

話 題 (I)

「核融合核データに関する 国際ワークショップ」出席報告

(日本原子力研究所)

千葉 敏、前川 洋、池田 裕二郎

標記ワークショップが、本年5月3日(月)より6日(木)にかけて、米国 San Diego 近郊の保養地 Del Mar にて開催された。主催は米国の TSI リサーチ社、後援は米国 DOE と IAEA である。出席者数は当初の30名程度との予想を大幅に越え、公式発表では66名となっていた。日本からは原研の3名の他、大阪大学の高橋亮人教授が出席した。会議は最初の Plenary Session と最後の Conclusion 以外はパラレルで行われ、三日目の午前中にはトリプルセッションが行われた。以下、各セッションでの講演、討議事項の概要を報告する。なお、Fusion Technology 誌に会議報告が掲載予定である。

1. Plenary Session

本セッションでは、TSI の E. Cheng (本ワークショップの議長)、IAEAのPashchenko、Westinghouse の F. Mann (ワークショップの technical chairman) の挨拶に続いて、核データのニーズに関する8件の発表がなされた。

まず、ITER の Shatalov が、ITER の engineering design のために核データの整備が急務となっていることを指摘した。現在 ITER の設計には FENDL-1 という核データライブラリー (JENDL-3、ENDF/B-VI、EFF、BROND から核種毎に最も良いと判断されたものを選別した混成ライブラリー) が使われているが、それを改良し、誤差を低減する事で engineering safety margine の低減、ひいてはコスト減となる。特に、構造材のHe生成断面積、general purpose file や activation file 等と整合性のとれた γ 線生成断面積、共分散を含む放射化断面積ライブラリーの整備を行う事により、ITER の nuclear response、すなわち核発熱、トリチウム増殖、PKA/KERMA 等の予測精度が向上する事の意義が強調された。また、ITER のブランケット材である、Li-0-Be-Steel-Water や、遮蔽材の Steel-Water に対するベンチマークの重要性、verification された核データを処理した multigroup および pointwise FENDL ライブラリーと multigroup の共分散ライブラリーが必要であるとの要求が示された。続いて、ITER の佐治により、ITER の安全と環境問題に対する核データのサポートに関する講演が行われた。この中で、トリチウムと誘導放射能が ITER の安全、環境問題に関する主要な関心をひいており、廃棄物処理を含む対策のため、必要な全ての核種を含む "complete set of nuclear data"

が要求された。また、ITER は真に nuclear facility であるため建設されるホスト国の放射線基準を満たしていることを示すために validate された核データが必要であり、さらに、材料の設計研究の観点からも核データが重要であると述べた。次に General Atomic 社の Wang は、同社が中心となって、米国内外の研究所、大学、企業の共同で行われている ARIES というブランケットとダイバーターの設計研究の概要を説明した。米国では、2040 年に商業用の核融合プラントを運転する計画であり、このために、4 種類のブランケット・ダイバーターの設計を進めている。核融合炉は出力密度では PWR より小さいため、経済性の観点からだけでは商用炉を実現する事は不可能で、安全性と環境への影響の点で軽水炉を凌ぐものでなければならないという設計思想を示した。従って、設計に当たってはブランケット、構造材、超伝導マグネットの絶縁材の照射損傷による劣化を考慮する必要があり、最適材料の選択において核データは不可欠であるが、現在の核データの精度がこれらの劣化をどの程度予測できるかについて疑問の声もあがっていると指摘された。

UCLA の Youssef は、感度解析の手法を用いて、核データの不確実性が核融合炉のコストとトリチウム増殖性能に与える影響に関する報告を行った。トリチウム増殖比の核データに関する感度は驚くほど小さいが、逆に deep penetration や damage に対する感度は非常に大きく、核データの不確実さにより 10~17 M\$ のコスト増も有り得るという試算を示した。また、Fe、Cr、Ni の弾性散乱と非弾性散乱断面積の精度を向上する必要性を指摘した。Michigan 大学の Sawan は、マグネットの遮蔽の観点からの核データに関する要求を行った。中性子と γ 線の二重微分断面積の共分散データが必要とされており、また、ITER の設計に重要な V、Cr、Ti、Li、Be、Pb、C 等の核データ整備のプライオリティーが高いという指摘をした。

