

一般セッション | VIII. 核不拡散・保障措置・核セキュリティ：801-2 核不拡散・保障措置・核セキュリティ技術

2024年9月11日(水) 10:30 ~ 11:55 会場(講義棟B棟2F B204)

[1001-05] 核不拡散・核セキュリティ

座長:堀 雅人(JAEA)

10:30 ~ 10:45

[1001]

ウランケイ化合物燃料を用いた大型軽水炉の長期運転可能性・高安全性・核セキュリティ性に関する研究

*森 悠輔¹、相楽 洋¹ (1. 東工大)

10:45 ~ 11:00

[1002]

人工知能技術と背景分析により核物質盗難行為の検知と推理手法の構築

*李 湛¹、宋 星宇¹、陳 実¹、出町 和之¹ (1. 東京大学)

11:00 ~ 11:15

[1003]

核鑑識のための回収Puの起源推定に必要な重要シグネチャ核種の検討

*佐藤 颯¹、相楽 洋¹、韓 治暎¹、木村 祥紀²、田辺 鴻典³ (1. 東工大、2. JAEA、3. 科警研)

11:15 ~ 11:30

[1004]

Numerical Analysis of Photonuclear Reaction Detection using High Energy Gamma-ray from ${}^7\text{Li}(p,g){}^8\text{Be}$ reaction Triggered by Pelletron Accelerator*Krittana Kiatkongkaew¹, Hiroshi Sagara¹, Tatsuya Katabuchi¹, Chikako Ishizuka¹, Risa Kunitomo¹ (1. Tokyo Tech)

11:30 ~ 11:45

[1005]

核分裂即発ガンマ線の核セキュリティへの応用

表示付認証機器Cf-252を用いた測定

*芝 知宙¹、杉崎 沙希²、山口 知輝¹ (1. 原子力機構、2. E&Eテクノサービス)

11:45 ~ 11:55

座長持ち時間

ウランケイ化物燃料を用いた大型軽水炉の 長期運転可能性・高安全性・核セキュリティ性に関する研究

Impact of Uranium-silicide fuels on enhancement of
fuel lifetime, nuclear safety and security in large scale LWRs

*森 悠輔¹, 相楽 洋¹

¹東京工業大学

本研究では、ウランケイ化物(U_3Si_2)燃料を用いた軽水炉の核特性、定常運転及び冷却材喪失事故(LOCA)発生時のピーク燃料温度、長期運転可能性、安全性を向上させることを明らかにした。

キーワード: 事故耐性燃料, ウランケイ化物燃料, 核熱解析, 過渡解析, 核セキュリティ

1. 緒言 軽水炉燃料開発において、高燃焼度化と安全性を達成するためにウラン濃縮度を高め、燃料集合体型式が 15x15(燃料棒直径 10.7 mm)から 17x17(燃料棒直径 9.5 mm)のように燃料棒を細くし本数を増やす設計が取られてきた^[1]。事故耐性燃料である U_3Si_2 燃料は重金属密度が高く、ウラン濃縮度を上げずに運転期間の長期化が可能であり、燃焼を通じて熱伝導率が高いためピーク温度の抑制と高い安全性が期待できる。また、化学的安定性が高いことから Pu の単離が技術的に困難なため、核不拡散性の向上が期待され、中小型 PWR 利用における有効性が示されてきた^[2]。本研究では、大型 PWR 及び BWR において、 U_3Si_2 燃料を用いて長期運転可能性、安全性、核セキュリティ性を同時に向上させる設計条件を明らかにすることを目的とする。

2. 研究手法 まず軽水炉燃料の反応度・燃焼解析のために、集合体を模擬した 2 次元実効ピンセルモデルを用いた MVP/MVP-BURN^[3,4]による中性子輸送及び燃焼計算を行った。次に RELAP5-3D^[5]を用いて、3GW_{th} クラスの大型 PWR 炉心に対する伝熱流動、核動特性を解析し、定常時および過渡時における安全特性評価を行った。パラメータとして、燃料集合体内の燃料棒直径および本数、ウラン化学形態(UO_2 、 U_3Si_2)を置いた。最後に、核セキュリティ性として、サボタージュによる安全機能喪失を想定した炉心安全影響を評価した。

