

燃料デブリ取り出しに向けた研究

令和2年7月7日（火）

国立研究開発法人 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

講師：佐藤 一憲

内 容

1. 福島第一原子力発電所事故の特徴
2. BWR特有の炉心溶融挙動の大きな不確かさ
3. BWR特有の不確かさ低減のための実験
4. デブリ取り出しに向けた炉内状況の把握
5. 廃止措置に向けた取り組み

1. 福島第一原子力発電所事故の特徴

— 直流電源を含む全電源喪失と最終除熱源喪失 —

(厳密に正確な表現ではないが、端的に言い表すとすれば)

SBO: Station black out = 全交流電源喪失

	SBO	福島第一*	福島第二
交流電源	×	×	○
直流電源	○	×	○
最終除熱源	○	×	×

* : 1~3号機について

1-1. 「直流電源」の役割

AC/DC		用途の特徴
交流電源	外部電源	給水ポンプなどの動的機器の電力源に使用
	非常用DG	
直流電源	バッテリー	計測①: プラント状態を知る手段 制御②: 静的機器(弁など)の駆動や制御を行う

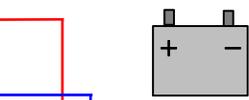
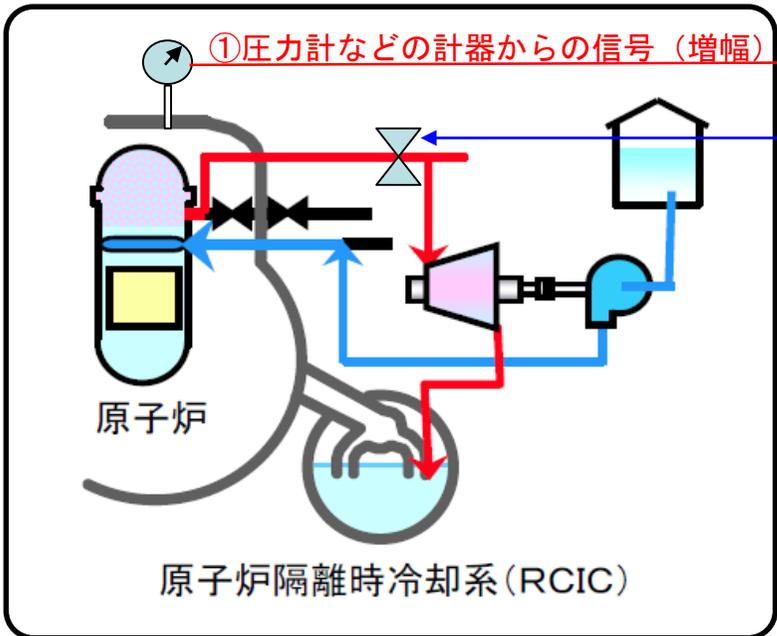


外部電源
(写真はイメージ)



非常用発電機
(写真は6号機)

緊急時冷却系 (ECC) は原子炉で発生する蒸気を利用して冷却水を炉心に送り込むことができる。



② 弁などの駆動・制御



中央制御室
(写真は3号機)

■ 地震により1～6号機で全ての外部電源を喪失

- 送電鉄塔の倒壊(写真参照)、遮断器やケーブル損傷により全ての外部電源が失われた(外部電源7回線のうちの1回線は工事中)



- 全号機において非常用ディーゼル発電機(DG)が正常に自動起動(定期検査で点検中の4号機を除く)。



AC/DC		用途の特徴
交流電源	外部電源	給水ポンプなどの動的機器の電力源に使用
	非常用DG	
直流電源	バッテリー	計測①: プラント状態を知る手段 制御②: 静的機器(弁など)の駆動や制御を行う



©GeoEye

写真 福島第一原子力発電所法面の土砂崩壊



撮影 東京電力株式会社 (H23.3.18撮影)

写真 土砂崩壊による夜の森線鉄塔の倒壊

1-3. 津波による電源への影響

- 津波到達(第1波:15:27頃、第2波:15:35頃)により、地震直後に自動起動していた非常用DGは6号機の1台(空冷)を除き全て停止。
- 5, 6号機(ともに燃料交換のため停止中)は6号機の1台の非常用DGの電力により、原子炉は冷温停止に至り、それぞれの使用済燃料プールの冷却も維持できた。
- 直流電源(125V) :
 - 3号機のみ直流母線の被水を免れ、非常用冷却系の制御や計測(圧力、水位など)に限られた電力を供給。

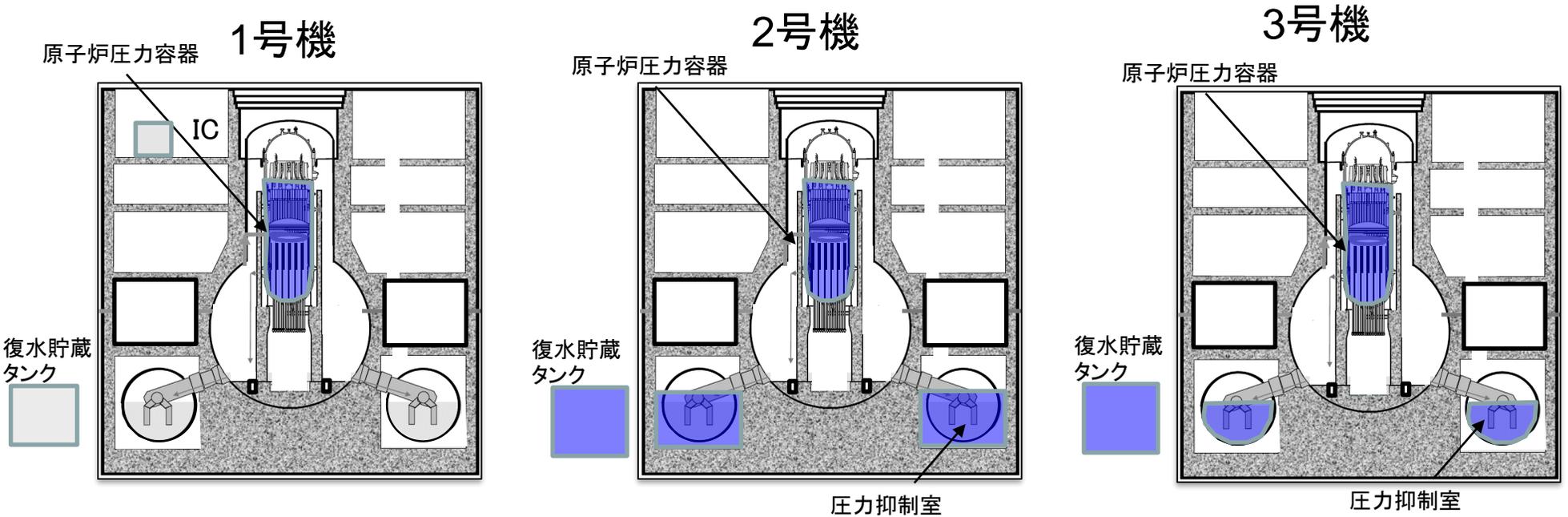
地震時に運転中

AC/DC	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	用途の特徴
	運転中				停止中		
交流電源	外部電源	外部電源	外部電源	外部電源	外部電源	外部電源	給水ポンプなどの動的機器の電力源に使用
	非常用DG	非常用DG	非常用DG	非常用DG	非常用DG	非常用DG	計測①: プラント状態を知る手段
直流電源	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	バッテリー	制御②: 静的機器(弁など)の駆動や制御を行う

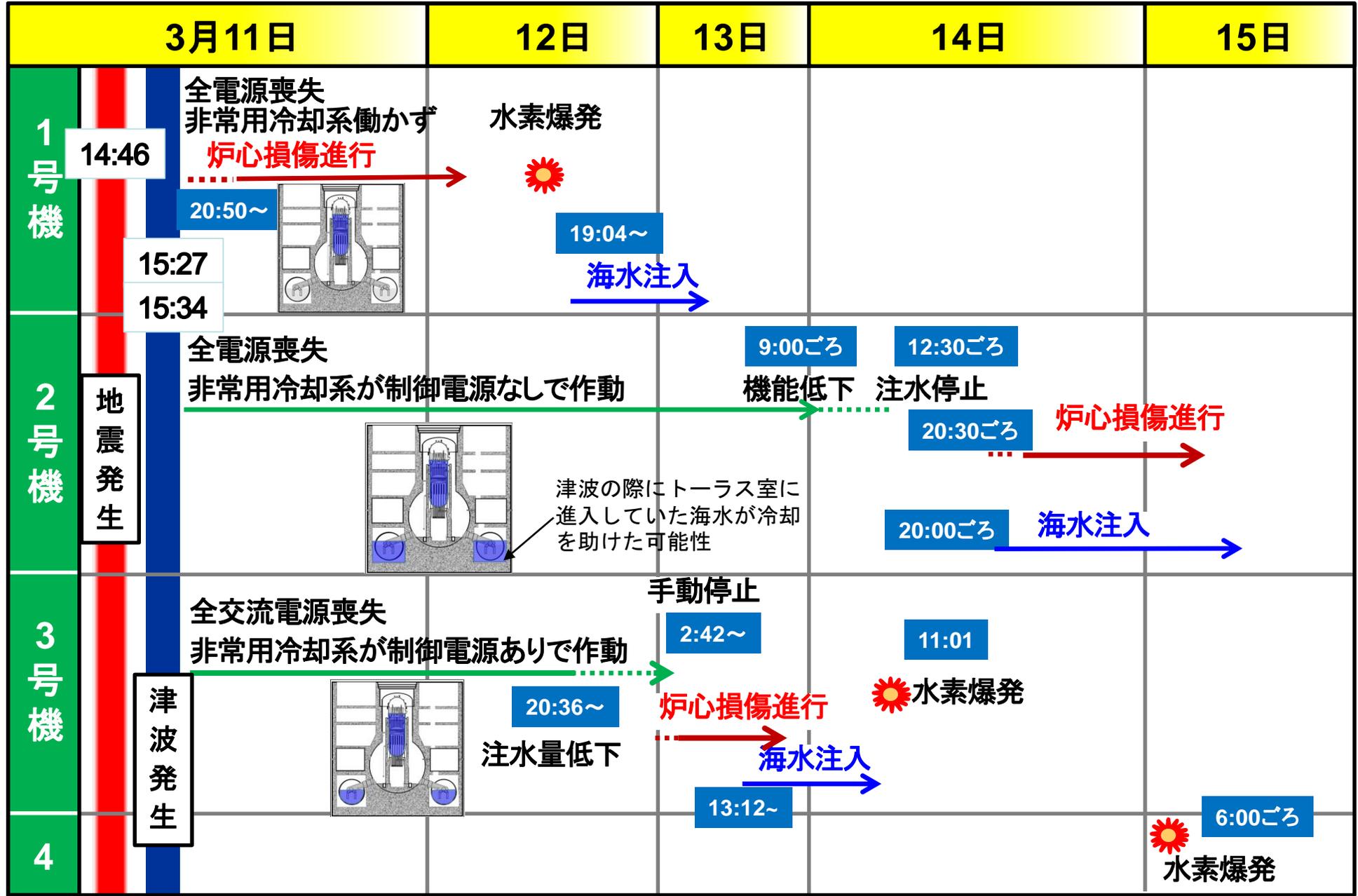


建屋が離れている

- 1～6号機の全てにおいて津波により海水ポンプが機能を喪失
⇒ 最終除熱源喪失
- 1号機の非常用復水器(2基)は共に弁が閉じていた
- 2、3号機では圧力抑制室や復水貯蔵タンクの水を利用して2～3日間炉心の損傷を食い止めていたが、海水注入が遅れた



1-5. 福島第一原発各号機の事故進展状況



1-6. 1号機のIC(非常用復水器)は弁が閉じていて機能せず

ICは自然循環のみ(ポンプ不要)で炉心を冷却できる

1号機では津波によって全電源喪失に至った時点で隔離弁が閉状態であった

津波到達時に隔離弁が開状態だったら...

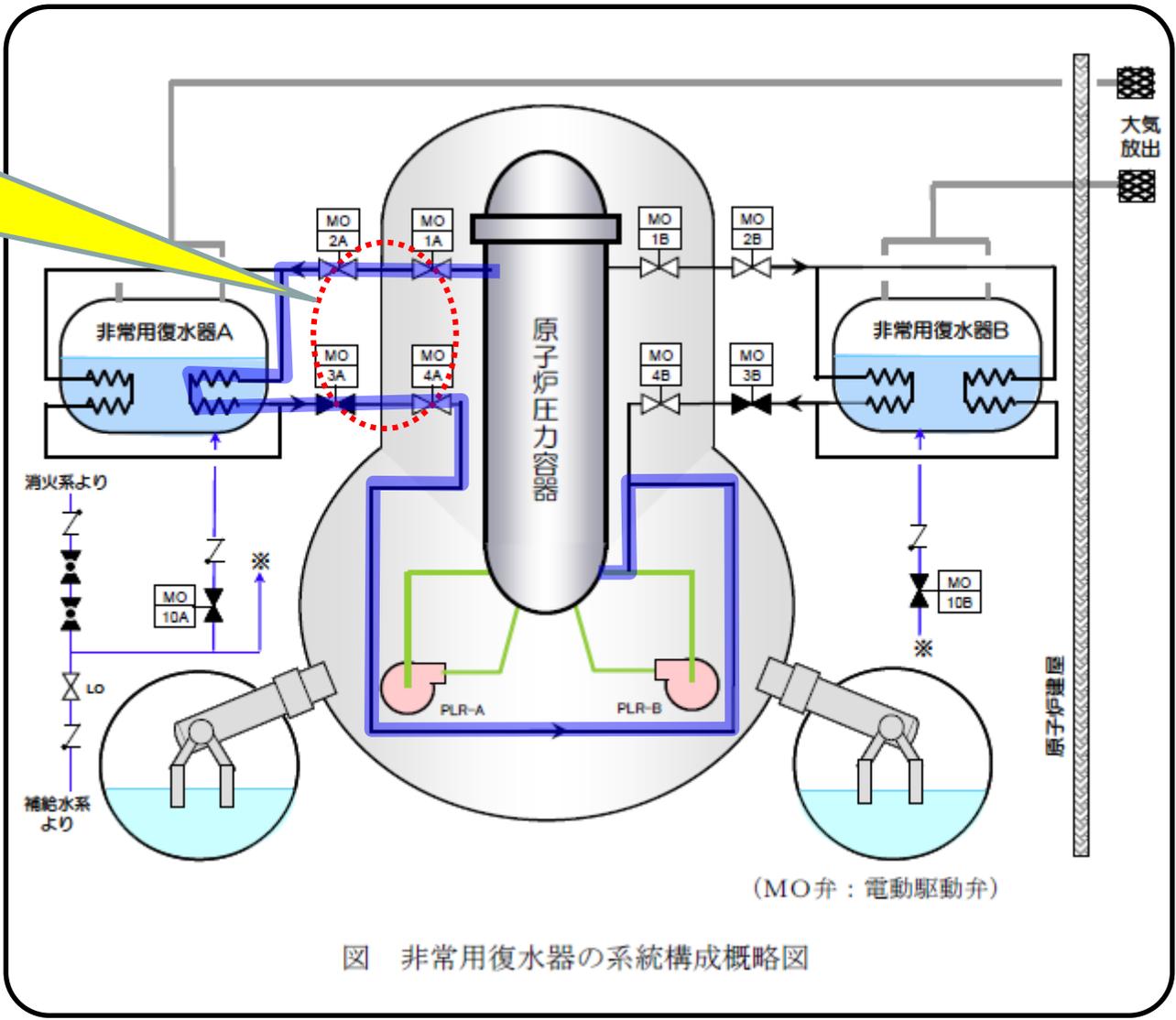
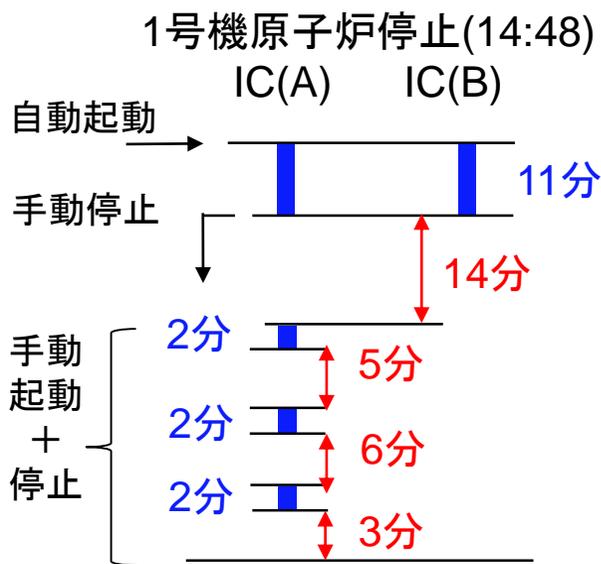
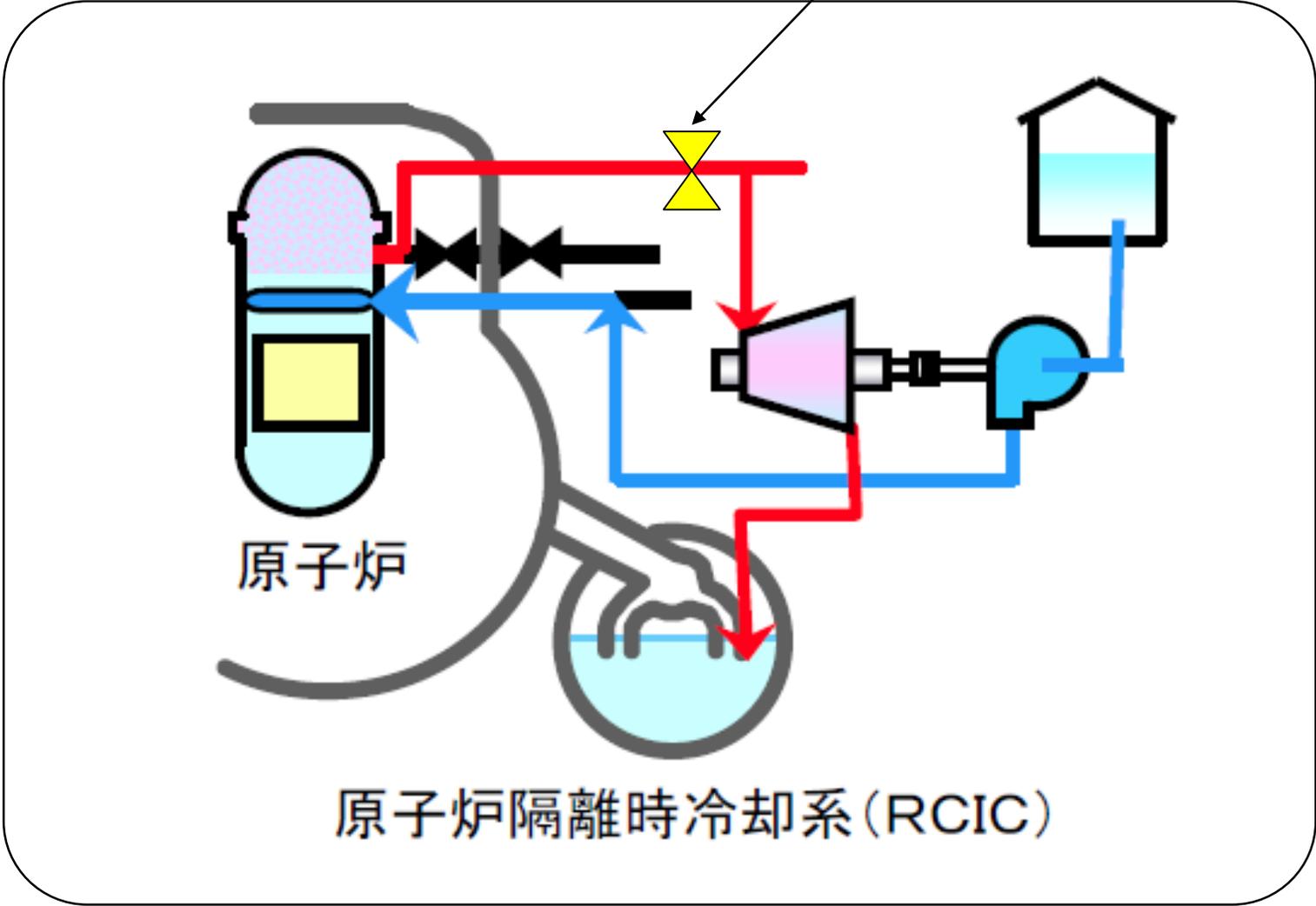


