FP 核データサブワークンググループ活動
26年を振り返って

高エネルギー加速器研究機構
川合 将義

e-mail: masayoshi.kawai@kek.jp

1. はじめに

FP 核データサブワークング・グループは、1997 年 6 月 17 日でもって 26 年間続
いた活動を終息した。シグマ委員会の中では常設グループの CINDA などを除くと最
長のワークインググループであった。その間に JENDL-1 用 28 核種（1976 年）、
JENDL-FP-1.5（1977 年。正式にはこのような名称はなく、JENDL-1 の補遺として NEA
Data Bank に JENDL-FFP-WG の名で送付登録されている。ここでは説明の便宜上この
名前を与える）の追加 34 核種、JENDL-2 向けの 100 核種（1985 年）、さらに最終的
な成果である JENDL-3.2 用の As-75 から Tb-159 までの 172 核種（1994 年）の核データ
を評価して来た。対象とした核種の多さと評価とともに自前による積分テストを含
む活動の殆どをワークインググループメンバーのボランティアに頼っていたことを思え
ば、かように長期に渡ったことはやむを得ない事かも知れない。なお、最初的 JENDL-1
FP ライブラリーは、15 MeV までの中性子断面積を含むが、分離共鳴パラメータは
BNL-325 third edition のものを採った。そして、JENDL-2 以降ではエネルギーの
上限を 20 MeV に上げるとともに分離共鳴パラメータも中性子断面積と同様に独自の
評価を行なっている。また、JENDL-3.1 以降は、燃料の燃焼計算だけでなく放射化計
算や核融合炉など、より広い範囲の用途に応えられるようにしきい反応断面積も含め
た。核種の数 172 は、ENDF/B-V や ENDF/B-VI の FP ライブラリー（Ge-72 から Dy-164
までの）193 核種に匹敵する。その後、NEANS の核データ評価国際協力活動（WPEC）
にも参加して、JENDL-3.2 の評価が質的にも優れている事が確認できた。

2. JENDL-1 の頃

このグループが設立された 1971 年頃は、高速実験炉「常陽」の核設計と高速臨界
実験値の解析が原研や各メーカーで独自に作られた数値をもとにに行われていたが、燃料の非均質効果の解析などでかなりの数を生じていたため、米国のENDF/Bや英国のUKNDLのような統一した核データライブラリーJENDLの必要性が叫ばれ出した頃であった。元々、FPの核データ評価は、対象核種が多いことからどの機関も共同作業を期待していたのでグループ作りは順調であり、（故）飯島氏をリーダーとして15人ほどで活動を開始した。その後、FPの積分テストを自ら実施するため炉定数専門会のFP炉定数WGを吸収した。従って、途中加わった人も含めて活動に関与してきたメンバーは文末に示すように全部で27名を数えた。活動の中心的な存在であった飯島氏、菊池氏、松本氏、田坂氏は残念ながら鬼門に入られた。最初はシグマ委員会のご意見番ともいうべき人も相当に入っており、かなり辛い状況を賜ったりした。例えば、最初の28FP核種の核データの評価レポート作成の折は、我々（当時の）新人はもっとより普段問題にされないようなベテランの英文も押し並べてスタッフに切り裂かれ、あるものは辛うじて主語と動詞のみが残ったといった有様に耐えを提出したのである。こうのような中で飯島さんの苦労は並み大抵ではなかった筈と察する。飯島さんは、核物理と炉物理の両方に精通され、FP核種の選定、核データの評価の仕組み作りから積分テストに至るまでワークインググループの活動のあらゆる戦略を練り上げ、さらには評価のためのプログラム作りや評価の仕事までこなされた。お茶の水博士の風貌そのままに、人を良く指導し、成果を若い人に分け与えて活動が継続できるように本当によく気負をされた。かくも長期活動できたのも彼あってのことと思う次第である。彼は、このFP核データの研究で東工大から学位を授与されたのも当然であろう。

