

東京電力 福島第一原子力発電所 1～3号機の炉心損傷状況の推定について

平成23年11月30日
東京電力株式会社



東京電力

概要

- 当社は、1～3号機の炉心状態について、解析結果から、
 - 1号機については、津波到達後比較的早い段階において、燃料ペレットが溶融し原子炉压力容器底部に落下。
 - 2号機および3号機については、炉心は一部溶融したものの、燃料域にとどまり、原子炉压力容器の損傷には至っていない。なお、実際の水位がより低い状態を想定した場合は、原子炉压力容器の損傷に至る。ことを公表している（1号機：5月15日、2,3号機：5月24日発表）。
- その後も引き続き炉心状態の推定を行っていたが、炉心スプレイ系からの注入を始めとする注水方法・流量変更時の原子炉压力容器底部ならびに格納容器内の温度の挙動の変化等、相当量のデータが蓄積されてきたため、今回、1～3号機の炉心状態について、包括的な見直しを行った。

1. 压力容器内の状態の評価

- 1-1 MAAPによる解析【1, 2, 3号機】
- 1-2 注水実績に基づく熱バランスによる推定【1, 2, 3号機】
- 1-3 温度評価モデルに基づく熱バランスによる推定【2, 3号機】
- 1-4 水位計指示値による推定【1, 2号機】

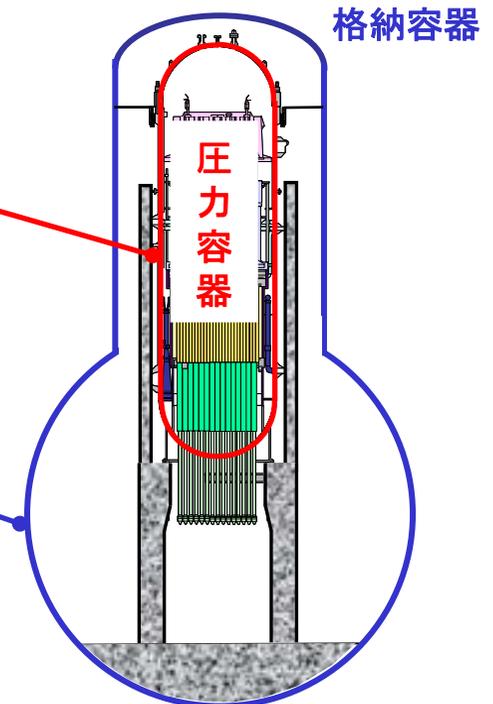
2. 格納容器内の状態の評価

- 2-1 格納容器内ガス濃度による推定【1, 2号機】
- 2-2 原子炉補機冷却系による推定【1号機】

3. 温度計指示値による現状評価

- 3-1～3-4 温度計指示値による評価【1, 2, 3号機】

4. まとめ



1. 圧力容器内の状態の評価

1-1 MAAPによる解析【1, 2, 3号機】

1-2 注水実績に基づく熱バランスによる推定【1, 2, 3号機】

1-3 温度評価モデルに基づく熱バランスによる推定【2, 3号機】

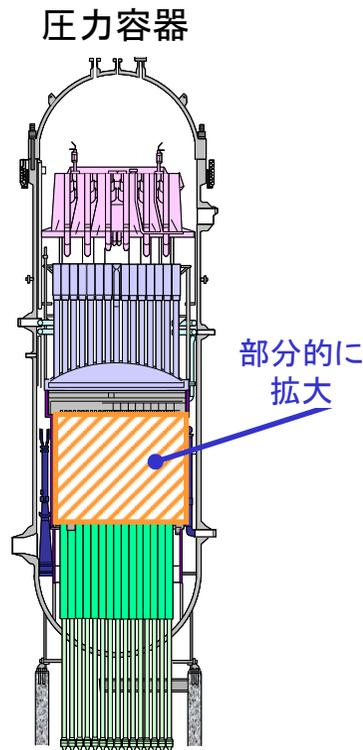
1-4 水位計指示値による推定【1, 2号機】

1-1. 圧力容器内の状態を解析コードで推定（1号機）

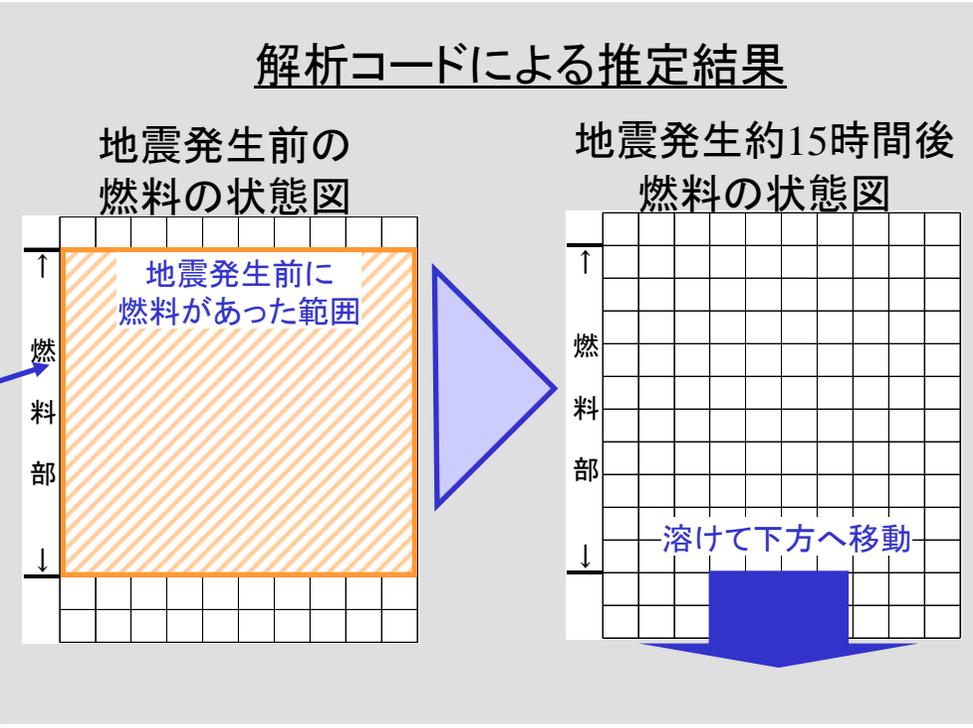
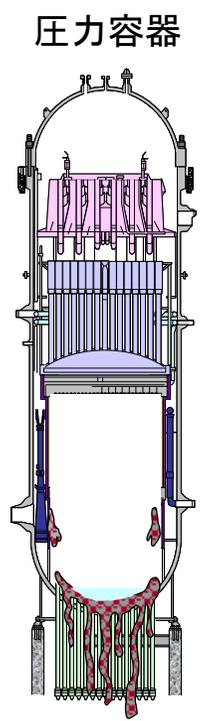
1号機

- 解析の結果、燃料は地震発生前の位置から溶融して下方に全て移動したと評価。
- 損傷燃料によって、圧力容器の破損も発生している可能性が高いと評価。

地震発生前の
圧力容器内のイメージ



燃料が溶けて下方に
移動した圧力容器内のイメージ

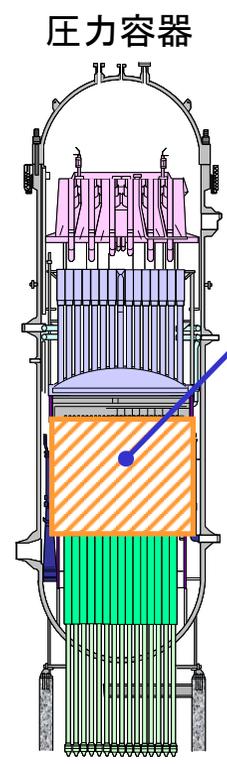


1-1. 圧力容器内の状態を解析コードで推定（2・3号機）

2・3号機

- 水位計の不確かさを考慮した保守的なシナリオでは、燃料の大半は原子炉圧力容器下部に溶融して移動したと評価。
- 水位計の指示値を基にしたシナリオでは、燃料は損傷したもののほとんどは元の炉心位置に残っていると評価。

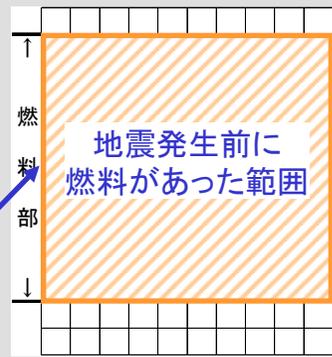
地震発生前の
圧力容器内のイメージ



部分的に
拡大

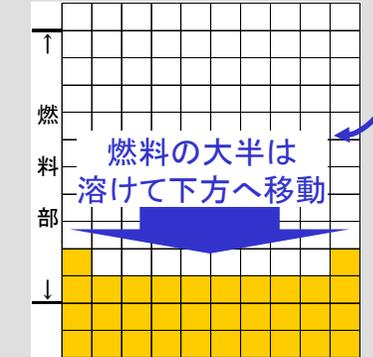
2号機 解析コードによる推定結果

地震発生前の状態

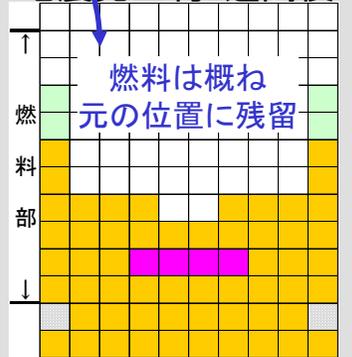


- 損傷状態のモデル
- 燃料なし（崩落）
 - 通常燃料
 - 破損燃料が堆積（燃料棒形状は維持）
 - 溶融した燃料が被覆管表面を流下し、燃料棒表面で冷えて固まり燃料棒外径が増加
 - 燃料棒外径がさらに増加し、燃料で流路が閉塞
 - 溶融プール形成

