

一般セッション | II. 放射線工学と加速器・ビーム科学および医学利用：202-2 放射線物理，放射線計測

2025年3月13日(木) 15:55 ~ 17:25 B会場(Zoomルーム2)

[2B13-17] 燃料デブリ計測

座長:寺阪 祐太(JAEA)

15:55 ~ 16:10

[2B13]

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

(5) アクティブ中性子法開発 (FNDI法)

*米田 政夫¹、藤 暢輔¹、前田 亮¹ (1. JAEA)

16:10 ~ 16:25

[2B14]

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

(6) アクティブ中性子法 (FFCC法) 開発

*藤 暢輔¹、前田 亮¹、米田 政夫¹ (1. JAEA)

16:25 ~ 16:40

[2B15]

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

(7) パッシブγ線法の研究開発

*寺島 顕一¹、松村 太伊知¹、坂本 雅洋¹、冠城 雅晃¹、芝 知宙¹、杉崎 沙希²、奥村 啓介¹ (1. JAEA、2. E&Eテクノサービス)

16:40 ~ 16:55

[2B16]

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

(8) パッシブγ線法の数値解析と測定結果の評価

*冠城 雅晃¹、芝 知宙¹、松村 太伊知¹、坂本 雅洋¹、寺島 顕一¹、杉崎 沙希²、奥村 啓介¹ (1. JAEA、2. E&Eテクノサービス)

16:55 ~ 17:10

[2B17]

東京電力福島第一原子力発電所のデブリ探査を想定した高ガンマ線バックグラウンド下における中性子検出法の提案

*神野 郁夫¹、冠城 雅晃¹、松村 太伊知¹、Riyana Eka¹、寺島 顕一¹、坂本 雅洋¹、奥村 啓介¹ (1. 日本原子力研究開発機構)

17:10 ~ 17:25

座長持ち時間

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (5) アクティブ中性子法開発 (FNDI 法)

Development of analysis and estimation techniques to determine the properties of fuel debris

(5) Development of active neutron method (FNDI method)

*米田 政夫、藤 暢輔、前田 亮

JAEA

福島第一原子力発電所の廃止措置に資するため、原子炉格納容器内部から取り出された物体に含まれる核燃料物質量を計測するための非破壊測定技術開発を実施している。本講演では、候補技術の一つであるアクティブ中性子法 (FNDI 法) に関する開発において得られた成果を報告する。

キーワード：アクティブ中性子法、福島第一原子力発電所、非破壊測定、核燃料物質、廃止措置

1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃止措置においては、原子炉格納容器などから取り出された物体の性状把握や、燃料デブリと放射性廃棄物への仕分けなどによって、燃料デブリの取り出しから保管までの合理化などが期待されている。我々のグループでは、燃料デブリの非破壊測定法の候補技術であるアクティブ中性子法のうち、熱中性子による核分裂反応を利用する高速中性子直接問いかけ法 (FNDI 法)、および高速中性子による核分裂反応を利用する高速核分裂中性子同時計数法 (FFCC 法) の評価を進めている。これまでの研究により、FNDI 法は中性子吸収材を多量に含む燃料デブリの測定が困難である一方、FFCC 法は中性子吸収材の影響を受けにくく、FNDI 法よりも高い測定精度が得られることが明らかになった。また、FNDI 法による測定では中性子消滅時間を取得でき、このデータは FFCC 法の測定結果を補正するための有用な情報となる可能性が示唆されている。

2. 中性子消滅時間データの取得

FNDI 法では、中性子発生装置から生成されるパルス中性子 (高速中性子) を、測定対象物自身 (例：コンクリート) やその周辺に配置した減速材で熱中性子化させた後に核分裂性物質と反応させる。この手法は、照射中性子と核分裂中性子の時間差を利用して、照射中性子と核分裂中性子を区別するものである。パルス中性子照射後に観測される核分裂中性子カウントの時間推移として得られる中性子消滅時間は、測定対象物の組成 (例：水分) の影響を反映するが、同時に照射中性子の条件 (エネルギーやパルス幅) の影響も受ける。本研究では、モンテカルロ計算コード (PHITS, MVP) を用いたシミュレーション、および JAWAS-T 装置 (図 1 参照) を用いた要素試験を実施した。その結果、中性子消滅時間は燃料デブリの組成に応じて変化しており、FFCC 法の補正に必要な組成情報を含んだ中性子消滅時間を取得できることなどが分かった。

