

<第 53 回 原子力学会賞受賞 記念寄稿>

加速器駆動システムの中性子特性に関する基礎研究

京都大学 複合原子力科学研究所 卞 哲浩

1. はじめに

「温故知新」、広辞苑を開くと「昔の物事を研究し吟味して、そこから新しい知識や見解を得ること。」と書いている。加速器駆動システム (Accelerator-Driven System: ADS) とは加速器と原子炉を組み合わせた新しい原子力システムということが言い尽くされている。「何がどのように新しいのだろうか?」、ADS 研究を始めてこれまで 15 年以上の間、この問いと向き合っていたように思う。

筆者が京都大学臨界集合体実験装置 (Kyoto University Critical Assembly: KUCA) で ADS 研究を開始した頃、臨界性、反応度、反応率分布、中性子スペクトルおよび未臨界度などの炉物理パラメータは既に確立された技術を用いて測定していた。結局のところ、「故きを温ねて新しきを知る」ことに通ずるのでは、つまり、従来の測定技術を用いた実験ではあるが、ADS の実験研究を炉物理の分野においてどのように位置づけるべきか、また、KUCA での実験を通して「物理としての ADS」で何を研究すべきかを追求し、そこに新たな物理 (いささか大げさではあるが、「未臨界の炉物理」という大きな目標) の展開を見出そうと決意したことを思い出す。

本稿が「物理としての ADS」という命題にどこまで答えたかは別の機会に譲るとし、以下に、ADS 研究の黎明期における国内外の動向、KUCA を用いた京都大学における ADS 基礎研究、そして、ADS 研究の現状と今後の展望について述べたいと思う。

2. 国内外での ADS 研究

1990 年代中頃までは「消滅処理」という表現が高レベル放射性廃棄物処理の代名詞として使われ、その後は、「オメガ計画」に謳われたように、軽水炉での MOX 燃料の利用、高速炉での Pu の利用と併せて、核破砕中性子によるマイナーアクチノイドの核 (種) 変換処理へと進み、「分離・変換」という表現に変化したことを記憶している。特に、核破砕中性子による核変換処理技術は、ノーベル物理学賞を受賞された Rubbia 博士 [1] が提案した加速器を用いた新たな中性子源の新たな応用として注目を集めていた。ADS の黎明期、国内では JAEA による J-PARC での核変換実験施設 (Transmutation Experimental Facility: TEF [2]) の建設計画が発表され、ヨーロッパでは欧州委員会において MYRRHA (Multi-purpose hybrid Research Reactor for High-tech Application [3]) の開発が提唱され、1990 年代後半から既存の臨界実験装置と DT 加速器 (14 MeV 中性子発生装置) を組み合わせた炉物理実験が、ヨーロッパにおいて本格的に開始された。

フランスの MASURCA 実験装置と DT 加速器を用いた MUSE 実験 [4]-[6] では、未臨界体系における未臨界度や中性子スペクトルの測定に関する様々な炉物理実験が行われた。その後、ベラルーシにあった YALINA Booster [7]-[9] という装置を用いて、DT 加速器に加えて DD 加速器 (2.6 MeV 中性子発生装置) を用いたパルス中性子法による未臨界度測定実験が行われ、MUSE 実験での検討課題であった未臨界度測定の位置依存性という古典的な研究課題や、未臨界体系における放射化法による中性子スペクトルの測定方法などについての議論が盛んに行われた。この頃から、未臨界度のオンライン測定 (実時間測定) を応用した未臨界度監視モニターの開発がヨーロッパ全体で大きな研究テーマとして取り上げられ、実験を通じた基礎研究が 2010 年代半ばまで精力的に行われた。

ADS の一部を構成する原子炉は、次世代の原子力システム (Generation-IV) における鉛冷却高速炉をベースとする鉛ビスマス冷却高速炉であり、MUSE および YALINA での実験計画が終了した後、MUSE 実験で使用した燃料とフランス国内の DT 加速器をベルギーに移設し、GUINEVERE 計画として鉛冷却臨界集合体と DT 加速器による炉物理実験が、VENUS-F 施設 [10]-[13] で 2019 年まで行われた。一方、国内に目を転じると、JAEA による TEF 施設の概念設計や安全設計が 2018 年に終了し、実験施設の本格的な建設を待つばかりであった。

