

使用済み燃料からの中性子放出率

北海道大学
エネルギー環境システム専攻
原子炉工学研究室

千葉豪、川本洋右

平成 25 年 8 月 2 日

西原らが報告書 (JAEA-Data/Code 2012-018) で推定している福島第一原子力発電所の初装荷燃料の組成を用いて、比出力一定 (25.3[GWd/t]) での燃焼計算を実施し、燃焼後の燃料からの中性子放出率を計算した (福島第一原発での中性子放出率の推定値は同報告書に与えられている) 。計算は UO₂ 燃料、MOX 燃料について、異なる燃焼度で実施した。結果を次頁以降の図にまとめる。

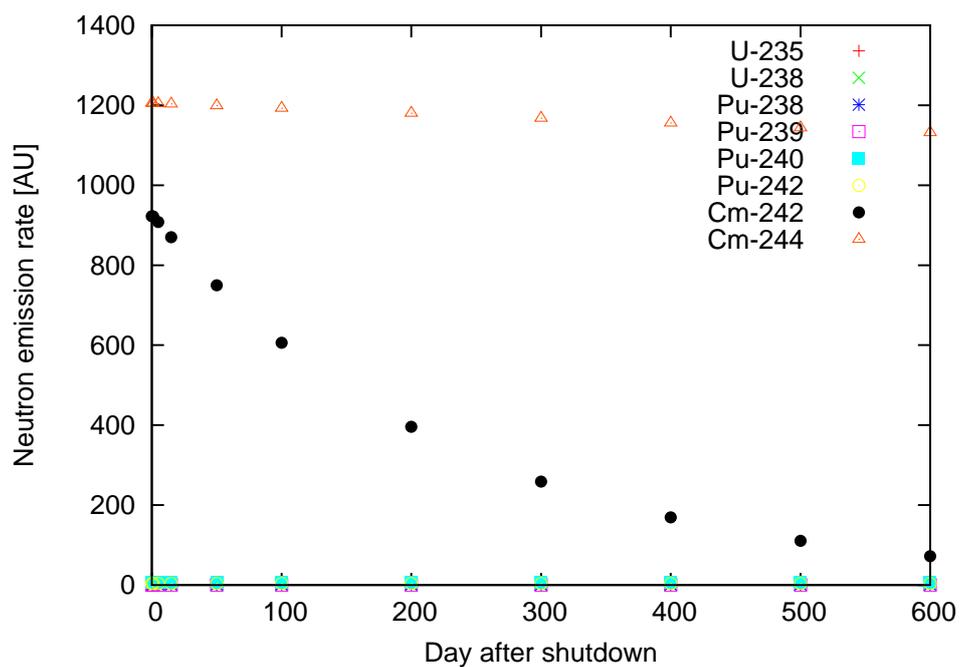


Fig. 1: 使用済み UO₂ 燃料 (43GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (linear scale)

