

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18317

研究課題名(和文) 高ガンマ線量率場におけるリアルタイム未臨界度測定手法の開発

研究課題名(英文) Research and development for real-time subcriticality monitoring in high gamma dose rate field

研究代表者

遠藤 知弘 (Endo, Tomohiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：50377876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高ガンマ線量率場で適用可能な未臨界度リアルタイム測定手法に関して研究を実施した。未臨界度の測定誤差評価を目的として、原子炉雑音解析による未臨界度測定手法について統計誤差推定手法を新たに考案した。また、未臨界度推定に必要なパラメータ(一点炉動特性パラメータ)に不確かさが存在する場合に対しても、データ同化手法を適用することで未臨界度推定結果の不確かさを低減が可能であることを確認した。樹脂型Eu添加LiCAFを用いた中性子検出器を試作し、名古屋大学コバルト60照射室を利用した高ガンマ線量率場において炉雑音測定の予備実験を実施し、炉雑音測定への適用可能性について調査した。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted for the real-time subcriticality monitoring in high gamma dose rate field. In order to estimate a measurement error of subcriticality, statistical error estimation methods were newly developed for subcritical measurement technique by the reactor noise analysis method. Using the data assimilation method, it was confirmed that the uncertainty of the measured subcriticality could be reduced even under a situation where parameters required for subcriticality measurement (e.g. one-point kinetics parameters) have uncertainties. In order to investigate the applicability of a prototype detector of "Transparent RUBber SheeT type (TRUST) Eu doped LiCaAlF6 (Eu:LiCAF) scintillator" to the reactor noise measurement, preliminary experiments were carried out under high gamma dose rate field at the Nagoya University Cobalt 60 irradiation facility.

研究分野：原子炉物理学

キーワード：未臨界度測定 原子炉雑音 一点炉動特性方程式 データ同化 樹脂型Eu添加LiCAF 中性子 ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故により、1F1~3号機では炉心溶融が起こり、その結果として原子炉構造材・制御棒等と混ざりあって冷え固まった「燃料デブリ」が炉心圧力容器(PCV)だけでなく格納容器下部にまで存在していると推察されている。将来的な1F廃炉作業において燃料デブリ取出を行うことが計画されている。現状の1F1~3号機については、プラントパラメータやPCVガス管理システムによる ^{135}Xe 濃度のモニタリング結果を踏まえるに、未臨界状態(中性子増倍率 $k_{\text{eff}} < 1$)、すなわち核分裂連鎖反応は持続せず終息する状態であると考えられる。しかし、事故前には臨界状態で原子炉を運転していたことから分かるように、1F炉内に存在する燃料デブリは潜在的には臨界超過し得るリスクを抱えている。例えば、作業員被ばく量・周辺環境影響を低減する等の目的により、燃料デブリを冠水させた状態で燃料デブリ取出作業を実施することを考えた場合、冠水作業時にPCV内の水位が上昇することで内部に残存した核燃料のH/U比(水と核燃料の割合)が増加したり、燃料デブリ掘削時に局所的にH/U比が変化したりすることで、核分裂連鎖反応がより長く持続するようになり臨界状態($k_{\text{eff}} = 1$)に近づく可能性がある。従って、燃料デブリ取出作業を安全かつ着実に進めるためには、リアルタイムで未臨界度($-p \equiv (1 - k_{\text{eff}})/k_{\text{eff}}$)を監視することが非常に重要であると考えられる。特に1F燃料デブリ取出時における未臨界度測定を考えた場合には、外部から新たに中性子源を投入するようなアクティブ法よりも、外部中性子源が不要なパッシブ法のほうが施設運用上も望ましいと考えられる。ただし、燃料デブリ中に存在する放射性的核分裂生成物により炉内のガンマ線量率が極めて高いため、高ガンマ線バックグラウンド場において適用可能な放射線検出器および未臨界度測定手法の選定が大きな課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、東京電力福島第一原子力発電所事故で発生した溶融燃料デブリ取出時におけるリアルタイム未臨界度監視技術の開発に向けて、ガンマ線と中性子線が混在する場で適用可能な未臨界度実時間監視手法について検討することを目的とした。

