



FENDL-3 第二回会合参加報告

日本原子力研究開発機構

国枝 賢

kunieda.satoshi@jaea.go.jp

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

2010 年 3 月に IAEA が主催する核データ国際協力プロジェクト“Nuclear Data for Advanced Systems – Fusion Devices (FENDL-3)”の第二回技術会合 (@ IAEA 本部) に出席した。各国から原子核反応理論、核データ評価、測定、データ処理及び核融合関連ベンチマーク解析の専門家が集まり、米国 3 名、イギリス 1 名、フランス 2 名、ドイツ 2 名、ロシア 1 名、オランダ 2 名、ハンガリー 1 名、ルーマニア 1 名、スロベニア 1 名、韓国 1 名、IAEA 2 名、日本 2 名、計 19 名の参加があった。また LANL の河野氏が米国代表の一人として参加されていた。今回の会合では前回のキックオフミーティング (2008 年 12 月) で各国の代表者に割り当てられたタスクの進捗状況や各国・各機関の核データに関連する最新の研究報告があり、今後の活動計画に関して議論が行われた。なお会議の議事録や参加者の発表資料は IAEA 核データセクション (IAEA-NDS) のホームページ

<http://www-nds.iaea.org/fendl3/index.html>

にて閲覧可能である。

プロジェクトの概要及び前回の会合

先ずこの国際共同プロジェクトに関して、活動目的と概要及びこれまでの合意事項や活動状況を簡単に説明したい。このプロジェクトの目的は核融合技術のための世界共通核データライブラリーを構築することである。現在の最新版は共鳴領域から 20 MeV までの中性子入射断面積を格納したライブラリー FENDL-2.1 であり、ブランケットやその他の構造材として重要な 71 核種に対するデータが収められている。今回のプロジェクトの主な目的は ITER 以降の IFMIF や DEMO 炉の開発・設計で必要となる高エネルギー核デ

ータ（上限 150 MeV）、荷電粒子（陽子と重陽子）入射データ、放射化断面積及び共分散データを含めた評価済ライブラリーの整備を行うことである。また 20 MeV 以下の中性子断面積の更新も行われる予定である。最終的には原則として核種あるいはエネルギー領域毎に各国の核データのいずれかが採用されることになっている。2008 年のキックオフミーティングでは中性子入射データに関してスタータライブラリー（FENDL-3/SLIB）を作ることが合意され、その作成方法に関して話し合いを行った。作成ルールは以下の通りである。

- 既存のデータを最新版で更新する。例えば FENDL-2.1 で ENDF/B-VI.8 から採用されていたデータについては ENDF/B-VII.0 に置き換える。JENDL-3.3 から採用されていたデータについては JENDL/HE-2007 に置き換える等。
- ENDF、JEFF の最新版で高エネルギーデータが無い核種の場合は JENDL/HE-2007 の 20 MeV 以上のデータをそれらとマージさせる。JENDL/HE-2007 にも格納されていない核種については TENDL（後述）をマージする。
- IAEA スタンダードライブラリーを優先的に採用する。
- アイソトープ毎に評価されたデータを優先的に採用する。

この時点で JENDL/HE-2007 から 20 MeV 以上の部分的な採用を含み、88 核種中 45 核種が採用されることになった。また、今後 FENDL-3/SLIB の処理やベンチマーク解析、中性子吸収材等、新たに追加すべき核種の検討を行うことが合意され、タスクが担当者に割り振られた。陽子と重陽子入射のデータに関してはそのリソースを調査、放射化断面積は EAF の最新版を採用、共分散については既存の評価済みデータや Shadow Library として TENDL が候補に挙がった程度であった。この中で日本側は FENDL-3/SLIB の編集作業を担当することになった。これはデータの抽出やファイルのマージを行って FENDL-3/SLIB を最終的に用意する作業である。ちなみに既に 2009 年 3 月に作業を終えて IAEA-NDS へ送付している。

今回の参加者の主な報告

ITER 機構の M. Loughlin 氏より ITER の設計・建設計画に関して報告があった。同氏は正式なメンバーではなくオブザーバーとして特別に招聘されている。現場の設計者からの意見や要望を受け入れようという IAEA-NDS の意図が感じられた。断面積の精度に関する要求は無かったが、FENDL に新たに追加すべき核種を 90 核種ほどリストアップしていた。ITER では様々な物理パラメータを測定するために測定機器が多数あるようで、それらの機器にはマイナーな核種を多く使用しているようである。中には Re のように各国のいずれのライブラリーにも格納されていないような核種のデータまで挙げられてい

