー効果、非均質効果等に関する実験が行なわれた。本報告はVI-2集合体の概要と、非均質臨界量、プルトニウム高次同位元素効果、サンプル反応度係数分布、核分裂比および核分裂率分布、バンチング効果、模擬ブランケット効果、ピン状燃料アッセンブリーによるピンプレートとの比較等についての実験結果をまとめたものである。特性試験関係のデータは付録にまとめられている。

## 2. FCA VI-2 集合体の概要

VI-2集合体は前述の如く「もんじゅ」内側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235によるドライバーで囲んだゾーン系である。VI-2集合体の試験領域、ドライバー、制御安全棒の引出し装填図をそれぞれFig. 1, 2, および3に示す。炉心高さはVI-1集合体と同じで「もんじゅ」とほぼ等しい91.44 cmである。軸方向ブランケットは20.32 cm厚の劣化ウラン(DU)ブロックを用いている。試験領域のセル構造は組成を「もんじゅ」のそれに近づけることおよび非均質効果をできるだけ小さくすることを考えてFig. 1の如くPu(1/16")/DUO<sub>2</sub>(1/4")/Na(1/4")/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")=2/3/4/2枚と決定された。これはVI-1集合体の試験領域のPu(92% fissile)を3枚/パックから2枚/パックに減らし、代わりにAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")を1枚ふやしたものである。ドライバー領域は手持ちU-235量で臨界になるようにVI-1集合体のそれよりU-235の濃度をふやしている。すなわち、VI-1のドライバー<sup>1)</sup>のNU(1/16")2枚とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")1枚を20%濃縮ウランおきかえ、かつ非均質さができるだけ小さくなるよう配列したものである。制御安全棒の装填パターンはVI-1と全く同じである。Table 1にVI-2集合体の各領域の組成(原子数密度)を示す。

Fig. 4にVI-2集合体基準系の装荷図を示す。各1/2集合体当り引出し本数は試験領域89本、ドライバー124本、ブランケット320本、制御安全棒4本である。試験領域の体積は248ℓで、体系全体に対する反応度の持ち分(摂動分母への寄与分)は約40%である。

## 1. ま え が き

FCAでは高速原型炉「もんじゅ」の核設計法の検証と安全性の確認に資するための模擬実験が行なわれている。物理的な模擬実験としてVI-1およびVI-2炉心によって臨界性(プルトニウム富化度)、反応度係数、その他組成特性量に関する実験を行ない、ついで格子管集合体を現在の35行×35列から51行×51列に拡大した後、工学的な模擬実験を第VII炉心系で行なうという計画になっている。その最初のVI-1集合体<sup>1)</sup>は「もんじゅ」の外側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235燃料によるドライバーでとり囲んだゾーン型集合体であり昭和47年8月から48年2月まで6ヶ月間にわたって種々の実験が行なわれた。続くVI-2集合体は「もんじゅ」の内側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235によるドライバーでとり囲んだものであり48年3月に初臨界を達成して以来49年4月まで臨界性、反応率、反応度値、中性子スペクトル、ナトリウムボイド効果、ドップラー効果、非均質効果等に関する実験が行なわれた。本報告はVI-2集合体の概要と、非均質臨界量、プルトニウム高次同位元素効果、サンプル反応度値分布、核分裂比および核分裂率分布、パンチング効果、模擬ブランケット効果、ピン状燃料アッセンブリーによるピンプレートと比較等についての実験結果をまとめたものである。特性試験関係のデータは付録にまとめられている。

## 2. FCA VI-2 集合体の概要

VI-2集合体は前述の如く「もんじゅ」内側炉心の組成を模擬した試験領域をU-235によるドライバーで囲んだゾーン系である。VI-2集合体の試験領域、ドライバー、制御安全棒の引出し装填図をそれぞれFig. 1, 2, および3に示す。炉心高さはVI-1集合体と同じで「もんじゅ」とほぼ等しい91.44 cmである。軸方向ブランケットは20.32 cm厚の劣化ウラン(DU)ブロックを用いている。試験領域のセル構造は組成を「もんじゅ」のそれに近づけることおよび非均質効果をできるだけ小さくすることを考えてFig. 1の如くPu(1/16")/DUO<sub>2</sub>(1/4")/Na(1/4")/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")=2/3/4/2枚と決定された。これはVI-1集合体の試験領域のPu(92% fissile)を3枚/パックから2枚/パックに減らし、代わりにAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")を1枚ふやしたものである。ドライバー領域は手持ちU-235量で臨界になるようにVI-1集合体のそれよりU-235の濃度をふやしている。すなわち、VI-1のドライバー<sup>1)</sup>のNU(1/16")2枚とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1/16")1枚を20%濃縮ウランおきかえ、かつ非均質さができるだけ小さくなるよう配列したものである。制御安全棒の装填パターンはVI-1と全く同じである。Table 1にVI-2集合体の各領域の組成(原子数密度)を示す。

Fig. 4にVI-2集合体基準系の装荷図を示す。各1/2集合体当り引出し本数は試験領域89本、ドライバー124本、ブランケット320本、制御安全棒4本である。試験領域の体積は248ℓで、体系全体に対する反応度の持ち分(摂動分母への寄与分)は約40%である。



Table 2 に VI-2 集合体試験領域の基本モード中性子スペクトルを VI-1, 「もんじゅ」内側、外側炉心のそれらとともに示す。試験領域の中心ではほぼ基本モードスペクトルが確立していることが計算上確められている。

Table 1 Composition of Assembly VI-2

 $(10^{22}/\text{cm}^3)$ 

Material	Test region	Driver	Blanket	
			Radial**	Axial
Pu-239	0.10458			
Pu-240	0.00933			
Pu-241	0.00092*			
U -235	0.00152	0.28483	0.0289	0.0086
U -233	0.69057	0.68915	3.9885	4.0070
O	1.7286	1.3619		
Na	0.7656	0.7656		
Al	0.2403	0.9079		
Cr	0.3413	0.3134	0.1827	0.1827
Fe	1.2504	1.1504	0.6652	0.6652
Ni	0.1566	0.1402	0.0796	0.0796

\*) 1973.3

\*\*) Equal to core height

Table 2 Comparison of calculated fundamental mode spectra of MONJU inner and outer cores and their mock-ups, VI-1 and VI-2

Group No. g	$\Phi_g \cdot \Delta u_g$			
	VI-2	MONJU inner-core	VI-1	MONJU outer-core
1	0.203	0.200	0.259	0.243
2	0.989	0.987	1.261	1.199
3	2.572	2.608	3.213	3.139
4	5.116	5.323	6.316	6.344
5	7.310	8.180	9.411	9.484
6	10.354	10.955	12.460	12.240
7	15.663	15.917	17.515	16.862
8	15.003	15.118	15.346	15.202
9	14.773	14.335	13.776	13.537
10	12.047	11.471	9.949	10.110
11	6.694	6.202	4.948	5.183
12	3.561	3.165	2.421	2.551
13	2.041	1.828	1.291	1.425
14	2.009	2.036	1.126	1.467
15	1.017	1.034	0.476	0.666
16	0.444	0.443	0.172	0.252
17	0.154	0.151	0.0490	0.0760
18	0.0375	0.0360	0.0096	0.0158
19	0.0096	0.0088	0.0021	0.0035
20	0.0016	0.0014	0.0003	0.0005
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

\*) JAERI-Fast-0 25 group calculation

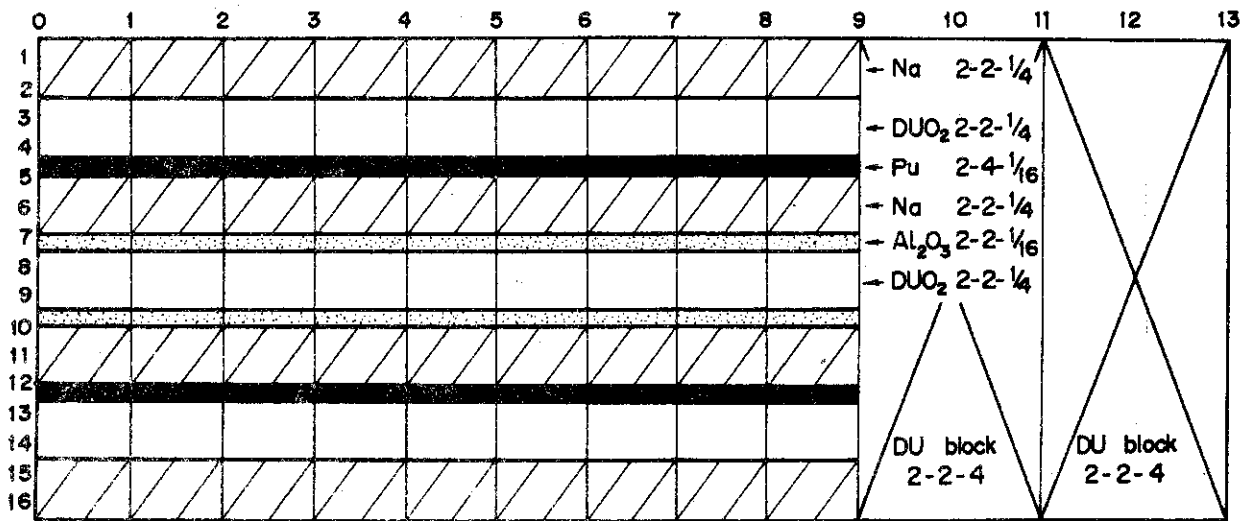


Fig. 1 Test region drawer pattern of Assembly VI - 2

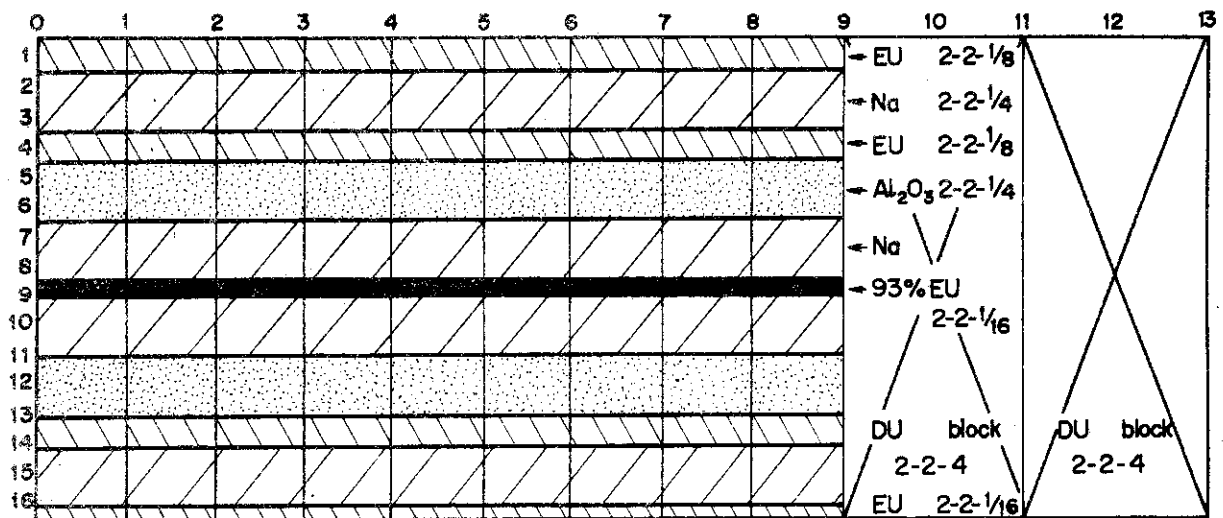


Fig. 2 Driver region drawer pattern of Assembly VI - 2

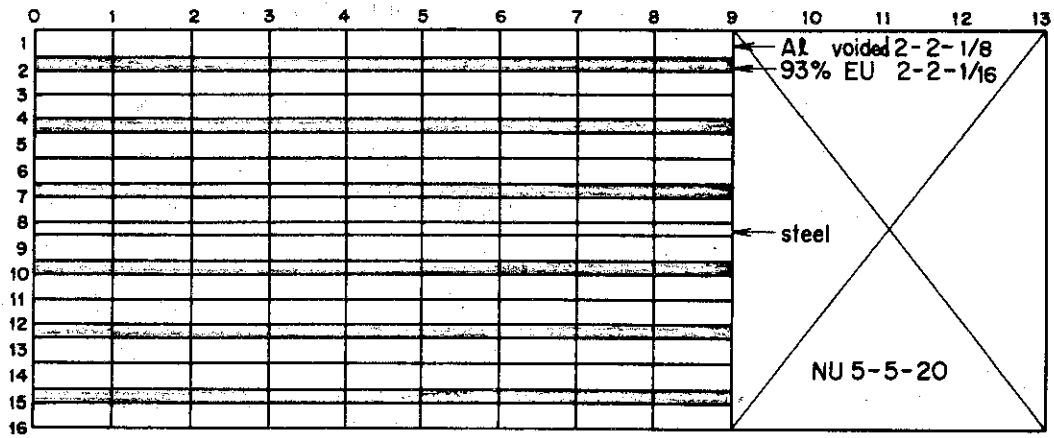


Fig.3 S/R, C/R cell pattern of VI-2

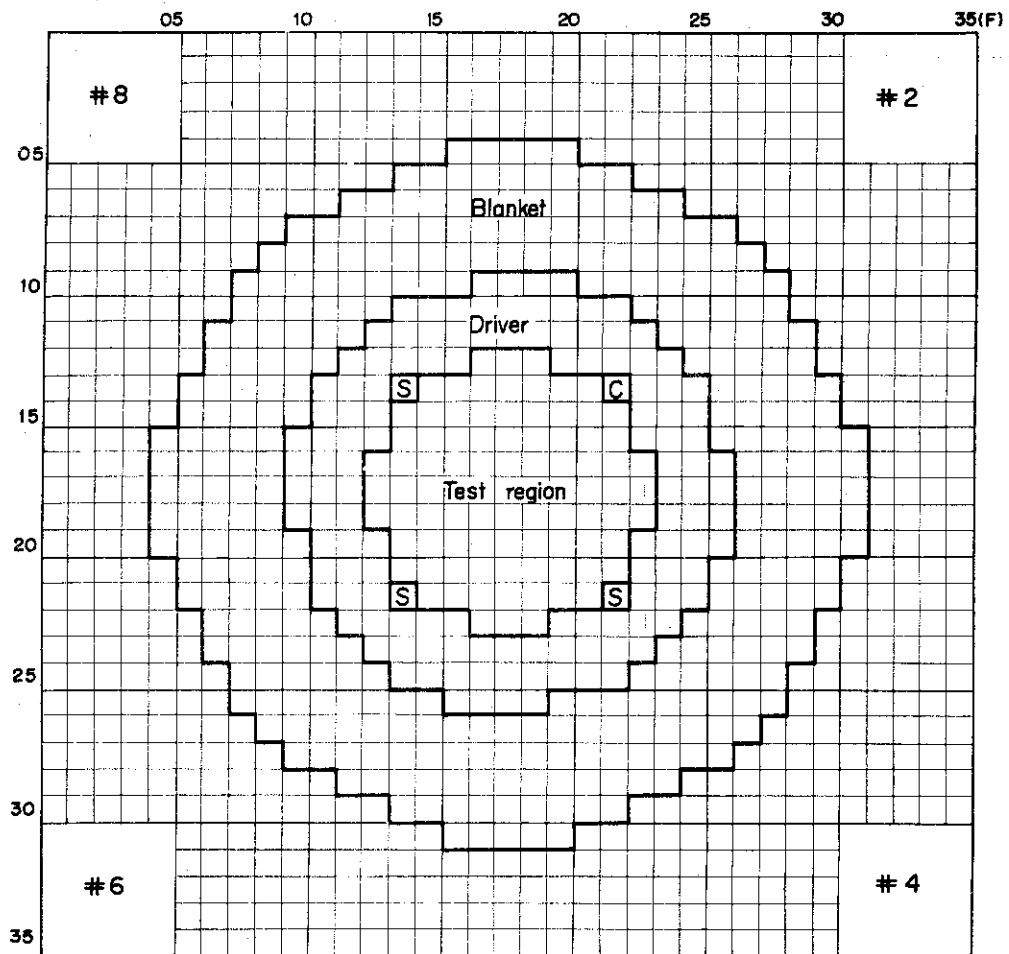


Fig. 4 Vertical cross section of Assembly VI-2 (FIX. SIDE)

