

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 沸騰水型原子炉の燃料装荷時における起動領域中性子モニタ指示値の予測手法の開発

氏 名 渡邊 将人

### 論 文 内 容 の 要 旨

沸騰水型原子炉の燃料装荷時における起動領域中性子モニタ指示値の予測手法を新たに開発した。

原子力発電所の地震対策や大規模補修などにより、数年の長期にわたって原子炉が停止する例が見られ、速やかな再起動が望まれている。ここで、長期停止後の再起動にあたって、特に沸騰水型原子炉（BWR）における技術的な課題のひとつに、起動領域中性子モニタ（以下、SRNM：Start-up Range Neutron Monitor という。）の指示値が減少して、原子力発電所の保安規定で定める下限値を下回る問題がある。SRNM は起動領域と称する原子炉の停止状態から核加熱までの低いレベルの中性子束を計測する炉内検出器である。

SRNM 指示値が減少する原因は、照射燃料中に生成した中性子源でもあるアクチノイドが放射性壊変により減少し、これに伴い中性子束が減少したことによる。これらのアクチノイドは自発核分裂や $\alpha$  n 反応によって中性子を放出しており、主な核種は半減期 162 日の  $^{242}\text{Cm}$  および半減期 18.1 年の  $^{244}\text{Cm}$  である。

SRNM 指示値には検出器の健全性を常時確認する目的で、下限値が設定されており、その値は毎秒 3 カウント（3 cps）である。中性子束の減少により SRNM 指示値がこの下限値を下回った場合でも SRNM は故障したと見なされるので、この状態では原子炉を再起動することはできない。この場合は高価な起動用中性子源を購入して、SRNM 指示値を 3 cps 以上にする必要がある。現状の問題点は、長期停止後の SRNM 指示値を予測する際、予測精度を評価した事例がないため、誤差が不明なことである。

また、3cps の下限値は、毎年行われる燃料交換時にも適用される。SRNM 周りに燃料を 4 体装荷した時点で SRNM 指示値が 3 cps 未満であると予測される場合は、燃料装荷を継続できないことがある。そこで、燃料装荷前に強力な中性子源である使用済燃料を SRNM 周りに数体仮置きして、SRNM 指示値を 3 cps 以上とする作業工程を加える必要がある。現状の問題点として、SRNM 指示値の予測手法が無いため、保守的な判断基準で使用済燃料の仮置きを判断せざるを得ず、必要以上の作業工程となっている可能性がある。

したがって、長期停止時および燃料装荷時の SRNM 指示値を予測する手法を開発し、現状の問題点を解消する必要がある。本研究では、SRNM 指示値の予測手法を開発するにあたり以下に示す三つの課題を設定し、これらを解決することで予測手法を完成させた。

#### (1) 長期停止時における SRNM 指示値の減少量を評価する技術 (第 3 章)

SRNM 指示値の減少量を特徴づける炉内の  $^{242}\text{Cm}$  と  $^{244}\text{Cm}$  の生成量の相対比 (以下、Cm 相対比という。) の計算精度を実機データで検証した。

検証に用いる測定値は、数ヶ月間の連続した SRNM 指示値の測定により求めた。本測定では、既往研究で考慮していない SRNM 指示値中に数%含まれる一定値と見なせるような長半減期成分を考慮し、測定精度の向上に努めた。なお、本測定方法が適用できる実機データは貴重である。通常は定期点検により停止直後に燃料は取り出され、燃料を装荷した後は直ぐに再起動してしまう。本研究において測定できたのは、浜岡原子力発電所の 5 プラント過去 10 年間で毎年燃料交換されているにも関わらず 4 ケースだけであった。

一方、Cm 相対比の計算は現行のプロセス計算機の計算手法に準拠しつつ、SRNM の検出器インポートランスを全炉心体系で求めることにより、Cm 相対比の計算を効率的に行なう方法を提案している。

最終的に、Cm 相対比の計算値と測定値 (C/M) は比較的良い一致を示した。C/M の僅かな差異については、本研究で運転履歴を考慮できる簡易モデルを考案し、現行のプロセス計算機の計算手法が運転停止期間や比出力の変動などの運転履歴を考慮できないことに起因することを示した。なお、既往研究では、Cm 相対比の測定を燃料 1 体単位で燃焼度 20GWd/t 程度のもので行なったが、本研究では、40GWd/t 程度の高燃焼度燃料を含む炉心単位で測定を行っており、Cm 相対比の計算精度が妥当とする検証範囲を大幅に拡大することができた。

#### (2) 燃料取出時における SRNM 指示値中の光中性子を定量化する技術 (第 4 章)

運転停止直後の BWR における光中性子の発生量を計算するモデルを考案し、実機データで検証した。

炉停止後の SRNM 指示値の減少量を測定していた際、SRNM 指示値の中に炉内の中性子源の大部分を構成していると思われた  $^{242}\text{Cm}$  の半減期 162 日より早く減少する成分が観察された。本研究の検討により、この成分を光中性子であると推定し、SRNM 指示値の予測手法の開発において、光中性子の考慮が必要か否かを判断するために、光中性子の定量化を行った。

