



燃料・材料工学に関する研究

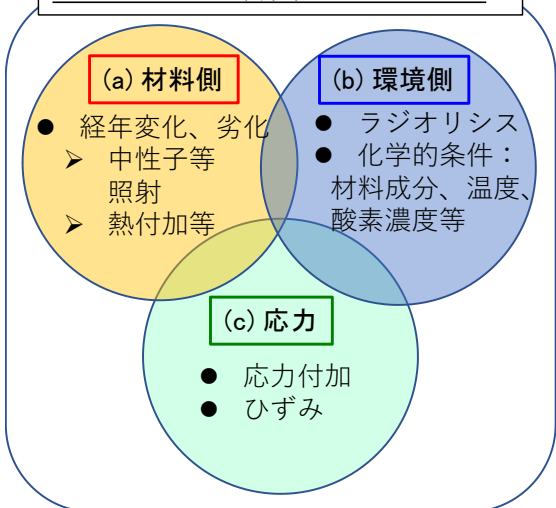
原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター
燃料・材料工学ディビジョン

燃料・材料工学ディビジョンの役割と目指すところ

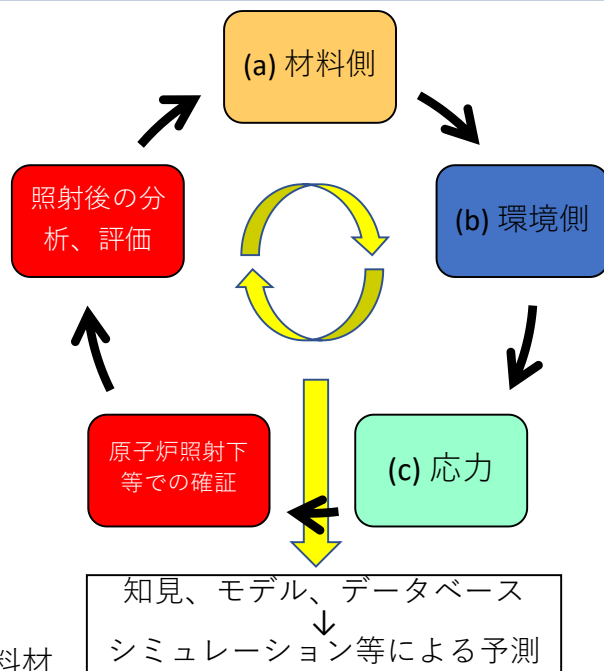
「燃料・材料基礎基盤」として、原子力の安全・革新利用を継続的に支える

- 基礎基盤技術開発・整備と高度化（主に「項目5」に対応）
- 研究成果創出と実装化への貢献：論文・特許、事業者等への知見等提供

原子力燃料材料の特性、ふるまいに与える影響因子と重畳効果



※図は応力腐食割れの例。原子力燃料材料には様々な因子が重畳的に作用する。



【課題認識】

- 照射試験炉、ホットセル等のインフラを用いた**実使用環境での確認・分析に多大な時間、コストを要する**（昨今の世界的インフラ縮小による追い打ち）
- シーケンシャルでの個別因子影響評価結果から**重畳効果を評価する困難性**
- 得られたデータの解析・評価技術高度化

第3期中計期間中に目指したもの：

- 単一の影響因子について、実環境をできるだけ模擬／再現した実験・解析技術基盤を開発・高度化
- 技術適用により、スピノフも念頭に置きながら、軽水炉安全性向上、分離変換技術、1F廃炉支援それぞれに対して、有用かつ革新的な成果を創出する

中長期計画（抜粋）

軽水炉等の安全性向上に資する燃材料及び機器、並びに原子力施設のより安全な廃止措置技術の開発に必要となる基盤的な研究開発を進める。具体的には以下。

- 事故耐性燃料用被覆管候補材料の酸化・溶融特性評価手法や、使用済燃料・構造材料等の核種組成・放射化量をはじめとする特性評価手法等を開発する
- 開発した技術の適用性検証を進め、原子力事業者の軽水炉等及び自らが開発する原子力システムの安全性向上に資する
- 研究開発の実施に当たっては外部資金の獲得に努め、課題ごとに達成目標・時期を明確にして産業界等の課題やニーズに対応した研究開発成果を創出する

研究テーマの選定

- 「事故の発生防止」、「事故の拡大防止」、「廃止措置の適切な実施」に係る研究テーマを設定
- 「基礎基盤研究（交付金で推進）」「実装化研究（外部連携・外部資金獲得を目指す）」を設定

達成目標

- 軽水炉シビアアクシデント（SA）時の最重要のFPであるセシウム（Cs）及びヨウ素（I）について、Cs-I-Mo-B-O-H系の化学挙動評価技術を開発し、データベースを構築する
- PWRや再処理施設事故時の重要なFPであるルテニウム（Ru）等の化学挙動解明に向けて、化学挙動を評価しデータベースを構築する
- 事業者により開発が進められている事故耐性燃料の設計・安全性評価の根拠データとして資することを目指して、照射時や事故時等における重要な事象についての基礎的な知見やデータを取得する

実施計画

		H27	H28	H29	H30	H31/R1	R2	R3
基礎 基盤	[事故拡大防止] A. FP化学挙動評価	a1.Cs-I-Mo-B-O-H系の化学挙動評価技術開発					a2. Ru, Srの 化学挙動評価	
実装化	[事故発生防止] B. 事故耐性燃料の開発 [外部資金]	b1.研究開発計画策定,基礎データ取得				b2.事故時挙動メカニズム評価, 候補材スクリーニング		

第3期中長期計画達成目標と成果

①項目4安全性向上

A. FP化学挙動評価

軽水炉等重大事故時のソースターム評価高度化において最重要である核分裂生成物（FP）化学挙動の解明とモデル化／データベース化、ソースターム解析手法（コード）としての実装

達成目標1：軽水炉シビアアクシデント（SA）時の最重要のFPであるセシウム（Cs）及びヨウ素（I）について、Cs-I-Mo-B-O-H系の化学挙動評価技術を開発し、データベースを構築する

- ✓ FP放出移行再現実験装置TeRRaを開発し、データがほぼ皆無で未解明のBWR（ホウ素制御材）における主要な化学挙動・現象として、**ホウ素がCsと化学的に作用し、Csを捕捉すること、一旦原子炉内に沈着したIを再蒸発させることを明らかにした（原子力学会論文賞受賞）。**
⇒ 事故時のFP放出タイミング考慮やSA後の放出考慮の必要性
- ✓ 原子炉冷却系等の温度領域で必要となる化学反応速度定数データセットを計算科学手法により整備し、**TeRRa実験結果で検証して、データベース（ECUME）を構築した（プレス発表）。**
- ✓ **産業界と共同して、データベースをSA解析コードSAMPSONに組み込み・実装化し、SA時の化学挙動評価を可能とした。（計画を超える成果）**

達成目標2：PWRや再処理施設事故時の重要なFPであるルテニウム（Ru）等の化学挙動解明に向けて、化学挙動を評価しデータベースを構築する

- ✓ 事故における空気侵入時に揮発して重大な環境影響を及ぼすRuについて、TeRRaによる事象把握と化学反応速度データベースの構築・検証を行い、ECUMEを拡充
- ✓ 収量が大きく内部被ばくの観点で最も重要なSrを対象として、事故時に生じ得る構造材等との化学反応を精査して事象再現実験を行い、これまで知られていなかった構造材料等に化学的に吸着することを明らかにした。

第3期中長期計画達成目標と成果

①項目4安全性向上

B. 事故耐性燃料の開発

複数の国内事業者による開発が進められている事故耐性燃料（ATF ※）の2030年代を皮切りとした国内商用炉への実装化支援として、国内開発とりまとめ・照射健全性確認支援（外部資金）、及び事故時挙動解明のための基礎基盤研究を実施

達成目標：事業者により開発が進められている事故耐性燃料の設計・安全性評価の根拠データとして資することを目指して、照射時や事故時等における重要な事象についての基礎的な知見やデータを取得する

- ✓ FeCrAl-ODS被覆管の冷却材喪失事故（LOCA）時の酸化挙動を評価し、酸化速度定数が単純な温度依存性を示さないことを明らかにした。
⇒ 酸化挙動メカニズムを解明した上でモデル化する必要性
- ✓ Crコーティング被覆管の高燃焼度までの長期照射時やLOCA時の堅牢性確認（国際プロジェクトにおいてもその影響評価の重要性が認識）に資するため、高照射量までのイオン照射と微細組織観察、事故時模擬の高温試験等を行い、照射誘起の介在物生成や、高温酸化に関する挙動データ取得を実施した。
- ✓ Crコーティング被覆管の重大事故時における破損・溶融評価手法構築を目指して、産業界等と協力し、物性モデルを構築して事故解析コードに組み込むことにより、事故時挙動を評価する手法を整備した。

