

JAERI - M
84-180

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)

1984年10月

石黒 幸雄・上橋敬一郎・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）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

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)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
石黒幸雄・土橋敬一郎・佐々木誠*

(1984年9月11日受理)

熱中性子力体系標準コード (SRAC) システムの稠密格子の高転換加圧水炉 (HCPWR) への適用性を検討した。まず, SRACシステムに組み込まれている解析手法の精度を検討するため, 稠密格子系の種々の積分パラメータについて, ENDF/B-4を用いて連続エネルギー・モンテカルロ・コードとの比較計算を行った。次に, EIRのPROTEUS炉心で行われた k_{∞} , 反応率, 反応率比及び ^{238}U の吸収率の微細構造に対する測定値の解析を行った。諸外国のコード・システムによる結果に比べて良好な結果が得られたが, 諸外国の結果と同様に, これ等の積分量に対する予測精度は, 減速材ボイド率に依存するという好ましくない傾向を示している。これ等の解析結果をもとに, HCPWRの核特性解析上の問題が議論されている。

* 日本情報サービス株式会社

Physics Problems on Analysis of High Conversion Pressurized Water
Reactor (HCPWR) with Tighter Pitch Lattices

(An Analysis of PROTEUS-LWHCR Cores by SRAC System)

Yukio ISHIGURO, Keichiro TSUCHIHASHI and Makoto SASAKI*

Department of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 11, 1984)

Study has been made on the applicability of the SRAC system to high conversion pressurized water reactors (HCPWR). First, in order to investigate the accuracy of the methodology incorporated in the SRAC system, the integral parameters calculated by the SRAC system have been compared with those by the continuous energy Monte Carlo code, VIM, using ENDF/B-4. At the next stage, experimental analyses have been accomplished for k_{∞} , various reaction rate ratios and the fine structure of ^{238}U capture rate measured at EIR PROTEUS Cores, by use of the SRAC multigroup constant library based on JENDL-2. Though preferable analyzed results are obtained from the SRAC system, compared with the results from the various foreign codes, the analysis accuracy significantly depends on the degree of moderator void, as seen in the use of the foreign codes. The physics problems on the HCPWR analysis are discussed under the light of the analyses made.

Keywords: PROTEUS, Physics Problem, SRAC, Tight-lattice, Analysis.
High Conversion Pressurized Water Reactors, Comparative
Evaluations, Codes, Feasibility Study

* On leave from Japan Information Service Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. SRAC システムの群定数ライブラリー及び格子計算法	3
2.1 群構造及び群定数作成法	3
2.2 多群実効断面積計算法	8
(a) Table-Look-Up 法	8
(b) IR 法	8
(c) 超詳細群による直接計算法	8
2.3 多群格子スペクトル計算法及び洩れの効果	9
3. モンテカルロ・コード VIM との比較による SRAC システムの計算精度の検討	10
3.1 共鳴エネルギー領域の無限稀釈断面積の比較	13
3.2 実効断面積及び反応率の比較	17
4. PROTEUS 稠密格子炉心の解析	35
4.1 実験の概要	35
4.2 核データ及び格子解析モデル	36
4.3 解析結果及び結果の検討	45
(a) Two-Rod 非均質性	45
(b) 反応率比及び k_{∞}	49
(c) ^{238}U の吸収反応率 (C8) の燃料ピン内の微細構造	57
5. まとめ	60
謝 辞	61
文 献	62

Contents

1. Introduction	1
2. Multigroup Constant Library and Cell Calculation Method	3
2.1 Group Structure and Multigroup Constant Generation Method	3
2.2 Methods to Calculate Multigroup Effective Cross Sections ..	8
(a) Table-Look-Up Method	8
(b) IR Method	8
(c) Direct Numerical Method Using Ultrafine Groups	8
2.3 Calculational Method of Multigroup Cell Spectrum and Leakage Effect	9
3. Studies on Calculational Accuracy of SRAC System by Comparison with Monte Carlo Code VIM	10
3.1 Comparison of Infinite Dilute Cross Sections in Resonance Energy Region	13
3.2 Comparison of Effective Cross Sections and Reaction Rates	17
4. Analysis of PROTEUS Cores with High Compact Lattice	35
4.1 Outline of Experiment	35
4.2 Nuclear Data and Cell Analysis Model	36
4.3 Results and Discussions	45
(a) Two-Rod Heterogeneity	45
(b) Reaction Rate Ratios and k_{eff}	49
(c) Fine Structure of ^{238}U Capture Rate (C8) in Fuel Pins ..	57
5. Conclusions	60
Acknowledgment	61
References	62

1. ま え が き

加圧水炉 (PWR) の燃料ピンの格子のピッチを減少させることによって PWR の転換比を高めようという Edlund の提案⁽¹⁾は、核燃料の有効利用の観点から強い関心を集めている。即ち、高速増殖炉開発の遅れから、ウラン資源利用の効率を高めるため、軽水炉 - 高速炉路線の中間的役割を果たす転換比 0.9 ~ 0.95 の高転換軽水炉を開発しようとする機運が高まっている。諸外国における最近の研究⁽²⁾⁻⁽⁶⁾では、既存の軽水炉技術を使用し、しかもプラント設計を大幅に変更しないで、PWR 炉心を Pu/U の稠密格子の炉心で直接置き換える可能性が調べられている。この場合、安全性の見地から、次の三項目について技術的確認を得ることが必要であるとされている⁽²⁾。即ち、

- (1) 全ての燃焼段階において、負の冷却材ボイド係数が得られること。
- (2) 稠密に装荷された格子内の燃料ピンの変形が許容され得るものであること。
- (3) LOCA 時の非常炉心冷却が可能なること。

特に項目(1)は、純粋な炉物理的問題であると同時に HCPWR の概念設計そのものに関して最も基本的な前提の一つであり、他の開発研究課題に優先させて、技術的確認を得る必要があると考えられる。

一般に、転換比を上げようとするれば、減速材/燃料体積比を下げる必要があり、転換比 = 0.95 を達成しようとする場合、この体積比を LMFBR において考えられている 0.5 ぐらいに極端に小さくした燃料集合体を用いる必要がある⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。この場合、Pu の濃縮度も LMFBR とほぼ同じ 8% ぐらいが考えられている。ここで注意すべきことは、転換比を上げるために体積比を下げると、負のボイド係数の絶対値が減少し、ついにはボイド係数が正になってしまうことである。即ち、転換比を上げることと、ボイド係数に余裕を持たせることとは、相反する方向にあって、この二つの方向の妥協点を見出すことは、HCPWR 設計に関する最も決定的問題となっている。一方、LMFBR での Na ボイド係数は、高速炉の核特性量のうちで最も予測精度の悪いものとして知られており、現在でもその予測精度は、設計側からの要求精度を充分満たすまでには至っていないといわれている。次章以降でも示されるように、HCPWR は、その格子構成からして、LWR と同様に LMFBR と同様に相当異なる中性子スペクトルを有しているが、ボイド率が増加すれば、LMFBR のボイド状態に近づくので、そのボイド係数を正確に予測することもまた困難を伴うであろうと予想される。冷却材のボイド効果は、中性子の生成、消滅さらに洩れ等の過程の総合的な結果であるので、HCPWR を設計するためには、これ等の過程を正確に予測できるデータ及び手法を用いる必要がある。

これまでの HCPWR の核設計は、FBR 及び LWR に対して開発された標準的なセル・スペクトル計算コードを改良して行われている。例えば、速中性子エネルギー領域の実効断面積を良く知られた Bondarenko 型の炉定数セット⁽⁷⁾で計算できるようにしたり⁽⁴⁾、HCPWR 解析で重要な共鳴エネルギー領域の実効断面積を詳細群計算に基づく断面積と入れ換える⁽⁵⁾などの工夫を行って、HCPWR 特有の中速エネルギー領域の重要性を考慮できるようにしている。一方、Edlund は、多群

法に基づく計算精度は充分でないとして、連続エネルギー・モンテカルロ・コード VIM⁽⁸⁾ を中核的に使用して設計を行っている⁽³⁾。VIM コードの結果によれば、標準的な LWR 設計手法による転換比は、5%以上過大評価され、以前の報告^{(1),(9)}ほど高い値は得られなかったとしている⁽³⁾。

しかし、これ等の解析手法の実験的検証は、ほとんどなされておらず、炉物理実験そのものも、スイスの SAPHIR での部分的臨界実験ぐらいなものである。この実験は、1981 年の夏以来、EIR の PROTEUS 炉施設で、PuO₂/UO₂ の稠密格子に対する適当な積分ベンチマークを設定するために進められているものである⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。ここでは、ボイド反応度係数に主眼を置いて実験がなされており、各種の中心反応率比及び k_{∞} などが測定されている。また、WIMS-D⁽¹³⁾ 及び EPRI-CPM⁽¹⁴⁾ コードを使用して、それ等の測定値の解析もなされているが、解析結果は、LWR 格子での積分量に対して一般的に得られている予測精度に比べて、はるかに悪いものであると報告されている。特に、積分量に対する実験値と計算値の差違の大きさはボイド率に依存する。という結果は注目すべきで、計算された中性子スペクトルが充分正確に再現されていないと見なすべきであろう。このように、既存の LWR 系に対して開発されたコードでは、HCPWR 系の炉物理特性量を高精度で予測できると期待することは困難である。

ここでは、熱中性子炉体系標準設計コード (SRAC) システム⁽¹⁵⁾ の HCPWR 系への適応性を検討すると共に、この系での核特性解析上の問題点を摘出し将来解決すべき研究項目を整理することを目的とする。このため、まず PROTEUS 炉心の HCPWR 格子をモデルとして、連続エネルギー・モンテカルロ・コード VIM との比較において、SRAC システムの計算精度を検討する。次に、PROTEUS 炉による HCPWR 格子での実験の解析を k_{∞} 及び反応率比を中心にして行い、SRAC システムの解析手法及び多群定数ライブラリーについて議論する。

なお、HCPWR の概念及び技術的課題については、松浦氏による詳しい解説記事⁽¹⁶⁾ を参照していただきたい。

2. SRACシステムの群定数ライブラリー及び格子計算法

格子スペクトルを正確に予測することは、核特性解析上最も基本的な条件である。特に HCPWR のような LWR とも LMFBR とも異なるスペクトルを有する我々が経験していない体系を扱うにあたっては、用いるデータ及び手法のスペクトル再現性をまず調べる必要がある。従って、ここでは格子スペクトルの予測精度に的を絞って問題を取り扱い、全炉心に関連した問題は扱わないことにする。このため、まず SRAC システムで用いられている群定数ライブラリー及び格子スペクトル計算法について簡単に述べる。詳しいことは、参考文献 (15) を参照されたい。

2.1 群構造及び群定数作成法

SRAC システムの基本ライブラリーの群構造は、Table 1 に示されている。ここで、速中性子及び熱中性子エネルギー領域に重なったエネルギー領域が、 $3.9279\text{eV} \geq E \geq 0.41399\text{eV}$ の間に設けてあるのは、上方散乱の影響及び ^{240}Pu の 1.056 eV 共鳴レベルを考慮するためである。また、Table 1 - (C) の超詳細群は、後述のように、共鳴エネルギー領域で厳密に格子計算をするために用いられるもので、現在のところ、 $130.07\text{eV} \geq E \geq 0.41399\text{eV}$ の間でのみ、この取り扱いが可能である。

多群定数を作成するための核データとしては、熱エネルギー領域には、ENDF/B-3⁽¹⁷⁾、速中性子及び共鳴エネルギー領域では、ENDF/B-4⁽¹⁸⁾ が用いられている。さらに、JENDL-2⁽¹⁹⁾ を主体とする多群ライブラリーも用意されている⁽²⁰⁾。

速中性子領域の群定数ライブラリーは、無限稀釈断面積と対応する自己遮蔽因子及び重い核種に対する共鳴パラメータから成っている。シャープな共鳴構造を有しない中重核の群定数は、標準的な手法で計算された。一方、重い核種の実効断面積は、減速材の減速に対して NR 近似を仮定して、次の式を解いて計算された。

$$(\alpha_x(u, T) + \sigma_0) \phi(u, \sigma_0, T) = \frac{1}{1 - \alpha} \int_{u-\xi}^u \sigma_s(u', T) \phi(u', \sigma_0, T) du' + \sigma_0 \quad (1)$$

ここで、 σ_0 及び T は、それぞれ、背景断面積と温度を表わし、その他の記号は通常用いられているものである。核反応 x の共鳴遮蔽因子は、各群の無限稀釈断面積 σ_∞ を用いて、

$$f_x(\sigma_0, T) \equiv \frac{1}{\sigma_\infty} \frac{\int_{\Delta u} \sigma_x(u, T) \phi(u, \sigma_0, T) du}{\int_{\Delta u} \phi(u, \sigma_0, T) du} \quad (2)$$

で求められる。ここで注意すべきことは、減速材の減速項に NR 近似を仮定したことにより、遮蔽因子の内挿の際に、IR 近似等により適当な補正をしないと、HCPWR では実効断面積に誤差がもたらされる可能性があることである。但し、共鳴核種の減速は厳密に取り扱っていることも注意すべきである。

上式 (1) 及び (2) で用いられる共鳴断面積は、分離領域では、核データ・ファイルの共鳴パラメータを直接用いて計算された。一方、非分離領域では、共鳴パラメータの統計分布関数を用い

て計算される平均断面積に適合する共鳴パラメータの列，即ち，共鳴“はしご”⁽²¹⁾を発生させることにより，断面積が計算された。これ等の一連の断面積の計算及び式(1)と(2)の計算は，TIMS-1コード⁽²²⁾を用いて実行された。

このようにして作成された断面積の他に，SRACの基本ライブラリーの中には，(核分裂スペクトル+1/E+マックスウェル分布)に基づく多群標準スペクトルも用意されている。この標準スペクトルは，群数をあらかじめ縮約して格子計算時間を短縮する目的で用意されているものである。このように縮約されたライブラリーをユーザー・ライブラリーと呼ばれており，後述の全ての多群計算は，このユーザー・ライブラリーを出発点としている。

Table 1. Energy Group Structure of SRAC Public Library

(a) Fast Energy Group Structure

Group	Energy Range (eV)		Upper Velocity (m/sec)	Lethargy Upper	Width
	Upper	Lower			
1	0.10000E+8	0.77880E+7	0.43740E+8	0.0	0.25
2	0.77880E+7	0.60653E+7	0.38600E+8	0.25	0.25
3	0.60653E+7	0.47237E+7	0.34065E+8	0.50	0.25
4	0.47237E+7	0.36788E+7	0.30062E+8	0.75	0.25
5	0.36788E+7	0.28651E+7	0.26529E+8	1.00	0.25
6	0.28651E+7	0.22313E+7	0.23412E+8	1.25	0.25
7	0.22313E+7	0.17377E+7	0.20661E+8	1.50	0.25
8	0.17377E+7	0.13534E+7	0.18233E+8	1.75	0.25
9	0.13534E+7	0.10540E+7	0.16091E+8	2.00	0.25
10	0.10540E+7	0.82085E+6	0.14200E+8	2.25	0.25 *
11	0.82085E+6	0.63928E+6	0.12532E+8	2.50	0.25
12	0.63928E+6	0.49787E+6	0.11059E+8	2.75	0.25
13	0.49787E+6	0.38774E+6	0.97596E+7	3.00	0.25
14	0.38774E+6	0.30197E+6	0.86129E+7	3.25	0.25
15	0.30197E+6	0.23518E+6	0.76008E+7	3.50	0.25
16	0.23518E+6	0.18316E+6	0.67077E+7	3.75	0.25
17	0.18316E+6	0.14264E+6	0.59195E+7	4.00	0.25
18	0.14264E+6	0.11109E+6	0.52240E+7	4.25	0.25
19	0.11109E+6	0.86517E+5	0.46101E+7	4.50	0.25
20	0.86517E+5	0.67380E+5	0.40684E+7	4.75	0.25 **
21	0.67380E+5	0.52475E+5	0.35904E+7	5.00	0.25
22	0.52475E+5	0.40868E+5	0.31685E+7	5.25	0.25
23	0.40868E+5	0.31828E+5	0.27962E+7	5.50	0.25
24	0.31828E+5	0.24788E+5	0.24676E+7	5.75	0.25
25	0.24788E+5	0.19305E+5	0.21777E+7	6.00	0.25
26	0.19305E+5	0.15034E+5	0.19218E+7	6.25	0.25
27	0.15034E+5	0.11709E+5	0.16960E+7	6.50	0.25
28	0.11709E+5	0.91188E+4	0.14967E+7	6.75	0.25
29	0.91188E+4	0.71017E+4	0.13208E+7	7.00	0.25
30	0.71017E+4	0.55308E+4	0.11656E+7	7.25	0.25
31	0.55308E+4	0.43074E+4	0.10287E+7	7.50	0.25
32	0.43074E+4	0.33546E+4	0.90779E+6	7.75	0.25
33	0.33546E+4	0.26126E+4	0.80112E+6	8.00	0.25
34	0.26126E+4	0.20347E+4	0.70699E+6	8.25	0.25
35	0.20347E+4	0.15846E+4	0.62391E+6	8.50	0.25
36	0.15846E+4	0.12341E+4	0.55060E+6	8.75	0.25
37	0.12341E+4	0.96112E+3	0.48590E+6	9.00	0.25
38	0.96112E+3	0.74852E+3	0.42881E+6	9.25	0.25
39	0.74852E+3	0.58295E+3	0.37842E+6	9.50	0.25
40	0.58295E+3	0.45400E+3	0.33396E+6	9.75	0.25
41	0.45400E+3	0.35357E+3	0.29472E+6	10.00	0.25
42	0.35357E+3	0.27536E+3	0.26009E+6	10.25	0.25
43	0.27536E+3	0.21445E+3	0.22952E+6	10.50	0.25
44	0.21445E+3	0.16702E+3	0.20255E+6	10.75	0.25
45	0.16702E+3	0.13007E+3	0.17875E+6	11.00	0.25 ***

Table 1 (continued)

46	0.13007E+3	0.10130E+3	0.15775E+6	11.25	0.25
47	0.10130E+3	0.78893E+2	0.13921E+6	11.50	0.25
48	0.78893E+2	0.61442E+2	0.12286E+6	11.75	0.25
49	0.61442E+2	0.47851E+2	0.10842E+6	12.00	0.25
50	0.47851E+2	0.37266E+2	0.95680E+5	12.25	0.25
51	0.37266E+2	0.29023E+2	0.84437E+5	12.50	0.25
52	0.29023E+2	0.22603E+2	0.74516E+5	12.75	0.25
53	0.22603E+2	0.17604E+2	0.65760E+5	13.00	0.25
54	0.17604E+2	0.13710E+2	0.58033E+5	13.25	0.25
55	0.13710E+2	0.10677E+2	0.51214E+5	13.50	0.25
56	0.10677E+2	0.83153E+1	0.45196E+5	13.75	0.25
57	0.83153E+1	0.64760E+1	0.39885E+5	14.00	0.25
58	0.64760E+1	0.50435E+1	0.35199E+5	14.25	0.25
59	0.50435E+1	0.39279E+1	0.31063E+5	14.50	0.25
60	0.39279E+1	0.30590E+1	0.27413E+5	14.75	0.25
61	0.30590E+1	0.23824E+1	0.24192E+5	15.00	0.25
62	0.23824E+1	0.18554E+1	0.21349E+5	15.25	0.25
63	0.18554E+1	0.16374E+1	0.18841E+5	15.50	0.125
64	0.16374E+1	0.14450E+1	0.17699E+5	15.625	0.125
65	0.14450E+1	0.12752E+1	0.16627E+5	15.750	0.125
66	0.12752E+1	0.11253E+1	0.15619E+5	15.875	0.125
67	0.11253E+1	0.99312E+0	0.14673E+5	16.000	0.125
68	0.99312E+0	0.87643E+0	0.13784E+5	16.125	0.125
69	0.87643E+0	0.77344E+0	0.12949E+5	16.250	0.125
70	0.77344E+0	0.68256E+0	0.12164E+5	16.375	0.125
71	0.68256E+0	0.60236E+0	0.11427E+5	16.500	0.125
72	0.60236E+0	0.53158E+0	0.10735E+5	16.625	0.125
73	0.53158E+0	0.46912E+0	0.10085E+5	16.750	0.125
74	0.46912E+0	0.41399E+0	0.94736E+5	16.875	0.125

* Lower boundary of Fast Fission Range

** Lower boundary of Smooth Range

*** Lower boundary of Resonance I Range

(b) Thermal Energy Group Structure

Group	Energy Range (eV)		Upper Velocity (m/sec)	Lethargy	
	Upper	Lower		Upper	Width
1	0.39279E+1	0.30590E+1	0.27413E+5	14.75	0.25
2	0.30590E+1	0.23824E+1	0.24192E+5	15.00	0.25
3	0.23824E+1	0.18554E+1	0.21349E+5	15.25	0.25
4	0.18554E+1	0.16374E+1	0.18841E+5	15.50	0.125
5	0.16374E+1	0.14450E+1	0.17699E+5	15.625	0.125
6	0.14450E+1	0.12752E+1	0.16627E+5	15.750	0.125
7	0.12752E+1	0.11254E+1	0.15619E+5	15.875	0.125
8	0.11254E+1	0.99312E+0	0.14673E+5	16.000	0.125
9	0.99312E+0	0.87642E+0	0.13784E+5	16.125	0.125
10	0.87642E+0	0.77344E+0	0.12949E+5	16.250	0.125
11	0.77344E+0	0.68256E+0	0.12164E+5	16.375	0.125
12	0.68256E+0	0.60236E+0	0.11427E+5	16.500	0.125
13	0.60236E+0	0.53158E+0	0.10735E+5	16.625	0.125
14	0.53158E+0	0.46912E+0	0.10085E+5	16.750	0.125
15	0.46912E+0	0.41399E+0	0.94737E+4	16.875	0.125

Table 1 (continued)

16	0.41399E+0	0.38926E+0	0.88996E-4	17.000	0.0616
17	0.38926E+0	0.36528E+0	0.86297E-4	17.0616	0.0636
18	0.36528E+0	0.34206E+0	0.83597E-4	17.1252	0.0657
19	0.34206E+0	0.31961E+0	0.80896E-4	17.1909	0.0678
20	0.31961E+0	0.29792E+0	0.78196E-4	17.2587	0.0703
21	0.29792E+0	0.27699E+0	0.75496E-4	17.3290	0.0729
22	0.27699E+0	0.25683E+0	0.72796E-4	17.4019	0.0755
23	0.25683E+0	0.23742E+0	0.70097E-4	17.4774	0.0786
24	0.23742E+0	0.21878E+0	0.67396E-4	17.5560	0.0818
25	0.21878E+0	0.20090E+0	0.64696E-4	17.6378	0.0852
26	0.20090E+0	0.18378E+0	0.61996E-4	17.7230	0.0891
27	0.18378E+0	0.16743E+0	0.59296E-4	17.8121	0.0932
28	0.16743E+0	0.15183E+0	0.56597E-4	17.9053	0.0987
29	0.15183E+0	0.13700E+0	0.53896E-4	18.0031	0.1028
30	0.13700E+0	0.12293E+0	0.51196E-4	18.1059	0.1083
31	0.12293E+0	0.10963E+0	0.48496E-4	18.2142	0.1145
32	0.10963E+0	0.97080E-1	0.45797E-4	18.3287	0.1216
33	0.97080E-1	0.85397E-1	0.43096E-4	18.4503	0.1282
34	0.85397E-1	0.74276E-1	0.40420E-4	18.5785	0.1396
35	0.74276E-1	0.64017E-1	0.37696E-4	18.7181	0.1486
36	0.64017E-1	0.54520E-1	0.34996E-4	18.8667	0.1606
37	0.54520E-1	0.45785E-1	0.32296E-4	19.0273	0.1746
38	0.45785E-1	0.37813E-1	0.29596E-4	19.2019	0.1913
39	0.37813E-1	0.30602E-1	0.26897E-4	19.3932	0.2116
40	0.30602E-1	0.24154E-1	0.24196E-4	19.6048	0.2366
41	0.24154E-1	0.18467E-1	0.21497E-4	19.8414	0.2685
42	0.18467E-1	0.13543E-1	0.18796E-4	20.1099	0.3101
43	0.13543E-1	0.93805E-2	0.16097E-4	20.4200	0.3672
44	0.93805E-2	0.59804E-2	0.13396E-4	20.7872	0.4502
45	0.59804E-2	0.33423E-2	0.10696E-4	21.2374	0.5818
46	0.33423E-2	0.14663E-2	0.79965E-3	21.8192	0.8239
47	0.14663E-2	0.35238E-3	0.52965E-3	22.6431	1.4258
48	0.35238E-3	0.10000E-4	0.25965E-3	24.0689	3.5621
48L	0.10000E-4	*****	0.43738E-2	27.6310	*****

(c) Energy Group Structure for Ultra Fine Resonance Calculation

The energy group structure in the ultra fine group calculation performed by PEACO routine for the Resonance II range is prepared in the MCROSS library file as follows:

```

*****
Upper boundary energy      130.07 eV
Lower boundary energy     0.4139 eV
Uniform lethargy width    0.00125
Number of ultra fine groups 4600
    on cross section table
Number of fine energy groups
    on flux calculation      460
*****

```

2.2 多群実効断面積計算法

(a) Table-Look-Up法

式(2)で定義された遮蔽因子を直接内挿して実効断面積が求められる。燃料ピン内の重い共鳴核種に対しては、

$$\sigma_0 = \frac{1}{N} \sum_{j \neq \text{fuel}} \Sigma_j + \frac{a(1-c)}{1+(a-1)c} \frac{1}{N\ell} \quad (3)$$

ここで、 N は着目している共鳴核種の原子密度、 Σ_j は j 核種の無限希釈面積、 ℓ はピンの直径、 a 及び c は、それぞれ、Bell及びDancoff係数である。

重い共鳴核種以外に対しては、均質化した時の平均密度 \bar{N}_i 及び無限希釈全断面積 $\bar{\Sigma}_i$ を用いて、次の式で計算される。

$$\sigma_{0i} = \frac{1}{\bar{N}_i} \sum_{j \neq i} \bar{\Sigma}_j \quad (4)$$

次に述べるIR法の場合と同様に、 $f_x(\sigma_0, T)$ の内挿は、三次のスプライン関数を用いて実行される⁽²³⁾。

(b) IR法

この方法は、共鳴核種のみにも適用され、背景断面積は、次の式で与えられる。

$$\sigma_0 = \frac{1}{N} \sum_{j \neq \text{fuel}} \lambda_j \Sigma_j + \mu^* S, \quad (5)$$

ここで、 S は、非均質性を表す量で式(3)の右辺第二項で与えられる。 λ_j 及び μ^* は、IRパラメータで連立超越方程式を解いて得られる⁽²⁴⁾。

SRACシステムにおいては、IR法で取り扱うために共鳴パラメータが用意されているエネルギー範囲は、 $130.07 \text{ eV} \geq E \geq 0.4139 \text{ eV}$ で、この上限エネルギーから上では、上述のTable-Look-Up法が使用される。IR法は、共鳴物質を含む領域と減速材の二媒質からのみ成る格子に対して開発された手法であるので、IR法の使用に際しては格子のモデル化に関する問題が残る。

(c) 超詳細群による直接計算法

IR法の上述の適用範囲 $130.07 \text{ eV} \geq E \geq 0.4139$ で、非均質領域における実効共鳴断面積を厳密に計算するため、衝突確率を用いて中性子スペクトルを計算するPEACOルーチン⁽²⁵⁾がSRACシステムに組み込まれている。即ち、次の中性子減速方程式を直接解き実効断面積が計算される。

$$V_i \sum_i(u) \phi_i(u) = \sum_j P_{ji}(u) V_j S_j(u), \quad (6)$$

ここで添字 i, j は、領域番号を示し、 P_{ji} は、 j -領域で等方に散乱されエネルギー u になった中性子が、 i -領域で最初に衝突する確率であり、 $S_j(u)$ は減速中性子源を示す。その他の記号は慣例のものである。

ここで必要な超詳細群共鳴断面積は、核種及び温度についてあらかじめ用意しているものを用いる。さらに、超詳細群に対する多数回の衝突確率計算の効率を高めるため、あらかじめ定めた断面積値に対して用意した衝突確率の値を内挿する方法⁽²⁵⁾を採用している。現在SRACシステムにおいては、16種の格子形状の衝突確率の計算ができ、我々が出合うほとんどの格子配列を

取り扱えるようになっている。共鳴中性子束スペクトルの計算は、Kier⁽²⁶⁾によって開発された回帰法で行っている。計算されたスペクトルを荷重にして、必要な実効断面積及び平均中性子束スペクトルなどがユーザーの指定するユーザー・ライブラリーの群構造に従って求められる。

2.3 多群格子スペクトル計算法及び洩れの効果

上記の実効断面積計算法 (a) 及び (b) で計算された各媒質 (領域) の多群実効断面積を用いて、格子の均質化断面積の計算のための多群格子スペクトルが、(c)の場合同様、多群衝突確率法によって計算される。計算法 (c) が使われる場合でも、 $E \geq 130.07$ eVでは、(a)の方法によって得られる実効断面積によって、同様の計算が必要である。この場合、 $E \leq 130.07$ eVでは、必要な量は、既に (c)の方法によって得られている値に置き換えられる。

このようにして得られるスペクトルには、体系からの洩れの効果が考慮されていないので、それを断面積の縮約に用いるのには不適當である。この洩れを考慮するために、次のような方法が採用されている。

まず、群数を縮約することなく空間的にのみ平均操作を行って、多群均質断面積を計算する。次に、この断面積を使って、洩れをバックリングで考慮した P_i 或いは B_i 近似式で均質化された系の中性子束スペクトルを計算する。このようにして得られたスペクトルを ϕ_g^B とし、初めに計算されている格子内中性子束スペクトルを ϕ_{ig} (i は領域に対応)とすれば、洩れを考慮したスペクトル ϕ_{ig}^L は次の式で計算される。

$$\phi_{ig}^L = \phi_{ig} \cdot \phi_g^B / \bar{\phi}_g \quad (7)$$

$$\bar{\phi}_g \equiv \sum_i V_i \phi_{ig} / \sum_i V_i \quad (8)$$

ここで、洩れを考慮しても各群の格子内の相対的な中性子束分布は変わらないものと仮定している。

この中性子束スペクトルの再規格の操作によって、方法 (a) と (c) に基づくスペクトルがスムーズに結ばれることに注意すべきである。通常熱中性子炉の解析においては、このようにして求めたスペクトルで群縮約を行った後に、炉心計算に移る手順を取っている。以後のHCPWRの解析では、格子内中性子束スペクトルの再現性的を絞って議論を進めるので、縮約操作を必要としない。

3. モンテカルロ・コードVIMとの比較によるSRACシステムの計算精度の検討

SRACシステムのHCPWR格子系での計算精度を検討するため、中性子束スペクトル及び反応率比について、連続エネルギー・モンテカルロ・コードVIMとの比較計算を行った。後ほど詳しく議論するPROTEUS-LWHCR炉心の格子⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾をこの計算のための組成及び形状として選んだ。Fig.1に示してあるように、この格子は、二つの異なる燃料ピンから構成されているので、ここでは簡単のため、平均化された組成の燃料ピンを持つ単位六方格子セルを考えて検討を行った。これらの組成密度は、Table 2に示してある。この計算は、熱群20群、速中性子群66群、計86群で行った。群構造は、Table 3に示してある。次の章の実験解析もこの群構造で行った。

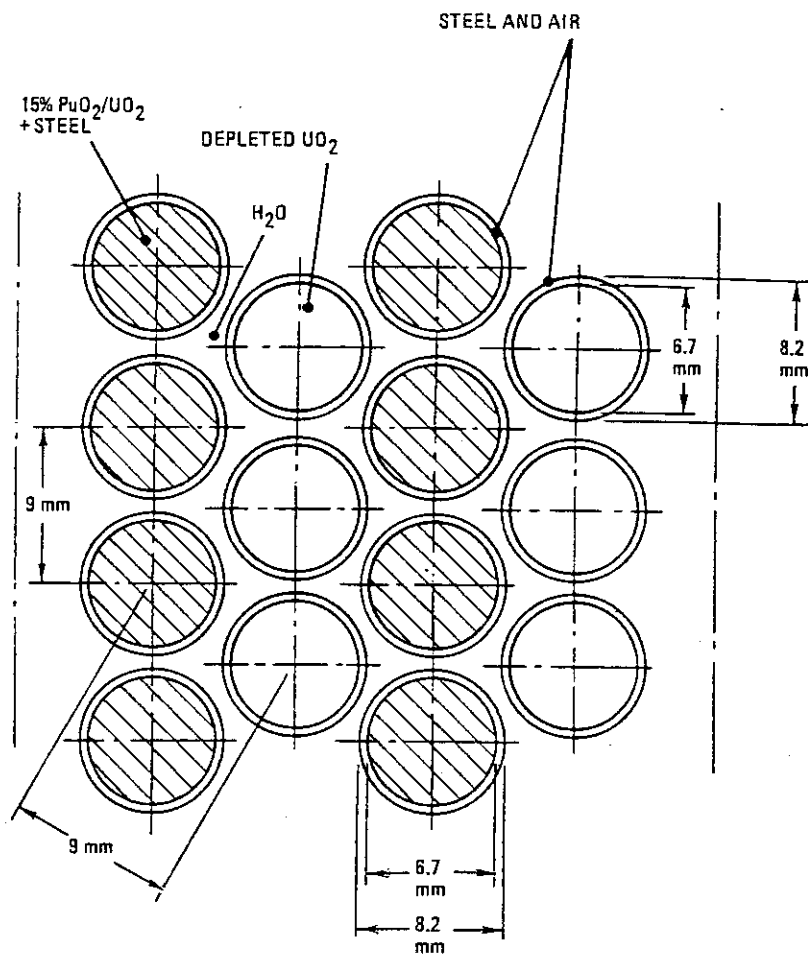


Fig.1 Test-Lattice for PROTEUS-LWHCR Cores 1-3(Refs. (10)-(12))

Table 2 Atomic number densities ($\times 10^{30} m^{-3}$) for test-lattice materials in PROTEUS Cores 1-3 (Refs. (10)-(12))

<u>Material 1 (Fuel 1, 15 % PuO₂/UO₂ + Steel):</u>			
²³⁵ U ..7.781-5*	²³⁸ U ..1.839-2	²³⁹ Pu..2.580-3	²⁴⁰ Pu..5.699-4
²⁴¹ Pu..5.675-5	²⁴² Pu..1.256-5	²⁴¹ Am..3.833-5	O ..4.346-2
H ..2.005-4	Al..3.683-4	Fe..2.600-3	Cr..6.843-4
Ni..3.301-4	Mn..5.376-5	Si..3.286-5	Mo..8.123-6
<u>Material 2 (Fuel 2, Depl. UO₂):</u>			
²³⁵ U ..9.851-5	²³⁸ U ..2.328-2	O ..4.677-2	Al..3.827-4
<u>Material 3 (Clad, Steel + Air + Al):</u>			
Al..6.080-3	Fe..3.125-2	Cr..8.536-3	Ni..5.118-3
Mn..1.001-3	Mo..7.354-4	Si..8.124-4	N ..1.323-5
<u>Material 4 (Moderator):</u>			
<u>Core 1 (H₂O at 32 °C):</u>	H ..6.652-2	O .. 3.326-2	
<u>Core 2 (Air/Al Smear, 37 °C):</u>	N ..3.8-5	O .. 1.0-5	Al..8.1-4
<u>Core 3 (Dowtherm, 35 °C):</u>	H ..3.824-2	C .. 4.578-2	O ..2.832-3

* to be read as 7.781×10^{-5}

Table 3 Energy Group Structure of User Library.

