

別紙 1 3 フィルタ装置からの放射性物質の再浮遊について

■ 水スクラバ

水スクラバに捕捉された放射性物質は、以下のメカニズムにより再浮遊する可能性がある。

(水スクラバの放射性物質再浮遊メカニズム)

- ① エントレインメントによる飛沫の浮遊
- ② よう素イオンが放射線照射により無機よう素となり浮遊

このうち①のエントレインメントによる飛沫については、『別紙 1 2 金属フィルタの液滴除去性能について』にて示す通り、水スクラバの後段に設置されている金属フィルタによりベントガスから除去することが可能な構成となっている。そのため、水スクラバより放射性物質を含んだ飛沫が発生したとしても、液滴除去性能を有する金属フィルタによって、放射性物質が環境へ放出されることを防止する設計としている。

また、②のよう素イオンの放射線照射による無機よう素の生成については、スクラバ水がアルカリ性に保たれていれば生じないことを、下記の試験にて確認している。スクラバ水の pH は、無機よう素の DF 捕捉性能を維持するため 以上としている。そのため、スクラバ水は常にアルカリ性となっていることから、放射性照射によるよう素イオンからの無機よう素の生成は生じない。

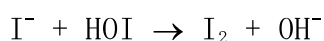
以上より、水スクラバにて捕捉された放射性物質の環境への放出は生じないと考える。

また、フィルタ装置使用後は、スクラバ水を格納容器に移送することで、放射性物質がフィルタ装置から環境へ放出されるリスクを更に低減する。

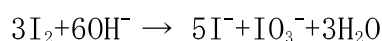
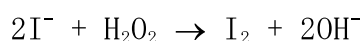
(無機よう素再浮遊試験)

I⁻ (よう素イオン) は照射下で酸化種 OH・ラジカルあるいは H₂O₂ によって酸化され、I₂ (無機ヨウ素) および HOI, さらに IO₃⁻ になる。一方、生成した I₂, HOI 及び IO₃⁻ は還元種 (e_{aq}⁻, H) との反応によってもとに戻ると同時に、I₂ は加水分解する。I₂, HOI 及び IO₃⁻ は酸化種過剰の場合に応じて溶液内に残留するようになる。

■酸性環境下における反応式



■アルカリ性環境下における反応式



そのため、スクラバ水がアルカリ性に確保されていれば、よう素イオンから生成された無機よう素は、再びよう素イオンに戻るため、スクラバ水から無機よう素が再浮遊することはない。

今回、下記の第1図のに示す試験装置にて、放射線照射環境下におけるよう素イオンの挙動と溶液の pH の影響を確認する試験を実施した。



第1図 照射下よう素イオン挙動確認試験装置図

第1図に示す通り、放射線照射室に置かれた加温容器の中に、CsIを溶解し、pHを調整した後に、高温状態としつつ、空気ポンベによりバブリングを行った状態で放射線を照射する。加温容器からの排気は鉛遮蔽内に設置した空容器、ならびに捕集容器内のよう素吸収液を通気することで、排気に含まれるよう素を回収する構成となっている。

試験開始前の加温容器内のよう素量と、試験開始後の加温容器内、空容器内、捕集容器内、ならびに配管部のよう素量を比較することで、加温容器からのよう素の再浮遊の有無を確認した。

加温容器内の初期のよう素量を6.5mg (CsI: 1×10^{-4} [mol/l]), pHを4, 7, 10の3ケース、加温容器の温度を90℃とし、積算放射線量約18[kGy]を照射した後の各部のよう素量を確認した結果、第1表の通りとなった。

第1表 照射下よう素イオン挙動確認試験結果



第1表より、アルカリ性であれば、よう素イオンを含む溶液に放射線を照射したとしても、よう素の浮遊は生じないことが確認できた。

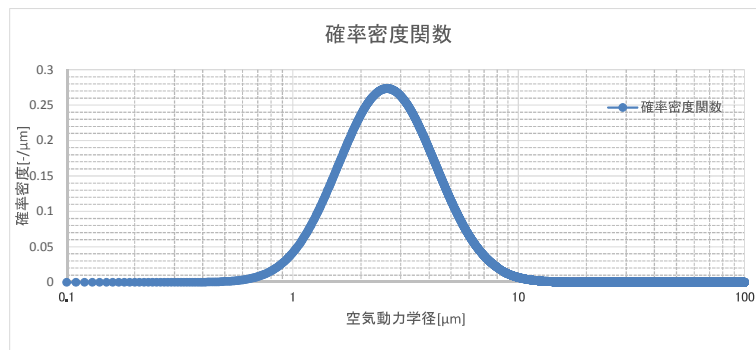
そのため、スクラバ水からのよう素イオンの浮遊を防止するため、スクラバ水はアルカリ性に保つ必要がある。

■ 金属フィルタ

フィルタ装置を使用すると、金属フィルタは捕捉した放射性物質の崩壊熱により発熱する。もしも、金属フィルタの温度が捕捉した放射性物質の融点よりも高くなってしまうと、捕捉した放射性物質が金属フィルタより再浮遊してしまう恐れがある。そのため、金属フィルタの温度は、金属フィルタに捕捉された放射性物質の融点以下である必要がある。

フィルタ装置使用中は、金属フィルタにはベントガスが通気されることから、金属フィルタに捕捉された放射性物質の崩壊熱は除去される。一方、フィルタ装置使用後においては、ベントガスによる熱の除去はできないことから、金属フィルタの温度は上昇する。そこで、フィルタ装置使用後におけるフィルタ装置金属フィルタ部の温度評価を行った。

まず、有効性評価シナリオ（大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失，D/W ベント）における、金属フィルタに捕捉される放射性物質の崩壊熱を評価する。本シナリオにてフィルタ装置に流入する粒子状放射性物質の総崩壊熱は約 9.3kW となる。また、粒子径の分布は第 2 図の通りである。



第 2 図 エアロゾル粒子径分布（大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失，D/W ベント）

第 2 図の粒子径分布に対して、『別紙 30 2. 金属フィルタ閉塞』にて示した水スクラバの DF のうち、保守的に最小流量相当の DF 性能線を用いて、(1)式により水スクラバのオーバーオールの DF を算出すると、水スクラバの DF は 34 となる。

$$DF_{total} = \frac{\int M(D_p) dD_p}{\int \frac{M(D_p)}{DF(D_p)} dD_p} \quad (1)$$

DF(D_p)は、粒径 D_p における水スクラバの DF

M(D_p)は、フィルタ装置に流入する粒径 D_p のエアロゾルの総質量

そのため、水スクラバの後段に設置する金属フィルタに捕捉される崩壊熱は

9.3/34=0.28kW となる。

そこで、金属フィルタ部の温度評価を実施する際の金属フィルタ捕捉崩壊熱を、0.28kW に対して、放射性物質の不均一な付着等を考慮しても十分保守的な5kW に設定する。

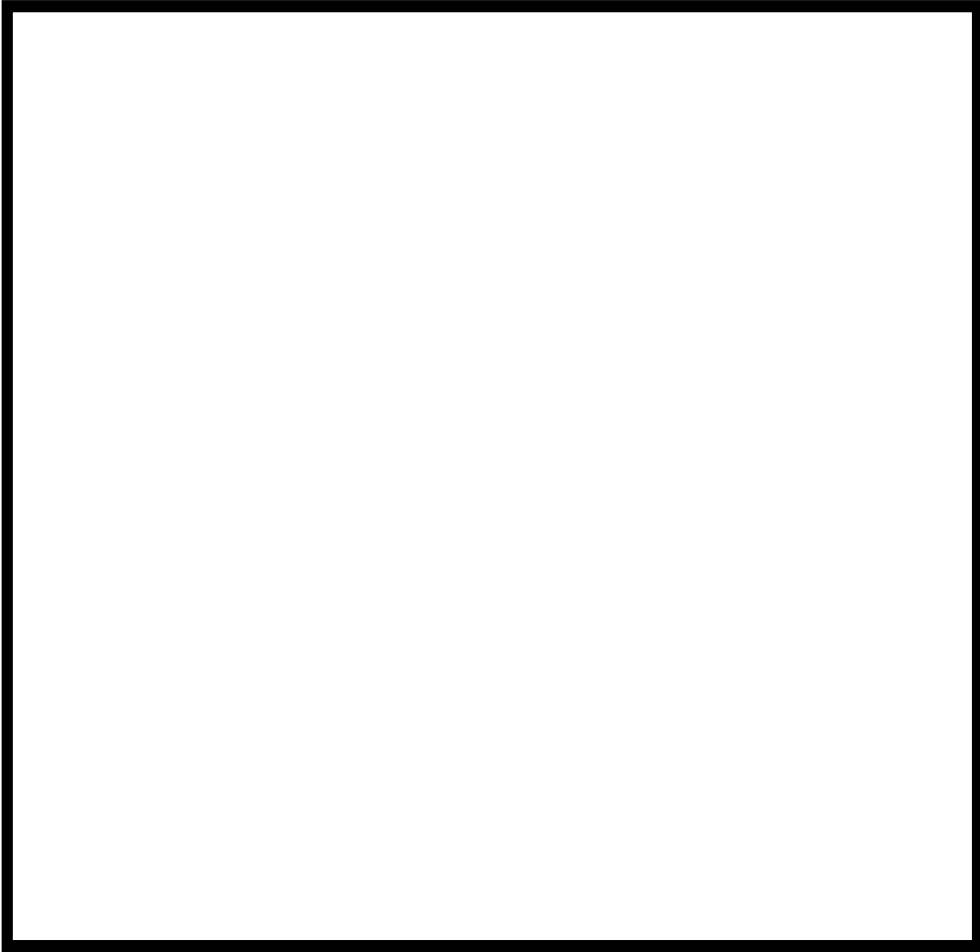
上記の通り、金属フィルタに捕捉される崩壊熱 5kW にて、まず金属フィルタ部の温熱解析を実施する。温熱解析には STAR-CCM+ (ver. 8.04.010) を用いた。なお、STAR-CCM は第 4 表に示す通り、原子力産業にも広く利用されている解析コードである。

なお、フィルタ装置使用後においても、スクラバ水に捕捉された放射性物質の崩壊熱によりスクラバ水が蒸発し、金属フィルタ部においてガスの流れは生じるが、ここでは保守的にスクラバ水の給水のタイミングを想定し、スクラバ水の蒸発が発生していない状態の評価を実施した。

【温熱解析条件】

第 2 表 フィルタ装置温熱解析条件一覧表

項目	条件
評価コード	・ STAR-CCM+ (ver. 8.04.010)
設定条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 乱流モデル：Realizable K-ε ・ 状態方程式：理想気体 ・ 圧縮性：考慮 ・ 重力：考慮 ・ 気体の種類：水蒸気 ・ 定常
フィルタ装置内圧力	・ 大気圧（フィルタ装置使用後を想定）
フィルタ装置 周囲温度	・ 65℃
スクラバ水沸騰	・ 無し
スクラバ水温度	・ 100℃
フィルタ装置容器	<ul style="list-style-type: none"> ・ 材質：SUS316L ・ 厚さ：30mm
フィルタ装置保温	<ul style="list-style-type: none"> ・ 有り ・ 材質：ケイ酸カルシウム保温材 ・ 厚さ：50mm
金属フィルタ 捕捉崩壊熱	・ 5kW



第3図 解析モデル

第2表の解析条件ならびに第3図の解析モデルにて評価を実施したところ、金属フィルタ捕捉崩壊熱 5kW の場合の金属フィルタ部最高温度は、約 185℃となった。



第4図 解析結果(金属フィルタ捕捉崩壊熱 5kW)

一方、金属フィルタは第5図の通り、小粒径の粒子を捕捉する焼結シート

前後に、大粒径の粒子やスクラバ水の飛沫を捕捉する金属繊維からなるウェブを設置した構造となっている。



第5図 金属フィルタ構造図

第2図の解析モデルは焼結シートのみをモデル化したものであり、ウェブについてはモデル化されていない。しかしながら、ウェブは空気を多く含む金属繊維であることから、ある程度の断熱効果があると考えられる。そこで、半径方向1次元の定常熱伝導評価式により、ウェブに挟まれた焼結シートの温度評価を実施した。

評価の条件を第3表に示す。

第3表 定常熱伝導条件一覧表

項目	条件
評価式	・半径方向1次元 定常熱伝導評価式
金属フィルタ 捕捉崩壊熱	・5kW
金属フィルタ 捕捉部位	・全ての放射性物質が焼結シートに付着しているとする (ウェブには付着していない)
金属フィルタ 周囲温度	・185℃
ウェブ熱伝導率	・保守的に水蒸気の熱伝導率を適用 (ステンレス製のウェブによる熱伝導率を考慮しない) ・水蒸気の熱伝導率は、金属フィルタ周囲温度の値を適用 (温度が低い方が、熱伝導率が小さく保守的であるため) ・0.032W/(m・K) (185℃における水蒸気の熱伝導率)
金属フィルタ 設置本数	・128本
金属フィルタ 表面積	・0.36m ²

第3表の条件により評価した結果、ウェブに挟まれた焼結シートの温度は、下記の通りとなった。

【ウェブを考慮した場合の焼結シートの温度】

$$\begin{aligned} \text{金属フィルタ発熱量} &= 5 \times 10^3 / 128 \\ &= 39.1 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{金属熱流束 (片面)} &= 39.1 / 2 / 0.36 \\ &= 54.3 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{金属フィルタ厚さ方向温度差} &= 54.3 \times 11.45 \times 10^{-3} / 0.032 \\ &= 19.5 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{焼結シート部温度} = 185 + 19.5 = 204.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

なお、フィルタ装置使用時に格納容器から飛来する放射性物質のうち、高揮発性の水酸化セシウムの融点は約272℃である。そのため、金属フィルタに捕捉される放射性物質の崩壊熱が5kWの場合、金属フィルタ焼結シートの温度は放射性物質の融点以下となり、捕捉された放射性物質が再浮遊する恐れはない。

よって、大LOCA+SBO+ECCS機能喪失シナリオのD/Wベントを考慮したとしても、金属フィルタに捕捉された放射性物質の再浮遊は生じないと考える。

第4表 STAR-CCM+ , STAR-CD の原子力産業における使用実績

No	企業	使用ツール	概要	備考
1	JAEA	STAR-CD	水銀ターゲットの熱流動設計(流体の核発熱及び伝熱を考慮した水銀および重水の熱流体解析)	http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2008-033.pdf
2	三菱FBRシステムズ	STAR-CD	過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発(「もんじゅ」実証炉内、冷却系統の自然循環除熱の検討)	http://www.jst.go.jp/nrd/result/h21/p02.html
3	三菱FBRシステムズ	STAR-CD	非定常流動解析に基づいた流動構造連成解析手法の開発	http://www.mfbr.co.jp/contents/0700.html
4	JAEA	STAR-CD	照射集合体伝熱解析(高速炉「常陽」内の照射集合体伝熱分布の評価)	
5	東京電力	STAR-CD	東通 ドライウエルスプレイ作動中の原子炉格納容器内流動解析	http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/3/1/004/04-05.pdf
6	AREVA	STAR-CCM+	PWR 集合体のスペーサグリッド周辺評価(蒸気バブルのふるまい評価)	http://www.aesj.or.jp/~fuel/Pdf/kaihou_2012_48-1.pdf
7	JAEA	STAR-CCM+	気体軸受液体水素ポンプのスラスト軸受性能評価解析及び気柱管内の熱音響振動解析コードの開発(スラスト軸受の浮上量評価)	http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2012-042.pdf
8	電力中央研究所	STAR-CCM+	発電プラントの配管減肉現象の予測手法開発における STAR-CCM+の適用(流れ加速型腐食の原因の1つである乱流エネルギーの検討)	http://www.idaj.co.jp/ccsc2011/lecture/star_b13.html
9	JAEA	STAR-CCM+	冷中性子源装置の減速材容器内沸騰解析(減速材容器の受熱による減速材(液体水素)の沸騰挙動様相の解析)	
10	JNES	STAR-CCM+	汎用数値流動解析コードを用いた高速増殖炉におけるナトリウム-水反応解析手法の整備	http://www.jnes.go.jp/content/000119050.pdf
11	エネルギー総合工学研究所	STAR-CCM+	福島第一原子力発電所の圧力抑制プール内における蒸気凝縮の二相流解析	http://www2.cd-adapco.com/l/14592/2013-11-05/5smk3

別紙14 水スクラバにて考慮する荷重と評価結果

フィルタ装置の水スクラバにおいては、ベント開始時にスクラバ配管内にたまっていた水のクリアリングによる噴流により、フィルタ装置の内部構造物に大きな荷重がかかる。そこで、このクリアリング荷重によるフィルタ装置内部構造物に発生する応力を評価した。なお、保守的に地震荷重（基準地震動 S_s ）ならびに自重による荷重も組み合わせて評価を実施した。

(1) クリアリング荷重の評価

クリアリング荷重を評価するため、まずスクラバノズルからの水の噴射速度を算出する。ダルシー・ワイスバッハの式より、スクラバノズルからの水の噴射速度は以下のように算出できる。

$$P_i = P_o + \left(\frac{\zeta + 1}{2} \right) \rho v^2 \quad (1)$$

$$\Delta P = P_i - P_o \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \left(\frac{2\Delta P}{\rho(\zeta + 1)} \right)^{0.5} \\ &= \left(2 \times \frac{(0.72 \times 10^6 - 0.10 \times 10^6)}{1000 \times (3.05 + 1)} \right)^{0.5} \\ &= 17.5 [\text{m/s}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 P_i 、 P_o 、 ρ 、 ζ は、以下の通り設定した。

■ $P_i = 0.72 \text{MPa (abs)}$

P_i はベント開始時のスクラバ配管内の圧力であり、保守的に格納容器の最高使用圧力の2倍の圧力である 0.72MPa (abs) とする。実際は、格納容器からフィルタ装置に至る配管の圧力損失により、スクラバ配管内の圧力は格納容器の圧力以下となる。

■ $P_o = 0.01 \text{MPa (abs)}$

P_o は噴射直後の圧力であり、保守的に大気圧である 0.10MPa (abs) とする。実際は、スクラバ水の水頭圧力が作用するため、大気圧以上となる。

■ $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$

ρ は水の密度であり、 1000kg/m^3 とする。

■ $\zeta = 3.05$

ζ は圧力損失係数の総和であり、保守的にスクラバ配管から一番近いノズルまでの配管の圧力損失係数とする。

また、噴射速度から、力積の式を用いてスクラバノズルにおける荷重Fを算出した。

$$F\Delta t = mv \quad (4)$$

$$\frac{m}{\Delta t} = \rho Av \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{m}{\Delta t} \times v = \rho Av^2 \\ &= 1000 \times \left(\pi \times \left(\frac{5}{2} \right)^2 \times 50 \times 140 \times 10^{-6} \right) \times 17.5^2 \\ &= 42092[\text{N}] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、スクラバノズルの断面積Aは、一つのノズルにΦ5mmの穴が50個設置されており、スクラバノズルは全部で140本設置されていることから、(6)式の通り算出される。

よって、スクラバノズル1本当たりの荷重は以下の通りとなる。

$$(F/g)/140 = m = 30.7[\text{kg}] \quad (7)$$

また、スクラバ配管の400Aエンドキャップにかかるクリアリング荷重について評価する。

まず、400A配管の水の流速を求める。400A配管の流速は、スクラバノズルの断面積比より、以下の通り算出することができる。

$$\begin{aligned} v_2 &= \left(\frac{2\Delta P}{\rho(\zeta+1)} \right)^{0.5} \times \frac{A_{scrubber}}{A_{400A}} \\ &= \left(\frac{2\Delta P}{\rho(\zeta+1)} \right)^{0.5} \times \left(\frac{\pi \times \left(\frac{5}{2} \right)^2 \times 50 \times 140 \times 10^{-6}}{\pi \times \left(\frac{381}{2} \right)^2 \times 1 \times 10^{-6}} \right) \\ &= 21.1[\text{m/s}] \end{aligned} \quad (8)$$

また、噴射速度から、力積の式を用いてスクラバノズルにおける荷重Fを算出した。

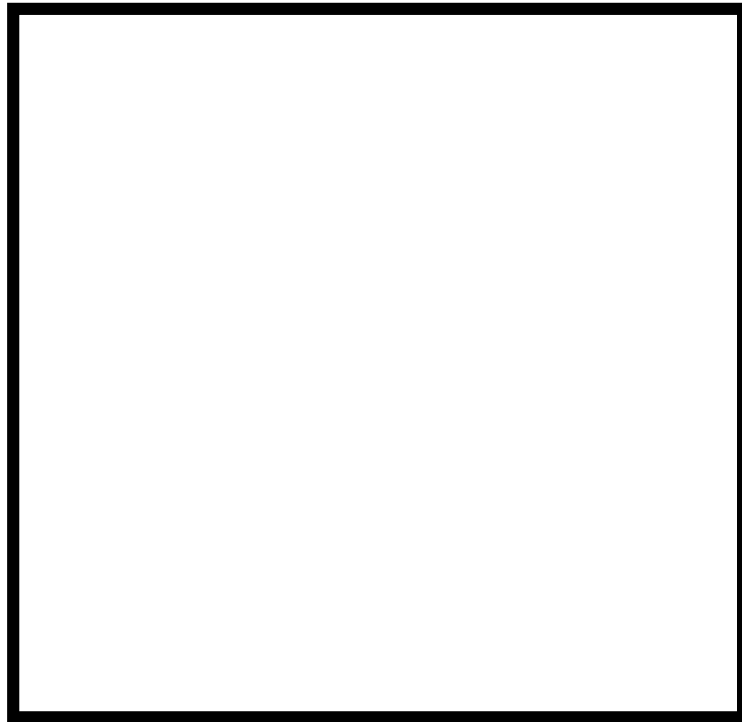
$$\begin{aligned}
 F &= \frac{m}{\Delta t} \times v = \rho A v^2 \\
 &= 1000 \times \left(\pi \times \left(\frac{381}{2} \right)^2 \times 1 \times 10^{-6} \right) \times 21.1^2 \\
 &= 50744 [\text{N}]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

よって、400A 配管エンドキャップに加わる荷重は以下の通りとなる。

$$F/g = m = 5.17 [\text{t}] \tag{10}$$

(2) フィルタ装置内部構造物応力評価

フィルタ装置の FEM モデル (第 1 図) を作成し、式(7)(10)で算出されたクリアリング荷重、ならびに基準地震動 S_s による地震荷重を負荷し、各部に発生する応力を算出した。応力の評価には、汎用構造解析コード FINAS v21.0 を用いた。また、健全性評価に当たり、許容応力は第 1 表に示す供用状態 D の値を用いた。



第 1 図 フィルタ装置 FEM 解析モデル

第 1 表 許容応力一覧

評価対象	曲げ [MPa]	引張 [MPa]	せん断 [MPa]	配管 [MPa]
スクラバ配管	—	—	—	240
支持構造物 (U ボルトを含む)	220	162	93	—

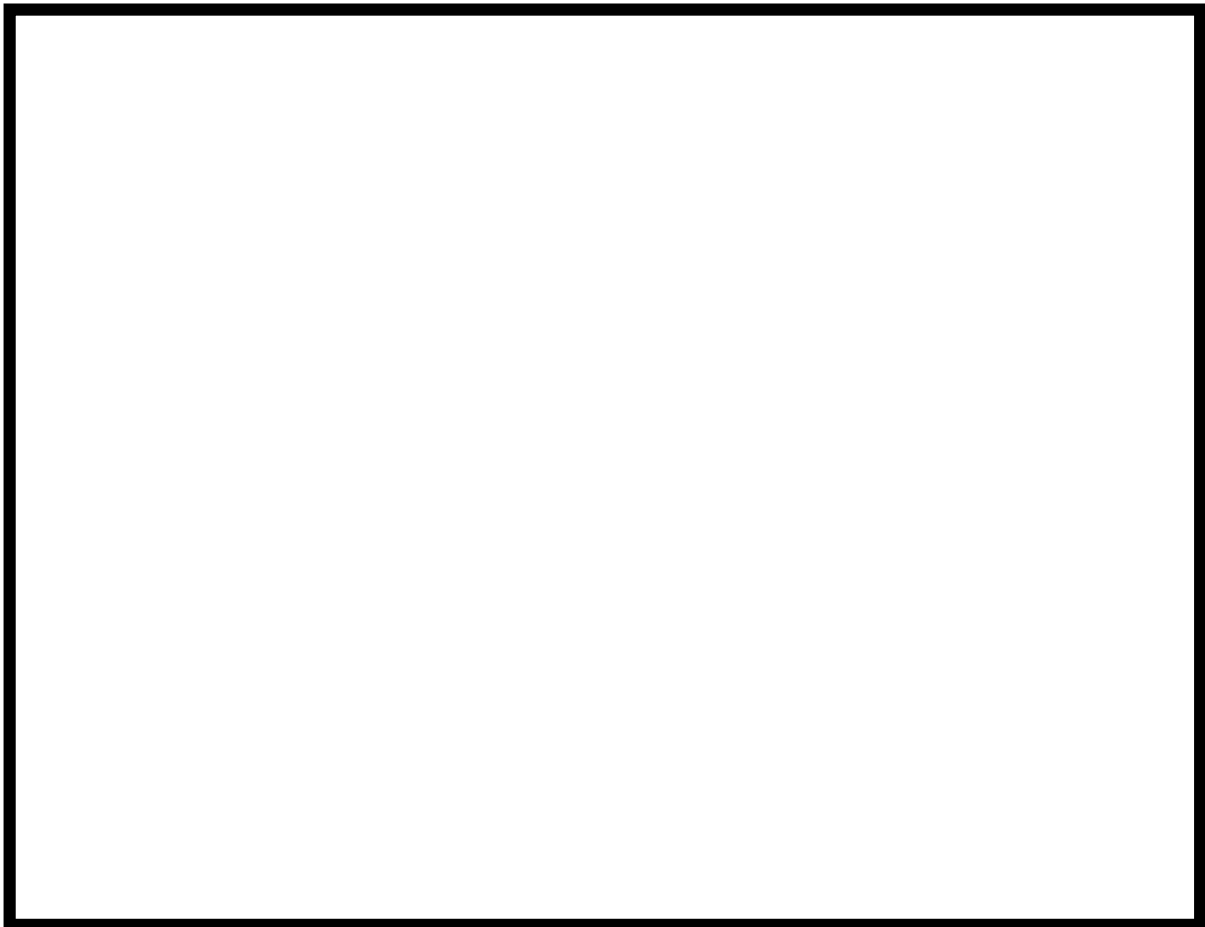
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

以上の条件のもと評価を実施したところ、第2表ならびに第3表の通りとなり、発生応力が許容応力以下となっていることを確認した。そのため、フィルタ装置内部構造物は、クリアリング荷重・地震荷重・自重による荷重が重畳した場合においても、健全性を確保することが可能である。

第2表 評価結果一覧表①

識別番号	部位名称	断面係数 Z [mm ³]	Uボルト断面積 [mm ²]	内圧 [MPa]	σ (自重) [MPa]	σ (水の噴出反力) [MPa]	σ (耐震) [MPa]	ボルト本数	σ (合計) [MPa]	許容値 [MPa]	裕度	判定	
1	400A配管	ティー	-	1.50E+06	0	7	28	146.62	181	240	1.3	○	
2		直管部(Sch 160)	-	3.88E+06	0	0.35	0.24	12.49	14	240	17.1	○	
3		直管部(Sch 40)	-	1.50E+06	0	0.28	0.07	7.62	8	240	30.0	○	
4		エルボ	-	1.50E+06	0	1.15	0.36	20.06	22	240	10.9	○	
5	200A配管	ティー	-	2.69E+05	0	8.07	15.79	36.36	61	240	3.9	○	
6		直管部	-	2.69E+05	0	2.69	5.54	7.74	16	240	15.0	○	
7	100A配管	エルボ	-	5.25E+04	0	3.69	7.40	3.02	15	240	16.0	○	
8		引張方向	-	1.57E+02	-	0.00	0.00	12.55	2	7	162	23.1	○
9	UボルトM16 (100A配管用)	せん断方向	-	1.57E+02	-	0.19	1.55	21.41	2	12	93	7.7	○
10	UボルトM20 (200A配管用)	引張方向	-	2.45E+02	-	0.00	0.00	100.04	1	101	162	1.6	○
11		せん断方向	-	2.45E+02	-	0.00	0.00	35.59	1	36	93	2.5	○

※発生応力の内圧、 σ (自重)、 σ (水の噴射反力)、 σ (耐震)は小数点以下第1位で四捨五入、発生応力の σ (合計)は小数点以下第1位で切上げ、許容値は小数点以下第1位で切捨て、裕度は小数点以下第2位で切捨てを実施。これらはすべての評価が完了後に実施している。



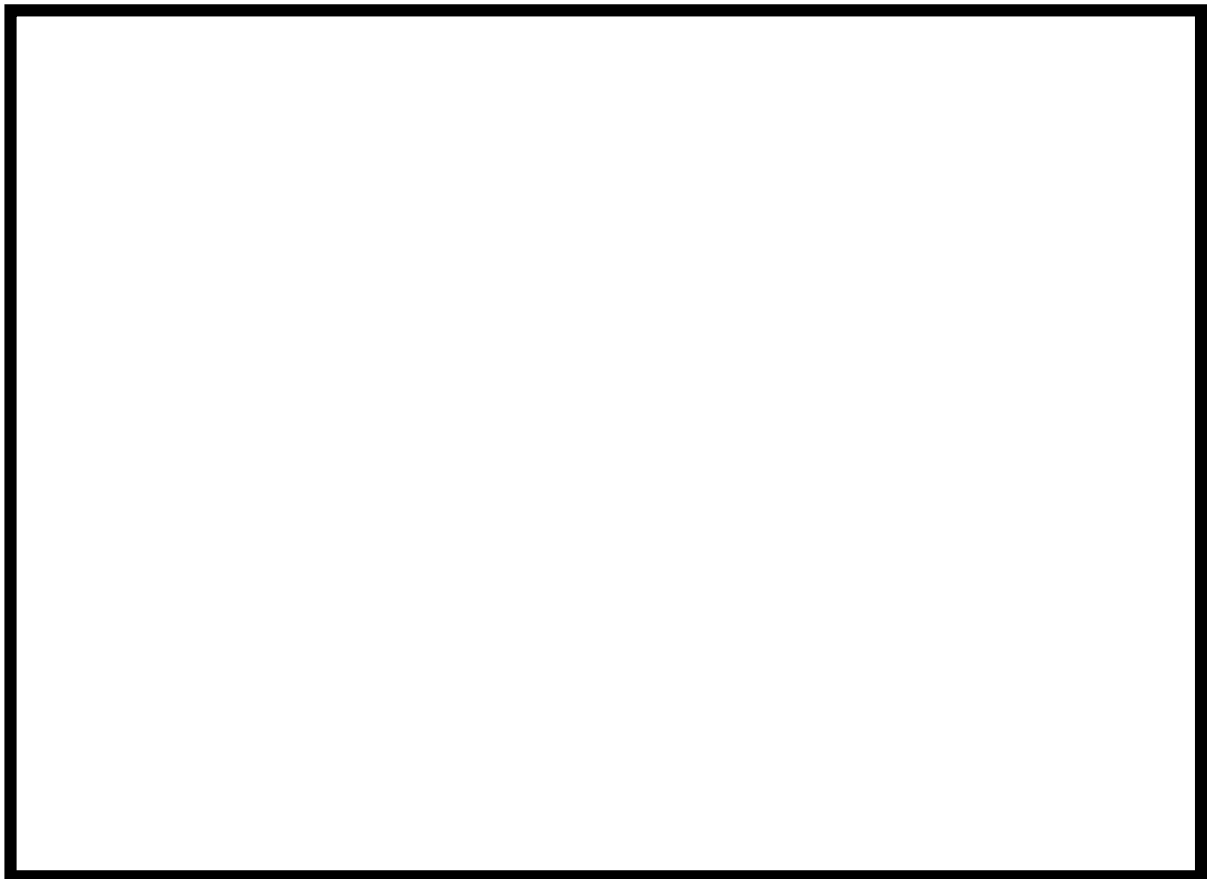
第2図 応力発生点①

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

第 3 表 評価結果一覧表②

	部位名称	X (MPa)	Y (MPa)	Z (MPa)	M (MPa)	合計 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	判定	
1	入口サポート	引張	7	-	-	-	8	162	20.2	○
2		せん断	-	5	3	-	9	93	10.3	○
3		曲げ	-	-	-	39	39	220	5.6	○
4	スクラバ配管サポート H鋼	引張	2	-	-	-	2	162	81.0	○
5		せん断	-	3	0	-	3	93	31.0	○
6		曲げ	-	-	-	22	23	220	9.5	○
7	スクラバ配管サポート C鋼	引張	1	-	-	-	2	162	81.0	○
8		せん断	-	7	0	-	7	93	13.2	○
9		曲げ	-	-	-	42	42	220	5.2	○
10	スクラバ配管サポート 支持柱	引張	5	-	-	-	6	162	27.0	○
11		せん断	-	2	2	-	5	93	18.6	○
12		曲げ	-	-	-	5	6	220	36.6	○

※発生応力の X, Y, Z, M は小数点以下第 1 位で四捨五入, 発生応力の合計は小数点以下第 1 位で切上げ, 許容値は小終点以下第 1 位で切捨て, 裕度は小数点以下第 2 位で切捨てを実施している。なお, これらはすべての評価が完了後に実施している。



第 3 図 応力発生点②

第4表 FINAS の原子力産業における使用実績

No	企業	使用ツール	概要	備考
1	JNES	FINAS	BWR 炉内構造物耐震実証試験体解析	https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000007949.pdf
2	JNES	FINAS	もんじゅ IHX ベローズの弾塑性大変形クリープ解析	https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000126973.pdf
3	JAEA	FINAS	もんじゅ 炉心構成要素の群振動解析	http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/4/2/014/14-3-5.pdf
4	JAEA	FINAS	もんじゅ 原子炉容器及び炉内構造物の鉛直方向振動解析	http://www.atom.pref.fukui.jp/senmon/dai58kai/no1-3.pdf
5	JAEA	FINAS Ver.18	再処理施設 ラグ支持貯槽の地震動による時刻歴応答解析	http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2011-006.pdf
6	PNC	FINAS Ver.10	FBR 原子炉容器モデルのスロッシング解析	http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/PNC-TN9410-87-125.pdf
7	JANTI SANE 委員会	FINAS Ver.18	柏崎刈羽原子力発電所 No.3 ろ過水タンクおよび7号機軽油タンクの地震動による時刻歴応答解析	http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-02.pdf
8	東京電力	FINAS Ver.20.1	福島第一 汚染水処理設備 円筒型タンク(1000m ³ 容量)の基準地震動S _s に対する耐震性評価	http://www.tepco.co.jp/cc/presentation/betu14_j/images/140409j0103.pdf
9	九州電力	FINAS	川内原子力発電所2号機 燃料取替用水タンクおよび復水タンクの耐震バックチェック評価	https://www.nsr.go.jp/archive/nisa/stresstest/files/kaitou15-4.pdf
10	三菱原子燃料 関西電力	FINAS	大飯発電所第1,2号機 燃料体の強度計算に用いる炉心支持構造物の地震応答解析(基準地震動S _s)	http://www.nsr.go.jp/data/000031724.pdf
11	三菱重工	FINAS	FBR 実用化炉 ポンプ組込型 IHX の振動解析	https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/434/434045.pdf
12	海洋技術安全 研究所	FINAS	原子力プラント機器の高経年化と熱流動挙動に関する研究 流路内円管列の流力弾性振動解析	https://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/21/05/02/PNM21050201-00.pdf
13	原子力発電環境 整備機構	FINAS Ver.12	最終処分施設の処分場の設計 廃棄体定置後のニアフィールドにおける温度解析	https://www.numo.or.jp/approach/technical_report/tr0401pdf/TR0401-04c4.pdf

別紙 1 5 よう素フィルタからの放射性物質の再浮遊について

■ 放射線照射による再浮遊

よう素フィルタの銀ゼオライトに捕捉されたよう素は、捕捉した放射性核種による放射線の照射を受ける。ここで、一旦銀ゼオライトに捕獲されたよう素が放射線照射下において安定的に保持できるのかを確認するため、有機よう素を吸着した銀ゼオライトに対して放射線を照射したものと、放射線を照射していないものとを比較し、放射線照射によるよう素の離脱の有無の確認を行った。

まず、よう素フィルタの銀ゼオライトが吸収する放射線量について、以下の第 1 表の条件にて評価を行った。

第 1 表 銀ゼオライト吸収放射線量評価条件

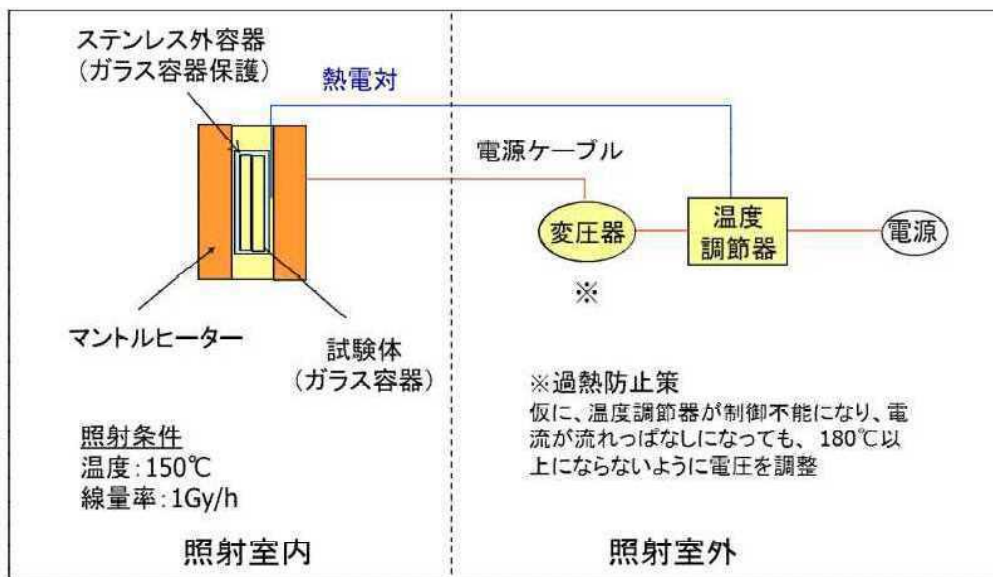
項目	条件
対象プラント	・ ABWR
事故シナリオ	・ シナリオレス（圧力容器から格納容器内に CsI が 100% 放出すると想定）
格納容器 pH 制御	・ 格納容器の pH 制御は無し
ベントタイミング	・ 出力停止後 1 時間後（線量を保守的に算定するための仮定）
対象線源	・ よう素フィルタに蓄積したよう素（有機よう素、無機よう素）及びよう素が崩壊して生成したキセノン。放射線としてはガンマ線及びベータ線を考慮
格納容器外への放出割合	・ 有機よう素=0.04, 無機ヨウ素=0.91×0.5（格納容器への沈着）×0.01（スプレーによる除去）×0.1（S/C での除去） ・ D/W ベントの場合も、無機ヨウ素は少なくとも一度は S/C スクラビングを受けるものと考えられるため、S/C での除去も考慮する
フィルタ装置の DF	・ 無機よう素, 有機よう素=1（除去されない）
よう素フィルタの DF	・ 無機ヨウ素, 有機よう素=∞（全て除去される）
線源分布	・ よう素フィルタの吸着材全体に均一に吸着されると想定
評価時間	・ 10 万時間（積算値がほぼ変化しなくなるまでの時間）
評価方針	・ ORIGEN2 コードにてよう素フィルタに蓄積したよう素、キセノンの放出エネルギー（崩壊熱）の時間変化を評価し、この放出エネルギーが全量よう素フィルタに充填される銀ゼオライト全量で 100% 吸収されたとして、吸収線量を評価（系外への漏えい無し）

第 1 表の条件にて、よう素フィルタに充填される銀ゼオライトに吸収される累積放射線量を評価したところ、銀ゼオライト 1g 当たり 20kGy との結果となった。

上記の評価結果を踏まえ、第 2 表の条件にて銀ゼオライトの放射線照射試験を実施した。また、試験設備の概略構成図を第 1 図に示す。

第2表 銀ゼオライト放射線照射試験条件

項目	条件
供試体	<ul style="list-style-type: none"> 有機ヨウ素吸着済みの銀ゼオライト（1サンプル1g） 有機ヨウ素を性能破過するまで吸着した
照射線量	<ul style="list-style-type: none"> 累積照射線量：4.1kGy, 18.9kGy, 28.4kGy 照射線量率：1.02Gy/h, 1.05Gy/h, 1.08Gy/h
試験温度	<ul style="list-style-type: none"> 150℃
分析装置	<ul style="list-style-type: none"> SEM/EDX



第1図 試験設備概略構成図



第2図 試験サンプル，保護容器



第3図 放射線照射設備

第2表の条件にて、有機よう素吸着済みの銀ゼオライトに放射線を照射したものと、放射線を照射していないものに対して成分分析を実施したところ、第3表の通りとなった。また、放射線照射量とよう素・銀の濃度比の関係は第4図の通りとなった。これらの結果より、放射線照射の有無、累積放射線量の大きさに関わらず、よう素と銀の濃度比はほぼ一定であった。そのため、放射線照射により、銀ゼオライトに捕捉されたよう素の再揮発は生じないと考えられる。

第3表 成分分析結果

--

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

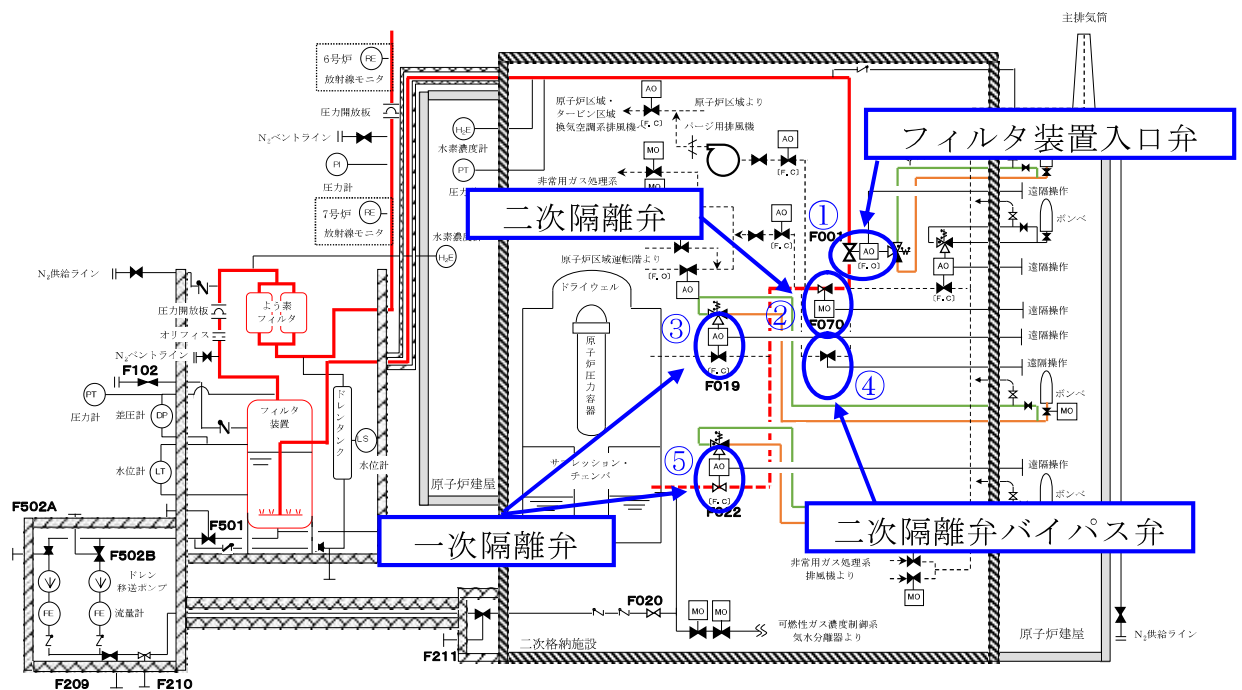


第4図 累積放射線量とよう素・銀濃度比の関係

別紙 1 6 格納容器圧力逃がし装置の弁選定の考え方

格納容器圧力逃がし装置を使用するためには、第 1 図に示す通り、一次隔離弁、二次隔離弁、フィルタ装置入口弁の合計 3 つの弁が「開」となる必要がある。一次隔離弁とフィルタ装置入口弁には空気駆動弁 (AO 弁)、二次隔離弁には電動駆動弁 (MO 弁) を選定している。それぞれの弁の駆動方式・弁の状態 (NC (通常状態「閉」; Normal Close), NO (通常時「開」; Normal Open), FC (電源喪失時「閉」; Failure Close), FO (電源喪失時「開」; Failure Open)) 及び採用理由について第 1 表に示す。

一方、二次隔離弁については、単一故障により格納容器圧力逃がし装置、ならびに耐圧強化ベントともに機能を喪失し、格納容器ベントが実施できなくなる。そのため、格納容器減圧機能の信頼性を向上されるため、二次隔離弁をバイパスする二次隔離弁バイパス弁を設置する。なお、二次隔離弁バイパス弁は手動駆動弁 (HO 弁) とする。



第 1 図 格納容器圧力逃がし装置系統概要と主要弁

第1表 格納容器圧力逃がし装置 弁選定理由

No.	弁名称	駆動方式 弁の状態		選定理由
① ②	格納容器一次隔離弁 (ドライウエル側, サプレ ッション・チェンバ側)	空気 駆動	NC FC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 格納容器隔離機能の信頼性を高めるためには、FC 動作の空気駆動弁が望ましいこと ■ 全開・全閉の運用であること ■ 苛酷事故時の作業員の弁操作に関する労力の低減を図ること (弁駆動空気系の改造により、全電源が喪失した状態においても、二次格納施設外よりポンベの空気を弁駆動部へ供給することにより開操作が可能。労力が非常に小さい) ■ エクステンションにより、二次格納施設外からの人力操作も可能であること
③	格納容器二次隔離弁	電動 駆動	NC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 開度調整が必要であること ■ エクステンションにより、二次格納施設外からの人力操作が可能であること
④	フィルタ装置入口弁	空気 駆動	NO FO	<ul style="list-style-type: none"> ■ 格納容器圧力逃がし装置の機能信頼性を高めるためには、FO 動作の空気駆動弁が望ましいこと ■ 全開・全閉の運用であること ■ 苛酷事故時の作業員の弁操作に関する労力の低減を図ること (弁駆動空気系の改造により、全電源が喪失した状態においても、二次格納施設外よりポンベの空気を弁駆動部へ供給することにより閉操作が可能。労力が非常に小さい) ■ エクステンションにより、二次格納施設外からの人力操作が可能であること
⑤	二次隔離弁バイパス弁	手動 駆動	NC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 開度調整が必要であること ■ 駆動部の構造が非常にシンプルであり、信頼性が高いこと ■ エクステンションにより、二次格納施設外からの人力操作が可能であること

一方、格納容器圧力逃がし装置（FCVS）を設置している諸外国の弁構成を以下に例示する。

【フィンランド】

フィンランド BWR プラントに設置されている FCVS 系統の概略系統図を第 2 図に示す。V1 と V20 は圧力開放板である。ベントラインに設置している弁は全て手動駆動弁で構成されている。D/W のラインにはバイパスラインが設置されており、V2, V3 は通常時「開」となっている。また、V21, V23 についても通常時「開」となっている。そのため、操作員がベントラインに設置された弁の「開」操作を実施しなくても、格納容器圧力が規定の値まで上昇し、V1 と V20 の圧力開放板が開放すれば、D/W のバイパスラインより格納容器ベントは自動的に開始される。



第 2 図 概略系統図（フィンランド BWR プラント）

【ドイツ】

ドイツの BWR プラントに設置されている FCVS 系統の概略系統図を第 3 図に示す。FCVS 系統は、2 ユニットで共有する設計となっている。ベントラインには、格納容器隔離のための電動弁が 2 つと、ユニット間の切り替えのための電動弁が 1 つ設置されている。また、フィルタ装置の出口側には逆止弁が設置されている（FCVS 使用後にフィルタ装置内の水蒸気が凝縮し、フィルタ装置内圧力が負圧となった場合に、スタックから空気を吸い込むことがないように設置されているものと考えられる）。



第3図 概略系統図（ドイツ BWR プラント）

【スイス】

スイスの BWR プラントに設置されている FCVS 系統の概略系統図を第4図に示す。ベントラインには電動弁が2つ設置されており、格納容器から1つめの弁は通常時「開」、2つめの弁は通常時「閉」となっている。また、2つめの弁をバイパスするラインが設置されており、バイパスラインには圧力開放板が設置されている。そのため、操作員が2つめの弁の「開」操作を実施しなくても、格納容器圧力が規定の値まで上昇し、圧力開放板が開放すれば、格納容器ベントは自動的に開始される。



第4図 概略系統図（スイス BWR プラント）

フィンランドならびにスイスのプラントでは、圧力開放板により格納容器ベントの開始に際して人的介入が不要な弁構成となっている。柏崎刈羽 6/7 号炉は格納容器ベントを実施する際は、必ず操作員による弁操作が必要な構成としている。これは、格納容器ベントのタイミングは、あくまでも人間が決めるべきであるという設計思想によるものである。ただし、弁操作を実施しないと格納容器ベントができないことから、弁は事故時に確実に操作できることが要求される。そのため、空気駆動弁には、エクステンションによる人力操作機構とポンペによる駆動機構を二次格納施設外に設置し、電動駆動弁についてもエクステンションによる人力操作機構を二次格納容器外に設置している。また、電動駆動弁（二次隔離弁）が単一故障した場合に備え、それをバイパスする手動駆動弁を設置し、弁操作に対する信頼性の向上を図った構成としている。

また、ドイツのプラントでは、フィルタ装置の下流側に逆止弁が設置されているが、柏崎刈羽 6/7 号炉には設置していない。これは、逆止弁の固着等により、格納容器ベントの実施が阻害されるのを防止するためである。しかしながら、ベント実施後には格納容器圧力逃がし装置内が負圧となり、排気口から空気を吸い込む可能性がある。そのため、格納容器ベント実施後には、可搬型窒素供給装置により格納容器圧力逃がし装置の窒素パージを実施することとしている。

以上より、諸外国のプラントと柏崎刈羽 6/7 号炉では、格納容器圧力逃がし装置の弁構成が異なるが、これは設計思想の違いであり、諸外国の懸念事項に対して、柏崎刈羽 6/7 号炉の弁構成であったとしても対策は施せていると考えている。

別紙 1 7 格納容器圧力逃がし装置と他系統との隔離

格納容器圧力逃がし装置は、既設の不活性ガス系と耐圧強化ベントのラインよりフィルタ装置にベントガスを導くが、他の系統・機器とは弁で隔離することで、他の系統や機器への悪影響を防止する設計としている。それぞれの系統における隔離弁の駆動方式等を第 1 表に整理する。各弁の構成については、第 1 図に示す。

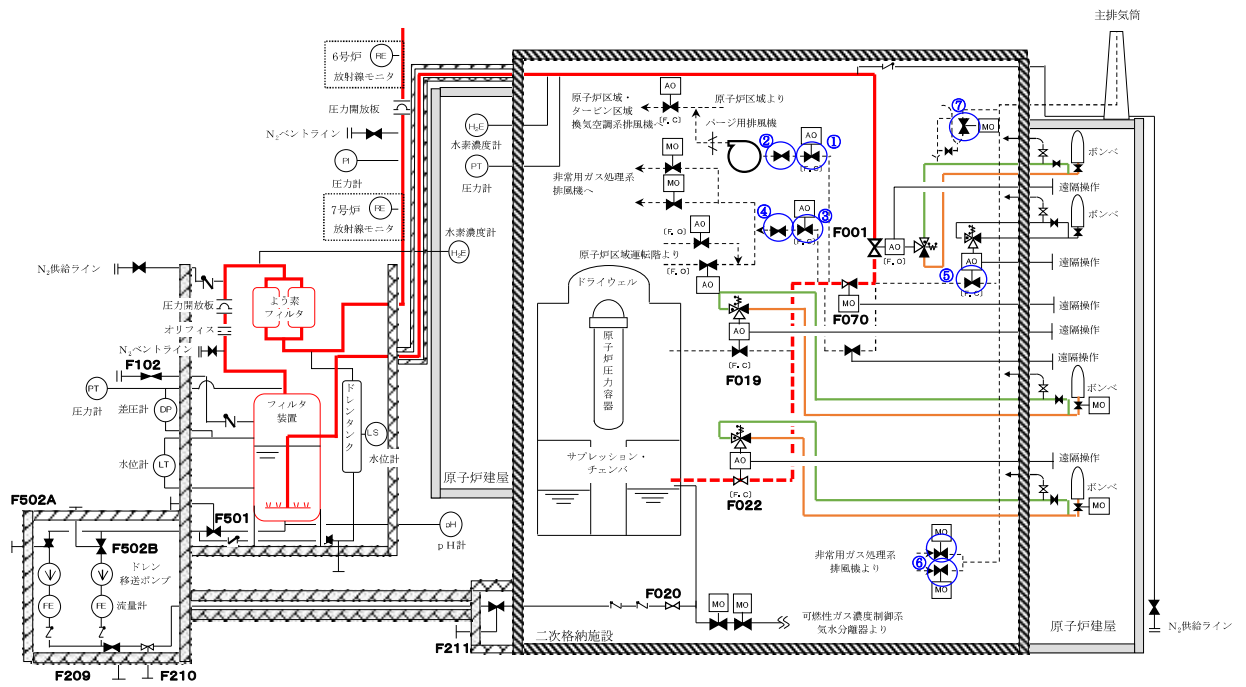
第 1 表 格納容器圧力逃がし装置に接続している他の系統の隔離弁

系統名称	系統の隔離弁				採用理由
	一次隔離弁		二次隔離弁		
換気空調系 ①②	空気 駆動	NC FC	手動 駆動	NC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 既設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。 ■ 新設手動駆動弁（二次隔離弁） 格納容器圧力逃がし装置から換気空調系の隔離を確実にする観点から、手動駆動弁を新設する。
非常用ガス処理系 ③④	空気 駆動	NC FC	手動 駆動	NC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 既設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。 ■ 新設手動駆動弁（二次隔離弁） 格納容器圧力逃がし装置から非常用ガス処理系の隔離を確実にする観点から、手動駆動弁を新設する。
耐圧強化ベント ⑤⑥⑦	空気 駆動	NC FC	電動 駆動	NC	<ul style="list-style-type: none"> ■ 新設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。 ■ 既設電動駆動弁（二次隔離弁） 電動駆動弁が採用されている。
			電動 駆動	NO	

①～⑥の弁については、系統作動時の圧損を減らすよう考慮してバタフライ弁としており、弁座シール材には EP ゴムを用いている。

弁座シール材に EP ゴムを用いたバタフライ弁においては、格納容器一次隔離弁が晒される環境を模した条件にてシール機能確認試験を実施しており、閉じこめ機能は確保可能であることを確認している。（小型弁試験装置により、EP ゴム弁座シールのバタフライ弁を 0.3MGy の累積放射線量を照射し、PCV 設計圧力の 2 倍の圧力・200℃の蒸気暴露環境に 168 時間晒した状態において、シール機能の健全性を確認する試験を実施）

