

大型高速炉用修正炉定数の研究*

(東 芝) 亀井孝信, (日立) 三田敏男, (MAPI) 河北孝司, (三菱総研) 佐藤 理
(CRC) 齊藤正幸, (動燃) 石川 眞, (原 電) 林 秀行

要旨

FBR実証炉の炉心設計では、今後の基本設計に向けて核設計精度の向上が要請されている。一方、日米が共同で行った大型高速炉臨界実験(JUPITER)の実験解析では、出力分布及び制御棒反応度値の解析値と測定値の比に大きな場所依存性がある事が判明した。本研究では、臨界実験データを炉定数に反映する、いわゆる炉定数調整法を用いて、FBR実証炉用の炉定数を作成した。このようにして求められた炉定数は、大型高速炉の臨界実験結果を良く再現し、前記問題の解決に極めて有効である事が判明した。本報告では、炉定数調整手法の概要と、この炉定数調整法を用いて作成された修正炉定数の有効性について論じる。

1. はじめに

大型高速炉の核設計及び臨界実験(JUPITER実験)解析には、我国独自の評価済核データライブラリーであるJENDL-2をもとに作成した70群炉定数JFS-3-J2を使用している。このJUPITER実験解析では、制御棒値と出力分布に於いて、その計算値(C)と測定値(E)の比(C/E値)に大きな場所依存性が見られている。その一例を図1に示すが、この場所依存性は、炉心の型式によらず存在している。炉心設計では、制御棒値および出力分布は重要なパラメータであり、こうしたC/E値の場所依存性は、核設計に対する要求精度を満足する上で大きな障害となっている。近年、核データ自身の不確かさに起因して生じる解析結果の精度に関する研究が国内外で進められており、臨界実験体系で得られた核特性データを最も良く再現するように炉定数を調整する方法、すなわち炉定数調整法、の有効性が確認されつつある。本研究は、この動向を踏まえて、前記C/E値の場所依存性を解消し、大型炉の予測精度を向上させる事を目的として、炉定数調整法に関する研究を行った。

2. 炉定数調整手法の概要

最近、炉物理及び遮蔽計算の分野で、核データ自身の不確かさに起因して生ずる計算結果の不確かさ解析が盛んに行われて、その定量的手法の開発と適用研究が大いに進められている^(1~3)。そして、模擬臨界実験体系で得た特性測定値(E)を最も良く再現するよう炉定数(核

* 本報告は、1990年秋の大会に於ける(核データ・炉物理)特別会合に於いて報告した内容をまとめたものである。尚、本研究は、動燃・原電共同研究として実施された。(原電は、電力のFBR実証炉研究として実施)。

データ)を調整する、いわゆる炉定数調整法の威力が認識され、予測誤差低減の有力武器として、大いに活用されている(4~6)。

この炉定数調整法とはBayesの条件付き確率推定法を利用した最小自乗法に基づくものである。確率論に於けるBayesの定理は、新しいデータを用いて事前予測確率を修正する方法である。事象E、Cの同時生起確率を $P(E, C)$ 、各々の事前予測確率を $P(E)$ 、 $P(C)$ 、又事象Eが起こった時の、Cの起こる事後確率(条件付確率)を $P(C|E)$ とする。Bayesの定理は

$$P(C|E) = \frac{P(E, C)}{P(E)} = P(E|C) \cdot \frac{P(C)}{P(E)} \quad (1)$$

と表される。ここで、Eは測定値、Cは断面積と考えて話を進める。

上記Bayesの定理を炉定数の修正に用いる。炉定数の予測値をT、真値を T_o とする。 T_o はTの近傍でガウス分布をしていると仮定して、

$$P(T_o) (= P(C)) = \text{const} \times \exp\left[-\frac{(T_o - T)^2}{2M}\right] \quad (2)$$

と表記出来る。ここで、MはTの分散である。

次に積分量の測定値を R_e 、真値を R_o とすると、同様に考えて

$$P(R_o) (= P(E)) = \text{const} \times \exp\left[-\frac{(R_o - R_e)^2}{2V_E}\right] \quad (3)$$

と書ける。但し V_E は R_e の分散である。

解析手法上の誤差を V_M とすると、真値 T_o を用いた積分量解析値 $R_c(T_o)$ は、 R_o の周りに分散 V_M で分布する。従って、 T_o が与えられた時、測定値 R_e は $R_c(T_o)$ のまわりに分散 $V_E + V_M$ で次式のように分布する。

$$P(R_e | T_o) (= P(E | C)) = \text{const} \times \exp\left[-\frac{(R_e - R_c(T_o))^2}{2(V_E + V_M)}\right] \quad (4)$$

従って、積分量 R_e が測定されたという条件の下で炉定数の真値 T_o を得る確率は、Bayesの定理から

$$\begin{aligned} P(T_o | R_e) (= P(C | E)) &= (P(E | C) \times P(C)) / P(E) \\ &= \text{const} \times \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) / \exp\left[-\frac{(R_o - R_e)^2}{2V}\right] \end{aligned}$$

$$\text{但し、} Q^2 = \frac{(R_e - R_c(T_o))^2}{V} + \frac{(T_o - T)^2}{M}, \quad V = V_E + V_M \quad (5)$$

