

## PHYSOR2024 に参加して

日本原子力研究開発機構 郡司 智

### 1. はじめに

筆者は編集担当委員より、PHYSOR と PHYSOR2024 について概説せよとのお題をいただいたため、炉物理国際会議 PHYSOR について少しだけ概要を記す。PHYSOR は 1990 年に開始された米国原子力学会 (ANS) 主催の権威ある炉物理の国際会議であり、2 年に一回開催されている (3 回に 1 回は北米外で実施)。ちなみに日本人はフィズールと呼称するが、日本以外では米国人も含めてファイザーと呼ぶ。日本においては、水戸 (1996) と京都 (2014) で開催実績がある。

PHYSOR2024 は 2024 年 4 月 21 日 (日) ~24 日 (水) の会期で、カリフォルニア州サンフランシスコ「ヒルトン・サンフランシスコ」で開催された。初日はワークショップ (有料オプション) とウェルカムパーティが開かれ、2~4 日目は毎日朝一番にプレナリーがあり、その後 7 会場に分かれてのテクニカルセッションが開かれた。会議の最終日の夜にバンケットが、会期後の 25 日 (木) にはテクニカルツアー (近隣のローレンス・リバモア国立研究所、及び Kairos Power 社のラボ) が開催されている。参加費は ANS のメンバーでない参加者は早期申込で \$1,250 であった。

筆者は前回 PHYSOR2022 (ピッツバーグ) では発表を行ったものの、コロナ禍での開催であったため録画スライドによる参加であり、対面で参加するのは PHYSOR2016 (サンバレー) 以来であったこと、昨年自分が国際会議 ICNC2023 の主催者側であったことなどから今回の参加を楽しみにしていた。

### 2. PHYSOR2024 におけるトピック・学術発表

ヒルトンサンフランシスコの 7 会場で並行してセッションが行われた。PHYSOR では会議ごとにキャッチフレーズがあり、今回は“Beyond the Blueprint: Pioneering Reactor Physics for Real-World Implementation”であった。それに違わず、筆者が参加したセッションの印象では、マイクロ炉、高温ガス炉、熔融塩炉、HALEU (高純度低濃縮ウラン) などに関するトピックが多かった印象で、机上の理論・設計から一歩進んだ研究紹介が多数あった。

発表が行われたのは 22 日 (月) ~24 日 (水) の 3 日間であり、毎日全員が一同に介するプレナリーから開始された。プレナリーで取り上げられた 3 テーマは下記のとおりである。

Plenary I: Session on Industry Progress Towards Reactor Deployment

Plenary II: The Role of National Laboratories in Advanced Reactor Deployment

Plenary III: Current and Future Needs for Reactor Physics Experimental Facilities

プレナリー I では、米国アイダホ国立研究所 (INL) の A. A. Jaoude 氏をモデレータとし

て、今回の会議にスポンサーとして名を連ねている各社各機関の研究開発状況や自社製品の優位性について紹介された。米国外からの参加者からすると、どの炉が最も実用化に近いのか判断ができない部分があったが、可搬型炉などかなり野心的なコンセプトが紹介されていた一方で、設計的には特段目新しいものは無いように思われた。例えば高濃縮燃料を用いる高速炉で反応度制御にコントロールドラムを用いるなどのコンセプトは、原子力開発初期の宇宙用原子炉と同じである。発表を行ったのは次の各社であった(関連 URL を記載するのでご参考まで)。

・ Kairos Power (P. Peterson 氏)、熔融塩実証炉 Hermes シリーズ

<https://kairopower.com/tennessee/>

・ TerraPower (J. Vollmer 氏)、GE 日立と共同開発した熔融塩炉 Natrium

<https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>

・ GE 日立 (J. C. Hannah 氏)、LEU+ ( $^{235}\text{U}$  濃縮度~10wt.%燃料) を使う LWR、BWR 型 SMR

<https://www.governova.com/nuclear>

・ NANO Nuclear (J. Walker 氏)、マイクロ炉 (ZEUS、ODIN)

