



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,  
CULTURE, SPORTS,  
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

### 参考資料3

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
原子力科学技術委員会  
原子力研究開発・基盤・人材作業部会(第9回)  
R3. 6. 28

# 令和3年度原子力システム研究開発事業 採択課題の概要

研究開発局 原子力課

**【課題名】**

高出力密度高温ガス炉におけるマルチフィジクス挙動のV & V

【基盤チーム型(一般)】

実施期間: 令和3年度~令和5年度

【研究代表者・所属機関】 岡本孝司・東京大学

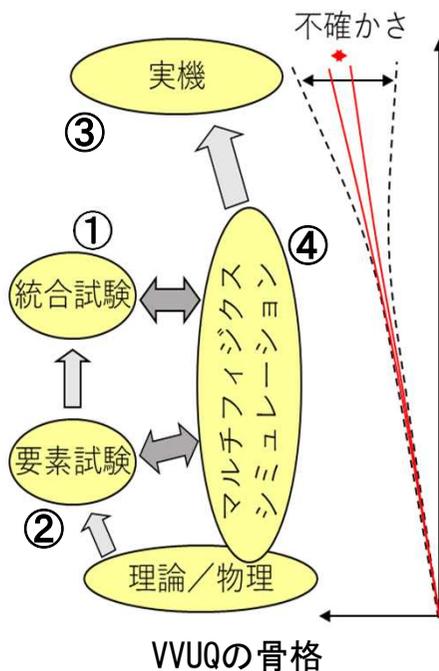
【共同研究機関】 東京工業大学、日本原子力研究開発機構

【目的】 高温ガス炉は、極めて安全な原子炉であるとともに、1000度近い熱を供給できるメリットがあり、カーボンフリー社会の中核的な技術となり得る。燃料コンパクトを、SiCコンパクトとすることで、熱除去性能が上昇し、出力密度向上が期待できる。本研究では、空気侵入事故時のSiCコンパクト酸化挙動を評価するため、マルチフィジクス挙動を評価することができるコード開発を行い、要素試験、統合試験を通じて、酸化挙動のVVUQ(Verification, Validation & Uncertainty Quantification)を行うとともに、VVUQ手法の確立を目指す。

