

1F 1～3号機の原子炉・格納容器の状況把握の歴史的展開

Historical challenges to understand the in-reactor and containment status of unit 1 to 3

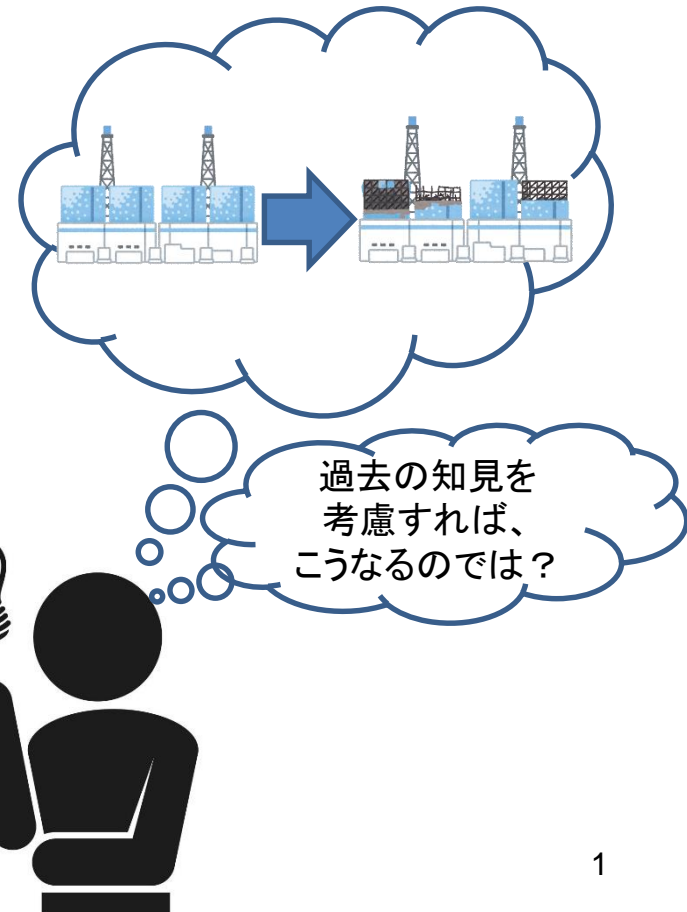
2023.08.28



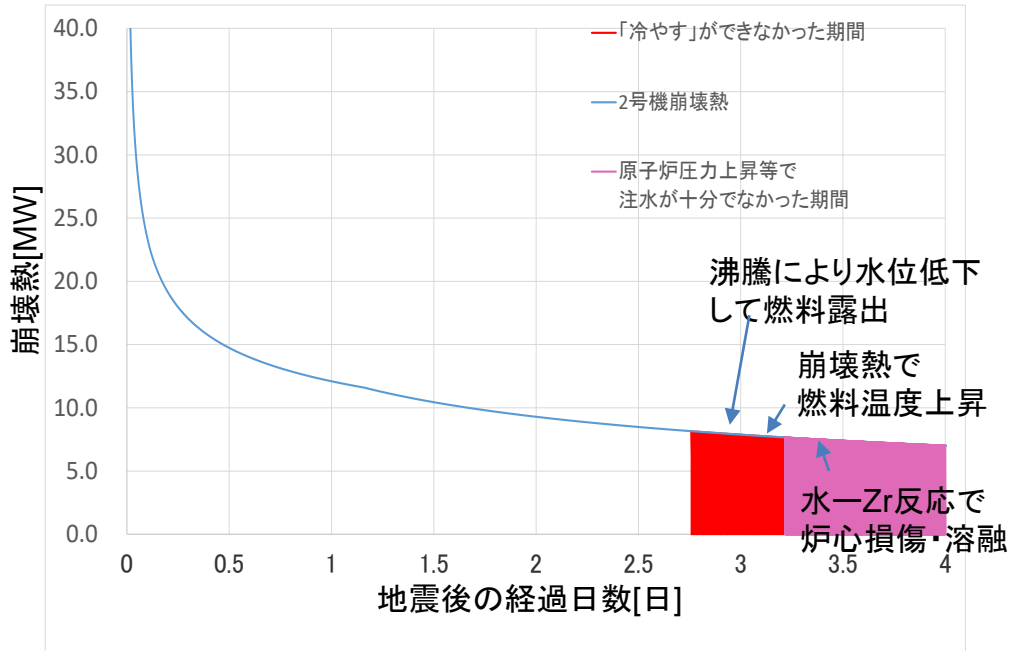
- 事故直後は原子炉建屋内の線量が高く、事故炉を直接確認することは困難
- 炉心損傷・炉心溶融を起こした1～3号機の原子炉・格納容器の状況把握は廃炉を進めるうえで基本となる重要な情報
- そのため、解析コードを用いて事故進展を評価し、その結果として原子炉・格納容器の損傷状態を評価することから始めた

解析コードによる評価

- 原子炉の設計に関する十分な知見
- 事故に関するこれまでの研究成果を解析コードに取り込むことで、事故により、燃料・原子炉・格納容器の損傷状況を評価可能
- 2011年の段階で、事故の厳しさが1号機>3号機>2号機であるといった基本的な事故の特徴が判明していた
- × 実際のBWRの事故は世界初であり、実物を見たことのない技術者には知識の限界がある
- すべての構造物・現象を評価するわけではないことから、解析コードによる解析結果だけで、事故炉の状況をすべて評価することはできない



福島第一原子力発電所1～3号機の事故は崩壊熱を冷やせなかったことが原因すなわち、崩壊熱のエネルギーが燃料を融かし、原子炉を破損させた。



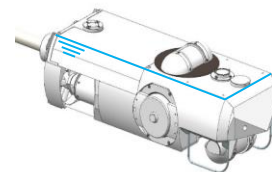
解析コードによる評価は、冷却ができていない期間の蓄積エネルギー（赤い部分）がどう使われるかを評価することで事故進展を評価すること

- ①水が沸騰する→水が無くなる
- ②燃料温度が上昇する
- ③化学反応が発生（発熱・吸熱）
- ④燃料が溶融する
- ⑤溶融燃料から構造物への熱移動とそれによる構造物の破損・溶融

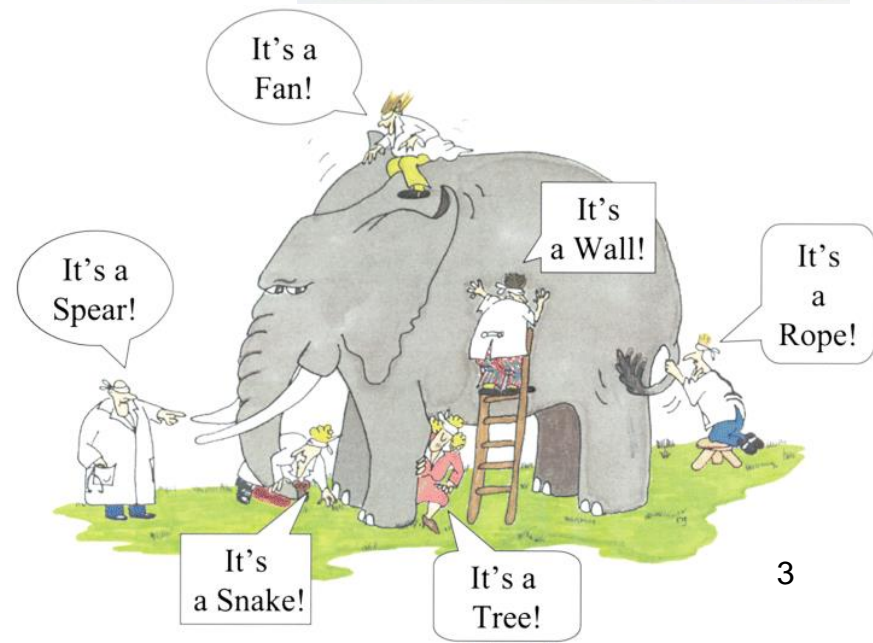
- 減衰により、敷地内・原子炉建屋内の放射線量が徐々に低下していくことにより、2012年以降、直接の調査を実施することができるようになった
- 事故後に開始された研究開発により、調査のためのロボットや測定器が完成し、それらを現場に投入することで格納容器の内部の状態が少しずつ分かり始めた

内部調査による直接確認

- 百聞は一見に如かず
 - 廃炉を進めるために必要な情報が得られる
- 解析コードでは評価されないような構造物や現象を含め、実際の状況が映像・線量情報として得られるため、原子炉・格納容器の状況把握には直接の調査が必須



- ✕ 直接アクセスできる場所は限られる
- カメラを通じてしか見られない
- 状況確認が遠隔からのものになるため「群盲象を撫でる」のような状況になることから、見たものが何であるかその解釈が問題となることがある



内部状況調査

2号機 トーラス室内調査
(2012年 4月)



1号機 PCV内部調査
(2012年 10月)



1号機 PCV内部調査
(2017年 3月)

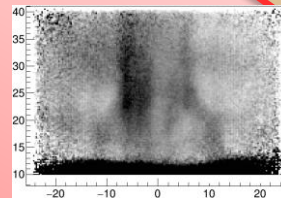


海外でデブリ経験調査

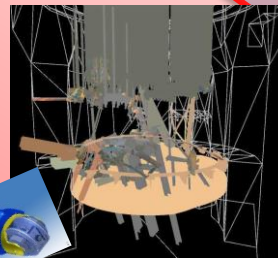
- 1) TMI 2 WS @ Idaho
- 2) チョルノービリデブリ分析経験研修 @ホローピン研究所



Muon
2015年3月



3号機PCV内部調査
(2017年 7月)



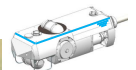
2号機PCV内部調査
(2018年 1月)



内部状況調査



1号機PCV内部調査
(2023年 3月)