3. 京都大学における ADS 基礎研究

① DT 加速器を用いた予備実験

ヨーロッパに遅れること約 10 年、2003 年から KUCA に併設されている DT 加速器と固体減速架台 (A 架台) を組み合わせた ADS の実験研究が本格的に開始されたが、実験の計画段階ではどこから手を付けるべきか大変悩んだ記憶がある。当初は手探りの状態であったが、外部中性子源を用いた新たな中性子源の開発を目標に、パルス中性子法や中性子源増倍法による未臨界度測定、未臨界体系での中性子スペクトルの測定を中心に、実験データ [14]-[20] を積み上げることで ADS の成立性を含めた検討が行われた。2008 年には実験手法や数値計算による解析手法の目途が立ち、ようやくスタートラインに立ったことを実感した。DT 加速器を用いた ADS 実験が軌道に乗り始めた頃から、新たな 100 MeV の陽子加速器 (Fixed-Field Alternating Gradient: FFAG accelerator [21]-[23]; 100 MeV 陽子加速器) の建設と導入が本格化し、KUCA における ADS 研究の新たなミッションであった ADS による核変換技術の実験的な実証という大きな目標が、次第に見えるようになった。

② FFAG 加速器を用いた基礎実験

2009 年 3 月には、世界で初めてとなる ADS (A 架台と FFAG 加速器の組み合わせ) による炉心内の中性子増倍が KUCA [24] で実証され、ヨーロッパにおける ADS 研究の一時的な停滞もあり国内外の ADS コミュニティから大きな期待と高い評価を頂いた。そのときは、連日の徹夜作業にもかかわらず歴史的な第一歩を踏み出したという感動と、多額の国費が

投入されたこともあり、今後の責任の重さを痛感した瞬間でもあった。

KUCA における ADS 基礎研究を進める主な目的は、前述の通り、ADS による MA の核変換技術の応用の実証ではあるが、炉物理研究という観点からは施設の特徴を生かした特色ある研究も同時に推進する必要性を認識していた。KUCA の A 架台では高濃縮ウランとポリエチレン減速材を用いていることから、炉心の中性子スペクトルは熱中性子が支配的であり、TEF や MYRRHA で検討されている鉛ビスマス高速炉の中性子スペクトルは実現できないことは当初から懸念されていた。ただし、炉心全体ではなくても局所的に高速中性子スペクトルを模したテスト領域を炉物理実験において導入し、天然ウランやトリウム燃料 [25]-[26]、ポリエチレンの他に鉄、鉛、鉛ビスマスなどのサンプルを加えて、幅広いスペクトルを炉心で実現することを念頭に置いた。また、FFAG 加速器の導入によって DT 加速器を含めた外部中性子源の多様化が実現し、単色の 14 MeV 中性子と広範なスペクトルを持つ高エネルギー中性子 [27] という二つの外部中性子源の違いによる実験研究が可能になった。そして、臨界近傍から深い未臨界までを実験で実現し、中性子計測の高効率化やデータ処理の高速化、さらに、従来の未臨界度測定技術 [28] が加速器中性子源を用いた未臨界体系でどこまで適用できるかを、実験的に検討することができるようになった。KUCA での特色ある ADS 実験研究の主な特徴をまとめると以下のようになる。

- 炉心内での幅広い中性子スペクトルの実現
- 異なる中性子スペクトルを持つ 2 つの外部中性子源の活用
- 未臨界体系における中性子計測技術の高度化

KUCA のもう一つの実験上の制約として、構造上および規制上の理由から加速器のターゲットを炉心中心に設置することができず、そのため、常に炉心の外から外部中性子源を入射せざるを得なかった。中性子ガイド [29] の導入や二層ターゲット [30]、重金属ターゲットの特性実験 [31] などを通して、できるだけ多くの高エネルギー中性子を炉心中心に輸送することを試み、その過程で遮蔽工学、高エネルギーに対する中性子計測技術や中性子工学の知識を身に付け、それらを実験に応用するための試行錯誤が繰り返された。

