

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

(2) FENDL-3 プロジェクトの概要

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

日本原子力研究開発機構

核データ評価研究グループ

国枝 賢

kunieda.satoshi@jaea.go.jp

1. はじめに

2008年、IAEA核データセクションによる研究協力プロジェクト (Coordinated Research Project: CRP) の1つとして、“先進システム—核融合装置用核データライブラリ (Nuclear Data Libraries for Advanced Systems - Fusion Devices)” という課題のCRPが始動した。本CRPは、核融合応用に関連した評価済ライブラリであるFENDL (Fusion Evaluated Nuclear Data Library: 最新版FENDL-2.1) のアップグレードを主たる目的とし、その適用対象をIFMIFやITER以降の次世代DEMO炉まで拡張することにある。本CRPは3年間のプロジェクトとして組織され、2011年に成果がFENDL-3として公開予定である。

以下、FENDLの経緯とFENDL-3の概要を述べ、2008年12月に開催された第1回研究調整会合の内容について報告する。

2. FENDLの経緯

FENDL作成に当たっては、独自に断面積評価作業を行うことはせず、その時点で利用可能である各国の評価済断面積データファイルの中から核種毎に最良のデータを採択する方針でライブラリが編集されてきた。最初のライブラリであるFENDL-1が1995年に公開されて、その後改訂作業を経て、1998年にFENDL-2.0が完成し、ITERの設計に使用された。FENDL-2.0は中性子輸送計算用の汎用ライブラリの他、特殊目的ファイルとして放射化断面積(FENDL/A-2.0)、崩壊特性(FENDL/D-2.0)、ドジメトリ(FENDL/DS-2.0)、核融合反応の荷電粒子断面積(FENDL/C-2.0)から構成されている。各ファイルの詳細についてはHP[1]を参照のこと。その後、さらに中性子輸送計算用の汎用ライブラリの改訂作業が行われ、2004年にFENDL-2.1(現時点での最新版)が完成する。表1に格納され

ている 71 核種と採用された評価済ライブラリの一覧を示す。JENDL からは 25 核種が採用されている。MCNP 計算用に処理された ACE フォーマットのライブラリ (FENDL/MC-2.1) と多群輸送計算用に MATXS と GENDF フォーマットのライブラリ (FENDL/MG-2.1) が準備されている。FENDL-2.1 に関する詳細な情報は HP[2]を参照のこと。

表 1 FENDL-2.1 に格納されている核種と元になる汎用ライブラリ

No.	Library	NMAT	Materials
1	ENDF/B-VI.8 (E6)	40	^2H , ^3H , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B , ^{16}O , ^{19}F , $^{28-30}\text{Si}$, ^{31}P , S , $^{35,37}\text{Cl}$, K , $^{50,52-54}\text{Cr}$, $^{54,57,58}\text{Fe}$, ^{59}Co , $^{61,62,64}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{197}Au , $^{206-208}\text{Pb}$, ^{209}Bi , $^{182-184,186}\text{W}$
2	JENDL-3.3 (J33)	18	^1H , ^3He , ^{23}Na , $^{46-50}\text{Ti}$, ^{55}Mn , $^{92,94-98,100}\text{Mo}$, ^{181}Ta , V
3	JENDL-3.2 (J32)	3	Mg , Ca , Ga
4	JENDL-FF (JFF)	4	^{12}C , ^{14}N , Zr , ^{93}Nb
5	JEFF-3 (EFF) JEFF3	4	^{27}Al , ^{56}Fe , ^{58}Ni , ^{60}Ni
6	BROND-2.1 (BR2)	2	^{15}N , Sn

3. FENDL-3

最初に述べたように、2008 年に新 CRP が組織され、FENDL-3 へ向けたアップグレード作業が開始された。詳細は HP[3]を参照して頂きたい。FENDL-3 に期待される成果を要約すると、以下の 4 項目になる。

- 1) FENDL-2.1 (71 核種に対する 20MeV までの中性子入射反応の核データ) が、主要な最新核データライブラリ (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1, JENDL/HE-2007 等) を用いて更新される。
- 2) 陽子および重陽子反応データも汎用ファイルおよび放射化ファイルに入る。
- 3) IFMIF 設計サイドからの要求に応じるために、入射粒子のエネルギー範囲を 150MeV まで拡張する。
- 4) 設計における誤差評価のために、評価済ライブラリに共分散ファイルも取り入れる。