<https://nanonuclearenergy.com/nano-reactors/>

・ Westinghouse Electric Company (L. Crider 氏)、マイクロ炉 (eVinci)

<https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor/>

・ Rolls-Royce (O. Hannaut 氏)、小型モジュール炉 (SMR) をワンオフではないインフラ PJ と位置づけて開発することなど

<https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#/>

・ newcleo (D. Tomatis 氏)、2030 年頃に MOX 利用炉の許可取得を目指すことなど

<https://www.newcleo.com/products-services/delivering-our-gen-iv-vision/>

プレナリーII では、ORNL の E. Davidson 氏をモデレータとして、国立研究所の役割について米国の 17 の国立研究所を代表する複数の国立研究所 (アルゴンヌ、アイダホ (INL)、ロスアラモス (LANL)、オークリッジ (ORNL)) に加え、韓国の韓国原子力研究院 (KAERI)、スイスのパウル・シェラー研究所 (PSI) が研究状況とその役割について紹介した。トピックが先進炉開発に関してであったため、米国国研は SMR 開発における産業界との協働や、計算解析によるサポート、KAERI は SMR 「SMART」のほか、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉に対する取り組みについて報告した。PSI は、自国の商業原子炉が段階的に閉鎖となる状況であるが、欧州宇宙機関 (ESA) との宇宙炉開発や SMR を PSI キャンパスの暖房、養魚、農業に使うコンセプトなどを披露した。

プレナリーIII では、スロベニアのヨーゼフ・ステファン研究所の L. Snoj 氏をモデレータとして、数を減らしている炉物理実験施設の必要性について論じられた。登壇者 (機関) は米国から INL、LANL、WEC、欧州からフランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN)、ス

イス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) であり、施設、実験者、理論物理屋のそれぞれの専門家としての観点から討論された。

プレナリー後は 7 会場に分かれてテクニカルセッションが実施されたが、プレナリー会場はパネル討論会場に設定されていた。パネルセッションのテーマは表 1 のとおりであり、原子力或いは炉物理がどのように社会に貢献していくのか、新しい潮流は何か、公共性の高い OECD/NEA の取り組みの紹介等が行われた。

表 1 Panel Session のトピック

Computational Reactor Physics Methods to Support I&C
Generative AI for Reactor Physics
Key Regulatory Developments and Needs for Advanced and Small Modular Reactors
Nuclear at COP28
OECD NEA Activities Related to Scientific Issues of Nuclear Reactor Systems
Reactor Startup and First Criticality
Status of the ICSBEP, IRPhE, SFCOMPO, and SINBAD Benchmark Handbooks
Unleash Your Vision: Crafting the Blueprint for Launching Your Game-Changing Startup!

テクニカルセッションは表 2 のとおり、特段トラックが設けられたわけではなく、20 のテーマごとに合計 53 セッション開催された。プログラムによれば発表数は 247 件であった。

発表時間は 15 分、質疑 5 分であり、一人あたりに与えられた時間は 20 分であった。これは他の国際会議からしても短いと思われた。ポスター発表は設けられなかったことから、実質 3 日間という短い会期に多くの口頭発表を押し込んだ結果であろう。“Methods for Reactor Physics Analyses”のセッションでは、なんと並行してセッションが行われた。会場配置もコーヒープレイク会場とプレゼンテーションの各部屋が上下に離れており、15 分の短いコーヒープレイクの時間での大移動は少々疲れた。

セッショントピックの内容としては、キャッチフレーズの触れ込みどおり、様々な炉型に対してセッションが成立するほどの投稿があったようである。高速炉に関する発表件数以上の高温ガス炉やマイクロ炉の発表件数があるような状況で、少し前までは学生が発表するようなトピックも、スタートアップ企業が発表していたりするのが印象的であった。

