

重水炉はなぜ天然ウランでも臨界にできるのか*

千葉豪

平成 29 年 3 月 1 日

標題に対する回答は極めてシンプルであり「中性子吸収断面積は極めて小さいため、核燃料に対する減速材（重水）の割合を大きくすればするほど中性子は減速され、効率的に核分裂連鎖反応を起こすことができる」ということに尽きる。

水素（H-1）と重水素（H-2）の中性子捕獲断面積を比較するため、JENDL-4.0 に収納されている当該データを Fig. 1 に示す。10 keV 以下のエネルギー領域で、H-2 の断面積は H-1 と比べて 3 桁程度小さい値となっていることが分かる。

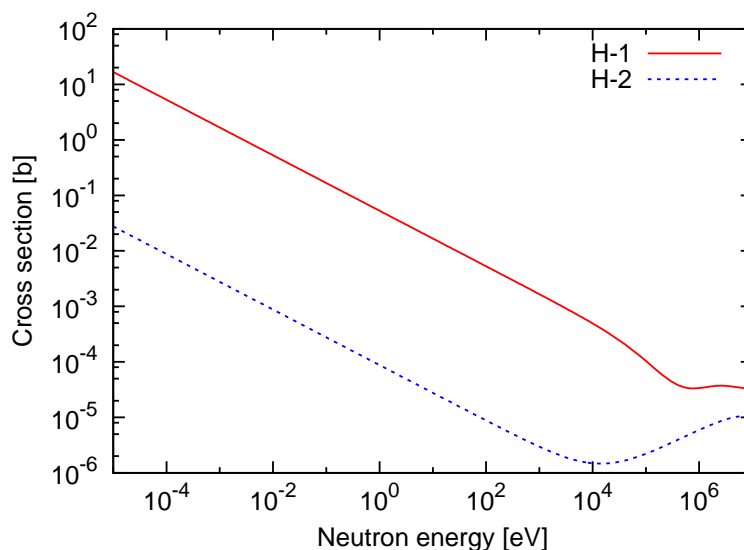


Fig. 1: Neutron capture cross section given in JENDL-4.0

PWR の UO_2 燃料を模擬したピンセル（ペレット半径 0.412[cm]、被覆管半径 0.476[cm]）を考え、減速材に軽水を用いた場合と重水を用いた場合とで無限増倍率を計算した。なお、減速材領域には水素もしくは重水素と酸素のみが含まれるものとし、水素もしくは重水素の数密度を 0.066[1/cm/b]、酸素の数密度を 0.033[1/cm/b] とした。

燃料の U-235 濃縮度とピンピッチを可変パラメータとした計算結果を Fig. 2 に示す。

*/Document/Fundamental/HWR

軽水減速の場合には、ピンピッチが小さい場合には減速不十分により、ピンピッチが大きい場合には水素による中性子吸収により、無限増倍率は減少し、あるピンピッチで極大値を示す。今回の計算で模擬したPWR燃料のピンピッチは1.265[cm]であるため、3.4%濃縮燃料セルは「減速不足」の領域で設計されていることが分かるであろう¹。

一方、重水減速の場合には、ピンピッチを増加させるに従い、無限増倍率が単調に増加していくことが分かる。これは、重水素による中性子吸収が無視出来ることから説明できるであろう。

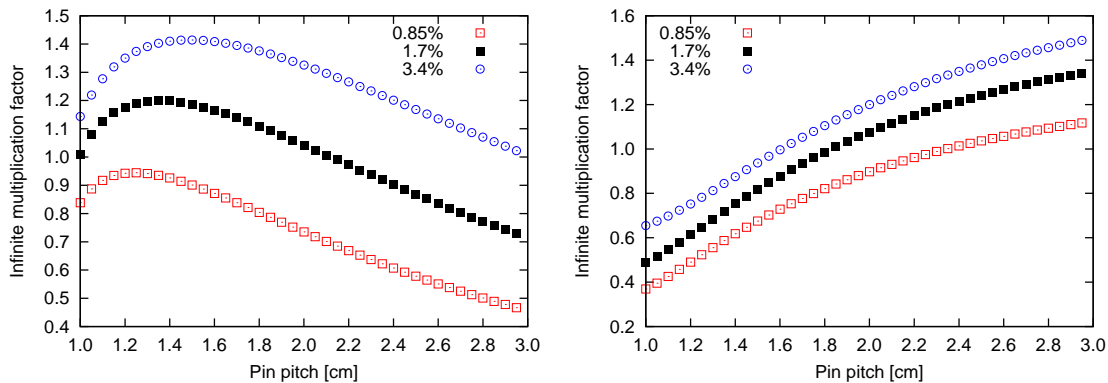


Fig. 2: Infinite multiplication factor dependent on pin pitch (left: light-water reactor, right:heavy-water reactor)

次に、燃料領域における中性子束エネルギースペクトルのピンピッチに対する依存性をFig. 3に示す(燃料ペレットのU-235濃縮度は0.85%とした)。ピンピッチの増加に伴い、中性子束エネルギースペクトルが軟化していることが分かる。