FENDL-3 の特徴は、IFMIF 設計 (50MeV までの中性子、陽子、重陽子核データが必要) を念頭においた入射粒子の種類とエネルギーの拡張にある。また、4) の共分散ファイルを準備する点も特徴の 1 つである。最終的に、中性子汎用ライブラリ (新たな核種の追加を含む)、荷電粒子汎用ライブラリ (陽子、重陽子)、放射化断面積 (中性子、陽子、重陽子)、および共分散ファイルが作成される予定である。

4. 第1回研究調整会合の概要と FENDL-3 用ライブラリ作成方針

本CRPの第1回研究調整会合(Research Co-ordination Meeting: RCM)がウィーンのIAEA本部にて、2008年12月2日～5日の4日間開催された。参加は、日本、フランス、ドイツ、ハンガリー、イタリア、韓国、オランダ、ルーマニア、ロシア、スロベニア、イギリス、米国、ITER、IAEAの12ヶ国、2国際機関から合計19名であった。図1に参加者の集合写真を示す。本プロジェクトのリーダー(正式名称: Project Scientific Officer)はIAEAのA. Mengoni氏である。日本からは、国枝(原子力機構)と渡辺(九大)が参加し、河野氏(LANL)が米国代表の1人として出席した。第1回RCMの主たる目的は、FENDL-3活動計画を議論し、参加者に対するタスクの分担を決めることであった。



図1 参加者の集合写真

まず、R. Forrest氏(UKAEA, 英国)を議長に選出して、最初の2日間(12/2,3)は、参加者全員が関連した研究活動やFENDL-3へ向けた貢献の可能性についてそれぞれ発表を行った。実験、理論、断面積評価からベンチマークまで多岐に亘る発表であった。本報では、その中からIFMIF用重陽子反応に関連した研究内容のみを抜粋し、後述の5-2節で要約して報告する予定である。なお、全発表のpptファイルやpdfファイルはHP[3]から入手可能である。

3日目以降は各ファイルの作成方針について討議を行った。その結果、更新ならびに作成に向けた基本手順および各参加者の作業分担が合意された。以下、中性子ファイル、陽子・重陽子ファイル、放射化断面積(中性子、陽子、重陽子)ファイルおよび共分散ファイルの作成方針をそれぞれ要約する。

4-1. 中性子ファイル作成方針

- 1) FENDL-2.1 に採択されている汎用ライブラリ (JENDL, ENDF/B, JEFF, BROND) を現 version (ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL/HE-2007, BROND-3) に置き換える。
- 2) もし、高エネルギーデータを含んでなければ、20MeV 以上は JENDL/HE-2007 をマージする。
- 3) 高エネルギー評価データがまったくない核種は、TENDL-2008 (Koning が TALYS 計算で作成したライブラリ [4] のこと。以下の 5-1 節で解説する) を採用する。
- 4) 追加核種の必要性を検討する。例えば、Ag, In, Cd, Hf, Gd (吸収材) 等、その他に IFMIF や ITER 関連で必要な核種が追加核種の候補である。

この作成方針に従って採択予定のライブラリと核種の間係を表 2 に整理する。JENDL/HE-2007 は現時点で 35 核種採用予定である。なお、赤字で記載した核種は 20MeV 以上の断面積データが無いために、上記方針 2) に従って、JENDL/HE-2007 の評価値が採択されることになる。このような核種が全部で 10 核種あるので、これも含めると、JENDL/HE-2007 から 45 核種が初期中性子ファイルとして採用される予定である。また、青字の核種は上記方針 3) に該当する核種で、20MeV 以上の評価値がまったく存在しないために、TENDL-2008 の計算値が採用される予定である。ここで、一言コメント。軽核である ^3H , $^3,4\text{He}$, $^6,7\text{Li}$, ^9Be , $^{10,11}\text{B}$ については、残念ながら 20MeV 以上の評価値および TENDL-2008 の計算値が存在しないという現状がある。これら軽核の評価は、IFMIF 用核データも含め、高エネルギー核データ評価研究で残されている優先度の高い研究課題の 1 つである。

初期ファイル完成後 (2009.4 月末に完成)、ベンチマーク解析等で評価値の吟味、選択がなされ、最終的に FENDL-3 へ採用されるライブラリが核種毎に決まることになる。

表 2 中性子初期ファイルに格納予定の核種と採用予定の汎用ライブラリ

赤字：20MeV 以上の評価値がないために JENDL/HE-2007 の評価値が採用予定の核種 (全部で 10 核種)
 青字：20MeV 以上の評価値がまったく存在しないために、TENDL-2008 が採用される予定の核種。

