

ウラン需要増加に対応する Pu 有効利用燃料の開発

株式会社日立製作所 研究開発グループ
環境・エネルギーイノベーションセンター 原子力システム研究部
荒木 颯太

1. はじめに

この度は、「ウラン需要増加に対応する Pu 有効利用燃料の開発」に対して炉物理部会優秀講演賞をいただき、大変光栄です。

日本では、資源有効利用の観点から使用済燃料を再処理して回収したプルトニウム (Pu) を利用する方針ですが、本研究は Pu をさらに有効に使うためにはどうすればよいか、の思いから検討したものです。

2. 研究の背景

2023 年に開催された国連気候変動枠組条約第 28 回締約国会議 (COP28) において、カーボンニュートラル達成に向け、世界の原子力発電容量を 2050 年までに 2020 年比 3 倍まで増加することが宣言され、COP30 までに日本を含む 33 か国が賛同しました。宣言通り世界の原子力発電容量が 3 倍まで増加するかはわかりませんが、今後世界的に原子力発電が増加しウラン燃料需要が増加する可能性が高いと考えています。

一方で、ロシアによるウクライナ侵攻に伴い、ロシアなど東側諸国が権益をもつウラン鉱山やウラン濃縮工場へ日本や欧米の企業がアクセスできなくなるといった、地政学的な要因によるウラン燃料サプライチェーンへの影響が顕在化しています。このような状況から、今後ウラン燃料の需給がひっ迫し、価格が増加する可能性があると考えています。

3. 概要

そこで、ウラン燃料価格が増加しても、安価な原子力発電を維持するために、再処理で回収される Pu をさらに有効利用できないかと考えました。六ヶ所再処理工場では、最終的に年間 800 トンの使用済燃料が再処理され、年間 6~7 トン程度の Pu が回収される予定です。この Pu は、当面の間は BWR をはじめとする軽水炉で使用されます。この Pu から重量当たりに取り出すエネルギーを増加する (Pu 利用効率を高める) ことができれば、ウラン燃料をさらに節約できます。

軽水炉で Pu から取り出すエネルギーを増加するうえでの課題は、非核分裂性 Pu による熱中性子吸収です。使用済燃料から回収された Pu には、非核分裂性で、かつ大きな中性子捕獲断面積をもつ Pu-240 が 30%程度含まれるため、そのような同位体を含まないウラン燃料と比較して中性子の損失が大きくなります。このため、Pu を含む燃料では、ウラン燃料と比較して運転中の臨界維持に必要な核分裂性物質濃度を高める必要があります。軽水

炉でプルトニウムを燃焼すると、Pu-239 が中性子捕獲し、Pu-240 へ核反応することにより、運転が進むにつれて Pu-240 の同位体割合が増加するため、中性子の損失がさらに大きくなります。

この Pu-240 の増加を抑制することで、Pu を最大限活用することをめざし、まず Pu-240 が増加するメカニズムを分析しました。Figure 1 に、Pu 同位体のうち Pu-239 と Pu-240 の熱群領域の中性子吸収断面積（核分裂と捕獲断面積の和）を示しました。横軸は入射する中性子のエネルギー、縦軸は中性子吸収マイクロ断面積を示しています。①Pu-239 による中性子吸収では Pu-239 が核分裂により減少するとともに、Pu-239 が Pu-240 に核変換することで Pu-240 の同位体割合が増加します。②Pu-240 による中性子吸収では Pu-240 が Pu-241 に核変換することで Pu-240 が減少します。これらの反応のエネルギー依存性に着目すると、①Pu-239 による中性子吸収は②Pu-240 による中性子吸収よりも熱群の領域で起こりやすいことが分かります。そのため熱群が多く存在する軽水炉においては、①Pu-239 中性子吸収が優位になり、運転中に Pu-240 の同位体割合が増加します。

