

## 会議のトピックス(II)

### WONDER2006 に参加して

日本原子力研究開発機構

原田 秀郎

harada.hideo@jaea.go.jp

米国ロスアラモス研究所

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

京都大学原子炉実験所

堀 順一

hori@rri.kyoto-u.ac.jp

原子炉応用のための核データ評価に関する第1回国際ワークショップ(WONDER2006: Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor applications)は、2006年10月9日より11日までの3日間にわたり、CEAのカダラッシュ及びNEAの共催により、フランスカダラッシュ研究所からバスで数分のところに位置するカダラッシュ城で開催された。参加者は、約60名であり、内訳はフランス24名、米国11名、ベルギー6名、ドイツ4名、ブルガリア4名、イギリス3名、日本2名、国際機関NEA2名、ロシア、ハンガリー、オランダ、ルーマニアから各1名ずつの参加であった。

右の写真が丘の上に立つカダラッシュ城である。ここカダラッシュ研究所へは、エクサン・プロバンスの町から主催者が3日間にわたり準備してくれた専用のバスに乗り、特徴ある岩山の風景を眺めつつ参加した研究者と話し込んでいるとすぐに(約50分です)到着する。このサイトはITERの建設も予定されているところであ



り、周りに研究所以外の建物は全く見当たらず、研究に専念するにはもってこいの風光明媚な場所である。

ワークショップでは、41 件の口頭発表と 6 件のポスター発表があった。1 日目は、核データ測定に関する口頭発表が 12 件、2 日目は、核データ理論及び評価に関する口頭発表が 15 件、3 日目は、核データ評価用コード及び核データ誤差評価コードに関する口頭発表が、14 件あった。発表のほとんどは 20 分発表で 5 分の質問という形式であったが、2 時間程度毎に 30 分のコーヒーブレイクが用意されており、必要な議論はここで行うことができた。昼食は必然的に全員カダラッシュ城のレストランで取ることとなるため、ここでも情報交換ができるように配慮されていた。60 名規模の会議は情報交換をするにはきわめて効率のよい規模のものであった。

核データ測定のセッションでは、 $\text{Np-237}$  の熱中性子捕獲断面積が 1 つの大きな話題となった。CEA サクレ研究所の Letourneau が、グルノーブルの高束中性子炉 ILL を用いておこなった最近の結果として  $180 \pm 5$  バーンを報告する一方、JAEA の原田（著者の一人）は、京大炉を用いて行った最近の結果として  $169 \pm 4$  バーンを報告した。従来の核データ評価値間に存在した 181 バーンと 162 バーンという大きな差は解消されたものの、放射性核種の熱中性子捕獲断面積の測定は困難なことが参加者の間で認識された。熱中性子捕獲断面積は、エネルギーの高い中性子捕獲断面積の規格化にも利用される重要なものであり、エネルギーの高い領域を測定した米国ロスアラモス研究所 Ullmann や、 $\text{Np}$  の評価にかかわっている米国ロスアラモス研究所 Kawano（著者の一人）及び CEA の Noguere などの関心を集めた。発表後、測定データ間の差について、Letourneau らと議論したがその原因は明らかとならなかったため、今後メール等で情報交換を行うこととした。

核データの測定では、この他に、セルン研究所やロスアラモス研究所で行われているプロジェクト研究の進捗がレビューされた。米国の Rensselaer Polytechnic Institute の電子線加速器施設が核データ測定のために設備更新されたことは新しい動向である。また、欧州の若手研究者より飛行時間測定法による中性子捕獲断面積測定におけるバックグラウンドの問題点や解析手法の改善に関する詳細な研究が多く報告された。本分野の世界的権威である Kaeppler は、飛行時間測定法と放射化法による断面積測定データの相互確認が信頼性の確保のために有効であることを指摘した。

理論や評価に関して手法という観点からは新しい話題は少なかったようである。共鳴領域の理論は何十年前前から議論されており、新しい視点からの研究というのが難しいのが一つの理由であろう。それを代弁して余りあるのが、ブルガリアの Lukyanov による R-matrix の講演だった。氏は "Multilevel Parameterization of Resonance Neutron Cross Sections" という講演タイトルだけのスライドを表示したまま、40 年以上にわたる共鳴公

