

電源構成の考え方について

(1) 電源系統の構成

格納容器フィルタベント系の隔離弁及び計装設備の重大事故等時における電源構成は、以下のとおり。

a. 常設代替交流電源設備

常設代替交流電源設備として、ガスタービン機関及び発電機を搭載したガスタービン発電機を設置する。本設備は、ガスタービン発電機の遠隔起動操作スイッチにより中央制御室からの起動を可能とする。

b. 可搬型代替交流電源設備

可搬型代替交流電源設備として、ディーゼル機関及び発電機を搭載した高圧発電機車を配備する。本設備は、常設代替交流電源設備と異なる場所に分散して配備する。接続口は、原子炉建物の西側、南側及びガスタービン発電機建物の南側に位置的分散を考慮して設置することで、共通要因により接続することができなくなるようにする。

c. 常設代替直流電源設備

常設代替直流電源設備として、S A用 115V 系蓄電池を設置する。本設備は、重大事故等対処設備専用の蓄電池であり、所内常設蓄電式直流電源設備とは位置的分散を図る。本系統は、常設代替交流電源設備、可搬型代替交流電源設備又は可搬型直流電源設備による電源の給電が開始されるまでの期間も格納容器フィルタベント系の計装設備に、24 時間にわたり電源を給電できる容量を有している。

d. 可搬型直流電源設備

可搬型直流電源設備として、高圧発電機車及び常設充電器を配備し電源を給電する。

(2) 電源種別ごとの電源給電範囲

a. 常設代替交流電源設備による電源給電範囲

常設代替交流電源設備により、ベント弁（第 1 弁：MV217-4，第 1 弁：MV217-5，第 2 弁：MV217-18，第 2 弁：MV217-23，第 3 弁：MV226-13）、ドレン移送ポンプ、格納槽排水ポンプ、ベントフィルタ 1 次ドレン弁、循環ライン止め弁、ドレン移送ライン連絡弁、薬液貯蔵タンク出口弁、フィルタ装置周り計装設備、第 1 ベントフィルタ出口水素濃度、スクラバ水 pH 及び第 1 ベントフィルタ出口放射線モニタ（高レンジ・低レンジ）に給電が可能である。

電源給電範囲を図 1～図 2 に、負荷一覧を表 1 に示す。

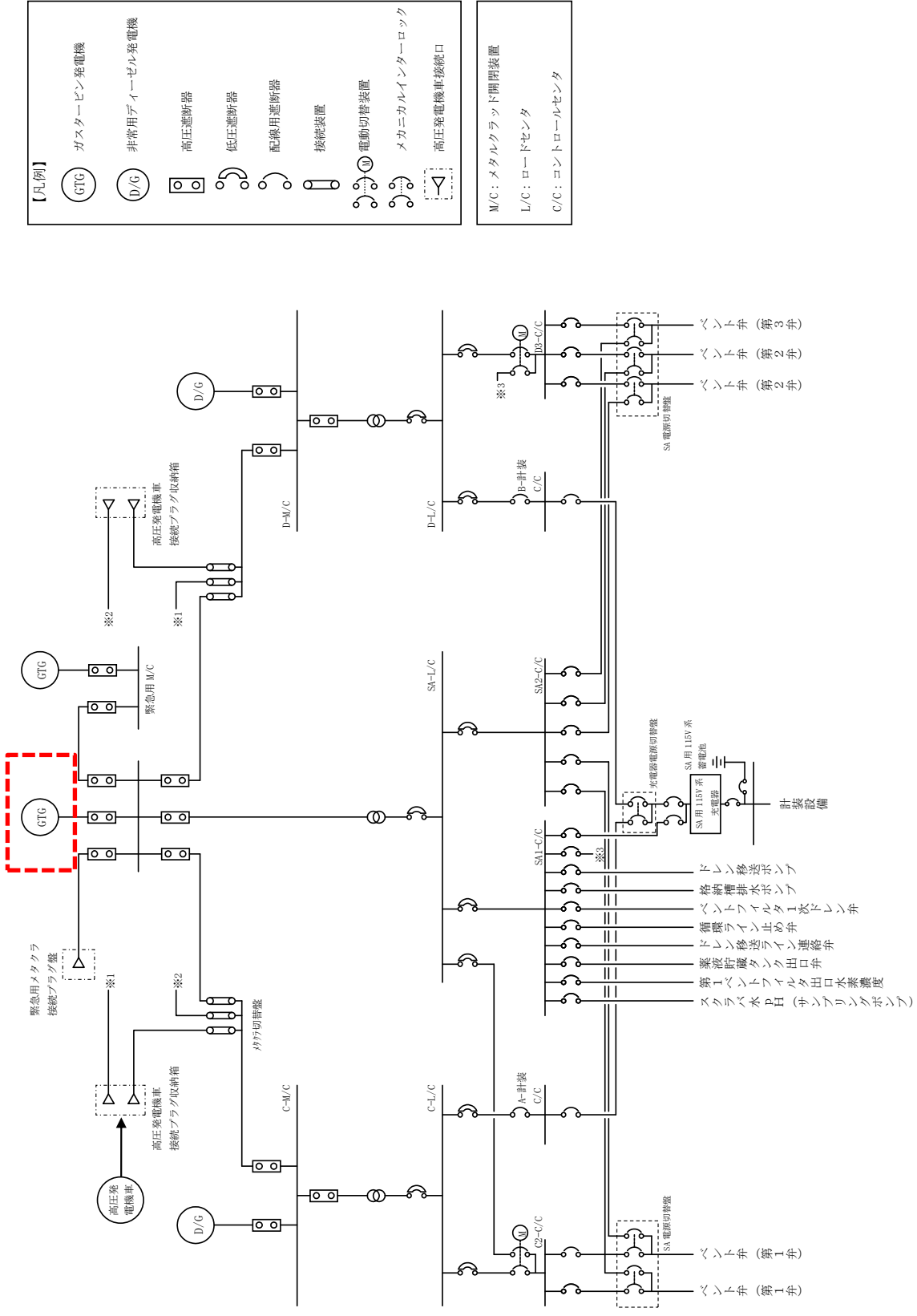


図1 常設代替交流電源設備による電源給電範囲 (交流電源)

