

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	燃料デブリ中のプルトニウム定量のためのパッシブ中性子非破壊測定技術の研究
Title(English)	
著者(和文)	長谷竹晃
Author(English)	Taketeru Nagatani
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12581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,木倉 宏成,片淵 竜也
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12581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)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)

Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	長谷 竹晃		審査員主査： Chief Examiner	相樂 洋

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

第1章では、本研究の背景として、核物質管理においてプルトニウムの非破壊測定技術の開発が強く求められている社会的ニーズを述べ、福島第一原子力発電所の廃炉を進めていく上では燃料デブリ中のプルトニウム定量が重要だが既存技術を用いた測定が技術的に困難であることを指摘し、多様な中性子源を持つ燃料デブリからプルトニウムの直接情報を外部線源を用いずに取り出すパッシブ中性子非破壊測定技術を提案した上で、数値解析及び実証試験により、提案した手法のプルトニウム定量への適用性及び不確かさの評価を行うという本論文の目的を述べた。

第2章では、燃料デブリ中のプルトニウムを燃料自身から放出される中性子情報を利用して定量するにあたり、従来開発されてきている健全な使用済燃料集合体に対する非破壊測定技術では、燃料デブリ性状の多様性に伴う中性子漏れ増倍及び燃焼度の多様性に伴う中性子放出源核種割合の不確かさが課題である点を指摘した上で、これらの課題を解決する Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI) 法の適用を提案するとともに、Differential Half-life of Spontaneous Fission Nuclides (DHS) 法を新たに考案した。

第3章では、DDSI 法の中性子漏れ増倍率測定への適用性評価を行った。燃料デブリ中の燃料、構造材、水、中性子吸収材等の組成をパラメータとし、DDSI 法の応答値と中性子漏れ増倍率を評価した結果、両者の間に強い相関関係が確認され、燃料デブリの中性子漏れ増倍率評価に対する DDSI 法の有効性を明らかにした。さらに、収納容器内をボクセル化した空間にランダムに燃料、構造材、中性子吸収材、水等を配置した不均質なモデルを構築し、燃料デブリ中の Cm-244 実効質量定量の不確かさを導出した結果、湿式貯蔵及び乾式貯蔵における Cm-244 実効質量の定量の不確かさは、それぞれ、約 8%及び約 4%となることを明らかにした。湿式貯蔵については、単純な中性子同時計数値を用いた評価と比較して、DDSI 法を用いることにより不確かさを 1/4 程度に低減できることを明らかにした。

第4章では、DDSI 法による中性子漏れ増倍率測定の実証試験を行った。MOX 試料の周辺にホウ酸粉末及び Cf-252 線源を配置することにより燃料デブリを模擬した試料を中性子非破壊測定装置により測定した結果、DDSI 応答値と中性子漏れ増倍率の間に強い相関関係を確認し、DDSI 法による中性子漏れ増倍率評価の不確かさが、IAEA が定める非破壊測定目標精度と比較して十分に小さいことから、燃料デブリのように中性子増倍・吸収双方の効果が存在する測定体系に対する中性子漏れ増倍率評価に DDSI 法が有効であることを実証した。

第5章では、Pu-240 実効質量及びプルトニウム定量への DHS 法の適用性を評価した。Pu-240 実効質量の不確かさを評価した結果、系統誤差は、Cm-246 の影響により、最大 80%程度過大評価することを見出した。これを解決するため、DHS 法で測定可能な短半減期核種 (主に Cm-244) と長半減期核種 (主に Pu-240 及び Cm-246) の重量比と燃焼計算の組み合わせにより、Cm-246 を定量し、Pu-240 実効質量を補正する手法を新たに考案し、系統誤差は 20%以内に改善できることを明らかにした。さらに、乾式貯蔵の燃料デブリ中のプルトニウム定量の不確かさを評価した結果、32年間の測定間隔をとった場合、不確かさが最も悪化すると想定される大量の低燃焼度組成と微量の高燃焼度組成が混在する組成に対しては 40%程度過小評価するという課題はあるものの、それ以外の組成に対しては全誤差 10%以内でプルトニウム定量が可能であり、燃料デブリ中のプルトニウム定量への DDSI-DHS 法の高い適用性を明らかにした。

第6章では、提案したパッシブ中性子非破壊測定技術の1号機への有効性を評価した。まず、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術としての有効性を評価した結果、炉心平均組成比によりプルトニウム量を評価した場合、その系統誤差は-99.6~97.6%と非常に大きいものの、プルトニウムの検出下限は数百 mg オーダーであり、仕分け技術として活用できることを明らかにした。次に、核物質管理技術としての有効性について評価した結果、32年の測定間隔をとった DDSI-DHS 法のプルトニウム定量の不確かさは-40~10%であり、不確かさを大幅に改善することを明らかにした。さらに、本技術の保障措置への適用性を評価した結果、ベストエフォートの計量管理及び査察側が行う再検認に適用可能であり、保障措置結論導出のために重要な技術となりうることを明らかにした。以上のことから、本技術は、適切な核物質管理や廃炉作業に貢献する重要な技術となり得ることを示した。

第7章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、燃料デブリ中のプルトニウム定量の課題を指摘した上で、これらを解決する DDSI 法及び DHS 法を提案し、数値解析や実証試験によりこれらの技術の有効性や不確かさを定量的に明らかにし、適切な核物質管理や廃炉作業に貢献する重要な技術となり得ることを示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	長谷 竹晃		審査員主査： Chief Examiner	相楽 洋	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This thesis proposes and evaluates a passive neutron non-destructive assay (NDA) technique for quantifying plutonium in fuel debris, which is a challenging task for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (1F). The technique utilizes the neutron information emitted from the fuel itself, without using any external neutron source, to extract the direct information of plutonium from the fuel debris with various neutron sources. The thesis consists of seven chapters.

The first chapter introduces the social needs and technical difficulties of developing NDA techniques for plutonium in nuclear material management, and states the purpose of this paper.

The second chapter proposes two methods, Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI) and Differential Half-life of Spontaneous Fission Nuclides (DHS), to measure the neutron leakage multiplication factor and quantify plutonium by using the difference in half-life between short-lived and long-lived nuclides.

The third chapter evaluates the applicability and uncertainty of the DDSI method by parametrically changing the composition and position of fuel debris.

The fourth chapter conducts a demonstration test of the DDSI method by simulating fuel debris with MOX samples and neutron absorber.

The fifth chapter evaluates the applicability and uncertainty of DHS method to quantify Pu-240 effective mass and plutonium in fuel debris, and proposes a new method to correct the systematic error due to Cm-246.

The sixth chapter evaluates the effectiveness of the proposed technique for Unit 1 of 1F, and shows that this technique can be used as a sorting technique, a nuclear material management technique, and a safeguards verification tool.

The seventh chapter summarizes the results and concludes that this thesis proposes and evaluates DDSI and DHS methods to solve the challenges of plutonium quantification in fuel debris, and demonstrates that these methods are important techniques that can contribute to proper nuclear material management and decommissioning work.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

