

「JENDL 高エネルギー核データファイル積分テストに関するタスクフォース」答申（案）の概要

JENDL 高エネルギー核データファイル積分テストに関するタスクフォース

原研核データセンター

深堀 智生

e-mail: fukahori@cracker.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

シグマ委員会では高エネルギー核データ評価ワーキンググループ (WG) を設置し、JENDL High Energy File (以下 JENDL-HE と略記する) の整備作業を実施してきた。その第1版である 50 MeV までの JENDL-HE が 1998 年度には完成予定である。しかしながら、そのデータレビューおよび積分テスト手法が未確立であるのは大きな問題である。評価した JENDL-HE の利用を促すためにも評価値の積分的検証が必須であると考えられる。そのため、シグマ委員会では JENDL-HE に関する積分評価のためのタスクフォース (メンバー*) を 1997 年度に設置し、今後のシグマ委員会における中高エネルギー核データ評価および整備に対する指針を得ることを目的として1年間の調査活動を実施した。

調査検討はタスクフォースの議論を踏まえて、微分測定データの現状調査、積分測定データの現状調査、レビュー手法の調査と検討、断面積処理法と輸送計算法の調査、ベンチマーク手法の調査、海外の動向調査、高エネルギーファイルの仕様、利用者の動向調査とユーザーニーズの調査について実施した。本報告は、海外の動向調査、高エネルギーファイルの仕様を除く本タスクフォースの調査検討結果 (シグマ委員会に対する答申 (案)、詳細は JAERI-Review にて公開予定) の概略をまとめたものである。

(*)タスクフォースメンバー： 大山幸夫(原研/タスクフォースリーダー)、馬場護(東北大)、渡辺幸信、河野俊彦(九大)、山野直樹、小迫和明(住友原子力)、植木紘太郎、小田野直光(船研)、林克己(HEC)、義澤宣明(MRI)、沼尻正晴(KEK)、中島宏、田中進、前川藤夫、今野力、深堀智生、千葉敏、長谷川明(原研)

2. 微分測定データの調査

2.1 基本方針

本作業では、中高エネルギー領域における微分断面積測定データを調査し、JENDL-HE のレビュー作業に必要となる実験データの現状を把握することを目的とする。調査の基本方針をまとめると以下の通りである。

- 入射粒子 : 中性子と陽子に限定。
- 標的核核種
 - (1) 中性子 : 調査可能な全主要核種を対象。
 - (2) 陽子 : データ量が膨大になるため、主要 11 核種に限定。
- エネルギー領域 : 上限は特に設けず、データがあれば調査する。
- 断面積の分類 (基本的には JENDL-HE に格納予定の断面積データ)
 - (1) 全断面積 (陽子入射では全反応断面積)
 - (2) 弾性散乱断面積
 - (3) 非弾性散乱断面積 (離散的準位への遷移)
 - (4) 中性子及び荷電粒子生成断面積 (主に、放出粒子 2 重微分断面積)
 - (5) 放射化/核種生成断面積
 - (6) ガンマ線生成断面積
 - (7) 核分裂断面積
- 調査方法 : EXFOR による検索を主体に、原子核物理関連ジャーナルや最近の核データ国際会議の報告書を対象とした文献ベースの検索も併用する。

2.2 中性子データ

2.2.1 中性子データの概要

中性子入射反応についての実験データは陽子入射反応や 15 MeV 以下の領域に比べ極端に少ないことがまず特徴的である。近年、世界的な中高エネルギー領域への関心の高まりとともに、新しい中性子源設備が整備され、新しい実験が開始されたことによって、中性子実験はかなりの進展を見せたが、データが質量ともに不足である点に変わりはない。この原因として、従来工学分野のニーズが乏しかったことに加え、20 MeV 以上での実験に必要な大型の加速器と中性子源が世界的にみても非常に限られていることが挙げられる。さらに、この領域では単色の中性子源が無く、そのために中性子散乱、放射化・核種生成などの実験が困難であることも挙げられる。また、測定装置に関しても、反応チャンネル数が増え、粒子のエネルギー範囲が広がる分、低エネルギー領域に比べて複雑で高価な装置が必要となることも実験を困難にしている。

一方、高エネルギー領域での核データでは対象となるエネルギー領域が広く、反応の種類も膨大となる。上述した実験の困難さを考えると評価に必要なデータについて実験値が揃うことは到底期待できない。従って、評価は主として理論計算に基づいて

行われ、実験データの役割はそれらのモデルやパラメータの検証及び系統性や系統式の導出にあると考えられる。また、上のような事情から高エネルギー領域ではいくつもの実験データがあつてその中から自然淘汰的にデータがスクリーニングされるということも期待できない。従つて、実験データ自体に、self-consistencyチェックの機能を期待できるのが望ましい。それらの点を考えると単発的な実験データよりは、複数の核種、入射エネルギーについての系統的な実験があり、複数の実験者によるデータがあるようなデータが評価にとって有効であろうと考えられる。

