

1号機 ペデスタルの状況を踏まえた対応について

2023年5月31日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

-
1. インナースカート及びペネトレーション部応力評価
 2. ペデスタル支持機能低下時ダスト被ばく評価
 3. ダスト飛散抑制対策の検討

1. ペDESTALの支持機能喪失時の影響考察に関する補足説明

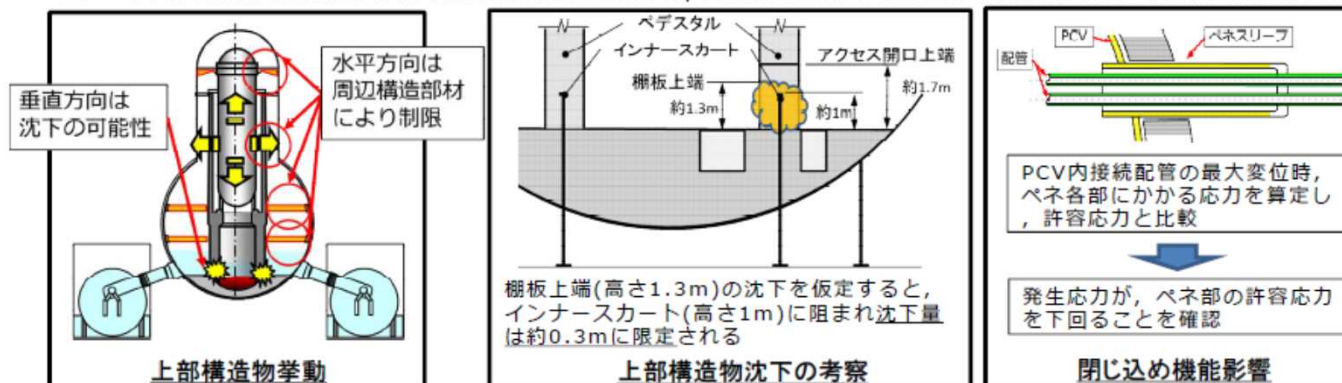
- 特定原子力施設監視・評価検討会（第107回）でお示した、1号内部調査結果を踏まえたペDESTAL機能喪失時の影響考察の内、以下の項目に関する補足説明を行う。
 - ① 上部構造物（RPV / RSW / ペDESTAL他）の沈下を仮定した場合、インナースカートに阻まれ沈下量が限定されること
→上部構造物の沈下を想定した際にインナースカートが支持に必要な構造強度を有すること
 - ② 上部構造物の沈下に伴うPCV閉じ込め機能への影響が小さい（ペネ部の損傷に至らない）こと



【参考】ペDESTALの支持機能喪失時の影響考察

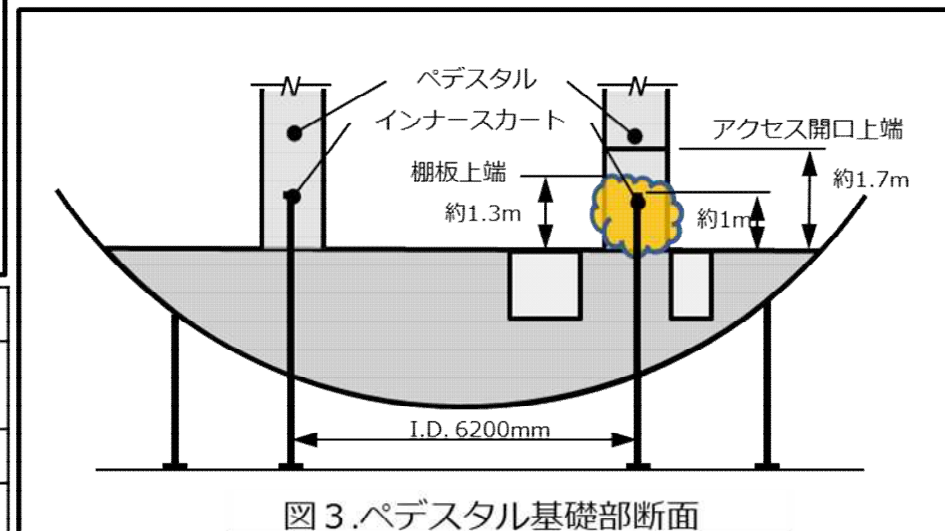
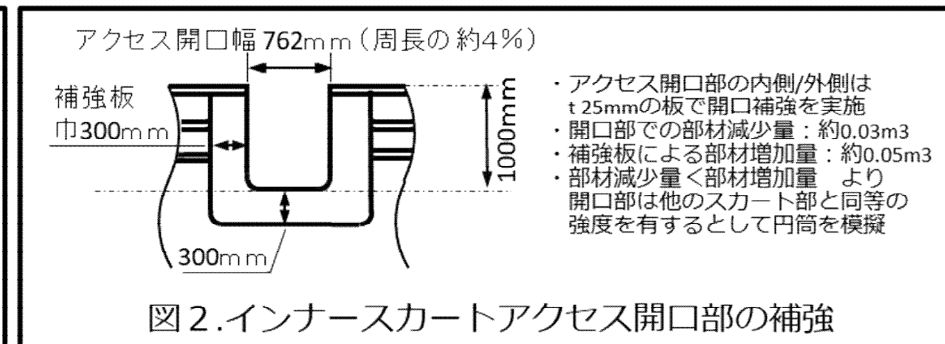
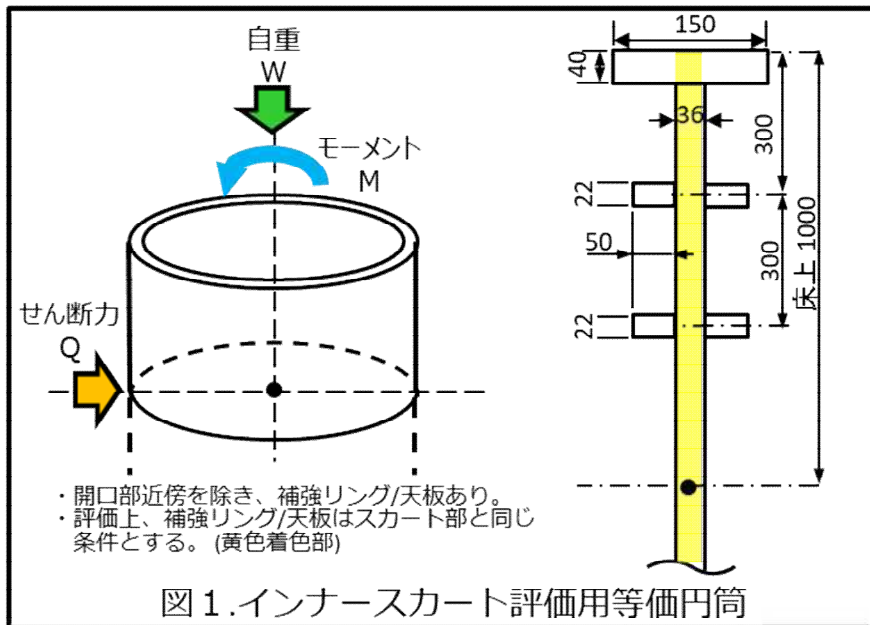
- 支持機能喪失時の上部構造物（RPV/RSW/ペDESTAL他）の挙動
 - **水平方向の移動**は周辺構造部材（バルクヘッド等）に制限*され**限定的な傾斜**に留まる見込み
 - **垂直方向の移動**は周辺構造部材による支持ができず、**沈下の可能性**は否定できない
- PCV内部調査結果を踏まえた上部構造物の沈下の考察
 - 鉄筋露出の範囲が大きいアクセス開口部近傍で、鉄筋に目立った**たわみ変形が無く**、**これまでの地震**に対し**ペDESTALの支持機能は維持**されている
 - インナースカートに有意な変形が確認されていないことから、**上部構造物の沈下を仮定した場合でもインナースカートに阻まれ沈下量は限定される**
- ペDESTALの支持機能喪失時の閉じ込め機能への影響
 - 上部構造物接続配管取合部（PCVペネトレーション（以下、ペネ））は沈下に伴う接続配管の変位により影響を受ける可能性あり
 - ペネ部及び接続配管の簡易応力評価より、沈下に伴う接続配管の変位により**ペネ部の損傷（閉じ込め機能の喪失）には至らない**見込み

