

加速器駆動システムにおけるパルス中性子源を用いた実効遅発中性子割合の測定

京都大学複合原子力科学研究所

山中 正朗

この度は第十二回日本原子力学会炉物理部会賞を賜り大変光栄に存じ上げます。この研究を進めるにあたりご指導そしてご助言くださりました 三澤先生、卞先生、北村先生、志賀氏、金氏、また、KUCAでの実験においてサポートして下さった技術職員の皆様に感謝申し上げます。受賞に伴い炉物理部会会報に寄稿させていただける榮譽にあずかり恐縮しております。

1. はじめに

本研究では、加速器駆動システムの炉心試験において実験と計算で得られる異なる未臨界度を比較するために必要な実効遅発中性子割合の測定に向けて、中性子源が外部にある場合と中性子源がパルス状に照射される場合について測定手法を開発した。本研究の目的は Rossi- α 法による炉雑音解析を利用した β_{eff} の測定手法のひとつである Nelson 数法において中性子源を炉心外部に設置した場合の適用性およびパルス中性子源に対して Nelson 数法による測定手法を新たに開発することである。本稿では研究の基になった Nelson 数法と本研究の概要について紹介したい。

2. Nelson 数法

Nelson 数法はロスアラモス国立研究所の Spriggs 氏が考案した β_{eff} の測定手法である。本測定手法では、外部中性子源を考慮するために必要な 2 つの補正係数(計算)、ドル単位の未臨界度(実験)および Rossi- α 法による相関強度(実験)を組み合わせることによって直接 β_{eff} が得られる。従来手法との比較では核分裂率、中性子寿命および検出効率などの推定が困難なパラメータを必要としないといった利点を有する。実機 ADS の設計では不確定要素が多く、どの程度の放射線(γ 線、中性子)レベルで測定するのか、検出器はどうするのか、また、事前に必要なパラメータを考えられる実機環境を想定して適切に用意できるかといった実機 ADS での実用性において頭を悩ませるこれらの問題に対し、Nelson 数法によって β_{eff} 測定上の負担を軽減でき、実用面において高い可能性を示すのではないかと考えた。

定常中性子源を用いた Rossi- α 法では、時刻 t_1 および t_2 で検出した二つの中性子信号間の複合確率 $P(t_1, t_2)$ が以下のように表される。

$$P(dt_1, dt_2) dt_1 dt_2 = C dt_1 dt_2 + A e^{-\alpha(t_2 - t_1)} dt_1 dt_2 \quad , \quad (1)$$

α : 即発中性子減衰定数、 C : 検出器の平均計数率、 A : 相関強度。

また、 A および C はそれぞれ以下のように示される。

$$A = g \left(\frac{\lambda_d \lambda_f \langle \nu_p (\nu_p - 1) \rangle}{2\alpha} \right), \quad (2)$$

λ_d : 中性子検出効率、 λ_f : 核分裂の検出効率、
 g : 外部中性子源の相関強度に与える効果を考慮した補正係数、

$$C = \frac{\lambda_d g^* S}{1 - k_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

S : 中性子源強度、
 g^* : 中性子源由来の中性子が源分布に与える影響を考慮した補正係数。

β_{eff} を推定するために式(1)を用いたフィッティングによってパラメータ A および C を求め、 α について中性子寿命 l を用いて以下のように変形する。

$$\alpha = \frac{\beta_{\text{eff}}}{l} \frac{1 - \rho_s}{1 - \rho_s \beta_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

ρ : $\Delta k/k$ 単位の未臨界度、 ρ_s : ドル単位の未臨界度。

さらに、 λ_f は実効増倍率 k_{eff} と β_{eff} を用いることで以下のように表される。

$$\lambda_f = \frac{(1 - \beta_{\text{eff}}) k_{\text{eff}}}{l \langle \nu_p \rangle}, \quad (5)$$

$\langle \nu_p \rangle$: 核分裂あたりに放出される即発中性子の平均数。

β_{eff} および ρ_s のパラメータに加えてパラメータ N を新たに定義し、式(2)、(3)、(4)および(5)を組み合わせると、 N は以下のように表される。

$$N = \left(\frac{2g^*S}{g \langle \nu_p \rangle \Gamma} \right) \left(\frac{A}{\alpha C} \right) = \left(\frac{1 - \beta_{\text{eff}}}{\beta_{\text{eff}}} \right) \left[\frac{\rho_s}{(1 - \rho_s)^2} \right], \quad (6)$$