2.2.2. 調査結果と検討

全断面積は、中性子輸送や遮蔽の計算、核データ評価などにおいて最も基礎となる基本的な物理量である。幸い実験的には、通常の透過実験によって精度良く測定することができ、EXFORやBarashenkov compilation[1]には300 GeV付近までにわたつていくつかの実験データが見出される。この内、Finlayら[2]やSchimmeringら [3]のデータをあわせると2.5 GeV程度までのデータが一応揃っている状況にある。

中性子散乱・生成断面積は、応用上もまた基本的な物理量としても重要であるが、実験データは30 MeVを越えると非常に乏しい。弾性散乱の場合には、非弾性散乱中性子の寄与を補正すれば、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子源とTOF法によつても測定が可能である。中国原子能研(CIAE)やUppsala大でもそれぞれ $T(d,n)$ 、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 疑似単色中性子源[4,5]、LANSCEでは核破碎中性子源を使った散乱実験[6]が開始されている。また、離散準位への非弾性散乱断面積もエネルギー分解能の問題から中性子の測定では困難で、唯一のデータは $(n,x\gamma)$ のガンマ線データを用いて得られている[7,8]。DDXについても状況は同様で、65 MeVにおけるUC Davis のデータが事実上唯一のものと言える。

荷電粒子生成に関する実験データの内、 $H(n,p)$ 反応については、核物理・核工学における最も基本的な量であることから、中間エネルギーにおいても多くの実験が行われてきた。この反応断面積データは角度分布も含めて最も良く知られたものであり、中間エネルギー領域でも精度は数%以下であるといわれてきた。しかし、最近Uppsalaで行われた実験の結果、従来信じられていた値と10%近く違う実験値が報告された。このデータの重要性を考えると早急に解決されるべきものとする。 (n,p) 、 (n,d) 反応に関してはGamov-Teller型巨大共鳴や核構造などを興味の対象としてTRIUMF、LANL、Uppsalaなどでいくつか系統的な実験が行われたが、実験データは核物理的に興味のある高エネルギー部や前方角部などに限られ、照射損傷評価に必要な低エネルギー部に関してはデータが無いなどの問題点がある。広いエネルギーと角度範囲を含むデータはUC Davisのグループ[9]によつて最初に測定された。その後、UCL[10]、LANL[11]及び東北大・原研[12]などで大きなダイナミックレンジを有する特別の荷電粒子テレ

スコープを用いて実験が行われている。

放射化断面積データは加速器施設における放射化量の評価に必要であるとともに、種々のエネルギー、反応についてのデータがあるので評価データのベンチマークに有用である。そのため、いくつかのグループによって実験が行われ、また新たな実験計画が進められている[13]。このエネルギー領域で中性子源が単色でないことは、非単色成分の中性子によって生成されるバックグラウンドを差し引くための低エネルギー中性子に対する断面積データが必要であり、測定は低エネルギー側から順次進めていくことが必要となる。そのため、高エネルギー領域までの一貫したデータを得るには、系統的な実験が極めて重要となる。Nakamuraらの測定[14,15]は種々の施設にまたがってはいるが、20 MeVから210 MeV間での範囲にわたって一貫した手法によるもので注目される。核変換、核種生成断面積については、LANSCEにおける(n,xγ)データから広いエネルギー範囲にわたって多くの情報が得られている [16,17]。

核分裂断面積データはエネルギー生成の面で加速器炉の核設計に必要なだけでなく、ドシメトリや中性子束測定にも重要である。幾つかのグループによって連続スペクトルの核破砕中性子や ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応による疑似単色中性子を用いて系統的な測定がなされている。この測定は多重の核分裂箔を装荷した核分裂電離箱を用いて核分裂片収量を求めることによって行われる。ほとんどの測定はback-to-back型核分裂電離箱を用いて ${}^{235}\text{U}$ に対する相対値を求めており、その絶対値はLANLで $\text{H}(n,p)$ を基準に求められた ${}^{235}\text{U}$ 断面積に規格化されている。従って、今後400 MeV以上の高エネルギー側における相対測定とともに、絶対値の新たな測定が強く要望される。

ガンマ線生成断面積に関しても多くはないが幾つかの実験データが報告されている[16-19]。中でもLANSCEの強力な核破砕中性子ビームを用いて測定された数MeVから200-400 MeV辺までの広範囲にわたる高分解能のガンマ線スペクトルデータが注目される。