そのような中で“Nonproliferation and Safeguards, Accident Dose Analysis and Reactor Physics Analyses for Externally Driven Systems”というタイトルからして詰め込みすぎのセッション座長を務めさせていただいた。内容は比較的地味ながらも興味深いものであったが、それぞれの専門家が集まったセッションであったため、質疑応答の時間を持たせるのに少々努力が必要であった。その他の聴講セッションは臨界安全及び研究炉関係が主であり、各施設の

取り組み状況を把握することができた。昨今のゼロカーボンエネルギーとしての原子力の復権に伴い、米国内の研究炉も近代化改修や再稼働が計画されている。例えば、ORNL は HIFR 炉のベリリウム反射体の交換改修を計画し、ノースカロライナ州立大学の 1 MW プールタイプ炉 PULSTER は燃料の濃縮度を 4wt% から 6wt% まで上げるための準備を進めている。これら海外の施設に比べると、日本の炉物理実験施設で実験ができる範囲は限られており、日本の施設に海外の研究者を呼び込んで成果を出すためには、施設固有の特長をいかに出すかが課題であると感じた。

表2 テクニカルセッションのタイトルとセッション数、発表件数

タイトル	セッション数	発表数
Advanced Reactors Design and Core Analysis	2	10
Advancements in UQ and Validation Methodologies	3	14
Data, Methods, Code Validation	7	33
Designing Reactors for Integrated Energy Systems and Space Nuclear Reactors Design and Core Analysis	1	4
Experimental Reactor Physics for Advanced Reactors	1	5
Fast Reactors Design and Core Analysis	1	5
Fuel Management and Optimization	1	5
Fuel-Cycle Physics and Scenarios	1	5
Light-Water Reactors Design and Core Analysis	3	15
Machine Learning and Artificial Intelligence for Reactor Physics	2	10
Methods for Reactor Physics Analyses	11	48
Micro-Reactors Design and Core Analysis	2	8
Molten Salt Reactors Design and Core Analysis	1	5
Multi-Physics Reactor Simulations and Validation	5	24
Nonproliferation and Safeguards, Accident Dose Analysis and Reactor Physics Analyses for Externally Driven Systems	1	5
Nuclear Criticality and Safety	3	14
Pebble-bed Reactors Design and Core Analysis	2	10
Reactor Physics Methods in Control and Optimization Problems	1	5
Research Reactors for Reactor Physics Analysis and Simulation	3	15
Special Session on TVA Watts Bar Benchmark	2	7
<b>Total</b>	<b>53</b>	<b>247</b>

### 3. 自発表について

23日(火)午後の臨界安全セッションIIで「Critical Experiment Plans on the New STACY to Clarify the Criticality Characteristics of the Molten Core-Concrete Interaction Products」というタイトルで発表を行った。本研究の内容は、JAEAが整備を進める定常臨界実験装置STACY更新炉を用いてMCCIで生成した燃料デブリの臨界特性を評価するために製作するコンクリート構造材棒を用いた実験体系の最適化に関するものである。前日の22日にSTACY更新炉が初臨界を達成したことから、急きょ現地でスライドを差し替えて自発表内で初臨界の報告をした。主な質疑として、コンクリートを用いた臨界実験データに大変興味があるが、どのようにコンクリートの経時変化を評価するのかという質問があり、試料を多めに作り、適宜破壊分析すること、試料ごとの不確かさが考えられることから、適宜試料の入れ替えての実験を検討している旨を答えた。また、装荷方法の最適化に感度評価を用いたことから、コンクリートの実効増倍率に対する感度はそんなに大きいのかという質問があり、もちろん支配的なのはUや水であるが、今回は装荷方法、装荷位置の評価の目的のみで感度に着目している旨を回答した。会場には40名程度の聴講者が居たように思われるが、概ね好意的な反応であったと感じた。

また、STACYの初臨界とその利活用については、最終日のプレナリーIIIにおいて、「我々のコミュニティに新しい施設が加わることを歓迎し、紹介したい」とモデレータである Luca Snoj氏から紹介を受け、全参加者の前でアナウンスする稀有な機会をいただいた。そこでSTACYの目的とJAEAの決意、実験テーマの提案呼びかけを行えたことは筆者にとって今回の出張の最大の成果だったように思う。筆者の顔を見かけると「Congratulations!」と声を掛けてくださる参加者も複数おられ、ありがたかった。



