研究論文

1036. 反応度測定のための中性子源ならびに
ガンマ線強度の評価法

島津 洋一郎*

*Estimation of Neutron Source and Gamma Source Strengths for
Reactivity Measurements*

By Yoichiro SHIMAZU

A new method has been studied for estimating both neutron source and gamma source strengths to be taken into account for reactivity measurement using a digital reactivity meter. Normally such correction is not necessary because appropriate neutron flux level is selected for the measurements. However when the neutron flux level is to be lowered than the appropriate level the corrections of neutron source and gamma source must be made. It is shown from the study that the value $(\rho_m - \rho)N/l$ equals to $S - \gamma\rho/l$, a constant, where ρ_m is the reactivity calculated by the reactivity meter without the corrections, ρ is a known reactivity, N is the sum of neutron and gamma signals, l is neutron life time, S is the neutron source and γ is gamma source. Based on this fact S and γ can be estimated when two different reactivities are given and the corresponding constants are known. Theoretically this constant can be obtained as soon as the reactivity is given so that it is not required to wait the transient effect to die out. Thus this method can estimate both neutron source and gamma source in a very short time.

KEYWORDS: neutron sources, gamma sources, inverse kinetic equation, reactivity, reactivity meters, reactor physics test, reactor kinetics, measuring methods, evaluations

I. はじめに

PWRでは、毎回の燃料交換後の起動時に、炉物理試験を実施し、核特性を測定する。核特性のうちでも反応度特性は最も重要なパラメータの一つであり、ゼロ出力炉物理試験において測定される。ゼロ出力炉物理試験は、反応度フィードバックの効果が現れない範囲で、中性子源の影響が無視できる程度に中性子束レベルを高くして実施される。反応度特性は反応度計で測定されるが、上述の理由から、反応度の算出には中性子源は省略されている。このため、中性子束のレベルが大幅に低下するような場合には、中性子源の影響により、測定される反応度が真値からずれてくる。このようなことがないようにするには、中性子源強度を事前に評価し、反応度算出に際して考慮する必要がある。中性子源強度の評価法については、文献(1)、(2)等で報告されている。

実際の炉心においては、中性子束のレベルが低い場合には、中性子源の影響のみならず、照射中の燃料からの γ 線の影響が出てくる。中間領域の検出器は補償型中性子検出器であるため、この影響は排除できるが、出力値は対数ス

ケールであること、ならびに検出器の有効長が炉心高さに比べて短いため、中性子束の分布の変化の影響を受ける。出力領域検出器は非補償型であるが、長尺であり、中性子束分布の変化の影響は受けにくい。このため通常、出力領域の検出器信号を使用する。中性子束が低下する場合において精度よく反応度を評価するためには、中性子源強度のほかに、 γ 線強度も評価する必要がある。

本報では、このような観点から、中性子源強度と γ 線強度双方を効率的に評価する方法について検討した結果を報告する。

II. 反応度測定に対する中性子源と
 γ 線の影響

中性子源と γ 線が共存する体系における炉心反応度測定系は以下のように表せる。

炉心

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \Sigma \lambda_i C_i + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

反応度計(中性子源省略モデル)⁽³⁾⁽⁴⁾

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho_m - \beta}{l} N + \Sigma \lambda_i Q_i \quad (3)$$

* 三菱重工業㈱原子力技術センター (Mitsubishi Heavy Ind., Ltd.)

