

## MCNP/ENDF/NJOY ワークショップ

北海道大学

千葉 豪

[go\\_chiba@eng.hokudai.ac.jp](mailto:go_chiba@eng.hokudai.ac.jp)

### 1. 諸言

2012年10月30日から3日間、米国ロスアラモス国立研究所(LANL)で標記のワークショップが開催された。本ワークショップは、LANLのMCNPコード開発チームが主体となり、核データ形式や核データ処理コード、共分散の利用まで含めた今後のMCNPコード開発に対するニーズについて外部機関からの意見を参考にする目的で開催されたものである。主催者の一人であるLANLのChadwick氏が冒頭の挨拶で「複数のコミュニティからStake holderを招集し、Break throughを図る」と語っていたように、ユーザー向けのワークショップというよりは、「コアなメンバー」を集めた会合というような印象を受けた。米国内からはLANLとローレンスリバモア(LLNL)の研究者が多数参加し、それに加えてオークリッジ(ORNL)のRearden氏(SCALEコード)、アルゴンヌ(ANL)のMcKnight氏らの参加があった。また米国外からは、フランスCEAのTrama氏、Nicola女史、スロベニアJSIのTrkov氏、IAEAのCapote氏、オランダNRGのVan der Marck氏、英国CCFEのSublet氏などが参加していた。日本からはJAEAの長家氏と私の計二名が参加した。「コミュニティのStake holder」という観点からは私の参加には疑問符がついてしまうが、その辺りは触れないでいただきたい。

私は炉物理のエンジニアなので、本報告の内容が偏ってしまっていることはご容赦いただきたい。また、本報告の一部(大部分?)は長家氏の会議メモから抜粋させていただいている。

### 2. MCNPの開発状況など

MCNP6の最新版は2013年の春に正式リリースされる。MCNP6は、MCNP5とMCNPXを統合し、更に新機能が加えられている。物理モデルの改良としては、同時イベントから発生する粒子の相関の考慮、核データによる軽核の輸送、電場の考慮、中性子輸送時の(on the fly)ドップラー拡がりの考慮、デルタ線生成機能の追加などが挙げられる。また、並列計算機能の強化、分散低減法の改良も図られている。今後、半年に1回MCNP

の正式版をリリースする予定である。

MCNP6 の開発で特に力が入られている機能の一つが臨界性に対する感度係数計算機能である。LANL の Kiedrowski 氏は、MCNP6 の新機能である随伴重みを用いた感度係数計算機能について発表し、Jezebel 炉心と Zeus 炉心について非常に細かく区切られたエネルギーメッシュでも小さい統計誤差で感度係数を計算していた。現在、国家核安全保障局 (NNSA) からの資金で、共分散データを MCNP ライブラリ形式である ACE 形式として取り込み、自動的に実効増倍率に対する核データ誤差を評価できるようにしようとしている。

なお、実効増倍率に対する感度解析という点では ORNL の SCALE コードが先行しており、多群エネルギー近似ベースではあるが、複雑な体系の感度係数を MC コードの KENO により計算することができるようになっている。また、「Emerging techniques」として多群近似を排除した「Continuous-energy TSUNAMI」も開発中である。

また、LANL では、MCNP コードとは別に、モンテカルロアプリケーションツールキット (MCATK) と呼ばれるモンテカルロソルバーを開発している。これは、一から C/C++ 言語で書かれたコードであり、MCNP と同じ乱数ジェネレータ、ACE ライブラリを用いている。Agile 開発、ユニットテスト、サブバージョンによるバージョン管理など、JAEA の炉物理グループで開発している Marble システムと同様のコード開発手法を取り入れている。この MCATK が将来 MCNP に取り込まれるかどうかはまだ分からない。



