

## 会議のトピックス(IV)

### 2010 年春の大会・核データ部会企画セッション 「JENDL-4 の完成と今後の展望」

#### (1) JENDL-4 の核データ評価

日本原子力研究開発機構

柴田 恵一

[shibata.keiichi@jaea.go.jp](mailto:shibata.keiichi@jaea.go.jp)

#### 1. はじめに

汎用ライブラリーJENDL-3.3は2002年5月に公開され、現在まで多くの方々に使って頂いている。旧原研シグマ研究委員会では、既に2002年9月に「次期JENDL検討小委員会」を立ち上げ、約半年を掛けて次の汎用ライブラリーはどうあるべきかを検討した。その詳細については核データニュース76号を参照されたい。要約すると、今後の革新的原子炉開発、現行軽水炉の高燃焼度化或いはMOX燃料の使用、更には燃焼度クレジットを考え、次期ライブラリーではMA及びFPデータの信頼度向上が重要であると謳われた。実験値が少ないMA及びFPの評価のための国産の理論計算コードの必要性、誤差データの付与、及び品質保証についても言及されている。収納核種についてはそれ程増やす必要は無いが、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $^{197}\text{Au}$ 、 $\text{Dy}$ は是非加えてほしいとの利用者からの要望があった。これらの検討結果はシグマ本委員会に答申され、委員会としてはこの答申に沿って汎用ライブラリーJENDL-4を開発すべきであるとの決定を下した。2005年10月に発足した日本原子力研究開発機構の核データ評価に関する第1期中期計画は正にこの決定を受けたものとなった。

図1にJENDL-4の開発スケジュールを示す。最初の2年間で統計モデルに基づく理論計算コードPOD及びCCONEを開発した。それらを用いて評価を行い、2008年3月にはアクチノイド核種部

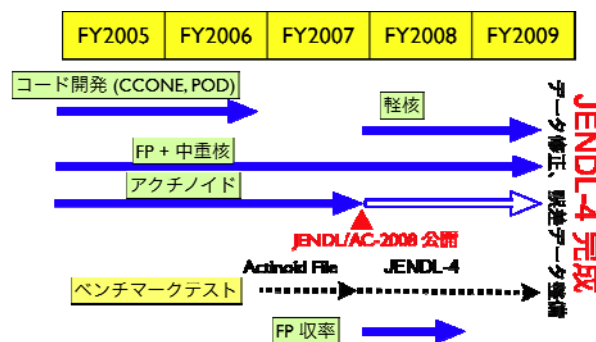


図1 JENDL-4の開発スケジュール

分を纏めた JENDL Actinoid File 2008 を公開した。2008 年度は新たに核分裂収率及び軽核の評価を行った。その後、ベンチマークテストからのフィードバックによるデータの修正及び誤差データの整備を行い、2010 年 3 月末に JENDL-4 は予定通り完成した。以下の章では評価手法及び幾つかの評価結果を示す。

## 2. アクチノイド核種

Z = 89 ~ 100 の範囲で 79 核種を評価した。JENDL-3.3 はこの範囲で 62 核種であったので、17 核種増えたことになる。熱中性子断面積は実験値、系統性、或いは CCONE 計算値の 1/v での外挿等から評価した。図 2 に JENDL-3.3 と JENDL-4 の代表的な核種の熱中性子断面積の差を示す。核分裂断面積で大きな差があるのはいずれも sub-threshold 核分裂である。捕獲断面積では  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242}\text{Cm}$  で差が大きくなっている。 $^{235}\text{U}$  に関しては、変化はなかった。

分離共鳴パラメータに関しては  $^{232}\text{Th}$ 、 $^{233,238}\text{U}$ 、 $^{239,241}\text{Pu}$  は ORNL グループの最新評価値を採用した。また、 $^{236,238}\text{Np}$  は古高氏 (JAEA) が SAMMY コードにより評価した。その他の核種については、実験値を再現するように再調整した。

