

2号機原子炉格納容器内部詳細調査 アクセスルート構築作業時の影響評価について -検討状況

2020年9月3日



東京電力ホールディングス株式会社

PCV内
ダスト
浮遊量

汚染密度

- X-6ペネ前およびPCV内の放射線量率より設定
- Cs以外にも, α , β 核種を試料分析結果に基づき設定

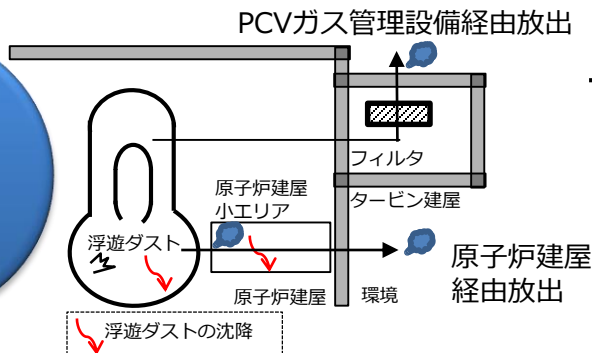
ダスト発生対象

- PCV内部調査時の映像, AWJ影響範囲確認結果, 予定作業内容に基づき設定

気相移行率

- ダスト浮遊要因毎に, DOE HANDBOOKの気相移行率を適用

放出量



通常時

- 作業全工程を対象に評価
- PCVガス管理設備経由, 原子炉建屋経由の2つの経路より放出

異常時 (バウンダリ施工箇所開放)

- 最もPCV内浮遊量が多いCRDレール切断作業を対象に評価
- 原子炉建屋経由の経路より放出

被ばく量



被ばく経路

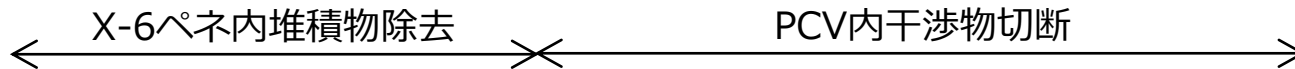
- 大気に放出される放射性核種について, 左記の4つの被ばく経路を設定し敷地境界における実効線量を評価

評価結果

敷地境界実効線量 [通常時]約 8.0×10^{-4} mSv [異常時]約 1.3×10^{-1} mSv

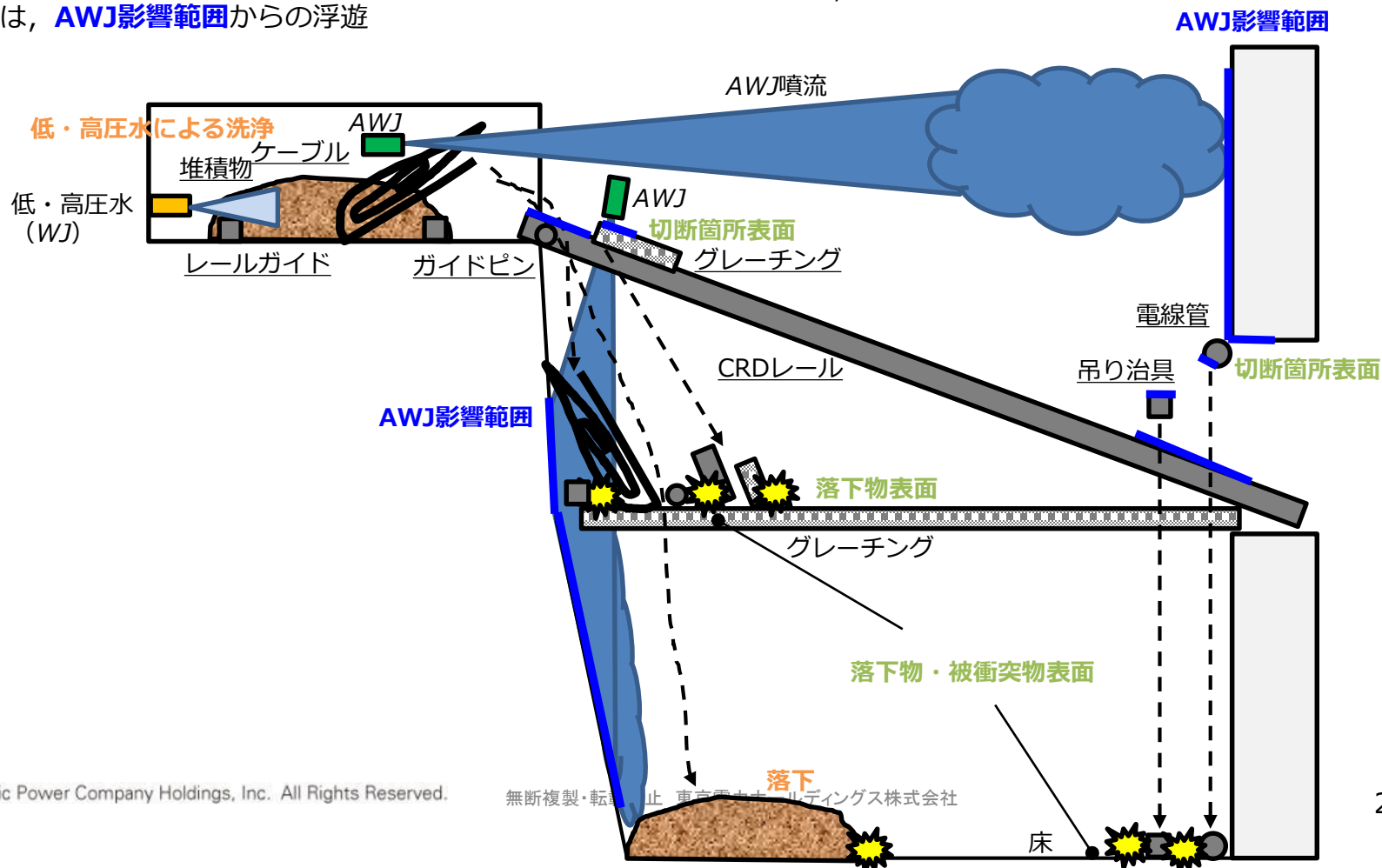
1. PCV内ダスト浮遊量 アクセスルート構築作業の概念図

■ 本作業におけるダスト浮遊については、以下のようなケースを想定して評価



- 堆積物 <低・高圧水 (WJ) による洗浄・落下>
 ✓ 堆積物の **低・高圧水による洗浄**, **落下** により浮遊
 ケーブル, レールガイド <AWJ切断/落下>
 ✓ 切断片の落下では, **被衝突物表面** から浮遊
 ✓ AWJ切断では, **AWJ影響範囲** からの浮遊

- ガイドピン, CRDレール, グレーチング, 吊り治具, 電線管
 <AWJ切断/落下>
 ✓ AWJ切断では, **切断箇所表面** と **AWJ影響範囲** からの浮遊
 ✓ 切断片の落下では, **落下物・被衝突物表面** から浮遊