図 非常用復水器の系統構成概略図

(東電作成公開資料より)

1-7. 2号機のRCICは全電源喪失状態で作動していた

蒸気量を制御する制御弁は電源が失われると全開になる設計



(東電作成公開資料より作成)

2. BWR特有の炉心溶融挙動の大きな不確かさ

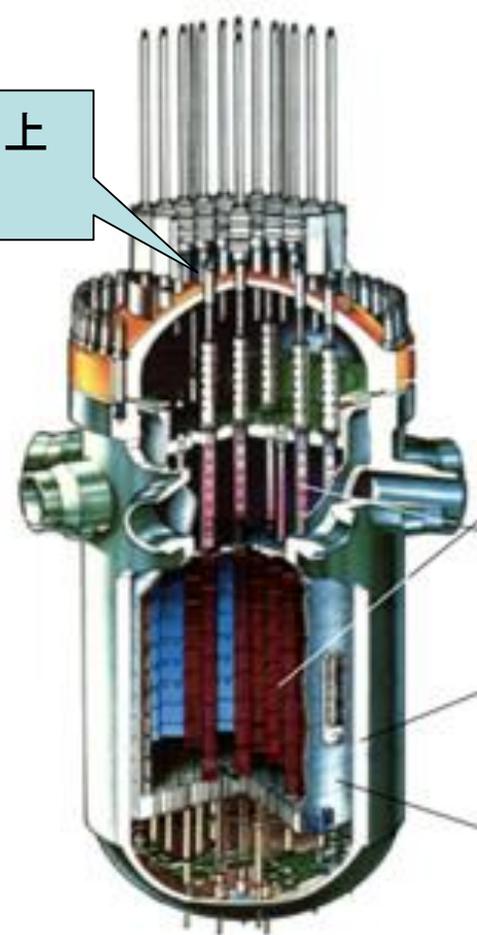
2-1. TMI事故後PWRを主対象として研究が進展

TMIの場合

1Fの場合

制御棒は上から挿入

12 m



加圧水型原子炉 (PWR)

5 m

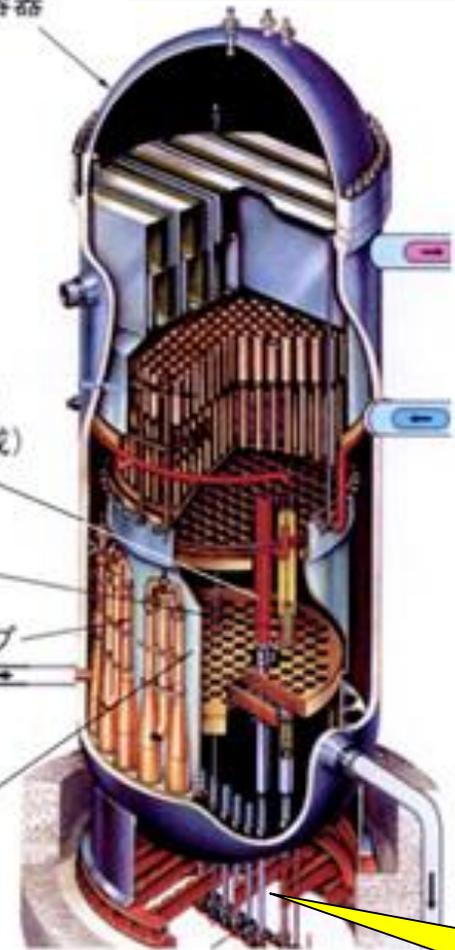
原子炉圧力容器

炉心
(多数の燃料
集合体で構成)

制御棒

ジェットポンプ

炉内構造材



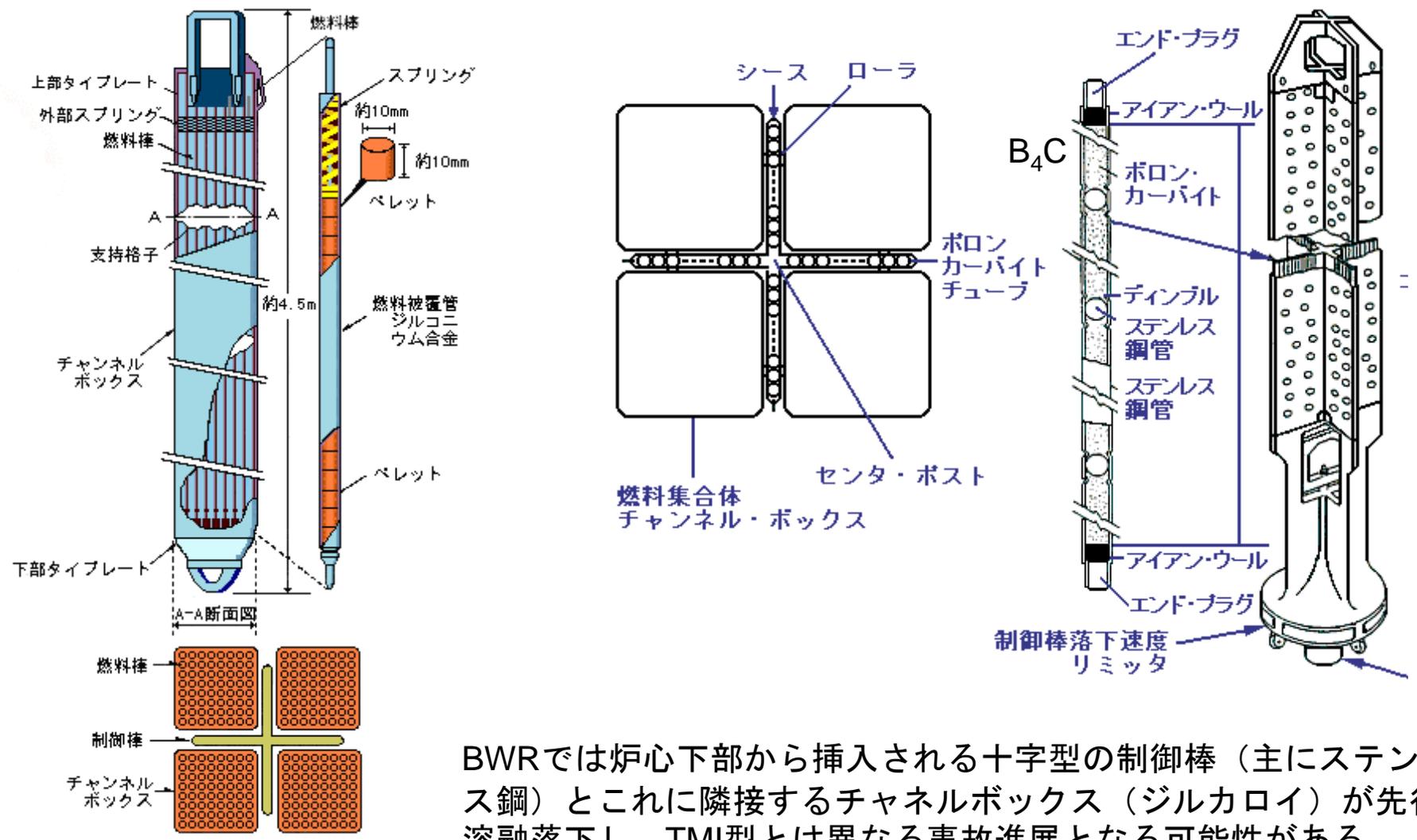
沸騰水型原子炉 (BWR)

6 m

22 m

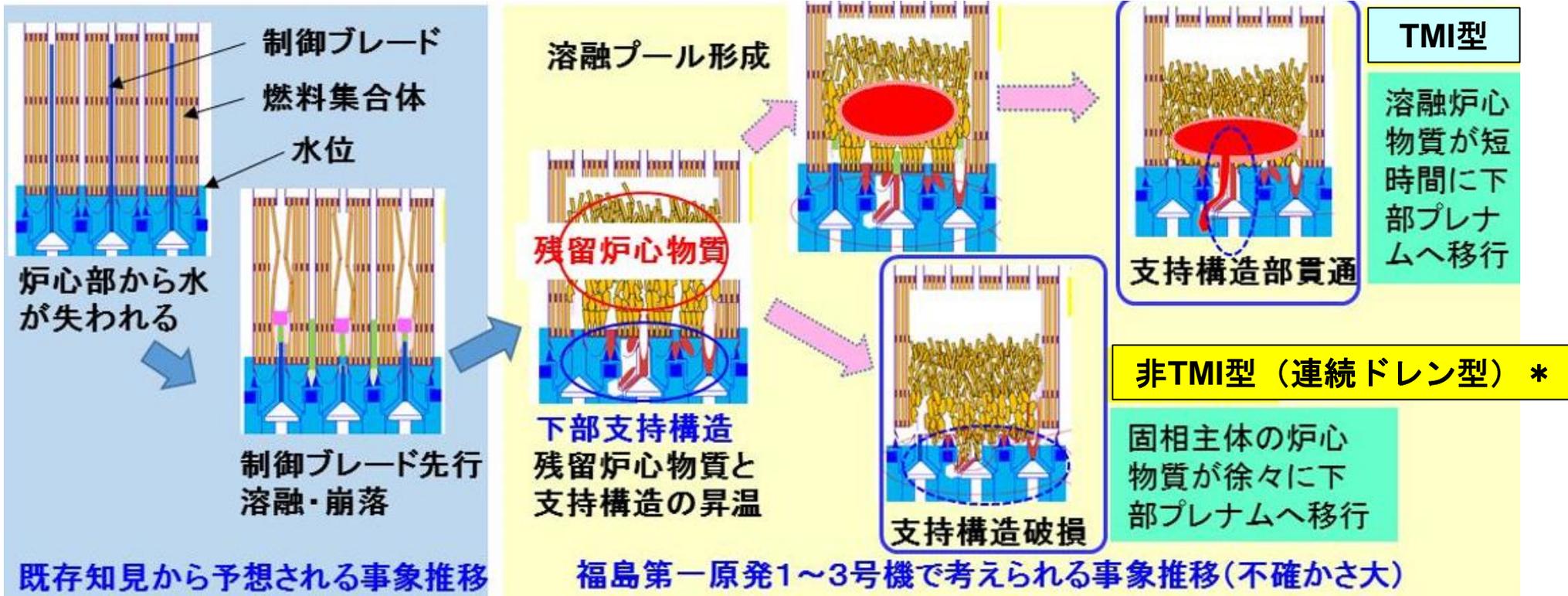
制御棒は下から挿入

2-2. BWR用燃料と制御棒



BWRでは炉心下部から挿入される十字型の制御棒（主にステンレス鋼）とこれに隣接するチャンネルボックス（ジルカロイ）が先行溶融落下し、TMI型とは異なる事故進展となる可能性がある。

2-3. BWR特有の事故進展の可能性



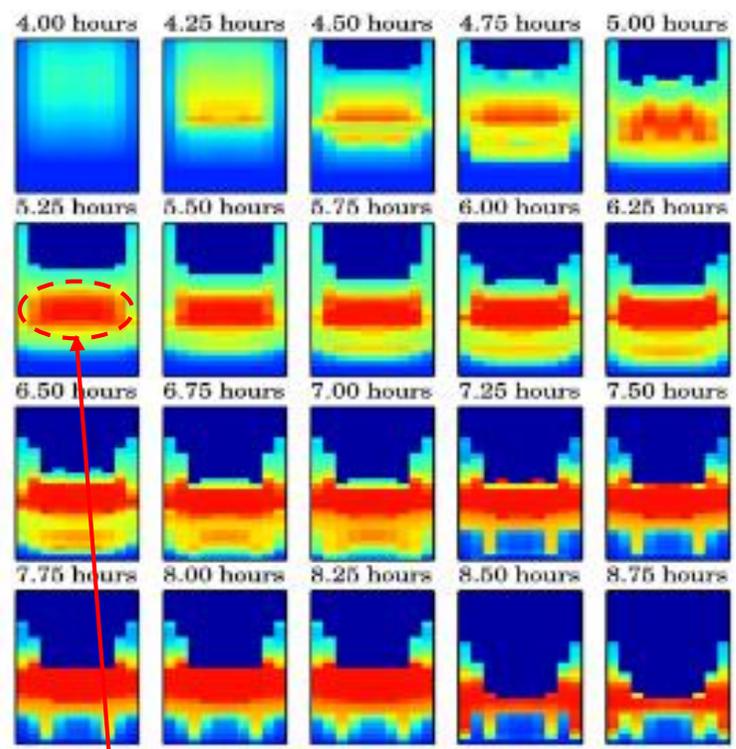
* 米国サンディア研究所のR. Gauntt氏らが1997年に可能性を指摘 (NUREG/CR-6527)

