



デブリの生成過程と取扱い

倉田 正輝

日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター
廃炉研究プランナー

Kurata.masaki@jaea.go.jp

日本原子力学会2022年廃炉委員会公開シンポジウム

令和4年6月25日



本日の概要・論点

0. 燃料デブリの特徴 **-取出す対象物としての観点で-**

1. どこにどのような燃料デブリが存在するか？

- 「**典型事故シナリオ**」と「**1F事故シナリオ**」の相違
- **1F燃料デブリの特性と堆積状態の理解について**

2. 燃料デブリの取扱いの難しさ・注意点は？ 実デブリの分析をどうやるのか？

- 取出し作業のおよその流れ
- **燃料デブリ分析による特性評価の方法について**
 - **廃炉ニーズの観点**
 - **分析技術の観点**
 - **サンプル代表性の観点**

○ 典型事故シナリオの理解、1F固有事象の理解について、詳細は以下を参照ください。

H29-30年度経産省原子力の安全性向上を担う人材の育成事業「軽水炉過酷事故に対処できる人材育成基盤の構築」

M. Kurata et al., Phenomenology of BWR fuel assembly degradation, J. Nucl. Mater. 500 (2018) 119-140.

M. Kurata et al., Advances in fuel chemistry during a severe accident; Update after Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident, in Advances in Nuclear Fuel Chemistry, edited by M. Piro, Elsevier, Woodhead Publishing, 2020

0. 取出す対象物としての燃料デブリの特徴

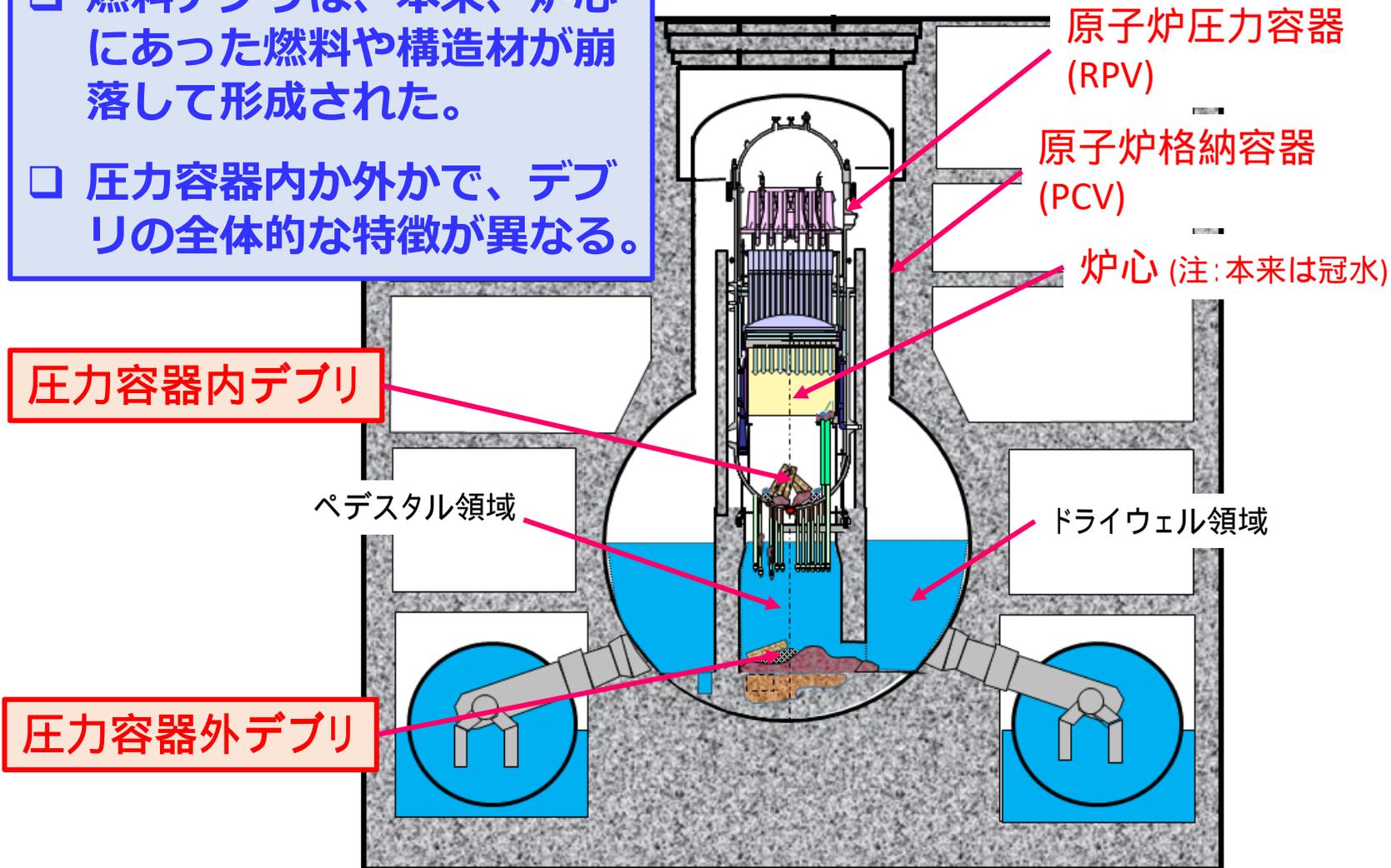
燃料デブリは「unknown unknowns」、その意味は？

- 燃料デブリ取出しの工程設計・管理には「燃料デブリの特性データベース」が必要
- データベースには、種々の物性・特性について、平均値（or中央値）と、不確かさの範囲を評価され、格納
- ところが、燃料デブリでは、
 - **分析の基準物質が存在しない** ⇒ 後者のunknown
 - **不確かさの評価には膨大な分析が必要**、現実問題として、デブリ取出し初期には、評価困難 ⇒ 前者のunknown
- 従って、燃料デブリ取出しは、データベースを、内部調査や事故進展解析等で補完し、安全裕度を十分に大きく取ったエンジニアリングで進めていくことになる。
- どこまでのunknownであれば、安全裕度を十分に大きく取った工程设计ができるか、さらに、そこからどのようにunknownを減らせば、設計の「逐次的な」合理化につながるのかが、工学としての課題

燃料デブリは、我々が初めて目にする全く新しい物質という意味ではないことにご留意いただきたい。未解明なこともまだまだ多いが、概略的な特性の理解は少しずつ進んでいる。