1. PCV内ダスト浮遊量

(参考) 評価で考慮する対象物とダスト浮遊要因の一覧

作業ステップ		ダスト発生源	ダスト浮遊の要因
(A) X-6ペネ内			
(A)-1 X-6ペネ堆積物 洗浄/落下	堆積物	WJによる洗浄 堆積物の落下	
	PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下	
(A)-2 ケーブル 切断/落下	PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離	
	PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下	
(A)-3 レールガイド 切断/落下	PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離	
	PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下	
(B) PCV内			
(B)-1 CRDレール切断作業	(B)-1-1 CRDレール 切断/落下	CRDレール	AWJによる切断 切断片の落下
		PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下
		PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離
	(B)-1-2 ガイドピン 切断/落下	ガイドピン	AWJによる切断 切断片の落下
		PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下
		PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離
	(B)-1-3 CRDレール上 グレーチング 切断/落下	CRDレール上グレーチング	AWJによる切断 切断片の落下
		PCV下部グレーチング (被衝突物)	切断片の落下
		PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離
(B)-2 CRDレール 吊り治具 切断/落下	CRDレール吊り治具	AWJによる切断 切断片の落下	
	PCV床面 (被衝突物)	切断片の落下	
	PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離	
(B)-3 電線管 切断/落下	電線管	AWJによる切断 切断片の落下	
	PCV床面 (被衝突物)	切断片の落下	
	PCV内構造物	AWJ影響範囲の表面剥離	

通常時評価対象
(全作業)

異常時評価対象
(CRDレール
切断作業)

ダスト浮遊量[Bq]

$$\begin{aligned} &= \text{ダスト発生源の放射能濃度[Bq/g]} \left(\text{表面汚染密度[Bq/cm}^2\text{]} \right) \\ &\times \text{ダスト発生源の量[g]} \left(\text{表面積[cm}^2\text{]} \right) \\ &\times \text{気相移行率[-]} \end{aligned}$$

ダスト浮遊要因毎に設定し，評価

ダスト浮遊の要因

- X-6ペネ内堆積物のWJによる洗浄・落下
- AWJ影響範囲にある構造物の汚染表面からの剥離
- その他要因（影響小）

1. PCV内ダスト浮遊量

X-6ペネ内堆積物のWJによる洗浄・落下による浮遊

$$\text{ダスト浮遊量[Bq]} = \text{放射能濃度[Bq/g]} \times \text{堆積物量[g]} \times \text{気相移行率[-]}$$

<放射能濃度, 堆積物量>

- X-6ペネハッチ前(R/B側)の線量率実測値に基づき、X-6ペネ内砂状堆積物の放射能濃度を計算。
γ線源としてCsを想定。
- カメラ映像に基づき、ペネ管内1/2高さ、ハッチ内面から1000mmまでの堆積を想定。
- 砂状堆積物の密度は、一般的な土の密度 2g/cm^3 とする。

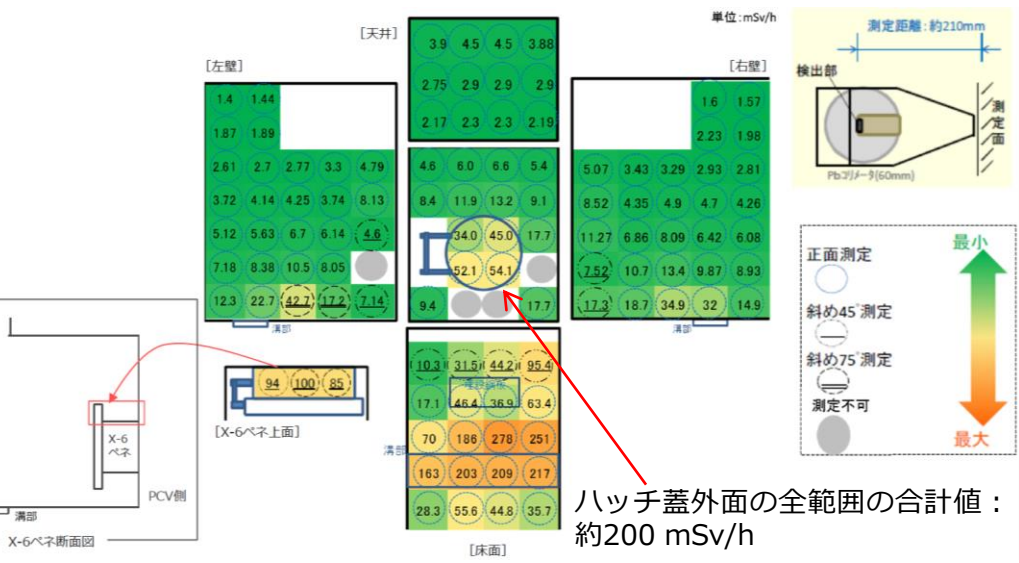


図 X-6ペネハッチ蓋外面線量測定結果

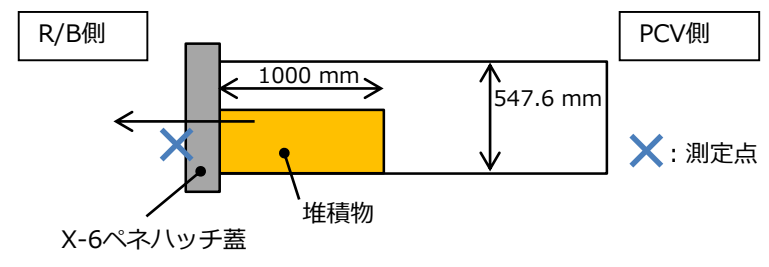


図 放射能濃度計算モデル

放射能濃度 Cs-134 : 2.8×10^6 Bq/g Cs-137 : 3.5×10^7 Bq/g	堆積物量 体積 : 1.2×10^5 cm ³ 重量 : 2.4×10^5 g
--	---

1. PCV内ダスト浮遊量

X-6ペネ内堆積物のWJによる洗浄・落下による浮遊

$$\text{ダスト浮遊量[Bq]} = \text{放射能濃度[Bq/g]} \times \text{堆積物量[g]} \times \text{気相移行率[-]}$$

<放射能濃度> (α核種, β核種の考慮)

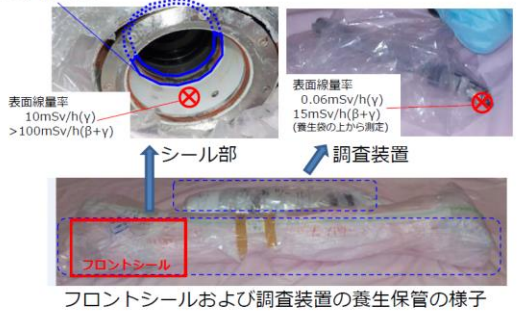
- α核種として、2号機ガイドパイプシールリングのスミアの結果に基づき、Am-241/Cs-137放射能比を1と設定。
PCV外へ放出されるまでに1/100に低減されると想定。
- β核種として、PCVガス管理システムにおける過去のPCVガス濃度測定結果に基づき、Sr-90をCs-137の放射能比25倍に設定。