### 3. VI - 2 集合体の非均質臨界量

Fig. 4 に示す装荷状態 (VI - 2 基準系) に対し種々の補正実験による補正を施して非均質円筒炉心の臨界量を求めた。補正の項目は (1) 制御安全棒 singularity, (2) 境界形状効果, (3) 密着面間隙効果, (4) 過剰反応度である。これら補正量を Table 3 に示す。同表で (5) は径方向の天然ウランブランケットを軸方向と同じ劣化ウランブロックに置換した場合の反応度変化である。これら補正実験の方法, データについては付録に記述されている。Table 3 で用いられている反応度の単位  $\rho_0$  は No. 9 安全棒の 0 - 50.0 mm ストロークに対応するもので, 次節に述べる如く燃料組成密度係数による反応度スケール校正の結果その値は  $\rho_0 = 0.0519 \% \Delta k / k$  である。しかし  $\rho_0$  の値は臨界量には影響を与えない (質量係数も  $\rho_0$  単位で測定されている故)。補正項のうちでは制御安全棒の singularity がもっとも大きく約  $1.5 \% \Delta k / k$  もある。

(1)~(4)の補正量を基準系装荷量に加えて非均質臨界量を決定した結果を Table 4 に示す。補正の反応度変化をドライバー周辺部の装荷量に変換する際にはドライバー領域周辺質量係数の実測値 ( $1.25 \rho_0 / \text{drawer}$ ) を用いた。

Table 3 Corrections to loaded mass

Item	Reactivity change	Number of driver drawers*
(1) C/R, S/R singularity	$32.8 \pm 0.1 \rho_0$	26.24
(2) Edge effect		
(i) Test region	$0.91 \pm 0.04 \rho_0$	0.73
(ii) Driver	$-3.59 \pm 0.16 \rho_0$	-2.87
(3) Gap effect	$-3.23 \pm 0.50 \rho_0$	-2.58
(4) Excess reactivity	$-7.31 \pm 0.01 \rho_0$	-5.85
(1)~(4) Sum	$19.58 \pm 0.55 \rho_0$	$15.66 \pm 0.44$
(5) Blanket NU to DU	$11.8 \pm 0.1 \rho_0$	9.44
(1)~(5) Sum	$31.4 \pm 0.6 \rho_0$	$2.51 \pm 0.5$

\*) Mass coefficient :  $(1.25 \pm 0.01) \rho_0 / \text{drawer}$   
 $\rho_0 = 0.0519\% \Delta k / k$

Table 4 Critical parameters of Assembly VI-2

	Experiment	Calculation* (Homo. 2D, R-Z)
R(test region)	29.38 (cm)	
R(driver)	$46.70 \pm 0.05$ (cm)	
R(blanket)	72.17 (cm)	
V(test region)	247.97 (l)	
V(whole core)	$626.5 \pm 1$ (l)	
Pu-fissile	103.98 (kg)	
U-235(driver)	$420.4 \pm 0.8$ (kg)	
k-effective	1.000	0.981(J-F-0) 0.998(J-F-II) 0.992(RCBN) 1.026(ABBN)

\*) See Appendix A.6

## 4. VI-2 集合体における実験

VI-2 集合体においては1年以上にわたって種々の実験が行なわれたが、ここではこれらのうち主として臨界性に関する実験結果について述べる。ここで触れる実験項目は、燃料組成密度係数による反応度スケールの較正とそれによる遅発中性子データの評価、プルトニウム高次同位元素効果、サンプル反応度値分布、核分裂比および核分裂率分布、燃料板バンチング効果、模擬ブランケット効果、ピン状燃料によるピンプレートとの比較などである。

### 4.1 燃料組成密度係数による反応度スケールの較正

反応度効果の実験値—計算値の比較の際にはいつも反応度スケールの精度が問題になる。通常はペリオドを測定し、逆時間方程式により反応度スケールが較正されているが、これには遅発中性子実効生成率の精度の悪さから数%の誤差が考えられる。FCAにおいては2, 3年前から燃料組成密度係数による反応度スケールの較正が行なわれておりその絶対精度は1~2%以内と考えられる<sup>2)</sup>。VI-2 集合体においても本法を適用してスケールの較正を行なった。

試験領域におけるプルトニウム(92% fissile)とドライバー領域における93%濃縮ウランの密度係数が測定され、値はそれぞれ  $386.5 \rho_0/2$ 枚/パック(4.2 Table 6) および  $215.4 \rho_0/1$ 枚/パックであった。ドライバー領域における燃料を93%濃縮ウランとU-238から成るものと考えるとドライバー領域の20%濃縮ウラン中のU-235の寄与分を合わせ、仮想的な全93%濃縮ウランの組成密度係数は  $543.0 \rho_0$  となる。したがって全炉心の組成密度係数(92% Pu + 93% EU)は  $(386.5 + 543.0) \rho_0 = 929.5 \rho_0 / \Delta N_f / N_f$  となり、これを計算値  $0.4822 \Delta k / k / \Delta N_f / N_f$  (J-F-Oセットによる2D, R-Z計算)に規格化することにより、

$$\rho_0 = 0.0519 \% \Delta k / k$$

が得られる。ここで  $\rho_0$  は実験における反応度の単位でNa 9安全棒の0-50.0 mmストロークに対応するものである。以上の結果をまとめてTable 5に示す。同表には種々の遅発中性子データを用いたペリオド法による結果も併記してあるが、従来よく用いられてきたKeepinのデータは7%ほどスケールを過少評価することが分る。この傾向はV炉心系における結果<sup>2)</sup>においても見られる。Krick & EvansのデータやTomlinsonの評価データはかなり良い結果を与えることが分る。VI-2 集合体においては反応度スケールとして密度係数法による上記  $\rho_0 = 0.0519 \% \Delta k / k$  を統一して用いている。

### 4.2 プルトニウム高次同位元素効果

Pu-240, Pu-241の臨界性に及ぼす効果を研究するため同位元素組成の異なるプルトニウム燃料による置換実験を行なった。VI-2 集合体の試験領域のプルトニウム燃料は92% fissileのものであるが、これを81%および75% fissileのdirtyプルトニウム燃料に置換した場合の

反応度変化, および 92 % Pu 自身の反応度係数が測定された。置換領域の大きさは試験領域全体および F 側中央 3 行 × 3 列 × 2 パック (2.79  $\ell$ ) の 2 種類で, 試験領域全体の置換反応度は F 側 1 本のサンプル引出しによる試験領域径方向反応度トラバースの結果を体積積分して求めた。結果を Table 6 に示す。これら置換反応度の測定値から 3 元 1 次連立方程式を解いて各同位元素別の密度係数の値が求められた (Table 7)。Table 8 は分離の際用いられたプルトニウム燃料の組成マトリックスである。3 × 3 × 2 パックによる測定はほぼ基本モード・スペクトルでの値になるので断面積評価のためにはより適当であると考えられる。

Table 5 Reactivity Calculation by Fuel Density Coefficient

	Fuel Density Coefficient ( $\Delta k/k/\Delta N_f/N_f$ )			
	Test Region	Driver	Test region+Driver	
Experiment	386.5 $\cdot\rho_0$	543.0 $\cdot\rho_0$	929.5 $\cdot\rho_0$	
Calculation (J-F-0, 2D R-Z)	0.2046	0.2776	0.4822	
	D.C.M.	Keepin	Krick & Evans	Tomlinson
$\rho_0$ (% $\Delta k/k$ )	0.0519	0.0483	0.0532	0.0506
$\rho_0$ (period)	1.000	0.930	1.024	0.975
$\rho_0$ (D.C.M.)				

$\rho_0$  : 0-50mm stroke of #9 safety rod

Table 6 Reactivity change by Pu fuel substitution in VI-2 test region

	Reactivity change (% $\Delta k/k$ )	
	Whole test region	3 $\times$ 3 $\times$ 2 packs (F)
92%Pu $\rightarrow$ 81%Pu	0.57 $\pm$ 0.01	0.0107 $\pm$ 0.0001 <sub>5</sub>
92%Pu $\rightarrow$ 75%Pu	1.11 $\pm$ 0.01	0.0215 $\pm$ 0.0001 <sub>5</sub>
92%Pu(2plates/pack)	20.06 $\pm$ 0.02	0.422 $\pm$ 0.003



Table 7 Plutonium density coefficients in VI-2 test region ( $\Delta k/k/10^{24} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

Isotope	Whole test region	3×3×2 packs (F)
Pu-239	187.6 ± 1	3.96 ± 0.03
Pu-240	20 ± 2	0.33 ± 0.02
Pu-241	283 ± 10	6.2 <sub>3</sub> ± 0.1

Table 8 Composition matrix of Pu fuel plates (U.K. 2"-2"-1/16" 2 plates/pack)

(10<sup>22</sup>/cm<sup>3</sup>)

Type	Pu-239	Pu-240	Pu-241
92% fissile Pu	0.104754	0.009186	0.000774* (0.000746)**
81% fissile Pu	0.102260	0.024300	0.003372* (0.003252)**
75% fissile Pu	0.095337	0.033752	0.009201* (0.008872)**

\*) For whole test region (1973.6)

\*\*) For 3×3×2 packs (F) (1973.12)

4.3 サンプル反応度値空間分布 (EUO<sub>2</sub>, <sup>10</sup>B<sub>4</sub>C, および Mo)

VI-2 集合体の F 側第 1 パックに設けられた 20 mm φ の径方向実験孔中において 90% 濃縮ウラン酸化物, 90% 濃縮 B<sub>4</sub>C, モリブデン各サンプルの反応度値空間分布の測定を行なった。EUO<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C サンプルは A<sub>1</sub> 製, Mo サンプルはステンレス鋼製のカプセルに入れカウンター駆動機構により移動して径方向空間分布を測定した。反応度変化は No 1 制御棒の臨界位置の変化より求めた。サンプルチェンジャーを用いてサンプル入りカプセルと空カプセルの測定を行ない両者の差をサンプルの反応度値とした。結果を Table 9 および Fig. 5 に示す。

Table 9 Reactivity worth distributions of EUO<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C, and Mo samples in Assembly VI-2

Position	r(cm)	90% EUO <sub>2</sub> (15.456g)	90% B <sub>4</sub> C (0.979g)	Mo (32.930g)
F18-18	0.00	1.000*	1.000**	1.000***
-19	5.52	0.972 ± 0.01	0.978 ± 0.01	0.967 ± 0.03
-20	11.04	0.931	0.929	0.953
-21	16.56	0.844	0.882	0.812
-22	22.08	0.703	0.743	0.735
-23	27.60	0.603	0.650	0.547
-24	33.12	0.492	0.487	0.401
-25	38.64	0.335	0.344	0.090
-26	44.16	0.247	0.169	0.057
-27	49.68	0.152	0.052	0.037
-28	55.20	0.054	0.024	

\*)  $(3.10 \pm 0.03) \times 10^{-3} \% \Delta k/k$  at core centre

\*\*\*)  $-(3.72 \pm 0.03) \times 10^{-3}$

\*\*\*\*)  $-(1.10 \pm 0.02) \times 10^{-3}$

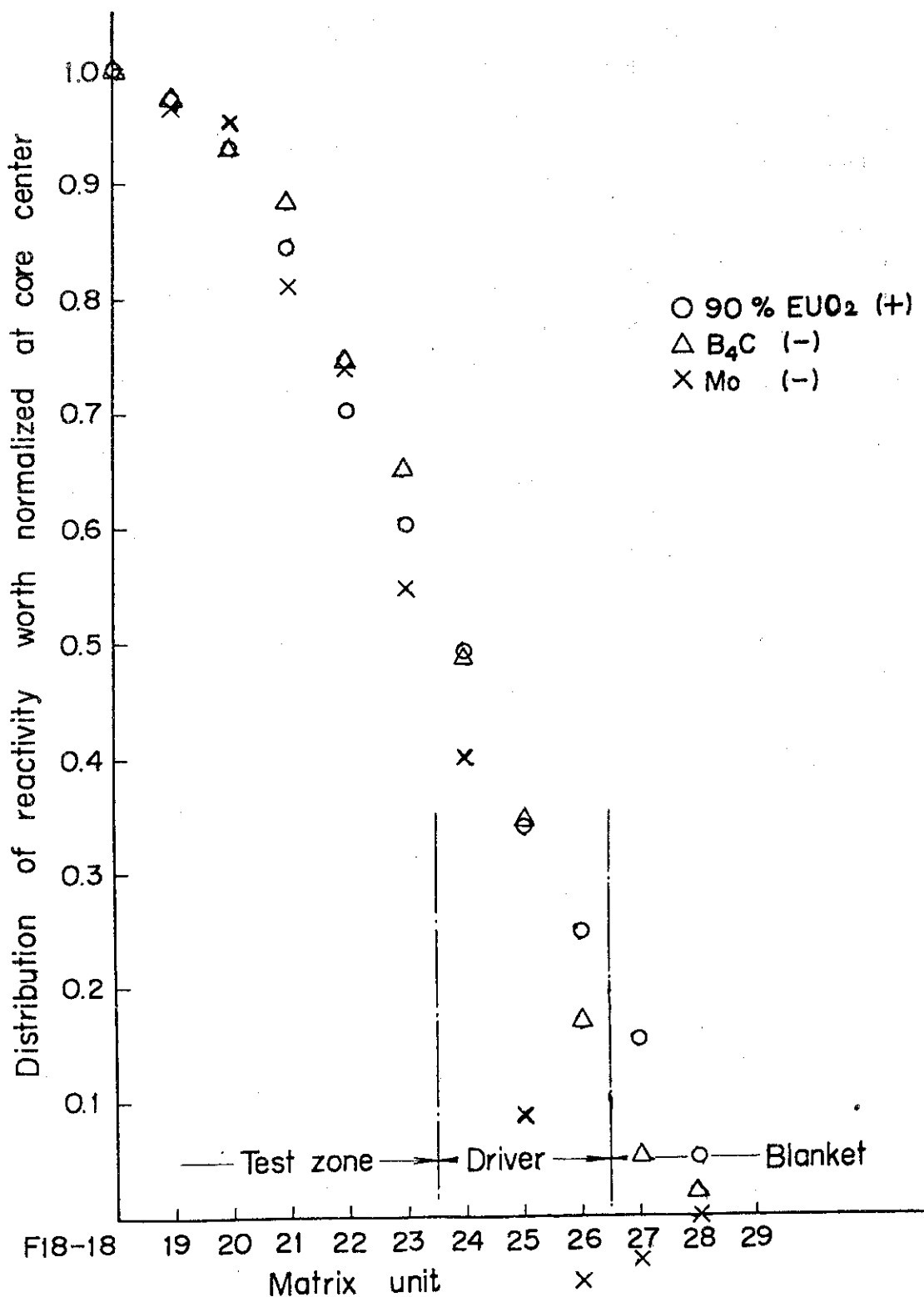


Fig.5 Radial distributions of UO<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C and Mo reactivity worths in Assy. VI-2