この確率を最大にするよう、従って Q^2 を最小にするように T_o を定める。

$$\text{即ち, } \frac{\delta Q^2}{\delta T_0} = 0 \quad (6)$$

ここで、断面積の変動に対する積分特性の変動率、即ち、感度係数 G 、を使って、

$$R_c(T_0) = R_c(T) + G \cdot (T_0 - T)$$

と表記すれば、上式は解ける。このようにして、炉定数の推測値 T_0 を求めるのが、いわゆる炉定数調整法である。この際、必要な入力データは、各種核特性に対する感度係数 G 、調整前の断面積 T 及びその誤差マトリックス M 、核特性の測定値 R_e 、 T を用いて計算した解析値 $R_c(T)$ 、及びそれらの誤差 V である。これらの情報を用いて次式により、新しい炉定数 T' とともに、新しい共分散 M' を求めることが出来る。

$$T' = T + M' G^t V^{-1} (R_e - R_c(T)) \quad (7)$$

$$M' = (M^{-1} + G^t V^{-1} G)^{-1} \quad (8)$$

上式で得られた T' を用いて計算した場合、断面積の誤差に伴って生じる特性値の誤差 V は

$$V = G M' G^t \quad (9)$$

で与えられる。

3. 炉定数調整の為の計算条件

本研究で採用した炉定数調整計算の作業手順を図2に示す。炉定数の調整に用いる実験体系としては、実証炉を対象とした解析計算の予測精度を向上させることを目的とすることから、一連のJUPITER 実験の代表的な実験データを用いた。また使用する積分データの種類としては、実効増倍率の他、反応率比、反応率分布、制御棒価値、ナトリウムボイド反応度とした。

調整のベースとなる断面積ファイルとしては、JUPITER 実験解析に用いたJENDL2断面積を選んだ。調整のための計算のエネルギー群数は、JUPITER 実験解析の経験から、炉心特性を精度良く計算するのに必要とされている18群を選んだ。但し、最終的には70群ライブラリーを作成することを目的とする。

調整する核種としては、実証炉の核特性の評価上重要な11核種($^{235, 238} \text{U}$ 、 $^{239, 240, 241} \text{Pu}$ 、 C 、 O 、 Na 、 Fe 、 Cr 、 Ni)とし、反応の種類はこれら各核種毎に核分裂、捕獲、弾性散乱、非弾性散乱、弾性散乱の非等方余弦、核分裂当たりの中性子発生数等延べ32反応を選んだ。また、核分裂スペクトルも調整対象とした。その他、制御棒価値の予測精度を向上させる目的で、制御棒価値の測定値と計算値を関係づける際に必要となる遅発中性子割合 β も調整パラメータの一つに選んだ。

4. 炉定数調整計算結果

炉定数調整後の主要積分核特性の C/E 値を調整前の C/E 値とともに表1に示す。また、

同表には断面積の誤差にともなう核特性の不確かさ幅も併せて示した。これらの表より、炉定数調整法の適用により、主要積分核特性のC/E値は大幅に改善する事、及び断面積の誤差にともなう核特性の不確かさ幅も大幅に減少する事が分かる。また、先に述べた反応率分布及び制御棒値のC/E値の半径方向の位置依存性は大幅に解消した。即ち、炉定数の調整により、上記空間依存性は、反応率分布で約5%が1%（図3）に、また制御棒値は約10%が2%（図4）と大幅に改善した。

炉定数調整後の核分裂スペクトル及び主要な断面積の調整幅を表2に示す。核分裂スペクトルは、硬くなる傾向にあるが調整幅は非常に小さい。 ^{235}U の核分裂断面積は全エネルギー群に亘って調整により減少している。 ^{238}U の捕獲断面積は200keV以上では増大、それ以下では減少している。また ^{239}Pu の核分裂断面積は10keV以上で1~2%減少している。図5~7にこれら調整後の断面積を調整前（JENDL-2）及びJENDL-3の断面積と比較して示す。 ^{235}U 及び ^{239}Pu の核分裂断面積は調整によりJENDL-3に近づく傾向にある。一方、 ^{238}U の捕獲断面積は必ずしもJENDL-3に近づく方向には動いていない。

図8及び9に、炉定数調整に使用しなかった21体系に於ける実効増倍率及び反応率比に対する計算結果を、調整後の炉定数及びJENDL-2、JENDL-3間で比較して示す。今回炉定数の調整の対象とした体系は4600~8500 literのPu装荷炉心である事を考えると、数百liter以上でC/E値の改良が見られる事は、調整炉定数の計算結果の信頼性の高さを示している。

5. 今後の検討課題

炉定数調整法は、積分核特性の予測精度を向上させる上で非常に有効な手法である事が明らかになった。特に、JUPITER 実験解析に於いて、制御棒値および反応率分布のC/E値が炉心内の場所により大きく変動すると言う、炉心設計上好ましくない問題が有ったが、こうした問題点も炉定数の調整により殆ど無くす事が出来た。しかしながら、炉定数の調整に適用する積分特性の種類によって、炉定数の調整幅は大きく異なる事も判明した。得られた修正炉定数は、実証炉の設計に於ける種々の特性評価に於いて使用されるためには、普遍性を持ったものである必要がある。こうした事から、炉定数の調整に使用する積分特性の種類を、幅広く選ぶ事が重要である。また、同じ事が実験体系についても言える。すなわち、核特性感度係数が異なっている体系では、修正炉定数も異なったものになる。従って、可能ならば、実験体系についても幅広く選ぶ事が好ましい。また、炉定数の調整に使用する共分散データを変えて計算したところ、炉定数の調整幅が少なからず変動した。この事から、信頼の於ける炉定数を得る上で、共分散データの重要性は大きい。現在、本研究は3年計画の2年目であり、共分散データの見直しやFBR実証炉設計への適用性評価の為に研究等を継続中である。