3. 結果 大型 PWR における 1000 秒後 LOCA 発生時の燃料棒最高温度を、燃料型式(17x17、15x15)および化学形態(UO_2 、 U_3Si_2)について比較評価した結果を図 1 に示す。定常運転時の燃料最高温度は、17x17 の細径燃料集合体において、 UO_2 に比べ U_3Si_2 は 742 K 低くなった。また、15x15 の太径燃料集合体と比較すると、 UO_2 では 554 K 高いのに対し、 U_3Si_2 は 116 K と差が格段と小さかった。これは U_3Si_2 の熱伝導率が燃焼末期の保守的仮定においても UO_2 に比べ 6 倍程度大きいためである。また、LOCA 発生後、直後の原子炉スクラム作動および 50 秒後の非常用炉心冷却設備の動作によりいずれの燃料においても最高温度が冷却水温度の約 350 K まで下がった。特に U_3Si_2 は冷却されるまでの時間が UO_2 に比べ短縮されている効果も確認された。

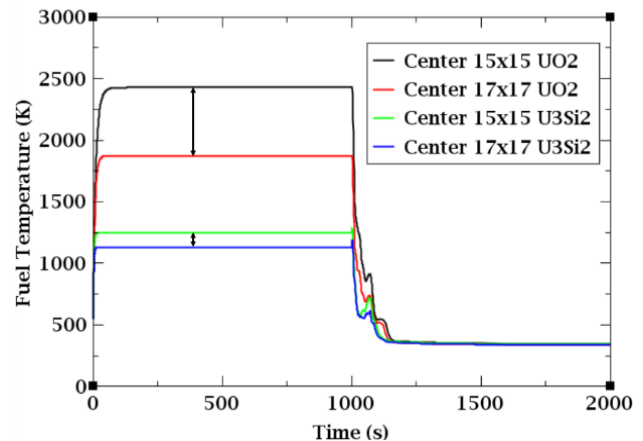


図 1 LOCA 時の燃料棒最高温度

4. 結言 U_3Si_2 燃料を用いた軽水炉の核特性、定常運転及び LOCA 発生時のピーク燃料温度評価により、長期運転可能性、安全性の向上効果を確認した。今後、核セキュリティ性の評価を行う。

謝辞 本研究の一部は、原子力規制人材育成事業における 3S 研究プロジェクトの支援を受けて行われた。

参考文献 [1]原子力安全研究協会, 軽水炉燃料のふるまい, 2013, [2]N. Mitsuboshi and H. Sagara, Annal. Nucl. Energy, 2021, [3]長家他, JAEA-Data/Code-2016-019, 2016, [4]奥村他, JAEA-Data/Code2011-010, 2011, [5] RELAP5-3D code manual, INEEL-98-00834, 2005

*Yusuke Mori¹, Hiroshi Sagara¹

¹Tokyo Institute of Technology.

The development of detection and reasoning methods for nuclear material theft behaviors based on artificial intelligence and background analysis

*Zhan Li, Xingyu Song, Shi Chen, Kazuyuki Demachi
The University of Tokyo

Abstract: A novel detection and reasoning method for nuclear material theft behaviors is proposed in this research. In detail, an extra tree-structured analysis process is proposed to determine the status of background objects. Besides, this background analysis process is well integrated in our previously proposed explainable reasoning methods. The results show that our proposed methods prove to be promising to detect nuclear material theft events.
Key words: nuclear security; human malicious behaviors identification; artificial intelligence; background analysis

1. Introduction

In our previous research [1], three novel and explainable reasoning methods are proposed to solve the problems of human malicious behaviors in external intrusion of nuclear security. However, for the more complex and significant scenarios of nuclear material theft, the proposed methods are required to be advanced with the process of background analysis.

2. Methodology

The framework is shown in Fig.1, which is mainly comprised by two calculation steps called computer vision module (CVM) and reasoning module (RM). In CVM, multiple deep learning models (in blue font) are implemented and applied to extract the three types of human actions, which are HPOIA, HBOIA and TA in Fig.1. However, for the cases of nuclear material theft, we additionally add a process of background analysis (in green font) in CVM, thus the corresponding output background analysis (BA) would also be obtained. Then, the three extracted human actions as well as BA results are comprehensively considered for final reasoning in RM.

3. Conclusion

With the development of background analysis process shown in Fig.2, the special background object ‘nuclear fuel’ would be assigned with a label which might be ‘exist’, ‘hidden’ or ‘disappear’. The proposed methods seem to be useful for identification of nuclear material theft cases.

