

核データ・炉物理特別会合(2)

評価済核データライブラリー JENDL-3.3 の現状

日本原子力研究所 核データセンター

柴田 恵一

e-mail: shibata@ndc.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

JENDL-3 シリーズの第1版は1989年に公開された。それから、5年後の1994年に改訂第2版である JENDL-3.2 を公開した。JENDL-3.2 は 340 核種のデータを含み、米国の ENDF/B-VI、欧州の JEF-2 に匹敵する大型汎用ライブラリーとなった。そして、現在、第3版である JENDL-3.3 を作成している。JENDL-3.3 では、1997年にでた「シグマ委員会 JENDL-3.2 問題点検討小委員会」の報告書にある問題データの再評価を主に行ってきた。評価作業を実際に実施しているのはシグマ委員会中重核評価 WG 及び重核評価 WG である。遅発中性子データに関しては、遅発中性子 WG の協力を得ている。重要核種については、現在、その評価・編集は殆ど終了している。それらの評価値は、リアクター積分テスト WG 及び Shielding 積分テスト WG において積分的検証が行われている。

2. JENDL-3.2 の問題点

まず、JENDL-3.2 ではどのような問題があったかをおさらいしてみる。最大の問題点は、U-235 データにある。即ち、熱中性子炉での k_{eff} が JENDL-3.1 に比べ 0.3 から 1% 大きくなってしまった。JENDL-3.2 では、U-235 の共鳴パラメータとして ENDF/B-VI.2 のものを採用したが、それが災いしたようである。

2 番目はベラルーシの Maslov 等に指摘された重核の放出中性子スペクトルの形状である。スペクトルのファイル化には細心の注意が必要であることが分かった。スペクトルでは、閾エネルギーでの与え方により、処理コードがエラーを起こすことが分かっている。物理的には閾エネルギーのスペクトルは定義しようがないが、技術的問題を解消するために何らかの方策が必要である。

通常の炉物理計算では問題とならないが、核種によって JENDL-3.2 の捕獲断面積が MeV 領域で急激に減少することがある。これは物理的にはおかしいので、direct 及び semi-direct 過程を考慮する必要がある。

ファイル化上のミスも幾つかある。例えば、O-16(n,2n)断面積は編集ミスにより、10 倍大きな値が格納されている。また、Ni(n,α)反応断面積は発熱反応であるが、立ち上がりエネルギーの設定を間違えたために、低エネルギーまで裾野を引いてしまった。これら単純ミスは、勿論、修正する必要がある。

3. 評価

3.1 重核データ

共鳴パラメータ

JENDL-3.2 最大の問題である U-235 共鳴パラメータに関しては、NEA 原子力科学委員会 評価国際協力 WP のサブグループ 18 で検討されてきた。その結論は、1997 年の Leal 等[1] の評価値を推奨するというものであった。この評価は SAMMY コードを用いて得られたもので、フィットするデータとしては 15-16 件の fission, capture, absorption, transmission, η の測定値が選ばれた。共鳴領域の上限エネルギーは 2.25 keV で、エネルギー領域は 1 領域となっており、3193 本の共鳴が与えられている。このパラメータは ENDF/B-VI.5 で採用されており、JENDL-3.3 でもこれ以上のものは無いだろうと言うことで採用した。図 1 と 2 に U-235 核分裂断面積と捕獲断面積を示す。10 eV 以上で、JENDL-3.3 の捕獲断面積は JENDL-3.2 を大きく上回っている。

重核では Pu-240 の共鳴パラメータも ORNL-Cadarache で評価した値を採用した。従って、主要重核の共鳴パラメータは、U-233,235、Pu-239,240,241 で ORNL グループの評価値が採用されたことになる。なかなか、この分野での日本独自のアクティビティーが出て来ないことが残念である。

核分裂断面積

JENDL-3.2 では U、Pu の核分裂断面積は絶対測定及び比の測定を考慮した、いわゆる同時評価により求められた。重核評価 WG 内で JENDL-3.3 ではどうするか議論を行った結果、U-235 のエネルギーの高いところに新しい測定があり、また、今回は U-233 も同時評価に加えてほしいとの要求があり、同時評価を再度行うことになった[2]。対象は、U-233,235,238 及び Pu-239,240,241 の核分裂断面積である。エネルギー範囲は、30 keV から 20 MeV まで、但し、U-238 と Pu-240 は 100 keV 以上とした。評価の対象、即ち、最小自乗法でフィットされるのはそれぞれの核種の測定値及び比の測定値で、全体で 170 件程度のデータセット、データ点として約 4700 点を選択した。