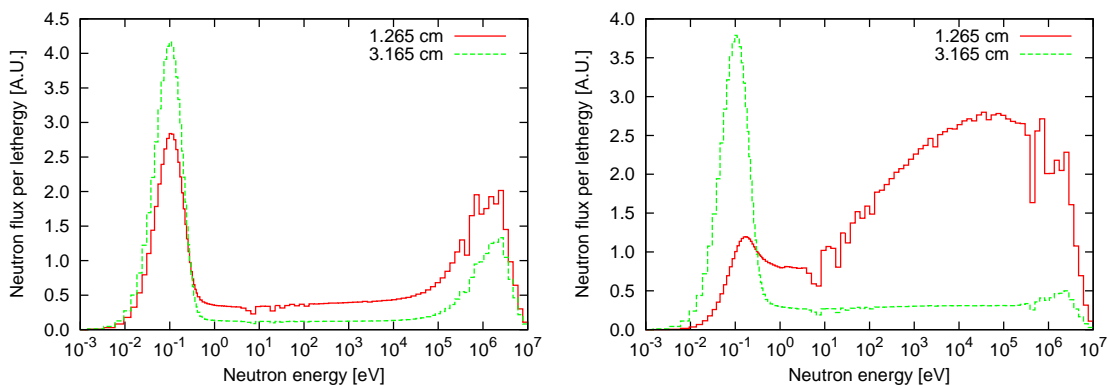


Fig. 3: Neutron flux energy spectra in fuel pellet region with 0.85% U-235 enrichment (left: light-water reactor, right:heavy-water reactor)

中性子束エネルギースペクトルの変動が、核分裂連鎖反応、すなわち無限増倍率に与える

¹出力の増大(冷却材温度の上昇)に対して、負の反応度フィードバック効果を持たせるため。

影響を考える際には、 η 値（中性子吸収あたりの核分裂による中性子発生数）のエネルギー依存性を観察することが有益である。そこで、まずは燃料ペレット領域における巨視的断面積 $\nu\Sigma_f$ 、 Σ_a から計算した η 値を Fig. 4 に示す。熱中性子エネルギー領域において、エネルギーが低いほど η 値が大きくなっており、中性子の減速が無限増倍率を大きくすることが分かるであろう。

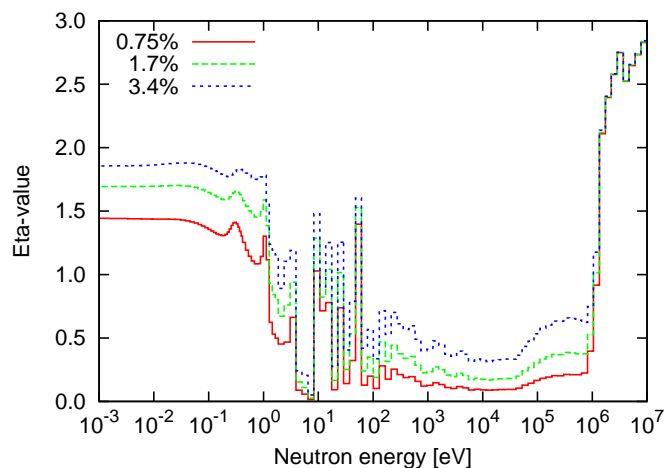


Fig. 4: ‘Macroscopic’ η -value of fuel pellet region

ただし、我々は減速材領域における中性子吸収の効果も考える必要がある。そこで次に、ピンセル平均の巨視的断面積から計算した η 値を Fig. 5 に示す（燃料ペレットの U-235 濃縮度は 3.4% とした）。軽水減速セルでは、ピンピッチの増加に伴い水素による中性子吸収が増加するため、特に熱エネルギー領域で η 値が減少していく。従って、ピンピッチを大きくして中性子束エネルギースペクトルを低い側にシフトさせても、正味の η 値が低下するため、無限増倍率は減少していくことになる。一方、重水減速セルでは、重水素による中性子吸収は無視できる程度であるため、ピンピッチの増加に伴う η 値の減少はほとんど見られず、ピンピッチに増加は無増倍率を大きくしていく。

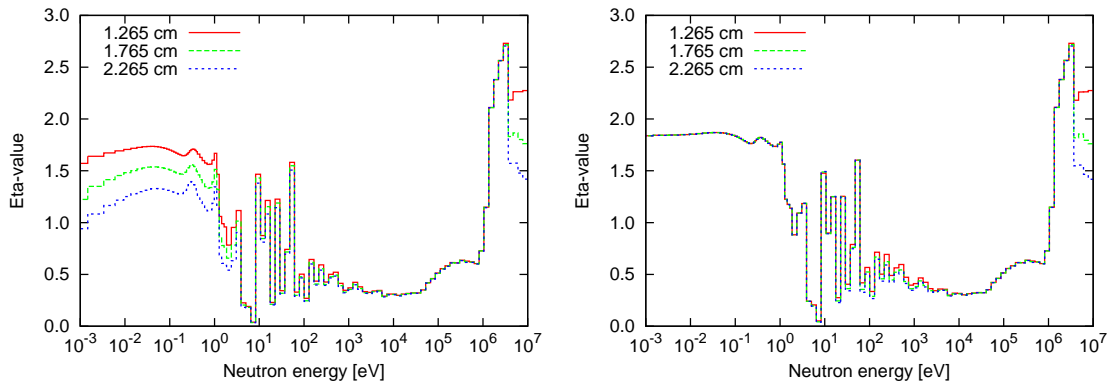


Fig. 5: ‘Macroscopic’ η -value of homogenized pincell (left: light-water reactor, right: heavy-water reactor)