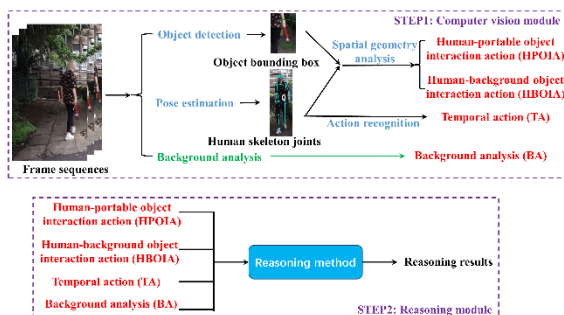


Fig.1 Framework

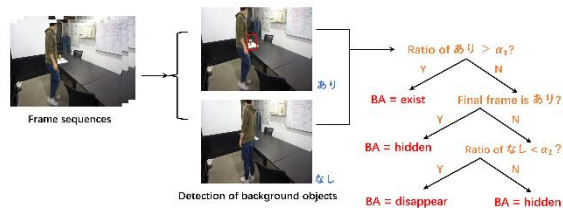


Fig.2 Background analysis

References

[1] Li, Z., Song, X., Chen, S., Demachi, K., 2024. Data, language and graph-based reasoning methods for identification of human malicious behaviors in nuclear security. Expert Systems with Applications 236, 121367.

核鑑識のための回収 Pu の起源推定に必要な重要シグネチャ核種の検討

Identification of Key Signature Nuclides to Estimate the Origin of Reprocessed Pu for Nuclear Forensics

*佐藤 颯¹, 相楽 洋¹, 韓 治暎¹, 木村 祥紀², 田辺 鴻典³

¹東京工業大学, ²日本原子力研究開発機構, ³科学警察研究所

本研究では、再処理工程で多様な形態で存在する回収 Pu の起源推定を目的とし、核鑑識の重要パラメータの一つである燃料核種組成情報を活用した重要シグネチャ核種の検討を行った。

キーワード：核鑑識, 核セキュリティ, 回収 Pu, PWR・BWR, 照射済燃料核種組成

1. 緒言

我が国では、Pu リサイクルを行う核燃料サイクルの実現を推進しており、Pu 利用に係る透明性を高めることが求められる。本研究では、再処理工程において多様な形態で存在する回収 Pu が生成された原子炉型、燃料型、再処理工程における分離生成年代を推定するために、照射済核種組成の違いから機械学習を用いた起源推定に必要な重要シグネチャ核種の検討を行った。

2. 研究手法

本研究では、照射済核種組成インベントリを作成するためゼロ次元の核種崩壊生成計算コード ORIGEN2.2、核データライブラリには JENDLE - 4.0 を中核とする核データを導入した ORLIBJ40 を用いた。まずベンチマークとして、SFCOMPO に含まれる BWR および PWR 燃料ペレット照射後試験結果と燃焼計算結果の比較により計算精度を確認した。次に、表 1 に示す PWR・BWR 燃料集合体の再処理前後における核種組成計算を行った。これらにより核種データベースを構築し、再処理工程における除染係数等を用いた測定可能性を考慮し、機械学習手法を用いて回収 Pu の起源を推定するための重要シグネチャ核種の検討を行う。

表 1 核種崩壊生成計算に必要な燃料情報^{1,2}

集合体タイプ	平均取出燃焼度 [GWd/t]	ウラン濃縮度 [wt%]	冷却期間 [years]	(再処理後)冷却期間 [years]
BWR STEP II	39.5	3.4	10, 50	0.1, 10, 50
PWR STEP I	44	4.1	10, 50	0.1, 10, 50

3. 結果

ベンチマーク結果より、主要 Pu 同位体(Pu-239,240,241)の計算精度が 5%以内であることを確認した。また、PWR と BWR の使用済燃料中核種密度の差が 10%以上となる核種リストを抽出し、シグネチャ核種候補とした。今後、燃料型(BWR Step I, II, III, PWR Step I, II)をパラメータとした照射済燃料組成や集合体内の位置ごとの照射後燃料核種組成情報を用いてデータベースの拡充を行い、機械学習手法を用いた起源推定に必要な重要シグネチャ核種の検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構との共同研究「核鑑識のための回収プルトニウムの起源推定手法に関する研究」成果の一部を含んでおり、日本原子力研究開発機構における成果は文部科学省核セキュリティ補助金事業によるものである。東京工業大学原子力規制人材育成事業による予算支援を受けている。

参考文献

[1] OECD, Nuclear Energy Agency. SFCOMPO 2.0 (Spent Fuel Isotopic Composition).

