

研究開発評価課題 「原子力基礎工学研究」に関する 第4期中長期計画における

中間評価

燃料・材料工学研究

目指すもの：（第4期終了時にあるべき姿）

- スマート技術等開発
2つの影響因子（「環境」と「照射」等）が重畳した条件を模擬／再現した実験・解析基盤技術を開発（スマート技術ver.1）
- モデル、データベース等構築
スマート技術等を用いて、軽水炉システム安全性向上・長期利用等に対して、有用かつ革新的な知見等（モデル、データベース等）を創出
- シミュレーション技術開発
得られた知見等に基づくシミュレーションを行うことにより、成果の価値を向上させ、燃料材料のDX化を推進
- 成果実装化（原子力安全性向上、減容化・有害度低減、1F廃炉支援等）
実装化への成果デリバリーの仕組みを定着させ、成果を事業者等のニーズに応じて継続的かつタイムリーに提供
- バックエンドや革新炉等を視野に入れた新規研究開始
減容化・有害度低減基盤技術等を改良・応用し、軽水炉サイクルに係る分離技術や革新炉用新型燃料に関する新たな基礎基盤研究に着手

主に「項目2(1)1：原子力基礎基盤研究」に対応

基礎基盤

主に項目1(1)：安全性向上等に対応

安全性向上

1F廃炉

| 分野 (研究グループ) | スマート技術等開発 | モデル、データ ベース等構築 | シミュレーション 技術開発 | 成果実装化 新規研究開始 |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 防食材料 技術開発 | <u>軽水炉システム材料腐食挙動：</u> 軽水炉システム特有の条件（放射線場、高温水、沸騰硝酸等）における腐食予測技術高度化（「環境」と「照射」の影響因子重畳） | ATF ^{*1} 被覆管、再処理機器材料等の腐食予測モデル構築 | 材料寿命評価に資する長時間腐食予測シミュレーション | <u>原子力燃材料：</u> <ul style="list-style-type: none"> • ATF（燃料ふるまい解析） • 再処理材料 • 原子炉構造材料 • 1F材料 <u>新規研究：</u> <ul style="list-style-type: none"> • 革新炉等燃材料 その他 |
| 照射材料工学 | <u>原子炉構造材料の劣化挙動：</u> 高エネルギー粒子線照射下での材料への応力負荷条件における構造材特性変化等評価手法の開発（「照射」と「応力」、「照射」と「環境」等の影響因子重畳） | 重畳影響が材料特性へ与える影響に関する知見取得 | — | |
| 燃料高温科学 | <u>FP^{*2}挙動：</u> 高温ラマン測定装置等によるFP化学挙動評価手法の開発 | 軽水炉事故時後期や廃炉に係るFP化学挙動データベース拡充 | 事故解析コード等によるFP性状予測シミュレーション | |

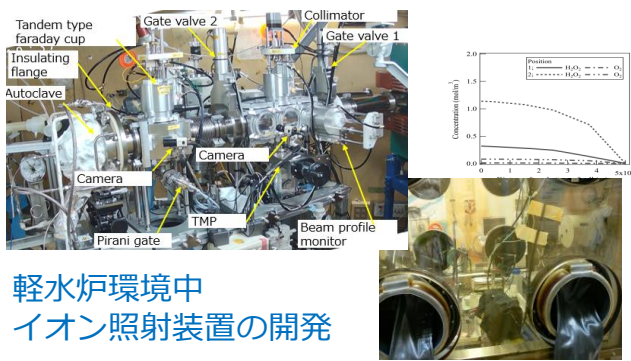
*1 事故耐性燃料（Accident Tolerant Fuels）、*2核分裂生成物（Fission Product）

対象

- 原子力材料：再処理プラント材料、被覆管材料、炉内構造材料等
- 材料・環境条件：安全・性能向上における重要・クリティカル条件

- 加速器やガンマ線照射を用いた照射技術と、独自センサーによるその場計測技術開発やデータ駆動を活用したハイスループットなデータ取得方法の構築による、網羅的なデータ取得、手法高度化
- 最新の計算科学的手法を元に構築した材料開発・評価スキーム等により、ミクロ～マクロ機構論的シミュレーションによる実時間・実スケールでの腐食・劣化等特性変化評価を目指す

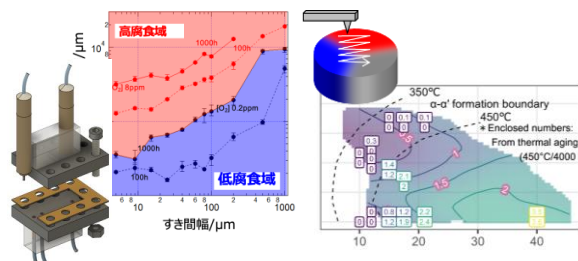
代替照射技術



軽水炉環境中
イオン照射装置の開発

代替照射下腐食試験
ラジオリシス解析

その場／高度測定技術



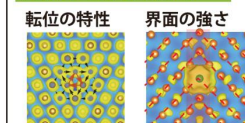
その場測定独自セ
ンサーの開発
網羅的実験→条件
の可視化

ハイスループ
ット手法構築
→系統的なデー
タ取得

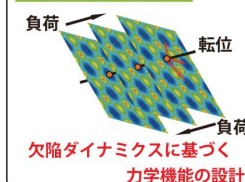
シミュレーション技術

材料開発スキーム

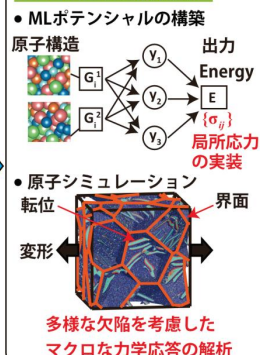
欠陥の電子状態計算



転位運動の解析



MLPIによる変形解析



計画

軽水炉システム材料腐食挙動：軽水炉システム特有の条件（放射線場、高温水、沸騰硝酸等）における腐食予測技術高度化（「環境」と「照射」の影響因子重畳）

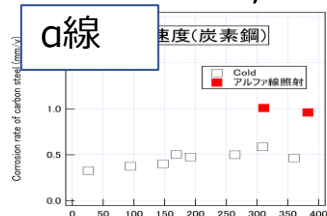
進捗

ラジオリシス解析、実証試験、新規非破壊測定手法の研究をすすめ、**放射線環境下の原子力システム材料劣化の新たな予測手法の初期モデルを構築**した。

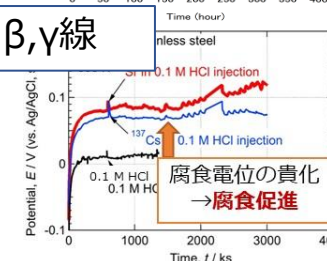
1F構造材料腐食等、東電・エネ庁等から放射線環境下での材料腐食挙動解明に対する強い要望

①代替照射腐食試験

→WASTEF, NUCEFにおいて実施

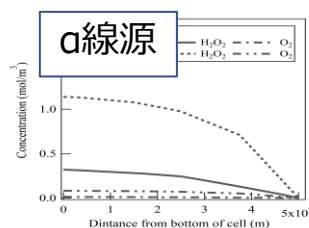


照射下試験

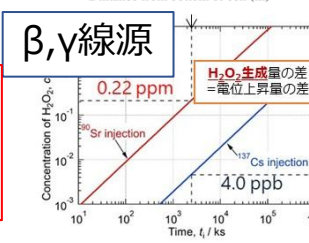


α線・β線照射下での腐食加速を確認

②ラジオリシス解析



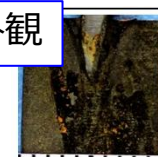
α,βともに
H₂O₂が増加



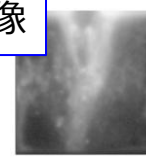
溶液中H₂O₂が腐食加速の要因であることを確認

③イメージングプレート(IP)を用いた新規非破壊測定手法

外観



IP像



腐食生成物中の放射性核種の可視化に成功
→腐食促進部位の特定

ラジオリシス解析と小規模実証試験を組み合わせ腐食劣化予測モデルを構築し、α線・β線に起因する構造材料の腐食加速メカニズムを明らかにした

成果を論文3報として公開し、知見を東京電力等の事業者を提供

青山ら,材料と環境, 71(2022), 110-115. 青山ら,材料と環境, 72(2023), 284-288. T. Aoyama et al., Ann. Nucl. Energ, 214(2025) 111229.

