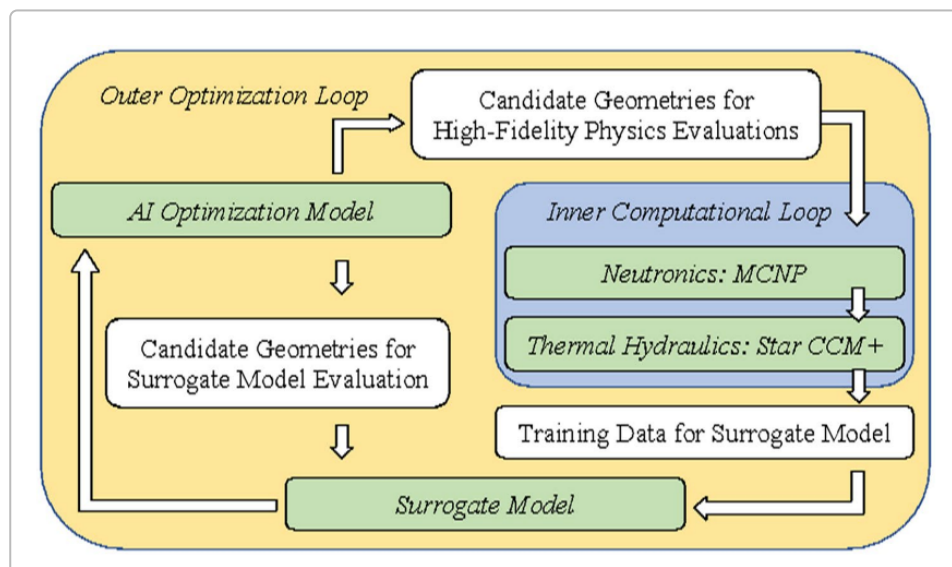


原子力計算科学における近年の研究動向（2022～2025年）とAI・機械学習の活用

近年（2022年～2025年）の原子力計算科学分野では、高精度シミュレーションとデータ駆動型技術の融合が進み、各分野で研究が活発化しています。特に、人工知能（AI）・機械学習（ML）の手法が様々な原子力分野に応用され、シミュレーションの高速化、設計の最適化、物性予測、異常検知などに大きな成果を上げています¹²。以下、原子炉設計から核融合に至る広範なカテゴリ別に、主要な研究動向とAI・ML活用事例を整理します。また各カテゴリ内では、代表的な事例を表形式でまとめ、研究機関名・論文（プロジェクト）名・発表年・技術概要・AIの役割を明示します。

原子炉設計・最適化分野の動向

原子炉設計では、近年は高度な計算最適化とマルチフィジックス・シミュレーションが重視され、AIがこれらを支援しています。従来、炉心や炉設備の設計は設計者の経験と試行錯誤に頼る部分が大きかったですが、現在は大規模計算とAIによる自動探索が可能になりつつあります³⁴。例えば、Oak Ridge国立研では機械学習によるマルチフィジックス模擬（サロゲート）モデルを用いて数千の炉心候補形状を高速評価し、温度ピーク係数を3倍改善する最適設計を導出しました³。この研究では、AIが高速近似モデルとして働き、スーパーコンピュータ上で膨大な候補を評価することで従来困難だった任意形状炉心の最適化を実現しています⁵。また、イスラエルの研究グループは強化学習をMonte Carlo計算と統合するOpenNeoMCフレームワークを開発し、燃料密度や水ギャップを変数とする研究炉セルの自動最適化に成功しました⁶⁷。このように、強化学習や遺伝的アルゴリズムによる炉心配置・構造の自動探索が進み、AIが新しい原子炉概念の発見やSMR（小型モジュール炉）設計にも貢献し始めています⁸⁹。さらに、設計段階からデジタルツイン技術を導入し、AIでモデル校正しながら最適化を行うアプローチも検討されています¹⁰。



※ORNL研究チームによる「AI最適化モデル」を用いた炉心設計フレームワークの概念図。内側ループで高fidelityの詳細物理計算（中性子輸送：MCNP、熱流体：STAR-CCM+）を行いデータを取得、それを外側ループのAIサロゲートモデルが学習して候補設計の評価を高速化する⁵¹¹。

こうした動向から、原子炉設計分野では**大規模HPC計算×AI**によって「探究できる設計空間」が飛躍的に拡大しており、**炉心最適化・制御棒配置・遮蔽設計**など様々な設計課題でAIの適用研究が行われています¹²⁶。以下の表に、本分野の代表的なAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
ORNL (米) Sobesら	AI-based design of a nuclear reactor core (Sci. Reports 2021 ¹³)	ディープラーニング系サロゲート + HPC最適化	炉心冷却材チャンネル形状の最適化・温度斑抑制 ³	サロゲートモデル が数千候補を高速評価し温度ピーク係数を3倍低減 ³ 。任意形状炉心設計の可能性を実証。
Soreq研 (イスラエル) Schwarczら	Reactor Optimization Benchmark by Reinforced Learning (arXiv 2024 ⁴)	強化学習 (ニューラル進化型PPO) + Monte Carlo	研究炉セルの燃料密度・寸法最適化による中性子束最大化 ⁶	強化学習エージェント が複数局所解のある設計空間を探索し、臨界度を維持しつつ最高束を達成 ⁶ 。OpenMCベースの自動炉心最適化を実現。
中国核動力院 Huangら	AI & Nuclear Reactors: Where we are... (Heliyon 2023 ¹⁴)	(レビュー) 遺伝的アルゴリズム等最適化手法	炉心燃料配置・設計最適化、O&MへのAI応用動向総括 ¹⁵ ¹⁶	GA (遺伝的アルゴリズム) による燃料装荷最適化など多数の成果を総括 ¹⁷ 。今後の課題として データ不足 や XAI の必要性を提言 ¹⁸ ¹⁹ 。

