

JAERI-M

9056

FCA V-3, V-3B および V-2-R
集合体の核分裂率分布

1980年9月

溝尾 宣辰・小川 弘伸・小林 圭二*

前川 洋・松野 義明**・三田 敏男***

藤崎 伸吾・弘田 実弥

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

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、複製などのお問合せは、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 V-3, V-3B および V-2-R 集合体の核分裂率分布

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

溝尾宣辰 • 小川弘伸 • 小林圭二^{*} • 前川 洋

松野義明^{**} • 三田敏男^{***} • 藤崎伸吾 • 弘田実弥

(1980年8月6日受理)

高速実験炉「常陽」のEngineering mock-up 体系であるV-3, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-3B5 及びV-2-R 集合体における核分裂率分布の測定を行なった。使用した検出器は440 ppm劣化U²³⁸, 93 %濃縮U²³⁵及びPu micro fission chamberであり, 20 mm ϕ の実験孔の中のtraverse により中心面の半径方向分布を求めたものである。各体系の炉心構成物質は同一のものであるが、ブランケットは天然ウラン金属、酸化物ウランと減速材、及びSUS と異なっており、これによる炉心内分布の変化は小さいが、ブランケット領域においては大きな変化が見られた。

計算は、JAERI-FAST version 2 を用い、EXPANDA-4 及びEXTERMINATOR-2 により1次元及び2次元拡散計算を行なった。計算値対実験値(C/E)は、炉心内では極めて良いが、ブランケットでは一貫して1.0より小さくなる傾向を見せている。この傾向は実験孔によるストリーミング効果と計算時におけるブランケットの外側の空格子領域の取扱い方によって大体改善される。ストリーミング効果は減衰の大きな天然ウラン金属ブランケット内のU²³⁸ mfc の分布に対して約30 %の補正になることが箔の補正実験により明らかになった。計算において、空格子領域の物質としての非等方性はブランケット内の分布に大きく影響しているが、ブランケット内の非等方散乱についてはP₃まで取り入れたら十分であることが分った。

* 京都大学原子炉実験所

** 東京芝浦電気(株)原子力本部

*** 日立原研

Fission Rate Distributions on Assemblies V-3, V-3B and V-2-R

Nobutatsu MIZOO, Hironobu OGAWA, Keiji KOBAYASHI*
Hiroshi MAEKAWA, Yoshiaki MATSUNO**, Toshio SANDA***
Shingo FUJISAKI and Jitsuya HIROTA

Division of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 6, 1980)

The fission rate distributions were measured on a series of Assemblies FCA V-3, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-3B5 and V-2R. They are the systems for engineering mock-up of Fast Experimental Reactor "JOYO". Composition of core material is common for any of Assemblies. However, different material is used with the Assemblies such as natural uranium metal, mixture of uranium oxide and moderators, and stainless steel for their blanket.

One-dimensional diffusion calculations by EXPANDA-4 and two-dimensional diffusion calculations by EXTERMINATOR-2 have been performed using JAERI-FAST Version II. The ratio of calculational result to the experimental one (C/E) is very close to the unity in the core region. It is less than 1.0 systematically in the blanket region. This disagreement can be improved by taking the streaming effect of experimental hole, and by appropriate treatment of the empty lattice region outside of the blanket.

Keywords: JOYO Fast Experimental Reactor, Engineering Mock-up Critical Experiment, Fission Rate, Uranium 238, Uranium 235, Plutonium, Radial Distribution, FCA Assembly

* Research Reactor Institute of Kyoto University.

** Department of Nuclear Power, Toshiba Electric Co. Ltd.

*** Hitachi Atomic Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.

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

目 次

1 序	1
2 実験体系	3
3 反応率分布の測定	9
3.1 測定法	9
3.2 測定結果	10
3.3 補正実験	14
4 計算および計算値対実験値 (C/E) 比較	24
4.1 均質拡散計算	24
4.2 S/N 計算	26
5 結論および今後の課題	35
謝 辞	35
参考文献	35
付 錄	36

Contents

1. Introduction	1
2. Description of Assembly Configurations	3
3. Measurement of Reaction Rate Distributions	9
3.1 Experimental Method	9
3.2 Experimental Results	10
3.3 Experiments for Correction	14
4. Calculations and Comparison with Experiment (C/E)	24
4.1 Homogenized Diffusion Theory Calculation	24
4.2 Transport Theory Calculation	26
5. Conclusions and Problems	35
Acknowledgment	35
References	35
Appendix	36

1. 序

高速炉臨界実験装置（FCA）の第V炉心系は、高速実験炉「常陽」の模擬体系であり、反応率分布の測定は模擬実験の一項目である。本稿は前述の実験項目に関して核分裂計数管による測定値および第一次的な計算値について報告するものである。

核分裂率分布の計算値対実験値（以下C/Eと略す）の現状は、炉心とブランケットの境界部分およびブランケット部において1.0からずれる傾向をもち、これはFCAにおける今迄の実験および世界的に共通なものである。特にブランケット部では、実験値は計算値程小さくならず、ブランケットの末端ではC/Eは0.7あるいはそれ以下にすらなる。これに反して炉心部では全ての体系についておおむねよい結果が得られている。ブランケット部におけるC/Eの1.0からのずれは、ブランケットの物質、厚さ等にあまり関係なく、一般的な不一致の原因は分っていない。

核分裂率分布の問題は、中性子の輸送の問題であって原子炉の核計算における最も基本的なものである。計算された分布が実測値と合わないということは、その計算が実験体系の状況を忠実に再現し記述していないことを意味する。このことは体系の固有値の比較などでは分らない原子炉計算の不備な点を見出す手掛りとなる。反応度に関する問題でも、摂動法の適用限界を超える大きな反応度については、この計算値に対して、反応率分布の計算値が実験値と合っていないことが影響を及ぼすことが予想される。

反応率分布の物理的概念は明確であり、実験と計算の比較においてもその間に不確定なものはない。したがって実験値と計算値の不一致の原因是、実験値の系統的誤差（あるいは計算との比較に際して必要とする補正量）、計算に使用する群定数、計算コードの数値計算法、および計算の手法等が考えられる。計算の手法とは、現実の実験体系を計算に乗るようにモデル化する方法を意味し、反応率のような局所的物理量の計算を目的とする場合は、体系全体にわたって、その物理的状況を現実の実験体系と極めて一致させる必要がある。例えば、系の固有値の計算では適当な外挿距離を用いればよいが、反応率分布の場合にはこのような方法では限界があり、境界条件は結果に大きな影響をもつ。本稿では上記4種の原因のうち、実験値とその補正及び計算の手法について検討したものである。特にブランケット部の不一致に注目して、この領域の外部境界条件ともいべきSUS空格子領域の計算上の取り扱いについて考察した。

本稿はV-3, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-3B5, V-2-Rの体系について報告するものである。これらの体系は常陽模擬実験の中でEngineering Mock-upを目的とする体系である。V-3およびそれ以前のPhysics Mock-upを目的とするV-1, V-2体系は天然ウランブランケットであるのに対して、V-3B体系は、その径方向ブランケットを常陽に模擬し、そのブランケット特性を調べることを目的とした体系である。したがって、上記の体系の炉心組成はV-2炉心と全く同じものであり、特にV-3およびV-3Bは炉心の形状も同一のものでありブランケット領域のみ異なる。しかし、V-3B体系のブランケット模擬は模擬材料の量による制約によって不完全なものであり、軸方向ブランケットは天然ウランとなっている。またブランケット厚が充分に取れないためV-3B3, V-3B4はブランケット部がセクターとなっている。

V-3B5は常陽の燃料ラック部の核分裂率を調べるべく作られた体系であるが、現在のFCAの大きさでは寸法が足りず、炉心からの距離に関しては常陽とかなり異なり、材料の不足から極めて複雑な形状となっている。したがってこれらの体系はスペクトル模擬に重点を置いて考えられ中性子束場の勾配に関する模擬は特別な配慮をしていない。このような体系での模擬実験値は、C/Eを求めて実際の設計計算法の検定を行なうために使用され、その実験値自体ではあまり意味をもたない。前述の計算法の検定という立場からは、反応率分布の模擬実験はスペクトル模擬と同時に、中性子束場の勾配すなわち中性子束の角度分布の模擬も本来必要なことである。プランケット模擬に関して、V-3B3, V-3B4等のプランケット部のセクタ一体系を作るに際して、前もって二次元R-θによる予備計算を行ない、いくつかの注意すべき点が明らかになった。セクター角度とスペクトルとの関係は飽和的傾向はなく、セクター角度が180°の場合、セクター中心部でのスペクトルは本来の(360°)スペクトルに比して異なっている。180°のセクターを2つもつ90°セクターとして対称性をよくした場合、スペクトルはより均質的傾向に向うので本来の(360°)スペクトルからよりずれることになる。プランケットセクター部が他のプランケット部より受ける影響は、両プランケット間の直接的な中性子の流入出と同時に炉心を介した影響が考えられる。前者は、いわば円周上の中性子の移動拡散に対して、後者は動径上の中性子の移動拡散の効果である。円周上の中性子束の勾配は両プランケット物質の相異にもよるが動径上の勾配に比すべくもなく、したがって炉心を介した他プランケット部の影響は無視し得ない。セクター中心の動径上の各点のスペクトルを本来の(360°)スペクトルと比較すると、炉心より遠方程相異が大きくなる傾向がある。プランケットの末端部に来る中性子は円周上を移動拡散して来るものより、動径上したがって炉心方向から流入する方が多いことは容易に予想できる。したがってセクター的なプランケット模擬の場合、必ずしも扇形にこだわる必要はなく、炉心に近いプランケット部程模擬材料の比率を大きくする方が有利である。例えば、33cm厚のプランケットにおいて、90°セクターに必要な模擬材料の量は、はじめの11cmを180°、次の11cmを90°、最後の11cmを30°の扇形の積み重ねを行なった場合と同じ量になる。そしてこの場合後者の方が、本来の(360°)中性子束分布に近くなる。(セクター中心の動径上で)。このことは模擬材料の量が限定されている場合に極めて肝心な問題となる。このように、中性子束分布あるいは反応率分布に関するプランケット模擬については実験体系を形成するにあたっていろいろ配慮すべき問題が残されているように思う。

各体系のプランケット物質はV-3が天然ウラン金属、V-3Bの径方向プランケットは常陽模擬プランケット、V-2-RはSUS反射体となっており、V-2と比較されるべきものである。これらの形状寸法その他については第2章で概略する。実験はmicro fission chamber(以下mfcと略す)によってZ軸中心面の動径上をtraverseしたものである。実験結果およびそれに関する議論は第3章に記してある。計算はJAERI-FAST¹⁾の群定数を用い、1次元拡散コードEXPANDA-4²⁾で各種のサーベイを行ない、2次元拡散コードEXTERMINATOR-2³⁾の結果からC/Eを求めた。また、非等方散乱の効果を見るために、RSICのDLC-2を出発として、S_NコードANISN⁴⁾による計算を行なった。これらのことについては第4章に記述する。第5章において全体的な問題点に関して議論する。

2. 実験体系

本報告の対象とするV-3, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-3B5およびV-2-Rの各体系の炉心部の物質構成はV-2集合体と全く同じものであり、Table 1に示す原子数密度のものである。各体系の特性については別に報告されるので^{5) 6)}、ここでは省略する。各体系の断面図をFig. 1～6に示す。各体系の軸方向および径方向のブランケットの構成物質を略号でTab.2に、これらの物質の原子数密度をTab. 3に示す。各種引出しの装填図は省略するが(前述の参考文献を参照のこと)、軸方向の寸法は高さが60.96 cmであり、軸方向ブランケットの厚さは30.48 cmとなっている。したがって軸方向と径方向ブランケットの物質の異なる体系では、例えばV-3B1集合体の場合、軸方向の物質の配置状況は炉心と同じ高さの60.96 cmの部分はFDNまたはPDN、その上下の30.48 cmの部分はNUとなっている。

V-3およびV-3B体系は常陽のEngineering Mock-upのために作られた体系であり、炉心内にNa-channelがあり、常陽ではこの部分に制御棒が挿入されることになる。V-3集合体ではこのNa-channelにB₄C模擬制御棒を入れてその反応度価値の測定を行なった。⁷⁾

V-3集合体のブランケットはV-1, V-2集合体と同様に天然ウラン金属であるのに対して、V-3B1はUO₂(0.2%劣化)およびAl₂O₃を用いた模擬ブランケットの一種である。

これらの物質は(FDAおよびPDA)本来の模擬ブランケットであるFDNの中のNaをAl₂O₃およびSUSで更に模擬したものであり、FDNの不足を補うために使用された。V-3B体系におけるブランケット物質の変化に伴う反応度調整は、炉心内のNa-channelの数によって行なわれ、これによって各体系による炉心形状の変化を防ぐことになった。V-3B3集合体ではFDNブランケット部のセクター角度は180°に近いが、厚さが常陽に比し充分でないために、V-3B4では角度を犠牲にして厚みを増したものである。V-3B5は常陽の燃料ラック中の使用済み燃料の核分裂率を知るために作られたものであるが、寸法的には模擬されていない。SUS反射体およびNa領域の軸方向ブランケットに相当する部分はSUS(SAX)で占められている。V-2-R集合体は常陽のマークⅡ計画に相当するもので、ブランケットをSUS反射体にしたものであり、V-2集合体と比すべきものである。

Table 1 Atomic Number Densities of core Region (10^{22}cm^{-3})

nucleid	core	Na channel	JOYO core
Pu - 239	0.10458		0.10928
Pu - 240	0.009325		0.03905
Pu - 241	0.001069		0.00781
U - 235	0.1470		0.1665
U - 238	0.5836		0.5505
O	1.3101		1.7290
Na	0.8134	1.6592	0.9212
Al	0.8830		
Cr	0.3273	0.4065	0.3565
Fe	1.1950	1.4936	1.1610
Ni	0.1535	0.1752	0.1993
Mo			0.0254

Table 2 Blanket/Reflector Materials of Assemblies V

Ass.	Axial		Radial	
	V-1	NU	NU	NU
V-2	NU	NU	NU	NU
V-3	NU	NU	NU	NU
V-3-B1	NU	Zone ; FDA	Zone ; PDA	Zone ; PDA
V-3-B2	NU	Zone ; FDN	Zone ; PDA	Zone ; PDA
V-3-B3	NU	Sector ; FDN	Sector ; PDA	Sector ; PDA
V-3-B4	NU	Sector ; FDN	Sector ; PDA	Sector ; NUA
V-3-B5	NU, SAX	Sector ; FDN	Sector ; DU	Sector ; SRD
V-2-R	SAX	SRD		

