

J A E R I - M

9 9 3 1

F C A VI-1 集合体による Na ボイド実験とその解析  
( F C A による高速原型炉模擬実験報告 )

1 9 8 2 年 2 月

白方敬章<sup>\*</sup>・三田敏男<sup>\*</sup>・後藤義則<sup>\*\*</sup>・黒井英雄・弘田実弥

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。  
入手の問合せは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)高野高速印刷

F C A VI - 1 集合体によるNa ボイド実験とその解析  
(F C A による高速原型炉模擬実験報告)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

白方 敬章<sup>\*</sup>・三田 敏男<sup>\*</sup>・後藤 義則<sup>\*\*</sup>

黒井 英雄・弘田 実弥

(1982年1月8日受理)

高速原型炉「もんじゅ」の外側炉心の組成を模擬したFCA VI - 1集合体において各種のNa void 効果、具体的にはチャンネル閉塞効果、軸方向分布、中心Void 効果、広領域 Void 効果等を測定した。一方 AGLIライブラリー、JAERI-Fast セット等を用いて測定結果の解析を行なった。その結果、中心 Na void 効果の問題点が明らかになり、中心Void 効果の解析のために群の取り扱いが必要であること、Na の 3 KeV の共鳴の断面積の大きさが重要な役割を演じていること、そしてAGLI / 0 およびAGLI / 1ライブラリーの Na の断面積には問題が残されていること、が明らかになった。

---

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。

\* 動力炉・核燃料開発事業団

\*\* 三菱原子力工業株式会社

Experiment and Analysis of Sodium Void Reactivity Worth  
on FCA Assembly VI-1

Keisho SHIRAKATA\*, Toshio SANDA\*, Yoshinori GOTO\*\*,  
Hideo KUROI and Jitsuya HIROTA

Division of Reactor Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 8, 1982)

This report presents the results of experiments and analyses of sodium void reactivity worths performed on FCA Assembly VI-1, which is a physics mock-up for the outer core of Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU". Sodium void reactivity worths, such as channel void worth, axial distribution of void worth, void worth of central small region, and void worth of large region were measured. Analyses were made with AGLI library, JAERI-Fast set, and etc. As the results, problems on the central sodium void reactivity worth were identified and following conclusions were obtained: Calculational treatment by fine groups is necessary for analysis of the central void worth, and sodium resonance at 3 KeV plays an important role in formation of central void worth, and AGLI/0 and AGLI/1 libraries still leave inaccuracy in cross section data of sodium to be solved for analysis of the central void worth.

Keywords: Sodium Void Reactivity Worth, Experiment, Analysis, FCA Assembly, Physics Mock-up, Fast Breeder Reactor, AGLI Library, Fine Group, Cross Section

---

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

\* Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.

\*\* Mitsubishi Atomic Power Industries, Incorp.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 実 驗 .....	2
2.1 FCA M-1集合体 .....	2
2.2 Na 試料 .....	2
2.3 Na void 効果実験 .....	7
2.4 実験誤差 .....	12
3. 解 析 .....	15
3.1 1次元 P1 摂動計算 .....	15
3.2 2次元拡散計算 .....	19
3.3 1950群非均質計算 .....	19
4. 実験値と計算値の比較および検討 .....	25
謝 辞 .....	34
参考文献 .....	34
Appendix 1 日本製Na 試料による Void 効果 .....	35
Appendix 2 ドイツ製 Na 試料による Void 効果 .....	41

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Experiment.....	2
2.1	FCA VI-1 Assembly .....	2
2.2	Na plates .....	2
2.3	Na void coefficients .....	7
2.4	Experimental error .....	12
3.	Analysis .....	15
3.1	One dimensional P1 perturbation .....	15
3.2	Two dimensional diffusion calculation .....	19
3.3	1950 group heterogeneity calculation .....	19
4.	C/E and discussion .....	25
	Acknowledgment .....	34
	References .....	34

## I. 序論

高速原型炉「もんじゅ」の模擬実験の一環としてFCA M-1 集合体におけるNa void効果を測定し、他方その測定結果を2, 3のData - methodによって解析した。

炉心中心におけるNa void効果は一般にその絶対値が小さく、信頼できる実験値を得ること、並びにその結果を解析することは、炉物理における一つの課題である。諸外国で行なわれているNa void効果実験においても、炉心中心におけるVoid効果の実験値と計算値の不一致が報告されている。これは、Naが取り去られたことによる減速散乱効果、吸収効果、中性子源効果などVoid効果の各成分が互に相殺し合う関係にあり、炉心中心では結果として絶対値の小さい値になるためである。その結果、炉心組成が非均質であるために生じる効果が解析上相対的に大きい値になり、一方測定時の燃料移動、炉心温度変化等の測定誤差が実験上相対的に大きい値になってしまふ。炉心周辺部では漏洩効果が圧倒的に大きくてVoid効果は絶対値の比較的大きい負になり、実験値と計算値の一致が得られやすいのであるが、炉心中心におけるVoid効果は、特に試験領域が小さくて無限小サンプル的に取扱える場合、減速散乱ソースの効果が大きい。FCA M-1集合体のような炉心スペクトルではNaによる減速散乱項は多群近似で計算される場合群によってランダムに正負にまたがっており、全体としての減速散乱ソースの計算結果は群数に大きく依存している。炉心中心は中性子束の勾配がなく、したがって漏洩がなく、媒質のみに依存した炉物理量が得られる特異な場所であるが、解析がEnergy dependencyのみによるということは、逆に多群近似の群数や方法など解析システムの精度が一層厳しく要求されることになる。そこで、炉心中心におけるVoid効果をできる限り精度よく測定し、一方実験値と計算値間の相関を見ることが本研究の一つの目的である。

「もんじゅ」の外側炉心を模擬したFCA M-1集合体の試験領域は、Fissileとしては、DUO<sub>2</sub>に含まれるごくわずかのU-235が存在するものの、ほぼ純粋なPu系である。Pu-239の $\alpha$ 値 ( $\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ )はエネルギーが増すに従って減少するが、数百KeVで急激に下がり、その結果Pu系炉心のエネルギー的なインポータンスの変化の具合はU系炉心に比べてPu系炉心の方がはるかに大きい。炉心中心でNaを取り去ると減速材が減少したことになってスペクトルが硬化し、その効果は、インポータンスが高エネルギー側で高いことからVoid効果を正にする方向に働く。このスペクトル効果はU-235系炉心の場合よりもPu系炉心の方が顕著であり、Pu系炉心では全体としてのVoid効果も正になり易く、しかも大きな正になる可能性もある。このことは高速炉の安全性の見地から炉心の核設計上も大きな問題であり、大型高速炉の形状が一般にパンケーキ型に落ち着いて来た要因の一つである。このような観点から、既存のデータの少いPu系炉心のVoid効果を測定し、また計算値との相関をみると、炉物理の解析上並びに大型高速炉の設計上有意義であると考える。

FCA M-1集合体は「もんじゅ」の部分モックアップ炉心であるけれども、その軸方向はサイズ的にフル・モックアップと考えてよい。そこで模擬実験としては、Void効果の軸方向分布、並びにチャンネル閉塞効果に重点を置いて測定を行なった。これらの実験値は計算値との相間に使われる一方、高速原型炉「もんじゅ」のVoid効果としての意味を有するものと考えられる。

## 2. 実験

### 2.1 F C A VI-1 集合体

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、高速臨界実験装置FCAにおいて一連の模擬実験が行なわれている。FCA VI-1集合体<sup>1)</sup>はその第一段階として組まれたもので「もんじゅ」の外側炉心の組成を模擬した試験領域を有し、「もんじゅ」の物理的な模擬実験としてPu 富化度、反応度係数等に関する研究を行なうこととする目的としている。

VI-1集合体はPu系の試験領域の半径方向をU-235によるドライバー領域で取り巻いたゾーン型の炉心を持ち、その外側をさらに天然ウランによるブランケットで巻いた構造になっている。円筒形の集合体の軸方向側にはドライバーではなく、劣化ウランによるブランケットだけである。VI-1集合体の装荷図をFig. 1に示し、試験領域の引出しの装填図をFig. 2に示す。「もんじゅ」は全体としてパンケーキ型をした2層のゾーン型円筒炉心であり、VI-1集合体はその外側炉心の組成と炉心の高さを模擬して試験領域としたものであるが、両者の寸法はFig. 3およびFig. 4に示された通りである。但しこれらの図の半径方向断面は「もんじゅ」のSubassembly構造およびVI-1集合体の格子管構造をそれぞれ等価半径で近似したものである。VI-1集合体は「もんじゅ」の外側炉心の組成に依存した炉物理量を測定するのが第1の目的であるが、Fig. 4から明らかなように軸方向に関してはサイズ的にも「もんじゅ」の模擬になっているので、軸方向の空間依存性を測定することがもう一つの目的である。試験領域の形状はかなり細長い円筒形で体積は225.7ℓ、Pu-fissileの装荷量は142.02kgである。試験領域の引出しの装填図はFig. 2に見られるように、Pu燃料板の配列が中心対称になっていない。このことは後で述べるように、Na void効果を始め種々の炉物理量の実験と解析を複雑にしている。

VI-1集合体の炉心およびブランケットの組成をTable 1に示す。但しドライバーの組成は、ドライバー領域内にある制御棒、安全棒を含めて平均的にならした値を用いている。試験領域の組成に対する比較のため、「もんじゅ」外側炉心の設計値<sup>2)</sup>の組成が同時に与えられている。試験領域のPu-fissileの濃度は「もんじゅ」の外側炉心よりも15%ほど高く、ナトリウム含有量は逆に16%程度低い。試験領域のU-235は劣化度0.21%のDUO<sub>2</sub>中に含まれているものであるが、その原子数密度はPu-fissileの1/100以下であり、Fissileに関してほぼ純粋なPu系であると言える。

### 2.2 Na 試料

高速炉の組成を模擬するためFCAにはNa試料が模擬物質の一つとして大量に保有されているが、現在手持ちの試料はメーカーの違い、試料の大きさの違い等により4種類に大別できる。いずれもステンレスの被覆で密封されたプレート状の試料であり、FCAの引出しに装填できるようになっている。本実験で使用された3種類の試料の寸法と組成をTable 2に示す。VI-1集合体の試験領域はFig. 2に示したように各パックに2"×2"×1/4"のNaが4枚はいっており、組成がな

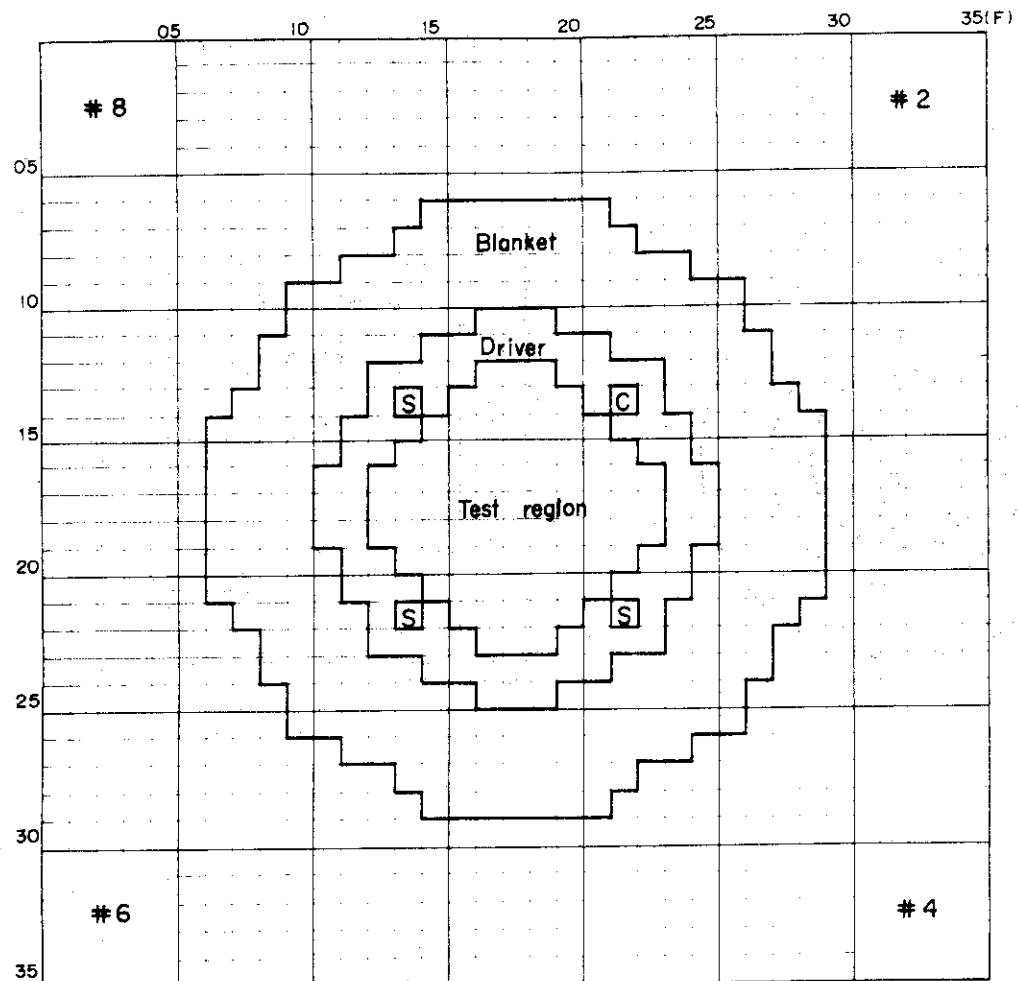


Fig. 1 Vertical cross section of Assembly VT-1

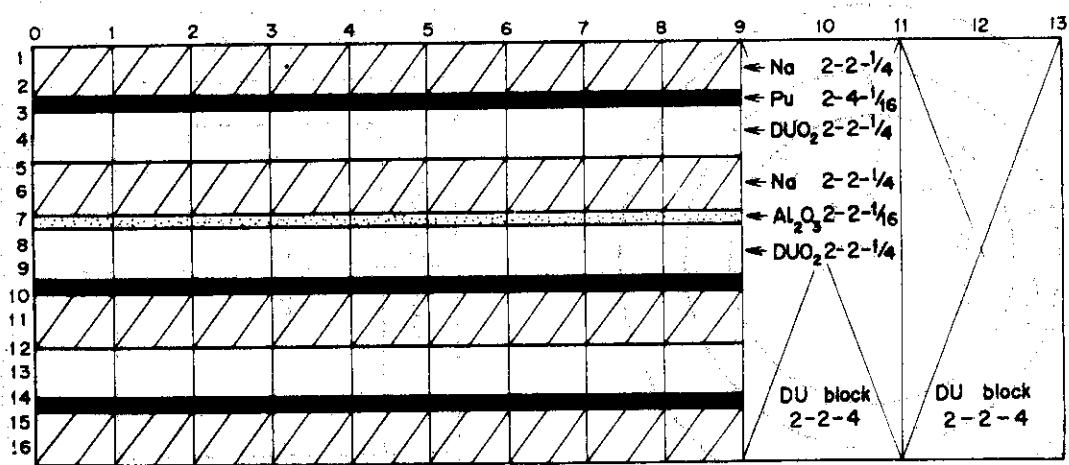


Fig. 2 Test region drawer pattern of Assembly VT-1

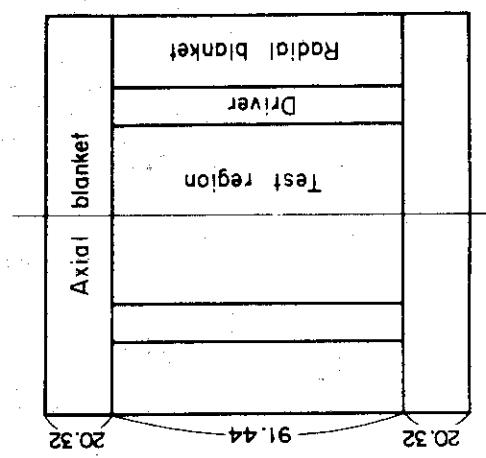
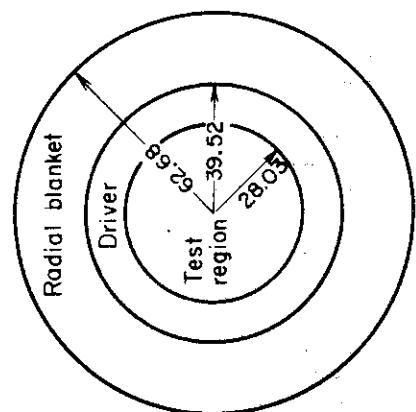


