

JAERI-M
86-039

高転換軽水炉の核特性解析上の問題点(II)
(SRACによるPROTEUS実験解析報告)

1986年3月

石黒 幸雄・秋江 拓志・金子 邦男*・佐々木 誠*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

高転換軽水炉の核特性解析上の問題点(Ⅱ)
(SRACによるPROTEUS実験解析報告)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
石黒 幸雄・秋江 拓志・金子 邦男*・佐々木 誠*

(1986年1月31日受理)

高転換軽水炉(HCLWR)系における炉物理量の予測精度は必ずしも高くない。SRACシステムによるPROTEUS実験の解析結果は、諸外国のコード・システムと比べ良好であったが、いろいろな問題点も指摘された。この結果をふまえ、SRACシステムに改良が加えられた。さらに新しいPROTEUS実験の結果が公表されたため、解析のやり直しを行なった。これらの結果を通して、高転換軽水炉の炉物理解析上の問題点をまとめた。

Physics Problems on Analysis of
High Conversion Light Water Reactor (II)
(Analysis of PROTEUS Experiment by SRAC)

Yukio ISHIGURO, Hiroshi AKIE, Kunio KANEKO*
and Makoto SASAKI*

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken
(Received January 31, 1986)

There are still uncertainties in predicting reactor physics quantities of high conversion light water reactors (HCLWR). In the analysis of PROTEUS experiments, preferable results were obtained from the SRAC system, compared with the other codes, but some problems were also pointed out. Considering these problems, several improvements have been made in the SRAC system. On the other hand, new results of PROTEUS experiments were published, so a sequence of these PROTEUS experiments have been analysed again. Through these analysis, reactor physics problems on analysing HCLWRs have been summarized.

Keywords: High Conversion Light Water Reactor, PROTEUS, SRAC System,
Experimental Analysis, Reactor Physics Problems

* Japan Information Service Co., Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. SRAC システムの改良	2
2.1 無限希釈断面積の修正	2
2.2 Dancoff 係数計算法の改良	2
3. PROTEUS 実験解析	5
3.1 PROTEUS 実験	5
3.2 計算手法	5
3.3 SRAC と VIM の比較	6
(a) 中性子束	6
(b) Capture Rate と Fission Rate	6
(c) ^{238}U Capture, ^{239}Pu Fission の実効断面積	7
(d) Two Rod Heterogeneity と反応率比	7
3.4 SRAC と実験値の比較	7
(a) Two Rod Heterogeneity	7
(b) 反応率比	8
(c) 他のコードとの比較	8
(d) k_{∞} のボイド係数に対する種々の反応率の寄与	8
4. まとめ	10
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Improvement in SRAC System	2
2.1 Correction of Infinite Dilute Cross Section	2
2.2 Improved Method of Dancoff Factor Calculation	2
3. Analysis of PROTEUS Experiment	5
3.1 PROTEUS Experiment	5
3.2 Methods of Calculation	5
3.3 Comparison of SRAC Calculation with VIM	6
(a) Neutron Flux	6
(b) Capture Rate and Fission Rate	6
(c) Effective Cross Section of ^{238}U Capture and ^{239}Pu Fission	7
(d) Two Rod Heterogeneity	7
3.4 Comparison of SRAC with Experiment	7
(a) Two Rod Heterogeneity	7
(b) Reaction Rate Ratios	8
(c) Comparison with Other Codes	8
(d) Contribution of Various Reaction Rates to k Void Coefficient	8
4. Conclusions	10
References	11

1. ま え が き

軽水炉における転換率を高める目的で燃料ピン間隔を狭くして減速能を低下させた格子を用いる高転換軽水炉は、U-Pu系の燃料の利用効率が格段に向上すると共に、燃焼にともなうPuの劣化が少ないため、有効なPu貯蔵手段となり得る。これらの理由により、高転換軽水炉は、高速増殖炉の実用化に備え、高速炉核燃料サイクルの先導的役割を果たすものとの関心が高まりつつあり、欧米、特に西ドイツ及びフランスにおいて積極的に基礎的設計研究がなされている。これらの研究では、稠密格子に対する計算のために、従来の標準的な手法に様々な改良が加えられたり、またモンテカルロ法を用いるなど多くの試みがなされている。

高転換軽水炉に関する炉物理実験としては、スイスEIRのPROTEUS炉施設での部分臨界実験が公表された唯一のものである⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾（フランスでもERASME臨界実験装置を用いた実験が実施されているが、結果はまだ公表されない⁽⁵⁾）。この実験では、色々な中心反応率比や k_{eff} 等が測定された。一方、EIRでのWIMS⁽⁶⁾、EPRI-CPM⁽⁷⁾等のコードを用いての測定値の解析やその他各国でPROTEUS炉心に対してなされた理論解析による稠密格子の炉物理量に対する予測はいずれも、LWR格子に対して得られたものに比べ非常に悪いものとなっている。

原研においても、熱中性子炉体系標準設計コードSRACシステム⁽⁸⁾の稠密格子系への適応性を検討するべくPROTEUS炉心の解析を行ない、他の解析手法に比べおおむね良好な結果を得たが、一方では様々な問題点も指摘された⁽⁹⁾。

ここではSRACシステムを用いて一連のPROTEUS実験解析の再計算を行なった。それは以下のような理由による。すなわち、

- 前回の解析⁽⁹⁾の後PROTEUSの新しい実験結果（cores 4～6）が公表された⁽⁴⁾。
- 前回の問題点を考慮し、SRACシステムに次のような改良が加えられた。
 - (1) 重要共鳴核種（ ^{238}U 、 ^{239}Pu 等）の非分離共鳴領域における無限希釈断面積の修正。
 - (2) 異種の燃料ピンからなる格子での共鳴核種のDancoff係数をピンごと、核種ごとに求められる様計算法を改良⁽¹⁰⁾

等である。実験との、あるいは連続エネルギー・モンテカルロ・コードVIM⁽¹¹⁾による解析との比較からSRACシステムの稠密格子系における炉物理量の予測精度を再検討すると共に、これらの結果を通して高転換軽水炉における核的な解析上の問題点をまとめる。

2. SRACシステムの改良

前回のPROTEUS炉解析で指摘された問題点のうち、無限希釈断面積及びDancoff係数の計算についてSRACシステムの改良を行なった。このどちらの量も共鳴領域に関するものであり、高転換軽水炉でのこの領域の重要性から考えて積分量に大きな影響を持つことも考えられる。SRACシステムにおける実効共鳴断面積の計算法等は、前回の解析あるいは文献(8)を参照されたい。

2.1. 無限希釈断面積の修正

SRACシステムにおける高速中性子エネルギー領域群定数ライブラリーの作成は、TIMS-PGGシステム⁽¹²⁾が用いられている。このシステムは、ENDF-B4タイプの評価済み核データファイルから群定数を作成するもので、TIMS-1⁽¹³⁾、PROF-GROUCH-GII R^{(8), (12)}等のコードから成る。U、Pu等重い核種の群定数は、中性子減速方程式を数値的に解いてTIMS-1により計算された。その際、非分離共鳴領域の共鳴断面積は、共鳴パラメータが従う統計分布関数を用い、平均断面積に適合する共鳴パラメータの“はしご”(ladder)を発生させるという方法で計算されるが、この共鳴列のはしごが正しく評価されていない、ということが前回の解析で明らかになった。その結果、特に²³⁹Puの核分裂断面積では分離と非分離の境界エネルギー群で40%近い過少評価が見られ、その他²³⁸U等の捕獲等の断面積においても無視できないほど大きな誤差を生じたため、今回非分離共鳴領域での重要核種の無限希釈断面積の修正を行なった。

修正断面積としてはPROF-GROUCH-GII Rで計算されたものを採用した。このコードは、1/Eと核分裂スペクトルに基づく中性子スペクトルで重みをつけることによって群平均断面積を計算するという標準的な方法で群定数を求めるもので、SRACシステムでは、軽・中重核種、あるいは重核種でもシャープな構造を有しない断面積に対する群定数作成に用いられている。

図1～5に例としてENDF-B4の場合の²³⁸U及び²³⁹Puに対する非分離共鳴領域における評価値(統計平均断面積計算コードUNRESRによる結果)、新旧の群定数ライブラリーの断面積の比較を示す。

2.2. Dancoff係数計算法の改良

格子計算における実効共鳴断面積の計算に際し、SRACシステムではIR法 超詳細群による直接計算法(PEACO)⁽¹⁴⁾等の計算法が用意されている⁽⁸⁾。E>130.1 eVの領域では、NR近似に基づくtable-look-up法のみが使用可能となっていて、この場合実効共鳴断面積はDancoff係数を用いて計算される⁽⁸⁾。このDancoff係数は、系が2領域ピンセルからなる無限

格子であるという仮定のもとに求められたものであり、PROTEUS実験における格子のように異種燃料棒が存在する場合、Dancoff係数を計算する格子のモデル化が問題となる。簡単に燃料組成を平均化したピンを持つ格子に置き換えて得られたDancoff係数を用いることの問題点は前回の解析でも指摘された。このような多種の燃料ピンを含む格子においては、各燃料領域ごと、各核種ごとにDancoff係数を計算する必要がでてくる。ここでは、PROTEUS実験等に見られる複雑格子に対する一般化されたDancoff係数の導出法について述べる。(詳細は文献(10)を参照)

衝突確率法を用いると、セル内の減速方程式は、

$$\phi_i(u) = \sum_j P_{ij}(u) W_j(u) X_{oj} / X_j(u) \quad (1)$$

のようになる。ここで

$$W_j(u) = S_j(u) / \Sigma_{oj}$$

$$X_{oj} = \bar{l}_j \Sigma_{oj}, \quad X_j(u) = \bar{l}_j \Sigma_j(u)$$

であり、 $S_j(u)$ は減速中性子源、 \bar{l}_j は領域 j の平均弦長、 Σ_{oj} は $\Sigma_j(u)$ の non-resonant part である。

今注目する核種の共鳴断面積 σ_r が共鳴エネルギー付近で無限大であると近似すると、衝突確率 P_{ij} はこの核種が存在する領域 R において

$$P_{ij}(\sigma_r) \equiv P_{ij}(u) \Rightarrow \delta_{ij} - r_{ij} / X_i \quad (i \in R) \quad \text{for } X_i \Rightarrow \infty \quad (2)$$

と表わせる。ここで

$$r_{ij} \equiv \lim_{\sigma_r \rightarrow \infty} \{ \delta_{ij} - P_{ij}(\sigma_r) \} X_i$$

である。また $\sum_j P_{ij} = 1$ であるので $\sum_j r_{ij} = 0$ または $r_{ii} = -\sum_{j \neq i} r_{ij}$ となる。(1),(2)を用いると、

$\phi_i(u)$ は $i \in R$ において次式で表わされる。

$$\phi_i(u) \Rightarrow [W_i(u) X_{oi} - \sum_{j \in R} W_j(u) X_{oj} r_{ij} / X_j(u)] / X_i(u) \quad \text{for } X_i \Rightarrow \infty \quad (3)$$

今、数百 eV 以上のエネルギー領域を対象としているので NR 近似を用いると、

$$W_i(u) = \text{const} \equiv 1$$

また、 $j \in R$ であれば $X_{oj} / X_j = 1$ であるので(3)は

$$\phi_i(u) \Rightarrow (X_{oi} - \sum_{j \in R} r_{ij}) / X_i \quad \text{for } X_i \Rightarrow \infty \quad (4)$$

となる。

一方非均質系での吸収体中のスペクトルは均質媒質におけるスペクトルの形で表わすと、

$$\phi_i(u) = (X_{oi} + b_i) / (X_i + b_i) \Rightarrow (X_{oi} + b_i) / X_i \quad \text{for } X_i \Rightarrow \infty \quad (5)$$

(4)と(5)を比べることにより

$$b_i \equiv -\sum_{j \in R} r_{ij} = 1 - C_i \quad (6)$$

となり、 C_i は i 領域の Dancoff 係数である。衝突確率法を用いて r_{ij} を求めることにより、Dancoff 係数を計算できる。

Table 1 に PROTEUS の cores 1 ~ 3 に対してこの方法を用いて計算された Dancoff 係数を、均質化された 1 ロッドセルに対する値と比較して示す

3. PROTEUS 実験解析

3.1 PROTEUS 実験

PROTEUS-LWHCRにおける実験は、Puを燃料とする稠密格子炉心に対する冷却材ボイド反応度係数を評価するためにR. Chawlaらによって行なわれた。実験の詳細は前回の解析や文献(1)~(4)等に表示されている。炉心は15% fissile PuのMOX燃料と減損ウランの2種類の燃料棒が六方格子状に並べられているテスト領域(減速材/燃料 体積化 ≈ 0.5)とそれを囲むバッファゾーン及びドライバーゾーンからなり、テストゾーンはドライバーゾーンからの中性子で臨界に保たれる。テストゾーンの減速材は入れ換えることができ、この実験ではH₂O Air, Dowthermが用いられた。Dowthermは冷却材の42.5%ボイドを模擬する減速材である。燃料、被覆、減速材の組成はTable 2に示されている。

テスト領域の格子配置はMOXピン(fuel 1)とUO₂ピン(fuel 2)が1対1に配列された6% fissile Puを模擬する格子(上記の3つの減速材に対応してそれぞれcore 1, core 2, core 3)と両者が2対1に配列された8% Puを模擬する格子(core 6~4)の2種類について実験が行なわれている(core 4~6の実験結果は前回のPROTEUS解析の後で発表された)。図6~7にそれぞれの格子を示す。

これらの炉心について測定された量は

- C 8 (²³⁸U capture rate), F 9 (²³⁹Pu の fission rate , 以下同様) F 8 , F 5 等の two rod heterogeneity (ある反応率の異種燃料棒間の比)
- 炉心での反応率比, C 8 / F 9 , F 8 / F 9 , F 5 / F 9 等
- k_{∞}

である。ただし, cores 4~6についてはテストゾーンが小さいため k_{∞} の測定はなされていない。

3.2 計算手法

SRACによる計算はすべて衝突確率法に基づくセル計算であり、格子モデルは図6, 7のPROTEUS-coresの格子を厳密に再現したtwo rod cellを用いた。エネルギー群の構造等は前回と同じで、高速群66群、熱群20群である。実効共鳴断面積の計算は $0.683\text{ eV} \leq E \leq 130.1\text{ eV}$ では詳細スペクトル計算ルーチンPEACOを使用、 $E > 130.1\text{ eV}$ ではNR近似に基づくtable-look-up法を用いた。その際、前回問題点となったDancoff係数計算法については、複雑格子において燃料ピンごと、核種ごとにDancoff係数が求められるよう計算法を改良してある。(2章参照)

前回同様SRACシステムの計算手法の精度を検討するために、連続エネルギー・モンテカルロ・コードVIMとの計算結果の比較をまず行なった。VIMではENDF-B4に基づくデー

ライブラリーが使用されているため、SRACシステムについてもENDF-B4から作成されたライブラリーを用いた。またVIMとの比較のためバックリング $B^2 = 0$ とした。VIMではピンの軸方向を十分に長く(10^{15} cm)とり境界条件を完全反射として $B^2 = 0$ に対応する計算を行い、 k_{eff} の精度が0.2~0.3%になる点を目安にhistory数を決めた。

実験と比較するためのSRACの計算では、実験体系を模擬するために B^2 を調節して $k_{eff} = 1.0$ となるようにして計算を行なった。ライブラリーはJENDL-2に基づくものを主体にENDF-B4も用いて解析を行った。

計算で求めた量のうち、two rod heterogeneityについてはMOXピンでの原子一個あたりの反応率の、 UO_2 ピンでの原子一個あたりの反応率に対する比として求めた反応率比はMOXピン、 UO_2 ピンでの原子一個あたりの反応率を実際に存在する原子数を重みとして平均した値の比として求めた。反応率の測定のみ用いられた核種(^{233}U , あるいは UO_2 ピンにおける ^{239}Pu 等)の個数密度はすべて 10^{-12} ($\times 10^{24}$ atoms/cm³)とした。

3.3 SRACとVIMの比較

以下にPROTEUS cores 1~6に対応するセルモデルについてVIM及びSRACで行なった計算結果を比較して示す。

(a) 中性子束

図8~10はcores 1~6に対するセル平均中性子束である。ボイド率0% (cores 1, 6)及び42.5% (cores 3, 4)について1 eV以下のところでSRACとVIMの値に不一致が見られる。0%ボイドでSRACの計算値がVIMより大きく、42.5%ボイドでは逆にSRACの方が小さくなっている。100%ボイドの炉心については全体的にSRACとVIMの不一致が目立つ。

図11~15は各coreの領域別中性子束である。縦軸を線型目盛にして高エネルギー側の違いをはっきりさせた。まず100 keV~1 MeVにかけてSRACとVIMの違いが目立つ。特に500 keV~1 MeVにかけて0%ボイド、42.5%ボイドの炉心で両者の差が大きい。また30 keV付近でSRACがVIMより常に大きな値を出している。これは ^{56}Fe の27.7 keVにピークのある共鳴レベルに対するSRACの断面積の評価に問題があるものと思われる(前回の解析でも指摘されていた)。

同一の炉心についてMOXピン(fuel 1), UO_2 ピン(fuel 2), 減速材の各スペクトルを比較するとSRACとVIMのずれの傾向はどの領域に対しても同じであることがわかる(図11~13)。従ってSRACのスペクトル計算に問題があるとすれば、それは炉心内のスペクトル分布の計算にではなく、一点近似スペクトルの計算にあると思われる。

(b) Capture Rate と Fission Rate

cores 1, 6及び3, 4(0%及び42.5%ボイド状態)についてみると1 keV以下でのSRACとVIMのずれが目立つ(図16, 18, 19, 21)。この部分はPEACOを用いて分離共鳴の実効断面積を計算しており、その計算精度に問題がある可能性がある(^{238}U と ^{239}Pu の実効断面積の比較グラフを後で示す)。中性子束の所でも指摘した30 keV付近と100 keV~1

MeV にかけてスペクトルの差が見られた部分については, capture 及び fission rate における差は相対的にあまり重要な大きさではない。

100% ボイドの炉心について見ると, スペクトルの場合と同様に, 全体としてSRACとVIMの差の大きな部分が目立つが特に30 keV 付近の⁵⁶Feの共鳴レベルに対応する部分での差が大きい(図17, 20)。ここでの差はそれより低エネルギーの群数で大小が逆転している部分とキャンセルしているようにも見えるが, ボイド率の大きい炉心に対する計算精度に大きな影響を与えている可能性もあり, この部分の断面積等の精度を上げる必要がある。

(c) ²³⁸U Capture, ²³⁹Pu Fission の実効断面積

²³⁸U, ²³⁹Puともに前回の解析で見られた1 keV~10 keVにかけての非分離共鳴領域の実効断面積のSRACとVIMの不一致はかなり改善されていることがわかる。しかし²³⁸U capture について見てみると100 eV 前後の分離共鳴のピークにおいてSRACの値がVIMによるものに比べて小さくなっている。さらにこれ以外にも代表的共鳴レベルの共鳴断面積を過少評価する傾向があることがわかる。反応率のエネルギー分布を見てもわかるようにこの分離共鳴領域の実効断面積の計算精度にはまだ問題が多いものと思われる。この事実は種々の炉物理量に影響を及ぼす可能性があり, 検討すべき課題である。

(d) Two Rod Heterogeneity と反応率比

Table 3 (及び図27)のtwo rod heterogeneityの比較では, SRACとVIMのずれは最大2%程度であり特に42.5%, 100%ボイドでのC8, core 5でのF9でVIMの誤差をかなり上回る差違が認められる。ただし, 後で述べるSRACと実験値との差に比べるとこの差は相対的に小さい。

反応率比(Table 4と図28)を見てみると, 炉心の特性を決定する上で重要なパラメータであるC8/F9に最大2%程度の差が認められる。ただし, two rod heterogeneity同様, 実験値とSRACとの差に比べるとこの差は小さい。

以上のことをまとめてみると, SRACによる計算値は分離共鳴領域の特に²³⁸Uの実効断面積の計算に多少問題があり, PEACOの精度にはまだ問題があるものと思われる。SRACにおける²³⁸Uの共鳴の過少評価が改善されると, その他の積分値なども, VIMと一致する方向に変わって行くと考えられる。

3.4 SRACと実験値の比較

(a) Two Rod Heterogeneity

これまでの解析において, 特にC8のtwo rod heterogeneityは最も実験に対する予測精度の悪いものであった。Table 5に実験値を示すが, まずC8のtwo rod heterogeneityが最も1からはなれる場合でも0.986で極めて1に近い値を示すことがわかる。簡単に背景断面積でこのことを理解しようとしても明確には説明できない。⁽⁹⁾ Table 5にはJENDL-2及びENDF-B4を用いたSRACの計算結果も示してあるが, JENDLとENDFの違いはわずかである一方, C8, F9において実験値との差が大きい(図29)。これらのずれは前節のVIMとの比較によるずれ(図27)より特にC8において2倍近くも大きくこの事実を理解す

るのはかなり困難である。

Table 5にはさらに前回の解析による cores 1～3の結果もあるが(図30), これと比べても特に実験値に近づいたとはいえない。

two rod heterogeneity に関する矛盾は高転換軽水炉の非均質効果に対する理解を得るための最も基本的な問題と考えられ、早急に解決する必要がある。

(b) 反応率比

Table 6及び図31に反応率比の実験値及びJENDL-2とENDF-B4によるSRACの計算結果を示す。炉心での測定値である実験値と比較するためにSRACによる計算値にPROTEUS/FM factor (基本モードのスペクトルによる反応率比に対する炉心での反応率比の比で、これらはChawla et. al.⁽³⁾に示された計算値をそのまま用いた: Table 6-(a)) を乗じたものが、 $\langle \rangle$ 内に示してある。これを見ると、two rod heterogeneity の場合に比べて実験値との差が大きいうように思われるが、実験誤差もtwo rod heterogeneity に比べて2～3倍の大きさのものが多く、この差もやむを得ない。しかし実験誤差を上回る差を示している計算値が多く、相対的に見てtwo rod heterogeneity やVIMとの比較におけるtwo rod heterogeneity, 反応率比と比べてこの反応率比の実験との一致はあまり良くない。Table 7及び図32は前回の解析で行なった cores 1～3の結果であるが、これに比べ今回実験値に近づいたとはいえない。また、同率の反応率比に対してボイド率によってC/Eが大きく異なる傾向が存在する。

個々の核種の反応率比については以上の様に誤差やばらつきが目立つが、 k_{∞} については(core 1～3のみでしか測定値がないが)いずれも実験誤差内の値がSRACによって得られている。

(c) 他のコードとの比較⁽³⁾

PROTEUS実験に対してSRAC以外の他のコードによって行なわれた解析の結果を図33～36及びTable 8に示す。他のコードでもSRACと同様か、それを上回る反応率比の実験値との差が見られる。ここで、どのコードによる結果もほぼ同じボイド依存性を示しており、それらの傾向は興味深い。同一の原因によってこのような依存性があらわれている可能性がある。いずれにせよ軽水炉や高速炉に比べて高転換軽水炉系における反応率比の予測精度は相当に劣るようである。

k_{∞} については、3つのボイド率について実験値とよく一致しているのはJENDL-2を用いたSRACだけである。SRACでもENDF-B4を用いた場合にはボイド率が大きくなるにつれて実験値からはずれた k_{∞} が得られる。

(d) k_{∞} のボイド係数に対する種々の反応率の寄与

Chawla らによる実験の報告⁽³⁾には k_{∞} のボイド係数に与える個々の核種の反応率による影響の評価が提案されている。そこで用いられた方法をSRACによる計算値にも適用した結果をTable 9に示す。ボイド率が v_1 %から v_2 %へ変化する時の k_{∞} のボイド係数は

$$\alpha_v = (k_{\infty 2} - k_{\infty 1}) / (\bar{k}_{\infty} \cdot \Delta v) \quad (\%^{-1})$$

ここで、 $\bar{k}_{\infty} = (k_{\infty 2} + k_{\infty 1}) / 2$, $\Delta v = v_2 - v_1$

この α_v を特定の反応率 R_i からの寄与の和として考える時、 R_i に対するボイド係数を次のように考える。

$$\alpha_{vi} = [-(\Delta A_i / \bar{A}) + (\Delta P_i / \bar{P})] / \Delta v$$

ここで A_i 、 P_i は反応率 R_i による中性子吸収、中性子生成をそれぞれ表わし、 \bar{A} 、 \bar{P} はボイド率 v_1 、 v_2 での全吸収率、生成率の平均値である。

\bar{A} 、 \bar{P} の実験値は得られないので、実験値から α_{vi} を得るためには次のようにする。Table 9の $(\Delta v / \Delta R)$ で示している値、即ち $\alpha_{vi} / \Delta R_i$ をWIMS、EPRI-CPMに対して求めてみると、両者の差があまりない。そこで両方のコードによる平均値を実際の $\alpha_{vi} / \Delta R_i$ と仮定し、これに実験による ΔR_i を乗じて α_{vi} の測定値とする。SRACによる $\alpha_{vi} / \Delta R_i$ も示しているが、これとWIMS、EPRI-CPMの平均値の差はあまり大きくない(高々数%)なのでこの仮定を認めることとして、Table 10の実験値との比較ではChawlaらによって計算された「実験値」をそのまま用いている。

実験値との比較は、core 1~3では0%→100%、0%→42.5%→100%の3つのボイド率変化に対して、core 4~6では0%→100%に対してのみ行なった。Table 10の()内がC/Eであるが、符号が逆のものがあったり、2倍以上の差であるものもあり、 α_{vi} の計算精度には問題が多い。しかし各反応率比間の α_{vi} の相対的な大小関係については大まかな評価が可能であると思われる。

4. ま と め

高転換軽水炉では、高速炉や軽水炉では考えられないくらい高い割合の反応が共鳴領域(1eV～1KeV)で起こるため、このエネルギー領域での(特に代表的な分離共鳴レベルでの)吸収及び分裂反応を精度良く計算することは高転換軽水炉の核特性を評価する上で極めて重要である。さらに、ボイド発生によりスペクトルが大幅に変化するため高転換軽水炉の解析・設計には軽水炉の設計に用いられている小数群計算では十分な精度が期待できず多群法に基づくデータ及び手法を必要とすると考えられる。この際必要とする多群実効断面積の計算も、これまでのIR法等の簡便法に依らず、超詳細群計算によって求める必要があることも前回の解析で指摘された。

SRACシステムにおいては以上のような事項はほぼ満足されていると考えられる。高転換軽水炉系での炉物理量の予想精度も他のコードに比べ高い。しかし、Dancoff係数の計算法やFast Libraryの修正にもかかわらずTwo Rod Heterogeneity等の積分量の実験値との不一致は前回と比べてあまり改善されなかった。さらに反応率のVIMとの比較で分離共鳴領域で食い違いが見られたように、SRACにおいては分離共鳴領域の実効断面積の計算精度にはまだ問題が残る。また、反応率比、 k_{∞} といった積分値では実験値と計算結果との差はVIMとの差に比べてはるかに大きい。使用する核データによって計算結果もかなり違い、核データの精度について全面的見直しが必要である。特に、 ^{238}U 及びPu同位体元素の共鳴エネルギー領域の断面積の再検討・評価が必要と思われる。

実験と解析との間の矛盾のうち、最も大きいものの1つはC8に対するtwo rod heterogeneity factorに関するものである。まず第1に、なぜ実験値が極めて1に近いのか理解できない。C8のtwo rod heterogeneityに関する矛盾を解決し、早期に高転換軽水炉格子系の非均質効果について理解を深める必要がある。

中心反応率比のC/Eのボイド率依存性は、既存のコード間でよく似た振舞いをするものがあり、共通の問題に基づいている可能性がある。従ってこの問題も詳細に検討し、データ及び手法上の問題点を固定する必要がある。

SRACによる実験解析では $k_{\text{eff}} = 1$ にするために、全群に均一な B^2 を与えてセルのスペクトルを計算したが、これが実際の測定されたバックリングと一致しているかどうか、高転換軽水炉格子系で精度よくfundamental modeが実現されるか、といった問題も炉心計算を行なって確認する必要がある。

これらの問題点から起こる不確定性は実効増倍率の予測精度に直接影響を及ぼし、さらにはインベントリーやサイクル期間の予測に重大な不確定性をもたらすことになり、早期に解決する必要がある。

参考文献

- (1) Chawla R.: "Breakdown of the k_{∞} Void Coefficient of a LWHCR Lattice," Atomkernenergie, 37, 303 (1981).
- (2) Chawla R. et al.: "Comparison of Calculated and Measured Parameters for a Pu-Fueled LWHCR Lattice," Proc. ANS Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Core Thermal Hydraulic, Kiamesha Lake, N.Y., NUREG/CP-0034, 902 (1982).
- (3) Chawla R. et al.: "Reactivity and Reaction Rate Ratio Changes with Moderator Voidage in a Light Water High Converter Reactor Lattice," Nuclear Technology, 67, 360 (1984).
- (4) Chawla R. et al.: "Further Investigation in the PROTEUS-LWHCR Phase I Program," NEACRP-A-636 (1984).
- (5) "The CEA Experimental Program for Validating the Tight Lattice Reactor Concept," NEACRP-A-635 (1984).
- (6) Askew J.R. et al.: "A General Description of the Lattice Code WIMS," J. Brit. Nucl. Energy Soc., 5, 564 (1966).
- (7) "Advanced Recycle Methodology Program (ARMP), System Documentation," Internal EPRI Report (1977).
- (8) Tsuchihashi K. et al.: "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis," JAERI-1285 (1983).
- (9) 石黒幸雄他: "高転換加圧水炉 (HCPWR) の核特性解析上の問題点 (SRACシステムによる PROTEUS-LWHCR 炉心の解析)", JAERI-M 84-180 (1984)。
- (10) Ishiguro Y. et al.: "Generalized Dancoff Factor in Complex Lattice Arrangement," J. Nucl. Sci. Technol., 22, 853 (1985).
- (11) Levitt L.B. and Lewis R.C.: "VIM-1, A Non-Multigroup Monte Carlo Code for Analysis of Fast Critical Assemblies," AI-AEC-12951, Atomic International (1970) and Milton L.J.: "VIM User's Guide", ANL, Argonne, Illinois, January 1980.
- (12) Takano H. et al.: "TIMS-PGG: A Code System for Producing Group Constants in Fast Neutron Energy Region", JAERI-M 82-072 (1982).

