

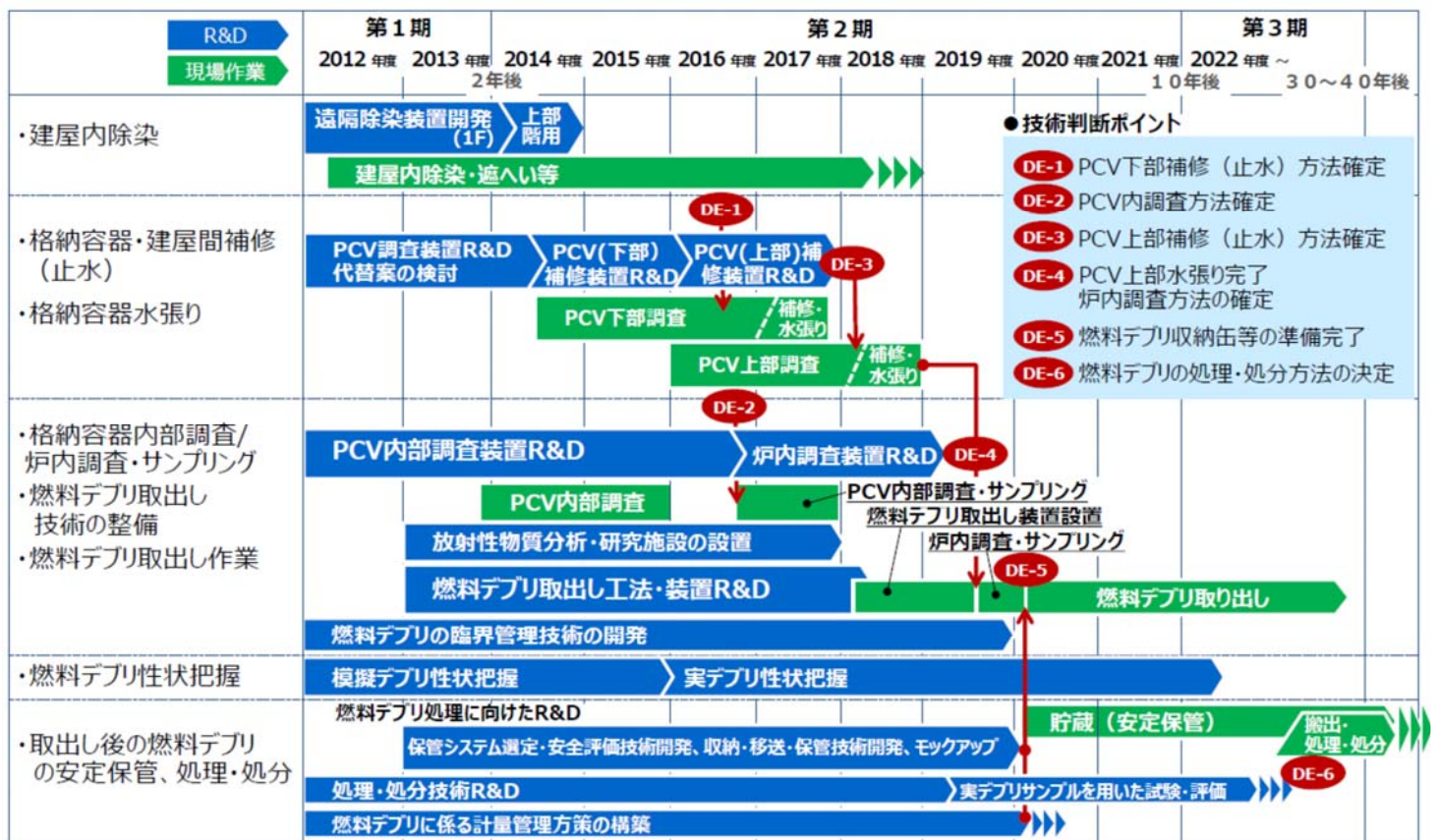
# 廃炉に関する基礎・基盤研究マップ の考え方

平成28年4月18日

日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター

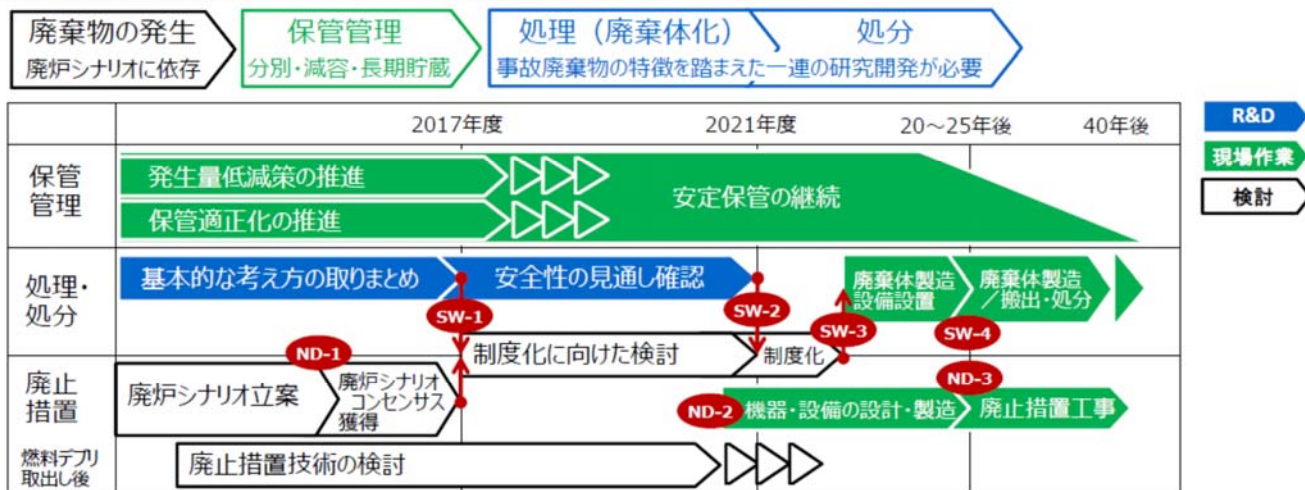


## 燃料デブリ取出し計画(2号機)(中長期ロードマップ)



出典) “IRIDシンポジウム2015in福島”より抜粋

## 中長期ロードマップにおける放射性廃棄物対策の位置づけ



●技術判断ポイント（次工程へ進む判断のポイント。追加で必要な研究開発や工程又は作業内容の見直しも含めて検討・判断する。）

- SW-1 固体廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ（2017年度）
- SW-2 固体廃棄物の処理・処分における安全性の見通し確認（2021年度）
- SW-3 廃棄体仕様・製造方法の確定（第3期）
- SW-4 廃棄体製造設備の設置及び処分の見通し（第3期）

- ND-1 廃止措置シナリオの立案（2015年度）
- ND-2 除染・機器解体工法の確定（第3期）
- ND-3 廃棄物処分の見通し・必要な研究開発の終了（第3期）

## 廃炉に向けた基礎・基盤研究のあり方

＜基礎・基盤研究への期待＞（NDFの提唱する基礎・基盤研究）

- 大幅改善が可能性なイノベティブ研究。
- 学術的な視点で、現象や知見やデータを提供する研究。
- 顕在化していない課題を発見・抽出する研究。（NDF 2015戦略プランより抜粋）