予定展開

ラジオリシス解析および実証試験を通じた予測モデルの高度化を進め、1F廃炉等の原子力施設の構造材料劣化予測に貢献

計画

軽水炉システム材料腐食挙動：軽水炉システム特有の条件（放射線場、高温水、沸騰硝酸等）における腐食予測技術高度化（「環境」と「照射」の影響因子重畳）

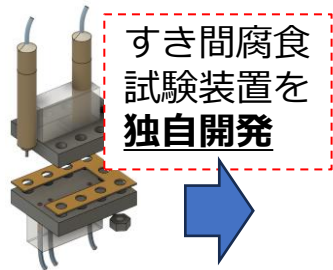
進捗

独自開発実験装置と計算解析を組み合わせた新たなスマート測定技術を構築し、**高温高压水中におけるすき間内部での腐食性環境形成メカニズムを明らかにした。**

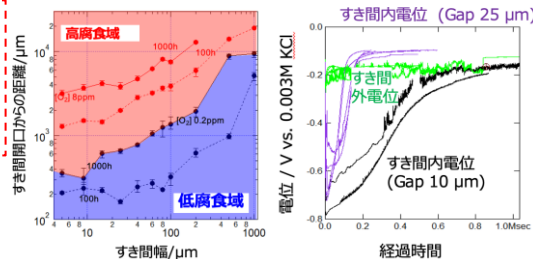
電力からの軽水炉SCC（※）進展予測のための基礎知見取得、海水混入等の非定常事象対応手法開発等の要望

（※）PWR一次系配管等で近年生じた応力腐食割れ。高経年化等における課題となっている。

①SCC部位を想定したすき間腐食試験



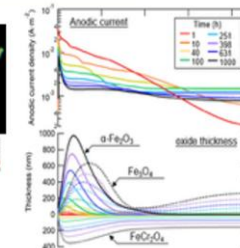
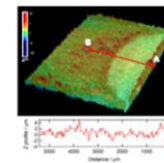
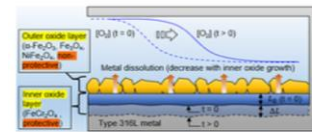
すき間腐食
試験装置を
独自開発



高腐食性環境生成条件（すき間幅と深さ）を特定

応力下における腐食試験については現在検討中

②計算によるすき間内部ケミストリー検証



溶液中化学種の詳細な挙動をシミュレーション

- すき間部における高腐食性環境発現のメカニズムを解明
- 有害イオン除去の条件探索を実施

新たなSCCスマート測定技術を構築し、SCC進展予測のための重要因子であるすき間部における高腐食環境生成条件を特定した

成果を高IF（Impact Factor=8.3）論文として公開し、電力事業者に提供

Y. Soma et al., Corrosion Science, 251, 2025, 112897

予定展開

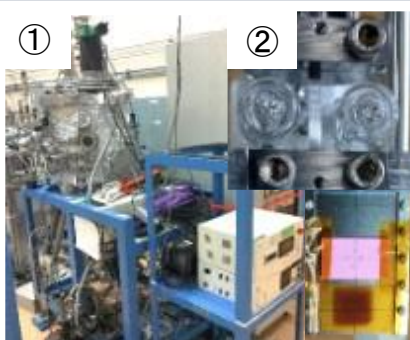
構築した測定技術とラジオリシス解析を組み合わせ、①実プラント運転時および点検保守時の重要データとして参照可能な要点検箇所のカリテリア開発、②及び汚染部の積極的浄化方法の開発、などを実施

計画

原子炉構造材料の劣化挙動：高エネルギー粒子線照射下での材料への応力負荷条件における構造材特性変化等評価手法の開発（「照射」と「応力」の影響因子重畳）

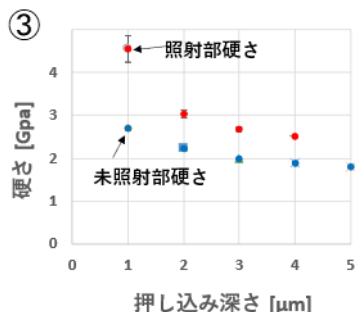
進捗

イオン照射下応力負荷試験装置整備を完了。照射劣化挙動に関して、系統的な実験・検証により**FeCrAl合金の組成・照射条件の影響を体系化**。実験及び第一原理計算から、Al添加量による α' 相形成挙動を理論的に実証。本知見は、最適な組成設計と延性の改善に活用可能。



①材料照射チャンバーと応力負荷加熱ホルダーを東海タンデム加速器施設に完備
②応力負荷試験片とビーム形状

③超微小硬さ計による照射後硬さの深さ分布測定例（照射部では硬さが増大）



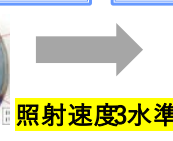
14組成Fe-Cr-Al合金を照射し、APT測定と重回帰分析で体系化

14種類のFe-Cr-Al合金を照射

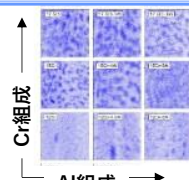


タンデム加速器@ QST・TIARA

3DAPによる α' 相解析



照射速度3水準

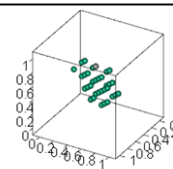


α' 相形成（体積率）への影響評価

線形重回帰モデルによるCr組成、Al組成、損傷速度損傷量を考慮した α' 相の形成予測を体系化した

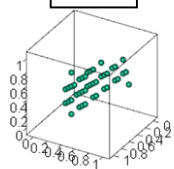
第一原理計算によるAl添加の影響解明

Fe-18Cr-0Al (at.%)



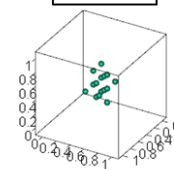
少量添加で促進

12Al



多量添加で抑制

24Al



α' 相形成が最大

α' 相形成が最大になるAl濃度について、磁性や原子構造解析によるCrクラスター形成機構の解明も進行中

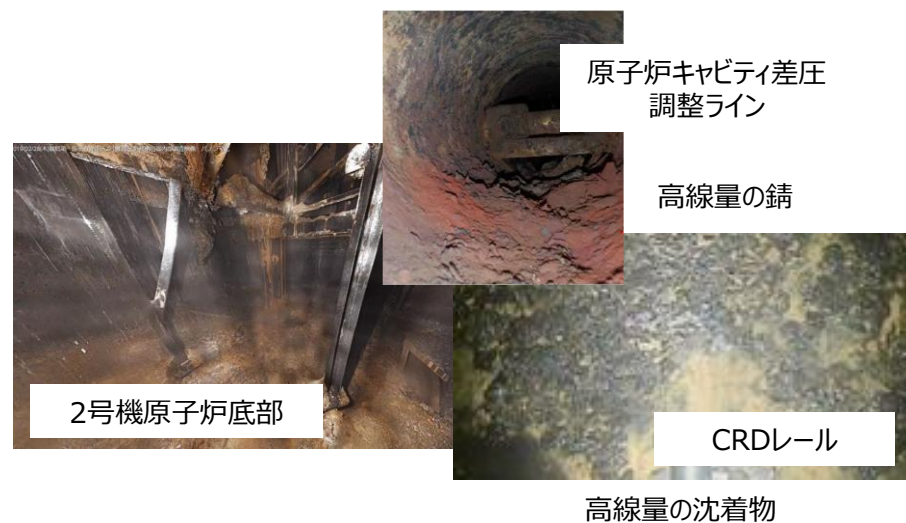
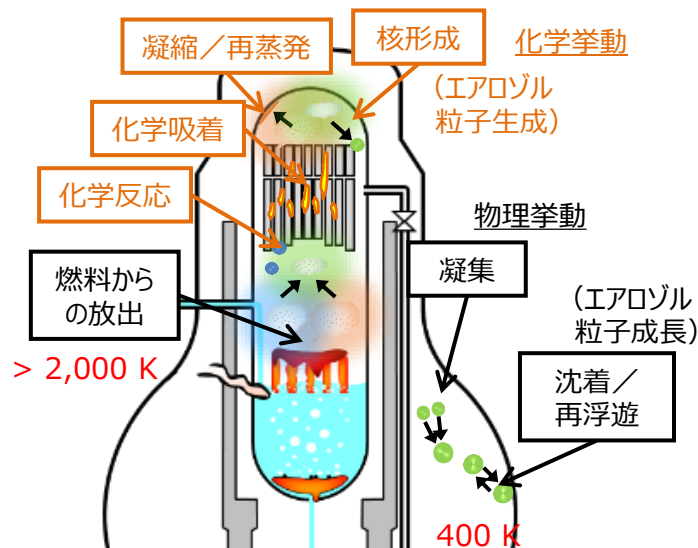
成果を論文（下記）、他3報として公開

・Y. Abe, T. Tsuru et al., J. Nucl. Mater. 606 (2025) 155606; Y. Abe, A. Kubo, S. Ukai, T. Tsuru, J. Nucl. Mater. in press.

