

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05381

研究課題名（和文）炉雑音解析法による空間高次モードのノード探査に基づく不規則体系の臨界近接検知

研究課題名（英文）Detection of criticality approaching in irregular systems based on node search of spatial higher-order modes using reactor noise analysis method

研究代表者

北村 康則 (Kitamura, Yasunori)

京都大学・複合原子力科学研究所・准教授

研究者番号：60332706

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：福島第一原子力発電所において予定されている燃料デブリ回収作業においては、形状や水との混合状態の変化に伴う再臨界の発生を阻止する必要がある。そこで、炉雑音解析により中性子減衰定数を監視し、その兆候を検知する手法に関する研究を行なった。まず、深い未臨界状態における同手法の適用性について検証するため、実効増倍率で0.48 - 0.71の深い未臨界状態の体系を構築し、炉雑音解析を実施した。結果、深い未臨界状態でも中性子減衰定数の監視により臨界近接の兆候が検知できることを実証した。一方、燃料デブリのように広範囲に分布する未臨界体系において問題となる高次モード成分の除去について、更なる研究が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東京電力福島第一原子力発電所において、近い将来に実施される燃料デブリ回収作業が予定されている。現状の燃料デブリ体系は未臨界であると推定できるが、今後の燃料デブリ取り出し作業等に伴い、燃料デブリ形状や水との混合状態が変化することによる臨界を防止することは、一般公衆及び作業員に過度の被ばくが生じることのないようにするために必要である。本研究の成果は、これに貢献しようとするものである。

研究成果の概要（英文）：In the planned fuel debris retrieval process at the Fukushima-Daiichi plant, it is necessary to prevent the criticality due to changes in shape and mixing state with water. Therefore, we conducted a research on a method for monitoring the neutron decay constant and detect the signs of criticality approaching by reactor noise analysis. First, to verify the applicability of the method in deep subcriticality, systems with the effective multiplication factors of 0.48 - 0.71 were constructed and reactor noise analysis was performed. As a result, it was demonstrated that the signs of criticality approaching can be detected by monitoring the neutron decay constant even in deep subcriticality. On the other hand, further research is required on the removal of higher mode effects, which are problematic in subcriticality systems distributed over a wide area such as fuel debris.

研究分野：原子炉物理

キーワード：福島第一原子力発電所 燃料デブリ回収 再臨界阻止 炉雑音解析法 不規則体系

### 1. 研究開始当初の背景

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所では、燃料デブリの回収作業が計画されている。同作業では回収に伴い、デブリの形状や水との混合状態が変化し、デブリ体系が臨界に近接していく可能性が排除しきれない。そのため、再臨界となる前に、臨界に近接する兆候を検知する技術の開発が必要である。しかしデブリ体系は、これまで原子炉物理学が想定してきた規則的に炉心構成要素が配列する体系と大きく異なっており、新しい手法の提案が必要である。

### 2. 研究の目的

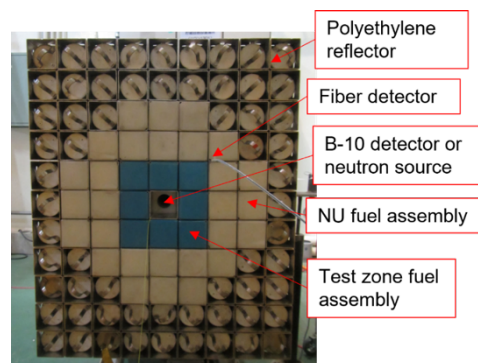
(1) 福島第一原子力発電所で計画されている廃止措置において、最も重要な作業は、格納容器内に溶解落ちて堆積した燃料デブリの回収である。燃料デブリは、現状において十分に深い未臨界状態を維持していると考えられるが、今後の回収作業に伴って形状や水との混合状態が変化し再臨界に近づこうとする可能性が排除しきれない。そこで回収作業を安全に遂行するため、ファインマン $\alpha$ 法に代表される炉雑音解析法を用いて臨界近接の兆候を検知する技術の開発が求められている。ファインマン $\alpha$ 法では、中性子増倍体系に設置した中性子検出器から得られるゲート幅 $T$ 当たりの計数値の分散値 $\sigma^2$ と平均値 $m$ を用いて相関量 $Y = \sigma^2/m - 1$ を計算する。これを様々な $T$ について繰り返して得られる $Y$ カーブが一点炉近似のもと導出された理論式、 $Y(T) = Y_{\infty}[1 - \{(1 - e^{-\alpha T})/\alpha T\}]$ に従う場合、この式を最小二乗法で $Y$ カーブにあてはめてパラメータ $Y_{\infty}$ と即発中性子減衰定数 $\alpha$ が決定される。そのうち $\alpha$ は、臨界近傍において、未臨界度と1次線形関係にあることから、 $\alpha$ の挙動を監視することによって臨界近接の兆候が検知できるはずである。ただし、深い未臨界状態における適用性について、ファインマン $\alpha$ 法は、まだ十分な検証が行われているとは言えない。そこで深い未臨界状態における実験を通じて、これを検証する。