【参考】2号機PCV内部調査装置のサーベイ結果



- サマリング日 : 2019年2月28日
- 表面線量率 : 左下図の箇中参照 [(γ): 1cm線量当量率, (β+γ): 70μm線量当量率]
- 表面汚染密度: フロントシール部をスミアサンプリングした試料のγ線核種分析および全α計測を実施
 - ・全α/Cs-137存在比: 8×10^{-1}
 - ・γ線核種分析の検出核種: 右下表参照
 - ・備考: スミアの表面線量率(β+γ)が高いため、サーベイ員や分析員の被ばく低減を考慮してスミアを別のスミアで再サンプリングし、相対濃度[存在比]を評価した(スミアをスミアでサンプリングする際の採取効率を設定できないため、定量評価はできない)。

スミアサンプリング



検出核種	Cs-137に対する存在比
Co-60	4×10^{-1}
Ru-106	1×10^0
Rh-106	1×10^0
Sb-125	5×10^{-1}
Cs-134	9×10^{-2}
Cs-137	-
Ce-144	5×10^{-1}
Eu-154	1×10^0
Eu-155	6×10^{-1}
Am-241	8×10^{-1}

PCV内外部のα核種の広がりに関するデータ



<Cs-137に対するα核種の存在比>

	1号機		2号機		3号機	
	2017/4 α核種分析*	6×10^{-2} [2]	2019/2 全α計測	8×10^{-1} [1]	-	-
①PCV内汚染物						
②PCVガス管理設備 フィルタ前サンプリング [1] (粒子状フィルタ) **	2016/12 全α計測	10^{-4}	2017/5 全α計測	10^{-3}	2017/4 全α計測	-
③PCV内滞留水 [3]	-	-	2013/8 α核種分析*	10^{-4}	2013/8-2015/10 α核種分析*	10^{-3}
④建屋1階瓦礫等 [3]	2013/10-2015/10 α核種分析*	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	-	-	2014/3 α核種分析*	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
⑤オベフロ瓦礫等 [3]	2015/10-2016/4 α核種分析*	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	2014/1-2014/5 α核種分析*	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	-	-

注: α核種が検出されたことのあるデータを例示。同じ測定箇所、毎回検出限界値を超える濃度が検出されている訳ではない。
*α核種分析結果のPu-238, Pu239+240, Am-241, Cm-244の合算値
**PCVガス管理設備フィルタ後の全α計測結果は1~3号機すべてND



[1]東京電力HD分析データ, <http://www.tepco.co.jp/decommission/data/daily-analysis/index-j.html>.
[2]東京電力HD, "1~3号機原子炉格納容器内部調査関連サンプリング等の分析結果" 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第56回)より算出。
[3]IAEA分析データ, <https://frandl-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>.

図 シールリングスミア結果とα核種の広がり傾向 (P17,18参照)

1. PCV内ダスト浮遊量

X-6ペネ内堆積物のWJによる洗浄・落下による浮遊

ダスト浮遊量[Bq]
=放射能濃度[Bq/g]×堆積物量[g]×**気相移行率**[-]

＜気相移行率＞ DOE HANDBOOK※に基づき設定

- ・ WJ洗浄： 高圧水の圧力開放時のダスト浮遊に類似すると見なし、「加圧容器/配管からのベント時の飛散率」の液面上もしくは容器全体破損条件の気相移行率（0.35MPa以上）の0.2%を設定（1号機と同条件）。
- ・ 堆積物落下： 水との混合が不確実であるため、「乾燥粉体の自由落下」の気相移行率として1%を設定。

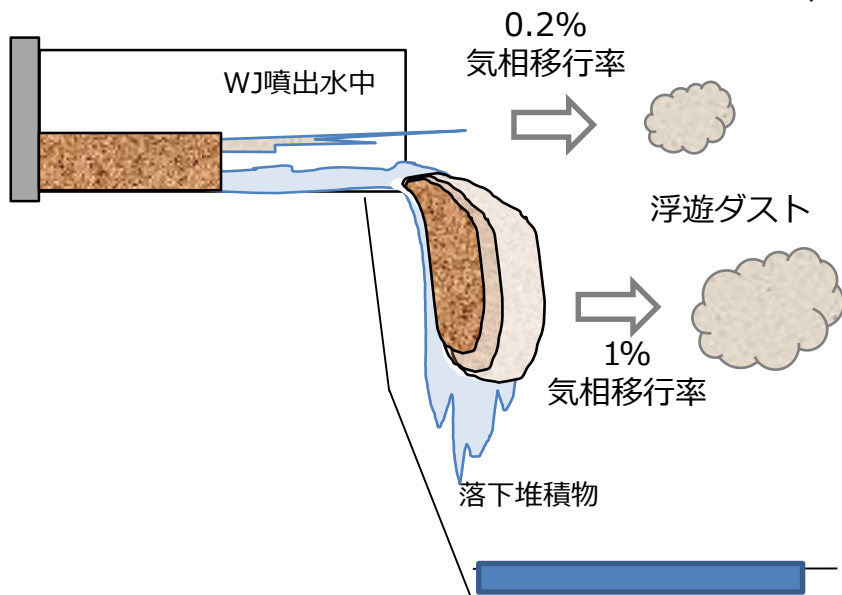


図 堆積物除去のダスト飛散想定

「乾燥粉体自由落下」の気相移行率 (DOE HANDBOOKに基づき設定)

$$ARF=0.1064(M_0^{0.125})(H^{2.37})/\rho_{BP}^{1.02}$$

ここで、

ARF: 気相移行率の平均値, Bounding Factorとして2倍する

M_0 : 粉体重量(堆積物236 kg)

H: 落下高さ(X-6ペネ高さ5.26 m)

ρ_{BP} : 密度(堆積物密度2000 kg/m³)

より、

$$=9.25 \times 10^{-3} \Rightarrow \text{気相移行率1\%と設定}$$

設定条件

堆積物全体に対してWJ洗浄(0.2%)された後、X-6ペネ高さより落下(1%)することから、X-6ペネ堆積物除去作業における気相移行率は合計1.2%となる。

	気相移行率[-]
WJ洗浄によるダスト浮遊	0.2%
堆積物落下によるダスト浮遊	1%
合計	1.2%

※Department of Energy, "DOE HANDBOOK: AIRBORNE RELEASE FRACTIONS/RATES AND RESPIRABLE FRACTIONS FOR NONREACTOR NUCLEAR FACILITIES Volume I - Analysis of Experimental Data", DOE-HDBK-3010-94, December, 1994 Reaffirmed 2013

1. PCV内ダスト浮遊量

AWJ影響範囲にある構造物の汚染表面からの剥離による浮遊

ダスト浮遊量[Bq]
 =汚染密度[Bq/cm²]×対象範囲[cm²]×気相移行率[-]