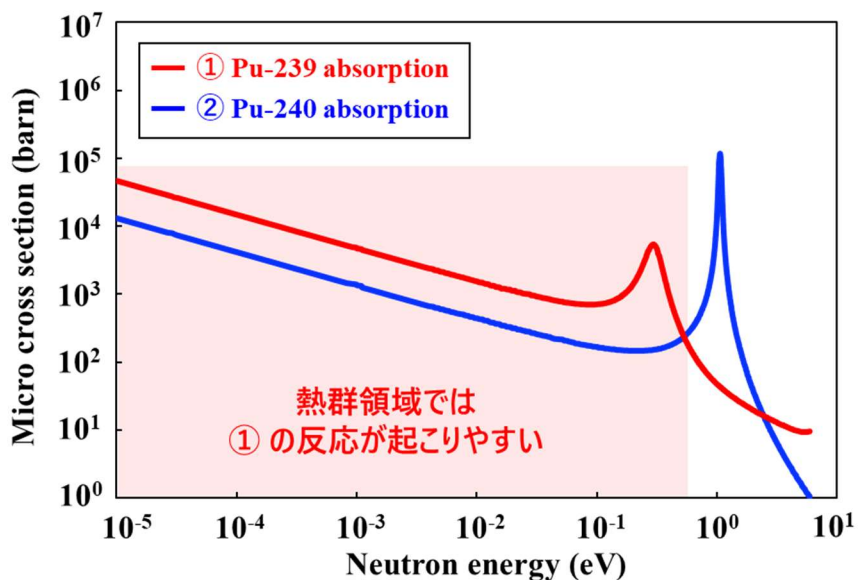


Figure 1 Pu 同位体の中性子吸収断面積

この点に着目し、本研究では、可燃性毒物として燃料によく用いられるガドリニウムを使って Pu-240 の増加を抑制できないかと考えました。Figure 2 に、Pu 同位体の中性子吸収断面積に Gd-157 の中性子捕獲断面積を重ねたものを示します。ガドリニウムの中性子吸収反応は、熱群領域で、①Pu-239 による中性子吸収よりもさらに 3 桁ほど断面積が大きな反応です。そのガドリニウムと Pu を混在させることで、熱群領域でのプルトニウムの核反応を抑制し、共鳴領域に大きな第一共鳴ピークをもつ②Pu-240 による中性子吸収を相対的に増加させるアイデアです。

Figure 3 に Pu-240 割合の燃焼変化、Figure 4 に核分裂性 Pu (Pu-239+Pu-241) の燃焼変

化を、Pu とガドリニウムを混在した燃料棒 (MOX-Gd 燃料棒) と MOX 燃料棒の場合を比較してそれぞれ示します。②Pu-240 の中性子吸収が相対的に増加することで、運転が進むにつれて MOX-Gd 燃料棒の方が Pu-240 同位体割合が減少することが分かります。また Pu-239 の中性子吸収を抑制することで、核分裂性 Pu 同位体割合 (Pu-239+Pu-241) が増加することが分かります。

