

核データ・炉物理特別会合(1)

高エネルギー評価済核データファイルの現状

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

日本原子力研究所核データセンター

深堀智生

fukahori@ndc.tokai.jaeri.go.jp

1. 背景

近年、加速器技術の発展により、原子力のエネルギー生産分野のみならず、非エネルギー分野においても、粒子線の高度利用の必要性が議論されている。¹⁾ 国内だけでも、日本原子力研究所(原研)及び高エネルギー加速器研究機構における統合計画、国際核融合炉材料照射施設(IFMIF)、原研高崎の放射線高度利用施設(TIARA)、放射線医学総合研究所の重粒子線癌治療施設(HIMAC)等において、高エネルギー粒子線利用のための加速器を中心とした施設が多分野にわたって利用に供されようとしている。こういった基礎研究、放射性廃棄物の核変換処理研究、核融合炉材料研究、医学研究などを目的とした次世代高エネルギー粒子線利用施設の建設が計画されているが、これらの施設の建設及び上記研究を遂行するために、高エネルギー核データが必要となる。

以下、高エネルギー評価済核データファイルの現状について、シグマ委員会高エネルギー核データ評価ワーキンググループの活動を含め、報告する。

2. 高エネルギー核データファイル

ここで言う「高エネルギー」とは、従来の核分裂炉及び核融合炉用に整備されてきた核データファイルの上限である20MeV以上であると定義する。また、高エネルギー核データに対するニーズは、従来の原子炉と異なり、中性子ばかりでなく、陽子データも必要であることが特徴の1つである。

要求されている高エネルギー核データの種類を大まかに整理すると、次のようになる。(1)高エネルギー中性子及び陽子の物質中での輸送計算用断面積データとして、全断面積、弾性散乱断面積および角度分布や粒子放出二重微分断面積(DDX)、(2)放射化や核変換量の推定やドジメトリ用の断面積データとして、核種生成断面積、(3)材料の損傷評価用の断面積データとして、ガス(水素・ヘリウム)生成断面積などである。又、二次物理量として、核発熱や線量評価用に、カーマファクタや線量換算係数なども必要となる。

広い入射エネルギーや標的核の範囲に亘って、これらの断面積データファイルを作成する上で、実験データや理論計算に基づいた核データ評価作業を行なうことになる。高エネルギー領域では、20MeV以下の低エネルギー領域に比べ、実験データが著しく不足している。利用可能な高エネルギー中性子源が殆どないことを反映して、中性子反応に対する実験データはかなり乏しい。一方、陽子入射反応については、世界中で稼動している（していた）陽子加速器を利用した原子核物理研究を通じて生産された膨大な測定データが存在する。しかしながら、組織的なデータベース化が必ずしも十分でなく、又、ある特定の核物理的興味のある“窓”を介して測定されたデータが多く、応用上重要な系統的なデータ（例えば、DDXデータでは、広い角度や放出エネルギーに亘るデータ）は必ずしも十分でないと云える。このような現状を踏まえて、現時点の高エネルギー核データ評価においては、理論計算が主力にならざるを得ない状況にある。

3. 高エネルギー核反応の特徴

図1に、高エネルギー核反応の特徴を模式的に示す。入射エネルギーが高くなると、前平衡過程や多重フラグメンテーション過程などのダイナミカルな反応過程が支配的になる。このような反応過程を経由して、放出される粒子は重心系で強い前方性をもって

