

## PHYSOR2026 参加記

名古屋大学 山本章夫

### 1.全体の発表傾向の分析

全発表タイトルからキーワードを拾い出し、そのキーワードに関連する発表件数をまとめたものを表 1 に示す。ここ数年、様々な炉型に関する解析手法の開発、設計研究が活発になされている。特に高速炉、溶融塩炉、高温ガス炉、マイクロ炉などに注目が集まっていることが分かる。また、マルチフィジックス解析などのシステム解析についても発表件数が多い。さらに、AI 関係(機械学習、NN)についても、多くの取り組みがなされていることが分かる。

表 1 キーワード別発表件数サマリー

PHYSOR2026 発表論文 キーワード別件数サマリー			
総論文数: 533件 分類キーワード数: 35 ※重複カウントあり			
順位	キーワード (日本語)	キーワード (英語)	発表件数
1	ベンチマーク・検証・妥当性確認	Benchmark, Verification & Validation (V&V)	76
2	核データ・断面積	Nuclear Data & Cross Sections	54
3	高速炉 (SFR・LFR)	Fast Reactor (SFR / LFR)	53
4	Monte Carlo法	Monte Carlo Method	44
5	燃焼・核変換計算	Burnup & Depletion	44
6	熱水力解析	Thermal-Hydraulics Analysis	42
7	溶融塩炉 (MSR)	Molten Salt Reactor (MSR)	38
8	軽水炉 (PWR・BWR)	Light Water Reactor (PWR / BWR)	38
9	マルチフィジックス連成	Multiphysics Coupling	38
10	中性子輸送	Neutron Transport	36
11	高温ガス炉 (HTGR・VHTR)	High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR / VHTR)	31
12	不確かさ定量化・感度解析	Uncertainty Quantification & Sensitivity Analysis	29
13	炉動特性・過渡解析	Reactor Kinetics & Transient Analysis	26
14	機械学習・深層学習・ニューラルネット	Machine Learning / Deep Learning / Neural Networks	25
15	臨界安全・臨界実験	Criticality Safety & Critical Experiments	25
16	小型モジュール炉 (SMR)	Small Modular Reactor (SMR)	22
17	マイクロ炉・ヒートパイプ炉	Micreactor & Heat Pipe Reactor	22
18	燃料サイクル・プルトニウム管理	Fuel Cycle & Plutonium Management	20
19	遮蔽・線量評価	Radiation Shielding & Dosimetry	20
20	拡散・ノード法	Neutron Diffusion & Nodal Methods	18
21	サロゲートモデル・縮約次元モデル	Surrogate & Reduced-Order Models (ROM)	16
22	炉心最適化・炉心設計	Core Design & Optimization	16
23	均質化・群定数生成	Homogenization & Group Constant Generation	16
24	中性子雑音解析	Neutron Noise Analysis	15
25	宇宙・特殊用途原子炉	Space & Special Purpose Reactors	13
26	データ同化・核データ調整	Data Assimilation & Nuclear Data Adjustment	12
27	核融合・ハイブリッドシステム	Fusion & Hybrid Systems	11
28	分散低減・バリエーションリダクション	Variance Reduction	9
29	共鳴自己遮蔽	Resonance Self-Shielding	8
30	GPU・高性能計算 (HPC)	GPU Acceleration & High-Performance Computing (HPC)	7
31	原子炉物理教育	Nuclear Education & Training	6
32	デジタルツイン	Digital Twin	5
33	ランダムレイ法	Random Ray Method	5
34	同位体製造・放射性同位体	Radioisotope Production	4
35	核セキュリティ・保障措置	Nuclear Security & Safeguards	3

## 2.個別発表

発表件数が多く(>500 件)、8トラックほどのパラレルセッションで実施されたため、全ての発表は聴講できなかったが、全論文のタイトルを改めて確認し、聴講したものも含めて興味を引いた論文/ポスター発表/プレゼンテーションについて概要をまとめた。

Impact of Neutron Library and Thermal Conductivity on PWR Axial Stability, U. Svensson, Studsvik