燃料デブリは、主に2領域に存在

- ❑ 燃料デブリは、本来、炉心にあった燃料や構造材が崩落して形成された。
- ❑ 圧力容器内か外かで、デブリの全体的な特徴が異なる。



3号機の建屋断面 (現時点での模式図)

1. どこにどのようなデブリが存在するか？

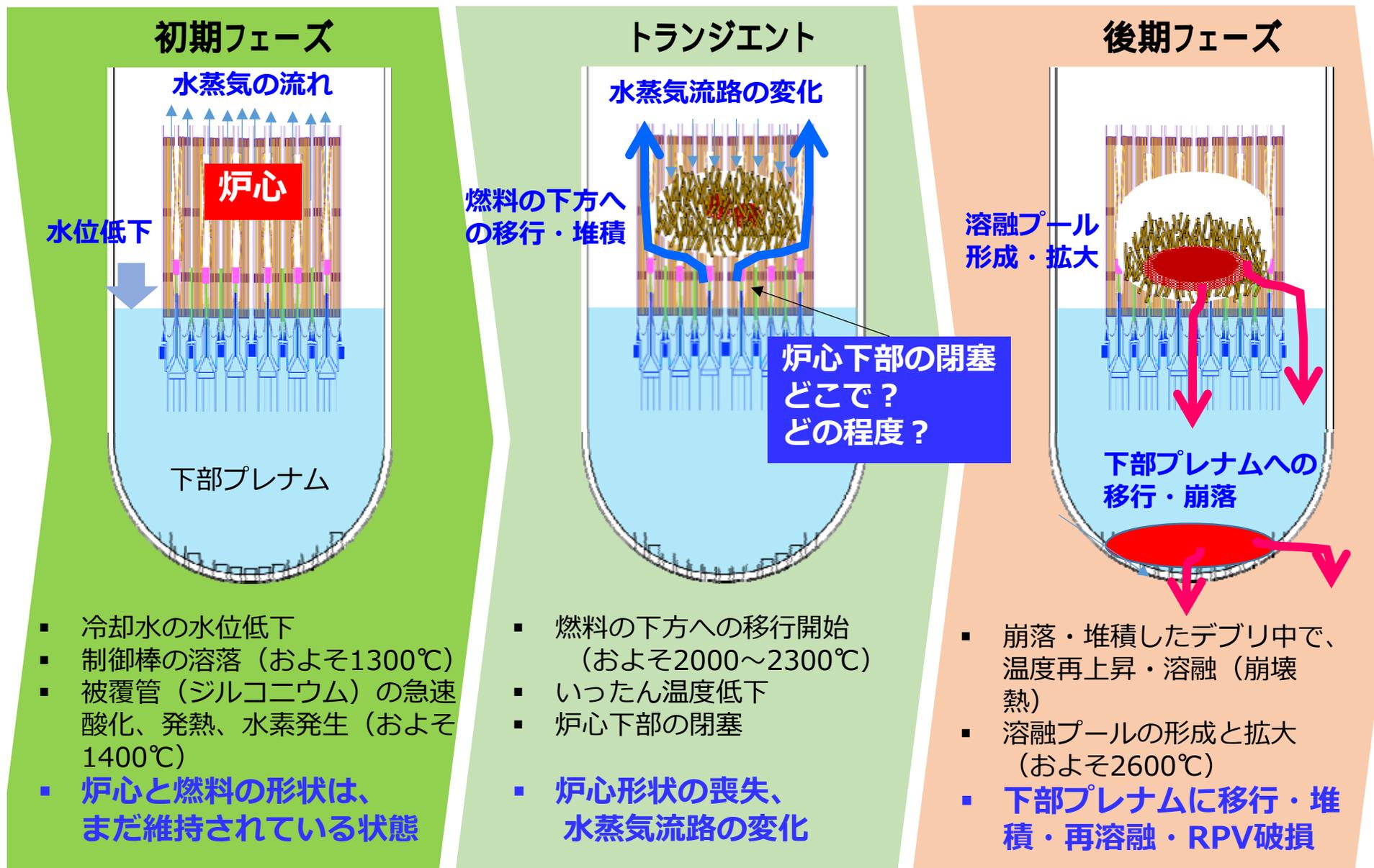
□ シビアアクシデント・・・メルトダウン、メルトスルー、MCCI（チャイナシンドローム）というイメージ

例：NHK番組廃炉への道のCG・・・炉心で燃料が高温溶融し、原子炉圧力容器下部に溶落、圧力容器を溶融破損して格納容器に溶落、さらにコンクリートを溶融しつつ下方や横方向に広がる。

(MCCI: Molten Core Concrete Interaction)

- ❖ このイメージは、米国スリーマイル原発事故の解析に基づいて評価された、「**典型事故シナリオ**」に基づいている。
- ❖ 内部調査や最近の研究により、**1F事故シナリオは典型事故シナリオとかなり異なっていた**ことがあきらかになってきている。
- ❖ 「**1F事故シナリオ**」は、**号機間でも異なっており**、燃料デブリの特徴や分布に大きく影響している。

