

会議のトピックス(III)

IAEA 主催 「核データ開発のための長期ニーズ」に関する技術会議 2011年11月2~4日、IAEA本部、Vienna、Austria

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門 石川 眞

ishikawa.makoto@jaea.go.jp

先端基礎研究センター

重原子核反応フロンティア研究 Gr

千葉 敏

chiba.satoshi@jaea.go.jp

国際原子力機関 (IAEA)

核データセクション 大塚 直彦

N.Otsuka@iaea.org

1. はじめに

IAEAの核データセクション (HeadはR. Forrest氏) では、今後10~20年間の核データ研究に関する長期ニーズを収集するため、定期的に加盟各国から代表を招聘して技術会議を開いています。前回は2000年11月に開かれたそうなので、今回は11年ぶりの開催になります。参加者は、オプザーバを入れると計26名でした。特に、米国と日本からは2名ずつが招かれました。米国は、BNLの核データセンター長であるM. Hermann氏とLANLの核計算物理部長であ



写真1 IAEA本部への入り口(国連ビルの中央ホールからIAEA本部のある棟への通路)

る M. Chadwick 氏、日本からは JAEA の石川と千葉です。大塚は IAEA 職員としての参加でした。通常、IAEA がこのような技術会議に旅費負担で招聘するのは、各国 1 名が原則とのことですが、日米両国が世界の主要汎用ライブラリである ENDF/B と JENDL を開発していることを配慮して特別の扱いをしていただいたようです。

本会議では、事務局から事前に、各参加者に提言を行ってほしい技術分野が割り当てられておりました。その大項目は、①Medical&analytical applications、②Energy productions、③Libraries、④Basic science、⑤Tool/Visualisation と非常に多岐に渡っており、計 22 件もの発表がありました。また、Forrest 氏からは、事前、以下のような「発表の心得」が送られてきました。つまり、各自の好きなことをどんどんしゃべりなさいということだと勝手に理解しました。

"The talk should be about 20 minutes long and should address perceived problems, challenges or needs in the area. It should not attempt to be a review of the topic or to be comprehensive, I am more interested in your opinions and visions of how the field should develop and the relevance to NDS's future work."

このような会議ですので、著者 3 名で本会議の全体を網羅した報告をするのはとてもできません。本会議の正式な報告書は、後日 IAEA から公開される予定ですので、ここでは、著者らが核データニュース読者の皆さんにとくにお伝えしたいと思ったことを、トピックス的に書かせていただくこととします。ご了承ください。

2. Medical and Analytical Applications

本セッションでは粒子ビームの医学及び他の利用についての報告がありました。

英国 Surrey 大学の Nichols 氏はガンなどの治療に関係するビーム利用の説明をしました。ビーム照射による治療中のイメージングや照射量推定、また治療用 RI 製造に必要な核データとして、特定のガンマ線放出核種やベータ線放出核種の生成断面積、崩壊データの必要性が説明されました。この分野では IAEA はリーダーシップをとって来ており、Nichols 氏は ENSDF 等を通じ崩壊データの整備に寄与してきました。その中には α 放出核種も含まれていますが、これについては最近 JAEA 原科研のタンデム加速器を用いた研究も始まっており、その重要性が再認識されました。

続いてハンガリー ATOMKI の Tarkanyi 氏が加速器利用に必要な陽子及び重陽子による放射化断面積の系統的研究の必要性について報告しました。目的は医学利用、放射化分析、天体核物理、宇宙利用、他の加速器利用分野と広範な話題を含んでいました。いくつかの結果は TALYS コードで計算された TENDL2010 ライブラリと比較されていましたが、必ずしも一致は良くなく、TENDL ライブラリを使用する際には注意が必要であると思われま

ロシア IPPE の Gurbich 氏は、イオンビーム利用に必要な核データのレビューを行いま

した。ここで言うイオンビーム利用とは PIXE (Particle Induced X-ray Emission)、RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry)、EBS (Elastic Backscattering Spectrometry)、ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis)、NRA (Nuclear Reaction Analysis)、PIGE (Particle Induced Gamma Emission) などの分野で、物質の組成を調べる手段です。これらの手法においては微分断面積が用いられるのでその精度向上が不可欠とのことです。そのためのイオンビーム用の特殊ライブラリ IBANDL が作成されており、その報告もされました。