Table 3 Atomic Number Densities of Blanket/Reflector Materials ($\times 10^{22}$)

	U235	U238	0	Na	Al	Cr	Fe	Ni
NU	0.0289	3.9890				0.1827	0.6652	0.0796
DU	0.00838	4.0069				0.1827	0.6652	0.0796
FDA	0.002021	0.9207	3.2167		1.1905	0.5280	1.9184	0.2258
PDA	0.001870	0.9228	3.2215		1.1905	0.5280	1.9184	0.2258
FDN	0.002021	0.9207	1.8548	0.7656		0.3134	1.1504	0.1420
NUA	0.007068	0.9752	2.7238		2.0984	0.5280	1.9184	0.2258
SRD						1.5915	5.6420	0.6959
SAX						1.6319	5.7849	0.7135
NPT						0.4441	1.6355	0.2044
JOYO-R	0.00279	1.100	2.206	0.7304		0.3036	1.006	0.1727
JOYO-Z	0.00219	0.8619	1.728	0.9212		0.3565	1.1610	0.1993

JAERI -M 9056

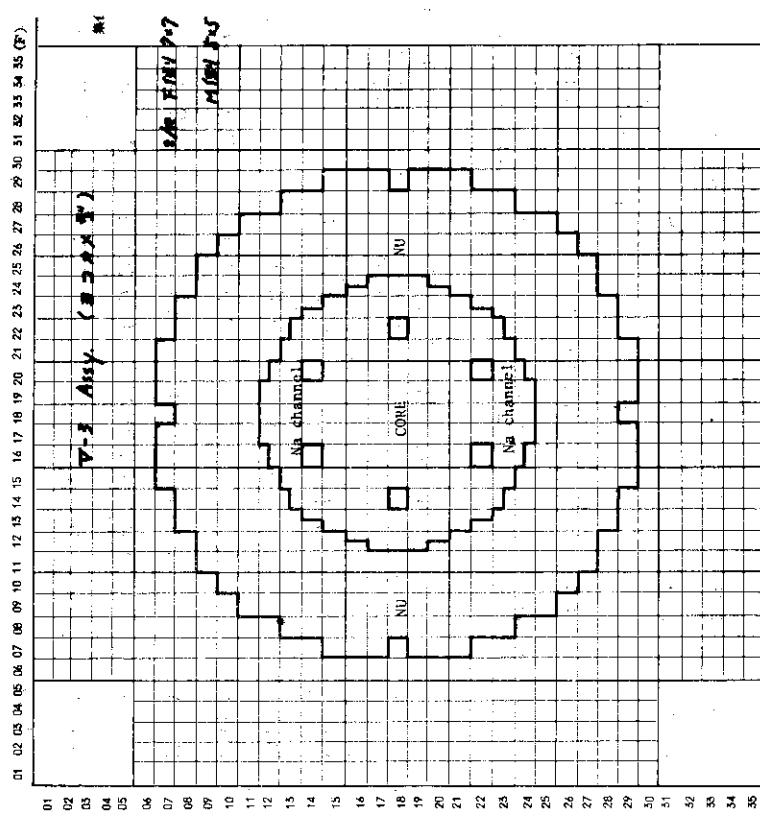


Fig. 1 Assembly V-3 Loading Pattern

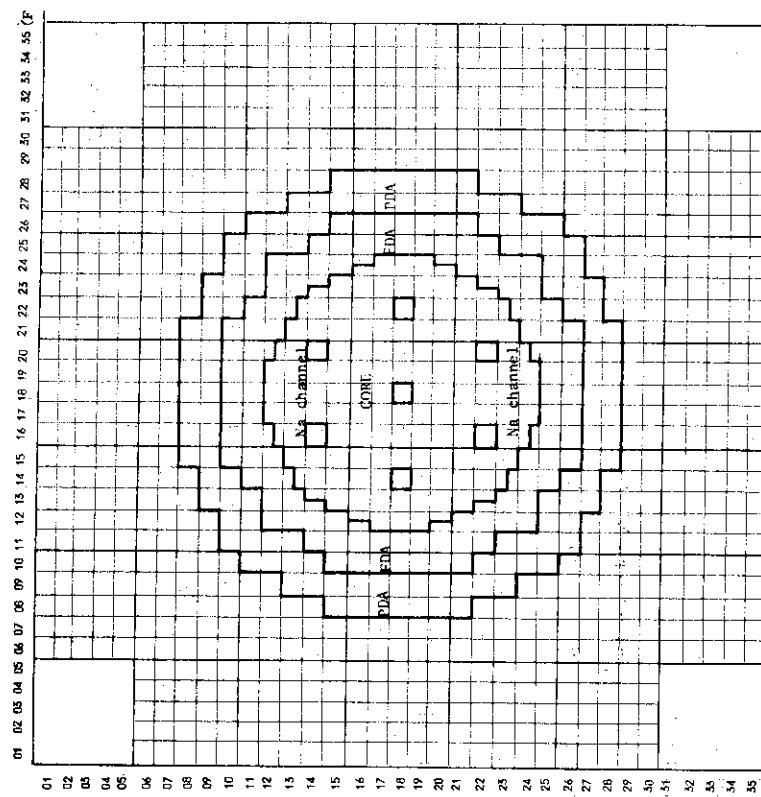


Fig. 2 Assembly V-3B1 Loading Pattern

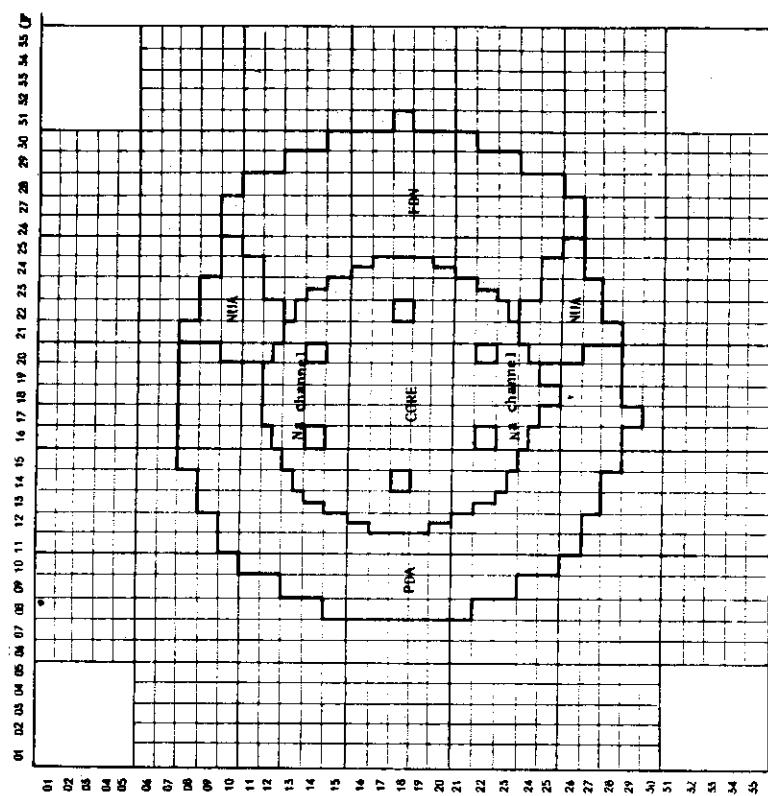
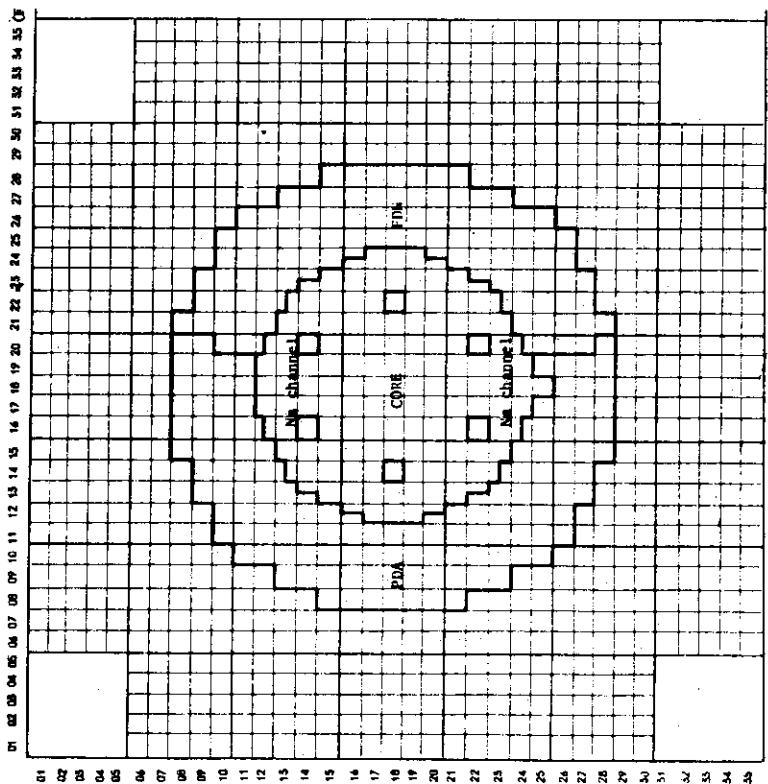


Fig. 3 Assembly V-3B3 Loading Pattern
Fig. 4 Assembly V-3B4 Loading Pattern



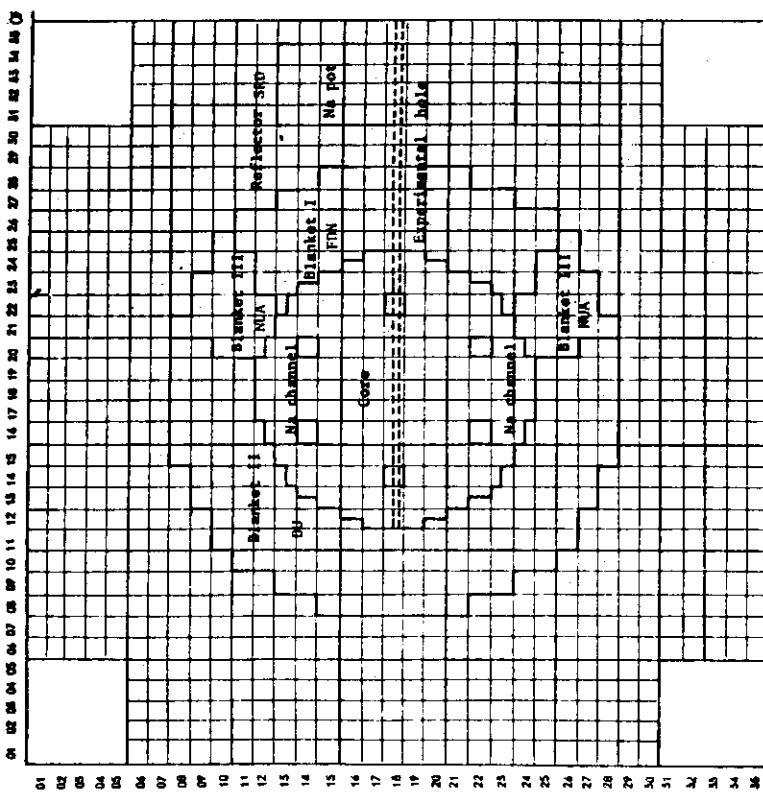


Fig. 5 Assembly V-3B5 Loading Pattern

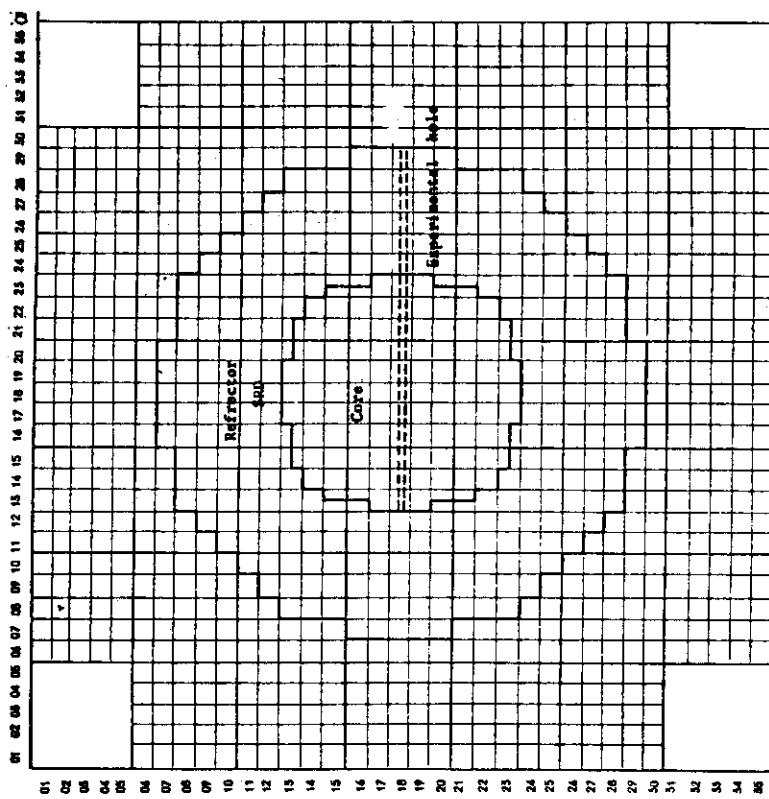


Fig. 6 Assembly V-2-R Loading Pattern

3. 反応率分布の測定

3.1 測定法

反応率分布の測定は補正実験を除き micro fission chamber (以下mfcと略す)で行なわれた。使用した各mfcの同位体存在比その他の仕様をTable 4に示す。 U^5 mfc内の U^8 の寄与はあまり考えなくてよいが、 U^8 mfc内の U^5 の寄与はブランケット部において無視できず、 U^8 mfcの分布は U^8 そのものの分裂率分布に比し、なだらかな傾向をもつ。これらのmfcはcoating量が少ないので α との分離は容易である。各mfcの有効長さは20 mm余があるので、極めて積分的な測定値になっている。炉のpower levelのmonitorsとしては、常に3系統を用意し、それぞれ計数率を異なるものとしてある。 U^5 fission chamber, U^8 fission chamber, Np fission chamber, micro BF_3 等をこれに使用した。いずれも計数効率が大きいので炉外のかなり離れた場所に設置された。

反応率分布の測定は前述のmfcを実験孔の中をtraverseして求めた。実験孔は18列の引出しの第1パックの中心(体系の軸方向の中心より25.4 cmずれた所)に20 mmφの径のものである。この中を3C2Vのケーブルの先端につけられたmfcが移動して分布の測定を行なった。このことは後述する系統的誤差源となる。

