

1号機 ペDESTALの状況を踏まえた対応について

2023年6月5日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

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

1-1. 被ばく評価結果まとめ

- これまでのペDESTAL強度評価結果等から、大規模な損壊等に至る可能性は低いと想定しているが、シナリオ想定に保守性を持たせケーススタディを実施。
- 想像を広げたシナリオにおいても、事故時の基準5mSv/事象を下回ることから、著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないと考えている。
- 上記の通り、著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないと考えているが、万が一の事態に備え今後の方策(閉じ込め強化、機動的対応)を検討している。

ダスト発生シナリオと敷地境界での実効線量

ケース		A-0	A-1	B
ダスト発生シナリオ	事象	RPV支持構造物が 座屈 。 接続配管等を引っ張り ながらRPVが 沈下 。 PCVに 大開口 が発生。		
	発生モード	構造物の表面汚染物 が、 表面湿潤状態 で こすられて剥離 。	構造物の表面汚染物 が、 表面乾燥状態 で こすられて剥離 。	RPVに残存・付着した燃料デブリ が、 乾燥状態 で 振動により浮遊 。
	発生対象	なし。 (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)	1号機AWJ最大ダスト濃度を記録した汚染表面の比例倍。 (RPV外表面積で剥離すると仮定)	燃料デブリ11.2ton ※ (燃料の全てが粉状と仮定)
実効線量		極めて軽微	約0.03mSv/事象	約0.04mSv/事象

<ダスト発生シナリオと被ばく評価条件の保守性>

- ・インナースカートは座屈に至らないと判断しているが、万が一座屈が生じたと仮定(ケース共通)
- ・上部構造物 (RPV/RSW/ペDESTAL他) 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) は維持されると考察しているが、PCVに大開口が発生すると仮定 (ケース共通)
- ・PCV内は湿潤状態でダストは飛散し難い環境だが、乾燥状態を仮定(ケースA-1、B)
- ・RPVに残存・付着した燃料デブリは塊状になっているものも混在しているが、燃料の全てが粉状と仮定(ケースB)
- ・PCV内で発生したダストは、PCV内で時間の経過とともに拡がるが、瞬時に拡がると仮定 (ケースA-1、B)
- ・PCVから漏えいするダストは、PCVからの漏えい箇所の一部が捕集され、残りのダストは建屋内に滞留して沈着・沈降により減少し、建屋からの漏えい箇所ですらに捕集されて減少する見込みだが、PCVや建屋からの漏えい箇所での捕集効果、建屋での沈着・沈降効果がないと仮定 (ケースA-1、B)

既往最大のダスト濃度を計測した1号機AWJ実績に基づく、**表面汚染物からのダスト飛散**を想定したシナリオ。

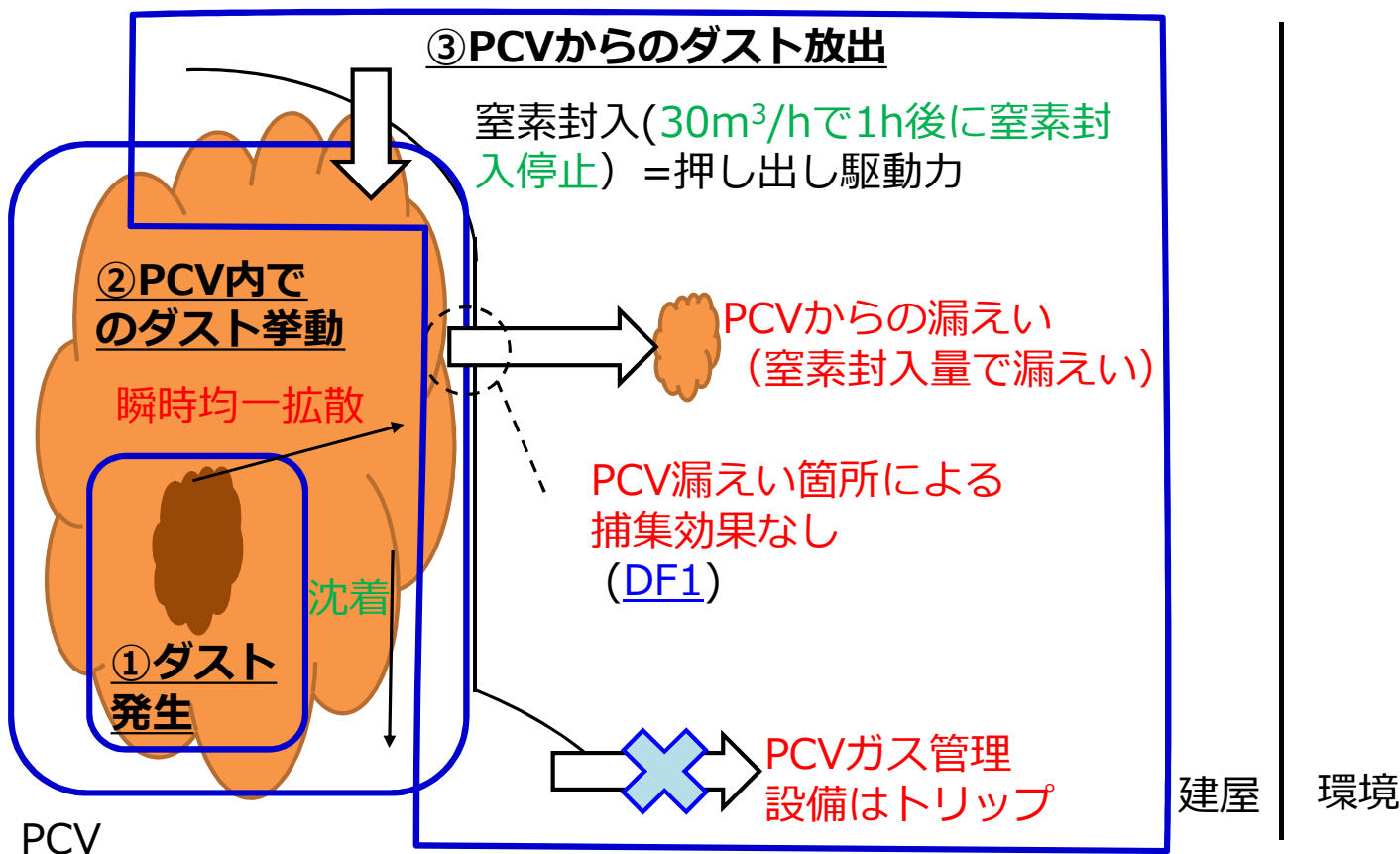
燃料デブリからダストが発生することを仮定したシナリオ。

2021年2月、2022年3月の地震(双葉町・大熊町：震度6弱)でも、構造物の表面汚染物や燃料デブリに力が加わった可能性はあるが、**PCV内ダスト濃度上昇として検知されるほどのダスト追加発生は確認されていない。その観測事実は考慮せず、当該状況が発生し、ダスト追加発生があるものと仮定**したシナリオ。

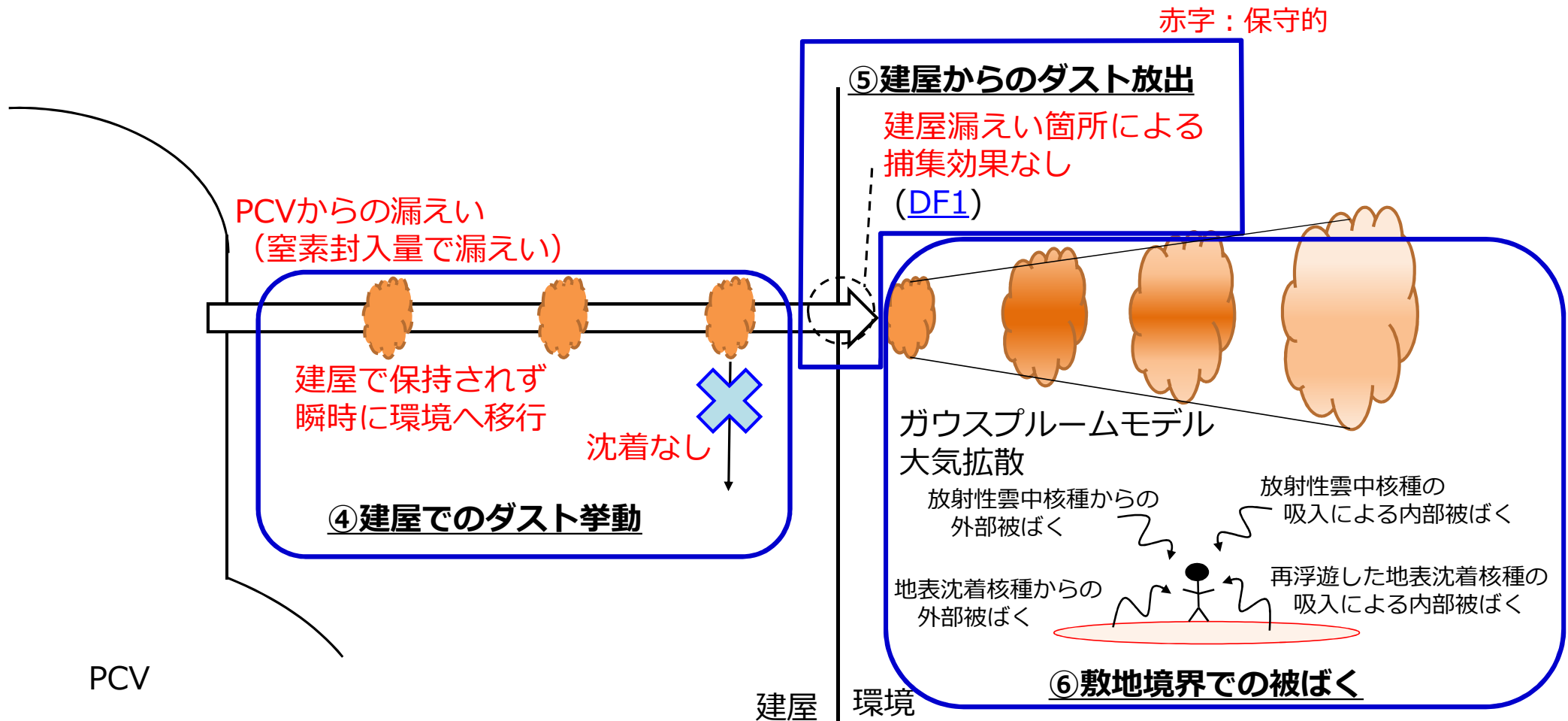
※ 以下の参考文献から、RPV底部およびRPV下部CRDハウジングに付着した燃料デブリに含まれる燃料(UO2)として、11.2tonとした。(参考) 平成26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化」、IRID

①ダスト発生	ダスト発生シナリオ（詳細後述）
②PCV内のダスト挙動	ダストの拡散： PCV内に瞬時均一拡散 ダストの沈着： 考慮 （1号機AWJ時に確認したダストの低減率を適用）
③PCVからのダスト放出	ダスト押し出し駆動力 = 窒素封入（30m ³ /hで1h後に窒素封入停止） 放出経路： PCVからの漏えいのみ （窒素封入量で漏えい） PCVガス管理設備はトリップ 放出経路の捕集効果： なし （大開口を想定し漏えい箇所の捕集効果は期待しない）