3. Energy Productions

ここでは、核分裂、核融合、高エネルギー応用の分野からの核データニーズについての 5 件の報告がありました。

1) カナダ AECL の Koziar 氏が現在の核分裂システムから見た核データへのニーズを整理していましたが、彼は、**図 1** に示すように例の Salvatores 氏がまとめた WPEC の SG26 「革新原子炉システムの核データニーズ」の計算結果を引用して議論を展開していました。この SG26 では 2008 年当時の簡易評価による BOLNA 共分散 (BNL, ORNL, LANL, NRG, ANL の略) を用いており、また対角成分のみで要求精度を満たす試みを行ったので、今ではかなり評価が異なっているはずなのですが、まだその数値が引用されているのを見てその影響力は大きいのだとあらためて思いました。

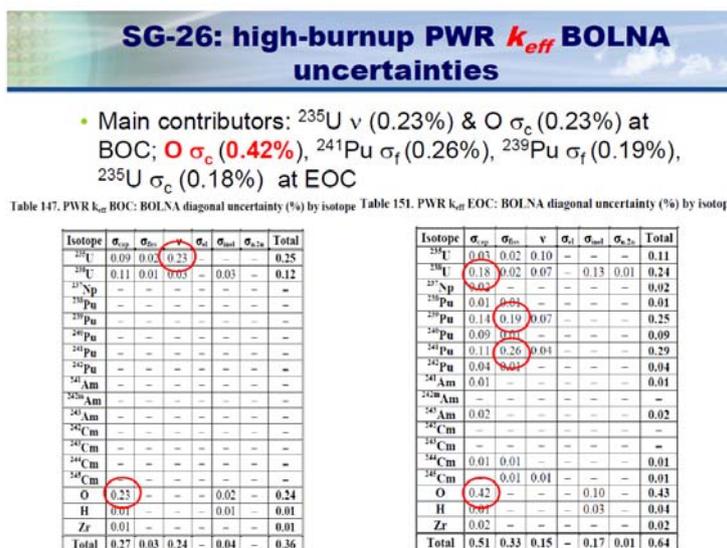


図 1 軽水炉臨界性に対する核データ不確かさの寄与 (Koziar 氏が SG26 の報告書から抜粋)

2) JAEA 石川からは、革新的核分裂システムからのニーズを抽出するために、高速炉・ADS・次世代軽水炉の 3 つを代表としてとりあげ、各々のシステムの核データに関連した特徴と現状の研究開発状況を整理した上で、今後の核データ関連活動に対する提言を、核データユーザーの立場から行いました。**図 2** に核データニーズに関連した高速炉の特徴を示します。発表後の質疑では、特に設計目標精度と共分散の関係や、炉定数調整の

物理メカニズムについて多くの議論がありましたが、共分散データが今後ますます重要になるという認識は、参加者全員が共有していたようです。

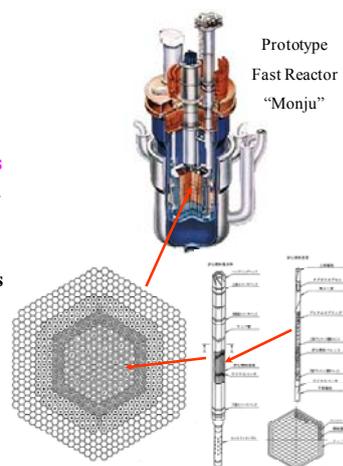
<提言> 革新的核分裂炉への応用から見た核データ研究の長期ニーズ

将来の核分裂炉としては、高速炉（INPRO、Gen-VI、FaCT）、ADS、次世代軽水炉などがある。ここで重要なのは、これらの炉心設計において、核データは既に工業生産プロセスの重要な一素材となっており、単にアカデミックな興味の対象ではないことである。これは核データに対して、相関を含む誤差データ（共分散）の完備や検証（V&V）システムの整備などを通して、工学的な品質保証

が必要であることを意味しており、このための研究開発が今後不可欠である。具体的な核データとして、特に今後、精度の向上や評価核種数の増加等が望まれるものとしては、マイナーアクチノイド（MA）核種、核分裂生成物（FP）核種、熱中性子の散乱則 $S(\alpha, \beta)$ などが挙げられる。

Features of Nuclear Parameters in Fast Reactors

- ★ **Complicated heterogeneous structure** composed of fuel pellets, claddings, coolant, wrapper tubes, plural Pu-enrichment regions,
- ★ Needs to treat accurately neutron collision & absorption in **wide energy range over 5-orders** from several MeV of fission spectrum through a few 10 eV where neutron disappears,
- ★ **Major contribution to design uncertainty comes from error of physical property, that is nuclear data, and,**
- ★ **Very high target accuracy requirement,** compared with other engineering fields such as thermal hydraulics, fuel material, etc.



