中性子実効計数率比による 未臨界度の決定と予測

中村 久*, 白川 正広*

(1986年 12月17日 受理)

Subcriticality Determination and Prediction Based on Effective Neutron Count-Rate Ratio

By Hisashi NAKAMURA and Masahiro SHIRAKAWA

KEYWORDS: Bayesian approach, calibration-curve, counting efficiency, data adjustment, effective count-rate ratio, neutron monitors, paired-detector, prediction, subcriticality, variational method

核燃料サイクルの各ステップにおいて、決して臨界になってはならない設備またはその状態を対象に、その未臨界度を直接測定して継続的にモニタすることの利点は様々である。かかる未臨界度測定法あるいはモニタ手法に対して、ほぼ共通に要請される条件は、(1)臨界または臨界近傍での反応度較正実験を必要とせず、深い未臨界状態での測定だけで未臨界度の決定ができること、(2)未臨界度の決定あるいは補正手順において核燃料組成の詳細を必要としないこと、(3)オンライン的機能作動ができ、装置およびその保守が簡単であること、等である。これに対して、 ^{252}Cf -source-driven neutron-noise analysis method⁽¹⁾ は、上記方向を目指す代表例である。

本報では、上記の要請に応ずる可能性ある手法として、実効計数率比 (ECRR: Effective Count-Rate Ratio) の概念による未臨界度決定法および予測法を提案している。装置としては、通常の中性子計数技術だけでなく、この点は上記の雑音解析法に優る点である。すでに予備的検証実験も実施されたが、今後この種の測定データが蓄積されることを期待して、ECRR 概念の有効性に関する理論的根拠を明らかにする。

1. ECRR の定義

任意の外部中性子源を含む未臨界状態にある燃料体系を考える。この体系に関する中性子束 ϕ は、演算子表示によるボルツマン方程式

$$(A - M)\phi = S \quad (1)$$

ここで、 A : 中性子の吸収、散乱、輸送を含む演算子
 M : 増倍演算子

S : 外部中性子源

を解いて求める。この体系内に、中性子エネルギー分布に対しそれぞれ異なる応答 Σ_1 および Σ_2 ($\Sigma_2 \neq \Sigma_1$) を示す2つの中性子検出器の組(対検出器)を考える。対検出器のそれぞれの計数率比 R は、 ϕ を用いて

$$R = \langle \Sigma_2 \phi \rangle / \langle \Sigma_1 \phi \rangle \quad (2)$$

で与えられる。記号 $\langle \rangle$ は、 ϕ に関する積分量であることを表わす。

次に、 R と実効増倍率 k とを結びつけるために、まず、(1)式に対応する固有値方程式とその随伴方程式を考える。

$$[A - (1/k)M]\phi_0 = 0, \quad (3)$$

$$[A^* - (1/k)M^*]\phi_0^* = 0 \quad (4)$$

ここで、 ϕ_0, ϕ_0^* : 固有値 $(1/k)$ に関する固有関数とその随伴関数

さらに、方程式(1)と(4)とから、反応度 $\rho = [1 - 1/k]$ の演算子表示を得る。すなわち、

$$\rho = -\langle \phi_0^*, S \rangle / \langle \phi_0^*, M\phi \rangle \quad (5)$$

そこで、 R を反応度的に有意なものとするために、固有関数 ϕ_0 に関する計数率比

$$R_0 = \langle \Sigma_2 \phi_0 \rangle / \langle \Sigma_1 \phi_0 \rangle \quad (6)$$

を考え、 R_0 (固有計数率比と呼ぶ)を用いて規格化する。すなわち、

$$R_* = R/R_0 \quad (7)$$

ここで、新たに定義される比 R_* が ECRR である。

2. ECRR の炉物理的意義

すでに(7)式により定義した ECRR (または R_*) の炉物理的内容と、その導入の意義について述べる。

ECRR 概念の主な内容をまとめると次の通りである。

- (1) 2つの検出器を体系内同一位置に配置するとすれば、ECRR は規格化されたスペクトル・インデックスである。
- (2) 臨界状態では、ECRR 値は1に収束する。一般的に、燃料装荷に伴い R_* 値が単調に変化 ($R_* < 1$ で) するよう設定できれば、ECRR 自体が未臨界の尺度となりうる。
- (3) ECRR の定義式によれば、その評価上、中性子束および計数効率の規格化が直接関与せず、

* 富士電機(株) (Fuji Electric Co., Ltd.)

