

## PHYSOR'08

### International Conference on the Physics of Reactors « Nuclear Power: A Sustainable Resource »に出席して

京都大学 中島 健

[nakajima@rri.kyoto-u.ac.jp](mailto:nakajima@rri.kyoto-u.ac.jp)

大阪大学 村田 勲

[murata@eie.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:murata@eie.eng.osaka-u.ac.jp)

近畿大学 大澤 孝明

[ohsawa@ele.kindai.ac.jp](mailto:ohsawa@ele.kindai.ac.jp)

日本原子力研究開発機構 久語 輝彦

[kugo.teruhiko@jaea.go.jp](mailto:kugo.teruhiko@jaea.go.jp)

#### 1. 概要

PHYSOR (International Conference on the Physics of Reactors) は、もともとは米国原子力学会の炉物理部会のトピカルミーティングとして開催されていた会合であるが、1990年より国際会議として米国外(フランス・マルセイユ)で初めて開催され、2000年からは米国の内外で2年毎に開催されるようになり、現在に至っている。

今回の PHYSOR'08 は、2008年9月15日(月)～18日(木)にスイスのインターラーケンにおいて、PSI (Paul Scherrer Institute) とスイス原子力学会の主催(ANS、NEAの共催)により開催された。スイスアルプスへの入り口とでもいふべきインターラーケンとでの開催とあってか、参加者は34カ国から550名を超え、前回カナダ・バンクーバーで開催された PHYSOR'06 を大幅に(150名以上)上回っている。米国からの参加者が最も多く119名であり、次いでフランス76名、開催国スイス60名であり、日本からは49名が参加し、4番目の多さである。

会議でのトピックスとしては、いわゆる原子炉物理に限らず、広く「原子炉の物理」



写真1: アルプスの山々に囲まれた  
インターラーケンの市街

に関するトピックスが取り上げられているが、今回特徴的だったのは、「Fuels and Materials Behavior」及び「Facilities of safety research」という従来の枠を超えた分野のセッションが新たに設けられたことである。このように新しい分野を取り入れたことも、参加者が増えた要因といえよう。会議は、朝 8 時 10 分からの Plenary session により始まり、その後 5 つの会場に別れての Session が夕方 5 時過ぎまで(最終日の午後は Closing plenary session) 続く、タイトなプログラムが組まれており、各セッションでは、口頭発表 265 件、ポスター発表 162 件が行われた。

以下、各著者の観点に基づいて、会議での話題を紹介する。

(注: 上記の参加者、発表件数等の数値は、入手した資料を基に算出したものであり、公式な数値ではありません)

## 2. Opening plenary session

オープニングセッションでは、持続可能な社会を形成していくために、最も重要なエネルギー問題について、ヨーロッパ、米国、アジア、そして、会議開催国であるスイスが、それぞれの、あるいは世界のあるべきエネルギー戦略を紹介した。

発表を聞いて感じた各国もしくは各領域の大きな方向性は次のようである。ヨーロッパと日本はほぼ同調と言える。原子力を温暖化対策の切り札として推進して行くという姿勢を示している。米国は、発表者の McFarlane 氏は、ヨーロッパ及び日本と同様、前向きな考えを持っていると感じたが、恐らく氏自身、国としては若干取り組み不足を感じているのではないかと思わせる部分があった。スイスは、原子力は一つの選択肢と位置づけたかなり冷静な考えを示した。以下順に詳しく見て行く。

### 1) ヨーロッパ : “Nuclear Energy Research in Europe,” R. Schenkel (JRC)

EU では、電力のうち 32% を原子力により賄っている。EU 圏に居住する人々は、原子力の競争力の高さ及びその温室効果ガス削減能力の高さを十分に認めているためであろう。新しいプラントの計画・建設も進められている他、プラントの寿命を延ばす措置も重要と位置づけられており、オランダの Borssele 原子炉では 60 年までの延長を既に決めている。

しかし、ここに至る道のりは長く、これまでに多くの議論を経てきた。いくつかを紹介すると、戦略的エネルギー技術プラン (SET Plan 2007) では、現在の原子炉の安全で安定的な運転が重要であること、長期的には、持続可能な原子炉技術の発展 (例えば Gen. IV) が必要である、との認識が示されている。2007 年 9 月には、持続可能な核エネルギー技術プラットフォーム (SNE-TP) が立ち上がり、2008 年には、戦略的研究計画 (SRA) が示された。それらによると、中長期的には、プラントの寿命延長と Gen. III 及び IV への転換が必要であることが示されている。また、ADS や VHTR などのオプションも指摘されている。2007 年には、オープンな議論を行うため、ヨーロッパ核エネルギーフォー

ラム (ENEF) の第一回会合がブラチスラバで開催された。

研究的な部分に目を移すと、バックエンドや燃料サイクル技術を主要問題と位置づけている。現行の原子炉 (Gen. II, III) の寿命を延ばし、安全で効率的な運転を継続すると同時に、長期的には、Gen. IV の高速炉を目指す。このほか、PA 問題を総合的に取り上げるため、ヨーロッパ内でのコンセンサス構築や原子力教育まで、きちんと議論する必要がある。このため EURATOM の研究プログラム (FP7) では、80.4 億ユーロを安全性、廃棄物処理、セキュリティ、環境の各問題にほぼ同額割り当てている。Gen. IV については、原子力エネルギーを電力以外の目的にも使用することを広く画策していく必要があるとし、高速炉の開発を Gen. IV の枠内で進める。しかし、現実問題としては、その実現は 2040 年よりも後になるだろう。