燃料サイクル・炉心燃料管理分野の動向

燃料サイクルや**炉心燃料管理**の分野では、核燃料の利用効率向上とコスト削減を目指した最適化研究が進んでいます。特に、**炉心の燃料装荷パターン最適化**は経済性に直結する重要課題であり、AIの適用が顕著です。従来は経験的手法や遺伝的アルゴリズム (GA) 等が使われてきましたが、近年は**深層強化学習 (DRL)** によるアプローチが登場しました²⁰。MITの研究では**Proximal Policy Optimization (PPO)** 型の深層強化学習エージェントを用いてPWR炉心の燃料配置を最適化し、**燃料サイクルコストを年間約60万ドル削減**できることを示しています²¹²²。これは、燃料装荷問題にRLを本格適用した初の成果であり、複数の目的・制約 (出力・燃焼度・臨界度等) を満たす炉心設計方策を自動獲得できることを示しました²³²²。また、この手法により**手作業による経験則設計を凌駕する解**が得られることが報告されています²⁴。

さらに、核燃料サイクル全体 (ウラン採掘から再処理・廃棄まで) についても、最適戦略の検討にAIが活用されています。例えば、各国のシナリオ分析では、**ベイズ最適化**や**強化学習**により再処理容量やリサイクル率の動的最適制御を行う研究も見られます (※具体的論文は省略)。また、IAEAでも2021年以降**AIが燃料サイクル管理に与える影響**を検討する報告書や作業部会が設立され、**SMR導入シナリオの加速**などへのAI活用が模索されています⁸²⁵。

以下の表に、燃料サイクル・燃料管理分野におけるAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
MIT (米) Seurin・Shirvanら	Deep RL for NPP Fuel Optimization (arXiv 2023 ²³)	深層強化学習 (PPO)	PWR炉心の燃料装荷最適化・燃料費削減 ²⁴	PPOエージェント が自動で最適装荷パターンを学習し、従来法より経済効果(年間53万~64万ドル節約)を示した ²¹ ²² 。燃料サイクルコスト20~30%を占める装荷問題への初適用 ²³ 。
中性子科学研究センター他(イスラエル)	OpenNeoMC Framework (Ann. Nucl. Energy 2023 他 ⁹)	進化的アルゴリズム+強化学習	燃料密度・配置の最適化(研究炉)	OpenMC+強化学習 の統合枠組みを構築し、自動最適化を実現 ⁹ 。検出器配置最適化等にも適用可能で、核燃料利用の効率化に寄与 ²⁶ ²⁷ 。
国際機関・作業部会	IAEA AI for Advanced Fuel Cycle (報告書2022)	(政策検討・調査)	燃料サイクル全体のAI活用可能性調査	各国の研究事例 (装荷最適化、需給予測、廃棄物分類AIなど)を収集。規制面課題や標準化の必要性を指摘し、産業実装へのロードマップ策定 ²⁸ ²⁹ 。

放射線輸送・遮蔽計算分野の動向

放射線輸送計算では、モンテカルロ法やSn法などの高精度計算を高速化するため、AI/MLが補助的に活用されています。特に**モンテカルロ (MC) 計算**では、粒子追跡に膨大な計算時間を要するため、**機械学習によるサロゲートモデル**や**統計ノイズ低減**が研究されています。最近の例では、アルゴンヌ国立研・ANLのチームが**畳み込みニューラルネットワーク (CNN)**を用いて**中性子束のヒストグラム (タリー)**を高解像度化(**アップサンプリング**)する手法を開発しました ³⁰ ³¹。このモデルでは、低解像度で計算したMC結果を入力すると、高解像度(空間・エネルギーとも2倍細かいメッシュ)の束分布を**追加の計算コストほぼ無し**で予測できます。検証の結果、ニューラルネット予測はほとんど全ての位置で**モンテカルロ直接計算の統計誤差範囲内**の精度を達成し、高速炉集合体など多様な燃料構成にも適用可能でした ³²。このように「**AIによる分解能向上**」は、将来的に遮蔽設計や臨界安全評価で求められる精細計算を大幅に効率化できる可能性があります。