Table 10 Absolute Fission Rate Ratio (VI-2)

Position	$R^{49}/R^{25}$	$R^{28}/R^{25}$
18-18	$0.956 \pm 3\%$	$0.0219 \pm 3\%$
18-29	$1.046 \pm 3\%$	$0.0058 \pm 3\%$

Table 11 Radial Fission Distributions (VI-2)

Position	$U^5$ mfc		$U^8$ mfc		Pu mfc	
18-18	1.000	$\pm 0.3\%$	1.000	$\pm 0.3\%$	1.000	$\pm 0.3\%$
-19	0.983	$\pm 0.5\%$	1.007	$\pm 0.5\%$	0.993	$\pm 0.5\%$
-20			0.991	"	0.976	"
-21	0.920	"	0.984	"	0.936	"
-22			0.976	"	0.878	"
-23	0.765	"	0.957	"	0.797	"
-24	0.658	"	0.946	"	0.698	"
-25	0.527	"	0.801	"	0.591	"
-26	0.411	"	0.561	"	0.458	"
-26.5			0.398	"	0.383	"
-27	0.268	"	0.228	$\pm 1\%(0.234)$	0.294	"
-27.5			0.135	"(0.141)		
-28	0.164	"	0.0825	$\pm 2\%(0.0888)$	0.177	"
-28.5			0.0526	"(0.0575)		
-29	0.0939	1%	0.0334	"(0.0383)	0.105	"
-29.5	0.0725	"	0.0226	"(0.0251)		
-30	0.0542	"	0.0147	"(0.0171)	0.0577	$\pm 1\%$
-30.5	0.0397	"	0.00965	"(0.0114)		
-31	0.0291	"	0.00625	"(0.0077)	0.0316	"
-31.5	0.0226	"	0.00386	"		

#### 4.4 核分裂比

原子数の絶対校正が行なわれている核分裂計数管を用いて核分裂比の測定を行なった。結果を Table 10 に示す。測定は 20 mm  $\phi$  の実験孔中に核分裂計数管を置いて行なわれた。炉心の中心 18-18 および天然ウラン(金属)ブランケット中において測定した。使用した核分裂計数管は参考文献(3)の Table 2.4 のものと同一である。U<sup>5</sup>, U<sup>8</sup> については 93%濃縮および天然の二種の検出器で測定し、連立方程式をたてて解いたものである。Pu<sup>239</sup> については 94% Pu<sup>239</sup> の検出器である。

JAERI-FAST-II (70群)を用いた中心での計算結果は、 $R^{49}/R^{25} = 0.950$ ,  $R^{28}/R^{25} = 0.0232$  となっている。U<sup>238</sup> の核分裂率の測定において、20 mm  $\phi$  の実験孔中での測定ということが影響をおよぼしていると考えられる。

#### 4.5 核分裂率分布

核分裂計数管および箔を用いて、径方向および軸方向の核分裂率分布をそれぞれ測定した。結果を Table 11 および Table 12 にそれぞれ示す。径方向分布は 20 mm  $\phi$  の実験孔中を検出器の traverse によって測定したものである。検出器の仕様は参考文献(4)の Table 4 のものと同一である。U<sup>5</sup> mfc は 93%濃縮、U<sup>8</sup> mfc は 99.96% U<sup>238</sup>, Pu mfc は 99% Pu<sup>239</sup> となっており、effective length は 20 ~ 25 mm のものである。軸方向分布の測定に使用した箔は 90%濃縮および 380 ppm 劣化の金属ウラン箔である。照射はセルの中心面に垂直に 12.5  $\phi$  の円形箔を設置して行ない、Ge(Li) 検出器を用いて  $r$  線の測定を行なった。

径方向分布の測定に関しては、実験孔内のストリーミング効果が考えられ、これは U<sup>8</sup> mfc について特に無視し得ない量であることが分っている<sup>4)</sup>。ストリーミング効果の補正実験は次のように行なった。まず、18-18 からブランケット最外部迄実験孔を設けて分布を測定し、次に 18-27 迄の実験孔を埋めて 18-28 以降の分布を測定し、更に 18-28 迄の実験孔を埋めて 18-29 以降の分布を測定した。この測定の結果、20 mm  $\phi$  の実験孔を 50.8 mm にわたって天然ウラン金属で埋めることによって、それ以降の分布は U<sup>8</sup> mfc に対して、一様に  $0.953 \pm 0.003$  低下することが分った。U<sup>5</sup> mfc に対しては殆ど変化が見られなかった。U<sup>8</sup> mfc の分布は炉心方向の状態に対する依存性が極めて強く<sup>4)</sup>、その反対方向の状態については第一近似的に無視することが出来る。したがって、前述の  $0.953 \pm 0.003$  の積み重ねより、ブランケット内各点のストリーミング効果が算出出来る。表に示された U<sup>8</sup> mfc の分布はこのストリーミング効果の補正を行なったあとのものである。この補正された分布型は箔を用いた測定の結果と実験誤差内で一致している。

実験孔の存在は上記のストリーミング効果の他に、そこに物質が存在しないということによる cavity 効果が考えられるが、後者に関する補正は行なわれていない。

Table 12 Axial Fission Distributions (VI-2)

No.	Position cm	U <sup>5</sup> Foil		U <sup>8</sup> Foil	
1	0.00	1.000	±0.8%	1.000	±1.5%
2	5.08	0.996	"		
3	10.16	0.967	"	0.959	"
4	15.24	0.929	"	0.945	"
5	20.32	0.873	"	0.893	"
6	25.40	0.800	"	0.803	"
7	30.48	0.720	"		
8	35.56	0.616	"	0.619	"
9	40.64	0.508	"	0.454	"
10	45.72	0.372	±1%	0.269	"
11	50.80	0.224	"	0.0880	±3%
12	55.88	0.128	"	0.0336	"
13	60.96	0.0692	"	0.0138	±5%
14	66.04	0.0320	"	0.00869	±8%

#### 4.6 バンチング効果

臨界性に対する非均質効果を評価するための燃料板のバンチング実験を行なった。試験領域については6種類、ドライバー領域については2種類のセルパターンのバンチングを行ない反応度変化を測定した。バンチングパターンをFig. 6に示す。いずれのパターンも基準パターン(A)と較べて燃料の重心の移動はない。実際にバンチングした領域はFig. 7に示す如くF側1/2集合体の第1象限で、試験領域は22本、ドライバー領域は31本である。バンチングの結果得られた反応度変化を本数について直線外挿し各領域全体のバンチング効果とした。結果をTable 13に示す。これらの実験結果から基準パターンの非均質効果を実験的に外挿することは現在のところかなり困難であるが、その外挿手法の確立のための種々の試みが進行中である。

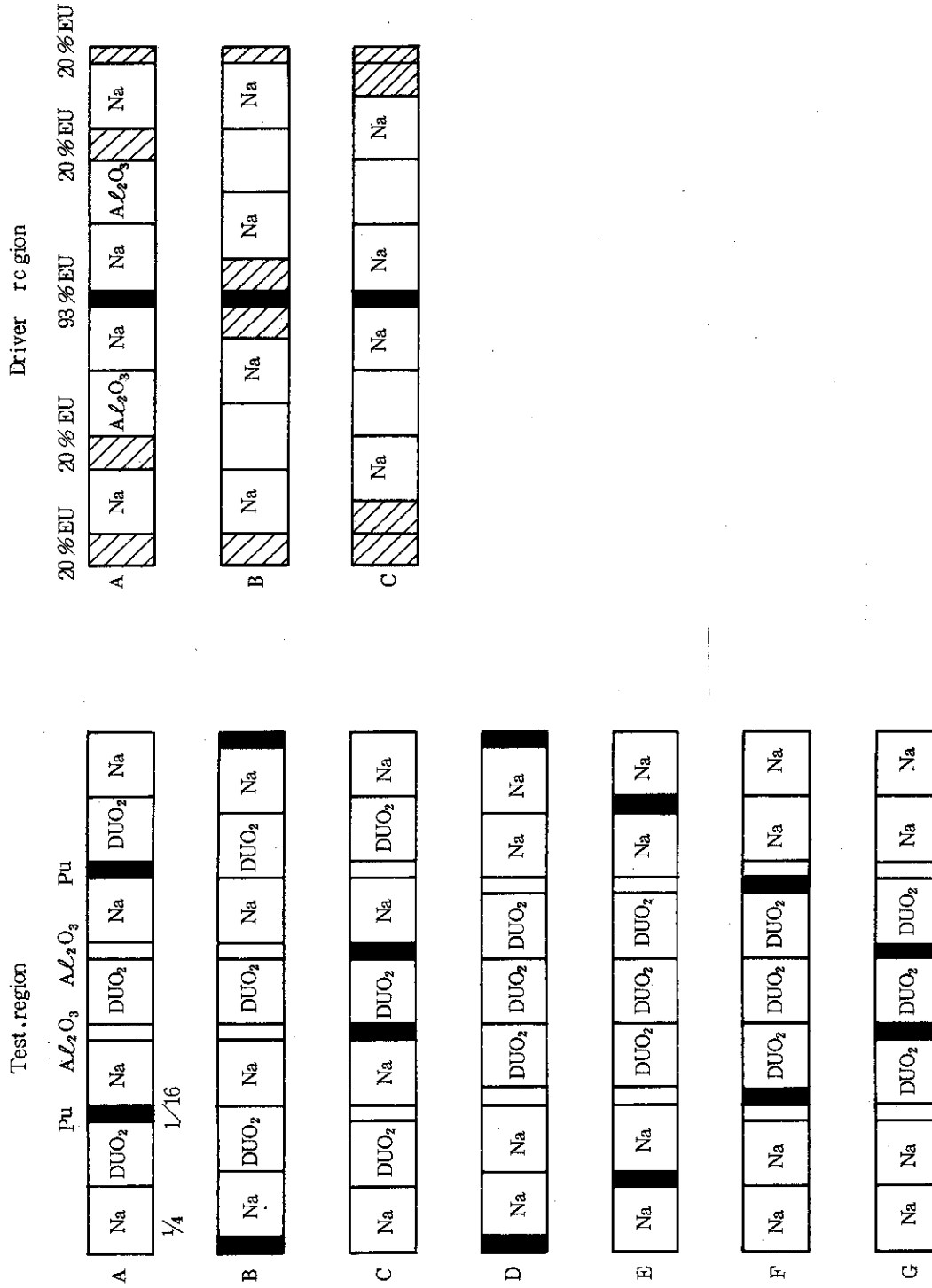


Fig. 6 Bunching Patterns

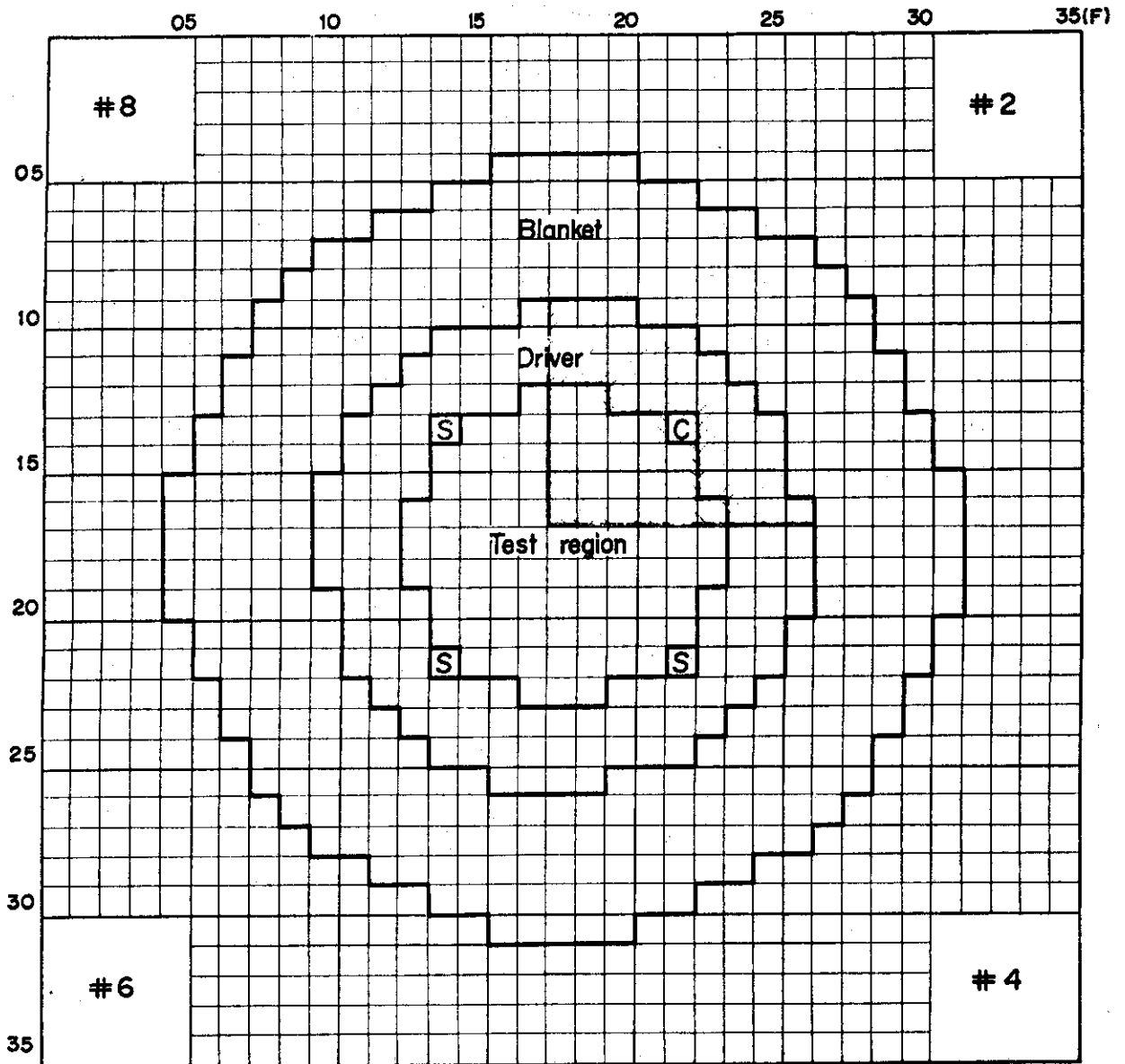
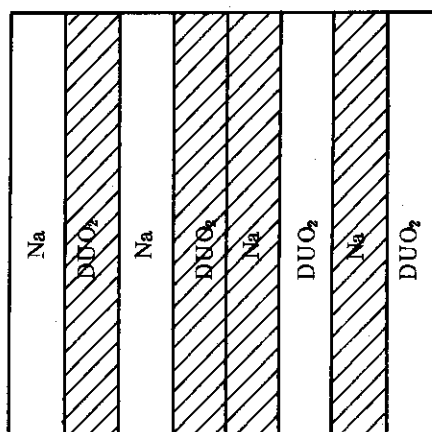


