

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07016

研究課題名(和文) 中性子線源を用いた新しいアクティブ中性子法に関する研究

研究課題名(英文) Research for a new active neutron method using a neutron source

研究代表者

米田 政夫 (Komeda, Masao)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職

研究者番号：90469817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：核セキュリティ対策において小型で可搬性を有する核物質検知装置の実現は重要である。本研究では、回転照射法と呼ぶ新しい測定手法を提案し、その研究開発に取り組んだ。本手法は測定対象物の近傍で中性子線源を高速回転(数千rpm)させ、その間に観測される中性子カウントの時間変化の形状から核物質検知を行うものである。シミュレーションによって本手法の基本性能の把握、実証実験用回転照射装置を製作した。本装置は横50、奥行40、高さ62(cm)とコンパクトである。京都大学複合原子力科学研究所において天然ウランを用いた本手法の原理実証実験を実施し、核物質の検知に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、核セキュリティ対策の強化は、世界的な潮流であるといえる。その対策においては、あらゆる場所に容易に設置して検査できる装置が重要であるが、現状では核テロの材料になりうるU-235等の核物質に対する有効な検知装置は存在しない。本研究手法は、そのような小型で可搬性を有する核物質検知装置の実用化に資するものであり、核セキュリティ対策強化という点において意義がある。また、本研究は新しい測定原理に基づく測定手法の確立という学術的意義も有する。

研究成果の概要(英文)：In the fields of nuclear security, it is significant to realize a nuclear material detection apparatus which is compact and portable. We invented a rotation irradiation method, in which a neutron source is rotated at a high speed (thousands of rpm) nearby the measurement target, and carried out the research and development of the method. Nuclear material can be detected by confirming the deformation of the time-distribution of neutron counts. We evaluated the fundamental performance of the method by simulation, and produced the rotation irradiation apparatus for the demonstration experiment. The apparatus is compact; 50 cm in width, 40 cm in depth, and 62 cm in height. We succeeded to detect nuclear material in demonstration experiments with natural uranium at KURNS.

研究分野：中性子計測

キーワード：核物質検知 核セキュリティ アクティブ中性子法 計量管理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今日の世界的なテロ脅威の高まりを受け、甚大な被害をもたらす核物質を用いた大規模テロが実際に起こり得るものとして深く憂慮されており、港湾等の重要拠点への核物質検知装置の設置は核セキュリティ強化において極めて重要である。一般に使用される検知機器は、検査対象物から放出される放射線を測定するパッシブ法によるものである。この手法は、比放射能の高い放射性物質の検知においては一定の効果があると考えられるが、比放射能の低い核物質に対しては有効とは言えず、特に代表的な核物質である U-235 に対しては遮蔽が僅かでも検出できない。比放射能が低い核物質に対しても検出可能な Differential Die-Away (DDA) 法と呼ばれる手法があるが、これは非常に高価な DT 中性子源を用いており、装置が非常に重厚で RI の設置許可申請も必要であることから、様々な場所に配置する必要がある核セキュリティ用途には適さない。つまり、これまでは核セキュリティ対策に適した核物質検知手法が無く、新たな検知手法の研究開発が喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

核セキュリティ対策に適した核物質検知装置を開発するため、中性子線源を用いた新たな核物質検知手法に関する研究開発を実施した。中性子を用いた核物質測定では核分裂中性子を測定することで核物質検知を行うが、その際、照射する中性子と核分裂中性子を区別して測定する必要がある。その手法として、中性子線源を測定対象物の近傍で高速で回転させ、その間に観測される中性子カウントの時間変化の形状から核分裂中性子を測定(すなわち核物質を検知)する手法を考案した。本研究の目的は以下の3つである。(1) 新たな手法についてシミュレーションによって基本性能の把握を行う。(2) 汎用的な部品(モーター等)を用いた実証装置を設計・製作する。(3) 実際に核物質を用いた実験によって本研究手法の有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションによる解析