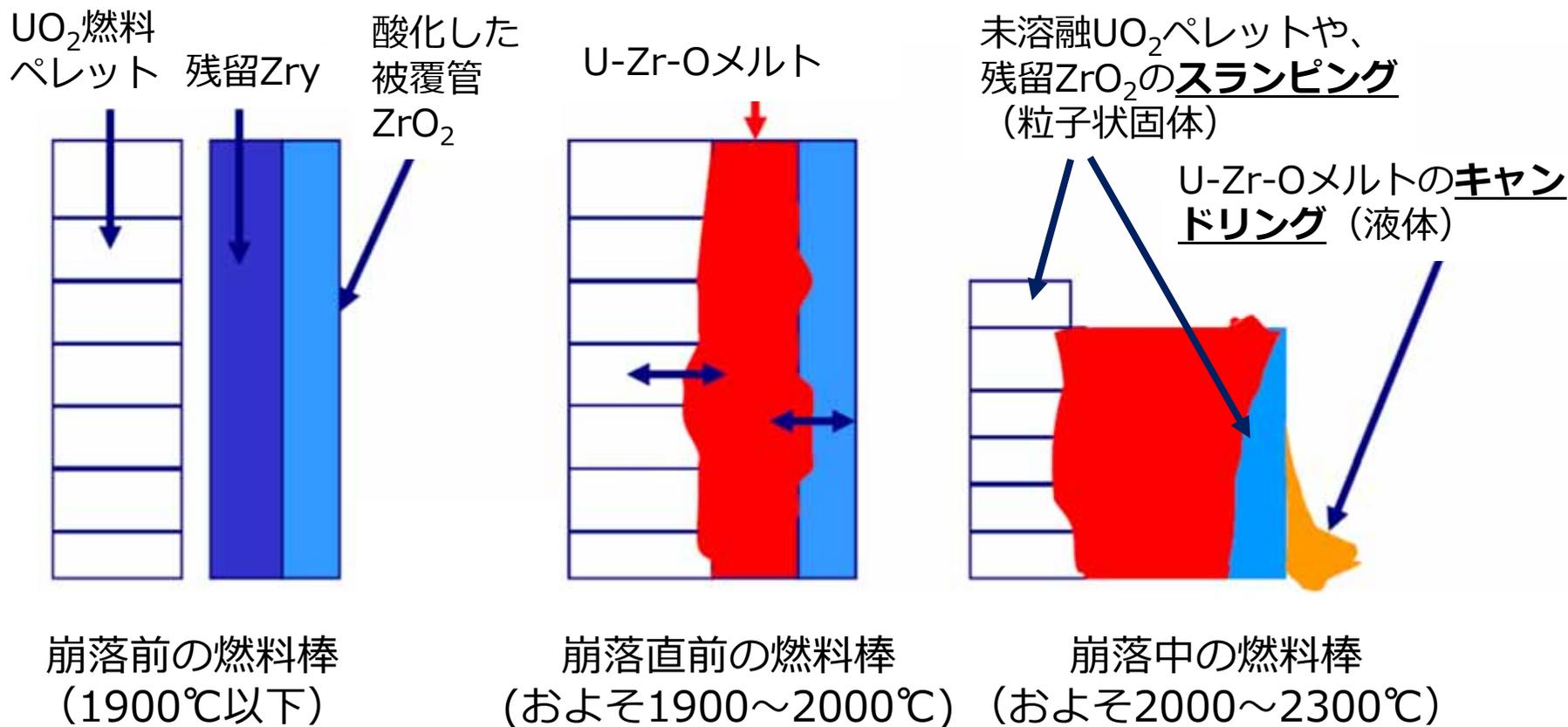
典型事故シナリオ -圧力容器内の3つのフェーズ-



この典型シナリオが、メルトダウンというイメージの背景となっている。

燃料崩落現象の理解

-初期フェーズ～トランジエントでの燃料ふるまい-



□ 燃料溶融は、約1900°C以上で、急速に燃料と被覆管の間の反応層で液相化が進み、約2000～2300°Cで、**固体と液体の混合状態**で崩落する現象。

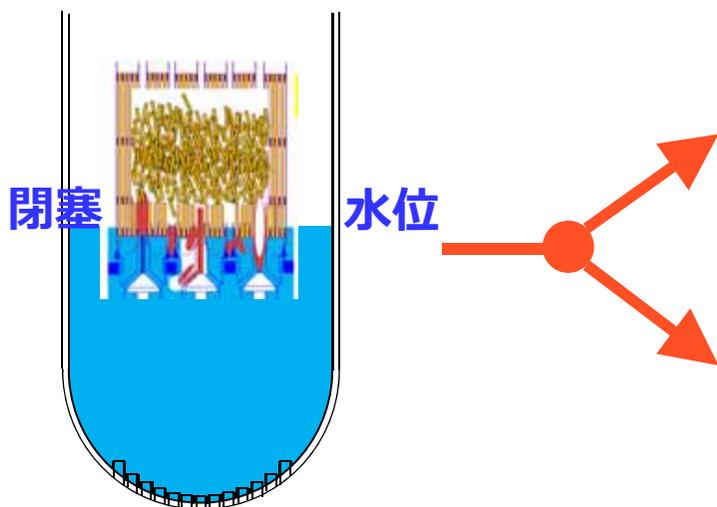
メルトダウンというイメージは、あまり適切ではない。崩落は、溶融物（メルト）だけでなく、むしろ粒子状や塊状の固体を多く含んで起こる（スランピング）。粒子状なのか、塊状なのかは、崩落⇒堆積した後の再溶融のメカニズムに影響する。

燃料崩落現象の理解

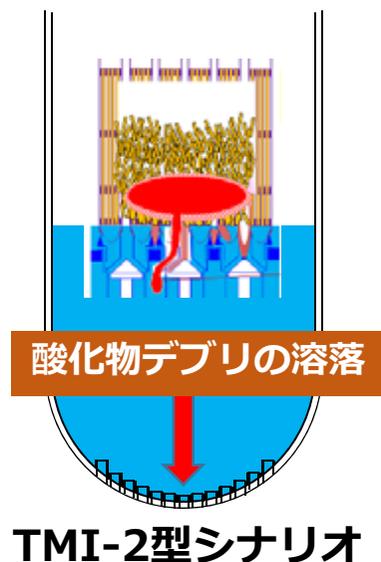
- トランジエント～後期フェーズ -

シナリオ分岐の重要因子

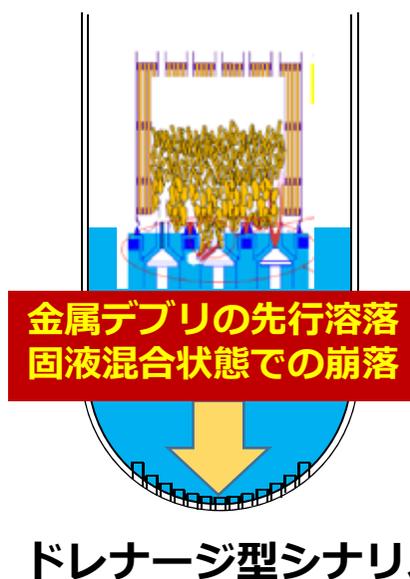
- ・ 崩落時の冷却水水位
- ・ 炉心下部の閉塞程度



燃料崩落途中
(トランジエント)
の炉心イメージ



- 【TMI-2型】
- ・ 稠密に閉塞される
 - ・ デブリ中に水蒸気が供給されず、崩壊熱を除去できない
 - ・ 溶融プール形成・拡大
 - ・ 高温溶融酸化物デブリの溶落 (約2600℃)



- 【ドレナージ型】
- ・ 稠密に閉塞されない
 - ・ デブリ中に水蒸気が供給され、崩壊熱をある程度除去
 - ・ 大きな溶融プールは形成されない
 - ・ 固体液体混合状態で次第に崩落 (約2000～2300℃)