（※）Crコーティング被覆管、FeCrAl-ODS被覆管及びSiC被覆管

目的

Cs及びIの化学挙動を明らかにし、化学挙動を評価可能なデータベースを構築する。
データベースをSA解析コードSAMPSONに組み込み、実装化する。

構造材等との化学反応モデル

- 現行のSA解析コードに直接組み込み



実験によりモデル整備

Cs化学
吸着

化学挙動データベースECUME

Reactions	A (cm ³ /mol-s)	n	E _a (J/mol)
IO + H → O + HI	1.1E+17	-1.57	1.75E+04
IO + H ₂ → OH + HI	5.7E+02	3.27	9.07E+04
IO + OH → O ₂ + HI	1.6E+09	0.99	2.89E+05
HOI + O → O ₂ + HI	2.0E+12	0.14	2.39E+05
HOI + H ₂ → HI + H ₂ O	1.1E+17	1.18	1.83E+05
I + O + M → IO + M	1.1E+17	2.00	0.00E+00
CSiOH + CSiOH + M → CSi ₂ O ₂ H ₂ + M	1.4E+16	2.00	0.00E+00
IO + IO → O ₂ + I ₂	1.5E+00		
HOI + Cs → OH + CsI			

sample

Cs-I-B-Mo-O-H系

Cs-B-O、
Cs-Si-Fe-O化合物

熱力学データ

- 新たなCs化合物を対象



実験や第一原理計算を用いた解析等によりデータ取得・整備

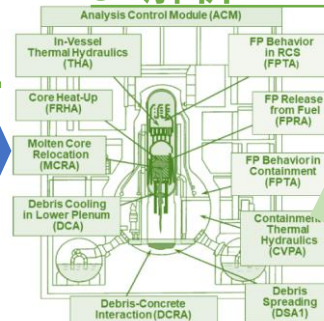
化学反応速度定数データ

- 素反応を対象

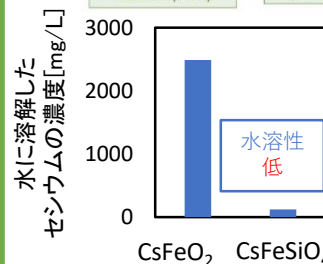


第一原理計算を用いた解析等によりデータ取得、再現実験装置TeRRa（写真）で検証

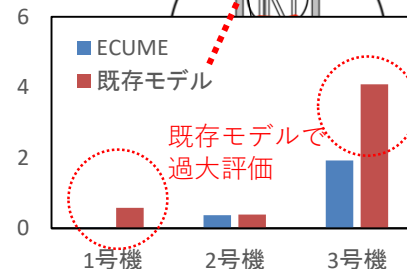
SA解析コード（SAMPSON等）



1F事故解析：
圧力容器内部のCs分布



初期インベントリに対する割合



予測解析例：

圧力容器上部構造材料に吸着した水溶性の低いCs量

成果

- 1F事故で重要性が明らかとなったホウ素の影響や鋼材への化学吸着挙動等のCs及びIの化学挙動を明らかにし、鋼材との化学反応モデル、化学反応速度定数データ、熱力学データから構成されるデータベースECUMEを構築した。
- データベースをSA解析コードSAMPSONに組み込み実装化することにより、SA時のCsの化学挙動評価を可能とし、SA後も炉内や格納容器内に残存するCs量の評価のための手法整備に貢献した。

令和3年度計画

軽水炉を含めた原子力施設の継続的な安全性・信頼性の向上に資するため、以下を実施する。

- 軽水炉等過酷事故時の原子炉内外の核分裂生成物沈着挙動評価・ソースターム評価技術高度化のために、格納容器等のより低温領域における化学挙動データを取得して公開済みの核分裂生成物化学挙動データベースを更新する。
- 事故耐性燃料被覆管候補材料の事故時高温条件での挙動評価及び通常運転時の健全性に関わるデータの取得を完了する。

令和3年度実績（見込み）

【目標を達成】

- 格納容器構造材へのCs 化学吸着挙動等をモデル化してSA 解析コードへ組み込み、関連実験により検証することにより、適用性を確認した。
- 事故耐性燃料について、CrコーティングZr合金の事故時におけるCrとZrの共晶に関する基礎データを取得し、SA解析コードに組み込むことにより、事故時溶融挙動評価手法の整備に貢献した。また、FeCrAl-ODS鋼のLOCA試験後の破損形態に関するデータ等を取得した。

中長期計画（抜粋）

核データ、燃料・材料の劣化挙動、放射性核種の環境中挙動等の知見を蓄積し、長寿命核種の定量分析や核燃料物質の非破壊測定等の測定・分析技術を開発する。また、核特性、熱流動、環境動態、放射線輸送、耐震評価、シビアアクシデント時の炉内複雑現象等のモデル開発のための基礎データの拡充並びに信頼性及び妥当性検証のための測定手法や分析手法の開発を進め、データベース及びコンピュータシミュレーション技術の開発を進める。

この研究を進めることにより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、分離変換技術等の放射性廃棄物処理処分、軽水炉を含む原子炉技術高度化、環境影響評価及び放射線防護の各分野に貢献する。

達成目標

- 原子力構造材料の劣化挙動に与える因子・影響を明らかにし、挙動予測モデルを構築する
- ターゲット窓材等ADS構造材の設計成立性評価に向けた劣化挙動評価技術開発として、高温領域溶融鉛ビスマス中での構造材の腐食挙動や強度特性に係る特性データを取得しモデルを構築する
- 窒化物燃料基礎特性データを取得・評価し、ふるまい解析コードに反映する
- 窒化物燃料製造の枢要な要素技術を開発・実証し、実プロセスの技術的成立性を評価する
- 再処理プロセスにおける各種環境重畳条件下での腐食挙動を評価する実験技術を開発する
- 実炉照射環境模擬条件下における材料損傷診断／予測手法の確立に向けて、材料欠陥・微細組織の直接観察／測定／計算科学技術を開発する
- ADS等燃料設計や安全評価の根拠となるデータ取得等に資することを目指して、超高温溶融加熱手法や先進的な融点測定手法等を開発、装置を製作して運用する
- 軽水炉重大事故時のFP化学挙動を評価可能な装置及び分析手法を開発する

中長期計画と実施計画

②項目5基礎基盤研究

実施計画

年度	H27	H28	H29	H30	H31/R1	R2	R3
A.原子力構造材料の劣化挙動評価	a1.低温-長時間熱時効材SCC試験、 粒界腐食進展に及ぼす溶液組成等腐食環境の影響調査			a2.原子炉材料の照射劣化挙動予測モデル、 再処理機器腐食予測モデルの開発			
B.ADS基盤研究	b1.ターゲット窓材候補材の照射試験、 高温Pb-Bi中材料腐食試験			b2.系統的な材料特性データ取得、Pb-Bi中酸素濃度検出・制御技術開発			
C.MA窒化物燃料製造技術				ADSの機器開発、プロセス設計へ反映			
	c1.燃料模擬物質等機械特性データ取得、先進燃料ふるまい解析コード開発			c2.燃料模擬物質等基礎特性データ取得、燃料製造技術開発			

- A.～C.の研究に共通基盤的に必要な技術開発として、「D.先進的な分析・測定手法や計算科学的手法、軽水炉条件や再処理プロセス機器の要因重畳環境を模擬した実験的評価手法の開発」も実施
- B.及びC.の成果は「分離変換技術開発研究（④項目7：減容化・有害度低減）」に反映。当該反映成果分の報告は「分離変換技術開発研究」にて実施。

第3期中長期計画達成目標と成果

②項目5基礎基盤研究

A.原子力構造材料の劣化挙動評価

軽水炉の高経年化対策、再処理施設のプロセス機器材料の腐食対策、海水混入商用炉再稼働のための健全性評価等に対して根拠となる基礎基盤的な知見・データを提供することを目指し、各種原子力材料の劣化挙動を解明

達成目標：原子力構造材料の劣化挙動に与える因子・影響を明らかにし、挙動予測モデルを構築する

✓ 再処理プロセス機器の腐食挙動評価：

使用済燃料溶解液である高濃度硝酸の成分（ HNO_3 , NO_2 ）により、溶解液に含まれる**ネプツニウム（Np）が再酸化**されて腐食性の高い高次イオン状態として保持され、**材料の腐食を加速**することを明らかにした。また、**減圧沸騰等の再処理プロセスにおける影響因子を評価し、Np再酸化の効果と併せて腐食量予測モデルを構築し、規制者や事業者**に提供した。

✓ 軽水炉圧力容器鋼の応力腐食割れ（SCC）発生挙動解明への貢献：

炉内での長時間の高温環境がSCC発生に与える影響を超長時間（10万時間）の熱時効試験等により評価し、冷間加工材に長時間熱時効が加わるとSCC発生感受性が上昇すること、その原因の一つは塑性変形機構が変化することを明らかにして物理モデルを構築した。

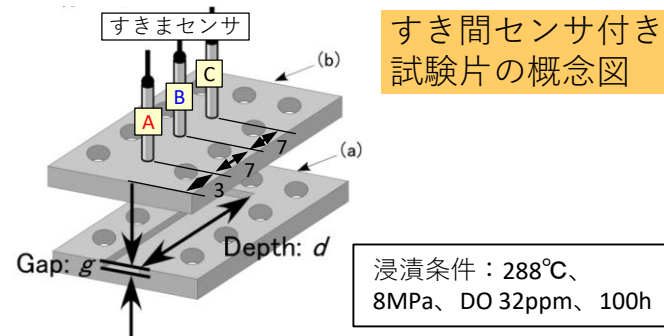
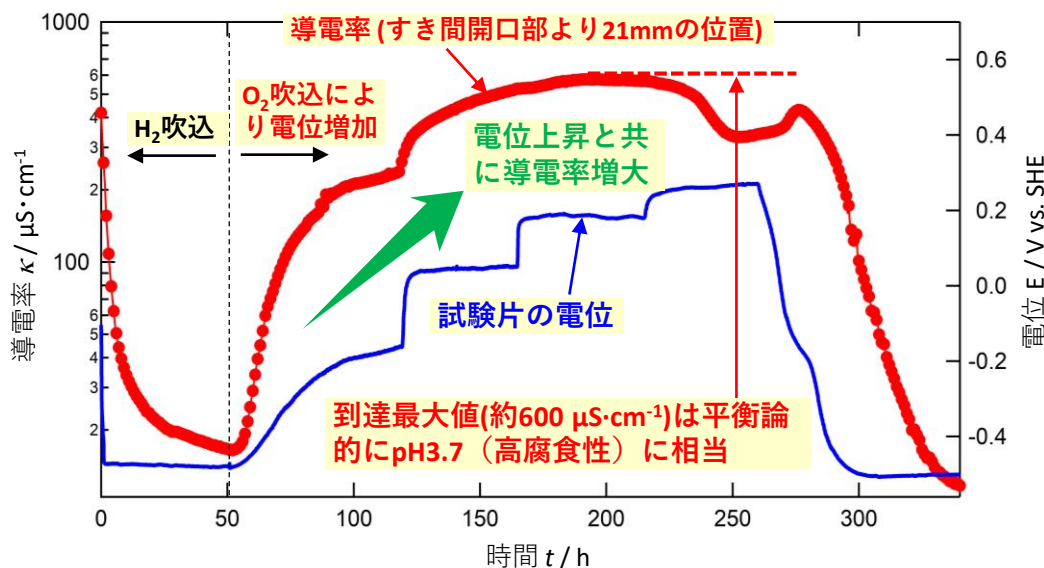
中長期計画以外の成果

