

## < 国際会議に参加して >

原子燃料工業株式会社 花山 育志  
( E-mail : hanayama@nfi.co.jp )

### 1 . 概要

シカゴで 2004 年 4 月 25 日 ~ 29 日に開催された PHYSOR2004 に参加した。PHYSOR は原子炉物理を主に取り扱った国際会議であるが、約 300 もの発表件数を考えると、国際的に見てこの分野の研究がいかに盛んに行われているかがわかる。

会議の雰囲気は我が国における学会と何ら変わりなかった。発表の質も非常に高いと感じた。炉物理の流れを変えるような、センセーショナルな報告には出会えなかったが今後このような国際会議には積極的に参加・報告したいと考える。

興味を持ったセクションについて概要を以下にまとめる。

### 2 . Plenary Session

フランス, ロシア, 日本, アメリカより原子力利用に関するトピックスや今後の炉物理研究活動等に関する総括的な報告がなされた。日本からは東大 岡教授が報告された。Studsvik Scandpower の Smith 氏は、実際の原子炉における物理事象が非常に多岐の学術的分野にわたっていることから、炉物理研究者が原子炉の運転管理を、逆に運転管理者が炉物理に関する理解を深めることの重要性について説明された。私も以前より原子炉の特性は炉物理だけでなくそれ以外の種々の事象の重なりという認識を持っていたことから共感を覚えた。また同氏により、モンテカルロ法による炉心計算の可能性や近年現実的な計算時間で可能となった 3 次元燃料棒単位の炉心輸送計算なども紹介された。LANL の Brown 氏からは MCNP の変遷や今後の大規模計算に向けた取り組みなどが報告された。特に並列化計算については 3200CPU を使用し約 70% の効率を達成するなどソフト・ハード両面で進化してきている。

### 3 . Reactor Analysis Methods

本セクションでは、各国で使用されている核計算コードと炉物理に対する取組みなどが紹介された。日本からは阪大 竹田教授より報告がなされた。また、3 次元近代ノード法による炉心計算と 2 次元非均質体系の炉心計算を組み合わせたハイブリッド炉心計算手法など、炉心計算精度向上を図る様々なアイデアが見られた。

### 4 . Advances in LWR Analysis

本セクションでは、被覆粒子燃料に対する二重非均質性を考慮した計算手法に関する報告や粗メッシュ輸送計算精度の向上に関する報告等がなされ参考になった。特に粗メッシュ計算は、微細なタイムステップを取り扱う kinetics や多数の炉心計算を必要とする装荷パターン最適化に対して計算時間の観点から有効であることから、個人的には重要視している。

またこのセクションでは、燃料棒単位の不連続因子をニューラルネットワーク(NN)で算出する内容の報告もなされており、NN をはじめとする人工知能応用の幅広さを再認識した。

## 5 . Fuel/Core Design Analysis

名古屋大学 田淵氏からはPWRにおける中間停止時の効率的な燃料シャッフリング法に関する研究成果が報告された。本研究は今後我が国で長期サイクル運転が実施された場合の経済的な燃料運用に関する報告であり、すでに長期サイクル運転を実施している各国研究者が興味を持ったようであった。

その他、BWRの集合体設計用に開発された高精度の簡易集合体計算手法に関する有益な情報も得ることができた。今後の研究に生かしたいと考えている。

## 6 . 感想

数年前に日本原子力学会の交換留学制度によりANL(シカゴ)で研究を行ったがその時お世話になった恩師にも再会することができた。

PHYSORでは食事会・コーヒブレイクが多数アレンジされており、ここで各国技術者と情報交換を積極的に行うことが可能であり、更なるビジネスチャンスも(運が良ければ?)つかめると感じた。

会議は 29 日に終了したが、このとき私は体調をくずしていた。おそらく脂肪分の取りすぎだろう。帰国後妻からはダイエット食が提供されるようになり精神的ダメージを受けている。ご参考のため米国出張時の食事、摂取カロリー、味の評価を表 1 にまとめる。

表 1 米国での食事(PHYSOR の食事は太字で示す)