2.3 陽子データ

2.3.1 調査の概要

陽子入射反応については、粒子加速器が開発され、原子核反応の実験的研究が始まって以来の膨大な実験データの蓄積があり、先述の中性子データに比べて多岐にわたり圧倒的に多いという特徴がある。本調査では、調査対象核種を、加速器駆動消滅処理や陽子線ガン治療に関連した主要核種として、 ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{56}\text{Fe}$ (${}^{\text{nat}}\text{Fe}$), ${}^{58}\text{Ni}$, ${}^{90}\text{Zr}$, ${}^{184}\text{W}$, ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{209}\text{Bi}$ の 11 核種に限定した。ガンマ線生成断面積と核分裂断面積に関しては、今回の調査対象から除外した。中高エネルギー核分裂断面積については、深堀ら[20]により行われた系統式に関する研究が参考になる。

2.3.2 調査結果と分析

全反応断面積データに関して、EXFOR に登録されているデータは少ない。58 元素のデータが収録されており、データのエントリ数は、全反応断面積が 712、全断面積が 73 である。今回の EXFOR の調査結果と比較すると、文献[21]には、いずれの調査核種についても多くのデータが収録されている。EXFOR 及び文献[21]に含まれているほとんどのデータが 1980 年以前に測定されたものである。文献[21]の compilation を利用して、2 つのグループ[22,23]が中高エネルギー領域の全反応断面積に対する系統式を提案しており、実験データが不十分な場合の核データ評価において、これらの系統式の利用は有効であろう。また、Barashenkov[1]による数値データならびに文献の compilation があることも付記しておく。

弾性散乱・非弾性散乱断面積は、EXFOR にかなり膨大な実験データ（特に、 ^{12}C , ^{16}O , ^{90}Zr , ^{208}Pb の 4 核種）が登録されている。以下にこれらのデータの特徴を要約する。

- 同一核種・同一エネルギーでの複数の実験は乏しい。
- 入射エネルギーの増加とともに角分布は非常に強い前方ピークとなり、最前方角のみデータに限定される。
- 1980 年代以降のデータには、偏極物理量測定データが含まれる場合が多い。
- 弾性散乱データについては、これまでの中高エネルギー光学ポテンシャル研究をサーベイすることで、関連文献から有用かつ信頼性のおけるデータを選択できる。
- 非弾性散乱データについて、データ中には放出陽子 2 重微分断面積データも登録されている。

放出粒子 2 重微分断面積データの多くは、粒子生成断面積に含まれる。評価に有用な実験データの EXFOR 及び文献からの調査、及び現状分析の結果を以下にまとめる。

- 前平衡核反応過程に関する核物理研究の進展や工学的応用への必要性から、放出粒子 2 重微分断面積測定について多くの実験が行われてきた。
- 中性子放出データは 200 MeV 以上で系統的なデータが揃っている。
- 軽イオン放出のデータについては、200 MeV 以下の実験データは比較的揃ってきているが、まだ広い質量数範囲という点からは十分とは言えない状況にある。200 MeV 以上のデータは非常に限られている。中高エネルギー領域の系統的なデータとしては、NAC(南ア)で行われた 100~200MeV 領域での(p,p')測定は注目に値する。

核種生成断面積および放射化断面積に関して、かなり膨大な実験データが存在する。核種生成断面積および放射化断面積については、別途、C, O, Al, Si, Fe, W, Pb の 7 核

種について天然同位体を含んだ調査[24]が行われた。これら膨大な数のデータの中から、実際に核データ評価やレビューに使える信頼できるデータを選別する作業が必要である。また、文献調査から得られた有用な情報として、最近行われた中高エネルギー陽子による核種生成断面積測定[25-27]をあげておく。

3. ベンチマーク実験に関する調査・収集

3.1 ベンチマーク実験の調査・収集の基本方針

ベンチマーク実験データの調査・収集は、原子力学会放射線挙動専門委員会（現、放射線工学部会）、原研炉物理委員会遮蔽専門部会（現、高エネルギー粒子工学専門部会）で既にかかなりの部分が整理され、参考文献集の発行や、SATIF 会合等での報告が行われている[28-36]。また、電子媒体のデータベースとして、ORNL/RSICC においてもデータの数は限られるが、纏められている [37]。しかし、これらは施設設計を目的としたもので、必ずしも核データそのものの評価に適したもののみが集められているわけではない。そこで、基本的にはこれらを参考とし、最近文献及びデータベースからベンチマーク実験を再調査し、核データ評価に適したものを整理した。

