基礎から分かる未臨界

第6回 加速器駆動システムにおける未臨界度監視

日本原子力研究開発機構 方野 量太,
京都大学複合原子力科学研究所 山中 正朗

加速器駆動システム(ADS)は一定の出力を得るために、未臨界炉心と外部中性子源が組み合わされた原子力システムである。我が国ではマイナーアクチノイド(MA)を主な対象とした核変換炉として JAEA で研究が進められている。JAEA が提案する ADS では核燃料物質として Pu と MA が装荷されるため実効遅発中性子割合が小さく、安定な出力運転を実現させるために適切な未臨界度が設定される。万が一臨界に近づいた場合にはそれを検知し安全に停止できるように未臨界監視手法が求められている。第6回では、ADS の概要と従来の未臨界度測定手法の適用性およびその精度を検証し、従来法が持つ課題解決に向けた近年の取り組みについて紹介する。

KEYWORDS: Accelerator-Driven System, Monitoring of subcriticality, Pulsed-neutron source experiment, Feynman- α method, Extended-Kalman filter, Linear combination method

I. 加速器駆動システム(ADS)

1. 背景

ADS は、一定の出力を得るために、未臨界炉心と外部中性子源が組み合わされた原子力システムである。我が国では、再処理によって使用済み燃料からプルトニウムとウランを分離した後に高レベル放射性廃液中に残るマイナーアクチノイド(MA)を主な核変換対象とした核変換専用システムとして ADS を導入する構想のもと、高レベル放射性廃棄物の処分に係る負担軽減を目指している¹⁾。1988 年には原子力委員会によって策定された「群分離・消滅処理研究開発長期計画」(通称オメガ計画)以来、分離変換技術の研究開発を通して、MA 核種の短寿命化・安定化による長期的な放射線リスク低減および地層処分場面積抑制を担う核変換システムの一つとして ADS 研究が進められている。

2. JAEA が提唱する ADS²⁾

現在、JAEA が考案している ADS は炉心熱出力 800 MW で、加速器には大電流の高エネルギー陽子(1.5 GeV 程度)を連続ビームで加速する超電導線形加速

器を用いる(図1)。陽子ビームを入射する核破砕ターゲットおよび冷却材には、液体鉛ビスマス(LBE: 融点 124 °C, 沸点 1,670 °C)の使用が想定されている。冷却材の入口温度は 300 °C で、流速は 2 m/s である。燃料は、Pu と MA を主成分とするウランフリー窒化物を想定している。初装荷 MA 窒化物燃料量は約 2.5t であり、核変換量は年間 250 kg である。1 サイクル 600 日の運転期間において、実効増倍率 k_{eff} はサイクル初期の 0.97 から燃焼に伴いサイクル末期において 0.95 程度まで低下する。ADS は通常の原子炉と異なり制御棒を持たず、

図1 ADS の鳥観図

Subcriticality - from basics to applications (6) ; Subcriticality Monitoring in Accelerator-Driven System : Ryota Katano, Masao Yamanaka.

(2019 年 9 月 2 日 受理)

■ 前回のタイトル

第5回 1F 燃料デブリの臨界近接監視手法の開発

炉心出力を一定に保つために、燃焼に伴う k_{eff} の低下を補うように陽子ビーム加速器の出力をサイクル初期の 15 MW から末期にかけて 30 MW まで増加させる。実効遅発中性子割合 β_{eff} は初装荷炉心において約 0.19 % であり、10 サイクル目には約 0.17 % となる。ADS の燃料集合体は高速炉と同様に六角集合体(炉心の燃料領域の軸長は 1 m, 外半径は約 1.2 m)を用いることを提唱しており、炉中心から中性子源を供給するために炉心中央にはビームダクトと核破碎ターゲットが配置される。

3. 未臨界度の監視と課題

MA を多量に装荷する炉心では β_{eff} が小さく (0.2 % 未満) 即発臨界までの余裕が小さくなる上、ドップラー反応度が小さいことから、臨界状態の運転では精密な反応度制御と大規模な安全系が必要になる。そこで、未臨界状態で運転する ADS を導入することで安全性を高めている。ADS の未臨界度は、温度変化、燃焼、および事故で反応度が投入されても、未臨界が常に担保されるよう設定される²⁾。一方で、一般に炉心の未臨界度が浅いほど中性子源から発生した中性子の利得が良く、同じ中性子源強度でもより効率的に核変換が可能となるため経済性が高まる。ADS では MA の核分裂反応を利用した中性子経済の効率化を加味した核変換を狙っているため、安全性と経済性を考慮した最適な未臨界度範囲が設定される。未臨界度の設定には、投入され得る反応度と設計精度 (1.0 % dk/k) および測定精度 (0.5 % dk/k) が考慮されている。

