

福島第一原子力発電所事故への対応状況

① 廃止措置等に向けた取り組み

平成25年3月27日

日本原子力研究開発機構

内容

1. 東京電力福島第一原子力発電所（1Fサイト）の現況
2. 廃止措置等に向けた中長期ロードマップ
3. 廃止措置に向けた原子力機構の取り組み
 - 3-1 取組概況と研究体制
 - 3-2 廃止措置に向けた主な技術課題と最近の主な研究成果
 - 原子炉建屋内汚染状況調査
 - 燃料デブリ取り出しに向けた研究
 - 放射性廃棄物の処理・処分に向けた研究
4. 今後の取り組みについて
 - 研究拠点施設整備（モックアップ施設、放射性物質研究・分析施設）

1. 東京電力福島第一原子力発電所の現況

- 1～3号機の原子炉は、循環注水冷却システムの構築・維持により冷温停止状態を保持。
- 各号機のプールには、使用済燃料を保管中。
- 原子炉建屋内や周辺の敷地は、依然高線量。
(構内：最大約150 μ Sv/h(H25.3月測定)、スポット的には10Sv/h)
- 大量のガレキ、伐採木、汚染水処理廃棄物、処理水が発生。敷地内に貯蔵中。

各号機の状況

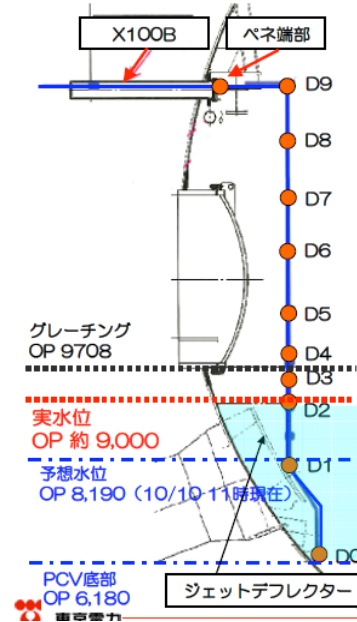
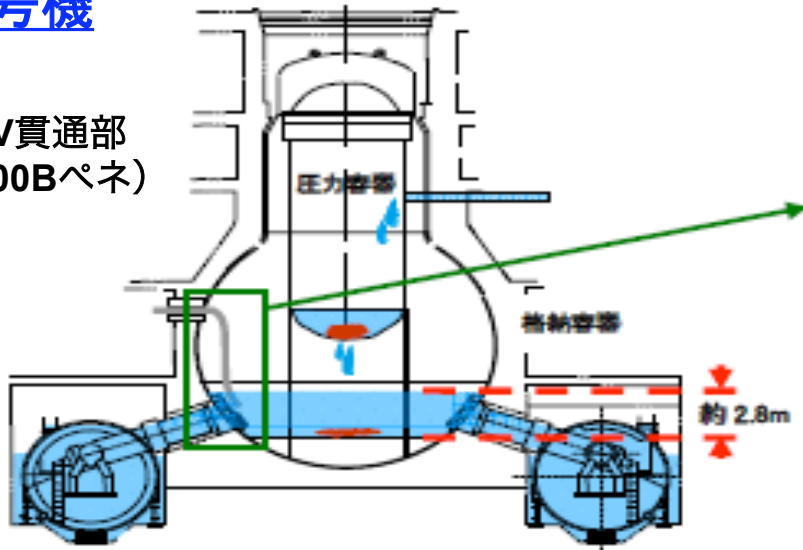
号機	原子炉		使用済燃料プール		原子炉建屋	
	注水状況		圧力容器下部温度	貯蔵体数	水温	雰囲気線量(最大)
1	淡水	約4.5m ³ /h	19.9℃	292体	14.5℃	約5.2Sv/h
2	淡水	約5.5m ³ /h	33.8℃	587体	14.4℃	約4.4Sv/h
3	淡水	約5.5m ³ /h	32.8℃	514体	12.4℃	約4.8Sv/h
4	—	—	—	1331体	24℃	約0.03Sv/h
計	—	—	—	2724体	—	—

原子炉の注水状況及び圧力容器下部温度、使用済燃料プールの貯蔵体数及び水温は、H25.3.25 11:00現在。
 雰囲気線量は、1号機:H24.7.4、2号機:H23.11.16、3号機:H24.11.27測定。4号機:不明。

2-1. 滞留水の水位・雰囲気線量の測定結果

1号機

PCV貫通部
(X-100Bペネ)



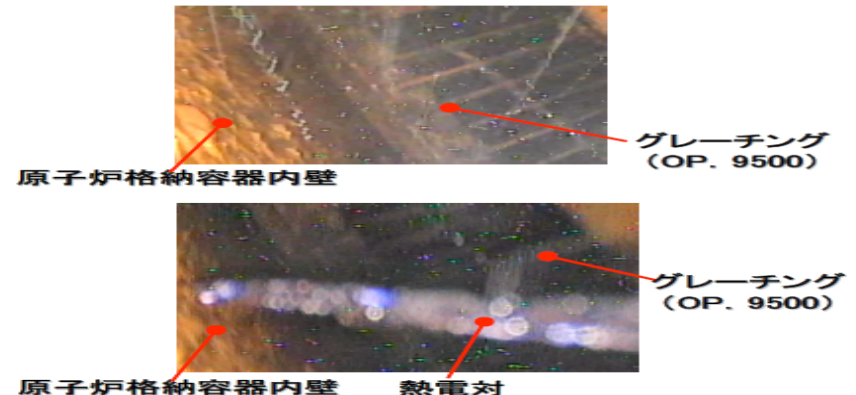
線量ならびに水位測定結果			
測定点	PCV底部からの距離	OP	線量測定値 (Sv/h)
ペネ端部	8,595	14,775	約11.1
D9	8,595	14,775	9.8
D8	(約7,800)	(約14,000)	9.0
D7	(約6,800)	(約13,000)	9.2
D6	(約5,800)	(約12,000)	8.7
D5	(約4,800)	(約11,000)	8.3
D4	(約3,800)	(約10,000)	8.2
D3	(約3,300)	(約9,500)	4.7
D2・水面	約2,800	(約9,000)	0.5
D1	-	-	-
D0	0	6,180	-

H24.10.10実施 (CCDカメラ、線量計)

滞留水水面は格納容器 (PCV) 1階グレーチングから約650mm下部 (O.P.約9,000mm) にあり, PCV底部を基準 (0) とした場合の水位は約2800mm

2号機

PCV内の水位レベルを1階グレーチングより上と想定していたが、グレーチング上に水面はないことが明らかとなった。



H24.1.19実施 (ファイバースコープ、熱電対)

