

核データ部会・炉物理部会合同企画セッション

(3) FP 核データに関する国際協力活動 (SG10, 17, 21, 23)

高エネルギー加速器研究機構

川合 将義

masayoshi.kawai@kek.jp

日本原子力研究開発機構

中川 庸雄

nakagawa.tsuneo@jaea.go.jp

1. はじめに

核分裂生成物 (FP) 核種の数膨大であるが、原子炉の核特性や放射線安全性評価に必要な核種は、原子番号 31~68 の範囲で約 200 核種である。その評価済核データファイルには、日本の JENDL や米国の ENDF/B、欧州の JEF (第 3 版から JEFF と改称)、さらにロシアの BROND 等がある。量的には ENDF/B が最も多く、ついで JENDL と JEF が多い。しかし、FP 核種は実験データの無いものも多いために、それぞれのファイル間での食い違いも目立った。そこで WPEC では、FP 核種の核データについてより信頼性の高い評価を願わくば世界標準的な評価データを実現しようとして、1991 年から 4 つのワーキンググループを立ち上げて実験データと評価データの現状、そして核データ評価法をレビューし、さらには信頼性の高いデータを選択する活動を行って来た。

まず、サブグループ (SG) 10 は 1991 年に編成された。これは、オランダの Petten における STEK 炉心で測定された反応度値について特に弱吸収体で計算値と実験値に食い違いの要因として非弾性散乱断面積の評価の粗さにあるとして、微分と積分データの不整合の原因追及を行って来た。また、SG17 は現存する評価済核データファイルの間の食い違いが、FP 核種全体として原子炉特性にどの程度に違って現れるかを検討した。さらに 2000 年当時存在した評価済核データファイルのデータを見ると、JENDL-3.2 は比較的新しい評価値を与えているが、ENDF/B-VI では 1974 年に公開された ENDF/B-IV のデータがそのまま採用されている核種が 65% もあり、米国としては ENDF/B-VII の作成に向けて緊急にこれらのデータを改訂する必要があった。このため、現状の評価済核データをレビューし、最も良さそうに思える評価済データを核種毎に選び出そうということになり、そのために編成されたのが SG21 である。ここでは共鳴パラメータや連続領域などにエネルギー領域を分けて実験データと比較し、推奨するデータを決めた。次に、その結

果を基にデータファイルの編集作業を行ったのが SG23 である。SG21 と SG23 は、BNL 国立核データセンター（NNDC）のセンター長である Oblozinsky が、設置を提案し、co-ordinator を勤めた。以下では、これら 4 つの SG について活動の概要を述べる。

2. SG10 (Evaluation Method of Inelastic Scattering Cross-Sections for Weakly Absorbing Fission-Product Nuclides)¹⁾

核燃料核種や構造材核種とともに非常に多くの FP 核種の反応度値が STEK 炉心で測定された。標準試料の反応度値を再現すべく調整された中性子スペクトルと随伴中性子スペクトルのデータが与えられていて、そのデータを用いることによって反応度値が計算でき、評価データの信頼性が容易に吟味できる。そして、JEF や JENDL のデータを吟味した結果、FP で強吸収体ではおおむね 10% 以内で実験値と一致する結果を得たが、Fig. 1 に示すように弱吸収体については反応度値をマイナス側に評価する傾向にあった。その傾向は、質量数 100 近傍の核で目立った。そのことに気づいた Gruppelaar は、原因が非弾性散乱断面積、特に直接過程寄与の過小評価にありそうだと考えて検討を提案し、1991 年に co-ordinator を川合、monitor を Gruppelaar として SG10 が編成された。メンバーは、ベルギー、フランス、日本、オランダ、ロシア、米国から参加し、総勢 18 名である。日本からは、シグマ委員会の FP 核データのメンバー 8 名（川合、千葉、中川、杉、中島、渡部、瑞慶覧、松延）、九大の河野、渡辺と PNC に滞在していたドイツ人の Dieze が参加した。