* ペDESTAL外部の調査及び事故時温度解析の結果を踏まえ、周辺構造部材に大規模変形等は生じず移動の制限は可能な見込み



2-1. ペDESTALの沈下を想定したインナースカート構造強度の概略評価

- 上部構造物に作用する荷重がインナースカートに負荷されることを想定し構造強度を評価。
- 評価にあたっては、以下を考慮。
 - インナースカートに負荷する荷重の範囲は、ペDESTAL上部構造物の自重、曲げモーメント、せん断力が対象。検討にあたって、曲げモーメント/せん断力はIRID評価におけるSs600相当値※1を採用。
 - コンクリート・鉄筋等は考慮せず、インナースカート単体で荷重を受けることを想定。
 - インナースカートの板厚は事故時の腐食量※1を保守的に考慮。
 - 上記仕様を基に、構造上インナースカートと等価となる円筒を模擬し、構造強度を評価。
 - 地震等により発生する「曲げ」、「垂直」、「せん断」、「座屈」応力を評価対象として許容値との比較を実施。



| 荷重の種類 | 荷重の大きさ |
|--------------|---------------------------------|
| 自重(デブリ落下分考慮) | 1,776t (落下分：水100t+燃料デブリ200t) |
| 基礎部曲げモーメント※1 | 74,800 kN・m |
| 基礎部せん断力※1 | 7,550kN |

※1 出典 平成26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金圧力容器/格納容器の耐震性・影響評価手法の開発
平成28年度成果報告技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (IRID) https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2017/06/20160000_11.pdf

2-2：インナースカート構造強度の概略評価結果

- 上部構造物の重量に対し地震等により発生する応力（「曲げ」「垂直」「せん断」）を導出し、インナースカート単体の構造部材の許容応力（降伏応力及び許容せん断応力）を下回ることを確認。
- インナースカートの座屈が発生する荷重は、構成部材の降伏応力を上回っており、座屈には至らないと判断。
 なお、実際にはインナースカート単体で上部構造物荷重を支持する訳ではなく、残留している鉄筋・コンクリートによる荷重の負担もあることから、ペデスタルは支持機能損失には至らないと考察。

表1. インナースカートの概略評価結果

| | 許容応力※1 | 発生応力 | 許容応力比 (発生応力/許容応力) |
|---------------------|-------------------------------------|---------|----------------------|
| ①曲げ(σ_M) | 235 MPa (Sy) | 80 MPa | 0.34 |
| ②垂直(σ_W)※2 | 235 MPa (Sy) | 43 MPa | 0.18 |
| ③せん断(τ) | 135 MPa ($Sy/\sqrt{3}$) | 25 MPa | 0.19 |
| ④座屈 | 4.87×10^6 MPa (座屈評価基準値) | — | 座屈評価基準値は十分に大きく、座屈しない |
| ⑤組み合わせ※3 | 235MPa(Sy) | 130 MPa | 0.55 |