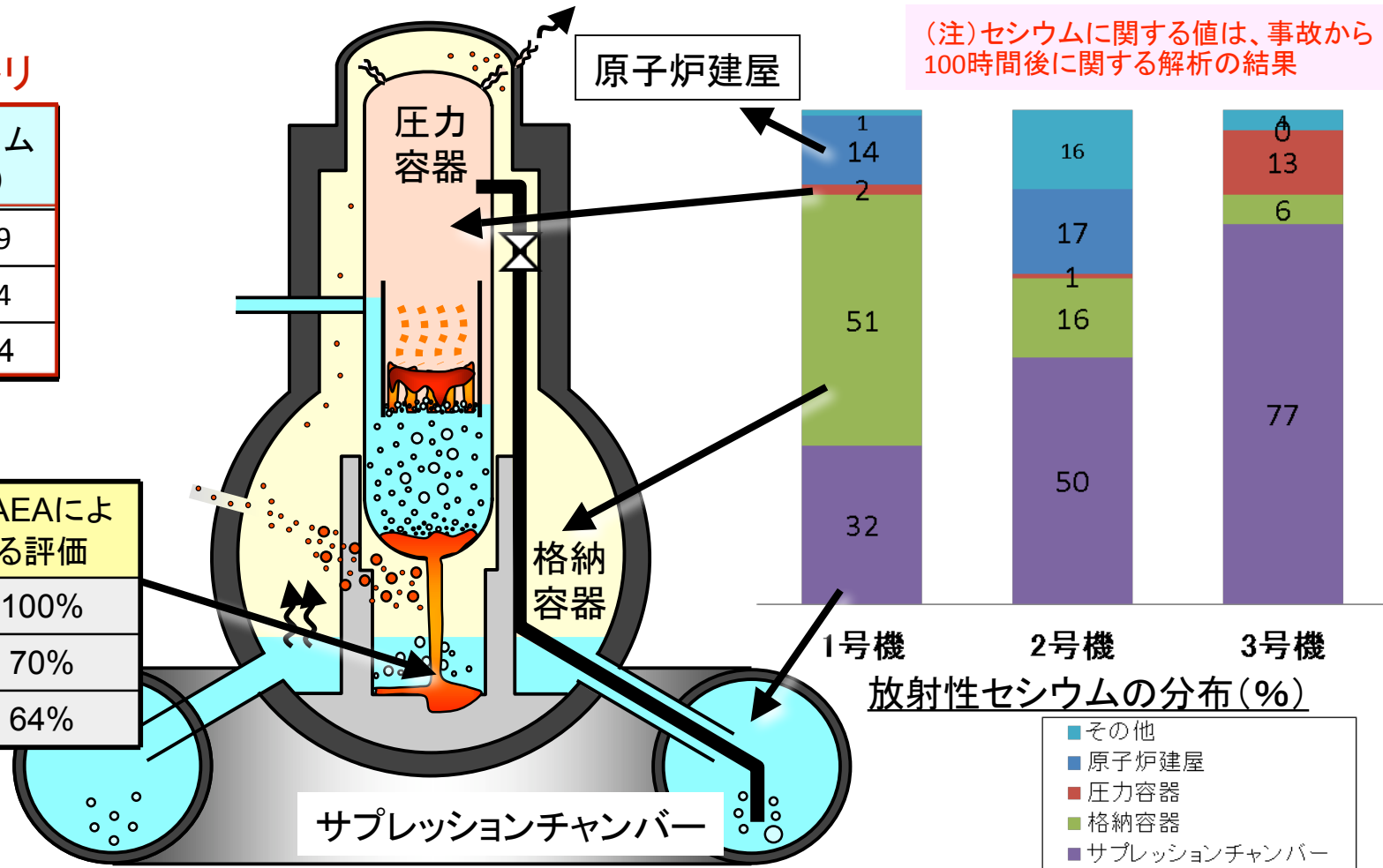
1～3号機中の燃料量と放射性セシウム量（解析による推定）⁵

炉心の初期インベントリ

	UO ₂ (ton)	セシウム (kg)
1号機	77	130.9
2号機	107	188.4
3号機	107	178.4

原子炉容器から落下したUO₂の重量割合

	東電による 評価	JAEAによる 評価
1号機	100%	100%
2号機	57%	70%
3号機	63%	64%



事故から2年後(現時点)の主要な放射性核種及び20年後の放射能(GBq)(2号機の例)
 セシウム以外は、大部分が燃料デブリ及び格納容器内に存在していると考えられる

	Sr-90	Ru-106	Cs-134	Cs-137	Ce-144	Pm-147	Pu-241
2年後	1.8×10 ⁸	2.3×10 ⁸	1.4×10 ⁸	2.4×10 ⁸	3.9×10 ⁸	2.6×10 ⁸	2.6×10 ⁸
20年後	1.2×10 ⁸	1.1×10 ³	3.4×10 ⁵	1.6×10 ⁸	4.4×10 ¹	2.2×10 ⁶	1.1×10 ⁸

使用済燃料プール（4号機）からの新燃料の取出し状況



撮影日：平成24年7月19日



燃料集合体の間から採取した瓦礫

- 燃料体に変形は見られなかった。
- 燃料棒は金属光沢があり、腐食や酸化の兆候は見られなかった。



燃料体の健全性確認調査

廃棄物、処理水等の貯蔵量 (H25.3.19)

廃棄物、処理水		貯蔵量	占有率
ガレキ類※	コンクリート、金属	58,000m ³	66%
	伐採木	51,000m ³	43%
汚染水処理廃棄物	廃スラッジ	597m ³	85%
	使用済みベッセル	490本	43%
処理水	RO及び蒸発濃縮装置後淡水受タンク	23,470m ³	75%
	濃縮廃液貯槽	5,508m ³	58%
	RO後濃縮塩水受タンク	241,712m ³	95%