赤字：保守的、緑字：現実的



④建屋でのダスト挙動	ダストの拡散：建屋の保持効果を考慮せず、瞬時に環境へ移行 ダストの沈着：考慮しない
⑤建屋からのダスト放出	建屋の捕集効果：なし（大開口を想定し漏えい箇所の捕集効果は期待しない）
⑥敷地境界での被ばく	放出後の挙動：ガウスプルームモデル大気拡散 被ばく経路：放射性雲中核種からの外部被ばく、吸入による内部被ばく 地表沈着核種からの外部被ばく、再浮遊した核種の吸入による内部被ばく

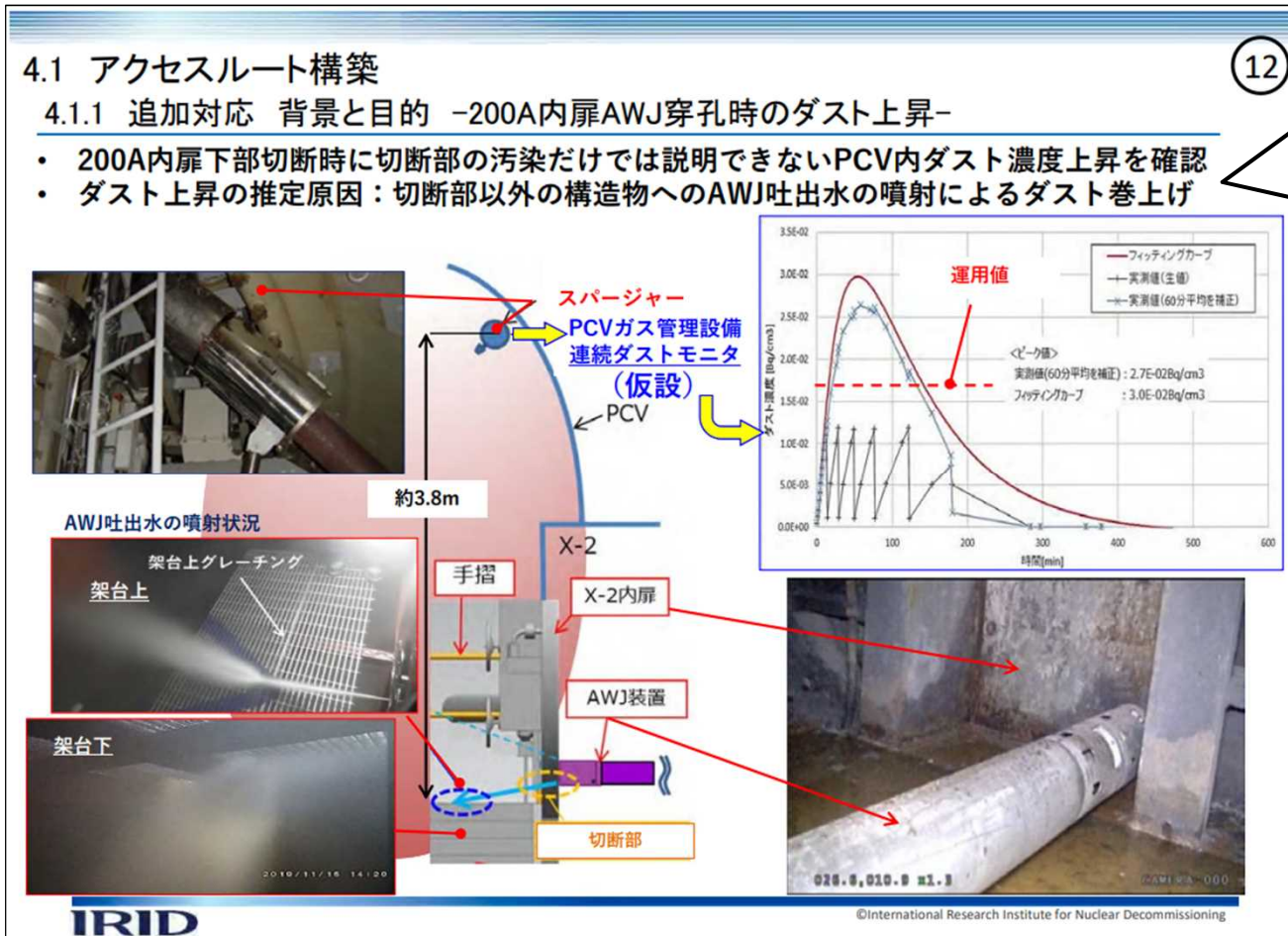


1-3. 被ばく評価 (①ダスト発生想定：ケースA-1)

ダスト発生シナリオ

- RPV支持構造物が**座屈**。**接続配管等**を**引っ張り**ながらRPVが**沈下**。
- **構造物の表面汚染物**が、**表面乾燥状態**で**こすられて剥離**。

ダスト発生想定



全β最大ピーク濃度約2.7E-2Bq/cm³を確認した2019年6月4日作業において、AWJ吐出水が作用したと考えられる推定面積を基準に、作用面積に対するピーク濃度を評価。
(注)

作用面積にRPV外表面を設定し、AWJ吐出水が作用したと考えられる推定面積の比例倍としてダスト飛散を評価。
なお、全βとしてCs134+137を設定。

平成29年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金原子炉格納容器内部詳細調査技術の開発（堆積物対策を前提とした内部詳細調査技術の現場実証） 平成31年度・令和元年度実施分成果報告
令和2年8月 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

(注) PCVガス管理設備ラインに設置した仮設モニタにおいてダスト濃度の上昇は確認されているが、PCVガス管理設備の本設モニタや建屋のモニタに有意な変動は確認されていない。

1-3. 被ばく評価 (①ダスト発生想定：ケースB)

ダスト発生シナリオ

- RPV支持構造物が**座屈**。**接続配管等**を**引っ張り**ながらRPVが**沈下**。
- **RPVに残存・付着した燃料デブリ**が、**乾燥状態**で**振動により浮遊**。

※1 (参考) 平成26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金「事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化」、IRID
 ※2近年の地震でPCV内でのダスト上昇も見られていないことから、脆化したものの落下が有意なダスト発生源になる可能性は低いと考えている。

ダスト発生想定

- RPVに残存・付着した燃料デブリとして、燃料11.2tonを設定(※1)
- その燃料デブリが全て数μmの粉状であると仮定し、全てが乾燥状態で存在すると仮定。
 (座屈・沈下時に、炉内の脆化したものが落下することは想定していない。※2)
- 振動による粉体の飛散として、粉体の加振試験によるダスト飛散率を参照設定。

$$11.2\text{ton} \times 100\% \times 100\% \times 100\% \times 1\text{E-}4\% = 11.2\text{g}$$

推定値 全て燃料 全て粉状 全て乾燥 実験値

<想定状況>

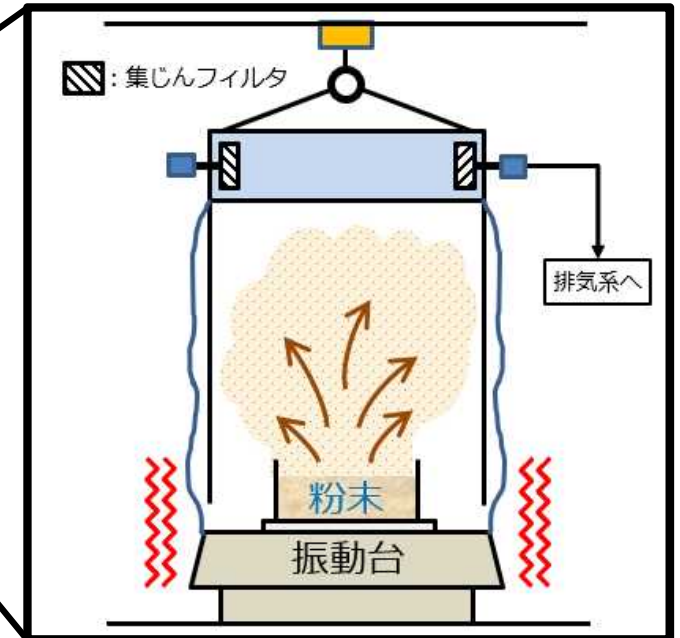
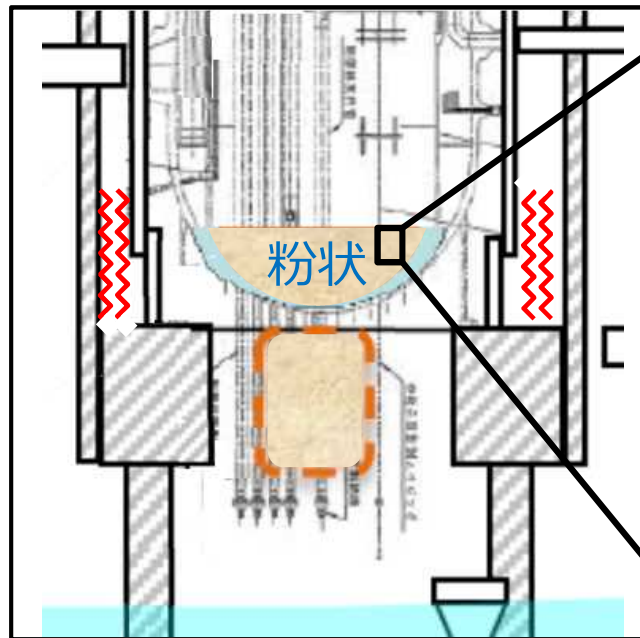
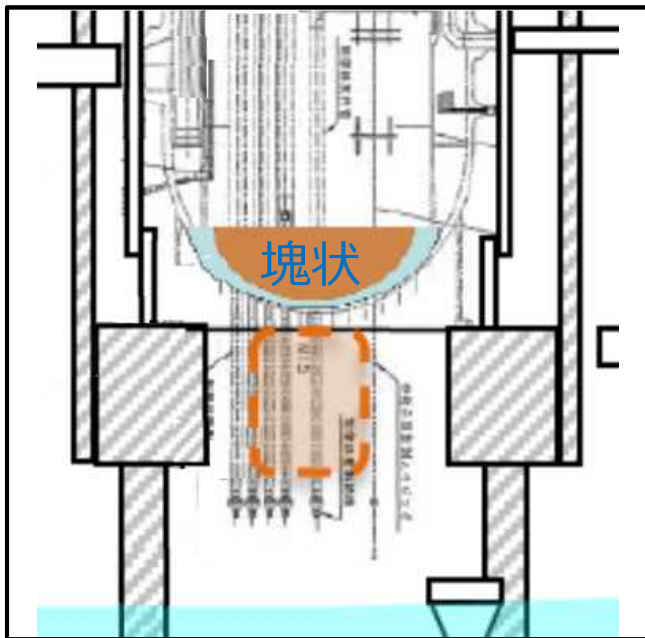
11.2tonの塊状の燃料デブリ
 全て燃料 (Cs等も全て残存)