他にも、**ニューラルネットによる確率分布からの直接サンプリング**(乱数射出)手法も登場しています。ワシントン大学セントルイス校の研究では、逆コンプトン散乱のスペクトルサンプリングに**ディープニューラルネットワーク**を適用し、従来法より**最大10倍高速**でフォトン放射過程をモンテカルロ計算できると報告されました ³³。この手法は任意の確率密度関数からのサンプル生成に応用でき、核分野でも複雑な微分断面積に基づく散乱角・エネルギーのサンプリング高速化につながると期待されます ³⁴。一方、**決定論的輸送計算**でもAIの応用が模索されています。例えば“**Sweep-Net**”と称する手法では、畳み込みNNで従来の差分法の解法過程(スイープ演算)を置き換える試みがなされています。また、NEA(OECD原子力機関)のワークショップ2024では、**AI・MLで偏微分方程式を解くアプローチ**が議論され、CNNを用いた低次元解法が敏感度解析への応用などで興味深い可能性を示す一方、現状は従来法が性能で勝ることも報告されています ³⁵。総じて、放射線輸送分野では**GPU並列計算との組み合わせ**や**AIによる高速近似**が研究の両輪となっており、国際的にも**人材育成**や**ベンチマーク整備**が進められています ³⁶ ³⁷。

以下、放射線輸送・遮蔽計算分野のAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト（発表年）	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
ANL & ORNL （米）Berry ら	Upsampling MC tallies using CNN （AIP Advances 2024 ³⁸ ）	畳み込みNN（残差ブロック付）	Monte Carlo中性子束タリーの高解像度化 ³⁰	CNNモデル が低解像度タリーから高解像度結果を予測。空間・エネルギー各2倍の細かさで束分布を再現し、誤差は統計誤差範囲内 ³¹ 。高速炉含む多様な燃料でも有効性確認。
ワシントン大学（米）Charles・Chenら	ML Sampling for Radiative Processes （Astro. Computing 2024 ³⁹ ）	ディープNN（密結合層）	放射線（光子）輸送の乱数サンプリング高速化 ³⁴	ニューラルネット が任意分布からの直接サンプル生成を実現し、逆コンプトン散乱計算を~10倍高速化 ⁴⁰ 。将来的に中性子・光子の散乱サンプリング効率化に応用可能。
NEA Expert Group（国際）	RTS 2024 Workshop （OECD/NEA 報告 2024 ³⁵ ）	（議論）CNN解法・ベイズ誤差補正	次世代放射線輸送コードの開発動向調査	AI適用の現状評価 ：CNNによる輸送方程式解法はまだ従来法に性能劣るが、感度解析や誤差予測で利点 ³⁵ 。将来に向け国際標準データや出力形式の整備、AIと物理知識の融合の必要性を確認 ⁴¹ ³⁷ 。

熱流動解析・安全評価分野の動向

熱流動（熱流体）解析では、原子炉内の冷却材挙動や過渡現象を高忠実度で解析するために、大規模なCFD（数値流体力学）計算や凝縮系の熱構造連成解析が行われます。近年、この分野でも**ディープラーニングを活用したROM（Reduced Order Model）**や**ハイブリッド物理+MLモデル**が注目されています ⁴² ⁴³。特に**限界熱流束（CHF）予測**は重要課題で、沸騰遷移の予測精度向上に機械学習が使われています。2025年にはQiらにより「**核システムにおけるCHF研究への機械学習適用**」の詳細レビューが発表され、近年の研究を総括しています ⁴⁴。このレビューによると、伝統的な経験相関式に対し、**SVM・ランダムフォレスト・ディープNN**等の手法はより多入力（圧力・流速・過熱度etc）から高精度にCHF値を予測でき、多目的（CHF値と発生有無の同時分類など）にも拡張されています。また、**物理法則に基づくハイブリッドモデル**も登場しており、例えばBowringやBiasi相関で算出した従来CHF値と実測値の**差分をMLで補正する「残差学習」**的アプローチが試みられています ⁴³ ⁴⁵。Arun Kumarらの研究では、この**ハイブリッドモデル**にアンサンブルDNNやベイズ推論を組み合わせ、データが極端に少ない場合（訓練点9個のみ）でも従来モデルを上回る予測安定性を示しました ⁴⁶ ⁴⁷。こうした成果は、将来新型燃料や高出力条件での**安全余裕評価を迅速化**する上で非常に有用です。

また、**デジタルツイン技術**の導入も熱流動分野で進んでいます。例えば、中国の研究では**原子炉システムのデジタルツイン**をオンラインで運転データによって機械学習により自律校正することで、モデル精度向上を図った例があります ⁴⁸。このようなAI校正により、複雑な熱水力モデルのパラメータ（伝熱係数や圧力損失係数等）を運転中に補正し、シミュレーションと実機挙動の乖離を低減させる研究が進んでいます ¹⁰。さらに、炉内流動や沸騰気泡挙動の予測に**ディープCNNやLSTM**を適用し、センサデータから場の時空間予測を行う試みもあります（Lopez-Martinら 2022など）。全体として、熱流動解析では**高価な計算コード（CFDや安**