※1：許容応力として、曲げ・自重・せん断には、降伏応力 Syを適用。

運転していないことから、内圧/温度は常圧/常温として評価を実施。

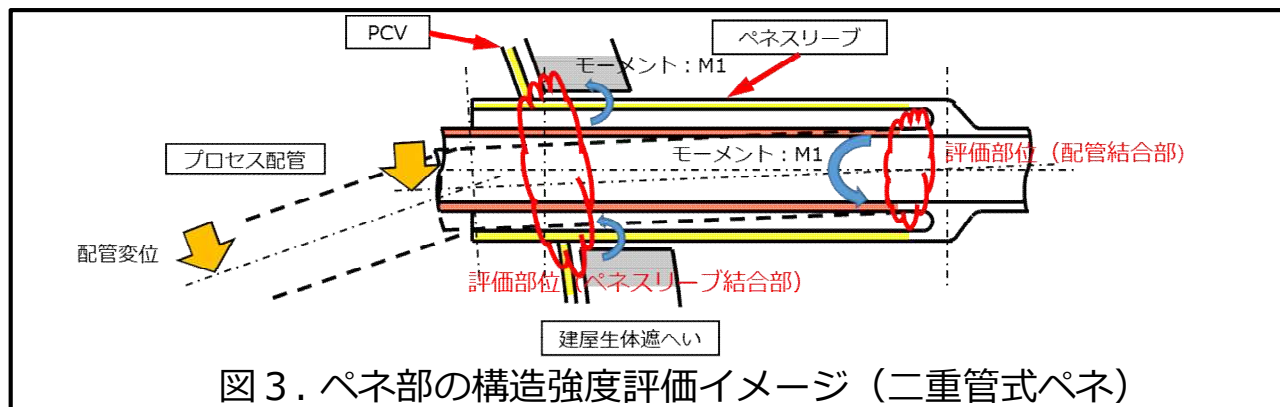
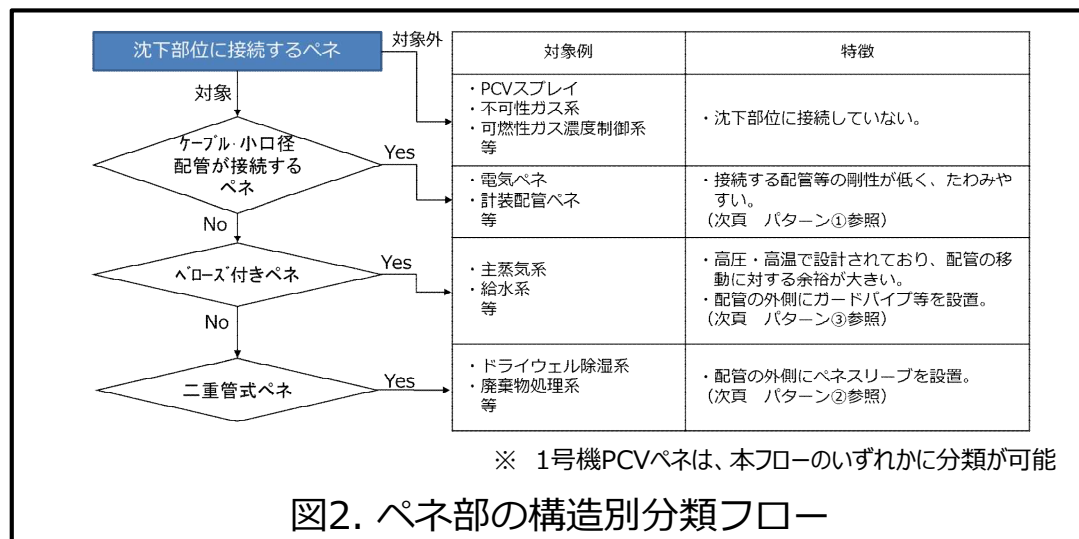
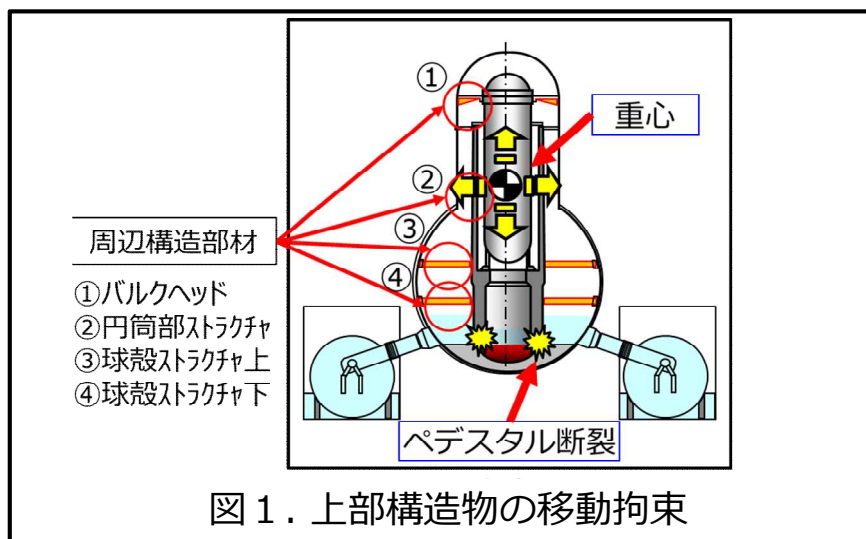
※2：自重には、地震時鉛直加速度を考慮して評価を実施。