一方、⑦については、玉型弁としており、弁座シールはメタルタッチである。そのため、放射線照射に対してシール機能を確保可能である。



第1図 格納容器圧力逃がし装置系統概要と他系統隔離弁

別紙 1 8 圧損計算の詳細

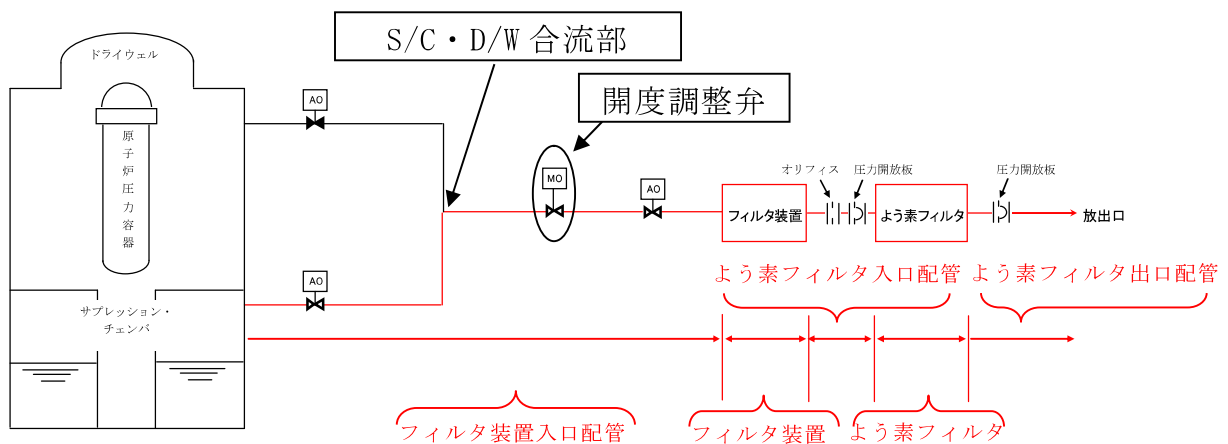
1 格納容器圧力毎の圧力損失

1.1 圧力損失・流量の評価

格納容器圧力逃がし装置を流れるガスの流量は、格納容器の圧力に依存し変化する。格納容器圧力逃がし装置使用時、格納容器圧力逃がし装置には格納容器内にて発生する水蒸気量に応じた流量のガスを通気し、格納容器圧力はその流量に応じた圧力にて静定する。

格納容器圧力が 2Pd (620kPa [gage]), 1Pd (310kPa [gage]) の際のガスの流量、各部の圧力損失、ならびに事故発生 1 週間後および 1 ヶ月後に発生する水蒸気量を通気する際の格納容器圧力、各部の圧力損失を第 1.1-1, 2 表に示す。なお、二次隔離弁 (MO 弁) については、ベント時は中間開度にて運用することとしている。そのため、二次隔離弁の開度の影響についても考慮することとする。また、各部の圧力勾配について、第 1.1-2, 3 図に示す。

なお、これらについては S/C を用いたベントの場合の評価であるが、D/W を用いた場合のベントにおいても、ほぼ同じ評価結果となる。(S/C 取出口～S/C・D/W 合流部と D/W 取出口～S/C・D/W 合流部の配管口径は同一であり、ルート長さに大きな違いはないため)



第 1.1-1 図 格納容器圧力逃がし装置 主ライン概略構成図

第 1.1-1 表 (6号炉) 格納容器圧力に対するガス流量と各部圧力損失

格納容器圧力 (kPa[gage])	二次 隔離弁開 度	ガス流量 (kg/s)	各部圧力損失 (kPa)				
			フィルタ装 置入口配管	フィルタ 装置	よう素 フィルタ 入口配管	よう素 フィルタ	よう素 フィルタ 出口配管

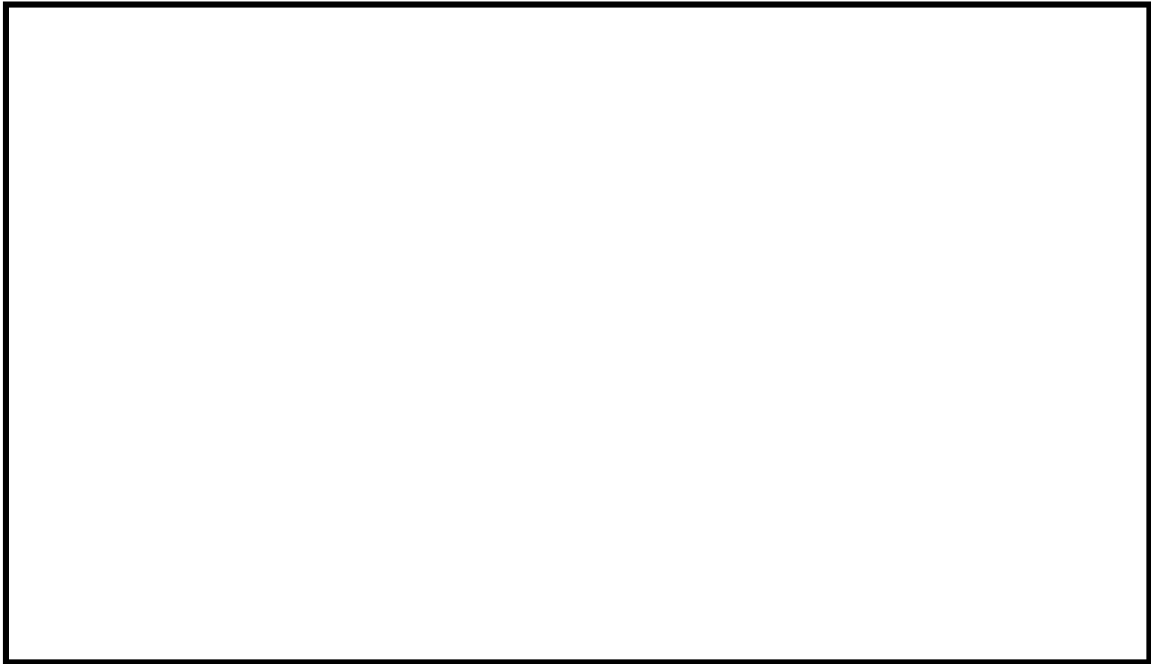
第 1.1-2 表 (7号炉) 格納容器圧力に対するガス流量と各部圧力損失

格納容器圧力 (kPa[gage])	二次 隔離弁 開度	ガス流量 (kg/s)	各部圧力損失 (kPa)				
			フィルタ装 置入口配管	フィルタ 装置	よう素 フィルタ 入口配管	よう素 フィルタ	よう素 フィルタ 出口配管

※ 1, 2 フィルタ装置, よう素フィルタの圧力損失については, 最大流量時に想定される圧力損失値を, 保守的に全評価ケースに適用

※ 3 事故発生 1 週間後に格納容器内にて発生する蒸気量

※ 4 事故発生 1 ヶ月後に格納容器内にて発生する蒸気量



第 1.1-2 図 (6号炉) 格納容器圧力逃がし装置 各部圧力勾配



第 1.1-3 図 (7号炉) 格納容器圧力逃がし装置 各部圧力勾配

第 1.1-1, 2 表に示す通り, フィルタ装置, よう素フィルタに非常に保守的な圧力損失を見込んだとしても, 事故発生 1 週間後, 1 ヶ月後に格納容器内において発生する蒸気全量を通気し, 格納容器の減圧状態を維持することが可能である。

なお, 格納容器圧力逃がし装置の系統における各部圧力損失のうち, ガスの流量に関連しないものは水スクラバ部の水頭圧のみである。それ以外のものは,

ガス流量が小さいほど圧力損失も小さくなる（ガス流量が0であれば、圧力損失も0となる）。そのため、格納容器の圧力がスクラバ水の水頭圧以上であれば、格納容器圧力逃がし装置のガスの通気は可能である。

1.2 フィルタ装置，よう素フィルタの圧力損失

【フィルタ装置】

1.1 の評価において、フィルタ装置の圧力損失としては、スクラバ部圧力損失、スクラバ水頭圧、金属フィルタ圧力損失を考慮している。水スクラバ部については最大流量時の圧力損失 []、スクラバ水頭圧については設計上の許容最大スクラバ水位時における水頭圧 []、金属フィルタ部については設計上の許容最大圧力損失 [] を考慮している。

水スクラバ部ならびに金属フィルタ部については、流量が低下すれば圧力損失も低下するが、1.1 では保守的に最大流量時の圧力損失に固定して評価を実施している。また、金属フィルタ部の圧力損失は、想定されるエアロゾル負荷量（大LOCA+全ECCS機能喪失+SB0，S/Cベント時のエアロゾル負荷量）に対して十分な裕度を持った設計としており、最大流量時においても許容最大圧力損失 [] には到達しないことを確認している。

なお、各圧力損失値の評価には、実機のスクラバ、金属フィルタを用いた当社FV試験設備にて取得した圧力損失データを用いている。

【よう素フィルタ】

1.1 の評価において、よう素フィルタの圧力損失としては、吸着塔の圧力損失を考慮しており、最大流量時の圧力損失 [] を考慮している。吸着塔の圧力損失は、流量が低下すれば圧力損失も低下するが、ここでは保守的に最大流量時の圧力損失に固定して評価を実施している。

なお、圧力損失値の評価には、実機の吸着塔を用いた当社のように素フィルタ試験設備にて取得した圧力損失データを用いている。

2 設計の意図

格納容器圧力逃がし装置の系統設計の意図は、格納容器圧力が 2Pd (620kPa [gage]) の際に、31.6kg/s の蒸気を排出可能であることである。（格納容器減圧という目的に対して、十分な容量を持つこと）

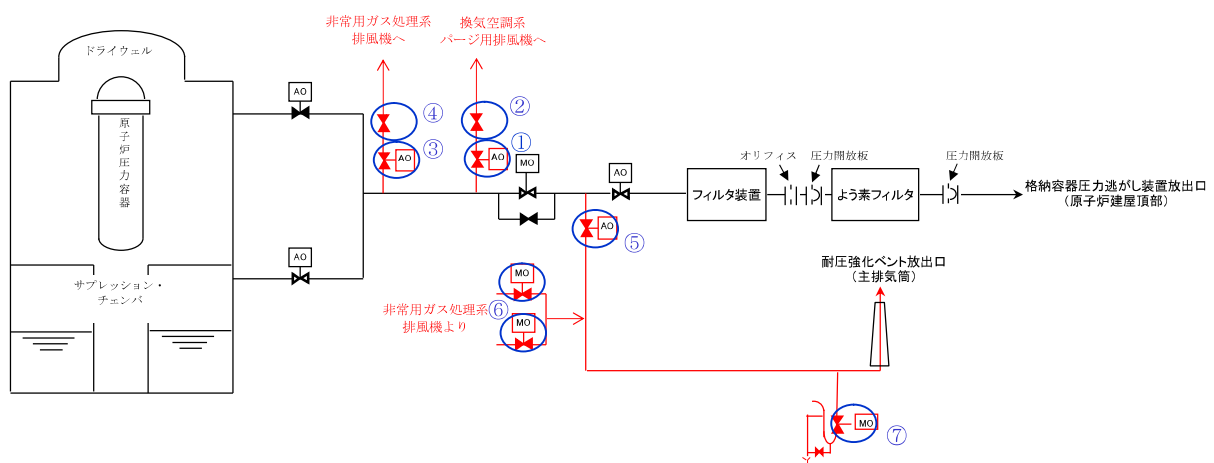
系統設計としては、これを満足するよう、配管ルート、配管口径、オリフィス径等の設定をしている。

フィルタ装置，よう素フィルタについては、この系統設計により評価されるガス条件において性能が満足できるよう、設計している。

別紙19 格納容器圧力逃がし装置と他系統との隔離について

1 他系統の接続位置

格納容器圧力逃がし装置には、排気経路に非常用ガス処理系、換気空調系ならびに耐圧強化ベント系が接続されている。非常用ガス処理系と換気空調系との接続箇所は、第1図に示す通り一次隔離弁と二次隔離弁の間となっている。また、耐圧強化ベント系は二次隔離弁とフィルタ装置入口弁との間に接続され、耐圧強化ベント系には非常用ガス処理系が接続されている。また、格納容器圧力逃がし装置とそれぞれの系統を隔離する弁は各2弁ずつ設置し、格納容器圧力逃がし装置使用中に、格納容器圧力逃がし装置と確実に隔離できるようにし、ベントガスに含まれる水素が原子炉建屋に回り込むことを防止する設計としている。



第1図 格納容器圧力逃がし装置 接続他系統概略構成図

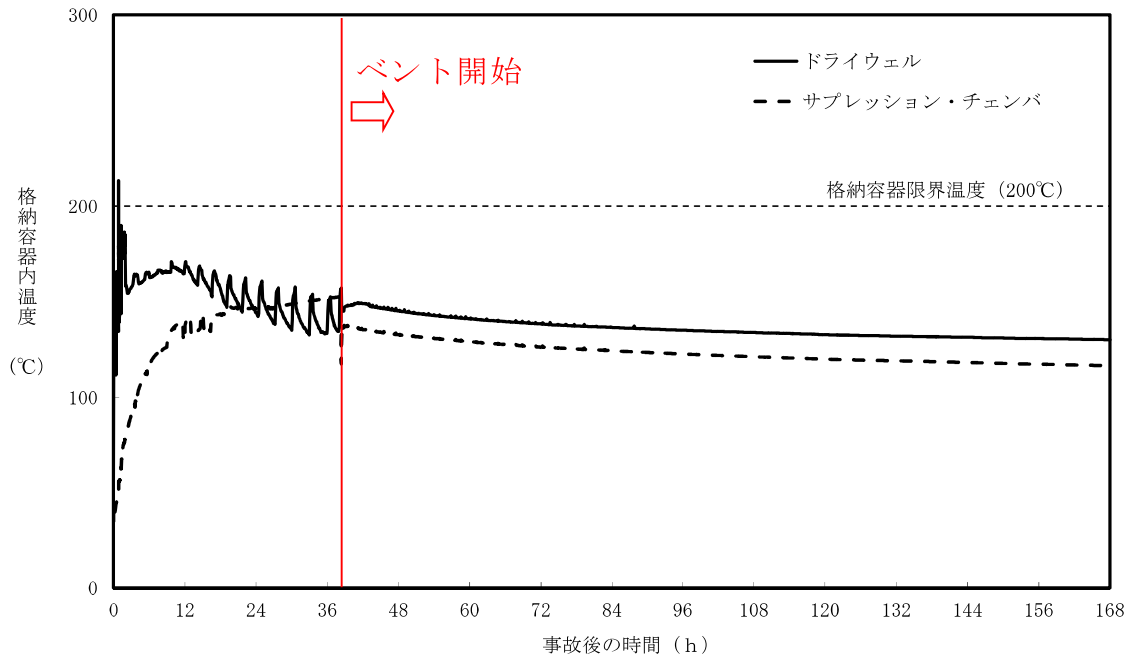
2 格納容器圧力逃がし装置運用時に他系統隔離弁が受ける負荷

炉心損傷後に格納容器圧力逃がし装置を運用する場合、まず二次隔離弁を「調整開」とし、次に一次隔離弁を「開」とすることで、格納容器ベントを開始する。そのため、格納容器圧力逃がし装置に接続される非常用ガス処理系、換気空調系、ならびに耐圧強化ベント系と格納容器圧力逃がし装置を隔離している弁は、一次隔離弁を「開」操作し、格納容器ベントを開始するタイミングで、ベントガスと接することとなる。

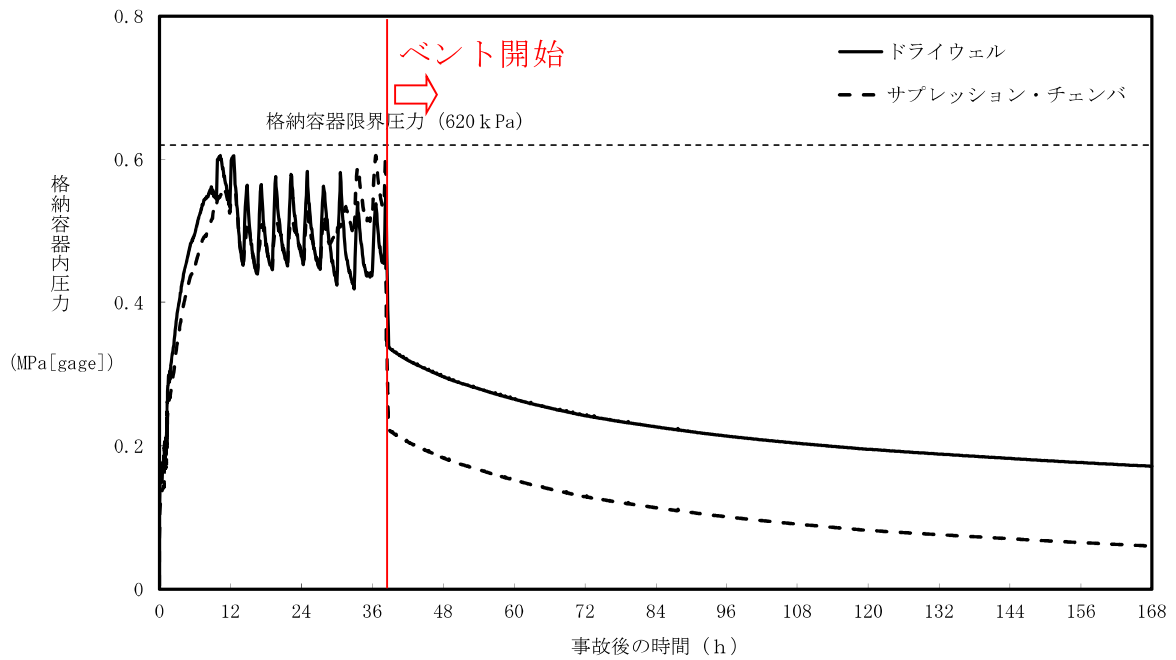
ここで、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離している弁の部分におけるベントガスの温度・圧力は、格納容器から当該弁までの配管部におけるエネルギー損失により、格納容器の温度・圧力よりも小さな値となる。大LOCA+SBO+ECCS 機能喪失シナリオにおける格納容器の温度・圧力の推移は第2, 3図の通りとなる。

第2図より、格納容器の温度はベント開始後 200℃以下となる。そのため、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離している弁が晒される温度も 200℃以下となる。また、第3図より、格納容器の圧力はベント開始直前に PCV の設計圧力の 2 倍となるが、ベント開始後は即座に圧力が低下している。そのため、格納容器

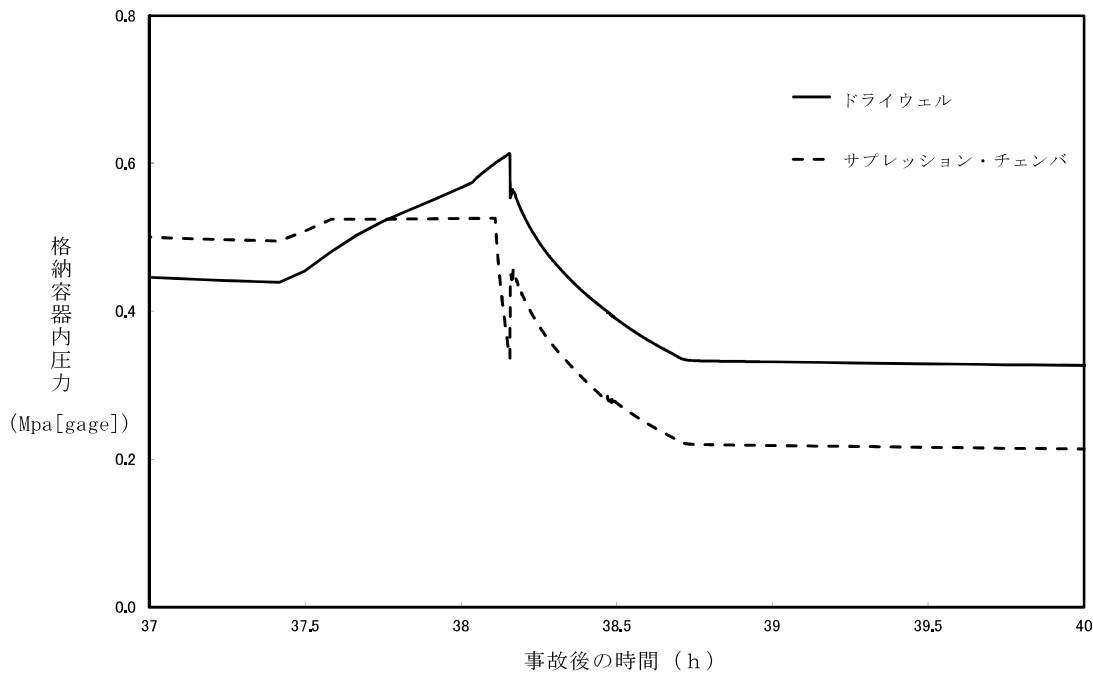
圧力逃がし装置と他系統を隔離している弁が晒される圧力も PCV の設計圧力の 2 倍以下となる。



第 2 図 格納容器温度推移（大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失シナリオ）



第 3 図 格納容器圧力推移（大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失シナリオ）



第4図 格納容器圧力推移（ベント初期部拡大）

一方、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離する①～⑥の弁は、弁シール材にEPゴムを用いたバタフライ弁としている。EPゴムシール材のバタフライ弁については、200℃・PCV設計圧力の2倍の圧力に晒した状態において、シール機能を確保可能であることを確認している。そのため、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離する弁のシール機能は確保可能である。また、シール機能をより強化するため、各弁のシール材をより耐環境性に優れた改良EPDMへ変更する。⑦の弁は玉型弁であり、弁座シールはメタルタッチであることから、耐温度、耐圧力性能は非常に高く（圧力クラス600LB）、格納容器圧力逃がし装置使用時において、弁のシール機能を確保可能である。

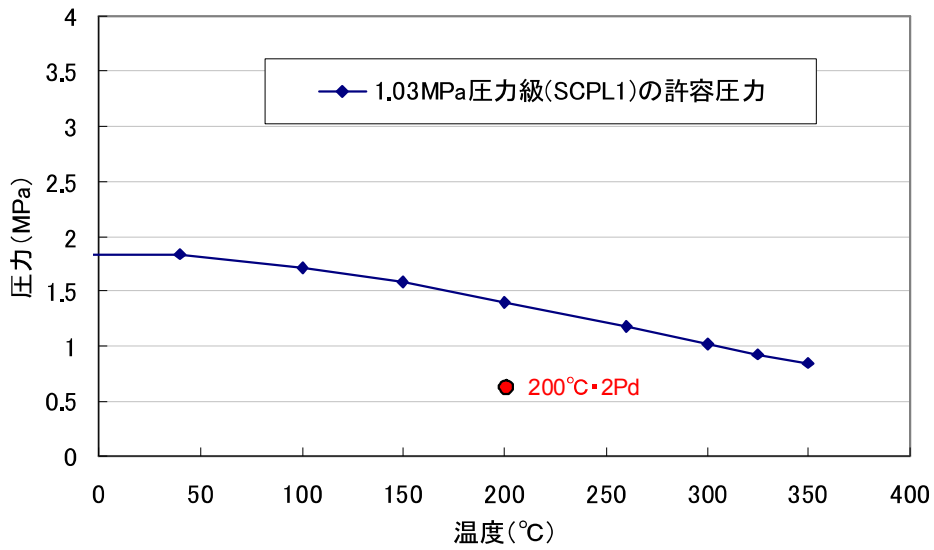
格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離する弁の駆動方式、状態、圧力クラス、採用理由について第1表にまとめる。第1表に記載の通り、格納容器圧力逃がし装置から他系統を隔離する1つめの弁（一次隔離弁）については、事故時に確実に「閉」動作するよう、Failure Closeの空気駆動弁を採用している。

また、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離する弁は、全て圧力クラスを150LB、ならびに600LBとしており、第5、6図に示す通り200℃・PCV設計圧力の2倍の圧力は、許容圧力を下回る。そのため、200℃・PCV設計圧力の2倍の圧力に対して、耐圧部の強度に問題はない。

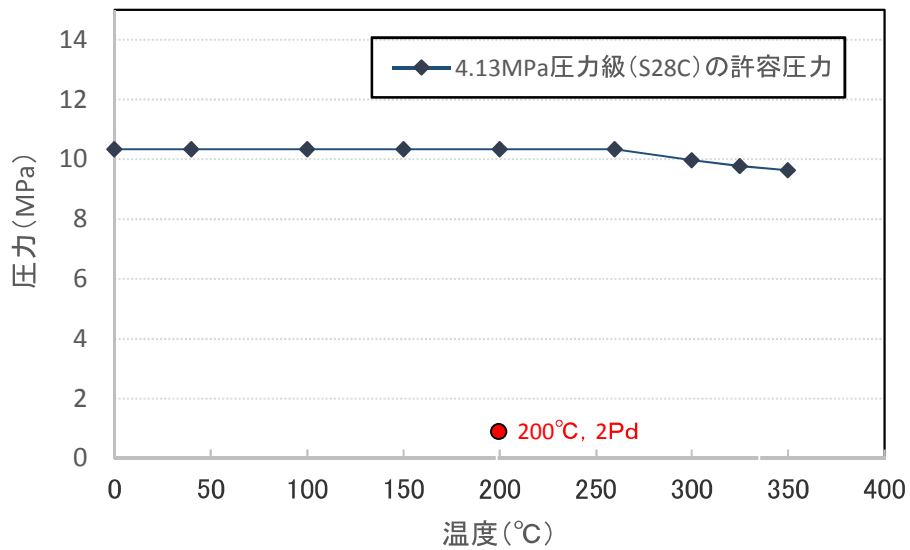
以上より、格納容器圧力逃がし装置と他系統を隔離する弁は、晒される環境条件に対して、隔離機能を有すると考える。

第 1 表 格納容器圧力逃がし装置に接続している他の系統の隔離弁

系統名称	一次隔離弁			二次隔離弁			採用理由
	駆動方式 状態		圧力 クラス [LB]	駆動方式 状態		圧力 クラス [LB]	
換気空調系 ①②	空気 駆動	NC FC	150	手動 駆動	NC	150	<p>■ 既設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。</p> <p>■ 新設手動駆動弁（二次隔離弁） 格納容器圧力逃がし装置から換気空調系の隔離を確実にする観点から、通常時「閉」の手動駆動弁を新設する。</p>
非常用ガス 処理系 ③④	空気 駆動	NC FC	150	手動 駆動	NC	150	<p>■ 既設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。</p> <p>■ 新設手動駆動弁（二次隔離弁） 格納容器圧力逃がし装置から非常用ガス処理系の隔離を確実にする観点から、通常時「閉」の手動駆動弁を新設する。</p>
耐圧強化 ベント系 ⑤⑥⑦	空気 駆動	NC FC	150	電動 駆動	NC	150	<p>■ 新設空気駆動弁（一次隔離弁） 系統の隔離機能が要求される観点から、FC の空気駆動弁が採用されている。</p> <p>■ 既設電動駆動弁（二次隔離弁） 電動駆動弁が採用されている。</p>
				電動 駆動	NO	600	



第5図 150LB級バタフライ弁の設計上の許容圧力確認結果
 (出展：JSME 設計・建設規格 2005年版/2007 追補版)



第6図 600LB級バタフライ弁の設計上の許容圧力確認結果
 (出展：JSME 設計・建設規格 2005年版/2007 追補版)

3. 分岐点から他系統隔離弁までの位置関係及び水素滞留について

6号炉及び7号炉について、格納容器圧力逃がし装置と接続される他系統との隔離弁までの配管口径及び容積等を第2表、系統図を第7図、鳥瞰図を第8図及び第9図に示す。

ベント時において、これら他系統と隔離弁までの閉止空間における水素滞留の評価を「BWR配管における混合ガス（水素・酸素）蓄積防止に関するガイドライン（第3版）」に基づき実施した。

評価の結果、6号炉の換気空調系の隔離弁までの配管、及び耐圧強化ベント系への二次隔離弁及び二次隔離弁バイパス弁までの配管、及び7号炉の耐圧強化ベント系への二次隔離弁バイパス弁までの配管については、水平枝管であり閉止端までの長さが短いため、水素が蓄積することはない。

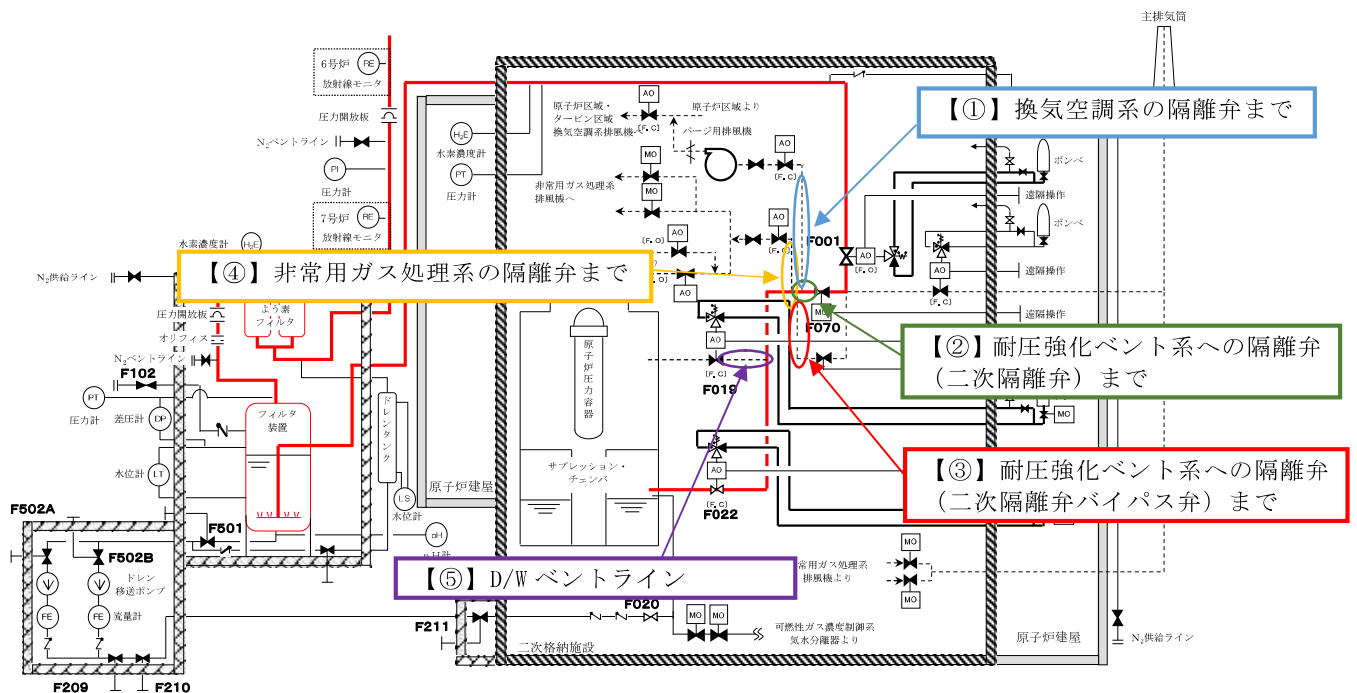
一方、6号炉及び7号炉の非常用ガス処理系の隔離弁までの配管、及び7号炉の耐圧強化ベント系への二次隔離弁までの配管については、水平及び上向きで分岐する組合せ枝管であり閉止端までの長さが長いため、水素が滞留する可能性がある。そのため、ベント時に水素を連続してベントの主ラインに排出させるベントラインを設置し、水素が蓄積することのない設計とする。

また、7号炉においては、W/Wベント時にD/W側一次隔離弁までの配管合流部において水素が滞留する可能性がある。そのため、W/Wベント時に水素を連続してベントの主ラインに排出させるベントラインを設置し、水素が蓄積することのない設計とする。一方で6号炉については、W/Wベント時においては配管合流部よりD/W側一次隔離弁、D/Wベント時には配管合流部よりW/W側一次隔離弁までが水平枝管（下り勾配）であるため、水素が蓄積することはない。

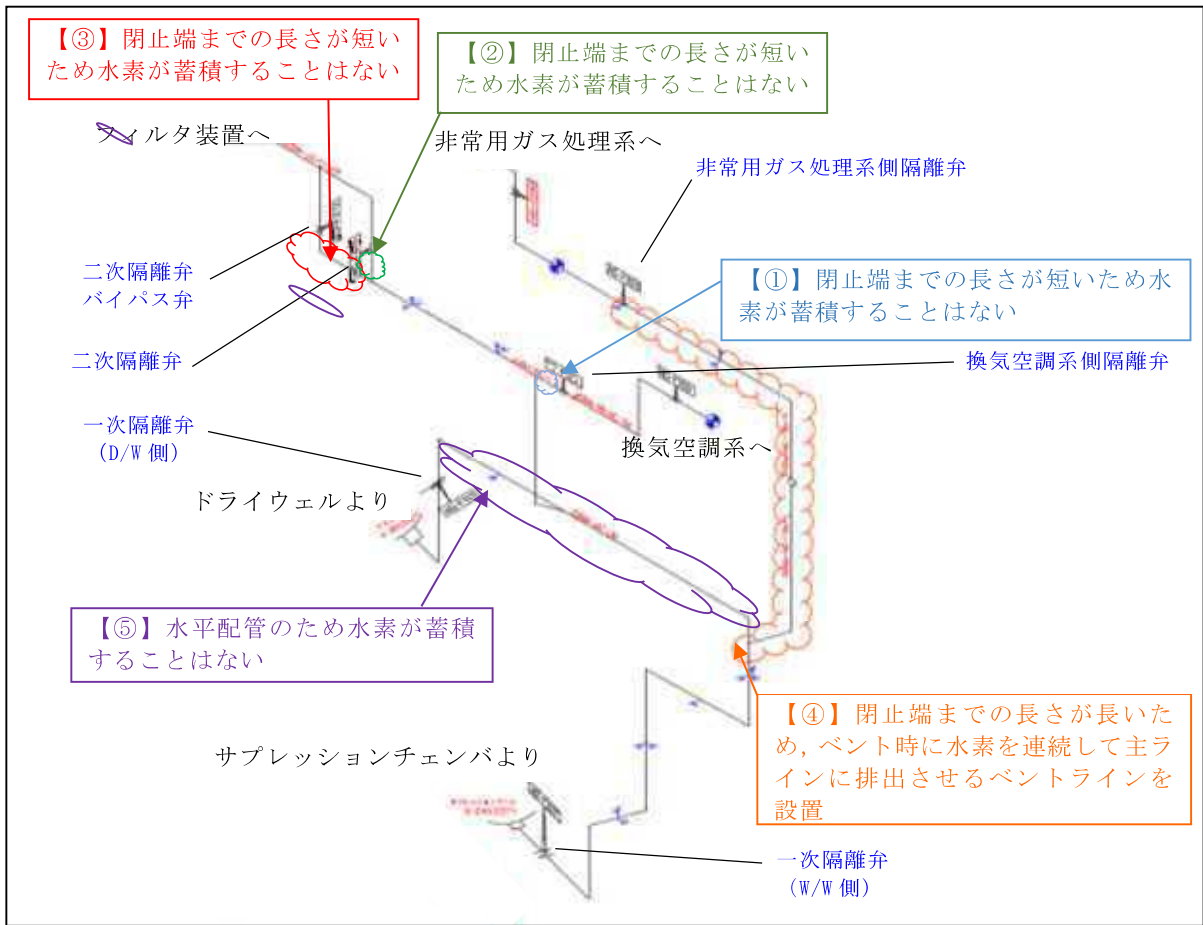
上記を踏まえて、水素滞留防止のために設置するベントラインの設置箇所を第10図～第12図に示す。

第2表 主ラインから他系統と隔離する弁までの配管口径及び容積等

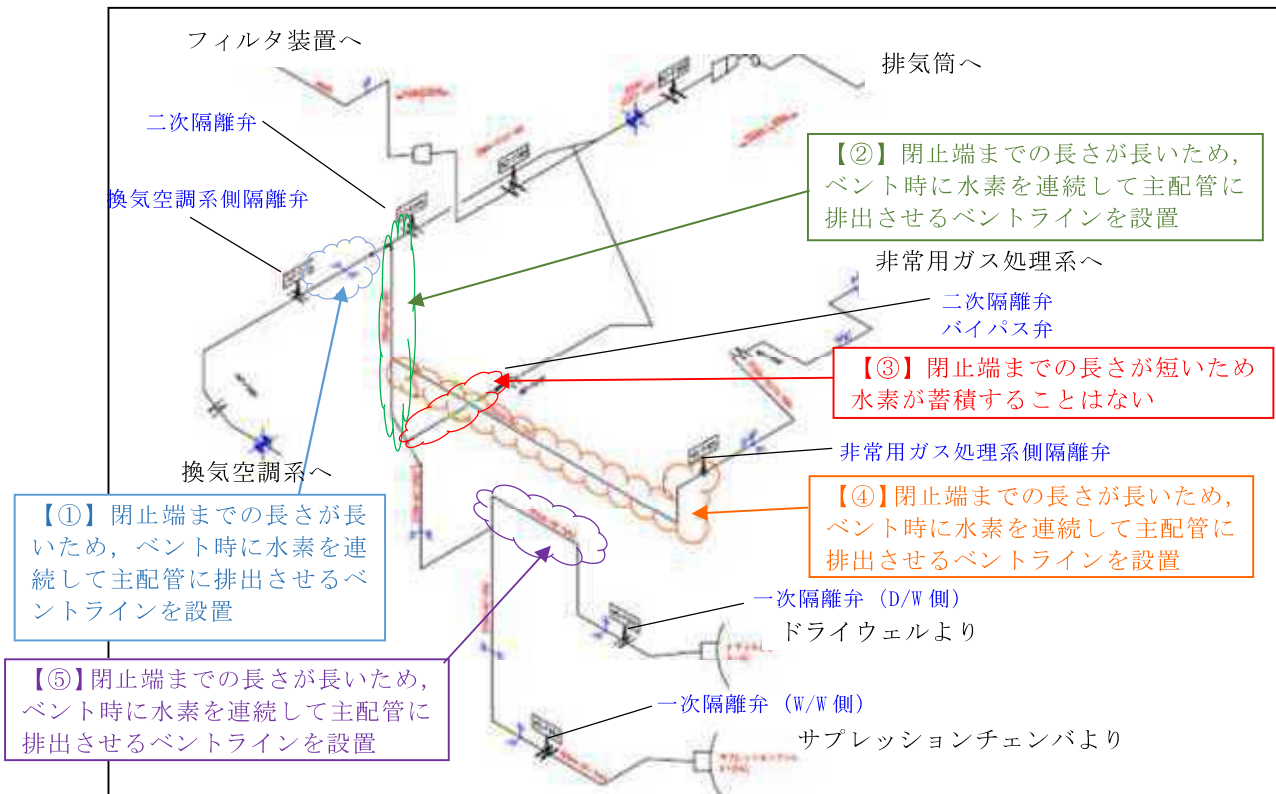
号炉	No	系統	配管口径	配管長 (m)	容積 (m ³)	対応方針
6	①	換気空調系	550A	0.7	0.2	対策不要
	②	耐圧強化ベント系 (二次隔離弁)	550A	0.8	0.2	対策不要
	③	耐圧強化ベント系 (二次隔離弁バイパス弁)	550A	2.4	0.6	対策不要
	④	非常用ガス処理系	400A 250A	2.0 11.8	0.9	ベントライン設置
7	①	換気空調系	550A	1.3	0.3	ベントライン設置
	②	耐圧強化ベント系 (二次隔離弁)	550A	3.1	0.8	ベントライン設置
	③	耐圧強化ベント系 (二次隔離弁バイパス弁)	550A	1.1	0.3	対策不要
	④	非常用ガス処理系	250A	4.5	0.3	ベントライン設置
	⑤	D/W ベントライン	550A	9.7	2.3	ベントライン設置



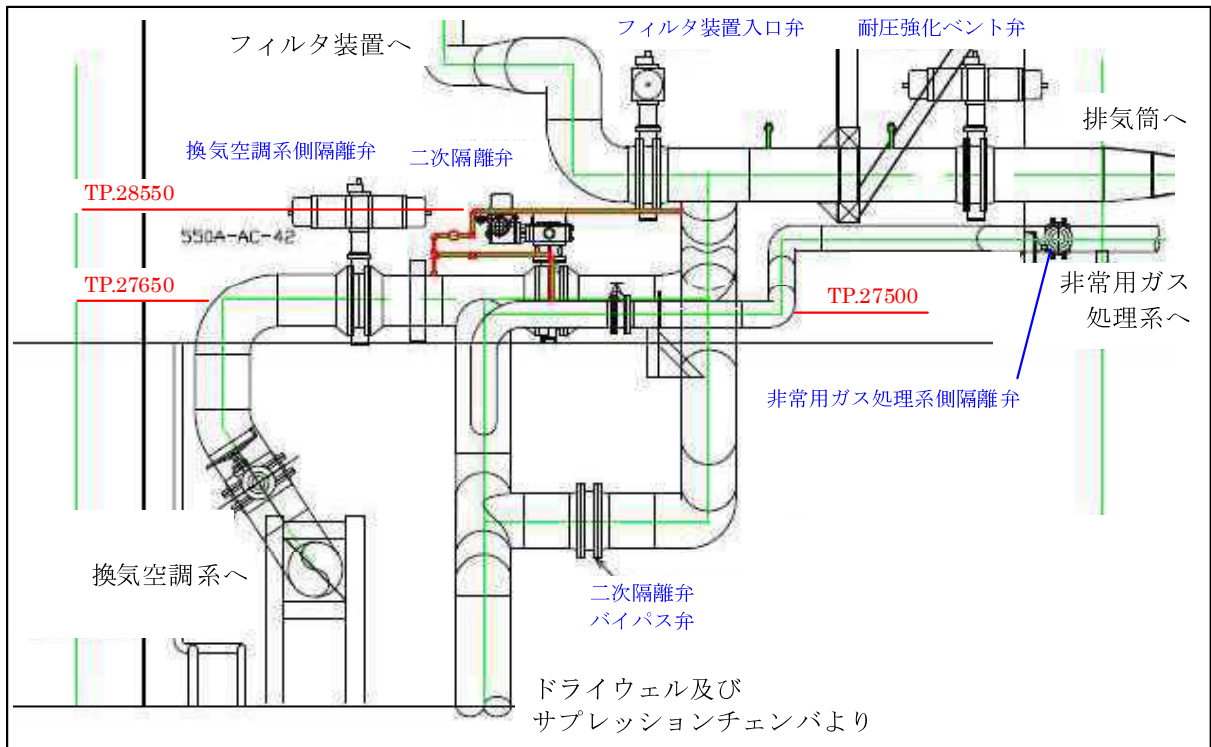
第7図 主ラインから他系統と隔離する弁までの配管系統図



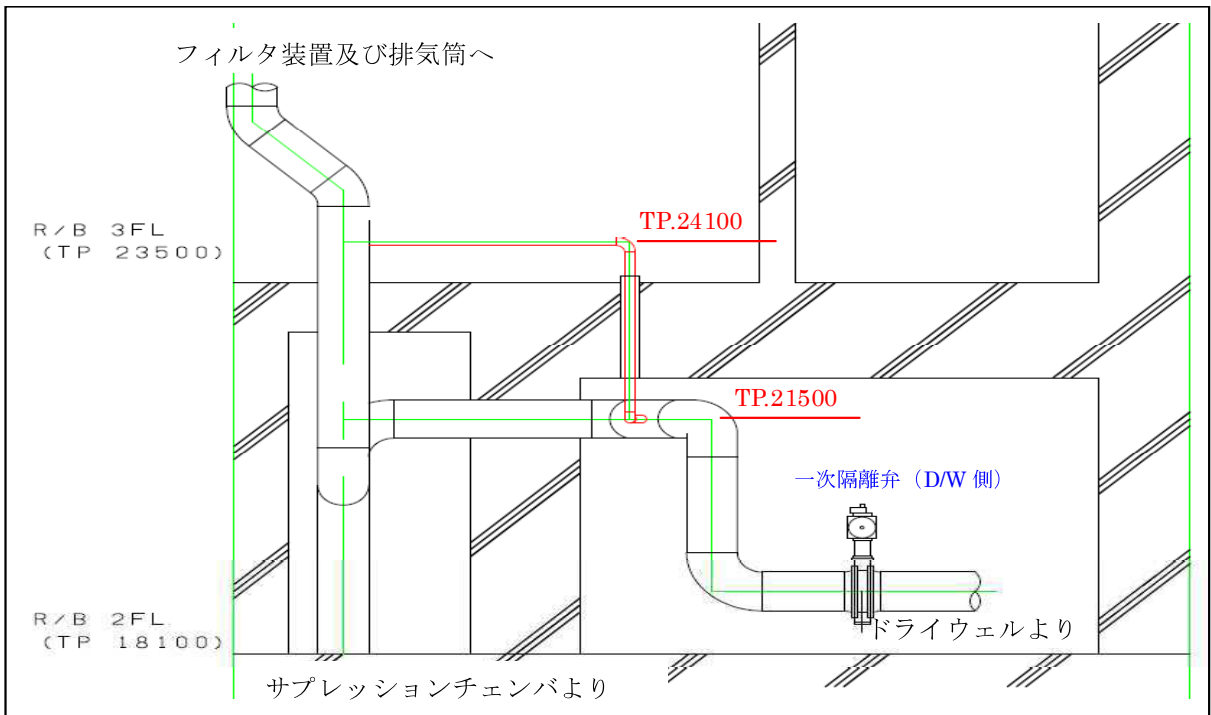
第 8 図 主ラインから他系統と隔離する弁までの配管鳥瞰図 (6号炉)



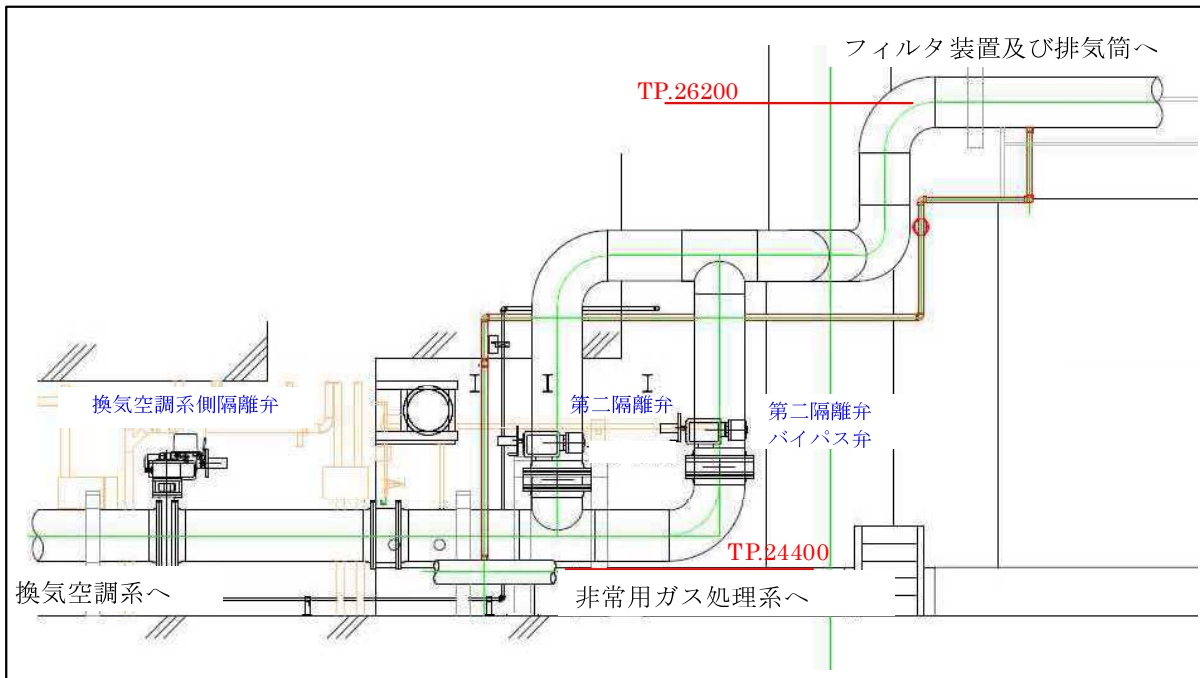
第 9 図 主ラインから他系統と隔離する弁までの配管鳥瞰図 (7号炉)



第 10 図 非常用ガス処理系及び換気空調系までの配管隔離弁に対するバイパスラインの設置位置図（7号炉）



第 11 図 D/W ベントラインに対するベントラインの設置位置図（7号炉）



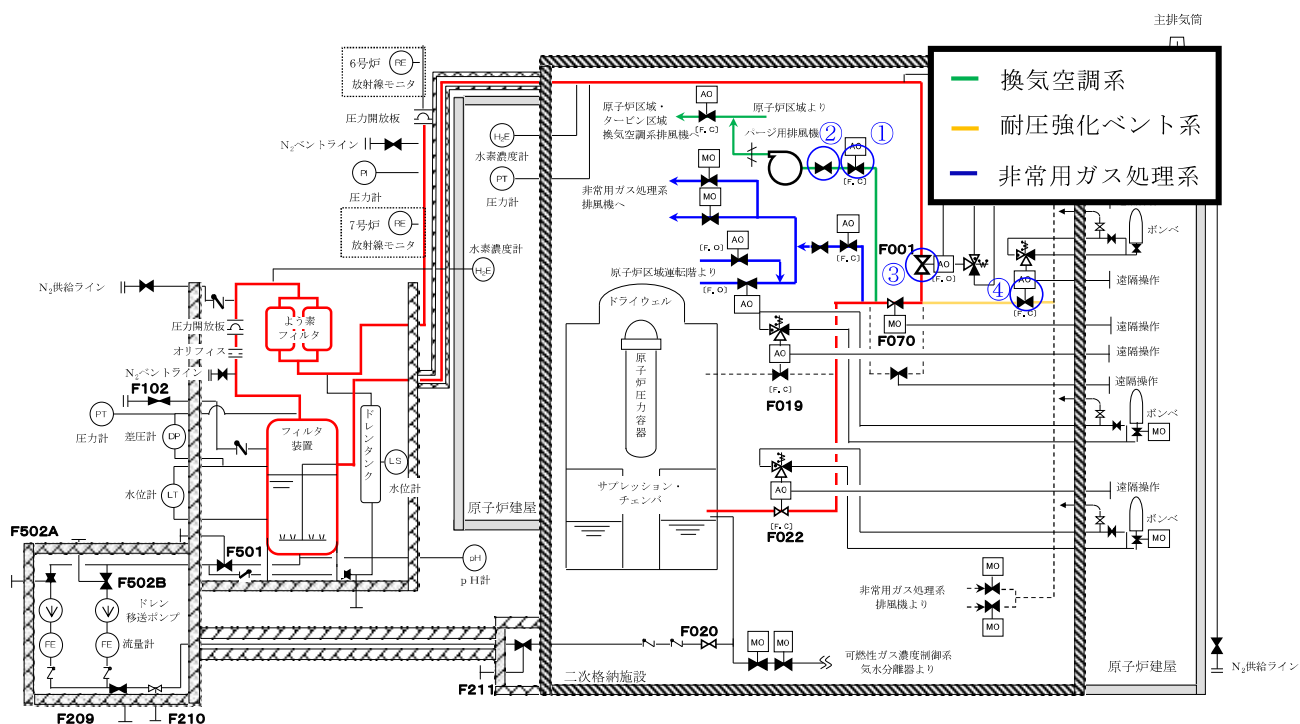
第 12 図 非常用ガス処理系までの配管隔離弁に対するベントラインの
設置位置図（6号炉）

4 格納容器圧力逃がし装置運用時における他系統使用との干渉

格納容器圧力逃がし装置と接続する系統は、換気空調系、耐圧強化ベント系、非常用ガス処理系がある。(第13図参照)

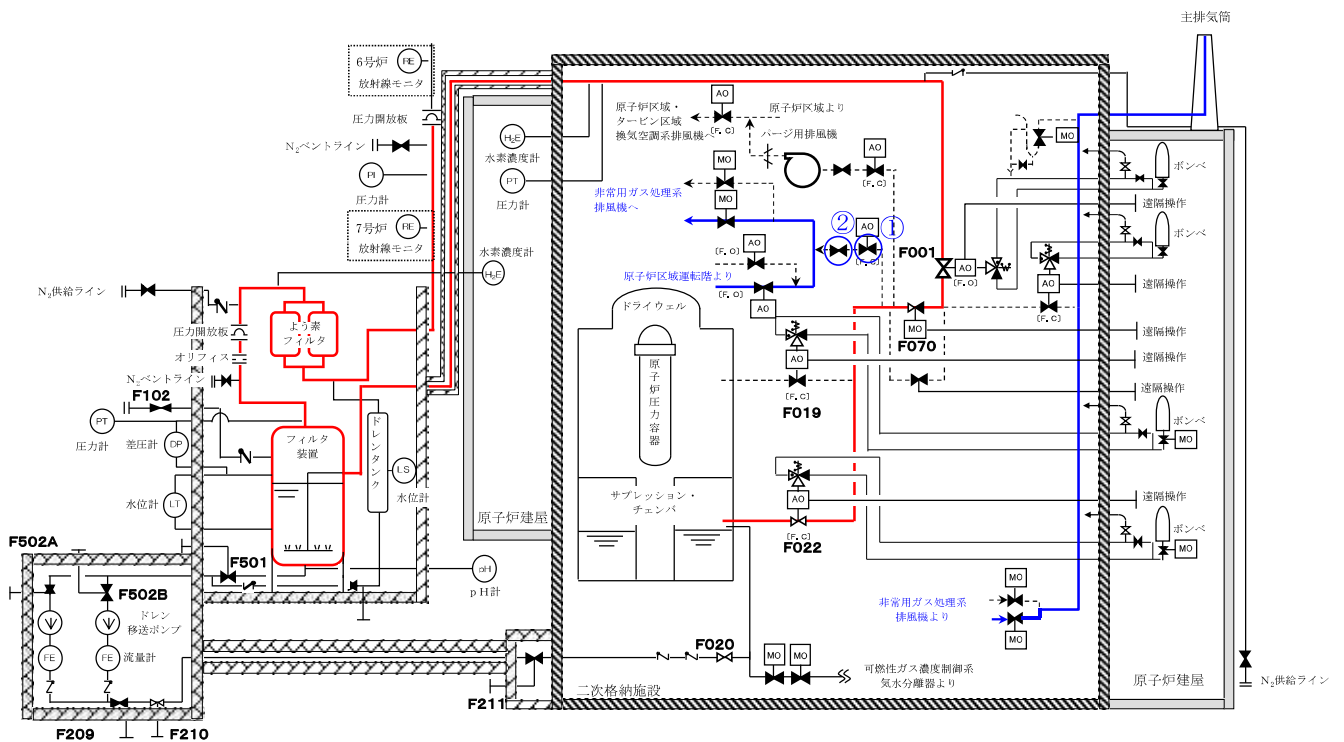
格納容器圧力逃がし装置に接続される換気空調系のラインは、通常時のプラント起動・停止時に格納容器内を窒素・空気に置換するためのものであり、事故時に格納容器圧力逃がし装置と同時に使用することはない。そのため、格納容器圧力逃がし装置使用時に、格納容器圧力逃がし装置と換気空調系を隔離する①②の弁が「閉」であっても問題はない。