<https://www.ans.org/meetings/physor2024/>

### 4. その他

日本からの参加者は、北海道大学、東京都市大学、名古屋大学、三菱重工業、原子燃料工業、原子力機構からおそらく16人であった。筆者は前週から米国滞在していたがそれまで日本人は皆無であったため、急に日本人が増えて英語が前週より出てこなくなったと感じた。環境は大事である。ウェルカムドリンクやバンケットのアルコール類はチケット制(受付時に配布)であり、それぞれ2杯までしか飲ませてもらえなかったのは大変残念であった。バンケットの料理は全く期待出来なかったが、ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)や海軍原子力研究所(NNL)の面々と楽しむことが出来た。

謝辞

PHYSOR2024 の組織委員としてご尽力くださった北海道大学千葉先生をはじめ、今回お世話になったすべての方々に感謝申し上げます。

## 付録 1. 開催都市サンフランシスコについて

今回の開催都市であるサンフランシスコは初めての訪問であった。前週過ごしていたリバモア (付録 2 参照) に比べると大都会であり、到着直後は衛生面、治安ともに良くないと感じたものの、慣れてしまえば意外と過ごしやすい街かもしれない。

サンフランシスコと言えば坂の街で、その坂たるや強烈な印象を受けた。会議場がある市中心部からゴールデンゲートブリッジやアルカトラズ島が見えるフィッシャーマンズワーフまでいくつかの通りで激坂を登ったが、いざ下りに入るとかなり踏ん張らないと転げ落ちる恐怖感があった。そんな坂に平気で路上駐車をしたり、古風なケーブルカーに混じって無人のタクシーがうろうろしているのである。滞在ホテルを選ぶときには地図で立地を見ながら予約をすると思うが、1ブロック違うと平気で3階分くらい標高差があるため、1ブロック先の安いホテルにはそれなりの理由があることがわかった。スーツケースをその1ブロック引っ張り上げるのに相当骨が折れるのである。

会期初日日曜日の午前中は時間があつたので、自転車を借りてゴールデンゲートブリッジを渡り、対岸のリゾート地を走った。観光はそのくらいであったが、西海岸の雰囲気は少しだけ味わうことができた。ただし、物価は日本の感覚からすると大変に高く、なるべく円に換算しないことを心掛けたが、クレジットカードの明細を見るとやはり凹む。弊機構のサンフランシスコにおける日当は6~7千円程度であり、昼飯を食べてコーヒーを飲んだらそれだけで終わりである。





ピア 39 の住人アザラシ (他にアシカもいる)