- (13) Takano H. et al.: "TIMS-1: A Processing Code for Production of Group Constants of Heavy Resonant Nuclides", JAERI 1267 (1980).
- (14) Ishiguro Y.: "PEACO-II: A Code for Calculation of Effective Cross Section in Heterogeneous Systems," JAERI-M 5527 (1974).

Table 3 Comparison of two rod heterogeneity.
(ENDF-B4, buckling = 0.0, two-rod model)

<VIM>				
CASE	C8	F8	F5	F9
Core 1	9.6269E-01 +0.51%	9.3374E-01 +0.46%	1.2681E+00 +0.52%	1.9098 +0.79%
Core 3	9.6519E-01 +0.52%	9.4249E-01 +0.50%	1.1419E+00 +0.83%	1.5945 +1.25%
Core 2	9.8749E-01 +0.91%	9.6741E-01 +1.58%	9.9873E-01 +0.89%	1.0002 +0.70%
Core 6	9.5545E-01 +0.95%	9.4715E-01 +0.64%	1.1752E+00 +0.77%	1.7085 +0.97%
Core 4	9.6763E-01 +0.62%	9.5457E-01 +0.81%	1.0914E+00 +0.53%	1.4222 +1.08%
Core 5	9.9416E-01 +0.65%	9.6865E-01 +0.83%	1.0013E+00 +0.59%	1.0032 +0.50%
<SRAC>				
CASE	C8	F8	F5	F9
Core 1	9.5563E-01 (0.993)	9.3092E-01 (0.997)	1.2636E+00 (0.996)	1.8966E+00 (0.993)
Core 1 (3 reg.)	9.5572E-01 (0.993)	9.3091E-01 (0.997)	1.2649E+00 (0.997)	
Core 3	9.4730E-01 (0.981)	9.3941E-01 (0.997)	1.1304E+00 (0.990)	1.5815E+00 (0.992)
Core 2	9.7025E-01 (0.983)	9.6063E-01 (0.993)	9.9766E-01 (0.999)	1.0052E+00 (1.005)
Core 6	9.5362E-01 (0.998)	9.4985E-01 (1.003)	1.1900E+00 (1.013)	1.7348E+00 (1.015)
Core 4	9.4944E-01 (0.981)	9.5656E-01 (1.002)	1.0972E+00 (1.005)	1.4521E+00 (1.021)
Core 5	9.7742E-01 (0.983)	9.7057E-01 (1.002)	1.0020E+00 (1.001)	1.0090E+00 (1.006)

(Relative value to VIM in parentheses.)

Table 4 Reaction rate ratios. (VIM & SRAC)
(Relative value to VIM in parenthesis)

CASE	CODE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	k-inf
Core 1	VIM	6.9741-2	9.6239-3	9.9150-1	1.6827	1.0278
		+0.64%	+0.61%	+0.65%	+0.60%	+0.22%
	SRAC	6.8264-2 (0.978)	9.5693-3 (0.994)	9.9227-1 (1.001)	1.6750 (0.995)	1.03640 (1.008)
	SRAC (3 reg)	6.8277-2 (0.979)	9.5706-3 (0.994)	9.9307-1 (1.002)	1.6753 (0.996)	1.03631 (1.008)
Core 3	VIM	8.9712-2	1.1777-2	1.0764	1.7977	0.9747
		+1.00%	+0.99%	+1.19%	+1.20%	+0.40%
	SRAC	8.9448-2 (0.997)	1.1980-2 (1.017)	1.0823 (1.005)	1.7993 (1.001)	0.97225 (0.997)
Core 2	VIM	1.6007-1	1.9903-2	1.1173	1.4496	0.8971
		+1.10%	+1.70%	+1.10%	+0.85%	+0.36%
	SRAC	1.5856-1 (0.991)	2.0098-2 (1.010)	1.1209 (1.003)	1.4301 (0.987)	0.90687 (1.011)
CASE	CODE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F3/F9	k-inf
Core 6	VIM	8.1699-2	1.1982-2	1.0096	1.9557	1.08515
		+1.11%	+0.87%	+0.97%	+1.04%	+0.29%
	SRAC	8.0100-2 (0.980)	1.1948-2 (0.997)	1.0055 (0.996)	1.9058 (0.974)	1.09320 (1.007)
Core 4	VIM	1.0035-1	1.4243-2	1.1085	2.0037	1.05269
		+0.73%	+0.90%	+0.65%	+0.99%	+0.23%
	SRAC	1.0069-1 (1.003)	1.4461-2 (1.015)	1.1175 (1.008)	2.0342 (1.015)	1.05279 (1.000)
Core 5	VIM	1.5755-1	2.1491-2	1.1035	1.5896	1.05530
		+0.74%	+0.90%	+0.69%	+0.67%	+0.24%
	SRAC	1.5724-1 (0.998)	2.1721-2 (1.011)	1.1067 (1.003)	1.5874 (0.999)	1.05886 (1.003)

Table 5 Two rod heterogeneity. (Experiment & SRAC)

< Experiment >

CASE	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Core 1	0.986 (1.0 %)	0.942 (0.8 %)	1.265 (1.2 %)	0.938 (0.5 %)	1.166 (1.5 %)	1.918 (1.4 %)
Core 3	0.989 (1.0 %)	0.938 (0.5 %)	1.131 (0.7 %)	0.935 (1.0 %)	1.113 (1.0 %)	1.572 (1.0 %)
Core 2	0.998 (0.3 %)	0.971 (0.5 %)	1.003 (0.3 %)	0.988 (1.0 %)	1.003 (0.3 %)	1.005 (0.3 %)

CASE	C8	F8	F5	F3	F9
Core 6	0.985 (0.8 %)	0.957 (0.9 %)	1.177 (0.6 %)	1.129 (1.0 %)	1.672 (1.1 %)
Core 4	0.999 (0.8 %)	0.954 (1.2 %)	1.088 (0.5 %)	1.079 (1.2 %)	1.429 (0.8 %)
Core 5	0.997 (0.3 %)	0.970 (0.7 %)	1.006 (0.7 %)	1.012 (0.6 %)	1.008 (0.8 %)

< SRAC : JENDL-2 >

CASE	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Core 1	0.95598 (0.970)	0.93191 (0.989)	1.2645 (1.000)	0.93101 (0.993)	1.1686 (1.002)	1.9081 (0.995)
Core 3	0.94752 (0.958)	0.94041 (1.003)	1.1349 (1.003)	0.93928 (1.005)	1.1005 (0.989)	1.5833 (1.007)
Core 2	0.96711 (0.969)	0.96154 (0.990)	0.99810 (0.995)	0.96055 (0.972)	0.99764 (0.995)	1.0074 (1.002)

CASE	C8	F8	F5	F3	F9
Core 6	0.95367 (0.968)	0.95072 (0.993)	1.1868 (1.008)	1.1248 (0.996)	1.7317 (1.036)
Core 4	0.94948 (0.950)	0.95740 (1.004)	1.0955 (1.007)	1.0765 (0.998)	1.4512 (1.015)
Core 5 (fast)	0.97669 (0.980)	0.97086 (1.001)	1.0019 (0.996)	1.0015 (0.990)	1.0089 (1.001)

< SRAC : ENDF-B4 >

CASE	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Core 1	0.95572 (0.969)	0.93090 (0.988)	1.2642 (0.999)	0.92971 (0.991)	1.1672 (1.001)	1.9039 (0.993)
Core 3	0.94751 (0.958)	0.93942 (1.002)	1.1356 (1.004)	0.93802 (1.003)	1.0994 (0.988)	1.5801 (1.005)
Core 2	0.96800 (0.970)	0.96081 (0.990)	0.99785 (0.995)	0.95956 (0.971)	0.99759 (0.995)	1.0074 (1.002)

CASE	C8	F8	F5	F3	F9
Core 6	0.95359 (0.968)	0.94981 (0.992)	1.1870 (1.008)	1.1238 (0.995)	1.7288 (1.034)
Core 4	0.94954 (0.950)	0.95654 (1.003)	1.0963 (1.008)	1.0757 (0.997)	1.4497 (1.014)
Core 5	0.97741 (0.980)	0.97033 (1.000)	1.0017 (0.996)	1.0015 (0.990)	1.0088 (1.001)

* () ... C/E value.

< Reference: results of previous calculation. >
(C/E , by PEACO & JENDL-2)

CASE	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Core 1	0.966	0.987	0.994	0.990	0.998	0.987
Core 3	0.956	1.000	0.997	1.002	0.985	1.008
Core 2	0.968	0.989	0.993	0.971	0.993	1.004

Table 6-(a) Reaction rate ratios.
(Experiment with PROTEUS/FM factors)

< Experiment >

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	F2/F9	F3/F9	k-inf
Core 1	0.0691 (2.2 %)	0.00987 (2.5 %)	0.988 (2.0 %)	1.78 (4.5 %)	.00254 (2.7 %)	1.900 (2.2 %)	1.045 (1.1 %)
Core 3	0.0874 (2.0 %)	0.01113 (2.3 %)	1.032 (1.8 %)	1.75 (3.5 %)	.00291 (2.5 %)	1.943 (2.0 %)	0.991 (1.5 %)
Core 2	0.1476 (1.5 %)	0.01926 (2.0 %)	1.091 (1.5 %)	1.46 (2.5 %)	.00473 (2.0 %)	1.648 (1.5 %)	0.905 (0.8 %)

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F3/F9
Core 6	0.0748 (3.0 %)	0.01192 (2.8 %)	0.946 (2.1 %)	1.887 (3.1 %)
Core 4	0.0939 (2.8 %)	0.01413 (2.6 %)	1.050 (1.8 %)	1.959 (2.7 %)
Core 5	0.1444 (2.0 %)	0.02219 (2.4 %)	1.056 (1.7 %)	1.624 (2.4 %)

<< PROTEUS/FM factors >> (from papers by Chawla et al.)

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	F2/F9	F3/F9
Core 1	0.998	0.980	1.000	1.000	0.980	1.001
Core 3	0.997	0.970	1.000	1.001	0.970	1.003
Core 2	0.975	1.030	0.985	0.990	1.032	1.034

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F3/F9
Core 6	0.998	0.983	0.999	1.001
Core 4	0.996	0.965	1.001	1.007
Core 5	0.992	0.946	1.016	1.041

Table 6-(b) Reaction rate ratios.

< SRAC : JENDL-2 >

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	F2/F9	F3/F9	k-inf
Core 1	6.6941-2 (0.969) <0.967>	1.0168-2 (1.030) <1.010>	9.9043-1 (1.002) <1.002>	1.6958 (0.953) <0.953>	2.5283-3 (0.995) <0.975>	1.8437 (0.970) <0.971>	1.04980 (1.005)
Core 3	8.7410-2 (1.000) <0.997>	1.2402-2 (1.114) <1.081>	1.0894 (1.056) <1.056>	1.8253 (1.043) <1.044>	3.0635-3 (1.053) <1.021>	2.02257 (1.041) <1.044>	0.98424 (0.993)
Core 2	1.5637-1 (1.059) <1.033>	1.9109-2 (0.992) <1.022>	1.1530 (1.057) <1.041>	1.4918 (1.022) <1.012>	4.6663-3 (0.987) <1.018>	1.5589 (0.946) <0.978>	0.89837 (0.993)

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F3/F9	k-inf
Core 6	7.8554-2 (1.050) <1.048>	1.2991-2 (1.090) <1.071>	1.0026 (1.060) <1.059>	1.9248 (1.020) <1.021>	1.10913
Core 4	9.8313-2 (1.047) <1.043>	1.5619-2 (1.105) <1.067>	1.1172 (1.064) <1.065>	2.0515 (1.047) <1.055>	1.07052
Core 5 (FAST)	1.5003-1 (1.039) <1.031>	2.3501-2 (1.059) <1.002>	1.1086-1 (1.050) <1.067>	1.5230 (0.938) <0.976>	1.09117

* () ... C/E value.

* < > ... C/E value multiplied by PROTEUS/FM factor.

Table 6-(c) Reaction rate ratios.

< SRAC : ENDF-B4 >

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	F2/F9	F3/F9	k-inf
Core 1	6.8411-2 (0.990) <0.988>	9.7245-3 (0.985) <0.965>	9.9337-1 (1.005) <1.005>	1.6748 (0.941) <0.941>	2.2517-3 (0.886) <0.868>	1.8204 (0.937) <0.938>	1.03742 (0.993)
Core 3	8.9442-2 (1.023) <1.020>	1.1799-2 (1.060) <1.029>	1.0895 (1.056) <1.056>	1.8054 (1.032) <1.033>	2.7139-3 (0.933) <0.905>	1.9975 (1.028) <1.031>	0.97044 (0.979)
Core 2	1.6262-1 (1.102) <1.074>	1.7889-2 (0.929) <0.957>	1.1406 (1.045) <1.029>	1.4524 (0.995) <0.985>	4.0570-3 (0.858) <0.885>	1.6204 (0.983) <1.017>	0.87355 (0.965)

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F3/F9	k-inf
Core 6	8.0343-2 (1.074) <1.072>	1.2421-2 (1.042) <1.024>	1.0052 (1.057) <1.056>	1.9012 (1.008) <1.009>	1.09706
Core 4	1.0075-1 (1.073) <1.069>	1.4873-2 (1.052) <1.016>	1.1166 (1.063) <1.064>	2.0288 (1.036) <1.043>	1.05665
Core 5	1.5559-1 (1.077) <1.069>	2.2052-2 (0.994) <0.940>	1.0984 (1.040) <1.057>	1.5778 (0.972) <1.011>	1.06927

* () ... C/E value.

* < > ... C/E value multiplied by PROTEUS/FM factor.

Table 6-(d) Reaction rate ratios.

(Reference: results of the previous calculations)

< SRAC : JENDL-2 >

CASE	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	k-inf
Core 1	(0.962) <0.960>	(1.032) <1.011>	(0.996) <0.996>	(0.947) <0.947>	(1.002)
Core 3	(0.994) <0.991>	(1.115) <1.082>	(1.042) <1.042>	(1.031) <1.032>	(0.988)
Core 2	(1.052) <1.026>	(1.013) <1.043>	(1.052) <1.036>	(1.014) <1.004>	(0.990)

Table 7 C/E values of two rod heterogeneity
by SRAC & other codes.

* 6 % fissile Pu (Core 1 - 3)

VOID	CODE	C8	F8	F5	F2	F3	F9
0 %	SRAC(J2)	0.970	0.989	1.000	0.993	1.002	0.995
	SRAC(B4)	0.969	0.988	0.999	0.991	1.001	0.993
	WIMS-D	0.942	0.992	1.010	0.994	1.005	1.123
	EPRI-CPM	0.929	1.003	0.994	-	-	-
	BOXER	0.990	1.034	0.979	1.038	0.993	0.990
42.5 %	SRAC(J2)	0.958	1.003	1.003	1.005	0.989	1.007
	SRAC(B4)	0.958	1.002	1.004	1.003	0.988	1.005
	WIMS-D	0.931	1.004	1.008	1.006	0.991	1.205
	EPRI-CPM	0.916	1.015	1.005	-	-	-
	BOXER	0.982	1.043	0.985	1.046	0.981	0.994
100 %	SRAC(J2)	0.969	0.990	0.995	0.972	0.995	1.002
	SRAC(B4)	0.970	0.990	0.995	0.971	0.995	1.002
	WIMS-D	0.982	0.981	0.998	0.972	0.997	1.056
	EPRI-CPM	0.979	0.993	1.003	-	-	-
	BOXER	-	-	-	-	-	-

* 8 % fissile Pu (Core 4 - 6)

VOID	CODE	C8	F8	F5	F3	F9
0 %	SRAC(J2)	0.968	0.993	1.008	0.996	1.036
	SRAC(B4)	0.968	0.992	1.008	0.995	1.034
	WIMS-D	0.935	0.977	1.010	0.995	1.167
	EPRI-CPM	0.926	1.020	1.004	-	-
42.5 %	SRAC(J2)	0.950	1.004	1.007	0.998	1.015
	SRAC(B4)	0.950	1.003	1.008	0.997	1.014
	WIMS-D	0.921	1.006	1.004	0.995	1.201
	EPRI-CPM	0.907	1.027	1.007	-	-
100 %	SRAC(J2)	0.980	1.001	0.996	0.990	1.001
	SRAC(B4)	0.980	1.000	0.996	0.990	1.001
	WIMS-D	0.987	1.003	0.995	0.988	1.034
	EPRI-CPM	0.985	1.018	0.999	-	-

Table 8-(a) C/E values of reaction rate ratios by SRAC & other codes.

* 6 % fissile Pu (Core 1 - 3)

VOID	CODE	k-inf	F5/F9	C8/F9	F8/F9	F1/F9	d-k
0 %	SRAC(J2)	1.005	1.002	0.967	1.010	0.953	-
	SRAC(B4)	0.993	1.005	0.988	0.965	0.941	-
	WIMS-E(1)	0.998	0.947	0.950	1.000	0.931	-
	WIMS-E(2)	0.994	1.003	0.956	0.987	0.982	-
	WIMS-D	0.990	1.096	1.002	0.974	1.092	-
	EPRI-CPM	1.012	0.984	0.926	1.019	1.024	-
	BOXER	0.987	1.011	1.036	1.113	0.959	-
	SPECTRA	1.001	1.076	0.978	0.955	1.042	-
42.5 %	SRAC(J2)	0.993	1.056	0.997	1.081	1.044	-0.0656
	SRAC(B4)	0.979	1.056	1.020	1.029	1.033	-0.0670
	WIMS-E(1)	1.012	0.962	0.953	1.117	1.032	-0.0401
	WIMS-E(2)	0.997	1.054	0.978	1.111	1.118	-0.0508
	WIMS-D	0.975	1.189	1.054	1.045	1.292	-0.068
	EPRI-CPM	1.014	1.085	0.951	1.068	1.165	-0.053
100 %	SRAC(J2)	0.993	1.041	1.033	1.022	1.012	-0.151
	SRAC(B4)	0.965	1.029	1.074	0.957	0.985	-0.164
	WIMS-E(1)	1.030	0.927	1.003	0.948	0.926	-0.1103
	WIMS-E(2)	1.021	0.964	1.023	0.945	0.952	-0.1140
	WIMS-D	1.023	1.126	1.044	0.990	1.289	-0.109
	EPRI-CPM	1.070	1.053	0.931	1.047	1.004	-0.090
	MICROX	0.968	1.049	1.086	0.972	0.995	-
	SPEKTRA	1.007	1.038	1.056	1.017	1.021	-0.135

(Multiplied by PROTEUS/FM factor)

Table 8-(b) C/E values of reaction rate ratios by SRAC & other codes.

* 8 % fissile Pu (Core 4 - 6)

VOID	CODE	k-inf	F5/F9	C8/F9	F8/F9	F3/F9	d-k
0 %	SRAC(J2)	-	1.059	1.048	1.071	1.021	0.0
	SRAC(B4)	-	1.056	1.072	1.024	1.009	0.0
	WIMS-D	-	1.160	1.101	1.030	1.155	-
	EPRI-CPM	-	1.076	1.016	1.064	-	-
42.5 %	SRAC(J2)	-	1.065	1.043	1.067	1.055	-0.0386
	SRAC(B4)	-	1.064	1.069	1.016	1.043	-0.0404
	WIMS-D	-	1.197	1.106	1.026	1.233	-
	EPRI-CPM	-	1.090	0.996	1.051	-	-
100 %	SRAC(J2)	-	1.067	1.031	1.002	0.976	-0.0180
	SRAC(B4)	-	1.057	1.069	0.940	1.011	-0.0278
	WIMS-D	-	1.142	1.058	0.969	1.007	-
	EPRI-CPM	-	1.071	0.942	1.017	-	-

(Multiplied by PROTEUS/FM factor)

Table 9 Contributions to k-inf void coefficient by various reaction rate ratios (SRAC).

* dR : reaction rate change. Av : alpha value. (10E-4 / %).
 * (Av/dR)_{wc} : average of WIMS & CPM
 * <Av/dR> : average of WIMS, CPM & SRAC

< CORE 1-3 >

((0 % - 100 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR	(Av/dR) _{wc}	<Av/dR>
C8/F9	J-2	133.60	-35.31	-0.264	-0.271	-0.269
	B4	132.31	-35.58	-0.269		-0.270
F8/F9	J-2	87.93	6.514	0.0741	0.071	0.072
	B4	110.20	7.704	0.0699		0.070
F5/F9	J-2	16.41	0.443	0.0270	0.028	0.028
	B4	12.99	0.363	0.0280		0.028
F1/F9	J-2	-12.03	-0.209	0.0173	0.018	0.018
	B4	-14.54	-0.249	0.0171		0.018

((0 % - 42.5 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR	(Av/dR) _{wc}	<Av/dR>
C8/F9	J-2	30.57	-21.03	-0.688	-0.685	-0.686
	B4	31.03	-21.68	-0.699		-0.689
F8/F9	J-2	21.97	3.890	0.177	0.173	0.173
	B4	25.19	4.274	0.170		0.172
F5/F9	J-2	9.986	0.611	0.0612	0.063	0.063
	B4	9.065	0.566	0.0625		0.063
F1/F9	J-2	7.623	0.349	0.0457	0.051	0.049
	B4	7.411	0.341	0.0460		0.049

((42.5 % - 100 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR	(Av/dR) _{wc}	<Av/dR>
C8/F9	J-2	78.90	-45.26	-0.574	-0.586	-0.586
	B4	77.30	-45.22	-0.585		-0.586
F8/F9	J-2	54.08	8.475	0.157	0.156	0.156
	B4	67.91	10.30	0.152		0.154
F5/F9	J-2	5.842	0.323	0.0553	0.058	0.057
	B4	3.600	0.225	0.0624		0.060
F1/F9	J-2	-18.26	-0.612	0.0335	0.040	0.038
	B4	-20.43	-0.672	0.0329		0.038

< CORE 4-6 >

((0 % - 100 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR
C8/F9	J-2	90.98	-23.79	-0.261
	B4	96.39	-25.48	-0.264
F8/F9	J-2	80.89	5.217	0.0645
	B4	81.94	5.005	0.0611
F5/F9	J-2	10.57	0.205	0.0194
	B4	10.08	0.205	0.0203

((0 % - 42.5 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR
C8/F9	J-2	25.16	-15.98	-0.635
	B4	25.71	-16.61	-0.646
F8/F9	J-2	20.23	3.209	0.159
	B4	21.04	3.135	0.149
F5/F9	J-2	11.43	0.493	0.0431
	B4	11.15	0.493	0.0442

((42.5 % - 100 %))

	Lib	dR (%)	Av	Av/dR
C8/F9	J-2	52.60	-28.95	-0.551
	B4	56.22	-31.40	-0.559
F8/F9	J-2	50.46	6.779	0.134
	B4	50.32	6.450	0.128
F5/F9	J-2	-0.771	0.009	-0.0116
	B4	-0.962	0.006	-0.0067

Table 10 Comparison of alpha value with experiment & other codes.

