

NEMEA7/CIELO 会議参加報告

ロスアラモス国立研究所 理論部門

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

1. 緒言

今年 5 月に Paris の OECD/NEA で開催された WPEC 会合に於いて、Subgroup 40, "Collaborative International Evaluated Library Organization (CIELO) Pilot Project"の設置が正式に決定された。CIELO (スペイン語/イタリア語で「空」の意味) は、JENDL, ENDF, JEFF, CENDL 等各国・地域で纏められている評価済み核データライブラリを国際的な協力で作成してみようというパイロットプロジェクトである。各国が何十年にもわたって開発してきた核データライブラリを単純に一本化するのは勿論無理な話であり、このプロジェクトの第一段階として、WPEC の下、限られた核種を標的としてライブラリ開発を実際に行い、まずは経験を積み上げてみようという位置づけとなる。Subgroup 40 では、H-1, O-16, Fe-56, U-235, 238, Pu-239 の主要重核を含む 6 核種を取り上げている。今回 Geel にて開催された NEMEA7/CIELO はそのキックオフミーティングであり、それぞれの核種に対する評価の現状を把握し作業プランを確認することが主な目的である。さらに主要核データライブラリの代表を招き、それぞれのライブラリが CIELO をどのような立場で見ているのかの意見交換を行った。なお NEMEA (Nuclear Measurements, Evaluations and Applications) は本来ヨーロッパにおける核データ関連のワークショップシリーズであるが、今回は主催者の一人 A. Plompen の提案によりそこに便乗する形で、NEA と LANL の共催の元に CIELO ワークショップを開催させて頂いた。なお全ての講演スライドが、NEA の Web サイトにて公開されている。

<https://www.oecd-nea.org/science/wpec/nemea7/topics.html>



Photo 1: 霧で霞んだ IRMM のキャンパスの中の会議場

2. 核種評価の現状と課題

NEMEA7の会合は11月5日～8日の4日間というやや短いスケジュールであったため、議論がそれないように主催者側（A. Plompen, E. Dupont, M. Chadwick, 河野俊彦）で講演者並びに題目をあらかじめ調整した。趣旨にそぐわない論文には辞退して頂いたものもある。CIELO ではそれぞれの核に対して評価責任者を割り当てており、その責任者による核種評価の現状とプラン、問題点の洗い出しを中心に会合が進められた。さらに各ライブラリ代表者からの CIELO に対する一般的な意見を伺った。以下に個々の核種について評価チームの紹介並びに NEMEA7 での議論を纏める。

2.1 H-1

IAEA の標準断面積として評価された G. Hale の R 行列計算が、全てのライブラリで採用されている。他に選択肢のない中でこの評価値を CIELO で議論する意味はあまりないが、全ての基本となる断面積でもあり CIELO に含まれている。IAEA は最新の標準断面積を数年以内に公開することを目標にしており、CIELO が最も早くこのファイル公開できる場となる。IAEA の標準断面積には(n,p)散乱のみが与えられ、R 行列で得られた捕獲断面積は含まれない（但し、IAEA の次期標準断面積がどのような形で公開されるかは未定）。Hale による新しい評価値には、20MeV 以上の高エネルギーデータが追加される予定である。

2.2 O-16

これも主に R 行列による評価であるが、評価に用いられる実験データの矛盾並びに R 行列理論との整合性が問題になっている。共鳴理論にはユニタリティによる強い物理制約があり、全てのチャンネルを実験データに合うように自由に変化させることはできない。G. Hale と国枝賢はそれぞれ独自の R 行列計算の結果から、一部の実験データに大きな規格化因子が必要であることを示している。他方、Plompen は測定の論文を注意深く調査し、それほど大きな再規格化には無理があると結論づけている。CIELO の酸素評価の責任者は国枝であるが、実験者の立場から参加する Plompen との連名となっている。

2.3 Fe-56

L. Leal による新しい共鳴パラメータ評価が進行中である。共鳴領域は非弾性散乱の閾エネルギー 850keV より高い 2MeV まで拡張されている。現在この共鳴パラメータのテストが ORNL によって行われているが、問題がなければそのまま CIELO に採用されることになる。