- ✓ 海水混入商用炉の圧力容器のすき間部で想定される腐食性イオンによるすき間腐食挙動解明に向けて、**すき間部水質をin-situで測定可能なセンサーを開発し、すき間部水質とその時間変化はバルク水質と異なるなど、腐食環境が根本的に異なること**を明らかにした。

【目的】 軽水炉環境中材料のすき間（割れ）内部の腐食環境を明らかにする。

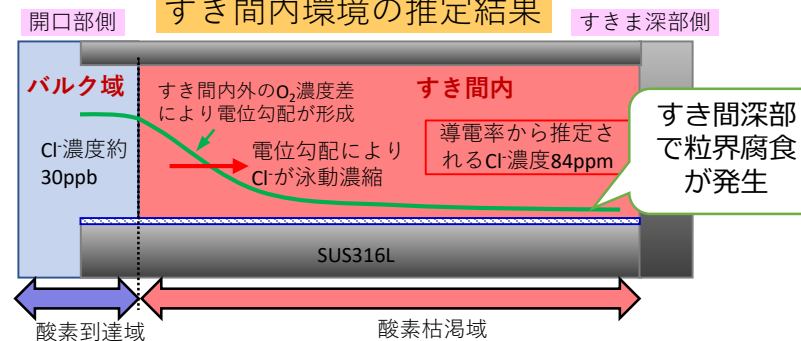
試験方法：開発したすき間センサを用いて高温高压水中におけるステンレス鋼すき間内部の腐食環境に及ぼす電位の影響を調べる。

すき間センサによるすき間内in-situ測定結果
(すき間内部の溶液導電率、電位)



すき間センサ付き
試験片の概念図

すき間内環境の推定結果



【成果】 すき間内部の導電率と電位の関係をin-situで定量的に捉えることに成功し、すき間深部は粒界腐食や粒界割れが発生しやすいことを明らかにした

【外部資金】 中部電力との2件の共同研究（研究資金受領）（H28-29, H31-R1）

【学術論文】 腐食の専門誌に論文2報投稿(うち1報は掲載済み：相馬ら、材料と環境,67(2018)381)

第3期中長期計画達成目標と成果

②項目5基礎基盤研究

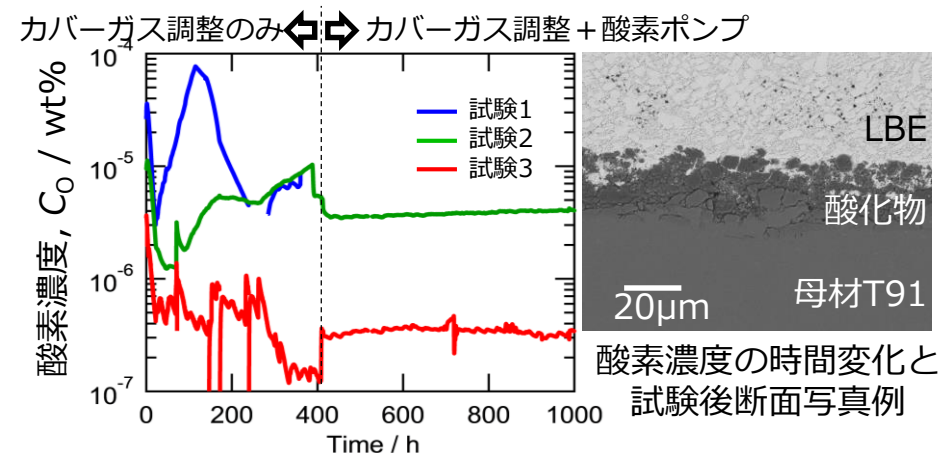
B.ADS基盤研究

ADSの設計成立性評価に資するためのターゲット窓材や被覆管等構造材の劣化挙動評価技術開発として、腐食挙動モデル構築や照射特性データの拡充を実施

達成目標：ターゲット窓材等ADS構造材の設計成立性評価に向けた劣化挙動評価技術開発として、高温領域溶融鉛ビスマス中での構造材の腐食挙動や強度特性に係る特性データを取得しモデルを構築する

- ✓ 溶融鉛ビスマス環境中でのターゲット窓材候補材（T91などF/M鋼）等構造材の腐食挙動評価として、**表面酸化保護膜の形成に与える酸素濃度の影響解明等により知見を蓄積し、モデルを構築**した。構築したモデルを用いて、**腐食抑制のための最適酸素濃度を評価・提示**した。
- ✓ 溶融鉛ビスマス中でのターゲット窓材候補材の腐食特性及び強度特性に係るデータを拡充した。また、ターゲット窓材候補材の照射特性評価のため、イオン照射試験を中心に照射データを拡充し、窓材のミクロ組織発達の予測モデル構築に資するデータを整備した。

【目的】 ADSにおける構造材料の腐食を低減するため、溶融鉛ビスマス共晶合金（LBE）中における材料の腐食挙動を解明し、腐食抑制策について検討する。

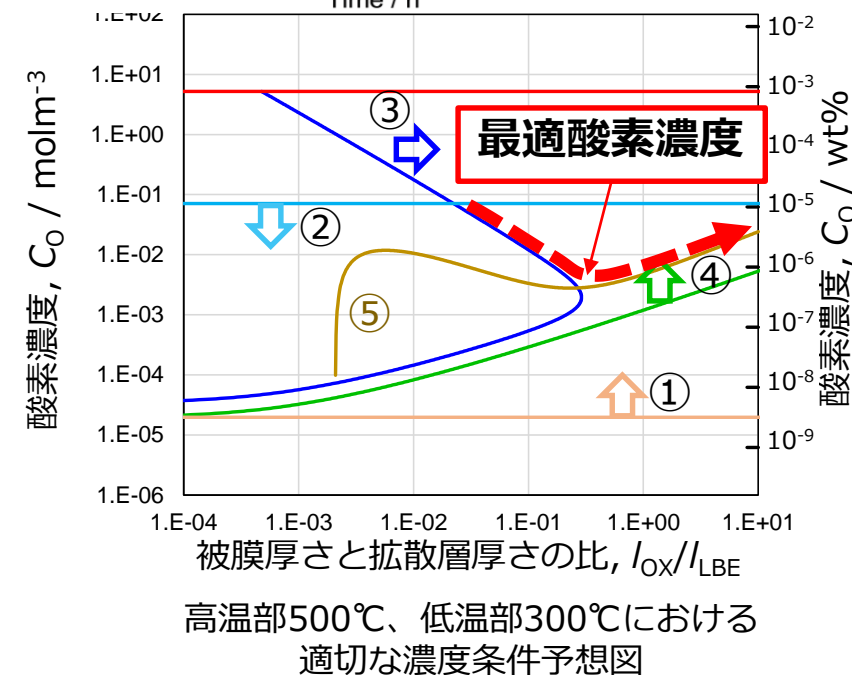


カバーガス調整と酸素ポンプを併用することで、LBE中の酸素濃度を精度よく制御し、T91およびSUS316Lの腐食試験を実施

腐食モデルを作成し、以下の条件から最適酸素濃度を予想（従来は①、②の条件のみ考慮）

- ① Fe_3O_4 が安定して存在できる濃度以上
- ② 低温部で PbO が析出する濃度未満
- ③ LBE拡散層中で酸化物が析出しない濃度（沈殿被膜ではなく緻密被膜が生成）
- ④ 酸化被膜が時間とともに厚くなる濃度
- ⑤ 高温部での腐食と低温部での析出の合計が最小となる濃度（腐食と流路閉塞の低減）

【成果】 溶融鉛ビスマス共晶合金中における材料腐食を低減するための、目標となる酸素濃度条件を提示した。



【学術論文】 JAEA-Researchに投稿中

第3期中長期計画達成目標と成果

②項目5基礎基盤研究

C.MA窒化物燃料製造技術

ADS用窒化物燃料開発として、燃料ふるまい解析手法の整備のための物性データベースや現象記述モデル構築、実製造プロセス技術成立性評価のための重要な要素技術開発を実施

達成目標 1：窒化物燃料基礎特性データを取得・評価し、ふるまい解析コードに反映する

- ✓ 特性データ取得・評価、データベース拡充：
模擬燃料のヤング率、熱伝導率等各種物性の温度依存性等のデータ取得・評価、Cm含有窒化物燃料ペレットを用いた室温での欠陥・He蓄積によるボイドスエリングと高温での回復等の挙動の解明等を行い、既存のデータと併せて窒化物燃料物性データベースを拡充し、web版を公開した（プレス発表）。
- ✓ 窒化物燃料用ふるまい解析コードの整備：
軽水炉燃料ふるまい解析コードFEMAXIをベースとして、窒化物燃料解析モジュールや種々の専用モデルをコーディングして感度解析を行い、PCMIが課題となることを明らかにした。

達成目標 2：窒化物燃料製造の重要な要素技術を開発・実証し、実プロセスの技術的成立性を評価する

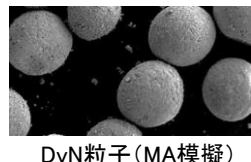
- ✓ MA含有燃料製造に適した外部ゲル化法による粒子作製の基本技術開発を行い、良好な球形の粒子と高純度（低酸素濃度）の窒化物作製条件を確立するとともに、自前の技術習得とTRU実証装置の検討材料とするためのフード内設置型装置を製作した。
- ✓ Zr母材ペレットの焼結密度制御について、緻密な組織が得られる微粉碎条件と気孔率制御のための気孔形成材・添加濃度を決定し、Pu及びNpを用いた試験で実証して実プロセスで使用可能とした。
- ✓ ¹⁵N濃縮窒素ガスの経済的利用技術について、閉じた系で循環精製利用する実験室規模の実証試験機を試作し、その原理が実プロセスに利用可能なことを実証した。

主な成果：MA窒化物燃料製造技術開発

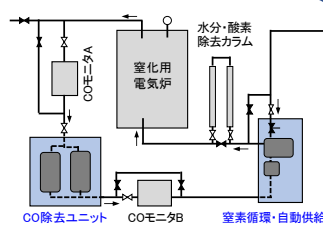
②項目5基礎基盤研究

【目的】 MA高含有の核変換用窒化物燃料製造を実現するための基盤技術開発と、燃焼挙動を予測するためのふるまい解析コード（モジュール）開発、並びに物性データベース拡充