図 3 と 4 に U-233 と U-235 の評価結果を示す。U-233 に関しては、JENDL-3.3 の評価値は JENDL-3.2 に比べ全体的に下がった。ORNL Leal[3] のベンチマーク解析によると JENDL-3.2 U-233 の核分裂断面積は JEZEBEL、GODIVA 等の小型高速炉体系で k_{eff} を 1% 大きくする原因になっていると報告されている。今回の評価値はそれを改善する方向である。U-235 では 12 MeV 以上で Lisowski 等[4] のデータを採用したことにより、その領域で JENDL-3.2 の値に比べ変化した。この U-235 断面積の変化は、比のデータにより他の断面積にも影響した。

中性子スペクトル

(n,n'), (n,2n)、(n,3n)等のスペクトルは Hauser-Feshbach コードで再評価した。(n,n')中性子スペクトルでは、低エネルギー部分は(n,2n)や(n,3n)の影響により、本来あまり yield が無

いはずであるが、JENDL-3.2 ではそうになっていなかった。再評価の結果はこの点を改善した。

核分裂中性子スペクトルに関しては、U-235 と Pu-239 でマルチモード解析を行った。図 5 に thermal でのスペクトルの比を示す。U-235 では、今回の評価値は JENDL-3.2 に比べ堅くなっている。一方、Pu-239 では JENDL-3.3 は 5 MeV 以上及び 1 MeV 以下では、JENDL-3.2 に比べ大きくなっている。

U-235,238 及び Pu-239 の核分裂スペクトルでは、second chance fission で最初に放出される中性子の前平衡成分を核分裂スペクトルに組み込んだ。

遅発中性子スペクトルに関しては、ENDF/B-VI で採用されている Brady-England[5]の 6 群スペクトルが JENDL-3.3 でも採用された。なお、U-235,238、Pu-239 では 6 群の崩壊定数は遅発中性子 WG により調整された。

ENDF フォーマットで中性子スペクトルを処理するときの問題になるのが、入射エネルギー方向の内挿である。JENDL-3.2 までは図 6 左の様な内挿方法をとってきた。即ち、入射エネルギー E1 での分布と E2 での分布を任意の E で内挿すると真ん中の図の様な不自然なものになってしまう。JENDL-3.3 ではこれを改善するために、内挿方法を右図のように変更した。新しい内挿法では、内挿を行う前に E1、E2 の分布を同じ最大エネルギーまで引き伸ばし、その後、実際の内挿が行われる。内挿が行われた後、最大エネルギーが決められ、そこまで引き戻される。このようにして不自然な内挿を防ぐ。なお、閾エネルギーでの分布は、MF5 では E2 での分布を 0 から 1 eV の範囲に圧縮した形を使っている。

MeV 領域捕獲断面積

JENDL の多くの核種で、MeV 領域の捕獲断面積が急激に減少するのが見られる。実際には、14 MeV で 1 mb 程度の断面積になるはずであり、 μb 以下になるのは物理的に不自然である。これは評価の際に、直接過程が考慮されなかったことに起因する。これを改善するために、理論計算を行った。

3.2 中重核データ

評価の概要

中重核データの改訂作業は、重核の同時評価やスペクトルの改訂のように纏めて出来るようなものではなく、従って、各評価者が独立に地道な作業を行った。共鳴パラメータに関しては、V、Cr、Fe、Co、W で改訂された。W 以外は全て Reich-Moore 型の共鳴公式となった。中重核では出来る限り天然元素と同位体ファイル間の矛盾をなくすべく、同位体みの評価を行った。(但し、例外的に V は 0.25% の組成を持つ V-50 を含めた天然元素ファイルのみを作成した。) その際、多くの天然元素で測定されている全断面積を同位体の合成で再現できるようにした。(n,2n)等の閾反応断面積は統計模型コードによる計算で改訂した。中性子スペクトルは JENDL/F-99[6]の MF6 形式を採用した。

鉄データ

共鳴パラメータに関しては、Fe-56 は JEF-2.2、Fe-54 は ENDF/B-VI の値を採用した。その結果、分離共鳴エネルギーの上限は、Fe-54 では 250 keV から 700 keV、Fe-56 では 250 keV から 850 keV にアップした。なお、Fe-57,58 の共鳴パラメータは JENDL-3.2 のままであるが、公式は Breit-Wigner から Reich-Moore に変更された。図 7 に Fe-56 の全断面積を示す。

全断面積は、Fe-54 は ORNL[7]、IRMM-Geel[8]の同位体データ、Fe-56 では IRMM-Geel[9]、ORNL[10]、NIST[11]の天然元素測定値から他の同位体の寄与を差し引いて作った。図 8 に天然元素の鉄の全断面積を示す。JENDL-3.2 では人為的に断面積の山谷をシャープにしたが、Geel の測定値を基にした JENDL-3.3 ではそのような加工はされていない。

Fe-56(n,2n)反応断面積は統計モデルコード TNG で再計算し、その結果、断面積は JENDL-3.2 に比べ若干小さくなり、そのしわ寄せとして弾性散乱断面積が幾分増加した。