事故進展解析

デブリ取り出し

2号機 試験的取り出し

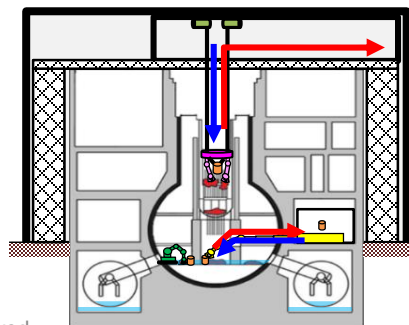
段階的取り出し

燃料デブリ取り出し工法評価小委員会

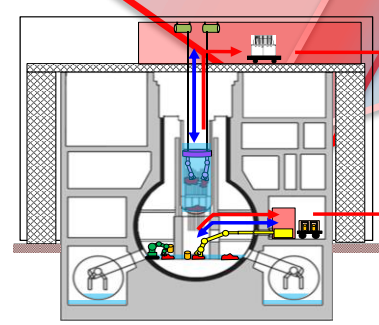
- 第1回：2023年3月29日 開始
- 現在、第5回：2023年7月19日まで議論を重ねており、今後も工法に関する評価を継続する

取り出し規模の本格的な拡大工法

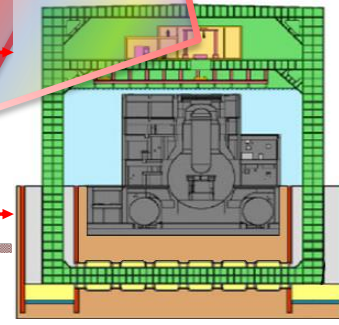
気中工法

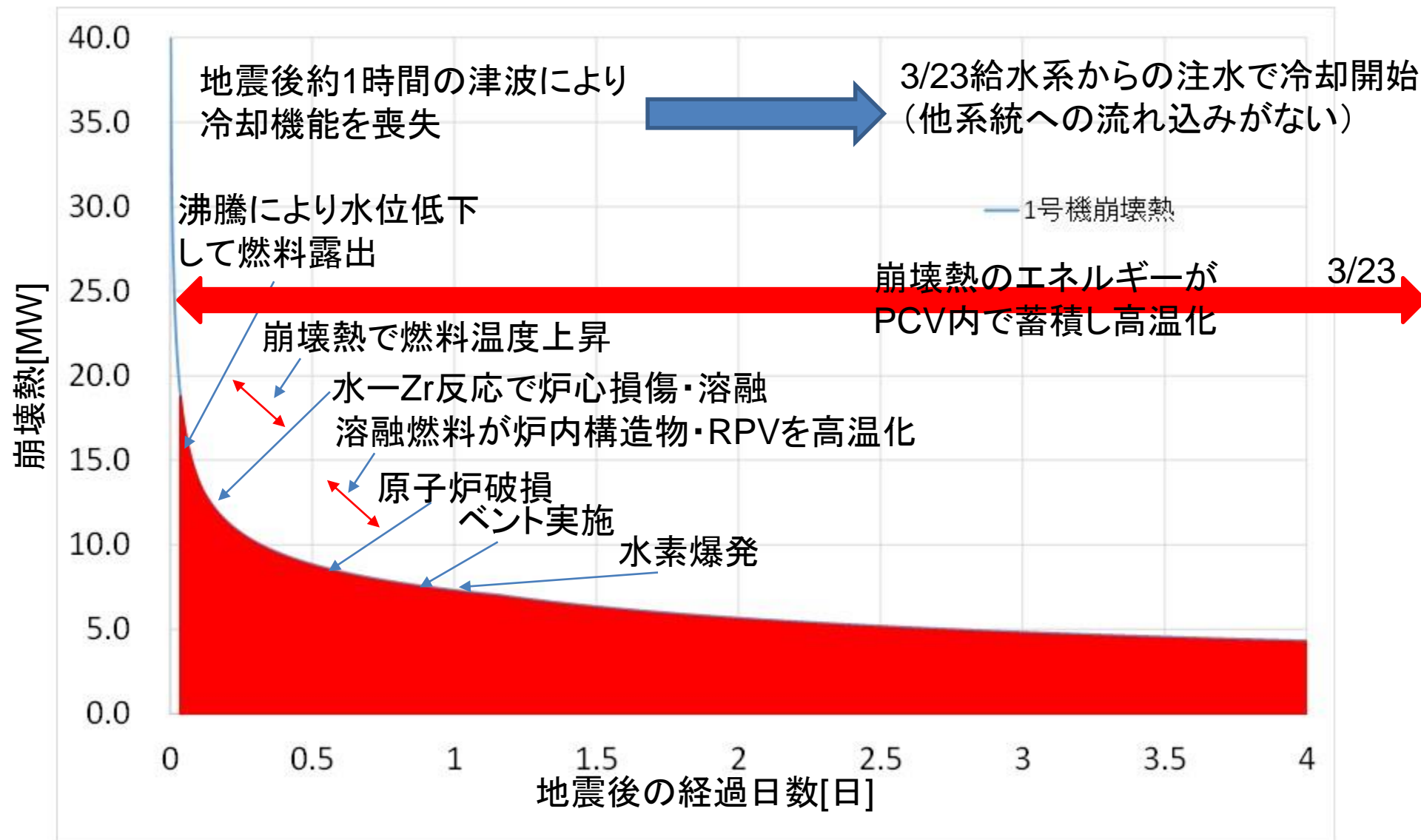


気中工法のオプション



冠水工法

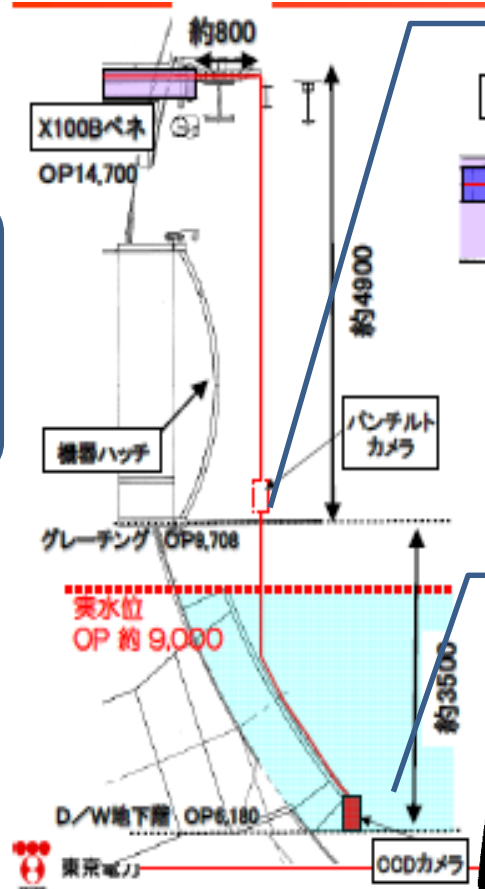




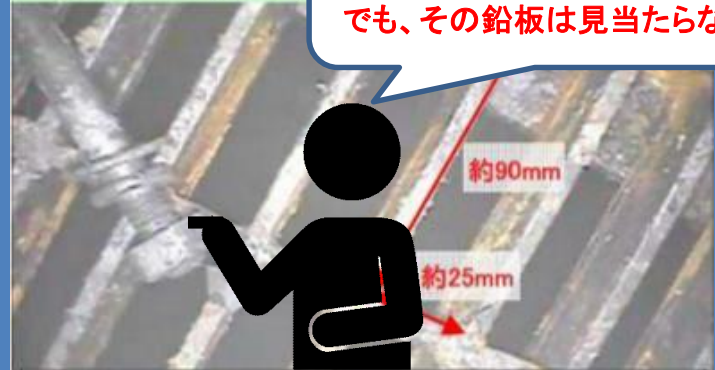
雰囲気線量
0.0mSv/h
だけで作業できる
かな？

ファイバースコープを
挿入して
なんとか
中を見て
みましょう

X100ペネ
なら線量が比較的
低いし何と
かなるの
では？

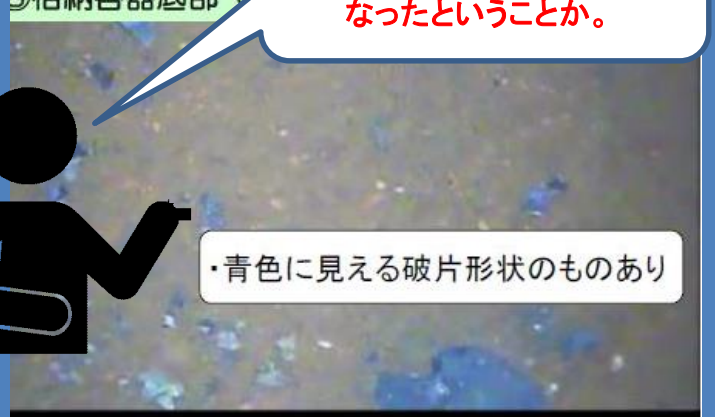


⑤ グレーチング上



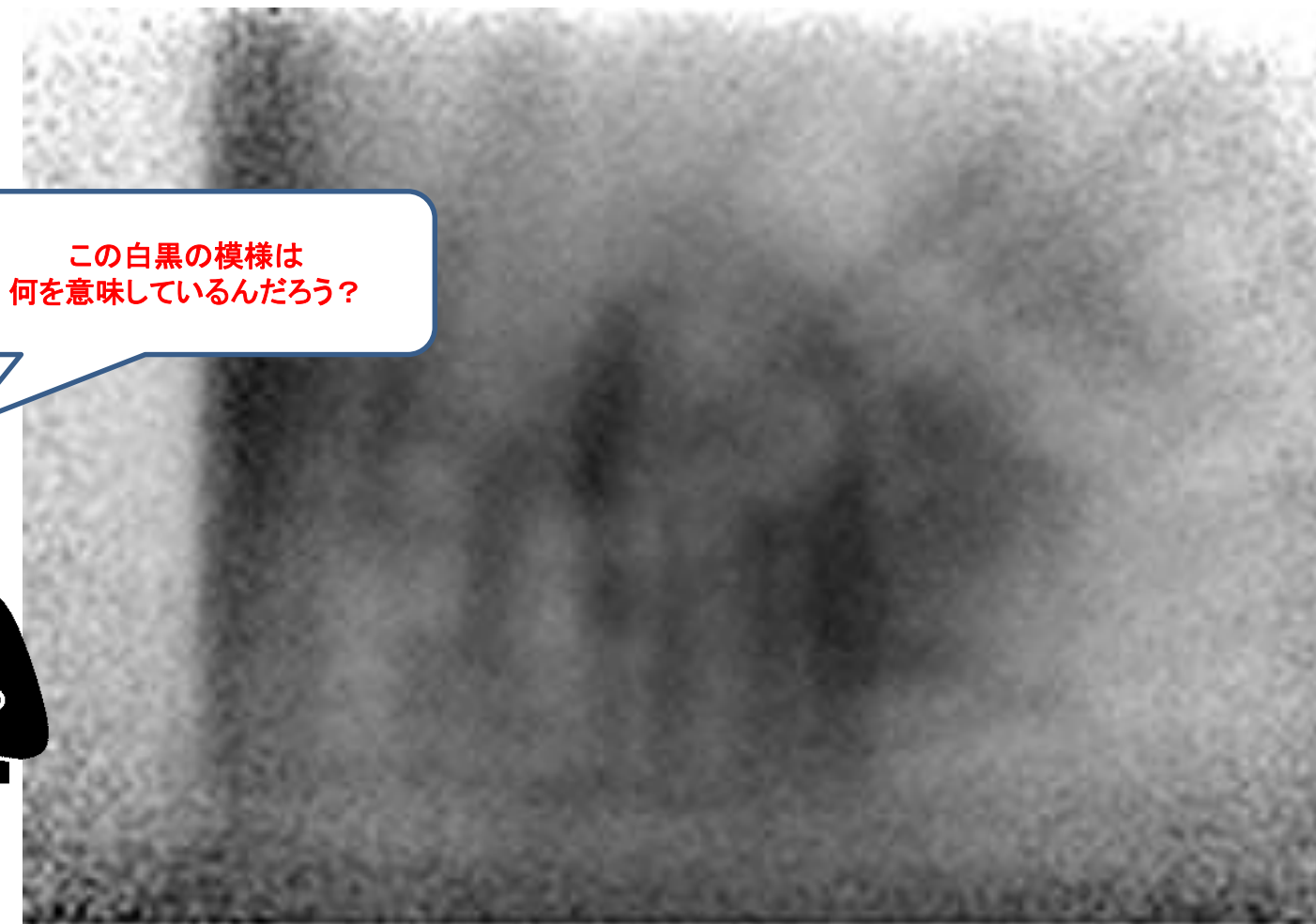
このボルトは、X100ペネの内側の鉛板を留めていたものだな。でも、その鉛板は見当たらないな？