3.2 ベンチマーク実験の調査結果

ベンチマークテストに相当と思われるベンチマーク実験は、以下の通りである。

- (1) 250MeV 以下のスペクトルが測定されているベンチマーク問題
 - 1) 113, 256 MeVp による TTY 測定 (LANL) [38-40]
 - 2) 52 MeVp-C による深層透過実験 (INS) [41,42]
 - 3) 65 MeVp-Cu による深層透過実験 (Osaka-AVF/Kyoto) [43]
 - 4) 22, 32.5 MeVp-Li による深層透過実験 (CYRIC) [44]
 - 5) 43, 68 MeVp-Li による深層透過実験 (JAERI/Tohoku) [45-47]
- (2) 250MeV 以上のスペクトルが測定されているベンチマーク問題
 - 1) 2, 2.55 GeVp による TTY 測定 (JINR) [48]
 - 2) 0.5, 1.5 GeVp による TTY 測定 (KEK/JAERI) [49]
 - 3) 0.8, 1.2, 1.6 GeVp による TTY 測定 (Saclay/JAERI) (未発表)
- (3) 放射化法によるベンチマーク問題
 - 1) 500 MeVp による鉄ビームダンプ実験 (KEK) [50,51]
 - 2) 0.9, 1.2 GeVp によるタングステン体系実験 (ITEP/JAERI) [52]
 - 3) 500 MeVp による鉛体系実験 (KEK/JAERI) [53]

ここでは、中性子スペクトルは比較的精度が良く、直接的に核データ評価に使用しやすいとの観点から、中性子スペクトルを測定している実験を中心に選択した。

スペクトル測定データのデータを 250 MeV で分けてあるのは、高エネルギーファイルの作成精度が、このエネルギーで分類されると予想されるからである。また、最近計画されている医療用加速器では、陽子エネルギー 250 MeV 近辺を予定しており、遮蔽設計などには、従来の Sn 法やモンテカルロ法等の設計手法が用いられると思われるので、250 MeV 以下の精度の良い中性子ライブラリーが求められている。

放射化法による測定データからは、スペクトル測定では得られない体系内等における中性子束に関するデータが得られるため、このデータを分けて、上に含めた。放射化法による測定データの精度は、それが積分量であるため、スペクトル測定によるデータより測定値自身の誤差は少ない場合が多い。そのため、精度の良い放射化断面積が入手できれば、核データの検証に大いに寄与しうると思われる。

4. 断面積処理法と輸送計算の調査

4.1 断面積処理に関する検討

本節では、核データファイルを輸送計算コードで使用する断面積ライブラリーに変換するための核データ処理コードによる断面積処理に関して、高エネルギー核データであることに起因する処理上の問題点や課題などの検討結果を述べる。

この分野では、米国 LANL の活動が最先端を走っており、そこでの方針と成果に強く依存し影響を受けている。例えば、中性子と陽子入射の 150 MeV までの評価済核データファイルが 1997 年に、その処理コードとして NJOY94 が既に公開されている。これらにより作成される断面積ライブラリーを使用可能で、高エネルギー粒子輸送機能を持つ MCNPX コードの開発も進められている。

4.1.1 高エネルギー核データファイルの書式

核データファイルを処理するためには、その書式が明確でありかつ評価された核データがその書式に完全に従っていることが必須である。書式は、ENDF-6 フォーマットを採用することが核データの表現精度からも世界的な趨勢となっている。ENDF-6 の規約の特徴の 1 つに、評価した核データを 1 つ以上の方法で格納できることがある。高エネルギー核データファイル（以下 HEF と略記）でも、中性子や陽子などの粒子生成データを MT=5 の核種生成と MT=201-207 の粒子生成で与える 2 通りの方法が可能である。前者は LANL 形式、後者は JAERI-BNL 形式と呼ばれる。あるエネルギー範囲で両者が同時に与えられた場合には粒子生成が重複することになるため、いずれか一方のみを選択的に処理するようにはなくてはならない。従って、核データ処理上の観点からは LANL 形式と JAERI-BNL 形式のどちらかで評価が統一されることが望ましい。どちらの形式も相互変換可能であるが、書式の拡張性（中間子データの格納）

の見地から国内では JAERI-BNL 形式が採用され、JENDL-HE に適用されることになっている。なお、NJOY コードの NJOY94 以後のバージョンは LANL 形式を処理するように整備・拡張されている。

4.1.2 輸送計算コード

高エネルギー領域の粒子輸送計算コードは、核内カスケード反応などが主体であるため外部ファイルの断面積ライブラリーを使用せずに、パラメータフィット等により必要な断面積を内部的に供給してきた。但し、HILO86 多群ライブラリーのように 20 MeV 以下の領域で使用されている輸送計算コードにそのまま使用できる従来型の書式を持つものは存在する。また、従来型のライブラリー（多群 PL 型、MCNP 型など）以外の書式が必要であれば、それに対応した核データ処理コードの改良も必要になる。MCNPX コードは、従来型の MCNP をベースにして LAHET による高エネルギー粒子輸送機能をそれに組み込むことにより LANL で開発・整備が進められている。但し、MCNPX の公開は早期には期待できない状況である。その断面積ライブラリーの仕様は非公開コードのため不明である。

HEF 評価とその処理を効率化・活性化するためには、HEF から作成される断面積ライブラリーを使用する高エネルギー輸送計算コードの存在が不可欠である。そのため、独自の輸送計算コードの整備が研究を促進するためにも強く望まれる。