No.	Library	NMAT	Materials
1	ENDF/B-VII.0	47	$^{1,2,3}\text{H}$, $^{3,4}\text{He}$, $^{6,7}\text{Li}$, ^9Be , $^{10,11}\text{B}$, ^{16}O , ^{19}F , $^{28,29,30}\text{Si}$, ^{31}P , $^{32,33,34,36}\text{S}$, $^{35,37}\text{Cl}$, $^{39,40,41}\text{K}$, $^{50,52,53,54}\text{Cr}$, $^{54,57,58}\text{Fe}$, ^{59}Co , $^{60,61,62,64}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, $^{182,183,184,186}\text{W}$, ^{197}Au , $^{206,207,208}\text{Pb}$, ^{209}Bi
2	JENDL/HE-2007	35 (+10)	^{12}C , ^{14}N , ^{23}Na , $^{24,25,26}\text{Mg}$, $^{40,42,43,44,46,48}\text{Ca}$, $^{46,47,48,49,50}\text{Ti}$, ^{51}V , ^{55}Mn , $^{69,71}\text{Ga}$, $^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$, ^{93}Nb , $^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}$, ^{181}Ta
3	JEFF-3.1	4	^{27}Al , ^{56}Fe , $^{58,60}\text{Ni}$
4	BROND-2	2	^{15}N , $^{\text{nat}}\text{Sn}$

4-2. 陽子・重陽子用ファイル作成方針

陽子、重陽子入射については、重要な核種の選定作業を先行させ、その後、各評価ファイルの比較および妥当性の検討を行う予定である。重陽子の評価済断面データとして、現時点では ENDF/B-VII.0 に軽核 5 核種の R-matrix による評価値がある。具体的には、 $^2,3\text{H}$ (10MeV まで)、 ^3He (1.4MeV まで)、 ^6Li (5MeV まで)、 ^7Li (20MeV まで) であるが、150MeV までの拡張を行う FENDL-3 には不十分な状況にある。そこで、現時点での候補として、理論のみで評価したライブラリである TENDL-2008 があるが、その品質評価をどうするかを検討が必要である。次回研究調整会合 (2010 年予定) で、以上の検討結果が報告され、陽子・重陽子用ファイル作成に向けた具体的な作業が始まる予定である。

4-3. 放射化断面データファイル作成方針

中性子放射化ファイルについては、EAF-2007 (European Activation File library [5]) を初期ファイルとして採用する。陽子および重陽子については、それぞれ、EAF-2007p と FZK の PADF (Proton Activation Data File)、EAF-2007d と TENDL-2008 が候補となり、実験データや IAEA 医療応用ライブラリに対する妥当性の検証を行う予定である。現時点での陽子・重陽子入射反応の重要核種としては、Al, V, Cr, Ni, Fe, Cu, Ta, W が挙げられている。

4-4. 共分散ファイル作成の方針

共分散については、採択したライブラリの中で共分散ファイルがある場合はそれを採用する。そうでなければ、TENDL-2008 の共分散ファイル (^{19}F より重い核種) を採用して、shadow ファイルを作成する方針である。20MeV 以上については、今後、共分散ファイルがどのような形で準備可能であるか調査する予定である。

5. 第 1 回研究調整会合のトピックス 2 題

本章では、第 1 回研究調整会合に関連した 2 つの話題を取り上げて解説する。1 つは、上述のファイル作成方針で何度か出てきた TENDL-2008。もう 1 つは、IFMIF 設計用核データとして重要な重陽子入射反応に関連した研究発表を 3 つ選択して解説する。

5-1. TENDL-2008

TENDL-2008 とは、“Consistent TALYS-based Evaluated Nuclear Data Library including covariance data”の略である。オランダ NRG の Koning と Rochman によって作成され、2008 年 11 月に公表された[4]。汎用核反応モデル計算コード TALYS (ver.1.0)を用いて、 ^{19}F から ^{209}Po までの標的核について、6 種類の入射粒子 (n, p, t, d, ^3He , ^4He) と光子に対する断面積を最大 200MeV まで計算して、それらをファイル化したものである。個々の核種について実験データに基づくパラメータの調整 (デフォルト値の使用) や計算値の規格化

を行っておらず、現在のバージョンは純粋に計算のみによって求めた評価ファイルである。なお、現時点では中性子の最大エネルギーは 20MeV になっており、共分散データが共鳴パラメータ (MF-32)、断面積 (MF-33)、弾性散乱角分布 (MF-34) に与えられている。また、MCNP 計算に使うために ACE フォーマットのライブラリも提供されている。

