

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	可搬型水チェレンコフ中性子検出器の開発及び核セキュリティへの適用可能性
Title(English)	Development of a portable water Cherenkov neutron detector and its applicability to nuclear security
著者(和文)	田辺鴻典
Author(English)	Kosuke Tanabe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12580号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:相樂 洋,小原 徹,林崎 規託,片淵 竜也,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12580号, Conferred date:2023/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

本論文は「可搬型水チェレンコフ中性子検出器の開発及び核セキュリティへの適用可能性」と題し7章から構成されている。

第1章「序論」では、核セキュリティの強化が世界規模で求められている研究背景を述べ、最も挑戦的かつ困難な喫緊課題として、水際対策における鉛等で隠蔽された高濃縮ウランの現場検知及び放射性物質又は核物質を用いたテロ（RNテロ）の初動対応での中性子イメージングの2課題を指摘した。そこで低コストかつ高感度な中性子検出器として、可搬型の水チェレンコフ中性子検出器（WCND）を新たに開発し、それらを活用した非破壊測定（NDA）技術による核物質検知を実証することで、核セキュリティへの高い適用性を明らかにすることを目的とし、本研究の位置づけ、意義を述べている。

第2章「可搬型 WCND の提案と原理検証」では、核セキュリティ用途で現場運用可能な全く新しい中性子検出器として、可搬型 WCND を提案し、数値解析を用いて、中性子検出及びガンマ線弁別の原理検証を行った。中性子又はガンマ線の入射に伴う水の発光特性等の詳細を明らかにした後、チェレンコフ光子の輸送計算を実施し、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明らかにした。また、WCND を中性子又はガンマ線検出器として用いる場合に期待される性能及び課題も明らかにした。

第3章「回転照射法用の WCND の開発」では、WCND の核物質 NDA 手法への適用例として、回転照射法に特化した WCND を新たに開発した。シミュレーションを用いた検出器デザインの最適化及び検出器の各構成要素（Gd 濃度、反射材の種類等）の実験による選定の結果、バックグラウンドガンマ線を十分に抑制した上で、従来の ${}^3\text{He}$ 検出器に対して4倍以上の中性子絶対検出効率（ $10.8\pm 0.1\%$ ）を1/15以下の製作コストで実現し、WCND が有望な代替検出器となりうることを明らかにした。

第4章「WCND を用いた NDA 技術による核物質検知の実証」では、第3章で開発した WCND を回転照射装置と組み合わせた NDA 技術を用いて、核物質検知の実証実験を実施した。結果として、開発目標（コスト、可搬性等）を全て満たした上で、20分間の測定で、天然ウラン（ ${}^{235}\text{U}$ 量 56.7 g）及び鉛で隠蔽された高濃縮ウラン（ ${}^{235}\text{U}$ 量 4.17 g）の検知に成功し、核セキュリティ上の最重要課題への技術的解決策を実証するとともに、WCND の本 NDA 技術への高い適用性を明らかにした。

第5章「飛来方向検知用 WCND の開発及び核物質検知の実証」では、中性子イメージングへの応用を目指し、WCND を用いた中性子飛来方向検知手法を新たに提案し、計算による原理検証の後、プロトタイプ検出器の製作を行い、 ${}^{252}\text{Cf}$ 線源（2.03 MBq）及び兵器級プルトニウム試料（ ${}^{239}\text{Pu}$ 量 6.28 g）を用いた実証実験を実施した。結果として、開発目標（コスト、感度等）を全て満たした上で、各試料を22.5度の角度分解能で検知できることを明らかにした。中性子のイメージングには間接的な2次反応を利用せざるをえず、技術的に非常に困難であるが、既存技術に対し圧倒的に高感度な方向検知を実証した。

第6章「WCND を用いた NDA システムの核セキュリティへの適用可能性」では、第2章から5章で開発した WCND を用いた NDA 技術の社会実装を想定し、NDA システムの概念提案を行い、基本性能に加え、核セキュリティへの適用可能性及び社会実装に向けた諸課題を明らかにした。「不審物検知システム」及び「放射線源分布イメージングシステム」の導入により、最も困難であった隠蔽された高濃縮ウランを含む核物質検知を担保する検知システムの構築により、実効性の高い水際対策が可能になると共に、初動対応者の被ばく量を低減した迅速な RN テロ対応も可能となることから、核セキュリティ強化に大いに貢献する可能性を示した。

第7章「結論」では、各章によって得られた結果を総括し、本論文の結論とした。本論文は、これまで中性子検出器の候補にすらなり得なかった WCND について、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、核セキュリティへの適用により最も困難な2つの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。