体系の外部の情況は次のようになっている。まずブランケットの外側は空格子領域(SUS)である。18-35の外側は約17 mmの押え板(SUS)があり、次に約84 mmの空隙があり、この間には所々にジャッキーが入っている。次に50 mmの鋼板と外部の補強構造によりFCA本体の外枠を形成している。その外側にはカウンター駆動機構その他の実験設備があり、炉室空間を経て炉室壁に至る。外枠の実効厚は補強構造のために明確ではない。

測定は各点で数回計数しMonitorで規格化した後そのばらつきを見ながら行なった。1回のtraverseの間は炉出力をほぼ一定に保った。これはmfcの計数率が炉心中心とブランケットあるいはその外部では大きな差があることから考えると不適当であるが、Monitorsの計数効率が若干変化することがあるためである。このようにした場合には、相対分布を求める際にMonitorsのdead time補正等はほぼ相殺し問題はなくなる。最終的な測定値としては各Monitorsによる規格化された相対分布の平均値を採用した。

測定値の誤差としてはrandom errorの以外に、次のような系統的な誤差を考えなければならない。それは実験孔およびmfcがひきずっている3C2Vケーブルによる摂動的効果である。実験孔の存在は、これにそった中性子のストリーミングを生じ、mfcに流入する中性子の方向依存性は炉心側が強調されて、本来実験孔のない場合に比べて分布はなだらかになる傾向を生じる。また実験孔による局所的な中性子束場のひずみは、炉心部とブランケット部等の物質の異なる所では、異なった様相を呈する可能性があり、このことは相対分布に関しても影響を与えることになる。ケーブルの相対分布に与える影響としては、スペクトルの乱し方が周辺のスペクトルによって異なること、traverseにしたがって体系内にあるケーブルの長さが異なってもくるた

めのスペクトルの乱し方の場所的な相異を生じること、および体系内にあるケーブルの長さが変化することによるMonitors の効率の変化が考えられる。これらの問題について部分的な補正実験を行なったが完全なものではない。

3.2 測定結果

測定結果をTable 5～10にV-3, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-3B5, V-2-Rの各体系について示す。表に示されたものは各mfc の計数による相対分布であり、同位体ごとに分離したものではない。また、表に示された値は前記の系統的誤差について補正は全くなされていない。(不感時間の補正は行なってある)。分布の規格化は便宜上炉心中心で行なってある。このことは、V-3B1のU⁸mfc については計算との比較に際して適當ではない。これは中心18-18がNa-channel になっており、拡散計算ではこの局所的なへこみを充分に計算し得ないためである。径方向の位置については、例えば18-18の場合には18-18の格子の中心点にmfc の実効中心がある場合をさしている。この位置に関する誤差は± 0.2 mmと考えられる。

上記の表に示された誤差は次のようにして求めたものである。計数値n に対して n の標準偏差を考えて、mfc およびmonitors の計数の標準偏差を誤差伝播則にのっとって取り入れて表に示された各点の測定値の誤差を計算すると、この場合は極めて小さな値が得られ、各monitor の示す相対分布の値の間のばらつきの方がかなり大きい。このばらつきについては、各monitor による系統的な傾向は見られず、random error によるものと考えてよい。これは n の標準偏差は母集団のものによるためであり、実際には適當でない。したがって各monitor 間のばらつきから誤差を求めた。

V-3集合体は18-22にNa-channelがあり、このsource heterogeneityのためにU⁸mfc ではなくぼみが現れている。この体系のブランケット(天然ウラン)内における分布の勾配は、他の全ての体系に比して最も急激なものである。V-3B1集合体は18-18および18-22にNa-channel があり、U⁸mfc はその部分においてくぼみを生じている。U⁸mfc の分布はブランケット内で急な曲率の変化が認められる(セミログにプロートした場合)。FDAとPDAの物質の相異を敏感に反映している。U⁵mfc の炉心ブランケット境界の分布はこのブランケットの減速の大きさを示している。また炉心領域で極めて平坦な分布を示すのは中心がNa-channel になっているのも一因と考えられる。V-2-Rでは反射体部分でU⁸mfc の分布が急激な減少を行なうのに対して、U⁵mfc の分布は反射体の減速性により、ピークを形成し、炉心内の分布も極めて平坦である。反射体領域では、U⁸のfission を起す中性子の発生項は皆無であることは、他の体系に比べて特長的なものである。いずれの体系でもブランケット内におけるU⁵mfc , U⁸mfc の分布の勾配の比率は変化しており、スペクトルが場所ごとに変化していることを示す。

V-3体系とV-3B体系の比較から、ブランケット物質の変化による炉心内の反応率分布の変化の様子を見ることができる。V-3B3およびV-3B4体系におけるブランケットのセクターによる炉心内の反応率分布の非対称性はTable. 11に示してある。中心18-18に対称な地点において、PDA側をFDN側で割ってその比を示したものである。ブランケットとの境界近傍を除けば5～6%以下でPDA側が高くなっている。U⁵mfc の分布の非対称性はU⁸mfc の場合に比

して大きい。また、いずれの場合も中心から 11 cm 位の半径では非対称性はほとんど問題とならないことが分る。V-3B3 体系に比べて V-3B4 体系の方が非対称性を解消している。特に V-3B4 体系では U^8 mfc の場合、炉心領域全体にわたって対称であるが、これは極めて偶然的な現象である。ともかく U^8 mfc の分布はその場の構成物質に強く支配され、 U^5 mfc の分布は体系全体の状態に敏感となっている。この対称性のよい V-3B4 体系の U^8 mfc と V-3 体系のそれと比較すると、18 - 23 まではほぼ完全に一致し、それより先、したがってプランケットから 8 cm 位のあたりから差がでて、境界点において天然ウランプランケットの V-3 体系の方が約 8 % 下っている。これは V-3 体系と V-3B3 体系の U^8 mfc の分布の比較においても大体同様である。これは NU プランケットと FDN プランケットの炉心内 U^8 mfc 分布に対する影響であるが、FDN プランケットと PDA プランケットの場合であれば、同程度あるいはそれ以下と考えてよい。そこで中心 18 - 18 に Na-channel のある V-3B1 体系と V-3B4 体系の U^8 mfc の分布の比較より中心の Na-channel による影響を見ることができる。この場合 18 - 22 で規格化して両者を比較すれば、両体系のプランケットの相異は関係ないと考えてよい。V-3B1 体系の分布を V-3B4 の値で割って求めた比を Table 12 に示す。 U^8 mfc の場合では、中心 Na-channel によってその部分では 17 % からの低下を示し、この影響は 18 - 20 まで(約 11 cm) およんでいる。これは極めて大きな影響である。これに対して U^5 mfc の分布に対して、V-3B4 の PDA の側の値を用い求めた比と同じ表に示してある。これによると、中心 Na-channel の影響は U^5 mfc の分布に対してほとんど現れていない。これは V-3B1 体系と V-3B3 体系の PDA 側の分布の比較を行なっても同じ状態である。したがって、このことは偶然的なことではなく、V-3B1 体系の中心 Na-channel は炉心領域の U^5 mfc の分布に対してほとんど影響をおよぼさないといえる。 U^8 mfc の分布とは反対に、 U^5 mfc の分布の場合は炉心内における非対称の強さを考え合せると、プランケットの影響を強く受ける傾向にあることが分る。そして V-3B1 体系、V-3B3 体系の PDA 側および V-3B4 体系の PDA 側の炉心内の U^5 mfc の分布がほとんど同じことから、traverse 方向のプランケットの影響は強いが、反対側のプランケットの物質には左右されていない。また V-3B3 体系の PDA 側の分布との比較から、PDA プランケットは V-3B3 体系位の角度(約 200°) をもてば、炉心内の U^5 mfc の分布は 360° の場合とほとんど同じであることが分る。実際、V-3B3 集合体と V-3B4 集合体の FDN 側の U^5 mfc の分布も炉心内ではほとんど同じものとなっている。したがって、FDN が 360° のプランケットにおいても、炉心内の U^5 mfc の分布は、V-3B3 集合体または V-3B4 集合体の分布と同じだと考えてよい。また、プランケット物質の炉心内分布に与える影響は U^8 mfc の場合は、境界から 8 cm 位までに対して、 U^5 mfc の分布に対しては 22 cm 位まで深部におよぼしている。

これらの現象の物理的説明はある程度容易に行ない得る。 U^8 mfc がその場の構成物質に依存しがちであることは、 U^8 の核分裂がしきい反応であり、その断面積のしきい値が高く、検出器に対する寄与は、その場での核分裂生成中性子が支配的であることによる。したがって、その場の核分裂断面積に支配される。この場合、周辺の影響は、周辺から飛来する中性子の検出器に対する直接的寄与と、周辺から移動して来てその場で核分裂を起し、その生成中性子が検出器に寄与する間接的なものが考えられる。前者の実験例は V-3B1 の中心 Na-channel の影響をあげることができる。前述のようにこの Na-channel は U^5 mfc の分布を変えていないが、 U^8 mfc に対

しては 18 - 20 までおよんでおり、これは 18 - 18 のくぼみが与えた影響と考えられ、この影響力がおよぼす範囲は広い。これは、U⁸mfc の核分裂のしきいエネルギーより高い中性子の平均自由行程が長いことに故来する。これに対して V-3 および V-3B 体系の U⁸mfc の炉心内分布がブランケット近傍において差異を生じるのは後者の間接的寄与によるところが大きい。炉心とブランケットの境界点 (18 - 24.5) における分布を比較すると、U⁵mfc に対しても U⁸mfc に対しても V-3, V-3B3, V-3B4, V-3B1 の順序で変化して高くなっている。U⁵mfc に関してこの順序は、ブランケット物質の性質や厚みの相異によって説明は容易である。ブランケットから反射して戻って来た中性子は U⁸ のしきいエネルギー以下の中性子が多いはずであるが、それらが核分裂を行した結果の生成中性子が U⁸mfc に寄与して前述の同じ順序の変化を見せることになる。また、U⁸mfc に対して、ブランケットの相異は間接的に影響するから、変化的度合は常に U⁵mfc の場合よりも小さくなっている。さらに、この変化を起す中性子はエネルギーが低いものが多く、その平均自由行程もそれほど長くないことも一因となって、ブランケット物質の相異が炉心内の U⁸mfc の分布に与える影響は深くおよばない。U⁵mfc の分布のブランケット近傍については、ブランケット物質による U⁵ の核分裂断面積の self-shielding factor の変化も考えに入れておかなければならない。そしてこれらのことから、ブランケット物質の相異が炉心内反応率分布に関して、U⁸mfc よりも U⁵mfc に対してより大きな影響を与えることになる。さらに traverse 方向のブランケット物質の変化が U⁵mfc の炉心内分布に与える影響が支配的原因のものと同じ理由による。炉心内分布の非対称性の小さいことは、本来拡散系のもつ均一化の性格とともに、この炉心の K_{oo} が約 1.8 と大きいこと、スペクトルが堅くて拡散係数が大きいことなどがあげられる。

V-1 集合体と V-3 集合体で炉心の物質構成、炉心の大きさ、形状等が異なっているにもかからず、U⁵mfc の炉心内分布は、炉心とブランケットの境界点からの距離をもって比較するとほとんど一致する。このことは、前述の V-3 および V-3B 集合体の比較の議論から考えて、炉心内の U⁵mfc の分布は、ブランケット物質に大きく支配されていることになる。これに対して、U⁸mfc の分布の場合には、18 - 22 の Na-channel の存在、炉心物質の相異に基づく fission-density の相異（炉心とブランケットの境界における fission density の不連続の度合の相異）等により、両者はほとんど似ていない。U⁵mfc に対する上述の議論は、V-2 集合体における分布に対しても成立っている。

V-2-R 集合体と V-2 集合体の炉心内 U⁵mfc の分布の比較において、前述のことから、その炉心形の相異を無視して、境界点からの距離で比較して適当な所で規格化すると、境界から 11 cm あたりから分布形に差異を生じ、境界点では V-2-R 集合体の方が約 50 % 高めになっている。しかし、V-1 集合体の炉心内の U⁵mfc の分布が前述のように、境界点での距離で比較すると V-3 集合体あるいは V-2 集合体のそれとよく一致していることから、V-2 炉心物質で V-2-R と同じ大きさにした場合、V-1 集合体と同じ大きさであるから、これと V-2-R との比較は意味がある。この場合、炉心中心で規格化して比較すると、中心から 16 cm (ブランケットとの境界から 14 cm) の所ですでに V-2-R 集合体の方が 10 % 高くなっている、境界点では 70 % 高めで、SUS 反射体の効果は極めて大きい。

ブランケット領域内での U⁸mfc の分布には実験孔によるストリーミング効果の存在が大きい

のでmfcによる測定値のみで議論するのはあまり好ましいことではないが、一般的傾向を見ることはできる。V-1, V-2, V-3集合体のブランケット（天然ウラン金属）領域ではU⁵, U⁸-mfcともによく似た分布形をしている。炉心の形状や寸法の相異から、前記のこととは炉心とブランケットの境界を一致させ、そこからの距離をもって比較した場合である。ブランケット内の反応率の分布形が炉心にあまり左右されないということは、炉心は単なる中性子源として存在しブランケットはその物質に独自に減衰を行なっているかに見える。V-3集合体とV-3B1集合体のブランケット領域における分布形を比較すると、V-3B1集合体のPDAおよびFDAの減速性能の良さからU⁵mfcの減衰は鈍化し、それに比例した量だけU⁸mfcの分布形もV-3集合体のそれに比して減衰が鈍化している。しかしながら、両物質中のウラン量の相異からこの比例には意味がなく、V-3B1集合体におけるU⁸mfcの分布の減衰の鈍化は、このブランケット物質の透過性のよさにもとづいていると考えるべきである。