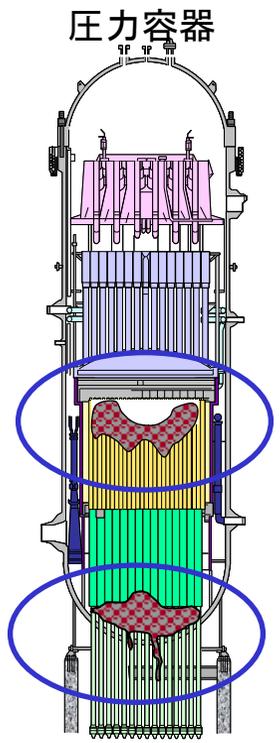
① 保守的な解析による
地震発生約109時間後



② 指示値どおりの解析による
地震発生約1週間後



① 保守的なシナリオにより
燃料が溶けて下方に移動した
圧力容器内のイメージ



【参考】解析コード（MAAP）とは

- 事故時のプラントの状態を評価するもので、MAAPとはModular Accident Analysis Program（事故解析コード※）の略

※クロスチェックができる解析コードとして原子力安全基盤機構（JNES）が保有するMELCORがある

- 操作等のイベント（電源喪失、ベントや注水の運転操作など）やプラントパラメータ（地震前の出力や圧力、水位など）を利用し、事故後の原子炉の温度変化や水位変化等を評価し、圧力容器の中の状況（燃料の損傷状況等）を中心に推定するもの

利用した情報（1号機の例）

プラント初期条件

項目	条件
地震前 原子炉出力	1380MW
地震前 原子炉圧力	7.03MPa
原子炉水位	通常
・	・
・	・
・	・

操作等イベント

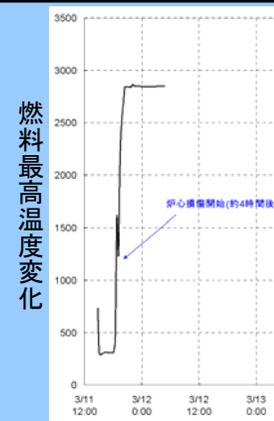
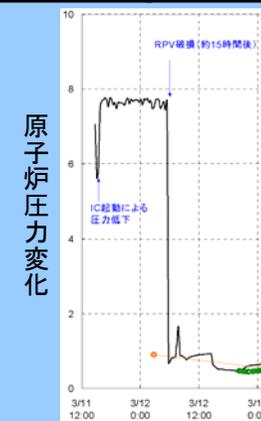
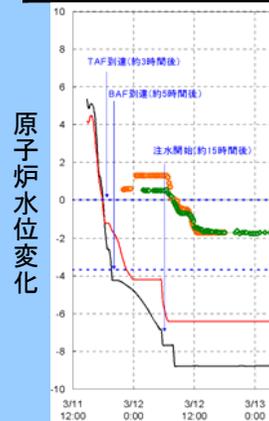
14:46 地震発生
14:52 非常用復水器自動起動
・
・
15:37 全交流電源喪失
・
・
5:46 消防ポンプで淡水注水を開始
14:30 格納容器ベント
・
・
14:53 淡水注水終了
20:20 海水による注水を開始

解析コードで評価

解析結果（1号機の例）

原子炉内の状況

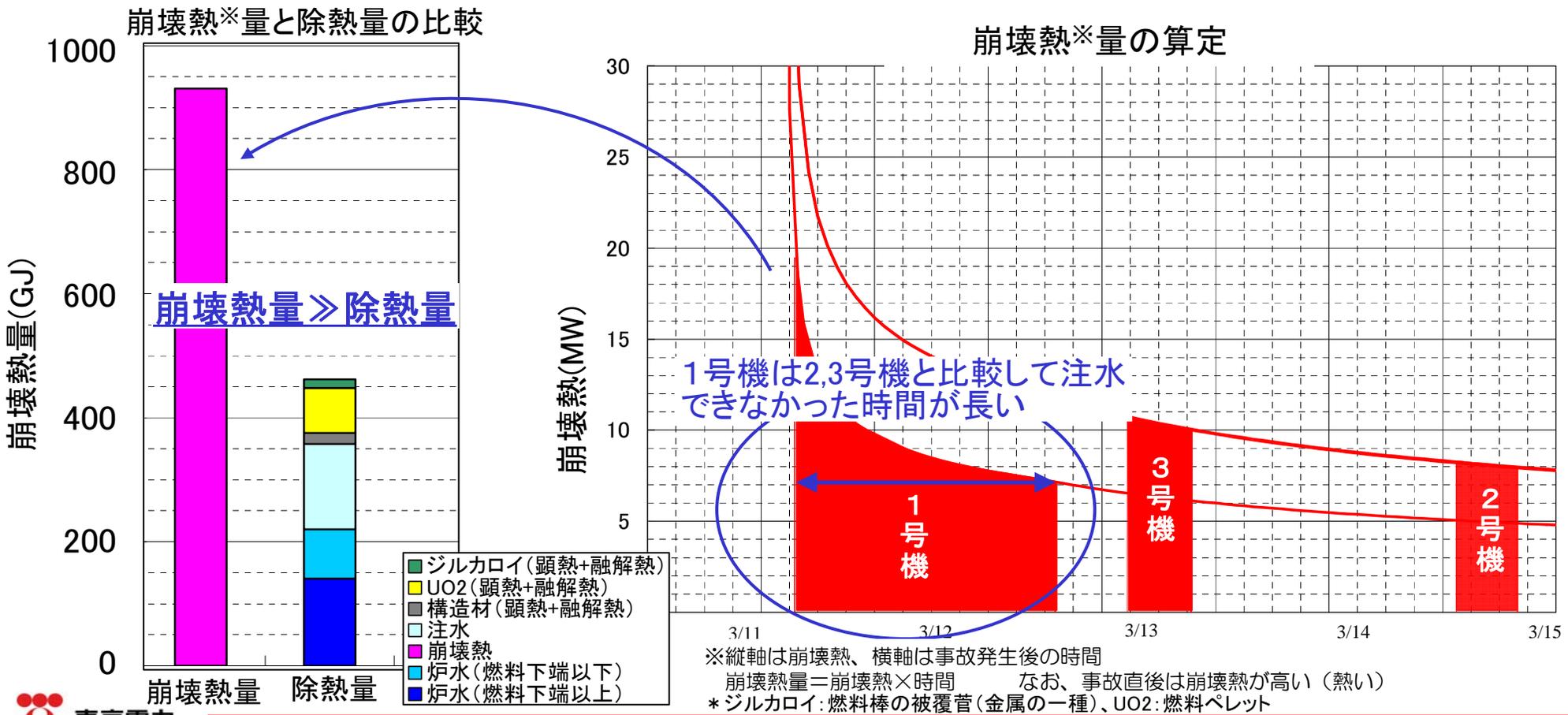
評価項目	結果
燃料の露出開始	地震発生後約 3 時間
燃料損傷開始	地震発生後約 4 時間
原子炉圧力容器破損	地震発生後約 15 時間



1-2. 注水実績に基づく熱バランスより炉内状況を推定（1号機）

1号機

- 1号機では海水注入が開始されるまでの間、原子炉で発生した熱量（崩壊熱※量）は、圧力容器内に存在していた水や圧力容器構造材などによる吸収可能な熱量（除熱量）を大きく上回った。 ※放射性物質が、放射線を出して別の物質に変わっていく現象を放射性崩壊と言い、それに伴って発生する熱のこと
- 結果、高温で溶融した燃料は、圧力容器下部に全て移動した後、圧力容器を損傷しながら、格納容器に相当量滴下していったと推定。