燃料製造技術



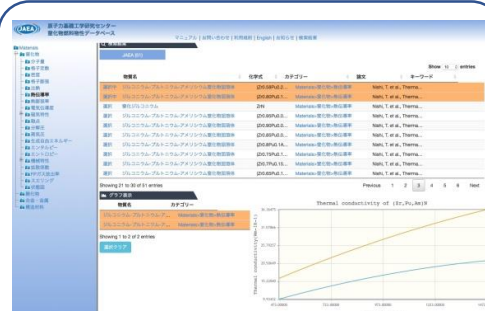
DyN粒子(MA模擬)


気孔率を制御した
(Pu,Zr)Nペレット

窒素循環精製システムの
概念図と実証試験機

- 外部ゲル化法による良好な球形状の高純度窒化物粒子の作製条件を確立
- ペレット焼結について、緻密組織かつ気孔形成材による気孔率制御をTRUで実証
- 窒化時の $^{15}\text{N}_2$ ガスの経済的利用（閉じた系での循環精製利用）の実証試験機を製作し、実用化可能なことを実証

物性データベース (DB)



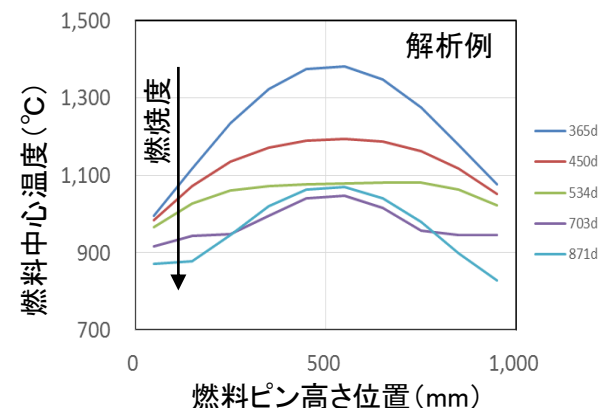
web版 <https://nfpdb.jaea.go.jp>

- 熱伝導率や熱膨張率等諸物性の温度・組成依存性を関数式及びグラフで表示
- MA高含有燃料に特有な、格子欠陥やHe蓄積・高温放出の挙動データを取得

ふるまい解析コード（モジュール）

燃料ふるまい解析コードFEMAXI用の
窒化物燃料解析モジュール

- 燃料内温度分布、燃料寸法、ピン内圧、被覆管応力等を燃焼度の関数として解析
- 現状用いているモデルと感度解析の結果をJAEA-Data/Codeにとりまとめ公開



- 【成果】 ① 実燃料製造の枢要な要素技術（ゲル化、焼結密度制御、 $^{15}\text{N}_2$ ガス経済的利用）を開発・実証
② 燃料物性DBのweb版を公開するとともに、新規データをふるまい解析モジュールに順次反映

【研究開発報告書】 柴田裕樹他、「ADS用窒化物燃料ふるまい解析モジュールの開発」 JAEA-Data/Code 2019-023（2020年3月）。
【プレス発表】 「核変換用燃料のふるまい予測に必要な物性データベースを公開」（R1.10.23付け日刊工業新聞他に掲載）
【アウトカム】 物性データベースとふるまい解析コード整備によりADS燃料設計を可能とした。実燃料製造の枢要な要素技術の開発・実証により、準工学規模での研究開発へ進む礎とした。

第3期中長期計画達成目標と成果

②項目5基礎基盤研究

D.先進的な分析・測定手法や計算科学的手法、軽水炉条件や再処理プロセス機器の要因重畳環境を模擬した実験的評価手法の開発

材料／環境／応力要因が重畳した条件下での原子力燃料材料挙動解明により、より不確かさが小さく科学的根拠が充実した知見・データを取得して安全性評価等へ役立てることを目指した実験・解析手法の開発と継続的高度化を実施

達成目標 1：再処理プロセスにおける各種環境重畳条件下での腐食挙動を評価する実験技術を開発する

- ✓ 水溶液への放射線（ γ 線）照射によるラジオリシス、溶液中の放射性溶存イオン種（Np, Pu）、沸騰・減圧硝酸等のプロセス条件等の各種環境因子が重畳した条件下で腐食データを取得可能なホットセル対応技術を開発し、系統的なデータ取得を可能とした。本技術を用いて商用再処理機器の使用済燃料溶解槽材料の長期的な腐食予測を行い、事業者や規制者に提供した。

達成目標 2：実炉照射環境模擬条件下における材料損傷診断／予測手法の確立に向けて、材料欠陥・微細組織の直接観察／測定／計算科学技術を開発する

- ✓ 電子線照射下での欠陥直接観察と画像解析による多量データ解析を組み合わせた手法、陽電子消滅測定による物質中の欠陥挙動評価技術等を開発した。これらの手法・技術を適用し、鉄鋼中の照射欠陥の動的挙動の解明、多様な用途が期待されるイオン液体の新たな再処理溶媒としての可能性発掘等を行った。
- ✓ 電子状態の計算シミュレーションによって合金化による材料の「割れにくさ」等の機械特性への影響を評価する手法を構築し、マグネシウム合金の添加元素最適化への指針を提示した。

第3期中長期計画達成目標と成果

②項目5基礎基盤研究

D.先進的な分析・測定手法や計算科学的手法、軽水炉条件や再処理プロセス機器の要因重畳環境を模擬した実験的評価手法の開発 （続き）

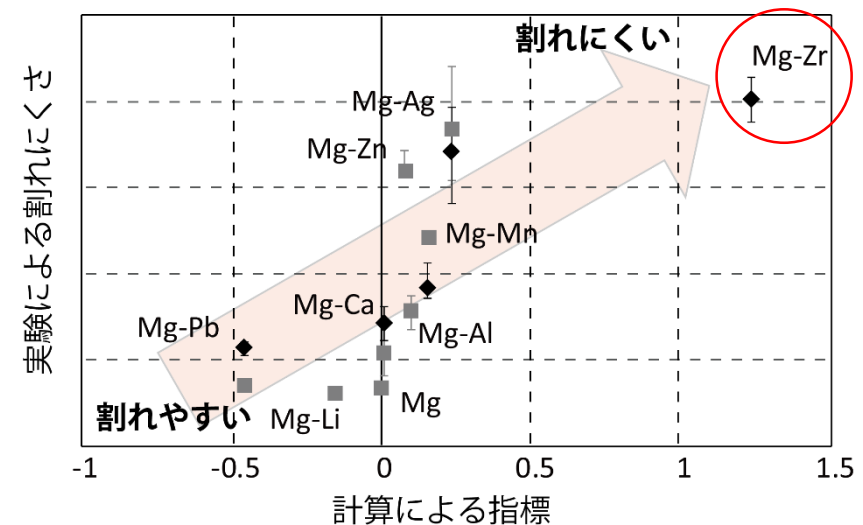
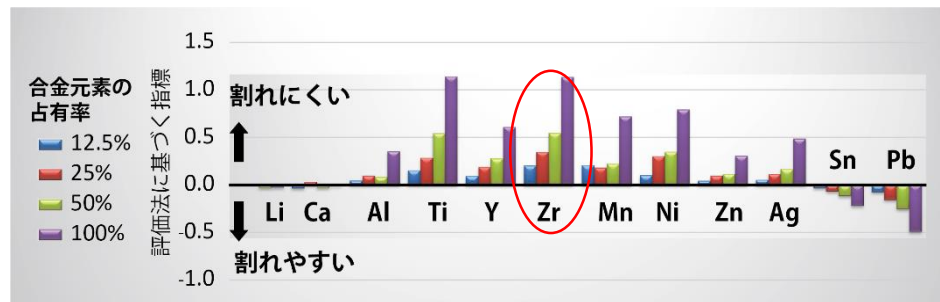
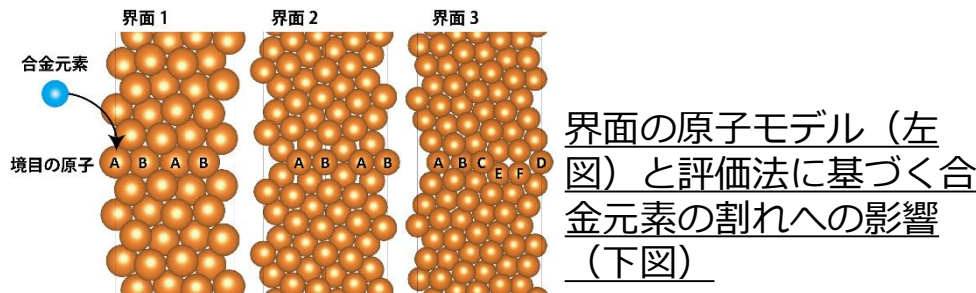
達成目標 3：ADS等燃料設計や安全評価の根拠となるデータ取得等に資することを目指して、超高温溶融加熱手法や先進的な融点測定手法等を開発、装置を製作して運用する

- ✓ レーザー局所加熱による無容器・極短時間（0.1秒）の融点測定装置と評価手法を開発し、3000℃以上の超高温融点物質の融点評価を±50℃前後の誤差で評価可能とした。
- ✓ 高出力集光加熱による温度勾配下・任意雰囲気での加熱装置を製作し、種々の性状の模擬燃料デブリを作製可能とした。

達成目標 4：軽水炉重大事故時のFP化学挙動を評価可能な装置及び分析手法を開発する

- ✓ 熱流動、構造材料等条件が複雑に重畳して影響するFP放出・移行挙動において、最も大きな影響を与えるFP化学挙動を評価するため、炉心溶融から格納容器への移行プロセスにおける化学挙動を再現する装置（TeRRa）と、FP化学形を直接測定可能な一連の分析装置を整備し、軽水炉重大事故時のFP化学挙動データベース構築を可能とした。

【目的】電子状態の計算シミュレーションによって合金化による機械特性への影響を評価し、機能向上をもたらす合金元素を探索する方法を構築する。



計算による指標と実験の割れにくさの関係

- 【成果】① 合金元素近傍の電子状態に基づくシミュレーションにより、材料の「割れにくさ」を評価し、機能向上をもたらす合金元素を探索する計算手法を開発
- ② 軽量だが割れやすい特徴を持つマグネシウムに着目し、本手法を用いてジルコニウムなどの合金元素が割れにくさを向上できることをシミュレーションするとともに、実験結果とも良い相関性を有することを提示

