

PHYSOR2024 参加報告  
-研究機関職員の立場から-

日本原子力研究開発機構  
藤田 達也

## 1. はじめに

2024年4月21日から24日まで米国カリフォルニア州サンフランシスコにおいて、国際会議 PHYSOR2024 が開催されました。サンフランシスコと聞いて思い浮かんだものがアルカトラズ島とユニオンスクエアぐらいと実は個人的にはあまり知らない土地であり、また外国出張そのものが実に6年ぶり<sup>1</sup>だったこともあって、期待と不安を感じつつ渡米しました。

初日はワークショップ（午前3件・午後3件の計6件）、2日目以降は毎朝のプレナリーセッションと午前1回・午後2回のテクニカルセッションが実施されました。次章以降では、聴講した主な発表内容について、個人的な所感を交えつつ簡単に紹介していきたいと思います。

なお、会場の雰囲気や現地の街並み・食べ物については、最終ページのフォトギャラリーを御参照ください。

## 2. ワークショップ

「Scientific Machine Learning for Nuclear Engineering Applications」は、今回限りのワークショップというわけではなく、過去には M&C2021・PHYSOR2022・M&C2023 でも開催されてきたもの（今回が4回目）ということで、講義スタイルではなく実際の適用事例の発表を聞いていくスタイルでした。なお、次回は M&C2025 でも開催予定とのことです。ということで、参加予定の方がいましたら是非どうぞ。

米国 INL、米国 ORNL、米国 TAMU、米国 BLUE WAVE AI LABS から、デジタルツインに係る最新の動向として、シミュレーションコード（AIRES-NODE や RAVEN）と Python パッケージ（PylibROM や PySensors）の開発など、ソフトウェア面での研究成果やその適用事例が発表されました。また、特にデジタルツインへの機械学習の応用として、スパース学習の適用やデータ駆動型の低次元モデルの検討の成果なども報告されていました。

個人的な所感として、前回の PHYSOR2022 までは機械学習の適用事例としては、炉物理研究ではある種の伝統的な最適化問題である、取替炉心燃料配置や中性子エネルギー群構造が記憶に新しいところではありますが、研究炉に設置する熱電対のセンサーの個数や位置の最適化やデジタルツインの低次元モデルの構築など、機械学習の適用先の幅広さに関心を持った次第です。

---

<sup>1</sup> PHYSOR2020 は新型コロナウイルス感染症拡大のため中止、PHYSOR2022 は対面で開催されたが新型コロナウイルス感染症の影響があり渡航できず

### 3. テクニカルセッション

- **Advancements in UQ and Validation Methodologies** (計 14 件の発表、私もここ)

摂動論に基づく不確かさ評価手法の適用として、低次元モデルを用いることで感度係数の計算コストを低減する手法の提案・計算精度、マルチフィジックスシミュレーションでの温度・出力・遅発中性子先行核密度の感度係数を定量化するフレームワークの開発・検証、一般線形化最小二乗法を用いたデータ同化による使用済燃料の臨界管理基準の見直しなどが報告されました。また、米国の商用軽水炉炉心設計コードでは、ユーザーや規制当局の関心の高まりを背景に、核データ起因の不確かさ評価機能の実装が進められていることが発表されました。

不確かさ評価に関する研究については、従前は核反応断面積に起因する不確かさに焦点を当てたものがほとんどであったように思いますが、マルチフィジックスシミュレーション上の不確かさを評価することやデータ同化を用いてより現実的な安全余裕の評価を行うことに主眼が置かれつつあるように感じました。また、不確かさ評価対象となる物理量も、中性子増倍率や核反応率などに限らず、炉心安定性を示すドミナンス比などが対象となりつつありました。今回の PHYSOR での発表は十人十色なところがあり、不確かさ評価に関する研究のある種の広がりや発展を感じました。個人的にも、従来路線だけでなく、見方を大きく変えて研究テーマを見つめ直すことが必要かもしれないと考えさせられるところです。

- **Special Session on TVA Watts Bar Benchmark** (計 7 件の発表)

OECD/NEA/NSC/WPRS において提案・解析結果の取りまとめが進められている TVA Watts Bar Unit 1 Multi-Physics Benchmark<sup>2</sup>に関する特別セッションとして設けられました。4 ループ PWR の設計・運転・測定データに基づいて、零出力炉物理試験やサイクル運転に関する全 7 つの Exercise が用意されているものです。なお、8 つ目の Exercise として炉心外のフルエンス評価に関する問題設定を新たに進めていることが報告されました。

