

話 題

核データ・炉物理合同特別会合から

標記の特別会合は、シグマ特別専門委員会と炉物理研究特別専門委員会の共催により核データ評価者と利用者の自由な意見交換の場として、日本原子力学会の年会および分科会にあわせ毎回開かれているものです。“核データニュース”では、その都度この会合での講演内容を掲載してきました。昨1987年10月2日～4日北海道大学工学部で開かれた62年秋の年会では、次の3人の方が下記の題名で講演されました。

- | | |
|--|------------|
| (1) JENDL-3Tのベンチマーク・テストの概要 | 高野 秀機(原 研) |
| (2) 原子力データベースに関する最近の状況 | 菊池 康之(原 研) |
| (3) 「Specialists” Meeting on Experimental Data for Decay Heat Predictions」出席報告 | 吉田 正(NAIG) |

JENDL-3Tのベンチマーク・テストの概要

原 研 高野 秀 機

はじめに

シグマ委員会炉定数専門部会ではJENDL-3Tのベンチマーク・テストを(1)高速炉、(2)熱中性子炉-高転換軽水炉、(3)核融合炉、(4)遮蔽、(5)核分裂生成物(FP)の5分野の積分データについて行うこととし、それぞれ担当者と役割分担が決っている。いまのところ(1)と(2)のテストが先行した形となり、昨1987年10月の原子力学会で予備的な結果が発表された。本稿ではそれを要約、紹介することにする。なお(3)(4)(5)については同年11月に開催された核データ研究会の報告集を読みたい。

群定数の計算は、JENDL-3T編集グループと密接なコンタクトをとりながら、重要核種より順次行われた。高速炉用にはJFS-3型70群構造、熱中性子炉用としてはSRAC型高エネルギー74群と熱領域48群の群定数ライブラリーを25核種について作成した。群定数計算コードはTIMS-PGGプロセス・コード・システムである。ただし熱中性子散乱則 $S(\alpha, \beta)$ はJENDL-3の評価が済んでいないためENDF/B-IIIのデータを用いた。

高速炉ベンチマーク炉心は、従来より用いられてきた21ヶの臨界集合体に、2次元ベンチマークのためにFCA-6-2とZPPR-9を追加した。熱中性子炉ベンチマークとしてはU-235、Pu-239及びU-233を燃料とする臨界安全実験とTRXとETA炉心での格子パラメータ実験である。高転換軽水炉はPu炉心のPROTEUSとU炉心のFCA-XIV-1である。

1. 熱中性子炉 (LWR)

ベンチマーク炉心の特徴を Table 1 に示す。臨界実験の解析は一次元 S_n 計算コード ANISN で P_1S_8 近似で行った。計算結果を燃料が U-235, Pu-239, U-233 の場合に分けて Fig. 1, 2, 3 に水対燃料比の関数として示す。Fig. 1 では H/U-235 の値が小さくなるに従って JENDL-3T は k_{eff} を過大評価する。特に金属燃料でスペクトルが非常にかたい場合には実験値を 3%, JENDL-2 の値を 2% も過大評価することが分る。これは JENDL-3T では ν -235 値が高エネルギー領域で JENDL-2 よりも非常に大きく評価されたためである。Pu 系に対しては Fig. 2 より分かるように JENDL-3T は JENDL-2 よりも良い結果を示している。U-233 系に対しても Fig. 3 に見られるように幾分過小評価ではあるが良い結果となっている。ただしスペクトルの硬い metal の場合は k_{eff} を 2.5% 大きく見積っている。

Table 3 には TRX と ETA 炉心での格子パラメータの実験解析結果を示す。これから分かることはエピサーマル領域での σ_c (U-238) が JENDL-3T では JENDL-2 の過大評価を改善していないこと、更に σ_f (U-238) / σ_f (U-235) も 10% 近く実験値を過大評価している。一方 U-233, Th-232 系の ETA 炉心では JENDL-3T は JENDL-2 の結果をかなり改善していることが分かる。担し、 σ_f (Th-232) / σ_f (U-235) 及び σ_c (Th-232) / σ_f (U-233) は、実験値をかなり過小評価している。

2. 高転換軽水炉 (HCLWR)

Table 2 に PROTEUS と FCA 炉心の特徴を示す。PROTEUS の core (1, 2, 3) は 6% Pu fission, core (4, 5, 6) は 8% Pu fission に相当する。

PROTEUS 炉心に対する解析結果を Fig. 4 と 5 に示す。 k_{eff} (Fig. 4) に対して JENDL-3T はボイド率ゼロの場合実験値との一致は良いが、ボイド率の増加と共に過小評価の傾向にある。Fig. 5 は σ_c (U-238) / σ_f (Pu-239) の反応率比の比較を示す。これは転換比に相当するものであるが、JENDL-3T は過大評価の傾向にある。

Table 4 は FCA-XIV-1 炉心での解析結果で、 k_{eff} は JENDL-3T では 1.5% 過大評価で、JENDL-2 よりも 3% 実効増倍率が大きくなっている。これは U 系炉心のため ν -235 値の相違が大きな影響を及ぼしているためである。

3. 高速炉 (FBR)

一次元拡散ベンチマーク計算は、従来 JFS-3-J2 セット等で行われてきた 21 ヶの臨界集合体に対して実施した。計算結果は非均質及び輸送効果の補正を行って実験値と比較された。Fig. 6~10 に C/E (計算と実験値の比) に対して、JENDL-2 と JENDL-3T の結果が比較されている。 k_{eff} (Fig. 6) に関しては、JENDL-3T は U 系炉心に対して過大評価、Pu 系炉心に対しては過小評価になっている。又増殖比 (σ_c (U-238) / σ_f (Pu-239 or U-235)) に対しては JENDL-3T は大型炉心に対して ~10% 近く過大評

価の傾向にある。一方、Fig. 9より分かるように $\sigma_f(\text{Pu-239})/\sigma_f(\text{U-235})$ は、JENDL-2の過小評価がかなり改善されている。しかし、しきい値核分裂反応率 $\sigma_f(\text{U-238})/\sigma_f(\text{U-235})$ に対しては非常にJENDL-3 Tは過大評価となる。

二次元ベンチマーク計算がFCA-6-2とZPPR-9に対して実施された。主にドップラー反応度、Na-ボイド反応度及び反応率分布が計算された。

Table 5はZPPR-9でのサンプルドップラー反応度の計算結果の比較を示す。JENDL-3 Tは約6% JENDL-2より大きくなり実験値に近づいている。Fig. 11と12はFCA-6-2とZPPR-9でのNa-ボイド反応度の比較を示す。JENDL-3 TはJENDL-2での過大評価及びボイド領域依存性を大幅に改善していることが分かる。Fig. 13, 14, 15には反応率分布の比較が示されている。FCA-6-2での $\sigma_f(\text{U-238})$ 反応率分布(Fig. 13)ではドライバー領域での過大評価が著しい。JENDL-3 Tではドライバー領域はU-235燃料であるため一層実験値との不一致が拡大されている。Fig. 14と15はZPPR-9での $\sigma_f(\text{Pu-239})$ と $\sigma_c(\text{U-238})$ 反応率分布の比較である。JENDL-3 Tは1%程JENDL-2での外側炉心での過大評価を改善している。

4. 評価断面積と積分データの関係

ここではJENDL-3 Tの評価核データにまで遡って、核データの相違が積分データへ及ぼす影響を考える。JENDL-2とJENDL-3 Tの無限希釈断面積の差を各反応の各エネルギー群毎に計算し、その差が各種の積分データに及ぼす影響を21ヶのFBRベンチマーク集合体についてもとめた。これらはCATEXコードを用いてなされた。

Table 6には主要核種の核データに対するJENDL-3 Tの特徴をJENDL-2と比較して示す。これから、 $\sigma_f(\text{U-235})$ 、 $\nu-235$ 、 $\sigma_{in}(\text{U-238})$ などはJENDL-2より大幅に変えられていることが分かる。

Fig. 16にはJENDL-3 Tでの評価断面積 $\sigma_f(\text{U-235})$ のJENDL-2からの%変化を各群で示す。100 eVから10 keVではJENDL-3 Tは6%以上もJENDL-2より小さくなっている。このグラフの中に例えば100 eV~10 keVでの $\sigma_f(\text{U-235})$ の変化が k_{eff} や中心反応率比に及ぼす効果が示されている。これらは21ヶの臨界集合体からの平均的な値である。10 keV~1 MeVでJENDL-3 TはJENDL-2よりも約3% $\sigma_f(\text{U-235})$ が小さく評価されている。これは k_{eff} を~1.2%も小さくし、C8/F5($\sigma_f(\text{U-238})/\sigma_f(\text{U-235})$)とF9/F5($\sigma_f(\text{Pu-239})/\sigma_f(\text{U-235})$)を2%大きくする。また100 eV~10 keVの非分離領域で6%も $\sigma_f(\text{U-235})$ を小さくした影響は、スペクトルの軟かい大型炉心では k_{eff} に約1%生じ、C8/F5を2%大きくする。

Fig. 17には $\nu-235$ のJENDL-2とJENDL-3 Tの相違が示されている。10 eV以上でJENDL-3 Tの $\nu-235$ はかなり大きくなっている。10 keV~1 MeVでの変化は k_{eff}

を2%も大きくする。

Fig. 18は σ_f (Pu-239)のJENDL-2とJENDL-3 Tの差を示す。全体にJENDL-2よりもJENDL-3 Tの評価は小さくなっている。10keV~1MeVで約5%小さくなっており、 k_{eff} を1.7%、F9/F5を3%小さくし、C8/F9を3.6%も大きくする影響を示している。又1keV以下の共鳴領域でもJENDL-3 Tの評価は小さく、HCLWRでは重要な問題になると思われる。