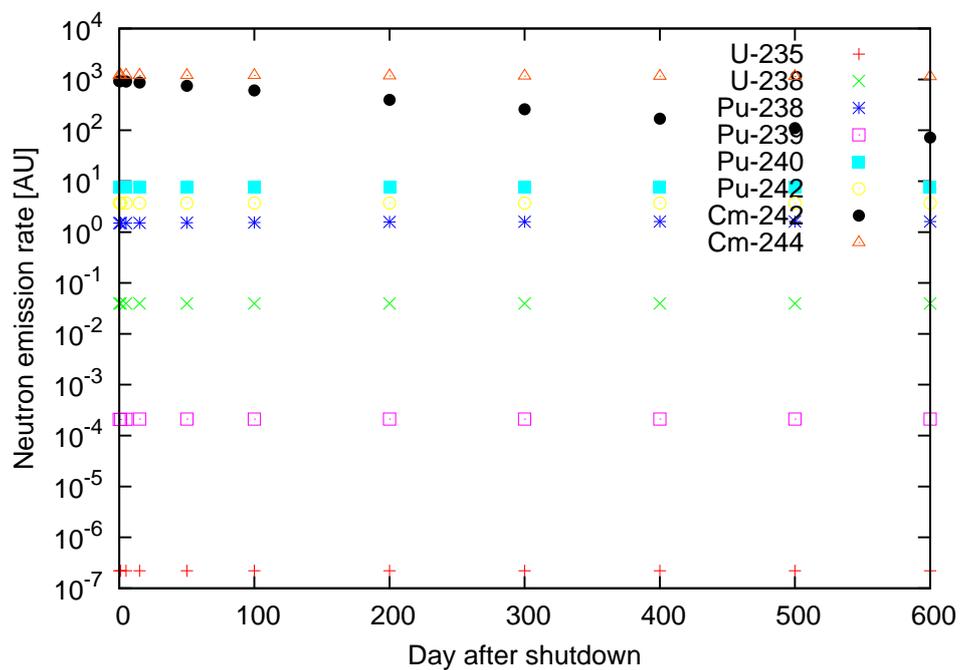


Fig. 2: 使用済み UO₂ 燃料 (43GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (log scale)

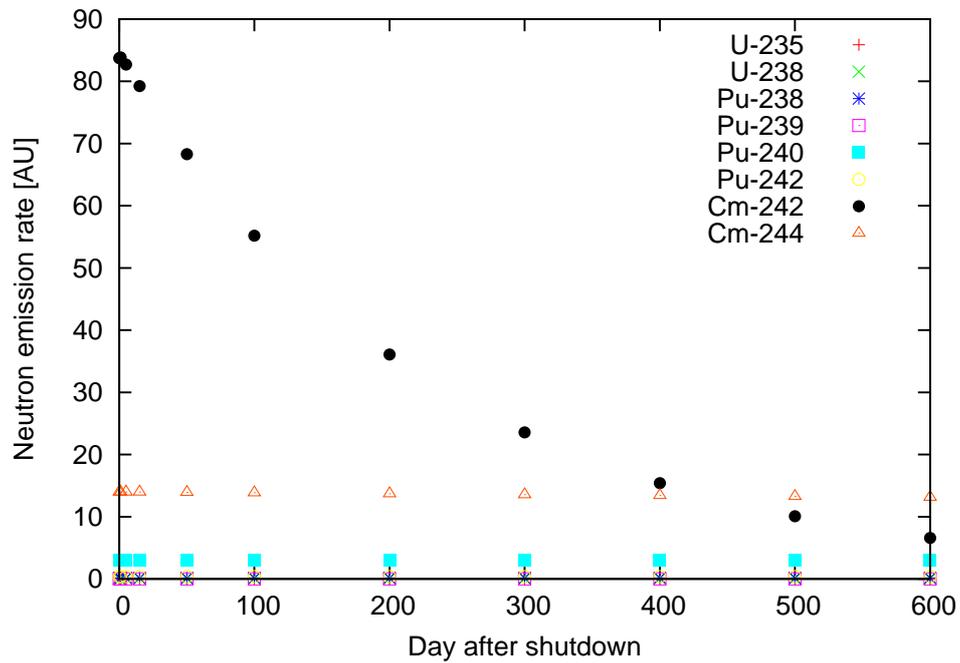


Fig. 3: 使用済み UO₂ 燃料 (18GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (linear scale)

