

# Physor2024 に参加して

日本原子力研究開発機構

多田 健一

2024年4月21日から24日に米国のサンフランシスコで開催された炉物理分野の国際会議 Physor2024 に参加した。本稿では、私が参加したマルチフィジクスプラットフォーム Kraken 及び MOOSE に関する Workshop と、聴講した「Data Methods, Code Validation」と「Multi-Physics Reactor Simulations and Validation」の概要と、個人的な感想について記載した。

## 1. Workshop

筆者のグループでは、核熱カップリングを中心としたマルチフィジクスプラットフォーム JAMPAN の開発を進めていることもあり、Workshop では、フィンランドの VTT が開発しているマルチフィジクスプラットフォーム Kraken と、米国のアイダホ国立研究所 (INL) が開発しているマルチフィジクスプラットフォーム MOOSE についての講習会に参加した。

### 1.1 Core Level SMR Simulations with the Kraken Framework

Kraken は VTT が開発している連続エネルギーモンテカルロ計算コード Serpent と熱水力計算コード Kharon、燃料ふるまい計算コード FINIX/SuperFINIX を組み合わせたマルチフィジクスプラットフォームである。Kraken は TRACE や Apros などのシステムコードと組み合わせた計算を行うことも可能で、炉心だけでなく、プラント全体の解析が可能となっている。なお、Kharon や FINIX は Kraken に同梱されている。Kraken は Python ベースで記載されており、大まかなコンセプトは JAMPAN と同様である。また、utils クラス内に様々な入力を格納しており、これらのサンプル入力をベースにユーザーが実施したい解析の入力を整備することを想定している。

Kraken の詳細は公式 HP([https://serpent.vtt.fi/kraken/index.php/Main\\_Page](https://serpent.vtt.fi/kraken/index.php/Main_Page)) をご参照頂きたい。なお、本 Workshop の講義資料についても Kraken の HP([https://serpent.vtt.fi/kraken/index.php/Kraken\\_workshop\\_PHYSOR\\_2024](https://serpent.vtt.fi/kraken/index.php/Kraken_workshop_PHYSOR_2024)) からダウンロードすることができる。

VTT では、Kraken を利用した VVER-1000 や SMR の過渡モデルの開発や、EU の

EVEREST プロジェクトの一環として、PWR、VVER-400、TRIGA 炉の詳細解析などを実施している。また、高温ガス炉への対応も検討しているなど、様々な炉系を対象とした炉心解析システムとなっている。

Workshop では、Kraken を用いて VTT が開発している SMR の LDR-50 の解析を行った。なお、サンプル入力やどのように Kraken を動かすかなどの説明については講義資料に記載されているので、ここでは割愛する。LDR-50 は 2020 年から VTT で開発を開始した SMR である。厳冬期の熱源としての利用を想定しており、65~120°C 程度の熱源として、熱供給ネットワークに接続することを想定しており、電力供給のためのタービンなどは備えていない。フィンランドの熱利用の 50%(10GWth)以上を賄うことを目標としており、既存の軽水炉の技術の延長で開発を進め、2030 年に初臨界を迎える予定とのことである。なお、LDR-50 の詳細については Steady Energy 社の HP(<https://www.ldr-reactor.fi/en/>)や LDR-50 のベンチマーク体系(LDR-lite:<https://www.ldr-reactor.fi/en/ldr-lite-benchmark/>)をご参照頂きたい。

Workshop では様々な計算結果の可視化についても説明があった。Kraken は解析だけでなく、解析結果の可視化にも力を入れており、三次元的に出力分布を出力できるなど、利便性を高めている。サンプル入力の数も多く、HP も充実していることから、大学などで広く利用される可能性が高いと感じた。実際、教育利用なども考慮しているようで、HP の拡充と講習会の実施を進めていくようである。

## 1.2 ART/NEAMS Modeling and Simulation – Molten Salt Reactors

MOOSE は NEAMS プロジェクトの下、INL が中心となって開発しているオープンソースのマルチフィジクスプラットフォームである。なお、筆者の認識が間違っているかもしれないが、MOOSE 自体はオープンソースであるが、核計算コード Griffin や熱水力計算コード Pronghorn、燃料ふるまい計算コード MARMOT など、MOOSE 上で動作するそれぞれの計算コードはオープンソースではないことに注意が必要である。

本 Workshop では、INL のスパコンにアクセスし、MOOSE 上で Griffin と Pronghorn を組み合わせたマルチフィジクス計算の実演を実施した。なお、参加者は事前に INL のスパコンへのアクセス権を取得し、さらに Griffin と Pronghorn の利用許諾を受ける必要があった。これらは米国以外のユーザーにはかなり厳しく、筆者も審査期間の関係で、スパコンのアクセス権の取得が間に合わなかった。

Workshop の参加者の内、全体の 2/3 程度が学生で、ほとんどが MOOSE を利用した経験があると回答していた。上述の通り、米国外からの利用は厳しいものの、米国内では研究目的だけでなく、教育用のツールとして広く利用されていることが推測される。