Fig.7 Bunching regions in fuel plate bunching experiment (fixed half)



Table 13 Results of bunching experiment

Region	Pattern	Reactivity change ( $\% \Delta k/k$ )
Test region	B	$-0.0105 \pm 0.01$
	C	$0.116 \pm 0.01$
	D	$0.019 \pm 0.01$
	E	$-0.025 \pm 0.01$
	F	$0.203 \pm 0.01$
	G	$0.314 \pm 0.01$
Driver	B	$0.277 \pm 0.01$
	C	$0.116 \pm 0.01$

Fig. 8 Cell Pattern of  $\text{DUO}_2/\text{Na}$  blanket

#### 4.7 模擬ブランケット効果 (VI-2-B集合体)

試験領域の軸方向ブランケット (F, M計 178本) を 8'' (20.32 cm) 厚の劣化ウランブロックから劣化ウラン酸化物とナトリウムよりなる模擬ブランケット ( $\text{DUO}_2/\text{Na} = 4/4$ , 7パック, 14'' (35.56 cm) 厚) に変更し, 臨界性, 反応率分布, ナトリウムボイド効果等に関する実験が行なわれた。この系を VI-2-B 集合体と称する。ここでは臨界性および核分裂率分布に関する実験結果について述べる。

炉心部 9パック, 軸方向ブランケット 7パックは一本の引出しに入り切らないので, 後部 3パックは別の引出しに装填し連結して格子管に挿入した。模擬ブランケットのセルパターンを Fig. 8 に, 組成を Table 14 に示す。試験領域軸ブランケットを劣化ウランブロックから模擬ブランケットに置換した際の反応度変化は,

$$(+ 0.120 \pm 0.005) \% \Delta k / k$$

であった。前後の引出しのパック間には板バネその他による約7 mm のギャップがあるが、このギャップを3 mm ほど大きくする実験を行なった結果実験誤差の範囲 ( $\pm 0.005 \% \Delta k / k$ ) 内でギャップ効果は検出されなかった。

90 %濃縮ウラン箔および 380 ppm劣化ウラン箔による試験領域中心軸上の核分裂率分布の測定結果をTable 15 に示す。

Table 14 Composition of DUO<sub>2</sub>/Na blanket

Material	Atom density ( $10^{22}/\text{cm}^3$ )
U-235	0.00187
U-238	0.9228
O	1.8596
Na	0.7656
Cr	0.3134
Fe	1.1504
Ni	0.1420

Table 15 Axial Fission Distributions (VI-2-B)

No.	Position cm	U <sup>5</sup> Foil	U <sup>8</sup> Foil
1	0.0	1.000 ± 0.8%	1.000 ± 1.5%
2	5.08	0.980 "	0.992 "
3	10.16	0.963 "	
4	15.24	0.929 "	0.946 "
5	20.32	0.873 "	0.904 "
6	25.40	0.801 "	0.848 "
7	30.48	0.733 "	0.770 "
8	35.56	0.642 "	0.643 "
9	40.64	0.557 "	0.503 "
10	45.72	0.477 ± 1%	0.307 "
11	50.80	0.406 "	0.147 "
12	55.88	0.328 "	0.0819 ± 3%
13	60.96	0.258 "	0.0514 "
14	66.04	0.200 "	0.0309 "
15	66.78	0.193 ± 2%	0.0279 ± 5%
16	71.86	0.136 "	0.0178 "
17	76.94	0.0947 "	0.0105 "
18	82.02	0.0585 "	0.00515 ± 8%

## 4.8 ピン状燃料アッセンブリーによる実験

臨界実験装置による実験は通常板燃料を用いて行なわれているが、実際の動力炉の如くピン状燃料を用いた場合との臨界性、ナトリウムボイド効果等に対する非均質効果の差異を研究するためピン状燃料を使用した実験を行なった。ピン燃料は 9.0 mm  $\phi$  の  $\text{PuO}_2/\text{DUO}_2$  ペレットを 0.3 mm 厚のステンレス鋼で被覆したもので長さ約 152 mm である。これを 4  $\times$  4 四角格子状に孔をあけた外辺 2" 角、長さ 6" のステンレス鋼製カランドリアに 16 本挿入しエンドプレートをネジ止めして1個のアッセンブリーを組立てる。1個のアッセンブリーは板状セル3パックに対応しており、FCA の引出しに装填し格子管に挿入する。軸方向ブランケットは長さ 14" のステンレス鋼被覆の  $\text{DUO}_2$  ピンおよびカランドリアからなりピンの径、ピッチその他長さ以外の寸法は炉心部と同じである。Table 16 にピン状燃料アッセンブリー（格子管、引出しを含む）の均質化原子数密度を示す。ピンのプルトニウム組成は 75% fissile の Drity プルトニウムである。同表には置換実験の際基準となる板状セルの組成も示してあるが、置換領域のプルトニウム燃料はすべてあらかじめ U. K 製 2"-2"-1/16" 型のものにそろえられた。

カランドリアにはナトリウムを封入したものと封入していないものがあり後者はナトリウムボイド効果の実験に用いられた。ここでは臨界性、非均質効果、核分裂率分布に関する結果について

Table 16 Composition of pin-fuel assembly

 $(10^{22}/\text{cm}^3)$ 

Material	**	**	Pin-assembly	
	92%Pu cell	75%Pu cell	Core	Axial blanket
Pu-239	0.104754	0.095337	0.09542	-
Pu-240	0.009186	0.033752	0.03585	-
Pu-241*	0.000746	0.008872	0.00979	-
U-235	0.00152	←	0.00125	0.001567
U-238	0.69057	←	0.61774	0.77225
O	1.7286	←	1.5206	1.5476
Na	0.7656	←	0.7274	0.7511
Al	0.2403	←	-	-
Cr	0.3413	←	0.4477	0.4349
Fe	1.2504	←	1.6053	1.5601
Ni	0.1566	←	0.2098	0.2035

\*) 1973.12

\*\*) UK 2"-2"-1/16" plate Pu

て述べる。実験はすべて試験領域の軸方向ブランケットが模擬ブランケットに変わったVI-2-B集合体で行なわれた。(4.7参照)。

#### 4.8.1 置換反応度測定結果

(1) F側1/2集合体中心3行×3列9本の引出しをピンアッセンブリーに置換  
置換は次の如き3段階で行ない各段階の反応度変化を測定した。

(i) 板状セルのままプルトニウム燃料を92%Puから75%Puに置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.0670 \pm 0.0005 \% \Delta k/k$$

(ii) 炉心部のみ75%Pu板状セルからピンアッセンブリーに置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.0176 \pm 0.0003 \% \Delta k/k$$

(iii) ブランケット部を板状セルからピンアッセンブリーに置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.0036 \pm 0.0001 \% \Delta k/k$$

(2) 全試験領域置換効果

ピンアッセンブリー引出し(炉心部18",ブランケット部14")1本によるF側試験領域径方向反応度トラバースの結果を体積積分して試験領域全体がVI-2-B板状セル(92%Pu)からピン体系に変わった場合の置換反応度を求めた。

$$\text{反応度変化} \quad 1.32 \pm 0.01 \% \Delta k/k$$

(3) 中心広領域置換効果

試験領域の中心5行×5列×6パック(F,M側各3パック)を炉心ピンアッセンブリー50個に置換した。

(i) 5×5×6=150パックの92%Puを75%Pu板に置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.105 \pm 0.002 \% \Delta k/k$$

(ii) 150パックの75%Pu板状セルをピンアッセンブリーに置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.047 \pm 0.001 \% \Delta k/k$$

(4) 中心領域3行×3列×3パック(F側のみ)置換効果

3×3×3=27パックを75%Pu板状セルからピンアッセンブリー9個に置換：

$$\text{反応度変化} \quad 0.0090 \pm 0.0001 \% \Delta k/k$$

以上の置換反応度測定結果をTable 17にまとめて示す。

#### 4.8.2 板状セルとピン状セルの非均質効果の差

非均質効果をセル中での中性子束の微細構造にもとづくいわゆるセル非均質効果と、ストリーミング効果の如く中性子の拡散に影響を与えるいわば空間依存の非均質効果の2種類に分けることができる。試験領域の軸方向に貫通してピンアッセンブリーと置換した場合には両方の効果が混在し、実用的な意味でオーバーオール効果をみるのにはこれも良いが、非均質効果の解析のためには分離した形で実験値が得られることが望ましい。中性子束分布が平坦な中心領域ではストリーミング効果は無視出来るのでセル非均質効果のみが現われると考えてよい。

実験精度その他を考慮して4.8.1の(4)中心3×3×3=27パックでの置換実験の結果がセル非均質効果の解析のためには最も適当であると考えられる。しかしTable 16から分るように75

Table 17 Summary of Substitution Experiments with Pin-Assembly

Region	Pattern	Reactivity Change (% $\Delta k/k$ )
3x3 Central Channels (F)	1. Plate(92% $\rightarrow$ 75%)	0.0670 $\pm$ 0.0005
	2. Plate(75%) $\rightarrow$ Pin	0.0176 $\pm$ 0.0003
	3. Blanket(Plate $\rightarrow$ Pin)	0.0036 $\pm$ 0.0001
Whole Test Region	Plate(VI-2-B) $\longrightarrow$ Pin(C&B)	1.32 $\pm$ 0.01
Central Region 5x5x6 packs	1. Plate(92% $\rightarrow$ 75%)	0.105 $\pm$ 0.002
	2. Plate(75%) $\rightarrow$ Pin	0.047 $\pm$ 0.001
Central Region 3x3x3 (F)	Plate(75%) $\rightarrow$ Pin	0.0090 $\pm$ 0.0001

Table 18 Heterogeneity Effect (Pin - Plate)\*

Material	Composition $N_m$ ( $10^{22}/\text{cm}^3$ )		$C_m$ Density Coefficient ( $\Delta k/k/10^{24}\text{cm}^{-3}$ )	$\Delta\rho$ ( $C_m \cdot \Delta N_m$ ) ( $10^{-5}\Delta k/k$ )
	Plate(75%)	Pin		
Pu-239	0.09534	0.09542	5.94 $\pm$ 0.05	0.49
Pu-240	0.03375	0.03585	0.50 $\pm$ 0.03	1.04
Pu-241	0.00887	0.00979	9.35 $\pm$ 0.2	8.58
U-235	0.00152	0.00125	4.40 $\pm$ 0.02	-1.17
U-238	0.69057	0.61774	-0.283 $\pm$ 0.005	-20.60
O	1.7286	1.5206	-0.0220 $\pm$ 0.0004	4.58
Na	0.7656	0.7274	-0.0230 $\pm$ 0.0005	0.88
Al	0.2403	0.	-0.0267 $\pm$ 0.0003	6.41
SUS	1.7483	2.2628	-0.0396 $\pm$ 0.0003	20.37
Total				21. $\pm$ 1.
Experimental:				
Plate(75%) $\rightarrow$ Pin				9.0 $\pm$ 0.1
Heterogeneity Effect (Plate $\rightarrow$ Pin)				-12.0 $\pm$ 1.
Calculation:				
Homogeneous $\rightarrow$ Pin (J-F-II/SIMPLE-D)				3.93
Homogeneous $\rightarrow$ Plate				4.87
Plate $\rightarrow$ Pin				

\*) central region 3x3x3 packs

％Pu 板状セルとピンアッセンブリーはその均質化組成が完全には同じではなく、その組成の違いの影響を補正してやらないと非均質効果を取り出すことができない。核計算にもとづいて組成の違いを補正しようとするるとそれに伴う誤差が大きくなって非均質効果の実験値を有意な精度で求められなくなるということが判明したので、組成効果は実験的に補正することにし、そのために各物質 (Pu-239, -240, -241, U-235, -238, O, Al, Na, SUS) の中心 3×3×3 パックにおける密度係数を測定した。これらの密度係数を用いると板状セル ピン状セルの組成効果は  $(21 \pm 1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k$  となる。前記(4)の置換反応度  $(9.0 \pm 0.1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k$  に対しこの組成効果を補正すると板状セルとピン状セルの非均質効果の差は板状セルを基準にして

$$-(12.0 \pm 1) \times 10^{-3} \% \Delta k/k$$

となる。この値から外挿すれば試験領域全体としては  $0.5 \% \Delta k/k$  程度の値になる。上記の結果は Table 18 にまとめて示されている。同表の計算値は MC<sup>2</sup> 等と同じく等価定理により共鳴遮蔽の非均質効果を扱ったものである。source の非均質効果を考慮すれば、とくに板状セルの方の非均質効果の計算値はまだかなり大きくなると考えられる。

4.8.3 ピン状燃料アッセンブリー軸方向核分裂率分布

VI-2-B 集合体の試験領域の中心 3 行 × 3 列 × 全軸長をピン状燃料アッセンブリーに置換した系を VI-2-P 集合体と称する。この体系の中心軸上において 90 濃縮ウラン箔および 380 ppm 劣化ウラン箔により核分裂率分布の測定を行なった。結果を Table 19 に示す。

Table 19 Axial Fission Distributions (VI-2-P)

No.	Position cm	U <sup>5</sup> Foil	U <sup>8</sup> Foil
1	0.0	1.000 ± 0.8%	1.000 ± 1.5%
2	5.08	0.999 "	
3	10.16		
4	15.24	0.931 "	
5	20.32		
6	25.40	0.816	0.833 "
7	30.48	0.737 "	
8	35.56	0.652 "	0.632 "
9	40.64	0.561 "	0.480 "
10	45.72	0.493 "	0.312 "
11	50.80	0.433 "	0.168 ± 3%
12	55.88	0.352 ± 1%	0.0953 "
13	60.96	0.277 "	0.0589 "
14	66.04	0.212 "	0.0324 "
15	71.12	0.161 ± 2%	0.0201 ± 5%
16	76.20	0.106 "	0.0109 "
17	81.28	0.0688 "	0.0075 ± 8%