<評価のための変換>

燃料デブリは全て数μmの粉体
 全て乾燥状態で存在
 振動により浮遊

<評価に用いた飛散率>

粉体の加振試験結果 1E-4%

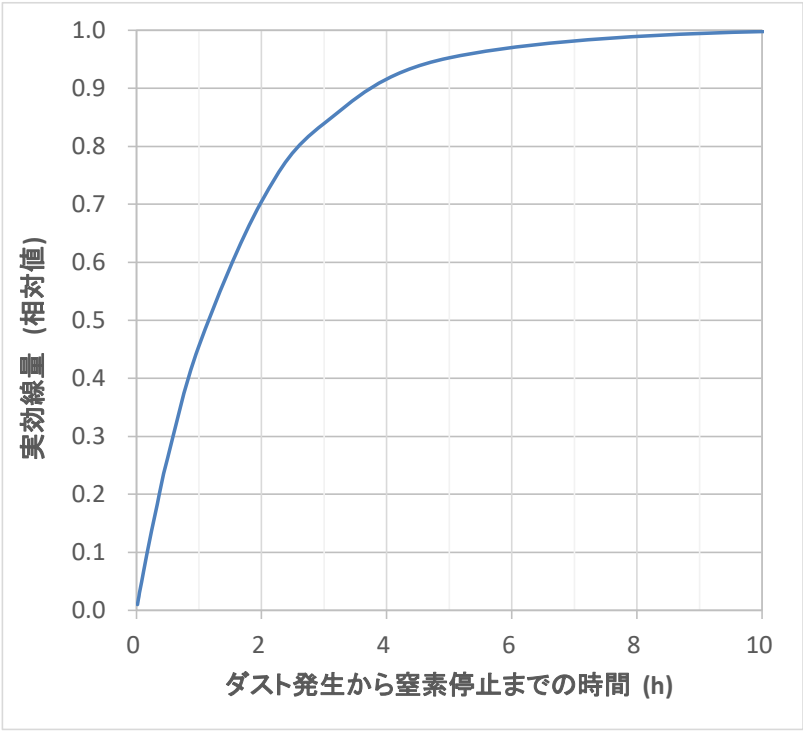


2. 窒素封入を停止した場合の被ばく低減効果

ダスト発生から窒素封入停止までの時間による被ばく線量：

- 窒素封入停止時間に対する敷地境界での実効線量の抑制効果（下の図表参照）
- 被ばく低減効果が得られるよう可能な限り窒素停止時間を早める方策を検討(ALARP)

ダスト発生から窒素封入停止までの時間		実効線量 (相対値)	被ばく低減効果
3 分	(= 0.05 h)	0.030	約 1/33
5 分	(= 0.08 h)	0.049	約 1/20
10 分	(= 0.17 h)	0.10	約 1/10
30 分	(= 0.50 h)	0.26	約 1/4
60 分	(= 1 h)	0.46	約 1/2
120 分	(= 2 h)	0.70	約 1/ 1.4
180 分	(= 3 h)	0.84	約 1/ 1.2
600 分	(= 10 h)	1.00	約 1/1



3-1. PCV大開口発生時の被ばく評価への影響

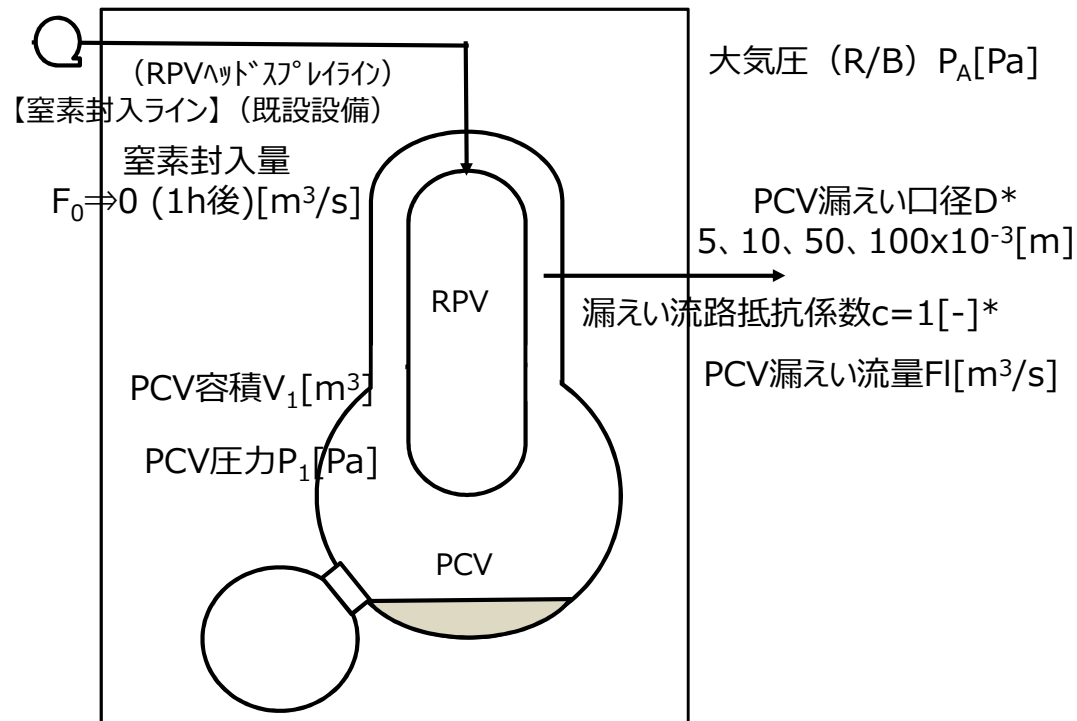
	小開口 ・正圧時に圧力が立つ状況	大開口 ・正圧時に圧力が立たない状況
気密性	あり	なし
漏えい箇所捕集効果*	考慮できる DF10	考慮しない DF1
容器による保持効果	考慮できる	考慮できる
被ばく評価への影響	0.1倍以下 (圧力依存の漏えい流量)	1倍 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">今回の被ばく評価の想定</div>

※原子力発電技術機構、「重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する総括報告書」、平成15年3月

3-2. PCV小開口時の被ばく評価への影響 (1/2)

- PCV漏えい口径*を5～100mmと変化させ、事象発生後および1h後の窒素封入停止によるPCV圧力と漏えい流量の変化を確認した。
- PCV開口部が小さい場合、開口部からの漏えい流量は窒素封入によって加圧されるPCV圧力と、PCV外の圧力の差圧に起因した流量となる。

<評価モデル>



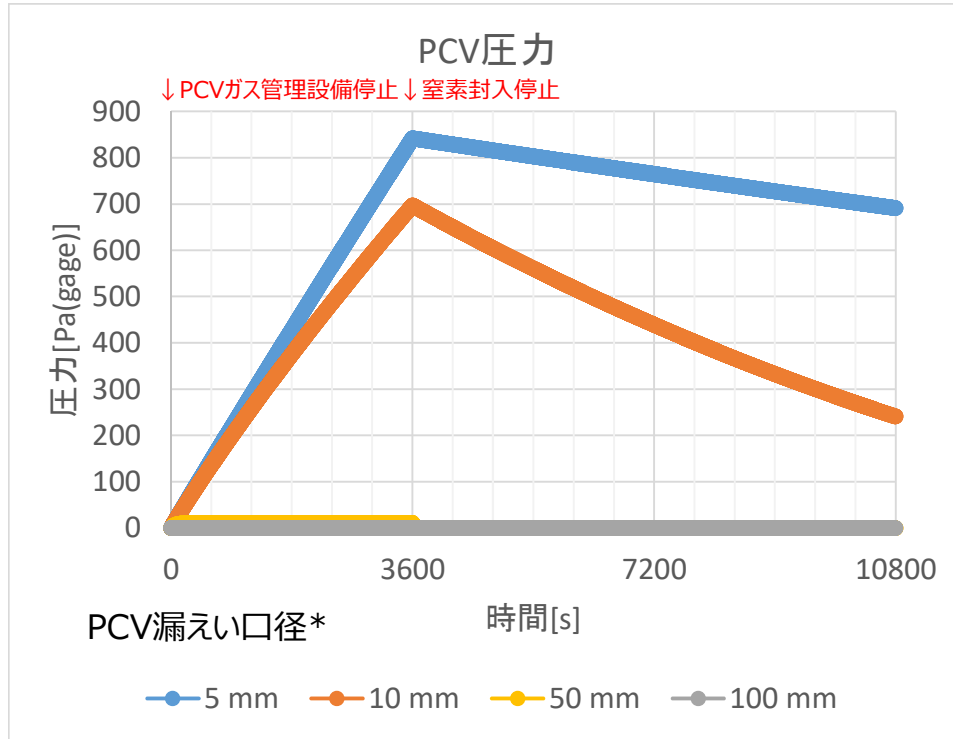
<支配方程式>

$$F_l(t) = c \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1(t) - P_A)}$$

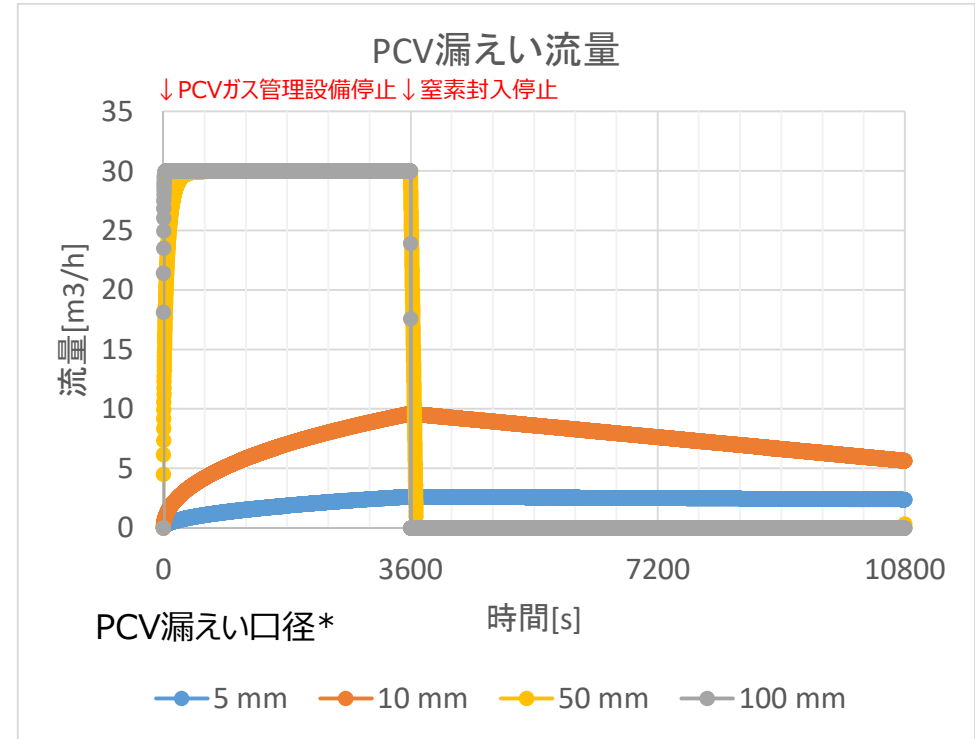
$$\Delta P_1(t) = \frac{\{F_0(t) - F_t(t)\} \Delta t}{V_1} P_1(t)$$

*今回の評価では、口径サイズに対するPCV圧力・漏えい流量の応答を見ることを目的としていることから、簡便のため流路抵抗 $c=1$ とした。従って、実際のPCVの圧力・流量や口径を評価している訳ではない。漏えい流量は大きめの評価となっている。

<PCV圧力>



<PCV漏えい流量>



- ✓ PCV漏えい口径が比較的小さい場合は、PCVの加圧・減圧に時間を要し、大開口の場合と比較して事象初期の漏えい流量が小さくなる。
- ✓ PCV漏えい口径が比較的大きい場合は、PCVはほぼ加圧されず、大開口の場合と比較しても漏えい流量はほぼ同じ。

<時刻毎の漏えい総量と被ばく評価への影響>

PCV漏えい口径*[mm]	1h時点での漏えい総量[m3]	2h時点での漏えい総量[m3]	3h時点での漏えい総量[m3]
5	1.8	4.4	6.8
10	6.6	15.2	21.9
50	29.6	30.0	30.0
100	30.0	30.0	30.0
大開口	30	30	30