ワークインググループ発足時は、シグマ委員会で作った熱中性子炉用FP定数や入手したばかりのオーストラリアのCookやイタリーのBenzにによって評価されたデータの間に何倍という大きな食い違いが目立って、評価の重要性が認識されていたのと、FP（質量）領域の準位密度公式の導出や中性子強度関数の系統性など核的な性質を解明したいといった物理的興味もあって、各人の間で評価活動が精力的に進められた。具体的には、FPの場合、評価対象核種が多い上に断面積の測定データの無いものも多いので、断面積の評価は核計算モデルに基づいて推定することが重要になる。従って、核計算モデルの選定とその計算に用いる光学模型パラメータや準位密度パラメータなどの核モデルパラメータの系統性を調べて各核種のパラメータ値を決めることが主要な作業となる。その場合、パラメータは、断面積やレベルスキャームなどの測定値にフィットして求める。そして、得られたパラメータの系統性は、測定の無い核に適用する。しかし、始めの頃は核構造データファイルENSDFが無かったため、基になるレベルスキャームのデータまで評価する必要があった。それも含めてかなり急いで仕
事が進められた。また、準位密度の式については超伝導モデルの式の提案もあり、喧嘩騒話の議論を経て、一応定評の有ったGilbert-Cameronの式に落ち着いた。そして、1973年のローニャにて開かれたFP核データの専門家会議には、高速炉の燃焼計算で重要な28核種の断面積の初期の評価結果を持って行った。引き続いて完成したばかりのCASTHYコードを用いて再評価を行い、結果がJENDL-1に納められた。その成果は、日本原子力学会でも認められるところとなり、1976年の技術賞の栄誉を担うことができた。これによってJENDL作成に一段と弾みがついた次第である。

次いで追加の34核種を含むJENDL-FP-1.5を完成させ、Cookなどの他のライブラリーやしていないで重要核種の積分テストや燃焼計算ができるようになった。この頃には、競争相手である米国ではENDF/B-IVが、オランダではRCNライブラリーが完成した。また、積分実験値として、原研のFCAとオランダSTEK炉心での試料の反応度値が、また、米国EBR-IIの試料照射データやCFRMFでの放射化データが報告されたため、これらのライブラリーを用いて積分テストが行われた。これによりJENDL-1の問題点が明らかになった。

ただし、JENDL-FP-1.5の完成は、JENDL-1とJENDL-2編集時期の間にあったこともあり、この評価結果はJENDLに採用されることなかった。

3. JENDL-2のための評価

1977年頃から始まるJENDL-2のFP核種の評価では、高速炉の燃焼計算と積分テストを考慮して対象核種を100核種に増やした。これは、高速炉でのFPによる捕獲率99.6%、FP収率の195%をカバーしている。単に核種を増やすだけでなく、評価法についてもENDF/B-IVやRCNで採用していたものを参考に改良を加えた。そのため、新しい核のレベルスキームの評価とともに、準位密度パラメータ、光学モデルパラメータの再評価を行った。そして、準位密度パラメータに関してはFig.1に示すような系統性が、さらに光学モデルパラメータについても途開発された核データ評価システムNDESを用いて局所的な質量依存のパラメータが見つけられた。もっとも、パラメータの系続性を求める仕事は、木を見つ森を見ずということが無いかに、あまり細部に魚わない思い切りが必要で、半断面積の測定データを5%以内で再現することを目標に、光学モデルパラメータを決めた。これらの結果に基づいてJENDL-2の共鳴領域より上20MeV以下の断面積の計算評価を行った。

また、JENDL-2からは分離共鳴パラメータも可能な限り独自に評価することにした。といっても全ての核について実験データの収集から始めるには人手が少なかったため、BNLのMughabghabらの評価値をベースにして、新しい測定値があればそれで補うか置き換えるという方針を探った。それでも評価値と測定値を共鳴レベル毎にエネルギーの
系統的なずれも考慮して比較することが必要であるため、それらのデータの格納システム REPSSTOR を使用し、いくつかのユーティリティーコードを作成した。なお、Mughabghab のデータは、共鳴パラメータの中性子幅、幅射幅など最新の測定値が考慮されている点は良いが、部分幅から計算された capture area が表の値と一致しないなどの矛盾もあり、また、未測定のパラメータは空欄になっているため、評価済みデータとして与えるためには、それらを補うことが必要である。即ち、レベル每に実験値と Mughabghab のデータを比較検討しながら、その共鳴エネルギー、スピン、パリティ、中性子幅や幅射幅を逐一決めることが必要であり、計算値で置き換えるといった手抜きが許されない大変に労力を要する仕事である。もっとも、スピンの決定などはサイコロならず鉛筆を転がして決めてしまったという単なる選択肢をとることも大きく、10^{-5} eV から 20 MeV まで全エネルギー区間にまたがって独自の評価に基づくライブラリーを 1985 年に完成させた。