参考文献

- (1) 弘田実弥, 他: "FCA VI-1 集合体の臨界実験," 私信 (1973)
- (2) 飯島 勉, 他: "FCA V 炉心系における密度係数," JAERI -M 5890 (1974)
- (3) Konishi, T., et al: 私信 (1971)
- (4) 溝尾宣辰, 他: "FCA V-3, V-3-B および V-2-R 集合体の核分裂率分布,"  
私信 (1973)

## 付録 特性試験データおよび核計算

## 目 次

A.1	制御棒校正データ .....	26
A.2	周辺質量係数 .....	32
A.3	系の未臨界度と出力校正 .....	34
A.4	温度係数 .....	35
A.5	臨界量補正実験データ .....	37
A.5.1	過剰反応度 .....	37
A.5.2	密着面間隙効果 .....	37
A.5.3	制御安全棒装填状態の効果 (singularity) .....	38
A.5.4	炉心境界形状効果 .....	38
A.5.5	径方向ブランケット置換効果 .....	43
A.5.6	臨界量補正項目のまとめ .....	44
A.6	VI-2 集合体臨界性の核計算 .....	47



## A.1 制御棒校正データ

Measured doubling time for  $\rho_0: \rho_0=0 \sim 50.0\text{mm}$  (No.9 S/R)

Power range [A]	Doubling time* [sec] (#6CH)
$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-7}$	57.2
$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-7}$	61.4
$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-7}$	64.1
$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-6}$	69.0
$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-6}$	70.6
$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-6}$	70.4
$(0.2 \rightarrow 0.4) \times 10^{-5}$	70.3
$(0.3 \rightarrow 0.6) \times 10^{-5}$	71.6
$(0.4 \rightarrow 0.8) \times 10^{-5}$	71.7

上記データの中で  $0.3 \times 10^{-6}$  [A] から  $0.4 \times 10^{-5}$  [A] までの3個のデータの平均値

$$T_D = 70.4 \text{ [sec]}$$

を採用した

Period T は,

$$T = T_D / \ln 2 = \frac{70.4}{0.693} = 101.6 \text{ [sec]}$$

\*  $0.5 \times 10^{-6}$  A で臨界点確認

逆時間方程式により算出した標準反応度  $\rho_0$  は次のようになる。

$$\rho_0 = 0.0483 \% \Delta k / k$$

標準反応度  $\rho_0$  は1次元拡散コードARGOにより断面積セットJ-F-0, J-F-II.

ABBN, RCBNの四種のセットを用いて円筒型炉心モデルとして計算した  $\beta_{i,m,eff}$  を用いて逆時間方程式により求めた。

$\beta_{i,m,eff}$  の計算に用いた  $\beta_{i,m}$  のデータはJ-F-0, J-F-IIについて従来使用されている Keepin Sandmeier のデータの他に, Krick & Evans, Tomlinson のデータを用いた。Keepin の  $\beta_{i,m}$  の値および Keepin の値に対する Krick & Evans, Tomlinson の比を Table -A.1, A.2 および A.3 に示した。

また, 逆時間方程式の計算の際使用した  $\lambda_i$  の値は Keepin の値で, Pu-241 については Sandmeier の値を用いた。 $\lambda_i$  の値は Table -A.4 に示す。ARGOにより求めた  $\beta_{eff}$  の値のうち,  $\beta_{i,m}$  として Krick & Evans の値を用い, 断面積セットとして J-F-0 を用いて求めた。 $\beta_{i,m,eff}$  の値は Table -A.5 に示した。

標準反応度  $\rho_0$  の計算結果, 密度係数測定により求めた  $\rho_0$  の値との比較, および J-F-0, J-F-II について Keepin の  $\beta_{i,m}$  を用いて求めた  $\rho_0$  と Sandmeier, Krick & Evans,

Tomlinson による  $\beta_i, m$  を用いて求めた  $\rho_0$  との比較を Table -A. 6 に示す。

採用した  $\rho_0$  の値は、密度係数法により求めた値とし、

$$\rho_0 = 0.0519 \% \Delta k / k$$

上記の  $\rho_0$  の値をVI-2 炉心の標準反応度とする。

Table A.1 Elementwise  $\beta_i$  data (Keepin)

$\ell$ Nuclide	1	2	3	4	5	6
U -235	2.451(-4)	1.374(-3)	1.213(-3)	2.625(-3)	8.256(-4)	1.677(-4)
U -238	1.911(-4)	2.014(-3)	2.381(-3)	5.704(-3)	3.308(-3)	1.103(-3)
Pu-239	7.752(-5)	5.712(-4)	4.406(-4)	6.691(-4)	2.101(-4)	7.140(-5)
Pu-240	7.448(-5)	7.262(-4)	5.107(-4)	9.310(-4)	3.405(-4)	7.714(-5)
Pu-241	1.862(-4)	1.044(-3)	9.215(-4)	1.994(-3)	6.272(-4)	1.274(-4)

Table A.2  $\beta_i$ -data Krick & Evans/Keepin

$\ell$ Nuclide	1	2	3	4	5	6
U -235	1.073	1.073	1.073	1.073	1.073	1.073
U -238	1.197	1.197	1.197	1.197	1.197	1.198
Pu-239	1.078	1.078	1.079	1.087	1.079	1.078
Pu-240	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085
Pu-241	1.082	1.081	1.082	1.082	1.082	1.082

Table A.3  $\beta_i$ -data Tomlinson/Keepin

$\ell$ Nuclide	1	2	3	4	5	6
U -235	1.035	1.036	1.035	1.036	1.036	1.036
U -238	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
Pu-239	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
Pu-240	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085
Pu-241	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082

Table A.4  $\lambda$  ( $\text{sec}^{-1}$ )

$\lambda$	1	2	3	4	5	6
M						
U-235	0.0127	0.0317	0.115	0.311	1.4	3.87
U-238	0.0132	0.0321	0.139	0.358	1.41	4.02
U-239	0.0129	0.0311	0.134	0.331	1.26	3.21
Pu-240	0.0129	0.0313	0.135	0.333	1.36	4.04
Pu-241	0.0128	0.0299	0.1238	0.3519	1.612	4.621

Table A.5  $\beta$ -effective value

$\beta$	1	2	3	4	5	6	$\beta_{\text{eff total}}$
m							
U-235	1.334182(-4)	7.478275(-4)	6.600798(-4)	1.428996(-3)	4.494086(-4)	9.192928(-5)	3.511048(-3)
U-238	2.743370(-5)	2.891090(-4)	3.418661(-4)	8.187905(-4)	4.748140(-4)	1.584036(-4)	2.110285(-4)
U-239	2.26823(-5)	1.671327(-4)	1.290506(-4)	1.957840(-4)	6.153800(-5)	2.089159(-5)	5.969023(-5)
Pu-240	4.903115(-7)	4.780563(-6)	3.362155(-6)	6.128926(-6)	2.241436(-6)	5.07825(-7)	1.751122(-5)
Pu-241	2.462512(-7)	5.831522(-6)	4.397723(-6)	9.914823(-6)	4.637597(-6)	0.0	2.503331(-3)
Sum	1.842708(-4)	1.214681(-3)	1.138756(-3)	2.459614(-3)	9.928126(-4)	2.712753(-4)	6.26078(-3)
							0.033477
							0.012779
							0.006502
							0.000178
							0.000217
							0.053153

J-F-0 set,  $\beta$  is Krick & Evans

Table A.6 Comparison of  $\rho_0$  Value

Crossection set and $\beta$ -data	RCBN	ABBN	J-F-0				J-F-II				D.C.M.
			Keepin	Sandmeier	Krick & Evans	Tomlinson	Keepin	Sandmeier	Krick & Evans	Tomlinson	
$\rho_0$ (% $\Delta k/k$ )	0.04939	0.04770	0.04827	0.04925	0.05315	0.05058	0.04801	0.04902	0.05290	0.05036	0.0519
$\rho_0$ (Keepin)			1.0	1.020	1.101	1.048					
$\rho_0$ (Keepin)							1.0	1.021	1.102	1.049	
Period/D.C.M.	0.952	0.919	0.930	0.949	1.024	0.975	0.925	0.945	1.019	0.970	1.0

Table A.7 Reactivity calibration by substitution of rods (Power level #6  $0.5 \times 10^{-7} A$ , 90%BCS)

Step No.	Position of C/R No.1 [mm]	Position of C/R No.2 [mm]	Position of S/R No.9 [mm]	Position of S/R No.2 [mm]	memo
0	full in	full out	50.00	42.47	
1	49.08	"	full in	"	
2	"	359.12	50.00	"	
3	97.09	"	full in	"	
4	"	269.79	50.00	"	
5	147.22	"	full in	"	
6	"	203.70	50.00	"	
7	202.41	"	full in	"	
8	"	148.04	50.00	"	
9	268.01	"	full in	"	
10	"	97.72	50.00	"	
11	355.62	"	full in	"	
12	"	49.24	50.00	"	
13	527.87	"	full in	"	
14	"	full in	49.85	"	
15	full out	full in	44.85	"	
16	268.01	193.29	full in	full in	
17	193.28	"	"	"	

1973. 3. 5. ~ 4. 19

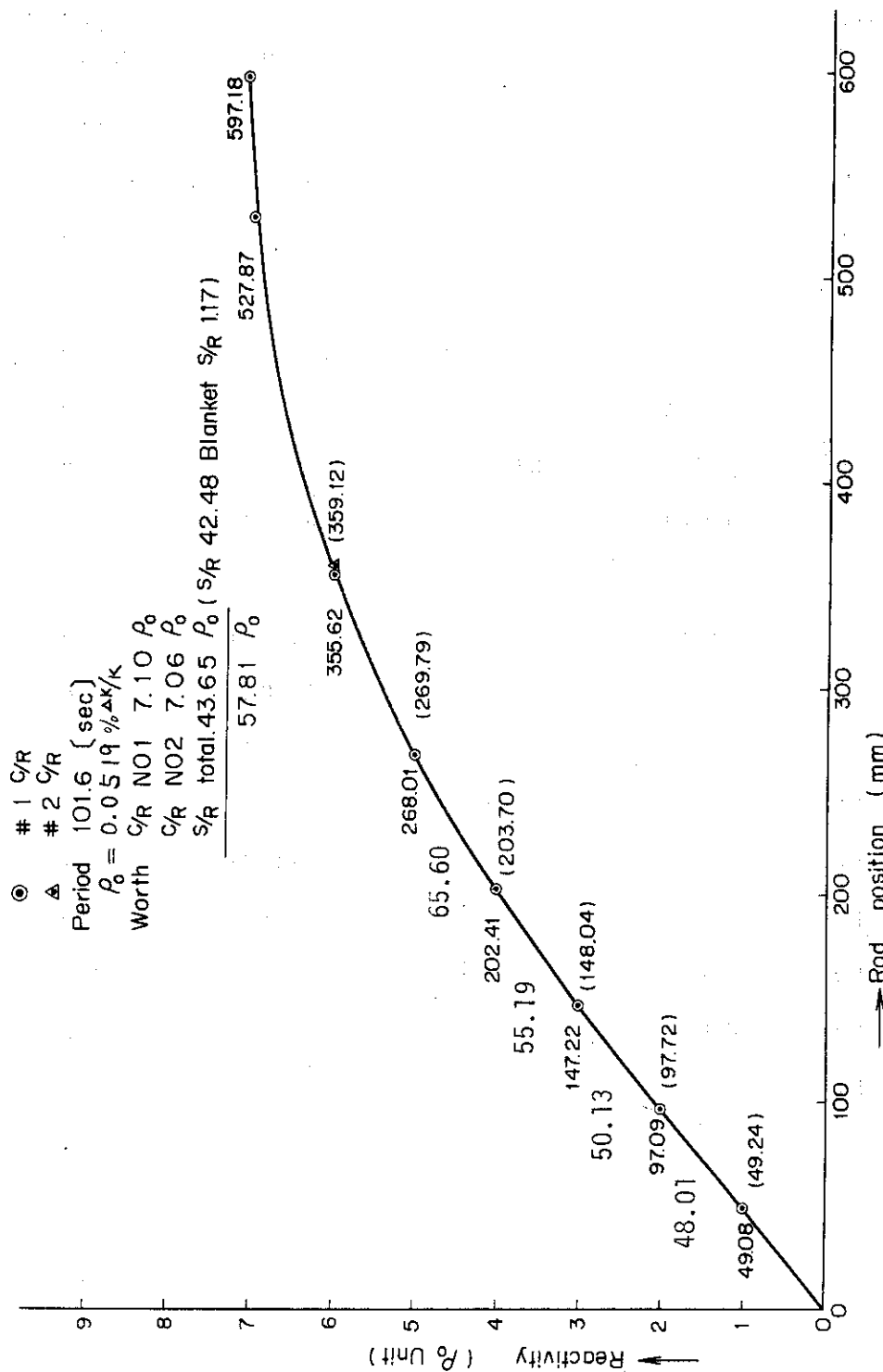


Fig. A.1 Calibration curve of control rods of assembly VI-2

## A.2 周辺質量係数

Table A.8 Mass coefficient measurement

Core	R (matrix unit)	C/R Position (mm)	Reactivity change ( $\rho_0$ /drawer)
Reference 1	5.323	#1 C/R250.74 #2 C/R131.45	-
M-1	5.385*	#1 C/R 97.09 #2 C/R131.46	-1.3685
Reference 2	8.311	#1 C/R250.74 #2 C/R131.45	-
M-2	8.246**	#1 C/R105.48 #2 C/R131.46	1.285

\* Driver zone の F 20 - 23 のドライバー引出しをテストゾーン引出しに置換した部分の重心の半径。

M-1 は F 20 - 23 のドライバー引出しとこれに対応する移動側のドライバー引出しの合計 2 本をテストゾーン引出しに置換。

Reference 炉心の等価半径  $R = 5.323$  での質量係数は、

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= -1.3685(\rho_0) \times (5.385/5.323)^3 \\ &= -1.433 \pm 0.01(\rho_0/\text{drawer})\end{aligned}$$

\*\* Driver zone の F 20 - 26 のドライバー引出しをブランケット引出しに置換した部分の重心の半径。

M-2 は固定側 F 20 - 26 のドライバー引出しとこれに対応する移動側のドライバー引出しの合計 2 本をブランケット引出しに置換。

Reference 炉心の等価半径  $R = 8.311$  での質量係数は、

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= 1.285(\rho_0) \times (8.246/8.311)^3 \\ &= 1.245 \pm 0.01(\rho_0/\text{drawer})\end{aligned}$$