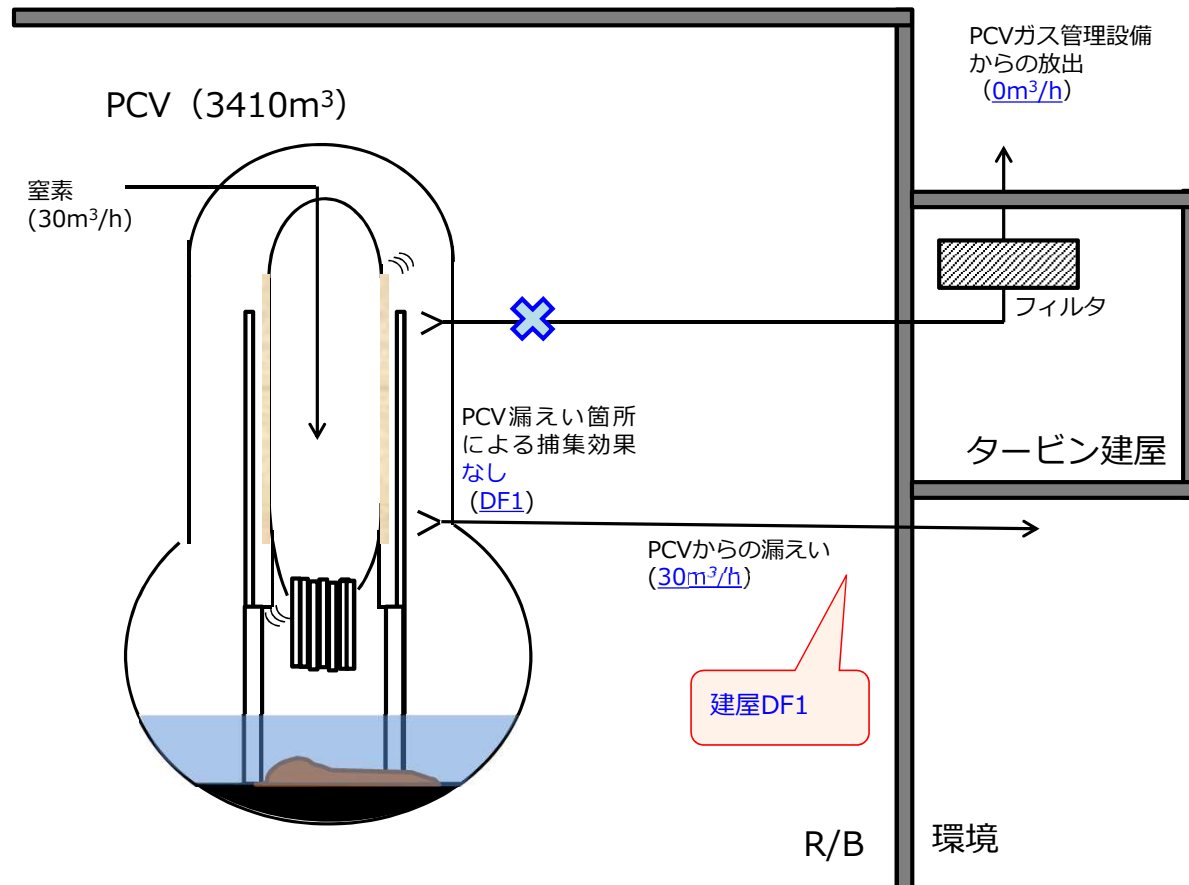
- ✓ 例えば、口径*5mm、2h時点での被ばく線量は、大開口時の評価の4.4/30倍となる見込み（PCVダスト濃度も低下する見込みであることから、保守的な想定）であり、漏えい口径が小さい場合には被ばく線量は小さくなると考えている。
- ✓ 漏えい箇所での捕集効果も加味すると、更に1/10倍の効果がある。

*今回の評価では、口径サイズに対するPCV圧力・漏えい流量の応答を見ることを目的としていることから、簡便のため流路抵抗 $c=1$ とした。従って、実際のPCVの圧力・流量や口径を評価している訳ではない。漏えい流量は大きめの評価となっている。

ダスト発生シナリオ

- RPV支持構造物が**座屈**。**接続配管等**を**引っ張り**ながらRPVが**沈下**。
- **構造物の表面汚染物**が、**表面湿潤状態**で**こすられて剥離**。

評価モデル

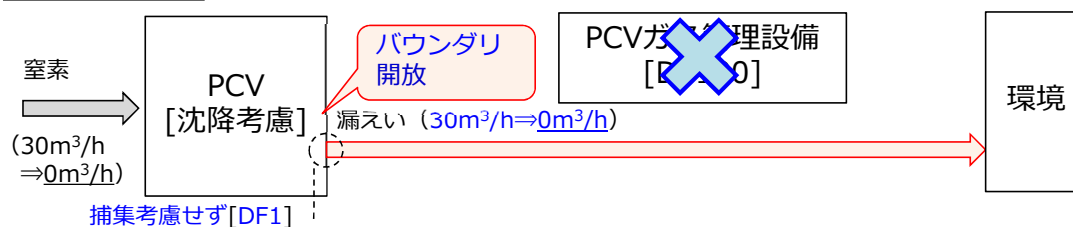


<PCV内のダスト飛散想定>

- ✓ PCV内は湿潤状態となっているため、PCV内のダスト濃度の増加は限定的※と考えられる。

※ 乾燥状態でのダスト飛散の実例として、2021年2月および2022年3月の地震（双葉町・大熊町：震度6弱）時の1・2号機の原子炉建屋および1～3号機のタービン建屋内のダスト濃度が、通常の変動幅より1桁程度の一時的な増加に留まったことを踏まえると、湿潤状態では同程度以下と想定。また、同地震時におけるPCVガス管理設備のダストモニタに有意な上昇がないことを確認。

給排気量収支 [窒素封入停止時間：1h]



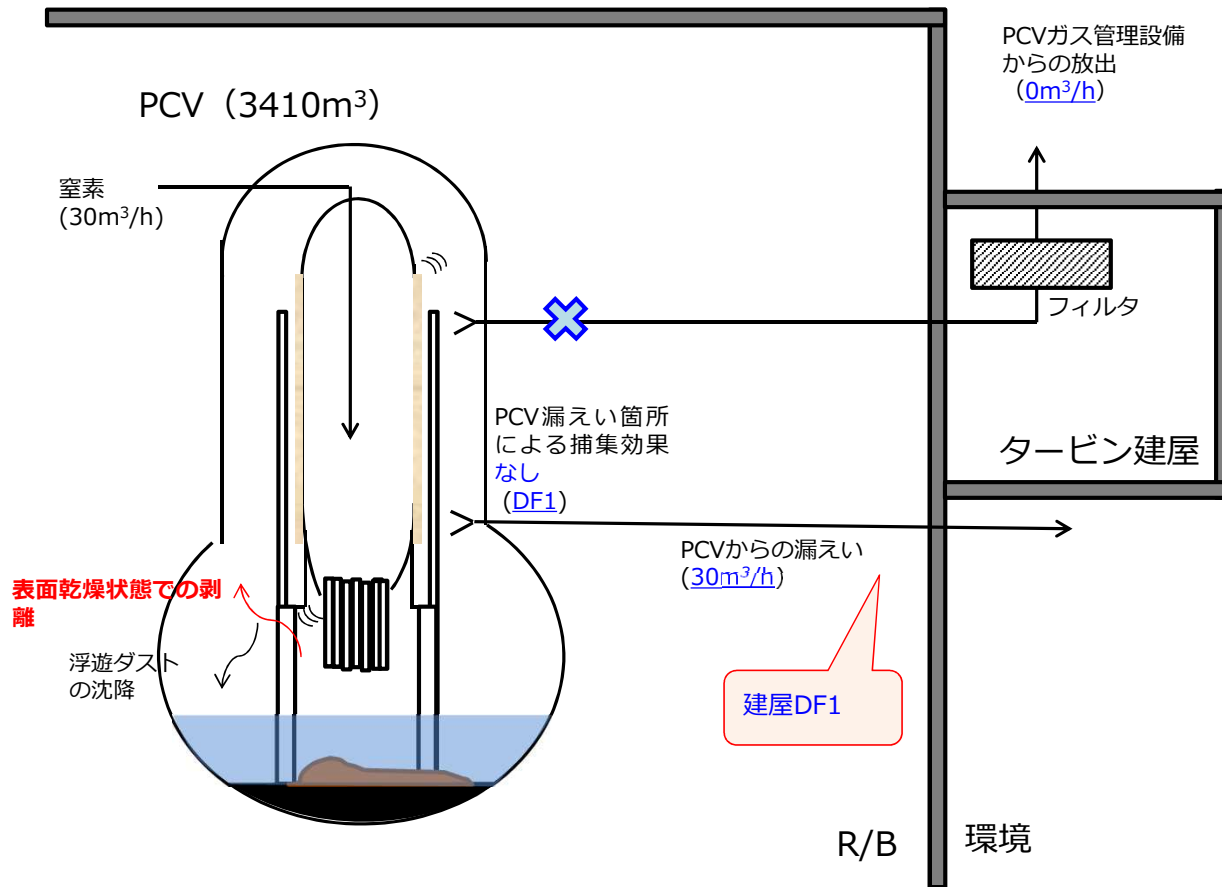
- ダスト発生源
 - 影響を想定する構造物表面の汚染密度
 - 1号機AWJの全β最大ピーク濃度（約 $2.7E-2Bq/cm^3$ ）を記録した作業箇所を基準として汚染密度を想定
（密度を特定することはできないので、作用面積に応じてダスト飛散を想定）
- 給排気条件
 - 窒素封入継続： $30m^3/h$ （1h）
 - PCVガス管理設備トリップ： $0m^3/h$ （バウンダリ開放）
- 低減効果
 - 漏えい箇所捕集効果DF1（バウンダリ開放により低減効果無し）
 - 放出経路での低減割合（PCV内ダスト沈着を考慮）
- 被ばく経路
 - 放射性雲中核種からの外部被ばく、吸入による内部被ばく
 - 地表沈着核種からの外部被ばく、再浮遊した核種の吸入による内部被ばく

【参考】 ケースA-1 <評価体系>

ダスト発生シナリオ

- RPV支持構造物が**座屈**。**接続配管等**を**引っ張り**ながらRPVが**沈下**。
- **構造物の表面汚染物**が、**表面乾燥状態**で**こすられて剥離**。

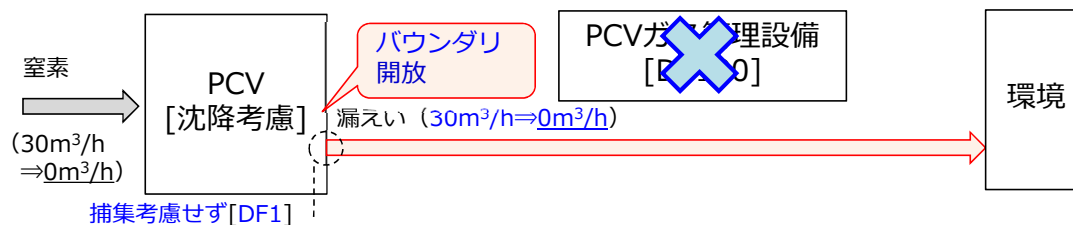
評価モデル



<PCV内のダスト飛散想定>

- ✓ 1号機AWJ時の最大ピーク濃度を基準に、作用面積に応じてダスト飛散を想定
- ✓ 発生したダストは、瞬時にPCV内に均一拡散するものと仮定

給排気量収支 [窒素封入停止時間：1h]