③ 核破碎中性子源を用いた動特性パラメータ測定

DT 加速器を用いた予備実験において得られたいくつかの知見を基に、核破碎中性子源を用いたときの未臨界度をはじめ実効遅発中性子割合、即発中性子減衰定数や中性子生成時間などの動特性パラメータについて、新たなチャレンジングな試みとして、これまで注目されなかった研究課題を実験によって解決することに目を向けた。特に、KUCA での共同利用実験では、ADS において新たに導入した高効率の光ファイバー検出器の性能評価、パルス中性子法およびノイズ法による測定精度の比較、データ同化手法を適用した測定手法の高度化などが検討された。さらに、外部中性子源のスペクトル変化に伴う動特性パラメータ

の変化、実時間測定（オンライン測定）による測定時間の高速化などは、計装系の高度化やデジタル化の恩恵もあって、核破砕中性子源を用いた ADS 実験において実現可能な見通しを得ることになった。研究課題への新たな取り組みの展開は、冒頭にもあった「温故知新」がそのまま当てはまる出来事の連続であったように思う。

これらの研究課題の解決に向けた積極的な試みは、それらの研究成果が KUCA の共同利用実験 [32]-[38]および日本原子力学会・英文論文誌の Special issue [39]-[47]などで大きなうねりとなり、KUCA における ADS 研究は大きなピークを迎えることになった。その他にも、未臨界状態における中性子スペクトルの測定 [48]-[50]、実験炉級 ADS 炉心での Pb-Bi のボイド反応度を模擬した Pb-Bi のサンプル反応度解析 [51]-[54]、そして、外部中性子源の入射による Np-237 および Am-241 の核分裂反応および捕獲反応の測定を通して、ADS による MA 核種の核変換技術が実験的に実証された [55]-[57]。これらの実験は KUCA における核破砕中性子源を用いた ADS 基礎研究の集大成として結実した。DT 加速器および核破砕中性子源を用いた ADS 実験のほとんどの結果は、Open Access [58]としてアーカイブされることになり、これまでの ADS 基礎研究の参照と併せて、加速器中性子源による動特性パラメータの数値解析などの検証データとして利用されることを今後は期待している。

④ ADS 基礎実験を通じた教育的効果

KUCA で ADS 基礎実験を開始した頃に、国内の共同研究者から以下のような命題を頂いたことを忘れることができない。ADS 基礎研究の成否は博士課程の学生をどれだけ輩出するかに掛かっており、それは博士課程の学生の数だけ研究テーマを創出することと同じであると。幸いにして、国内では近畿大学 [58]-[66]で 3 名、京都大学 [67]-[72]で 2 名、そして、ハンガリー、ギリシャ、フランス、イタリア、韓国および中国の大学では KUCA での ADS 基礎研究が博士課程のテーマとして大きく取り上げられ、国内外を合計すると 10 名以上の博士を輩出することになった。決して多くはないものの予想以上の教育的効果を上げることができたと自負している。

4. おわりに

ADS 研究の国内における今後の展望をここに書くべきではあるが、財政的な理由から FFAG 加速器を維持することができず、また、DT 加速器を維持するには時間、労力、人材、そして、資金などのあらゆる資源が枯渇しており、残念ながら KUCA での ADS 基礎実験は 2019 年 3 月を以て幕を閉じた。そのため、炉物理実験を通じた ADS の基礎研究を進めることは難しくなったが、JAEA では ADS による核変換処理に向けた新たな取り組みを引き続き検討しているようであり、その展開に期待を寄せたいと思う。

将来的には KUCA の低濃縮化が順調に進み、新たな加速器の導入が検討されるようであれば、パルス中性子源を用いた動特性解析のための基礎実験や新たな中性子検出器の開発などが可能になり、ADS 基礎実験に限定しない炉物理や放射線計測分野の基礎研究に資す