※ガレキ類はH25.2.28

処理水貯蔵容量が逼迫⇒以下の対策を実施

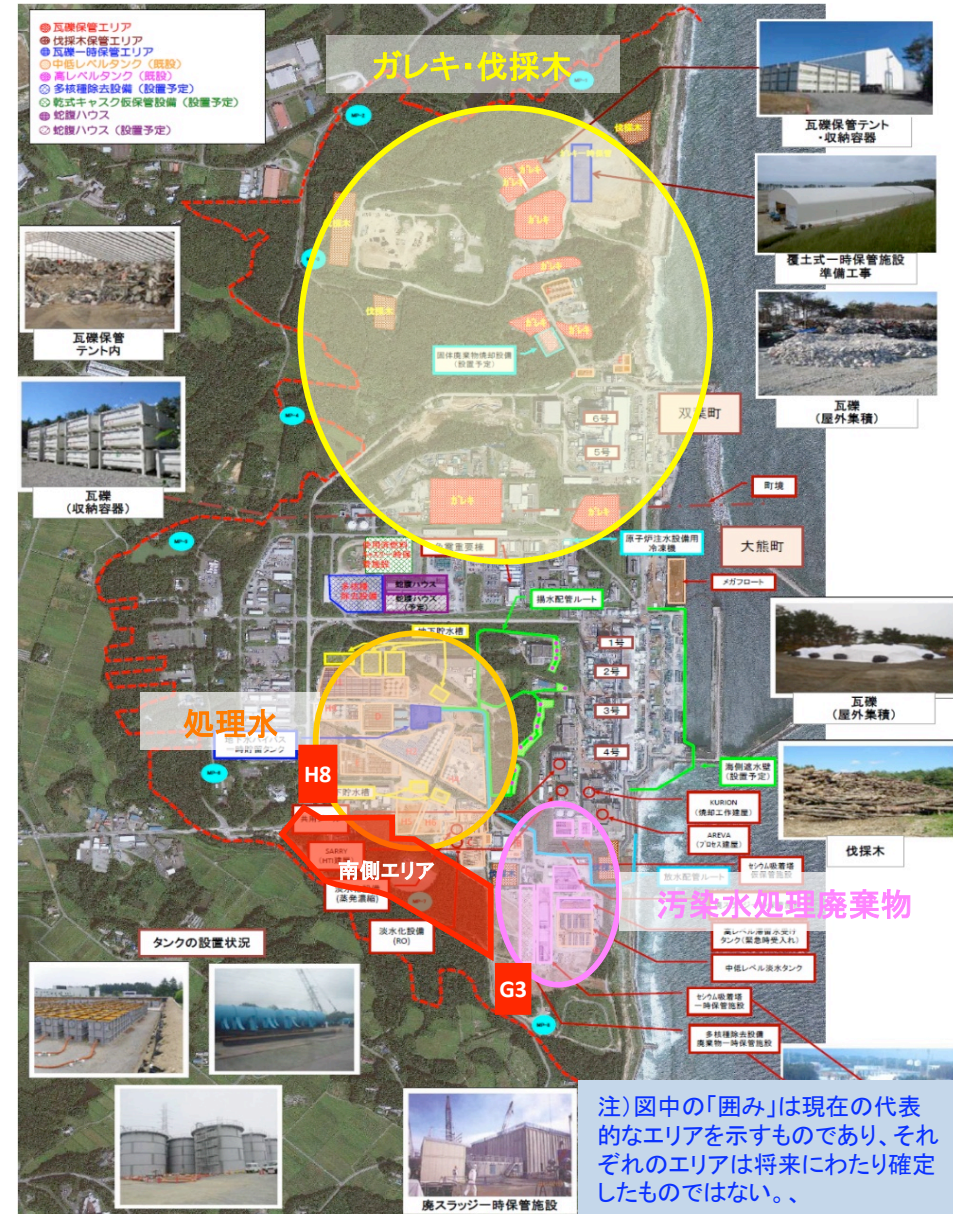
① 貯蔵タンクの増設

- 平成25年度上期中の貯蔵量を確保 (G3、H8エリアに増設)
- 更なるタンク増設の詳細スケジュールを策定 (南側エリア)

② 汚染水発生量の抑制・低減策の早期実施

- 地下水バイパス等による地下水流入抑制対策 (400トン/日の地下水流入)
- 建屋滞留水の塩分濃度及び放射能濃度の低減による水処理量低減・循環ループ縮小化

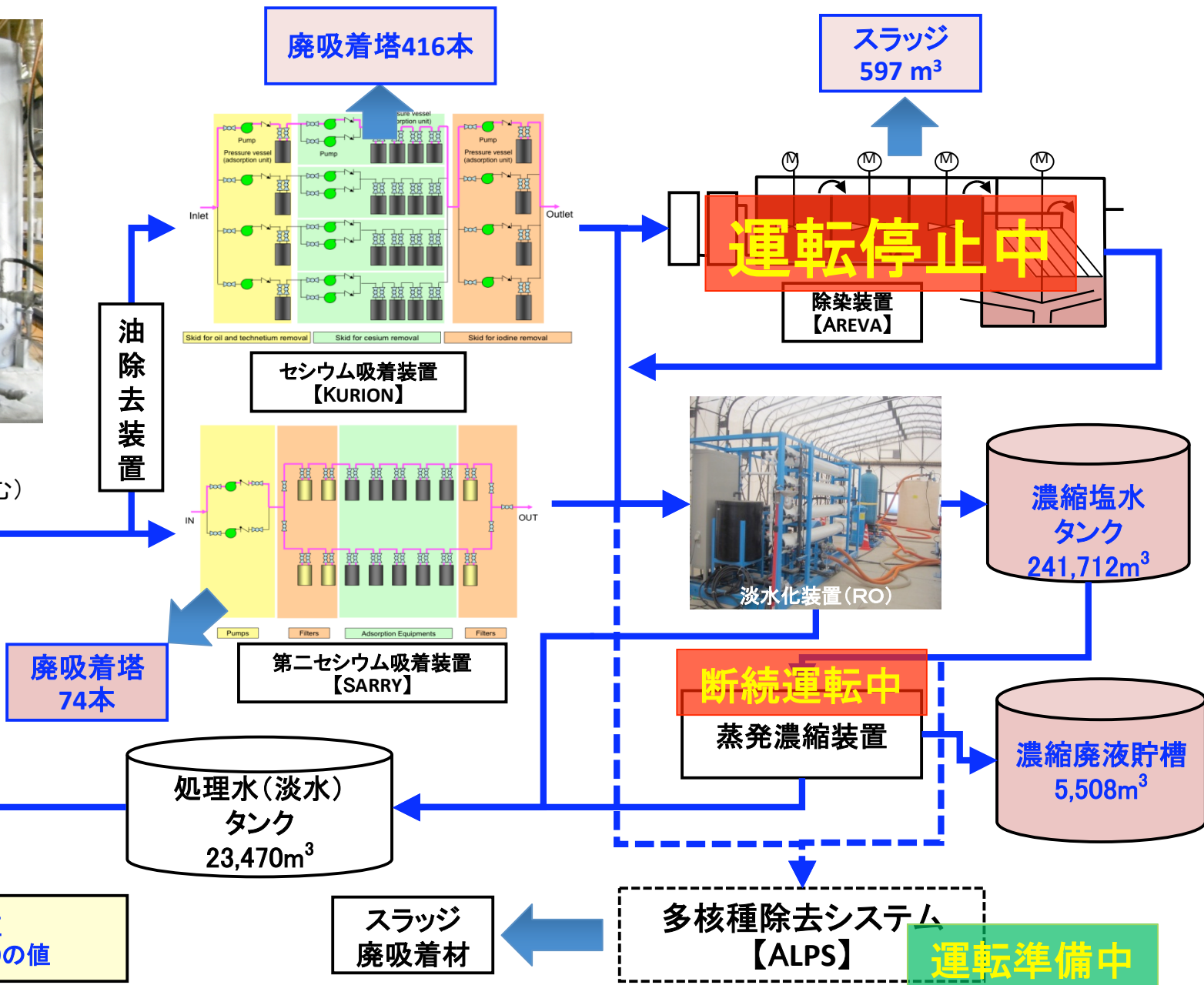
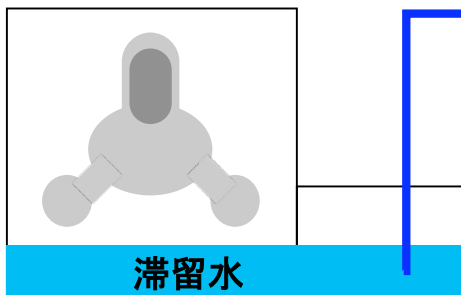
➤ 多核種除去設備の早期稼働、浄化水の海洋放出の再開、多種多様の廃棄物の性状把握、安全な保管、処理・処分が課題



廃棄物、処理水等の保管



SARRY吸着塔外観写真
φ1.4m×H3.6m、24t(遮蔽体含む)



廃棄物量はH25.3.19の値
タンク・貯槽貯蔵量はH25.3.19の値

2. 廃止措置等に向けた中長期ロードマップ

廃止措置へ向けた中長期ロードマップ

(ステップ2完了)

2年以内

10年以内

30~40年後

ステップ1, 2

第1期

第2期

第3期

<安定状態達成>

- ・冷温停止状態
- ・放出の大幅抑制

3号機 (H23年9月10日)



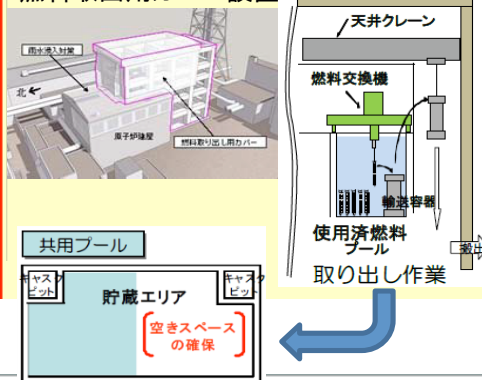
(H24年10月16日)



