



廃炉工程で発生する 放射性飛散微粒子挙動の解明に関する 暫定的な研究開発戦略

2017年8月10日
放射性飛散微粒子挙動の解明分科会



1. 現状把握（研究開発課題に係る国内外の動向）

1

【背景】

原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)に設置された研究連携タスクフォースの中で、6件の廃炉に係る重要研究開発課題が抽出された。燃料デブリを切削する際に発生する多量の α ダストの閉じ込め管理のためには、 α ダストの物理的・化学的性質等の性状把握、切削方法毎のダストの発生量予測とそれらを踏まえた閉じ込め対策の検討等が必要となる。「**廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明**」分科会は、前述の課題を検討し、研究開発を推進する目的で発足した。

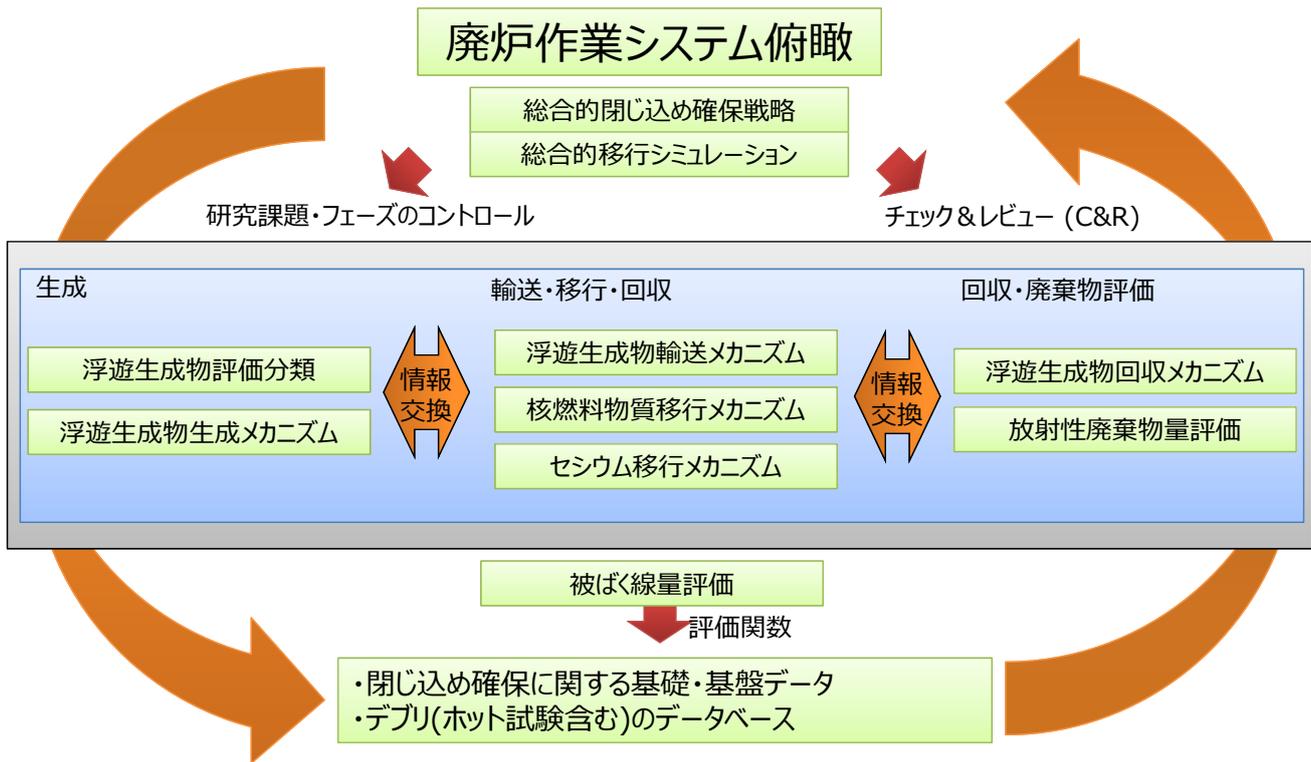
【国内外の動向】

- 燃料デブリ切削時の放射性微粒子の飛散挙動に関しては、TMIのデブリ取り出し、JRR-3の廃炉、核燃料サイクル工学研究所のグローブボックス解体、電中研データベース等、整理すれば1F廃炉現場においても有効に使えるデータがあることが分かった。