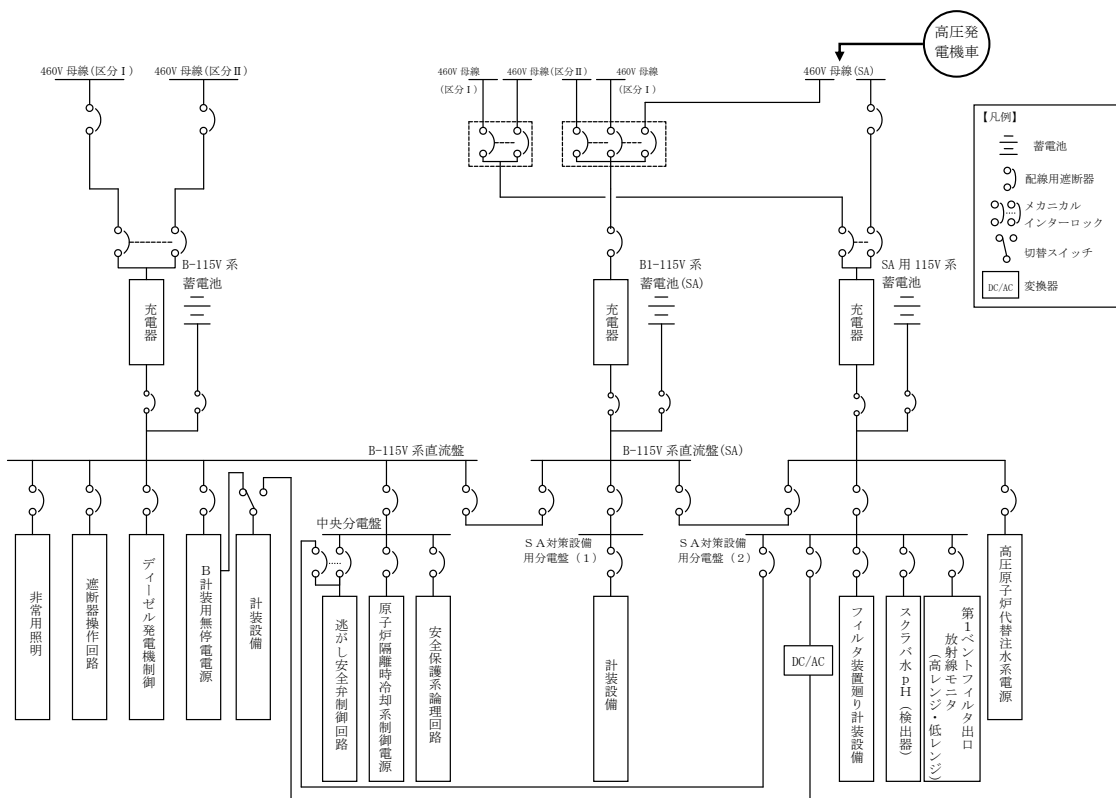


図2 常設代替交流電源設備による電源給電範囲 (直流電源)

表1 常設代替交流電源設備による負荷一覧

	負荷	負荷容量 (交流 (kW))	備考
1	ベント弁 (第1弁 : MV217-4)	1.4kW	
2	ベント弁 (第1弁 : MV217-5)	1.4kW	
3	ベント弁 (第2弁 : MV217-18)	0.72kW	
4	ベント弁 (第2弁 : MV217-23)	0.72kW	
5	ベント弁 (第3弁 : MV226-13)	0.72kW	
6	ドレン移送ポンプ	約 11kW	
7	格納槽排水ポンプ	約 30kW	
8	ベントフィルタ 1次ドレン弁	0.43kW	
9	循環ライン止め弁	0.43kW	
10	ドレン移送ライン連絡弁	0.43kW	
11	薬液貯蔵タンク出口弁	0.13kW	
12	フィルタ装置廻り計装設備	約 0.1kW	
13	第1ベントフィルタ出口水素濃度	約 25kW	
14	スクラバ水 pH	約 21kW	サンプリングポンプ含む
15	第1ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ・低レンジ)	約 0.2kW	
合計		約 95kW ^{※1}	

※1 常設代替交流電源設備の設備容量は 4,800kW (6,000kVA) とし、負荷容量約 95kW に対して必要十分な容量とする。

b. 可搬型代替交流電源設備による電源給電範囲

可搬型代替交流電源設備により、ベント弁 (第1弁 : MV217-4, 第1弁 : MV217-5, 第2弁 : MV217-18, 第2弁 : MV217-23, 第3弁 : MV226-13), ドレン移送ポンプ, 格納槽排水ポンプ, ベントフィルタ 1次ドレン弁, 循環ライン止め弁, ドレン移送ライン連絡弁, 薬液貯蔵タンク出口弁, フィルタ装置周り計装設備, 第1ベントフィルタ出口水素濃度, スクラバ水 pH 及び第1ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ・低レンジ) に給電が可能である。