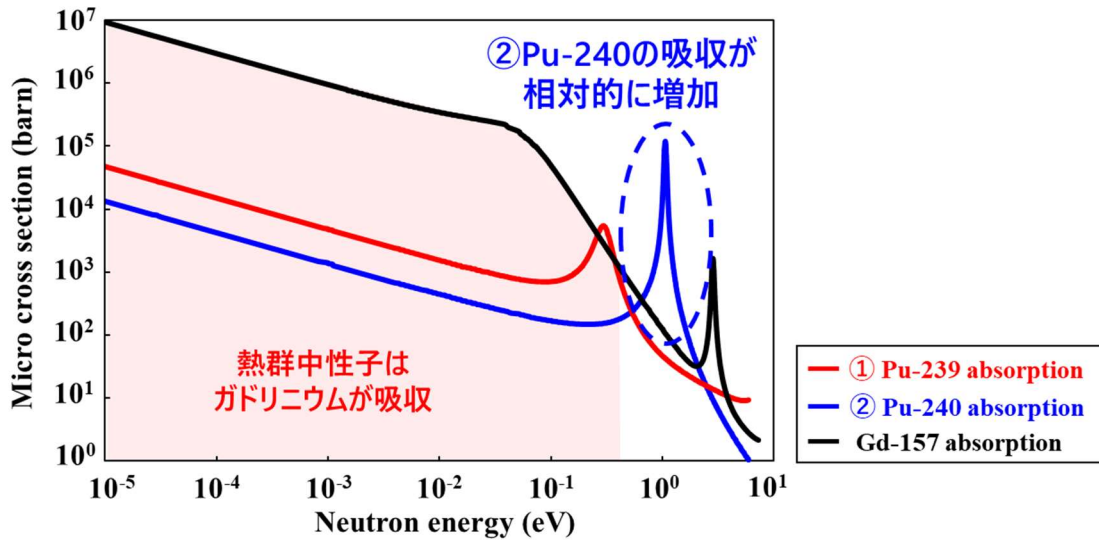


Figure 2 ガドリニウム及び、Pu 同位体の中性子吸収断面積

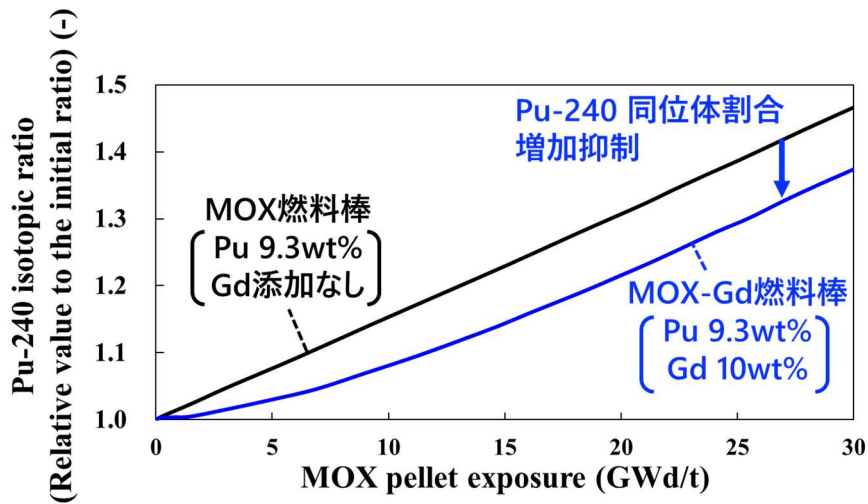


Figure 3 Pu-240 同位体割合の燃焼変化

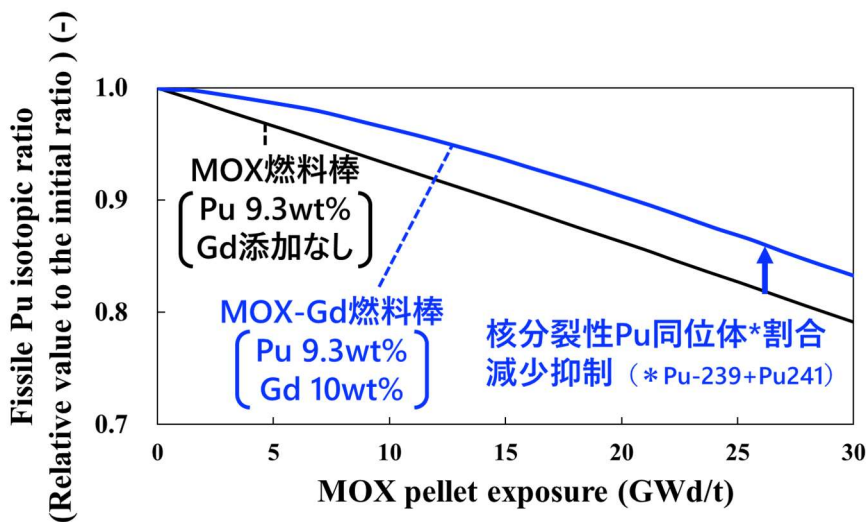


Figure 4 核分裂性 Pu (Pu-239+Pu-241) 割合の燃焼変化

このアイデアを基に Pu 有効利用燃料を設計しました。Figure 5 に、BWR 10×10 格子燃料での設計例を示します。Pu 有効利用燃料は、MOX-Gd 燃料棒をウラン燃料の UOX-Gd 燃料棒の代わりに用います。これは、余剰反応度制御のため、もともとウラン燃料に添加していたガドリニウムを MOX 棒へ移しただけなので、新たに中性子吸収物質であるガドリニウムを追加する訳ではなく、中性子経済の悪化を招くことはありません。また、すべての Gd 燃料棒を Pu とガドリニウムを混在させた MOX-Gd 燃料棒とすることで、前述した Pu-240 同位体割合の低減効果を最大化するねらいです。

最後に、Pu 有効利用燃料によるウラン使用量の低減効果を試算した結果を述べます。Figure 6 に、国内 BWR 発電でのウラン使用量を評価した結果を示します。図中に示した条件で評価した結果、Pu 有効利用燃料は、現行 MOX 燃料よりもウラン使用量を約 10%低減できることを確認しました。