[2]奥村啓介, “軽水炉使用済み燃料の核種インベントリ”, 日本原子力研究開発機構, 2011.

*Hayato Sato¹, Hiroshi Sagara¹, Chi Young HAN¹, Yoshiki Kimura² and Kosuke Tanabe³

¹Tokyo Tech., ²JAEA, ³NRIPS

Numerical Analysis of Photonuclear Reaction Detection using High Energy Gamma-ray from ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction Triggered by Pelletron Accelerator

*Krittana Kiatkongkaew¹, Hiroshi Sagara¹, Tatsuya Katabuchi¹, Chikako Ishizuka¹ and Risa Kunitomo¹
Tokyo Institute of Technology¹.

A potential of photonuclear reactions to be utilized in non-destructive assay methods for nuclear security and safeguards has been realized. A numerical study on activated photonuclear reactions by γ -rays emitted from the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction, including influences from geometrical condition and detectability analysis was performed.

Keywords: Non-Destructive Assay, Nuclear Security, Photonuclear reaction, Detectability, Pelletron Accelerator

1. Introduction High energy γ -rays from the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction can be considered an effective photon source for active interrogation of nuclear materials. An experimental demonstration on photonuclear reaction induced by γ -rays from the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction utilizing a proton beam from the Pelletron accelerator of Tokyo Tech is planned. This study aims to perform a numerical study on the current active method utilizing the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction. The study includes impacts from geometrical condition, and detectability analysis.

2. Methodology Numerical analyses were carried out with the Monte Carlo simulation code MCNP. The previous experimental data of the energy distribution and yields of γ -rays from the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction [1] were used to isotropically generate photons in the calculation. Photonuclear reactions occurring in the samples were calculated from photonuclear

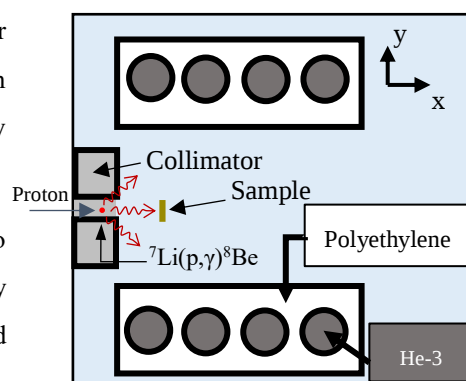


Figure 1 Simulated neutron measurement apparatus

cross section data of ENDF/B-VII.1. Investigation on detectability of photonuclear reactions changing sample materials, distance, and sample thickness was performed for the measurement setup shown in the **Figure 1**.

3. Result Geometrical conditions such as distance, sample thickness and surface area have an impact on photoneutron emission. The sample was placed at 1 cm from the photon source and neutrons were detected with ${}^3\text{He}$ proportional counters surrounded with polyethylene moderators. The limit of detectability was evaluated based on background neutrons from photoneutrons

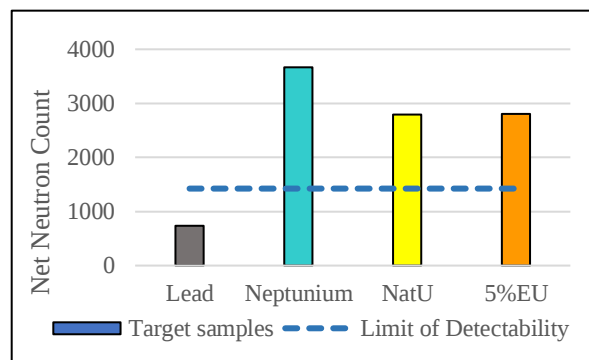


Figure 2 Net neutron counts from samples placed at 1 cm from source position

emitted from the lead collimator. As shown in **Figure 2**, at a sample distance of 1 cm from the photon source, given the sample size of 1 cm² surface area and 1 mm thick, neutrons from lead are below the detectability limit, while photonuclear events from nuclear material samples such as neptunium and uranium samples are found to be detectable.

4. Conclusion The characteristics of neutron emission by γ -rays from ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction regarding sample materials and geometrical conditions have been investigated in numerical analyses. With an optimal experimental setup, photon-induced neutron events from nuclear materials can be made detectable.

Acknowledgement This research was partially supported by the Nuclear Regulation Authority of Japan through the Tokyo Tech ANSET-CP 3S program and also by JSPS KAKENHI Grant numbers JP23H01894, and Nuclear Regulation Authority, Japan.