③ 格納容器底部

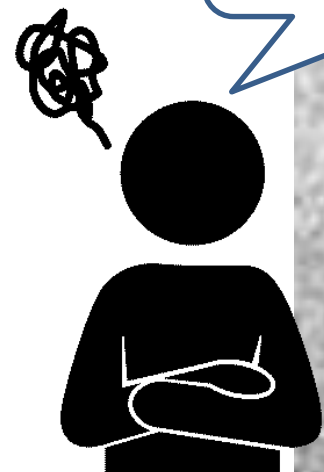


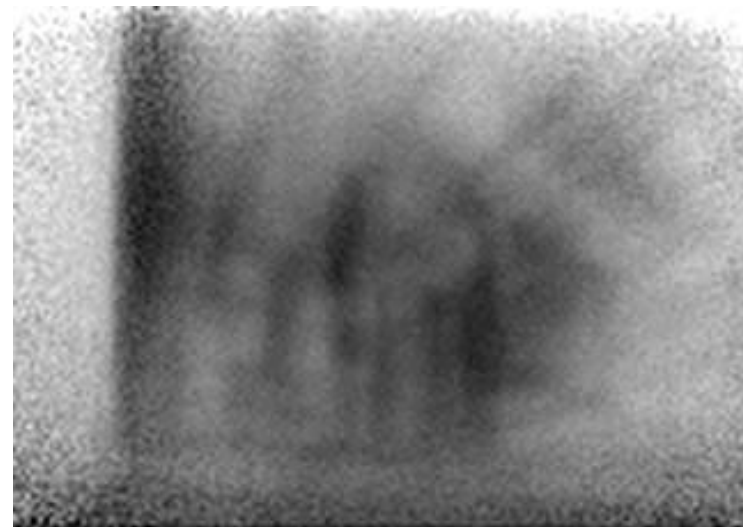
これは、鉛が溶けたものだな。とすると、327.5℃以上になったということか。

・青色に見える破片形状のものあり



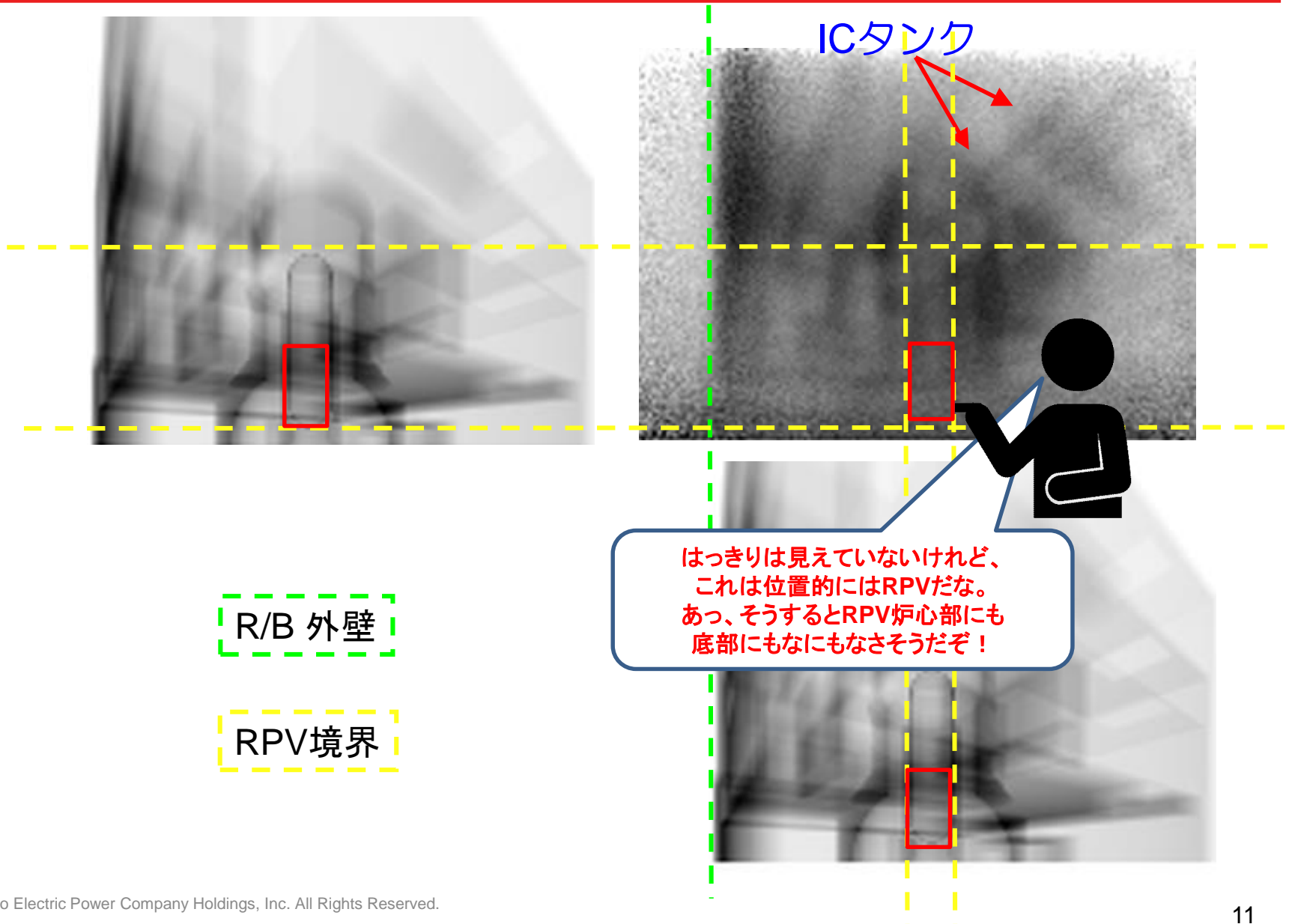
この白黒の模様は
何を意味しているんだろう？

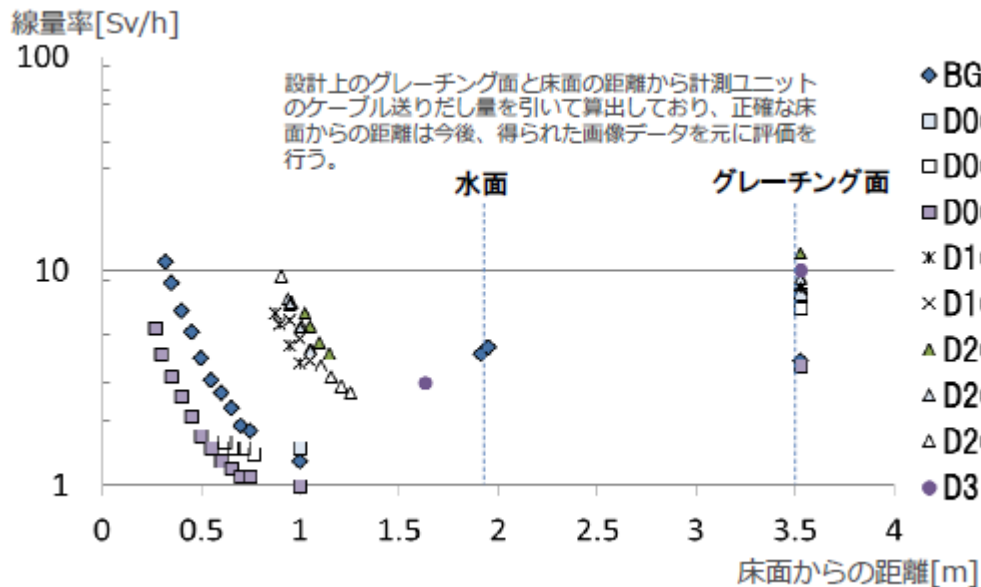




1号機のシミュレーション画像と比べてみよう。



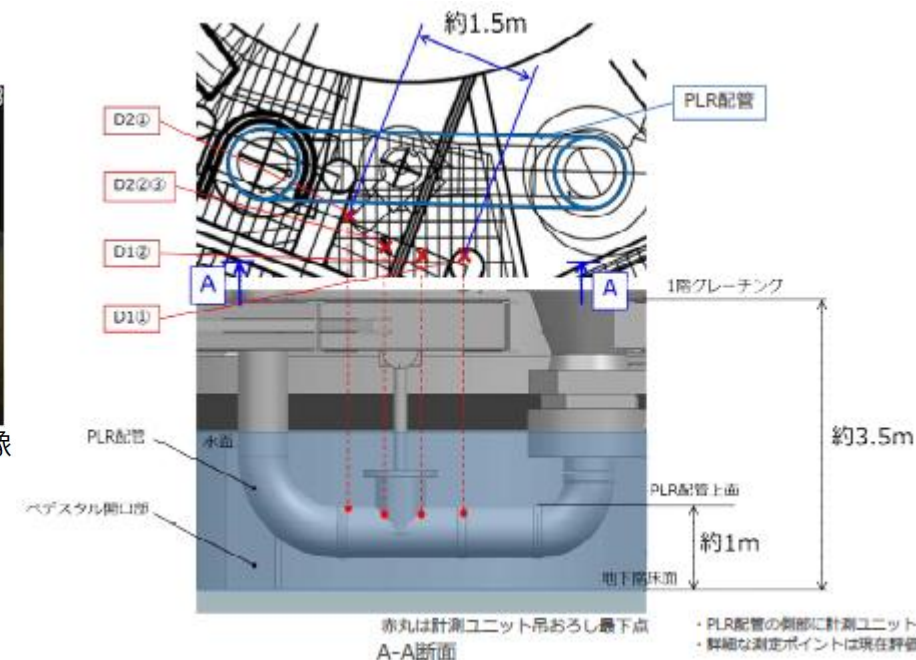




3/21 D3 最下点近傍の画像



3/20 D2① 最下点近傍の画像



• サンプル全体の観察結果

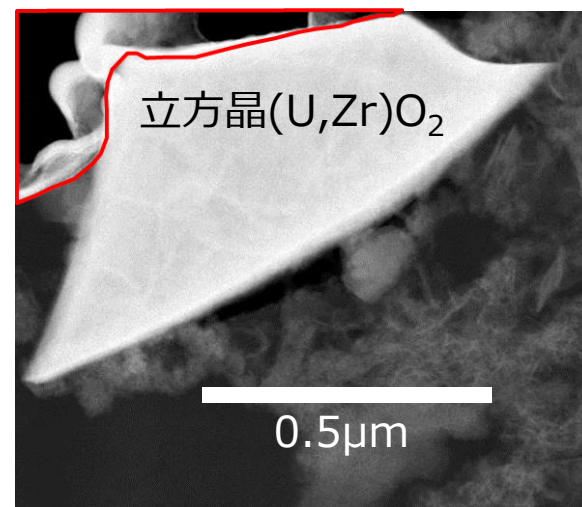
- SEM-EDS分析では、鉄さび上にU含有粒子が混在していることが確認された。
- ただし、観察領域(300 μm \times 200 μm 程度)の平均で見ると、U濃度は低く検出されない程度。
- ICP-MS分析結果では、Feが多く次いでAl、Cu、Zn、Pb、U等が確認された。

• U含有粒子の観察結果

- Uリッチな立方晶(U,Zr)O₂、Zrリッチな正方晶(Zr,U)O₂、単斜晶ZrO₂が確認。



これらはTMI-2のデブリからも観察されたものだね。
これは、非常な高温を経験したことを意味しているし、
ZrO₂はゆっくり冷却されたことを示しており、
事故進展予想とも整合しているな。
化学的に不安定なU₃O₈やUO₃は確認されていないことは、
今後の取出しに向けて有利な情報じゃないかな。



デブリ取り出しに関するデブリの分布に関する重要な情報。

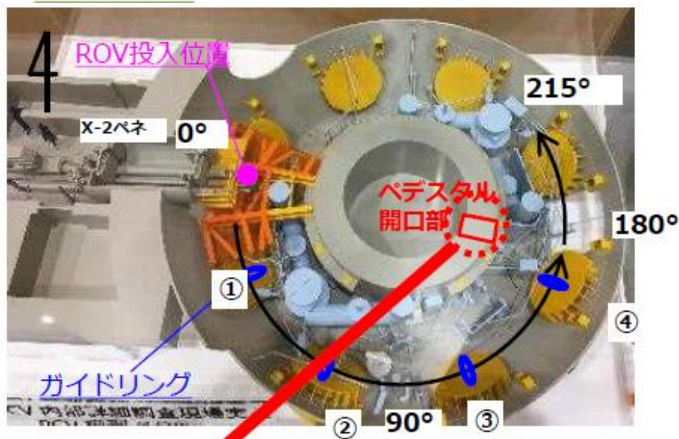
全体量からは小さい割合だが、Uを含んだ物質がペDESTAL外で確認されたことを示す。



A. ペDESTAL開口部付近



従来のMCCI実験結果