オルキオルト 3 号機(EPR)初装荷炉心 BOC における Xe 振動試験の解析を B7.1, B8.0, 8.1, JEF2.2, 3.2, JENDL4,5 を用いて実施したもの。Xe 振動の周期と減衰率を計算した結果、実測の減衰率はマイナス(振動が減衰)であった一方、JENDL5 のみがプラスの減衰率(振動が発散)という結果が得られている。JENDL5 の水素の影響が大きいようであるが、それだけでは説明しきれない模様。

Subcritical Isothermal Temperature Coefficient Measurement Utilizing the Spatially Corrected Inverse Count Rate Functionality within the BEACON™ Core Monitoring System, P. Sebastiani, Westinghouse

炉心モニタリングシステム BEACON に組み込まれた Spatially Corrected Inverse Count Rate (SCICR)法を用いて、未臨界状態において原子炉(PWR)の温度を上げていく際の中性子カウントレートの変化から等温温度係数を測定する研究。3つのプラントで 170°C~290°C程度の冷却材温度において測定が実施されており、実測された等温温度係数は予測値とよく一致している。

Preliminary Optimization of Fuel Bowing Surrogate Variables for the BEAVRS Benchmark, A. Persico, MIT

BEAVRS ベンチマーク問題において見られる径方向出力チルトを燃料棒の曲がりによって再現することを試みた研究。CASMO4/SIMULATE3 の燃料棒曲がりモデルを用い、径方向出力チルトを再現する燃料棒曲がり量を最適化手法によって求めている。出力チルトの測定値の傾向を再現することには成功しているが、BEAVRS ベンチマーク問題では燃料集合体曲がりの測定値がないことから曲がり量の妥当性は検証出来ていない。また、曲がり量は出力チルトを再現するように評価されているが、その物理的な裏付けについては、確認されていない。

Subgroup Resonance Self-Shielding Using an Isogeometric Analysis Spatial Discretization of the Self-Adjoint Angular Flux Equation, L. Fernandes, Imperial College

Even-parity 輸送方程式と似た形をした second-order self-adjoint angular flux 形式の輸送方

程式を isogeometric analysis(IGA)法と組み合わせ、サブグループ法による共鳴計算を行った研究。3x3 UO<sub>2</sub> ピンセル体系において本手法を適用し、従来手法である衝突確率法を用いた結果と比較を行っている。計算精度は従来手法と同程度であるが、本手法の方が計算時間は長くなっている。より大型の体系に適用すると、提案手法のメリットが生じるかもしれない。

#### Temperature Interpolation of Cross Sections in the Peacock Monte Carlo Code, W. Dawn, Studsvik

連続エネルギーモンテカルロコード Peacock における分離・非分離共鳴及び S(a, b)の温度内挿に関する研究。非分離共鳴領域におけるスムーズな温度内挿については、引き続き課題があるとのこと。TSL については、その複雑な挙動のため、TSL そのものを内挿し任意の温度点における TSL を求めることは困難である。そのため、確率的な温度内挿を用いる。(TSL データ自体は温度点における値を使用し、温度に応じて使用する温度点のサンプリング確率を変化させる)。

#### Analysis of the Neutronic Effect of the Axial Twist of Helical Cruciform Fuel Rods Using Peacock, W. Madsen, Studsvik

Lightbridge Corporation により LWR 用に開発されているヘリカル型の十字型燃料棒をモンテカルロコード Peacock で解析している。BWR の十字型制御棒のブレード長を短くしたような形状の燃料棒であり、しかもこれが軸方向にねじれるという複雑な幾何形状となっている。CSG 幾何形状を使っていたとしても、軸方向のヘリカル形状は模擬できないため、軸方向については燃料棒を薄くスライスし、少しずつ回転させながら軸方向に積み上げ、モデル化を行っている。この手の燃料棒は、従来の 2 次元格子計算で扱うことは難しいと思われる。

#### Isotropic to Directional Transport Cross Section Rehomogenization Procedure during the Nodal Diffusion Solution, V. Lujan, Georgia Institute of Technology