図 3 に  $^{235}\text{U}$  の中性子捕獲断面積を示す。JENDL-3.3 では Leal 等の分離共鳴パラメータを採用し、その上限は 2.25 keV であった。しかしながら、ウラン燃料高速炉心である BFS の臨界性、ナトリウムボイド反応度の過小評価から、1 keV 付近の断面積が大きすぎるのではとの指摘があった。そこで、JENDL-4 では同じ共鳴パラメータを採用するものの、その上限は 500 eV とし、500 eV ~ 3 keV 付近の断面積を JENDL-3.3 より低めに設定した。その結果、上記積分実験の再現性は改善した。

共鳴領域以上の核分裂断面積は実験値が多くある場合は最小自乗法により、実験値が無い場合は CCONE による理論計算より評価値を求めた。また、 $^{233,235,238}\text{U}$  及び  $^{239,240,241}\text{Pu}$

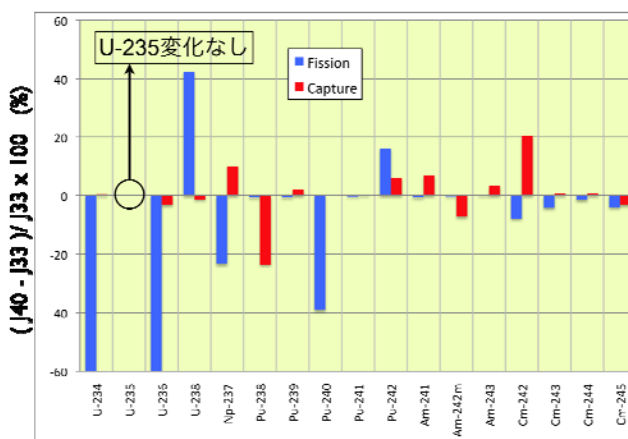


図 2 熱中性子断面積の差

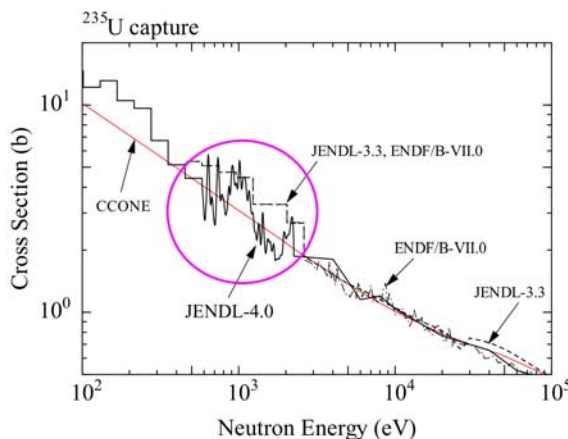


図 3  $^{235}\text{U}$  中性子捕獲断面積

の核分裂断面積はそれぞれの核種の断面積測定値に加え、色々な組み合わせの比の測定（例えば、 $^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ ）があるので、これらを考慮した同時評価を行った。共鳴領域以上の所謂スムーズパート断面積は実験値の豊富な反応以外は CCONE による理論計算で評価した。一例として、図 4 に  $^{238}\text{U}(n,2n)$  反応断面積を示す。JENDL-3.3 は低めの Frehaut 等の実験値をベースにした。この実験値は他の核種でも常に低めであることが分かっている。JENDL-4 ではこの実験値を再規格化するとともに、CCONE による計算値を採用した。図のように今回の評価結果は ENDF/B-VII.0 と同程度になった。

JENDL Actinoid File 2008 では評価の最終段階で、積分データを考慮した系統的なデータ補正を実施した。その後この手法に対する批判が生じ、関係者と議論を続けたが、結論として JENDL-4 では系統的な補正は行わないことにした。しかしながら、積分実験の再現性を考慮したデータの修正は不可欠であり、昔ながらの核種毎独立の手修正を実施した。例として、 $^{235}\text{U}$  の  $\nu_p$  を図 5 に示す。この例では、GODIVA、FLATTOP-U、BFS の高速炉ベンチマークの結果を受けて keV 領域の修正を行った。