※3：評価上厳しくなる圧縮応力側の組み合わせ応力として、以下の式を適用。

$$\text{組み合わせ応力} = ((\sigma_M + \sigma_W)^2 + 3\tau^2)^{0.5}$$

3 - 1 : PCV閉じ込め機能への影響の概略評価

- ペDESTALが損傷して支持機能を喪失した際の影響として、以下の2ケースを想定。
 - 上部構造物の倒壊等により、PCVバウンダリを直接損傷させるケース
 - 上部構造物に接続する配管等が変形、移動し、PCVバウンダリ（ペネ部）を損傷させるケース
- 上部構造物の水平方向移動は構造部材により拘束され倒壊等によるPCV直接損傷には至らない見込み。
- 上部構造物沈下時のペネ部の損傷有無を評価し、PCV閉じ込め機能への影響を確認。
 - 接続配管等のPCVペネ部のパターンを調査・分類し、各パターンで配管変位時の応力を評価。
 - 上部構造物の沈下量はインナースカートに阻まれ0.3m程度と考えられるが、万が一インナースカートに支持されない場合を仮定して、棚板上端が底部まで沈下（1.3m程度）する際の検討を実施。



3-2：上部構造物沈下時のペネトレーションへの影響の概略評価結果

- ペネスリーブ内でプロセス配管が最大限に変位した際に発生する曲げモーメントを評価部位に負荷し、発生応力を評価。
- 上部構造物の大規模な変位を想定した場合でも、ペネスリーブ内プロセス配管の変位は上記の最大値に留まると想定。
(最大値を超えて上部構造物が変位する場合はPCV内の配管に変形/損傷が生じる見込み)
- 各パターンにおける評価結果より、上部構造物が1.3m程度沈下した場合でもペネ部の構造健全性（PCV閉じ込め機能）は維持されるものと考察。
 - パターン①及びパターン②
ペネスリーブに発生する応力が許容応力を下回ることを確認。一部プロセス配管で変形/損傷が生じる見込み。
 - パターン③
プロセス配管がベローズを介してペネスリーブに接続しており、直接ペネスリーブには荷重がかからない構造となっている。
プロセス配管で変形/損傷が生じる見込み。

表1. ペネトレーションの構造別の検討結果(例)

| | イメージ図 | 対象ペネ | 想定変位 | 配管に発生する応力 | ペネスリーブに発生する応力 | 備考 |
|-------|-------|------|---------------|---|--|----------------------|
| パターン① | | X-30 | 182mm (最大) | 410 Mpa 許容値Su：520 MPa 外径：34mm 厚さ：4.5mm | 10 Mpa 許容値Su：415 MPa 外径：267.4mm 厚さ：15.1mm (配管6本考慮) | ケーブル、小口径配管が接続 |
| パターン② | | X-23 | 36mm (最大) | 410 Mpa 許容値Su：415 MPa 外径：165.1mm 厚さ：7.1mm | 77 Mpa 許容値Su：415 MPa 外径：267.2mm 厚さ：15.1mm | 二重管式 主に中口径配管が接続 |
| パターン③ | | X-7 | 97mm (参考) | 481 MPa 許容値Su：480 MPa 外径：406.4mm 厚さ：21.4mm | - | ベローズ付き 主に大口径配管が接続 |

※ ペネスリーブの許容応力として最小引張り強さSuを採用

【参考】インナースカート構造強度の概略評価内容

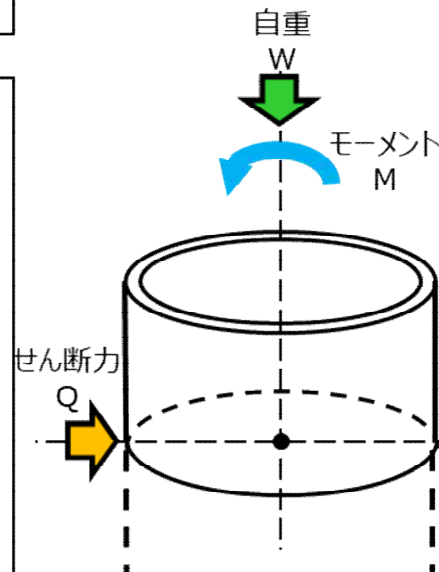
- 地震等により、上部構造物が直接応力が負荷された状態で、インナースカートの構造強度を評価。
- 評価にあたっては、以下を考慮。
 - インナースカートに負荷する荷重の範囲は、ペDESTAL上部構造物の自重、モーメント、せん断力が対象。
 - コンクリート・鉄筋等はないものとみなし、インナースカート単体での支持可否を評価。
 - インナースカートの板厚は、事故時の腐食量を保守的に考慮。
 - 上記仕様を基に、構造上、インナースカートと等価となる円筒を模擬し、構造強度を評価。
 - 構造強度の比較は、地震による「曲げ」、「自重」、「せん断」、「座屈の有無」を対象として実施。

○ 検討用重量・モーメント・せん断力

- ・ペDESTAL基礎上部重量 W : 1,776 ton = 17416.6kN
(工認重量 2,076t - 落下重量 300t ※¹ = 1,776t)
- ・ペDESTAL基礎部モーメント M : 74,800 kN・m※²
- ・ペDESTAL基礎部せん断荷重 Q : 7,550 kN※²