Fig. 3 Geometry for MONJU  
Scale : cm

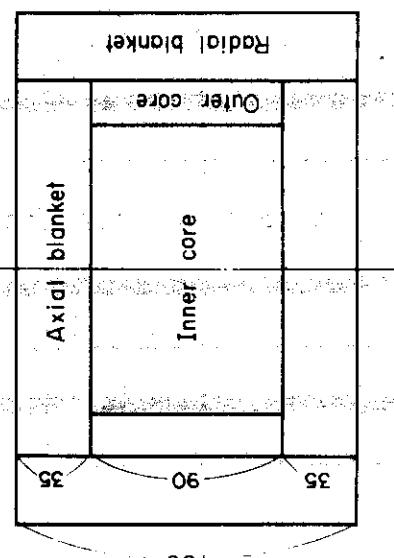
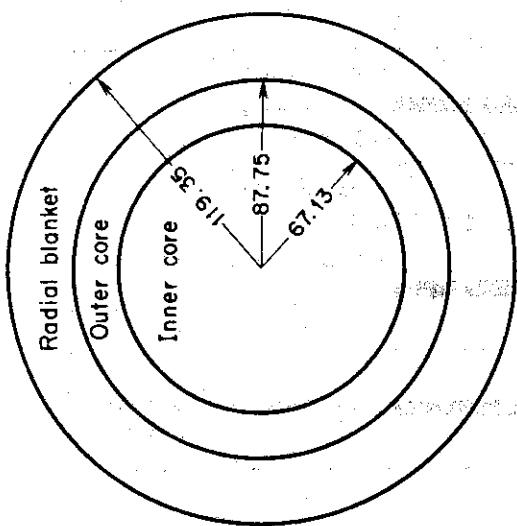


Fig. 4 Geometry for Assembly VI-1  
Scale : cm

Table 1 原子数密度 ( $10^{22}/\text{cm}^3$ )

Nuclide	Outer core (Initial state)	FOCA Assy. VI-1			
		Test region	Driver	Radial blanket	Axial blanket
Pu-239	0.112900	0.15704			
-240	0.029981	0.013896			
-241	0.007464	0.001510			
U-235	0.001091	0.001518	0.236071	0.02889	0.00838
-238	0.537667	0.69160	0.611863	3.9864	4.0072
O	1.378206	1.55498	1.462088		
Na	0.908807	0.76564	0.727358		
Al		0.13535	1.059447		
Cr	0.400312	0.35782	0.317432	0.184612	0.184612
Fe	1.457441	1.30874	1.164361	0.672129	0.672129
Ni	0.174503	0.16353	0.143379	0.080476	0.080476

Table 2 Na 試料の寸法と組成

		英國製試料	日本製試料	ドイツ製試料
寸法 (インチ)		$2 \times 2 \times \frac{1}{4}$	$2 \times 2 \times \frac{1}{4}$	$2 \times 2 \times \frac{1}{8}^*$
Na の質量 (g/1枚)		11.310	11.550	7.110
SUS の質量 (g/1枚)		24.13	24.05	10.039
試料内平均組成 ( $10^{22}/\text{cm}^3$ )	Na	1.80802	1.84637	2.2731
	Cr	0.30869	0.29407	0.25150
	Fe	1.1457	1.09789	0.90727
	Ni	0.14726	0.20068	0.17095
セル平均組成 (格子管の1パック 154.79 $\text{cm}^3$ 内に試料が 1枚ある場合のセル 平均組成 $10^{22}/\text{cm}^3$ )	Na	0.19141	0.19547	0.12033
	Cr	0.032681	0.031133	0.013315
	Fe	0.12129	0.11623	0.048030
	Ni	0.015592	0.021246	0.0090493

\* ドイツ製試料の寸法は一応  $2'' \times 2'' \times \frac{1}{8}''$  としてあるが、実際の幅は 3.513 mm あり、 $\frac{1}{8}'' (= 3.175 \text{mm})$  よりも大きい。したがって  $\frac{1}{8}''$  としての規格通りの装填は無理である。

るべく均質に近くなるよう、しかも引出し内で左右対称になるよう配置されている。このことは、非均質効果をできるだけ小さく抑えて均質計算の精度を高め、またセル計算を可能にする上で重要なことである。

V-1集合体の試験領域に用いられている Na は基準系では全部英國製試料であり、今回の Na void 効果の測定は主にこの試料を用いて行なわれたので、その測定値を基準の実験値として扱うこととする。日本製試料とドイツ製試料については、互に独立の実験値を求める意味で同様に Na void 効果が測定されたが、日本製Na 試料については一部の試料に水分が混入している恐れがあり、実験値の信頼性に疑問が残っている。そこで日本製試料による実験値並びに試料の信頼性の疑問に関しては Appendix 1の方に集録した。ドイツ製試料については Table 2で明らかなように中味のNa 量に比べて被覆のステンレスの量が少く、その点で優れた試料と言える。しかし試料の幅が規格とは異なるため標準の装填パターンが組めず、今回は実験値の数も少ないので、Appendix 2にまとめ実験値の参考にするに止める。

Na void 効果の測定は Na かんを Void かんで置換することにより被覆のステンレスはそのまま中味の Na のみ取り去られた状態を作り、その際の反応度効果を検出することにより行なわれる。Void かんとしては、日本製試料とドイツ製試料についてはそれぞれに対応するものがあり、Void かんの寸法、ステンレスの量ともに Table 2 の Na かんと同じである。しかし英國製試料に対しては対応する Void かんがないので、実験では同じ寸法の日本製試料の Void かんを用いて代用し、Void かんの組成の違いは計算で補正することにした。

### 2.3 Na Void 効果実験

Na void 効果に伴う反応度変化は、引出し中の Na かんを Void かんで置換した場合の臨界点のいずれ、即ち臨界時の制御棒の変化によって測定される。この測定方法は、Void に伴う反応度変化を較正済の制御棒の反応度値で補充して臨界に保ち、その時移動した制御棒の位置の差を較正曲線から反応度に換算する方法である。V-1集合体で行なった Na void 効果実験は次の 4 種類に分類することができる。即ち、

- (1) チャンネル閉塞効果の径方向分布
- (2) 軸方向分布
- (3) 炉心中心 Void 効果
- (4) 広領域 Void 効果

である。実験精度を上げるために、上記の(1), (2), (3)の実験は FCA の 1/2 集合体を密着させたままの状態で置換を行なった。これらの一つについてその測定法並びに測定結果を以下に示す。但しこれらの測定結果は、英國製Na 試料と日本製Void かんのステンレスの違いを補正する以前の生の測定データである。こうしたのは、ステンレスの違いをいかに補正するかがすでに解析上問題であり、Data-method の違いにより補正量がかなり異なるからである。

#### (1) チャンネル閉塞効果の径方向分布

この実験は工学的には、サブアセンブリー 1 本が 100% Void になった場合に相当しており、この効果の半径方向の空間依存性が測定された。この測定は、まず Na かんを Void かんで置き換えた引出しを予め 2 本作り、密着状態にある 1/2 集合体の固定側 (F 側) の炉心引出し 2 本と置換させ

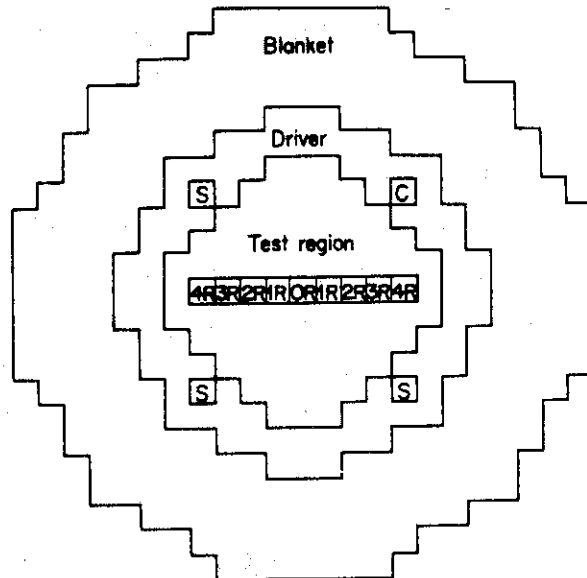


Fig. 5      Drawer position for channel void reactivity worth measurement in fixed-half of Assy. VT - 1

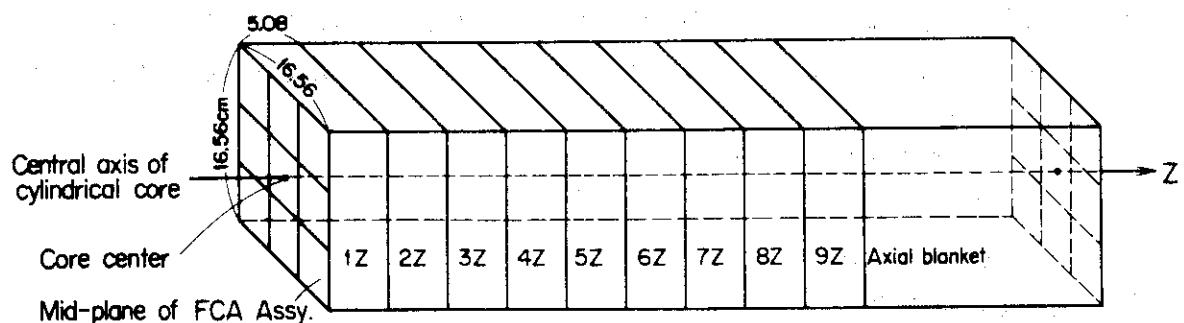


Fig. 6      View of 9 drawers for axial distribution measurement of sodium void reactivity worth in Assy. VT - 1

ることにより行なわれた。測定位置は Fig. 5 に示された通りであるが、炉心中心 0 R は引出し 1 本だけの置換で測定された。引出し 1 本当り除去される Na の質量は 407.2 g である。測定結果を Table 3 に示す。

#### (2) 軸方向分布

この測定は Fig. 6 に示すように、F 側の 1/2 集合体の中心引出し 3 行 3 列の 9 本を使い、円筒炉心の中心軸即ち Z 軸に沿って 1 パックずつ測定点をトラバースさせることにより行なわれた。この測定は本来円筒炉心の中心の引出し 1 本で行なうのが理想的であるが、Void 効果が小さくて測定誤差に埋没してしまう恐れがあるため、9 本で行なわれた。したがって測定領域の大きさは 9 パックであり、除去される Na の量は 407.2 g である。測定領域をこのようにとった場合、領域内の径方向分布の勾配が小さいと言え、厳密には空間的に無限小のサンプルの Void 効果を求めたことにはならない。しかし相対的な軸方向分布並びに有限体積の Void 効果として測定結果の意味は十分にあると考える。測定結果を Table 4 に示す。

#### (3) 中心 Void 効果

炉心中心 Void 効果の測定は、中性子束の勾配がなく、したがって中性子の漏洩のない炉心中心における Void 効果を測るのが目的であるから、測定領域はできるだけ小さく、無限小サンプルに近いことが望ましい。しかし測定精度の観点からは領域が大きく測定値の絶対値が大きく、また 1/2 集合体を密着したままで行なうことが望ましい。そこで、固定側の炉心中心 3 行 3 列の (1, 2) Z, 即ち  $3 \times 3 \times 2$  パックを測定領域とした。Na 試料は英國製だけでなくドイツ製および日本製でも行なわれ、また A 1 の Void 効果も測定された。

A 1 void 係数の測定は模擬実験としての実際的な意味はないけれども、計算法並びに実験誤差のチェックのためには有意義な方法である。というのは、A 1 と Na は質量数も似ており散乱物質としてほぼ同等の反応をするが、共鳴の位置など断面積カーブはかなり相違しており、単位原子数当りの Void 係数の絶対値は A 1 の方が一般に大きい。即ち Na と同様の点もあれば相違している点もあり、同種のしかし独立の測定として計算法および実験誤差のチェックに意味がある。また Na は取扱い上試料にステンレスの被覆がしてあり、Na の質量のほぼ 2 倍に相当する量のステンレスに起因する反応度価値が各測定に付きまとうが、A 1 は被覆が不用であるため測定値の信頼性が高い。そこで計算法並びに実験誤差のチェック自体のためには、Na よりも上記の点で単純な A 1 の方がはるかに優れている。測定は、F 側 3 行 3 列の (1, 2) Z の  $2'' \times 2'' \times 1/4''$  の Na 試料を  $2'' \times 1'' \times 1/8''$  の A 1 板 4 枚で置き換えて A 1 の標準パターンとし、この状態から A 1 板を 1 枚あるいは 2 枚取り去って 25% Void および 50% Void 効果を測定した。結果は Na Void 効果と共に Table 5 にまとめた。

#### (4) 広領域 Void 効果

上記(3)の炉心中心小領域 Void の場合、スペクトルの変化はごく小さいと考えられ、Void 効果の加算性も保たれているはずである。しかし Void 領域を大きくしていくと、媒質自体が変化することによりスペクトルも変化し、また炉心中心からはずれることにより漏洩の効果もはいって来る。これらの効果を調べるために、炉心中心を中心として測定領域を大きくした場合の Void 効果を測定した。Na void 効果の絶対値は、Void 領域をある程度大きくした場合あるいは炉心全部の Na が喪失した場合に最も大きい値になるであろうが、その反応度価値がどれくらいのオーダーに達するかを予測することは高速炉の安全性を検討する上で重要な値である。しかし VI-1 集合体の場合試験領域全体