本研究手法の測定体系は、中性子線源回転装置、測定対象物及び中性子検出装置で構成される。中性子検出装置は、比例計数管の周りをポリエチレンで囲み、更にその外側にカドミウム等の中性子吸収材を取付けているものであり、主に熱外中性子を測定するものである。対象物近傍で中性子線源を高速回転させ、線源が近付く時と遠ざかる時の中性子カウントの時間推移を比較する。測定イメージを図1に示す。核物質を含まない場合、中性子線源の回転速度に関係なく、中性子カウントの時間形状はピーク前後でほぼ対称となる。一方、核物質を含む場合、回転速度が遅い場合は、核物質の有無にかかわらず中心点前後で対象となるが、回転速度が速くなるとピーク後の値が中心点前よりも大きくなる。シミュレーションでは、実験とは異なり線源中性子と核分裂中性子を直接求めることが可能であり、容易に本手法の基本性能を得る事ができる。これにより、実証実験で用いる回転照射装置で必要となる性能(回転半径及び回転速度)を明らかにする。

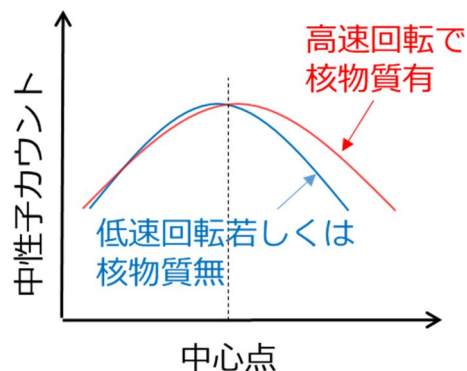


図1 測定データのイメージ

(2) 実証装置の設計・製作

本研究手法では、中性子線源を高速(数千rpm)で安定的に回転させることが非常に重要となる。そこで、中性子線源の回転方法は中性子の透過性が高いアルミニウム製円盤の外側に線源を取り付け、円盤を回転させることで線源を回転させる方法を用いた。円盤の直径は、後述するシミュレーションの結果をもとに32cmとした。本装置は高速回転体を扱うため、危険回転数が回転速度に一致しないように円盤やシャフトなどの構造を考慮して設計を行った。また、仮に円盤やボルトが飛散しても周りに被害を及ぼさない構造を有することを計算によって求めた。円盤は、下部円盤に上部円盤をはめ込む構造になっており、下部円盤の窪みに中性子線源を取り付け、上部円盤が蓋となる。円盤の回転に異常が生じた場合には自動で回転が停止する機能を有する。モーターは出

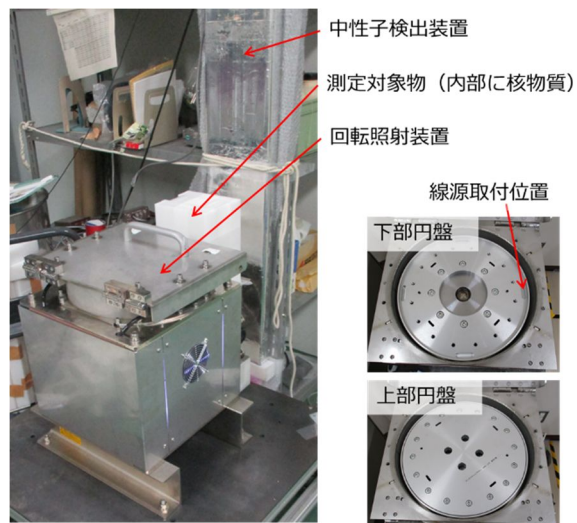


図2 回転照射装置及び実験様子

力 0.75kW のサーボモーターを用い、最高回転速度は 6000rpm である。製作した回転照射装置及び次の(3)で示す実験の様子を図 2 に示す。

(3) 実証実験

実験は京都大学複合原子力科学研究所の KUCA にて実施した。中性子線源として 5MBq の Cf-252 を、核物質として U-235 を 85g 含む天然ウランを用いた。実験では最初に、測定対象物を設置しない状態で測定を行い、高速回転時の照射の安定性や回転トリガーと同期したデータ収集等の確認を行う。核物質を用いた実験では、回転速度を変えた測定を行い、高速回転時に中心点以降の値が増加することを確認する。