References [1] Saito, T., Katabuchi, T. et al., (2017). Journal of Nuclear Science and Technology, 54:2, 253-259

核分裂即発ガンマ線の核セキュリティへの応用 表示付認証機器 Cf-252 を用いた測定

Application of prompt fission gamma rays to nuclear security

Measurements using approved Cf-252 devices with certification labels

*芝 知宙¹, 杉崎 沙希², 山口 知輝¹

¹原子力機構, ²E&E テクノサービス

核物質に特有な核分裂に伴う即発ガンマ線 (PFG) を検出することを、核セキュリティ分野へ応用する。特に表示付認証機器 Cf-252 を用いた測定について述べる。

キーワード: 核分裂即発ガンマ線、核セキュリティ、核物質検知

1. 緒言

核セキュリティ上、遮蔽体内に隠ぺいされた核物質を検知する技術が求められている。核物質に特有な PFG は連続スペクトルであるが、透過力の高い高エネルギー領域までのスペクトルを有する。現在、原子力機構 核不拡散・核セキュリティ総合支援センターでは、PFG を用いた核検知技術の開発を行っている。本報告では、ウランからの PFG を測定するため、 UO_2 試料に対して中性子源（表示付認証機器 Cf-252）を用いたアクティブ中性子実験について述べる。

2. 実験体系のシミュレーション手法

実験に使用した試料は、元素重量 24g の天然ウランの二酸化物であった。中性子源（表示付認証機器 Cf-252）の放射能は 3.1 MBq であった。この中性子源を UO_2 試料に接近させ、核分裂反応を誘発させ、PFG を発生させた。発生させたガンマ線は、HPGe 検出器（直径 58.9mm、長さ 59.3mm、35%効率）で測定した。測定時間は数時間とした。試料と同様の PFG を放出する中性子源のみのガンマ線測定に対して、 UO_2 試料+中性子源（Cf-252）のアクティブ測定が、有意に CPS が上がっているかを確認した。

3. 結果と今後の展望

天然バックグラウンドとなる Tl-208 の 2615 keV 付近を避け、2700-2710 keV の区間の CPS を図に示す。区間全域にわたり、アクティブ測定では、中性子源のみのガンマ線測定と比較し、有意な増加が確認できる。今後は異なるウラン試料を用いた実験や、本実験を再現するシミュレーション手法を確立し、検出限界となる核物質量を評価していく。

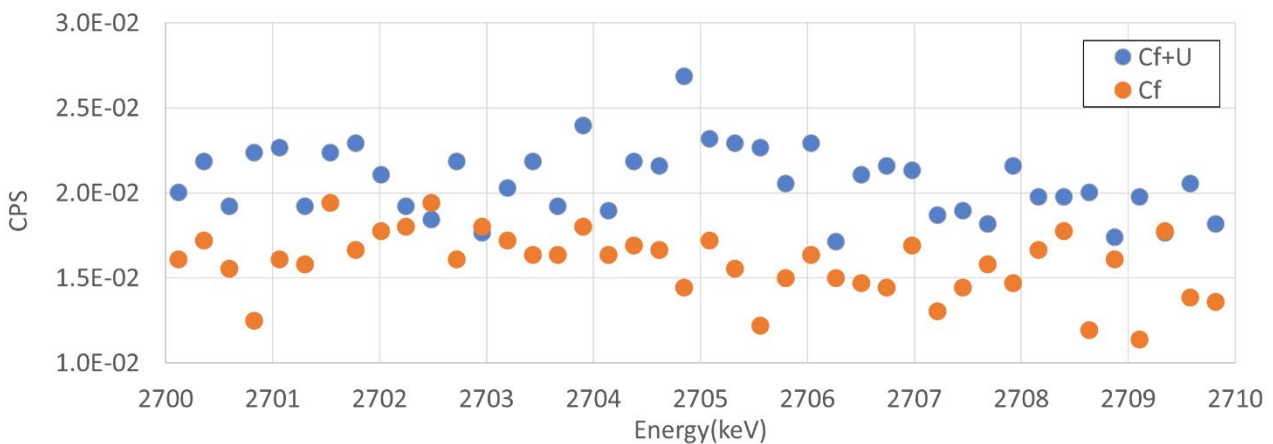


図 2700-2710 keV 区間の CPS

*Tomooki Shiba¹, Saki Sugizaki² and Tomoki Yamaguchi¹

¹JAEA, ²E&E Techno Service