謝辞

本研究の遂行に於いて、感度係数計算コード及び炉定数調整計算コードの提供及び全体に対するコメントをして頂いた阪大竹田敏一氏、断面積の共分散の評価及び調整後の断面積に対する考察をして頂いた原研菊池康之氏及び中川庸雄氏、積分ベンチマークテストの計算をして頂いた原研高野秀機氏に、また、本研究の種々のフェイズで有用なコメントを頂いた炉定数調整WGの動燃白方敬章氏及び原電池上哲雄氏に対して謝意を表します。

参考文献

- (1) J.B.Dragt et.al.:Methods of Adjustment and Error Evaluation of Neutron Capture Cross Sections; Application to Fission Product Nuclides, Nucl.Sci. Eng.,62,117(1977)
- (2) T.Kamei,T.Yoshida:Error Due to Nuclear Data Uncertainties in the Prediction of Large Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Core Performance Parameters, Nucl.Sci.Eng.,84,83(1983)
- (3) T.Takeda,T.Umano:Burnup Sensitivity Analysis in a Fast Breeder Reactor - Part 1:Sensitivity Calculation Method with Generalized Perturbation Theory, Nucl.Sci.Eng.,91,1(1985)
- (4) T.Kamei,T.Yoshida,T.Takeda,T.Umano: Burnup Sensitivity Analysis in a Fast Breeder Reactor - Part 2: Prediction Accuracy of Burnup Characteristics, Nucl.Sci.Eng.,91,11(1985)
- (5) T.Kamei,Y.Kato: Investigation on Space Dependence of C/E Values for Control Rod Worths and Reaction Rate Distributions in ZPPR-10A and -10D Assemblies, J.Nucl. Sci. Technol.,22(12),1025(1985)
- (6) T.Takeda, A. Yoshimura, T.Kamei,K.Shirakata: Prediction Uncertainty Evaluation Methods of Core Performance Parameters in Large Liquid-Metal Fast Breeder Reactors, Nucl. Sci.Eng.,103,157(1989)

表1 調整前と後のC/E値と断面積の不確かさに伴う核特性の誤差

ZPPR-9 積分核特性	C/E値		断面積の不確かさに伴う核特性の誤差 (%)	
	調整前	調整後	調整前	調整後
Keff	0.9973	1.0000	3.4	0.2
F25/F49	1.0170	1.0079	2.8	1.4
C28/F49	1.0480	1.0161	7.1	1.6
F49分布 (内外炉心境界)	1.0310	0.9941	4.1	0.6
(外側炉心)	1.0510	1.0034	5.0	0.8
制御棒価値 炉中心	0.9230	1.0200	5.9	3.2
最外周	0.9858	1.0224	6.2	2.9
Naボイド反応度	1.2800	1.1506	19.2	6.1
* (97D Z=±20")				

* 97マトリックスの上下20インチからNaを除去

表2 Reference ケースに於ける断面積調整幅

(%)

EG	Upper Energy	Reference				
		X	σ_f^{25}	σ_{in}^{28}	σ_c^{28}	σ_f^{49}
	(eV)					
1	1.000E+07	0.00	-0.66	3.04	8.44	-0.45
2	6.065E+06	0.06	-0.73	0.28	7.71	-0.58
3	3.679E+06	0.18	-1.06	-1.94	3.92	-0.90
4	2.231E+06	-0.02	-0.85	-6.43	2.46	-0.79
5	1.353E+06	-0.16	-1.28	-4.54	0.43	-1.07
6	8.209E+05	-0.17	-2.17	-2.82	1.02	-1.78
7	3.877E+05	-0.48	-1.62	-2.47	1.15	-1.56
8	1.832E+05	-0.40	-1.36	-1.41	-0.09	-1.13
9	8.652E+04	-0.25	-1.06	-0.35	-1.45	-0.82
10	4.087E+04	-0.12	-0.89	0.00	-5.20	-1.10
11	1.931E+04	-0.05	-1.13	0.00	-6.91	-1.58
12	9.119E+03	-0.02	-4.70	0.00	-5.27	0.35
13	4.307E+03	-0.01	-4.94	0.00	-5.62	0.25
14	2.035E+03	0.00	-4.46	0.00	-9.20	0.38
15	9.611E+02	0.00	-2.40	0.00	-7.50	1.61
16	4.540E+02	0.00	-2.08	0.00	-7.21	2.08
17	2.144E+02	0.00	-2.07	0.00	-3.98	2.28
18	1.013E+02	0.00	-0.08	0.00	0.00	3.41