Total number of users fast groups 66
 Total number of users thermal groups 20

group	E _{upper} (ev)	ΔU	group	E _{upper} (ev)	ΔU
<<<< fast >>>>			45	0.16702E+03	0.2500
1	0.10000E+08	0.2500	46	0.13007E+03	0.2500
2	0.77880E+07	0.2500	47	0.10130E+03	0.2500
3	0.60653E+07	0.2500	48	0.78893E+02	0.2500
4	0.47237E+07	0.2500	49	0.61442E+02	0.2500
5	0.36788E+07	0.2500	50	0.47851E+02	0.2500
6	0.28651E+07	0.2500	51	0.37266E+02	0.2500
7	0.22313E+07	0.2500	52	0.29023E+02	0.2500
8	0.17377E+07	0.2500	53	0.22603E+02	0.2500
9	0.13534E+07	0.2500	54	0.17604E+02	0.2500
10	0.10540E+07	0.2500	55	0.13710E+02	0.2500
11	0.82085E+06	0.2500	56	0.10677E+02	0.2500
12	0.63928E+06	0.2500	57	0.83153E+01	0.2500
13	0.49787E+06	0.2500	58	0.64760E+01	0.2500
14	0.38774E+06	0.2500	59	0.50435E+01	0.2500
15	0.30197E+06	0.2500	60	0.39279E+01	0.2500
16	0.23518E+06	0.2500	61	0.30590E+01	0.2500
17	0.18316E+06	0.2500	62	0.23824E+01	0.2500
18	0.14264E+06	0.2500	63	0.18554E+01	0.2500
19	0.11109E+06	0.2500	64	0.14450E+01	0.2500
20	0.86517E+05	0.2500	65	0.11253E+01	0.2500
21	0.67380E+05	0.2500	66	0.87643E+00	0.2500
22	0.52475E+05	0.2500	<<<< thermal >>>>		
23	0.40868E+05	0.2500	67	0.68256E+00	0.1250
24	0.31828E+05	0.2500	68	0.60236E+00	0.1250
25	0.24788E+05	0.2500	69	0.53158E+00	0.1250
26	0.19305E+05	0.2500	70	0.46912E+00	0.1250
27	0.15034E+05	0.2500	71	0.41399E+00	0.1252
28	0.11709E+05	0.2500	72	0.36528E+00	0.1252
29	0.91188E+04	0.2500	73	0.31961E+00	0.1432
30	0.71017E+04	0.2500	74	0.27699E+00	0.1541
31	0.55308E+04	0.2500	75	0.23742E+00	0.1670
32	0.43074E+04	0.2500	76	0.20090E+00	0.1823
33	0.33546E+04	0.2500	77	0.16743E+00	0.2006
34	0.26126E+04	0.2500	78	0.13700E+00	0.2228
35	0.20347E+04	0.2500	79	0.10963E+00	0.2498
36	0.15846E+04	0.2500	80	0.85397E-01	0.2882
37	0.12341E+04	0.2500	81	0.64017E-01	0.3352
38	0.96112E+03	0.2500	82	0.45785E-01	0.4029
39	0.74852E+03	0.2500	83	0.30602E-01	0.5051
40	0.58295E+03	0.2500	84	0.18467E-01	0.6773
41	0.45400E+03	0.2500	85	0.93805E-02	1.0320
42	0.35357E+03	0.2500	86	0.33423E-02	5.8117
43	0.27536E+03	0.2500		1.00000E-05	
44	0.21445E+03	0.2500			

3.1 共鳴エネルギー領域の無限稀釈断面積の比較

現在入手している VIM コード⁽⁸⁾の核データ・ライブラリーは、ENDF/B-4に基づいて作成されており、しかも 300°K に対して用意されているに過ぎない。このため、SRAC システムによる計算も ENDF/B-4 から作成されたライブラリーを用いて行った。重い共鳴核種については、同じ核データを用いても共鳴断面積の処理方法によって共鳴断面積の値及びエネルギー依存性が異なることがあるといわれている。それ故、両コードによる実効断面積の検討を行う前に、重要共鳴核種である ^{238}U 及び ^{239}Pu について、両ライブラリーの断面積のエネルギー依存性及び計算に用いた群構造に対する無限稀釈断面積の比較を行った。ここで、VIM コードの無限稀釈断面積は、水素原子又は炭素原子だけから成る媒質の中に着目している共鳴核種を無限に薄めることにより求めた。

分離共鳴エネルギー領域 ($^{238}\text{U}; E \leq 4 \text{ KeV}$, $^{239}\text{Pu}; E \leq 301 \text{ eV}$) においては、二つの基本ライブラリーの断面積のエネルギー依存性の差違は、線形目盛りでプロットしても、共鳴ピークの極く近傍を除いては、区別できない程度のものであった。無限稀釈断面積の比較は、Fig. 2 及び 3 でなされている。 ^{238}U の 6.67 eV 共鳴を含む群では、VIM コードの統計誤差に比べて有意な差があるようにも見られるが、一般的にはこの領域では両者のライブラリーの本質的な差はないと結論することができる。

非分離共鳴領域 ($4 \text{ KeV} \leq E \leq 45 \text{ KeV}$; ^{238}U , $301 \text{ eV} \leq E \leq 25 \text{ KeV}$; ^{239}Pu) においては、VIM コード及び SRAC システムの断面積の作成方法は、それぞれ異なる統計的手法に基づいている。即ち、VIM コードでは、確率表手法⁽²⁷⁾が用いられており、指定されたエネルギー点の周りのエネルギー範囲で用いられるべき断面積の確率分布から断面積の確率表を作成し、それを基にして乱数を引くことにより断面積が求められている。一方、SRAC システムでは、着目しているエネルギー範囲に渡って、共鳴パラメータの従う確率分布に基づき一連の共鳴パラメータの“はしご”⁽²¹⁾を発生させることによって非分離断面積が計算されている。後者で共鳴パラメータから計算されるエネルギー平均断面積が、パラメータに対する分布関数から計算される平均断面積と等しくなるように“はしご”を選んだとすれば、両者の無限稀釈断面積は等しくなるはずである。しかし、Figs. 2 及び 3-(b) から見られるように、この領域での両者の無限稀釈断面積の間の差はかなり著しく、 ^{238}U 及び ^{239}Pu 共に SRAC システムの値が相対的に小さい。この差違については、現在明確な結論は得られていないが、SRAC の断面積を作る際、断面積に対する実験値又は解析的に得られる平均断面積を充分再現するように共鳴列の“はしご”が選ばれてない可能性が考えられる。この非分離領域の取り扱いの違いから来る断面積の差違は、VIM コードと SRAC システムから得られる積分量の間の差違として、直接表われることが次に示される。

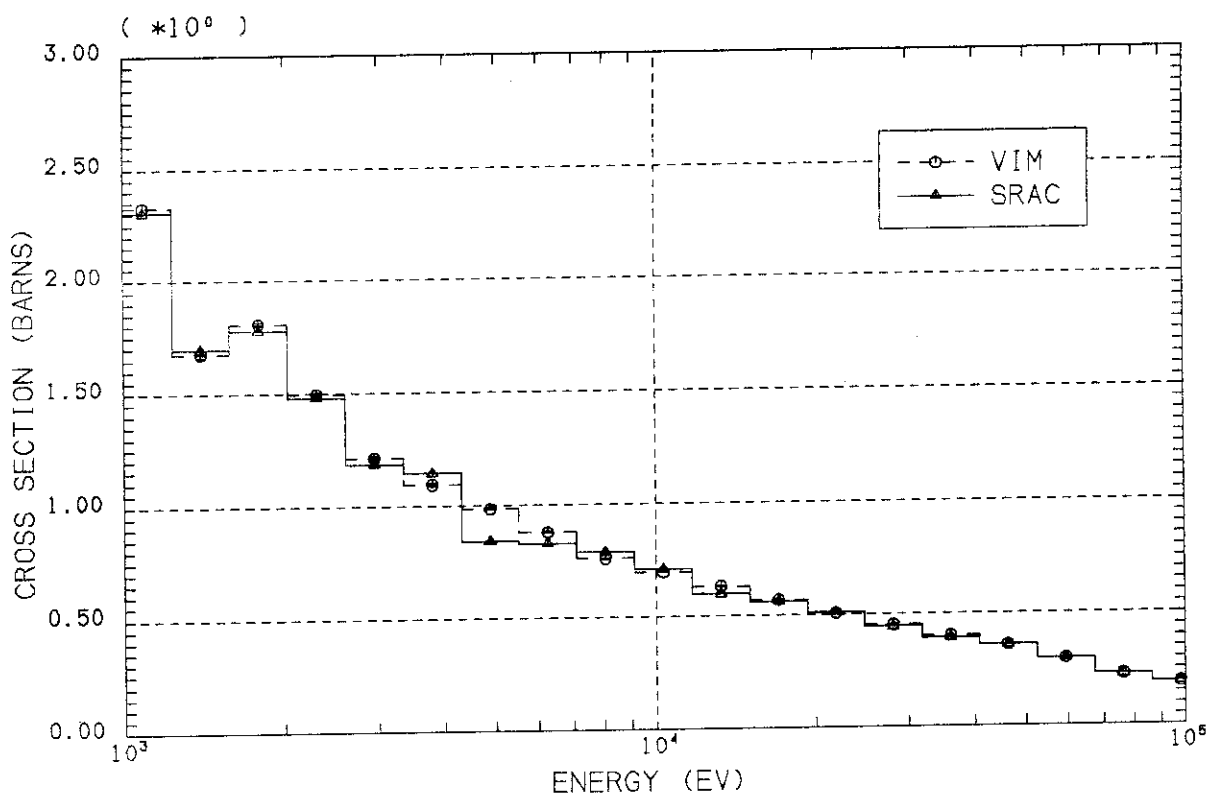
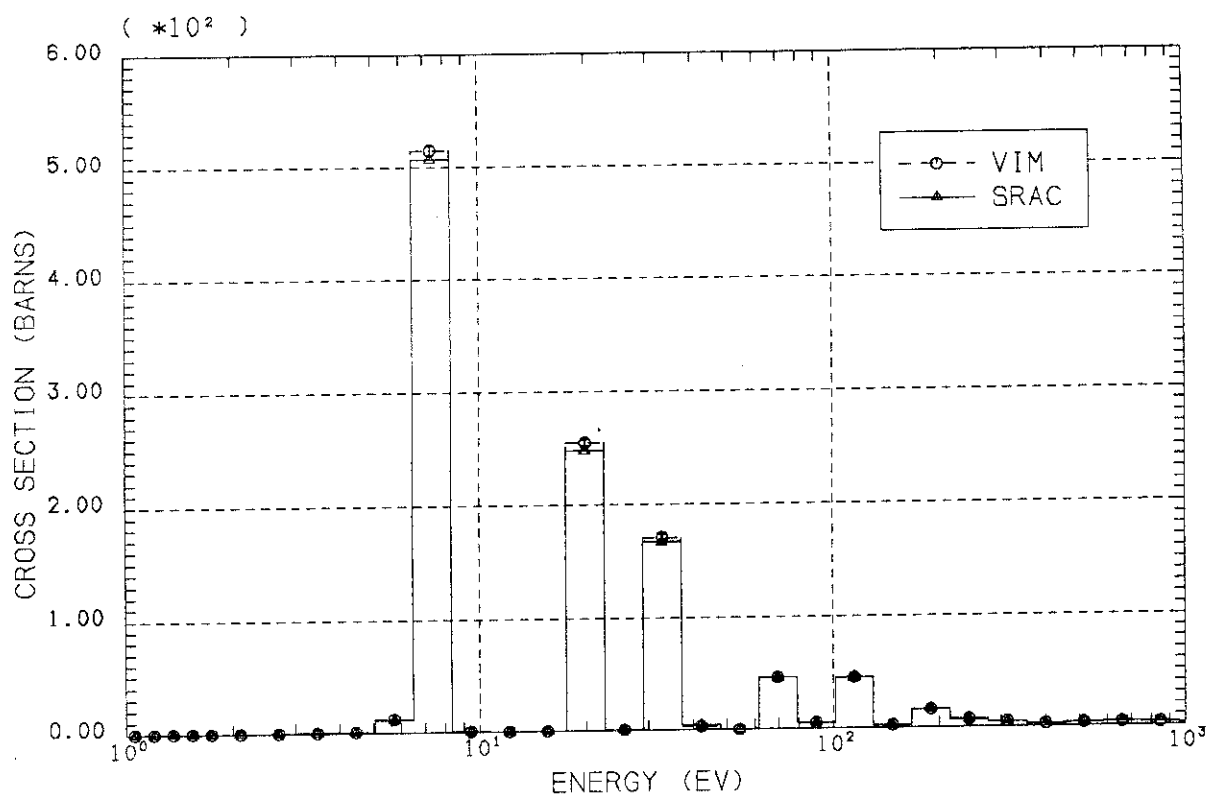


Fig.2 Infinite Dilution Capture Cross Section of ²³⁸U
(ENDF/B-4) (VIM: Moderator; Carbon, History; 60000)

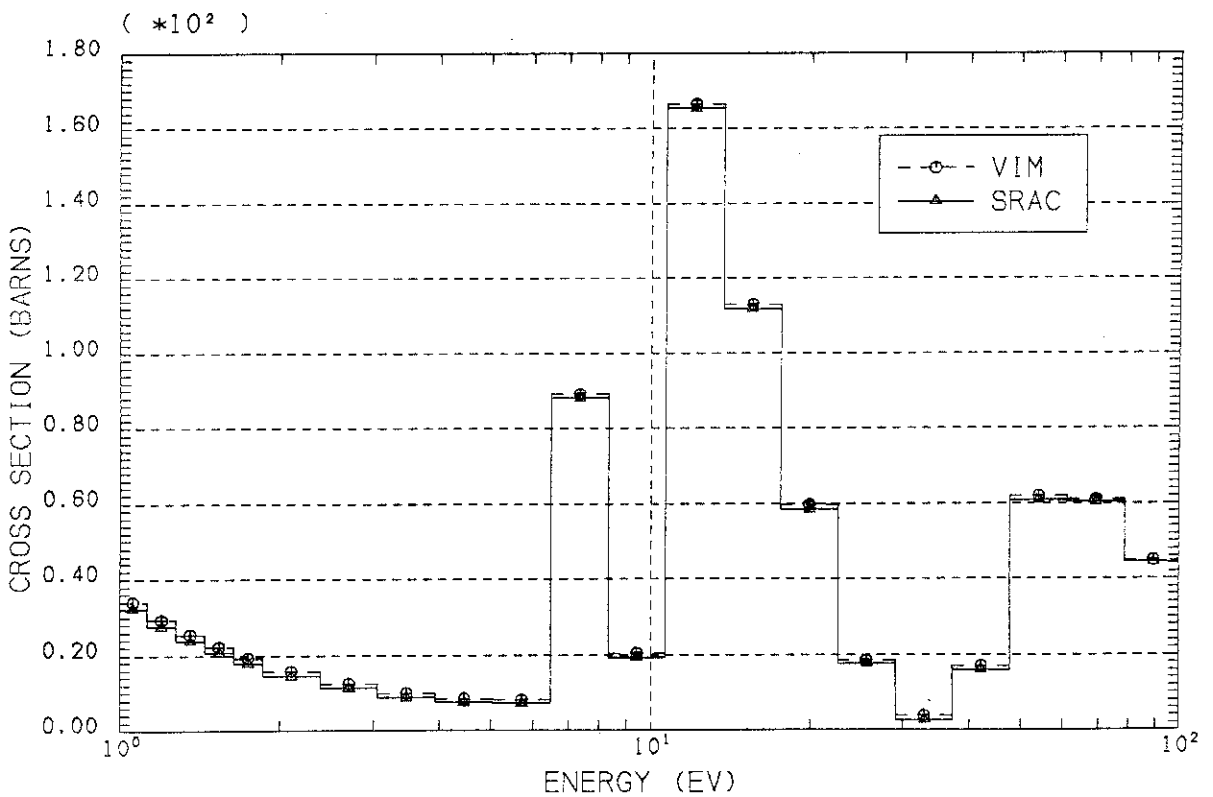
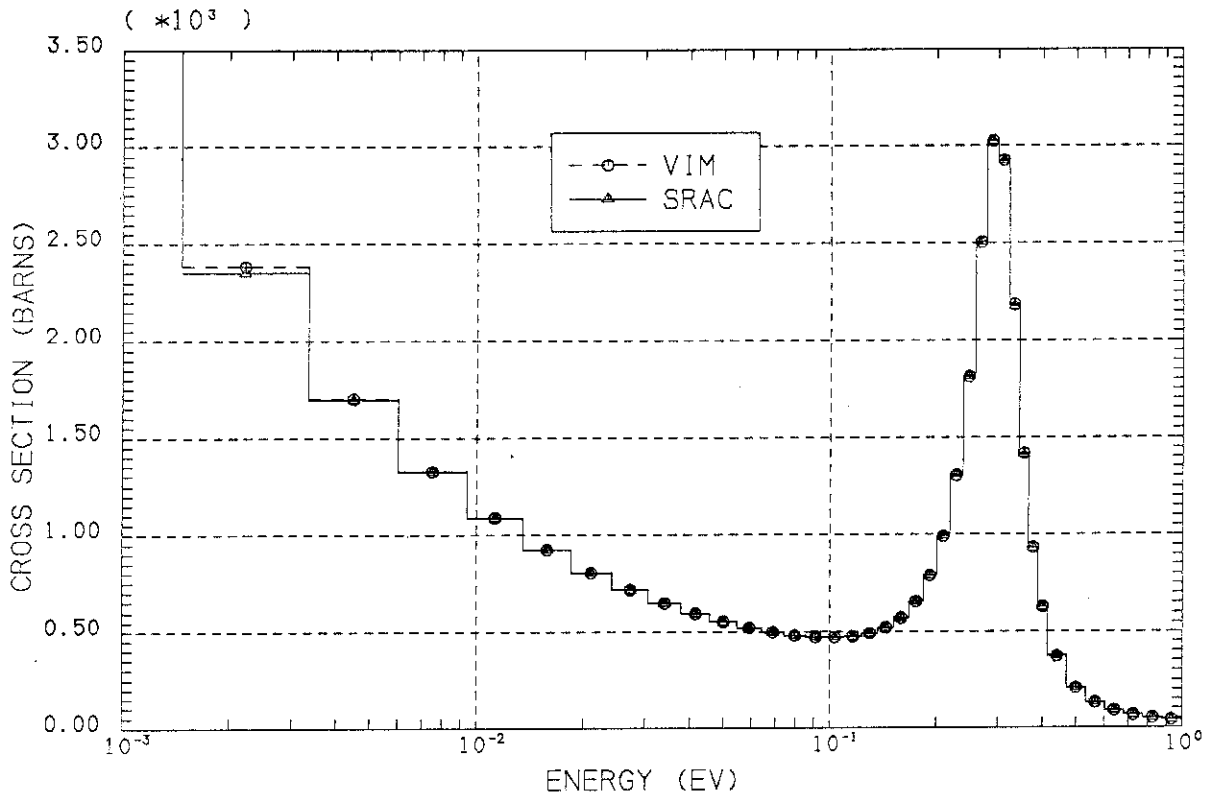


Fig.3-(a) Infinite Dilution Fission Cross Section of ^{239}Pu
 (ENDF/B-4) (VIM: Moderator; Carbon, History; 60000)

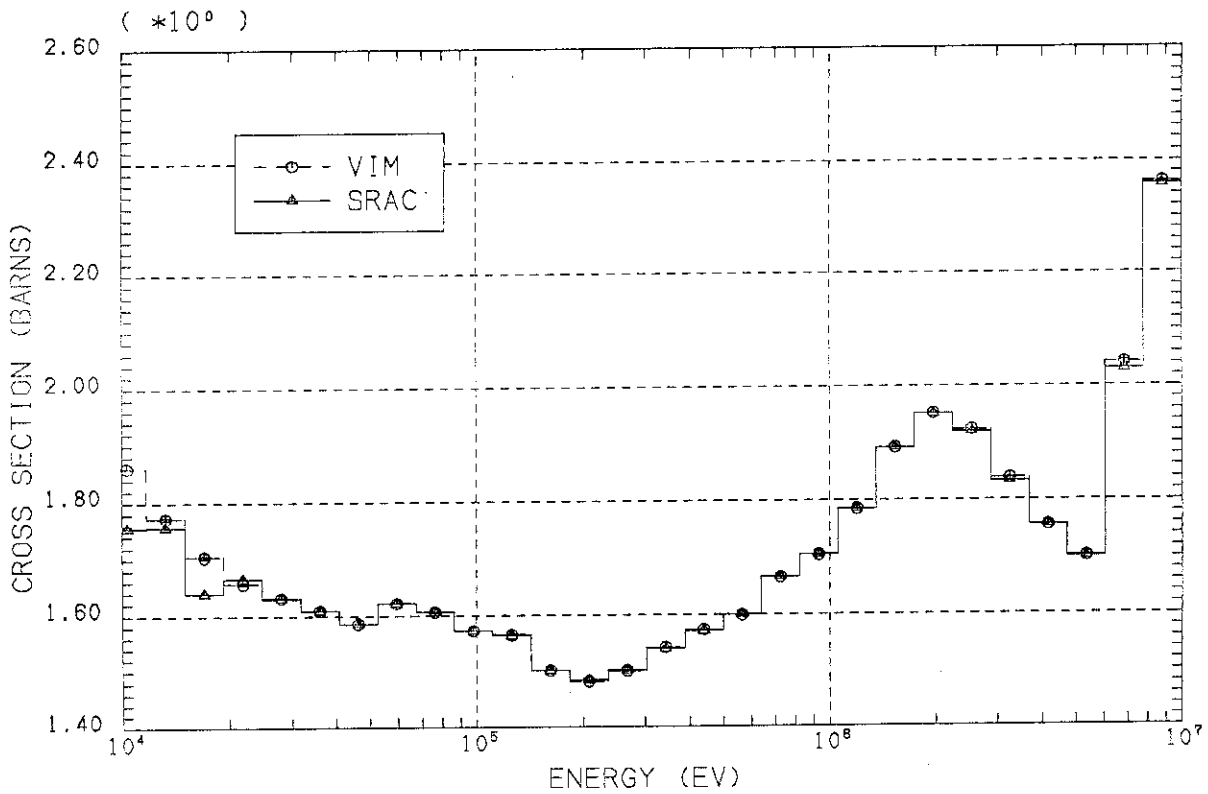
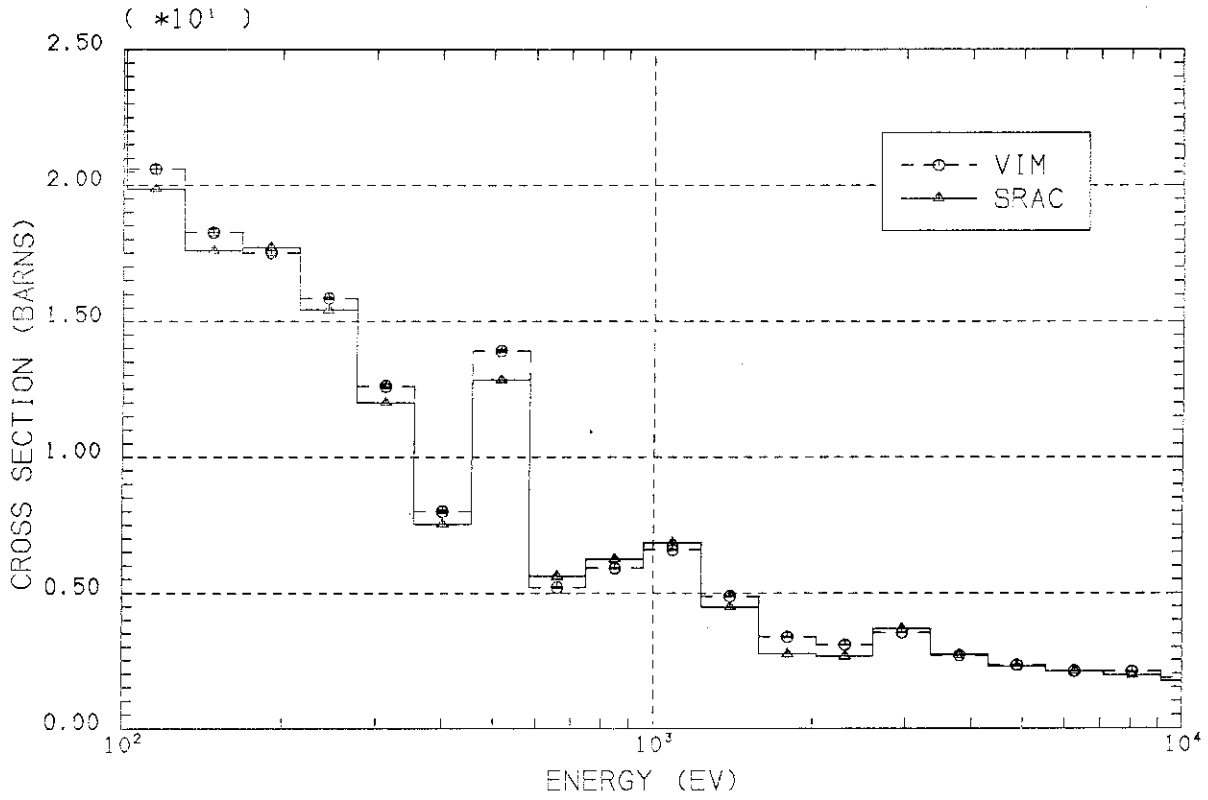


Fig.3-(b) Infinite Dilution Fission Cross Section of ^{239}Pu
(ENDF/B-4) (VIM: Moderator: Carbon, History: 60000)

3.2 実効断面積及び反応率の比較

PROTEUS-LWHCRの二種類の燃料ピンの平均化した組成を持つ無限長燃料ピンから成る六方格子($B^2=0$)において、VIMコードとSRACシステムから得られる実効断面積及び反応率分布の比較を行った。Figs. 4~9には、 ^{238}U の吸収及び ^{239}Pu の分裂に対する実効断面積が、ボイド率0, 42.5及び100%の場合にプロットされている。ここで、ボイド率100%の場合においては、低エネルギー領域($E \leq 1\text{KeV}$)が重要でないうえに、VIMコードの統計誤差が大きいため、プロットは省略されている。SRACシステムのPEACOルーチンで取り扱われる130eV以下のエネルギー範囲では、VIMコードとPEACOルーチンによる結果の一致は極めて良好であるが、IR法及びTable-Look-Up法による結果はかなり悪く、重要な ^{238}U の6.67eV共鳴レベルを含む群では、20%近くの誤差が見られる。体積比が1.5~2程度の通常の軽水炉では、IR法による誤差は高々数%で、このように大きな誤差がもたらされると指摘されたことがない。これまでのIR法等の解析的手法の精度の検証は、HCPWRほどに中性子吸収が多くない全体的なスペクトルが $1/E$ に近いような体系で行われたに過ぎなかったからであろう。ボイド率が小さい場合においても、このエネルギー領域における ^{238}U の吸収の相対割合が大きいため、簡便なTable-Look-Up法などによらず、詳細なスペクトル計算によって実効断面積を計算する必要があることを示している。

一方、この上のエネルギー領域($E \geq 130\text{eV}$)では、前節で指摘されたVIMコードとSRACシステムの非分離共鳴断面積の作成法に直接起因すると思われる差違が実効断面積の間に見られる。この領域では、Table-Look-Up法のみがSRACシステムに組み込まれていることに注意すべきである。さらに、 ^{238}U の無限稀釈と実効断面積を比較してみると、このTable-Look-Up法は、VIMコードに比べて、実効断面積を計算する際の共鳴遮蔽因子を過少評価する傾向がある。この原因の一つは、減速材の減速項にNR近似をして求めた遮蔽因子を減速材の少ないHCPWR格子に適用したことに帰することができるかもしれない。因に、JFS-3-J2高速炉用群定数セット⁽²⁸⁾の作成の際には、質量30の減速材が減速項を評価するのに仮定された。

Fig. 10には、反応率のエネルギー分布のボイド率依存性を見るために、VIMコードで計算された ^{238}U の吸収及び ^{239}Pu の分裂に対するエネルギー群の反応率がプロットされている。ここで、ボイド率0, 42.5及び100%の場合を考えているのは、後述するPROTEUS炉におけるボイド実験がこれら3点の値に対して行われたためである。これらのグラフから、ボイド率50%から100%の間に反応率のエネルギー分布が急激に変化することが分る。既ち、この間に、中性子スペクトルが中速系から高速系に変化しており、両系の炉物理特性は、本質的に異っているものと考えられる。それ故、中間点に少なくとも、もう1点の実験値が必要であろう。

Figs. 11~15では、上の反応率に対して、SRACシステムに組み込まれている3つの実効断面積計算法で計算された値が、VIMコードとの比較において、プロットされている。一般的に、低エネルギー領域においては、実効断面積の場合に比べて両者の一致が悪い。この理由は、実効断面積の計算には、分子分母に中性子束が現われるので、中性子束の誤差が入りにくいからである。高エネルギー領域においては、実効断面積の場合と同様に、無限稀釈断面積の差違が見られ、特に100%ボイド反応率分布には、スペクトルの比重の高い10KeV前後でその差違が明確に現われ

ている。

さらに、100%ボイドの反応率分布において、30KeV近傍で極端に異なる値が見られる。この理由は、SRACシステムの ^{26}Fe の27.7KeVの共鳴レベルに対するシャープな巨大散乱断面積の除去断面積が精度良く評価されていないことを示していると考えられる。より精度の高いHCPWRの核特性評価のためには、高速炉での研究成果を取り入れて、その他の中重核種の共鳴散乱断面積の取り扱い精度を上げる努力をする必要のあることを示している。

Table4には、ここで考えている無限格子に対して計算された反応率比(C8/F9, F8/F9, F5/F9, F1/F9)及び k_{∞} の値が比較されている。SRACシステムにおいてはPEACOルーチンによる精度が最も高いものとして両者を比較すると、 k_{∞} で0.4~0.7%程度SRACの値が過少評価されている。反応比では、F8/F9~+3%, F5/F9~+1%程度の相違が見られる。SRACシステムの ^{238}U の吸収及び ^{239}Pu の分裂に対する無限稀釈断面積が非分離共鳴領域で相対的に小さく見積られていることを上で指摘したが、これらの積分量の差違は、主に2つのコードの基本断面積の差から起因しているものと考えられる。既に、両者の非分離共鳴断面積の差違が無くなれば、積分量間の差違の大部分は解消するものと考えている。

この節の結論として、SRACシステムに格子計算のために用意されている計算手法をHCPWRに適用する際には、本質的な問題がないと考えられる。しかし、HCPWRの特色である共鳴エネルギー領域の取り扱いに関して、次の3点の見直しを行って早期に解決を図る必要があると考えられる。

- i) 非分離共鳴領域の“はしご”が適正に選択されているか?^{注)}
- ii) HCPWRを扱うのに、共鳴遮蔽因子を計算するときに減速材の減速をNR近似で取り扱うのが合理的か?
- iii) PEACOルーチンで取り扱うエネルギー範囲は、 $E \leq 130 \text{ eV}$ で充分か?