米国 Studsvik Scandpower 社、フランス IRSN、米国 NNL、米国 NCSU から、Exercise 1 (サイクル 1 定常高温零出力)、Exercise 2 (サイクル 1 定常高温全出力)、Exercise 3 (サイクル 1 燃焼) に対する解析結果が発表されました。各機関における解析では、マルチフィジックスシミュレーションを含めた解析スキームとして、CASMO5/SIMULATE5 などを用いた二段階解析に基づくものだけでなく、high-fidelity simulation としてモンテカルロコード (MC21 や SERPENT) とサブチャンネル解析コード (CTF) の結合させたものも用いられていました。測定データと良好な一致を示される一方で、サイクル末期においては中性子束分布の偏りや振動が生じる事例なども報告されました。

PWR のサイクル炉心に関するベンチマークとしては、MIT-BEAVRS が思いつくところですが、問題設定は類似しているところが多く、一方でより多くの Exercise の設定や参加者の解析結果が将来的に取りまとめられることを考えると、今後、解析コードの V&V に有益なベンチマークになるだろうと思います。個人的にも機会があれば是非取り組んでみたい。

<sup>2</sup> [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_32202/tva-watts-bar-unit-1-multi-physics-benchmark](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_32202/tva-watts-bar-unit-1-multi-physics-benchmark)

- Machine Learning and Artificial Intelligence for Reactor Physics (計 10 件の発表)

発表内容は 10 件 10 色というところであり、先ほどワークショップでも触れましたが、機械学習の適用先が拡大されつつあることを実感しました。

個人的に関心が高かったものとしては、TRIGA 炉のデジタルツインとガウス過程回帰に基づく核熱結合計算時の断面積再構築に関する発表です。前者では、TRIGA 炉の状態監視と運転制御のためのデジタルツインの実装を目的としたものとして、一点炉動特性計算と長・短期記憶ニューラルネットワークを組み合わせた低次元モデルが紹介され、参照解とした 3 次元輸送計算と良い一致を示すことが報告されました。今回は温度フィードバックが考慮されておらず今後の課題とされましたが、状態監視技術の確立に有益な成果であると、興味深く感じました。後者では、特定の状態変数下での断面積を用いた教師あり学習を行うことにより、多群断面積（発表では 8 群構造まで検討）が有する状態変数への依存性の考慮（複数の状態変数に対するマッピング）に対して優れた性能を発揮することが報告されました。利点としては、状態変数の種類が増えたとしても、再構築の処理が複雑化しないことだと考えられます。また、個人的な経験を踏まえれば、断面積のエネルギー群数が増えてくると状態変数に対する依存性が複雑化する場合がありますが、そのような挙動も簡易に取り扱えそうに思いました。聴講した限りではまだ燃焼計算までは対応していないようでしたので、今後の動向に注視したいところです。

#### 4. おわりに

約 6 年ぶりに国際会議に参加して、炉物理研究の様相が、少なくとも個人的に認識していたものからは大きく変わりつつあることを感じた一週間でした。

研究機関職員の立場から振り返ってみますと、国内学会では件数がそれほど多くない機械学習関連の発表が年々増えつつあり、また適用先も原子炉から研究炉まで多岐にわたっており、特定の個別領域だけでなく炉物理研究全体への波及の可能性を感じました。また、本報告では触れませんでしたでしたが、毎朝のプレナリーセッションでは日替わりでさまざまなトピックを多くの機関から聴くことで海外の最新動向を知る機会になりました。比較的新しい技術ではありますので「目新しさ」というのもあるかもしれませんが、現状は国内動向と海外動向には大きく乖離していると個人的には感じていますが、こういったところに先んじて積極的に取り組んで議論を深め、国内コミュニティに持って帰ってくるのが研究機関職員の役目の 1 つなのかもしれないと感じる次第です。

そういえば、2011 年に Modeling Experimentation Validation (MeV) Summer School<sup>3</sup>で同じグループだった方（現在米国 ORNL、当時はお互いに博士課程）と 13 年ぶりに再会しました。当時を懐かしみつつ、お互いの近況を報告しあい、また次回の PHYSOR に向けてお互いに研究を頑張ろうと話ことができ、良い機会を得られたと思います。

---

<sup>3</sup> [https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/annual\\_report/pdf64/No64-15.pdf](https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/annual_report/pdf64/No64-15.pdf)

フォトギャラリー