- 国際廃炉研究開発機構(IRID)のプロジェクトにおいては、2021年度の取り出し開始を目標に2017～2018年度にかけて検討や開発を進める主要5課題(1.デブリ加工時の特性把握、2.閉じ込め手法、3.捕集・回収技術、4.検出技術、5.システム成立性)を抽出している。本課題ではホット試験は実施しない。

- 大量のデブリを対象とする廃炉工程においては、総合的な閉じ込め性能確保が必須である。必ずしも負圧によるインリークの確保が確実ではない場においては、微粒子生成メカニズムに基づく発生量抑制や輸送・挙動把握による広がり抑制、さらに被ばくや廃棄物の低減が必須の課題である。多くの試験はコールドで可能であるが、現場適用性の観点からホット試験も実施する意義がある。

● Project ALPHA (Advanced Leak prevention for highly-contaminated Activity)



(1) 廃炉作業のシステムの俯瞰

閉じ込めを確保と、高線領域での放射性微粒子生成を伴う作業の両立を図るためのシステムを構築する。

1. 閉じ込め確保策の調査検証

- 閉じ込め確保策の調査
- 作業により生じる微粒子閉じ込めシステムの概念検討
- 福島を想定した、閉じ込め確保策検討

2. 過去のGB解体などの作業の再評価

- 放射線管理データの再評価によるデータベース化
- 海外事例の調査とデータベース化

3. 総合的な閉じ込め性能評価手法

- 調査結果、粒子生成、移行、回収などで得られた情報などを統合して、総合的な仕組みを考察する

※2.5年で個々のシミュレーション等は、可能。統合化するための設計を、3.で考えていく。

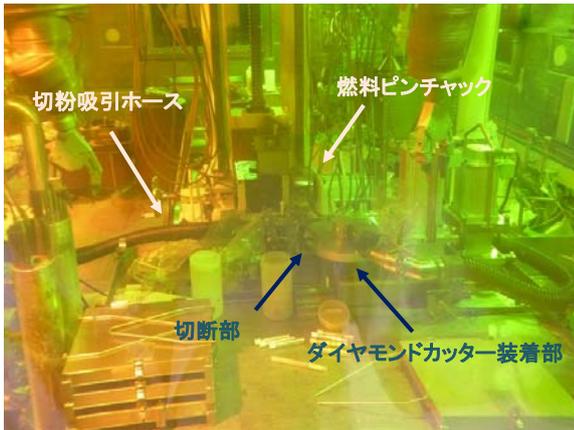
(2.1) 放射性飛散微粒子の生成

過去のデータベースや模擬デブリ、燃料ピン等の切断時に発生する微粒子を観察、評価することにより、その量や粒径分布情報等を得る。粒径分布等のデータベースは粒子の輸送・移行等の検討に必要なデータである。生成メカニズムの解明が進めば、生成の抑制の検討も可能となる。