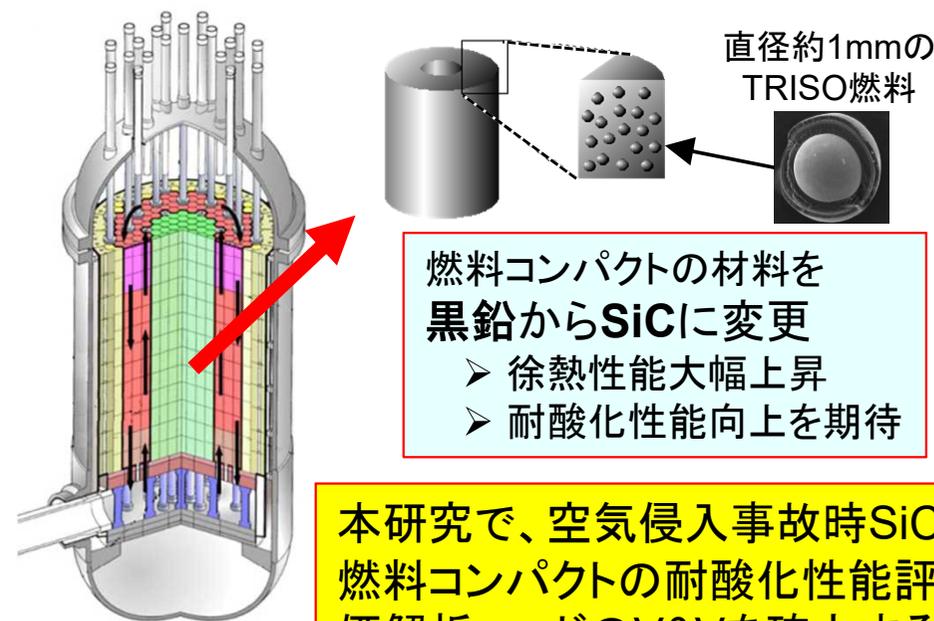
**【課題概要】**

SiC燃料コンパクトを用いた高出力密度高温ガス炉の、空気侵入事故時の酸化挙動を評価する。この現象は、化学反応、反応生成物物質移行、冷却材流動、輻射伝熱など、極めてマルチフィジクスである。このため、SiC酸化反応に関する解析コードを整備し、要素試験、統合試験を含む、VVUQ手法を確立するとともに、高出力密度高温ガス炉の可能性を追求する。

- ① 空気侵入事象を模擬する統合試験(東京大学)
- ② TG-DTAによるSiC酸化の要素試験(東京工業大学)
- ③ SiCコンパクトの実機条件評価(日本原子力研究開発機構)
- ④ マルチフィジクス解析コードの開発とVVUQ(東京大学中心)



**【期待される成果・発展性】 中空円柱状燃料コンパクト(φ26L39)**



直径約1mmのTRISO燃料

燃料コンパクトの材料を黒鉛からSiCに変更

- 徐熱性能大幅上昇
- 耐酸化性能向上を期待

本研究で、空気侵入事故時SiC燃料コンパクトの耐酸化性能評価解析コードのV&Vを確立する

より安全な日本発の高温ガス炉技術へ

**【課題名】**

3D造形革新燃料製造のシミュレーション共通基盤技術

【基盤チーム型(一般)】

実施期間:令和3年度~令和5年度

【研究代表者・所属機関】 瀬川 智臣・日本原子力研究開発機構

【共同研究機関】 株式会社フローサイエンスジャパン、佐賀大学、株式会社シンターランド

**【目的】**

高速炉/高温ガス炉サイクルにおける燃料技術を共通化したダブルサイクルシステムの実現を目的とし、燃料製造設備の小型化及び複数ラインにより多様な燃料仕様に柔軟に対応可能とする3D造形革新燃料製造技術を開発する。