### 3. FP 核種

$Z = 30 \sim 68$  の範囲で JENDL-3.3 より 30 核種多い 215 核種を評価した。原則として、半減期 10 日以上、核分裂収率 0.1% 以上が対象である。分離共鳴パラメータはシグマ委員会 FP 核データ評価 WG の協力を得て、124 核種のデータを評価した。非分離共鳴パラメータは、今回から自己遮蔽の計算にのみ使用するオプションに変更し、上限も JENDL-3.3

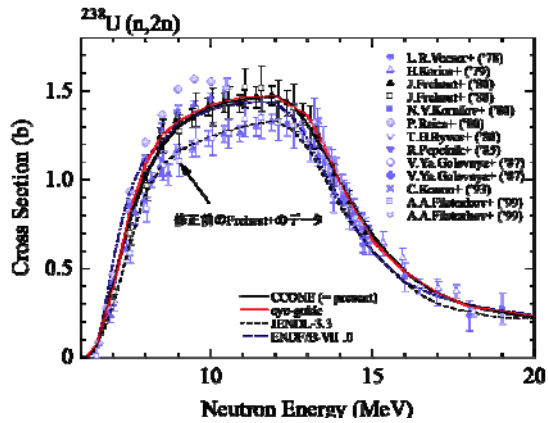


図 4  $^{238}\text{U}(n,2n)$  反応断面積

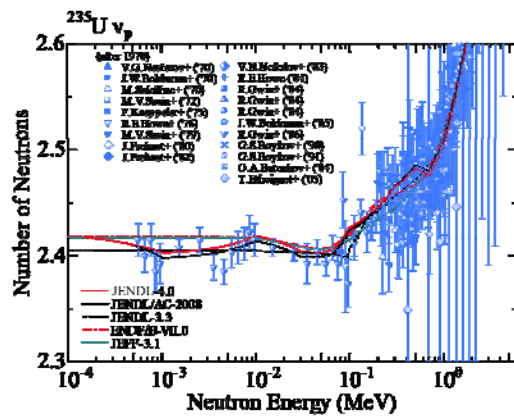


図 5  $^{235}\text{U}$  の核分裂当たりの放出即発中性子数

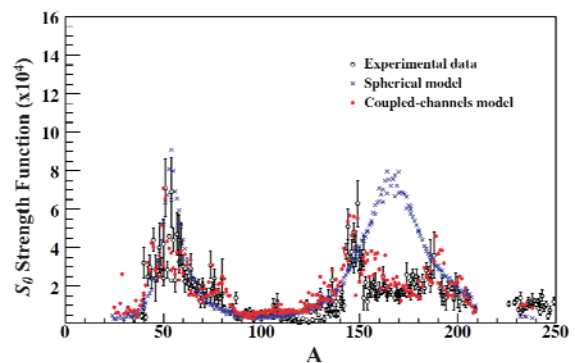


図 6 s-波中性子強度関数の質量数(A)依存

の一律 100 keV から可能な限り引き上げた。スムーズパート断面積は、広い質量範囲に適用できるチャンネル結合光学模型パラメータを導出し、CCONE 及び POD コードにより 170 核種の評価を行った。図 6 は s 波中性子強度関数を質量数の関数としてプロットしたものである。A = 150 ~ 200 付近の変形核の領域で今回得られたチャンネル結合光学模型パラメータは球形光学模型パラメータより良く実験値を再現することが分かる。この様に、信頼度の高いモデルパラメータを用いて評価計算を実施している。