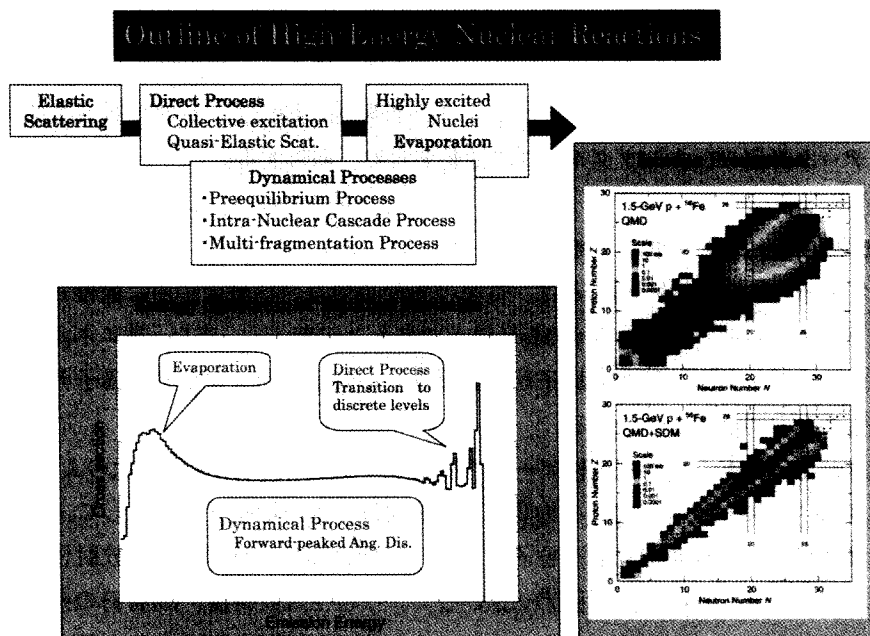


図1 高エネルギー原子核反応の特徴

放出される。従って、放出粒子スペクトルには、低エネルギー部（蒸発平衡成分）を除いて、前方性を有する連続スペクトル領域が広いエネルギー範囲に亘り観測される。次に、高エネルギー反応では、放出される軽粒子（中性子や陽子など）の多重度が大きくなり、図1（右図）に示すように、質量数・原子番号の広範囲に亘る残留核が生成される。従って、入射エネルギーが高くなるにつれて、膨大な数の同位体生成断面積に関する情報が必要になる。さらに、パイ中間子生成のしきいエネルギーを越えると、中間子や励起核子（ Δ 粒子やアイソバー）の自由度が重要になってくる。よって、原子核を核子多体系と捉える描像から、ハドロン多体系と見なす取り扱いが必要になってくる。

高エネルギー核データ評価に使う理論計算¹⁾には、以上のような特徴をよく説明できる核反応理論モデルの構築やその精密化が要求される。例えば、前平衡反応については統計的多段階反応モデルが核データ評価に役立つ有効な理論モデルになるであろうし、さらに、多重フラグメンテーション過程を伴う複雑なハドロン反応を包括的に捉えるには、分子動力学法を応用した核反応シミュレーション手法が有力な計算手段となるであろう。

4. 海外の高エネルギー核データ評価活動の動向

表1に、海外における主要な高エネルギー核データ評価活動の現状をまとめている。最初に高エネルギーファイル(ENDF/B-VI 高エネルギーファイル)の整備を始めたのは、米国のBNLであり、1GeVまでの中性子及び陽子入射反応データをALICE-Pコードを使って評価している。但し、 ^{12}C 、 ^{56}Fe 、 ^{208}Pb 、 ^{209}Bi の4核種しか格納されていない。現在、最も活動が盛んで、多くの評価済みデータを生産しているのは、米国LANLである。ここでは、FKK-GNASHコードシステムを用いて、150MeVまでの中性子及び陽子入射高エネルギーファイル(LA150)を完成させている。²⁾ この他、ヨーロッパやロシアでは、ECN Petten(150MeVまでの陽子及び中性子ファイル)、FZK(50MeVまでのIFMIF用中性子ファイル)、IPPE(100MeVまでのファイル：WIND、100MeVまでの放射化断面積ファイル：MENDL-2)等で評価活動が行なわれている。さらに、最近では、中国や韓国が高エネルギー核データ評価に着手している。