○ インナースカートの検討条件

- ・インナースカート材質 : SM41A (SM400A相当)
- ・材料降伏応力 S_y : 235MPa (板厚36mm)
- ・材料縦弾性係数 E : 203,000MPa
- ・平均半径 r : $r = 3,118\text{mm}$
- ・インナースカート板厚 t : $t = \text{公称寸法} - (\text{腐食量} 2.44 \times 3 \times 2)$
- ・インナースカート外直径 Do : $Do = 2 \times r + t$
- ・インナースカート内直径 Di : $Di = 2 \times r - t$
- ・断面積 A : $A = \pi \times (Do^2 - Di^2) / 4$
- ・断面係数 Z : $Z = \frac{\pi \times (Do^4 - Di^4)}{32 \times Do}$
- ・断面二次モーメント I : $I = \frac{\pi \times (Do^4 - Di^4)}{64}$
- ・断面二次半径 kt : $kt = ((Do^2 + Di^2) / 16)^{0.5}$
- ・露出高さ (座屈距離) L : 1,000mm
- ・開口補強されているため、円筒の形状として検討を実施



■ 構造強度の検討

インナースカートを円筒構造物とし機械工学便覧の式より

① 曲げ (モーメント) による応力

・曲げ (モーメント) による応力 σ_M : $\sigma_M = \frac{M}{Z}$

② 自重 (地震鉛直加速度0.5g考慮) による応力

・自重による応力 σ_w : $\sigma_w = \frac{W \times (1 + 0.5)}{A}$

③ せん断応力

・せん断応力 τ : $\tau = a \times Q / A$

ここで $a = \frac{4 \times (Do^2 + Do \cdot Di + Di^2)}{3 \times (Do^2 + Di^2)}$

④ 座屈に至る応力

オイラーの式から、座屈に至る応力は
両端固定 ($n=0.5$) として

・座屈に至る応力 σ_t : $\sigma_t = n \times \pi^2 \times (E / (L / kt)^2)$

※¹ デブリ落下分として水100t+燃料デブリ200tを考慮

※² モーメント・せん断力はIRID H28-2-4より : SS600相当

※³ 腐食量はIRIDによる炭素鋼の腐食試験結果を使用

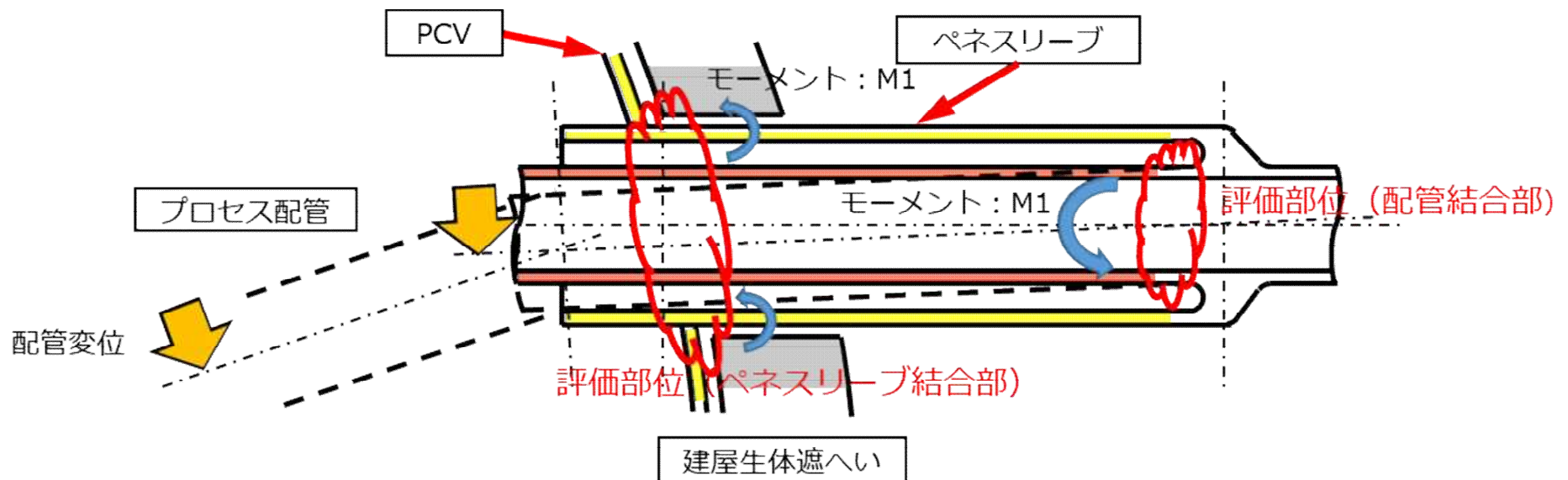
【参考】 上部構造物沈下時のペネトレーションへの影響の概略評価内容

バウンダリとなるペネスリーブに発生する応力の導出を以下の2 STEPで実施。

- ペDESTAL上部構造物の変位に伴いプロセス配管に加わる曲げモーメントに対する評価
 - プロセス配管のペネトレーション内で取り得る最大変位量から配管結合部のモーメント M_1 を算出
 - プロセス配管の断面係数 Z_1 より曲げ応力 σ_{M1} を導出

$$\text{モーメントによる応力 } \sigma_{M1} : \sigma_{M1} = M_1 / Z_1$$
- プロセス配管のモーメント M_1 がペネ端板を經由してスリーブに加わるとしてペネスリーブ付け根部を評価
 - ペネスリーブの断面係数 Z_2 より曲げ応力 σ_{M2} を導出し、許容応力を下回ることを確認

$$\text{モーメントによる応力 } \sigma_{M2} : \sigma_{M2} = M_1 / Z_2$$



ペネ部の変形イメージ (例 パターン②)