< CORE 1-3 >					
((0 % - 100 %))					
	Expt.	SRAC(J2)	SRAC(B4)	WIMS	EPRI-CPM
C8/F9	-32.2	-35.31	-35.58	-35.0	-31.5
	+0.8	(1.097)	(1.105)	(1.087)	(0.978)
F8/F9	6.08	6.514	7.704	6.23	6.64
	+0.18	(1.071)	(1.267)	(1.025)	(1.092)
F5/F9	0.34	0.443	0.363	0.45	0.40
	+0.06	(1.303)	(1.068)	(1.324)	(1.176)
F1/F9	-0.31	-0.209	-0.249	-0.06	-0.40
	+0.09	(0.674)	(0.803)	(0.194)	(1.290)
((0 % - 42.5 %))					
	Expt.	SRAC(J2)	SRAC(B4)	WIMS	EPRI-CPM
C8/F9	-17.9	-21.03	-21.68	-22.4	-19.2
	+1.7	(1.175)	(1.211)	(1.251)	(1.073)
F8/F9	3.48	3.890	4.274	4.89	4.88
	+0.43	(1.118)	(1.228)	(1.405)	(1.402)
F5/F9	0.33	0.611	0.566	0.93	0.72
	+0.14	(1.851)	(1.715)	(2.818)	(2.182)
F1/F9	-0.05	0.349	0.341	0.91	0.57
	+0.23	(-6.98)	(-6.82)	(-18.2)	(-11.4)
((42.5 % - 100 %))					
	Expt.	SRAC(J2)	SRAC(B4)	WIMS	EPRI-CPM
C8/F9	-43.0	-45.26	-45.22	-43.2	-40.0
	+1.8	(1.053)	(1.052)	(1.005)	(0.930)
F8/F9	8.52	8.475	10.30	7.24	8.03
	+0.39	(0.995)	(1.209)	(0.850)	(0.942)
F5/F9	0.38	0.325	0.225	0.11	0.18
	+0.12	(0.855)	(0.592)	(0.289)	(0.474)
F1/F9	-0.66	-0.612	-0.672	-0.75	-1.09
	+0.14	(0.927)	(1.018)	(1.136)	(1.652)
< CORE 4-6 >					
((0 % - 100 %))					
	Expt.	SRAC(J2)	SRAC(B4)	WIMS	EPRI-CPM
C8/F9	-25.2	-23.79	-25.48	-23.7	-21.0
	+1.7	(0.944)	(1.011)	(0.940)	(0.833)
F8/F9	5.8	5.217	5.005	5.1	5.2
	+0.4	(0.899)	(0.863)	(0.879)	(0.897)
F5/F9	0.20	0.205	0.205	0.19	0.17
	+0.05	(1.025)	(1.025)	(0.950)	(0.850)

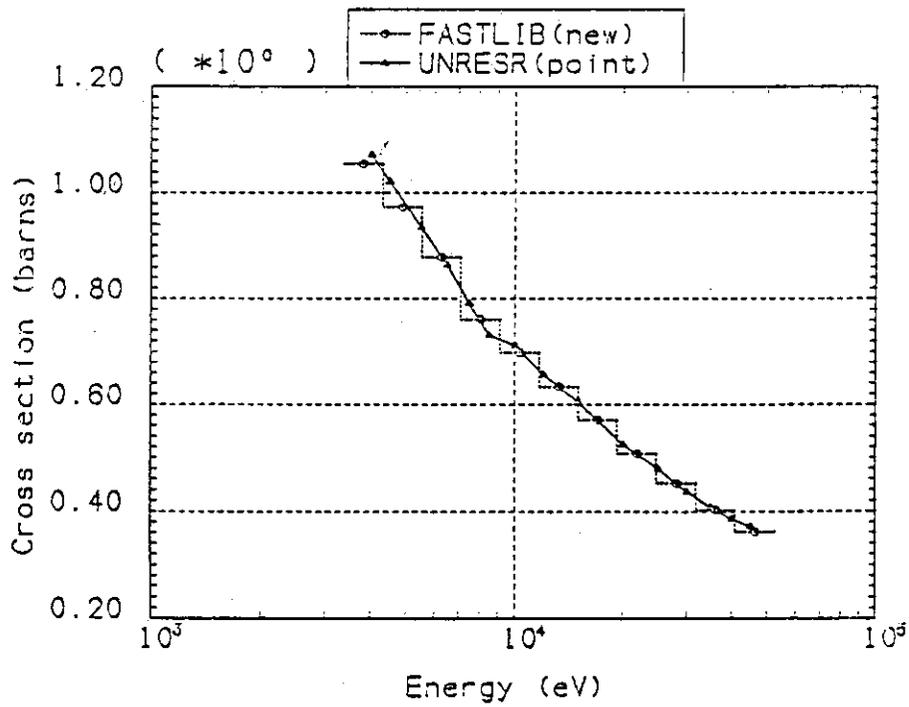
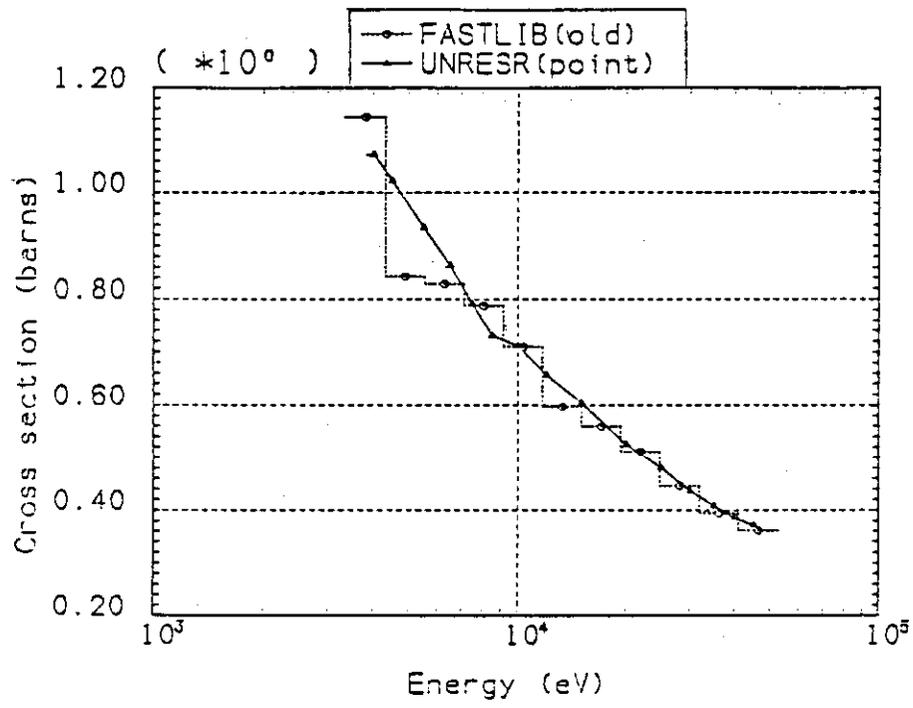


Fig. 1 Capture cross section of ^{238}U

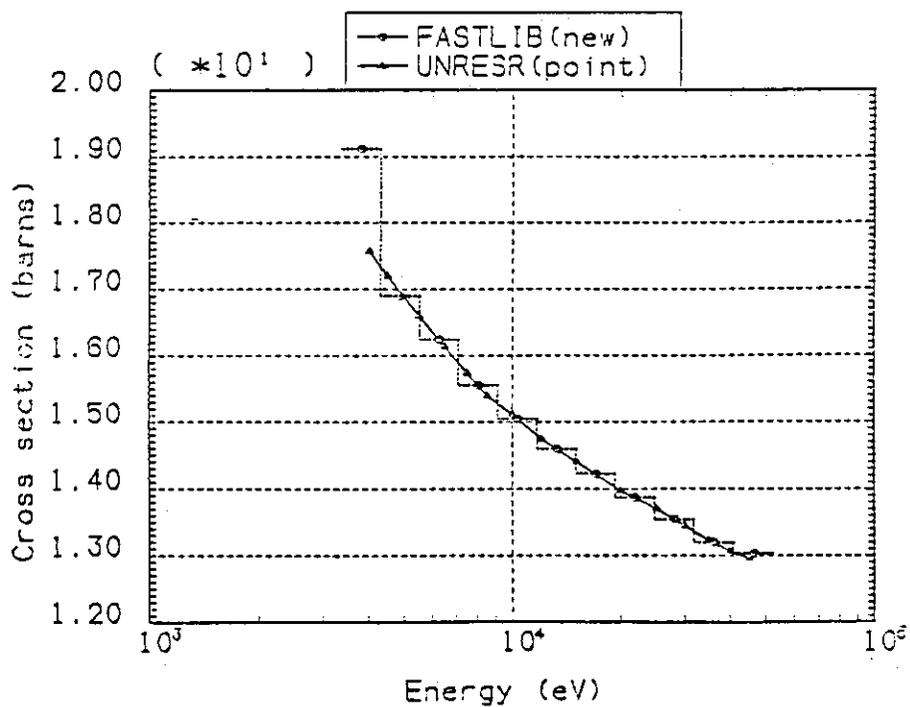
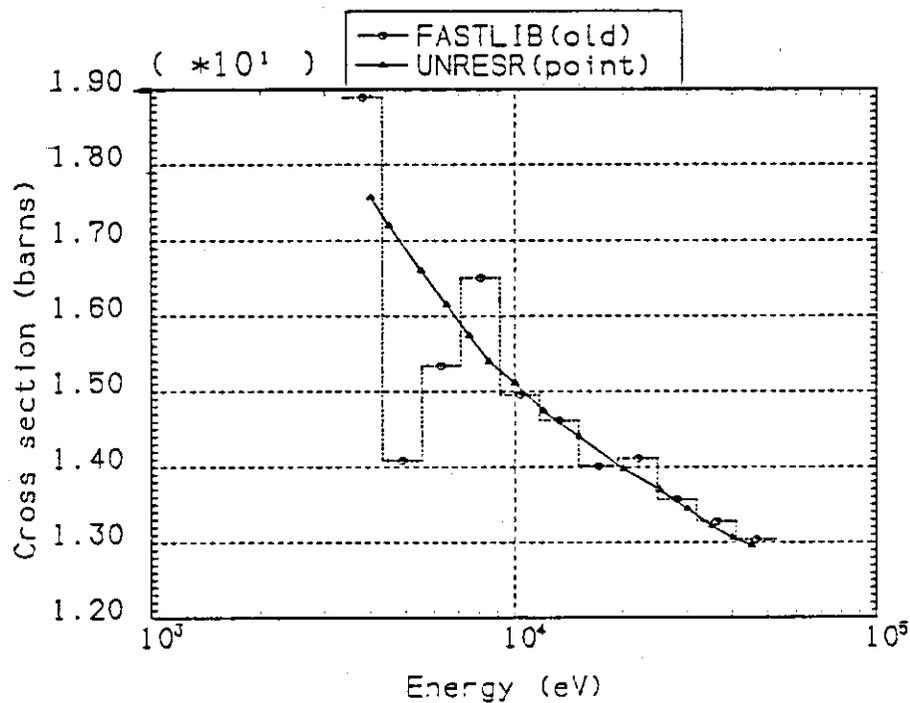


Fig. 2 Total cross section of ^{238}U

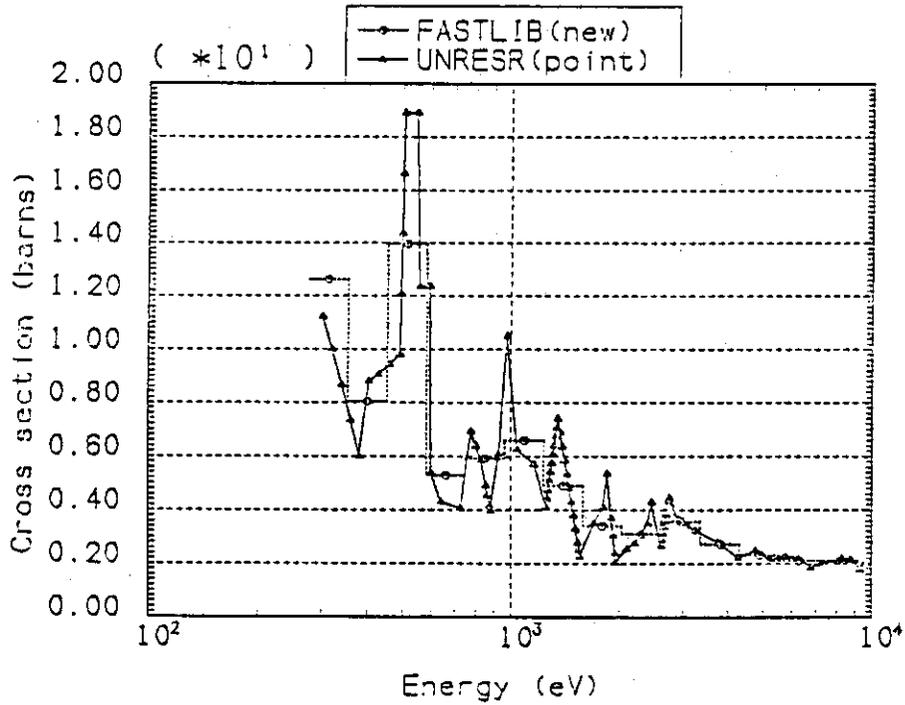
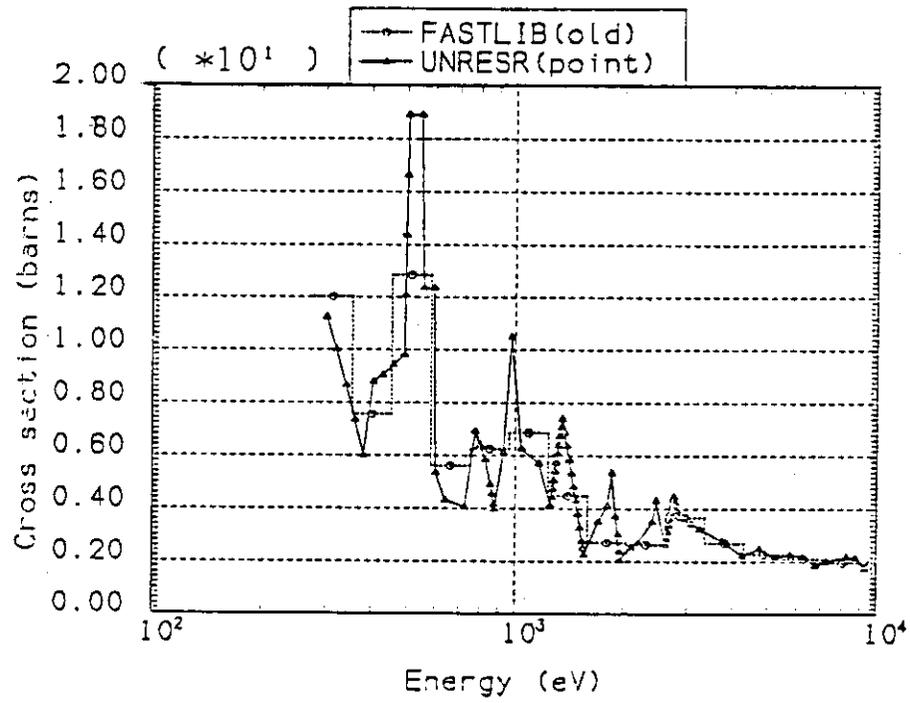


Fig. 3 Fission cross section of ^{239}Pu

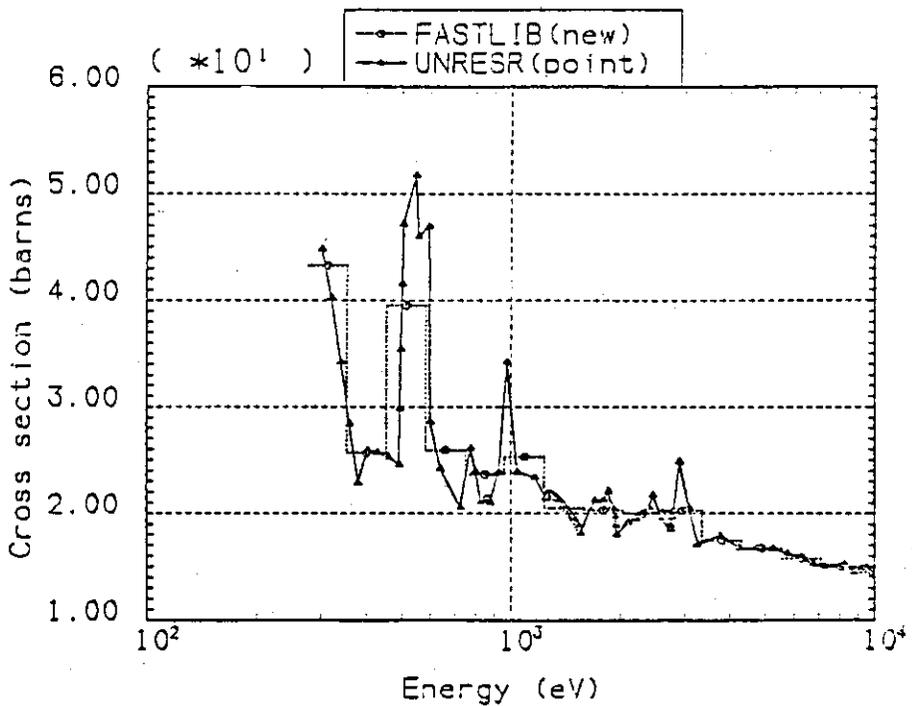
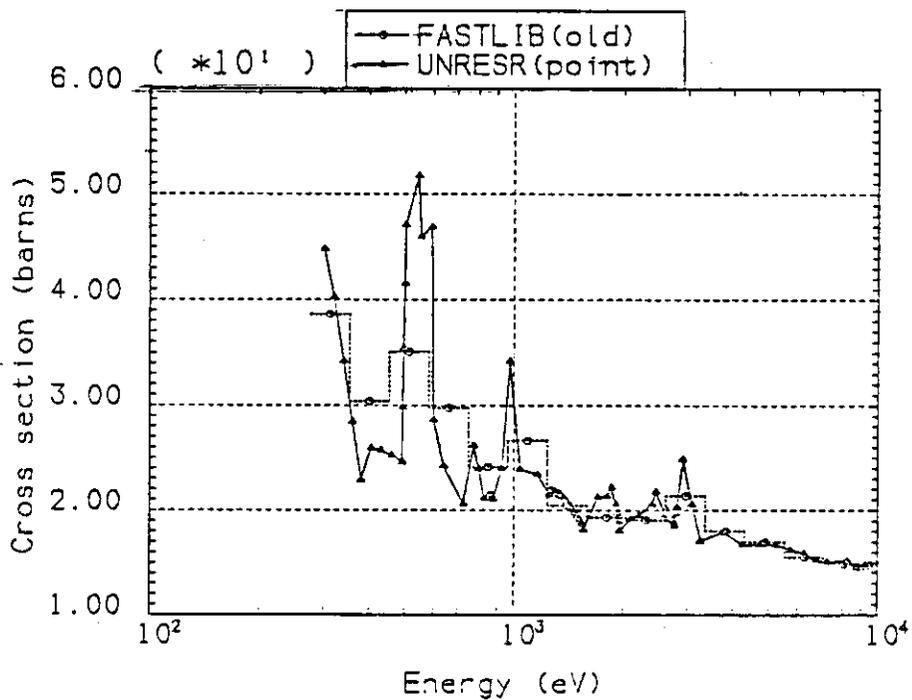


Fig. 4 Total cross section of ^{239}Pu

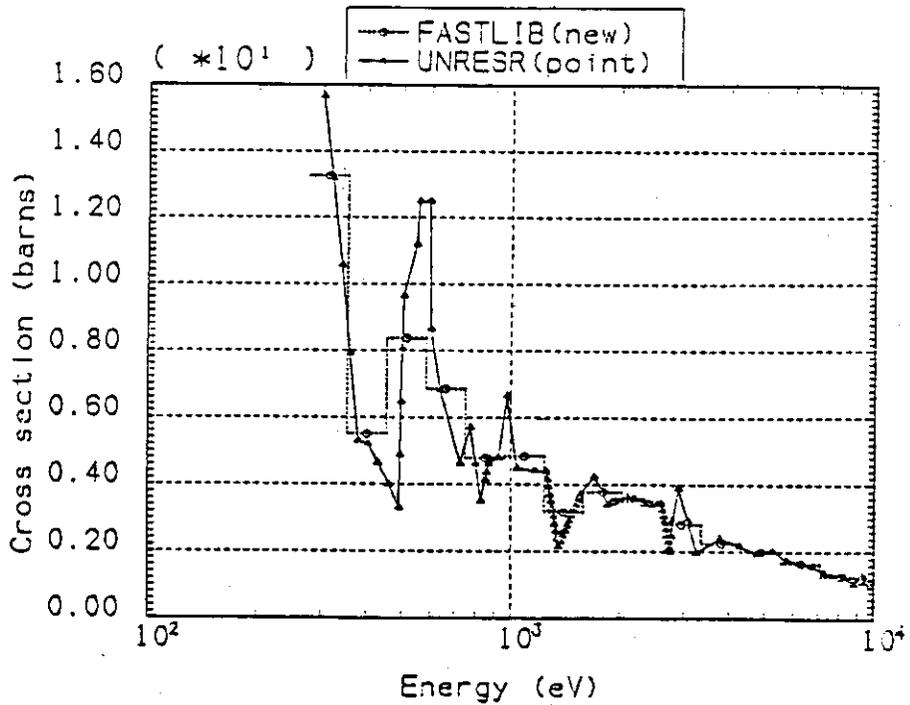
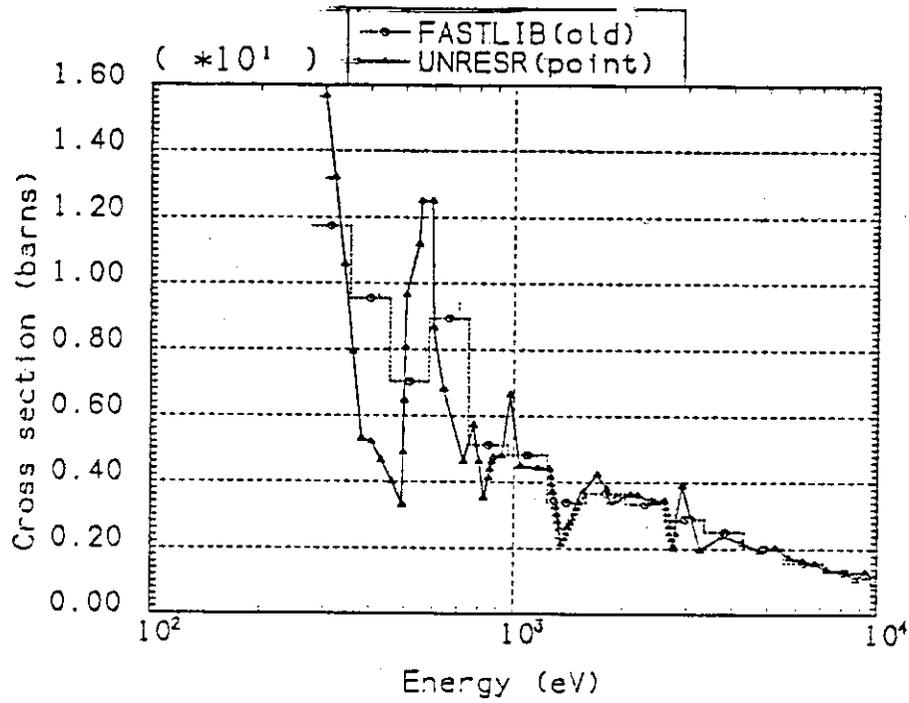