高速炉の格子計算においては、SRACシステムと同様の衝突確率法に基づく多群法の結果は、固有値で $\pm 0.2\%$ k , 反応率で $\pm 1\%$ 程度でVIMコードと一致していることを考え合せると、ここで示されたSRACシステムの精度は充分でないかもしれない。さらに、ボイド反応度などに対して高い精度が必要な場合には、中重核種の巨大共鳴散乱断面積にも適当な考慮を払う必要があろう。また、SRACではF8/F9が常に高く評価されることから、SRACライブラリーの核分裂スペクトル及び ^{238}U の核分裂断面積も検討する必要があるだろう。

注) その後のSUPERTOGコード²⁹⁾との比較・検討の結果、SRACシステムのライブラリー及びJFS-3-J2²⁸⁾に用いられている“はしご”が正しく評価されていないことが明らかになった³⁰⁾。これについては、4.3節で議論することにする。

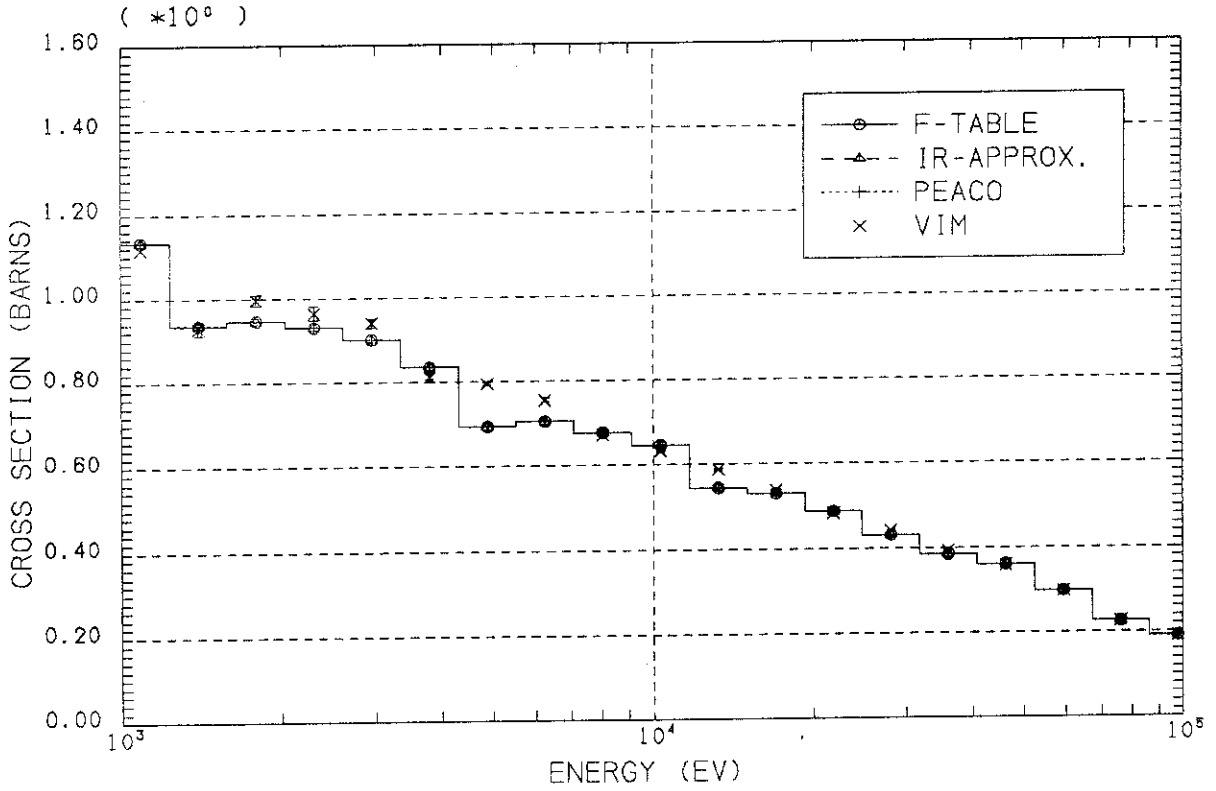
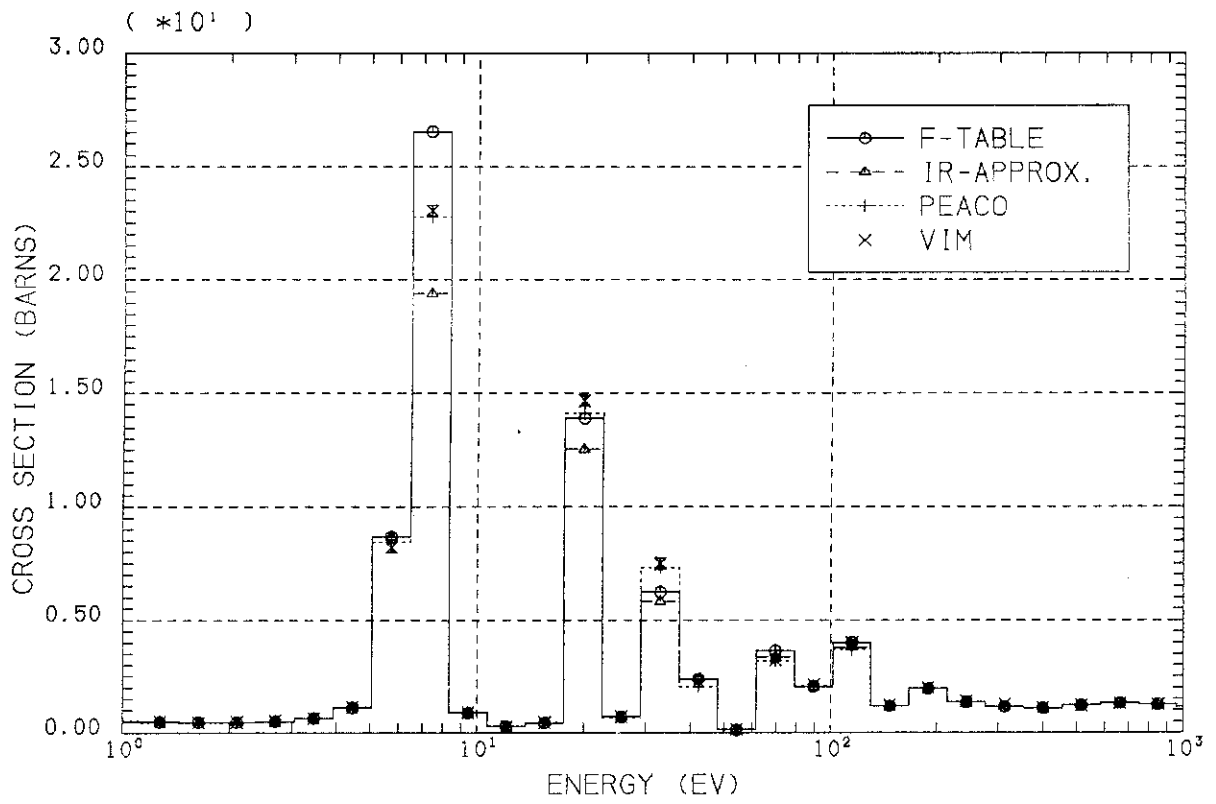


Fig.4 Comparison of Effective Capture Cross Section of ^{238}U for 0% Void

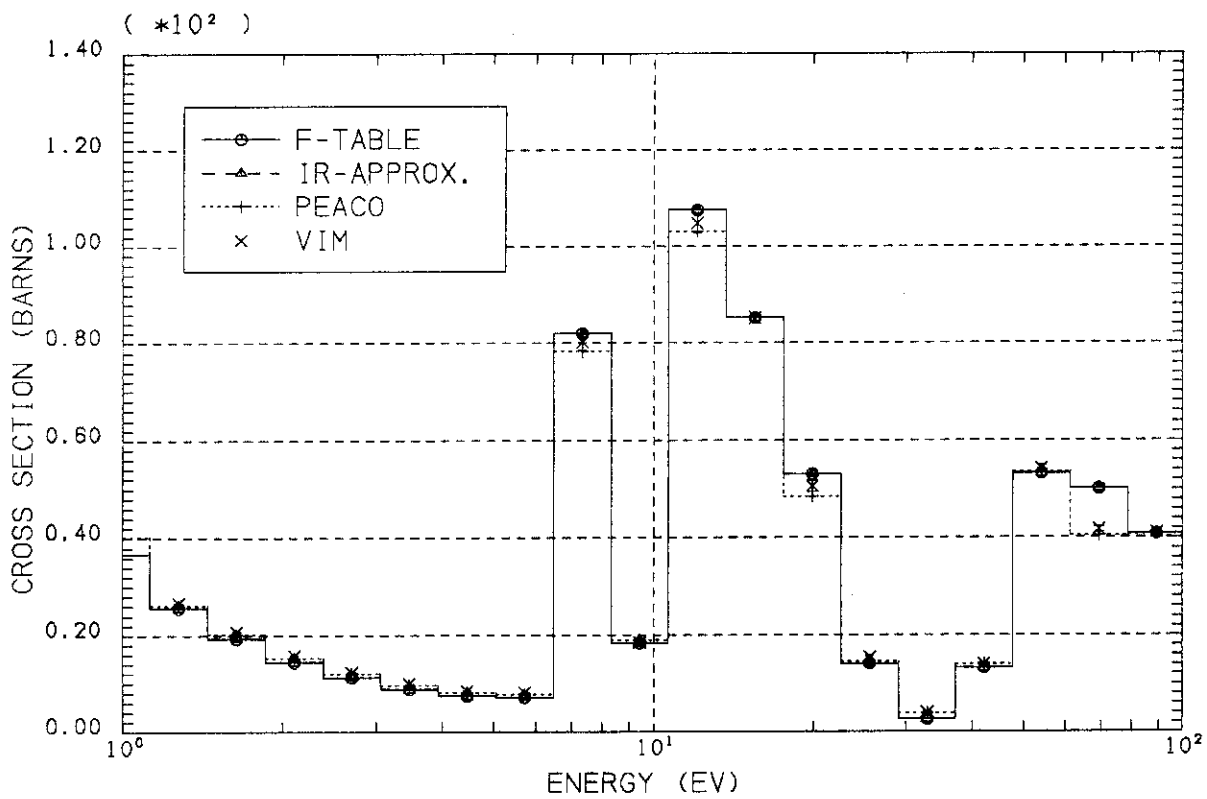
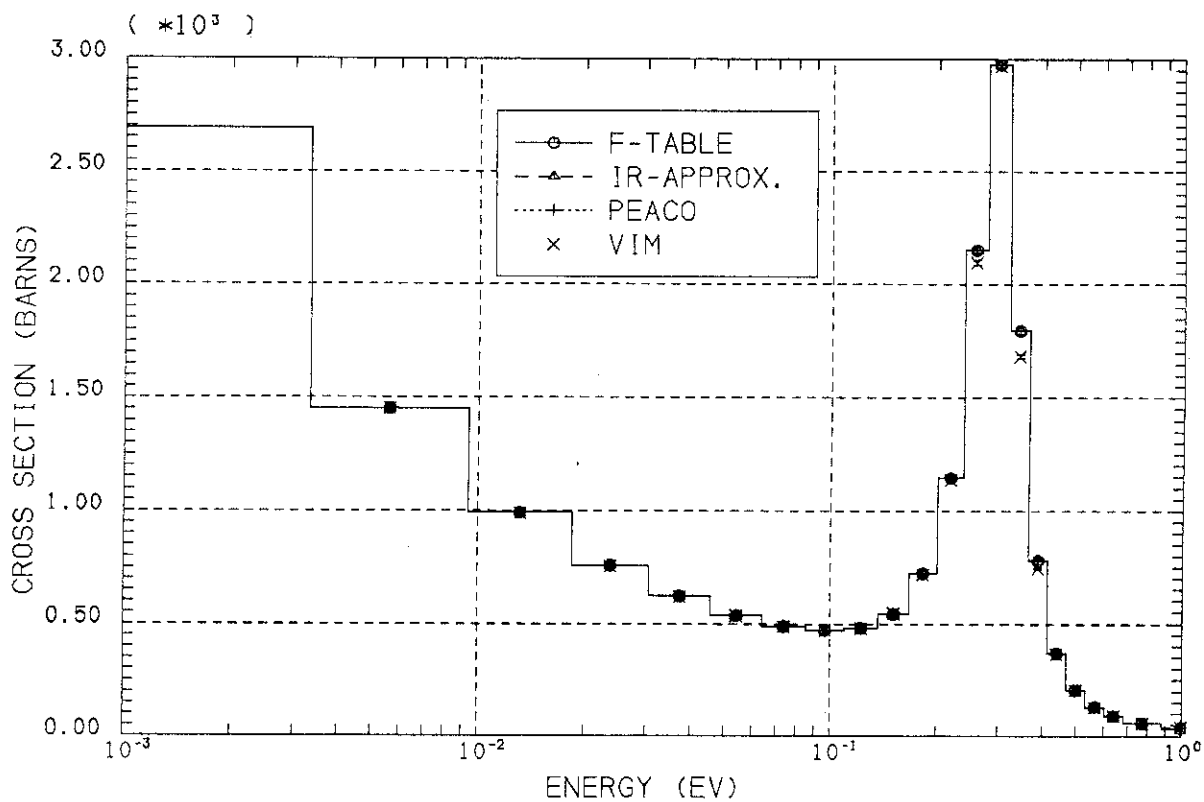


Fig.5-(a) Comparison of Effective Fission Cross Section of ²³⁹Pu for 0% Void

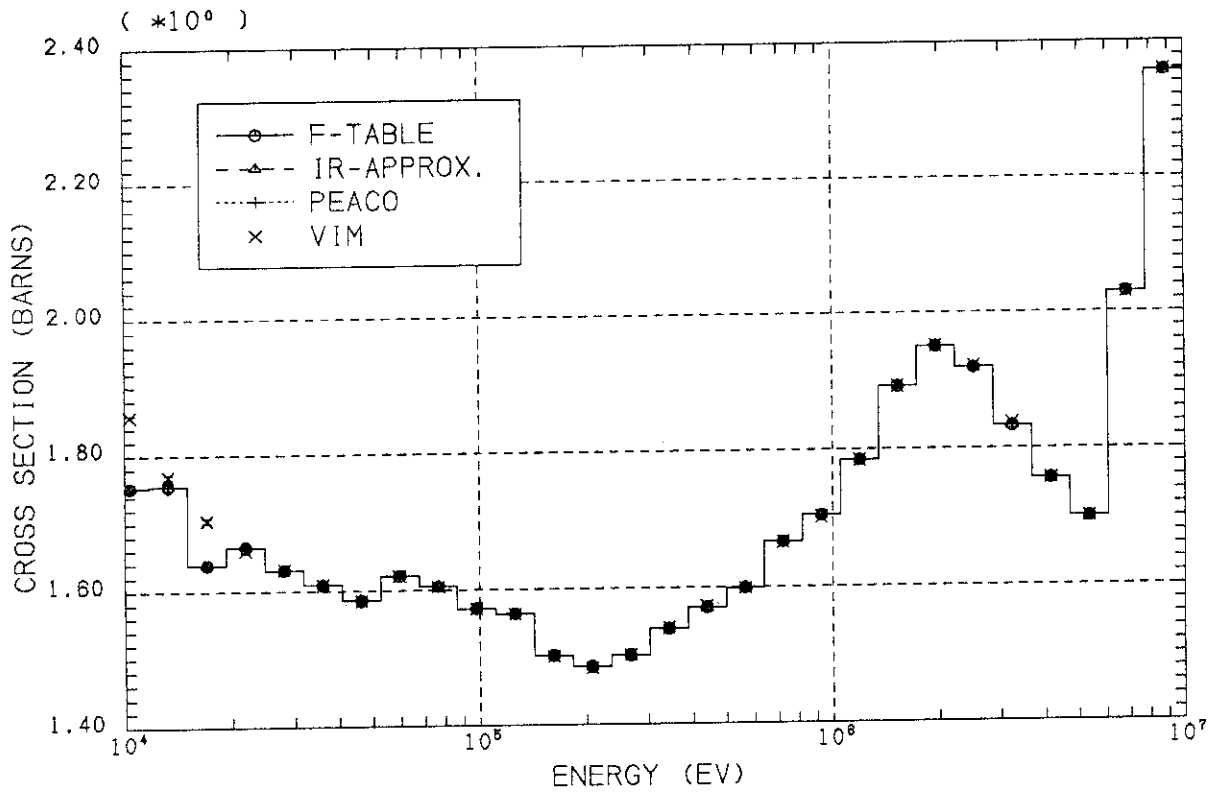
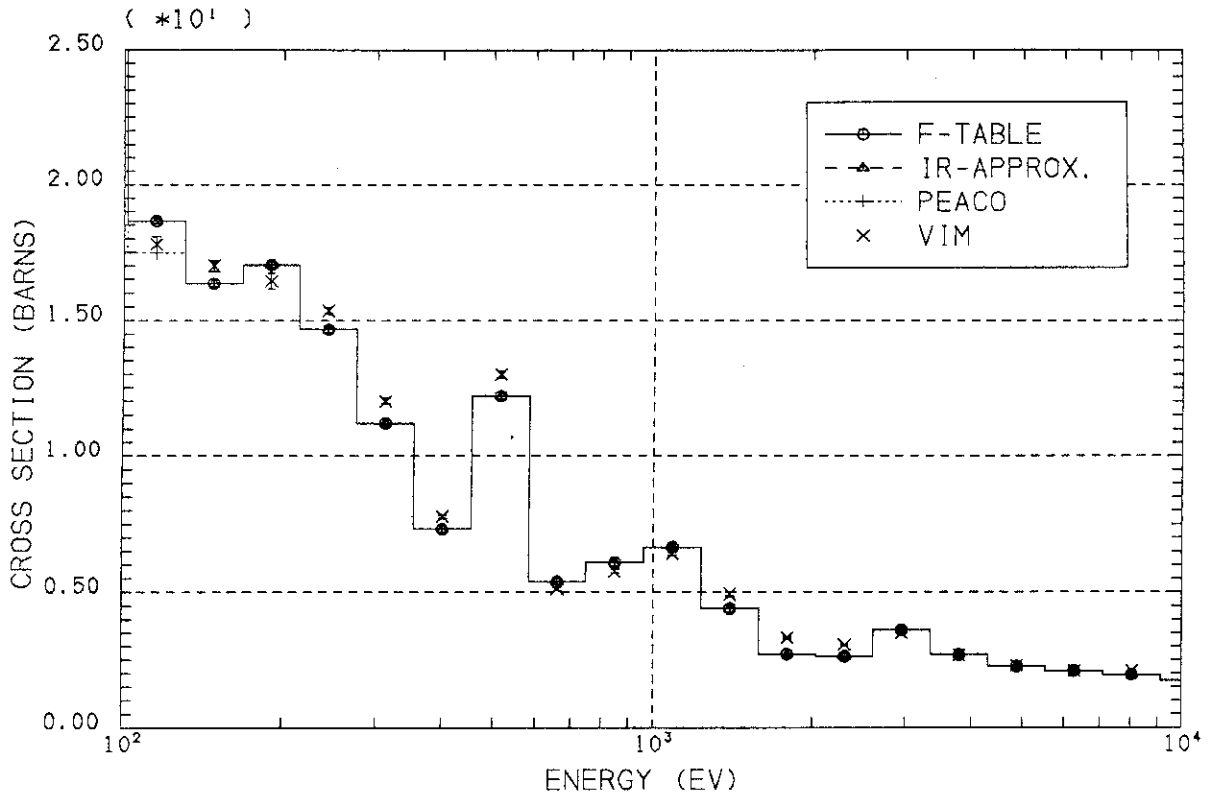


Fig.5-(b) Comparison of Effective Fission Cross Section of ²³⁹Pu for 0% Void

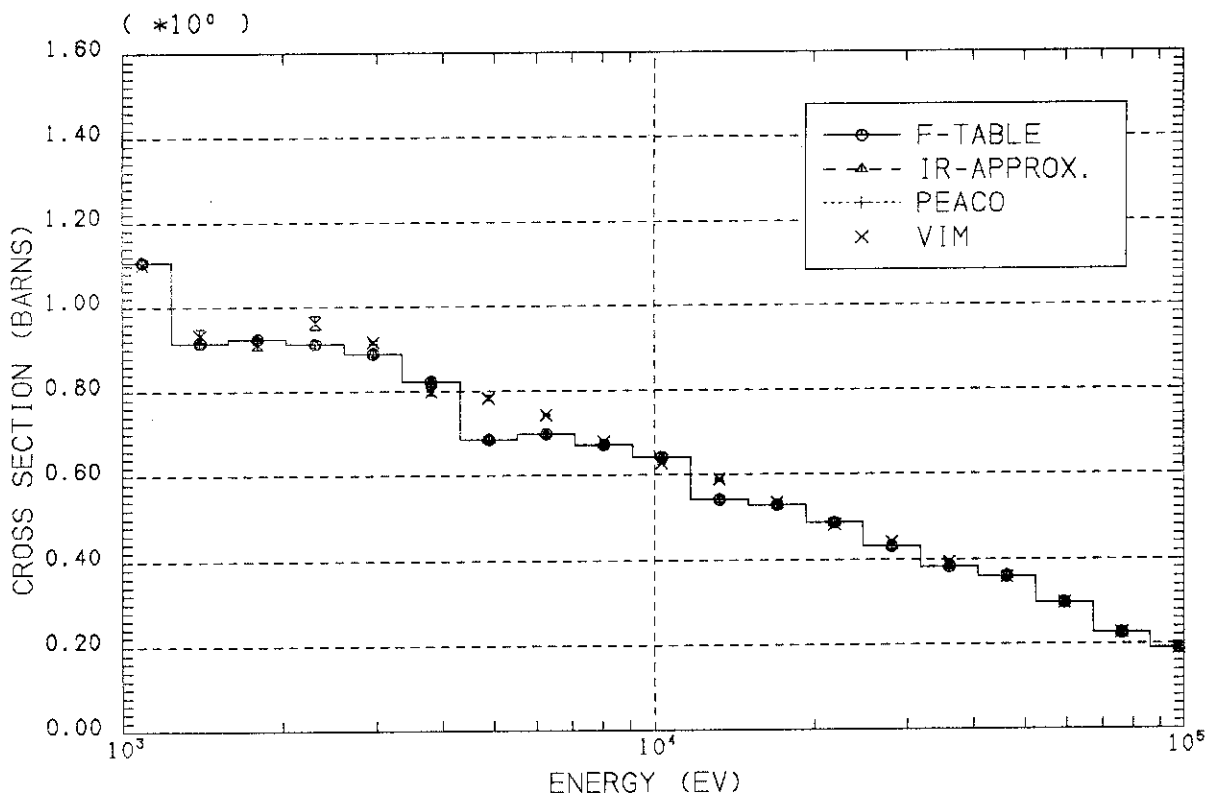
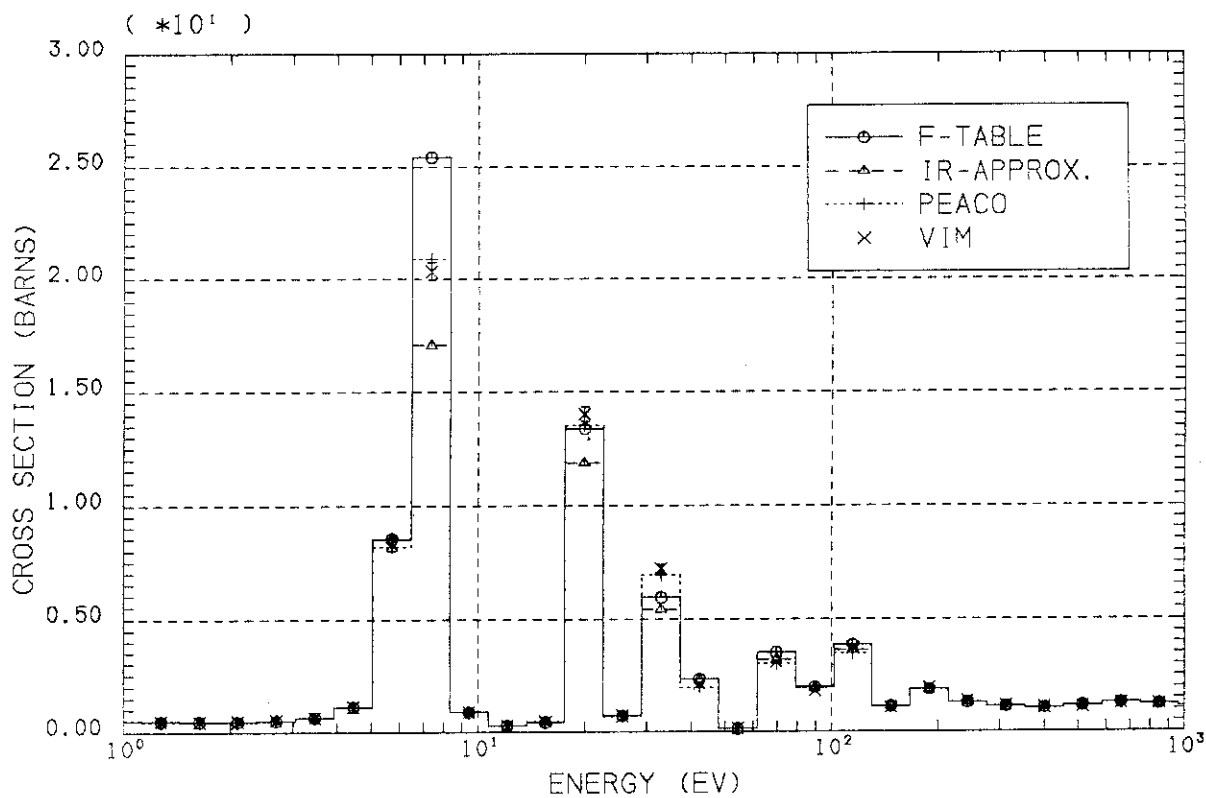


Fig.6 Comparison of Effective Capture Cross Section of ^{238}U for 42.5% Void

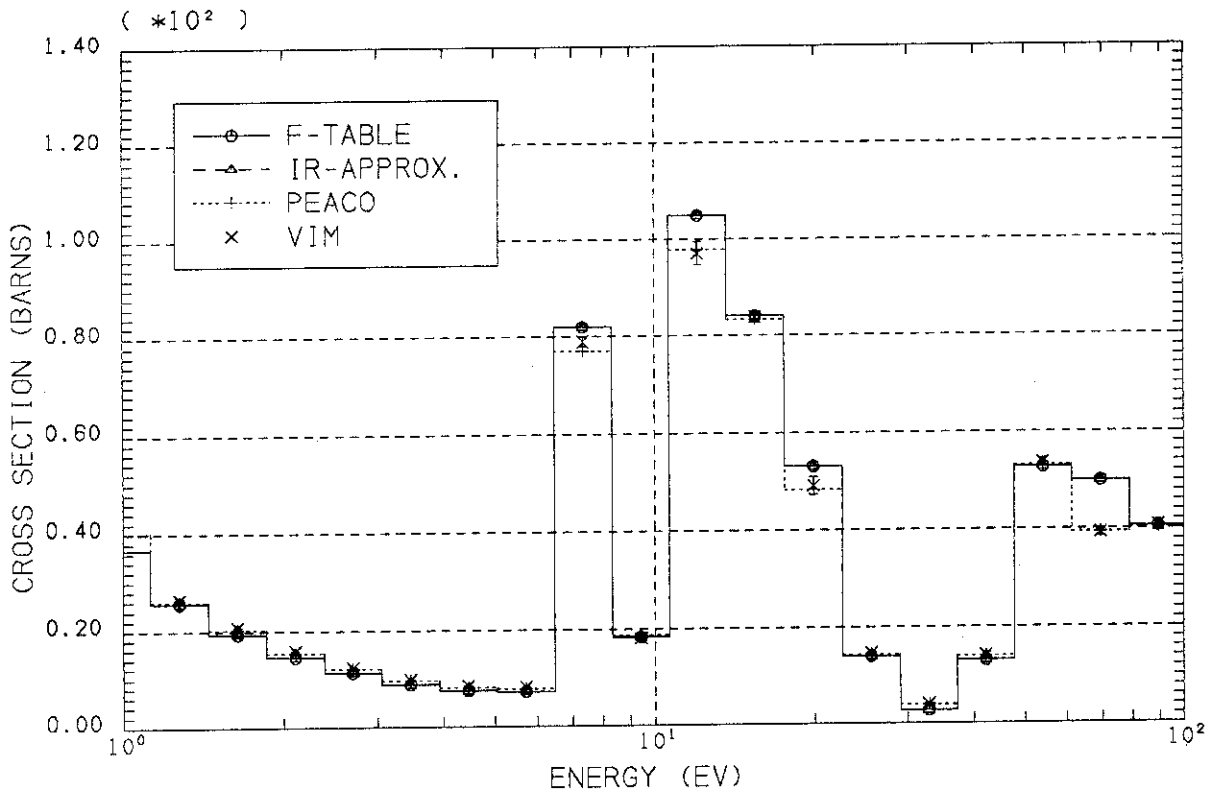
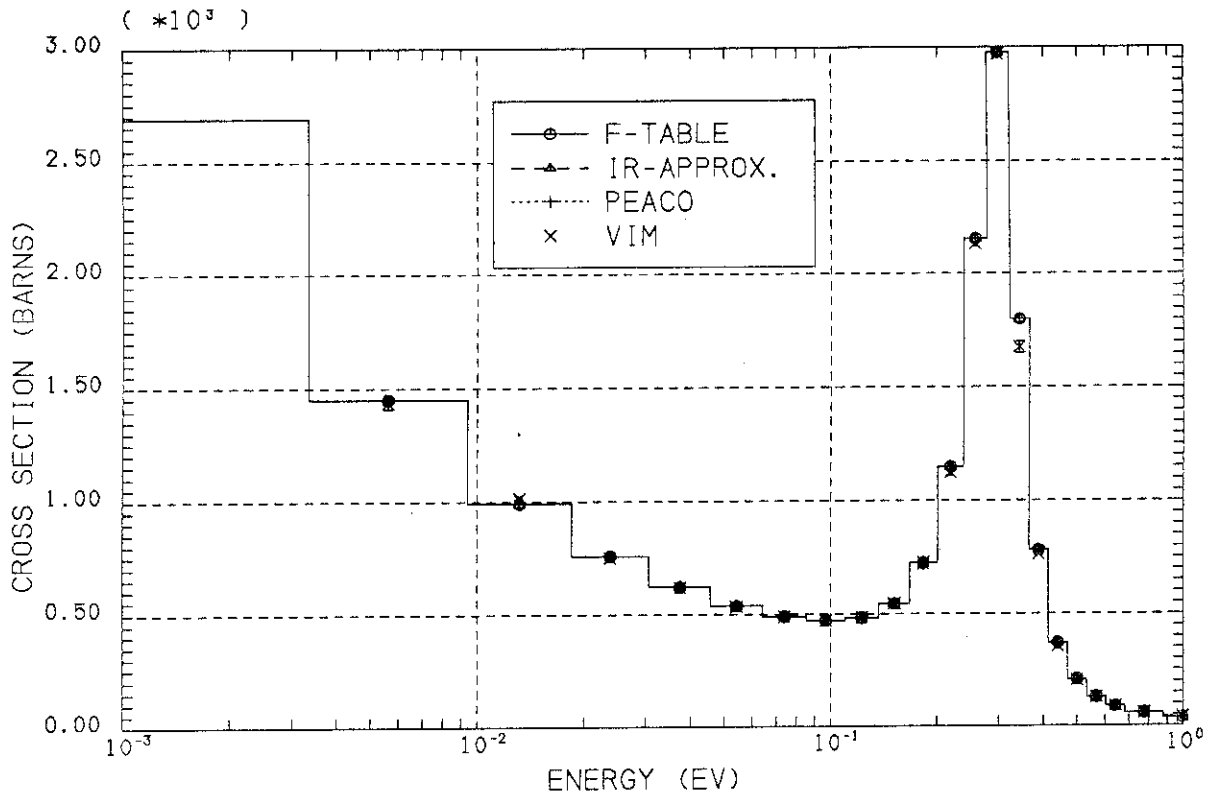