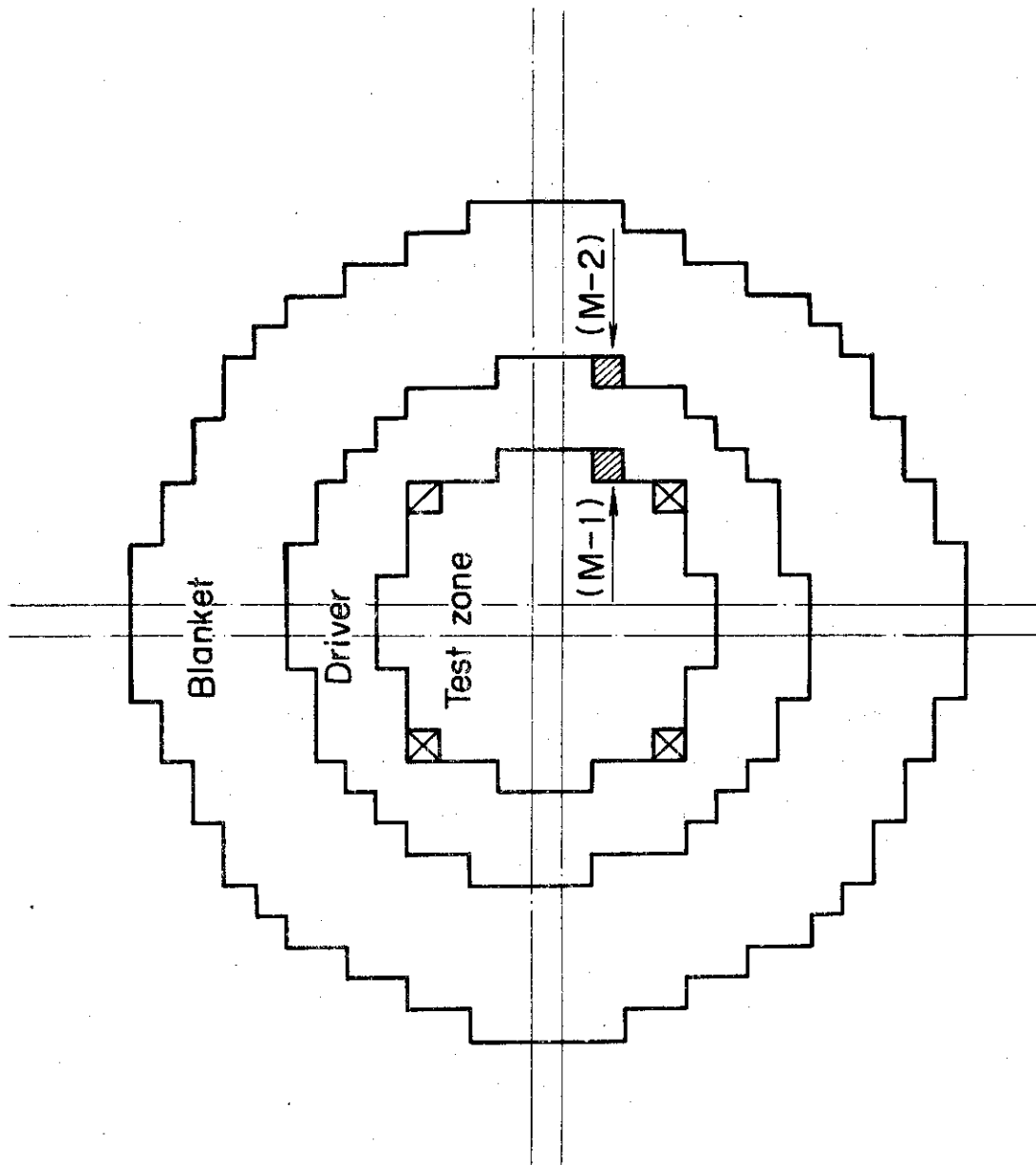


Fig. A.2 Drawer position for mass coefficient measurement (Fixed side).



A.3 系の未臨界度と出力校正

(1) 系の未臨界度 (制御棒校正時データ)

炉出力 (#6 ch)	制御棒位置 (mm)	反応度 ( $\rho_0$ )
$0.5 \times 10^{-7}$ A	#1 C/R 41.22 #2 C/R full out	0.839
$0.5 \times 10^{-6}$ A	#1 C/R 35.32 #2 C/R full out	0.719

$0.5 \times 10^{-7}$  A と  $0.5 \times 10^{-6}$  A の時の系の未臨界度の差は  $0.12 \rho_0$  となる。故に  $0.5 \times 10^{-7}$  A 時の未臨界度は

$$1 - \frac{0.12 \rho_0}{0.5 \times 10^{-7}} = \frac{0.12 \rho_0}{0.9} = 0.133 \rho_0$$

$0.5 \times 10^{-6}$  A 時の未臨界度は

$$\frac{0.12 \rho_0}{0.5 \times 10^{-6}} - 1 = \frac{0.12 \rho_0}{9} = 0.013 \rho_0$$

(2) 出力校正

$0.5 \times 10^{-6}$  A 時の炉出力を Source の増倍より概算する。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{S}{3.1 \times 10^{10}} \\ S = \frac{S_0}{1-K} = \frac{S_0}{\delta K} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} S = \text{Total fission 数/sec} \\ S_0 = \text{装荷 Pu の自発核分裂数} \\ \quad = 2.97 \times 10^6 \text{ fission/sec} \\ \delta K = (0.5 \times 10^{-6} \text{ A 時の未臨界度}) \\ \quad = 0.013 \rho_0 = 6.34 \times 10^{-6} \Delta k/k \end{array}$$

$$S = \frac{S_0}{\delta K} = \frac{2.97 \times 10^6}{6.34 \times 10^{-6}} = 4.68 \times 10^{11} \text{ fission/sec}$$

従って  $0.5 \times 10^{-6}$  (A) 時の出力 P (W) は

$$P = \frac{4.68 \times 10^{11}}{3.10 \times 10^{10}} = 15.0 \text{ (W)}$$

## A.4 温度係数

温度係数の測定は炉室温度を上昇させて行なった。

Table A.9 Core temperature coefficient

T.C. Position	Reactivity change [ $\rho_0/^\circ\text{C}$ ]
F-2	0.053±0.005
M-1	0.047±0.005

炉心全体の温度係数として、F-2とM-1の平均値を採用することとした。(温度測定場所は「FCAVI-1集合体の臨界実験」Private communication を参照)

Core temp coefficient = 0.050 ± 0.005 [ $\rho_0/^\circ\text{C}$ ]

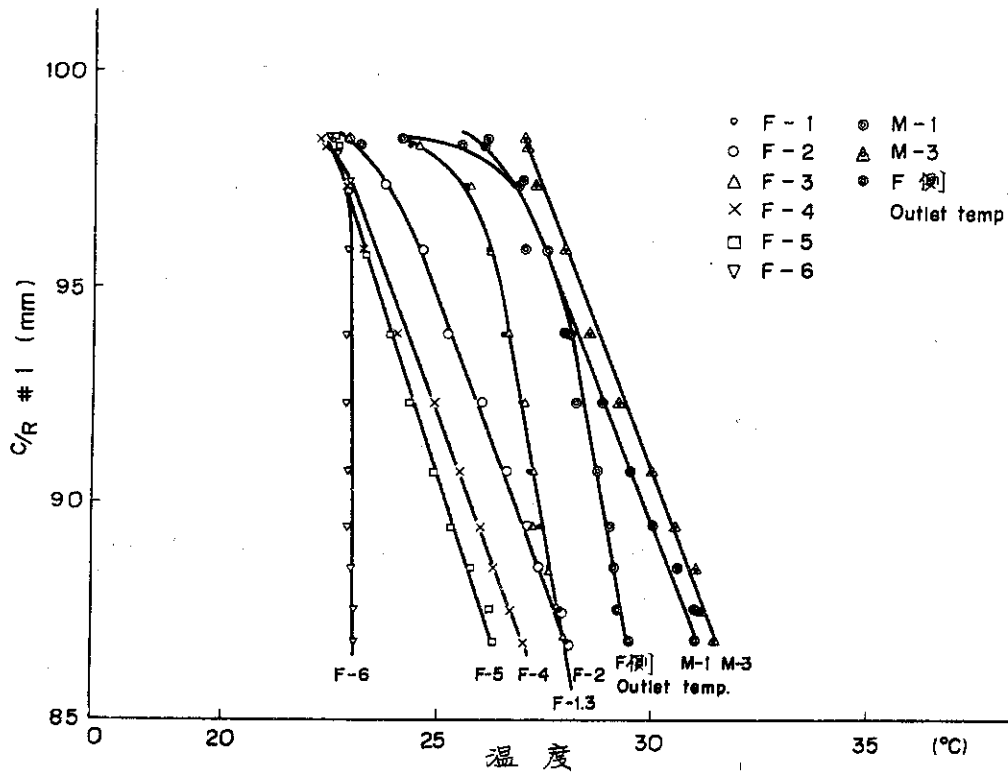


Fig. A.3 炉心温度效果

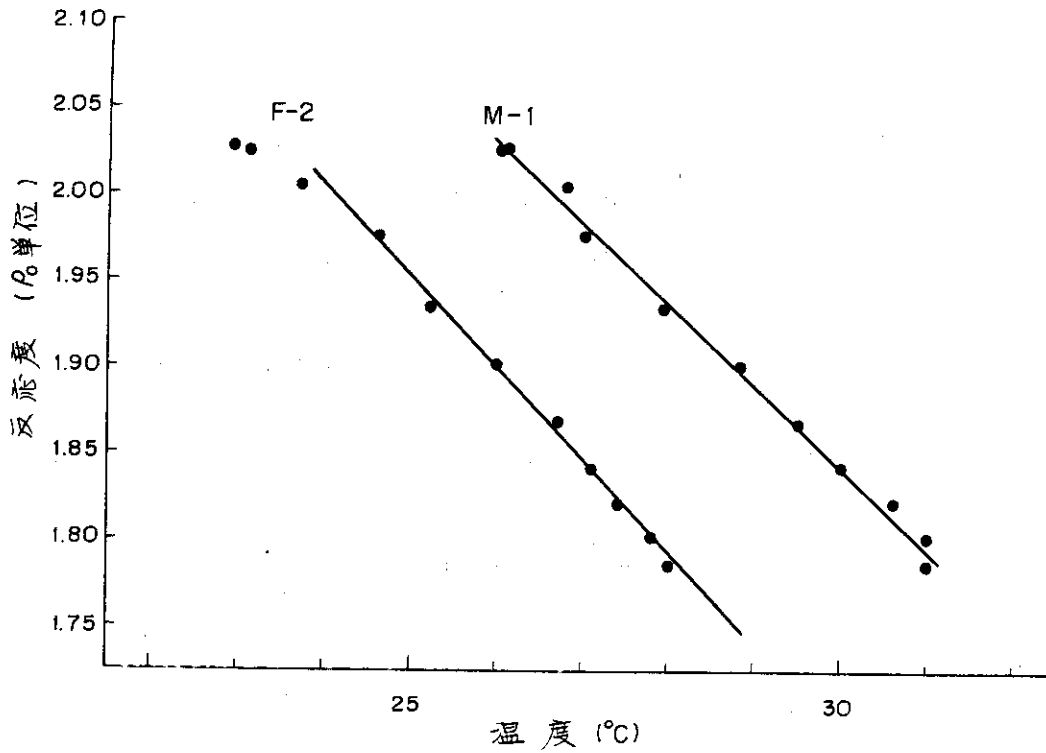


Fig. A.4 炉心温度系数

## A.5 臨界量補正実験データ

## A.5.1 過剰反応度

VI-2の基準炉心での臨界点は、CH. 6出力  $0.5 \times 10^{-7}$  Aにおいて 1C/R 202.41 mm, 2C/R 171.01 mm で制御棒の余裕は  $7.44 \rho_0$  となる。  
 $0.5 \times 10^{-7}$  Aでの未臨界度が  $0.13 \rho_0$  であるから過剰反応度 ( $\rho_E$ )は,

$$\rho_E = (7.44 - 0.13) \rho_0 = 7.31 \pm 0.01 \rho_0$$

となる。

## A.5.2 密着面間隙効果

Table A.10 Gap effect measurement

Gap (mm)	#1 C/R Position (mm)	Reactivity change ( $\rho_0$ )
-0.009 <sub>0</sub>	202.41	0.000
-0.009 <sub>2</sub>	203.18	
0.160	191.14	-0.210
0.459	171.68	-0.563
0.973	139.66	-1.156
0.985	138.70	-1.176
1.982	77.43	-2.415

臨界点は CH. 5  $0.5 \times 10^{-7}$  A, 90% BCS で、間隙は 4 隅測定器で求めた。  
 テーブル密着時の臨界は 2 度行ない、密着時の反応度は 2 個のデータの平均値を採用した。  
 Gap 効果は密着面近くの勾配から求めた。すなわち

$$\Delta \rho = \frac{0.210 X}{0.160 + 0.009} = (1.243 \pm 0.062) X (\rho_0 / \text{mm} - \text{gap})$$

ただし X は mm で表わした間隙距離

故に Gap 効果による反応度の増加は

$$3.23 \pm 0.50 \rho_0 \text{ [密着面燃料間隙 } 2.6 \pm 0.3 \text{ mm]}$$

となる。

## A. 5.3 制御安全棒装填状態の効果 (Singularity)

Table A.11 Control-safety rod singularity effect

Core	C/R Position	Reactivity change
Reference	#1C/R 202.41 #2C/R 171.01	-
S/R(F14-14)→Driver	#1C/R full in #2C/R 165.57	$-(4.1 \pm 0.01)\rho_0$

安全棒引出し1本をドライバー引出しに置換すると  $(4.1 \pm 0.01)\rho_0$  分だけ反応度が負になる。従ってS/R, C/R 全数の8本をドライバー引出しに置換すると  $(4.1 \pm 0.01)\rho_0 \times 8 = (32.8 \pm 0.1)\rho_0$  だけ反応度が減少する。

ここでドライバー引出し1本当りの worth を求めると、炉心上側のS/R, C/R worthが7.00  $\rho_0$ /本であるから

$$(7.00 - 4.10)\rho_0 = 2.90\rho_0$$

がドライバー1本当りの worth となる。

## A. 5.4 炉心境界形状効果 (Edge effect)

Table A.12 Irregular core boundary effect

Core Pattern	C/R Position		Power (A)	Reactivity Change ( $\rho_0$ ) (4/4quadrant)	Irregularity (w)
	#1 C/R (mm)	#2 C/R (mm)			
A <sub>1</sub> (Reference)	212.69	161.72	$0.5 \times 10^{-7}$	0	4.712
Bd (2/4quadrant)	147.22	161.72	$0.5 \times 10^{-7}$	-2.262	7.558
Cd (1/4quadrant)	156.47	161.72	$0.5 \times 10^{-7}$	-3.852	10.034
Bt (2/4quadrant)	237.24	161.72	$0.5 \times 10^{-7}$	0.748	5.044
A <sub>2</sub> (Reference)	133.81	252.37	$0.5 \times 10^{-7}$	0	2.761
Ct (4/4quadrant)	202.41	252.37	$0.5 \times 10^{-7}$	1.268	6.370

Core Pattern の Bd, Cd はドライバーの場所を表わし, Bt, Ct はテストゾーンの場所を表わす。

A<sub>1</sub> パターン (Reference) に対する Bd, Cd と A<sub>2</sub> パターン (Reference) に対する Bt, Ct の各々の直線をひき, Irregularity (w) = 0 での外挿値を出し, その値の平均値を Edge effect とした。