評価の一例として、図 7 に  $^{80}\text{Se}$  の中性子捕獲断面積を示す。この例では、POD コードを用い、 $\gamma$  線強度関数は東工大の捕獲断面積測定値を再現するように規格化している。東工大以外の実験値との一致も良い。JEFF-3.1.1 の評価値は系統的に大きすぎる事が分かる。図 8 には入射中性子エネルギー 14.1 MeV における銀からの放出中性子スペクトルを示す。CCONE による計算結果は励起エネルギー 2.5 MeV の擬似共鳴を入れることにより実験値を良く再現している。なお、このような擬似共鳴は多くの FP 核種に於いて実験値を再現するために必要であることが分かっている。

FP 核種の低エネルギー断面積の問題として最後まで残ったのが、 $^{157}\text{Gd}$  熱中性子捕獲断面積である。JENDL-3.3 の熱中性子断面積は 253,681 b であるが、最新の RPI の分離共鳴パラメータを使うと 226,000 b になる。評価のポリシーとして、分離共鳴パラメータは最新のものを使いたいのだが、問題が生じた。RPI のパラメータを用いると Gd が燃料に含まれている FUBILA 実験の出力分布は JENDL-3.3 より再現性は良くなる。ところが、ICSBEP にある Gd 溶液体型での臨界性はかなり大きくなる。感度解析の結果、この 2 種

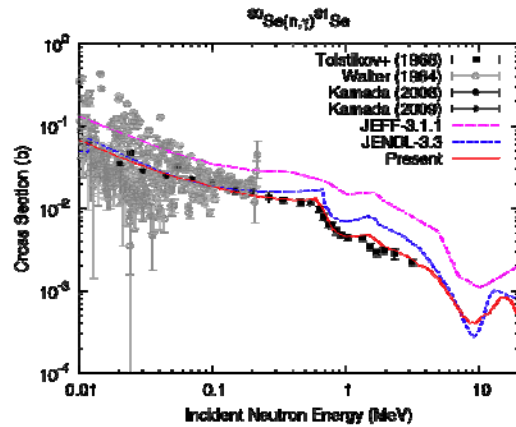


図 7  $^{80}\text{Se}$  中性子捕獲断面積

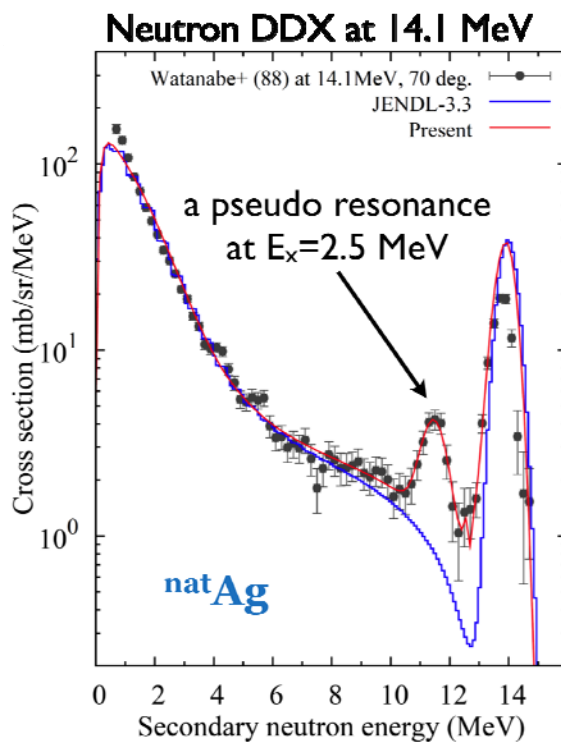


図 8 14.1 MeV における銀からの放出中性子スペクトル

類の体型の $^{157}\text{Gd}$ 捕獲に対する感度は0.1 eVを境に若干異なる。全く同じなら両者を満足する解は無いことになるが、少し異なるので共鳴パラメータを調節してみた。負の共鳴も入れてみた。残念ながら、与えられた時間内では調整不能であった。そこで、最後の手段として、バックグラウンドを挿入した。即ち、図9のように0.1 eV以上はRPIのパラメータからの計算値を用い、0.1 eV以下ではJENDL-3.3に乗り換えた。結果として、熱中性子捕獲断面積はJENDL-3.3から変わらなかった。