Fig.7-(a) Comparison of Effective Fission Cross Section of ^{239}Pu for 42.5% Void

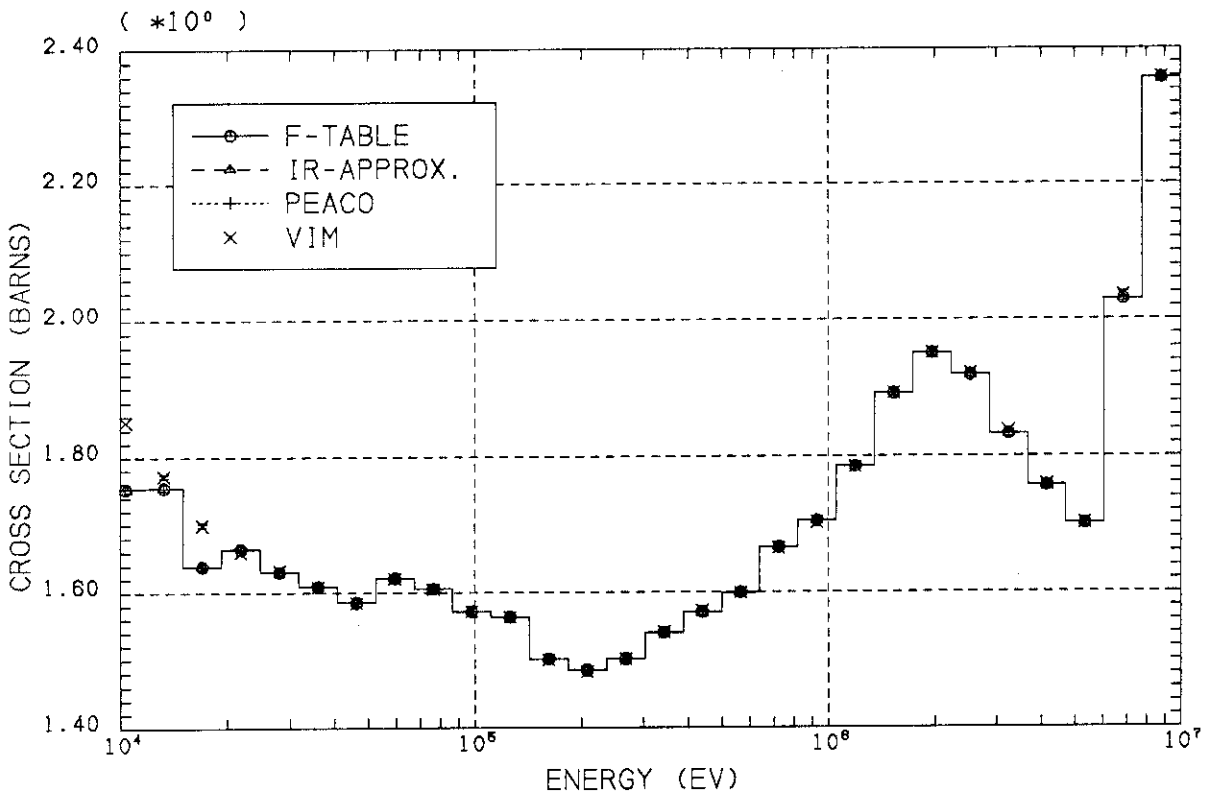
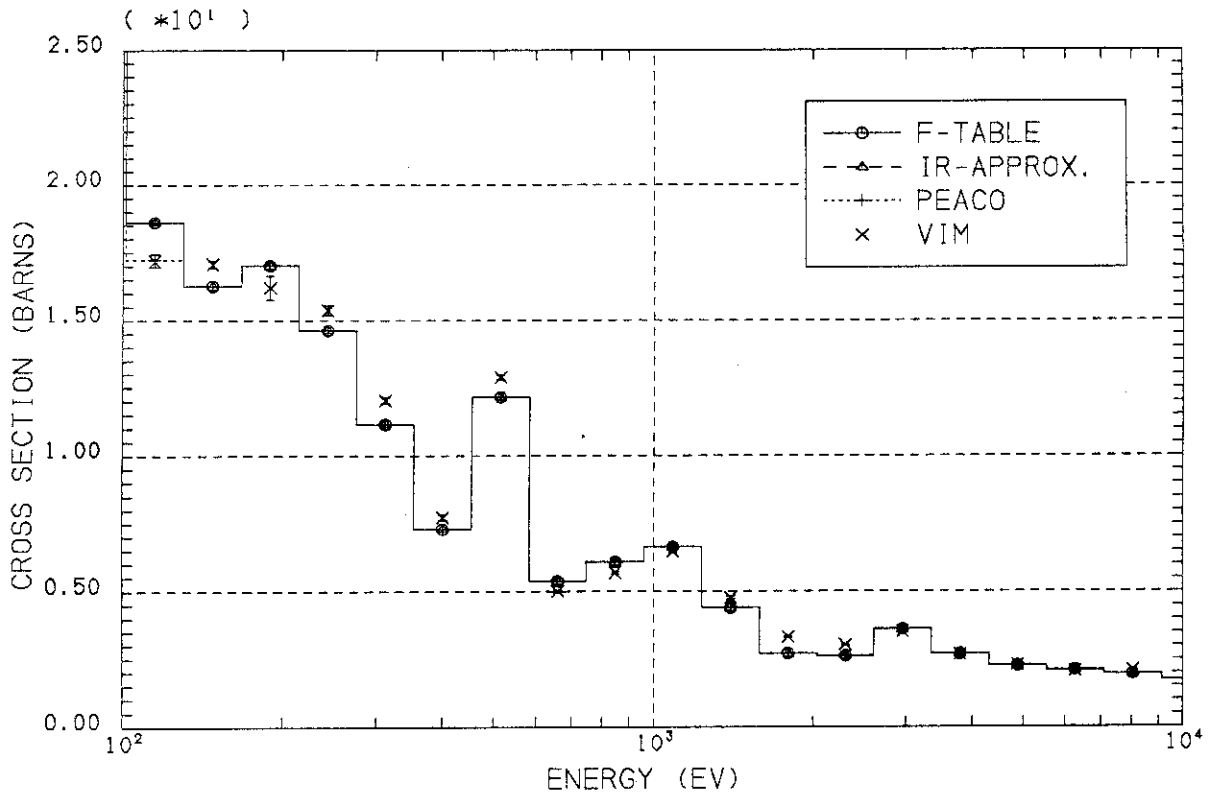


Fig.7-(b) Comparison of Effective Fission Cross Section of ²³⁹Pu for 42.5% Void

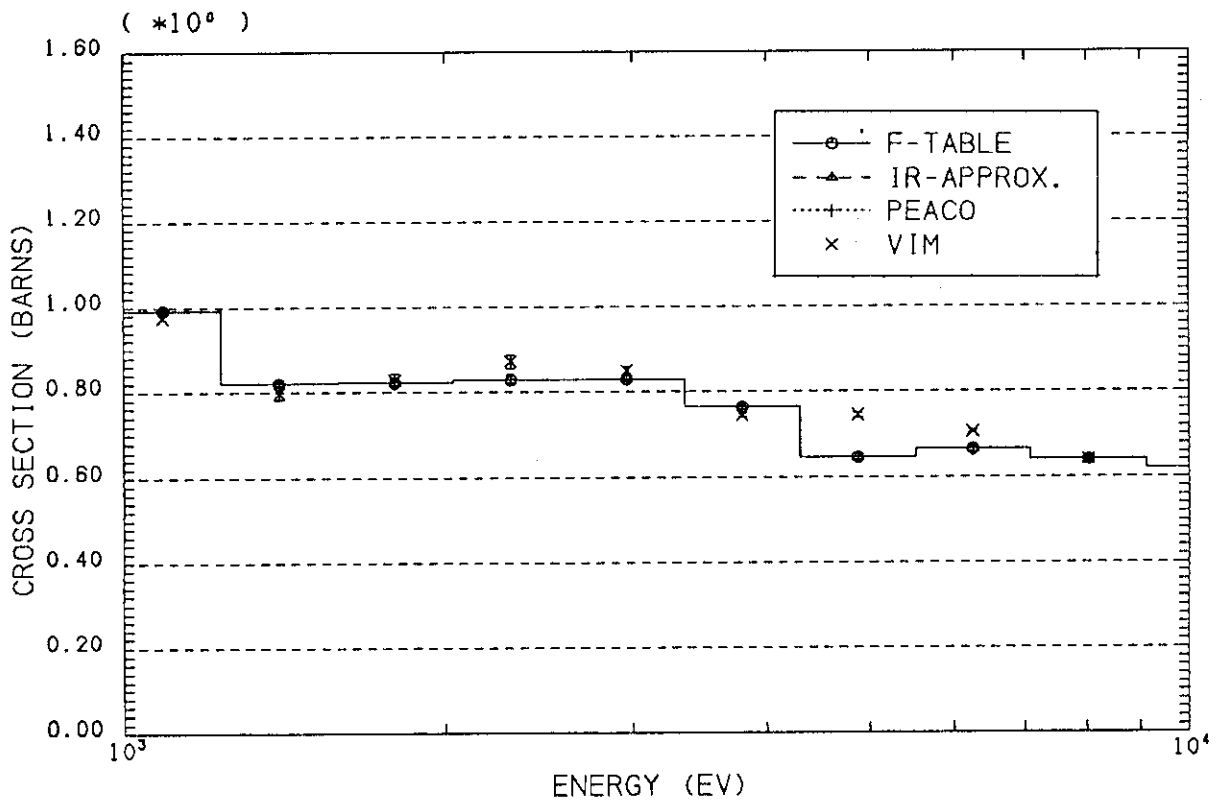
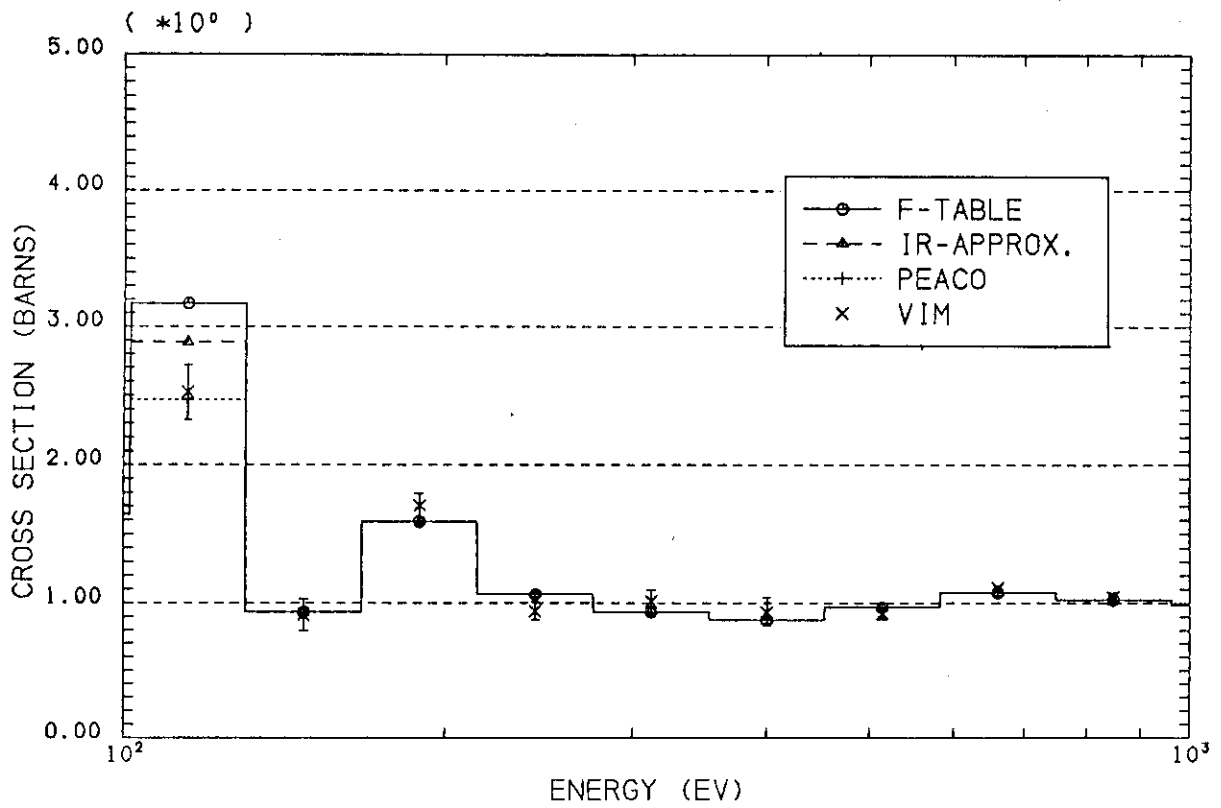


Fig.8 Comparison of Effective Capture Cross Section of ²³⁸U for 100% Void

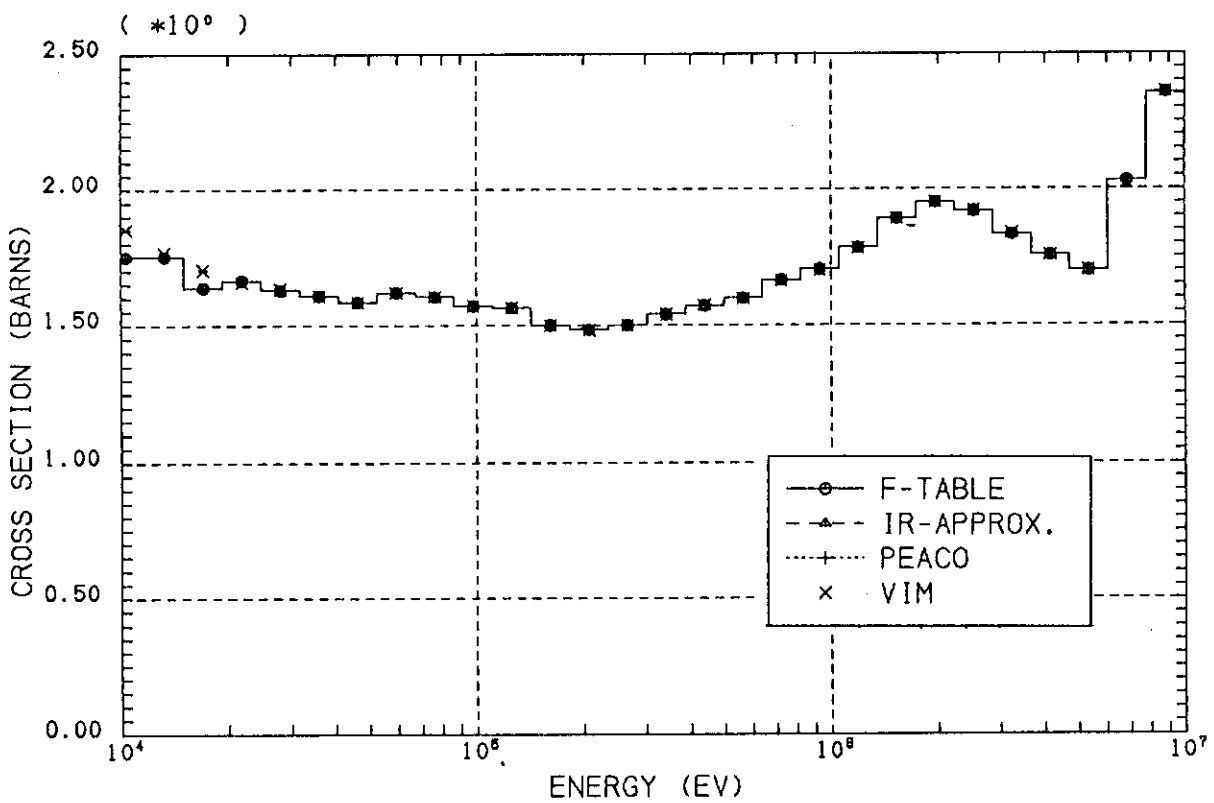
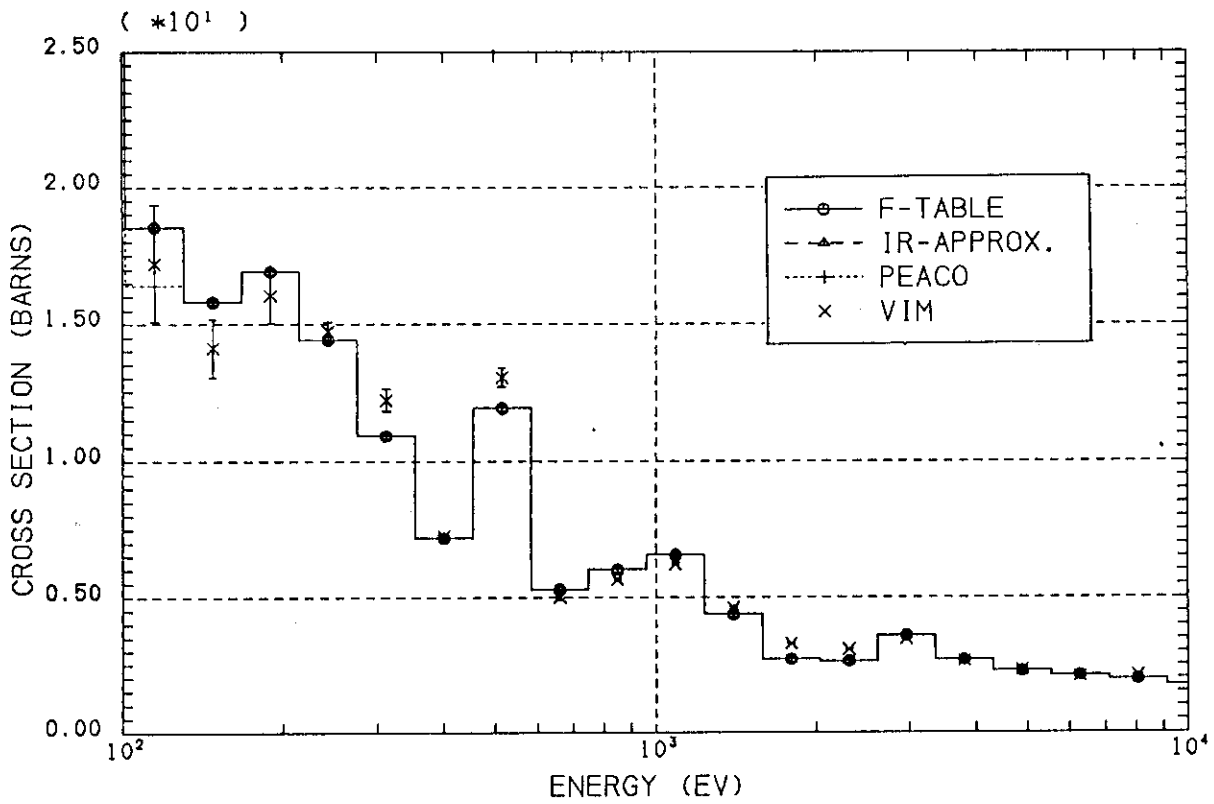


Fig.9-(a) Comparison of Effective Fission Cross Section of ^{239}Pu for 100% Void

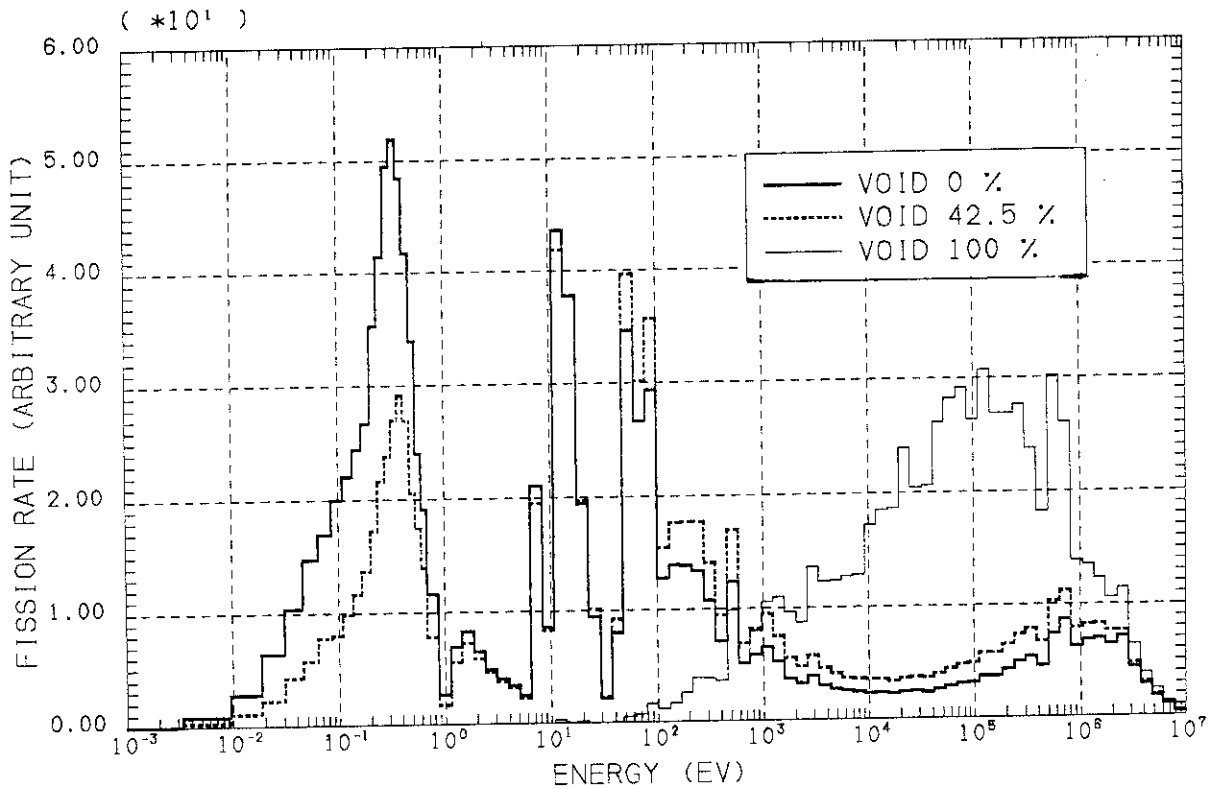
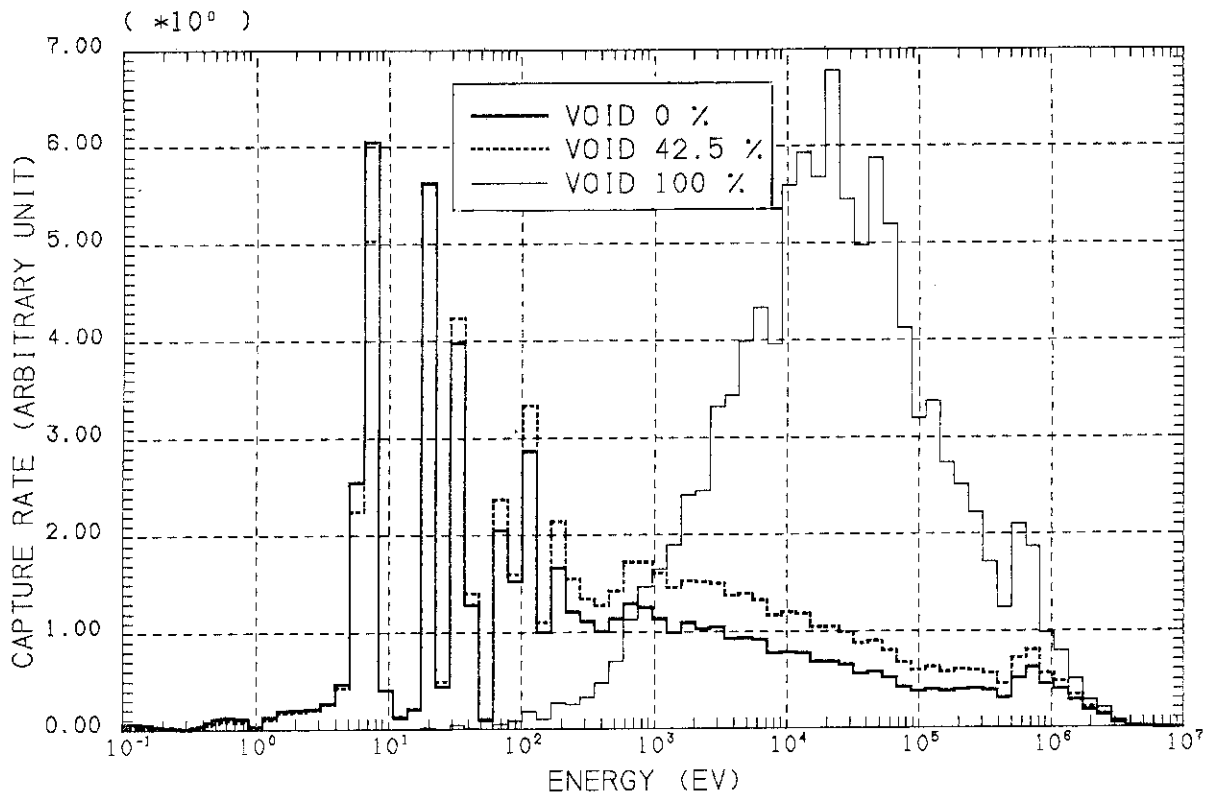


Fig.10 Reaction rate Distributions of ^{238}U Capture and ^{239}Pu Fission Calculated by VIM Code

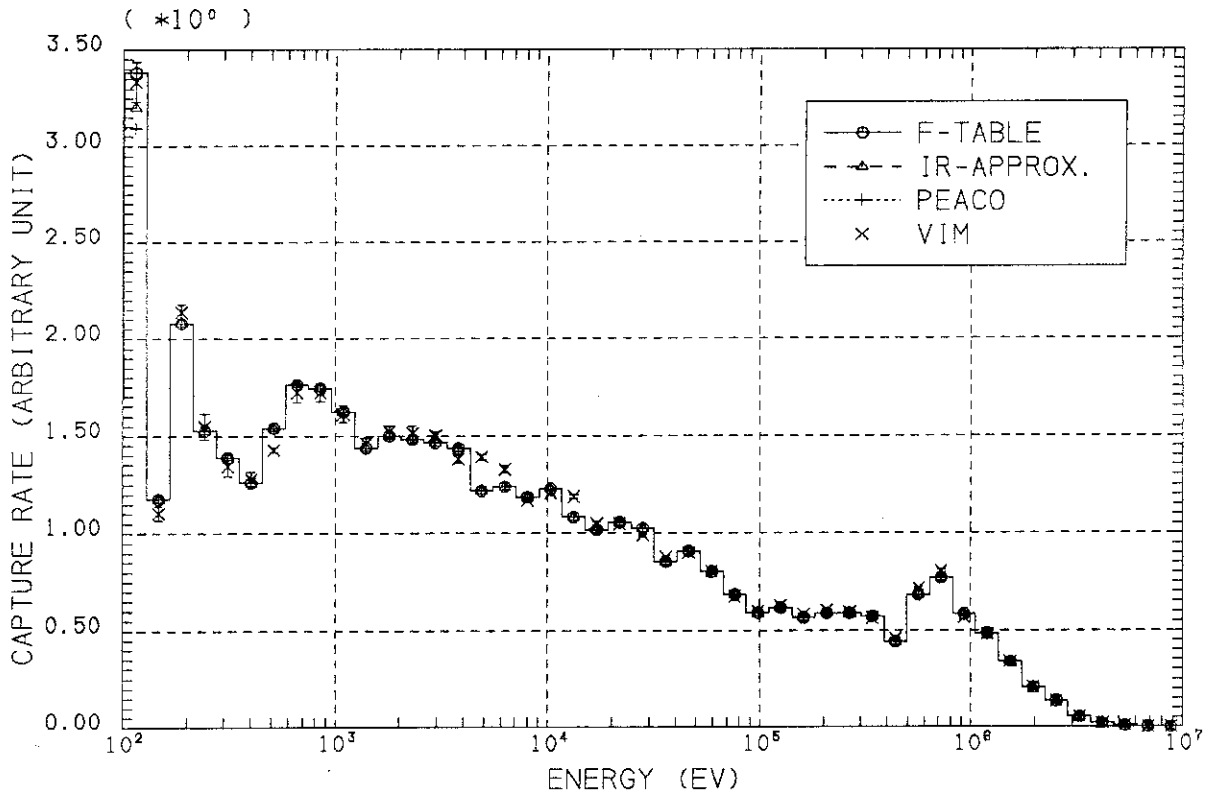
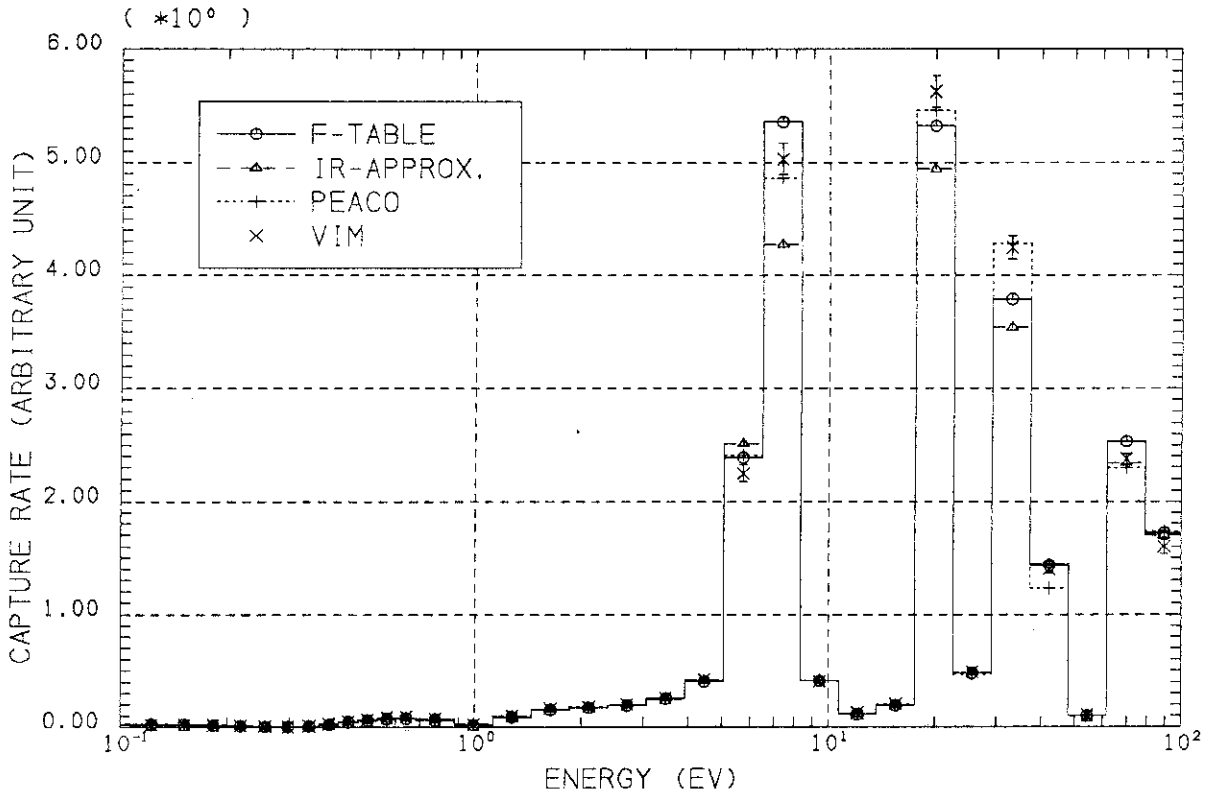