ADS は未臨界で運転するため、運転前に未臨界度測定によって所定の未臨界度に近接させる (この試験を未臨界度校正と呼ぶ)。未臨界度校正には、未臨界度の精密な測定が可能なパルス中性子源 (PNS) 法のような手法が望まれる。一方、パルス中性子源を用いた出力運転では、パルス状の発熱が材料に悪影響を与えかねないため、定格出力運転時には定常中性子源による駆動が想定されている。定格出力運転では動的手法による未臨界度の測定ができないが、万が一臨界に近づいた場合にも中性子源の供給を断つことで炉心を安全に停止できるよう、未臨界度の変動が設計値を満足しているかを監視する手法の選定が求められる。また、核分裂反応率の空間分布は中性子源が燃料領域外にあるために中性子源に強く影響を受けた形状となり、測定した未臨界度は検出器の位置に依存する。そのため、基礎研究として検出器の位置依存性ならびに監視値のゆらぎの把握が求められる。

そこで、基礎研究として我が国で唯一 ADS 実験ができる京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) において、核破碎中性子源および 14 MeV 中性子源の異なる中性子源を外から供給して零出力で未臨界度測定実験を実施し、従来手法の精度・信頼性および中性子源依存性を検証した。第 II 章では KUCA における従来手法の検証結

果について紹介する。また、第 III 章では KUCA での基礎実験で明らかになった従来手法の課題解決に向けた取り組みについて紹介する。第 IV 章には本稿のまとめを記述する。

II. 未臨界監視手法の適用性

未臨界度の測定手法とその特徴については、本連載講座の第 3 回「未臨界度測定のいろは」で広く紹介された。本節では、従来手法が ADS における未臨界度測定にどのように適用できるかを実際の未臨界炉物理実験で得られたデータを例に挙げて紹介し、従来手法を ADS に適用する際の問題点の抽出にも焦点をあてる。

1. パルス中性子 (PNS) 法

PNS 法は、外部中性子源としてパルス中性子を使用し、中性子計数の時間変化から未臨界度を推定する手法である。PNS 法では Simons-King 法 (α -fitting 法)⁴⁾ および面積比法³⁾ が代表的である。Simons-King 法では、未臨界体系にパルス中性子を打ち込んだ後の中性子計数の減衰の時定数 α (即発中性子減衰定数) を指数関数によるフィッティングで求め未臨界度に換算する。面積比法では、中性子計数の即発中性子に起因する計数と遅発中性子に起因する計数の比によりドル単位の未臨界度が測定できる。面積比法は未臨界度の絶対測定が可能で、Simons-King 法も数値計算によってあらかじめ α から未臨界度への換算係数を評価しておけば未臨界度校正が可能である。

KUCA での実験で PNS 法は、検出器が中性子源の近くにある場合を除いて 8 % dk/k までの未臨界度に対し約 10 % の相対誤差で未臨界度を測定できることがわかった⁶⁾。

未臨界度測定において PNS 法による恩恵は大きく未臨界度校正での適用が期待される。本手法は検出器を制御棒などの近くに設置しても体系全体での核分裂連鎖反応に起因する中性子が検出できれば良いが、中性子源に近い位置では中性子源の影響を大きく受けるため、未臨界度測定精度が悪化することが課題として抽出された。

2. 逆動特性法

外部中性子源を用いた未臨界度監視における逆動特性法では式 (1) を使用し、ある時刻 t_j (j : 時間幅のインデックス) で得られた中性子計数率 $P(t_j)$ を測定することで未臨界度を求めることができる。ただし、あらかじめ計算によって、第 i 群の遅発中性子先行核数 C_i とその崩壊定数 λ_i ならびにその相対収率 a_i 、 β_{eff} 、および、生成時間 Λ をそれぞれ決めておく必要がある。