経過 日数	タイミ ング	食事の内容	カロリー (kcal)	味の評価
1 日目	朝	コーヒー, パン	220	
	昼	ホタテのカルパッチョ, コーヒー, パン	300	
	夕	<b>ローストビーフ(約 500g), サンドイッチ, ピザ, アルコール少々</b>	2510	
2 日目	朝	コーヒー, パン	220	
	昼	<b>サラダ, ソーセージ, フライもの, コーヒー, フルーツ</b>	630	
	夕	スペアリブ(約 400g), サラダ, ポテトグラタン, アルコール少々	2120	
3 日目	朝	コーヒー, パン	220	
	昼	ハンバーガー, フライドポテト, ペプシ	820	
	夕	<b>サラダ, スープ, ステーキ(約 150g), 魚, パン, コーヒー, デザート</b>	1240	
4 日目	朝	コーヒー, パン	220	
	昼	<b>サラダ, チキンソテー(約 200g), ライス, パン, コーヒー, デザート</b>	1250	
	夕	ステーキ(約 500g), サラダ, パン, アルコール少々	1960	
5 日目	朝	コーヒー, パン	220	
	昼	ハンバーガー, フライドポテト, ペプシ	820	
	夕	ピザ(約 500g), エビのカクテル, チキンサテ, アルコール少々	2030	
総合評価			日本での約 40%増	

カロリー計算 : <http://www2.plala.or.jp/agaben/calorie.html>

味の評価 : x 受け入れがたい, 普通, おいしい, 非常においしい

< 国際会議に参加して >

三菱重工業株式会社 左藤 大介  
(E-mail:d\_sato@mhi.co.jp)

2004 年の 4 月 25 日から 29 日にかけて米国シカゴで開催された炉物理国際会議 PHYSOR2004 に参加してきましたので、この場を借りまして概要を紹介したいと思います。PHYSOR 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で 2 年毎に開催されています。今回の会議では世界 21 カ国から総勢 281 名の参加者があり、内訳は米国 134 名、フランス 32 名、日本 27 名と日本は 3 番目の参加者でした。

会議が開催されたシカゴは、五大湖のひとつであるミシガン湖に面した街で米国有数の大都市です。ダウNTOWNには最近まで世界一であったシアーズタワーを代表とする超高層ビルディングが乱立しており、地震の多い日本からは想像もできないような外観を持つビルがあり非常に美しい街並みでした。会議が開催されたのがミシガン湖岸のホテルであったためか、発表者の方を含め参加者はラフな服装(かなりの方がノータイ)が多かったのが驚きでした。

会議は 4 つの平行セッションからなっており、炉物理の国際会議とだけあって興味のあるセッションは数多くあったのですが、全てを聴講するのは難しく、筆者の参加したセッションについて簡単に述べたいと思います。

まず、炉物理本題から少し離れるのですが、いくつかの発表・講演の中で non-proliferation (核拡散抵抗性) という言葉を何度か耳にしたのが印象的でした。次々世代原子炉開発として実施されている Gen-IV 炉心の開発目標としても、non-proliferation が項目としてあがっていました。特に、Banquet の際に行われた講演が non-proliferation についてであり、最近の世界情勢を反映してか原子力研究者の開発目標に対する考え方が変わってきたのかなと感じました。筆者の独断と偏見ですが、当初、原子力に関する技術が飛躍的に進歩したのは、軍事目的に開発されたのが一因であったことを考えると複雑な心境になりました。

さて、本題の炉物理に関する発表についてですが、筆者の印象として MOC (Method of Characteristics) に関連した発表が多かったように感じました。近年の計算機の進歩に伴って、MOC を利用した 3 次元非均質炉心計算に関する発表も数件行われました。炉心設計手法は、1,2 次元合成法から 3 次元ノード法、そして、3 次元非均質計算へと進歩しつつあり、炉物理に関する研究開発の成果が確実に実炉心設計に反映されていくのだなと感じました(3 次元非均質計算については計算時間の観点から少し先の話になると思いますが)。また、例えとしては変かもしれませんが、計算機の HD の容量を幾ら増やしても、すぐにユーザーが使用していつまでたっても不足している状態と同じように、炉物理研究者も計算機が幾ら進歩しても、それを上回るような負荷の計算手法を開発しており、ユーザー(炉物理研究者)は管理者(計算機開発者)泣かせだとも思いました(このあくなき追求精神が、計算機開発の Driving Force にもなれば良いと思いますが)。

最後に、繰り返しにはなりますが、PHYSOR は炉物理に特化した国際会議であるため、興味のある発表が数多くありました。筆者が思うに世界の機関から数多くの研究者が参加する会議であるため、当然ながら炉物理の最先端の情報を入手するには最適の場であり、炉物理の研究者同士で交流を深めるのにも非常に良い機会であるとも感じました。また機会があれば是非とも参加したいと感じました。

## < 国際会議に参加して >

核燃料サイクル開発機構 羽様 平  
( E-mail : hazama@oec.jnc.go.jp )

サイクル機構(JNC)からは高速炉解析分野の 3 名(庄野、千葉、羽様)が参加した。第 4 世代炉開発国際フォーラム(GEN-IV)の効果もあり、ガス炉を中心に高速炉も注目され始めている。高速炉関連で印象に残った発表について 3 名の報告をまとめて以下に記す。