2-4. MAAP-MELCOR Crosswalk研究

1号機解析における炉心温度の差

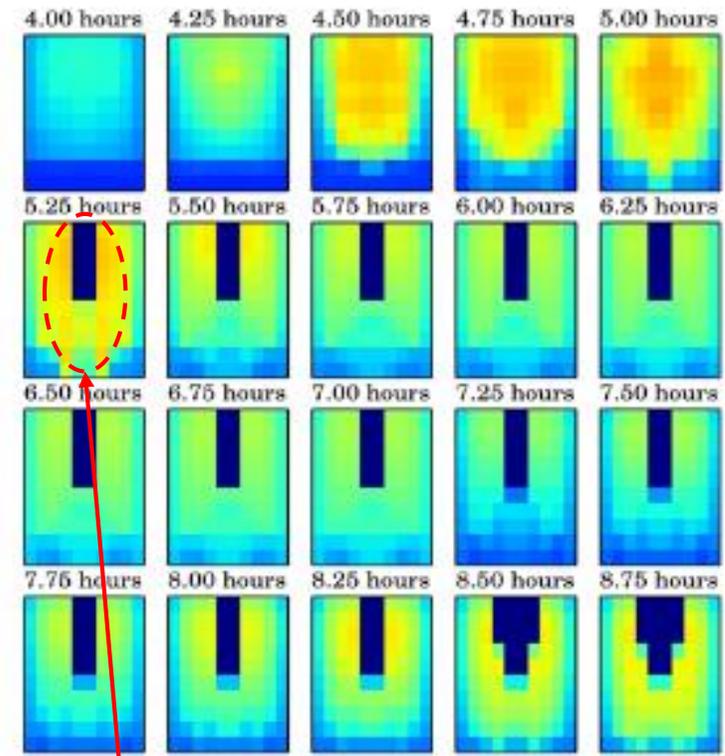
MAAP

MELCOR



TMI型

燃料溶融プール形成



非TMI型

燃料は固体のまま崩落

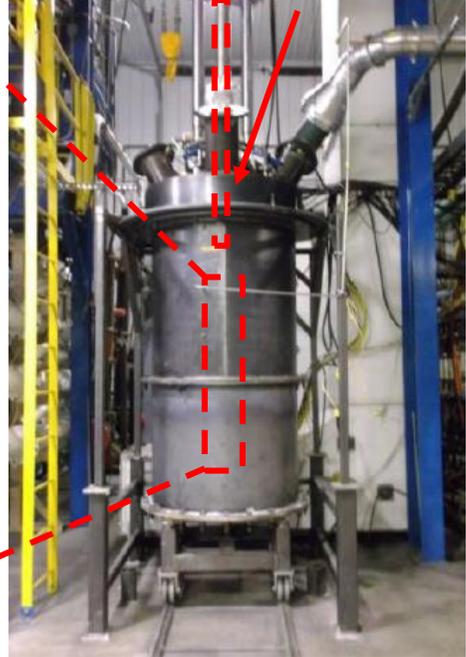
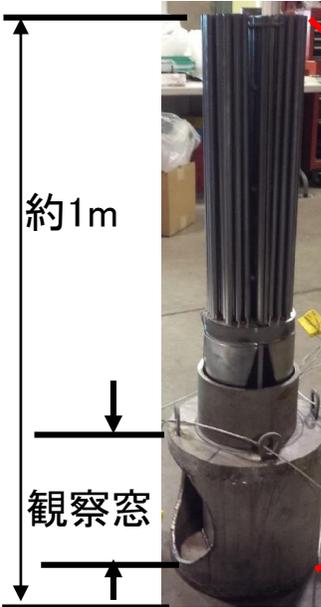
出典 : R. Wachowiak, et al., "Modular Accident Analysis Program (MAAP) – MELCOR Crosswalk, Phase 1 Study", Nov. 2014

3. BWR特有の不確かさ低減のための実験

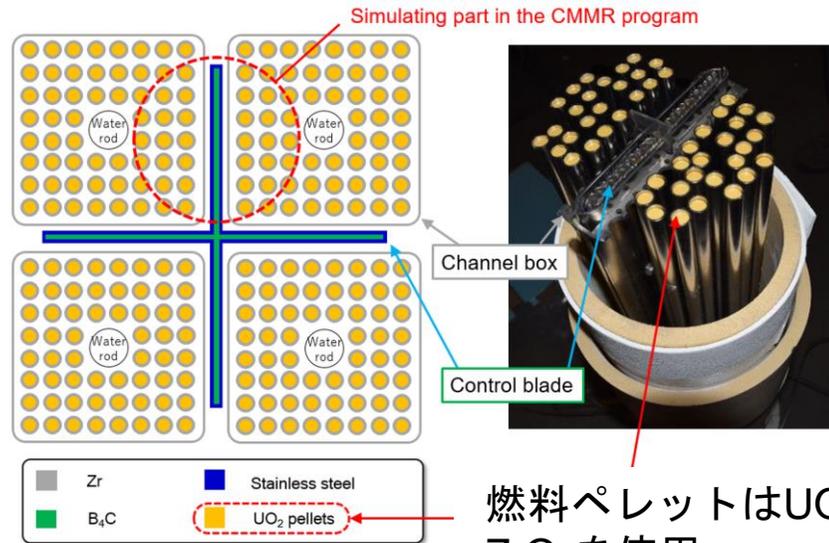
3-1. 非移行型プラズマトーチを用いたJAEAの実験(1/2)

経済産業省／廃炉・汚染水対策事業費補助金「総合的な炉内状況把握の高度化」で実施

プラズマトーチ



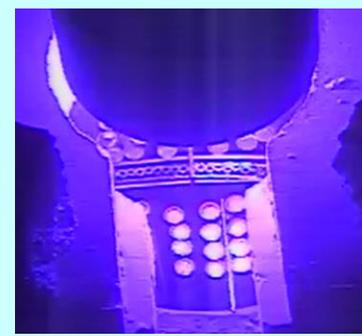
試験体例



燃料ペレットはUO₂の代わりにZrO₂を使用

試験体上部の映像例

加熱中



3-2. 非移行型プラズマトーチを用いたJAEAの実験(2/2)

経済産業省／廃炉・汚染水対策事業費補助金「総合的な炉内状況把握の高度化」で実施

CMMR3

- チャンネルボックス(Zr)2面
- 模擬燃料棒(ZrO_2)48本
- 制御棒ブレード

加熱しやすい体系に改良
※プラズマ加熱の最高出力は同じ

燃料頂部から25cm下方 観測方向

30cm

CMMR4

- 以下の写真の観測方向

燃料頂部

37cm

部分的閉塞
酸化物の溶融により小規模な溶融プールを形成(下部は固化物による閉塞)

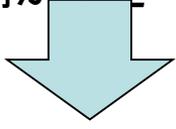
制御棒ブレードが溶け落ちた空間

上から流下した溶融酸化物が固化したものの(部分閉塞)

高温に晒されても燃料棒は崩壊しない

実験からの知見

- ✓ 制御棒とチャンネルボックスの先行溶融落下を確認(既存知見と一致)
- ✓ 酸化物燃料は溶融に至るまで柱状に残留し、崩壊しにくい。
- ✓ 残留酸化物燃料は互いに密着せず、隙間がしやすい。

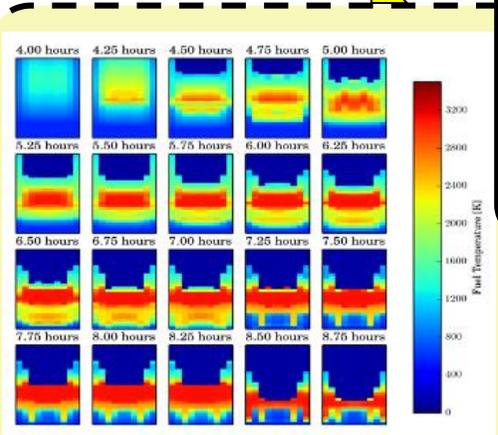


MAAPのモデル(TMI型)の方が現実に近いと推定(新知見)

4. デブリ取り出しに向けた炉内状況の把握

4-0. 炉内状況把握の全体像

整合性

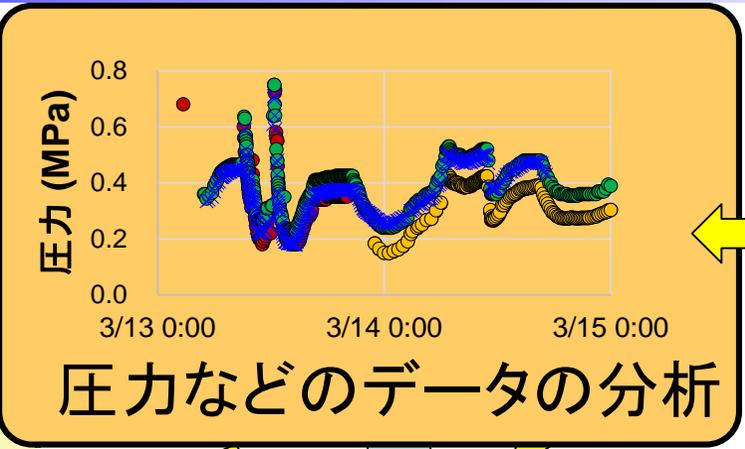


解析モデルによるシミュレーション

加熱

2017-02-13 11:25:34

実験によるBWR特有の挙動の解明



PAN-069 TILT +078
PAN-087 TILT +071

※ 1ピッチの大きさ—原子炉断面において約25cm程度

水平距離 (m)

北 南

圧力容器下部の構造

プラント内部調査の結果

保護膜

1μm

HD 2300A 200kV x30.0k ZC

プラント内で採取されたサンプルの分析

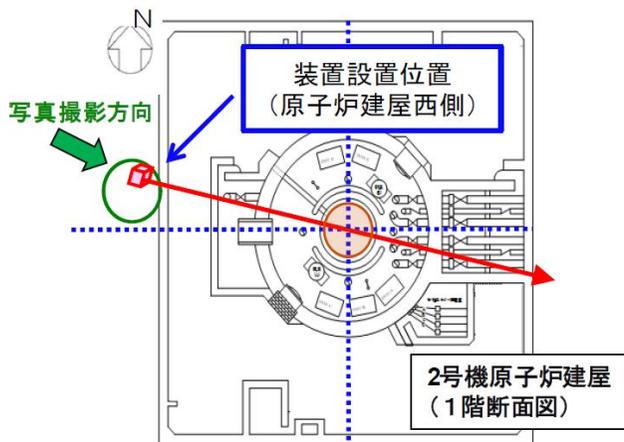
専門家による議論

4-1 ミュオン測定の結果

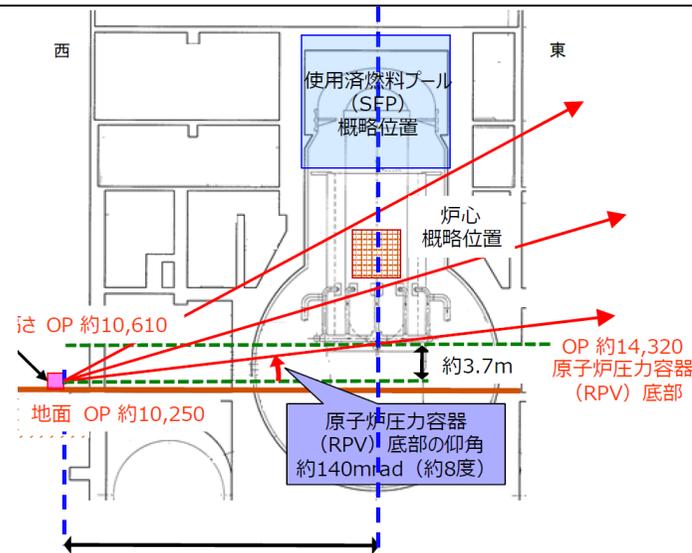
4-1 ミュオンによる測定結果(1号機~3号機)



ミュオン測定装置設置
(小型装置, 約1m×1m×高さ1.3m)

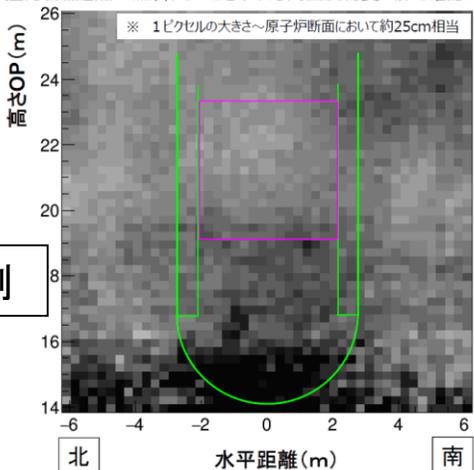


ミュオン測定装置 設置位置

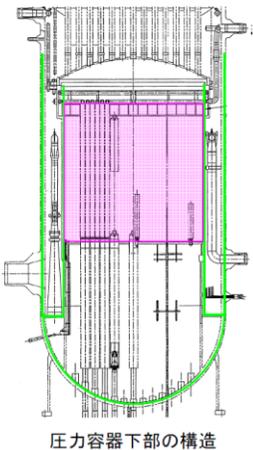


圧力容器下部における物質分布 (圧力容器底部詳細)

■ 圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。



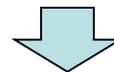
TEPCO
(測定結果 H28.7.22 時点)



2号機の例

出典: 東京電力ホールディングス
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2016/images1/handouts_160317_06-j.pdf

これまでに1~3号機のミュオン測定 (透過法) を実施



2号機については圧力容器下部に密度の大きな領域の存在を確認。1号機、3号機の結果ではこのような特徴は見られない。

4-2 内部調査の結果

① 1号機

② 2号機

③ 3号機

4-2-①

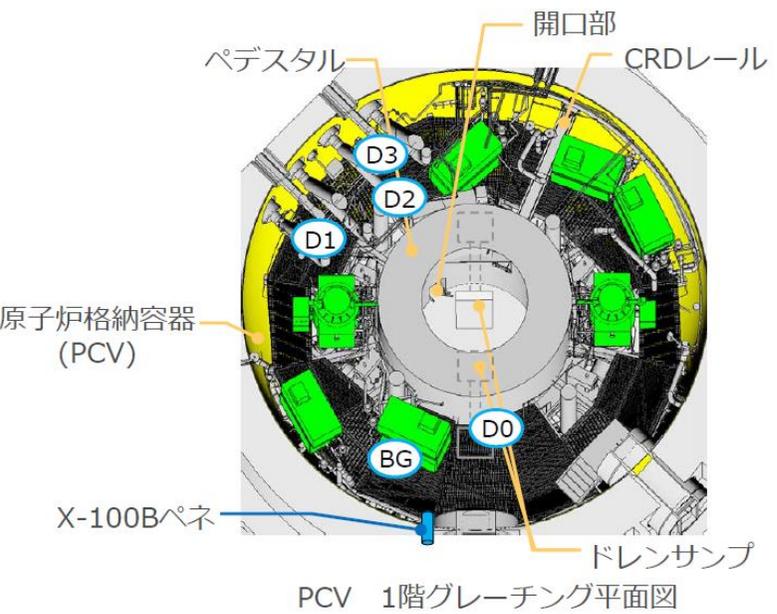
- 1号機ペデスタルの様子(1/3) -

3. 自走式調査装置による測定点

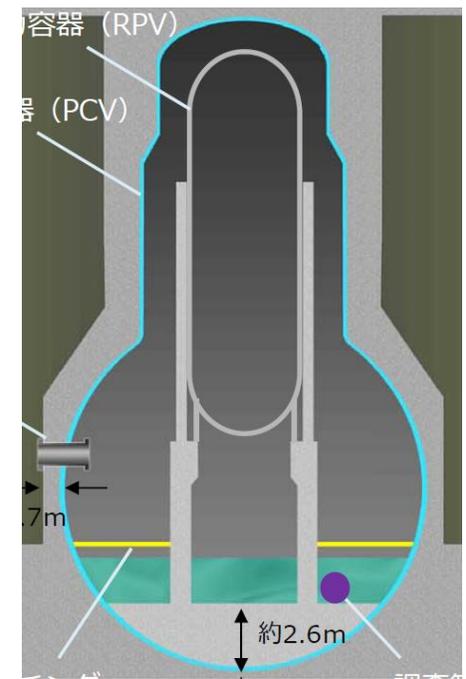
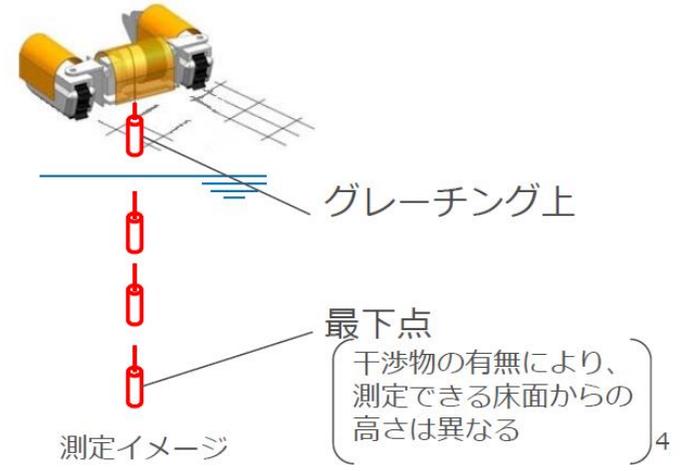


■ 今回の調査における測定点は以下の通り

測定点	推定する内容等
D0	ドレンサンプからの燃料デブリの拡散有無の推定
BG	D0～D3の測定に対するバックグラウンドレベルの把握
D1, D2	開口部からの燃料デブリの拡散有無の推定
D3	PCVシェルに燃料デブリが到達している可能性があるかの推定