予定展開

第一原理計算を組み込んだフェーズフィールド法で、イオン照射データを中性子照射条件へ外挿する。さらに、 α' 形成の飽和照射量と同程度の照射が可能なJRR-3により検証を進める予定（次期中長計）

- 安全性向上に向けたソースターム評価の高度化および1F廃炉作業における安全評価・廃棄物処理で重要となる**核分裂生成物（FP）の化学挙動**を対象とし、データ取得、反応メカニズムの解明、モデル化および検証を実施した。
- 得られたデータやモデルは**データベースECUME**として取りまとめ、シビアアクシデント（SA）解析コード（SAMPSON、THALES-2等）へ実装し、FP化学挙動やソースターム評価に役立てた。



事故時挙動：主にソースターム評価高度化への反映

ガス状ヨウ素生成、セシウム（Cs）沈着に係る化学挙動

- **制御材ホウ素等**との反応によるガス状ヨウ素の生成量
- Csの**各種構造材**（RPV材料、PCV壁材、保温材、コンクリート）との**吸着量**

事故後挙動：主に1F廃炉作業への反映

デブリ冷却水との接触や化学的安定性に着目

- Csの**各種構造材**（RPV材料、PCV壁材、保温材、コンクリート）との**吸着生成物の性状（水溶性）**

受賞：部会奨励賞等2件、論文：主著12件

▶ ATF実用化に向けた国際的な取組みにおいて、SA時のFP化学の重要性が示された。

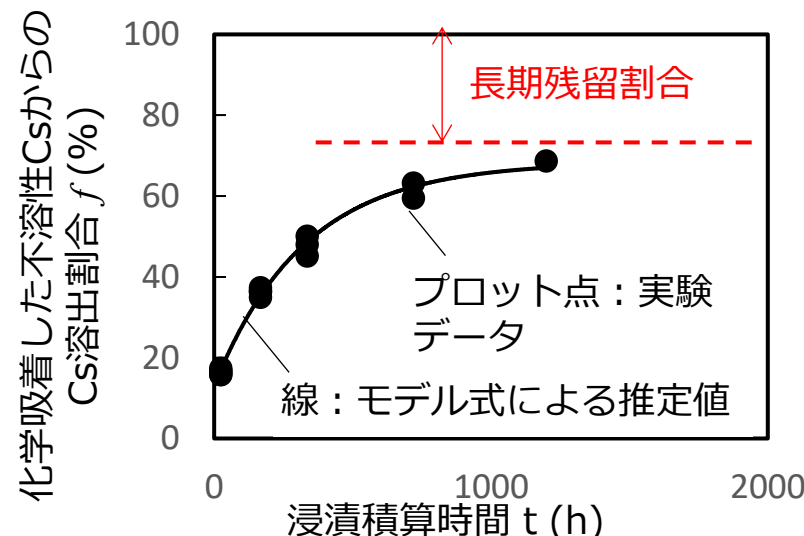
計画

軽水炉事故時FP化学挙動モデル・データベース構築：FPの事故後挙動評価のための炉内長期移行モデルの整備

進捗

ステンレス鋼に化学吸着したCsは数十日の長期間かけて徐々に水に溶出することを明らかにし、**解析コードで利用可能なモデル式を構築**した。これにより1F等長期間水に晒される場合のCsの水への溶出量や付着残存量を見積もれるようになった。

- 事故後の炉心冷却によって生じた凝縮水や、燃料デブリの冷却水により、炉内で沈着したCsが再溶出・移行した可能性
 - この再溶出の有無を把握することは、1F廃炉や廃棄物処分における除染プロセス設計や、廃棄物からの溶出挙動評価に不可欠
- 難溶性の沈着Csの水への浸漬試験により、溶出速度データを取得し、拡散に基づく溶出モデル式を構築した。



Csが化学吸着したステンレス鋼試験片からのCsの溶出挙動実験データとモデル式による推定値（30℃）

成果を論文1件として公開、炉内のCs残留量や水相を介した事故後Cs移行量の予測技術高精度化に繋がった。

K. Nakajima et al., J Nucl Sci Technol. under review (2025).

予定展開

SA解析コード等による事故時の沈着量計算結果と組み合わせることで、事故後長期間のCsの移行予測技術開発に寄与するとともに、1F廃炉・廃棄物処分に係る安全評価や除染方法検討等に資する。

第4期中長期計画の実施計画

| テーマ | 達成目標 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|----|----|----|----------------------------|-----|--|
| 基礎基盤 | 軽水炉システム材料の腐食・劣化挙動評価のための代替照射/スマート測定技術(SMiRT)の開発、モデル等構築 (交付金にて実施) | | | | | | | | |
| 原子力科学技術に係る基礎基盤研究 | | 材料腐食に関するスマート測定技術の構築 | | | | | スマート測定技術を用いた腐食特性評価と予測モデル開発 | | |
| | | 代替照射によるスマート技術開発 | | | | | 構造材料等の照射特性予測 | | |
| | | 核分裂生成物等の炉内長期移行モデルの整備 | | | | | 核分裂生成物等の移行予測技術の高度化 | | |
| 安全性向上 | ステークホルダーとの対話を通じたニーズ・シーズのマッチング | 軽水炉研究ニーズ・シーズによる研究の検討・受託・共同研究の提案 | | | | | | | |
| 原子力の安全性向上のための研究開発 | 事故耐性燃料用被覆管候補材料(ATF)の照射影響評価技術開発等 (外部資金等にて実施) | ATFの照射時や事故時の被覆管等堅牢性評価に関する基盤研究 国/事業者等からのニーズに応じて実施 | | | | | | | |
| | ATF開発に資する基礎基盤研究 (交付金にて実施) | 照射影響評価のための試験装置・技術開発 | 照射影響に関するデータ取得、モデル化 | | | | 燃料ふるまい解析 | | |
| 1F廃炉 | 燃料デブリ分析等に係る達成目標を福島部門からのニーズに応じて設定 (交付金にて実施) | | | | | | | | |
| 1F廃炉支援 | | 1F環境下での構造材健全性評価、燃料デブリ分析及び炉内状況評価等に係る研究を、福島部門からのニーズに応じて実施 | | | | | | | |

軽水炉用事故耐性燃料（Accident Tolerant Fuel; ATF）の2030年代以降実装化を目的としたオールジャパン体制での研究開発

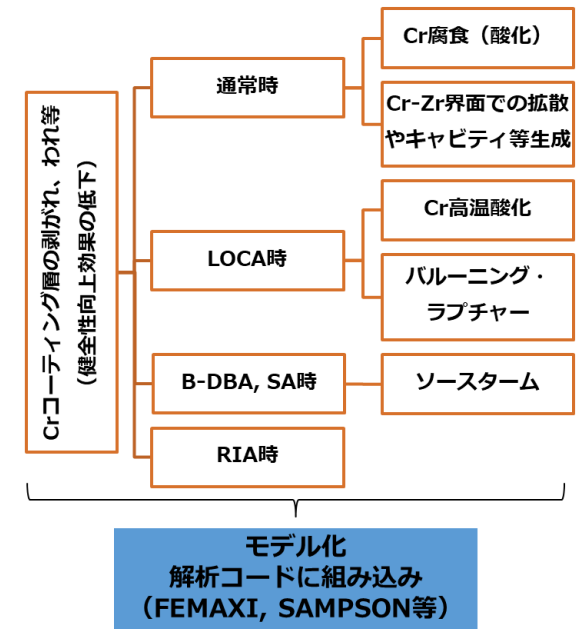
- Crコーティングジルカロイ（Cr-Zry）被覆管
- FeCrAl-ODS被覆管
- SiC/SiC複合材料被覆管

JAEA：独自技術等を活かして共通技術基盤を整備し、国内開発を推進

- 国内開発推進：開発管理、国内ステークホルダー調整、規制側との議論促進等
- 国際協力：照射／照射後（PIE）試験コーディネイト、国際プロジェクト参加等
- 基盤技術開発・人材育成：基礎基盤研究実施、照射試験技術者／研究者育成等

【基礎基盤研究について】

- 技術課題をJAEA独自技術（照射／PIE、核燃料工学、防食・照射工学）に照らして研究課題設定
- 研究課題に応じた予算活用（受託及び交付金）
- Cr-Zry：Zryとの差異であるCrコーティングについて、はがれ等による喪失が設計・安全性評価に与える影響評価のメカニズム解明
⇒「高燃焼度状態」「事故時」事象
- FeCrAl-ODS：材料の照射による特性変化、安定性評価等



事故耐性燃料（ATF）：国内開発推進

－開発を進めるための技術的議論の場（ATFプラットフォーム）の構築－
安全性向上

計画

ATF実装化においてとりわけ重要なマイルストーンである許可取得とそのために不可欠な照射試験を進めることを目指して、国内ステークホルダーの技術的議論を促進する。

進捗

規制側を含む国内全ステークホルダーがATFの開発に係る技術的議論をフラットな立場で行い、それぞれのミッションを前に進めることを企図して、事業者との定期的なコミュニケーションの場の運営に加えて、**JAEAによる運営の下、ATFプラットフォーム（ATF-PF）を立ち上げた。**

‘25.7.1にキックオフ会合を開催

- ✓ 原子力規制庁、電気事業者等の国内ステークホルダー約90名が参加
- ✓ 目的：ATFの安全確保に必要な技術的課題整理を目的に、ATFの設計・安全性評価に係る技術的な情報・データを共有・議論
- ✓ 内容：①照射試験データ等技術的な情報等に関する共有・議論、②研究協力・技術協力の可能性検討、③関連する人材の育成に関する検討、等
- ✓ 照射データ等を用いた具体的な議論を行うために、4つのSub-WG（ATF候補材毎のSWG 3つと共通基盤技術SWG）を設置
- ✓ 2026年度末までの2年間にSWG毎の議論を進め報告書等に纏めて公開

