

WG活動紹介(Ⅱ)

F P 核データWG

(株) 東芝
川合 將義

本ワーキンググループは、1971年に発足したもので、常設のCINDAグループを除くとシグマ委員会内で最も長く活動を続けている。その為、シグマ委員会の中心メンバーでこのワーキンググループに係わった人も多い。現在のメンバーは8名*とやや小規模化した感があるが、反面小回りが利いて集中作業等の日程が採りやすいといえる。活動内容は、核分裂生成物核種の核データの評価である。対象核種は、質量数的にはA=75～159と限られているがその数は非常に多い。そのため、断面積計算の基本パラメータのシステムティクスの確立から原子炉での反応度価値等の解析を通じた積分テストをも自ら行っているところが、JENDLのFP以外の核データ評価を行っている他のワーキンググループと違っている。ここ数年はJENDL-3.2を中心に活動を進め、他の核種データと歩調を併せてファイルを完成することができた。また、NEANSCでの評価国際協力(サブグループ10)では、FPの非弾性散乱断面積の評価法と積分テストの問題を追求しており、当ワーキンググループはその活動を積極的に支援し、データを提供した。以下、それらの活動概況を記す。

JENDL-1 から JENDL-3 への経緯

JENDL-3.2に含まれる核データは、全部で340核種に及んでいるが、その半数の172核種について当ワーキンググループが関わっている。もちろん、最初からこんなに多くの核を対象にしてきた訳でなく、1975年にGeneral Purpose Fileに先駆けて作成したJENDL-1のFPライブラリー⁽¹⁾は、高速炉用の28核種(JENDL-1全体では72核種)しかない。FP領域の核の断面積は測定が無いものが多いので、その評価には計算に頼ることが多い。JENDL-1評価の過程では、光学模型パラメータや中性子捕獲断面積のグローバルな系統性が調べられた。断面積の計算には当時完成したばかりのCASTHYコードが使われた。ついで、1984年完成したJENDL-2⁽²⁾では、181核種

*) ワーキンググループメンバー

瑞慶覧 篤(日立)、渡部 隆(川重)、松延 廣幸(住原工)、中島 豊、中川 庸雄、千葉 敏、杉 暉夫(原研)、川合 將義(東芝、リーダー)

中 100 核種を占めた。これは、高速炉での FP 毒（中性子捕獲反応）の 99.6%、FP 蓄積収量の 195 % を与える。評価対象が多いだけに FP 領域をいくつかに分けて核モデル計算パラメータの系統性を求めたのと評価のツール（JOBSETTER など）の開発が行われた。共鳴パラメータも BNL-325 からの借り物でなく、独自の評価も行われた。JENDL-1 などの積分テストも行い、その結果が JENDL-2 の評価にフィードバックされた。続いて 1990 年 12 月には JENDL-3.1 を完成した。これは FP 核種 172 核種⁽³⁾を含んでおり、高速炉だけでなく、軽水炉や高温ガス炉の燃焼計算にも適用できる。また、(n,2n) 反応や荷電粒子放出などのしきい反応断面積も完備しており、核融合炉などでの材料損傷評価、中性子ドジメトリーなどの基礎核データを提供できるもので、量的に同程度の欧米の ENDF/B-VI や JEF-2 に無い特徴として特筆できる。このしきい反応断面積の評価は、前平衡過程を考慮した蒸発模型計算コード PEGASUS⁽⁴⁾の開発に負うところが多い。また、評価の過程では、JENDL-2 の積分テストと断面積の調整結果も考慮された。レベル密度パラメータや光学模型パラメータの系統式が得られた。

JENDL-3.2 作成作業

1990 年 12 月に JENDL-3.1 の一部として公開された FP ファイルについては、その後、原子炉中での試料の反応度値や中性子捕獲率の積分データを用いてデータの信頼性を検証した。その結果、主要な核種については 10 % 以内で積分データを再現しうることが分かった⁽⁵⁾。しかし、重い FP 核で過小評価の傾向が見出された。また、微分データの新しい測定として、オメガ計画で問題とされる長寿命放射性 FP 核種 ^{90}Sr と ^{137}Cs の熱中性子断面積や共鳴積分に関する JRR-4 での測定データが発表された。この値は、従来の評価値と数倍も違っていて早急に改訂の必要を覚えた。また、KfK、ORNL やロシアの FEI からも中性子捕獲断面積のデータが報告された。また、必ずしも新しい測定ではないが、ORNL の Capture データの一部は、データ処理上のミスがあり、補正係数が Nucl. Sci. Eng. 誌に報告されていた。数多くある JENDL-3.1 の核種の中には、評価の時間的な制約からその補正がなされないものがあった。特に、評価の手間がかかる共鳴パラメータにおいて目立った。一方、Zr や Mo のアイソトープの非弾性散乱断面積に直接過程の寄与が考慮されていないなど、評価上の不具合が一部核種で見つかった。そのような核について再評価を行い、改訂を行った⁽⁶⁾。