プール内の使用済燃料
取り出し開始まで

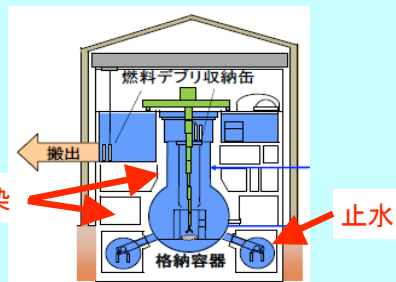
- ・プール内の使用済燃料取り出し開始
- ・追加放出及び廃棄物による敷地境界線量1mSv/年未満
- ・原子炉冷却と滞留水処理の継続

燃料取出用カバー設置



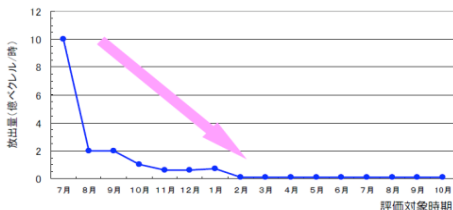
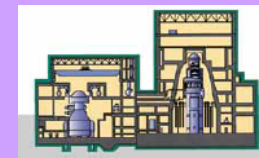
燃料デブリ取り出し開始まで

- ・全号機プール内の使用済燃料取り出し終了
- ・建屋内除染、格納容器修復・水張完了
- ・燃料デブリ取り出し開始
- ・原子炉冷却継続、滞留水処理の完了



廃止措置終了まで

- ・燃料デブリ取り出し完了 (20~25年後)
- ・廃止措置の完了 (30~40年後)
- ・廃棄物処理処分の実施



<1~3号機からの放射性物質(セシウム)の一時間当たりの放出量>

1~3号機からの放出量

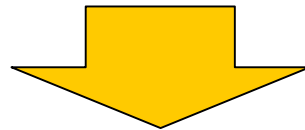
出典: 政府・東京電力中長期対策会議(H24年7月30日)を加工

ステップ1: 「放射線量が着実に減少傾向にある」状況を達成 (H23年7月19日)

ステップ2: 「放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている」状況を達成 (H23年12月16日)

平成24年7月の改訂ポイント

- **信頼性向上に係る実施計画を反映**
[事例]循環ライン配管の耐圧ホースをポリエチレン管に取替
- **作業実績及び技術開発成果の反映**
 - 使用済み燃料プールからの燃料の取り出し
 - 地下水流入の抑制
 - 研究開発体制の強化
 - 作業円滑化のための環境整備
- **作業の進捗に対応して、目標を明確化**
[事例]多核種除去設備の導入（汚染水の残留放射性核種の除去）



平成25年6月頃に改訂予定

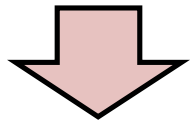
- 各号機の進捗状況に応じて、号機毎のロードマップの作成
- 燃料デブリの取り出しに係る工程をどの程度前倒しにすることができかが、重要な改訂ポイント。

3. 廃止措置に向けた原子力機構の取り組み

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故への 原子力機構の取組概況

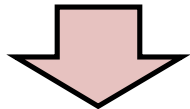
指定公共機関としての活動

平成23年3月11日～



中期計画で主要業務に位置付け

平成24年4月1日～



対応の基本的考え方

- 我が国唯一の原子力に関する総合的研究開発機関としての責務
- 福島技術本部を司令塔とし、原子力機構全体としてその人材、研究施設を活用し、最大限の貢献を果たす。
- 中長期的観点から継続して福島第一原子力発電所事故に対する取り組みを行う。

環境汚染への対処に係る研究開発

- 自治体・関係府省との連携、モニタリング・マッピングの継続
- 長期の環境中での放射性物質の動態研究など

廃止措置等に向けた研究開発

- 国の研究開発計画に基づく研究開発の実施
- ホット施設の活用、機構施設の廃止措置技術、経験の活用

国内外との連携・情報発信、人材育成

福島技術本部

本部長
(理事長) 鈴木 篤之

本部長代理
(理事) 伊藤 洋一
(理事) 上塚 寛

福島環境安全センター (184名)

【業務内容】

- (1) 福島地区における関係機関との連携・協力
- (2) 環境モニタリング・マッピング
- (3) 環境修復研究開発

企画調整部 (19名)

【業務内容】

- (1) 福島対応に係る総括
- (2) 企画、計画の策定
- (3) 行政機関等外部との調整対応

福島技術開発推進会議

(H24/4/1新設)

(H24/4/1組織再編)

復旧技術部 (6名)

- ・ 福島第一原子力発電所サイト内に係る燃料の処理技術、滞留水の処理技術等の研究開発の総合調整。
- ・ 政府・東京電力中長期対策会議の下での運営会議、研究開発推進本部等を通しての対外対応。

(H24/6/1新設)

現地対応グループ (8名)

- ・ 福島第二原子力発電所内に拠点を設置し、6月より駐在開始。
- ・ 福島第一原子力発電所サイト内の、汚染状況の調査、汚染水、瓦礫試料等の採取、分析、輸送等に関することを実施。

原子力科学研究所

原科研技術開発特別チーム (85名)

- ・ 計画調整Gr
- ・ 材料健全性評価技術開発Gr
- ・ 臨界管理技術開発Gr
- ・ 炉内状況解析技術開発Gr
- ・ 燃料デブリ評価・計量管理技術開発Gr
- ・ 廃吸着材処理技術開発Gr
- ・ 計量管理技術開発Gr
- ・ 廃棄物分析Gr

核燃料サイクル工学研究所

核サ研技術開発特別チーム (52名)

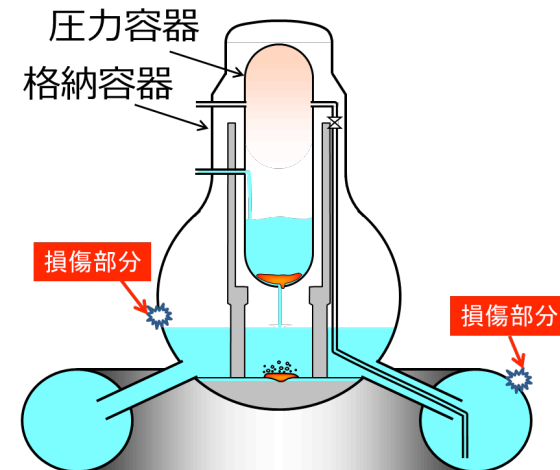
- ・ 計画調整Gr
- ・ プール燃料処理・保管技術開発Gr
- ・ 燃料デブリ取扱技術開発Gr
- ・ 廃棄物処理処分技術開発Gr
- ・ 遠隔操作技術開発Gr
- ・ 分析技術開発Gr

大洗研究開発センター

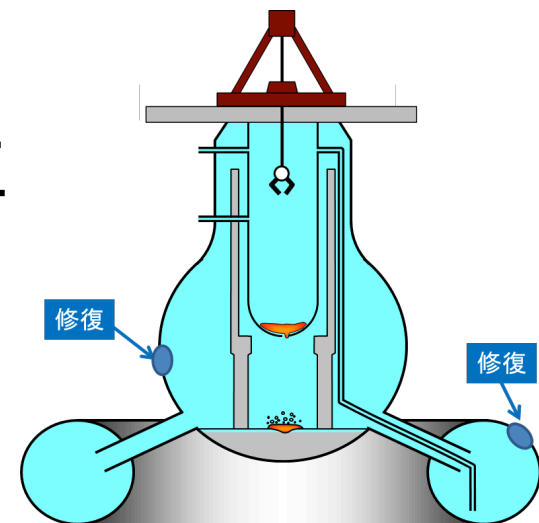
大洗研技術開発特別チーム (32名)