・ 計測ユニットを底部までおろし、その後5cm間隔で上昇させながら線量を測定



グレーチング 調査箇所

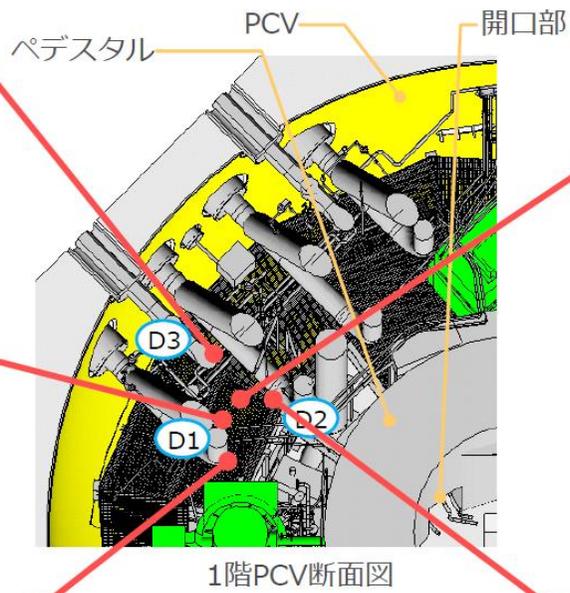
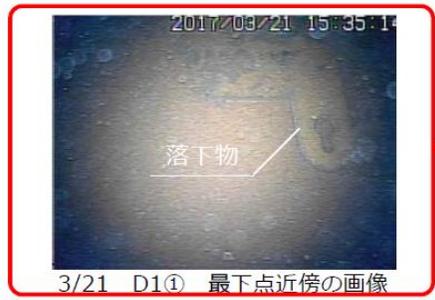
4-2-①

- 1号機ペデスタルの様子(2/3) -

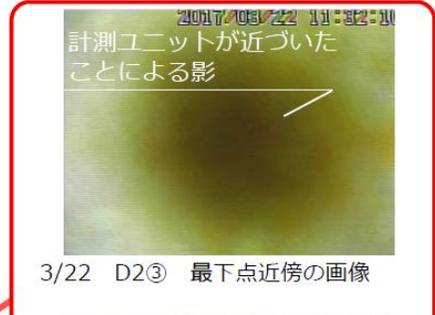
4. 画像測定結果



■ 撮影した代表的な画像は以下の通り

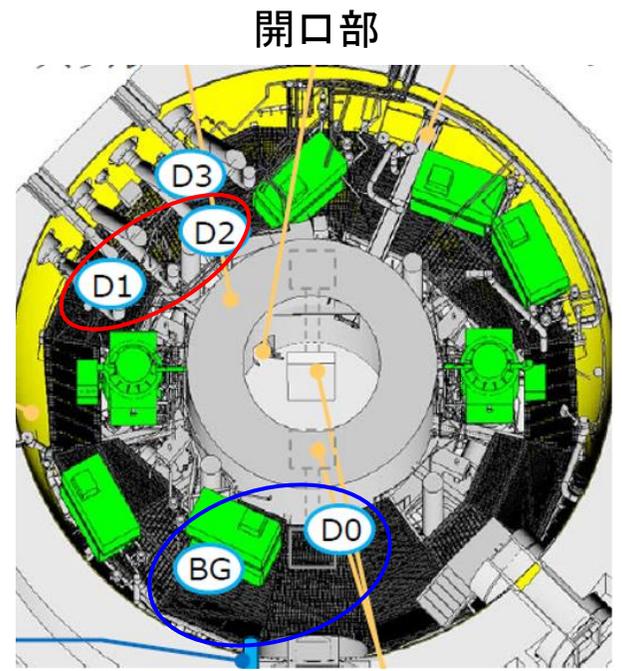
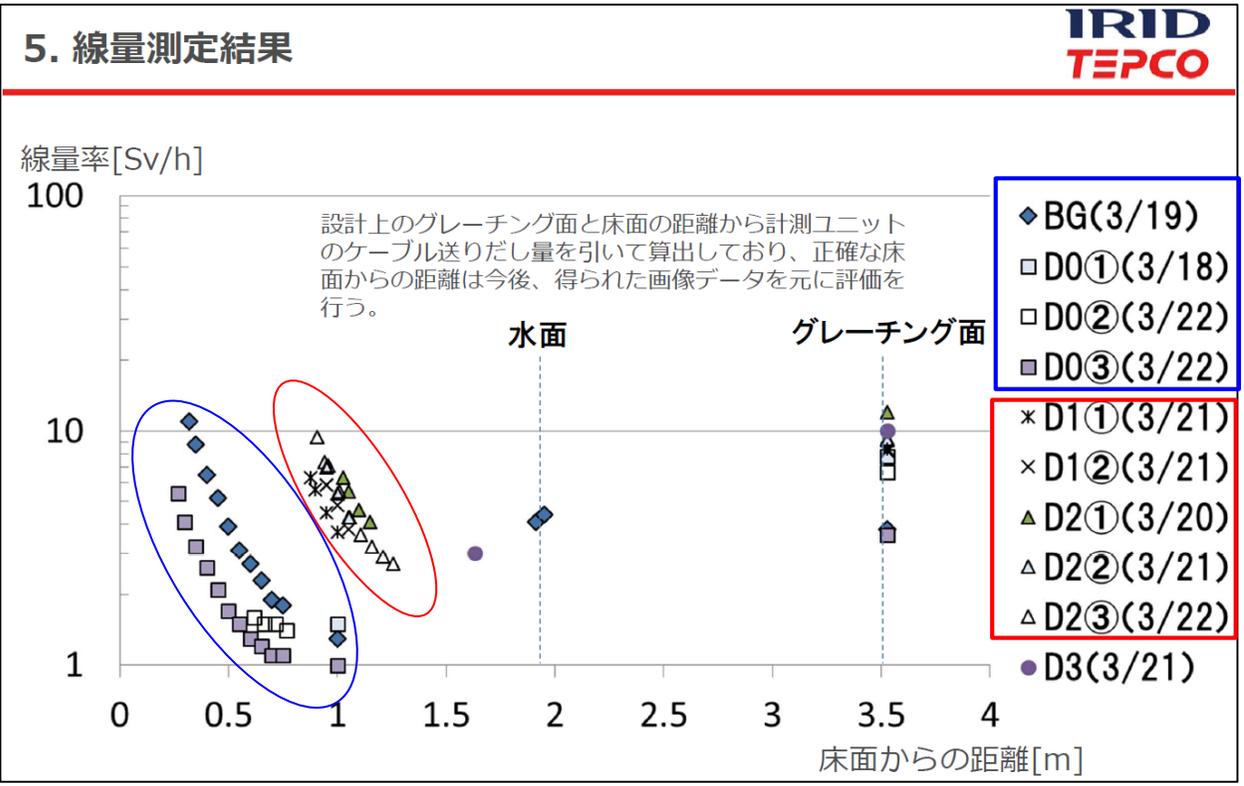


・詳細な計測ポイントは現在評価中



4-2-①

- 1号機ペデスタルの様子 (3/3) -



開口部の近くでは約90cm
遠くでは約30cmの堆積物が存在

4-2 内部調査の結果

① 1号機

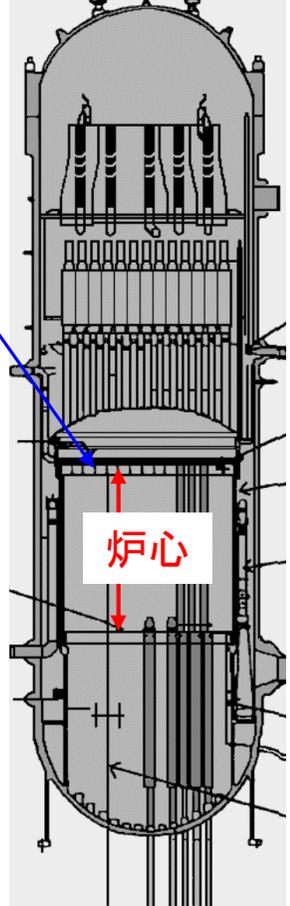
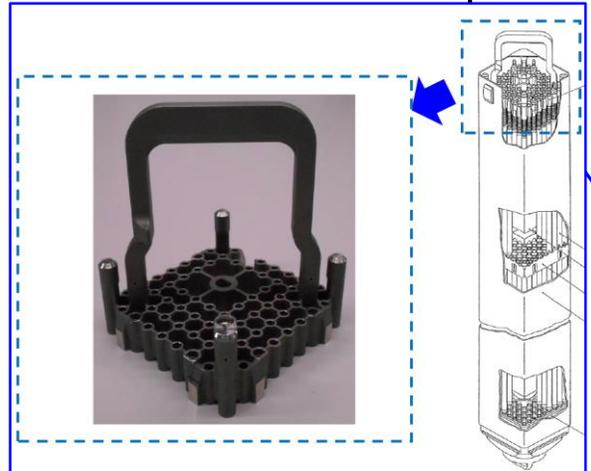
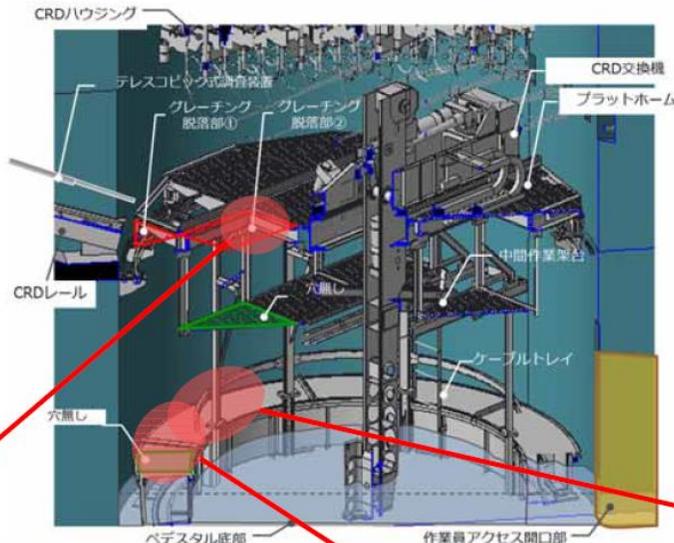
② 2号機

③ 3号機

4-2-②

- 2号機ペデスタル内の様子(1/2) -

2. 調査結果 (速報) (1/2)



燃料集合体の一部

※調査位置は暫定

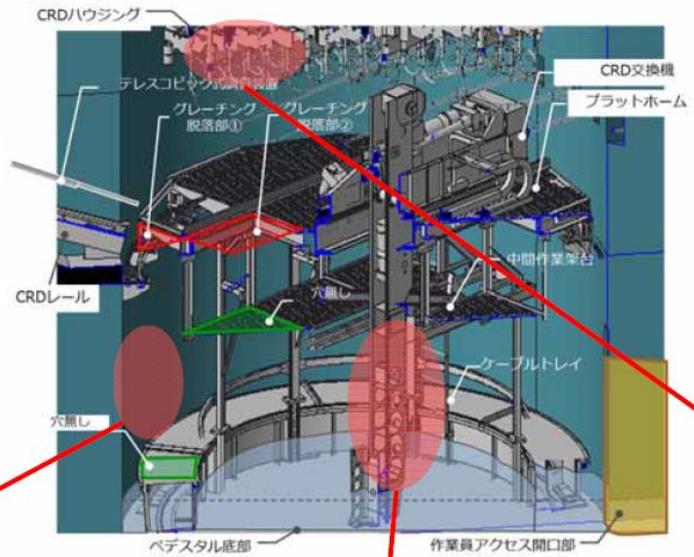
画像提供：国際廃炉研究開発機構 (IRID)

3

4-2-②

- 2号機ペDESTAL内の様子(2/2) -

2. 調査結果 (速報) (2/2)



健全なCRD (制御棒駆動機構) の下部

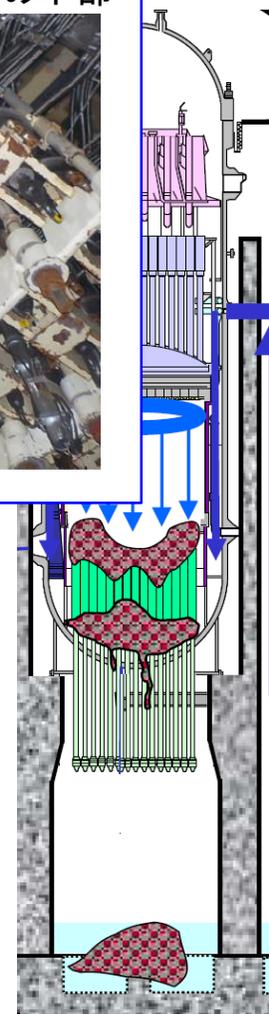


この写真は5号機



※調査位置は暫定

画像提供: 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 4



4-2 内部調査の結果

① 1号機

② 2号機

③ 3号機

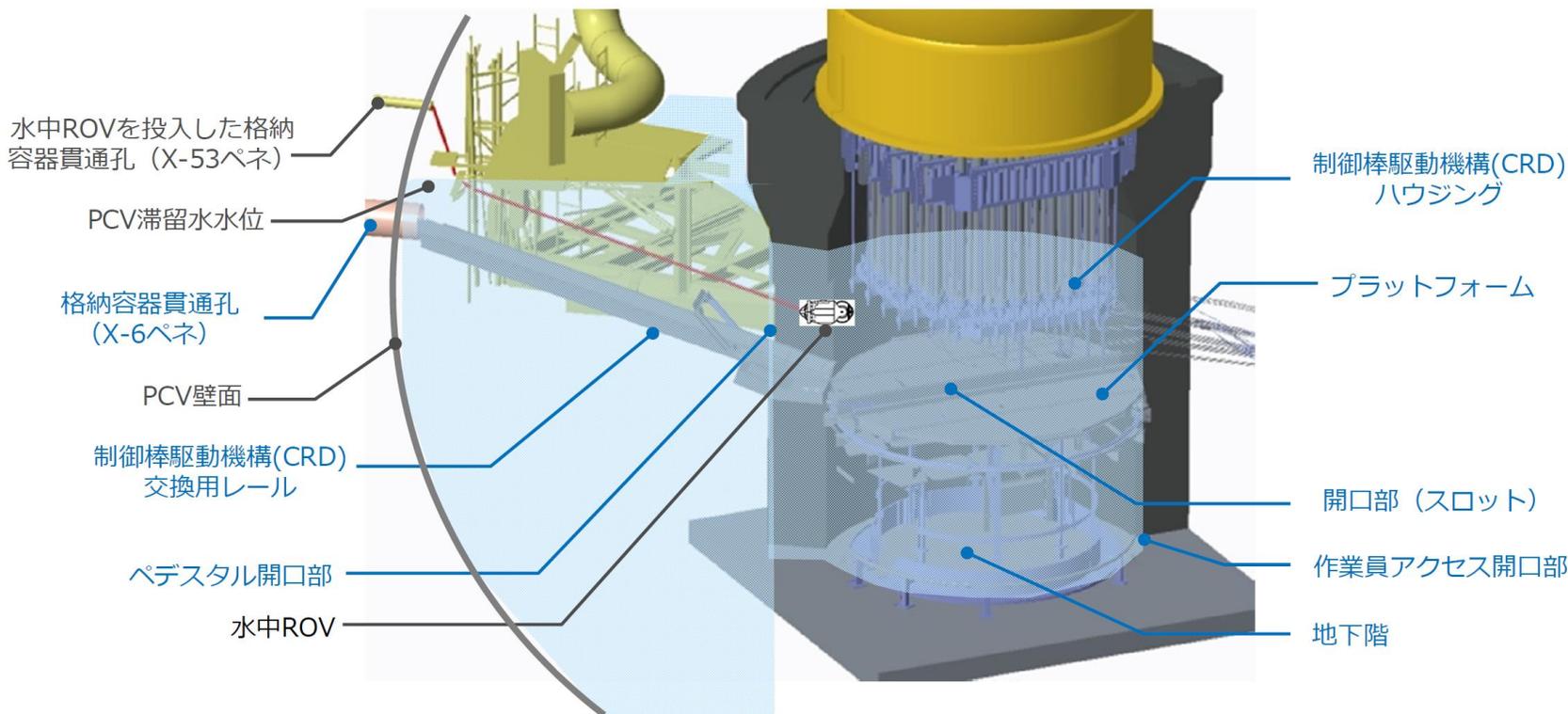
4-2-③

- 3号機ペDESTAL内の様子(1/3) -

1. 原子炉格納容器内部調査の概要



2017年7月，水中遊泳式遠隔調査装置（水中ROV）により，ペDESTAL内部の調査（VT）を実施



調査概要図

4-2-③

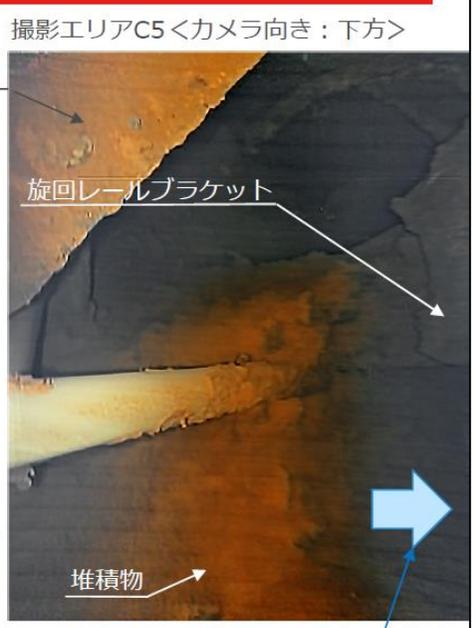
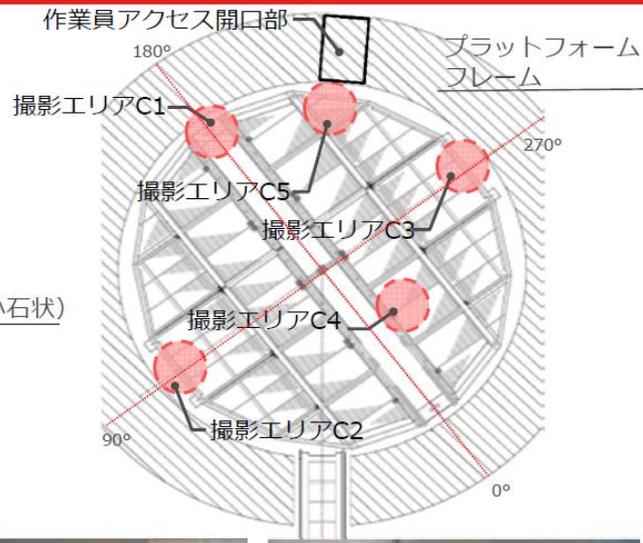
- 3号機ペデスタル内の様子(2/3) -