電源給電範囲を図3～図4に、負荷一覧を表2に示す。

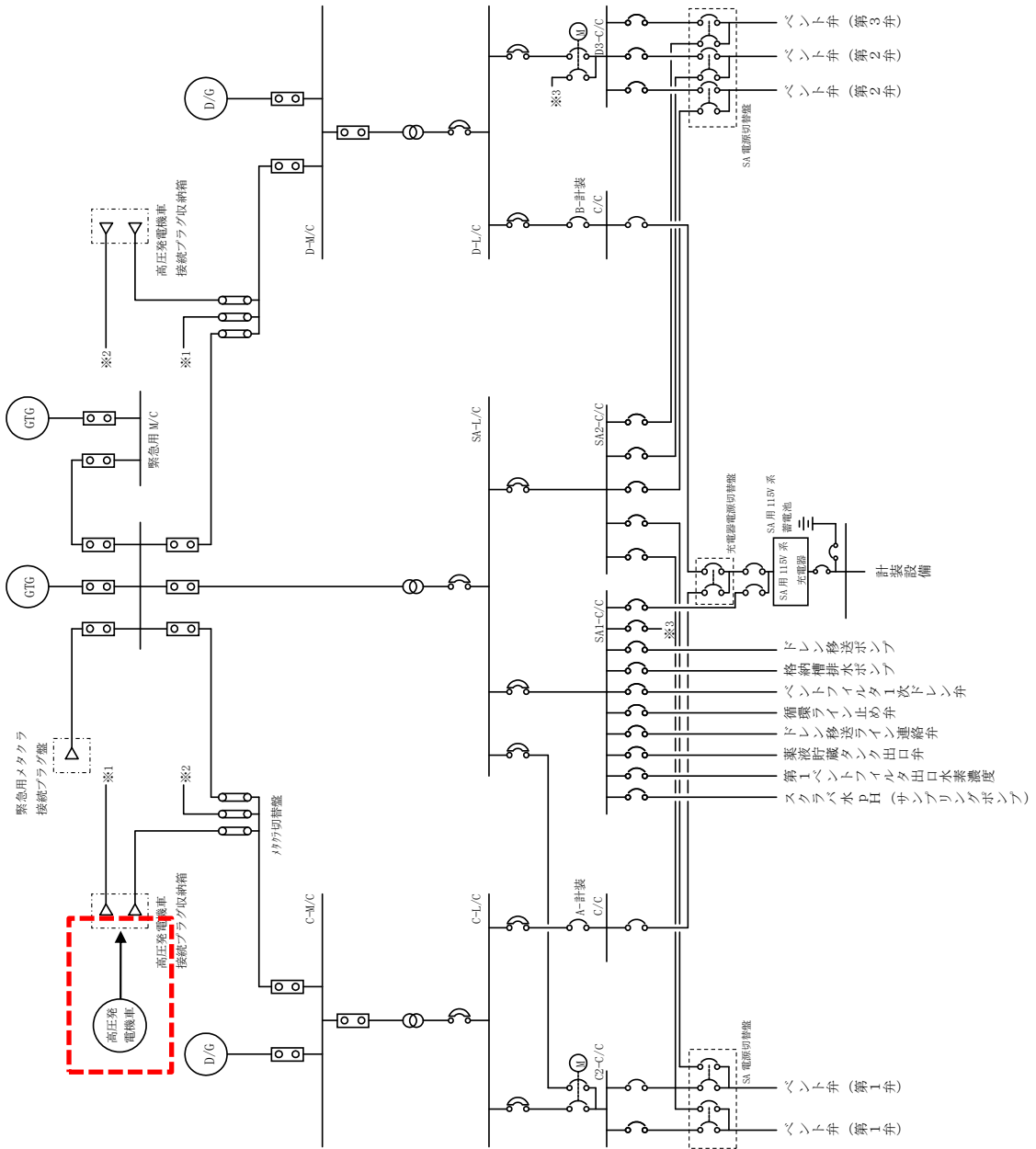
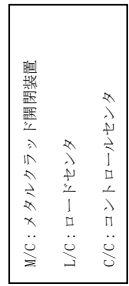
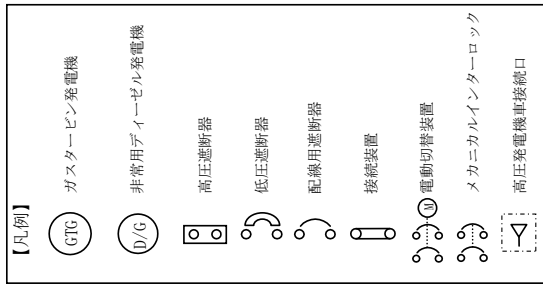


図3 可搬型代替交流電源設備による電源給電範囲 (交流電源)