局所的体系変化の影響を受けにくく、また、その比の形から計算誤差も生じにくい性質をもつ。

対検出器の代表例として、 ^{235}U 核分裂計数管と ^{238}U 核分裂計数管の組合せがある。これらはすでに、スペクトル・インデックスのデータ取得用に利用されている。ECRR 値が臨界状態で1に収束するのは、(1)式の ϕ が(3)式の ϕ_0 と一致(規格化定数は別)して、 $R=R_0$ となることによる結果である。未臨界状態では、 $R_e < 1$ または $R_e > 1$ となるが、計数率比の分母と分子の交換により一般的に $R_e < 1$ とする。なお、深い未臨界状態で R_e 値が単調変化する一般的保障はなく、対検出器の配置に依存する。Fig. 1にFBR体系の計算例*を示す。

Fig. 1 Calculated R_e -values on typical FBR approach to critical

ところで、ECRR の定義式(7)によれば、分子の計数率比は直接測定可能であるが、分母の固有計数率比 R_0 は計算によってのみ評価できる量である。したがって、直接測定により ECRR 値を評価することはできない。また、ECRR と実効増倍率 k とを、後に述べる方法で一義的に関係づけたとしても、ECRR は特定対検出器に固有の値をとる概念であり、後者はどの一般性はない。したがって、よく特定された体系の未臨界の尺度として ECRR を適用する可能性はあるものの、一般的には実効増倍率 k を精度よく評価するための補助概念と考える。

直接測定でなくとも、ECRR 値を精度よく評価する方法は存在する。この手法は、対検出器により測定した計数率比 $R(\text{EXP})$ を用いて、いわゆるデータ調整

(data adjustment) の手法を利用する。すなわち、 $R(\text{EXP})$ と対応する計算値が一致するようデータ修正した場合、 R_0 や ρ の計算値もまた正しく修正されることを期待する。

方程式(1),(3)の解を計算により求める時、そこで用いる演算子を一般的に $\bar{X}$ と書いて代表させる。この $\bar{X}$ には中性子断面積ライブラリーだけでなく、燃料組成の不確かさ等による系統的な誤差も含まれるものとする。そこで、正しい演算子 X を

$$X = \bar{X}(1+f) \quad (8)$$

で表わす。ここで、 f が上述の誤差に対応するもので、データ調整上の実質的なパラメータである。

一方、 R , ECRR, ρ は、それぞれ(2),(7),(5)式に見られるように、すべて中性子束に関する積分量の比の形で与えられている。このような特性量に対する計算値を $\bar{P}$ と書いて代表させる。この時、(8)式による誤差 f に由来する、正しい演算子 X に対応する特性量 P が存在する。修正後の P 値は変分法または一般化摂動法を利用すると²⁾、近似的に

$$P = \bar{P}(1+Tf) \quad (9)$$

という行列表示で表わされる。ここで、 T は感度係数行列であり、その大きさはパラメータ f と特性量 $\bar{P}$ の数で決まる。また、 f はすべての特性量に対して共通のものとする。

データ調整は計数率比を(9)式に適用した基本式

$$d = \{C_R \cdot R(\text{EXP}) / \bar{R} - 1\} - T_R f \quad (10)$$

ここで、 $\bar{R}$: 計数率比計算値

T_R : $\bar{R}$ に対する感度係数

に基づいて行う。行列 T_R の大きさは f と $R(\text{EXP})$ の入力データ数に依存する。差 d の期待値を、いわゆる Bayesian Approach³⁾ の手法で求めて f 値を決定する**。この f 値を用いることにより修正特性量は、すべて(9)式より直ちに求められる。(10)式の右辺第1項に含まれるもう1つのパラメータ C_R は、 $R(\text{EXP})$ が相対測定値とすると、計算値 $\bar{R}$ と直接比較するために考慮すべき規格化定数である。この C_R 値は、別の実験により与えられる場合は別にして、臨界状態における計数率比較正実験が可能な場合には直ちに求め

* 同一対検出器($^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$)を異なる3点に配置し、炉心内 Pu 燃料を順次装荷して臨界近接を行なった場合の計算例である。炉中心配置の対検出器 ECRR 値の計算では、周辺部に比べて分母と分子を逆転した。