【学術論文】 T. Tsuru, et al., “Interfacial segregation and fracture in Mg-based binary alloys: Experimental and first-principles perspective”, Acta Materialia 151 (2018) 78-86. [\(IF=6.036\)](#)

【プレス発表】 「電子状態の計算シミュレーションで産業利用の高い合金を設計する」（H30.5.14付け日刊工業新聞他に掲載）

【アウトカム】 合金開発に係る時間・コストの大幅な削減と希少元素を用いない低コストな合金開発への応用が期待

令和3年度計画

燃料・材料工学研究では、原子力構造材料の劣化挙動予測モデル開発について、低温熱時効の影響を考慮した機構論的応力腐食割れ発生モデルを構築する。また、腐食挙動データ取得及び腐食影響因子解析と実験データとの比較に基づいた腐食量評価モデルを完成させる。窒化物燃料製造に関する基盤研究として、フード設置型のゾルゲル法による粒子作製装置を製作する。

令和3年度実績

【目標を達成】

- 原子力構造材料の劣化挙動予測モデル開発として、応力腐食割れ発生挙動に及ぼす低温熱時効の影響に関する陽電子消滅等のデータを取得して妥当性を検証し、劣化挙動予測モデルを構築した。
- すき間部や放射線環境下における腐食挙動データ取得、及びラジオリシス解析等を用いた腐食影響因子解析を行い、実験データとの比較により妥当性検証した腐食量評価モデルを開発した。
- 窒化物燃料製造に関する基盤研究として、燃料模擬物質やウランを用いた粒子作製試験を行うため、ゾルゲル法による粒子作製装置を構築した。

1F事故への対処

1F廃炉に向けたデブリ取出し、格納容器や廃棄物保管容器の健全性評価の根拠となる基礎基盤的な知見・データ・手法を提供するための研究を実施

達成目標 1：1F特有の環境下における材料の劣化（腐食）挙動を解明する。

- ✓ 1F特有の環境が材料腐食挙動に与える影響の解明に向けて、それぞれ、ガンマ線照射下、液面揺らぎ等による気中と水中に交互に晒される状態（気液交番環境）、廃ゼオライト吸着塔内におけるゼオライト等が腐食に与える影響を明らかにした。
- ✓ 事故時に注入された海水が混入した状態でラジオリシス（放射線分解水質）が生じる因子が重畳した系での影響を評価するモデルを構築し、データベースとして整備した。
- ✓ これら1F特有環境下での腐食因子影響を踏まえ、1F格納容器等の長期的な健全性（耐腐食性）の担保に貢献するため、廃棄物低減等を達成可能な環境負荷の小さい防錆剤を考案・開発した。

達成目標 2：1F燃料デブリ受入・分析に備え、分析体制と一連の分析スキームを構築する

- ✓ 炉心やMCCI等の未照射ウラン模擬デブリを種々の溶融加熱手法で作製し、生成相、組織、硬さ、FP化学形等の基礎性状データを収集・整理し、IRID等を通じて提供した。
- ✓ 茨城地区への1F燃料デブリ受入・分析に向けて、東電、NDF、CLADSと調整しつつ原科研内横断的チームを構築し、一連の分析スキーム（加工、固体分析、完全溶解、元素分離、化学・同位体分析）を確立した。

1F事故への対処（続き）

達成目標 3：1F炉内に多量に残留する放射性セシウムの性状を予測する

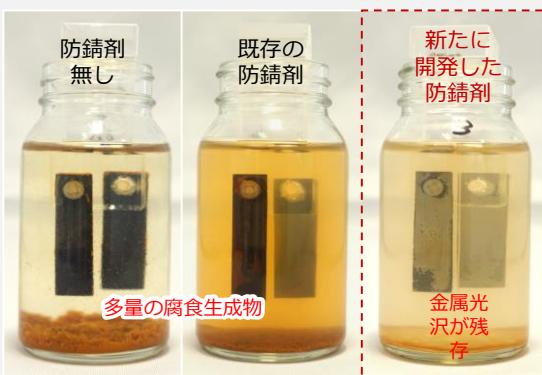
- ✓ セシウム（Cs）が構造材と化学反応を生じて吸着する現象のメカニズムを解明し、モデルを構築した。
- ✓ 構築したモデルを含めて核分裂生成物（FP）の化学挙動に係るデータベースを構築するとともに、モデル等を解析コードへ組み込み、1F圧力容器内構造材料に化学的に吸着したセシウム（Cs）について、水溶性や安定性等の性状を予測した。

【目的】 1F 格納容器内部環境に特有の懸念点を解決し、一般鋼材にも適用可能な防錆剤を考案・開発する

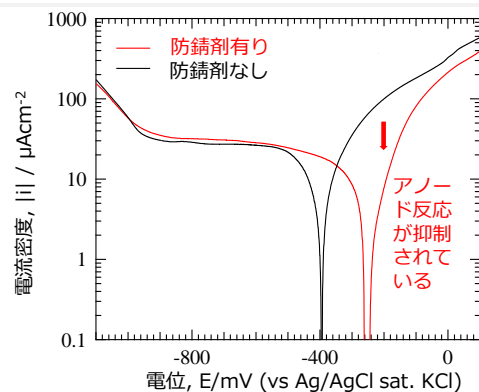
1F環境を模擬した環境で炭素鋼の腐食を抑制する既存の防錆剤が検討されてきたが、**水処理工程に影響する・排水基準が著しく低い・放射線照射で性能が低下する等の1F特有の懸念**が多く現場での使用が現実的ではなかった。



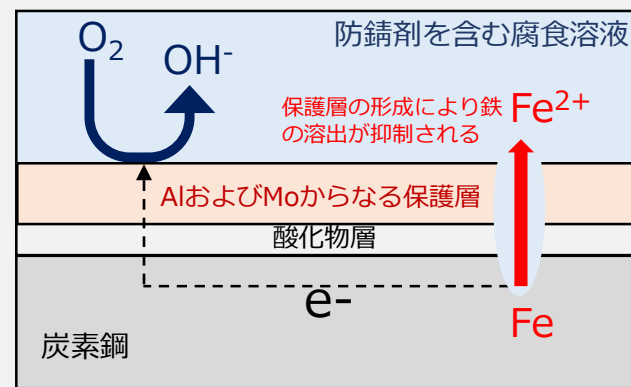
1F特有の懸念に該当しない薬品として乳酸Alおよびモリブデン酸Naの混合塩をこれまでの防錆剤開発の知見に基づいて考案し、腐食試験や電気化学・表面分析より腐食抑制効果や腐食抑制メカニズムを解明した。



100h腐食試験後の外観写真



防錆剤の有無で変化する動電位分極曲線



腐食抑制メカニズム

【成果】電気化学および表面分析結果より、開発した新規防錆剤の腐食抑制メカニズムを解明し、**既存の防錆剤では腐食を抑制できないような少量の添加でも炭素鋼の腐食を低減できる新規防錆剤を考案**した。本防錆剤は排水基準への抵触や放射線下での性能低下の懸念が無く、**一般鋼材への適用においても利点を有する**

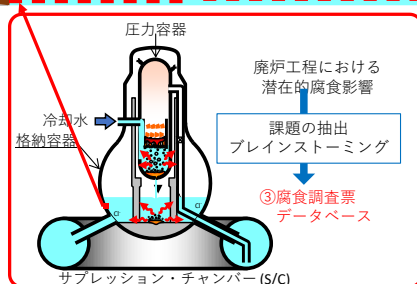
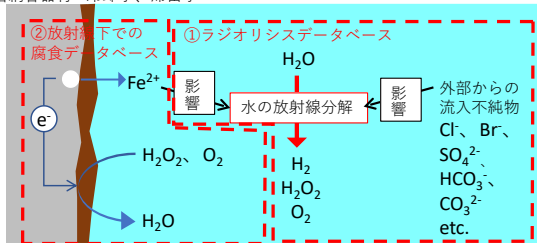
【特許】日本原子力研究開発機構，大谷恭平ら，水系における防食剤および防食方法，特許6932409，2021-09-08。

【アウトカム】1F格納容器等の長期的な健全性（耐腐食性）の担保に貢献。一般鋼材の防錆剤としても適用可能。

【目的】 1Fに代表される高い放射線の環境における腐食に関して、「放射線環境下での腐食データベース」を構築する。

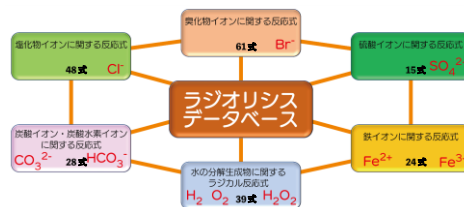
放射線環境下にある1F格納容器材(主材料は炭素鋼)の腐食模式図と放射線環境下での腐食データベースの概要

格納容器材 冷却水、滞留水



「放射線環境下での腐食データベース」

- ①海水混入系ラジオリシスデータベース
(水の放射線分解(以下、ラジオリシス)のデータをまとめたデータベース)
- ②放射線環境下腐食データベース
(放射線照射下での鉄を主成分とする合金の腐食データをまとめたデータベース)
- ③腐食調査票データベース
(1F廃炉工程における潜在的腐食影響に関して検討した結果をまとめたデータベース)



海水混入系ラジオリシスデータベースとして、合計179の反応式および反応速度定数を文献調査により取得し、とりまとめた。一部の反応式に関しては、実験結果をもとに最適化した。

放射線環境下腐食データベースでは、環境条件(温度、照射条件など)と腐食速度や腐食電位を一覧表にまとめた。また、喫水線部での炭素鋼腐食への照射影響、オゾンの影響、ホウ酸塩を含む水中での炭素鋼の腐食への放射線影響に関して新たにデータを取得した。

