

高速炉燃料に MA を添加するとなぜドップラー反応度が低下するのか¹

千葉 豪

高速炉において、MA を添加した燃料を用いると、冷却材ボイド反応度の絶対値は大きく、ドップラー反応度の絶対値は小さくなるのが広く知られている。前者については Am-241 の添加により随伴中性子束のエネルギースペクトルが変化すること、後者については MA の添加に伴う燃料の Pu 富化度の増加により U-238 のインベントリが低下することで説明されるのが一般的である。ここで後者について考えると、MA 添加により燃料の Pu 富化度は高く設定されることになるが、例えば 20 wt% の富化度が 25 wt% に増加したとする場合、U の重量割合は 80% から 75% に低下することになり、U 重量の相対的な変動量は 6% 強程度に過ぎない。それに比べて MA 添加に伴うドップラー反応度の低下量はずっと大きく、このような U のインベントリの変化で説明することは難しいと考えられる。

そこで、高速原型炉「もんじゅ」を模擬した炉心 [1] におけるドップラー反応度を対象として検討を行った。計算には CBZ コードシステムを用い、燃料集合体は均質として扱い、炉心は二次元円筒モデルに模擬した。ドップラー反応度は、炉心燃料、ブランケット燃料のいずれについても温度を 500 K 上昇させたときの印加反応度として計算した。

計算は以下の 5 ケースについて行った。

- Case 0 : 基準燃料組成での計算。Pu-241 の数密度は内側炉心で 2.16×10^{-4} [/cm/barn]、外側炉心で 2.91×10^{-4} [/cm/barn] である。
- Case 1a : 基準燃料組成に対して、Pu-241 の数密度を内外炉心で 10^{-4} [/cm/barn] 小さくし、その分を Am-241 数密度に追加した。
- Case 1b : Case 1a に対して、Case 0 と実効増倍率が同程度となるように、内外炉心の TRU 同位体の数密度を一律 1.15 倍に増加させた。
- Case 2a : 基準燃料組成に対して、Pu-241 の数密度を内外炉心で 10^{-4} [/cm/barn] 小さくし、その分を Pu-242 数密度に追加した。
- Case 2b : Case 2a に対して、Case 0 と実効増倍率が同程度となるように、内外炉心の TRU 同位体の数密度を一律 1.12 倍に増加させた。

得られた計算結果を Table 1 に示す。

Table 1: Numerical results of Doppler reactivity

Case		k_{eff}	Doppler reactivity [10^{-3} dk/kk']
0	Ref.	1.08903	-2.648
1a	Pu-241 → Am-241	1.01579	-2.754 (1.040*)
1b	Pu-241 → Am-241	1.09282	-2.141 (0.808)
2a	Pu-241 → Pu-242	1.02857	-2.953 (1.115)
2b	Pu-241 → Pu-242	1.09201	-2.421 (0.914)

* Ratio to reference.

Case 0 と Case 1a、2a を比較することにより、Pu-241 を Am-241 もしくは Pu-242 に置換したときのドップラー反応度の変動を見ることが出来るが、いずれにおいてもドップラー反応度の絶対値が増加した。また、増加の程度は Pu-241 が Pu-242 に置換される Case 2a の方が大きいという結果が得られた。内側炉心、外側炉心、径ブランケット、軸ブランケットの各領域における領域平均中性子束について、全エネルギー積

¹Document/Study/FR.DOP.MA

分値で規格化したものを Fig. 1 に示すが、内外炉心領域における keV 領域の中性子束が Case 1a、2a で大きくなっていること、すなわち、中性子スペクトルが軟化していることが分かる。また、この傾向は Case 2a のほうが Case 1a と比べてより顕著であり、ドップラー反応度の大小と整合する。これより、Case 0、1a、2a におけるドップラー反応度の差異は中性子スペクトルの差異で説明できるものと考えられる。このように中性子スペクトルに差異が生じた原因を考える材料とするため、Pu-241、-242、Am-241 の中性子吸収断面積と捕獲断面積を Fig. 2 に示す。keV 領域において fissile である Pu-241 は高い吸収断面積を示す。一方、non-fissile である Am-241、Pu-242 は Pu-241 と比べて小さい吸収断面積を示すが、特に Pu-242 ではその差異が大きい。これは中性子捕獲断面積を見ると明らかであるが、Am-241 は Pu-241、-242 と比較して一桁弱程度大きい値を示していることが分かる（その他の Pu 同位体に対しても同様である）。すなわち、Pu-241 を Am-241 もしくは Pu-242 に置換することにより、keV 領域の中性子吸収断面積が低下し、低エネルギーに減速される中性子数が大きくなるため、中性子スペクトルが軟化したものと考えられ、その影響は Pu-241 を Pu-242 に置換した場合に、より大きく現れる。

