

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：82505

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15213

研究課題名（和文）核物質検知のための可搬型チェレンコフ中性子検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a portable Cherenkov neutron detector for nuclear material detection

研究代表者

田辺 鴻典（Tanabe, Kosuke）

科学警察研究所・法科学第二部・研究員

研究者番号：60822070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、回転照射法用の中性子検出器として、新たに水チェレンコフ中性子検出器（WCND：Water Cherenkov Neutron Detector）の開発を行うことで、非常に低コストかつ可搬性のある核物質非破壊測定システムを実現することである。最大のボトルネックとなるガンマ線との弁別には、波高弁別法を採用した。結果として、主要なバックグラウンドとなる2.223 MeVガンマ線を十分に抑制した上で、従来のHe-3検出器に対して、高感度（4倍以上）かつ低コスト（1/15以下）な中性子検出を実証した。回転照射装置と組み合わせた実験により、グラム量の核物質の現場検知も実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで中性子検出器の候補にすらなり得なかった水チェレンコフ中性子検出器（WCND）について、実測定環境下において、欠点であったガンマ線を抑制した上での低コストかつ高感度な中性子検出を実現し、回転照射法への適用により、隠匿された核物質の現場検知という核セキュリティ上の喫緊課題に対する技術的解決策を実証しており、工学及び工業上貢献するところが大きい。本研究で実現した核物質検知装置の導入により、実効性の高い水際対策が可能になるとともに、WCNDは本用途に限らず、可搬性のある低コストかつ高感度な中性子検出器として広範囲への活用が今後期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is the development of a water Cherenkov neutron detector (WCND) as a novel neutron detector for the Cf-252 rotation method to realize an extremely low-cost and transportable non-destructive assay system for nuclear materials. A pulse height discrimination method was adopted to discriminate neutrons from gamma-rays, which is the biggest bottleneck for neutron detection of WCND. As a result, high sensitivity (more than 4 times) and low-cost (less than 1/15) neutron detection was demonstrated compared to the conventional He-3 detector with sufficient suppression of 2.223 MeV gamma-rays. In addition, the on-situ detection of gram quantities of nuclear material was also demonstrated through experiments in combination with a Cf-252 rotation device.

研究分野：原子力工学

キーワード：核セキュリティ チェレンコフ検出器 核物質 中性子 放射線計測

1. 研究開始当初の背景

放射性物質又は核物質に関連する犯罪行為や核・放射線テロ行為といった核セキュリティ事案の脅威が国際的な懸念事項となっており、中でも、不法に持ち込まれる核物質の検知は喫緊の課題である。特に核物質が容器等に隠匿されている場合の現場検知は不可能な状況にあり、これらの非破壊測定 (NDA) 技術の開発が強く望まれている。

代表的な核物質 NDA 手法の1つであるアクティブ中性子法は、測定対象物に外部から中性子を照射し、核分裂反応の結果放出される中性子を測定することで核物質を検知する。本手法は高性能である一方で、従来装置は非常に高価かつ重厚・大型な上、加速器中性子源を必要とすることから、核燃料施設のような大型施設に使用場所が限定されており、社会普及に至っていない。回転照射法は、可搬性に優れた革新的なアクティブ中性子法である[1]。本手法による核物質検知装置は、中性子線源を回転させる回転照射装置と中性子検出器で構成される。従来実験では、低コストで可搬性のある回転照射装置を用いたが、中性子検出器として高価な ^3He 検出器を多数使用したため、低コスト化の課題が残った [2]。また、 ^3He 検出器の高速中性子感度の低さも実用化に向けた課題であった。 ^3He 検出器の数を増加させることは可搬性やコストの面から現実的な解決策とはならず、回転照射法の実用化には低コストかつ高い高速中性子感度を有する新たな中性子検出器の開発が急務であった。 ^{10}B 含有検出器は廉価であるが検出感度が低く、 ^6Li 含有検出器はガンマ線感度の観点から結晶の大型化が困難であり、実現可能な検出感度に上限がある。有機シンチレータは、弾性散乱の断面積の低さ故、高い検出感度が望めない。従って、既存の中性子検出器では上記課題の克服は不可能であった。