4. 研究成果

(1) シミュレーション結果

シミュレーション体系を図 3 に、MVP コードを用いたシミュレーション結果を図 4 (回転速度 1000rpm) と図 5 (回転速度 5000rpm) に示す。シミュレーションは、中性子線源を A 点から B 点(角度は 180° に該当)に移動させた時の中性子カウント値の時間推移を求めた。ここで中心位置とは、中性子線源が対象物に最も近付いた時間と定義し、1000rpm では 15000 μ 秒、5000rpm では 3000 μ 秒となる。核物質有りの場合に加えて、核物質無しの場合(核物質を空気に置換)した場合、核物質有りのカウント値における核分裂中性子の値についても表示した。図 4 の 1000rpm の結果では、核物質が存在しても中心位置前後の値はほぼ同じであることが分かる。これは紫色で示した核分裂中性子のカウント値が中心位置前後でほぼ同じであるためである。つまり、核物質が存在する場合は核分裂中性子が発生するが、回転速度が遅いと中性子線源の中性子と同じタイミングでカウントされることを示している。ところで、核物質有りの結果(赤線)は核物質無しの結果(黒線)より明らかに値が大きくなっているが、注意すべきはこれらの積分値から核物質の有無を判断することはできない。グラフの高さ(若しくは積分値)は、測定対象物の物質組成に大きく依存し、例えば核物質を含まなくても対象物組成によって中性子透過量(つまりグラフの高さ)は大きく変動するためである。

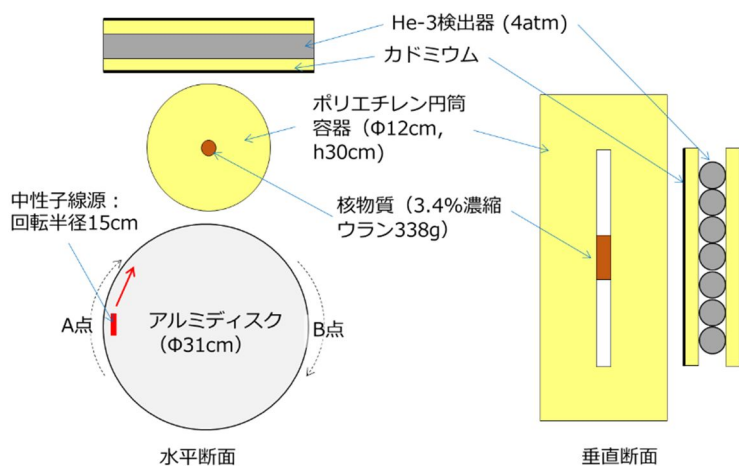


図 3 シミュレーション体系

図 4 の 1000rpm の結果では、核物質が存在しても中心位置前後の値はほぼ同じであることが分かる。これは紫色で示した核分裂中性子のカウント値が中心位置前後でほぼ同じであるためである。つまり、核物質が存在する場合は核分裂中性子が発生するが、回転速度が遅いと中性子線源の中性子と同じタイミングでカウントされることを示している。ところで、核物質有りの結果(赤線)は核物質無しの結果(黒線)より明らかに値が大きくなっているが、注意すべきはこれらの積分値から核物質の有無を判断することはできない。グラフの高さ(若しくは積分値)は、測定対象物の物質組成に大きく依存し、例えば核物質を含まなくても対象物組成によって中性子透過量(つまりグラフの高さ)は大きく変動するためである。