5. 国内での高エネルギー核データ評価活動

5. 概要

「シグマ委員会」では、高エネルギー核データファイル整備に向け、評価手法開発、フォーマット整備、ベンチマーク問題調査、核データ処理に関する研究活動などを行なっている。それらの活動成果は、「高エネルギー核データ専門家会議報告」³⁾やシグマ委員会「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」報告⁴⁾にまとめられている。

表1 海外における高エネルギー核データ評価活動の現状

所在	概要	格納核種
BNL	ENDF/B-VI 高エネルギーファイル。1GeV までの中性子・陽子入射反応データ。ALICE-P コードによる評価	^{12}C , ^{56}Fe , ^{208}Pb , ^{209}Bi
LANL	150MeV までの中性子及び陽子入射高エネルギーファイル。FKK-GNASH コードによる評価	H, C, N, O, Al, Si, P, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Nb, W, Hg, Pb の同位体
ECN Petten	150MeV までの中性子及び陽子ファイル。FKK-GNASH コードによる評価	$^{54,56}\text{Fe}$, $^{58,60}\text{Ni}$
FZK	50MeV までの IFMIF 用中性子ファイル	^{52}Cr , ^{56}Fe , ^{51}V
IPPE Obninsk	100MeV までのファイル(WIND)	$n+^{235} \sim ^{238}\text{U}$, $^{237,239}\text{Np}$, $^{236} \sim ^{244}\text{Pu}$, $p+^{238}\text{U}$
IPPE Obninsk	100 MeV までの放射化断面積ファイル (MENDL-2)	505 核種 (反応)
NEA Data Bank	多くの核種の全断面積、弾性散乱断面積及び非弾性散乱断面積実験データのサーベイ (Brashenkov compilation)	多数

現在、シグマ委員会の高エネルギー核データWGの中に、高エネルギーファイル作成サブWGを作り、表2に示す核種を対象に、3GeV までの高エネルギー領域の中性子及び陽子入射反応断面積の評価およびファイル化 (JENDL 高エネルギーファイル: JENDL-HE) を精力的に進めている。対象核種は、ユーザの優先度に応じて3つに分類されている。全部で124核種 (第1優先度は42核種、第2優先度は42核種、第3優先度は40核種) にのぼる。3GeVを上限にしているのは、JAERI-KEK 統合計画の大強度陽子加速器コンプレックスの1つである 3GeV 陽子サイクロトロン施設的设计への利用を視野に入れている。主な格納断面積データは、全断面積、弾性散乱断面積及び角分布、中性子や陽子などの軽粒子生成断面積及びDDX、同位体生成断面積である。なお、データフォーマットは ENDF-6 フォーマットを採用する。

表2 JENDL 高エネルギーファイルに格納予定の核種

1st priority	^1H , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{23}Na , ^{27}Al , $^{50,52,53,54}\text{Cr}$, $^{54,56,57,58}\text{Fe}$, $^{58,60,61,62,64}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{181}Ta , $^{180,182,183,184,186}\text{W}$, ^{197}Au , $^{196,198,199,200,201,202,204}\text{Hg}$, $^{204,206,207,208}\text{Pb}$, ^{209}Bi , $^{235,238}\text{U}$
2nd priority	^9Be , $^{24,25,26}\text{Mg}$, $^{28,29,30}\text{Si}$, $^{39,41}\text{K}$, $^{40,42,43,44,46,48}\text{Ca}$, $^{46,47,48,49,50}\text{Ti}$, ^{51}V , ^{55}Mn , ^{59}Co , $^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$, ^{93}Nb , $^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}$, $^{238,239,240,241,242}\text{Pu}$
3rd priority	^2H , $^{6,7}\text{Li}$, $^{10,11}\text{B}$, ^{13}C , ^{19}F , $^{35,37}\text{Cl}$, $^{35,38,40}\text{Ar}$, ^{50}V , $^{64,66,67,68,70}\text{Zn}$, $^{69,71}\text{Ga}$, $^{70,72,73,74,76}\text{Ge}$, ^{75}As , ^{89}Y , ^{232}Th , $^{233,234,236}\text{U}$, ^{237}Np , $^{241,242,242m,243}\text{Am}$, $^{243,244,245,246}\text{Cm}$