A 黒鉛減速炉の特性

減速比が大きい減速材としては、重水のほかに黒鉛が挙げられる。そこで、同様の体系において減速材を黒鉛に置換して計算を行なった。なお、減速材領域の炭素の数密度は、IRPhEPハンドブックのHTR-10のデータを参考に、 0.0867 [/b/cm] とした。

無限増倍率の計算結果を Fig. 6 に示す。重水炉と同様に、減速材の割合を大きくするにつれて無限増倍率が大きくなっていくことが分かる。また、黒鉛は質量が大きく減速能が小さいため、燃料に対する減速材の割合を大きくする必要があることが分かる。

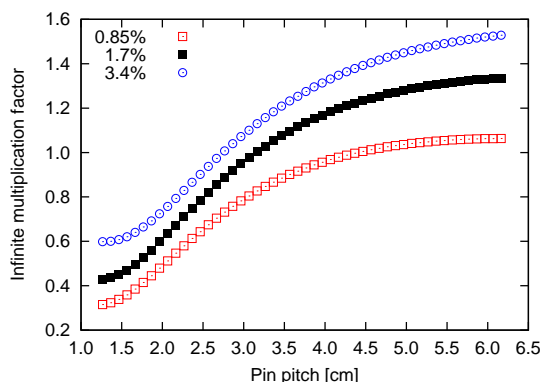


Fig. 6: Infinite multiplication factor dependent on pin pitch for carbon reactor

さらに、無限増倍率が 1.4 程度になるピンピッチを各々の減速材について選び、燃料領域の中性子束エネルギースペクトルを計算した (U-235 濃縮度は 3.4wt%)。結果を Fig. 7 に示す。MeV 領域に特徴的な差異が現れていることが分かる。

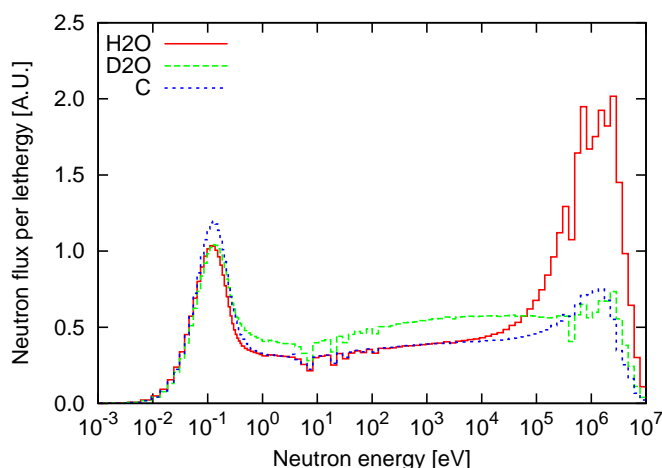


Fig. 7: Neutron flux energy spectra in fuel pellet region with 3.4% U-235 enrichment

最後に、同一の条件で燃料領域における U-238 の中性子捕獲反応率を計算した。結果を Fig. 8 に示す。共鳴領域において黒鉛減速のほうが有意に大きい値を示しているが、Fig. 7

で示したように、中性子束スペクトルには当該領域で差異が見られなかったことから、U-238の実効捕獲断面積の差異に起因するものと考えられる。黒鉛減速炉では減速材の割合を大きくするため、それに伴いU-238の共鳴自己遮蔽効果が小さくなり、U-238実効捕獲断面積が大きくなるものと推察される。

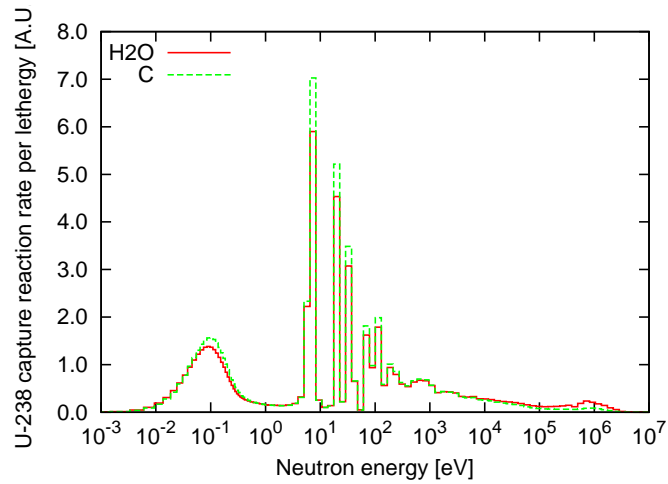


Fig. 8: Uranium-238 capture reaction rate energy spectra in fuel pellet region with 3.4% U-235 enrichment