Fig.11 Comparison of Reaction rate Distributions of ²³⁸U Capture for 0% Void

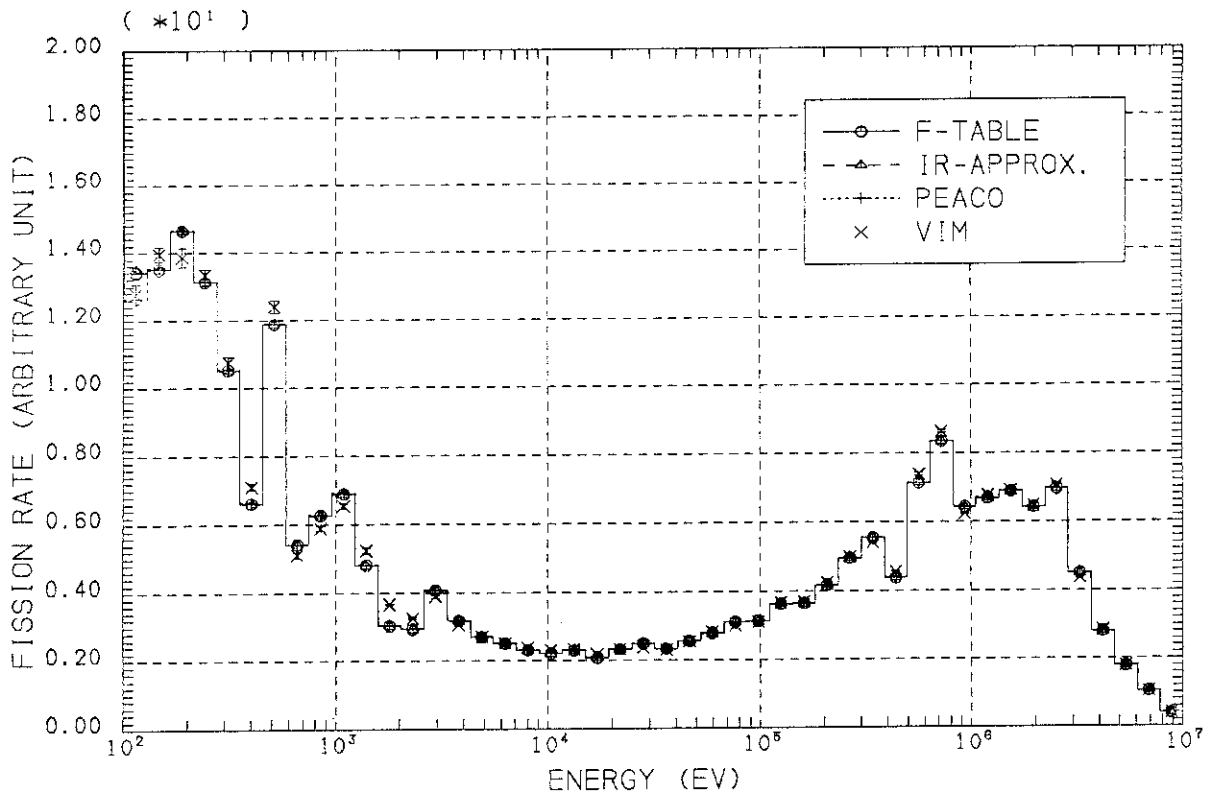
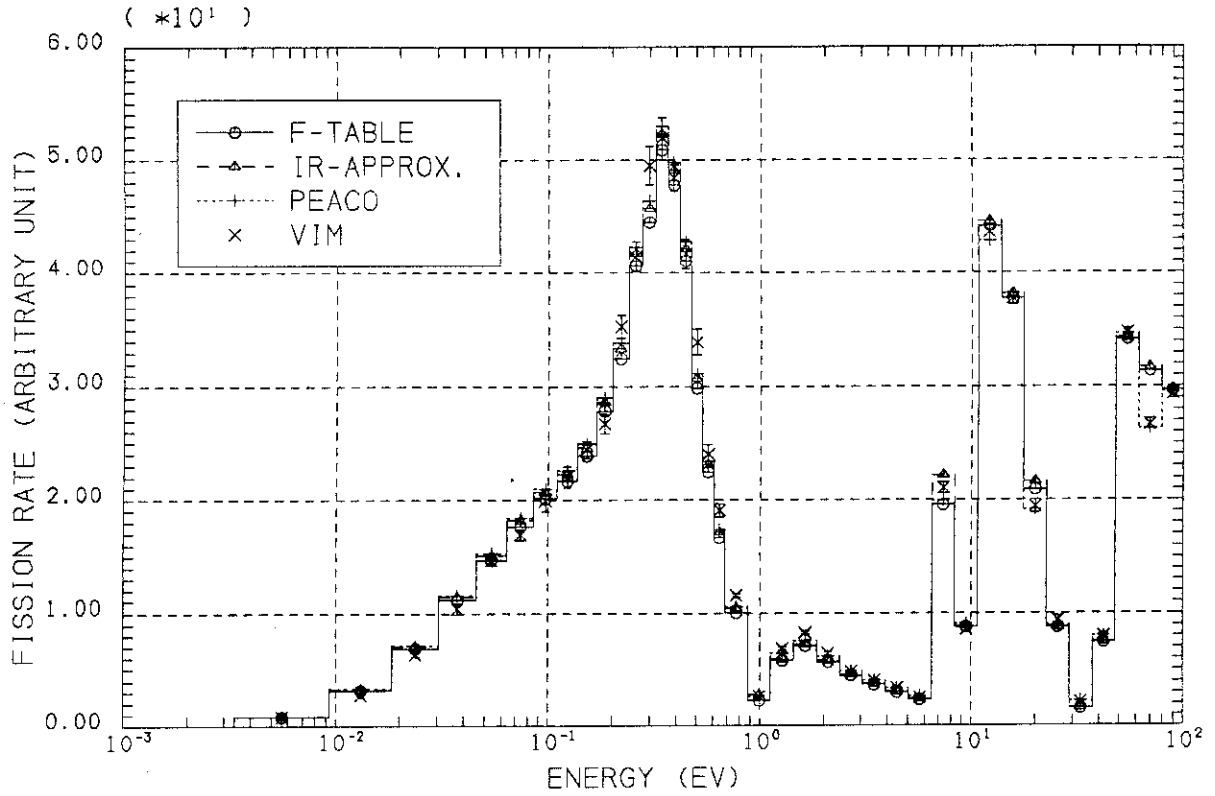


Fig.12 Comparison of Reaction rate Distributions of ^{239}Pu Fission for 0% Void

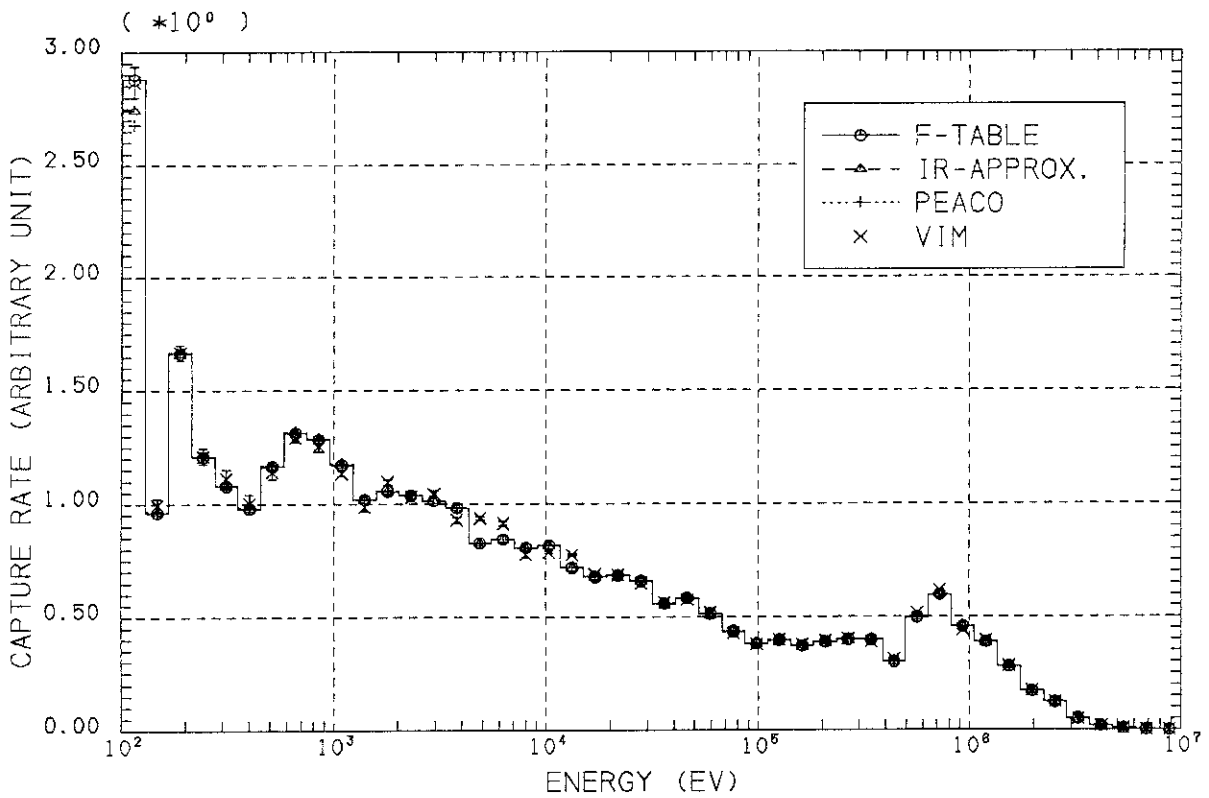
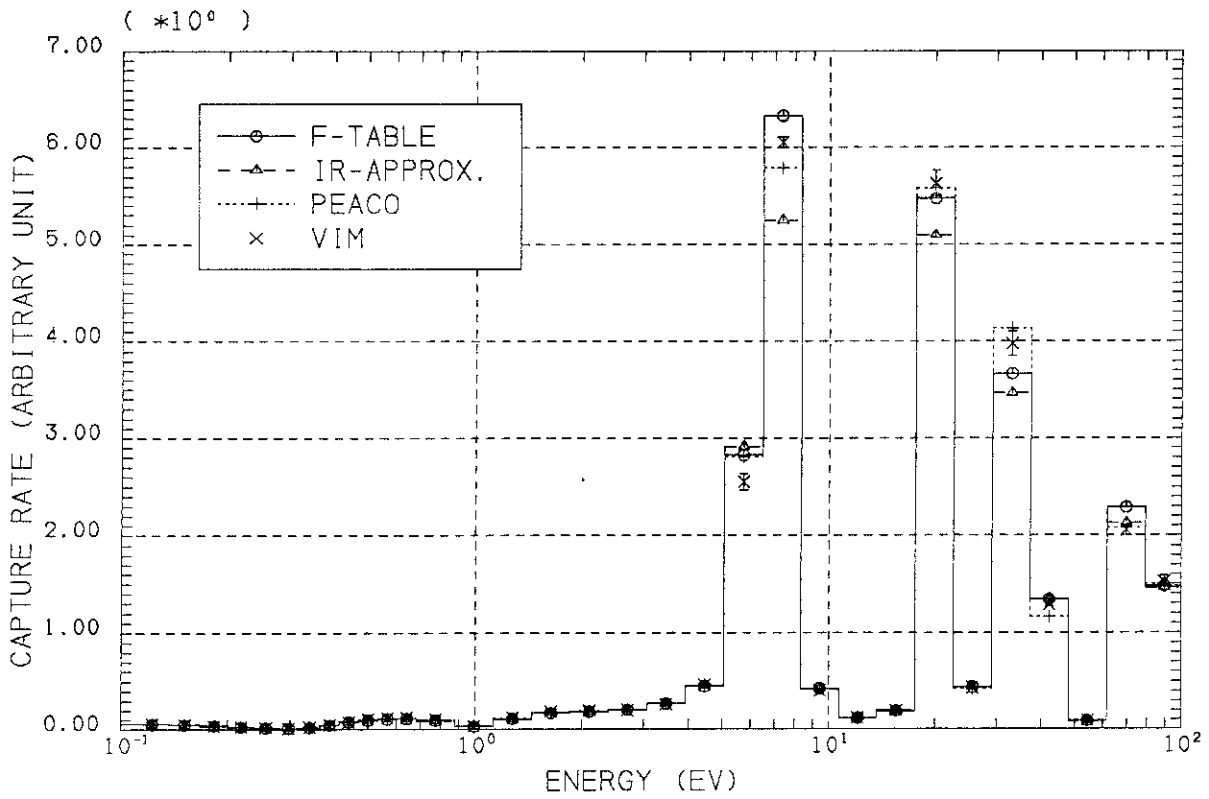


Fig.13 Comparison of Reaction rate Distributions of ^{238}U Capture for 42.5% Void

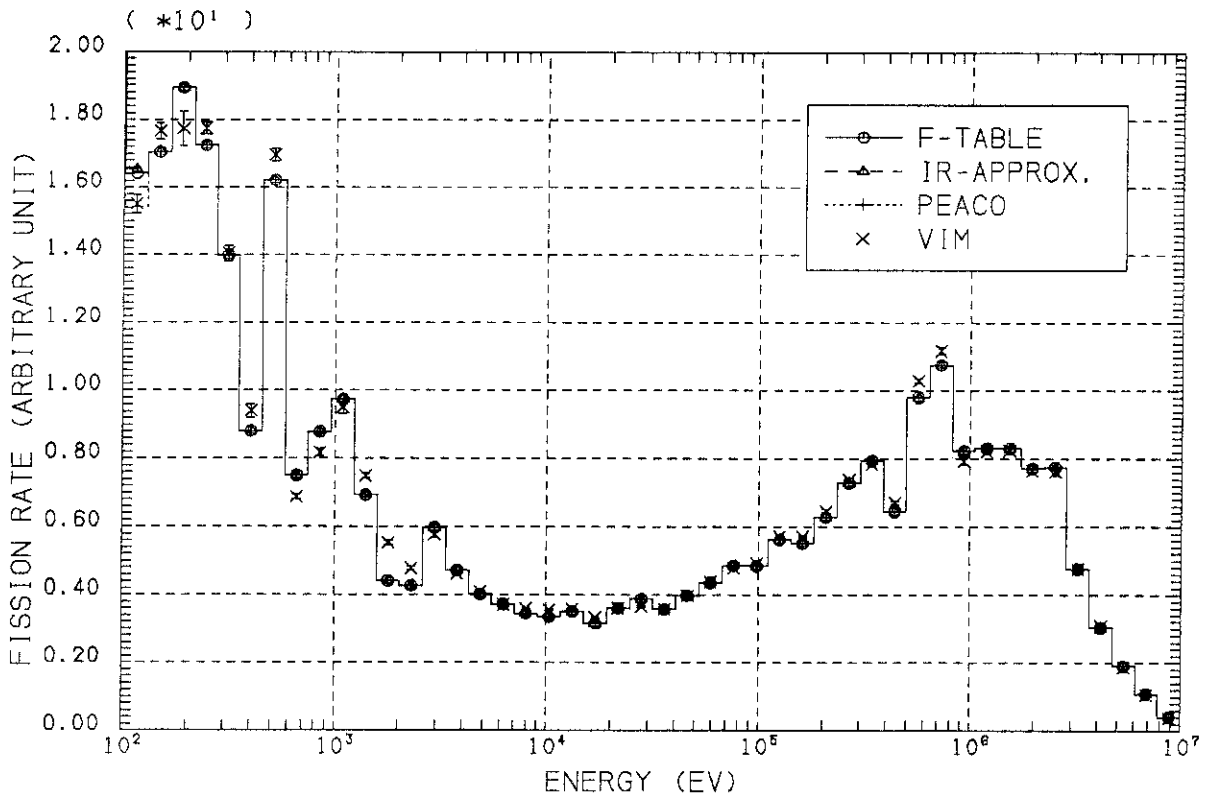
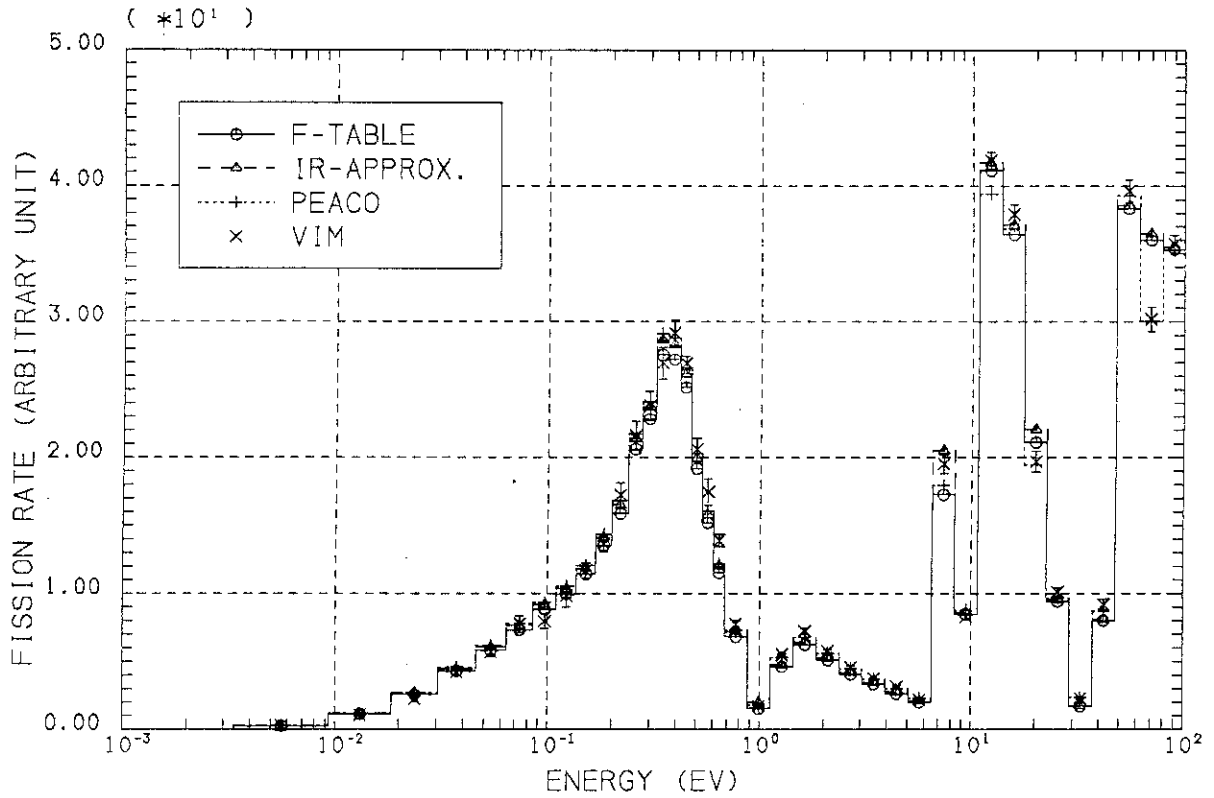


Fig.14 Comparison of Reaction rate Distributions of ^{239}Pu Fission for 42.5% Void

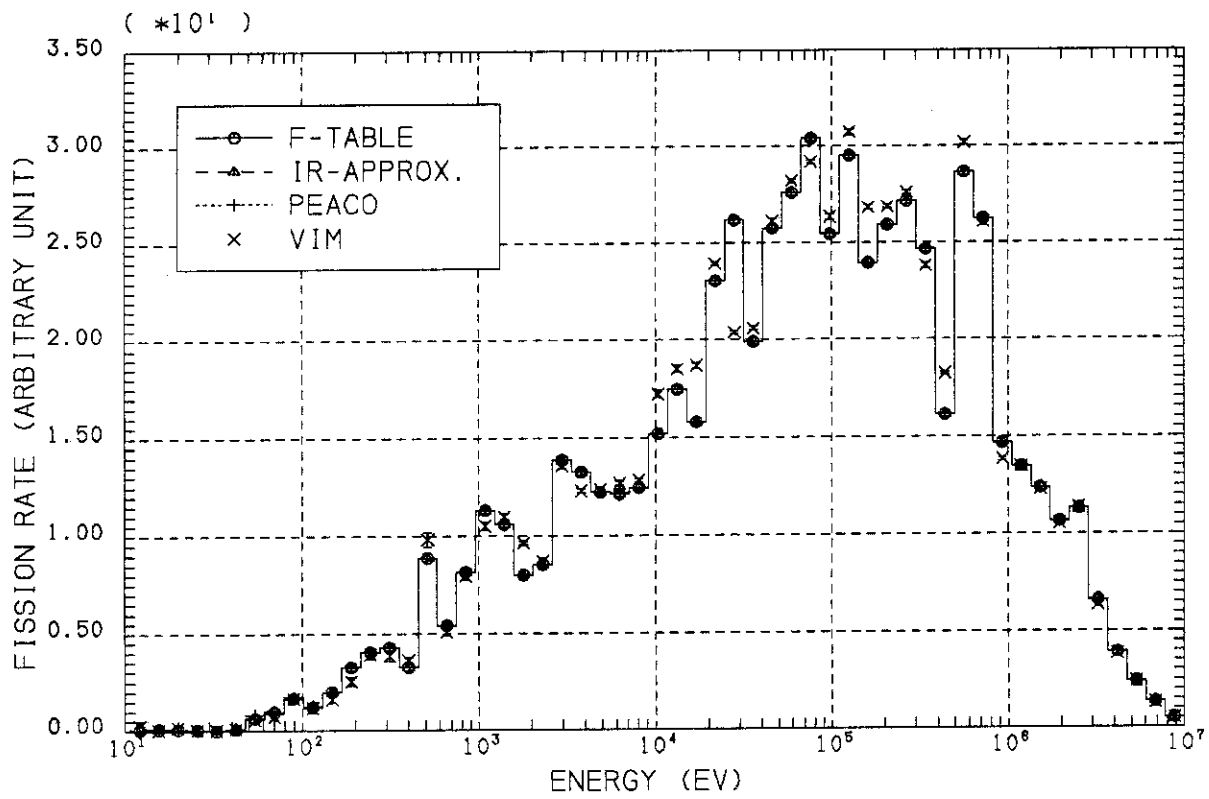
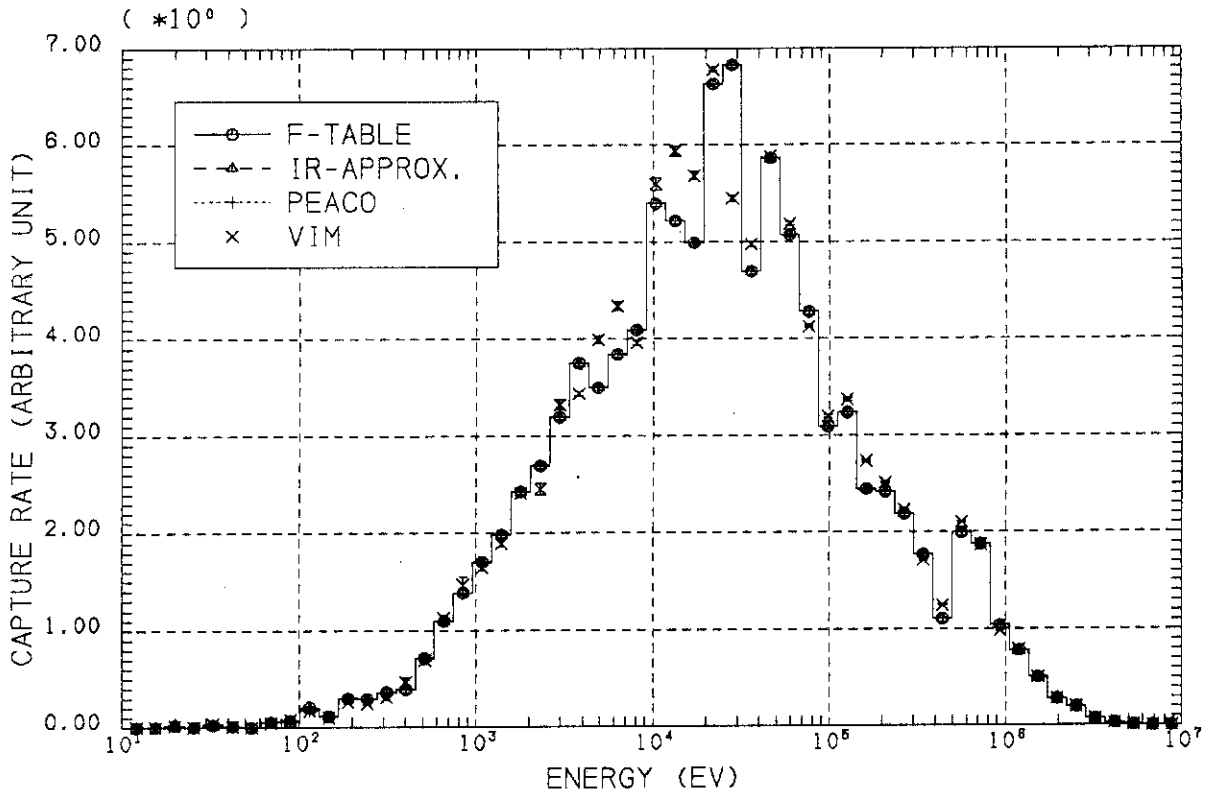


Fig.15 Comparison of Reaction rate Distributions of ^{238}U Capture and ^{239}Pu Fission for 100% Void

Table 4 Comparison of reaction rate ratios between VIM and SRAC.
(The values in parentheses are ratio to VIM values.)

<SRAC calculational conditions>
Library : ENDF-B4, Geometrical buckling = 0.0,
Lattice model : hexagonal cell

* Core 1 (Water) void 0 %

reaction rate ratio	VIM (100000 hist.)		F-Table	SRAC IR	PEACO
C8/F9	0.06739 ± 0.46%		0.06806 (1.010)	0.06489 (0.963)	0.06673 (0.990)
F8/F9	0.009648 ± 0.56%		0.009815 (1.017)	0.009641 (0.999)	0.009704 (1.006)
F5/F9	0.8389 ± 0.37%		0.8475 (1.010)	0.8434 (1.005)	0.8491 (1.012)
F1/F9	1.627 ± 0.34%		1.664 (1.023)	1.666 (1.024)	1.637 (1.006)
k_{∞}	1.0265 ± 0.35%		1.0148 (0.989)	1.0301 (1.004)	1.0240 (0.998)
	(collision)				
	1.0306 ± 0.34%		(0.985)	(1.000)	(0.994)
	(analog)				
	1.0273 ± 0.40%		(0.988)	(1.003)	(0.997)
	(track length)				
	1.0281 ± 0.30%		(0.987)	(1.002)	(0.996)
	(average)				

* Core 2 (Air) void 100 %

reaction rate ratio	VIM (60000 hist.)		F-Table	SRAC IR	PEACO
C8/F9	0.1604 ± 0.18%		0.1598 (0.996)	0.1597 (0.996)	0.1597 (0.996)
F8/F9	0.01988 ± 0.96%		0.02058 (1.035)	0.02057 (1.034)	0.02057 (1.034)
F5/F9	1.118 ± 0.10%		1.118 (1.000)	1.118 (1.000)	1.119 (1.000)
F1/F9	1.450 ± 0.12%		1.444 (0.996)	1.444 (0.996)	1.444 (0.996)
k_{∞}	0.9056 ± 0.29%		0.8965 (0.990)	0.8967 (0.990)	0.8968 (0.990)
	(collision)				
	0.8999 ± 0.45%		(0.996)	(0.996)	(0.997)
	(analog)				
	0.9043 ± 0.33%		(0.991)	(0.992)	(0.992)
	(track length)				
	0.9033 ± 0.24%		(0.992)	(0.993)	(0.993)
	(average)				

(to be continued)

Table 4 (continued)

* Core 3 (Dowtherm) void 42.5 %

reaction rate ratio	VIM (80000 hist.)		F-Table	SRAC IR	PEACO
C8/F9	0.08850 ± 0.40%		0.08949 (1.011)	0.08538 (0.965)	0.08804 (0.995)
F8/F9	0.01181 ± 0.33%		0.01228 (1.040)	0.01204 (1.019)	0.01217 (1.030)
F5/F9	0.9856 ± 0.35%		0.9892 (1.004)	0.9830 (0.997)	0.9968 (1.011)
F1/F9	1.781 ± 0.34%		1.780 (0.999)	1.786 (1.003)	1.765 (0.991)
k _∞	0.9706 ± 0.31%		0.9543 (0.983)	0.9697 (0.999)	0.9615 (0.991)
	(collision)				
	0.9677 ± 0.38%		(0.986)	(1.002)	(0.994)
	(analog)				
	0.9694 ± 0.42%		(0.984)	(1.000)	(0.992)
(track length)					
0.9693 ± 0.30%		(0.985)	(1.000)	(0.992)	
(average)					

4. PROTEUS 稠密格子炉心の解析

4.1 実験の概要

実験はプルトニウム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、臨界実験集合 PROTEUS で行われた^{(10)~(12)}。原子炉全体の形状等は、文献(31)に詳しく示されている。この炉は、大まかにいって、黒鉛と重水減速のドライバー・ゾーンと天然ウラン金属棒のバッファー・ゾーンに囲まれた中心部に、目的とする形状、組成をもった直径0.43mのテスト領域を置き、それを周辺部のドライバー・ゾーンからの熱中性子で臨界にするようになっている。テスト領域の燃料棒の配置は Fig. 1 に示されている。15% PuO₂/UO₂と減損ウランの2種類の燃料が六方格子状に交互に並べられ、燃料部分と減速材部分の体積比はほぼ2.0である。減速材を入れ換えることによってボイドを模擬することができ、この実験の場合、減速材はH₂O (core 1), Air (core 2), Dowtherm (core 3)の3種類が用いられていた。core 1は0%ボイド、core 2は100%ボイドにそれぞれ対応する。Dowthermは、ジフェニール26%、ジフェニール・オキサイド74%の共融混合物であり、42.5%ボイドを模擬する。燃料、被覆、減速材の組成は Table 2 に示されている。

測定された量は以下の通りである。

A 3種類の炉心(core 1, core 2, core 3,)に対して、PuO₂/UO₂, depleted UO₂各燃料棒での²³⁸Uのcapture rate, 及び²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu, ²³²Th, ²³³Uのfission rate.