【推論】

- ・ 1F事故は、両者の中間的なシナリオ (ドレナージ要素が強い順に、2号>3号>1号) と推定
- ・ この現象は燃料デブリの分布や特性に大きく影響

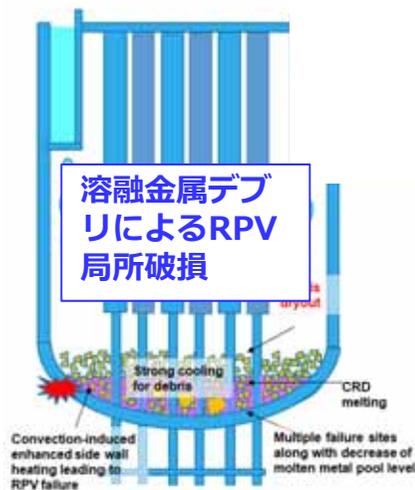
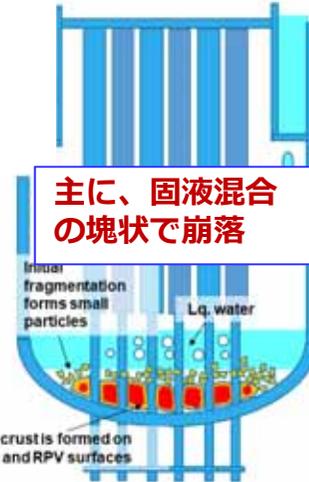
燃料崩落現象の理解

-燃料デブリの压力容器下部への堆積-

2号機



3号機



□ 燃料デブリの崩落・堆積

2, 3号機共通：冷却水中に崩落、デブリはいったん冷却・固化

2号機：粒子状デブリが多い（酸化・分散しやすい、空冷しやすい）

3号機：塊状デブリが多い（酸化・分散しにくい、空冷しにくい）

□ 燃料デブリのドライアウト・再溶融

2, 3号機共通：崩壊熱で、金属デブリ先行溶融、酸化物デブリ温度上昇

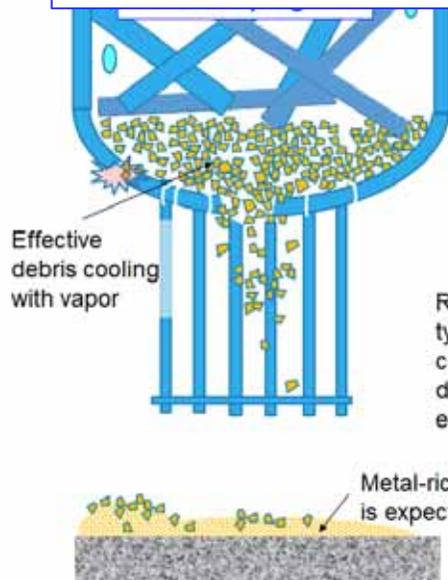
2号機：溶融金属デブリによる局所破損

3号機：溶融金属デブリによる局所破損の可能性？

さらに、酸化物燃料デブリが半溶融状態（固液混合）になり、大規模破損

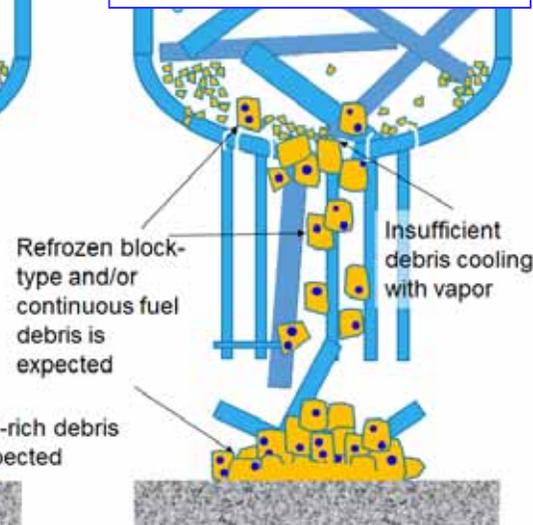
2号機

金属デブリによる側面、および底面の局所破損
残留した酸化物燃料デブリは空冷された可能性



3号機

金属デブリによる局所破損があった可能性
酸化物燃料デブリは粘性の高い状態で数時間かけて崩落
(温度は高々2000-2300℃)



燃料デブリのメルトスルーというイメージは、あまり適切ではない。

2号機は、燃料デブリの多くは圧力容器内に残留（メルトに至らず）。

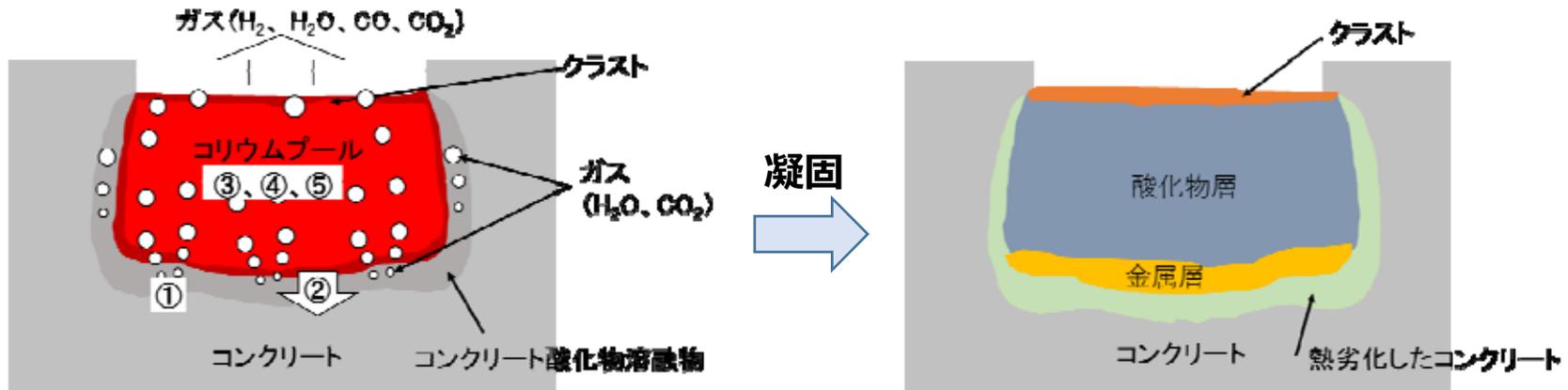
3号機は、粘性の高い、固液体の混合状態の燃料デブリが崩落・移行。

□ 燃料デブリの崩落・ペDESTAL内へ堆積

2号機：溶融金属デブリ（およそ1000～1300℃）による局所破損・移行、燃料デブリ（主に酸化物）は圧力容器底部に残留、構造材（鋼材）は概ね形状を維持

3号機：酸化物燃料デブリが半溶融状態（固液混合：およそ2000～2300℃）で数時間かけて移行、構造材は大きく破損しているが、溶融した様子はあまり見られない

MCCI -圧力容器外の典型事象-



□ MCCI : Molten Core Concrete Interaction

- 溶融した燃料デブリ（**2600℃以上**）が、**短時間**で、格納容器底部コンクリートの**ピットに溶落**して、**コンクリートを溶融浸食**する現象
- コンクリート熱分解、ガス発生、溶融浸食・混合、酸化還元、などが複雑に進行
- 凝固すると、表面クラスト、酸化物デブリ（燃料デブリ主成分）、金属デブリ、劣化コンクリート等に分離