### 廃炉関連研究への対応

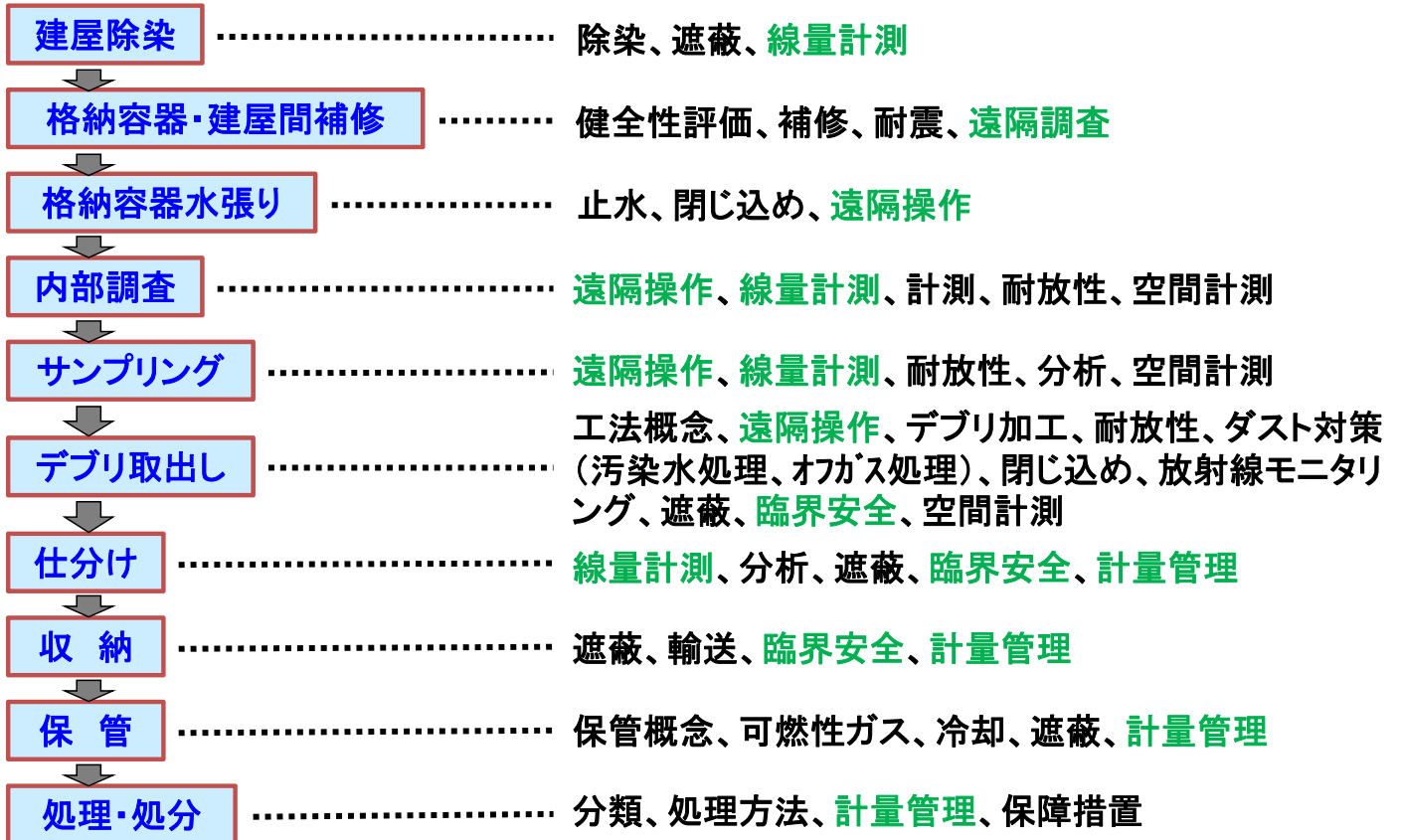
- 廃炉のニーズに対応
  - 廃炉作業にタイムリーに貢献  
（反映時期と内容を明確化）
- ⇒ 国プロ研究はここに主眼を置いている

- ニーズの先を見た基礎データ、ツール、デバイスの開発
  - 将来の廃炉関係者の人材育成に貢献
- ⇒ 基礎・基盤研究はここに主眼を置く

### 基礎・基盤研究の進め方

- ◆ 廃炉のニーズや反映時期を意識して進める。
- ◆ 国プロでは着手し難い研究（イノベティブ、顕在化していない課題等）を実施。
- ◆ 学術的な研究を実施し、人材育成に貢献する。