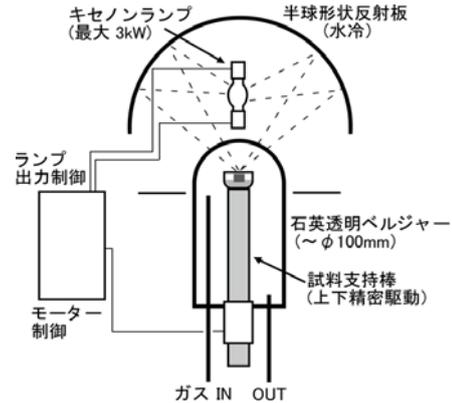
【提案例】

- MOX燃料ピンの切断に伴う微粒子発生量・粒径等の評価や過去に切断を行った際のフィルタ上の捕集粒子評価等

- ワイヤーソー切断・レーザー溶断等を模擬した微粒子の生成メカニズム評価や粒径分布の観察、(Amホット試験含む)。



MOX燃料ピンの切断工程の例

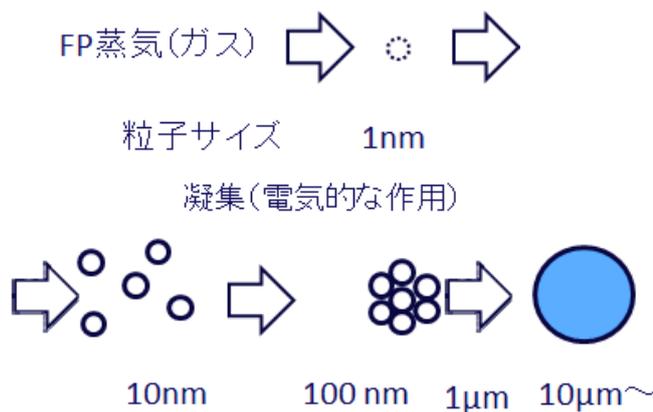


集光加熱による模擬デブリ溶融試験の例

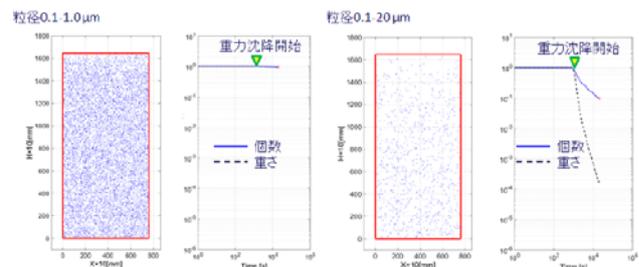
(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(気相-1)

構造体、配管等の切断作業において、発生直後の微粒子は数nm～数100nmであり、電気的作用による凝集、周囲の水の凝集や吸湿により最大約数百 μm まで粒径が成長する。粒径は、移行挙動（重力沈降やフィルタ除去）に影響するパラメータである。特に廃炉作業で想定される湿潤雰囲気下での粒子挙動（とくに粒径成長）について知見は僅少であるため、高温高湿度場での粒子挙動の把握試験を実施し、データベース構築を目指す。

粒子核形成



高温高湿度雰囲気下でのエアロゾル粒径成長のイメージ

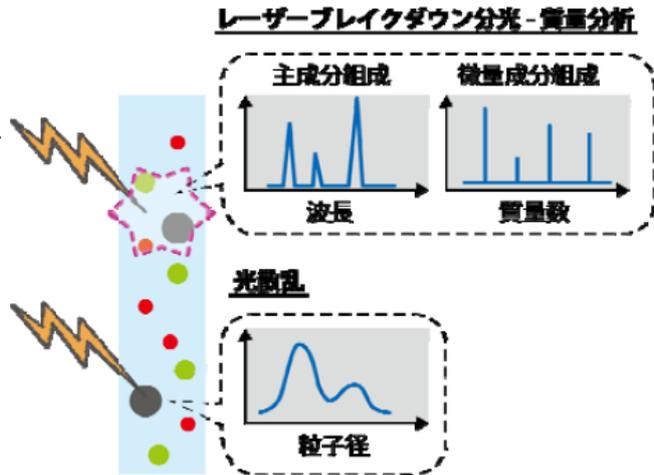


粒径が重力沈降に及ぼす影響の解析例

(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(気相-2)

原子力施設で用いられる放射線測定や一般のエアロゾル評価に用いられるカスケードインパクトでは、デブリ取り出し等で発生する浮遊生成物の組成やサイズ分布を迅速、且つ、その場で測定することは出来ない。レーザーブレイクダウン分光-質量分析と光散乱を組み合わせたカスケード型光計測システムを用いた浮遊生成物のin-situ計測を実施する。

