

< 炉物理部会賞受賞記念寄稿 >

炉物理の基本的な事柄について確認した

北海道大学 千葉 豪

1 はじめに

今年度の炉物理部会賞を受賞することが出来たので、部会報への寄稿という副賞もいただくことになりました。文章を書くことが好きな私にとっては大変有難い副賞です（逆にPPT資料を作ることは大嫌い）。「また千葉が...」と思う方もいらっしゃると思いますが、副賞ということでご勘弁下さい。

この4月から北海道大学で教員（の見習い）をしており、学生さんに原子力工学の基礎を教えるべく種々の本を勉強したり、いろいろな授業に顔を出して（原子力）工学の基礎を教えてもらったりしています。その際に、炉物理の基本的な事柄に関して疑問に感じたことがいくつかあったので、それについて書いていきたいと思います。

2 中性子の増倍に有利なのは熱中性子系？高速中性子系？

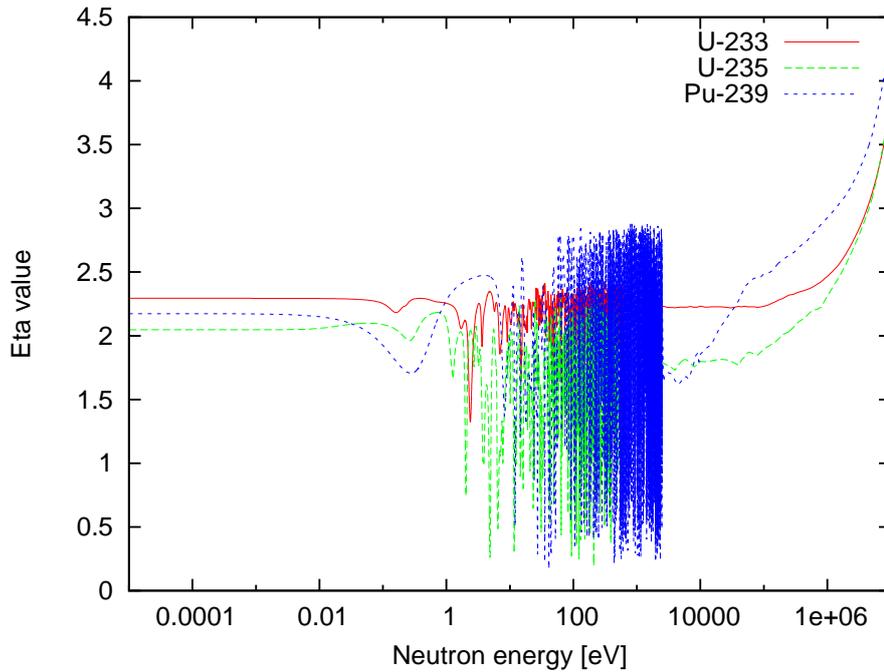
U-235の核分裂断面積を観察すると、熱中性子領域での値は高速領域と比べて二桁程度大きいことが分かります。それを受けて、「熱中性子領域での核分裂断面積が大きいから、熱中性子系では臨界になりやすい」というような説明がされることがあります。確かに、断面積が大きければ核分裂する確率は大きいわけですから、臨界になりやすそうです。一方、高速炉に対して、「核分裂の連鎖反応の過程で中性子が余るため、それを使ってU-238からPu-239への転換を行う」という説明がよくされます。中性子が余る、ということは核分裂の連鎖反応を維持することが容易であることを意味しますから、高速中性子系で臨界になりやすいということが言えます。

結局のところ、臨界になりやすい、すなわち中性子の増倍に有利なのは、熱中性子系なのでしょうか、高速中性子系なのでしょうか？

中性子の増倍については、 η 値、すなわち $\nu\sigma_f/(\sigma_c + \sigma_f)$ で議論するのが炉物理の常道となっています。Fig. 1に主要重核の η 値を示しますが、熱領域では全ての核種が2から2.3程度の値をとる一方、高速領域では入射エネルギーの増加に伴い値が増加していることが分かります。この図より、中性子の増倍という観点からは、U-235については熱領域と高速領域で同程度、Pu-239については高速領域の方が有利ということが分かります。

ここまでの議論はありきたりといえはありきたりですが、とりあえずU-235、Pu-239といった核分裂性核種を100%に濃縮して用いた場合は高速中性子系で中性子の増倍は起こりやすいと考えてよいでしょう。