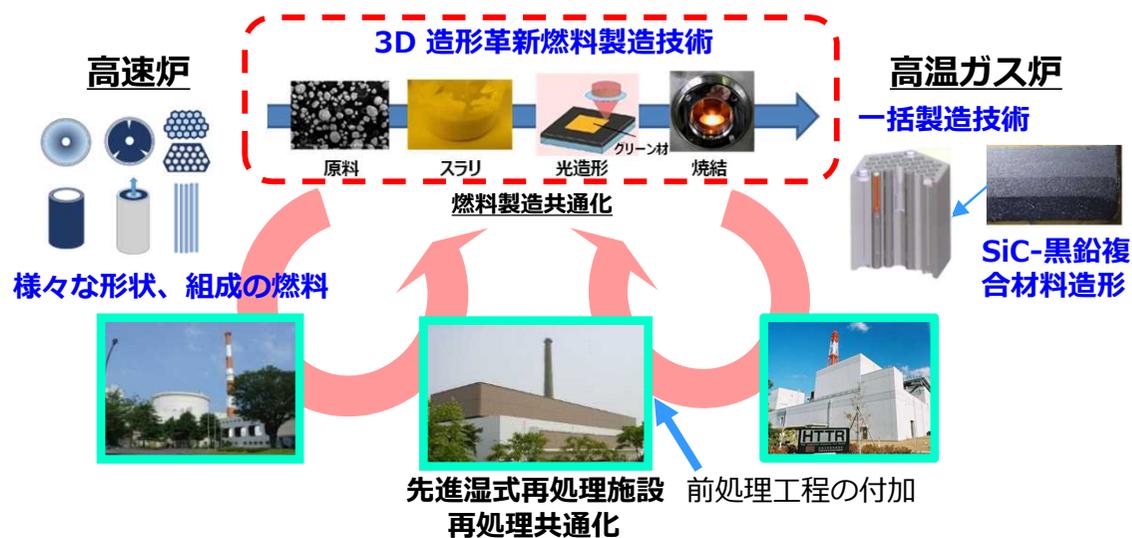
**【課題概要】**

最近、革新的なセラミック造形技術として三次元(3D)プリンティング技術の開発が行われ、産業界でも導入されつつある。

本研究では、3D造形技術を適用して、新型炉用の燃料体の製造技術開発を行う。研究対象の燃料体は、除熱効率を向上させることによって安全性を高めた一体型の燃料体であり、グラファイトとシリコンカーバイトから構成される。

この燃料体の3D造形製造プロセスとして、粒子スラリー技術、光造形技術、スパークプラズマ焼結技術について、各工程の物理現象と、中性子照射による密度変化のモデル開発を通して、燃料製造と照射挙動を合わせたマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション技術に関する研究開発を実施する。

このシミュレーション技術の開発によって燃料製造技術の開発を効率的に加速して進めることができる。

**【期待される成果・発展性】**

(高速炉燃料サイクル) 多様な燃料・炉心構成要素仕様への適応による安全性向上、燃料生産ラインの合理化による発電コストの低減が可能になると期待される。

(高温ガス炉燃料サイクル) 大型化・ユニット出力の倍増、SiC-黒鉛複合材料燃料体による空気/水浸入事故時の炉心酸化防止・ゼロ汚染の燃料取扱いが可能になると期待される。

## 【課題名】

革新型原子炉開発のための核データ整備基盤の構築

【基盤チーム型(一般)】

実施期間: 令和3年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 堀 順一・京都大学

【共同研究機関】 日本原子力研究開発機構、東京工業大学、近畿大学

## 【目的】

革新型原子炉開発において核データの高度化の必要性が想定される代表的な材料、核種を選定し、基盤データを取得する。本事業では、微分測定、積分測定、評価の3項目を並行して実施することにより、産業界からの要求に迅速且つ柔軟に対応し、必要な核データを短期間で高度化するスキームを構築することを目指す。

## 【課題概要】

革新型原子炉の研究開発において特に重要であると思われる材料、核種に対して、以下の研究課題を実施する。

### ①微分測定

- ・熱中性子散乱則の精度向上のため、主要な減速材の全断面積及び散乱断面積測定をJ-PARCを用いて実施する。
- ・廃棄物管理上問題となる核種生成に係る荷電粒子放出反応断面積を測定するための検出器を新たに開発し、構造材に対する高速中性子領域での断面積測定をJ-PARCを用いて実施する。

### ②積分測定

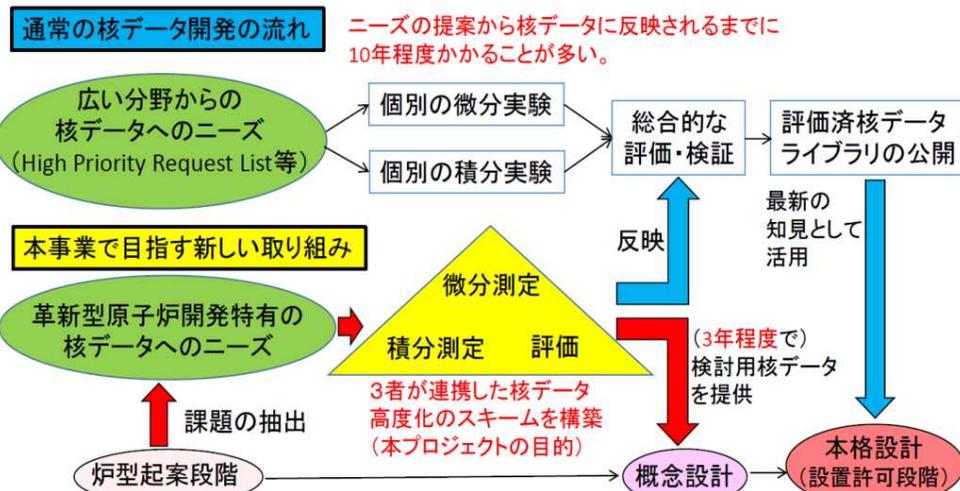
- ・熱中性子散乱則データを検証するための積分測定を京都大学ライナックを用いて実施する。
- ・核データを検証するための試料反応度測定を近畿大学原子炉を用いて実施する。