V-3B3集合体とV-3B4集合体のブランケット領域(FDN物質)のU⁵mfcの分布形は、そのブランケット領域の厚みの相異によって、大きく異なる形を示している。両者は炉心から5.52cmまでは完全に一致しているが、ブランケットの厚いV-3B4体系の方が次第に大きくなり、V-3B3集合体のブランケットの末端の18-28では、V-3B4集合体の方が1.5倍にもなっている。このことは、炉心内でも指摘されたように、U⁵mfcの分布は動径方向の物質構成に敏感であり、したがってブランケット厚みに極めて敏感であることを示している。これに対して両体系のU⁸mfcの分布形はV-3B3集合体のブランケット領域間では、よく似た形をしておりU⁵mfcの分布形の挙動と全く異なっている。このことは、ブランケット内でU⁸mfcに応答する中性子はその場での核分裂生成中性子量には左右されず、周辺（特に炉心）からのもれ出た中性子が支配的であることを示す。したがって、ブランケット厚みはあまり関係なく、炉心からの距離とその間にある物質に左右される。またこのことは、実験孔の存在を大きな摂動と見なすことになる。測定法上からは、ブランケット領域のトラバースに際して炉心側の実験孔を塞いでいかばかりよい結果を得ることが期待される。V-3B1集合体とV-3B3集合体のブランケット領域内の比較を行なうと、U⁵mfcの分布は炉心とブランケットの境界を除いて(この部分では5%程V-3B1体系の方が高い)全体に分布形が一致している。そしてこの場合もU⁵mfcの分布の傾向とは関係なく、U⁸mfcの分布形は一致しておらず、V-3B3体系の方が全体に減衰はなめらかで、ブランケット末端では35%高めになっている。炉心内における分布から考えて、この差はV-3B3体系のセクターによるものではなく、PDAやFDAとFDNの物質の性質の差でありこの物質の透過性のよさによるものである。V-3-R集合体は反射体をもっており、したがってこの領域では核分裂中性子源は存在していない。この体系と、V-1集合体とかV-3集合体のNUブランケット内のU⁸mfcの分布を比較すると、V-2-Rの減衰はなめらかで、末端では80%程高くなっている。したがってNUブランケット内の核分裂中性子源の存在よりも、両者の透過性の相異が支配的であることを示す。全てのブランケット物質において、U⁸mfcとU⁵mfcの相対比は場所ごとに異なり、スペクトルが場所ごとに異なっていることを示す。

ブランケットの外部の空格子領域では分布形が急になだらかになるのは全ての体系に共通している。V-3B3とV-3B4体系の空格子領域のU⁵mfcの分布形を比較すると極めて同じ形をしている。これはFCA本体のしめつけ枠の減速性および反射の影響によると考えられる。この場合

も U^5 mfc の分布形においては、ブランケットの大きさや形状があまり影響しないことが見られる。これに対して U^8 mfc の場合には、分布形はこの領域で全く異なっており、今までの物質に依存しやすい傾向が見られない。したがってこの差は、ブランケットの形状や大きさによるものと考えるべきである。空格子領域に入つて減衰が鈍化する傾向は V-2-R 集合体においても見られる。これはこの領域における中性子の吸収やもれがブランケット部に比して小さくなつたことを意味する。特にこのことは、軸方向のバックリミングについて考慮する必要を感じさせる。実際一群近似で見ると、ブランケットの Σ_a は大体 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 、R-Z 計算より求めた B_z^2 は $0.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$ であり、空格子領域の拡散係数は 10 cm を起えるものであり、このことは空格子領域の DB^2 はブランケットの Σ_a より大きくなり、ブランケットのすぐ外部から減衰が鈍化しはじめることに矛盾するものである。

V-3B5 体系ではその Na 領域の 18-33 に燃料を入れた体系 (V-3B5-F) およびそのまわりを天然 B_4C で囲んだ場合 (V-3B5-BF) の反応率分布の測定を行なつた。18-33 の燃料引き出しは Fig. 7 に示すものである。V-3B5-BF 体系は 17-33, 19-33 の引出しの Na-plate を横積みにし、それぞれ一番下および一番上に B_4C -plate を入れ、18-33 の燃料引出しの両横を同様に B_4C -plate におきかえた体系である。この部分について Fig. 8 に模型的に図示してある。 B_4C -plate は $\frac{1}{4}$ " 厚のものであり、その原子数密度は Table. 13 に示す。18-33 に燃料引出しが入ることにより、この部分における U^5 mfc は反応率が約 45 % 低下し、大きな self-shielding が見られる。実験孔に沿うストリーミングを除くために炉心方向から 18-32 までの実験孔を全てつぶし、V-3B5-F および V-3B5-BF 体系の 18-33 から 18-35 までを U^5 mfc および Pu mfc で traverse し、その反応率の比を求めて Table 14 に示す。これにより B_4C -plate の効果は 18-33 において更に 40 ~ 45 % の反応率の低下をきたしている。また U^5 mfc よりも Pu mfc の方が大きな低下を示している。これらの測定は常陽の燃料ラックを Mock-up して行なつたものであり、燃料ラック中の燃料の発熱が大きくなつた場合には、 B_4C により周囲をかこみ、燃料中の核反応をおさえることが想定されたためである。また、V-3B-5 F 体系では炉心まで実験孔が貫通した場合と、18-32 までの実験孔が塞がれた場合について測定されたので、このことから実験孔によるストリーミング効果を知ることができるが、これについては後に述べるように、18-33 以後の U^5 および Pu mfc に対しては、ストリーミング効果はほとんどないと見なせる。

3.3 補正実験

20 mm ϕ の実験孔によるストリーミング効果は無視し得ないものであり、特に勾配の急な炉心からのもれに依存しているブランケット領域内の U^8 mfc の分布に対しては大きな補正量となっていることが箔による補正実験より確認された。使用した箔は Cu の (n, r) および In の (n, n') であり、前者は共鳴箔に対して後者はしきい検出器であり、そのしきいエネルギーは大体 0.4 Mev であり、5 Mev において最大となり 355 mb の断面積をもつ。 U^{238} の σ_f に比べると、少しばかり低いエネルギーの所で感度が強く、ABBN の一群のエネルギー領域の部分が低めである。Cu (n, r) の断面積と U^{235} の σ_f を比較すると、Cu の方が少し低いエネルギー側

で感度が大きく、ストリーミングに関しては出にくい方向にある。測定は実験孔のある場合(H)とない場合(N)において分布を求め、それぞれ中心 18 - 18 または 18 - 19 で規格化して比較した。結果を Table 15 に示す。Cu 箔に関しては、全体にわたって大きな効果を生じていないが、In 箔の場合は極めて大きなストリーミング効果を生じている。この場合にも、もともとブランケット物質が透過性がよくて U^8 mfc の分布のなだらかな V-3B5 体系の場合は、減衰の大きな V-2-R 集合体に比し約半分のストリーミング効果になっている。したがって、ストリーミング効果は減衰が大きく、急勾配の分布形に対して大きな問題となり、NU ブランケットの場合は V-2-R 集合体のケースに相当し、V-3B 集合体は V-3B5 の場合を考えればよい。なお、V-3B5-F 体系では、前述のように実験孔が全体にあいている場合と炉心から 18 - 32 までの実験孔を塞いで、 U^5 mfc および Pu mfc を用いて 18 - 33 から 18 - 35 までの分布を求めた。実験孔のある場合とない場合の比を求めて Table 16 に示してある。この場合 18 - 33 が極少値になっているので、炉心側のストリーミングを防ぐだけでは充分ではないが、一応 Cu 箔と一貫した結果を出しておき、これらの mfc についてはストリーミング効果はあまりあらわれていない。

V 炉心系では行なわれなかつたが VI-1 集合体において行なった補正実験について、その結果を簡単に記述しておく。mfc のひきずる 3C2V ケーブルの影響を見るために、もう 1 本ダミーのケーブルを付けて traverse を行なつた。ケーブルが 1 本の場合に比べると、 U^5 mfc の分布について炉心領域ではほとんど差はないが、NU ブランケット領域内に入って最大 5 % の変化が現れ、ケーブルの存在はブランケット領域の分布を高めに見る傾向がみられた。

U^5 mfc の分布は動径方向の物質に敏感であることはすでに述べた。VI-1 集合体においてブランケットの外側の空格子領域に空の引出しを入れて traverse を行ない、標準的な状態と比較した。これによると U^8 mfc については分布に関して差異は生じなかつたが、 U^5 mfc の分布の場合には、炉心の外辺部およびブランケット部で分布は低めになり、空格子領域に入って高めになっている。空の引出しを入れることは、この空格子領域の SUS 量を約 60 % 増加させることに相当し、これに対して U^5 mfc の分布は最大 6 % の低下を見せておる。

mfc の traverse の際には不感時間についての配慮から、一般にかなり低い power で測定が行なわれる。このとき炉は Pu 燃料の自発中性子のために、実際は未臨界だが、見かけ上臨界状態 (source critical) になっている。このことを考慮して、power level を変えて分布を求めて比較したが、有意な差は見られなかつた。

Table 4 Counter Specifications

		U^8 mfc	U^5 mfc	Pu mfc
coatint (mg)		4.0	0.16	0.17
effectiv length (mm)		25.0	20.7	20.7
isotopic ratio	234 U		0.0125	
	235 U	0.00044	0.93	
	236 U		0.0025	
	238 U	0.99956	0.055	
	239 Pu			0.99
	240 Pu			0.01

Table 5 Radial Fission Distribution (V-3)

material	position	U^8 mfc	U^5 mfc	Pu mfc
core	18-14	0.626±0.5%	0.747±0.5%	0.731±0.5%
	18-17	0.975 "	0.969 "	0.972 "
	18-18	1.000 "	1.000 "	1.000 "
	18-19	0.991 "	0.980 "	0.985 "
	18-20	0.928 "	0.938 "	0.938 "
	18-20.5	0.882 "	0.894 "	0.902 "
	18-21	0.817 "	0.856 "	0.854 "
	18-21.5	0.725 "	0.826 "	0.813 "
core	18-22	0.641 "	0.777 "	0.763 "
	18-22.5	0.615 "	0.723 "	0.710 "
	18-23	0.575 "	0.649 "	0.642 "
	18-23.5	0.487 "	0.564 "	0.559 "
	18-24	0.403 "	0.493 "	0.486 "
	18-24.5	0.294 "	0.424 "	0.421 "
	18-25	0.172±0.8%	0.331 "	0.326 "
	18-26	0.0647±1%	0.197±0.8%	0.192±0.8%
SUS Lattice	18-28	0.0108±2%	0.0607±1%	0.0590±1%
	18-30	0.00266±5%	0.0200±2%	0.0211±1.5%

Table 6 Radial Fission Distribution (V-3B1)

material	position	U^8 mfc	U^5 mfc	Pu mfc	BF_3
core	18-16	1.038±0.5%	0.905±0.5%	0.926±0.5%	
	18-17	1.078 "	0.957 "	0.984 "	0.933±0.5%
Na	18-18	1.000 "	1.000 "	1.000 "	1.000 "
	18-19	1.080 "	0.983 "	1.000 "	0.955 "
core	18-20	1.062 "	0.919 "	0.947 "	0.884 "
	18-21	0.961 "	0.857 "	0.883 "	0.847 "
Na	18-22	0.768 "	0.789 "	0.782 "	0.795 "
	18-23	0.705 "	0.695 "	0.690 "	0.699 "
core	18-23.5	0.634 "		0.628 "	0.659 "
	18-24	0.535 "	0.592 "	0.574 "	0.642 "
FDA	18-24.5	0.419 "	0.566 "	0.526 "	0.638 "
	18-25	0.274 "	0.529 "	0.482 "	0.642 "
PDA	18-26	0.126±0.8%	0.429 "	0.370 "	0.557 "
	18-27	0.0604 "	0.307 "	0.267 "	0.427 "
SUS Lattice	18-27.5	0.0446 "	0.252 "	0.222 "	0.360 "
	18-28		0.193 "	0.175 "	0.292 "
	18-28.5	0.0202 "	0.146 "	0.133 "	0.231 "
	18-29			0.113 "	0.210 "
	18-30				0.166 "

Table 7 Radial Fission Distribution (V-3B3)

material	position	U^8 mfc	U^5 mfc
core	18-12	0.433 ± 2%	0.586 ± 2%
	18-13	0.594 ± 1%	0.676 ± 1%
Na	18-14	0.648 "	0.787 "
	18-15	0.819 "	0.861 "
core	18-16	0.922 "	0.927 "
	18-17	0.977 "	0.987 "
Na	18-18	1.000 ± 0.3%	1.000 ± 0.3%
	18-19	0.981 ± 1%	0.970 ± 1%
	18-20	0.910 "	0.917 "
	18-21	0.800 "	0.837 "
core	18-21.5	0.714 "	"
	18-22	0.631 "	0.742 "
core	18-22.5	0.592 "	0.702 "
	18-23	0.557 "	0.635 "
FDN	18-23.5	0.495 "	0.569 "
	18-24	0.412 "	0.511 "
SUS Lattice	18-24.5	0.311 "	0.462 "
	18-25	0.205 "	0.423 "
SUS Lattice	18-26	0.1033 ± 1.5%	0.332 "
	18-27	0.0537 "	0.238 "
SUS Lattice	18-27.5	0.0395 "	0.195 "
	18-28	0.0282 "	0.154 "
SUS Lattice	18-28.5	0.0201 "	0.118 ± 2%
	18-29	0.0149 "	0.0976 "
SUS Lattice	18-30		0.0778 "
	18-31	0.00847 ± 2%	0.0693 "
	18-33	0.00563 "	0.0577 "
	18-35	0.00429 "	0.0508 "

Table 8 Radial Fission Distribution (V-3B4)

material	position	U^8 mfc	U^5 mfc
core	18-12	0.424 ± 1%	0.582 ± 0.5%
	18-13	0.579 "	0.669 "
Na	18-14	0.639 ± 0.5%	0.783 "
	18-15	0.802 "	0.851 "
core	18-16	0.915 "	0.913 "
	18-17	0.978 "	0.961 "
core	18-18	1.000 ± 0.3%	1.000 ± 0.3%
	18-19	0.977 ± 0.5%	0.979 ± 0.5%
Na	18-20	0.915 "	0.917 "
	18-21	0.808 "	0.839 "
core	18-21.5	0.721 "	0.792 "
	18-22	0.633 "	0.750 "
core	18-22.5	0.602 "	0.705 "
	18-23	0.572 "	0.638 "
core	18-23.5	0.508 "	0.587 "
	18-24	0.420 "	0.531 "
FDN	18-24.5	0.321 ± 0.8%	0.491 "
	18-25	0.211 "	0.456 "
SUS	18-26	0.107 "	0.381 "
	18-27	0.0571 "	0.289 "
Lattice	18-28	0.0308 "	0.222 "
	18-29	0.0178 "	0.172 ± 1%
Lattice	18-30	0.0112 "	0.115 "
	18-30.5	0.00822 "	0.0883 "
Lattice	18-31	0.00602 "	0.0677 "
	18-31.5		0.0549 "
Lattice	18-32	0.00307 ± 2%	0.0501 "
	18-34	0.00268 "	0.0441 "
SUS	18-35		0.0416 "
Lattice	18-35(+10cm)		0.0376 "
Lattice	18-35(+20cm)		0.0247 "
Lattice	18-35(+25cm)		0.0204 "