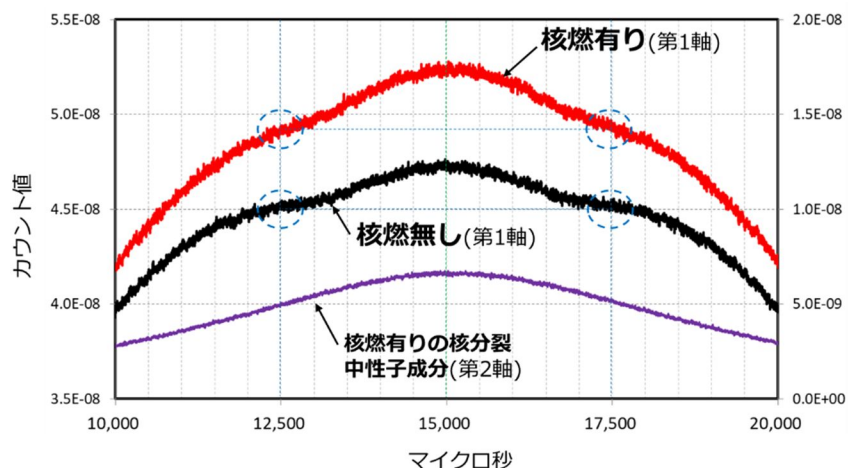


図 4 シミュレーション結果 (回転速度 1000rpm)

図 5 に示す 5000rpm の結果では、核物質を含まない場合は低速(1000rpm)と同様に中心位置前後でほぼ同じであるが、核燃有りの場合は中心位置より後の結果は前よりも明らかに高くなっている。これは核分裂中性子のピーク位置が中心位置よりも後に遅れているためであることが分かる。このピーク位置が遅れる理由は、モデレータにおける線源中性子の減速時間に比べて、線源の移動速度の影響が強くなるためである。この結果から本手法により核物質を検知するこ

とが可能であることが示された。より直感的に回転効果を理解するために、図6にPHITSコードを使用して求めた核分裂中性子分布を示す。これらは1000rpmと5000rpmで回転させている線源が赤星で示した場所にいる瞬間の核分裂中性子分布を表している。1000rpmでは両位置でほとんど同じであるが、5000rpmでは後半(一番右の図)の中性子数が少し多くなっていることが分かる。これは中性子線源を高速回転させることによって赤星位置以前で発生した核分裂中性子がより多く残存しているためである。

5000rpm時の中心位置前後の積分比(後者/前者)は1.017(±0.006)となる。最高回転速度を3000rpmにした場合、積分比は1.010(±0.006)となり、5000rpmより低い値となるが、核物質を十分に検知可能である。これは、最高回転速度が高いほど検知性能が高いということの意味する。つまり、3000rpmで検知できれば5000rpmでも検知できるということであるため、実証実験では3000rpmを用いる事とした。

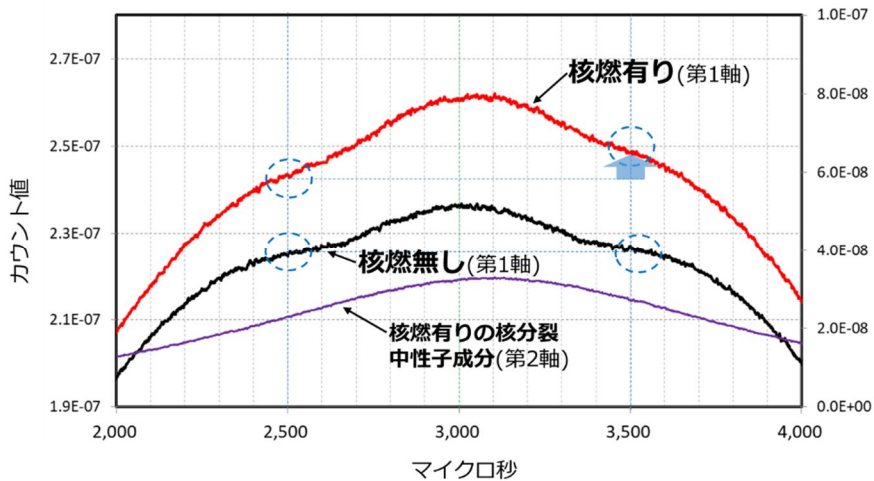


図5 シミュレーション結果(回転速度 5000rpm)