TENDL-2008 評価の流れは図 2 に示されている。彼等は、評価に使用されたモデル計算コードや ENDF フォーマット処理コードが一旦検証されてその有効性が実証されると、図 2 のスキームに従って ENDF-6 データファイルが自動的に作成可能であり、評価者の知識はずっとコンパクトな方法 (例えば、モデル計算のパラメータ) で保存できると述べている。要するに、計算機の処理能力の向上によって、十分検証された核反応モデルがあれば、ENDF-6 フォーマットの断面積データ (共分散データ含む) ばかりでなく輸送計算用ライブラリまでも許容時間内に広範な質量数範囲に亘り自動生成可能であることを主張している。今後の評価手法 (データベース生産手法?) の 1 つの方向性を示しているとは思いますが、さらに議論を進めることは本報告の範囲を超えているので、ここでは簡単な紹介に留めて別の機会に譲ることにする。

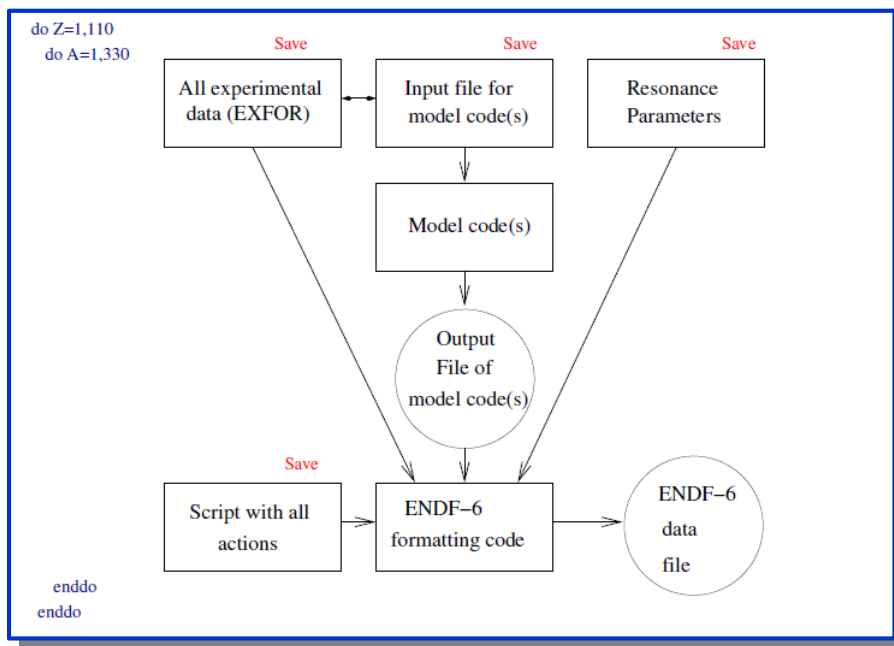


図 2 TENDL-2008 評価に使われた計算の流れ (文献[4]より転載)

5-2. 重陽子入射反応に関連した話題

FENDL-3 の特徴の 1 つとして、入射粒子を重陽子まで拡張したことを述べた。この拡張は、重陽子ビームを液体リチウム標的に照射して大強度中性子を発生する IFMIF プロジェクトに関連している。そこで、本節では 3 つの関連した話題を取り上げて解説する。

なお、本 CRP の HP[3]上に発表に使われた ppt ファイルが公開され入手可能であることを付記しておく。

まず、重陽子入射反応の実験に関連して、F. Tárkányi (ATOMKI, ハンガリー) は、これまで行ってきた陽子・重陽子入射反応に対する放射化断面積測定について報告した。彼等は、世界中の 10 施設の加速器 (東北大 CYRIC と放医研サイクロ含む) を利用して 38 種の金属ターゲットに対して、200MeV 以下のエネルギー領域における陽子・重陽子入射放射化断面積を測定して、合計約 450 の生成核種の断面積を決定した。医療用 RI 製造を目的にしたデータが多いが、IFMIF にも利用可能なデータが多数含まれている。