ることが期待できる。そのため、KUCA の低濃縮化の早期実現が待たれるところである。

最後に、本稿で紹介した KUCA における ADS 基礎実験は、KUCA の維持および運営に携わる教員および技術職員の方々の労力と支援によって可能であった。また、KUCA の ADS 基礎研究で得られた研究成果は、共同利用実験に積極的に取り組んだ大学および研究機関の教員および研究員の方々の変わらぬ支援と研究への熱意に依るところが大きいことは論を俟たない。さらに、これらの研究成果は、これまで研究室に在籍していた多くの学生や博士研究員たちの絶え間ない努力と忍耐の賜物であり、ADS 基礎実験に向けた彼らの情熱なしでは KUCA での ADS 基礎研究を語ることはできないことをここに記したいと思う。

参考文献

- [1] C. Rubbia, “A High Gain Energy Amplifier Operated with Fast Neutrons,” *AIP Conf. Proc.*, **346**, 44 (1995).
- [2] K. Tsujimoto, T. Sasa, K. Nishihara, et al., “Neutronics Design for Lead-Bismuth Cooled Accelerator-Driven System for Transmutation of Minor Actinide,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, 21 (2004).
- [3] H. A. Abderrahim and P. D’hondt, “MYRRAHA, A European Experimental ADS for R&D Applications Status at Mid-2005 and Prospective towards Implementation,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 491 (2007).
- [4] R. Soule, W. Assal, P. Chaussonnet, et al., “Neutronic Studies in Support of Accelerator-Driven Systems: The MUSE Experiments in the MASURCA Facility,” *Nucl. Sci. Eng.*, **148**, 124 (2004).
- [5] M. Plaschy, C. Destouches, G. Rimpault, et al., “Investigation of ADS-Type Heterogeneities in the MUSE4 Critical Configuration,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 779 (2005).
- [6] J. F. Lebrat, G. Aliberti, A. D’Angelo, et al., “Global Results from Deterministic and Stochastic Analysis of the MUSE-4 Experiments on the Neutronics of the Accelerator-Driven Systems,” *Nucl. Sci. Eng.*, **158**, 49 (2008).
- [7] C. M. Persson, A. Fokau, I. Serafimovich, et al., “Pulsed Neutron Source Measurements in the Subcritical ADS Experiment YALINA-Booster,” *Ann. Nucl. Energy*, **35**, 2357 (2008).
- [8] M. Tesinsky, C. Berglöf, T. Bäck, et al., “Comparison of Calculated and Measured Reaction Rates Obtained through Foil Activation in the Subcritical Dual Spectrum Facility YALINA-Booster,” *Ann. Nucl. Energy*, **38**, 1412 (2011).
- [9] A. Talamo, Y. Gohar, S. Sadovich, et al., “Correction Factor for the Experimental Prompt Neutron Decay Constant,” *Ann. Nucl. Energy*, **62**, 421 (2013).
- [10] W. Uyttenhove, P. Baeten, G. Van den Eyden, et al., “The Neutronic Design of a Critical Lead Reflected Zero-Power Reference Core for On-Line Subcriticality Measurements in Accelerator-Driven Systems,” *Ann. Nucl. Energy*, **38**, 1519 (2011).