○検討用モーメント

・検討用のモーメントを、ペネトレーション内の配管の最大変位量から求める。

プロセス配管外直径/内直径： Do_1/Di_1

ペネトレーションスリーブ外直径/内直径： Do_2/Di_2

とした場合に、プロセス配管の最大変位 ϵ_1 は

$$\text{最大変位 } \epsilon_1 = (Di_2 - Do_1) / 2$$

プロセス配管を最大変位させる際の配管にかかる力Fは

$$\text{荷重 } F = (3 \times E \times I \times \epsilon_1) / L^3$$

の式で導かれる。ここで、

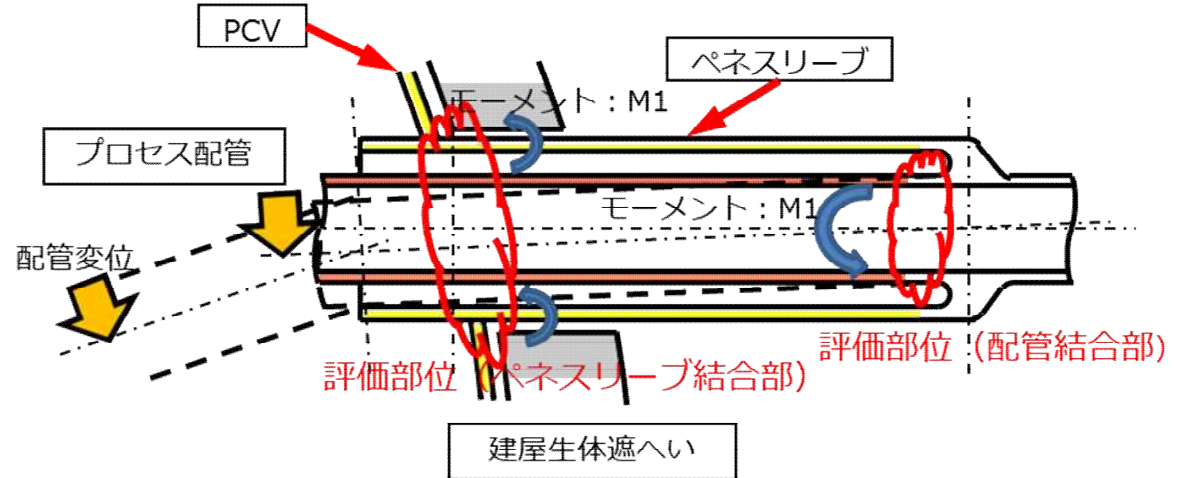
縦弾性係数 E：203,000 MPa

配管の断面二次モーメント $I_1 = \pi \times (Do_1^4 - Di_1^4) / 64$

配管検討長さ L：2,100 mm以上で想定

検討用モーメント M_1 は

$$\text{検討用モーメント } M_1 = L \times F \quad \text{となる。}$$



○プロセス配管結合部に発生する曲げ応力

・検討用のモーメントより、プロセス配管に発生する応力を求める。

プロセス配管外直径/内直径： Do_1/Di_1

とした場合に、プロセス配管の断面係数 Z_1 は、

$$\text{断面係数 } Z_1 = \pi \times (Do_1^4 - Di_1^4) / (32 \times Do_1)$$

プロセス配管を最大に変位させた際に発生する応力は

$$\text{配管曲げ応力 } \sigma_{M1} = M_1 / Z_1$$

○ペネスリーブ結合部に発生する曲げ応力

・検討用のモーメントが直接ペネスリーブに作用したと仮定した場合のペネスリーブ結合部に発生する応力を求める。

ペネスリーブ外直径/内直径： Do_2/Di_2

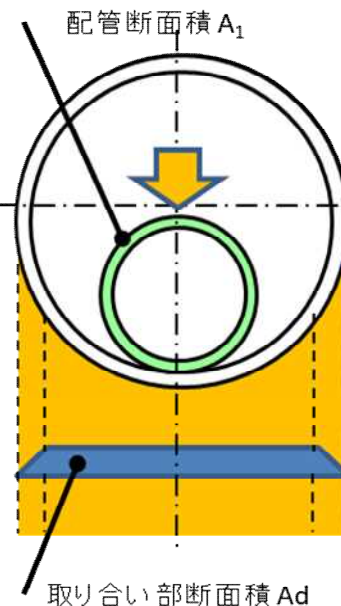
とした場合に、ペネスリーブの断面係数 Z_2 は、

$$\text{断面係数 } Z_2 = \pi \times (Do_2^4 - Di_2^4) / (32 \times Do_2)$$

プロセス配管を最大に変位させた際に発生する応力は

$$\text{配管曲げ応力 } \sigma_{M2} = M_1 / Z_2$$

$Z_2 > Z_1$ となるように設計されているので、配管破断時にもペネスリーブは破壊に至らない。



○配管がPCV取り付け部より先に破壊する理由

・プロセス配管の断面面積 A_1 ： $A_1 = \pi \times (Do_1^2 - Di_1^2) / 4$

配管材料が破損する引張応力を Su とする。

配管材料が破損するせん断応力 $S\tau$ は、 $S\tau = Su / (3^{0.5})$ とする

引張力による破断荷重 F_t ： $F_t = Su \times A_1$

せん断力による破断荷重 F_r ： $F_r = S\tau \times A_1 = 0.58 Su \times A_1$

ペネスリーブを通じて、PCVのペネ取り付け部にかかる

力を、ペネ下側の部分で受けるとした場合には、

ペネ取り付け部板厚 Td ：

とすると、受圧面積 Ad は、 $Ad = Do_2 \times Td$

PCV取り付け部が損傷に至る応力を Su とすると

$Su = \text{損傷荷重 } Fd / Ad$ より

損傷荷重 $Fd = Su \times Ad$

配管を押し下げる荷重とPCV取り付け部を圧縮する荷重は