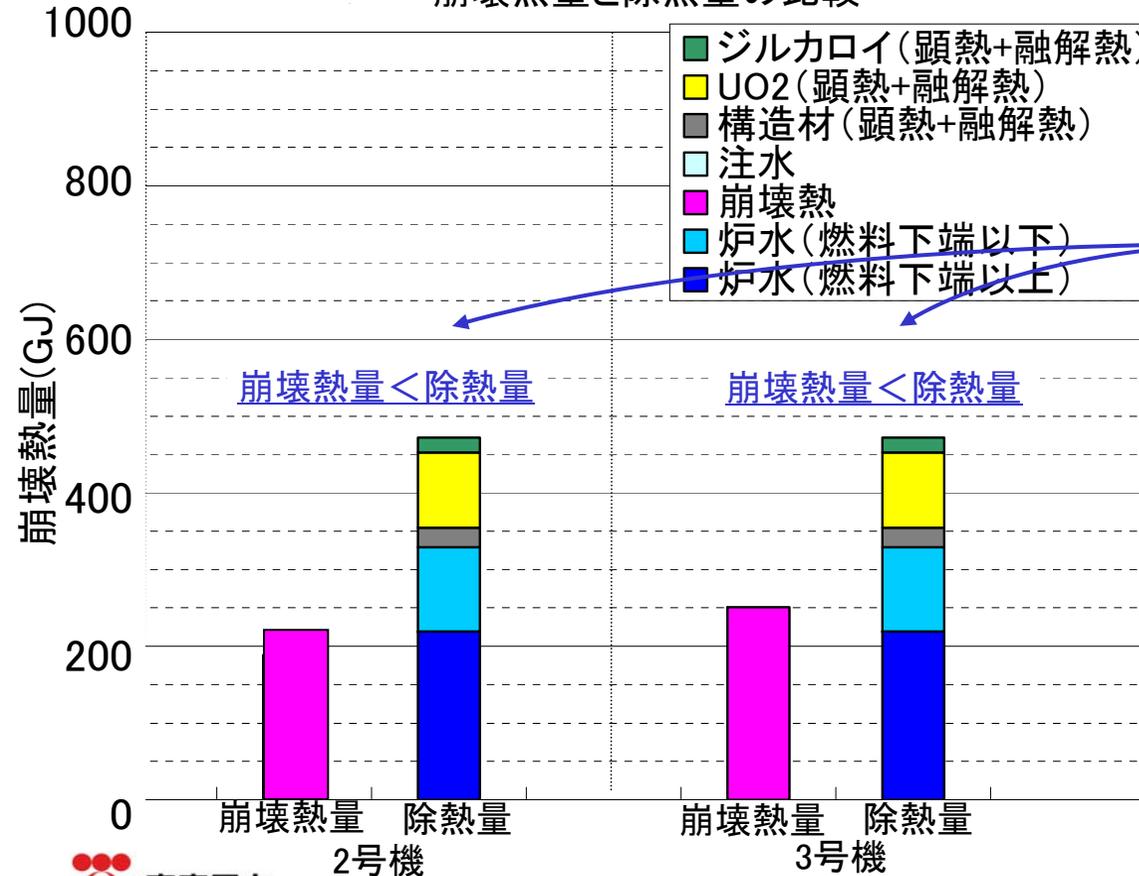


1-2. 注水実績に基づく熱バランスより炉内状況を推定（2・3号機）

2・3号機

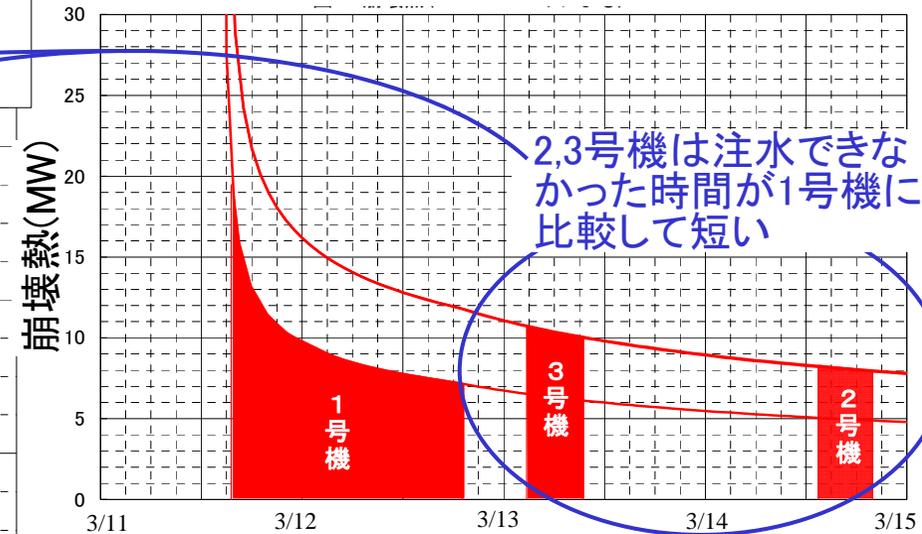
- 2,3号機における注水が停止している間の崩壊熱量は、圧力容器内に既に存在していた水が蒸発することにより吸収できる程度であった。
- 結果、水に接していなかった一定量の燃料が溶けて圧力容器下部に移動した可能性はあるが、**多量の燃料が格納容器底部に滴下するような圧力容器の大きな損傷は生じていない**と推定。

崩壊熱量と除熱量の比較



* ジルカロイ: 燃料棒の被覆管(金属の一種)
UO2: 燃料ペレット

崩壊熱量の算定

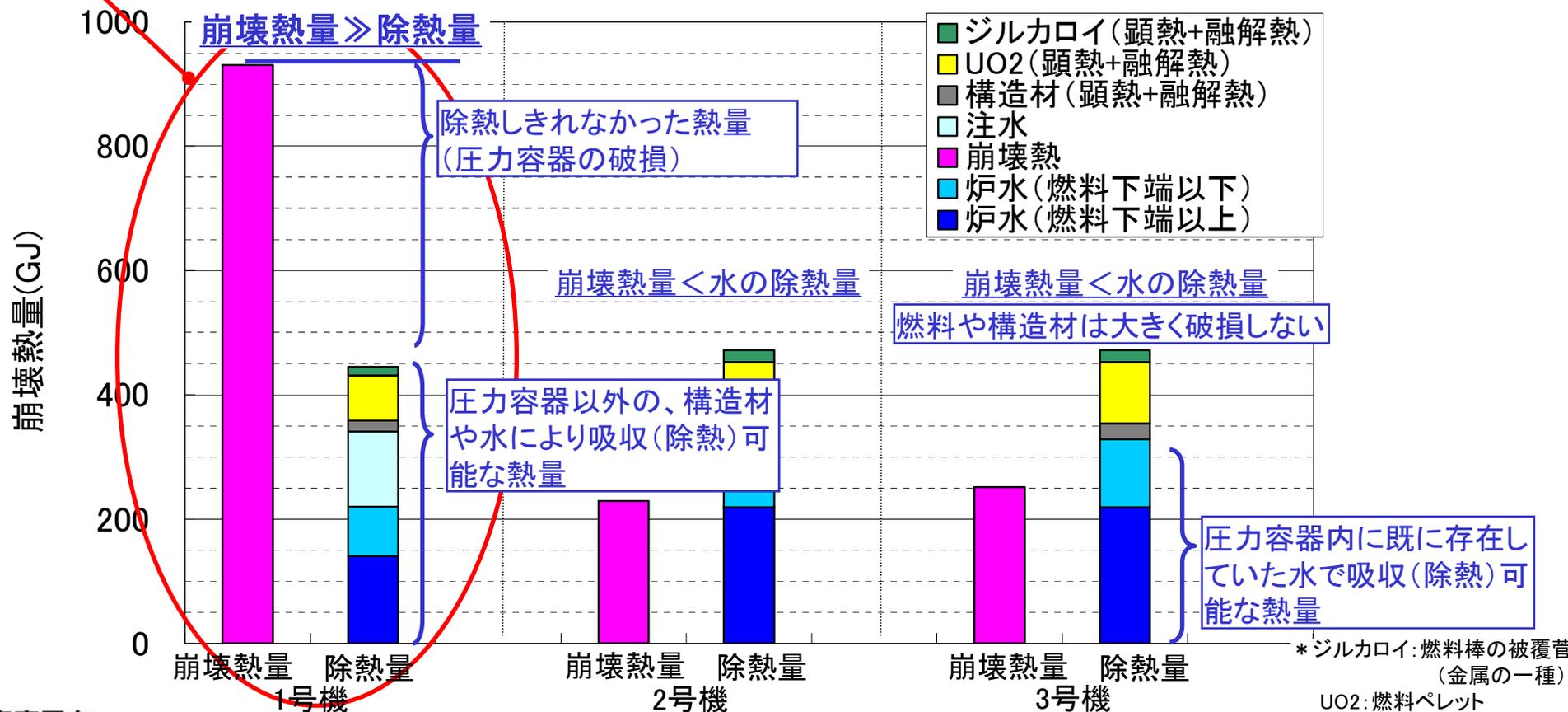


※縦軸は崩壊熱、横軸は事故発生後の時間
崩壊熱量＝崩壊熱×時間
なお、事故直後は崩壊熱が高い(熱い)

【参考】熱バランスとは

- 発生する熱量（崩壊熱量）とその熱量を吸収（除熱）する物質（水や構造材など）の量とのバランスを評価
- 1号機のように、崩壊熱量の方が吸収量（除熱量）よりも大きく、水の温度上昇や蒸気へ変化（気化）及び構造材の温度上昇等で吸収（除熱）できなければ、構造材の破損・融解を引き起こし、さらには圧力容器の破損につながる

崩壊熱量と除熱量の比較

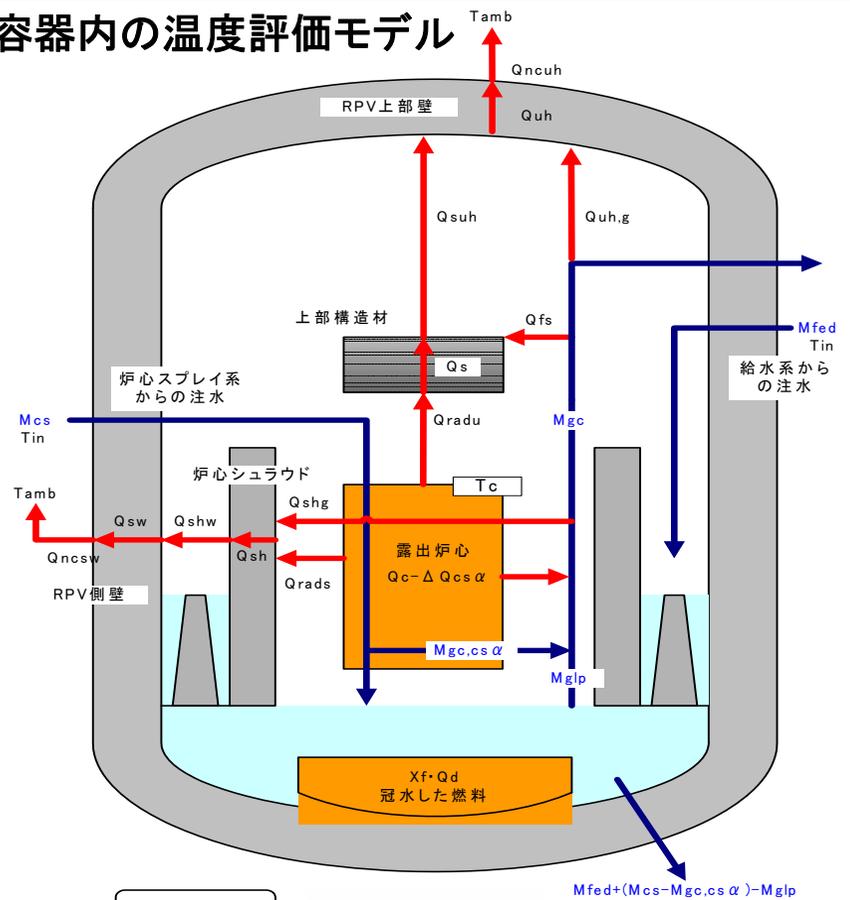


1-3. 圧力容器内の状態を温度評価モデルによる熱バランスより推定（2・3号機）

2・3号機

●注水量や崩壊熱から、測定された原子炉圧力容器の温度分布を再現するよう、燃料が存在する位置を推定した結果（10月10日時点）、2, 3号機とも、露出炉心の割合は3%程度以下と評価され、燃料の大半は原子炉圧力容器下部または原子炉格納容器内で冠水している状態と推定。

圧力容器内の温度評価モデル



赤線：熱の流れ
青線：水の流れ

温度評価モデルの概要

- ▶原子炉へ注水した水は、**崩壊熱**で温められ、水または蒸気の形で外部へ流出する。
- ▶崩壊熱により発生するエネルギーが、原子炉圧力容器の中でどのように消費されるか（熱バランス）を評価。
- ▶崩壊熱のエネルギー消費の形態は、
 - 水の温度上昇
 - 水の蒸発
 - 蒸気の温度上昇
 - 燃料の温度上昇
 - 構造材の温度上昇
 が挙げられる。