図2 KUCAでの過渡実験で測定した計数率と推定された反応度

$$\rho(t_j) = \frac{P(t_j) - P(t_{j-1})}{t_j - t_{j-1}} \frac{\Lambda}{P(t_j)} + \beta_{\text{eff}} - \frac{\Lambda}{P(t_j)} \times \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i(t_j - t_{j-1})} \left\{ \frac{a_i \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} P(t_j) \Delta t + C_i(t_{j-1}) \right\} - \frac{\Lambda \epsilon S}{P(t_j)} \quad (1)$$

ここで、測定開始時において体系が未臨界定常状態であれば、遅発中性子先行核数の初期値 $C_i(t_1)$ と実効中性子源強度 ϵS は以下のように書き表される。

$$C_i(t_1) = \frac{a_i \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} P(t_1), \quad (2)$$

$$\epsilon S = -\frac{\rho(t_1)}{\Lambda} P(t_1), \quad (3)$$

式(2)および(3)より定常中性子源によって運転される未臨界炉心の未臨界度の監視には、未臨界度の初期値が必要になることがわかる。

式(1)を用いた未臨界度の Online 監視の一例を図2に示す。図2(左)には、燃焼に伴う未臨界度変化の監視を念頭に、ADS実炉で想定されている運転初期の k_{eff} が約0.97における過渡実験の計数率変化を示す。本図では約520秒で制御棒(価値: 約800 pcm)がモーター駆動によって未臨界炉心に挿入され、計数率が減少した。図2(右)は計数率を式(3)に代入して推定された反応度の推移である。本図から、制御棒が挿入されると反応度が負に大きくなっており、得られた反応度も参照値付近を推移したため、ADSの起動・運転時の未臨界を監視できる可能性を示した。しかし、本実験から、未臨界度が大きくなると推定値が約1 % dk/k ばらつくことが判明した。この推定値のばらつきは、低計数率ほど計数のばらつきが大きいことに起因している。測定の目標精度が0.5 % dk/k であるので、運転時に検出器の損傷を防ぐために炉心から離して設置することも念頭に、監視値のばらつきが低減される推定手法の開発が本実験を通じて課題として抽出された。

3. Feynman- α 法

Feynman- α 法は核分裂連鎖反応に起因した中性子のゆらぎがポアソン分布とは異なることに着目して、中性子計数の分散と平均の比(分散/平均)から1を引いた量を $Y(T) \equiv \sigma^2(T)/\langle C(T) \rangle - 1$ として定義する(T : 統計処理を行う時間幅)。KUCAにおける一連のADS模擬実

験⁶⁾では、中性子源付近を除き、測定値 α に対する検出器の位置依存性はほとんど見られないことが実証された。さらに、パルス中性子法における α -fitting 法と比較しても手法間での α の差異は5 % 程度であり、また、BF₃検出器とLiCAF 光ファイバー検出器⁶⁾の検出器の種類による α の差異も4 % 以内であり、ADS運用時の炉物理試験において本手法は未臨界度校正に十分な精度を有するという知見を得た⁷⁾。検出器の場所を工夫することで本手法も起動前の未臨界度校正において重要な役割を果たすことが期待される。

III. 研究開発状況

II章で取り上げられた従来手法の課題に対して、本章ではADSでの未臨界度監視の信頼性向上を目指した研究開発状況について紹介する。なお、検出器および信号処理に必要な機器はII章と同様のものを用いているため、手法を改善することで信頼性が大きく向上し、新たな装置開発の必要がないということを強調したい。

1. 最適検出器位置探索

II章で述べた通り、未臨界度の測定結果は検出器の位置に依存することが課題であった。そこで、面積比法では、(ドル単位未臨界度の計算値) / (面積比の計算値) を補正係数として測定結果に乗じることにより、空間依存性が補正できる。この補正係数により検出器位置依存性を大幅に低減できるが、補正係数を数値計算によって求めているため、理論モデル、幾何形状、製造公差、核データ等に起因する不確かさが混入し、かえって測定精度を悪化させてしまう可能性がある。そこで、補正係数に乗じる必要の無い(補正係数がちょうど1となる)位置に検出器を置けば、補正係数による不確かさは混入せず、高精度な測定が期待できる。先行研究では、補正係数が1となる位置近傍では核データに起因する補正係数の不確かさが小さくなることが示されている⁸⁾。つまり、補正係数が1となる検出器位置では数値計算による不確かさの影響を受けにくく最適な検出器位置が決定できるということである。実際には、幾何形状をより忠実に再現し中性子と物質の相互作用も可能な限り厳密に扱うことが可能である連続エネルギーモンテカルロ計算コードを用いて最適検出器位置を探索すれば、不確かさを極力低減した高精度未臨界度測定が期待できる。