モンテカルロ計算で炉心計算用の輸送補正断面積を作成する方法に関する研究。輸送補正断面積は、一般的には out scatter 近似などを用いて計算されることが多いが、正確ではない。そのため、Cumulative Migration Method が開発され、OpenMC や Serpent2 で用いることができる。しかし、CMM は単一集合体にしか適用出来ず、カラーセット体系において使用できない問題点がある。この点を解決するため、軽水炉の炉心解析で用いられている re-homogenization の考え方を適用している。まず、集合体を部分均質化し、その部分均質化断面積を用いてカラーセット計算を 2D で実施、そのカラーセット計算で得られた中性子流を用いて輸送補正断面積を計算する。結果として、CMM より提案手法の方が出力分布の計算精度が改善した。

Nuclear Data Adjustment Guided by the Coverage Quantification Metric  $q_c$ , U. Mertyurek, ORNL

断面積調整に用いる実験データの選択方法として、代表性因子があるが、これは、ある特定の臨界実験と対象とする体系の類似度を計算するものである。これに対して、相互情報量を用いたインデックス  $q_c$  を新たに定義し、これを手がかりに断面積調整を行う臨界実験を選択する試みである。代表性因子と異なり、断面積調整に用いる実験データの誤差などを考慮できる特徴がある。

How to Achieve Sustainable Nuclear Education and Training – Examples of Success Stories from Chalmers University of Technology’s Ecosystem, D. Christophe, Chalmers University of Technology

スウェーデンのチャルマース工科大学における原子力教育の紹介。オンライン学習教材を中心に組み立てられており、それに短いまとめ用の講義と演習が組み合わさった構成になっている。「初等原子力工学」「原子力工学-過去・現在・将来」「GRE@T-PIONEER」コースの紹介があった。オンライン教材の学習においては、オンデマンド講義を視聴し、そのあと関連する質問にオンラインで答え、certificate を得る設計となっている。

Online Core Flux Reconstruction Using Ex-core Neutron Detectors and Assembly Thermocouples, C. Luo, Shanghai Jiao Tong University

炉外検出器と集合体出口の冷却材温度計の情報を用いて、大型高速炉の炉心内の中性子束分布を再構成する研究。名大の浦瀬らの提案手法を用い、POD を用いて中性子束の部分空間を構築し、その展開係数を求めることで中性子束を再構成出来ることを示している。

CASMO5 Analysis of HTC Critical Experiments, J. Hykes, Studsvik

約 40GWd/t の軽水炉燃料の U-Pu 組成に相当する燃料を用いた HTC 臨界実験の解析を CASMO5 で行っている。吸収材として、ボロンスチール、Cd などを使用している。軸方向バックリングは、MCNP6.3 による軸方向分布をフィッティングすることにより求めている。実効増倍率の誤差は数百 pcm 以内程度であり、全般的によく一致しているが、Cd 吸収体を用いたケースについてはやや計算値が過小評価になっている。MCNP でも同様の傾向が見られているので、実験値、あるいは、実験条件の記述に何らかの問題があるのでは、とのこと。

Neutronic Assessment about FeCrAl and SiC Claddings in SMART Nuclear Reactor, P. Fasolo, Universidade Federal de Minas Gerais

SMR である SMART の燃料被覆材として、Zr, SiC, FeCrAl を用いた際の炉心特性の解析に

関する研究。解析において、被覆管の厚さはいずれも同じにしていると思われる。反応度損失が最も少ないのは SiC であり、続いて Zr。FeCrAl は反応度損失が 30% dK/K 程度と大きく、被覆管を薄くしないと実用的ではないであろう。

Neutronics/Thermal-Fluid Coupling in MPACT for Steady-State Heat Pipe Microreactor Analysis, S. Choi, University of Michigan

ヒートパイプを用いたマイクロ炉の核熱結合計算に関する研究。核計算は MPACT を使用し、伝熱計算は①TRISO 燃料、②燃料コンパクト、③炉心に分けてシンプルな解析的モデルにて実施している。このような解析は、詳細な伝熱解析のチェックとして重要であると考えられる。

