

原子力学会炉物理部会・核データ部会企画セッション

(4) 実機核特性の予測精度に関する代表性因子について

大阪大学大学院工学研究科

竹田 敏一

takeda@nucl.eng.osaka-u.ac.jp

1. 緒言

核データを用いて核設計あるいは、核計算を実施した場合の計算結果の精度を予測する事は、特に安全評価にとって重要である。

原子炉の安全審査においては、計算値を測定データのある実験値（臨界実験データ等）と比較し、計算が安全側であることを確かめ、その設計値を妥当なもの（保守的なもの）と評価している。

しかし、常に保守的であっても、古いモデルを採用した場合には物理現象を忠実に表現しているわけではなく、現実を忠実にモデル化する最確評価（ベストエスティメイト）を取り入れる必要がある。

炉心計算における最確評価には 3 次元の核熱結合が用いられる。その妥当性はモンテカルロ法等の結果と比較することにより保証される。問題は核データ（断面積ライブラリー）による設計値の不確かさの評価である。これには、後で示すように核データの共分散を用いて、計算値の不確かさ幅を評価することができる。

さらに、革新炉のような新型炉を設計する場合は、検討する炉心をモデル化して、臨界実験を実施し、その核特性を把握するのが常である。

このような臨界実験を実施した場合、或いは実施しなかった場合の実機核特性の評価の方法が図 1 に示されている。

2. 精度評価の方法

まず、臨界実験を実施せず計算コードを用い直接、核特性を計算する場合の精度を考える。

計算としては、連続エネルギーモンテカルロ計算を用いると、標準偏差が評価でき、それを計算誤差とすることができる。

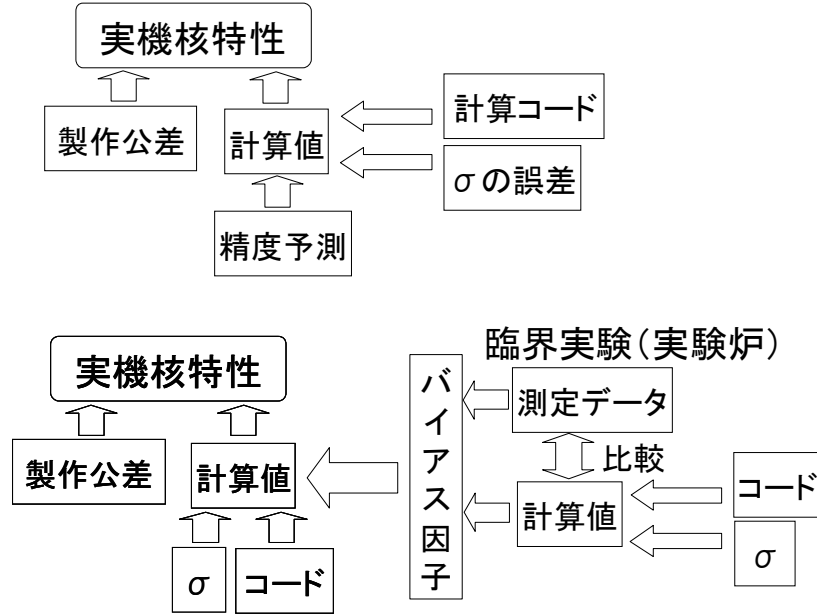


図1 実機核特性評価方法

また、計算法として2次元或いは、3次元の拡散コード、輸送コードによる決定論的手法を用いる場合には計算誤差としては、①断面積の自己遮蔽効果の誤差、②3次元体系のモデル化誤差、③メッシュ誤差、④エネルギー群誤差、⑤輸送計算における角度分点に基づく誤差、等があり、各計算誤差を ΔR_{mi} とすると、全体の計算誤差は、

$$\Delta R_m = \sum_i \Delta R_{mi} \quad (1)$$

となる。

次に、核データに基づく核特性の誤差評価を行う。

$\Delta \sigma_\ell$ = 用いる断面積の真値からの差

により、 $\Delta \sigma_\ell$ を定義する。ここで、サフィクス ℓ は核種、反応、エネルギーを表している。断面積が $\Delta \sigma_\ell$ だけ変化した場合の核特性の変化は感度係数 S_ℓ を用いて、

$$\Delta R = S_\ell \Delta \sigma_\ell \quad (2)$$

と表される。 ℓ についての和をとり、さらに計算誤差も含めると核特性の誤差は、

$$\Delta R = \sum_i \Delta R_{m,i} + \sum_\ell S_\ell \Delta \sigma_\ell \quad (3)$$