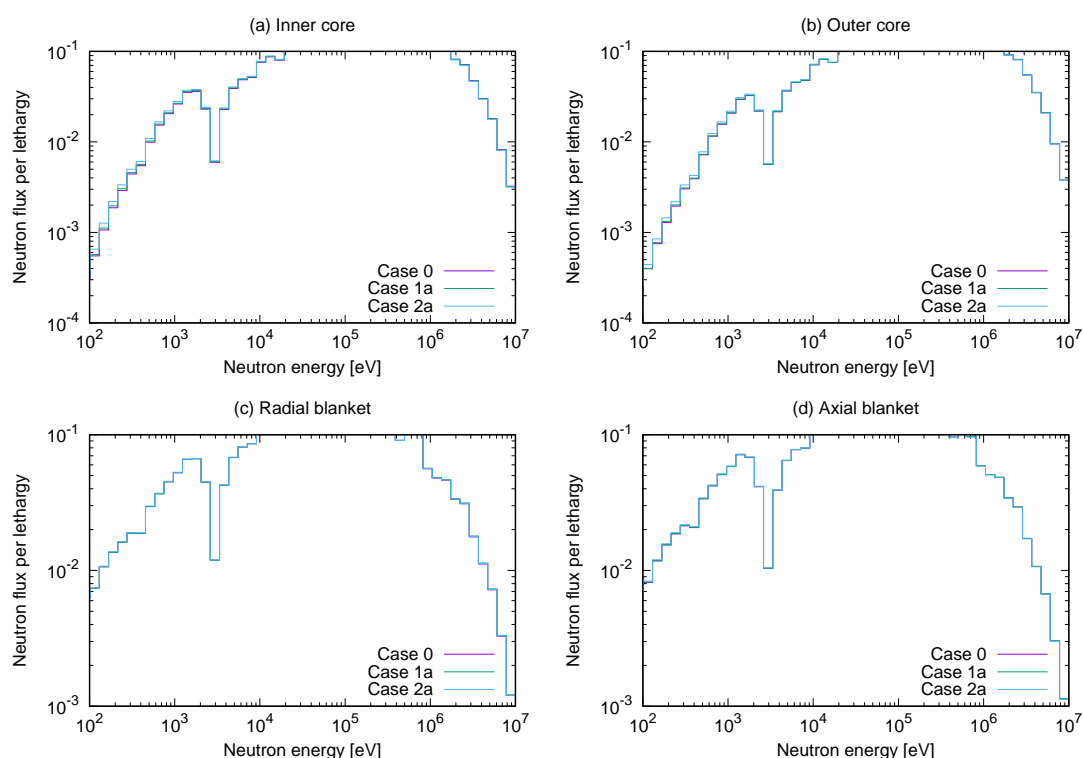


Fig. 1: Region-averaged normalized neutron flux energy spectra at several different regions

次に、Case 0 と Case 1b、2b の結果を比較することで、Pu 富化度の違いも含めた影響を考慮することが出来る。このとき、Case 1b、2b のドップラー反応度の絶対値は低下し、特に Am-241 に置換した場合に顕著である。このドップラー反応度における差異は、同様に中性子スペクトルの形状から説明することが可能である。領域平均の中性子スペクトルを比較したものを Fig. 3 に示すが、Case 1b、2b においてスペクトルが硬化していることが分かる。このスペクトル硬化の理由は同様に中性子吸収断面積の差異で説明できるであろう。

以上より、MA の添加によるドップラー反応度の低下は、keV 領域の捕獲断面積が Pu 同位体と比較して大きい Am-241 が燃料に含まれることにより、中性子スペクトルが硬化することで引き起こされると理解することが適切であると言えるであろう。