式の歴史を得々と紹介していた。なお氏の理論は Adler-Adler を拡張したもののようなものであった。

共鳴理論そのものの話題としては、Saclay の Ribon が厳密な R-matrix と Reich-Moore (RM)、MLBW の近似を比較して、その妥当性を議論した。RM と R-matrix の差異は非常に小さく、この近似の良さを再確認した形となった。Ribon は BWMN という名称を用いておりやや混乱したが、これは Breit-Wigner Multi-Niveaux の略で multi-level のフランス版だそうである。

非分離領域の理論では、主に 2 つのアプローチがあり、強度関数や平均共鳴幅等の非分離共鳴パラメータを用いて断面積を表現するものと、光学模型と統計模型で断面積を計算する方法である。ブルガリアの Koyumdjieva は、非分離共鳴パラメータの中に周期的な共鳴を仮定することで非分離領域の平均断面積の解析解を求める方法を提案した。非常に数式密度の高い講演であったが、非分離パラメータから断面積を出したいなら NJOY などを走らせれば済むことだし、なぜそこまで解析解に拘るのか、筆者 (T.K.) には今ひとつ理解できなかった。一方、このモデルでは、サンプルの透過実験に利用可能な共鳴ピーク間の干渉を考慮した解析モデルを提供しており、今後大強度の中性子束が J-PARC などで利用可能になった際、厚いサンプルを用いた透過実験により新たな研究が展開できるかもしれない (H.H.)。

それとは対照的に、Lynn は正攻法で非分離領域での核分裂断面積を計算し、アクチニドの断面積実験値が再現できることを示していた。また、Froehner も正統的な非分離領域の理論を俯瞰した後、揺らぎの断面積を求める Moldauer の理論、及び GOE を用いた三重積分の方法を紹介している。この GOE の計算は、今では比較的容易にできるようになったが、計算値は Moldauer での結果とほとんど変わらないことが知られており、実際の評価では Moldauer で十分であるということの理論的裏付けにもなっている。

光学模型+統計模型での非分離領域の評価の話題としては、Sirakov が光学模型を用いて非分離パラメータのエネルギー依存性を求める方法を紹介していた。これはどちらかというと非分離パラメータ寄りのアプローチである。また Kawano は分離共鳴での R-matrix からエネルギー平均 S-matrix を求め、それを再現するチャンネル結合ポテンシャルを得、それを用いて U-238 の中性子捕獲断面積の計算を行った。Koning は "TALYS meets the URR" というタイトルで講演したが、TALYS で非分離共鳴の評価を行うまではいっておらず、原理的に可能という話だった。Koning が登壇すると「講演題目は『TALYS は全てを計算する』です」と座長からからかわれていた。

評価用コード及び誤差評価コードに関するセッションでは、飛行時間測定法のデータ解析用に開発された SAMMY 及び REFIT コードの更新状況及び問題点が報告された。核データの評価研究の専門家間で誤差を含めた評価結果を与えることの重要性が共通認識としてあり、誤差評価に向けたコード開発の進捗が報告された。

共鳴領域でのデータ解析に使われるコードの発表が数件あった。R-matrix での解析と例えば、Moxon の REFIT、Larson の SAMMY が有名であり、この両者が同じ会合で鉢合わせした。カダラッシュでは新しいコードを開発中で、De Saint Jean は C++を使った CONRAD というコードの紹介を行っている。このコードが何を何処まで計算するのかまだ未知数な所が多いのだが、少なくとも共鳴領域で R-matrix でパラメータを求め、非分離では FITACS のような計算を行うようである。ただ SAMMY のようなコードを目指しているわけでも無いようで、主眼は、実験データから炉物理計算への誤差の伝播をなるべくきちんと計算したいということのようだった。

CEA の Courcelle らが飛行時間測定法のデータ解析において、各共鳴ピークに対する中性子自己遮蔽を計算する際に用いる中性子散乱則に固体効果を取り組むことが U-238 の核データの高精度化には必要であることを指摘した。共鳴パラメータを得る際に重要になる結晶での散乱に関して提唱されている幾つかのモデルについて、up scattering の定量的な考察を行ったが、どのモデルを採用すべきなのかははっきりしないようである。同様の議論は、Moxon がコード REFIT での Doppler 効果の補正でも行われていた。REFIT と例えば、Larson の SAMMY の商売敵でもあり、両者の比較に関する議論は、傍から見ている分にはおもしろいものである。SAMMY は多重散乱の補正ができない（散乱 1 回のみ）と誰かが言えば、即座に「REFIT だってできない」という声があがったり。