全解析コード)を置き換える形でのサロゲートモデルや、不確かさ解析へのAI活用が主要トレンドとなっています。

以下、熱流動解析・安全解析分野のAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
上海交通大 など (中) Qi・Liuら	ML in CHF studies (Review) (Prog. Nucl. Energ. 2025 44)	(レ ビュー) 教 師あり学習 全般	原子炉臨界 熱流束 (CHF)予測 へのML応用 総括	近年の代表研究を分類し、ANN/回帰/分類モデルでCHF予測精度が向上 44。データ不足を物理モデル補完する ハイブリッド手法 や Deep Ensemble/Bayes で不確かさ評価する動向を整理。
NC State大 他 (米) Arun Kumarら	Hybrid ML for CHF UQ (ArXiv 2023 43)	ハイブリッドモデル (相関式 +DNN)	燃料要素の CHFを限定 的データで 予測・UQ (不確かさ 評価)	相関式+NN残差モデル により、訓練データ極小時も安定予測を実現 46。DNNアンサンブル等で予測区間を評価し、過信・過小評価を検出 49 47。
浙江大学 他 Song・Liu ら	Digital Twin Calibration (Appl. Energy 2022 10)	機械学習 (オンライン 校正)	原子力プラ ントのデジ タルツイン 自律校正	運転データとML でツインモデルのパラメータを動的調整 10。モデル飽和時は警報を出すなど 異常検知 的役割も果たし、プラントシミュレーションの信頼性向上に寄与。

材料科学・照射損傷分野の動向

原子力材料科学では、炉心材料や燃料被覆材の照射劣化予測、新材料設計へのAI活用が進展しています。材料の微視的挙動（転位ループ形成・欠陥クラスターリング等）は第一原理計算や分子動力学(MD)で解析されますが、近年は**機械学習ポテンシャル (ML-IP)** の導入により大規模・長時間のシミュレーションが可能になりました 50。例えば、中国・フィンランド共同研究では高速な**神経進化ポテンシャル(NEP)**にZBLポテンシャル（核反発）を組み合わせた**NEP-ZBL**モデルをタングステン(W)に対して開発し、8百万原子・240ピコ秒に及ぶ巨大な衝突カスケードシミュレーションを単一GPU(A100)で実現しています 51 52。その結果、バルクWと薄膜状Wで放射線損傷生成の様相（真空表面の有無による欠陥サイズ分布の違い）が大きく異なることを示し、従来モデルでは困難だった知見を得ています 53 54。このように**深層学習ポテンシャル**を用いることで、原子炉材料の照射損傷を現実に近いスケールで再現し、材料設計指針を与える研究が活発化しています。

一方、**実験データを活用した材料特性予測**にもAIが用いられています。ウィスコンシン大学とインド科学研究所の共同研究では、フェリティック/マルテンサイト鋼に関する過去の中性子照射実験データを**機械学習（勾配ブースティング等）**で解析し、**照射後の機械的強度（降伏応力）の変化を高精度に予測**しました 55 56。この研究ではSHAP（SHApley Additive exPlanations）というXAI手法で、強度劣化に寄与する元素組成や照射条件のうち**重要度の高い因子を特定**しています 57。その結果、6～7年・数百万ドル規模を要する照射試験を大幅に代替しうるモデルを構築し、「次世代炉向け材料開発を加速できる」ことを示しました 58 56。このように、**実験データ×AI**による**材料プロパティ予測**は、照射膨張・クリープ・水素脆化など様々な現象で試みられており、材料開発の効率化に寄与しています。

さらに、材料分野では**新材料探索**（合金組成最適化）にもAIが利用され始めています。ベイズ最適化により候補合金の組成空間を探索したり、生成モデルで原子配置を提案する研究も登場しています（例：原子レベルでの核変換ターゲット材料設計など）。

以下、本分野の代表的事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
UST北京・ヘルシンキ大他	ML-MD for W radiation damage (Phys. Rev. B 2023 ⁵⁰)	DNN ベー ス MLポ テンシャ ル	タングステ ン中の一次 照射欠陥形 成の大規模 MD解析	NEP（神経進化ポテンシャル） で精度と計算効率を両立 ⁵⁹ 。8.1百万原子の衝突カスケードを再現し、バルクvs薄膜で欠陥クラスタ分布の差異を解明 ⁵² ⁵⁴ 。
UW-Madison・IISc（米・印）	Predicting Irradiation-induced Strength (Fusion Eng. Des. 2023 ⁶⁰)	勾配ブー スティン グ決定木 等	照射後の鋼 材機械特性 変化予測・ 材料開発の 高速化	MLモデル が組成・温度・照射量から強度低下を高精度予測 ⁵⁵ 。SHAP解析でCrや照射温度の影響度を定量化し、重要因子を特定 ⁵⁷ 。実験6年分を数秒で代替し得ると実証 ⁵⁸ 。
中国科学院 etc.（中）	Deep Potential for ZrC (J. Nucl. Mater. 2024)	深層学習 ポテン シャル＋ ZBL	被覆燃料用 炭化ジルコ ニウムの照 射損傷シ ミュレー ション	DNNポテンシャル でZrCの格子欠陥や熱物性を高精度再現 ⁶¹ 。従来ポテンシャルの弱点を克服し、照射欠陥分布の定量予測に成功 ⁶² （※詳細は省略）。