X: 核分裂スペクトル

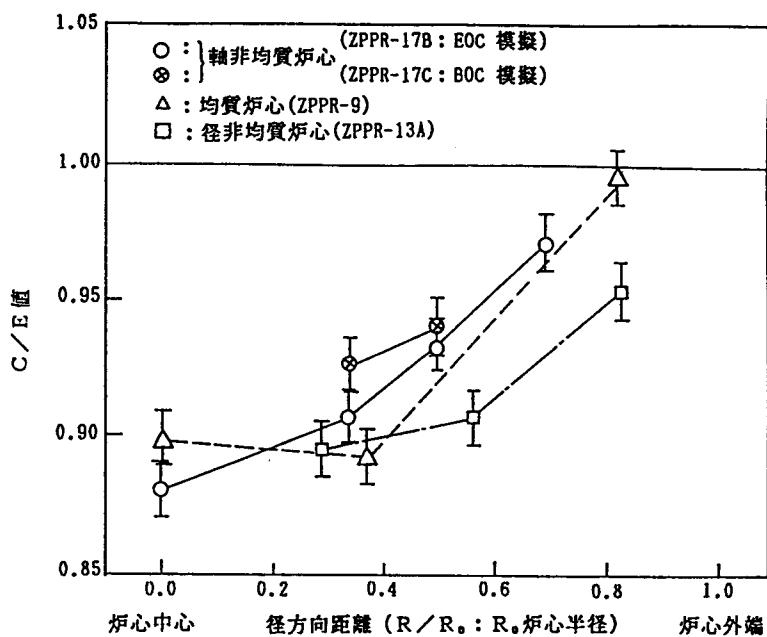


図1 制御棒価値のC/E値の径方向変化

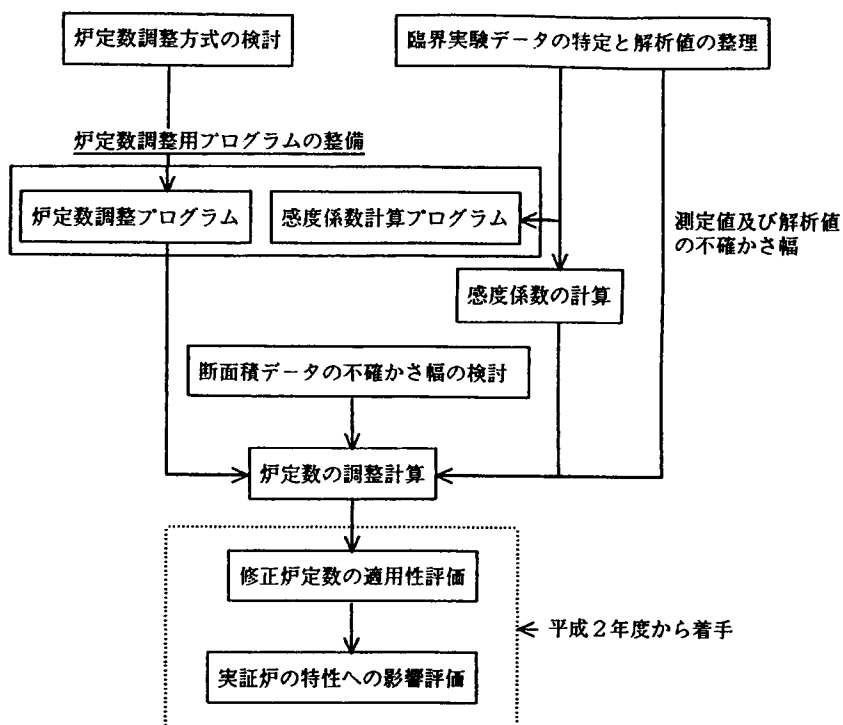


図2 炉定数調整に関する検討手順

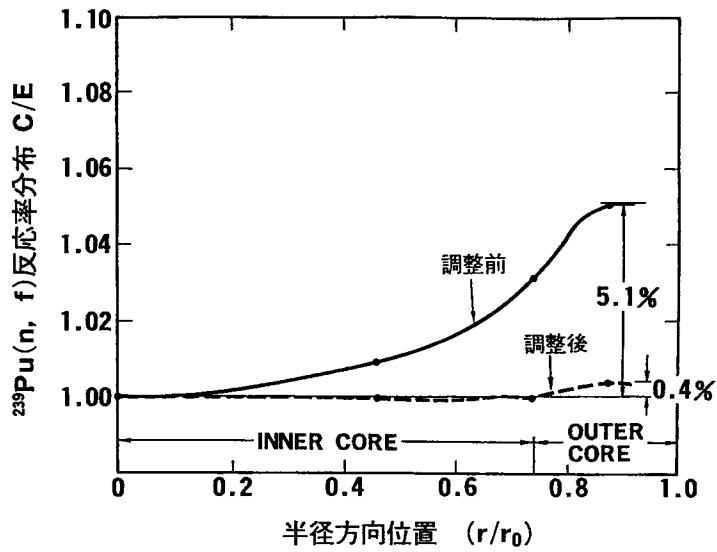


図3 反応率のC/E値の空間分布
 — ^{239}Pu の径方向分布 (ZPPR-9) —
 (r_0 : 炉心径)

