

原子力計算科学×AI/ML最新動向（2024年～2025年初頭）

背景と全体動向

近年、原子力分野でも人工知能（AI）・機械学習（ML）・深層学習（DL）の活用が急速に拡大しています。特に**2024年1月から2025年6月**にかけては、原子炉物理や原子力計算科学にAI/MLを導入する試みが各国で活発化しました¹²。例えば、**デジタルツイン**（原子炉の仮想モデル）技術への関心が高まり、リアルタイムで炉の挙動を予測・監視するためにAIを用いる研究が加速しています³⁴。AI技術の進歩により、原子炉シミュレーションの高速化、炉心設計の最適化、異常検知の高度化が実現可能となりつつあり、これらは原子力プラントの安全性・効率向上につながると期待されています²。各国の研究機関（米国DOE、日本JAEAなど）や国際機関（OECD/NEA、IAEA等）も専門のタスクフォースやベンチマーク課題を立ち上げ、AI/ML手法の有効性検証やガイドライン策定を進めています⁵⁶。

主なAI手法・アルゴリズムの活用トレンド

原子力計算科学で注目されるAI/MLアルゴリズムには、以下のようなものがあります。

- ・**グラフニューラルネットワーク（GNN）**： 原子炉やプラントの**システム全体**をノード（機器・要素）とエッジ（相互関係）で表現し、複雑な相互作用を学習する手法です⁷。GNNは**デジタルツイン**構築の中核技術として採用されており、Argonne国立研究所ではGNNベースの原子炉デジタルツインを開発し、限られたセンサーデータから炉の状態を高速かつ高精度に予測しています³。GNNにより、出力変動や冷却系性能変化など様々なシナリオで炉心挙動をリアルタイム予測し、異常検知や運転支援を実現できることが示されています³⁴。
- ・**物理インフォームド・ニューラルネットワーク（PINN）**： **物理法則を組み込んだ深層学習手法**で、少ないデータでも高精度を実現できる点から注目されています⁸。PINNは中性子輸送方程式や拡散方程式などの**炉物理の支配方程式を直接解く**用途に活用され、既存の数値解法に匹敵する精度で計算を高速化する成果が報告されています⁹。例えば、韓国KAERIの研究ではPINNにより一群拡散方程式の解を高速算出し、従来法と比較して大幅な効率化を確認しました⁸。PINNとその変種は多次元・高次元の問題にも適用が進み、**計算精度と効率の両立**（高精度な代理モデルの構築）に寄与しています¹。
- ・**深層強化学習（DRL）**： 強化学習は、自律的なエージェントが試行錯誤を通じて最適方策を学ぶ手法で、原子力分野では**最適化問題**への応用が進みました。特に炉心燃料の**装荷パターン最適化**（どの燃料集合体をどこに配置するか）において、深層強化学習が既存のヒューリスティック手法を上回る成果を示しています¹⁰¹¹。MITの研究では深層強化学習（近接方策最適化PPOアルゴリズム）により、遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法など従来法を凌駕する高品質な炉心リロードパターンを短時間で発見できることが報告されました¹⁰¹¹。強化学習により燃料交換サイクルの経済性向上や探査の自動化が期待されています。
- ・**ディープラーニングによるサロゲートモデル**： 汎用的なディープニューラルネット（DNN）や畳み込みNN（CNN）を用いて、高度な**代理モデル**や**超解像**を行う研究も進んでいます。例えば、マルチグループ拡散計算の**代理モデル**としてANN（全結合NN）を訓練し、従来コードと同等の出力を**桁違いの高速**で予測できることが示されています¹²。また、モンテカルロ中性子輸送計算で得られる低解像度フ

ラックス分布を、CNNで**高解像度化（超解像）**する試みもあります¹³。CNNモデルは空間・エネルギー分解能を倍増しつつ、統計誤差を劣化させずに結果を推定できると報告されており¹⁴、詳細解析を高速に行う新手法として注目されています。