(2) 福島第一発電所の1~3号機における燃料デブリは号機により若干の違いはあるものの格納容器内で不規則に広範囲に堆積していることが分かっており、中性子増倍体系がコンパクトで全体が様な時間的挙動を示すことを前提とする一点炉近似の妥当性は保証されない。そのため $Y$ カーブが上記の理論式で表現できなくなり、未臨界度と直接結びつく適切な $\alpha$ が決定できない可能性が高い。これまで原子炉物理学の分野では、一点炉近似に従わない中性子増倍体系におけるファインマン $\alpha$ 法の適用について、中性子増倍体系を2領域に分割した二点炉結合体系として取り扱う方法が考えられてきた。しかし、これまでの理論においては、中性子増倍体系の組成および外部中性子源分布が完全に対称となる2領域であることが仮定されてきた。しかし、その仮定は、燃料デブリ体系と大きくかけ離れているため、不適切である可能性が高い。そこで我々は、本研究に先立って、組成および外部中性子源分布が非対称な二点炉結合体系におけるファインマン $\alpha$ 法理論式を新たに導出した。しかし得られた理論式は非常に複雑で単純に上記の $Y$ カーブにあてはめてパラメータ抽出をすることは不可能であるとの結論に至っていた。そこで、本研究では、得られた理論式を見直して、それらを適切に組み合わせることで即発中性子減衰定数を抽出することができないかについて検討を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 未臨界実験：当初、本研究では、京都大学臨界実験装置(KUCA)を用いた未臨界実験を実施する予定であった。しかし、現在、KUCAは、燃料低濃縮化作業を実施しており、それが想定を大きく超えて長期化する事態となった。従って、KUCAの炉心の外でも使用可能な低濃縮ウラン及び天然ウランのサンプルを使用し、実効増倍率が0.48~0.71の深い未臨界状態の体系を構築して、炉雑音解析実験を実施した。ただし、ウランサンプルの保有量の制約から、本実験では、広範囲に燃料が分布することまでは模擬できなかった。これ点については、次の理論検証で扱う。

右上の写真は、本研究で構築した未臨界体系の例である。中心3x3のエリア(青印の部分)には、低濃縮ウランと天然ウランを装填した燃料集合体を配置した。また、その周辺のエリア(白印の部分)には、天然ウランのみを装填した燃料集合体を配置した。さらにその外部には、ポリエチレン反射体を設置した。実効増倍率は、中心エリアの燃料集合体に含まれる低濃縮ウランをアルミサンプルに置換していくことで変化させた。さらに、水と燃料デブリとの混合状態の変化を模擬するため、ウランと減速材の組み合わせを変えた燃料集合体を使用した体系も複数構築した。なお、中心エリアの右上角には本研究で調達した光ファイバー検出器を、中央部には既設の中性子検出器を設置した。