謝辞：本研究成果は、「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金 (燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発))」に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業において得られた成果である。

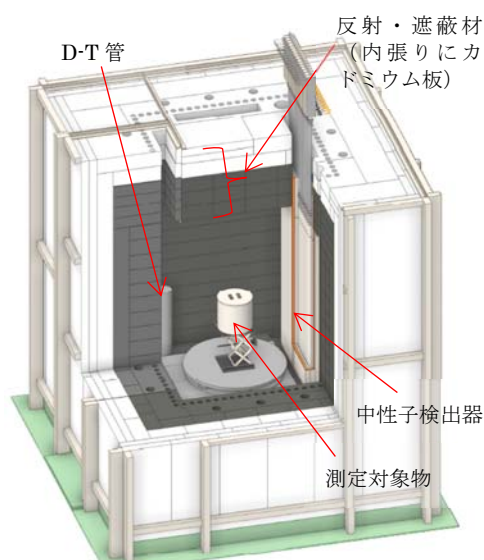


図 1 JAWAS-T 装置
(奥行、幅、高さ：約 2m)

* Masao Komeda, Yosuke Toh, Makoto Maeda, Japan Atomic Energy Agency

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (6) アクティブ中性子法 (FFCC 法) 開発

Development of analysis and estimation techniques to determine the properties of fuel debris

(6) Development of active neutron method (FFCC method)

*藤 暢輔, 前田 亮, 米田 政夫

JAEA

福島第一原子力発電所の廃止措置に資するため、原子炉格納容器内部から取り出された物体に含まれる核燃料物質量を計測するための非破壊測定技術開発を実施している。本講演では、候補技術の一つであるアクティブ中性子法（高速核分裂中性子同時計数法：FFCC 法）に関する開発において得られた成果を報告する。

キーワード：アクティブ中性子法、福島第一原子力発電所、非破壊測定、核燃料物質、廃止措置

1. 緒言

福島第一原子力発電所の廃止措置においては、原子炉格納容器などから取り出された物体の性状把握、もしくは燃料デブリと放射性廃棄物への仕分けなどによって、燃料デブリの取り出しから保管までの合理化などが期待できる。しかし、取り出される物体には核燃料物質のほか、制御棒由来の中性子吸収材や原子炉構造物など、測定を妨害する多様な物質が含まれており、これらに適用可能な非破壊測定技術の開発が求められている。

2. 中性子消滅時間などを利用した測定精度向上

本研究では、福島第一原子力発電所の廃止措置に資する燃料デブリの非破壊測定の候補技術として、中性子による誘発核分裂反応を利用する 2つのアクティブ中性子法：高速中性子直接問いかけ法 (FNDI 法) および高速核分裂中性子同時計数法 (FFCC 法：図 1) の検討を行っている。FNDI 法は測定試料によって熱化された中性子による核燃料物質の核分裂反応を利用する測定法であり、中性子吸収材を含むデブリ等の測定が困難であるものの、試料の内容物の情報を有する中性子減衰時間という付加的な情報が得られる。FFCC 法は、高速中性子による核分裂反応を利用してウラン総量を測定する手法であり、中性子吸収材の影響を受けにくい。モンテカルロ計算コード PHITS および MVP を用いて FNDI 法および FFCC 法のシミュレーションモデルを構築し、典型的な燃料デブリの測定を模擬した。その結果、FNDI 法で取得した中性子減衰時間などを FFCC 法の測定結果の補正に用いることで、測定精度の向上が可能であることを確認できた。

謝辞：本研究成果は、「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発））」に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業において得られた成果である。

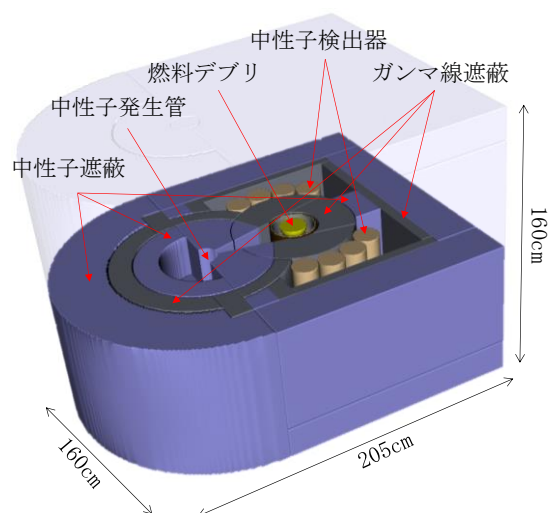


図 1 FFCC 法装置のシミュレーション体系例(断面図)