(1995年 10月18日 受理)

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} N - \lambda_i Q_i \quad (4)$$

$$N = n + \gamma \quad (5)$$

初期条件

$$n_0 = -\frac{\ell S}{\rho_0} \quad (6)$$

$$C_{i0} = \frac{\beta_i}{\ell \lambda_i} n_0 \quad (7)$$

$$N_0 = n_0 + \gamma \quad (8)$$

$$Q_{i0} = \frac{\beta_i}{\ell \lambda_i} N_0 \quad (9)$$

この状態から反応度変化が与えられると、中性子束の変化は、変化後の反応度により定まる中性子束レベル n_f に向かって変化する。この過渡変化の時定数は中性子源がない場合と同じである。すなわち、

$$n(t) = n_f + (n_0 - n_f) \sum F_j \exp(s_j t) \quad (10)$$

$j = 1 \sim 7$

ここで、 F_j は、(11)式で算出されるものであり、 S_j は方程式(12)の根である。

$$F_j = \frac{\ell + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{s_j + \lambda_i}}{\left[\frac{d}{ds} \left(\ell s + \sum_{i=1}^6 \frac{s \beta_i}{s + \lambda_i} - \rho \right) \right]_{s=s_j}} \quad (11)$$

$$\ell s + \sum_{i=1}^6 \frac{s \beta_i}{s + \lambda_i} - \rho = 0 \quad (12)$$

一方、反応度計での反応度は中性子束の値が一定値に収束していくことから、ゼロに収束していく。

(6)式からわかるように、反応度と安定時の中性子束レベルとの間には1対1の関係がある。よって、反応度が正

確にわかっている場合には、この関係式から、 S と γ の値を決定できる。すなわち、既知の反応度を ρ_1 と ρ_2 とすれば、

$$N_1 = -\frac{\ell S}{\rho_1} + \gamma \quad (13)$$

$$N_2 = -\frac{\ell S}{\rho_2} + \gamma \quad (14)$$

よって、

$$S = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \cdot \frac{N_1 - N_2}{\ell} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{N_1 \rho_1 - N_2 \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \quad (16)$$

このようにして得られた S, γ を反応度のモデルに考慮すれば、中性子束レベルが中性子源の影響を受けるレベルまで低下しても反応度は正確に算出できる。

PWRの起動時炉物理試験時においては、ホウ素濃度の希釈の後、制御棒を引き抜いて臨界を達成する。この際の制御棒位置は全引抜き位置から少し挿入された位置である。臨界達成後に中性子束レベルを上昇し、さらにホウ素濃度を調整しながら一度制御棒を全引抜き位置近辺まで引き抜き、その状態で炉心特性の測定を行う。よって、この間に制御棒の価値は反応度計で精度よく測定できる。この既知の制御棒価値を利用すれば、上記の原理に従い、 S, γ を評価できる。

しかし未臨界状態で安定な中性子束レベルを得るまでには、かなり長い時間待つ必要がある。具体的にはFig. 1に示す通りである。この安定待ちの時間は、添加反応度が小さくなればなるほど長くなる。この問題は、下記のような過渡状態の特性を利用すれば解決できる。

Fig. 1 Reactor transient with a neutron source with constant reactivities

III. 過渡状態での評価

過渡状態では、中性子源のないモデルにより算出される反応度計の反応度、 γ 線を含んだ反応度計への入力信号と真の反応度との間には、下記の関係が成立する。なお、以下、簡略化のため、遅発中性子先行核は1群として扱う。また、実用反応度計では、中性子束信号の微分項と中性子寿命の積は十分小さいため、ゼロとしている。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \lambda C + S \quad (17)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{\ell} n - \lambda C \quad (18)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\beta}{\ell} N - \lambda Q \quad (19)$$

$$\rho_m = \beta - \frac{\ell \lambda Q}{N} \quad (20)$$

ここで、 $R = Q - C$ とすると

$$R = Q - C \quad (21)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\beta}{\ell} \gamma - \lambda R \quad (22)$$

よって、

$$R(t) = R_0 e^{-\lambda t} + \frac{\beta \gamma}{\ell \lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (23)$$