Table 9 Radial Fission Distribution (V-3B5)

mate- rial	position	V-3B5			V-3B5-F	
		U ⁸ mfc	U ⁵ mfc	Pu mfc	U ⁵ mfc	Pu mfc
core	18-18	1.000 ±0.3%	1.000±0.3%	1.000±0.3%	1.000±0.3%	1.000±0.3%
	18-19		0.978±0.8%			
	18-20	0.931 ±0.8%	0.926 "	0.915±2%		
	18-21		0.850 "			
Na	18-22	0.647 "	0.777 "	0.749 "	0.768±0.8%	0.747±0.8%
core	18-23		0.665 "			
	18-24	0.431 "	0.559 "	0.530 "	0.552 "	0.528±1%
	18-24.5	0.327 "	0.517 "			
	18-25	0.215 "	0.486 "			
FDN	18-26	0.109 "	0.414 "	0.362 "	0.408 "	0.370 "
	18-27	0.0586 "	0.352 "			
	18-27.5		0.329 "			
	18-28	0.00338 "	0.315 "	0.290 "	0.313 "	0.293 "
SRD	18-28.5	0.0261±1%	0.312 "			
	18-29	0.0196 "	0.311 "	0.290 "	0.308 "	0.293 "
	18-30	0.0104 "	0.275 "	0.279 "	0.264 "	0.264 "
	18-31	0.00624±1.5%	0.228 "	0.237 "	0.208 "	0.216 "
Na	18-32	0.00460 "	0.199 "	0.212 "	0.161 "	0.169 "
	18-33*	0.00340±2%	0.167 "	0.182 "	0.0937±1%	0.0897 "
	18-34	0.00264 "	0.136 "	0.147 "	0.0981 "	0.104 "
	18-34.5		0.123 "			
SUS	18-35		0.0912 "	0.100 "	0.0726 "	0.0792 "
	18-36		0.0507±1%		0.0444 "	
	18-37		0.0446 "		0.0400 "	

* 18-33 : Fuel Drawer on V-3B5-F

Table 10 Radial Fission Distribution (V-2-R)

material	position	U^8 mfc	U^5 mfc	Pu mfc
core	18-13	0.502±0.5%	0.681±0.5%	0.657±1%
	18-15	0.818 "	0.856 "	
	18-17		0.982 "	0.974 "
	18-18	1.000±0.3%	1.000±0.3%	1.000±0.3%
	18-19	0.983±0.5%	0.978±0.5%	0.980±1%
	18-20	0.924 "	0.934 "	
	18-21	0.832 "	0.849±1%	0.838 "
	18-22	0.698 "	0.753 "	
	18-23	0.522 "	0.682 "	0.653 "
	18-23.5		0.706 "	0.677 "
SRD	18-24	0.246 "	0.759 "	0.750 "
	18-24.5		0.797 "	0.775 "
	18-25	0.104 "	0.798 "	0.781 "
	18-26	0.0473 "	0.708 "	0.710 "
	18-27	0.0242±0.8%	0.555 "	
	18-28	0.0125 "	0.391 "	0.392 "
SUS Lattice	18-29	0.00614±1%	0.221 "	0.219 "
	18-29.5		0.145 "	
	18-30		0.122 "	0.127 "

Table 11 Asymmetry of Radial Fission Distribution in Core Region

position	V-3B3		V-3B4	
	U ⁵ mfc	U ⁸ mfc	U ⁵ mfc	U ⁸ mfc
18-n				
18-12	1.15 ± 0.01	1.05 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.01 ± 0.01
18-13	1.07 ± 0.01	1.07 ± 0.01	1.05 ± 0.01	0.01 ± 0.01
18-14	1.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.14 ± 0.01	1.01 ± 0.01
18-15	1.03 ± 0.01	1.02 ± 0.01	1.01 ± 0.01	0.99 ± 0.01
18-16	1.01 ± 0.01	1.01 ± 0.01	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01
18-17	1.02 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.98 ± 0.01	1.00 ± 0.01

values of $\phi(n)/\phi(36-n)$

Table 12 Flux Depletion by 18-18 Na channel

position	U ⁵ mfc	U ⁸ mfc
18-18	0.99 ± 0.01	0.83 ± 0.01
18-19	1.02 ± 0.01	0.92 ± 0.01
18-20	1.00 ± 0.01	0.97 ± 0.01
18-21	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01
18-22	1.00	1.00
18-23	1.02 ± 0.01	1.01 ± 0.01
18-24	1.00 ± 0.01	1.05 ± 0.01

values of $[\phi(x, B1)/\phi(36-x, B4)]/[\phi(22, B1)/\phi(14, B4)]$

Table 13 B_4C Plate (2"-2"-1/4") Specification

B_4C weight gr	28.90
SUS weight gr	38.65

Table 14 Fission Rate Ratio (V-3B5-BF)/(V-3B5-F)

position	U^5 mfc	Pu mfc
18-33	$0.460 \pm 1.5\%$	$0.412 \pm 1.5\%$
18-33· $\frac{1}{4}$	0.480 "	0.427 "
18-33· $\frac{1}{2}$	0.548 "	0.529 "
18-34	0.627 "	0.619 "
18-34· $\frac{1}{2}$	0.674 "	0.640 "
18-35	0.705 "	0.709 "

Table 15 Streaming Effect (Ratio H/N)

Position	Cu(V-3-B5)	In(V-3-B5)	In(V-2-R)
18-18	1.000 ± 0.009		1.000 ± 0.003
18-19		1.000 ± 0.003	
18-22			1.018 ± 0.005
18-23			1.034 ± 0.004
18-24	0.986 ± 0.030	1.061 ± 0.005	1.174 ± 0.008
18-26	0.947 ± 0.018	1.138 ± 0.016	1.227 ± 0.019
18-28	0.944 ± 0.027	1.148 ± 0.024	1.265 ± 0.034
18-30	0.977 ± 0.034	1.336 ± 0.054	
18-32	1.036 ± 0.023	1.296 ± 0.129	

Table 16 Streaming Effect of V-3B5-F

Position	U^5 mfc	Pu mfc
18-33	1.03 ± 0.02	1.04 ± 0.03
18-34	1.02 ± 0.02	1.03 ± 0.03
18-35	1.01 ± 0.02	1.05 ± 0.03

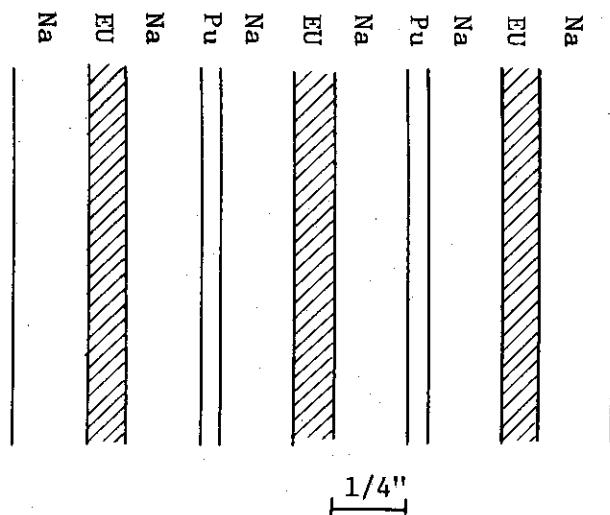


Fig. 7 V-3B5-F 18-33 Fuel Drawer

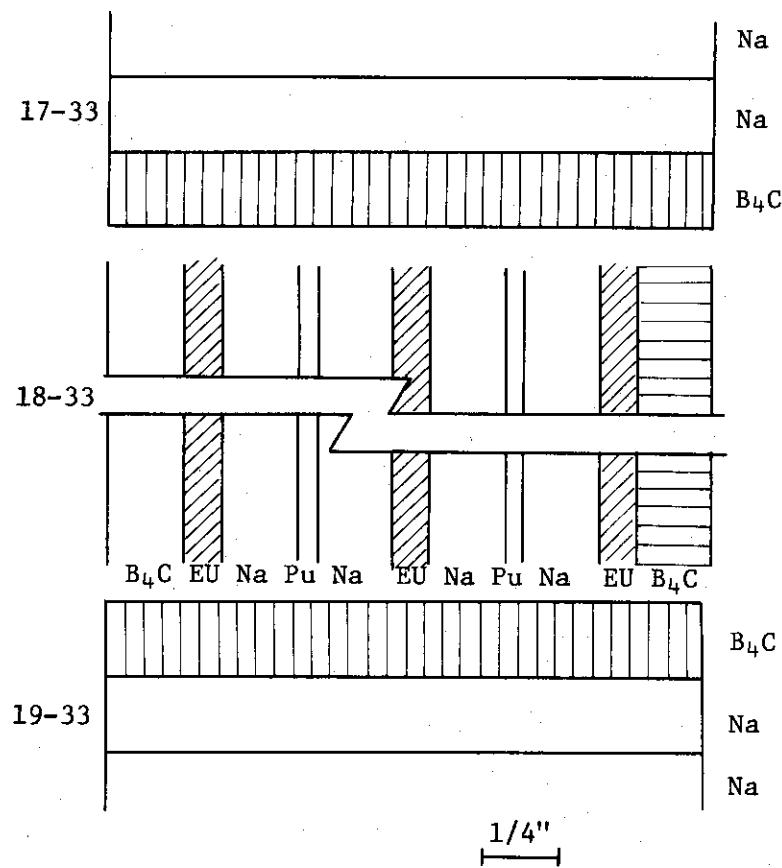


Fig. 8 V-3B5-BF Loading Pattern

4. 計算および計算値対実験値(C/E)比較

4.1 均質拡散計算

Fig. 9に均質拡散モデルによる多群計算の流れを示す。JAERI-FAST version 2を出発の群定数として、1次元拡算コードEXPANDA-4で中性子束分布の計算、反応率分布の計算、縮約断面積の作成、その縮約断面積を用いた中性子束分布、反応率分布の計算を行ない、2次元計算のためのサーベイ計算を行なった。サーベイ計算は2次元計算における電子計算機のコアの大きさからくる制約に基づくものであり、縮約群数、メッシュ巾、およびプランケット内をSub-regionに分けることについて行なった。プランケット内をSub-regionに分けるのは、この領域におけるスペクトル変化が激しいために、同一物質でも縮約断面積を作った場合、場所ごとに異なったものとなり、一領域と見せないとある。反応率分布の計算の場合の検出器の断面積は、各核種についての各領域の σ_{eff} を用いて実効断面積を求め（あるいは更に縮約して）、これより反応率分布を求めた。したがって、一般に領域が異なると検出器の断面積が異なることになり反応率分布はその境界において不連続を呈することになる。しかし、この問題はいまのところ深刻なものではない。

縮約群数については、25群を出発として10群、8群、6群、および4群として、V-1, V-3 V-3B およびV-2-Rの各体系について各mfcの反応率分布を求めて比較した。このサーベイ計算は B_z^2 の影響を入れないために、0.93のshape factorを用いて各体系を、球型にモデル化したものだが、この結果から10群計算は25群のそれにはほとんど等しく、8群計算は6群のそれに近いことが分った。6群縮約計算の反応率分布は25群のそれと比較すると、NUプランケット内で最大2%，酸化物プランケットのV-3B体系ではプランケット領域のsub-regionの外側でわずかな差が見られる程度で、大勢を判断するのには支障はない。V-2-R集合体の反射体領域では6群計算はきびしく、sub-regionの炉心側で+4%，外側では、3%程度25群計算との差異を生じた。縮約計算によるプランケット領域における反応率分布は、各sub-regionにおいて25群の結果と交錯する形で進み、系統的に次第にずれていくという傾向は見られない。したがって、少数縮約計算によるsub-regionの境界における不連続は、この間に25群計算のそれを必ず含み、全体的傾向を見る上からは問題とならない。これらの結果から判断して2次元計算は6群縮約で行なうこととし、群構造は25群の4, 6, 8, 11, 14, 25を区切りとして構成した。

メッシュ巾は0.6 cmから276 cmまで変えて、その反応率分布を求めて比較した。勾配のゆるやかなU⁵mfcの分布については全系内で1%以下の変化しか見られなかった。U⁸mfcの分布の場合は、炉心とプランケットの境界において最大4%の変化を見たが、この差は波及することなく、この点から離れるにしたがって解消する傾向にある。実際の2次元計算では、体系によっては部分的に2.76 cmのメッシュ巾を取り入れてある。

プランケットまたは反射体領域のsub-regionについては、これは多く取るにこしたことはな

いのだが、前述のように25群計算から系統的にずれる心配がないことから、11.04 cm厚を単位に取った。炉心部分についても中心部分と周辺部分に2分して縮約計算を行なった。ブランケット部の第1番目と第2番目のsoh-regionの縮約断面積を比較すると、 $\nu\Sigma_f$ が最も大きな変化を見せ、第2番目では約半分に減少している。

上の計算をもとにして2次元計算を拡算コードEXTERMINATOR-2で行なった。まずR-Z計算を行ない、軸方向バックリング B_z^2 を求めた。 B_z^2 は炉心と軸方向ブランケットとの境界における中性子の流出量より求める方法で計算した。 B_z^2 は各領域ごとに求めたものである。この B_z^2 を用いて、2次元X-Y計算を同上のコードで行ない、この結果のC/EをFig. 10~14にV-1 V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-2-Rの各体系について示してある。

計算に際して、空格子領域およびFCA本体のしめつけ棒のモデル化が問題となってくる。しかし、本稿ではしめつけ棒の厚さは14 cmとして固定した。空格子領域は物質としての非等方性を強くもち、径方向については均質化に大きな無理はないように考え得るが、軸方向に関しては問題がある。特にR-Z計算で得た B_z^2 を使用してX-Y計算を行なうと、この領域は極めてもの強い領域となり、実験値のようななだらかな減衰には決してなり得ない。このことは均質化モデルによる拡散係数を使用して求めた B_z^2 の値に問題があることになる。そこで、図中には、この空格子領域の B_z^2 をR-Z計算で得た値の場合（実線）と零に置いて得た場合（点線）について示してある。図中において、これらの処理法の差をみると極めてブランケットの深部にまでおよび、 $U^5 mfc$ と $U^8 mfc$ の双方に影響しているのが見られる。R-Z計算による B_z^2 を用いた場合にはブランケット外端においてC/Eが急激に下る傾向が明確に見られるが、これは拡散計算の本質に反するものである。一方、 $B_z^2 = 0.0$ と置いた計算では、C/Eは末端で急激に上がり、これは上がりすぎのきらいを感じさせる。したがって、 B_z^2 は零とするのは極端だが、極めて小さな値であり、この適正な評価はブランケットのかなり深部にわたってC/Eを改良するものと考えられる。

V-3B集合体における $U^5 mfc$, $Pu mfc$ のC/Eは1.0にかなり近いものになっている。 $U^8 mfc$ についてもそのストリーミング効果を補正すれば相当よい結果と考えられる。V-3B1集合体は18-18にNa-channelがあり、拡散計算ではこのような部分には限界があるので、18-20あたりで規格化してC/Eを求め示してある。