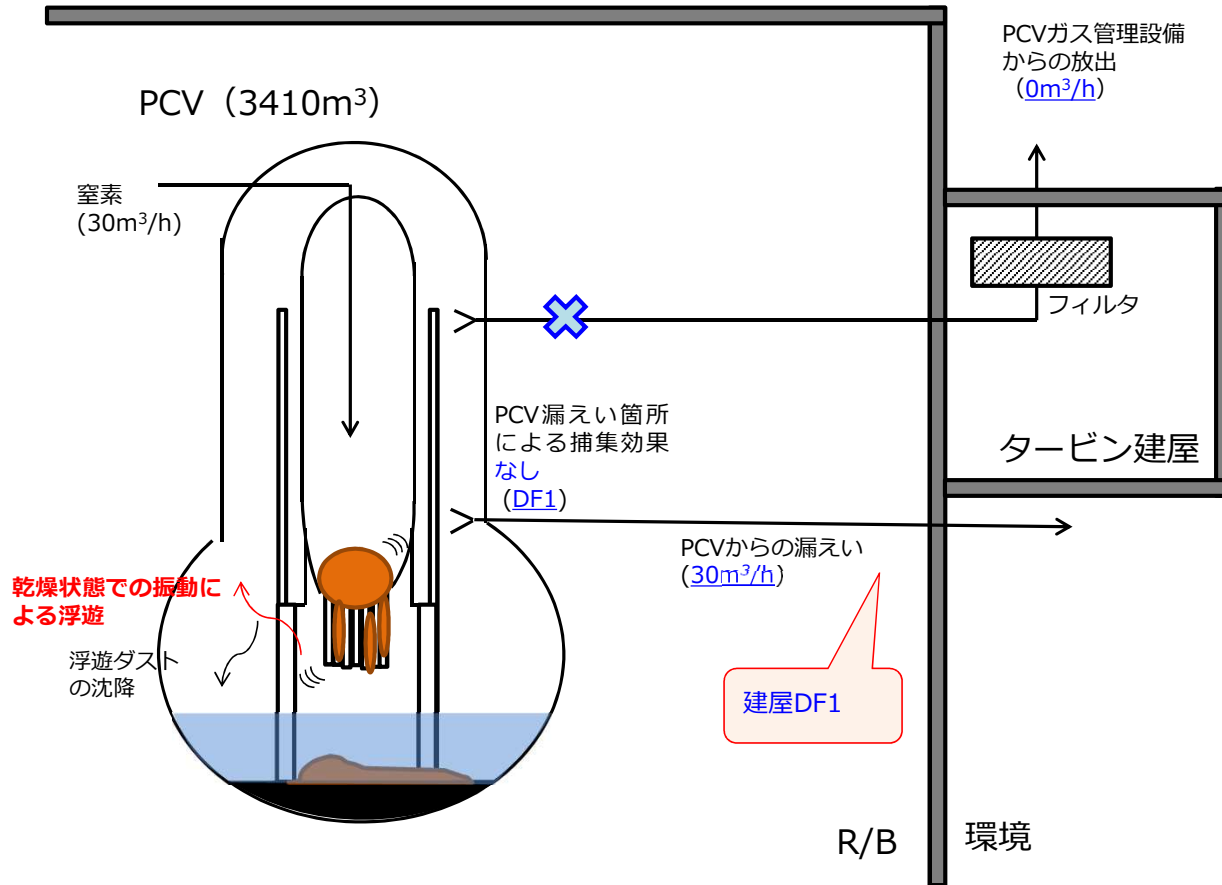


- ダスト発生源
 - 影響を想定する燃料デブリ
 - RPV下部およびCRDハウジングに残存・付着した燃料デブリ
→評価上は燃料**11.2ton**を想定（構造物等は含まない）
 - 燃料デブリの核種想定
 - 電力中央研究所廃止措置ハンドブック記載の55核種
（セシウム等の環境に放出された核種も保守的に全量残存しているものと想定）
 - 1号機平均燃焼度25.8GWd/t 12年減衰
- 給排気条件
 - 窒素封入継続：30m³/h（1h）
 - PCVガス管理設備トリップ：0m³/h（バウンダリ開放）
- 低減効果
 - 漏えい箇所捕集効果DF1（バウンダリ開放により低減効果無し）
 - 放出経路での低減割合（PCV内ダスト沈着を考慮）
- 被ばく経路
 - 放射性雲中核種からの外部被ばく、吸入による内部被ばく
 - 地表沈着核種からの外部被ばく、再浮遊した核種の吸入による内部被ばく

ダスト発生シナリオ

- RPV支持構造物が**座屈**。**接続配管等を引っ張り**ながらRPVが**沈下**。
- **RPVに残存・付着した燃料デブリ**が、**乾燥状態**で**振動により浮遊**。

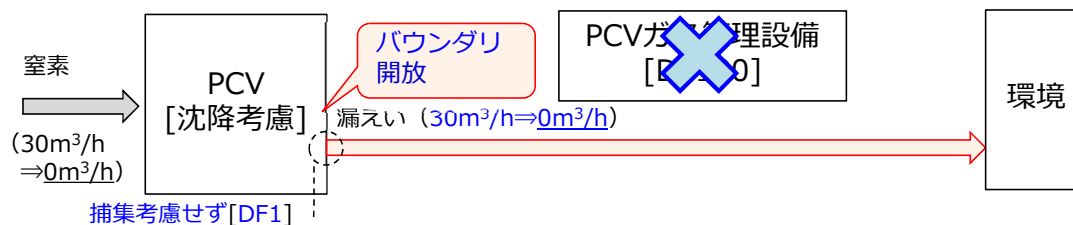
評価モデル



<PCV内のダスト飛散想定>

- ✓ 乾燥している箇所が存在していると仮定
- ✓ 乾燥箇所にRPVに残存・付着した燃料デブリが粉として存在しているものと仮定
- ✓ 振動による粉の飛散については、燃料デブリを想定した微粉末（数 μm 粒子程度）加振試験で得られた1E-4%を参照設定
- ✓ 発生したダストは、瞬時にPCV内に均一拡散するものと仮定

給排気量収支 [窒素封入停止時間：1h]

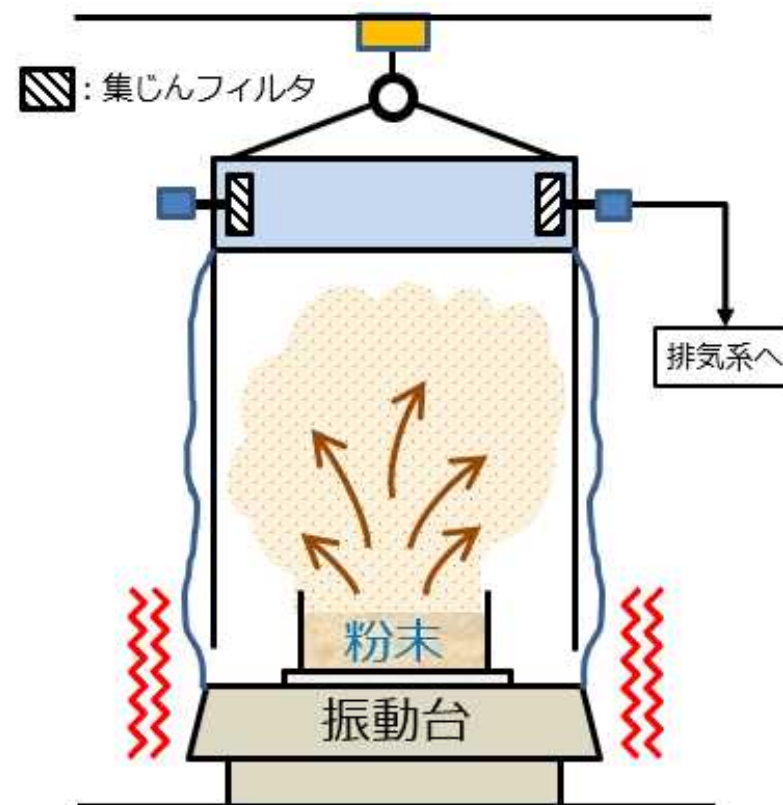


粉状の燃料デブリを想定した粉体加振試験（自主試験）

静置された粉末について、微細振動を加えた際に粉末が気中に浮遊する割合を試験により確認。

振動

- 粒径 μm オーダーのアルミナまたは酸化タングステン粉末
- 水平または垂直に加振
(最大加速度約 11m/s^2 、周期 0.1s 前後)
- 空力等価径 $10\mu\text{m}$ 粒子の終端速度を上回る上昇流流速で回収
- 粉末堆積高さ 4cm
- 加振時間 250s



飛散率 (ARF x RF) を「フィルタ集じん重量/装荷粉体重量」と定義。
全てのケースで $1\text{E}-4\%$ 以下の飛散率となった。
垂直加振より水平加振の方が飛散率は高い傾向。
比重が小さく、粒径が小さいほど飛散率は高い傾向。

- 事象発生から時間 t (h) までに、環境へ放出される放射エネルギー $Q_R(t)$ (Bq) :

$$Q_R(t) = A_0 \times \frac{\frac{F}{V_{PCV}}}{\lambda_d + \frac{F}{V_{PCV}}} \times \left\{ 1 - \exp\left(-\left(\lambda_d + \frac{F}{V_{PCV}}\right)t\right) \right\} \quad (\ast 1)$$

ここで、

- A_0 : 事象発生初期のPCV内浮遊ダストの放射エネルギー(Bq)
- V_{PCV} : PCV体積(m^3) . . . 3410 (m^3)
- F : 窒素封入量(m^3/h) . . . 30 (m^3/h)
- λ_d : ダスト低減率 (1/h) . . . 0.6 (1/h) ($\ast 2$)

($\ast 1$) 事象発生から時間 t (h)経過後のPCV内の浮遊ダスト放射エネルギー $A(t)$ (Bq)は、窒素封入による押し出し率(F/V_{PCV})とダスト低減率(λ_d)により減少し、以下の式で表す。

$$A(t) = A_0 \times \exp\left(-\left(\lambda_d + \frac{F}{V_{PCV}}\right)t\right) \quad \dots (1)$$

PCV内に浮遊したダスト放射エネルギー $A(t)$ が、窒素封入による押し出し率(F/V_{PCV})で環境へ放出されることから、単位時間あたりに環境へ放出される放射エネルギーの変化は、以下の式で表わされる。

$$\frac{Q_R}{dt} = \left(\frac{F}{V_{PCV}}\right)A(t) \quad \dots (2)$$

(2)式に(1)式を代入し、積分すると環境へ放出される放射エネルギー $Q_R(t)$ の式が得られる。

($\ast 2$) 1号機AWJ作業時のダスト濃度変化 (3.5時間で1桁程度減少と評価) より設定

- 事象発生初期のPCV内浮遊ダスト濃度 (Bq/cm³)

核種	ダスト濃度 (Bq/cm ³)
Cs-134	1.1E+01
Cs-137	7.5E+01

- 環境へ放出される放射エネルギー(Bq)

核種	放出量 (Bq)
Cs-134	2.4E+08
Cs-137	1.7E+09

- 事象発生初期のPCV内浮遊ダスト濃度 (Bq/cm³)

