

1 遅発中性子に関わる炉物理パラメータ

遅発中性子は原子炉の動特性、制御において極めて重要な役割を果たす。

炉物理計算で最も重要な遅発中性子に関わるパラメータといえば、実効遅発中性子割合 β_{eff} が挙げられるであろう。

「実効」が付されない「遅発中性子割合」 β は、全核分裂中性子に占める遅発中性子の割合に対応し、核分裂反応あたりの平均発生中性子数を ν 及び平均発生遅発中性子数を ν_d としたとき、

$$\beta = \frac{\nu_d}{\nu} \quad (1)$$

と定義される。 ν 、 ν_d は核分裂性核種で異なる値となるので、 β も含めたこれらのパラメータを ν_i 、 $\nu_{d,i}$ 、 β_i のように核分裂性核種（ここでは i ）で区別するものとする。

一般的な原子炉では複数種の核分裂性核種が燃料に含まれるため、炉心としての遅発中性子割合 β は以下のように定義できるであろう。

$$\beta = \frac{\sum_i \int \int N_i \nu_{d,i} \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E) dr dE}{\sum_i \int \int N_i \nu_i \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E) dr dE} = \frac{\sum_i \int \int N_i \nu_{d,i} \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E) dr dE}{\int \int \nu \Sigma_f(E) \phi(r, E) dr dE} = \sum_i \bar{\beta}_i \quad (2)$$

ここで、

$$\bar{\beta}_i = \frac{\int \int N_i \nu_{d,i} \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E) dr dE}{\int \int \nu \Sigma_f(E) \phi(r, E) dr dE} \quad (3)$$

である。このように炉心としての遅発中性子割合は核分裂性核種毎の寄与別に評価することができるが、ここでの $\bar{\beta}_i$ と前述の β_i とは意味合いが全く異なることに注意されたい。

後述するが、遅発中性子がとりうるエネルギー（エネルギー・スペクトル）は、即発中性子のものとは大きく異なり、スペクトルが全体的に低エネルギー側にシフトしている。従って、遅発中性子が1個生まれたときと即発中性子が1個生まれたときでは、核分裂連鎖反応に与える影響は異なることになる。例えば遅発中性子が超高速のエネルギーを有し、原子炉で反応せず、容易に漏れ出るようであれば、遅発中性子が生成したとしてもその存在は原子炉内での核分裂連鎖反応に全く影響を及ぼさないことになる。このような点を考慮したものが実効遅発中性子割合であり、以下の式で定義される。

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\sum_i \int dr \int dE' \phi^\dagger(E') \chi_{d,i}(E') \int dE N_i \nu_{d,i} \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E)}{\sum_i \int dr \int dE' \phi^\dagger(E') \chi_i(E') \int dE N_i \nu_i \sigma_{f,i}(E) \phi(r, E)} \quad (4)$$

ここで、 χ_i 、 $\chi_{d,i}$ は核分裂性核種 i の全核分裂中性子及び遅発中性子のエネルギー・スペクトル（核分裂スペクトル）を、それに乗ぜられている $\phi^\dagger(E)$ は随伴中性子束を示す。随伴中性子束はそのエネルギーの中性子の核分裂連鎖反応に対する重要度に対応するパラメータであり、即発中性子と遅発中性子のエネルギー・スペクトルの差が核分裂連鎖反応度に及ぼす影響の大きさが考慮されることになる。

以上の定義から明らかなように、炉心全体としての遅発中性子割合を計算する場合は中性子束分布が、実効遅発中性子割合を計算する場合は中性子束分布と随伴中性子束分布が、それぞれ必要となる。

¹/Document/DATA/DN_DATA

2 遅発中性子に関わる核データ

2.1 全核分裂中性子に占める遅発中性子の割合

全核分裂中性子に占める遅発中性子の割合 β_i について、JENDL-4.0 の評価データに基づき 175 群構造で計算した。はじめに、いくつかの核分裂性核種について Fig. 1 に示す。原子番号が大きくなるにつれて遅発中性子の割合が低下していく傾向が分かる。

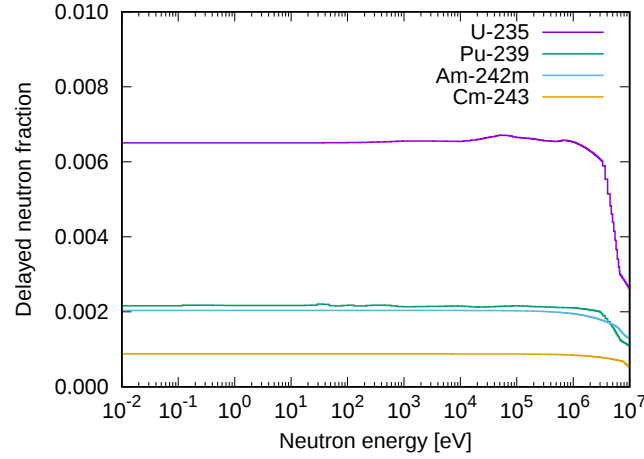


Fig. 1: Delayed neutron fraction in total fission neutrons (1)