MeV 領域の断面積評価は M. Herman を中心とするグループによって評価が行われる予定であり、当然 EMPIRE による評価となる。実験データも比較的豊富であり、既存ファイルも大体似通った評価値を与えているので、さほど大きな変化はないであろう。議論の一つに、実験データに見られる断面積の揺らぎをどこまで追従するかというのがあった。JEFF ではかなり高いエネルギーまで非弾性散乱断面積測定データの揺らぎを、データをトレースする形で取り込んでいるが、本当に存在する揺らぎなのか、実験上の変動なのか自明ではない。少々やり過ぎの感があるのは否めない。

2.4 主要重核

U-235, 238, Pu-239 評価の担当者は、高速領域では P. Romain (U-235) , R. Capote, 岩本修 (U-238) , 河野俊彦 (Pu-239) と割り振られているものの、他の核種ほど厳密には考えておらず、互いに協力しつつ作業を進めていく。なぜなら、例えば即発核分裂中性子スペクトルや変形核に対する統計モデル計算のように、全重核に共通する話題が多いためである。なお核分裂スペクトル評価は IAEA の CRP として進行中であり、Capote と P. Talou が対応する。おそらくは Madland-Nix モデルによる計算値が提供されるであろう。

全 3 核種に最新の共鳴パラメータを与えるため、評価値としては比較的野心的な物となるが、一方で積分計算に対する性能は未知数である。Pu-239 の共鳴パラメータは WPEC/Subgroup 34 で ORNL/CEA Cadarache が評価したもの、U-235 は WPEC/Subgroup 29 の成果に基づき LANL 及び RPI での中性子捕獲断面積測定値を追加したもの、そして U-238 は IRMM の測定並びに REFIT による解析。ただしこれらの共鳴パラメータが実際に採用されるかどうかの最終的な決定はなされていない。

模型計算に関する問題点としては、Plompen, Capote, 河野が纏めた IAEA のレポート [INDC(NDS)-597 (2012)]が詳しい。非弾性散乱断面積のような直接測定できないものの評価は計算に頼らざるを得ないが、評価値に大きな差を生む原因ともなる。他方、ベンチマークテストの結果には断面積の大きな差が見えてこない場合があり、明らかにどこかで差異が相殺されていることが分かる。有名な例であるが、Fig. 1 に各ライブラリが与えている Pu-239 の全非弾性散乱断面積の比較を示す。100keV 領域で JEFF と ENDF に大きな違いが見られるにも関わらず、両者とも Jezebel の実効増倍率 1.0 を与える。

なおこれら核種の核分裂断面積は、IAEA における標準断面積評価の対象であり、これらも CIELO に取り込まれるであろう。JENDL-4 の核分裂断面積評価は大塚直彦による独自の同時評価であるが、評価に用いることができる実験データは自ずと限られており、両者の差は小さいので問題は無いと考えられる。