改訂の内容を表 1 に示す。対象は全部で 63 核種である。熱中性子断面積と共鳴積分は、主に JRR-4 での測定結果を反映したものであるが、 ^{92}Zr は天然の Zr の全断面積の値の再現性を良くするために修正したものである。

共鳴パラメータの修正は、以下に示すように核種毎に対応が異なっている。Te アイ

ソープは ORNL の新しい測定、Ce と Ba は原研 LINAC での測定に基づいて再評価したものである。Eu は JRR-4 での測定値を再現するように第 1 共鳴順位や Negative resonance を再評価した。 ^{137}Cs は、JRR-4 での測定によって従来採用していた測定値がはっきりと否定されたので、分離共鳴パラメータを削除した。 ^{93}Nb 、 ^{99}Ru 、 ^{103}Rh は複合核のスピン J の決定に端を発したものでパラメータ間の整合性に問題があったために修正した。 ^{107}Ag と ^{109}Ag は 1 keV 近傍にレベルの見落としの影響が見られたので、人工的にレベルを追加した。それ以外は、上述の Capture area データの修正情報に基づいてパラメータを修正したものである。また、JENDL-3.1 の評価において共鳴パラメータをできるだけ多く取り込もうと分離共鳴のエネルギー上限を高く採ったが、実験データにレベルの見落としが多分にあり、それが積分データの過小評価の原因の一つになっていた。従って、捕獲断面積のエネルギー依存性を見て、非分離共鳴領域の計算値と概ね同等といえるエネルギーを分離共鳴の上限とした。結果としては上限値を下げるようになった。一方、Te については、ORNL の Capture 測定によるデータは、測定の分解能の粗さから Doublet や Triplet のデータを含んでいるため、測定パラメータから断面積を計算すると中性子捕獲断面積は良く再現するが、散乱断面積が高エネルギー側で不確かになってしまった。そのため、上限値を測定データのエネルギー範囲いっぱいまで上げられなかった。

分離共鳴領域以上の捕獲断面積は、積分テストの結果や新しい測定データを考慮して、捕獲断面積の実験データを見直し、その結果に基づいて計算値を再規格化した。図 1 に ^{148}Sm の結果を例示する。なお、 ^{137}Cs については、JENDL-3.1 が積分データである CFRMF での捕獲率より一桁低く評価していたが、それを再現しようとする断面積の形（エネルギー依存性）が非常におかしなものになるので、積分測定の方が誤っていると判定し、JENDL-3.1 の値のままとした。

^{98}Mo 、 ^{100}Mo 、 ^{103}Rh については、全断面積が数 MeV 以上での測定データからのずれが目立つので、それを是正するため光学モデルパラメータを再評価したもので、捕獲断面積のエネルギー依存性も改良できた。非弾性散乱断面積は、直接過程の寄与が考慮されていなかったため、表に示した核種のほとんどは JENDL Fusion File からデータを探って改良した。

以上の改訂結果の妥当性を積分テストにより吟味した。その結果、測定の再現性は JENDL-3.1 から大幅に変わるといったものではないが、計算値と測定値の比（C/E 値）のばらつきは総じて小さくなった。すなわち、JENDL-3.1 では、所々で C/E 値がとびはねていたが、特定の傾向にまとまった。もっともこの傾向は、完全に 1.0 に収束するというものでなく、例えば、STEK 炉心での反応度値については質量数が 130 以上の重い核では 10 ~ 20 % 過小評価となっている。この過小評価は、次項で述べるよう