4.1.3 処理法

HEF から断面積ライブラリーを作成するための核データ処理コードは、以下の処理要件を満たす必要がある：

- ・ ENDF-6 対応、
- ・ 粒子生成データの処理（MT=5 または MT=201-207）、
- ・ HEF に対応した処理の上限エネルギーの引き上げ、
- ・ 適切な書式のライブラリーが作成可能。

ENDF-6 の MF=6 を実際に取り扱える公開された処理コードは NJOY94 しかない。最新の公開版である NJOY94 は、LANL 形式の HEF から MCNP 用ライブラリーと多群断面積ライブラリーを作成できる。当対象とする入射粒子が中性子と陽子に限定されるのであれば、JAERI-BNL 形式を LANL 形式に変換して NJOY で処理するのが効率的であるかもしれない。

未公開の NJOY の最新版は、MCNPX に対応して中性子と陽子入射に対する HEF の処理機能の拡張が行われ、次段階として光中性子の処理機能の整備が予定されている。これが作成する HEF に関連した断面積ライブラリーの形式は、MCNPX、MCNP、

多群断面積の3種類である。対応する HEF の粒子生成データの形式は MT=5 の LANL 形式のみである。

JENDL-HE は、MT=201-207 を使用する JAERI-BNL 形式で粒子生成データの評価がなされている。この形式の MT=201 と 202 を直接処理できるように NJOY94 を改良し MCNP 用ライブラリーを作成できるようにした NJOY94/JHE が整備されている。20 MeV 以下では反応別データを使用し、それ以上では弾性散乱、中性子生成 (MT=201) とガンマ線生成 (MT=202) データを使用する。この処理上の留意点として、JENDL-HE の中性子生成断面積は multiplicity が評価できないため、正味の反応断面積が導出できない。そのため吸収断面積をゼロとして、弾性外断面積を中性子生成反応断面積と見なし、その multiplicity を (中性子生成断面積) / (弾性外断面積) とすることで中性子生成量を保存する断面積の取り扱いが必要となる。ガンマ線生成もこの中性子生成に結合した形で処理される。

JENDL-HE では、核分裂と放射捕獲を 20 MeV までとせず、粒子生成データと同じ上限エネルギーまで与えることが想定されているが、その処理においては弾性外断面積の取り扱いに注意し、取り扱う反応間の重複には最大限注意を払わねばならない。また、中性子以外の粒子入射の核データファイル処理機能についての検討と対応作業も NJOY 最新版の公開が遅れるようであれば必要となる。

4.2 ベンチマークテストのためのテスト計算

1998 年初めに 50 MeV までの JENDL-HE のいくつかの元素に対して MCNP コード [55]用の輸送断面積ライブラリーが作成された。このライブラリーを用いた JENDL-HE のベンチマークテストに着手した。ベンチマークテストには、日本の3施設で行われた遮蔽実験を選んだ。東大の核研及び阪大 RCNP で行われた実験 [32,42,43]では白色中性子源が使われており、中性子スペクトルに加え2次 γ 線スペクトルも測定されている。原研 TIARA で行われた実験 [34,45,46,55]では p-Li 反応による準単色中性子源が使われているためにベンチマークテストに好都合であり、またビーム軸上に加えて軸上から離れたオフセットの位置でも中性子スペクトルが測定されているため、散乱による2次中性子の角度分布まで含めたテストが可能である。これらの実験では炭素・鉄・鉛・ポリエチレン・水・コンクリートの総計6種類の材料が使われている。

供給された MCNP ライブラリーには 12 元素に対する輸送断面積が含まれていたが、JENDL-HE 単独で計算が行えたのは 6 材料のうちの鉄のみであった。この他に JENDL-HE の Mg, Al, Si, K, Ca, Fe のデータに 100XS ライブラリー [56]の H 及び O のデータを補ってコンクリートの計算も行った。また、参考のために、100XS ライブラリー単独の計算も行った。さらに、すべての実験に対して MORSE コードと HILO86 ラ

イブラリの組合せによる計算が以前に行われており[33,34,45,46]、JENDL-HE による計算結果との比較が可能である。

計算結果の例として、TIARA で行われた鉄及びコンクリート実験で測定された中性子スペクトルの比較を分析する。コンクリート体系では JENDL-HE による計算結果と実験値との一致は比較的良い。最も一致の悪い厚さ 150 cm のコンクリート遮蔽を透過した 40 MeV 中性子のピーク部分でも計算値は実験値よりも約 50%大きい程度である。一方、鉄体系では JENDL-HE による計算結果は遮蔽厚さの増加と共に中性子束を過小に計算する傾向が強い。厚さ 100 cm の鉄遮蔽の背後では、JENDL-HE による中性子束は実験値の約 1/4 である。