その他の高エネルギー関連のファイルとして、140MeV までの光子入射データを格納した光核反応データファイル、IFMIF のための 50MeV までの中性子入射反応を対象にした IFMIF 用高エネルギーファイル及び PKA/KERMA ファイルも整備している。

5.2 JENDL-HE の評価手法

次に JENDL-HE の評価方法について要点を整理する。2章で述べたように、高エネルギー領域での実験データが乏しいために、理論モデル計算を中心にした断面積の評価を行なうことになる。使用する計算コードシステムの概要を図2に示す。エネルギー領域を 20MeV~250MeV までの中間エネルギー領域(I)と 150MeV 以上の高エネルギー領域(II)に分けて、それぞれの領域で、異なった計算コードシステムを使用する。(I)の領域では、LA150 ファイルの評価に利用された GNASH コード⁶⁾を主要な理論計算コードとして採用する。但し、一部の軽核 (NやO) の評価では、EXIFON コード⁶⁾が利用された。全断面積や弾性散乱断面積などの物理量を求める光学模型計算には、ECIS コード⁷⁾や OPTMAN コード⁸⁾が使われる。これらのコードで計算される透過係数や離散的準位への直接非弾性散乱断面積は、GNASH コードの入力データになる。(II)の高エネルギー領域では、反応経路が膨大になり、ハドロンの自由度も効いてくるために、原研で独自に開発された JQMD コード⁹⁾を使用する。JQMD コードは、ダイナミカルな反応過程を量子分子動力学 (QMD) 法で扱い、平衡状態からの粒子放出には統計崩壊モデルを使用したモンテカルロコードである。(II)の領域の全断面積、弾性散乱断面積、全反応断面積の計算には、システムティックスに基づく TOTELA コード¹⁰⁾が利用される。(I)と(II)の領域でそれぞれ計算された断面積は、150MeV~250MeV の overlapping 領域で接続される。中性子全断面積や陽子入射反応同位体生成断面積で広いエネルギー範囲に亘り比較的多数の実験データが存在する場合は、一般化最小自乗法に基づく GMA コード¹¹⁾などを用いたフィッティングにより評価値を導出することも行なう。

5.3 評価結果

ここでは、紙面の都合上、¹²C に限定して、JENDL-HE の評価結果の1例を示す。それ以外のいくつかの核種 (²⁸Si, ⁵⁶Fe, ^{63,65}Cu, W 同位体) については、2000年11月に開催された核データ研究会で評価結果が報告されたので、詳細はその報告集¹²⁾を参考にしてもらいたい。又、²⁷Al については、文献¹³⁾に結果が掲載されている。

図3に、弾性散乱核子に対する角度分布の実験値と計算値(評価値)の比較を示す。計算は、軟回転模型により決定された原子核ハミルトニアンのパラメータを使った結合チャンネル(CC)法に基づく OPTMAN コードを使って行なわれた。¹⁴⁾ 中性子、陽子とも 150MeV までの実験値をよく再現している。尚、本計算手法および全断面積や非弾性散乱断面積に対する結果は文献¹⁴⁾に詳しく述べられている。次に、CC法による計算で導

出された透過係数が GNASH コードに入力され、150MeV までの粒子・ガンマ線生成断面積やエネルギースペクトル、及び同位体生成断面積が計算された。同位体生成断面積の結果の一例を LA150 評価値と比較して図 4 に示す。尚、150MeV 以上では、JQMD コードによる計算結果が使われた。また、粒子生成 DDX の結果として、図 5 に 90MeV における(p,xp)スペクトルを示す。角分布計算には、Kalbach の系統式¹⁵⁾が使われている。後方では、過小評価の傾向があるが、実験値との良い一致が得られている。