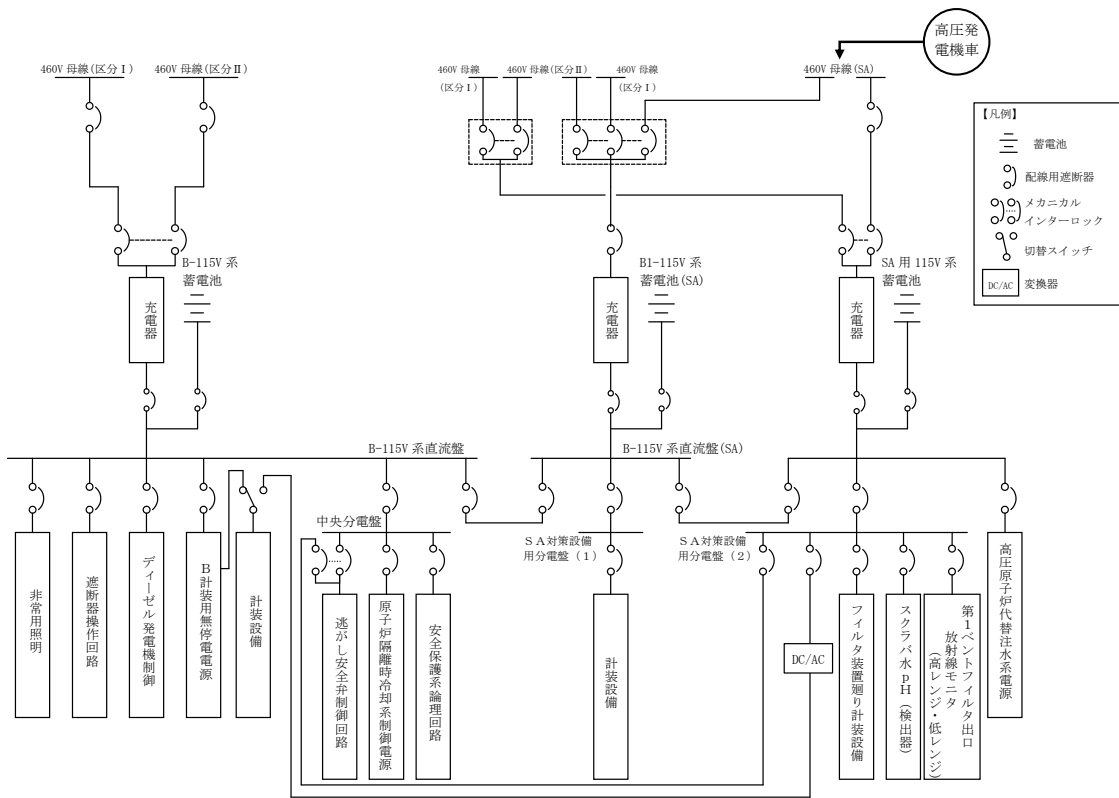


図 4 可搬型代替交流電源設備による電源給電範囲（直流電源）

表2 可搬型代替交流電源設備による負荷一覧

	負荷	負荷容量 (交流 (kW))	備考
1	ベント弁 (第1弁 : MV217-4)	1.4kW	
2	ベント弁 (第1弁 : MV217-5)	1.4kW	
3	ベント弁 (第2弁 : MV217-18)	0.72kW	
4	ベント弁 (第2弁 : MV217-23)	0.72kW	
5	ベント弁 (第3弁 : MV226-13)	0.72kW	
6	ドレン移送ポンプ	約 11kW	
7	格納槽排水ポンプ	約 30kW	
8	ベントフィルタ 1次ドレン弁	0.43kW	
9	循環ライン止め弁	0.43kW	
10	ドレン移送ライン連絡弁	0.43kW	
11	薬液貯蔵タンク出口弁	0.13kW	
12	フィルタ装置廻り計装設備	約 0.1kW	
13	第1ベントフィルタ出口水素濃度	約 25kW	
14	スクラバ水 pH	約 21kW	サンプリングポンプ含む
15	第1ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ・低レンジ)	約 0.2kW	
合 計		約 95kW ^{※1}	

※1 可搬型代替交流電源設備の設備容量は、高圧発電機車3台分の1,200kW (1,500kVA)とし、負荷容量約95kWに対して必要十分な容量とする。

c. 常設代替直流電源設備による電源給電範囲

常設代替直流電源設備により、フィルタ装置周り計装設備及び第1ベントフィルタ出口放射線モニタ（高レンジ・低レンジ）に給電が可能である。

ベント弁（第1弁：MV217-4，第1弁：MV217-5，第2弁：MV217-18，第2弁：MV217-23，第3弁：MV226-13），ドレン移送ポンプ，格納槽排水ポンプ，ベントフィルタ1次ドレン弁，循環ライン止め弁，ドレン移送ライン連絡弁，薬液貯蔵タンク出口弁，第1ベントフィルタ出口水素濃度及びスクラバ水pHについては交流機器であり，常設代替直流電源設備から給電はできない。

なお，ドレン移送ポンプ，排水ポンプ及び第1ベントフィルタ出口水素濃度については，使用時期は事故収束時となり，時間的余裕があることから，常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備からの給電が十分可能である。また，スクラバ水pHについては，系統待機時及び事故収束時に使用すること，ベント弁（第1弁：MV217-4，第1弁：MV217-5，第2弁：MV217-18，第2弁：MV217-23，第3弁：MV226-13）については，遠隔手動弁操作機構が付いており，手動での開閉操作が可能である。