ここで、高速炉の過酷事故を考えてみて下さい。ナトリウムを冷却材として使っていることを無視するとして、わずかに未臨界状態の炉心に燃料を冷やすための水を注入するとしたら、炉心は核的にどうなると思いますか？直感的に、「中性子が減速されて再臨界になる」と

Fig. 1: η value of heavy nuclides

思いませんか？しかし、これまでの議論を踏まえると、熱領域の η 値は高速領域よりも小さいため、反応度は低下することになってしまいます。

また、「高速中性子では核分裂断面積が小さいため、連鎖反応を起こさせるためには高濃度の燃料が必要である」という解説を目にすることがあります。この説明には首をかしげる点がありますが、軽水炉の MOX 燃料と、高速炉 MOX 燃料とでは、後者の方が Pu 富化度は高いことは確かです。この事実はこれまでの議論と矛盾することになります。

以上より、これまでの議論で何かを見落としていたと考えられますが、それは何だと思えますか？そうです、実際の原子炉では、U-235 や Pu-239 といった核分裂性核種は U-238 と混合して用いられる、という点です。では、U-238 と混合された場合での実効的な重核種の η 値はどうなるのでしょうか。重核種と U-238 が混合された系での巨視的な η 値を Fig. 2 に示します（なお、この図では多群データとしました）。熱領域では Fig. 1 と比べて大きな差異はありません。これは熱領域では U-238 の捕獲断面積は核分裂性核種の核分裂断面積と比べてずっと小さいことに由来します。一方、高速領域では、U-238 の捕獲断面積と核分裂断面積の差が熱領域と比べてずっと小さくなるので、U-238 との混合系の η 値は核分裂性核種単体での値と比べて低下することが分かります。つまり、核分裂性核種が U-238 と混合される通常の場合には、中性子の増倍という観点からは熱中性子系のほうが望ましいと言えることが分かります（逆に、U-238 の Pu-239 への転換という観点からは高速中性子系のほうが望ましいと言えます）。

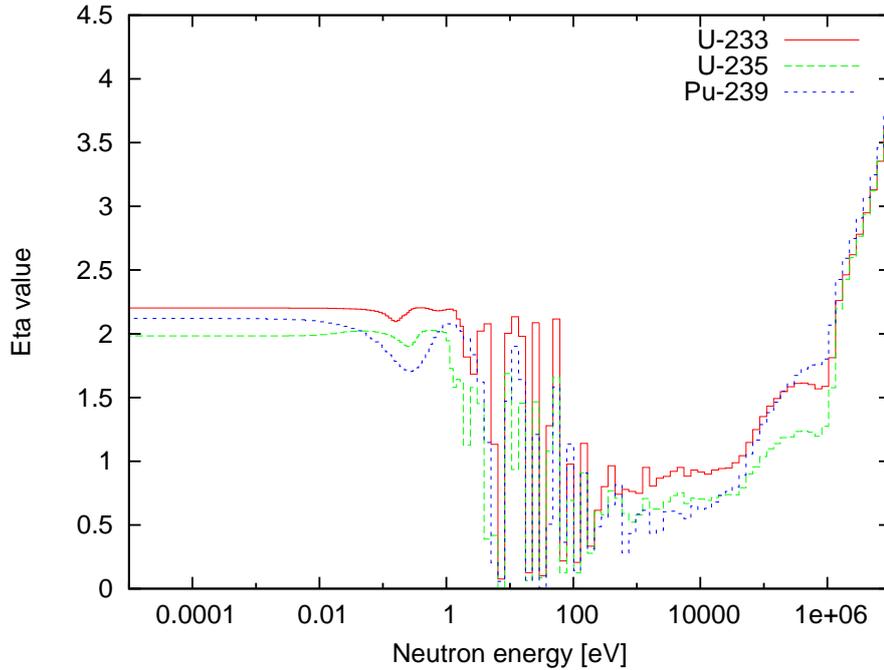


Fig. 2: η value of composition of heavy nuclide and uranium-238

3 軽水炉燃料の非均質効果

技術論文であれば各節できちんと結論を整理すべきですが、本稿はそういうものではないので、次の話題に移りたいと思います。

ある燃料関係の授業で、軽水炉燃料の非均質効果について以下のように説明された先生がいました。「燃料と減速材を分離して配置させることにより、減速材領域での中性子の熱化を促進し、効率的に熱中性子核分裂を起こさせる」というものです。これは、燃料領域で核分裂により発生した中性子が減速材領域に移動し、そこで熱化されて燃料領域に戻る、というようなイメージになるでしょうか。非常に分かりやすいですが、正しいのでしょうか？一般的な炉物理屋であれば、非均質効果と言えば共鳴自己遮蔽効果を連想するのが普通かと思いますが、かといって、この「減速材領域での中性子バイパス論」もあながち誤っているとは思えません。