Fig. 19は σ_c (U-238)のJENDL-2とJENDL-3 Tの相違を示す。差は100keV以上に見られ、 k_{eff} を0.3~0.8%小さくし、C8/F9を3%大きくする。

Fig. 20は σ_{in} (U-238)のJENDL-2とJENDL-3 Tの差を示す。1MeV以上では平均40%、100keV附近でも20%もJENDL-3 Tは大きくなっている。1MeV以上での大きな差は k_{eff} やC8/F9に大きく影響すると思われる。

Fig. 21は核分裂スペクトルの相違を示す。JENDL-3 TではMadland-Nixの式に従って、JENDL-2よりも硬いスペクトルが評価された。これはU-235、U-238、Pu-239どれに対しても同様である。この χ の変化が k_{eff} に及ぼす影響がFig. 22に示されている。これから k_{eff} を0.5%大きくすることが分かる。又Fig. 23には χ の変化が σ_f (U-238)/ σ_f (U-235)へ与える影響が示されており、5%も存在することが分かる。

Fig. 24はU-235、Pu-239、U-238、等の ν -値がJENDL-2からJENDL-3 Tに変わったときの k_{eff} への影響を示す。U系炉心では2%以上、Pu系炉心では0.3%大きくなっている。

Fig. 25と26にはNi-naturalの散乱断面積と捕獲断面積のJENDL-2とJENDL-3 Tの比較を示す。JENDL-3 Tは σ_s はかなり大きく、 σ_c はかなり小さくなっている。この相違が k_{eff} に与える影響はFig. 27に示されている。ZPR-3-56のNi-反射体をもつ炉心では1.2%、Niの量が多くなる大型炉心では0.3%もあることが分かる。

5. 結 論

Table 7に結論の要約を示す。JENDL-3 TはFBRでのNa-ボイド、ドップラー反応度がJENDL-2と比べて良く実験値と一致する。又LWRでの k_{eff} もJENDL-2よりも実験値との一致がよい。一方スペクトル・インデックスでは過大評価である。

Table 6とTable 7を比較し、JENDL-3 Tの積分データ予測精度をより高めるために、以下の数点に関して特に再評価の検討を望みたい。

- (1) U-235の ν -値(10eV以上の領域)と σ_f (100eV以上、特に100eV~10keVの非分離領域)
- (2) U-238の σ_{in} (1MeV以上)
- (3) Pu-239の σ_f (10~100keVと分離共鳴領域)
- (4) 核分裂スペクトル

(5) Niの σ_s と σ_c

100 keV 以上の領域は同時評価法が採用されており，再評価の難しい領域と思われる。従って非弾性散乱断面積や核分裂スペクトルを含めた群定数のAdjustmentを行うことによって，JENDL-3Tの問題点を取り除くことは可能と思われる。

Table 1. LWR benchmark cores

Critical experiment	Lattice parametr experiment
U-235 fuel	
ORNL - 1, 2, 3, 10 H/U-235 : 972 - 1835	TRX-1,2(1.3 wt% U235 metal) V(H2O)/Vf : 2.35, 4.02
McNeany & Jenkins-Cores 1, 2, 3 H/U-235 : 0.0, 50, 1393	ETA-1 (6.7wt%U235-ThO2) D2O (Driver TRX)
Strawbridge & Barry-Cores 55 U-metal and 61 UO2-rods	
U-233 fuel	
McNeany & Jenkins-Cores 1 - 10 H/U-233 : 0.0 - 381	ETA-2 (3 wt% U233-ThO2) D2O (Driver TRX)
McNeany & Jenkins -Cores 11, 12 U-233 + Th-232 H/U-233 : 1533, 1986	
PU-239 fuel	
PNL - 1, 2, 3, 4, 5 H/Pu-239 : 131 - 1204	

Table 2. HCLWR benchmark cores

PU-239 fuel
PROTEUS(pin) - cores (1, 2, 3) & (4, 5, 6)
Vm/Vf : 0.5
Void fraction(%) : 0, 42.5, 100
Two rod heterogeneity : UO-PuO + DUO
U-235 fuel
FCA-14-1 (plate, 6.5% E)
Vm/Vf : 0.6
Void fraction (%) : 0.0, 45

Table 3 The C/E-values for lattice cell parameters

assembly	parameter	JENDL-2	JENDL-3T
TRX-1	ρ_{23}	1.057	1.081
	δ_{25}	1.022	1.012
	δ_{23}	1.052	1.095
	C^*	1.024	1.031
TRX-2	ρ_{23}	1.040	1.063
	δ_{25}	1.007	0.997
	δ_{23}	1.024	1.058
	C^*	1.011	1.015
ETA-1	ρ_{02}	0.977	1.011
	δ_{25}	1.064	1.060
	δ_{02}	0.810	0.846
	CR	0.919	0.974
ETA-2	ρ_{02}	0.958	0.982
	δ_{23}	1.055	1.054
	δ_{02}	0.944	1.007
	CR	0.895	0.938

ρ_{23} : U-238 capture epithermal to thermal
 δ_{25} : U-235 fission epithermal to thermal
 δ_{23} : U-238 fission to U-235 fission
 C^* : U-238 capture to U-235 fission
 ρ_{02} : Th-232 capture epithermal to thermal
 δ_{02} : Th-232 fission to U-235 fission
CR : Th-232 capture to U-235 fission
 δ_{23} : U-233 fission epithermal to thermal
 δ_{02}^* : Th-232 fission to U-233 fission
 CR^* : Th-232 capture to U-233 fission

Table 4 Benchmark calculation for FCA-XIV-1 assembly
 () shows the ratio of calculation to experiment

	EXPERIMENT	JENDL-2	JENDL-3T
< 0 % VOID >			
K-INFINITY	1.1759 ± 0.0015	1.16079 (0.987)	1.19407 (1.015)
F 9/F.5	2.353 ± 3.1%	2.3603 (1.003)	2.3705 (1.007)
F 8/F 5	0.00568 ± 6.0%	0.00673 (1.186)	0.00717 (1.262)
C 8/F.5	0.03768 ± 2.8%	0.04293 (1.139)	0.04366 (1.159)
<45 % VOID >			
K-INFINITY	1.0831 ± 0.0048	1.06579 (0.984)	1.10206 (1.017)
F 9/F 5	2.083 ± 3.0%	2.0059 (0.963)	2.0184 (0.969)
F 8/F 5	0.00798 ± 5.0%	0.00933 (1.169)	0.01006 (1.260)
C 8/F.5	0.05489 ± 2.2%	0.06076 (1.107)	0.06225 (1.134)

F9/F5 : Reaction rate ratio of Pu-239 fission to U-235 fission

F8/F5 : Reaction rate ratio of U-238 fission to U-235 fission

C8/F5 : Reaction rate ratio of U-238 capture to U-235 fission

Table 5 ZPPR-9 DOPPLER REACTIVITY EFFECTS ---
 NUO₂ SAMPLE

Core Model : 2D-RZ
 Number of groups : 70 G
 Using Code : CIPER
 Cell Model : Homogeneous
 Diffusion Coefficient : EXPANDA Method

LIBRARY	TEMPERATURE	REACTIVITY (OK/K*10E-6) EXPERIMENTS (ERROR)	CALCULATION	CORRECTED	C / E
JENDL2	298K - 487.5k	-1.03380 (± 0.0299)	-0.81110	-0.90821	0.87852
	298K - 644.4K	-1.64210 (± 0.0299)	-1.29670	-1.45488	0.88599
	298K - 794.0K	-2.18700 (± 0.0299)	-1.66840	-1.87650	0.85802
	298K - 935.4K	-2.47060 (± 0.0336)	-1.96490	-2.21375	0.89604
	298K - 1087.0K	-2.84750 (± 0.0299)	-2.23990	-2.52779	0.88772
JENDL3T	298K - 487.5K	-1.03380 (± 0.0299)	-0.86590	-0.96957	0.93787
	298K - 644.4K	-1.64210 (± 0.0299)	-1.38550	-1.55452	0.94666
	298K - 794.0K	-2.18700 (± 0.0299)	-1.78430	-2.00686	0.91763
	298K - 935.4K	-2.47060 (± 0.0336)	-2.10320	-2.36957	0.95911
	298K - 1087.0K	-2.84750 (± 0.0299)	-2.39960	-2.70802	0.95102

Table 6 JENDL-3T CHARACTERISTICS

	U-235	U-238	Pu-239
β_f	-5% ; 100eV- 1 MeV	-4% > 1 MeV	-5 % > 10 Kev
β_c	-10 % ; 100eV- 1 MeV	+5% ; 100KeV- 1MeV	-5% ; 10Kev-1 Mev
β_{in}	+10 % ; 200KeV-3 MeV	+40% > 1 MeV	+40-100% < 1 MeV
χ	hard	hard	hard
ν	+2.5% ; 100eV- 1MeV	-1 % > 2 MeV	-1 % > 1 MeV
	+17 % ; 10 - 100 eV	+2 % ; 1-2 MeV	+1 % ; 1 - 400 KeV
			+4 % ; 0.5 - 1 KeV

Table 7 CONCLUDING REMARKS

Int. Data	Fuel	LWR	HCLWR	FBR
K _{eff}	U235	Ok	+1.5%	+2%
	Pu239	Ok(+0.5%)	Ok	Ok
	U233	-1 %		+2 %(metal)
C3/F5	U235	+2%	+16%	+5%
C3/F9	Pu239		+5%	+7%
F9/F5				Ok
F8/F5		+8%		+15%
F8/F9	Pu		+7%	
Doppler(NUO2)				Ok
Void Reactivity				Ok
Reaction Rate Distribution				OK