次に、各元素毎に Fig. 2 に示す。質量数の増加に伴い遅発中性子の割合が増加していく傾向が分かる。

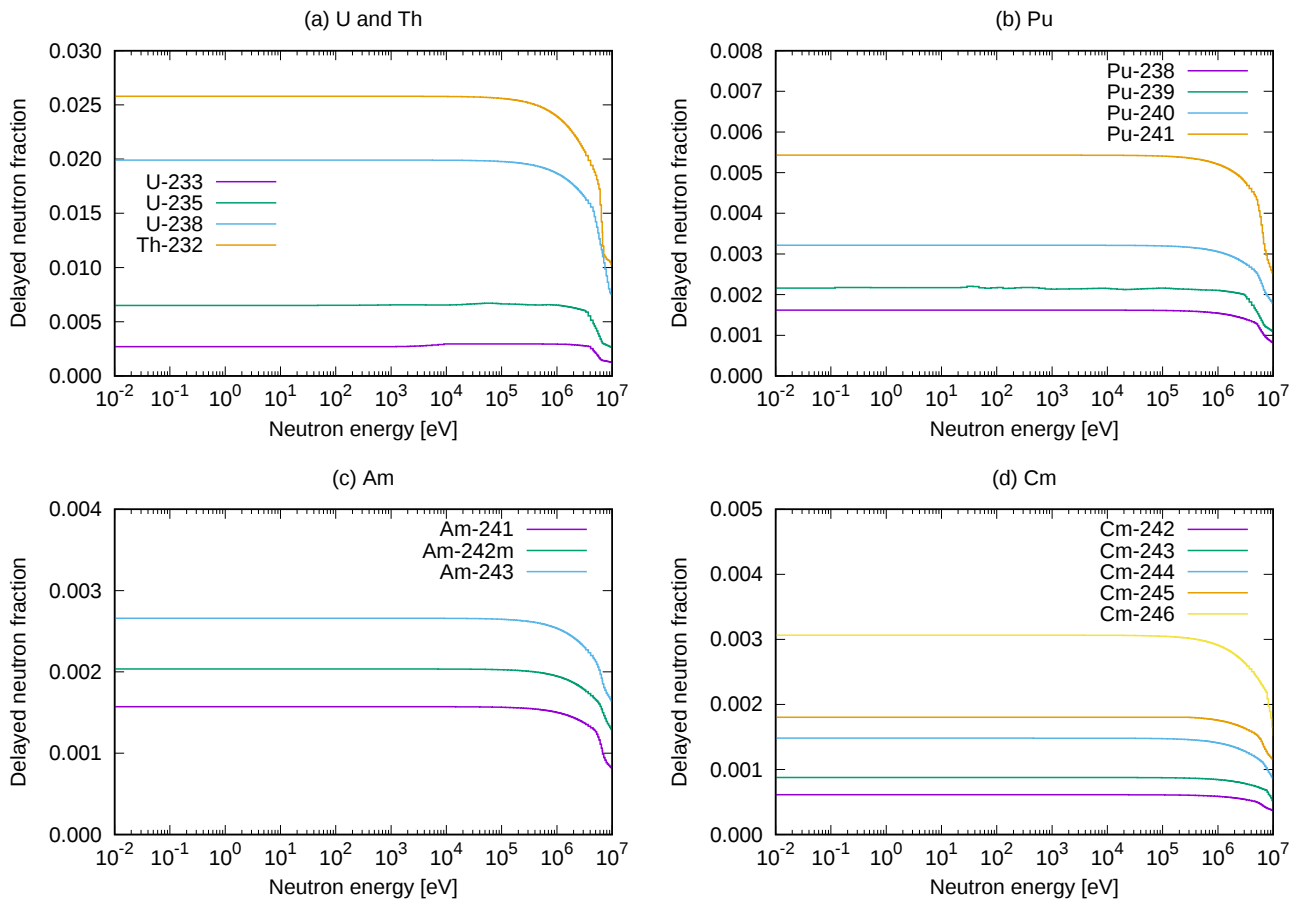


Fig. 2: Delayed neutron fraction in total fission neutrons (2)

2.2 遅発中性子のエネルギースペクトル

遅発中性子のエネルギースペクトル χ_d の評価の歴史的な経緯について簡単に述べる。

遅発中性子の家系毎の崩壊定数や収率等のデータについては頻繁な再評価等が行われてきたが、エネルギースペクトルについては Keepin が 1965 年のテキストにおいて整理した値がしばらく用いられてきた [1]²。