となる。これより、計算された核特性量 R の分散は、

$$V_c(R) = V(R_m) + S'VS \quad (4)$$

となる。ここで、 $V(R_m)$ は、計算による分散、 S は感度の行列であり、 S' は S の転置行列である。また、 V は断面積共分散である。

次に、臨界実験を実施した場合を考える。臨界実験は実機をモデル化したものであり、場合によってはかなりシンプルなものとなっている。この臨界実験体系と実機とを区別するため、臨界実験体系のパラメータは異なるスーパーフィクスで表す。臨界実験を実施することにより、種々の核特性測定値 R_E^E が与えられ、図 1 に示すようにこの測定値と計算値 R_C^E との比で定義されるバイヤス因子 f が求められる。

$$f = R_E^E / R_C^E \quad (5)$$

一般にこの因子は 1 よりずれている。これは、測定値 R_E^E には測定誤差 ΔE があり、計算値には計算法の誤差及び断面積誤差に基づくエラーが含まれるためである。

$$R_E^E = R_0^E (1 + \Delta E) \quad (6)$$

$$R_C^E = R_0^E (1 + \Delta R_m^E + S^E \Delta \sigma) \quad (7)$$

上式で、 R_0^E は、臨界実験体系での核特性の真値である。

実機での核特性計算値は、

$$R_C = R_0 (1 + \Delta R_m + S \Delta \sigma) \quad (8)$$

となる。バイヤス因子を用いる方法では、(8)式の計算値は次のように補正される。

$$\tilde{R} = f R_C \quad (9)$$

(5)～(8)を上式に代入し、誤差は充分小さいと仮定すると、補正された核特性は次式で与えられる。

$$\tilde{R} = R_0 \{1 + \Delta S \Delta \sigma + (\Delta R_m - \Delta R_m^E) + \Delta E\} \quad (10)$$

但し、

$$\Delta S = S - S^E \quad (11)$$

(10)より、 $\tilde{R}_C$ の分散値は、

$$V(\tilde{R}_C) = \Delta S' V \Delta S + V(R_m - R_m^E) + V(E) \quad (12)$$

上式で第1項は断面積、第2項は計算法、第3項は実験の各誤差に基づく $\tilde{R}_c$ の分散への寄与を表している。

(4)、(12)を用いると臨界実験を実施し、バイヤス因子を適用することにより、分散値は以下のように低減する。

$$\begin{aligned} VR &\equiv \frac{V(\tilde{R}_c)}{V(R_c)} \\ &= \frac{\Delta S' V \Delta S + V(E) + V(R_m - R_m^E)}{S' V S + V(R_m)} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、代表性因子 γ を

$$\begin{aligned} \gamma^2 &= \frac{S' V S^E}{S' V S} \frac{S^{tE} V S}{S^{tE} V S^E} \\ &\approx 1 - \frac{\Delta S' V \Delta S}{S' V S} \end{aligned} \quad (14)$$

で定義すると、

$$VR = \frac{(1 - \gamma^2) S' V S + V(E) + V(R_m - R_m^E)}{S' V S + V(R_m)} \quad (15)$$

となり、計算誤差を考えない場合には、

$$VR = 1 - \gamma^2 + \frac{V(E)}{S' V S} \quad (16)$$

となる。臨界実験を実施することにより $VR \rightarrow 0$ とすれば設計精度の高度化が図れる。

このためには、(16)より、次の条件が必要となる。

- ① 代表性因子を1に近くする。

この条件は $S^E \approx S$ の臨界実験をすればよいことがわかる。

- ② 実験誤差 $V(E)$ が断面積誤差 $S' V S$ に比べ充分小さいこと。

3. 適用例

2.で導出された方式に基づき、臨界実験による核特性分散の低減効果を超寿命小型高速炉 4S に対して調べてみる。4S 炉は超寿命の運転のため、高内部転換比をもち、反応度制御は炉心のまわりの反射体を上下に動かすことにより行う高速炉である。

この炉心の重要な核特性は、反射体反応度価値、Na ボイド反応度であり、種々の核特性を把握するため、FCA を用いた臨界実験が実施されている。

図2に示される 4S 炉、FCA 体系から得られるバイヤス因子を 4S 炉に適用した場合の反射体反応度価値の分散値低減を求めた。図3はこの値の1からのずれ、即ち、何%分散値が少なくなったかを示す図で、実験誤差の関数として示してある。この図より、反射