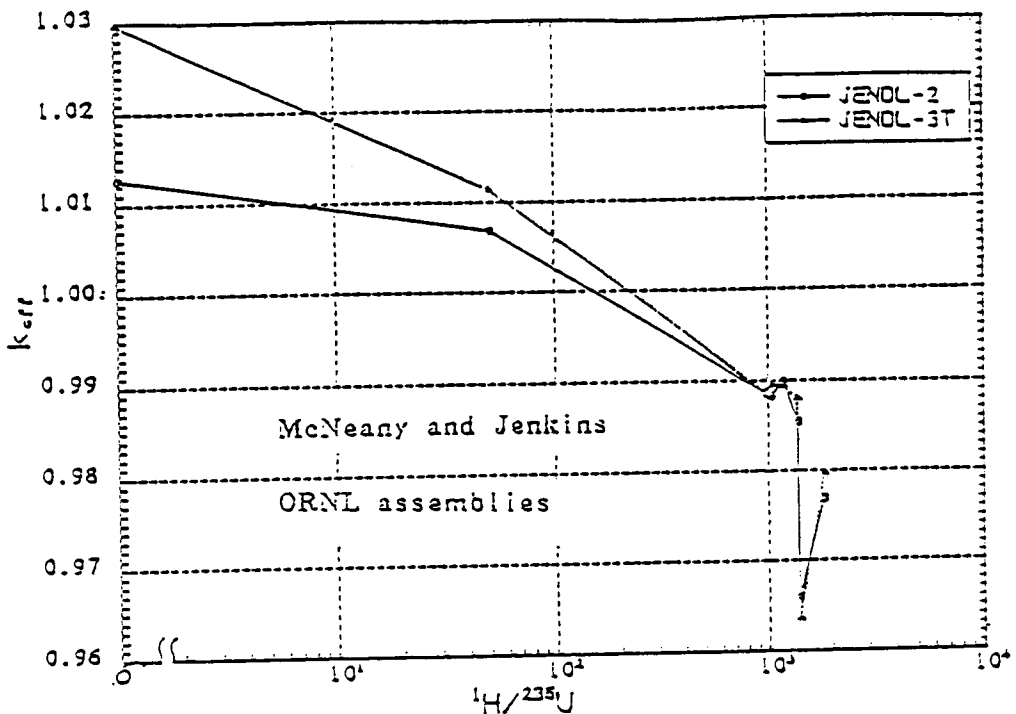


Fig. 1 k_{eff} for ^{235}U Critical Experiments (ANISN, P₁S₈)

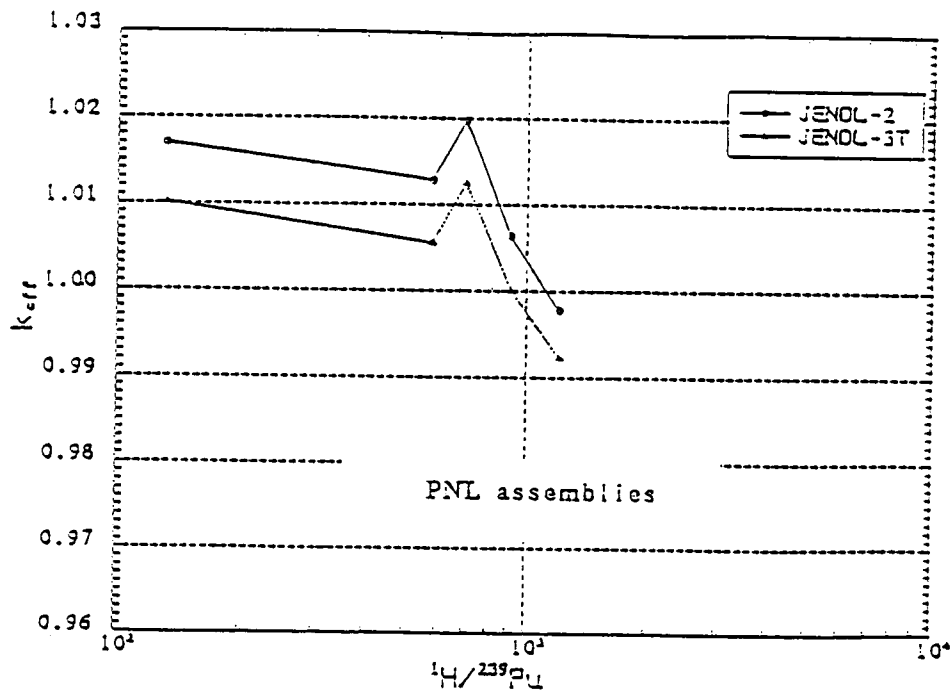


Fig. 2 k_{eff} for ^{239}Pu Critical Experiments (ANISN, P₁S₈)

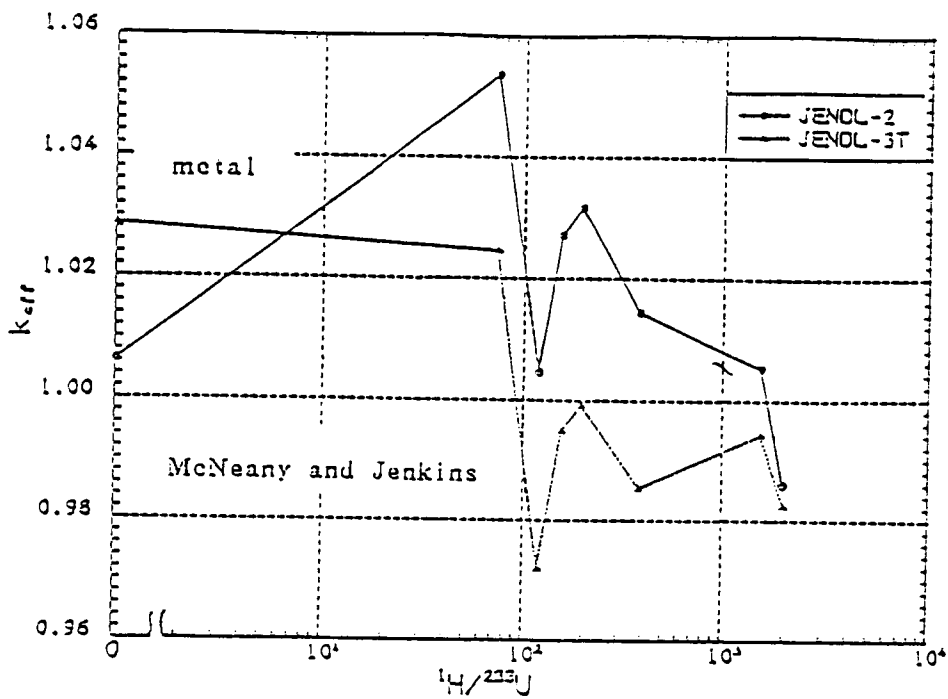


Fig. 3 k_{eff} for ^{235}U Critical Experiments (ANISN, P₁S₈)

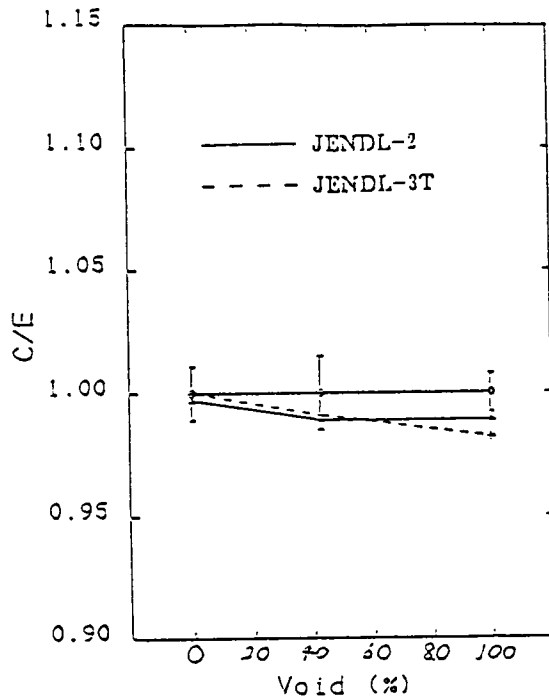


Fig. 4 The C/E values of infinitemultiplication factors for PROTEUS cores 1, 2, and 3

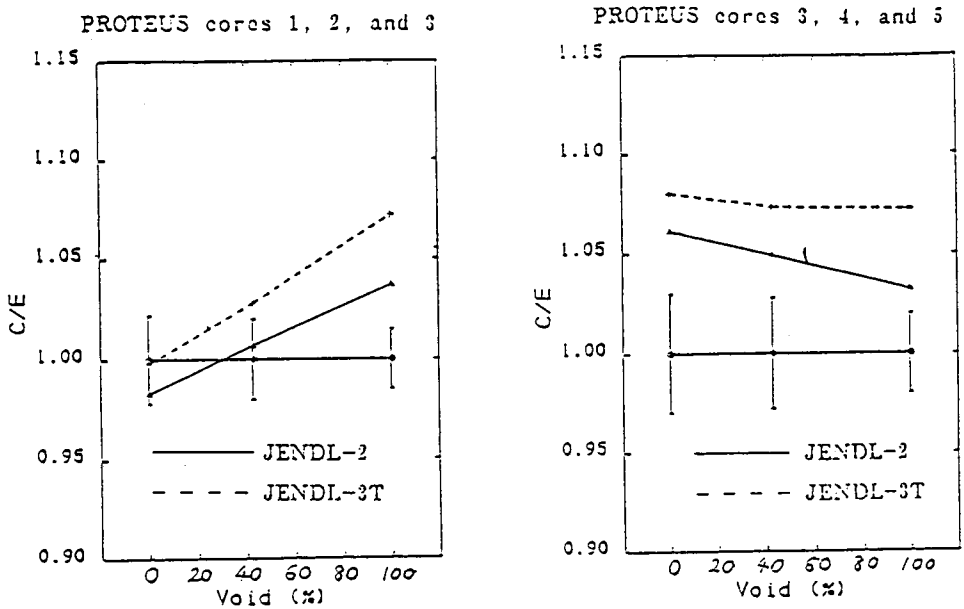


Fig. 5 Comparison of reaction rate ratios of U-238 capture to Pu-239 fission (C8/F9)