上記の主要手法と用途例を表にまとめます。

AI技術・手法	主な応用例（原子力分野）	研究例・成果
グラフニューラルネットワーク（GNN）	原子炉システム全体のモデル化（デジタルツイン）、 プラント状態監視・異常検知	Argonne研のGNN-basedデジタルツインで炉の挙動を高速予測 ³ 。異常発生時に安全措置提案も可能 ⁴ 。
物理インフォームドNN（PINN）	中性子拡散・輸送方程式の高速解法、 マルチフィジックス連成の簡略モデル化	KAERIでPINNにより拡散方程式を高速高精度に解法 ⁸ 。PINNは少データで高精度を達成し従来法と同等の結果を実現 ⁹ 。
深層強化学習（DRL）	炉心設計最適化（燃料装荷パターン最適化等）、 運転プロファイル最適化	MITでPPOアルゴリズムを用い燃料配置を最適化し、GAや焼きなまし法を凌駕 ¹⁰ ¹¹ 。数十万通りの配置探索を自動化 ¹⁵ 。
ディープラーニング（DNN/CNN）	炉物理計算の代理モデル（サロゲート）、 モンテカルロ結果の高解像度化	Mines研のANN代理モデルは多群計算を桁違い高速化 ¹² 。CNNでMC計算の空間・エネルギー解像度向上 ¹³ 。

主な応用領域と事例

AI/ML技術の原子力計算科学への応用は多岐にわたります。主要トピックごとに最新動向を整理します。

1. 中性子輸送計算・炉物理シミュレーションへのAI応用

原子炉物理の基盤である**中性子輸送方程式**や拡散方程式の解法にAIを用いる研究が進展しました。PINNや深層NNにより、これらの方程式を従来より高速に近似解く試みが数多く報告されています⁹¹。例えば、中国の研究では深層NNを用いて7次元の高次元中性子輸送問題を解き、集合体無限増倍率 k_{eff} を平均145 pcm程度の誤差で予測できたと報告されています¹⁶。この誤差は工学的許容範囲（500 pcm, 5%）内に収まっており、高次元輸送計算への**データ駆動型AIアプローチ**の有効性を示しています¹⁷。また、日本のBEAVRSベンチマーク炉心に対し、LSTM（長短期記憶ネットワーク）を用いて燃料サイクル中の k_{eff} （実効増倍率）推移を学習・予測した例では、最大誤差2.5 pcmという非常に高い精度で予測が可能となり、機械学習が輸送計算に応用できることを実証しました¹⁸。さらに、モンテカルロ法と機械学習のシナジーも注目されています。例えば、機械学習モデルでモンテカルロ計算の結果（中性子フラックス分布など）を補間・補正し、**統計誤差低減**や**収束加速**を図る研究が進んでいます¹³。総じて、AIによる**高速で精度の高い炉物理シミュレーション**の実現が見え始めており、今後は多群拡散計算だけでなく、時空間依存の輸送計算やマルチフィジックス連成計算への応用拡大が期待されます。

2. 炉心設計・最適化へのAI応用

炉心や燃料サイクルの**最適化問題**にもAIが活用されています。代表例が**炉心燃料装荷パターンの最適化**で、これは経済性・安全性を両立するために燃料配置を最適化する組合せ最適化問題です。従来、この問題は遺伝的アルゴリズム（GA）や焼きなまし法などでアプローチされてきましたが、近年は**強化学習**や高度な機械学習による新手法が登場しています¹⁰。2024年には、MITのグループが深層強化学習（PPOアルゴリズム）を用いてPWR炉（加圧水型炉）の単目標最適化を行い、**従来の探索アルゴリズムを上回る性能**を示しました¹⁰¹¹。彼らの手法では、燃料交換サイクルのコスト指標を報酬とし、強化学習エージェントが自律的に何

百万通りもの装荷プランを探索・学習します。その結果、従来法より高い燃料利用効率を達成する配置を発見し、計算時間も大幅短縮できました^{10 19}。また、支援ベクタ回帰（SVR）やニューラルネットによって炉心設計パラメータ（出力ピーキング因子や反応度係数など）を高速評価し、**燃料配置の自動探索**を支援する研究も報告されています^{20 21}。さらに、炉心だけでなく核燃料サイクル全体（例えば燃料濃縮や交換戦略の最適化）にベイズ最適化や遺伝的プログラミングを適用する試みも見られます。これらの動向は、AIが炉心・燃料設計における**高度な意思決定支援ツール**となりうる可能性を示しています。