4. ベンチマークテスト

最後に、ベンチマークテストの結果を幾つか紹介する。遮蔽に関しては、FNS、OKTAVIAN をはじめとする中性子とガンマ線のベンチマーク問題が取り上げられている。一方、リアクター積分テストでは、高速炉、熱中性子炉体系が対象となっている。ベンチマークテストは現在進行中であり、また、評価値自身もベンチマークテストからのフィードバックにより改訂される可能性がある。従って、ここに掲載されるのはあくまでも preliminary だと考えていただきたい。

図 9 は FNS で行われた鉄の体系内 61cm での中性子スペクトルを示している。全体的に JENDL-3.3 による解析結果は JENDL-3.2 に比べ測定値との一致は良くなっている。図 10 は同じく FNS で行われた鉄体系内でのガンマ線発熱の実験の解析である。JENDL-3.2 では中性子の入射面近傍で実験値に比べ計算値がかなり大きくなっていて、これは、JENDL-3.2 の鉄のガンマ線生成断面積が過大評価だったことによる。JENDL-3.3 ではこのような過大評価はなくなり、誤差範囲内で実験値と一致している。

図 11 は U-235 データの臨界性に対する影響を見たものである。図中、JENDL-3.3 とあるのは U-235 だけを JENDL-3.3 に変え、その他のデータは JENDL-3.2 を用いた計算結果である。高速炉系及び熱中性子炉系とも k_{eff} は下がった。図としては掲載しないが、U-233 も JENDL-3.2 では JEZEBEL、FLATTOP で k_{eff} が 1%程大きく出ていたが、JENDL-3.3 の U-233 を使うことによりそのような過大評価は無くなった。

図 12 は Pu 系のベンチマークテストで、図中、JENDL-3.3 は Pu-238 から Pu-242 までを JENDL-3.3 に置き換えた計算である。このケースでは、臨界性に関しては、JENDL-3.2 と殆ど変わっていない。

ベンチマークテストの詳しい報告は、2000 年核データ研究会で行われたので、今後出版されるその報文集を参照されたい。

5. 終わりに

JENDL-3.3 の評価の現状及びベンチマークテストの結果について報告した。今後やるべきことは、断面積とともにその共分散の整備を重要核種について行うことである。また、これから続々と出るであろうベンチマークテストの結果を考慮して、評価値の改訂を行っていく必要もあろう。JENDL のような大型ライブラリーの作成はシグマ研究委員会及びユーザーの協力が不可欠である。今後とも、変わらぬ支援をお願いしたい。

参考文献

- [1] Leal L.C., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, **131**, 230 (1999).
- [2] Kawano T., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 237 (2000).
- [3] Leal L.C. and Wright R.Q.: ORNL/TM-13313 (1997).
- [4] Lisowski P.W., et al.: Proc. Specialists' Meeting on Neutron Cross Section Standards above 20 MeV", Uppsala 1991, p.177 (1991).
- [5] Brady M.C. and England T.R.: *Nucl. Sci. Eng.*, **103**, 129 (198).
- [6] Chiba S., et al.: *Fusion Eng. Design*, **37**, 175 (1997).
- [7] Carlton R.F., et al.: *Bull. Am Phys. Soc.*, **30**, 1252 (1985).
- [8] Cornelis E., et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp 1982, p.135 (1983).
- [9] Berthold K., et al.: Taken from EXFOR (1995).
- [10] Perey F.G., et al.: ORNL-4823 (1972).
- [11] Carlson A.D. and Cerbone R.J.: *Nucl. Sci. Eng.*, **42**, 28 (1970).