その後、Shalev らによって 20 の主要な遅発中性子先行核について放出する中性子のエネルギースペクトルの測定データが取得されたことより、1977 年に Saphier らが、それら 20 核種のデータを用いた総和計算から新たなエネルギースペクトルの評価を行った [2]。この評価では、150keV 以下のスペクトルについては実験値が存在せず信頼性が乏しいこと、先行核の 6 番目の家系については、やはりデータが不足しており不十分なものとなっていることが論文中で指摘されている。

さらにその後、遅発中性子関連の測定データの拡充を受けて、1982 年、Rudstam は 67 の遅発中性子先行核データを用いて総和計算を実施し、6 群遅発中性子データのエネルギースペクトルを計算した [3]。エネルギースペクトルの測定データが与えられている核種数は 29 である。この論文には、U-235 の熱中性子核分裂による遅発中性子の各先行核家系のエネルギースペクトルの数値データが 10keV 刻みで与えられている。

そして 1989 年、Brady と England は、測定データと理論計算結果を基に、271 核種の先行核を用いた総和計算を行い、各先行核家系のデータを導出した [4]。なお、中性子のエネルギースペクトルについては、34 の主要な先行核について測定されたデータ (1985 年の Greenwood らのデータ [5] 等) を用いている。中川によると、Brady と England のデータは Saphier のものと比べて明らかに優れているとのことである [6]。