<汚染密度>

- PCV内部調査線量率測定結果に基づき、PCV内壁およびペDESTAL外壁が均一にCs汚染しているとして汚染密度を計算。
- 1号機実施計画評価と同様に円筒モデルを採用。

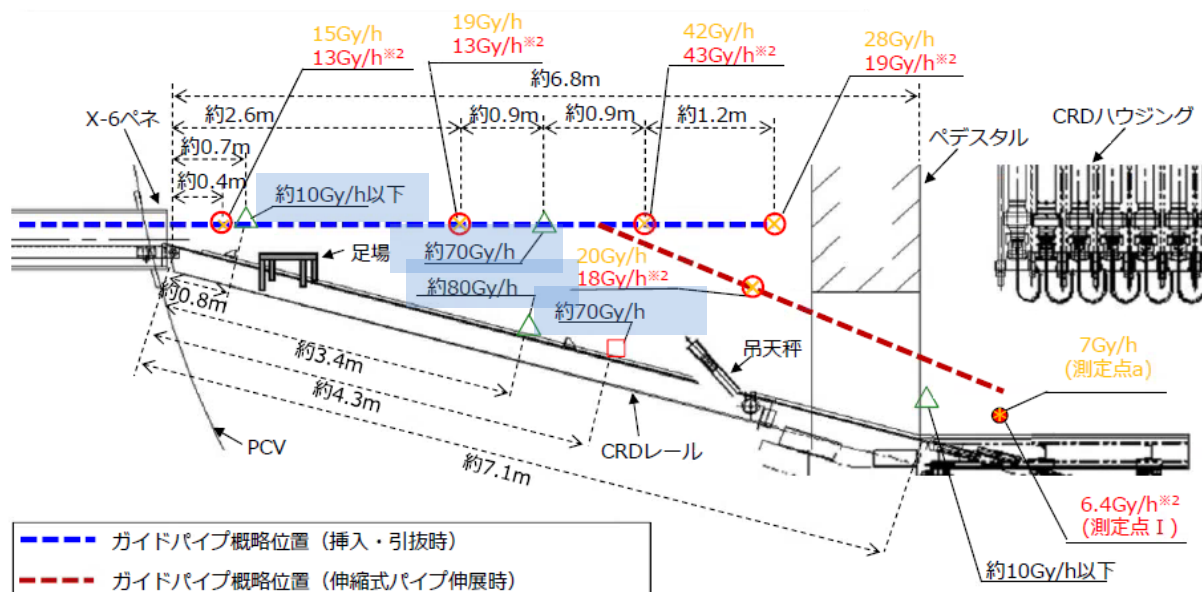


図 PCV内部調査線量測定結果と評価点 (薄青)

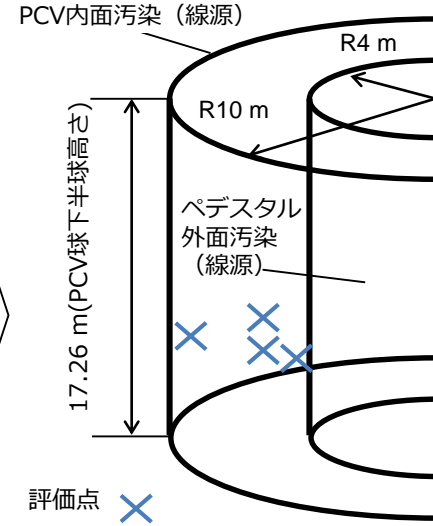


図 汚染密度計算モデル

4点の評価点のうち、最も厳しい結果を採用。
 (80Gy/hの地点)

評価結果	
Cs-134	: 4.7×10 ⁸ Bq/cm ²
Cs-137	: 5.8×10 ⁹ Bq/cm ²

1. PCV内ダスト浮遊量

AWJ影響範囲にある構造物の汚染表面からの剥離による浮遊

$$\text{ダスト浮遊量[Bq]} = \text{汚染密度[Bq/cm}^2\text{]} \times \text{対象範囲[cm}^2\text{]} \times \text{気相移行率[-]}$$

<対象範囲>

- ・試験によりAWJの影響で塗装が剥離する範囲を確認（図1, 2）。
- ・AWJ影響範囲試験結果に基づき、噴射時のAWJ影響範囲の包絡線を設定（図3）。
- ・AWJ影響範囲にある対象物の表面積を読み取るため、定点でAWJ噴射時の影響範囲を設定（図4）。