[www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/kikaku_session/20250911_kikakusession_ATF/20250911_kikakusession_ATF\(4\).pdf](http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/kikaku_session/20250911_kikakusession_ATF/20250911_kikakusession_ATF(4).pdf)



SWGにおける実施内容案

- [Cr-Zry]/[FeCrAl-ODS]/[SiC/SiC]SWG：
 - 各SWGにおいて、被覆管及び燃料ペレットについて、国外関連データ含め、以下の情報を収集：
 - 物性等データ、照射／照射後試験データ
 - PIRT関連情報（評価及び元データ、情報）、技術課題評価結果等
 - 学会PIRTをベースとしてTRLに照らし、1.を踏まえて技術課題（現状と目標のギャップ）を特定。必要に応じPIRT/TRL改良にフィードバック
 - 技術課題解決策（研究開発、協力、人材育成等）案を議論
- [共通技術基盤]SWG：
 - 以下の情報を収集：
 - 試験・解析手法等に係る情報（燃料技術への適用が期待されるもの含め）
 - ・ 照射／PIE試験手法、炉外試験手法等
 - ・ 燃料設計／ふるまい解析コード、コードベンチマーク結果等



プレス発表、原子力学会企画セッションでの講演等により周知し、広く参加を呼びかけ。多様な観点からの議論により技術課題を抽出し、早期実装に向けた研究開発最適化や技術・人材基盤構築の指針提示を目指す。

電気新聞掲載（7月18日付）、原子力学会2025年秋の大会・部会等企画セッション（北九州）

予定
展開

SWG毎に分かれて、ATFの重要事象を対象に、様々な専門家の視点から新たに追加・考慮すべき項目がないか等を検討・議論。2026年度までの成果を踏まえて継続的な課題特定・研究開発への反映を実施。

事故耐性燃料（ATF）：基礎基盤研究 － ATFの照射下腐食挙動評価－

安全性向上

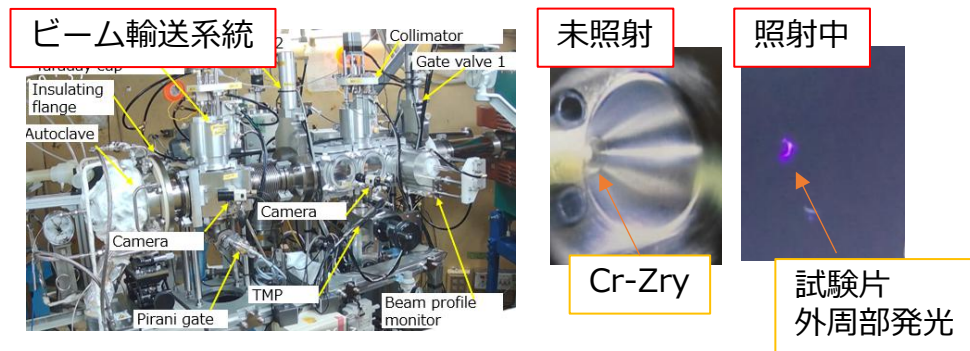
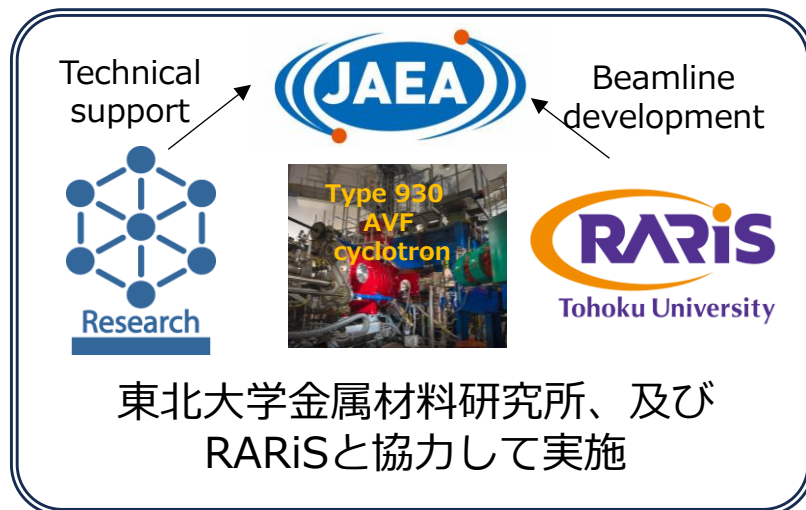
計画

ATFの炉内照射時、とりわけ高燃焼度時における被覆管腐食挙動評価を行うため、炉内条件を模擬した照射下腐食試験装置を開発し、Cr-Zry等の腐食挙動を評価する。

進捗

東北大学との連携協力により、先端量子ビーム科学研究センター（RARiS）・サイクロトロン加速器施設に専用のビームラインを敷設し、**照射下腐食試験装置整備を完了**。プロトンビーム照射試験を実施し、目標照射位置に確実にプロトンビームを照射できることを確認（2025年度末見込み）。

照射下腐食試験装置の開発・設置（東北大学）



照射試験を実施し装置の動作確認を実施

並行してガンマ線照射試験装置の開発・設置を進行中（QST高崎研究所）

原子炉内の複雑な環境下における照射下腐食劣化挙動技術開発と機構の解明により、設計・安全性評価に寄与する科学的知見取得を目指すとともに、国内関連技術・人材基盤の維持向上に寄与。

読売新聞掲載（10月27日付）、Y. Soma et al., 22nd ICFRM, Shizuoka, Japan., 石島他, 日本原子力学会2025年秋の大会（福岡）。

予定
展開

原子炉内の環境により近づけた試験条件でのデータ取得とともに、腐食に係る多くの要素試験データや知見等と合わせてATFの照射下腐食劣化過程を明らかにし、現象モデル化並びに腐食劣化予測に繋げる

事故耐性燃料（ATF）：基礎基盤研究 －Cr-Zryの冷却材喪失事故（LOCA）モデルの構築－

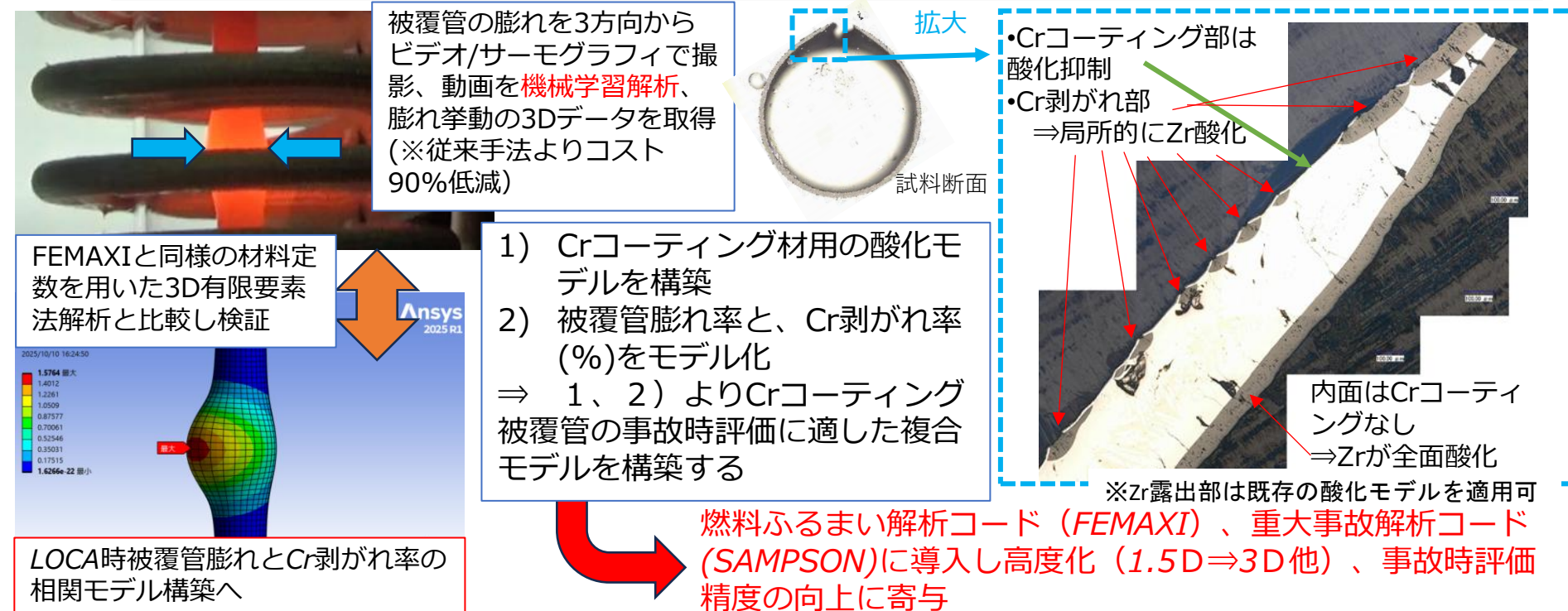
安全性向上

計画

イオン照射等による代替照射技術開発による照射時ふるまい評価や、設計基準事故（冷却材喪失事故 LOCA）時の被覆管破損メカニズム解明のための基礎基盤研究を実施

進捗

Cr-ZryのLOCA時3D変形挙動・酸化挙動を解析し、**Crの剥がれを評価するために必要な酸化モデルを構築した**。また、膨れ・Cr剥がれ挙動評価のための**実験・解析手法を構築した**。