ところが、

2, 3号機では、高温溶融した燃料デブリの溶落は起こらなかったと推定
1号機でも、直近の内部調査で、典型事象の描像と異なる観測結果

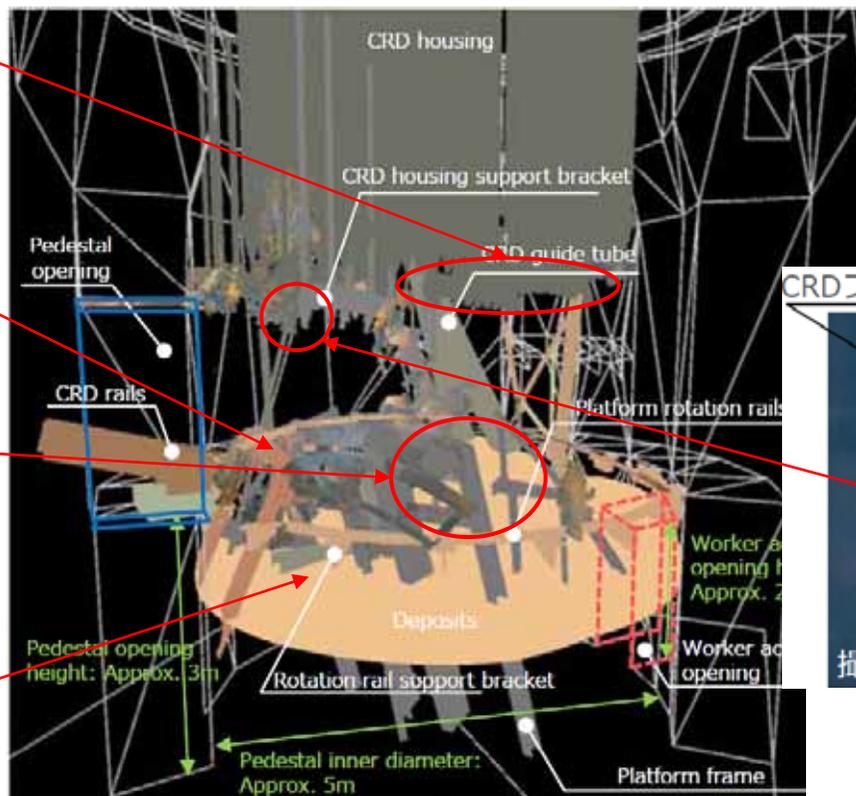
参考：3号機の内部調査

CRD支持鋼材が喪失
(溶融or機械的に崩落)

中空にあったプラットフォームが脱離し、堆積物中に埋もれている

中央部に山状の堆積物が存在
(半溶融物が堆積したことを示唆)

堆積物中に未溶融・半溶融・凝固の構造物が残留している可能性



【参考文献】

原子炉格納容器内部調査及び燃料デブリ取り出しに向けた対応状況 ~3号機原子炉格納容器内部調査映像からの3次元復元結果~ (2018年5月18日)

<http://www.nsr.go.jp/data/000230857.pdf>



CRDフランジ上に付着物
(溶融・凝固したデブリ?)

観測結果

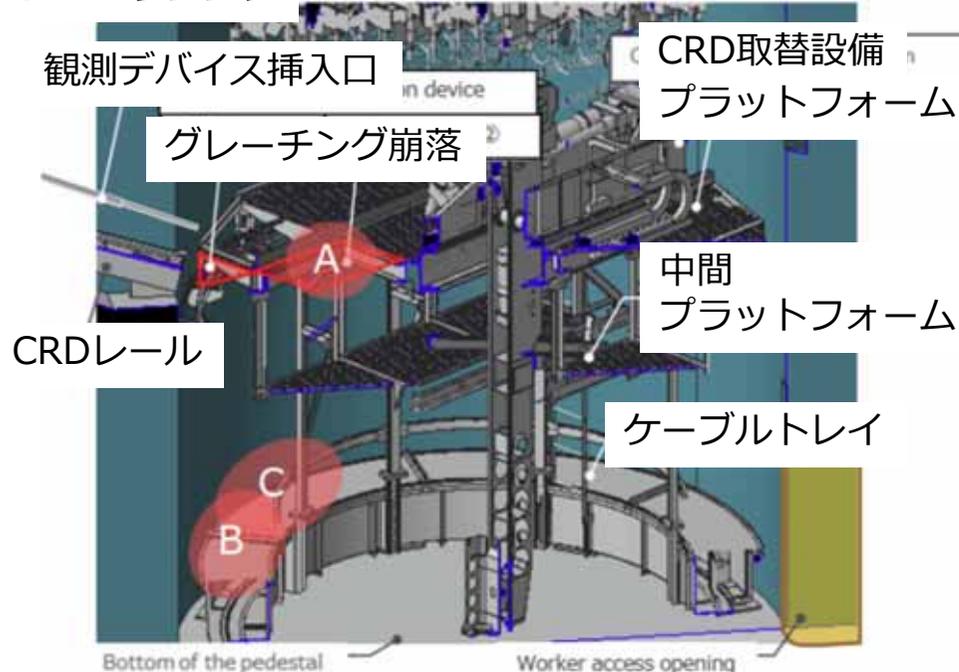
- ❑ 本来コンクリート床面の上 (最大約3m) に堆積
- ❑ 堆積物の中央部に山状の盛り上がり
- ❑ 堆積物中に構造材が残留