格納容器圧力逃がし装置と耐圧強化ベント系は、③④の弁により使用する系統を選択することができる。また、格納容器圧力逃がし装置と耐圧強化ベント系は同時に使用することはない。



第13図 格納容器圧力逃がし装置系統概要と他系統隔離弁

格納容器圧力逃がし装置と非常用ガス処理系の使用時における系統構成を第14図に記載する。第14図に記載の通り、非常用ガス処理系使用時は原子炉区域運転階より原子炉建屋内のガスを吸気し、非常用ガス処理系排風機ならびにフィルタを通した後に主排気筒へ排気する。そのため、非常用ガス処理系使用時には、格納容器圧力逃がし装置に接続される非常用ガス処理系のラインは使用しない。よって、当該ラインに接続される①②弁については、非常用ガス処理系使用時において「閉」となっているにもかかわらず非常用ガス処理系の機能に影響を与えるものではない。



第14図 格納容器圧力逃がし装置，非常用ガス処理系使用時の系統構成

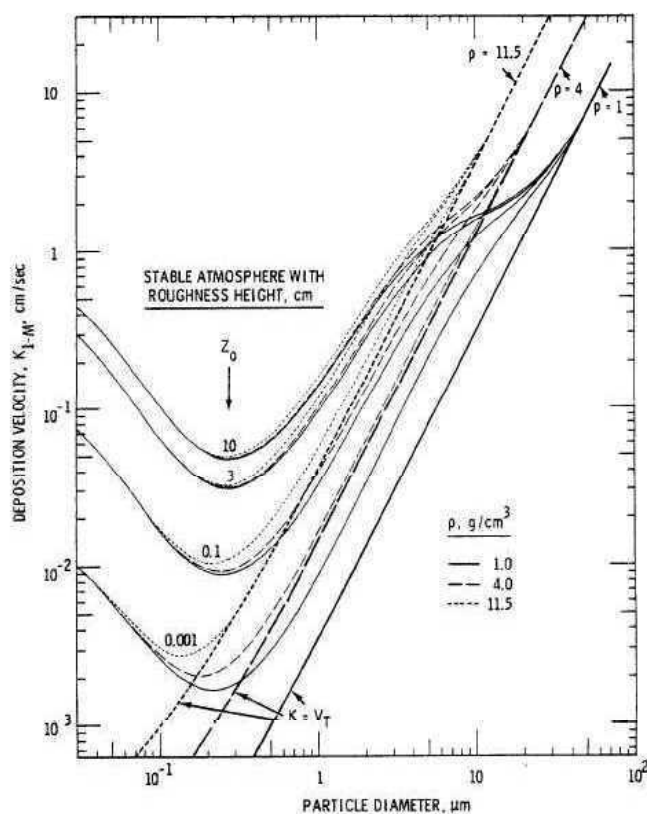
以上より、格納容器圧力逃がし装置と接続する換気空調系，耐圧強化ベント系，非常用ガス処理系は，格納容器圧力逃がし装置と接続していることで，その系統の機能に影響を与えることのない設計としている。

配管内面への放射性物質付着量の考え方について

配管内面への放射性物質（エアロゾル）の付着量を設定するにあたっては、NUREG/CR-4551 を参照し、付着量を設定する主要なパラメータとして沈着速度に着目して、配管内面への沈着割合を検討した。

NUREG/CR-4551 “Evaluation of Severe Accident Risks: Qualification of Major Input Parameters MACCS INPUT” *1 は、環境拡散評価（MELCOR Accident Consequence Code System: MACCS 計算）についての文献となっており、その評価には、エアロゾル粒子径、エアロゾル粒子密度、対象物の表面粗さで沈着速度を整理した Sehmel のモデルが用いられている。

この Sehmel の沈着速度モデルに基づき、配管内面の表面粗さ 0.001cm ($10\ \mu\text{m}$) と粒子密度 4g/cm^3 を想定した、PCV より放出される粒子径ごとの沈着速度（第 1 図参照）を用いて配管内面への沈着割合（エアロゾルの沈着速度と配管内のベントガス通過時間から算出された、流れているベントガス中のエアロゾルが壁面に到達する割合）を以下の通り評価した。

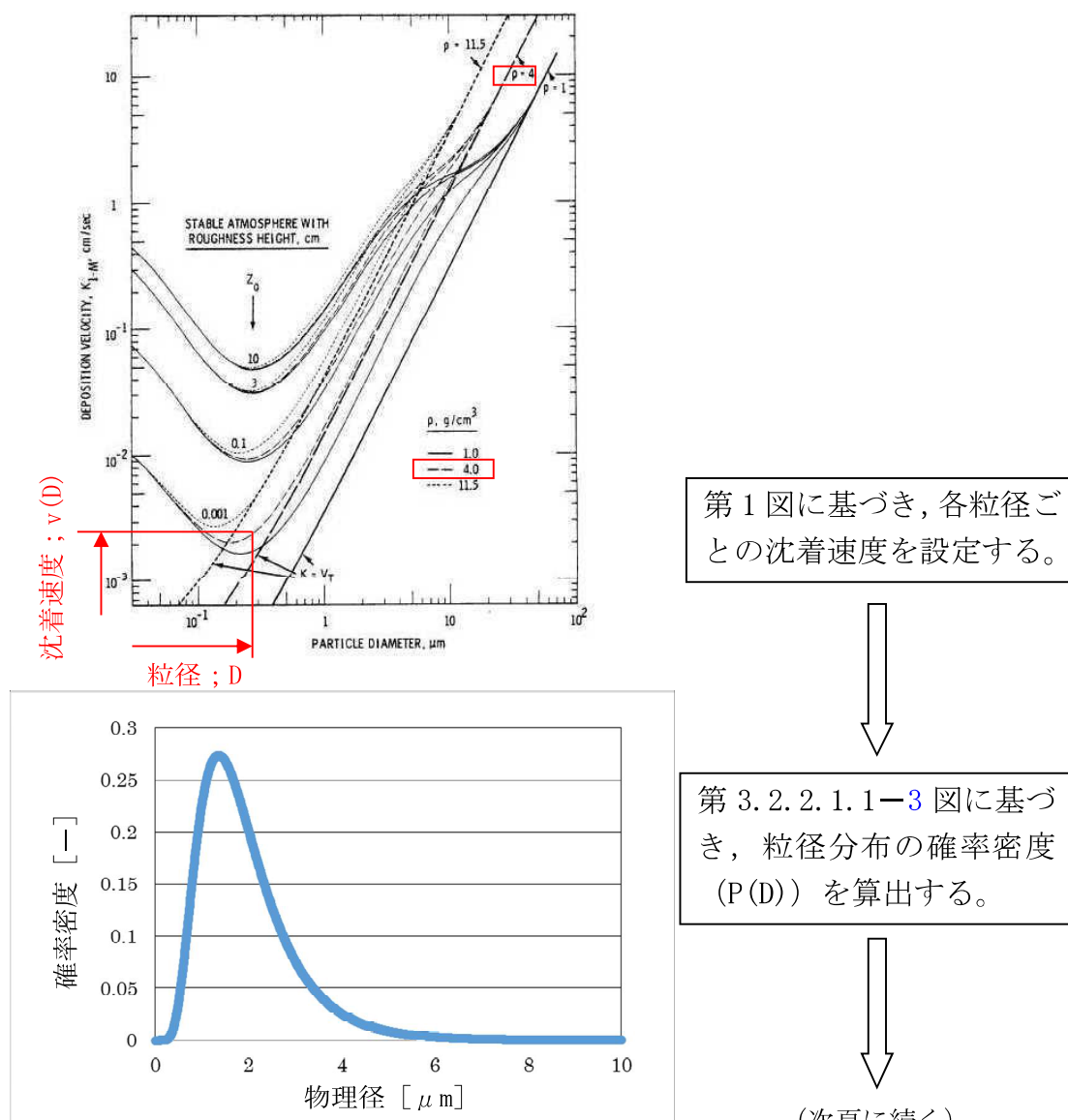


第 1 図 エアロゾル粒子径と沈着速度の関係

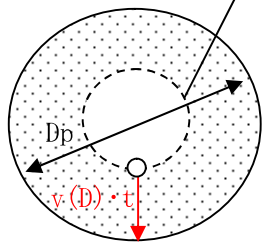
評価条件は、ABWR（6号炉及び7号炉）を対象として、配管長さ100m、配管内径400mm、2Pdおよび最小流量で排気される蒸気流量を適用する。また、考慮する粒子径分布は「大LOCA+全交流動力電源喪失+全ECCS機能喪失(D/Wベント)」(第3.2.2.1.1-3図)に基づくものとした。

これらの条件から、100mの配管をベントガスが通過する時間を算出し、その時間に粒径ごとの沈着速度を乗じて、ベントガス通過時間中に配管内面方向にどれだけのエアロゾルが移動するかを評価する。この移動した粒子の総和について、ベントガス通過中のエアロゾル総量に対する割合を算出することで沈着割合を評価する。

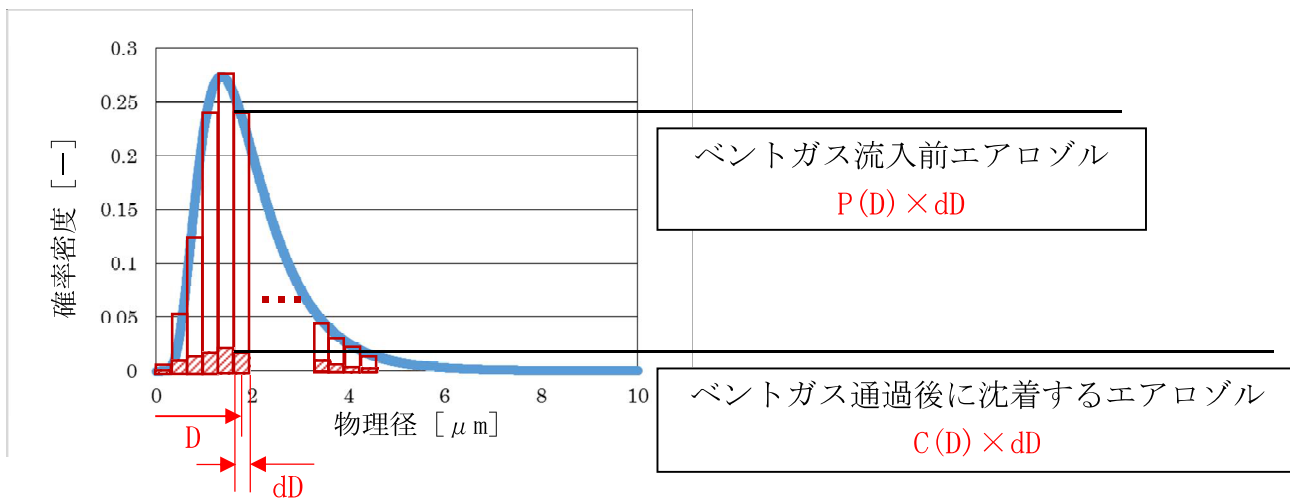
評価の考え方を第2図および第3図に、評価結果を第1表に示す。



第2図 沈着割合評価の考え方 (1/2)



沈着量は、100mの配管をベントガスが通過する時間 (t) の分だけ、各粒子が各沈着速度 (v(D)) で移動して壁面に到達できる範囲 (A=π((Dp/2)² - ((Dp/2) - v(D)・t)²))にあるエアロゾル量の総和となる。



第3図 沈着割合評価の考え方 (2/2)

上記の関係から、沈着割合 R は以下の式で表される。

$$R = \left(\frac{\sum \text{Red Boxes}}{\sum \text{White Boxes}} \right) \times 100 = \left(\frac{\sum (C(D) \times dD)}{\sum (P(D) \times dD)} \right) \times 100 = \left(\frac{\sum (C(D))}{\sum (P(D))} \right) \times 100$$

ここで、C(D)は以下の式で表される。

$$C(D) = P(D) \times \left(\frac{\pi (Dp/2)^2 - \pi ((Dp/2) - v(D) \cdot t)^2}{\pi (Dp/2)^2} \right)$$

$$= P(D) \times \left(\frac{(Dp/2)^2 - ((Dp/2) - v(D) \cdot t)^2}{(Dp/2)^2} \right)$$

第1表；排気される蒸気流量に対する沈着割合評価結果

項目	パラメータ	単位	2Pd	最小流量
配管条件	長さ	m	100	
	内径	m	0.4	
沈着条件	沈着速度の分布	m/s	$1.9 \times 10^{-3} \sim 3.9 \times 10^{-1}$	
排気条件	蒸気流量	kg/s	15.7	2.5
	蒸気流速	m/s	33.1	14.8
沈着割合		%	約 2.5	約 5.4

第1表より、最小流量であっても約5.4%の沈着割合となることが評価された。以上を踏まえ、エルボ部などといった部位での沈着量がばらつくことを考慮し、100m あたり 10%を配管への沈着割合として放射性物質の付着量を設定する。

*1；”Evaluation of Severe Accident Risks: Qualification of Major Input Parameters MACCS INPUT”,
NUREG/CR-4551 Vol.2 Rev.1 Pt.7, 1990

別紙 2 1 配管内面に付着した放射性物質による発熱の影響について

フィルタベント容器上流の配管内面には放射性物質（エアロゾル）が付着することが想定されることから、その放射性物質の崩壊熱による温度上昇が配管の構造健全性に与える影響について検討した。

検討対象とする状態は、以下の 2 ケースを想定した。

【ケース 1】

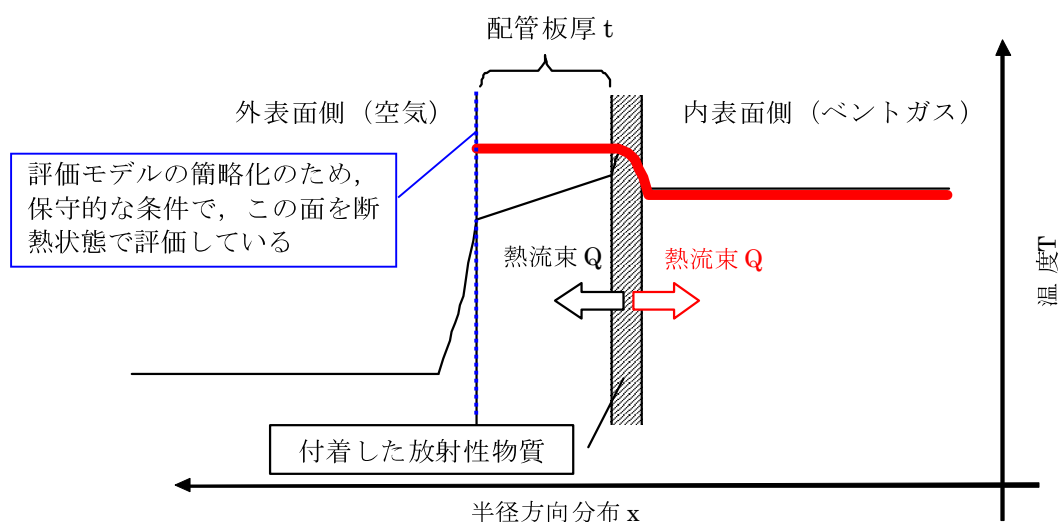
ベント中を想定し、配管内に高温の蒸気が流れ、なおかつ配管内面に付着した放射性物質からの発熱が加わった状態。

【ケース 2】

ベント停止後を想定し、配管内面に放射性物質が付着した後で配管内ベントガス流れがないため、放射性物質からの発生熱がこもる状態。

まず、【ケース 1】として、第 1 図に示すような配管の半径方向の温度分布を考慮して評価を行った。配管内には高温のベントガス流れが存在し、配管内面には放射性物質が付着して崩壊熱による発熱を行っている。この場合、放射性物質の崩壊熱による熱量は配管内面・外面双方に放熱され、配管板厚方向に熱勾配ができるが、本評価では保守的に配管外面は断熱されているものとした。

【ケース 1】の温度評価条件を第 1 表に示す。



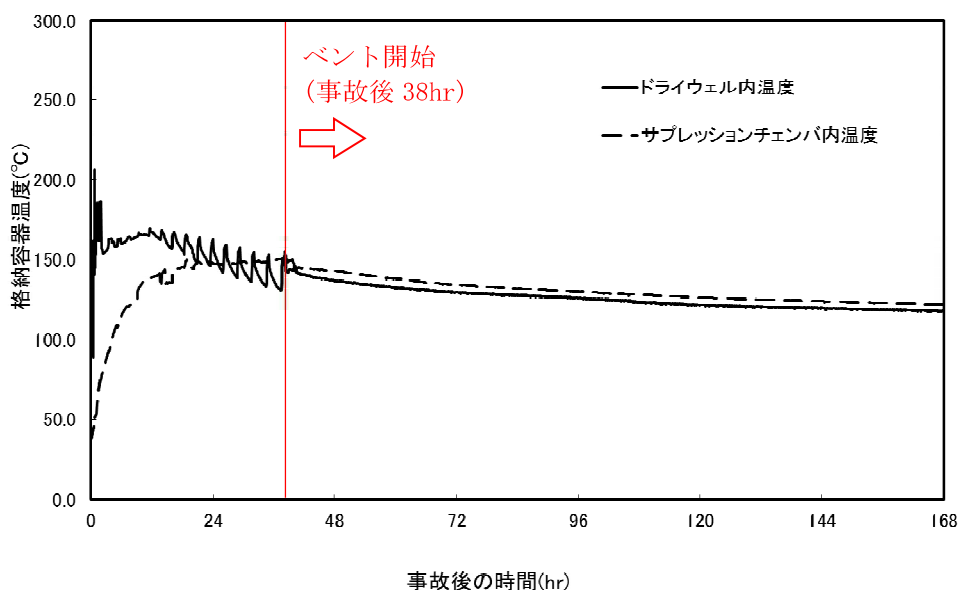
注；実際の伝熱状態は——で示すような分布になると想定されるが、保守的な評価となるよう配管外面を断熱し、全ての熱流束がベントガス側に移行する評価とした。
(赤線で示されるような熱流束の与え方と分布)

第 1 図 配管内表面の温度評価 (イメージ)

第1表 配管内表面の温度上昇評価条件【ケース1】

項目	条件
評価シナリオ	有効性評価シナリオ「大破断 LOCA+全交流動力電源喪失 +全 ECCS 機能喪失 (D/W ベント)」
PCV より流入する崩壊熱量	9.3 kW
配管内発熱割合 (FP 付着割合)	10%/100m
配管外径, 板厚	400A, Sch40
配管熱流束	7.3W/m ²
質量流量	2.5kg/s (ベント後期 (ベント1ヶ月後の蒸気流量))
ベントガス温度	150°C

ベント時のガス温度条件を踏まえて配管内面の温度を評価する。第2図に大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失シナリオにおける D/W ベント時の格納容器内の温度推移を示す。ベント時に最も配管内ガス温度が高い条件としてはベント開始直後であり、概ね 150°C 以下となる。



第2図 格納容器内温度推移

(大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失シナリオ, 38hr 後 D/W ベント)

格納容器より流入する崩壊熱量は 9.3kW とし、配管内面に付着する放射性物質質量割合としては、別紙 20 にて設定した 10%/100m を用いる。評価にあたって

は保守的な条件として、付着割合の全量の放射性物質が付着した条件で発熱しているものとする。また、ベントガス流量については流速が低くなることで熱伝達率が低くなり、保守的な評価となることから、ベント後 1 ヶ月の蒸気流量である 2.5kg/s を用いた。

配管内表面に付着する放射性物質の崩壊熱による配管内面の温度上昇は、以下の式で算出した温度上昇量で評価する。

$$\Delta T = q / h \quad \dots \text{式 (1)}$$

ΔT ; 放射性物質の崩壊熱による配管内表面の温度上昇 (°C)

q ; 配管熱流束 (W/m²)

h ; 配管内表面の熱伝達率 (W/(m²·K))

$$h = Nu \times k / d \quad \dots \text{式 (2)}$$

Nu ; ヌッセルト数

k ; 水蒸気の熱伝導率 (0.032 (W/(m·K)))

d ; 水力等価直径 (m)

ここで、 Nu を算出するにあたり円管内乱流の熱伝達率を表現するものとして Kays の式を引用した (式 (3))。

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} \times Pr^{0.5} \quad \dots \text{式 (3)}$$

Re ; レイノルズ数

Pr ; プラントル数 (1.1 ; 保守的に 160°C の飽和蒸気の値を設定)

$$Re = v \times d / \nu \quad \dots \text{式 (4)}$$

v ; 流速 (約 41.7 (m/s) ; 質量流量から換算)

d ; 水力等価直径 (m)

ν ; 水蒸気の動粘性係数 (約 4.2×10^{-6} (m²/s))

これより、配管内面の温度上昇は 0.09°C 程度であると評価できる。ベントガスの温度は 150°C 程度であることから、上記の温度上昇分を考慮しても、配管内表面温度は配管設計における最高使用温度である 200°C を下回っているため、配

管の構造健全性に影響を与えることはない。

次に、【ケース 2】の温度評価条件を第 2 表に示す。

第 2 表 配管内表面の温度上昇評価条件【ケース 2】

項目	条件
評価シナリオ	有効性評価シナリオ「大破断 LOCA+全交流動力電源喪失+全 ECCS 機能喪失 (D/W ベント)」
PCV より流入する崩壊熱量	9.3 kW
配管内発熱割合 (FP 付着割合)	10%/100m
配管外径, 板厚	400A, Sch. 40
配管熱流束	7.3W/m ²
配管外表面放射率	0.80 (酸化鉄相当の放射率 ^{*1})
環境温度	50°C

*1 ; 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第 5 版

以上の条件に基づき、配管内面に付着した放射性物質の崩壊熱による温度を評価する。ここで、評価対象の配管板厚は 12.7mm であり、炭素鋼の熱伝導率が 50W/(m・K) 程度であることから、板厚方向の温度勾配は微小であると考えられることができる。そのため、配管内表面の温度はほぼ配管外表面温度と同等であると考え、配管内部の熱量による温度を評価する方法として JIS A 9501 “保温保冷工事施工標準” の表面温度および表面熱伝達率の算出方法を用いて、配管外表面温度を評価する。

評価式の概要は以下の通りとなる。

$$T = (q / h_{se}) + T_{atm} \quad \dots \text{式 (5)}$$

T ; 配管外表面温度 (°C)

q ; 配管熱流束 (W/m²)

h_{se} ; 配管外表面熱伝達率 (W/(m²・K))

T_{atm} ; 環境温度 (°C)

この式 (5) における、q と h_{se} は以下の式で表される。

$$q = Q / S \quad \dots \text{式 (6)}$$

$$h_{se} = h_r + h_{cv} \quad \dots \text{式 (7)}$$

Q ; 単位長さあたりの配管内面での発熱量 (W/m)

S ; 単位長さあたりの配管外表面積 (m²)

h_r ; 放射による配管外表面熱伝達率 (W/(m²・K))

h_{cv} ; 対流による配管外表面熱伝達率 (W/(m²・K))

上記の h_r は以下の式で表される。

$$h_r = \varepsilon \times \sigma \times \left(\frac{(T + 273.15)^4 - (T_{atm} + 273.15)^4}{(T - T_{atm})} \right) \quad \dots \text{式 (8)}$$

ε ; 配管外表面放射率 (0.80)

σ ; ステファン・ボルツマン定数 (5.67×10⁻⁸ (W/(m²・K⁴)))

h_{cv} については、JIS A 9501 “保温保冷工事施工標準” 附属書 E (参考) 表面温度及び表面熱伝達率の算出方法における、垂直平面及び管 (Nusselt の式) 及び水平管 (Wamsler, Hinlein の式) をもとに対流熱伝達率を算出した。垂直管 (式 (9), (10)) と水平管 (式 (11)) とで得られる h_{cv} を比較し、小さい方の値を用いることで保守的な評価値を得るようにしている。

$$h_{cv} \text{ (垂直管)} = 2.56 \times (T - T_{atm})^{0.25} \quad ((T - T_{atm}) \geq 10K) \quad \dots \text{式 (9)}$$

$$h_{cv} \text{ (垂直管)} = 3.61 + 0.094 \times (T - T_{atm}) \quad ((T - T_{atm}) < 10K) \quad \dots \text{式 (10)}$$

$$h_{cv} \text{ (水平管)} = 1.19 \times \left(\frac{(T - T_{atm})}{D_o} \right)^{0.25} \quad \dots \text{式 (11)}$$

D_o ; 配管外径 (m)

これらにより評価した結果、配管外表面温度は約 51℃となる。

以上の結果から、配管内表面温度は配管設計における最高使用温度である 200℃を下回っているため、配管内表面に付着した放射性物質の崩壊熱は、ベント後における配管の構造健全性に影響を与えることはない。

なお、これらの式を含めた評価については、JIS A 9501 において、適用範囲が -180℃～1000℃となっており、適用に対して問題ないことを確認している。また、管外径などの寸法にかかる制約条件は規定されていない。

別紙 2 2 スクラバノズルのエロージョンについて

スクラバノズルは、第 1 図に示す通り、ノズル吹き出し部手前の配管が細く、当該部にてベントガスの流速が大きくなる。そのため、ベントガス中の水蒸気が凝縮してできた液滴が、この高流速のガス流れにより加速され、高速の状態でスクラバノズルの天板に衝突すると考えられる。この液滴の衝突により、スクラバノズル天板にエロージョン（液滴衝撃エロージョン）が生じて孔が開くと、水スクラバの性能が低下する恐れがある。そこで、この液滴の衝突によるスクラバノズル天板の液滴衝撃エロージョンに対する評価を行った。



第 1 図 スクラバノズル構造図

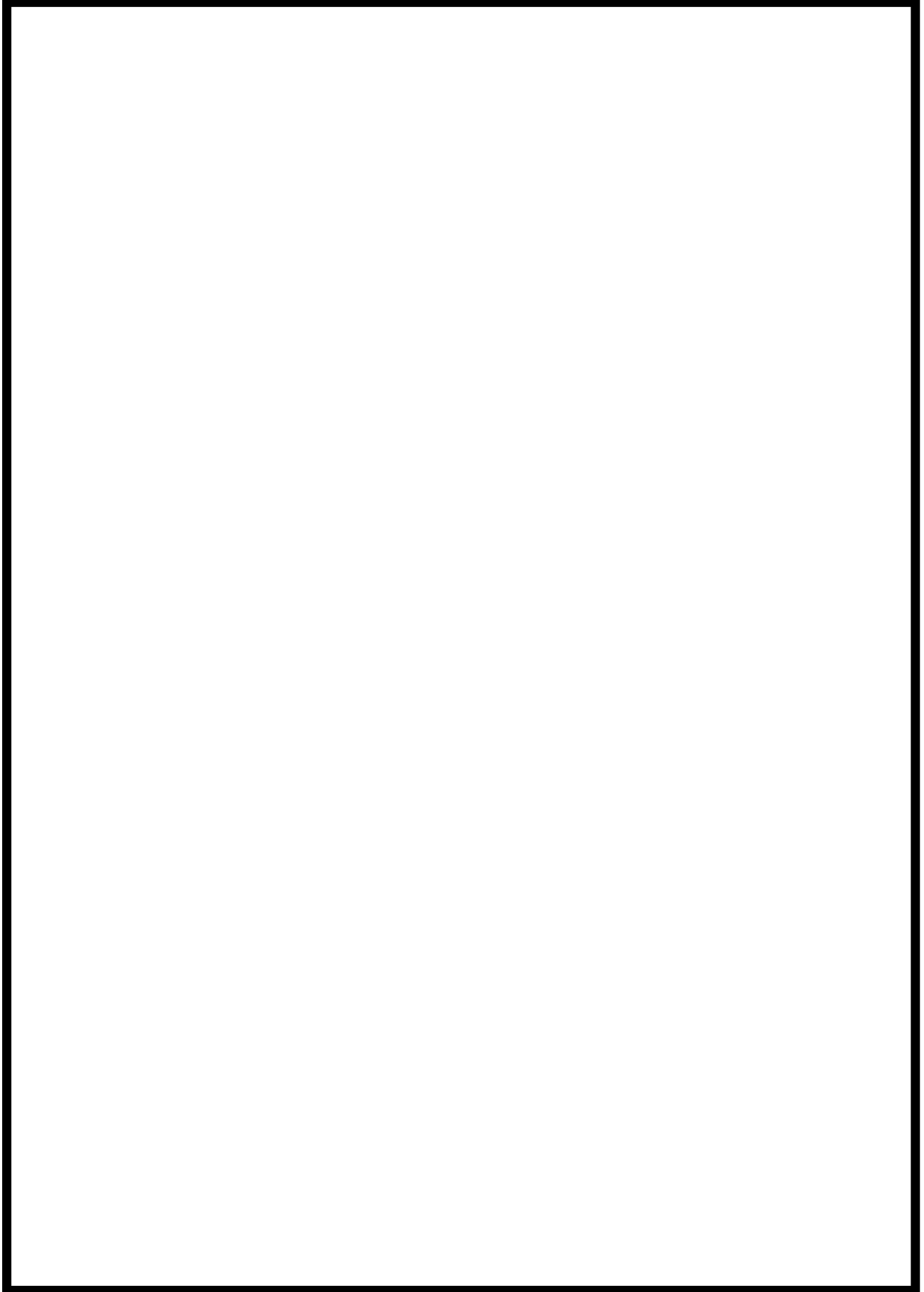
まず、スクラバノズル吹き出し部手前の配管におけるベントガス流速を算出する。ベントガスの体積流量は最も厳しい超過流量時の 37000[m³/h]とする。また、スクラバノズル細管部の内径は 、スクラバノズル本数は 140[本]である。

$$\begin{aligned} \text{スクラバノズル細管部流速[m/s]} &= 37000/3600/ \{140 \times (\text{input}) \times 10^{-3}\}^2 \times \pi / 4 \\ &= \text{input} \end{aligned}$$

一方、『発電用設備規格 配管減肉に関する規格（2005年版）（増訂版）JSME S CA1-2005』より、液滴衝撃エロージョン発生の限界流速は 70[m/s]である。そのため、スクラバ細管部の流速は液滴衝撃エロージョン発生の限界流速よりも小さいことから、スクラバノズル天板に液滴衝撃エロージョンは生じない。

なお、蒸気を累積で 179 時間通気した後の、フィルタ性能試験設備のノズルを取り外して外観確認を行ったが、エロージョンの発生は認められなかった。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



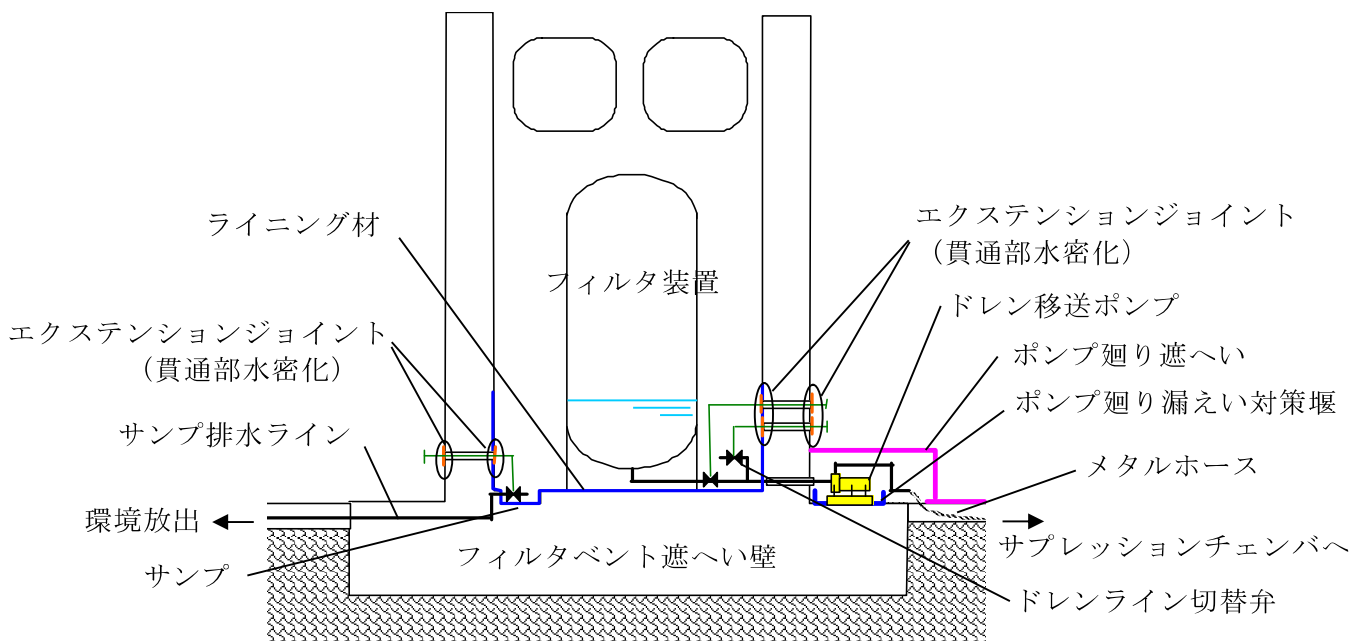
第2図 試験用フィルタノズル 外観確認結果

別紙 2 3 格納容器圧力逃がし装置からの漏えい対策について

1. フィルタ装置及びフィルタ装置廻り配管からの漏えい対策について

フィルタベント遮へい壁は上部に屋根が無い場合、雨水や降雪等は遮へい壁内に流入する。タンク室内に流入した雨水等はサンプに集められ、サンプ排水ラインを通じて外部へ放出される。

一方で、遮へい壁内でフィルタ装置及びフィルタ装置廻り配管から漏えいがあった場合の対策についてを第 1 図に示す。サンプ排水ラインに設置されている排水止め弁をタンク室外部よりエクステンションジョイントを介して遠隔操作して閉じることで、漏えい水を遮へい壁内側に貯留し、遮へい壁外部へ漏えいしないようにする。また、遮へい壁タンク室内はコンクリート表面の亀裂への追従性の良いポリウレア系のライニング材を内側に塗布することにより、地震等により遮へい壁内のコンクリート面に亀裂が生じていた場合にも、亀裂を通じてタンク室外部へ漏えいすることを防止する。



第 1 図 フィルタベント遮へい壁内の漏えい対策概要図

さらに、遮へい壁タンク室内の弁を遠隔操作するために設置しているエクステンションジョイント貫通部については、貫通部を O リングにて水密化することにより、貫通部を通じた漏えいを防止している。

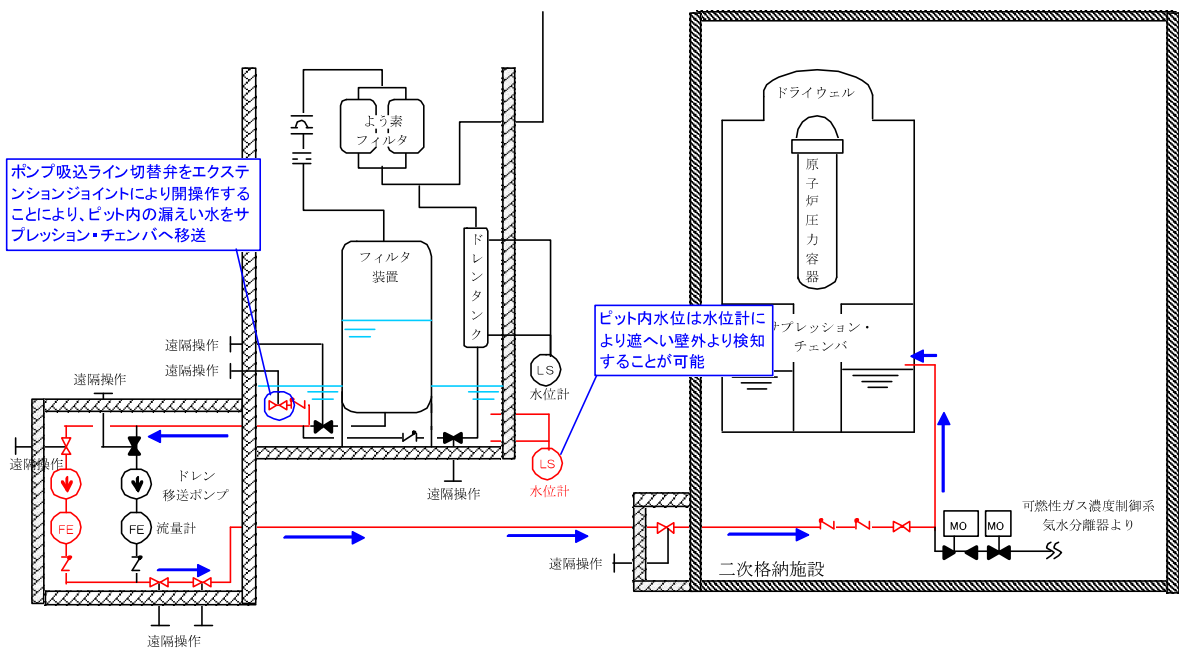
貫通部シャフトは第 2 図に示すとおり、遮へい壁内外よりベアリングにて固定されているが、それぞれのベアリングに対して O リングを組み合わせることにより、貫通部を 2 重の水密構造としている。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第2図 エクステンションジョイント貫通部に対する水密構造

フィルタバント使用時に漏えいがあった場合に排水止め弁を閉じる必要があるため、雨水によってタンク室内の水位が上昇した場合には、漏えい水を含んだ雨水がオーバーフローにより外部へ漏えいする懸念がある。そのため、第3図に示すようにドレン移送配管のポンプ吸込側を分岐してタンク室側に開放し、漏えい水をドレン移送ポンプを用いてサプレッションチェンバへ移送することが可能な構造とした。通常時はフィルタ装置内のスクラバ水が上昇対策としてサプレッションチェンバへ移送する運用としているが、附室側からエクステンションジョイントにて切替弁を操作することにより、遮へい壁内に貯留した雨水等をサプレッションチェンバへ移送することが可能である。一方で、遮へい壁内には水位計を設置することにより、遮へい壁内の雨水がオーバーフロー水位に達しているかを遮へい壁外より監視可能である。



第3図 遮へい壁内サンプ排水操作概要図

ベント実施後はサンプ排水弁を常時閉運用とすることにより、万が一漏えいがあった場合には環境へ放出することを防止する運用とする。ベント実施後に周辺線量が下がった後にサンプ排水弁を微開し、サンプ排水ラインより遮へい壁内の貯留水をサンプリングし、遮へい壁内に漏えいがないことを確認した上で排水を行う。

2. ドレン移送ポンプ及びポンプ廻り配管からの漏えい対策について

遮へい壁外に設置されているドレン移送ポンプについては、軸封部からの漏えいのない構造であるキャンドモーターポンプを用いることとしている。

また、ドレン移送ポンプ及びポンプ廻りの配管については、鉄板遮へい壁が設置されており、ドレンライン使用時にポンプ及び配管内のスクラバ水からの線量に対して操作員の被ばくを低減するよう配慮されている。(第4図, 第5図)



第4図 ドレン移送ポンプ廻りメタルホース布設図（平面図）



第5図 ドレン移送ポンプ廻りメタルホース布設図（側面図）

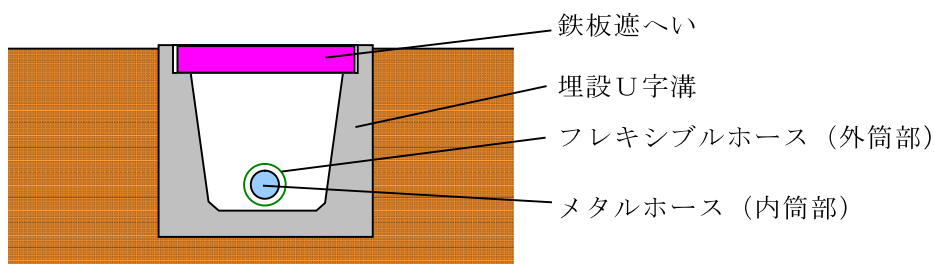
3. 遮へい壁外の屋外配管からの漏えい対策について

ドレン移送ポンプから原子炉建屋までの屋外配管については、可撓性のあるメタルホースを用いることで地震による変位を吸収する構造としている。また、第6図に示すように、フレキシブルホースを外筒としてメタルホースを内部に格納することで二重管構造とし、メタルホースからの漏えいは外筒部のフレキシブルホース内に貯留する構造となっている。メタルホース間の接合部はフランジ締結されており、メタルホースに損傷があった場合には対象部を予備品に交換可能な構造としている。



第6図 メタルホースの二重管構造

メタルホースは第7図のように埋設U字溝内に格納されており、U字溝上部にはスクラバ水に含まれる放射性物質による地上面の線量の上昇を抑制するように鉄板遮へい蓋が設置されている。



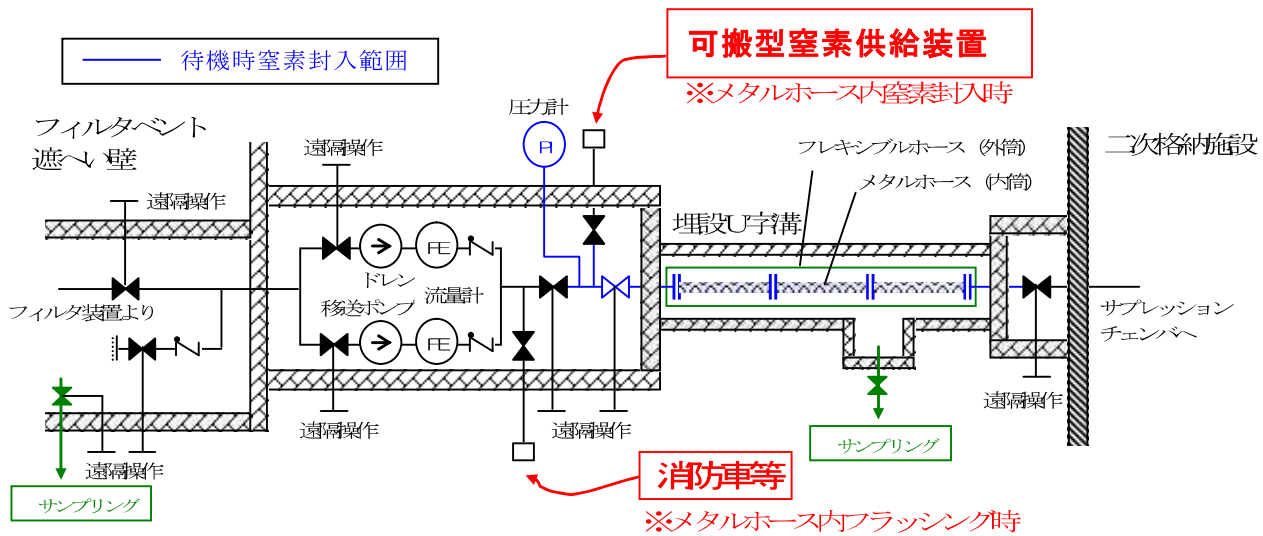
第7図 U字溝内メタルホース布設図

系統待機時には第8図に示すようにメタルホース内を可搬型窒素供給装置車により大気圧より高い状態で窒素封入しており、圧力計にてメタルホースの内圧を常時監視可能な構造としている。ドレンライン使用前にメタルホースが損傷した場合には、メタルホース内の封入窒素ガスが外筒部へ漏えいして内圧が下がるため、圧力計にて監視可能である。したがって、ドレンライン使用前には圧力計を確認し、メタルホースの健全性を確認した上でドレンラインを使用する手順としている。

また、ドレンライン使用後は、待機時と同様に可搬型窒素供給装置車より系統内に窒素を供給してメタルホース内のスクラバ水をサプレッションチェンバへ移送すると共に、メタルホース両端の仕切弁を全閉することにより圧力計にてメタルホースの圧力降下を監視する。

メタルホースの布設範囲を第9図及び第10図に示す。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



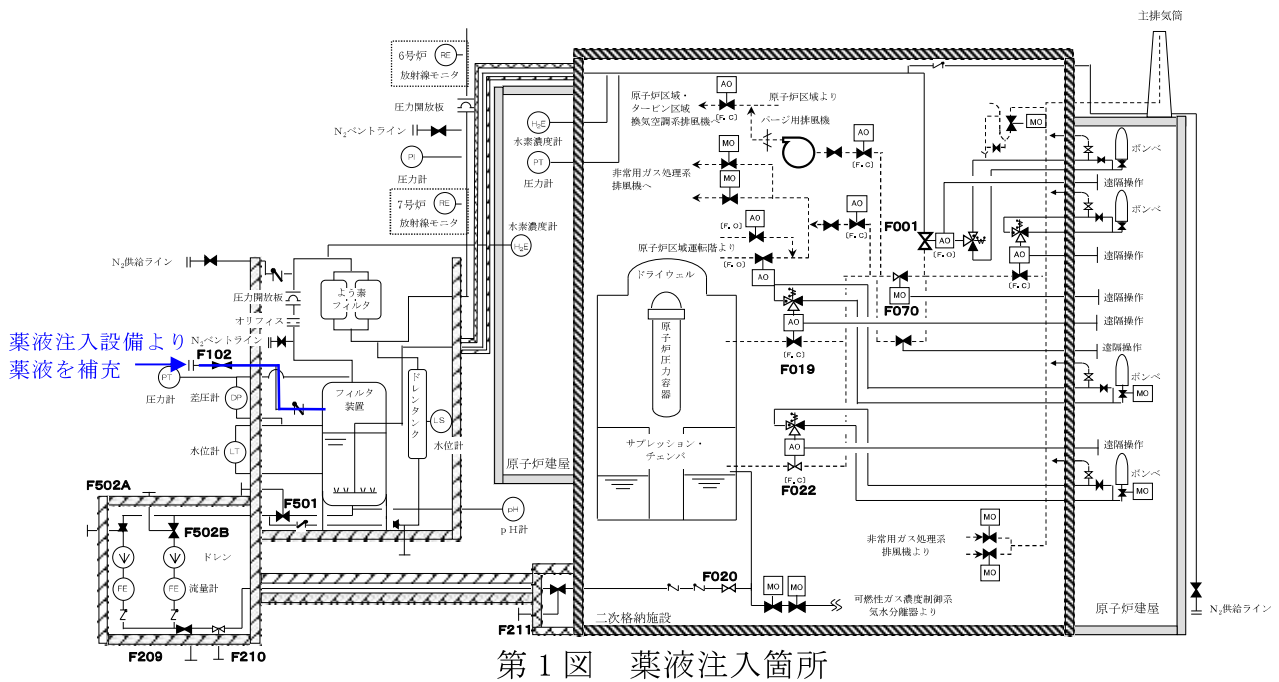
第 9 図 メタルホース布設範囲図 (7号炉)



第 10 図 メタルホース布設範囲図 (6 号炉)

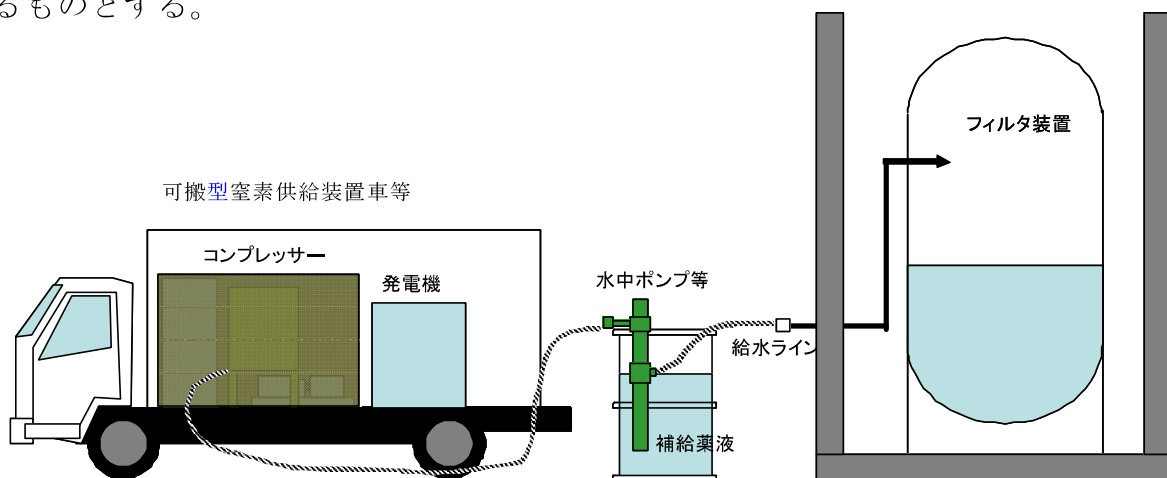
別紙 2 4 スクラバ水の pH 調整方法について

ベントガスに含まれる水蒸気の凝縮によりフィルタ装置内のスクラバ水位が上昇した場合、スクラバ水に含まれる薬液が凝縮水により薄まるため、スクラバ水の pH 値が低下する。pH 値が規定値よりも低くなった場合には、第 1 図に示すように給水ラインを用いて外部よりスクラバ水へ薬液を補充する必要がある。



第 1 図 薬液注入箇所

薬液を補充する方法については、第 2 図に示すように、可搬型窒素供給装置車等の空気圧力にて空気駆動水中ポンプ等を用いてフィルタ装置内に薬液を注入する。補充する薬液濃度は、スクラバ水内の初期濃度よりも十分に濃度の高いものとし、必要な補充量についてはフィルタ装置水位により予め算出した量を補充するものとする。



第 2 図 薬液注入装置概要図 (案)

薬液を貯留するタンク及び水中ポンプ等の資機材は可搬式として薬液補給が必要な時期までに予め給水口付近まで運搬して待機するものとする。また、補給する薬液については、高濃度の薬液をあらかじめ用意しておき、必要となる時期までに必要量をタンク内に準備する。

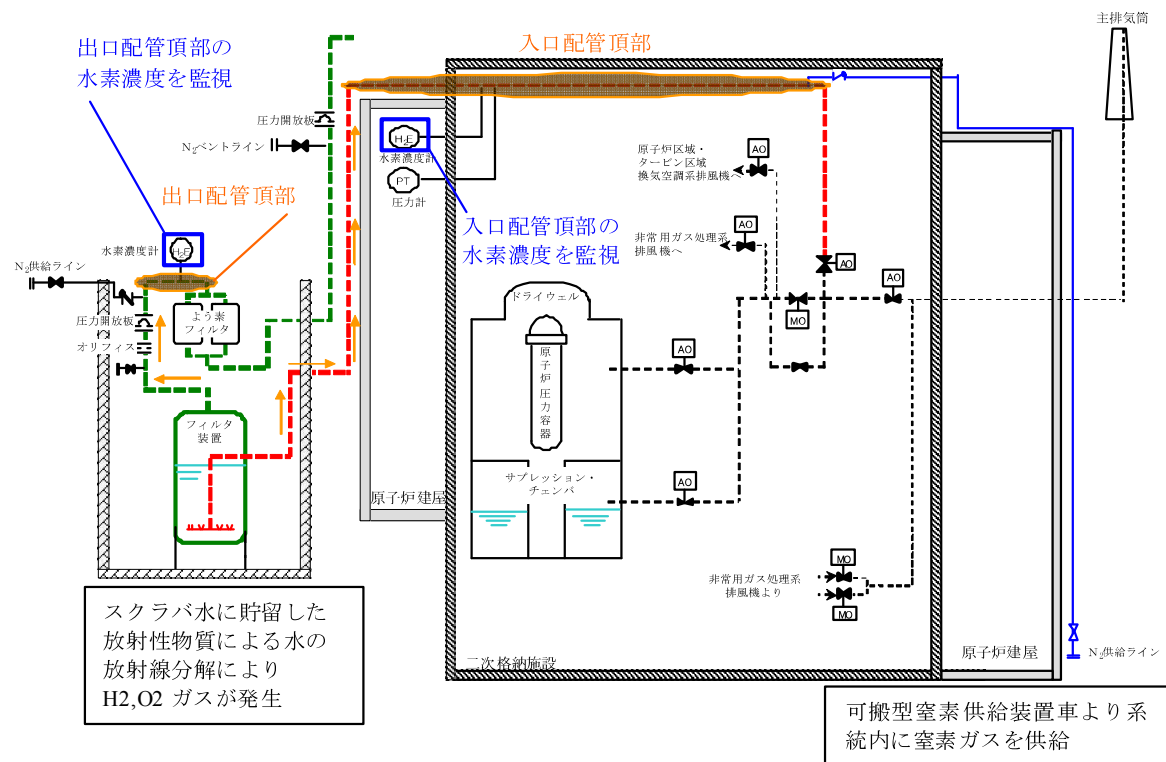
別紙 2 5 窒素ガス置換に対する考え方について

1. 格納容器圧力逃がし装置への水素滞留可能性について

ベント実施直後には格納容器内で水-ジルコニウム反応によって発生した水素がベントガスとともに格納容器圧力逃がし装置を通じて系外へ放出される。このときのベントガスのモル組成としては水蒸気及び水素、窒素が支配的であり、酸素はほとんど含まれていない。ベント実施前はあらかじめ系統内は窒素置換されており、ベントガスに含まれる水素濃度が高くて可燃限界に達することはない。

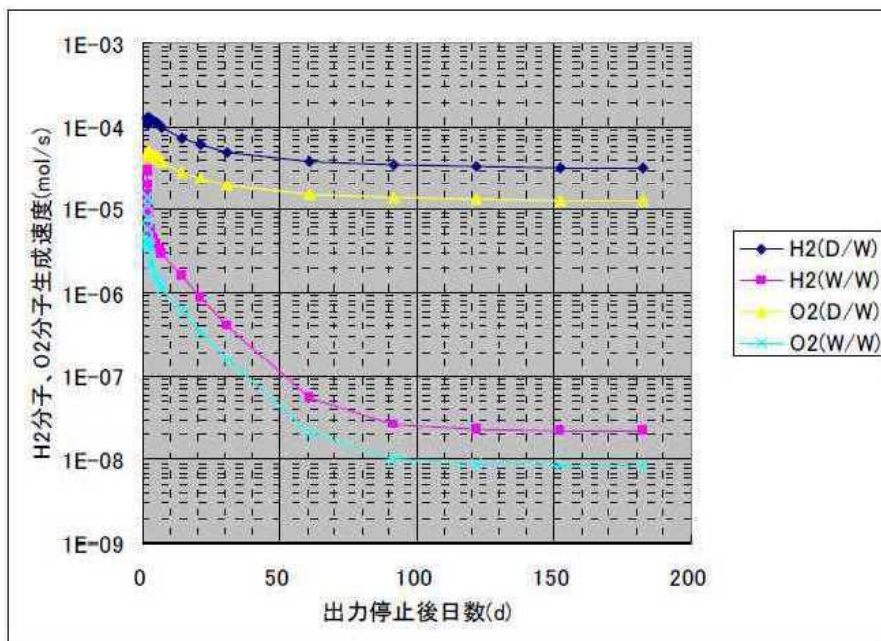
ベント実施中においては格納容器内及びフィルタ装置内へ放出された放射性物質により水の放射線分解によって発生する水素・酸素が系統内へ放出される。ただし、常にガス流れがあること、及びベントガス中のモル組成としては水蒸気が支配的であるため、系統内が可燃限界に達することはない。また、配管内で他系統への隔離弁によって閉塞する箇所のうち、水素滞留の可能性のある箇所については別紙 19 に示すベントラインを設置することで、局所的に水素・酸素濃度が上昇しないように配慮している。