そこで、数値計算で軽水炉燃料の非均質効果というものを定量的に評価することにしました。

一般に、中性子のエネルギースペクトルは重核種の断面積の共鳴ピークに対応して歪むため、共鳴ピーク付近での反応率が低下し、反応断面積は実効的に減少します。この効果は「エネルギー的な共鳴自己遮蔽効果」と呼ばれますが、この効果は重核種を密集させた非均質体系で促進されるため、原子炉で主要な共鳴断面積である U-238 の実効捕獲断面積がより小さくなり、炉心の反応度が増加することになります。また、共鳴ピークや熱中性子断面積など、重核種が大きい断面積を有するエネルギー領域では、中性子束の空間分布が燃料ピン中心で大きく歪みます。従って、燃料ピン中心付近の反応率が低下し、燃料ピンセル全体

としての実効的な反応断面積は小さくなります。この効果は「空間的な自己遮蔽効果」と呼ばれ、例えば U-238 の巨大共鳴を有するエネルギー領域では実効捕獲断面積が低下することで炉心に正の反応度を与えます。

非均質効果は、この「エネルギー的な効果」と「空間的な効果」とに大別することができます。そこで、非均質効果に対するこれらの内訳を定量的に評価するため、以下の4通りの計算を行いました。

- ケース A：体積重みで数密度を混合した系（均質系）で実効微視的、巨視的断面積、無限増倍率 k_A を計算
- ケース B：非均質系で実効微視的断面積を計算し、それをを用いて均質系での巨視的断面積、無限増倍率 k_B を計算
- ケース C：均質系で実効微視的断面積を計算し、非均質系で巨視的断面積、無限増倍率 k_C を計算
- ケース D：非均質系で実効微視的、巨視的断面積、無限増倍率 k_D を計算

無限増倍率に対する成分別の非均質効果は以下のようにして得ることが出来ると考えられます。

- 正味の非均質効果： $k_D - k_A$
- エネルギー的な非均質効果： $k_B - k_A$
- 空間的な非均質効果： $k_C - k_A$

計算対象は ORIGEN ライブラリの作成に用いられた PWR 燃料ピンセルとし、U-235 の濃縮度が 4.1% の UO_2 燃料と Pu 富化度が 10% の MOX 燃料としました。また、計算の曖昧さを除くため、減速材領域に含まれる構造材核種は含まないものとしました。

計算は JENDL-4.0 ベースの 107 群ライブラリを用いて行い、共鳴計算は Dancoff 係数を用いた等価原理で、固有値計算は衝突確率法でそれぞれ行いました。

得られた無限増倍率を Table 1 に、それから計算された非均質効果を Table 2 にそれぞれ示します。エネルギー的な効果と空間的な効果の和は、正味の非均質効果と比較して 10 から 15% 程度大きく、両者の干渉効果が無視できない程度あることが分かりますが、非均質効果のおおまかな分析は可能であると考えられます。

Table 1: Results of infinite multiplication factor

Case	UO_2	MOX
A	1.23526	0.98946
B	1.31232	1.04194
C	1.25606	1.08345
D	1.31886	1.13142

Table 2: Results of heterogeneity effect (unit:%dk/kk')

	UO ₂	MOX
Net effect	+5.13	+12.68
Energy component	+4.75	+5.09
Space component	+1.34	+8.77
(Sum of energy and space components)	(+6.09)	(+13.86)

次に、摂動計算により、非均質効果を中性子生成成分、吸収成分、散乱成分に分けて評価しました。結果を Table 3 に示します。エネルギー的な効果は主に吸収成分で生じていること、空間的な効果は生成成分と吸収成分との相殺で決まっていることが分かります。

Table 3: Component-wise heterogeneity effect (unit:%dk/kk')

	Yield	Absorption	Scattering
UO ₂ energy component	-0.21	+4.99	-0.03
UO ₂ space component	-7.08	+7.65	+0.77
MOX energy component	-0.96	+6.11	-0.05
MOX space component	-29.17	+35.17	+2.24