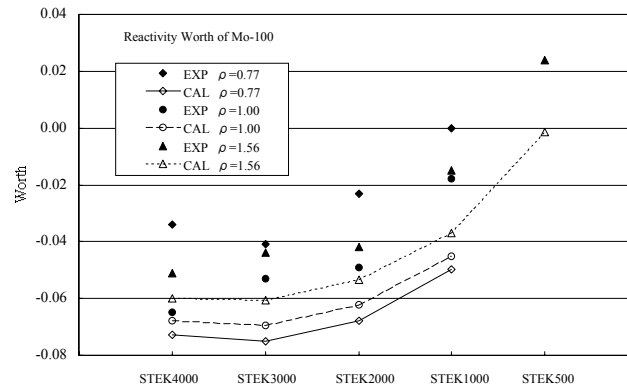


Fig. 1 Mo-100 の反応度値の実験値と計算値

活動は、先ず JENDL-3.2、JEF-2.2、ENDF/B-VI の核種別に非弾性散乱断面積データの相互比較を行った。その結果、非弾性散乱断面積について直接過程が考慮されているのは、JENDL-3.2 のみであることが確認された。そこで、JENDL-3.2 のデータを主体に非弾性散乱断面積直接過程の計算法の検討を行った。その結果、多くの核で one phonon による励起が DWBA 法で評価できること、Nd 等の変型核の場合には coupled-channel 理論が

必要であることが分かった。残る問題は、Mo や Pd の質量数 100 近傍核での測定との食い違いの原因解明であり、Geel の IRMM で非弾性散乱断面積が新たに測定された。その結果に対して、JENDL で採用していた全断面積にフィットして求めた光学模型パラメータ (OMP) や Moldauer 等の global fit OMP によっては測定値を再現できないことが分かった。そして良好な OMP を用いれば DWBA モデルによって非弾性散乱断面積を十分な精度で評価できることが河野一渡辺によって示された (Fig. 2 参照²⁾)。ただし、かように良好な OMP による断面積を用いても STEK 炉心での反応度値の実験値を再現できなかったもので、その食い違いの要因が MVP コードによるモンテカルロ計算法や積分輸送コードによる非均質効果の評価法を駆使して追求された。結果は、食い違い要因が特に随伴中性子スペクトルの曖昧さにありそうだということで、最終的には新しい積分実験が必要であるという結論を導き出した²⁾。

その後、感度解析法によって反応度値に対して非弾性散乱断面積の感度について調べた結果、Mo-98 や Mo-100 では高いこと、それに対して Mo-96 では低くなって Gruppelaar が質量数 100 の核で非弾性散乱断面積の問題を特に取り上げた理由も確認できた³⁾。

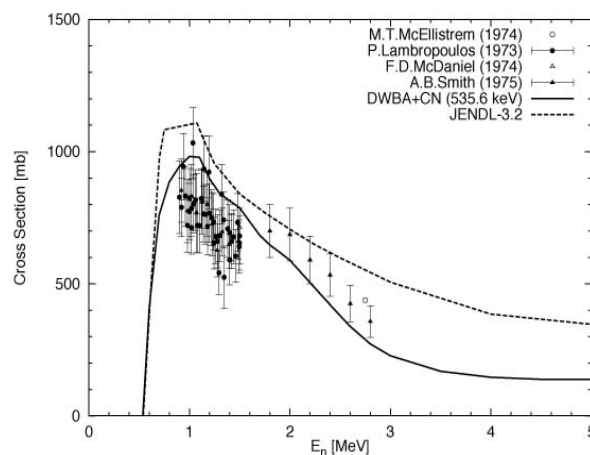


Fig. 2 Mo-100 の非弾性散乱断面積の実験値と計算値²⁾

3. SG17 (Status of Pseudo-Fission-Product Cross Sections for Fast Reactors)⁴⁾

FP には Ge から Er まで多くの元素が含まれ、中性子断面積の実験データの無い核種が多く、それらの断面積の評価値は評価モデルや核モデルパラメータの取り方に大きく依存する。そうした核では評価済核データファイルの間で核データの食い違いが小さくなく、エネルギー範囲によっては桁違いに異なる場合もある。そこで、FP 核データの現状を調べ、FP 核全体で眺めた異種ファイル間の核データの食い違いが原子炉の核特性に与える影響について関心が持たれて Gruppelaar を co-ordinator 兼 monitor として、1995 年に SG17 が編成された。メンバーは、オランダ、フランス、日本、ロシア、英国から参加し、総勢 15 名である。日本は、シグマ委員会の FP 核データ WG のメンバー 6 名 (川合、中