ベント停止後にベント弁を閉じた後は、系統内にガス流れが無くなるため、スクラバ水内に蓄積された放射性物質による水の放射線分解によって発生した水素・酸素が系統内に滞留する。水素は分子量が小さいため、浮力により上部へ移行して、時間とともに系統内配管頂部に蓄積する。(第 1 図)

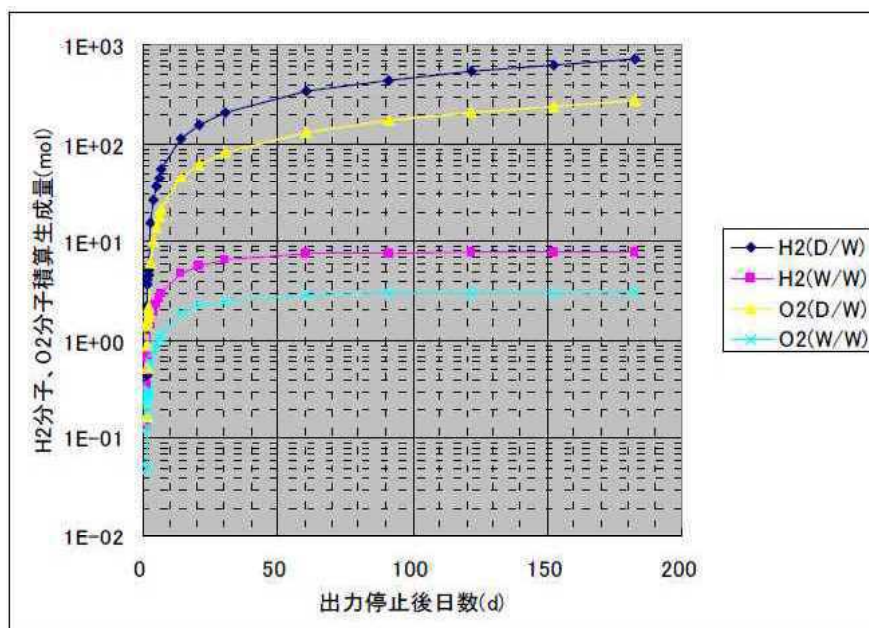


第 1 図 スクラバ水内での水素・酸素の発生系統図

2. スクラバ水で発生する水素・酸素により系統内が可燃限界となるまでの評価
 ベント実施時において、スクラバ水内に蓄積された放射性物質の影響により、
 水の放射線分解にて発生する水素・酸素の生成速度及び積算生成量について評
 価を行った。ベントシナリオとしては大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失シナリオとし、
 38 時間後に W/W 及び D/W よりベントを行った条件とした。評価結果を第 2 図及
 び第 3 図に示す。



第 2 図 スクラバ水内での水素・酸素分子の生成量速度



第 3 図 スクラバ水内での水素・酸素分子の積算生成量

なお、水素・酸素分子の生成量を算出するにあたって、有効性評価の補足説明資料「G 値について」にて紹介されている電力共同研究「事故時放射線分解に関する研究」にて実測された照射開始から短時間経過後の実効 G 値のうち、最も大きい実効 G 値である以下の値を用いた。※1

$$G(\text{H}_2) = 0.36(10^{-2}\text{eV}), G(\text{O}_2) = 0.14(10^{-2}\text{eV})$$

※1 上記の値は FCS の性能解析に用いることを目的として設定した環境条件下での G 値の測定結果である。有効性評価の補足説明資料「G 値について」で示したとおり、G 値は苛酷事故環境下では上記の値よりも低いという実験結果が得られている。このため、今回の評価において FCS の性能解析条件下での G 値を用いることは保守的な扱いになっているものとする。

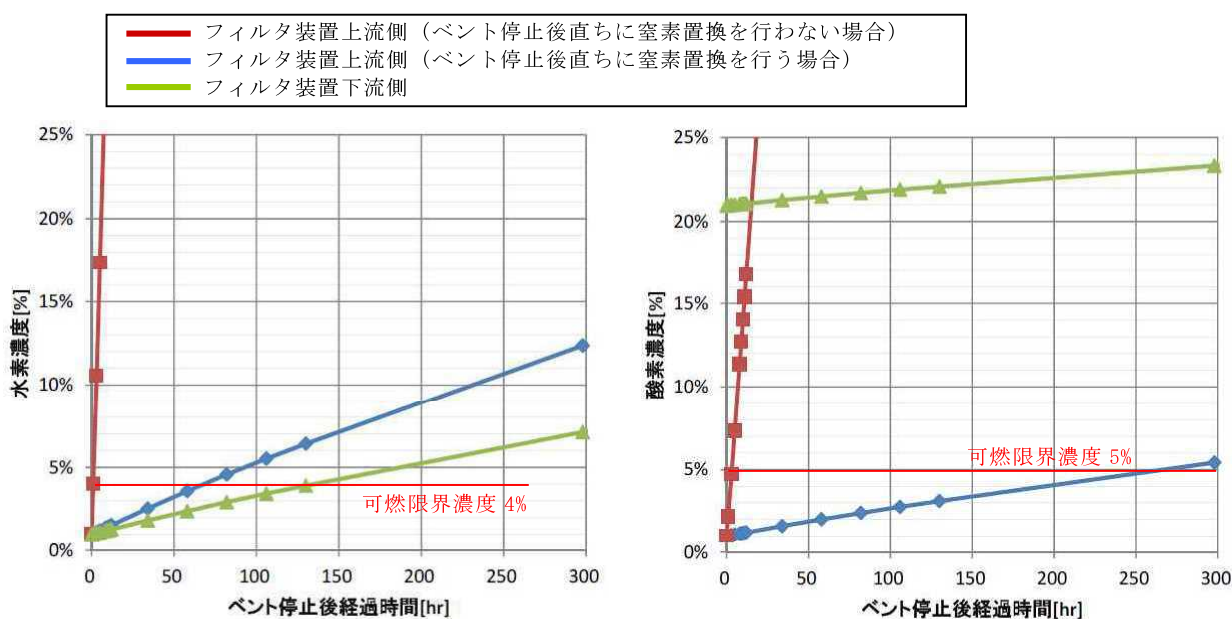
上記をもとに、ベント停止後に系統内の水素及び酸素が可燃限界濃度となるまでの概略時間について計算を行った。可燃限界の基準としては、水素 4%以上、酸素 5%以上、水蒸気 60%以下とした。なお、保守的な条件として、系統内の水蒸気が外気温度まで冷却されて凝縮する時間は考慮せず、ベント停止後直ちに水蒸気は凝縮したものとする。

評価条件を第 1 表、評価結果を第 4 図及び第 5 図に示す。

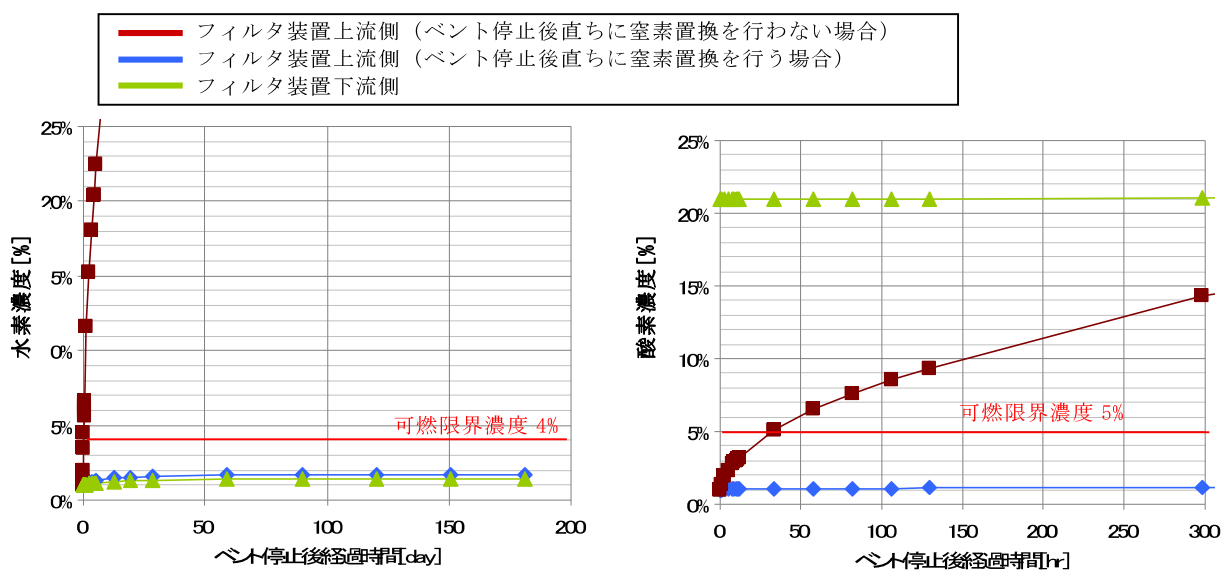
第 1 表 評価条件一覧

評価対象	主な評価条件
フィルタ装置上流側 (ベント停止後直ちに窒素置換を行わない場合)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 隔離弁を閉止後に窒素置換を行わず、系統内配管での放熱によってベントガスに含まれていた水蒸気が凝縮してフィルタ装置上流側配管が負圧 (46℃で約 0.1atm) になることにより、スクラバ水がフィルタ装置上流側配管に約 9m 吸い上げられたと仮定した。 ・ 系統内の気体のモル組成として、水素と酸素以外は全て水蒸気と仮定した。また、初期の系統内の気体条件として、水素 1%、酸素 1%が系統内に存在すると仮定した。 ・ スクラバ水に蓄積された FP によって水素・酸素が発生する範囲としては、フィルタ装置内の配管からフィルタ装置上流側配管の水面までの範囲とした。 ・ スクラバ水位はノズル上端から 0.5m と仮定し、吸い上げにより下限水位を下回らないものとした。 ・ 水素、酸素が蓄積する範囲としては、保守的に水面から真上の第一エルボまでの小さな空間で評価した。

評価対象	主な評価条件
フィルタ装置上流側 (ベント停止後直ちに窒素置換を行う場合)	<ul style="list-style-type: none"> ・隔離弁を閉止後に窒素置換を行い、フィルタ装置上流側配管が窒素で置換 (1atm) されたと仮定した。(スクラバ水がフィルタ装置上流側配管に吸い上げられることはない) ・系統内の気体のモル組成として、水素と酸素以外は全て窒素と仮定した。また、初期の系統内の気体条件として、水素 1%, 酸素 1%が系統内に存在すると仮定した。 ・スクラバ水に蓄積された FP によって水素・酸素が発生する範囲としては、フィルタ装置内の配管からフィルタ装置上流側配管の水面までの範囲とした。 ・スクラバ水位はスクラバノズル上端部から 2.5m (上限水位) と仮定し、水素、酸素が蓄積する範囲としては、保守的に水面から真上の第一エルボまでの小さな空間で評価した。
フィルタ装置下流側	<ul style="list-style-type: none"> ・隔離弁を閉止した後は、窒素置換を行う・行わないに係わらない ・初期の系統内の気体条件として、水素 1%, 酸素 1%が系統内に存在し、残りは全て水蒸気と仮定した。 ・スクラバ水位はノズル上端から 2.5m (上限水位) と仮定した。 ・保守的に狭い空間体積への水素・酸素ガスの蓄積を評価することとし、フィルタ装置気層部から下流側配管への水素・酸素ガスの拡散が起こらないものと仮定して評価を行った。 ・フィルタ装置下流部はラプチャーディスクが開放されていることから、初期ガス組成としては、空気 1atm とした。



第 4 図 水素・酸素濃度のベント停止後の時間経過 (D/W ベント時)



第5図 水素・酸素濃度のベント停止後の時間経過 (W/W ベント時)

評価を行った結果、ベント停止後直ちに窒素置換を行わない場合では、D/W ベントの場合は約8時間後、W/W ベントの場合は約9日後にフィルタ装置上流側の水蒸気濃度が60%以下となり、可燃限界に達した。

一方で、ベント停止後直ちに窒素置換を行う場合では、D/W ベントの場合では約6日後にフィルタ装置下流側の水素濃度が4%以上（酸素濃度は大気開放のため5%以上）となり、可燃限界に達した。W/W ベントの場合では、180日後でも可燃限界に到達することはなかった。

3. 窒素置換完了までの所要時間について

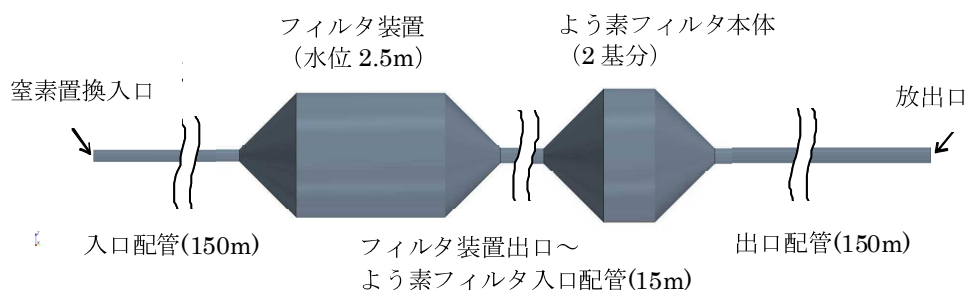
格納容器圧力逃がし装置の簡略化したモデルを用いて、系統内に蓄積した水素を可搬型窒素供給装置を用いて窒素置換し、水素濃度が可燃限界濃度以下となるのに必要な時間を評価した。

評価条件を第 2 表，評価モデルを第 6 図に示す。

第 2 表 評価条件

項目	値
使用コード	汎用流体計算コード STAR-CCM+ Ver. 8.04
窒素供給装置流量	70 Nm ³ /h*
窒素供給装置ガス組成	窒素 99%，酸素 1%
系統内初期ガス組成	窒素 91%，酸素 5%，水素 4%
FV 系統モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・第 6 図参照 ・強制対流と濃度差に伴う混合ガスの相互拡散を考慮する。

※ 可搬型窒素供給装置の窒素供給能力としては、純度 99%以上の窒素ガスを、70 Nm³/h の流量にて供給可能である。



第 6 図 窒素置換評価モデル

上記条件にて系統内の水素濃度の時間的変化の評価を行った結果、約 3 時間程度で系統内全域において濃度が 1%を下回った。以上より、可搬型窒素供給装置は系統内が可燃限界に達した状態から約 3 時間程度で水素濃度を 1%まで下げる能力を有している。

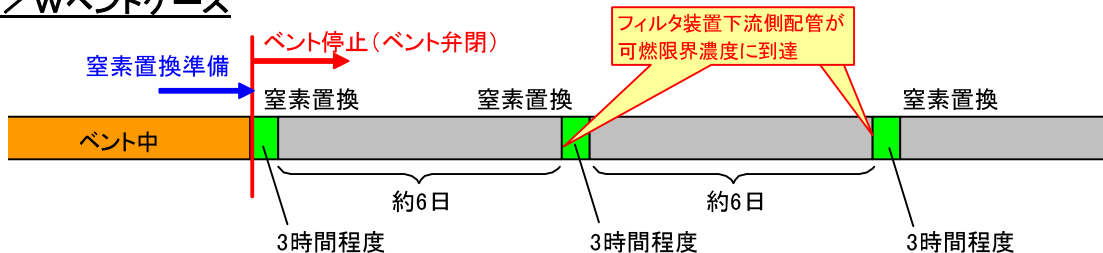
4. 窒素置換を間欠的に行う場合の妥当性について

窒素置換が完了後に窒素置換作業を停止し、次回窒素置換を開始するまでの時間余裕について評価を行った。その結果、D/W ベントの場合は約 6 日後に可燃限界に達したが、W/W ベントの場合は約 180 日以上可燃限界に達することはなかった。したがって、間欠的に窒素置換を行うことは可能である。

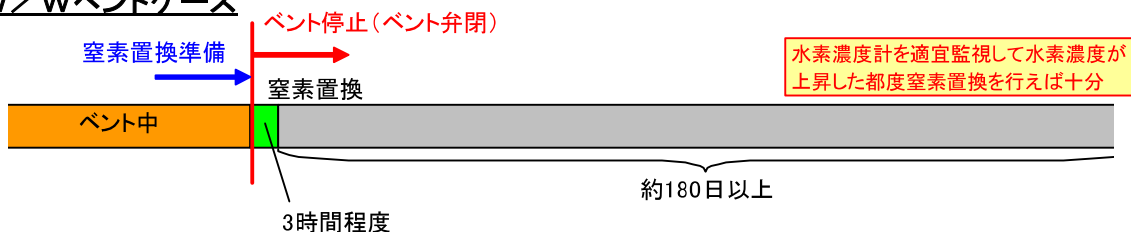
間欠的に窒素置換を行う際の、窒素置換を停止する際の判断基準としては、前述の評価に基づき、系統内配管頂部に設置されている水素濃度計により監視を行い、可搬型窒素供給装置の窒素供給能力 (70Nm³/h において窒素濃度 99%)、ならびに水素濃度計の誤差を考慮して、規定時間窒素置換を実施し、その上で水素濃度が 2%以下になった時点で窒素置換を停止する。

以上をもとに、窒素置換を間欠的に実施する運用に関してを第 7 図に示す。ベント停止においては、直ちに窒素置換を開始できるよう、あらかじめ可搬型窒素供給装置の配備を行っておき、ベント停止後直ちに窒素置換を開始する運用とする。また、窒素置換完了後には水素濃度計にて水素濃度を監視しつつ、水素濃度が上昇した場合には間欠的に窒素置換を行うこととする。

D/Wベントケース



W/Wベントケース

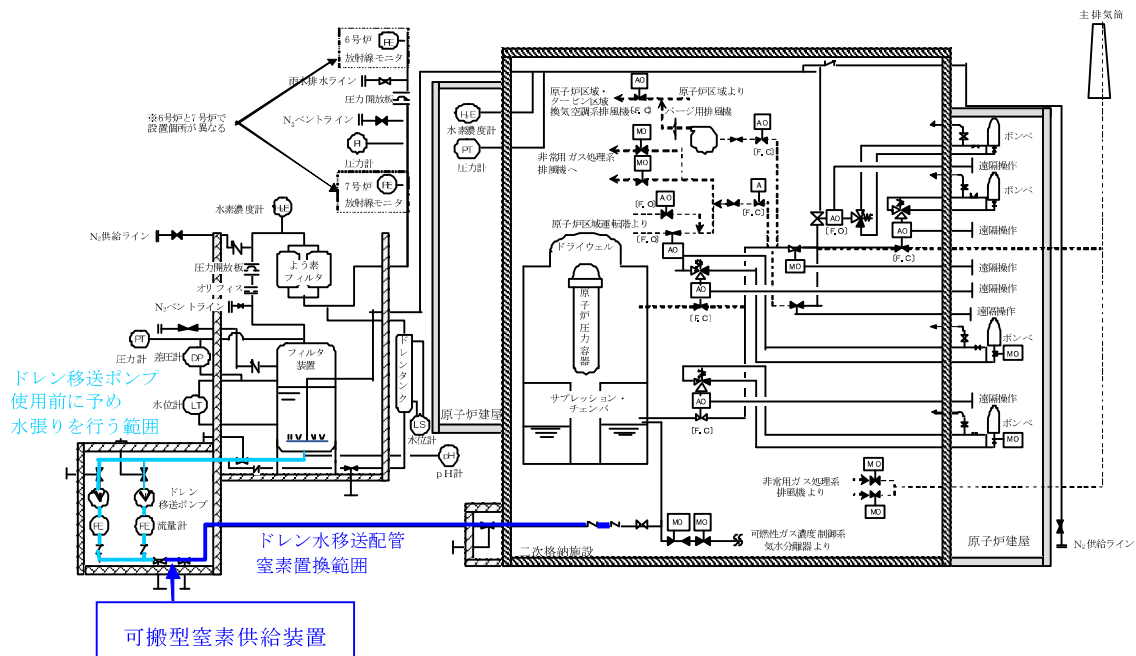


第 7 図 ベント停止後の間欠的な窒素置換運用

別紙26 ドレン移送ライン使用時における格納容器内へ空気流入影響について

ドレン移送ラインについては、第1図のように可燃性ガス濃度制御系配管を通じてサブプレッションチェンバに接続されている。スクラバ水をドレン移送ポンプを用いてサブプレッションチェンバへ移送した際には、ドレン移送ポンプ下流側配管のうち水張りを行っていない範囲の空気がスクラバ水と同時にサブプレッションチェンバへ流入する。サブプレッションチェンバ内の水素濃度が高い状態でスクラバドレン水を移送した場合には、流入した空気に含まれる酸素と水素が合流してサブプレッションチェンバ内で局所的な水素燃焼を生じることが懸念される。

したがって、点検停止中に予めドレン移送ライン（ポンプ出口側隔離弁～格納容器隔離弁間）の窒素置換をしておくことにより、スクラバドレン水移送時においてもサブプレッションチェンバ内に酸素が流入しない運用とする。



第1図 ドレン移送ライン窒素置換範囲系統図

別紙 27 スクラバ水の設定について

【待機時薬液濃度の設定】

水スクラバの無機よう素に対する DF を 1000 以上とするためには、スクラバ水の pH を 以上とする必要がある。そのため、スクラバ水の薬液として NaOH を添加することとしている。

一方、ベント中は、以下の 3 つの要因によりスクラバ水の pH は酸性側にシフトする。

(スクラバ水 pH を低下させる要因)

- ① 格納容器からの酸性物質の飛来に伴う水酸化物イオンの消費
- ② 無機よう素のイオン化に伴う水酸化物イオンの消費
- ③ ベントガスに含まれる水蒸気の凝縮によるスクラバ水量の増加に伴う希釈

フィルタ装置待機時のスクラバ水薬液濃度は、これらの要因を考慮しても pH が 以上を維持できるよう設定する必要がある。

そこで、①～③の要因による水酸化物イオンの消費、希釈量を評価する。

① 格納容器からの酸性物質の飛来に伴う水酸化物イオンの消費

格納容器内に敷設されるケーブルの被覆材が、熱ならびに放射線により分解し酸性物質が生じる。この酸性物質がフィルタ装置に流入し、スクラバ水の pH を低下させる。格納容器からフィルタ装置に流入する酸性物質は HCl で $330[\text{mol}]^{*1}$ と評価している。そのため、この酸を中和するため、水酸化物イオンも $330[\text{mol}]$ 消費される。

※1 原子炉圧力容器が破損し、炉心溶融物が下部ドライウエルに落下した場合は、下部ドライウエルが局所的に高温になり、下部ドライウエルに接続されるケーブルの被覆材が熱分解する可能性がある。ここでは、保守的に格納容器内のケーブルの被覆材の全量が熱分解されるものと仮定し、HCl の生成量を評価した。熱分解により生成された HCl については、ドライウエルスプレイにより気相部から除去されるとともに、格納容器内に保持されている間、水蒸気と共にサプレッション・プールに移行し複数回スクラビングを受けることから、ドライウエルスプレイによる除去効果及びサプレッション・プール水によるスクラビング効果を考慮してフィルタ装置への流入量を評価した。

なお、格納容器ベント実施後においては、ケーブルが存在する格納容器気相部の線量率が低下することから、放射線分解による HCl の生成量は無視できるものと考えられる。

$$\begin{aligned}
 Q &= q_1 \times 1 / (DF_1 \times DF_2) \\
 &= 33000 \times 1 / (10 \times 10) \\
 &= 330 [\text{mol}]
 \end{aligned}$$

Q : HCl の流入量 [mol]

q₁ : 熱分解による HCl 発生量 (33000) [mol]

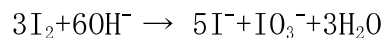
DF₁ : ドライウェルスプレイによる除去係数 (10: CSE 試験に基づき設定) [-]

DF₂ : サプレッション・プールでのスクラビングによる除去係数

(10: 発電用軽水型原子炉の安全評価に関する審査指針 (平成 2 年 8 月 30 日
原子力安全委員会決定 一部改訂 平成 13 年 3 月 29 日 原子力安全委員
会)) [-]

② 無機よう素のイオン化に伴う水酸化化物イオンの消費

スクラバ水にて無機よう素を捕捉する際には、下記の化学反応式に記載の通り、1 [mol] の無機よう素を捕捉するためには、2 mol の水酸化化物イオンが消費される。



今、フィルタ装置に流入する無機よう素量は、5.22 [mol]^{※2} と評価している。そのため、この無機よう素を捕捉するため、水酸化化物イオン 10.44 [mol] が消費される。

※2 無機よう素のフィルタ装置への流入量は、格納容器内での沈着や、サプレッション・プール水によるスクラビング効果を考慮し、以下の式により評価する。ここで、よう素放出量の低減対策として導入した格納容器内 pH 制御については、その効果に期待しないものとした。

$$\begin{aligned}
 Q &= q_0 \times F \times g \times 1 / (DF_1 \times DF_2 \times DF_3) \times 1/M \\
 &= 29100 \times 1 \times 0.91 \times 1 / (2 \times 10 \times 1) \times 1/254 \\
 &\sim 5.22 [\text{mol}]
 \end{aligned}$$

Q : 無機よう素のフィルタ装置への流入量 [mol]

q₀ : よう素の停止時炉内内蔵量 (29100) [g]

F : よう素の原子炉圧力容器から格納容器内への放出割合 (1) [-]

g : 無機よう素の組成構成比 (0.91: R. G. 1. 195) [-]

DF₁ : 格納容器内での沈着による除去係数 (2: Standard Review Plan 6.5.5) [-]

DF₂ : サプレッション・プールでのスクラビングによる除去係数

(10: 発電用軽水型原子炉の安全評価に関する審査指針 (平成 2 年 8 月 30 日
原子力安全委員会決定 一部改訂 平成 13 年 3 月 29 日 原子力安全委員
会)) [-]

DF₃: ドライウェルスプレイによる除去係数 (1) [-]

M: 無機よう素の分子量 (254) [-]

③ ベントガスに含まれる水蒸気の凝縮によるスクラバ水量の増加に伴う希釈
待機時のフィルタ装置には、スクラバノズル上端から 1[m]まで水を張って
おり、水量は 23670[l]である。ベントガスの凝縮により、スクラバ水の最大
水位はスクラバノズル上端から 2.2[m]であることから、水量は 38750[l]へ増
加する。そのため、スクラバの薬液濃度は $23670/38750=0.61$ 倍に希釈される。

ここで、フィルタ装置待機時のスクラバ水薬液濃度を [] [wt%]とする。スクラ
バ水の初期量は 23670[l]であるため、添加する NaOH の量は $23670 \times [] = []$
[kg]=[] [mol]となる。

上記の①及び②による水酸化物イオンの消費量は $330+10.44=340.44$ [mol]であ
るため、これらの反応後、水酸化物イオンの残存量は
[] - $340.44 = []$ [mol]となる。一方、③の最大水位におけるスクラバ水の
量は 38750[l]である。そのため、水酸化物イオン濃度は
[] / $38750 = []$ [mol/l]となり、pHは []となる。

よって、フィルタ装置待機時のスクラバ水薬液濃度を [] [wt%]とすると、①②
③の要因を考慮した後の pHは []となり、無機よう素の DF を 1000 以上とする
ために必要なスクラバ水の pHである [] よりも十分に大きい。そのため、フィル
タ装置待機時のスクラバ水薬液濃度は [] [wt%] (NaOH) とする。また、その時の
pHは []となる。

【ラジオリシスによる pH の変化】

フィルタ装置スクラバ水は、スクラバ水に捕捉された放射性物質による放射線に晒される。この放射線により、スクラバ水が放射線分解し、pH が酸性側にシフトしてしまうと、所望の無機よう素除去性能を達成できなくなる可能性がある。

そこで、放射線分解シミュレーションにより、スクラバ水に想定される高温の放射線照射環境下において、スクラバ水の pH がどのように変化するかの評価を実施した。評価の条件を第 1 表に示す。

第 1 表 放射線分解シミュレーション条件一覧表

項目	条件
評価コード	・ FACSIMILE
設定条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水の放射線分解収量，分解生成物の反応式リスト，反応速度定数 ：文献¹⁾より設定 ・ 高温での水酸化ナトリウム解離定数 ：文献²⁾より設定.
スクラバ水の条件	<p>【ケース 1：スクラバ水温 100℃】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ スクラバ水温度：100℃ ・ 雰囲気：脱気 ・ スクラバ水吸収線量率：10kGy/h^{※1} ・ 照射時間：7 日間 ・ 初期 pH：12.5（20℃における値） <p>【ケース 2：スクラバ水温 200℃】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ スクラバ水温度：200℃ ・ 雰囲気：脱気 ・ スクラバ水吸収線量率：10kGy/h^{※1} ・ 照射時間：7 日間 ・ 初期 pH：12.5（20℃における値）

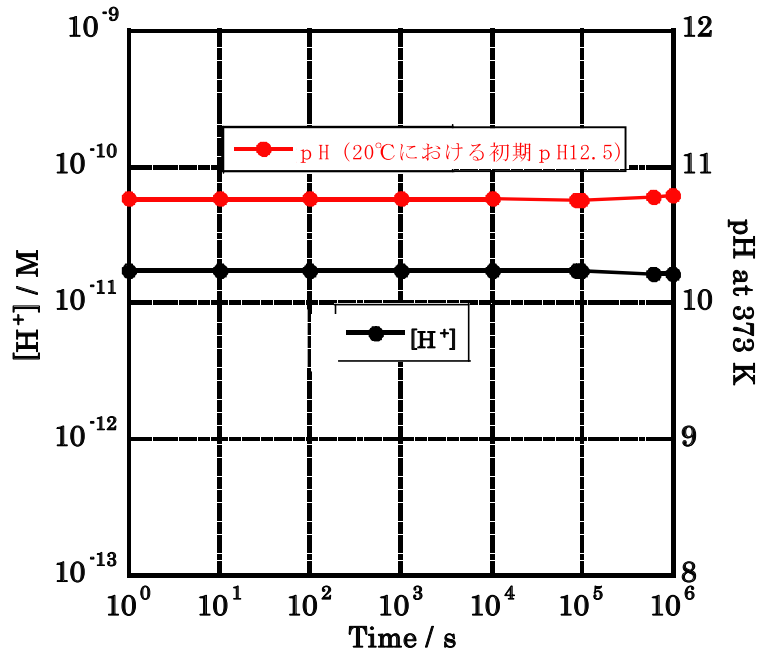
文献¹⁾：A. J. Elliot, AECL 153-127160-450-001 (2009)

文献²⁾：Kiwamu Sue et al., J. Supercrit. Fluids, 28, 287-296 (2004)

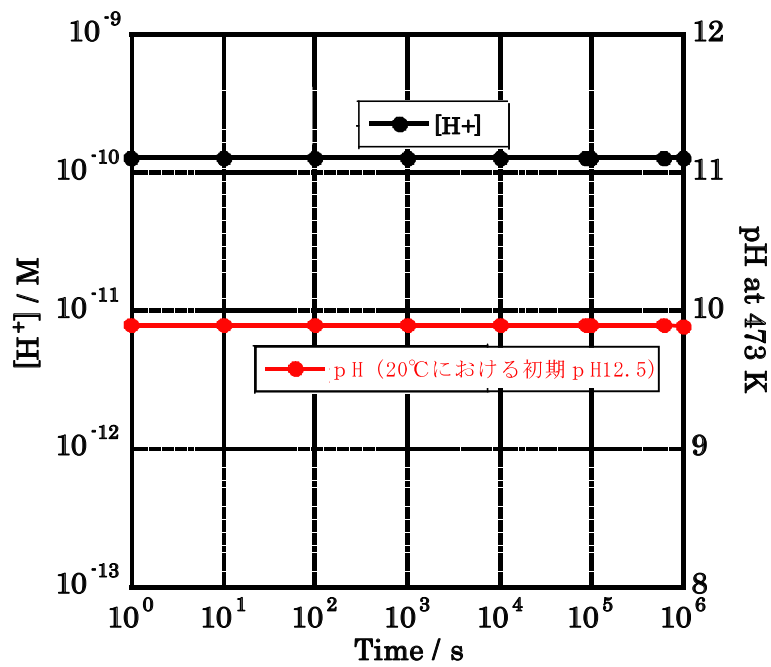
※1 大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失，D/W ベントシナリオにて想定される線量率の約 10 倍

第 1 表の条件にて放射線分解シミュレーションを実施したところ、スクラバ水 pH の時間推移は第 1 図，第 2 図の通りとなった。第 1 図，第 2 図より、いずれのケースにおいても、H⁺濃度はほとんど変化しておらず、そのためスクラバ水の pH もほとんど変化しないことがわかった。

よって、スクラバ水の放射線分解による pH の変化はほとんど生じないことから、スクラバ水の放射線分解がフィルタ装置の無機よう素の捕捉性能に与える影響はない。



第1図 スクラバ水 pH の時間推移 (スクラバ水温 100°C)



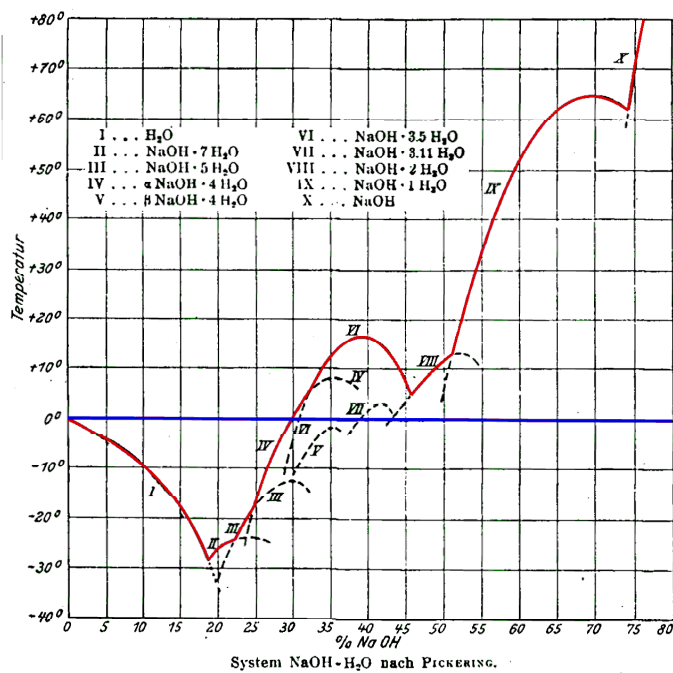
第2図 スクラバ水 pH の時間推移 (スクラバ水温 200°C)

【薬液の劣化・濃度均一性】

フィルタ装置スクラバ水に添加する NaOH の水系の相平衡については、『Gmelins Handbuch der anorganischer Chemie, Natrium, 8 Auflage, Verlag Chemie, Berlin 1928』より、第3図の通り示されている。第3図より、フィルタ装置スクラバ水の添加濃度である NaOH [wt%] では、水温が 0℃ 以上であれば相変化は起こらない（つまり析出することはない）ことがわかる。フィルタ装置は保温材を敷設してあり、スクラバ水は 0℃ 以上となる。よって、フィルタ装置待機中に NaOH が析出することはない。

また、NaOH は非常に安定な化学種であり、フィルタ装置待機中、フィルタ装置はラブチャディスクにより外界と隔離され、窒素雰囲気置かれることから、フィルタ装置待機中において、薬液が変質することはない。

また、フィルタ装置を使用すると、スクラバノズルから噴射されるベントガスによりバブリングされ、NaOH は均一に拡散されると考えられる。



第3図 NaOH の水系相平衡図

【水位の設定】

スクラバ水の水位は、以下の理由から下限水位/上限水位を設定し、フィルタ装置使用中は、スクラバ水位が下限水位から上限水位までの範囲を逸脱しないよう水位の確認、調整を行う。

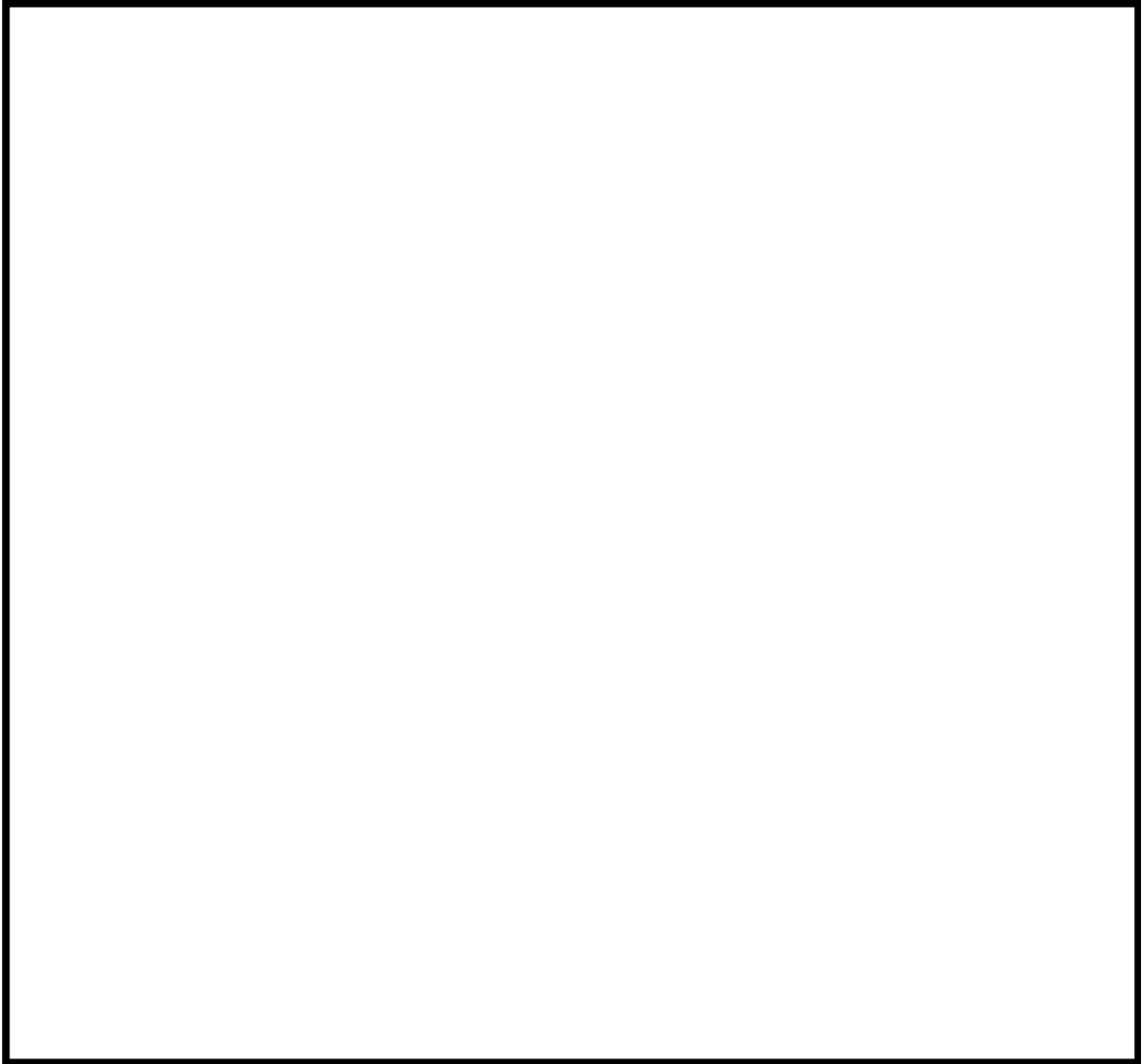
① 下限水位

- ・スクラバ水は、水位が高い方がDFは大きくなる。
- ・スクラバ水位がスクラバノズル上端から0.5m以上であれば、DFが目標性能を満足できることを確認している。
- ・そのため、水スクラバの下限水位を、スクラバノズル上端から0.5mに設定する。

② 上限水位

- ・スクラバ水位が上昇し、ベントガスによるスクラバ水の吹き上がりが金属フィルタに到達すると、金属フィルタの有効面積が減少し、金属フィルタの差圧が上昇する。
- ・金属フィルタの差圧が上昇すると、金属フィルタドレン配管内の水位が上昇し、最悪の場合、金属フィルタドレン配管から金属フィルタ二次側へスクラバ水を噴出する。
- ・スクラバ水の噴出は、金属フィルタドレン配管下端が気相に露出するまで継続する。
- ・金属フィルタドレン配管下端の位置は、第4図の通り、スクラバノズル上端よりも低いため、水スクラバは機能喪失する。また、金属フィルタドレン配管を通じて、金属フィルタをバイパスしてガスが流れることから、金属フィルタも機能喪失する。そのため、フィルタ装置の機能が喪失する。
- ・スクラバ水の吹き上がり量、ならびにスクラバ水吹き上がりに伴う金属フィルタの差圧上昇については、以下の『スウェル試験』により確認し、その結果、上限水位をスクラバノズル上端から2.2mに設定する。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第4図 フィルタ装置構造図

(スウェル試験)

水スクラバにガスを噴射した際の、スクラバ水の吹き上がり（スウェル）量と金属フィルタの差圧を確認する試験を実施した。

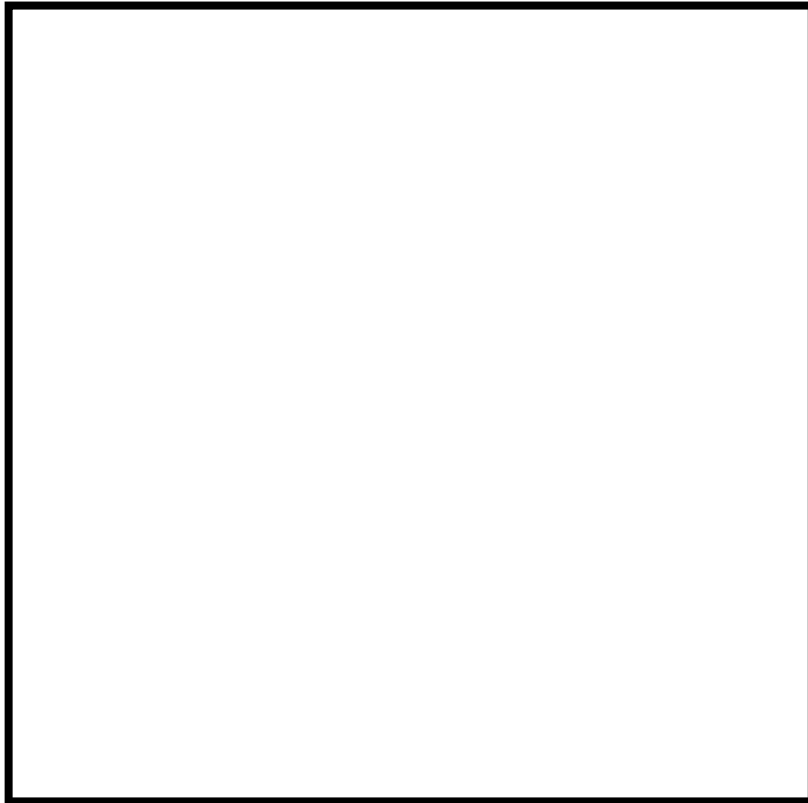
試験条件は第2表に記載の通り、実機と同じ高さの試験装置を用い、スクラバ水の水位を徐々に大きくし、スクラバ水の吹き上がり量を目視にて確認し、同時に金属フィルタの差圧を計測した。水の粘度が大きい方が、吹き上がり高さも高くなることから、保守的にスクラバ水を常温の状態とし、試験ガスは常温の空気を用いた。また、薬液による影響を考慮するため、スクラバ水に実機と同じく [wt%]のNaOHを溶解した。

第2表 スウェル試験条件一覧表

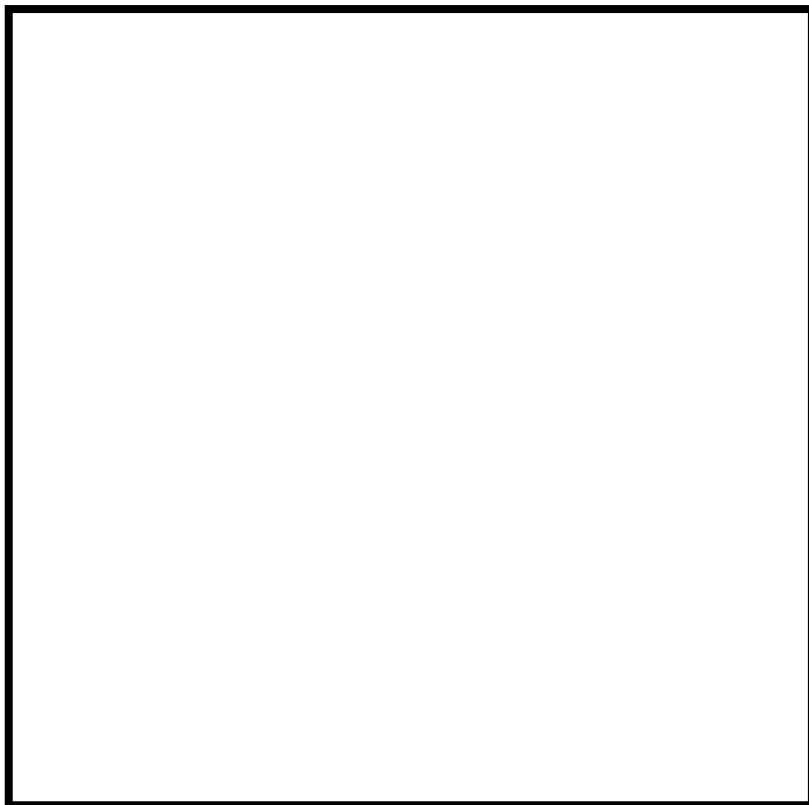
項目	条件
試験装置	<ul style="list-style-type: none"> ・実機高さ試験装置 スクラバノズル本数は1本（実機は140本）、断面積は実機の1/140
試験ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・空気
ガス・スクラバ水温度	<ul style="list-style-type: none"> ・常温
スクラバ水位	<ul style="list-style-type: none"> ・1m, 2m, 2.1m, 2.2m, 2.3m, 2.4m, 2.5m (2Pd相当流量試験時) ・2m, 2.5m (最小流量相当試験時)
ガス体積流量	<ul style="list-style-type: none"> ・2Pd相当流量 ・最小流量相当
薬液濃度	<ul style="list-style-type: none"> ・NaOH wt%

上記条件にて試験を実施した結果、スクラバ水の吹き上がり量は第5, 6図の通りとなった。第5図に示す通り、2Pd相当流量（実機最大流量）においては、スクラバ水位2.3mで吹き上がった水は金属フィルタ下端に到達し、それより高い水位では金属フィルタの一部が水没した。また、第6図の通り、最小流量相当では、スクラバ水位2.5mでも吹き上がった水は金属フィルタ下端には到達しなかった。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

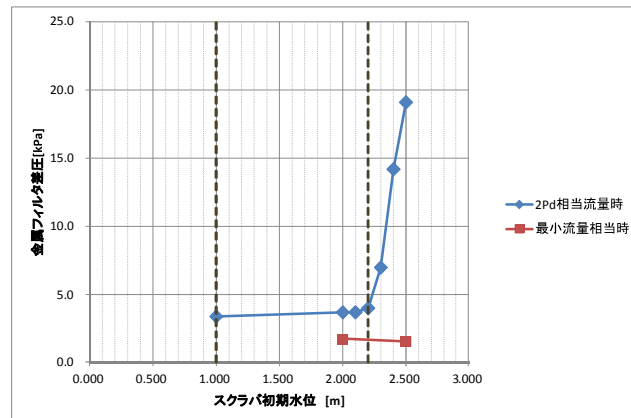


第5図 吹き上がり量目視確認試験結果（2Pd相当流量時）



第6図 吹き上がり量目視確認試験結果（最小流量相当時）

また、金属フィルタの差圧は第7図の通りとなった。第7図に示す通り、2Pd相当流量（実機最大流量）においては、水位が2.3m以上となると金属フィルタの差圧が急上昇していることがわかる。そのため、やはり金属フィルタの一部が水没してしまうと、金属フィルタの差圧が上昇することを確認した。一方、最小流量相当では、スクラバ水位2.5mでも金属フィルタの差圧上昇は認められなかった。



第7図 金属フィルタ差圧計測結果

以上より、水スクラバの上限水位は、実機最大流量時の吹き上がり高さを考慮して、スクラバノズル上端+2.2mに設定する。

一方、フィルタ装置が最大流量となるのは、格納容器圧力2Pdにてベントを開始した直後であり、スクラバ水位は低い状態である。ベントガスの凝縮によりスクラバ水位が上昇して上限水位に到達する時には、ベント開始から十分時間が経過しており、ベントガスの流量は最大流量と比較して十分小さくなっている。

そのため、水スクラバの水位が高い状態と、ベントガスの流量が大きい状態を組み合わせ設定した上限水位は、非常に保守的である。

別紙 2 8 6号炉と7号炉で放射線モニタ設置位置が異なることに対する考え方

放射線モニタの設置目的は、別紙3で示したとおり、配管の線量率(mSv/h)から放射性物質濃度(Bq/cm³)を算出することである。

放射線モニタは6号炉の場合、ラプチャーディスク通過後に設置しており、7号炉では、ラプチャーディスク通過前に設置してあるが、ラプチャーディスクは、格納容器からの排気圧力(0.62MPa [gage])と比較して十分低い圧力(0.10MPa [gage])で開放する設定としているため、6号炉及び7号炉の設置位置でも放射線モニタで十分に計測することが可能である。そのため、放射線モニタの設置位置は、現場の施工性を考慮して上記のとおり設計している。

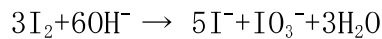
なお、ラプチャーディスクが開放したかどうかの判断については、圧力計で確認できる設計としている。

別紙 29 よう素捕捉時の化学反応による影響について

(1) 水スクラバによる無機よう素の捕捉

【化学反応熱】

水スクラバには、薬液として NaOH を [wt%] 溶解することにより、下記の化学反応式により、無機よう素をよう素イオンとして、水スクラバ中に捕捉する。



上記の反応に伴う反応熱 Q_1 を標準エンタルピーより算出すると、 Q_1 は以下の通りとなる。なお、無機よう素は固体状とガス状で標準エンタルピーが異なることから、それぞれの場合について反応熱 Q_1 を算出する。(化学便覧改訂 5 版基礎編 II 表 10.127 および表 10.139 より)

① 無機よう素が固体状の場合

$$3x[0] + 6x[-230.015] = 5x[-56.78] + 1x[-221.3] + 3x[-285.83] + Q_1$$

$$Q_1 = -17.4 [\text{kJ/mol}]$$

ここで、フィルタ装置に流入する無機よう素は 5.22 [mol] と評価していることから、無機よう素の捕捉により生じる熱量 Q_2 は、以下の通りとなる。

$$Q_2 = Q_1 \times 5.22$$

$$= -17.4 \div 3 \times 5.22$$

$$= -30.276 [\text{kJ}]$$

② 無機よう素がガス状の場合

$$3x[62.438] + 6x[-230.015] = 5x[-56.78] + 1x[-221.3] + 3x[-285.83] + Q_1$$

$$Q_1 = 169.914 [\text{kJ/mol}]$$

ここで、フィルタ装置に流入する無機よう素は 5.22 [mol] と評価していることから、無機よう素の捕捉により生じる熱量 Q_2 は、以下の通りとなる。

$$Q_2 = Q_1 \times 5.22$$

$$= 169.914 \div 3 \times 5.22$$

$$= 295.651 [\text{kJ}]$$

一方、フィルタ装置には、事故後 1 ヶ月においても約 2.5 [kg/s] の蒸気が流入する。なお、フィルタ装置に流入する蒸気が、保守的に大気圧の飽和蒸気であるとする、蒸気の比エンタルピーは 2675.57 [kJ/kg] となる。よって、事故後 1 ヶ月における、フィルタ装置への蒸気エネルギーの流入率 W_3 [kJ/s] は以下の通りとなる。

$$W_3 = 2675.57 \times 2.5$$

$$= 6688.92 [\text{kJ/s}]$$

ゆえに、無機よう素が捕捉される際の熱量は、事故後 1 ヶ月後のフィルタ装置への蒸気流入量を想定したとしても、1 秒間に流入する蒸気のエネルギーに満たない非常に小さい熱量であることがわかる。そのため、無機よう素捕捉による熱量

がフィルタ装置の性能に与える影響はない。

【化学反応生成物】

無機よう素が反応するときの生成物は、フィルタ装置の性能に影響を与えるものではなく、可燃性物質もないことから、生成物の除去等特段の対応は不要である。

また、格納容器から塩化物の飛来が想定されるが、スクラバ水の水酸化ナトリウムと反応してNaClが生成されるだけであることから、フィルタ装置の性能に影響を与えるものではない。

また、有機よう素はスクラバ水とは反応しないことから、有機よう素の飛来がフィルタ装置の性能に与える影響はない。さらに、フィルタ装置内の内部に塗装は施していないため、フィルタ装置内で有機よう素が発生することはない。

(2) 銀ゼオライト吸着材による有機よう素の捕捉

【化学反応熱】

よう素フィルタは、銀ゼオライト吸着材により、下記の化学反応式によって、有機よう素をよう化銀として、銀ゼオライト中に捕捉されている。

上記の反応に伴う反応熱 Q_1 を標準エンタルピーより算出すると、 Q_1 は以下の通りとなる。(化学便覧改訂5版基礎編II 表10.127, 10.129 および表10.133 より)



ここで、よう素フィルタに流入する有機よう素は9.16[mo] (1.3[kg]) と評価していることから、有機よう素の捕捉により生じる熱量 Q_2 は、以下の通りとなる。

$$Q_2 = Q_1 \times 9.16$$
$$= 142.004 \times 9.16$$
$$= 1300.757 [\text{kJ}]$$

一方、よう素フィルタには、事故後1ヶ月においても約2.5[kg/s]の蒸気が流入する。なお、よう素フィルタに流入する蒸気が、保守的に大気圧の飽和蒸気であるとすると、蒸気の比エンタルピーは2675.57[kJ/kg]となる。よって、事故後1ヶ月における、よう素フィルタへの蒸気エネルギーの流入率 W_3 [kJ/s] は以下の通りとなる。

$$W_3 = 2675.57 \times 2.5$$
$$= 6688.92 [\text{kJ/s}]$$

ゆえに、有機よう素が捕捉される際の熱量は、事故後1ヶ月後のよう素フィルタへの蒸気流入量を想定したとしても、1秒間に流入する蒸気のエネルギーに満たない非常に小さい熱量であることがわかる。また、よう素フィルタに流入する

蒸気により、この熱量はすぐに除去されると考えられる。そのため、有機よう素捕捉による熱量がよう素フィルタの性能に与える影響はない。

【化学反応生成物】

有機よう素が反応するときの生成物として、可燃性物質である [] が生成されるが、この [] はベントガスと共に窒素雰囲気となっている系統内を通過し、燃焼することなく系統外へ排出されることとなる。そのため、よう素フィルタにおいて、有機よう素を捕捉する際に生成される [] が、格納容器圧力逃がし装置に与える悪影響はない。なお、仮に有機よう素の反応が全て上式による場合、発生する [] の量は [] (9.16[mo1]) となる。一方、ベントガスの蒸気流量は、事故後1ヶ月後においても約2.5[kg/s]となっている。そのため、発生する [] の量は、ベントガスの蒸気流量に対して非常に微量である。