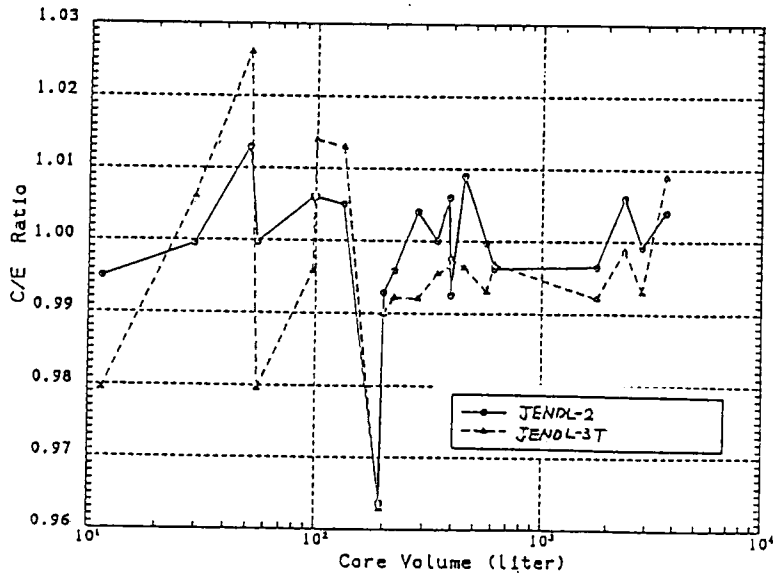


Fig. 6 k-effective

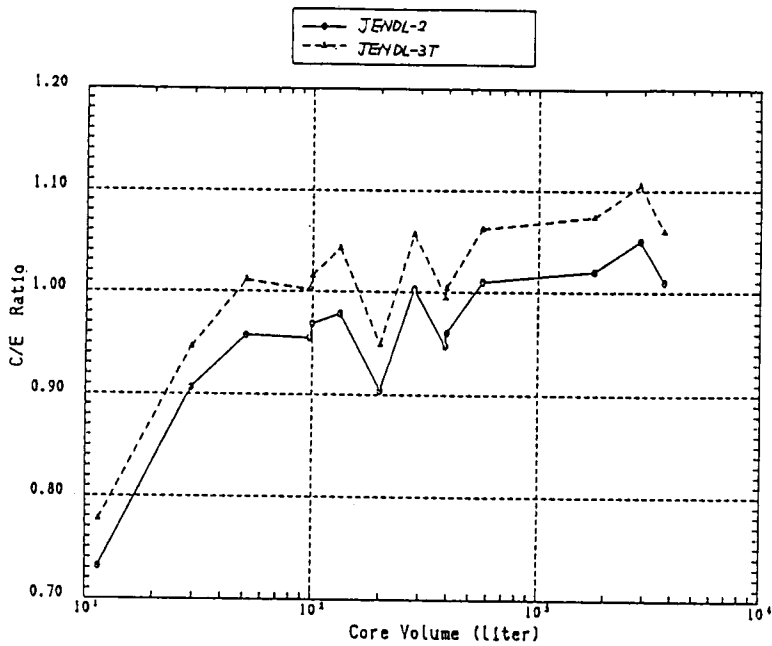
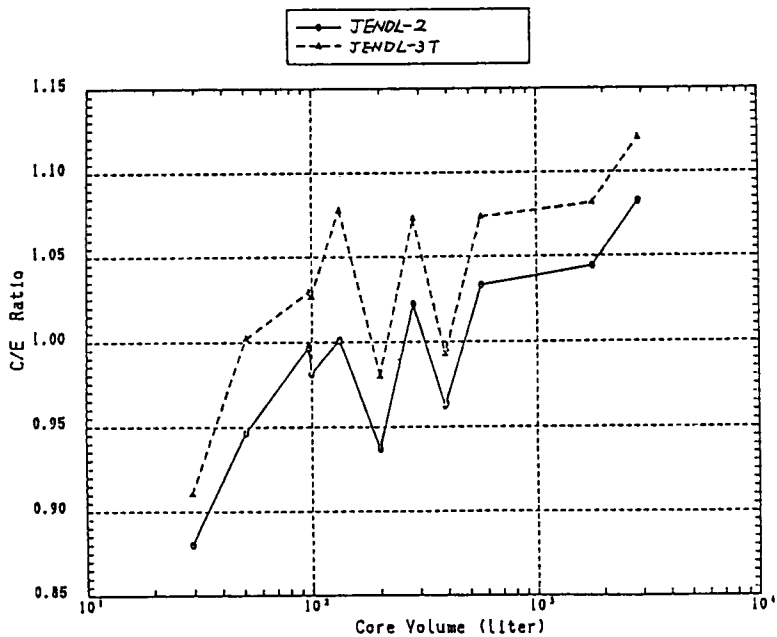
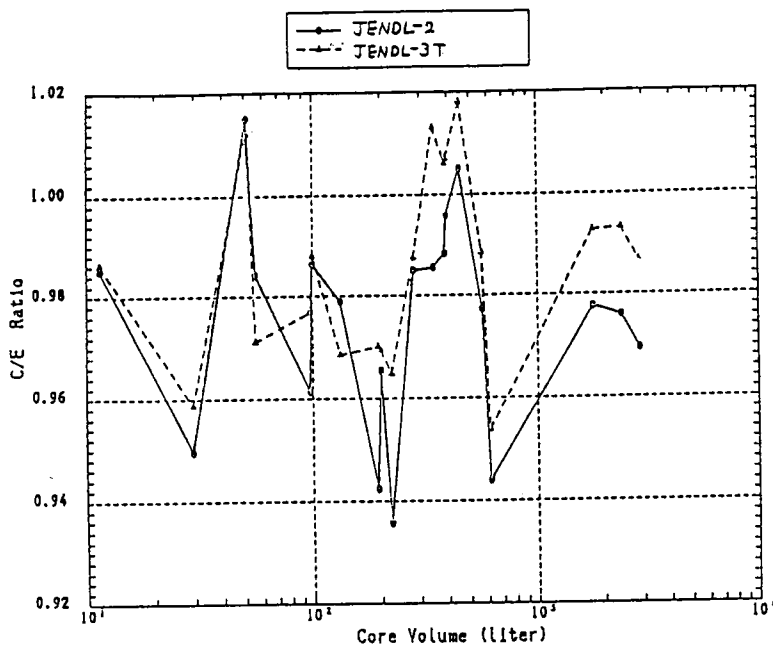


Fig. 7 C/E Ratio of $\langle \sigma_c^{238} / \sigma_f^{235} \rangle$



No	Core Name	Core Volume (l)
1	VERA-1B	29.37
2	ZPR-3-6F	50.94
3	SNEAK-7A	96.97
4	ZPR-3-12	99.64
5	ZPR-3-11	132.31
6	FCA-5-2	199.23
7	SNEAK-7B	281.16
8	ZPR-3-48	387.97
9	ZEBRA-2	393.27
10	HZA	565.06
11	HZB	1777.61
12	ZPR-6-7	2870.14

Fig. 8 C/E Ratio of $\langle \sigma_c^{238} / \sigma_f^{239} \rangle$



No	Core Name	Core Volume (l)
1	VERA-11A	11.45
2	VERA-1B	29.37
3	ZPR-3-6F	50.94
4	ZEBRA-3	55.56
5	SNEAK-7A	96.97
6	ZPR-3-12	99.64
7	ZPR-3-11	132.31
8	ZPR-3-54	193.61
9	FCA-5-2	199.23
10	ZPR-3-53	221.71
11	SNEAK-7B	281.16
12	ZPR-3-50	343.13
13	ZPR-3-48	387.97
14	ZEBRA-2	393.27
15	ZPR-3-49	449.77
16	HZA	565.06
17	ZPR-3-56	613.78
18	HZB	1777.61
19	ZPPR-2	2382.00
20	ZPR-6-7	2870.14