Γ : Diven 因子 ($\langle \nu_p (\nu_p - 1) \rangle / \langle \nu_p \rangle^2$)。

式(6)を β_{eff} に対して解くことで、 N と ρ_s により β_{eff} が以下のように得られる。

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\rho_s}{N(1 - \rho_s)^2 - \rho_s}. \quad (7)$$

ここで、パラメータ N を Spriggs 氏は Nelson 数と名付けたのである。本パラメータの命名のエピソードが論文の本文および欄外に記されており、“*I have chosen to call this quantity the Nelson number N .*”そして “*In memory of Professor George W. Nelson, director of the University of Arizona Research Reactor –my teacher, my dissertation advisor, my co-worker, and my friend.*”とある。この画期的な手法もさることながら研究の舞台が次世代に継承されている瞬間を垣間みたような気がして心が揺さぶられたので紹介した。私もこのような鋭い発見をした際にはこのような命名をしたいと思っているが、残念ながら未だその能力が私に備わっていないことが非常に悲しいと感じる次第である。

さて、パルス状の中性子源に対する Rossi- α 法においても、複合確率 $P(t_1, t_2)$ を同じ核分裂家系の核分裂連鎖反応に対する相関確率 P_C および異なる核分裂家系または中性子源由来の中性子による比相関確率 P_U に分類することで定常中性子源のように以下のように評価することができる。^[2]

$$P(t_1, t_2) dt_1 dt_2 = P_C(t_1, t_2) dt_1 dt_2 + P_U(t_1, t_2) dt_1 dt_2 . \quad (8)$$

パルス状の中性子源が存在する下での P_C は式(2)による定常中性子源が用いられた時のものと同様に以下のように表される。

$$P_C(t_1, t_2) = g \left(\frac{\lambda_d \lambda_f \langle \nu_p (\nu_p - 1) \rangle}{2\alpha} \right) e^{-\alpha(t_2 - t_1)} dt_1 dt_2 . \quad (9)$$

非相関確率 P_U に対しては、その表式は外部中性子源のパルス形状に大きく依存しており、本研究では、その形状はガウス分布であるとみなし、非相関確率をさらに定数項の $P_{U, \text{const}}$ と三角関数が含まれた項の $P_{U, \text{const}}$ に分けることで以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & P_U(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \\ &= P_{U, \text{const}}(t_1, t_2) dt_1 dt_2 + P_{U, \text{trig}}(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \\ &= \frac{\lambda_d g^* S \Lambda \sqrt{2\pi} \sigma}{(-\rho) T_0} dt_1 dt_2 \\ & \quad + \frac{\lambda_d g^* S (-\rho) T_0}{2 \Lambda \sqrt{2\pi} \sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha^2 + (2n\pi/T_0)^2} e^{-(2n\pi/T_0)^2 \sigma^2} \cos\{(2n\pi/T_0)(t_2 - t_1)\} dt_1 dt_2 , \end{aligned} \quad (10)$$

T_0 : パルス周期、 σ : パルス幅.

ガウス分布状のパルス中性子源を用いた実験における Rossi- α 法の結果を用いれば、 P_C および P_U の強度は式(8)を用いたフィッティングから得ることができる。しかし、 P_C は急激に減衰し、 P_U の分布と重なって、一度のフィッティングで相関強度および非相関強度を得ることは非常に困難であることがわかる。そこで、式(10)において P_C が十分に減衰した領域で非相関項のフィッティングを行い、その後に関連確率を抽出した。

ここで、パルス状の中性子に対するネルソン数 N_{PNS} は以下のように得られる。^[3]

$$N_{PNS} = \left(\frac{2\sqrt{2\pi} \sigma g^* S \langle v_p \rangle}{g \langle v_p (v_p - 1) \rangle T_0} \right) \left(\frac{A}{\alpha B} \right) = \frac{(1 - \beta_{eff})(-\rho_s)}{\beta_{eff} (1 - \rho_s)^2}, \quad (11)$$

N_{PNS} および式(11)における β_{eff} の関係より、 β_{eff} は実験的に以下のように得ることができる。

$$\beta_{eff} = \frac{-\rho_s}{N_{PNS} (1 - \rho_s)^2 - \rho_s}. \quad (12)$$

3. 研究概要

京都大学臨界集合体実験装置でおよそ $k_{eff} = 0.97$ (定常中性子源) および $k_{eff} = 0.93$ (核破砕パルス中性子源) までの未臨界体系を構築して、定常中性子源を用いた Nelson 数の適用範囲およびパルス中性子源に拡張した β_{eff} の推定手法を検証した。