V-1集合体^{注)}はNUブランケットであり、ブランケット領域内の減衰は $U^8 mfc$ のみならず $U^5 mfc$ の場合も急であり、これに対してもストリーミング効果を考慮すべきものと思われる。それにしても、V-3B体系の場合に比べて、C/Eの傾向は悪く他に原因があるように思われる。

V-2-R集合体の場合は、反射体内のピーキングを計算ではうまく再現し得ない傾向にある。そして、 $U^5 mfc$ や $Pu mfc$ の炉心の外辺部の分布も他の体系に比してC/Eの悪化が見られ、このことはSUS反射体の取り扱いが計算ではうまくいっていないことを示唆する。

2次元X-Y計算によって求められた中性子束は、Z軸方向に関して、使用された B_z^2 が計算された範囲にわたる積分値だと考えるべきである。このことは、X-Y計算の結果と実験値の比較が必ずしも妥当ではないことを意味する。Table 17~20にV-1およびV-2-R集合体にお

注) 実験値は文献(8)のものを使用した。

ける U^8 mfc および U^5 mfc の分布について、R-Z 計算をした場合の Z のちがいによる径方向分布の差異の生じ方を示してある。これらの表によると、Z=0 における分布が最も急勾配を示していることが分る。このことは、先の C/E をプランケット末端で更に小さくすることを示すものである。

4.2 S N 計算

プランケットおよび反射体では実験と計算の一一致がよくないが、この領域では分布の勾配が急であることが一つの特色となっている。分布の勾配が急なことは、中性子束角度分布に高次 P_L 成分の存在が考えられ、したがって散乱核における高次 P_L 成分について配慮する必要があるようと思われる。

非等方散乱を考慮した計算の流れを Fig. 15 に示す。DLC-2C の 100 群断面積をもとにして、ANISN において P_0 、100 群計算を行ない、100 群中性子束を求め、これを用いて DLC-2C を縮約して、再び ANISN で P_L 計算を行なった。縮約は 18 群とし、群構造は 17 群までは ABBN のそれとはほぼ一致させ、それ以下を第 18 群としたものである。

NU プランケットの V-1 集合体について、 P_L の次数を変えた場合の分布形の変化の度合を Table 21 に示す。計算にあたっては P_L の次数の効果のみを見るために S_{16} で固定して全ての計算を行なった。この表より、 P_3 計算を行なえば充分であり、 P_1 計算でもプランケット末端で 3.5 % 低めにみるにすぎないことが分る。実際、極めて単純な物質構成内を中性子が輸送する間に、複雑な角度分布を形成することは物理的に考えにくく、したがって散乱核に関しても高次の P_L まで取り入れる必要のないことが察しられる。

但し、ここに行なった縮約は高次 P_L の散乱核に関しても、中性子束を重み関数として求めたものである。

Table 17 Z-Dependence of U⁵ mfc Radial Traverse (V-1)

R	core			blanket		
	18-18	18-21	18-23	18-24	18-26	18-28
Z 0.00	1.00	8.00-1	5.29-1	2.93-1	8.62-2	1.61-2
10.16	1.00	8.00-1	5.28-1	2.93-1	8.61-2	1.62-2
16.94	1.00	7.99-1	5.27-1	2.91-1	8.58-2	1.64-2
23.71	1.00	8.03-1	5.37-1	3.03-1	9.51-2	1.93-2
30.48	1.00	7.99-1	5.25-1	2.94-1	9.61-2	2.06-2

Table 18 Z-Dependence of U⁸ mfc Radial Traverse (V-1)

R	core			blanket		
	18-18	18-21	18-23	18-24	18-26	18-28
Z 0.00	1.00	7.75-1	4.26-1	1.22-1	1.38-2	1.83-3
10.16	1.00	7.74-1	4.26-1	1.22-1	1.37-2	1.84-3
16.94	1.00	7.74-1	4.25-1	1.22-1	1.37-2	1.87-3
23.71	1.00	7.74-1	4.24-1	1.21-1	1.40-2	2.00-3
30.48	1.00	7.72-1	4.18-1	1.26-1	1.73-2	2.74-3

Table 19 Z-Dependence of U⁵ mfc Radial Traverse (V-2-R)

R	core			blanket		
	18-18	18-21	18-23	18-24	18-26	18-28
Z 0.00	1.00	8.47-1	5.96-1	6.31-1	5.70-1	3.01-1
10.16	1.00	8.48-1	5.99-1	6.35-1	5.78-1	3.05-1
16.94	1.00	8.49-1	6.04-1	6.47-1	5.94-1	3.14-1
23.71	1.00	8.52-1	6.15-1	6.75-1	6.22-1	3.29-1
30.48	1.00	8.59-1	6.50-1	7.49-1	6.46-1	3.40-1

Table 20 Z-Dependence of U⁸ mfc Radial Traverse (V-2-R)

R	core			blanket		
	18-18	18-21	18-23	18-24	18-26	18-28
Z 0.00	1.00	8.31-1	4.61-1	2.88-1	4.49-2	8.63-3
10.16	1.00	8.31-1	4.62-1	2.88-1	4.49-2	8.67-3
16.94	1.00	8.32-1	4.64-1	2.89-1	4.48-2	8.78-3
23.71	1.00	8.34-1	4.67-1	2.89-1	4.52-2	9.23-3
30.48	1.00	8.34-1	4.62-1	2.84-1	5.08-2	1.15-2

Table 21 Effect of Anisotropic Scattering (Assy. V-1)

region position	core			blanket		
	18-21	18-22	18-23	18-24	18-26	18-28
P ₁ /P ₇ U ⁸ -mfc	0.999 0	0.997 0	1.002 7	1.015 1	0.986 0	0.965 0
	1.000 3	1.000 7	1.002 5	1.005 6	1.004 2	1.001 4
P ₃ /P ₇ U ⁸ -mfc	1.000 0	0.999 9	0.999 8	1.001 8	0.999 9	1.000 1
	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 1	1.000 0	1.000 0
P ₅ /P ₇ U ⁸ -mfc	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

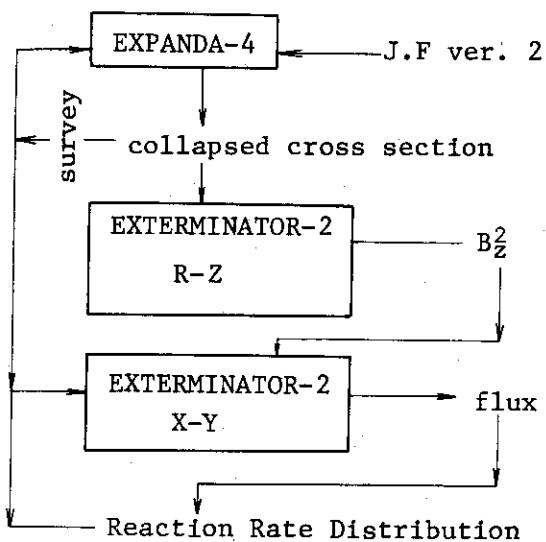


Fig. 9 Calculation Flow (2-D Diffusion)