体反応度価値の実験誤差が 5%もあるとほとんど実験の意味がなく、実験を有効に用いるためには実験誤差を 1~2%程度以下にする必要のあることがわかる。

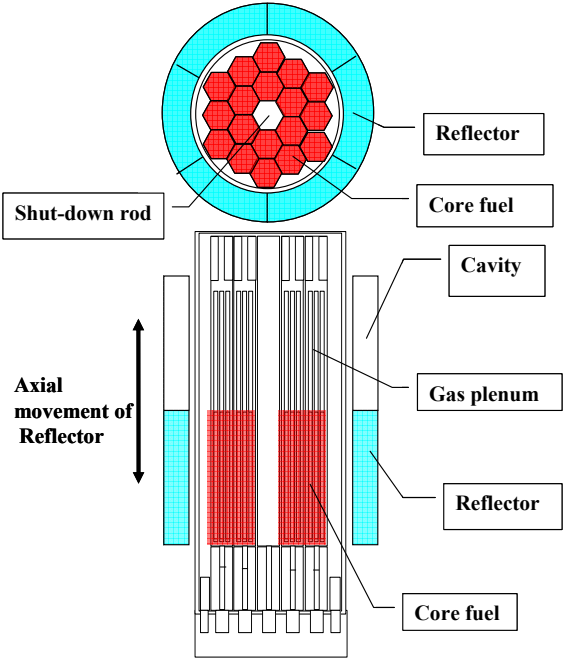


図 2-1 実機小型高速炉 (4S)

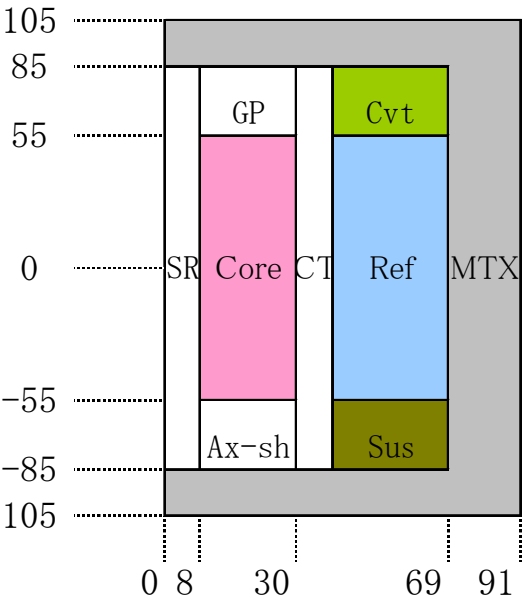


図 2-2 FCA モックアップ体系

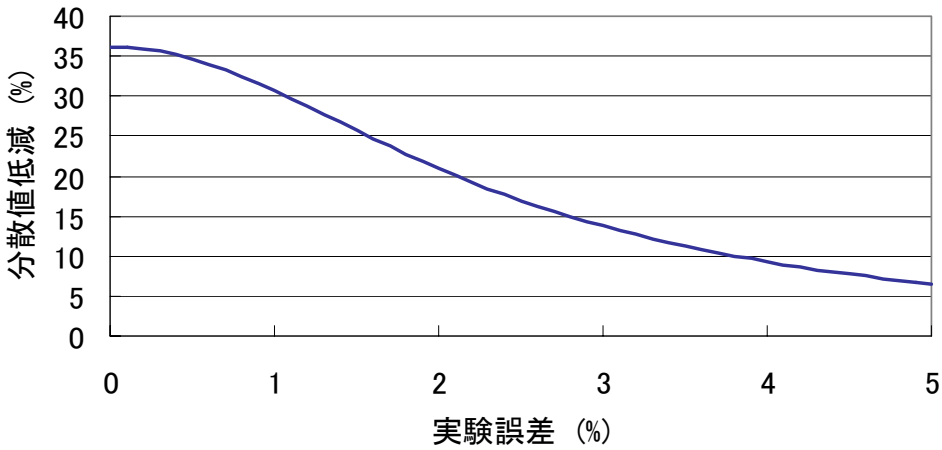


図 3 反射体反応度価値の分散値低減

4. 結論

臨界実験による分散値低減の理論式を導出した。この式により、どのような臨界実験が設計精度の高度化に必要かがわかり、さらに、実験誤差をどのくらいに見積もれば実験が有効かがわかるようになった。