2. 研究の目的

本研究では、中性子検出用の物質として水に着目し、可搬性のある低コストな全く新しい中性子検出器として、水チェレンコフ中性子検出器(WCND: Water Cherenkov Neutron Detector)の開発を行うことを目的とした。WCND は原理的にガンマ線にも感度を有するため、ガンマ線の混在が避けられないアクティブ中性子法に適用する際には、中性子とガンマ線の弁別手法の確立が必須であった。本研究では波高弁別法を採用し、回転照射法に適した WCND を新たに開発することで、非常に低コストかつ可搬性のある核物質 NDA システムの実現を目指した。

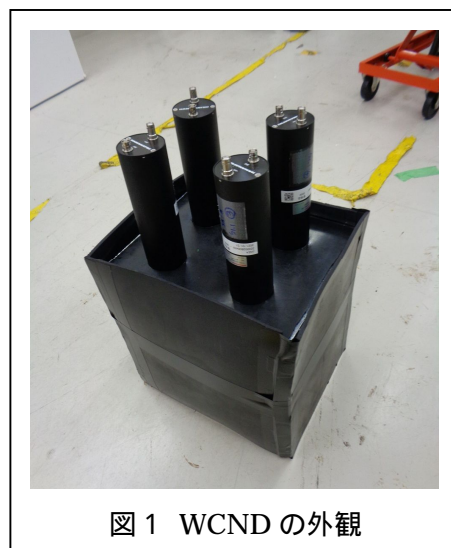
3. 研究の方法

WCND は Gd 溶解水を封入したアクリル容器及び光電子増倍管 (PMT) で構成される。はじめに、光学光子シミュレーション [3]を用いて、輻射体サイズ、境界条件、PMT の数や接続方法、粒子の入射条件毎の検出光電子数、中性子検出効率及びガンマ線との弁別能を評価し、主要なバックグラウンドとなる $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ 反応由来の 2.223 MeV ガンマ線と中性子の波高値による弁別可能性を検証した。また、PHITS シミュレーション [4]を用いて、核物質検知性能が最大となる回転照射法に最適な検出器デザインを決定した。続いて、プロトタイプ検出器を製作し、性能比較実験により、検出器の各構成要素 (Gd 濃度、反射材、PMT、波長変換剤) を選定した。最終的に、上記の検討結果を踏まえ実機を製作し、 ^{252}Cf 線源と ^{60}Co 線源を用いた性能評価実験を実施し、 ^3He 検出器との性能比較を行った。さらに、京都大学複合原子力科学研究所 (KURNS) において、開発した WCND を回転照射装置と組み合わせ、核物質検知の実証実験を実施した。

4. 研究成果

図1に開発した WCND の外観を示す。塩化ガドリニウム ($\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, JUNSEI 製) を 0.50wt% 溶解させた純水で充たされた 5 mm 厚のホワイトアクリル容器で構成されている。容器内面には反射材 (0.75 mm 厚、PMR10P1, THORLABS 社製) が1層張り付けられており、容器の上部には、光学グリス (TSK5353) を介して PMT (Hamamatsu H11284-100) が4個接続されている。水中には波長変換剤 (Amino-G-salt) を 30 mg/L 溶解させており、水面と PMT の間には 2 mm 厚のアクリル窓が差し込まれている。また、熱中性子を防ぐために、アクリル容器の外面は 5 mm 厚のポロンシートで覆われている。検出器全体は遮光のためのブラックシートで2重に覆われており、有感体積は $30^{\text{W}} \times 30^{\text{H}} \times 25^{\text{T}}$ cm であった。

図2は、 ^{252}Cf 線源 (8.8 kBq) 及び ^{60}Co 線源 (1.7 kBq) を WCND の側面表面中心に設置した際の波高分布スペクトルをそれぞれ示している。測定時間は各 15 分間であり、環境バックグラウンド差引後のスペクトルであ



る。ガンマ線に対して中性子起因の発光量が多く、波高値により明確に中性子とガンマ線を弁別できることが示された。 ^{60}Co 線源からのサムガンマ線 (2.505 MeV) を抑制できる値 (2150ch) に閾値を設定した際の中性子検出効率は $10.8 \pm 0.1\%$ であった[5]。誤差は統計誤差である。先行研究で使用した ^3He 検出器バンクの中性子検出効率は $2.6 \pm 0.2\%$ であったことから、結果として、 ^3He 検出器バンクの約 1/15 以下の製作コストで、4 倍以上の中性子検出効率を実現した。