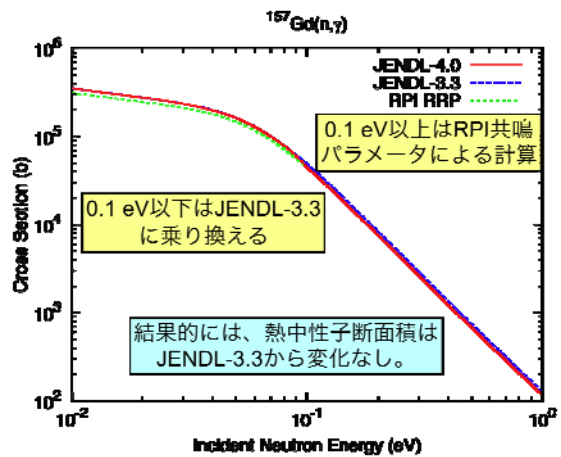


図9  $^{157}\text{Gd}$  中性子捕獲断面積

#### 4. その他の核種

軽核では $^1\text{H}$ 、 $^9\text{Be}$ 、 $^{10}\text{B}$ 、 $\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$ を改訂した。 $^1\text{H}$ は軽水炉ベンチマークの結果を踏まえて、最終的にENDF/B-VII.0のデータを採用した。 $^{10}\text{B}$ はトリチウム生成断面積を再評価した。何故なら、PWRの高燃焼度化にともない冷却水中のホウ素濃度が増加し、それに伴い $^{10}\text{B}$ に起因するトリチウム生成を精度良く評価する必要が出てきたからである。図10から分かるように今回の評価値は熱中性子領域でJENDL-3.3より33%小さい。また、高速中性子領域でもJENDL-3.3にない共鳴が存在し、ENDF/B-VII.0に近い評価値となっている。

構造材では、 $\text{Si}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Mn}$ 、 $^{56,57}\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}$ を改訂した。JENDL-3.3にある天然Vは $^{50,51}\text{V}$ の新評価で置き換えられた。また、 $^{59}\text{Fe}$ 及び $^{59}\text{Ni}$ は新たに評価された。 $^{59}\text{Ni}$ の(n,α)反