また、Simons-King 法についても高精度な未臨界度測定が可能な検出器位置の探索法が提案⁹⁾されており、未臨界度測定の信頼性向上に資すると考える。

2. 拡張カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、時刻に対して一階連立線形微分方程式で表されるシステムの状態の最尤値(もっともあ

図3 図2(左)の計数率を入力データとしたときの拡張カルマンフィルタによる反応度のオンライン監視¹⁰⁾

図4 中性子計数率と陽子ビームの電流値(左)および拡張カルマンフィルタによる反応度のオンライン監視(右)¹¹⁾

りそうな値)を、観測値とそのシステムを支配する方程式を用いた最尤推定法によって推定する手法である。動特性を示す状態空間モデルである式(1)および(2)が非線形であるため、テイラー展開で1次までの微少項を取り扱うことができる拡張カルマンフィルタに注目し、II-2節で逆動特性法によって推定された未臨界度のゆらぎ低減に取り組んだ。

図3に図2(左)の計数率を観測データ、観測データの不確かさを計数の平方根を観測データの不確かさとしてそれぞれ入力したときの反応度の推定値を示す。本図より、推定値が参照値と良い一致を示しているだけでなく、逆動特性法による推定値(図2(右))と比較すると推定値のばらつきが約1 % dk/k から約0.3 % dk/k まで低減されることが実証でき、拡張カルマンフィルタが未臨界度オンライン監視に適用可能であることがわかった。

制御棒挿入による基礎的な過渡実験から拡張カルマンフィルタが未臨界度のオンライン監視に適用できる可能性が示されたので、計数率が200 cps と低い(図4(左))中で中性子源が加速器の不安定性によって激しく変動したときの厳しい条件において本手法によるオンライン監視を試みた。本過渡実験では、制御棒の挿入によって4.2 % dk/k (Case I) から6.3 % dk/k (Case III) まで未臨界度を変化させた。図4(右)に反応度の監視結果を示す。図4(左)の計数率からは一見しても反応度の変化を確認することができないが、図4(右)から拡張カルマンフィルタによって低計数率で外部中性子源強度が大きく変動している中においても反応度は参照値付近を示した。これらの実験から、拡張カルマンフィルタが実際のADSにおける未臨界度監視にも適用できる可能性を示

図5 PNS法におけるパルス入射後の中性子検出の様子

図6 線形結合法の概念図

すことができた。

3. 線形結合法

PNS法において、パルス入射後の中性子計数は、中性子源からの距離に応じておおむね図5のようになる。中性子源から近い検出器では、中性子源から発生した中性子が一斉に検出器になだれ込むためパルス入射直後の計数は大きく、その後急峻に減衰する。対して、中性子源から遠い検出器では、中性子が体系内を飛行して検出器に至るまで時間がかかるため、計数の立ち上がりがパルス入射から遅れる。Simons-King法では、中性子計数が単一の指数関数で減衰すると仮定してフィッティングを行うため、中性子源と検出器の位置関係に応じて即発中性子減衰定数 α が過大/過少評価される。

パルス入射からしばらく経つと、中性子計数は単一の指数関数で減衰し、準定常状態に至る。この状態は、体系内の中性子は核分裂連鎖反応によってのみ生じたものであり、この時の減衰の強度が未臨界度に対応する。しかし、外部中性子源からの影響は中性子検出器の位置により異なるために準定常状態に至るまでの時間が異なることから、検出器の位置依存性による不確かさが残る。

線形結合法は、体系内に広く分散させた複数の検出器における中性子計数を適切な重さによって重ね合わせ(線形結合させ)、パルス入射直後の外部中性子源の影響を相殺させることで、準定常時の指数関数を抽出する手法である(図6)。この手法はKUCAでのパルス中性子法実験に適用され、基本モードの指数関数を抽出し、従来のSimons-King法と比較して検出器の位置の効果による不確かさ低減の可能性を示した¹²⁾。この手法によってPNS法で課題となっていた検出器の位置依存性