2. 調査結果

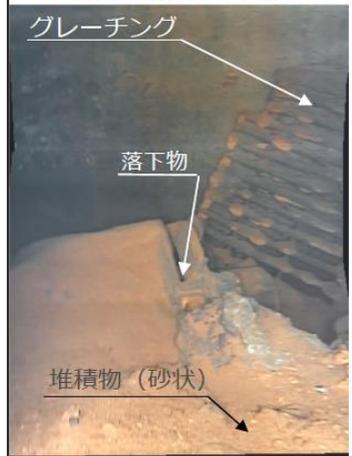
2.3. ペデスタル内下部



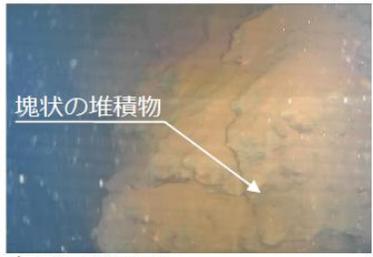
撮影エリアC1
＜カメラ向き：下方＞
堆積物（小石状）



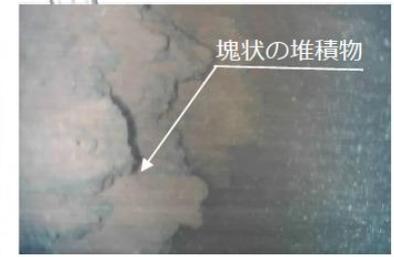
撮影エリアC5＜カメラ向き：下方＞
旋回レールブラケット
堆積物
作業員アクセス開口部の方向



撮影エリアC2
＜カメラ向き：水平＞
グレーチング
落下物
堆積物（砂状）



撮影エリアC3
＜カメラ向き：上方＞
塊状の堆積物



撮影エリアC4
＜カメラ向き：下方＞
塊状の堆積物

- 砂状，小石状や塊状の堆積物を確認
- 作業員アクセス開口部は視認できなかった（近傍に堆積物を確認）

画像提供：国際廃炉研究開発機構（IRID）
画像処理：東京電力ホールディングス(株)

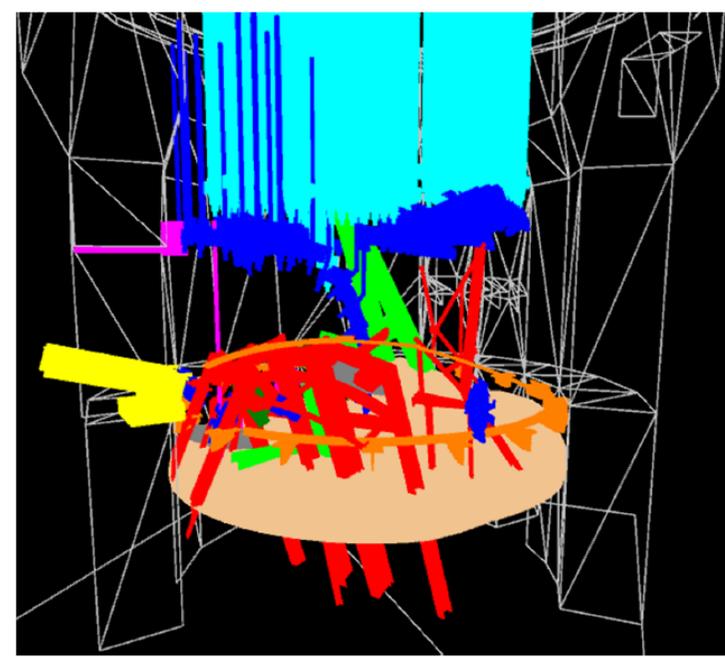
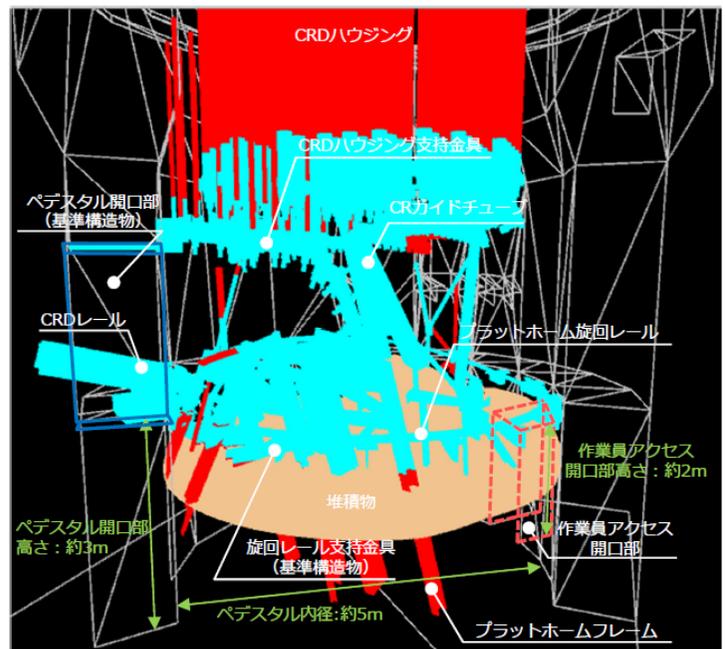
4-2-③

- 3号機ペデスタル内の様子(3/3) -

2. 映像を確認した構造物の範囲



- 映像を確認して復元した構造物と、映像では確認できないため設計情報に基づき推定して復元した構造物がある
- ペデスタル開口部および一部の旋回レール支持金具には大きな損傷が見られなかったため、これらの構造物は事故前と同じ位置にあったと考え、3次元復元時における位置の基準とした
- なお、ペデスタル内の状況を全体的に把握するために復元しており、構造物の配置はおおよその位置である

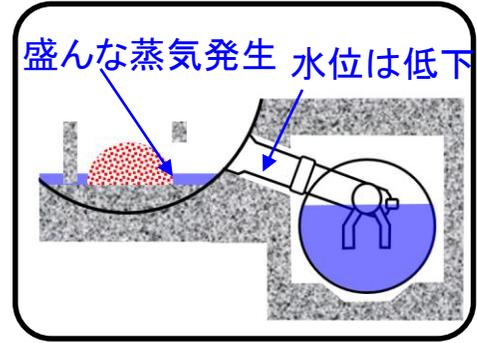
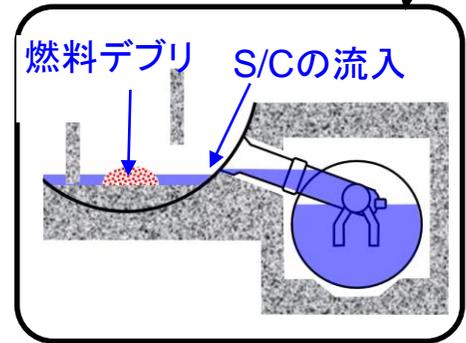
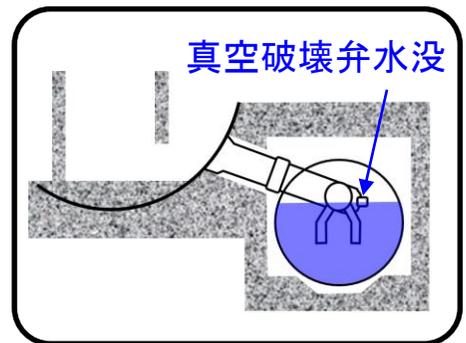
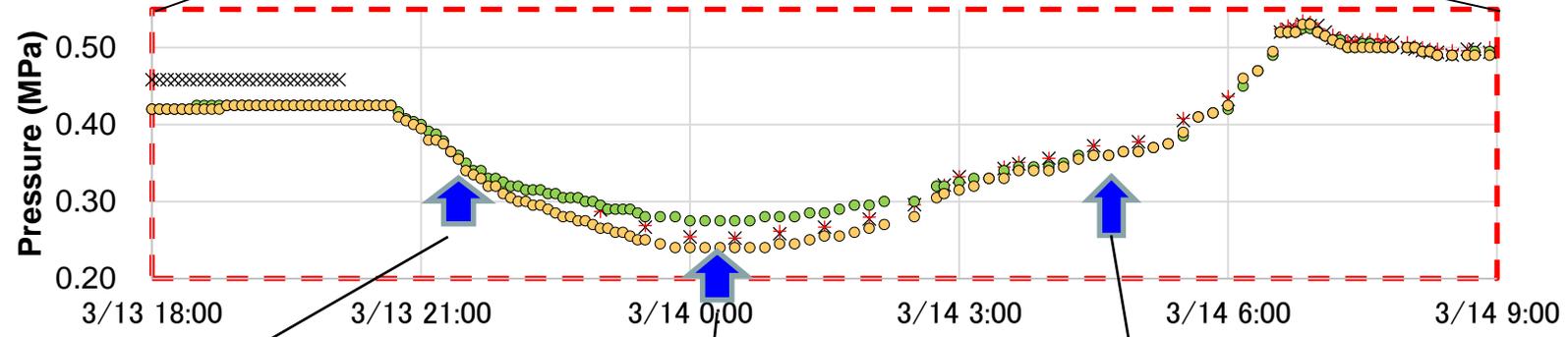
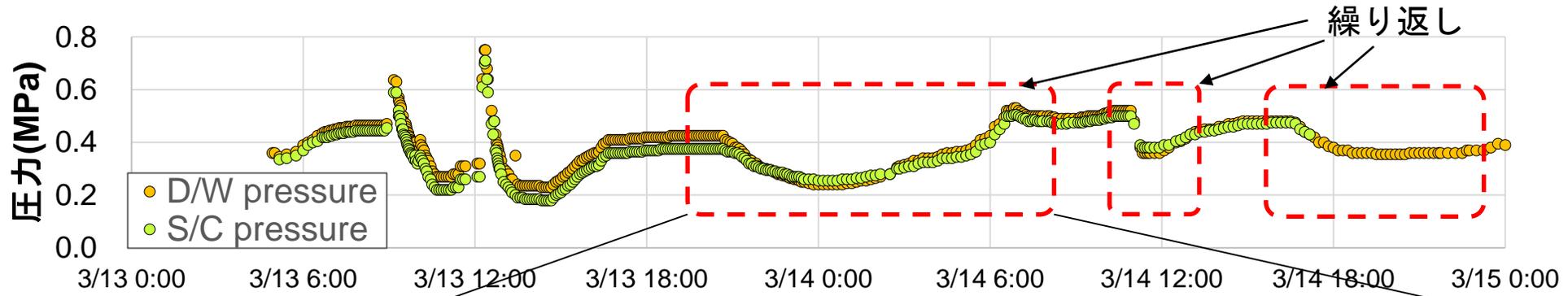


- | | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------------|----------------------|
| : 映像を確認した構造物 | : 映像を確認できなかった構造物 (設計情報から推定) | : プラットホーム, 梁台等の構造物 | : CRガイドチューブ |
| | | : プラットホーム旋回モータ | : CRD交換レール |
| | | : CRDハウジング支持金具 | : プラットホーム旋回レール, 支持金具 |
| | | : CRDハウジング | : 端子箱, 電線管, パイプ |
| | | | : グレーチング |

映像作成: 東芝エネルギーシステムズ(株)