1-4. 圧力容器内の状態を水位計の指示値より推定（1・2号機）

1・2号機

- 原子炉水位計の校正の結果、1, 2号機ともに、元々の燃料位置に現在も水位が保たれず、燃料が本来の位置に形状を保ったまま留まっている可能性が低いこと、一方2号機では、原子炉側の配管近傍に燃料（熱源）が存在する可能性があると推定。

● 1号機

- 5月11日、基準面器へ注水し原子炉水位計の校正を実施。
- 原子炉水位計は燃料有効頂部よりマイナス5m以下であると指示。

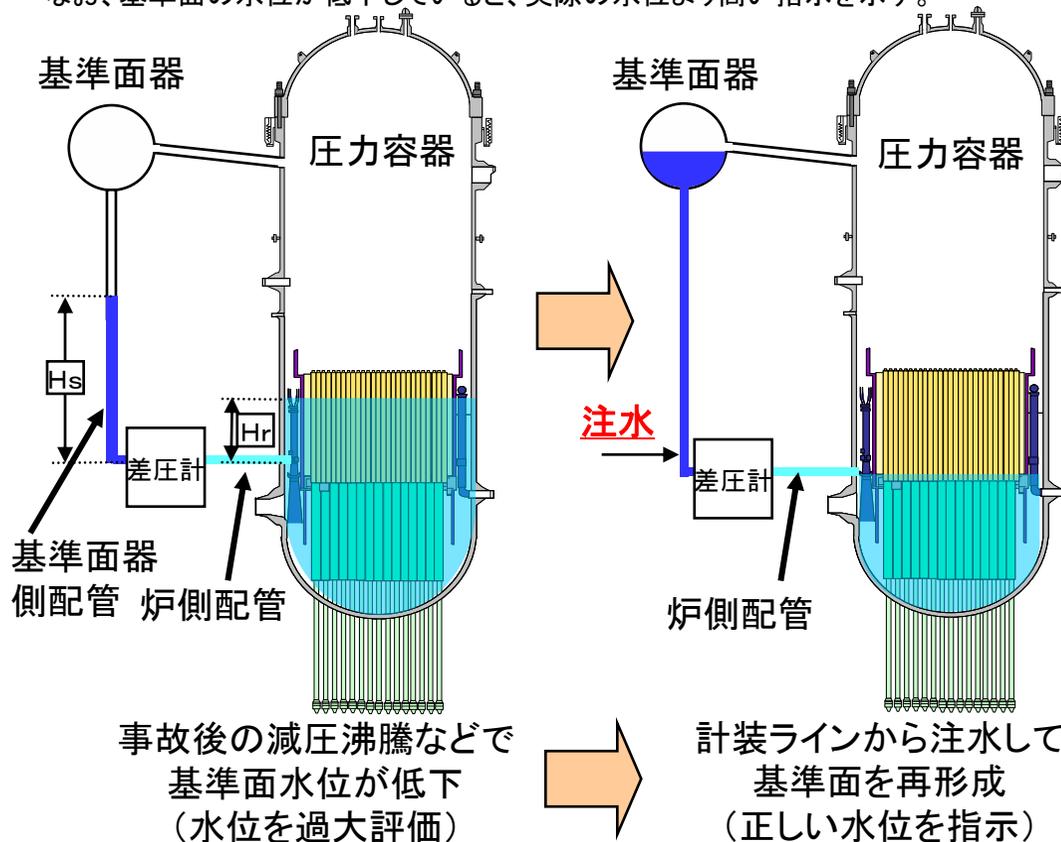
● 2号機

- 6月22日および10月21日、基準面器へ注水し原子炉水位計への水張りを実施。
- 仮設圧力計の指示値から燃料有効頂部よりマイナス5m以下と推定。
- 6月22日には原子炉側、基準面器側の両方の配管の水が短時間で蒸発。また、10月21日には炉側配管の水がゆっくりと蒸発。

● 3号機

- 計装機器のある場所の放射線量が高く、原子炉水位計の校正は未実施。

※原子炉内の水位は、原子炉内の水頭と隣接する基準面器の圧力差によって計測する。
 なお、基準面の水位が低下していると、実際の水位より高い指示を示す。



原子炉水位計の校正（イメージ）

2. 格納容器内の状態の評価

2-1 格納容器内ガス濃度による推定【1, 2号機】

2-2 原子炉補機冷却系による推定【1号機】

2-1. 格納容器内ガスの放射能濃度より推定（1・2号機）

1
・
2
号
機

- 原子炉格納容器内のガスを採取し、放射能濃度の測定を実施した結果、セシウム134、137濃度について、損傷の程度が大きいと推定される1号機の方が2号機よりも大きく、圧力容器から格納容器へ移行（落下）している燃料の量が多いと推定。

● 1号機

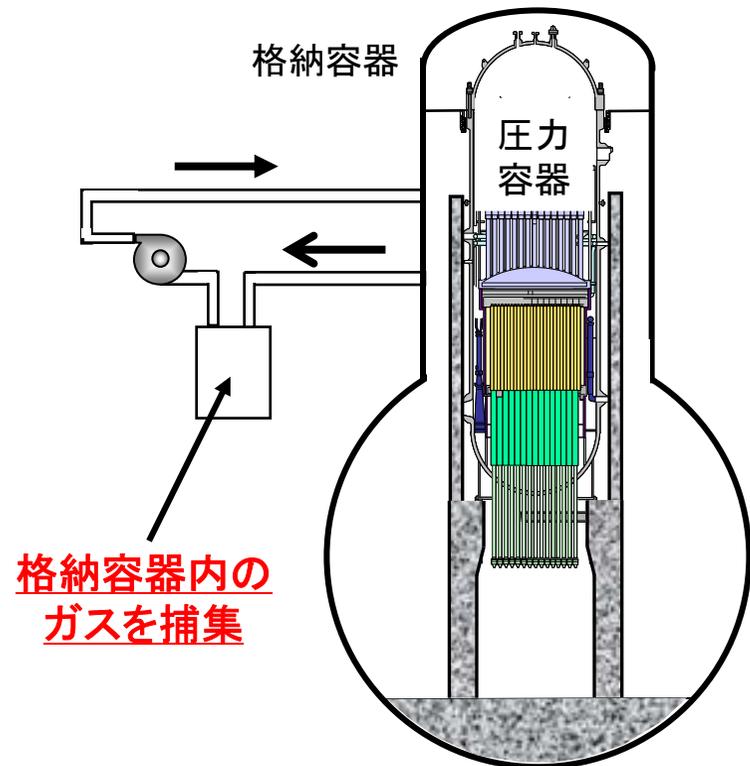
- 9月14日、原子炉格納容器内のガスを採取し、放射能濃度の測定を実施。
- セシウム134およびセシウム137を検出、ヨウ素131は検出限界未満。

● 2号機

- 8月9日、原子炉格納容器内のガスを採取し、放射能濃度の測定を実施。
- セシウム134、セシウム137、クリプトン85、キセノン131mを検出、ヨウ素131は検出限界未満。

● 3号機

- 適切なサンプリングラインを確保できておらず、放射能濃度測定は未実施。

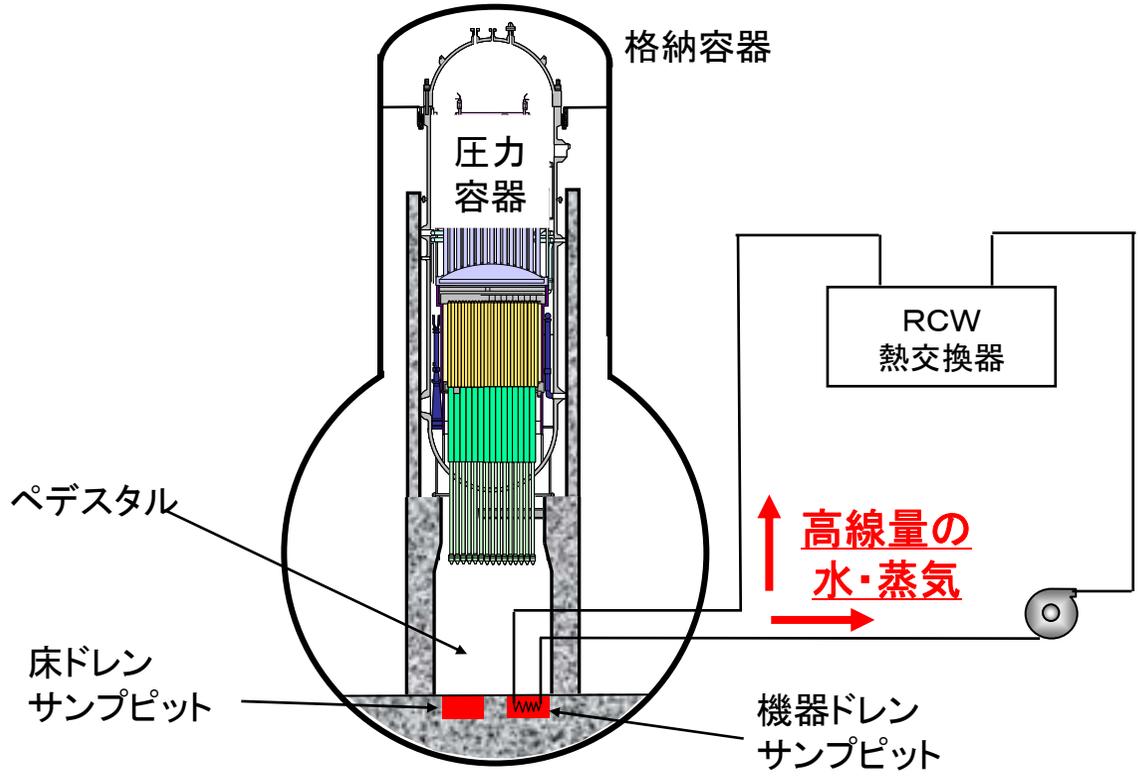


格納容器内のガス採取(イメージ)