別紙 30 フィルタ装置の長期使用時の影響について

フィルタ装置を長期間使用した場合の影響として、フィルタ装置スクラバ水にエアロゾルを捕集したことによるスクラバ水性状変化による DF 性能への影響と、金属フィルタに捕捉されるエアロゾルによる閉塞、スクラバノズルの振動による脱落、さらに金属フィルタによう素が付着することによる腐食の影響について、以下の通り確認した。

1. スクラバ水性状変化による影響

水スクラバには、格納容器ベントに伴い飛来するエアロゾルが大量に捕捉される。エアロゾルには、水溶性のエアロゾルと非水溶性のエアロゾルがあり、エアロゾルを捕集することによりスクラバ水の性状が変化する。このスクラバ水の性状の変化が DF 性能に与える影響を確認するため、水溶性エアロゾルとして CsI を、非水溶性エアロゾルとして TiO_2 それぞれをスクラバ水に大量に投入して、水スクラバ単体の DF 性能試験を行い、エアロゾルを投入しない場合の DF 性能試験の結果と比較した。

試験は第 1-1 図に示す、アクリル試験装置を用いて実施した。試験条件を第 1-1 表に示す。また、実機に換算したエアロゾルの投入量を第 1-2 表に示す。第 1-2 表より、非常に大量のエアロゾルを投入したことがわかる。



第 1-1 図 試験概要図 (スクラバ水性状影響確認試験)

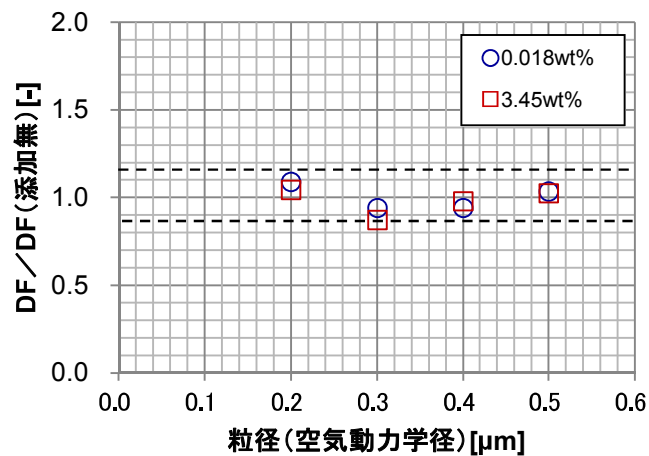
第 1-1 表 スクラバ水性状影響確認試験条件一覧表

項目	条件
試験装置	・ アクリル試験装置
試験ガス	・ 空気
スクラバ水位	・ 1m
ガス・スクラバ水温度	・ 常温
ガス体積流量	・ 2Pd 相当流量 ・ 最小流量相当
スクラバ水への エアロゾル投入濃度	【CsI】 ・ 0.018wt% ・ 3.45wt% 【TiO ₂ 】 ・ 0.019wt% ・ 3.67wt%
試験エアロゾル	・ PSL

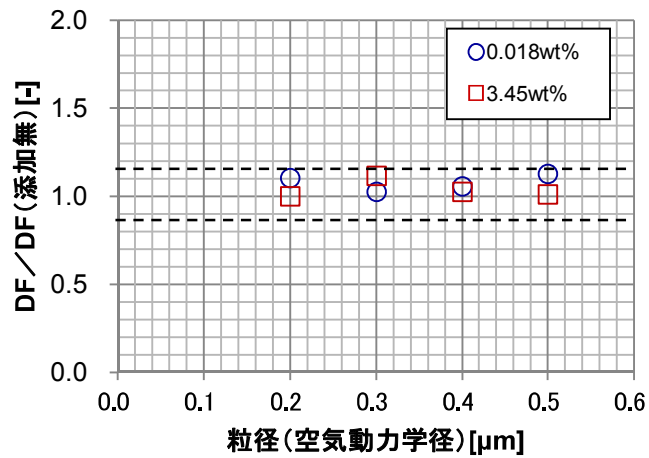
第 1-2 表 エアロゾル投入量実機換算値

試験投入濃度		実機換算量
CsI	0.018wt%	4.42kg
	3.45wt%	847.32kg
TiO ₂	0.019wt%	4.66kg
	3.67wt%	901.35kg

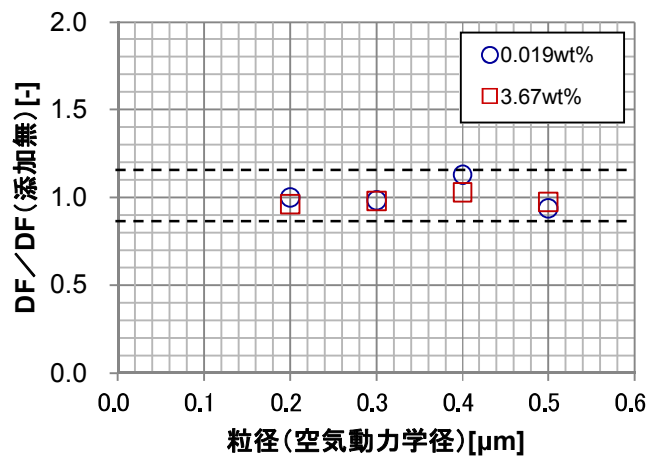
上記の条件にて試験を実施して DF を算出し、スクラバ水にエアロゾルを投入しない場合の DF との比を算出した結果、第 1-2～5 図の通りとなった。



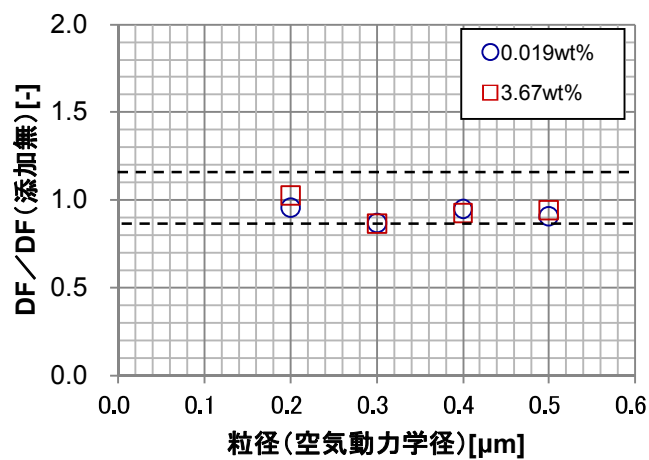
第 1-2 図 DF 比 (CsI 投入, 2Pd 相当流量)



第 1-3 図 DF 比 (CsI 投入, 最小流量相当)



第 1-4 図 DF 比 (TiO₂ 投入, 2Pd 相当流量)



第 1-5 図 DF 比 (TiO₂ 投入, 最小流量相当)

試験の結果より、エアロゾルを投入する場合としない場合で、DF に顕著な増減はなく、また DF の増減に一定の傾向は認められなかった。そのため、実機においてエアロゾルがスクラバ水に大量に流入したとしても、水スクラバの DF 性能に影響はないと考える。

2. 金属フィルタ閉塞

フィルタ装置へのエアロゾルの流入による、金属フィルタの閉塞評価を実施した。事故シナリオは、大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失シナリオと、MCCI が発生する高圧・低圧注水機能喪失シナリオ^{※1}とし、フィルタ装置へのエアロゾル流入量が大きい D/W ベントの場合を考慮した。

※1 フィルタ装置へのエアロゾル流入量の不確かさを考慮してもフィルタ装置が性能を発揮できることを確認するために、熔融炉心・コンクリート相互作用により、コンクリートエアロゾルが大量に発生するシナリオを想定した。このシナリオでは、原子炉圧力容器への注水及び下部ドライウエルへの事前水張りに全て失敗し、熔融炉心が下部ドライウエルに落下してから 1 時間後に初めて格納容器内（下部ドライウエル）に注水を開始するものとした。

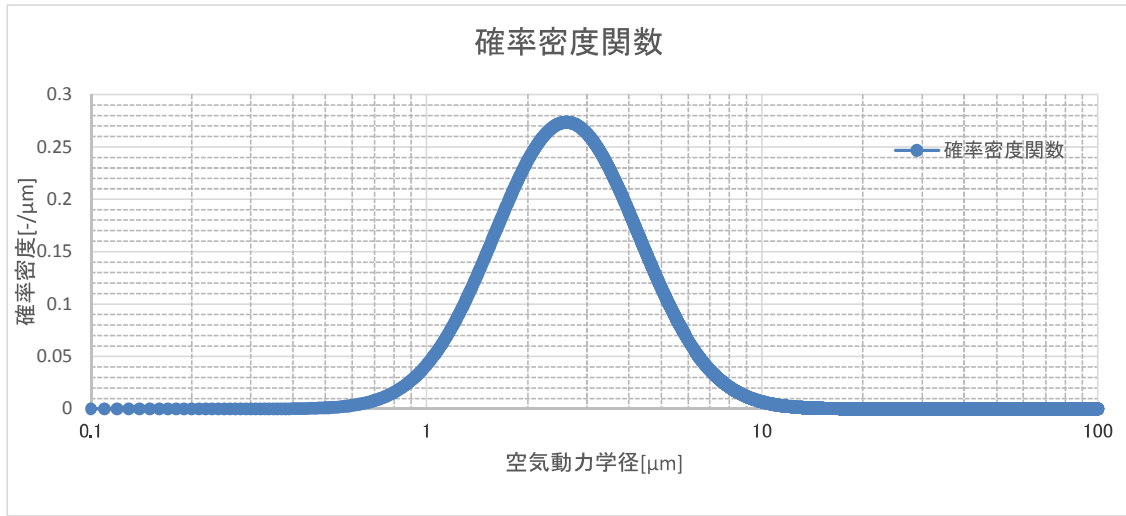
評価の手順は、以下の通りとなる。

- ① 各シナリオにおける、フィルタ装置に流入するエアロゾルの粒子径分布と流入量 (cm³) を評価
- ② フィルタ装置に流入するエアロゾル粒子径分布に対して、水スクラバ単体のオーバーオール DF を算出
- ③ フィルタ装置に流入するエアロゾル量を水スクラバ単体のオーバーオール DF で除して、金属フィルタに流入するエアロゾルの量を算出
- ④ 金属フィルタに流入するエアロゾルの量と、金属フィルタに許容されるエアロゾル量と比較し、流入量 < 許容量であることを確認する

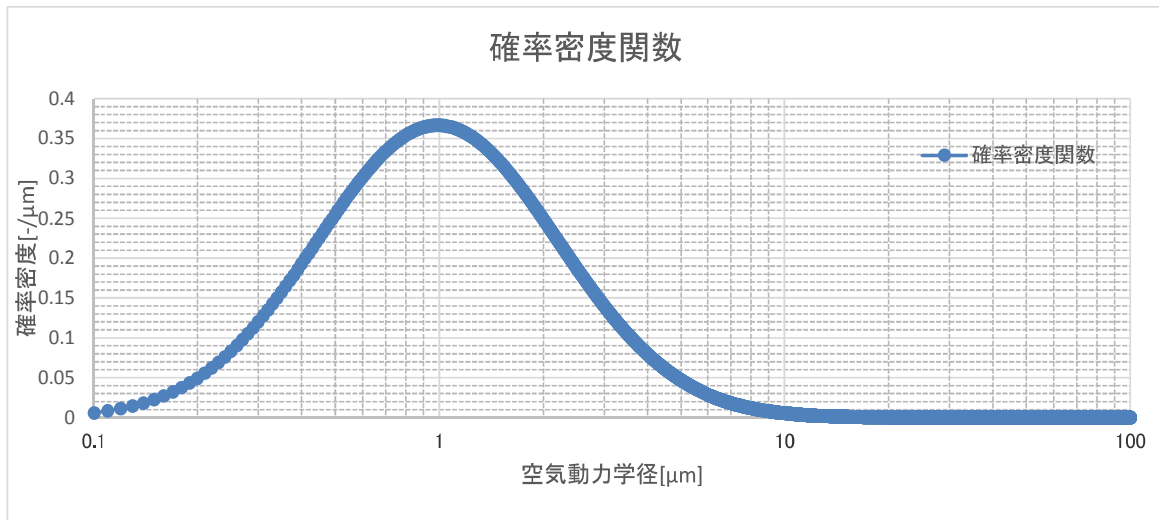
以下に評価結果を示す。

① フィルタ装置に流入するエアロゾル粒子径分布と流入量

フィルタ装置に流入するエアロゾルの粒径分布は第 2-1, 2 図の通りとなる。また、フィルタ装置に流入するエアロゾル量は第 2-1 表の通りとなる。



第 2-1 図 エアロゾル粒子径分布（大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失, D/W ベント）



第 2-2 図 エアロゾル粒子径分布（高圧・低圧注水機能喪失, D/W ベント）

第 2-1 表 エアロゾル流入量

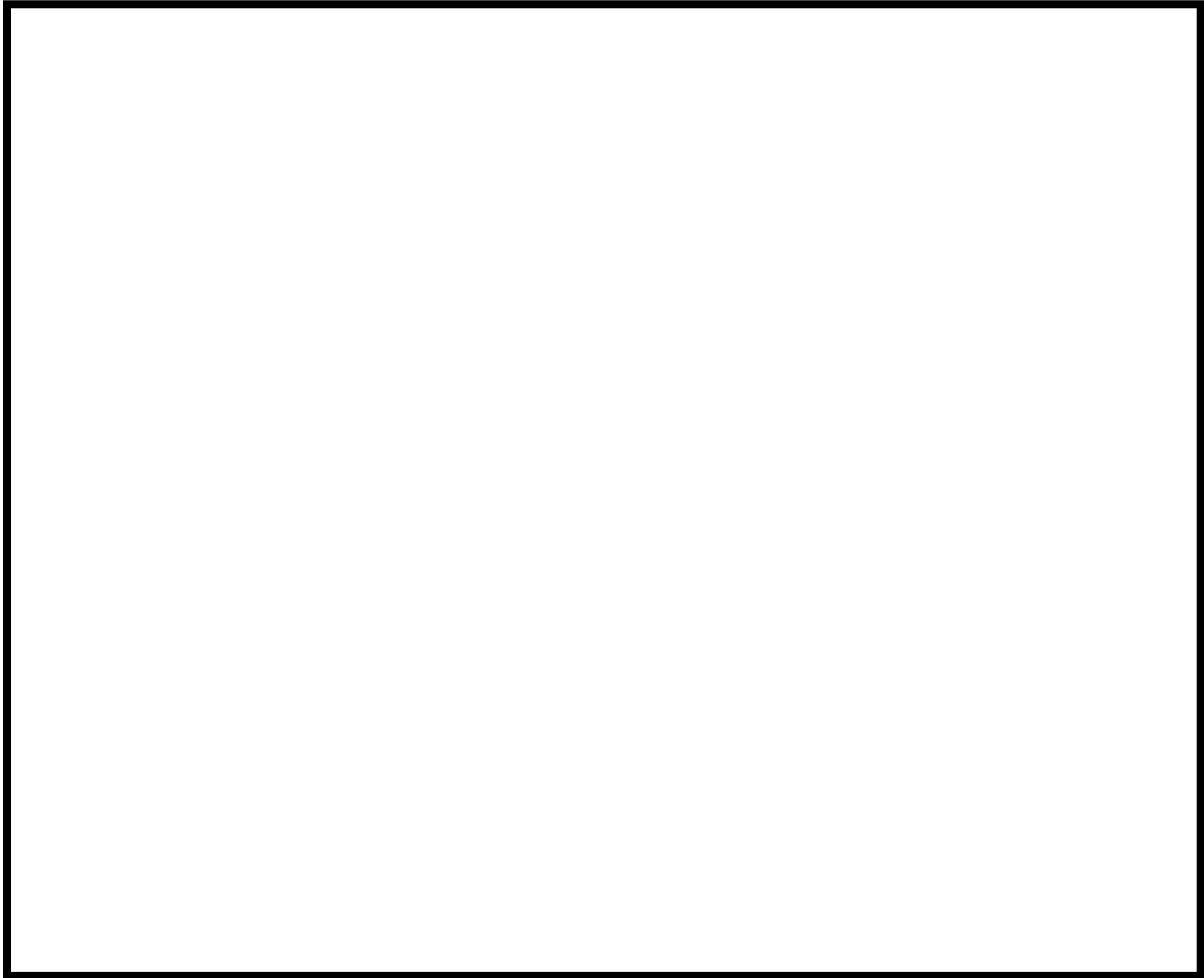
シナリオ	エアロゾル流入量
大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失, D/W ベント	569.48 cm ³
高圧・低圧注水機能喪失, D/W ベント	10203.38 cm ³

② 水スクラバ単体オーバーオール DF

水スクラバオーバーオールの DF を評価するため、水スクラバ単体の DF 性能試験にて DF を評価した。

DF 性能試験は、実機により近い条件である蒸気を用いた場合にて実施した。なお、スクラバ水温は飽和温度とし、水蒸気の凝縮効果を見込まない保守的な条件とした。試験設備は第 2-3 図、試験条件を第 2-2 表に示す。なお、スクラバ水の薬液の影響を考慮し、スクラバ水に実機と同じ NaOH を [wt%] 溶解して試験を実施した。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

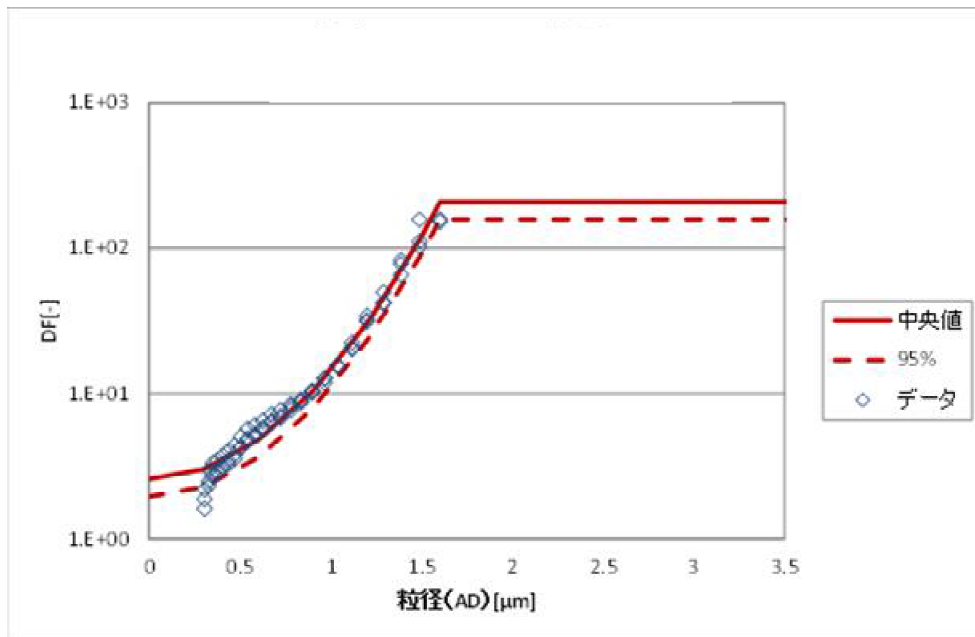


第 2-3 図 試験概要図（蒸気，水スクラバ性能試験）

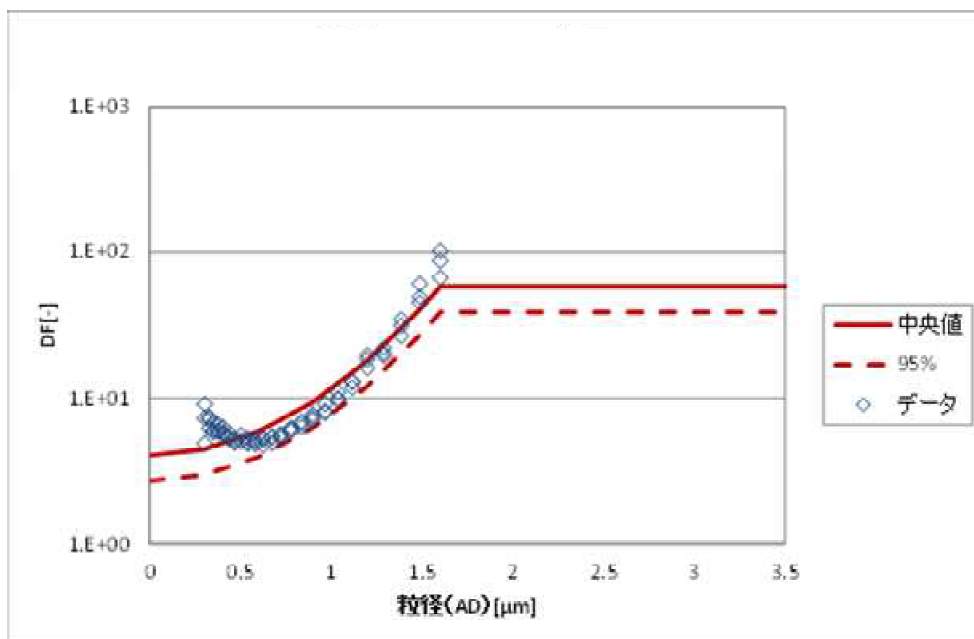
第 2-2 表 蒸気，水スクラバ試験条件一覧表

項目	条件
試験装置	・実機高さ試験装置
試験ガス	・蒸気＋空気（エアロゾル送気用） ・試験時蒸気割合：約 95%（2Pd 相当流量） 約 88%（最小流量相当）
スクラバ水位	・ 1m
ガス・スクラバ水温度	・ 約 100℃
ガス体積流量	・ 2Pd 相当流量 ・ 最小流量相当
薬液添加量	・ NaOH <input type="text"/> wt%
試験エアロゾル	・ TiO ₂

上記の条件にて試験を実施した結果、蒸気試験における DF は第 2-4 図、第 2-5 図の通りとなった。なお、試験データプロットにはばらつきがあることから、これらデータプロットのフィッティングカーブを作成し、さらに 95%信頼区間の下限値を示すカーブを作成した。また、2Pd 相当流量、最小流量相当ともに約 1.5 μm 、までのデータがあるが、それより大きい粒子径領域の DF については、非常に保守的な設定であるが、データがある最大の粒子径における DF 値であるとした。このようにして作成した線を水スクラバ単体の DF 性能線とした。



第 2-4 図 水スクラバ性能試験結果 (2Pd 相当流量)



第 2-5 図 水スクラバ性能試験結果 (最小流量相当)

第 2-1 図，第 2-2 図の粒子径分布に対して，第 2-4 図，第 2-5 図に示す水スクラバの DF 性能線を用いて，(1)式により水スクラバのオーバーオール DF を算出すると，第 2-3 表の通りとなった。

$$DF_{total} = \frac{\int M(D_p) dD_p}{\int \frac{M(D_p)}{DF(D_p)} dD_p} \quad (1)$$

DF(D_p)は，粒径 D_p における水スクラバの DF

M(D_p)は，フィルタ装置に流入する粒径 D_p のエアロゾルの総質量

第 2-3 表 水スクラバオーバーオール DF

シナリオ	ガス流量	水スクラバ オーバーオール DF
大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失， D/W ベント	2Pd 相当流量	115
	最小流量相当	34
高圧・低圧注水機能喪失， D/W ベント	2Pd 相当流量	15
	最小流量相当	12

③ 金属フィルタに流入するエアロゾルの量

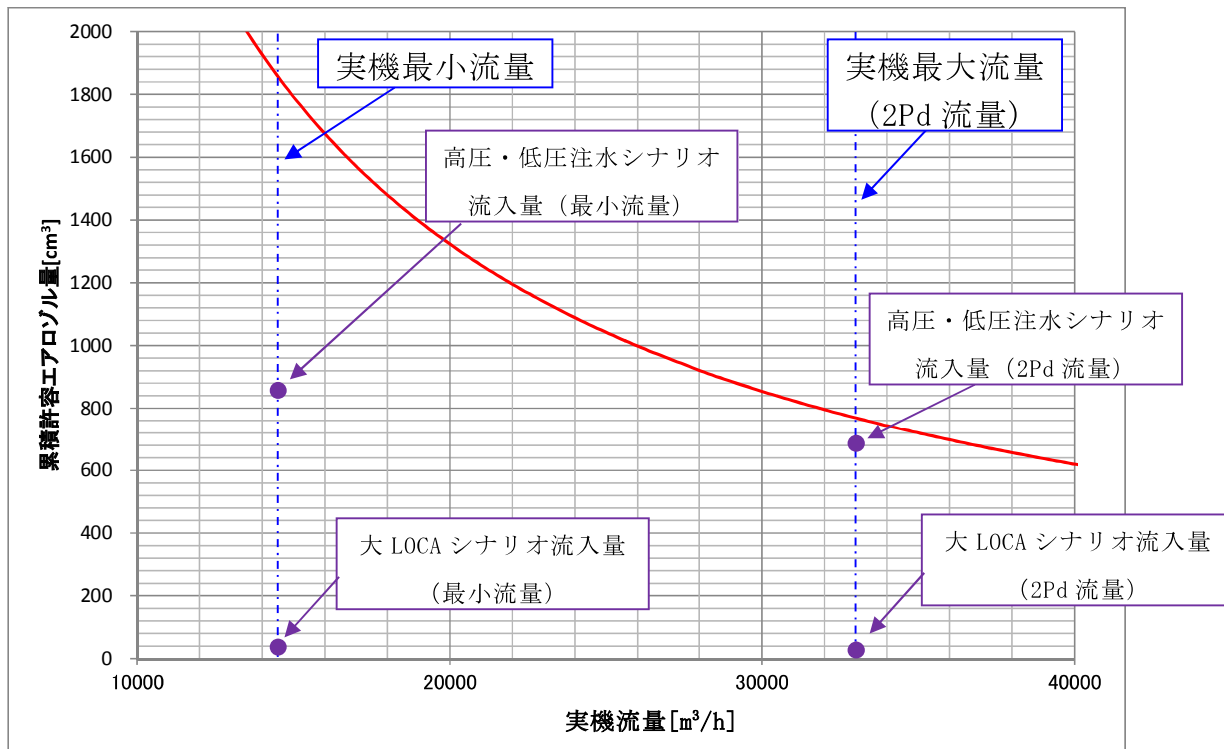
フィルタ装置に流入するエアロゾル量①と，水スクラバのオーバーオール DF ②より，金属フィルタに流入するエアロゾルの量は，第 2-4 表の通り評価できる。

第 2-4 表 金属フィルタに流入するエアロゾル量

シナリオ	ガス流量	金属フィルタに流入する エアロゾル量
大 LOCA+SB0+ECCS 機能喪失， D/W ベント	2Pd 相当流量	4.95 cm ³
	最小流量相当	16.75 cm ³
高圧・低圧注水機能喪失， D/W ベント	2Pd 相当流量	680.23 cm ³
	最小流量相当	850.29 cm ³

④ 金属フィルタに流入するエアロゾルの量と、金属フィルタに許容されるエアロゾル量と比較

金属フィルタに許容されるエアロゾル量を第 2-6 図に示す。



第 2-6 図 金属フィルタの許容エアロゾル量

第 2-6 図に示す通り、大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失シナリオ、MCCI が発生する高圧・低圧注水機能喪失シナリオともに、金属フィルタに流入するエアロゾルの量は、金属フィルタに許容されるエアロゾルの量よりも小さいことがわかった。よって、金属フィルタの閉塞は生じないと考える。

3. スクラバノズルの振動による脱落

スクラバノズルは、第 3-1 図に示す通り、ユニオンにより接続されている。フィルタ装置使用中は、スクラバノズルからはベントガスが勢いよく噴射され、それによる流力振動によりユニオンが緩む恐れがある。ユニオンが緩み、スクラバノズルが脱落してしまった場合、水スクラバの除去効率が低下すると考えられる。

そこで、第 3-2 図に示す通りユニオンにワイヤリングを施し、フィルタ装置使用時のスクラバノズルユニオンの緩みを防止することとする。なお、ワイヤリングに用いるワイヤの材質は、腐食の発生を考慮し SUS316L とする。



第 3-1 図 スクラバノズル構造図



第 3-2 図 ワイヤリング設置図

4. よう素による金属フィルタ腐食の影響

フィルタ装置に設置される金属フィルタは SUS316L ステンレス鋼製である。ステンレス鋼にベントガスに含まれる CsI や I₂ に由来する I⁻ が付着すると、Cl⁻ と同じハロゲン元素イオンであることから、ステンレスの保護被膜を破壊し、局所腐食の原因となる可能性がある。そこに O₂ が存在すると、保護被膜が破壊された箇所の腐食が進展する。(有機よう素は金属フィルタでは捕捉できないため、金属フィルタ腐食の原因とはならない)

フィルタ装置には、金属フィルタの前段に水スクラバが設置されており、CsI や I₂ の大部分は水スクラバに捕捉される。そのため、フィルタ装置の金属フィルタには、CsI や I₂ に由来する I⁻ が付着するとしても、非常に微量であると考えられる。さらに、フィルタ装置に流入するベントガスには O₂ はほとんど含まれないことから、酸化性が弱く、腐食反応は進みにくいと考えられる。そのため、よう素種に起因する金属フィルタの腐食により、金属フィルタのエアロゾル捕捉性能が低下することは考えにくい。

今回、金属フィルタに CsI が付着したことによる、金属フィルタのエアロゾル捕捉性能に与える影響を確認するため、以下の試験を実施した。

【試験項目】

- (1) DF 性能試験装置の試験用フィルタに CsI 粒子を混入した水蒸気を通気。
金属フィルタに CsI を付着させる。
- (2) 金属フィルタに CsI を付着させた状態で、一定期間保持する。(CsI に由来する I⁻ による金属フィルタの腐食を進展させる)
- (3) CsI を付着させた金属フィルタを用いて、エアロゾル DF 計測試験を実施。
粒子を付着させていない新品の金属フィルタを用いたエアロゾル DF 計測試験と比較することで、CsI が付着することによる、金属フィルタの性能に与える影響を確認する。

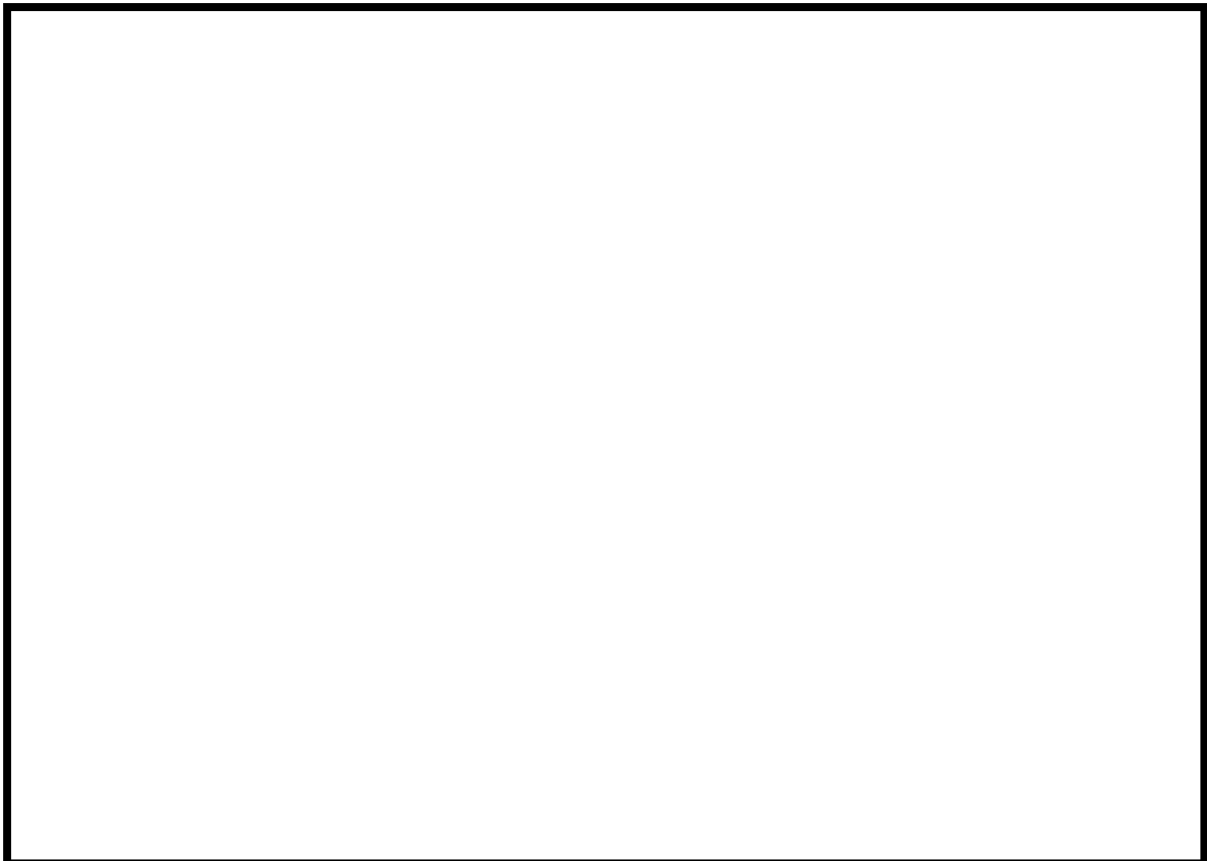
試験(1)の試験条件を第 4-1 表、試験装置構成図を第 4-1 図、試験に用いた CsI 粒子の粒子径分布を第 4-2 図に示す。試験では、水スクラバに捕捉される CsI 粒子の量を小さくし、金属フィルタに流入する CsI 粒子の量を大きくするため、ガス流量は最小流量相当とし、CsI 粒子の粒子径は実機で想定される粒子径よりも小さいものを用いた。また、CsI 粒子の送気量は 0.0051mol としている。実機の大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失、D/W ベント時にフィルタ装置へ流入すると想定される CsI 粒子の量は 0.5599mol であり、金属フィルタは 128 本設置されているため 1 本当たりに換算すると 0.0044mol となることから、今回の試験で送気される CsI 粒子の量は、実機よりも大きくなる。さらに、実機ではベントガスには酸素はほとんど含まれないが、今回の試験では約 19%の割合で空気を混入し、より金

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

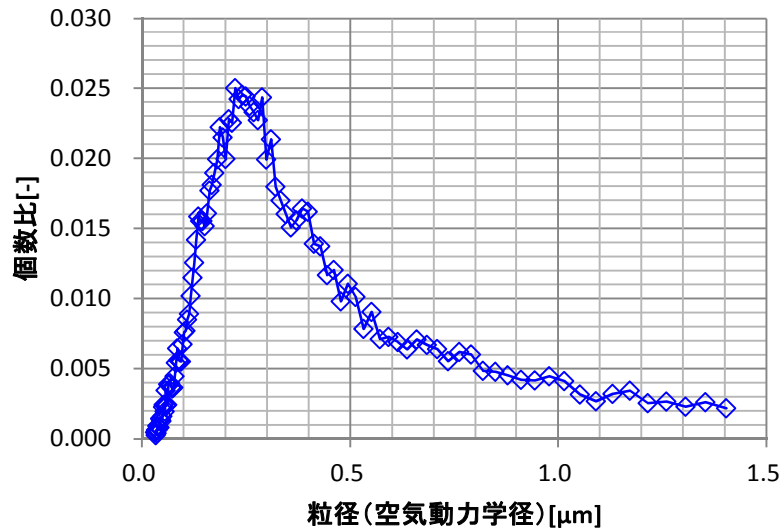
属フィルタの腐食が進展する環境とした。

第 4-1 表 CsI 粒子付着試験一覧表

項目	条件
試験装置	・実機高さ試験装置
試験ガス	・蒸気＋空気（エアロゾル送気用） ・試験時蒸気割合：約 81%
スクラバ水位	・1m
ガス・スクラバ水温度	・約 100℃
ガス体積流量	・最小流量相当
薬液添加量	・NaOH <input type="text"/> wt%
試験エアロゾル	・CsI
試験エアロゾル送気量	・0.0051mol（CsI）



第 4-1 図 CsI 粒子付着試験構成図



第 4-2 図 CsI 粒子の粒子径分布

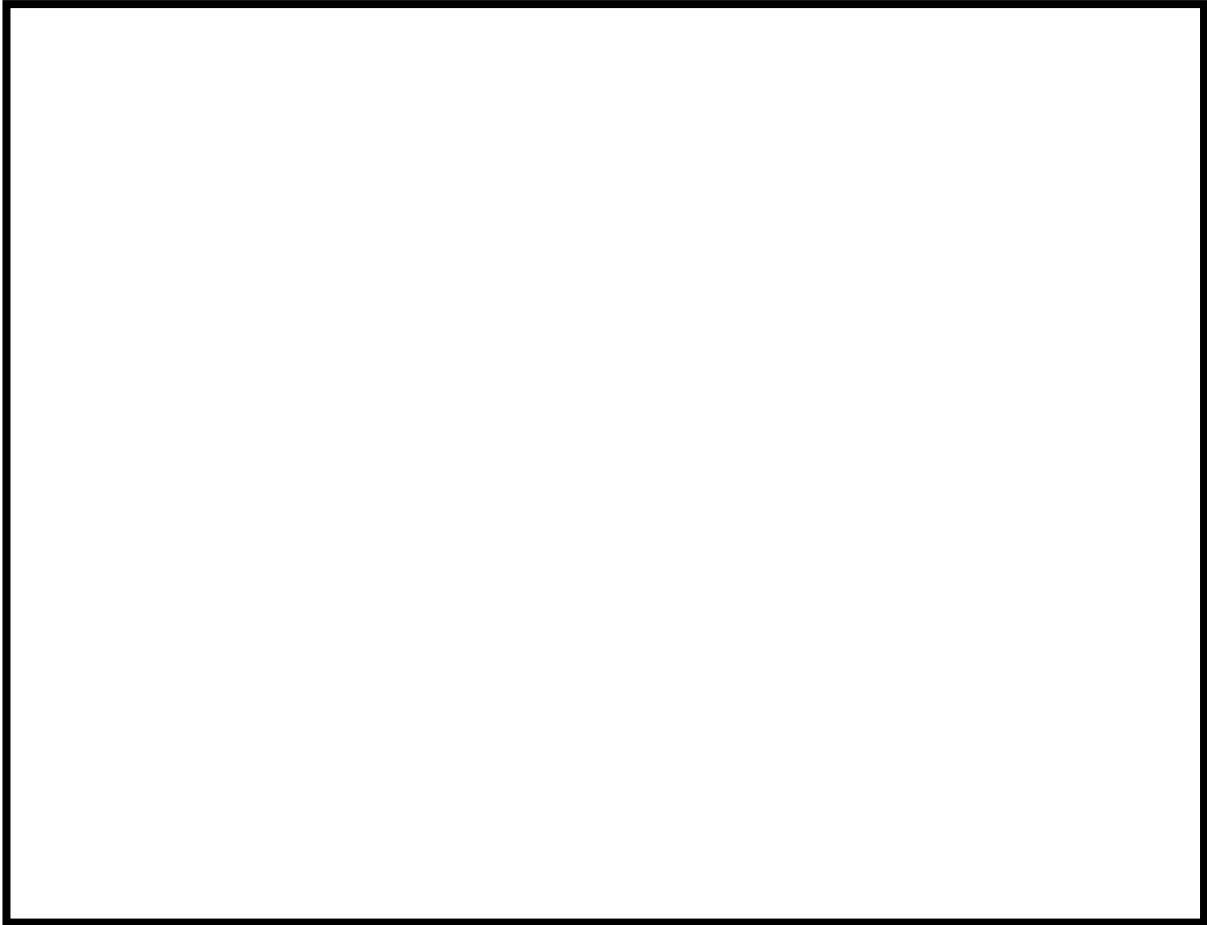
試験(1)が完了後、試験フィルタへの蒸気と CsI 粒子の送気を停止し、ヒーターを停止して2日間静置した。その間、金属フィルタには凝縮水が付着し、試験用フィルタ出口側から空気を吸い込むことで、金属フィルタは空気中に晒された状態となっていた。その後、試験フィルタから金属フィルタを取り外し、約 2.5 ヶ月の間空調の無い倉庫に保管した。これを試験(2)とした。

試験(3)は、試験条件を第 4-2 表、試験装置構成を第 4-3 図の通りとし、試験を実施した。試験の結果を第 4-4 図に示す。

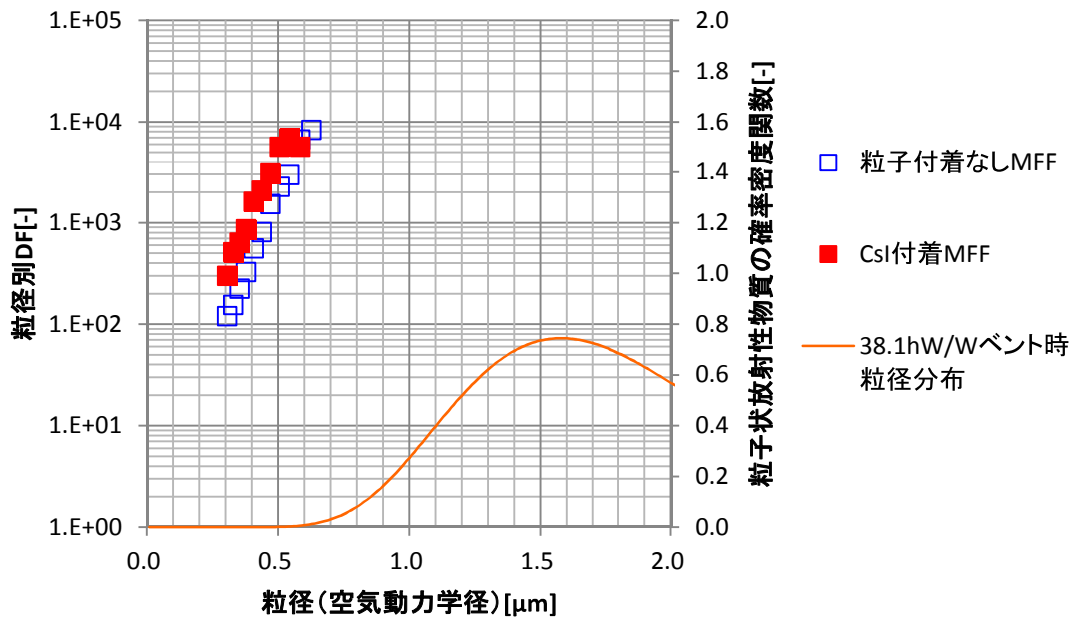
第 4-4 図より、CsI が付着した金属フィルタと新品の金属フィルタでは、エアロゾル除去性能はほぼ同じであることが確認できた。よって、CsI の付着による金属フィルタのエアロゾル除去性能の低下は生じないことが確認できた。

第 4-2 表 エアロゾル計測試験一覧表

項目	条件
試験装置	・実機高さ試験装置
試験ガス	・常温空気
スクラバ水位	・1m
ガス体積流量	・2Pd 相当流量
試験エアロゾル	・TiO ₂
使用金属フィルタ	・CsI 付着金属フィルタ ・新品金属フィルタ



第 4-3 図 エアロゾル DF 性能試験構成図



第 4-4 図 エアロゾル DF 性能試験結果 (CsI 付着影響確認試験)

別紙 3 1 地震による損傷の防止に関する耐震設計方針の説明

1. 配管設計における荷重の組み合わせと応力評価について

格納容器圧力逃がし装置は、ベント使用中は機器が損傷を受けることなく健全であることが求められる。したがって、設計上の最高使用温度・圧力(200℃, 2Pd)における荷重条件を「供用状態 A」及び「供用状態 B」として、クラス 2 機器として各部にかかる応力が許容応力以内であることを確認している。

一方で、当該設備は設置許可基準の三十九条における常設耐震重要重大事故防止設備兼常設重大事故緩和設備に該当し、基準地震動 S_s による地震力に対して重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものであることとしている。したがって、地震荷重に対する荷重の組み合わせを「供用状態 D」とし、各部にかかる応力が設計引張応力以内であり、なおかつ疲労破壊を起こさないことを確認している。

表 1 配管設計における荷重の組み合わせと許容応力

荷重の組合せ	許 容 応 力			供用状態	適用規格
	一次応力 (曲げ応力を 含む。)	一次+二次応力	一次+二次 +ピーク応力		
D + P _d + M _b	1.5 · S _h	S _a (c)	—	(A, B)	設計・建設規格 PPC-3520(1) PPC-3530(1)
D + P _d + (M _a) + M _b	1.8 · S _h	S _a (d)	—		設計・建設規格 PPC-3520(2) PPC-3530(1)
D + P _d + (M _a) + S _s	0.9 · S _u	S _s 地震動のみによる疲労解析を行い、疲れ累積係数が 1 以下であること。 ただし、地震動のみによる一次+二次応力の変動値が 2 · S _y 以下であれば疲労解析は不要。		D (IVAS)	JEAG4601 第 3 種管の許容 応力/第 3 種管の 許容応力の解説

【各記号の注釈】

D : 自重及びその他の長期的機械的荷重による応力

P_d : 内圧応力

M_a : その他の短期的機械的荷重による応力 (当該設備においては対象外)

M_b : 二次応力 (熱応力)

S_a (c) : 一次+二次応力に対する許容応力 (短期的荷重を含まない場合)

S_a (d) : 一次+二次応力に対する許容応力 (短期的荷重を含む場合)

S_h : 最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章 表 3 に定める値

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

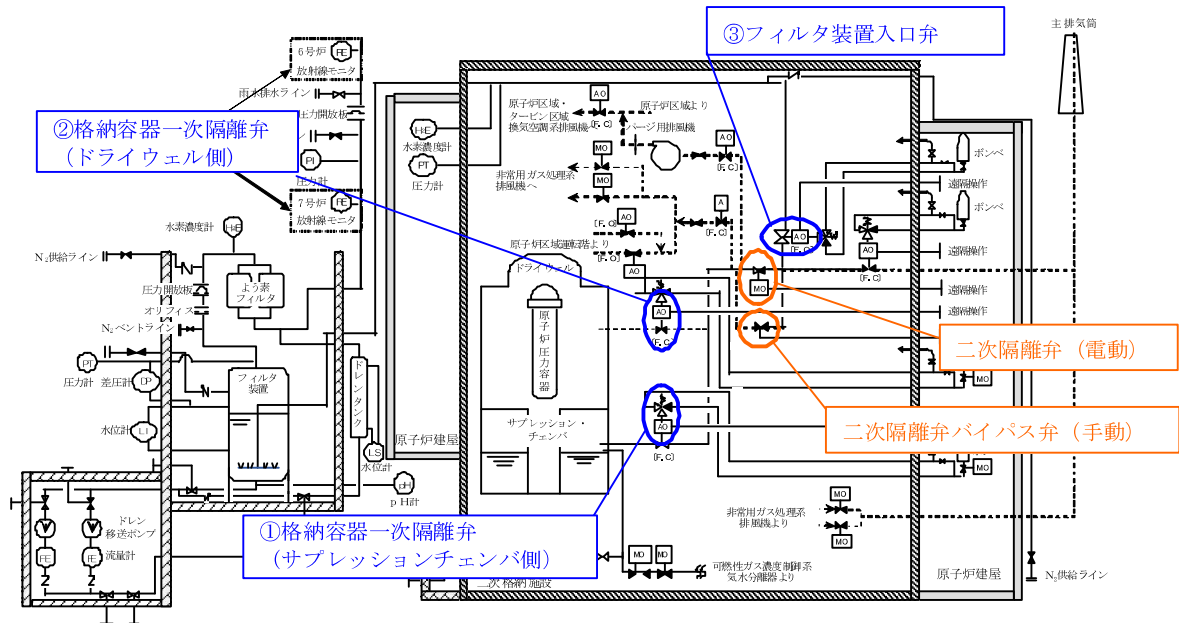
S_u : 設計引張強さ 設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 9 に規定される値

なお、当該設計における荷重の組み合わせと許容限界としては、原子力発電所震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984, JEAG4601-1987 及び JEAG4601-1991 追補版）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 59 年 9 月，昭和 62 年 8 月及び平成 3 年 6 月）（以下「JEAG4601」という。）および発電用原子力設備規格（設計・建設規格 JSME S NC1-2005(2007 追補版含む）（日本機械学会 2005 年 9 月，2007 年 9 月）（以下「設計・建設規格」という。）に準拠したものである。

別紙 3 2 空気作動弁に対する人力操作の成立性について

1. 概要

ベント操作に関連して開閉が必要な空気作動弁としては、格納容器一次隔離弁（ドライウェル側及びサブプレッションチェンバ側）及びフィルタ装置入口弁がある（第1図）。これらはの弁はいずれもシリンダー操作式空気作動バタフライ弁であり、二次格納施設外からの遠隔人力操作が可能な構造としている。



第1図 二次格納施設外より人力操作を行う空気作動弁

遠隔人力操作機構の主な機器構成を第2図に示す。

- ・ 二次格納施設外の操作ハンドルの回転トルクを弁駆動部シリンダーの操作軸をまで伝達させるための等速ジョイント
- ・ 手動操作軸の回転トルクを低減するための減速ギアボックス
- ・ 等速ジョイントを躯体床もしくは壁面に固定するためのギアボックス

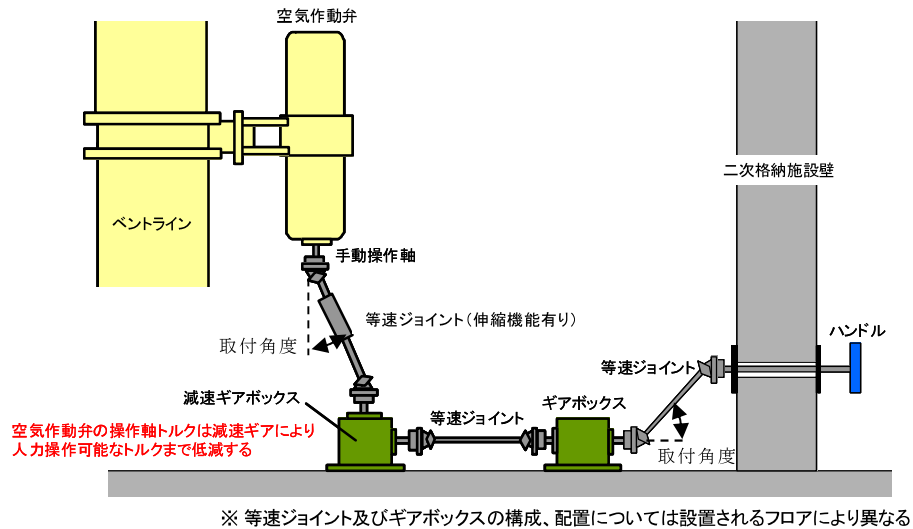
により構成されている。

空気作動バタフライ弁に対して空気作動の場合と人力操作を行う場合の動作機構の説明を第3図に示す。

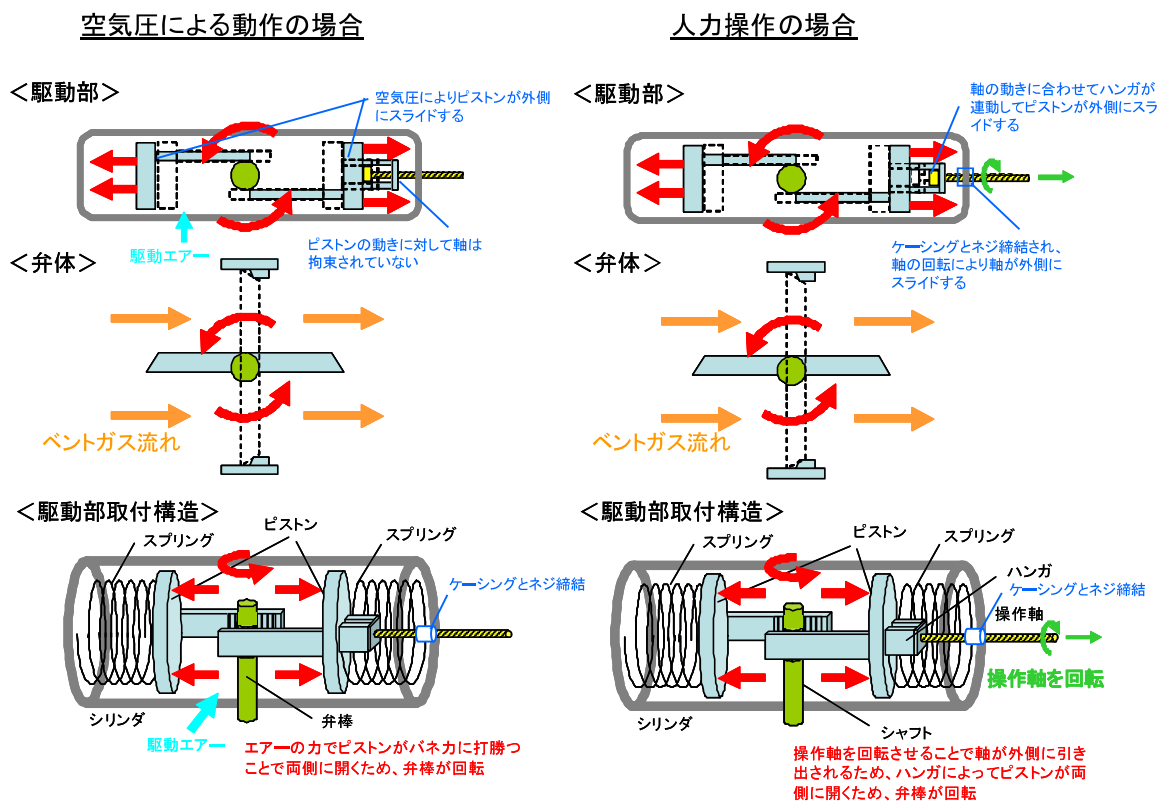
空気作動を行う場合にはシリンダー内に空気を供給することにより、ピストンがスプリング反力に逆らって外側に押し広げられ、ピストンの動作に合わせて弁棒が回転して弁体が開閉動作する。

一方で、人力操作を行う場合、操作軸がケーシングに対してネジ締結になっており、手動で操作軸を回転させることにより、操作軸が水平方向に移動する。ピストンに取り付けられているハンガは操作軸と連動して回転することなく水平方向に移動し、弁が開閉する。この際に、スプリング力は水平方向の力しか発生しな

いため、操作軸を水平方向に押さえつけるだけである。そのため、操作軸に回転力を加え続けなくても逆転することはなく、開保持は可能である。開保持可能であることは弁単体を用いた実機での作動試験においても十分に確認済みである。



第2図 空気作動弁遠隔操作機構構成図



第3図 空気作動弁を操作する際の動作原理

2. 操作性

二次格納施設外よりハンドルを回転する際の操作トルクについては、等速ジョイントやギアボックスによる伝達効率を考慮した上で、人力で操作可能な回転数、トルクに調整されている。人力操作対象弁を操作する際の最大トルク及び人力で全開もしくは全閉するためのハンドル回転数について第1表に示す。

第1表 空気駆動バタフライ弁の人力操作性 (6/7号炉)

No.	弁名称	駆動方式	弁の状態	最大操作トルク※1	回転数 (全閉→全開)	操作時間※2	必要人員※2
①	格納容器一次隔離弁 (ドライウエル側)	空気駆動	N.C F.C	30~40N・m	779回転	約20分	2人
②	格納容器一次隔離弁 (サプレッション・ チェンバ側)	空気駆動	N.C F.C	30~40N・m	779回転	約20分	2人
③	フィルタ装置入口弁	空気駆動	N.O F.O	30~40N・m	779回転	約20分	2人