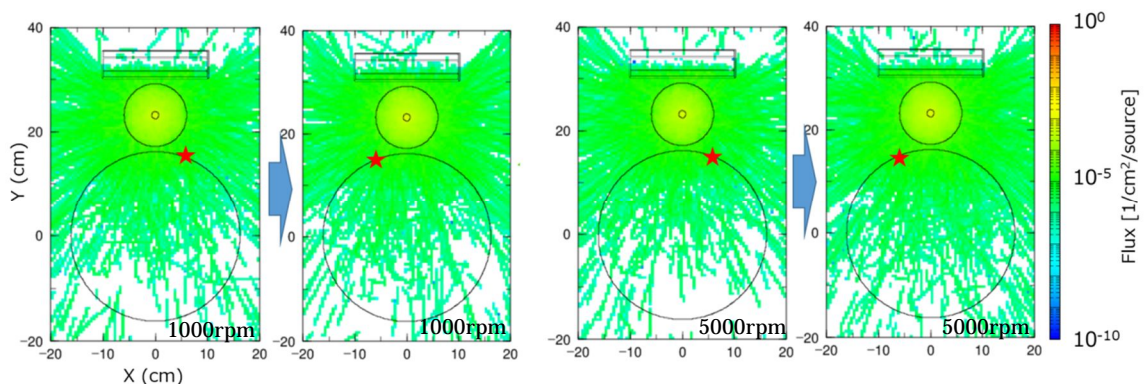


図6 核分裂中性子分布(1000rpm、5000rpm)のシミュレーション結果、赤星が線源位置で、線源は反時計回りに回転。

(2) 実証装置

完成した装置に約12gの模擬線源を取り付け、3000rpmで長時間(合計数時間)の動作試験を行った。回転時及び加速・減速はスムーズであり、ソフトウェアおよびハードウェアともに動作に問題がないことを確認した。停止状態から3000rpmに到達する時間は約3分であり、3000rpmから完全に停止するまでの時間は約2分半となる。本装置は実証試験用に安全マージンを大きめにとってあるにも関わらず、迅速な動作が可能となっている。なお、実用装置ではさらに時間を短縮することも可能である。

(3) 実証実験結果

測定対象物がない体系の実験結果(3000rpm)を図7に示す。シミュレーションの中心位置(3000rpm時は5000μ秒)と実験の横軸が異なるが、これは両者の回転トリガーの取得位置が異なるためである。中性子線源を用いた動作確認試験により、高速回転時でも問題なく回転トリガーの取得及び中性子カウント測定が実施できることを確認した。