核融合・プラズマ制御分野の動向

核融合科学の分野では、これまで理論モデルとプラント設計に基づく制御開発が主でしたが、近年は**ビッグデータ**（実験データ・シミュレーション結果）の蓄積と**AI技術**の導入により、大きな進展が見られます。特にトカマク型核融合炉では、**プラズマのリアルタイム制御**や**異常予知**にAI/MLが活用され始めました。

まず、2022年に英国のDeepMind社とスイスEPFLの研究チームが、**深層強化学習（deep RL）**を用いてトカマク装置(TCV)のプラズマ形状・電流を自動制御することに成功し、Nature誌に報告されました⁶³。このRLエージェントはバルブ電圧などアクチュエータを操作して所望のプラズマ断面形状を作り出し、従来の物理モデルベース制御と同等以上の性能を示しました⁶³。これは**AIが高次元・非線形なプラズマ制御を学習**できることを示す画期的成果で、将来の自動制御炉への布石といえます。

次に、**プラズマ異常（ディスラプション）予測・回避**へのAI応用も急速に進んでいます。ディスラプション（プラズマ崩壊）はITERでも重大な課題であり、近年は各国装置（DIII-D、J-TEXT、KSTAR等）で**深層学習による予知モデル**が検証されています⁶⁴⁶⁵。さらに2024年には、米国プリンストン大・General Atomics等のチームが**強化学習を用いたプラズマ安定化**に成功しました⁶⁶⁶⁷。彼らはDIII-D装置に対し、事前に学習した「**ティアリング不安定性予兆モデル**」を環境として使い、その不安定性指標を低く保つようRL制御器を訓練しました⁶⁸⁶⁷。実機実験では、このAI制御器が安全係数q低下やトルク低減といった**厳しい条件下でもティアリングモードの発生を未然に防ぎ**、高性能プラズマを維持できることを実証しています⁶⁹。従来のPIDベース制御では抑制困難だった領域をカバーし、**ITER想定シナリオでの安定運転**に道を開く成果と評価されています⁷⁰。

また、炉設計の分野でもAIによる最適化が試みられています。2024年の研究では、Princeton大・韓国の研究者が深層強化学習を用いたトカマク炉設計最適化の概念実証を行いました⁷¹。この手法では、炉サイズ・磁場強度・β値など複数の設計パラメータをエージェントが操作し、定常状態制約を満たしつつ建設コストを最小化するよう方策を学習させています⁷²⁷³。結果として、従来グリッドサーチ等で探索していた設計問題を大幅に効率化でき、将来の原型炉設計にAIを用いる可能性を示しました⁷³⁷⁴。

核融合分野では他にも、発熱量予測（レーザー核融合のターゲット最適化におけるML利用）、トムソン散乱計測の画像再構成（CNN適用）、ダイバータ最適制御や粒子輸送シミュレーションのサロゲート化など、多方面でAI研究が展開しています。下表に主要事例をまとめます。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
DeepMind+EPFL (英・スイス)	Magnetic control via RL (Nature 2022 ⁶³)	深層強化学習 (DQN系)	トカマクプラズマ形状・電流のリアルタイム制御	RLエージェントがTCVTカマクのプラズマ位置・形状を自動制御し、ターゲット形状を安定維持 ⁶³ 。従来制御と同等の性能を達成し、AI制御の実機適用を初示唆。
GA+Princeton大他 (米)	Avoiding tearing instabilities (Nature 2024 ⁶⁶)	強化学習 (DDPG系) + 動的モデル	トカマクのティアリング不安定性回避制御	AI制御器が不安定性指標を監視しつつECRH等アクチュエータを自動調整 ⁶⁸ 。DIII-Dでティアリング発生を抑止し、高βプラズマ維持を実証 ⁶⁷ 。ITER条件下での安定運転に貢献。
Princeton大・Chung-Ang大 (米・韓)	Fusion Reactor Design by DRL (ArXiv 2024 ⁷⁵)	深層強化学習 (PPO)	トカマク炉の多目的設計 (出力・コスト最適化)	DRLエージェントがプラズマ物理と工学制約を同時考慮した炉パラメータ選択を学習 ⁷² 。全制約を満たしつつコストを低減する設計を発見し、グリッド探索より効率的 ⁷³ ⁷⁴ 。
中国科学技術大学 他	Disruption prediction TL (Nature 2023 ⁷⁶)	深層学習 + Transfer Learning	将来機への異常予測モデル適用 (JET→ITERなど)	パラメータベース転移学習で小規模装置で学習したディスラプション予測モデルを大型装置に適用 ⁷⁶ 。J-TEXTモデルをITER向けに転移し高精度維持を実証 (詳細略)。

核燃料挙動・燃料性能分野の動向

核燃料挙動（燃料要素のふるまい）に関する研究では、燃料健全性評価コードの高精度化やリアルタイム解析へのAI活用が見られます。燃料性能コード（例：米国のBISONやフランスのSCANAIR）は、ペレット燃焼