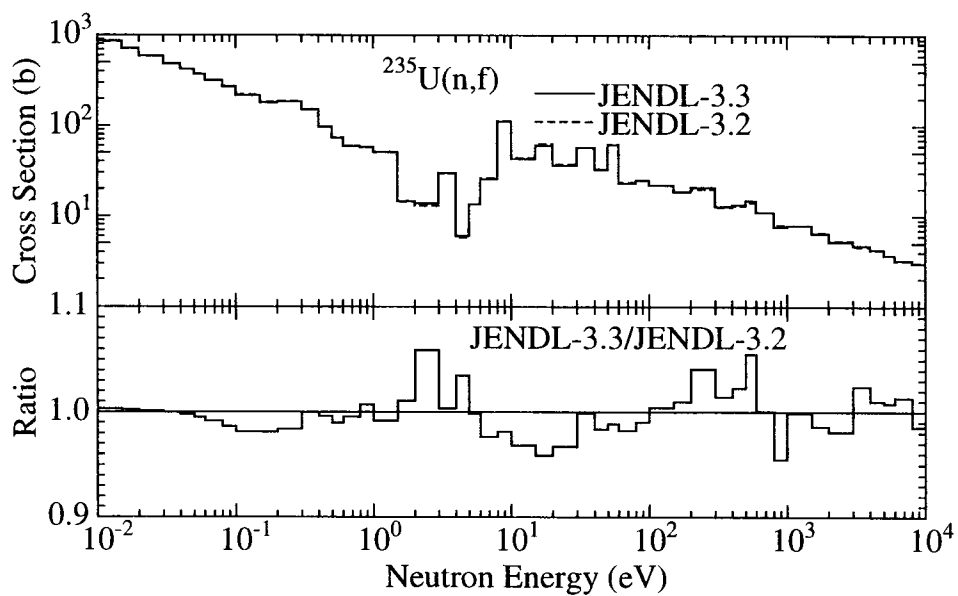


图1 U-235 核分裂断面積

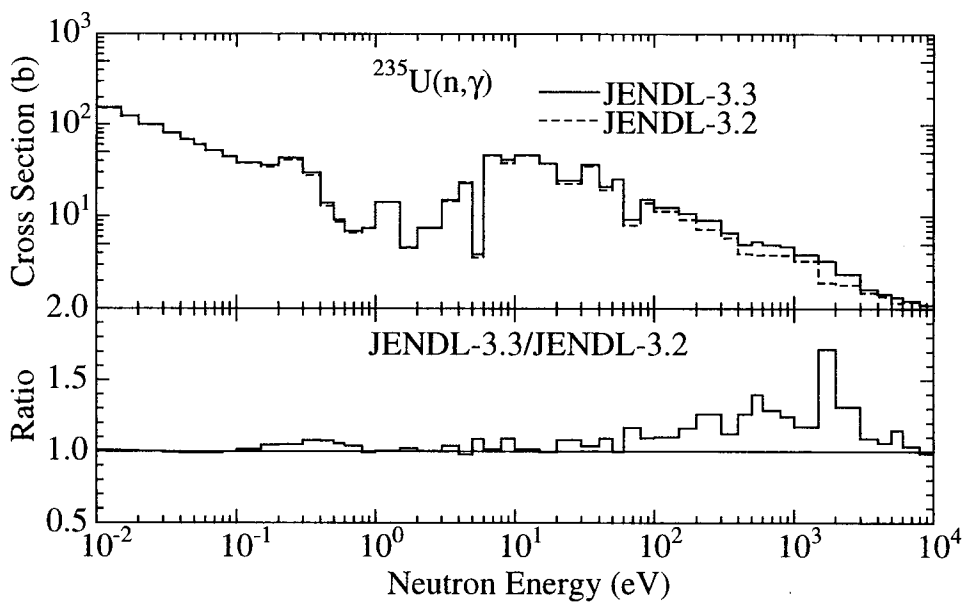


图2 U-235 中性子捕獲断面積

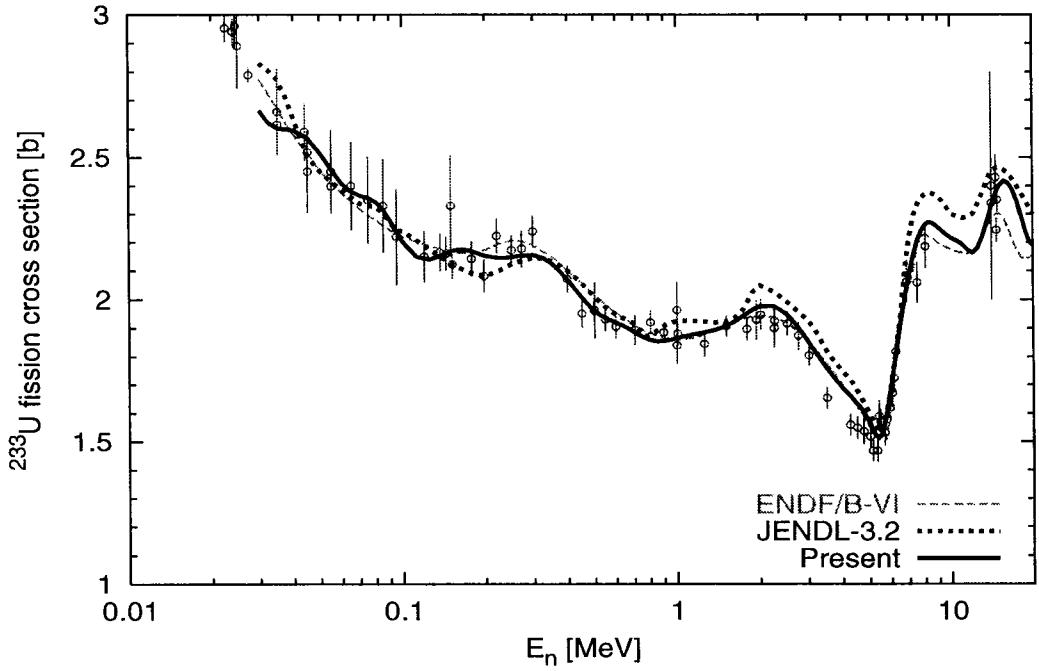