ストリートカーが動態保存されてフィッシャーマンズワーフまで運行



借りた「デラックスコンフォートバイク」と  
ゴールデンゲートブリッジ



ゴールデンゲートブリッジの銘板



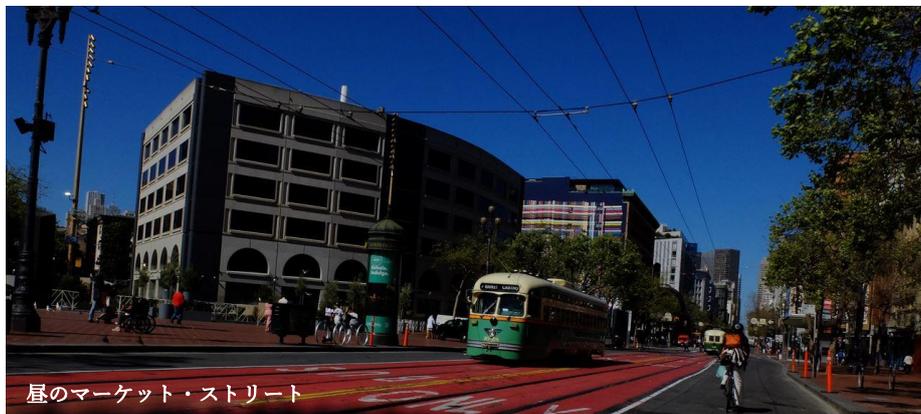
ゴールデンゲートブリッジの対岸 Tiburon から SF の街並み



夜のマーケット・ストリート



夜のケーブルカー



昼のマーケット・ストリート

## 付録 2. 番外編 LLNL 訪問

前述したとおり、筆者は PHYSOR2024 の前週に LLNL を訪れていた。PHYSOR 開催に合わせて OECD/NEA 傘下で活動する国際臨界実験ベンチマークプロジェクト (ICSBEP) の技術レビュー会合が LLNL であったためである。ICSBEP の他に国際炉物理ベンチマーク (IRPhE) プロジェクト、遮蔽積分実験データベース (SINBAD) の技術レビュー会合も合わせて開かれた。会期中 LLNL 内のテクニカルツアーも開催され、レーザー核融合実験施設である国立点火施設 (NIF) や未臨界集合体 ISSA、熱中性子散乱則を評価する Pulsed-Neutron Die-Away (PNDA) 装置などを見学した。NIF は莫大な予算を掛けて開発中であるが、今回のツアー参加者はみな核分裂炉の専門家ということで、NIF 側の説明者に核分裂炉の優位性を力説するといった珍場面もあった。ISSA や PNDA ははるかに低予算の手作り感あふれる施設であり、ISSA の担当者によれば、燃料集合体はリサイクル品、その他の装置は 10 ドル DIY で作ってやったと笑い飛ばしていた (確かに検出器の固定装置には自転車のクイックリリースが使われていた)。そんな彼らに米国のスピリッツを垣間見た。

NIF

<https://lasers.llnl.gov/>

ISSA

[https://ncsp.llnl.gov/sites/ncsp/files/2021-05/Nelson-LLNL\\_2019-TPR-Presentation-ISSA-Benchmark.pdf](https://ncsp.llnl.gov/sites/ncsp/files/2021-05/Nelson-LLNL_2019-TPR-Presentation-ISSA-Benchmark.pdf)

PNDA

[https://ncsp.llnl.gov/sites/ncsp/files/2022-02/39\\_pnda\\_tpr\\_llnl\\_2022.pdf](https://ncsp.llnl.gov/sites/ncsp/files/2022-02/39_pnda_tpr_llnl_2022.pdf)

Livermore はサンフランシスコからサンフランシスコ湾を挟み 60 km ほど東に位置する町で、名産のワインのためのブドウ畑に囲まれて LLNL がある。IT 産業で有名な San Jose へのベッドタウンでもあるようで、San Jose との間のアタモント通勤急行 (ACE) は朝に西行きのみ 4 本、夕方は東行きのみ 4 本というすごく「振った」ダイヤである。LLNL へのアクセスはサンフランシスコ国際空港からサンフランシスコを経由する都市間鉄道 BART が Dublin/Pleasanton 駅まで伸びており、そこからバスで 40 分程度で Livermore 中心部に到着する。ただし、あまり宿泊施設はなく、そこから LLNL へのアクセス手段もかなり限られるため、今回は LLNL メンバーに毎日送迎してもらった。アメリカ人研究者の朝は早く、普通にホテル前 6 時半ピックアップとかであった。時差ボケで寝られないうえに (夜は日本の仕事があり) かつ朝が早いのでかなりの寝不足のまま 1 週間を過ごした。



原子番号 116、リバモニウムの発見を記念して



朝夕に爆音の警笛とともにやってくる ACE Train



木曜日の夕暮れ、人々の憩い

**National Ignition Facility**

Livermore Livermore National Laboratory

**ICSBEP NIF Tour**  
April 17, 2024

**NIF&PS**

**Science & Technology on a Mission**  
The world's largest and highest-energy laser system, NIF made scientific history on Dec. 5, 2022, by achieving fusion ignition in a lab for the first time. This produced a net laser energy gain using the same self-sustaining process that powers the sun and the stars. ●

ICSBEP ツアー御一行様