B core 1, core 3, に対して、炉心の軸方向、径方向の反応率分布(²³⁸Uのcapture, ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁹Puのfission, 及びRh(n, n')反応)

炉心での反応率の測定は、主としてfoil activation法を用いて行われた。その際、精度を上げるために、1つの核種に対して一種類以上のfoilが用いられた(0.5mm UO₂, 0.1mm U-metal, 0.1mm Pu/Al合金, 0.5mm PuO₂/UO₂)。また、fission track recorderも用いられた(²⁴¹Puのfission rateに関してはこの方法でしか測定されない)。

これらの反応率の精度は、foil activation法が使用できなかった²⁴¹Puについて約4%であるのを除けば、2.0~2.5%である。

反応率の空間分布の測定は、物質バックリング及びk_∞を決定するために行われた。各反応率について得られた分布に対して、軸方向にコサイン関数を、径方向にベッセル関数をあてはめて、それぞれの方向のバックリングが決定された。なおcore 2のk_∞は、同様な条件で過去に行われた実験(PROTEUS-GCFR core 6, 1976年)から得られた値に補正を加えて決定された(今回の実験の燃料棒のピッチが9mmであるのに対して、GCFR core 6は10mmである点のみが異なっている)。

4.2 核データ及び格子解析モデル

上記の実験の解析は、ENDF/B-4 と JENDL-2 に基づく 2 組の多群ライブラリーを用いて行った。ボイド率が高くなると、HCPWR のスペクトルに近づくので、使用するライブラリーは、高速炉系の実験解析にも耐える必要がある。Table 5 は、SRAC ライブラリーの標準的な高速炉ベンチマーク問題⁽²⁸⁾ に対する k_{eff} の予測の程度を、既存の 3 つの高速炉用炉定数セット⁽²⁸⁾,⁽³²⁾ との比較において、示したものである。JENDL-2 による SRAC 用ライブラリーは、高速炉系に対しても充分の精度で k_{eff} を予測できることを示している。一方、ENDF/B-4 に基づくライブラリーは、高速炉系で k_{eff} を 1~2% 程度過少評価することが知られている。それ故、ここでは JENDL-2 による SRAC ライブラリーを主体として実験解析を進めた。

Fig. 1 の HCPWR の格子計算を行うために、この格子形状を厳密に取り扱うことできる衝突確率法の形状ルーチンが著者の一人（土橋）によって新しく用意された。このルーチンでは、Fig. 16 のように格子内の燃料ピンに異った組成を指定することができるので、Chawla 等によってなされた新しい実験のための複雑な格子⁽³¹⁾ も取り扱うことができる。Fig. 16 中の数字は格子内の中性子束分布を代表させる領域に対応する。格子形状のモデル化に伴う解析精度を検討するため、15% PuO₂/UO₂ 燃料ピンと減損 UO₂ ピンの平均原子密度組成を持つ燃料ピンから成る六方格子及び円柱化近似された格子モデルに対しても解析計算を行った。なお、格子スペクトル計算は、第 3 章の場合と同様に 86 群で行った。

共鳴エネルギー領域における実効断面積計算法の格子スペクトル計算への影響を見るため、前述の Table-Look-Up 法、IR 法及び超詳細群法による結果の比較も行った。但し、130.07 eV 以上の領域では、実効断面積は全て NR 近似に基づく Table-Look-Up 法によって求められた。

ここで、格子スペクトル計算に必要な実効断面積を求めるためには、式 (3) から判るように 2 燃料組成問題に対する Dancoff 係数が必要となる。SRAC システムを用いた解析で使用した Dancoff 係数の計算モデルに簡単に触れ、その妥当性を前もって吟味しておくことにする。まず、two-rod 格子の 2 種類の燃料組成を平均化した組成を有する燃料ピンから成る単位六方格子を考えて、そこで次の式に従って Dancoff 係数 C が計算される。即ち、

$$1 - C = (1 - P_{ff}(X))X \quad X \rightarrow \infty, \quad (8)$$

ここで、 $P_{ff}(X)$ は、燃料ピンで生れた中性子が燃料ピンで衝突する確率、 $X = \ell \sum_f$ で、 \sum_f は燃料ピンの全断面積である。このようにして得られた値を両方の燃料ピンの Dancoff 係数として入力して、実効断面積の計算を行った。

²³⁸U のように両方の燃料ピン、ほぼ均等に含まれている核種に対しては、上式から得られる係数を共通に用いることにより、平均の意味で正しい実効断面積が計算されると考えられる。しかし、²³⁹Pu のように一方の燃料ピンに片寄って存在する核種から見ると、単位格子は上記の六方格子より大きく（異核種の共鳴準位間の偶然の一致を無視して）、それ故、対応する Dancoff 係数は、上式 (8) で与えられる値より小さいはずである。この場合、式 (8) による Dancoff 係数を実効断面積の計算に用いると、計算された値は過少評価されることになる。即ち、two-rod モデルで計算した ²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、などの実効断面積は、厳密な計算に比べて過少評価される可能性があることに注意すべきであろう。

ここでは、まず HCPWR の核特性の大まかな特色を把握するために、上述のデータ及び手法で計算した中性子スペクトル及び反応率分布について議論することにする。

Figures 17 及び 18 には、それぞれ、格子平均の中性子スペクトル、吸収反応率分布 ($\sum_{ag} \phi_g$) 及び分裂反応率分布 ($\sum_{fg} \phi_g$) が示されている。ここでは、2 種類の燃料ピンの平均組成を持つピンと減速材から成る円柱格子を考えて、詳細スペクトル計算ルーチン (PEACO) を用いて計算を行った。Fig. 19 には、格子の平均イータ値に対応する \sum_{fg}/\sum_{ag} が示してある。これなどの図から、共鳴エネルギー領域における吸収及び分裂反応を精度良く計算することは、HCPWR の核特性を評価するうえで極めて重要であることが判る。さらに、冷却材ボイド係数の計算においては、ボイド率の増加に伴ない反応率に大きな比重を占めるエネルギー領域が高くなり、全てのエネルギー領域の反応率を正確に求める必要があることも判る。

Figures 20~22 では、共鳴エネルギー領域における実効断面積の計算法の相違による反応率分布の差違が比較されている。低ボイド率 (<42.5%) においては、吸収反応の大部分が ^{238}U , ^{240}Pu 等の代表的な共鳴レベルで起り、計算された吸収反応率分布は用いた手法間で大きくバラついていて、これ等の核種による共鳴吸収は、転換率の値に直接寄与してくるので、その正確な評価のためには PEACO ルーチンによる詳細計算が必要と考えられる。詳細計算は 130.07 eV まで考慮されているが、この領域の最上限群においても、吸収反応率の手法間の相違が大きいことから、130.07 eV の上のエネルギー領域でも詳細計算を必要とすることが知られる。一方、分裂率分布に関しては、手法の間の相違はほとんど無視できる程度のものであるが、 ^{238}U の共鳴レベルとの異核種間の共鳴レベルの重なりによる影響が見られる。それ故、分裂率の計算結果からも、詳細スペクトル計算の必要なことが明らかである。なお、分裂スペクトル領域及び熱エネルギー領域で手法の間で差違が見られるが、これは反応率分布を規格化したことから起因するもので本質的なことではない。

次節からは、主に詳細スペクトル計算に基づいた実験の解析結果についての議論を進める。

Table 5 Calculated k_{eff} values for benchmark test problems of fast reactors

No.	Assembly	Fuel	JAERI-FAST Set			SRAC Library	
			Original	JENDL-2B	ENDF/B4	ENDF/B4	JENDL-2B
1	VERA-11A	Pu	0.9924	0.9924	0.9855	0.9861	0.9959
2	VERA-1B	U	1.0036	0.9954	0.9954	0.9953	1.0022
3	ZPR-3-6F	U	1.0166	1.0123	1.0095	1.0095	1.0135
4	ZEBRA-3	Pu	0.9980	0.9983	0.9917	0.9850	0.9957
5	ZPR-3-12	U	1.0070	1.0011	0.9987	0.9985	1.0078
6	SNEAK-7A	Pu	1.0051	1.0014	0.9915	0.9892	1.0052
7	ZPR-3-11	U	1.0080	1.0021	1.0050	1.0041	1.0054
8	ZPR-3-54	Pu	0.9544	0.9544	0.9338	0.9347	0.9570
9	ZPR-3-53	Pu	0.9965	0.9912	0.9777	0.9747	0.9985
10	SNEAK-7B	Pu	1.0044	0.9985	0.9896	0.9842	1.0001
11	ZPR-3-50	Pu	0.9985	0.9971	0.9817	0.9747	1.0009
12	ZPR-3-48	Pu	1.0031	1.0005	0.9891	0.9852	1.0049
13	ZEBRA-2	U	0.9852	0.9831	0.9781	0.9751	0.9951
14	ZPR-3-49	Pu	1.0042	1.0055	0.9924	0.9882	1.0066
15	ZPR-3-56B	Pu	0.9967	0.9889	0.9775	0.9750	0.9907
16	ZPR-6-7	Pu	1.0033	0.9937	0.9816	0.9736	0.9964
17	ZPR-6-6A	U	1.0019	0.9988	0.9895	0.9857	1.0063
18	ZPPR-2	Pu	1.0087	1.0004	0.9887	0.9789	1.0006
19	MZA	Pu	1.0012	0.9945	0.9842	0.9904	1.0080
20	MZB	Pu	1.0013	0.9911	0.9809	0.9784	0.9972
21	FCA-V-2	Pu	1.0091	1.0057	0.9787	0.9797	0.9931

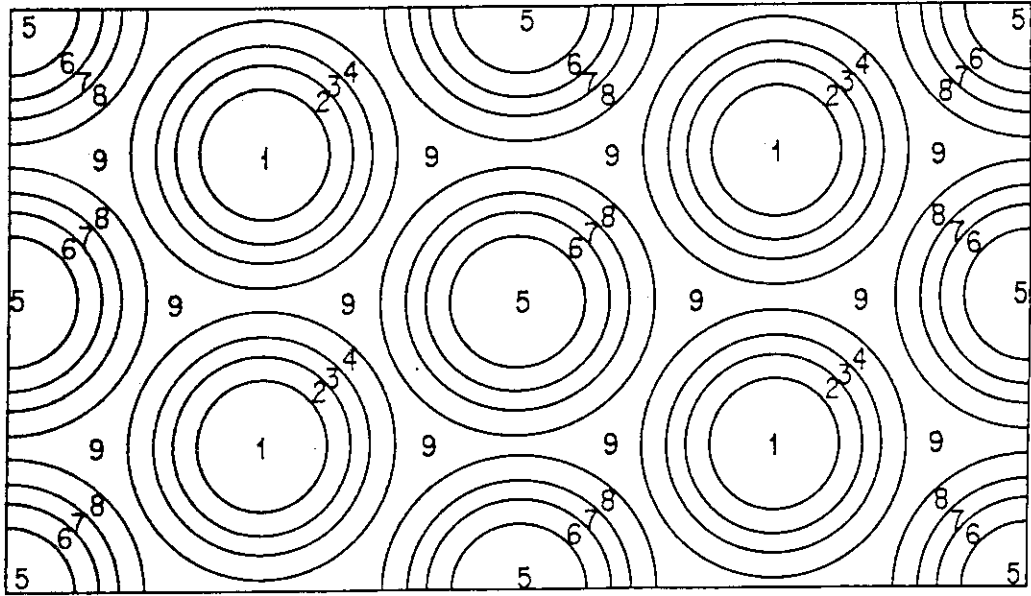


Fig.16 Geometrical Model of Two Rod Cell

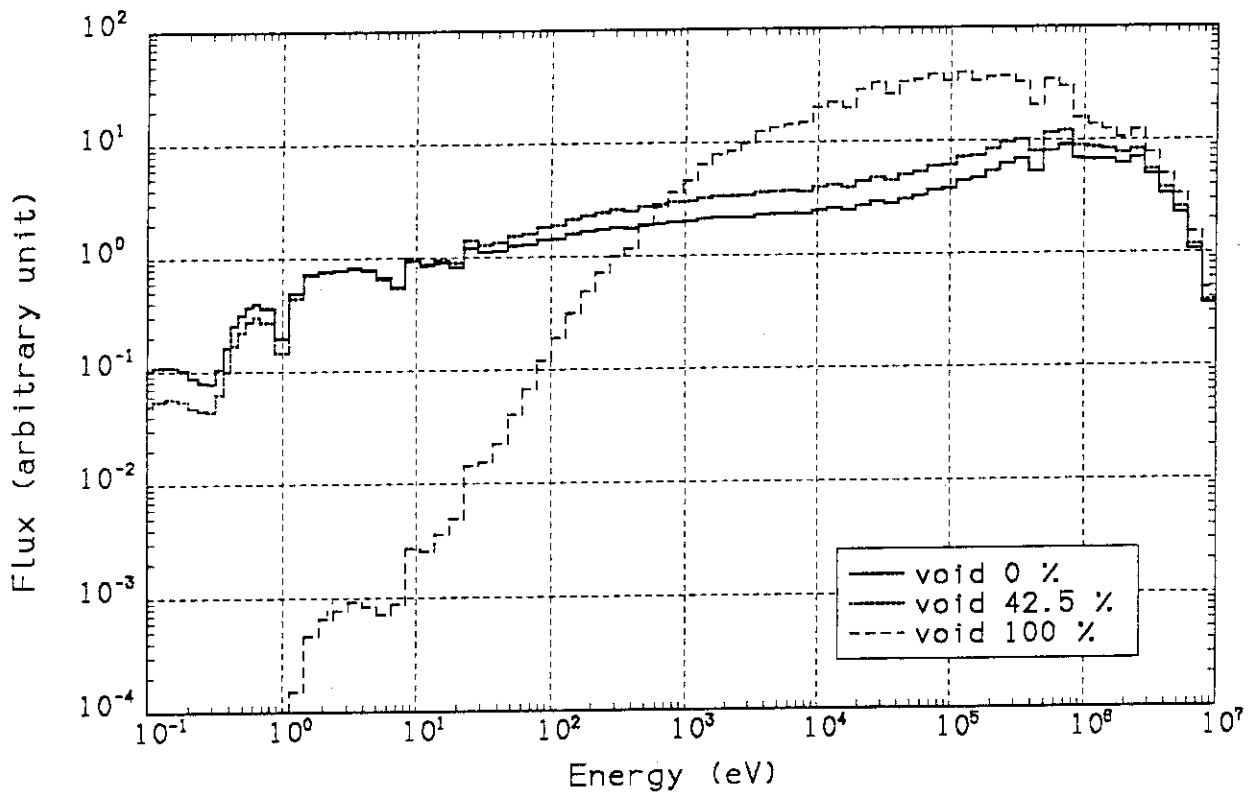


Fig.17 Neutron Spectra in Test Region of PROTEUS Cores

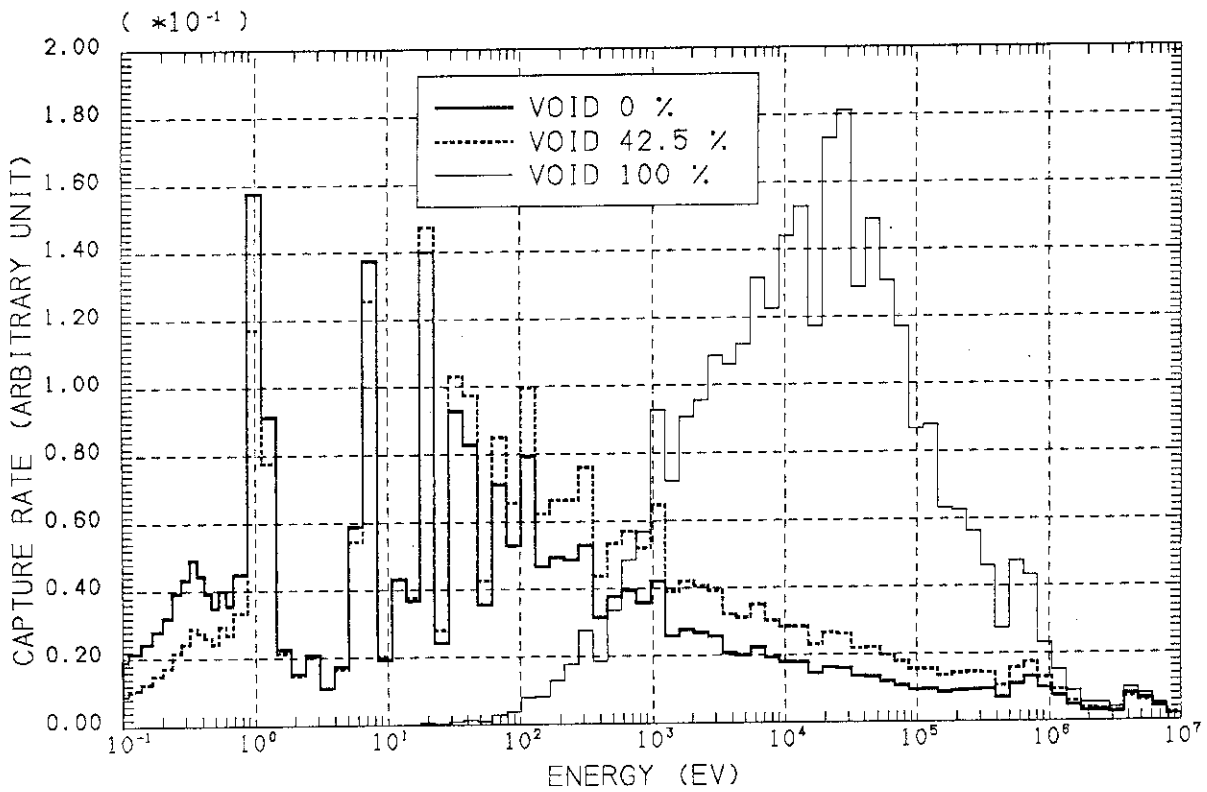
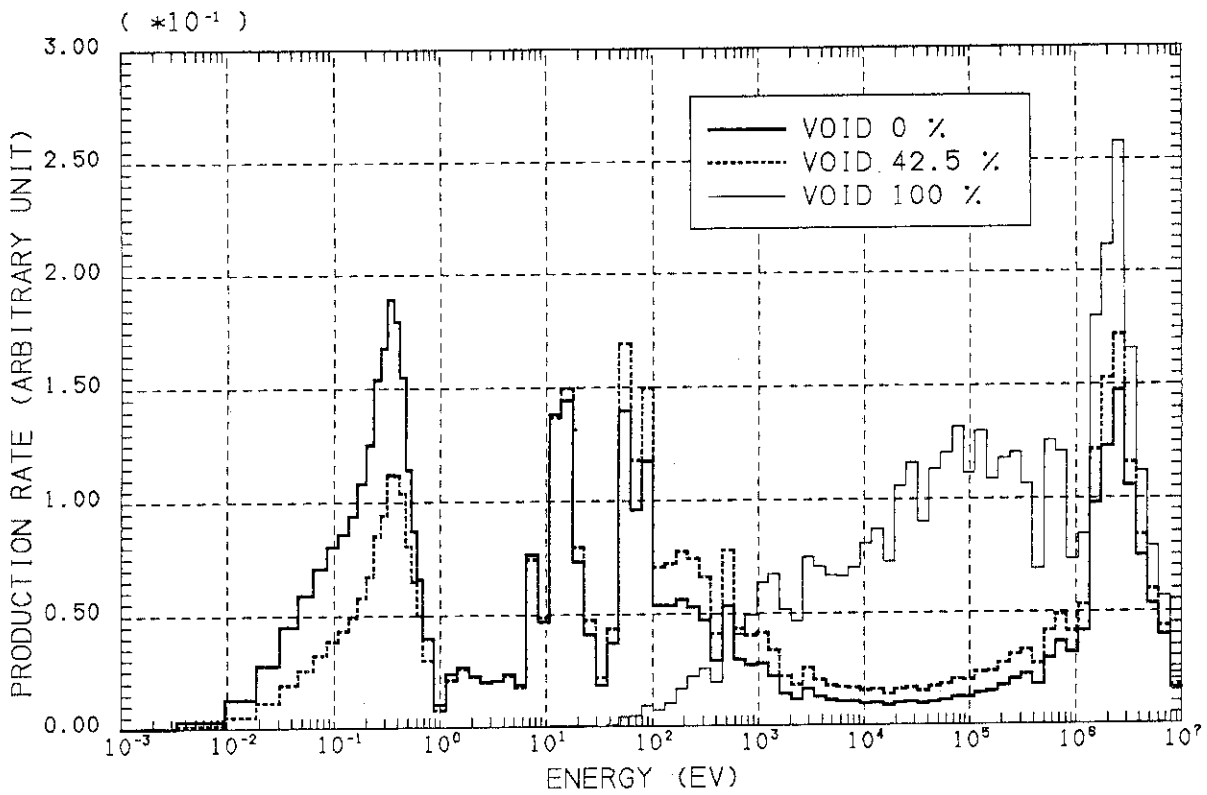


Fig.18 Macroscopic Capture and Fission Rate Distributions in Test Region of PROTEUS Core

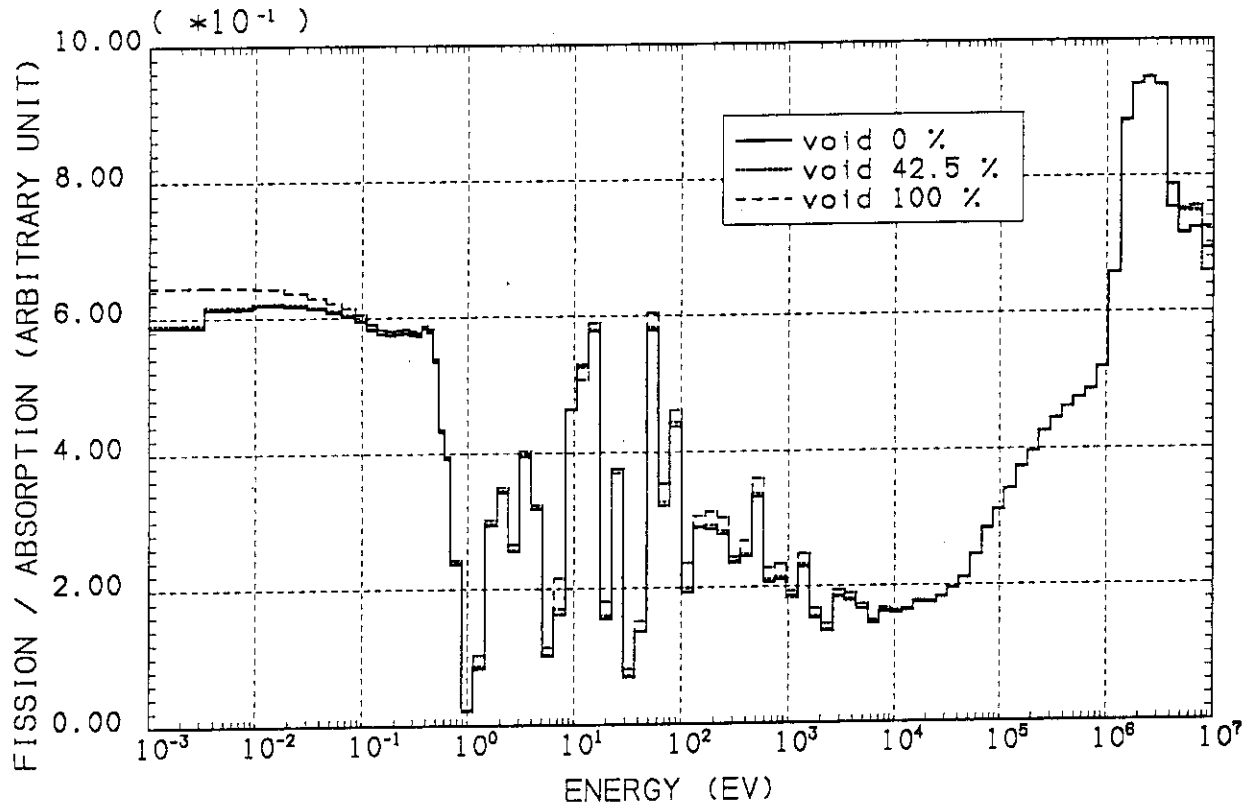


Fig.19 η -Values for Test Regions of PROTEUS Core

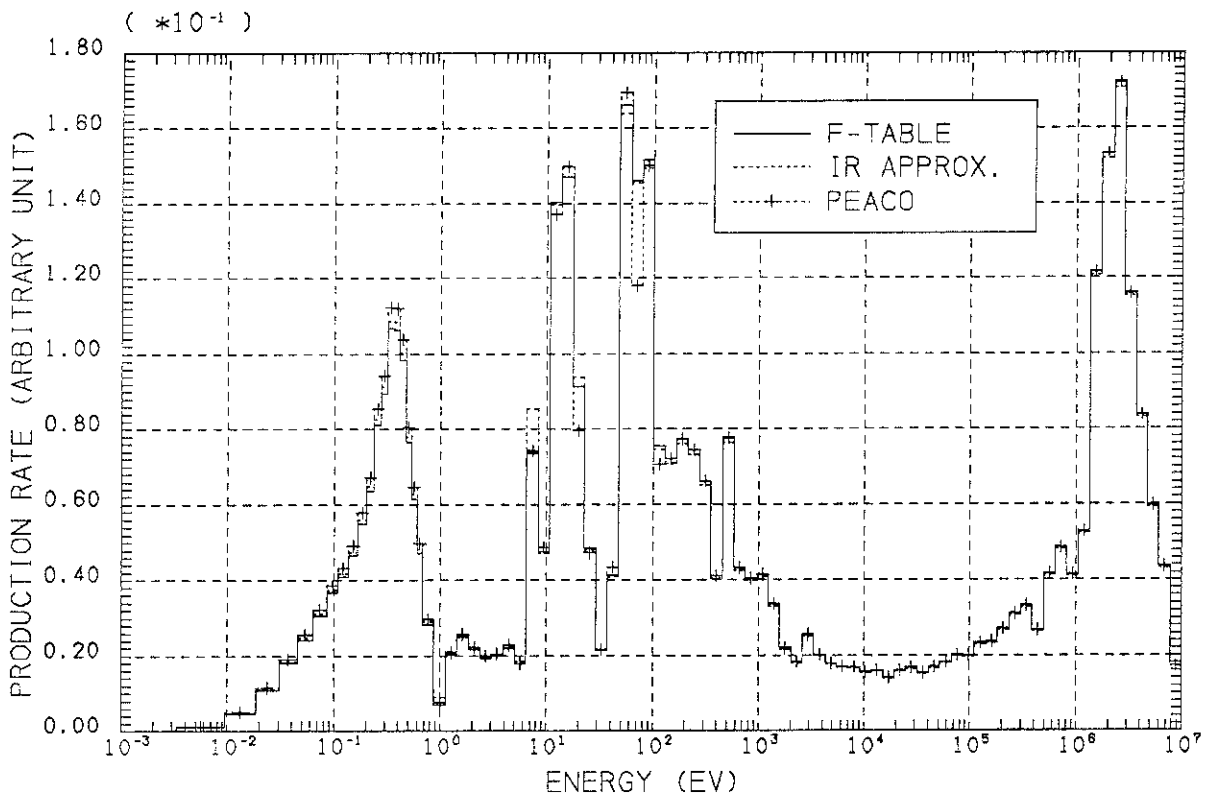
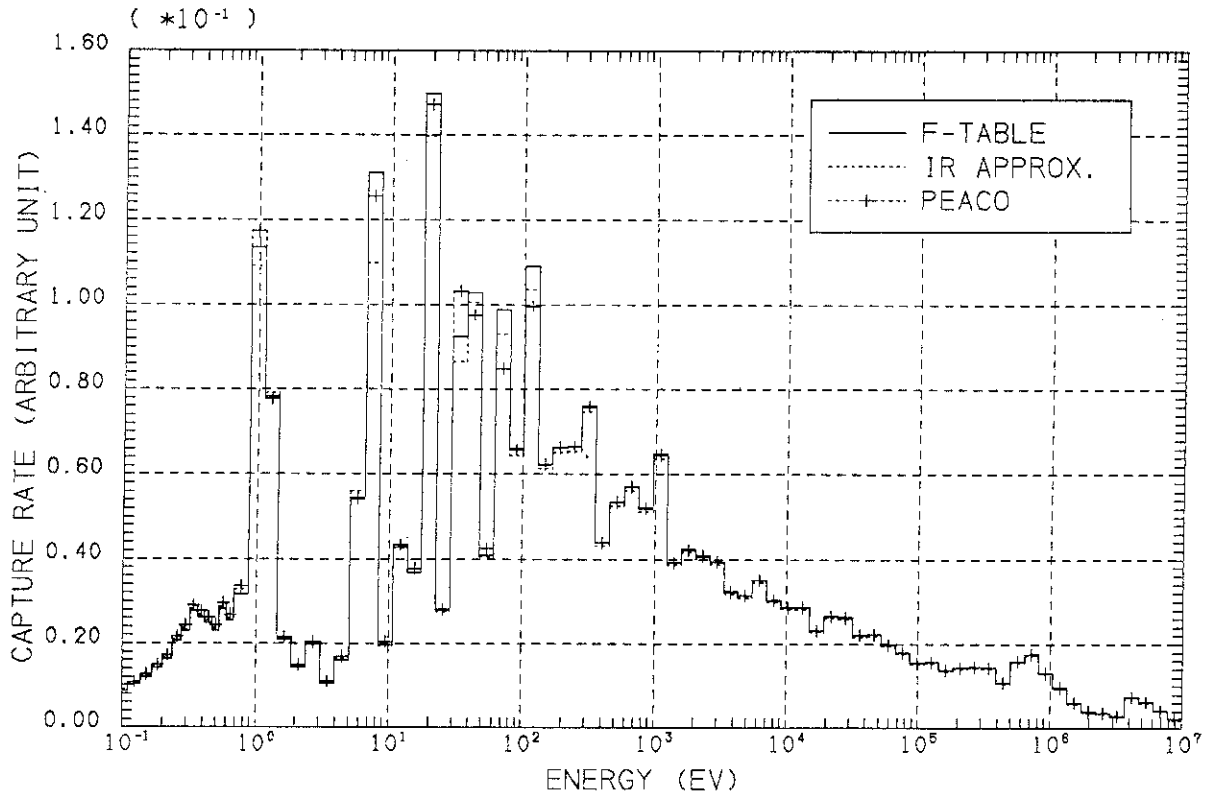


Fig.20 Comparison of Capture and Production Rates among Various Calculational Methods(0% Void)