Table 3 チャンネル閉塞効果の測定結果

Void 領域	Void チャンネル中心の 炉心中心軸からの距離 (cm)	除去された Na 量 (g)	正配列 Void 効果 ( $10^{-5} \Delta k/k$ )
0 R	0	407.2	$0.55 \pm 0.41$
1 R	5.52	814.3	$-0.20 \pm 0.45$
2 R	11.04	814.3	$-1.96 \pm 0.45$
3 R	16.56	814.3	$-4.77 \pm 0.45$
4 R	22.08	814.3	$-8.32 \pm 0.45$

Table 4 炉心中心軸方向 Void 効果の測定結果

Void 領域	Void 領域中心の 炉心中心から の距離 (cm)	除去された Na 量 (g)	正配列 Void 効果 ( $10^{-5} \Delta k/k$ )
1 Z	2.54	407.2	$5.82 \pm 0.70$
2 Z	7.62	407.2	$5.57 \pm 0.70$
3 Z	12.70	407.2	$4.72 \pm 0.70$
5 Z	22.86	407.2	$1.11 \pm 0.70$
7 Z	33.02	407.2	$-3.99 \pm 0.70$

Table 5 Na および Al の炉心中心 Void 効果の測定結果

	Void 領 域	Void 領域の体積 ( $\ell$ )	除去された量 ( g )	正配列 Void 効果 ( $10^{-5} \Delta k/k$ )
Na	(1, 2)Z ( 英国製試料 )	2.786	814.3	$12.09 \pm 0.70$
	(1, 2)Z ( ドイツ製試料 )	2.786	1023.8	$14.03 \pm 0.70$
Al	(1, 2)Z 25% Void	2.786	353	$6.12 \pm 0.70$
	(1, 2)Z 50% Void	2.786	705	$12.94 \pm 0.70$
	1 Z 50% Void	1.393	353	$6.21 \pm 0.70$
	2 Z 50% Void	1.393	353	$6.10 \pm 0.70$

Table 6 広領域 Void 効果の測定結果

Void 領 域	Void 領域の体積 ( $\ell$ )	除去された Na 量 ( kg )	正配列 Void 効果 ( $10^{-5} \Delta k/k$ )
$3 \times 3 \times 4$	5.572	1.629	$24.27 \pm 0.97$
$5 \times 5 \times 4$	15.479	4.524	$45.12 \pm 1.49$
$5 \times 5 \times 6$	23.219	6.786	$58.80 \pm 1.49$

のVoid 効果というものは、その領域がドライバーゾーンにとり巻かれた構造であることを考えると、模擬実験としてもあるいは計算値との対比においても、直接的な意味は余りないと考えられる。そこで実験としては、試験領域の媒質に依存し、しかもVoid 効果の領域依存性を求めるべく、Table 6 に示したような3種類の大きさの領域におけるVoid 効果を測定した。測定領域が1／2集合体のF M両側にまたがるため、1／2集合体を分離して置換を行なった。密着直後は炉心の温度変化が激しいが、変化の仕方がいつも同じ傾向を示すことをを利用して、測定を常に臨界到達後20分という時間に行なうことによりVoid 効果に対する臨界点の測定誤差を回避した。

## 2.4 実験誤差

Na void 効果の値は集合体によりまた炉心の場所により正にもなれば負にもなり、しかもその絶対値は一般に小さい。測定値が測定誤差との対比においてしか意味を持ち得ないのは言うまでもないが、Na void 効果の場合は測定値の絶対値に対して測定誤差が相対的に大きいので、得られた測定値から真の知見を引き出すためには実験誤差の評価が重要な意味をもつて来る。

臨界法による反応度価値の測定は臨界点の移動すなわち臨界時の制御棒の位置の差から求めるのであるが、実験値を割り出すに当って炉心温度の変化、密着面間隙の違い、および誤装填があった場合はその補正をそれぞれ行なっている。1／2集合体を密着させたままの状態に保っていても時間の経過につれて炉心温度は(0.1～0.5°C)／10時間程度ほぼ規則的に変化し、密着面間隙は(20～80)mm／10000／10時間程度やはりほぼ規則的に変化する。これらの変化は、特性試験の際に測定された炉心温度係数 $2.35 \times 10^{-5} \Delta k/k/\text{°C}$  および密着面間隙係数 $7.23 \times 10^{-4} \Delta k/k/\text{mm}$  を用いて補正した。またNa かんやVoid かんの一部の誤装填はVoid 量とVoid 効果が比例するとして補正した。

実験誤差として考えられる要因を以下に一つ一つ挙げ、VI-1集合体の特性試験および今までのFCAにおける各集合体の特性試験のデータを参考にして、その評価を試みた。反応度の単位としてVI-1集合体の特性試験で用いられた。

$$\rho_0 = 0.0501\% \Delta k/k$$

を用い、各要因別の誤差の評価値と、それを算出する基礎となったデータを示す。 $\rho_0$  は安全棒1本を密着面から3.0cm 引き抜いたことに相当する反応度であるが、遅発中性子パラメータとしては、Sandmeier の値を用いたPu-241のλ以外はすべてKeepin の値を用いて算出された値である。

$$(1) \text{ 炉心温度測定誤差} \quad 0.0066 \rho_0$$

温度計自体の誤差と読み取り誤差を合わせて、0.1°C／(1回の温度測定)と評価して計算した。

$$(2) \text{ 密着面間隙測定誤差} \quad 0.002 \rho_0$$

以前に行なわれた分離密着繰返し試験から密着精度はC/R 1目盛にして約0.1mmと評価される。またこれとは別に、1／2集合体の密着位置指示の平均誤差を10／10000mmと評価すると、ほぼ同じオーダーの誤差が算出される。

$$(3) \text{ 装填脱時の燃料移動による測定誤差} \quad 0.012 \rho_0 / 9 \text{ 本}$$

炉心中心3行3列付近における炉心引出しの反応度価値はC/R 1とほぼ同じである。冷却室あ

るいはプラットフォームで行なわれる引出し 1 本の装填脱作業に伴う燃料移動の誤差を引出し全体として  $0.2 \text{ mm}$  と評価した。したがって引出し 1 本につき  $0.004 \rho_0$ , 9 本では  $0.012 \rho_0$ , 18 本では  $0.017 \rho_0$ , 50 本では  $0.0283 \rho_0$  になる。

(4) 分離密着の再現性の誤差  $0.006 \rho_0$

$1/2$  集合体の分離密着を繰り返すことにより、上記の炉心温度、密着面間隙、燃料移動の誤差以外に、さらに従来の経験から C/R 1 位置で  $0.3 \text{ mm}$  の誤差があると評価する。これは、炉心温度、密着面間隙、燃料移動等の誤差が分離密着の際には増幅され、上記の評価誤差以外にさらに全体としてこの程度の誤差が上積されると考えることもできる。

(5) C/R 1 臨界点指示の誤差  $0.001 \rho_0 / 1$  臨界

装置自体の誤差とある有限時間内に臨界と判断する誤差を合わせて、C/R 1 位置で  $0.05 \text{ mm}$  と評価した。

(6) 安全棒 6 本と C/R 2 の Full in の再現性の誤差  $0.0004 \rho_0 / 2$  臨界の差

以前に行なわれた Full in 繰返し試験から C/R 1 位置にして  $0.02 \text{ mm}$  と評価した。

(7) C/R 1 較正曲線の相対的誤差  $0.000015 \rho_0 / \text{mm}$

上記の(5)と(6)より較正曲線の勾配は大ざっぱに言って

$$(0.02 \pm 0.000015) \rho_0 / \text{mm}$$

となる。

(8) 一部誤装填の補正の誤差 誤装填分の価値の 1 割

一部の Na かんや Void かんの誤装填はその質量 weight で補正するが、それに伴う誤差はその補正量の 1 割とした。

(9) Na 試料の質量および不純物の誤差  $(1.5 / \sqrt{\text{試料枚数}}) \%$

プレート状の Na 試料中に含まれている Na の質量および被覆のステンレスの質量は、個々のプレート間でわずかではあるがばらつきがある。その平均質量は Table 2 に示した通りであるが、個々のプレートの Na およびステンレスの質量を調べてみると、Na およびステンレスともそれぞれの平均値から標準偏差的にとらえて 1% 程度のばらつきがある。不純物としてはステンレス中に C, Si, Mn, P, S, Mo 等が全体で 3 w/o 程度あり、Na 中には元素として C, Cl, Mg, O, H 等が数 ppm から数十 ppm オーダー存在する。そこでこれらの試料の誤差を全体として Na の質量に換算して考え、各プレートに 1.5 % の誤差があるものとして扱うこととする。そうすると N 枚のプレートを用いた測定に対しては、 $(1.5 / \sqrt{N}) \%$  の誤差があることになる。

最終的な実験誤差は、互に独立な上記の誤差が積算されたものとしてそれらの 2 乗和のルートをとることによって求められる。その結果、 $1/2$  集合体を密着させたままで行なわれる測定では燃料移動と炉心温度変化による誤差が大きく、分離密着を伴って多数の引出しを置換する測定では燃料移動に伴う誤差が圧倒的に大きいことがわかる。 $1/2$  集合体を密着したまま 9 本の引出しを置換して行なわれた軸方向分布測定の誤差は約  $0.7 \times 10^{-5} \Delta k/k$  になり、分離して 50 本の引出しを置換して行なわれた広領域 Void 効果測定の誤差は約  $1.5 \times 10^{-5} \Delta k/k$  になる。これらの値は測定される反応度変化が微小な場合、相対的にはかなり大きい誤差と言える。

以上の測定誤差とは別に、反応度スケール  $\rho_0$  にも誤差がある。 $\rho_0$  の誤差要因としては、 $\beta_i$ ,  $\lambda_i$  など核データの誤差、Fission ratio の測定誤差、Period の測定誤差等が考えられる。

$\rho_0$  の誤差は上記の(1)~(9)のランダム誤差に対して系統的誤差ということができる。反応度スケールの誤差は実験値の誤差には含めないで別個に扱われるのが一般的であるので、本実験においても実験誤差には含めていない。

### 3. 解析

計算値と実験値とを直接比較してみる、というのが結果の解析の常套手段であるが、Na void 効果の計算の場合現時点では断面積に起因する問題と式の取扱いに起因する問題の双方が考えられ、計算結果を直ちに実験結果と比較してみても正しい結論が引き出せるとは限らない。そこで、計算値の信頼性を確かめる意味でいろいろな Data-method による計算値間相互で比較検討してみることが必要である。断面積セットとしては JAERI-Fast 70群セット<sup>3)</sup>とAGLI ライブライバー 1950 群とを主に用いて計算した。AGLI ライブライバー<sup>4)</sup>についてはそれぞれの Version 間の比較も行なった。そのほか比較のため、ABBN, RCBN<sup>5)</sup>などでも一部計算してみた。なおこれらの計算結果は特に断らない場合英國製 Na 試料を用いた体系における Void 効果であり、求めようとしている VI-1 集合体における Void 効果とはこの値にはかならない。したがってこれらの計算結果は、日本製 Void かんを使用して得られた実験値に直接対応する値ではない。被覆のステンレスの違いに対する補正是実験値の方に施し、この章の計算結果に対応する値に直して次章で両者を比較する。

#### 3.1 1次元 P1 摂動計算

JAERI-Fast 70群セットを用いて1次元臨界計算コード FRAUP 1<sup>6)</sup>で臨界計算を行なうことにより球体系の中性子束分布および Adjoint flux 分布を求め、炉心中心付近の Na をそれぞれ 25%, 50%, 75%, 100%, Void にした場合の反応度変化を1次元摂動計算コード PIPERT で摂動法により計算した。インプットの 70 群断面積を準備する PICX 70 も含めて、これらのコードは Modular code system DOYC-II に含まれているものである。

実際の VI-1 集合体は 3 領域からなる円筒型であり、特に Test region は

$$\frac{H \text{ (高さ)}}{D \text{ (直径)}} = \frac{9.144 \text{ cm}}{56.06 \text{ cm}} = 1.63$$

の細長い円筒型であるが、計算モデルはこれらを適当な球で近似したことになる。そのため中心から離れるに従って中性子束分布並びに Adjoint flux 分布の実際とのずれが大きくなると予想され、摂動法による反応度価値計算はこの場合炉心中心に極近い範囲に限定される。計算に用いた臨界体系の半径はそれぞれ  $r_{\text{core}} = 30.36 \text{ cm}$ ,  $r_{\text{driver}} = 45.39 \text{ cm}$ ,  $r_{\text{blanket}} = 67.92 \text{ cm}$  であるが、これらの領域の空間メッシュ数はそれぞれ 17, 16, 16, 計 49 メッシュで計算した。基準体系の Driver や Blanket の厚さ、あるいは Blanket が DU であるか NU であるかなどは臨界性自体には勿論影響するが、臨界系である限り 1 次元摂動計算でも炉心付近の Void 効果には殆んど利かない。作られた Void 領域の実際の形は直方体であるが、これを等体積の球で近似したモデルで反応度価値を計算した。

計算結果を Table 7 に示す。さらに断面積セットによる計算値の違いを見るため、JAERI-Fast-0, JAERI-Fast-II, ABBN, RCBN の 4 種の 25 群セットを用いて拡散近似摂動計算コード SIMPLER<sup>7)</sup>により計算してみた。これらの結果も併せて Table 7 に示してある。計算

Table 7 各種断面積セッタによる中心Na void 効果の一次元擾動計算の結果

Void 領域 (バックス数)	Void 領域 の 体 積 ( $\ell$ )	Void 領域 の 等価半径 ( cm )	除去された Na 量 ( kg )	J-F-II 70 群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	J-F-0 25群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	J-F-II 25群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	ABBN ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	RCBN ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
3×3×2	2.786	8.729	0.814	7.65	9.97	10.9	8.84	5.66
3×3×4	5.572	1.0998	1.629	13.8	18.0	19.9	15.7	9.63
5×5×4	15.479	15.461	4.524	26.7	36.9	42.4	29.5	14.9
5×5×6	23.219	17.697	6.786	29.3				
k-eff				0.99998	0.98680	1.00154	1.02578	0.99109

モデルは JAERI-Fast 70 群による 1 次元 P1 計算で臨界調整した前述の球を用いており、断面積セットによる  $k_{-eff}$  の違いも見ることができる。これらの計算結果はそれ自体、濃度的に何% Void の摂動の値を用いるか、すなわち遮蔽因子に起因する誤差や摂動領域が大きいことによる誤差などを含んでいる。しかし Table 7 の計算結果を見ると、これらの系統的な誤差の大きさの如何に拘らず、この種の断面積セットによる Void 係数はセットによって大幅に異なることが明らかである。