これまでに様々な未臨界度測定法が提案されているが、それぞれの手法には利点・欠点が存在する。リアルタイムモニタリングに適した手法としては、中性子源増倍法や逆動特性法が挙げられる。これらの手法では、中性子検出数の時間変化を計測することで、未臨界度を逆推定することができる。ただし、これらの手法で測定可能なのは、未臨界度の相対的な変化 Δp であり、測定開始時点における未臨界度の絶対値 $-p_0$ を事前に与える必要がある。そこで、未臨界度絶対値を推定する手

法として、本研究ではパッシブ法の一つである炉雑音解析手法に基づく手法に注目した。核分裂連鎖反応が生じている体系において、ある時間幅内に検出された中性子数 C が従う頻度分布は、ポアソン分布からずれること(例: 分散 $\sigma_C^2 > \text{平均}(C)$)が知られている。このポアソン分布からのずれは、1回の核分裂反応当たりに同時に複数個の中性子が放出される現象に起因し、臨界状態に近づいて核分裂連鎖反応が持続するほどポアソン分布からのずれも大きくなる。このような物理現象に基づき、例えば、三次中性子相関法では、中性子検出数時系列データの分散と平均の差異、および三次中心モーメントと平均の差異を分析することで、未臨界度の絶対値を推定することができる。ただし、炉雑音解析手法では、評価された未臨界度測定結果の測定誤差、特に中性子検出数の統計誤差に起因した不確かさを推定する手法が確立されていなかったため、この問題解決を目的とした。

リアルタイム未臨界度モニタリング手法としては、実機原子炉における反応度計の原理としても実績のある、一点炉動特性方程式に基づいた手法に注目した。ただし、1F燃料デブリ取出を考えた場合、炉内のH/U比の状況には大きな不確かさがあり、一点炉動特性方程式による未臨界度推定で必要となる動特性パラメータ(例: 中性子生成時間 Λ)にも不確かさが存在している。そこで、一点炉動特性パラメータに不確かさある場合についても適用可能な未臨界度推定法を模索するため、データ同化手法の適用可能性について検討した。

ガンマ線バックグラウンド場においても中性子検出数の時系列データが測定可能な放射線検出器として、本研究では、中性子線/ガンマ線弁別性能に優れた、Eu添加LiCaAlF₆シンチレータ(Eu:LiCAF)に注目した。Eu:LiCAFは、 ^3He 検出器の代替として近年検討が進められており、小片状のEu:LiCAFを透明樹脂中に大量に分散させた形状(Transparent Rubber Sheet LiCAF、以下TRUST Eu:LiCAF)とすることで、ガンマ線影響を軽減させつつ中性子検出効率を高めた検出設計が可能となっている。加えて、TRUST Eu:LiCAFは検出器形状の柔軟性に富んでいることから、検出器挿入が容易ではない1F作業現場に適していると考えた。そこで本研究では、TRUST Eu:LiCAFを用いた未臨界度測定について検討することを目的とした。

3. 研究の方法

2節で述べた目的を達成するために、本研究では以下の手順により検討を進めた。

- ① 炉雑音解析手法の統計誤差推定手法を確立するために、リサンプリング手法の一つであるブートストラップ法の適用、および誤差推定式の導出を試みた。
- ② 未臨界度測定結果の不確かさを低減するために、ベイジ理論に基づいたデータ同化手法の適用可能性について検討した。

- ③ TRUST Eu:LiCAF による検出器を試作し、名古屋大学コバルト 60 照射室を利用した高ガンマ線量率場において、中性子線 / ガンマ線弁別性能を確認し、炉雑音測定の前備実験を実施した。

当初、③で試作した TRUST Eu:LiCAF 検出器を用いて、京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) において未臨界度測定実験を行う計画を立てていた。しかし、平成 27、28 年度ともに、新規制基準対応のため KUCA の運転ができず、実際の核燃料を用いた未臨界度測定実験については実施することができなかった。