No.	核種	ダスト濃度 (Bq/cm ³)
1	H-3	2.2E-02
2	Be-10	3.0E-10
3	C-14	8.4E-06
4	S-35	0.0E+00
5	Cl-36	0.0E+00
6	Ca-41	0.0E+00
7	Mn-54	0.0E+00
8	Fe-55	0.0E+00
9	Fe-59	0.0E+00
10	Co-58	0.0E+00
11	Co-60	0.0E+00
12	Ni-59	0.0E+00
13	Ni-63	0.0E+00
14	Zn-65	0.0E+00
15	Se-79	3.0E-05
16	Sr-90	4.8E+00
17	Zr-93	1.5E-04
18	Nb-94	1.2E-08
19	Mo-93	0.0E+00
20	Tc-99	1.1E-03

No.	核種	ダスト濃度 (Bq/cm ³)
21	Ru-106	8.5E-03
22	Ag-108m	1.1E-08
23	Cd-113m	1.2E-03
24	Sn-126	5.2E-05
25	Sb-125	2.8E-02
26	Te-125m	6.4E-03
27	I-129	2.6E-06
28	Cs-134	1.8E-01
29	Cs-137	6.5E+00
30	Ba-133	9.6E-07
31	La-137	0.0E+00
32	Ce-144	1.7E-03
33	Pm-147	5.9E-01
34	Sm-151	2.5E-02
35	Eu-152	1.4E-04
36	Eu-154	1.3E-01
37	Ho-166m	1.3E-07
38	Lu-176	0.0E+00
39	Ir-192m	0.0E+00
40	Pt-193	0.0E+00

No.	核種	ダスト濃度 (Bq/cm ³)
41	U-234	1.4E-04
42	U-235	3.5E-06
43	U-236	2.3E-05
44	U-238	3.4E-05
45	Np-237	2.1E-05
46	Pu-238	1.6E-01
47	Pu-239	2.8E-02
48	Pu-240	3.8E-02
49	Pu-241	5.1E+00
50	Pu-242	1.3E-04
51	Am-241	1.4E-01
52	Am-242m	5.0E-04
53	Am-243	1.1E-03
54	Cm-242	4.1E-04
55	Cm-244	8.5E-02

- 環境へ放出される放射能量(Bq)

No.	核種	放出量 (Bq)
1	H-3	4.8E+05
2	Be-10	6.7E-03
3	C-14	1.9E+02
4	S-35	0.0E+00
5	Cl-36	0.0E+00
6	Ca-41	0.0E+00
7	Mn-54	0.0E+00
8	Fe-55	0.0E+00
9	Fe-59	0.0E+00
10	Co-58	0.0E+00
11	Co-60	0.0E+00
12	Ni-59	0.0E+00
13	Ni-63	0.0E+00
14	Zn-65	0.0E+00
15	Se-79	6.8E+02
16	Sr-90	1.1E+08
17	Zr-93	3.4E+03
18	Nb-94	2.6E-01
19	Mo-93	0.0E+00
20	Tc-99	2.5E+04

No.	核種	放出量 (Bq)
21	Ru-106	1.9E+05
22	Ag-108m	2.4E-01
23	Cd-113m	2.7E+04
24	Sn-126	1.2E+03
25	Sb-125	6.3E+05
26	Te-125m	1.4E+05
27	I-129	5.8E+01
28	Cs-134	4.0E+06
29	Cs-137	1.5E+08
30	Ba-133	2.2E+01
31	La-137	0.0E+00
32	Ce-144	3.8E+04
33	Pm-147	1.3E+07
34	Sm-151	5.7E+05
35	Eu-152	3.2E+03
36	Eu-154	2.8E+06
37	Ho-166m	3.0E+00
38	Lu-176	0.0E+00
39	Ir-192m	0.0E+00
40	Pt-193	0.0E+00

No.	核種	放出量 (Bq)
41	U-234	3.1E+03
42	U-235	8.0E+01
43	U-236	5.1E+02
44	U-238	7.6E+02
45	Np-237	4.7E+02
46	Pu-238	3.6E+06
47	Pu-239	6.4E+05
48	Pu-240	8.5E+05
49	Pu-241	1.1E+08
50	Pu-242	2.8E+03
51	Am-241	3.2E+06
52	Am-242m	1.1E+04
53	Am-243	2.5E+04
54	Cm-242	9.3E+03
55	Cm-244	1.9E+06

- 放射性雲中の核種からの外部被ばく

$$H_{\gamma} = K \cdot E_{\gamma} / 0.5 \cdot D / Q \cdot Q_R \cdot 1000$$

H_{γ} : 放射性雲中の核種からの γ 線による外部被ばく実効線量[mSv]

K : 空気カーマから実効線量への換算係数[Sv/Gy] (=1)

E_{γ} : γ 線の実効エネルギー[MeV] (※1)

D/Q : 相対線量[Gy/Bq] (=6.1E-19)

Q_R : 放射性核種の大気放出量 (各経路の DF を考慮した合計) [Bq]

- 地表沈着した核種からの外部被ばく

$$G_{ex} = K_{ex} \cdot \chi / Q \cdot V \cdot f \cdot Q_R \cdot T \cdot 1000$$

G_{ex} : 地表沈着した核種からの γ 線による外部被ばく実効線量[mSv]

K_{ex} : 外部被ばく実効線量換算係数[(Sv/s)/(Bq/m²)] (※2)

V : 沈降速度[m/s] (=0.01)

f : 残存割合[-]

T : 被ばく時間[s] (=365×24×3600)

- 放射性雲中の核種の吸入による内部被ばく

$$H_I = K_{in} \cdot R_1 \cdot \chi / Q \cdot Q_R$$

H_I : 放射性雲中の核種の吸入摂取による内部被ばく実効線量[mSv]

K_{in} : 内部被ばく実効線量係数[mSv/Bq] (※1)

R_1 : 呼吸率[m³/s] (=1.2 [m³/h] /3600)

χ/Q : 相対濃度[s/m³] (=6.0E-5)

- 地表沈着した核種から再浮遊した核種の吸入による内部被ばく

$$G_{in} = R_2 \cdot K_{in} \cdot \chi / Q \cdot V \cdot f \cdot F \cdot Q_R \cdot T$$

G_{in} : 地表沈着した核種から再浮遊した核種の吸入摂取による内部被ばく実効線量[mSv]

R_2 : 呼吸率[m³/s] (=22.2 [m³/d] / (24×3600))

F : 再浮遊率[m⁻¹] (=1E-6)

(※1) (財) 電力中央研究所「廃止措置工事環境影響評価ハンドブック (第3次版)」(平成19年3月)

(※2) EPA-402-R-93-081 「FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 12 EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER, AND SOIL」 Keith F. Eckerman and Jeffrey C. Ryman September 1993

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

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**：PCV均圧※1、窒素封入停止策※1、2、大型カバーによるPCVからの直接放出量の低減

※1 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

※2 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。

2. RPVペDESTAL支持機能低下における機動的対応

■ 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】 RPV・PCV冷却設備の機動的対応（1）

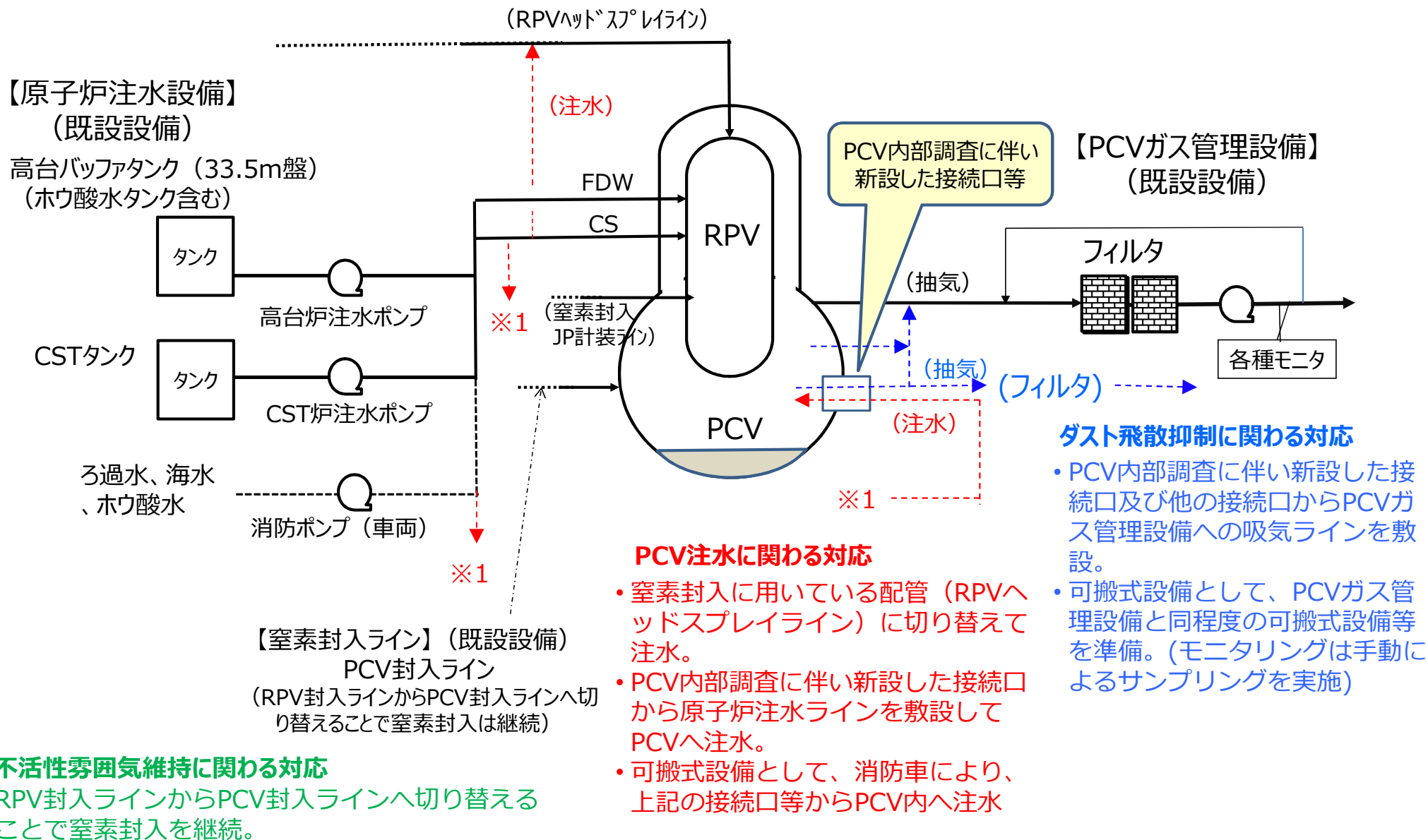
【RPVペDESTAL支持機能低下により想定される影響に対する機動的対応】

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 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)
		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。			
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