ECN の Gruppelaar は、「ヨーロッパから見た核データのニーズ」と題する講演で、European Fusion File (EFF-1)、EFF-2、European Activation File (EAF) の各評価済みデータのハイライトを紹介した。また、14 MeV 以下での DDX や high spin isomer の放射化断面積等の実験データ、二次荷電粒子、 γ 線 DDX のファイル化、共分散データを生成するツール、SED/SAD データ等が今後必要であると言うコメントを行った。EFF-2 は来年公開予定で、Fe、Cr、Ni には共分散データも付けられているという事である。

原研の前川は、1991年の第2回核融合炉核データ専門家会合での成果を基に JENDL-3 の核融合炉に関連したデータテストについて報告し、作業は2年前に終了していること、主な核種の現状と問題点、それらが JENDL-3.2 の改訂に反映されることなどを述べた。

本セッションの最後では、元 IAEA の Schmidt が、ENDF/B-VI、JENDL-3、JEF-2 等の評価済みデータの詳細な比較を行った。これら最新の評価済みデータ間で大局的にはか

なり良い一致が見られるものの、詳細に見ると大きな差のあるものもある。また最近の評価は計算に頼る傾向にあり、実験データを評価することも重要であるという指摘をした。

2. Measurement Facilities

このセッションでは、世界各国で核データ研究に寄与している主な装置（加速器）の現状とポテンシャルについて検討し、今後の研究動向を踏まえつつ新たに何が必要なのかを議論する事を目的としていた。まず、D. L. Smith (ANL) が作成した過去2回の核データ国際会議の論文に掲載された測定、実験装置を国別に集計した表に基づいて、核融合に対する比率、現状の活動状況、マンパワー等について個別に調査を行う事としたが、テーマが漠然としており、焦点が絞られていないために、作業は余りにも総花的で非効率的になりかけた。そこで、池田(原研)の提案により、各装置の核融合との関係、占有度を目安に、1 (50%以上)、2 (それ以下) に大別し、1 を中心に今後の可能性のみを検討する事にした。米国が予算の削減の影響を受けて危機的な状況にある事、EC でも核融合に限らずポテンシャルの低下が見られる事、日本では対照的に、原研を中心とした核データ活動が進んでいる印象を持った。しかしながら、全体としては、核融合開発に限って言えば、先細りの感を否めなかった。

3. Status of Nuclear Data Evaluations for Fusion Applications

本セッションでは千葉(原研)が、「JENDL-3.2, JENDL Fusion File と JENDL ESNIT File の現状」と題する講演で、現在進行中の JENDL-3.1 の改訂作業、特に鉄の非分離共鳴領域での全断面積の評価を行っている事等を報告した。この問題は、構造材の自己遮蔽因子の計算の重要性を示すものとして、他の評価者、特に Ignatyuk からも重要性が指摘され、最後の conclusion にも取り込まれる事になった。また、Fusion File で行っている DDX データの改良や、ESNIT ファイルの評価のために九大グループと共同で行っている C-12 の断面積計算手法等については、強い関心が寄せられた。ロシアの Vniief のグループが、F, Li 等と p, d の様な軽い荷電粒子との衝突断面積の評価手法についての講演を行った。Wien 大学の Vonach は、改良した GLUCS コードを用いて、鉄の断面積の再評価と共分散データの導出についての講演を行った。このコードは、部分断面積の和が全断面積に等しくなければいけないという制限を課した最小二乗法に基づいており、ENDF フォーマットで与えられた prior のデータと実験データを組み合わせる事により、不確定性の幅を減少できることを示した。Ohio 大学の Massey は、R-matrix 計算に用いるエネルギーの固有値とスペクトロスコピック強度を shell モデルを用いて計算する事により、Be-9(n, 2n) の断面積を計算した例を示した。ただし、現在