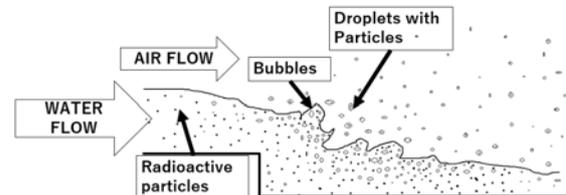
- ・集光させたレーザーを用いて粒子のプラズマ化（ブレイクダウン現象）させその発光分光を観測。さらに質量分析から、粒子を構成する主成分・微量元素の定性・定量評価を行う。
- ・光散乱を用いた粒径分布評価を行う。小型化を図り、グリーンハウスの出口HEPAフィルタ前などに設置して、発生する微粒子の分析をリアルタイムで行うシステム開発を目指す。



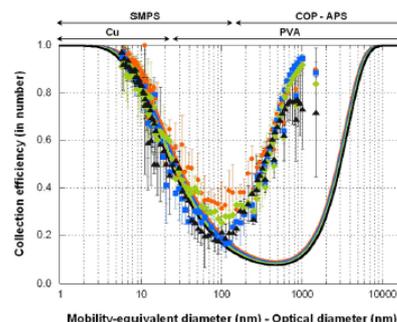
(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(気相・気液界面-1)

放射性微粒子(コロイド、イオン含む)の輸送や移行挙動を気液界面、気中において把握し、総合的閉じ込め性能向上の足がかりとする。ミスト生成挙動はレーザーによる観測だけでは、粒子一粒一粒に対しての評価が困難であることから、シミュレーションを含め検討する。フィルタ技術や回収システムの提案もスコープに入れる。

1. 界面からの微粒子生成基礎挙動評価
気液界面からのミスト生成挙動をせん断力、粒子密度(表面張力)、発熱量などの関数として評価する。

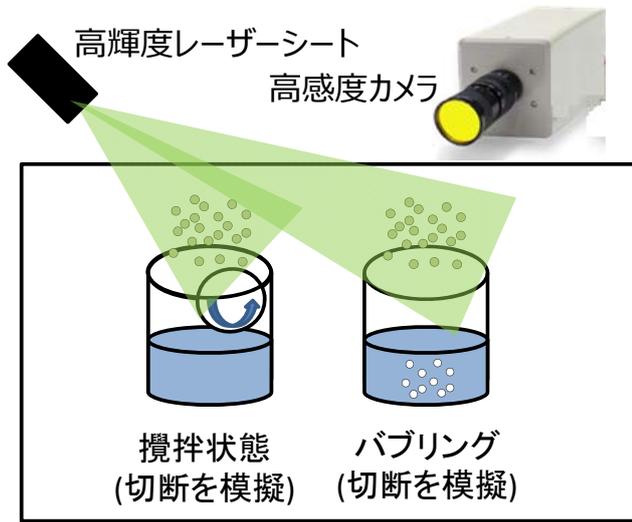


2. 微粒子吸着挙動評価
粒子サイズ(nm~ μ m)毎の粒子回収挙動を評価する
0.1 μ mサイズは吸着性能が悪い

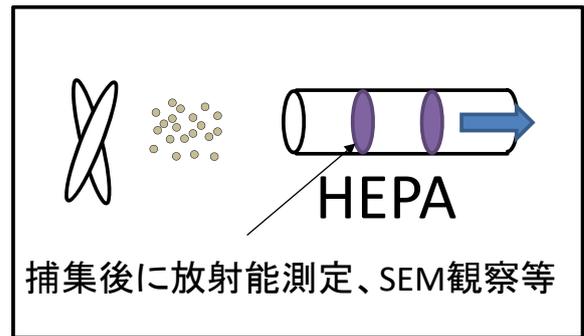


(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(気相・気液界面-2)

放射性飛散微粒子を作業空間内に閉じ込めるために、その気液界面での移行や気中での飛散、及びHEPAによる捕集後の挙動把握を行う。具体的には、レーザーと高感度カメラを用いて気中の微粒子を可視化することにより、効率的に捕集するための情報を得る手段を検討すると共に、 α ダスト特有の線量評価や液相から気相へ移行したものの捕集挙動を調査する。レーザーによる計測手法は、5年後をめどに廃止措置フィールドでの試験を目指す。