まとめとして、EU としては、

- 長期的な原子力戦略として、高速炉と Pu 並びにアクチノイドのリサイクルが重要であり、開発の優先順位を予算と時間の観点から決定する。
- 非電力分野の応用については VHTR 研究を産の協力のもと行うべき。
- 国際協力の必要性はもちろん、PA のためには、バックエンド戦略について真面目に意見交換を進めていく必要がある。

## 2) 米国：“Nuclear Energy and Global Warming,” H. McFarlane (INL)

Samuel Johnson の言葉から、“Your manuscript is both good and original, but the part that is good is not original and the part that is original is not good.”を引用してスタートした。この発表のことを言っているのである。少し日本的な謙虚な言い方とも言えるが、今回は日本人以外の人からでているため、初めは若干責任逃れに聞こえた。しかし、最後まで聞くともちろんそうではなかった。

McFarlane 氏の発表の多くは、常に地球全体を念頭に置いたものだった。しかし、それは、逆に米国にもっと世界の先頭に立って取り組んで欲しい、と言っているようにも聞こえた。発表内容の方はとても大局的なものだった。

このままの状態で行くと地球がどうなってしまうかを真面目に考える必要がある (それを、氏はシミュレーション結果により視覚的に示した)。それが温室効果ガスに関係していることは間違いない。温室効果ガスをどうするかということについては、もちろん地球工学的な除去も考える必要はあるが、やはり、その排出量を減らすことが重要である。経済発展はどうしてもエネルギーを必要とするからである。しかし、実際人類の歴史上これほどまでに経済が劇的に発展したことはなく、言い換えれば、これほど急激に人口が増大したことはかつてなかったのである。人類は、これまで直面したことの無い厳しい状況に置かれている。そのことを端的に示すためには、世界の人口分布の移り変わりを見れば良い (2000 年前から西暦 2050 年までの推移を 9 枚の世界地図で見せた)。

これは、シンプルであるがとてもインパクトがあり、非常に強い説得力を持つ。

以上を踏まえエネルギー源を考えると、現在、化石燃料、核分裂、そして、風力や太陽熱を含む、水素-ヘリウムエネルギーが候補となる。我々の核分裂は、廃棄物問題等の激しい議論があり、随分と逆風の時期もあったが、エネルギー源としてこれまで人類の役に立ってきたことは疑いの無い事実である。あまり知られていないが、ウランやトリウムは、地球ができた時から存在し、減衰し続け地球の温度を制御してきた。そして何よりも、温室効果ガスの排出量が少ないことは特筆に価する。

電力供給割合と炭酸ガス排出量の関係から考えると、国によって状況が異なること、また、原子力エネルギーは確かに大きな役割を果たしているが、水力が大きな寄与を占めている国もあること、一方で、再生可能エネルギーの割合は依然として低いこと、等が見て取れる。EPRIの炭酸ガス排出量削減能力のポートフォリオによると、2050年の段階で現在の排出量を下回らせるためには、原子力エネルギー以外に炭素のストレージなど直接対策の効果も大きいと見積もっている。米国では、2007年で31基の新しい火力プラント計画がキャンセルもしくは計画延期されているし、風力発電が、この10年で10倍近くに増大している。

原子力エネルギーは、当然将来の持続可能なエネルギー源として重要だし、炭酸ガスの排出を抑える役割を果たすことが期待できる。プリンストン大学のPacala氏及びSocolow氏による“Stabilization wedges”コンセプトによると、原子力エネルギーが果たす役割は、1GtC/year程度であり、それは、米国では1970年代の原子力発電所の建設ペース(5~8基/年)に相当するものであるとしている。原子力の割合を引き上げるためには、耐用年数を引き上げることや、新しいマーケットとして水素やプロセスヒートについてもオプションとしてあげられるとしている。

結局、上記のコンセプトによると、世界では1000基程度の発電所があればシナリオを満たすことができ、そのための資源であるウランやトリウムもまだ存在する。アクチニドリサイクルを完成させ、Gen. IV高速炉により、資源の利用率は100倍にはなるので、超長期的にも持続可能である。しかし、実際の実現のためには、現在様々な形で存在するバリアーをなくさねばならないということを忘れてはならない。

### 3) 日本とアジア：“Perspectives for Nuclear Energy in Japan and Asia,” K. Matsui (IAE)

日本のエネルギー政策の基本は、「安定供給、環境保全、低価格」であり、長期的には、「30~40%のシェア」、「核燃料サイクル開発の推進」、「2050年までの商用ベースのFBRの実現」を掲げている。より具体的には、現行の原子炉の寿命延長及び新たな長寿命原子炉への更新を、核燃料サイクル及びFBRの完成を目指しながら平行して進める。さらには、日本企業の海外への進出のサポート、国と地方のコミュニケーション、廃棄物処理の対策強化などについても、原子力政策の一環として進める。なお、特に核燃料サイ

クルについては、使用済み燃料貯蔵施設、再処理施設、MOX 燃料製造施設、を完成させ、LWR-MOX を経て、FBR へと移行していくシナリオである。

地球温暖化問題に対しては、日本は“Cool Earth 50”を提案しており、2050 年までに炭酸ガス排出を現在の半分にすることを旨とする。日本には、世界トップレベルのエネルギー技術があるので、ロードマップ策定や国際協力について積極的に参加して行く必要がある。世界的には、IEA の 2008 年の Energy Technology Perspectives (ETP) によると、BLUE Map シナリオで、2050 年における原子力シェアは 23%、MIT による 2003 年の原子力エネルギーの将来研究では、2050 年で 19%と評価されている。アジアで見ると、インドでは 2050 年には原子力は約 20%シェア (275GWe)、中国では 2030 年頃から FBR を導入し、2050 年で約 15%シェア (250GWe)、等となっている。温室効果ガスの排出量については、中国が突出して多いが、インドのプラント数の増加率も多い。一方、GDP 当たりの排出量については、日本は突出して小さく、世界的にみても米国の半分、EU 諸国よりも 40%程度小さい。