- [11] W. Uyttenhove, D. Lathouwers, J. L. Kloosterman, et al., “Methodology for Modal Analysis at Pulsed Neutron Source Experiments in Accelerator-Driven Systems,” *Ann. Nucl. Energy*, **72**, 286 (2014).
- [12] J. L. Lecouey, N. Marie, G. Ban, et al., “Estimate of the Reactivity of the VENUS-F Subcritical Configuration using A Monte Carlo MSM method,” *Ann. Nucl. Energy*, **83**, 65 (2015).
- [13] N. Marie, J. L. Lecouey, G. Lehaut, et al., “Reactivity Monitoring of the Accelerator Driven VENUS-F Subcritical Reactor with the “Current-to-Flux” Method,” *Ann. Nucl. Energy*, **128**, 12 (2019).
- [14] C. H. Pyeon, Y. Hirano, T. Misawa, et al., “Preliminary Experiments on Accelerator-Driven Subcritical Reactor with Pulsed Neutron Generator in Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 1368 (2007).
- [15] C. H. Pyeon, M. Hervault, T. Misawa, et al., “Static and Kinetic Experiments on Accelerator-Driven System in Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 1171 (2008).
- [16] C. H. Pyeon, H. Shiga, T. Misawa, et al., “Reaction Rate Analyses for an Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons in the Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, 965 (2009).
- [17] C. H. Pyeon, H. Shiga, K. Abe, et al., “Reaction Rate Analysis of Nuclear Spallation Reactions Generated by 150, 190 and 235 MeV Protons,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**, 1090 (2010).
- [18] S. Kawaguchi, T. Misawa, C. H. Pyeon, et al., “A New Experimental Correction Method for the First-Order Perturbation Approximation on the Steady Subcritical Reactor,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**, 550 (2010).
- [19] T. Yagi, T. Misawa, C. H. Pyeon, et al., “A Small High Sensitivity Neutron Detector using A Wavelength Shifting Fiber,” *Appl. Radiat. Isot.*, **69**, 176 (2011).
- [20] C. H. Pyeon, Y. Takemoto, T. Yagi, et al., “Accuracy of Reaction Rates in the Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons at the Kyoto University Critical Assembly,” *Ann. Nucl. Energy*, **40**, 229 (2012).
- [21] T. Planche, J. B. Lagrange, E. Yamakawa, et al., “Harmonic Number Jump Acceleration of Muon Beams in Zero-Chromatic FFAG Rings,” *Nucl. Instrum. Methods A*, **632**, 7 (2011).
- [22] J. B. Lagrange, T. Planche, E. Yamakawa, et al., “Straight Scaling FFAG Beam Line,” *Nucl. Instrum. Methods A*, **691**, 55 (2013).
- [23] E. Yamakawa, T. Uesugi, J. B. Lagrange, et al., “Serpentine Acceleration in Zero-Chromatic FFAG Accelerators,” *Nucl. Instrum. Methods A*, **716**, 46 (2013).
- [24] C. H. Pyeon, T. Misawa, J. Y. Lim, et al., “First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, 1091 (2009).
- [25] C. H. Pyeon, J. Y. Lim, Y. Takemoto, et al., “Preliminary Study on the Thorium-Loaded

- Accelerator-Driven System with 100 MeV Protons at the Kyoto University Critical Assembly,” *Ann. Nucl. Energy*, **38**, 2298 (2011).
- [26] C. H. Pyeon, T. Yagi, K. Sukawa, et al., “Mockup Experiments on the Thorium-Loaded Accelerator-Driven System in the Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **177**, 156 (2014).
- [27] C. H. Pyeon, T. Azuma, Y. Takemoto et al., “Experimental Analyses of External Neutron Source Generated by 100 MeV Protons at the Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Eng. Technol.*, **45**, 81 (2013).
- [28] T. Yagi, C. H. Pyeon, T. Misawa, “Application of Wavelength Shifting Fiber to Subcriticality Measurements,” *Appl. Radiat. Isot.*, **72**, 11 (2013).
- [29] J. Y. Lim, C. H. Pyeon, T. Yagi, et al., “Subcritical Multiplication Parameters of the Accelerator-Driven System with 100 MeV Protons at the Kyoto University Critical Assembly,” *Sci. Technol. Nucl. Install.*, **2012**, 395878 (2012).
- [30] Y. Takahashi, T. Azuma, T. Nishio, et al., “Conceptual Design of Multi-Targets for Accelerator-Driven System Experiments with 100 MeV Protons,” *Ann. Nucl. Energy*, **54**, 162 (2013).
- [31] C. H. Pyeon, H. Nakano, M. Yamanaka, et al., “Neutron Characteristics of Solid Targets in Accelerator-Driven System with 100 MeV Protons at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Technol.*, **192**, 181 (2015).
- [32] T. Endo, A. Yamamoto, T. Yagi, et al., “Statistical Error Estimation of the Feynman- α Method using the Bootstrap Method,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **53**, 1447 (2016).
- [33] H. Iwamoto, K. Nishihara, T. Yagi, et al., “On-Line Subcriticality Measurement using a Pulsed Spallation Neutron Source,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 432 (2017).
- [34] W. F. G. Van Rooijen, T. Endo, G. Chiba, et al., “Analysis of the KUCAA ADS Benchmarks with Diffusion Theory,” *Prog. Nucl. Energy*, **101**, 243 (2017).
- [35] T. Endo, G. Chiba, W. F. G. Van Rooijen, et al., “Experimental Analysis and Uncertainty Quantification using Random Sampling Technique for ADS Experiments at KUCAA,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 450 (2018).
- [36] T. Endo, A. Yamamoto, M. Yamanaka, et al., “Experimental Validation of Unique Combination Numbers for the Third- and Fourth-Order Neutron Correlation Factors in the Zero Power Reactor Noise,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, 322 (2019).
- [37] R. Katano, M. Yamanaka and C. H. Pyeon, “Application of Linear Combination Method to Pulsed-Neutron Source Measurement at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **193**, 1394 (2019).
- [38] F. Nishioka, T. Endo, A. Yamamoto, et al., “Applicability of Dynamic Mode Decomposition to Estimate Fundamental Mode Component of Prompt Neutron Decay Constant,” *Nucl. Sci. Eng.*, **196**, 133 (2022).