### プレナリーセッション：

前回の PHYSOR にもまして、将来社会を担う原子炉システム像に対して炉物理を初めとする炉心関連技術が何をできるか、どのように今後の開発を進めるか、既に蓄積された技術情報をいかに保存・活用するか、という問題意識に立った内容が多く語られた。

C. Brown (British Nuclear Fuels plc)による「核燃料サイクルの視点からのニーズ」では、燃料開発と品質確保の困難さをレビューし、ともすれば「新型燃料」を導入しようとする炉物理屋に対する苦言が呈された。にこやかな発表態度だったが、終了時には会場が固まったかのようなムードを感じた。サルバトーレ氏(ANL/CEA)が、「MA の全量リサイクルは、軽水炉体系では不可能だが、高速炉では可能であり、高レベル廃棄物の毒性低減のために非常に意義が大きい。これを見出したのは炉物理であり、それを実施に移せるかどうかの最重要課題は燃料の開発だ。その面で炉物理と燃料開発は大いに関係がある」とコメントしていたのが印象的であった。

材料面の課題を横においたまま炉心設計の提案だけが先行し、いつしか消えていく状況は新型炉研究ではよく見受けられるが、実現してこそ価値のあるエンジニアリングとしては好ましい状況ではない。とはいっても材料開発が追いつくまで炉物理屋が休業するわけにもいかない。炉物理側としてはもどかしい限りである。

### 個別セッション：

千葉(JNC)の発表では、高速実験炉「常陽」MK-III 炉心の性能試験とその解析結果が報告された。MK-III 炉心の概要、性能試験の結果と JNC 標準手法による解析値との比較に加えて、反射体の実効断面積作成手法に関する検討、断面積共分散を用いた解析値の誤差評価について説明し、MK-III 炉心の核特性を良好に解析できていることをアピールしていた。

J. Tommasi(CEA)の発表では、ガス冷却高速炉を模擬した ZPR-9 炉心の実験解析結果が報告された。決定論的手法と確率論的手法との間で燃料非均質効果に 0.2% k/kk 程度の相違が生じており、希薄領域(ガス領域)と燃料領域を均質化したときの中性子ストリーミング効果の評価が課題としている。じっくり検討すれば興味深い成果が得られるかもしれない。また、核特性の C/E 値の中には良好な結果が得られたものがあつた半面、箔で測定された反応率比などは測定結果を合理的に説明できないものもあることが紹介された。過去の実験データを掘り起こして活用することの限界であり、近年国際機関で着手されている実験データの整備保存活動の重要性を改めて認識した。

実機経験に乏しい高速炉では、核データの誤差を積み上げて炉心設計の信頼性を評価す

るのが現実的な方策である。さらに、実験解析データに基づいて調整を施した炉定数を使用することによって核データに起因する誤差を低減することが有効である。これに関する発表を以下にまとめる。

J. Bosq(CEA)は 2400MWth のガス冷却高速炉についての設計精度を報告した。燃料には CERCER と呼ばれるセラミック複合燃料 (UPuC/SiC (50%/50%)) を使用している。評価は、JEF-2.2 と、JEF-2.2 を積分実験データで調整した炉定数 ERALIB1 の 2 種類を用いて、実効増倍率と炉中心反応率比について実施している。調整後炉定数を使用すると核データに起因する誤差を低減できるが、ERALIB1 にはガス炉の実験データが含まれていないため、Si などガス炉特有の核種は調整されていない。しかしながら、それらの寄与は限定的であり、Na-MOX に対する場合と同様に核特性の誤差低減が図られている。

G. Palmiotti(ANL)は、MA を中心とした PIE データを元にした炉定数調整について報告した。フランスの高速炉 PHENIX での照射実験 (TRAPU) データを用い、解析には CEA のシステムを用いている。エネルギー 1 群での暫定評価であるが、JEF-2.2 と ENDF/B-VI に対する調整結果 (調整後断面積) が良く一致しており、調整が良好であることを示していた。

一般化摂動論に燃焼を考慮して感度係数を評価している点など、調整手法は我々と共通しているが、実験データを豊富に取りそろえている状況はうらやましい限りである。また、MA を含め、すべての核種について断面積の誤差データが整備されていることも驚きであったが、厳密に評価したものではなく、炉物理研究者が核データ評価者の助言を受けて工学的な判断で評価したものとのことである。根拠は不明であるが、関連データ以外は信頼できると考えているらしい。

