

原子力発電所等における停止時未臨界監視手法の開発

(受託者)株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

(研究代表者)田代祥一 炉心設計部

(再委託先)国立大学法人福井大学

(研究期間)平成 27 年度～29 年度

1. 研究の背景とねらい

(研究の背景)

福島第一原子力発電所事故後の新規制基準策定段階において、燃料の健全性を維持する観点から、原子炉停止時における反応度誤投入への対応について議論が行われた。その一つの解決策として、未臨界監視が提案された。もし未臨界監視が実現すれば、制御棒の誤引抜や燃料の誤装荷といった反応度誤投入事象を検知し、想定外の臨界超過を予防でき、原子力発電の安全性を向上することが期待できる。

未臨界度の測定は様々な方法が開発されている（パルス中性子法、炉雑音解析法、中性子源増倍法、反応度計等）。しかしながら、商用炉の未臨界監視に実用化されたものは存在しない。これには二つの理由が考えられる。一つは、停止中の炉心には制御棒が多数本挿入されており、臨界に至るまでに十分な余裕があることから、未臨界監視の必要性が無いと考えられていた事である。もう一つは、例えば未臨界監視に反応度計モデル（図 1 参照）を適用する場合、中性子検出器への実効的な中性子源強度を高精度に評価する事や、検出信号からノイズ成分を適切に除去する事が必要であるが、これらが技術的に難しい事である。

基礎式（遅発中性子先行核6群 動特性方程式）

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + Q(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \end{cases}$$

n : 中性子束（出力）
 C_i : i グループの遅発中性子先行核数
 β_i : i グループの遅発中性子発生割合
 λ_i : i グループの遅発中性子先行核の崩壊定数
 ρ : 反応度
 Λ : 遅発中性子生成時間
 Q : ソースターム（中性子源強度）

反応度評価式

$$\rho(t) = \beta_{\text{eff}} + \Lambda \frac{d}{dt} [\ln n(t)] - \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \beta_i \left\{ n(0) e^{-\lambda_i t} + \lambda_i \int_0^t e^{-\lambda_i(t-\tau)} n(\tau) d\tau \right\} - \frac{Q(t) \cdot \Lambda}{n(t)}$$

図 1 反応度計モデル

(研究のねらい)

本研究は停止中の原子力発電所で適用できる未臨界監視手法を開発する事がねらいである。具体的には、マイクロ燃焼モデル^[1]を備えた BWR 炉心シミュレータ AETNA^[2]により、原子炉停止時における実効的な中性子源強度を高精度に評価する事を試みる。さらに、反応度計開発で培われてきたノイズフィルタ技術を用いて原子炉停止時の高ノイズ環境における検出信号から適切にノイズ成分の除去を行う事を試みる。そしてこれらの技術を組み合わせることによって、世界で初めての停止時未臨界監視手法の実現を目指す。

2. これまでの研究成果

2.1 反応度評価手法の開発（平成 27 年度）

1 点炉逆動特性法に基づく原子炉の反応度測定手法はよく知られている^[3]。この手法を未臨界度の監視に適用するには、適切な中性子源強度を設定する必要があった。そこで、中性子源核種の絶対量をマイクロ燃焼モデルで評価できる決定論コード AETNA により、検出器応答及び実効増倍率を評価し、1 点炉逆動特性法に基づく反応度計の中性子源強度を逆算により評価する手法について検討した。燃料シャフリング中など、中性子源強度が刻々と変化する状況では、前記の逆算により求めた中性子源強度による校正頻度が高いほど、評価精度が向上することを確認した。ただし、現状のプラントシステムでは、自動で中性子源強度を校正することは困難であり、操作員が手動で校正する必要がある。すなわち、校正頻度が高いほど、操作員の負荷が増加する。そこで、評価精度と校正の負荷を勘案した結果、1 日 1 回程度の校正が実用的であることを確認した。

