

## WG活動報告

# 高エネルギー核データ評価ワーキンググループ

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. はじめに

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、放射線の高度利用の必要性が議論されている。こういった基礎研究、放射性廃棄物の核変換処理研究、核融合炉材研究、医学研究などを目的とした次世代放射線利用施設の建設が計画されているが、この施設の建設そのもの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。本ワーキンググループ(WG)は、こういった状況の下、評価済高エネルギー核データファイルの作成を目的に結成された。その後、1998年5月7日のシグマ委員会運営委員会において、旧高エネルギー核データ評価WG、光核反応データ評価WG、PKAスペクトルWG等を合併し、再構成することが承認された。これによって、従来より高いエネルギー領域の核データ全般を対象にした新高エネルギー核データ評価WGが発足した。旧高エネルギー核データ評価WGに関しては、それまでの活動に関連して、評価済高エネルギー核データファイル整備の現状、現存ファイルの課題、その他の活動状況、予定等を核データニュース No.59 [1]に寄稿済みであるので、これを参照していただきたい。

新高エネルギー核データ評価WG(以下、「高エネルギー核データ評価WG」と記す)は当初下記の6つのサブワーキンググループ(SWG)から構成されていたが、

- IFMIF 用中性子ファイル作成 SWG
- MeV 陽子ファイル作成 SWG
- GeV ファイル作成 SWG
- 光核反応ファイル作成 SWG
- PKA/KERMA ファイル作成 SWG
- 高エネルギー放射化断面積検討 SWG

作業の進展及び再編成により現在では、

- 高エネルギーファイル作成 SWG (渡辺幸信 SWG リーダー)

- 光核反応ファイル作成 SWG (深堀智生 SWG リーダー)
- IFMIF 用中性子ファイル作成 SWG (深堀智生 SWG リーダー)
- PKA/KERMA ファイル作成 SWG (川合将義 SWG リーダー)
- 高エネルギー放射化断面積検討 SWG (SWG リーダーは調整中)

の5つのSWGで活動している。WGメンバー(順不同、敬称略、平成14年8月31日現在)は以下の通りである。

渡辺幸信、執行信寛(以上九大)、川合将義(KEK)、山野直樹、小迫和明(以上住友原子力)、村田 徹(アイテル)、植木紘太郎、小田野直光(以上海技研)、桑折範彦(徳島大)、渡部 隆(川重)、真木紘一、日野哲士(以上日立)、義澤宣明(三菱総研)、原田秀郎(サイクル機構)、有賀武夫、柴田恵一、千葉 敏、中島 宏、深堀智生(以上原研)

本報告では、各高エネルギー関連核データファイル整備の現状を主に、本WGの活動をSWG毎に紹介する。なお、本稿を作成するに当たって時間不足のため、各SWGリーダーの推敲を受けていないので、理解不足による誤りがあったとしたら、全て筆者の責任であることを記しておく。

## 2. 高エネルギーファイル作成 SWG

高エネルギーファイル作成SWGでは20 MeVから3 GeVに亘るエネルギー範囲の陽子及び中性子入射反応の評価及びレビューを行い、JENDL高エネルギーファイルを作成するための作業を行っている。評価対象核種は、表1に示すもので、それぞれ利用者からのアンケートにより、優先順位が決められている。

評価手法のアウトラインは、SWGでの検討の結果、150~250MeV領域(評価者によって異なる)を境に、低エネルギー側は前平衡+統計モデルコード、高エネルギー側はQMDなどのシミュレーション系コードで評価を行い、両者の整合性を持たせて接続する評価手法を採択するように決定された。この結果、評価計算は次のように入射エネルギー領域を2分割するように行われる。

- Quick-GNASH code 計算 : < 250 MeV  
但し、軽核(N, O)についてはEXIFONを使った計算を行う。また、評価者によって他の方法を採用することは可。
- JQMDあるいはNMTC/JAM 計算 : 150 MeV ~ 3 GeV
- 20 MeV 以下はJENDL-3.3のデータを採用し、 $10^{-5}$  eV から3 GeV までをカバーするデータファイルを作成する。

これに伴い、評価用計算コード(quick-GNASH、EXIFON、ALICE-F、JQMD、SCINFUL/DDX、TOTELA、FISCAL)の整備を行った。quick-GNASH、EXIFON、ALICE-Fは前平衡+統計モデルコード、JQMDは量子論的分子動力学法(QMD)を用いたコード、SCINFUL/DDXは