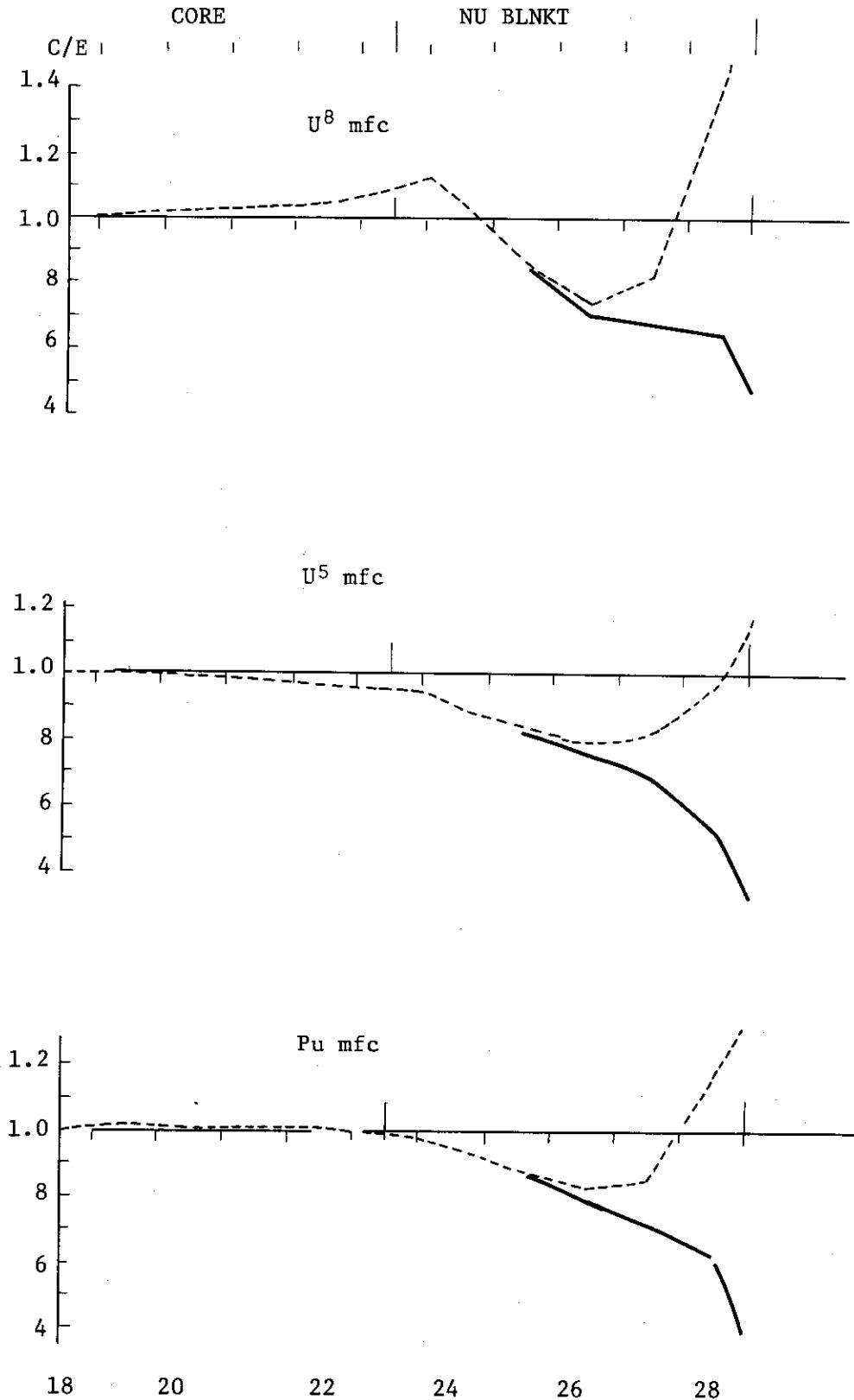


Fig. 10 Radial Traverse (V-1)
 B_z^2 (Empty Lattice) = 0.0

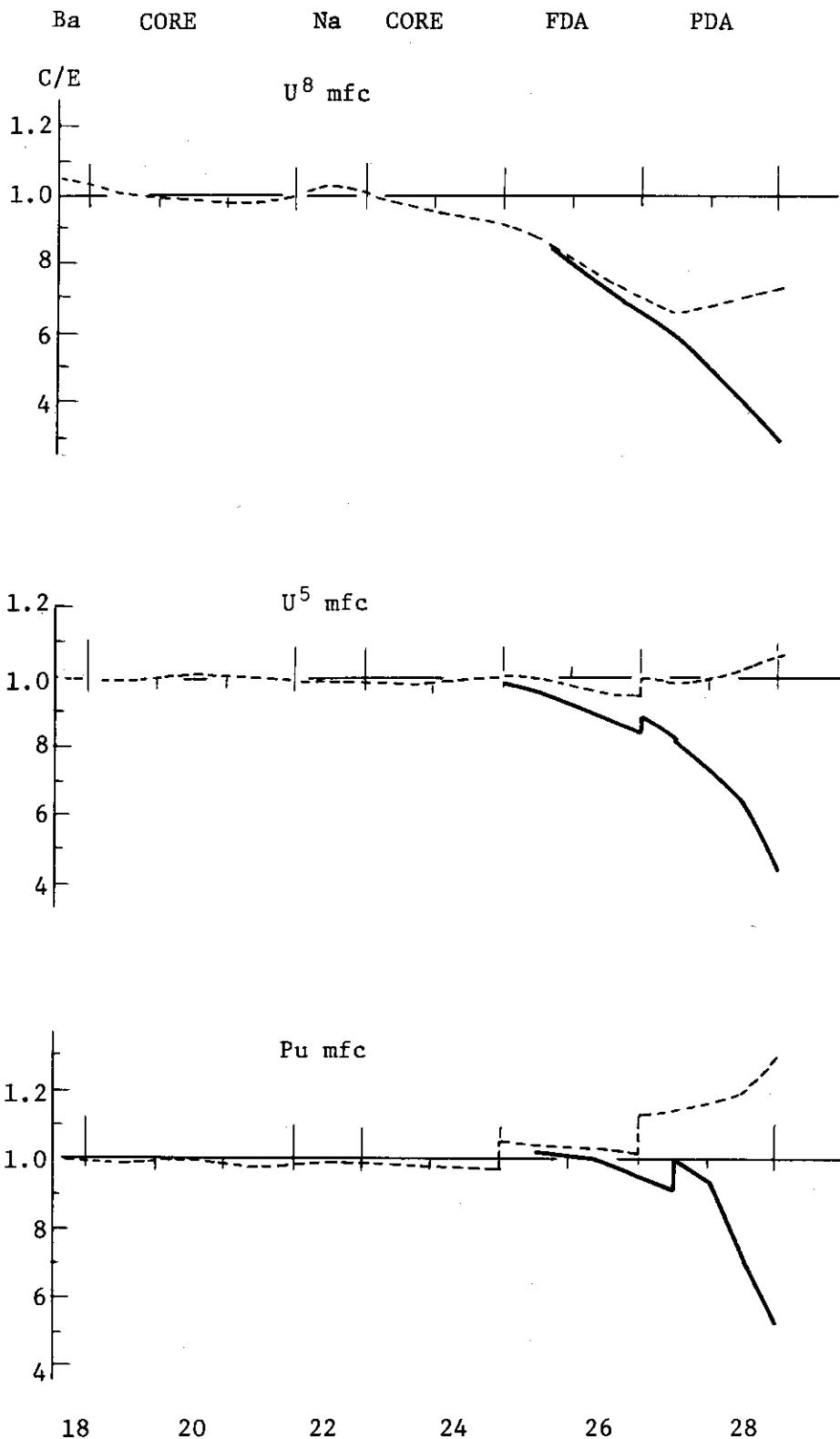


Fig. 11 Radial Traverse (V-3B1)
 B_z^2 (Empty Lattice) = 0.0

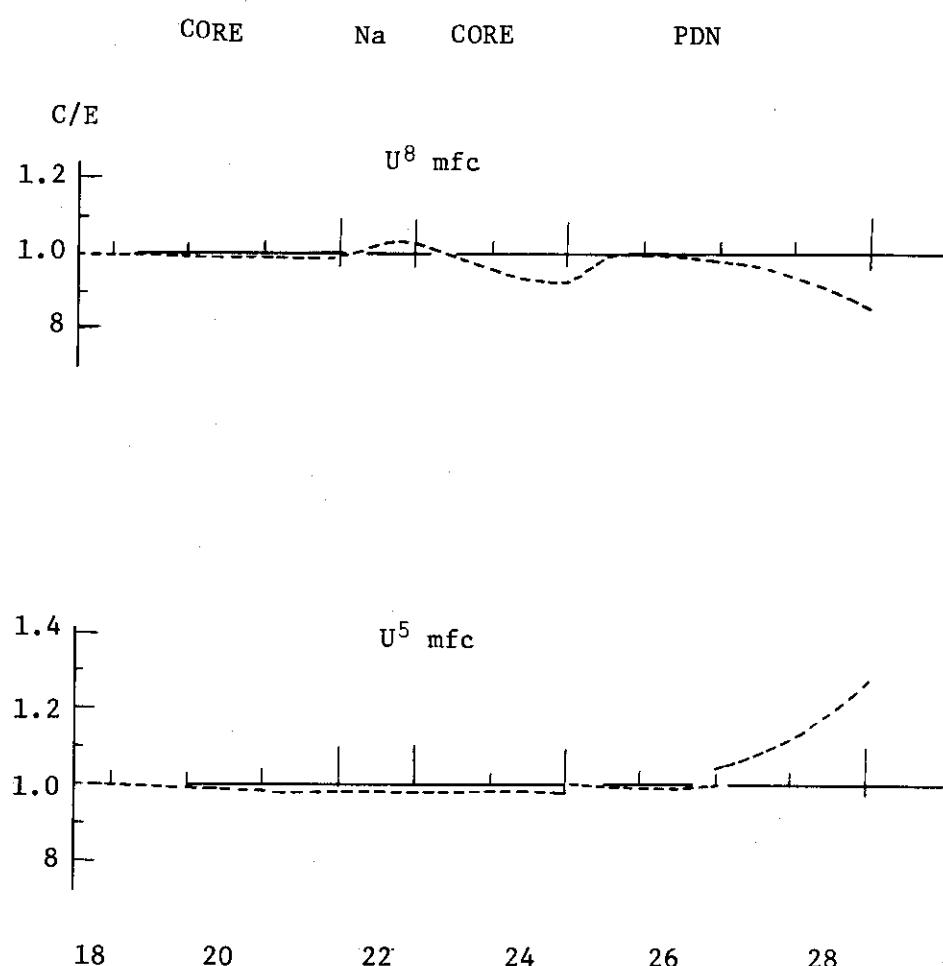


Fig. 12 Radial Traverse (V-3B3)
 B_z^2 (Empty Lattice) = 0.0

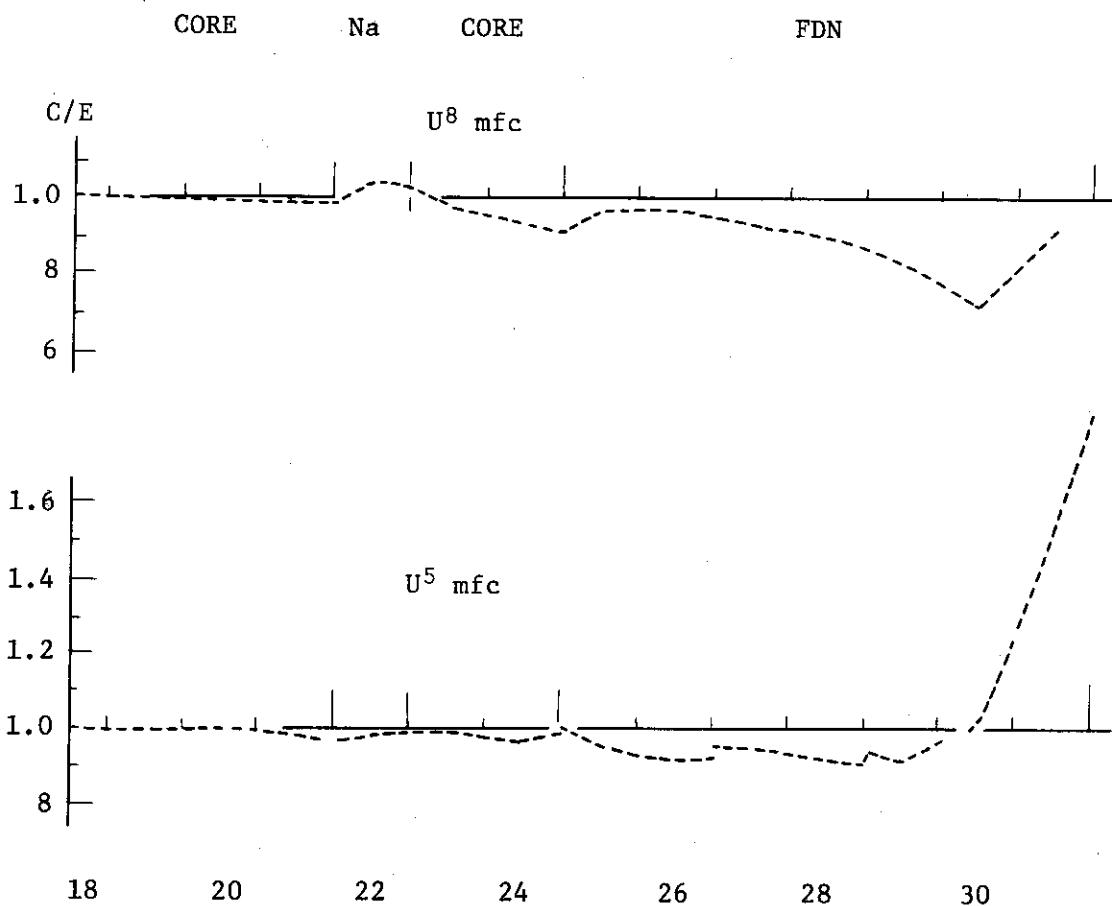


Fig. 13 Radial Traverse (V-3B4)
 B_z^2 (Empty Lattice = 0.0)

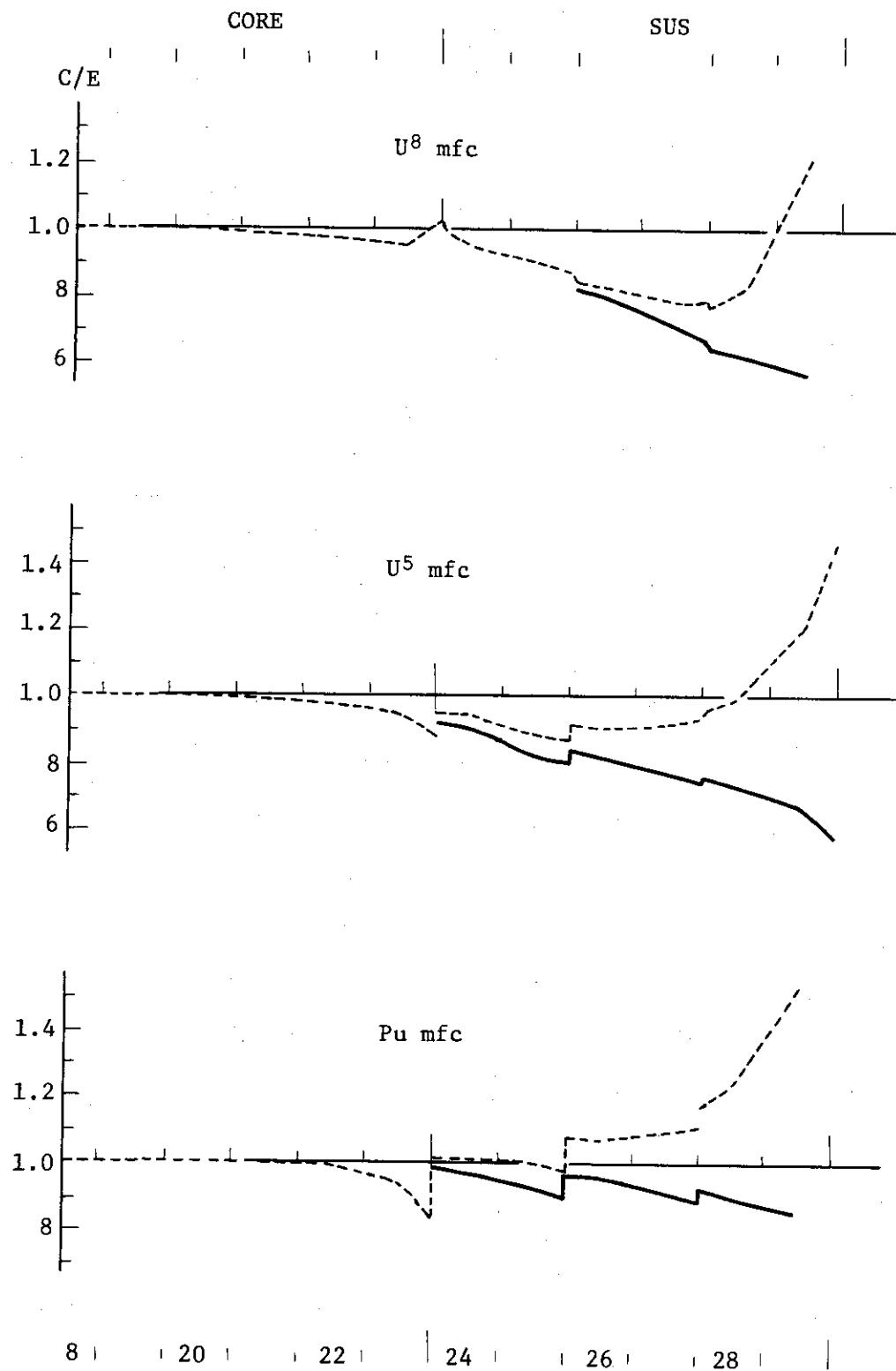


Fig. 14 Radial Traverse (V-2-R)
 $\dots B_z^2$ (Empty Lattice) = 0.0

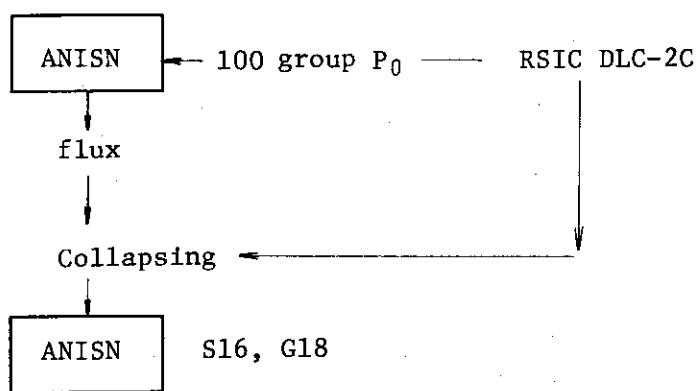


Fig. 15 Calculation Flow (1-D S_N)

5. 結論および今後の課題

C/E は炉心内ではほぼ 1.0 のあたりにあり、ブランケットおよび反射体に入って、全ての mfc について 1.0 よりも低めに出ている。ブランケットおよび反射体内ではスペクトル変化が激しいことから、その相対分布の計算は容易に正確を期したいことは想像されることである。しかし C/E が一貫して各体系で 1.0 より小さくなることは、他に根本的な問題が考えられる。それは実験上は mfc 測定における実験孔の存在であり、U⁸ mfc については 20 - 30 % の補正量になることが分った。また、計算上からは空格子領域の取り扱い方にあり、これはブランケットの深部にまで影響をもつことが分った。これらの両補正に加えて、諸々の小さい値の雑多な補正を行なうことにより、系全体にわたって C/E の改善は可能と思われる。高次散乱核については P₃ まで取り入れれば充分であることが判明した。その他の結論については各章に記述してあるので詳細は省略する。

今後の課題としては空格子領域の取り扱いを精密化する必要が考えられる。また、ストリーミングについては、箔の使用が期待されるが、データ処理の点からは mfc の測定はすぐがたいものがあり、これに対する解析的な補正法を確立することは極めて有意義である。

謝 辞

EXTERMINATOR-2 の使用にあたって核設計研究室の中川正幸氏の好意に感謝致します。
また、ANISN の使用にあたって蔽遮研究室の宮坂駿一氏の好意に感謝致します。

参考文献

- (1) Katsuragi S, et al.: "JAERI-FAST Reactor Group Constants System Part I, II"
JAERI-1195 (1970) and-1199 (1970)
- (2) 鈴木友雄："JAERI-FAST SET を用いた高速炉用一次元拡散コード (EXPANDA-4)"
JAERI-memo 3660 (1970) (公開)
- (3) Fowler T.B, et al.: "EXTERMINATOR-2", ORNL-4078 (1967)
- (4) Engle W.W : "A Users Manual For ANISN ", K-1693 (1967)
- (5) 弘田実弥, 他 :"FCA V-3B 集合体におけるブランケット効果実験", JAERI-M 9057
(1980)
- (6) 弘田実弥, 他 :"FCA V-2-R 集合体における反射体効果実験", JAERI-M 9058 (1980)
- (7) 溝尾宣辰, 他 :"FCA V-3 集合体における B₄C 模擬制御棒実験と解析", JAERI-M 9055
(1980)
- (8) 小西俊雄, 他 :"FCA V-1, V-2 集合体における核分裂比, 核分裂率分布の測定",
JAERI-memo 4341 (1971) (公開)

5. 結論および今後の課題

C/E は炉心内ではほぼ 1.0 のあたりにあり、ブランケットおよび反射体に入って、全ての mfc について 1.0 よりも低めに出ている。ブランケットおよび反射体内ではスペクトル変化が激しいことから、その相対分布の計算は容易に正確を期しがたいことは想像されることである。しかし C/E が一貫して各体系で 1.0 より小さくなることは、他に根本的な問題が考えられる。それは実験上は mfc 測定における実験孔の存在であり、U⁸ mfc については 20 - 30 % の補正量になることが分った。また、計算上からは空格子領域の取り扱い方にあり、これはブランケットの深部にまで影響をもつことが分った。これらの両補正に加えて、諸々の小さい値の雑多な補正を行なうことにより、系全体にわたって C/E の改善は可能と思われる。高次散乱核については P₃ まで取り入れれば充分であることが判明した。その他の結論については各章に記述してあるので詳細は省略する。