同様の方法で  $A\ell$  の Void 係数を計算した結果を Table 8 に示す。炉心中心付近に Na の代りに  $A\ell$  を入れた領域を新たに設けて基準系とし、その  $A\ell$  が濃度的に 50%だけ Void になった場合の反応度変化を摂動法で求めたものである。基準系から  $A\ell$  を濃度的に 50%だけ Void にした場合から  $A\ell$  void 係数を計算したのは、実験がそのような体系で行なわれたからである。Table 8 の計算結果を見ると、この種の断面積セットによる  $A\ell$  Void 係数は Na void 係数と同様にセットにより大幅に異なることが明らかである。

前記 2.2 で述べたように英國製試料には対応する Void かんがなく、Void 効果の測定は止むを得ず日本製 Void かんを使用して行なわれた。その補正を行なうため、英國製 Na 試料に対応する仮想の Void かんを用いた場合と日本製 Void かんを用いた場合の Void 効果の違いを調べてみた。その結果、Table 9 に示されたように Void かんの違いによる Void 効果の差は JAERI-Fast 70 群では約 2% であることがわかった。この値は勿論 Void の大きさや場所の違いにより少しずつ異なる性質のものである。この差は Void かんのステンレスの違いによるものと考えられるが、その物理的な意味を調べてみよう。Table 2 において日本製 Void かんのステンレスと英國製 Na 試料のステンレスを比べてみると、ステンレスの質量は殆んど同じであるがその組成は異なり、前者は後者に比べてクロムと鉄が少なく、その分だけニッケルが多くなっている。ところがニッケルはクロムや鉄に比べて 1.0 KeV 以上の高エネルギー領域で吸収断面積がかなり大きい。したがって前者は後者に比べて高エネルギー領域で吸収断面積が大きいことになり、Void 系として日本製 Void かんを使用すれば反応度効果がマイナス側にずれ、見掛け上 Na Void 効果を小さくする結果になったものと考えられる。Void かんの違いによる差が約 2% であるというこの計算結果は、用いた断面積セットに依存した値であり、セットの違いによりかなり異なることが予想される。というのは、この差はクロムおよび鉄とニッケルとの置換に伴う反応度変化を考えることができるが、置換に伴う反応度変化は両者の断面積セットによる差が殆んどそのまま反応度変化に利くと考えられ、クロム、鉄およびニッケルの断面積はセットによりかなりの違いがあると思われるからである。要するにこれらの断面積の誤差は、基準系と Void 系で同じものを使用している限り Na Void 効果の計算値には直接影響しないが、これらの置換に伴う反応度変化の計算値にはもろに影響するということである。

また Na 試料の違いによる Void 効果の違いを見るため、英國製試料の代りに日本製試料およびドイツ製試料を用いた場合の Void 効果を計算してみると、Table 9 に示すような結果になった。これら試料の違いにより摂動法による Void 効果の計算値に約 4% の差が生じることがわかる。この差は、Na および被覆のステンレスの違いによる炉心の均質的組成の違いから来る Void 効果の差、基準系の  $k_{-eff}$  の違いによる Void 効果の差、並びに試料の厚さ等が変わることによる Void 効果の差などによるものと考えられる。

Table 8 各種断面積セットによる中心 Al void 効果の 1 次元 P1 摂動計算の結果

Void 領域 (バック数)	Void 領域 の 体 積 ( $\ell$ )	Void 領域 の等価半径 (cm)	除去された Al 量 (kg)	J-F-II		J-F-0		J-F-II		ABBN		RCBN
				70群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	25群 ( $\times 10^{-4} \Delta k/k$ )	25群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	2.5群 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )					
3×3×2	2.786	8.729	0.705	15.8	14.4	14.0	10.3	12.6				
3×3×4	5.572	10.998	1.411	29.9	26.9	26.3	19.0	23.6				
$k_{eff}$				0.99995	0.986647	1.001397	1.02561	0.99084				

Table 9 Na 試料および Void からの違いによる Void 効果の違い

Na 試 料	英 国 製	英 国 製	日 本 製	日 本 製	ド イ ツ 製
Void かん	英 国 製	英 国 製	日 本 製	日 本 製	ド イ ツ 製
領域 3×3×2 ベックの Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	7.65	7.51	8.12	9.18	
単位 Na 量当りの Void 効 果 の 比	1	0.982	1.039	0.954	

### 3.2 2次元拡散計算

2次元拡散コード CI TATION<sup>8)</sup>を用いて直接計算並びに摂動計算することにより Void 効果を計算した。前節で述べたようにまず JAERI-Fast 70 群セットで P1 計算をすることにより 1 次元体系のスペクトルを求め、それを用いて各領域内で 70 群から 26 群に縮約したものをそれに相当する 2 次元体系の各領域の断面積とした。Void 領域の断面積は、1 次元の基準体系中に出来るだけ同じような Void 領域を設けて 70 群で P1 計算を行ない、そのスペクトルを使って 26 群に縮約したものを用いた。エネルギー 26 群の切り方は FCA VI-1 集合体のスペクトルを考慮して決したものであるが、1 KeV 以上は 1 decade 当りほぼ 5 群の粗さになっている。2 次元計算は  $20 \times 20$  メッシュの R-Z モデルで行なわれ、基準系並びに Void 系の固有値を計算し、また摂動法で Void 領域の反応度価値を計算した。計算結果を Table 10 に示す。求めようとする反応度価値が  $10^{-5} \Delta k / k$  のオーダーで微小であるため、固有値計算の場合  $k-\text{eff}$  の収束条件は  $10^{-6}$  で計算している。Table 10 を見ると同じ体系でありながら基準系の  $k-\text{eff}$  の値が少しずつ異なっているのは、計算しようとする Void 領域の位置と大きさに合うようメッシュの取り方をいくらか変えたからである。なおこれらの計算結果は始めに述べた通り、英國製試料で構成された炉心からある領域の Na だけが取り除かれた場合に対応している。この Table で 1Z ~ 9Z の軸方向分布の  $k-\text{eff}$  の値は、計算の都合上 Void 領域を実際の体系の 2 倍として計算した結果である。また 0R ~ 4R のチャンネル閉塞効果径方向分布の値は、円環状の領域の Void 効果を計算しそれに体積比を掛け出したものである。Table 10 の結果を見ると、炉心中心付近では直接計算と摂動計算の結果がほぼ一致しているが、中心から離れるに従い、また Void 領域が大きくなるに従って両者の差が大きくなり、摂動計算結果の方がマイナス側にずれて来る。Na を取り去って Void にするとその領域の Normal flux は全体としてエネルギー的に硬くなり、特に 3 KeV の共鳴以下で Void 効果において最も寄与の大きい減速散乱の効果は低エネルギー側では負であり、高エネルギー側では正である。そこで摂動計算における減速散乱の効果は直接計算に比べて低エネルギー側でも高エネルギー側でも less-reactive な方向へずれることになり、全体の Void 効果もマイナス側へずれたのであろう。一方、これらの 2 次元計算の結果を前節の 1 次元摂動計算の結果と比較してみると、2 次元の結果が小さめに出ている。これは、Void 効果は中心が一番大きく中心から離れるに従って減少する分布であり、計算は Void 領域の体積一定で行なっているため、2 次元計算よりも Void 効果の小さい off-center 側を体積積分したことになるからであろう。

### 3.3 1950群非均質計算

1950 群のAGLI ライブライバーを用いて炉心中心領域の Na Void 効果を計算した。そのやり方は、衝突確率法により板状セルの非均質スペクトルを計算し、それを重み関数として 1950 群から 26 群に縮約したセル平均の実効断面積を作成する。その縮約 26 群定数を用いて Sn 臨界計算コード DTF-V<sup>9)</sup>により直接計算で中心ボイド効果を求めるという方法で行なった。そこでまず VI-1 集合体の試験領域、ドライバー、プランケット並びに Void 領域など領域ごとの非均質スペクトルを計算し、その領域の実効断面積を求める。この 1950 群非均質スペクトルはその媒質の基本モードスペクトルであり、多領域である実際の体系のものとはスペクトル全体の形は少々異なるが、求めら

Table 10 JAERI-Fast Version IIによるNa void効果の2次元拡散計算結果

Void 領域	Void 領域の 体積 ( $\ell^3$ )	除去された Na 量 (kg)	直 接 計 算				振動計算による Void 効果 ( $\times 10^{-6} \Delta k/k$ )
			基準系	$k$ -eff	Void 系	$k$ -eff	
1Z	1.393	0.4072	0.9999971	1.000044	3.65	3.64	
2Z	1.393	0.4072	0.9999971	1.000034	3.15	3.08	
3Z	1.393	0.4072	0.9999965	1.000008	2.15	2.02	
5Z	1.393	0.4072	0.9999979	0.9999961	-0.9	-1.26	
7Z	1.393	0.4072	1.000010	0.9999923	-4.4	-5.1	
9Z	1.393	0.4072	0.9999987	0.9999845	-7.1	-8.4	
0R ( $\times 2$ )	2.786	0.8143	0.9999978	0.9999954	-2.4	-2.6	
1R	2.786	0.8143	0.9999978	0.9999798	-3.0	-3.3	
3R	2.786	0.8143	0.9999961	0.998680	-6.8	-7.7	
4R	2.786	0.8143	0.9999955	0.997538	-9.6	-14.5	
$3 \times 3 \times 4$	5.572	1.629	0.999971	1.000107	1.36	1.35	
$5 \times 5 \times 4$	15.479	4.524	0.999961	1.000185	2.24	2.07	
$5 \times 5 \times 6$	23.219	6.786	0.999956	1.000236	28.0	24.6	

れる実効断面積に対する影響は coarse group 内における両者の fine spectrum の相対的な形の違いだけであり、これは極めて小さいと考えられる。板状セルの非均質計算は、HUMP THUMP で Coarse group の Collision probability を計算して非均質セルの Source 分布を求めておき、それを用いて SP - 2000 により非均質セルの 1950 群スペクトルを計算する。縮約 26 群の群構造を Table 11 に示すが、これは FCA のスペクトルを考慮して決めたものであり、前節の CITATION に用いた 26 群の群構造とほぼ等しくなっている。これを用いて DTF - N で S<sub>s</sub> 球体系の K - calculation を行ない、基準系と Void 系の k-eff の差から Void 効果を出している。

Table 11 からもわかるように、AGLI ライブラリーはエネルギーの上限 10.5 MeV から下限 0.66 eV までを 0.0085 の等レサージ間隔で切った 1950 群の Fine group cross section library である。このライブラリーは A, B 2 つの File を組み合わせて臨界計算に必要な炉定数を揃える仕組みになっており、現在ある 4 種類の Version の任意の組合せが Poption で選べるようになっている。File A には各核種の全断面積、散乱中性子の角度分布、核分裂中性子数、核分裂スペクトルが含まれている。AGLI ライブラリーの 4 種の Version は AGLI-0<sup>10)</sup>, AGLI/0N, AGLI/1, AGLI/1N と呼んでいる。AGLI/0 は UKNDL と END F/B の核データ並びに JAERI-Fast セット作成に用いられた Source data から作成されたものである。AGLI/1 は高速臨界実験装置で測られた実効増倍率および核分裂率比の約 60 個の積分実験値を用いて AGLI/0 を修正したものである。AGLI/0N および AGLI/1N は上記の 2 種の Version の Na の断面積のみを差し換えたものであり、Na の 3 KeV の共鳴付近の断面積について報告された新たなデータ<sup>11)</sup>を取り入れたものである。

断面積セットの信頼性を調べる目的で AGLI ライブラリーの各 Version による Na void 効果の計算値を比較してみる。Table 12 は V-1 集合体試験領域の中心  $3 \times 3 \times 3$  パックに相当する半径 9.992 cm の球状の領域の Void 効果をそれぞれの Version で計算した結果である。4 領域 43 メッシュの球を計算モデルとし、Geometry を固定しておいて k - calculation を行なったものであるが、ドライバーとブランケットについては同一の断面積を用い、試験領域と Void 領域についてそれぞれの Version から計算された実効断面積を用いた。まず File B を AGLI/0 に固定して File A を変えた場合の基準系の k - eff を比較してみると、AGLI/1 と AGLI/0 との差、あるいは AGLI/1N と AGLI/0N との差が共に約 1.55%  $\Delta k/k$  もあり、積分実験値で修正した AGLI/1 および AGLI/1N の方が臨界性について大幅に reactive であることがわかる。同様に AGLI/0N と AGLI/0 との差、あるいは AGLI/1N と AGLI/1 との差は共に約 0.19%  $\Delta k/k$  であり、Na の 3 KeV の共鳴の大きさの違いが臨界性にこの程度影響し、新データを採用した場合の方が reactive になることがわかる。また File A を AGLI/1 に固定して File B を AGLI/0 から AGLI/1 に変えた場合、約 0.84%  $\Delta k/k$  reactive になる。各 Version による Void 系の k - eff の値を見てみると、基準系の k - eff の値にはほぼ追随しており、Void 効果の大きさは Version 間の k - eff の差に比べて桁違いに小さい。計算された Void 効果は Version 間で大きな開きのあることが明らかであり、AGLI/1N - AGLI/0 セットを基準にして計算値間の比をとると 8% から 49% の違いになる。Na の 3 KeV の共鳴付近の断面積として新しいデータを用いると、Void 効果が 3 割以上小さくなることがわかる。

Table 11 非均質計算で用いた縮約26群構造

Coarse group No.	下限の Fine group No.	下限エネルギー (eV)	Coarse group No.	下限の Fine group No.	下限エネルギー (eV)	Coarse group No.	下限の Fine group No.	下限エネルギー (eV)
1	55	$6.579 \times 10^6$	10	550	$9.79 \times 10^4$	19	1045	$1.457 \times 10^8$
2	110	$4.122 \times 10^6$	11	605	$6.134 \times 10^4$	20	1100	$9.129 \times 10^2$
3	165	$2.583 \times 10^6$	12	660	$3.844 \times 10^4$	21	1180	$4.625 \times 10^2$
4	220	$1.618 \times 10^6$	13	715	$2.408 \times 10^4$	22	1270	$2.152 \times 10^2$
5	275	$1.014 \times 10^6$	14	770	$1.509 \times 10^4$	23	1360	$1.001 \times 10^2$
6	330	$6.353 \times 10^5$	15	825	$9.454 \times 10^3$	24	1480	$3.611 \times 10^1$
7	385	$3.98 \times 10^5$	16	880	$5.924 \times 10^3$	25	1600	$1.302 \times 10^0$
8	440	$2.494 \times 10^5$	17	935	$3.712 \times 10^3$	26	1950	$6.647 \times 10^{-1}$
9	495	$1.563 \times 10^5$	18	990	$2.326 \times 10^3$			