(2) 複雑体系の即発中性子減衰定数抽出のための理論検討：右図のように、燃料が広範囲に分布した体系を2つの領域 (L と R) に分割し、それぞれの領域ごとに別個に核分裂連鎖反応等の中性子反応が起きつつ、相互に中性子の交換も行うことで結合している二点炉結合体系モデルを考える。各領域には、外部中性子源が設置され、領域ごとに設置された中性子検出器にて中性子計数が測定できるとする。

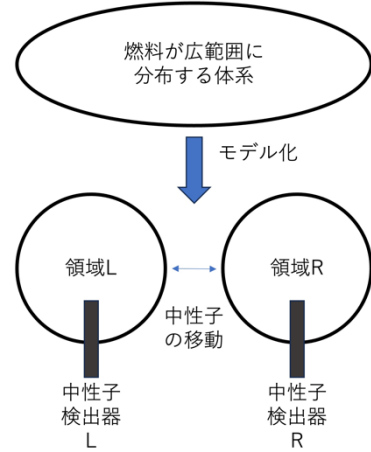
従来の理論においては、2つの領域の対称性を仮定し、全ての中性子反応断面積、外部中性子源強度及び中性子検出器の検出効率が同じであるとしていたが、本研究では、この対称性は想定せず、2つの領域で異なる値を用いることとし、ファインマン $\alpha$ 法の理論式を確率過程論における後向きコルモゴロフ方程式を用いて定式化した。

以下に定式化した相関量 $Y$ の定義を示す。

$$Y_{var,i}(T) = \frac{\sigma_i^2}{m_i} - 1, \quad i = L, R$$

$$Y_{cov,i}(T) = \frac{Cov_{L,R}}{m_j}, \quad i = L, R, \quad j \neq i$$

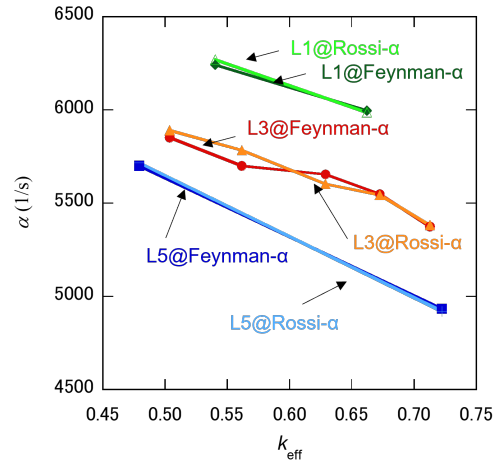
ここで、 $m_i$ はゲート幅 $T$ あたりに中性子検出器 $i$ で計数した中性子数の平均値、 $\sigma_i^2$ はゲート幅 $T$ あたりに中性子検出器 $i$ で計数した中性子数の分散値、 $Cov_{L,R}$ はゲート幅 $T$ あたりに中性子検出器LとRで計数した中性子数の共分散値である。



#### 4. 研究成果

(1) 未臨界実験：まず、各未臨界体系の実効増倍率及び体系内の中性子束分をモンテカルロ計算コードMCNP6にて評価した。評価した中性子束分布と光ファイバー検出器で実際に測定した中性子反応率分布を比較したところ、大きな矛盾はないことを確認した。以上より、計算により評価した実効増倍率にも大きな問題ないことを確認した。

右図は、横軸に計算によって評価した実効増倍率、縦軸に炉雑音実験（ファインマン $\alpha$ 法及びロッシ $\alpha$ 法）により測定した即発中性子減衰定数 $\alpha$ をプロットしたものである。図中の $L_x$  ( $x=1, 3, 5$ )は低濃縮ウランサンプル1つに組み合わせられるポリエチレン減速材の数を示しており、この数が大きくなるにつれて、水と燃料デブリの混合状態において、水の比率が大きくなっていく。この図より、実効増倍率で0.48~0.71という深い未臨界状態において、水と燃料デブリの混合比が変化しても、体系が臨界に近接するに従って、 $\alpha$ が小さくなるという結果が得られていることがわかる。以上より、深い未臨界状態においても、 $\alpha$ の挙動を監視することによって、臨界近接の兆候が検知できることが実証された。