Fig. 9 C/E Ratio of $\langle \sigma_f^{239} / \sigma_f^{235} \rangle$

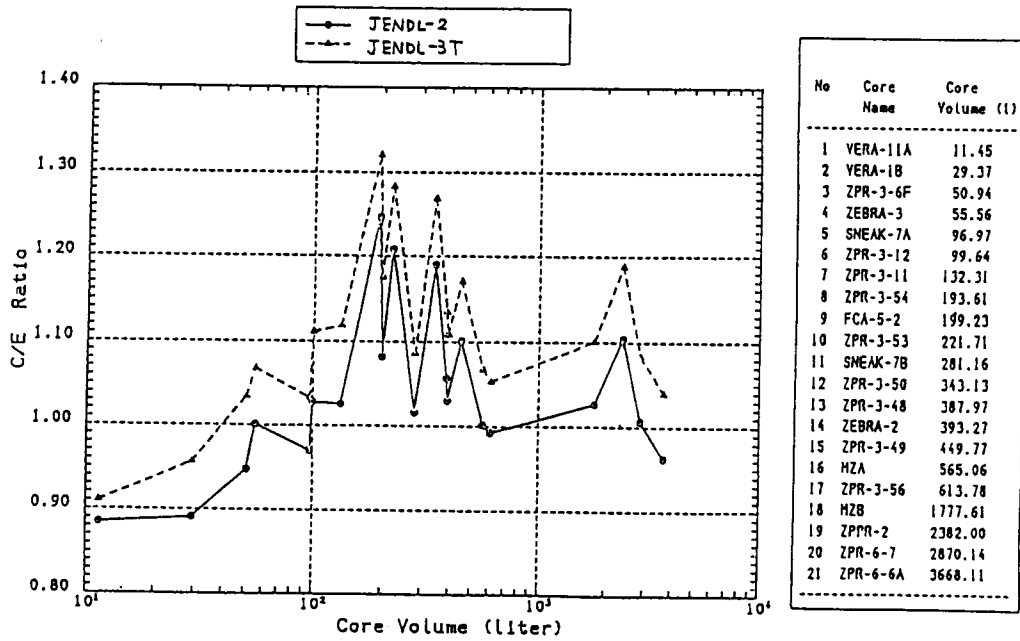


Fig.10 C/E Ratio of $\langle \sigma_f^{238} / \sigma_f^{235} \rangle$

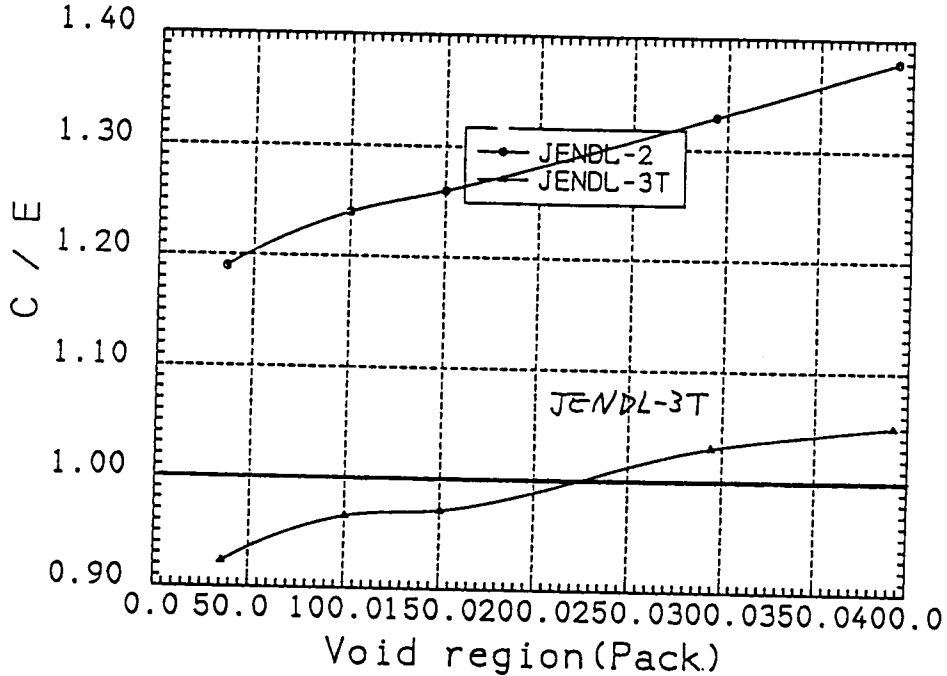


Fig.11 Comparison of Na-void reactivity at the FCA-VI-2 core

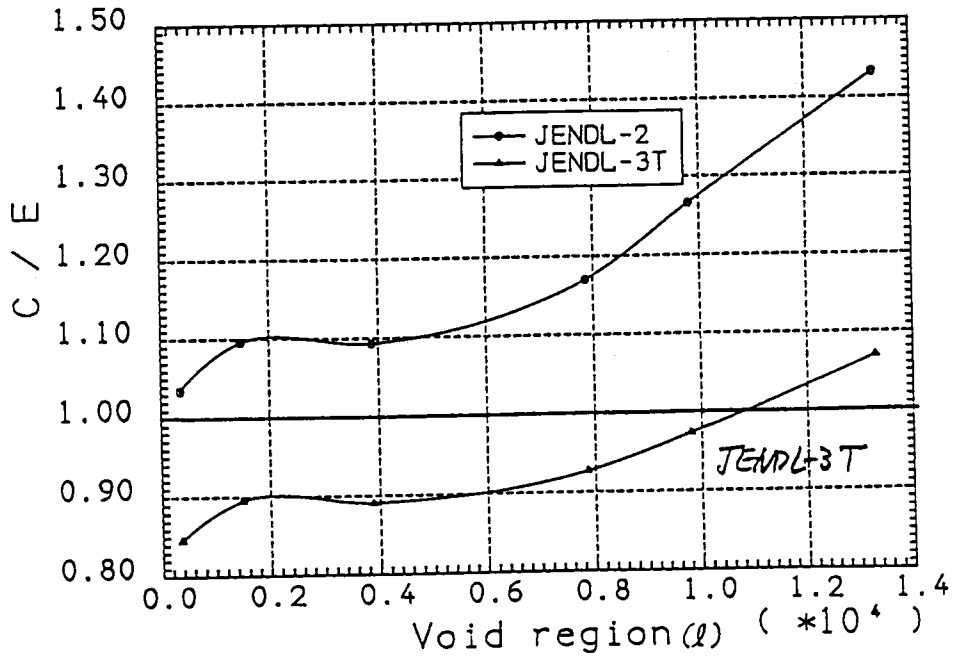


Fig.12 Comparison of Na-void reactivity at the ZPPR-9 core

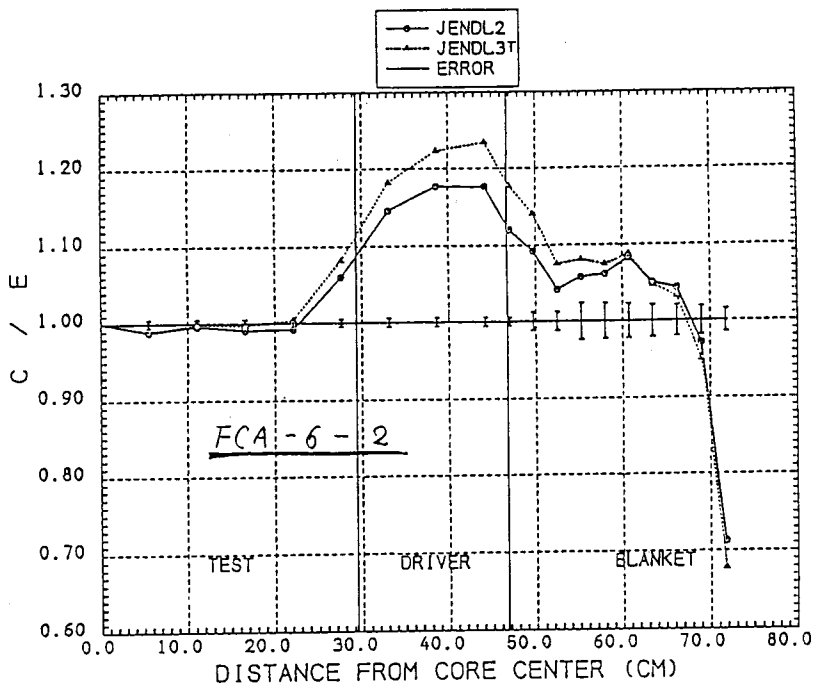


Fig.13 U-238 FISSION RATE DISTRIBUTION (R-DIRECTION)

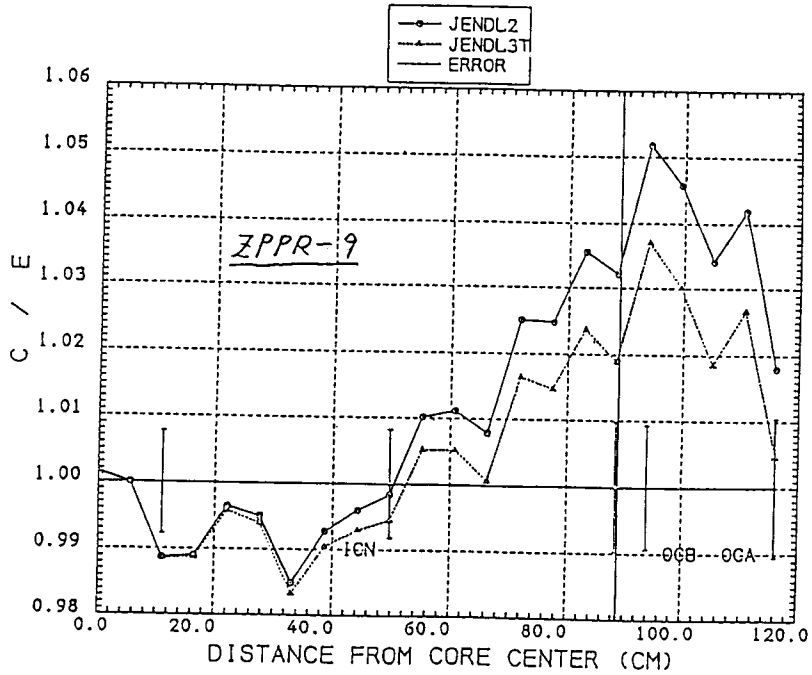


Fig.14 PU-239 FISSION RATE DISTRIBUTION (R-DIRECTION)