可視化手法を用いた気液界面における飛散挙動把握のイメージ

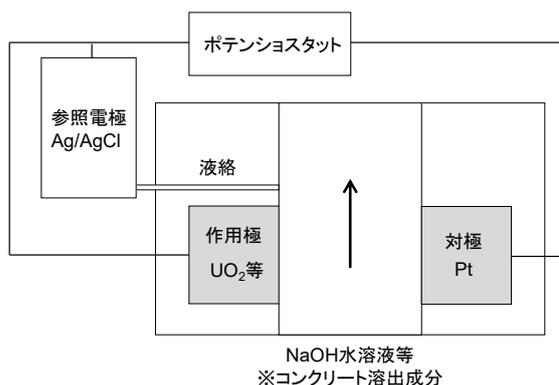


HEPA捕集試験のイメージ

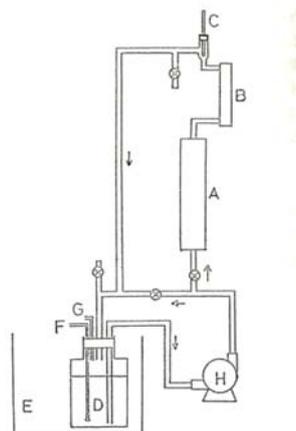
(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(液相-1)

デブリの取出しにおいて発生する α ダストは、表面積が大きく、またその表面は新しく露出したものであるため、冷却水の激しい流れに晒された際、に多くの物質を溶出させることが予想される。そのため、流動環境下での溶出挙動を把握することは重要である。加えて、MCCI生成物やコンクリート構造物の掘削に伴い放出されるコンクリート由来の成分は、 α ダストの溶出挙動に影響を与えることが予想される。

流動条件や溶液組成をパラメータに浸漬試験を実施し、その溶出挙動を調査する。また、電気化学的な評価を取り入れ、溶出メカニズムの解明や腐食電流密度を用いた定量的な解析を試みる。



流動場における電気化学的手法を用いた溶出試験の模式図



電気化学的手法を用いた溶出試験の装置案

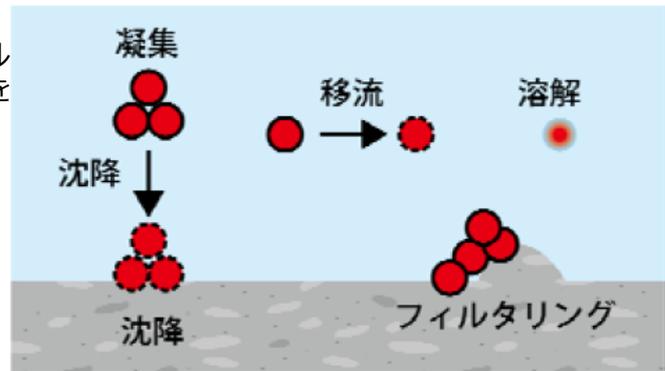
(2.2) 放射性飛散微粒子の輸送・移行(液相-2)

微粒子の移行挙動は沈降やフィルタリングなどの過程により、溶存種よりも複雑になる。また、高い比表面積のため、溶解・再沈殿などの副反応による粒子の変質と汚染の拡大も想定される。