3. 原子炉・プラント監視と異常検知へのAI応用

原子力プラントの安全運転には、**状態監視**と**異常の早期検知**が不可欠です。この分野でもAI/MLが大きく貢献し始めています。最近の動向としては、プラント全体を仮想空間に再現する**デジタルツイン**技術が注目されており、そこに機械学習モデルを組み込むことでリアルタイム監視・予測を行う研究が進んでいます^{3 4}。前述のArgonne研の例では、GNNベースのデジタルツインが実炉の挙動をほぼリアルタイムで計算し、センサー劣化の検知や事故シナリオ下での挙動予測に活用されています^{22 4}。このようなモデルは**異常検知（アノマリー検知）**にも応用され、通常と異なる振る舞いを検出すると直ちに警告を発し、必要ならば制御措置を提案することも可能です²³。

異常検知アルゴリズムの面では、教師なし学習や生成モデルの活用が進んでいます。例えば、**拡散確率モデル（DDPM）**を用いた教師なし異常検知では、正常データから学習したモデルに新データを入力し再構成誤差を見ることで異常を検出する手法が提案されています（ノイズツートイズ学習戦略）²⁴。また、Isolation Forestなどの異常検知アルゴリズムをデジタルツインと組み合わせ、小型炉の運転データから**異常な運転挙動（プロリファレーションの兆候など）**を自動検出する試みもあります²⁵。加えて、センサーデータのドリフトや故障を検知する**物理インフォームドな異常検知モデル**も研究されています²⁶。総じて、従来は人間の経験に頼っていた異常兆候の把握を、AIが大量のデータ解析によって自動化・高感度化する方向に進んでいます。これにより、プラントの予知保全（CBM: Condition-Based Maintenance）や事故予防の精度向上が期待されます^{27 28}。

さらに、運転データ以外の情報源にもAIが活用されています。例えば、**自然言語処理（NLP）**技術を用いて、プラントの運転日誌や報告書を自動で解析・要約し、重要な異常や傾向を抽出する試みもあります^{29 30}。米国INLでは発電所の膨大なテキスト報告を機械学習でスクリーニングし、緊急度の高い事項を自動抽出するシステムを開発中であり、運用現場での意思決定の効率化が図られています^{31 32}。また、画像認識・コンピュータビジョン分野では、旧式プラントの**アナログ計器をカメラで読み取りデジタル化**する技術や、監視カメラ映像から人為ミス（バルブの締め忘れ等）を検知する**画像異常検知技術**も開発されています^{33 34}。このように、AIはプラントのあらゆるデータ（数値計測、テキスト記録、映像）を総合的に分析することで、安全監視と運転管理の高度化に寄与し始めています。

4. 核データ解析・その他の応用

原子力計算科学の基盤となる**核データ**分野にも、AIの波が及んでいます。核データ（中性子断面積など）の評価・補完に機械学習を使う研究が活発化しており、不確かさ低減や自動化が模索されています³⁵。【2024年のPHYSOR国際会議】では、ケンブリッジ大学の研究者が既存の評価済み核データライブラリ（JENDLやENDF/Bなど）を教師データとして(n,2n)反応の断面積をMLで再評価する手法を発表し、実験値によらないデータ駆動型の核データ改良アプローチとして注目されました³⁶。このような手法は、核データの自動評価・校正や、核データと炉物理計算を一体化する**トータルモンテカルロ法**の高度化にも繋がる可能性があります³⁷。実際、日本原子力学会の炉物理部会ロードマップでも「機械学習・AIやデータ同化を用いた核データの自動評価・修正」が今後の重要課題として挙げられています³⁷。

その他、核融合炉のプラズマ制御や放射線計測データ解析など、原子力・放射線分野全般でAI活用の検討が進んでいます。生成AI（生成型ディープラーニング）を用いて未知の事故シナリオを**データ拡張**したり、マルチフィジックスシミュレーションの結果を補間する試みも見られます⁶。国際的には、OECD/NEAのタスク

フォースによるベンチマーク課題において、**異常検知**や**ジェネレーティブAI**の原子力応用がフェーズ分けして検証されている状況です³⁸。このように、核データからプラントシステムまで幅広い領域で、AI/MLが補助ツールから不可欠な技術へと位置づけを変えつつあります。