に断面積のデータの悪さよりも、積分データの計算方法や積分測定値のデータ処理といった炉物理的な問題に起因するのではないかと思っている。

NEANSC の評価国際協力（サブグループ 10）作業

NEANSC の評価国際協力サブグループ 10 では、FP の非弾性散乱断面積の問題を扱っている。これは、STEK 炉での反応度値を解析したところ、FP の弱吸収体で測定の実験データの再現性が悪く、その原因が非弾性散乱断面積の直接過程の寄与を無視していることにあるのでは、との指摘を受けたことから始まった。活動は、1991 年から始まったが、核データの評価と積分テストの両方の活動を行っている当ワーキンググループが主導する形で進捗した。内容は、非弾性散乱断面積の評価方法として、JENDL-3.1 で採用してきた DWBA 法の適用性を評価したことと、STEK 炉心のデータの解析法の妥当性と精度を評価したことである⁽⁷⁾。前者については、実験データや Coupled Channel 計算との比較を通じて行き、単フォノン振動順位への非弾性散乱について DWBA 法が妥当であることが確認できた。また、質量数が 100 近傍の核や 140 以上の変形核については、Coupled Channel 計算の方が望ましいといえる。

一方、STEK 炉心の積分テストについては、弱吸収体核種の非弾性散乱の直接過程の寄与を調べた結果、軽い核で改善方向であるが、重い核では効果が少ないことがわかった。さらに、MVP コードを用いたベクトルモンテカルロ法計算による中性子スペクトルの詳細解析を通じて精度評価を行った。その結果、高エネルギースペクトルが改善され、その寄与の大きいデータの再現性が若干向上した。また、従来より用いている Petten から報告された低エネルギー側の中性子スペクトルが妥当であることもわかった。一方、質量数 130 以上の強吸収体の反応度値を過小評価する問題については、 ^{127}I 、 ^{133}Cs 、 ^{149}Sm などの、断面積の測定が比較的多く、信頼性が高いと考えられる核で顕著なため、試料の実効的な共鳴断面積の計算の誤差に帰因していると推定し、現在追加検討を行っている。

まとめ

以上示したように JENDL-3.2 は、JENDL-3.1 の問題点の大部分を取り除いたものであり、現存する FP の核データライブラリーの中では、最も信頼性が高いものと思う。今後、これらの評価について早期にレポートを仕上げ、皆様のご叱正を仰ぎたい。特に、評価に非常な労力を要した共鳴パラメータについては、評価結果だけでなく、ベースとなった実験データとの比較表を著すことにより、今後の評価者だけでなく、測定をめざす人の参考としたい。

参考文献

- (1) Y. Kikuchi, et al., JAERI 1268, (1981).
- (2) T. Aoki, et al., 核データ国際会議報文集, Santa Fe, Vol.2, p.1627 (1985).
- (3) M.Kawai, et al., J.Nucl. Sci. Technol., 29, 195 (1989)
- (4) S.Iijima, et al.: unpublished.
- (5) T. Watanabe, et al., 1992年FP核データ専門家会議 NEA/NSC/DOC(92)9, p.411.
- (6), (7) M.Kawai, et al., 核データ国際会議 Gatlinburg, 1994.

表1 FP核種データの改訂内容

熱中性子断面積、共鳴積分： ^{90}Sr , ^{90}Zr , ^{92}Zr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu
分離共鳴パラメータ： ^{88}Sr , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{92}Zr , ^{93}Nb , ^{99}Tc , ^{99}Ru , ^{103}Rh , ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{110}Cd , ^{111}Cd , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{125}Te , ^{126}Te , ^{137}Cs , ^{135}Ba , ^{137}Ba , ^{138}Ba , ^{139}La ^{140}Ce , ^{141}Pr , ^{142}Nd , ^{143}Nd , ^{144}Nd , ^{145}Nd , ^{144}Sm , ^{154}Eu , ^{155}Eu
分離共鳴領域上限を下げた： ^{80}Se , ^{107}Pd , ^{113}Cd , ^{127}I , ^{139}La , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{154}Sm
捕獲断面積の再規格化： ^{79}Br , ^{81}Br , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{117}Sn , ^{124}Sn , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{122}Te , ^{123}Te , ^{124}Te , ^{138}Ba , ^{142}Ce , ^{148}Sm , ^{150}Sm
全断面積、捕獲断面積のエネルギー依存性修正： ^{98}Mo , ^{100}Mo , ^{101}Ru , ^{103}Rh
非弾性散乱断面積の修正 ^{75}As , ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{94}Zr , ^{96}Zr , ^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{95}Mo , ^{96}Mo , ^{97}Mo , ^{98}Mo , ^{100}Mo , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{150}Nd , ^{144}Sm , ^{148}Sm , ^{150}Sm , ^{152}Sm , ^{154}Sm