4. JENDL-3 とその改訂版

JENDL-3 の評価では、全ての炉型での燃料計算に加えて核融合炉での核変換や線量測定などの用途を考慮して、As から Tb までの元素をすべて対象にして、172 核種を選定し評価を行った。評価では、収率が高く質量数が偶数の核の非弾性散乱断面積に直接過程の寄与を含めた。また、(n, 2n) や (n, p) 反応などのしきい反応断面積を評価対象に加えたため、計算にはそれらの核種の準位密度パラメータまで必要になり、作業は JENDL-2 以上に大変になった。省力化のためにパラメータ決定作業と並んで計算コードや大量データ処理のための数多くの道具作りを行った。例えば、準位密度パラメータ評価用には、評価済み核構造データファイル ENSEF のデータをもとに評価ができるように ENSDFRET、LDENS、LEVDENS コードを開発した。中性子断面積の計算は、主として統計モデルに基づく CASTHY コードに依るが、その入力簡便化のため JOBSETTER コードと計算パラメータデータベース PARAMFL を作成したが、これは省力化に大いに役立った。さらに、しきい反応断面積計算のためには、前平衡過程を考慮した多段階蒸発モデルコード PEGASUS が活用できた。また、レベル基本的な構成データパラメータ評価のためには、共鳴パラメータ格納システム REPSSTOR への入力補助コード XSTOREP、ETOREP、REPRENUM ならびに部分幅計算の補助コード TREP、スピンや角運動量決定コード JCONV、PASSIGN などを作た。これらのコードは、NDES や非分散共鳴パラメータの決定用コード ASREP とともに共鳴作業効率の向上に役立った。

さらに、評価結果の積分テストとその改良のため一連のテストが同時にできるように積分テストのシステムを開発した。このシステムでは、TIMS-PGG コードで作成さ
れた 70 群の群定数を用いて標準場での試料の反応度値値や中性子捕獲率を計算し、測定値と比較できる。また、積分データによる核データの調整法も開発した。これは、Bayes の定理を用いた方法であるが、共分散行列の計算にはパラメータ誤差に基づく量だけでなく、Poter-Thomas 分布や共鳴レベルの分布について Dyson － Mehta モデルを採用し、さらに中性子束の誤差から成るモデル誤差を考慮するなど、先駆的なやり方を入ったものである。なお、JENDL 評価は、本来微分データ中心主義で、積分テストによる調整は極力反対する立場が取られてきたが、FP 核種の場合、断面積のデータが無い場合の便宜として JENDL-3.1 以降採用した。その有効性の判断は、Zr-93 の反応度価値について、JENDL-1 が約 2 倍過大であったのを考慮して評価した JENDL-2 に、評価後に報告された ORNL の測定値が非常に良く合ったという事実を根拠にしている。実際にには、JENDL-3 評価の際、断面積の測定の無い Xe-124, 126 や Eu-152, 154 の捕獲断面積評価にのみ採用された。

JENDL-3 のための評価は、1990 年に JENDL-3.1 の FP データファイルとしてまとめた。そして、併せて積分テストも行い、STEK 炉での反応度価値をおおむね 10%以内で再現できる結果を得て、1992 年に原研東海研で開かれた F P 核データ専門家会議で報告した。しかし、最終評価までに時間が掛かったこともあり、評価後に重要な核で新しい測定値が発表されたり、測定値自体の実験補正の情報を評価に取り込んでいないもののが散見されたため、再評価を行い、1994 年に JENDL-3.2 の FP データファイルとしてまとめた。この中には JRR-4 で得られた Sr-90, Cs-137, Eu-154, 155 の熱中性子断面積の採用、30 核種の共鳴パラメータ、15 核種の中性子捕獲断面積の再規格化、Zr, Mo などの JENDL Fusion File 用に評価された非弾性散乱断面積としきい反応断面積の採用が含まれる。

