

核融合炉核データ専門家会議

(日本原子力研究所) 長谷川 明

シグマ委員会及び炉物理委員会合同の第2回核融合核データ専門家会議が、クリスマス休暇直前の1990年12月20日(木)と21日(金)の2日間にわたって、原研東海研究所第5会議室で開催された。これは1985年7月23~25日にわたって開かれた第1回会合(JAERI-M 86-029)に次ぐものであり、それ以降のJENDLの改良を振り返ると共に、現在のJENDL-3の問題点を総括し今後の課題を明らかにしてJENDLの発展に役立つようとの主旨で、核データ評価者(実験者を含む)、利用者(積分実験者、解析者、核融合設計者)からなる専門家だけを集めて開かれた会議である。参加者は初日40人、2日目37人、初日の夕方原研あこぎクラブで開かれた懇親会への出席者は29名であった。

初日はシグマ委員会委員長である、原研石井物理部次長からの開会の挨拶で始まった。JENDL-3が完成し、今後JENDLは試作品から商品へと変貌をとげる必要がある。それは例えて言えば完成度の高い大衆車なのか高級車なのか、それとも車ではなく飛行機なのか? ユーザーあつての核データである。将来の展望をこの会議でしっかりつかんで欲しいとの挨拶であった。

ついで「核融合核データとJENDL-3作成の経緯」と題された最初のsessionでは、原研FNSの前川さんから、この会議の経緯と目標についての基調講演があった。核融合炉プロジェクトからの特別の要請として、JENDL-2がJENDL-3 PR1、PR2、-3T、-3と順次改良されて行った過程について、第1回専門家会議からの経緯とJENDL-3積分テストのため作られた核融合核データ積分テストSWGの活動経過、並びに、この会議のスコープについて会議設定側からの話をされた。次に原研核データセンターの中川さんから、核融合炉中性子工学の要請に対する核データ側の対応についての話があった。JENDL-2を核融合炉に利用した場合のDDXが実験データと全く合わなかったことから、前平衡過程及び直接過程を考慮する計算コードを使用して83年JENDL-3PR1が作成される結果となった。それは構造材核種、主要同位体のみで8核種であった。Liにまだ問題があることから、Pseudo-levelによるDDXの再現性を改良したJENDL-3PR2(Li-6、Li-7、C-12のみ修正)が85年に、87年にはGNASH、DWUCK、PEGASAS等を用いて全面改訂されたJENDL-3Tがリリースされた。その後、核データ研究会でBe、Pbが要修正との報告を受けて改訂されたJENDL-3が89年12月に公開された。171核種の汎用ライブラリーで核分裂炉はもちろん核融合炉でも適用可能になっている。評価では日本の測定データが非常に役だった。測定、評価者、ベンチマーク・テスト実施者の良い連携の結果であると結んだ。

次の「核定数作成の立場から」の session では、原研遮蔽研の長谷川からシグマ委員会 炉定数専門部会標準群定数検討委員会との協力で作成している、中性子 295 群 γ 線 104 群の JSSTD 汎用群定数について、設計思想、利用例として自己共鳴遮蔽因子 (f-table) の問題について、Winfrith の鉄深層透過問題に対する結果を示した。共鳴が支配的なエネルギー領域では、無限希釈断面積のみでは深層透過問題については全くお手上げの状況となるとの話があった。また原研 FNS 小迫さんからは、連続エネルギーモンテ・カルロ コード MCNP 用ライブラリーの作成について、特に、群定数に対する優位性についての議論があった。P_q 有限項打ち切りに対する優位性、炉定数処理に起因する誤差の混入の排除等に優位性があるとしている。本ライブラリーは今回の積分テストで全面的に使われた。

昼食後の session 4、5 は本会議のハイライトである。ここでは fusion neutronics 積分テストWGが行ったベンチマーク・テスト及び各種の実験解析の結果が発表された。核種別に OHP 3 台をフルに使って、異なった積分実験の解析結果が並行して議論できるような発表形式をとった。

session 4の「ブランケット関連核種（軽核中心）」では原研核データセンター千葉さんから核融合炉で重要な核種（軽核中心但しPbを含む）についての JENDL-3 のレビューがあった。これら核種については本質的に理論計算が困難であり、実験データをなぞった事、積分実験データからの情報を基に再評価を行ったその過程が説明された。現在 FILE6 データの作成を開始しているとの紹介があった。その後で、個々の核種の実験解析の結果が並行して発表された。