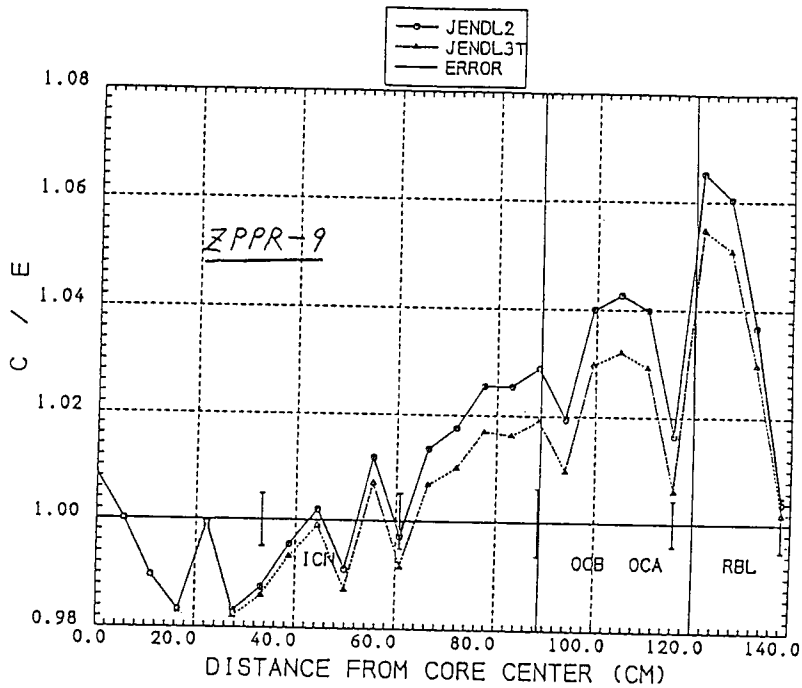


Fig.15 U-238 CAPTURE RATE DISTRIBUTION (R-DIRECTION)