5. 国際協力への参加
一方、1991 年から始まった NEANS の核データ評価国際協力活動（WPEC）の一環で、FP 核種の非弾性散乱断面積の評価（SWG10）と FP 全体としての断面積の相互比較（SWG17）の作業が企画された。この 2 つのサブグループ活動に FP ワーキンググループも参加して、JENDL-3.2 のデータを JEF-2.2, ENDF/B-VI, BROND-2 などと比較検討し、JENDL-3.2 の優秀性を確認した。

すなわち、SWG10 の活動では、当初、STEK 炉心での中性子吸収の小さい核での積分データの再現性の悪い理由に非弾性散乱断面積の過小評価が指摘され、直接過程を考慮する事の重要性が指摘された。JENDL-3.1 では DWBA 近似によって直接過程を考慮して評価値が得られていたため、その評価方法自体が議論の対象になった。いろいろな核で測定値と比べて検討の結果、D W B A 法がフォノンが 1 個だけ関係するレベル
間の遷移に伴う非弾性散乱の断面積の評価には十分適用できるという結論を得た。また、Nd や Sm などの変形核の回転レベルなどではチャンネル結合 (CC) 理論が必要であるという結論を得た。ただし、質量数 100 のまわりの核では、JENDL-3 の評価に用いた光学模型パラメータで DWBA 計算では、非弾性散乱断面積を過大評価するという問題が残ったが、ワーキンググループ解散後、九大の河野氏の計算により、非弾性散乱の異常な振る舞いは、JENDL Fusion File の評価に用いた modified Walter-Guss や JENDL-3.1 の光学模型パラメータが、この質量領域の p 波共鳴を強く励起 (enhance) してしまうためである。CC 計算でも過大評価すること、さらに、適正な光学模型パラメータを用いれば測定値を良く再現することが明確され、DWBA 法の適用性に関する結論が誤っていたことが明らかになった。因みに ANL のグループが得た光学模型パラメータを用いて Mo-100 の非弾性散乱断面積の計算結果を Fig. 2 に示す。計算結果は、DWBA 法でもベルギーの IRIM での測定値を良く再現している。

また、STEK 炉心の試料の反応度価値のデータを用いた JENDL-3.2 の積分テストにおいて、C/E 値が 5-10%低く、特に質量数 130 以上で低くなることが分かった。従って、断面積の測定データの見直しや、連続エネルギーのモンテカルロ法や衝突密度法によるスペクトル計算を通じて STEK 積分実験における積分データと微分データの食い違い要因の分析を行ったが、微分データからはその原因を特定できず、むしろ積分実験の問題として残った。

SWG-17 活動では、ライブラリーに含まれる各核種の寄与を F/P の表率で重み付けして積算して得た典型的な高速炉の炉心スペクトルで縮約した 1 群断面積と反応度係数について、JENDL-3.2、JEF-2.2、BROND-2 による結果を相互比較した。中性子捕獲についてライブラリー間の食い違いは高々 10%であることに、反応度係数に対して非弾性散乱の割合が 5%程度しか無い事が分かった。一方、中性子捕獲断面積について JENDL-3.2 が他より低いということで問題視するような指摘があったため、核種別に測定値と評価値の比較図を作成し、その原因を調べ、どちらの信頼性が高いかを検討した。その結果、JENDL-3.2 が、前のデータに比べて低い傾向にある最新の断面積を考慮していること、また、JEF-2.2 が STEK 積分実験のデータを用いた積分テスト結果で調整していることが JENDL-3.2 との系統的なずれを生んでいる事が明らかになった。Fig. 3 は、JENDL-3.2 での C/E 値と JEF-2.2 に対する JENDL-3.2 の中性子捕獲断面積比の相関図であるが、両者には非常に強い相関があることがわかる。