(2) 確率過程論における後向きコルモゴロフ方程式を用いて定式化した $Y_{var,i}(T)$ を以下に示す。

$$Y_{var,L}(T) = -\frac{2\lambda_{d,L}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \left\{ \frac{\mu_{N_L,N_L}}{\langle N_L \rangle} - \frac{\lambda_{f,L}\langle v_{f,L}(v_{f,L} - 1) \rangle}{2\alpha_1} (1 + \Delta_L) \right\} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T} \right) - \frac{2\lambda_{d,L}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \left\{ \frac{\mu_{N_L,N_L}}{\langle N_L \rangle} - \frac{\lambda_{f,L}\langle v_{f,L}(v_{f,L} - 1) \rangle}{2\alpha_0} (1 + \Delta_L) \right\} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T} \right)$$

$$Y_{var,R}(T) = -\frac{2\lambda_{d,R}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \left\{ \frac{\mu_{N_R,N_R}}{\langle N_R \rangle} - \frac{\lambda_{f,R}\langle v_{f,R}(v_{f,R} - 1) \rangle}{2\alpha_1} (1 + \Delta_R) \right\} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T} \right) - \frac{2\lambda_{d,R}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \left\{ \frac{\mu_{N_R,N_R}}{\langle N_R \rangle} - \frac{\lambda_{f,R}\langle v_{f,R}(v_{f,R} - 1) \rangle}{2\alpha_0} (1 + \Delta_R) \right\} \left( 1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T} \right)$$

ただし、 $\alpha_0$ と $\alpha_1$ はそれぞれ、基本モード及び高次モードの即発中性子減衰定数であり、臨界近接の兆候が検知するために使用する、すなわち抽出すべきは $\alpha_0$ の方である。また、その他の種々のパラメータは体系に依存する定数である。

一方、 $Y_{var,i}(T)$ の定式化の結果は以下である。

$$Y_{cov,L}(T) = -\frac{2\lambda_{d,L}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \frac{\mu_{N_L,N_R}}{\langle N_R \rangle} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T}\right) - \frac{2\lambda_{d,L}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \frac{\mu_{N_L,N_R}}{\langle N_R \rangle} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T}\right)$$

$$Y_{cov,R}(T) = -\frac{2\lambda_{d,R}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \frac{\mu_{N_L,N_R}}{\langle N_L \rangle} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T}\right) - \frac{2\lambda_{d,R}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \frac{\mu_{N_L,N_R}}{\langle N_L \rangle} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T}\right)$$

以上の4式を見る限り、いずれの相関量 $Y$ についても、 $\alpha_0 T$ に依存する項及び $\alpha_1 T$ に依存する項の線形和となっており、 $\alpha_0$ の抽出は容易ではない。ここで、これらを組み合わせた新たな相関量として、例えば、

$$Y_{New}(T) = \frac{Y_{cov,L}(T)m_R}{T} - \frac{Y_{cov,R}(T)m_L}{T}$$

を導入してみると、

$$m_i = \lambda_{d,i} \langle N_i \rangle T, \quad i = L, R$$

であるため、

$$Y_{New}(T) = -\frac{2\lambda_{d,L}\lambda_{d,R}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \mu_{N_L,N_R} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T}\right) - \frac{2\lambda_{d,L}\lambda_{d,R}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \mu_{N_L,N_R} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T}\right) \\ + \frac{2\lambda_{d,L}\lambda_{d,R}\alpha_1}{\alpha_0(\alpha_0 - \alpha_1)} \mu_{N_L,N_R} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_0 T}}{\alpha_0 T}\right) + \frac{2\lambda_{d,L}\lambda_{d,R}\alpha_0}{\alpha_1(\alpha_1 - \alpha_0)} \mu_{N_L,N_R} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 T}}{\alpha_1 T}\right) = 0$$

となってしまう。以上より、燃料が広範囲に分布した体系において、即発中性子減衰定数を抽出するためには、更なる検討が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                     | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 三澤 毅<br><br>(Misawa Tsuyoshi)<br><br>(70219616) | 京都大学・複合原子力科学研究所・教授<br><br><br><br>(14301) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|         |         |