※1 空気駆動弁を人力操作する場合のハンドルトルクについては、弁駆動部の手動操作軸がスプリングをたわめながら回転する反力が支配的であり、全開操作を行った際に全開状態付近で受ける反力が最大となる。一方で、全閉状態で弁体に対して2Pdの差圧が負荷された状態で、全開操作を行ったときには、差圧が無い状態と比べて操作トルクは過渡的に大きくなる可能性があるが、スプリング反力と比較して小さい。

以上のことから、最大操作トルクは全開操作時に全開付近のものを対象としており、その時点での弁体前後の差圧影響はない。

※2 操作時間については、既に遠隔人力操作機構を設置済みの空気駆動弁（7号炉の格納容器一次隔離弁（ドライウエル側及びサプレッション・チェンバ側））に対し、遠隔人力操作機構にて人力操作試験を行った際の実績時間（全閉→全開とする時間）をもとに設定している。

人力操作試験にあたっては、SA時の作業状況を再現するために全面マスクを着用して実施し、操作員の個人差による影響については極力保守的な結果となるように配慮して実施した。なお、人力操作試験を実施していない空気駆動弁の操作時間については、等速ジョイントの伝達ロス等の差異を考慮すると、人力操作試験を実施済みの空気駆動弁（7号炉の格納容器一次隔離弁（ドライウエル側及びサプレッション・チェンバ側））よりも短くなる見込みである。

3. 信頼性

シリンダー操作式空気作動バタフライ弁である格納容器一次隔離弁(ドライウエル, サプレッション・チェンバ)については, 従前より格納容器バウンダリの一次隔離弁として設置されているものであり, 十分な耐放射線性, 耐震性, 耐環境性を有している。また, フィルタ装置入口弁については, 格納容器一次隔離弁と同一仕様のものを採用しており, 格納容器一次隔離弁と同様に, 十分な耐放射線性, 耐震性, 耐環境性を有している。

また, シリンダー操作式空気作動バタフライ弁について操作軸を回転させることにより開閉することは, 従前から配備していたラチェットハンドルにて人力操作する機構(第4図)を取り付けることで実施しており, 現状までに当該装置を用いることによる開閉操作によって, シリンダー操作式空気作動バタフライ弁に不具合は発生していない。そのため, 操作軸を回転させることによる生じる荷重に対して, 操作軸やハンガ, ピストン, シリンダが十分な強度を有していると考ええる。



第4図 シリンダー操作式空気作動バタフライ弁

一方, 今回追設する遠隔人力操作機構においても, 事故時の動作要求を満足することを確認するため, 耐放射線性, 耐震性, 耐環境性について, 下記の通り検証した。また, ベント操作を複数回実施する場合を想定し, 繰り返しの荷重(駆動トルク)に対する遠隔人力操作機構の健全性についても確認した。

【耐放射線性】

ベント時に配管から受ける線量に対して劣化しないことが求められるが, 駆動部及びケーシング等の強度部材として有機物を使用していないため, 操作性に影響を与えることはない。

【耐震性】

等速ジョイント及びギアボックス単品について、各部品が設置されるフロアにおける地震荷重に対して健全であることを加振試験にて確認する。また、各部品を組み合わせた場合に、構成上最も厳しいパターンを代表して、加振試験を行うことで健全性を確認する。

また、操作対象弁が設置される配管が熱及び地震荷重によって変位するため、建屋床及び壁面に直接設置されるギアボックスに対して相対変位を生じる。これによって、弁とギアボックスを接続する等速ジョイントに可動範囲外の荷重がかかり、機器を破損することを防止するため、操作対象弁とギアボックスを接続する等速ジョイントは変位を吸収するための伸縮機構が設置されている。

【耐環境条件】

遠隔人力操作機構が設置されるエリアの事故時環境温度としては、保守的に100℃を想定する。等速ジョイントやギアボックスの主要部材は金属であることから事故時環境温度においても影響はない。一方で、主要部材以外で比較的耐熱温度が低いものについては以下の2点がある。

- ・ ギアボックスに使用している潤滑油については、高温状態に晒された条件で長期間使用することで劣化速度が早まる傾向がある。劣化した状態で使用することによりギアボックスの内部抵抗が増加する可能性があるが、人力による低速回転で使用するものであり、使用時間も十分短いことから、潤滑油の劣化が機能に影響することはない。
- ・ 等速ジョイントに使用されている異物混入防止カバーについてはクロロプレンゴム製品であるが、カバーの劣化が機能に影響を及ぼすことはない。また、クロロプレンゴム(CR)は ASTM における材料物性として耐熱温度が120℃と規定されているため、十分に許容温度以内である。

【複数回動作に対する健全性】

等速ジョイント（伸縮機構有り、無し）には、長時間健全に動作するために許容されるトルクと取付角度が定められている。遠隔人力操作機構の等速ジョイントに負荷されるトルクと取付角度は、これらの許容トルクならびに許容取付角度を超過しないよう設計している。

一方、ギアボックスには、長時間健全に作動するために許容されるトルクが定められている。遠隔人力操作機構のギアボックスに負荷されるトルクは、この許容トルクを超過しないよう設計している。

なお、遠隔人力操作機構を構成する等速ジョイントやギアボックスは、本来自動車の駆動系等の長時間に渡り動作することが要求される回転機械に適用さ

れるものである。そのため、トルクや取付角度について、許容される範囲を満たす使い方をすれば、遠隔人力操作機構を複数回使用した程度で損傷するものではない。なお、これまで、実機に設置した遠隔人力操作機構を用いて、格納容器一次隔離弁の開閉操作を合計 18 回実施したが、遠隔人力操作機構および弁に不具合は発生していない。

別紙 33 格納容器ベント実施に伴う現場作業の線量影響について

格納容器ベント実施に伴う現場作業は、放射線環境下での作業となることから、作業の成立性を確認するために、各作業場所における線量影響を評価する。

また、中央制御室又は現場のいずれにおいても同等の操作が可能な場合については、高線量環境が予想される現場での作業線量のみについて記載する。なお、線量影響の評価に当たっては、「実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）を参照した。

1. 想定する作業と作業時間帯、作業エリア

ここでは、格納容器ベント実施に伴う作業を評価対象とする。格納容器ベントの実施前及び実施後における作業の作業場所、作業時間帯を第 1 表及び第 1-1 図から第 2-5 図に示す。

2. 想定シナリオ

柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉においては、格納容器破損防止対策に係る有効性評価における雰囲気圧力・温度による静的負荷のうち、格納容器過圧の破損モードにおいて想定している、「大破断 LOCA 時に非常用炉心冷却系の機能及び全交流動力電源が喪失したシーケンス」においても、格納容器ベントを実施することなく事象を収束することのできる代替循環冷却系を整備している。従って、仮に 6 号炉及び 7 号炉において同時に重大事故が発生したと想定する場合であっても、第一に両号炉において代替循環冷却系を用いて事象を収束することとなる。しかしながら、被ばく評価においては、片方の号炉において代替循環冷却に失敗することも考慮し、当該号炉において格納容器圧力逃がし装置を用いた格納容器ベントを想定する。格納容器ベントに至る事故シーケンスとしては、前述の「大破断 LOCA 時に非常用炉心冷却系の機能及び全交流動力電源が喪失したシーケンス」を選定した。

なお、よう素放出量の低減対策として導入した格納容器内 pH 制御については、その効果に期待しないものとした。

3. 評価経路

格納容器ベント実施前においては、二次格納施設内からのガンマ線の影響を受ける。また、格納容器ベント実施後においては、格納容器ベント前の被ばく経路に加え、格納容器ベントに伴い大気中に放出された放射性物質並びに格納容器圧力逃がし装置のフィルタ装置、よう素フィルタ及び配管内の放射性物質

からのガンマ線の影響を受けることになる。各作業で評価対象とする被ばく経路を第 1 表に示す。また、被ばく経路の概念図を第 3-1 図及び第 3-2 図に示す。

4. 評価方法

(1) 格納容器から原子炉建屋に漏えいする放射性物質

原子炉建屋外の作業エリアにおいては、原子炉建屋内の放射性物質からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による実効線量を、作業エリアの位置、建屋の配置と形状並びに作業エリアを囲む壁等によるガンマ線の遮蔽効果を考慮し評価する。直接ガンマ線については、QAD-CGGP2R コードを用い、スカイシャインガンマ線については、ANISN コード及び G33-GP2R コードを用いて評価する。

原子炉建屋内の作業エリアにおいては、二次格納施設内の放射性物質からのガンマ線による実効線量を、QAD-CGGP2R コードを用いて評価する。

(2) 大気中へ放出される放射性物質

大気中へ放出された放射性物質による作業エリアでの被ばくは、事故期間中の大気中への放射性物質の放出量をもとに、大気拡散効果及び作業エリアを囲む壁等によるガンマ線の遮蔽効果を考慮して実効線量を評価する。

(3) フィルタ及び配管内の放射性物質

フィルタ及び配管内の放射性物質による作業エリアでの被ばくは、フィルタ及び配管内の放射性物質からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による実効線量を、作業エリアの位置、フィルタ及び配管の位置と形状並びに作業エリアを囲む壁等によるガンマ線の遮蔽効果を考慮し評価する。評価に当たっては、MCNP5 コード及び QAD-CGGP2R コードを用いる。

5. 評価条件

主な評価条件を第 2-1 表～第 2-6 表に示す。

6. 評価結果

格納容器ベント (W/W ベント) の実施前及び実施後における作業時の実効線量率を第 3-1 表、第 3-2 表に示す。また、格納容器ベント (D/W ベント) の実施前及び実施後における作業時の実効線量率を第 4-1 表、第 4-2 表に示す。

最も被ばく量が大きくなるのは、屋外で行う水位調整または、屋内で行う格納容器二次隔離弁の開操作であり、6 号炉の格納容器ベント実施時で W/W ベント時は約 47mSv、D/W ベント時は約 45mSv、7 号炉の格納容器ベント実施時で W/W ベント時は約 46mSv、D/W ベント時は約 45mSv となる。従って、緊急時作

業に係る線量限度 100mSv に照らしても、作業可能であることを確認した。

なお、第 3-1 表～第 4-2 表の評価結果は、第 1 表に示す各作業の作業開始時間の範囲のうち、作業線量の評価結果が最も大きくなる時間帯で作業を実施した場合の線量率を記載しており、その他の時間帯における線量影響は前述の評価結果以下となる。従って、第 1 表に示す各作業の作業開始時間の範囲においては、いずれの時間帯においても作業可能である。

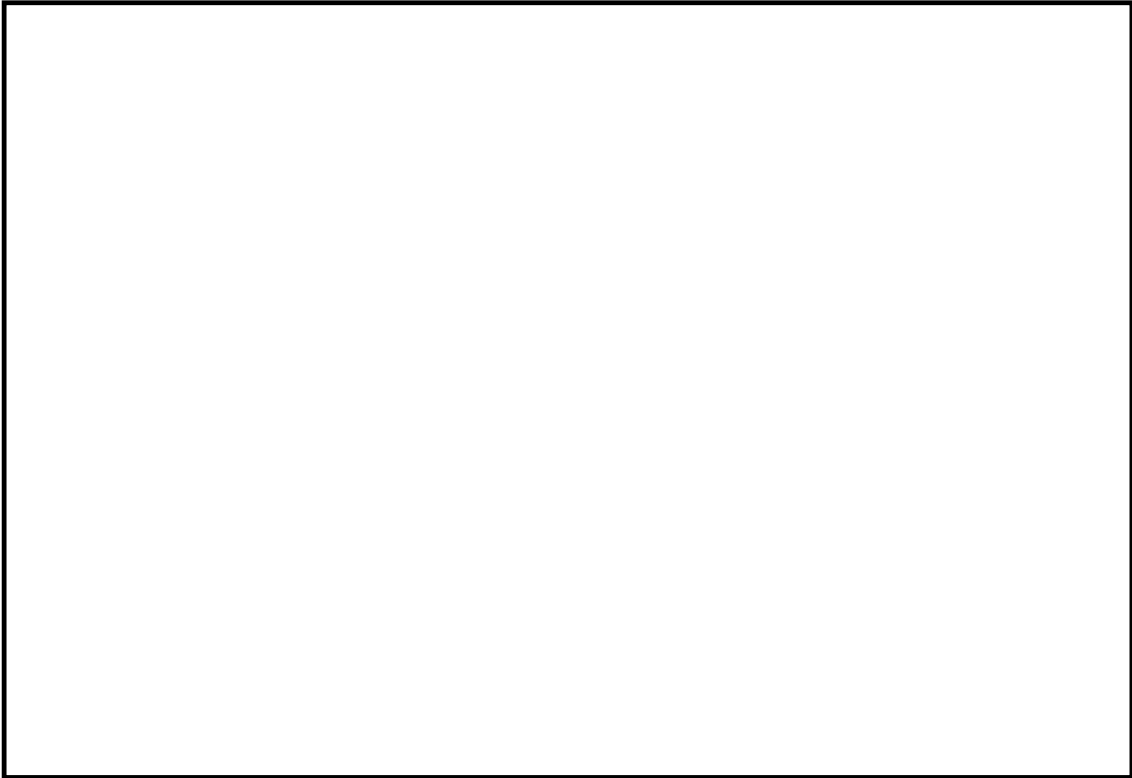
また、炉心損傷前ベント後に炉心損傷の兆候が見られた場合における隔離弁の閉操作等の作業については、当該作業に係る被ばく量が、炉心損傷後の格納容器ベントに伴う作業時の被ばくに包含されるものと考えられるため、作業可能である。

第1表 格納容器ベント実施前後の作業及び被ばく経路
 ※1 スクラバ水の上限水位到達時間の評価結果から、水位調整に要する作業時間に余裕を見込み3時間を差し引き設定

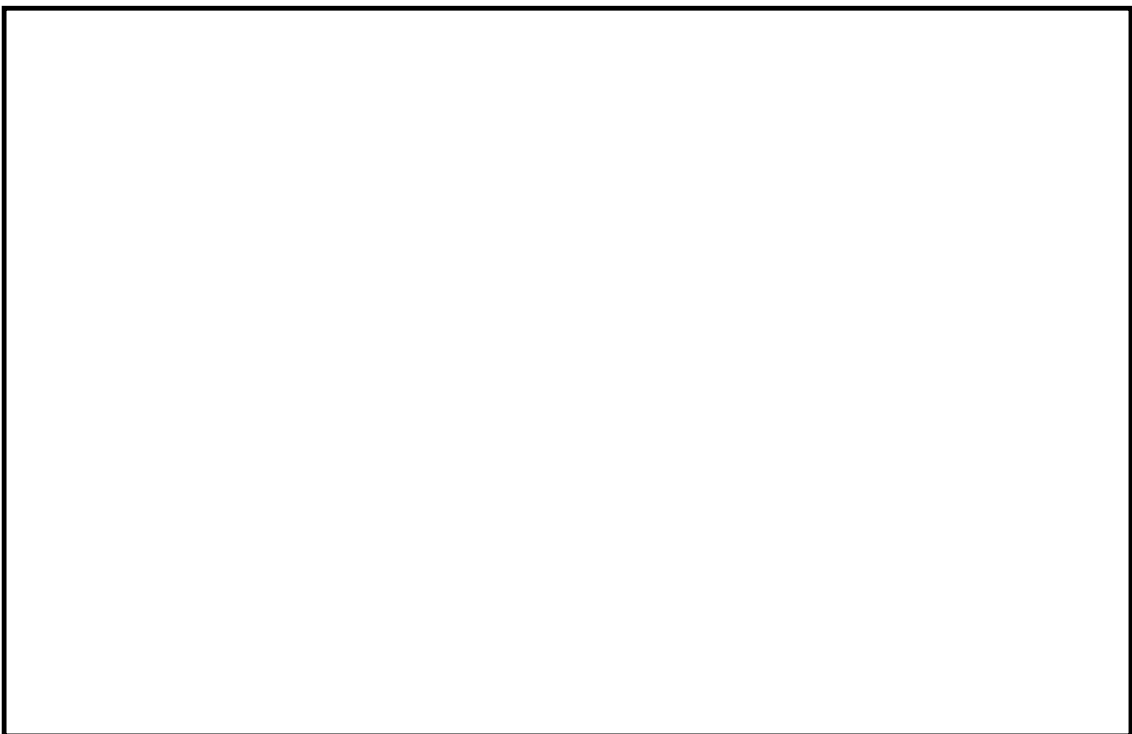
評価経路	評価内容	格納容器ベント実施前の作業			格納容器ベント実施後の作業			ドレンタンク排水
		格納容器二次隔離弁の開操作 (二次格納施設外)	フィルタ装置排水ポンプ 水張り	格納容器一次隔離弁の開 操作 (二次格納施設外)	フィルタ装置水位調整	フィルタ装置への 薬液注入	排水ラインの 窒素バージ	
格納容器から原子炉 建屋に漏えいする放 射性物質	二次格納施設内に浮遊する放射 性物質からのガンマ線による外 部被ばく	○	○	○	○	○	○	○
大気中へ放出される 放射性物質	大気中へ放出された放射性雲中 の放射性物質からのガンマ線に よる外部被ばく	— ^{*1}	— ^{*1}	○	○	○	○	○
	大気中へ放出された放射性雲中 の放射性物質を吸入摂取するこ とによる内部被ばく	— ^{*1}	— ^{*1}	—	○	○	○	○
フィルタ及び配管内 の放射性物質	大気中へ放出され地表面に沈着 した放射性物質からのガンマ線 による外部被ばく	— ^{*1}	— ^{*1}	○	○	○	○	○
	格納容器圧力逃がし装置のフィ ルタ装置及びばよう素フィルタ並 びに配管内の放射性物質からの ガンマ線による外部被ばく	○	(屋内の配管中の線源と の間に十分な遮へいがあ るため、影響は軽微であ り無視できる)	○	○	○	○	○
作業開始時間 (事象開始後)	4 時間後～ 約 38 時間後	約 36 時間後～ 約 37 時間後	ベント実施時刻 (約 38 時間後)	W/W ベント時：63 時間後 ^{*1} D/W ベント時：79 時間後 ^{*1}	W/W ベント時：63 時間後以降 D/W ベント時：79 時間後以降	168 時間後 以降 ^{*2}		
作業時間 (作業場所へのアクセス時間を含む)	60 分間	60 分間	25 分間	135 分間 (現場滞在は 60 分間 ^{*3})	60 分間 ^{*3}	60 分間 ^{*3}		

※1 スクラバ水の上限水位到達時間の評価結果から、水位調整に要する作業時間に見込み3時間を差し引き設定
 ※2 ドレンタンク内凝縮水量の評価結果を参照
 ※3 詳細仕様検討中のため、今後見直す可能性がある
 ※4 線源となる放射性物質が無いため評価対象外

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

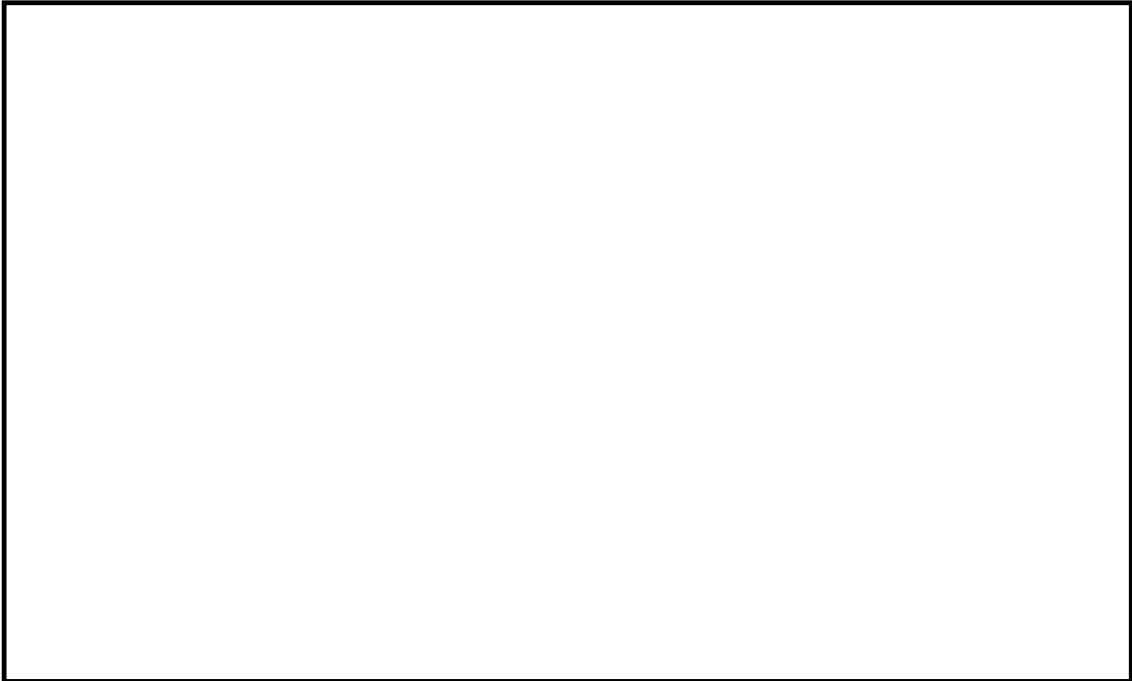


第 1-1 図 6 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋 3 階）

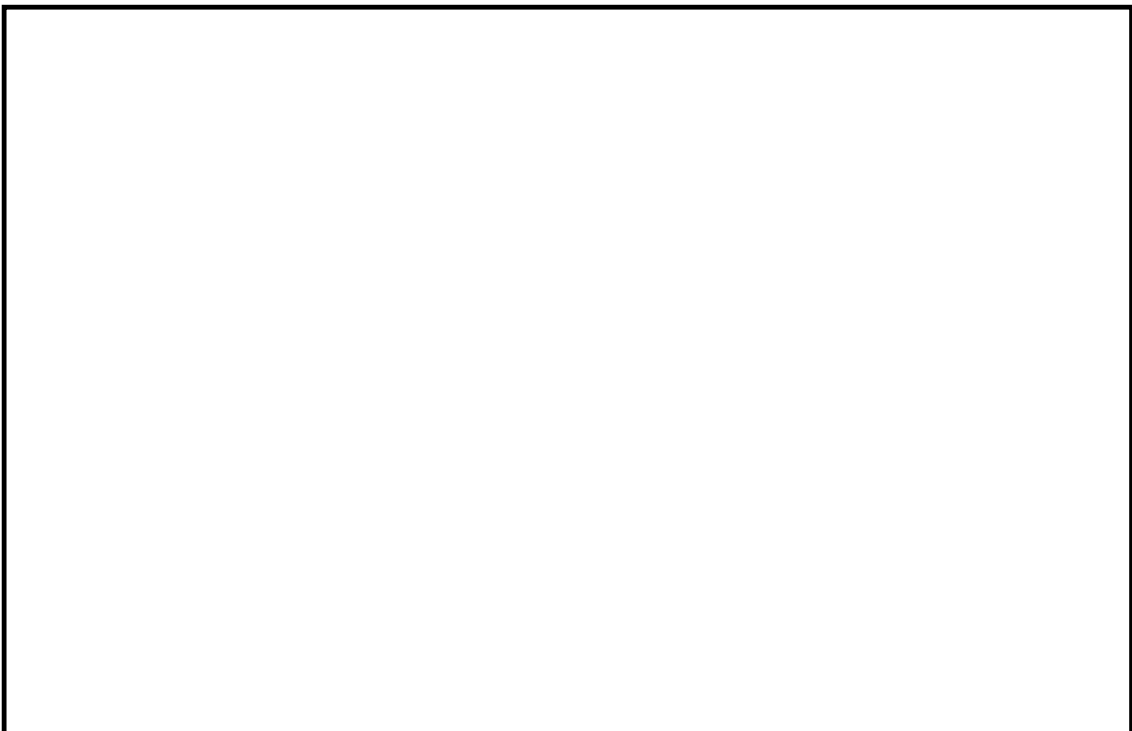


第 1-2 図 6 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋 2 階）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

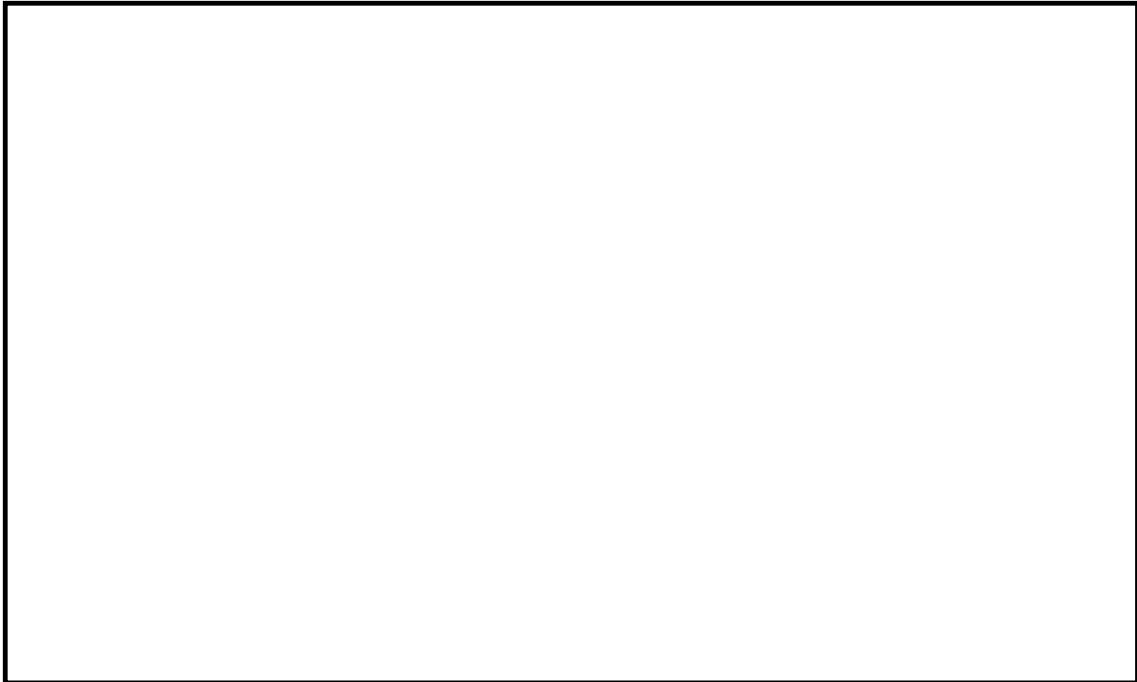


第 1-3 図 6 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋地下 1 階）

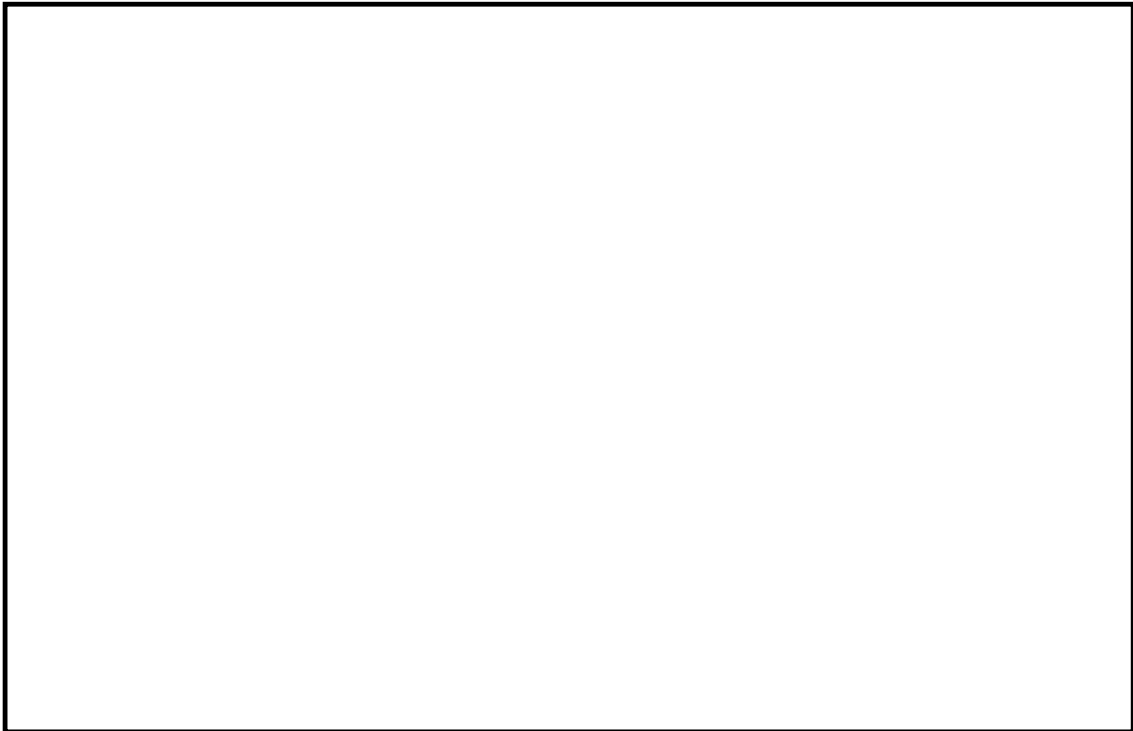


第 1-4 図 6 号炉屋外作業場所及び周辺の遮蔽壁

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

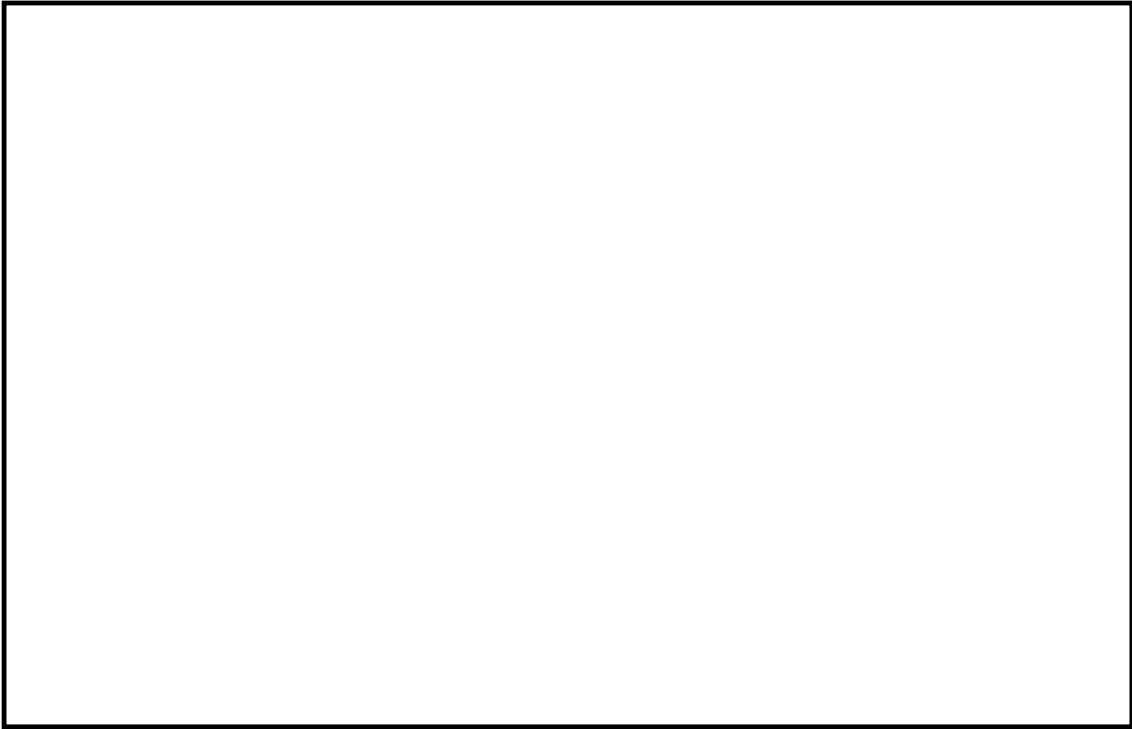


第 2-1 図 7 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋中 4 階）

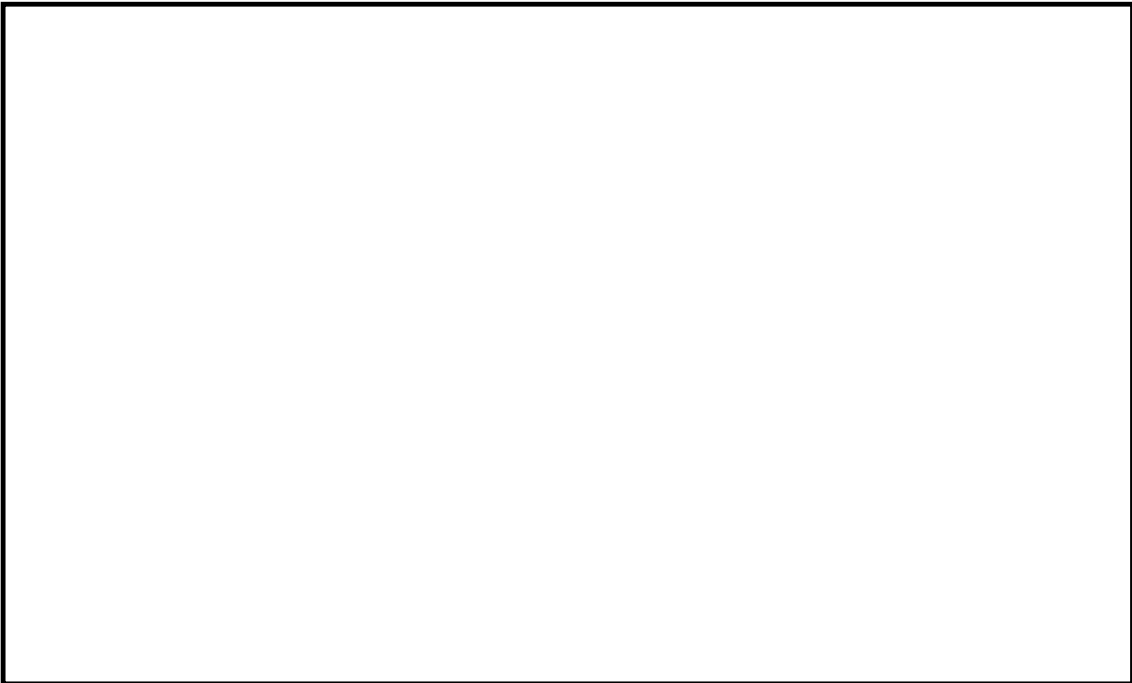


第 2-2 図 7 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋 4 階）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

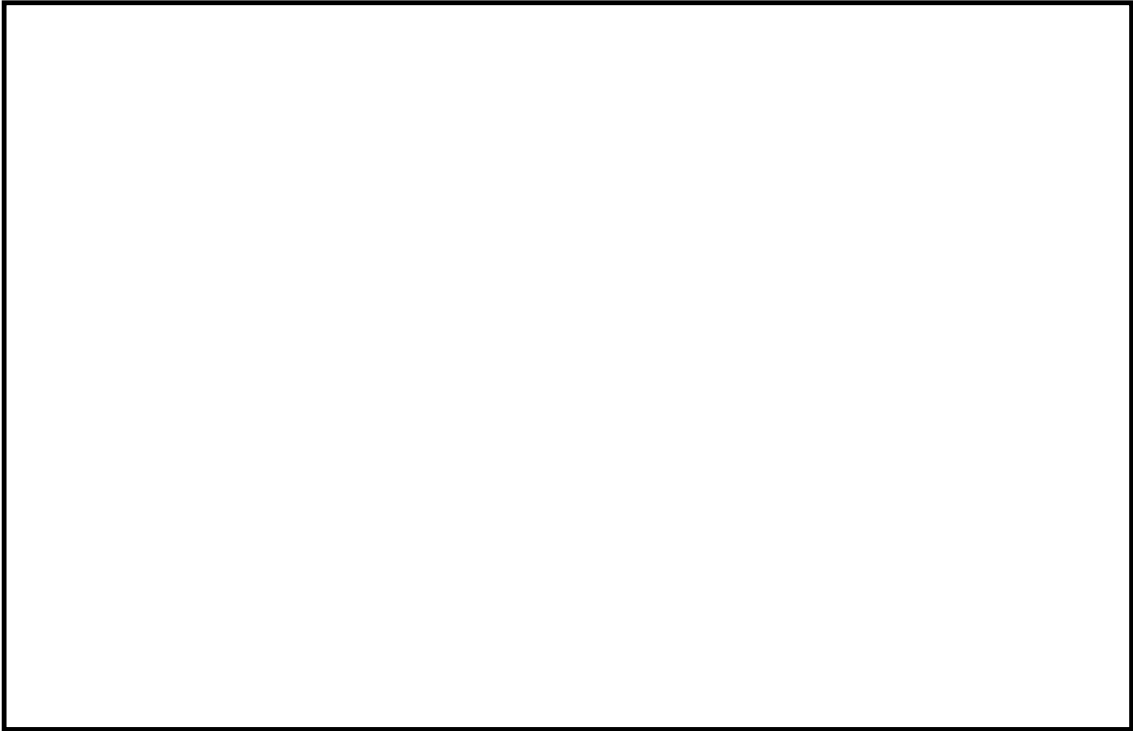


第 2-3 図 7 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋 2 階）

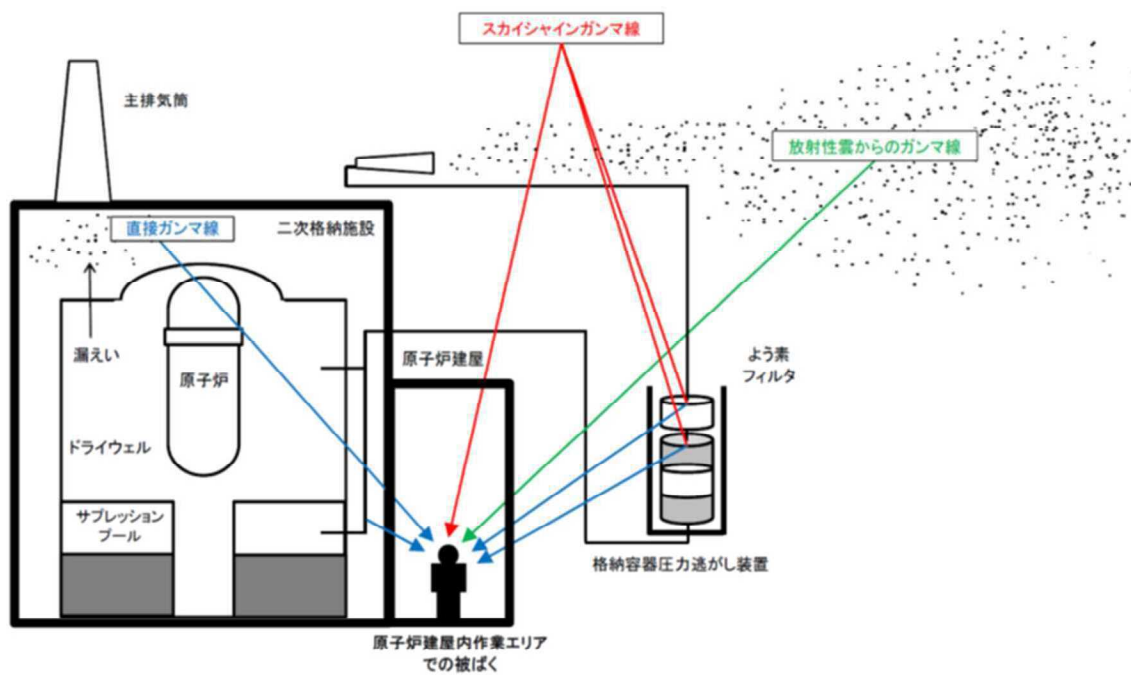


第 2-4 図 7 号炉屋内作業場所及び周辺の遮蔽壁（原子炉建屋地下 1 階）

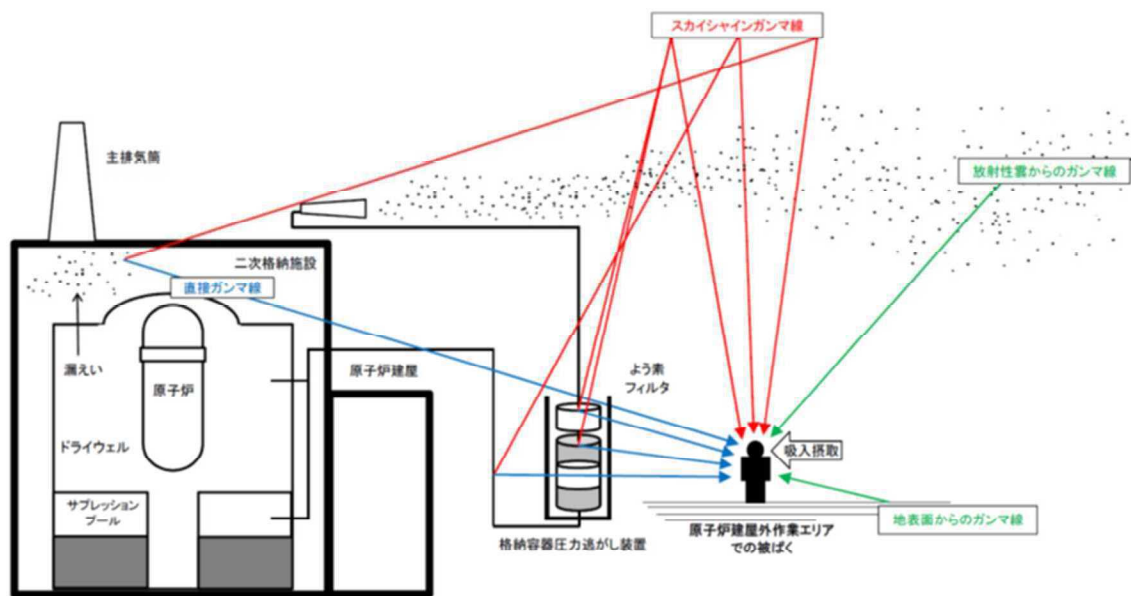
枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。



第 2-5 図 7 号炉屋外作業場所及び遮蔽壁



第3-1 図 被ばく経路概念図（原子炉建屋内）



第3-2 図 被ばく経路概念図（原子炉建屋外）

第 2-1 表 大気中への放出放射能評価条件 (1/2)

項目	評価条件	選定理由
炉心熱出力	3,926MWt	定格熱出力
運転時間	1 サイクル：10,000h (416 日) 2 サイクル：20,000h 3 サイクル：30,000h 4 サイクル：40,000h 5 サイクル：50,000h	1 サイクル 13 ヶ月(395 日) を考慮して、燃料の最高取出燃焼度に余裕を持たせ長めに設定
取替炉心の燃料装荷割合	1 サイクル：0.229 (200 体) 2 サイクル：0.229 (200 体) 3 サイクル：0.229 (200 体) 4 サイクル：0.229 (200 体) 5 サイクル：0.084 (72 体)	取替炉心の燃料装荷割合に基づき設定
放出開始時刻	格納容器漏えい： 事象発生直後 格納容器ベント： 約 38 時間後	MAAP 解析に基づく
格納容器内 pH 制御の効果	未考慮	格納容器内 pH 制御設備は、重大事故等対処設備と位置付けていないため考慮しない
原子炉圧力容器から格納容器に放出されるよう素の形態	粒子状よう素：5% 無機よう素：91% 有機よう素：4%	格納容器内 pH 制御の効果に期待しないため、R. G. 1. 195 に基づき設定
格納容器から原子炉建屋への漏えい率	以下のとおり、開口面積を格納容器圧力に応じ設定。MAAP 解析上で、格納容器圧力に応じ漏えい率が変化するものとした。 【開口面積】 1Pd 以下：0.9Pd で 0.4%/day, 1~2Pd：2.0Pd で 1.3%/day に相当する開口面積	格納容器の設計漏えい率 (0.9Pd で 0.4%/day) 及び AEC 式に基づき設定
格納容器の漏えい孔における捕集係数	希ガス：1 無機よう素：1 有機よう素：1 粒子状物質：450	粒子状物質に対しては、格納容器の漏えい孔での捕集効果を考慮

第 2-1 表 大気中への放出放射能評価条件 (2/2)

項目	評価条件	選定理由
格納容器内でのエアロゾルの除去効果	MAAP 解析に基づく	MAAP 解析で評価
格納容器内での有機よう素の除去効果	考慮しない	保守的に考慮しないものとした
格納容器内での無機よう素の沈着による除去係数	無機よう素：2	「発電用軽水型原子炉の安全評価に関する審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日 原子力安全委員会決定 一部改訂 平成 13 年 3 月 29 日 原子力安全委員会) を参照
サプレッション・プールでのスクラビングによる無機よう素の除去係数	無機よう素：10	Standard Review Plan 6.5.5 に基づき設定
ドライウェルスプレイによる無機よう素の除去係数	無機よう素：100	CSE 試験に基づき設定
原子炉建屋から大気中への漏えい	考慮しない	格納容器から漏えいした水蒸気は原子炉建屋内で凝縮するため、原子炉建屋空間部が過度に加圧されることはないと考えられる。また、原子炉建屋の換気空調系を停止しているため、外気との空気のやり取りがないものと想定した。
格納容器からベントラインへの流入割合	炉内内蔵量に対して、 希ガス類：約 9.4×10^{-1} よう素類：約 3.1×10^{-2} Cs 類：約 8.8×10^{-7} Te 類：約 1.8×10^{-7} Ba 類：約 7.1×10^{-8} Ru 類：約 8.8×10^{-9} La 類：約 7.1×10^{-10} Ce 類：約 1.8×10^{-9}	MAAP 解析結果及び NUREG-1465 の知見に基づき設定。よう素類については、よう素の化学形態に応じた格納容器内での除去のされかたの違いを考慮。
格納容器圧力逃がし装置の除去係数	希ガス：1 有機よう素：1 無機よう素：1,000 粒子状放射性物質：1,000	— 設計値
よう素フィルタによる除去係数	希ガス：1 粒子状放射性物質：1 無機よう素：1 有機よう素：50	— 設計値

第 2-2 表 放射性物質の大気中への放出量 (7 日間積算値)

核種 グループ	停止時炉内内 蔵量 [Bq] (gross 値)	単一号炉当たりの放出放射エネルギー[Bq] (gross 値)	
		格納容器圧力逃がし装置及びよ う素フィルタを経由した放出 (W/W ベント時)	格納容器圧力逃がし装置及 びよう素フィルタを経由し た放出 (D/W ベント時)
希ガス類	約 1.6×10^{19}	約 7.6×10^{18}	約 6.5×10^{18}
よう素類	約 3.4×10^{19}	約 5.7×10^{15}	約 4.2×10^{15}
Cs 類	約 1.3×10^{18}	約 3.4×10^9	約 5.1×10^{12}
Te 類	約 9.5×10^{18}	約 2.4×10^9	約 3.4×10^{12}
Ba 類	約 2.9×10^{19}	約 2.3×10^9	約 3.4×10^{12}
Ru 類	約 2.9×10^{19}	約 3.7×10^8	約 5.4×10^{11}
La 類	約 6.5×10^{19}	約 6.6×10^7	約 9.6×10^{10}
Ce 類	約 8.9×10^{19}	約 3.0×10^8	約 4.3×10^{11}

第 2-3 表 放射性物質の大気拡散評価条件 (1/2)

項目	評価条件	選定理由
大気拡散評価モデル	ガウスプルームモデル	審査ガイドを参照
気象データ	柏崎刈羽原子力発電所にお ける 1 年間の気象データ (1985 年 10 月～1986 年 9 月)	建屋影響を受ける大気拡散評価を 行うため保守的に地上風 (地上約 10m) の気象データを使用 審査ガイドに示された通り、発電 所において観測された 1 年間の気 象データを使用
実効放出継続時間	1 時間	保守的に 1 時間と設定
放出源及び 放出源高さ	【6 号炉】 6 号炉格納容器圧力逃がし 装置配管：地上 40.4m 【7 号炉】 7 号炉格納容器圧力逃がし 装置配管：地上 39.7m	実高さを参照。 なお、放出エネルギーによる影響 は未考慮。
累積出現頻度	小さい方から累積して 97%	審査ガイドを参照
建屋巻き込み	考慮する	放出点から近距離の建屋の影響を 受けるため、建屋による巻き込み 現象を考慮
巻き込みを生じる代 表建屋	6 号炉原子炉建屋 及び 7 号炉原子炉建屋	放出源であり、巻き込みの影響が 最も大きい建屋として設定

第 2-3 表 放射性物質の大気拡散評価条件 (2/2)

項目	評価条件		選定理由
放射性物質濃度の評価点	屋内外の作業エリア	全方位（16 方位）に対し，放出点からの距離を 10m 刻みで変更した大気拡散評価を行い，最大の評価結果を与える方位及び距離を選定	大気拡散評価の評価結果が，作業エリア全域に適用可能となるよう保守的に設定
着目方位	屋外の作業エリア	全方位	大気拡散評価の評価結果が，作業エリア全域に適用可能となるよう保守的に設定
建屋投影面積	1931m ²		審査ガイドに示された評価方法を参照し設定。風向に垂直な投影面積のうち最も小さいもの。
形状係数	1/2		審査ガイドに示された評価方法を参照し設定

第 2-4 表 相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q)

放出点	評価点	放出点から評価点までの距離 [km]	相対濃度 (χ/Q) [s/m ³]	相対線量 (D/Q) [Gy/Bq]
6 号炉格納容器圧力逃がし装置配管	屋内外の作業エリア	相対濃度：0.01km 相対線量：0.05km	1.0×10^{-3}	7.4×10^{-18}
7 号炉格納容器圧力逃がし装置配管	屋内外の作業エリア	相対濃度：0.01km 相対線量：0.05km	1.0×10^{-3}	7.4×10^{-18}

第2-5表 線量換算係数及び地表面への沈着速度等

項目	評価条件	選定理由
線量換算係数	成人実効線量換算係数使用(主な核種を以下に示す) I-131 : 2.0×10^{-8} Sv/Bq I-132 : 3.1×10^{-10} Sv/Bq I-133 : 4.0×10^{-9} Sv/Bq I-134 : 1.5×10^{-10} Sv/Bq I-135 : 9.2×10^{-10} Sv/Bq Cs-134 : 2.0×10^{-8} Sv/Bq Cs-136 : 2.8×10^{-9} Sv/Bq Cs-137 : 3.9×10^{-8} Sv/Bq 上述の核種以外の核種は ICRP Publication71 及び ICRP Publication72 に基づく	ICRP Publication71 及び ICRP Publication72 に基づく
呼吸率	1.2m ³ /h	ICRP Publication71 に基づく成人活動時の呼吸率を設定
地表への沈着速度	エアロゾル : 1.2cm/s 無機よう素 : 1.2cm/s 有機よう素 : 沈着無し 希ガス : 沈着無し	線量目標値評価指針(降水時における沈着率は乾燥時の2~3倍大きい)を参考に、湿性沈着を考慮して乾性沈着速度(0.3cm/s)の4倍を設定。乾性沈着速度は NUREG/CR-4551 Vol.2*1 より設定。
配管内、フィルタ内の線源強度の評価で用いる、放射性物質の付着割合	【配管内】 希ガス : 0% 有機よう素 : 0% 無機よう素 : 10%/100m 粒子状物質 : 10%/100m	NUREG/CR-4551 を参照し、付着量を設定する主要なパラメータとして沈着速度に着目して、配管内面への沈着割合を設定(別紙20参照)
	【フィルタ装置】 希ガス : 0% 有機よう素 : 0% 無機よう素 : 100% 粒子状物質 : 100% 【よう素フィルタ】 希ガス : 0% 有機よう素 : 100% 無機よう素 : 0% 粒子状物質 : 0%	
遮蔽	第1-1図～第2-5図のとおり	遮蔽厚さは設計値

*1 NUREG/CR-4551 Vol.2 "Evaluation of Severe Accident Risks: Quantification Major Input Parameters"

第2-6表 防護措置

項目	評価条件	選定理由
マスクによる除染係数	50	着用を考慮し、期待できる除染係数として設定した
安定よう素剤	考慮しない	服用を考慮しないものとした
防護服	考慮しない	着用を考慮しないものとした

第3-1表 6号炉の格納容器ベント(W/Wベント)実施に伴う被ばく評価結果 (単位: mSv/h)

評価経路	評価内容	格納容器ベント実施前の作業			格納容器ベント実施後の作業		
		格納容器二次隔離弁の開操作 ※1 屋内 (二次格納施設外)	フィルタ装置排水ポンプ水張り 屋外	格納容器一次隔離弁の開操作(S/C側) 屋内 (二次格納施設外)	フィルタ装置水位調整 屋外	フィルタ装置への薬液注入 ※1 屋外	排水ラインの塞ぎパージ ※1 屋外
格納容器から原子炉建屋に漏えいする放射性物質	二次格納施設内に浮遊する放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	4.3×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.4×10 ⁰	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1
大気中へ放出される放射性物質	大気中へ放出された放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	2.3×10 ⁰	2.3×10 ⁰	5.5×10 ⁻¹
	大気中へ放出された放射性物質を吸入摂取することによる内部被ばく	—※3	—※3	(大気中の放射性物質の屋内への流入は無いものとして想定した)	8.5×10 ⁻¹	8.5×10 ⁻¹	0.1以下
フィルタ及び配管内の放射性物質	大気中へ放出され地表面に沈着した放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下
	格納容器圧力逃がし装置のフィルタ装置及びよう素フィルタ並びに配管内の放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	0.1以下	(屋内の配管中の線源との間に十分な遮へいがあるため、影響は軽微であり無視できる)	1.1×10 ¹	4.2×10 ¹	4.2×10 ¹	1.9×10 ¹
合計線量率		4.3×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	1.7×10 ¹	4.7×10 ¹	4.7×10 ¹	2.2×10 ¹
現場作業時間		60分間	60分間	25分間	60分間※2	60分間※2	60分間※2
作業線量		43mSv	2mSv	7.1mSv	47mSv	47mSv	22mSv

※1 作業線量の評価結果が最も大きくなる時間帯で作業を実施した場合の線量率を記載

※2 詳細仕様検討中のため、今後見直す可能性がある

※3 線源となる放射性物質が無いため評価対象外

第3-2表 7号炉の格納容器ベント(W/Wベント)実施に伴う被ばく評価結果 (単位：mSv/h)

評価経路	評価内容	格納容器ベント実施前の作業			格納容器ベント実施後の作業			ドレンタンク排水※1
		格納容器二次隔離弁の開操作※1 (屋内 (二次格納施設外))	フィルタ装置排水ポンプ水張り (屋外)	格納容器一次隔離弁の開操作(S/C側) (屋内 (二次格納施設外))	フィルタ装置水位調整 (屋外)	フィルタ装置への薬液注入※1 (屋外)	排水ラインの塗素パージ※1 (屋外)	
格納容器から原子炉建屋に漏えいする放射性物質	二次格納施設内に浮遊する放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	4.3×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.4×10 ⁰	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1
	大気中へ放出された放射性雲中の放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	2.3×10 ⁰	2.3×10 ⁰	2.3×10 ⁰	5.5×10 ⁻¹
大気中へ放出される放射性物質	大気中へ放出された放射性雲中の放射性物質を吸入摂取することによる内部被ばく	—※3	—※3	—	8.5×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁴	8.5×10 ⁻⁴	0.1以下
	大気中へ放出され地表面に沈着した放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下
フィルタ及び配管内の放射性物質	格納容器圧力逃がし装置のフィルタ装置及び요소フィルタ並びに配管内の放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	0.1以下	(屋内の配管中の線源との間に十分な遮へいがあるため、影響は軽微であり無視できる)	0.1以下	4.1×10 ¹	4.1×10 ¹	4.1×10 ¹	1.9×10 ¹
	合計線量率	4.3×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.4×10 ⁰	4.6×10 ¹	4.6×10 ¹	4.6×10 ¹	2.2×10 ¹
現場作業時間		60分間	60分間	25分間	60分間※2	60分間※2	60分間※2	60分間※2
作業線量		43mSv	2mSv	2.7mSv	46mSv	46mSv	46mSv	22mSv

