

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420906

研究課題名(和文)核物質量を測定するためのパルス中性子を用いた新しい遅発中性子解析法の開発

研究課題名(英文)Development of delayed neutron analysis method using pulsed neutron for detection of illicit nuclear material amount

研究代表者

三澤 毅 (Misawa, Tsuyoshi)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：70219616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：隠匿された核物質を探知する核セキュリティ対策のための核物質の探知・定量方法として、パルス中性子を用いた遅発中性子雑音解析法を提案して実験と解析を実施した。研究用原子炉で実験を行う予定であったが、原子力規制庁による審査実施中のため実験を行うことができなかったため、天然ウランとCf中性子源を用いた体系で中性子雑音解析実験を実施し、非常に深い未臨界状態でも核物質量の増減に関する情報を取得できること、ガンマ線雑音解析による測定を併用することにより測定精度を向上させることができることが判った。また発生する中性子エネルギーを測定する新しい核物質の探知手法の有効性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：Delayed neutron noise analysis combined with pulsed neutron source was newly proposed and experiments and analysis were carried out for development of illicit nuclear material amount detection system. Since a research reactor in Kyoto University could not operate during this research period because of inspection by Nuclear Regulation Authority, neutron noise and gamma-ray noise analysis experiments based on variance to mean ratio method were carried out using subcritical system with natural uranium and Cf neutron source. Through those experiments, variation of nuclear material amount could be detected by neutron noise analysis, and moreover, combination of neutron and gamma-ray noise analysis was effective for increase detection efficiency for illicit hidden neutron material. Another experimental method by detection of neutron energy was also examined and it was found that this new method could be adopted for illicit nuclear material detection.

研究分野：原子力工学

キーワード：核物質 中性子 ガンマ線 核セキュリティ 雑音解析

1. 研究開始当初の背景

現在、世界各国で発生している様々なテロ行為を防止することは国際社会にとって重要な課題ある。中でも核物質を用いた核テロはその影響を考えると最も危険な行為であり、それを防ぐことは非常に重要であるといえる。スーツケースやコンテナ等に隠匿されたウランやプルトニウム等の核物質を探知するための手法として放射線を用いる様々な方法が提案されてきた。また、同様の研究として未臨界度測定に関する様々な研究が行われてきたが、この未臨界度測定法は核物質質量に関するパラメータを測定するものであり、隠匿された核物質質量を求めるためにも適用できると考えられる。これまでの未臨界度測定に関する研究は、臨界に比較的近い状態での測定が主であり、隠匿された核物質のような未臨界度が非常に深い状態での研究はほとんど行われていなかった。

そこで、これらの実験手法の測定精度をより向上させることが求められていたが、パルス状の中性子を発生させることができる加速器中性子源を用いて未臨界度測定を行うための新しい実験を通じ、遅発中性子に着目した全く新しい解析法により未臨界度を精度良く評価できる可能性があることが判った。

2. 研究の目的

本研究においては核セキュリティ対策の新しい核物質の探知・定量方法として、パルス中性子を用いた新しい測定解析手法として遅発中性子解析法を提案した。この手法では、パルス状の中性子を対象物に照射し、そこから放出される中性子を測定するもので、図1のようにパルス状中性子が発生してしばらくした後の遅発中性子のみが支配する時間領域に着目し、その時間領域のみの中性子雑音解析、または中性子源増倍法のための計数率測定を行うことで未臨界度を求めるという全く新しい発想に基づく測定法である。この遅発中性子解析法による実験と解析を行うことを通じて本解析法の有効性を明らかにすることを研究の目的とした。