インドを含めたアジア諸国の人口は世界の半分にもなる。とくに、中国やインドの経済発展は著しいものがある。アジアの原子力依存度、80GWe、は世界の 1/3 を占めており、2050 年には MIT によると 350GWe にもなる。別の研究では、1000GWe にまでなるとの見方もある。今後を考えた場合、燃料サイクルや廃棄物処理についての技術は不可欠であり、様々な機関や国際的協力関係、援助、人的資源が原子力技術開発のキーになるといえる。

#### 4) スイス：“Swiss CO<sub>2</sub>-free Electricity Production into the Future,” W. Steinmann (SFOE)

IEA の試算では、世界のエネルギー消費は次の 25 年で 50%増大し、その中で石炭の増大が一番大きい。さらに CO<sub>2</sub> の排出量は、55%増大すると見込まれている。松井氏の発表でも参照された IEA の BLUE Map シナリオでは、2005 年比較で、50%の CO<sub>2</sub> 排出量の削減を 2050 年までに行う、としている。つまりこれは、完全な方向転換を必要とする。ETP によると、ベースラインの排出量は 2050 年で 62Gt となっている。それを BLUE Map シナリオで 14Gt にするというものであるが、その中身は、原子力により 6%、再生可能エネルギーにより 20%程度、その他は、効率の見直しによっている。つまり、原子力で見ると現在のエネルギーシェアが 5%程度で、今後 50 年で 20%程度まで上昇するとしても、その効果は、2050 年までで -6%程度と見積もられる、ということであり、むしろエネルギー効率に目を向けたほうが良いのではないだろうか（以上が、この後も貫かれる Steinmann 氏の基本的な考え方である）。

スイスのエネルギー見直しは以下のように 4 つのシナリオで議論されている。

シナリオ 1：通常通り。

シナリオ 2：CO<sub>2</sub> 税を導入、協力を呼びかける。

シナリオ3：数値目標を導入し、規制を強化する。また、国際的な足踏みをそろえる。

シナリオ4：さらに、資源確保のために様々な優先順位政策を経済や生活に導入する。

それぞれのシナリオにより、2035年でのエネルギー消費は、2003年規模に比較して、それぞれ+2%、-4%、-14%、-27%になると試算している。電力消費については、シナリオ1では、+29%であるが、シナリオ4では、-2%にできる。2035年までには、フランスからのエネルギー輸入も終わらせ、ほぼ原子力と水力により賄うという見通し（しかし、Looming（ぼんやりと浮かぶ）としている）である。シナリオ4により、供給量不足はほぼ避けられ、コージェネを広く導入する。

そして、スイスにおけるエネルギー戦略は以下のものである。

政策1：エネルギー効率の向上と需要の抑制

CO<sub>2</sub>税の導入、エネルギーの規制強化、エネルギーのラベル化、機器に対する推奨技術の選定、そのための証明制度の設定、エネルギー効率基金（時限）設立。

政策2：再生可能エネルギーの推進

熱源として、バイオマス、太陽熱、地熱などを、電力として、水力、バイオマス、地熱、風力などを、バイオ燃料として、バイオエタノール、バイオディーゼルなどをそれぞれ推進する。

政策3及び4：供給量不足対策として、短期的には、CO<sub>2</sub>を排出する熱源を利用するが、長期的には、原子力を考える。但し、導入時間がかかること（プランニングに通常4年、国民投票の対象ともなっている）と廃棄物は問題であると考えている。国際的には、EU内での理解を得ること、そして、エネルギーマーケットを機能させ利用可とすることが重要である。

最後に以下を指摘する。「政治家は、エネルギー政策のための条件を整える仕事をする。つまり、それは、供給、競争、持続可能性について安定的に実現するということである。しかし、エネルギーを取り扱う政府機関だけでは状況を良くすることは難しい。それには、この会議に出席しているような、能力の高い専門家や、革新的なアイデアを持つ研究者が必要である。しかし、我々は企業家や投資家にも当然期待しなければならないだろう。また、究極的には、良く理解している住民が重要であり、彼らが持続可能なエネルギー社会を支えることになるだろう。」

[村田 勲]

### 3. 核データ関連

今回の PHYSOR'08 の特徴のひとつは、従来に比べて核データ関係の発表件数が47件と大幅に増えたことである。以下に今回の発表論文数の内訳を示す。

口頭発表：19件（核データの測定と評価：5件、共分散：5件、

評価・処理の方法：4件、ライブラリの検証と応用：5件）

ポスター：28件

このことが、炉物理と核データとの交流の深まり、炉物理を考えた核データ研究、核データの検証をねらった炉物理の研究が進展していることの証左であるならば好ましいことである。

以下、筆者の目から見て興味を感じたトピックスを紹介する。

## 1) Np ベンチマーク体系の解析

マイナーアクチニド (MA) への関心を反映して、Np-237、Am-240~243 等の核データ測定と評価、ベンチマーク実験との比較についての報告が目立った。

例えば、Np-237 の臨界実験は、従来はミリグラムないしグラム・オーダーのサンプルワース測定に止まっていたが、International Critical Safety Benchmark Evaluation Project で、6kg の Np を、高濃縮ウラン (HEU)、ポリエチレン反射体+HEU、低炭素鋼反射体+HEU で囲んだ臨界実験が実施された。この3つの体系の測定データを用いて ENDF/B-VII ライブラリの Np-237 データを検証した結果が R. Brewer ら (LANL) によって報告された。その結果、 $k_{\text{eff}}$  の計算値が  $2\sigma$  だけ過小になる傾向が見られ、これは、Np-237 と HEU の弾性散乱及び Np-237 の捕獲断面積が原因と思われるので、そのデータを再検討する必要があると結論されている。キログラム・オーダーの MA を使ったベンチマーク実験が実施され、それに基づいて核データの検証が行われるようになってきているとは、知らなかった (知らぬは筆者だけか?)。