川、渡部、瑞慶覧、中島、松延）が参加した。

先ず、JENDL-3.2、JEF-2.2、ENDF/B-VI、BROND-2 の大型高速炉の炉心における 1 群化断面積と反応度係数を比較した。その結果を Table 1 に示すが、ライブラリー間の違いは予想に比べて小さい。そして、JENDL-3.2 が他のライブラリー、特に JEF-2.2 に比べて中性子捕獲反応について低くなる傾向のあることが分かった。

Table 1 FP 全体の炉心核特性と最大の食い違い

反 応	1 群化断面積（食違）	反応度係数（食違）
中性子捕獲	0.561 b (5.9%)	-0.566 (5.8%)
弾性散乱	14.8 b (5.4%)	-0.004 (17%)
非弾性散乱	0.545 b (9.0%)	-0.066 (4.8%)
(n, 2n)	1.12 b (70%)	-0.0007 (7.5%)
全反応	14.8 b (6%)	-0.642 (5.3%)

次いで、核種別の断面積データが比較された。さらに反応度価値への寄与の高い 40 核種の中性子捕獲反応断面積について JENDL-3.2 と他のライブラリーの比較が行われた。評価年代等を考慮すると最も新しい実験データを反映していて信頼性の高い JENDL-3.2 が、JEF-2.2 に比べて低い傾向が見られた。その原因は、STEK 炉心での積分測定値に基づいて調整された JEF-2.2 にあることが推定された。即ち、JENDL-3.2 による STEK 炉心での積分測定値の C/E 値と JEF-2.2 に対する JENDL-3.2 の断面積の比の間に強い相関が認められた。

4. SG21 (Assessment of Neutron Cross-Section Evaluations for the Bulk of Fission Products)⁵⁾

この SG は、BNL/NNDC の Oblozinsky が提案し、2001 年 4 月の WPEC 会合においてに編成が認められた。参加者は BNL/NNDC の他ブルガリア、韓国、日本、ロシア、IAEA、中国から参加し、総勢 13 名であった。日本からは柴田、中川、川合の 3 名が参加した。

レビューの対象となった評価済核データライブラリーは、当初は ENDF/B-VI.8、JENDL-3.2、JEF-2.2、CENDL-3.0（中国のライブラリー）、BROND-2 であった。その後、各ライブラリーで改訂が進んだことにより ENDF/B-VII のための新たな評価値や、JENDL-3.3、JEFF-3.0 も対象として取り上げられた。

この作業のため、BNL/NNDC は専用のホームページを用意しそこにレビューに必要な情報を集約した。主なものは、評価済データと実験データの比較図、評価済データから求めた熱中性子断面積と共鳴積分値などである。

レビュー作業者は、分担核種が決められ、それぞれの核種に対して、次の検討を行った。

1. 熱中性子断面積や共鳴パラメータ
2. 共鳴領域より上（連続領域）における、全断面積、捕獲断面積、弾性・非弾性散乱断面積、 $(n,2n)$ 、 (n,p) 、 (n,α) 断面積とその評価法

これを基に共鳴領域と連続領域で推奨する評価値を決め、その結果を核種毎のレポートにまとめた。SG21 でレビューした核種は、原子番号 31～68 の範囲の 211 核種に及んだ。

全てのレビュー結果が出揃った 2004 年 4 月に、NNDC においてワークショップが開かれ、最終的な推奨値が決められた。ワークショップでは、核種毎にレビュー報告書を検討し、実験データや評価値との比較を実際にスクリーンに表示しながら、推奨値を決めた。ここで対象核種として新たに 7 核種が加えられ、核種数は 218 に増えた。推奨値の概要を Table 2 に示す。