- A. Detailed analytical modeling
- B. Use of integral experimental data

図 2 核データニーズに関わる高速炉の核的特徴
(石川の発表から抜粋)

3) 韓国 KAERI の Y.O. Lee 氏が、高エネルギーデータのニーズに関して報告を行いました。具体的には、(1) 高速中性子源としての $p, d + Li, Be$ 反応 ($E_p < 100$ MeV, $E_d < 50$ MeV)、(2) 加速器駆動炉のための高エネルギー反応 ($E_n, E_p < 2$ GeV) のモデルとデータライブラリの整備、ならびに感度解析による要求精度の確定、(3) 遮蔽材等の構造材に対する非弾性・放射化断面積の改善、(4) 半導体誤動作などに関連した珪素に対する荷電粒子生成高エネルギーデータの整備が挙げられました。GeV 領域までの評価をやっているのは JENDL だけであり、そもそも数百 MeV 以上はモンテカルロコードがあれば十分なのではないか、というコメントがありましたが、これに対して Lee 氏は、許認可等に際して必要となる再現性などの点からライブラリとしてデータが整備されることの重要性を主張しました。

4. Libraries

ここでは、核データの処理、実験データベース EXFOR、汎用ファイルなどに関する 5 件の報告がありました。

1) 核データの処理からのニーズについてはスロベニア JSI の Trkov 氏が報告しましたが、質疑応答で、米国が最新の NJOY2010 を公開しておらず、その他の国は古い NJOY99 にパッチを当ててライブラリを群定数セットなどに処理しなければならないために、最新の ENDF フォーマットに対応できないことがあり、かなり混乱をきたしていることが話題になりました。石川からは、米国の好意に頼るのではなく、世界の公的な機関である IAEA や NEA がライブラリ処理コードを開発・改良していくべきではないかと提案し、一部の参加者から強い賛同を得ました。Trkov 氏はまた、最近独国 Karlsruhe の宇宙核物理向け $kT=30$ keV マクスウェル平均断面積の評価データベース KADoNiS が、微分データのベンチマークに有用であることを強調しました。

2) 実験データと EXFOR に関して、欧州委員会共同研究センター (EC-JRC, Geel) の Plompen 氏が報告を行いました。彼は、GELINA の白色中性子ならびに VdG 加速器の準単色中性子を用いた Geel における研究活動のレビューを行ったあとで、学術雑誌には投稿し難いような詳細の誤差の情報を記録する媒体としての EXFOR の重要性を強調していました。

3) 汎用ライブラリの観点から、米国 LANL の Chadwick 氏が報告をしましたが、彼はなんと、世界統一汎用ライブラリの開発 (ENDF/I、I は International のことだと思います) を提言しました。彼が大きな理由のひとつとして挙げたのは、世界的に見られる核データ評価者のマンパワー不足です。米国では、ベテラン退職者を補充する若い研究者が少なくなっているとのことで、これは日本と同じような深刻な状況のようです。

5. Basic science

1) JAEA 千葉が、原子力機構で行っている代理反応、核分裂研究、軽い原子核の核反応機構研究についての現状と将来計画の講演及び提言を行いました。代理反応については、マイナーアクチノイド、長寿命核分裂生成物、s-過程の分岐点となる不安定原子核の中性子断面積を決定できる手法として日米欧等で開発が行われていますが、日本では千葉のグループを中心に研究が進められており、その現状を報告しました。JST の支援を受けて開発した核分裂測定用の多芯線比例計数管と半導体検出器、捕獲反応断面積を測定する $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の設計や性能などについて、さらに代理反応過程を記述する理論の説明

も行いました。理論については、千葉らが開発した動的模型による核子移行反応及び生成した原子核の崩壊や中性子放出を記述できる半古典的統一的モデル、量子力学的な離散化連続チャンネル結合理論を用いる二中性子移行反応におけるスピン分布についての成果を紹介しました。特に重イオン入射反応と軽イオン入射反応において生成されるスピン分布の違いを説明し、それぞれの特性を議論しました。さらに既存の装置を用いて行った核分裂測定の実験の結果を紹介し、重イオン代理反応の持つ潜在的可能性の高さを紹介しました。また、軽い原子核領域の話題として、重水減速臨界体系を核力モデルの検証に用いる可能性と、離散化連続チャンネル結合法を用いる中性子+ ${}^6\text{Li}$ 反応の研究現状について講演を行いました。

2) 共分散からのニーズに関して、仏国 CEA の Bauge 氏が報告を行いましたが、彼はここで、積分実験データを用いての核反応モデルパラメータの調整を提案していました。これは最近、多くの研究者が提案している方法ですが、従来からある炉定数の調整とは異なって、この方法には 2 つの大きな問題があるように、石川には思われました。ひとつは、JEZEBEL などの臨界実験データの C/E 値を 1.0 に近づけるように核反応モデルパラメータを調整すると、関連する核種・反応間のパラメータ全てに相関が付きませんが、現在の ENDF フォーマットでは、このような膨大な相関の格納は不可能なことです。もうひとつは、この操作を行うためには、核反応モデルパラメータの事前共分散データを準備する必要がありますが、核反応モデルパラメータの事前誤差や相関の評価などは全くできていないために、一律誤差を入れるような手段しかなく、物理的な説明性・妥当性を欠くのではないかということです。これらを質問したのですが、納得のいく回答は得られませんでした。