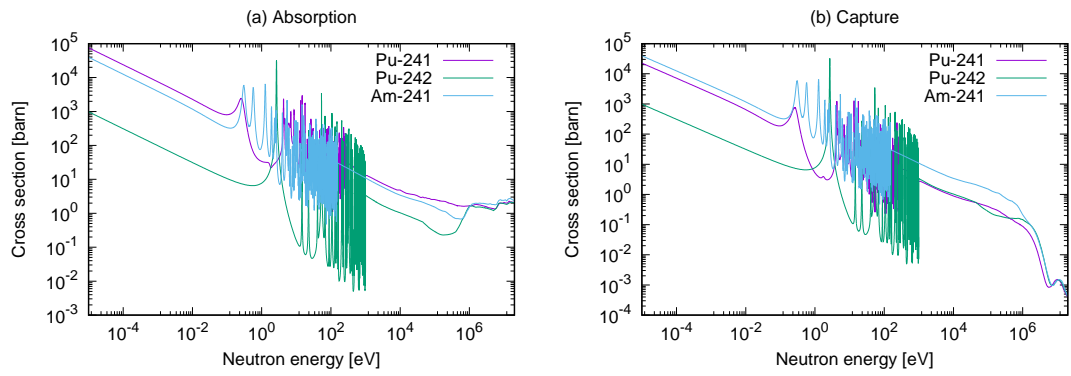


Fig. 2: Neutron absorption and capture cross sections of Pu-241, -242, and Am-241

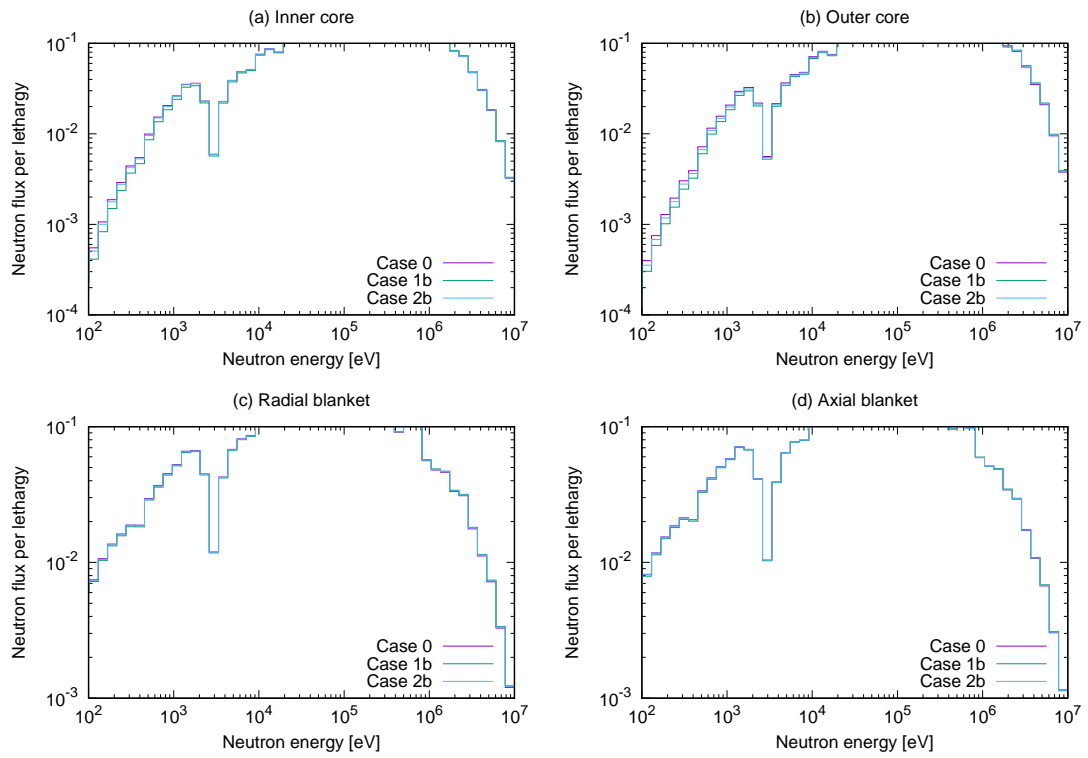


Fig. 3: Region-averaged neutron flux energy spectra at several different regions (2)

参考文献

- [1] 高下浩文、他、「核設計手法報告書」、JNC TN8410 2000-011 (2000).