写真1 サンタフェで食べた巻き物

### 3. 共分散データの利用

核分裂系の中性子実効増倍率など積分パラメータの不確かさを定量化、また合理化するための、核データの共分散の利用に関する報告、議論があった。

ORNL の Rearden 氏からは、ICSBEP ハンドブックに収納されている多数の積分データに対して核データ共分散に基づく不確かさを定量化した結果と、それらのデータ群に対して炉定数調整法を適用することで核データがどのように「最適化」されたかについての報告があった。また、ANL の McKnight 氏は、アイダホ研 (INL) での COMMARA2 共分散データを用いた炉定数調整に関するアクティビティを代理報告した。McKnight 氏からは「炉定数調整は核データ評価に重要な情報を与えるものであるが、評価自体に使うべきではない」というコメントもあった。調整された炉定数の適用範囲はそもそも限定されたものであるという考えに由来しているものと理解した。

また、炉定数調整法のお膝元の日本から、長家氏が JENDL-4.0 をベースとした調整炉定数セット ADJ2010 に関して報告した。この報告には Chadwick 氏が「炉定数調整によって核データがどのように変動したのか知りたい」と大きな関心を示した。日本での炉定数調整のアクティビティはもう 10 年以上の歴史を持つものであり、さらにそれ以前には ANL や CEA-Cadarache (ERALIB の開発) で精力的な研究が行われていた。今になってようやく核データの研究者が炉定数調整に関心を持つようになったということは大変興味深い。

積分パラメータの不確かさの定量化という点では、感度係数を用いたアプローチの他に、共分散データに基づいてランダムな核データセットを多数発生させ、その結果得られる積分パラメータの確率分布から不確かさを定量化するというアプローチ Stochastic Sampling が挙げられる。その代表的な適用例が NRG の「Total Monte Carlo」である。NRG のグループは、今や中性子増倍率や反応度といった核分裂炉の静的な積分パラメータのみならず、核分裂炉の燃焼特性、使用済み燃料の長期毒性、核融合炉の遮蔽といったパラメータにまで手を広げ、各種論文誌に大量の論文を発表している。Total MC では MC の計算に時間を要することが問題となるが、今回のセミナーでは「Fast total Monte Carlo」という手法が紹介された。この方法を簡単に説明すると、まず基準核データを用いた MC 計算を複数回行い積分パラメータの統計をとる (手順 A)。その後、共分散に応じて値を振った核データを生成し MC 計算を行うことを同じ回数行い積分パラメータの統計をとる (手順 B)。手順 A と B とで同一の乱数列を用いることにより、核データに起因する積分パラメータの不確かさは、B と A で得られた積分パラメータのばらつきの差から評価できる、というものである。この方法ではヒストリー数を節約することができるため、高速の評価が可能となる。ただし、不確かさの定量評価には、計算速度の観点から Deterministic の方が有利と考えているという言及があり、別途 DRAGON コードを用いた軽水炉系の誤差伝播計算も行っているとのことである。また、Van der Marck 氏の発表で印象的だったのが、彼らの「Wish list」に「ENDF」に対する項目が全く無かった点である。TENDL、Total Monte Carlo に対する自信の表れと受け取った。

#### 4. 相関を考慮した粒子輸送計算と検出器応答

MCNP6 の開発でもう一つ力が入れているのが、核分裂で放出される複数の中性子やガンマ線の相関や核種の崩壊で出てくる複数のガンマ線を考慮することである。テロ対策を目的とした核物質検知のための検出法の開発が行われており、その一環として、国土安全保障省（DHS）の資金で、MCNP を用いたシミュレーションが行われている。現状の ENDF フォーマットにはこのような相関のデータが入っていないので、計算モデルでシミュレーションを行っている。ミシガン大学の Martin 氏のグループでは MCNP-Polimi というコード、LLNL では完全な相関を考慮できる FREYA 核分裂モデル、LANL の Talou 氏らはモンテカルロ Hauser-Feshbach 理論に基づく CGMF コードを開発している。

相関データの取扱いについて、ENDF フォーマットに加えることも検討されているが、実際にはデータ量が膨大となってしまうことが容易に予想される。一方で、MCNP 内部に計算モデルを組み込む場合には、保守管理や Documentation が必要となり、それも簡単ではない。相関を考慮した輸送計算機能を必要とするユーザーがどの程度いるのかを把握することが重要という指摘があった。