*Yosuke Toh, Makoto Maeda, Masao Komeda, Japan Atomic Energy Agency

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (7) パッシブγ線法の研究開発

Development of analysis and estimation techniques to determine the properties of fuel debris

(7) Research and development of passive gamma-ray method

*寺島 顕一¹, 松村 太伊知¹, 坂本 雅洋¹, 冠城 雅晃¹, 芝 知宙¹, 杉崎 沙希², 奥村 啓介¹

¹JAEA, ²(株)E&E テクノサービス

福島第一原子力発電所（1F）の原子炉格納容器（PCV）から取り出される回収物に対して、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに資する非破壊計測技術の開発を進めている。候補となる手法は複数あるが、本発表ではパッシブγ線法における要素試験の概要と数値解析について報告する。

キーワード：福島第一原子力発電所，燃料デブリ，放射性廃棄物，非破壊計測技術，ガンマ線スペクトル分析，放射線輸送コード，燃料試験施設

1. 緒言 福島第一原子力発電所の廃止措置において、PCV からの回収物を燃料デブリと放射性廃棄物に仕分けすることは、その後の安全な長期保管や処理処分をする際に重要となる。その際、仕分けに利用できる可能性がある技術の一つとしてパッシブγ線法が挙げられる。しかしながら、1F の燃料デブリは熔融前の燃焼度が約 1～51GWd/t と広範囲であり、さらに取り出し期間が長期におよぶことが予想される。そのため、回収される燃料デブリの条件により放射線特性が大きく変動し、計測が困難となることが考えられる。そこでパッシブγ線法の要素試験として、図 1 に示すような HPGe 検出器によるγ線スペクトルの計測を実施した。対象として、燃焼度、冷却期間、材料組成などが大きく異なる、TMI-2 燃料デブリと高燃焼度軽水炉使用済み燃料ペレット切断片の 2 つの試料を用いた。また、計測の実施前には試験体系の最適化などのために、燃焼計算ならびに放射線輸送計算コードを用いた数値解析を実施した。

2. 試料選定 要素試験で用いた低燃焼度のサンプルとして、TMI-2 の燃料デブリを選定した。これは軽水炉燃料とジルコニウム被覆管などが混ざりあったものである。炉心平均燃焼度は 3.25GWd/t、冷却期間は約 46 年である。一方、高燃焼度のサンプルとしては、平均燃焼度がペレット平均で 59.5GWd/t、冷却期間が約 23 年である軽水炉使用済み燃料を選定した。試験場所としては燃料試験施設（RFEF）にある気密セルである α-γ セルを選定した。図 1 は要素試験を模擬した放射線輸送計算コード MCNP6.2 による計算体系である。また、選定したサンプルの燃料組成は SCALE6 の ORIGEN モジュールを用いた燃焼計算により得た。本発表では要素試験の詳細と数値解析法について説明する。計測試験の結果と数値解析の比較検討については次の発表で報告する。

謝辞：本研究成果は、「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）」に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業[1]において得られた成果である。

参考文献 [1] 高崎他、「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の

開発 (1)燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、1A06、2024

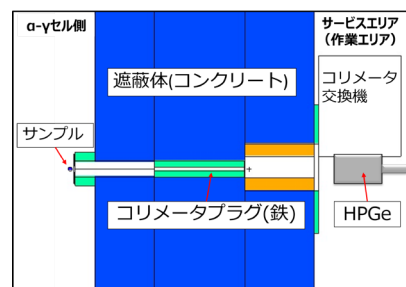


図 1 要素試験を模擬した数値解析の計算体系

*Kenichi Terashima¹, Taichi Matsumura¹, Masahiro Sakamoto¹, Masaaki Kaburagi¹, Tomooki Shiba¹, Saki Sugizaki² and Keisuke Okumura¹

¹Japan Atomic Energy Agency, ²E&E Techno Service co., Ltd.