4-3 プラントデータの分析

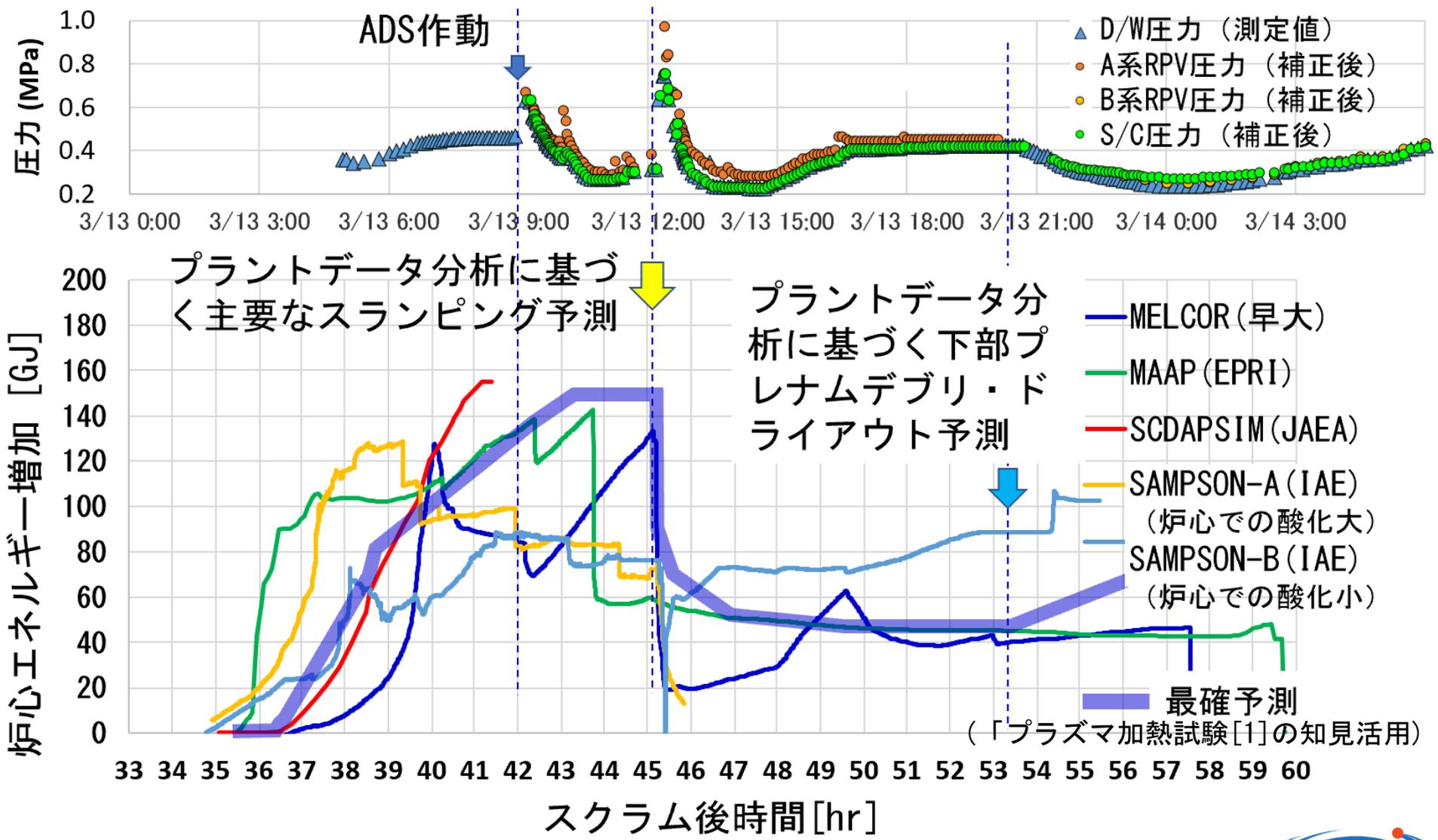
3号機における圧力データの分析例

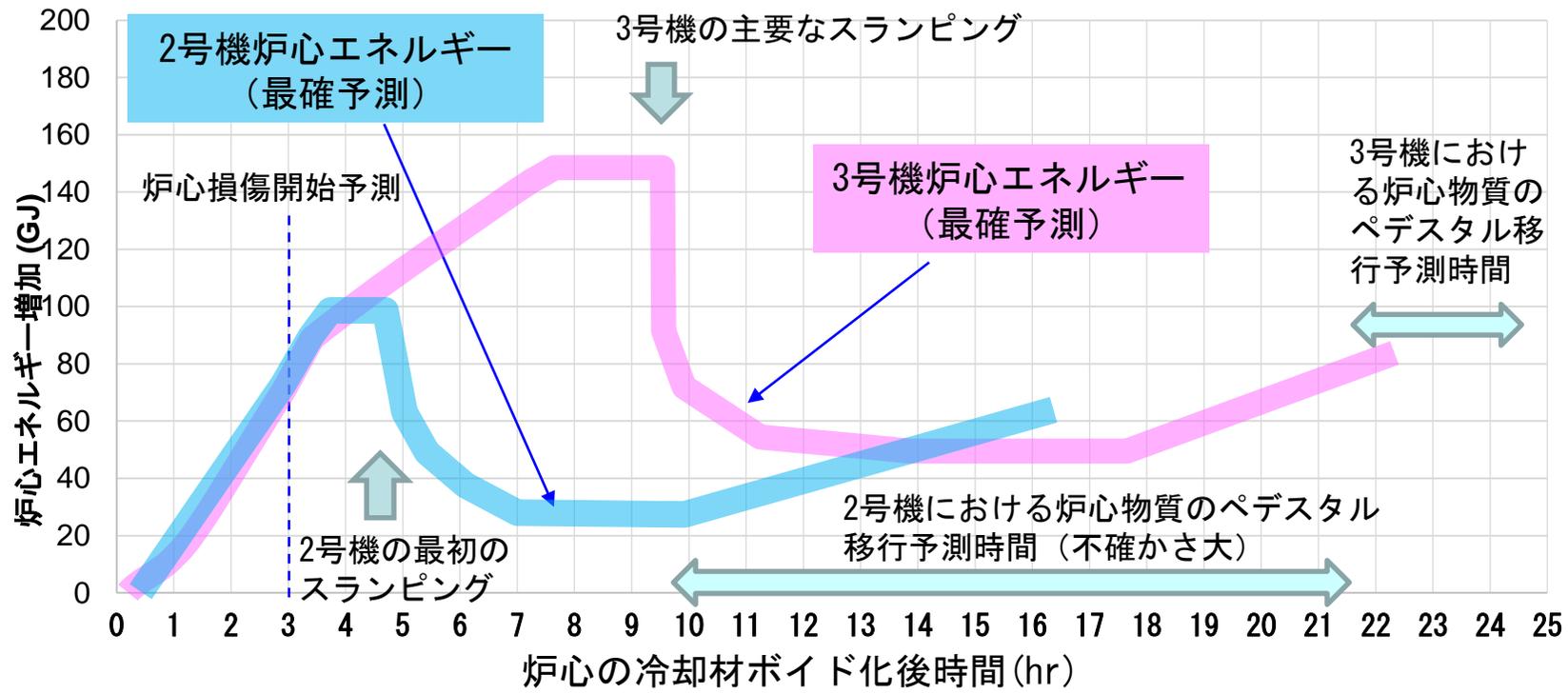


出典: I Sato, "An interpretation of Fukushima-Daiichi Unit 3 plant data covering the two-week accident-progression phase based on correction for pressure data", J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol 56, Num.5, pp.394-411, April, 2019.

蒸気発生低下 → 圧力低下 → S/C水の流入 → 蒸気発生 → 圧力上昇 → 液相水枯渇 → 圧力低下

4-4 解析評価例





IRID



3号機で到達した炉心エネルギーは2号機よりも大きかった可能性を指摘

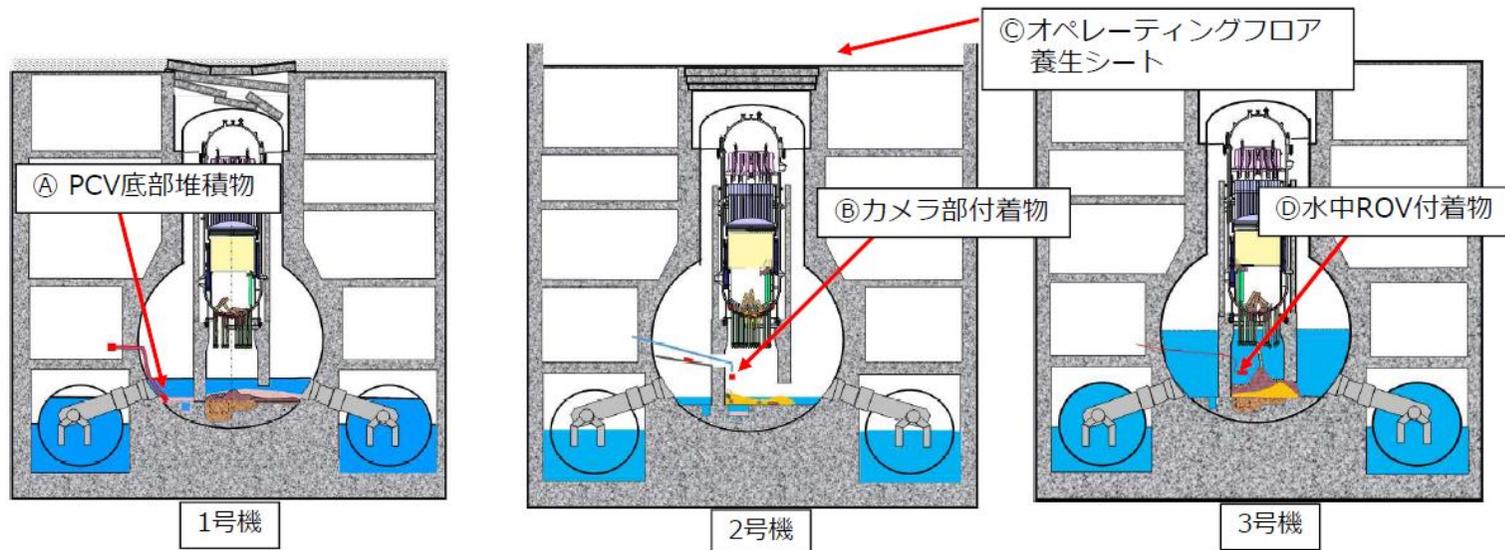
4-5 1F採取試料の分析

4-4. 1F試料の分析(1/2)

2. 分析サンプルの一覧



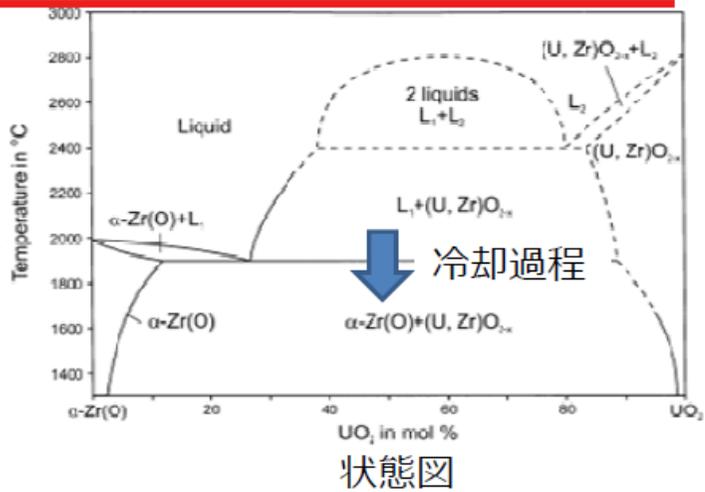
サンプル	概要	採取時期
① 1号機 PCV底部堆積物	格納容器底部の堆積物（浮遊物）を吸引し採取したもの	2017年4月
② 2号機 PCV内部調査装置付着物（カメラ部付着物）	格納容器内部調査で使用した、パンチルトカメラの表面を拭き取ったもの。ペDESTAL内上部から落下した水滴中の成分（微粒子）が付着している可能性	2018年1月
③ 2号機 原子炉建屋オペレーティングフロア養生シート	原子炉建屋最上階のシールドプラグ近傍にあった養生シートを採取したもの	2014年3月
④ 3号機 PCV内部調査装置付着物（水中ROV付着物）	3号機格納容器内部調査装置（水中ロボット）の表面を拭き取り採取したもの	2017年7月



4-4. 1F試料の分析(2/2)

5. TEM分析結果 ①1号機PCV底部堆積物

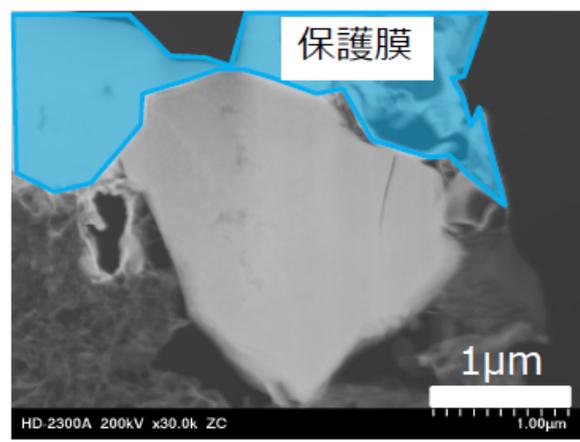
- 1号機PCV底部堆積物から検出された粒子は約2 μ mであった(左下図)。
- (U,Zr)O₂母相(右下図分析点①,③,④,⑤)内部に高Zr領域(分析点②)が確認された。
- 領域②は、冷却過程で(U,Zr)O_{2-x}から分離した α -Zr(O)相と考えられる(右図)。



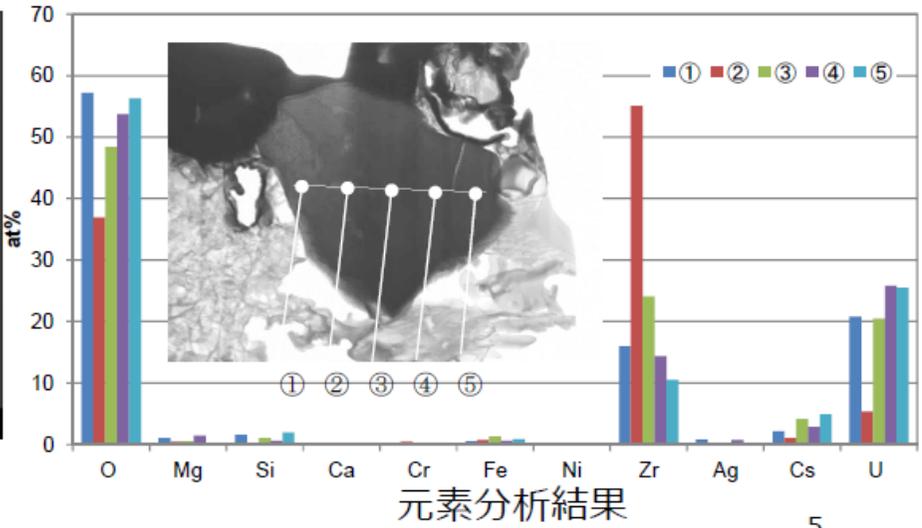
1号機のPCV(格納容器)底部堆積物に対するTEM(透過型電子顕微鏡)分析

↓

TMIでも確認されている溶融燃料が冷却過程を経て生成したとみられる物質を検出



TEM像



4-6 総合的な炉内状況の把握

1号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図

- ・事故中に炉内で溶融プールを形成した可能性。(一般的な推定)
- ・シュラウドが変形または破損または座屈している可能性がある。(一般的な推定・解析)
- ・シュラウドが破損した場合、ダウンカマ部に溶融燃料が侵入し、ジェットポンプ破損の可能性。(一般的な推定)

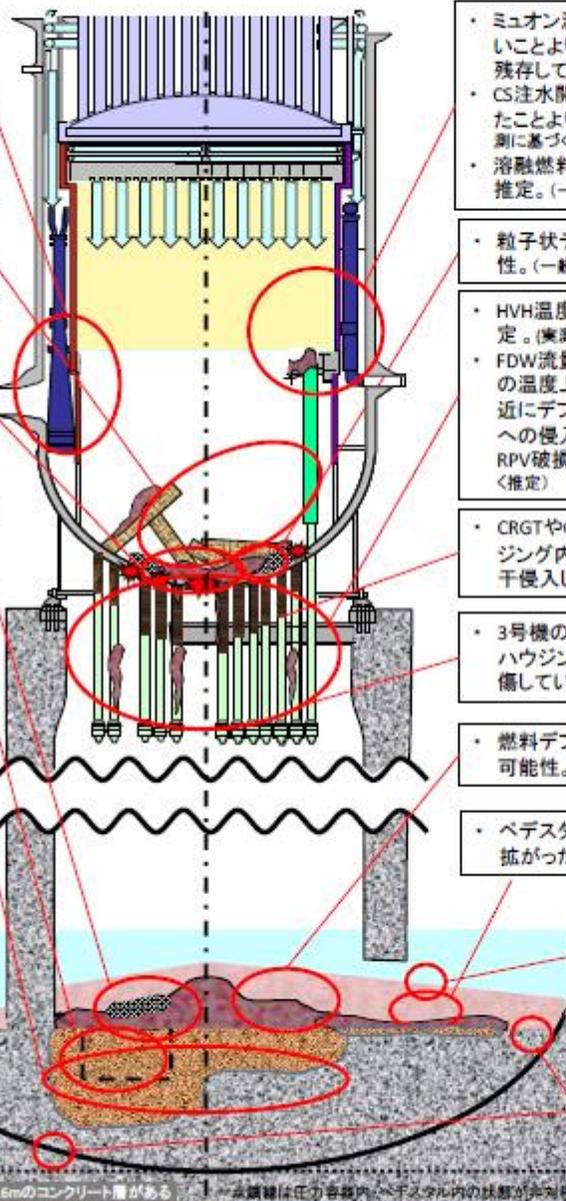
- ・高温の燃料デブリからの熱移動が小さい場合、CRGTは溶けずに残る可能性。(一般的な推定)

- ・炉心まで水位形成できないため、下部プレナムに破損口が存在。(実測に基づく推定)
- ・下部プレナム底部のボトムドレン等が脆弱であり、損傷している可能性。(一般的な推定)
- ・下部プレナムに落下した燃料はRPV底部に残存する可能性。(一般的な推定)

- ・PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成される。
- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)

- ・サンブ近傍のベデスタル壁及びその下部のコンクリートが、他の領域よりも浸食が大きくなっている可能性。(解析)

- ・MCCIを起こした燃料デブリはコンクリートと混合している。(一般的な推定・解析)
- ・機器ドレンサンブ内のRCW配管が損傷し、放射性物質がRCW系統内に混入したと推定。(実測に基づく推定)



- ・ミュオン測定、解析結果及び水位が形成されないことより、大部分の燃料が溶融し、燃料棒は残存していないと推定。(実測・解析)
- ・CS注水開始(2011/12/10)前に冷却ができていたことより、デブリの存在量は僅かと推定。(実測に基づく推定)
- ・溶融燃料が固化した一般的な酸化物デブリと推定。(一般的な推定)

- ・粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)

- ・HVH温度からデブリがCRD付近に存在すると推定。(実測・解析に基づく推定)
- ・FDW流量を減少させた際に特定のHVH温度計の温度上昇が大きいことから、外周部のCRD付近にデブリが存在(外表面への付着か、内部への侵入かは区別できない)し、その直上にRPV破損口が存在している可能性。(実測に基づく推定)

- ・CRGTやCRDハウジングの破損に伴いCRDハウジング内部に燃料デブリや溶融した金属が若干侵入している可能性。(一般的な推定・試験)

- ・3号機のPCV内部調査結果を踏まえると、CRDハウジング、プラットフォーム、RPV底部は損傷している可能性。(実測に基づく推定)

- ・燃料デブリの一部はMCCIを起こさず固化した可能性。(一般的な推定)

- ・ベデスタル開口部を通じて、D/W床へデブリが拡がった可能性。(一般的な推定・解析)

- ・D/W床には堆積物が存在し、堆積高さは、ベデスタル開口部に近いほうが高い傾向。(実測)

- ・サンドクッションドレン管から漏水しているため、PCVの損傷が生じたと推定。(実測・解析)

凡例

	残留燃料棒及びその残骸※
	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)※
	コンクリート混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	破損したシュラウド
	ペレット※
	RPV破損口
	上部タイプレート※
	堆積物(材質不明)
	バルーニング燃料※
	酸化物デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C ※
	制御棒混合溶融物※

※1号機の推定図中では使用していない

PCV下には約7.6mのコンクリート層がある

本図は任意の断面、ベデスタル内の状態が必ずしもこの通りであることを表現

1号機のデブリ取り出しにかかわる課題例

RPV (圧力容器)内はどうなっているのか?

この堆積物は何なのか?

ペDESTALコンクリート浸食の有無・程度は?

燃料デブリはどの範囲に存在するのか?