エネルギー的な効果のエネルギー群別寄与を UO₂、MOX 燃料について Figs. 3、4 にそれぞれ示します。吸収成分においては主に U-238 の巨大共鳴が支配的であること、生成成分においては 10eV 付近で Pu-239 の共鳴と思われる比較的大きな成分が MOX 燃料の場合に見られることが分かります。

次に空間的な効果のエネルギー群別寄与を UO₂ 燃料について Fig. 5 に示します。熱領域においては大きな正の吸収成分と負の生成成分とが見られますが、これは U-235 の大きな熱領域核分裂断面積に起因する効果と考えられ、絶対値としては生成成分が僅かに大きくなっています。また、U-238 の巨大共鳴が属するエネルギー群で有意な吸収成分、散乱成分が見られます。吸収成分は U-238 の共鳴吸収断面積が空間的遮蔽効果により小さくなる効果である一方、散乱成分はセル平均の実効減速散乱断面積が大きくなることによる効果と考えられます。後者は、燃料と減速材が別個で存在することにより共鳴ピーク付近の中性子が共鳴に捕捉されずに効率的に減速される効果、すなわち冒頭の「減速材領域での中性子バイパス効果」の類と解釈することができますが、その寄与は大きいものではありません。

さらに空間的な効果のエネルギー群別寄与を MOX 燃料について Fig. 6 に示します。これより 0.3eV 付近の Pu-239 の巨大共鳴における寄与が大きいことが分かります。この巨大共鳴の構造は 107 群断面積では陽に扱われるため、今回の評価では「空間的な効果」に分類されましたが、実質的にはエネルギー的な効果も含まれているものと考えられます(幅の広いエネルギー群構造を採用すれば一部はエネルギー的な効果に含まれると思われます)。また、吸収成分と生成成分とが相殺していますが、絶対値としては吸収成分がより大きいです。これは Pu-239 の 0.3eV の巨大共鳴では捕獲断面積も大きいことに由来しているのでしょう。

