

<炉物理部会賞奨励賞 記念寄稿>

## 核破碎中性子源の非ポアソン性を考慮した加速器駆動未臨界体系に対する原子炉雑音解析

(研究実施時) 近畿大学大学院 総合理工学研究科  
(現) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
大洗研究所 高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課

中嶋 國弘

### はじめに

この度は「核破碎中性子源の非ポアソン性を考慮した加速器駆動未臨界体系に対する原子炉雑音解析」に関しまして炉物理部会賞奨励賞をいただき、大変光栄です。

本研究は近畿大学在学中に実施したものであり、研究の遂行にあたっては橋本憲吾教授、佐野忠史准教授、左近敦士講師に大変熱いご指導をいただきました。深く感謝を申し上げます。

また、本研究の成果は京都大学複合原子力科学研究所との共同研究による成果でございます。下哲浩准教授をはじめとする京都大学複合原子力科学研究所の職員の皆様に深く感謝を申し上げます。

### 研究の概要

ADS の炉雑音解析に関する研究は 1990 年代末から始まり、最初はポアソン性の定常中性子源を前提としていた従来の炉雑音解析の理論式の改良から着手されました。まず、加速器の直流モードにおける核破碎中性子源の非ポアソン性を考慮して改良された理論式を導出し、炉雑音解析で得られる相関振幅が核破碎中性子源によって増加することを理論的に示されました。<sup>1-4)</sup>その後、Degweker ら<sup>5-8)</sup>によって加速器のパルスモードにおける核破碎中性子源駆動下の理論式が導出されました。これらの理論式にはパルス状の核破碎中性子源による非ポアソン性と遅発中性子による寄与も考慮された厳密なものでした。しかし、これらの理論式に基づく非線形最小自乗フィッティングは理論式の複雑さと未知変数の多さから困難となっていました。さらに、先行研究のパルス中性子実験<sup>9-14)</sup>ではパルス中性子入射による空間高次モードの影響が観察され、この影響についても検討する必要性がありました。

本研究では ADS の核破碎パルス中性子源に対する核破碎反応による非ポアソン性とパルス中性子源による高次モードの影響を考慮した新たな炉雑音解析手法を開発し、その適用性を実験的に確認することを目的としました。本研究で用いる炉雑音解析手法として

Feynman- $\alpha$ 法、Rossi- $\alpha$ 法<sup>15)</sup>、パワースペクトル法<sup>16)</sup>について検討しました。

まず、炉雑音解析の解析時間スケールを考慮した近似を与えることで厳密な理論式を簡単化し、炉雑音解析に適用可能な解析式を導出しました。

実験は KUCA の A 架台の未臨界炉心と FFAG 加速器を組み合わせた加速器駆動未臨界炉体系で実施し、核破砕パルス中性子源駆動下の未臨界炉体系で取得した中性子計数の時系列データに対して、炉雑音解析を実施し、新たに導出した解析式を適用しました。

Feynman- $\alpha$ 法で得られた即発中性子減衰定数は燃料固有中性子源駆動下の同様の未臨界炉体系で解析された参照値<sup>17)</sup>とよく一致しました。しかし、Rossi- $\alpha$ 法で得られた即発中性子減衰定数は参照値を大きく過小評価しました。この原因はパルス中性子の入力で励起される空間高次モードによってパルスピーク形状に歪みが現れたからだと考えています。そこで、最小自乗フィッティングの際に高次モードの影響を受けているピーク付近の計数確率データに対してマスキングを行う手法を提案しました。結果、フィッティング曲線は計数確率分布と一致し、即発中性子減衰定数の過小評価は解消されました。

パワースペクトル解析においても非相関ピークに高次モードの影響が現れ、得られた即発中性子減衰定数は参照値に対して過小評価となりました。そこで、パワースペクトルの解析式に高次モードを考慮した補正項を追加することで即発中性子減衰定数の過小評価を解消することができました。

## おわりに

原子炉雑音に関する研究は筆者にとって UTR-KINKI と KUCA の再稼働が実現したことで実施できるようになった研究テーマであり、再稼働に力を尽くされた皆様に感謝を申し上げます。原子炉実験は炉物理を学ぶ上で必要不可欠であるだけでなく、他大学の学生や共同研究者との交流の場でもあり、人生の中でかけがえのない経験と思い出となりました。研究から約2年経過しており、研究生生活を思い返すと、すでに懐かしさを感じてしまいます。