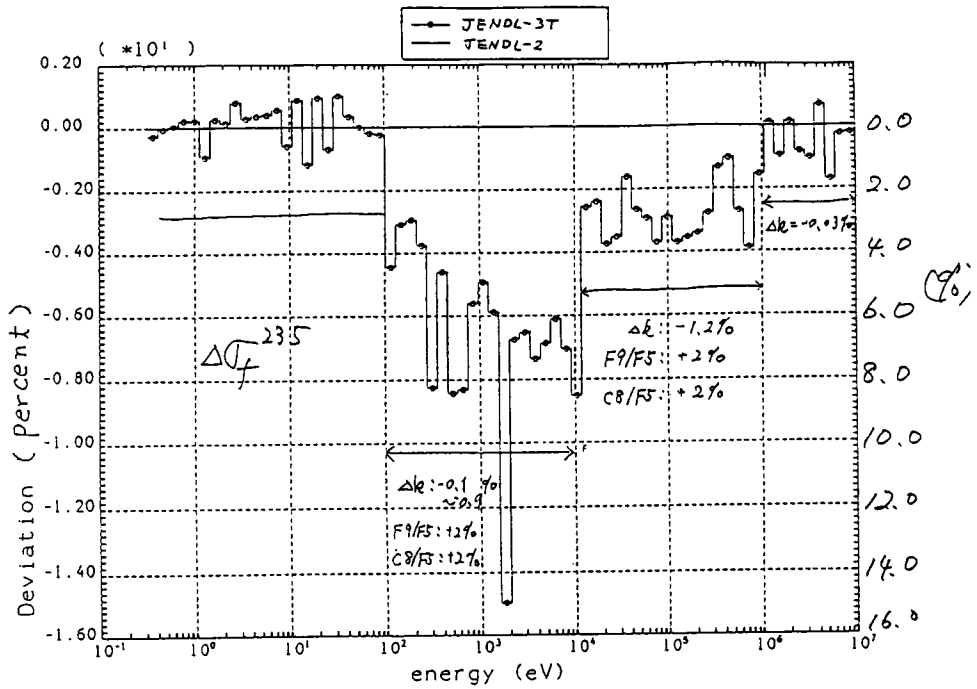


Fig.16 Deviation for σ_f (U-235) of JENDL-3T from JENDL-2

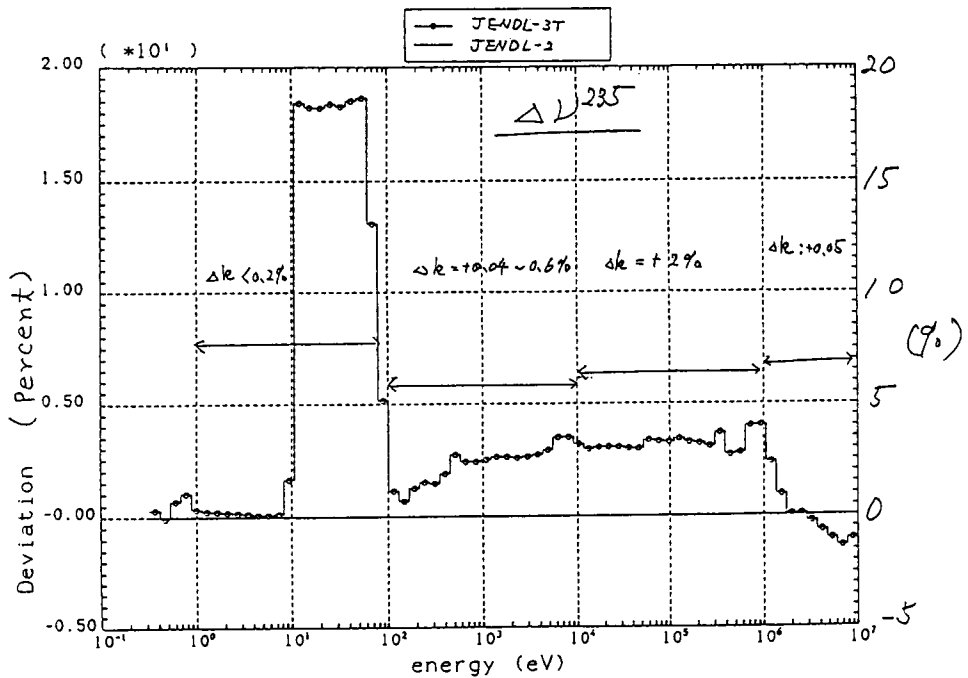


Fig.17 Deviation for ν (U-235) of JENDL-3T from JENDL-2

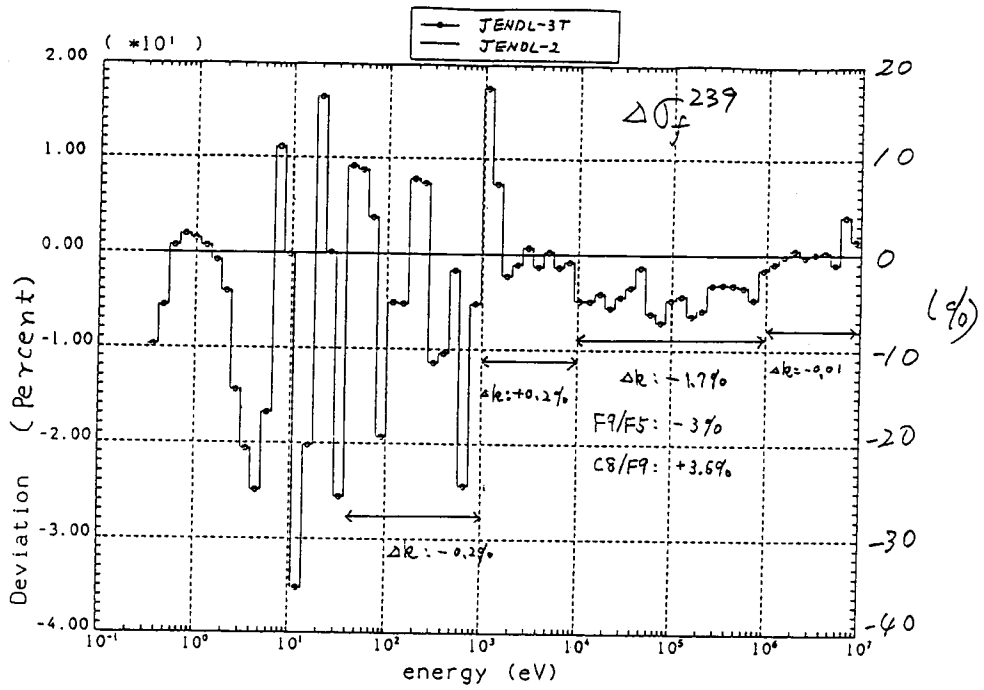


Fig.18 Deviation for σ_f (Pu-239) of JENDL-3T from JENDL-2

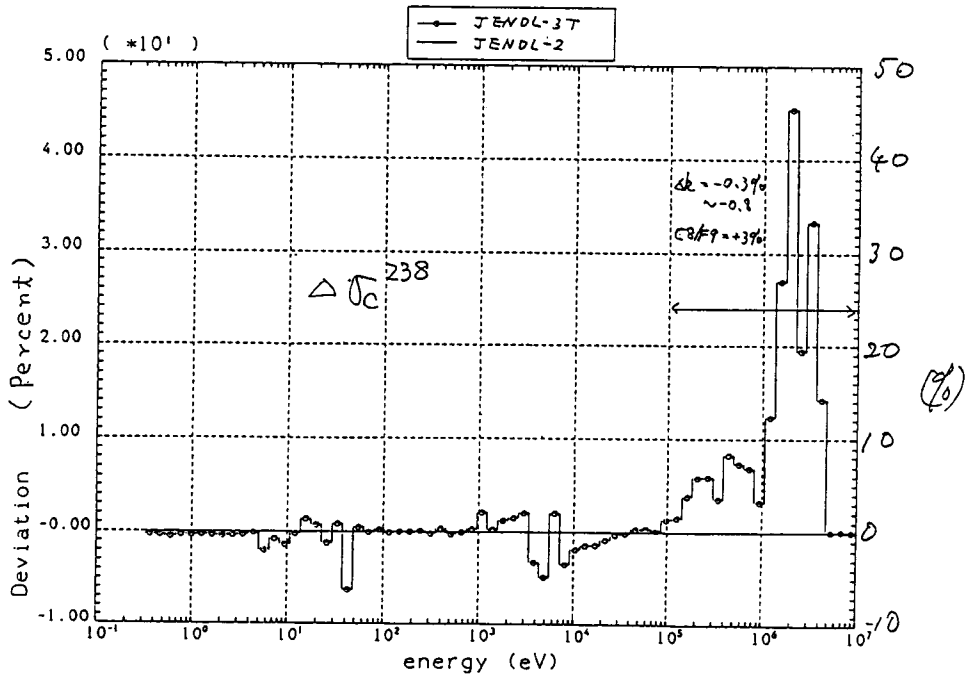


Fig.19 Deviation for σ_c (U-238) of JENDL-3T from JENDL-2

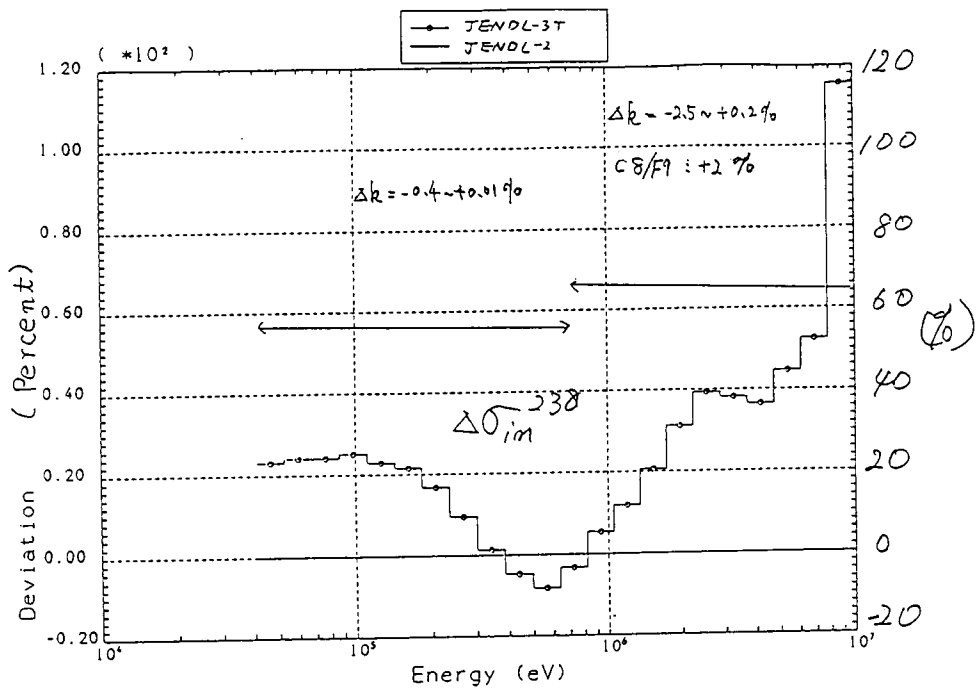


Fig.20 Deviation for σ_{in} (U-238) of JENDL-3T from JENDL-2

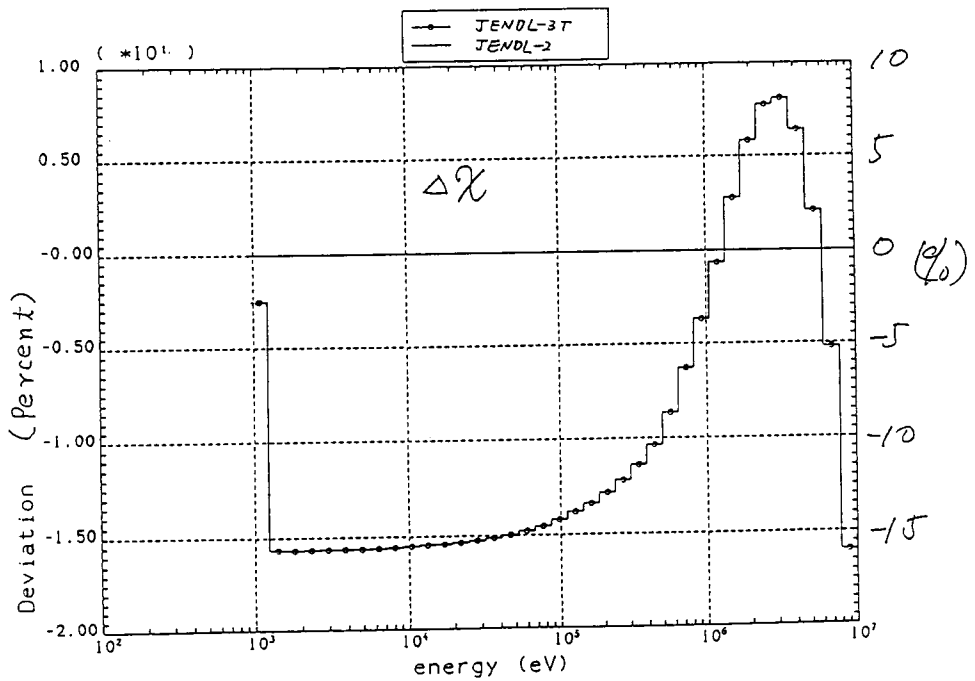


Fig.21 Deviation for χ (U-235) of JENDL-3T from JENDL-2

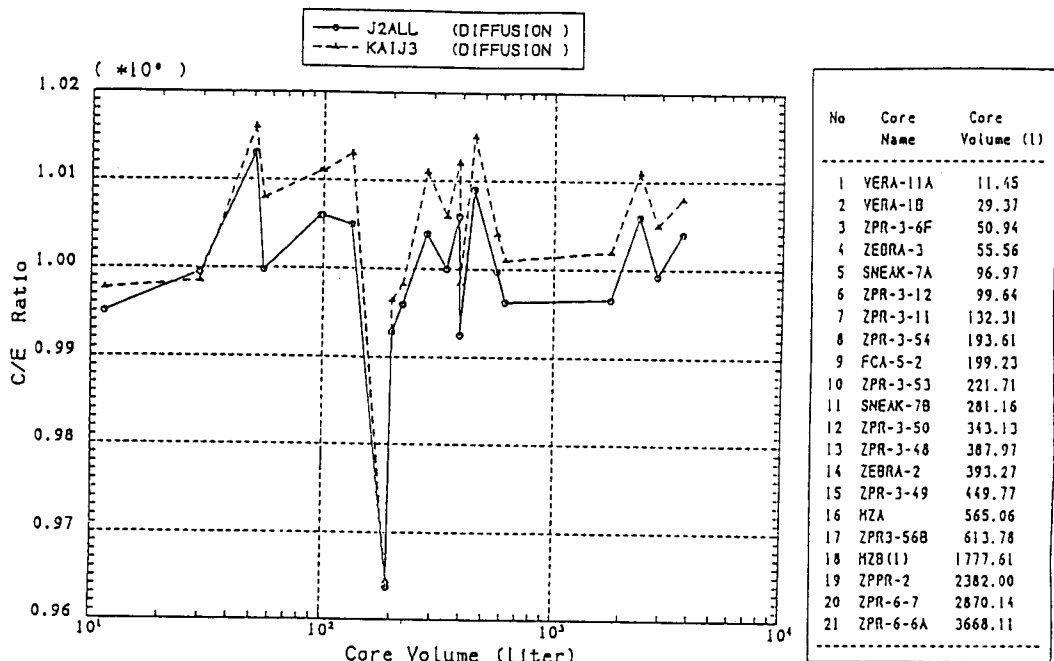


Fig.22 The effect of fission spectrum change on K_{eff}

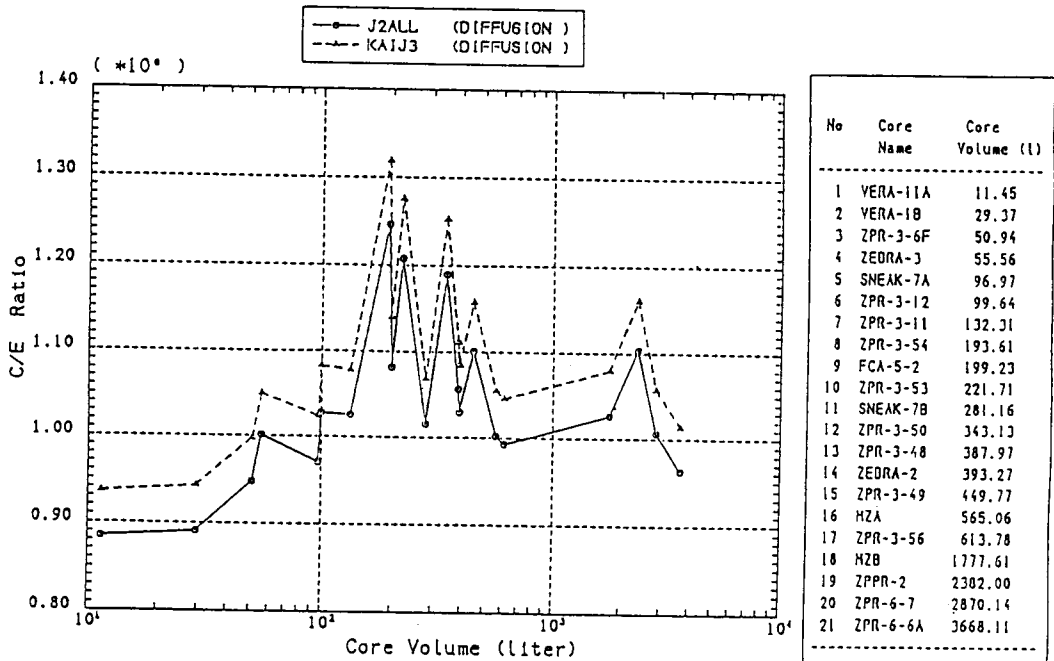


Fig.23 The effect of fission spectrum change on $\langle \sigma_f(U-238) / \sigma_f(U-235) \rangle$