- 事故中に炉内で溶融プールを形成した可能性。(一般的な推定)
- シュラウドが変形または破損または座屈している可能性がある。(一般的な推定・解析)
- シュラウドが破損した場合、ダウンカマ部に溶融燃料が落下し、燃料デブリが形成される可能性がある。(一般的な推定・解析)

- 炉心まで水位形成できないため、下部プレナムに破損口が存在。(実測に基づく推定)
- 下部プレナム底部のボトムドレン等が脆弱であり、損傷している可能性。(一般的な推定)
- 下部プレナムに落下した燃料はRPV底部に残存する可能性。(一般的な推定)

- サンブ近傍のペDESTALコンクリートの下部のコンクリートが、他の部分よりも浸食が大きくなっている可能性。(一般的な推定・解析)

- MCCIを起こした燃料デブリはコンクリートと混合している。(一般的な推定・解析)
- 機器ドレンサンブ内のRCW配管が損傷し、放射性物質がRCW系統内に混入したと推定。(実測に基づく推定)

- ミュオン測定、解析結果及び水位が形成されないことより、大部分の燃料が溶融し、燃料棒は残存していないと推定。(実測・解析)
- CS注水開始(2011/12/10)前に冷却ができていたことより、デブリの存在量は僅かと推定。(実測に基づく推定)
- 溶融燃料が落下した際に燃料棒が折断され、燃料デブリが形成される可能性がある。(一般的な推定)

- 粒子状デブリが燃料棒の間にたまる可能性がある。(一般的な推定)
- HVH温度が上昇し、燃料棒の間に存在すると推定。(実測・解析)
- FDW流量が減少し、特定のHVH温度計の温度上昇が確認されたことから、外周部のCRD付近にデブリが燃料棒表面への付着が、内部への慢性的な侵入(確認できない)し、その直上にRPV破損している可能性。(実測に基づく推定)

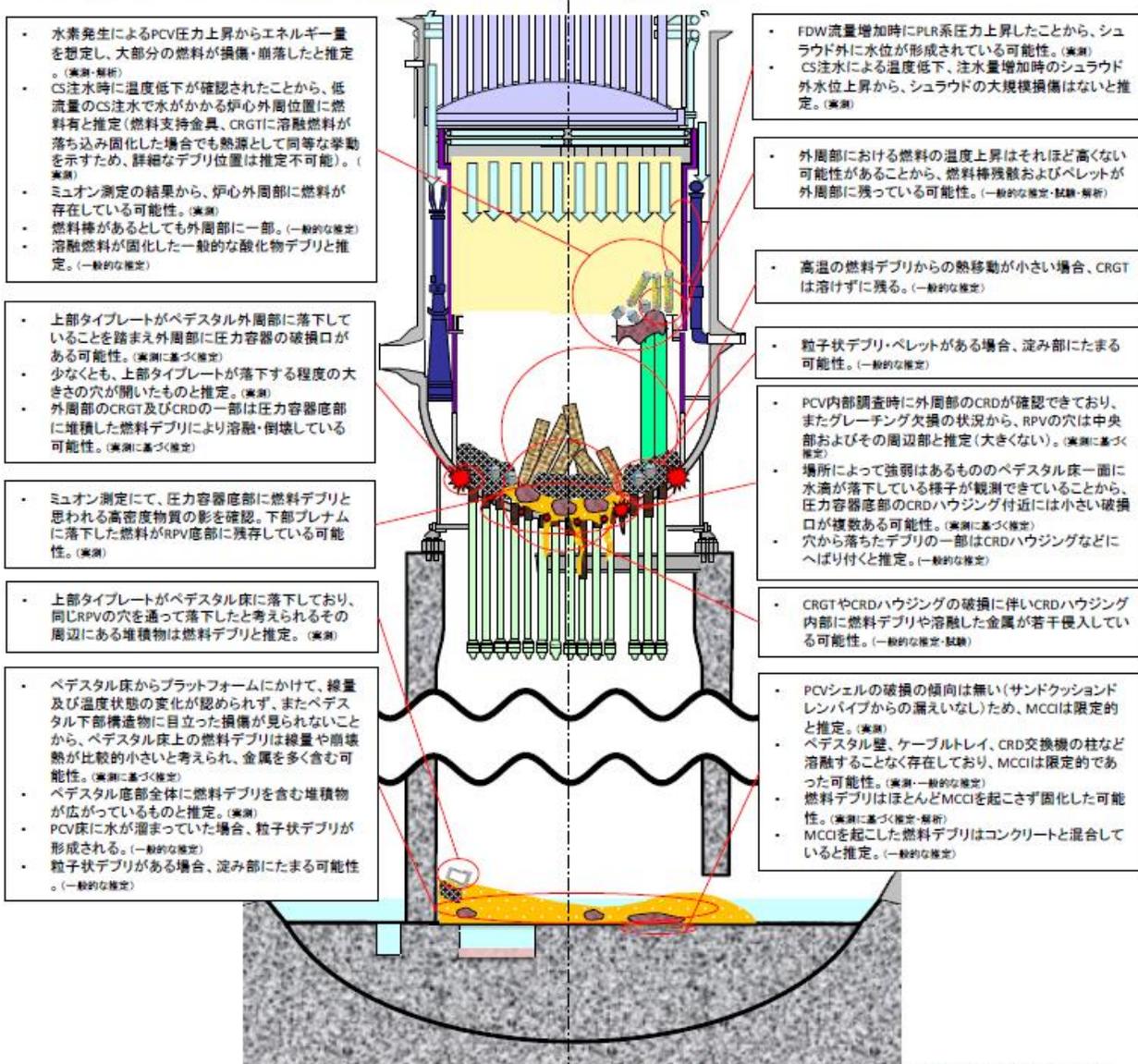
- CRGの破損に伴いCRDハウジング内に燃料デブリや溶融した金属が若干残存する可能性がある。(一般的な推定・試験)
- RPV内部調査結果を踏まえると、CRDハウジング、プラットフォーム、RPV底部は損傷している可能性がある。(一般的な推定)

- ペDESTALコンクリート/D/W床へデブリが拡がっている可能性がある。(一般的な推定・解析)
- D/W床には堆積物が存在し、堆積高さは、ペDESTAL開口部に近いほうが高い傾向。(実測)
- サンドクッションドレン管から漏水しているため、PCVの損傷が生じたと推定。(実測・解析)

	残留燃料棒及びその残骸※
	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料棒破断片(金属を多く含む)※
	燃料棒混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	破損したシュラウド
	ペレット※
	RPV破損口
	上部タイプレート※
	酸化物デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C ※
	制御棒混合溶融物※

※1号機の推定図中では使用していない

2号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図



凡例

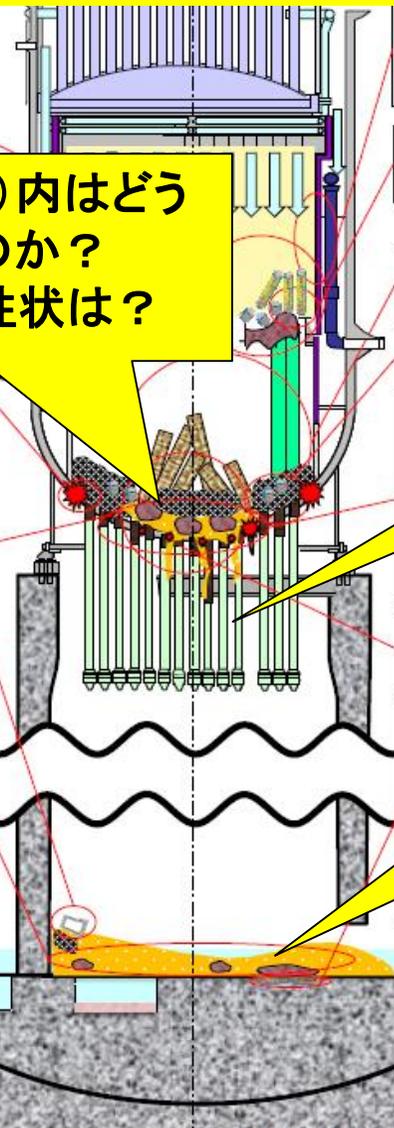
	残留燃料棒及びその残骸
	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)
	コンクリート混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	破損したシュラウド※
	ペレット
	RPV破損口
	上部タイプレート
	堆積物(材質不明)
	パルーニング燃料※
	酸化物デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C※
	制御棒混合溶融物※

一点鎖線は圧力容器内・ベDESTAL内の状態が非対称であることを表現

※2号機の推定図中では使用していない

2号機のデブリ取り出しにかかわる課題例

- 水素発生によるPCV圧力上昇からエネルギー量を想定し、大部分の燃料が損傷・崩壊したと推定。(※例・解析)
- CS注水時に温度低下が確認されたことから、低流量のCS注水で水がかかる炉心外周位置に燃料と推定(燃料支持金具、CRGTに溶融燃料が落ち込み固化した場合でも熱源として同等な挙動を示すため、詳細なデブリ位置は推定不可)



- FDW流量増加時にPLR系は力上昇したことから、シュラウド外に水位が形成されている可能性。(※例)
- CS注水による温度低下、注水量増加時のシュラウド外水位上昇から、シュラウドの大規模損傷はないと推定。(※例)

	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)
	コンクリート混合デブリ

- 外周部における燃料の温度上昇はそれほど高くはない可能性があることから、燃料棒残骸およびペレットが外周部に残っている可能性。(一般的な推定・経験・解析)

- 高温の燃料は溶けず

- 粒子状デブリ可能性

- PCV内部調査時に外周部には燃料棒が落ちており、またグレーチングが破損している。RPVの穴は中央部および下部に多く見られる(大きくない)。(※例に基づく推定)
- 燃料棒の破断はあるもののベドスタル床一面に燃料棒が落下している様子が観測できていることから、炉心下部のCRDハウジング付近には小さい破損口が複数ある可能性。(※例に基づく推定)
- 穴から落ちたデブリの一部はCRDハウジングなどにへばり付くと推定。(一般的な推定)

	シュラウド
	破損したシュラウド※
	ペレット
	RPV破損口

**RPV(圧力容器)内はどうなっているのか？
燃料デブリの性状は？**

- 少なくとも、上部タイブレードが落下する程度の大きさの穴が開いたものと推定。(※例)
- 外周部のCRGT及びCRDの一部は圧力容器底部に堆積した燃料デブリにより溶融・倒壊している可能性。(※例に基づく推定)

- ミュオン測定にて、圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。下部プレナムに落下した燃料がRPV底部に残存している可能性。(※例)

- 上部タイブレードがベドスタル床に落下しており、同じRPVの穴を通して落下したと考えられるその周辺にある堆積物は燃料デブリと推定。(※例)

- ベドスタル床からプラットフォームにかけて、線量及び温度状態の変化が認められず、またベドスタル下部構造物に目立った損傷が見られないことから、ベドスタル床上の燃料デブリは線量や前焼熱が比較的小さいと考えられ、金属を多く含む可能性。(※例に基づく推定)
- ベドスタル底部全体に燃料デブリを含む堆積物が広がっているものと推定。(※例)
- PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成される。(一般的な推定)
- 粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)

**燃料デブリの性状は？
(取り出しやすさ、など)**

- ベドスタル床に燃料デブリが落ちており、CRD交換機の柱など溶融している可能性は低い。(一般的な推定)
- 燃料デブリはほとんどMCCIを起こさず固化した可能性は低い。(一般的な推定・解析)
- MCCIを起こした燃料デブリはコンクリートと混合していると推定。(一般的な推定)

	酸化物デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C※
	制御棒混合溶融物※

一点鎖線は圧力容器内・ベドスタル内の状態が非対称であることを表現

※2号機の推定図中では使用していない

3号機のデブリ分布・RPV・PCV状態の推定図

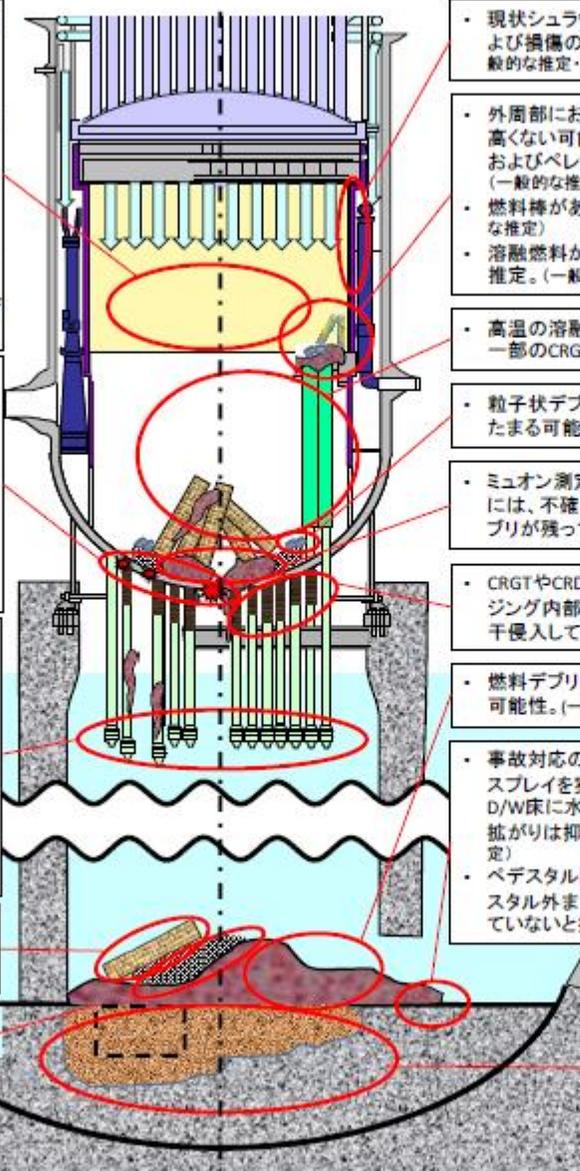
- 水素発生によるPCV圧力上昇からエネルギー量を想定し、大部分の燃料が溶融したと推定。(実測・解析)
- 平成25年12月9日～24日までCS系を停止した時(FDWからの流量を増やし全注水量としては一定)、RPV各部で温度上昇は見られなかったため、炉心位置に存在する燃料デブリは少ないと推定(2号機より少ない)。(実測)
- 上述の話とあわせ、CS系からの注水開始により総注水量が増加した時(平成23年9月1日)にRPV下部温度が低下したため、燃料デブリが下部プレナムにあると推定。(実測)
- ミュオン測定の結果、もとの炉心域には燃料デブリの大きな塊は存在していない可能性。(実測)

- CRGTと推定される構造物が圧力容器外へ落下していることから、少なくともCRGTが落下する程度の大きさの破損口が開いたものと推定。(実測)
- ベDESTAL内で水面の揺らぎがRPV中央部および外周部で確認されたことから、RPV中央部および外周部に破損口が存在する可能性。(実測)
- CRDハウジング下部においてフランジ面が段違いになっていることから、CRDハウジングと圧力容器底部の一部の溶接部が固着されていないと推定。(実測に基づく推定)

- PCV内部調査の結果、2号機と比較してベDESTAL内の損傷が進んでいる様子が確認できており、PCVに落下した燃料デブリの量も2号機と比較して多いものと推定。(実測)
- プラットフォームが損傷している様子が確認されており、高温のデブリが落下した影響と推定。(実測)
- CRDハウジング支持金具の損傷および溶融物が固化したとおもわれるものの付着が確認されており、当該部を含め、その上下位置あるいは周辺には燃料デブリが存在する可能性。(実測)

- ベDESTAL下部において溶融物が固化したと思われるものやグレーチング等の落下物、堆積物を確認。(実測)

- PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成された可能性。(一般的な推定)
- 粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)



- 現状シュラウドについては、健全な可能性および損傷のある可能性、双方考えられる。(一般的な推定・解析)

- 外周部における燃料の温度上昇はそれほど高くない可能性があることから、燃料棒残骸およびペレットが外周部に残っている可能性。(一般的な推定・試験・解析)
- 燃料棒があるとしても外周部に一部。(一般的な推定)
- 溶融燃料が固化した一般的な酸化デブリと推定。(一般的な推定)

- 高温の溶融デブリからの熱移動が小さい場合、一部のCRGTは溶けずに残る。(一般的な推定)

- 粒子状デブリ・ペレットがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)

- ミュオン測定の結果、原子炉圧力容器の底部には、不確かさはあるものの、一部の燃料デブリが残っている可能性。(実測)

- CRGTやCRDハウジングの破損に伴いCRDハウジング内部に燃料デブリや溶融した金属が若干侵入している可能性。(一般的な推定・試験)

- 燃料デブリの一部はMCCIを起こさず固化した可能性。(一般的な推定)

- 事故対応の中で3月13日7:39から1時間強D/Wスプレイを実施しており、圧力容器破損時にD/W床に水位があると考えられ、燃料デブリの拡がりは抑制された可能性。(実測・一般的な推定)
- ベDESTAL開口部を通じて、燃料デブリがベDESTAL外まで広がるが、シェルアタックには至っていないと推定。(実測・解析)

- 4号機に加えて、3号機でも爆発が起こっており、MCCIにより発生した水素が爆発に寄与した可能性が考えられる。(実測)

凡例

	残留燃料棒及びその残骸
	酸化デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)※
	コンクリート混合デブリ
	CRGT
	破損したCRGT
	CRD
	CRD(内部にデブリ)
	シュラウド
	破損したシュラウド※
	ペレット
	RPV破損口
	上部タイプレート※
	堆積物(材質不明)※
	パルーニング燃料※
	酸化デブリ※
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C ※
	制御棒混合溶融物※