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発 (8) パッシブ γ 線法の数値解析と解析結果の評価

Development of analysis and estimation techniques to determine the properties of fuel debris

(8) Evaluation of numerical analysis and experimental results for passive gamma-ray method

*冠城 雅晃¹, 芝 知宙¹, 松村 太伊知¹, 坂本 雅洋¹, 寺島 顕一¹, 杉崎 沙希², 奥村 啓介¹

¹JAEA, ²(株)E&E テクノサービス

福島第一原子力発電所の廃止措置に資するため、原子炉格納容器内部から取り出された回収物に対して、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けに資する非破壊計測技術の開発を進めている。本発表では、候補技術の一つであるパッシブ γ 線法に関する実測と数値解析の評価結果について報告する。

キーワード：福島第一原子力発電所、燃料デブリ、放射性廃棄物、非破壊計測技術、 γ 線スペクトル分析、放射線輸送コード、燃料試験施設

1. 緒言

福島第一原子力発電所の原子炉格納容器（PCV）から回収される燃料デブリ等は、条件により放射線特性が異なることが予想される。このため、燃料デブリに対するパッシブ γ 線法において、測定対象となり得る γ 線核種を選定することが重要である。そこで、燃焼度、冷却期間、材料組成などが大きく異なる TMI-2 燃料デブリと高燃焼度軽水炉使用済み燃料ペレット切断片（SF）の 2 つの試料の γ 線スペクトル計測を行い、前発表で説明する数値解析の結果と比較して、計測できる γ 線核種を確認した。

2. JAEA 燃料試験施設における実測

JAEA 燃料試験施設のホットセルのコンクリート壁に開けられた計測用ポートのセル側出口に TMI-2 燃料デブリまたは SF の試料を設置し、同ポートの反対側出口に HPGe 検出器を設置して、 γ 線スペクトル計測を行った。計測されたスペクトル結果を図 1 に示す。同スペクトルの主要なピークを解析し、線源となる γ 線核種を同定したところ、TMI-2 燃料デブリでは、Cs-137、Co-60、Eu-154、一方で SF 試料では、Cs-134、Cs-137、Eu-154 が確認できた。Tl-208 からの高エネルギーピークも確認できたが 1 秒当たりの計数率が 0.01 以下であり、測定対象には適さないことが分かった。

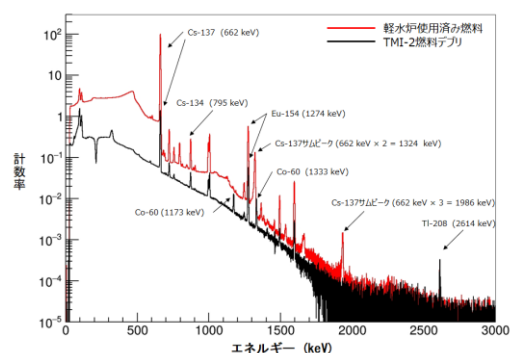


図 1. HPGe による燃料の実測スペクトル

3. 結論

要素試験結果では、両試料において、事前の数値解析で検出できることを予測した γ 線核種が検出でき、数値解析の有用性が確認できた。また、燃焼度が小さく数十年を経過した試料においても Cs-137 および Eu-154 は非破壊計測条件で検出できることが確認できた。この 2 核種は測定対象として有用な核種であると考えられる。本研究で得られた知見は、今後のパッシブ γ 線法の開発に活用することが期待される。

謝辞：本研究成果は、「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）」に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業において得られた成果である。

*Masaki Kaburagi¹, Tomooki Shiba¹, Taichi Matsumura¹, Masahiro Sakamoto¹, Kenichi Terashima¹, Saki Sugizaki², Keisuke Okumura¹

¹Japan Atomic Energy Agency, ²E&E Techno Service co., Ltd.