ここで、本研究で開発する予測手法は、燃料取出時に SRNM 検出器の相対感度を推定し、この相対感度を燃料装荷時の SRNM 指示値の計算値に適用し、cps 単位の SRNM 指示値を予測する。相対感度とは、SRNM 指示値における cps 単位の実測値をその計算値で割った値である。SRNM 指示値の計算値は基本的に相対値であり、また実機の SRNM 感度も不明であるため、このような相対感度を用いて計算値を cps 単位の予測値に換算する必要がある。したがって、燃料取出時に行う相対感度の推定に、光中性子の存在が影響を与えるか否かを評価する必要がある。

BWR における光中性子の発生機構は、軽水中の存在比 0.015% の重水素と 2.2MeV 以上の  $\gamma$  線との  $\text{D}(\gamma, \text{n})\text{H}$  反応である。 $\gamma$  線は照射燃料中の核分裂生成物である  $^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$  の過渡平衡（親核種の  $^{140}\text{Ba}$  の半減期：12.8 日）から発生する。

光中性子の測定は、SRNM 指示値中における光中性子由来の成分と、アクチノイドから発生している中性子由来の成分との相対比で行い、これを測定値とした。本測定では、相対比の測定を精度良く行うために、最初に  $^{242}\text{Cm}$  の成分を定量化し、次に光中性子を定量化する 2 段階で測定する方法を考案し適用した。光中性子の測定も長期間にわたる SRNM 指示値の測定が必要であり、本測定は過去 10 年間で 3 ケースだけ実施できた貴重な事例である。

光中性子の計算については、その発生量を求める厳密な計算には、計算負荷の高い  $\gamma$  線の全炉心輸送計算が必要である。本研究ではこの輸送計算を省略できる光中性子の簡易モデルを考案した。このモデルでは、光核反応が扱えるモンテカルロ計算コードを用いて、単位計算ノード（一辺約 15cm の直方体）中における光中性子発生率を、定格出力で運転した停止直後の  $\gamma$  線源強度のもとで計算し、この発生率の絶対値がサイクル平均比出力に比例すると仮定した。

以上に基づき算出した光中性子の計算値を測定値と比較検証した結果、計算精度はおおむね妥当であることが確認された。BWR における  $^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$  由来の光中性子の発生量は停止直後において 15GWd/t の燃料から発生するアクチノイド由来の中性子発生量とほぼ同量であることを確認できた。最終的に、光中性子が SRNM の相対感度に与える影響を評価した結果、初装荷および第 2 サイクルまでを除き、その影響は小さいと判断された。本研究は軽水炉で光中性子を定量化した初めての研究である。

### (3) 燃料装荷時における SRNM 指示値の予測手法の開発 (第 5 章)

SRNM 周りに 4 体の燃料を装荷した時点の SRNM 指示値を予測する簡易手法を開発し、実機データで検証した。この手法は①中性子源強度式、②ノイズ補正、③増倍補正の三要素から構成されている。

①中性子源強度式は、浜岡原子力発電所にて使用中の全種類の燃料に対して燃焼計算を行い、これらを平均化したものである。

次に、②ノイズ補正は、燃料 1 体装荷時の SRNM 指示値を正確に予測するために導入したものである。実機の SRNM 感度は所定の値に校正されていないため、ある感度を中心に正規分布していると仮定できる。この仮定を利用して、燃料 1 体を装荷した時点で計算した SRNM の相対感度 (SRNM 指示値の実測値をその計算値で割ったもの) を燃焼度に対して一様な分布となるような補正を考案した。

最後に、4 体装荷時の SRNM 指示値は、1 体装荷時の SRNM 指示値の単純な足し合わせでは表現できず、③中性子増倍に対する補正が必要であることが判明した。そこで、4 体装荷時において中性子増倍を考慮するモデルを考案し、実測値を再現するようにモデルのパラメーターを調整した。

最終的に開発した SRNM 指示値の予測手法は、燃料装荷時の予測に限られるが、その予測精度は相対標準偏差で約 20%と推定された。この予測精度を前提に過去に行われた使用済燃料の仮置き必要性を再評価したところ、約 8 割の使用済燃料の仮置きを削減できる見通しを得た。

以上、本研究では、上記の (1) から (3) に示す課題を解決することにより、SRNM 指示値の予測手法を開発した。この手法を実機に適用することにより、長期停止時の SRNM 指示値の減少量を正確に予測でき、高価な起動用中性子源の購入を回避することができる可能性が高まる。さらに、燃料装荷時における SRNM 指示値の正確な予測により、不必要な使用済燃料の仮置きを回避でき、燃料装荷工程の短縮も可能となり、原子力発電の保守・運転費用の削減に貢献できる。