Validation of APOLLO3<sup>®</sup> self-shielding methods for stainless-steel reflectors calculations, J. Vidal

EPR で用いられている鉄反射体の自己遮蔽効果の取り扱いに関する検討。鉄反射体を一領域の共鳴物質として扱うのではなく、自己遮蔽の空間依存性を考慮することで計算精度が向上するとの結果が示された。なお、鉄反射体に関しては、plenary セッションで中国の参加者から、「中国の EPR の炉心解析を行ったところ、鉄反射体近辺の出力に測定と計算の差異が見られた。断面積の調整は行っているのか」という質問があった。なお、WH の関係者に AP1000(鉄反射体を採用している)の出力分布誤差について聞いてみたところ、「特異な傾向は見られていない」とのことであった。

Assembly Bowing Reactivity Calculation Methodology Applied to Lead Fast Reactor, K. Ramey, ANL

WH が開発している Lead Fast Reactor を対象とした燃料集合体曲がり起因の反応度評価に関する検討。炉心出力を DIF3D で、温度分布を DASSH で、曲がり量を NUBOW-3D で、添加反応度を PERSENT で計算する。PERSENT は一次摂動論に基づいているため、解析結果の検証が課題であると思われる。

Nuclear Data Uncertainty Quantification for Small High-Leakage Light Water Reactors using CASMO5/SIMULATE5, R. Ferrer, Studsvik

C5/S5 にランダムサンプリング法を用いた不確かさ評価が実装され、それを臨界集合体のように小型体系に適用した。C5 単体の不確かさ評価結果と C5/S5 の不確かさ評価結果が比較され、両者が同等であることが示された。

Streaming Correction Method of Griffin for Gas-cooled Pebble-bed Reactor, H. Park, ANL  
ペブルベッドタイプの高温ガス炉におけるストリーミング効果の取り扱いに関する検討。

高速炉のストリーミング効果の評価に用いられている Benoist の方向依存拡散係数が用いられ、方向依存拡散係数を用いることで、Serpent との実効増倍率の差異が小さくなることが示された。

The Calculation of Sensitivity Coefficient for Depletion Equations Using Mini-Max Polynomial Approximation Method, B. Tan, Institute of Nuclear and New Energy Technology  
燃焼感度の計算のため、指数行列を微分する matrix exponential derivative 法と MMPA を組み合わせる研究。重核種の燃焼チェーンに対して本手法を適用し、直接法により求めた燃焼感度係数を精度良く再現出来ることを確認した。

A Systematic Re-evaluation of the BEAVRS Benchmark with OpenMC, B. Oreri, MIT  
PWR 炉心のベンチマークである BEAVRS ベンチマークについて、これまでの仕様とコードバージョンの変遷でどの程度の影響が生じているかを改めて調査した研究。一般的に、ベンチマークは一回発行されると仕様が fix される場合が多いが、BEAVRS については、継続的に仕様がアップデートされている。OpenMC のバージョンの変更と合わせて影響を確認した結果、実効増倍率に与える変化は 0.1%dK/K 以内であり、影響は小さかった。なお、断面積ライブラリを変更して解析した結果、ARO 状態の実効増倍率の最小値は JEFF3.2 の 0.9993 であり、最大は JEFF3.3 の 1.004 であった。

Improvement of ENDF/B-VIII.1 Library Generation and Correction System for Lattice Calculation of HTGR System, J. Kim, Kyung Hee University  
HTGR 設計計算のため、prismatic 燃料要素において決定論的コードである DeCART2D と連続エネルギーモンテカルロコード McCARD で単一燃料要素における反応率の比較を行い、両者の反応率が一致するように補正因子を計算した。MHGTR-350 の二次元炉心を対象に解析を行った結果、補正を行っていないライブラリでは実効増倍率に 400-600pcm 程度の差異が生じるが、補正を行うことで差異が 200pcm 程度に抑えられることが分かった。