京都大学の KURNS において、開発した WCND を回転照射装置と組み合わせ、核物質検知の実証実験を実施した。

図 3 (a) に実験のセットアップを示す。回転照射装置の隣にポリエチレン板 (モデレータ) で囲んだ核物質を配置し、その隣に WCND を設置した。測定対象物は天然ウラン (図 3 (b)、 $50 \times 50 \times 158$ mm、 ^{235}U : 56.7 g 含有) であり、中性子線源 (^{252}Cf : 2.9 MBq) 1 個が回転円盤に設置された。核物質有り及び無しの各条件について、回転数 4000 及び 600 rpm とした場合の回転と同期した中性子カウントの時間スペクトルをそれぞれ取得した。各測定時間は 10 分間であった。図 3 (c) は、中性子カウントの時間スペクトル (4000 rpm、核物質有りの条件) の測定結果を示している。中心時間 ($t=6375 \mu\text{s}$) 前後のカウント数の積分値の比 (後半/前半) を導出したところ、核物質有りの場合のみ、比が統計的に有意に増加した。結果として、 ^3He 検出器バンクを用いた先行研究において約 60 分の測定時間を要した対象試料について、約 15 分の測定 (^{252}Cf 3.7 MBq 使用時) での検知を実証した。さらに、本 NDA 装置 (回転照射装置 + WCND) を用いて、鉛で隠匿された高濃縮ウラン試料検知の実証実験も実施した。高濃縮ウラン試料を鉛板で囲い、可搬型の高純度ゲルマニウム半導体検出器によるパッシブ測定では検知が困難であることを確認した上で、同試料に対して回転照射法を適用した。結果として、WCND を用いた回転照射法により、鉛で隠匿された高濃縮ウラン試料の現場検知も実証した。結論として、本研究により、現場運用可能な可搬性、コスト及び性能を満した核物質 NDA 装置が実現し、核セキュリティ強化に大いに貢献する成果が得られた。

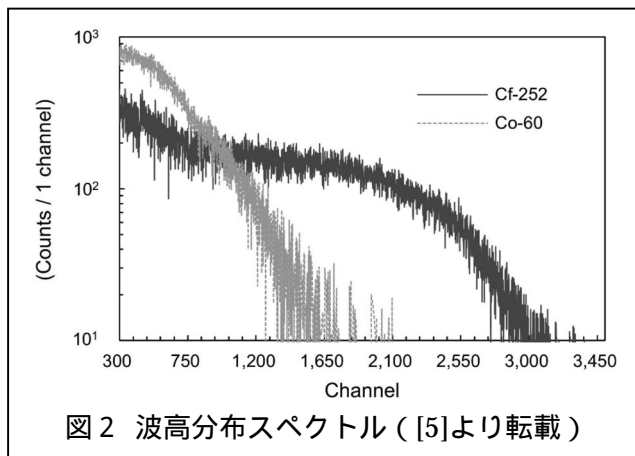


図 2 波高分布スペクトル ([5]より転載)