データ処理と炉物理応用についての発表が 3 件。一つは Kahler による NJOY の開発の現状。ENDF/B-VII のリリースと同調するかのように次々と update がリリースされている。共鳴パラメータの共分散を処理する ERRORJ についても言及されていた。Sublet は、ENDF ファイルから確率テーブルを生成する CEA の処理コード CALENDF の現状を報告した。今後、Chiba-Unesaki による非整数モーメント法を用いるとのことである。Hwang も確率テーブルの取り扱いについての議論であったが、筆者には難解でほとんど理解できなかった。

共分散に関連した講演もいくつかあり、このトピックスの関心の高さが分かる。Larson は SAMMY 内部でのデータ共分散の取り扱いを説明し、Bauge と Noguere は Monte-Carlo を用いた誤差伝播の計算を紹介した。他方、Rochman は deterministic な手法による誤差の伝播計算で、共鳴領域の共分散評価を行っている。評価のみならず、実験者の方でもなるべく誤差情報を正しく記録しようという試みがなされているようである。Borella は、TOF 実験での巨大になりがちなデータに対し、そのデータ共分散を少ない領域で保存できる AGS というシステムを紹介している。原理的には、巨大な共分散行列を作ってしまうのでは無く、各誤差の要因に分解しておいて、それを SAMMY 等の解析コードで利用しようというものらしい。

本ワークショップは、「原子炉応用のための核データ」というテーマを切り口に、カダ

ラッシュ研究所の研究者を中心として開催された第 1 回会議であった。原子核物理、核データ測定、核データ評価、炉物理の研究者が一堂に集まり議論できたことは、本ワークショップの特徴であり、本分野の新たな展開を図る上で意義あるものであったといえよう。



左の写真は、エクサン・プロヴァンス街中の景色である。人口 15 万人程度の小さな町である。ノーベル賞（文学）受賞者である大江健三郎氏の講演が予定されているらしく、同氏の多くのポスターを街中で見かけた。柔道だけでなく文学でも日本の文化が関心をもたれているようである。核データの分野でも

さらに交流の深まることを期待したい。

#### （追加旅行記）

著者の一人（T.K.）は、WONDER2006 終了後、2 日間だけ CEA Cadarache を訪問し、コード開発や共鳴領域での誤差評価等について議論した。Cadarache 城に続けて宿泊することはできなかったため、Aix-en-Provence のホテルへ移動し、そこから車で通勤する・・・と書けば簡単なことのようにだが、実際に Aix で車を運転するのは、箱崎の町中を運転するほど難しい（分かる人にしか分からない）。道は狭く、至る所一方通行。おまけに旧市街を囲むリング沿いには、行く先の標示があるものの、それに気づいた時にはすでに遅く、リングをもう一周回る羽目になる。CEA の連中も言っていたが、初めてここを運転する者は、最低 3 周は回らないと一人前になれないんだとか。

同じく Aix に宿泊していた某 N.L.氏と町の中心で待ち合わせ、昨夜車を入れた駐車場に向かう。実は待ち合わせ時間に遅刻した。理由は、CEA 入所のバッジが見当たらず、スーツケースをひっくり返して探していたため。結局見つからなかったため、きっと車の中に忘れたのだろうと、そのまま出かけた。

10 分遅刻を N.L.氏に詫び、メモしておいた駐車場のある方向に揺るぎない自信を持って向かった。その通りに入る一つ前の交差点、そこで魔が差した。「こっちから行けばきっと近道よ」。同意して、そこを曲がり、駐車場のある方向に歩く。歩く。歩く・・・でも駐車場は見当たらない。明らかに行き過ぎている。とにかく一旦降り出しに戻り、

正しい通りへと入ってようやく駐車場を発見した。

車内を探せども、バッジは見つからない。無くしたと言えば再発行してくれるだろうと楽観して、運転席のドアを閉め、エンジンをかけた。と、半ドアのランプが点いている。ドアを閉め直しても消えない。不審に思ってドアをもう一度開くと、そこに自分のバッジが落ちていた。

今回は Aix を難なく脱出し、そのままハイウェイに入った。しかし3分後、Cadarache 方面への分岐で失敗。ハイウェイを出てUターンし、再び Aix に戻り、再びUターンしてハイウェイに再突入。正しい分岐へと入り、今度は大丈夫。Cadarache への出口さえ間違え無ければ、後は一本道です。余裕綽々で高速を突っ走る事20分ほど。突然、助手席から「今の出口、CEA って書いてあったわよ」、「わー」。普通なら、Aix から Cadarache は40分ほどで到着するらしい。でも今日の所要時間は1時間半。