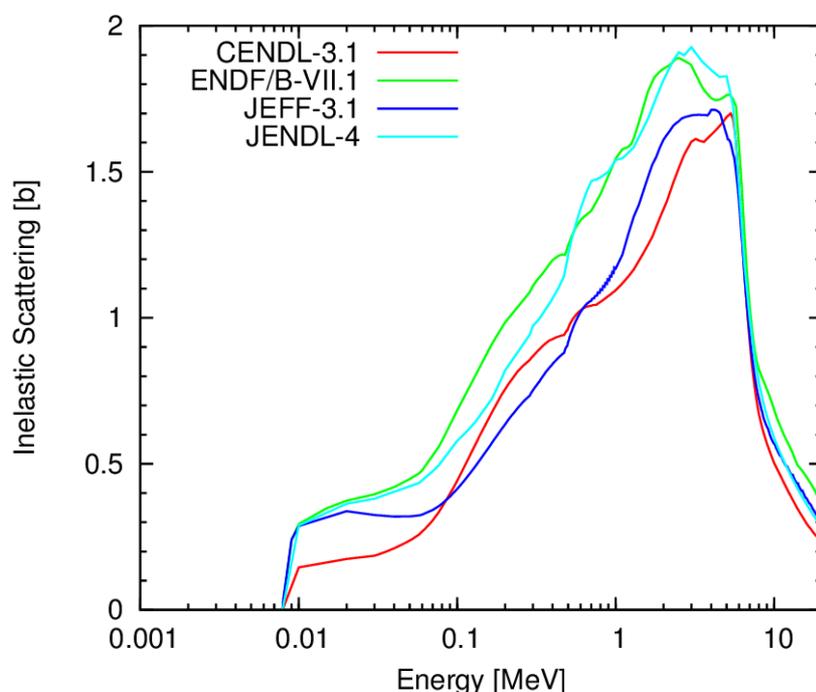


Fig. 1: 各ライブラリにおける Pu-239 全非弾性散乱断面積の比較

3. 国際核データライブラリについて

「国際統一ファイル」の考え自体は古く、JENDL-3, ENDF/B-VI, JEFF-2 が出揃った 90 年代には、既にそのようなアイデアが語られていた。そもそもユーザ側からも、複数のライブラリが存在することによる不便さを訴える声がある。しかしライブラリ統一を実現するには多くのハードルを乗り越える必要があり、長らく実際のプロジェクトとして

議論されるには至らなかった。ファイル統合の困難さは、IAEA が作成している核融合用データライブラリ FENDL からも理解できると思う。FENDL は言わば寄せ集めのライブラリであるが、国際機関によるお墨付きが与えられるとなれば、自国の評価ファイルが少しでも多く採用されたいという力学が研究者間に働く。

複数の核データライブラリが平行して開発されるに至った原因のひとつに、ENDF/B-V の非公開決定がある。日本は独自のライブラリ JENDL を開発し、OECD では「統一ファイル」としての JEF (Joint Evaluated File) 開発を決定した。今日では JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File) は欧州のライブラリと認識されることが普通であるが、これはあくまで OECD のファイルである。日本は OECD 国であるものの、JEF 開始当初に独自路線を進むことを決定し、JEF には参加しなかった（但し JEF-1, 2 には JENDL からのファイルが多く含まれるし、作成そのものに関わられた日本の方々もいる）。

JENDL-4, ENDF/B-VII, JEFF-3 が出揃った現在、枝葉末節の不具合を除けば、どのファイルを使っても実用上さほど変わらない状況となっている。但しあくまで核分裂エネルギー利用について述べている。また核データの評価手法そのものも落ち着いてきた感がある。専門家の知識と経験による微妙な数字操作は稀になり、既存の共鳴パラメータに統計模型計算を追加というスタイルが主流である（軽核を除く）。その統計模型計算も、CCONE, POD, CoH₃, EMPIRE, TALYS どれを使ってもさほど変わらない数値が得られるであろう。評価手法が確立されている現在、核データのような公開された情報を各国で独自に作成しているのは労力の無駄であると指摘されても仕方ない。

一方で評価ライブラリを手元で管理する最大の利点は、その自由度にある。ライブラリは本来利用者のものでなくてはならず、各国の核データ利用者にはライブラリに対する独自の要求が存在しうる。例えば JEFF では遅発中性子群を 8 群に拡張しているが、JENDL と ENDF では 6 群のままにしているのもユーザからの要望によるものである。全体を統合するとなると、このような利用者の要望をどこが受けるのか、それを決定するのは誰かといった問題も解決していかなければならない。この司令塔問題は既に深堀によって指摘されており、現状では NEA のパイロットプロジェクトとして進行しているものの、関係諸国全てが OECD に加盟している訳ではない。また NEA は JEFF も抱えている。

核データライブラリそのものは無償で提供されているが、その開発費用はゼロではない。各国は其々別の予算の中から核データ評価を行っており、統一ファイルに対する最大の懸念は、その予算を失いかねないというものである。これは全ライブラリに共通であり、慎重に対応していく必要がある。各ライブラリが短期的に国際ファイルに統合されることはないということを、念頭に置くべきであろう。現在 CIELO に含まれるのは 6 核種のみであり、評価済み核データライブラリとしての実用性はない。CIELO が目指しているものは、最新の実験データや核理論・統計理論の知識の保管庫 (Repository) である。新しい共鳴パラメータも CIELO のプロジェクトを通じ、他のライブラリよりも先に