また、核物質検知の観点から、Photonuclear の Validation のための積分ベンチマークデータが非常に少ない点が指摘された。



写真 2 アルバカーキ空港で昼に食べたサラダ

#### 5. 断面積処理コード

NJOY99 版の最新版 (99.384) が近くリリースされる。最新版では、配列が拡張され、32 ビット/64 ビットの不整合の修正、新しい MT 番号の追加が行われている。NJOY2000

版の最新版である NJOY2012 も近くリリースされる。NJOY2012 の配布については、LANL の Technology Transfer Division で処理され、11 月 30 日以降に Kathleen McDonald 氏に問い合わせを欲しいとのことである。NJOY2012 では、NJOY99 に含まれない新しい機能（Limited Reich-Moore 分離共鳴形式 LRF=7 の処理、温度点数の制限の撤廃、無限希釈断面積の数の制限の撤廃など）が追加されている。NJOY2012 において将来改良を予定している機能は、LLNL が提案している一般化核データ（GND）形式への対応、改良された ACE 形式での出力、ACE 形式への共分散データの出力がある。GND 形式の策定については、現在、LLNL と BNL が行っているが、核データ評価国際協力ワーキングパーティー（WPEC）の下、国際的な協力体制が期待されている。

また、CEA で開発している断面積処理コード CALENDF の立場から、Sublet 氏が異なる核データ処理コード、MC コード間で差異が観察される場合について、非分離共鳴領域の取扱いを例に挙げて説明した。現状では処理コードと MC コードは一体となっており（NJOY と MCNP、CALEDF と TRIPOLI、等）、処理コードと MC コードの多様な組み合わせが実現できていないことを問題点として指摘した。

LLNL では GND 形式の提案と並行して、核データ処理コード FUDGE を開発している。ただし、事情通の TK 氏によると、LLNL と LANL は仲が良くないので、FUDGE がスタンダードになることはないだろうとのことである。



写真3 アルバカーキ空港で昼に食べたタコス

## 6. 結言

感度解析や不確かさの定量化といった技術は、欧米の研究チームが本格的に取り組みだしたここ 10 年程度で劇的に進歩した。我が国でも地道に R&D は続けられているが、



ORNL の SCALE コードシステム、NRG の Total MC、LANL の MCNP への多群近似なしの感度計算機能の追加など、多くの分野で先を行かれてしまっていることは事実として受け止めなければならないだろう。個人的には、これらに対して正面攻撃を挑むことはもう不可能であり、出来る限り身軽な装備で局地的なゲリラ戦を挑みながら「本陣を脅かす」ことで存在感を失わないようにするしか方策はないと考えている。筆者の個人的な欧米への劣等感に過ぎないと指摘される方もおられるかもしれないが、それならばそれで安心である。

今回、TK 氏こと LANL 河野氏と長家氏と一緒にいる機会が多々あった。それぞれ核データ、炉物理分野を牽引する立場の二人の議論は大変勉強になった。特に河野氏が進めている「低エネルギー領域での統計理論に基づくイベント・ジェネレーター付きモンテカルロ粒子輸送計算」の構想は、固定観念に縛られる性質をもつ自分としては大変刺激的であった。核データにしる、炉物理にしる、根本的な理論はずっと前からそれほど大きく変わっているわけではないかもしれないが、それでもまだまだ変わることは出来るのだなと感じた。

核データ評価のためのツール開発や核データ評価自体について、「どうせ似たようなことをやるのならば、世界の研究者間で役割分担して、任せるところは任せればよいではないか」という意見があり、一方では「何かあったとき（どこかの国が情報を囲い込むとか）の保険のため、また技術継承のため、日本としてのアクティビティを維持して可能な限り日本独自で行うようにする」という意見がある。それぞれの言い分はそれぞれ合理的であるが、前者は「強者の論理」という印象を受けないでもない。私は弱者なので、おそらくそういう言い方はできないだろう。

いずれにしても、核データの分野で今中枢を担っている方たちは、この分野を「魅力ある研究分野」として後世に残そうと懸命に努力されている。これは炉物理の分野でも然りである。これらの研究分野の魅力にとりつかれた自分としても、出来る限りのことをしていきたいと考える昨今である。