注目すべき研究グループ・プロジェクトと主要論文

2024～2025年に特に活躍が目立つ研究グループとしては、以下が挙げられます。

- ・**Argonne国立研究所（米国）**：原子炉のデジタルツイン開発において先導的役割を果たしています。Rui Hu氏らのチームはGNNベースの原子炉デジタルツイン手法を開発し、その成果を米国原子力学会や学術誌『Nuclear Technology』で発表しました^{7 22}。彼らの研究はグラフニューラルネットによる大規模シミュレーション高速化とリアルタイム異常検知を両立しており、**原子炉運用へのAI実装の一步前進**として評価されています。
- ・**MIT・タフツ大学（米国）**：Korosh Shirvan教授のグループは炉心燃料装荷問題への強化学習適用で先駆的成果を出しました。2024年にはPaul Seurin氏との共著で、深層強化学習(PPO)によりPWR炉心の最適リロード戦略を導出した論文をarXivに発表¹⁰し、従来手法を凌ぐ統計的優位性を示しています。同グループは単目的最適化に続き、多目的最適化（経済性と安全余裕の両立など）への拡張研究も進めており、学界や産業界から注目されています。
- ・**清華大学・東華大学（中国）**：Zhangらによる包括的レビュー論文「Artificial Intelligence in Reactor Physics: Current Status and Future Prospects」は2025年に発表され、炉物理領域のAI応用を網羅的に整理した重要文献です^{39 40}。同レビューでは、中国・フランスを含む国際的な研究動向を踏まえ、**定常・過渡・燃焼領域ごとのAI応用課題**や、PINN・データ同化・デジタルツイン等のキーワードを明確に位置付けています。著者ら（東華大・SJTU・EDFなどの合同チーム）は炉物理×AIの研究ネットワークを構築しており、中国における原子力AI研究のハブ的存在です。
- ・**日本原子力機構（JAEA）**：日本ではJAEAの計算科学センターが**AI・DX技術開発室**を設置し、原子力分野へのAI活用研究を推進しています。JAEAは次世代炉シミュレーション基盤「JAMPAN」を開発する中でマルチフィジックス計算へAIを組み込むことを模索しており⁴¹、国内の原子力学会でも生成AIや大規模言語モデル（LLM）の可能性について特別講演を行うなど、産官学でAI活用の機運が高まっています⁴²。特に炉物理部会ロードマップ2024では、デジタルツイン開発や燃料装荷最適化へのAI活用が明確に謳われ、国内各研究機関（大学・メーカー含む）と連携した取組みが進行中です^{43 44}。
- ・**ケンブリッジ大学（英国）**：前述の核データへのML応用で先導するほか、原子力規制分野でのAI活用にも取り組んでいます。英国ではAIを原子力規制に活かす戦略策定が進められており、ケンブリッジ大やロスアラムス研と連携したベンチマーク問題（例：確率論的リスク評価へのAI導入）が計画されています^{45 46}。Rohan Gaya氏らの核データML手法はその一端であり、今後炉物理と核データの融合研究が深化する見通しです。

以上のように、原子力計算科学×AIの研究は**グローバルな広がり**を見せており、国際機関OECD/NEAも**AI/MLベンチマーク**（臨界熱流束予測や異常検知、最適化問題などを含む二段階構成）を主導しています⁵。Phase 1では回帰・分類・異常検知、Phase 2では生成モデル・最適化といったテーマで各国のAI手法を比較・検証する計画です³⁸。このような取り組みを通じて、原子力分野でのAI/ML/DLの知見共有が進み、標準的手法やベストプラクティスが確立されていくことが期待されます。

おわりに（まとめと展望）

2024年から2025年前半にかけて、原子力計算科学分野におけるAI/ML/DL応用は**理論研究と実応用の両面で大きく前進**しました。定常状態の炉心設計から過渡事象のリアルタイム対応、燃料燃焼の解析まで、幅広い課題に対して機械学習が新たな解決策を提供し始めています⁴⁰。特に、従来は計算負荷のため困難だった高次元問題を解くPINNやDNNサロゲート、複雑な組合せ最適化を処理する強化学習、そして大量データから異常を察知する異常検知モデルは、本分野のゲームチェンジャーとなりつつあります。これらの技術は**計算効率と精度の両立**を可能にし、原子力システムの設計・運用プロセスを革新しています¹²。