## 1) ドライバーゾーンの Edge effect :

$$A_1 - Bd \text{ 外挿値 } 3.75 \rho_0$$

$A_1 - Cd$  外挿値  $3.44 \rho_0$

Edge effect =  $3.595 \pm 0.155 \rho_0$

( $w=0$ )

2) テストゾーンの Edge effect

$A_2 - Bt$  外挿値  $-0.87 \rho_0$

$A_2 - Ct$  外挿値  $-0.95 \rho_0$

Edge effect =  $-0.91 \pm 0.040 \rho_0$

( $w=0$ )

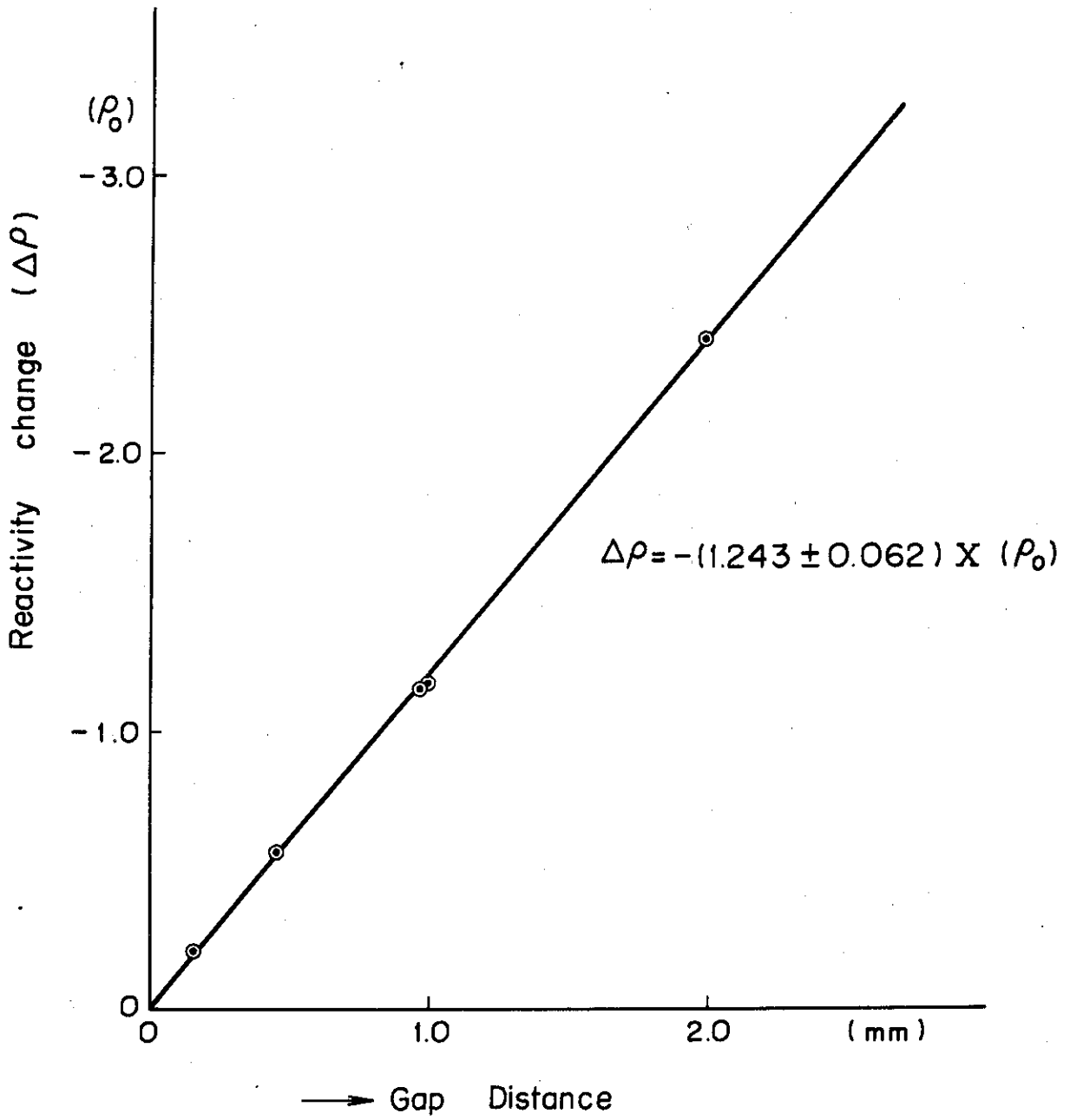


Fig. A.5 Gap effect

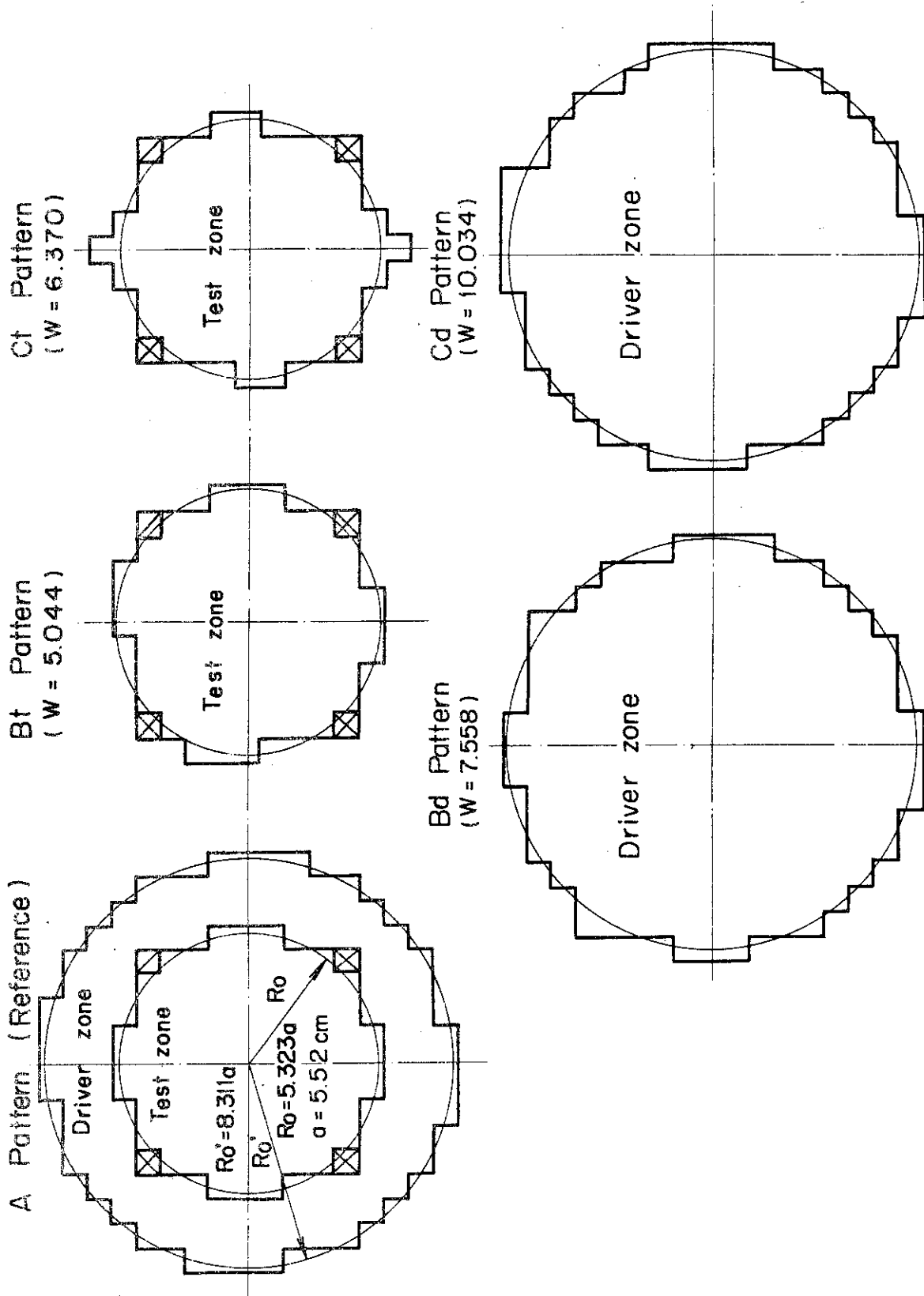


Fig. A.6 Core cross section for the measurement of core irregular boundary effect



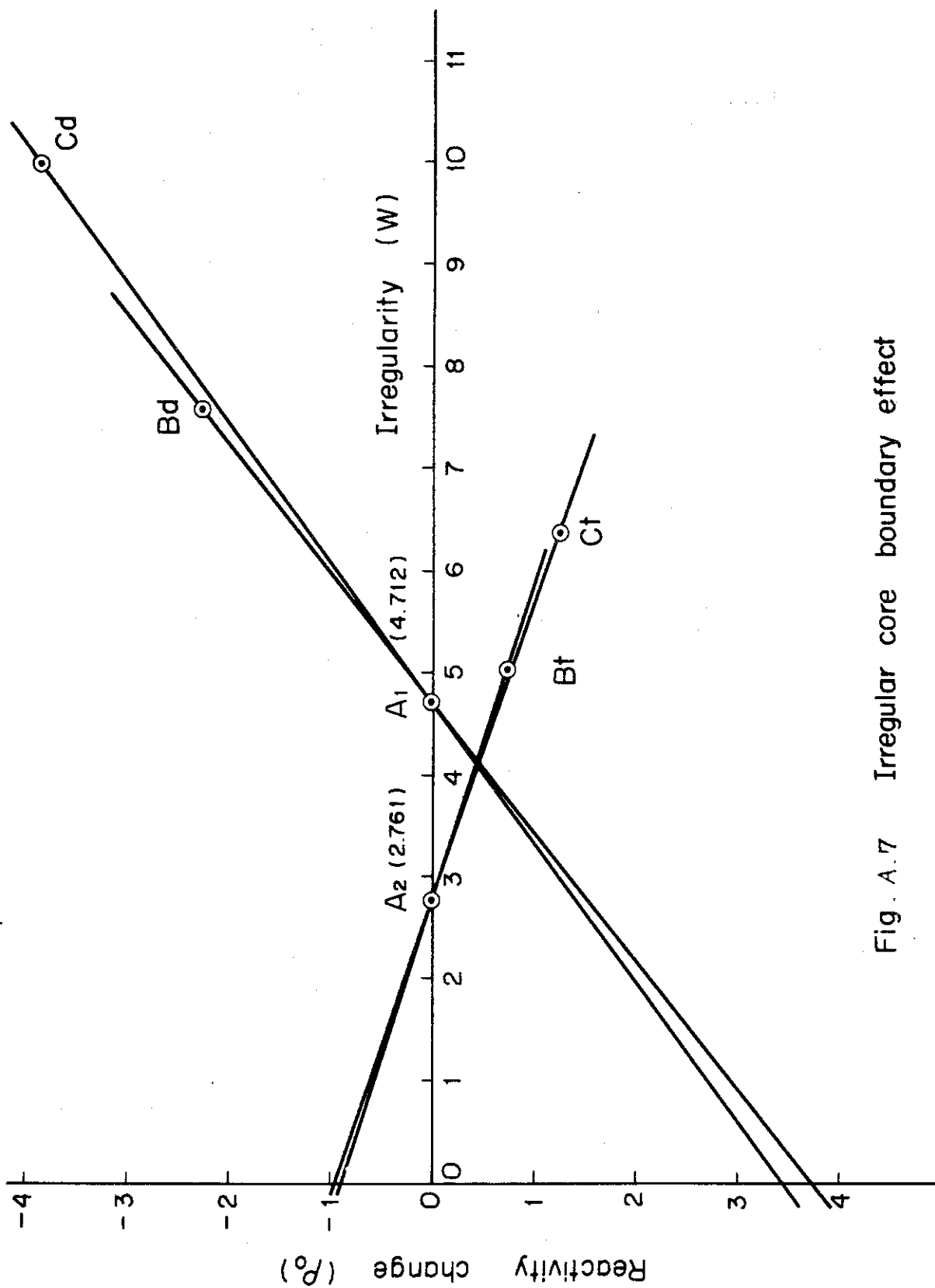


Fig. A.7 Irregular core boundary effect

## A. 5.5 DUB置換反応度トラバースデータ

ブラケット引出しの置換場所は Fig. 8 のように固定側 (F), 移動側 (M) の各十字部分である。

N. U. B. を D. U. B. に置換した場合の反応度変化の計算は, (1) ドライバーゾーンとの等価半径の境界から引出し (ユニット) を並べて行なった場合と, (2) 実際の引出し位置 (ユニット位置) の中心を中心点として行なった場合の2種類の計算を体積積分値と等価半径  $R_i$  からの計算の各々について行ない, さらにこれらの平均値を D. U. B. 置換反応度変化量とした。

Table A. 13 N. U. B. を D. U. B. に置換した場合の体積積分値

Position	Reactivity change ( $\rho_0$ )			Mean ( $\rho_0$ )
	Differential	Volume integ(1)	Volume integ(2)	
9	-0.427	-7.707	-6.799	
10	-0.184	-2.950	-2.950	
11	-0.074	-1.350	-1.350	
12	-0.029	-0.498	-0.480	
13		-0.045	-0.045	
Total		-12.550	-10.822	-11.69±0.1

Table A. 14 等価半径  $R_i$  からの計算による反応度変化

Position	Reactivity change ( $\rho_0$ )			Mean ( $\rho_0$ )
	Differential	Calculation (1)	Calculation (2)	
9	-0.427	-7.513	-6.036	
10	-0.184	-2.909	-2.890	
11	-0.074	-1.285	-1.278	
12	-0.029	-0.550	-0.546	
13		-0.037	-0.104	
Total		-12.930	-1.086	-11.89±0.1