○試験概要

AWJの噴流による影響範囲を推定することを目的に、AWJからターゲット板までの距離を変え、塗装剥離範囲を測定した。

○影響範囲結果（概要）

- ・4mまでは単調増加、4mからは単調減少
- ・増加率は1m以遠は噴射角の約1.7倍、1m以内は約3.4倍

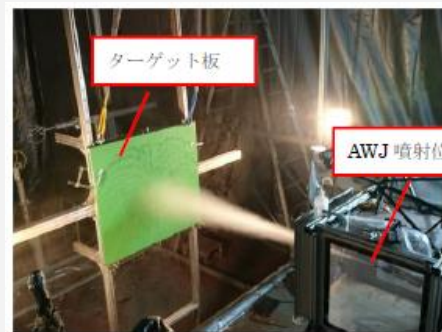


図1 AWJ噴流の様子

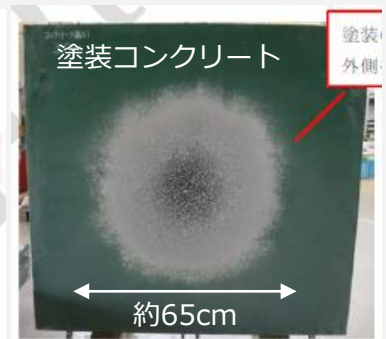


図2 塗装剥離の様子（3m位置）

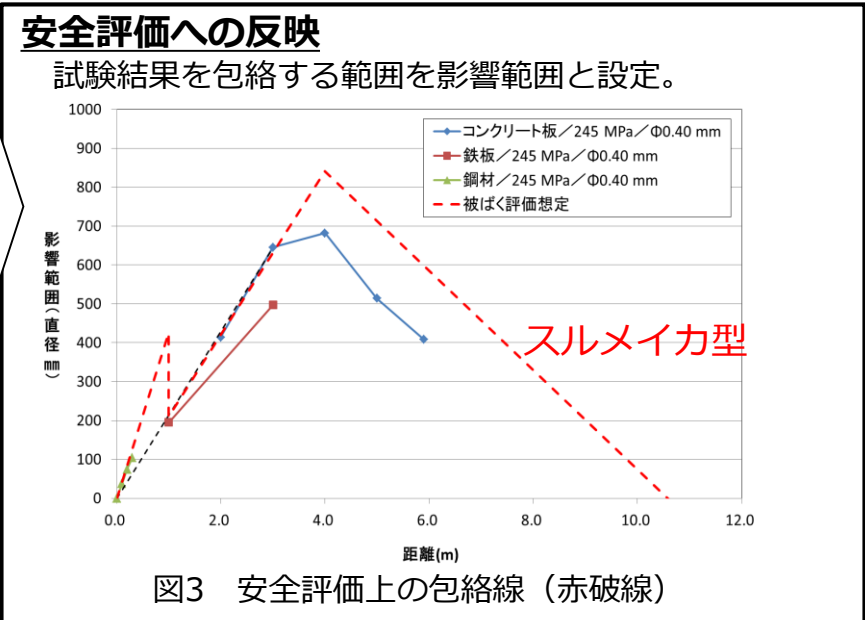
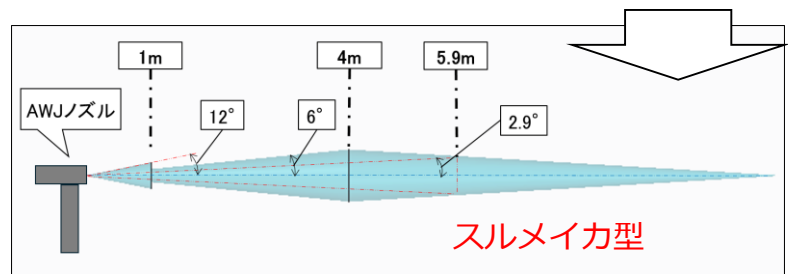


図3 安全評価上の包絡線（赤破線）

図4 定点でのAWJ噴射時の影響範囲



1. PCV内ダスト浮遊量

AWJ影響範囲にある構造物の汚染表面からの剥離による浮遊

$$\text{ダスト浮遊量[Bq]} = \text{汚染密度[Bq/cm}^2\text{]} \times \text{対象範囲[cm}^2\text{]} \times \text{気相移行率[-]}$$

<対象範囲>

- 作業上想定される位置・角度に影響範囲を適用（図5）し，対象となる構造物表面積を読み取る。

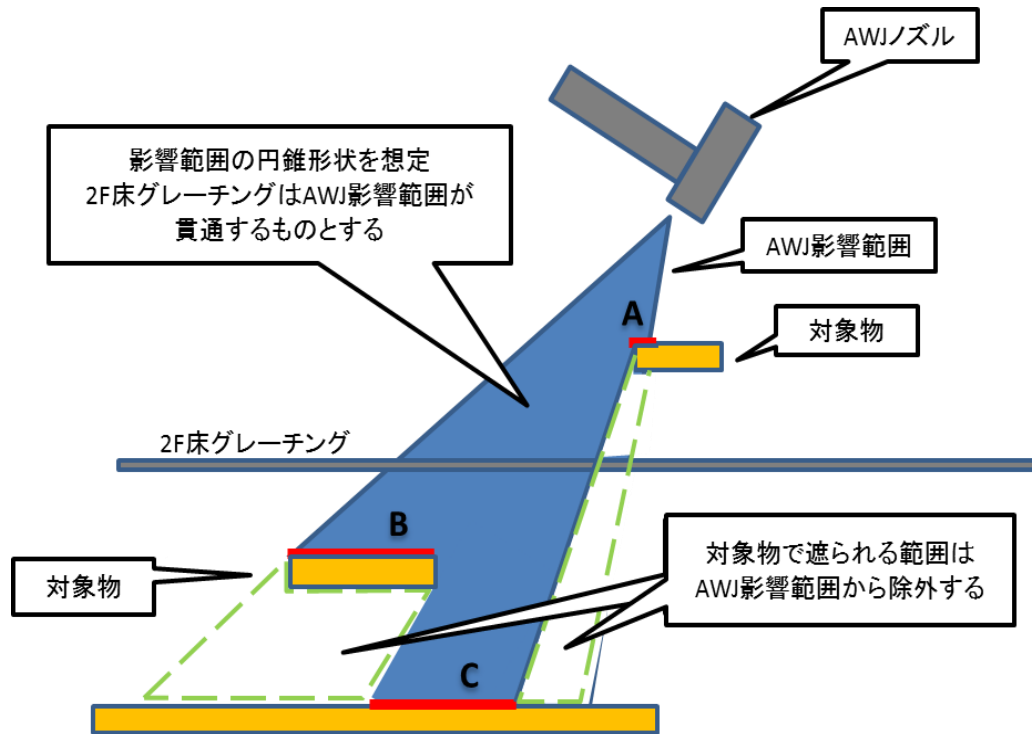


図5 CAD読み取り時の影響範囲の適用ルール

評価結果

	AWJ影響表面積[cm ²]	
	1m以内	1m以遠
(A)-2,3 X-6ペネ内作業（ケーブル，レールガイド切断）	2.3x10 ⁴	8.5x10 ⁴
(B)-1 CRDレール切断作業（CRDレール，ガイドピン，グレーチング切断）	3.0x10 ⁴	3.0x10 ⁵
(B)-2 CRDレール吊り治具切断作業	4.4x10 ³	5.0x10 ²
(B)-3 電線管切断作業	1.5x10 ³	-

1. PCV内ダスト浮遊量

AWJ影響範囲にある構造物の汚染表面からの剥離による浮遊

ダスト浮遊量[Bq]
 =汚染密度[Bq/cm²]×対象範囲[cm²]×**気相移行率[-]**

<気相移行率> DOE HANDBOOKに基づき設定

- 1m以内は剥離のエネルギーが大きく（切断可能），影響範囲の増加率も大きいことから，「加圧容器/配管からのベント時の飛散率」の液面上もしくはは容器全体破損条件の気相移行率（0.35MPa以上）の0.2%を設定（1号機と同条件）。
- 1m以遠は剥離のエネルギーが弱まるため，気相移行率は「高圧水噴出時」（図1）の0.01%を設定（図2）。