- ・ 計画調整Gr
- ・ 燃料材料特性解明Gr
- ・ 廃ゼオライト保管挙動評価グループ
- ・ 検知機器技術開発Gr
- ・ 炉内解体技術開発Gr

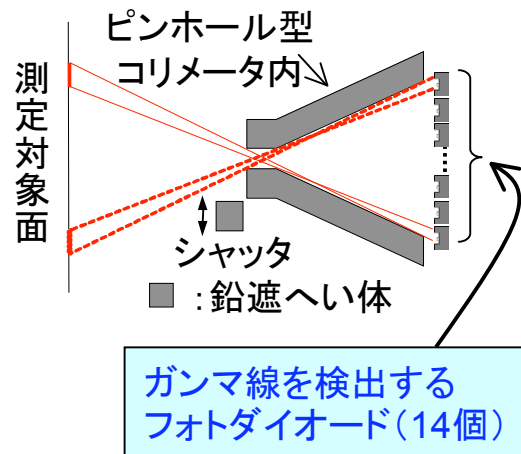
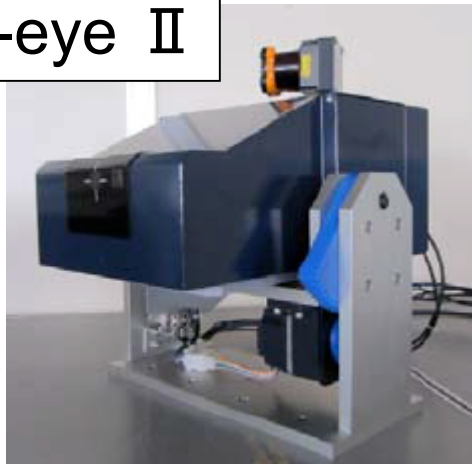
- 建屋内の除染や格納容器の修復
- 損傷燃料(デブリ)取出し技術の開発
 - 炉内状況の把握
 - 燃料デブリの特性把握
(取り出し方法の検討)
 - 遠隔操作技術
 - 再臨界の防止
- 使用済燃料プール及び燃料の健全性確認、共用プールへの移送と保管
- 汚染水、水処理廃棄物、がれき等の放射性廃棄物の処理、保管



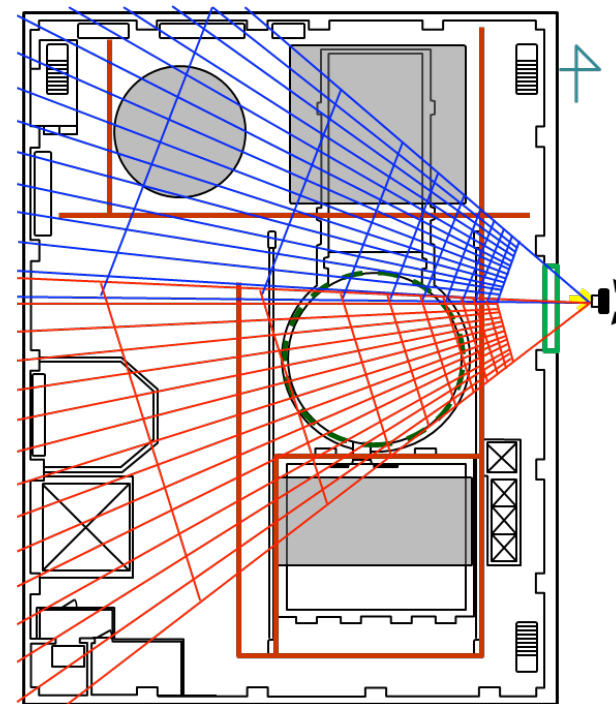
燃料取り出し作業のためにも格納容器を修復し、水で満たす必要がある。



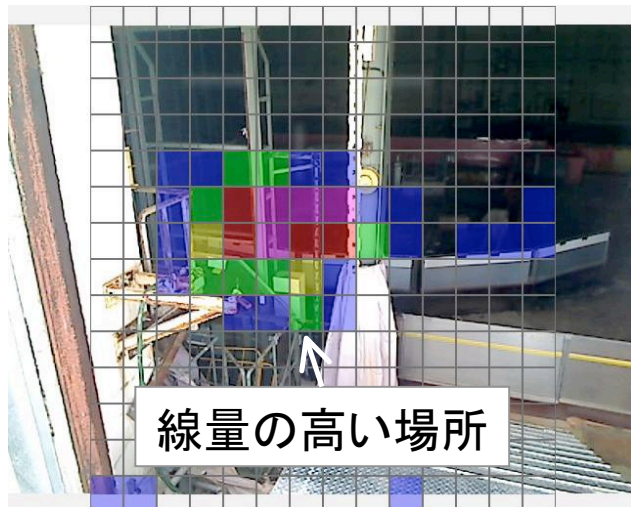
γ -eye II



γ -eye II の外観と水平断面概略図



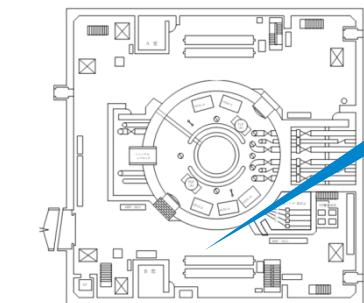
測定のイメージ



2号機では燃料取り出し準備を行うために5階オペレーティングフロアの線量率を下げる必要がある。 γ -eye IIを用いて開口部(ブローアウトパネル)から線量分布を計測した。(H25.2.21)

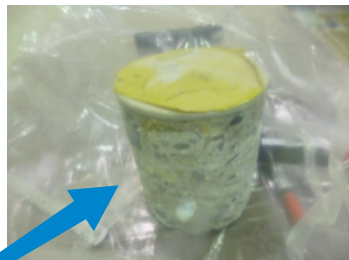
取得できるデータのイメージ

- 原子炉にアクセスするため、効果的・効率的な建屋除染が必要
- 放射性物質の種類、量、分布、壁や床への浸透状況などを分析



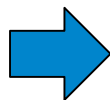
福島第一原子力発電所
(1~3号機)原子炉建屋内
(1階イ
メージ図)

建屋内の床や壁から
「コアサンプル」を採取



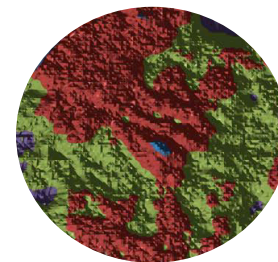
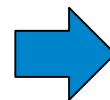
コアサンプル外観
(約Φ10cm)