た。具体的な核種についてはホームページを参照して頂きたい。

米国 Wisconsin 大学の M. Sawan 氏より簡単な ITER 模擬体系や FNG 積分実験によるベンチマーク解析結果の報告があった。FENDL-2.1 で ENDF/B-VI から採用されていたデータを ENDF/B-VII.0 に置き換えた計算結果は、FENDL-2.1 に基づく計算結果とほぼ同様の結果となったが、FENDL-3/SLIB を用いると特に模擬体系内マグネットにおける中性子束やガンマ線束が非現実的に大きくなることが報告された。FNG 積分実験値とは比較的良好な一致を見せていたが、やはり FENDL-2.1 とは異なる傾向を示していた。この積分計算では 20 MeV 以上のデータは実質使われないはずなので、FENDL-2.1 に基づく計算結果とあまり変わらないはずである。この問題に関しては実は事前に筆者（国枝）に連絡があり、2009 年の CSWEG でも報告がなされた。またその後もメールベースで議論した経緯がある。データ編集における自分のミスのせいではないかと思い、暫くの間心中穏やかではなかった。その後、スロベニアの A. Trkov 氏の調査で、結局 NJOY のスペクトルデータ内挿におけるバグ（20 MeV でデータの格納形式が変わる場合に問題が出る可能性があるらしい）が見つかり、積分計算における FENDL-3/SLIB の問題はそれが原因であることが判った。M. Sawan 氏の報告はこのような内容であった。

スロベニアの A. Trkov 氏より Jozef Stefan Institute (JSI) における FENDL-3 関連の活動報告が行われた。FENDL-3/SLIB に基づく輸送計算用ライブラリーの作成に関する報告があり、ACE ファイル（モンテカルロ輸送計算用の処理済みデータ）の作成は全て終了したとのことである。「MATXS（決定論輸送計算用の処理済みデータ）形式のデータが必要か？」との疑問を投げかけていたが、設計者側からはそれほど需要は無さそうであった。また 20 MeV におけるデータ不連続の問題を指摘され、処理過程でやや気になった様子であった。これは各国のいずれのライブラリーでも大なり小なり存在する問題である（もちろん JENDL/HE も例外ではなく、今後解決すべき課題である）。またタングステン同位体に対する核データ評価（共分散を含む）やそのベンチマーク計算の話が少しあり、広く活動している様子が窺えた。

ドイツ Karlsruhe Institute of Technology (KIT) の U. Fischer 氏より IFMIF テストセルモジュールに対する FENDL-3/SLIB を用いた積分計算結果が報告された。もちろん実験データは無いため、全て核データに基づくモンテカルロシュミレーションの結果である。D-Li 中性子源近傍の各テストセル（Eurofer + NaK）における中性子束やガンマ線束、核発熱やガス生成量を計算し、これまで使われていた IFMIF Standard Library（主に LA150 をベースに構築した核データライブラリー）に基づく計算結果との比較を示していた。中性子束やガンマ線束に関しては特に顕著な差異は見られなかったが、発熱量やガス生

成量に関しては 10 %あるいはそれ以上の差異が見られるケースもあった。

ドイツ Karlsruhe Institute of Technology (KIT) の P. Pereslavtsev 氏より KIT における核データ評価活動について報告があった。同氏によると、最近 200 MeV までの中性子に対する Cr 同位体の核データ評価を行ったそうである。Geometry Dependent Hybrid (GDH) Model が組み込まれた TALYS コードの使用、複合粒子光学ポテンシャルや準位密度パラメータの変更、ORNL の最新の共鳴パラメータ（共分散データを含む）の採用、またモンテカルロ法により連続領域の共分散を導出した等の話があった。測定データとの比較によりオリジナル TALYS の計算結果よりも劇的に良い結果が得られていることは判ったが、モデルやパラメータの変更がどのように効いているのかについて詳細は述べられなかった。最後に OKTAVIAN ベンチマーク計算の結果が示され、この評価データを用いると JEFF-3.1.1 よりもパフォーマンスが向上することが報告された。その他のライブラリーとの比較も気になるところである。

オランダ NRG の A. Koning 氏より TENDL (Talys-based Evaluated Nuclear Data Library) の概要が報告された。これは ENDF フォーマット形式で格納された TALYS コードによる計算値である。モデルパラメータのチューニングが十分になされていないため各国のライブラリーに比べて質は劣るが、不安定核を含む膨大な原子核に対するデータであり、主要な反応はもちろん、二重断面積やガンマ線生成データ、モンテカルロ法により推定された共分散データまでも格納しており、いわゆる完備性を備えたライブラリーとなっている。さらには 200 MeV までの高エネルギーデータ、質はさて置き重陽子やアルファ粒子等の軽イオン入射の断面積までも格納している。フレームワークとしては以前から大変魅力的に感じていた。また今後の核データライブラリーそのものの在り方に問題を投げかけているようにも思う。FENDL-3 では、ある核種やエネルギー領域において各国のいずれのライブラリーにもデータ格納されていない場合は TENDL を採用せざるを得ない。