### ③核データ整備及び炉設計への影響評価

- ・本事業で得られた新たな測定データを考慮した核データ評価を実施し、検討用核データライブラリを整備する。
- ・新たに整備した核データを用いた革新型原子炉の核特性計算を実施し、従来の核データによる計算値と比較検討する。

## 【期待される成果・発展性】

- ・革新型原子炉に重要となる材料、核種に対して、熱中性子散乱則データ、荷電粒子放出反応断面積データを取得する。新たな測定手法も提案する。⇒ 核データの高度化に貢献
- ・微分測定、積分測定、評価の3者が緊密に連携することにより、目的を革新型原子炉開発に特化した検討用核データライブラリを短期間で提供する。⇒ 炉心設計の効率的な推進に貢献



### 【課題名】

原子炉自在設計のためのテーラード溶接シミュレーションシステムの構築

【基盤チーム型(若手)】

実施期間:令和3年度~令和5年度

【研究代表者・所属機関】 門井浩太・大阪大学

【共同研究機関】 日本原子力研究開発機構

### 【目的】

原子炉の安全性確保と高機能化に資する自在な設計による新型原子炉設備の製造を実現することを目的とし、素材や部品の多種多様な組合せの異種材料溶接に対し、設計段階から溶接プロセス、溶接割れ性、耐応力腐食割れ性などの溶接部性能までをワンズルーで予測するテーラード溶接プロセスシミュレーションシステムを構築する。

### 【課題概要】

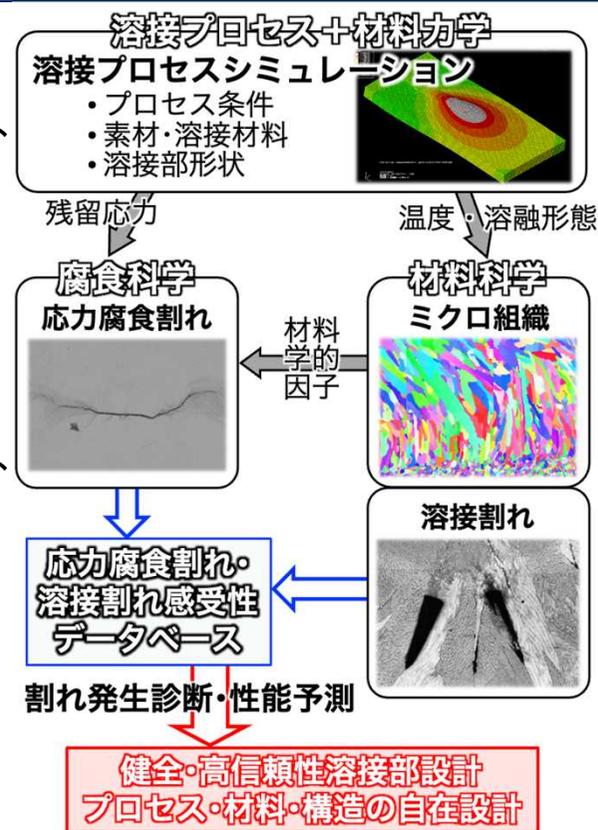
溶接過程特有の急速な熱履歴による非平衡な状態変化と、異材溶接による化学組成変化に伴う材質や特性の変化、特に従来より原子炉設備で要求される溶接割れと応力腐食割れの防止を対象とし、これらの発生リスクを設計段階から予測するシミュレーションシステムの構築を目指す。