推論

粘性の高い (固体液体混合状態) の燃料デブリ (2000~2300℃と推定) が、数時間かけて崩落・堆積と推定、ほとんどMCCIが起きていない可能性

参考：2号機の内部調査

CRDハウジング



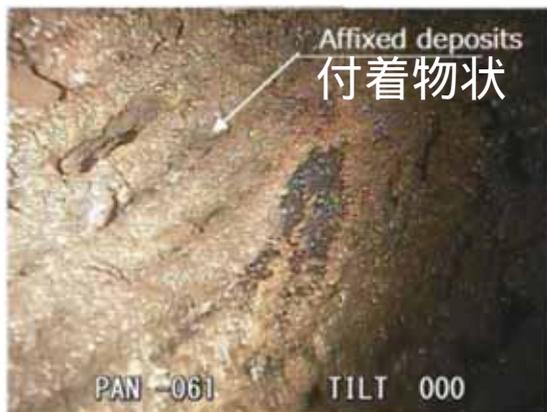
観測結果 2号機のペDESTAL領域内側

- ペDESTAL床一面に、石ころ状/砂状の堆積物を確認
- 燃料集合体部材（上部タイププレート）の一部が落下
- ケーブルトレイ等の構造物がほぼ残留
- グレーチングの一部に大きな孔

推論

比較的低い温度（1000～1300℃と推定）で、ほぼ金属デブリのみ溶落、酸化物デブリはあまり溶融せずに、圧力容器に残留

領域 A



領域 B



領域 C



参考：1号機の内部調査



堆積物より上部



堆積物より下部



ペDESTAL開口部付近

PCV底部

観測結果

- PCV床/構造部上に、塊状・溶岩状の堆積物
- ペDESTAL開口部付近に、テーブル状の堆積物、それより下部ではコンクリートが消失し、内部の鉄筋やインナースカートが露出
- PCV底部の堆積物が上下の層を形成
 - 上層：コンクリート表面に堆積物が存在
 - 内部：コンクリート材が失われ鉄筋が残存、空洞状
 - 下層：堆積物が存在

典型シナリオからの予想とはかなり異なっている

【参考】
1号機PCV内部調査の状況について(2022年5月26日)
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2022/05/3-3-2.pdf>

*Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. 2019/02/14 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Primary Containment Vessel Internal Investigation

1F事故での燃料デブリ分布・特性

-事故シナリオの特徴に基づく、現状でのまとめ-

	1号機	2号機	3号機
圧力容器内	<ul style="list-style-type: none"> □ ほとんど残留していないと推定 	<ul style="list-style-type: none"> □ 燃料デブリの大部分が堆積 □ 空隙が多い可能性 □ 多くの破損孔、構造材と混合の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> □ 燃料デブリが、一部残留している可能性
圧力容器外	<ul style="list-style-type: none"> □ ペDESTAL内外に広がっている（コンクリート面上にも存在） □ 典型的MCCIと異なる複雑な堆積状態 	<ul style="list-style-type: none"> □ 主に金属デブリが、比較的薄く堆積と推定 □ MCCIはほとんど起きていないと推定 	<ul style="list-style-type: none"> □ コンクリート上に燃料デブリが堆積 □ デブリ固液状態からの複雑な凝固、構造材の巻込み、等、複雑な堆積状態

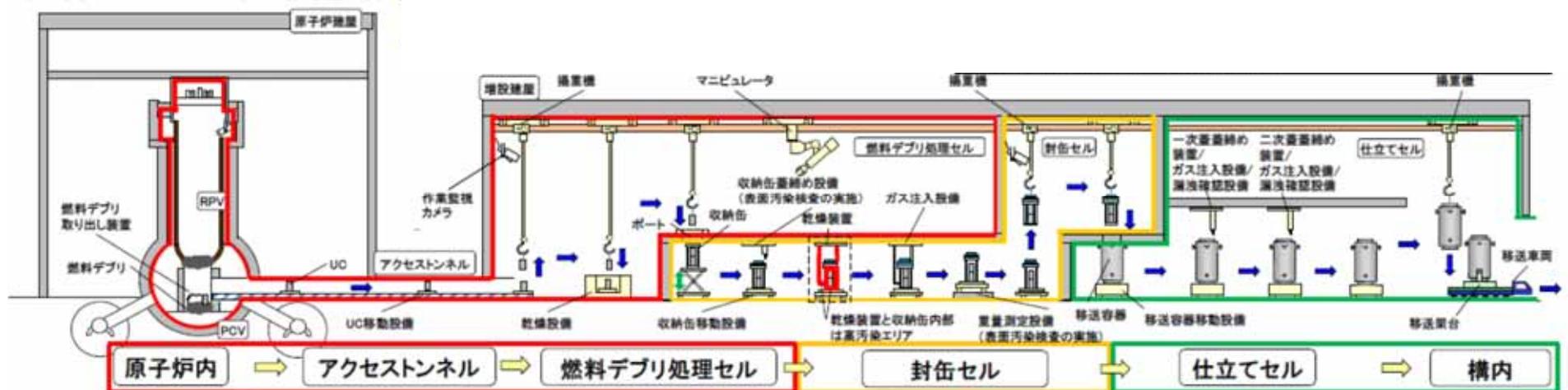
- 号機ごとに「圧力容器内デブリ」と「圧力容器外デブリ」の分布と特徴が異なる。
- 号機・領域ごとに、デブリの溶融・凝固過程や混合状態が異なるため、その物理化学的な特性や堆積状態、構造物の破損状態、等が大きく異なる。

号機・領域ごとに、燃料デブリの諸特性について、
 平均値とバラつき評価が難しく、かつ、不確かさの範囲が広い。
 (燃料デブリ取出し工程設計における大きな課題： unknown unknowns)