- 模擬微粒子のコロイドとしての特性や格納容器内及び環境中の様々な媒体との相互作用を評価・整理し、移行モデルの高度化に資するデータを取得する。

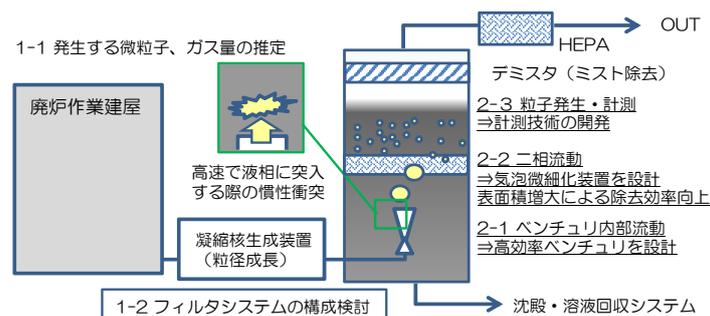
想定される微粒子のサイズ分布，比重を下に，モデル微粒子を選定し，炉内水の組成条件で以下の評価を行う。

- 動的光散乱による安定性評価（沈降実験）
- バッチ法による付着量評価（付着量評価）
- カラム法による破過挙動評価（フィルタリング評価）
- 粒子サイズを考慮した熱力学計算による変質評価



(2.3) 放射性飛散微粒子の回収・廃棄物評価

廃炉作業における切断作業に伴い発生する放射性物質(主に粒子状物質)の除去においてはHEPA等の高性能フィルタが有効である。しかしこれらのフィルタは高性能が故、目詰まり等により、交換頻度が高いため、前段にプレフィルタを設置することが一般的である。廃炉においては高性能かつ信頼性・保守性の高いフィルタシステムの開発が重要である。本提案においてはベンチュリスクラバ・気泡微細化装置・デミスタ等で構成される粒子除去システムの開発を目指す。

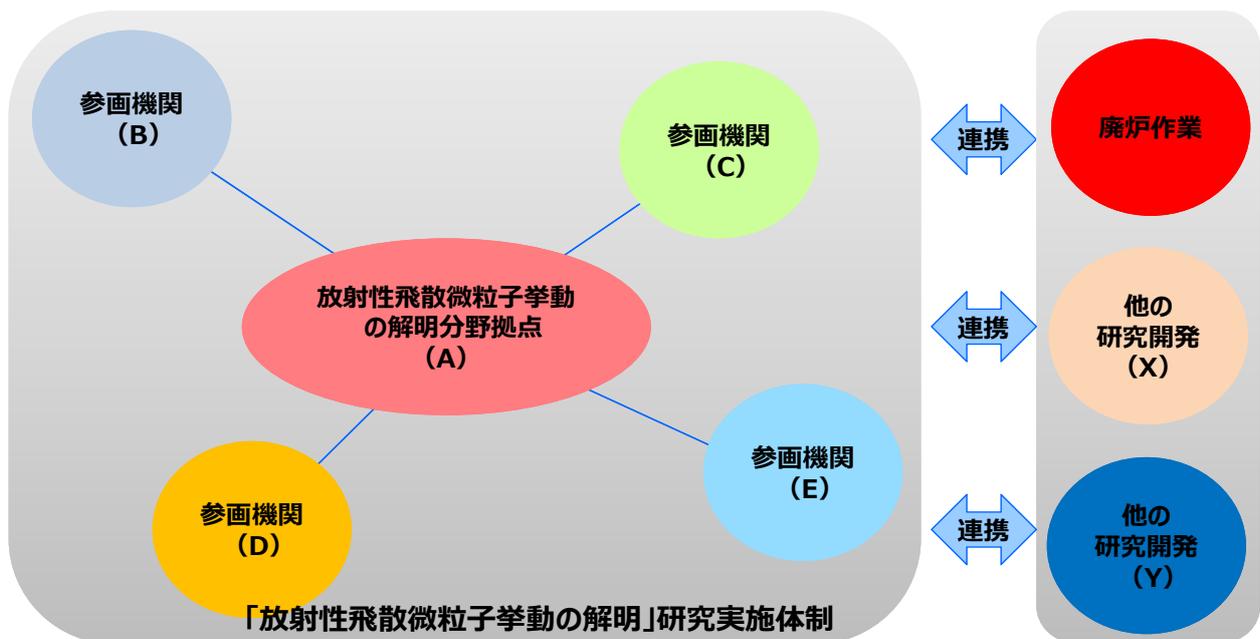


(4) 被ばく線量評価、クライテリアの設定

グリーンハウス内外や敷地境界における線量や放射性物質濃度の合理的な許容範囲の設定にはデブリ由来微粒子の生体への影響把握が不可欠である。また作業者の被ばく量の正確な把握のため、フィルタ透過や空間線量の基礎的評価を行う。