图3 U-233核分裂断面積

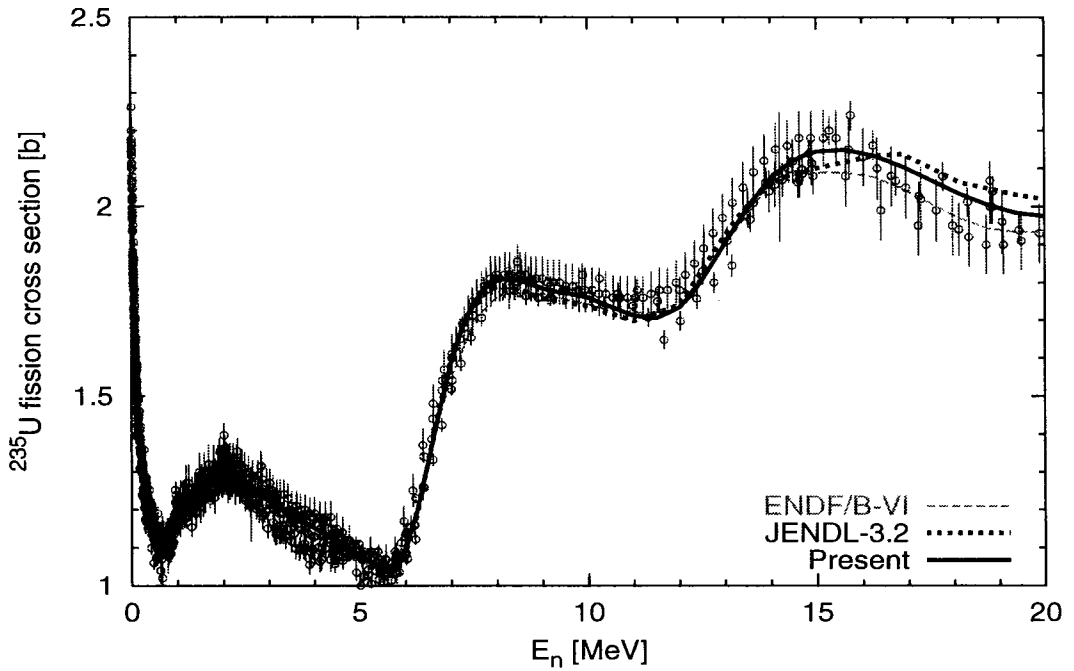


图4 U-235核分裂断面積

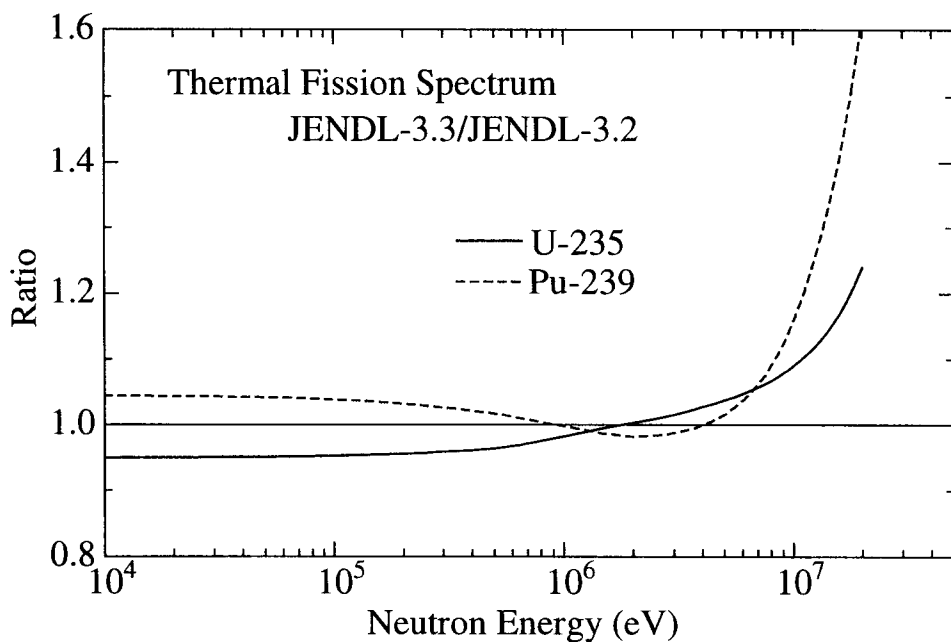


