

話題・解説(その I)

## 大型高速炉の核設計精度向上の為の炉物理的アプローチ

NAIG 亀井孝信

### 1. はじめに

安全でかつ性能のすぐれた炉心を設計する為には、臨界性や制御棒価値、出力分布等の主要核特性を精度良く予測する事が不可欠である。こうした目的の為、日米共同計画の下に米国の ZPPR 装置を使用して大型炉の為の臨界実験(JUPITER 実験<sup>(1)</sup>)が行なわれた。これらの実験データを核特性の予測に活用する方法は、大きく分けて2つある。ひとつは「バイアス・ファクター法<sup>(2)</sup>」であり、もうひとつは「群定数調整法<sup>(3)</sup>」である。「バイアス・ファクター法」は炉心特性の計算値に、臨界実験で得られた測定値(E)と計算値(C)の比( $E/C$ ) (バイアス・ファクター)を乗じる事により、予測値を求める方法である。我が国では、「常陽」の設計に於いてこの方法が用いられ、その有用性がいかに発揮された。この方法は直感的なアプローチであり、それ故にバイアス・ファクター適用後の核特性予測値の誤差の評価を困難としていたが、最近その誤差の評価法も確立された<sup>(4)</sup>。一方、「群定数調整法」は、測定値と解析値の誤差及び群定数の誤差を考慮しながら、測定値を良く再現するように群定数を修正する方法であり、理論的に洗練されている。本方法では、群定数調整の結果として、修正後の群定数のみならず、その共分散も同時に得られるので、核特性の予測値の誤差評価を行う事は非常に容易である。

本報告では、大型高速炉予測精度向上の為に、炉物理側で取られているアプローチの内、断面積の評価と密接に絡む分野の現状を報告する。

### 2. 臨界実験データ解析上の問題点

JUPITER 実験では、ZPPR-9 及び-10 集合体を組み、均質型大型高速炉用の臨界実験がかなり詳細に行なわれ、大型炉核特性の予測精度を求める上で、非常に有用なデータを提供している。これら実験データの解析は、PNC を中心に国内の諸機関が協力して鋭意進められている。

この実験解析作業の中で、我々はひとつの問題に遭遇した。それは、制御棒価値及び反応率分布の  $C/E$  値の炉心内の場所依存性が非常に大きいという事実である。具体的に言えば、前記  $C/E$  値は、炉中心では小さく、炉中心からの距離が増大すると共に大きくなる。制御棒価値では、最外周の制御棒位置での  $C/E$  値は、炉中心の値に比べて、4~12% 大きい。又、<sup>235</sup>U の反応率分布についても同様な傾向があり、4~5% の  $C/E$  値の場所依存性がある。このように、 $C/E$  値に大

きな場所依存性が存在する事は、核設計上適用すべきバイアス・ファクターを決め難くするという点で好ましい事ではない。そこで、このC/E値の場所依存性の原因を追求する目的で、我々は群定数調整法による解析を行なった。

群定数調整法では、実測値を良く再現するように修正された群定数 $T'$ 及びその共分散マトリックス $M'$ は、下記のように求められる。

$$T' = T + M' G^t V_E^{-1} (I_e - I_c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$M' = (M^{-1} + G^t V_E^{-1} G)^{-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $T$ 及び $M$ は修正前の断面積及びその共分散マトリックスで、 $V_E$ は測定された核特性量 $I_e$ と $T$ を用いて計算された核特性量 $I_c$ の差異、 $(I_e - I_c)$ 、の不確かさ幅である。又、 $G$ は核特性の感度係数である。

(1)式を適用するに当って、実測値を利用する方法として、次の2方法が考えられる。

方法1 …… 各種積分特性量のC/E値を1.0に近づける。

方法2 …… C/Eの空間変動を最小にする。

方法2は、必ずしもC/E値を1.0に近づける事を保証しない。表1に、活用した実験項目と使用した $V_E$ の値を示す。方法2で、制御棒価値の $V_E$ が小さくなっているのは、空間的な相対値に焼き直す事により、反応度スケール等測定値と計算値を結びつける上で入ってくる系統誤差を取り除く事が出来るからである。以上の方法で群定数を調整して、最終的に得られたC/E値を表2に示す。方法1では制御棒価値のC/Eの場所依存性が、群定数調整後も50%程残っているが、方法2では殆ど場所依存性が消えている。この事から、C/E値の場所依存性は、断面積の不確かさから来ている可能性が大きい事が判明した。尚、参考の為に、表3に主要な反応の群定数補正量(=  $\Delta T/T$ )を示す。同表より、 $^{238}\text{U}$ の $\sigma_c$ は、100keV以下で5~8%減少、 $^{239}\text{Pu}$ の $\sigma_f$ は、800keV~100keVで約3%減少、1keV以下では約4%増加、等興味深い結果が見られる。