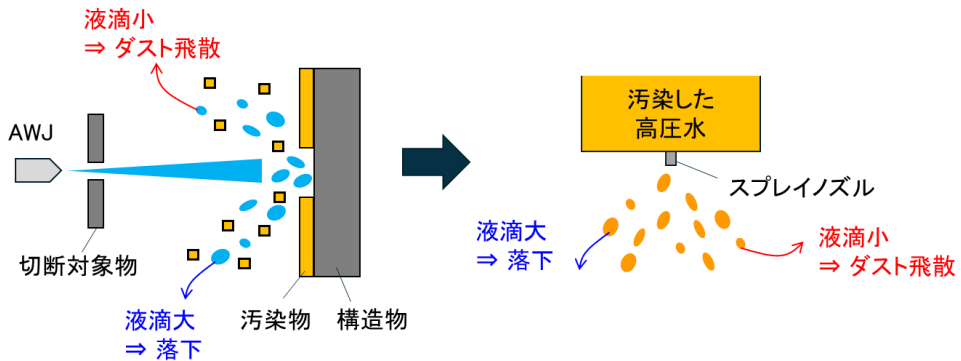


図1 AWJ噴流遠方（左）と高圧水噴出（右）のダスト飛散の類似性

設定条件

気相移行率[-]		
(参考)切断欠損表面	1m以内	1m以遠
0.2%	0.2%	0.01%

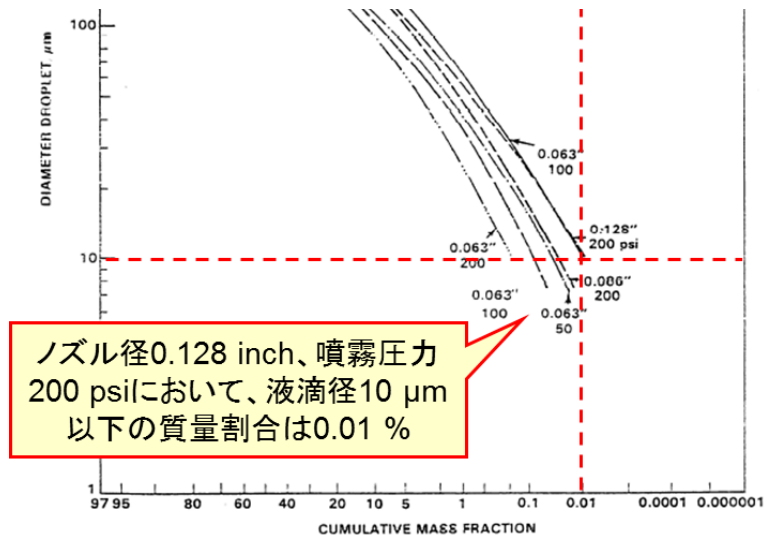


図2 高圧水噴出時の気相移行率試験結果（0.01%）

WJの液滴径の研究※によれば液滴径は吐出圧増加により低下し，また300mm以遠では増加することが確認されている。作業使用マシンの運転条件に照らしても10μm以下の液滴が支配的にならないと推定できる。このため，DOE HANDBOOKの適用範囲内と判断し，バウンディング値の0.01%を採用。

1. PCV内ダスト浮遊量

その他要因による浮遊

その他のダスト浮遊

- ・ AWJ切断欠損部からの浮遊
- ・ 落下切断片・落下切断片被衝突物（床・グレーチング）からの浮遊

$$\text{ダスト浮遊量[Bq]} \\ = \text{汚染密度[Bq/cm}^2\text{]} \times \text{対象範囲[cm}^2\text{]} \times \text{気相移行率[-]}$$

<汚染密度>

- ・ PCV内部調査線量率測定結果に基づき、汚染密度を計算（P8と同じ）。

<対象範囲>

- ・ CADより読み取り。グレーチングの場合は表面積が大きいいため、平板とした読み取り表面積の2倍と設定。

<気相移行率>

- ・ AWJ切断欠損部からの浮遊：「加圧容器/配管からのベント時の飛散率」の液面上もしくは容器全体破損条件の気相移行率（0.35MPa以上）の0.2%を設定（1号機と同条件）。
- ・ 落下物・被衝突物からの浮遊：「非金属または複合固体の自由落下時」の気相移行率を適用

「非金属または複合固体の自由落下時」の気相移行率（DOEハンドブックに基づき設定）

$$\text{ARF} \times \text{RF} = (\text{A})(\text{P})(\text{g})(\text{h}) \quad (4-1)$$

where: ARF X RF = (Airborne Release Fraction)(Respirable Fraction)

A = empirical correlation, 2E-11 cm³ per g-cm²/s²

P = specimen density, g/cm³

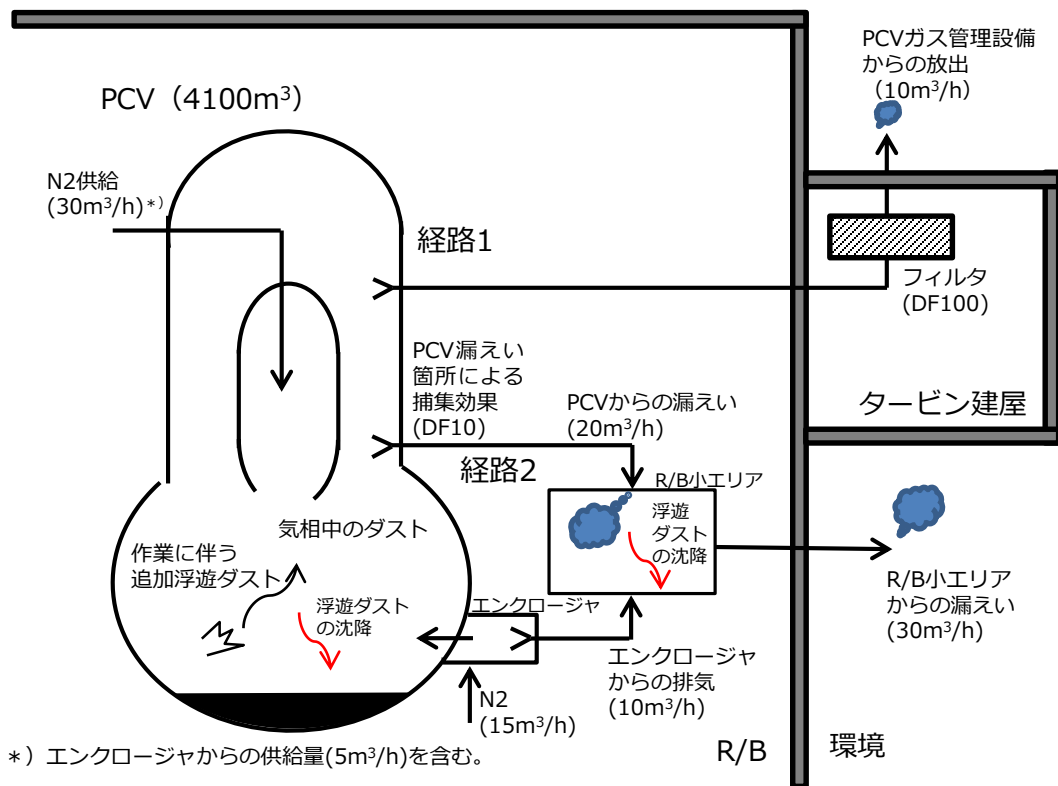
g = gravitational acceleration, 980 cm/s² at sea level

h = fall height, cm.

Use of this correlation to estimate the ARF x RF value is considered very conservative, and may be excessively so if large debris from substantial heights is considered.