(米国アルゴンヌ研究所webサイトより)



これまでの実験で得られたMCCIの知見では、溶融した燃料がコンクリート上に落下すると、下方やその後横方向にコンクリートを侵食していくはずだった。
1号機ペDESTALの様相は、それとは大きく異なるな。

ペDESTAL開口部の下部コンクリートの欠損、鉄筋がむき出しとなっている状態が確認された。

↑ 事故進展に関する新たな情報であるとともに、廃炉作業への影響も考慮が必要

2022年2023年の水中ロボットで確認された情報(その2)

- 調査箇所⑧、⑨、⑩については、ROVが到達できなかったものの、開口部にて撮影した映像や、ROVが遊泳中に撮影した映像からペDESTAL基礎部の状態を確認
- 確認した基礎部の状態は他の調査箇所と似ている状態であり、ペDESTAL内側下部のコンクリートが一部消失している箇所には配筋を確認

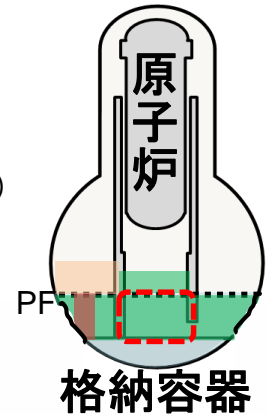
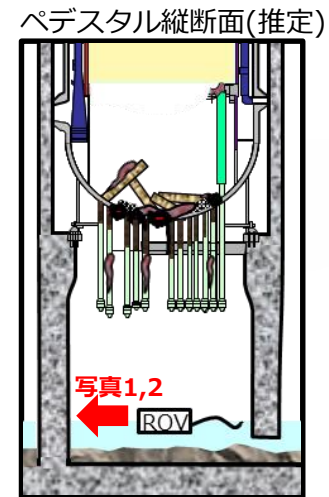
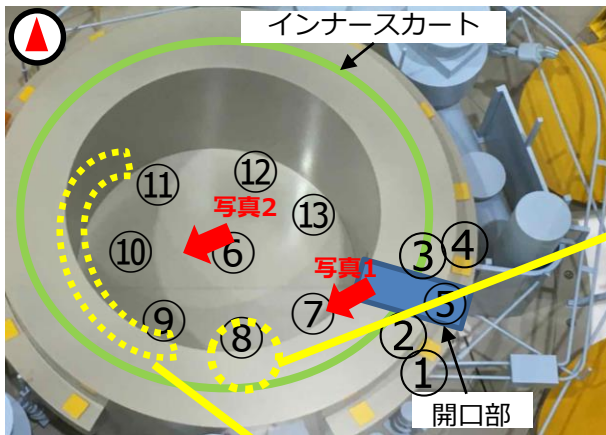


写真1. ポイント⑧ペDESTAL基礎部



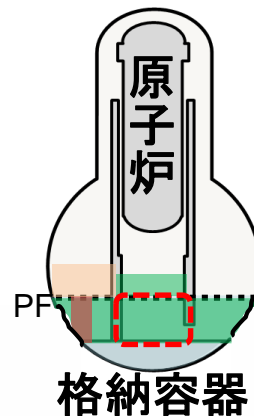
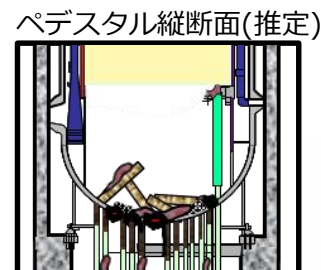
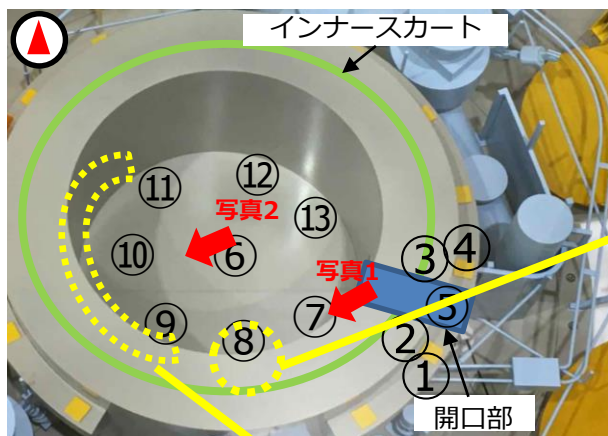
写真2. ポイント⑨、⑩ペDESTAL基礎部

画像処理：東京電力ホールディングス(株)

ペDESTAL全周にわたって内側コンクリートが消失していることが確認された。

2022年2023年の水中ロボットで確認された情報(その2)

- 調査箇所⑧、⑨、⑩については、ROVが到達できなかったものの、開口部にて撮影した映像や、ROVが遊泳中に撮影した映像からペDESTAL基礎部の状態を確認
- 確認した基礎部の状態は他の調査箇所と似ている状態であり、ペDESTAL内側下部のコンクリートが一部消失している箇所には配筋を確認