原研システム研中川さん、船研植木さん、原研 FNS 前川さん、大山さん、京大炉市原さんからの Li-6、Li-7、Be-9、C-12、N-14、O-16、F-19、Pb の積分実験結果の簡単な紹介と個々のデータの議論が東北大馬場さんの司会で行われた。きわめて活発な議論となり、予定時間を大幅に超過した。まとめ役の馬場さんには大変であったと思う。同じ実験を複数者が解析したものもあり、横断的に同一核種についての検討が行われ、議論がかみ合いすぎて時間が足りなかったと言う印象であるが、JENDL-3 の現状についてきわめて良いコンセンサスを得られたのではないかと思う。これら核種の JENDL-3 の現状は、Be、F にまだ問題があるかも知れないが、かなりの線までいっているとの認識では一致したのではないかと思う。細かい議論については、報文集が年度内に出版される予定なので、それを参照されたい。

session 5 の「構造材関連核種」では原子力データセンターの浅見さんから Cr、Fe、Ni についての JENDL-3T からの修正を中心に話があった。積分実験からの結果を吟味しながら、微分実験値を再度検討して修正を行ったとの事である。本発表は、当初 Fe、Ni を一手に評価された東芝飯島さんをお願いしていたのであるが、飯島さんが急逝されてしまったため、急遽浅見さんをお願いすることとなった。（浅見さんには大変ご迷惑をおかけ

した。) 積分評価結果と討論では、原研 FNS の前川、大山、今野さん、船研植木さん、京大炉市原さんからの発表と討論を九大の神田先生の司会で行われた。今野さんからの鉄単体の深層透過実験の解析結果では、解析手法により結果に大きな差が出ていること (DOT3.5 (無限希釈断面積を用いた) と MCNP 解析)、大山さんからは TOF 実験で 30 度方向でのシステムティックな差が有ることが報告され、FILE6 の DDX 表示の必要性が示唆された。京大炉の市原さんからは、阪大 OKTAVIAN を用いた Al、Si、Ti、Cr、Mn、Co、Cu、Zr、Nb、Mo、W についての 0.4-4.7 mfp 球体系での TOF 実験解析が報告された。きわめて精力的な実験であり、実験の問題点も指摘されていたが Ti、W、Zr、Nb 等積分実験が少ない中において JENDL-3 のデータのチェックの為に貴重な実験となっている。最後に、前 session で残されていた、Pb についての討論が行われた。

session 6 の炉工学的ベンチマーク実験では、原研システム研中川さんから、日米共同実験 Phase-II の解析結果についての紹介があった。トリチウム生成率 (TPR) をはじめとした中心軸上でのエネルギーも角度も積分された実験値を解析したものであり、Be-Li₂O の境界で C/E が 1.6 から 0.8 へと大きく変動する。解析に当たっては、検出器断面積として用いる activation file には、特に測定値のないエネルギーの低いところでの断面積については、まだかなり問題がある。TPR については、JENDL-3PR1 と JENDL-3 とで差はない。次の東大の J.Cetner さんから、T 増殖比評価を時間依存 TPR 分布の解析から評価する話があった。次の高橋先生からの話も、球体系の時間依存 TRP 分布の実験結果から核データに対して言及した。Li-6 では問題は無い。内部に Pb を入れたとき平均値で 10% 程差が出る。Be 直後で C/E が低くなるが深くなると計算値に一致する。積分すると (全体として見ると) ほぼよいとの結論であった。