2. 燃料デブリの取扱いの難しさ・注意点は？ 実デブリの分析をどうやるのか？

- 取出し作業のおよその流れ
- 燃料デブリ分析による特性評価の方法について
 - 廃炉ニーズの観点
 - 分析技術の観点
 - サンプル代表性の観点

デブリ取出し工程の概略、移送容器封入まで



○ デブリ取出し（炉内）

- デブリへのアクセスルート構築
- 閉鎖系（レッドエリア）構築
- デブリ取扱い治具設計、製作
- デブリ分割、切断、セルへ搬入

○ 封缶

- 収納缶設計、製作
- 閉鎖系（イエローエリア）構築
- デブリ乾燥処理
- デブリ重量測定
- 表面汚染検査

○ 仕立て、構内輸送

- 移送容器設計、製作
- グリーンエリア構築
- 不活性ガス封入
- 漏洩検査

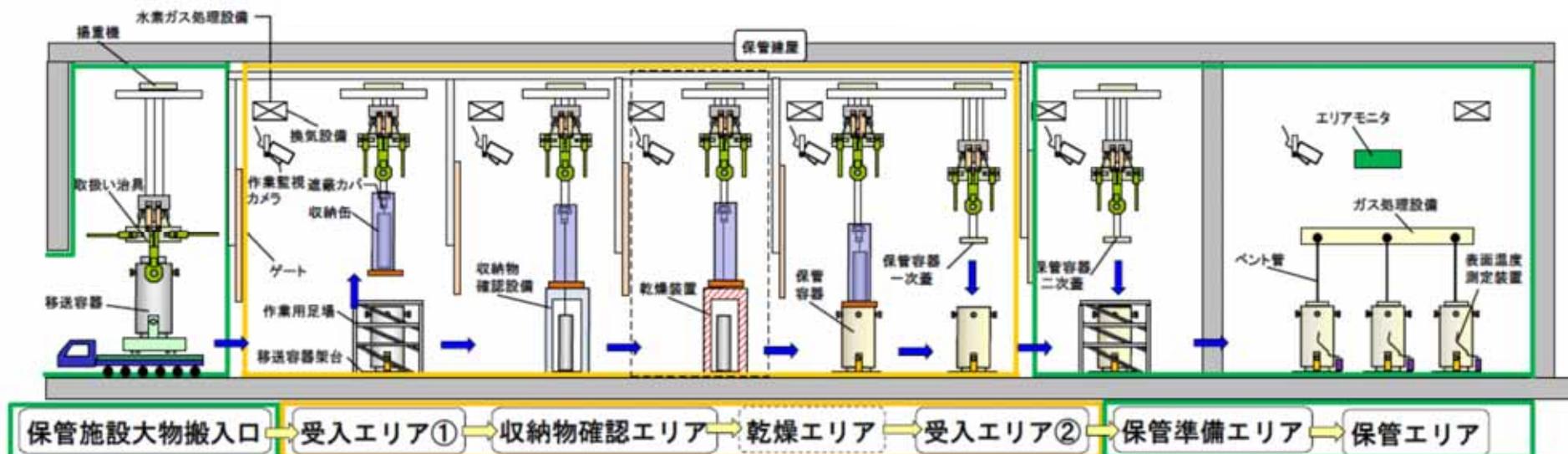
これらの工程設計で必要となる評価項目

- 未臨界性
- 除熱
- 閉じ込め
- 遮蔽
- 核物質計量
- 機器や容器の構造
- 材料の経年劣化
- デブリの経年変化
- 水素対策
- 火災防止
- 遠隔操作性
- 作業性
- 乾燥
- 工程管理
- それぞれのトラブル対策
- 等

以下の公開資料に基づいて筆者がとりまとめ、まだ工程が確定しているわけではない。

<https://irid.or.jp/research/20200000-2/>

デブリ取出し工程の概略、保管まで



○ 受入れ

- 収納缶取出し、乾燥
- 閉鎖系（イエローエリア）構築
- 保管容器封入、一次蓋

○ 保管

- 保管容器、二次二
- グリーンエリア構築
- エリアモニタ
- ガス処理
- 表面線量連続測定

評価項目はおよそ同じ

以下の公開資料に基づいて筆者がとりまとめ、まだ工程が確定しているわけではない。

<https://irid.or.jp/research/20200000-2/>

燃料デブリの取扱いの難しさ・注意点は？

【課題①】 評価項目が多分野、評価因子が多様

- それぞれの工程について、未臨界性、核物質計量、取扱い安全性（水素対策、火災防止など）、工程管理、放射線対策・遮蔽、ダスト閉じ込め・換気、除熱、機器や収納缶の設計、経年劣化評価・対策、遠隔操作性、トラブル対策、等、多くの設計項目について、関連する設計因子を評価し、工程設計を行う必要がある。
- これら設計項目・因子は、背景となる技術分野・専門性が多様であり、技術者・専門家の認識共有が極めて重要である。
- それぞれの設計項目・因子で、個別に、保守的に安全裕度を見込みすぎると、コスト増や作業の長期化につながる。

- # 設計項目ごとに、様々な課題やリスクが抽出される。これらの重要性・優先度をどう定めて、工程全体としてどう評価するのが重要となる。
- # また、設計因子を評価（設計式・設計値、誤差範囲、安全裕度検討）するためには、燃料デブリデータベースが必要となる。

しかし、⇒課題②

燃料デブリの取扱いの難しさ・注意点は？

【課題②】 燃料デブリ (unknown unknowns) を分析し、燃料デブリデータベースを整備する必要がある

- ミクロ、マクロの双方の観点で、unknown unknownsの分析・評価方法の整備が必要（背景：2つの観点でのサンプル代表性）
- ミクロ観点では、燃料デブリサンプル（g～kg規模）を定性定量する分析技術・手法の整備が必要（分析品質管理）
- 複雑で多様なデブリ分布や堆積状態を考慮すると、g～kg規模での分析データ積上げだけで、設計因子（評価式、バラつき）のデータベースを整備することは非現実的
- マクロ観点では、内部調査、事故進展解析などとの総合評価や、デブリ取出し進捗にともなって新たに得られる知見・データにより、エンジニアリングを合理化、安全性をいっそう向上、していくことになる（逐次的アプローチ）

サンプル代表性を考慮した燃料デブリデータベースの逐次拡充と、内部調査や事故進展解析との総合評価に基づく、エンジニアリングの逐次合理化・精緻化

課題①： 多様な設計項目・因子について

- 工程設計段階（大規模取出し前） -

- 全ての設計因子やリスクについて、実デブリ分析データを完備することは困難、エンジニアリングで安全裕度を大きく取って対応
- 取出し対象領域から採集した燃料デブリサンプル（数g～数100g規模）の「**現況分析**」で、工法・装置設計、取出しプロジェクトのエンジニアリングを支える、燃料デブリの基本的データ（設計根拠データ）を提示
- 併せて、「**安全評価用分析**」により、安全評価・設計の根拠データセットを提示
- 廃炉事業者は、燃料デブリの「現況分析」「安全評価用分析」データと、それ以外の知見・データ（内部調査、事故進展解析、等）による、総合評価に基づいてエンジニアリングを実施

設計根拠データを提示するには、限られた物量の燃料デブリサンプルについて、内部調査や事故進展解析と照合せながら、形成メカニズム、事故時に経験した環境、経年変化、等の詳細な特性を調べる必要がある。