等しいため、配管破断時のペネ取り付け部圧縮応力 σd は

$$F = Su \times A_1 = \sigma d \times Ad$$

$A_1 < Ad$ となるように設計されており、損傷に至る応力 Su が

同じであれば、 σd は Su より小さい値となる。

よって、せん断または引張により配管が先行して損傷に至る。

1. インナースカート及びペネトレーション部応力評価

2. ペDESTAL支持機能低下時ダスト被ばく評価 検討中

3. ダスト飛散抑制対策の検討

-
1. インナースカート及びペネトレーション部応力評価
 2. ペデスタル支持機能低下時ダスト被ばく評価
 3. ダスト飛散抑制対策の検討

1. ダスト飛散抑制対策の検討

- これまでも2022年3月の地震など強い地震を経験しているが、ペDESTALの支持機能は維持されている
- しかしながら、これまでの経験や耐震評価の結果をもって、支持機能に問題はないとするのではなく、仮に支持機能を喪失したとしても、その際に取り得る方策については検討を進めている

<万が一の事態に備えて以下の方策を検討>

- RPV等の傾斜・沈下によるダスト飛散に対する方策
 - **ダスト飛散抑制に関わる機動的対応**（地震でPCVガス管理設備機能喪失した時の可搬式設備を用いたPCV排気）
 - **PCV閉じ込め強化**^{※1}：PCV均圧^{※2}、窒素封入停止策^{※2,3}、大型カバーによるPCVからの直接放出量の低減

※1 第100回監視・評価検討会でのコメントを踏まえ、仮に支持機能の低下に起因して格納容器の 損傷が拡大した際にダストによる環境への影響をできる限り小さくするための方策を検討中

※2 技術会合において議論を行う「PCVの閉じ込め機能の維持に関する論点」に沿って検討中

※3 窒素封入設備 A、B号機は、遠隔による停止が可能。C号機については、現在、遠隔操作機能の改造を計画。改造までは速やかに現場での停止を行うこととする。

■ RPVペDESTAL支持機能低下により想定される影響に対する機動的対応

- ペDESTAL支持機能が低下した場合でも、PCVへの水・ガスの流路が完全に喪失することは考え難いが、万一の可能性として、既存のRPV注水設備・PCVガス管理設備・窒素封入設備(以下、冷却設備)による燃料デブリの冷却やPCVのダスト飛散の抑制機能が喪失すると想定。
- それらの代替として、冷却設備の復旧までPCV内環境を維持できるよう、機動的対応として、可搬式設備やPCVへの新たな注水口・吸込口等を整備。
なお、機動的対応として、現在の冷却設備の運用状況と同程度の機能になるよう想定。

■ 機動的対応の現場展開

- 事象発生後、まずは「影響の緩和措置」を実施。その後、「機動的対応」に展開。
 - 機動的対応は、「冷却設備を使用する場合」「可搬式設備を使用する場合」の2通りを想定。
 - 機動的対応の現場展開に約1日程度での対応を想定。
- 高線量エリアである原子炉建屋内での作業になることから、予め専用の接続口や配管・ホース等を敷設することが必要。

■ 機動的対応の準備状況

- 現在、必要な資機材（可搬式設備含む）、工事の検討中。
 - 新しい接続口の選定・バウンダリ構築(冷却設備含む)・配管等の敷設ルートの設定(既存設備の軽微な改造が発生)
 - 可搬式設備（PCVガス管理設備相当）の仕様、モニタリング機能の扱い（設備付け）
- 資機材を先行取得して対応整備→追加工事で対応の向上を図る。
主たる資機材の抽出を終え、現在整備中（2023年12月末完了予定）。
(補足) 上記の専用機材の整備まで、応急的対応として構内資機材(準備済)の活用。

