

報告番号	甲 第	号
------	-----	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 空間及び中性子エネルギーを考慮した三次中性子相関法  
による未臨界度測定法の研究

氏 名 遠藤 知弘

### 論 文 内 容 の 要 旨

再処理施設等の核燃料取扱施設においては、核燃料を多量に取り扱うことから、臨界に達する可能性を潜在的に有している。従って、臨界安全設計及び管理によって、安全性を十分に担保する必要がある。現状の核燃料取扱施設において臨界安全設計及び管理の直接的な対象となっているのは、核燃料の質量や濃度、取扱機器の形状や配置である。つまり、体系が臨界に対してどれだけの裕度があるかを示す指標である「未臨界度」の測定及び監視は臨界安全設計及び管理の直接的な対象とはなっていない。これは、測定するために施設に大幅な変更を加えることなく、未臨界度を簡便かつ正確に測定する方法が、今日に至るまで確立されなかったことが一つの原因として考えられる。特に、既存の未臨界度測定手法の欠点として、未臨界度の相対値は比較的容易に測定することができるが、未臨界度の絶対値は容易に測定できないという点が挙げられる。

この問題点を解決するために、本研究では古橋晃により提案された「三次中性子相関法」に着目した。三次中性子相関法とは、中性子検出数の時間的ゆらぎを解析することによって、未臨界度の絶対値を測定することができる手法である。三次中性子相関法では、検出時間幅  $T$  の間に検出された中性子数の時系列データを測定する。こうして得られた中性子検出数の時系列データの分散から二次相関量  $Y$  値を測定し、さらに三次モーメントから三次相関量  $X$  値を測定する。三次中性子相関法では、 $T \rightarrow \infty$  の極限における  $Y$ ,  $X$  値の飽和値  $Y_\infty$ ,  $X_\infty$  を推定し、それらの比  $X_\infty/Y_\infty^2$  が「3」という値からどの程度ずれているかを調べることによって未臨界度 ( $-\rho$ ) を求めることができる。概算すると、 $X_\infty/Y_\infty^2$  の「3」からのずれが、体系の未臨界度に概ね相当する。より正確に未臨界度を評価するためには、体系内の核分裂性核種及び外部中性子源の種類を特定する必要がある。

しかし、従来の三次中性子相関法の問題点として、空間及び中性子エネルギーの効果をどのように補正すべきかが十分に解明されていないという点があった。その理由は、従来の三次中性子相関法の理論が、空間及び中性子エネルギーの効果を厳密には取り扱っていなかったためであった。本研究では、上述の問題点を解決するために、「空間及び中性子エネルギーの効果を厳密に考慮に入れた三次中性子相関法の理論式を導出すること」、及び「こ

これらの効果を補正した三次中性子相関法による未臨界度測定法を提案すること」を目的として研究を行った。以下において、本研究の成果を総括する。

### 1. $\alpha$ 固有関数展開を利用した固有関数展開を利用した三次中性子相関法の理論式導出

$\alpha$  固有関数とは、時間に関して指数関数的に減衰する性質を持った固有関数である。 $\alpha$  固有関数が持つ直交性を利用することによって、任意の中性子数密度の時間変化を  $\alpha$  固有関数展開の形式で表すことができる。まず、体系内に 1 個の中性子が投入されたときの中性子数密度の時間変化を表す「グリーン関数」を  $\alpha$  固有関数展開の形式で導出した。次に、このグリーン関数を用いて、1 個の中性子が検出される確率「1 時点検出確率」、1 対の中性子のペアが検出される確率「2 時点検出確率」、1 組の中性子のトリオが検出される確率「3 時点検出確率」を導出した。最後に、これら 3 つの検出確率を検出時間幅  $T$  の範囲で積分することにより、 $T$  に対する二次、三次相関量  $Y, X$  値の関数形を  $\alpha$  固有関数展開の形式で導出することができた。

導出した  $Y, X$  値の関数形は、高次の固有関数が互いに複雑に絡み合った非常に複雑な多重和の形式で表されることが明らかとなった。そこで、体系が臨界に近く基本モード成分が優越な場合を考えることにより、基本モード近似の未臨界度換算式を導出した。また、導出した  $Y, X$  値の理論式より、高次モードの固有関数の値がゼロとなる節点に外部中性子源や検出器を配置することで、それに対応した高次モード成分を除去できることが明らかとなった。一方、核分裂反応に起因した成分については高次モード成分を除去できないことも明らかとなった。従って、高次モードの影響が無視できない場合には基本モード近似の未臨界度換算式が妥当ではないため、高次モード成分を補正できるような手法を開発する必要があることが分かった。