項目	温度(℃)	照射線量率(Mr/h)	照射時間(h)	腐食速度(mm/a)	腐食電位(V/NHE)	備考
1	25	0.1	1	0.01	-0.45	炭素鋼
2	25	0.1	1	0.02	-0.45	炭素鋼
3	25	0.1	1	0.03	-0.45	炭素鋼
4	25	0.1	1	0.04	-0.45	炭素鋼
5	25	0.1	1	0.05	-0.45	炭素鋼
6	25	0.1	1	0.06	-0.45	炭素鋼
7	25	0.1	1	0.07	-0.45	炭素鋼
8	25	0.1	1	0.08	-0.45	炭素鋼
9	25	0.1	1	0.09	-0.45	炭素鋼
10	25	0.1	1	0.10	-0.45	炭素鋼

【成果】放射線環境下での腐食トラブルの発生可能性、対策等を検討するうえで有用な情報である、ラジオリシスおよび放射線照射下での腐食試験データをデータベースとしてとりまとめた。さらに、1Fの廃炉工程において、潜在的腐食影響を腐食調査票データベースとして整理した。これは、長期にわたる1F廃止措置において、保全対策の根拠や安全対策立案へつながることが期待されるものである。

【外部資金】 H29-H31(R01)文科省英知事業、R02-R04英知事業CLADS補助金

【学術論文】 佐藤智徳 他、「放射線環境下での腐食データベース」 JAEA-Review 2021-001

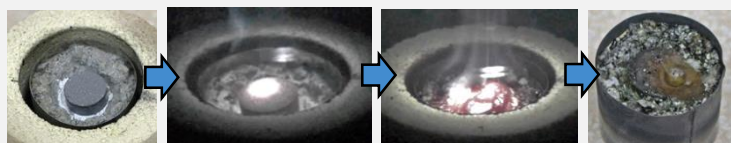
【アウトカム】 本データベースは、1Fでの腐食環境評価だけではなく、汚染水の保管容器の腐食環境や、水の放射線分解により発生する水素量の評価などにも応用が期待される。また、放射線環境下にある鉄系合金の腐食評価に幅広く応用できる。2021/10プレス発表。

【目的】 1F廃炉支援のため、基礎工センター/原科研のインフラと技術を活用し、模擬試験により燃料デブリ性状に関する知見を取得するとともに、1Fデブリサンプル分析のための体制と技術を確立する

CLADS若手研究者を全面サポートし研究成果抛出

① MCCI生成物中のFP化学形データ取得

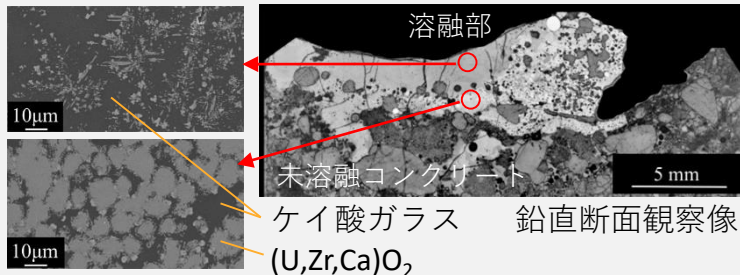
コンクリート片上で模擬FP (Sr, Ba等) を添加した炉心材料 (U, Zr, SUS, B) を集光加熱により熔融・固化し、断面組織・生成相を分析



加熱前

集光加熱によるMCCI模擬

加熱後



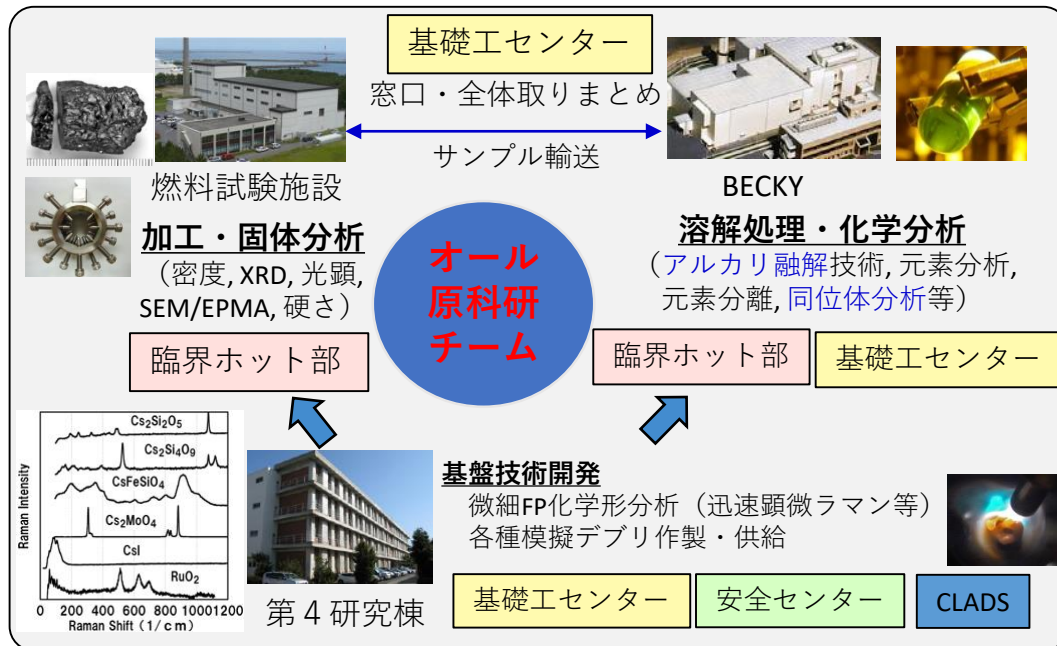
- Sr, Baはケイ酸ガラス中に溶解、重い(U,Zr)O₂は下方へ
- Moと白金族はSUS構成元素と合金形成

【成果】① FPソースタームで重要なSrとBaについて、MCCI生成物中での化学形に関する知見を取得

② 1Fデブリサンプル受入・分析に備え、**オール原科研での分析体制と技術を構築（～R3年度）**

1F支援最重要ミッションの遂行に不可欠な基盤構築

② 1Fデブリサンプル受入・分析に向けた準備



- ・原科研内組織を横断した分析体制と一連の分析スキーム・技術を確立、機構内公募資金による分析装置整備・更新

【学術論文】 A. Sudo et al., “Experimental evaluation of Sr and Ba distribution in ex-vessel debris under a temperature gradient”, J. Nucl. Sci. Technol. DOI: 10.1080/00223131.2021.1879690 (2021).

【アウトカム】 MCCI生成物中のFP化学形データは事故進展時のFPソースタームと今後のデブリ取出し作業時の有用な参考データとなる
R4年以降に予定されている1Fデブリサンプル受入に間に合うよう、サンプル量と性状に応じた分析のルーチン化が可能となる

評価項目	自己評価
(1)研究成果の達成度と当初計画の妥当性 ・ 研究開発の達成度（成功・不成功の原因の把握・分析）と妥当性 ・ 学会賞等の受賞数	S

学会賞等：25件受賞すると共に、シミュレーション技術の開発、1F廃炉に関する燃料材料研究を**計画通り達成し、当初計画は妥当であり、特に顕著な成果もあげている**と評価した。

研究開発の達成度と妥当性：

- 計画外含めた多くの成果抛出により、研究開発の達成度は十分以上と評価する。
 - ✓ FP化学挙動評価等の原子力安全性向上、原子力構造材料の劣化挙動評価、MA窒化物燃料製造技術開発等の分離変換基盤技術開発、1F廃炉への貢献に係り、多くの知見・データ等をモデル化／データベース化して公開した。
 - ✓ さらに、構造材すき間腐食挙動評価についてすき間環境がバルクと本質的に異なることの解明、FP化学挙動モデルのSA解析コードへの実装完了など、計画を超える成果を挙げた。
 - ✓ これらの成果を抛出するにあたり、実機での腐食環境要因や事故時挙動・環境要因を模擬して高精度のデータを取得する実験技術を確立した。
- 成果抛出・デリバリーの基本的な仕組みを構築して研究を進めたことが主な成功要因と分析する。
 - ✓ 原子力燃料材料挙動評価の本質である「材料（照射）」「環境」「応力」の3要素の重畳効果解明技術の追及（シーズ）を事業者・規制者等のニーズへマッチングさせるため、まず単一影響因子（「環境」因子）下における挙動評価技術開発を実施して事業者・規制者双方への共通基盤的な成果をタイムリーに提供する等の適切な成果目標を設定したこと
 - ✓ 成果目標達成のためのマネジメントとして、基礎基盤（シーズ）・応用（ニーズ）への適時・適切なリソース配分、事業者・規制者のみならず共同研究や外部講師派遣等各種の機会を活用した原子力外を含めての国内外の大学・国研等との幅広いチャンネル確保による、基礎基盤と応用のバランス最適化

学会賞等の受賞数：計25件

- ✓ H27 日本原子力学会技術賞「福島第一原子力発電所で発生した高放射性ゼオライト吸着材の保管時健全性評価手法」
- ✓ H27 JNST Most Popular Article Award 2015 “Characterization of solidified melt among materials of UO_2 fuel and B_4C control blade”
- ✓ H27 日本原子力学会 核燃料部会 第4回核燃料部会部会賞（奨励賞）「アメリカシウム含有イナータマトリックス燃料の焼結挙動の解明」
- ✓ H28 腐食防食学会 岡本剛記念講演賞「複雑な実環境をシミュレートしたデータ取得にもとづく腐食要因の解明」
- ✓ H28 腐食防食学会 論文賞「沸騰硝酸中における310ステンレス鋼の粒界腐食に及ぼすリンの局所偏析の影響」
- ✓ H28 腐食防食学会 技術賞「高温水中における応力腐食割れ発生試験方法の規格化ならびに規格改正」
- ✓ H28 腐食防食学会進歩賞「電気化学的手法を用いた原子力材料の腐食機構に関する研究」
- ✓ H28 原子力学会核燃料部会夏期セミナーポスター優秀賞「MCCI生成物中の海水塩・FP等の化学形」