接合科学、材料科学、材料力学、腐食科学が重畳するマルチフィジックスに対し、溶接プロセスを考慮したCAE解析技術、独創的な実験と分析、基礎学理に基づく溶接割れ、応力腐食割れの知識基盤を獲得する。得られた知見を統計的にデータベース化し、溶接割れ、応力腐食割れの感受性ハザードマップを構築するとともにCAE解析モデルの高度化を図る。CAE解析から得られる材料学的・力学的な挙動などの情報とハザードマップにより、各割れの発生リスク診断、溶接部信頼性・性能の予測を志向する。科学的に溶接部の信頼性予測・診断が可能な設計・プロセス制御の指針の提供、所望の溶接部性能からの逆解析による溶接プロセス条件や適用材料の適正化に向けて取り組む。従来溶接技術では創成・製造できなかった新型原子炉設備の自在な設計を可能にするテーラード溶接技術の確立を目指す。

### 【期待される成果・発展性】

設計段階からの溶接プロセスや材料の最適選択、網羅的・効率的な検討によって、これまで困難とされてきた溶接プロセス条件や多種多様な材料の組合せの異材溶接が可能となる。

これにより、安全性や機能を最大限に追求した、新型原子炉設備の自在な設計・製造、既存設備の保全・補修を目指す。加えて、これまでものづくり技術の足枷となっていた溶接プロセスの概念を覆し、特殊工程からの脱却を志向する。



## 【課題名】

機械学習を利用した計算科学による照射損傷予測・脆化評価技術の整備

【基盤チーム型(若手)】

実施期間:令和3年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 熊谷知久・電力中央研究所

【共同研究機関】 東京理科大学

## 【目的】

小型モジュール炉等の新型炉では実機条件下における中性子照射脆化データの実験的取得が困難となることが予測される。これを補う数値シミュレーション手法を整備することを目指し、これまで照射脆化の数値シミュレーションにおいてボトルネックとなっていた部分を、近年発達の目覚ましい機械学習技術を応用した手法により解決し、数値解析により照射脆化評価を行うための技術を開発する。

## 【課題概要】

個別要素技術として以下の3種の数値解析技術を開発し、これらをマルチスケール解析として組み合わせ、照射損傷予測・脆化評価技術を可能とする。

### ①活性化エネルギーを学習するニューラルネットワークを用いたキネティックモンテカルロ法による照射欠陥性状の予測

ニューラルネットワークを活用することにより計算コストを低減したキネティックモンテカルロ法を開発する。これを用いて、様々な小型モジュール炉の照射条件に対応できるよう幅広い照射条件を想定し、材料中の照射欠陥の種類、密度、サイズの予測を行う。