- [39] C. H. Pyeon, A. Talamo and M. Fukushima, “Special Issue on Accelerator-Driven System Benchmarks at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 133 (2020).
- [40] K. Watanabe, T. Endo, M. Yamanaka, et al., “Real-Time Subcriticality Monitoring System Based on a Highly Sensitive Optical Fiber Detector in an Accelerator-Driven System at the Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 136 (2020).
- [41] A. Talamo, Y. Gohar, M. Yamanaka, et al., “Calculation of the Prompt Neutron Decay Constant of the KUCA Facility Configurations Driven by a Californium of Spallation External Neutron Sources,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 145 (2020).
- [42] A. Talamo, Y. Gohar, M. Yamanaka, et al., “Paralyzable and Non-Paralyzable Dead-Time Corrections for the Neutron Detectors of the KUCA Facility Using External Neutron Sources,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 157 (2020).
- [43] R. Katano, M. Yamanaka and C. H. Pyeon, “Measurement of Prompt Neutron Decay Constant with Spallation Neutrons at Kyoto University Critical Assembly Using Linear Combination Method,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 169 (2020).
- [44] H. J. Shim, D. H. Kim, M. Yamanaka, et al., “Estimation of Kinetics Parameters by Monte Carlo Fixed-Source Calculations for Accelerator-Driven System,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 177 (2020).
- [45] G. Chiba and T. Endo, “Numerical Benchmark Problem of Solid-Moderated Enriched-Uranium-Loaded Core at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 187 (2020).
- [46] T. Endo, K. Watanabe, G. Chiba, et al., “Nuclear Data-Induced Uncertainty Quantification of Prompt Neutron Decay Constant Based on Perturbation Theory for ADS Experiments at KUCA,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 196 (2020).
- [47] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, T. Endo, et al., “Experimental Analyses of β_{eff}/Λ in Accelerator-Driven system at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **57**, 205 (2020).
- [48] C. H. Pyeon, T. M. Vu, M. Yamanaka, et al., “Reaction Rate Analyses of Accelerator-Driven System Experiments with 100 MeV Protons at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 190 (2018).
- [49] N. Aizawa, M. Yamanaka, T. Iwasaki, et al., “Effect of Neutron Spectrum on Subcritical Multiplication Factor in Accelerator-Driven System,” *Prog. Nucl. Energy*, **116**, 158 (2019).
- [50] C. H. Pyeon, M. Yamanaka and B. S. Lee, “Reaction Rate Analyses of High-Energy Neutrons by Injection of 100 MeV Protons onto Lead-Bismuth Target,” *Ann. Nucl. Energy*, **144**, 107498 (2020).
- [51] C. H. Pyeon, A. Fujimoto, T. Sugawara, et al., “Validation of Pb Nuclear Data by Monte Carlo Analyses of Sample Reactivity Experiments at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **53**, 602 (2016).
- [52] C. H. Pyeon, A. Fujimoto, T. Sugawara, et al., “Sensitivity and Uncertainty Analyses of Lead Sample Reactivity Experiments at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **185**,