### 2. 検出器インポートランスを利用した三次中性子相関法の理論式導出

$\alpha$  固有関数展開を利用した  $Y, X$  値の理論式の場合、高次モード成分をどのように取り扱うかという問題を避けることができなかった。この問題を解決するためには、固有関数展開に依らずに理論式を導出する必要があった。そこで別の理論式導出法として、中性子検出確率が従う方程式に基づいて、 $Y, X$  値の理論式を導出し直した。ここで、本研究の独自の発想として、原子炉物理学において従来から知られている検出器インポートランス  $I_1$  に加えて、新たに二次、三次検出器インポートランス  $I_2, I_3$  を導入した。 $I_1, I_2, I_3$  の物理的な意味は、「1 個の中性子が体系内に存在する場合に、それによって検出された中性子数の平均値、二次階乗モーメント、三次階乗モーメント」をそれぞれ意味する。これらの検出器インポートランスを利用することによって、 $Y, X$  値の飽和値  $Y_\infty, X_\infty$  の理論式を、物理的に理解しやすい非常に明快な形で導出することができた。

さらに、三次中性子相関法の未臨界度換算式を導出するために、検出器インポートランスで加重平均された未臨界増倍率  $k_{\text{det}}$  という量を新たに導入した。 $k_{\text{det}}$  は、外部中性子源だけでなく中性子検出器にも依存した中性子増倍率である。 $k_{\text{det}}$  によって定義された未臨界度 ( $-\rho_{\text{det}}$ ) を利用することによって、空間及び中性子エネルギーの効果を考慮に入れた三次中性子相関法の未臨界度換算式を導出することができた。その結果、従来の三次中性子相関法の未臨界度換算式における各係数が、検出器インポートランスに

よって補正されることが明らかとなった。ただし、導出した三次中性子相関法の未臨界度換算式において直接得られる未臨界度は、 $k_{\text{det}}$  を用いて定義された未臨界度 ( $-\rho_{\text{det}}$ ) であることに注意する必要がある。本研究で新たに導入した  $k_{\text{det}}$  と従来用いられている実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  との関係については、今後の課題としてさらなる検討の余地が残されている。

### 3. 三次中性子相関法のための三次元 $S_N$ 輸送計算コードの開発

検出器インポートンスを利用することで、 $Y_\infty$ ,  $X_\infty$  の数値計算が可能であり、さらに三次中性子相関法の未臨界度換算式における空間及びエネルギーの補正が可能であることが示された。ここで、検出器インポートンス  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  は随伴輸送方程式によって記述されるため、中性子束の数値解を求める際に従来用いられている手法をそのまま適用して、 $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  の数値解を求めることができる。そこで、 $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  の数値解を求めるために、決定論的手法の一つである離散座標法 ( $S_N$  法) を用いた三次元輸送計算コードを新たに開発した。ただし、本研究で開発した  $S_N$  輸送計算コードでは、できる限り少ない数の飛行方向分割数で高精度の計算を行うために、本研究で新たに開発した  $S_N$  法立体角分点セット ( $EO_N$ ) を新たに導入することにした。ここで、 $EO_N$  分点セットとは、 $1/8$  立体角において偶数次及び奇数次のモーメント条件をできる限り満足するように設計された立体角分点セットである。

開発した  $S_N$  輸送計算コードの妥当性を確認するために、三次中性子相関法の実験を模擬したモンテカルロシミュレーション計算を行い、比較検討を行った。 $S_N$  輸送計算コードで得られた  $Y_\infty$ ,  $X_\infty$  は、モンテカルロシミュレーションによって推定された  $Y_\infty$ ,  $X_\infty$  の結果と良く一致した。これにより、本研究で導出した  $Y_\infty$ ,  $X_\infty$  の理論式、及び開発した  $S_N$  輸送計算コードの妥当性を確認した。また、検出器インポートンスの数値解を利用することによって、三次中性子相関法の未臨界度換算式における空間及び中性子エネルギーの効果を適切に補正できることを確認した。非常に興味深い性質として、検出器インポートンスで加重平均された未臨界増倍率  $k_{\text{det}}$  と実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  が近い値となることが計算結果によって明らかとなった。

以上により、本研究では、空間及び中性子エネルギーの効果を考慮した三次中性子相関法の理論式を導出することができた。さらに、検出器インポートンスで加重平均された未臨界増倍率  $k_{\text{det}}$  という中性子増倍率を新たに導入することによって、空間及び中性子エネルギーの効果を検出器インポートンスによって補正した未臨界度換算式を新たに提案することができた。また、導出した理論式に基づいて空間及び中性子エネルギーの効果の補正を行うためのツールとして、検出器インポートンスを計算することができる三次元  $S_N$  輸送計算コードを開発した。今後の課題としては、本研究の成果に基づいた三次中性子相関法による未臨界度測定実験を行い、実際の測定における適用可能性について検討を行うことである。本研究で得られた成果は、原子炉雑音の理論を新たに解明するものであり、実際の臨界安全に適用可能な未臨界度絶対測定法の実用化に大いに貢献するものであると言える。