** 上記の手法では、入力データに関する誤差設定の吟味が十分にでき、通常の最小自乗法に比べて物理的に有意な結果が得やすい。

られる。すなわち、まず C_R に試行値を与えて(10)式によるデータ調整を実施し、その結果 $R_e=1$ となるように C_R 値を決定する。この値を、以後の未臨界状態における f 値決定の手順では一貫して用いる。かかる手順は、修正中性子源増倍 (MSM) 法や通常の中性子雑音解析法⁽¹⁾の較正手順と同等のものである。

上述の C_R の決定手順を、臨界のみでなく未臨界状態をも含めた(臨界近接実験を想定した)手順に拡張して考えると、ECRR 概念の意義がより明確となる。

ECRR と k に関し、任意の対検出器につき1つの曲線関係を設定する*。すなわち、

$$R_e = C_0 - F[1-k; C_i] \quad (11)$$

ここで、 $F[1-k; C_i]$ は、常に正値をとる $(1-k)$ の任意の関数で、 $F[0; C_i]=0$ とする。係数 $C_0, C_i (i=1, N_i)$ を決めれば、曲線(11)式が定まる。係数の数 N_i が少数であるほど、曲線決定のための回帰解析手順が簡単となる。任意の臨界近接手順において、パラメータ C_R と演算子パラメータ f とは、全体系状態に共通として、各ステップにおける計数率比測定データ R (EXP)を用いてデータ調整を行う。その結果得られる修正特性量の組 $[R_e, k]$ を(11)式に用いて C_0, C_i を決定する。この時、繰返し法により C_R 値を決定するための条件は、 $R_e=1$ ($k=1$ の時)の条件を(11)式に適用すると、 C_0 に対して

$$C_0=1 \quad (12)$$

である。以上は、いわば曲線(11)式の較正手順である。任意未臨界状態の修正ECRR値を較正済曲線(11)式に適用すれば、直ちに k 値が求められる。なお曲線(11)式は、対検出器が複数設定してあればその数だけ決まる。したがって、平均的な k 値の精度は対検出器の数が多いほど良くなることになる。

これまでの較正手順より判明することは、臨界での計数率比測定値を必ずしも必要としないことである。要は、曲線(11)式の係数決定に必要な入力データ(未臨界状態における測定)があれば十分である**。このことがECRR 概念導入の意義の1つである。

* より厳密には、臨界近接経路(燃料装荷パターン)にも依存する。

** もちろん決定精度は、パラメータ f の設定法と測定データ数に依存する。

3. 未臨界度モニタへの適用性

本報の最初に述べたように、未臨界度モニタの手法としては深い未臨界状態における測定のみから未臨界度を決定する必要があるが、ECRR による手法では計数率比規格化定数 C_R を臨界状態における較正実験なしに決定する問題に帰着する。

前節2.の考察より、次の2つのアプローチが存在する。すなわち、

- (1) 別の模擬実験からの外挿に問題がないことが明らかな設備では、あらかじめ C_R 値を設定する。この場合、ECRR 値自体を未臨界度の尺度とすることも考えられる。
- (2) 燃料装荷計画に従い、深い未臨界状態で曲線(11)式の較正に必要な計数率比データを on-line (または off-line) 的に蓄積し、安全限界に近づくほどその評価精度が高まるシステムとする。

この2つのオプションは対象設備の運用計画と密接に関連する。

ところで、上記2つのモニタ手法[特に(2)の場合]では、もう1つ別の機能、ECRR および k 値を予測する機能を考えることができる。すなわち、上記(1)または(2)の手法において、深い未臨界状態での測定より求めた演算子調整データ f 値を用いて、次の燃料装荷による体系変化に対応するECRR 値を予測することができる。さらに、(9)式により直接的に、あるいは較正曲線(11)式にECRR 予測値を適用して実効増倍率の予測値が得られる。かかる予測機能はモニタとしての応用分野を拡大するものと思われる。

本研究に関して、動力炉・核燃料開発事業団の白方敬章氏を初めとして、すでに多くの方々のご協力を頂いている。ここで改めてお礼申し上げたい。

なお、本報の内容は、動燃事業団と富士電機㈱との契約に基づく研究成果をもとにまとめたものである。

— 参 考 文 献 —

- (1) 例えば、MIHALCZO, J.T., et al.: *Ann. Nucl. Energy*, **13**, 351 (1986).
- (2) STACEY, Jr., W.M.: *Nucl. Sci. Eng.*, **48**, 444 (1972); Lin, SHENG-CHI., et al.: *ibid.*, **67**, 61 (1978).
- (3) Chao, YANG-AN: *ibid.*, **75**, 60 (1980).