計算対象は ORNL の 10MWth の溶融塩炉で、実機を対象とした Pump Startup Test、

Pump Coast-Down Test、Natural Circulation Test の三ケースを Validation テストとして、Pump Driven Transients、Temperature Driven Transients、Reactivity Driven Transients、Localized Transients の四ケースを Verification テストとして実施した。

残念ながら筆者は講義を聞くだけになってしまったため、実際に動かすことは出来なかった。講習を聞いた印象では、解析対象や計算精度の観点ではスパコンの利用を前提とした MOOSE の方が優れているものの、使いやすさの観点では Kraken の方が優れているように感じた。学生が自分で原子炉を設計して色々なパラメータを変えてみるといった操作を行う上では、Kraken の方が使いやすいかもしれない。

## 2. Data Methods, Code Validation

本セッションでは、主に核データの改良及び核データの妥当性確認に関する発表を聴講した。核データの改良では、熱中性子散乱則の評価方法の改良や新たな評価についての発表が多かった。

評価方法の改良としては、フランスの IRSN の V. Jaiswal 氏から EXFOR などに収録されている実験データを用いて、最適な熱中性子散乱則を評価する手法についての発表があった。発表を見ると、実験データのばらつきが大きいため、現時点では有効な手法とは言えないかもしれないが、将来的には有効な手法になるかもしれない。

また、新たな評価としては、米国のノースカロライナ州立大学(NCSU)の A. I. Hawari 教授の研究室で開発している分子動力学シミュレーションに基づく熱中性子散乱則計算コード FLASSH を用いた濃縮度依存の U in  $\text{UO}_2$ 、O in  $\text{UO}_2$  や、パラフィン中の H の評価の発表があった。また、筆者が個人的に興味深いと思ったのは、米国の Naval Nuclear Laboratory (NNL) の A. Trainer 氏が発表した N in UN の評価である。本発表では、N-14 in UN と N-15 in UN のそれぞれの熱中性子散乱則の評価を主に説明していたが、筆者が興味を持ったのは評価した熱中性子散乱則を用いた解析結果である。N-15 の散乱断面積が N-14 に比べて大きいことから、N-15 を濃縮した燃料を用いることで、熱炉体系で実効増倍率が高くなることが示されていた。加速器駆動炉(ADS)でも窒化物燃料を用いることから、C-14 の生成を抑制するために N-15 を濃縮する必要があるということは理解していたが、熱炉体系では実効増倍率が高くなる効果もあるとは思わなかった。発表では窒化物燃料を使った新しい炉心のコンセプトといった説明は無かったものの、もしかしたら窒化物燃料を使うことで高性能な革新炉の設計が出来るかもしれない。

そのほかの発表では、英国のケンブリッジ大学の R. Gaya 氏の機械学習による  $(n, 2n)$  断面積の評価が面白かった。実験データを用いた機械学習による断面積評価はやられていたが、R. Gaya 氏の手法は既存の評価済み核データを教師データにした点が面白かった。本発表では、JENDL-5、JEFF-3.3、ENDF/B-VIII.0、CENDL-3.2、TENDL-2021 の質量数 30 ~ 100 までの他の核種の  $(n, 2n)$  反応断面積を教師データとして利用し、解析したい核種の

(n, 2n)断面積を推定していた。本手法を用いることで、しきい値も含めて評価済み核データの値とよく一致しているとのことである。核データに収録されていない核種の核データを生成する手法、もしくは TENDL のように別の手法で自動生成した核データを検証する手段として、として有効な手法になるかもしれない。なお、本発表で使った機械学習モデルなどについては Github(<https://github.com/Rohan-TG/PHYSOR2024>)から入手することができる。

### 3. Multi-Physics Reactor Simulations and Validation

本セッションでは、主にマルチフィジックスコード開発と、マルチフィジックスの妥当性確認に関する発表を聴講した。

マルチフィジックスコード開発では、Serpent2 と SubChanFlow(SCF)を結合した Rod Ejection Accident (REA)解析、Serpent 2 と CFD コード CFX を結合した研究炉解析、Serpent2 と中性子ビーム計算コード McStats、中性子ビーム炉の解析などのモンテカルロ計算コードとのカップリングの例や、MOOSE を使ったマルチフィジックス解析の発表があった。また、詳細なマルチフィジックス解析だけでなく、SIMULATE5-K や CAMVVER(APOLLO-3&CATHARE-3)、ANTARES(PARCS&CATHARE-3)、ZDkin(独自核コード&ATHENA, ZDthermal)など、現行の炉心解析コードを用いた全炉心規模の過渡及び定常解析の発表も数多く見られた。また、軽水炉以外では、熔融塩炉のマルチフィジックス解析が多い印象を受けた。

詳細なマルチフィジックス解析については、連続エネルギーモンテカルロ計算コードとサブチャンネル解析コード、もしくは CFD コードとの核熱結合の発表が多く、後述する JAMPAN と同様のコンセプトのマルチフィジックス解析コードの開発が世界的に進められていることがよく分かった。