※1 作業線量の評価結果が最も大きくなる時間帯で作業を実施した場合の線量率を記載
 ※2 詳細仕様検討中のため、今後見直す可能性がある
 ※3 線源となる放射性物質が無いため評価対象外

第4-1表 6号炉の格納容器ベント(D/Wベント)実施に伴う被ばく評価結果 (単位: mSv/h)

評価経路	評価内容	格納容器ベント実施前の作業			格納容器ベント実施後の作業			ドレンタンク排水※1
		格納容器二次隔離弁の開操作※1 屋内 (二次格納施設外)	フィルタ装置排水ポンプ水張り 屋外	格納容器一次隔離弁の開操作(D/W側) 屋内 (二次格納施設外)	フィルタ装置水位調整 屋外	フィルタ装置への薬液注入※1 屋外	排水ラインの塗薬パージ※1 屋外	
格納容器から原子炉建屋に漏れ出す放射性物質	二次格納施設内に浮遊する放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	4.5×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.8×10 ⁰	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1
	大気中へ放出された放射性雲中の放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	4.9×10 ⁰	4.9×10 ⁰	4.9×10 ⁰	6.0×10 ⁻¹
	大気中へ放出された放射性雲中の放射性物質を吸入摂取することによる内部被ばく	—※3	—※3	(大気中の放射性物質の屋内への流入は無いものと想定した)	2.4×10 ⁰	2.4×10 ⁰	2.4×10 ⁰	5.1×10 ⁻¹
フィルタ及び配管内の放射性物質	大気中へ放出され地表面に沈着した放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹
	格納容器圧力逃がし装置のフィルタ装置及びびょう素フィルタ並びに配管内の放射性物質からのガンマ線による外部被ばく	0.1以下	(屋内の配管中の線源との間に十分な遮へいがあるため、影響は軽微であり無視できる)	0.1以下	3.5×10 ¹	3.5×10 ¹	3.5×10 ¹	2.0×10 ¹
合計線量率		4.5×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.8×10 ⁰	4.5×10 ¹	4.5×10 ¹	4.5×10 ¹	2.3×10 ¹
現場作業時間		60分間	60分間	25分間	60分間※2	60分間※2	60分間※2	60分間※2
作業線量		45mSv	2mSv	2.8mSv	45mSv	45mSv	45mSv	2.3mSv

※1 作業線量の評価結果が最も大きくなる時間帯で作業を実施した場合の線量率を記載

※2 詳細仕様検討中のため、今後見直す可能性がある

※3 線源となる放射性物質が無いため評価対象外

第4-2表 7号炉の格納容器ベント(D/Wベント)実施に伴う被ばく評価結果 (単位: mSv/h)

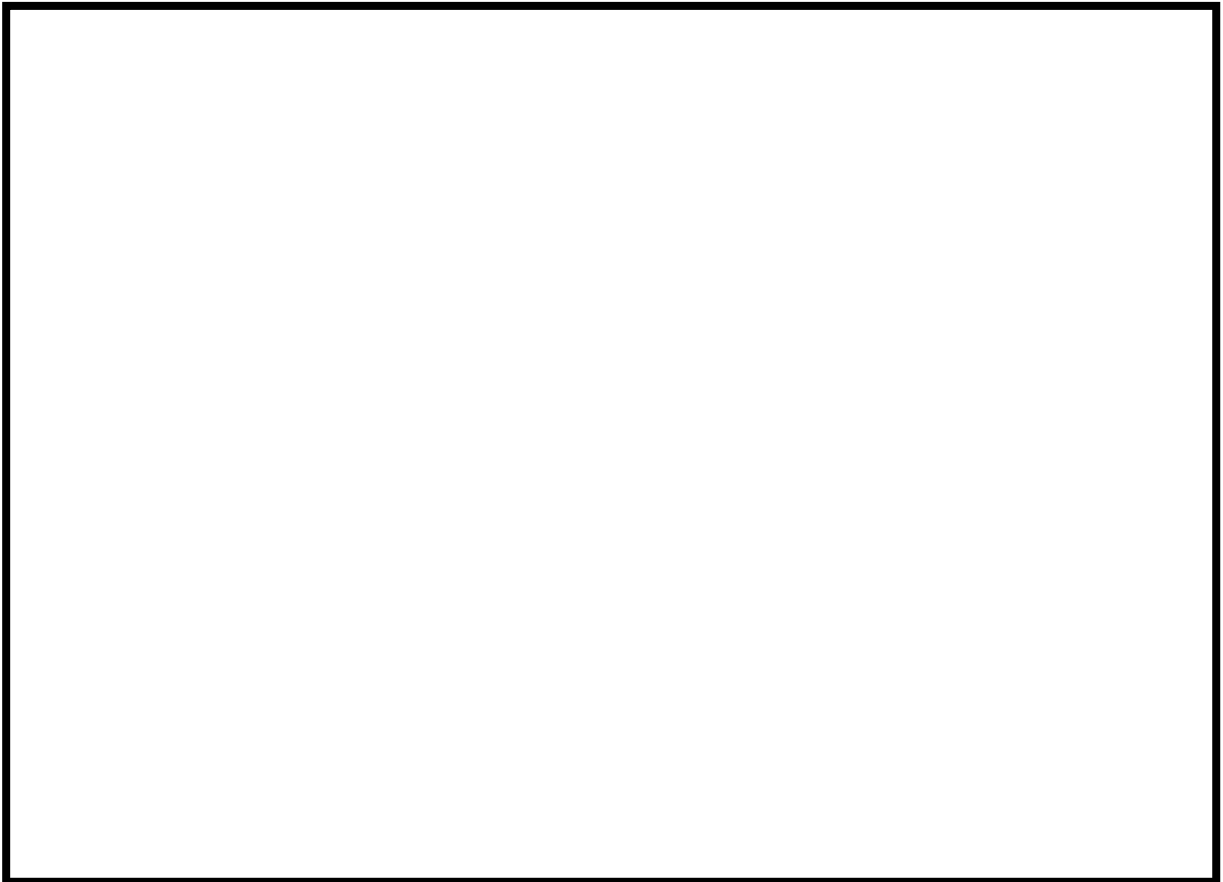
評価経路	評価内容	格納容器ベント実施前の作業			格納容器ベント実施後の作業			ドレンタンク 排水
		格納容器二次隔離弁の 開操作 (二次格納施設外)	フィルタ装置排水ポンプ 水張り 屋外	格納容器一次隔離弁の 開操作(D/W側) 屋内 (二次格納施設外)	フィルタ装置水位調整 屋外	フィルタ装置への薬液 注入 屋外	排水ラインの 塗薬パージ 屋外	
格納容器から原子 炉建屋に漏えいす る放射性物質	二次格納施設内に浮遊する 放射性物質からのガンマ線 による外部被ばく	4.5×10 ¹	2×10 ⁰ ※2	6.8×10 ⁰	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1	2×10 ⁰ ※1
	大気中へ放出された放射性 雲中の放射性物質からのガ ンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	4.9×10 ⁰	4.9×10 ⁰	4.9×10 ⁰	6.0×10 ⁻¹
大気中へ放出され る放射性物質	大気中へ放出された放射性 雲中の放射性物質を吸入摂 取することによる内部被ば く	—※3	—※3	—	2.4×10 ⁰	2.4×10 ⁰	2.4×10 ⁰	5.1×10 ⁻¹
	大気中へ放出され地表面に 沈着した放射性物質からの ガンマ線による外部被ばく	—※3	—※3	0.1以下	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹
フィルタ及び配管 内の放射性物質	格納容器圧力逃がし装置の フィルタ装置及び素フ ィルタ並びに配管内の放射 性物質からのガンマ線によ る外部被ばく	0.1以下	(屋内の配管中の線源と の間に十分な遮へいがあ るため、影響は軽微であ り無視できる)	3.8×10 ⁰	3.4×10 ¹	3.4×10 ¹	3.4×10 ¹	1.9×10 ¹
	合計線量率	4.5×10 ¹	2×10 ⁰ ※1	1.1×10 ¹	4.4×10 ¹	4.4×10 ¹	4.4×10 ¹	2.3×10 ¹
現場作業時間	60分間	60分間	60分間	25分間	60分間※2	60分間※2	60分間※2	60分間※2
作業線量	45mSv	2mSv	4.4mSv	44mSv	44mSv	44mSv	44mSv	23mSv

※1 作業線量の評価結果が最も大きくなる時間帯で作業を実施した場合の線量率を記載
 ※2 詳細仕様検討中のため、今後見直す可能性がある
 ※3 線源となる放射性物質が無いため評価対象外

別紙 3 4 スクラバ水スロッシングの影響について

フィルタ装置使用中に地震が発生した場合、スクラバ水にスロッシングが発生する可能性がある。そこで、フィルタ装置使用時にスロッシングが発生したスクラバ水の挙動について、CFD 解析にて確認した。

解析の条件として、フィルタ装置の性能として厳しい条件である、下限水位であるスクラバノズル上端+0.5mの時に、基準地震動 S_s の地震が発生したとする。評価の結果を第 1 図に示す。



第 1 図 スクラバ水スロッシング評価結果

第 1 図に示す通り、下限水位時に S_s 地震によりスロッシングが発生すると、波高が高い瞬間はスクラバノズルが一部気相部に露出し、水スクラバの性能が低下する。

しかしながら、地震が発生して、さらにスクラバノズルの一部が気相部に露出している時間は、格納容器ベント実施期間と比較して非常に小さく、さらに水スクラバの後段には金属フィルタも設置していることから、格納容器ベントにより放出される放射性物質のトータル量に影響を与えるものではないと考える。

別紙 3 5 格納容器圧力逃がし装置の材料選定に係る技術的根拠

(1) ガスケット選定の妥当性

格納容器圧力逃がし装置の弁、フィルタ装置・よう素フィルタのマンホール、オリフィス、圧力開放版等の接続部に設置するガスケットには、使用時の温度、圧力、放射線による劣化によってリークが生じないように、耐温度、耐圧力、耐放射線性能に優れた黒鉛を主要材としている『ステンレス製うず巻きガスケット』と『黒鉛パッキン』を用いている。これらのガスケットを格納容器圧力逃がし装置に使用することの妥当性を以下に示す。

なお、格納容器圧力逃がし装置において、最も放射線量が大きくなるのは、最も大量の放射性物質を保持するスクラバ水である。大 LOCA+SBO+ECCS 機能喪失の D/W ベントシナリオにおいて、ベントガスに含まれる希ガスと有機よう素以外の全ての放射性物質がスクラバ水に捕捉された場合、スクラバ水の放射線量率は最大で約 1kGy/h となる。

① ステンレス製うず巻きガスケット

格納容器圧力逃がし装置のガスケットに用いているステンレス製うず巻きガスケットは、優れた耐熱性・耐薬品性を有しており、ステンレス (SUS316) 製の内外輪の間に、黒鉛パッキンをフィラー材として用いたものである。格納容器圧力逃がし装置に使用するステンレス製うず巻きガスケットは、最高仕様温度 450℃、最高仕様圧力 30MPa のものを選定しており、格納容器圧力逃がし装置の設計条件 (200℃, 0.62MPa) に対して、十分な余裕を有している。

また、ステンレス製うず巻きガスケットは、1.0MGy の放射線照射に対してもパッキンのシール性能を確保可能であることから、十分な耐放射線性を有している。

さらに、ステンレス製うず巻きガスケットは、フィルタ装置スクラバ水に想定される強アルカリ環境下においても適用可能であることを確認している。

以上より、ステンレス製うず巻きガスケットを格納容器圧力逃がし装置に使用することは妥当であると考えられる。

なお、ステンレス製渦巻きガスケットは、フィルタ装置フランジ部、よう素フィルタフランジ部、ドレン設備フランジ部に用いている。

② 黒鉛パッキン

格納容器圧力逃がし装置のガスケットに用いている黒鉛パッキンは、優れた耐熱性・耐薬品性を有しており、シート状に形成することで柔軟性、弾性を有した材料で、パッキン・ガスケットの材料として幅広い分野で使用され

ている。格納容器圧力逃がし装置のガスケットとして使用する黒鉛パッキンは、最高使用温度 300℃、最高使用圧力 3.4MPa のものを選定しており、格納容器圧力逃がし装置の設計条件（200℃、0.62MPa）に対して、十分な余裕を有している。

また、黒鉛パッキンは、0.1MGy の放射線照射に対してもパッキンのシール性能を確保可能であることから、十分な耐放射線を有している。

さらに、黒鉛パッキンは、フィルタ装置スクラバ水に想定される強アルカリ環境下においても適用可能であることを確認している。

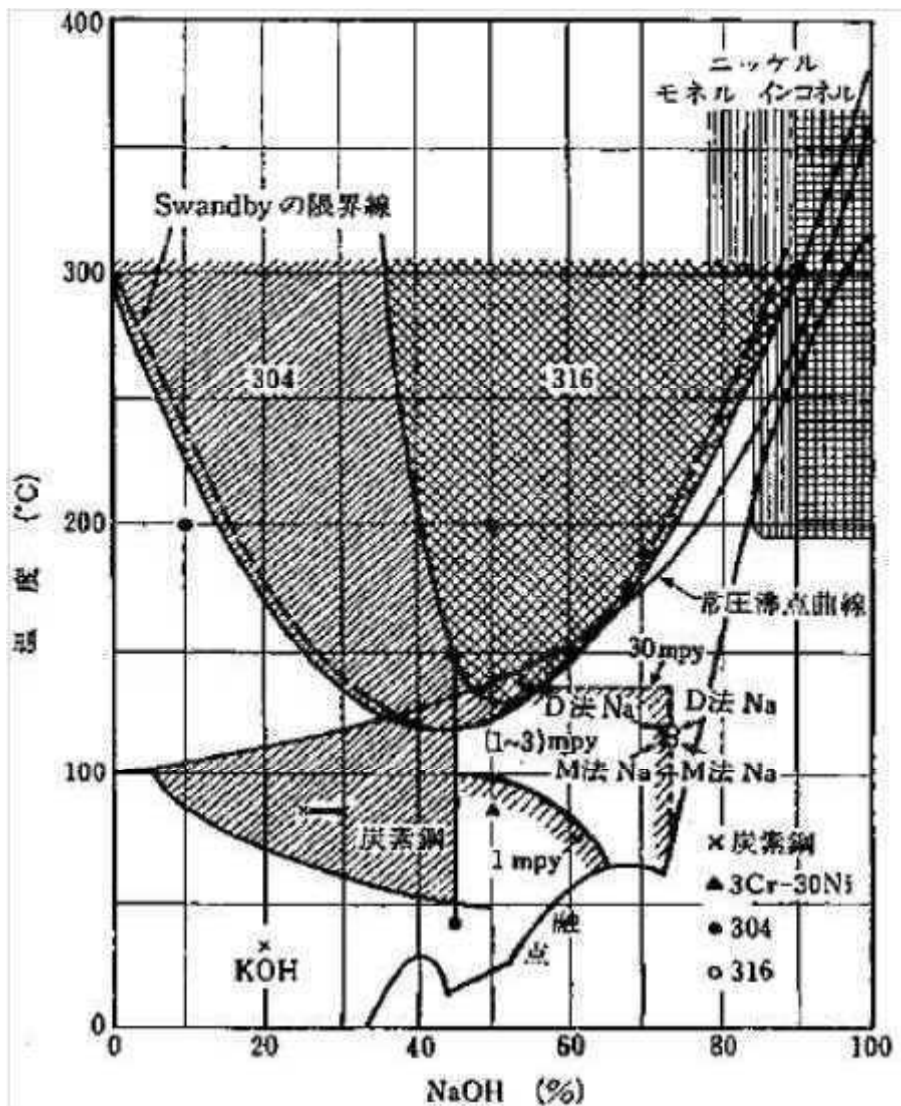
以上より、黒鉛パッキンを格納容器圧力逃がし装置に使用することは妥当であると考ええる。

なお、黒鉛パッキンは、ステンレス製渦巻きガスケットを用いているフィルタ装置フランジ部、よう素フィルタフランジ部、ドレン設備フランジ部以外の接続部に用いている。

(2) フィルタ装置構造材（ステンレス鋼）の妥当性

フィルタ装置の容器・内部構造材には、SUS316Lを用いている。

フィルタ装置待機中は、スクラバ水にはNaOH [] [wt%]の薬液を内包している。ステンレス鋼は、高濃度のNaOH溶液に晒されるとアルカリ腐食割れを生じる可能性がある。ステンレス鋼のアルカリ腐食割れに対する温度とNaOH濃度の関係は、『小若，金属の腐食と防食技術，アグネ承風社，2000年』により，第1図の通り示されており，NaOH [] [wt%]，フィルタ装置の最高使用温度である200℃においては，SUS316材のアルカリ腐食割れは生じないことが確認できる。そのため，フィルタ装置スクラバ水のNaOH濃度において，アルカリ腐食割れは発生しない。



第1図 アルカリ腐食割れに及ぼす温度，濃度の影響

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

また、フィルタ装置使用中は、無機よう素の捕捉性能を確保するため、フィルタ装置の pH を 以上に維持することとしているが、アルカリ腐食割れが生じるほど NaOH が高濃度となることはない※1。

一方、フィルタ装置使用中は、pH を 以上の強アルカリに保つことにより、フィルタ装置に飛来する塩化物による、フィルタ装置の容器・内部構造材に発生する孔食、すきま腐食、SCC の発生を抑制することができる。

※1 フィルタ装置使用中の薬液の補給は、フィルタの水位が上昇して、ドレン操作を実施する都度実施する。薬液の補給量は、ドレン操作により抜けてしまった分の薬液量とする。そのため、薬液の補給により、薬液濃度が必要以上に高濃度となることはない。

別紙 3 6 フィルタ装置の性能維持の確認について

フィルタ装置使用中に、フィルタ装置の性能が維持されていることについては、下記をもって確認することができる。

【エアロゾル除去性能】

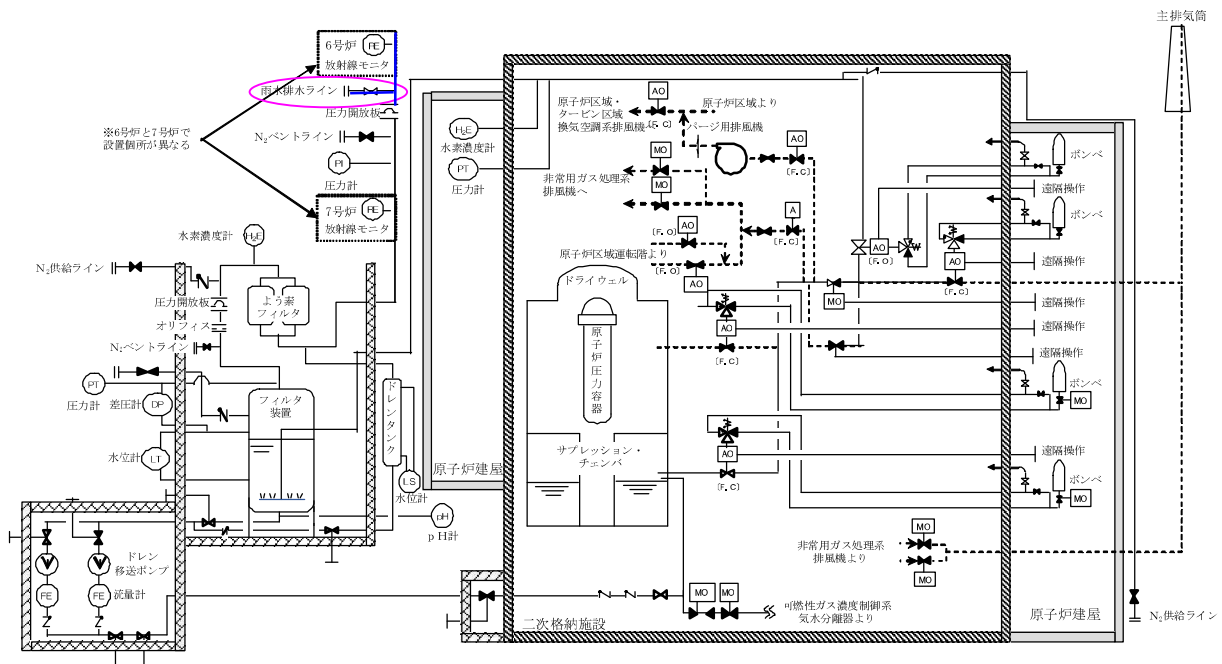
- 水スクラバについては、水位が規定の水位（スクラバノズル上端+0.5～2.2m）にあることで、規定の性能を維持することができる。スクラバの水位については、フィルタ装置に設置されている水位計により確認することができる。
- 金属フィルタについては、差圧が規定の差圧 (kPa) 以下であることで、規定の性能を維持することができる。金属フィルタの差圧は、フィルタ装置に設置されている金属フィルタ差圧計をもって確認可能である。

【無機よう素除去性能】

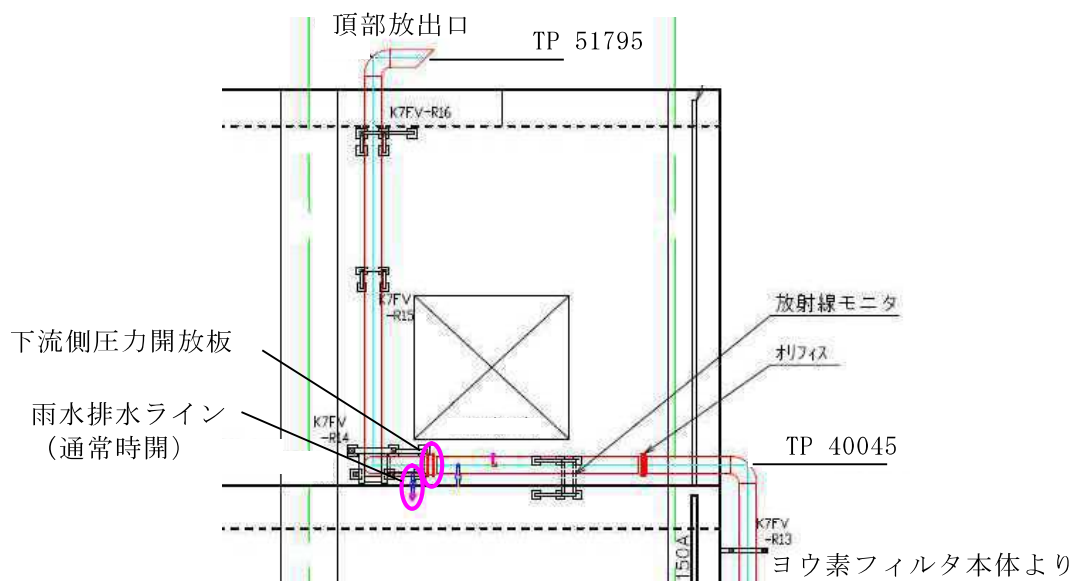
- 無機よう素除去性能については、スクラバ水の pH が規定値 (pH) 以上であることで、規定の性能を維持することができる。スクラバ水の pH は、pH 計により確認可能である。
なお、スクラバ水の pH については、スクラバ水位の上昇によりドレン操作を実施する都度、ドレン操作によりフィルタ装置より抜けてしまった分の NaOH を追加することで、pH 以上に維持することが可能である。

別紙 3 7 圧力開放板の凍結による影響について

よう素フィルタ下流側の圧力開放板出口側は第 1 図に示すとおり大気側に開放されているため、格納容器圧力逃がし装置の出口配管の頂部放出口から雨水が流入した場合、圧力開放板まで流入する。そのため、第 2 図に示すように圧力開放板の下流側配管水平部に設置している雨水排水ラインの止め弁を常時開運用とすることにより、流入した雨水は圧力開放板下流側配管内に蓄積せずに系外へ放出され、配管内で凍結することはない。



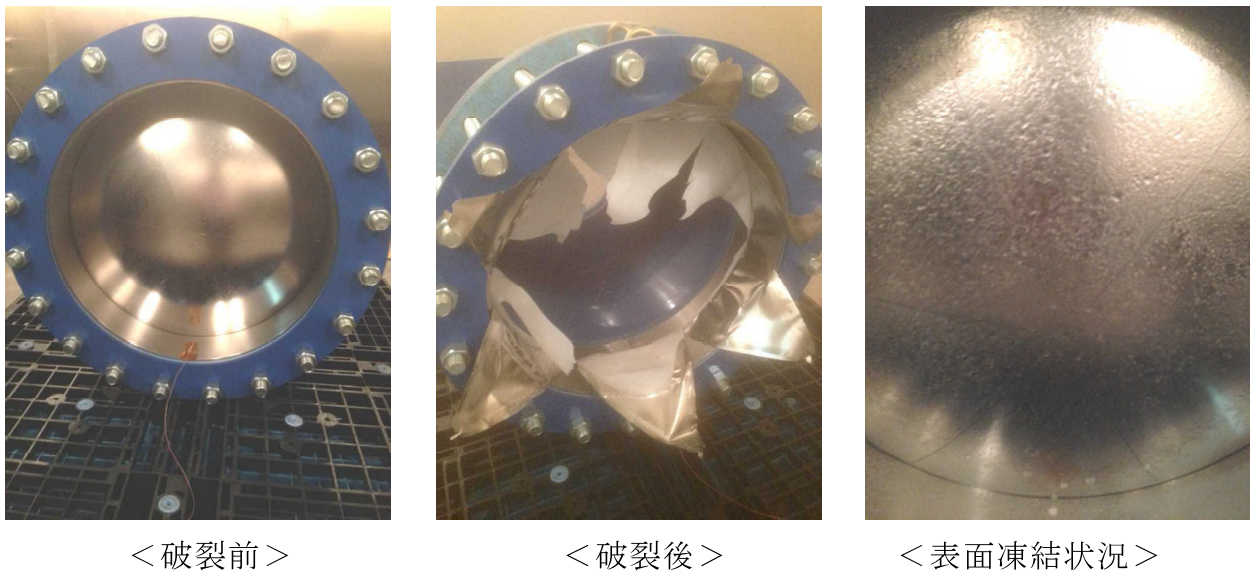
第 1 図 雨水排水ライン系統図



第 2 図 圧力開放板下流側の配管配置図 (7号炉)

一方で、下流側圧力開放板の出口側配管は大気開放されていることから、配管内で水分が結露して水滴が付着し、その状態で外気温が氷点下以下となった場合には圧力開放板表面で水分が凍結する可能性がある。圧力開放板表面が凍結することにより、設定圧力での作動への影響については、圧力開放板表面を意図的に凍結させることにより、凍結状態を模擬した冷温破裂試験を行うことにより、破裂圧力に影響がないことを確認している。(第3図)

試験結果を第1表に示す。



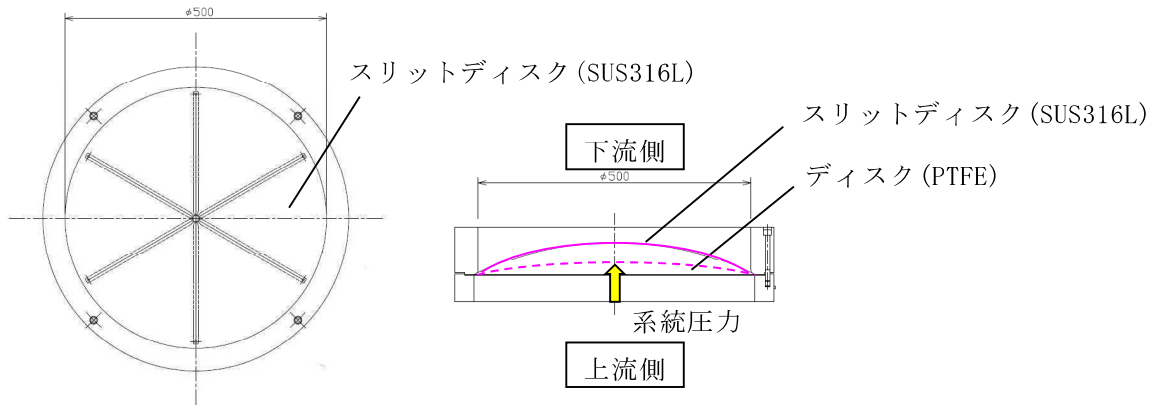
第3図 圧力開放板破裂試験

第1表 圧力開放板表面の凍結による破裂圧力影響試験結果

	破裂設定圧力	試験環境温度	備考
通常破裂圧力 (工場出荷時)	0.1±0.01MPa	200℃±10℃	仕様書において定める破裂 圧力設定値
凍結時破裂圧力 (冷温試験時)		-17℃以下	圧力開放板出口側を凍結

圧力開放板の構造を第4図に示す。圧力開放板上流側の系統圧力が上昇すると、圧力によりディスク(PTFE)が膨らみ、スリットディスク(SUS316L)に接触する。圧力に対してスリットディスクの強度が許容値を上回っている場合は、圧力開放板は破裂することはない。圧力が上昇してスリットディスクの許容値を超えた場合には、スリットディスクが均等に破裂し、系統圧力は大気側に開放される。

当該の圧力開放板の破裂圧力は200℃にて0.1MPaにて破裂するように設定されているが、冷温破裂試験においては [] にて破裂した。これはステンレスの物性値は温度によって左右することから、200℃以外の温度条件では破裂圧力は変化することによるものと考えられる。但し、試験の結果からもベント操作に対して阻害するほどの影響ではないため、凍結したとしても問題はない。



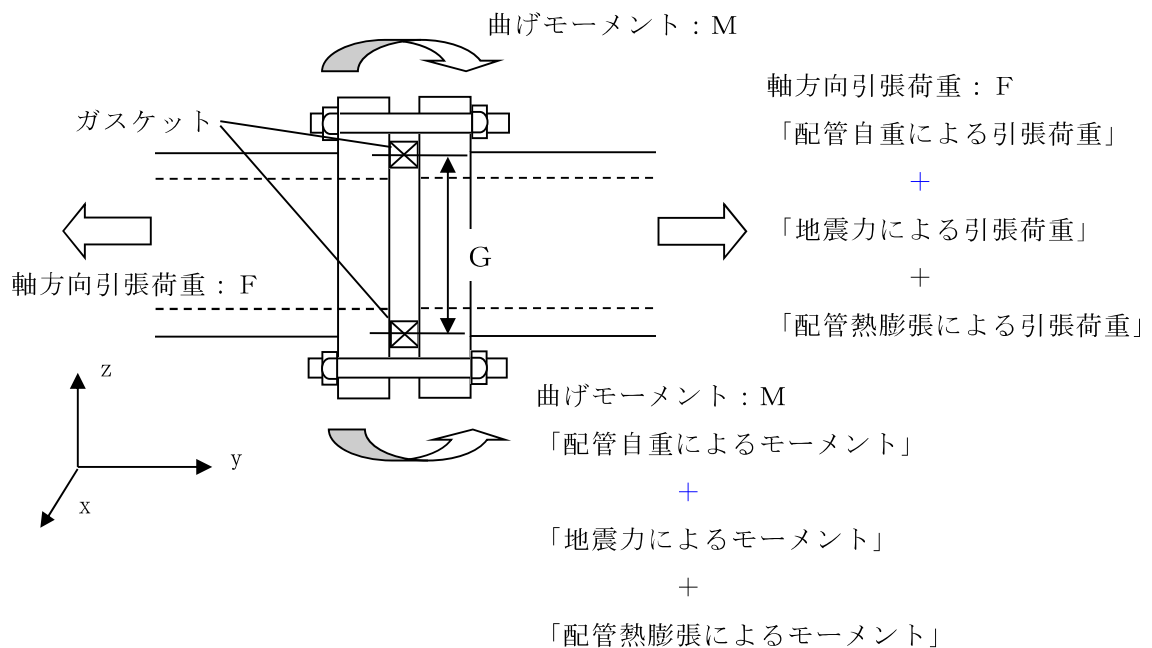
第4図 圧力開放板構造図

別紙 3 8 高温使用時におけるフィルタベント系統からの漏えいがないこと

格納容器圧力逃がし装置の使用状態において、常温での最高使用圧力に対するフランジ部の強度評価については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年度版)」の「PPD-3414 フランジ」において既に評価済みである。

本資料においては、高温・高圧環境下 (200°C, 0.62MPa) にて配管と配管をつなぐフランジ間からの漏えい評価について示す。

「高圧ガス設備等耐震設計指針 (2012)」を用いて配管内圧及びフランジに接続する配管から受ける反力を考慮してフランジボルト締付圧力十分に必要な面圧を満足していることを評価する。なお、フランジに接続する配管からの反力については、自重、地震荷重、配管の熱膨張が同時に負荷されたものとし、フランジの片当たりの原因となるモーメント及び両側からの引張力について考慮するものとする。(第 1 図)



第 1 図 フランジにかかる配管荷重

「高圧ガス設備等耐震設計指針（2012） レベル 2 耐震性能評価 解説編」に基づき、フランジ漏えい評価を実施した。以下に評価式を示す。

$$mp + \alpha p_e \leq \sigma_a \quad \dots (1)$$

m : ガasket係数 [-]

p : 内圧 [MPa]

α : 等価内圧に対する漏えい影響度補正係数で、0.75m [-]

σ_a : ボルトの初期締め付け力によるガasket面圧 [MPa]

p_e : 地震力等に係る軸方向引張力 F 及び曲げモーメント M に対する等価内圧 [MPa]であり以下の式で算出する。

$$p_e = \frac{4F}{\pi G^2} + \frac{16M}{\pi G^3} \quad \dots (2)$$

G : ガasket接触面の平均直径 [mm]

F : 軸引張力 [N]

M : 曲げモーメント [N・mm]

ここで、軸引張力 F は配管応力解析における配管軸方向の引張荷重 F_y であり、曲げモーメント M は同様に配管応力解析における軸直角方向のモーメントの M_x と M_z から $\sqrt{M_x^2 + M_z^2}$ で算出する。

なお、フランジの熱膨張係数がボルトよりも大きいため、フランジボルト間の熱膨張差によりガasketの面圧が増加するが、安全側に働くため本評価においては考慮しない。

今回、格納容器圧力逃がし装置の配管応力解析モデル^{*1}にて、自重、地震荷重（基準地震動 S_s ）、最高使用温度（200℃）における配管熱膨張が作用した場合の各節点における x, y, z 各成分の反力とモーメントを算出し、各節点の反力とモーメントの中から、成分毎の最大値をそれぞれ抽出した。

この抽出された成分毎の反力とモーメントの最大値が、フィルタ装置とよう素フィルタの配管フランジ（500A）に作用し、さらに内圧として最高使用圧力（0.62MPa）が印可されているという非常に保守的な条件にて、上記(1)式に基づきフランジ漏えい評価を実施した。

評価の結果、(1)式の判定条件を満足することを確認した（第1表参照）。よって、格納容器圧逃がし装置使用時の高温状態においても、配管フランジからの漏えいは発生しない。

※1 配管応力解析モデルにおいてフランジ部のモデル化は、フランジ設置箇所にはフランジの質量に相当する質点を負荷し、当該部の配管材質をフランジの材質として置き換えることを行っている。ただし、フランジの断面係数等の形状に起因する剛性の影響については考慮していない。そのため、系の固有振動数が実機条件とは少し異なる可能性がある。しかしながら、解析に用いる FRS は、周期軸方向に±10%拡幅されているため、このようなモデル化による誤差の影響は包絡されていると考えられる。

第1表 フランジ漏えい評価結果

項目	記号	単位	値
設計条件			
最高使用圧力	P	MPa	0.62
ガスケット接触面寸法－外径	D	mm	568
ガスケット接触面寸法－内径	d	mm	536
ガスケット寸法－厚さ	tg	mm	4.5
ガスケット座の基本幅	b0	mm	8.0
ガスケット接触面の平均径	G	mm	553.7
ガスケット有効幅	b	mm	7.1
ガスケット係数	m	—	3
ガスケットの最小締付荷重	y	MPa	68.9
ガスケット接触面積	A	mm ²	27747
標準トルクからのガスケット面圧	σ_a	MPa	40.5
最小トルクからのガスケット面圧	σ_b	MPa	31.5
応力評価			
地震動等による曲げモーメント	M	N・mm	2.43E+08
地震動等による引張力	F	N	1.55E+05
等価内圧	pe	MPa	7.92
等価内圧に対する漏洩影響度補正係数	α	—	2.3
標準トルクからのガスケット面圧を想定した場合			
ガスケット開口圧力	σ	MPa	19.7
標準トルクからのガスケット面圧	σ_a	MPa	40.5
漏洩評価 $\sigma < \sigma_a$			合格
最小トルクからのガスケット面圧を想定した場合			
ガスケット開口圧力	σ	MPa	19.7
最小トルクからのガスケット面圧	$\sigma_{a'}$	MPa	31.5
漏洩評価 $\sigma < \sigma_{a'}$			合格

別紙 3 9 格納容器圧力逃がし装置使用後の保管管理

格納容器圧力逃がし装置使用後には、フィルタ装置，ならびによう素フィルタには多量の放射性物質が捕捉される。そのため，格納容器圧力逃がし装置使用後には，フィルタ装置ならびによう素フィルタに捕捉された放射性物質が環境に放出することがないように，適切に保管する必要がある。格納容器圧力逃がし装置使用後のフィルタ装置，ならびによう素フィルタの保管方針を以下に示す。

【フィルタ装置】

格納容器圧力逃がし装置使用後は，フィルタ装置内のスクラバ水は格納容器へ移送し，スクラバ水に捕捉された放射性物質が環境へ放出しないよう気中保管する。

なお，「別紙 1 3」に記載の通り，フィルタ装置に放射性物質を含んだスクラバ水が保管されていたとしても，水スクラバから環境への放射性物質の再浮遊は防止可能であるが，放射性物質の放出リスクを更に低減するため，スクラバ水を格納容器へ移送する。

また，同じく「別紙 1 3」に記載の通り，有効性評価シナリオにおいて，金属フィルタに捕捉した放射性物質は，フィルタ装置使用後にベントガス流れが無い状態においても，崩壊熱に伴う金属フィルタの過熱による放射性物質の再浮遊は生じないことを確認している。

【よう素フィルタ】

よう素フィルタについても，気中保管とする。

よう素フィルタに流入した放射性よう素は，AgI の化学種にてよう素フィルタ内に捕捉される。AgI は，以上の高温状態にて水素環境に晒されると，AgI が還元されて HI（ガス状）の化学種となり，よう素は環境へ放出されてしまう。

そのため，上記の通り，スクラバ水を格納容器へ移送することで，よう素フィルタに水素が流入しないようにし，よう素フィルタからの放射性よう素の再浮遊を防止する。

なお，格納容器圧力逃がし装置使用後には，放出口手前に設置している放射線モニターにて，フィルタ装置ならびによう素フィルタからの放射性物質の放出がないことを確認する。

別紙40 よう素フィルタ部に発生する偏流について

よう素フィルタは、第1図に示す通り、キャンドルと呼ばれる銀ゼオライトを充填した吸着塔を19本配置した構造となっている。このよう素フィルタを2基設置し、計38本のキャンドルを設置する。

ベントガスがキャンドルに充填された銀ゼオライト吸着材を通過する過程で、ベントガス中に含まれるガス状よう素が銀ゼオライトに捕捉される。



第1図 よう素フィルタ構造図

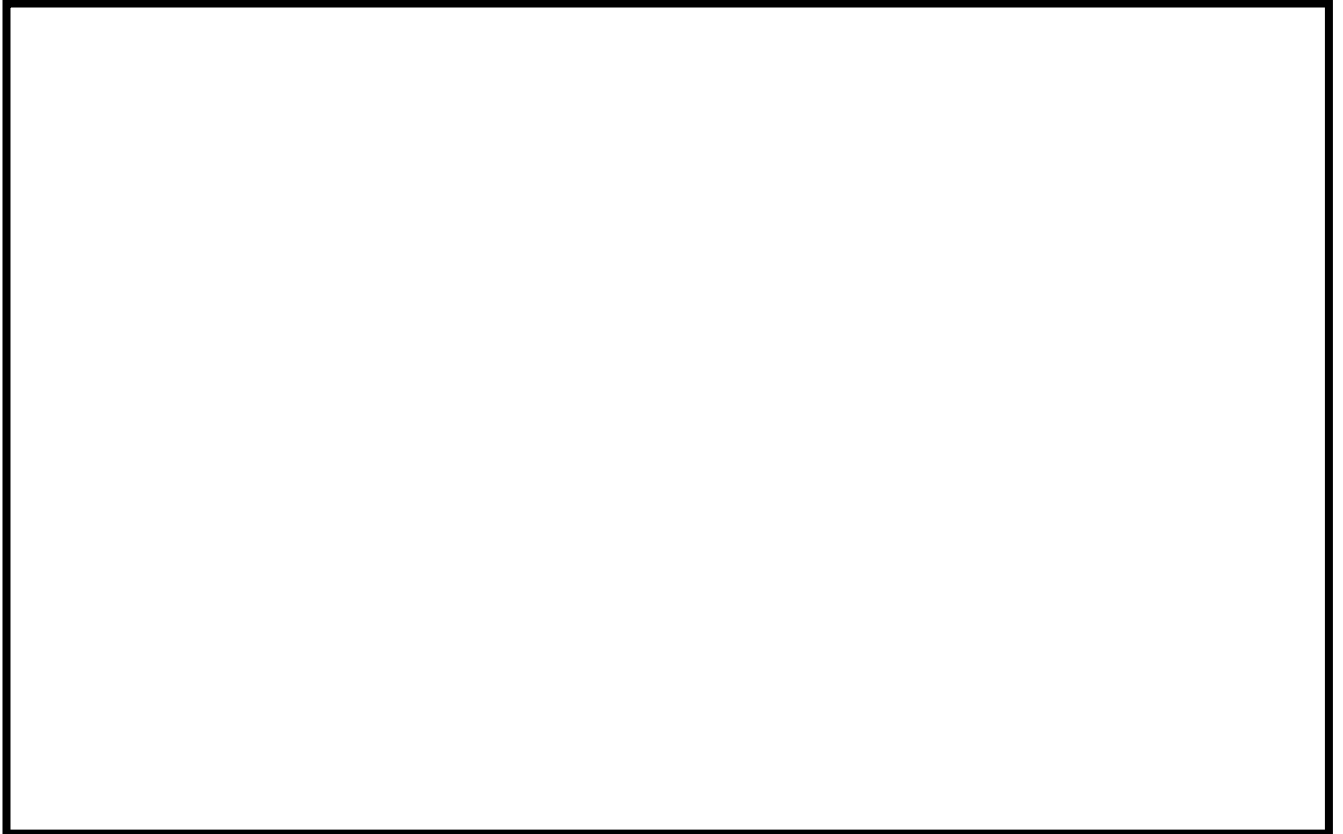
よう素フィルタのガス状よう素除去性能は、ベントガスと銀ゼオライト吸着材との接触時間が大きいほど、大きくなる。そのため、よう素フィルタ内で偏流が生じ、局所的にベントガスの銀ゼオライト吸着材通過速度が大きくなり、銀ゼオライト吸着材との接触時間が小さくなると、ガス状よう素除去性能が低下する。

そこで、流動解析により、よう素フィルタ内に生じるガスの偏流を評価した。

なお、銀ゼオライトが充填されているキャンドル部の流動特性について確認するため、実機と同じキャンドルを用いて蒸気を通気する流動試験（キャンドルユニット試験）を実施した。そして、キャンドルユニット試験により得られた試験データをよう素フィルタの流動解析に適用し、流動解析の精度向上を図った。

【キャンドルユニット試験】

第2図に示す通り、実機と同じキャンドルを容器内に1本設置し、試験容器に実機のキャンドル1本に相当する体積流量の蒸気を通気し、キャンドルに生じる差圧を計測した。



第2図 キャンドルユニット試験装置全体図

実機のように素フィルタで処理するベントガスの最大体積流量は、第3.2.3.3-2表に示す通り、 $15.9\text{m}^3/\text{s}$ (格納容器2Pd時流量)である。実機のように素フィルタのキャンドルの設置本数は38本であるため、キャンドル1本当たりの体積流量は $0.42\text{m}^3/\text{s}$ (格納容器2Pd時流量)となる。そこで、実機の最大体積流量を網羅するように、第1表の通り、キャンドルユニット試験の試験条件を設定した。

第1表 キャンドルユニット試験条件一覧表

項目	条件
試験装置	・ キャンドルユニット試験装置
キャンドル設置本数	・ 1本
試験ガス	・ 蒸気
ガス体積流量	・ 0.74 m ³ /s ・ 0.51 m ³ /s ・ 0.39 m ³ /s ・ 0.29 m ³ /s ・ 0.23 m ³ /s

第1表の条件にて試験を実施した結果、ガス体積流量とキャンドル差圧の関係は、第3図の通りとなった。

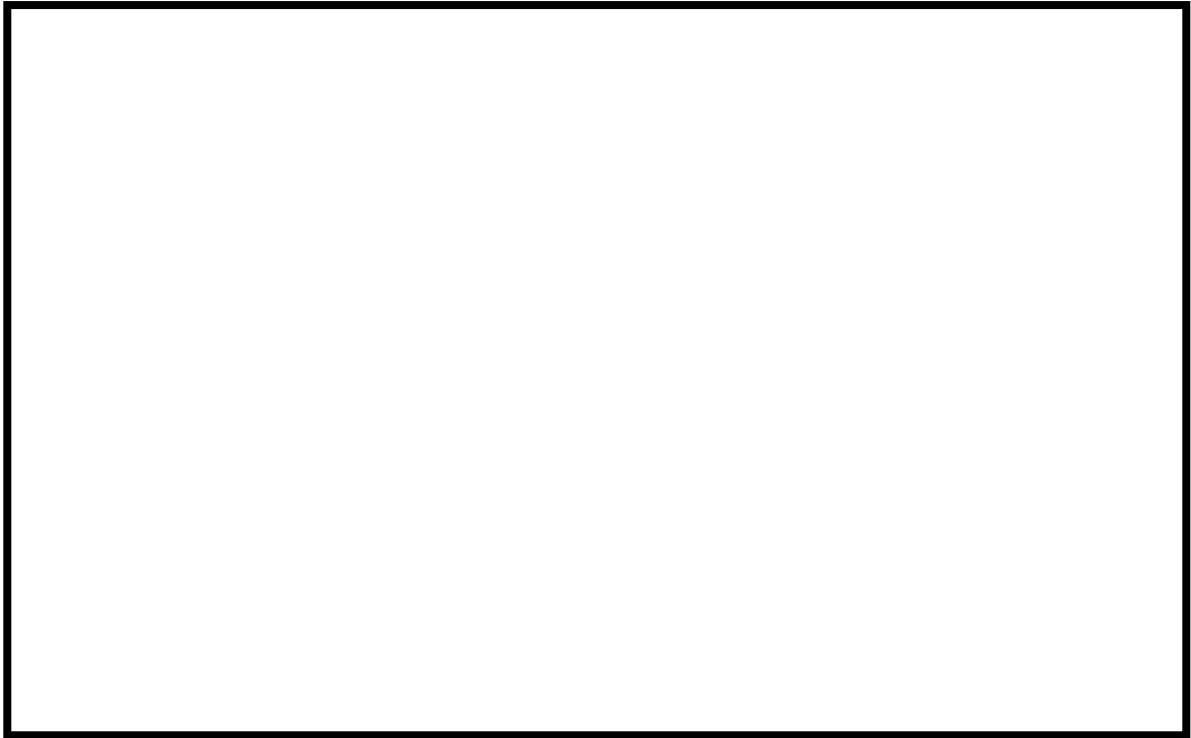


第3図 試験結果（ガス体積流量とキャンドル差圧の関係）

第3図のキャンドル差圧の実測値を用いて、よう素フィルタ全体の流動解析を実施した。

【よう素フィルタ全体流動解析】

よう素フィルタ内の偏流を評価するため、よう素フィルタ全体の流動解析を実施した。解析モデルは第4図に示す通り、よう素フィルタ1基をモデル化した。



第4図 よう素フィルタ流動解析モデル

まず、キャンドルをモデル化しているポーラスメディアの圧損係数を、第3図のキャンドルユニット試験実測値より求める。第3図のガス体積流量をキャンドルの表面積で除すことで、線速度LV (m/s)に変換し、試験データを非線形最小二乗法により最適フィッティングした抵抗係数カーブを作成する。抵抗係数カーブは、以下の2パターン作成する。

- ① 慣性抵抗項 (LV^2 の項) と粘性抵抗項 (LVの項) を考慮
(ガス流れがAgXに遮られる際に生じる慣性抵抗に加え、ガスがAgXとAgXの間の狭隘部を通過する際に生じる粘性抵抗を考慮)
- ② 慣性抵抗項 (LV^2 の項) を考慮
(ガス流れがAgXに遮られる際に生じる慣性抵抗のみを考慮)

以上の条件にて、抵抗係数カーブを作成すると、第5図の通りとなる。①を赤線、②を緑点線で示す。また、それぞれの抵抗係数カーブは以下の関数で表される。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad D_p &= \boxed{} \times LV^2 + \boxed{} \times LV & \dots (1) \\ \textcircled{2} \quad D_p &= \boxed{} \times LV^2 & \dots (2) \end{aligned}$$

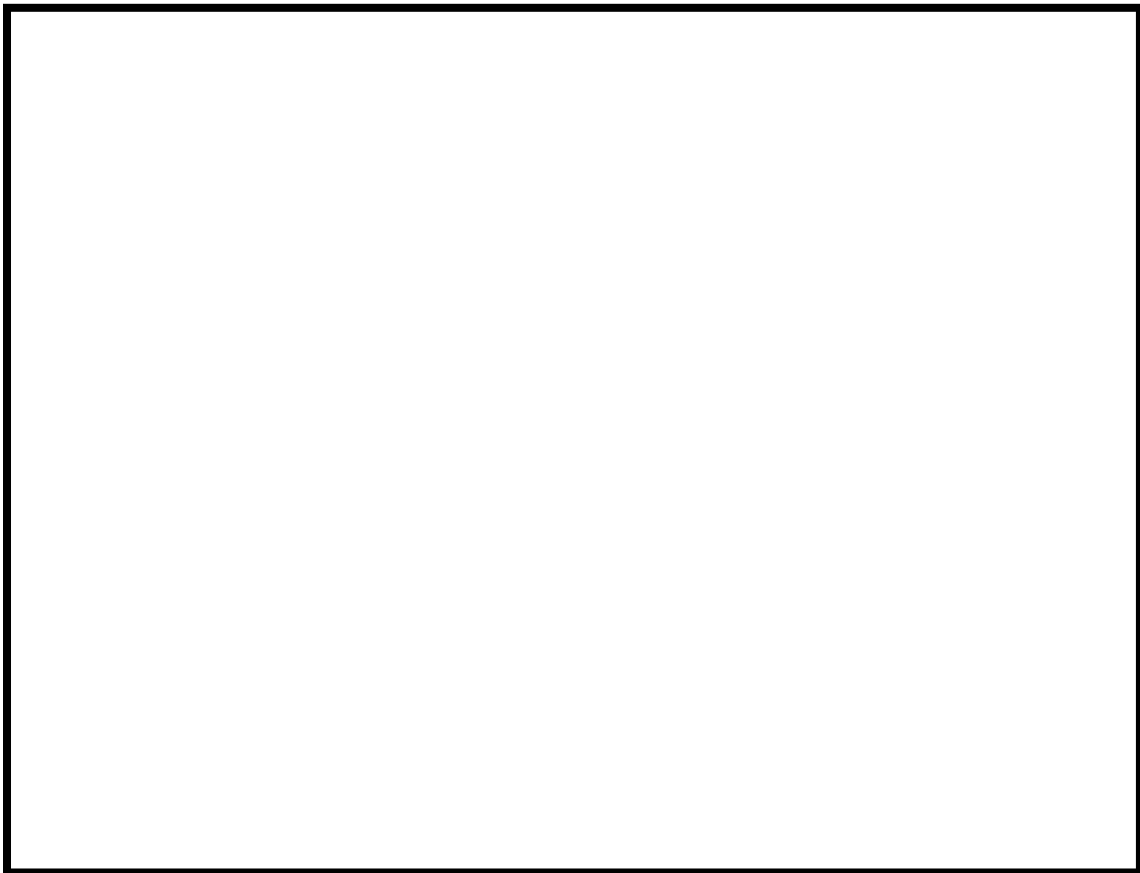
次に、(試験実測値－フィッティングカーブ) のRMSを算出したところ、①は115.3、②は176.7となった。そのため、①の方が実験データを精度よくフィッティングできていることがわかった。よって、①をキャンドルの抵抗係数カーブとした。

次に、汎用抵抗式は以下の通り表される。

$$\text{汎用抵抗式} : D_p = k_i \times \rho \times LV^2 + k_v \times \mu \times LV \quad \dots (3)$$

ここで、 ρ : 気体密度 (kg/m^3)、 μ : 粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 k_i : 慣性抵抗係数 (-)、 k_v : 粘性抵抗係数 ($1/\text{m}$) である。(1)、(3)式より、 $k_i \times \rho = \boxed{}$ 、 $k_v \times \mu = \boxed{}$ となる。ここで、キャンドルユニット試験時のガスの密度は $0.56937 (\text{kg/m}^3)$ 、粘性係数は $1.3032 \times 10^{-5} (\text{Pa} \cdot \text{s})$ であったことから、 k_i ならびに k_v は、 $k_i = \boxed{} (-)$ 、 $k_v = \boxed{} (1/\text{m})$ となる。

そのため、 $k_i = \boxed{} (-)$ 、 $k_v = \boxed{} (1/\text{m})$ を、流動解析を実施する際のキャンドル (ポーラスメディア) の圧力損失係数とする。



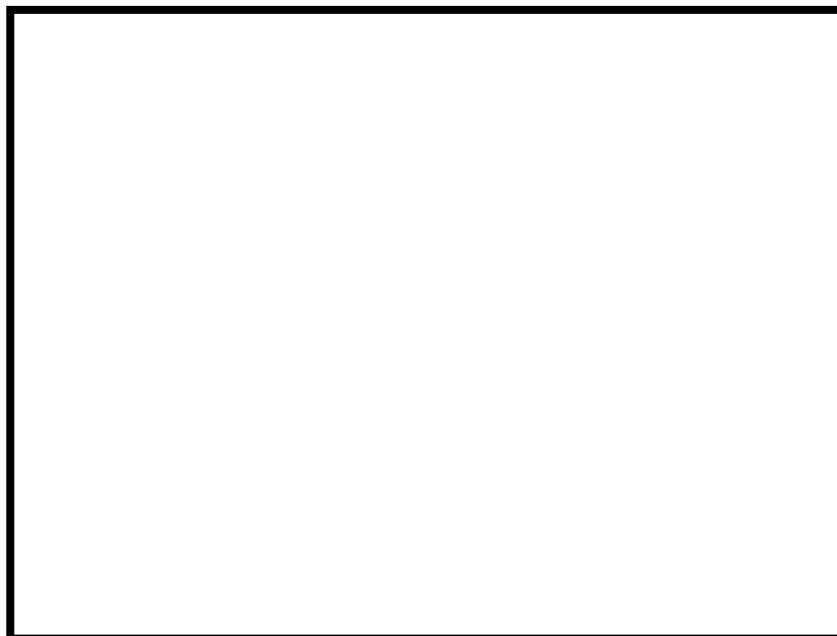
第5図 抵抗係数カーブ

よう素フィルタ全体の流動解析は、実機の流量を網羅するよう、格納容器圧力 2Pd にてベントした直後の最大流量相当と、事故後 1 ヶ月後の流量の 2 ケースで実施した。解析条件を第 2 表に示す。