一点鎖線は圧力容器内・ベDESTAL内の状態が非対称であることを表現 ※3号機の推定図中では使用していない

3号機のデブリ取り出しにかかわる課題例

想定し、大部分の燃料が溶融したと推定。
(実測・解析)

- 平成25年12月9日～24日までCS系を停止した時(FDWからの流量を増やし全注水量としては一定)、RPV各部で温度上昇は見られなかったため、炉心位置に存在する燃料デブリは少ないと推定
- 上級下ナミ
- ミブ

CRGTと推定される構造物が落下していることから、少なくともCRGTが落下する程度の大きさの破損口が開いたものと推定。(実測)

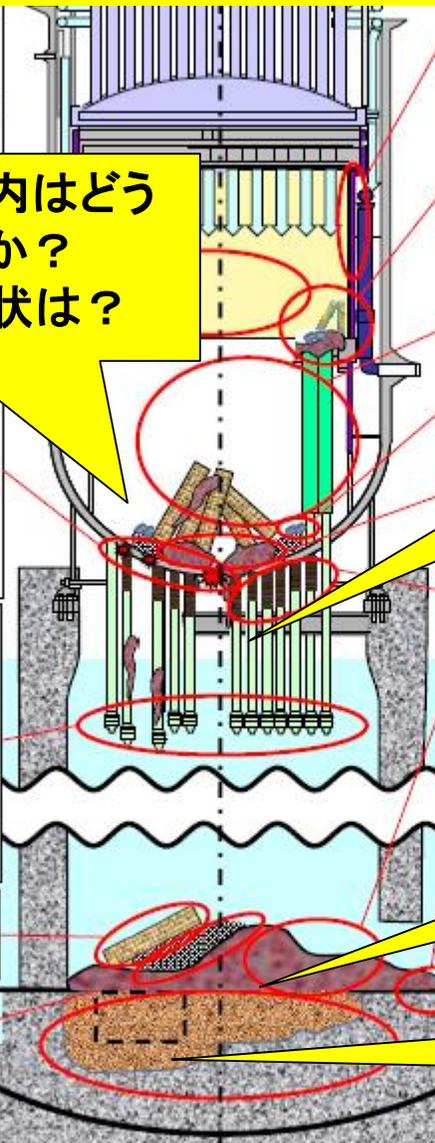
- ペDESTAL内で水面の揺らぎがRPV中央部および外周部に確認されたことから、RPV中央部および外周部に破損口が存在する可能性。(実測)
- CRDハウジング下部においてフランジ面が段違いになっていることから、CRDハウジングと圧力容器底部の一部の溶接部が固着されていないと推定。(実測に基づく推定)

PCV内部調査の結果、2号機と比較してペDESTAL内の損傷が進んでいる様子が確認できており、PCViに落下した燃料デブリの量も2号機と比較して多いものと推定。(実測)

- プラットフォームが損傷している様子が確認されており、高温のデブリが落下した影響と推定。(実測)
- CRDハウジング支持金具の損傷および溶融物が固化したとおもわれるものの付着が確認されており、当該部を含め、その上下位置あるいは周辺には燃料デブリが存在する可能性。(実測)

ペDESTAL下部において溶融物が固化したと思われるものやグレーチング等の落下物、堆積物を確認。(実測)

- PCV床に水が溜まっていた場合、粒子状デブリが形成された可能性。(一般的な推定)
- 粒子状デブリがある場合、淀み部にたまる可能性。(一般的な推定)



状況によって、健全な可能性および損傷のある可能性、双方考えられる。(一般的な推定・解析)

- 外周部における燃料の温度上昇はそれほど高くない可能性があることから、燃料棒残骸およびペレットが外周部に残っている可能性。(一般的な推定・試験・解析)
- 燃料棒があるとしても外周部に一部。(一般的な推定)
- 溶融物
- 高温の一部
- 粒子状デブリがたまる可能性。
- ミューン...原子炉圧力容器の底部に...一部は燃料デブリが残っている可能性。(実測)
- CRGTやCRDハウジングの破損に伴いCRDハウジング内部に燃料デブリや溶融した金属が若干侵入している可能性。(一般的な推定・試験)
- ペDESTAL...燃料デブリがペDESTAL...シェルアタックには至って推定。(実測・解析)

	酸化物デブリ(多孔質)
	粒子状デブリ
	燃料デブリ(金属を多く含む)※
	コンクリート混合デブリ
	RPV破損口
	シュラウド
	破損したシュラウド※
	ペレット
	RPV破損口
	重金属デブリ※
	粉状ペレット※
	被覆管残渣※
	溶融炉内構造物※
	固化B4C ※
	制御棒混合溶融物※

**RPV(圧力容器)内はどうなっているのか？
燃料デブリの性状は？**

林立する制御棒駆動機構(CRD)の内部はどうのような状態か？

**燃料デブリの性状は？
深さ方向のデブリ性状の分布は？**

コンクリート底部の浸食は？

一点鎖線は圧力容器内・ペDESTAL内の状態が非対称であることを表現 ※3号機の推定図中では使用していない

5. 廃止措置に向けた取り組み

(参考) 改訂中長期ロードマップの目標工程案

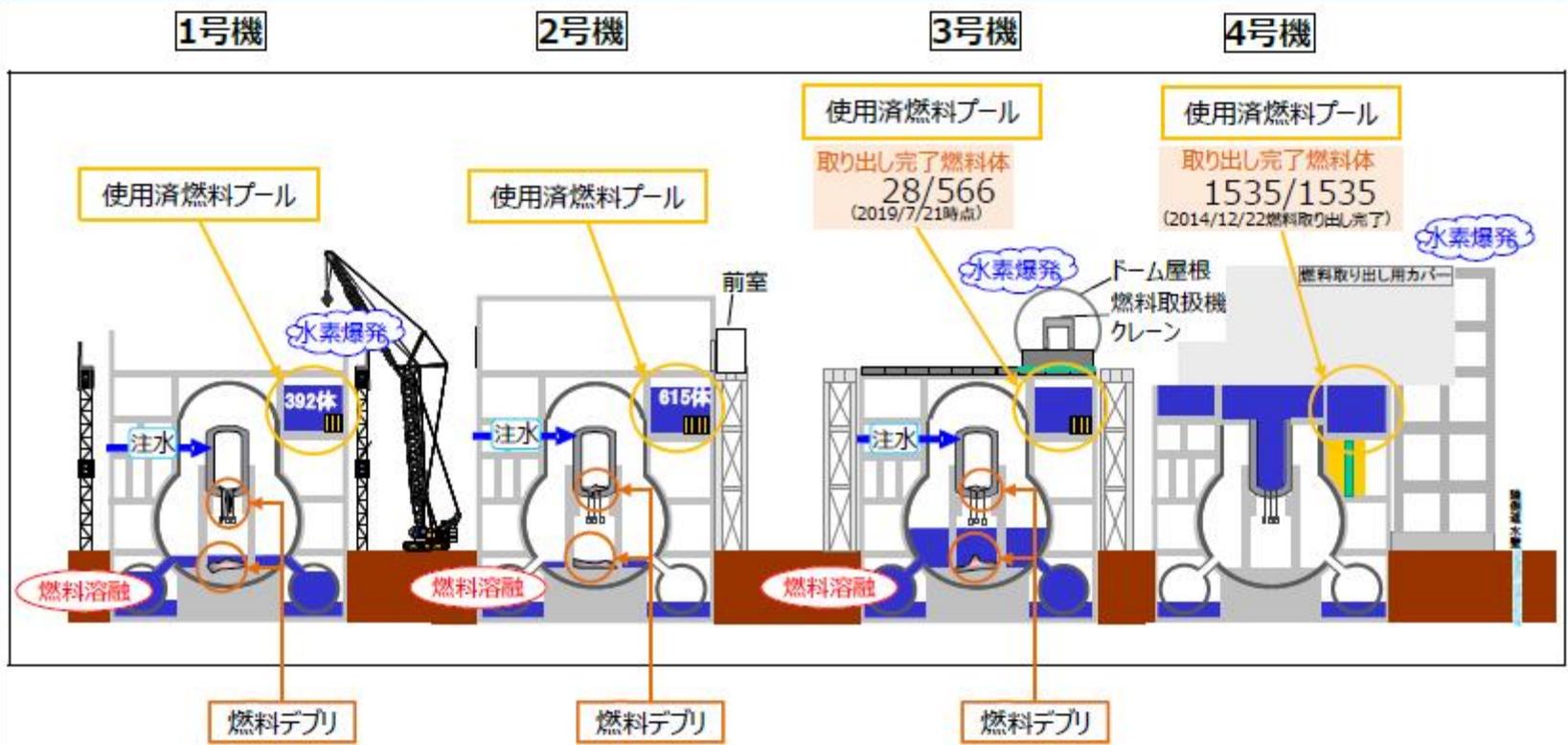


主な目標工程

		現行	改訂案
汚染水対策	汚染水発生量を150m ³ /日程度に抑制	2020年内	2020年内
	汚染水発生量を100m³/日以下に抑制	-	2025年内 新設
滞留水処理	建屋内滞留水処理完了※	2020年内	2020年内(※)
	原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減	-	2022年度～2024年度 新設
燃料取り出し	1～6号機燃料取り出しの完了	-	2031年内 新設
	1号機大型カバーの設置完了	-	2023年度頃 新設
	1号機燃料取り出しの開始	2023年度目処	2027年度～2028年度 見直し
	2号機燃料取り出しの開始	2023年度目処	2024年度～2026年度 見直し
安全確保・飛散防止対策のため工法変更			
燃料デブリ取り出し	初号機の燃料デブリ取り出しの開始 (2号機から着手。段階的に取り出し規模を拡大)	2021年内	2021年内
廃棄物対策	処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見直し	2021年度頃	2021年度頃
	ガレキ等の屋外一時保管解消	-	2028年度内 新設

※1～3号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却建屋を除く。

(参考) 福島第一原子力発電所 1～4号機の現状



<1/2号機排気筒の解体>



地元企業が元請として参画。
【2019.8】

<燃料デブリ取り出し>



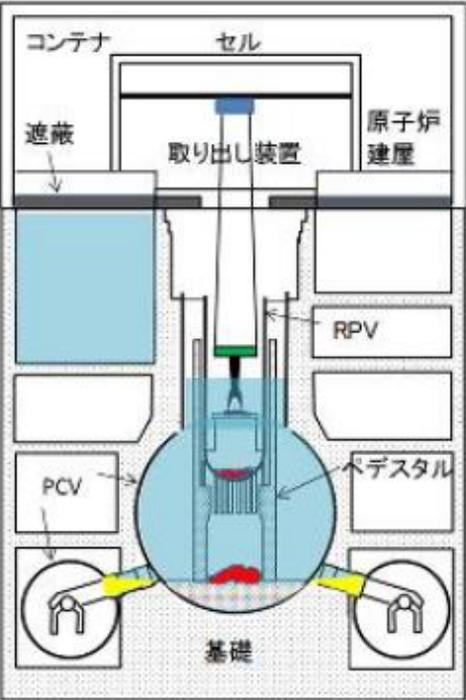
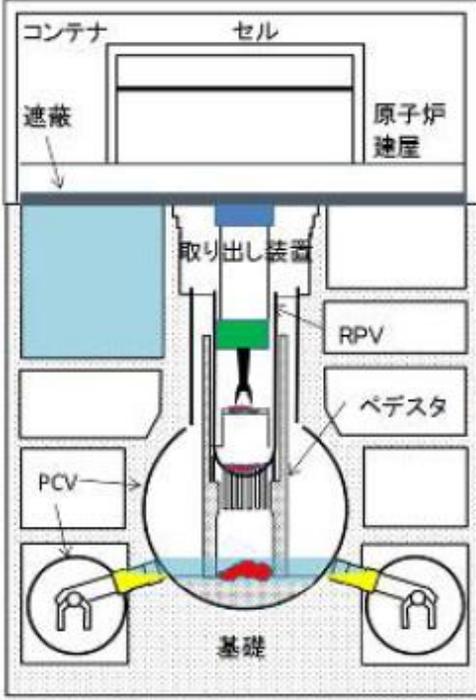
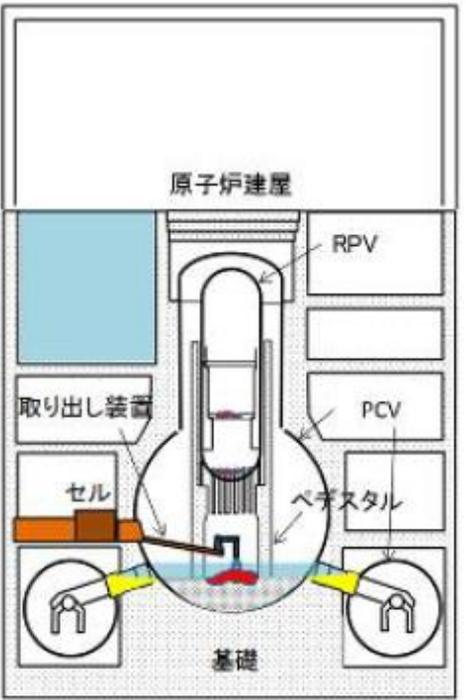
燃料デブリと思われる堆積物をつかんで動かせることを確認 (2号機)。
【2019.2】

<燃料取り出し>



燃料の溶け落ちた炉で初めて、遠隔操作による使用済燃料プールからの燃料取り出しを開始 (3号機)。
【2019.4】

デブリ取り出し工法の候補(2017年の段階)

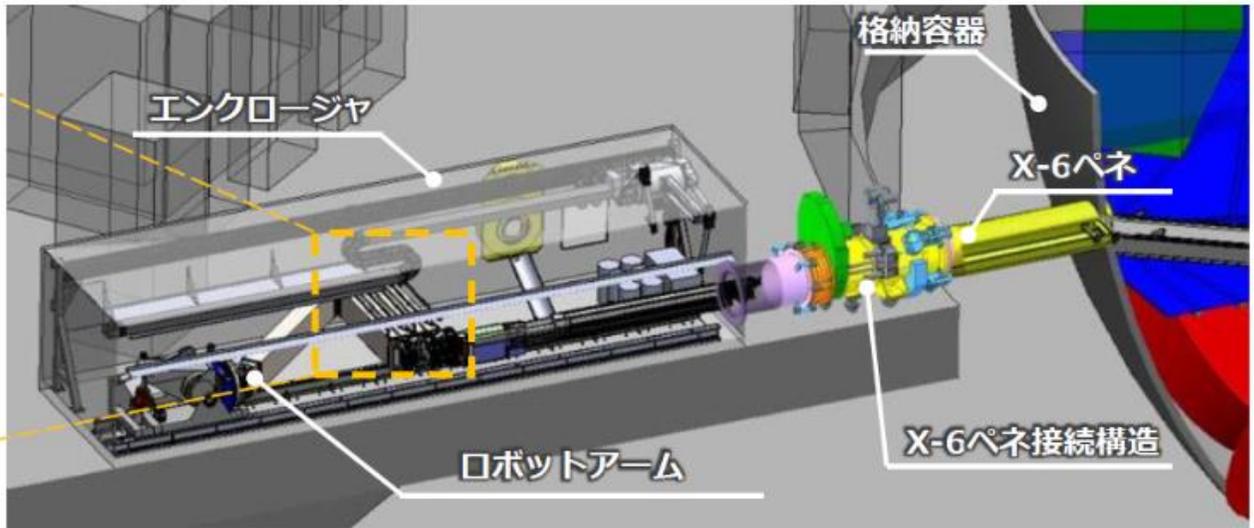
項目	①冠水一上アクセス工法	②気中一上アクセス工法	③気中一横アクセス工法
<p>【工法説明】</p> <ul style="list-style-type: none"> *: 赤色部分 燃料デブリ存在想定 *: 水色部分 水張り範囲の想定 *: 黄色部分 ベント管止水 	 <p>オベフロからアクセスして、燃料デブリ全てを水で覆った状態で切削し、オベフロから取り出しを行う工法</p>	 <p>オベフロからアクセスして、気中に露出している燃料デブリには水を掛けながら切削し、オベフロから取り出しを行う工法</p>	 <p>PCV横からアクセスして、気中に露出している燃料デブリには水を掛けながら切削し、PCV横から取り出しを行う工法</p>

重点的に検討を進める3つの工法

出典：東京電力ホールディングス、「福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2017」

2号機燃料デブリ取り出し方策の例

ロボットアーム



試験的取り出し		段階的に取り出し規模を拡大	
<p>アクセス装置</p>	<p>デブリ回収装置</p> <p>金ブラシ案 真空容器案</p>	<p>アクセス装置</p>	<p>デブリ回収装置</p> <p>グリッパツール案 掘削回収ツール案</p>

出典: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/shared/img/pq0h-2jz6bae8.png>

終わりに

- JAEA/CLADS（廃炉環境国際共同研究センター）では東京電力HD社などとの密接な協力のもと、燃料デブリ取り出しなど、廃炉に向けて1F各号機の「炉内状況把握」に今後とも全力を挙げて取り組みます。
- このようなプロジェクトに若い研究者の皆様のご参加を期待しています。

ご清聴ありがとうございました