成果を高IF（Impact Factor=8.3）論文や招待講演等として公開。各解析コード（FEMAXI及びSAMPSON）の酸化モデル構築のためのインプット情報を提供し、事故時評価精度の向上並びに各解析コードの高度化等々に寄与
Mohamad, et al, *Corrosion Science* 224(2023)111540, Mohamad et al, *NuMAT* 2024(invited), 根本ら, JAEA-Research 2024-018, 等

予定
展開

事故時評価精度の更なる向上（各解析コードの高度化等）を目指して、Crコーティング被覆管等ATF候補材毎の個別試験データの収集・解析、モデルの検証、修正等を進める

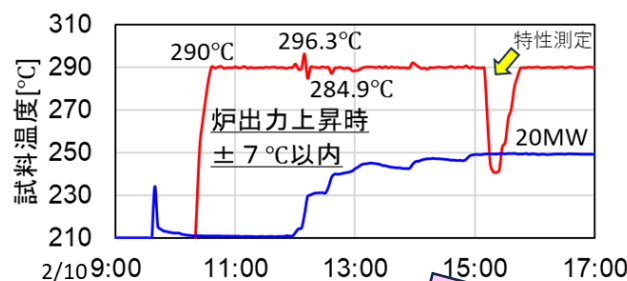
計画

ステークホルダーとの対話を通じた軽水炉等の安全性・経済性向上に関する課題・技術開発 ニーズを把握し、機構内外との連携による基盤技術開発及び適用性検証を行う

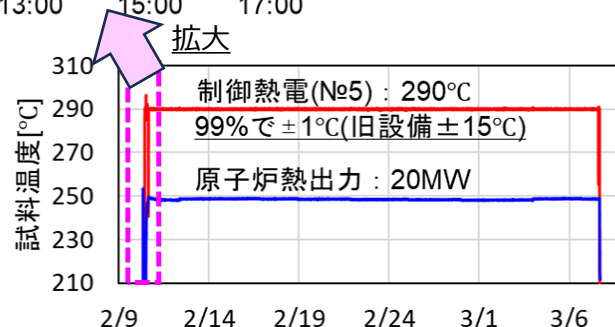
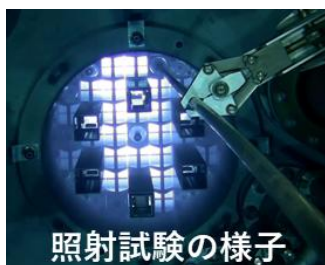
進捗

研究用原子炉JRR-3における高精度な温度制御下での照射試験技術を構築するとともに、PWR高照射量領域まで照射された国内原子炉圧力容器鋼材に対する**破壊靱性データの拡充及び破壊靱性マスターカーブ(MC)法の適用性を確認**⇒経年劣化対策技術基盤拡充

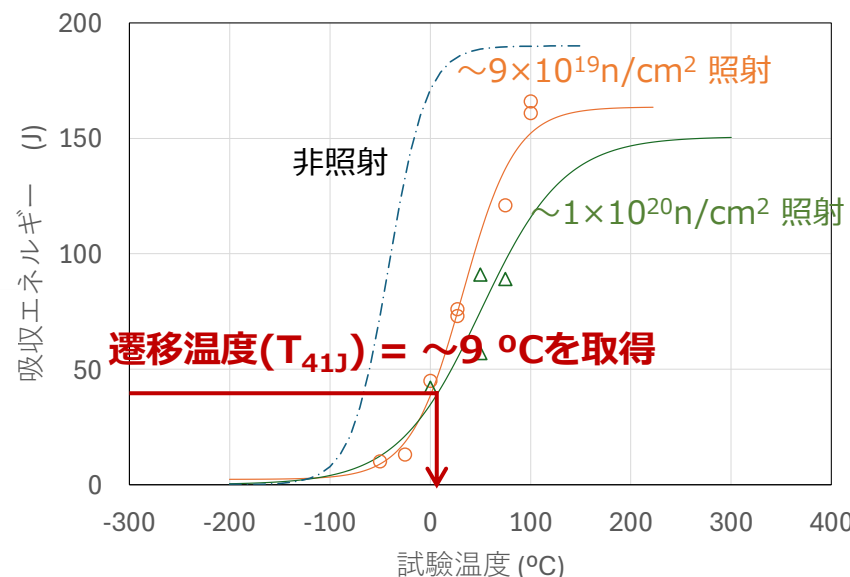
- JRR-3において照射キャプセルの設計改善等を行い、炉出力によらず 290 ± 10 °Cでの高精度の温度制御照射を実現
- JRR-3を用いて60年相当の中性子照射を行った圧力容器鋼材の破壊靱性・シャルピー衝撃試験データを取得



炉出力上昇時：±7°C
定常出力時：±1°C
高精度な照射温度制御を達成



JRR-3運転時間での照射温度履歴



照射後試験（シャルピー衝撃試験）結果

不足しているデータ拡充によりMC法適用の電気協会基準(JEAC4201-20XX)の規制庁エンドースに寄与

予定展開

成果を論文化し、JEAC4201等へ根拠データとしての有用性を高める。他の試験炉や商用炉とのデータ比較によりJRR-3の材料試験炉としての有用性を示し、照射基盤技術の機構外利用を促進する。

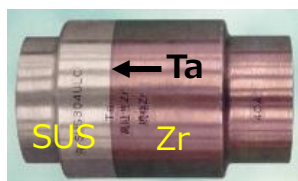
計画

ステークホルダーとの対話を通じた軽水炉等の安全性・経済性向上に関する課題・技術開発 ニーズを把握し、機構内外との連携による基盤技術開発及び適用性検証を行う

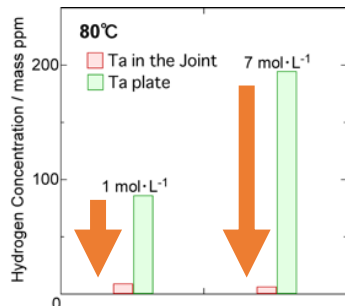
進捗

六ヶ所再処理工場で使用されているSUS-Ta-Zr異材継手において、**NaOHによる除染時のTa部水素吸収抑制機構を明らかにし**、知見を規制側に提供

NaOH除染時異材継手部Taで水素脆化の可能性
⇒対象部位の安全性について規制側（NRA）より検証要請



①継手部模擬材の水素吸収試験



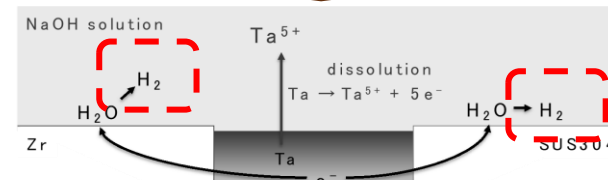
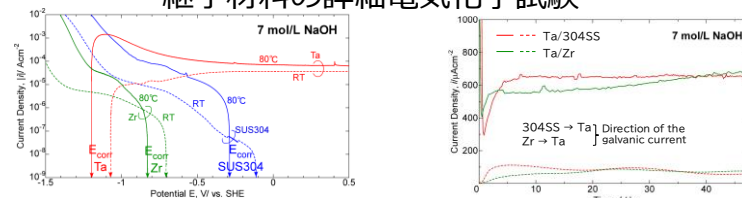
赤：継手部の水素吸収量
緑：Ta単体の水素吸収量

継手部における水素吸収量低下を明らかにした

②継手部水素吸収挙動の機構解明



継手材料の詳細電気化学試験



水素発生部はTa外であることを確認
→継手での水素吸収抑制機構を解明

再処理工場のNaOH除染時における継手部水素脆化可能性が低いことを明らかにした

成果をNRA技術ノートおよび論文1報として公開。規制側による系統除染プロセス含めた施設経年劣化評価のための根拠データを提供。

NRA技術ノート, NTEN-2022-1002(2022). Y.Ishijima et al., Mechanical Engineering Journal, Vol. 12[4], pp. 24-00434(2025).