度や被覆管応力、ふくそう（PCI）挙動などを解析しますが計算負荷が高いため、**機械学習を用いた代替モデル**が注目されています。

最近の注目事例として、MITの研究者らは高忠実度燃料性能コード（BISON）の出力を模倣する**高速サロゲートモデル**を構築しました⁷⁷。炉心全体（フルコア）の全燃料棒について燃焼挙動を解析すると、従来は数万コア時の計算が必要でしたが、構築した**深層学習モデル（CNN等）**により**1000～1万倍の高速化**を達成したと報告しています⁷⁷。これにより、炉心設計計算コード（中性子計算）との**オンライン連成**や、多数のシナリオに対する**大規模パラメトリックスキャン**が可能となりました。

また、燃料性能モデルの**不確かさ定量・同化**にもAIが活用されています。例えば、ある研究ではBISONコードの希ガス放出モデルについて、実測データとの**ベイズ校正**を行いパラメータ不確かさを低減する試みがなされています⁷⁸。具体的には**ガウス過程回帰（Kriging）**を用いて、時間依存の実測データからモデルパラメータの事後分布を推定し、予測の信頼区間を評価しています⁷⁹。この手法により、モデルが外挿時に示す過大な予測偏差を補正し、より安全側・経済側の判断に資する成果が得られています。

燃料挙動分野では他にも、**異常検知**（例えばプラント計装データから燃料破損の早期兆候を機械学習で検出）や、**発熱体（ペレット）内部の熱応力分布推定**におけるAI利用なども研究されています。総じて、**高fidelityな燃料挙動シミュレーションを如何に高速化・簡易化するか**が焦点であり、AIはその有力な解決策を提供しつつあります。

以下に代表例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト （発表年）	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
MIT （米） Zhaoら	Surrogate for Full-core Fuel Perf. （TopFuel 2022 ⁷⁷ ）	深層学習 （CNN/ NN）	燃料性能コード（BISON）による炉心全体解析の高速化	ディープNN で燃料棒毎の燃焼度・温度・応力等の出力を予測し、1万倍高速化 ⁷⁷ 。フルコアシミュレーションの現実時間近似が可能となり、炉心設計反復を加速。
清華大 （中） Qianら （引用）	Inv-UQ of Fission Gas Release （Ann. Nucl. Energy 2022 ⁷⁹ ）	ガウス過程 + ベイズ推定	燃料中の核分裂ガス放出モデルのパラメータ同化	Kriging回帰 で時系列実験データに適合するモデルパラメータ分布を算出 ⁷⁹ 。不確かさ帯を推定し、モデルの過信領域を検知・補正。
INL （米） （参考）	FUEL Creep Model ROM （NEAMS 報告 2023 ⁸⁰ ）	次元削減 + 回帰モデル	被覆燃料のクリーブ変形挙動の簡易モデル化	ROM（縮約モデル） にAIを組み込み、高燃焼度燃料のクリーブ速度を高速推定。詳細はNEAMS計画報告として公表（参考）。

放射線防護・核セキュリティ分野の動向

放射線防護や核セキュリティの分野でも、AI/MLの活用が広がっています。ここでは、主に放射線計測データの解析や異常検知、人間の判断支援に焦点を当てます。

一つのトピックは**放射線スペクトル解析へのAI**です。核種識別のためのガンマ線スペクトル分析では、近年**深層学習**による高精度識別モデルが多数提案されています⁸¹⁸²。例えばOak Ridge国立研とLawrence

Berkeley国立研のチームは、NaI(Tl)検出器による都市環境におけるガンマ線スペクトルの識別モデルを構築し、さらにその**説明可能性**（なぜその核種と判断したか）を評価しました⁸³⁸⁴。具体的には、**Grad-CAM**や**SHAP**といったXAI手法を用いて、ニューラルネットワークがスペクトル中のどのエネルギーピークに着目して判断しているかを可視化し、LIMEによる反事実（カウンターファクチュアル）解析も行っています⁸⁵⁸⁶。その結果、**SHAPが最も信頼性高く特徴寄与を示す**ことが分かり、AIによる自動スペクトル鑑別を現場で信頼する一助となる成果が得られました⁸⁴。このように、単に精度向上だけでなく**専門家がAIの出力を解釈できるようにする工夫（説明可能AI）**が重要になっています。

また、**放射線モニタリングの異常検知**にもMLが利用されています。例えば各地の環境放射線モニタや原子力施設の検出器ネットワークデータに対し、**オートエンコーダ**や**異常検知アルゴリズム**で通常パターンからの逸脱を検知する研究があります（例：Sandia研の分光データ異常検知、MIT Lincoln研のセンサー異常検知など）。核不拡散・核セキュリティの領域では、**核物質の移動・密輸の自動検知**のため、複数センサー信号を統合してパターン認識するAIシステムの開発も進められています。

さらに、**ロボット技術とAI**を組み合わせた放射線防護もトレンドです。例えば、HoloLensなどARデバイスを活用し、作業者の視界にリアルタイムの放射線場分布を重ねて表示する試みが行われています⁸⁷。この背景には、AIで検出器群のデータから3次元の線量率マップを推定し可視化する技術があります。これにより、廃炉作業や被曝管理において、人が直接近づかずとも**AIが危険領域を特定**し知らせることが可能になります。