## 2) Am-241(n, $\gamma$ )断面積と逆過程に対する中性子透過係数

Am については、M.B. Chadwick、V. Maslov、筆者、の3件の発表があった。

Chadwick は Los Alamos で進められてきた DANCE 実験 (Detector for Advanced Neutron Capture Experiments) 計画で得られた 0.1keV~1MeV 領域の Am-241(n, $\gamma$ )断面積データと理論計算値が良好な一致を示すことを報告した。この実験では  $4\pi$ ガンマ線カロリメータで全捕獲ガンマ線を測定することにより、核分裂片からのガンマ線と識別するという方法をとっている。

理論計算では、従来、Hauser-Feshbach 計算では、逆過程の中性子透過係数は、基底状態に対する値を使用するのが通例だったが、Chadwick らはチャンネル結合理論を拡張し、励起状態に対する中性子透過係数を計算するという方法を使った。筆者も、長年、逆過程の中性子透過係数に基底状態に対する計算値を使うことの妥当性について、頭の中に小さな疑問符を持ちながら、解決しないまま今日まで来てしまった。Chadwick の報告によると、この新しい方法による計算結果は Am-241(n, $\gamma$ )断面積の 100keV 以上の領域で、ENDF/B-VII よりも良好な一致を与えるという。今回は(n, $\gamma$ )と(n,2n)反応断面積だけの発表だったが、中性子透過係数の効果は非弾性散乱でより顕著に現れると思うので、この方法で(n,n')断面積を解析し、従来の計算法及び実験値と比較した結果を見たいと思った。

【参考】帰国後、調べてみると、励起状態の中性子透過係数は s 波に対してはあまり変わらないが、p 波ではある程度の差が見られるという報告が河野俊彦氏によって行われていた。[cf. 宇宙核物理連絡協議会主催 第1回研究戦略ワークショップ「核物理から見た宇宙  $r$  プロセス研究の新時代に向かって」理化学研究所 (2008年9月)]

### 3) 核分裂即発中性子スペクトルの炉物理的効果

Chadwick は、核分裂即発中性子スペクトル (PFNS) の効果を調べるため、Pu-239 の PFNS に  $\pm 1\sigma$  の摂動を加え、Jezebel (硬スペクトルの Pu 球) の  $k_{\text{eff}}$  を計算した結果についても言及した。この結果、約 0.3~0.4% という大きな変化が見られた。これは GNEP の枠内で検討されている新型炉の特性にも影響が及ぶので、Los Alamos では、PFNS を理論・実験の両面からの詳細な研究を進めることを計画しているという。PFNS の誤差が  $k_{\text{eff}}$  に大きく影響することは、石川眞氏 (JAEA) がかねて指摘されてきたことであるが、そのことが確認されたことになる。

PFNS の不確かさと共分散については、このほか、PFNS を 2 つの Watt 分布で表示する方式と JENDL-3.3 の共分散ファイルを用いた I. Kodeli (IAEA, OECD) らの報告もあった。

### 4) MA の核分裂中性子スペクトル計算法

Am 同位体の臨界質量には 30~80% の不確かさがあり、その原因は、核分裂断面積と PFNS の不確かさにある、という指摘がある (H. Dias *et al.* 2003)。やはり、MA の核データにはまだまだ問題点が内在しているようだ。

JENDL/AC-2008 作成の際に、筆者は、MA 核種のマルチモード Madland-Nix モデルによる PFNS の評価計算をやらせていただいた。今回の会議では、その結果を JENDL-3.3 と比較して示した。JENDL-3.3 (Maslov の計算値 (1996~7) を採用) の PFNS 評価データを見ているうちに、不思議なことに気がついた。入射エネルギーが (n,n') 反応の閾値 (約 6MeV) を越えると、スペクトルが急にソフトになり、かつ、そのスペクトルに unphysical なガタガタ (揺らぎ) が見られるのである (図 1 を参照)。スペクトルがソフトになるのは、どうやら、核分裂片から放出される post-fission neutron のスペク

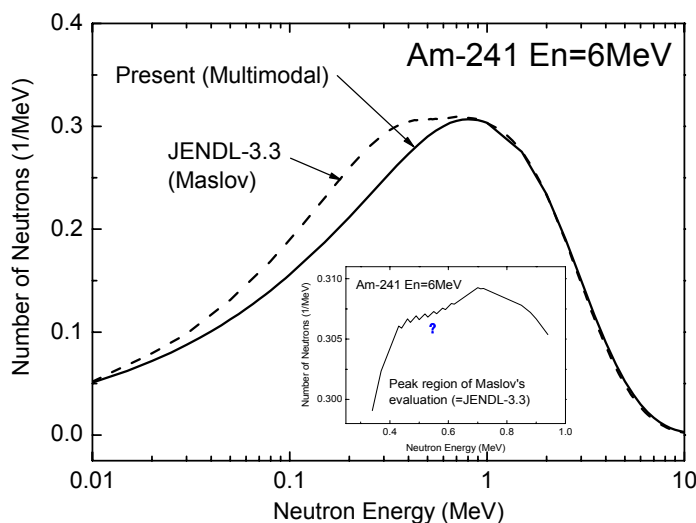


図1 Am-241 の6MeVにおける核分裂中性子スペクトル  
(I. Ohsawa, PHYSOR'08)



トルの上に、pre-fission (inelastic) neutron のスペクトルが乗っかってくるためらしいが、それにしては pre-fission neutron の寄与分が大きすぎるように思える。入射エネルギー 6MeV では、second-chance fission の寄与はせいぜい数%程度に過ぎないからである。