次に、理論モデルに関する 2 つの研究報告を紹介する。1 つは、C. Kalbach (TUNL, 米国) の仕事で、入射粒子分解反応の現象論的モデルである。重陽子は結合エネルギーが 2.2MeV と小さいために、標的核の核力場やクーロン場の中で分解され易く、分解反応は中性子生成の重要な反応過程である。重陽子分解反応により構成粒子 (中性子と陽子) は前方に強く放出され、入射エネルギーの約半分の放出エネルギーを中心とした幅広いピーク構造を示す特徴がある。Kalbach は、重陽子、 ^3He 、 α 粒子入射反応の実験データに基づいて、中心エネルギー、ピーク幅、角度分布、断面積絶対値の質量数依存性の系統性を調査し、1 つの現象論的モデルを提案している。最終的には、このモデルは前平衡励起子モデル計算 (PRECO コード) へ組み込まれる予定である。

次に、M. Avrigeanu (Horia Hulubei, ルーマニア) の重陽子入射放射化断面積計算について解説する。断面積計算に先立ち、モデル計算に必要な光学ポテンシャル (特に 15MeV 以下の低エネルギー領域に着目) を現象論的に、あるいは現実的な核子核子ポテンシャルに基づく folding モデルを適用して決定した。離散的準位へのストリップング直接反応を DWBA の枠組みで計算し、さらに分解反応やブレークアップ融合反応 (連続状態へのストリップング反応と等価) を現象論的に取り扱う手法を提案し、 ^{27}Al に対する放射化断面積計算へ適用した結果が報告された。TALYS 計算等との比較を示すことで、上述の直接過程の取り扱いの重要性を強調した。

ここで、国内の IFMIF 関連核データ研究活動について補足しておく。実験については、東北大の馬場氏等のグループ[6]が CYRIC で TTY 測定や放射化断面積測定を精力的に行い、落合氏等 (JAEA) のグループ[7]によって TIARA を使った放射化断面積測定がなされた。また、理論解析として、筆者 (YW) 等の九大グループ[8]が重陽子分解反応に着目した CDCC や Glauber モデル解析を行っており、橋本氏等 (JAEA) のグループ[9]は CDCC を完成融合や不完全融合反応へ拡張する試みを続けている。また、村田氏[10]は低エネルギー領域の $d+\text{Li}$ 反応に着目した共鳴解析を行っている。このように、IFMIF 関連の重陽子核データ研究についても我国は高いポテンシャルを有している。

6. まとめ

本報告では、FENDL-3に向けて2008年から始動したIAEA核データセクションによる研究協力プロジェクト(CRP)「先進システムー核融合装置用核データライブラリ」の紹介を行った。本CRPは、FENDL-3を“Beyond ITER”と位置づけ、核データの適用対象をIFMIFやITER以降の次世代DEMO炉まで拡張することを狙っている。そのため、最大入射エネルギーを150MeVまで拡張し、入射粒子も中性子ばかりでなく、陽子や重陽子まで含める計画である。また、設計における誤差評価や感度解析のために共分散ファイルも準備する予定である。現時点で、中性子用初期ファイルにJENDL/HE-2007から45核種採択されており、高エネルギー領域への拡張に伴い、日本からの貢献が期待されている。

次回研究調整会合は2010年核データ国際会議前後に開催が予定されており、それまでの期間、参加者で分担して、初期ファイル作成およびそれを用いたベンチマーク作業等のタスク活動を行っていく計画である。最終成果は、2011年にFENDL-3として公開される予定である。

謝辞

第1回研究調整会合参加に際し、国内における核融合中性子工学研究の現状に関する資料を提供して頂きました今野氏、西谷氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] FENDL-2.0, <http://www-nds.iaea.org/fendl/>
- [2] FENDL-2.1, <http://www-nds.iaea.org/fendl21/>
- [3] FENDL-3, <http://www-nds.iaea.org/fendl3/>
- [4] TENDL2008, <http://www.talys.eu/tendl-2008/>
- [5] R. Forrest, Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology 2007 (2008) pp. 11-16, DOI: 10.1051/ndata: 07713.
- [6] M. Hagiwara et al., J. Nucl. Mater. 329-33 (2004) 218-222; M. Hagiwara et al., Fusion Sci. Technol. 48 (2005) 1320-1328.
- [7] K. Ochiai et al., of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology 2007 (2008) pp. 1011-1014, DOI: 10.1051/ndata: 07663.
- [8] T. Ye et al., Phys. Rev. C 78, 024611 (2008); T. Ye et al., to be submitted to PRC (2009).
- [9] 橋本慎太郎他、日本原子力学会春の大会 G14、東工大、2009年3月23日～25日.
- [10] 村田 徹、日本原子力学会春の大会 G13、東工大、2009年3月23日～25日.