Fig. 5 Capture cross section of ^{239}Pu

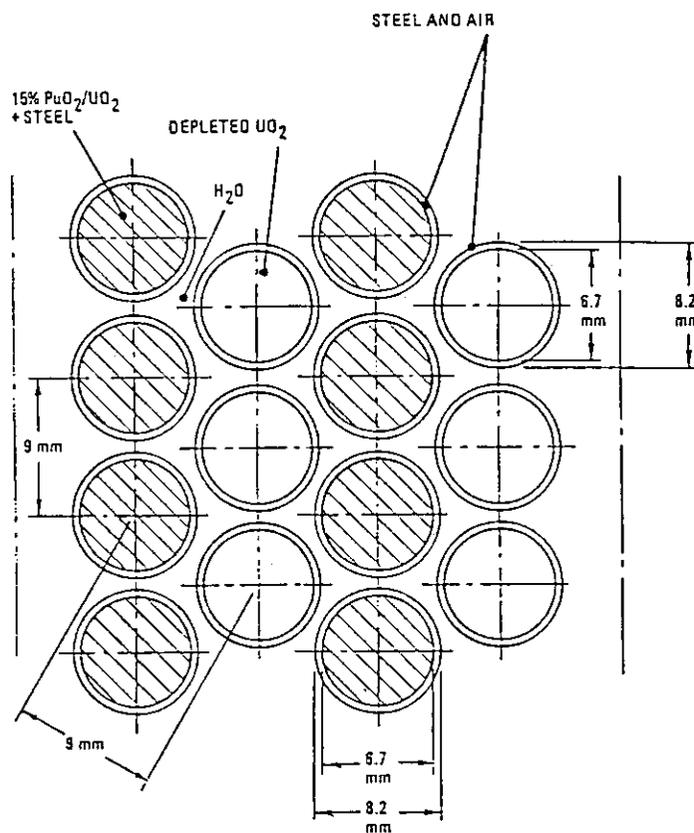


Fig. 6 Test lattice for PROTEUS-LWHCR cores 1 ~ 3

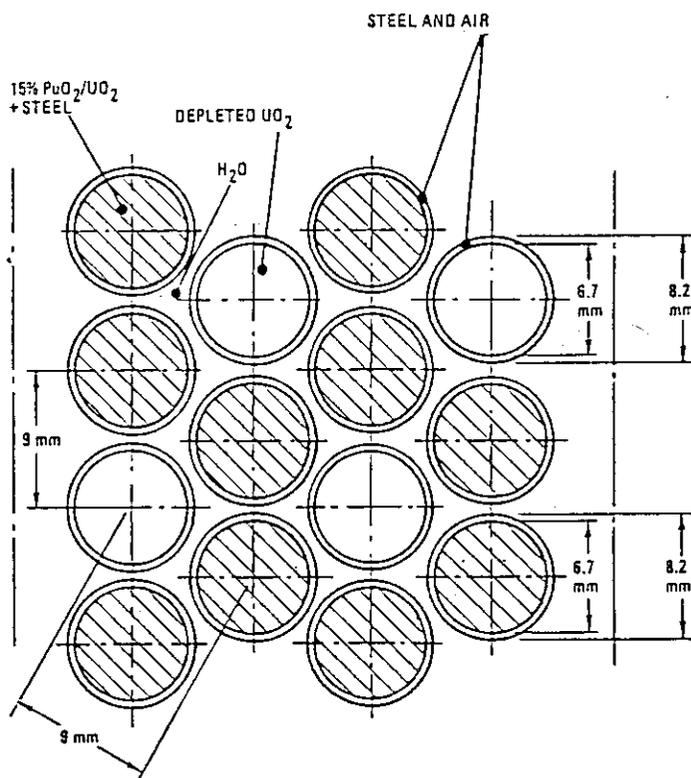
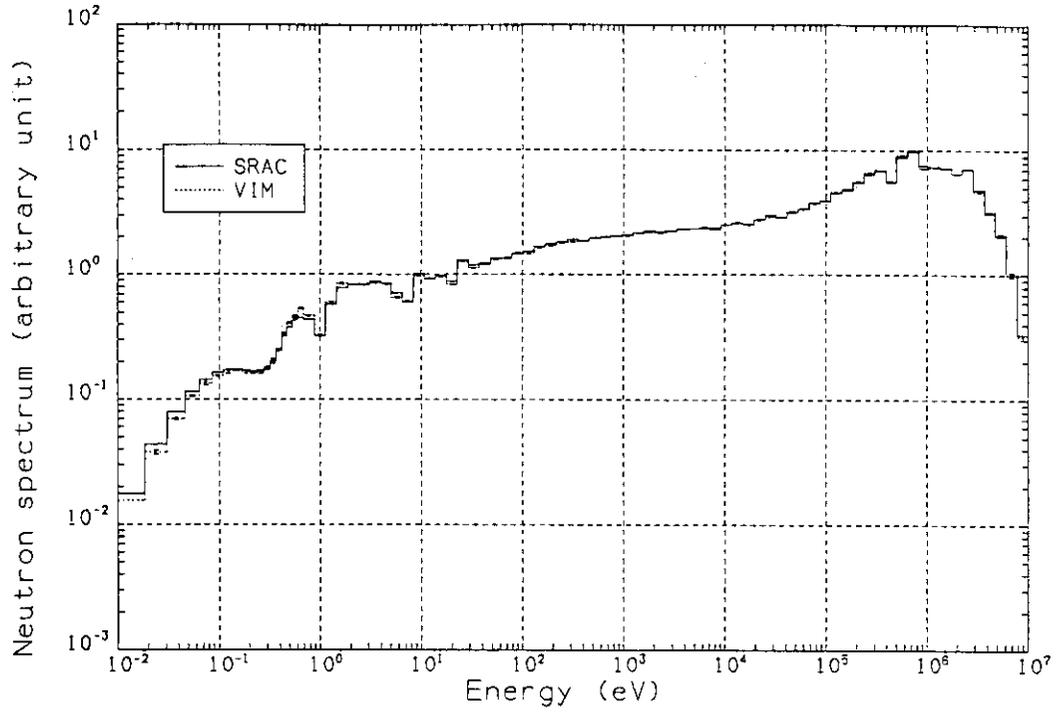
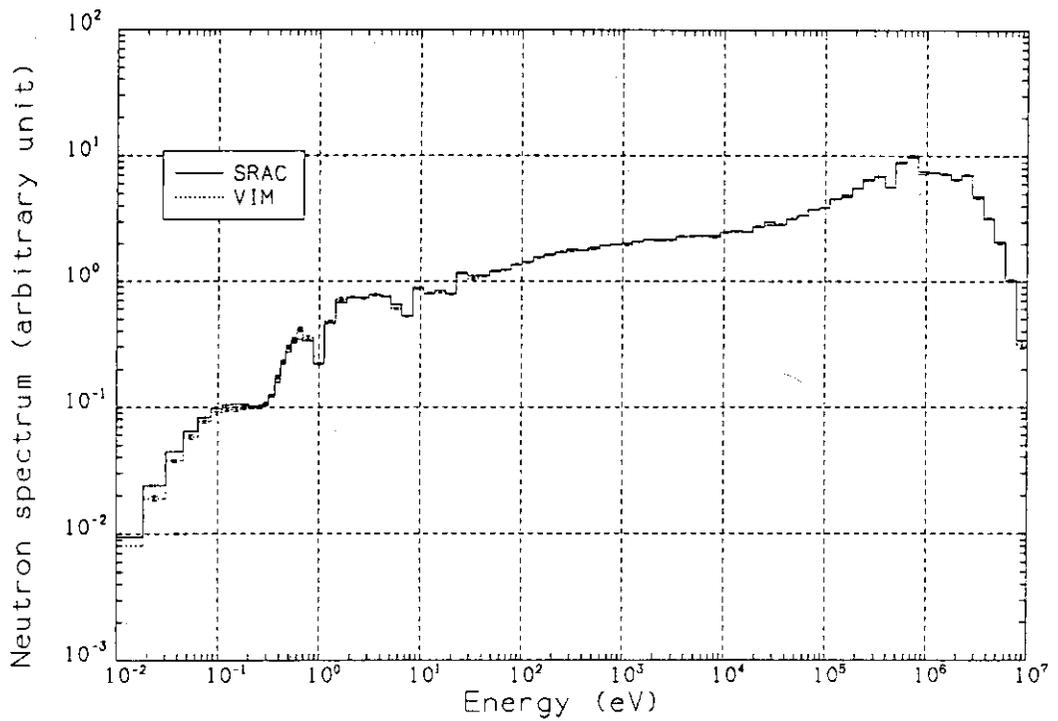


Fig. 7 Test lattice for PROTEUS-LWHCR cores 4 ~ 6

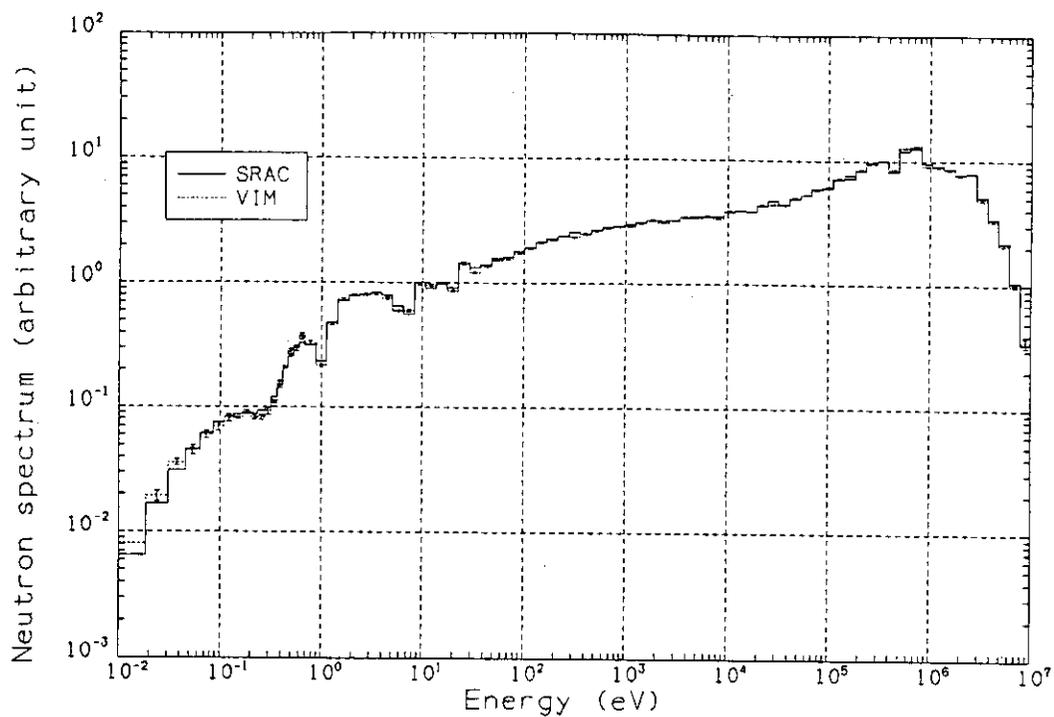


Neutron spectrum. (Core 1 , cell average)

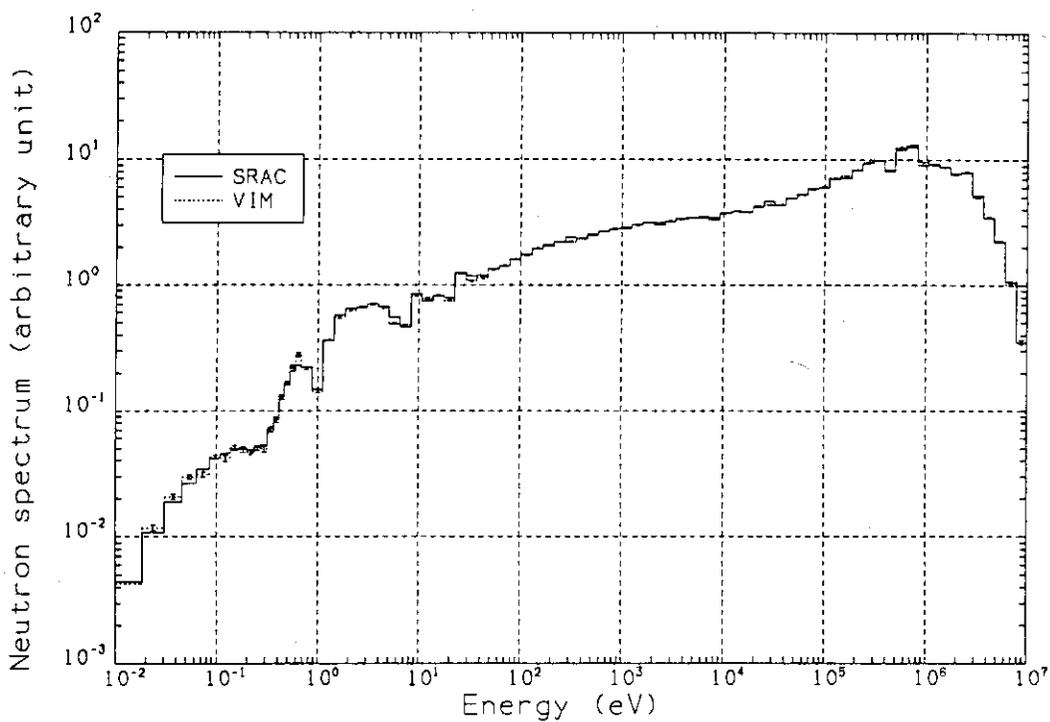


Neutron spectrum. (Core 6 , cell average)

Fig. 8 Neutron spectra (cores of 0% void)

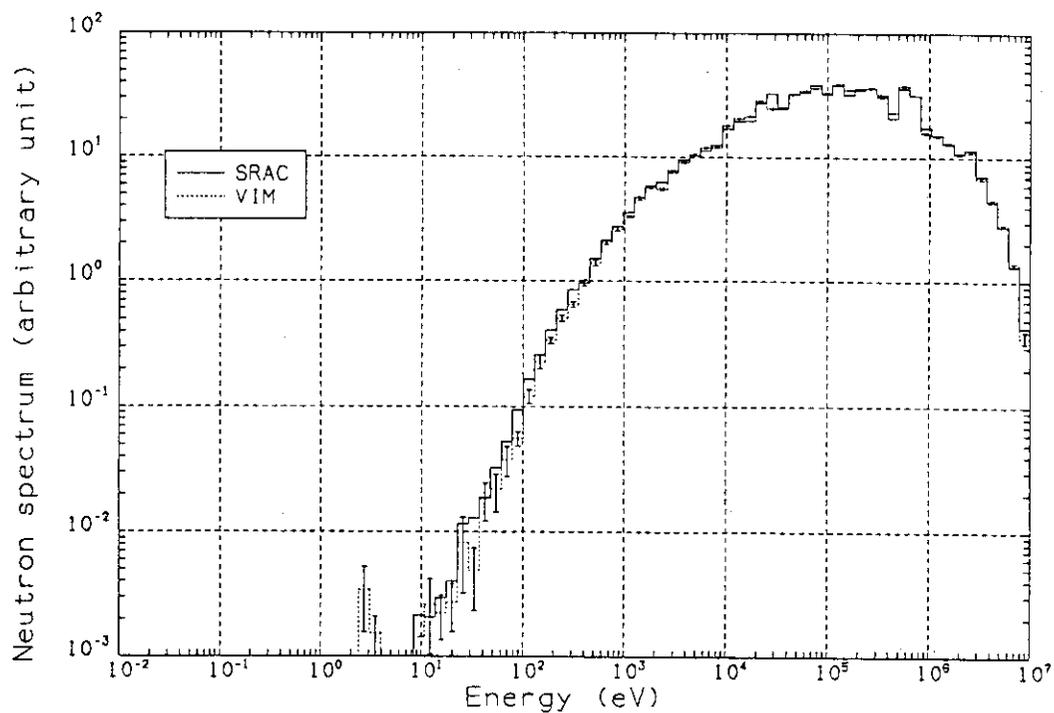


Neutron spectrum. (Core 3 , cell average)

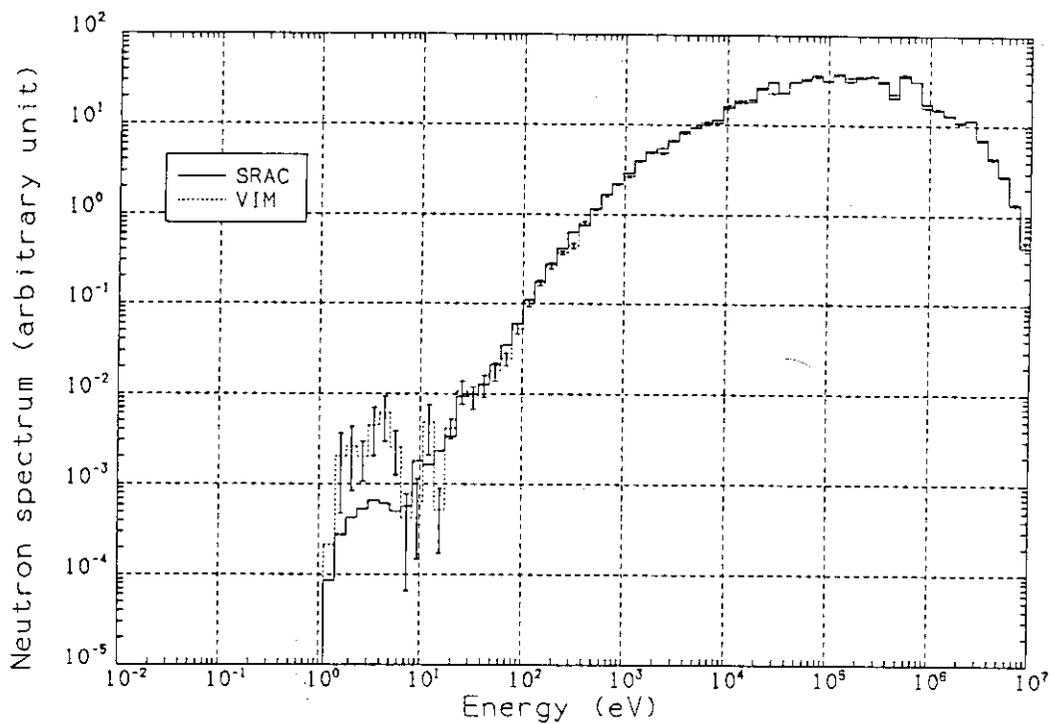


Neutron spectrum. (Core 4 , cell average)

Fig. 9 Neutron spectra (cores of 42.5% void)

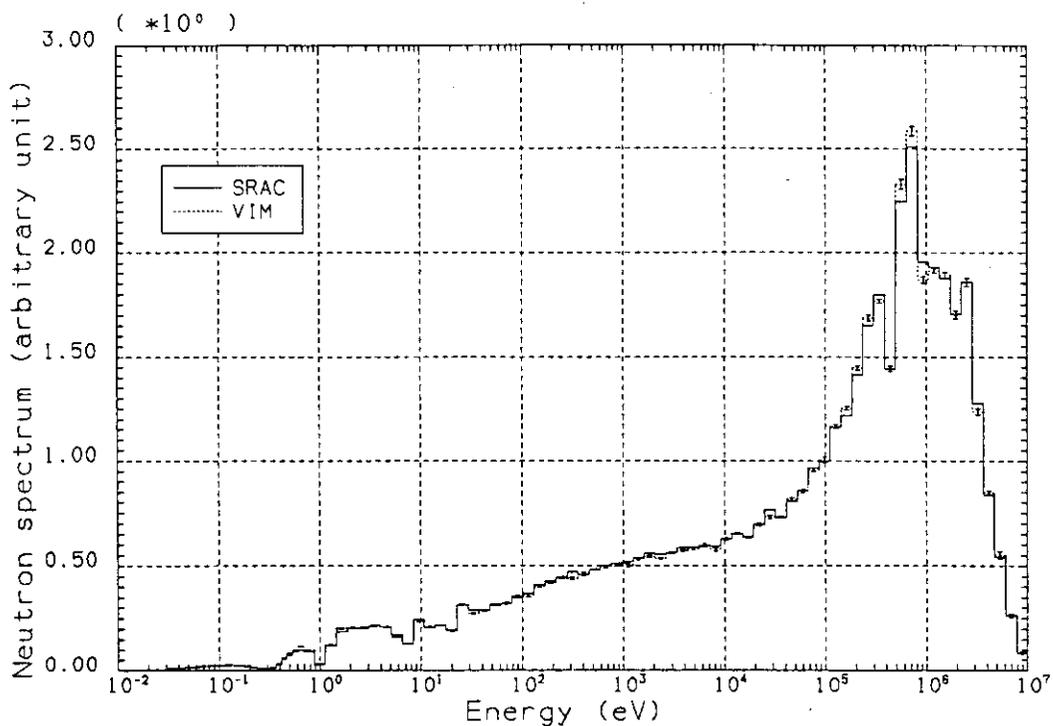


Neutron spectrum. (Core 2 , cell average)

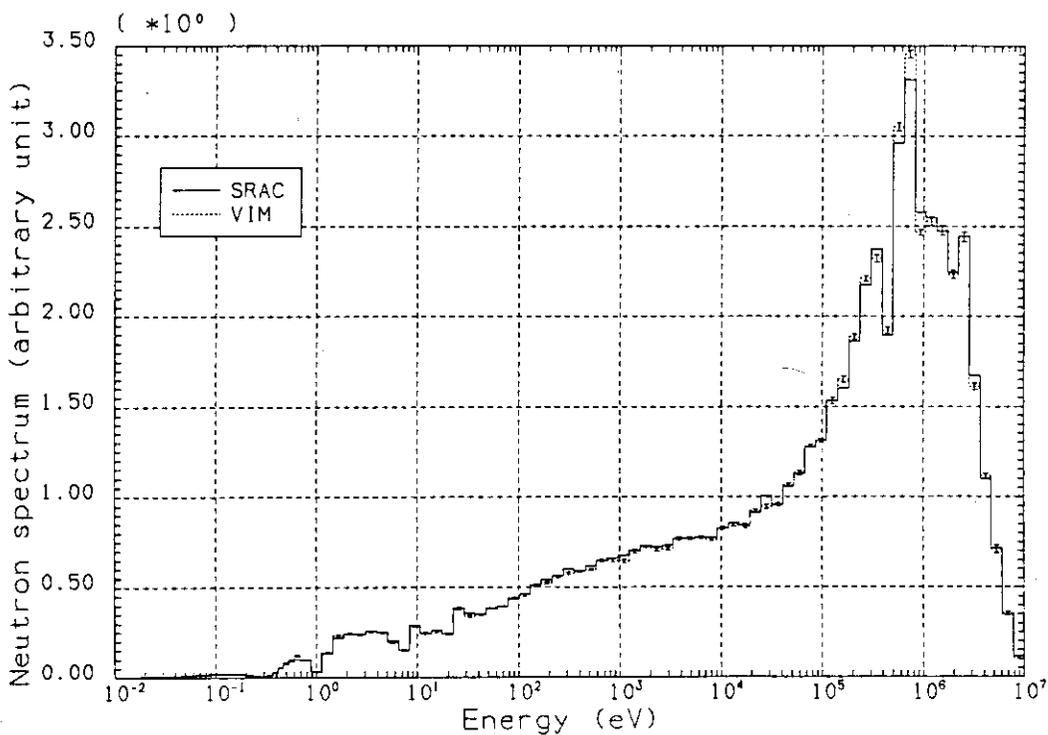


Neutron spectrum. (Core 5 , cell average)

Fig. 10 Neutron spectra (cores of 100% void)

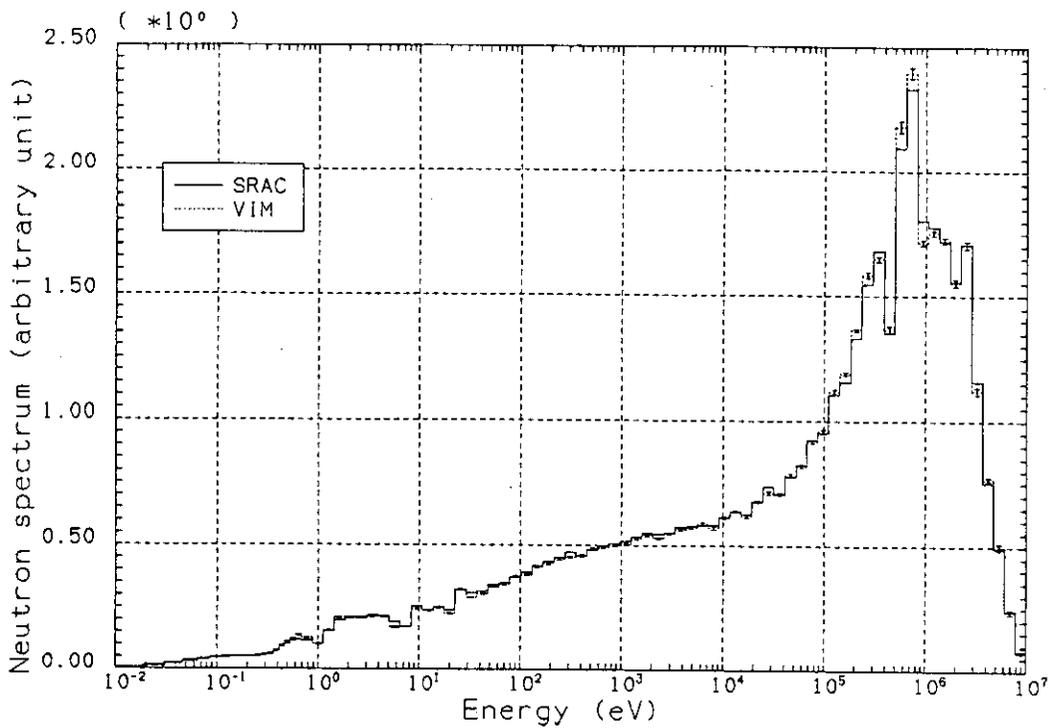


Neutron spectrum. (Core 1 , fuel 1)

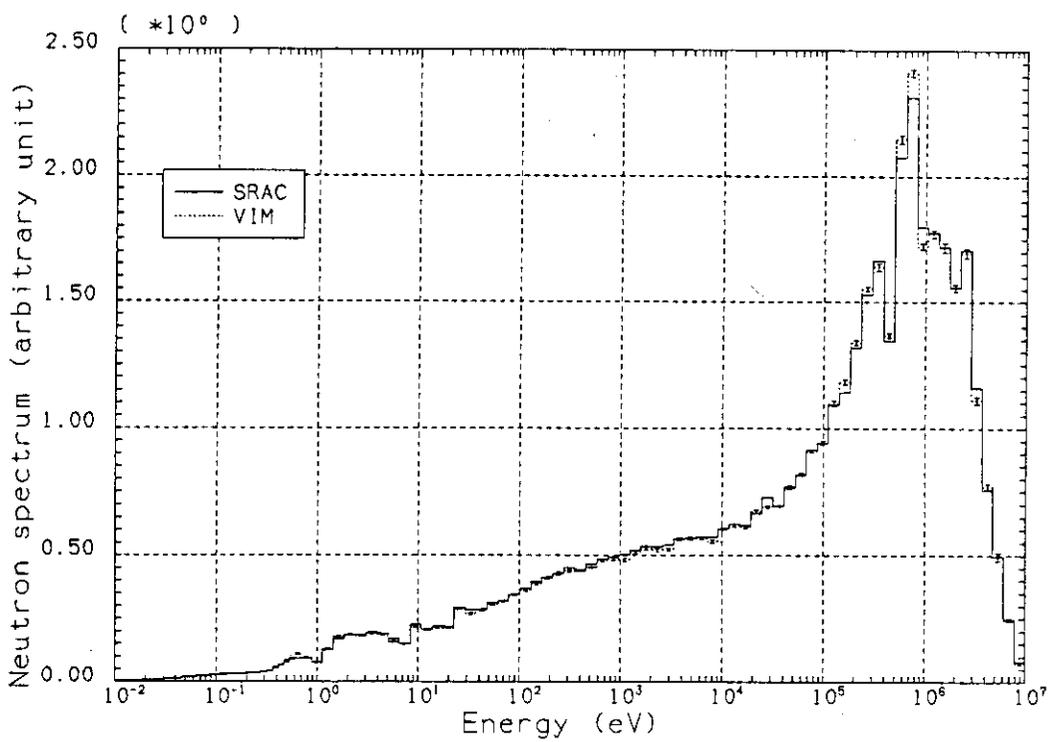


Neutron spectrum. (Core 6 , fuel 1)

Fig. 11 Neutron spectra (cores of 0% void, fuel 1)

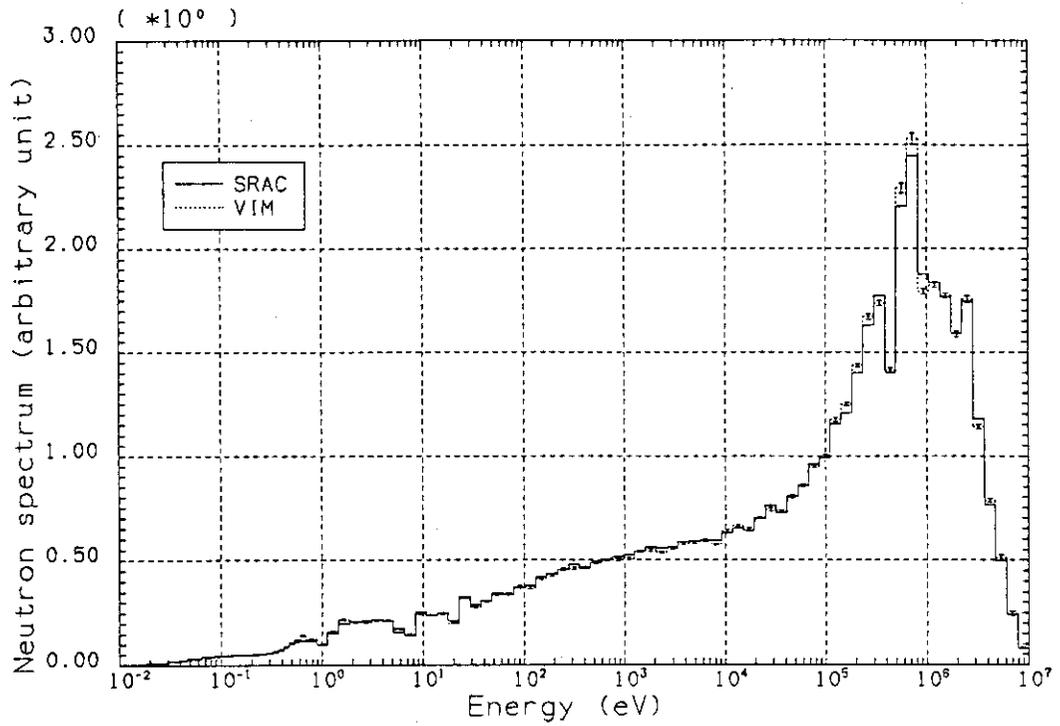


Neutron spectrum. (Core 1 , water)