筆者はこの会議で、この疑問を直接 V. Maslov に質したい、と思っていた。彼の返事は、「この計算は自分ではなく、自分の部下がやったものだから、このガタガタは自分の責任ではない」という拍子抜けするものだった。たとえそうであっても、同じコードを使って計算した結果を、自分の名前で報告しているのだから、少なくとも原因を調べ、修正する責任はあると思うのだが。

今回の会議での Maslov の論点は、「pre-fission neutron が重要」であった。彼は Hauser-Feshbach 理論で計算した結果、従来よりずっとソフトな pre-fission neutron スペクトルが得られた。Weisskopf-Ewing の式などを使っているようではだめだ、と言う。筆者の経験では、入射エネルギー 6MeV 以上では、連続状態への非弾性散乱が主体になるので離散状態への中性子放出はさほど重要ではなくなると思うのだが。

もう 1 点、彼は以前には、中性子の前平衡放出が重要だ、Madland-Nix モデルではこれが考慮されていないから不正確だ、と主張していた。もしそうなら、スペクトルは前平衡過程成分の存在によってハードになるはずだが、今回はそのことは一言も言及しなかった。

彼の論点は、常に pre-fission neutron にあり、肝心の post-fission neutron は Watt 型スペクトルで表示するなど、扱いが（私には）ずいぶんラフに見える。これではバランスを失っているのではないか。結局、彼との議論は、いつもの通り平行線をたどった。

## 5) IAEA/NDS、LANL の関心

PFNS が炉物理特性に及ぼす影響の大きさに鑑みて、LANL では、理論・実験の両面から PFNS の研究を行う研究計画を立てようとしている。一方、IAEA/NDS は、CRP (Coordinate Research Project を立案するため Consultants' Meeting を 11 月に招集して集中的に議論することを提案している。

実は、歴史が古い割には、PFNS の信頼度の高い精密な測定データは多くないのである。狭いエネルギー範囲のスペクトルデータであったり、入射エネルギーよりも下のエネルギー領域のスペクトルデータの信頼度が不明だったり、というケースが多い。Madland らがまとめた NEA/WPEC-9 (核分裂中性子スペクトル) 報告書 (2003) でも、U-235 についてさえ、まだ不確かさが大きいので高精度の測定を急ぐべきである、と提言している。

核分裂における中性子放出の物理を解明するには、中性子だけを測っていても不十分である。筆者は、核分裂片と中性子の、エネルギー、角度のマルチパラメータ測定が重要だと思っている。シングルパラメータ測定には限界がある。さまざまな入射エネルギー

一における(n,f), (n,n'f), (n,2nf)反応の核分裂片と中性子の同時相関測定を行うとおもしろいと思う。他方、臨界体系の積分実験、共分散を用いた感度解析、多数の閾反応を利用した核分裂スペクトル平均断面積などが重要であることは言うまでもない。[大澤孝明]

#### 4. 炉物理計算手法

炉物理計算手法に関する報告として、「Lattice physics calculations」と「Lattice and core physics methods」のセッションにおける発表の概要を紹介する。

##### 1) Lattice physics calculations における発表

• “An optimized ultra-fine energy group structure for neutron transport calculations,” H. Huria, Westinghouse, USA

Westinghouse の格子物理計算コード PARAGON では、現行の ENDF/B-VI.3 の 70 群エネルギー構造では、U-238 の共鳴積分を 3% 減少させる。これを是正するために共鳴自己遮蔽の近似計算を排して共鳴領域や Pu の低エネルギー共鳴を詳細に取り扱い、かつエネルギー群数をできるだけ最小化した最適な詳細エネルギー群構造として、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP との比較により、6064 群構造（高速：64 群、共鳴：5877 群、熱：123 群）を求めた。検証計算として、ピンセルと集合体ベンチマークに幅広く適用した。ピンセルにおいて、ドップラー反応度欠損ベンチマークに適用して、臨界固有値を MCNP と比較した結果、 $\text{UO}_2$  燃料（濃縮度 0.7% から 5%）では最大 47pcm、原子炉級 MOX 燃料（富化度 1% ~ 8%）では最大 134pcm であった。BWR ピンセルに対しては、0 から 60% ボイドにおいて最大 84pcm、PWR 集合体では、最大 121pcm であった。多様な軽水炉体系での臨界固有値をほぼ 200pcm 以内で計算している。

• “Equivalence of control rod model in high temperature gas-cooled reactor,” Z. Xuhua, Inst. of Nuclear and New Energy Technology, China

高温ガス炉における制御棒や吸収球に対する計算モデルを種々提案し、詳細計算との比較により、最適な計算モデルを提案した。吸収体に対しては表面積を保存し、その他は体積を保存する計算モデルが推奨された。

• “Burnup dependence of coolant void reactivity for ACR-1000 cell,” R. Le Tellier, AECL, Canada

CANDU-6 後継の先進炉心として ACR-1000 を開発中である。ACR-1000 は濃縮ウラン燃料を使用し、軽水冷却である。また、43 本の燃料棒からなる燃料バンドルの中央には毒物棒が装荷される。ACR-1000 の冷却材ボイド反応度を予測するための 2 次元無限集合体計算法として、DRAGON と WIMS-AECL コードの比較検証が進められた。共鳴計算・中性子束・燃焼計算用のメッシュ分割の影響、中性子漏えいモデルの影響などが調査された。中性子漏えいモデルの検証には実験データの取得や 3 次元輸送計算の必要性が述

べられた。

• **“Recent advances in the HELIOS-2 lattice physics code,” C.A. Wemple, Studsvik Scandpower USA**