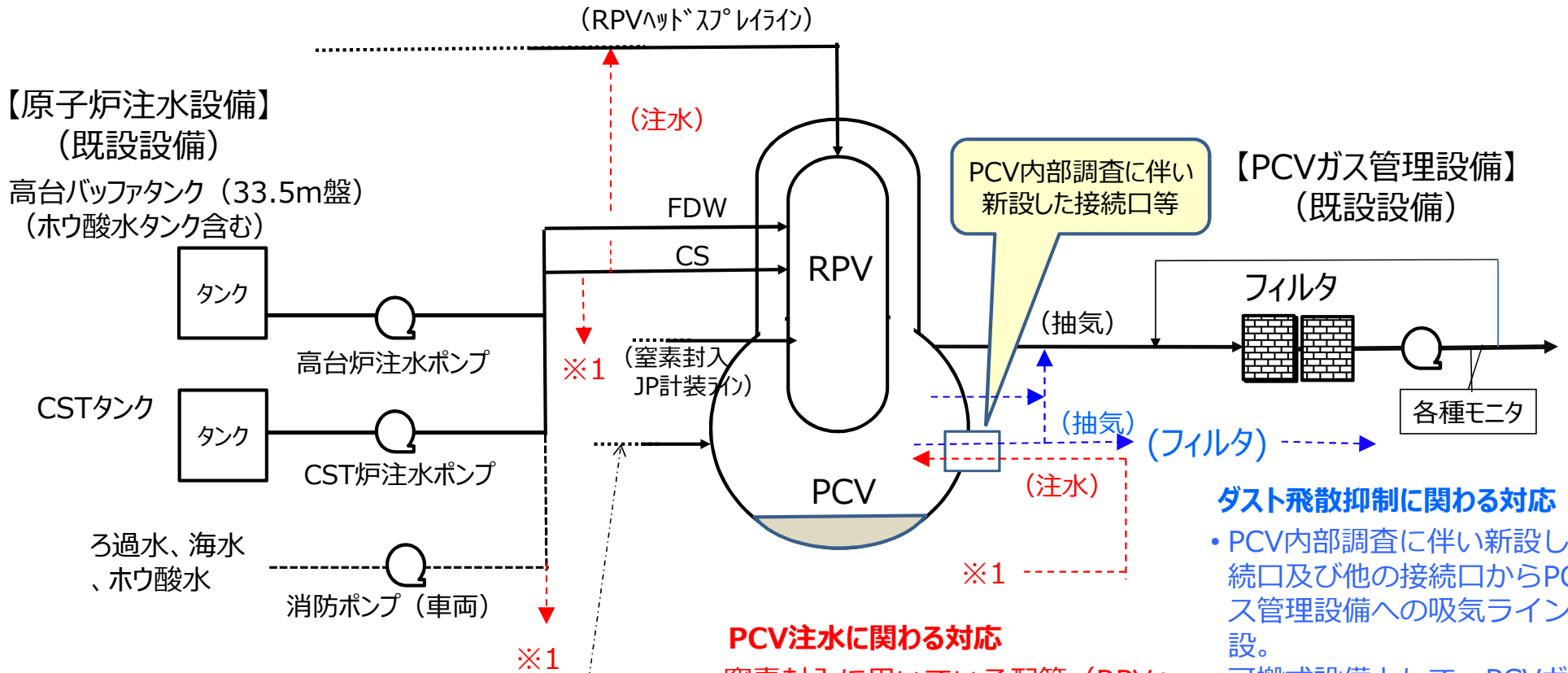
参考 1 . RPV・PCV冷却設備の機動的対応（1）

【RPVペDESTAL支持機能低下により想定される影響に対する機動的対応】

| 想定される影響 | | 影響緩和策 | 機動的対応 | 状況(資機材) | |
|----------|-----------|---|--|--|---|
| 燃料デブリの冷却 | 原子炉注水設備 | RPV等の傾斜、沈下により既設配管（CS系、FDW系）の損傷し、燃料デブリの冷却が阻害される。 | PCV内でRPVへの直接配管が損傷(破断)した場合、PCV内への注水は継続される。 | <ul style="list-style-type: none"> ・窒素封入に用いている配管（RPVヘッドスプレイライン）に切り替えて注水。 ・PCV内部調査に伴い新設した接続口(X-2(φ200※1)から原子炉注水ラインを敷設してPCVへ注水。 ・注水は原子炉注水設備(CS系ラインを活用)または可搬式設備による。 ・可搬式設備として、消防車を使用。 | <ul style="list-style-type: none"> ・RPVヘッドスプレイ切替資機材について整備済 ・新設の接続口の取付治具を整備中 ・ラインとなるホース、消防車は整備済 |
| ダスト飛散の抑制 | PCVガス管理設備 | RPV等の傾斜、沈下にペDESTAL内、PCV底部の一部の燃料デブリの粉砕によるダスト飛散や、衝撃、振動による構造材に付着しているダストが舞い上がる。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ダストが舞い上がったとしても、PCVガス管理設備のフィルタを介した排気流量の増加により、ダスト濃度上昇の影響の緩和を行う。 ・フィルタ差圧が上昇した場合、待機系統への切替及びフィルタの交換を行う。 | <ul style="list-style-type: none"> ・PCV内部調査に伴い新設した接続口(X-2(φ250※1))及び他の接続口から排気ラインを敷設。 ・敷設した排気ラインをPCVガス管理設備または可搬式設備に取付、排気。 ・可搬式設備として、PCVガス管理設備と同程度のファン・フィルタ等を準備。 (モニタリングは可搬式設備に設置、または手動によるサンプリングを実施) | <ul style="list-style-type: none"> ・新設の接続口の取付治具・ホース、可搬式設備を準備中 <p>上記の専用機材の整備まで、応急的対応として構内の下記資機材の活用 (ダクトホース、局所排風機(フィルタ付)準備済)</p> |
| | | PCV内は湿潤環境となっているため、PCV内のダスト濃度の増加は限定的と考えられる。 | <ul style="list-style-type: none"> ・PCVガス管理設備の吸込口は、PCV内のCCSスプレイとしているため、損傷の可能性は低い。 | | |
| 不活性雰囲気維持 | 窒素封入設備 | RPV等の傾斜、沈下により既設配管（RVH系、JP計装系）の損傷し、RPV内の不活性雰囲気の維持が阻害される。 | RPV封入ラインからPCV封入ラインへ切り替えることで窒素封入を継続・再開（ダスト飛散時は窒素封入量の低下・停止となる） | <ul style="list-style-type: none"> ・RPV封入ラインからPCV封入ラインへ切り替えることで窒素封入を継続・再開。 | 整備済 |

※1 現場状況や操作性により変更の場合あり

機動的対応イメージ 【窒素封入ライン】（既設設備）



【窒素封入ライン】（既設設備）
PCV封入ライン
（RPV封入ラインからPCV封入ラインへ切り替えることで窒素封入は継続）

PCV注水に関わる対応

- 窒素封入に用いている配管（RPVヘッドスプレライン）に切り替えて注水。
- PCV内部調査に伴い新設した接続口から原子炉注水ラインを敷設してPCVへ注水。
- 可搬式設備として、消防車により、上記の接続口等からPCV内へ注水

ダスト飛散抑制に関わる対応

- PCV内部調査に伴い新設した接続口及び他の接続口からPCVガス管理設備への吸気ラインを敷設。
- 可搬式設備として、PCVガス管理設備と同程度の可搬式設備等を準備。（モニタリングは手動によるサンプリングを実施）

不活性雰囲気維持に関わる対応

- RPV封入ラインからPCV封入ラインへ切り替えることで窒素封入を継続。