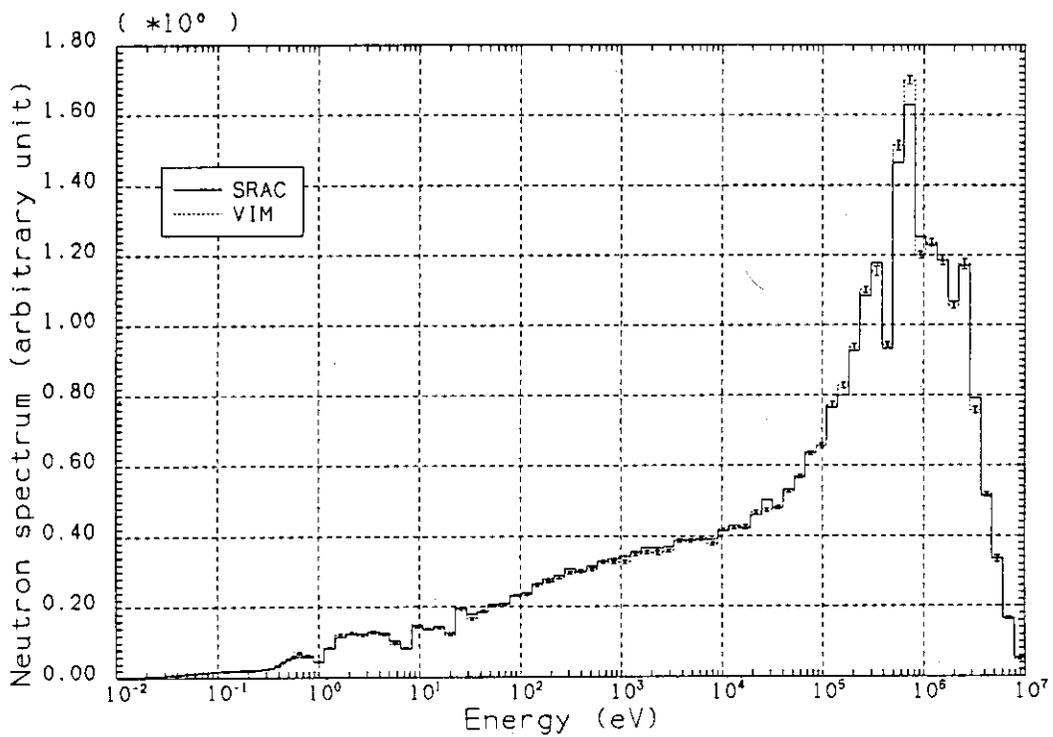


Neutron spectrum. (Core 6 , water)

Fig. 13 Neutron spectra (cores of 0% void, fuel 2)

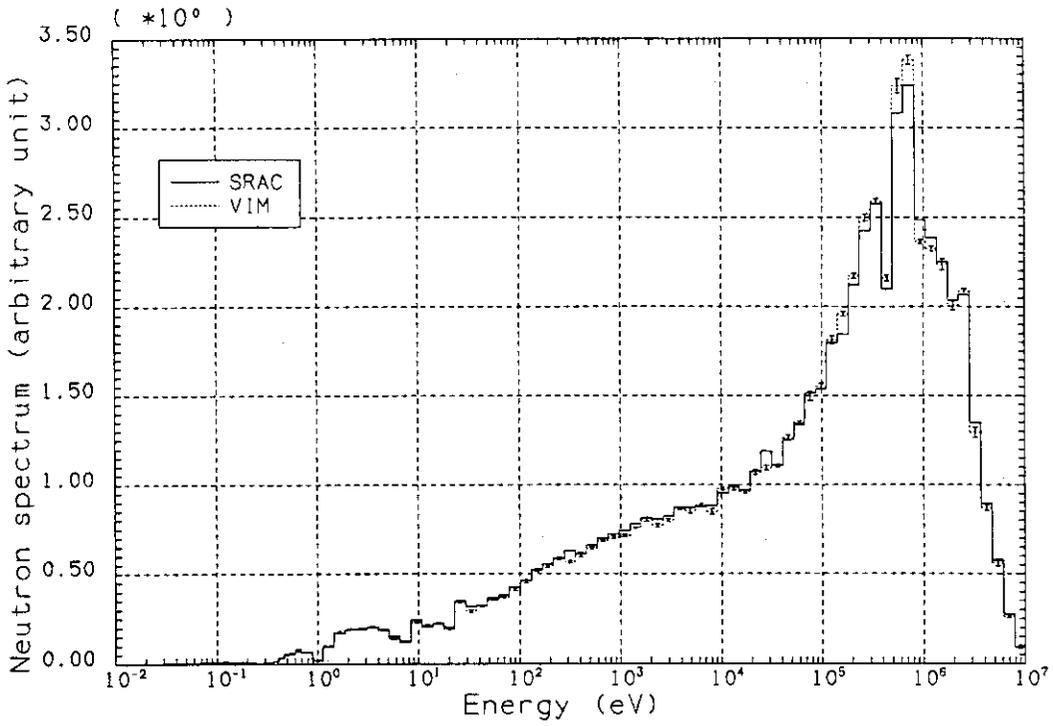


Neutron spectrum. (Core 1 , fuel 2)

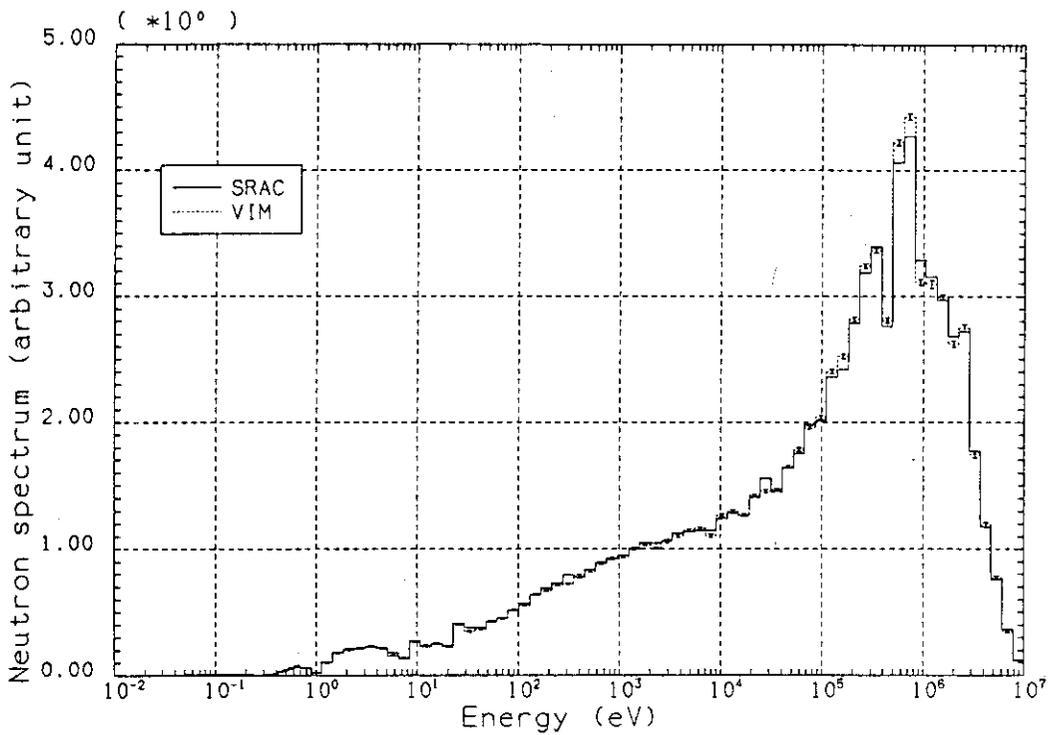


Neutron spectrum. (Core 6 , fuel 2)

Fig. 12 Neutron spectra (cores of 0% void, water)

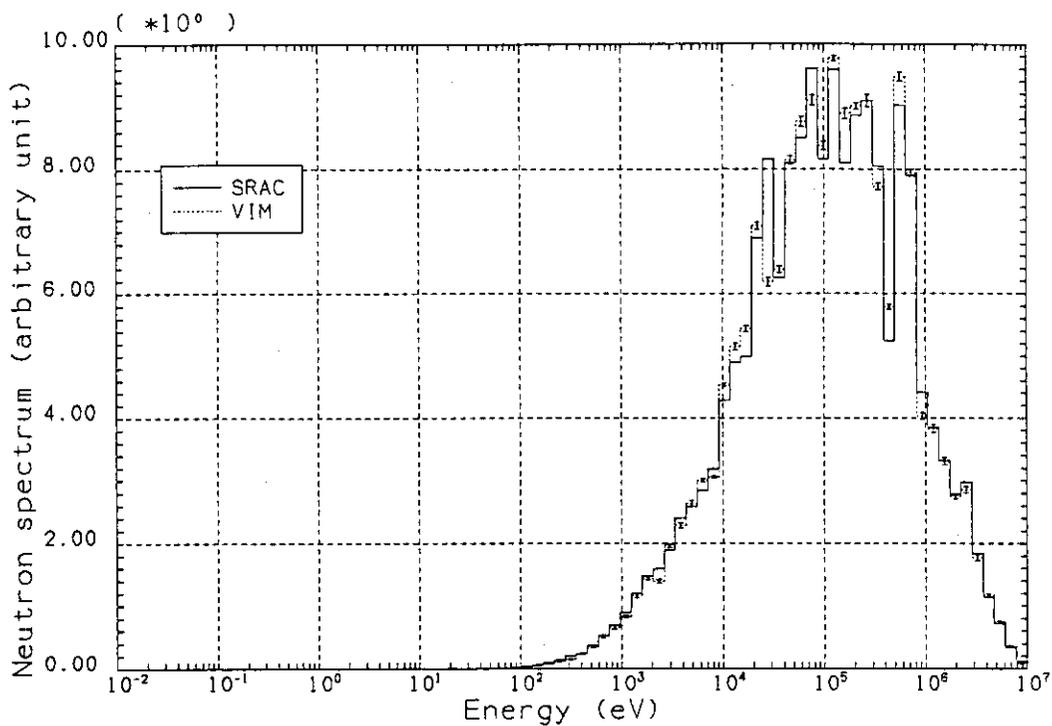


Neutron spectrum. (Core 3 , fuel 1)

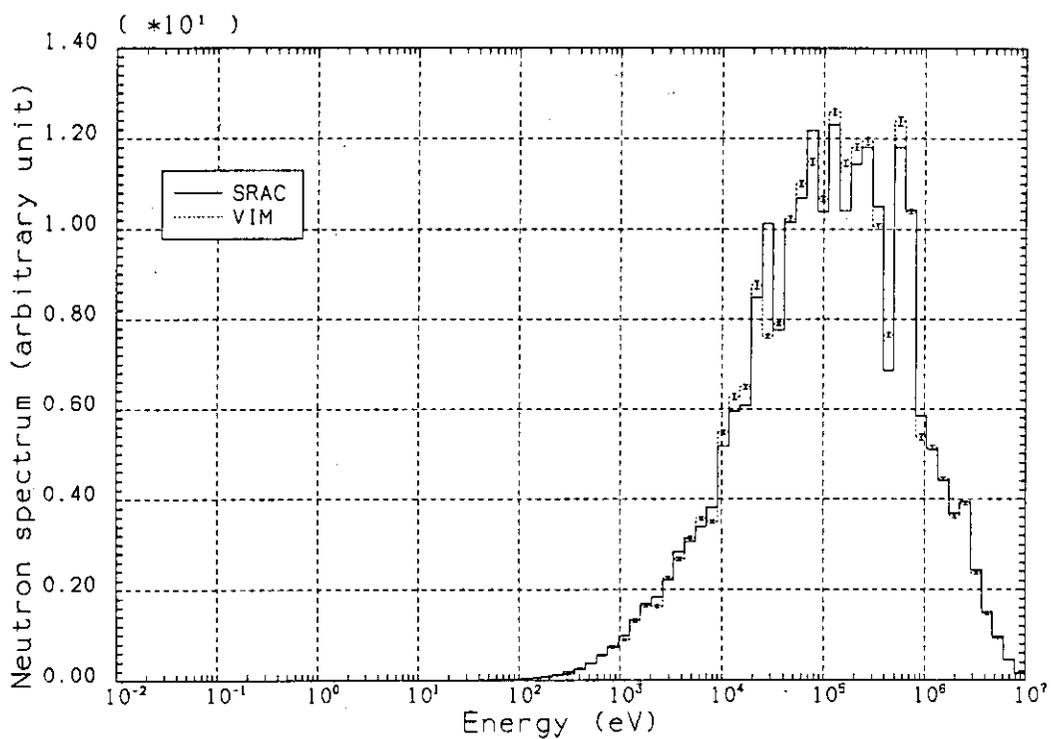


Neutron spectrum. (Core 4 , fuel 1)

Fig. 14 Neutron spectra (cores of 42.5% void, fuel 1)

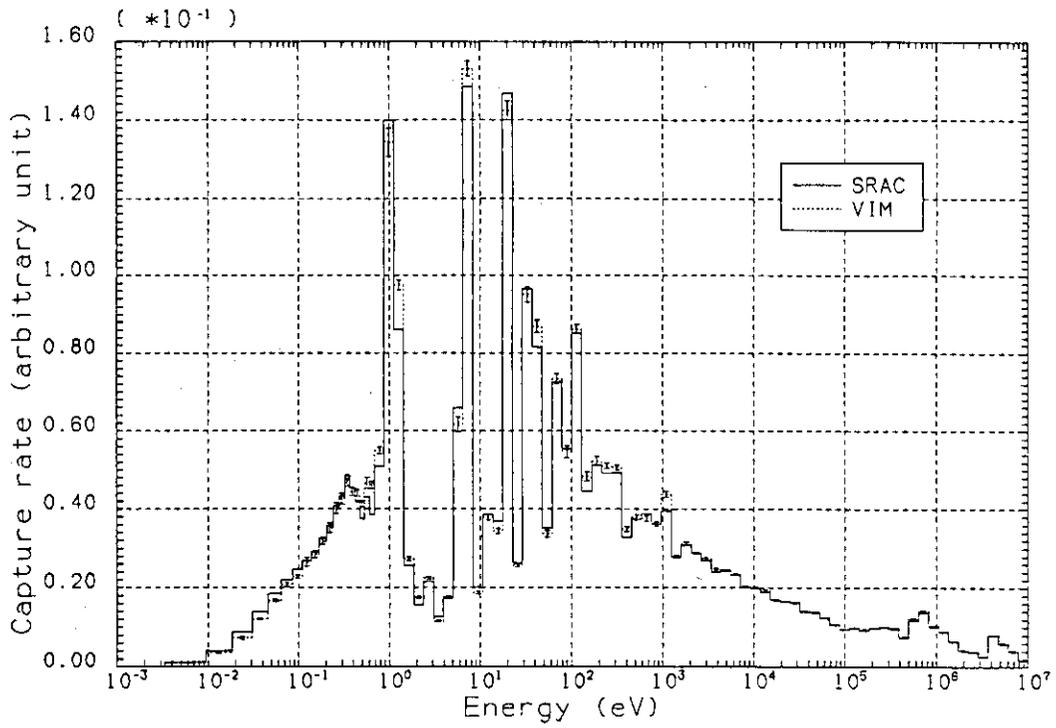


Neutron spectrum. (Core 2 , fuel 1)

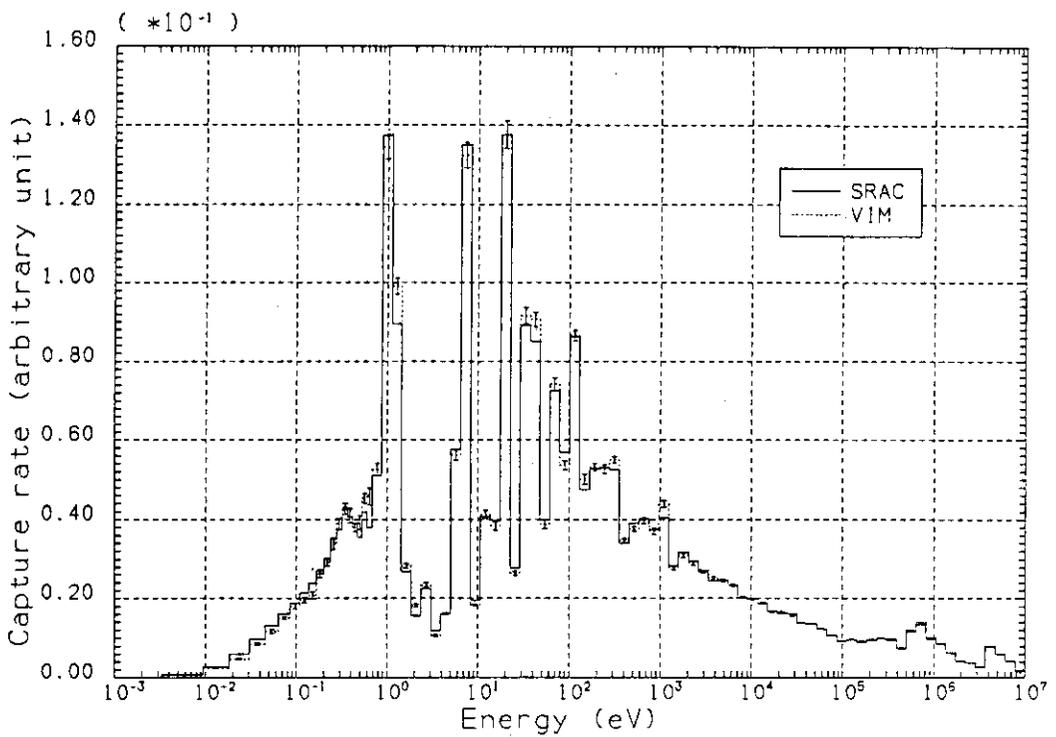


Neutron spectrum. (Core 5 , fuel 1)

Fig. 15 Neutron spectra (cores of 100% void, fuel 1)

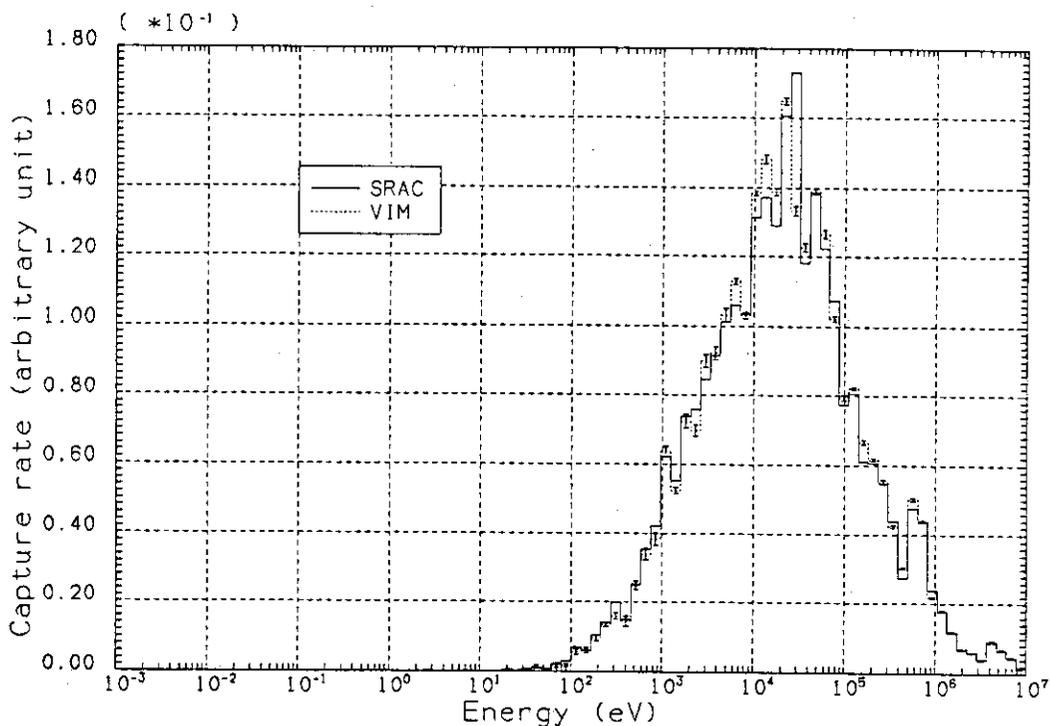


Capture rate. (Core 1 , cell total)

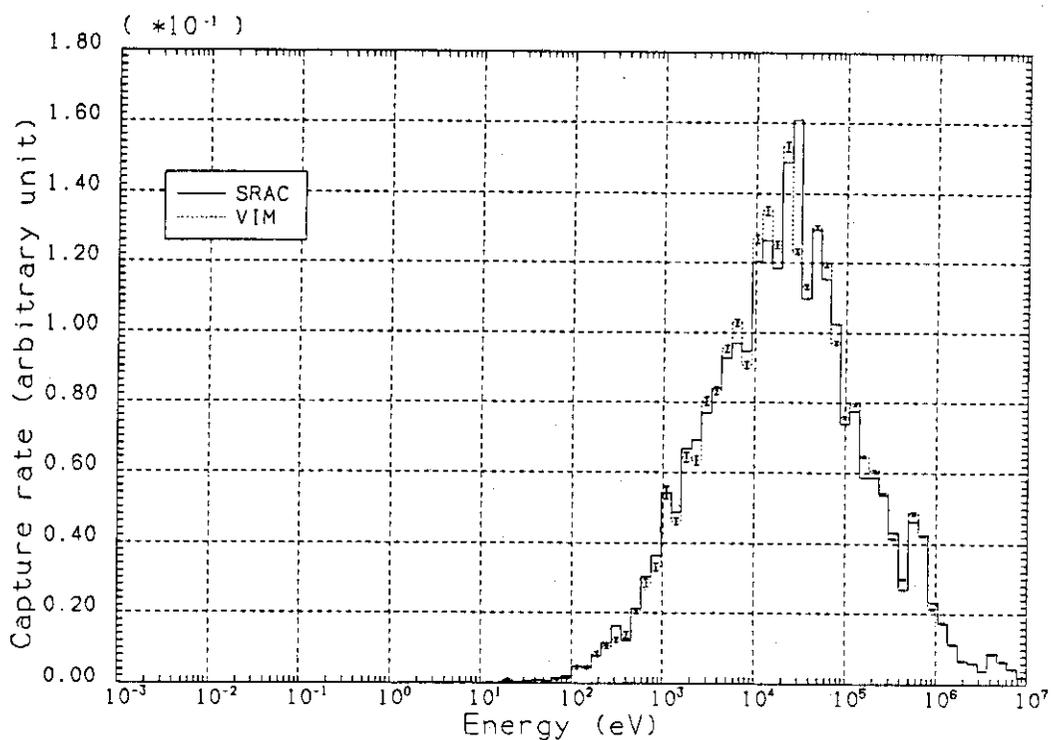


Capture rate. (Core 6 , cell total)

Fig. 16 Capture rate(cores of 0% void)

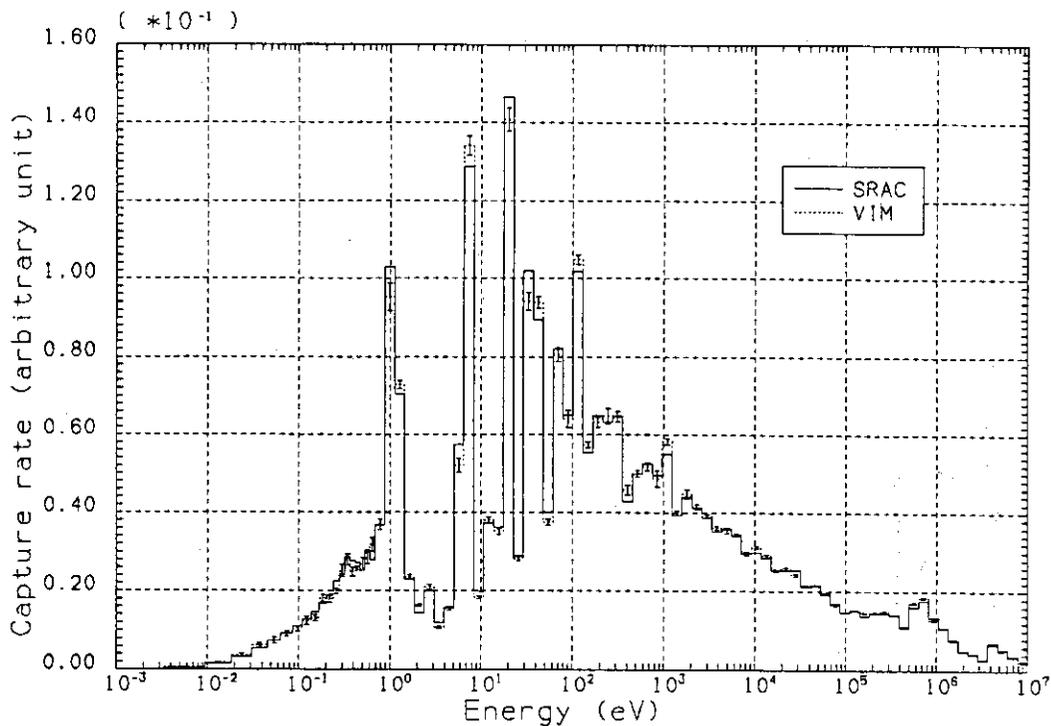


Capture rate. (Core 2 , cell total)