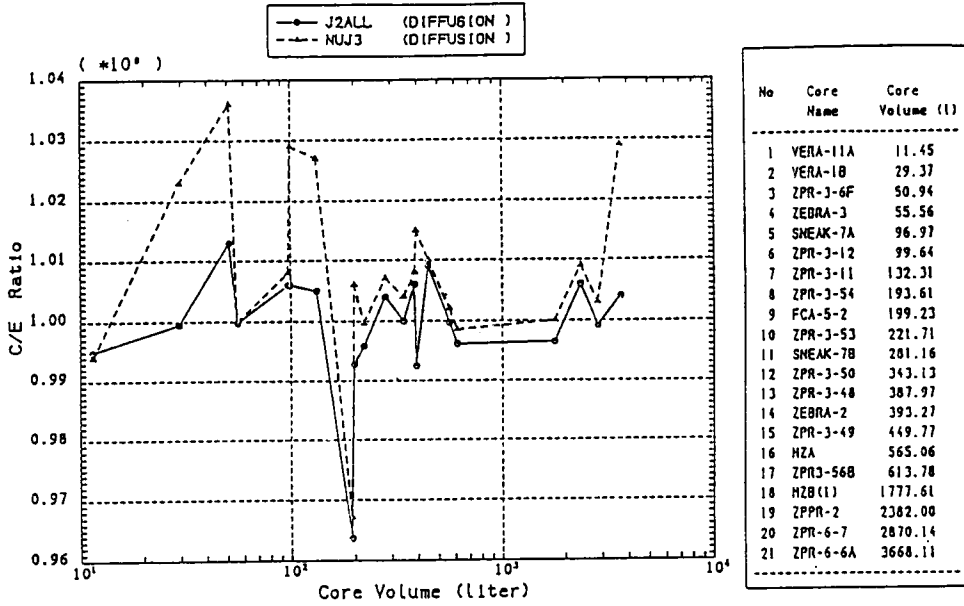


Fig.24 The effect of ν -value change on K_{eff}

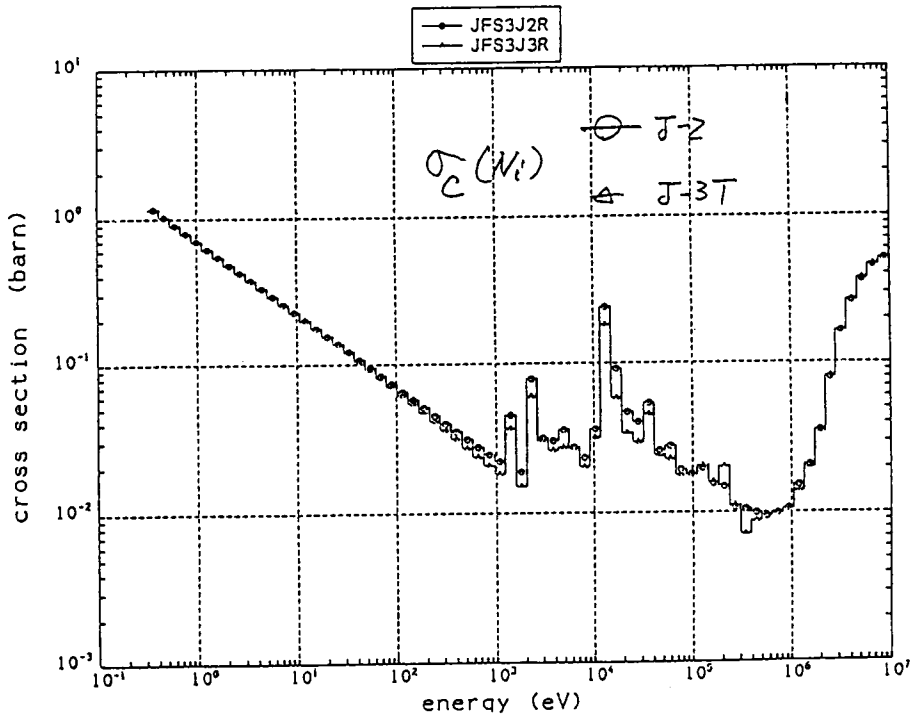


Fig.25 Comparison of capture cross sections of Ni

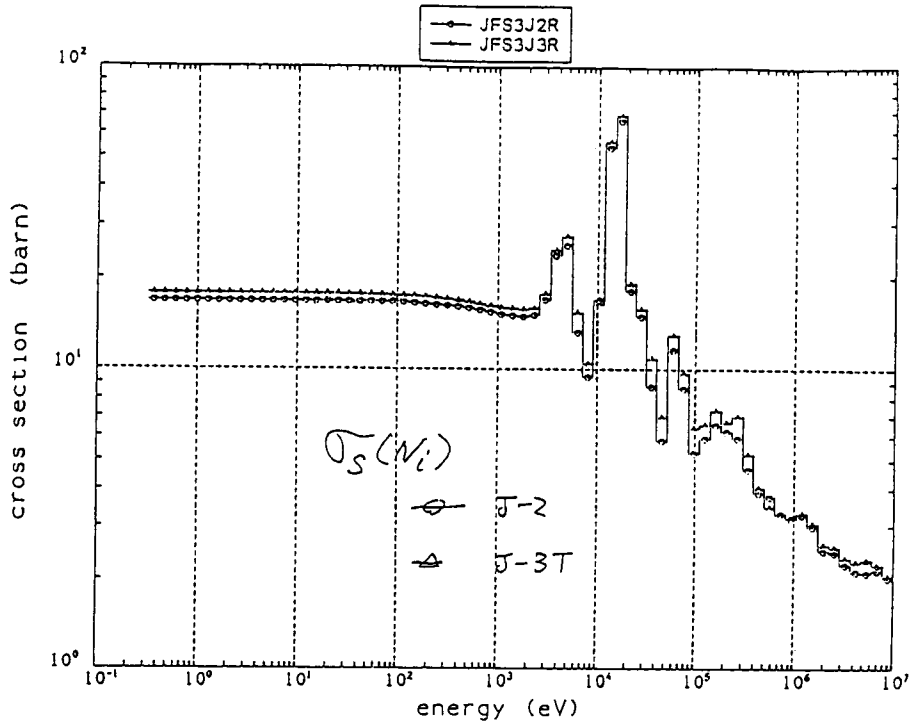


Fig.26 Comparison of elastic scattering cross sections of Ni

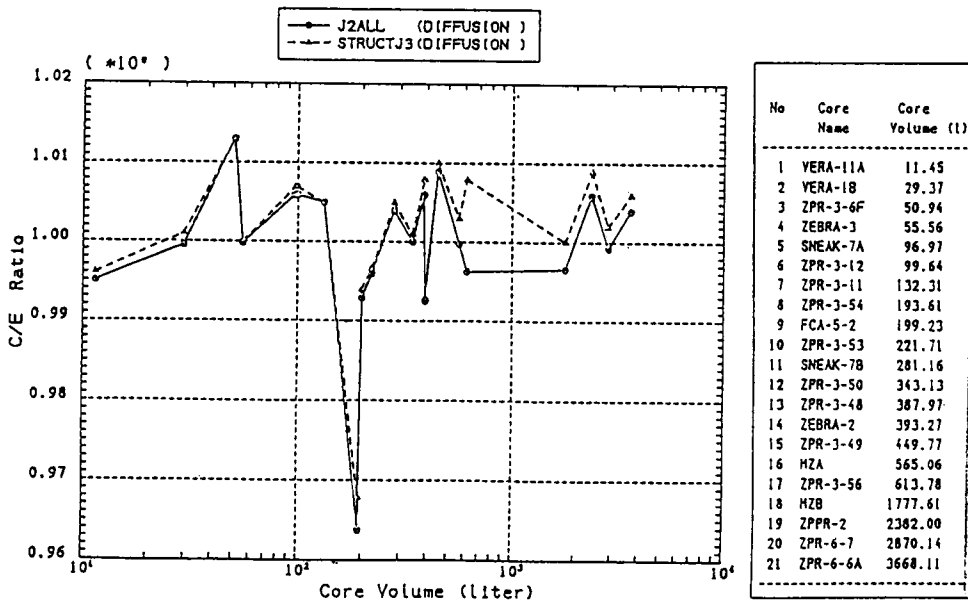


Fig.27 The effect of Ni-cross sections change on Keff