218 核種のうち、84 核種のデータは、既存の評価値をそのまま採用することになった。残り 134 核種については共鳴領域と連続領域に分けて推奨するデータが決められた。Mughabghab(new)は S. Mughabghab による最新の推奨値⁶⁾のことで、全体の半分については彼が評価した共鳴パラメータを採用することになった。EMPIRE は H. Herman が作成している理論計算コード⁷⁾であり、25 核種については、満足できる連続領域の評価値が無いので、このコードで計算し直すこととしたものである。JENDL-3.3 は 44 核種のデータがそのまま採用された。共鳴パラメータが採用された核種が 7、連続領域の評価値が採用された核種が 66 であった。JENDL-3.3 は、採用された核種数が一番多く、FP 領域については 2004 年の時点で最も優れた評価済核データライブラリーであったと言える。

Table 2 SG21 による推奨値の概要

ライブラリー名	共鳴領域	連続領域	全領域
JENDL-3.3	7	66	44
ENDF/B-VI.8	13	17	1
ENDF/B-VII	--	--	27
JEFF-3.0	--	--	1
CENDL-3.0	--	27	10
BROND-2	1	1	1
Mughabghab(new)	109	--	--
EMPIRE calc.	--	25	--
合計	134	134	84

5. SG23 (Evaluated Data Library for the Bulk of the Fission Products)

SG21 が 218 核種に対する推奨値を決めて当初の目的を達成し終了したので、続いてその推奨値をまとめてファイルを作成する作業が必要になった。

SG23 は 2004 年 5 月に開かれた WPEC で設置が認められ、活動を始めた。メンバーは

co-ordinator の Oblozinsky と monitor の Jacqmin (CEA) の他に、ENDF/B、JEFF、JENDL、BROND、CENDL のグループから参加した 12 名である。JENDL からは中川と柴田がメンバーになっている。

複数のライブラリーからデータを採用してまとめる必要があった 134 核種については、中国核データセンターから NNDC に visitor として滞在していた研究員が C. Dunford の指導の下にファイル編集を行い、2004 年 12 月までにこの作業は終了をみた。その後、ファイル編集上の問題点が Dunford と Pronyaev によって検討され修正された。

一部のデータで NNDC では解決できない問題のうち、JENDL のデータに関係するものは JENDL グループに解決を任せられ、それに対応した。また、164 核種について熱中性子断面積と共鳴積分の計算を行い、コメント部分の書き換え作業も JENDL 側で行った。

SG23 の作業では、最終的に As-74 が加えられて原子番号 31～68 の 219 核種のデータがまとめられた。現在、最終レポートを作成中である。

6. まとめ

SG10 の作業により FP 核種の非弾性散乱断面積の評価法と STEK 積分実験が評定され、SG17 で評価済核データファイル相互の食い違いが FP 全体では著しい差異を生み出さないことを明らかにした。SG21 と SG23 の作業により、FP 領域（原子番号 31～68）の 219 核種のデータがまとめられた。これらのデータは、2006 年 12 月に公開された ENDF/B-VII.0⁸⁾ の中に取り込まれている。

参考文献

- 1) M. Kawai et al., NEA/WPEC-10 (2001).
<http://www.nea.fr/html/science/wpec/volume10/volume10.pdf>
- 2) T. Kawano et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **35**, 519 (1998).
- 3) M. Kawai et al., Proc. Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Oct. 7 - 12, 2001, Tsukuba, Japan, (*J. Nucl. Sci. Technol.*, Supplement 2,) vol.2, p.982 (2001).
- 4) H. Gruppelaar et al., NEA/WPEC-17, ECN-R98-N14 (1998).
<http://www.nea.fr/html/science/wpec/volume17/volume17.pdf>
- 5) P. Oblozinsky et al., NEA/WPEC-21 (2005).
<http://www.nea.fr/html/science/wpec/volume21/volume21.pdf>
- 6) S.F. Mughabghab, "Atlas of Neutron Resonances," Elsevier (2006).
- 7) M. Herman: <http://www.nndc.bnl.gov/empire219/>
- 8) M.B. Chadwick et al.: *Nucl. Data Sheets*, **107**, 2931 (2006).