本メモでは、Brady と England の評価値を採用した JENDL-4.0 に格納されている遅発中性子のエネルギースペクトルを多群化して示す。

²中性子エネルギーを 6 つに分割したエネルギースペクトルの表が p.176 に与えられている。

2.2.1 先行核家系毎のスペクトル

Fig. 3 に先行核家系毎のスペクトルを示す。

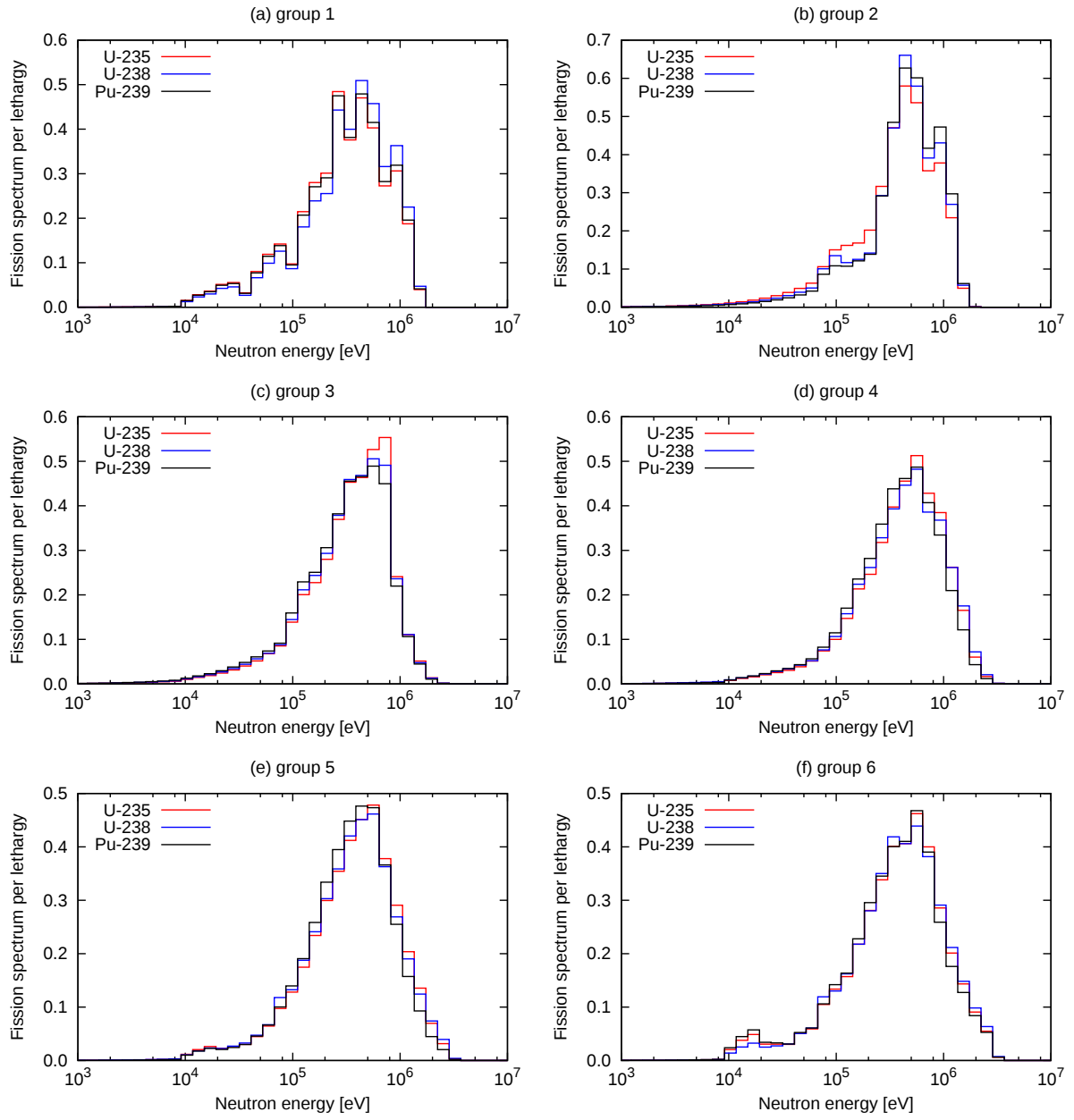


Fig. 3: Family-wise energy spectra of delayed neutrons given in JENDL-4.0

2.2.2 核分裂性核種毎のスペクトル

Fig. 4 に核分裂性核種毎のスペクトルを示す。

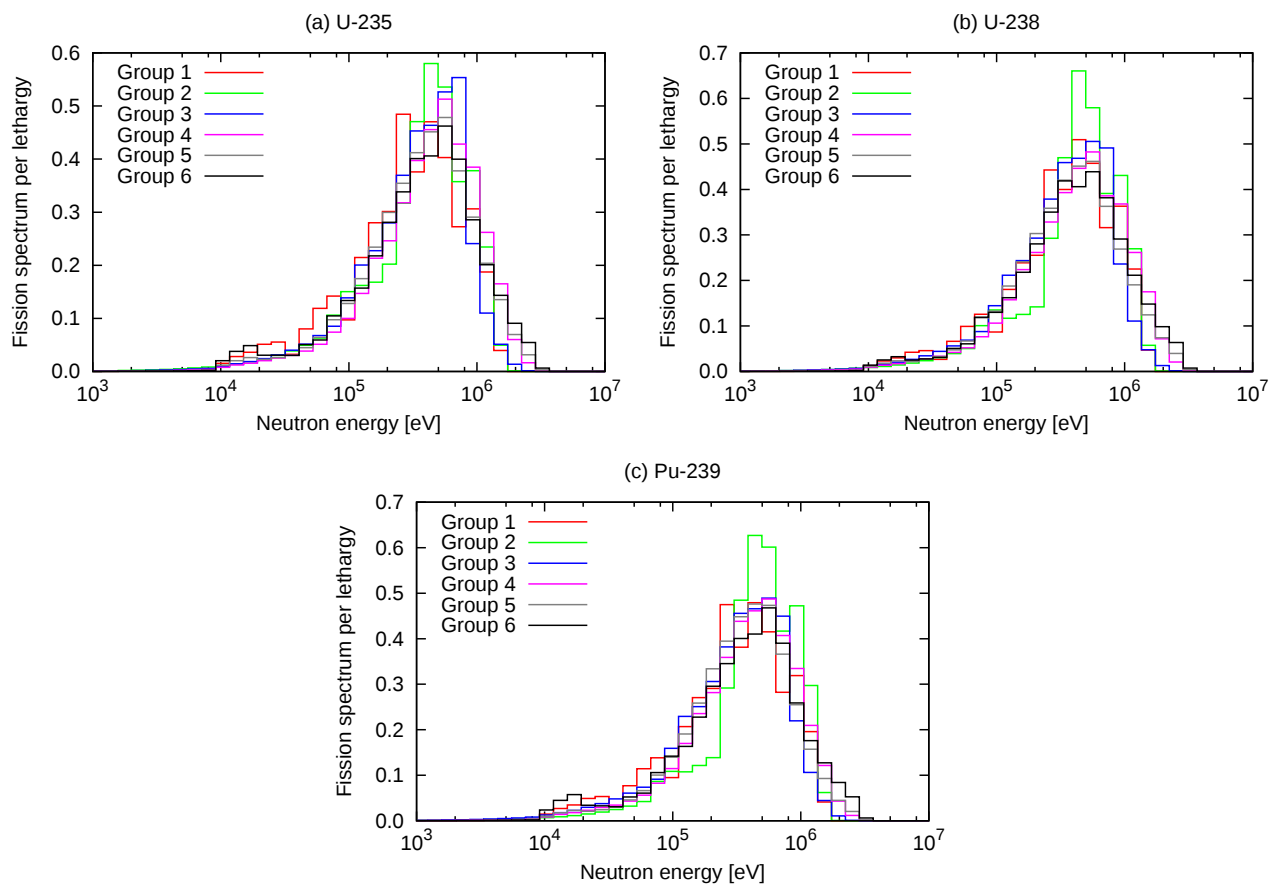


Fig. 4: Nuclide-wise energy spectra of delayed neutrons given in JENDL-4.0

2.2.3 JENDL-4.0 と JENDL-3.2 の評価値の比較

Brady と England の評価に基づく JENDL-4.0 に対して、JENDL-3.2 では Saphier の評価値が採用されている。

以下、各先行核系毎の遅発中性子のエネルギースペクトルの JENDL-4.0 と-3.2 の評価値を、U-235 について Fig. 5 に、U-238 について Fig. 6 に、それぞれ示す。なお、ここで「JENDL-3.2」としているのは JENDL-3.2 の改訂ファイルである³。