課題①： 多様な設計項目・因子について

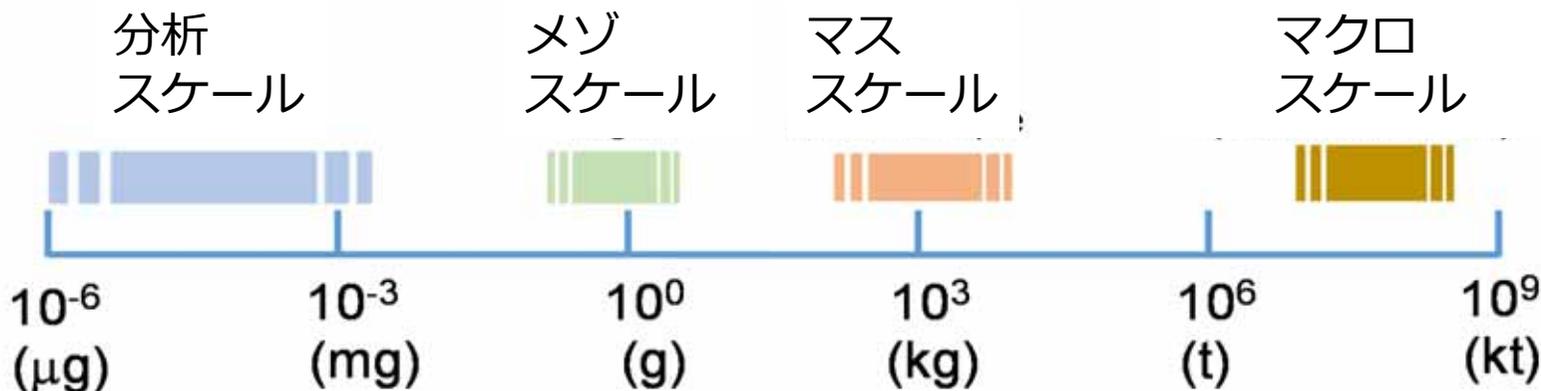
-廃炉オペレーション段階-

- 計画検討・工程管理、計量管理、それらの合理化、安全性のいっそうの向上に向けて、取出した燃料デブリから分析サンプル（数kg規模）を分取し、**「試行的な分析」**で、工学を支える**燃料デブリの基本的データ（設計根拠データ）**を**「逐次」**拡充・精緻化
- トラブル対応、想定外事象対応が必要となった場合には、分析サンプルの**「非定常（オンデマンド）分析」**により、**必要データを「優先的に」**拡充・精緻化
- 他方、製品仕様（収納物、廃棄体など）の確認のために、**「ルーチン分析：簡易全量分析と抜取り詳細分析」**を実施
- この段階でも、内部調査や解析で拡充される知見との**総合評価によるエンジニアリングが継続**

「試行的分析」「オンデマンド分析」等に基づく、エンジニアリングを支えるために、事故進展・デブリ形成メカニズムの理解の深化が必要となる。

⇒エンジニアリングと事故進展の理解の、「逐次的」進捗は、
廃炉オペレーションにおける車の両輪

課題② : unknown unknownsの分析 - 2つの観点でのサンプル代表性 -



分析装置で直接測定できる。
真値に近い分析値が得られる。

メゾスケール評価値の積上げで、平均的特性とバラつきを、ある程度は定量的に評価できると見込まれる。

分析データから直接評価できる。
真値に近い評価値が得られる。

工程設計・オペレーションには、マクロスケールで、デブリの平均的な特性とバラつきの知見が必要。

← **マイクロ観点でのサンプル代表性**

← **マクロ観点でのサンプル代表性**

- 技術・経験の積み上げで、**ある程度評価可能**
- 「現況分析」までに、**分析基準や品質管理**の準備が必要
- マススケール評価において、分析技術側と廃炉ニーズ側で、どの項目・因子をどのレベルで測定・評価するのかを**認識共有**する必要
- **測定原理やデブリ特性を熟知した「目利き」が重要 (⇒人材育成)**

- 分析データ積上げで、**定量的に評価することは現実的でない**
- ミクロ観点での分析技術向上により、第二のunknownを、内部調査や事故進展解析と照ら合わせた総合評価により、第一のunknownを、**逐次精緻化**し、エンジニアリングで対応
- **分野横断した「認識共有」「総合評価」の継続が不可欠**

参考： デブリ分析の品質管理

- 一般的な分析（例：使用済み燃料）では、サンプルの概略的な特徴は既知であり、分析の基準条件を設定しやすい。

例：使用済み燃料では、主成分はウランの二酸化物（蛍石構造）、FP組成や化学形、分布等の概略は推定可能、従って、分析計画（分析手順、定性・定量の方法）が定めやすい。

- 燃料デブリでは、多様なタイプごとに分析基準が必要

- 燃料やFP以外の成分が混入している可能性
- ミクロな組成・化学形・分布は、最初は、ほとんど予想がつかない
- 物理化学的特性や形態、サイズなどが多様

- 従って、

- どのデータを、どのような精度で得たいのか（**廃炉ニーズ**）を理解した上で、
- 各々の分析技術では、どんな物理量をどのように測っているのか（**分析手法・装置の基本原則**）を理解し、
- 過去の経験を過度に信用せずに、元素ピークや構造オーバーラップ、バックグラウンドの評価等を基本に立ち戻って実施し、
- 分析データは、手法・評価過程、サンプル採集位置、評価部位、判断根拠、評価日などを含め管理する必要がある。（**品質管理**）
- さらに、直接得られる分析値から、どこまで評価できるのか（**サンプル代表性**）を理解しておく必要がある。

まとめ

1. どこにどのような燃料デブリが存在するか？

- 内部調査、サンプル分析、事故進展解析などにより、号機・領域ごとの燃料デブリについて分布や特性の理解が進んでいる。
- 1F事故直後に、知見がほとんどない中で検討された「典型シナリオ」に基づく予想とはかなり異なり、号機・領域ごとに、多様で複雑な分布・堆積状態であることがわかってきている。

2. 燃料デブリの取扱いの難しさ・注意点は？ 実デブリの分析をどうやるのか？

- 燃料デブリ取扱いの課題のうち、デブリ特性評価に関する二つの重要課題「多様な設計項目・設計因子」「unknown unknownsである燃料デブリの分析方法」について議論した。
- 廃炉工程を着実に進めるには、内部調査や事故進展解析と照し合せた、燃料デブリの「現況分析」「安全評価用分析」「試行的分析」「オンデマンド分析」、並びに、製品仕様確認のための「ルーチン分析」が必要となる。
- 二つの観点でのサンプル代表性を考慮した、分析技術・方法、品質管理体制の整備と、これをけん引する熟練技術者、およびサポートする「目利き」研究者の育成が極めて重要である。