4. 研究成果

- (1) 炉雑音解析手法における統計誤差推定手法の開発

(1-1) Feynman- α 法

炉雑音解析手法の統計誤差推定に関して、まずは二次の中性子相関を分析する Feynman- α 法によって測定される統計誤差の推定について検討を実施した。Feynman- α 法では、ある時間幅 T の間に測定された中性子検出数 $C(T)$ の時系列データを測定し、 $C(T)$ の分散 σ_C^2 の平均 $\langle C \rangle$ からの相対差異 (二次相関量 $Y(T) \equiv (\sigma_C^2 - \langle C \rangle) / \langle C \rangle$) を求める。時間幅 T の変化に対する $Y(T)$ の変化を分析することで、即発中性子減衰定数 α を求め、 $\alpha \approx (\beta_{\text{eff}} - \rho) / \Lambda$ の関係に基づいて未臨界度を推定することができる。Feynman- α 法の統計誤差推定の難しさは、核分裂連鎖反応によって $C(T)$ が従う確率分布が解析的に表現できない点にあった。そこで、リサンプリング法の一種であるブートストラップ法を用いることで、1 回の炉雑音測定実験で得られた中性子検出数の頻度分布に基づいて、仮想的な中性子検出データを多数個サンプリングし、二次相関量 $Y(T)$ 、 α のブートストラップ標本 $Y^*(T)$ 、 α^* を求め、統計誤差としてブートストラップ 95% 信頼区間を利用する方法を試みた。申請者が過去に KUCA で実施した炉雑音測定の結果を活用して、本手法の有効性について検討した (図 1)。図 1 に示したように、ブートストラップ法により推定された信頼区間内、未臨界度の参照値 (Feynman- α 法を 93 回実施することで得られた平均値) が存在する確率は約 87% 程度であり、95% に比較的近い結果が得られることが確認できた。

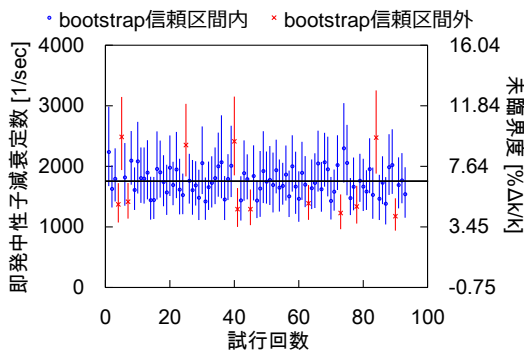


図 1 ブートストラップ法による Feynman- α 法の統計誤差

一方、二次相関量 $Y(T)$ の評価で使用する①標本平均の統計誤差、②不偏分散の統計誤差、③標本平均と不偏分散の共分散、および④不確かさ伝播則に基づくことで、二次相関量 $Y(T)$ の統計誤差 $\sigma_{Y,\text{est}}$ は以下の式で表現できることを導出した。

$$\frac{\sigma_{Y,\text{est}}}{1+Y} \approx \sqrt{\frac{1+Y}{N\bar{C}} + \frac{1}{N} \left(\frac{M_4}{(s^2)^2} - \frac{N-3}{N-1} \right) - \frac{2M_3}{N\bar{C}s^2}} \quad (1)$$

上式において、 N は中性子検出数のデータ数、 \bar{C} は中性子検出数の標本平均、 s^2 は不偏分散、 M_3 および M_4 は三次および四次中心モーメントの不偏推定量をそれぞれ表す。さらに、 $Y < 1$ となる未臨界体系の場合には、中性子検出確率の確率母関数が従う支配方程式に基づくことで、 M_3 および M_4 が二次相関量 Y 値を用いて以下のように近似可能であることを見出した。

$$M_3 \approx (1+3Y)\bar{C} \quad (2)$$

$$M_4 \approx 3\{(1+Y)\bar{C}\}^2 + (1+7Y)\bar{C} \quad (3)$$

近似式 (2)、(3) 式を (1) 式に代入することで、二次相関量 $Y(T)$ の統計誤差は N, \bar{C}, Y のみを用いて評価することもできる。

$$\frac{\sigma_{Y,2\text{nd}}}{1+Y} \approx \sqrt{\frac{Y(1-Y)(2-Y)}{(1+Y)^2 N \bar{C}} + \frac{2}{N-1}} \quad (4)$$

なお (4) 式において、 $Y \approx 0$ 、すなわち中性子検出数の確率分布がポアソン分布で近似できる場合、 $Y(T)$ の統計誤差は次式で概算できる。

$$\sigma_{Y,P} \approx \sqrt{\frac{2}{N-1}} \quad (5)$$

以上で導出した式により、ブートストラップ標準偏差より推定された $Y(T)$ の統計誤差 ($\sigma_{Y,\text{bootstrap}}$) が (1) 式によって推定された統計誤差 $\sigma_{Y,\text{est}}$ とほぼ同じであることを確認することもできた (図 2)。なお、即発中性子減衰定数 α の統計誤差 σ_α については、 $Y(T)$ に対して解析式をフィッティングすることで α を推定しているため、簡便な評価式を導出することは困難であるが、数値計算により $Y(T)$ の微小変化 $\Delta Y(T)$ に対する α の微小変化 $\Delta \alpha$ を求めれば、不確かさ伝播則に基づいて σ_α を評価できる。