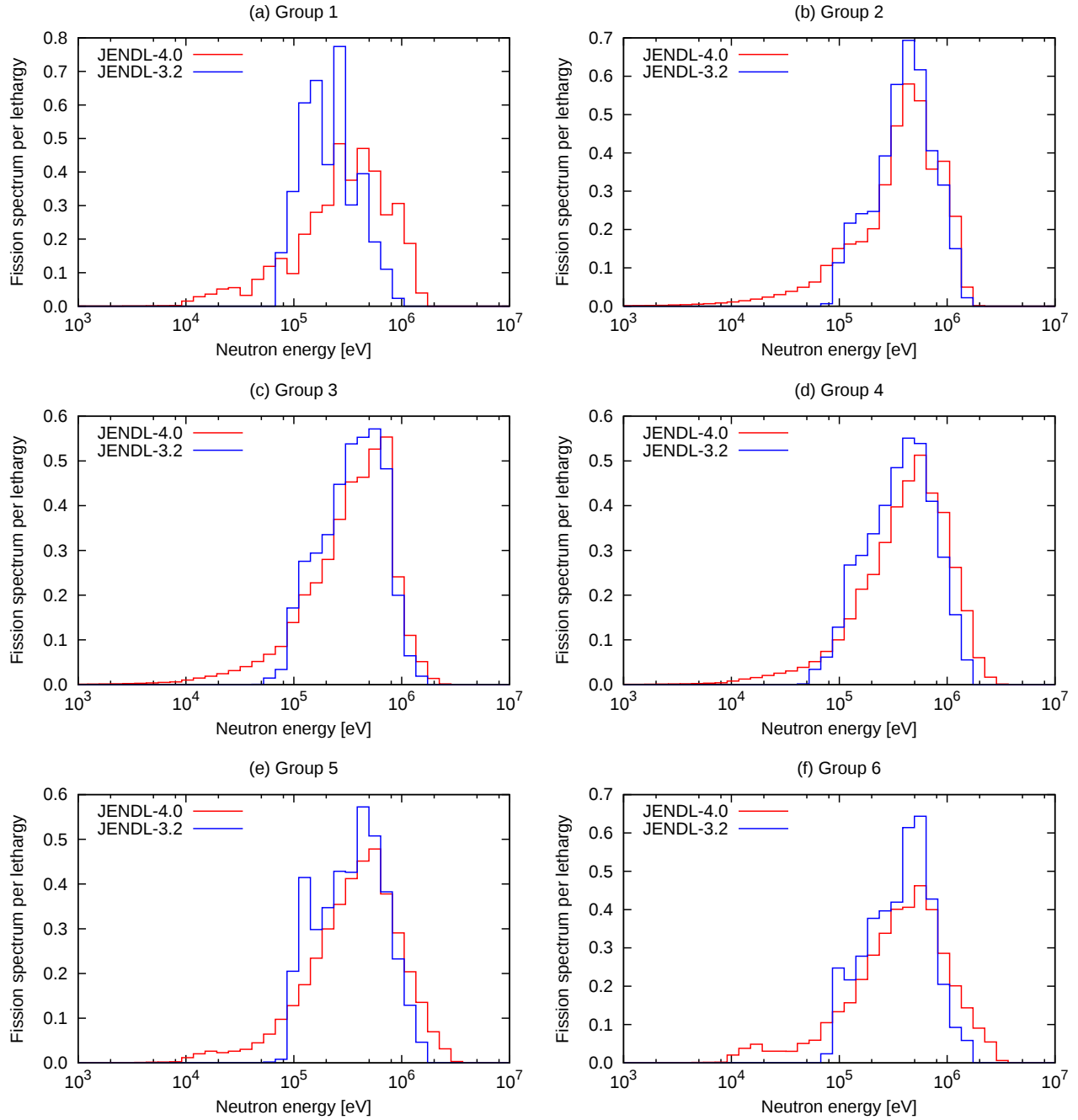


Fig. 5: Energy spectra of delayed neutrons from uranium-235 fission

³JENDL-3.2 は 1994 年に公開されたが、その後、1996 年 12 月に、Th-232、U-233、-235、-238、Pu-239、-240、-241 の MF/MT=5/455 について改訂が行われた。