輸送



大洗研究開発センターの
照射燃料集合体試験施設
(FMF)などで分析

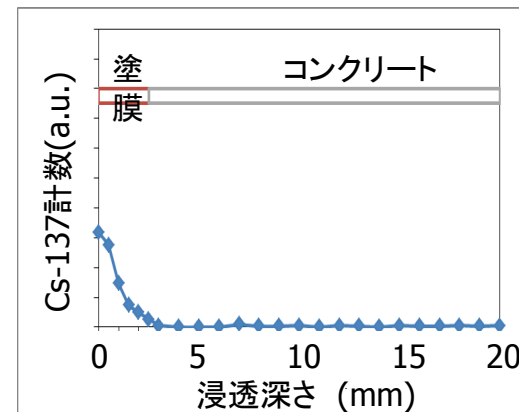
分析



20~25
15~20未満
10~15未満
5~10未満

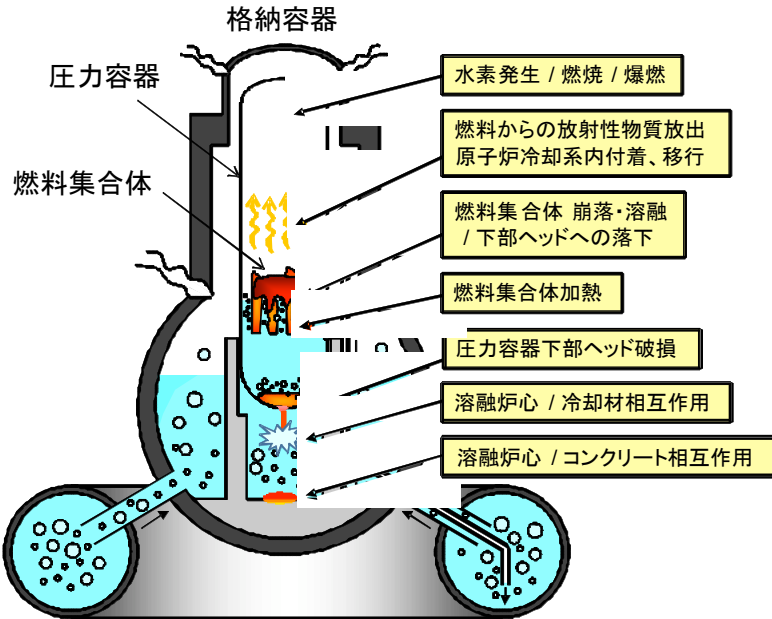
単位: kBq/cm²

イメージングプレートによる
汚染密度分布の評価



γスキャンによる放射性物質
の浸透深さの分析

炉内状況把握



シビアアクシデント時の原子炉内現象

事故の進展に伴い、どのように燃料が損傷、溶融、落下したかなどを事故時の現象を模擬した

- ・個別効果試験
 - ・大規模試験
- 及び
- ・計算コード解析

によって調べ、炉内状況の把握に資する

溶融固化燃料(デブリ)の特性評価

- : 機器設計に大きな影響を与える物性値。(実デブリサンプルにおける測定の可能性も考慮)
- : その他の物性値で代替可能または推定が困難な物性値。

取出し機器	主な対象	形状	粒径	密度	硬さ	弾性率	曲げ強さ	破壊じん性	動的破壊じん性	熱伝導率	比熱	融点	溶融潜熱
①カutting用ツールA (衝撃破壊)	塊状デブリ			○	●	○		●	○				
②カutting用ツールB (せん断)	ピン状構造物				●	●		●					
③カutting用ツールC (溶融切断)	板状構造物			●						●	●	●	○
④燃料回収用ツール (摘み取り)	粒子状デブリ	○	○	●									
⑤吸引システム (固液輸送)	粒子状デブリ	○	○	●									
⑥コア・ボーリング装置 (研削)	塊状デブリ			●	●	●	○	●		●	●		

注) 本表は現時点での暫定版であり、今後の新しい知見により変更が生じる可能性があります。

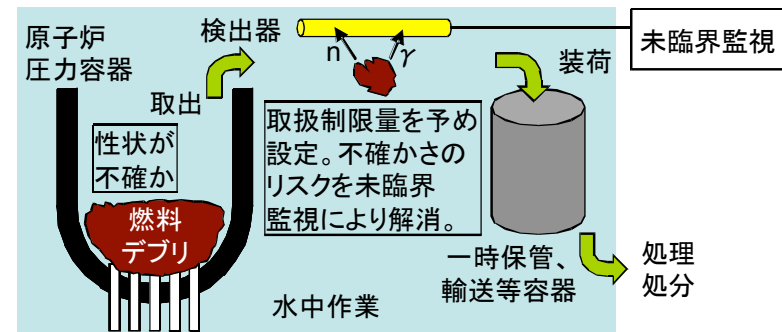
新たに取得すべき物性 S/A 研究等による知見も活用

燃料デブリの取り出し工法・装置の開発に向け、検討に必要な物性を整理するとともに、模擬デブリを作製し、その物性データを取得、整備
また、取り出し後の長期保管や処分などの処置シナリオの検討を実施

臨界管理技術開発

性状が不確かな燃料デブリの臨界安全研究開発

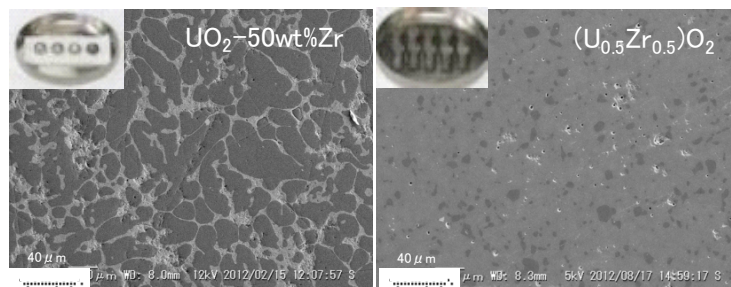
安全かつ効率的な燃料デブリ取扱い検討へ反映



燃料デブリの特性を把握する (1)

- デブリの生成条件（組成、温度履歴、酸素分圧）と性状（組織、密度等）の相関に関する調査
- 炉内外材料（海水塩、 B_4C 制御材、鉄、コンクリート等）との反応試験、及び生成物の性状評価
- 生成物の特性データ（硬度、熱伝導率等）の取得・評価

U-Zr-O系模擬デブリ試料作成

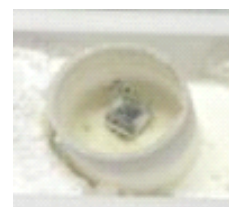


アタラク法

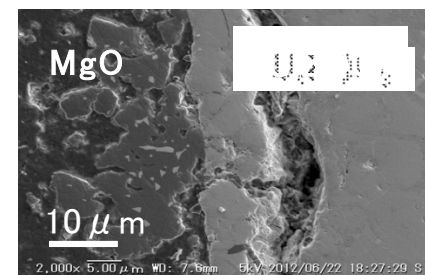
焼結

調製した模擬デブリの例。UとZrの割合が同等でも、酸化度合いや温度等の生成条件により組織が異なっている。
→ 硬さなどの特性に影響する。

海水塩と模擬デブリの高温反応性試験(～1400°C)