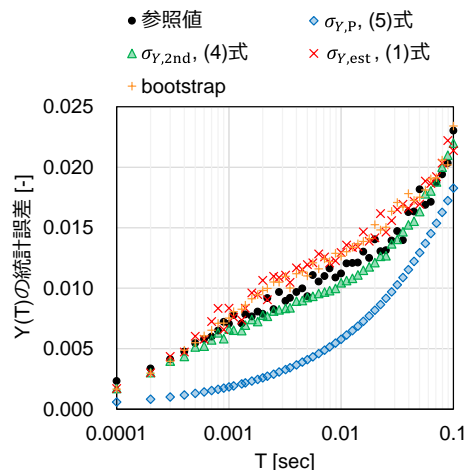


図 2 二次相関量 $Y(T)$ の統計誤差比較

(1-2) 三次中性子相関法

以上の検討を踏まえた上で、三次中性子相関法による未臨界度推定に対しても、ブートストラップ法の適用を試みた。三次中性子相関法では、Feynman- α 法で求める二次中性子相関量 $Y(T)$ に加えて、中性子検出数 $C(T)$ の三次中心モーメント μ_3 の平均 $\langle C \rangle$ からの相対差異(三次相関量 $X(T) \equiv (\mu_3 - \langle C \rangle) / \langle C \rangle - 3Y(T)$)を求める。検出時間幅 T が十分大きい場合に、 X/Y^2 が「3」からどれだけずれているかを調べることで未臨界度の絶対値を求めることができる。三次中性子相関法の統計誤差推定については、ブートストラップ法によって得られた信頼区間の妥当性を検証するために、三次中性子相関法の実験を仮想的に模擬した中性子輸送モンテカルロシミュレーションにより、数値実験を通じて検証を実施した。本数値実験では、10000秒の炉雑音測定を模擬し、ブートストラップ法により三次中性子相関法で得られた X/Y^2 値の95%信頼区間を求めた。初期乱数を変化させて1000回繰り返すことで、ブートストラップ信頼区間内に $T \rightarrow \infty$ の極限における X/Y^2 の真値が入る被覆確率を求めた(図3)。図3から分かるように、検出時間幅 T が小さい場合には、 $Y(T), X(T)$ が十分飽和していないため被覆確率が95%より小さいが、即発中性子減衰定数 α に対して $\alpha T \gg 10$ となると被覆確率は約95%となり、ブートストラップ法による統計誤差推定の妥当性を確認した。

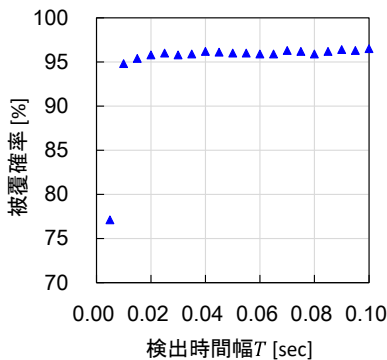


図3 ブートストラップ法による三次中性子相関法の95%信頼区間の被覆確率

(2) 未臨界度測定に対するベイズ理論に基づいたデータ同化手法の応用に関する検討

(2-1) 面積比法

まずは、未臨界度推定における時間発展が無い、より単純なケースとして、過去にKUCAにおいて実施した面積比法の実験結果を活用し、面積比法に対するデータ同化手法の適用可能性について事前検討を行った。ベイズ理論に基づいて、①面積比 AR の測定値と数値計算による予測結果の差異、および②面積比 AR と未臨界度 $-\rho$ の共分散の情報から、数値計算によって予測された未臨界度 $-\rho$ のバイアス・不確かさを低減するための式を導出した。結果として、申請者が過去に提案したランダムサンプリング法に基づいたバイアス因子法と同形の理論式に帰着することを確認した。

