

# 軽水炉でのプルトニウム有効利用のための 高減速 MOX 炉心の核特性

千葉豪

平成 26 年 9 月 1 日

中性子束のエネルギースペクトルを硬くして U-238 から Pu-239 への転換を促す「高転換炉」「低減速スペクトル炉」はよく知られている炉心概念である。この逆に、余剰プルトニウムを効率的に燃焼するために Pu-239 への転換を抑制する「高減速 MOX 炉心」が提案されている [1]。

高減速 MOX 炉心の核特性を把握する目的で、PWR のピンセルを模擬した MOX 燃料体系 [2] での計算を行った。

## 1 新燃料装荷体系の核特性

まずは新燃料装荷体系について、固定されたピンピッチのもと、燃料ピン径と被覆管厚さを変えることにより減速度合いを変化させ、それに伴う核特性の変化を計算した。なお、燃料、被覆管、減速材領域の組成も固定している (Composition 2、Pu 富化度 10 wt% のものを使用)。体系は Table 1 に示す 4 通りとした。Case 1 が通常の PWR を模擬したピンセルに対応する。

Table 1: Pincell geometric specification

Case	Fuel pin radius [cm]	Fuel clad thickness [cm]
1	0.412	0.064
2	0.38	0.05
3	0.36	0.05
4	0.34	0.05

Fig. 1 に燃料領域の中性子束のエネルギースペクトルを示す。Case の ID が大きくなる、すなわち燃料ピンが細径化するにつれて、スペクトルが低エネルギー側にシフトしている様子が分かる。

Table 2 に、燃料領域における微視的反応率を、U-238 捕獲、Pu-239 核分裂、Pu-241 核分裂の 3 つの反応について示す。中性子束エネルギースペクトルの軟化に伴い、U-238 捕獲反応率が低下し、Pu-239 と-241 の核分裂反応率が増加している様子が分かる。その結果、

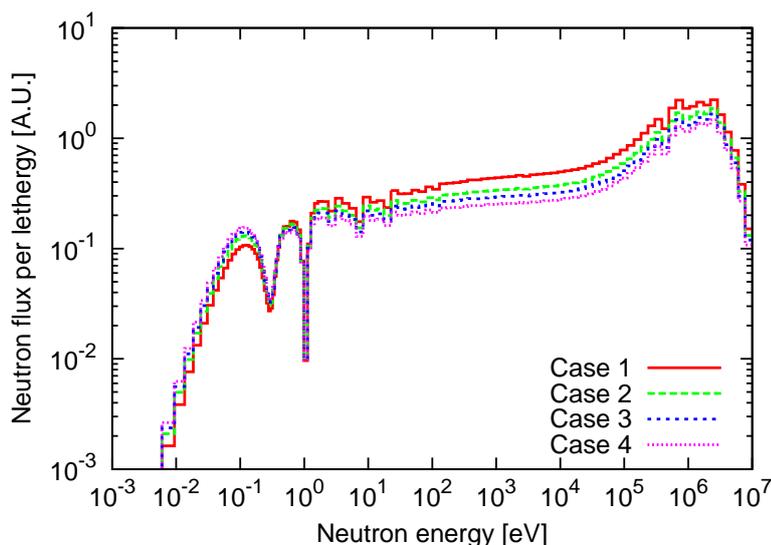


Fig. 1: Neutron flux energy spectra in fuel pellet region

U-238 捕獲反応率の、Pu-239 と-241 の核分裂反応率の和に対する比が低下しており、高減速化により U-238 からの Pu-239 の生成が抑制されることが分かる。

Table 2: Microscopic reaction rate in fuel region

Case	U-238 (n,g)	Pu-239 (n,f)	Pu-241 (n,f)	U-238(n,g)/ [Pu-239(n,f)+Pu-241(n,f)]
1	9.45	237	308	0.0173
2	8.15	252	315	0.0144
3	7.51	259	318	0.0130
4	6.89	266	323	0.0117