2.2 核計装信号処理手法の検討（平成 27 年度）

未臨界状態における反応度の評価には、外部中性子源強度の情報と、中性子束信号に含まれるノイズ成分の除去が必要である。そこで、知られている 3 種の反応度計モデル (IPK; Inverse Point Kinetics^[3], EKF; Extended Kalman Filter^[4], SRE; Simple Reactivity Estimation^[5]) について、BWR の燃料シャフリングを模擬した信号を用いてそれぞれ適用性についての検討を行った。その結果、それぞれの反応度計のシステムパラメータを妥当な値に設定することにより同等のノイズフィルタ性能が得られることが分かった。

2.3 未臨界監視装置の試作(平成 28 年度)

未臨界監視装置の試作機（オフライン）を作成した。具体的には、将来のプラントシステムとの連携や GUI の工夫等により、利便性や評価精度などを考慮したうえで試作機の要件定義（表 1 参照）を行い、評価プログラムを作成した。

未臨界監視装置が実用化した場合の様々な状況（使用者、使用場所、使用条件）に柔軟に対応できるように、高性能かつ軽量のタブレットパソコンを試作機のハードウェアに選定した。

表 1 要件定義

適用プラント	ABWR
上流側プラント設備	過渡現象記録装置
未臨界度評価モデル	反応度計モデル
入力変数、入力信号	AETNA 結果(β , λ , Q , Λ , ρ) SRNM 信号 (10 信号)
出力	・ 反応度 ・ 異常検知 (点滅)
適用範囲	未臨界 (市松装荷状態) } 臨界超過 (即発臨界未満)
計算停止時の対応	自動復帰 (計測の即再開)

2.4 核計装データ採取（平成 28 年度）

北陸電力殿の協力を得て、志賀原子力発電所 2 号機の原子炉内の燃料を燃料貯蔵プールに移動させる際に、燃料移動中の信号データを採取した（図 2、図 3 参照）。これにより、燃料取り出しや装荷による計数率の変化や、ノイズの影響などを確認することができた。