【提案例】

- ・ 作業員ならびに一般公衆の被ばく線量評価への適応性評価
- ・ 被ばく低減の観点からの閉じ込め性能検討
- ・ HEPAへの極微粒子のもぐりこみによる検出効率への影響評価
- ・ 軽元素を随伴するαダストからの中性子(γ線)による空間線量率評価
- ・ 湿潤ダスト捕集後の乾固によるHEPAダストフィルタの透過量評価



- ・ 長年にわたる1F 廃炉事業を支えるべく、コア人材ないしコア研究を中心とする拠点が形成され、長期的に事業に携わっていくことのできる体制構築を志向する。
- ・ 廃炉作業や他の研究開発と積極的に連携・協力する。

- 燃料デブリ切削時に発生するダストの性状把握や移行挙動の解明に係る多くの試験はコールド環境にて実施可能と考えられる。
- 燃料デブリ・マトリクス中のPuやその他の超ウラン元素などに着目することも重要であり、試験によってはコールドでの模擬が困難なものも存在する。U試験はもちろんのこと、Pu試験やホット試験におけるデータも必要である。
- Puの取り扱いが可能なホット試験施設(JAEA核サ研・大洗研)における試験は運転状況や許認可の問題から、第1期(FY29-31)は限定的なものにならざるを得ない。ウラン試験に関しては各施設、第1期から実施予定。
- 連携研究タスクフォースの考え方にに基づき、第1期は大規模な装置開発や試験ではなく、基礎・基盤研究を中心に実施する。

4. 中長期ロードマップ(実施時期)



● 達成目標

A：「総合的閉じ込め戦略に係る基本的な考え方」の提示（2018年度末）

- 知見の不足により具体的なニーズが得られない状況を踏まえて、現在の研究開発動向等を踏まえた知見をベースに2018年度末までの成果を加えた「基本的な考え方」を提示。
- 必要なホット試験実施項目の洗い出し

B：R&D成果の一次とりまとめ結果（2019年度末）

- 2019年までの研究成果のとりまとめを行う。



C：総合的閉じ込め戦略に係る基礎・基盤データ（2020年度末??）

- 総合的なデータを引用可能な形で整理する。

D：Puホットデータ、実規模データの提供（202?年）

- 模擬デブリやMOXを用いたホット試験から得られるデータの提供
- 実規模で利用可能なデータの提供

※ 成果の検証等に必要と考えられる現場データやサンプリングニーズについては、その都度関係者に伝えるものとする。

● コア人材の設定

- 実施各機関においては、中長期的に必要となる人材（コア人材）を設定し、コア人材を中心とした研究開発を検討する。

● 若手人材育成のための計画

- 中長期的に必要となる人材を育成する観点から、大学・研究機関等間で共同研究を実施する等、連携の強化に努める。
- 廃炉基盤研究プラットフォームの諸活動、福島リサーチコンファレンス等の場を活用する。

● 評価の視点

- 各年度ごとに得られた研究成果を分科会等でレビューし、事業全体の整合性なども含めた研究開発の品質をチェックする。(C&R)
- 必要に応じて、C&Rの結果を研究開発戦略へ反映し見直す。
- 研究開発の実施者からも積極的に、研究開発戦略への反映点を提案させるとともに、廃炉作業等に貢献できる知見をわかりやすく整理し、論文化や学会発表等の成果の発信に努める。

● 考え方

- 現象の理解の深化の各段階で、廃炉プロジェクト側と情報交換し、研究成果をデブリ取出し戦略、工法の開発、閉じ込め戦略策定に反映させることに努める。
- 現象として未解明な部分も多いので、成果については第三者の学術的なピアレビューを受け、公表することに努める。