Table 12 AGLIライブリーアによる中心  $3 \times 3 \times 3$  バック Void 効果の計算値の Version による比較

Version の組合せ ( File A - File B )	基準系 k-eff	Void 系 k-eff	Void 効果 ( $\times 10^{-4} \Delta k/k$ )	AGLI/1N-AGLI/0 セットに対する比
AGLI/0 - AGLI/0	0.9843650	0.9846198	2.55	1.27
AGLI/0N - AGLI/0	0.9862534	0.9864372	1.84	0.92
AGLI/1 - AGLI/0	0.9998700	1.0001366	2.67	1.33
AGLI/1N - AGLI/0	1.0017288	1.0019292	2.00	1.00
AGLI/1 - AGLI/1	1.0082969	1.0085959	2.99	1.49

実験値の解析には、File A - File B の組合せとして現在のところもっとも信頼性が高いと考えられるAGLI / 1N - AGLI / 0を組合せたセットを用いて行なった。実際に Na Void効果の測定が行なわれた炉心中心  $3 \times 3 \times 2$ ,  $3 \times 3 \times 4$ ,  $5 \times 5 \times 4$ ,  $5 \times 5 \times 6$  バックのVoid領域を同体積の球に置き換えて計算した。計算結果を Table 13 に示す。また比較のため、板状の非均質セルの原子数密度を平均して均質にした場合の 1950 群スペクトルを求め、それから均質体系におけるVoid 効果を計算してみた。その結果、炉心中心領域における均質体系のVoid 効果は非均質体系に比べて 20 数% 大きくなつた。全く同様の方法で炉心中心領域における  $A\ell$  void 効果を計算してみた。その結果は Table 14 に示す通りであるが、均質体系の  $A\ell$  void 効果は非均質体系に比べて約 9 % 大きい。

Table 13 AGLI ライブラーー(1N-0 セット)による中心 Na void 効果の計算結果

Void 領域 (パック数) と均質・非均質の別	Void 領域の 等価半径 (cm)	基準系 k-eff	Void 系 k-eff	Void 効果 ( $\times 10^{-4} \Delta k/k$ )
3 × 3 × 2 (非均質)	8.729	1.0019095	1.0020496	1.40
3 × 3 × 2 (均質)	8.729	1.0017468	1.0019189	1.72
3 × 3 × 4 (非均質)	10.998	1.0019073	1.0021641	2.57
3 × 3 × 4 (均質)	10.998	1.0016063	1.0019245	3.18
5 × 5 × 4 (非均質)	15.461	1.0019068	1.0024824	5.76
5 × 5 × 6 (非均質)	17.697	1.0019076	1.0026530	7.45

Table 14 AGLI ライブラーー(1N-0 セット)による中心 Al 50% Void 効果の計算結果

Void 領域 (パック数) と均質・非均質の別	Void 領域の 等価半径 (cm)	基準系 k-eff	Void 系 k-eff	Void 効果 ( $\times 10^{-4} \Delta k/k$ )
3 × 3 × 2 (非均質)	8.729	1.0019841	1.0021454	1.61
3 × 3 × 2 (均質)	8.729	1.0018473	1.0020233	1.76
3 × 3 × 4 (非均質)	10.998	1.0020469	1.0023520	3.05
3 × 3 × 4 (均質)	10.998	1.0017959	1.0021286	3.33

#### 4. 実験値と計算値の比較および検討

Channel void 効果径方向分布の測定結果と JAERI - Fast セットによる計算結果を Fig. 7 に示す。計算値は実験値よりもマイナス側に出ており、実験精度によるばらつきの大きさ以上に両者は食い違っている。径方向分布としては漏洩項が dominant になる炉心周辺に近づくにつれて両者の差が縮まる傾向を示している。

Fig. 8 は Na void 効果の軸方向分布について、測定結果と JAERI - Fast セットによる計算結果を比較したものである。Pu 系の M - 1 集合体では炉心中心で Void 効果が正になり、周辺では負になっている。中心付近で実験値と計算値の一一致が悪く、周辺に近づくと一致する傾向にあるのは Channel void 効果径方向分布と同様である。同一の断面積セット並びに同一の計算法を用いながらこのように場所によって実験値と計算値の一一致の具合が異なる結果になった。これは、炉心中心では減速散乱項が dominant であり、周辺部では漏洩項が dominant であるが、漏洩項は 70 群という取り扱い方でかなり精度よく計算され、一方減速散乱項は 70 群構造が Na の減速レサジー幅に対して粗いため計算精度が悪いことを示唆していると考えられる。つまりこのことは、断面積の問題はともかくとして、中心 Na void 効果解析のためには式の取扱いにおける群構造が重要な意味を持っていることを示している。

Fig. 9 は広領域 Void 効果の測定値と各種の計算値を比較したものである。25 群拡散近似摂動計算による Void 効果が断面積セットによって大幅に異なることは前章すでに述べたが、これは 25 群断面積自体が正しいかどうかという問題ではなく、25 群という群構造による中心 Na void 効果の計算精度が Void 効果の大きさに比べて粗過ぎるためであると考えられる。したがって 25 群炉定数によるこれらの計算結果を測定値と比較してその一致の具合により炉定数の優劣や適否を論ずることはできないと考える。Fig. 9において JAERI - Fast 70 群による 1 次元 P 1 摂動計算、2 次元直接計算、2 次元摂動計算の 3 種類の結果はほぼ近い値になっている。その差の原因については 3 章で述べた。1 次元計算と 2 次元計算、あるいは直接計算と摂動計算の違いはこのようにあるけれども、一定の断面積セットから出発している限りその差は限られたものであり、測定値との対比において現在問題になっている食い違いがこのような違いによるものでないことは明らかである。ところが J - F - II 70 群によるこれらの計算結果と J - F - II 25 群による計算結果を比較してみると、同じ Source data から炉定数でありながら約 2 倍という食い違いを見せている。このことは Na void 効果の計算値が群数に大きく依存していることを示している。AGLI / 1N セットによる結果は  $3 \times 3 \times 4$  パックの測定点では測定値とほぼ一致しているが、Void 領域が大きくなると測定値よりもかなり大きな値になる。しかし均質計算に比べて非均質計算の結果の方が 2 割以上も小さく、測定値に近い値になっている。これは均質と近似した場合核分裂中性子が Na による散乱で減速され易く、U - 238 の Fast fission ボーナスが非均質の場合に比べて少ないからであろう。このことは、基準系の臨界性については均質の方が less-reactive であるという計算結果に対応している。Na による中性子の吸収や漏洩防止の効果は小さい領域を考えた場合均質と非均質の差は小さいと考えられるが、減速散乱の割合は、特に核分裂中性子の減速散乱の割合は均質に分布している場合の方が大きい。Fast fission が起るような高エネルギー領域で Na による減速散乱は反応度

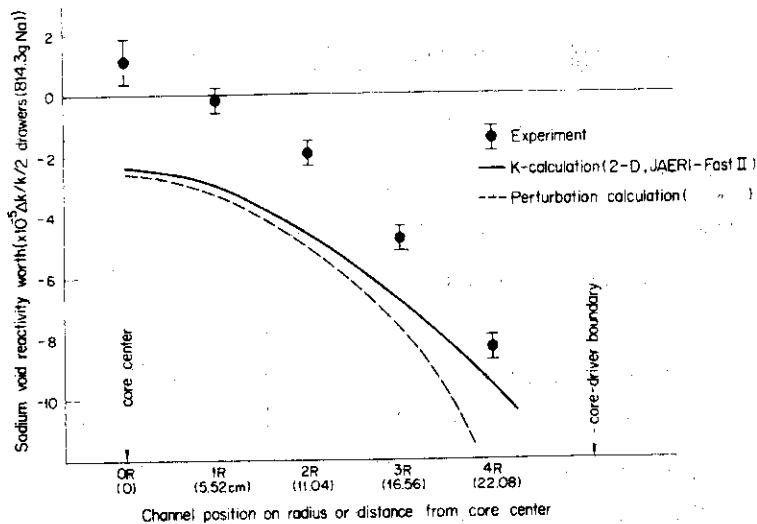


Fig. 7 Radial distribution of channel void reactivity worth in Assy VI-1

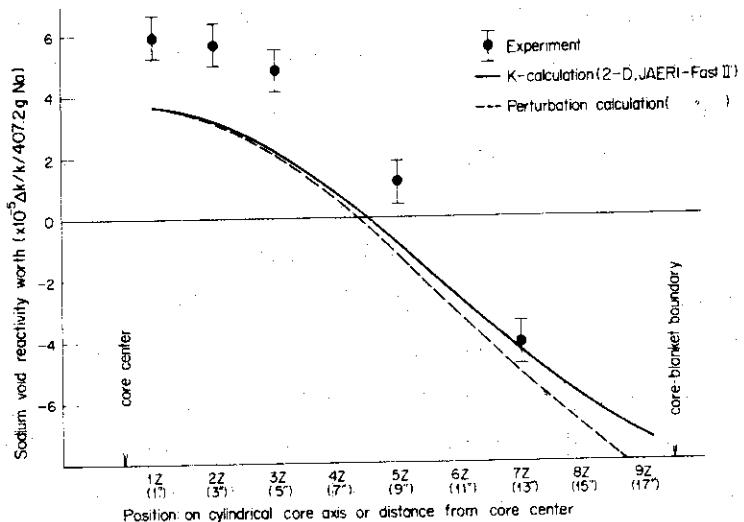


Fig. 8 Axial distribution of sodium void reactivity worth in Assy VI-1

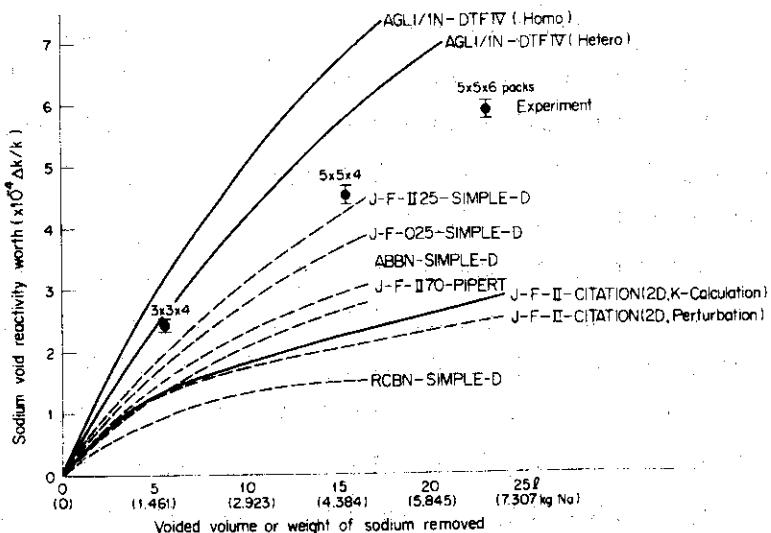


Fig. 9 Central sodium void reactivity worth as a function of voided volume in Assy VI-1

的には負の効果であり、したがってVoid 効果は正である。均質の取り扱いの方がVoid 効果の計算値が大きいのは、このような理由によるものと考えられる。前章で述べたように計算値が断面積セットにより特にその群数により著しく異なることがわかり、またAGLI の Version 間で計算値に大きな差のあることから断面積についても大きな問題が残されていることは明らかである。というのは、AGLI ライブライリー 1950 群という群構造は Na による散乱の平均減速レサジー幅がその 2.2.9 グループ幅に相当し、実効減速断面積を求める観点からしても十分細かいからである。Fig. 9において計算値と実験値を比較する場合上記のように信頼できる計算値が得られないという現状を認識してからねばならないが、比較の結果は J-F-II 70 群による計算値が実験値の約半分であり、AGLI / 1N セットによる非均質計算値は領域が小さい場合比較的よく一致しているが領域が大きくなると実験値よりも 2, 3割程度大きめである。

次に、中心小領域 Na void 効果の解析の検証として  $3 \times 3 \times 4$  パック領域を例にとり、計算値と実験値の比、いわゆる C/E 値の形で両者を比較してみる。中心 Al void 効果の値も含め、結果を Table 15 に示す。Na void 効果の実験値は J-F-II 70 群による計算で Void かんの違いを補正した値である。AGLI / 1N - 0 セットによる値は参考のため均質計算の結果も載せてある。この Table からわかる一つの一つは、AGLI / 1N - 0 セットによる非均質計算の結果は前述のような問題が残されているが、J-F-II 70 による計算結果に比べて大幅に改善されて実験値に近づいていることである。もう一つは、Al void 効果の計算結果は J-F-II 70 群と AGLI / 1N - 0 セットが殆んど同じ値を出しておらず、しかも実験値にはほぼ近い値になっていることである。これらの事柄をまとめると、Al void 効果は 70 群という群構造で 1950 群とほぼ同じ精度の計算ができるけれども、Na void 効果の場合は別であって計算値は群構造に大きく依存しており、詳細群で計算しなければならないことを示している。

議論を一步進めて Na void 効果や Al void 効果の計算値が何故このような特性を示すかを考察してみよう。Fig. 10 は AGLI / 1N - 0 セットによる 0 次元 1950 群スペクトルの計算結果であり、VI-1 集合体試験領域の基準系と Void 系の違いを示したものである。同様に Fig. 11 は J-F-II 70 群を用いた 1 次元計算による基準系と Void 系の炉心中心スペクトルである。これらの図を見ると基準系と Void 系のスペクトルは 3 KeV 付近で大幅に異なり、Na の 3 KeV の共鳴が系全体のスペクトルにいかに大きく影響するかがわかる。また Void 系のスペクトルは減速材が減少したことにより全体として硬化している。次に Fig. 12 は J-F-II 70 群による炉心中心の Adjoint flux のエネルギー分布であり、基準系と Void 系を比較したものである。Adjoint flux の低エネルギー領域における大きな変動は U-238 の共鳴吸収によるものであるが、Fig. 11 で明らかなように約 40 群以下は中性子束が殆どないので、この領域の反応度変化に与える寄与は極めて小さい。

さて炉心中心における Void 効果の反応度価値がどのようにして導かれるかを拡散近似の摂動計算の式で見てみよう。中性子バランスは漏洩、吸収、核分裂、減速散乱の 4 項で表現することができ、反応度価値もこれら 4 項の成立の和として考えられる。2 次以上の微小量を無視すると第 1 群における各項の反応度価値はそれぞれ

$$\text{漏洩} ; -\Delta D_i \nabla \phi_i \nabla \phi_i^*$$

Table 15 Naよりアルの中心  $3 \times 3 \times 4$  バッタ Void 効果の実験値と計算値の比較

	Na void	$\Delta\ell$ void
除去された Na 或は Al の量	1.629 kg	1.410 kg
実験 値 E	$(2.47 \pm 0.10) \times 10^{-4} \Delta k/k$	$(2.59 \pm 0.14) \times 10^{-4} \Delta k/k$
JAERI-Fast II 70 群計算値 $C_1$	$1.36 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_1}{E} = 0.55 \pm 0.02$	$2.99 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_1}{E} = 1.15 \pm 0.06$
AGLI/1N-0 非均質計算値 $C_2$	$2.57 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_2}{E} = 1.04 \pm 0.04$	$3.05 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_2}{E} = 1.18 \pm 0.06$
AGLI/1N-0 均質計算値 $C_3$	$3.18 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_3}{E} = 1.29 \pm 0.05$	$3.33 \times 10^{-4} \Delta k/k, \frac{C_3}{E} = 1.29 \pm 0.07$