一方

$$R_0 = \frac{\beta \gamma}{\ell \lambda} \quad (24)$$

であるため

$$R(t) = \frac{\beta \gamma}{\ell \lambda} = \text{定数} \quad (25)$$

すなわち、一たん平衡条件に到達後は一定となる。よって、反応度計で算出される先行核密度は以下の通りに表される。

$$Q(t) = C(t) + \frac{\beta \gamma}{\ell \lambda} \quad (26)$$

反応度計で算出される反応度 ρ_m は、

$$\rho_m = \beta - \frac{\ell \lambda}{N} \left\{ C(t) + \frac{\beta \gamma}{\ell \lambda} \right\} \quad (27)$$

整理すると、

$$\rho_m N = \beta n - \ell \lambda C \quad (28)$$

一方、真の反応度の関係は、(中性子束の微分項を省略している)

$$\rho = \beta - \frac{\ell \lambda C}{n} - \frac{\ell S}{n} \quad (29)$$

である。(28)式を代入して整理すると、

$$(\rho_m - \rho) N = \ell S - \rho \gamma \quad (30)$$

または、

$$\frac{(\rho_m - \rho) N}{\ell} = S - \frac{\rho}{\ell} \gamma \quad (31)$$

よって、 $(\rho - \rho_m) N$ を算出し、その後、反応度を変化させて同様にその反応度に相当する値を算出する。ここで得ら

れた2つの G_1, G_2 値より S, γ は次式で得られる。

$$S = \frac{\rho_2 G_1 - \rho_1 G_2}{\rho_2 - \rho_1} \quad (32)$$

$$\gamma = \frac{G_1 - G_2}{\rho_2 - \rho_1} \quad (33)$$

この原理による S, γ の評価を数値シミュレーションにより行った。中性子源強度は100/s、 γ 線強度は2/s相当とし、初期反応度は-0.1 pcmと仮定した。初期反応度を-0.1としたのは、-100 pcm程度の反応度で、中性子束のオーダーが3桁程度変化するようにしたためである。

中性子束の過渡変化は即発跳躍近似を採用し、計算時間幅は0.001 sとした。即発跳躍近似計算は、添加反応度が-150 pcmの場合でも、解析解と比べて、反応度添加後0.02 s以降では誤差は0.025%以下で一致している。これらのシミュレーション計算はすべて倍精度計算である。

数値シミュレーション結果をFig. 2に示す。この図には2種の算出結果を示す。具体的には、次の通りである。

SG 1: ρ として、既知の反応度をそのまま使用。

SG 2: ρ として、中性子束信号に基づいて反応度を逆算したものを使用。

SG 1では理論式から得た結果と少しずれている。この理由は、反応度計の反応度計算は一定時間幅で離散化されたモデルで行われているため、その誤差が非常に僅かではあるが発生している。このため真の反応度との差の値が理論的な値とずれる。特に、中性子束の値が大きい初期においてはそれが強調され、図に示すような結果となるためである。この考察が正しいことを示すのが、SG 2である。算出には、離散化されたモデルで算出された遅発中性子先行核値を用い、反応度を算出しているため、この離散化の誤差がキャンセルされている。

Fig. 3には、初期反応度を-10 pcmとした結果を示す。この場合では、初期中性子束の値がFig. 2と比べて2桁小さい。よって、真の反応度を使用した計算値でも初期から一定値になっていることから、上記考察が妥当であることがわかる。

このような過渡現象を短くするためには、中性子束をなるべく早く低下させることが必要であることから、出来るだけ大きな負の反応度を添加すること、ならびに反応度計算の時間幅を出来るだけ小さくする必要があるといえる。

このような配慮は必要であるが、この結果から、目的とする S, γ の値を評価するために必要な時間はこの過渡変化時間のみに短縮できることがわかる。この時間は高々秒のオーダーであり、従来法と比べると大幅に短縮できるとともに、他の不要な外乱の影響も排除できるといえる。

IV. 考 察

上記の議論には中性子束信号のノイズは含まれていない。しかし、もともと中性子源からの中性子放出は統計的

Fig. 2 $(\rho_m - \rho)N/\lambda$ transient with initial reactivity of $-0.000001\Delta k/k$

