

2010 年春の大会・核データ部会企画セッション

(2) JENDL-4.0 共分散評価

日本原子力研究開発機構

岩本 修

iwamoto.osamu@jaea.go.jp

1. はじめに

核データの共分散に対する要望が高まってきており、JENDL-4 の整備においても共分散データの充実を目標の一つとしている。JENDL-4.0 では主にアクチノイド核種に対して共分散の充実を図った。JENDL-3.3のアクチノイド核種は公開時点では、U-233, 235, 238, Pu-239, 240, 241 の主要 6 核種に対し共分散が整備され、Np, Am, Cm の一部のマイナーアクチノイド (MA) 核種については JENDL-3.3 の公開後共分散の評価が行われた。共分散データとしては即発・遅発核分裂中性子数 (MF31; MT455,456) や共鳴パラメータ (MF32; MT151)、また全断面積 (MF33; MT1)、弾性散乱断面積 (MF33; MT2)、非弾性散乱断面積 (MF33; MT4,51-90)、核分裂断面積 (MF33; MT18)、捕獲断面積 (MF33; MT102)、(n,2n) (MF33; MT16) 等の反応断面積があり、他に弾性散乱角度分布 (ルジャンドルの 1 次係数, MF34; MT2) と核分裂スペクトル (MF35; MT18) がある。これらの共分散データはユーザーの要望に沿って整備されたものであり、JENDL-4.0 でもこれらの核データについて共分散評価を行った。JENDL-3.3 では、MA 核種については核分裂断面積、捕獲断面積、共鳴パラメータのみに対して共分散が評価されたが、JENDL-4.0 では全てのアクチノイド核種 (79 核種) に対して、上記全ての核データ共分散の評価を行った。

2. 共鳴領域

JENDL-4.0では非分離共鳴パラメータは自己遮蔽因子の計算にのみ使用されるため、非分離共鳴パラメータの共分散は与えなかった。ここでは、分離共鳴に関する共分散について述べる。

主要核種のU-233, 235, 238, Pu-239の共鳴パラメータについてはORNLグループからSAMMYの解析結果の共分散データを入手したが、ファイルサイズが約100 MB~1.7 GBと巨大なため、低エネルギー側の共鳴パラメータに対しては部分的な共分散を採用し、それ以外の領域では断面積の共分散を与えた。

MAの共鳴パラメータに関しては、パラメータの分散のみを与えた。誤差はパラメータを採用した共鳴解析の文献またはMughabghabが編集した共鳴パラメータの表[1]から採用した。誤差が不明な共鳴パラメータに関しては、仮定した誤差を与えた。さらに測定データと比較検討して、断面積誤差を追加した。一部の核種では熱中性子断面積誤差を考慮して負共鳴の共分散を調整した。例として、図1に熱中性子領域でのAm-242mの核分裂断面積を示す。図中の影で示した部分は断面積の標準偏差の大きさ ($\pm 1\sigma$) であり、熱中性子領域で約9%となっている。

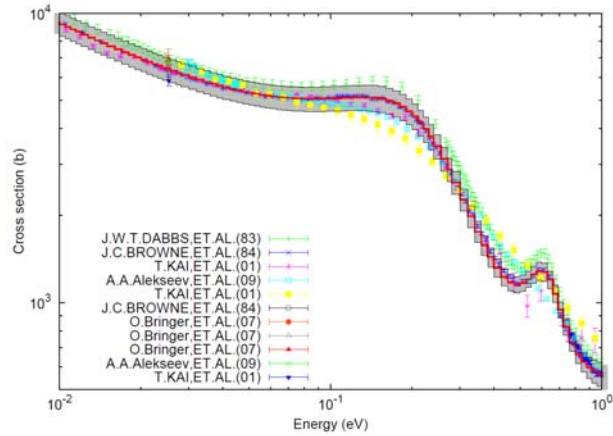


図 1. Am-242m 核分裂断面積

3. 核分裂断面積

主要核種であるU-233, 235, 238, Pu-239, 240, 241の核分裂断面積の評価では、断面積及び断面積比の測定データを用いて、SOKコード[2]による同時評価を行っており、断面積及び共分散の評価値が得られている。これらの核種の共分散は同時評価で得られた結果を採用した。ただし、測定データの不確定性を考慮し、同時評価で得られた誤差を2倍して採用した。最終的な誤差は小さい部分で1%程度である。共分散は複数の核種に対し同時に評価を行っているため、核種間に相関がついたデータとなっている。図2に同時評価で得られた核分裂断面積の相関行列を示す。全体に正の相関がついており、核種間の共分散でも特に同エネルギー点で強い相関が見られる。