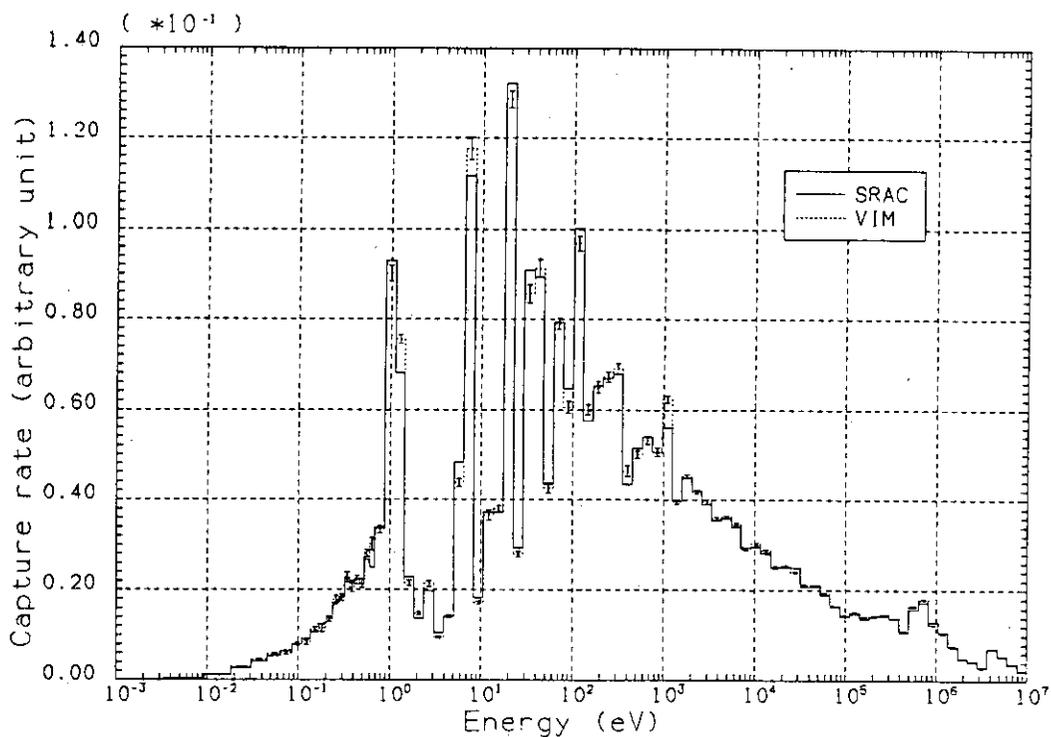


Capture rate. (Core 5 , cell total)

Fig. 17 Capture rate (cores of 100% void)

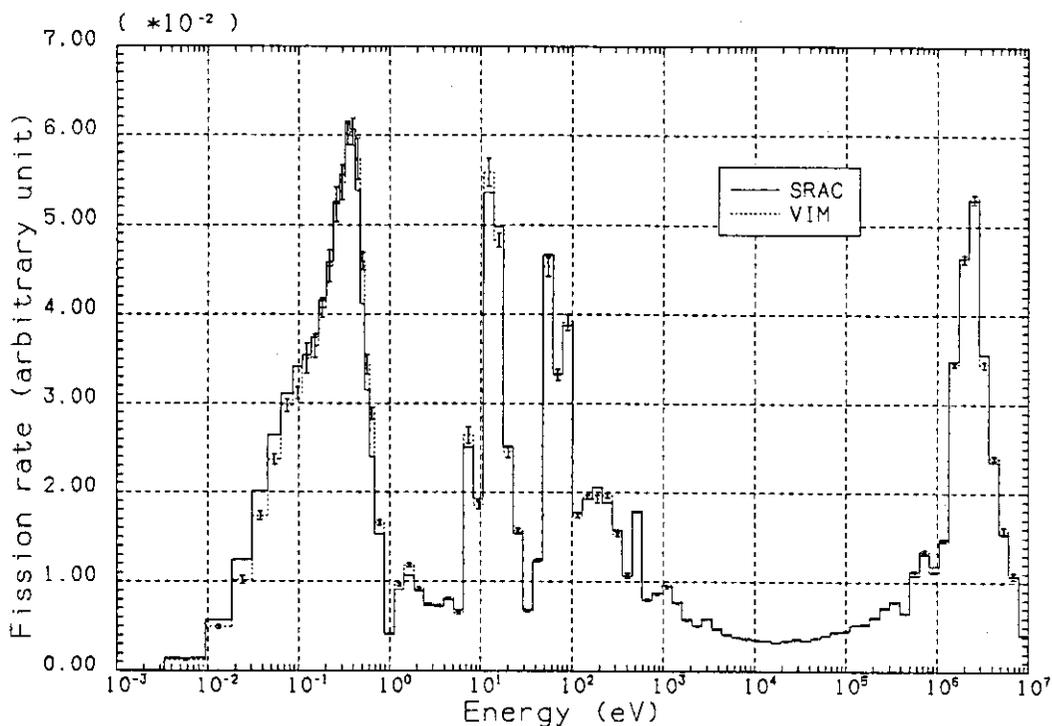


Capture rate. (Core 3 , cell total)

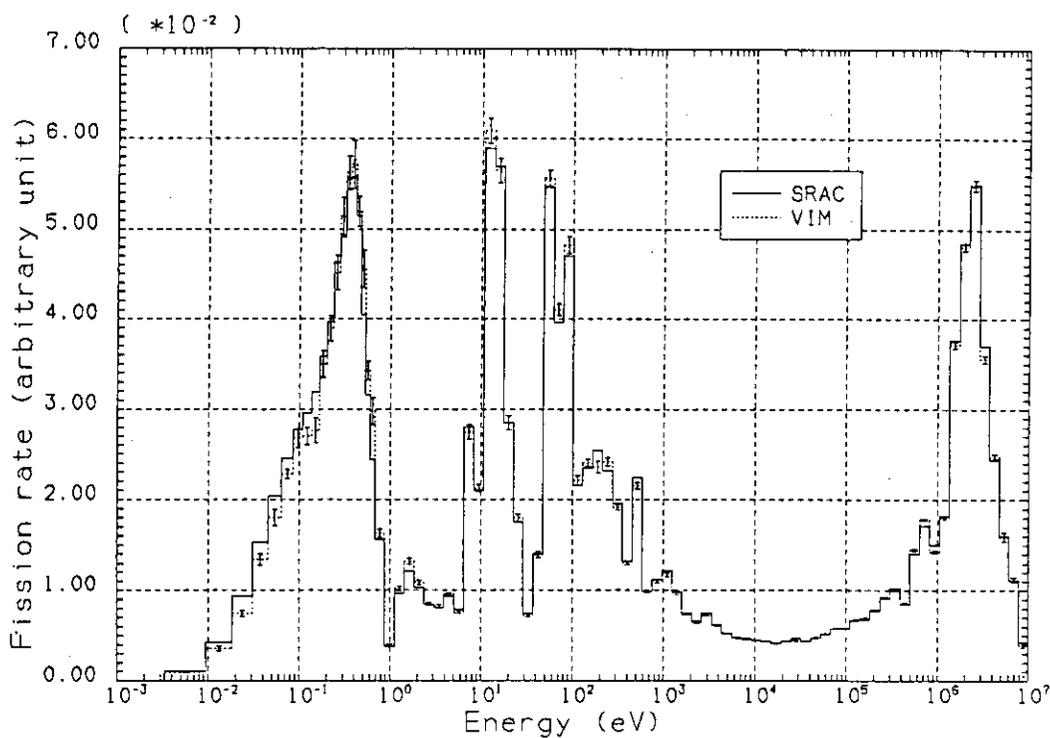


Capture rate. (Core 4 , cell total)

Fig. 18 Capture rate (cores of 42.5% void)

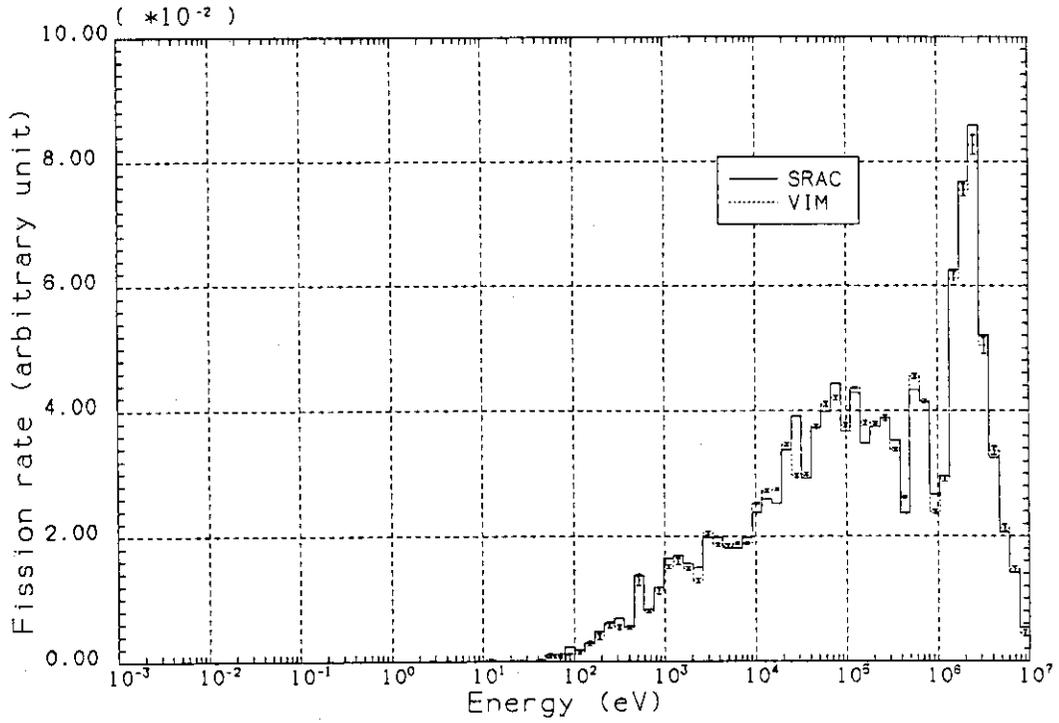


Fission rate. (Core 1 , cell total)

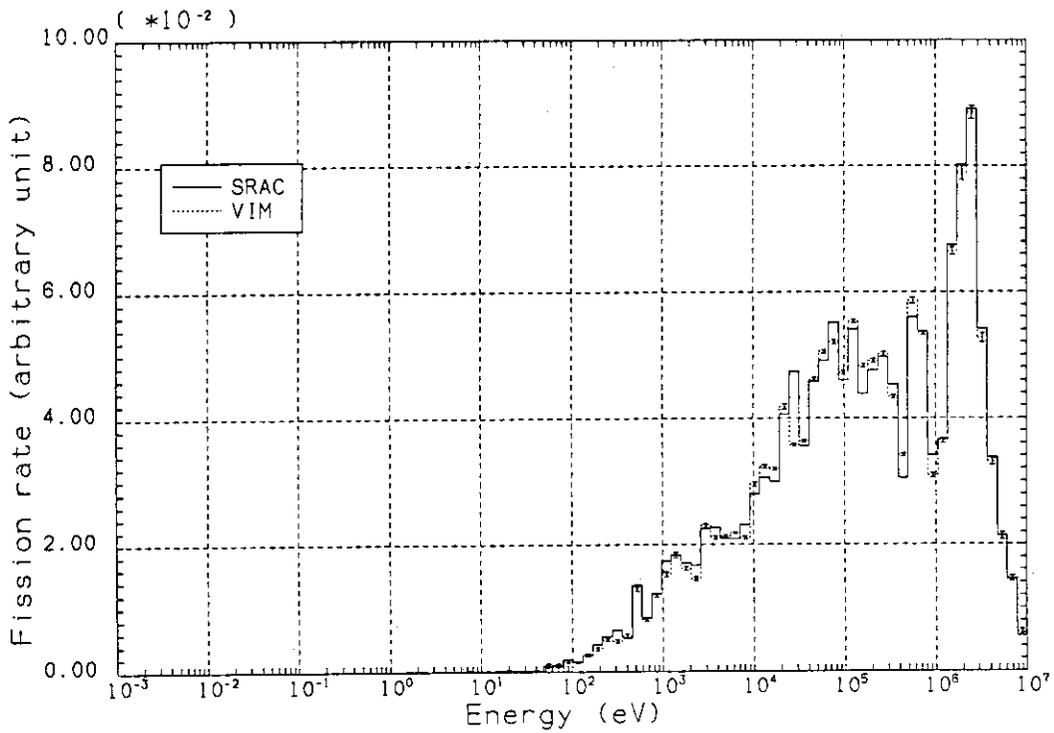


Fission rate. (Core 6 , cell total)

Fig. 19 Fission rate (cores of 0% void)

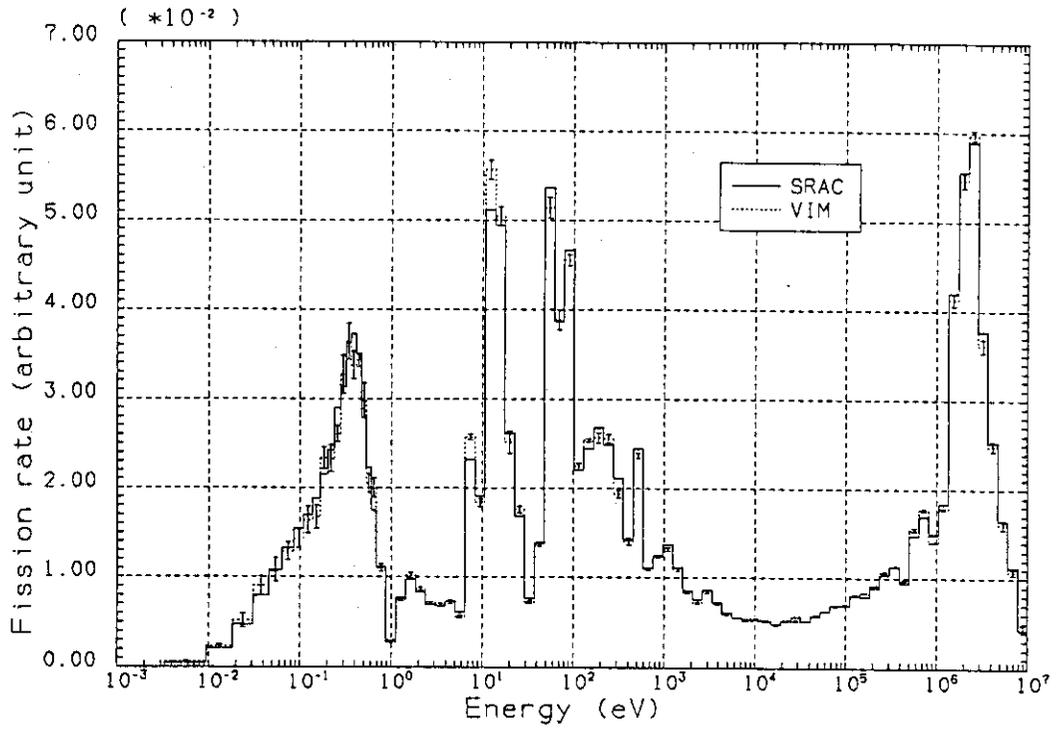


Fission rate. (Core 2 , cell total)

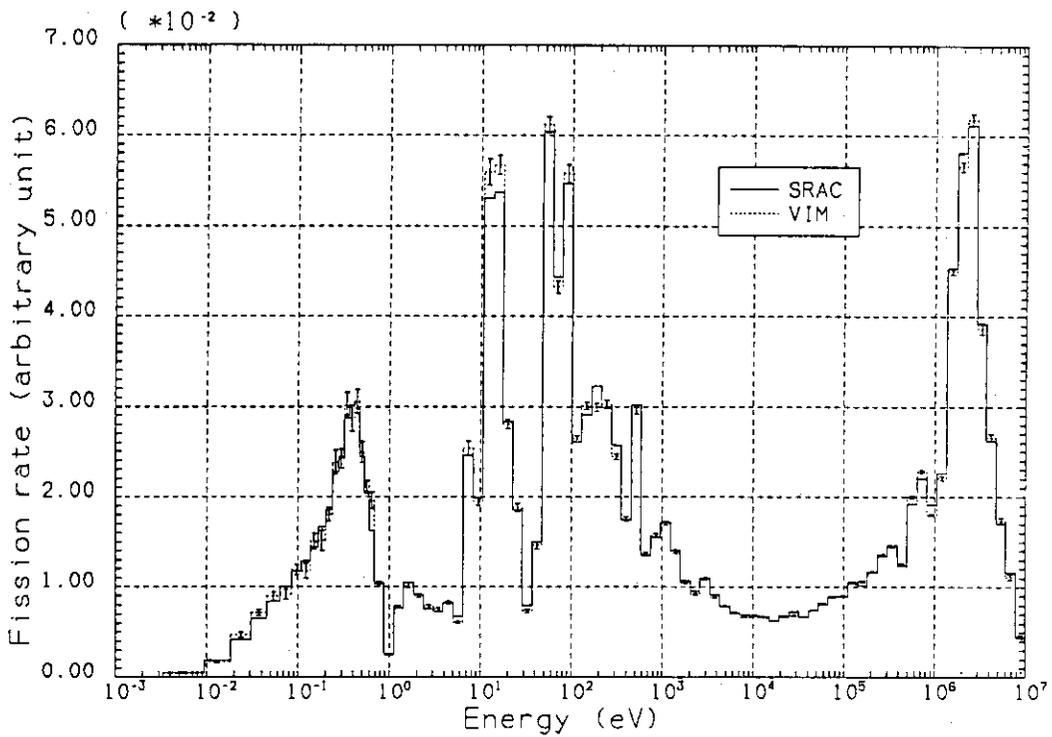


Fission rate. (Core 5 , cell total)

Fig. 20 Fission rate (cores of 100% void)

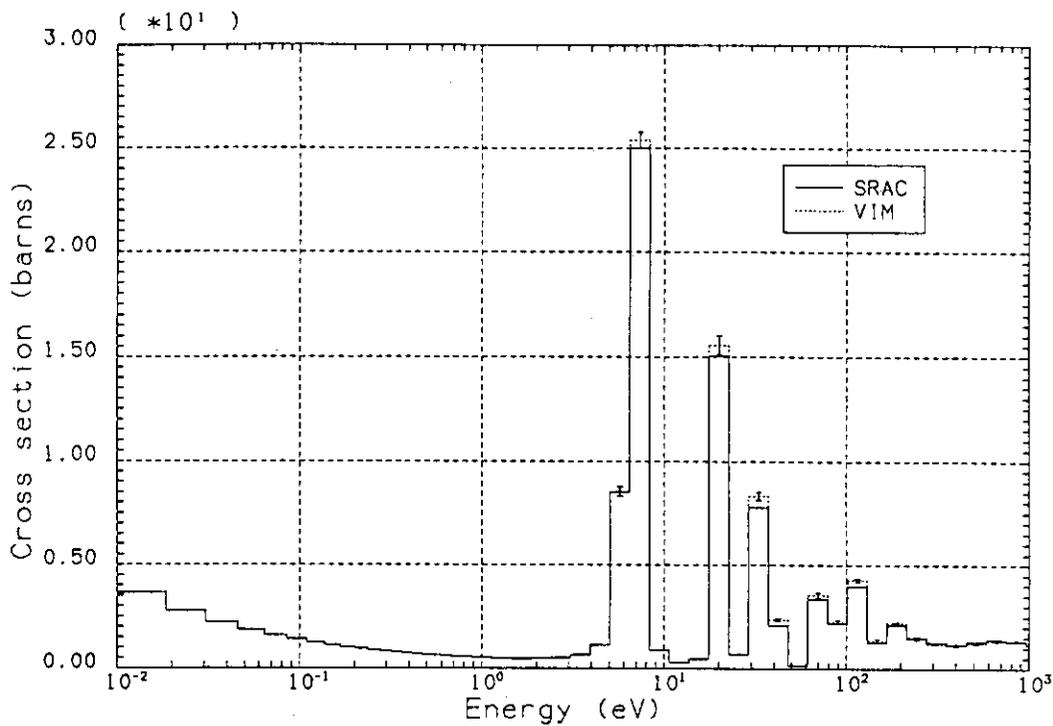


Fission rate. (Core 3 , cell total)

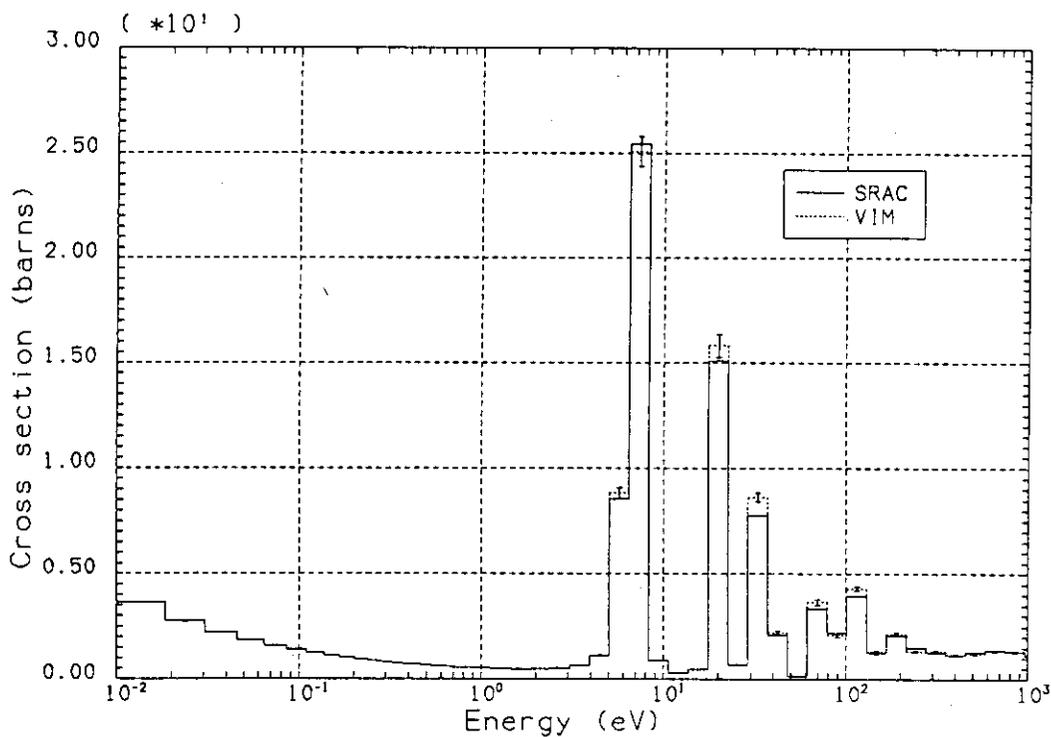


Fission rate. (Core 4 , cell total)

Fig. 21 Fission rate (cores of 42.5% void)

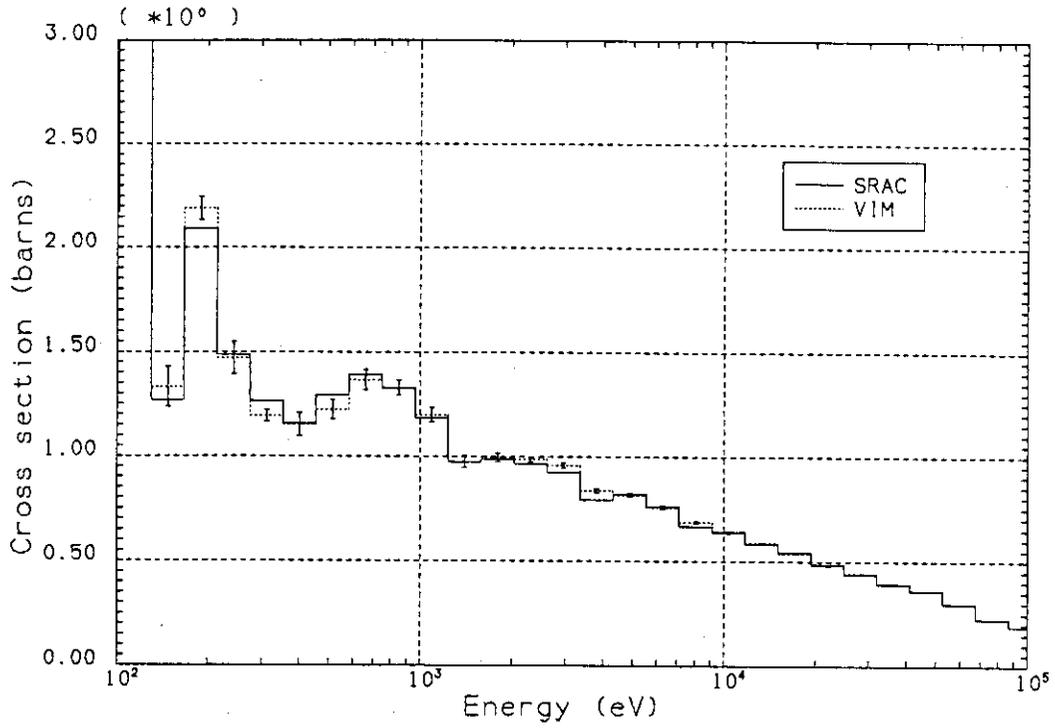


^{238}U capture cross section. (Core 1, fuel 1)

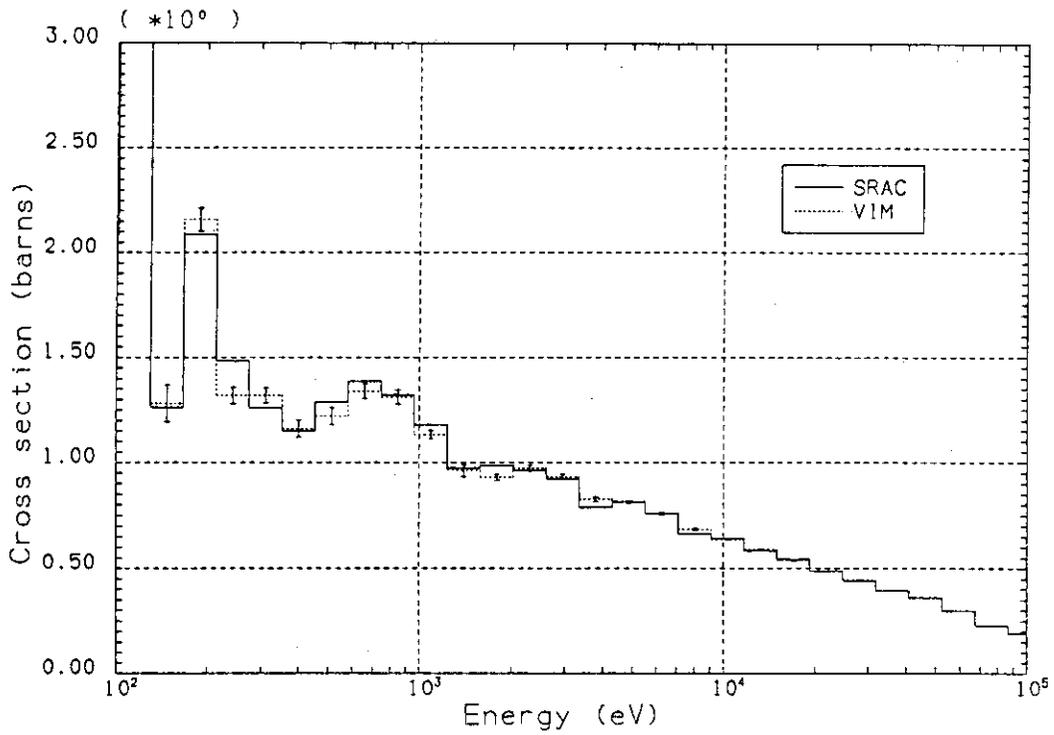


^{238}U capture cross section. (Core 6, fuel 1)

Fig. 22 ^{238}U capture cross section (cores 1, 6 fuel 1)