東京電力福島第一原子力発電所のデブリ探査を想定した 高ガンマ線バックグラウンド下における中性子検出法の提案

A Proposal of Neutron Detection Method in High Gamma-ray Background for Debris Search
in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

*神野 郁夫, 冠城 雅晃, 松村 太伊知, Eka Sapta Riyana, 寺島 顕一, 坂本 雅洋, 奥村 啓介
日本原子力研究開発機構

福島第一原子力発電所事故後炉心の高ガンマ線バックグラウンドの中で燃料デブリを探知するためには中性子を検知する必要がある。しかしバックグラウンドガンマ線フラックスが高く、電荷敏感測定は困難である。このため、耐放射線性母材の検出器2式の信号の差分を電流敏感測定した中性子検出法を提案する。

キーワード：福島第一原子力発電所事故，高ガンマ線バックグラウンド，中性子測定，電流測定法，差分

1. 緒言 放射線の測定には、個々の放射線が検出器に付与したエネルギーを測定する電荷敏感測定法と複数の放射線の付与エネルギーを測定する電流敏感測定法とがある。電荷敏感測定法では、最初に入射した放射線による生成電荷が電極に収集されてから次の放射線が入射する条件が必要である。このため測定可能計数率は $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 以下とされている[1]。原発事故により燃料が溶融した炉心においては、数 10 Gy/h 程度のバックグラウンド(BG)ガンマ線線量率(フラックス:約 $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)があり[2]、個々のガンマ線、中性子を測定することは困難である。この環境で燃料デブリを探知するために、電流敏感測定法を用いて中性子を検知する方法を考案したので、報告する。

2. ガンマ線 BG, 中性子由来荷電粒子によるエネルギー付与 有感面積 1 cm^2 、有感厚さ 0.2 mm の SiC 検出器に 662 keV のガンマ線がランダムな角度で入射する。オシロスコープによる観測を模擬し、 $0.1 \mu\text{s}$ (ガンマ線数:100)、 $1 \mu\text{s}$ (1000)および $10 \mu\text{s}$ (10000)サンプリングについて図 1 に示す。また 0.5 MeV (ビン番号 40)および 1 MeV (同 60)の荷電粒子によるエネルギー付与を示した。

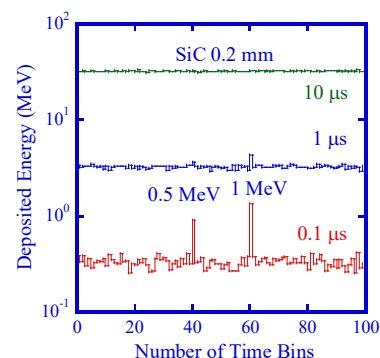


図 1. BG ガンマ線, 0.5, 1 MeV 荷電粒子が 0.2 mm 厚 SiC 検出器に付与したエネルギー。

3. 提案測定法 一つのサンプリング(測定)に BG ガンマ線が多数入射すると、中性子由来荷電粒子による信号が BG と区別できない。そこで、一定時間 T (例: $0.1 \mu\text{s}$)ごとの電流測定を行う。このため低雑音電流敏感型前置増幅器 VIEC を使用する[3]。従来の VIEC は放射線による誘起電圧が帰還

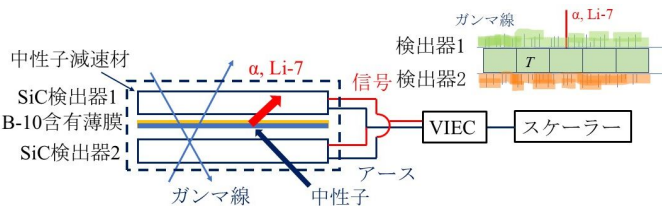


図 2. 提案測定法。

容量の上限電圧に達してリセットするが、本測定法では T ごとに電圧をリセットする。この間、設定値以上の電圧が誘起された場合に中性子由来荷電粒子を検知したとする。また BG ガンマ線による帰還容量電圧値の上昇を回避するため、図 2 のように SiC 検出器を 2 式使い、各検出器信号の差分を VIEC への入力とする。

4. 結論 検出器を 2 式使い、サンプリング時間を適切に設定し電流測定する手法で、高ガンマ線 BG においても荷電粒子の測定が可能となり、中性子の検出ができる見通しである。

[1] K. Taguchi et al., Med. Phys., **37**, 3957 (2010). [2] X. Xu et al., J. Nucl. Sci. Technol.,

<https://doi.org/10.1080/00223131.2024.2407372>. [3] I. Kanno, H. Onabe, J. Nucl. Sci. Technol., **58**,100 (2021).

*Ikuo Kanno, Masaaki Kaburagi, Taichi Matsumura, Eka Sapta Riyana, Kenichi Terashima and Masahiro Sakamoto, Keisuke Okumura
Japan Atomic Energy Agency