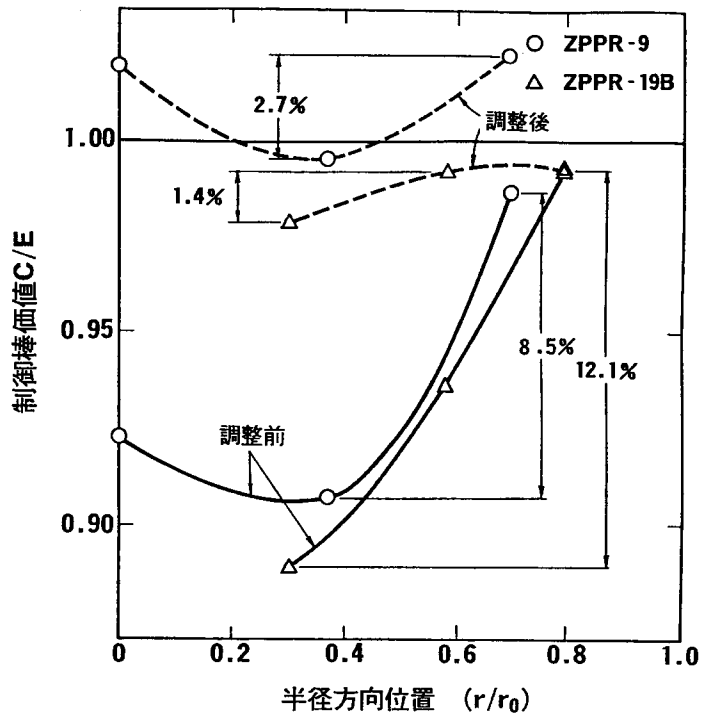


図4 制御棒価値のC/E値の空間分布
 —ZPPR-9及び19B—
 (r_0 : 炉心径)