Improvement of ENDF/B-VIII.1 Library Generation and Correction System for Lattice Calculation of HTGR System, K. Dominesey, Naval Nuclear Laboratory  
中性子スペクトルのエネルギー依存性を POD で展開する研究。Resonance calculation by Spectral Expansion (RSE)法においては POD 展開係数を計算する際の重みとして POD の直交基底そのものを利用しているのに対し、本手法では adjoint 中性子束から得られた基底を使用する点が異なる。Adjoint 中性子束に基づく基底を使用することで、より良く中性子バランスを取ることを目指している。361 群計算をリファレンスとして、3 群で PWR 炉心計算を実施した結果、Galerkin POD に対して、実効増倍率及び出力分布ともに本手法の方が良い精度が得られることが分かった。

### Continuous Energy Subgroup Method, B. Forget, MIT

サブグループ法方程式を書き直し、中性子束を一般的な MOC で用いる方程式の逆数で表現することにより、共鳴部分においてマイナスの中性子束が発生するという問題を回避しつつ中性子束の落ち込みを表現する。また、共鳴部分の断面積を SLBW で解析的に表現することにより、連続エネルギーの中性子エネルギースペクトルを解析的に表現し、精度良く共鳴計算を行うという研究。興味深いアプローチであるが、現時点では研究の初期段階であり、今後の発展が期待される。

### A Tensor Train-Based Low-Rank Approximation for Monte Carlo Tallies Compression, M. Imron, Khalifa University

モンテカルロ計算の Tally に伴うサイズ圧縮として、X, Y, Z 方向に分離した POD 直交基底の掛け合わせ及び足し合わせにより中性子束の再現を試みる研究。一般的には、計算体系 (2D や 3D) で POD 基底を作成するため、本手法を用いることでデータサイズを大幅に圧縮出来る。均質性の高い小型炉心でテストした結果、データサイズを 1/1000 程度に圧縮出来た。本手法は、均質性の高い炉心には使えそうであるが、実際の軽水炉のように X, Y 方向の中性子束分布の分離が難しい体系では、サイズ圧縮効果が小さくなる可能性があると思われる。

## 3.その他

### (1)原子力人材育成

4 月 23 日水曜日朝に行われた plenary session において、” Modelling in support of core reactor physics development” を題材に議論が行われ、筆者はパネリストとして参加した。他のパネリストは解析手法や炉設計についてショートプレゼンしていたが、筆者は原子力人材に関する内容についてショートプレゼンを行った。炉物理部会で執筆した「原子炉の物理」を紹介し、「数式を使わないで炉物理を説明する」コンセプトについて述べたが、plenary session の後で何人かから斬新なコンセプト、との言葉を頂いた。欧米でも原子力の再興に伴い、人材の確保には苦労しているようである。イタリアにおいても、原子力を再導入する方向であり、イタリア国内のいくつかの大学で原子力教育の再構築に取り組んでいるとの話を聞いた。日本の原子力人材育成の取り組みは海外にも参考になると感じたところである。

### (2)日本からの参加者について

今回、日本から 30 名近くが参加したということであり、近年になく多数の参加があった。トリノという場所の魅力もあってだと思いが、これまでの PHYSOR では、日本からの参加者が数人、ということもあったので、大変喜ばしい。このような国際会議は、海外の最新の

研究に触れる機会でもあり、また人脈を広げる機会でもあるため積極的な参加を促したい。

### (3) イタリアについて

イタリアは今回が初めての訪問であったが、トリノの治安は想像以上に良かった(米国と対比してだが・・・)。また、他の参加者も書いているように、食べ物は美味しく、個人的には念願のビステッカ(イタリアのステーキ)を学生と食べることが出来、満足であった。

また、先入観として、イタリアは時間にルーズという印象があったが、最初のセッションの 15 分前にならないと会議場が開場しない、進行におけるタイムマネジメントがしっかりしているなど、意外に(とっては失礼だが)しっかりしている印象であった。

トリノでは、(PHYSOR2026 の参加者を除き)日本人の観光客とは会わなかった。今回に限らず、海外で日本人と会うことが最近減っている印象である。