2. 放出量評価 通常時放出量評価モデル

評価モデル



*) エンクロージャからの供給量(5m³/h)を含む。

<PCV内のダスト想定>

- ✓ 堆積物除去及び干渉物切断作業に伴う追加浮遊分

<放出経路>

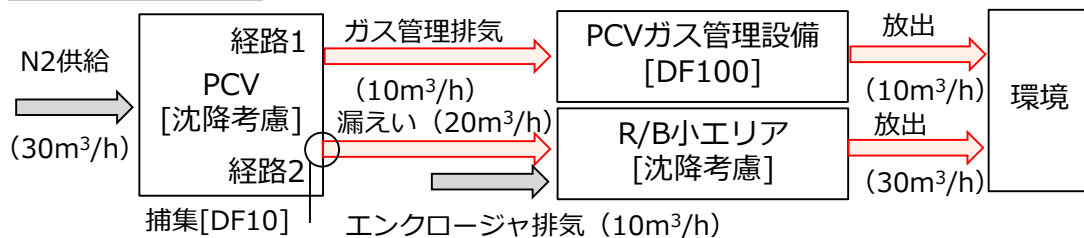
- ✓ 経路1：PCVガス管理設備により、フィルタを経由して環境へ放出
- ✓ 経路2：PCVの狭隘な漏えい箇所を經由してR/B小エリア（1階部1/4容積）へ漏えいし、さらに環境へ漏えい

<ダストの低減効果>

PCV内およびR/B小エリア内における沈降	考慮する
PCV漏えい箇所における捕集効果※	考慮する(DF10)
PCVガス管理設備フィルタ捕集効果	考慮する(DF100)

※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。

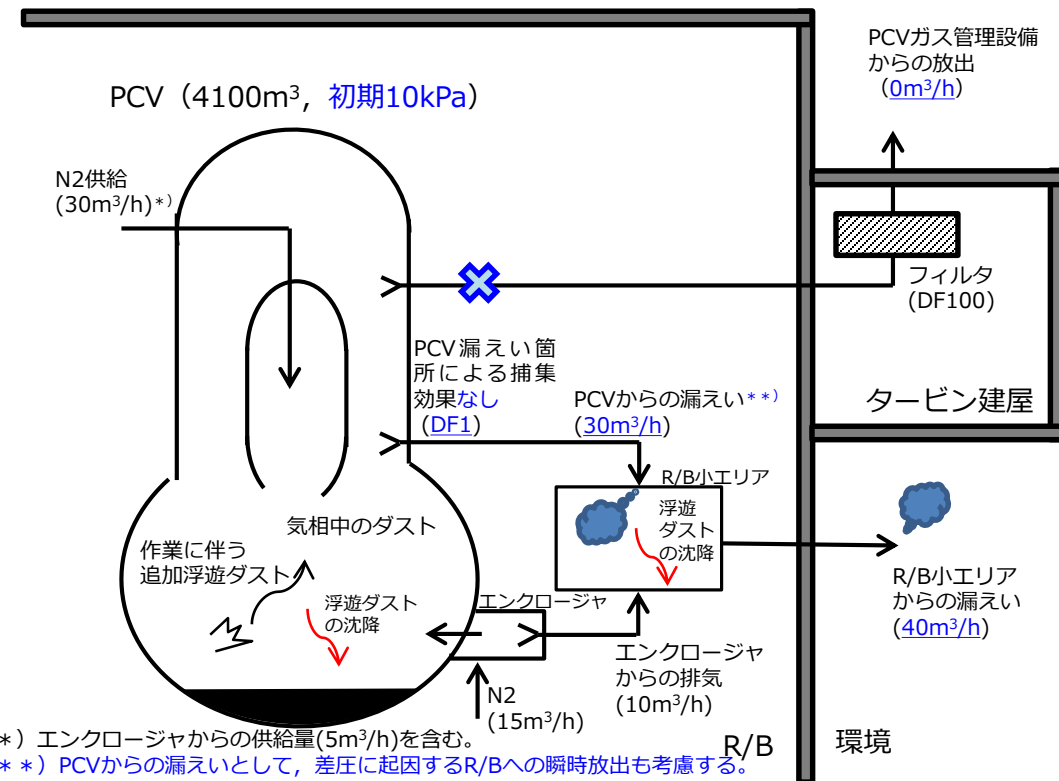
給排気量収支



2. 放出量評価

異常時(バウンダリ施工箇所開放時)放出量評価モデル

評価モデル



<PCV内のダスト想定>

- ✓ 堆積物除去及び干渉物切断に係る各作業のうち、最も放出量が多い作業工程である(B)-1 CRDレール切断時のダストを想定
- ✓ 復旧は見込まず、放出は継続すると設定

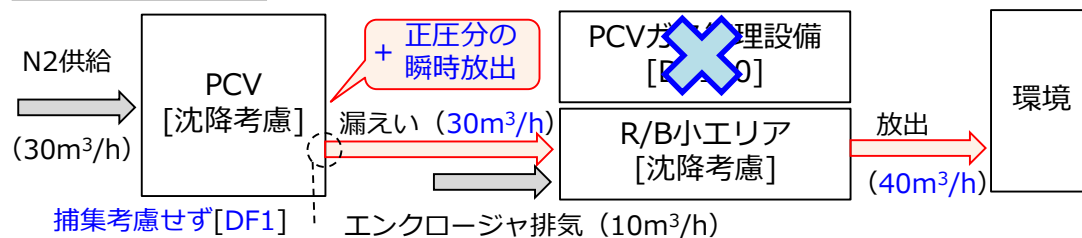
<放出経路>

- ✓ 施工箇所開放により、微正圧状態のPCVから差圧分のPCVガスがR/Bへ瞬時放出
- ✓ PCVガス管理設備による排気は見込まず、R/B小エリアを經由した放出のみの経路

<ダストの低減効果>

PCV内およびR/B小エリア内における沈降	考慮する
PCV漏えい箇所における捕集効果	考慮しない(DF1)
PCVガス管理設備フィルタ捕集効果	— (排気流量0)

給排気量収支



3. 被ばく評価

被ばく経路と気象条件

被ばく経路

環境へ放出・漏えいした放射性核種による一般公衆(敷地境界)への実効線量は、大気拡散による希釈を考慮し、4つの被ばく経路による実効線量の和として計算する。

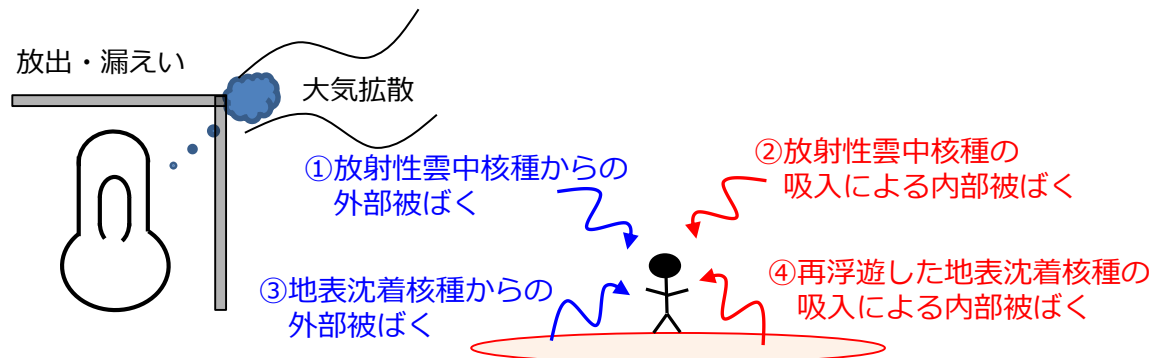


図 一般公衆(敷地境界)被ばく経路

気象条件 (大気拡散)