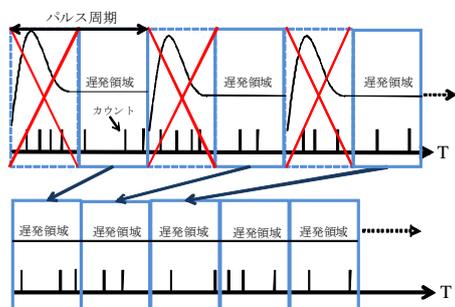


図1 遅発中性子解析法

3. 研究の方法

(1) 実験体系： 当初の計画では小型の研究

用原子炉である京都大学臨界実験装置 (KUCA) で高濃縮ウランとパルス中性子発生装置を用いて核物質探知の実験を行う予定であったが、原子力規制庁による研究用原子炉である KUCA の新規規制基準対応の審査が長引いてしまい、本研究期間中に KUCA を運転再開することができなかった。

そこで天然金属 U と Cf-252 中性子源を用いた未臨界体系での代替実験を実施した。天然ウラン金属板 (厚さ 1mm) とポリエチレン板 (厚さ約 6mm) のセルを繰り返した長さ約 28cm の燃料領域をもつ燃料体 (図 2) を使い、その燃料体を最大 48 体積み重ねて体系を構成して、燃料体の本数を変更することにより未臨界度を変化させた。なお、体系の実効増倍率 k_{eff} は連続エネルギーモンテカルロコードの MCNP6.1 を用いて評価し、例えば中性子計測実験では k_{eff} は 0.35~0.49 の範囲であった。

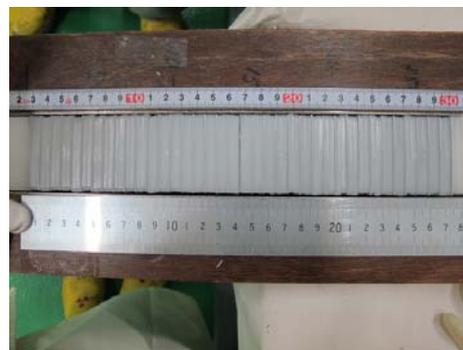


図2 天然ウランを含む燃料体

(2) 中性子雑音実験： 中性子計測のために B-10 塗布型比例計数管を体系の周囲に設置し、その検出データを時間分解能が 100nsec の時系列測定装置に取り込み、データ処理を行うことで雑音解析を実施した。雑音解析法としては平均対分散法 (Feynman- α 法)、Rossi- α 法の Type-I と Type-II の方法を採用した。両手法ともに原子炉の実験解析のために用いられる手法であるが、今回のような非常に深い未臨界体系での実験はほとんど行われていなかった。各測定法により得られたデータを遅発中性子および検出器の不感時間を考慮した理論式にフィッティングすることにより各体系における即発中性子減衰定数 (α 値) を求めることができる。実験ではデータの集積方法や検出器と中性子源の配置方法について MCNP6.1 によるシミュレーション計算を用いて適切な α 値を測定できるように検討を行った上で実施した。測定結果の例を図 3~4 に示す。実効増倍率の増加に応じて α 値が減少することを定量的に確認することができた。また、未臨界度が深い状態では Rossi- α 法に比べて平均対分散法のほうが測定精度が高いことが判った。