図5 U-235 と Pu-239 の熱中性子に対する核分裂中性子スペクトル

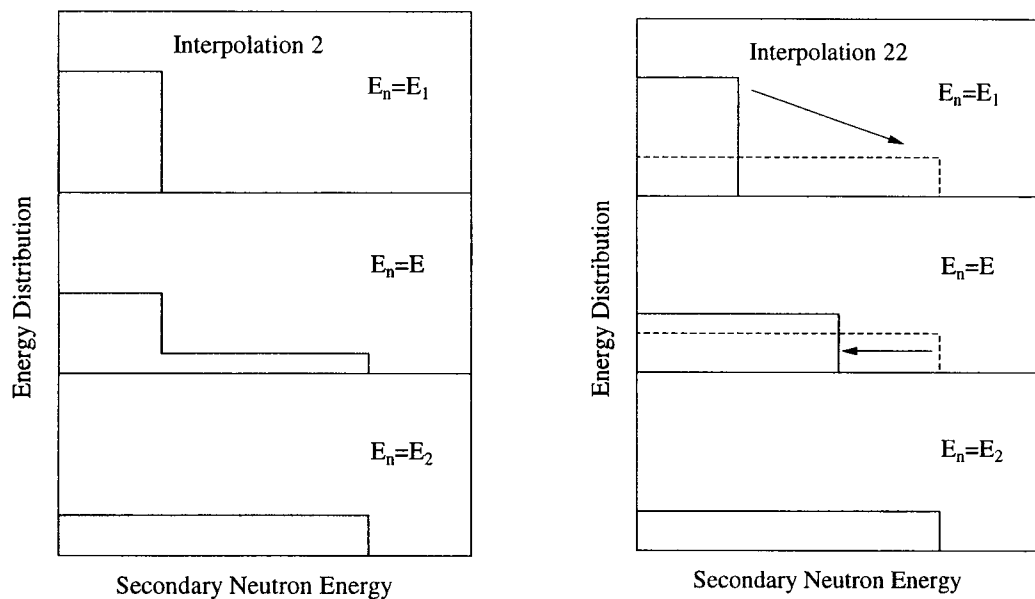


図6 中性子スペクトルの内挿

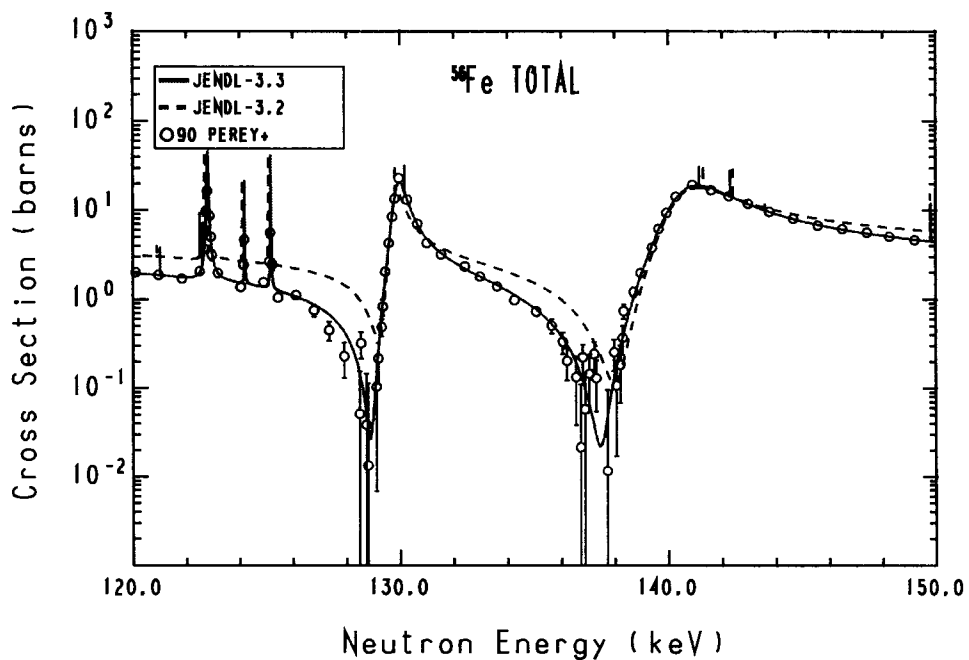


図7 Fe-56全断面積