2-2.格納容器内の状態を原子炉補機冷却系の状態より推定（1号機）

1号機

- 原子炉建屋1階北東に敷設された原子炉補機冷却系（RCW）配管において、高線量（220～260mSv/h）が計測（5月5日）されたが、圧力容器から滴下した高温の燃料が格納容器内に落下した場合、ペDESTAL下部の機器ドレンサンプルピット内に敷設された冷却用のRCW配管が損傷して、放射性物質を含む高線量の水・蒸気が配管内に移行する可能性があることと合致する。
- 一方、RCW配管損傷により配管内の水が格納容器内に入ること、で、溶融燃料の冷却に寄与した可能性も有りうる。

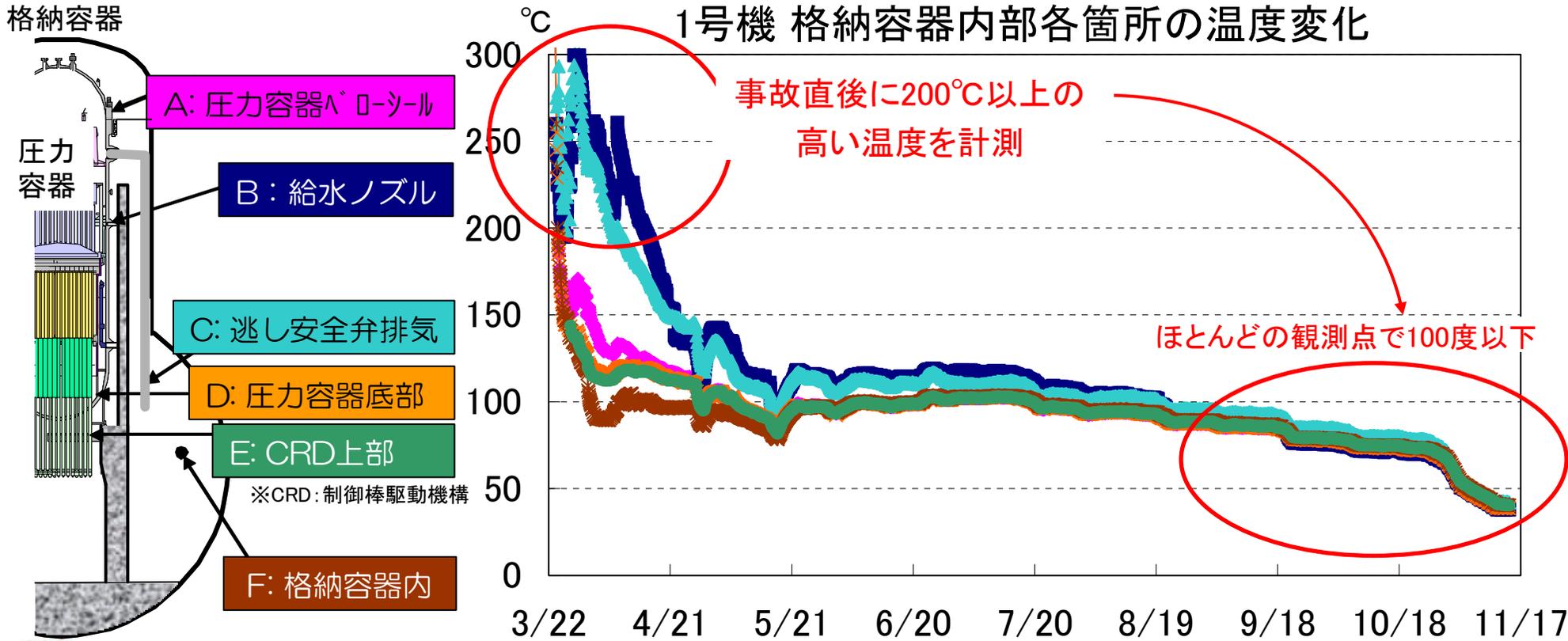


3. 温度計指示値による現状評価

3-1～3-4 温度計指示値による評価【1, 2, 3号機】

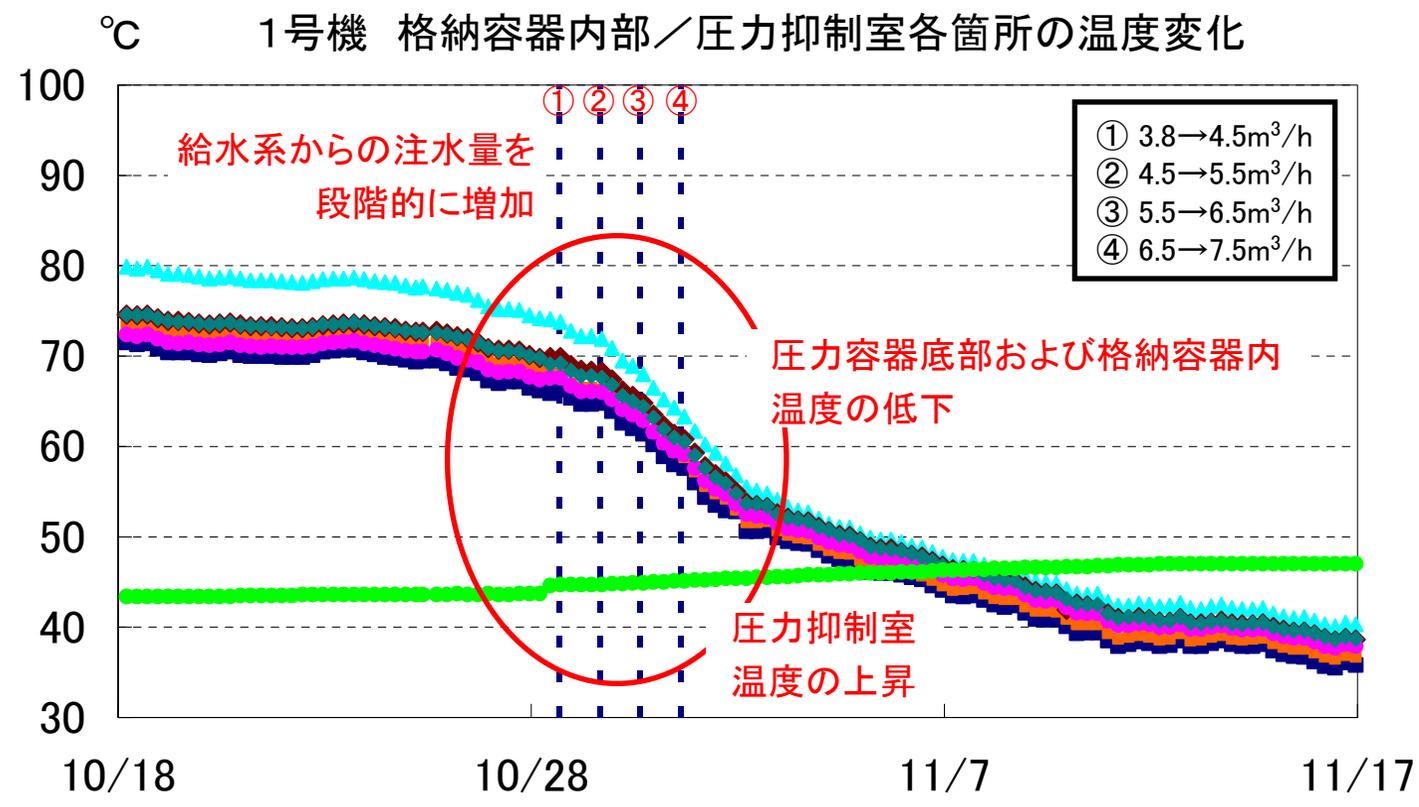
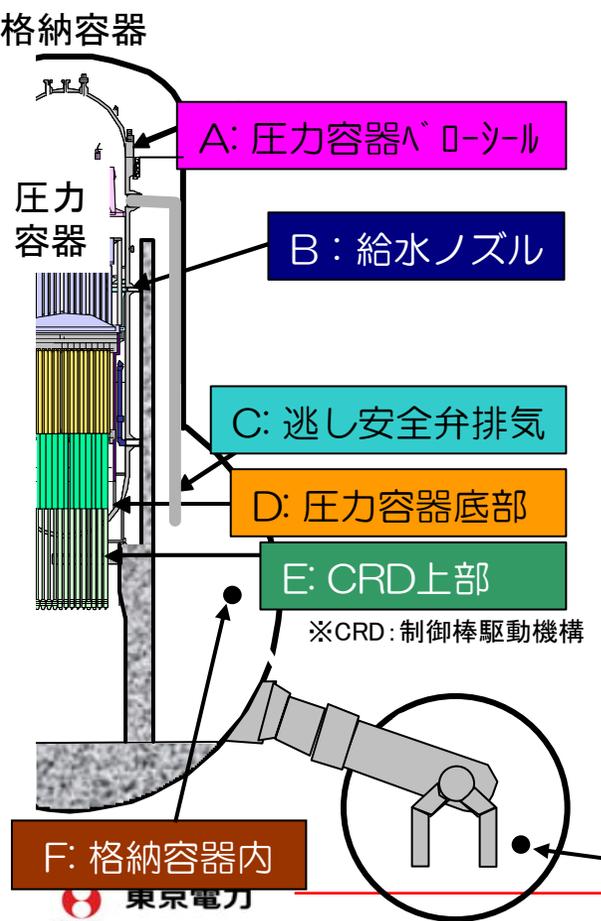
3-1. 温度計指示値による、推定内容の確認と現状評価①（1号機）

- 事故直後は高い温度を計測したが、8月以降はほとんどの測定点で100℃以下に低下
 - 現在は、格納容器の底部に滴下した燃料も含め、十分に冷却されている状態にあると評価