HELIOS は 1990 年代初頭にリリース（現行 1.10）され、一般形状を対象に衝突確率法により格子物理計算に供されてきた。最近、HELIOS に改良が加えられ、HELIOS-2 として、リリースが予定されている。主な改良点は、中性子輸送解法をこれまでの中性子流結合衝突確率法（CCCP）にキャラクターリスチックス法（MOC）を加えたこと、核データライブラリを ENDF/B-VI から ENDF/B-VII としたことである。CCCP から MOC への変更の理由は、中性子流結合がないと衝突確率法だけでは計算時間が遅いことと、大規模問題ではメモリーが大きくなることであり、MOC ではそれらを改善できるためである。MOC 法では、Non-cyclic reflected ray tracing と diffusion-like acceleration で内側反復加速を行っている。ENDF/B-VII ライブラリのエネルギー群構造は、177 群（高速 46 群、共鳴 73 群、熱 64 群）である。光子に対しては 49 群である。アクチニド 43 核種、FP 核種 178 核種、その他の核種を含めて合計 360 核種がライブラリ化されている。HELIOS-2 のリリース予定は 2008 年冬とのことであった。

• **“Refinement of the Santamaria-Hfaiedh energy mesh between 22.5eV and 11.4keV,” A. Hebert, EP Montreal Canada**

Santamaria-Hfaiedh エネルギーメッシュ（SHEM）では、これまで 281 群構造であった。共鳴の取り扱い手法として、Ribon 拡張モデルを簡素化して減速補正を回避することを目的に、22.5eV から 11.4keV のエネルギー範囲におけるエネルギー群構造を検討した。その結果、このエネルギー範囲でのこれまでの 30 群構造を 118 群構造にし、全体で 361 群構造が求められた。このエネルギー群構造は、減速の正確な取り扱いの他、相互共鳴干渉効果、温度勾配効果を取り入れることを可能とした共鳴取り扱い法（SPM：subgroup projection method）と用いられる。このエネルギーメッシュ構造ライブラリは、[www.polymtl.ca/merlin/](http://www.polymtl.ca/merlin/)で 10 月 1 日に公開されるとのことであった。

## 2) Lattice and core physics methods における発表

• **“Developments within WIMS10,” T. Newton, Serco, UK**

様々な熱中性子炉体系に適用可能な核計算ソフトウェアである WIMS コードの改良が紹介された。最新バージョンとなる WIMS10 は 2008 年に公開予定である。WIMS10 での主な改良点は、MOC 法を用いた 3 次元輸送計算ソルバーの開発、燃料内の温度変化を考慮に入れたサブグループ法の改良と燃料温度分布の計算機能、衝突確率法・拡散計算法の摂動モデルの導入、高速炉解析への適用性拡張のための ECCO との連携、JEFF3 ライブラリの整備、核分裂スペクトルへの材料・核種依存性の取り込み、等である。3 次元 MOC ソルバー（CACTUS-3D）の機能や先進的 CANDU 炉（ACR）等への適用例、燃料

ペレット内の温度依存性を考慮したサブグループ法の検証例などが報告されている。

• **“CASMO-5 energy release per fission model,” J. Rhodes, Studvik Scandpower, USA**

格子物理コード CASMO-5 に取り入れられた核分裂あたりの放出エネルギー計算モデルとその検討結果が紹介された。全回収エネルギーにおいてこれまで多くのコードで採用されていた捕獲あたり一定のエネルギーを放出しているとの仮定を排して、コード内で計算される中性子捕獲率を用いて捕獲による放出エネルギーの寄与を正確に計算するモデルの導入を検討している。水素 (H-1) やボロン ( $(n,\alpha)$ 反応) の捕獲反応あたりの放出エネルギーは他に比べて小さいため、ホウ酸水の濃度が高ければ捕獲あたりの平均の放出エネルギーも小さくなる。また、ガドリニウムや FP 核種の捕獲反応あたりの放出エネルギーは他に比べて大きいこと、Gd 入り燃料の燃焼初期では捕獲あたりの平均の放出エネルギーは大きいこと、燃焼が進むほど FP 核種の寄与が大きくなり捕獲あたりの平均の放出エネルギーは徐々に大きくなっていくことが示された。また、反応度の高い集合体で生じた過剰の中性子は反応度の低い集合体での捕獲反応の増加に寄与するとの予測から、捕獲エネルギーの空間依存性を取り扱うことが検討されている。捕獲あたりの平均の放出エネルギーの計算にあたり、従来の ( $\nu-1$ ) 個の中性子が捕獲に寄与するというモデルと捕獲対核分裂反応率の比が捕獲に寄与するというモデルを比べ、後者が正確である検証例を紹介した。

• **“Modification of the ANC modal code for analysis of PWR assembly bow,” F. Franceschini, Westinghouse, USA**

集合体曲がりが起こると、集合体間のギャップが通常の均一な間隔に比べ変化する。これは、水の体積変化を引き起こすため、中性子の減速に変化をもたらし、出力分布、燃料燃焼履歴や燃料棒の内圧等に影響し、安全性解析に少なからず影響する。Westinghouse では、安全性解析に燃料集合体曲がり解析を取り込む方式を開発した。標準の炉心解析コード ANC (Advanced Nodal Code : NEM を解法) を修正して、3次元の集合体間ギャップ分布を取り込んで核計算が可能な ANCGAP パッケージを開発した。このパッケージには、①炉心の力学解析から炉心内のギャップ分布の取得、②Westinghouse の 2次元輸送計算による定数作成コード PHOENIX-P を用いた、それらのギャップ条件を網羅した格子定数 (集合体断面積、不連続因子、出力分布など) の作成、③実際のギャップ形状やギャップ履歴に対応させた格子定数の調整、④調整された格子定数を用いたノード法に基づく炉心解析による 3次元ピン出力分布、燃焼など安全解析用の核的パラメータの供給、のステップが組み込まれている。