### ②古典分子動力学法による鉄中のらせん転位特性の解析

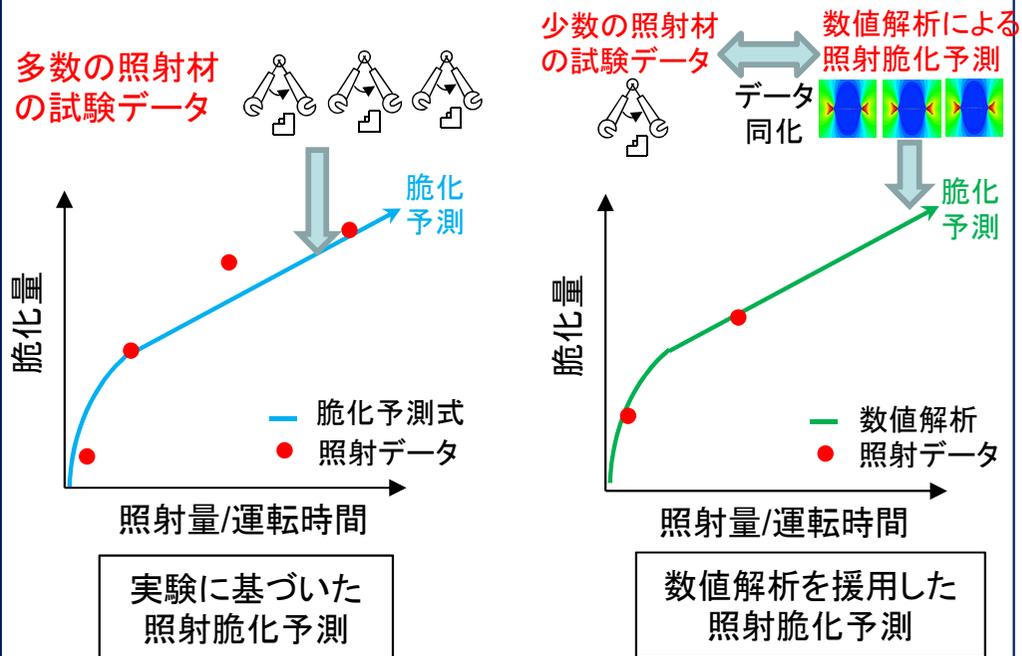
鉄中のらせん転位の易動度や、照射欠陥がらせん転位に及ぼす影響の強さをニューラルネットワーク型ポテンシャルを用いた古典分子動力学法によって計算する。

### ③離散転位動力学法解析による破壊靱性の計算

②で得られた特性を組み込んだ離散転位動力学法コードにより、①で得られた照射欠陥が多数のらせん転位に作用する系の解析を行い、照射を受けた材料の破壊靱性を計算する。

## 【期待される成果・発展性】

現在の多数の照射データに基づいて構築・検証される照射脆化予測に対し、少ない短時間の照射データに、数値解析結果をデータ同化することによって、照射脆化の予測手法構築を可能とする。



## 【課題名】

MA抽出のためのフッ素系スーパー溶媒の探査

【基盤チーム型(若手)】

実施期間:令和3年度~令和5年度

【研究代表者・所属機関】 中瀬正彦・東京工業大学

【共同研究機関】 京都大学、日本原子力研究開発機構、三菱重工業株式会社

## 【目的】

核燃料サイクルの要である再処理工程の革新、また長年の課題である少量でも高発熱性、高放射毒性のMA(マイナーアクチノイド)分離を達成するため、“フッ素系スーパー溶媒”をマテリアルズ・インフォマティクス(MI)の手法を活用して探査する。未知の溶媒における抽出系の特性や分配比、工学適用性までを推察可能なスキームの構築を目指す。

## 【課題概要】

使用済みMOX燃料、高燃焼度化燃料の再処理ではMA分離が重要となる可能性が高い。これを達成するため、高い耐放射線性や引火点がないといった固有の安全性を有する“フッ素系スーパー溶媒”をマテリアルズ・インフォマティクス(MI)の手法を活用して探査する。