今後の課題としては空格子領域の取り扱いを精密化する必要が考えられる。また、ストリーミングについては、箔の使用が期待されるが、データ処理の点からは mfc の測定はすべてがたいものがあり、これに対する解析的な補正法を確立することは極めて有意義である。

謝 辞

EXTERMINATOR-2 の使用にあたって核設計研究室の中川正幸氏の好意に感謝致します。
また、ANISN の使用にあたって蔽遮研究室の宮坂駿一氏の好意に感謝致します。

参考文献

- (1) Katsuragi S, et al.: "JAERI-FAST Reactor Group Constants System Part I, II"
JAERI-1195 (1970) and-1199 (1970)
- (2) 鈴木友雄: "JAERI-FAST SET を用いた高速炉用一次元拡散コード (EXPANDA-4)"
JAERI-memo 3660 (1970) (公開)
- (3) Fowler T.B, et al.: "EXTERMINATOR-2", ORNL-4078 (1967)
- (4) Engle W.W : "A Users Manual For ANISN", K-1693 (1967)
- (5) 弘田実弥, 他: "FCA V-3B 集合体におけるブランケット効果実験", JAERI-M 9057
(1980)
- (6) 弘田実弥, 他: "FCA V-2-R 集合体における反射体効果実験", JAERI-M 9058 (1890)
- (7) 溝尾宣辰, 他: "FCA V-3 集合体における B₄C 模擬制御棒実験と解析", JAERI-M 9055
(1980)
- (8) 小西俊雄, 他: "FCA V-1, V-2 集合体における核分裂比, 核分裂率分布の測定",
JAERI-memo 4341 (1971) (公開)

5. 結論および今後の課題

C/E は炉心内ではほぼ 1.0 のあたりにあり、ブランケットおよび反射体に入って、全ての mfc について 1.0 よりも低めに出ている。ブランケットおよび反射体内ではスペクトル変化が激しいことから、その相対分布の計算は容易に正確を期しがたいことは想像されることである。しかし C/E が一貫して各体系で 1.0 より小さくなることは、他に根本的な問題が考えられる。それは実験上は mfc 測定における実験孔の存在であり、U⁸ mfc については 20 ~ 30 % の補正量になることが分った。また、計算上からは空格子領域の取り扱い方にあり、これはブランケットの深部にまで影響をもつことが分った。これらの両補正に加えて、諸々の小さい値の雑多な補正を行なうことにより、系全体にわたって C/E の改善は可能と思われる。高次散乱核については P₃ まで取り入れれば充分であることが判明した。その他の結論については各章に記述してあるので詳細は省略する。

今後の課題としては空格子領域の取り扱いを精密化する必要が考えられる。また、ストリーミングについては、箇の使用が期待されるが、データ処理の点からは mfc の測定はすべてがたいものがあり、これに対する解析的な補正法を確立することは極めて有意義である。

謝 辞

EXTERMINATOR-2 の使用にあたって核設計研究室の中川正幸氏の好意に感謝致します。
また、ANISN の使用にあたって蔽遮研究室の宮坂駿一氏の好意に感謝致します。

参考文献

- (1) Katsuragi S, et al.: "JAERI-FAST Reactor Group Constants System Part I, II"
JAERI - 1195 (1970) and - 1199 (1970)
- (2) 鈴木友雄: "JAERI-FAST SET を用いた高速炉用一次元拡散コード (EXPANDA-4)"
JAERI-memo 3660 (1970) (公開)
- (3) Fowler T.B, et al.: "EXTERMINATOR-2", ORNL - 4078 (1967)
- (4) Engle W.W : "A Users Manual For ANISN ", K - 1693 (1967)
- (5) 弘田実弥, 他: "FCA V-3B 集合体におけるブランケット効果実験", JAERI-M 9057
(1980)
- (6) 弘田実弥, 他: "FCA V-2-R 集合体における反射体効果実験", JAERI-M 9058 (1890)
- (7) 溝尾宣辰, 他: "FCA V-3 集合体における B₄C 模擬制御棒実験と解析", JAERI-M 9055
(1980)
- (8) 小西俊雄, 他: "FCA V-1, V-2 集合体における核分裂比, 核分裂率分布の測定",
JAERI-memo 4341 (1971) (公開)

付録

V-1, V-3B1, V-3B3, V-3B4, V-2-R の各体系における U^5 mfc やび
 U^8 mfc の分布を Fig. A1~A5 に図示する。

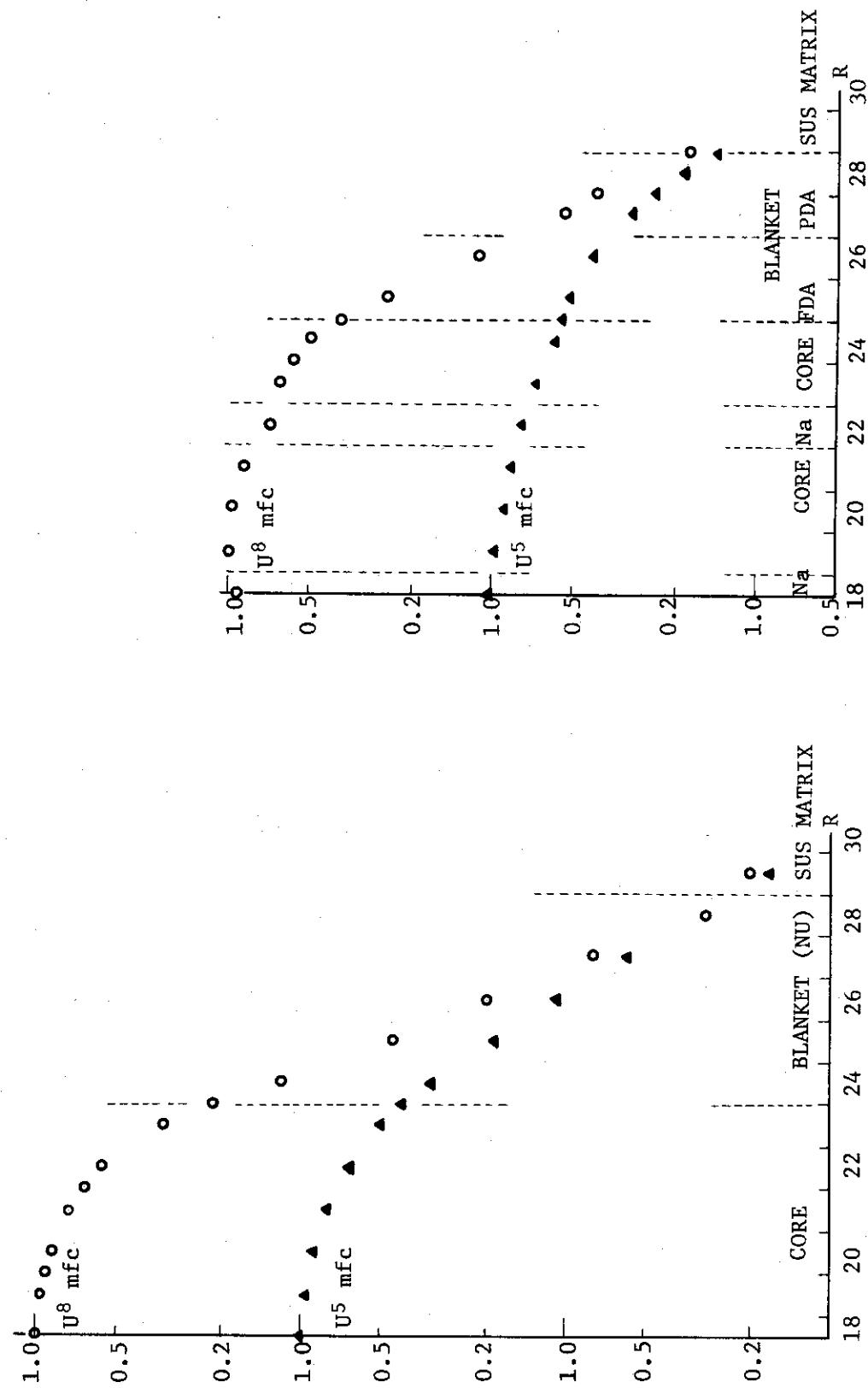


Fig. A1 Radial Fission Rates in FCA V-1

Fig. A2 Radial Fission Rates in FCA V-3-B1

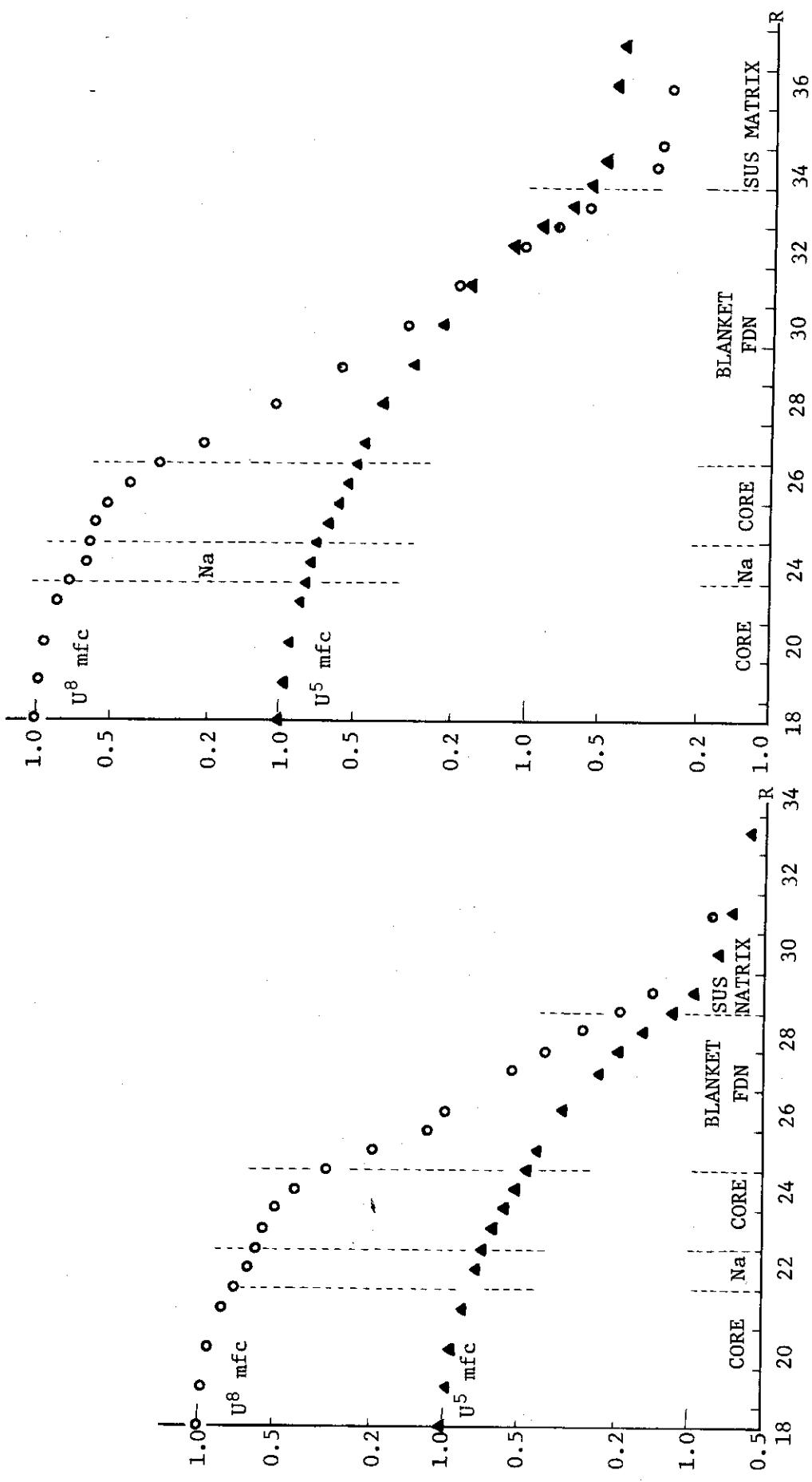


Fig. A3 Radial Fission Rates in FCA V-3-B3

Fig. A4 Radial Fission Rates in FCA V-3-B4

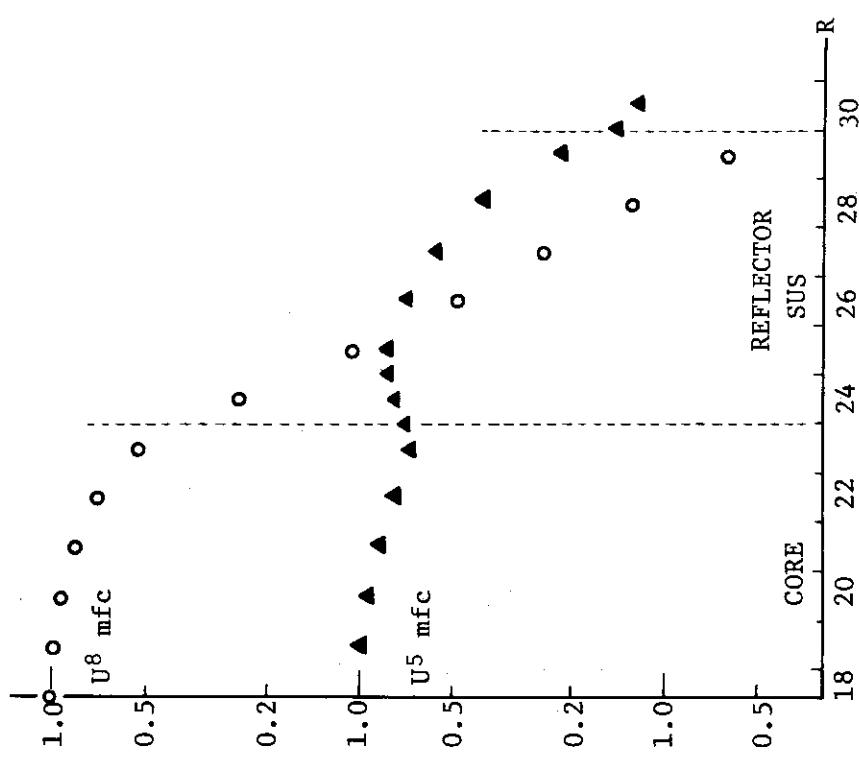


Fig. A5 Radial Fission Rates in FCA V-2-R