塩浸熱後
模擬デブリ

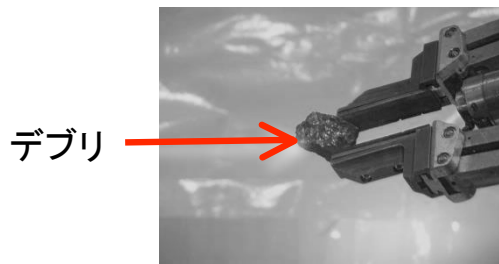
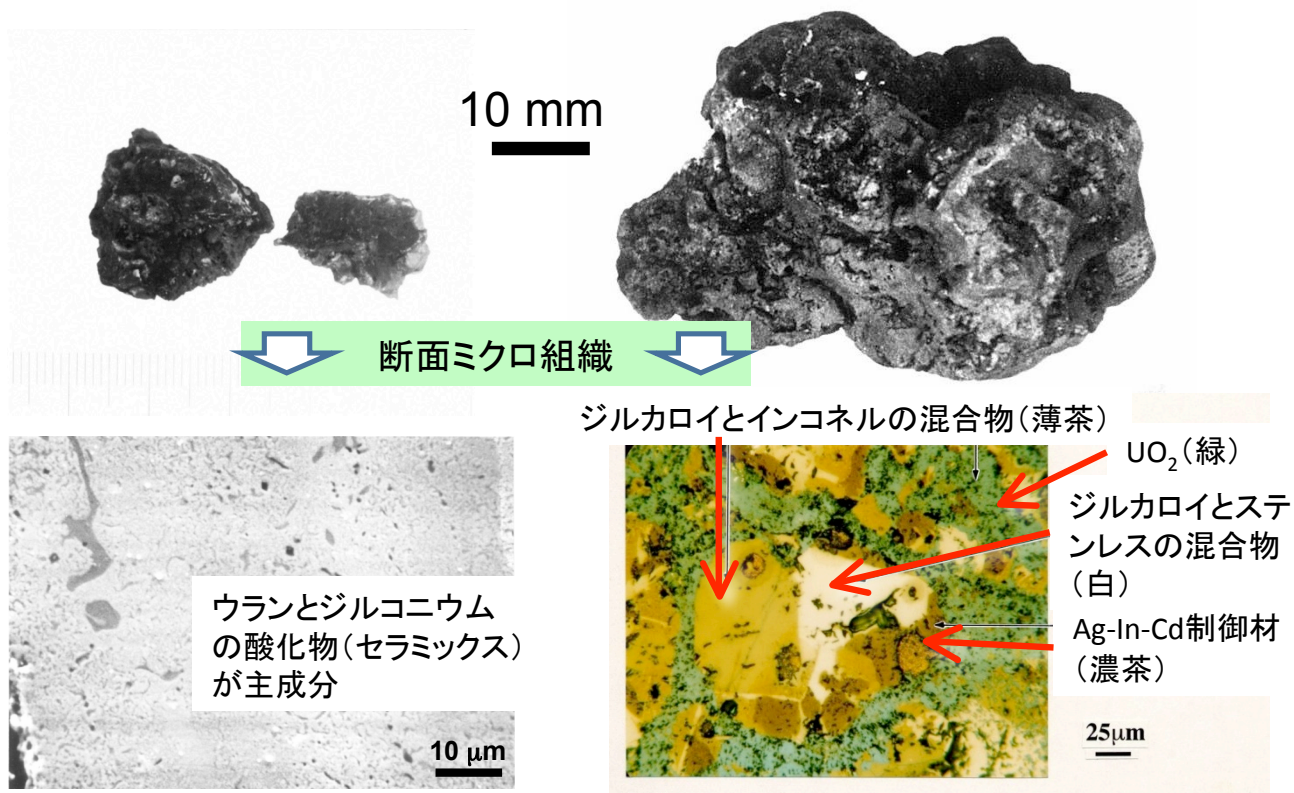


塩の接触部断観像

海水成分はデブリ全体の特性に影響を及ぼさない。

燃料デブリの特性を把握する (2)

- USNRC提案のOECD/NEA国際共同研究の一環として、約60個をデブリを日本に輸送(1991年)。原子力科学研究所の燃料試験施設において試験分析を実施。成果は、事故進展の解明などに貢献。
- 福島第一原発事故のデブリ取出し作業に向けたデブリ特性把握にも活用予定。



再臨界を未然に防ぐための研究（1）

- 燃料デブリの温度低下、取出作業に伴う形状や水分量の変化を想定した再臨界防止策が必要。
- 臨界条件の探索（計算シミュレーション）、未臨界を確認する技術（測定器システム）の開発を実施。

重要な要因

- 燃料デブリの所在、**量**、**密度**（**隙間**の有無）
- **水分量**
- 共存する他の材料（**鉄**、**コンクリート**など）
- 溶融した**制御棒**の所在
- 冷却水へのホウ素添加

燃料デブリ性状の想定（一例）

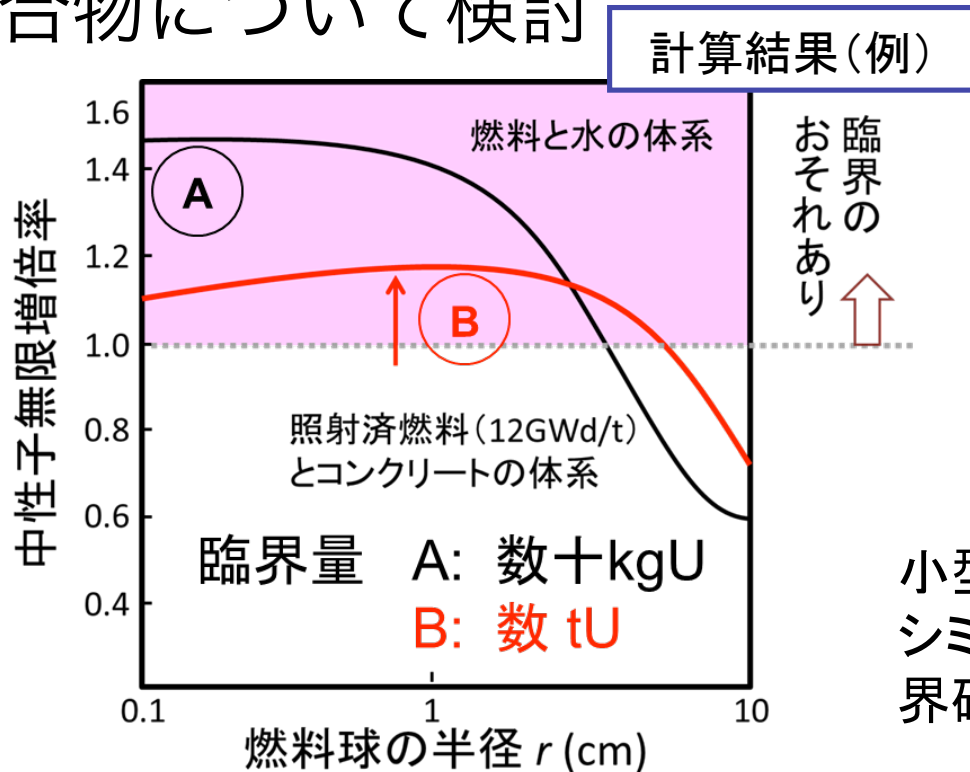


再臨界を未然に防ぐための研究（2）

- UO_2 燃料・コンクリート混合物について検討

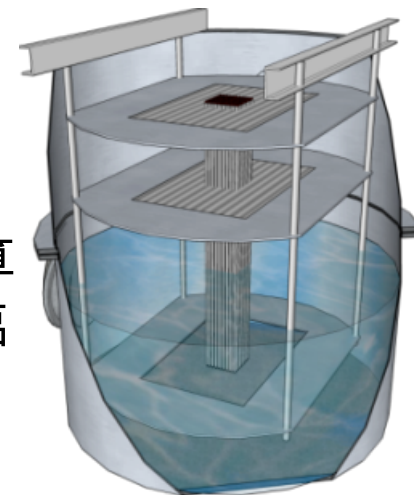
- 技術開発の要点・方針

- 目的: 大量(>臨界量)の燃料デブリの安全かつ効率的な取出し
- 方針: 実験的・実証的な確認を踏まえて、確実な手法を提案



STACY更新炉

小型原子炉を用いた、計算シミュレーション検証、未臨界確認技術の実証を計画



- 格納容器冠水部で温度低下による緩やかな再臨界の可能性
 - Xeガス監視・ホウ素投入準備が重要
 - 出力は小、現状の十分な遮蔽により外部影響は極小
- 格納容器/圧力容器水張り・取出作業時は、未臨界状態の担保策が必要