### 3. 燃焼特性予測精度

高速炉が商用炉として活用される為には、燃料サイクル費の観点から、又適切なる燃料交換計画の立案という観点からも、大型高速炉の燃焼特性を正確に予測する事が必要である。燃焼特性としては、燃焼による反応度損失量、増殖比、核分裂性物質生成量、燃焼による出力分布の変動等が考えられる。しかし乍ら、これらの諸量はいずれも通常の臨界実験に於いては確認し難い特性である。そうした背景から、1979年NEACRP委員会、大型高速炉(3000MWt)に対する国際ベンチマークが提案され、これに各国の諸機関が参加した。その結果のひとつである360日燃焼時

の反応度損失量を表4に示す。表4より明らかなように、燃焼反応度は、 $0.5\% \Delta k/k \sim 1.9\% \Delta k/k$ とかなり大きくばらついている。しかも、これらの特性量の実験による確認が殆ど不可能である事が問題の解決を困難ならしめている。そこで、私達は現状の核データの誤差を想定して、感度解析手法により、現状の燃焼特性予測精度の評価を行なった<sup>(6)</sup>。

今、誤差のない断面積セット $T_0$ を用いて計算された燃焼特性値を $I_0$ とする。この時 $T_0$ から $\delta T$ だけ誤差を持った断面積セット $T$ を用いて計算した燃焼特性を $I$ とすると、 $I$ と $I_0$ の間には、 $I = I_0 (1 + G \cdot \delta T)$ 、という関係が成り立つ。断面積セット $T$ の共分散行列を $M$ と表すと、 $I/I_0$ の共分散 $V$ は、 $V = G \cdot M \cdot G^t$ 、として得られる。従って、着目特性 $i$ の予測誤差は $\pm \sqrt{V_{ii}}$ として求められる。このようにして、燃焼特性予測誤差を評価すると、燃焼による反応度損失量は $\pm 30\%$ 、増殖比は $\pm 5\%$ と非常に大きい。そこで、前章で述べたJUPITER 実験で得られた実験値情報を活用して群定数を修正した場合、この予測誤差はどの程度改善されるかについて、定量的な評価を行なった。この場合の予測誤差 $V$ は、修正後の共分散を $M'$ とすると、 $V = G \cdot M' \cdot G^t$ で求められる。表5に、群定数調整後の燃焼特性予測誤差を、群定数調整前の誤差幅とともに示す。同表より、実験値の活用により、予測精度は大幅に改善される事が判る。表6に、参考の為に、群定数調整前後の断面積の不確かさ幅を、主要な反応について示す。 $^{238}\text{U}$ の $\sigma_c$ 及び $^{239}\text{Pu}$ の $\sigma_f$ の誤差幅が大幅に減少している事が判る。

#### 4. おわりに

大型高速炉の核特性予測精度を改善する為に炉物理側で行なっているアプローチについて論じた。炉物理側では、臨界実験で得られる積分実験データを活用して、予測精度を改善する努力が行なわれている。一方、核データ評価者達により、断面積の評価値の誤差幅を縮める努力が鋭意行なわれている。今後とも、両面からの努力により、更に核特性予測精度が向上する事を願う次第である。又、本報告で述べたような予測精度評価を行なう上で必要不可欠なものは、断面積の共分散マトリックスである。現在、我々は暫定的に、この共分散マトリックスを評価し、解析に用いているが、この数値の選定が最終的な結果を左右する重要な量である。JENDL-3では、主要核種に対して、この共分散マトリックスが準備されると聞いている。それらが早く利用出来る事を期待している。