予定展開

本成果は再処理環境における運転時および点検保守時の水素脆化評価に関する重要なデータとして参照され、除染プロセスを含め再処理施設の経年劣化評価および評価の妥当性検証に活用される見込み

トピックス（計画外の研究成果）

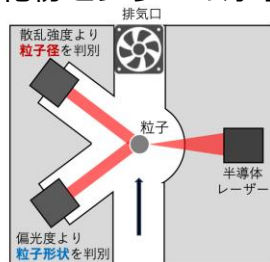
海浜地区にある原子力施設の外壁等で問題となっている大気腐食の基礎基盤研究として市販の花粉センサーを応用して飛来海塩のリアルタイム測定が可能であることを示した。

大気腐食挙動を決定する重要因子である温度、湿度、雨、飛来海塩量等のうち、飛来海塩量だけが時間分解能が低く腐食予測の精度低下のクリティカル要因となっており、新たな測定手法が望まれていた

既存花粉センサーを海塩粒子測定に応用

1年間の測定を実施し既存手法（ドライガーゼ）データで検証

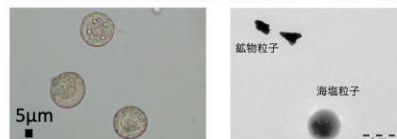
花粉センサーの原理



花粉センサー
→長年のリアルタイム
測定実績あり

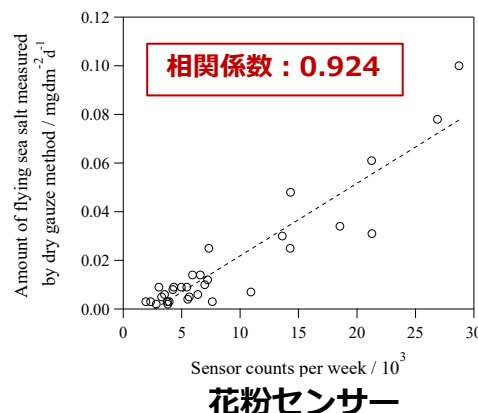
花粉と海塩粒子の
形状が近いことから
リアルタイムかつ
高精度な海塩粒子
測定が可能と推測

(球にどれだけ近いか) 吸込口
スギ花粉：球形、25μm程度 海塩粒子：球形、5μm程度



花粉と海塩粒子の形状比較

ドライガーゼ法



適切なしきい値により
既存法と良い相関を
得ることを確認

リアルタイムかつ
高精度な海塩粒子
測定を実現

既存花粉センサーを応用した新たな海塩粒子測定手法を確立した

本成果は学会や委員会を通じ産学の腐食研究者に展開され、大気腐食に関する新測定手法として広く認知・展開された。現在製品化を検討中。

大谷他, 材料と環境 (査読対応中)、共同研究予定 (神栄テクノロジー、大阪ガス)

－流動液膜下における腐食評価－

トピックス(計画外)

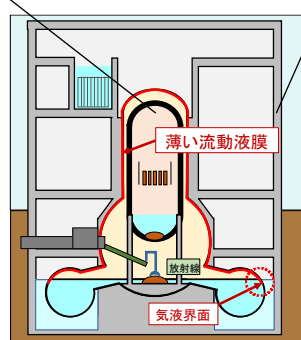
1F PCV壁面には薄い流動液膜が形成しており、鋼材の腐食促進が懸念されるため、液膜厚さおよび流速の鋼材腐食に及ぼす基礎的な知見を調査する。流動液膜下における腐食加速のメカニズムを明らかにした。

1F PCV壁面に形成されている薄い流動液膜による腐食促進が懸念されているが、これまで流動・液膜と腐食速度との関係を調査した報告はなく、それらの関係を系統的に示すデータが望まれていた。

1F PCV内部写真

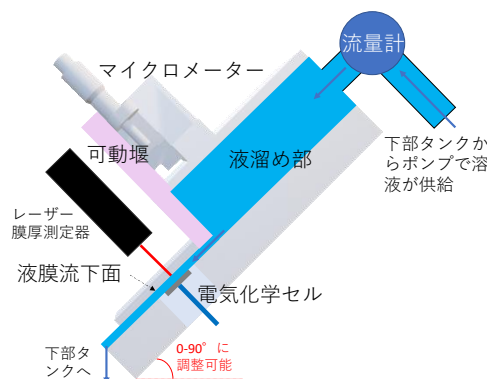


2号機PCV 内部写真



1F 2号機模式図

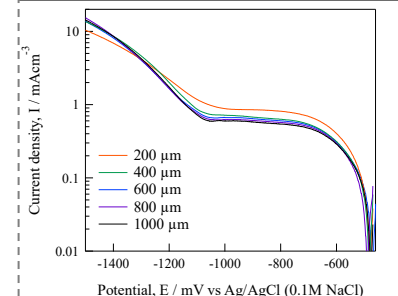
膜厚と流速を制御可能な液膜流下装置を独自開発



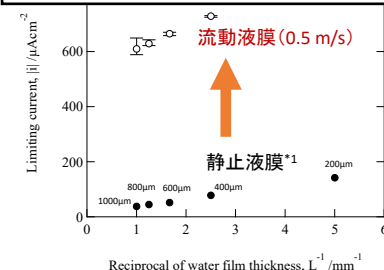
拡散限界電流 ←腐食に寄与する因子

- ・流動液膜下でも膜厚が薄くなるにつれて増大
- ・静止液膜と比較すると流動により増大

膜厚とカソード分極曲線



拡散限界電流と流動の関係



材料表面溶液の流動・膜厚と腐食速度との関係について系統的なデータを取得した

成果を論文として公開し、1F廃炉作業に関わる電力事業者に提供⇒PCV壁面の構造健全性評価における腐食予測モデルの構築および保守計画の策定に活用される予定。

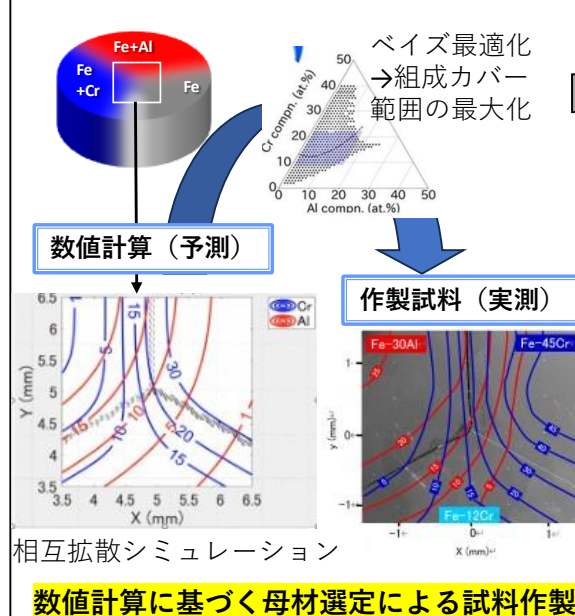
トピックス：計画外の成果

－材料の照射劣化要因である脆性相のハイスループット評価手法－

トピックス(計画外)

データ駆動（相互拡散、ベイズ最適化）による最適組成設計を通して傾斜組成試料の合理的な作製を可能に。一括イオン照射及び連続剛性法（CSM）に基づくナノインデンテーション（CSM-NI）測定と組み合わせた、ハイスループット評価手法を構築。1枚の試料で連続した組成点を網羅的に測定し、広範な組成領域の照射硬化を高精度に評価することにより、組成マップ上にて、照射欠陥と α' 相の寄与を定量的に分離することに成功。

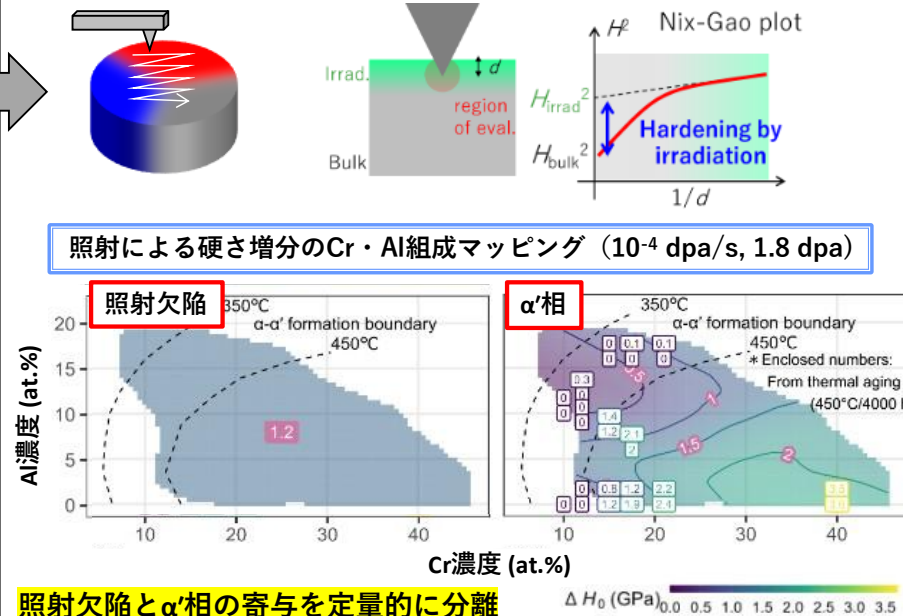
3つの母材を熱拡散接合



イオン照射



連続剛性法（CSM）ナノインデンテーション硬さ測定



・ 鶴飼、阿部ら、「イオン照射されたコンビナトリアルFeCrAl合金に生成する α' 析出物のハイスループット-ナノインデンテーション-マッピング」、日本金属学会2025年秋期講演大会