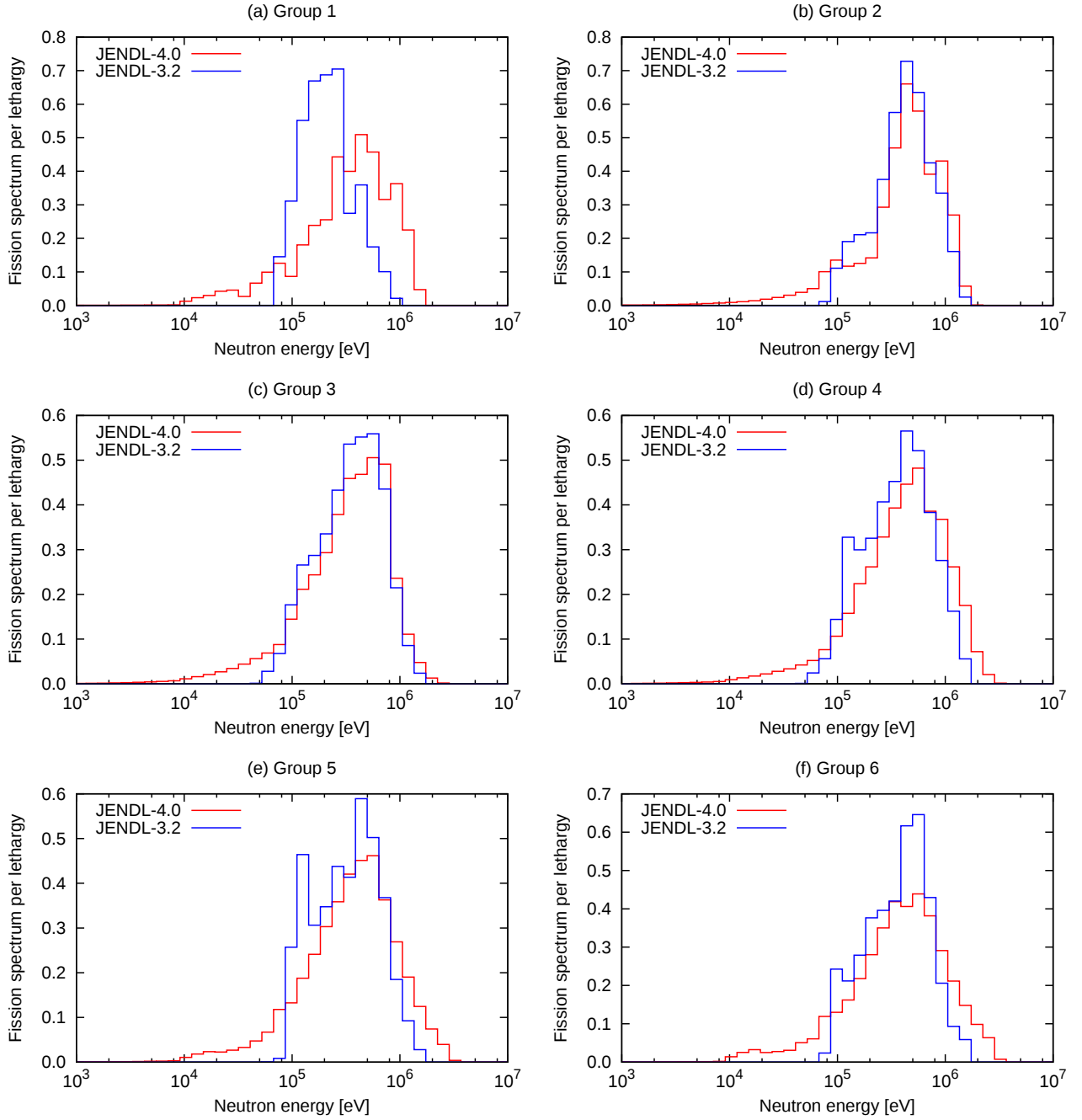


Fig. 6: Energy spectra of delayed neutrons from uranium-238 fission

2.2.4 遅発中性子先行核からの放出スペクトルとの比較

遅発中性子先行核を6つの家系に分類した場合、その半減期から、1群にはBr-87が、2群にはI-137とBr-88が主に含まれることになる。そこで、ENDF/B-VII.1の崩壊データファイルに与えられている核分裂生成物毎の遅発中性子スペクトルと、JENDL-4.0およびJENDL-3.2のU-235核分裂により発生する1群の遅発中性子スペクトルを比較した。

まずは、JENDL-4.0及びJENDL-3.2に与えられている先行核1群のスペクトルと、ENDF/B-VII.1のBr-87のスペクトルをFig. 7に示す。なお、ENDF/B-VII.1に与えられているBr-87の崩壊中性子エネルギースペクトルはBrady&Englandの評価値である。