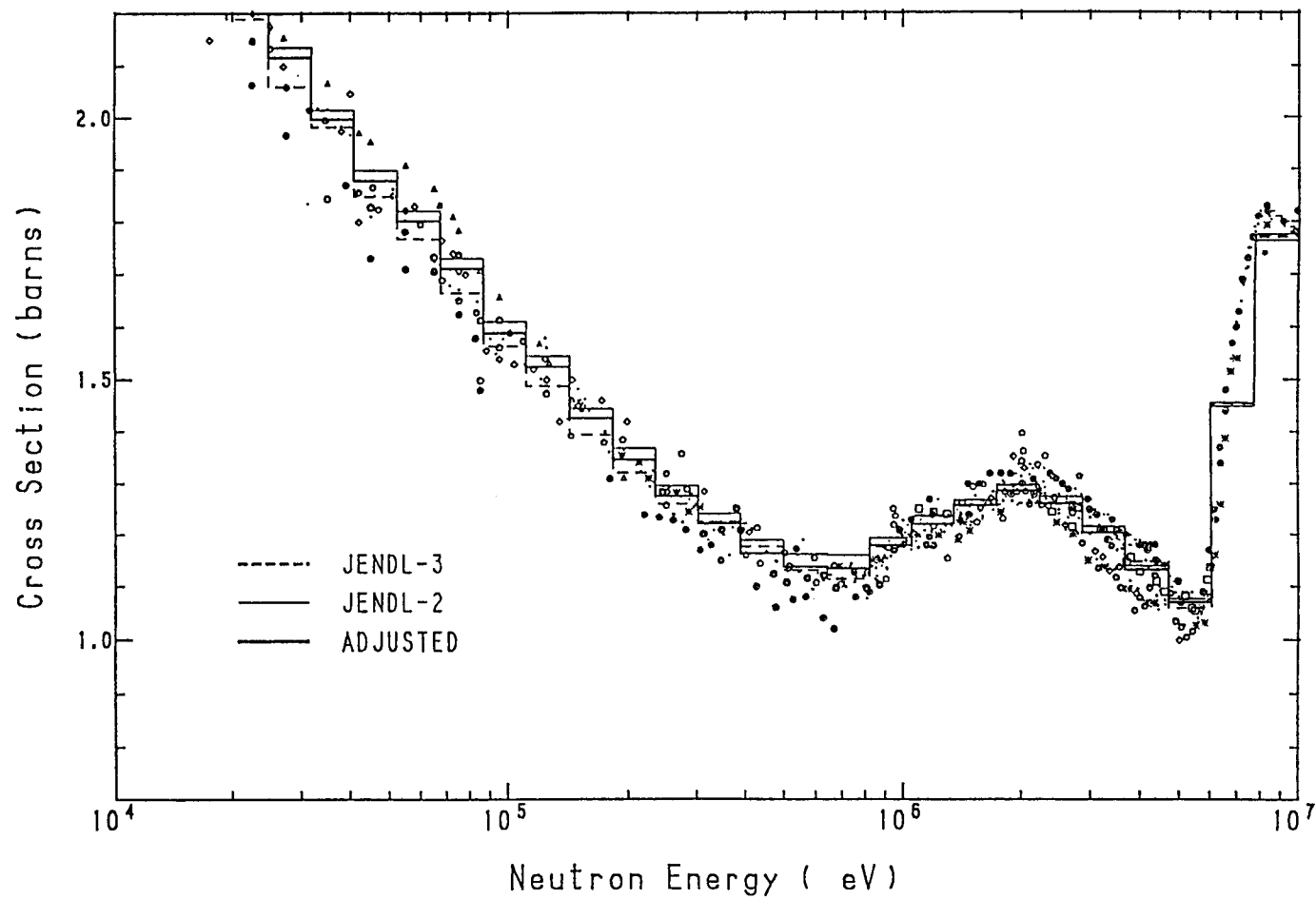


図5 ^{235}U の核分裂断面積
—調整後の断面積と調整前の断面積(JENDL-2)及びJENDL-3との比較—

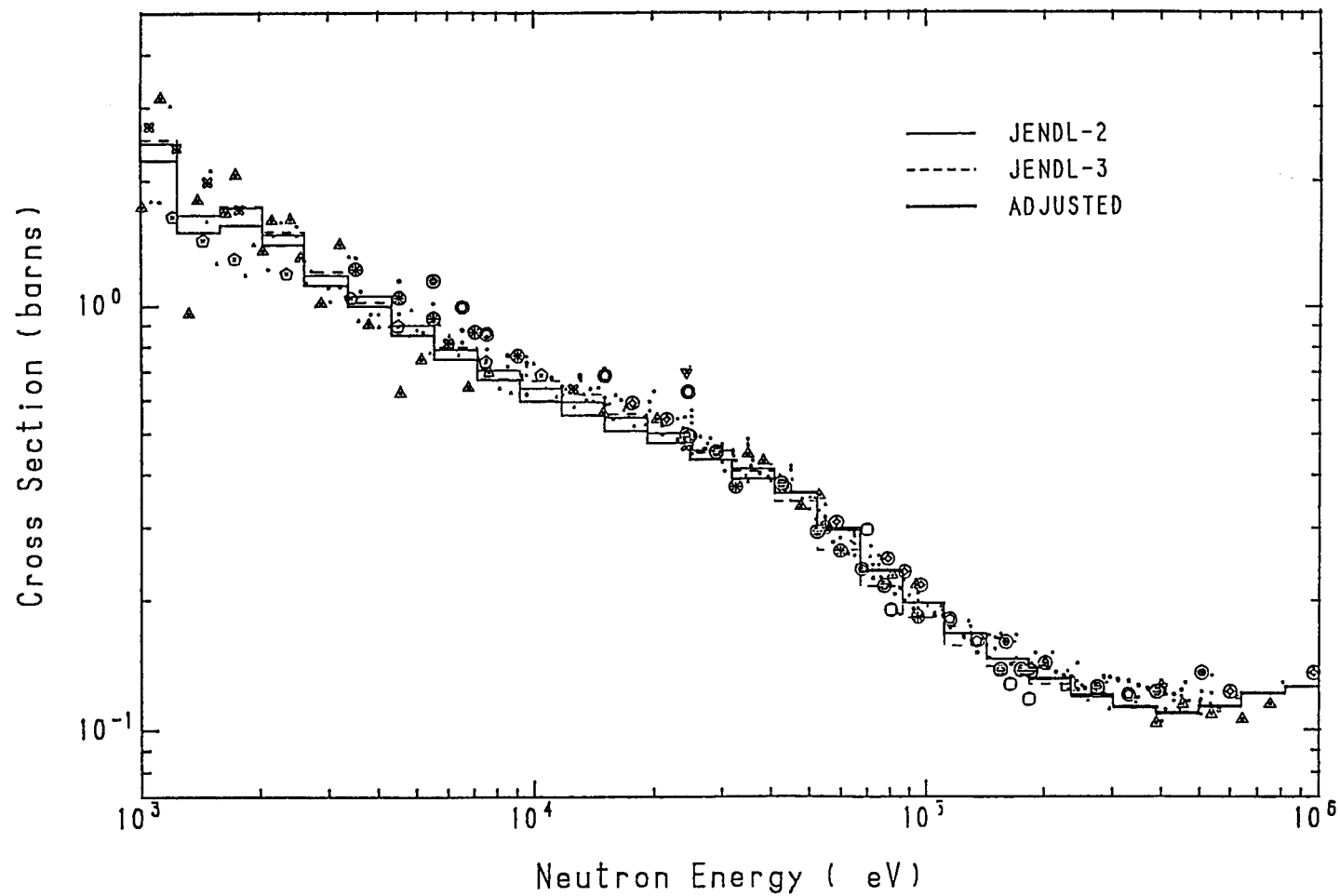


図6 ^{238}U の捕獲断面積