A. Santamarina (CEA)の発表では、軽水炉の PIE や臨界性のデータを使用して、JEF-2.2 を炉定数調整し、JEFF-3.0 への改訂が妥当であることを示していた。

炉定数調整はこれまで高速炉分野が主体で進められてきたが、軽水炉分野も仲間入りしているということで心強い感を持った。

庄野(JNC)及び G.Manturov(IPPE)は、ロシアの解体核処分のために検討されている BN-600 ハイブリッド炉心の核特性予測精度についてそれぞれの解析システムに基づく結果を報告した。ともに炉定数調整により高い予測精度が達成できることを示していた。

炉定数調整を含む JNC の高速炉解析システムについては、プレナリーセッションにおいて竹田 (阪大) が日本の核特性解析システムの一部として、また、最終日に開催された GEN-IV ワークショップにおいて羽様(JNC)が紹介し、従来解析手法に比して確実な精度向上を図りその性能を実験データで検証した成果は出席者の興味を惹いていた。

核データの誤差と感度係数を用いて核特性の誤差を評価し、さらに炉定数調整によりその誤差を低減するという一連の手法は、JNC だけでなく CEA、IPPE でも採用されており、共通のプラットフォームはできている。今後は手法や使用データの詳細比較が重要であり、GEN-IV のワークショップでも検討項目に挙げられている。とりわけ断面積誤差評価の妥当性については多くの炉物理関係者が関心を抱いており、核データ評価側でも注目されつつある。今後の進展に期待したい。

## < 国際会議に参加して >

日本原子力研究所・エネルギーシステム研究部・炉物理研究グループ 長家康展  
( E-mail : nagaya@mike.tokai.jaeri.go.jp )

PHYSOR-2004 に出席して参りましたので、私の方からはモンテカルロ法のセッションで興味深かった発表についてご紹介したいと思います。

ブタペスト大学の Szieberth 氏からモンテカルロ法で Feynman- 実験のシミュレーションを行ったときの分散低減法について発表がありました。炉雑音実験では核分裂中性子の相関に着目しているため、モンテカルロシミュレーションではアナログ法を用いることが普通です。しかし、アナログ法だと計算時間もかかりますし、検出器位置によっては統計精度が上がらない場合があります。分散低減法が使えるようになればこのような欠点も克服されるのですが、示された結果はまだ不十分で、今後の進展が期待されるようです。

LANL の Brown 氏からはモンテカルロ法で断面積が連続に変化する物質中での粒子追跡法と ( 中性子束が ) 連続的に変化するタリーの取り方について発表がありました。前者の粒子追跡法では断面積をルジャンドル展開し、それに基づく確率密度関数から物質内での飛行距離を決定するというものです。密度が連続的に変化する場合などに適用でき、ポイド分布を考慮するときなどに有効であると思われます。また、連続的に変化するタリーの取り方では、セル内の中性子束をルジャンドル展開し、その係数をモンテカルロのランダムウォークから決定するというものです。0 次の係数は通常のモンテカルロ法でのタリー ( セル平均値 ) になっており、あとは高次の係数を求めるだけでよく、どのようなモンテカルロコードでも比較的簡単に取り込むことができそうです。通常モンテカルロ法で中性子束分布を求める場合、計算体系を細かくセルに分割していましたが、この手法を用いればセルを細かく分割せずに中性子束分布を求めることができます。

上記の Brown 氏は連続的に変化するタリーについて 1 次元の例を示していましたが、ミシガン大学の Griesheimer 氏はこの手法を 2 次元分布に適用した例を報告しました。メッシュタリーとの比較も示され、それに匹敵する優れた手法であるようです。ただ、次元が大きくなると評価すべき展開係数が多くなることと、ルジャンドル展開の打ち切り誤差が問題になってくるようです。

オランダ NRG の van der Marck 氏からはモンテカルロ法を用いた実効遅発中性子 ( $k_{eff}$ ) の計算法について発表がありました。モンテカルロ法で  $k_{eff}$  を計算する場合、いつもその定義が問題になるのですが、彼らはそれをすべての中性子によって引き起こされた平均核分裂数に対する遅発中性子によって引き起こされた平均核分裂数の割合と定義していました。これは電中研の名内氏が 2003 年春の年会 (H18) で発表した手法とほぼ同様です。名内氏が核分裂中性子の数の比としているのに対し、van der Marck 氏は核分裂数の比としている点が異なりますが、値はそれほど変わらないでしょう。検証として、彼らは実験値と計算値を様々な体系で比較していましたが、大まかに見て 10% の範囲で一致するといった感じでした。参照解とするにはまだまだ精度が足りませんが、現在提案されているいくつかの手法について比較しているのは興味深い点でした。

その他、プレナリーセッションでの LANL の Brown 氏の講演が興味深く、最近のモンテカルロ法の話がよくまとめられていました。こちらはスライドが PHYSOR-2004 のホームページからダウンロードできますので、興味ある方は御覧ください。