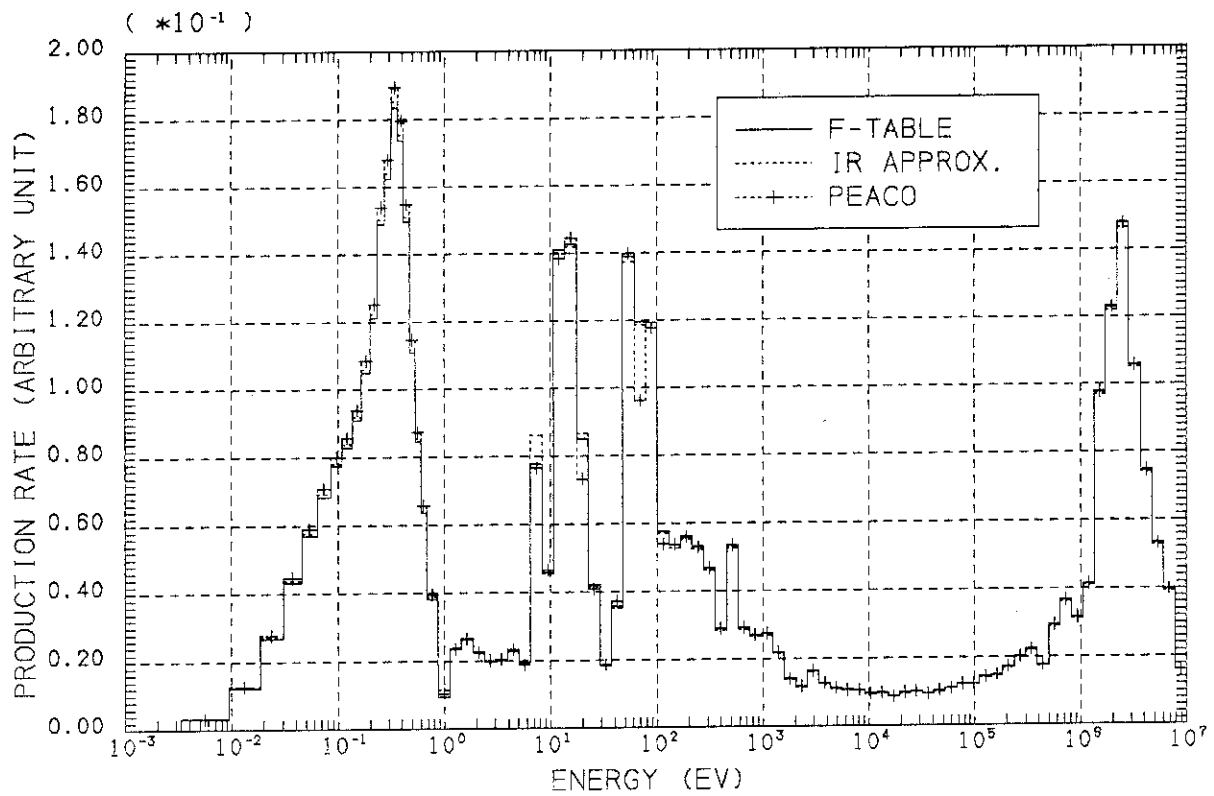
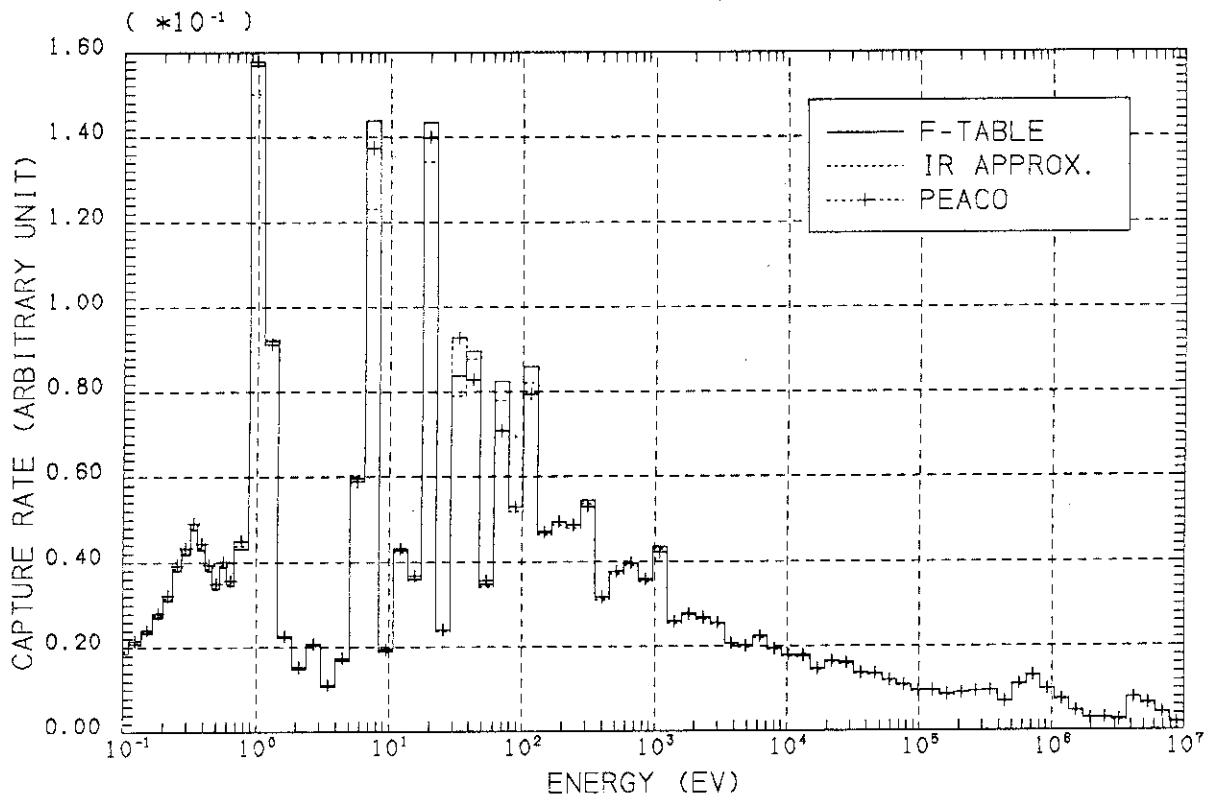


Fig.21 Comparison of Capture and Production Rates among Various Calculational Methods(42.5% Void)

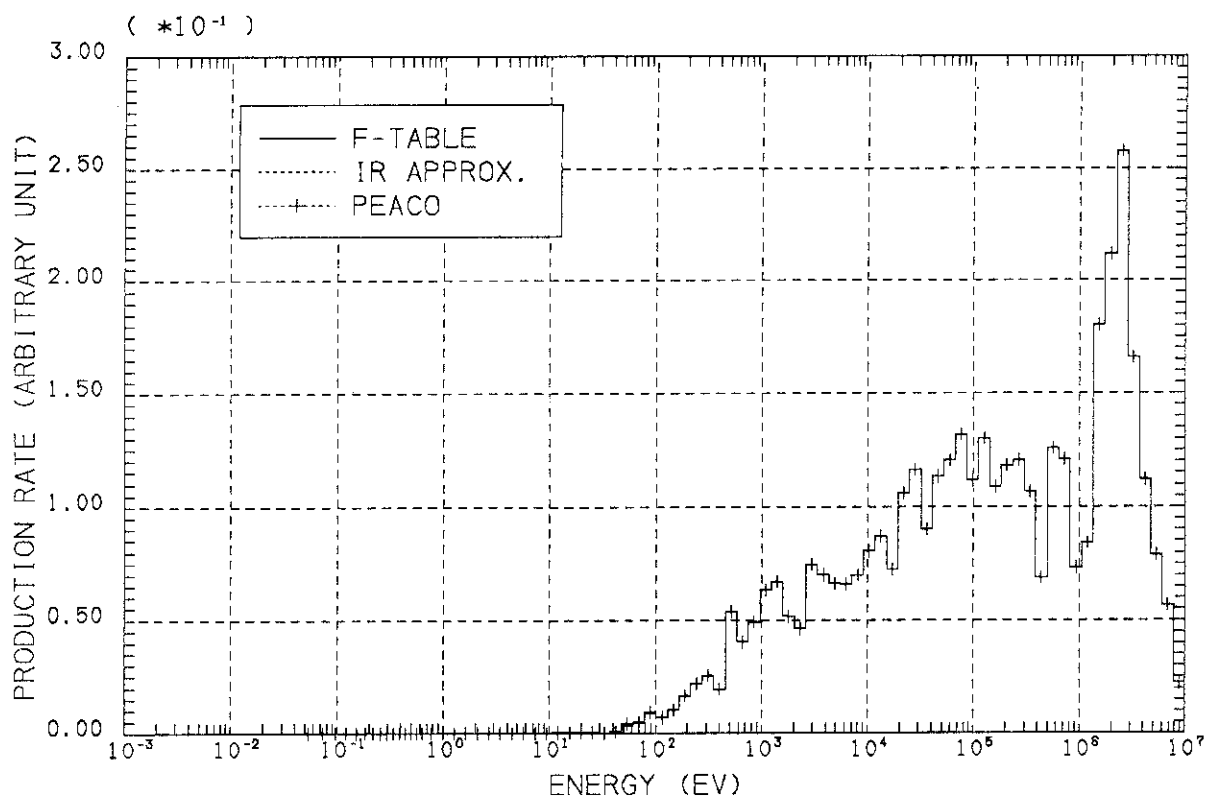
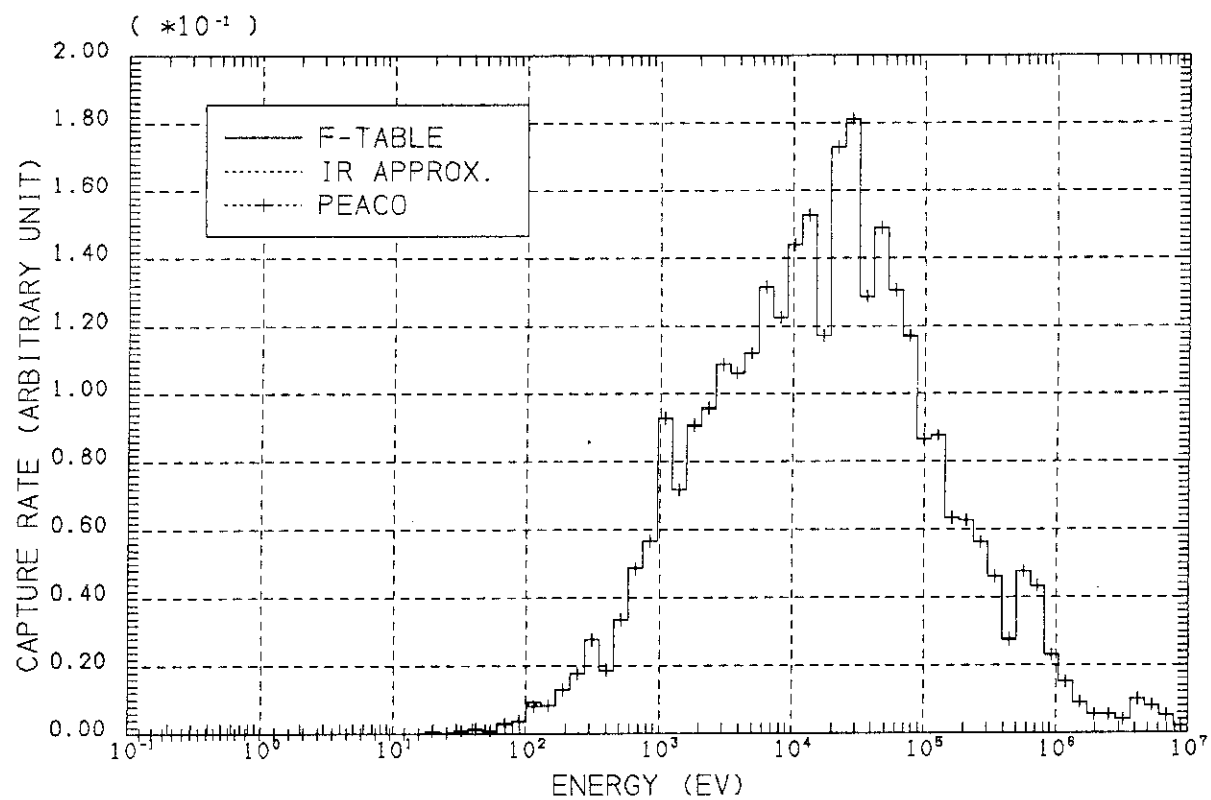


Fig.22 Comparison of Capture and Production Rates among Various Calculational Methods(100% Void)

4.3 解析結果及び結果の検討

(a) TWO-ROD 非均質性

この非均質性に関する問題は、高速炉臨界集合体におけるピン/プレート非均質効果に対応する問題であって、15% PuO₂/UO₂ピンと減損 UO₂ピンを同数ずつ配列することによって得られる格子系が、7.5%濃縮 PuO₂/UO₂燃料格子をどの程度模擬しているかという問題である。two-rodの入った格子を直接取り扱うことができない通常のスペクトル計算コードでは、この問題は解析上からも重要となる。

この非均質効果を検討するため、炉心中心部において上記の2種類の燃料ピンで種々の反応率が測定された。Fig. 16のtwo-rod格子モデルを用いて詳細スペクトル・ルーチンPEACOを通して解析した結果がTable 6に示されている。なお、ここで、他のコード・システムによる結果は、文献12)から引用したものである。

²³⁵U, ²³²Th, ²³³U及び²³⁹Puの分裂反応率に対応するF5, F2, F3及びF9については、実験との一致はかなり良好であるが、²³⁸Uの吸収反応率C8の計算結果は、どの炉心に対しても実験誤差範囲から相当はずれている。このC8は、HCPWRの核特性を決定するための最も重要な反応率の1つであるので、実験値と解析結果の差を検討しておくことが必要であろう。このため、1 KeV以上のエネルギー領域からの寄与が大部分を占める100%ボイド状態の場合を考えることにする。この場合、SRACシステムの計算は、Table-Look-Up法で全ての実効断面積が計算されていると仮定してもよい。

100%ボイド状態での非均質効果も含めた²³⁸Uの背景断面積は、15% PuO₂/UO₂及びUO₂ピンに対して、それぞれ、約25及び20バーンである。共鳴遮蔽因子が用意されている24.8KeV以下の領域からのC8への寄与は、全体の約半分を占める(Fig. 15を参照)。このエネルギー領域では、上記の25及び20バーンから作られる実効断面積の差は、無視できない値になる(例えば、文献(32)の遮蔽因子表を参照されたい)。このことからC8のtwo-rod非均質性が0.998±0.3%であることを理解するのは極めて困難である。それ故、この不一致の原因をSRACシステムのTable-Look-Up法に基づく実効断面積法自身の中に求める必要がある。即ち、稠密でしかも100%ボイドの格子に対して、“均質系と非均質の間を1つのDancoff係数を通じてつなぐ等価定理”を用いてもよいという保証は、これまで得られないのである。実際のtwo-rod格子系は、Dancoff係数で与えられる以上に2種類の燃料ピン間の相互干渉効果が強く、ほぼ同じ共鳴スペクトルが実現されていると考えられる。このような体系において、モンテカルロ法によって既存のTable-Look-Up法の精度を早期に検討する必要がある。

C8に対するtwo-rod非均質性が過少評価されているということは、減損UO₂ピン内の²³⁸Uの共鳴吸収が、PuO₂/UO₂ピン内に比べて、過大に遮蔽されていることを意味している。次の節で示されるように、2種類のピンで平均化された反応率比C8/F9に対しては、two-rod非均質性ほど大きな矛盾は実験値と計算値の間には存在しない。それ故、この場合、共鳴遮蔽のUO₂ピン内での過大評価とPuO₂/UO₂内の過少評価が相殺しているものと考えられる。C8に対して矛盾はあるけれども、諸外国のコード・システムに比較して、SRACシステムはtwo-rod非均質効果に対して良好な結果を与えると結論できよう。

Table 7は、上述の均質化した燃料ピン格子計算と種々の two-rod 格子モデル計算から得られた格子平均パラメータを比較したものである。WIMS, CMP 及び BOXER コードによる結果は、文献12)から引用した。なお、SRACシステムの結果は、均質化した燃料ピンから成る two-rod 格子モデルによる計算値と2種類のピンを考慮した two-rod 格子計算から得られた値との比として与えられている。これなどの比は、平均化した燃料組成のピンから成る単位セル・モデルがどの程度 two-rod 格子を模擬しているかを示すものである。HCPWR ではあまり重要でない F5/F9 に関してのみ、2つのモデル間で差が出ているに過ぎない。それ故、諸外国のコードでは two-rod 格子が直接取り扱えないので、single rod モデルで計算した値に対応する比を掛けることによって補正を加え、格子パラメータ等を算出している。SRAC システムには、two-rod 格子を厳密に扱うことができるので、この均質化に関する問題は本質的ではない。

Table 6 Two rod heterogeneity
 <Reaction rate in depleted UO₂ rod>/<that in PUO₂/UO₂ rod>
 The values in pargsisises show C.E. (Library : JENDL-2)

* Core 1 (Water) void 0 %

case	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Experiment	0.986 ± 1.0%	0.942 ± 0.8%	1.265 ± 1.2%	0.938 ± 0.5%	1.166 ± 1.5%	1.918 ± 1.4%
WIMS-D	0.929	0.934	1.278	0.932	1.172	2.154
EPRI-CPM	0.916	0.945	1.257	*	*	*
BOXER	0.976	0.974	1.239	0.974	1.158	1.899
SRAC						
F-Table	0.908 (0.921)	0.931 (0.988)	1.252 (0.990)	0.930 (0.991)	1.158 (0.993)	1.914 (0.998)
PEACO	0.953 (0.948)	0.930 (0.987)	1.258 (0.994)	0.929 (0.990)	1.164 (0.998)	1.893 (0.987)

* Core 2 (Air) void 100 %

case	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Experiment	0.998 ± 0.3%	0.971 ± 0.5%	1.003 ± 0.3%	0.988 ± 1.0%	1.003 ± 0.3%	1.005 ± 0.3%
WIMS-D	0.980	0.962	1.001	0.960	1.000	1.061
EPRI-CPM	0.977	0.964	1.006	*	*	*
SRAC						
F-Table	0.965 (0.967)	0.960 (0.989)	0.996 (0.993)	0.959 (0.971)	0.996 (0.993)	1.010 (1.004)
PEACO	0.966 (0.968)	0.960 (0.989)	0.996 (0.993)	0.959 (0.971)	0.996 (0.993)	1.009 (1.004)

* Core 3 (Dowtherm) void 42.5 %

case	C8	F8	F5	F2	F3	F9
Experiment	0.989 ± 1.0%	0.938 ± 0.5%	1.131 ± 0.7%	0.935 ± 1.0%	1.113 ± 1.0%	1.572 ± 1.0%
WIMS-D	0.921	0.942	1.140	0.941	1.103	1.894
EPRI-CPM	0.906	0.952	1.137	*	*	*
BOXER	0.971	0.979	1.114	0.978	1.092	1.562
SRAC						
F-Table	0.902 (0.912)	0.939 (1.001)	1.124 (0.994)	0.938 (1.003)	1.091 (0.980)	1.622 (1.032)
PEACO	0.945 (0.956)	0.938 (1.000)	1.128 (0.997)	0.937 (1.002)	1.096 (0.985)	1.585 (1.008)

Table 7 Effect of fuel homogenization.

Ratio of reaction rate ratio of two-rod calculation to that of single rod calculation. (library : JENDL-2)

* Core 1 (Water) void 0 %

	F-Table	PEACO	:	WIMS-D	CPM	BOXER
C8/F9	1.050	1.029	:	1.041	1.043	1.033
F8/F9	0.998	0.995	:	1.012	1.029	1.001
F5/F9	1.189	1.177	:	1.214	1.198	1.173
F1/F9	1.045	1.029	:	1.057	1.051	1.038
k_{∞}	1.002	1.004	:	1.000	1.006	1.004

* Core 2 (Air) void 100 %

	F-Table	PEACO	:	WIMS-D	CPM
C8/F9	1.001	1.001	:	1.009	0.997
F8/F9	0.992	0.992	:	1.000	1.027
F5/F9	1.004	1.004	:	1.023	1.018
F1/F9	1.006	1.006	:	1.019	1.020
k_{∞}	1.000	1.000	:	0.995	1.007

* Core 3 (Dowtherm) void 42.5 %

	F-Table	PEACO	:	WIMS-D	CPM	BOXER
C8/F9	1.037	1.026	:	1.053	1.048	1.031
F8/F9	0.999	0.996	:	1.018	1.038	1.000
F5/F9	1.114	1.097	:	1.143	1.135	1.096
F1/F9	1.050	1.027	:	1.072	1.064	1.036
k_{∞}	0.997	0.999	:	0.998	0.999	0.999

(b) 反応率比及び k_{∞}

Table 8 は、 k_{∞} に対する実験値 (E) と種々の計算モデルによる計算結果 (C) との比較を示している。ここで、 k_{∞} は、Buckling 探索によって臨界にされた系に対する基本モード・スペクトルにおける吸収に対する生成の比として定義されている。

全般的には、JENDL-2 に基づくライブラリーを使用した SRAC システムの結果は、実験値と良好な一致を示している。しかし、ENDF/B-4 によるライブラリーの k_{∞} に対する予測精度が悪く、2~4% 過少評価することが判る。3.2 節で示したように、PEACO ルーチンの詳細計算による ^{238}U の実効断面積の値に比べて、Table-Look-Up 法は過少評価し、IR 法は過大評価するので、PEACO ルーチンによる k_{∞} の値は対応する 2 つの k_{∞} の間にある。これら 3 つの計算法の差違は実験誤差と同程度であり、特に 100% ボイド状態では、差違はほとんどないことが判る。また、格子モデル間の差違も小さく、臨界性を論ずる場合には、組成の異なる 2 種類の燃料ピンの平均化した組成を持つ単一燃料ピン格子を円柱化近似した形状で計算すれば充分であることを示している。なお、ここで、HEX(1,F or P) と XY1(1,F or P) との間に 0.10~0.15% 程度の差があるのは、衝突確率計算の際の数値計算誤差に基づくものと考えられる。

Table 9 には、種々の反応率比に対する SRAC システムの計算結果が実験値との比較において示してある。この表中にある WIMS-D 及び EPRI-CPM による結果、文献 (12) より引用したものである。中性子バランス及び転換比の観点から最も重要な量は C8/C9 であるが、どのコード・システムの結果も実験値との一致が良くない (SRAC $\pm 5\%$, WIMS-DO $\sim +5\%$, EPRI-CPM $-5\sim -7\%$)。SRAC システムの結果の不一致については、その誤差の大きな源の一つは共鳴核種の非分離領域の共鳴“はしご”が充分精度良く選択されてないことに起因するものと考えられる。即ち、SRAC システムに用いられている JENDL-2 を処理した無限稀釈無面積は、JENDL-2 の評価値に比べて、 ^{238}U では 3.35 KeV で最大 10% の過少評価、 ^{239}Pu の分裂断面積では、0.583 KeV \sim 25.8 KeV で最大 40% 近い過少評価が見られる。これ等の様子は、Figs. 23~25 に示されている。なお、これ等の図は、核データ・センターの菊池康之氏によって作成されたものである。ここで、JENDL-2AV は JENDL-2 のデータを直接平均した値、JENDL-2B は SRAC ライブラリーに対する値。これ等の図から、SRAC システムの非分離領域の多群無限稀釈断面積は、概ね過少評価されていることが明らかである。特に、 ^{239}Pu の分裂断面積は著しく過少評価されている。 ^{238}U の吸収及び ^{239}Pu の分裂断面積を修正することにより、計算結果が改善されると予想されるが、反応率分布はスペクトルに大きく左右されるので、ここで定量的な議論をして結論を出すことは困難である。いずれにしても、早期に SRAC ライブラリーの非分離領域の断面積の再計算を行って、正確な解析をできるようにする必要がある。

ここで注目すべきことは、どのコード・システムによる反応率比に対する C/E もボイド率によって大きく変動することである。このことは、計算された中性子スペクトルが体系内に実現されているスペクトルを包括的に再現していないということを意味している。コード・システムによっては、分裂核種の共鳴実効断面積に対して無限稀釈断面積を用いるなど、実効断面積の計算に充分考慮が払われてないものもある。⁽¹²⁾ 前の 4.3 の (a) で問題になった C8 の two-rod 非均質性に直接関係している反応率比 C8/F9 の予測精度は特に良くないようである。C8/F9 の C/E 値が相対的に良い WIMS-D のその他の反応率比及び k_{∞} に対する C/E は極めて悪く、C8/F9 の C/E が

良いのは、偶然の一致としか言いようがない。

これまでの議論から、反応率比に関しても既存のコード・システムから矛盾のない計算結果は得られておらず、データ及び手法の両面から総合的に反応率比の予測精度を上げるための努力をする必要がある。SRACシステムについては、総合的に見ると好ましい結果を出していると結論できる。

Table 8 Results of geometrical buckling search by SRAC

latt. ; lattice model for calculation.
 CYL = cylinder , HEX = hexagon
 XY1 = multiple pin rod (single rod)
 XY2 = multiple pin rod (two rod)
 div. ; N = N meshes are assigned to fuel region.
 res. ; resonance calculation option.
 F = F-Table look-up , I = IR approximation
 P = PEACO
 C/E ; ratio of calculated k_{∞} to experimental value by
 R.Chawla et al.
 buckling ; geometrical buckling (cm^{-2})

* Core 1 : light water as moderater (0 % void)

Experiment : $k_{\infty} = 1.045 \pm 1.1 \%$

latt.	div.	res.	buckling	k_{eff}	k_{∞}	C/E
< JENDL-2 >						
CYL	1	F	6.40E-4	0.99996	1.03477	0.9902
	1	I	9.50E-4	1.00005	1.05188	1.0066
	1	P	6.62E-4	0.99999	1.03605	0.9914
HEX	1	F	7.05E-4	0.99999	1.03840	0.9937
	1	I	1.01E-3	0.99992	1.05511	1.0097
	1	P	7.55E-4	1.00013	1.04133	0.9965
CYL	3	P	6.87E-4	1.00002	1.03744	0.9928
HEX	3	P	6.90E-4	0.99997	1.03756	0.9929
XY1	1	F	7.43E-4	1.00000	1.04047	0.9957
	1	P	7.83E-4	1.00005	1.04276	0.9979
XY2	1	F	7.90E-4	0.99983	1.04640	1.0013
	1	P	8.50E-4	1.00004	1.04656	1.0015
	3	P	8.82E-4	0.99997	1.04826	1.0031
< ENDF-B4 >						
HEX	1	P	4.57E-4	0.99999	1.0248	0.9807
XY2	1	P	5.42E-4	1.00000	1.0295	0.9852

(to be continued)

Table 8 (continued)

* Core 2 : Air-Al smearing as moderator (100 % void)

Experiment : $k_{\infty} = 0.905 \pm 0.8 \%$

latt.	div.	res.	buckling	k_{eff}	k_{∞}	C/E
< JENDL-2 >						
CYL	1	F	-4.60E-4	1.00007	0.89560	0.9896
	1	I	-4.58E-4	0.99992	0.89590	0.9899
	1	P	-4.58E-4	0.99997	0.89594	0.9900
HEX	1	F	-4.59E-4	0.99998	0.89622	0.9903
	1	I	-4.58E-4	1.00002	0.89648	0.9906
	1	P	-4.58E-4	1.00007	0.89652	0.9906
CYL	3	P	-4.58E-4	0.99997	0.89594	0.9900
HEX	3	P	-4.58E-4	1.00004	0.89657	0.9907
XY1	1	F	-4.60E-4	1.00019	0.89599	0.9900
	1	P	-4.60E-4	1.00048	0.89624	0.9903
XY2	1	F	-4.59E-4	0.99958	0.89565	0.9897
	1	P	-4.58E-4	0.99988	0.89592	0.9900
< ENDF-B4 >						
HEX	1	P	-5.85E-4	1.00000	0.86683	0.9578
XY2	1	P	-5.85E-4	0.99978	0.86640	0.9573

* Core 3 : Dowtherm as moderator (42.5 % void)

Experiment : $k_{\infty} = 0.991 \pm 1.5 \%$

latt.	div.	res.	buckling	k_{eff}	k_{∞}	C/E
< JENDL-2 >						
CYL	1	F	-3.37E-4	1.00001	0.97611	0.9850
	1	I	-1.02E-4	1.00008	0.99283	1.0018
	1	P	-3.37E-4	0.99991	0.97605	0.9849
HEX	1	F	-3.15E-4	0.99994	0.97765	0.9865
	1	I	-7.94E-5	1.00001	0.99437	1.0034
	1	P	-2.96E-4	1.00003	0.97904	0.9879
CYL	3	P	-3.25E-4	0.99996	0.97693	0.9858
HEX	3	P	-2.82E-4	0.99995	0.97994	0.9883
XY1	1	F	-2.96E-4	0.99995	0.97900	0.9879
	1	P	-2.81E-4	1.00007	0.98015	0.9890
XY2	1	F	-3.38E-4	1.00001	0.97602	0.9848
	1	P	-2.96E-4	1.00040	0.97936	0.9883
< ENDF-B4 >						
HEX	1	P	-5.79E-4	1.00000	0.95898	0.9677
XY2	1	P	-5.76E-4	1.00002	0.95911	0.9678

Table 9. Comparison of reaction rate ratio and k_{∞} between calculation and experiment.