(2-2) 逆動特性法

以上の事前検討を踏まえ、一点炉動特性方程式に基づいたリアルタイム未臨界度測定手法に対するデータ同化手法の適用可能性について検討を実施した。核分裂連鎖反応が生じている体系において、体系内の中性子数 $n(t)$ の時間変化は、一点炉動特性方程式に基づいて簡便に記述することができる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{\text{eff}}}{\Lambda} n(t) + \sum_{m=1}^6 \lambda_m C_m(t) + Q(t) \quad (6)$$

$$\frac{dC_m}{dt} = \frac{\beta_m}{\Lambda} n(t) - \lambda_m C_m(t) \quad (7)$$

上式において、 $Q(t)$ は外部中性子源強度、 $C_m(t), \lambda_m, \beta_m$ は m 群の遅発中性子先行核数、崩壊定数、遅発中性子割合をそれぞれ表す。(6),(7)に基づくことで、 $n(t)$ の時間変化を測定することによって、中性子増倍体系の反応度 $\rho = (k_{\text{eff}} - 1) / k_{\text{eff}}$ を以下の式により逆推定することができる。

$$\rho(t) = \beta_{\text{eff}} + \Lambda \frac{d}{dt} \ln(n(t)) - \frac{\Lambda Q(t)}{n(t)} - \frac{\sum_{m=1}^6 \lambda_m \beta_m \int_{-\infty}^t n(t') e^{-\lambda_m(t-t')} dt'}{n(t)} \quad (8)$$

実機原子炉における臨界近傍の状態を考えた場合には、体系の寸法・組成等の情報を与えることで、(8)式で必要となる動特性パラメータ $\Lambda, \beta_{\text{eff}}, \beta_m$ を事前に数値計算で求めることができる。一方、1F燃料デブリ取出作業時を考えた場合、炉内状況が十分に解明できていないため、動特性パラメータ $\Lambda, \beta_{\text{eff}}$ の不確かさが大きい。また、H/U比の変化に伴って $\rho(t)$ が変化することとなるが、同時に動特性パラメータも変化する可能性がある。そこで本研究では、(6),(7)式に対して、データ同化手法の一種である拡張カルマンフィルタを適用し、中性子数の時系列データ $n(t)$ の測定結果を取り込むことで、一点炉動特性方程式中のパラメータ $\rho(t), \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ の不確かさを同時に低減させる方法について検討を実施した。本検討については、利用可能な実験データが無かったため、極めて深い未臨界体系($-\rho = 100$ [% $\Delta k/k$])に対して、H/U比が変化することでステップ状に正の反応度が添加されて $-\rho = 10$ [% $\Delta k/k$]まで未臨界が浅くなった状況を想定して、仮想的な数値実験(双子実験)を実施することとした。反応度添加前の $\rho(t), \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ の相対不確かさをそれぞれ約99%, 95%, 2%とし、0.1sec毎に $n(t)$ の観測値を取り入れた場合について、拡張カルマンフィルタ適用結果の一例を図4に示す。拡張カルマンフィルタを適用することで、反応度添加後の未臨界度推定結果の不確かさを約2%程度まで減少することができた。また、中性子生成時間 Λ についても、 $n(t)$ と Λ の相関が強いため、 $-\rho$ と同様に不確かさを低減することができる見込みを得た。一方、

β_{eff} については、 $n(t)$ との相関が弱いため、不確かさをほとんど低減できないことが分かった。今回の検討では、ステップ状に反応度変化が生じた後、定常状態で落ち着くケースのみについて検討を実施したが、パラメータ $\rho(t), \Lambda, \beta_{\text{eff}}$ が時間とともに変化するような、より複雑なケースについても検証を実施することが今後の検討課題として挙げられる。

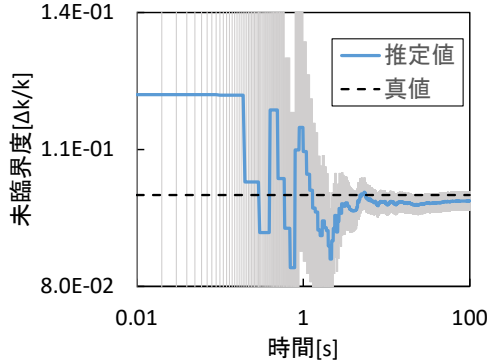


図 4 拡張カルマンフィルタによる未臨界度推定結果(誤差バーは推定結果の標準偏差 $\pm 1\sigma$)

(3) TRUST Eu:LiCAF を用いた測定実験

(3-1) TRUST Eu:LiCAF 検出器の試作

本研究では、 ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反応で生じたシンチレーション光の集光効率を高めるため、波長シフトファイバの周りに TRUST LiCAF をキリタンポ状に包み込んだ形状により、中性子検出器を試作した(図 5)。さらに TRUST Eu:LiCAF 周りをアルミ筒に入れ、波長シフトファイバの周りをウレタンチューブ内に挿入することで、遮光加工を施した。