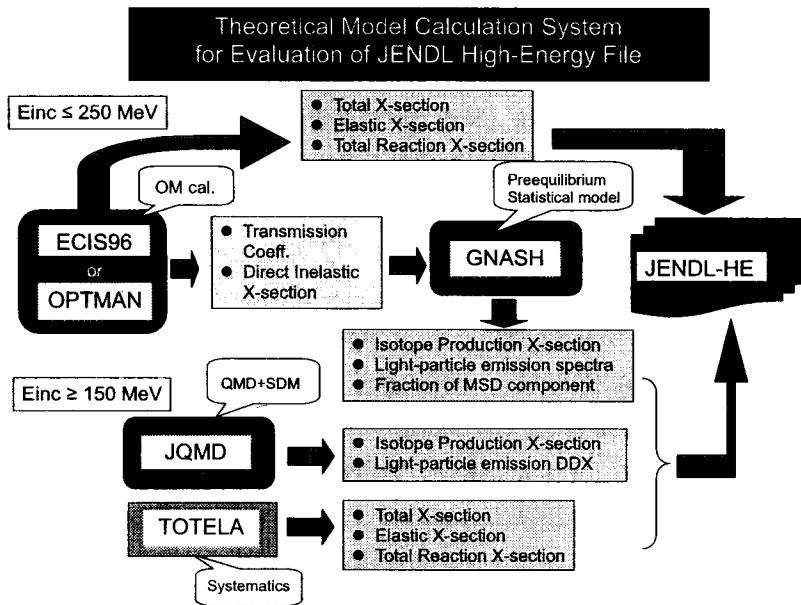


図2 JENDL 高エネルギーファイル評価用計算コードシステム

6. まとめと展望

本報では、海外・国内における評価済高エネルギーファイルの現状をレビューした。国内で整備が進められている JENDL-HE ファイルは、全 124 核種に対する 3GeV までの中性子及び陽子高エネルギー断面積データが格納される予定である。表 1 の海外の動向と比較すると、質・量とも圧倒的に充実したファイルを目指しており、本評価・ファイル化作業は一大プロジェクトであることを理解して頂けると思う。現在、第 1 及び第 2 優先度の主要な核種の評価をほぼ終了し、ファイル化作業を迅速に進めている段階である。高エネルギー核データ評価WGとしては、今後、評価終了核種を順次ベータ版として公開し、レビューと積分テストを並行して進め、2001年3月末を目標に第1版を公開したいと考えている。