その他の核種の核分裂断面積は、GMAコード[3]を使用した測定データの最小二乗フィッティングにより評価を行っており、共分散データも同時に得られている。GMAにより得られた共分散の例として、図3にAm-241及びAm-242mの核分裂断面積共分散を示す。共に数%の断面積誤差

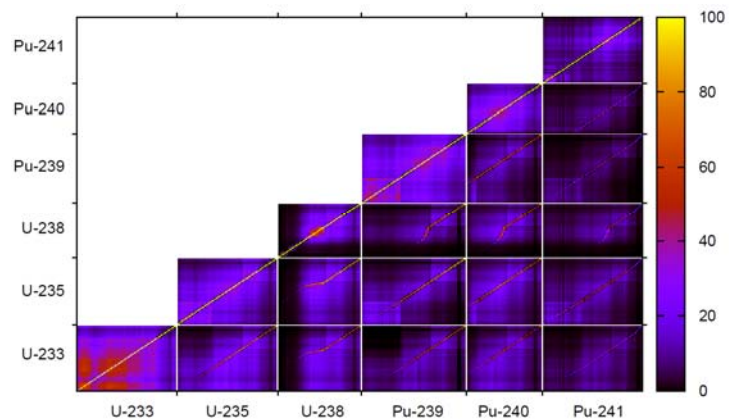


図 2. 同時評価で得られた核分裂断面積の相関行列

が得られている。
Am-241 は高いエネルギーと低いエネルギーで相関はほとんど無いが、Am-242mでは全エネルギーで比較的強い相関が

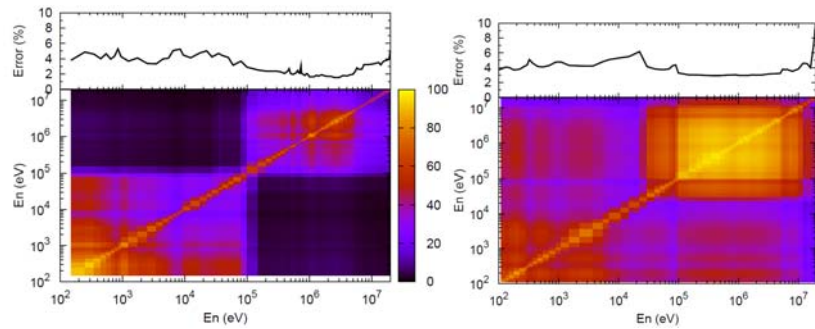


図 3. Am-241 (左) 及び Am-242m (右) の核分裂断面積共分散。

上が断面積誤差、下が相関行列を表す。

存在する。これは評価に用いた測定データの測定エネルギー範囲の違いに起因する。GMAの結果を採用した場合も、測定データと比較して誤差が小さすぎると判断した場合は、適当な係数を誤差に乗じるなどした。

4. 他の反応断面積

核分裂以外の反応断面積は、主に核反応モデル計算コードCCONEコード[4]による理論計算により評価を行っているが、断面積の評価時は最小二乗法等の統計的手法を用いていないため、断面積共分散は得られていない。JENDL-4.0のための共分散は、モデルパラメータに対する断面積の感度から、KALMANコードシステム[5]を用いた最小二乗法により共分散を評価した。感度計算に使用したモデルパラメータは光学ポテンシャル、レベル密度、ガンマ線強度関数、核分裂バリア等に関するパラメータで典型的には50個程度のパラメータを用いた。

応用上重要である中性子捕獲反応断面積については、断面積評価で比較対象とした測定データを用い、それらの統計誤差及び系統誤差を考慮してKALMANでの解析を行った。系統誤差はデータ間で無相関とした。系統誤差は各測定データセット内では100%の強い相関を仮定した。異なるデータセット間では、同一測定者に対しては80%の相関、異なる測定者間では40%の相関を仮定した。断面積の評価値を事前値とし、パラメータに対する感度を用いてKALMANによる推定を行った。得られた共分散に事前値と推定値の差を加えて、最終的な共分散評価値とした。図4にNp-237の捕獲断面積を示

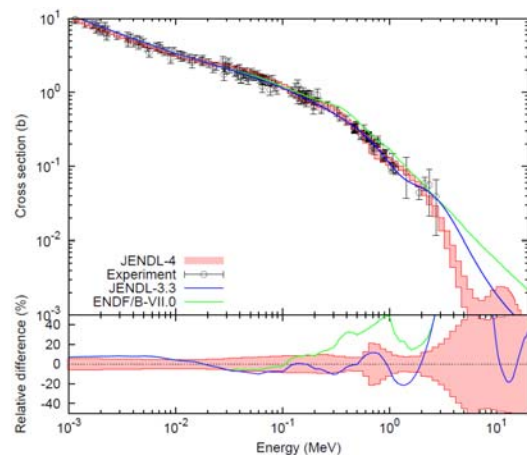


図 4. Np-237 捕獲断面積と誤差

上が捕獲断面積、下が JENDL-4 と他の評価値との

す。図中の影で示した領域が得られた誤差である。低エネルギー部分では、誤差範囲で JENDL-3.3 及び ENDF/B-VII.0 の評価値と一致している。測定データが無い高エネルギー部分では誤差以上の不一致が見られる。