電源給電範囲を図5に，負荷一覧を表3に示す。

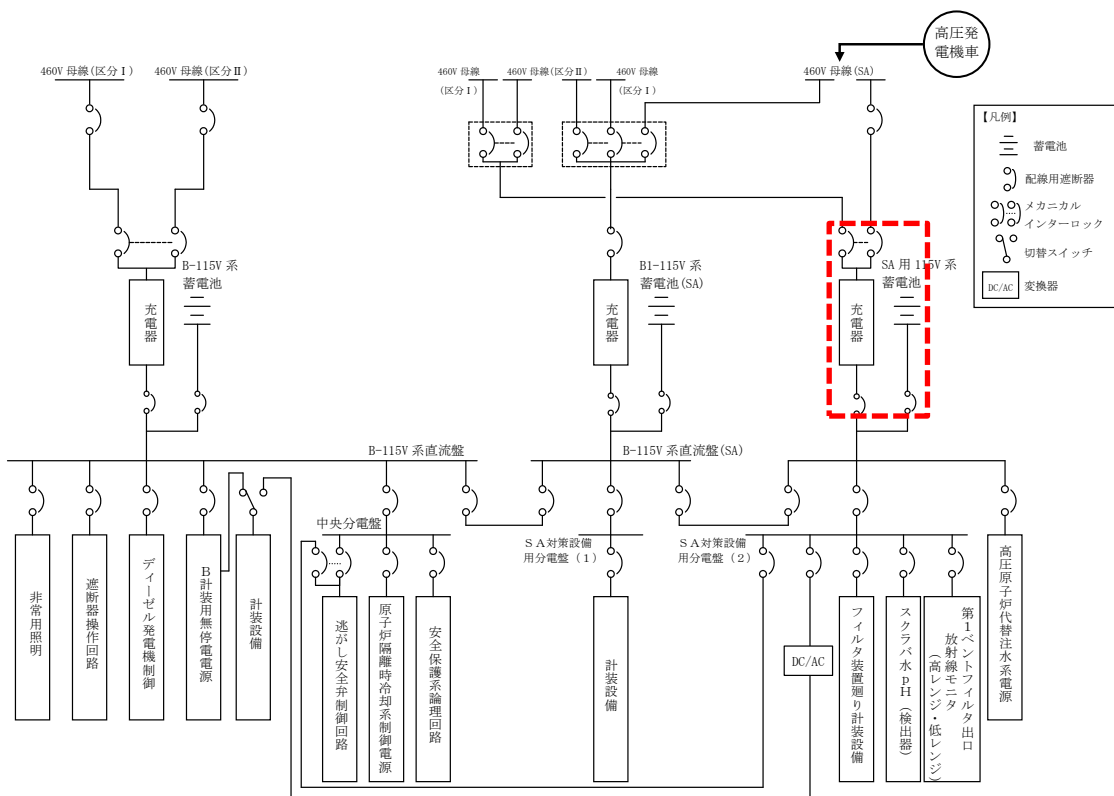


図5 常設代替直流電源設備による電源給電範囲

表3 常設代替直流電源設備による負荷一覧

	負荷	負荷容量 (交流 (kW))	備考
1	ベント弁 (第1弁 : MV217-4)	—	
2	ベント弁 (第1弁 : MV217-5)	—	
3	ベント弁 (第2弁 : MV217-18)	—	
4	ベント弁 (第2弁 : MV217-23)	—	
5	ベント弁 (第3弁 : MV226-13)	—	
6	ドレン移送ポンプ	—	
7	格納槽排水ポンプ	—	
8	ベントフィルタ1次ドレン弁	—	
9	循環ライン止め弁	—	
10	ドレン移送ライン連絡弁	—	
11	薬液貯蔵タンク出口弁	—	
12	フィルタ装置廻り計装設備	約1A	
13	第1ベントフィルタ出口水素濃度	—	
14	スクラバ水pH	—	サンプリングポンプ含む
15	第1ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ・低レンジ)	約2A	
合 計		約3A	約90Ah ^{※1}

※1 24時間使用した場合の容量

常設代替直流電源設備の設備容量は1,500Ahとし、負荷容量90Ahに対して必要十分な容量とする。

d. 可搬型直流電源設備による電源給電範囲

可搬型直流電源設備により、フィルタ装置周り計装設備及び第1ベントフィルタ出口放射線モニタ（高レンジ・低レンジ）に給電が可能である。

ベント弁（第1弁：MV217-4，第1弁：MV217-5，第2弁：MV217-18，第2弁：MV217-23，第3弁：MV226-13），ドレン移送ポンプ，格納槽排水ポンプ，ベントフィルタ1次ドレン弁，循環ライン止め弁，ドレン移送ライン連絡弁，薬液貯蔵タンク出口弁，第1ベントフィルタ出口水素濃度及びスクラバ水pHについては交流機器であり，可搬型直流電源設備から給電はできない。

なお，ドレン移送ポンプ，排水ポンプ及び第1ベントフィルタ出口水素濃度については，使用時期は事故収束時となり，時間的余裕があることから，常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備からの給電が十分可能である。また，スクラバ水pHについては，系統待機時及び事故収束時に使用すること，ベント弁（第1弁：MV217-4，第1弁：MV217-5，第2弁：MV217-18，第2弁：MV217-23，第3弁：MV226-13）については，遠隔手動弁操作機構が付いており，手動での開閉操作が可能である。