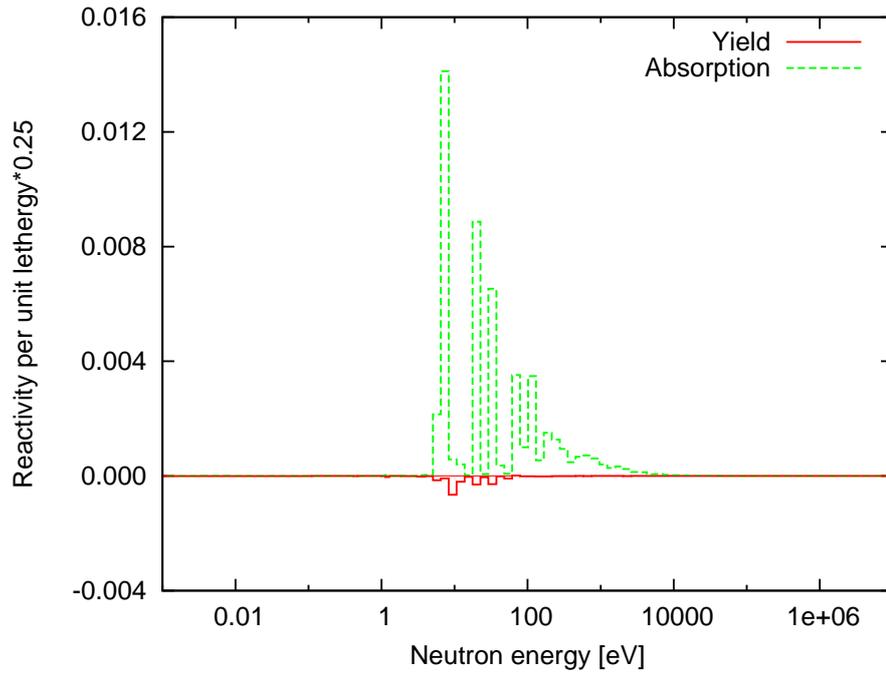


Fig. 3: Energy component of heterogeneity effect of UO₂ cell

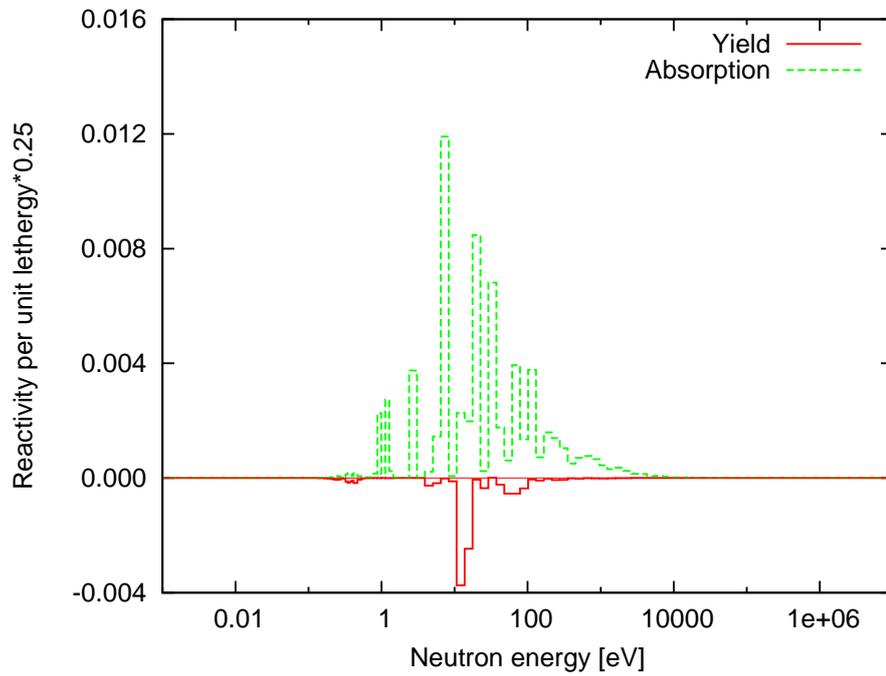


Fig. 4: Energy component of heterogeneity effect of MOX cell

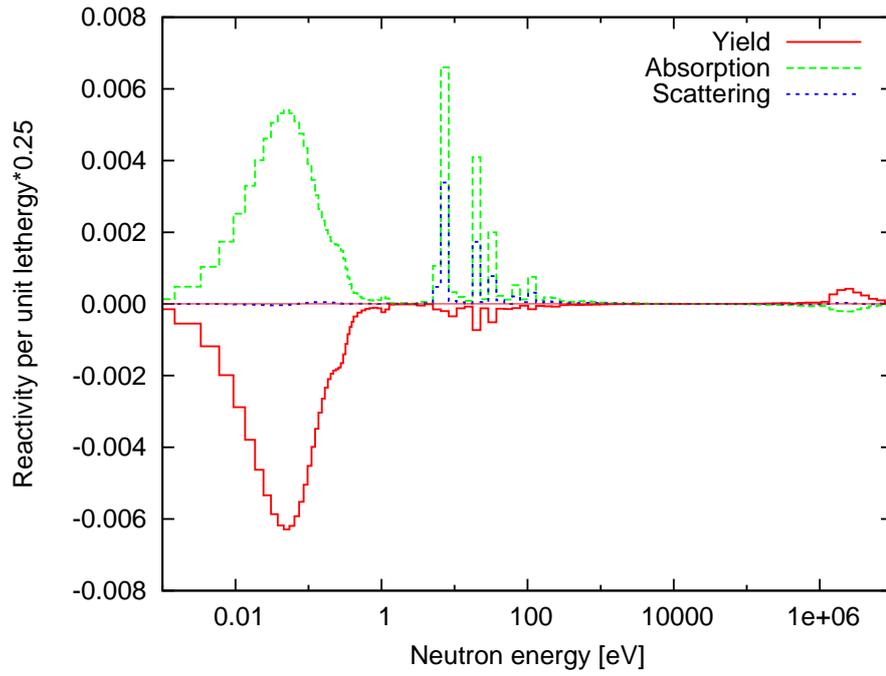


Fig. 5: Space component of heterogeneity effect of UO_2 cell

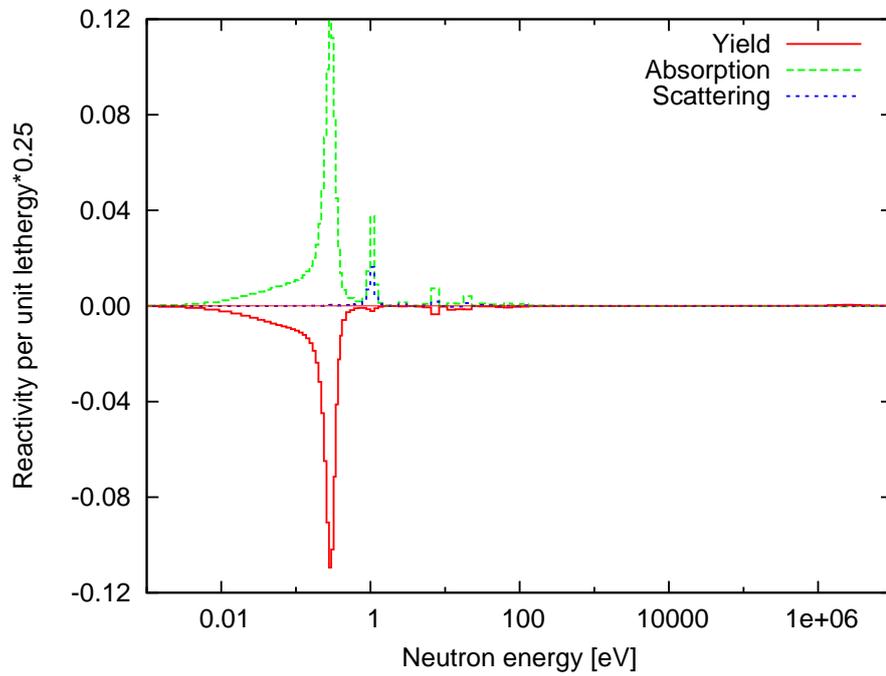


Fig. 6: Space component of heterogeneity effect of MOX cell

最後に、 UO_2 セルでの減速材領域から燃料領域への衝突確率を Fig. 7 に示します。熱外領域では 0.4 程度となっており、散乱源の半数弱は燃料領域で反応していることが分かります。