—調整後の断面積と調整前の断面積 (JENDL-2) 及びJENDL-3との比較—

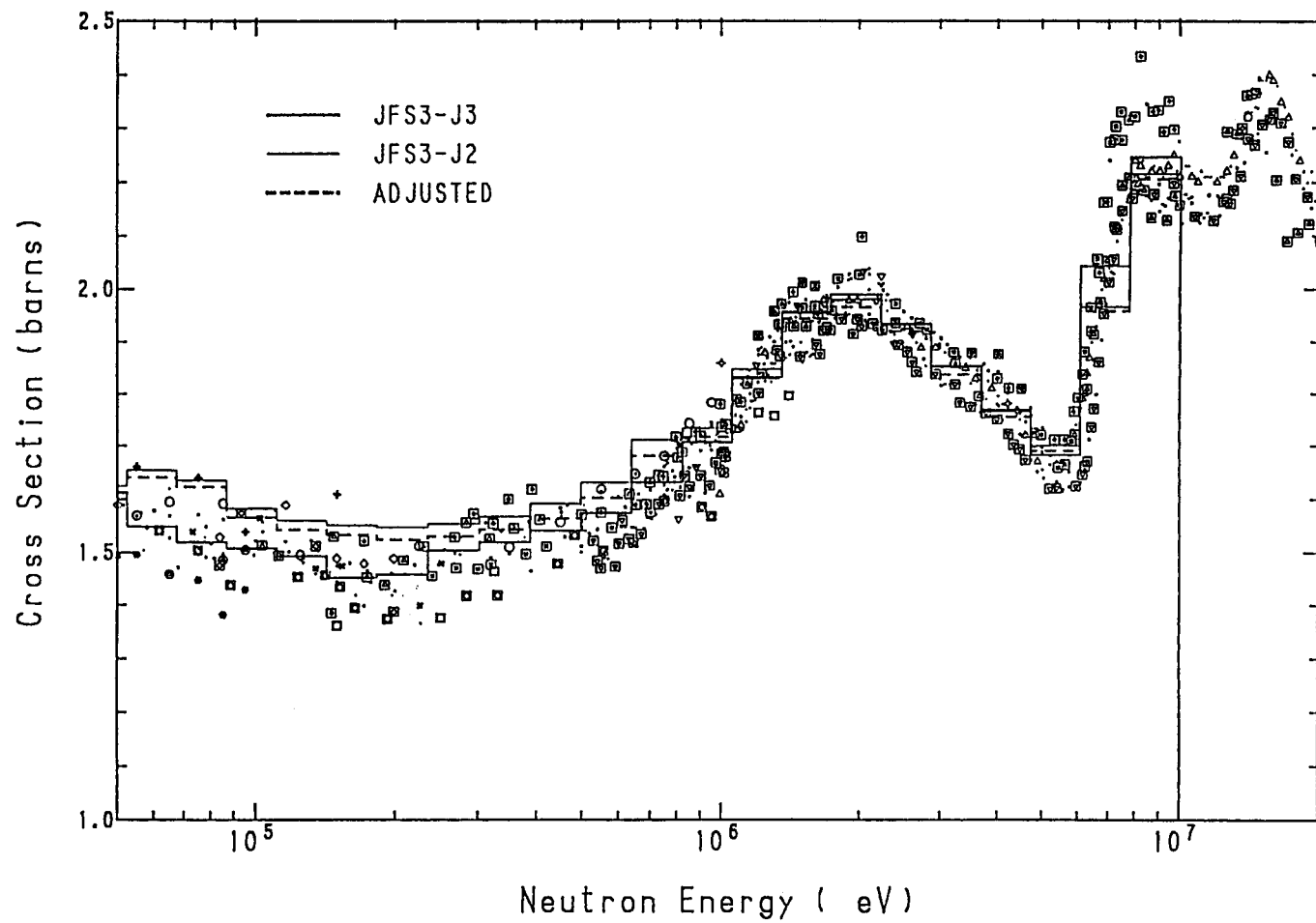


図7 ^{239}Pu の核分裂断面積
—調整後の断面積と調整前の断面積 (JENDL-2) 及びJENDL-3との比較—