定常中性子源を用いた実験では、Am-Be 中性子源を炉心外部に導入し、炉心外部に設置した BF₃ 検出器を用いて中性子信号を取得して Nelson 数法によって β_{eff} を推定した。本実験では制御棒の挿入によって未臨界度を段階的に変化させた。実験で得られた β_{eff} は MCNP6.1 と核データに JENDL-4.0 を用いて得られた β_{eff} と比較した。^[4] 実験と計算の比較では未臨界度によらず約 5% の差異が見られた。ここで、仮想的な数値実験により、中性子源が炉中心にある場合と外部にある場合で補正係数 g^* が大きく変化したため、外部に中性子源を設置したときは g^* の計算精度が重要になることが教訓として得られた。ただし、この g^* の計算では遅発中性子に関する核データを使用しないことを強調したい。この実験により Nelson 数法が $k_{eff} = 0.97$ までの未臨界度および中性子源が炉心外部に導入された場合においても適用できることが明らかになった。また、パルス中性子源を用いた β_{eff} の測定に向けて測定精度の指標を得た。

パルス状の中性子源を用いた実験では、炉中心に設置された光ファイバー検出器と炉心外部に設置された BF₃ 検出器で得られた中性子信号に対して開発手法を適用し β_{eff} を推定した。定常中性子源を用いた場合と同様に、測定した β_{eff} は MCNP6.1 と JENDL-4.0 で求めた β_{eff} と比較した。光ファイバー検出器による β_{eff} の測定値は ADS の運転モードの未臨界度である実効増倍率がおおよそ 0.93 までの範囲で計算とおおよそ 10% の差異で一致した。一方で、炉心外部に設置された BF₃ 検出器による結果は、炉雑音解析における非相関確率の抽出精度が低かったために計算値と比較できなかった。光ファイバー検出器での測定精度からパルス中性子実験において開発手法の適用性を実証することができた。 β_{eff} の測定値のさらなる精度向上のためには、外部中性子源のパルス形状に合わせた Rossi- α 法の表式を用いること、Rossi- α 法

において測定される相関強度が大きい位置に検出器を設置して測定することを炉物理実験における教訓として再確認させられた。

4. おわりに

福島第一原子力発電所事故が起きてから10年近く経とうとしている。筆者が専門を機械工学から原子力に移したのは事故の次の年であるから、原子力を学んで7年目になる。原子力という分野は非常に広範囲の知識が必要な総合工学分野であり、総合工学であるという実感は年々増すばかりである。工学の存在意義は危険な事象を取り除くまたは安全に取り扱う術を社会に提供して暮らしを豊かにするものであると考えている。(例えば、自動車はガソリンを爆発させながら我々の近くを通過するのである。しかし、目の前で自動車が爆発炎上するのではないかと意識される方は少ないと思う。それは自動車に対して工学の熟成が進んだためであると考ええる。) 資源のない日本にとって、原子力発電は日本の高度経済成長における電力需要を陰で支えた発電方式であり、エネルギーセキュリティの観点から直ちに原子力発電を停止するという国策はとられていない。ならば原子力システムを、本質を見抜く努力によってより理解し、工学の熟成および安全性の高いシステムの構築に貢献したいと思うのである。最後に、先の事故によって住む場所を他に移さざるをえなかった方々、今なお苦しんで居られる方々の思いを深く胸に刻んで、原子力工学の理解に努めさらなる熟成に向けて邁進したい所存である。

参考文献

- [1] G. D. Spriggs, “Two Rossi- α Techniques for Measuring the Effective Delayed Neutron Fraction,” *Nucl. Sci. Eng.*, **113**, 161 (1993).
- [2] Y. Kitamura, I. Pázsit, J. Wright, A. Yamamoto and Y. Yamane, “Calculation of the Pulsed Feynman- and Rossi-Alpha Formulae with Delayed Neutrons,” *Ann. Nucl. Energy*, **32**, 671 (2005).
- [3] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, S. H. Kim, Y. Kitamura, H. Shiga and T. Misawa, “Effective Delayed Neutron Fraction in Accelerator-Driven System Experiments with 100 MeV Protons at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 293 (2017).
- [4] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, Y. Kitamura and T. Misawa, “Measurements of Effective Delayed Neutron Fraction with External Neutron Source at Kyoto University Critical Assembly,” *Proc. Reactor Physics Asia Conf. (RPHA15)*, Jeju, Korea, Sep. 16-18, (2015). Korean Nuclear Society.