モンテカルロ法による粒子スペクトル計算コードで Break-up 反応が取り扱えるため軽核の評価に使用可能である。また、経験式を用いた全断面積、弾性散乱断面積などを計算する TOTELA コードや核分裂断面積を計算する FISCAL コードなども整備した。NMTC/JAM に関しては、原研大強度陽子加速器開発センターで開発されたものを使用している。更に、ファイル作成のための各種ツールの整備も行っている。COMPATH コードは汎用高エネルギーファイル化コードで、JQMD、NMTC/JAM、ALICE-F 等を初めとして、多くのコードの出力を JENDL 高エネルギーファイルのフォーマットにしたがって変換できるツールである。ADDQ は評価用コードがしきいエネルギーを出力しない場合でも、自動的にしきいエネルギーをファイルに付加するツールである。この他、高エネルギーファイル用に CRECTJ6 を核データセンターの中川氏に改良してもらう等、ファイルチェックプログラム群（例えば、レビューキット作成ツール jpts 等）の整備も行っている。

評価進捗状況は、以下の通りである。

評価終了核種：

H-1 (中性子のみ), C-12, N-14, O-16, Al-27, Si-28 ~ 30, K-39,41,  
Ca-40,42 ~ 44,46,48, Ti-46-50, Cr-50,52 ~ 54, Mn-55, Fe-56, Cu-63,65,  
Zn-64,66 ~ 68,70, Zr-90 ~ 92,94, Nb-93, W-180,182 ~ 184,186,  
Hg-196,198 ~ 202,204, Pb-208, Bi-209, U-235,238, Np-237, Pu-238 ~ 242,  
Am-241,242g,242m

計算 / 評価中の核種：

H-2, Li-6,7, Be-9, B-10,11, C-13, F-19, Na-23, Mg-24 ~ 26, Cl-35,37,  
Ar-36,38,40, V-51, Fe-54,57,58, Co-59, Ni-58,60 ~ 62, Ga-69,71,  
Ge-70,72 ~ 74,76, As-75, Y-89, Mo-92,94 ~ 98,100, Ta-181, Au-197,  
Pb-204,206,207, Th-232, U-233,234,236, Am-243, Cm-243 ~ 246

Priority 1 の殆どの核種及び Priority 2 の多くの核種が評価終了となっている。今後、評価終了核種は、微分レビューの後、中高エネルギー核データ積分テスト WG にてベンチマークテストを行い、順次公開される予定である。また、これらの評価の過程で、「高エネルギー核データファイルの積分テストに関するタスクフォース」報告書を検討し、対応のため、実験室系と重心系の変換及びファイル格納法の検討等を含むファイルの仕様及び評価方法を一部変更した。

評価結果及び全体の進捗状況などを「科学と技術のための核データ国際会議 (ND2001)」にて報告した[2-4]。また、国際協力として、NEANSC/WPEC/SG13 (中高エネルギー核データ) へ対応し、SG13 は報告書を提出し、活動を終了した。

平成 14 年度活動予定は、以下の通りである。

- 原研・KEK 統合計画の加速器施設設計に利用できるように、残った核種に対する

評価を早期に終わることを第1目標にして、できるだけ早急にファイル化を進める。

- JENDL-HE の公開に向けて、ファイル化が終了した核種から、微分データレビュー法のガイドラインに沿ってレビュー作業を始める。
- レビュー終了後、順次公開する。
- レビュー等を通じて、これまで採用してきた評価手法を検証し、より信頼性の高い高エネルギー核データ評価手法の確立を目指したアクションプラン（理論計算モデルの改良や評価作業の効率化などを含む）について検討する。

### 3. 光核反応ファイル作成 SWG

光核反応ファイル作成 SWG ではしきい値から 140 MeV のエネルギー範囲の光子入射反応の評価及びレビューを行い、JENDL 光核反応データファイルを作成するための作業を行っている。評価対象核種を表 2 に示す。

評価方法は、基本的に光吸収断面積の実験データのあるものはこれを基に、これが無いものは光中性子生成断面積の実験データから理論計算から導出した割合を掛けて光吸収断面積を導出し、これからの粒子放出を理論計算で求め、これを分岐比として種々の断面積を求める方式を採っている。上記理論計算は、基本的に前平衡過程を考慮した統計模型計算コード MCPHOTO または ALICE-F（光核反応計算用に改良したもの）を用いて行う。一部軽核には EXIFON コードも用いている。

評価進捗状況は、以下の通りである。

評価終了：

H-2, C-12, N-14, O-16, Na-23, Mg-24,25,26, Si-29,30, V-51, Cr-52, Mn-55, Fe-54,56, Co-59, Ni-58, Cu-63,65, Zn-64, Zr-90, Nb-93, Mo-92,94,96,98,100, Cs-133, Gd-160, W-182,184,186, Pb-206,207,208, U-235,238