図 5 試作した TRUST Eu:LiCAF 検出器

(3-2) n/γ 弁別実験

試作した検出器の性能について確認するために、名古屋大学コバルト 60 照射施設を利用して n/γ 弁別実験を実施した。まず照射室内の 4 地点(A, B, C, D)を選定し、電離箱を用いて ${}^{60}\text{Co}$ の γ 線による 1cm 周辺線量等量率 $H^*(10)$ を測定した。こうして測定された $H^*(10)$ を換算することで、各地点の光子束オーダーを A: 6×10^6 , B: 4×10^6 , C: 5×10^5 ,

D: 1×10^5 [photons/cm²/sec] と推定した。また、各地点において、 ${}^{252}\text{Cf}$ 中性子源と検出器の間をポリエチレンで減速した体系を構築し、Eu:LiCAF で検出された信号の波高分布を測定した。なお、TRUST Eu:LiCAF 検出器位置の中性子束オーダーについては、汎用粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を使用し、測定体系における中性子輸送計算を実施することにより、約 10^2 [neutrons/cm²/sec] と推定した。

一例として、A, D 地点における波高分布測定結果を図 6 に示す。図 6 において、黒線は ${}^{252}\text{Cf}$ 線源のみの結果、赤線は ${}^{60}\text{Co}$ 線源と ${}^{252}\text{Cf}$ 線源両方が存在する場合の結果をそれぞれ表している。100ch 付近に存在する波高ピークが中性子起因のカウントに起因した成分に対応しており、 γ 線の線量率増加に伴って中性子起因のピークが埋もれていくこと分かる。試作した検出器を用いた場合、光子束/中性子束 $< 10^4$ の条件であれば、中性子起因のピークを弁別することができ、例えば、中性子計数率の大小・時間変動により未臨界度を推定する手法(例: 中性子源増倍法、逆動特性法)を適用できると考えられる。

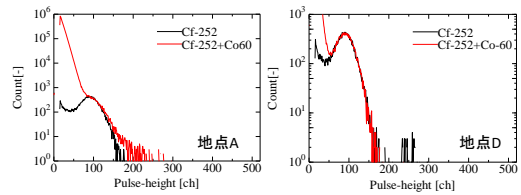


図 6 試作検出器による波高分布測定結果

(3-3) 炉雑音測定の予備実験

試作した検出器を用いて、まずは γ 線源が無い状況で、①Am-Be 中性子源、② ${}^{252}\text{Cf}$ 中性子源を用いて炉雑音測定実験を行い、Feynman- α 法により両者の Y 値を比較した。Am-Be 中性子源は、1 回の反応あたりに放出される中性子数が 1 個であるため、検出された中性子数が従う確率分布はポアソン分布に従い、二次相関量 Y 値はゼロとなることが期待される。一方、 ${}^{252}\text{Cf}$ は自発核分裂中性子源であり、1 回の核分裂反応あたりに複数個の中性子が同時に放出されることで、中性子検出数はポアソン分布からずれ、 Y 値はゼロより大きな値を取るようになる。本実験より、 ${}^{252}\text{Cf}$ を用いた場合には $Y > 0$ となることを確認し、試作した検出器により ${}^{252}\text{Cf}$ の自発核分裂を検知できることを確認した。

続いて、名古屋大学コバルト 60 照射施設において、 n/γ 弁別実験と同じ地点(A,B,C,D)において、 ${}^{60}\text{Co}$ による γ 線の影響がある状況下で ${}^{252}\text{Cf}$ を用いた炉雑音測定実験(測定時間 4000sec)を実施した(図 7)。結果として、 ${}^{60}\text{Co}$ による γ 線の線量率が増加するにつれて、 Y 値の統計誤差が大きくなり、 ${}^{252}\text{Cf}$ の自発核分裂の検知が困難となることが明らかとなった。この理由として、以下の 3 点が考えられる。