に関する課題が解消される可能性があり、未臨界度校正において信頼性向上に資すると考える。

IV. まとめ

我が国では、MA を集中的に核変換するためのシステムとして ADS の導入が検討されている。ADS は臨界に達することがないように設計されるため、起動前においては絶対測定が可能な手法によって所定の未臨界度に近接させる。また、運転時には定常中性子源を用いることが検討されている。従って、運転時に万が一所定の未臨界度から逸脱した場合にも動的手法に頼らずにそれを検出できるような未臨界度監視手法の選定が求められる。

本稿では、Ⅱ章において従来の未臨界度測定手法の ADS への適用性について議論し、加えて、Ⅲ章では未臨界度測定の信頼性向上に資する研究について取り上げた。未臨界監視について、現状は炉心スペクトルを高速炉に近づけた燃料にウランが装荷された零出力(熱的なフィードバックや燃焼による核種組成の変化が無視できる出力レベル)炉心で測定精度および信頼性が確認できたという基礎段階である。

今後も、実機 ADS での未臨界度監視精度のさらなる向上のために、KUCA など得られた実験データを活用して新たな未臨界度監視手法を継続的に開発し、その信頼性を検証することが重要であると考え。また、実機 ADS では燃料に MA が多量に含まれるため、ウラン燃料に比べ γ 線レベルが高くなり、測定場の中性子スペクトルも KUCA のものと比べて硬くなる。このことから、実際に高速スペクトルの実証炉心を用いて未臨界度校正および燃焼に伴う燃料および MA 核種組成変化に応じた大幅な未臨界度変化のなかで、中性子計測技術および提案手法が未臨界度監視の要求精度を満足するかの実証研究にも重点が置かれると考える。

— 参考資料 —

- 1) 放射性廃棄物減容化・有害度提言の技術開発：核種分離・転換, NSA/COMMENTARIES, No. 22, 日本原子力産業協会原子力システム研究懇話会, (2016).
- 2) T. Sugawara, et al., "Impact of impurity in transmutation cycle on neutronics design of revised accelerator-driven system," *Ann. Nucl. Energy*, 111, pp. 4490459 (2018).
- 3) N. G. Sjöstrand, "Measurements on a subcritical reactor

using a pulsed neutron source," *Arkiv för Fysik*, 11, pp. 233-246 (1956).

- 4) B. E. Simmons, et al., "A pulsed neutron technique for reactivity determination," *Nucl. Sci. Eng.*, 3(5), pp. 595-608 (1958).
- 5) R. P. Feynman, et al., "Dispersion of the neutron emission in U-235 fission," *J. Nucl. Energy*, 3(1-2), pp. 64-69 (1956).
- 6) K. Watanabe, et al., "Development of an optical fiber type detector using a Eu: LiCaAlF₆ scintillator for neutron monitoring in boron neutron capture therapy," *Nucl. Instrum. Methods A*, 802, pp. 1-4 (2015).
- 7) 山中正朗, "加速器駆動システムによる核変換処理の実現に向けた基礎研究(7)動特性パラメータの実験解析" 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2M 03, 岡山大学津島キャンパス, 2018 年 9 月 5 日~9 月 7 日.
- 8) T. Kimura, et al., "Uncertainty quantification of spatial correction factor for Sjöstrand method due to cross-section data," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 115, pp. 1081-1084 (2016).
- 9) S. H. Jang, et al., "Determination of an effective detector position for pulsed-neutron-source alpha measurement by time-dependent Monte Carlo transport simulations," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2018, Article ID 2350458 (2018).
- 10) M. Yamanaka, et al., "Subcriticality Estimation by Extended Kalman Filter Technique in Transient Experiment with External Neutron Source at Kyoto University Critical Assembly," *Eur. Phys. J. Plus* (2019) [to be submitted].
- 11) M. Yamanaka, et al., "Applicability of Extended Kalman Filter Technique to Reactivity Monitoring at Kyoto University Criticality Assembly," *Proc. Reactor Physics Asia 2019 (RPHA19) conference, Dec. 2-3, Osaka, Japan* (2019) [accepted].
- 12) R. Katano, et al., "Application of linear combination method to pulsed neutron source measurement at Kyoto University Critical Assembly," *Nucl. Sci. Eng.*, (2019) [in print].

著者紹介

方野量太 (かたの・りょうた)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 未臨界度測定/不確かさ定量評価

山中正朗 (やまなか・まさお)

京都大学複合原子力科学研究所
(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 原子炉物理実験/未臨界度測定, 動特性パラメータ