## 付録：旅先でのトラブルへの対処

帰国の際、アルバカーキからダラスまでの便が飛ばず、帰国が一日遅れるという貴重な経験をした。海外出張に慣れた読者の方も多いと思うが、私のような非熟練者もおられると思うので、この経験について簡単にまとめる。なお、今回の旅程は長家氏と全く同一であったので、大変心強かった。

ワークショップ終了後、LANL のスタッフとの打ち合わせで多忙な河野氏に別れを告げ、我々はサンタフェに向かった。ダウンタウンを一時間程度散策し、長家氏の思い出の寿司屋でサンタバーバラのウニやらドラゴンロールやらを食し、アルバカーキに落ち着いた。

帰国の際の旅程は、アルバカーキからダラスに移動し、3 時間弱待ったのち成田へ向かう、というものであった。アルバカーキ 7 時半発の便であったが、レンタカーの返却をしなければならぬため、早目の移動が必要となり、結局前日はほとんど寝なかった。車を返し、アルバカーキ空港で飛行機に搭乗したまでは良かったが、なかなか飛行機が動かない。「ちょっとトラブルがあるので 10 分くらい待って」というアナウンスが数回行われつつ、1 時間程度頑張ったようであるが、とうとうギブアップ。我々は再びアルバカーキ空港の搭乗口に降り立つこととなった。

生憎後方の座席であったため、搭乗口のカウンターには既に長蛇の列が並んでいた。次の便に乗れば成田への飛行機には間に合う状況であったが、この時点で断念。そのうち、航空会社のスタッフが電話番号を書いたカードを配布し始め「この番号に電話して再予約するように」とのこと。電話で再予約ができた乗客がちらほらと列を離れ始めた。「英語が苦手なので電話は難しい、なんとかしてくれ」とそのスタッフに頼むと「日本語を話すオペレーターがいるので大丈夫」との回答。とりあえずローミングで携帯からかけると自動音声案内。どうやら声で認識するようなシステムらしかったが、自信が無いので選手交代。しかし長家氏もうまくいかず、僅かずつ短くなっていく列に並んでひたすら待つことにした。

待つこと 1 時間程度、ようやくカウンターに到達。代替便を探してもらおうが、見つかったのは翌日のダラスー成田便。仕方ないのでそれを手配してもらおう。手間取ったのが筆者の成田ー新千歳の代替便の確保であり、だいぶ時間を要した (30 分程度?)。私は後ろで待っている数人の人たちが怒りださないか気が気でなかった (以前、JR みどりの窓口で長蛇の列を作ってしまったことがトラウマとなっている) が、長家氏によるとアメリカ人はこういうことには慣れているので問題ないとのこと。その後、特にごねたわけでもないがホテルの話になり、空港近場のホテルを確保してもらおうとともに昼食・夕食の 12 ドルのクーポンをもらい、手続き完了。

時刻は 11 時を回るくらいであり、かなり疲弊していたが、クーポンも入手したので空港のニューメキシコ・レストランでの昼食とした。とりあえずビールで乾杯。「Rio Grande」

の名を冠したビールを頼むもチリ入りのビールであったため、悲しい気持ちに。口直しに2杯目を頼み、タコスなどニューメキシコ料理を堪能した。その後、アルバカーキのダウンタウンに繰り出そうという長家氏の提案もあったが、結局ホテルで休息をとることにし、夕方、再度空港のニューメキシコ・レストランへ。今度はチリ入りではないビール2杯とタコスなどニューメキシコ料理を堪能した。

翌日の便は6時発で、4時にチェックインしろと前日に言われていたので、体内時計はもう滅茶苦茶。それでもアルバカーキを無事に飛び立ったのは嬉しかった。サンタフェでの巻き寿司が美味しかったので、中継のダラス空港でカリフォルニアロールを食べたら、大いに落胆。さらには、成田への飛行機では長家氏ともども「お楽しみ機器」の調子が悪く、「成田までの距離」とずっとにらめっこ、と散々たる有様であった。

とまあ、大変な思いをしたことをつらつらと書いたが、今となって思い返してみると全般的に楽しい旅行であった。ロスアラモスのコロッケも美味しかったな。



写真4 アルバカーキ空港で夜に食べたおつまみ達