- ① Y 値の絶対値は中性子の検出効率に比例するが、中性子弁別のため波高値の閾値を高く設定することで、検出効率が低下し Y 値の絶対値が減少した。
- ② γ 線の線量率増加に伴って、検出器回路系の不感時間による数え落としの効果が大きくなり、これが原因で Y 値が負側にシフトした。
- ③ 測定された Y 値の絶対値が小さいため、統計誤差によるばらつきの影響が大きい。測定時間が 4000 [sec] の場合、通常のバンチング法を利用すると、検出時間幅 $T = 0.01$ [sec] に対応するデータ数は $N = 400000$ となる。この時、(5)式より Y 値の統計誤差 (1σ) は約 0.002 のオーダーと概算できる。

今回の予備実験結果を改善するためには、測定回路系の不感時間の影響を抑制しつつ中性子検出効率を向上できるように、試作した検出器を改良する必要がある。ただし、今回の予備実験では核燃料が存在しない、すなわち核分裂連鎖反応が生じていないため、 Y 値の絶対値のオーダーが約 0.001 と極めて小さい点については留意すべきである。 Y 値の絶対値は、未臨界度 $-\rho$ がゼロ(臨界)に近づくにつれて大きくなる。例えば、申請者が過去に KUCA で実施した ^3He 検出器を用いた炉雑音測定実験の場合、 $-\rho \approx 6$ [% $\Delta k/k$] の未臨界体系における Y 値の絶対値オーダーは 0.1 であり、実際の未臨界増倍体系を対象とした場合には今回の予備実験よりも統計的に検知しやすい状況であると考えられる。従って、試作した検出器を用いた炉雑音測定による未臨界度測定について更に検討するためには、KUCA 等の実際に核燃料を含んだ未臨界増倍体系において炉雑音測定を実施することが、今後の課題として挙げられる。

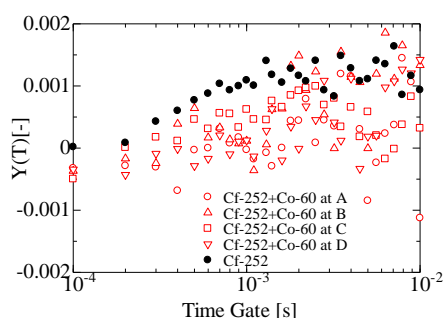


図 7 試作した検出器による二次相関量 $Y(T)$ 測定結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) T. Endo, A. Yamamoto, T. Yagi, C.H. Pyeon, “Statistical error estimation of the Feynman- α method using the bootstrap method,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **53**[9], pp. 1447-1453, DOI: 10.1080/00223131.2015.1113898 (2015).

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “検出中性子増倍率に基づいた面積比法の解釈,” 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015 年 9 月 9 日~11 日, 静岡大学静岡キャンパス.
- (2) 前納 健佑, 遠藤 知弘, 山本 章夫, “面積比法による未臨界度測定に対するデータ同化手法の適用,” 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015 年 9 月 9 日~11 日, 静岡大学静岡キャンパス.
- (3) T. Endo, A. Yamamoto, “Theoretical expression of area ratio method using detected-neutron multiplication factor,” American Nuclear Society 2015 winter meeting, Nov. 8~12, 2015, Marriott Wardman Park, Washington, DC.
- (4) K. Maeno, T. Endo, A. Yamamoto, “Application of data assimilation based on Bayesian theory to subcriticality measurements using area ratio method,” American Nuclear Society 2015 winter meeting, Nov. 8~12, 2015, Marriott Wardman Park, Washington, DC.
- (5) 遠藤 知弘, 山本 章夫, “Bootstrap 法を用いた三次中性子相関法による未臨界度測定,” 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016 年 3 月 26 日~28 日, 東北大学川内キャンパス.
- (6) 前納 健佑, 遠藤 知弘, 山本 章夫, “Eu:TRUSTLiCAF を用いた炉雑音実験に向けた予備実験,” 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016 年 9 月 7 日~9 日, 久留米シティプラザ.
- (7) T. Endo, A. Yamamoto, “Theoretical discussion of statistical error for variance-to-mean ratio,” International conference on Mathematics & Computational methods applied to nuclear science & engineering 2017 (M&C2017), Apr. 16-20, 2017, International Convention Center Jeju, Jeju, Korea.
- (8) K. Maeno, T. Endo, A. Yamamoto, “Evaluation of the n/γ discrimination performance of the neutron detector with Eu doped TRUST-LiCaAlF₆,” 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2017), Apr. 24-28, 2017, The Westin Miyako Kyoto, Kyoto, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
遠藤知弘 (ENDO Tomohiro)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50377876