- 460 (2017).
- [53] C. H. Pyeon, M. Yamanaka, A. Oizumi, et al., “Experimental Analyses of Bismuth Sample Reactivity Worth at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 1324 (2018).
- [54] C. H. Pyeon, M. Yamanaka and M. Fukushima, “Uncertainty Quantification of Lead and Bismuth Sample Reactivity Worth at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **195**, 877 (2021).
- [55] C. H. Pyeon, M. Yamanaka, T. Sano, et al., “Integral Experiments on Critical Irradiation of ^{237}Np and ^{241}Am Foils at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **193**, 1023 (2019).
- [56] C. H. Pyeon, M. Yamanaka, A. Oizumi, et al., “First Nuclear Transmutation of ^{237}Np and ^{241}Am by Accelerator-Driven System at Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, 684 (2019).
- [57] C. H. Pyeon, A. Oizumi and M. Fukushima, “Experimental Analyses of ^{243}Am and ^{235}U Fission Reaction Rates at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **195**, 1144 (2021).
- [58] C. H. Pyeon, Ed., *Accelerator-Driven System at Kyoto University Critical Assembly*, Springer, Singapore (2021).
- [59] H. Taninaka, K. Hashimoto, C. H. Pyeon, et al., “Determination of Lambda-Mode Eigenvalue Separation of a Thermal Accelerator-Driven System from Pulsed Neutron Experiment,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**, 376 (2010).
- [60] H. Taninaka, K. Hashimoto, C. H. Pyeon, et al., “Determination of Subcritical Reactivity of A Thermal Accelerator-Driven System from Beam Trip and Restart Experiment,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 873 (2011).
- [61] H. Taninaka, A. Miyoshi, K. Hashimoto, et al., “Feynman- α Analysis for A Thermal Subcritical Reactor System Driven by An Unstable 14 MeV-Neutron Source,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1272 (2011).
- [62] A. Sakon, K. Hashimoto, W. Sugiyama, et al., “Power Spectral Analysis for A Thermal Subcritical Reactor System Driven by A Pulsed 14 MeV Neutron Source,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 481 (2013).
- [63] A. Sakon, K. Hashimoto, M. A. Maarof, et al., “Measurement of Large Negative Reactivity of an Accelerator-Driven System in the Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 116 (2014).
- [64] A. Sakon, K. Hashimoto, W. Sugiyama et al., “Determination of Prompt-Neutron Decay Constant from Phase Shift between Beam Current and Neutron Detection Signals for An Accelerator-Driven System in the Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **52**, 204 (2015).
- [65] K. Nakajima, T. Sano, K. Takahashi, 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.*, **57**, 1152 (2020).

- [66] K. Nakajima, T. Sano, S. Hohara, et al., “Feynman- α and Rossi- α Analyses for a Subcritical Reactor System Driven by a Pulsed Spallation Neutron Source in Kyoto University Critical Assembly,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **58**, 117 (2021).
- [67] K. Nakajima, A. Sakon, T. Sano, 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.*, **58**, 374 (2021).
- [68] H. Shahbunder, C. H. Pyeon, T. Misawa, et al., “Experimental Analysis for Neutron Multiplication by using Reaction Rate Distribution in Accelerator-Driven System,” *Ann. Nucl. Energy*, **37**, 592 (2010).
- [69] H. Shahbunder, C. H. Pyeon, T. Misawa, et al., “Subcritical Multiplication Factor and Source Efficiency in Accelerator-Driven System,” *Ann. Nucl. Energy*, **37**, 1214 (2010).
- [70] H. Shahbunder, C. H. Pyeon, T. Misawa, et al., “Effects of Neutron Spectrum and External Neutron Source on Neutron Multiplication Parameters in Accelerator-Driven System,” *Ann. Nucl. Energy*, **37**, 1785 (2010).
- [71] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, T. Yagi, et al., “Accuracy of Reactor Physics Parameters in Thorium-Loaded Accelerator-Driven System Experiments at Kyoto University Critical Assembly,” *Nucl. Sci. Eng.*, **183**, 96 (2016).
- [72] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, T. Misawa, “Monte Carlo Approach of Effective Delayed Neutron Fraction by k-Ratio Method with External Neutron Source,” *Nucl. Sci. Eng.*, **184**, 551 (2016).
- [73] M. Yamanaka, C. H. Pyeon, S. H. Kim, et al., “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).