電源給電範囲を図6に，負荷一覧を表4に示す。

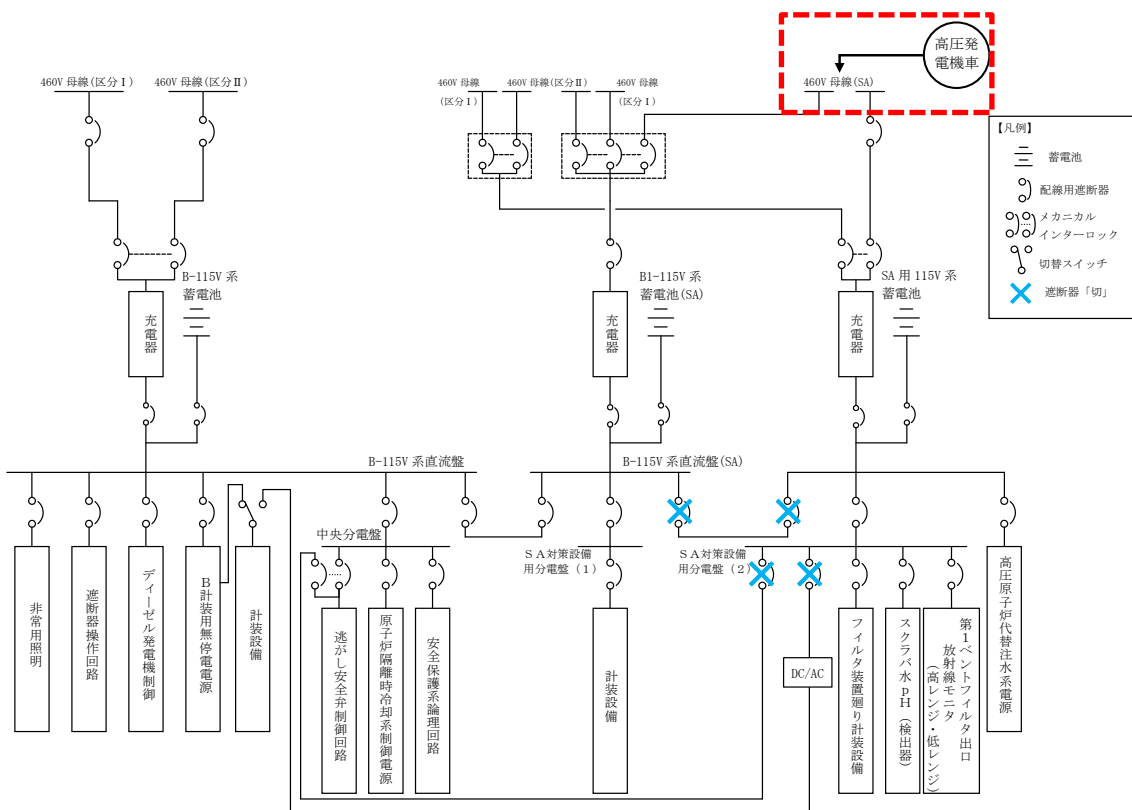


図6 可搬型直流電源設備による電源給電範囲

表4 可搬型直流電源設備による負荷一覧

	負荷	負荷容量 (交流 (kW))	備考
1	ベント弁 (第1弁: MV217-4)	—	
2	ベント弁 (第1弁: MV217-5)	—	
3	ベント弁 (第2弁: MV217-18)	—	
4	ベント弁 (第2弁: MV217-23)	—	
5	ベント弁 (第3弁: MV226-13)	—	
6	ドレン移送ポンプ	—	
7	格納槽排水ポンプ	—	
8	ベントフィルタ1次ドレン弁	—	
9	循環ライン止め弁	—	
10	ドレン移送ライン連絡弁	—	
11	薬液貯蔵タンク出口弁	—	
12	フィルタ装置廻り計装設備	約1A	
13	第1ベントフィルタ出口水素濃度	—	
14	スクラバ水pH	—	サンプリングポンプ含む
15	第1ベントフィルタ出口放射線モニタ (高レンジ・低レンジ)	約2A	
合 計		約3A	約90Ah ^{※1}

※1 可搬型直流電源設備の設備容量は、常設充電器の定格出力200Aとし、負荷容量3Aに対して必要十分な容量とする。

(3) 可搬型代替電源設備のアクセス性について

可搬型代替電源設備である高圧発電機車のアクセスルートについては、想定される重大事故等が発生した場合においても、保管場所から使用箇所まで複数のアクセスルートを確保している。

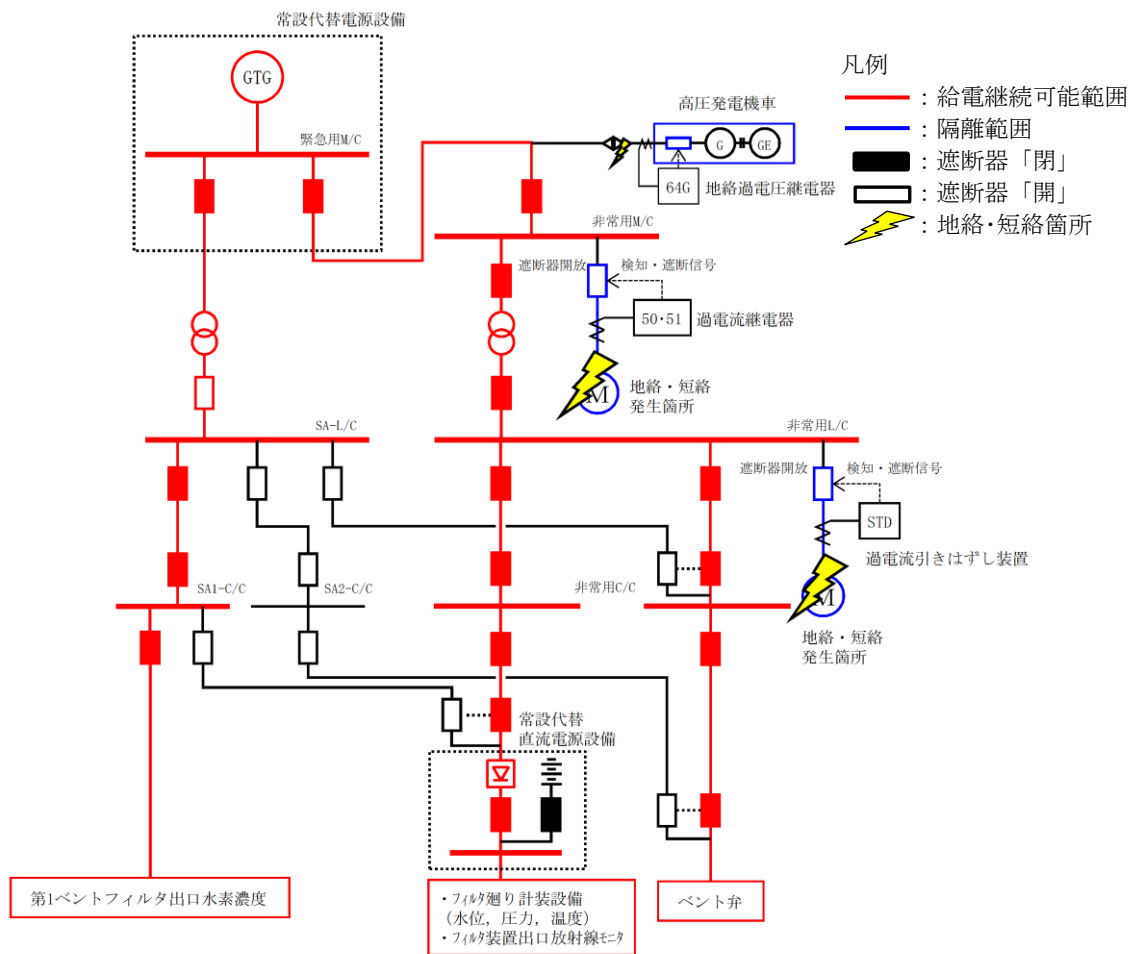
常設設備との接続部についても、共通要因によって接続することができなくなることを防止するため、原子炉建物西側並びに南側の異なる場所に分散配置している。