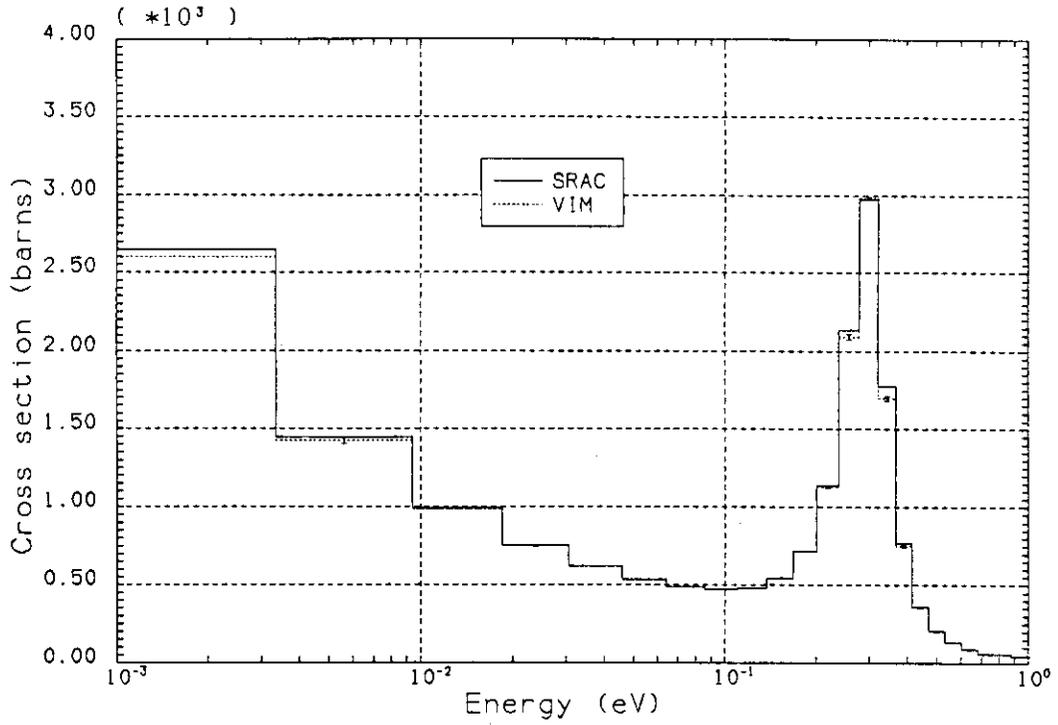


^{238}U capture cross section. (Core 1, fuel 1)

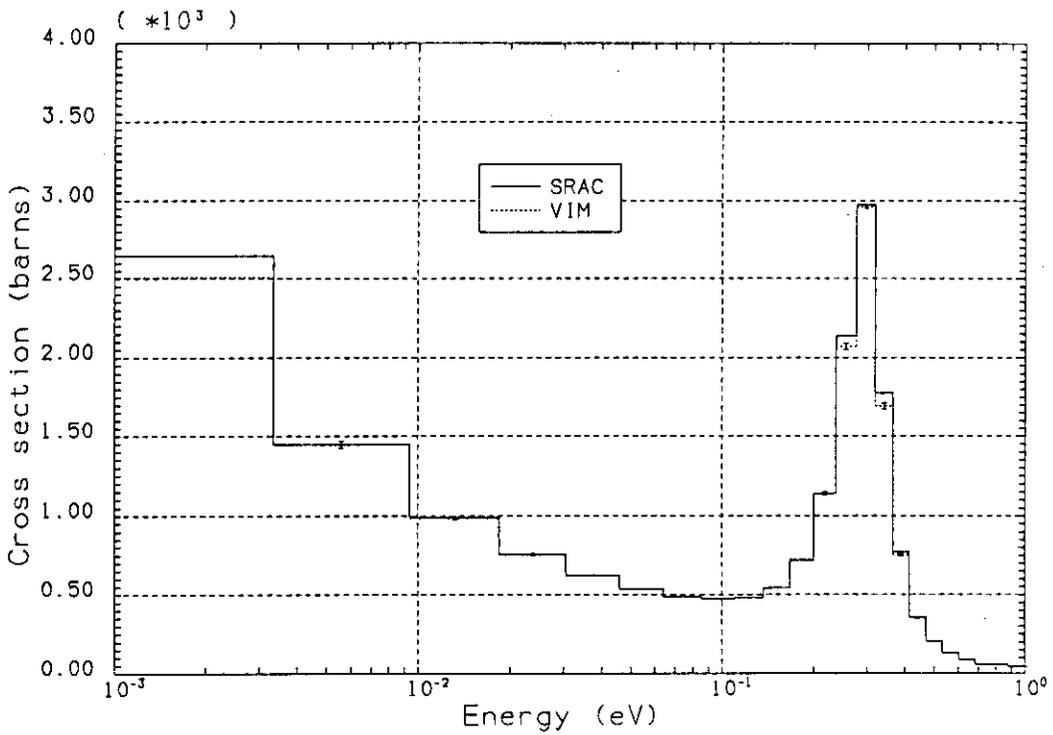


^{238}U capture cross section. (Core 6, fuel 1)

Fig. 23 ^{238}U capture cross section (cores 1, 6 fuel 1)

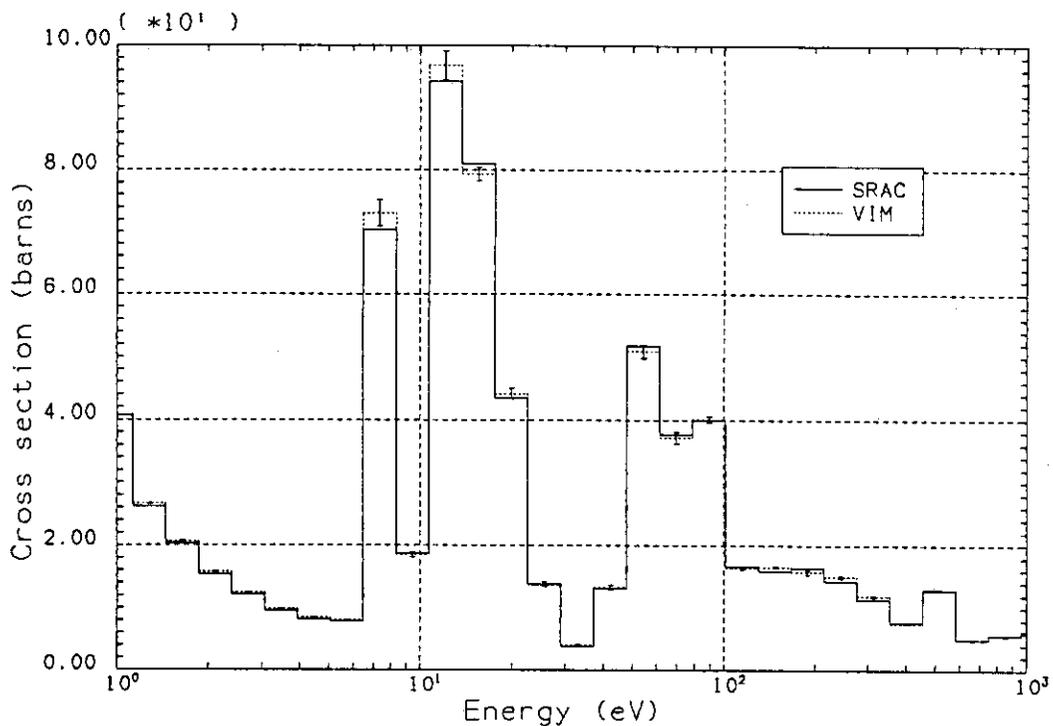


²³⁹Pu Fission cross section. (Core 1, fuel 1)

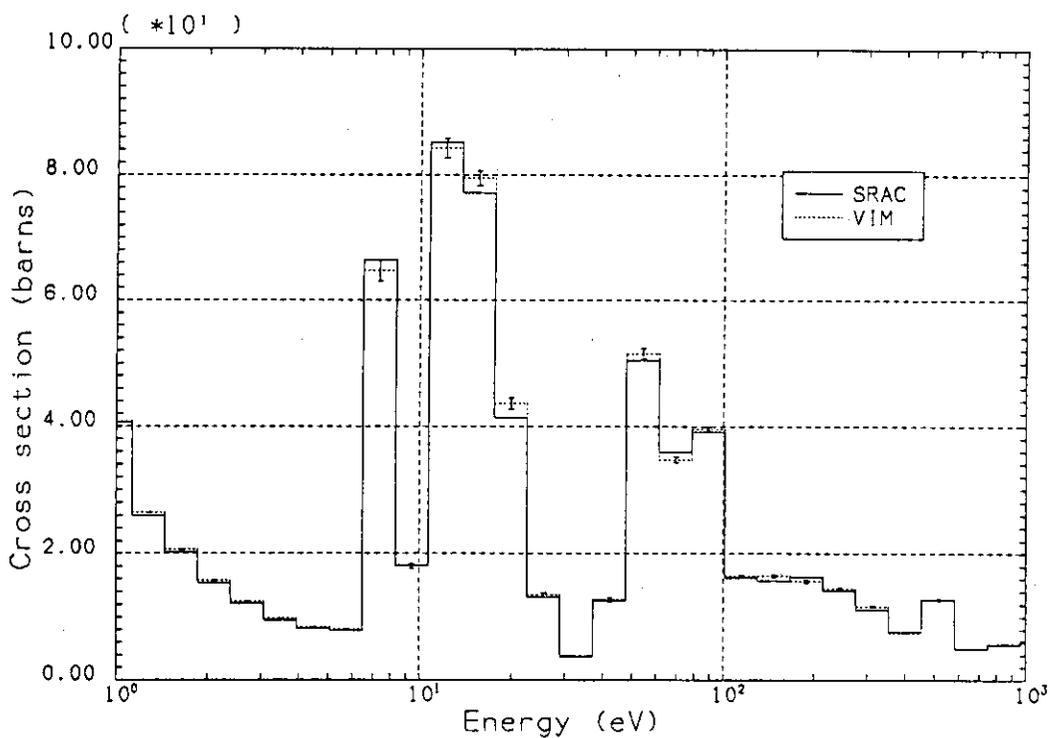


²³⁹Pu Fission cross section. (Core 4, fuel 1)

Fig. 24 ²³⁹Pu fission cross section (cores 1, 4 fuel 1)

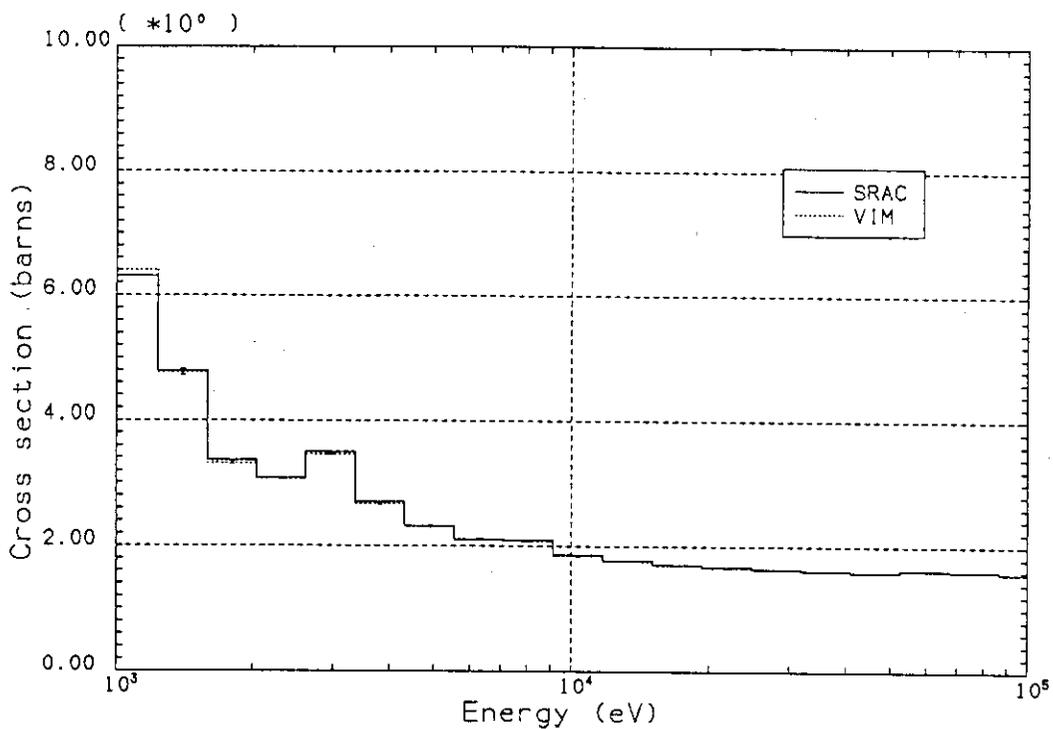


^{239}Pu Fission cross section. (Core 1, fuel 1)

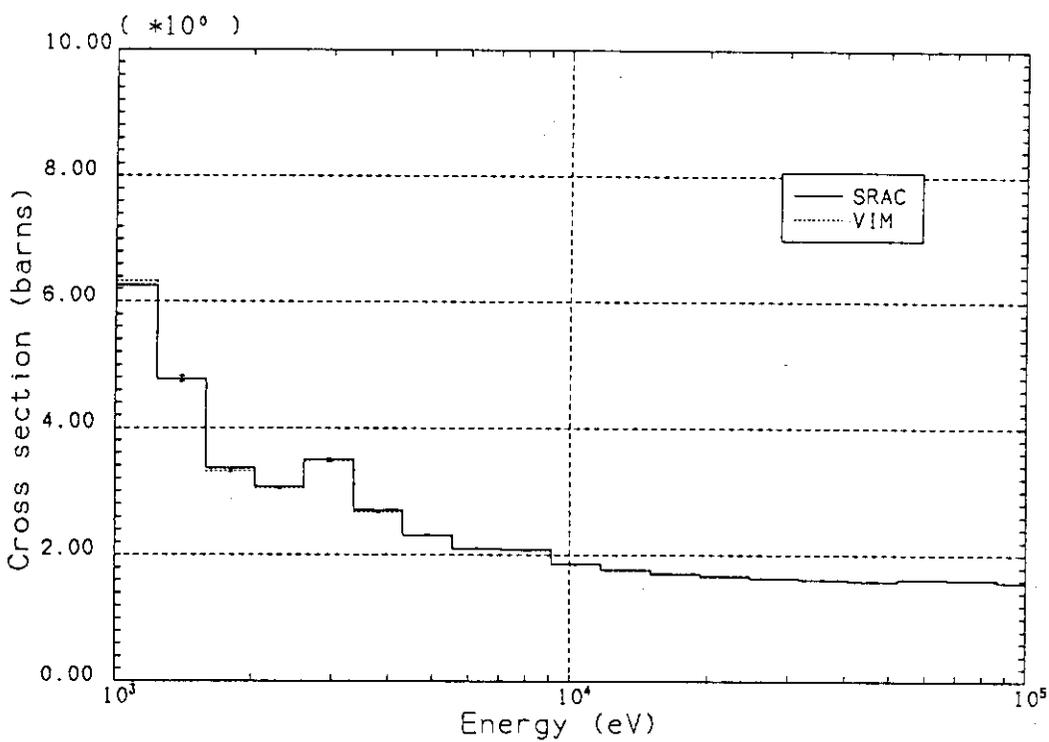


^{239}Pu Fission cross section. (Core 4, fuel 1)

Fig. 25 ^{239}Pu fission cross section (cores 1, 4 fuel 1)



²³⁹Pu Fission cross section. (Core 1, fuel 1)



²³⁹Pu Fission cross section. (Core 4, fuel 1)

Fig. 26 ²³⁹Pu fission cross section (cores 1, 4 fuel 1)

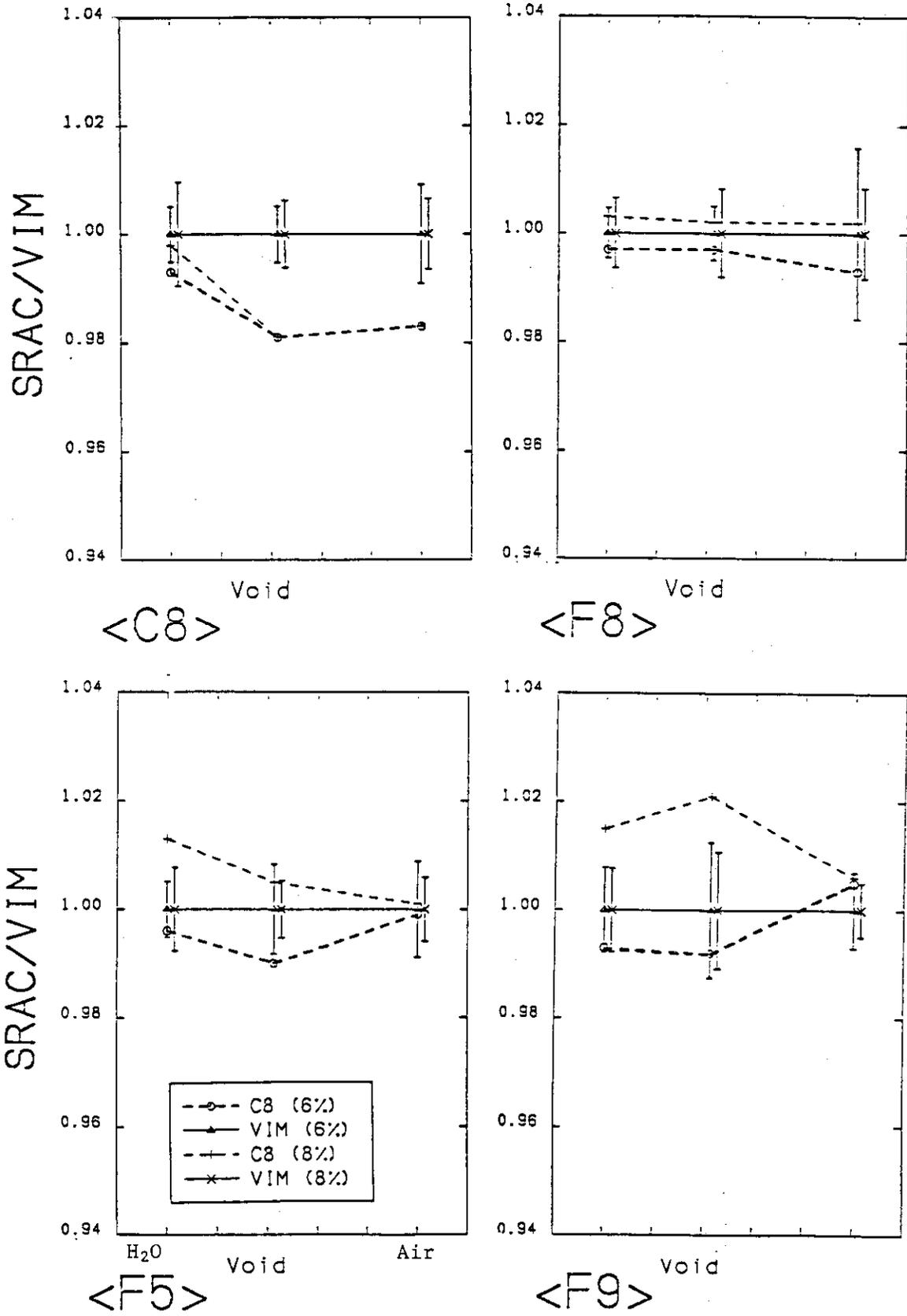


Fig. 27 Two rod heterogeneity SRAC/VIM (cores 1 ~ 6)

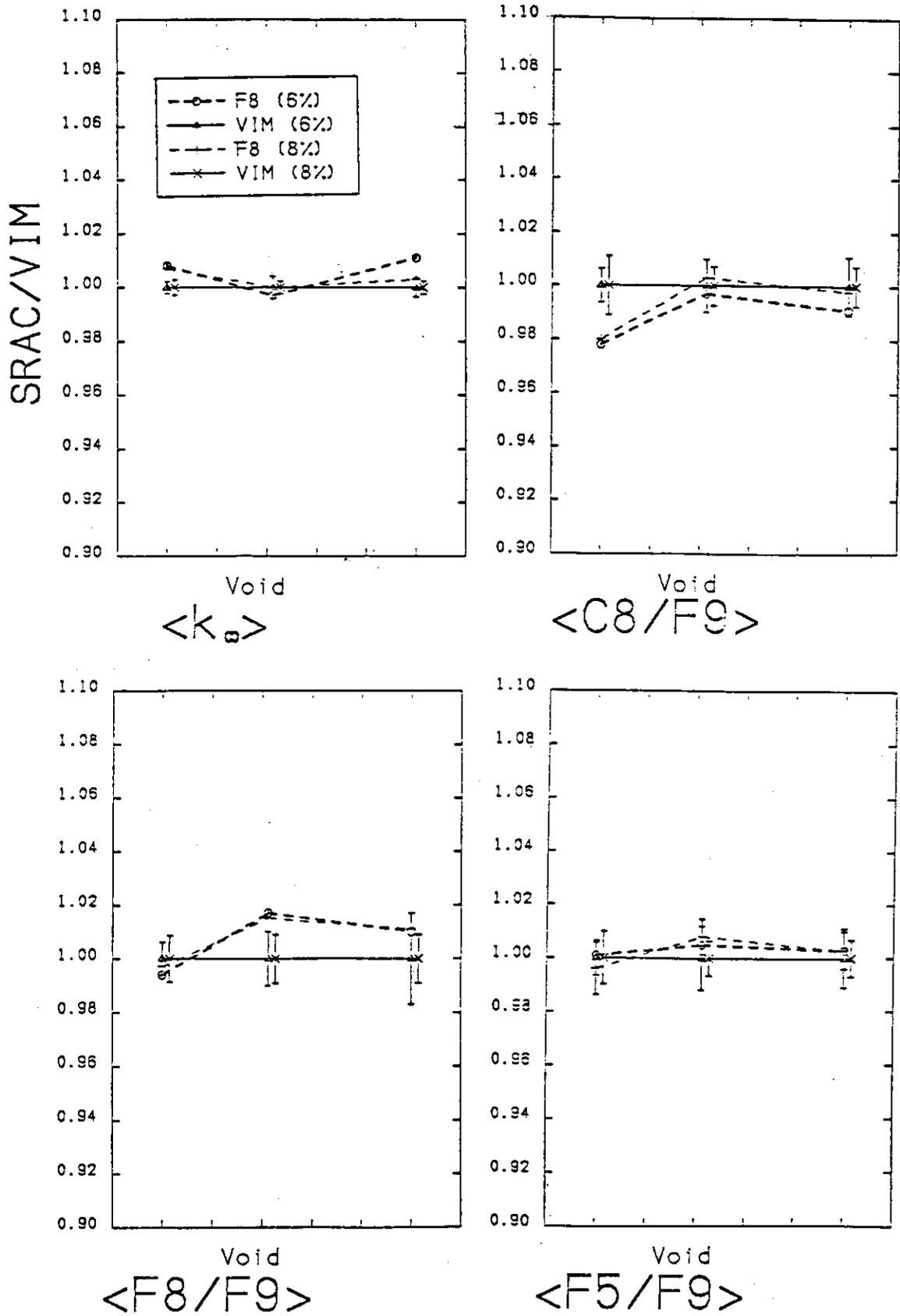


Fig. 28 Reaction rate ratio SRAC/VIM (cores 1 ~ 6)

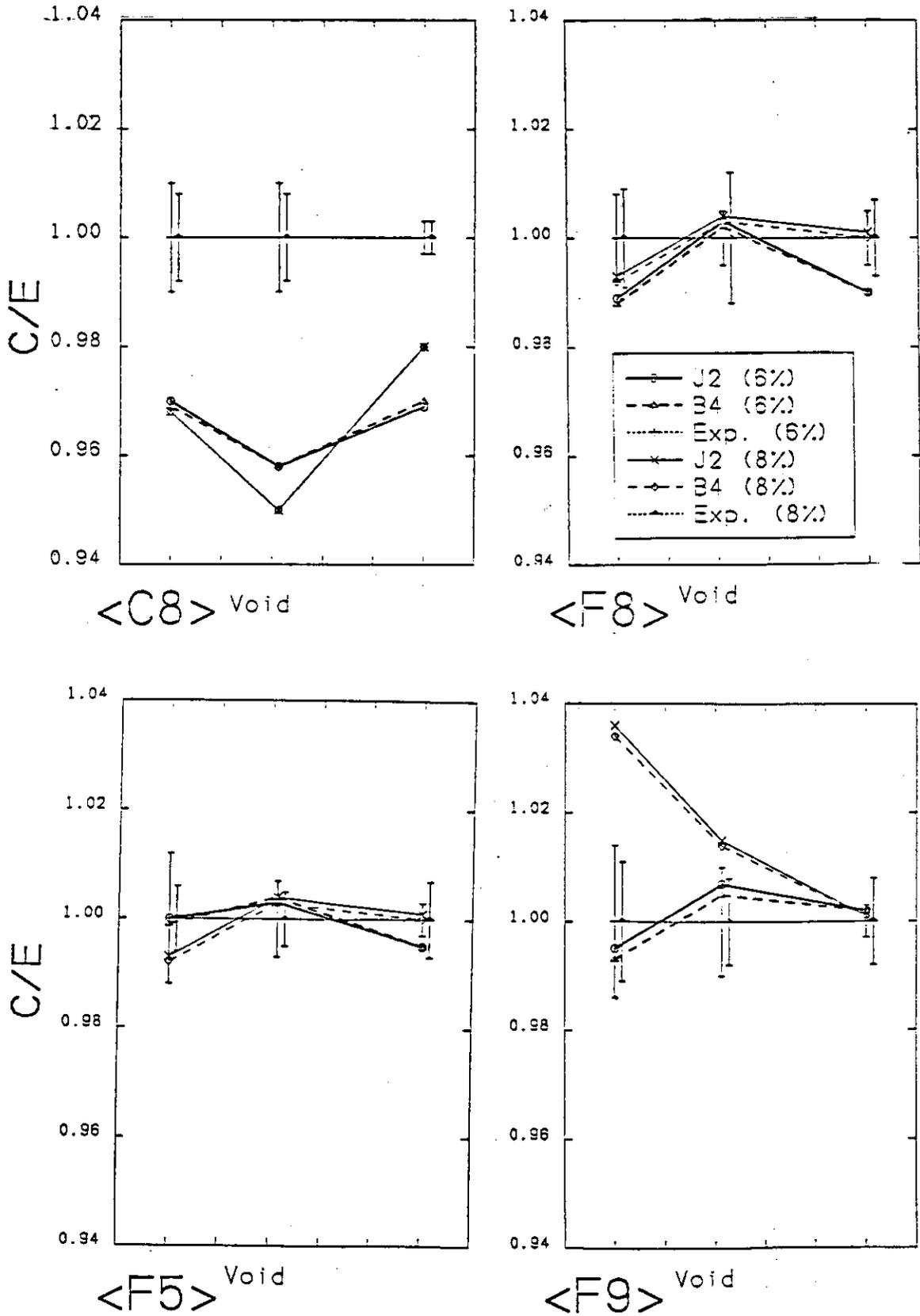


Fig. 29 Two rod heterogeneity (cores 1 ~ 6)