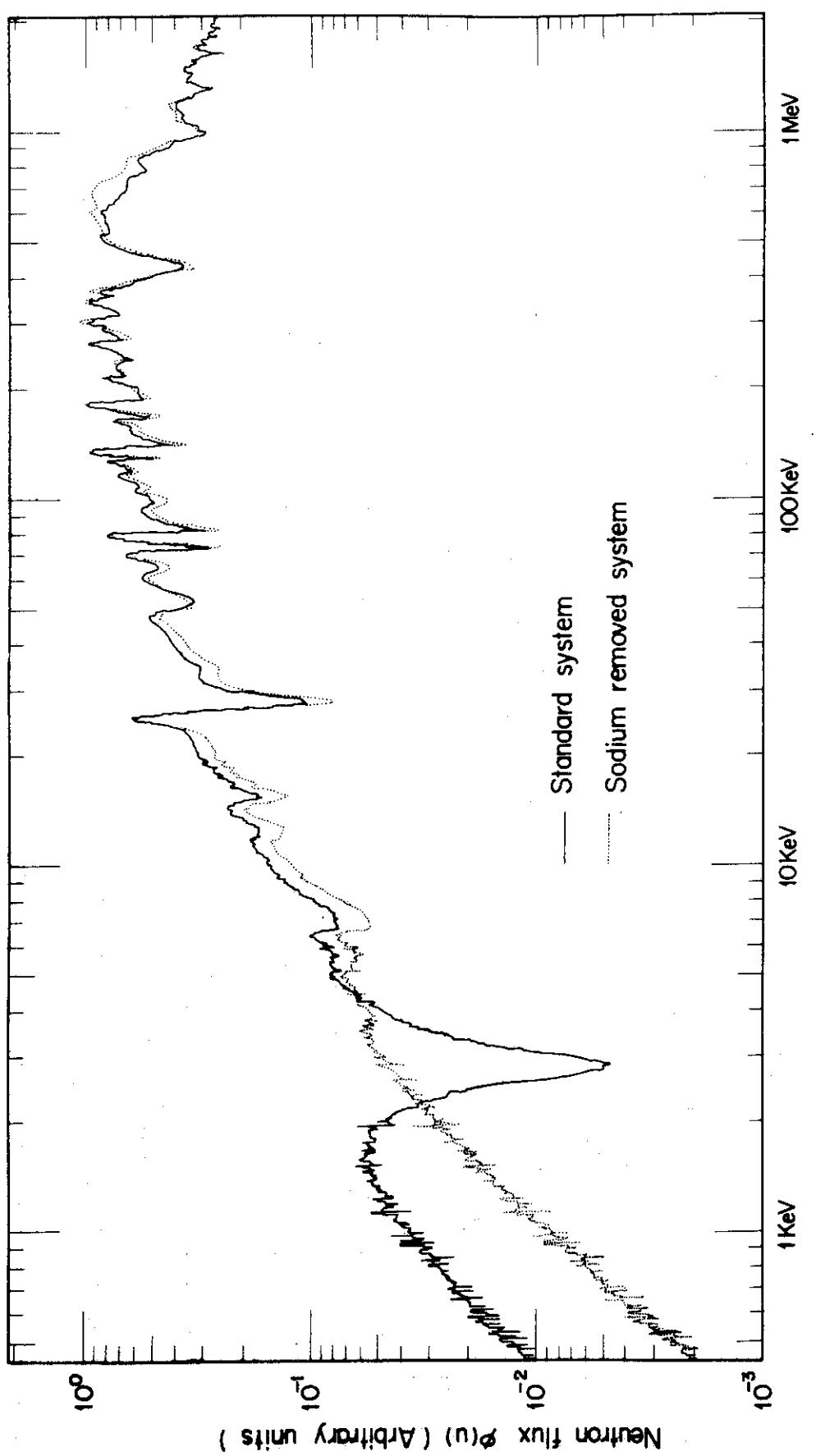
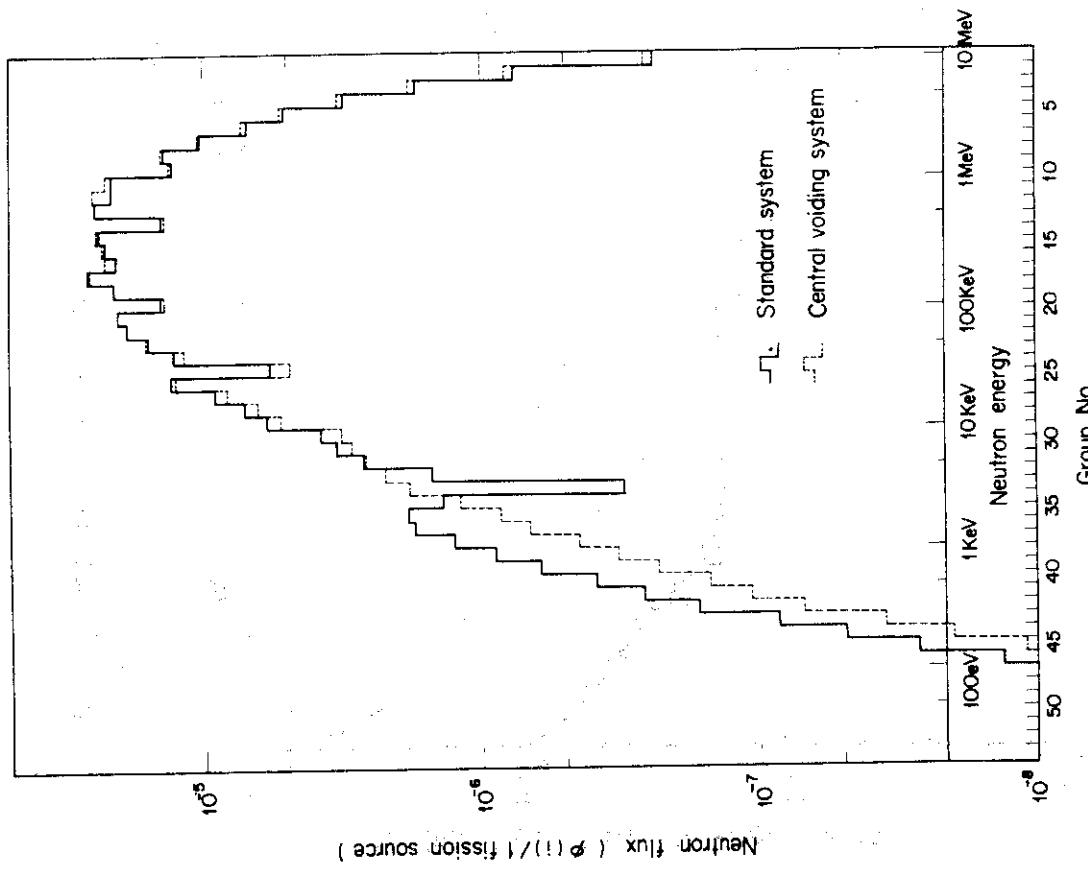
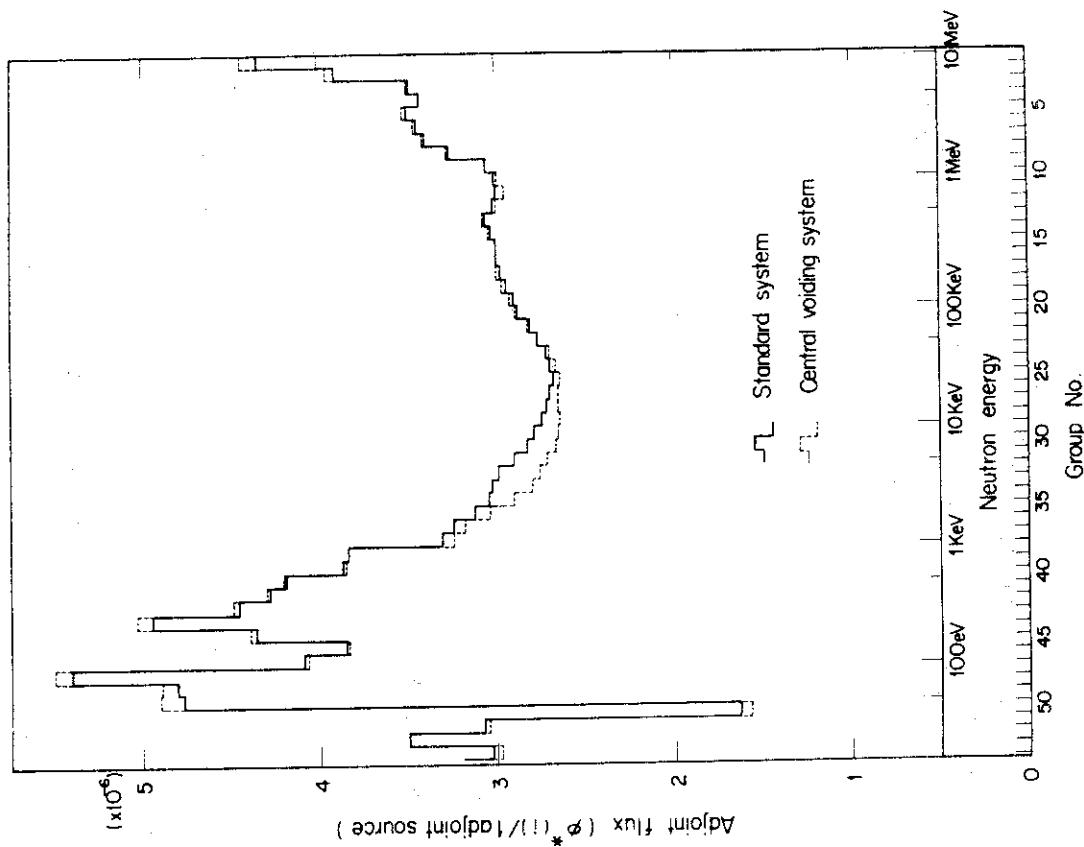


Fig. 10 Fundamental mode spectrum of Assy. VT-1 test region calculated by AGLI/1N-O library



$$\text{吸 収} ; -\Delta \Sigma_a^i \phi_i \phi_i^*$$

$$\text{核 分 裂} ; \frac{1}{k} \chi_i \nu \Delta \Sigma_f^i \phi_i \phi_i^*$$

$$\text{減速散乱} ; \phi_i \sum_{j=i+1}^{70} \Delta \Sigma_{i \rightarrow j} (\phi_j^* - \phi_i^*)$$

で表わされる。なお  $\Delta D$ ,  $\Delta \Sigma_a$ ,  $\Delta \Sigma_f$ ,  $\Delta \Sigma_{j \rightarrow i}$  は拡散係数および各目視断面積の Void 系と基準系の差である。各項の符号を調べてみると、漏洩項は炉心中心では 0 であり、off-center では一般に負である。吸収項はすべての領域で正であり、核分裂項は逆に負である。減速散乱項は Adjoint flux のエネルギー分布が群数に対して下り勾配であれば正であり、上り勾配であれば負であることがわかる。反応度値に対する各項の成分の以上のような性質は、物理的な意味を考えれば容易に理解できる。

次に、これらの成分のエネルギー分布並びに全群の和、即ち各項の大きさを調べてみよう。Fig. 13, 14, 15 は V-1 集合体の炉心中心における吸収項、核分裂項、減速散乱項のエネルギー分布であり、Na void の場合と Al void の場合を比較したものである。それぞれの分布の高さが直接比較できるよう、Na と Al の原子数を合わせてある。漏洩項は前述のように炉心中心ではすべての群で 0 であり、中心から離れるに従って絶対値の大きい負になり、炉心周辺では反応度値全体の大きさを左右する最も dominant な項になる。Fig. 13 の吸収項を見ると、Na と Al の吸収断面積の形の違いにより分布の形はかなり異なっているが、全体の反応度値の大きさはほぼ等しいことがわかる。Na の 3 KeV の共鳴は 33 群に相当するが、33 群の成分が小さいのは Fig. 11 の基準系スペクトルにおいてこの共鳴のため 33 群の flux が極端に落ち込んでいるためである。10 MeV 近くの高エネルギー側で吸収項が持ち上がる原因是、Na あるいは Al の (n, p) および (n,  $\alpha$ ) 断面積がこの付近で大きくなり、これらの反応も中性子バランス上は吸収と見なされるからである。

Fig. 14 の核分裂項を見ると、Na void の場合も Al void の場合も反応度値はすべての群で負であり、その絶対値は Na void の場合の方が 6 倍以上も大きい。これは、遮蔽因子が利いてくる低エネルギー側で Na の全断面積の方が Al のそれよりもはるかに大きく、したがって Na と Al を同じ原子数だけ取り去った場合の遮蔽因子の差は Na の方が大きくなる。そのため Pu の核分裂断面積の基準系と Void 系における差は Na の方が大きく、反応度値の核分裂成分は Na の方が絶対値が大きくなる。しかしその絶対値の大きさは吸収項や減速散乱項に比べてずっと小さく、Na void 効果あるいは Al void 効果全体の中で占める割合は 1 割程度あるいはそれ以下である。

Fig. 15 の減速散乱項を見ると、上記の吸収項、核分裂項と異なり各グループ成分の絶対値が桁違いに大きく、またグループ成分が正負にまたがっている。これは Fig. 12 の Adjoint flux 分布の勾配が正負にまたがっているからである。Adjoint flux の分布は Na 系と Al 系で余り変わらないので、減速散乱項のグループ成分の正負は Na と Al で一致している。しかしその大きさはかなり異なっており、特に 25 群以下の低エネルギー領域で Na void の反応度値が Al void に比べて絶対値のはるかに大きい負の値を示している。したがって Na void の場合減速散乱項は絶対値