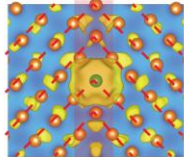
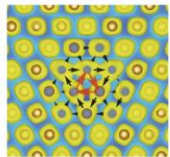
近年の合金設計は組成が複雑化し、従来の経験や勘に頼った方法による材料開発が困難な状況のところ。本研究では、電子状態計算に立脚した材料の欠陥構造の原子シミュレーション手法を確立し、材料の力学特性を非経験的、戦略的に設計する新たな材料設計スキームを構築した。

材料開発スキーム

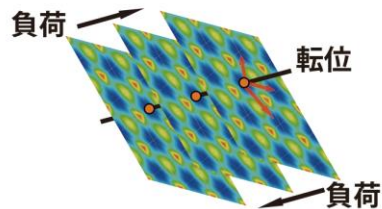
欠陥の電子状態計算

転位の特性

界面の強さ



転位運動の解析

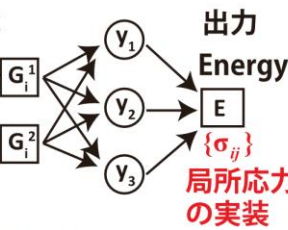
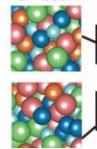


欠陥ダイナミクスに基づく
力学機能の設計

MLPによる変形解析

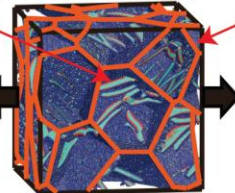
● MLポテンシャルの構築

原子構造



● 原子シミュレーション

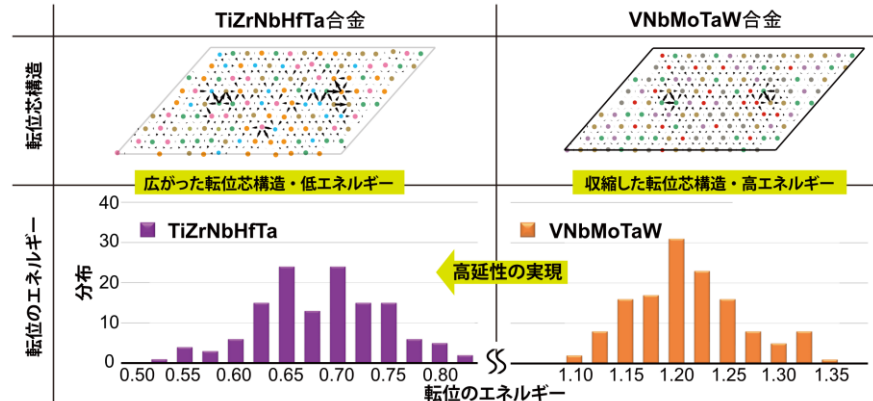
転位



多様な欠陥を考慮した
マクロな力学応答の解析

欠陥構造のダイナミクスを再現する解析手法の開発と機械学習ポテンシャルにより、優れた力学機能を評価・創出できる材料設計スキームを構築した。

例：ハイレントロピー合金：高延性の起源を解明



欠陥構造の力学と電子状態計算の融合
⇒ 優れた力学機能創出・戦略的材料開発基盤

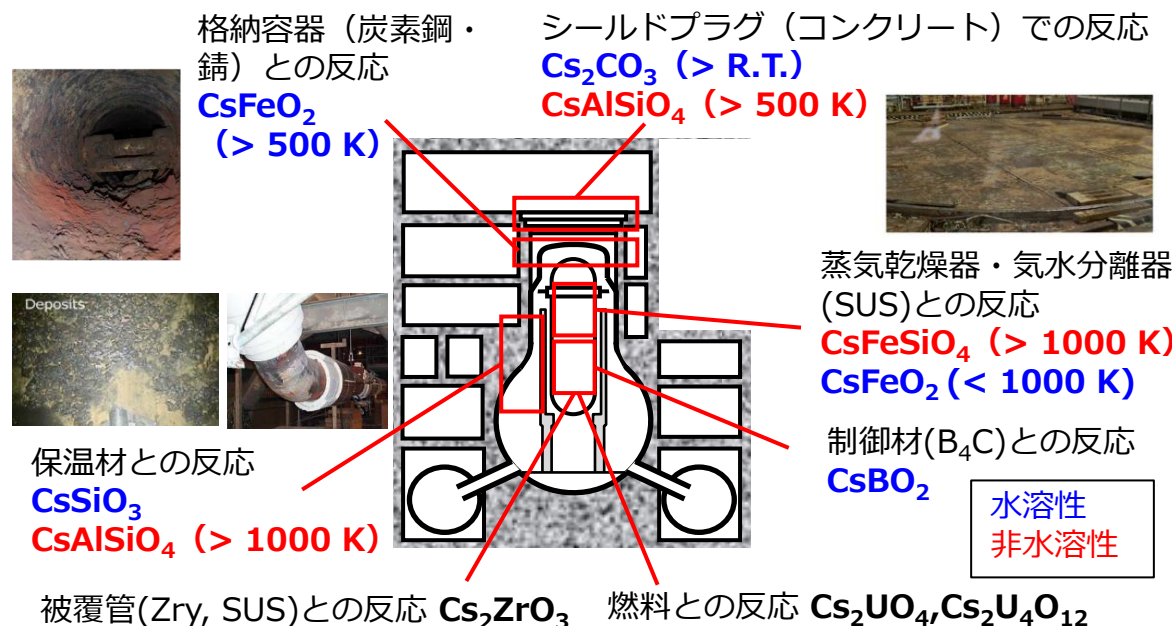
T. Tsuru, et al., Intrinsic factors responsible for brittle versus ductile nature of refractory high-entropy alloys, *Nature Commun.*, 15 (2024) 1706.

受賞① (2022年4月)：英国物理学会, MSMSE Emerging Leaders Award、受賞② (2025年3月)：第73回 日本金属学会論文賞、受賞③ (2025年11月)：2025年度 軽金属学会 軽金属論文賞、プレス発表① (2023年2月)：結晶粒超微細化により、酸素に起因したチタンの低温脆性を克服、プレス発表② (2024年3月)：耐火ハイレントロピー合金の脆性と延性を支配する因子の解明 ―多様な元素が拓く優れた合金の開発―

1F廃炉作業の安全評価や廃棄物処理に資する知見の提供に向けた計画外研究として、1Fの中長期的課題対応（NDF6課題の一つである放射性物質による汚染機構の原理的解明）への貢献を目指して、1F現地調査で示唆されたSRV、差圧調整ライン、シールドプラグ等からの漏えい経路における、線量の主要因であるCsの各種構造材への化学吸着挙動を調べた。保温材（SRV）、炭素鋼（差圧ライン）、コンクリート（シールドプラグ）等へのCsの吸着挙動を明らかにし、炭素鋼の錆への選択的な化学吸着等、線量分布の要因となり得るメカニズムを示唆した。

事故時で想定される高温条件においてCs蒸気種と各種構造材等の反応実験を実施し、反応メカニズムを解明した。さらに、Csの炉内分布予測のツールとして用いられるSA解析コードの改良に資するデータ取得とモデル化を進めた。

- 保温材
- 炭素鋼（錆）
- コンクリート
- 炉心材料：燃料、被覆管材料、制御材、蒸気乾燥器・気水分離器



成果を論文3報として公開し、炉内・建屋内セシウムの分布・性状予測を可能とするための基礎知見を東京電力に提供した。

- 1) M. Rizaal, K. Nakajima, Chemosphere, 363 (2024) 142870, 2)V.N. Luu, K. Nakajima, Nucl. Eng. Des. 426 (2024) 113402
- 2) K. Nakajima, M. Takano, J Nucl Sci Technol. 62(2025)78

これまでの実績と第4期終了までの計画 中長期計画以外の成果

項目2(1)1：原子力基礎基盤研究

● 防食材料技術開発：

- 【実績】「環境」と「照射」の影響因子重畳下での原子力システム材料に関する代替照射・その場測定技術（スマート測定技術）に係り、放射線環境下の原子力システム材料劣化の新たな予測手法の初期モデルを構築した。
- 【計画】技術の改良を進めるとともに、スマート測定技術を用いた材料腐食特性データの取得、汎用性の高い材料腐食予測モデル構築、及び海外試験炉照射材を用いた腐食予測モデルの妥当性検証と予測精度向上を図り、長時間腐食予測シミュレーションにより原子力材料寿命評価に資する。

● 照射材料工学：

- 【実績】高エネルギー粒子線照射下での材料への応力負荷条件における構造材特性変化等評価手法の開発（「照射」と「応力」、「照射」と「環境」等の影響因子重畳）として、イオン照射下応力負荷試験技術を確立してデータを取得した。また、APT測定と重回帰分析で組成・照射条件の影響を体系化し、合金組成に応じた組織安定性（ α' 相形成）を第一原理計算により理論的に実証した。
- 【計画】イオン照射下応力負荷試験によるデータ取得をすすめるとともに、ハイスループット実験と計算機シミュレーションを連携させ、合金組成や照射条件が組織安定性に及ぼす影響を体系化し、照射特性の予測モデルを構築する。モデルを用いて、重畳影響が材料特性へ与える影響に関する知見を取得する。