6. Tool/Visualisation

1) 目を引いた話題として、オランダ NRG の Koning 氏のライブラリ作成手法が挙げられます。Koning 氏は統計模型を中心とする TALYS コードシステムを構築しており、そのパラメータ決定に微分データだけではなく積分データも含めています。またカバーしている核種も 2000 核種を超えるなど、日米の主要ライブラリの 400 核種程度を凌駕しています。TALYS コードも汎用コードとして自由に配布し、世界的にもシェアを広げつつあります。

2) フォーマットとデータストレージに関して、米国 BNL の Herman 氏が報告を行いました。彼は、まずパンチカードイメージの名残をとどめる現在の ENDF-6 フォーマットについて、これまで非常に役立ってきたものの、現在の計算技術から見ると、1 行が 80

カラムに制限されていることから有効数字の制限など様々な不自由が生じており、また拡張性に欠けており処理コードのメンテナンスも難しく、さらに普通の人間 (an average homo sapiens) には読むことが難しく、また他のライブラリ (EXFOR や ENSDF など) と統合することが不可能であるなど、改善すべき点が多いと総括しました。この従来 ENDF フォーマットに代わる可能性のあるものとして、LLNL で開発されてきた XML ベースの General Nuclear Data (GND) format が紹介されました。そのイメージが図 3 にありますが、これは最近のオブジェクト指向技術を踏まえたもので、可読性・拡張性の観点から人間に優しいものになっていることが分かります。GND を様々な処理する fudge というシステムの開発が現在進められており、例えば ENDF-6 と GND の双方向変換は既の実現しているということです。これにより njoy など ENDF-6 を処理するコード資源は活かしつつ次世代のフォーマットの利点の理解を進めることが可能になるようです。この fudge はまた njoy に代わる処理機能を担うことも予定されているようです。米国の核データセンター長である Herman 氏がこのような大きな改革の提言を行ったことは、重要であると思われる。

GND's hierarchy logical & simple

(D. Brown)

The image shows a snippet of XML code for a reaction suite. Annotations with arrows point to specific parts of the code:

- Collection of reactions is a reactionSuite**: Points to the root `<reactionSuite>` tag.
- Full HTML documentation allowed**: Points to the `<documentation>` block containing text like "MODIFICATION OF ENDF/B-VII EVALUATION FOR NEW DATA".
- All particles in evaluation listed**: Points to the `<particles>` block listing various particles like gamma, n1, He6, and Li7.
- Each reaction is actually a reaction**: Points to a `<reaction>` block.
- Cross section**: Points to the `<crossSection>` block.
- Each outgoing particle has distributions collected together, even for fission!**: Points to the `<outputChannel>` block within a reaction.
- Different data representations can live side-by-side**: Points to the `<angular>` and `<legendrePointwise>` blocks within a cross-section.

10 NATIONAL LABORATORY

図 3 Generalized Nuclear Data (GND)フォーマット の概念
(Herman 氏の発表から抜粋)

7. おわりに（個人的感想）

難しい核データ研究のニーズということで迷ったのですが、ユーザーの立場でいいということだったので、居直って参加させていただきました。世界の核データ研究者たちが将来の課題について真剣に議論している様子を拝見して、たいへん勉強になりました。（石川）

久しぶりのNDS出張であったが、ヘッドがForrest氏になっていてずいぶん様変わりしたと感じました。自分が年を取ったことと等価であるが、かつてはNDSのヘッドとさえばすごく偉い人のように思っていたのだが、Forrest氏は核融合炉用核データの会合などでも議論した仲間であり、その一人が重要なポストを占めているのを見るのはうれしいことでした。また、出張前から大塚さんには大変お世話になりました。やはりこのような重要な国際機関に日本人がいるということは大事なことだと感じました。（千葉）

出席者の役割分担を少しだけお手伝いしました。与えられた出席者と発表分野を一对一に結ぶのはなかなか難しかったです。NDSは核データの会議が頻繁に開催されるので勉強の機会は多々ありますが、今回は広い分野を俯瞰する大変に良い機会になりました。2日半と比較的短い会議でしたがとても疲れしました。（大塚）

以上



写真2 IAEA 会議の様子

（千葉が核反応理論の観点からのニーズを報告しているところ）