^{148}Sm capture cross section

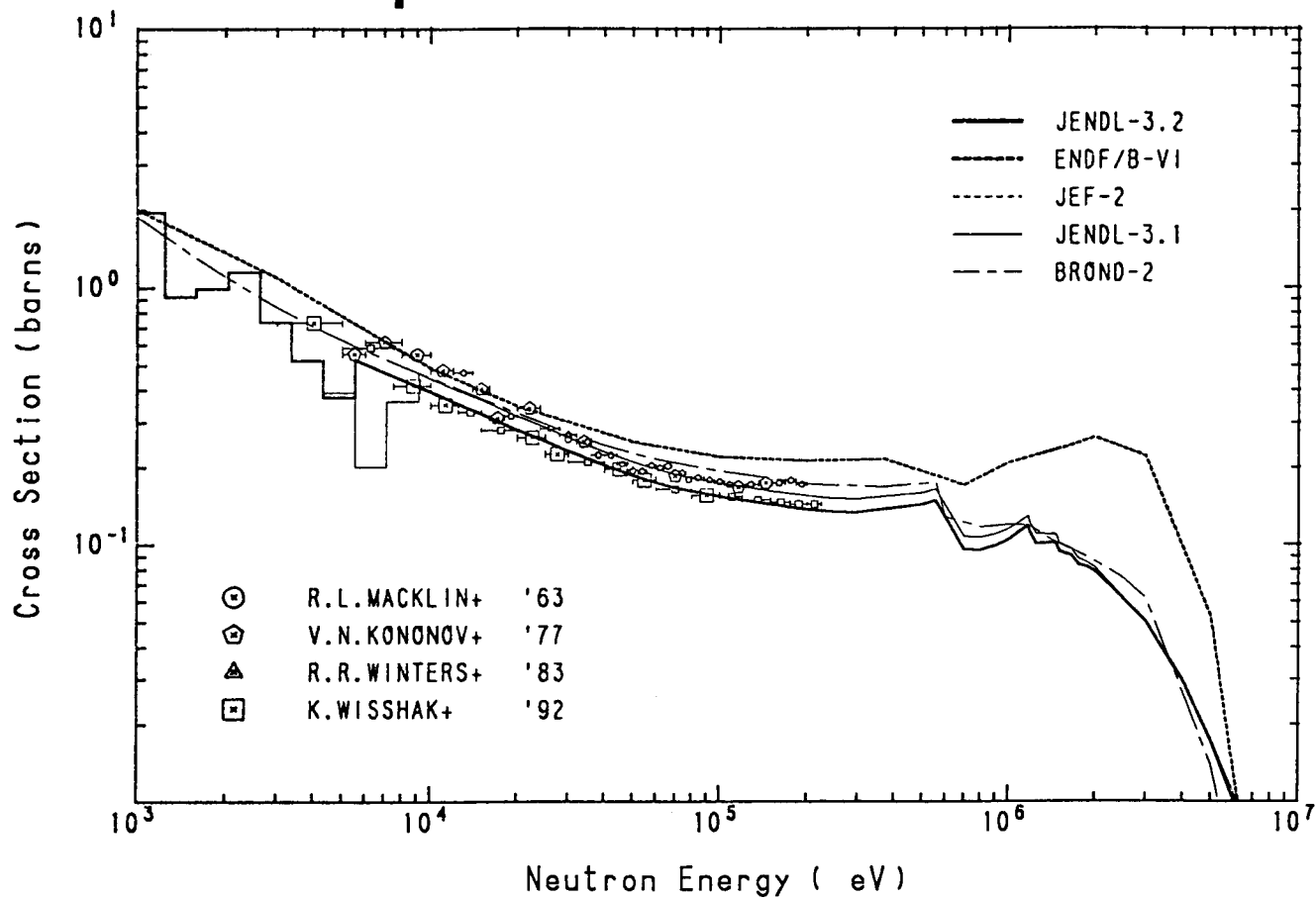


图1 ^{148}Sm 中子捕获截面