次に、減速材密度が低下した際の反応度効果、燃料温度が増加した際の反応度効果について計算を行った。前者については減速材領域の H-1、O-16 の数密度を 5% 低下させ、後者については燃料温度を 300[K] 増加させ、その反応度効果を計算した。結果を Table 3 に示す。高減速化に伴い、減速材密度の低下もしくは燃料温度の増加に伴う反応度の絶対値が低下している様子が分かる。一般的に軽水炉燃料は負の減速材温度フィードバック効果を持たせるため減速不足体系として設計されるが、燃料ピン径を 0.34[cm] まで細くして高減速化を図ったとしても減速不足体系であることがこの結果から分かる。

文献 [1] には、(マルチリサイクル時には)「Pu 組成が劣化し、核分裂性 Pu 富化度の増加により、ボイド係数の正への移行 (BWR) 減速材温度係数の正への移行 (PWR) 等の成立性を阻害する問題点が生じる」という記述がある (p.105)。核分裂性 Pu 富化度の増加による

Table 3: Reactivity effect of water number density reduction or fuel temperature increase

Case	$k_{\infty}$	dk/kk' for reduced water number density	dk/kk' for fuel temperature increase
1	1.13701	-0.0068	-0.0075
2	1.17667	-0.0068	-0.0067
3	1.19612	-0.0066	-0.0063
4	1.21518	-0.0062	-0.0059

減速材温度係数の正への移行について、その要因を考えるため、以下の計算を行った。まず、劣化した Pu の組成として、Pu-238:-239:-240:-241:-242:Am-241=4.6:31.1:35.1:9.8:18.4:1.0 の同位体組成を考えた。そして Case 1 の無限増倍率をほぼ再現するように Pu 富化度を調整した体系を構築した。これを Case 5 と記述する。

Case 5 について、減速材領域の H-1、O-16 の数密度を 5% 低下させた際に生じる反応度効果を計算したところ、 $-0.0012[\text{dk}/\text{kk}']$  という結果が得られ、Case 1 の結果 ( $-0.0075[\text{dk}/\text{kk}']$ ) と比較すると、値は正側に大きく近づいた。Case 5 と 1 の燃料領域の中性子束エネルギースペクトルを Fig. 2 に、随伴中性子束エネルギースペクトルを Fig. 3 に、それぞれ示す。減速材密度の減少に伴う反応度効果は、中性子束エネルギースペクトルの硬化に伴うものであるが、随伴中性子束のスペクトル形状から明らかなように、MOX 燃料では 0.3eV 程度より低い領域の中性子の高エネルギー側へのシフトによる負の反応度効果と、1eV 付近の中性子の高エネルギー側へのシフトによる正の反応度効果の相殺で決まると考えられる。Case 1 では、前者の効果が支配的である一方、高い熱中性子反応断面積を有する Pu の含有量が多い Case 5 では、熱中性子束レベルが低下するため、前者の効果が小さくなり、後者の効果の影響が拡大することになる。これが Pu 富化度の増加に伴う減速材密度係数の正側への移行の理由と考えられる。

## 2 燃焼特性

高減速 MOX 炉心の燃焼特性であるが、これまで述べた理由により Pu-239 の消費量が大きくなることに加えて、文献 [1] に記載されているように使用済み燃料の発熱量、中性子発生量がやや小さくなる。なお、発熱量の差は、主に Cm-244、Pu-238、Am-241 が大半を占めるという記載が文献 [1] にある (p.109)。Pu-238 は MOX 燃料では主に Cm-242 のアルファ崩壊により生成されることを考えると、U-238 から Pu-239 の転換を抑制する高減速 MOX 炉心で Cm-244、Pu-238、Am-241 の生成量が小さくなることは容易に説明がつくであろう。

前述の Case 1 から Case 4 について、45 GWd/t 燃焼時のいくつかのアクチノイド核種の数密度を計算した。結果を Table 4 に示す。高減速化により、核分裂性 Pu、発熱性アクチノイド核種の燃焼後数密度が低下していることが分かる。なお、本来であれば、高減速化に伴って反応度が増加することから、Pu 富化度を低下させる必要がある。この場合、U-238 の含有量が大きくなることから、この結果で見られた、高減速化に伴う核分裂性 Pu、発熱性アクチノイドの燃焼後数密度の低下は幾分緩和されるものと考えられる。