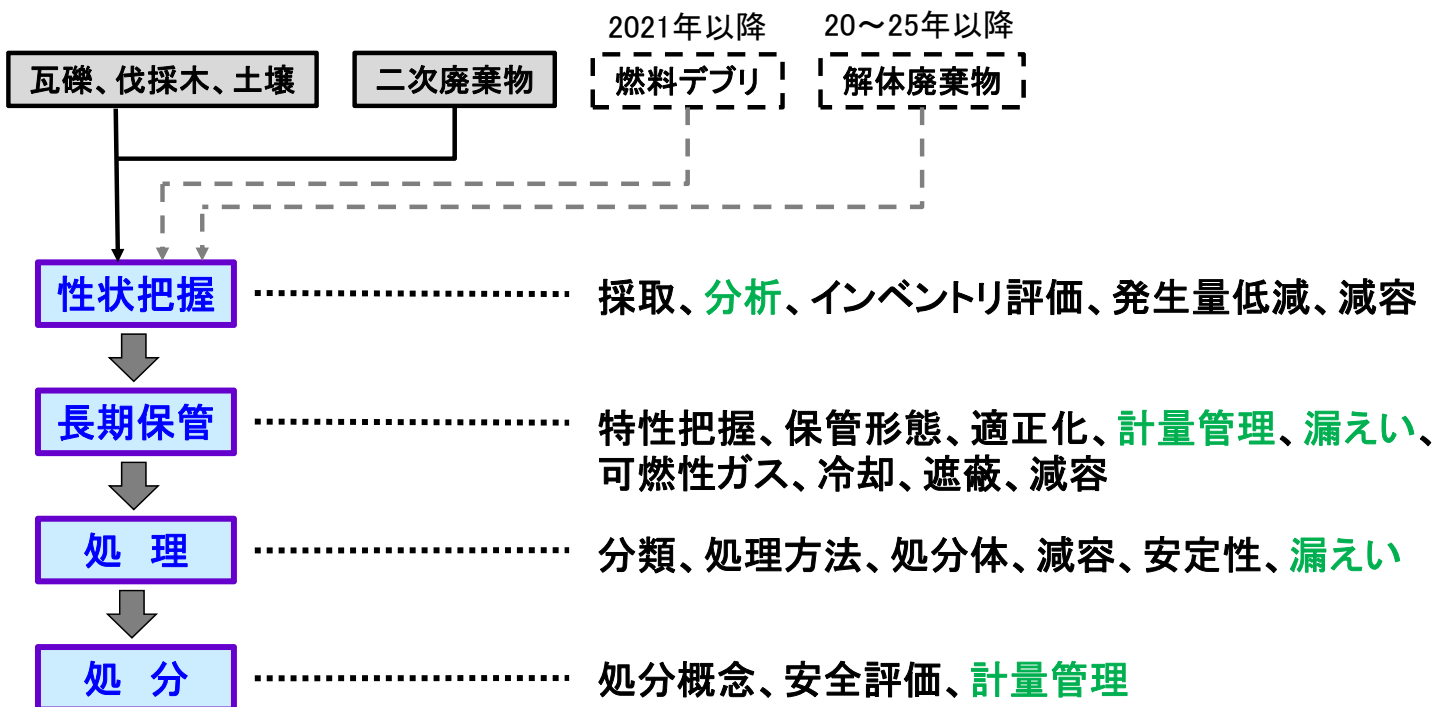
# デブリ取出し関連のキーワード



(共通ワード)

遠隔、分析、計量管理、安全対策(火爆、臨界、漏えい、被ばく)

# 廃棄物関連のキーワード



(共通ワード)

分析、計量管理、安全対策(火爆、漏えい、被ばく)

## デブリ取出し対策

## 廃棄物対策

### プラントの安定 状態の維持・管理・止水

(健全性評価) (耐震) (遠隔検査)  
(補修) (止水) (除染) (遮蔽)  
(腐食) (ガス発生)

### 調査・サンプリング

(線量計測) (遠隔操作) (遮蔽)  
(除染) (耐放射性) (分析)  
(空間計測)

### 炉内状況 デブリ状況把握

(炉内評価) (挙動解析) (事故シナリオ)  
(デブリ特性) (FP挙動)  
(線量評価)

### デブリ取出し

(工法概念) (デブリ加工) (遠隔技術)  
(ダスト対策) (汚染水処理) (閉じ込め)  
(放射線モニタリング) (臨界安全)  
(遮蔽) (オフガス系処理)  
(耐放射性) (空間計測)

### デブリ収納保管

(遠隔技術) (臨界安定) (脱水・乾燥)  
(可燃性ガス) (遮蔽) (分析) (冷却)  
(計量管理) (減容) (輸送)

### 共通分野

(遠隔技術) (安全対策:  
火爆、漏えい、被ばく、等)  
(臨界管理)

### 処理技術開発

(分類) (処理方法) (減容)  
(安定化) (廃棄体評価)

### 処分技術開発

(処分概念) (安全評価)  
(計量管理)

### 分析・計量管理

(分析技術) (計量管理)  
(非破壊測定)

### 性状把握

(採取) (試料分析)  
(インベントリ評価) (分析技術)  
(発生量低減)

### 長期保管

(特性評価) (遮蔽) (減容)  
(安全評価) (漏えい) (可燃ガス)  
(保管形態) (計量管理)

反映

反映

例) ミュオン粒子等を活用した可視化 放射性物質の分析・測定 放射性廃棄物の減容 制御・通信等の基盤技術 新規材料開発  
PCVや配管等の防食と長期寿命予測技術 燃料デブリやFP等の放射性物質の基本的特性 など、