関連論文として、計算例が以下のとおり発表されている。

• **“Analysis of PWR Assembly bow,” R.J. Fetterman, Westinghouse, USA**  
(セッション Core analysis-III)

ある PWR に対する集合体曲がり解析の計算モデルと解析結果が紹介された。集合体

曲がり最大 8mm であれば、燃料棒 1 本の積分出力  $F_{\Delta H}$  及び局所出力ピーキング  $F_Q$  はそれぞれ 1% 及び 2% であった。これらの増加は、安全解析の想定内で吸収でき、また、これまで集合体曲がり 8mm を超えるような事例はまだ見られたことがないとのことであった。

• **“Use of 2D whole core reactor models for PWR analysis with APOLLO2,” I. Zmijarevic, CEA, France**

キャラクタースティックス法 (MOC) と詳細な燃焼計算を用いた APOLLO2 による 2 次元非均質全炉心計算性能について報告された。JEF-3.1 を基本ライブラリとした XMAS 群構造の 172 群と SHEM 構造の 281 群ライブラリが用意されている。MOC 法では、メッシュ内で中性子束を線形近似する計算手法が開発されており、PWR 全炉心体系に対して、同等の計算精度を得るのに中性子束平坦近似に比べメッシュ数を約 1/3 に低減できている。共鳴自己遮蔽の計算は、燃料ピン内を 6 領域に分割して行われ、これらの領域は燃焼領域としても独立して扱われ、集合体での高精度の燃焼計算が実施できる。計算時間、メモリー削減のための少数群炉心計算が検討され、SHEM 構造であれば 26 群としても XMAS172 群以上の計算精度をもち、参照解の連続エネルギーモンテカルロコード TRIPOLI-4 の計算結果と 200pcm 以内で一致することが示された。散乱の非等方性の影響では、P1 計算により出力分布の誤差が低減されることが示された。2 次元集合体計算と 2 次元 MOC 炉心計算とを中性子束再構成法に基づき組み合わせた燃焼計算法に基づき、全炉心非均質燃焼計算の方式を実際の PWR 体系で実証した。 [久語輝彦]

## 5. 実験施設の状況

Technical Plenary Session の一つとして、“Experimental Facilities: experience, results and needs,”と題するセッションが行われ、欧米及びロシアから 5 件の発表があった。いずれも、原子力開発における実験施設の重要性を認識した報告であり、将来にわたり、その機能を維持するための努力、国際協力への期待がみられる。

• **Nuclear Facilities in OECD Countries: Status and Outlook**

P. D'hondt (SCK・CEN) からは、OECD における原子力試験研究施設のニーズに関する Expert Group (EG) の活動についての報告があった。この EG は、世界の試験研究施設の状態をレビューし、施設の将来のニーズを明らかにするために 2005 年に設置されたものであり、この EG により、積分テストの現状と将来の R&D のための試験研究施設のニーズに関する報告書と試験研究設備のデータベース (RTFDB) が整備されている。

データベースには 700 件を超える情報が記載されており、2007 年 7 月に OECD 加盟国に公開された (<http://www.nea.fr/rtfdb/>)。一方、報告書は年内に完成予定であり、「核データ測定」、「原子炉開発」、「中性子応用」、「ADS と核変換システム」、「燃料研究」、「材料研究」、「安全研究」の各分野における施設のニーズが述べられるとのこと。核データに

関しては、微分データと積分データを測定するための両方の施設の検討が行われる予定である。

#### • **Experimental Reactor Physics Perspective in France**

G. Bignan (CEA) からは、フランスにおける研究炉の状況についての報告があった。フランスでは、現在 9 基の研究炉が使用されている。このうちの 3 基、EOLE、MINERVE、MASURUCA はゼロ出力炉（臨界実験装置）であり、これらを用いて軽水炉、核変換、GEN-IV 等に関する広範囲な炉物理研究が行われ、その結果は核データや解析手法の検証に用いられている。これらの炉は、CEA の方針として今後も維持することが決定されており、次のとおり、施設の改修が行われているとのことである。

MASURUCA は現在改修中であり、2013 年後期より GEN-IV（高速炉）に関する R&D 研究を行う予定。また、EOLE と MINERVE は現在運転中であり、MASURUCA の後に改修が予定されている。後者の 2 基の炉は、今後も欧州における軽水炉開発での主要な施設といえる。ゼロ出力炉に関する将来プログラムとして、シニアサイエンティストの相互派遣（exchange）及び若い世代の教育訓練があるが、これらは国際協力としてオープンすべきであると述べている。

（補足：フランスの状況と比較すると我が国の臨界実験装置は、相当に厳しい状況に置かれているといえる。今後も原子力の研究開発継続していく上では、国内の装置の改修等の整備が進められるべきと考える。）

#### • **Status and Outlook for Irradiation Testing ... from a Halden Reactor perspective ... mostly**

W. Wiesennack (OECD Halden) からは Halden 炉による材料照射研究についての報告があった。Halden 炉では、これまでに多くの燃料及び材料の照射試験が行われ、関連する計測技術の開発が進められてきた。現状のニーズとしては、燃焼度増加に関する R&D、高経年化に関する材料研究が挙げられる。また、今後のニーズとしては、安全上裕度を維持した上で、運転経費を低減するための、燃料の利用効率・信頼性向上、運転の柔軟性向上の要求に対応する研究開発がある。なお、Gen. IV 炉や ADS では、軽水炉と核特性が大きく異なることから、材料研究が可能な研究炉あるいは原型炉の建設が欠かせないと考える。同分野では、今後、相当な開発作業と試験が必要であろう。