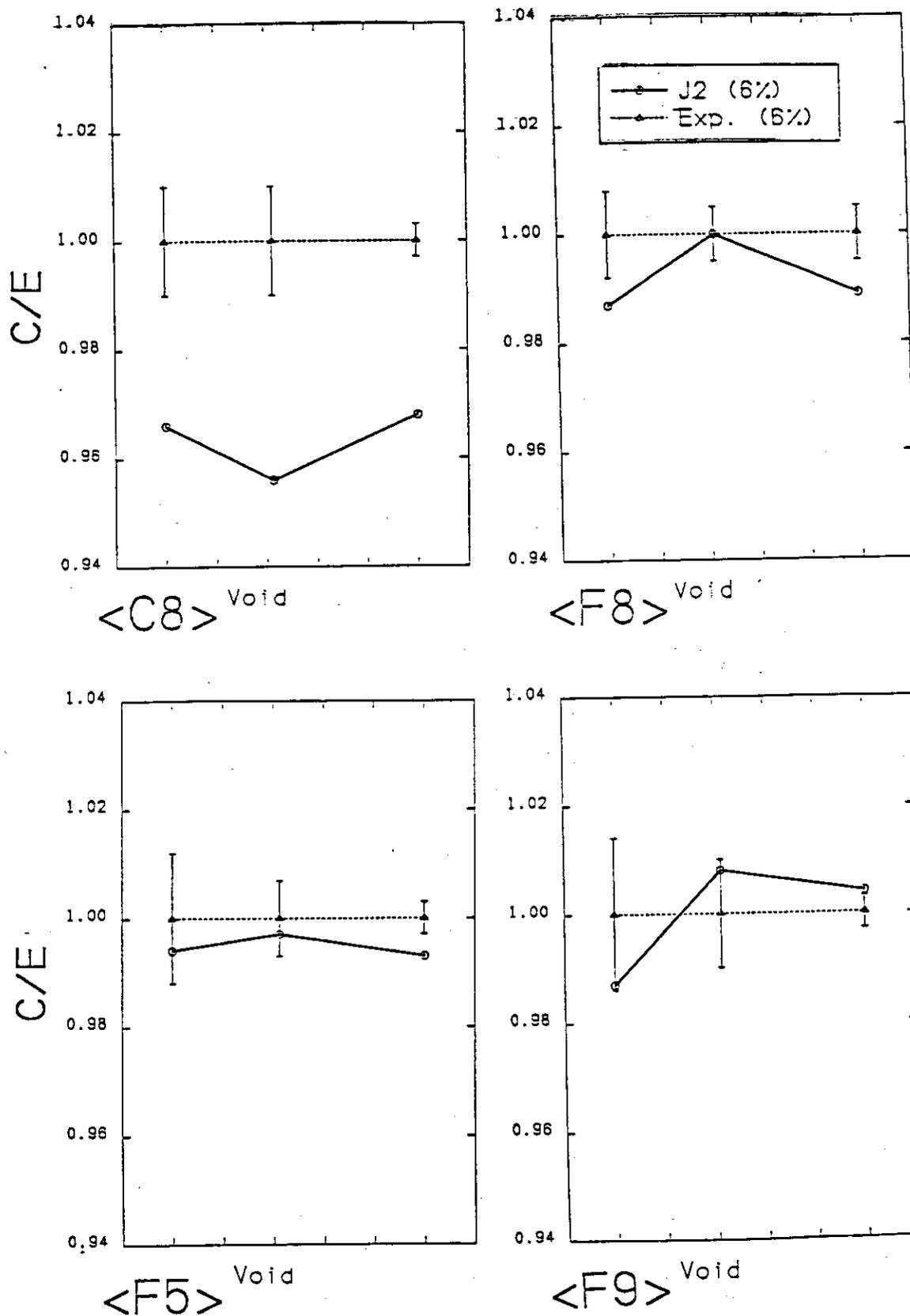


Fig. 30 Two rod heterogeneity (cores 1 ~ 3)
by previous calculations

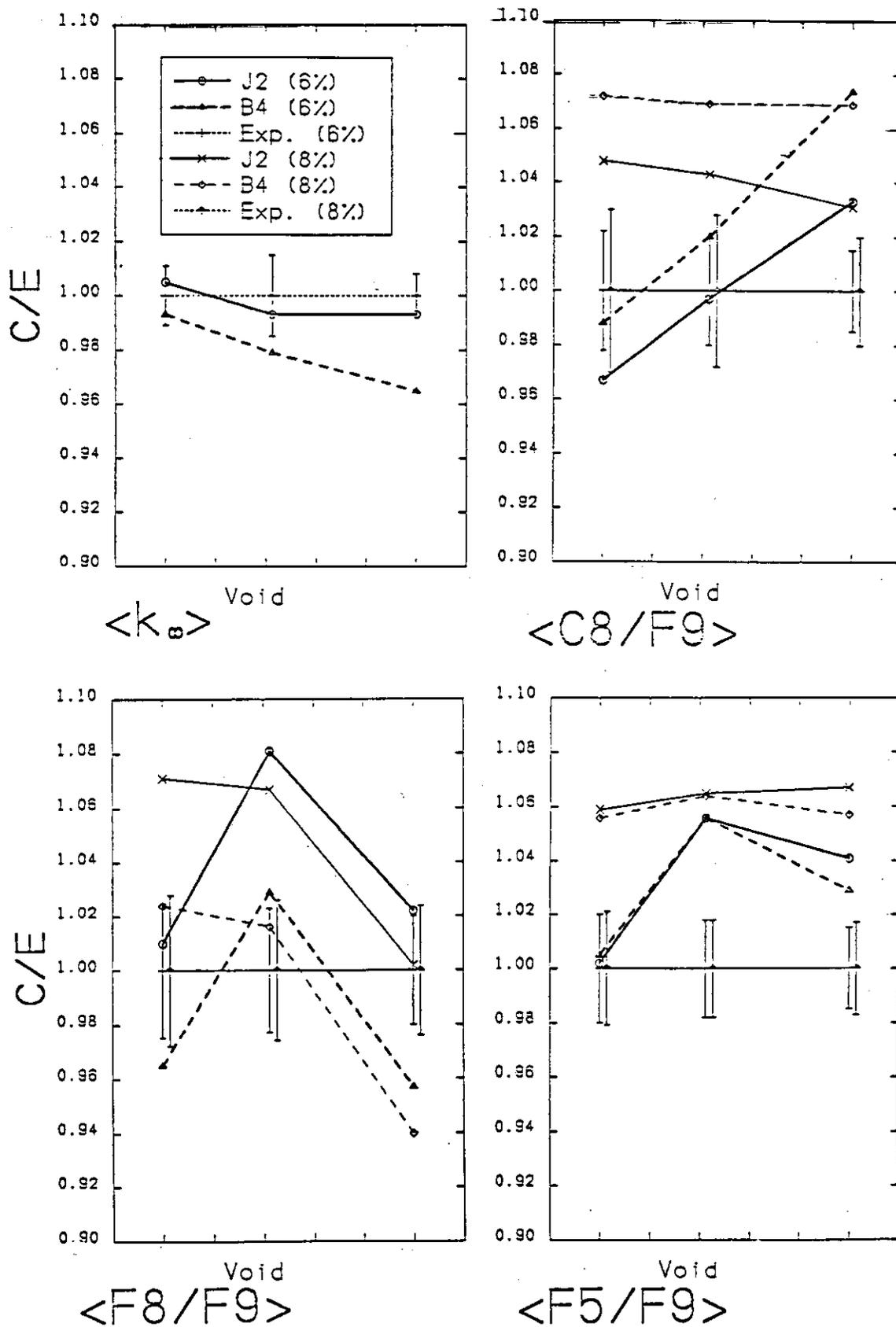


Fig. 31 Reaction rate ratio (cores 1 ~ 6)

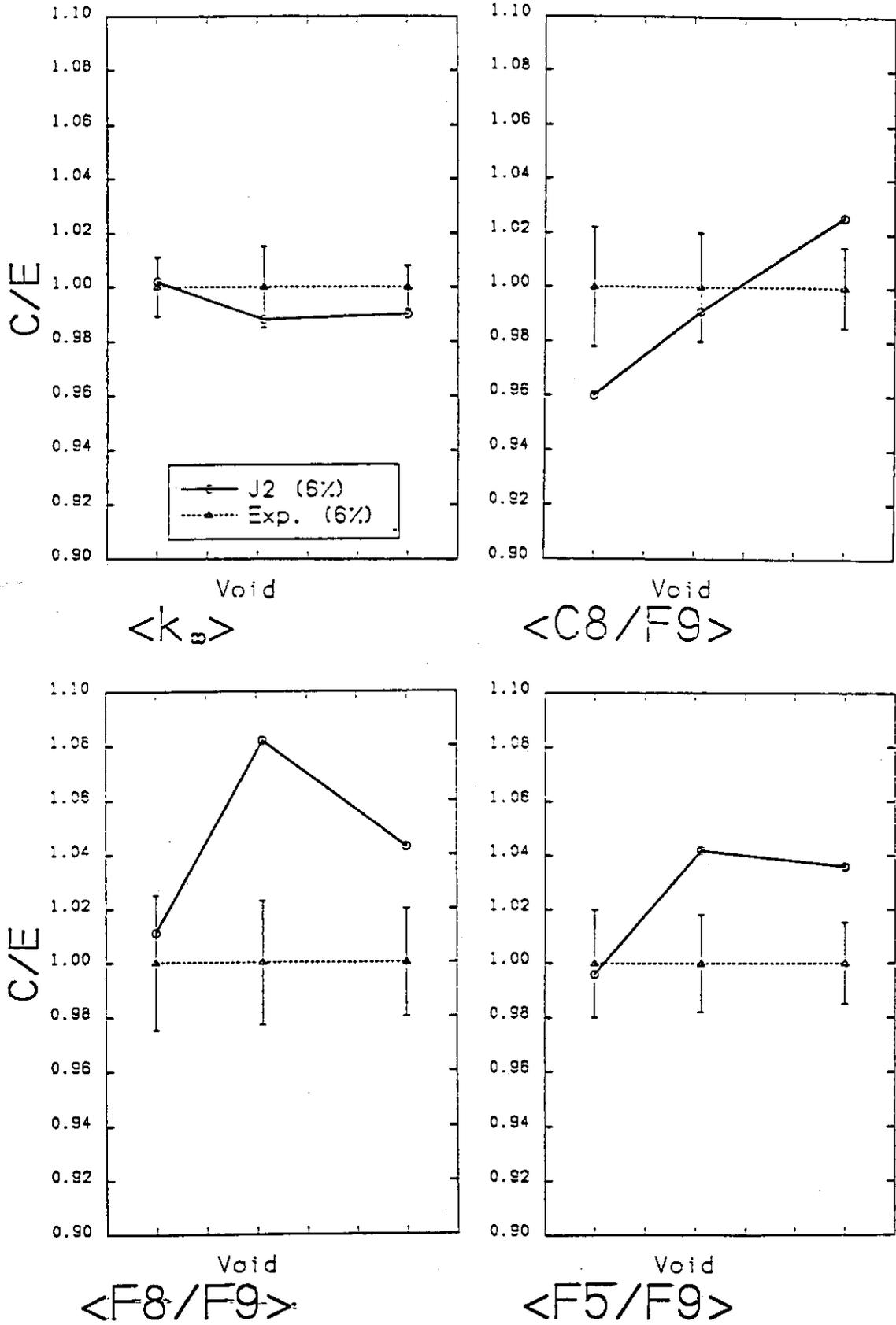


Fig. 32 Reaction rate ratio (cores 1 ~ 3)
by previous calculations

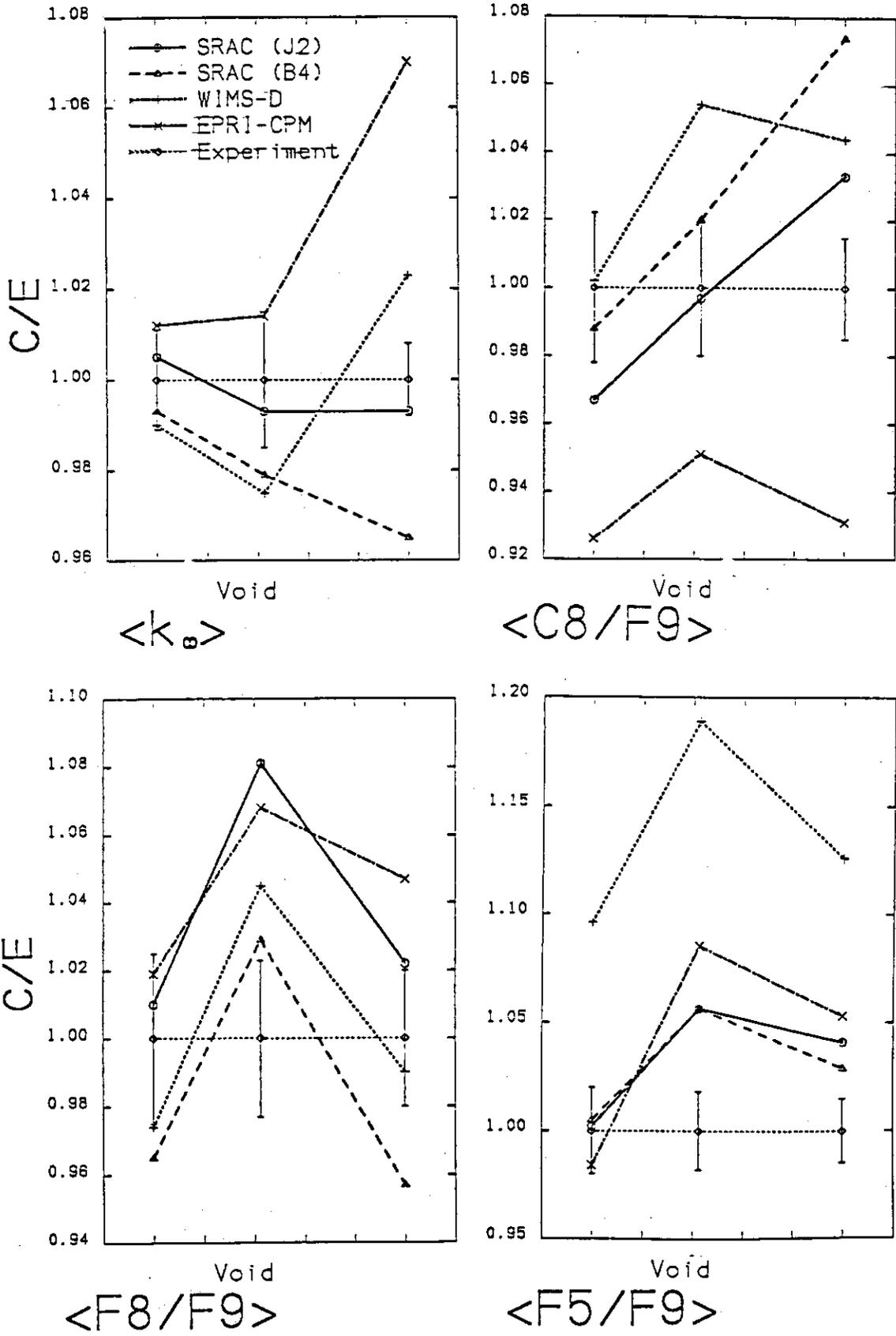


Fig. 33 Reaction rate ratio cores 1 ~ 3 (SRAC and other codes)

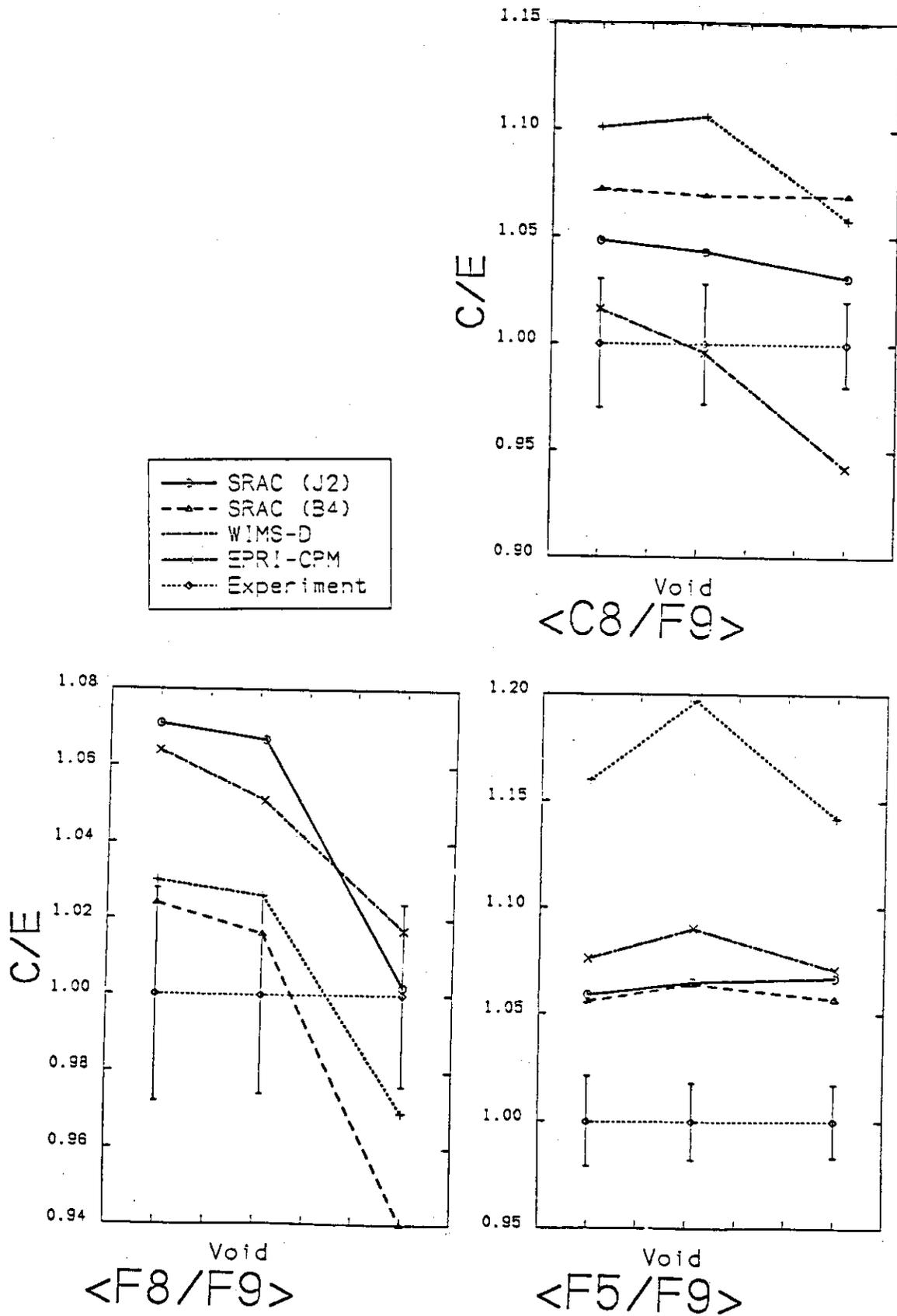


Fig. 34 Reaction rate ratio cores 4 ~ 6
(SRAC and other codes)

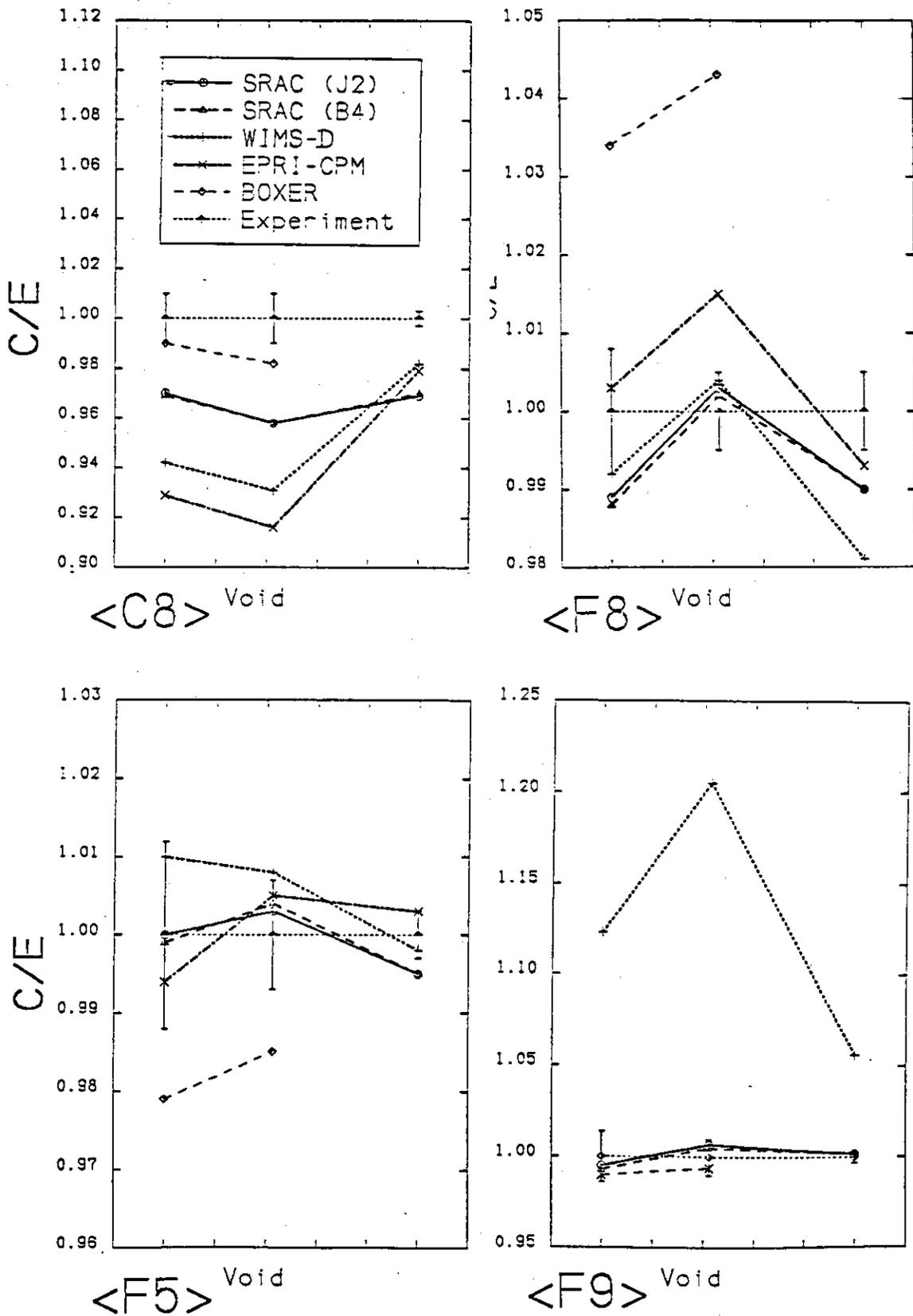


Fig. 35 Two rod heterogeneity cores 1 ~ 3
(SRAC and other codes)

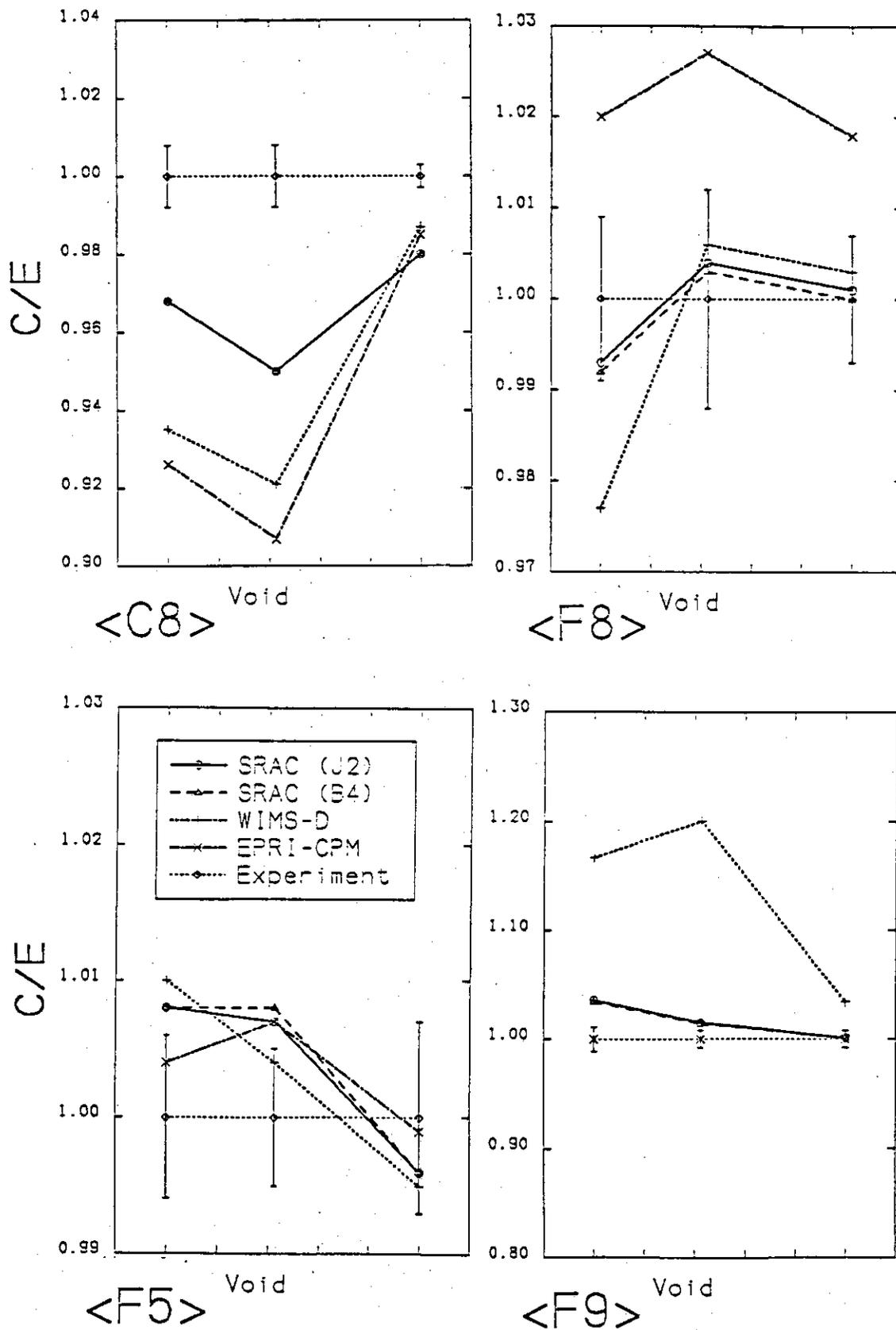


Fig. 36 Two rod heterogeneity cross 4 ~ 6 (SRAC and other codes)