評価項目	自己評価
(1)研究成果の達成度と当初計画の妥当性 学会賞等の受賞数(続き):	
✓ H29 第27回日本MRS年次大会奨励賞「First-principles and experimental study on interfacial fracture in Mg alloys」	
✓ H29 平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰(若手科学者賞)受賞「格子欠陥ダイナミクスに基づく構造材料の計算科学研究」	
✓ H29 Steering Committee of ANFC2017 Certificate of Appreciation「Appreciation for invited paper presentation」	
✓ H30 軽金属論文新人賞「グルコン酸や亜鉛イオンを含む模擬海水におけるA3003アルミニウム合金の腐食による形態変化とその機構」	
✓ H30 日本材料学会 学術奨励賞「欠陥組織と合金化に起因した力学特性の評価に関する原子・電子論的研究」	
✓ H30 日本原子力学会 核燃料部会部会賞(学会講演賞)「軽水炉シビアアクシデント時に構造材へ化学吸着したセシウム化合物の微細分布評価」	
✓ H30 日本原子力学会 原子力安全部会(講演賞)「シビアアクシデント時の原子炉冷却系条件におけるセシウム及びホウ素の気相化学反応に与えるホウ素の影響」(NRA受託により実施)	
✓ H31 原子力学会核燃料部会 学会講演賞「燃料模擬物質の粉碎条件と焼結密度の関係」	
✓ R1 原子力学会核燃料部会夏期セミナーポスター優秀賞「レーザー局所加熱法を用いた融点測定装置の開発; 窒化物測定への適応」	
✓ R1 日本原子力学会 核燃料部会部会賞(学会講演賞)「軽水炉シビアアクシデント時のCsと鋼材との化学吸着挙動(1)600℃付近における鋼材へのCs化学吸着挙動に関する実験的研究」	
✓ R1 日本原子力学会 原子力安全部会賞(講演賞)「原子力施設の重大事故時におけるRu科学挙動のデータベース構築」	
✓ R1 The International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-27) Best paper award「ADSORPTION BEHAVIOR OF CESIUM ON CALCIUM SILICATE INSULATION OF PRIMARY PIPING SYSTEM IN FUKUSHIMA DAIICHI NPP UNIT 2」	
✓ R2 腐食防食学会進歩賞「高温高純度水中におけるステンレス鋼のすき間内の局部腐食発生機構の解明」	
✓ R2 日本原子力学会 原子力安全部会賞(講演賞)「ソースターム評価手法の高度化に向けた核分裂生成物化学挙動データベースECUMEの開発(2)要素モデルセット」	
✓ R2 JNST Most Popular Article Award 2020「Formation mechanisms of insoluble Cs particles observed in Kanto district four days after Fukushima Daiichi NPP accident」	
✓ R3 日本原子力学会 論文賞「シビアアクシデント下のBWR高温領域移行時におけるホウ素の化学挙動」	
✓ R3 日本原子力学会英文誌インパクトファクター貢献への感謝状受領「An experimental investigation of influencing chemical factors on Cs-chemisorption behavior onto stainless steel」	

評価項目	自己評価
(2)研究成果の社会への反映 ・ 研究開発成果の効果・効用（アウトカム）の把握・普及の程度 ・ イノベーション創出への取組の妥当性 ・ 社会実装の達成度、取組の妥当性（技術・知識基盤プラットフォームの構築・提供を含む） ・ 科学技術政策、社会的・経済的意義／ニーズへの適合性	S

ニーズに対応した研究開発のアウトカムを見据えて、**多くの外部資金を獲得し、特に顕著な成果を挙げている**と評価した。

研究開発成果の効果・効用（アウトカム）の把握・普及の程度：

- 事業者・規制者等との実効的な意見交換によるニーズ把握とシーズとのマッチングを通じて、以下に示すようにアウトカムを十分把握していると評価する。
 - ✓ 六ヶ所再処理プラント稼働に係る機器材料の健全性評価について、実環境での腐食量予測モデルを成果として提示
 - ✓ 軽水炉重大事故時のソースターム高度化を通じた定期的な安全性向上等を念頭に、国際協力等による最新の動向把握含め、ソースターム高度化に不可欠なFP化学挙動モデルを成果として提示
 - ✓ 機構が主導するADS概念設計に必要な知見・データとして、窒化物燃料の製造技術と物性データベースを成果として提示

イノベーション創出への取組の妥当性：

- 原子力燃料材料研究開発の本質である「材料」「環境」「応力」重畳効果解明等による不確かさ（不明な挙動）低減に役立つ科学的根拠に基づいた知見等の取得により、特定条件下で使用が限定されるもの以上の幅広い適用性が期待される価値の高い知見等提供によるイノベーション創出を目指しており、取組は妥当かつ十分と評価する。
 - ✓ 機構でしかなし得ない放射線場かつ硝酸等過酷な環境下でのホット対応技術を開発することにより、再処理事業者・規制者へ有用な知見を提供
 - ✓ 原子力産業以外にも適用可能な技術・知見等として、一般鋼材に使用可能な環境負荷の小さい新たな防錆剤の開発、計算科学手法による高性能マグネシウム合金設計手法、陽電子消滅等の先進的な分析手法による水をベースとした溶媒の産業利用拡大への基礎的知見等を成果として拠出するとともに、特許取得や他産業への適用検討等を積極的に実施

社会実装の達成度、取組の妥当性（技術・知識基盤プラットフォームの構築・提供を含む）：

- 事業者等による材料健全性評価や安全性評価に必要な解析コード等に成果として提供したモデル等が組み込まれているなど、社会実装の達成度は十分以上であり取組は妥当であると評価する。
 - ✓ 再処理機器材料腐食量予測モデルについて、事業者によるプラント再稼働時の材料健全性検討への使用や規制者の審査マニュアル等への反映
 - ✓ ソースターム評価に必要なSA解析コードへのFP化学挙動モデルの組み込みと、解析実施（解析結果はOECD/NEAの国際プロジェクトで報告・共有）
 - ✓ 窒化物燃料製造技術開発においてクリティカルな課題である窒素原料の同位体濃縮技術開発について、ガス製造事業者との連携協力による実用化プラントの設計がなされている。さらに、同技術を他の産業技術として適用するための検討が開始されている。

評価項目	自己評価
<p>社会実装の達成度、取組の妥当性（技術・知識基盤プラットフォームの構築・提供を含む）（続き）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 事業者の若手技術者人材育成のための技術・知識基盤プラットフォームの構築として、軽水炉重大事故時に関する講義資料を事業者等と協力して作成して講義を実施している。FP化学挙動について、国内での研究コミュニティがほぼ皆無であったところ、欧米各国との連携協力、国際プロジェクトや国内学会専門委員会の主導、民間事業者等からの研究者・技術者受け入れによる育成を通じて、国内での実質上のFP化学挙動プラットフォームを構築している。 <p>科学技術政策、社会的・経済的意義／ニーズへの適合性：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 軽水炉の安全性向上や分離変換技術開発等の推進、及びその際のDX化推進等、科学技術政策や社会的・経済的意義／ニーズに則した研究開発を実施していると評価する。 ✓ 国内での事故耐性燃料（ATF）の開発推進役を担っており（外部資金）、ATFは安全性向上の重要な課題であるのみならず、事故時の水素爆発防止等社会的関心が高い課題への対応も見込めるものである。今期において、燃料開発の重要なマイルストーンである照射試験を開始させたことは大きな成果である。 ✓ 核燃料サイクルの要となる六ヶ所再処理工場運転（再稼働）に不可欠な材料健全性評価に必要なデータの提供 ✓ 高レベル放射性廃棄物低減・処分場面積低減による社会的受容性向上のための有望オプションである分離変換技術開発への貢献 <p>・ データベース等の公開等の成果の社会実装：3件</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 1F環境における海水混入系ラジオリシスデータベース公開 ✓ 核変換用窒化物燃料のふるまい予測に必要な物性データベース ✓ FP科学挙動評価のためのデータベース <p>・ 技術・知識基盤プラットフォームの構築：1件</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 過酷事故(SA)プラットフォームの構築(電事連-電工会-電中研-基礎工-安全研究センター) <p>・ 解説記事(含む書籍)：20件</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 1F廃炉特有の腐食影響を取りまとめた解説記事(腐食防食学会：4報) ✓ 再処理施設等の沸騰硝酸環境における腐食機構の解説記事(Elsevier, comprehensive nuclear material 2nd) ✓ セルラーオートマトンを用いたステンレス鋼の粒界腐食予測の解説記事(European Federation of Corrosion. EFC-GreenBook) 	

評価項目	自己評価
<ul style="list-style-type: none"> ・解説記事(含む書籍) (続き) : 20件 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 放射線化学や陽電子消滅寿命・運動量相関測定に関する解説記事(陽電子科学誌 : 2報、科学と工業 : 1報) ✓ マグネシウムの延性・靱性向上のための合金設計に関する解説記事 (軽金属学会誌 : 1報) ✓ (書籍) ハイエントロピー合金: カクテル効果が生み出す多彩な新物性 (内田老鶴圃 : 分担執筆) ✓ (書籍) The Plaston concept; Plastic deformation in structural materials, 2 Simulation of plaston and plaston induced phenomena 2.4 First principles calculations of dislocation cores (Springer : 分担執筆) ✓ 重イオン照射したセラミックスにおけるヒロックやイオントラック形成メカニズムに関する解説記事 (Quantum Beam Science : 1報) ✓ ADS用窒化物燃料の概念と基礎設計の解説記事(日本原子力学会誌連載講座) ✓ アクチノイド窒化物の熱物性と熱力学の総説(Elsevier, Comprehensive Nuclear Materials, 2nd Ed.) ✓ ADS用窒化物燃料の研究開発状況と¹⁵N濃縮の解説(日本原子力産業協会 NSA Commentaries) ✓ 沸騰水型原子炉内を移行するセシウムの化学挙動 評価に向けて~セシウムの化学挙動に与えるホウ素の影響評価~(日本原子力学会誌「ATOMO Σ」) ✓ シビアアクシデント時の燃料化学研究の進展; 福島第一原子力発電所事故後のアップデート (Advances in Nuclear Fuel Chemistry) ✓ 軽水炉シビアアクシデント時のセシウムの化学(日本原子力学会英文誌) ✓ セシウムと鋼材やストロンチウムと構造材との化学的相互作用(OECD/NEA TCOFF project Final Summary Report) ・受託研究(国/民間) : 66件 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 再処理プロセスでの腐食研究成果が、再処理施設の高経年化に関する規制庁受託として外部資金獲得につながった。 ✓ 格納容器の腐食への放射線影響評価研究成果が、1F英知事業 (廃炉加速化プログラム) として文部科学省からの受託研究2件の外部資金獲得につながった。 ✓ 軽水炉安全基盤研究としての受託研究が、さらに原子力の安全性向上を担う人材育成事業として資源エネルギー庁からの受託事業1件の外部資金獲得につながった。 ✓ H27-R1:規制庁受託(安セ兼務)「再処理施設の経年変化に関する研究」 ✓ H29-R1:文科受託(英知事業)「放射線環境下での腐食データベースの構築」 ✓ H30-R1:エネ庁受託(人材育成)「軽水炉過酷事故に対応できる人材育成基盤の構築」 ✓ H28-R2:JNFL受託「Np添加ウラン濃縮液中におけるステンレス鋼の低温腐食試験」 ✓ H29-R2:中電共研(中電からの資金提供)「高温水中における金属材料のすき間腐食クライテリアの高度化」 ✓ R2:鉄鋼協会「鉄鋼材料への腐食誘起水素侵入評価」 ✓ R3:鉄鋼協会「腐食劣化解析に基づく鋼構造物維持の最適化」 	