この後懇親会が開かれたが、さすが同分野の専門家会合だけあって懇親会への出席率は抜群であった。予定時刻の 8 時過ぎまで議論の花が咲いた。

2 日目は朝 9 時 10 分から始まった。session 7 は γ 線関連核データ (スペクトル、発熱等) であり、まず東工大の井頭さんが JENDL-3 のレビューをした。JENDL-3 の γ 線データは 59 核種 (31 元素) について、実験データを中心 (27/59 核種) とした評価で、その他経験式、理論計算 (GNASH、TNG、CASTHY、ECIS、JUPITOR1) が用いられた。実験値のかなりある Fe でも、 γ 線データの実験値間の一致は良くない。FNS での γ 線核発熱実験について、原研 FNS 大山さんから、核融合の核発熱を実験的に検証するため、 γ 線核発熱を TLD 内挿法、NE213 荷重関数法を用いた測定と解析結果が報告された。JENDL-3 では、Be は 50~60% 過小、C は 30% 過小、Li₂O は 20~30% 過小、Fe は 20~30% 過小、W は factor 2~3 倍過大とのことである。もっとも核融合炉の設計では現在 40~50% の誤差を見込んでいるとの事であった。ベンチマーク実験データがこれまで全く無かったのだから、実験値が出てきただけでも価値があるとの評価である。阪大 OKTAVIAN の山本さんの「球

体系からの γ 線エネルギースペクトルの測定とその解析」では、この実験では何を測定している事になるのかと言う事についての細かい議論があった。またモンテ・カルロの解析では中性子の追跡をどこのエネルギーで打ち切るかが重要とのこと。JENDL-3 の Si のデータは良好、Ti の場合はスペクトルの形が違い、Cr では過大評価であり、中性子非弾性散乱が過大ではないかと指摘された。離散 γ 線及び中性子の深層透過と γ 線生成が今後の課題である。原研桜井さん（植木さん代理発表）の「ORNL 14MeV SUS314 透過中性子及び γ 線実験解析」では MCNP 計算でゼロエネルギーから 15MeV までの計算がなされ ENDF/B-IV では C/E は 0.8、JENDL-3 では C/E は 0.9 と報告した。

session 8 の放射化断面積核データでは、まずデータ工学の山室先生から JENDL のレビューをされた。JENDL の放射化断面積ファイルとして、半減期一年以上の重要な 59 元素が来年 3 月に出来る。ENDF/B FILE10 のフォーマットで格納する。断面積は SINCROS-2 で計算、CONSISTENCY と PREDICTION の良さを強調していた。IAEA FENDL で先生の計算結果がかなり採用されていると報告された。次の原研 FNS の池田さんからは「核融合材料の放射化断面積」として、Fe、Cr、Ni、Mg、Al、Si、Ti、V、Mn、Co、Cu、Zr、Nb、Mo、W、Ta 16 核種についての誘導放射能の実験と計算との比較が報告された。 γ 線スペクトルについての THIDA、REAC2、DKR-ICF との比較から THIDA の一致が良いのを確かめた。国際協力のもと長寿命核の測定を開始した。今後も積分実験データを蓄積していく必要性を指摘した。東大井口さんから、「ドシメトリーファイルの精度評価」の題目で、JENDL-3 ドシメトリー積分テストWGの結果の発表があった。JENDL-3 ドシメトリーファイルを作成し、そのベンチマーク・テストを行った。誤差データは推定した。核分裂場では Mn-55、Cu-59、Ni-60、Cu-63、I-127 で一致が良くない。高速炉場ではほぼ $\pm 10\%$ で一致している。D-Li 場では JENDL-3 は他のファイルと比較してベストである。14MeV 場では殆ど問題は無い。以上から JENDL-3 のドシメトリーファイルは他のファイルよりも総合的にみて良い。誤差ファイルも概ね妥当である。

session 9 の KERMA、PKA、DPA ファイルでは、東芝川合さんから「評価とファイル化」と言うことで話があった。KERMA (Kinetic Energy Release in Matter)、PKA (Primary Knockon Atom)、DPA (Displacement per Atom) の概要について、特に材料照射損傷評価の為に ESNIT PROJECT からの要請（エネルギーは 50MeV 以下）に基づき、従来エネルギーバランス法から求めていた KERMA を直接法で計算するようにした事。これにより negative KERMA はなくなり、より正確である。現在計算手法の検討を終えた。ESNIT で要求される核種について、今後 PKA/KERMA のデータファイルをつくる。そのため、FILE 63(DPA)、64(KERMA)を新に定義した。

session 10 の「設計側からの問題点とコメント」は、データのエンドユーザーからの話であり、まず原研炉設計研の関(泰)さんから、「ITER/FER における安全性からの要請」