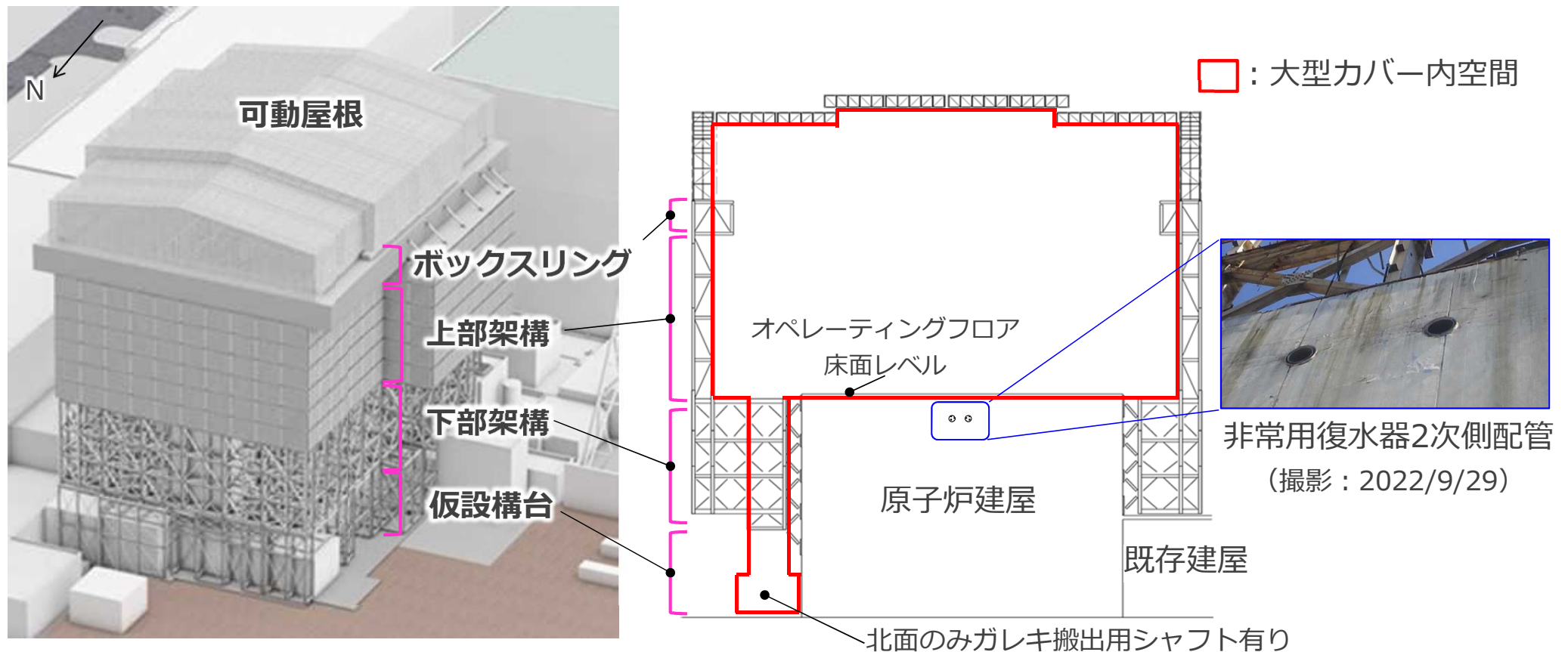
【参考】 RPV・PCV冷却設備の機動的対応（2）

機動的対応イメージ 【窒素封入ライン】（既設設備）



【参考】 1号機大型カバーの概要

- 1号機の燃料取り出しにあたり、ダスト飛散対策の信頼性向上等の観点から原子炉建屋を覆う大型カバーを設置し、その中でがれき撤去を行う計画
- 大型カバーは、オペレーティングフロア及びガレキ搬出を行うシャフト部を覆い、その中で発生するダストの飛散抑制を図るため、可能な限り隙間が少ない構造
- 非常用復水器2次系配管は、大型カバーの外側に位置する



大型カバー全体の概要図

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

1. ペDESTALの支持機能喪失時の影響考察に関する補足説明

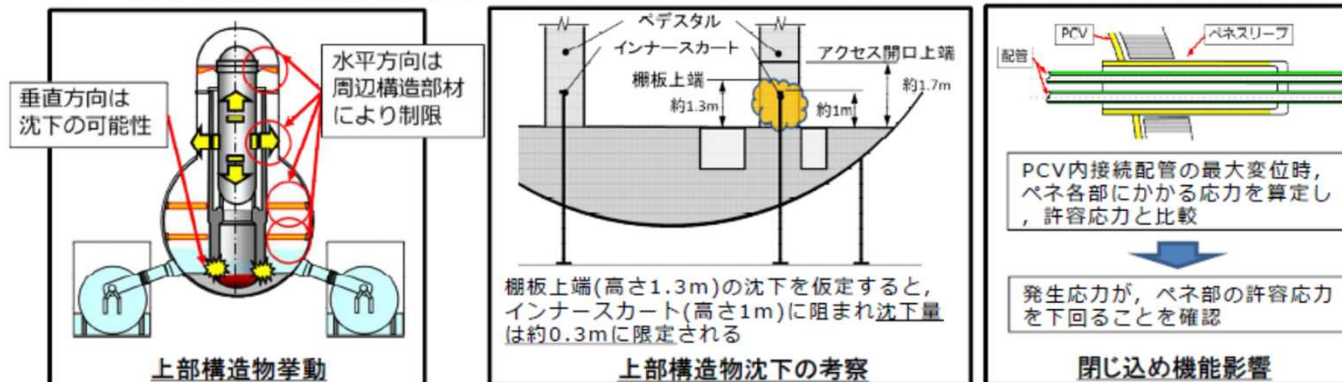
- 特定原子力施設監視・評価検討会（第107回）でお示した、1号内部調査結果を踏まえたペDESTAL機能喪失時の影響考察の内、以下の項目に関する補足説明を行う。
 - ① 上部構造物（RPV / RSW / ペDESTAL他）の沈下を仮定した場合、インナースカートに阻まれ沈下量が限定されること
→上部構造物の沈下を想定した際にインナースカートが支持に必要な構造強度を有すること
 - ② 上部構造物の沈下に伴うPCV閉じ込め機能への影響が小さい（ペネ部の損傷に至らない）こと



【参考】ペDESTALの支持機能喪失時の影響考察

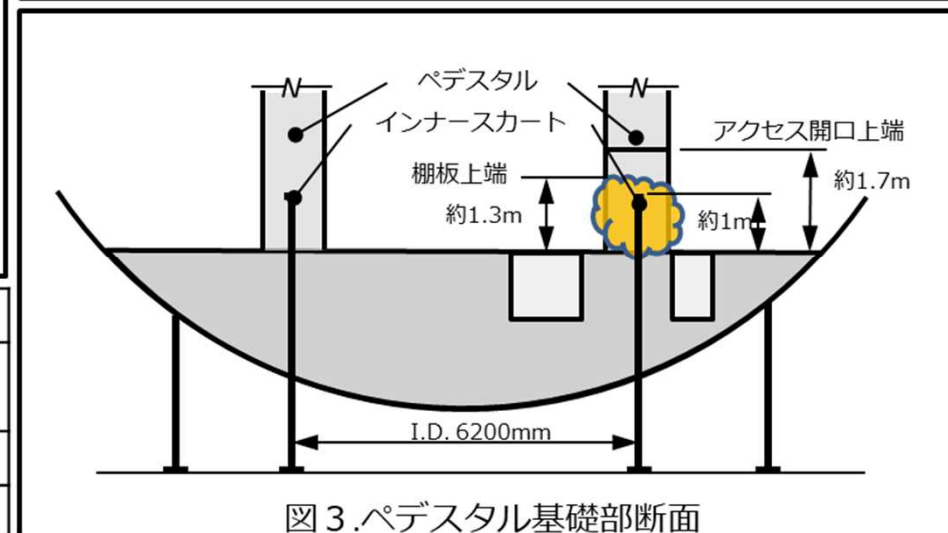
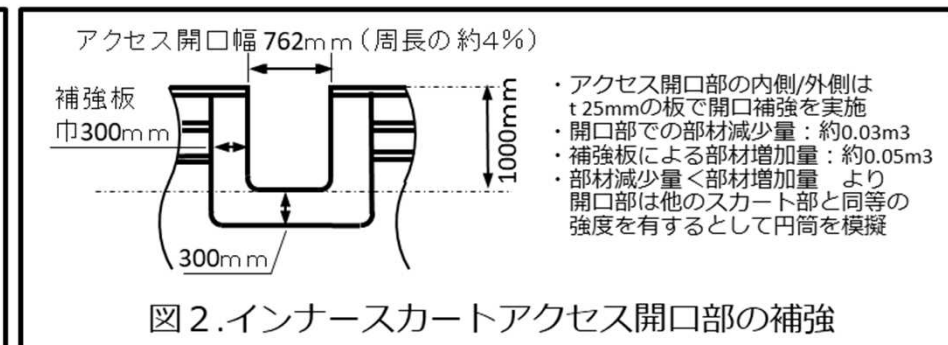
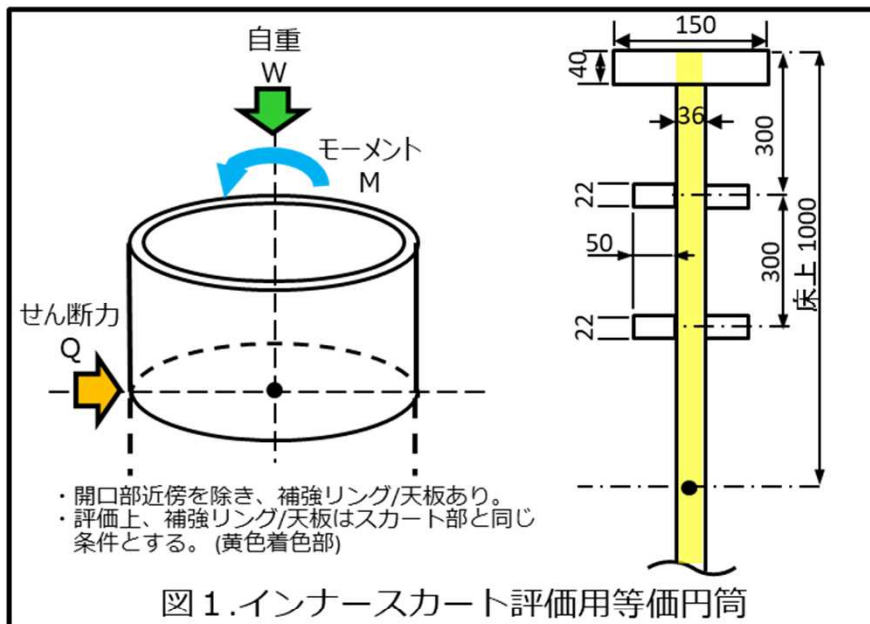
- 支持機能喪失時の上部構造物（RPV/RSW/ペDESTAL他）の挙動
 - **水平方向の移動**は周辺構造部材（バルクヘッド等）に制限*され**限定的な傾斜**に留まる見込み
 - **垂直方向の移動**は周辺構造部材による支持ができず、**沈下の可能性**は否定できない
- PCV内部調査結果を踏まえた上部構造物の沈下の考察
 - 鉄筋露出の範囲が大きいアクセス開口部近傍で、鉄筋に目立った**たわみ変形が無く**、**これまでの地震**に対し**ペDESTALの支持機能は維持**されている
 - インナースカートに有意な変形が確認されていないことから、**上部構造物の沈下を仮定した場合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応力は、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DESTAL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。