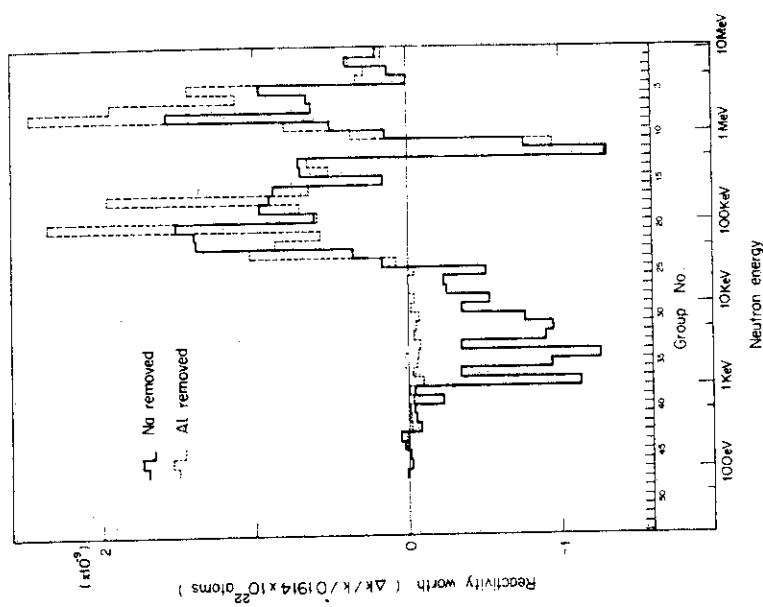


Fig. 13 Absorption component of Na or Al removal reactivity worth in Assy. VI - 1 calculated by JAERI - Fast II

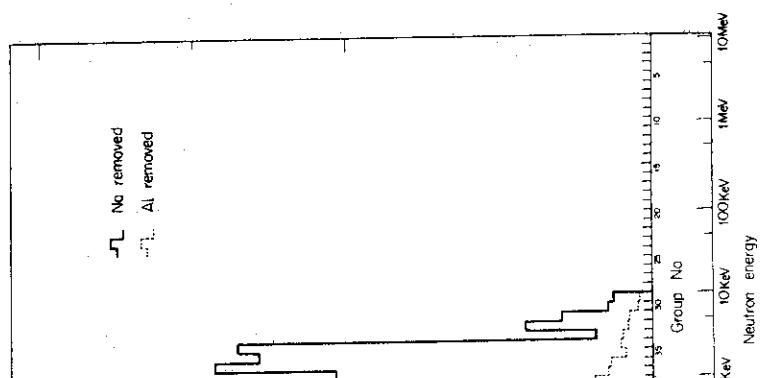


Fig. 14 Fission component of Na or Al removal reactivity worth in Assy. VI - 1 calculated by JAERI - Fast II

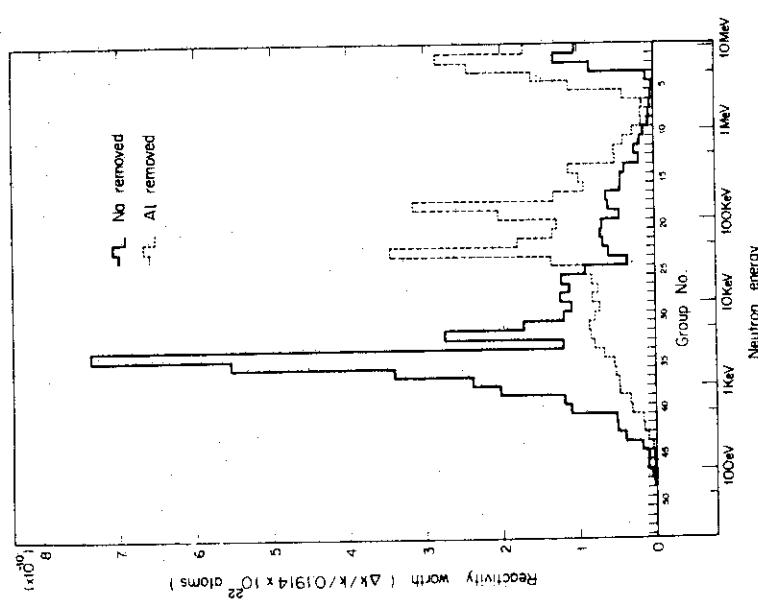


Fig. 15 Slowing down component of Na or Al removal reactivity worth in Assy. VI - 1 calculated by JAERI - Fast II

のかなり大きい正負のグループ成分の和になっており、大きい正の値と絶対値の大きい負の値が互に相殺し合った残りという形で形成されることがわかる。それに比べて  $A\ell$  void の場合 25 群以下の負の値は絶対値が非常に小さく、減速散乱項は大きい正の値と絶対値の小さい負の値の和になり、その結果大きい正の値になっている。Na と  $A\ell$  のこの違いは 25 群以下の低エネルギー領域における散乱断面積の大きさの違いによるものである。即ちこの領域で Na の散乱断面積は 3 KeV の巨大な共鳴のために  $A\ell$  に比べて全体として非常に大きく、このことが Na void 効果の減速散乱のグループ成分を絶対値の大きい負の値にしていることが明らかになった。そして全体としての Na void 効果の計算値が群数に大きく依存していたのも、Na void 効果のこのような形成過程に由来していることが明らかになった。Table 16 は上記の各項の大きさを Na と  $A\ell$  で比較したものである。吸収項はほぼ同じ大きさであるが、減速散乱項は  $A\ell$  の方が 4 倍程度大きい。核分裂項の絶対値は他の 2 項に比べて小さいので、炉心中心における Void 効果は吸収項と減速散乱項で実質的に決まっていることがわかる。そして Na の減速散乱項は 3 KeV の共鳴のために小さくなり、その結果 Void 効果全体も Na の方が  $A\ell$  よりも小さくなる。Na void 効果の解析のむつかしさはその減速散乱項の解析のむつかしさであり、それを解決するためには詳細群による計算、並びに Na の断面積特に 3 KeV の共鳴付近の断面積の精度が要求されることが明らかになった。

Table 16 JAERI-Fast 70 群 1 次元摂動計算における炉心中心 Void 効果の内訳  
 $(10^{-9} \Delta k/k / 0.19141 \times 10^{22} \text{ atoms})$

	漏洩項	吸収項	核分裂項	減速散乱項	和
Na void	-0.283	4.781	-0.951	4.088	7.635
$A\ell$ void	-0.340	4.223	-0.149	16.618	20.352

## 謝 詞

本実験を行なうにあたってVI-1集合体の特性試験を行なわれた高速炉物理研究室員の方々、並びにFCA管理機関員の方々に多大の御協力を戴いたことに対し感謝致します。また本解析を行なうにあたりCRCの中野鴻氏に御協力を戴いたことに対し感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 弘田実弥、他：Private communication (1973)
- 2) 小田島嘉一郎：“もんじゅ2次設計の概要”，動力炉技報No.5，43～57（1972年8月）
- 3) Katsuragi S, et al : " JAERI - FAST Reactor Group Constants System Part I and Part II ", JAERI-1195 (1970) and JAERI-1199 (1970)
- 4) Kuroi H. et al : " Adjusted cross section library AGLI and reliability of analysis of integral data ", International Symposium on Physics of Fast Reactors , TOKYO , A33, 1188, (1973)
- 5) 西村秀夫 : Private communication (1970)
- 6) 桂木学、鈴木友雄：“ABN群定数系を用いた一次元P1コード FRAU-PO”，JAERI-memo(公開) 2623 (1967)
- 7) 西村秀夫 : Private communication (1971)
- 8) Fowler T. B. and Vondy D. R. : " Nuclear reactor core analysis code CITATION " , ORNL-TM-2496 (1969)
- 9) Lathrop K. D. : LA-3373 (1965)
- 10) Kuroi H. and Tone T. : " Cross section data and specification of AGLI / 0 for fast reactor analysis " , JAERI-1230 (1973)
- 11) Schmidt J. J. : KFK120 (1966)

## 謝 詞

本実験を行なうにあたってVI-1集合体の特性試験を行なわれた高速炉物理研究室員の方々、並びにFCA管理機関員の方々に多大の御協力を戴いたことに対し感謝致します。また本解析を行なうにあたりCRCの中野鴻氏に御協力を戴いたことに対し感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 弘田実弥、他：Private communication (1973)
- 2) 小田島嘉一郎：“もんじゅ2次設計の概要”，動力炉技報No.5，43～57（1972年8月）
- 3) Katsuragi S, et al : " JAERI-FAST Reactor Group Constants System Part I and Part II ", JAERI-1195 (1970) and JAERI-1199 (1970)
- 4) Kuroi H. et al : " Adjusted cross section library AGLI and reliability of analysis of integral data ", International Symposium on Physics of Fast Reactors , TOKYO , A33, 1188, (1973)
- 5) 西村秀夫：Private communication (1970)
- 6) 桂木学、鈴木友雄：“ABN群定数系を用いた一次元P1コード FRAU-PO”，JAERI-memo(公開) 2623 (1967)
- 7) 西村秀夫：Private communication (1971)
- 8) Fowler T. B. and Vondy D. R. : " Nuclear reactor core analysis code CITATION " , ORNL-TM-2496 (1969)
- 9) Lathrop K. D. : LA-3373 (1965)
- 10) Kuroi H. and Tone T. : " Cross section data and specification of AGLI / 0 for fast reactor analysis " , JAERI-1230 (1973)
- 11) Schmidt J. J. : KFK120 (1966)

### Appendix 1 日本製 Na 試料による Void 効果

FCA VI-1 集合体において、日本製 Na 試料を用いて各種の Na void 効果を測定した。測定した項目は、チャンネル閉塞効果、軸方向分布、軸方向領域 Void 効果、ブランケット Void 効果、FM スルーチャンネル閉塞効果、Void 効果の Void 率による違い、広領域 Void 効果、などである。これらの測定は、測定領域のみを日本製 Na 試料で置き換えたものを基準系とし、それをさらに日本製 Void かんで置き換えたものを Void 系としてその臨界点の差を検出するという方法で行なわれた。これらの測定結果は本章で述べた英國製 Na 試料による測定結果とは独立のものであり、双方の測定結果を比較してみると測定結果の信頼性を確かめる上で重要である。なお Table 2 で示したように日本製 Na 試料と英國製 Na 試料の含有 Na 質量並びに被覆のステンレスの質量は互にほぼ等しく、ステンレスの組成がわずかに違っているに過ぎない。したがって同枚数当りの測定結果はその大きさを直接比較することができる。

チャンネル閉塞効果の測定結果を Table 17 および Fig. 16 に示す。Fig. 16 を Fig. 7 と比較して原えることは、日本製 Na 試料による測定結果の方が径方向依存性が小さく、また中心付近ではマイナス側に出ているということである。Fig. 16 の 0R と 1R は測定値の信頼性を確かめる意味で同じ測定を 2 度ずつ行なっているが、実験誤差いっぱいの違いを示しているのが注目される。

軸方向分布の測定結果を Table 18 および Fig. 17 に示す。この測定は F 側中心の 9 本の引出しで行なわれたが、その (10~13) Z の軸方向ブランケットは通常の装填通りの DU ブロックが充填された状態で行なわれたものである。この軸方向ブランケットを試験領域と同じ配列に組み直してブランケットの Void 効果が測定されたが、その結果を Table 19 および Fig. 17 に示す。その際 Pu プレートの代りに NU プレートが使用された。Fig. 17 を Fig. 8 と比較して言えることは、日本製 Na 試料による Void 効果が英國製 Na 試料による結果に比べて大幅にマイナス側に出ているということである。また Fig. 17 から言えることは、Void 領域の長さが 1 パックの場合正配列 Void 効果と逆配列 Void 効果は実験興奮の範囲内で一致しているということである。また炉心周辺の 8Z, 9Z になると (10~13) Z のブランケットの装填の違いが Void 効果に現われて来ることがわかる。

軸方向領域 Void 効果の測定結果を Table 20 および Fig. 18 に示す。この結果を見ると、Void 領域の長さが長くなるに従って正配列 Void 効果と逆配列 Void 効果の差が増大する様子がわかる。また FM スルーチャンネル閉塞効果の測定結果を Table 21 および Fig. 18 に示す。Fig. 18 の両図並びに Fig. 17 を比べてわかるることは、正配列 Void 効果の方が軸方向 Void 効果の加算性があり、逆配列 Void 効果は領域が長くなると単パックの Void 効果の和よりもプラス側にずれてくる。正配列 Void 効果に加算性が成り立つのは、Void 領域の両端がつまっておりストリーミング効果が利きにくいかからであろうと考えられるが、逆配列 Void 効果に加算性が成り立たない結果が出たことは予想外である。

Table 22 は  $3 \times 3 \times 4$  パックの領域を固定しておいて、その領域の Na の Void 率を増して行って Void 効果の増え具合を測定した結果である。具体的には Fig. 2 に示したようにセル内に 4 枚ある Na 試料のままで 1 枚を Void かんで置き換えて Void 効果を測定し、続いて Void かんを 1 枚ずつ増していく場合の Void 効果を測定したものである。Table 22 の測定結果は Void 率による Void 効果の加算性が全然成立していない。一方 Table 23 は広領域 Void 効果の測定結果であるが、この結果も全く予想外である。というのは、 $5 \times 5 \times 4$  パック並びに  $5 \times 5 \times 6$  パックの Void

Table 17 チャンネル閉塞効果の測定結果（日本製Na試料）

Void 領域	Void チャンネル中心の 炉心中心軸からの距 離 (cm)	除去された Na 量 (g)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
0 R	0	415.8	-1.05 ± 0.41
0 R	0	"	-1.86 ± 0.41
1 R	5.52	"	-2.53 ± 0.41
1 R	5.52	"	-1.86 ± 0.41
2 R	11.04	"	-2.88 ± 0.41
3 R	16.56	"	-4.74 ± 0.41
4 R	22.08	"	-6.31 ± 0.41