作業期間は月オーダーを要すると想定するため、通常時については年間5回の間欠放出の相対濃度・相対線量を用いる。

	通常時 (年間5回の間欠放出)	異常時 (短時間放出)
相対濃度	$1.7 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$	$2.0 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$
相対線量	$1.5 \times 10^{-20} \text{ Gy/Bq}$	$2.4 \times 10^{-19} \text{ Gy/Bq}$

4. 評価結果

放出量および被ばく線量

当該作業に伴う放射性核種の放出量および敷地境界での実効線量は、下記の通りであり、周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えることはない。

通常時

	作業全体
Cs-134放出量	約 1.6×10^7 Bq
Cs-137放出量	約 1.9×10^8 Bq
α 核種 (Am-241) 放出量	約 1.9×10^6 Bq
β 核種 (Sr-90) 放出量	約 4.8×10^9 Bq
敷地境界実効線量	約 8.0×10^{-4} mSv

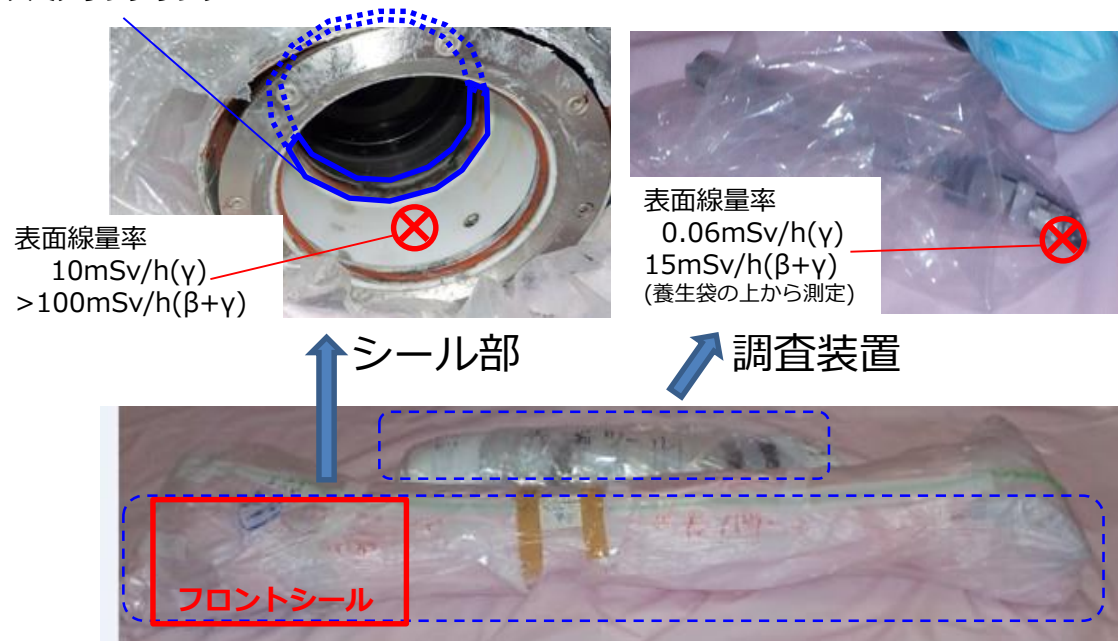
異常時 (バウンダリ施工箇所開放時)

	(B)-1 CRDレール切断作業
Cs-134放出量	約 2.1×10^8 Bq
Cs-137放出量	約 2.7×10^9 Bq
α 核種 (Am-241) 放出量	約 2.7×10^7 Bq
β 核種 (Sr-90) 放出量	約 6.7×10^{10} Bq
敷地境界実効線量	約 1.3×10^{-1} mSv

【参考】 2号機PCV内部調査装置のサーベイ結果

- ▶ サプリング日 : 2019年2月28日
- ▶ 表面線量率 : 左下図の図中参照 [(γ) : 1cm線量当量率, (β+γ) : 70μm線量当量率]
- ▶ 表面汚染密度 : フロントシール部をスミアサンプリングした試料のγ線核種分析および全α計測を実施
 - ・ **全α/Cs-137存在比 : 8×10^{-1}**
 - ・ γ線核種分析の検出核種 : 右下表参照
 - ・ 備考 : スミアの表面線量率(β+γ)が高いため, サーベイ員や分析員の被ばく低減を考慮してスミアを別のスミアで再サンプリングし, 相対濃度[存在比]を評価した (スミアをスミアでサンプリングする際の採取効率を設定できないため, 定量評価はできない)。

スミアサンプリング



フロントシールおよび調査装置の養生保管の様子

検出核種	Cs-137に対する存在比
Co-60	4×10^{-1}
Ru-106	1×10^0
Rh-106	1×10^0
Sb-125	5×10^{-1}
Cs-134	9×10^{-2}
Cs-137	—
Ce-144	5×10^{-1}
Eu-154	1×10^0
Eu-155	6×10^{-1}
Am-241	8×10^{-1}

PCV内外部のα核種の広がりに関するデータ

<Cs-137に対するα核種の存在比>

	1号機		2号機		3号機	
	測定時期・分析内容	存在比	測定時期・分析内容	存在比	測定時期・分析内容	存在比
①PCV内汚染物	2017/4 α核種分析*	6×10^{-2} [2]	2019/2 全α計測	8×10^{-1} [1]	-	-
②PCVガス管理設備 フィルタ前サンプリング [1] (粒子状フィルタ) **	2016/12 全α計測	10^{-4}	2017/5 全α計測	10^{-3}	2017/4 全α計測	-
③PCV内滞留水 [3]	-	-	2013/8 α核種分析*	10^{-4}	2013/8-2015/10 α核種分析*	10^{-3}
④建屋1階瓦礫等 [3]	2013/10- 2015/10 α核種分析*	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	-	-	2014/3 α核種分析*	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
⑤オペフロ瓦礫等 [3]	2015/10-2016/4 α核種分析*	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	2014/1-2014/5 α核種分析*	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	-	-

今回の取得
データ

注：α核種が検出されたことのあるデータを例示。同じ測定箇所でも、毎回検出限界値を超える濃度が検出されている訳ではない。

*α核種分析結果のPu-238, Pu239+240, Am-241, Cm-244の合算値
**PCVガス管理設備フィルタ後の全α計測結果は1～3号機すべてND



[1]東京電力HD分析データ,
http://www.tepco.co.jp/decommission/data/daily_analysis/index-j.html.
[2]東京電力HD, "1～3号機原子炉格納容器内部調査関連サンプル等の分析結果", 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議 (第56回) より算出.
[3]JAEA分析データ, <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>.