< REACTION RATE SYMBOLS >

F9 -- ^{239}Pu fission, C8 -- ^{238}U capture, F8 -- ^{238}U fission,
 F5 -- ^{235}U fission, F1 -- ^{241}Pu fission

< CASE SYMBOLS >

EXP. -- Experimental value by R.Chawla et al.
 WIMS -- C/E value by WIMS-D
 CPM -- C/E value by EPRI-CPM

F -- C/E value by SRAC using F-Table look-up
 P -- C/E value by SRAC using PEACO
 (by two rod calculation)

* Core 1 (Water) void 0 %

case	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	k_{∞}
EXP.	0.0691 ($\pm 2.2\%$)	0.00987 ($\pm 2.5\%$)	0.988 ($\pm 2.0\%$)	1.78 ($\pm 4.5\%$)	1.045 ($\pm 1.1\%$)
WIMS	1.002	0.974	1.096	1.096	0.990
CPM	0.933	1.003	1.016	1.033	1.012
SRAC					
(JENDL-2)					
F	0.971	1.035	0.994	0.968	1.001
P	0.962	1.032	0.996	0.947	1.002
(ENDF-B4)					
P	0.991	0.991	1.010	0.945	0.985

* Core 2 (Air) void 100 %

case	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	k_{∞}
EXP.	0.1476 ($\pm 1.5\%$)	0.01926 ($\pm 2.0\%$)	1.091 ($\pm 1.5\%$)	1.46 ($\pm 2.5\%$)	0.905 ($\pm 0.8\%$)
WIMS	1.044	0.990	1.126	1.271	1.023
CPM	0.931	1.047	1.053	0.990	1.070
SRAC					
(JENDL-2)					
F	1.053	1.013	1.051	1.013	0.989
P	1.052	1.013	1.052	1.014	0.990
(ENDF-B4)					
P	1.109	0.965	1.047	1.011	0.957

(to be continued)

Table 9 (continued)

* Core 3 (Dowtherm) void 42.5 %

case	C8/F9	F8/F9	F5/F9	F1/F9	k_{∞}
EXP.	0.0874 ($\pm 2.0\%$)	0.01113 ($\pm 2.3\%$)	1.032 ($\pm 1.8\%$)	1.75 ($\pm 3.5\%$)	0.991 ($\pm 1.5\%$)
WIMS	1.054	1.045	1.189	1.292	0.975
CPM	0.951	1.068	1.085	1.165	1.014
SRAC (JENDL-2)					
F	1.003	1.119	1.039	1.052	0.985
P	0.994	1.115	1.042	1.031	0.988
(ENDF-B4)					
P	1.029	1.067	1.059	1.036	0.968

²³⁸U CAPTURE

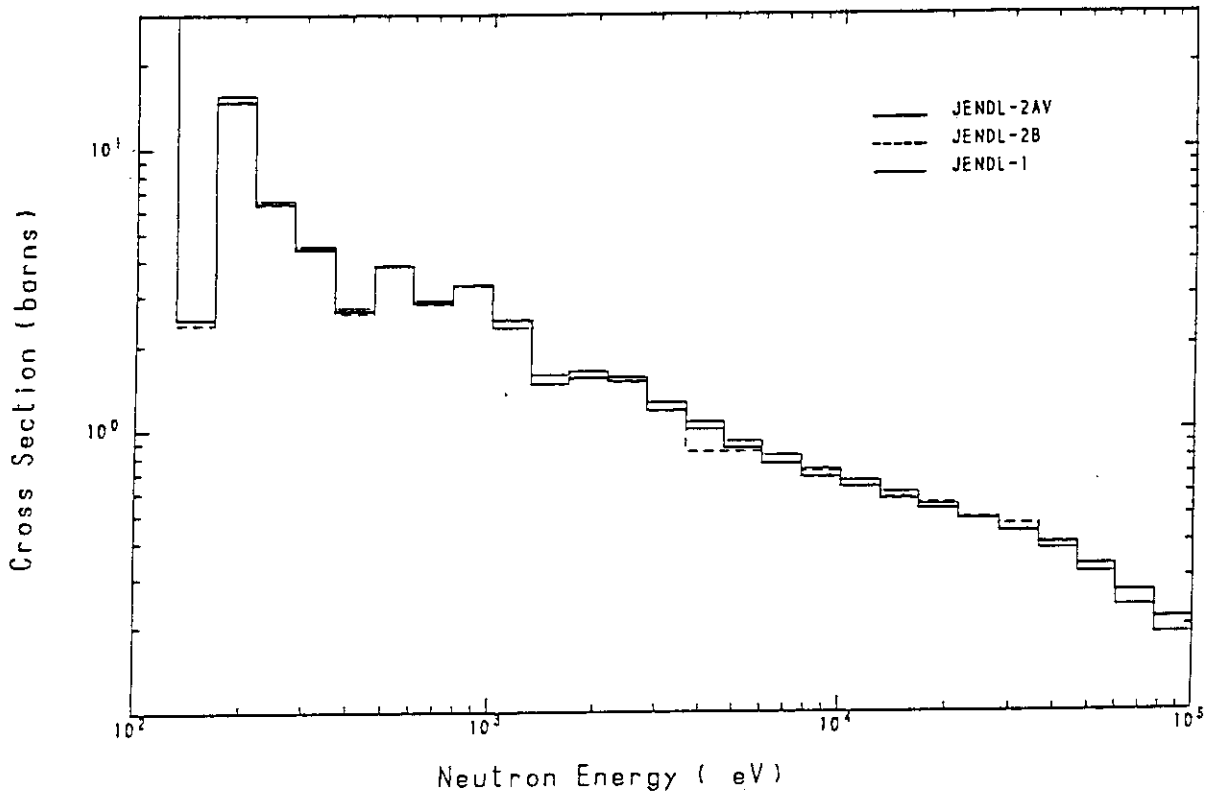


Fig.23 Comparison of Multigroup Capture Cross Sections of ²³⁸U (JENDL-2)

²³⁹Pu CAPTURE

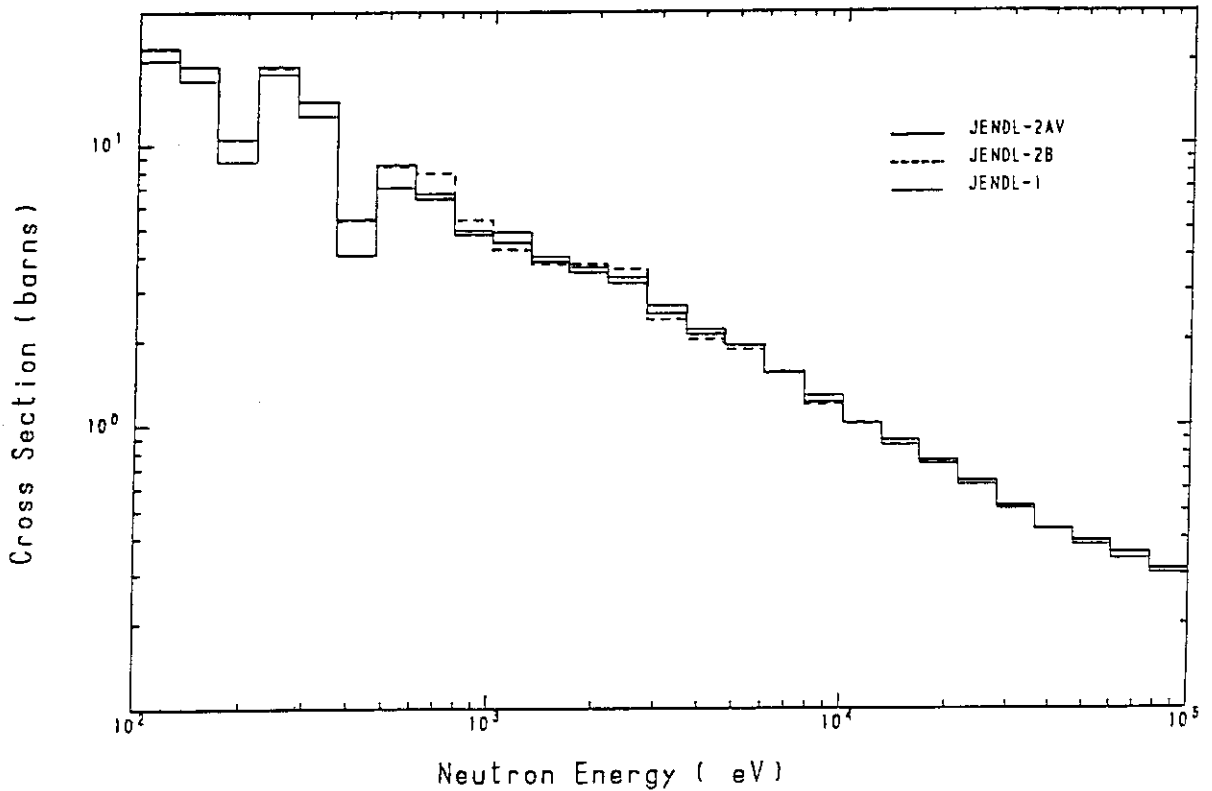


Fig.24 Comparison of Multigroup Capture Cross Sections of ²³⁹Pu (JENDL-2)

^{239}Pu FISSION

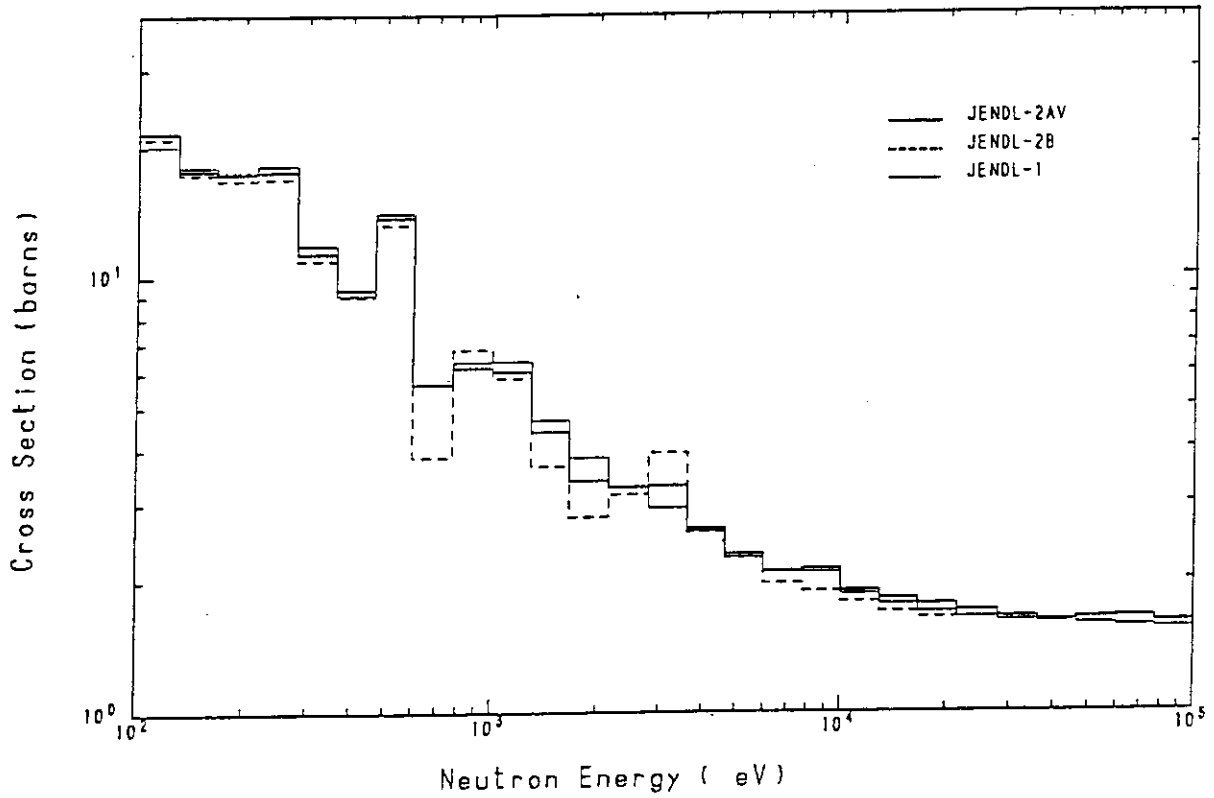


Fig.25 Comparison of Multigroup Fission Cross Sections of ^{239}Pu (JENDL-2)

(c) ^{238}U の吸収反応率 (C8) の燃料ピン内の微細構造

^{238}U の共鳴吸収の異常に高い強さを確認すると共に、燃料ピン内の吸収率の空間分布を知るために、フォイルを用いて C8 の径方向の分布が測定された⁽¹¹⁾。この微細構造を定量的に確認しておくことは、高い燃焼度が期待されている HCPWR の燃焼特性を予測するうえで、極めて重要なことである。即ち、C8 の微細構造に比例して生成される ^{239}Pu の量は、燃焼特性や転換率を評価する際決定的役割を演ずる。さらに、高速炉に比べて、低エネルギー領域の C8 への寄与が大きいため、微細構造の変化は急激であると予測される。それ故、C8 の微細構造の予測精度は、HCPWR の燃焼特性の予測精度を決定する可能性も考えられる。

Figure 26 には、 UO_2 及び PuO_2/UO_2 ピンに対する測定値と SRAC システムによる計算値の比較が行われている。ここでの“測定値”は、文献 11) の図から目で読み取ったものである。さらに、測定が行われた最外周部の領域の厚さは、極めて薄く約 0.02cm である。このような薄い領域を精度良く取り扱うようには、SRAC システムにおいては充分考慮が払われていない。このため、SRAC システムを用いる解析では、最外周部の 2 領域を 1 領域にまとめ、実験値に対しては平均操作をし比較を行った。SRAC システムの計算は JENDL-2 に基づいたライブラリーで行ったものであるが、実験結果との一致は極めて良いことが判る。一方、ENDF/B-4 ライブラリーを用いた SRAC の計算も single-rod 格子で行って、連続エネルギー・モンテカルロ・コード VIM との比較を行った。Fig. 27 の下の図では、 UO_2 及び PuO_2/UO_2 ピンに対する実験結果の平均値に対照させて、2 つの計算結果がプロットされている。この場合も実験値との一致が良い。 ^{238}U の核データに関しては、C8 の計算に大きく寄与する低エネルギー領域 (< 100eV) では、JENDL-2 と ENDF/B-4 の間にはもともと大きな差はない。Fig. 27 の上図においては、この場合の SRAC で計算された両ピン内の微細構造が比較されている。両者の間では、ほとんど差が見られないことが判る。

上記の議論から、SRAC システムに組込まれている共鳴吸収評価のための手法に基づいて計算された C8 の微細構造は、充分実験結果を再現できるものと結論される。しかし、この節の (a) で述べた C8 についての two-rod 非均質性に関する矛盾は、依然解決されないままである。

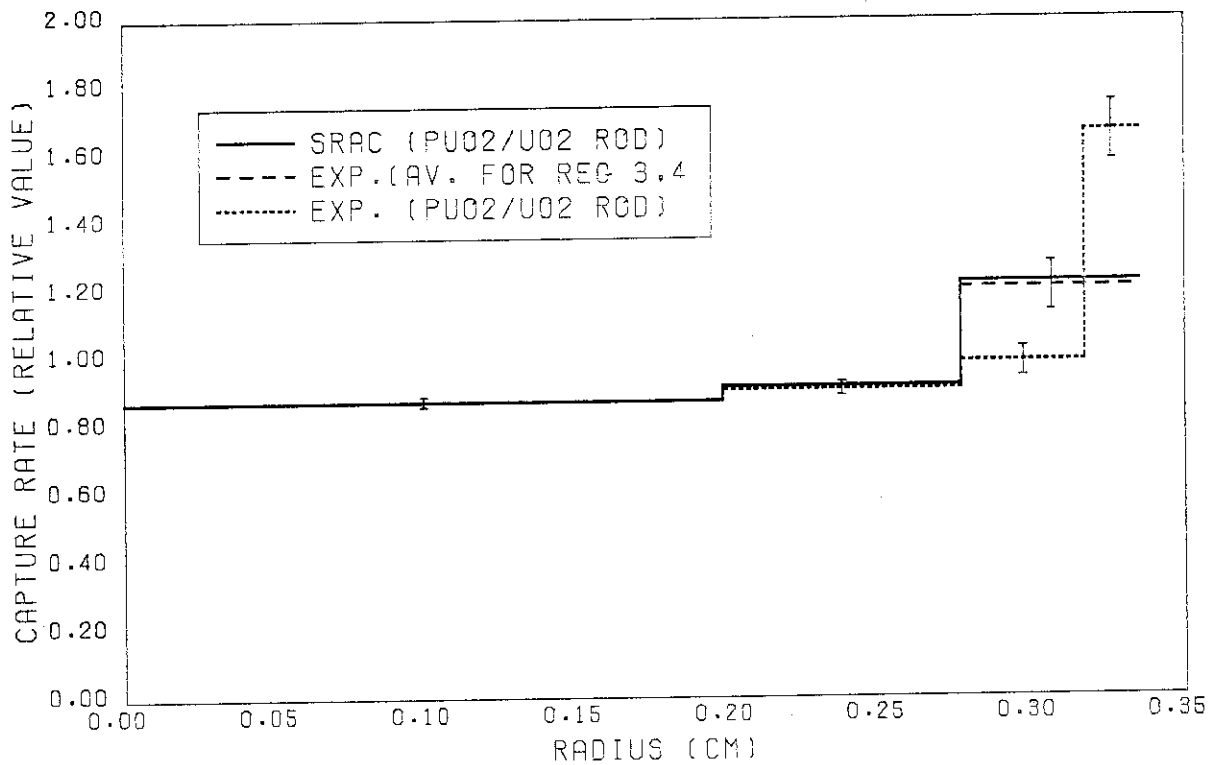
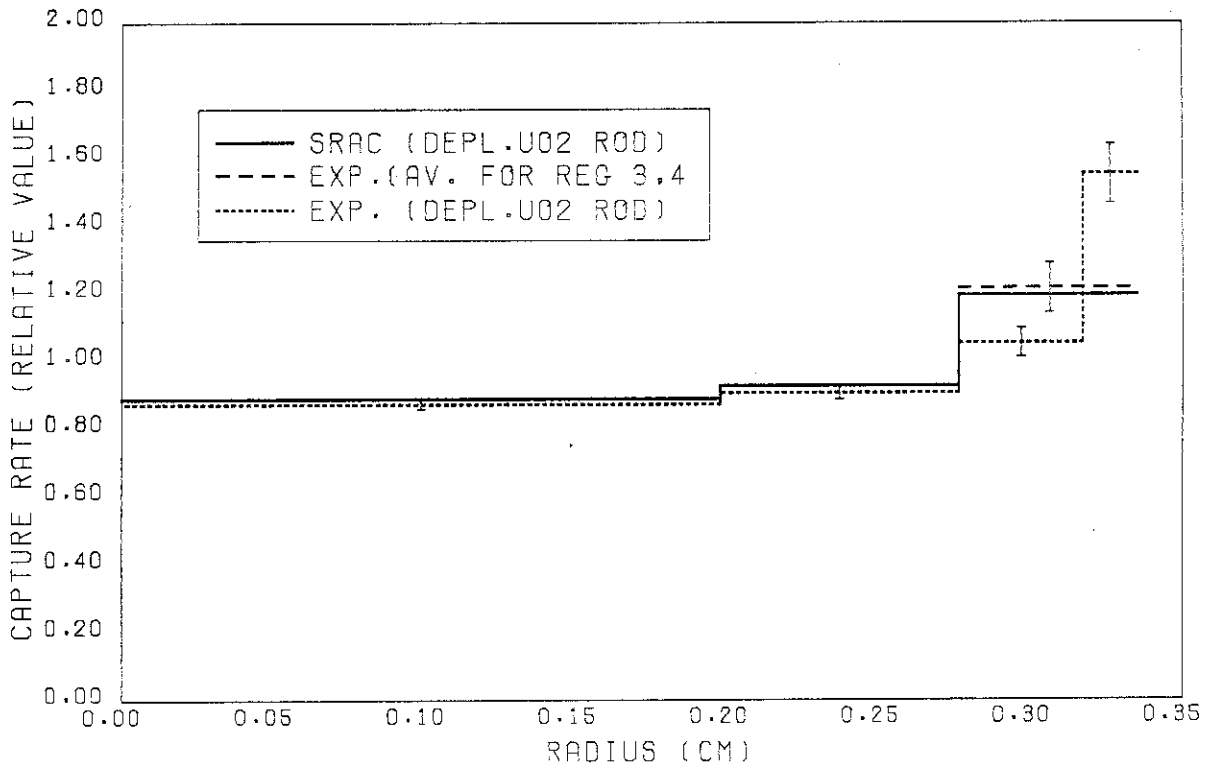


Fig.26. Comparison of Fine Structures for C8 between Measurement and Analysis

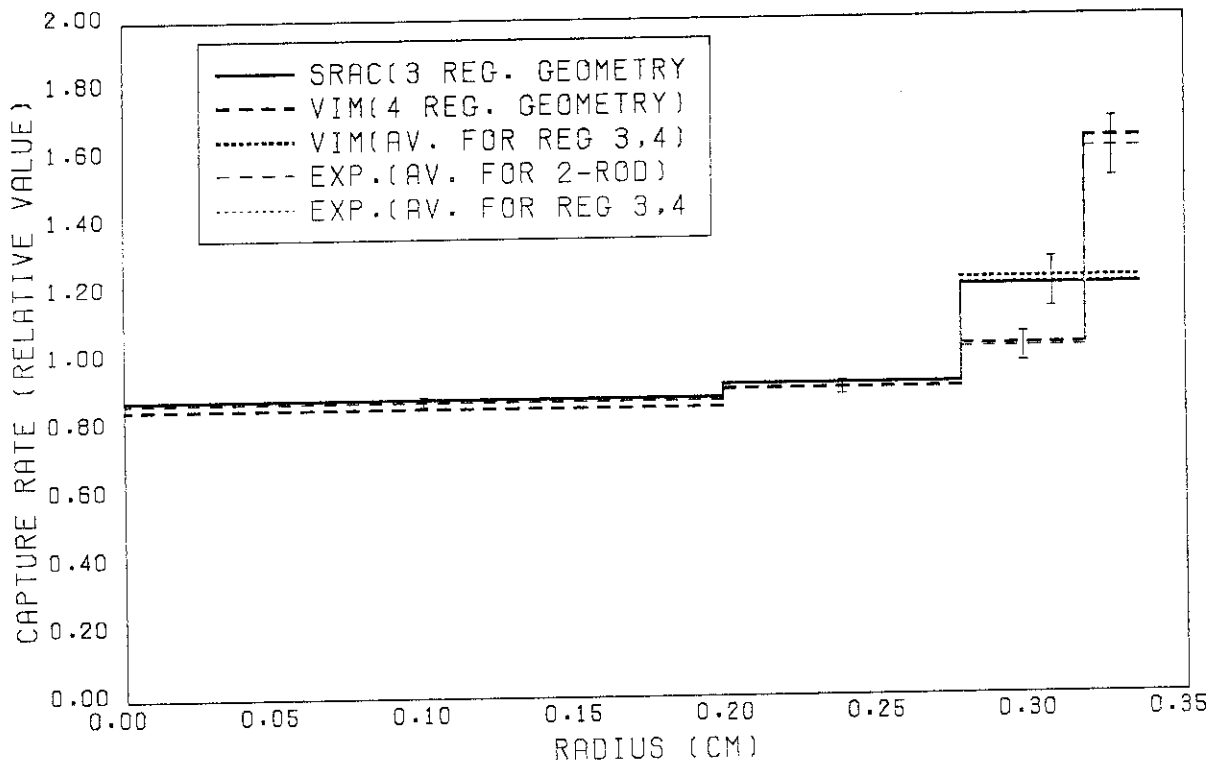
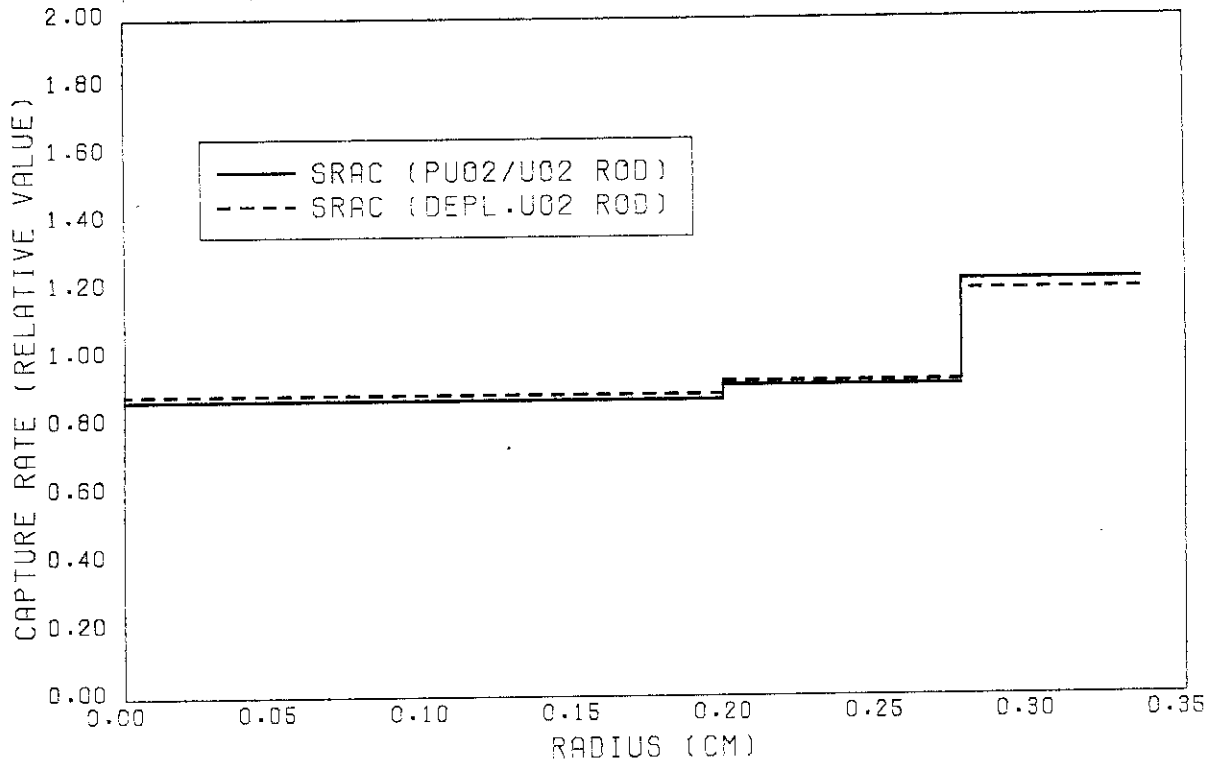


Fig.27 Fine Structure for C8 Calculated by ENDF/B-4 and Comparison with Measurement

5. ま と め

熱中性子炉体系の解析及び設計のために開発された SRAC システムを用いて、EIR の PROTEUS 炉で行われた HCPWR 格子の実験のうち、 k_{∞} 及び重要核種の反応率を中心として解析した結果について述べた。SRAC システムによる結果は、諸外国で熱中性子炉用に開発されたコード・システムの結果に比べて、総合的に見ると良好であることが示された。しかし、諸外国のコード・システムの結果と同様に、SRAC の予測精度は減速材のボイド率に依存するという好ましくない結果が得られた。この事実は、SRAC システムにおいてボイド率変化に伴う中性子スペクトルの追従が充分なされていないことを意味するものと考えられる。さらに不幸なことに、解析の途中で、重要共鳴核種の非分離領域の群定数に対する SRAC ライブラリーに、共鳴“はしご”を発生させた際に生じたと思われる誤差が発見されたことである。この誤差は無視できない大きさのものであるため、種々の炉物理量に対する定量的議論をする余地を少なくした。

ここで行った研究の成果として得られたものは、

- i) HCPWR 格子計算を行う場合は、共鳴エネルギー領域を超詳細群計算を行って、正確な実効断面積を求める必要のあることを連続エネルギー・モンテカルロ・コード VIM を使った比較計算で明かにしたこと、
- ii) two-rod 燃料格子を直接取り扱える衝突確率の形状ルーチンを用意することにより、two-rod 非均質性を厳密に計算できるようにしたこと

である。(i)に関連して、熱中性子炉を扱う場合に精度の高い近似解析法として広く用いられている IR 法が、HCPWR 格子に対して有効な手法とならないことは、予想外のことであった。一方、(ii)に関連して、実効分裂断面積の計算の際に、 ^{238}U 及び ^{240}Pu の共鳴レベルと分裂核種の共鳴レベルの間に、異核種間の偶然に一致するレベルの重りの効果が見られ、より正確な断面積の評価のために、超詳細スペクトル計算を行う必要がある。また、PROTEUS 炉の HCPWR 格子のテスト領域を解析する際の固有の問題であるが、C8 の two-rod 非均質効果の予測精度は、極めて悪いものであった。全共鳴エネルギー領域を詳細に取り扱うことは、経済的でないので、Table-Look-Up 法のため、稠密な two-rod 格子を扱う Dancoff 係数を導出する必要がある。

一方、HCPWR は高燃焼度が期待されているため、共鳴吸収の計算手法に関連して残されている問題の一つは、詳細スペクトル計算法と IR 法などの簡便法の間には燃焼計算で有意な差が出るかどうかということである。この問題は、C8 の燃焼ピン径方向の微細構造と関係しており、高速炉や熱中性子炉におけるより重要性は高いものと予想される。幸いにも SRAC システムによる C8 の微細構造の予測精度が高いので、早期に検討すべき興味ある問題の一つと思われる。

ここでは、Chawla 等⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾が行ったように、 k_{∞} ボイド係数を測定された反応率比に対応する要素に分配することによって、 k_{∞} テスト体系から HCPWR 炉心への外挿の際のボイド係数の予測精度を検討することはしなかった。このような検討のためには、バックリング B^2 に対応する大きさの一次元円柱形状炉心に対して、既存の拡散コードを用いて対応した計算を行う方が得

策であると判断される。このような計算ができるようにするためには、SRACシステムの拡散計計算部分に対して多少の修正・改良作業が必要である。解析結果は別報で発表の予定である。

謝 辞

Dr.R.Chawlaは、PROTEUSでの実験についての我々の質問に心よく返答して下さいるとともに我々が測定結果を解析し、文献12)の公刊前にその結果を発表することを許して下さい。ここに記して感謝の意を表します。さらに、本研究を進めるにあたり、HCPWRの問題について有益な助言を頂き、また本原稿に目を通して種々のコメントを頂いた原子炉工学部次長松浦祥次郎氏に感謝致します。

策であると判断される。このような計算ができるようにするためには、SRACシステムの拡散計計算部分に対して多少の修正・改良作業が必要である。解析結果は別報で発表の予定である。

謝 辞

Dr.R.Chawlaは、PROTEUSでの実験についての我々の質問に心よく返答して下さいるとともに我々が測定結果を解析し、文献12)の公刊前にその結果を発表することを許して下さいました。ここに記して感謝の意を表します。さらに、本研究を進めるにあたり、HCPWRの問題について有益な助言を頂き、また本原稿に目を通して種々のコメントを頂いた原子炉工学部次長松浦祥次郎氏に感謝致します。

文 献

- 1) Edlund M.C. : Trans. Am. Nucl. Soc., 24, 508 (1976).
- 2) Küsters H. : "Recent Reactor Physics and Shielding Investigations in the Federal Republic of Germany," Proc. of ANS-Topical Meeting in "1980 Advances in Reactor Physics and Shielding," Sun Valley, page 23, ANS (1980).
- 3) Uotinen V.O. et al. : EPRI-NP-1833, May (1981).
- 4) Oldekop W., Berger H.D. and Zeggel W. : Nucl. Technol., 59, 212 (1982).
- 5) Penndorf K., Schult F. and Bünemann D. : Nucl. Technol., 59, 256 (1982).
- 6) Donne M.D. and Hame W. : A Parametric Thermohydraulic Study of an Advanced Pressurized Light Water Reactor with a Tight Fuel Rod Lattice," KfK 3453 EUR7059e (1982).
- 7) Bondarenko I.I., Ed. : "Group Constants for Nuclear Reactor Calculations," Consultants Bureau, New York (1964).
- 8) 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.
- 9) Edlund M.C. : Annals of Nuclear Energy, 2, 801 (1975).
- 10) Chawla R. : "Breakdown of the k_{∞} Void Coefficient of a LWHCR Lattice," Atomkernenergie, 37, 303 (1981).
- 11) 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).
- 12) Chawla R. et al., : to be appeared in Nucl. Technol.
- 13) Askew J.R., Fayers F.J. and Kemshell P.B. : J. Brit. Nucl. Energy Soc., 5, 564 (1966).
- 14) "Advanced Recycle Methodology Program (ARMP), System Documentation", Internal EPRI Report (1977).
- 15) Tsuchihashi K. et al. : "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis," JAERI-1285 (1983).
- 16) Matsuura S. : J. At. Energy Soc. Japan, 26, 468 (1984).

- 17) ENDF/B Summary documentation, BNL-NCS-17541 (ENDF-201), 1st. Edition, compiled by D. Garber, available from the National Nuclear Data Center, BNL, Upton, Y.N. (1973).
- 18) *ibid.*, 2nd. Edition (1975).
- 19) Igarashi S. et al. : to be published in JAERI Report, and Kikuchi Y., Narita T. and Takano H. : J. Nucl. Sci Technol., 17, 567 (1980).
- 20) 高野秀機他 : "JENDL-2 の熱中性子炉ベンチマーク・テスト", JAERI-M 83-202 (1983).
- 21) Dyos M.W. and Stevens C.A. : Nucl. Sci. Eng., 25, 294 (1966), and Ishiguro Y. et al. : *ibid.*, 40, 25 (1970).
- 22) Takano H., Ishiguro Y. and Matsui Y. : "TIMS-1: A Processing Code for Production of Group Constants of Heavy Resonant Nuclei," JAERI-1267 (1980).
- 23) Takano H. and Matsui Y. : J. Nucl. Sci. Technol., 18, 152 (1981).
- 24) Ishiguro Y. and Takano H. : J. Nucl. Sci. Technol., 6, 380 (1969).
- 25) Ishiguro Y. : "PEACO-II: A Code for Calculation of Effective Cross Section in Heterogeneous Systems," JAERI-M 5527 (1974).
- 26) Kier P.H. : "RIFF-RAFF, A Program for Computation of Resonance Integrals in a Two Region Cell," ANL-7326 (1967).
- 27) Levitt L.B. : Nucl. Sci. Eng., 49, 450 (1972).
- 28) Takano H. and Ishiguro Y. : "Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constants Set JFS-3-J2", JAERI-M 82-135 (1982).
- 29) Wright R.Q. et al. : "SUPERTO: A Program to Generate Fine Group Constant and Pn Scattering Matrices from ENDF/B," ORNL-TM-2679 (1969).
- 30) Nakagawa M. : Private Communication (1984).
- 31) Hettirgott E., Chawla R. and Gmür K. : "Analysis of Test Lattice Experiments in the Light Water High-Conversion Reactor PROTEUS," NP-3190, Research Project 1074-4 (1983).
- 32) Takano H. et al. : "JAERI-Fast Reactor Group Constants Set, Version II," JAERI-1255 (1978).