一方で、課題も残されています。モデルの**解釈性や汎用性**を高め、ブラックボックスになりがちな深層学習の結果を現場で信頼して使うための工夫（例：説明可能AI、不確かさ定量）が重要です⁴⁷⁴⁸。また、原子炉物理と熱水力学のような**異なる物理領域の統合（連成）**にAIを適用する際の最適手法は未成熟であり、さらなる研究が求められます⁴⁹。データ不足を補うための**データ拡張**や、限られた計測から状態を推定する**データ同化技術**も引き続き重要課題です⁵⁰²。加えて、産業応用の観点では、現場でのモデル検証・検定（バリデーション）や、安全規制当局によるAI活用のガイドライン整備も必要となるでしょう⁴⁵⁴⁴。

総括すると、AI/ML/DLは原子力計算科学に革新的メリットをもたらす一方、慎重な検証と現場知見との融合が不可欠です。今後数年は、**デジタルツインの高度化**や**自動制御へのAI統合**、さらには大規模言語モデルによる知識管理など新たな展開も予想されます。原子力分野の研究コミュニティでは引き続きグローバルな協調の下で知見を蓄積し、安全・効率・経済性の向上に資するAI技術の実用化へと邁進していくことでしょう⁵¹⁴⁹。

¹ ² ²⁰ ²¹ ³⁹ ⁴⁰ ⁴⁷ ⁴⁸ ⁴⁹ ⁵⁰ Artificial Intelligence in Reactor Physics: Current Status and Future Prospects

<https://arxiv.org/html/2503.02440v1>

³ ⁴ ⁷ ²² ²³ Virtual models paving the way for advanced nuclear reactors | Argonne National Laboratory

<https://www.anl.gov/article/virtual-models-paving-the-way-for-advanced-nuclear-reactors>

⁵ ⁶ ³⁸ Nuclear Energy Agency (NEA) - Benchmark on Artificial Intelligence and Machine Learning for Scientific Computing in Nuclear Engineering. Phase 1: Critical Heat Flux Exercise Specifications

https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_89619/benchmark-on-artificial-intelligence-and-machine-learning-for-scientific-computing-in-nuclear-engineering-phase-1-critical-heat-flux-exercise-specifications?details=true

⁸ ⁹ 2024_KNS_abstract_R1

https://www.kns.org/files/pre_paper/52/24A-063-%EC%A0%84%EB%B3%91%EC%9D%BC.pdf

¹⁰ ¹¹ ¹⁵ ¹⁹ [2402.11040] Surpassing legacy approaches to PWR core reload optimization with single-objective Reinforcement learning

<https://arxiv.org/abs/2402.11040>

¹² ¹³ ¹⁴ Accelerating Monte Carlo and deterministic neutron transport models using machine learning

<https://repository.mines.edu/entities/publication/558bd694-f80c-468f-a926-b5f7327f41a6>

¹⁶ ¹⁷ Research on Data-Driven Methods for Solving High-Dimensional Neutron Transport Equations

<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/4153>

¹⁸ Neutron transport calculation for the BEAVRS core based on the LSTM neural network | Scientific Reports

[https://www.nature.com/articles/s41598-023-41543-1?](https://www.nature.com/articles/s41598-023-41543-1?error=cookies_not_supported&code=8fbcad17-89ac-4d82-8f74-1e6614475347)

[error=cookies_not_supported&code=8fbcad17-89ac-4d82-8f74-1e6614475347](https://www.nature.com/articles/s41598-023-41543-1?error=cookies_not_supported&code=8fbcad17-89ac-4d82-8f74-1e6614475347)

24 Unsupervised anomaly detection for Nuclear Power Plants based on ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0149197024004712>

25 Autonomous anomaly detection of proliferation in the AGN-201 ...

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306454924006534>

26 System-Level Physics-Informed Detection of Anomalies in Reactor ...

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00295450.2024.2338507>

27 28 [2211.11013] Machine Learning Methods for Anomaly Detection in Nuclear Power Plant Power Transformers

<https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2211.11013>

29 30 31 32 33 34 Artificial intelligence in nuclear: How computer and data scientists are enhancing the industry - Idaho National Laboratory

<https://inl.gov/feature-story/artificial-intelligence-in-nuclear-how-computer-and-data-scientists-are-enhancing-the-industry/>

35 37 43 44 45 46 51 rpg.jaea.go.jp

https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/roadmap/rm/rpg_rm2024.pdf

36 41 rpg.jaea.go.jp

https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/annual_report/pdf77/No77-12.pdf

42 [1H_PL] 原子力産業の未来を拓く ―AI・大規模言語モデルの可能性

https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/aesj2024f/session/1H_PL