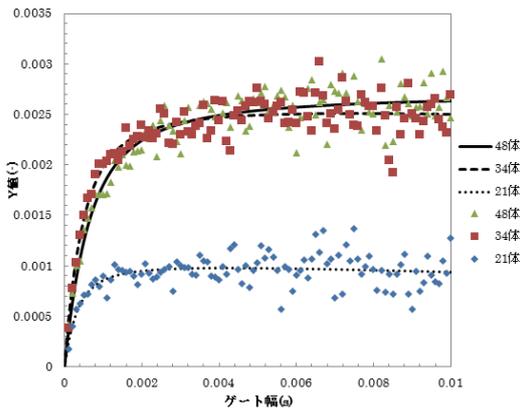


図3 平均対分散法の測定結果

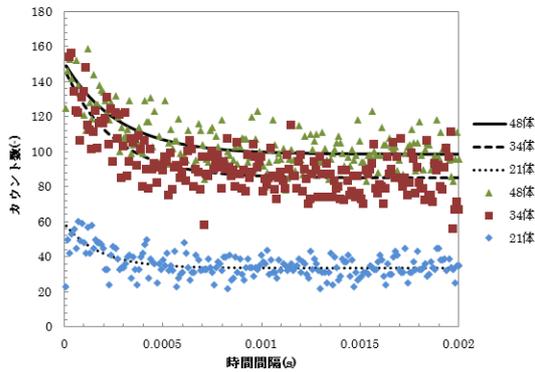


図4 Rossi- α 法 (Type1) の測定結果

(3) ガンマ線雑音実験： 中性子計測法による核物質探知の問題点として、対象物が水やポリエチレンのような水素含有物で覆われていた場合には核物質から放出された核分裂中性子が途中で遮蔽されてしまい、測定が難しいことが上げられる。そこで水素含有物での減衰が少ないガンマ線を測定することで核物質を探知する方法を併用することが有効であると考えられる。核物質が核分裂反応をした場合に発生される中性子は体系中の物質、例えば水素や鉄との捕獲反応、 (n, γ) 反応により 2.2MeV や 7.6MeV のある特定のエネルギーのガンマ線を放出するが、そのガンマ線を検出することは体系中に中性子検出器を設置して中性子を検出したことに相当すると考えられる。また、核分裂反応では同じく 10MeV 程度までの高エネルギーの即発ガンマ線を放出するので、これらのガンマ線を検出することで核物質を探知する実験を実施した。

実験体系は中性子雑音実験と同様に天然ウランとポリエチレンからなる未臨界体系で、ガンマ線の検出器としては NaI(Tl) などの幾つかの検出器の比較実験を行った上で、ガンマ線のエネルギー分解能は NaI(Tl) 等に比べて劣るものの高エネルギーのガンマ線に対する検出効率の高い BGO 検出器が適切であると判断した。BGO 検出器の波高分布か

ら、特定のガンマ線エネルギーによる信号成分の時系列データを測定し、そのデータを平均対分散法による雑音解析処理をすることにより体系の α 値を求めた。様々なエネルギー範囲での測定結果を比較した結果、水素からの捕獲ガンマ線のエネルギーを含む 2MeV ~ 4MeV のガンマ線のエネルギーの信号のみの時系列解析を行うことにより体系内の連鎖反応に関する情報を取得できることが判り、実効増倍率の増加に応じて α 値が減少することを定量的に確認することができた(図5)。

しかし、ガンマ線検出器は体系のバックグラウンドの影響により計数率が高く、検出器の不感時間の影響を強く受けるという問題があることがわかった。平均対分散法の理論式では不感時間の影響を考慮して作られているが、それは近似式であるため計数率が高い場合には精度が悪くなってしまふことが判った。そこで2本の BGO 検出器を用いて、検出器間の相互相関の平均対分散法による雑音解析を行う手法を用いることとした。この方法では核分裂連鎖反応の検出効率は下がるものの不感時間の影響を大幅に低減して α 値を測定することができることを示すことができた。さらに、相互相関の測定データに核分裂の即発ガンマ線に起因する補正項 D_{cov} を加える必要があることが判った。これまで未臨界度の浅い体系では無視できるとされていた補正項であるが、未臨界の深い体系の解析を行う際は考慮に入れる必要があることが初めて示された。

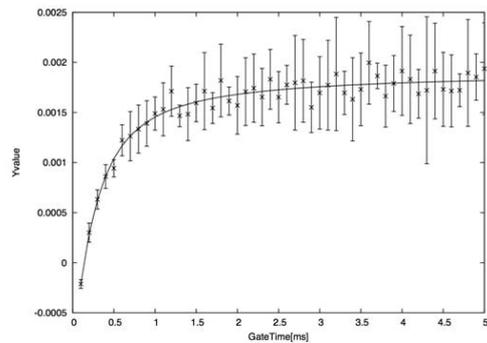


図5 ガンマ線平均対分散法の結果

(4) 遅発中性子雑音解析法の検討： 中性子とガンマ線による雑音解析法の有効性については未臨界体系での実験により確認することができたが、この手法を遅発中性子雑音解析法に用いることについて MCNP6.1 を用いてシミュレーション解析による検討を行った。中性子源としては DD 反応によるパルス中性子源を用い、中性子検出器としては直径1インチの He-3 検出器を用い、検出器や体系の周囲に設置する中性子反射体(ポリエチレンブロック)や遮蔽体(鉛)については MCNP による解析により最適な配置や量などを検