ほぼ全周にわたってペDESTALのコンクリートが剥離している。しかし、その高さがほぼ同じなのはなぜだろう？

写真1. ポイント⑧ペDESTAL基礎部

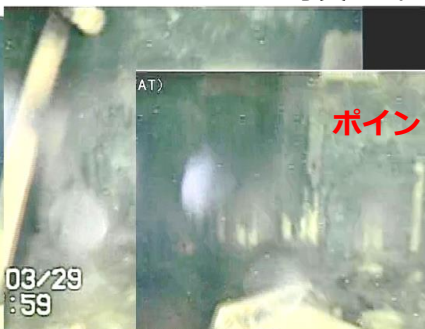


写真2. ポイント⑨、⑩ペDESTAL基礎部

画像処理：東京電力ホールディングス(株)

ペDESTAL全周にわたって内側コンクリートが消失していることが確認された。

- 格納容器部調査によりペDESTAL下部におけるコンクリートの消失を確認したことを踏まえ、3つの評価を実施

1. ペDESTALに残存しているインナースカートの強度評価にてペDESTALの支持機能喪失時の影響を評価しており、2011年に経験した東日本大震災と同程度の地震を受けた場合でも大規模な損壊等に至る可能性は低いことを確認している。



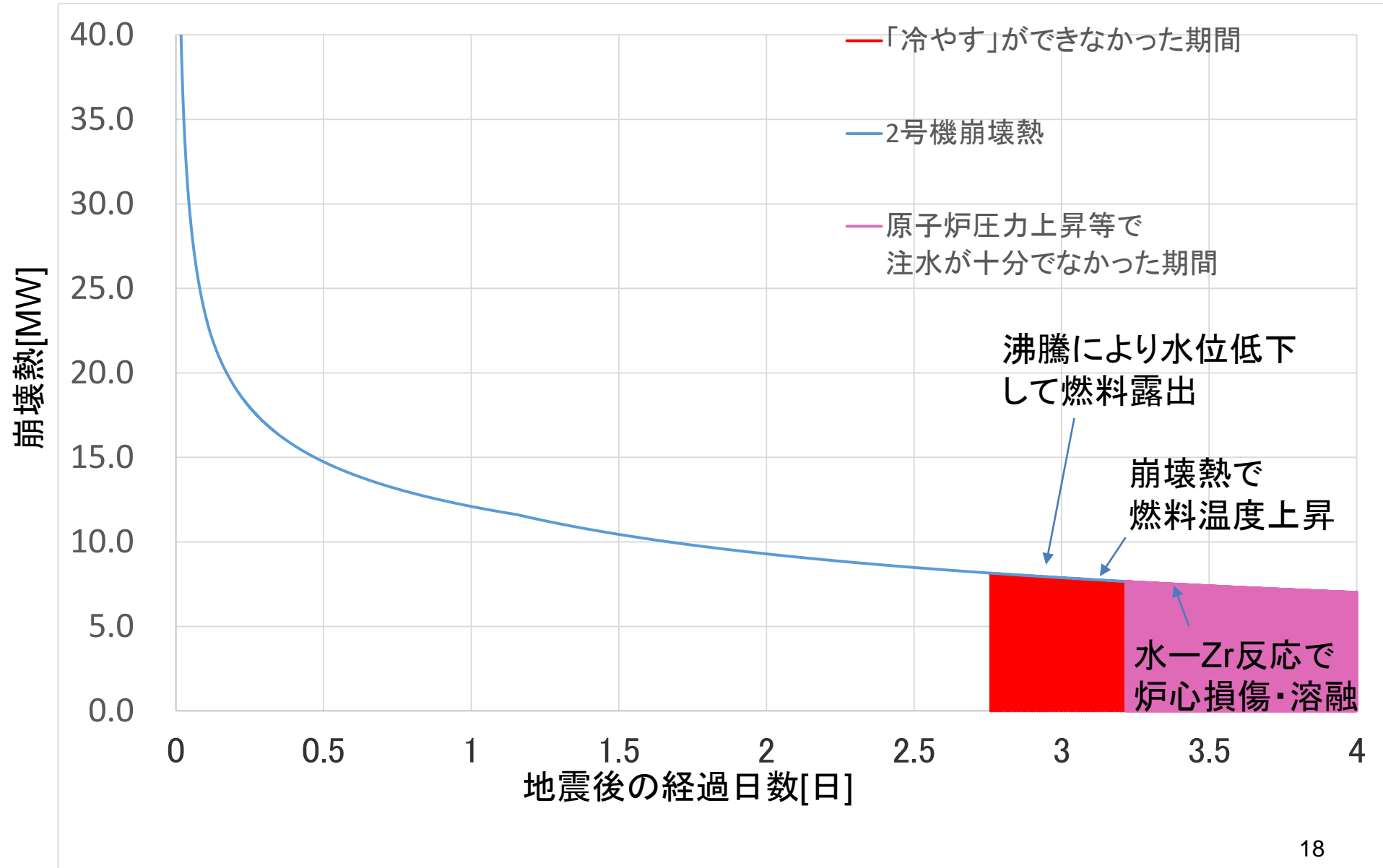
「ペDESTALは支持機能喪失しない」で思考停止をしない

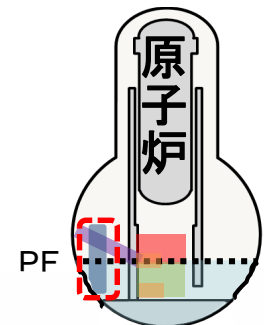
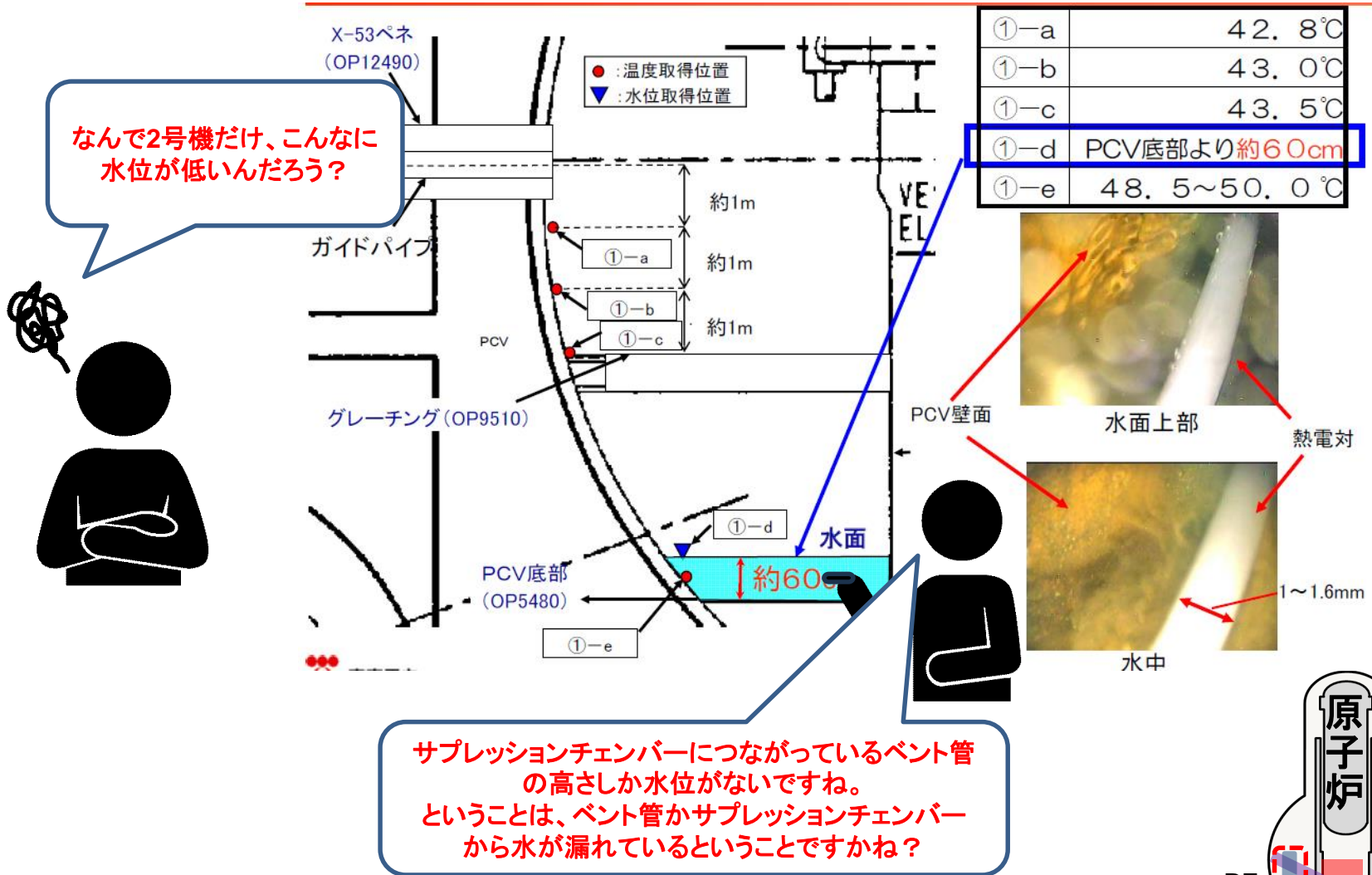
2. ペDESTALの支持機能が低下した場合を仮定して、保守性を持たせたシナリオにて敷地境界における実効線量を評価しており、事故時における基準である5mSv/事象を大きく下回る影響(0.03~0.04mSv/事象)であると評価している。