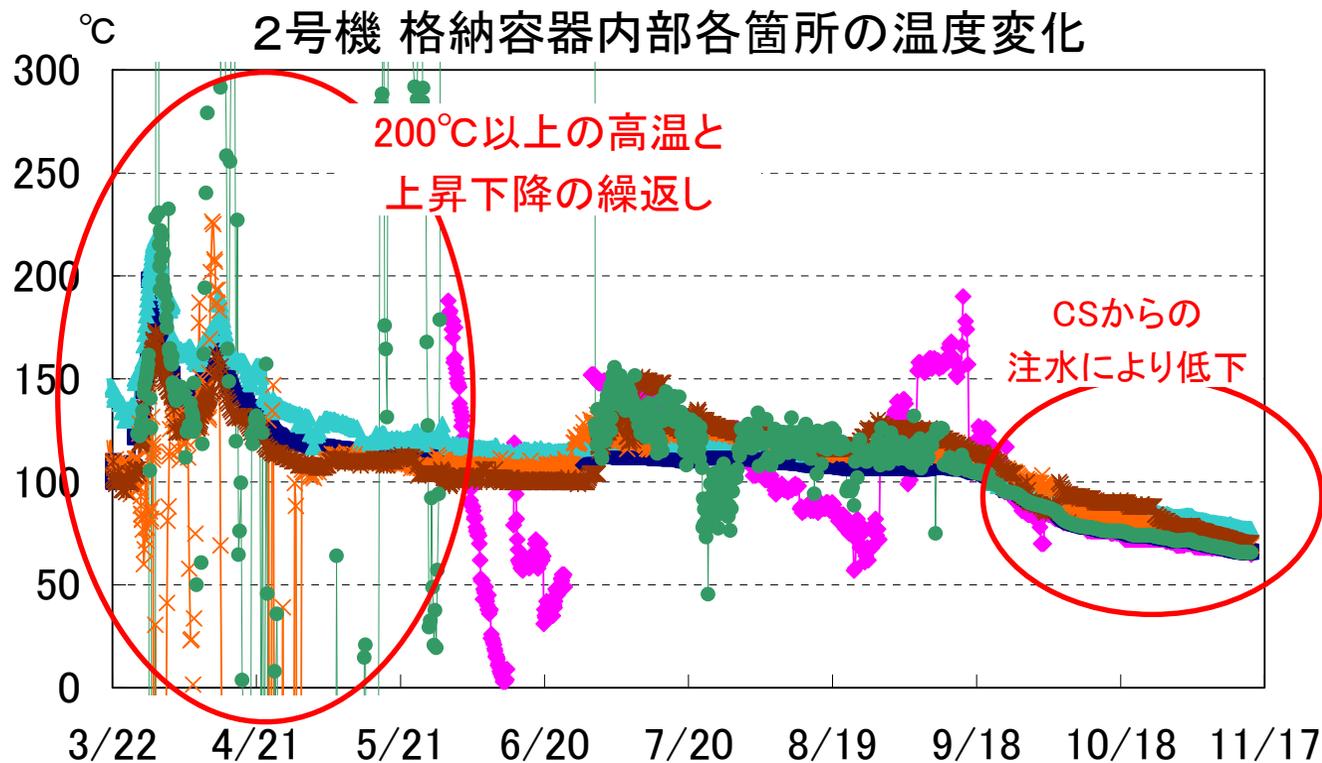
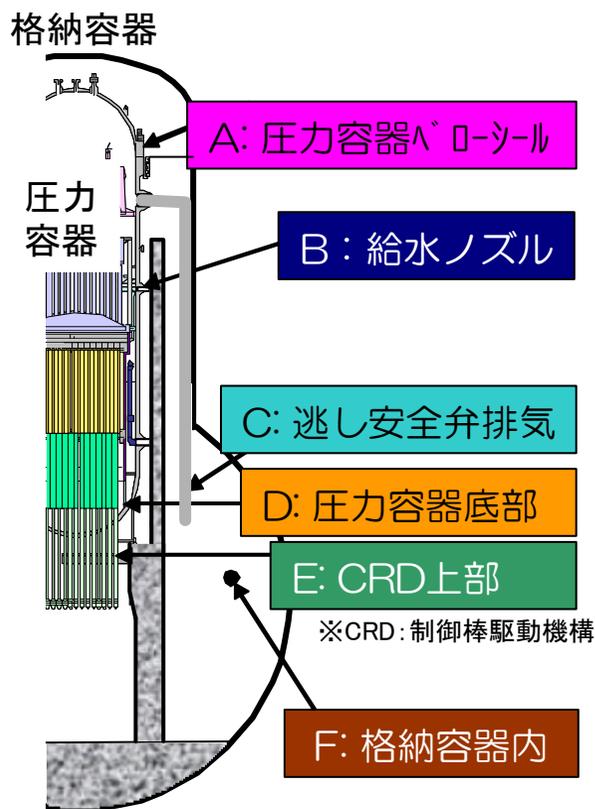
3-2. 温度計指示値による、推定内容の確認と現状評価②（1号機）

- 給水系からの注水量増加（10月28日）に伴い、圧力容器底部および格納容器内温度が低下するとともに、圧力抑制室の温度が上昇
 - 温度の低下に伴い、蒸気量が減少した分、燃料を冷却することで熱せられた水の量は増加し、その水の流入により圧力抑制室の温度は上昇
- 温度変化の挙動から、注水した水は溶融燃料の冷却に寄与と推定



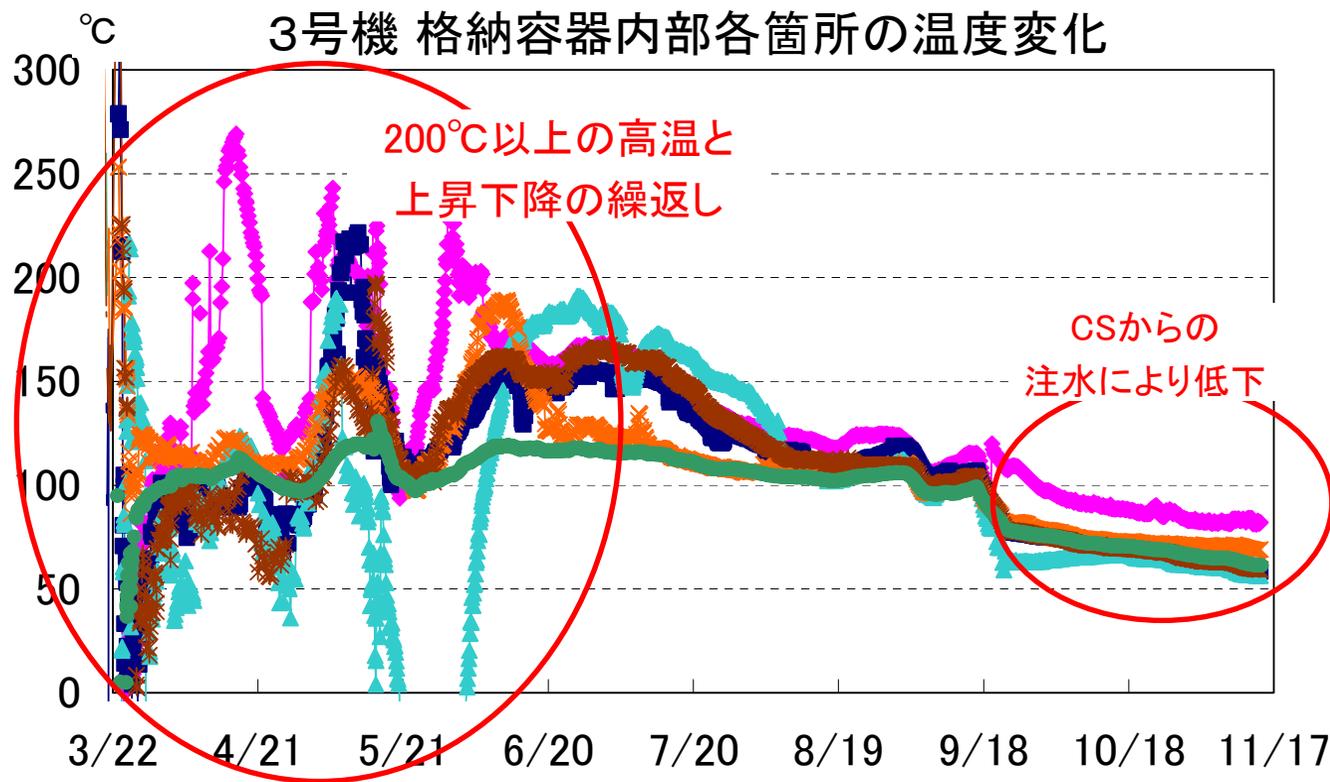
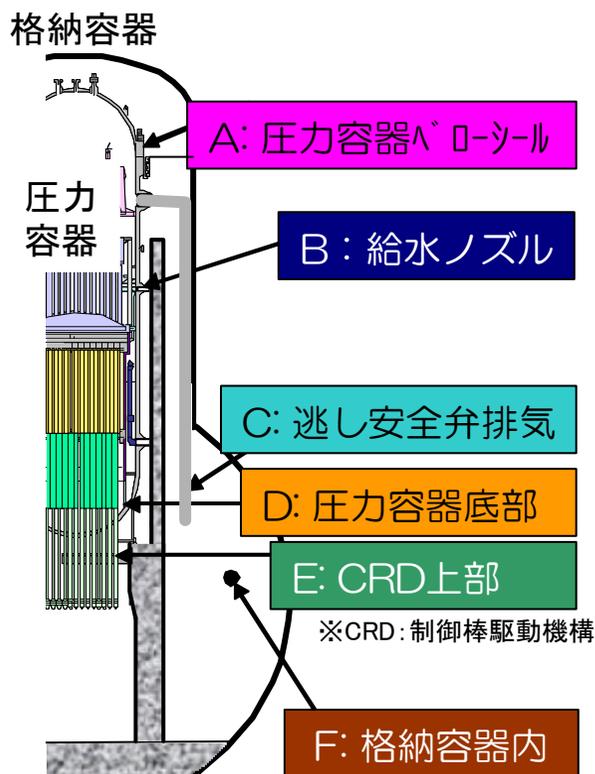
3-3. 温度計指示値による、推定内容の確認と現状評価（2号機）

- 5月末頃まで200℃以上の高温を含む上下動を計測していたが、給水配管に加え、圧力容器の中心部に上部から直接水を噴霧できる炉心スプレイ系配管（CS）からの注水開始（9月14日）した後、ほとんどの観測点で100℃以下に低下
 - 圧力容器内に大半の燃料が残っており（格納容器底部にはほとんど滴下していない）、それが十分に冷却されていると評価