## 基盤研究開発 \*

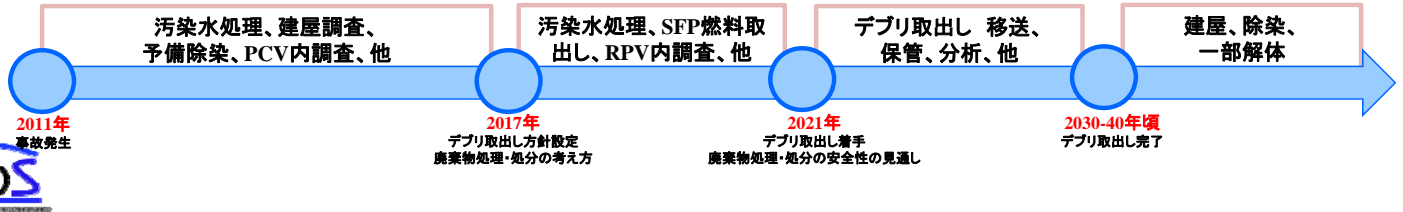
\*) 大幅改善が可能なイノベティブ研究。学術的な視点で現象や知見やデータを提供する研究。顕在化していない課題を発見・抽出する研究。

## 【デブリ取出し対策】(2/5)

凡例   : 補助金事業又は事業主体実施事項   : 基礎基盤研究

### ◆ 炉内状況・燃料デブリ状況把握 (1/2)

(炉内評価)	炉内状況の総合評価	(予測精度の向上)
(事故シナリオ)	事故進展シナリオ検討	(内部調査による評価・更新)
	???	
(挙動解析)	事故進展挙動解析技術	(内部調査による評価・更新)
	???	
	???	
(線量評価)	線量計測・線量評価技術 (手法検討)	(内部調査による評価・更新)
	???	

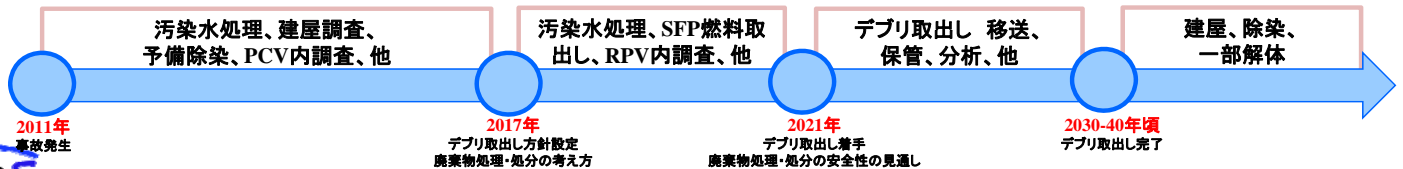


## 【デブリ取出し対策】(3/5)

凡例   : 補助金事業又は事業主体実施事項   : 基礎基盤研究

### ◆ 炉内状況・燃料デブリ状況把握 (2/2)

(特性評価)	デブリ特性評価	(実デブリ分析結果による更新)
	???	
	???	
(FP挙動)	FP放出挙動評価	(内部調査による評価・更新)
	???	
	???	