- ガレキ類、汚染水処理廃棄物の処理・処分方策の検討には、廃棄物の分析、保管から廃棄までの安全評価、廃棄物の処理及び処分最適化検討等が必要。
- 機構は、ガレキや汚染水等の放射能分析、長期保管時の水素発生や容器腐食、固体化等の廃棄物処理技術、処理・処分における課題抽出及び解決等を実施。

廃棄物性状の解明

●廃棄物の試料採取と分析

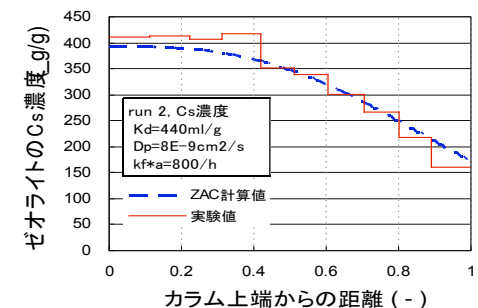
- 敷地に散乱したガレキ、伐採した汚染樹木の性状を把握するためには、実物の採取と分析が必要である。
- 機構職員が現地に出向いて試料を採取、東海研究所に輸送して分析を進めている。

●試料採取が困難な廃棄物のCs分布解析

- ゼオライトを充填した吸着塔によりセシウムを吸着しているが、高線量率のため試料の採取が難しい。
- このために、吸着計算コードZACを作成し、吸着塔内のCs分布の解析を可能とした。実際の使用済み吸着塔の発熱・放射線分布を推定するために多段解析を進める。



ガレキと伐採試料の採取



計算解析によるCs濃度の推算結果

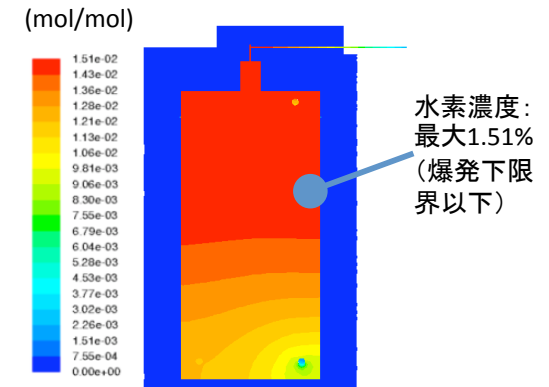
廃棄物の安定保管と廃棄体化処理

●放射線分解による水素生成安全解析

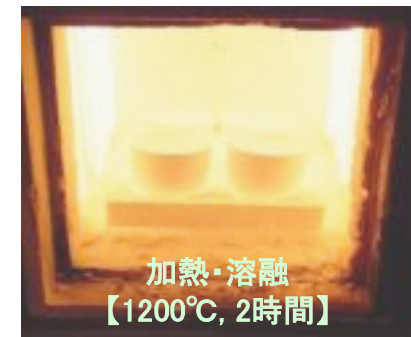
- ・セシウムを含む吸着塔の水素生成に関し、実験と計算解析により現地での管理方法を提案し、水素濃度が爆発限界に至らないことを確かめた。
- ・材料の耐久性やスラッジの保管等も検討している。

●ガラス固化等による廃棄体化

- ・汚染水処理から発生する二次廃棄物に関し、ガラス固化とセメント固化の適用性を実験的に調べた。
- ・ガラス固化に関し、固化が可能であること、化学的耐久性が優れることを見出し、候補技術の一つであることを確認した。



計算解析による水素濃度の推算結果



ゼオライトガラスの製造の様子

4. 今後の取り組みについて

福島1F廃止措置等に向けた研究開発

1Fサイトにおける現在の課題

福島1F事故の特徴

- ・ 事故進展プロセスの異なる複数の原子炉
- ・ 冷却における海水の注入
- ・ **BWR**の特徴 (B4C制御棒、下部構造)
- ・ **MCCI**の存在の可能性大
- ・ 大量の汚染水
- ・ 核燃料施設に匹敵する大量の廃棄物

- ・ 炉内状況の正確な把握
- ・ 大量の汚染水の発生
- ・ 高線量区域の残留
- ・ 大量の低レベル廃棄物

個別研究開発プロジェクト

- ・ 使用済み燃料プール燃料取出し
- ・ 燃料デブリ取出し機器・装置開発
- ・ 炉内状況把握解析
- ・ 燃料デブリ性状把握・処理準備
- ・ 放射性廃棄物処理・処分
- ・ 遠隔技術

機構がこれまで蓄積してきた知見 & 特長を生かした取り組み

- ・ 再処理開発
- ・ 放射性廃棄物処理・処分研究
- ・ 高速炉・燃料サイクル開発
- ・ 原子力基礎・基盤研究開発
- ・ 原子力安全研究
- ・ 原子炉・ホット施設の運転
- ・ 原子炉・ホット施設の廃止措置

機構として取り組むべき今後の研究開発の中心課題とH25年度開発体制

- ・ 燃料デブリ取り出し
- ・ 放射性廃棄物処理処分



福島技術開発特別チーム
(原科研、核サ研、大洗研)
福島技術開発試験部
福島燃料材料試験部

福島廃炉技術安全研究所

燃料熔融複雑系試験準備室

「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ 平成24年7月30日」より引用

福島復興再生基本方針を踏まえ、国内外の叡智を結集して研究開発を行い、将来的に国際的な研究拠点となることを目指していく。
 その際、日本原子力研究開発機構の専門的知見や既存施設の活用を図るとともに、将来に向けた人材の確保・育成に取り組む。

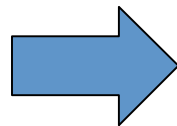
(構想)

廃炉技術分野における国際的な研究拠点
 (国際的な研究センター)

○国際連携・情報発信のための施設
 (国際会議などを誘致・開催し、情報発信や意見交換を行うなど国際協力のための拠点を整備)

○遠隔操作機器・装置の開発・実証のための施設
 (実規模モックアップ・センター (仮称))

○放射性物質の分析・研究のための施設
 (分析センター (仮称))



(実現に向けて)

経済産業省からの出資金による2
 施設の建設に着手 (JAEA)

JAEA、メーカー、電力などが参画
 する研究開発運営組織の発足

- 平成24年度補正予算において出資金として850億円が措置
⇒資本金に組入れ

- 日本原子力研究開発機構法第17条第1項第9号に規定される業務として実施。
⇒経済産業大臣からの依頼による業務として実施

- 措置された出資金は、研究拠点施設の建設のみに使用可能。

- 当該施設の維持管理費、研究開発費、公租公課等に係る費用について、福島第一原子力発電所の廃止措置等の研究開発の一環として発生するものは、別途手当てする。

スケジュール

- モックアップ施設

2014年度内の運用開始を目指す。 (候補地の検討：2012年度～、設計、建設工事：2013年度～)

- 放射性物質分析・研究施設

2017年度内の運用開始を目指す。 (設計：2013年度～、その後許認可手続きを経て、速やかに建設工事を開始)