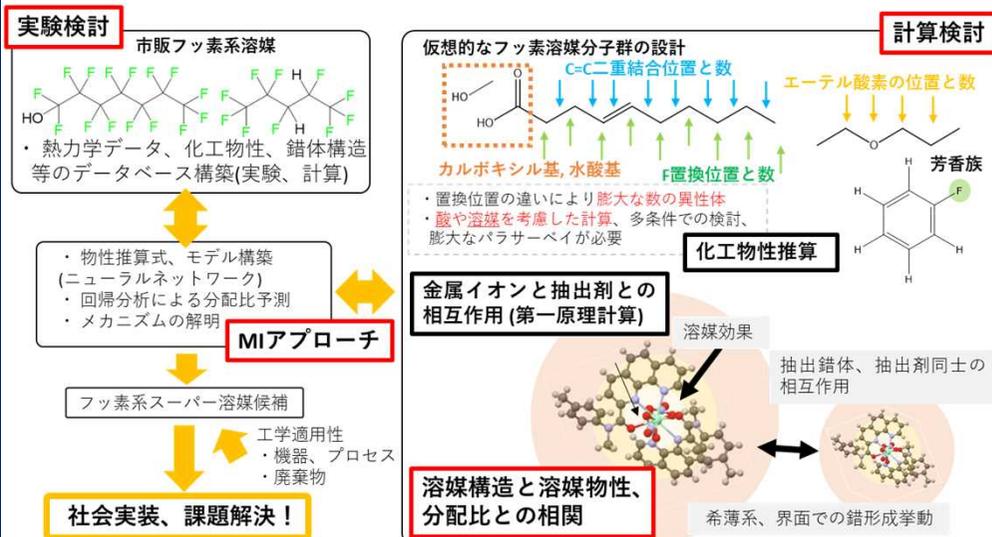
MA模擬として希土類元素の抽出挙動、溶媒化工物性、耐放射線性、溶液中の凝集体形成など基礎的理解を基盤とし、溶媒効果の観点から化学計算による錯形成エネルギー(第一原理計算)と化工物性(物性推算式、分子動力学(MD)計算)との相関を見出す。諸条件でのフッ素系溶媒の化工物性との相関、放射光を用いたメカニズム解明、溶媒効果を考慮した抽出錯体と近接溶媒分子の相互作用を見積もり、化工物性、相分離性、抽出錯体や溶媒の凝集効果を評価する。酸を考慮したMD計算により相分離、抽出錯体や溶媒の凝集効果、分子の拡散性を評価し、最終的には第一原理MD計算による抽出錯体・水相・有機相の複雑系に及ぼす溶媒の効果を解明する。

多段式ミキサセトラへの適用性、社会実装の観点から工学適用性も検討し、**社会のニーズに合致した“フッ素系スーパー溶媒”による再処理工程の革新を狙う**。結果はデータベース化し、重回帰分析などの統計解析モデルを作成することで未知の溶媒における特性と分配比、**工学適用性まで推察可能なスキームの構築**を目指す。

## 【期待される成果・発展性】

- ・MA抽出実験、ミキサセトラの実験はコストと時間がかかり、容易に実験できない場合がある。溶媒分子構造から化工物性、分配比、プロセス挙動までを推察可能とし、研究の加速が期待される
- ・固有の安全性や多数の優位点を有するフッ素系溶媒により長年のMA分離の課題に対する有効な解決策となる可能性がある。

フッ素系スーパー溶媒探査-マテリアルズインフォマティクスMIのアプローチ



【課題名】

高温ガス炉の出力分布測定のための核計装システムの開発

【基盤チーム型(若手)】

実施期間: 令和3年度~令和5年度

【研究代表者・所属機関】 深谷裕司・日本原子力研究開発機構

【共同研究機関】 ANSeeN株式会社、静岡大学

【目的】

炉内環境が高温であるため出力分布の測定手段が存在しない高温ガス炉に対し、炉外計装及び炉内計装による出力分布測定システムをハードウェア・ソフトウェアの両面から開発する。炉内計装用の耐高温・耐高線量素子に関しては、既存の検出素子を候補として検討しつつ、耐高温、中性子検出時のエネルギー弁別に優れた特性をもつGa<sub>N</sub>系素子を独自に開発する。

【課題概要】

炉外計装・炉内計装による炉内出力分布測定に関する各技術課題の解決を目指す。

炉外計装による出力分布測定

(1) 可動式検出器の開発

耐高温計装システム  
長距離電装システム

(2) 出力分布アンフォールディング技術の開発

V&Vを考慮した手法開発  
AI技術を応用した安定化

炉内計装による出力分布測定

(3) 耐高温センサーの検討・開発

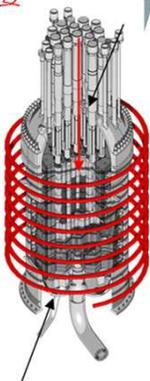
耐高温・エネルギー弁別特性からの素子選定  
新素材Ga<sub>N</sub>系検出素子の開発