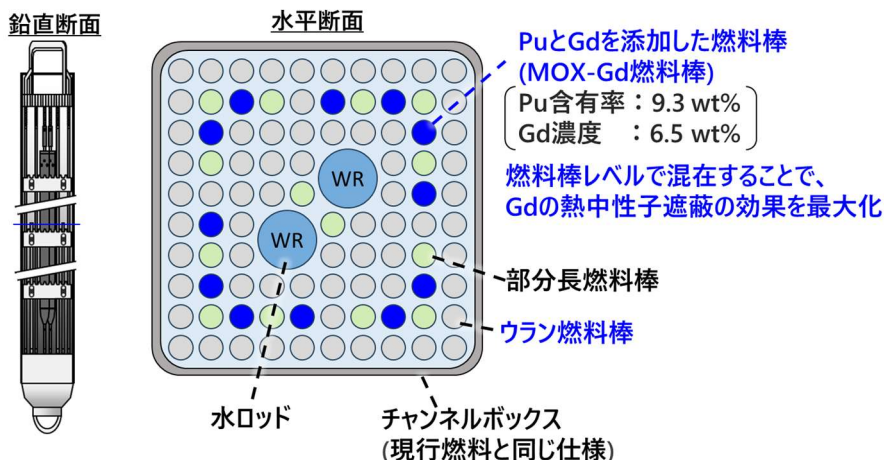


Figure 5 Pu 有効利用燃料設計例

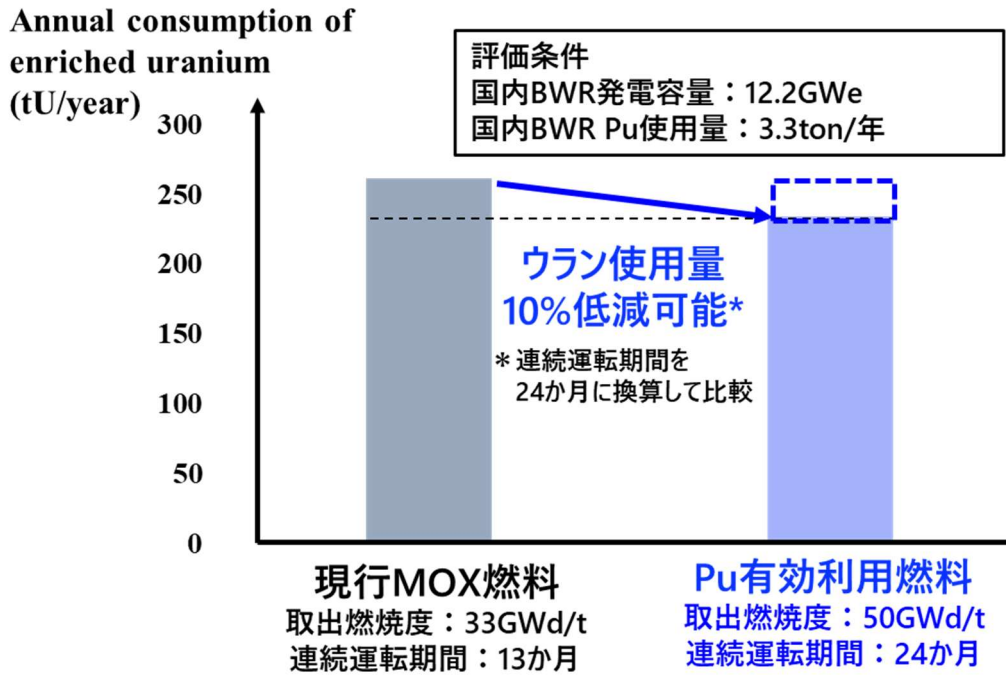


Figure 6 国内 BWR 発電でのウラン使用量評価結果

4. まとめ

本研究では、ウラン需給ひっ迫時にも原子力のコストメリットを維持するため、再処理工場で回収される Pu を軽水炉でさらに有効に利用する燃料概念を検討しました。工業製品の輸出を重要な経済基盤とする日本においては、安いエネルギーを確保・維持することは必要不可欠だと考えており、特に東西対立の顕在化によって、エネルギー安全保障に影響が出始めている昨今、原子力の重要性は非常に高いと考えています。すでにある商用炉を活用して、安価な原子力発電を維持するためにはどのような技術が必要か、今後も検討を続けていきたいです。