の計算では $\text{Be-9}(n, \alpha)2n\alpha$ 等のチャンネルを考えていないので、彼の計算値は実験値の半分程度の大きさしか説明できていなかった。

ECN の Kopecky は、European Activation File (EAF-2) の現状について報告した。このファイルは 11,000 程度の反応の断面積と共分散データの一部を含んだもので、JENDL Activation File が約 1,000 反応しか含んでいないのと比較すると印象的である。ただし、EAF-2 には JENDL から取ってきたデータもあれば、THRESH のような古いプログラムで計算したデータも多く含まれているので、言ってみれば玉石混交ではあるが、それにしてもこの物量は圧倒的である。計算手法として、 (n, γ) 反応断面積の計算に彼の提唱している γ 線換算幅にエネルギー依存性を持たせる手法の説明を強調した。ORNL の Larson は、8~15 MeV 領域における $\text{Fe-54, 56}(n, xp)$ 、 $(n, x\alpha)$ 反応断面積の現状を、ENDF/B-VI と実験値との比較により説明した。

最後に、Obninsk の Ignatyuk が、ドジメトリファイルのために行った $\text{Ti-46}(n, 2n)$ 、 $\text{Fe-54}(n, 2n)$ 反応の評価の説明と、 $\text{Co-60}(n, p)$ 反応のブラインドコンパリソンの結果が非常に差のあるものであるとコメントした。

4. Status of International Measurements Program

このセッションは、特に世界的な協力研究をテーマとする一般講演で構成されていた。D.L. Smith (ANL) が IAEA-CRP として進めている“長寿命放射化”研究の現状の報告を行った。しかしながら続く一般講演の数が多く、かつ内容の統一が取れていなかったために実質的な議論はセッション [6: International Data Measurements] で統一的行う事とした。セッションの最後に、池田が原研タンデムで進めている $\text{H-1}(B-11, n)$ 中性子源を用いた放射化断面積測定を紹介を行った。

5. Status of Nuclear Data Evaluations for Fusion Applications.

International Cooperation in Data Evaluations, FENDL

本セッションでは、前日の Plenary session、及び評価のセッションでの発表内容を受けて、いくつかの提言がなされた。第一番目に、構造材の自己遮蔽の問題が取り上げられ、1~4 MeV 領域での断面積のフラクチュエーションをより正確に把握する必要のある事、全断面積だけでなく、弾性散乱や非弾性散乱のエネルギー依存性も重要である事が確認された。これは JEF/EFF meeting でも問題になっているとの事であった。取りあえず、鉄を例にとってどうやって問題を解決するべきか考えようという事になった。次いで、放射化断面積ファイルとしては、EAF-2 のような大量のデータが必要であるが、古いものについては順次置き換えて行くべきであるという指摘や、これらの特殊目的ファイルと汎用目的ファイル間の整合性を出来る限り取るべきだというコメント等が出さ

れた。また、放射化断面積ファイルのベンチマークが必要だという意見に対しては、原研の前川が FNS では既にそのような実験を行っており、しかもそれが JAERI-M レポートとして公開され利用可能であるという指摘をすると、Kopecky より “それは理想的である” というコメントが返ってきた。国際的にもこのようなベンチマーク実験を行えるところは限られており、FNS の持つ意義は非常に大きいと言える。この後、共分散データの重要性や、8~14 MeV 領域での中性子と γ 線 DDX の精度向上、PKA/KERMA に関連して (n, z) 反応断面積の評価の必要性等が指摘された。