JENDL-HE に対しては 20 MeV 以上のデータのベンチマークテストが第一目的であるが、実際に核計算で使われるときには 20 MeV 以下の低エネルギーデータも重要である。そこで、原研 FNS の D-T 中性子源を用いて行われた鉄体系ベンチマーク実験[57,58] の解析も行った。JENDL Fusion File によるスペクトルは実験値と素晴らしい一致を示しているが、JENDL-HE による計算値は実験値からかけ離れた結果になっている。これは、JENDL-HE では 20 MeV 以下のデータとしてベンチマークテストが行われていない鉄の同位体に対する評価値を採用したためである。この例が示すように、20 MeV 以上の中性子発生源を用いたベンチマーク実験の他に、核融合及び核分裂炉開発のために蓄積された 20 MeV 以下の中性子発生源を用いた数多くのベンチマーク実験も依然として JENDL-HE のベンチマークテストに対して有効であることが分かる。

5. 標準レビュー手法の検討

JENDL-HE のレビュー手法については、JENDL の評価で蓄積されたような統一された評価方法がなく、各レビュー担当者の知識と経験に基づいて実施されているのが現状であると考えられる。そのため、レビュー結果は核種によって精粗があり得るため、品質保証の観点から好ましくなく、早急にレビュー手法を標準化することが望ましい。

JENDL-HE として評価されたデータの全てを微分データで確認することは現時点では不可能であるが、少なくとも存在するデータを数値的に検索/取得するためには EXFOR が必須である。JENDL の評価では NESTOR、SPLINT、CRECTJ システム等が既に整備されており、評価値の編集、測定データの検索/表示から作図までを一貫して行うことが可能である。JENDL-HE 評価に於いても同等の機能を有するシステムの整備を早急に行う必要がある。但し、NESTOR では EXFOR への変換作業のための時間的ずれによる最新データの格納遅延があるので、JENDL-HE 評価用には EXFOR を

直接処理する方法に改める。核データセンターは EXFOR のミラーサイトとなり、常に最新の EXFOR を管理できる体制とする。但し、最新データは EXFOR に格納されていない場合があり、この情報を何らかの方法で取得する手段を別途考慮する必要がある。

同時に、従来の file checker と合わせて、レビュー方法を手順化することにより、レビュー担当者はレビュー作業を効率良く実施することが可能で、かつチェック漏れなどの見落としを最小限に抑えることができる。また、微分データが要求精度に対して不十分であれば、粒子生成断面積の積分データとして、TTY データを積極的に利用する。そのためには JENDL-HE として評価したデータよりこれらの積分値を算出する tool を開発する必要がある。輸送計算の精度に関与する全断面積、弾性散乱断面積等を確認する目的には、できるだけ単純な体系で、かつ体系内外のスペクトルが測定されているベンチマークを取得選択する。遮蔽を目的としたベンチマークでは実際の体系を模擬した深層透過体系が多いが、多数回の散乱によって形成されるスペクトル情報のみでは核データに問題がある場合の反応の同定は困難である場合が多いため、核データ評価の目的では、比較的薄い体系での情報も非常に有効である。

6. シグマ委員会及びユーザグループへの提言

以上、個別の問題に関して検討が加えられた。本章ではこれら検討結果を基に今後必要な作業をまとめ、各研究委員会及びグループへの提言として整理する。

6.1 シグマ委員会へ

中性子入射実験データに関して、最近の比較可能な実験データや計算の検証に有効なデータが蓄積された有効なデータベースを評価とベンチマークに有効に生かす方法の検討が先ず重要と考える。

陽子入射実験データの収集に関して、新規データ取得に当たっては、ジャーナルや主要な研究施設の報告書などの非デジタル情報源や研究者間のネットワークを利用して、使えるデータを定期的にサーベイする作業が不可欠である。また、既存のデータ中から、実際に評価に使えるデータの選別作業ならびにその編集作業が急務であろう。

JENDL-HE 評価データのレビュー手法確立のため必要な作業は以下の通りとなる。

- (1) 積分データの取得/選択と数値ベンチマーク化作業
(thick/medium-range target yields、transmission experiments)
 - a) 利用者の目的と要求精度の調査作業
 - b) 上記の調査を基にした重要度の高いデータの数値化作業

- (2) JENDL-HE ファイルから thick 及び medium-range target yield を算出する tool の整備
- (3) JENDL-HE ファイルからの断面積処理を含む輸送計算手法の整備

JENDL-HE から断面積ライブラリーを作成するため、以下の処理要件を満たす処理コードが必要である。

- ・ ENDF-6 対応、
- ・ 粒子生成データの処理 (MT=5 または MT=201-207) 、
- ・ JENDL-HE に対応した処理の上限エネルギーの引き上げ、適切な書式のライブラリーが作成可能。

核データのベンチマークを行うために、次のステップとして実験の数値データ収集を行う必要がある。その際、どのデータが必要であり、どのデータがベンチマークとして使えそうか、取捨選択を行わなければならない。この作業は、相当の時間を要する。新しい WG の設置が必要であろう。