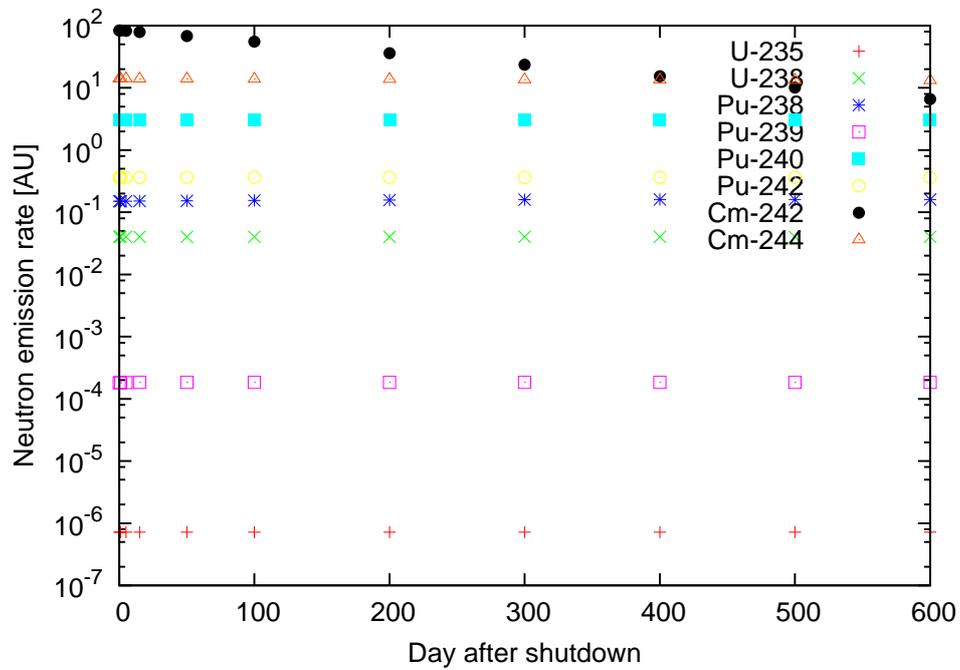


Fig. 4: 使用済み UO₂ 燃料 (18GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (log scale)

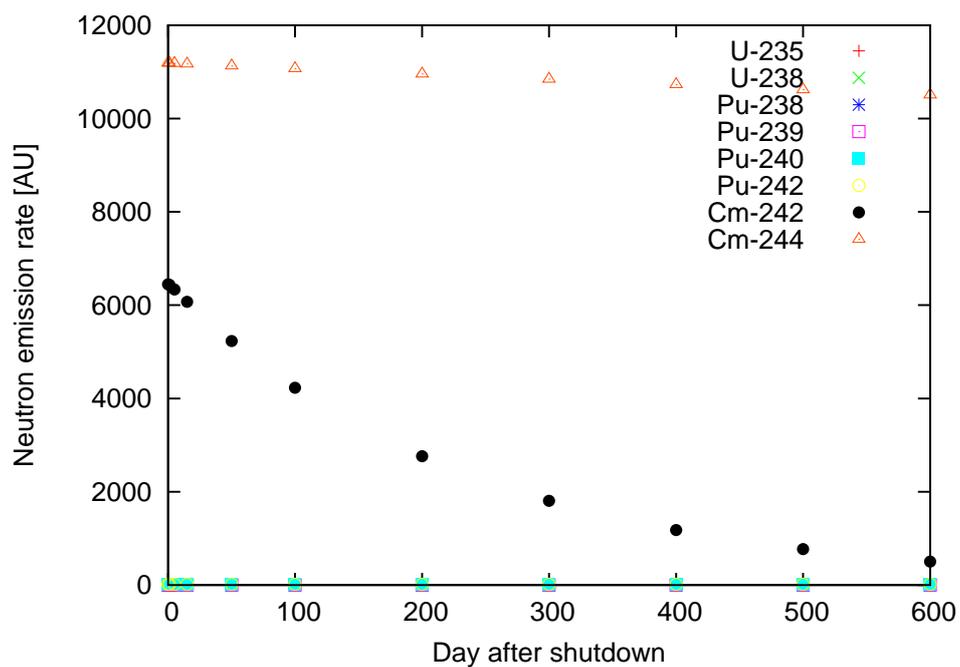


Fig. 5: 使用済み MOX 燃料 (43GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (linear scale)