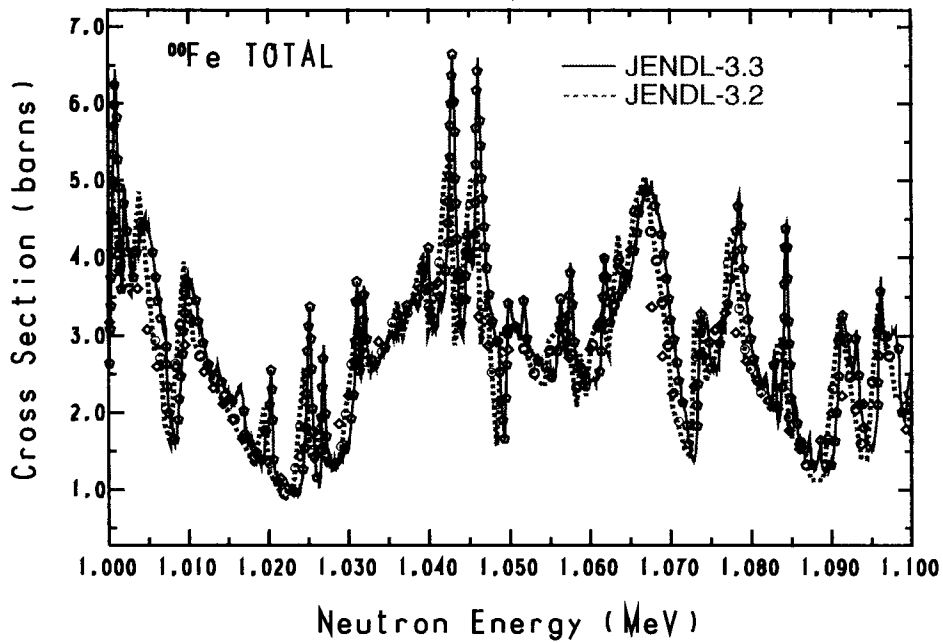


図8 天然鉄全断面積

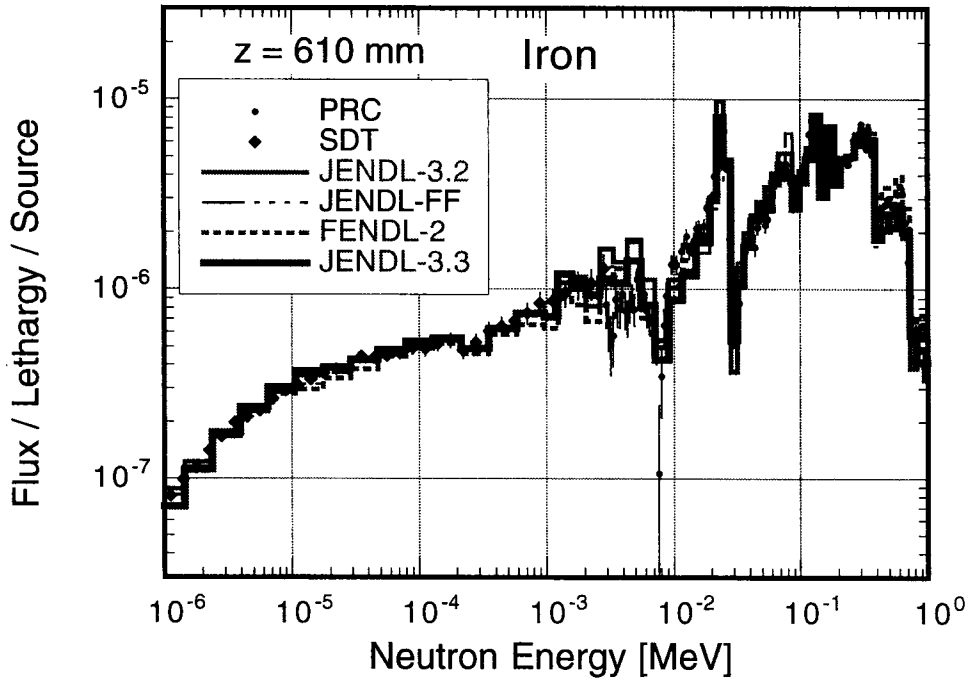


図9 鉄体系内中性子スペクトル

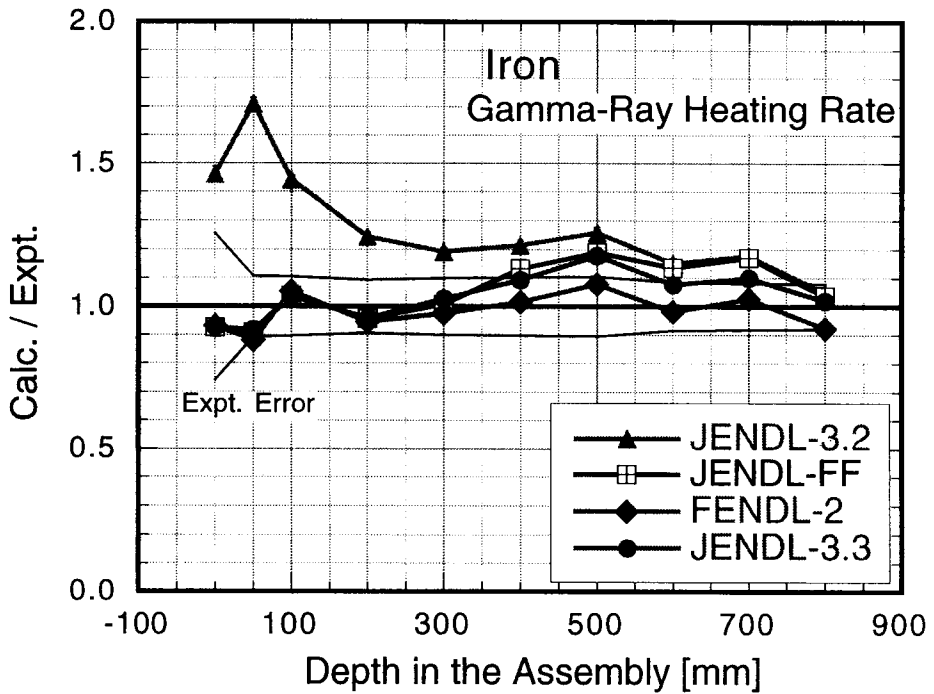