評価項目	自己評価
<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>受託研究(国/民間) (続き) :</u> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 使用済み燃料プールの事故時の安全性向上に関する研究が、原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業として経済産業省からの受託研究（重大時効解析手法の高度化）1件の外部資金の獲得につながった。 ✓ 大型計算機を活用した第一原理計算等の研究は、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）事業、戦略的創造研究推進事業（さきがけ）等として、JSTからの受託事業3件の外部資金獲得につながった。 ✓ 耐放射線性太陽電池開発に係る研究が、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業として文部科学省からの受託研究1件の外部資金獲得につながった。 ✓ ハイエントロピー合金（HEA）を対象にした複数の大学、研究機関との共同研究から派生し、原子力システム研究開発事業（新発想型）として、文部科学省からの受託研究1件の外部資金獲得につながった。 ✓ 文科省原シスで大型予算（3億）を獲得し、MA窒化物燃料の研究開発を当初計画より前倒し・加速して実施（特に外注が必要な¹⁵N関連やゲル化技術）。 ✓ 窒化物燃料に関する知見と高い技術力により、三菱重工からの受託研究（UN燃料の軽水炉利用、R2～）獲得。 ✓ 1F事故後早期から開始した模擬燃料デブリによる試験技術・知見により、IRIDとしての補助事業（デブリ性状把握～H27）、経産省補助事業（デブリ分析精度向上）獲得、先導的役割を果たしている。また、CLADS英知事業（2件）で民間・大学へ協力。 ✓ CLADS発足以前のSA時燃料破損・溶融過程解析手法の高度化（経産省受託研究～H27, 4.2億）を担った。 ✓ その他、大型の機構内競争的資金（1F推進費、R1-3、2.5億）獲得により、1Fデブリ受入・分析のための原科研内横断的チーム構築、分析技術・装置等の基盤を整備 ✓ 経産省受託事業「安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備」を継続して実施した。その結果、民間(日立GE)からの受託事業「SiC被覆管燃料の高温水蒸気酸化基礎データ整備」、「SiC被覆管接合部の高温耐圧健全性基礎データ整備」の外部資金獲得につながった。 ✓ 規制庁受託事業「シビアアクシデント時ソースターム評価技術高度化」を実施した。 ✓ 廃炉・汚染水対策事業「総合的な炉内状況把握の高度化（セシウムと鋼材との反応・再蒸発）」を実施した。 ・ 科研費 : 63件 	

燃料・材料工学に関する自己評価 (7/8)

評価項目	自己評価
(3)研究成果の展開・発展 ・将来/次期中長期計画への研究開発の展開、新たな課題への反映の検討	A

研究成果の次期中長期計画への研究開発の展開されており展開・発展は十分に行っていると評価した。

- 再処理機器材料腐食量予測モデル、窒化物燃料物性データベース、FP化学挙動データベース等については、データベース拡充やそれらの解析コード等への組み込みによる計算評価により、再処理機器材料交換時期検討、窒化物燃料設計、ソースターム評価、事故耐性燃料開発等のアウトカムへの貢献に向けた取り組みを事業者等と協力して継続していく。
- 「スマート技術による原子力燃料材料開発のDX化」を推進する：今期開発した環境要因を模擬した腐食挙動評価技術等を発展させ、他の影響因子の取り込みによる重畳効果評価手法の検討、高度その場測定分析技術採用による多量・多様・かつその場情報を含んだデータの迅速取得技術とデータ解析手法の高度化、得られたデータ・モデル等を組み込んだシミュレーションによる予測技術開発を実施する。これにより、実験で得られたデータや知見から年オーダーでの腐食量評価を可能とするなど、より価値の高い知見の取得と提供を目指す。
- 成果デリバリーの仕組みの継続的な高度化として、事業者等との継続的な対話の充実はもとより、燃料と材料間や環境・材料・応力間等の複数課題／専門性を超えた機構内外・国内外の議論のさらなる促進、リソースの流動的な活用や外部研究者・技術者受入れと協働によるニーズシーズマッチングの高度化、原子力以外へのスピノフ等の機会増加等を進める。国外においても、近年OECD/NEA等において基礎基盤と応用の各プロジェクトでのクロスカッティングが重視され始めたことから、これらへの積極的な参加とプロジェクトの主導に努め、基礎基盤と応用の動的なバランスマネジメント向上を目指す。
- 以上に基づき、事故耐性燃料の事故時挙動解明、各種原子力システムの新規高性能燃料材料開発やサイクル技術への展開等を目指した基礎研究実施等、軽水炉システムの長期利用等を見据えた機構でしかなし得ない新たな研究に着手する。

(4)国内外他機関との連携	S
---------------	---

国際協力：3件,共同研究：58件を実施しており、国内外との十分な連携が得られており、適切なニーズシーズマッチングによる多くの成果拠出において重要な役割を果たしていることから、特に顕著な成果を挙げていると評価した。

- ✓ CEAとのSTC No.4.9（原子力材料の腐食研究）の締結による、軽水炉材料や再処理機器材料の腐食研究に関する情報交換
- ✓ CEAとのSTC No.7.1（FP挙動研究）及びVTTとの協定締結による、研究者相互派遣を通じたFP挙動実験・解析
- ✓ ADS窓材候補材の照射・腐食特性評価等に関して、計算科学とイオン照射・原子炉照射（PSI、SCK・CENとの連携調整）実験を組み合わせるための研究
- ✓ 材料腐食挙動評価のための北大との材料表面化学反応シミュレーション、東工大との酸素センサ開発等に関する研究
- ✓ ハイエントロピー合金（HEA）等の原子力材料への適用のための物性解析・材料設計に係る計算科学及び実験研究
- ✓ 重照射環境下での燃料被覆管の微細組織形成に関する研究開発の電力中央研究所との協力
- ✓ MA窒化物燃料製造技術開発について、機構内拠点、電中研、九州大学と連携した文科省受託研究の継続
- ✓ 各種の1F支援研究として、量研機構高崎研究所、国内大学等と多くの共同研究

燃料・材料工学に関する自己評価 (8/8)

評価項目	自己評価
<p>(5)研究成果の発信</p> <p>・研究開発課題／成果の社会的受容性（社会へ及ぼす影響度の想定）査読論文数/プレス発表</p> <p>査読付き論文数:177報（うち高IF論文掲載（IF>5）：1報）、プレス:6件と、多くの成果が得られており、研究開発課題／成果の社会的受容性は特に顕著な成果を挙げている評価した。</p> <p>高IF論文掲載(IF>5)</p> <p>✓ Acta Materialia (IF=6.036)</p> <p>プレスリリース</p> <p>✓ 放射線環境中のセラミックスがもつ自己修復能力の発見～セラミックスの表面を観察する新しい手法による成果～(2017.10)</p> <p>✓ 電子状態の計算シミュレーションで産業利用価値の高い合金を設計する～割れにくいマグネシウム合金開発への貢献に期待～(2018.5)</p> <p>✓ 放射性廃棄物を減らす核変換技術の実用化に道筋～核変換用燃料のふるまい予測に必要な物性データベースを公開(2019.10.18)</p> <p>✓ 原子炉内での放射性物質のふるまい予測をめざす－重大事故時のセシウムの「化学」をデータベース化－(2020.3)</p> <p>✓ アルミニウムの自発的破壊現象の解明～水素でアルミがもろくなる原因の解明と、計算科学による高強度合金へ(2020.4)</p> <p>✓ 1Fの格納容器内にたまった水の中で金属材料はどう腐食するのか？～放射線環境下での腐食データベースの構築(2021.10)</p>	S
<p>(6)人材育成に関する取組</p> <p>・若手研究者の育成・支援への貢献の程度、特別研究生・夏期実習生</p> <p>多くの学生や若手研究者受け入れを通じた指導、大学講師としての派遣、外国留学への派遣等を行っており、人材育成に関する取組を確実に行的っていると評価した。</p> <p>大学連携講座：21名派遣</p> <p>外国留学：1名派遣</p> <p>特別研究生：16名受入</p> <p>夏期実習生：38名受入</p> <p>他部署（CLADS）受け入れ：7名</p> <p>若手研究者：3名受入（海外1人、メーカー2人）</p>	A

燃料・材料研究力を活かして、機構内外の関連研究開発を支援

- CLADS若手研究者・技術者(計7名受け入れ)の第4研究棟でのウラン実験指導、全面的サポート
⇒福島部門の主要な研究である燃料デブリ研究実施を支えている
- 大洗燃料研究棟汚染事故時の原因究明・検証実験
⇒核燃料取扱技術、知見等を活かした貢献
- 窒化物燃料や模擬燃料デブリの基盤技術を活かしたメーカーのサポート(英知事業での模擬デブリ供給(日立GE)、NEXIP受託(MHI)での軽水炉へのUN燃料適用性検討など)
⇒国内でウラン実験技術が大幅衰退しているところ、技術維持・復興への貢献
- 機構内外の一般建築物や機器等の腐食トラブル発生時の技術相談
- 各種分析・測定装置の機構内外利用支援
⇒試料の調製・取扱等ノウハウ含めた指導・支援
- 1Fデブリ分析評価に係るオールJAEA体制構築主導
⇒分析チーム構築や、機構大横ぐし活動の主導(委員会の主査、委員としての活動)