6. 気がかりなこと

以上、ワーキンググループの活動内容を時間に沿って説明してきた。核種数について言えば JENDL-3.2 の殆ど半分といえる 172 核種の断面積の評価を、殆どポランティ
ア作業で達成した訳で、26 年間活動を共にしてきたメンバーの粘りに感心する。しかし、本当に活動を終えるにはまだやりかけの仕事を片付ける必要がありそうである。即ち、最近、JENDL-3.2 の Pd-Sb の共鳴パラメータの評価、スムースパートの核データの評価システムや REPSTOR のマニュアルが JAERI-Data/Code レポートとして出版されたが、JENDL-3.2 の評価の詳細を記したレポートや、Pd-Sb を除く他の核の共鳴パラメータの評価レポート、積分テストのレポートの出版が残っている。とにかく関係したメンバーが新しい仕事に取り込まれて記憶が消えてしまう前に完成を急ぐ必要があり、まだ眠れない心境である。また、JENDL-3.2 といえども古い測定に基づいているものもあり、今後新しい核データが報告されたり JENDL-3.2 での問題点が明らかになった場合、修正されるべきものと考える。そのような事態になった時、また、このグループは蘇るかも知れない。

最後にこれまでに WG 活動に参加して長期にわたってご協力あるいは守立てて頃いたグループメンバーの方々、面倒な事務上の手続きや計算機使用についていろいろご教示頂いた核データセンターの皆さん、さらに平素から暖かいご声援とご助言を下さったシグマ委員会の方々に謹んで感謝申し上げる次第である。

これまでの FP ワーキング・グループ参加者（順不同、*印：最終メンバー）

青木保、五十嵐信一、（故）飯島俊吾、大竹敏、川合将義*、川本忠男、（故）菊池康之、小細忠輔、佐々木誠、杉原*、瑞慶覧篤*、（故）田坂完二、田中茂也、中川庸雄*、中島豊*、中嶋隆三、中村久、鏡織毅夫、西村和明、西村秀夫、堀田亮年、真木耕一、（故）松本純一郎、松尾廣幸*、村田徹、吉田正、渡部隆*。

参考文献
＜JENDL 評価＞
(3) Kikuchi Y., Nakagawa T., Matsunobu H., Kawai M., Igarasi S., Iijima S.: "Neutron Cross Sections of 28 Fission Product Nuclides Adopted in
JENDL-1,” JAERI 1268 (1981). (JENDL-1 28 FP 評価とレビュー)


＜共鳴パラメータ＞

(7) Kikuchi Y., Togawa O., Nakagawa T.: "Evaluation of Resonance Parameters of Mo, Tc, Te, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm and Eu Isotopes for JENDL-2 Fission Product File," JAERI-M 86-030 (1986)


＜積分テスト＞

(9) 西村秀夫、渡部隆、中川庸雄、菊池康之: "JENDL-FP データファイルの積分テスト," JAERI-M 8163, pp.136-166 (1979) (JENDL-1, 1.5 の積分テスト)


(11) Watanabe T., Kawai M., Zukeran A., Matsunobu H., Nakagawa T., Nakajima Y.,


＜評価コード＞


(14) 中川庸雄：日本原子力学会誌、22、559（1980）。 (NDES コード)

(15) 中川庸雄：「共鳴パラメータ格納検索システム REPSTOR」、JAERI-Data/Code 97-015 (1997).

(16) 中川庸雄、渡部 隆、飯島俊吾：「JENDL FP 核データ評価用プログラムシステム（スムースパート）」、JAERI-Data/Code 97-050 (1997). (ENSDFRET、LVLPLOT、LEVDENS、JOBSETTER (スムースパートの評価システム))


＜NEANSC 核データ評価国際協力事業＞


Fig. 1 Neutron-Number Dependence of Level Density Parameters for Fission Product and Structural Material Nuclides.
Fig. 2  Comparison of Mo-100 Inelastic Scattering Cross Sections Calculated by DWBA and CC Theory with the experimental data of IRMM.
Fig. 3  Correlation of the Ratio of One-Group Cross Section for JENDL-3.2 to JEF-2.2 vs. the C/E Values of Sample Worth in STEK experiments.