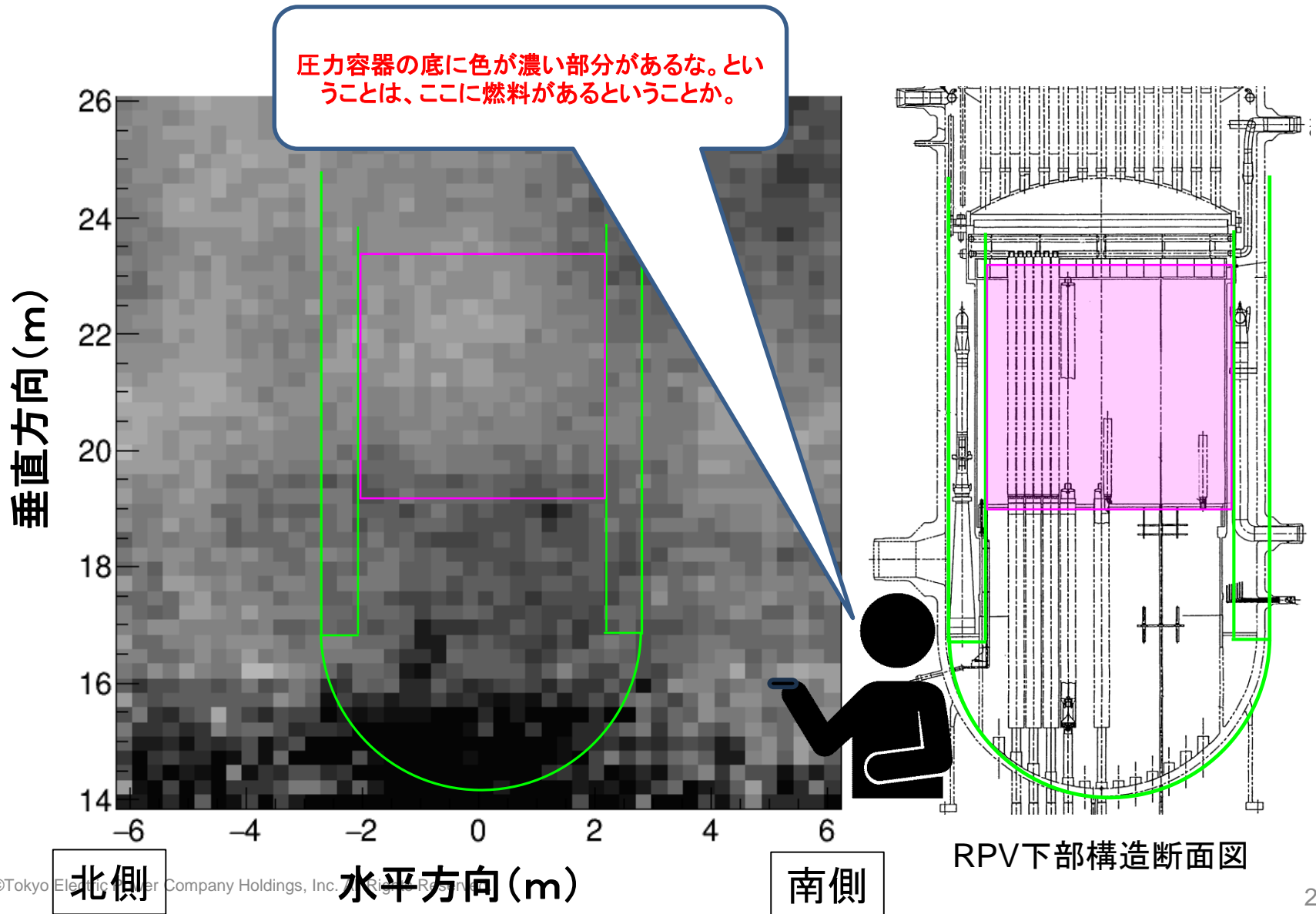


「万が一の状況の発生時」でも、影響緩和のための方策を準備

3. 万が一の支持機能低下に備え、放射性ダストの放出を抑制するため、原子炉格納容器の閉じ込め機能を強化し、機動的な対応を強化する取り組み。支持機能低下事象が発生した際に、原子炉格納容器内に供給している窒素の封入量を排気量よりも少なくすることで放射性ダストの非管理放出を抑制するとの考えから、事象が発生した際に速やかに窒素封入を停止する準備を進めている。加えて、機動的対応(可搬式設備を用いた排気設備の復旧等)の準備を進めている。





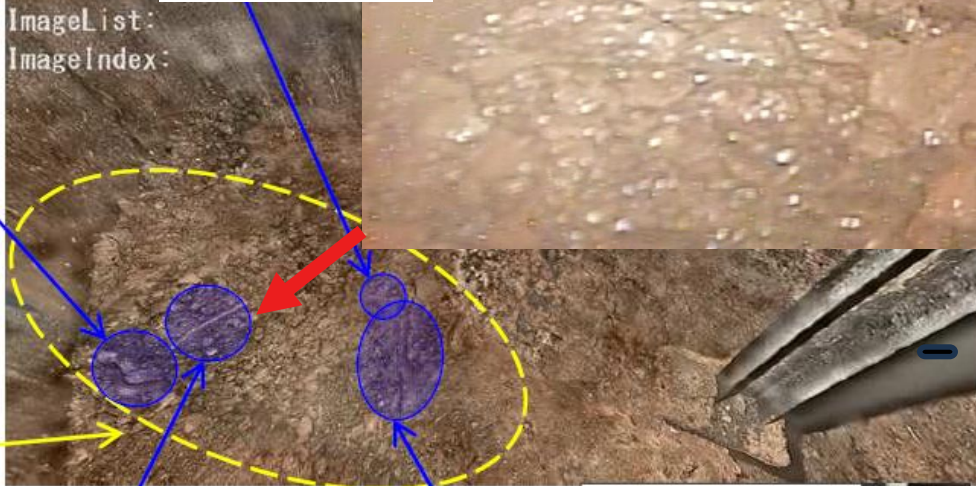


小石みたいな堆積物がペDESTAL全体に広がっている。しかも、高く積もっているところがい
くつかあるぞ!?



スプリング状の

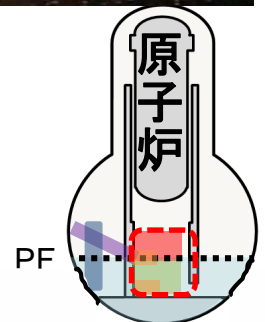
VIEWING AN
ImageList:
ImageIndex:



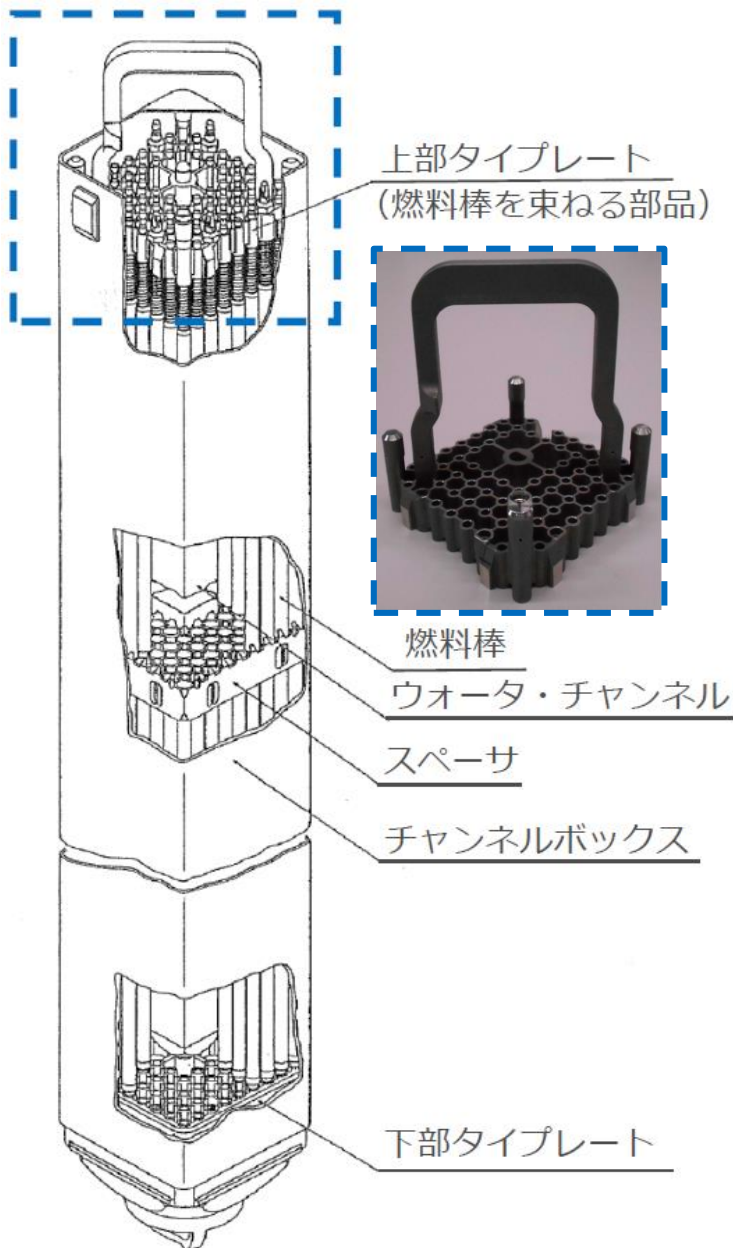
管状の落下物の落下位置

棒状の落下物の落下位置

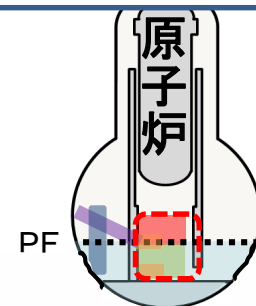
(参考)5号機昇降台車



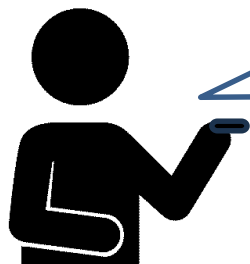
格納容器



高いところは、上から落ちてきたことを意味して
るんじゃないですか？だとすると、圧力容器に
いくつかの穴が開いている可能性がありますね！
しかも、燃料集合体の一部であるハンドルも見
えるということは少なくともその大きさは……。