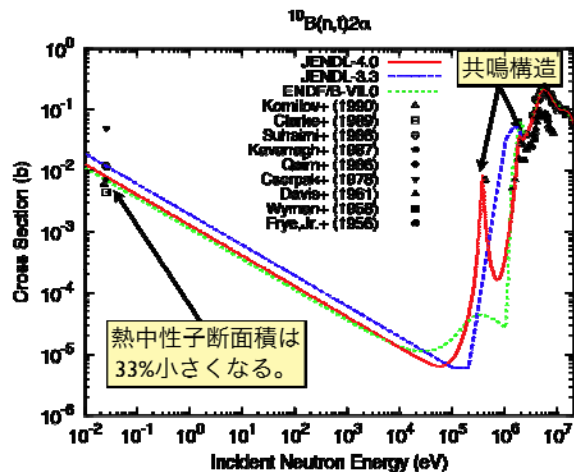


図10  $^{10}\text{B}$  トリチウム生成断面積

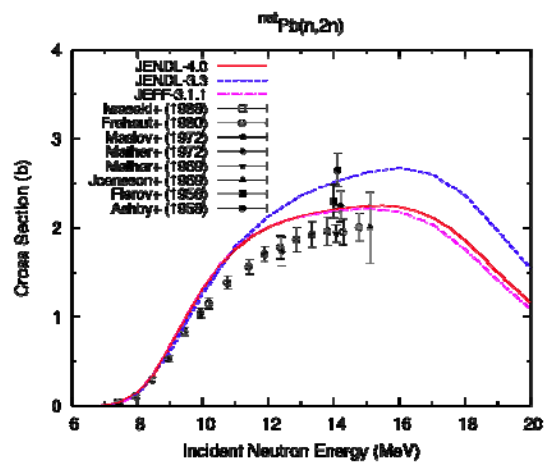


図11  $^{\text{nat}}\text{Pb}(n,2n)$ 反応断面積

応は原子炉格納容器の損傷評価にとって重要である。一方、FP以上の重い核では、Hf、W、Pb、<sup>209</sup>Biを改訂した。Pbでは<sup>208</sup>Pb以外は分離共鳴パラメータとしてn\_TOFで得られたものを考慮し、スムーズパート断面積はCCONEで再評価した。図11は得られた天然Pbの(n,2n)断面積であるが、14 MeVでJENDL-3.3より小さくなった。なお、Frehautの実験値(白丸)は<sup>238</sup>Uと同様に系統的に小さいことが分かる。改訂されたPbのデータはJENDL-3.3に比べ、高速炉及び核融合積分実験をよく再現することが分かっている。更に、<sup>169</sup>Tm、Yb、<sup>181,182</sup>Hf、Os、<sup>197</sup>Auを新たに評価した。<sup>182</sup>Hfは半減期が900万年であり、その生成断面積はBWRの制御棒の放射化を評価するために必要である。

## 5. 核分裂収率

ENDF/B-VII.0で採用されているEngland-Riderの評価をベースにした。但し、FP核種はJENDL FP Decay Data File 2000に合わせ、独立収率を再計算した。累積収率を計算する際は、上記ファイルの崩壊チェインを採用した。中性子誘起核分裂31核種、自発核分裂9核種のデータを整備した。因みに、JENDL-3.3は中性子誘起反応のみ12核種であった。

## 6. 日・米・欧の汎用ライブラリーの比較

表1に日・米・欧の汎用ライブラリーの比較を行った。JENDL-4は収納核種数、ガンマ線データ収納核種数、角度依存中性子スペクトル収納核種数、誤差データ収納核種数ともに欧米のライブラリーを上回っている。勿論、数が多ければ良いというものではないが、微分データの観点からは実験値との一致は良い。ベンチマーク計算の結果からは積分的実験の再現性もすこぶる良い。従って、現時点では世界一信頼度の高い汎用ライブラリーと、自負している。

表1 日・米・欧のライブラリー比較

	JEFF-3.1.1	ENDF/B-VII.0	JENDL-4.0
開発国	欧州	米国	日本
公開年	2009	2006	2010
収納核種総数	381	393	406
γ線データ収納核種数	139	206	354
角度依存中性子スペクトル収納核種数	83	171	318
誤差データ収納核種数	37	26	95

## 7. JENDL-4のパッケージ

JENDL-4のサブライブラリーは以下ようになる。

- 中性子反応サブライブラリー 406核種

- 核分裂収率サブライブラリー 中性子誘起反応 31 核種 自発核分裂 9 核種
- 熱中性子散乱則サブライブラリー 15 物質：ENDF/B-VI.8 及び VII.0 より選ぶ。
- 光子—原子サブライブラリー 100 元素：EPDL97 を採用。
- 電子—原子サブライブラリー 100 元素：EEDL を採用。

基本的な炉定数ライブラリーについては、原子力機構炉物理研究 Gr が整備する予定である。

## 8. 終わりに

JENDL-4 のためのデータ評価及び編集は予定通り平成 22 年 3 月末で終了した。データは JENDL-4.0 として 5 月 28 日に原子力機構核データ評価研究グループの Web ([http://www.ndc.jaea.go.jp/index\\_J.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/index_J.html)) 上で公開した。今後、このデータを色々な分野で積極的に使って頂きたい。4 月から核データ評価研究 Gr の主たるテーマは高エネルギー核データに移るが、20 MeV 以下の汎用ライブラリーのサポート業務は当然のことながら継続される。更なるデータの改良のために、JENDL-4.0 の使用経験のフィードバックをお願いしたい。

最後に、JENDL-4.0 の開発に協力して頂いた方々に謹んで感謝いたします。