討した。

その結果、港湾で使用する大型のコンテナを対象に本手法を用いて核物質探知を行う場合には、He-3 検出器をコンテナの上部、側面、下部に各 3 ユニットずつ計 9 ユニット設置することで体系中央に置かれた 1kg の高濃縮ウランを数秒程度の測定で探知することができること、また測定が難しいコンテナの隅にウランが隠匿された場合であっても 5 分間程度の測定により探知することが可能であることが判った。また対象物が水分により遮蔽されていて中性子検出法による測定が難しい場合には、同じ位置に BGO 検出器を設置し、ガンマ線による遅発中性子雑音解析法を併用することで対象物を検知できることが判った。ただし、ガンマ線検出器を利用する場合には鉛遮蔽体により周囲からのガンマ線の遮蔽を十分に行う必要があるため、装置としては重量がかなり大きくなってしまいうという問題点があるため設置型の探知装置では採用ができるが、可搬型ではガンマ線検出器を併用することは難しいと考えられるため、今後の更なる検討が必要である。

(5) 中性子エネルギー測定法 : 当初計画していた雑音測定により核物質探知実験に加えて、新たに DD 反応によるパルス中性子発生装置と高濃縮 U を用いた体系での核物質探知実験を実施した。これは遅発中性子雑音解析法では解析上取り除いていた核分裂に起因する即発中性子成分を別の手法で測定することで探知性能の向上に生かすもので、即発中性子の中性子エネルギーを測定する新しい実験手法を採用することにより核物質の検知を行うというものである。DT 中性子源の場合には 14MeV という核分裂反応で発生する中性子より高いエネルギーの中性子が発生するが、DD 中性子源からは 2.45MeV という単色エネルギーの中性子が発生、その中性子を対象物に入射させて中性子検出器によりそれ以上のエネルギーの中性子を検出することができれば、核分裂反応が起こったことを確認することができるという手法である。

実験では DD 反応により 2.45MeV の中性子を発生させることができる慣性静電閉じ込め型の核融合装置 (IEC 装置) を使用した。この装置は小型軽量で DT 反応による中性子源のようにトリチウムという放射性物質を使用せず、しかも高強度の中性子を発生させることができるため核物質の探知システムに用いる中性子源として有望であると考えている。IEC 装置から発生する中性子を高濃縮ウラン含有の核分裂計数管を集めた体系に入射させて、そこから発生する核分裂中性子を有機液体シンチレーション検出器により測定した。この液体有機シンチレーション検出器は高エネルギーの中性子を測定に広く用いられており、あるエネルギー以上の積分中性子を測定するのであれば、簡単な波高分析装置を用いてリアルタイムでの測定を

行うことができるが、本実験では時系列データも同時に測定して前述のガンマ線の雑音解析も併用して解析を行うことを可能にするため、2次元波高時系列同時測定装置を用いてデータ解析を行った。実験で用いる検出器の配置、周囲に配置するポリエチレン反射体、鉛遮蔽体の配置については MCNP6.1 によるシミュレーション解析により、最も検出効率を高くすることができる体系を検討した。

測定結果の例を図 5 に示す。チャンネル数が約 500 に相当する波高が 2.45MeV の中性子であり、それより低いチャンネル(波高に相当)に大部分のカウントが現れているが、それ以上のチャンネルのカウントは 2.45MeV の中性子に起因するもの、すなわち核分裂で発生した中性子によりのものであり、本手法が今後の新しい核物質探知手法として利用できることが判った。