(4) 電気設備の地絡・短絡対策

電気設備には、ベントに必要な隔離弁及び計測設備とは別の負荷にて地絡又は短絡が発生した場合にも、その影響がベントに必要な隔離弁及び計測設備へ波及しないように保護継電器を設け、地絡又は短絡を検知して電源系統より故障点を隔離するよう設計する。(図7)

高压発電機車を使用している場合に、短絡・地絡や過負荷による過電流が発生した時は、高压発電機車に設置している地絡過電圧継電器により検知・遮断する設計としている。

保護継電器は、接続先である所内電気設備と保護協調を図った設計としている。



電気設備における
事故点隔離の流れ

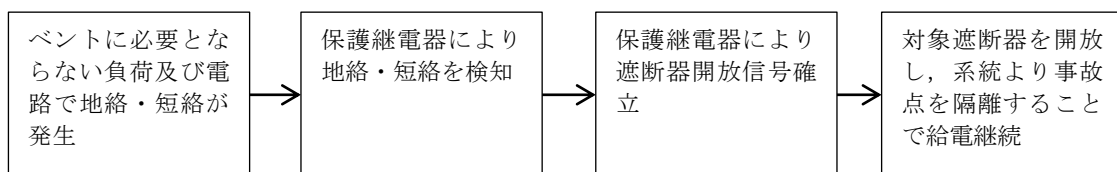


図7 電源設備の地絡，短絡対策

(5) 常設設備との接続部の浸水対策について

発電所は防波壁等を設置することで、基準津波に対して防護されており、基準津波が敷地に遡上して、高圧発電機車の保管場所及び接続口が浸水することはない。

なお、接続口は屋外盤に収納されており、ケーブル接続時も接続口へ雨水等の被水はない設計としている。

窒素供給装置の容量について

可搬式窒素供給装置の窒素容量は、下記①②を考慮して設定している。

- ① 残留熱代替除去系又は残留熱除去系による原子炉注水及び格納容器除熱を実施した場合、可搬式窒素供給装置を用いて格納容器内へ窒素を注入し、酸素濃度を5%（水素を燃焼させる下限濃度）未満に維持
- ② ベント停止後の格納容器フィルタベント系における水素滞留防止のため、窒素の供給を行い、格納容器フィルタベント系の系統内の水素濃度を4%（水素の可燃限界温度）未満あるいは酸素濃度を5%（水素を燃焼させる下限濃度）未満に維持

可搬式窒素供給装置の主要な仕様を表1に示す。

表1 可搬式窒素供給装置の主要仕様

窒素容量	約100 m ³ /h[normal]
窒素純度	約99.9vol%
窒素供給圧力	0.6MPa以上

以下に、可搬式窒素供給装置の窒素供給量の設定について示す。

(1) 格納容器における可搬式窒素供給装置の容量

可搬式窒素供給装置は、炉心の著しい損傷が発生した場合において、水の放射線分解によって発生する酸素の濃度上昇を抑制可能な設計とし、残留熱代替除去系又は残留熱除去系による除熱を開始した時点で原子炉格納容器内への窒素供給を実施する。

有効性評価シナリオ「水素燃焼」において、設計基準事故等対処設備である可燃性ガス濃度制御系の性能評価で使用しているG値を採用した場合のドライウエル及びサプレッション・チェンバの気相濃度の推移を図1及び図2に示す。事象発生12時間後にドライウエルへの窒素供給を開始し、100 m³/h[normal]にて窒素供給を実施する。事象発生約85時間後にドライウエルの酸素濃度がドライ条件で4.4vol%にと達すれば、格納容器フィルタベント系により原子炉格納容器内の水素及び酸素を排出することによって、原子炉格納容器内の酸素濃度は低下し、事象発生から168時間後においても、原子炉格納容器の酸素濃度が可燃限界である5.0vol%に到達することはない。