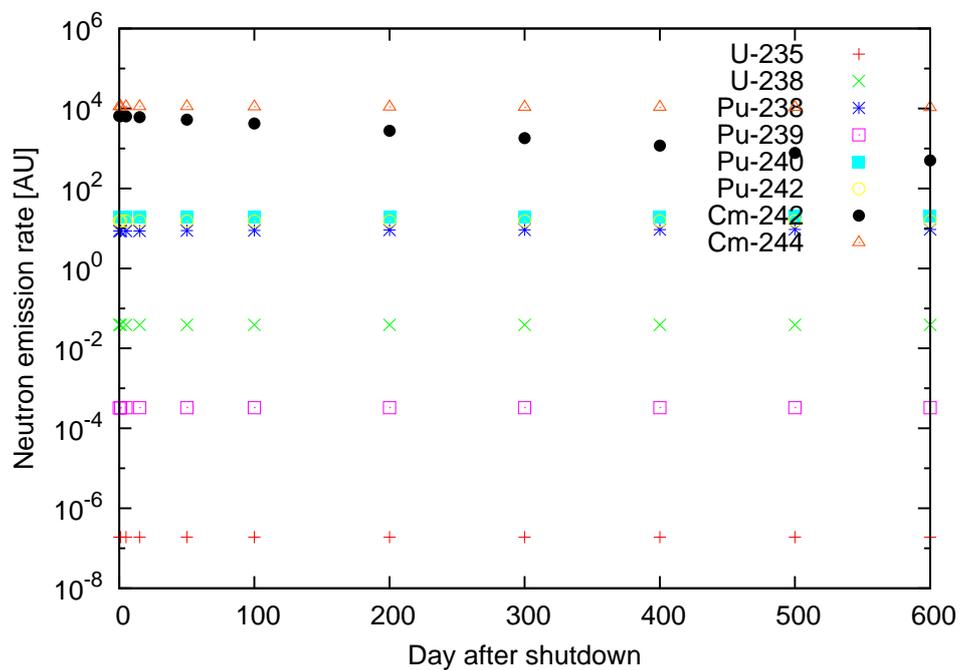


Fig. 6: 使用済み MOX 燃料 (43GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (log scale)

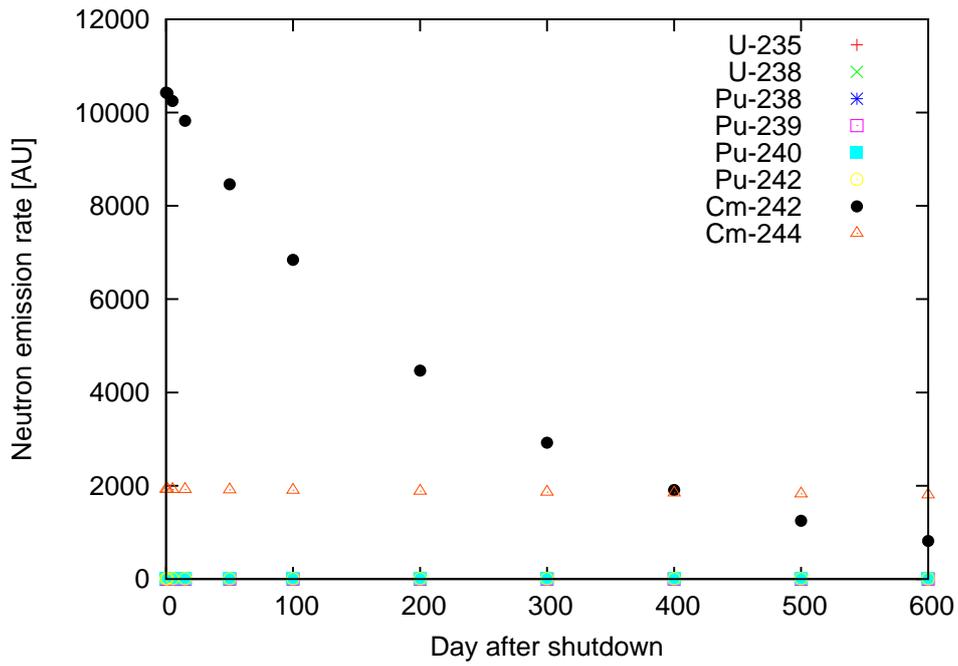


Fig. 7: 使用済み MOX 燃料 (18GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (linear scale)