第 2 表 よう素フィルタ流動解析条件一覧表

項目	条件
評価コード	・ STAR-CCM+ (ver. 9)
設定条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎式：質量保存式，運動量保存式 (Navier-Stokes 方程式) ・ 基礎式の離散化手法：有限体積法 ・ 乱流モデル：Realizable $k-\epsilon$ ・ 壁近傍の扱い：ALL $y+$モデル ・ 対流項離散化：二次精度風上差分 ・ 気体の扱い：水蒸気，非圧縮性流体 ・ キャンドル圧力損失係数：$k_i = \square (-)$，$k_v = \square (1/m)$
ベントガス条件	<p>【ケース 1：格納容器圧力 2Pd，ベント開始直後流量】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 体積流量：16.0 m^3/s (よう素フィルタ 2 基分) ・ 質量流量：15.8 kg/s (よう素フィルタ 2 基分) ・ 圧力：181.3 $kPa(abs)$ ・ 露点温度差：15 K <p>【ケース 2：事故後 1 ヶ月流量】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 体積流量：3.80 m^3/s (よう素フィルタ 2 基分) ・ 質量流量：2.48 kg/s (よう素フィルタ 2 基分) ・ 圧力：114.3 $kPa(abs)$ ・ 露点温度差：6.5K

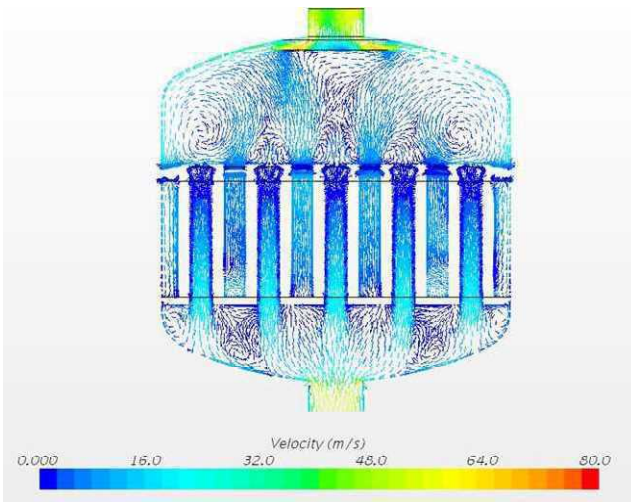
また，キャンドル配置と番号を第 6 図の通り設定した。



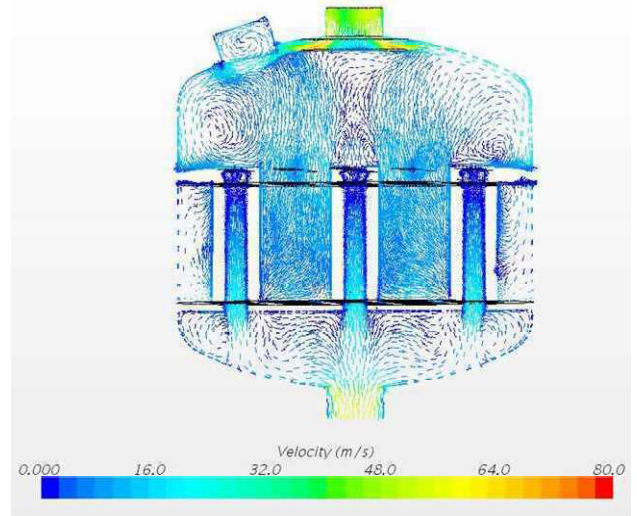
第 6 図 キャンドル配置ならびに番号

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

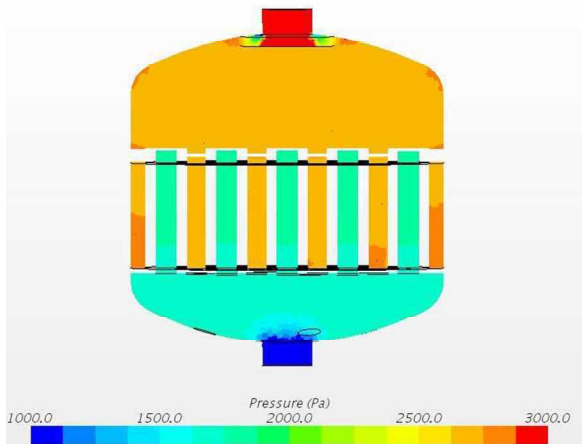
上記条件にてよう素フィルタ全体の流動解析を実施した。ケース1の解析結果を第7～11図，第3表に示す。



第7図 フィルタ中央(キャンドル31-35)断面ガス流速 (ケース1)



第8図 フィルタ中央 (出入口配管方向)断面ガス流速 (ケース1)

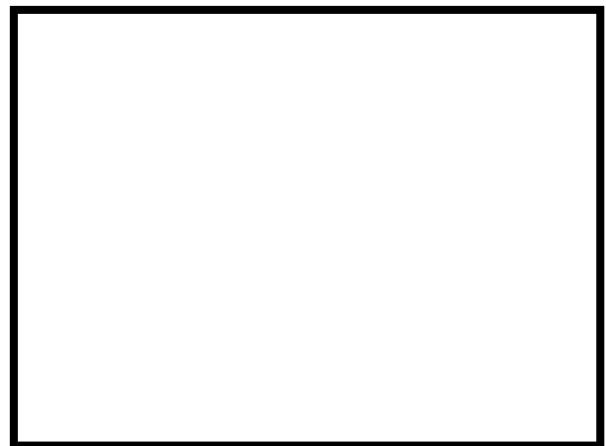


第9図 フィルタ中央(キャンドル31-35)断面ガス圧力 (ケース1)

第3表 各キャンドル流量分布 (ケース1)



第10図 各キャンドル流量分布 (ケース1)



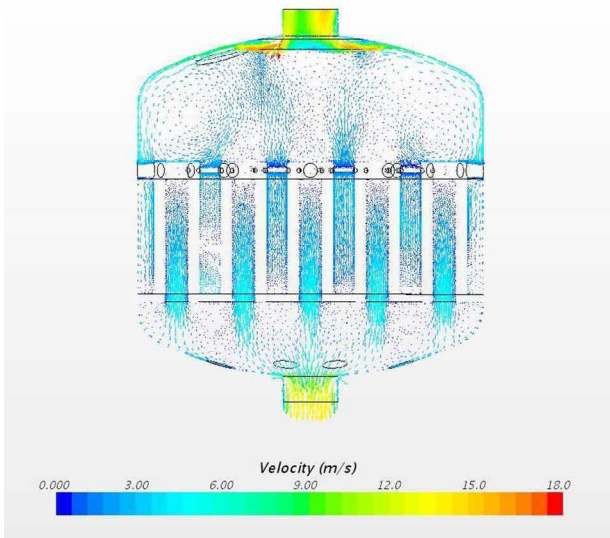
第11図 各キャンドル上下方向流速分布 (ケース1)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

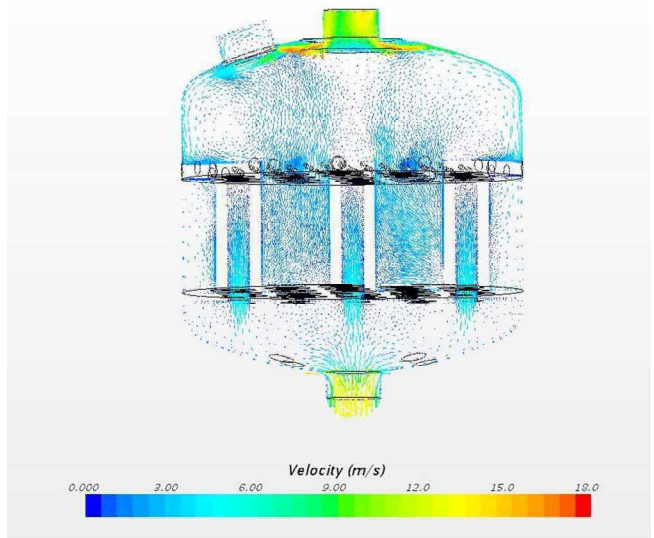
第10図、第3表より、各キャンドルの流量分配はほぼ均一で、各キャンドルのばらつきの範囲は±1%に収まっている。

また、第11図より、キャンドルの上下方向は、キャンドル下側の方が流量が大きい状態となっているが、上下方向のばらつきの範囲は±10%に収まっている。

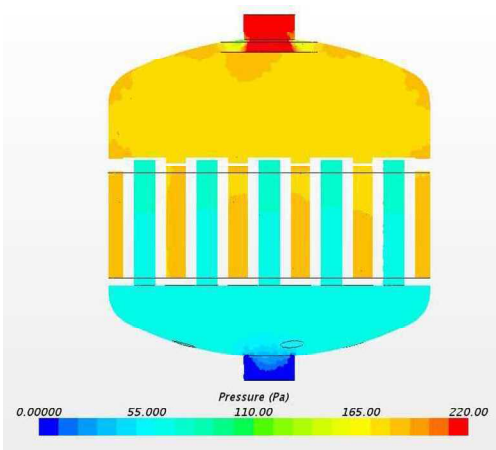
次に、ケース2の解析結果を第12～16図、第4表に示す。



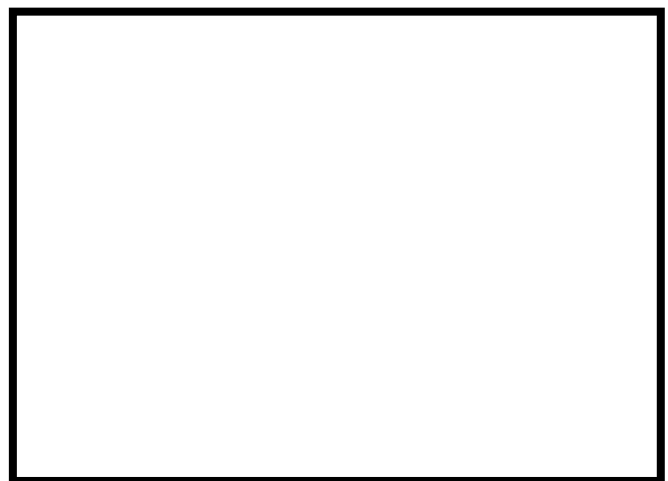
第12図 フィルタ中央(キャンドル31-35)断面ガス流速(ケース2)



第13図 フィルタ中央(出入口配管方向)断面ガス流速(ケース2)

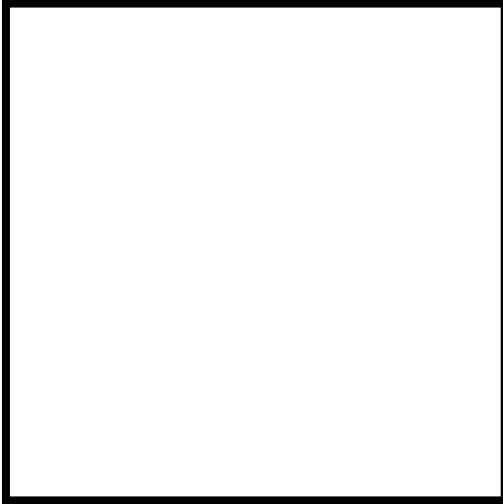


第14図 フィルタ中央(キャンドル31-35)断面ガス圧力(ケース2)



第15図 各キャンドル流量分布(ケース2)

第 4 表 各キャンドル流量分布
(ケース 2)



第 16 図 各キャンドル上下方向流速分布
(ケース 2)

第 15 図，第 4 表より，各キャンドルの流量分配はほぼ均一で，各キャンドルのばらつきの範囲は $\pm 0.6\%$ に収まっている。

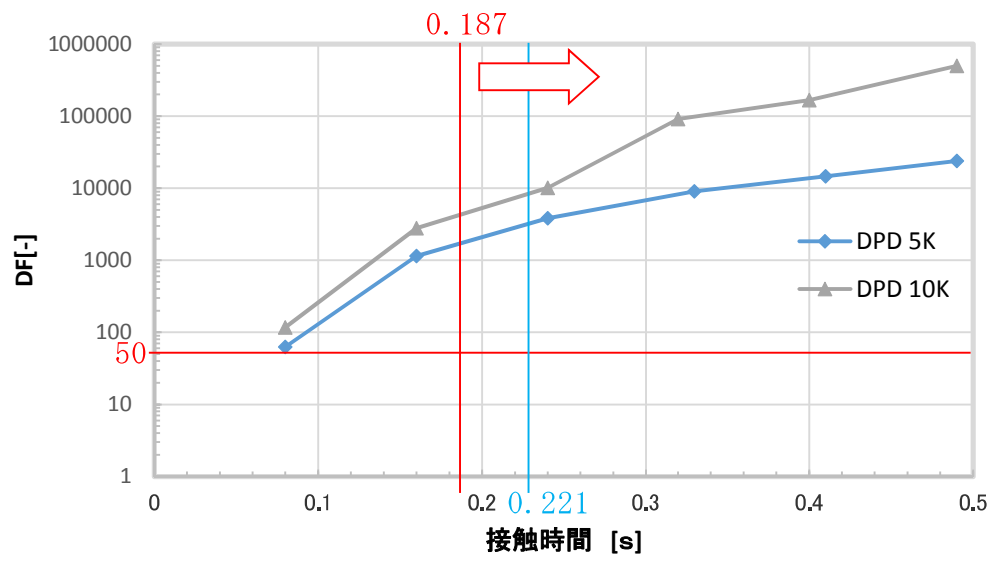
また，第 16 図より，キャンドルの上下方向は，キャンドル下側の方が流量が大きい状態となっているが，上下方向のばらつきの範囲は $\pm 5\%$ に収まっている。

以上より，よう素フィルタは流量が大きい方ほどキャンドル各部の偏流は大きくなるが，実機最大流量においても，各キャンドルの流量ばらつきは $\pm 1\%$ 以内，キャンドル上下方向のばらつきは $\pm 10\%$ 以内に収まることが確認できた。

次に，キャンドルの偏流がよう素フィルタの性能に与える影響を考える。

各キャンドルへ完全に均一にガスが流れていた場合における，ベントガスと吸着材の接触時間は，格納容器圧力 $2Pd$ のベント直後において $0.221[s]$ となる。ここで，キャンドルの偏流により，局所的にベントガスの流速が 15% 大きくなった場合，局所的にベントガスと吸着材の接触時間は 15% 減少し， $0.187[s]$ となる。銀ゼオライトの性能は第 17 図に示す通りであり，接触時間が $0.187[s]$ であっても DF50 以上確保可能である。

今，キャンドルの偏流は，格納容器圧力 $2Pd$ のベント直後であっても 15% より小さいため，キャンドルの偏流を考慮したとしても，DF50 以上は確保可能である。

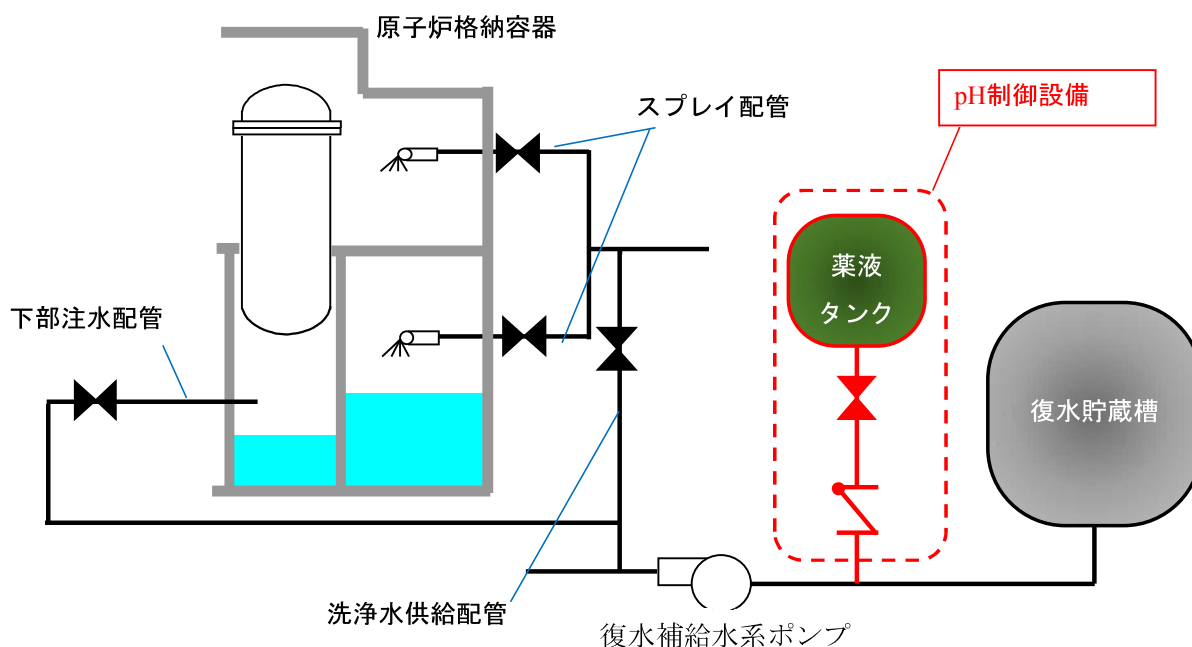


第 17 図 銀ゼオライト性能線図

別紙 4 1 格納容器 pH 制御による格納容器への影響の確認について

1. 設備概要

設備概要を第 1 図に示す。本システムは復水補給水系ポンプの吸込配管に薬液を混入させ、上部ドライウェルスプレイ配管、サプレッション・チェンバースプレイ配管、下部ドライウェル注水配管から原子炉格納容器内に薬液を注入する構成とする。薬液タンクに貯蔵する薬液は、原子炉格納容器内に敷設された全てのケーブルが溶融し、ケーブルに含まれる酸性物質(塩素)が溶出した際でも、原子炉格納容器内のサプレッション・プール水が酸性化することを防止するために必要な容量を想定し、水酸化ナトリウム(□[wt%]水溶液□[m³])とする。



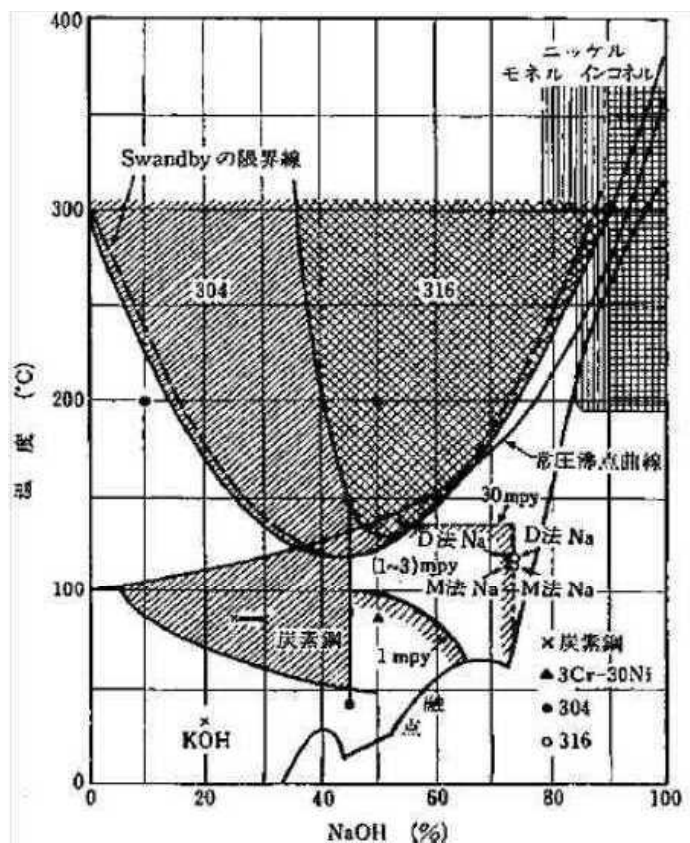
第 1 図 格納容器 pH 制御のための設備 系統概要図

2. 格納容器バウンダリに対する影響について

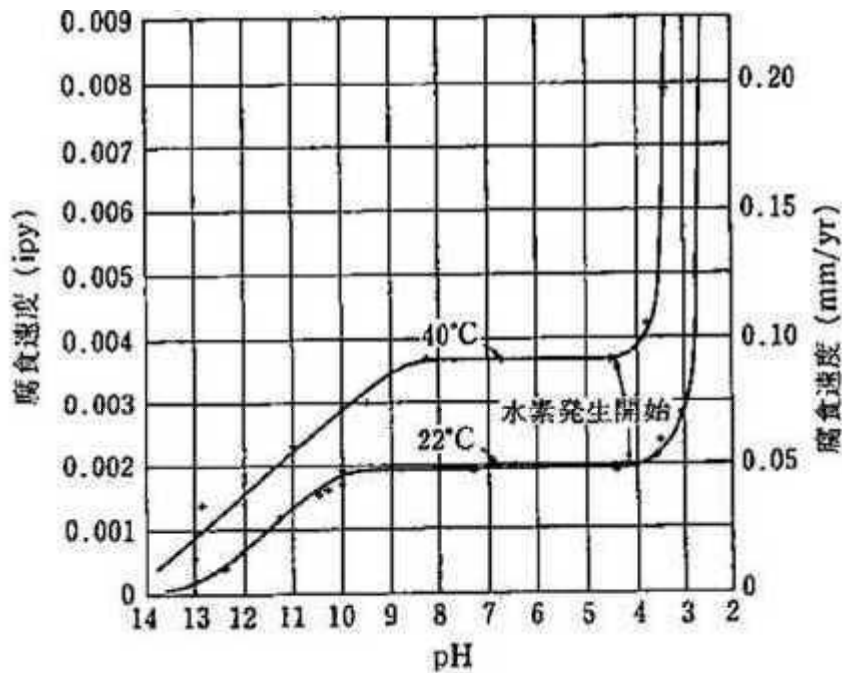
薬液は格納容器内の上部ドライウェル、下部ドライウェル、サプレッション・チェンバへそれぞれ均等に注入するが、それらは連通孔やベント管等で接続されており、最終的にはサプレッション・プールに流入する。その場合、サプレッション・プール水の水酸化ナトリウム濃度は最大で約□[wt%]、pH は約□となる。また各箇所へ所定量の薬液を注入した後は、薬液を含まない復水貯蔵槽の水をそれぞれの箇所へ継続して注水するため、薬液が局所的に滞留・濃縮することはない。

サプレッション・チェンバのライナ部で使用しているステンレス鋼、及び底

部ライナに使用している炭素鋼のアルカリ腐食への耐性を第2図，第3図に示すが，pH制御操作時の濃度ではアルカリ腐食割れは発生せず，また，塩化物による孔食，すきま腐食，SCCの発生を抑制することができる。



第2図 アルカリ腐食割れに及ぼす温度，濃度の影響
 出典『小若，金属の腐食と防食技術，アグネ承風社，2000年』



第3図 炭素鋼の腐食に及ぼす pH の影響

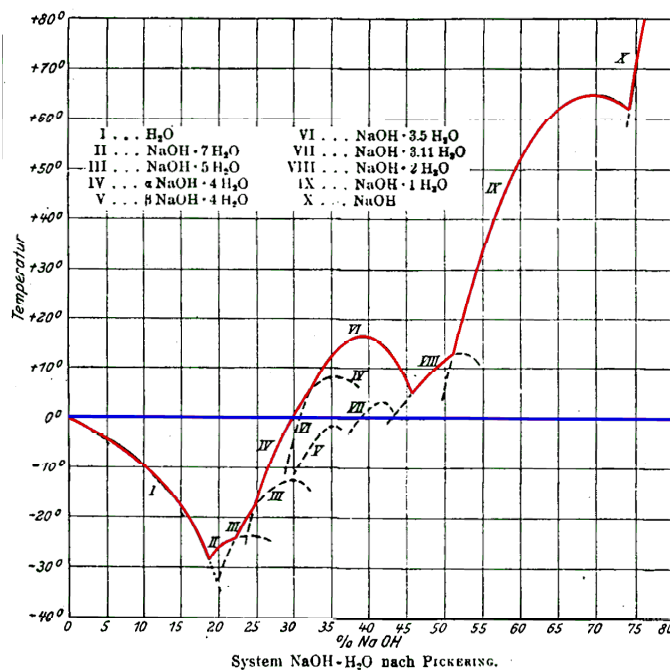
出典『小若，金属の腐食と防食技術，アグネ承風社，2000年』

また，原子炉格納容器バウンダリで主に使用しているシール材は，耐熱性能に優れた改良 EPDM に変更しているが，この改良 EPDM について事故条件下でのシール性能を確認するため，第1表の条件で蒸気暴露後の気密試験を実施し，耐アルカリ性能を確認した。

第1表 改良 EPDM 耐アルカリ性確認試験

これらから，pH 制御薬液による原子炉格納容器バウンダリへの悪影響は無いことを確認した。

なお，水酸化ナトリウムの相平衡を第4図に示すが，本システム使用後の濃度である [wt%] では，水温が 0°C 以上であれば相変化は起こらず，析出することはない。



第4図 水酸化ナトリウムの水系相平衡図

出典『Gmelins Handbuch der anorganischer Chemie, Natrium, 8 Auflage, Verlag Chemie, Berlin 1928』

3. 水素の発生について

原子炉格納容器内では、配管の保温材等にアルミニウムを使用している。アルミニウムは両性金属であり、スプレイにより水酸化ナトリウムに被水すると式(a)に示す反応により水素が発生する。また、原子炉格納容器内のグレーチングには、亜鉛によるメッキが施されている。亜鉛もまた両性金属であり、式(b)に示すとおり水酸化ナトリウムと反応することで水素が発生する。

これらを踏まえ、事故時に想定される原子炉格納容器内の水素の発生量を評価する。なお、実際に薬液と反応する金属はスプレイの飛散範囲内と考えられるが、保守的に格納容器内の全ての亜鉛とアルミニウムが反応し水素が発生するとして評価を行う。



3.1 アルミニウムによる水素発生量

格納容器内のアルミニウムの使用用途は配管保温材の外装材とドライウェルクーラのアルミフィンである。これらの全てが薬液と反応した場合の水素発生量を評価した。

【算出条件】

【計算結果】

上記条件より、アルミニウム量は [kg] となる。そして、式(a)よりこのアルミニウムが全量反応すると、水素の発生量は約 [kg] となる。

3.2 亜鉛による水素発生量

格納容器内の亜鉛の使用用途はグレーチングの亜鉛メッキである。そのためグレーチングの亜鉛メッキ量を調査し、アルミニウムと同様に全てが薬液と反応した場合の水素発生量を評価した。

【算出条件】

【計算結果】

上記条件より、亜鉛量はドライウェルで [kg]、サプレッション・チェンバで [kg] となり、合計で [kg] となる。そして、式(b)よりこの亜鉛が全量反応すると、水素の発生量は約 [kg] となる。

3.3 水素発生による影響について

水-ジルコニウム反応等により格納容器内で発生する水素量は、有効性評価上の大 LOCA シナリオで 592[kg]であり、薬液注入によりアルミニウムと亜鉛が全量反応したとしても、事故時の格納容器内の気相は水蒸気が多くを占めていることから、格納容器の圧力制御には影響がない。また、格納容器内は窒素ガスにより不活性化されており、本反応では酸素の発生がないことから、水素の燃焼は発生しない。

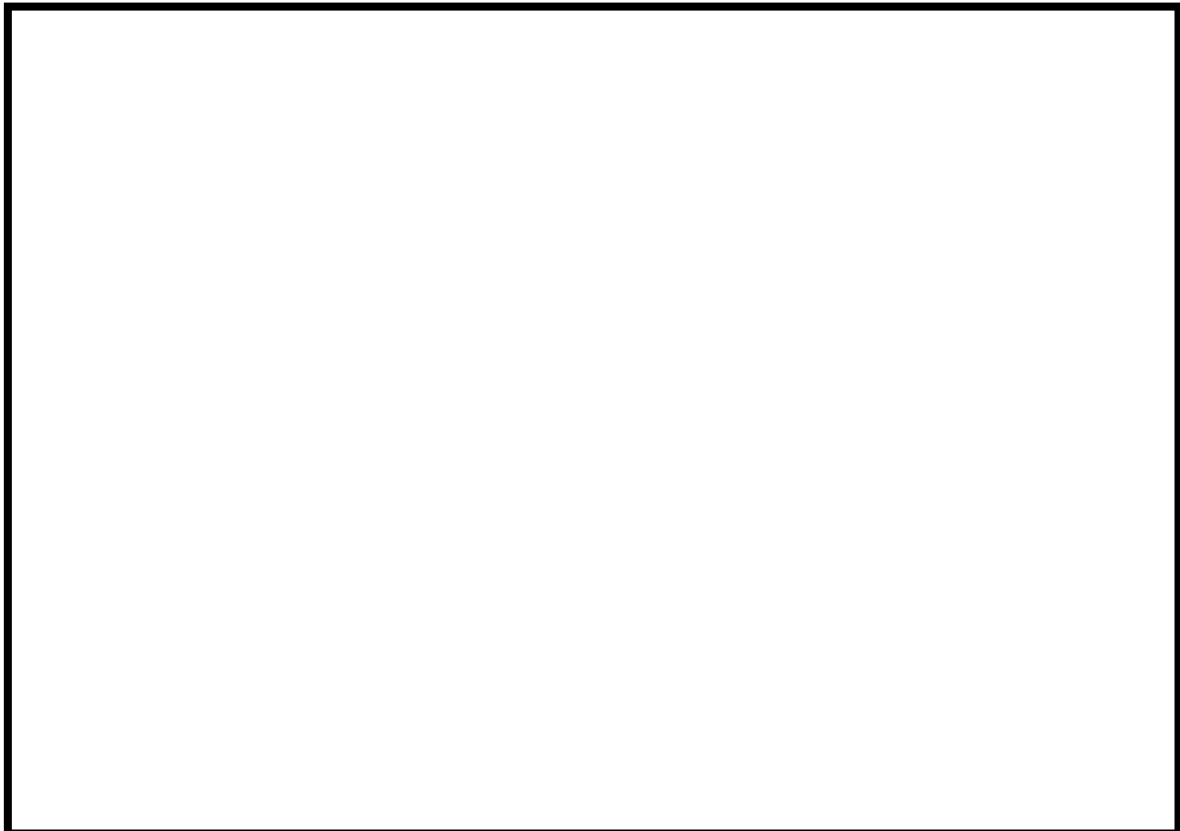
これらのことから、pH 制御に伴って格納容器内に水素が発生することを考慮しても、影響はないものとする。

別紙 4 2 よう素フィルタの初期過渡性能及び有機よう素許容吸着量について

1. よう素フィルタの初期過渡性能について

よう素フィルタの有機よう素除去性能については 3.2.2.3.3 に記載の通りであり、ベント初期から長期連続運転後のベント後期にかけて、目標とする除去性能が達成可能であることを確認している。しかし、第 3.2.2.3.3.1-1 図に示す性能線は、吸着材の温度が一定の状態の性能を示したものであり、ベント最初期の吸着材が冷えており、吸着層内でベントガスの蒸気の凝縮が発生するような状態のものとは異なる可能性がある。

そこで、第 1 図に示す有機よう素除去性能試験装置にて、ベント最初期の吸着材が冷えている状態を模擬し、よう素フィルタの初期過渡性能を確認した。



第 1 図 有機よう素除去性能試験装置構成図

ヨウ化メチル発生装置から供給されるガスは、ボイラからの蒸気と混合され、実機と同じ銀ゼオライト吸着材が充填された試験カラムに導かれる。試験カラム上流の配管にはガス注入口を設け、蒸気以外のベントガス組成である水素や窒素を必要に応じて注入してガス組成を調整できるようにした。試験カラムの銀ゼオライト充填層の厚さは、実機キャンドルユニットの吸着材充填厚さと同

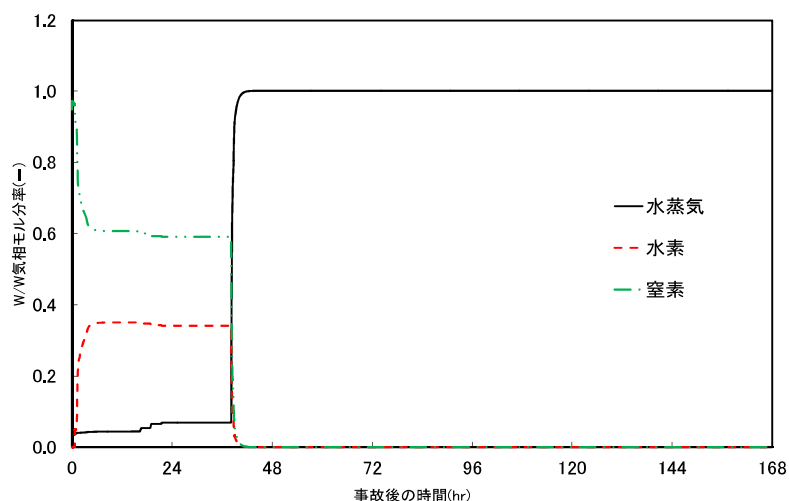
一寸法とした。

試験装置に供給されるヨウ化メチルの濃度は、サンプリング口①から試料を採取してガスクロマトグラフ（GC-FID：島津製作所製 GC-14B）による分析で確認した。一方、試験カラムを通過したガスは窒素希釈され、冷却トラップでガスと凝縮水に分離してサンプリング口②から採取され、その両方を試料としてGC-FIDによる分析を行った。また、蒸気流量は凝縮水の重量から算出した。試験は、まずダミーカラムに水蒸気を通気し、試験ガスの条件を安定させた後、吸着カラムにラインを切り替え、DFの計測を開始する。

今回実施した試験条件を第1表に示す。ベント最初期の状態を模擬するため、吸着材カラム部のヒータを切って吸着材の温度を室温の状態とし、その状態からダミーカラムより試験カラムへラインを切り替え、試験を開始した。また、ベント最初期のベントガスは蒸気、水素、窒素の混合ガスであることから、実機の条件を考慮して蒸気10%、水素30%、窒素60%の混合ガスとして試験を実施した（実機のガス組成は第2図参照）。さらに、接触時間はベント初期に想定される0.221sよりも短い0.173sとした。

第1表 よう素フィルタ初期過渡性能試験条件一覧表

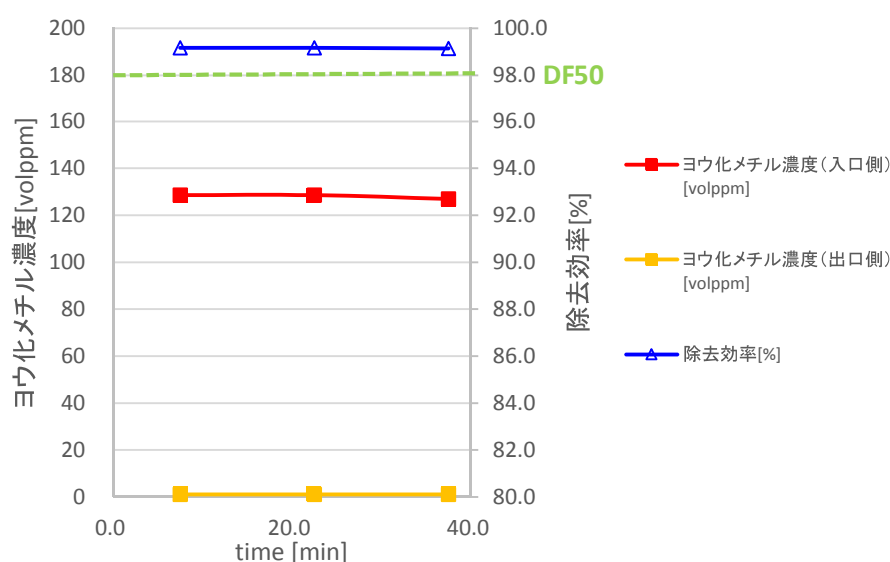
項目	条件
試験装置	有機よう素除去性能試験装置
試験ガス組成	蒸気10%、水素30%、窒素60%
試験ガス温度	101 °C
試験カラム入口圧力	15.9 kPa(g)
ヨウ化メチル濃度	126 volppm
接触時間	0.173 s



第2図 ベントガス組成時刻歴

第 1 表の条件にて有機よう素除去性能試験を実施したところ、DF の時刻歴は第 3 図に示す通りとなった。第 3 図中の最初の計測データは、試験カラム通気開始時から 15 分後までのガスを採取したサンプルのデータ、2 つ目のデータは 15 分後から 30 分後までのガスを採取したサンプルのデータ、3 つ目のデータは 30 分後から 45 分後までのガスを採取したサンプルのデータである。

第 3 図より、ベント最初期の吸着材が低温の状態であって、接触時間が実機よりも短い条件であったとしても、DF は 50 以上となることが確認できた。よって、実機においてベント最初期の吸着材が低温であって、吸着層内でベントガスの蒸気の凝縮が発生するような状況であっても、目標の DF を達成できると考えられる。



第 3 図 有機よう素除去性能試験結果

2. よう素フィルタの有機よう素許容吸着量について

よう素フィルタの有機よう素除去性能については 3.2.2.3.3 に記載の通りであるが、供給するヨウ化メチルの量は少なく、DF が低下するほどのヨウ化メチルは供給していない。

そこで、第 1 図の有機よう素除去性能試験装置を用いて、ヨウ化メチルを大量に供給し、DF が目標である 50 を維持する期間中に吸着できるヨウ化メチルの量を確認する試験を実施した。なお、この試験では、試験カラム部のヒータも入れた状態で、まず試験カラムに水蒸気のみを通気し、所望のガスの流量や温度となり、吸着材の温度が一定となったところでヨウ化メチルを供給することとした。

試験条件を第 2 表に示す。また、DF が 50 以上を維持する期間中に、実機の

よう素フィルタに吸着されるヨウ化メチルの総質量（3.2.2.3.3 に示すように、よう素フィルタは 2 個並列設置されるのでその合計値）であり、次式によって算出した。

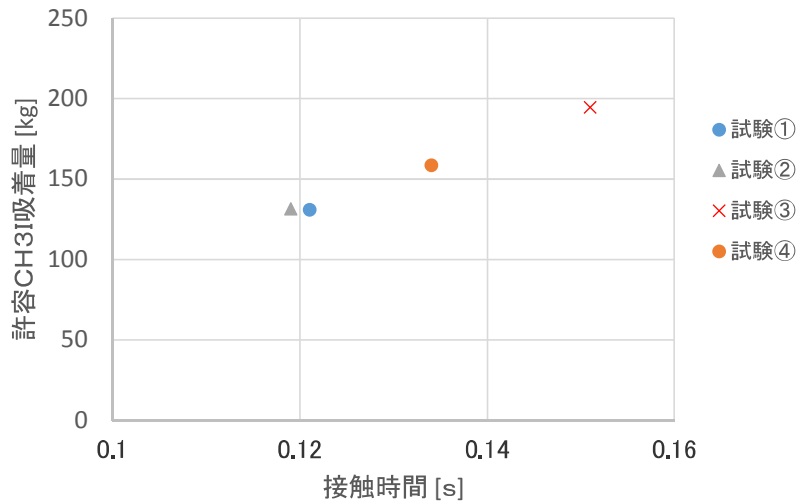
$$A = \int_0^T SI \left(1 - \frac{1}{DF}\right) dt \cdot AgX_r / AgX_t$$

ここで、A はよう素フィルタ許容吸着量、SI は試験カラムに単位時間当たり供給されたヨウ化メチルの質量、DF は除染係数、 AgX_r は実機のよう素フィルタ 2 個に充填される吸着材の総質量、 AgX_t は試験カラムに充填された吸着材の総質量、T は試験開始から DF が 50 を切るまでの時間である。

第 2 表 よう素フィルタ許容吸着量確認試験条件一覧表

項目	条件			
	試験①	試験②	試験③	試験④
試験装置	有機よう素除去性能試験装置			
試験ガス組成	蒸気 100%			
露点温度差	9.1 K	10.6 K	8.5 K	12.5 K
試験カラム	8.1	8.4	5.6	250.4
入口圧力	kPa (g)	kPa (g)	kPa (g)	kPa (g)
ヨウ化メチル濃度	55 volppm	116 volppm	48 volppm	57 volppm
接触時間	0.121 s	0.119 s	0.151 s	0.134 s

以上の条件にて試験を実施し、よう素フィルタの許容吸着量を評価したところ、第 4 図の通りとなった。第 4 図に示す通り、よう素フィルタの許容吸着量は接触時間に対してほぼ線形的に増加し、ヨウ化メチル濃度や、ガスの圧力に対する依存性はないことが確認できた。また、ヨウ化メチルの許容吸着量は 100kg 以上であることが確認できた。一方、実機にてよう素フィルタに流入する有機よう素の量は約 1.3kg^{*1} と評価していることから、流入量に対して十分な余裕があることが確認できた。



第4図 よう素フィルタ許容吸着量確認試験結果

※1 有機よう素のよう素フィルタへの流入量は、以下の式により評価する。
 ここで、有機よう素の格納容器内及びフィルタ装置での除去には期待しないものとした。また、よう素放出量の低減対策として導入した格納容器内 pH 制御については、その効果に期待しないものとした。

$$\begin{aligned}
 Q &= q_0 \times F \times g \times M_{\text{CH}_3\text{I}} / M_{\text{I}} \\
 &= 29.1 \times 1 \times 0.04 \times 142 / 127 \\
 &\sim 1.3 [\text{kg}]
 \end{aligned}$$

Q：有機よう素のよう素フィルタへの流入量[kg]

q_0 ：よう素の停止時炉内内蔵量 (29.1) [kg]

F：よう素の原子炉圧力容器から格納容器内への放出割合 (1) [-]

g：有機よう素の組成構成比 (0.04 : R. G. 1.195) [-]

$M_{\text{CH}_3\text{I}}$ ：有機よう素の分子量 (142) [-]

M_{I} ：よう素の分子量 (127) [-]

別紙 4 3 格納容器からの取り出し位置について

1. 格納容器圧力逃がし装置

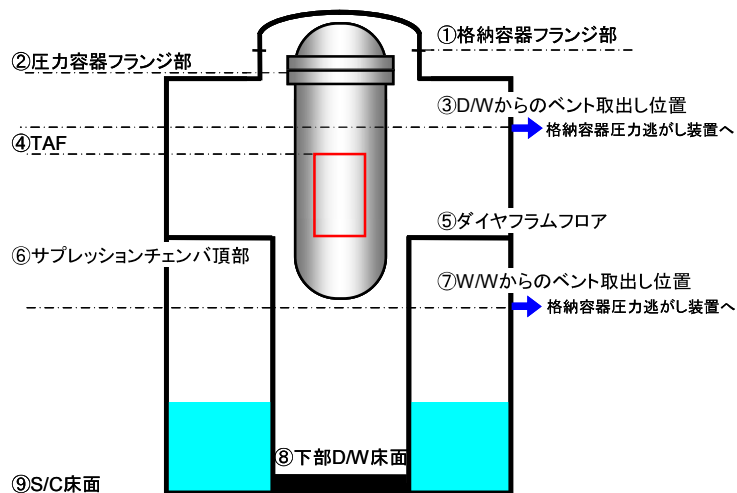
1.1 配管設置箇所

格納容器からの排気ラインの取り出し位置は、ドライウエル及びサブプレッション・チェンバのそれぞれに設け、いずれの箇所からも排気が可能な設計としている。

格納容器圧力逃がし装置の系統において、ドライウエル及びサブプレッション・チェンバからの取り出し箇所の概要を、第 1-1 表、第 1-1 図に示す。

第 1-1 表 格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概要 (T. M. S. L)

No.	場所	6号機	7号機
①	格納容器フランジ部	24,400	24,400
②	圧力容器フランジ部	22,653	22,653
③	ドライウエルからの取り出し箇所	19,000	19,000
④	有効燃料頂部		
⑤	ダイヤフラムフロア	12,300	12,300
⑥	サブプレッション・チェンバ頂部	11,100	11,100
⑦	サブプレッション・チェンバからの取り出し箇所	9,000	9,200
⑧	下部ドライウエル床面	-6,600	-6,600
⑨	サブプレッション・チェンバ床面	-8,200	-8,200



第 1-1 図 格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概略図 (高さ)

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

1.2 設計の意図

格納容器圧力逃がし装置の系統において、ドライウエル、及び、サプレッション・チェンバからの取り出し箇所は、ダイヤフラムフロア及びサプレッション・チェンバの水面からの高さを確保し、気相部からの取り出しを確保できる位置としている。

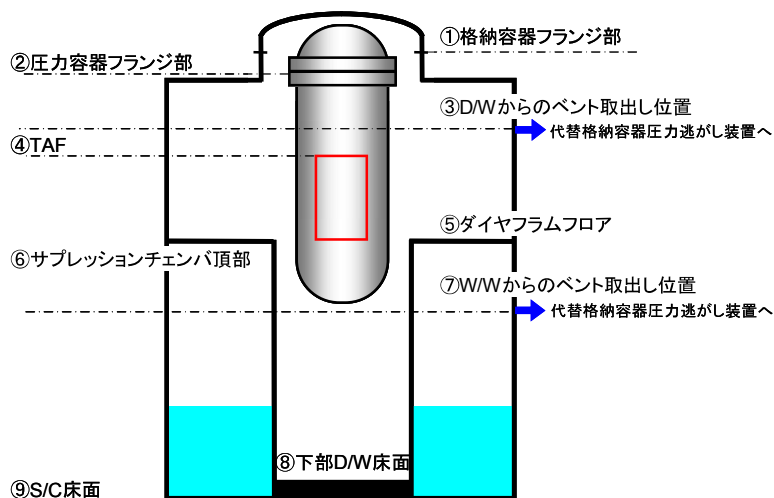
2. 代替格納容器圧力逃がし装置

2.1 配管設置箇所

代替格納容器圧力逃がし装置の系統において、ドライウエル、及び、サプレッション・チェンバからの取り出し箇所の概要を、第2-1表、第2-1及び第2-2表、第2-2図に示す。

第2-1表 代替格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概要 (T.M.S.L)

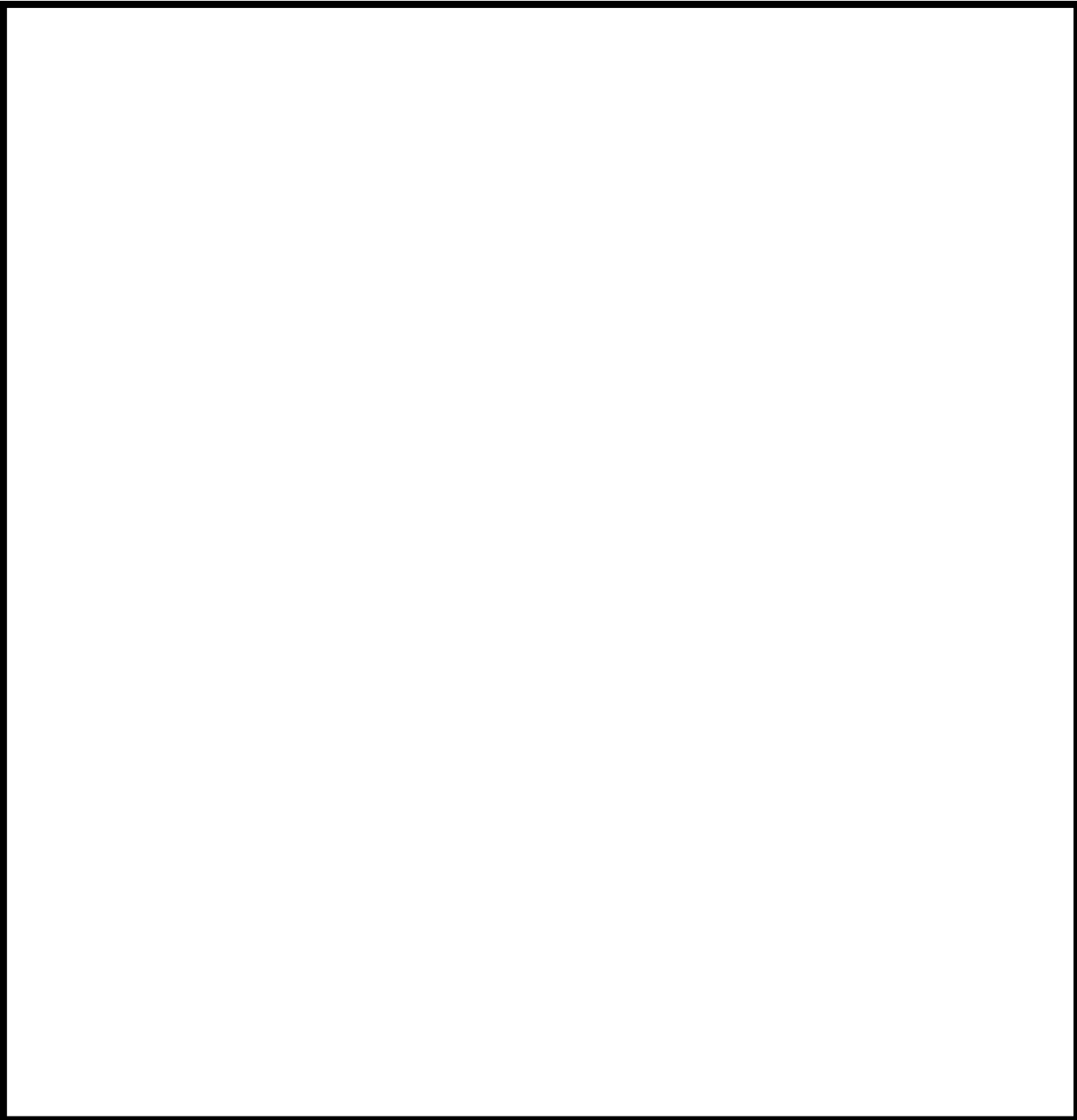
No.	場所	6号機	7号機
①	格納容器フランジ部	24,400	24,400
②	圧力容器フランジ部	22,653	22,653
③	ドライウエルからの取り出し箇所	20,100	20,100
④	有効燃料頂部		
⑤	ダイヤフラムフロア	12,300	12,300
⑥	サプレッション・チェンバ頂部	11,100	11,100
⑦	サプレッション・チェンバからの取り出し箇所	9,400	9,200
⑧	下部ドライウエル床面	-6,600	-6,600
⑨	サプレッション・チェンバ床面	-8,200	-8,200



第2-1図 代替格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概略図 (高さ)

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

第 2-2 表 代替格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概要 (角度)

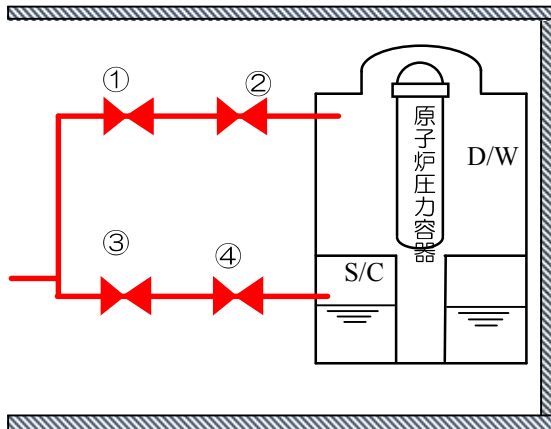


第 2-2 図 代替格納容器圧力逃がし装置 取り出し箇所概略図 (方位)

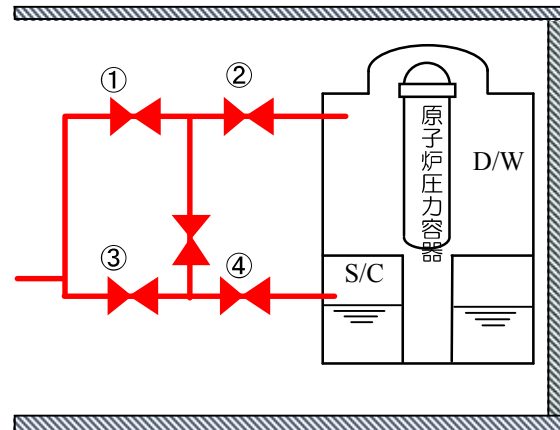
別紙 4 4 代替格納容器圧力逃がし装置の給気配管タイラインについての検討

1. 系統構成の比較

代替格納容器圧力逃がし装置の給気配管の系統構成は第 1 図の様に D/W 側と S/C 側それぞれに隔離弁を 2 弁設けることを検討しており、この構成にタイラインで接続する場合の系統構成を第 2 図に示す。タイラインを接続することによる影響を検討した。



第 1 図 地下式 FCVS 系統構成



第 2 図 タイライン接続案

2. タイラインを設置することによる悪影響について

タイラインを設けることで、これまで D/W 側と S/C 側の 2 パターンだったベントの系統構成が 4 パターンに増え、信頼性が向上すると考えられる。一方、タイラインを設けることで配管長も長くなり、配管自体もリークする可能性がある。特に K7 については S/C 側と D/W 側の格納容器からの取り出し箇所が対角位置 (180° 離れている) となっているため、タイラインとしてかなり長い配管の引き回しが必要となる。また、タイラインを設置することで現場施工の成立性による制約、水素溜まり、ドレン溜まりの発生などの悪影響が生じることが考えられる。

(参考) タイライン設置によるベント失敗率低減効果について

タイラインを設けることでベント可能となるケースが増えるが、組合せによってはタイラインを設けてもベントは不可である。具体的には、「①と④」、「②と③」の弁の故障時にタイラインを設けることでベントが可能となる（「①と②」、「③と④」はタイラインを設けてもベント可能、「②と④」、「①と③」はタイラインを設けてもベント不可）。エクステンションを用いた遠隔操作の故障率は $3.4 \times 10^{-8}[\text{h}]$ * であるため、弁の開操作失敗によるベント失敗確率について、タイラインを設けない場合は式 (1)、設ける場合は式 (2) の様に算出され、信頼性向上 (ベント失敗率の低減効果) は式 (3) より $2.32 \times 10^{-15}[\text{h}]$ となる。

$$(3.4 \times 10^{-8})^2 \times 4 = 4.62 \times 10^{-15} \quad (1)$$

[2 弁開の故障率] [4 パターン]

$$\underline{(3.4 \times 10^{-8})^2} \times \underline{2} + \underline{(3.4 \times 10^{-8})^2} \times \underline{(3.4 \times 10^{-8})} \times \underline{2} = 2.32 \times 10^{-15} \quad (2)$$

[2 弁開の故障率] [2 パターン] [2 弁開の故障率] [タイライン弁開の故障率] [2 パターン]

$$\underline{4.62 \times 10^{-15}} - \underline{2.32 \times 10^{-15}} = 2.32 \times 10^{-15} \quad (3)$$

[タイライン無しの失敗率(1)] [タイライン有りの失敗率(2)]

※別紙 10 にて提示したエクステンションを用いた操作の故障率を引用