(4) 高温ガス炉の炉内計装運用の検討

機器構造・炉内環境検討  
検出器のエネルギー特性の性能評価

① 炉外計装による測定  
② 炉内計装による測定

② :  
高温・高線量  
環境の素子開発  
が必要  
高速炉へ  
転用可能



① :  
中性子自由行程の長い高温  
ガス炉の特性を活かした出力  
分布推定手法

同じく、中性子自由行程の長い  
高速炉SMRへ転用可能

【期待される成果・発展性】

炉外計装による出力分布測定



高温ガス炉



高速炉SMR

※高速炉の  
炉内環境  
も高温環境

広範囲の原子炉への適  
用が期待できる。

炉内計装による出力分布測定



高温ガス炉



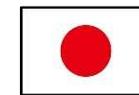
高速炉(大型炉・SMR)



※現行の炉内計装より  
コンパクト、圧力容器  
貫通部への負荷軽減

社会実装の見込み

- ▶ 民間技術移転(NEXIP)関連企業から「将来の実用化に向けて有益な技術開発である。」との評価
- ▶ 現在、日本・ポーランド間の協力協定があり、ポーランド炉への積極導入を提案



### 【課題名】

人工知能技術と熱流動の融合によるデータ駆動型プラント安全評価手法の開発

【基盤チーム型(若手)】

実施期間: 令和3年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 三輪修一郎・北海道大学

【共同研究機関】 電気通信大学、日本原子力研究開発機構、(株)原子力エンジニアリング

### 【目的】

本研究においては、複雑な気液界面ダイナミクスが伴う熱流動現象の理解推進に向け、「認識」「検出」「予測」の人工知能(AI)技術に着目し、データベースそのものの相関を捉えた「データ駆動型」アプローチを原子力熱流動へ適用し、AI技術融合による熱流体モデル開発ならびに解析手法の検討を目的とする。

### 【課題概要】

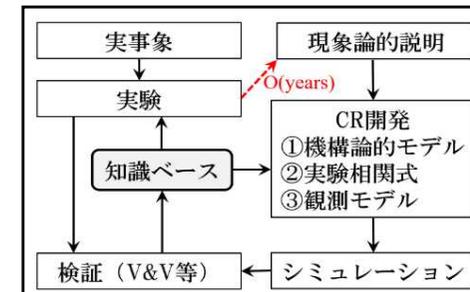
近年、熱水力計測機器の発展等から、多次元かつ多量のビッグデータが整備され、AI技術と熱流動の技術統合プラットフォーム構築が期待されている。しかしながら、AI技術により達成可能な具体的且つ効果的な解析例は少なく、熱流動分野における機械学習の有効性、優位性が未解明なのが現状である。本研究においては、画像認識と物体検出を軸としたAI技術に着目し、データベースに潜んだ関係性を捉える「データ駆動型アプローチ」を用いることで、AI技術と熱流動の融合による安全評価手法の開発を目指す。

本研究課題においては、対象とする熱流動現象(実事象)におけるモデル開発ならびに解析を「開発Phase」と「運用Phase」として考える。開発Phaseにおいては、①深層学習を用いたデータ駆動型モデルの開発、②数値流体力学シミュレーション(CFD)結果解釈のためのデータ駆動型解析を検討し、システム解析コードの運用にAI技術を適用させる運用Phaseにおいては、③データ駆動型評価モデル、の3つのサブテーマから成る課題に取り組む。

本研究課題により検討するテーマが派生し、原子力安全分野への機械学習応用におけるロードマップを提示するとともに、AI技術の汎用的「ツール」としての普及・発展を目指す。

### 【期待される成果・発展性】

従来手法におけるモデル開発例。



長期に及ぶデータ収集に加え、計測誤差、観測者によるバイアスが含まれる

【本提案】データ駆動型モデル開発(例: 流動様式遷移モデル)