D. U. B. 置換反応度変化量 (NUB DUB) は Table A. 13, A. 14 の平均をとり

$$-11.79 \pm 0.1 \rho_0$$

とする。

## A.5.6 臨界量補正項目のまとめ

Table A.15 Correction to loaded mass

(1) C/R, S/R Singularity	32.80±0.1 $\rho_0$
(2) Edge effect	
Test zone	0.91±0.04 $\rho_0$
Driver zone	-3.59±0.16 $\rho_0$
(3) Gap effect	-3.23±0.50 $\rho_0$
(4) Excess reactivity	-7.31±0.01 $\rho_0$
(1)~(4) Sum	19.58±0.55 $\rho_0$

$$\rho_0 = 0.0519\% \Delta k/k$$

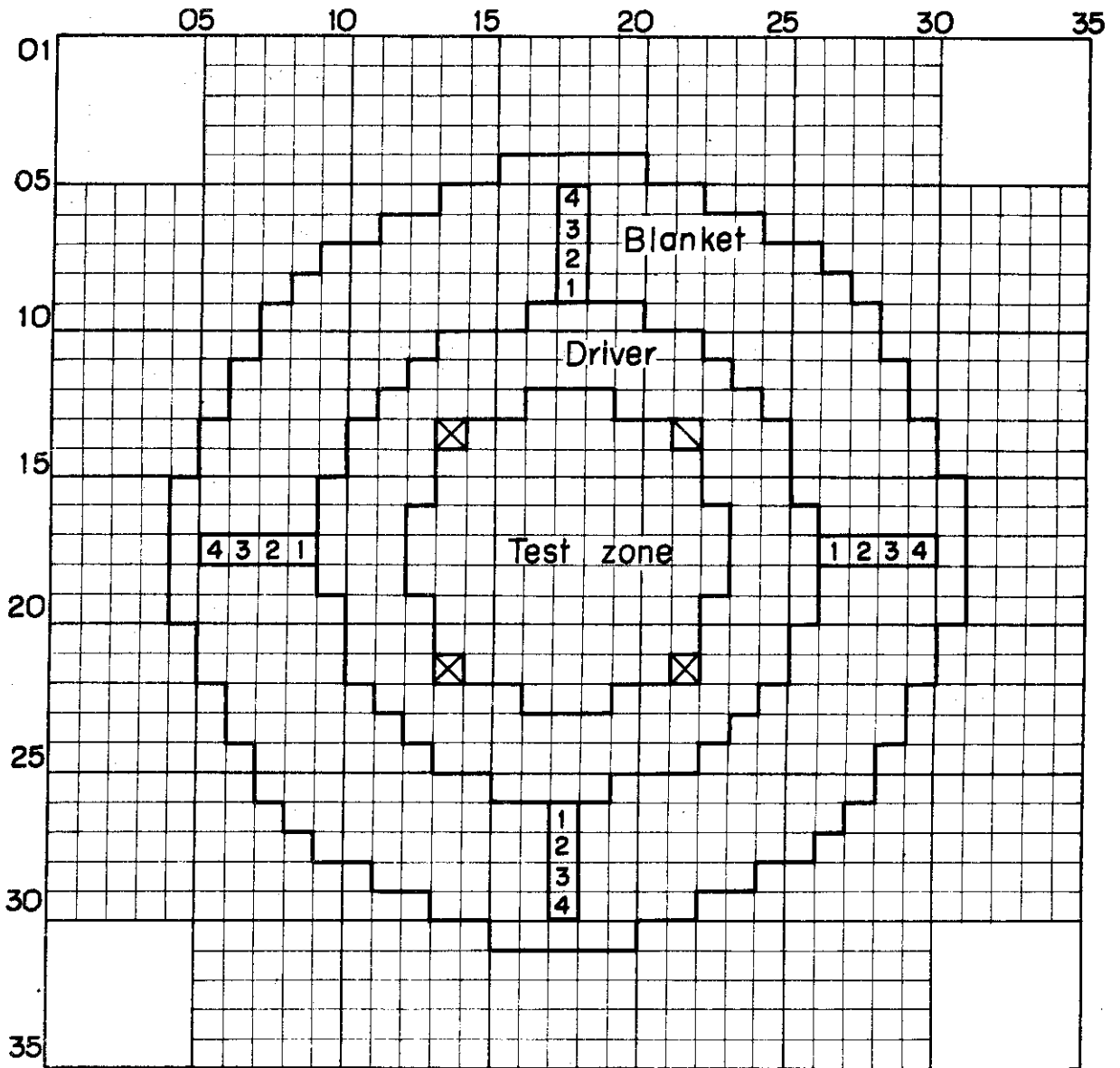


Fig. A.8 D. U. B. 置換反応度トラバース実験場所

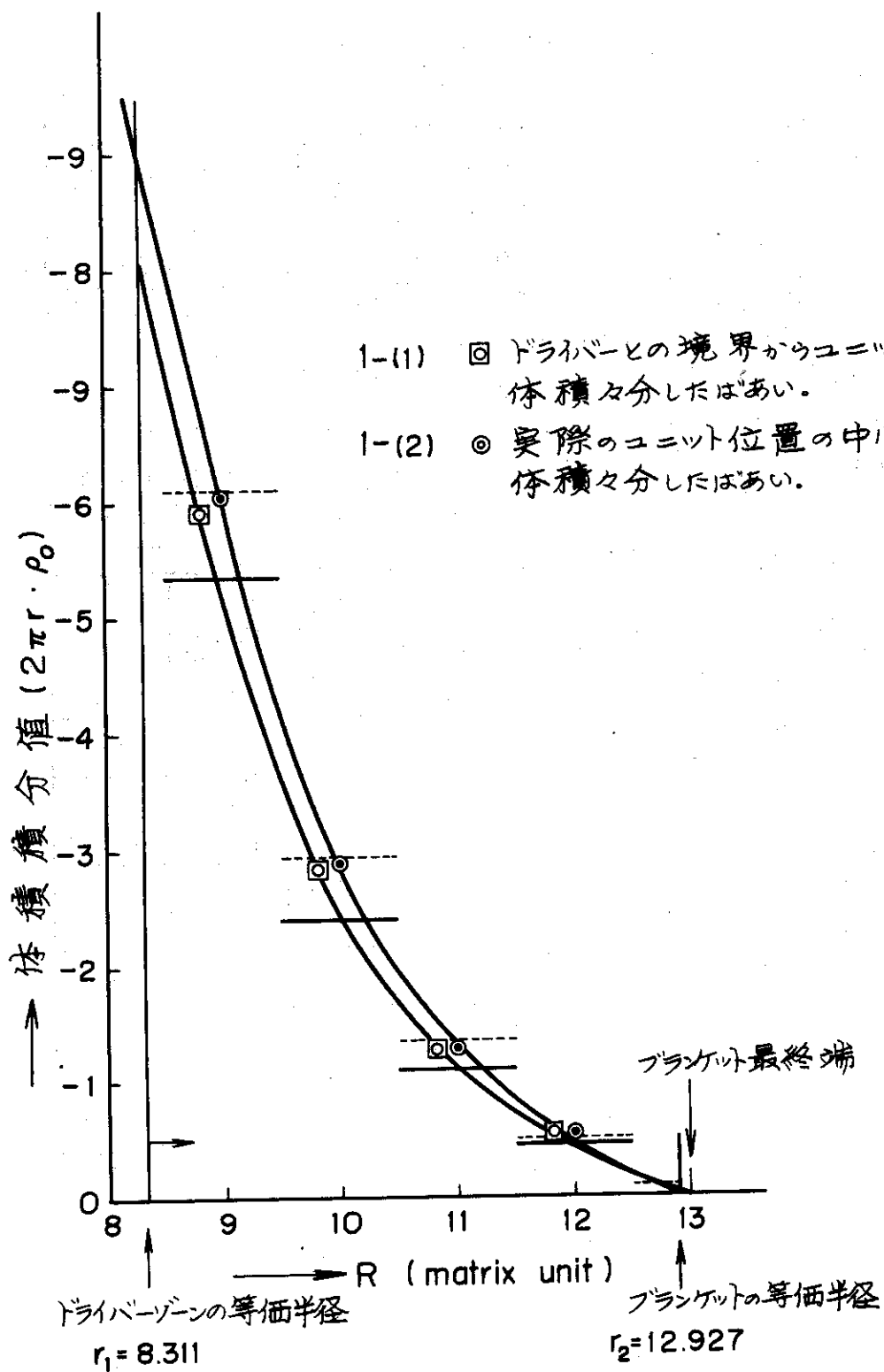


Fig. A.9 D. U. B. 置換反応度トラバース (NUB DUB)

## A.6 VI-2 集合体臨界性の核計算

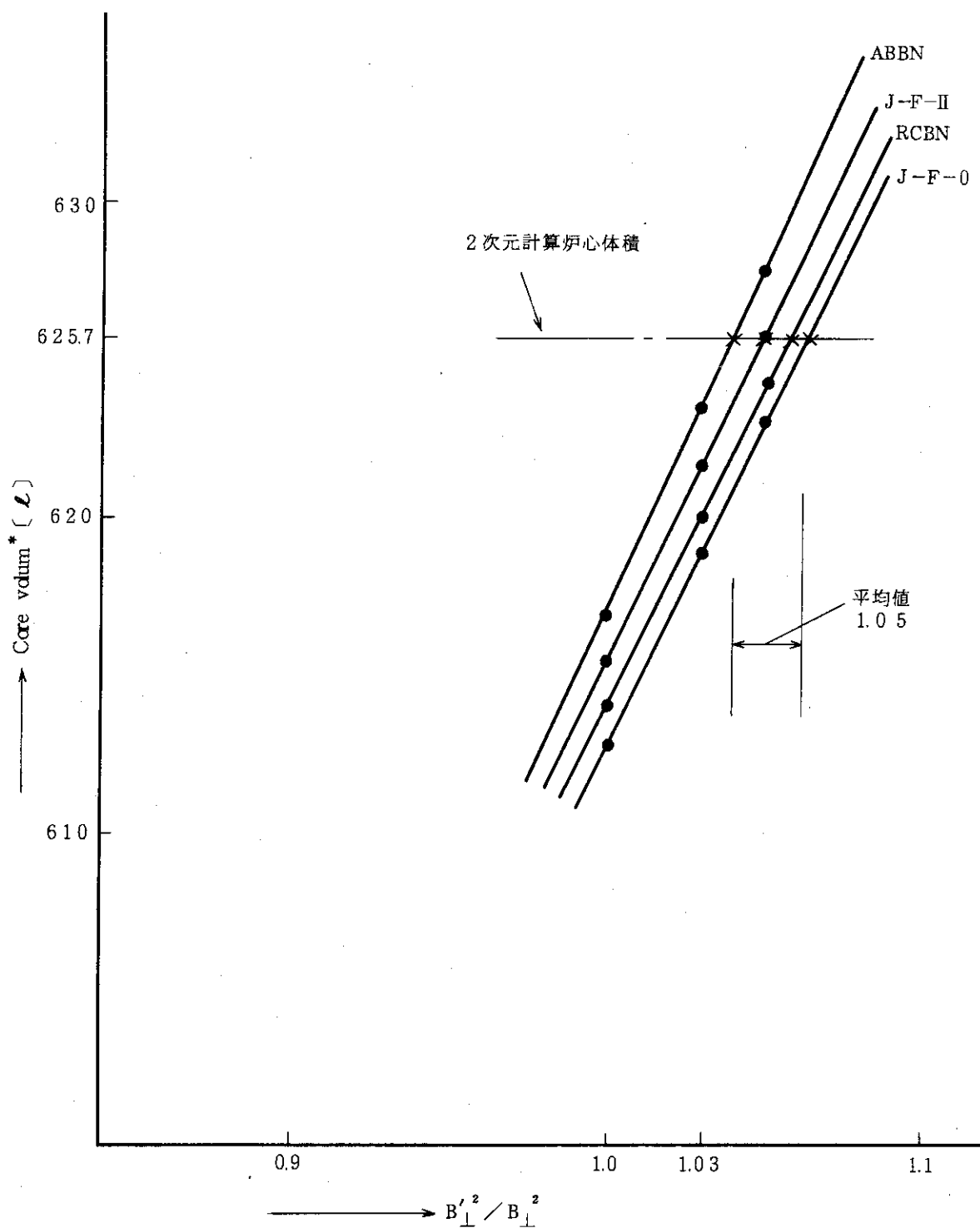
VI-2 炉心の計算は実験で得られた非均質臨界体積に対し2次元R-Zモデルで拡散近似により行なった。1次元モデルでは円筒モデルでドライバー厚さによる臨界サーチ, および2次元計算と同じ $k_{\text{eff}}$ を与えるドライバー厚さのサーチを行なった。1次元円筒計算で用いる垂直バックリング $B^{-2}$ の値は, 1次元計算により反射体節約を求め垂直バックリングの値を出すという従来の求め方では小さすぎる事が分った。最適なバックリング(2次元計算と同じ $k_{\text{eff}}$ , 体積を与えるような $B^{-2}$ )を与えるための補正係数を計算から求めた(Table A. 16の $B^{-2}/B^{-2}$ )。補正係数は断面積セットによって多少異なる。Fig. A. 10に $B^{-2}$ と炉心体積(2次元計算と同じ $k_{\text{eff}}$ を与える)の関係を示す。

計算に使用した断面積セットは各ケースともJ-F-0, J-F-II, RCBN, ABBNの4種類で, 1次元計算はEXPANDA-4によりdimensionサーチし, 2次元計算は, 拡散コードEXTERMINATOR-2により $k_{\text{eff}}$ サーチを行なった。2次元計算はEXPANDA-4による1次元計算で6群に縮約したマクロ断面積データカードをインプットして行なった。結果はTable A. 16に示されている。最後にNU-DUブランケット置換効果の計算結果をTable A. 18に示す。

Table A.16 Summary of criticality calculations  
(as built core-NU radial blanket)

Probe No.	Geometry	Approx	Code	Cross-section set	2D-equivalent buckling $B_{L^2}^{\dagger}$	Veylinder* ( $\lambda$ )	K effective	Critical* volume ( $\lambda$ )
1				ABBN	$B_{L^2}^{\dagger} / B_{L^2}^{\dagger} 1.040$	616.87	1.02579	562.62
2	Cylinder		EXPANDA	RCBN	1.058	614.13	0.99234	630.98
3	1-D	Diffusion	-4	J-F-0	1.064	612.82	0.98064	659.25
4				J-F-II	1.050	615.40	0.99805	619.81
5				ABBN	-	625.69	1.02580	-
6	Cylinder		EXTERMI-	RCBN	-	"	0.99233	-
7	2-D	Diffusion	NATOR-2	J-F-0	-	"	0.98063	-
8	R-Z			J-F-II	-	"	0.99805	-
Experiment						626.47	1.000	-

\* Transverse buckling  $B^2 (10^{-4})$ : 6.72 (テストゾーン) (ドライバ) (フランケット) 6.82 5.66



$B_{\perp}^2$  : 従来の方法で計算した垂直バックリング

Test Zone  $B_{\perp 1}^2 = 6.7199 \times 10^{-4}$

Driver Zone  $B_{\perp 1}^2 = 6.8198 \times 10^{-4}$

\* ) 2次元計算と同じ  $k_{eff}$  を与える炉心体積

Fig. A. 10 垂直バックリング  $B_{\perp}^2$  の補正係数



Table A.17 Group structure of 6-group constants

	Group number					
Reduced set	1	2	3	4	5	6
ABBN set	1~4	5~6	7~8	9~11	12~14	15~25
$E_L$ (*)	1.4MeV	0.4MeV	0.1MeV	10.0keV	1.0keV	0.215eV

(\*)  $E_L$ : Lower energy Limit of reduced group

Table A.18 Reactivity change due to replacement of radial blanket NU to DU

2dim (R-Z)

Crosssection set	ABBN	J-F-0	J-F-II	RCBN	Experiment
Reactivity change ( $\rho_0$ )	-10.097	-10.159	-10.457	-10.941	-11.8±0.1

\*  $\rho_0 = 0.0519\% \Delta k/k$