JENDL-HE のベンチマーク計算を実施するグループを結成する必要がある。今後、新しい元素に対して評価が行われ次第、順次ベンチマーク計算を実施し、問題点の抽出を通じてより信頼性の高い JENDL-HE の完成への貢献を期待する。

6.2 炉物理委員会または高エネルギー核データのユーザグループへ

JENDL-HE 評価とその処理を効率化・活性化するためには、JENDL-HE から作成される断面積ライブラリーを使用する高エネルギー輸送計算コードの存在が不可欠である。そのため、独自の輸送計算コードの整備が、研究を促進するためにも、強く望まれる。

6.3 核データセンターへ

JENDL-HE 評価データレビュー手法確立のため必要な作業は以下の通りとなる。

- (1) EXFOR ミラーサイト運用管理及び新規データ検索/取得作業(source を定めて定点観測するグループの設置)
- (2) 微分データの検索/取得のための EXFOR 処理 tool の整備作業
- (3) JENDL-HE 編集 tool と微分データを描画するグラフ tool の整備
- (4) 上記 tool を用いたレビュー方法の手順化作業

これらの作業項目のうち、必要性が高く、かつ緊急性のあるものを選択し、適宜 WG をシグマ委員会に設置して作業を実施する。必要があれば、作業計画を立案し、数年間のスケジュールを考慮した予算化措置を考える。また、他の類似する委員会等の活動とも積極的に協力し、委員会活動として協力を依頼する。

6.4 その他へ

中性子入射実験を進展させるには、大強度と狭いパルス幅を持った適切な中性子源設備が重要である。

7. おわりに

JENDL High Energy File (JENDL-HE)第1版の完成を目前に控えている一方で、そのデータのレビューおよび確認のための積分テスト手法が未確立であるのは大きな問題である。そのため、JENDL-HE に関する積分評価のためのタスクフォースによって、JENDL-HE 評価に係る問題点の現状を調査・検討し、今後のシグマ委員会における中高エネルギー核データ評価および整備に対する指針を得るための調査活動を実施した。本報告では、本タスクフォースの調査検討により明らかとなったシグマ委員会および利用者グループに対する提言をまとめ、シグマ委員会に対する答申の概説を行った。詳細は、公刊される JAERI-Review を参照していただきたい。

これらの調査結果及び提言が、今後の高エネルギー核データ整備へ向けた活動の参考になれば幸いである。更に言うならば、この提言を基に、必要であればシグマ委員会のワーキンググループを再編成し、ユーザ側との連携を保ちつつ、より効率の良い作業が行われることを期待する。また、高エネルギー核データの整備の結果もたらされる JENDL-HE の有効利用のためには、ライブラリ作成、輸送コードの整備等ユーザからの協力が必須であることも言うまでもない。核データ整備側及びユーザ側の密接な協力及び共同作業を望むものである。

参考文献

- [1] Barachenkov B.C.: "Cross Section of Interactions of Particles and Nuclei with Nuclei", JINR (1983).
- [2] Finlay R.W., et al: Phys. Rev., C47(1), 237 (1993).
- [3] Schimmering W., et al.: Phys. Rev., C7, 248 (1973).
- [4] Tang H., et al.: Proc. Conf. Nuclear Data, 1997 Treieste, pp.429 (1998).
- [5] Olsson N., et al: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, 1997 Treieste, pp.416 (1998).
- [6] Osborn J.H., JR: Dissertation, Univ. of California, Davis (1995).
- [7] Hitzenberger H., Pavlik A., et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, Gatlinburg 1994, pp.367 (1994).
- [8] Vonach H., Pavlik A., et al.: Phys. Rev., C50(4), 1952 (1994).