マルチフィジックスの妥当性確認としては、定常状態は米国の Tennessee Valley Authority(TVA)社の Watts-Bar 1 号機のベンチマークが、過渡状態は小型 PWR を用いた反応度投入実験である SPERT-III を用いることが多かった。特に Watts-Bar 1 号機のベンチマークは Physor2024 でスペシャルセッションが組まれていたこともあり、非常に多くの解析結果が紹介されていた。Watts-Bar 1 号機のベンチマークは、米国の CASL プロジェクトの妥当性確認のために整備したもので、VERA プロジェクトの元となったデータであり、世界的に広く利用されている。Watts-Bar 1 号機のベンチマークは、Veracity Nuclear の A. Godfrey 氏が 12 サイクルまでモデル化し、その内の 1~3 サイクルを VERA 及び NEA/NSC/WPRS の元でベンチマーク化したものとのことである。なお、Godfrey 氏によると、VERA と NEA/NSC/WPRS のベンチマークは若干異なっているとのことである。スペシャルセッションの参加者からは 4 サイクル目以降のデータもベンチマークとして公開

して欲しいとの要望が出たものの、残念ながら公開するかどうかの回答は得られなかった。

本セッションにおいて、筆者は筆者の所属するグループで開発を進めている核熱カップリングを中心としたマルチフィジックスプラットフォーム JAMPAN の概要と、JAMPAN 上での連続エネルギーモンテカルロ核計算コード MVP とサブチャンネル熱流動解析コード NASCA を組み合わせた複数集合体体系での核熱カップリング計算について説明した。発表中の筆者のジョークにも笑いが起きるなど、興味を持って発表を聞いて頂けたのではないかと思う。また、本発表に対し、JAMPAN 上での各計算コードの結合方法や、取り扱う幾何形状が異なる計算コード間でのデータの受渡方法など、マルチフィジックス計算手法について多くの質問が寄せられた。さらに、今後の開発方針についての質問があったことから、JAMPAN の開発に興味を持ってもらったと信じている。

## 4. 個人的な感想

Physor2020 はコロナ禍で中止となり、Physor2022 は対面形式で開催されたものの、コロナ禍が収まっていない状態であり、参加することが出来なかった。そのため、筆者にとっては6年振りの Physor への参加であった。開催期間が水曜までとコロナ禍前に比べて一日短かかったものの、口頭発表のみで約 250 件発表があり、参加者も約 380 人とコロナ禍前と変わらない盛況っぷりであった。普段は核データ分野(核データ評価・妥当性確認・処理)の専門家と会うことが多いので、炉物理分野の専門家と久々に会って情報交換を行うことができたため、非常に有意義な会議であった。

発表を見てコロナ禍前と変わったと思ったのは、革新炉開発に関する発表が増えていることである。コロナ禍前の Physor2018 では軽水炉の炉心解析手法高度化に関する発表が非常に多かったが、今回は高温ガス炉など、米国エネルギー省(DOE)が推進しているマイクロリアクター用の炉心解析手法の高度化に関する発表の方が多く見られた。また、1.1 節に記載したように、フィンランドの VTT が厳冬期の熱源としての SMR(LDR-50)の開発を進めるなど、従来は原子炉を輸入していた国でも政府主導で新型原子炉の開発を推進しているのが印象的であった。

また、今回の会議で強く感じたのは、国際交流が難しくなっている現状であった。例えば、コロナ禍前は大勢いた中国からの参加者は全くいなくなっていた。また、各国の輸出管理の厳格化が進んでいることも分かった。Workshop に参加した INL の MOOSE は計算自体を INL のスーパーコンピュータで実行する必要があるため、Workshop 限定での利用にも拘らず、審査に一月以上の時間を要した(そして時差や米国の祝日の影響もあって手続きがうまく進まず、結局アクセス権を手に入れることが出来なかった)。また、Serpent を開発している VTT も Serpent や Kraken などの開発コードの提供を制限し始めていることが分かった。特に商用利用についてはかなり厳しくなっているようである。また、VTT では、輸出管理

の影響で欧州外はもちろんのこと、欧州内ですら研究者の受け入れがかなり難しくなっているとのことである。大学についてはそのような制約はないようであるが、国立研究所については、今までのように気楽に訪れることが難しくなるかもしれない。

また、覚悟はしていたものの、昨今のインフレと円安のダブルパンチで物価が異常に高いことが衝撃的であった。セルフ形式の安いレストランで食べても 5000 円以上するし、ホテル近くの雑貨店でペットボトルの水を買ったら 500 円も取られるなど、日本人からしたらぼったくり状態であった。昨年以降、欧州には何度か出張しており、海外の物価高を実感していてもなお、かなりの驚きがあったので、世界的に見ても米国の物価高はひどいものと思われる。欧州では探せば安い食べ物が見つかったが、米国では中華街の中華食材以外に気軽に手が出せそうな金額のものが無く、学会会場で提供される朝食にかなり助けられた。

チップが 20%も取られる(コンビニ的なところでサンドイッチを買ってもチップで 10%取られることも驚いた)こともあり、軽い昼食で三千円以上かかることが普通なので、米国に出張する場合には、お土産代を確保するためにも、カロリーメイトなどの携帯食を持参し、食費を節約されることを強く勧めたい。

以上