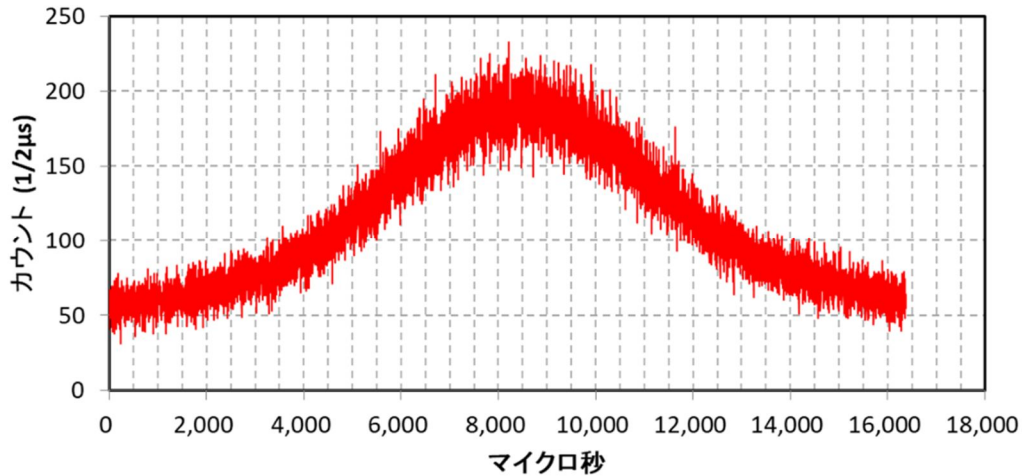


図7 測定対象物が無い場合の実験結果（回転速度 3000rpm, 15分計測）

核物質を用いた実験結果(3000rpm)を図8に示す。中心位置前後の6500、10000μ秒辺りに見られる小さな窪みは、中性子線源、モデレータ及び検出器の位置関係によるものである。3000rpm時の中心位置前後の積分比（後者/前者）は、1.023（±0.004）となる。一方、1000rpm時の積分比は、1.003（±0.004）であった。

1000rpmと3000rpmの積分比は不確かさを超えて有意な差があり、本研究手法を用いた核物質検知の実証に成功した。

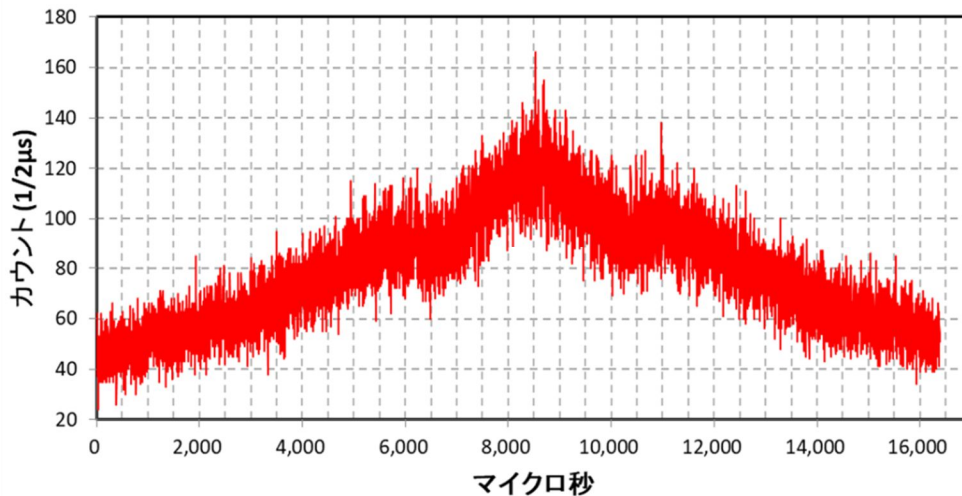


図8 核物質を含む場合の実験結果（回転速度 3000rpm, 15分計測）

核セキュリティ対策においては、新しい核物質検知装置の開発が喫緊の課題とされている。DT中性子源を用いる従来手法に比べて、本研究手法は低コストで小型であるという特長を有する。本研究によって新しい核物質検知手法を実証することができ、核セキュリティ分野において期待されている核物質に有効な検知装置開発に資することができた。本装置は人力で運搬することが可能であり容易に移動・設置が可能であることから、様々な場所での利用が期待される。また、今回の装置は実証実験に特化したものであるため、最高回転速度を抑えたものであった。汎用品を用いて回転速度を6000rpmまで向上させることは容易であり、それによって大幅な検知性能の向上も期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Komeda Masao, Toh Yosuke	4. 巻 135
2. 論文標題 Conceptual study on a novel method for detecting nuclear material using a neutron source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 106993 ~ 106993
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2019.106993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 米田 政夫、藤 暢輔
2. 発表標題 中性子線源を用いた新たなアクティブ中性子法に関する概念研究
3. 学会等名 第39回日本核物質管理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田 政夫、藤 暢輔、大図 章
2. 発表標題 中性子線源を用いた可搬型アクティブ中性子法装置に関する研究開発
3. 学会等名 日本原子力学会2019 年秋の大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 核物質検知装置	発明者 米田 政夫、藤 暢輔	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-181563	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----