- [9] Sabramanian T.S., et al.: Phys. Rev., C28(2), 521 (1983).
- [10] Slypen I., Corcalciuc V.C., Meulders J.P., Chadwick M.B.: Phys. Rev., C53(3), 1310 (1996).
- [11] Haight R.C.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, 1997 Treieste, pp.500 (1998).
- [12] Nauchi Y., et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, 1997 Treieste, pp.613 (1998).
- [13] Newmann S., et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, Tieste 1997, pp.379 (1998).
- [14] Kim E., et al.: Nucl. Sci. Engi., 129, 1 (1998)
- [15] Nakamura T., et al.: J. Atomic Energy Society, 40(1), 15 (1998) (in Japanese).
- [16] Hitzengerger H., Pavlik A., et al.: Proc. Int. Conf. Nuclear Data, Gatlinburg 1994, pp.367 (1994).
- [17] Vonach H., et al.: Phys. Rev., C50(4), 1952 (1994).
- [18] Ramakrishnan P., Mitchel G., Gould G.: Nucl. Sci. Eng., 98, 348 (1988).
- [19] Tanabe E., Shin K., Nakamura T.: J.Nucl. Sci. Technol., 31(11), 1133 (1994).
- [20] 例えば、Fukahori T.: Proc. of the 1990 Symposium on Nuclear Data, Nov. 29-30, 1990, JAERI, Tokai, Japan, JAERI-M 91-032, pp.106 (1991).
- [21] Bauhoff W.: Atomic Data and Nuclear Data Tables, 35, 430 (1986).
- [22] Sihver L.: et al., Phys. Rev., C47, 1225 (1993).
- [23] Wellisch H.P. and Axen D.: Phys. Rev., C54, 1329 (1996).
- [24] 山野直樹: 私信 (1998).
- [25] Michel R., et al.: Nucl. Instr. & Meth., B103, 183 (1995).
- [26] Gloris M., et al.: Nucl. Instr. & Meth., B113, 429 (1996).
- [27] Schiekel Th., et al.: Nucl. Instr. & Meth., B114, 91 (1996).
- [28] Nakamura T., et al.: Atomic Data and Nuclear Data Tables, 32, 471 (1985).
- [29] Hirayama H., et al.: "Annotated References of Shielding Experiment and Calculation of High Energy Particles", KEK report 90-18 (1990).
- [30] Hirayama H., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Problems", KEK report 92-17 (1993).
- [31] Hayashi K., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Analysis and Future Items to be solved", OECD Documents SATIF-1 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.135 (1994).
- [32] Nakashima H., et al.: "Benchmark Problems for Intermediate and High Energy Accelerator Shielding", JAERI-Data/Code 94-012 (1994).
- [33] Nakashima H., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Experiment Analyses", OECD Documents SATIF-2 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities,

- p.115 (1995).
- [34] Nakane Y., et al.: "Neutron Transmission Benchmark Problems for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities", JAERI-Data/Code 96-029 (1996).
- [35] Nakane Y., et al.: "Intercomparison of Neutron Transmission Benchmark Analyses for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities", OECD Documents SATIF-3 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.151 (1997).
- [36] Hayashi K., et al.: "Survey of Thick Target Neutron Yield Data and Accelerator Shielding Experiments", OECD Documents SATIF-2, pp.41 (1995).
- [37] Hunter H.T., et al.: "SINBAD-A Shielding Integral Benchmark Archive and Database for PC's", Proc. on 8th International Conference on Radiation Shielding, Arlington, USA, 24-28 April, 1994, pp.795 (1994).
- [38] Meier M.M., et al.: Nucl. Sci. Eng., 102, 310 (1989).
- [39] Meier M.M., et al.: *ibid.*, 104, 339 (1990).
- [40] Meier M.M., et al.: *ibid.*, 110, 299 (1992).
- [41] Shin K., et al.: *ibid.*, 71, 294 (1979).
- [42] Uwamino Y., et al.: *ibid.*, 80, 360 (1982).
- [43] Shin K., et al.: *ibid.*, 109, 380 (1991).
- [44] Ishikawa T., Miyama Y. and Nakamura T.: *ibid.*, 116, 278(1994).
- [45] Nakao N., et. al.: *ibid.*, 124, 228 (1996).
- [46] Nakashima H., et. al.: *ibid.*, 124, 228 (1996).
- [47] Nakao N., et. al.: J. Nucl. Sci. Technol., 34(4), 348-359 (1997).
- [48] Daniel A.V., et al.: " Neutron Production in Lead Target by High-Energy Light-Mass Heavy Ions," JINR-1-92-174 (1992).
- [49] Meigo S., et. al.: "Measurements and Spallation Neutrons from a Thick Lead Target Bombarded with 0.5 and 1.5 GeV Protons ", Proc. ICANS-XIII, pp.442 (1995).
- [50] Arakita Y., et al.: Nucl. Instrum. Methods., 164, 255 (1979).
- [51] Ban S., et al.: *ibid.*, 184, 409 (1981).
- [52] Takada H., et. al.: "Reaction Rate Distribution Measurement and Analysis for 0.895 and 1.21 GeV Proton Bombardment on Thick Tungsten Target", Proc. SARE3, pp.255 (1997).
- [53] Takada H., et al.: "Measurement of Reaction Rate Distributions in a Lead Assembly Bombarded with 500 MeV Protons", Proc. SARE3, pp.284 (1997).
- [54] Briesmeister J. F. (Ed.): "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code,

Version 4B", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1997).

[55] Nakao N., et al.: Nucl. Sci. Eng., 134, 348 (1997).

[56] Little R. C.: "Summary Documentation for the 100XS Neutron Cross Section Library (Release 1.0)", LA-UR-96-24, Los Alamos National Laboratory (1995).

[57] Konno C., et al.: Fusion Eng. Des., 18, 297 (1991).

[58] Maekawa F. and Oyama Y.: Nucl. Sci. Eng., 125, 205 (1997).