3-4. 温度計指示値による、推定内容の確認と現状評価（3号機）

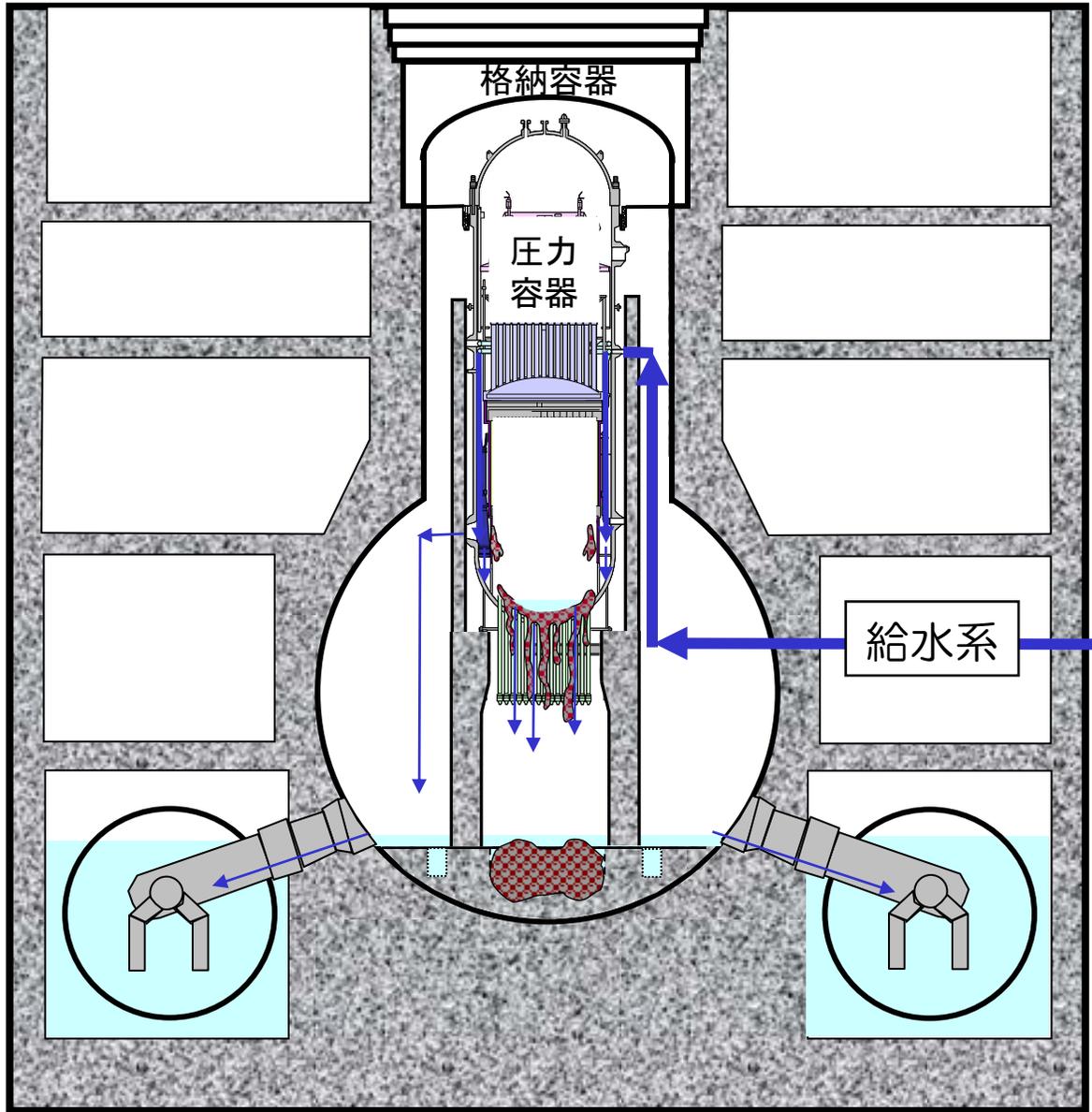
- 6月末頃まで200℃以上の高温を含む上下動を計測していたが、給水配管に加え、圧力容器の中心部に上部から直接水を噴霧できる炉心スプレイ系配管（CS）からの注水開始（9月1日）した後、ほとんどの観測点で100℃以下に低下
 - 圧力容器内に大半の燃料が残っており（格納容器底部にはほとんど滴下していない）、それが十分に冷却されていると評価



4. まとめ

4-1. 1号機の損傷燃料の状態に関するまとめ①

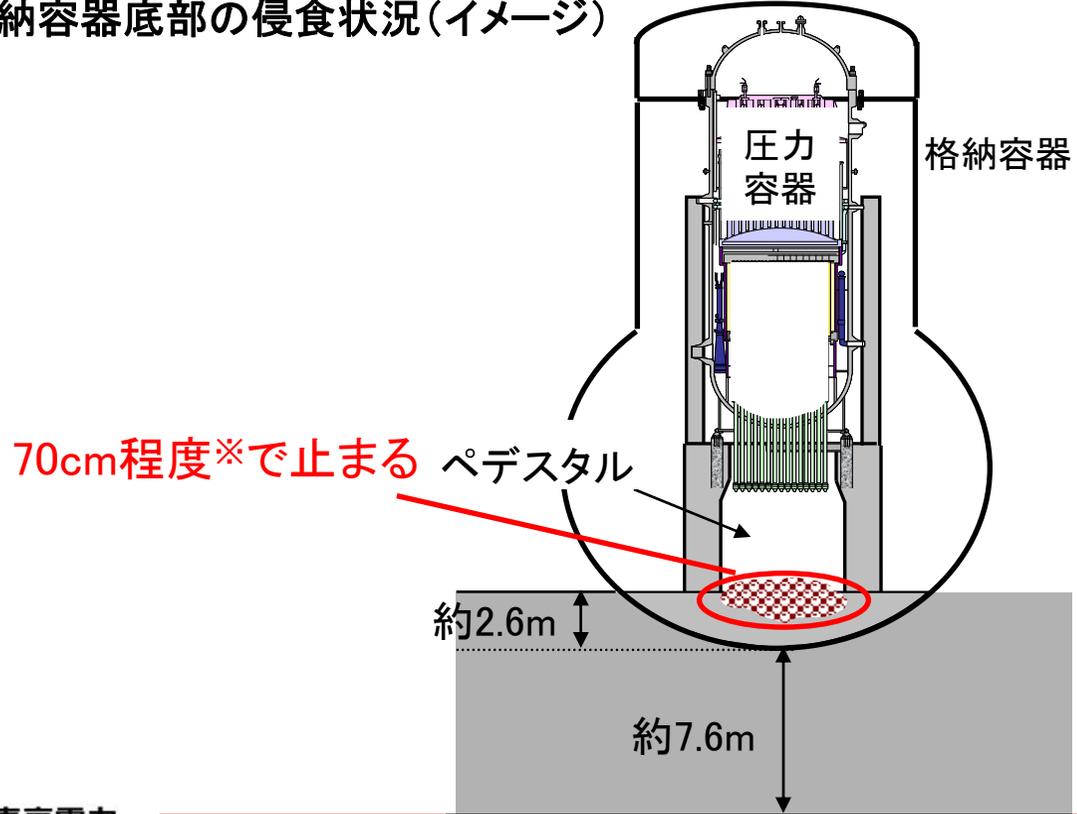
- 燃料は、地震前にあった位置から溶融して下方に全て移動。
【MAAPによる解析】
- さらに、圧力容器の破損も発生している可能性が高く、格納容器の底部に相当量滴下していったと推定。
【水位計指示値による推定】
【注水実績に基づく熱バランスによる推定】
【格納容器内ガス濃度による推定】
【原子炉補機冷却系による推定】
【温度計指示値による評価】 等
- 現在、注水は給水系配管より実施中であり、圧力容器底部及び格納容器内の温度は100℃以下で安定。
- よって、格納容器に落下した燃料も注水により概ね水に接する状態で冷却されているものと評価。



4-2. 1号機の損傷燃料の状態に関するまとめ②

- 格納容器底部に相当量滴下した溶融燃料は、格納容器底部にあるコンクリートを侵食している可能性があるが、現実的と考えられる条件で1号機のコア・コンクリート反応による侵食を解析コード（MAAP）で評価した結果、溶融した燃料による侵食は70cm程度※で止まるとの結果が得られた。
- また、格納容器内のガスサンプリング結果から、コア・コンクリート反応に起因すると考えられるガスは確認されておらず、現在進行形でコア・コンクリート反応が発生しているとは考えにくいと推定される。

格納容器底部の侵食状況(イメージ)



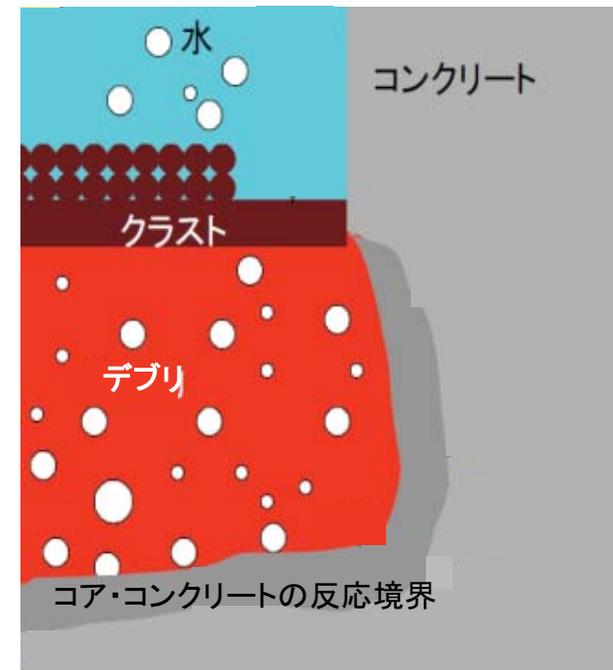
評価条件

- 堆積条件
 - ペDESTアル内部に落下した燃料デブリは、スリット（円筒状のペDESTアルの切り欠き部分）を通過して、ドライウェル床面（ペDESTアル外側）にも拡散。
 - ペDESTアルにある機器ドレンサンプ、床ドレンサンプへも一定量のデブリが堆積する。
- 崩壊熱
 - 揮発性の核分裂生成物に関しては、コア・コンクリート反応時には既に揮発済みとして、考慮しない。