#### 参考文献

- (1) 金城勝哉他、「JUPITER 実験解析」,昭和56年日本原子力学会年会, B31 (1981)の他多数あり。
- (2) S. Iijima, A. Shimizu, and T. Inoue, "The analysis of FCA Critical

- Experiments and Its Application to 'JOYO' Nuclear Designing", Proc. Int. Symp. Physics of Fast Reactors, Tokyo, Japan, October 16-23, 1973.
- (3) M. Humi, J. J. Wagschel, and Y. Yeivin, "Multigroup Constants From Integral Data" Proc. 3rd Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, 2, 398, United Nations, New York (1964)
- (4) T. Kamei and T. Yoshida, Nucl. Sci. Eng. 84, 83 (1983)
- (5) 亀井孝信, 加藤恭義, 「ZPPR-10A, -10Dの制御棒値及び反応率分布のC/E値の空間依存性に関する考察」, 昭和60年日本原子力学会, 秋の分科会, B27 (1985)
- (6) T. Kamei, T. Yoshida, T. Takeda, and T. Umamo, Nucl. Sci. Eng. 91, 11 (1985)

表1 想定した解析値と測定値の差異の不確かさ幅,  $V_E$  (%)

方法	実効増倍率	制御棒価値	$^{235}\text{U}(n,f)$ 反応率分布	反 応 率 比	
				$C^{28}/F^{49}$	$F^{28}/F^{49}$
方法1	0.5	5	2	3	4
方法2	0.5	2	2	3	4

表2 群定数調整前後のC/Eの比較

		調 整 前	調 整 後	
			方法1	方法2
実効増倍率 (ZPPR-10A)		0.991	1.000	1.000
反応率比 (ZPPR-9)	$C^{28}/F^{49}$	1.060	1.007	0.998
	$F^{28}/F^{49}$	0.988	0.997	1.004
制御棒価値 (ZPPR-10D)	炉 中 心	0.943	0.991	1.033
	最 外 周	1.053	1.047	1.053
	最外周/炉中心	1.117	1.057	1.020
反応率分布 (ZPPR-10D)	外側炉心/炉中心	1.047	0.993	1.001

表3 主要な反応の群定数修正幅 (%)

反 応	グループ	群定数修正幅 (方法2)
$\sigma_f^{49}$	1	-1.6
	2	-3.2
	3	0.4
	4	3.8
$\sigma_c^{49}$	1	1.1
	2	-0.8
	3	-7.1
	4	-9.2
$\sigma_f^{28}$	1	-5.0
$\sigma_c^{28}$	1	0.7
	2	1.0
	3	-4.7
	4	-7.7

各群下限エネルギー：800 keV, 100 keV, 1 keV, 0.025 eV

表4 3000MWt 炉で360日燃焼時の反応度損失(国際ベンチマーク)

使用核データファイル	燃焼反応度損失	機 関
JENDL-2	1.5% $\Delta k/k$	JAERI
ENDF/B-IV	0.5~0.7	EIR, CNEN, AAEC
ENDF/B-V	1.0	ANL
KEDAK-3	1.9	KFK
CARNAVAL-IV	1.3	CEA

表5 1000MWe 燃焼特性予測誤差(1 $\sigma$ )

(%)			
項 目	群定数調整前	群定数調整後	
燃 焼 反 応 度	± 30%	± 18%	
増 殖 比	± 5%	± 2.5%	
<sup>239</sup> Pu インベントリー			
炉 心	± 2%	± 1%	
ブランケット	± 3%	± 1%	
出力ピーキングファクター	± 3%	± 1.5%	

表6 群定数調整前後の断面積の不確かさ幅(1 $\sigma$ )

(%)			
反 応	グループ	断面積の不確かさ幅	
		群定数調整前	群定数調整後
$\sigma_f^{49}$	1	3.0	2.3
	2	5.0	2.9
	3	6.0	3.3
	4	6.0	4.8
$\sigma_c^{49}$	1	15.0	14.8
	2	15.0	14.3
	3	15.0	11.1
	4	15.0	9.4
$\sigma_f^{28}$	1	5.0	4.4
$\sigma_c^{28}$	1	5.6	4.2
	2	7.5	5.8
	3	7.6	3.7
	4	8.6	4.6

各群下限エネルギー：800 keV, 100 keV, 1 keV, 0.025eV