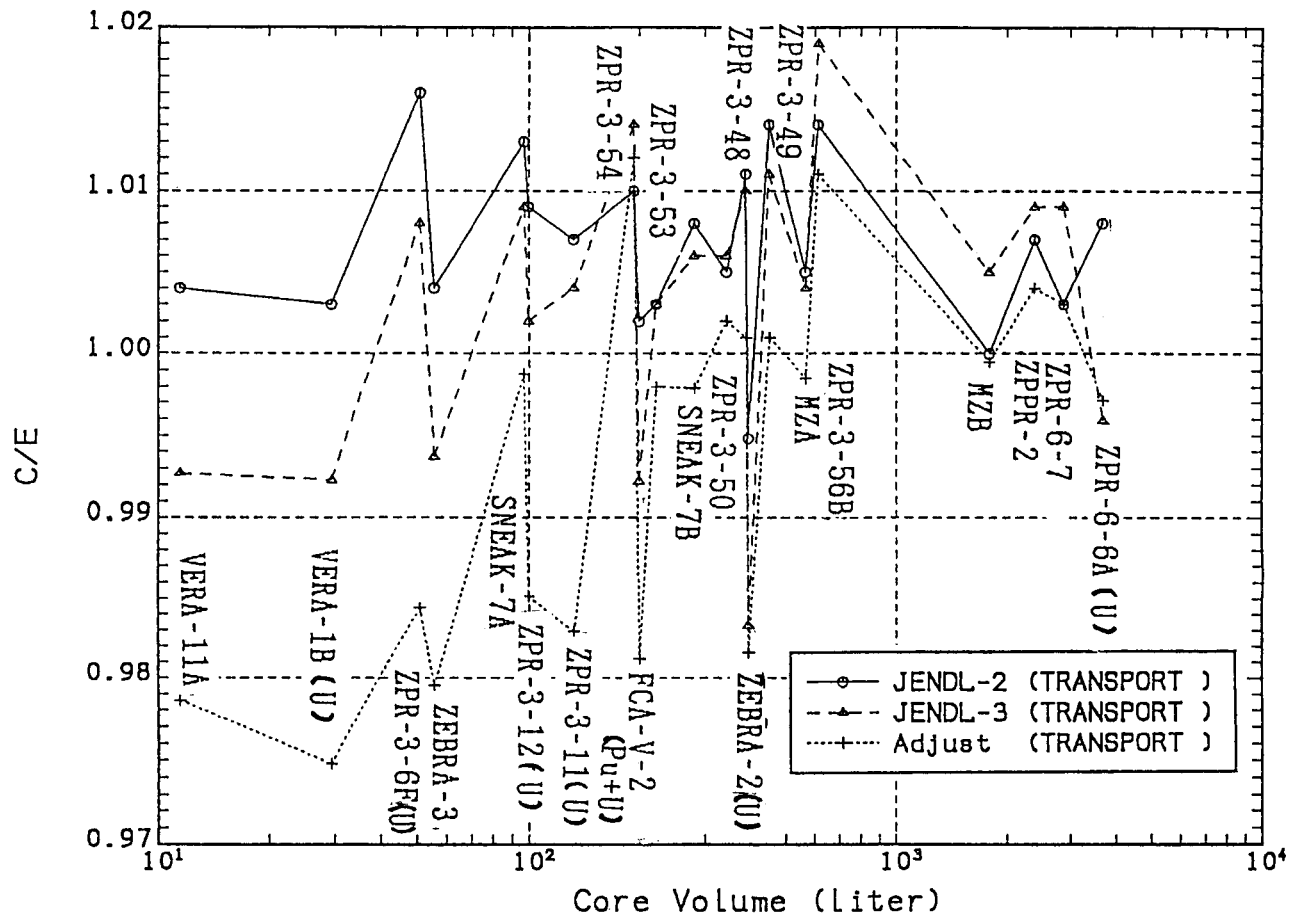


図8 21体系に対する国際ベンチマークテスト結果
実効増倍率

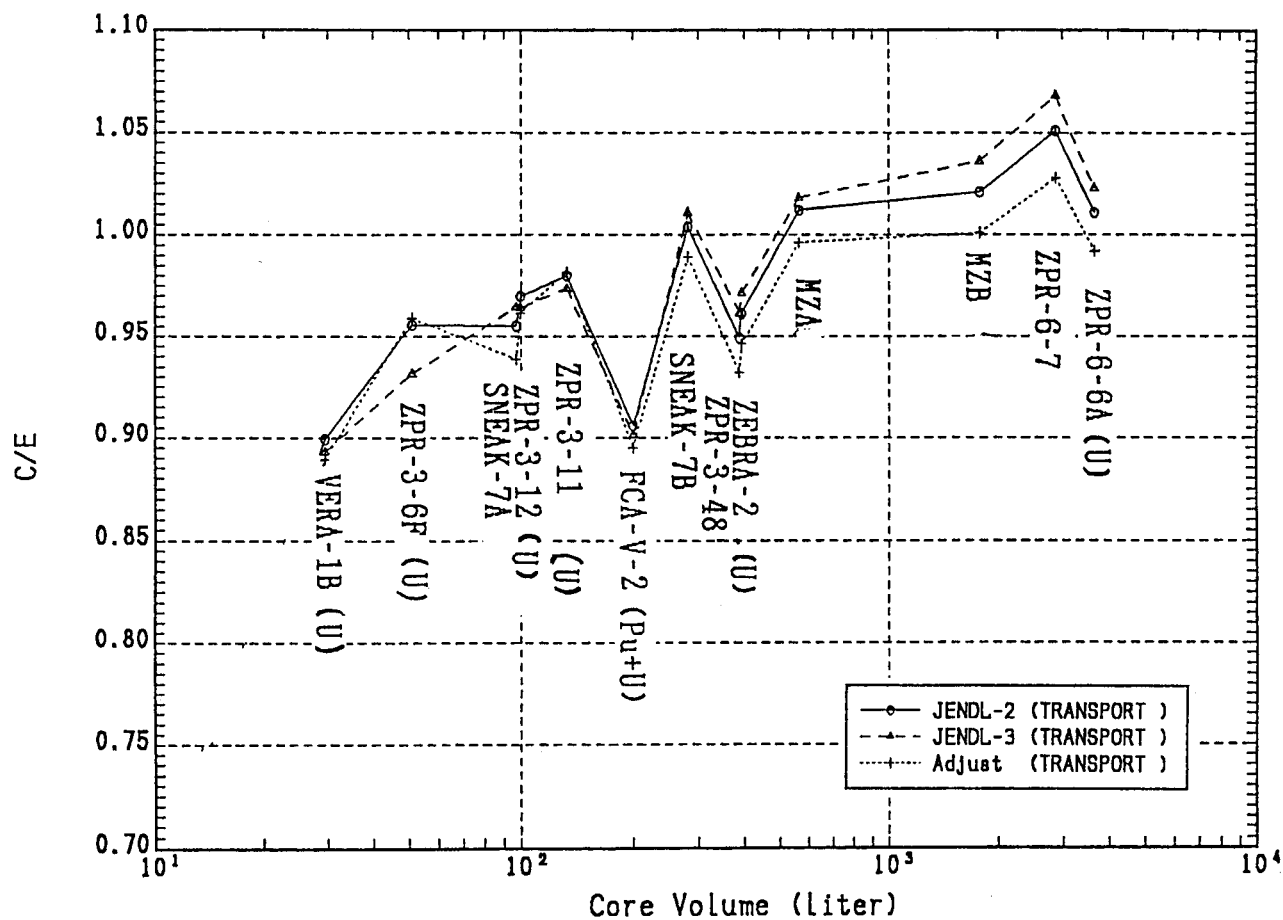


図9 21体系に対する国際ベンチマークテスト結果
反応率比 (^{238}U の捕獲反応と ^{235}U の核分裂反応の比)