格納容器



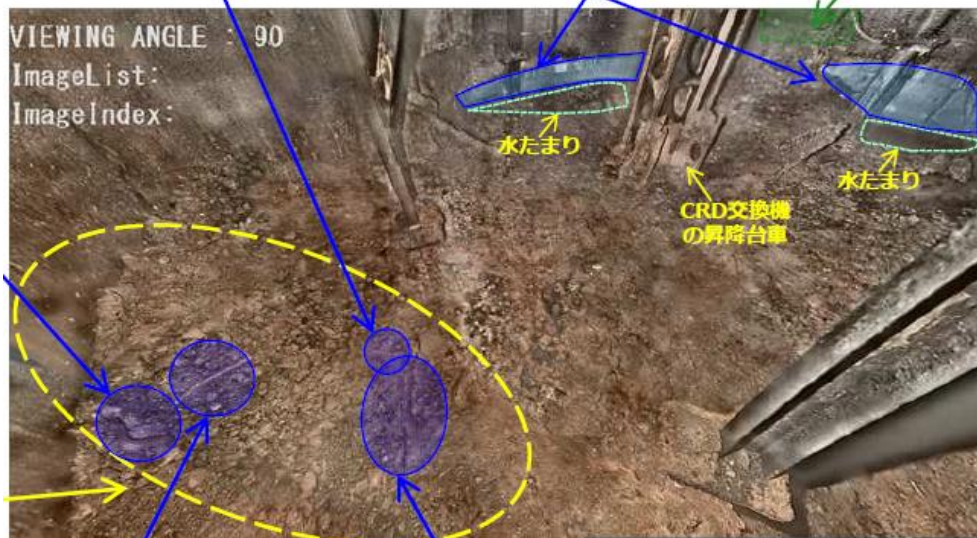
しかも、これだけの構造物が残っているということは温度はそれほど高くないのでは？



スプリング状の落下物の落下位置

ケーブルトレイ側面

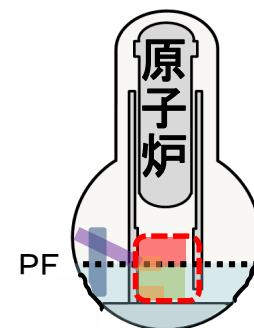
作業員アクセス開口部



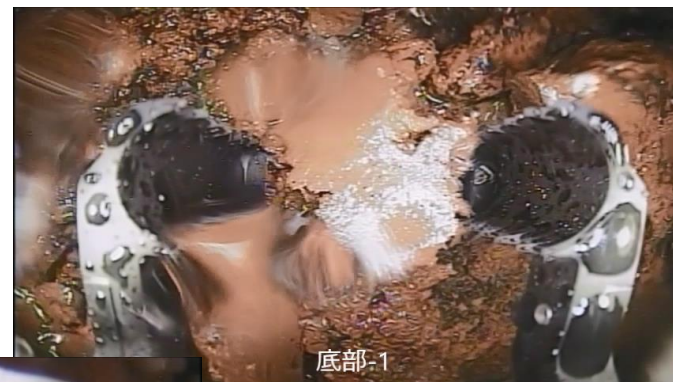
管状の落下物の落下位置

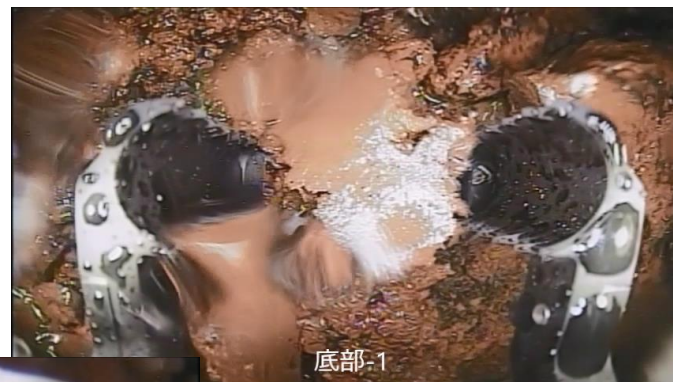
棒状の落下物の落下位置

(参考)5号機昇降台車



小石みたいな堆積物、取り出せないかな？
板状のものや、岩みたいなものもあるけど、
そっちはどうだろう？
ロボットで触って確認してみよう。



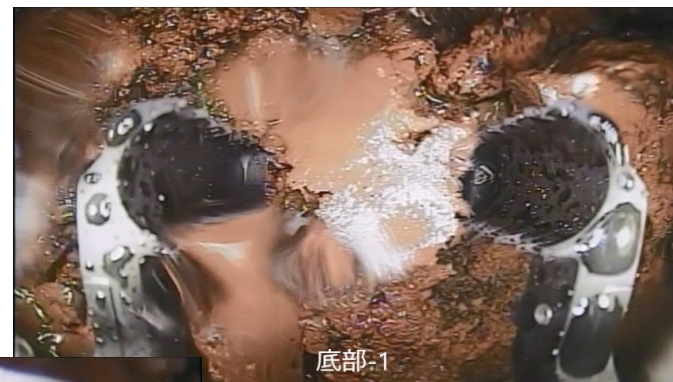


小石状や板状のものは
動きますね。



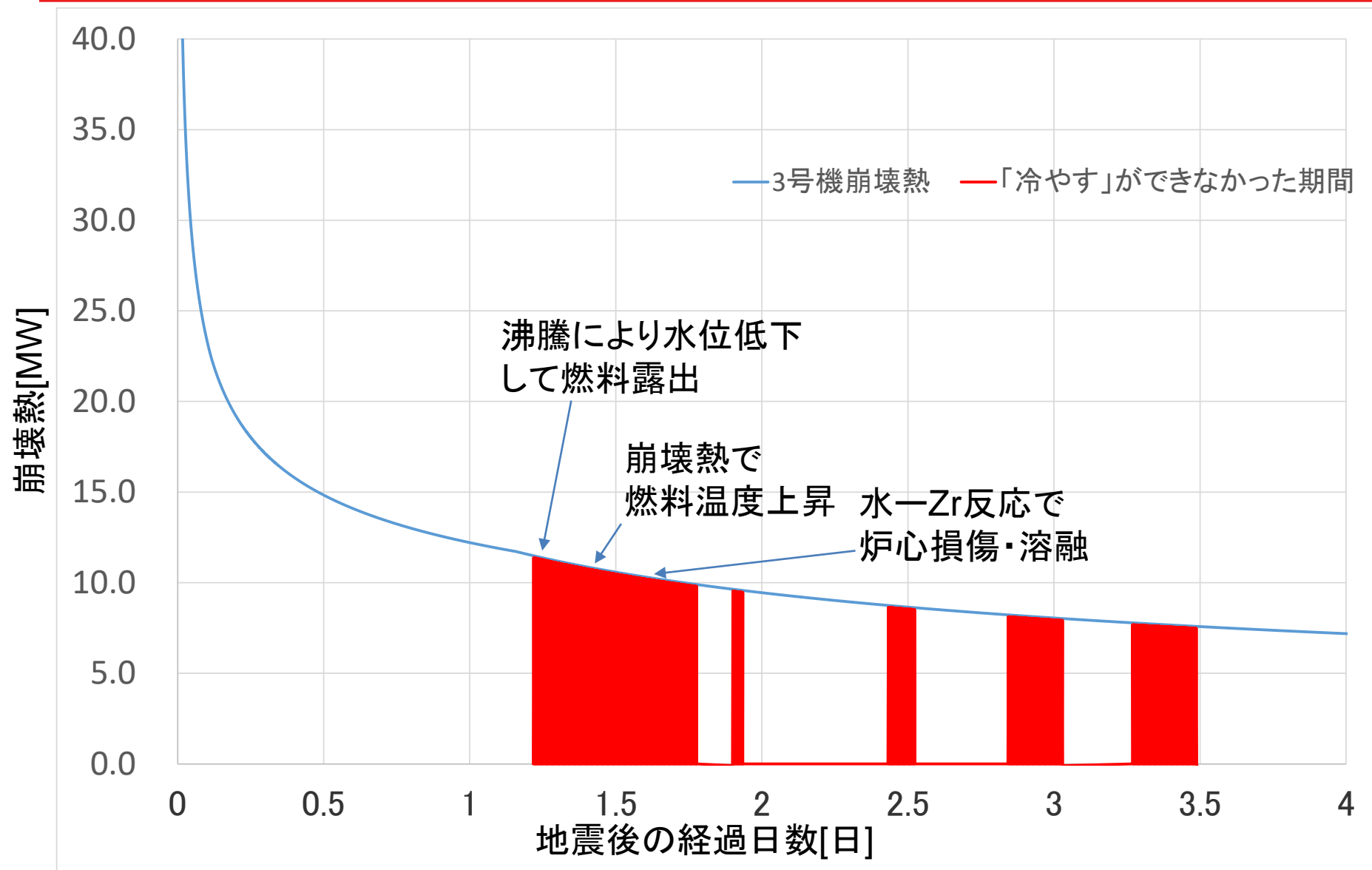
でも岩みたいなのは
動きません。





小石や板状のものは、拾えるから
取り出せるな！

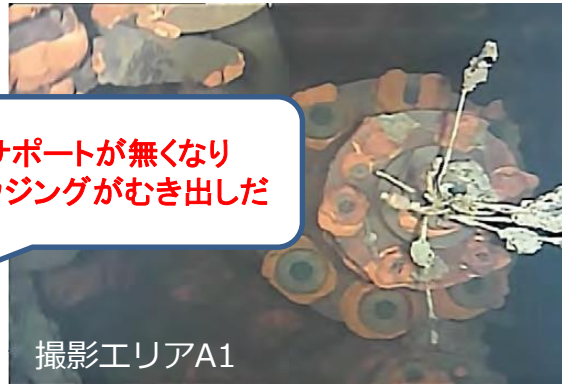






震災前のCRDハウジングの状況 (3号機)

CRDサポートが無くなり
CRDハウジングがむき出しだ



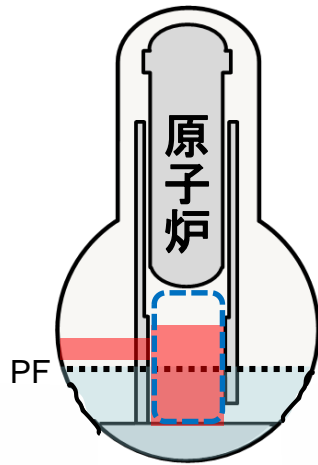
撮影エリアA1



撮影エリアA1



撮影エリアA2



格納容器



震災前のCRDハウジング支持金具の状態
(3号機)