#### • **Substantiation of Physical Concepts of Fast Reactors in Russia: Experience and Prospects**

Y. Khomyakov (Kurchatov) からは、ロシアにおける高速炉開発に関する報告があった。これまでの高速炉の実験及び理論的研究開発の歴史が紹介された。最近の研究としては、臨界実験装置 BSF-1 及び-2、照射炉 BOR-60、原型炉 BN-350 (1995 年で停止)、実証炉 (?) BN-600 を用いた各種試験が行われている。また、今後の計画として、MOX 燃料を用いた発電炉 BN-800 が 2012 年の運転開始を目指して建設中である。さらに、3 種類の新しい高速炉の概念が検討されているとのことである。実験施設としては、今後の高速炉の炉物理研究には、既存の BFS 装置の更新により対応する。照射炉 BOR-60 は、2015～2017

年に新しい多機能実験炉 MBIR にリプレースされる予定とのことである。

#### • Nuclear Facilities in the US: Status and Outlook

P. Finck (INL) は、米国における原子力施設に対するニーズについて報告した。今後 20 年間の原子力エネルギーを支えるためには、米国内の研究開発施設を再活性化が必要となることから、研究開発施設に対する今後のニーズを、産業界の将来目標及び既存の施設状況の 2 面から検討した。

既存軽水炉や改良型軽水炉といった直近の研究開発のニーズに対しては、既存施設により対応可能といえる。一方、今後 20 年間の研究開発については、大きなギャップがあるが、新しい施設のための経費については、国際協力が望ましい。また、DOE のインフラ整備にはプライオリティに基づく計画が必要である。大学の R&D 施設については改修が必要であるとしている。 [中島 健]

### 6. Closing plenary session

クロージングセッションでは、優秀論文賞として、各分野から 1 編または 2 編が選ばれ、16 分野から合計 26 編が発表された。これらは、Annals of Nuclear Energy の特集号に掲載される予定である。続いて、優秀ポスター賞として、3 件のポスターが紹介された。また、学生優秀論文賞が発表された。原子炉理論、炉物理実験、軽水炉解析、先進システムの観点から本会議の総括がなされた。最後に、関係各位への謝意が表された。次回の PHYSOR2010 は、2010 年 5 月 9 日から 14 日にピッツバーグで開催される ([www.physor2010.org](http://www.physor2010.org))。

優秀論文賞の中から、興味深く感じたものについて、以下に紹介する。

#### 「The Impact of $^{238}\text{U}$ Resonance Elastic Scattering Approximations on Thermal Reactor Doppler Reactivity」 D. Lee, Studvik, USA

熱外領域における弾性散乱を正確に取り扱う散乱カーネルを定式化し、それに基づき新たに開発したモンテカルロコード MCSD へ実装した。熱外領域では標的核は静止していると仮定して弾性散乱を取り扱うことが多い。重核は中性子の散乱効果が極めて小さいとの認識からこの仮定が正当化されてきたが、本論文では U-238 の熱運動を考慮して U-238 の共鳴弾性散乱を正確に考慮してその影響を評価した。正確なモデルに比べ標的核が静止したモデルは、軽水炉  $\text{UO}_2$  体系に対して、実効増倍率を高温全出力条件で約 200pcm 大きく、結果として、ドップラー反応度係数を約 10% の小さく見積もることを示した。高温ガス炉の HTR に対して、実効増倍率を高温全出力条件で約 450pcm も大きく見積もることを示した。 [久語輝彦]

### 7. その他

せっかくインターラークンで開催された会議の報告だというのに、セッションの紹介

ばかりでは主催者に申し訳がない(?)ので、最後に少しだけ、周辺の事項について触れることとします。

インターラーケンにはスイスの中心に位置し、ユングフラウ山(標高4,158m)、メンヒ山(4,099m)、アイガー山(3,970m)などのスイスアルプスへの登山口にあたる町である。この町は、二つの湖(トゥーン湖とブリエンツ湖)に挟まれており、町の名(Interlaken=Inter lakes)はそれに由来している。

会場は、Casino Kursaal(クアザール)という築150年ほどの施設が使用された(写真2)。その名のとおり、会場にはカジノが併設されており、参加者も楽しめるようになっている。参加者をなるべく外へ出さないようにとの配慮からか、期間中の昼食は全て会場内のコンサートホールにて Hosted lunch が提供された。

スイスをご存知のように、登山鉄道が発達しており、例えばインターラーケンから、富士山よりも高いユングフラウヨッホ(標高3,475m)までは登山電車を乗り継いで、2時間少々で辿り着くことができる(運賃は結構かさみますが)。このような恵まれた環境の中で、果たして4日間も会場へ足を運ぶことができるのか、いささか心許ないところであったが、幸いにも(不幸にも?)会議の前半は天候が悪く、インターラーケンでは雨、ホテルのユングフラウ山頂テレビによると山の上は吹雪という状況であり、会議の出席率はかなり高かったようである。ただ、この雨のため、日曜日夜にブリエンツ湖上の遊覧船内で行われたウェルカムレセプションでは、周りの風景がほとんど見え、狭い船内で人に揉まれて過ごすこととなってしまった。しかしながら、後半には天候が回復し、一步会場の外へ出ると、アルプスの山々がパノラマのごとく広がり、参加者を大いに誘惑するのであった。ちなみにユングフラウ(Jungfrau)とは若い女性(Young lady)という意味であり、この誘惑に抗することは(男女ともに)かなり困難といえる。なにせ、ちょっと電車に乗ると、写真3のような風景が目の前に広がっているのだから。やはり、仕事ではなく休暇で出かけるべきところである。

[中島 健]



写真2: 会議場 Casino Kursaal



写真3: アイガー (だと思う。)