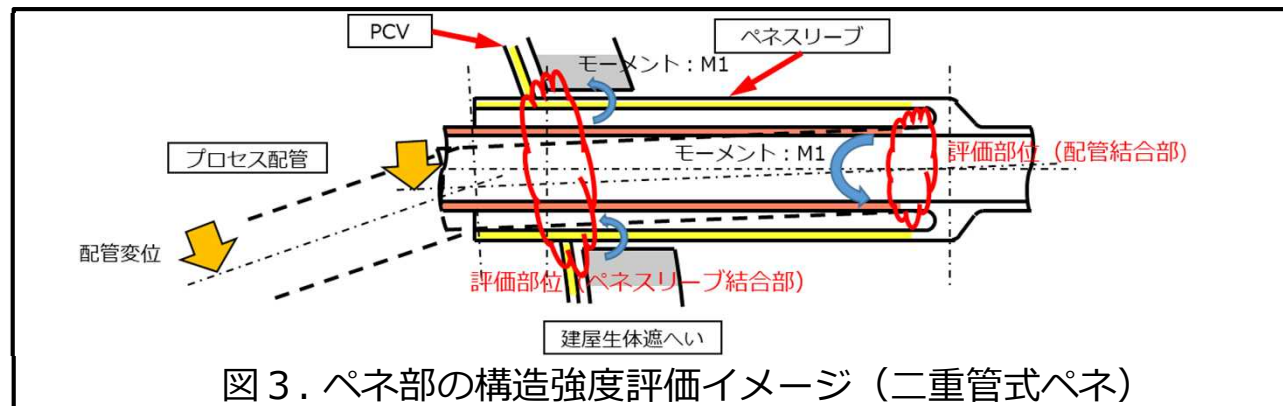
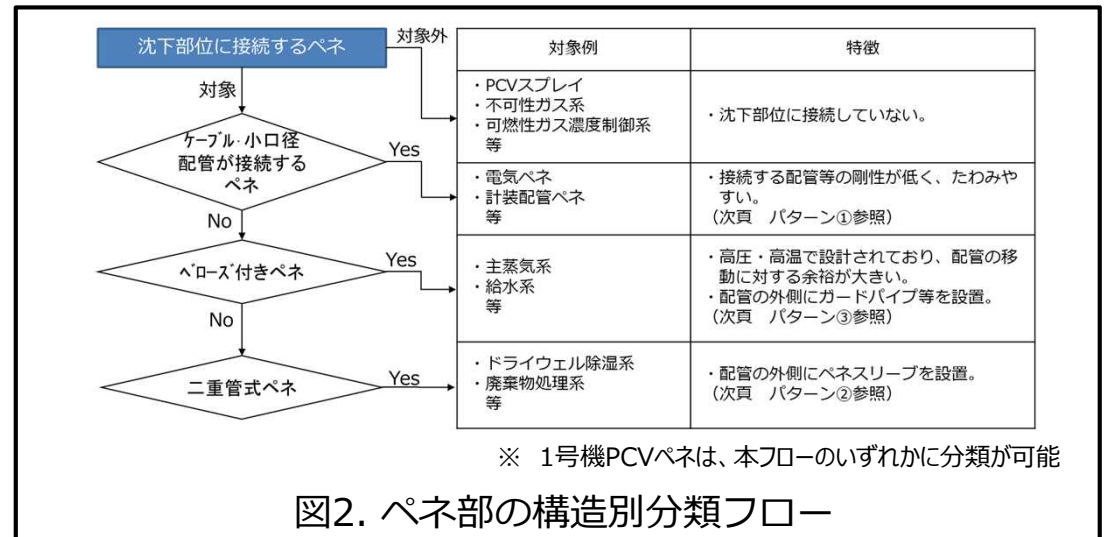
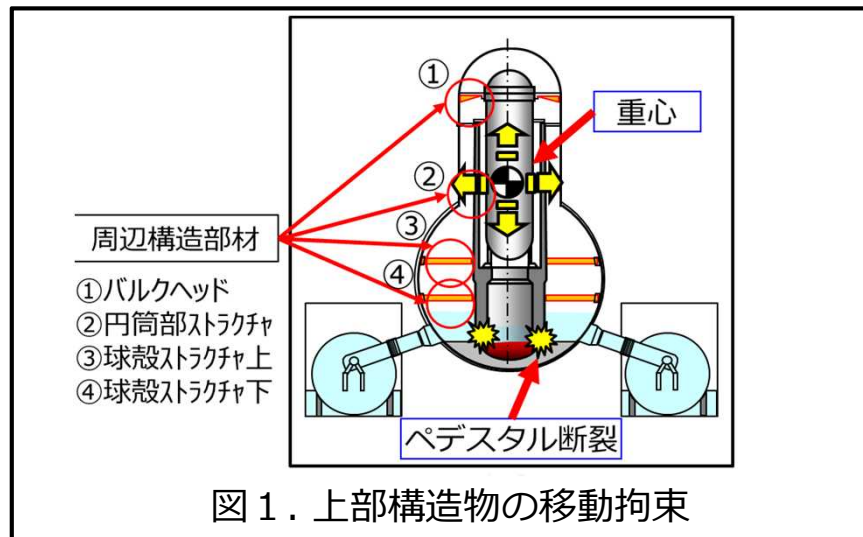
※2：自重には、地震時鉛直加速度を考慮して評価を実施。

※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】インナースカートの構造強度の概略評価内容

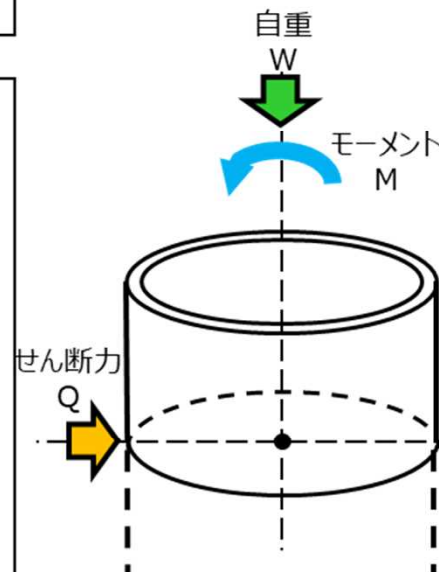
- 地震等により、上部構造物が直接応力が負荷された状態で、インナースカートの構造強度を評価。
- 評価にあたっては、以下を考慮。
 - インナースカートに負荷する荷重の範囲は、ペDESTAL上部構造物の自重、モーメント、せん断力が対象。
 - コンクリート・鉄筋等はないものとみなし、インナースカート単体での支持可否を評価。
 - インナースカートの板厚は、事故時の腐食量を保守的に考慮。
 - 上記仕様を基に、構造上、インナースカートと等価となる円筒を模擬し、構造強度を評価。
 - 構造強度の比較は、地震による「曲げ」、「自重」、「せん断」、「座屈の有無」を対象として実施。

○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

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

②自重 (地震鉛直加速度0.5g考慮) による応力

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

③せん断応力

$$\text{せん断応力 } \tau : \tau = \alpha \times Q / A$$

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

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

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

※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

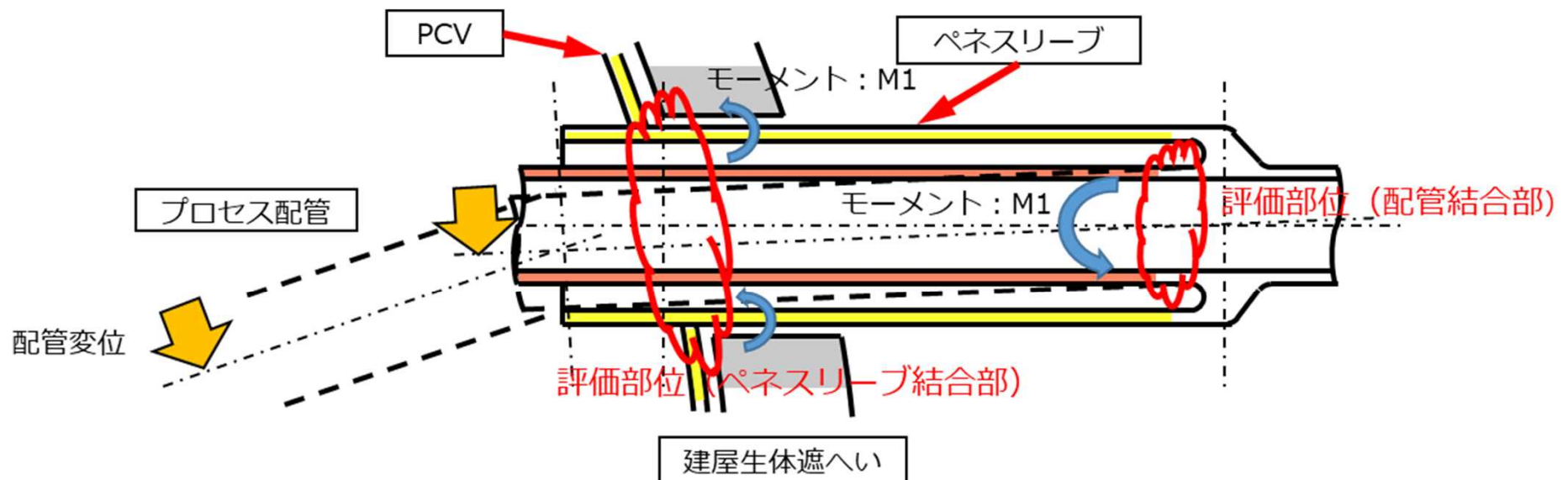
【参考】 上部構造物沈下時のペネトレーションへの影響の概略評価内容

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)

【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

○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、

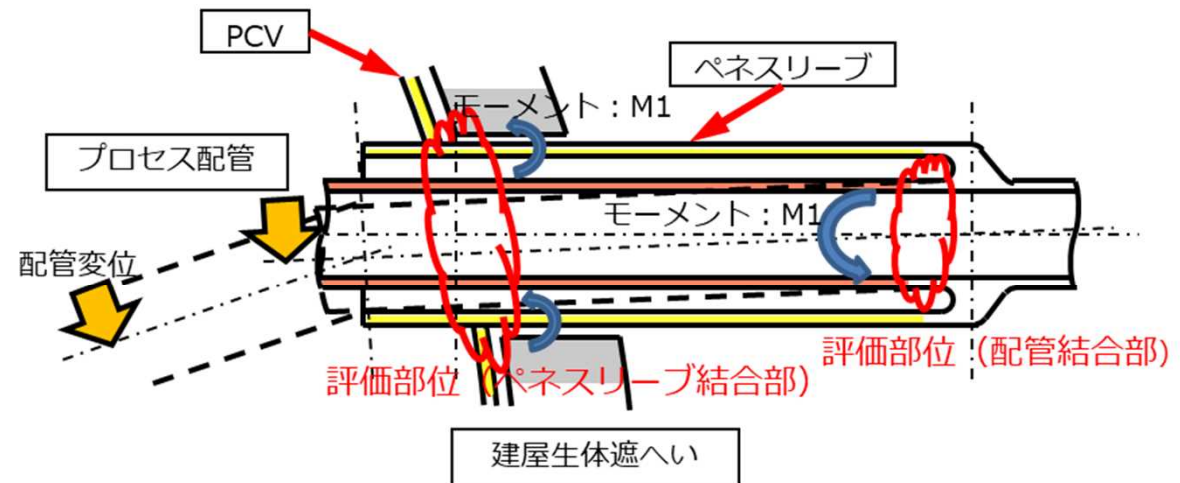
縦弾性係数 E：203,000 MPa

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

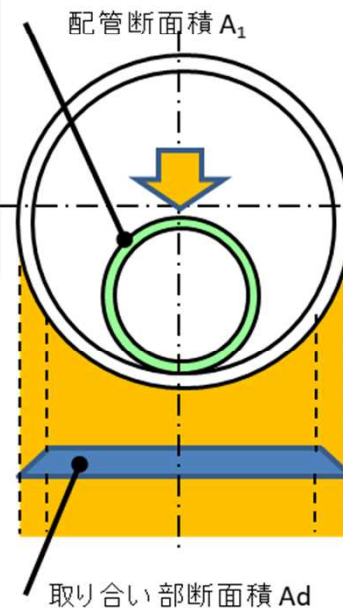
とした場合に、ペネスリーブの断面係数 Z_2 は、

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

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。