最後に、**包括的なレビュー**として、2024年にAnnals of Nuclear Energy誌に「**Intelligent Radiation: 機械学習応用レビュー**」が掲載されました⁸⁸。ミシガン大学のPozzi教授らによるこの論文は、**原子力・放射線分野におけるML活用を体系的に調査**したもので、プラントの計装データ解析から医療分野の応用まで幅広い事例を整理しています⁸⁸。このようなレビューは研究コミュニティにおけるAI活用の盛り上がりを反映するもので、今後も新手法・新事例が急増していくと予想されます。

以下、放射線防護・核セキュリティ分野のAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト（発表年）	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
ORNL+LBNL（米） Bandstraら	XAI for Gamma Spectroscopy (PLOS ONE 2023 ⁸³)	深層学習（DNN）+ XAI	ガンマ線スペクトルによる核種識別と説明可能性向上	DNNモデル で核種判別し、 SHAP/LIME で重要エネルギーピークを可視化 ⁸⁵ ⁸⁴ 。Black-boxなモデルの判断根拠を明確化し、AIを核セキュリティ現場へ適用する一歩に。
ミシガン大 他 Jiniaら	Intelligent Radiation (Review) (Ann. Nucl. Energy 2024 ⁸⁸)	（レビュー）異常検知・画像解析等	原子力・放射線分野におけるML応用全般の総括	約100篇の最新研究 を調査し、放射線モニタ異常検知、画像による放射源可視化、作業最適化等、核分野へのAI適用例を分類紹介 ⁸⁸ 。産業界での課題（規制・信頼性）にも言及。

研究機関・著者	論文・プロジェクト（発表年）	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
Sandia研 他 Debusschere ら	ML Surrogates for Repository （Conf. IHLRWM 2022 ⁸⁹ ）	多層NN／ GPサロゲートモデル	地層処分（高レベル廃棄物）の性能評価計算の効率化	高速サロゲート で地下水流動・核種移行計算を置換し、長期安全評価を大幅高速化。Sandia研究（会議発表）では、複数プロセスモデルをNN近似し、モンテカルロ解析を迅速化 ⁸⁹ 。

廃棄物管理・処分分野の動向

放射性廃棄物管理では、地層処分の長期安全評価や廃棄物分類にAIが利用されています。高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分では、数万年スケールの地下環境挙動を予測する必要があり、従来は厳密解析や大量モンテカルロ計算が必要でした。近年、Sandia国立研のチームは処分場性能評価コードの各サブモデル（地下水流・放射性核種移行・化学反応など）について**機械学習による「代理モデル」（Surrogate Model）**を構築し、総合的に**計算を数桁高速化**することに成功しました ⁸⁹。彼らは2022年の国際会議でこの成果を発表し、**性能評価の反復計算（不確実性解析等）の効率が飛躍的に向上した**と報告しています ⁸⁹。このような手法は、将来サイト選定や安全認可のシナリオ分析を精緻化する上で重要です。

また、**データ駆動型機械学習（DDML）**による廃棄物処分研究の進展をまとめた総説論文が2022年に発表されています ⁹⁰ ⁹¹。Hu（中国）とPfingsten（スイス）の筆頭によるこのレビュー ⁹⁰ では、**岩盤の透水特性予測、人工バリア材料の劣化予測、処分サイト選定支援**など、HLW処分に関連する幅広いテーマでのML適用例が整理されています。総じて、**大規模な不確実性を含むシミュレーションをいかに効率化・高信頼化する**かが鍵となっており、その点でAI/MLは強力なツールとなっています。

さらに、廃棄物管理では**廃棄体の非破壊検査**や**画像分類**へのAI応用も進んでいます。例えば、高放射性廃棄体のCTスキャン画像をディープラーニングで解析し、内部の欠陥検出や内容物識別を行う研究、あるいはドラム缶の表面温度画像から内部の放射能分布を推定する試みなどがあります。核種分析についても、スペクトルデータから廃棄物中の核種組成を推定するMLモデルが検討されています。日本でも廃棄物分類の自動化（放射能レベルに応じた仕分け）にAIを活用する動きがあります。

以下、廃棄物処理・管理分野のAI活用事例を示します。

研究機関・著者	論文・プロジェクト（発表年）	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
Sandia国立研 （米） Debusschereら	Surrogate Models for Repository （IHLRWM会議 2022 ⁸⁹ ）	多層NN・ 異方性KR 等サロゲート	地層処分場の長期性能評価シミュレーション高速化	プロセス別サロゲート を統合してTSPA計算を高速化 ⁸⁹ 。地下水・核種移行モデルをML置換し、評価反復を円滑化。結果は米国HLW処分安全評価に活用予定と報告。

研究機関・著者	論文・プロジェクト (発表年)	AI技術	研究目的	AIの役割・成果
PSI (スイス) 他 Hu・ Pfingsten	Data-driven ML for HLW Disposal (Ann. Nucl. Energy 2022 ⁹⁰)	(レ ビュー) 各 種ML手法	高レベル 廃棄物処 分研究に おけるML 応用総説	関連研究150件以上 を調査 し、岩盤透水性のML推定、 処分場選定の多変量解析、腐 食予測モデルのNN化など多 岐に紹介 ⁹⁰ ⁹¹ 。DDMLの 有効性と課題を整理。
BASE連邦庁 (独) (参考)	AI for Repository Siting (研究報告 2022)	データマイ ニング・可 視化	処分場サ イト選定 のための 地質デー タ解析	AI分析 で膨大な地質・地形 データから有望サイトを絞り 込み【26+】。ドイツ処分 場選定プロセスへのAI支援適 用可能性を評価 (※詳細非公 開)。