評価中：

Li-6,7, B-10,11, F-19, Al-27, Si-28, P-31, Ca-40,48, Ti-46, Ni-60, Au-197, Bi-209, Np-237

軽核を除く上記核種についてファイルチェックを行った。これを元に現在修正中である。データのレビュー作業及びフォーマットチェックへの対応検討も同時進行で行っている。また、原研で検討されているアクチニド核種の光核分裂による非破壊検査のために必要な核種を格納予定核種に追加（上記評価中核種の内、下線のもの）して、現在評価中である。また、ND2001 にて進捗状況を報告した[5]。

国際協力も行っており、平成 11 年 10 月 25 ~ 29 日に原研東海で開催された IAEA/CRP 第 3 回検討会合において、JENDL 光核反応データファイルから H-2, N-14, O-16, Fe-54,56, Ni-58, Cu-65, Zn-64, Ta-181, W-182,186 が採択された。

平成 14 年度活動予定は、以下の通りである。

- Na-23, Al-27, Si-28, Ni-60, Mo-92,94,96,98,100, Au-197 の 10 核種のファイル化を行う。すでにファイル化を終了した核種と合わせて、JENDL 光核反応データファイルとして公開したい。
- 公開版の JENDL 光核反応データファイルへの KAERI ファイルの取り込みの検討（そのまま受け入れるものと、光吸収断面積を置き換える核種の質をチェックする）
- SWG リーダーの交代（岸田→深堀）
- すべてのファイル化終了後、報告書を作成する。

#### 4. IFMIF 用中性子ファイル作成 SWG

IFMIF 用中性子ファイル作成 SWG では国際核融合材料照射施設 (IFMIF) のための 50 MeV までのエネルギー範囲の中性子入射反応の評価及びレビューを行い、IFMIF 用 JENDL 高エネルギーファイルを作成するための作業を行っている。評価対象核種を表 2 に示す。

評価は、従来の 20 MeV までのしきい反応評価で用いられていた SINCROS-II を 50 MeV まで延長し、実験データとの整合性を見ながら行われている。本ファイルは上述の JENDL 高エネルギーファイルの前段階として位置付けることができる。評価進捗状況は、以下の通りである。評価終了核種は、

Na-23, Mg-24 ~ 26, Al-27, Si-28 ~ 30, K-39, Ca-40,42 ~ 44,46,48, Ti-46 ~ 50,  
V-51, Cr-50,52 ~ 54, Mn-55, Fe-54,56 ~ 58, Ni-58,60 ~ 62,64, Cu-63,65,  
Y-89, W-182 ~ 184,186

であり、公開へ向けての最終ファイル化及びレビュー中である。評価が終了していない核種 (H-1, C-12, N-14, O-16, Li-6,7, Mo-92,94 ~ 98,100) に関しては、2 で述べた JENDL 高エネルギーファイルのデータを格納する。

平成 14 年度活動予定は、以下の通りである。

- ファイル化終了後、データのレビューを行い、できるだけ早く公開準備に入る。
- すべてのファイル化終了後、報告書を作成する。

#### 5. PKA/KERMA ファイル作成 SWG

PKA/KERMA ファイル作成 SWG では IFMIF のための 50 MeV までのエネルギー範囲の中性子入射反応の反跳原子 (PKA) スペクトル、損傷エネルギースペクトル、DPA 断面積、KERMA 因子等を IFMIF 用 JENDL 高エネルギーファイルから処理して、作成するための作業を行っている。評価対象核種を表 2 に示す。IFMIF 用 JENDL 高エネルギーファイルに含まれていない核種は、順次、3 GeV までのファイルから処理する予定である。

処理方法は、最初に放出された二次粒子が PKA の運動量及び運動エネルギーを殆ど決定するという実効単一粒子放出近似 ( Effective Single Particle Emission Approximation、ESPEA ) を用いた PKA スペクトル計算コード ( ESPERANT ) を開発した。20 MeV までの検証のため、JENDL Fusion File から処理したものの適用性を検証した。現在、この部分の公開へ向けての最終作業を行っている。また、50 MeV までの拡張性検証のため、Al-27、Fe-56 を用いて処理及び使用している近似のテストを行った。これに関連して、捕獲反応による PKA スペクトル計算 ( ESPERANT ) のためのフォーマット変換プログラム ( MF=12 ~ 15 → MF=3/MT=202 ) の検討を行い、原子炉ドシメトリ国際会議 ( 1999 ) に報告した [ 6 ]。最終的なファイルは、IFMIF 用中性子ファイル作成 SWG で作成されるデータファイル処理作業の後、作成される予定である。