ルーマニアの M. Avrigeanu 女史より Al と Cu に対する重陽子入射断面積の理論計算について報告があった。Double-Folding 法に基づく微視的光学ポテンシャル及び現象論的なポテンシャルを求め、弾性散乱微分断面積に関して実験データ及び Talys による計算値と比較を行っていた。結果を見る限り Talys の計算値よりも圧倒的に良く測定データを再現していた。また経験的な Break-up モデル、前平衡及び統計モデルを導入して幾つかの放射化断面積を計算し、実験データとの比較を行っていた。Taly 計算値の問題を指摘し、同女史の方法の優位性が述べられた。

河野氏より LANL における核データ評価の現状と今後の予定が報告された。軽核 (^3H 、 ^6Li 、 ^9Be 、 ^{16}O)、中重核及びアクチノイド核種という幅広い核種を担当・再評価中である。軽核評価 (^9Be) では近年の RPI の測定データを考慮した R-Matrix 解析の結果が報告され、ENDF/B-VII.0 との違いが示された。中重核の評価では構造材 Ti、V、 ^{58}Ni 、 ^{56}Fe 、 $^{63,65}\text{Cu}$ 、 ^{89}Y に対する部分改訂の話があった。 ^{58}Ni 、 ^{56}Fe については近年 LANSCE で測定されたデータを再現するようにアルファ粒子生成断面積を再評価していた。 ^{89}Y に関しては、中性子捕獲断面積の平均値が 100 keV 前後（分離共鳴領域）で測定値を大幅に過小評価する問題を考察していた。最終的には共鳴エネルギー上限を下げる方向で対処する模様である。最後に軽核に対する陽子入射ライブラリーのレビュー報告があった。JENDL/HE では評価が遅れているため、ほぼ ENDF/B-VII.0 と TENDL との比較結果であった。当然であるが、数 MeV 領域では R-Matrix 解析値（ENDF/B-VII.0）が尤もらしい断面積を与えていた。

なお日本側の報告として、渡辺が JENDL/HE-2007 のベンチマーク解析結果について総括し、最近の積分実験に対するデータのパフォーマンスを示した。また国枝は当時完成間近であった JENDL-4 の概要を説明した。共鳴パラメータに関する質問等があったが、参加者は公開に向けたタイムスケジュールが一番気になる様子であった。

今後の活動方針

会議後半では各代表者の報告に基づいて今後の活動方針が話し合われた。まず第二スタータ中性子ライブラリーを作成することが合意され、作成方法を議論した。主要な核種に関しては第一 FENDL-3/SLIB をほぼ引き継ぐ形となり、レビュー・ベンチマーク計算が引き続き行われる。また ITER や IFMIF 設計サイドから提案があった中性子吸収材（Ag、Cd、In、Gd、Hf）や個々のモジュールに使われるマイナーな原子核（計約 90 核種）に対するデータを新たに整備することが合意され、各国のライブラリーからデータを採用することになった。20 MeV 以下のデータに関しては今後のレビュー結果を受けて ENDF/B-VII.0、JEFF-3.1.1、JENDL-4.0 から採用される。20 MeV 以上の高エネルギーデータに対しては JENDL/HE-2007（データが無い場合は TENDL）から採用する。ただし 20 MeV 以下を JENDL-4 で置き換えることが採用の条件となった。なお今回初めてアクチノイド原子核である ^{232}Th と $^{235,238}\text{U}$ が加えられることになった。微量の ^{232}Th がコンクリート材に含まれており、また $^{235,238}\text{U}$ は中性子束の計測（Fission Chamber）に使われるからである。中性子ライブラリーにおける最終的な格納核種数は約 180 となる予定である。共分散データについては前回の合意と同じく Shadow Library として TENDL を採用する。陽子入射データに関しては JENDL/HE-2007、ENDF/B-VII.0 及び韓国 KAERI で評価されたデータ（Al、Si、Fe、Mo）をレビュー・比較検討し核種毎に三者から選択する。データが完全に無い核種に対しては TENDL である。また重陽子入射データに関しては全て

TENDL が採用される。放射化断面積については EAF-2010 が採用される見込みである。

なお日本側は前回と同様、中性子データライブラリーの整備・編集を主に担当することになった。結構手間のかかる作業なのだが IAEA-NDS のセクションリーダー R. Forrest 氏に煽てられて仕方なく引き受けてしまった・・・。今後のスケジュールは、2011 年 4 月までに ENDF 形式のライブラリー (FENDL-3/T) を完成させ、5 月頃に TV 会議でその確認作業を行い、その後 ACE ファイル作成とベンチマークを行って、2011 年 10～11 月に最終会合が開催される予定である。



会議参加者 (IAEA 会議室にて撮影)

謝辞

FNS ベンチマーク測定に対する積分計算を行い、結果を提供して下さった JAEA の今野氏に感謝いたします。また JENDL/HE-2007 のデータ処理・ベンチマーク計算を行って下さった清水建設の小迫氏、ベンチマーク関連の有意な資料を提供して下さった JAEA の岩元洋介氏、KEK の萩原氏に感謝いたします。滞在期間中は LANL の河野氏、IAEA の大塚氏から多くの点でフォロー頂きました。両氏に改めて感謝いたします。