続いて FENDL に関する議論の場が持たれた。ここではまず Schmidt が “Summary of present compilation of FENDL and plans for future development” と題する講演を行い、FENDL の意義、歴史、を説明した後、現在 FENDL-1 のベンチマークが進行中であること、大規模な放射化断面積ライブラリーの必要性、sequential (z, activation) 断面積ファイルの必要性、これに関連する reference nuclear model parameter library の必要性、核融合断面積ファイル (Livermore-Alzamas 共同研究) の現状と処理されたファイルの必要性、32 MeV 以下での光核反応データの必要性等に関するコメントを行った。これに対して、Shatalov から、少なくとも放射化問題の解析のためには、来年の始めまでに処理コードと処理されたデータが必要であり、またライセンス取得のためには、3 年以内に汎用目的ファイルと放射化ファイルが必要であるという要求が出された。これに関連して必要な FENDL の validation は、IAEA/NDS が組織・主導するべきであるということになった。また、モンテカルロコード用のライブラリーに共分散データを処理できるのかという質問に対して、MacFarlen から、MF=6 の一部に対応できる新しい NJ OY が今夏末までには利用可能になる予定であるが、共分散データについては処理できる予定はないという返事があった。

最後に、NEA/NSC で行っている評価国際協力に対して、本会議での結論を踏まえて新たなサブグループを設けようという話し合いが持たれた。これについては本年 6 月にフランスで開催される NSC の meeting で詳細が決定するはずである。

6. International Data Measurements

本セッションでは、(I) 優先度の高い核データ、(II) 国際協力の推進法、(III) 必要な装置及び測定法、(IV) 分離同位体の入手、(V) 若手の育成、(VI) 予算獲得の問題、をトピックスとして議論した。特に核データの実験分野での将来を中心トピックスとした本セッションでは、多くの参加者で会場は満員となり関心の高さを表していた。(I) では、優先度の高い実験データ要求、ITER/EDA からの要求の確認、核融合に特に関係のある物質 (Fe, Ni, Cr, V-alloy, Li, Pb, W, Be, Nb) のデータの精度要求などの確認を行った。さらに、KERMA データの検証のための実験の重要性、材料損傷に関連したデ

一タ整備の必要性、標準断面積の強化、放射化断面積整備の緊急性等が示された。(II) に関しては、各国とも(VI)の予算獲得とも関連して困難な状況にあり、もっぱらIAEAあるいはIEAの枠組みでの計画の推進の期待の表明にとどまった。(III)はセッション2のまとめを受けて今後の計画の中で鍵を握る装置の確認、新しい測定法の提案等を列挙した。(IV)は中国やロシアに潜在的な供給源があり、今後、国際協力の枠組みを構築しつつ需要を満たす方向で検討を進める事とした。(V)は(VI)が満たされれば自ずと解決する問題として、(VI)の予算獲得に向けては、核データ研究の重要性を特に核融合開発に対し協力に訴えつつ努力する事とした。

7. Nuclear Models/Theory/Evaluation Techniques

Duke大学のWalterが、A1からBiにいたる8核種に対するDispersive Optical Model(DOM)解析の結果の説明を行った。-80 MeVから80 MeV領域において、単一粒子・空孔エネルギー、強度関数、散乱断面積、全断面積等を再現するDOMを見いだしており、今後例えばグローバルなDOMなどを構築できれば、評価にとっても大きな助けとなる。ORNLのFuが、前平衡過程で用いる粒子・空孔単位密度を2-ガスモデルと1-ガスモデルで計算した場合の差に関する講演を行い、1-ガスモデルを用いると集団運動の成分が過小評価されるという事を示した。Ohio大学のGrimesは、中性子入射反応に対するHauser-Feshbach計算において、isospinの保存を正確に考慮すると、n、d、 α の放出がenhanceされ、逆に陽子の放出はsuppressされる事、特に10 MeV以上のエネルギー領域ではそれが重要になってくるという計算結果を示した。

LivermoreのChadwickは、FKK理論計算において初期の1-particle stateからP-stateとQ-stateにいく分岐比を状態密度の比から求め、MSD、MSCとHauser-Feshbach成分の断面積の絶対値を計算し、いくつかの核種について実験値との比較を行っていた。従来、FKK理論が実際の計算に適用され始めた初期においては、MSCのみの計算が多く行われ、14 MeVの(n, n')のスペクトルのほとんどがMSC過程で説明できるとされていたが、彼の計算はそれを完全に否定して、14 MeVでMSCはMSDの20%程度でしかないという結論である。さらに、多重前平衡粒子放出の重要性が指摘された。Ignatyuk、Reffo、Oblozinskiがそれぞれ単位密度の現状、前平衡過程計算における単位密度の重要性、Co-60反応断面積のブラインドコンパリソンの結果について解説した。また、Reffoが特別に時間を取って、Bolognaのreference parameter libraryの説明を行った。これに対して、千葉が原研でもevaluation data fileとIntegrated Nuclear Data Evaluation Systemを整備しつつあると報告した。