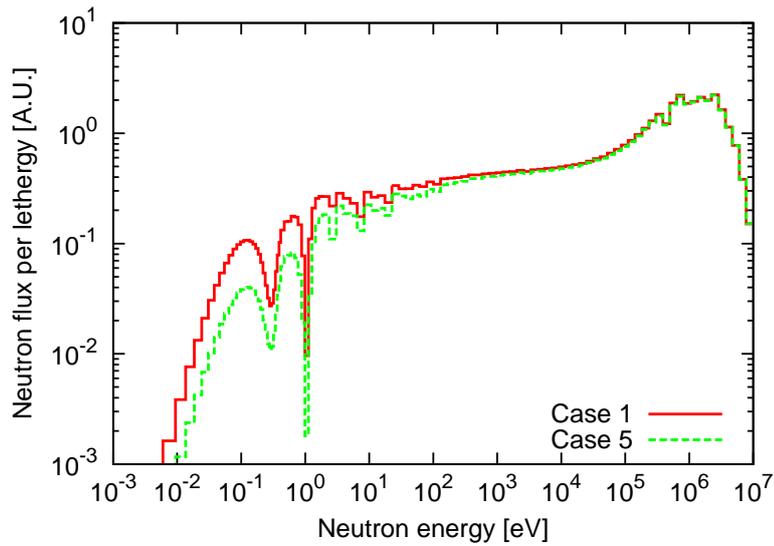


Fig. 2: Neutron flux energy spectra in fuel pellet region (multi-recycle Pu)

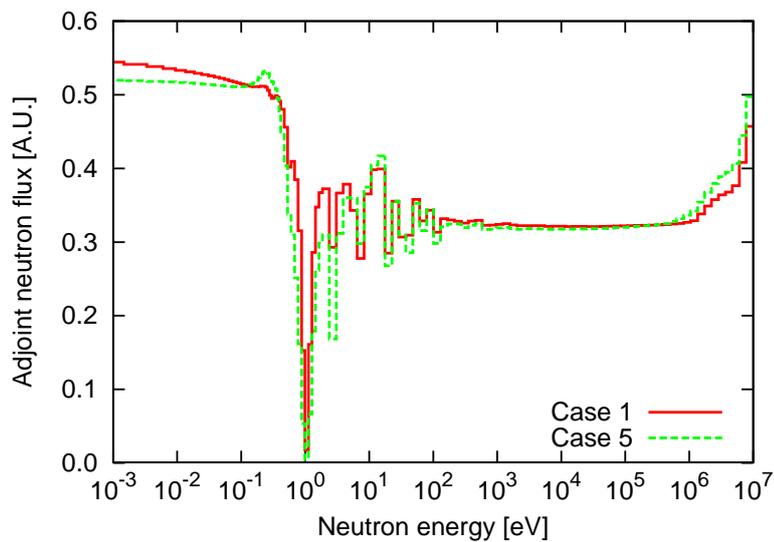


Fig. 3: Adjoint neutron flux energy spectra in fuel pellet region (multi-recycle Pu)

## 参考文献

- [1] 濱本和子、他、「軽水炉でのプルトニウム有効利用に向けた高減速 MOX 炉心」、日本原子力学会誌、43[5], 503-517 (2001).
- [2] 片倉純一、他、「JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ33」、JAERI-Data/Code 2004-015 (2004).

Table 4: Number densities at 45 GWd/t burnup ( $10^{24}$  /cm<sup>3</sup>)

Case	Pu-239	Pu-241	Pu-238	Cm-244	Am-241
1	3.82e-4	1.47e-4	3.56e-5	1.14e-5	2.03e-5
2	2.82e-4	1.22e-4	2.93e-5	8.30e-6	1.59e-5
3	2.34e-4	1.07e-4	2.57e-5	6.73e-6	1.35e-5
4	1.94e-4	9.29e-5	2.22e-5	5.35e-6	1.15e-5
(Initial)	4.98e-4	8.42e-5	1.93e-5	0.0	2.45e-5