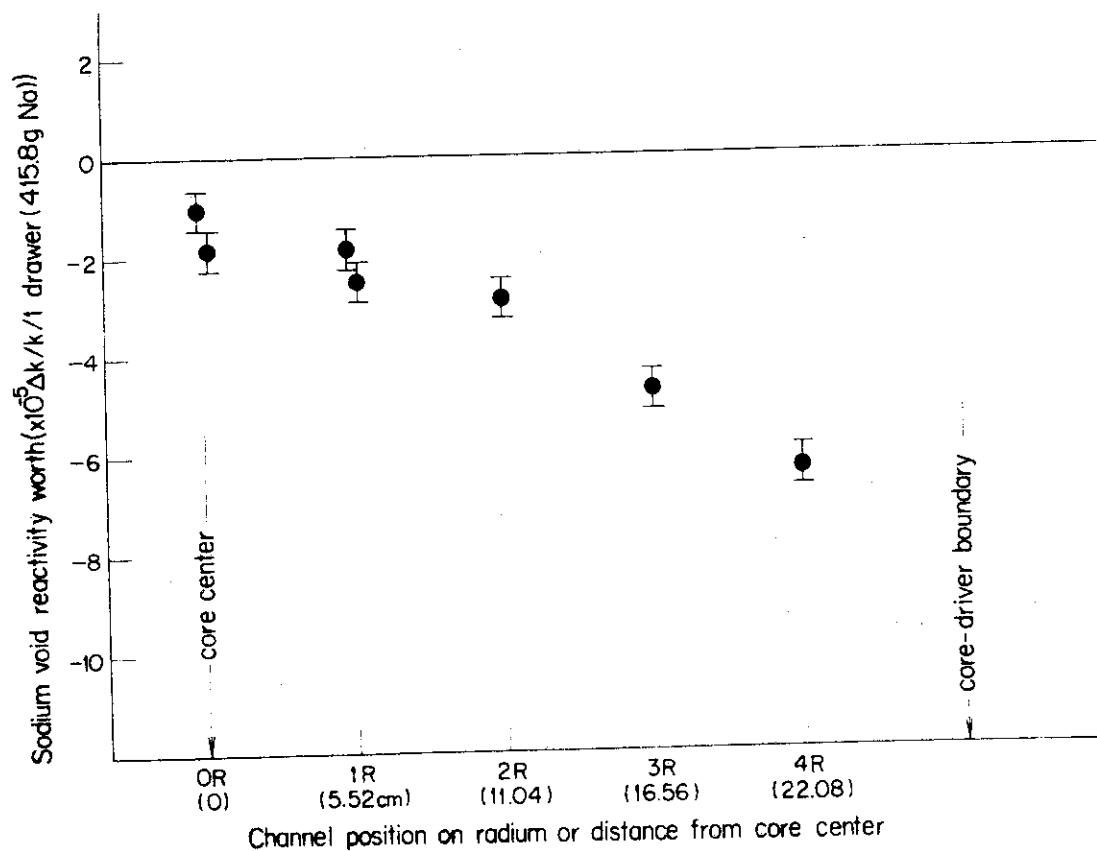


Fig.16 Channel void reactivity worth measurement in Assy.VI-1 with sodium sample made in Japan

Table 18 炉心中心軸方向 Void 効果の測定結果（日本製 Na 試料）

Void領域	Void領域中心 の炉心中心から の距離(cm)	除去されたNa量 (g)	正配列Void効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	逆配列Void効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
1 Z	2.54	415.8	$3.16 \pm 0.70$	$2.73 \pm 0.70$
2 Z	7.62	"	$1.65 \pm 0.70$	$1.29 \pm 0.70$
3 Z	12.70	"	$0.38 \pm 0.70$	$0.90 \pm 0.70$
4 Z	17.78	"	$-0.68 \pm 0.70$	$-1.31 \pm 0.70$
5 Z	22.86	"	$-3.30 \pm 0.70$	$-4.04 \pm 0.70$
6 Z	27.94	"	$-5.23 \pm 0.70$	$-4.65 \pm 0.70$
7 Z	33.02	"	$-6.57 \pm 0.70$	$-6.57 \pm 0.70$
8 Z	38.10	"	$-7.85 \pm 0.70$	$-6.65 \pm 0.70$
9 Z	43.18	"	$-7.44 \pm 0.70$	$-7.14 \pm 0.70$

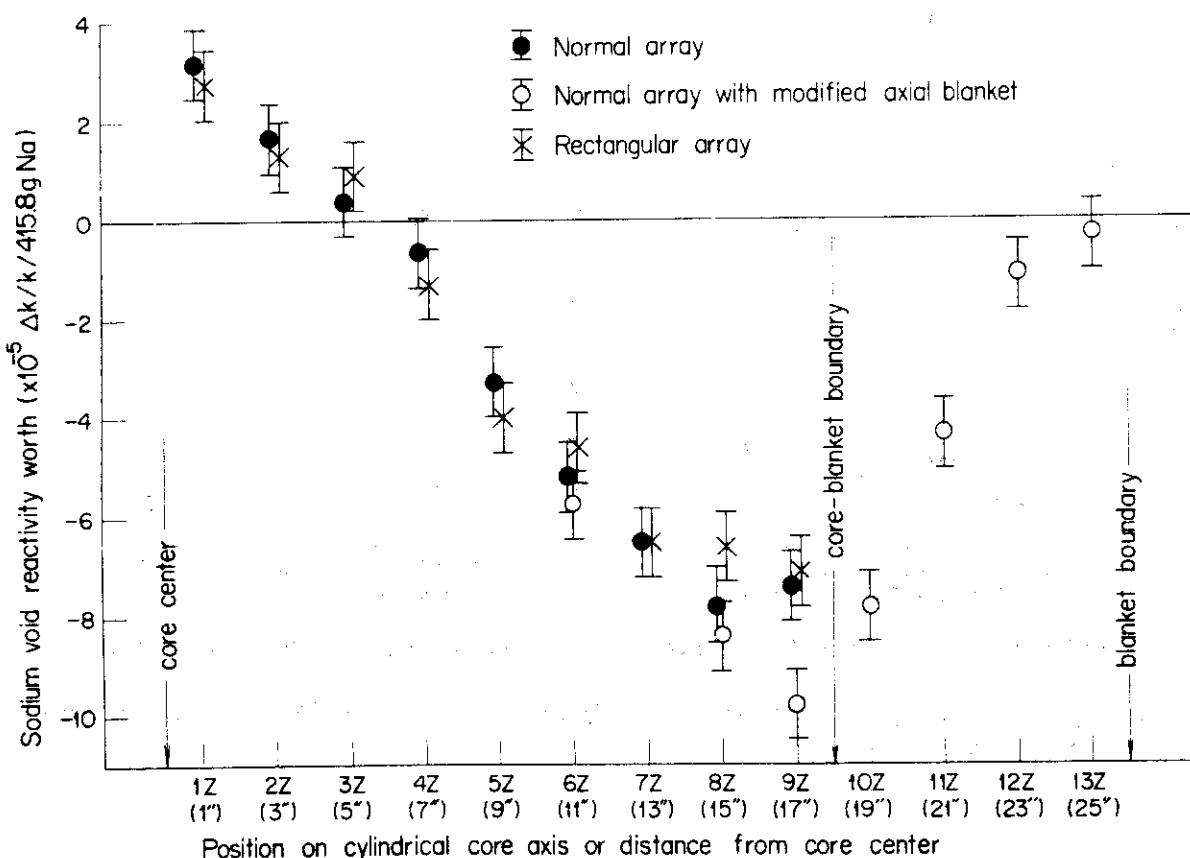


Fig.17 Axial distribution measurement of sodium void reactivity worth in Assy. VI-1 with sodium sample made in Japan

Table 20 軸方向領域 Void 効果の測定結果（日本製 Na 試料）

Void 領域	除去された Na 量 (kg)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )	逆配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
(1～3)Z	1.247	4.69 ± 0.70	6.10 ± 0.70
(1～6)Z	2.495	-2.86 ± 0.70	4.69 ± 0.70
(1～9)Z	3.742	-25.93 ± 0.70	-13.28 ± 0.70
(1～13)Z	5.405	-49.55 ± 0.70	

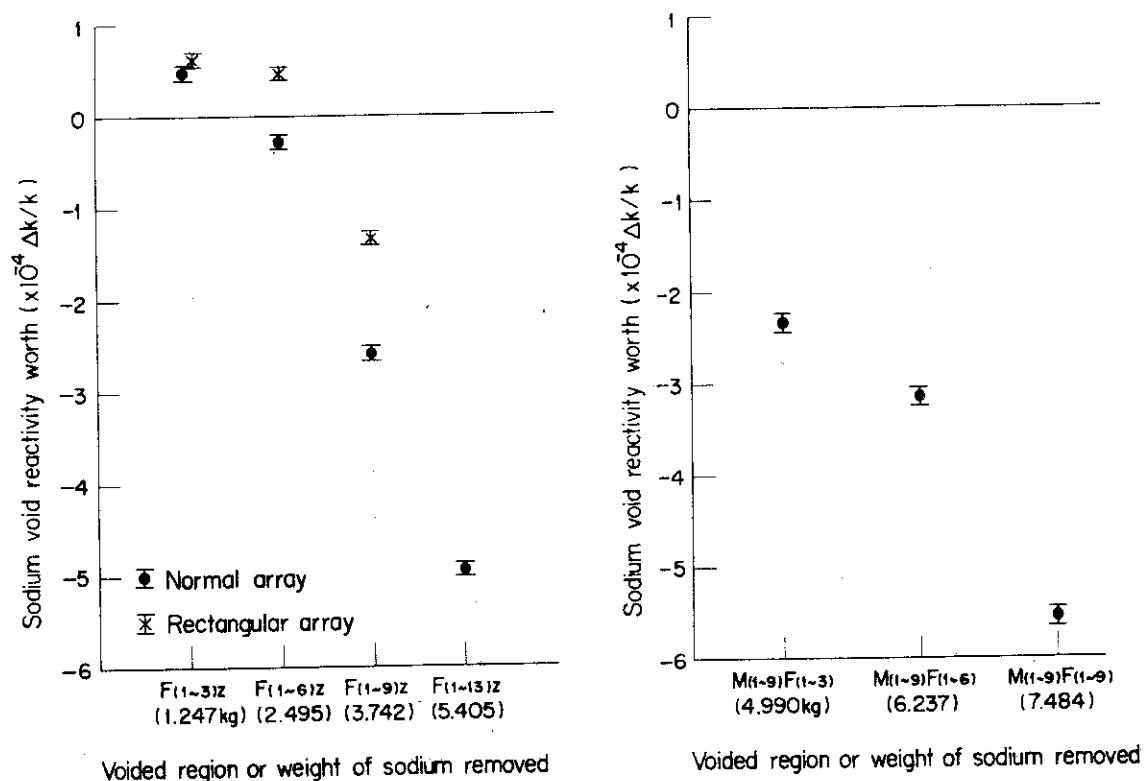


Fig.18 Sodium void reactivity worth measurement of axially grouped region in Assy. VI-1 with sodium sample made in Japan

Table 19 軸方向ブランケット Void 効果 (日本製Na試料)

Void 領域	Void 領域中心の 炉心中心からの距離 (cm)	除去された Na 量 (g)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
6Z	27.94	415.8	-5.79 ± 0.70
8Z	38.10	"	-8.43 ± 0.70
9Z	43.18	"	-9.81 ± 0.70
10Z	48.26	"	-7.84 ± 0.70
11Z	53.34	"	-4.37 ± 0.70
12Z	58.42	"	-1.14 ± 0.70
13Z	63.50	"	-0.34 ± 0.70

Table 21 FMスルーチャンネル閉塞効果の測定結果  
(日本製Na試料)

Void 領域	除去された Na 量 (Kg)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-4} \Delta k/k$ )
M <sub>(1~9)Z</sub> F <sub>(1~3)Z</sub>	4.990	-2.34 ± 0.10
M <sub>(1~9)Z</sub> F <sub>(1~6)Z</sub>	6.237	-3.15 ± 0.10
M <sub>(1~9)Z</sub> F <sub>(1~9)Z</sub>	7.484	-5.56 ± 0.10

Table 22 中心  $3 \times 3 \times 4$  バック領域 Void 効果の Void  
率による違い(日本製Na試料)

Void 率	除去された Na 量 (g)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
25% Void	415.8	$3.35 \pm 0.97$
50% Void	831.6	$2.04 \pm 0.97$
75% Void	1247.4	$2.18 \pm 0.97$
100% Void	1663.2	$4.48 \pm 0.97$

Table 23 広領域 Void 効果(日本製Na試料)

Void 領域	Void 領域の体積 ( $\ell$ )	除去された Na 量 (kg)	正配列 Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
$3 \times 3 \times 4$	5.572	1.663	$3.10 \pm 0.97$
$5 \times 5 \times 4$	15.479	4.620	$-5.44 \pm 1.49$
$5 \times 5 \times 6$	23.219	6.930	$-6.69 \pm 1.49$

Table 24 中心 Void 効果の測定結果(ドイツ製Na試料)

Void 領域	除去された Na 量 (g)	Void 効果 ( $\times 10^{-5} \Delta k/k$ )
1Z	511.9	$7.43 \pm 0.70$
(1,2)Z	1023.8	$14.03 \pm 0.70$

効果が負になっているが、これは軸方向分布の測定結果と矛盾した結果であり、また  $3 \times 3 \times 4$  パックの測定結果との関係も不自然であるからである。Table 2 2 および Table 2 3 の測定結果は Table 1 8 の 1Z, 2Z, 3Z の測定結果と本来関連があるはずであり、これらの結果をつき合わせて検討する必要がある。Table 1 8 の 1Z, 2Z の結果を基に  $3 \times 3 \times 4$  パックの Void 効果を予想すると、 $10 \times 10^{-5} \Delta k/k$  程度になるはずであり、Table 2 2 の 25% Void 効果の結果はほぼこれに一致する。この値を正しいと仮定すると、Table 2 2 の 50, 75, 100% Void 効果の測定値、並びに Table 2 3 の  $3 \times 3 \times 4$  パックの結果はすべてマイナス側にずれていることになる。そして  $5 \times 5 \times 4$  パック、 $5 \times 5 \times 6$  パックの値も大幅にマイナス側にずれていることになる。

以上のこと整理してみると、日本製 Na 試料による測定結果は英國製 Na 試料による結果に比べて常にマイナス側に出ているということ、また日本製 Na 試料による測定結果は試料を大量に使用した場合実験値としての信頼性がない、ということである。ここで思い起す必要のあることは、日本製 Na 試料はその封入口を溶接でなくて銀ロウで閉じてあり、その封入口からの Na の漏洩がフェノールフタレンにより検出された試料があるということである。その中にはプレートのふくれ上がっているものも何枚かあり、吸湿性の Na が水分を吸い込んだものと考えられた。また VI-1 集合体の中心における水素の反応度価値を測定してみると、

$$3.82 \times 10^{-5} \Delta k/k / 4.129 \text{ g ポリエチレン}$$

という結果を得た。水素の Void 効果という意味では符号が逆転してマイナスになる。VI-1 集合体は前述のごとく Na 試料としてはすべて英國製試料を装填しているが、F 側  $3 \times 3$  の引出しの 1Z だけ 9 パックを日本製 Na 試料で置き換えてみると臨界点は  $5.9 \times 10^{-5} \Delta k/k$  だけプラス側にずれた。この差は、Na およびステンレスの量のわずかな違いおよびステンレスの組成の違いに起因する反応度変化などすべてを含んだ値であるが、3 章 1 節で述べたようにステンレスの組成の違いは日本製試料の方がマイナス側にずれるはずである。それにも拘らず日本製 Na 試料を挿入した基準系の方がプラス側にずれるということは、試料中に水分が混入している可能性を裏付けるものである。

以上の考察から FCA にある日本製 Na 試料は現時点において試料の一部に水分が多少なりとも混入している恐れが強く、Na Void 効果の測定値がマイナス側にずれたり測定値に再現性がないのは試料中の水分が原因であると判断される。

## Appendix 2 ドイツ製 Na 試料による Void 効果

ドイツ製 Na 試料を用いて VI-1 集合体の中心 Void 効果を測定した結果を Table 2 4 に示す。この結果は英國製 Na 試料による測定結果と実験誤差の範囲内で一致している。