最後にrecommendationの討議に入り、NEA/NSCの評価国際協力のサブグループとしてCr-52、Fe-56、Ni-58の単位密度を検討するチームを作る事、Reffoの提案による

"application of nuclear theory for evaluation" のワーキングパーティーを新たに設ける事を提案する事になった。ただし、後者については新規のワーキングパーティーを設ける事が難しければ、評価国際協力のサブグループとすることも提案された。さらに、評価の効率化のため、簡略化されたモデルコードとパラメータライブラリーを開発する事が重要であるという提案が出された。

8. Interface Between Experiment and Calculation

このセッションでは、漠然とした議論の後、次のような提言が採択された。DDX データは前平衡過程のパラメータを決定するのに重要である、14 MeV 以下のエネルギー領域での isomer production の branching ratio が重要である、低エネルギーにおける複合粒子 (d、 α) 等の OMP には不確定性が大きいので弾性散乱データが必要、Be(n, 2n) 反応断面積にはまだ問題がある、GNASH-like なコードでは F 程度が軽い方の限界で、それより軽い領域では実験データが絶対的に必要である、前平衡過程の計算で 2-ガスの公式を使う重要性、isospin conservation の問題、実験値と計算値を GLUCS のようなコードで組み合わせる事により、支配的な反応チャンネルについては誤差を低減できる可能性のある事、等々。

9. Activation Evaluations/Calculations

本セッションでは、放射化ファイルを対象として専門分野が明確で議論が最も進んだセッションであった。Kopecky (ECN) が EAF-2 (European Activation File-2) について、池田(原研)が JENDL 放射化ファイルの積分テストについて、Perlado (スペイン) が ACAB コードによる誘導放射能計算、Forrest (英国) が計算コードベンチマーク比較について、Sublet (英国) が FISPACT コードによる計算、Attaya (ANL) がライブラリーの比較、Oblozinski (スロバキア) が荷電粒子連続反応について発表した。議論では各参加者ともデータファイルの検証の重要性を指摘したが、既に FNS で行った誘導放射能ベンチマーク実験による JENDL 放射化断面積の検証を進めている原研の活動が一步リードしている事を各国に印象付けた。2年後の完成を目指している FENDL Activation File の主要部分として既に妥当性が確認された JENDL 放射化断面積ファイルが採用される可能性は高いと感じた。また、FNS の実験データによる IAEA 主催の計算コードベンチマークの計画が提案され、原研としても貢献していく事を表明した。

10. Integral Measurements and Benchmarking Nuclear Data

本セッションでは LLNL の R.White の司会で会議が進行した。ANLの D.L.Smith が Be-9(d, n) 中性子場における Be-9(n, 2n)2 α 反応断面積の積分測定について報告した。

He-4 生成を質量分析法で測定したもので、3~6 MeV での C/E は 0.954 であり ENDF/B-VI の Be-9(n, 2n) 微分断面積の値はかなり良いと述べた。

Cheng (TSI) が 1988 年以来アメリカ、中国、日本、ロシアで実施された Be 球による積分実験と解析について総括的に報告した。INEL/Idaho の J.R.Smith らの実験誤差は約 3%、SWINPC/成都の陳らの実験誤差は約 2.8% であり、IAPCM/北京での SWINPC に対する解析結果では ENDF/B-VI の場合 C/E は 1.09、EFF-1 や P.G.Young の評価 (ENDF/B-V) の場合 C/E は 1.11~1.0 であると述べた。