Fig. 3 $(\rho_m - \rho)N/\lambda$ transient with initial reactivity of $-0.0001\Delta k/k$

な現象であり、揺らぎによるノイズが含まれている。ノイズレベルについてのデータはあまりないが、平均値に対して $\pm 5\%$ のランダムノイズを仮定した場合について検討した。 γ 線強度についても同様とした。ただし、これらのノイズはランダムノイズであるため、反応度計算用の信号は生のデータを10個平均したものを使用した。

Fig. 4 にシミュレーション結果を示す。収束判定基準は1秒間のSG値の算術平均を前後で比較し、その差が0.01%となると収束した値が得られたと判定した。

評価結果は以下の通りである。

$$S=97.55$$

$$\gamma=2.11$$

$$\text{所要時間}=30\text{s}$$

また、初期反応度を -10 pcm とすると、判定基準は0.005%としたものであるが、

$$S=100.4$$

$$\gamma=1.997$$

$$\text{所要時間}=5\text{s}$$

とよい結果が得られた。

この結果からわかるように、ノイズが存在してもノイズ

Fig. 4 Simulation result with neutron source and gamma noises

がない場合と同様に、妥当な時間内に、妥当な精度で S , γ の評価ができることがわかる。

なお、制御棒の挿入により、半径方向の出力分布変化により、中性子束信号に影響を与えるが、この効果は制御棒の移動量が限定されていることから、その影響も限られるといえる。しかし、この効果については、出力分布を事前に解析により求めておく必要があると考えられる。

V. まとめ

中性子源と γ 線強度についての配慮をして反応度を測定しなければならないような場合に対して、これらを効率的に評価する方法について検討した。その結果、限られた範囲での既知の反応度の情報を有効利用し、短時間でこれら

のパラメータを評価できることがわかった。この方法は信号源にノイズがある場合にも適用でき、妥当な結果を得ることができる。

—参考文献—

- (1) Hoogenboom, J. E., van der Sluis, A. R.: Neutron source strength determination for on-line reactivity measurements, *Ann. Nucl. Energy*, 15 [12], 553~559(1988).
- (2) 田村誠司, 木村敏雄: 逆動特性による未臨界度推定, 原子力学会「1992秋の大会」予稿集, D39.
- (3) Shimazu, Y., et al.: Development of a compact digital reactivity meter and a reactor physics data processor, *Nucl. Technol.*, 77, 247~254(1986).
- (4) 島津洋一郎, 中野雄三: デジタル反応度計と炉物理データ処理装置の使用経験, 原子力誌, 32 (3), 285~291(1990).

◇第2回「Computer Visualization Contest」◇ データ可視化の技術と活用事例をもとめて

主 催 日経サイエンス社

募集作品対象: 以下の項目に挙げる作品

- (1) 実験計測結果の可視化: 宇宙・地球物理・気象などの計測結果, 風洞実験など実験結果の可視化, 他。
- (2) 解析結果の可視化: 有限要素法解析, 流体解析, 電磁場解析, 音場解析など科学技術計算結果, 化学分野における分子形状, 他。
- (3) 画像処理/ボリュームレンダリング: 医療画像, リモートセンシ

グ, 画像認識などの画像処理やボリュームレンダリング, 他。

- (4) データ解析, プレゼンテーションほか: 景観設計, モニタリングシステム, FA シミュレーション, CAD データ表示・加工, 地図情報システム(地図データと人口動態, 各種統計データとの統合), 調査・集計結果(各種統計解析, 金融データ), 他。

- (5) その他, 経済分析など可視化に関する作品

応募申込締切 7月10日(水), 作品提出締切 8月12日(月)

問合せ・申込先 (〒101)千代田区内神田1-3-1 高砂ビル

(株)日本コンピュータ・グラフィックス協会

Computer Visualization Contest事務局

(TEL 03-3233-3475; FAX 03-3233-3450)