現在は原子力研究開発機構の HTTR で勤務しております。HTTR では 2024 年 3 月に安全性実証試験を完遂し、大きな節目を迎えました。次のミッションの HTTR 熱利用試験にむけて動き始めたところです。仕事をしていると、炉物理の知識よりも電気や機械、材料などの幅広い工学分野の知識を問われることが多くあり、原子力が総合工学分野であることを改めて感じています。もちろん研究生生活で得られた炉物理を含む知識・経験は非常に役に立っています。これからも技術者として成長し、原子力の技術発展に貢献できるよう、頑張っていきます。

最近では原子力学会にあまり顔をだすことができておりませんが、今後ともよろしくご願ひ申し上げます。

## 参考文献

- 1) Pa'zsit I, Yamane Y. Theory of neutron fluctuations in source-driven subcritical systems. Nucl Instrum Methods Phys Res A. 1998;403:431–441.
- 2) Pa'zsit I, Yamane Y. The variance-to-mean ratio in subcritical systems driven by a spallation source. Ann Nucl Energy. 1998;25:667–676.
- 3) Behringer K, Wydler P. On the problem of monitoring the neutron parameters of the fast energy amplifier. Ann Nucl Energy. 1999;26:1131–1157.
- 4) Kuang ZF, Pa'zsit I. A quantitative analysis of the Feynman- and Rossi-alpha formulas with multiple emission sources. Nucl Sci Eng. 2000;136:305–319.
- 5) Degweker SB. Reactor noise in accelerator driven systems. Ann Nucl Energy. 2003;30:223–243.
- 6) Degweker SB, Rana YS. Reactor noise in accelerator driven systems - II. Ann Nucl Energy. 2007;34:463–482.
- 7) Rana YS, Degweker SB. Feynman-alpha and Rossi-alpha formulas with delayed neutrons for subcritical reactors driven by pulsed non-Poisson sources. Nucl Sci Eng. 2009;162:117–133.
- 8) Rana YS, Degweker SB. Feynman-alpha and Rossi-alpha formulas with delayed neutrons for subcritical reactors driven by pulsed non-Poisson sources with correlation between different pulses. Nucl Sci Eng. 2011;169:98–109.
- 9) Tonoike K, Miyoshi Y, Kikuchi T, et al. Kinetic parameter  $\beta_{\text{eff}}/\ell$  measurement on low enriched uranyl nitrate solution with single unit cores (600φ,280T,800φ) of STACY. J Nucl Sci Technol. 2002;39:1227–1236.
- 10) Taninaka H, Hashimoto K, Pyeon CH, et al. Determination of lambda-mode eigenvalue separation of a thermal accelerator-driven system from pulsed neutron experiment. J Nucl Sci Technol. 2010;47:376–383.
- 11) Sakon A, Hashimoto K, Maarof MA, et al. Measurement of large negative reactivity of an accelerator-driven system in the Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2014;51:116–126.
- 12) Sakon A, Sano T, Hohara S, et al. An impact of inherent neutron source on subcriticality measurement in a highly enriched uranium core of Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2019;56:935–944.
- 13) Sakon A, Hashimoto K, Sugiyama W, et al. Power spectral analysis for a thermal subcritical reactor system driven by a pulsed 14 MeV neutron source. J Nucl Sci Technol. 2013;50(5):481–492.
- 14) Sakon A, Hashimoto K, Maarof MA, et al. Measurement of large negative reactivity of an accelerator-driven system in the Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2014;51(1):116–126.
- 15) Nakajima K, Sano T, et al. Feynman- $\alpha$  and Rossi- $\alpha$  analyses for a subcritical reactor system

driven by a pulsed spallation neutron source in Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2020;58(1):117–135.

- 16) Nakajima K, Sakon A, et al. Power spectral analysis for a subcritical reactor system driven by a pulsed spallation neutron source in Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2020;58(3):374–382.
- 17) Nakajima K, Sano T, et al. Source multiplication measurements and neutron correlation analyses for a highly enriched uranium subcritical core driven by an inherent source in Kyoto University Critical Assembly. J Nucl Sci Technol. 2020;57(10):1152–1166.