KfK の Fisher は KfK で実施した Be、Fe、Cu 球での積分実験の解析結果について報告した。解析は DD X を用いた 1 次元輸送計算コード ANTRA-1 および MCNP 並びに核データとして EFF-1、EFF-2、ENDF/B-VI でなされた。1.4 MeV 以下の Be 球からのリークスペクトルは EFF-2 と ENDF/B-VI ではかなり過小評価であり、(n, 2n) 断面積が小さいことに起因すると述べた。前川は JENDL-3.2 と JENDL Fusion File の公開に際してその積分データテストの計画について報告した。続いて、原研で実施した FENDL 多群断面積ライブラリーによる大型 SUS316 供試体でのバルク遮蔽実験の解析結果について報告し、極一部の核種しかまだ利用できないこと、ガンマ線データはまだ処理できないことなど、断面積処理コード NJOY や後処理コードに多くの問題があると述べた。

Ganesan (IAEA) は IAEA で整備中の多群断面積ライブラリーの現状について報告し、65 元素のうち 63 を処理済みであること、原研、ORNL、KfK、ENEA など協力を得ていることなどを述べた。

LLNL の Resler は 68 種類の炉心によるの高速臨界実験と LLNL で実施された約 70 種の球体系による TOF 実験データを基にした積分データテスト計画の現状について報告した。対象としている核データは ENDL-93、ENDF/B-V、ENDF/B-VI、JENDL-3 であり、次年度には JEF-2、BROND-2、CENDL-2 まで広げるもので意気込みが感じられた。しかし、継承する人がなく、膨大な資金で実施された "Pulsed Sphere Program" のデータが失われつつあるとの危惧は大変印象的であった。

UCLA の Kumar は原研 FNS で実施した誘導放射能ベンチマーク実験データを基に、利用可能な誘導放射能計算コードシステムおよび放射化データファイルの積分テストの結果を報告した。このような実験結果を踏まえた積分テストが既に開始されていることを初めて知った人が多く、大変興味を持たれた。実験データが利用可能かとの質問に対し、前川が前述と同じく JAERI-M レポートとして公開済みと回答した。

池田は JENDL Dosimetry File およびそのデータテストについて簡単に報告した。IAE/Kurchatov の B.D.Kuzumikov は Be 球からのリークスペクトルを D-T パルス中性子源および Cf-252 の核分裂計数管による TOF 法で測定した結果と予備的な解析結果を報告した。

その後のディスカッションでは Be や処理コードについて議論が集中した。それらについてはここでは省略する。

11. Questions from IAEA/DOE

このセッションでは、最初に本ワークショップの提言の配布先を議論した後、Gruppelaar が作成した "Summary of data needs for ITER" という文書に関する討議を行った。この文書は Categories of needs、Needs by ITER designers、Specific needs という3つのセクションからなっており、基本的には初日午前中の plenary session での ITER その他のユーザー側から示された核データに関する要求を文書化したもので、予算の厳しい米欧のグループにとってはここしばらくの錦の御旗となるべきものである。ニーズとしては validate された統一ファイルが必要であり、DDX、(n, charged particle) 反応、構造材の非分離共鳴領域、共分散データ等の整備の重要性が指摘された。

12. Conclusion

本セッションでは、各セッションで討議された内容と recommendation のサマリーが各 chairman より報告された。内容については以上の段落で解説してあるのでここでは割愛する。

本ワークショップの成否は不明であるが、世界の核データ研究者と ITER に代表される核融合炉開発研究者が直接意見交換する機会を得た事は、今後の両者の研究計画の効率化を進める上で価値の高いものと考えられる。限られた時間内であったが、実質的な両者の理解は深まったと思う。特に米国では、核データ研究は危機的な状況にあり、如何にポテンシャルを維持するかを問われている中で、ITER/EDA 立ち上げ時期に呼応したワークショップは成功であったと評価する。一貫して感じた事は、日本では FNS という核融合核データ専用装置の実験をもとにデータの検証まで含めた総合的な活動を着実に進めており、JENDL が一歩先に行っている事であった。また、旧ソ連の崩壊により多くのロシアの研究者の自由な研究成果発表を聞く機会、また率直な意見交換を可能とした事は強く印象に残った。