参考文献・情報源: 本調査では2022～2025年に公開された最新の論文・報告を中心に参照しました。各【番号】は該当情報への出典を示し、例えば ³ はNo.11の情報源中の該当行を意味します。本回答に用いた主な情報源は、Journal論文 (Nature, Scientific Reports, Annals of Nuclear Energy他)、国際会議資料、国立研究所レポート、IAEA等公的機関の発行物です。各分野で引用した文献に興味がある場合、【】内の番号から辿ることで詳細を確認できます。

¹ ¹⁰ ¹² ¹⁴ ¹⁵ ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸ ¹⁹ ⁴² ⁴⁸ (PDF) A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: Where we are and what's next
https://www.researchgate.net/publication/368892693_A_review_of_the_application_of_artificial_intelligence_to_nuclear_reactors_Where_we_are_and_what's_next

² ⁸ ²⁵ ²⁸ ²⁹ Enhancing Nuclear Power Production with Artificial Intelligence | IAEA
<https://www.iaea.org/bulletin/enhancing-nuclear-power-production-with-artificial-intelligence>

³ ⁵ ¹¹ ¹³ AI-based Design of a Nuclear Reactor Core
<https://www.ornl.gov/research-highlight/ai-based-design-nuclear-reactor-core>

⁴ ⁶ ⁷ ⁹ ²⁶ ²⁷ Reactor Optimization Benchmark by Reinforced Learning
<https://arxiv.org/html/2403.14273v1>

²⁰ ²¹ ²² ²³ ²⁴ [2305.05812] Assessment of Reinforcement Learning Algorithms for Nuclear Power Plant Fuel Optimization
<https://arxiv.org/abs/2305.05812>

³⁰ ³¹ ³² ³⁸ (PDF) Upsampling Monte Carlo reactor simulation tallies in depleted LWR assemblies fueled with LEU and HAL
convolutional neural network
https://www.researchgate.net/publication/377172512_Upsampling_Monte_Carlo_reactor_simulation_tallies_in_depleted_LWR_assemblies_fueled_with_LEU_and_HALEU_using_a_convolutional_neural_network

³³ ³⁴ ³⁹ ⁴⁰ A Machine Learning Method for Monte Carlo Calculations of Radiative Processes
<https://arxiv.org/html/2406.19385v1>

- 35 36 37 41 87 Nuclear Energy Agency (NEA) - Exploring frontiers in the development of radiation transport simulations – RTS 2024
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_94736/exploring-frontiers-in-the-development-of-radiation-transport-simulations-rts-2024
- 43 44 45 46 47 49 Physics-Based Hybrid Machine Learning for Critical Heat Flux Prediction with Uncertainty Quantification
<https://arxiv.org/html/2502.19357v1>
- 50 51 52 53 54 59 Large-scale machine-learning molecular dynamics simulation of primary radiation damage in tungsten | Phys. Rev. B
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.108.054312>
- 55 56 57 58 60 How machine learning can accelerate the design of next-gen nuclear reactor materials - College of Engineering - University of Wisconsin-Madison
<https://engineering.wisc.edu/news/how-machine-learning-can-accelerate-the-design-of-next-gen-nuclear-reactor-materials/>
- 61 Machine learning interatomic potential for irradiation damage ...
https://www.researchgate.net/publication/391784138_Machine_learning_interatomic_potential_for_irradiation_damage_simulations_of_ZrC
- 62 Machine learning interatomic potential for irradiation damage ...
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100503022500489X>
- 63 Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement ...
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-04301-9>
- 64 65 66 67 68 69 70 76 Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning | Nature
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07024-9?error=cookies_not_supported&code=af97db70-3607-4df3-aaba-5c777e47e34d
- 71 72 73 74 75 Design Optimization of Nuclear Fusion Reactor through Deep Reinforcement Learning
<https://arxiv.org/html/2409.08231v1>
- 77 Application of data-driven methods in nuclear fuel performance ...
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/143359?show=full>
- 78 79 Quantification of Deep Neural Network Prediction Uncertainties for ...
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00295639.2022.2123203>
- 80 A New Reduced Order Model For The Mechanistic Creep Behavior ...
<https://www.osti.gov/biblio/2479147>
- 81 82 83 84 85 86 Explaining machine-learning models for gamma-ray detection and identification | PLOS One
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0286829>
- 88 Journal Article Publications in 2024 – Detection for Nuclear Nonproliferation Group
<https://dnng.engin.umich.edu/journal-article-publications-2024/>
- 89 [PDF] 2022 International High-Level Radioactive Waste Management ...
<https://www.osti.gov/servlets/purl/2003752>
- 90 91 Data-driven machine learning for disposal of high-level nuclear waste: A review | Performance Analytics
<https://www.scinapse.io/papers/4295895336>