の講演があった。核データに対する、安全性からの要求は極めて強く、特に遮蔽、放射化の問題は重要であり、低放射化材料を使ったり（Co、Ni、Nb、Mo を減らす）、可動化部分を減らす（dust、corrosion、高温酸化の問題）、shutdown 後の decay heat についての予測精度の向上が期待されている。さらに、低放射化物質を積極的に使って行かないと動力炉としては定着しないだろうとの予測もある。放射化の観点からは、Co、Nb、Ni の断面積について精度良い評価が必要である。1980年に GICX-40 ができ、現在は FUSION-J3に移行している。当時と比べて格段に進歩している。世界に胸を張って設計が行なえるようになったと結んだ。次の原研特別チームの真木さんは「ITER/FER における核設計からの要請」について、次期装置からみた、核設計の現状と問題点、特に核データへの要求の詳しい話があった。FUSION-J3 では40核種が準備された。設計では、inboard toroidal magnetに対する発熱の条件が一番厳しい。核データには、40%の不確かさが見込まれている。要求精度は構造材、ブランケットについて5~10%、プラズマ対向材20%、電気絶縁材5~10%となっている。要求精度と現状とのギャップについての話が主体であり、断面積の感度は良く分からないのが現状であり、設計への feed back のしかたがまだ無いのが現状である。

session 11 の全体討論では、まず、原研前川さんから今回の専門家会議の総括がなされた。原研関さんの話を引用し、設計にとって、世界に胸を張れる核データファイルができあがったと指摘した。ここまで出来たのは、核データ側へのファイル作成の要請と要求精度の提示、またそれら評価作業をバックアップする大学をはじめ原研やメーカーを巻き込んだ DDX データや積分データの測定と時を得たファイルの公開、それら結果と逐次改訂された核データとのチェックの為の専門家会議と言う、一連の作業が極めてうまく進捗したと言う見本ともなるプロジェクトの成果である。JENDL-3 は核設計の要求精度を満たしたのかと言う問いに対して前川さんは中性子については85点、ガンマ線については80点の及第点を与えた。トリチウム生成量等の積分量については局所的には5~10%、全体的には5%と言う現状である。核発熱については、問題のある核種としては、F、Ti、Zr、Nb、Mo、W 等残っている。しかしながら全体としてはかなりの線までいっている。次のステップで何が必要か？微分実験では？積分実験では？解析手法では？処理コードでは？ENDF/B の FILE6 FORMAT が必要か？核データライブラリーのデータ量は適切なのか（精度とのかねあい又物理的なデータの収容能力、処理時間とのかねあい）？感度解析は？これらの問題について、議論したいときりだした。

その後で、阪大高橋先生を司会者として1時間を越える討論があった。JENDL-3 の核データの現状と問題点について、各核種毎に丁寧に議論を進めていった。そのため時間が不足し、今後の問題や、核融合炉ファイルの必要性特に FILE6、誤差ファイルについて十分な討論は行えなかったのは、残念であった。

最後に原研金子炉物理委員長から、核融合炉を中心にすえた JENDL-3 が出来た。従来中性子が中心であったものが γ 線、放射化、損傷に手が届きだしたと言う状況であろう。JENDL-3 は、原研の中で言えば NBI、プラズマ計測技術と言う世界をリードするものと並ぶものとして位置づけられている。今後新しいデータの取得や、設計サイドとの対話から核融合開発での中心ファイルとしての活躍を期待するとの挨拶があり散会となった。

専門家会議だけあって、きわめて内容の濃い会議であった。当初の核データに対する要求はほぼ満たされたようである。今後第3回の会議が開かれることが有るのだろうか？