この他、PKA/KERMA ファイル作成 SWG では、キャスクの中性子遮蔽材のレジンの放射線損傷に関して、KERMA を指標として使用する問題、高エネルギー領域の PKA 計算に関する検討を行った。

平成 14 年度活動予定は、以下の通りである。

- IFMIF 用中性子ファイルを元にした ESPERANT による処理。
- 代表的な核種及び合金等のはじき出しエネルギーをデータベース化する。
- 処理終了後、できるだけ早く公開準備に入る。
- すべてのファイル化終了後、報告書を作成する。

## 6. 高エネルギー放射化断面積検討 SWG

高エネルギー放射化断面積検討 SWG は、放射化断面積 WG 終了に伴う、高エネルギー領域の放射化断面積に関する作業を行うことを目的に設立された。ここでは、上述の各 SWG と連携するとともに、高エネルギー放射化断面積が必要な対象核種 ( エネルギーの上限の検討を含む ) の調査、核異性体への分岐比評価手法の検討等を行っている。

高エネルギーにおける核異性体への遷移確率 ( 全反応断面積との比 ) に関しては、系統式を検討し、これに対するプログラムのテストを行った。また、随時、JENDL 放射化断面積ファイルの問題点検討、積分テストの解析結果の検討、しきい反応断面積検討アドホック WG への協力を行っている。

平成 14 年度活動予定は、以下の通りである。

- 積分テストの検討
- ニーズの調査
- 引き続き、高エネルギーにおける核異性体への遷移確率の検討を行う。

## 7. おわりに

以上、高エネルギー核データ評価 WG の現状について紹介した。上記で紹介した以外

に、短期のタスクフォース的な SWG として、微分レビュー方法検討 SWG( 真木紘一 SWG リーダー ) の活動があった。ここでは、1 ) 微分レビュー・ガイドラインの作成、2 ) レビューに必要な各種ツールの開発・整備 ( EXFOR との比較プロットなど ) に関する検討を行った。検討結果は、各 SWG にて採択され、微分レビューで活用されている。

前の報告書でも書いたが、国内外で、着々と次世代放射線利用施設が計画されている中、これら計画の実現のためには高エネルギー核データ整備が、今後、益々その重要性を増すものと思われる。このためには、評価のための理論的基盤をより強固なものにしていかなければならないのは明白であるが、評価の基本はやはり実験データである。国際的な協力に基づく測定の継続はもとより、国内関係機関の方々のご協力を切に希望するものである。また、ユーザのニーズの現状を的確に把握し、必要な核データを精度良く提供すべく、評価済高エネルギー核データファイル整備の焦点を設定していく必要がある。更に、今後、高エネルギー核データ評価に関する国際協力もその重要性を増すものと思われる。本 WG においても、国内の関係諸機関と連携を保ち、高エネルギー核データファイルを順次公開していく所存である。今後とも、関係各位のご協力をお願いしたい。

#### 参考文献

- [1] 深堀智生 ; 「高エネルギー核データ評価 WG」, 核データニュース, **59**, 75 (1998).
- [2] Fukahori T., Watanabe Y., Yoshizawa N., Maekawa F., Meigo S., Konno C., Yamano N., Konobeyef A.Yu., Chiba S.: “JENDL High Energy File”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Sup. 2**, 25 (2002).
- [3] Sun W., Watanabe Y., Soukhovitskii E.Sh., Iwamoto O., Chiba Y.: “Evaluation of Cross Sections for Neutrons and Protons up to 200 MeV on Silicon Isotopes”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Sup. 2**, 120 (2002).
- [4] Yoshizawa N.: “Evaluations of Neutron and Proton Cross Sections on Fe up to 3 GeV”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Sup. 2**, 172 (2002).
- [5] Kishida N., Murata T., Asami T., Maki K., Fukahori T.: “Present Status of JENDL Photonuclear Data File”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **Sup. 2**, 56 (2002).
- [6] Fukahori T., Chiba S., Shibata K., Ikeda Y., Aruga T., Watanabe Y., Murata T., Yamano N. and Kawai M.; “JENDL PKA/KERMA File for IFMIF Project”, Proc. the Tenth International Symposium on Reactor Dosimetry, Sep.12-17, 1999, Osaka, Japan, Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment, *ASTM STP 1398*, pp.591, Jhon G. Williams, David W. Vehar, Frank H. Ruddy, and David M Gilliam, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2001.