測定データが存在する他の断面積については、測定データから幾つかの代表点での断面積誤差を推定し、その推定した誤差を用いて断面積全体の共分散を評価した。図5にU-233全断面積に対する共分散評価の例を示す。図中「pre」は事前誤差、「pos」はKALMANによる推定誤差を表す。図中の「assumed error」が測定データから推定し、KALMANの入力に用いた代表点である。

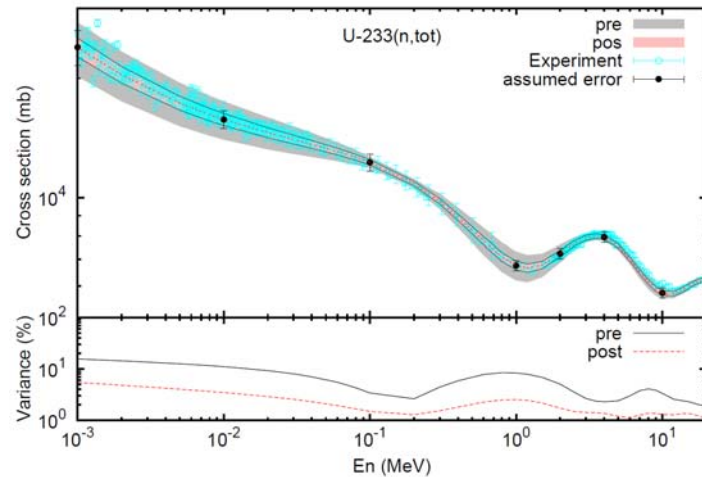


図5. U-233 全断面積（上）と誤差（下）

モデルパラメータは広いエネルギー領域にわたって感度を有するため、エネルギーの代表点での誤差を与えることにより、広いエネルギー範囲で誤差が減少する。

測定データが無い反応断面積については、仮定したモデルパラメータの誤差から求めた。測定データが存在する反応に対し、そのデータに感度が大きいパラメータについて大まかな誤差を推定し、測定データが存在しない場合はそのパラメータについて2倍程度の誤差を与えた。

弾性散乱角度分布及び核分裂スペクトルについても、モデルパラメータに対する感度からKALMANを用いて共分散の評価を行った。

5. 核分裂中性子数

即発核分裂中性子数 ν_p は、主として測定データを一次関数でフィッティングして得られたパラメータの共分散から評価した。測定データ間の相関を考慮していないため、得られた誤差は多くの場合過小評価していた。ここでは測定データの不確定さを考慮し、フィッティングにより得られた ν_p の誤差を定数倍して採用した。測定データが無い場合、代表点に対して仮定した誤差を用いて同様な方法で評価した。

遅発核分裂中性子数は、測定データが存在する場合は測定データを基に、最初の複合核からの核分裂のみの領域、中性子を1個放出した後の複合核の寄与が大きい領域、及びその中間領域に分割して、領域毎の誤差を求めた。測定データが無い場合は15%の誤差を与えた。

6. まとめ

JENDL-4.0 の核データについて共分散の評価を行い、核分裂中性子数 (MF31)、共鳴パラメータ (MF32)、反応断面積 (MF33)、弾性散乱角度分布 (MF34)、核分裂スペクトル (MF35) の共分散を全アクチノイド核種に対し評価した。JENDL-4.0 は JENDL-3.3 と比較し、アクチノイドの共分散データが充実したライブラリーとなった。共分散データは核データそのものと比較し信頼性の検証が難しい。「使える共分散」となるためには、ユーザーからのフィードバックが必要不可欠である。共分散の積極的使用とそのフィードバックを期待する。

参考文献

- [1] S. F. Mughabghab, “Atlas of neutron resonances, resonance parameters and thermal cross sections Z=1-100,” Elsevier (2006).
- [2] T. Kawano, H. Matsunobu, T. Murata *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 327 (2000).
- [3] W.P.Poenitz, BNL-NCS-51363, Vol.I, 249 (1981).
S. Chiba, D. L. Smith, ANL/NDM-121 (1991).
- [4] O. Iwamoto, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 687 (2007).
- [5] T. Kawano, K. Shibata, JAERI-Data/Code 97-037 (1997).