なお、有機液体シンチレーション検出器では計数が高いため、波高のパイルアップにより高エネルギー波高の領域に偽計数が観測されてしまうことが問題となったが、それについては波形のデジタル処理を採用する手法を検討し、その結果、個々の波形を細かくデータ処理することでパイルアップ現象を検知し、偽計数を減少させることができることが判った。なお、中性子のエネルギー測定と同時にガンマ線雑音解析によるデータ処理を実施したが、本実験で用いた高濃縮ウランの量が少なかったため、実験では有意な結果を得ることができなかったが、今後は BGO 検出器を用いた実験結果を生かして、核物質探知装置としての測定手法に加えて検討することが課題である。

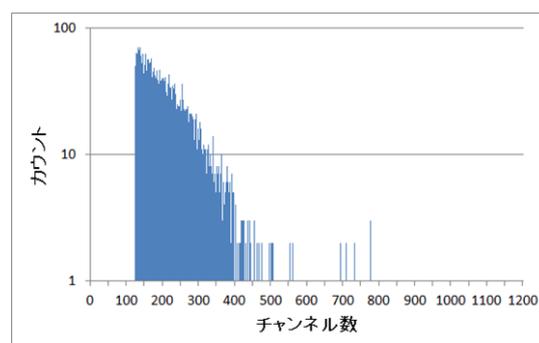


図 5 有機液体シンチによる測定結果

4. 研究成果

本研究で得られた成果をまとめる。

(1) 当初予定していた研究炉を用いた実験は研究炉の運転再開ができなかったため実施することができなかったが、天然ウラン金属と Cf 中性子源を用いた未臨界実験とシミュレーション計算により遅発中性子雑音解析法を中心とした核物質探知システム開発のための研究を行った。

(2) 中性子雑音解析法を用いることにより、核物質探知の対象となるような未臨界度の

非常に深い状態であっても核物質量の増減に関する情報を即発中性子減衰定数の測定を通じて取得できることが判った

(3) 中性子検出法では探知が難しい水素含有物質を含む体系についてはBGO検出器によるガンマ線の雑音解析法が有効であり、計数率が高い体系の場合には複数の検出器を用いた相互相関による雑音解析法を用いることで精度の高い測定を行うことができることが判った。ガンマ線は鉛などの比重の大きな物質により遮蔽されてしまうが、その場合は逆に中性子は遮蔽されにくいいため、核物質探知システムとしては中性子とガンマ線を併用して測定ことが望ましいと考えられる。

(4) シミュレーションによりコンテナを対象とした遅発中性子雑音解析法の核物質探知システムの性能評価を行った。その結果、体系の周囲に中性子検出器を配置することにより最大でも5分程度の短時間で隠匿された核物質を探知することができることが判った。また、設置型の検出システムの場合にはガンマ線検出器を併用して雑音解析法を行うことが有効であることが判った。

(5) DD 中性子源を用いた場合には中性子エネルギー測定法を用いることができ、有機液体シンチレーション検出器を用いて測定を行うことで核物質探知を行うことができることが判った。この手法を(2)(3)の遅発中性子雑音解析法と併用することで核分裂により発生する中性子を漏れなく測定することができ、核物質の探知効率を高めることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Y. Kitamura and T. Misawa, Ann. Nucl. Energy, 103, 2017, 470-479.
DOI:10.1016/j.anucene.2017.01.038

[学会発表] (計5件)

- ① T. Misawa, Y. Kitamura, Y. Takahashi and K. Masuda, 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Strasbourg, France, Oct. 29-Nov. 06 (2016).
- ② K. Masuda, T. Misawa, et al., CBRN Covergence 2015, Orkland, Florida, U. S. A., Oct. 27-30 (2015).
- ③ T. Misawa, Y. Yagi and C. H. Pyeon, PHYSOR2014, Kyoto, Japan, Sep. 28-Oct. 03 (2014).
- ④ 三澤毅、他、日本原子力学会 2017 年春の年会(2017).
- ⑤ 三澤毅、他、日本原子力学会 2016 年春の年会(2017).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三澤 毅 (Misawa, Tsuyoshi)
京都大学・原子炉実験所・教授
研究者番号： 70219616