表1 JENDL高エネルギーファイルへの格納予定核種

1 <sup>st</sup> priority (40 nuclides)	<sup>1</sup> H, <sup>12</sup> C, <sup>14</sup> N, <sup>16</sup> O, <sup>27</sup> Al, <sup>50,52-54</sup> Cr, <sup>54,56-58</sup> Fe, <sup>58,60-62,64</sup> Ni, <sup>63,65</sup> Cu, <sup>180,182-184,186</sup> W, <sup>197</sup> Au, <sup>196,198-202,204</sup> Hg, <sup>204,206-208</sup> Pb, <sup>209</sup> Bi, <sup>235,238</sup> U
2 <sup>nd</sup> priority (45 nuclides)	<sup>2</sup> H, <sup>9</sup> Be, <sup>10,11</sup> B, <sup>24-26</sup> Mg, <sup>28-30</sup> Si, <sup>39,41</sup> K, <sup>40,42-44,46,48</sup> Ca, <sup>46-50</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>55</sup> Mn, <sup>59</sup> Co, <sup>90-92,94,96</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>92,94-98,100</sup> Mo, <sup>181</sup> Ta, <sup>238-242</sup> Pu
3 <sup>rd</sup> priority (37 nuclides)	<sup>6,7</sup> Li, <sup>13</sup> C, <sup>19</sup> F, <sup>23</sup> Na, <sup>35,37</sup> Cl, <sup>36,38,40</sup> Ar, <sup>64,66-68,70</sup> Zn, <sup>69,71</sup> Ga, <sup>70,72-74,76</sup> Ge, <sup>75</sup> As, <sup>89</sup> Y, <sup>232</sup> Th, <sup>233,234,236</sup> U, <sup>237</sup> Np, <sup>241,242,242m,243</sup> Am, <sup>243-246</sup> Cm

表2 JENDL高エネルギー関連ファイルの概要

ファイル名	入射粒子及び エネルギー範囲	格納予定核種
JENDL光核反応 データファイル	光子 ≤ 140 MeV	<sup>2</sup> H, <sup>6,7</sup> Li, <sup>9</sup> Be, <sup>10,11</sup> B, <sup>12</sup> C, <sup>14</sup> N, <sup>16</sup> O, <sup>19</sup> F, <sup>23</sup> Na, <sup>24-26</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>28-30</sup> Si, <sup>31</sup> P, <sup>40,48</sup> Ca, <sup>46</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>52</sup> Cr, <sup>55</sup> Mn, <sup>54,56</sup> Fe, <sup>59</sup> Co, <sup>58,60</sup> Ni, <sup>63,65</sup> Cu, <sup>64</sup> Zn, <sup>90</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>92,94,96,98,100</sup> Mo, <sup>133</sup> Cs, <sup>160</sup> Gd, <sup>181</sup> Ta, <sup>182,184,186</sup> W, <sup>197</sup> Au, <sup>206-208</sup> Pb, <sup>209</sup> Bi, <sup>235,238</sup> U, <sup>237</sup> Np
JENDL高エネルギー ファイル (IFMIF用)	中性子 ≤ 50 MeV	<sup>1</sup> H, <sup>6,7</sup> Li, <sup>12</sup> C, <sup>14</sup> N, <sup>16</sup> O, <sup>23</sup> Na, <sup>24-26</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>28-30</sup> Si, <sup>39,41</sup> K, <sup>40,42-44,46,48</sup> Ca, <sup>46-50</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>50,52-54</sup> Cr, <sup>55</sup> Mn, <sup>54,56-58</sup> Fe, <sup>58,60-62,64</sup> Ni, <sup>63,65</sup> Cu, <sup>89</sup> Y, <sup>92,94-98,100</sup> Mo, <sup>182-184,186</sup> W
JENDL PKA/KERMA ファイル	中性子 ≤ 50 MeV	<sup>6,7</sup> Li, <sup>9</sup> Be, <sup>10,11</sup> B, <sup>12</sup> C, <sup>14</sup> N, <sup>16</sup> O, <sup>23</sup> Na, <sup>24-26</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>28-30</sup> Si, <sup>35,37</sup> Cl, <sup>39,41</sup> K, <sup>40,42-44,46,48</sup> Ca, <sup>46-50</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>50,52-54</sup> Cr, <sup>55</sup> Mn, <sup>54,56-58</sup> Fe, <sup>59</sup> Co, <sup>58,60-62,64</sup> Ni, <sup>63,65</sup> Cu, <sup>70,72-74,76</sup> Ge, <sup>90-92,94,96</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>92,94-98,100</sup> Mo, <sup>180,182-184,186</sup> W, <sup>204,206-208</sup> Pb, <sup>209</sup> Bi