Saphierの評価データでは先行核家系1群にはBr-87のみが含まれると想定されているため、Saphierのデータを採用したJENDL-3.2のスペクトルはBr-87が放出する中性子スペクトルそのものである。

一方、Brady&Englandの先行核家系毎の評価データでは、Br-87に加えてI-137とCs-143も先行核1群に寄与しているとされている[4]ため、Br-87の放出スペクトルとJENDL-4.0の1群のスペクトルは一致していない。

なお、Br-87からのスペクトルはJEFF-3.1.1でも与えられているが、離散エネルギー形式で与えられており、この両者と大きく異なる形状となっていた。

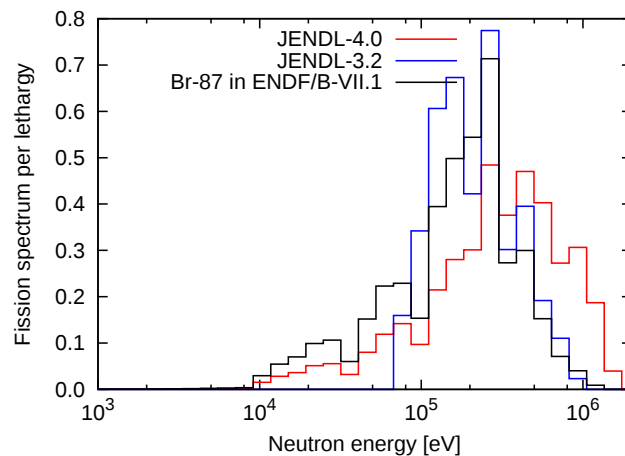


Fig. 7: Energy spectra of delayed neutrons of group 1 from uranium-235 fission

また、JENDL-4.0の2群のスペクトルと、ENDF/B-VII.1のI-137、Br-88のスペクトルをFig. 8に示す。I-137、Br-88のピークは数百 keV にある一方、JENDL-4.0の2群スペクトルのピークは100 から 200keV のあたりにある。先行核2群については、例えばRudstamの論文によると、Br-88、I-137に加えて、Sb-134、Te-136、Cs-141も寄与しているとされている[3]ことから、I-137、Br-88以外の核種の寄与の影響が現れているものと考えられる。

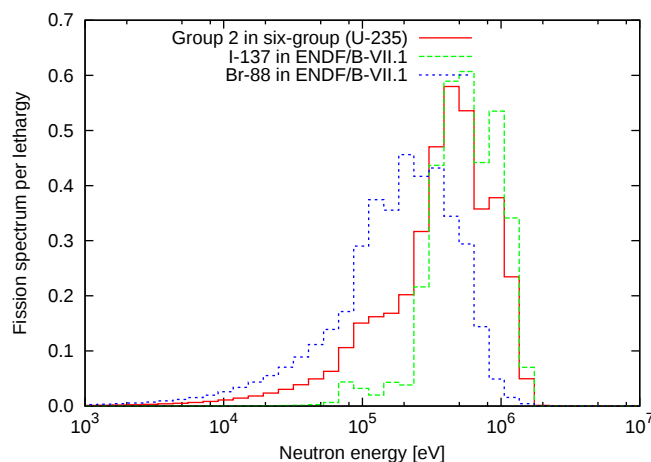


Fig. 8: Energy spectra of delayed neutrons of group 2 from uranium-235 fission

2.2.5 遅発中性子先行核の半減期

β^- 崩壊により 1 個、もしくは 2 個の中性子を放出する核種（評価済み核データファイルにおいて崩壊チャンネルが 1500000 もしくは 1550000 として定義されている核種）について、半減期を Fig. 9 に示す。ここでは JENDL-5、ENDF/B-VIII.1、JEFF-4.0 の崩壊データファイル、及び JENDL/FPD-2011 に収納されているものについて示す。JENDL-5 では、Hg と Tl の同位体に 10 秒を超える半減期のものが見られ、例えば Tl-211 の半減期は 80 秒とされている。ENDF/B-VIII.1 では、質量数が 70 を超える核種では、半減期 78 秒の Tl-210 のみが遅発中性子を放出するものとされている。