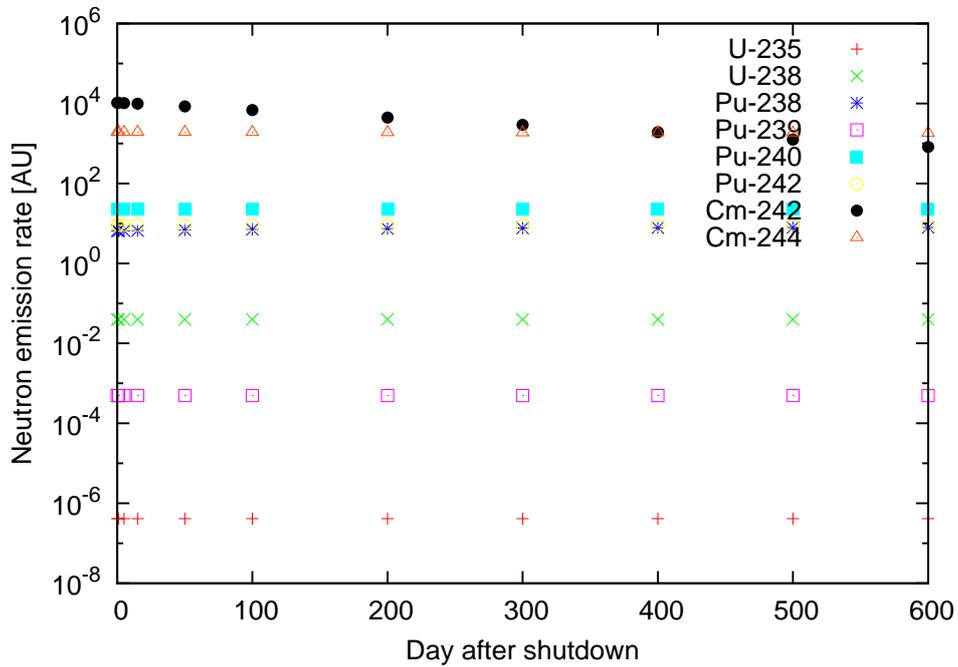


Fig. 8: 使用済み MOX 燃料 (18GWd/t 燃焼) からの中性子放出率 (log scale)