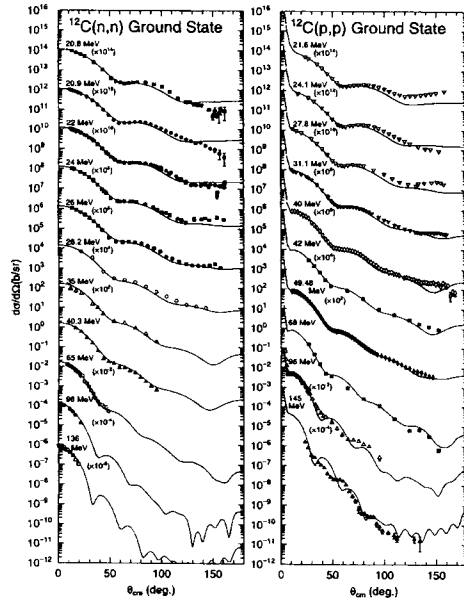


図3 ^{12}C の核子弾性散乱微分断面の測定値（記号）と計算値（実線）との比較。図は文献¹⁴⁾から転載。

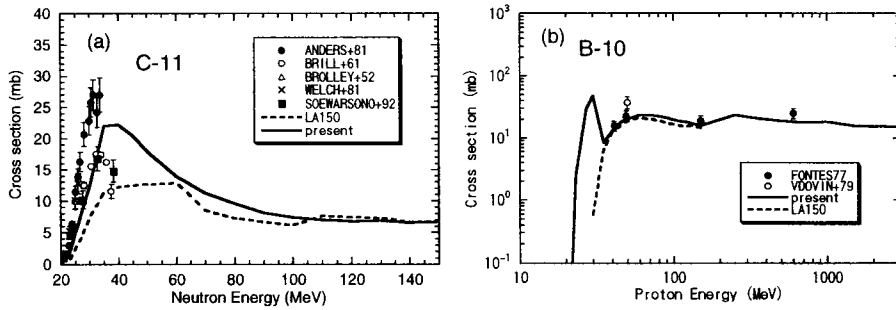


図4 同位体生成断面 (a) $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$, (b) $^{12}\text{C}(p,x)^{10}\text{B}$.

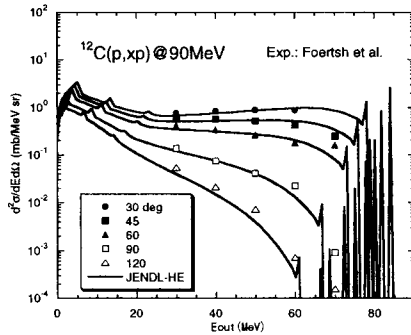


図5 ^{12}C に対する 90 MeV (p,xp) の二重微分断面

最後に一言。今後、高エネルギー核データ研究活動のアクティビティをさらに高めていく上では、原子力分野に留まらず、宇宙開発や医療、半導体産業などの新規応用分野の開拓を行なっていくことも1つの課題となるであろう。また、高エネルギー核データ研究をさらに魅力あるものにするには、高エネルギー領域における新しい実験データの測定や予測精度の高い理論モデルの構築を進めていくことが鍵になる。そのためには、従来の核データコミュニティの枠を越え、国内外の原子核物理コミュニティとの交流¹⁶⁾を深め、良好な相互協力関係を築いていくことも必要となるであろう。

謝 辞

本報をまとめるに当たり、御協力を頂いた高エネルギー核データ評価WG・高エネルギーファイル作成SWGのメンバー各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 深堀智生他、日本原子力学会誌 Vol.40, 3 (1998).
- 2) M.B. Chadwick et al., Nucl. Sci. Eng. **131**, 293 (1999).
- 3) 大山幸夫他、日本原子力研究所 JAERI-Review 98-020 (1998).
- 4) T. Fukahori (Ed.), Proc. the third specialists' meeting on high energy nuclear data; JAERI-Conf 98-016 (1998).
- 5) P.G. Young et al., LA-12343-MS, Los Alamos National Laboratory (1992).
- 6) H. Kalka et al., Z. Phys. A **341**, 289 (1992).
- 7) J. Raynal, "Notes on ECIS94", CEA-N-2772 (1994).
- 8) Efrem Sh. Sukhovitskii et al., OPTMAN and SHEMMAN codes, JAERI-Data/Code 98-019 (1988).
- 9) K. Niita et al., Phys. Rev. C, **52**, 2620 (1995); JAERI-Data/Code 99-042 (1999).
- 10) T. Fukahori, TOTELA code, private communication (1999).
- 11) S. Chiba et al., Proc. 1993 Nuclear Data Symp., JAERI-M 94-019, p.300 (1994).
- 12) 2000年核データ研究会報告文集; JAERI-Conf. (2001)に掲載予定。
- 13) Y.O. Lee et al., J. Nucl. Sci. and Technol. **36**, 1125 (1999).
- 14) S. Chiba et al., J. Nucl. Sci. and Technol. **37**, 498 (2000).
- 15) C. Kalbach, Phys. Rev. C **37**, 2350 (1988).
- 16) 永井泰樹、池田裕次郎、核データニュース、No.66 (2000), p.46.