図10 鉄体系内ガンマ線発熱率

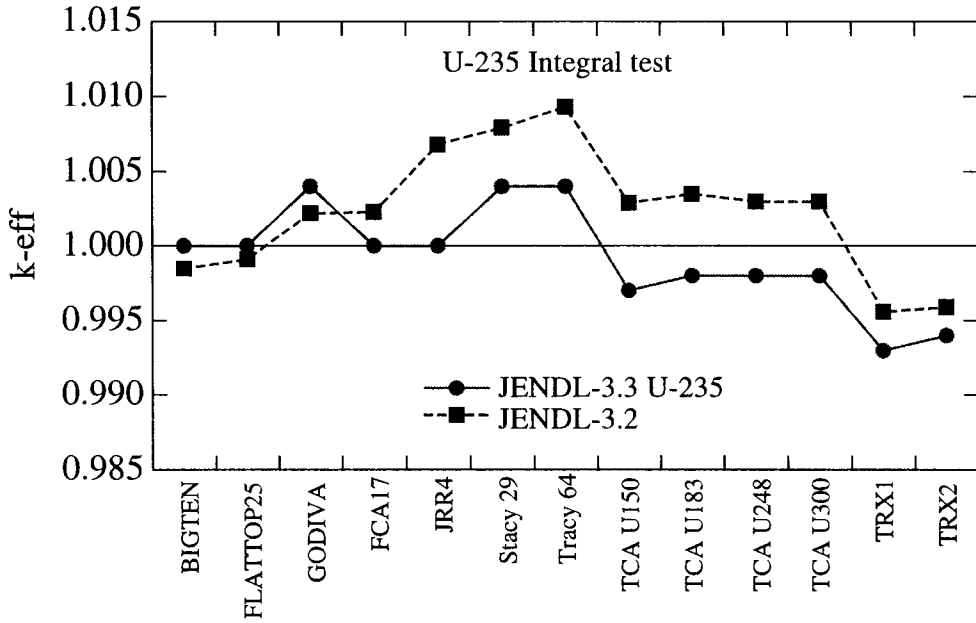


図 11 U-235 積分テスト

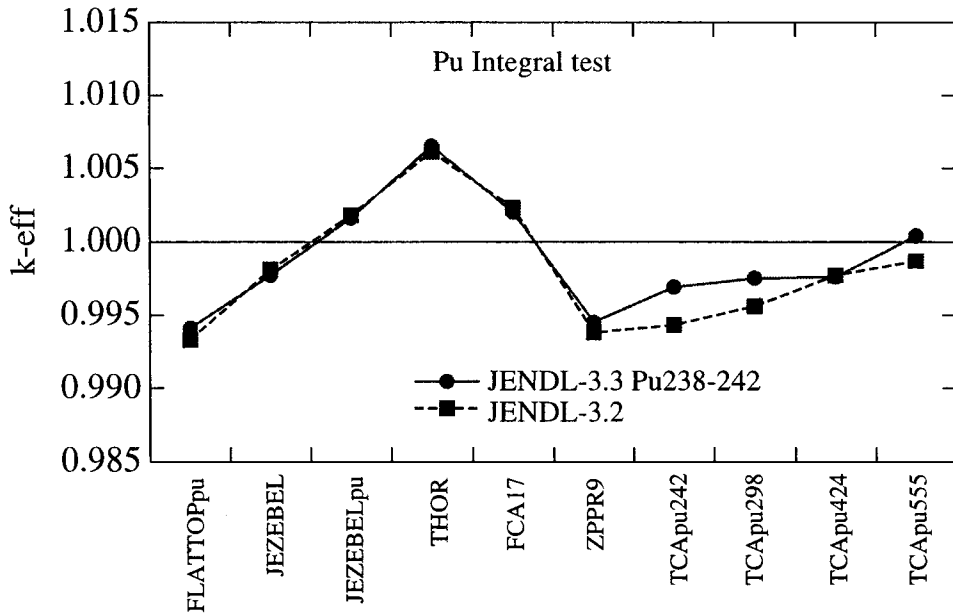


図 12 Pu 積分テスト