# 廃炉に伴う基礎・基盤研究マップのサンプル(例; 炉内状況・燃料デブリ状況把握)

研究分野	研究項目	研究課題	概要	成果の反映先、反映方法	反映時期	実施担当	実施上の課題、連携、特記事項	
【デブリ取出し対象】								
○炉内状況・燃料デブリ状況把握	(1)デブリ回収戦略の構築	(1) 炉内状況の総合評価	①炉内状況把握解析と材料科学的知見を考慮した、事故時プラントデータの分析(分野横断した専門家の認識共有)、1F事故進展理解の高精度方針の検討	プラントデータを考慮した、SA解析(温度分布、圧力変化、シナリオ、等)と材料科学的知見(酸化進展、化学反応条件、等)の総合評価による、事故進展及び燃料状態の予測(ベストエスティメイト及び分岐シナリオ)、予測精度向上に向けた開発課題の認識共有、知見のデブリサンプリングやデブリ取出しへの反映方法の具体化	(a)1F事故進展の理解の深化による、課題解決とデブリ取出しへの成果反映方法の認識共有 (b)デブリサンプリング優先度への知見提供、デブリサンプリング分析結果に基づく事故進展理解の深化、不審な分岐シナリオの排除 (c)炉内滞留デブリ、MCCI堆積物の特性評価精度の向上、評価精度向上に向けた境界条件の提示 (d)材料科学的知見、事故時プラントデータ(最高温度、酸化度、冷却材流量、等)に基づく、炉内C <sub>0</sub> の評価	現状知見によるベストエスティメイト及び分岐シナリオ(2017)予測解析精度の向上(2021)	NDF GLADS IAE IRD TEPCO	IRD新プロジェクトで実施 CLADSを幹事機関とした担当者レベルの認識共有の場 国際協力(国際ワークショップ)
		(2) デブリ取出しに向けた課題整理と解決法の検討、デブリ取出し戦略への反映	①TEPCO二期と、研究シーズ観点から課題、間の認識共有、課題の整理 ②炉内状況総合評価に基づくデブリ取出し戦略の検討	現場サイドでの課題と重要度の整理、基礎基盤実施項目と現場課題との対応の整理 事故進展シナリオを考慮したデブリ特性ケーススタディ(ベストエスティメイト、分岐シナリオ、境界条件、等)、廃棄物の特徴のケーススタディ	(a)ニーズ観点とシーズ観点での課題及び優先度の整理、関係づけ (b)デブリ取出し方法への知見提供、事故進展ケースごとに予測される課題と解決法の提示 (c)デブリサンプリング分析の活用方法提示 (d)廃棄物特性のケーススタディ(廃棄物処理・処分への知見提供)	現状知見によるベストエスティメイト及び分岐シナリオ(2017)予測解析精度の向上(2021)	NDF GLADS IAE IRD TEPCO	IRD新プロジェクトで実施 CLADSを幹事機関とした担当者レベルの認識共有の場 国際協力(国際ワークショップ)
	①溶融炉心の移行挙動評価	①-1炉心崩壊過程の熱流動解析	1F各号機条件での熱流動解析、燃料集合体温度変化、水蒸気流量解析 炉心溶融・移行現象の連続シミュレーションプラットフォーム(①-2、3と連携)	1F各号機条件での熱流動解析、燃料集合体温度変化、水蒸気流量解析 炉心溶融・移行現象の連続シミュレーションプラットフォーム(①-2、3と連携)	(a)燃料集合体破砕解析、RPV構造健全性解析、MCCI解析等に初期条件、境界条件を提供 (b)炉心溶融・溶融詳細シミュレーションによるSA進展シナリオの境界条件の知見提供	シミュレーションプラットフォーム整備(2021) 1F条件の整理(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学	組織間の役割分担、連携の明確化 要素モデル、データベースに期待(東北大、東工大、阪大、九工大、早大、名大、長岡技大、筑波大、等) 要素モデル、データベースに期待(新日鉄住金、NFD、GNF-J、日立GE、東芝、東工、NDC、伊藤忠CTC、等) 欧州知見の導入(CLADSを窓口としたSAFESTとの連携(KIT、CVR、KTH、等)) 模擬試験の役割分担(IAE/KAERI、JAEA/CRIEPI/HI/日立GE(GNF-J)、大学、等) 日米CNWG(プラズマ溶融試験) 熱力学データベースプロジェクト(NEA)、大学との連携 一部をIRD新プロジェクトで実施
		①-2燃料集合体崩壊過程の材料科学的解析・模擬試験	燃料集合体～炉心支持板部位の破砕・溶融詳細解析モデルの開発、1F条件での要素過程の模擬試験(水蒸気枯渇度、酸化進展度、等の検討)、燃料集合体規模での破砕・溶融詳細シミュレーション開発	炉内状況総合評価に、 (a)事故進展境界条件(制御破砕、炉心支持板閉塞、酸化進展度、等)を提供 (b)材料科学的メカニズム観点でのケーススタディとシナリオに応じた課題に関する知見を提供	詳細解析ツール整備(2017) 1F条件の整理(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学 メーカー IRD		