「減速材領域での中性子バイパス論」では、中性子が減速材領域でどんどどこんどこ減速していくようなイメージを持ちましたが、実際には減速材領域で水と衝突した中性子のうち 4 割はいったん燃料領域に侵入することになります。水の 2MeV から 1eV への減速に要する平均衝突回数は 16 回とされているため、減速材領域で核分裂エネルギーから熱領域まで減速されて燃料領域に入射するというようなイメージは完全な誤りと言えます。

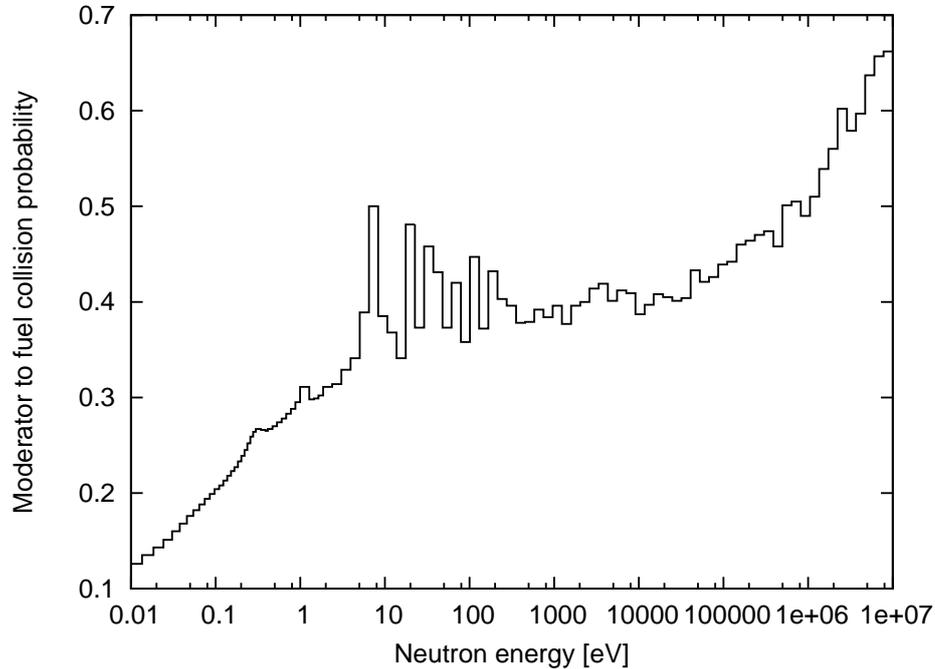


Fig. 7: Moderator to fuel collision probability in UO_2 cell

4 おわりに

もう少しネタを用意するつもりでしたが、年末ということもあり（今日はクリスマスイブ）、ここで力尽きてしまいました。北大の研究室のホームページにもいくつか「小ネタ」を掲載していますので、そちらも参照して下さい（ただし夏以降更新していません）。

本来であれば、最後に何か気の利いた一文で文章を終わらせるところですが、今年は何も思いつきません。どうかご容赦下さい。