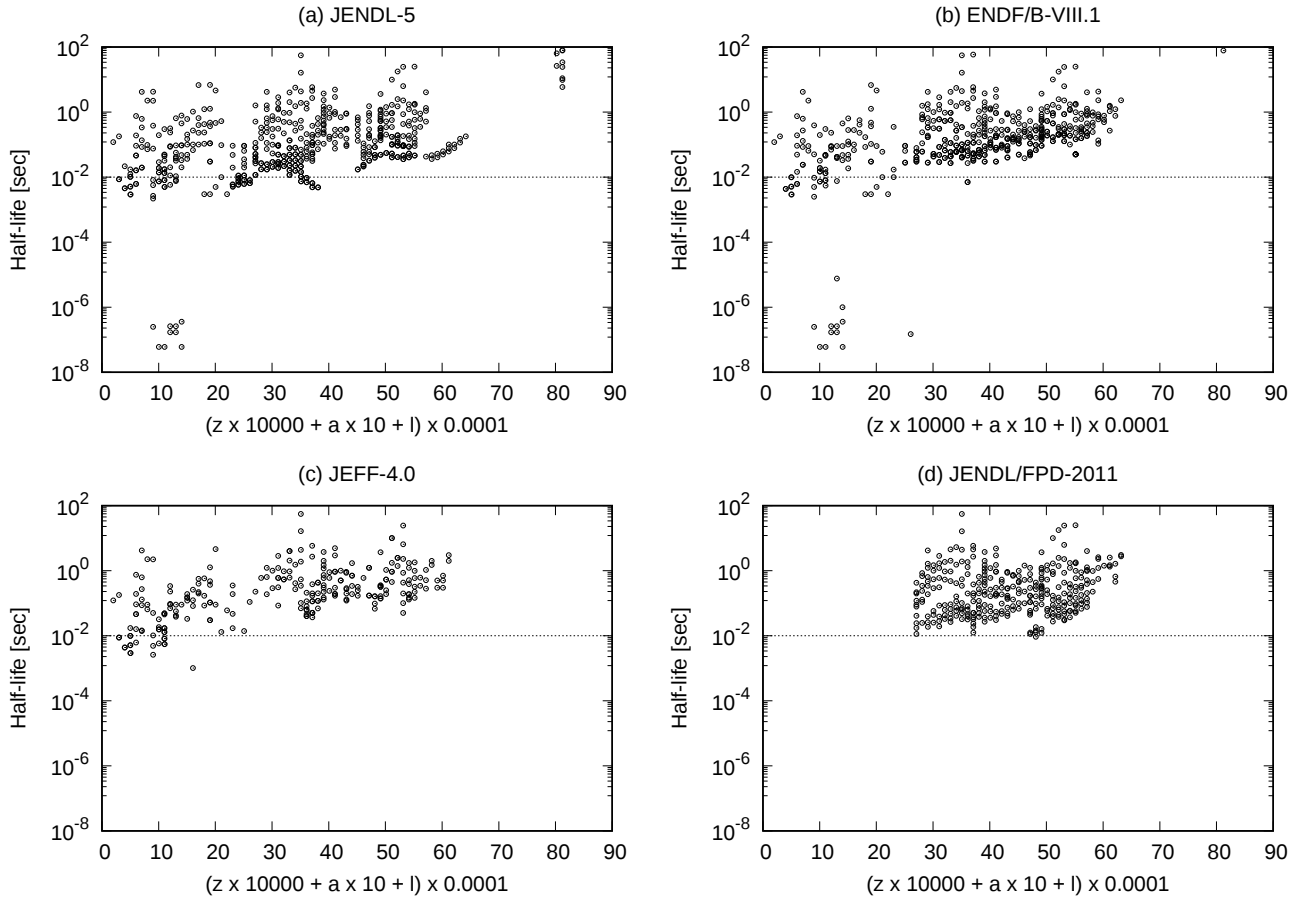


Fig. 9: Half-lives of delayed neutron precursors

参考文献

- [1] G. R. Keepin, *Physics of Nuclear Kinetics*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts (1965).
- [2] D. Saphier, et al., 'Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance in Reactor Calculations,' *Nucl. Sci. Eng.*, **62**, pp.660-694 (1977).
- [3] G. Rudstam, 'Six-Group Representation of the Energy Spectra of Delayed Neutrons from Fission,' *Nucl. Sci. Eng.*, **80**, pp.238-255 (1982).
- [4] M. C. Brady, T. R. England, 'Delayed Neutron Data and Group Parameters for 43 Fissioning Systems,' *Nucl. Sci. Eng.*, **103**, pp.129-149 (1989).
- [5] R. C. Greenwood, A. J. Caffrey, 'Delayed-Neutron Energy Spectra of $^{93-97}\text{Rb}$ and $^{143-145}\text{Cs}$,' *Nucl. Sci. Eng.*, **91**, pp.305-323 (1985).
- [6] T. Nakagawa, 'Present Status of Delayed Neutron Data in the Major Evaluated Nuclear Data Libraries,' JAERI-Conf 99-007, p.11-20 (1999).
- [7] T. Yoshida, et al., 'Evaluation of Delayed Neutron Data for JENDL-3.3,' *J. Nucl. Sci. Eng.*, Supp. 2, pp.136-139 (2002).