		①-3下部ヘッド破砕解析・試験	下部ヘッド破砕のFEM解析、熱流動・構造解析 模擬試験結果を用いた検証	(a)下部ヘッド破砕予測、実験破砕データを活用した現象理解のフィードバック、現場への知見提供	熱流動・構造連成解析手法の構築(2017) 模擬試験による検証、高度化(2021)	GLADS 基礎工 大学		
		②プラントデータを考慮した事故進展詳細解析	1F各号機のプラントデータを考慮した、事故進展解析(MELCOR、RELAP、SCDAPSIM、等) 熱力学と材料科学的知見を考慮した総合評価による事故進展理解の深化	(a)炉内状況の総合評価に知見提供、関係者の認識共有 (b)課題優先度の整理、デブリサンプリング優先度等知見提供	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS TEPCO 大学 IRD	CLADSを幹事機関とした担当者レベルの認識共有の場 国際協力(国際ワークショップ、BSAFとの連携) 一部をIRD新プロジェクトで実施	
	③MCCI堆積物の特性評価	③-1MCCI反応進展解析・評価、デブリ広がり解析、溶融炉心の移行を考慮したケーススタディ	SAシナリオ、材料科学的観点からMCCI反応解析(化学特性、熱特性) 溶融炉心の広がり解析 MCCI進展ケースごとのデブリ特徴の整理	(a)MCCI進展ケーススタディ(メルトスルーシナリオ、物理化学特性、広がり、等)に関する知見提供 (b)デブリサンプリング、デブリ取出しに向けた課題の整理 (c)デブリサンプリングの分析結果を用いたMCCI解析精度の向上 (d)廃棄物特性評価への知見提供	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学 IRD	組織間の役割分担、連携の明確化 要素モデル、データベースに期待(東北大、阪大、早大、等) 要素モデル、データベースに期待(新日鉄住金、日立GE、等) 欧州知見の導入(CLADSを通じたSAFESTとの連携(KIT、CVR、KTH、等)) BSAF、SAREFとの連携 熱力学データベースプロジェクト(NEA)、大学との連携 一部をIRD新プロジェクトで実施	
		③-2反応進展を考慮したデブリ特性解析・評価、凝固/再分布特性解析・評価	模擬溶融炉心内の特性試験(コールドフルスケール試験)と凝固・偏析解析 MCCI進展ケースごとのデブリ特徴の整理	(a)MCCI堆積物の特性ケーススタディ(メルトスルーシナリオ、物理化学特性、再凝析性、等)に関する知見提供 (b)デブリサンプリング、デブリ取出しに向けた課題の整理 (c)デブリサンプリングの分析結果を用いたMCCI解析精度の向上 (d)廃棄物特性評価への知見提供	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学 IRD		
		④RPV外サンプルからの事故進展、炉内状況の推定						
	(3)デブリ特性評価	④模擬デブリ特性評価	デブリ中に形成される主要相の諸物性測定及びデータベース整備と解析	燃料デブリ取出し準備プロジェクト(取出技術開発、収納保管技術開発、輸送管理技術開発等)、への設計計用データの整理。	燃料デブリ取出し準備プロジェクト(取出技術開発、収納保管技術開発、輸送管理技術開発等)、への設計計用データの整理。	1FMCCI生成物の特性推定(2017) IRD向けデータベース(燃料デブリ特性リリス)改訂(2017) 物性取得と解析、NEAデータベース構築・整理(2019)	GLADS 基礎工 大学 IRD	組織間の役割分担(特に③とのインターフェイス)、連携の明確化 事故進展シナリオを考慮した試験・解析パラメータ設定が重要 JAEAでの特許生受入れ、模擬デブリ試験/解析の分担実施(事故進展シナリオを考慮したケーススタディ)を、大学に期待 NEAの熱力学データベースプロジェクトへの共同参画を、大学に期待 以下をIRD既存プロジェクトにて実施 CEAとの研究協力(大規模ウラン試験)
		⑥-1燃料デブリ冷却評価技術	代替法としての空冷によるデブリ冷却評価の構築、乱流自然対流での冷却モデル開発、熱流動模擬試験	(a)完全空冷工法でのデブリ取出し計画策定に知見提供	冷却能力評価解析(2018)	GLADS 基礎工 大学	評価手法、コード開発に関して大学との連携を検討	
		⑥-2代替取出し法に係る課題の検討	代替法としての固体ボール状遮蔽材による燃料デブリ遮蔽	(a)固体ボール状遮蔽材によるデブリ取出し計画策定に知見提供	??	大学	長岡技科大	
	(4)線量計測・線量評価技術	①線源評価技術開発	燃料デブリの線源・環境熱・線量率評価手法開発	燃料デブリに限定せず、汚染水、放射性廃棄物など対象を問わず、放射線遮蔽、冷却等が必要な全ての局面(輸送、貯蔵)で利用可能な解析ツールの提供	2017年度中	GLADS 基礎工 大学	最新核データの導入に関して長岡技科大と連携	
		②プラント内の最確な線源分布と線量率評価技術開発	燃焼計算、放射化計算、SA解析、内部調査等の結果を活用し、1Fプラント内の時々の最確な線源分布と線量率分布を評価する手法開発	NOF等による廃炉工法の決定に必要な情報提供	2017年度末	GLADS 基礎工 大学	IRD炉内状況把握、BSAF2等の成果活用 線源解析法と線量率評価法に関する共同研究(北大)	