なお、「ウランからの中性子線を検出した」という情報がインターネットなどで見られるため、簡単にウラン燃料からの中性子放出率を計算してみる。

半径 0.5cm、長さ 1cm の円筒状の燃料ペレットを考え、ここに二酸化ウラン UO_2 が密度 95% で詰まっているとする。 UO_2 の密度を $10.96[g/cm^3]$ とすると、このペレットに含まれる UO_2 の重量は、 $10.96 \times (0.5 \times 0.5 \times \pi \times 1) \times 0.95 = 8.2[g]$ である。 UO_2 の分子量を $(238 + 16 \times 2) = 270$ とすると、このペレットに含まれる UO_2 分子の個数は、 $8.2 / 270 \times 6 \times 10^{23} = 1.8 \times 10^{22}$ となる。ウラン 235 の濃縮度を 4% とすると、ウラン 235 の個数は $1.8 \times 10^{22} \times 0.04 = 7.3 \times 10^{20}$ 、ウラン 238 の個数は $1.8 \times 10^{22} \times 0.96 = 1.7 \times 10^{22}$ となる。ウラン 235、238 の崩壊定数はそれぞれ 3.12×10^{-17} 、 $4.92 \times 10^{-18} [1/s]$ 、自発核分裂への分岐比はそれぞれ 7.20×10^{-11} 、 5.46×10^{-7} と与えられるので、個数に崩壊定数、分岐比を乗ずることにより、毎秒あたりの中性子放出数として、ウラン 235 が 1.6×10^{-6} 、ウラン 238 が 4.7×10^{-2} が得られる。つまり、半径 0.5cm、長さ 1cm の（新）燃料ペレットでは、20 秒に 1 回程度、ウラン 235 が自発核分裂を起こし、2 から 3 個の中性子が放出されると計算できる。ペレットから中性子線が等方に放出されるとし、距離 1m で中性子線を測定するものとする。測定面積を $10 \times 10 = 100 [cm^2]$ とすると、この測定面積が張る立体角の割合は $100 / (4 \times \pi \times 100 \times 100) = 8 \times 10^{-4}$ となる。自発核分裂により 3 個の中性子が発生するとすると、ペレットからの中性子放出数は毎秒 1.4×10^{-1} となるため、測定面を通過する中性子線の個数は、毎秒あたり $1.4 \times 10^{-1} \times 8 \times 10^{-4} = 1.1 \times 10^{-4}$ 程度となり、9000 秒毎に一本の中性子線が測定面を通過することになる。

次に、同じサイズの燃料ペレットから放出されるガンマ線について考える。燃料ペレット中での毎秒あたりの α 崩壊の回数は、ウラン 235 では 2.3×10^4 、ウラン 238 では 8.6×10^4 となる。従って、燃料ペレットの放射能は $2.3 \times 10^4 + 8.6 \times 10^4 = 110 [kBq]$ 程度となる¹。また、崩壊あたりの放出ガンマ線エネルギーは、ウラン 235 で $1.6 \times 10^5 [eV]$ 、ウラン 238 で $1.1 \times 10^3 [eV]$ であるため、燃料ペレットにおける毎秒あたりの放出ガンマ線エネルギーはウラン 235 の寄与が支配的となり $3.7 \times 10^9 [eV]$ となる。

また、ウラン 235 の α 崩壊では約 186keV のガンマ線が相対強度 0.57 で放出されるため、このエネルギーのガンマ線の放出率は毎秒 $4.6 \times 10^4 \times 0.57 = 2.6 \times 10^4$ 程度となる。ペレットからはガンマ線が等方に放出されるとし、距離 1m でガンマ線を測定するものとする。測定面積を $10 \times 10 = 100 [cm^2]$ とすると、この測定面積が張る立体角の割合は $100 / (4 \times \pi \times 100 \times 100) = 8 \times 10^{-4}$ となる。従って、この場合、測定面を通過するガンマ線の個数は、毎秒あたり $2.6 \times 10^4 \times 8 \times 10^{-4} = 20$ 程度となる。

ちなみに、43[GWd/t] まで燃焼させた UO_2 燃料では、ウラン 235、ウラン 238、セシウム 137 の放射能は相対値で 3×10^3 、 7×10^4 、 3×10^{10} と計算された（燃焼直後）。燃焼後のペレットでは、セシウム 137 の放射能はウラン 235 の 1×10^6 倍程度となる。なお、セシウム 137 は 1 回の崩壊あたり 0.9 本の 660keV のガンマ線を放出する（正確にはセシウム 137 の娘核種であるバリウム 137m が放出）。

¹ 「ウラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン」（文部科学省）によると、肌に密着せずに利用する場合の被ばく線量（単位 mSv/year）は、DEX（ウランの場合は 2.7×10^{-10} ）に放射能（Bq）と被ばく時間（hour）を乗じ、距離（m）の 2 乗で割ることにより求められる。ウランペレットが 1m の距離に四六時中存在しているとした場合、年間の被ばく量は 0.26mSv となる（10cm の場合は 26mSv）。