停止中原子炉の中性子データについては、これまで積極的に採取や研究がなされてこなかった分野であり、本データは当該分野において貴重なデータと言える。

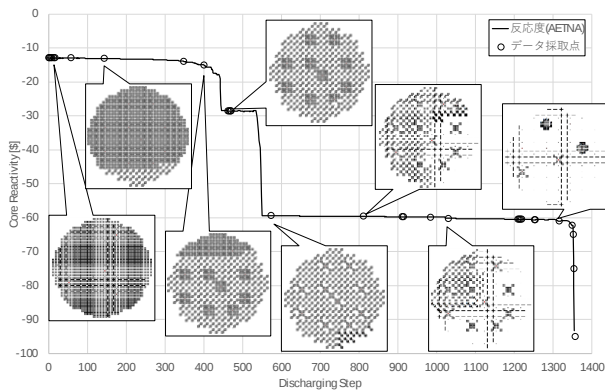


図 2 燃料移動作業の概要

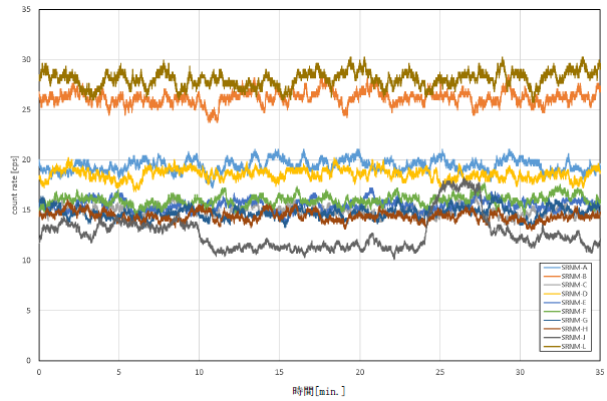


図 3 燃料移動時の計数率時系列の例

2.5 実機適用上の課題整理及び解決策の検討（平成 29 年度）

平成 28 年度に採取した実機信号を用いて、仮想過渡現象記録装置と未臨界監視装置試作機間の接続試験を行った（図 4 参照）。接続試験は実機適用する際のサイバーテロ対策への備えとして、片方向通信による伝送方式を採用した。また、過渡現象記録装置で取り扱う全信号を間引きはせずに伝送したが、問題なくオンライン監視が継続できることを確認した。その一方、データ欠損や計算停止が発生した場合は、手動で対処する必要がある、将来のオンライン監視システム化に向けて、自動復帰等の対策が必要であることが分かった。



図 4 接続試験の様子

3. 今後の研究

3.1 BWR 以外への適用性検討（平成 29 年度）

当開発手法における未臨界監視の 3 要素は以下である。（図 5 参照）

- 中性子増倍体系
- 中性子検出器
- パラメータ評価（炉心シミュレータ等）

通常の商用炉・研究炉はこれら 3 要素を基本的に備えているので、当開発手法を比較的容易に適用することが可能と考えている。また、福島第一原子力発電所の事故においては、使用済み燃料プールの除熱機能に問題が発生し、プール内の燃料の破損・未臨界性が議論となった。本研究の成果により、原子炉の核計装を用いて未臨界監視が有効に達成できる場合、その技術を燃料デブリ取出し時の炉心未臨界監視、又は使用済み燃料プールの未臨界監視という新たな分野への適用が考えられる。研究成

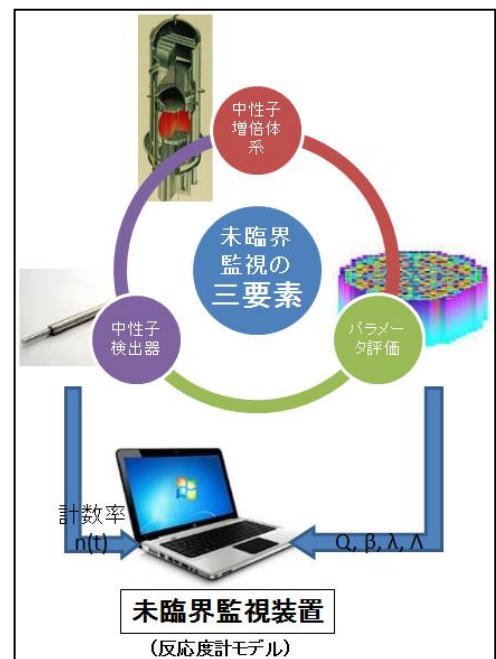


図 5 未臨界監視の 3 要素

果に基づいて、BWR のみならず臨界管理が必要な施設における未臨界監視への適用性を検討する。

3.2 目標達成度の評価（平成 29 年度）

3 年間の研究の総括として、目標指標値に対する達成度を評価する。達成度が低い指標については、課題を整理して将来の未臨界監視の実用化に向けて最適な改善案をまとめる。

4. 参考文献

- [1] Watanabe, M., et al., “Measuring the Photoneutrons Originating from $D(\gamma, n)H$ Reaction after the Shutdown of an Operational BWR,” J. Nucl. Sci. Technol. 46, No. 12, p. 1099 (2009)
- [2] M. Tojo, et al., “Development of the neutron source evaluation method and predictor of SRM/SRNM count rate in BWR simulator,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 52(7-8), pp. 970-978, (2015)
- [3] Y. Shimazu, et al., “Development of a digital reactivity meter and a reactor physics data processor,” Nucl. Technol. 77, 247-254, 1987.
- [4] T.U. Bhatt, et al., “Estimation of sub-criticality using extended Kalman filtering technique,” Annals of Nuclear Energy (60) 98-105, (2013)
- [5] Y. Shimazu, “A simple procedure to estimate reactivity with good noise filtering characteristics,” Annals of Nuclear Energy (73) 392-397, (2014)