		③燃料デブリ取出し工程における敷地境界線量率評価手法開発	シールドプラグ、RPV上蓋等を撤去した際の、スカイシャイン等による1F敷地境界線量を評価し、適正値を超える場合には対応策を検討	燃料デブリ取出し開始時の規制対応	初号機のデブリ取出し(～2021)			
④シンチレータと光ファイバを用いた高放射線場の遠隔放射線計測		耐放射線性光ファイバの先端にガンマ線光変換素子(シンチレータ)を取り付け、局所の線量評価に資する。 1)γ線フロントフラックス計測 ・エネルギーに依らず、フロントフラックスを計測し、エネルギーを仮定して等価的に線量を算定する。 2)エネルギー分解計測 ・できるだけ微小体積でガンマ線が吸収可能な素子を選定、開発し(熱化ルテチウム等)、γ線吸収特性、発光特性(波長、時間応答)を取得、大まかなエネルギー分析の可能性について、素子としての利用価値を判断する。 3)センサーとの組み合わせ技術開発 ・ファイバ/LIBSプローブ、視認プローブ等との組み合わせ	・デブリ位置情報への反映 ・炉内線量分布シミュレーション結果への反映 ・炉内作業における線量評価	デブリ取出し準備(2019-2020) デブリ取出し作業(2021-2040)	GLADS 基礎工 大学	長岡技科大 英国NPLとの共同研究開始		
(5)FP放出移行挙動評価	⑦炉内FP分布解析精度向上	1F各号機条件を考慮したMELCOR等各種SA解析コードによるFP分布評価、ベンチマーク等を通じたFP分布解析精度向上とモデル改良、あるいは課題抽出	(a)炉内状況総合評価に炉内FP分布情報を提供 (b)事故進展詳細解析への境界条件・初期条件等提供(詳細解析⇄SA解析間の相互フィードバック) (c)不確かさの大きい現象の抽出とモデル改良方針や必要な実験(総合実験、分離効果実験)条件の提示 (d)FP分布ベンチマーク解析(BSAF2)への貢献 (e)炉内線量分布評価のための線源分布データ	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 IAE等	BSAF2特でのベンチマーク実施 VITとの改善FPの共同解析		
	⑧-1化学反応速度論を考慮した解析技術	FP放出移行総合実験、分離効果実験から得られるFP分析データの化学反応速度論を考慮した解析によるFP化学挙動(化学的、化学反応)評価	(a)SA解析コードにおける化学モデル高度化やコードを用いた解析における境界条件提供 (b)FP分布ベンチマーク解析のためのデータやモデル提供 (c)炉内線量率評価への知見提供 (d)付着FPの固定性・除去性等の性状データ	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学等	VITとの改善FPの共同解析		
	⑧-2 FP放出移行再現実験によるFP化学挙動データベース構築	FP放出移行総合実験(ホット試験)によるモデル検証/模擬実験によるデータ蓄積、吸着・再蒸発等に係る分離効果実験、及びFP化学形の直接分析によるFP化学形データ取得	(a)化学反応速度論を考慮した解析のためのFP分析データ提供 (b)化学挙動データベース構築と化学モデル高度化 (c)FP分布ベンチマーク解析のためのデータ提供 (d)FPサンプル取得計画策定への知見提供 (e)付着FPの固定性・除去性等の性状データ	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 大学等	阪大との燃料からのFP放出メカニズム解明に係る共同研究		
	⑨-1 格納容器・原子炉建屋・環境から採取したサンプルや模擬試験により得られるサンプルの分析による環境-炉内境界部でのFP挙動評価	配管内の高気圧凝縮、スクラビング等のFP移行や化学形態に与える影響評価、モデル開発、模擬試験実施。 格納容器・原子炉建屋・環境から採取したサンプルの分析。	(a)化学反応速度論を考慮した解析のためのFP分析データ提供 (b)化学挙動データベース構築と化学モデル高度化 (c)FP分布ベンチマーク解析のためのデータ提供 (d)S/C濃性に与えるFP(エアロゾル)の影響評価 (e)環境動態モデルのソースターム条件提供	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021) 熱流動と化学形態を考慮したC <sub>0</sub> 移行モデル化(2019)	GLADS 基礎工 大学等	熱流動試験及び解析に関する大学との研究協力(筑波大)		
	⑨-2 環境動態と炉内解析の統合によるFP移行挙動評価高度化	環境-炉内境界部のFP等挙動解析とモデル化	(a)環境動態モデルのソースターム条件提供 (b)化学挙動データベース構築と化学モデル高度化 (c)FP分布ベンチマーク解析のためのデータ提供 (d)廃棄物インベントリ評価への知見提供	1F条件の詳細解析と模擬試験(現状知見の整理)2017、解析進展による評価精度向上(2021)	GLADS 基礎工 IAE			