撮影エリアA1



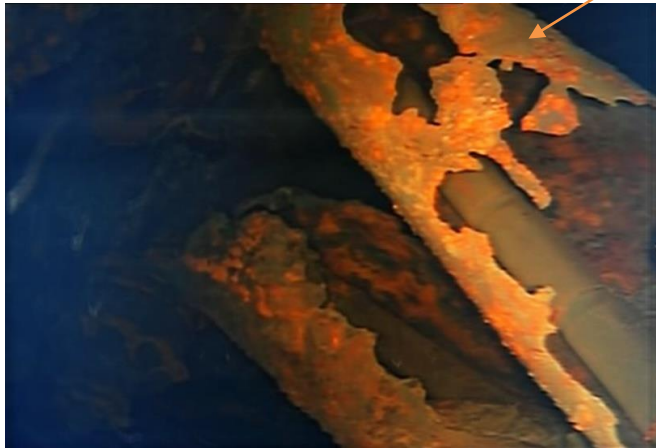
撮影エリアA1



水面がゆらゆらしているのは原子炉から水が落ちてきているからだな

2017年水中ロボットによるペDESTAL内部調査(その2)

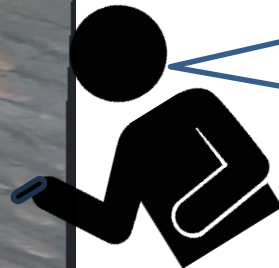
円筒状の構造物 (CRガイドチューブと推定)



これは制御棒を炉心に挿入するためのインデックスチューブのようだ。原子炉内にあったものが格納容器に落ちてきている

グレーチング

落下物 (制御棒下部と推定)



これは制御棒の図と見比べると制御棒の下部にある速度リミッタとそっくりだ。原子炉の燃料装荷位置から格納容器に落ちてきている。

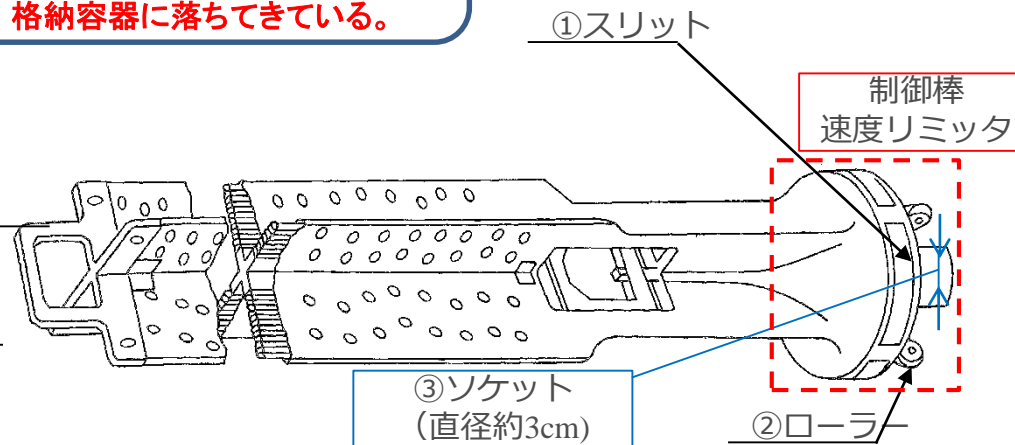
付着物

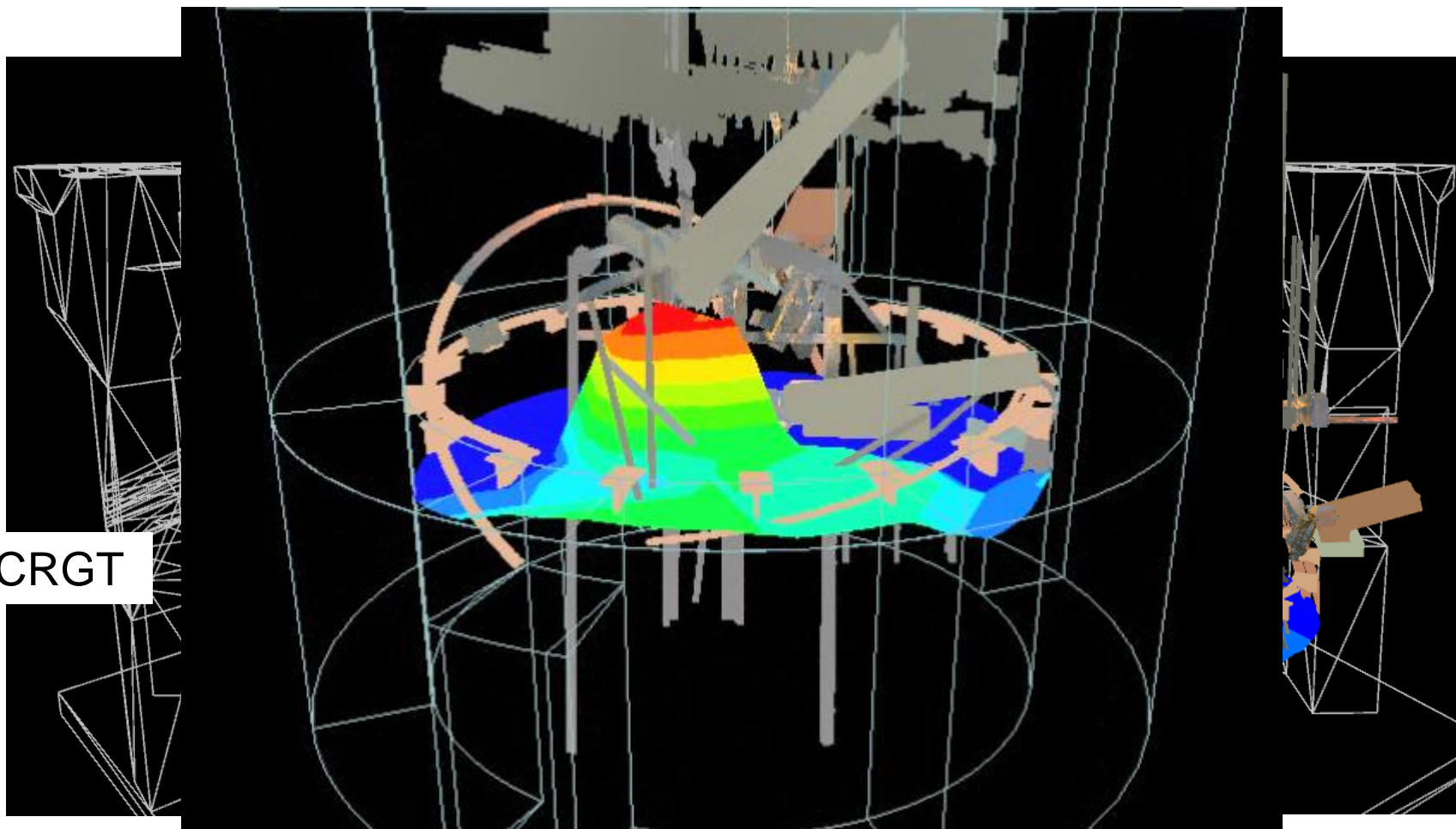
①スリット

②ローラー

③筒状の構造 (ソケットと推定)

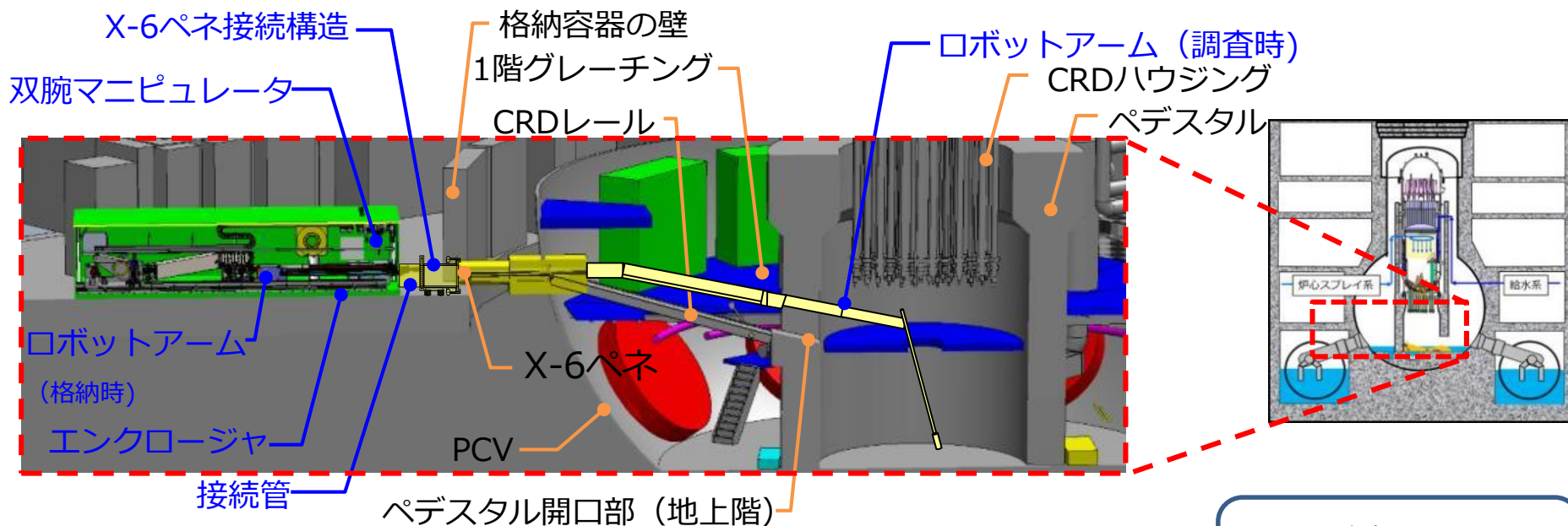
rights Reserved.





ペDESTAL下部の堆積物は中心部が高くなっている。

- アーム型装置をX-6ペネからPCV内に進入させ、PCV内障害物の除去作業を行いつつ、内部調査や試験的取り出しを進める計画
- 試験的取り出しにおいては、数g程度の燃料デブリを採取予定



2号機 内部調査・試験的取り出しの計画概要

デブリを数g
取れるといっても
何ができるの？



ご清聴ありがとうございました。