● 燃料高温科学：

- 【実績】過酷事故時のFPの性状予測に必要なFP化学挙動評価手法の開発として、各種測定装置によるCs吸着・溶出挙動を評価し、解析コードで利用可能なモデル式を構築した。
- 【計画】各種構造材へのCsの化学吸着挙動データ等の拡充とモデル化を行い、シビアアクシデント解析コードへの組込みを完了させ、FP性状予測シミュレーションを行う。

項目1(1)：一層の安全性・経済優位性を追求した原子力システムの研究

● 事故耐性燃料の開発：

- 【実績】規制側を含む国内全ステークホルダーがATFの開発に係る技術的議論をフラットな立場で行い、それぞれのミッションを前に進めることを企図した、JAEAによる運営の下、ATFプラットフォーム（ATF-PF）を立ち上げた。Cr-Zryの事故時酸化モデルを構築するとともに、Cr剥がれ挙動評価のための実験・解析手法を確立した。
- 【計画】ATFの重要事象に係る技術課題に関して、国内ステークホルダー間の連携・協力を推進し、継続的な技術情報の定期的更新並びに研究開発への反映を図る。挙動を解析可能なモデルを構築し解析コードに組み込み、国際協力で実施予定の大型バンドル試験等により妥当性検証を行う。

● その他：

- 【実績】軽水炉長期運転に資する圧力容器照射脆化評価のための試験炉照射基盤の確立と長寿命相当データの取得を実施し、基準策定に貢献した。再処理プラント継手材料の水素脆化への懸念に対して、水素脆化の可能性が低いことを明らかにし、プラント除染手順検討に貢献した。
- 【計画】ステークホルダーとの対話を通じたニーズ・シーズマッチング、開発した燃料材料関連技術の都度適用により、各種原子力システム、1F廃炉等のニーズへ継続的に対応していく。

項目2(1)1：原子力基礎基盤研究

- ✓ 軽水炉応力腐食割れ(SCC)を想定したすき間部における腐食挙動について実験および解析により評価し、すき間腐食の特徴的な挙動が発現する深さとすき間幅との関係を明らかにした。
- ✓ 大気腐食挙動を決定づける重要因子の一つである飛来海塩量を精度よくリアルタイムに取得可能な、新たな測定手法を確立した。
- ✓ 1F環境における材料腐食に関して、特に α 、 β 線が1F材料腐食に及ぼす影響を実験および解析により評価し、それぞれの放射線により溶液中に過酸化水素が生成され材料腐食が加速することを明らかにした。また、ラジオリシスを考慮した腐食挙動予測モデルを構築し、規制者や事業者を提供した。
- ✓ データ駆動設計と一括照射・連続測定により、1枚の試料で従来100枚分に相当する広範な組成評価を実現した。
- ✓ 従来の経験的手法では困難な複雑合金設計において、力学特性を戦略的に設計・評価できる非経験的な計算科学手法を確立した。
- ✓ 1F現地調査で示唆されたSRV(保温材)、差圧調整ライン(炭素鋼)、シールドプラグ(コンクリート)等からの漏えい経路におけるCsの各種構造材への化学吸着挙動を明らかにし、炭素鋼の錆への選択的な化学吸着等、線量分布の要因となり得る知見を事業者を提供した。

項目1(1)：一層の安全性・経済優位性を追求した原子力システムの研究

- ✓ 海外試験研究炉を用いた国産材料等の材料照射試験や燃料棒照射試験を実施するための照射試験スキームを新たに構築した。本スキームを活用して、若手技術者・研究者の海外派遣を実施し、照射／PIE技術の継承・人材育成を推進した。
- ✓ 冷却水損失事故条件でのCr-Zryの水素吸収及び脆化挙動を明らかにし、論文を公開した。

補足資料

中長期計画（抜粋）

社会的ニーズへの科学的貢献と原子力を支える基礎基盤となる中核的研究である核工学・炉工学、燃料・材料工学、化学・環境・放射線の研究開発を継続的に推進するとともに、原子力イノベーションに向けた革新的な原子力利用技術の創出につながる研究開発のDXを推進する。

具体的には、革新的原子力システム研究開発(デジタルツイン+)として、核特性、熱流動、燃料材料、環境動態、放射線輸送・計測等について、核熱カップリング等の機構論的なマルチフィジックスシミュレーション技術開発を進める。

これとあわせて、実験的な基礎データの拡充のためのスマート測定技術及び分析技術の開発並びに計算モデルの妥当性検証を行う。

これらの基礎基盤研究成果を活用して、軽水炉システムの安全性向上・核セキュリティに資する基盤技術の高度化、分離変換技術等の放射性廃棄物処理処分に関する基盤技術の高度化、東京電力福島第一原子力発電所事故の中長期的課題への対応、SMR等の革新炉開発の各分野の応用研究開発の加速に貢献する。

得られた成果を最大限に活用するために、研究開発成果を産業界や大学と連携してエネルギー利用以外の異分野連携等のスピンオフ研究にも適用し、原子力イノベーションの創出を目指す。

【実施内容：原子力の安全性向上のための研究開発】

「ステークホルダーとの対話を通じた軽水炉等の安全性・経済性向上に関する課題・技術開発ニーズを把握し、機構内外との連携による基盤技術開発及び適用性検証を実施」

アウトカムと想定研究テーマ ⇒ 今後事業者等との意見交換によりニーズ把握：

- 事故耐性燃料（ATF）
事業者による早期の実用化（最速でCrコーティング被覆管燃料の2030年代前半）を目指した開発への貢献として、原子炉内照射時や事故時のふるまい評価による燃料設計・安全性評価や燃料頑健性に係る知見等の提供（具体的な達成目標等の事業者等との意見交換実施中）
- 軽水炉高経年化対応
軽水炉の長期利用において課題となる事項への対応として、炉内構造物応力腐食割れや高照射量での照射特性等のメカニズム解明による知見の提供等
- 再処理機器材料
六ヶ所再処理施設再稼働時のリプレイス材選定への貢献として、長期間の腐食予測データ等の科学的根拠や知見の提供
- 軽水炉事故時のFP挙動評価
定期的な安全性向上における合理的なソースターム評価への科学的根拠や知見の提供

1. 事故耐性燃料（ATF）開発

- ✓ イオン照射等による代替照射技術開発による照射時ふるまい評価や、設計基準事故（冷却材喪失事故）時の被覆管破損メカニズム解明のための基盤研究を実施

2. 継続的な事業者等ニーズの把握による新規研究開始

- ✓ 事業者等に加えて、規制者・関連国内外研究所等との意見交換や、関連プロジェクト等への参加を通じてニーズ把握に努め、新規研究に着手することを目指す

【実施内容：原子力科学技術に係る基礎基盤研究】

「燃料材料のシミュレーション技術開発と実験的な基礎データ拡充のためのスマート測定技術開発並びに計算モデルの妥当性検証を行う。成果を軽水炉システムの安全性向上や分離変換技術に関する基盤技術の高度化、東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故の中長期的課題への対応、SMR 等の革新炉開発の各分野の応用研究開発の加速に貢献する。」

- 軽水炉システム材料腐食挙動：軽水炉システム特有の条件（放射線場、高温水、沸騰硝酸等）における腐食予測技術高度化（「環境」と「照射」の影響因子重畳）
- 原子炉構造材料の劣化挙動：高エネルギー粒子線照射下での材料への応力負荷条件における構造材特性変化等評価手法の開発（「照射」と「応力」の影響因子重畳）
- 燃料物性・FP挙動：窒化物燃料、燃料デブリ等の物性データベース拡充、軽水炉事故時後期や廃炉に係るFP化学挙動データベース拡充

【実施内容：1F廃炉支援】

「東京電力福島第一原子力発電所（1F）の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献するための基礎基盤研究として、燃料デブリの分析と事故事象の解析・評価による炉内状況の推定に資するためのデータ、モデル、知見等をCLADS等へ提供」

Advanced Technology Fuel研究計画

高安全性・高性能のAdvanced Technology Fuel（例：Gd/Cr添加5%超燃料ペレット・Cr-Zry被覆管）を2035年頃に工学実証段階に進めるため、**安全研究センター等との連携**に加え、開発した**研究基盤を結集**しメカニズム解明に基づく炉心・燃料ふるまい評価手法の高度化を加速

各ステークホルダー（事業者、NRA、等）活用：
審査や審査前検討で参照

連携テーマ例

ATFのLOCA時挙動評価

ATFふるまい解析

燃料物性DB構築

核熱・ふるまい連成解析

燃料溶融挙動解析

ATF性能・安全評価
レポート

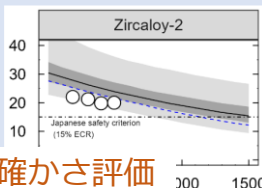
燃料ふるまい解析
コードパッケージ

燃料ふるまい
コード

照射試験DB
燃料物性DB



大規模実験



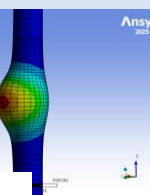
不確かさ評価

不確かさ

メカニズム



デジタルツイン+
ML/AI



データセット



分離効果実験