利用できる可能性が高い。核データライブラリは、全体のバランスの上に性能が成り立っているものであり、CIELO で作成された重核ファイルをそのまま ENDF や JENDL に差し替えても上手く行く保証は全くない。しかし崩れたバランスの中に、個々のファイルの精度向上のヒントが見えてくるはずである。

国際協調の元にファイルを作成する大きな利点は、局在する知識を共有できる点にもある。上の章で NEMEA7 での議論を纏めたが、このような活発な議論による情報を単独のライブラリ開発で得るのは難しい。限定的ながらも WPEC/Subgroup がそのような情報共有の場を提供しているが、CIELO はこれを拡大したものともいえる。NEA のメーリングリストを用いての議論が行われているが、CIELO 発足当初から重視しているのは、実際に評価者が会合を行うことである。当然ながら参加者に旅費等の負担を強いることになるが、顔が見える議論ほど有意義かつ効率的なものはない。5 月の WPEC に加え、秋にもう一回開催できれば理想的である。

4. 補遺

硬い話が続いたので、最後に少々力を抜いたベルギーの旅をお届けする。今回の会議の日本人参加者は自分を含めて 4 名であったが、おもしろいことに全員九州大学出身である。もちろん他国参加者、特にフランス人グループでは同窓生同士を見かけたが、九大は最大学閥であったかもしれない。だからといって何らかの影響力を行使できるものではない。



Photo 2: Hotel Watermolen, Kasterlee

IRMM を訪問するのは二度目で、最初に滞在したときの足の便の悪さに懲りて、今回は空港からレンタカーで Geel に移動した。実際には Geel ではなく、Kasterlee という田舎町にあるレストラン付きの小さなホテルに宿泊した。ほとんどの参加者は IRMM が用意した Geel 市内のホテルに泊まっていたようだが、DOE の出張手続きを前倒しで行う必要があったため、Chadwick と二人、先に別のホテルに予約を入れてしまったのである。他の参加者との After Five を楽しむことはできなかったが、ホテルのレストランはこの地域でトップクラスとのことで、なんと贅沢な夕食を楽しむことができた。男二人でのディナーには少々難があるが、飲み食いしてそのまま部屋に戻れるのがありがたい。この時期のベルギーは雨続きで、楽しみといえば食事と地ビールくらいなものである。

ホテルから IRMM まで車で 15 分程度。入りロケット横の窓口でバッジを貰い、それをゲートのセンサーに当てるとバーが上がって車で入れる仕組みである。どこかの研究所とは違い、簡単に入れるものだと油断していたら、即ガードに制止された。車を脇に避け、誰かエスコートが来るまで待てとの指示。やはり外国人には厳しいのかなと思っていたら、翌日は勝手に行けと言われた。昨日の指示は、単に所内で迷わないようにとの配慮だったのか。

会議夕食会のレストランへの移動も、通常の参加者にはバスが用意されたが、こちらは車を持っている手前、自力でたどり着く必要がある。しかも二人のうちどちらかが運転手、つまりアルコール無しのディナーとなる。幸いこの日の晩は Chadwick が運転手を買って出してくれたので、私は思う存分飲むことができた。彼は飲んでいないはずである。



Photo 3: ディナー会場にて、深堀氏が用意していた折り紙を披露

でも別テーブルだったので、詳細は不明である。

帰国のフライトが土曜日午前中だったので、金曜日午後のうちに **Brussels** まで移動しておいた。雨と霧の中、大型トレーラーを何台も追い越しながら高速道路を飛ばす。**New Mexico** ではありえない道路状況での運転であるが、自分自身は日本での運転で慣れているので何のことはない。ただ気のせいかな、後部座席に座っていた **Hale** 夫妻の会話が、高速に乗ってから途切れがちになっていたように思う。市内に入ってから渋滞は凄まじく、至る所工事で分断され、ナビが「そこを左折」と言うも右折しかできない状況だらけである。何度もナビの指示に背き、大通りの交通が信号で一瞬途切れたタイミングを見計らったの U ターンを繰り返し、ようやくホテルの駐車場入り口が見えたら、一方通行で進入禁止。日本国内を運転している気分であった。 (文中敬称略)