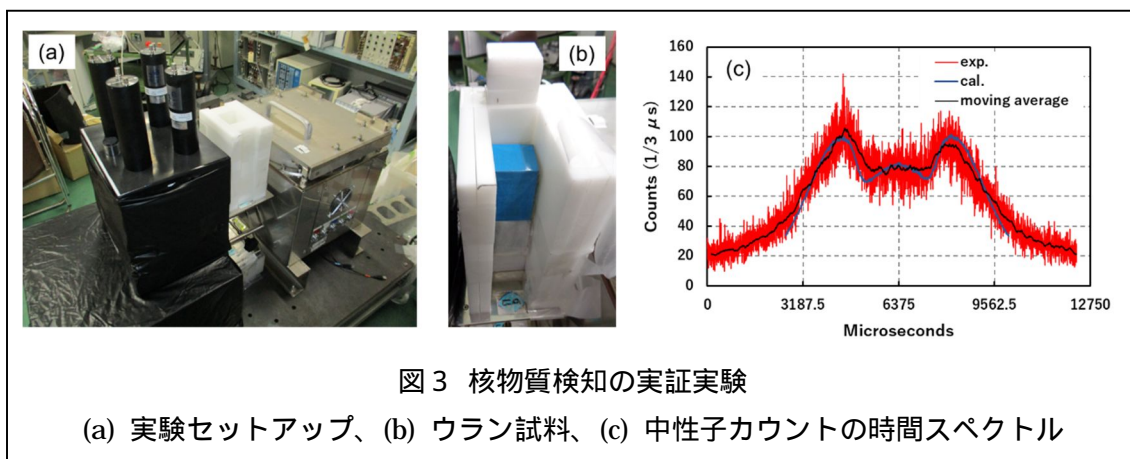


図 3 核物質検知の実証実験

(a) 実験セットアップ、(b) ウラン試料、(c) 中性子カウントの時間スペクトル

- [1] M. Komeda and Y. Toh, “Conceptual study on a novel method for detecting nuclear material using a neutron source”, *Annals of Nuclear Energy* 135, 106993 (2020).
- [2] M. Komeda, Y. Toh, K. Tanabe et al., “First demonstration experiment of the neutron rotation method for detecting nuclear material”, *Annals of Nuclear Energy* 159, 108300 (2021).
- [3] S. Agostinelli et al., “Geant4—a simulation toolkit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506, 250–303 (2003).
- [4] T. Sato et al., “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, *Journal of Nuclear Science and Technology* 55, 684–690 (2018).
- [5] K. Tanabe et al., “Development of a water Cherenkov neutron detector for the active rotation method and demonstration of nuclear material detection”, *Journal of Nuclear Science and Technology* 60, 769–781 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Tanabe Kosuke, Komeda Masao, Toh Yosuke, Kitamura Yasunori, Misawa Tsuyoshi, Tsuchiya Ken'ichi, Akiba Norimitsu, Kakuda Hidetoshi, Shibasaki Kazunari, Sagara Hiroshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of a water Cherenkov neutron detector for the active rotation method and demonstration of nuclear material detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 769 ~ 781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2022.2143449	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 -

1. 著者名 Tanabe Kosuke, Sagara Hiroshi	4. 巻 170
2. 論文標題 A novel method of neptunium-237 detection in its separated form and advanced fuel based on photonuclear reactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 108990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.anucene.2022.108990	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12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Tanabe, M. Komeda, Y. Toh, H. Sagara
2. 発表標題 Characterization of water Cherenkov neutron detector with high efficiency, availability and affordability for nuclear security
3. 学会等名 International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (IZES) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田辺鴻典, 米田政夫, 藤暢輔, 土屋兼一, 秋葉教充, 角田英俊
2. 発表標題 隠蔽された核物質の現場検知資機材の開発
3. 学会等名 日本法科学技術学会第28回学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺鴻典, 米田政夫, 藤暢輔, 土屋兼一, 秋葉教充, 角田英俊, 相楽洋
2. 発表標題 可搬型アクティブ中性子法装置による核物質検知に関する研究
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K.Tanabe, H. Sagara
2. 発表標題 Study for a new method to detect neptunium-237 based on photonuclear reactions
3. 学会等名 The 63th Annual Meeting of Institute of Nuclear Material Management (INMM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺鴻典, 相楽洋
2. 発表標題 光核反応を用いたAmの検出手法に関する研究
3. 学会等名 日本核物質管理学会 (INMMJ) 第43回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺鴻典, 米田政夫, 藤暢輔, 相楽洋
2. 発表標題 水チェレンコフ検出器を用いた可搬型アクティブ中性子法装置の開発
3. 学会等名 第58回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Tanabe, M. Komeda, Y. Toh, Y. Kitamura, T. Misawa, H. Sagara
2. 発表標題 Verification of the applicability of water Cherenkov detector to active neutron method and development of a prototype detector
3. 学会等名 IEEE NSS MIC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺鴻典, 相楽洋
2. 発表標題 光核反応を用いたNp-237の検出手法の提案
3. 学会等名 日本核物質管理学会 (INMMJ) 第42回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺鴻典, 米田政夫, 藤暢輔, 土屋兼一, 秋葉教充, 角田英俊, 柴崎一成
2. 発表標題 可搬型核物質検知装置用の低コスト中性子検出器に関する基礎研究
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Tanabe, H. Sagara
2. 発表標題 Feasibility study on detection and verification of minor actinides by NDA technique based on photonuclear reactions
3. 学会等名 IEEE NSS MIC RTSD 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田辺鴻典
2. 発表標題 可搬型水チェレンコフ中性子検出器の開発
3. 学会等名 ニュートロン次世代システム技術研究組合 令和5年度第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田辺鴻典
2. 発表標題 放射性物質又は核物質の現場検知技術の開発
3. 学会等名 艦磁研 秋季講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 放射線検出装置	発明者 田辺鴻典, 土屋兼一, 米田政夫, 藤 暢輔	権利者 科学警察研究所 長, 日本原子力 研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、2024-37897	出願年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------