【参考】コア・コンクリート反応とは

- 破損燃料（デブリ）の温度が高いまま（コンクリートの融点以上で）、格納容器に落下して格納容器底部のコンクリートに接する場合に発生（デブリがコンクリートを溶かす現象）
- デブリの熱源である崩壊熱は、時間と共に単調減少。加えて、反応が進むに従い、コンクリートとデブリが接触する面積が増える（除熱量が増える）ことから、コンクリートの侵食は限定的
- なお、以下の点からコンクリート侵食深さの正確な推定は困難
 - 格納容器底部のデブリの形状（平たい形状であれば除熱効果が大きくコンクリート反応は止まりやすい）が不明
 - コア・コンクリート反応の進行には諸説存在※
 - ✓ デブリ上部が水冷されて固化（クラスト化）することにより、水がデブリ下部まで到達せず、コア・コンクリート反応が進行するとの説
 - ✓ コア・コンクリート反応で発生するガスが、クラストを破壊し、水がデブリ層に流入することにより冷却され反応が止まるとの説
 - ✓ コア・コンクリート反応でクラストを破壊しない程度に発生するガスなどが、デブリ内部の熱伝達を活性化し、反応が進行するとの説

コア・コンクリート反応のイメージ



4-3. 格納容器内の状態に関するまとめ（2・3号機）

● 燃料は損傷・溶融したものの、一部は炉心部に残り、一部は原子炉圧力容器下部プレナム又は原子炉格納容器ペDESTALへ落下。

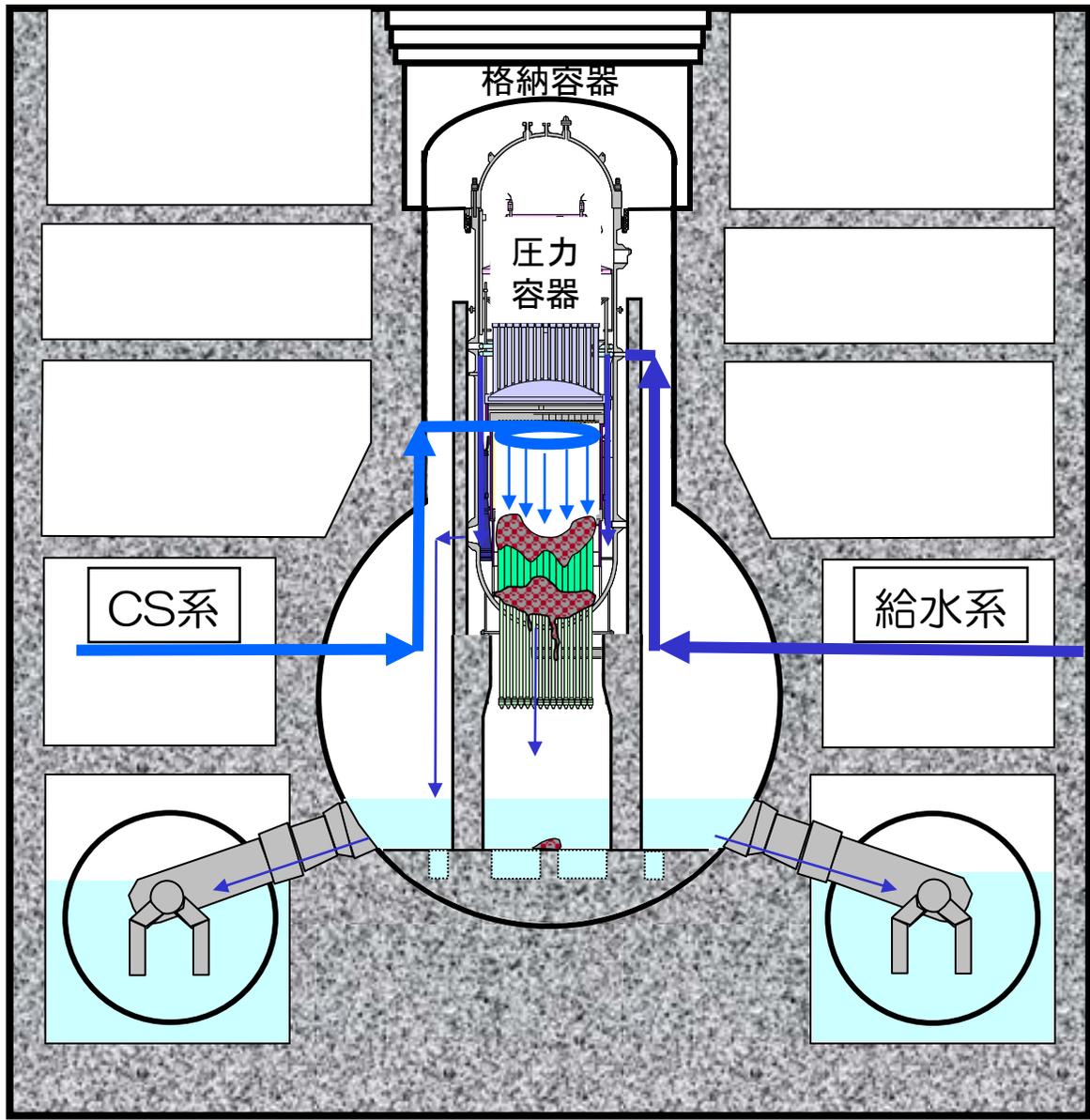
【水位計指示値による推定】
【注水実績に基づく熱バランスによる推定】
【温度計指示値による評価】 等

● 評価結果は、「地震発生前に燃料があった位置にほぼ残っている状況」から「損傷燃料の一部が格納容器底部に滴下」まで推定の幅がある。

【MAAPによる解析】

● 現在、注水は給水系配管と炉心スプレイ系（CS系）配管から実施中であり、格納容器内の各箇所の温度は100℃以下で安定。

● よって、いずれに移動した燃料も注水により概ね水に接する状態で冷却されているものと評価。



参考資料

【参考】1号機の現場状況から冷却状態の確認

1階床貫通部の状況比較



蒸気放出(6/3撮影)



蒸気放出無し(10/13撮影)

1階床貫通部からの蒸気放出(6/3確認)は確認されず(10/13)



蒸気発生は止まっているか、発生していても少量で、建屋に漏洩する前に凝縮(冷却されている)

【参考】 2号機の現場状況から冷却状態の確認



5階原子炉直上部からの状況：蒸気放出（9/17撮影）

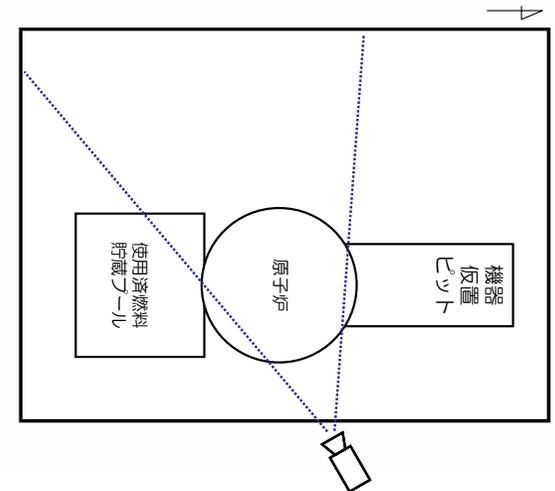


5階原子炉直上部の状況：蒸気放出無し（10/20撮影）

- ・9月17日に確認された蒸気放出が10月20日時点で確認されず。
- ・加えて、10月20日には天井クレーンの塗装が急激にはげ落ちており、これは乾燥を示す現象（高い湿度にさらされた塗装の粘着力が落ち、乾燥した際に剥がれ落ちる現象）。

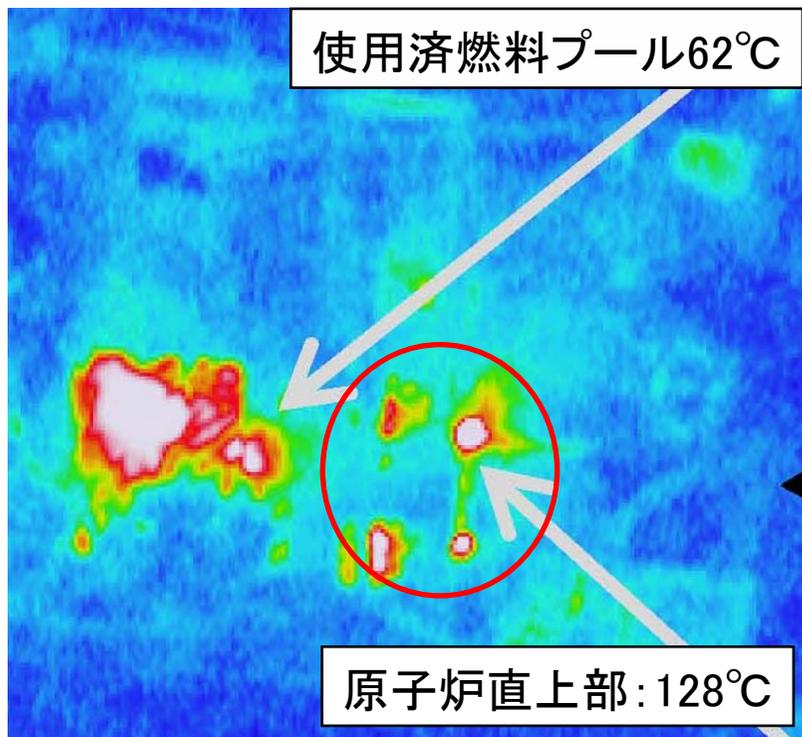


蒸気発生は止まっているか、発生していても少量で、建屋に漏洩する前に凝縮している（格納容器内は冷却されている）。



【参考】 3号機の現場状況から冷却状態の確認

上空からのサーモモニター



10/14時点で温度の上昇が見られる点の数、影響の範囲が小さくなっている



蒸気放出の規模は小さくなっている(格納容器内は冷却されている)。