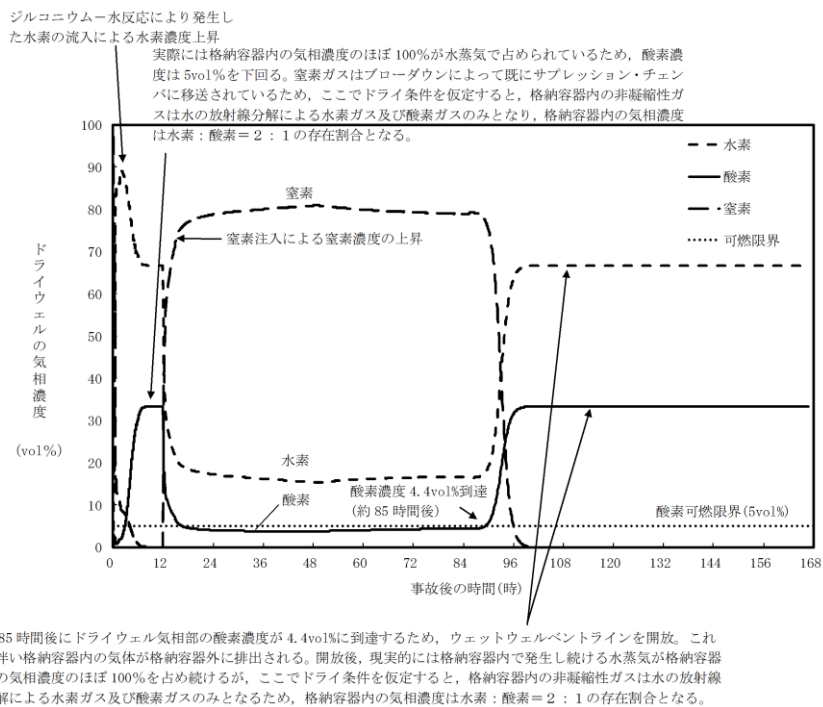


図1 「水素燃焼」において可燃性ガス濃度制御系の性能評価で使用しているG値を採用した場合のドライウエルの気相濃度の推移（ドライ条件）

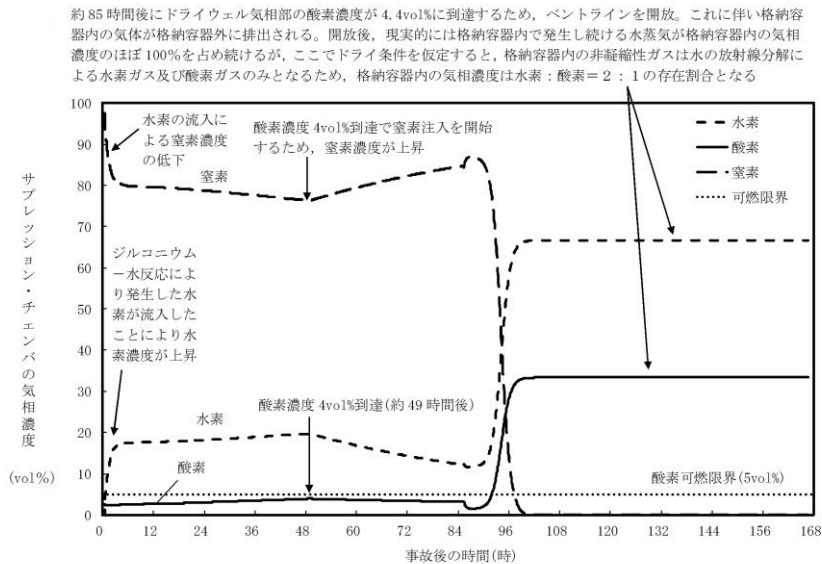


図2 「水素燃焼」において可燃性ガス濃度制御系の性能評価で使用しているG値を採用した場合のサプレッション・チェンバの気相濃度の推移（ドライ条件）

(2) 格納容器フィルタベント系における可搬式窒素供給装置の容量

可搬式窒素供給装置の容量は、格納容器過圧・過温破損シーケンス（冷却材喪失（大破断LOCA）＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失）における格納容器内の水素発生量に対して、系統内の水素濃度を可燃限界である4%未満に希釈できる十分な窒素供給量とするよう設定している。

計算条件を以下に示す。

- ・水素発生量は事象発生7日後を想定し、約1.3 m³/h[normal]とする。
- ・酸素発生量は事象発生7日後を想定し、約0.65 m³/h[normal]とする。

$$\begin{aligned} \text{必要窒素供給量} &= (\text{水素発生量} - \text{水素発生量} \times 0.04 - \text{酸素発生量} \times 0.04) / 0.04 \\ &= (1.3 - 1.3 \times 0.04 - 0.65 \times 0.04) / 0.04 \\ &= 30.6 \quad (\text{m}^3/\text{h}[\text{normal}]) \end{aligned}$$

可搬式窒素供給装置の容量は、上記の必要窒素供給量に余裕を見込み、100 m³/h[normal]と設定している。容量設定においてはベントガスの蒸気発生量を考慮していないため、十分保守的な設定である。

なお、系統内の全空間容積は約202 m³であり、窒素供給量100 m³/h[normal]で約7時間通気することで、系統内の酸素濃度を5%から1%まで低下させることが可能である。

エアロゾルの密度の変化が慣性衝突効果に与える影響について

Framatome 社（旧 AREVA 社）製のフィルタ装置は、ベンチュリスクラバと金属フィルタを組み合わせるエアロゾルを捕集するが、このうちベンチュリスクラバは、慣性衝突効果を利用してエアロゾルを捕集することから、エアロゾルの密度によって、除去効率への影響があらわれることが考えられる。しかし、重大事故等時に格納容器に発生するエアロゾルの密度の変化に対して、ベンチュリスクラバの除去効率の関係式（参考図書 1）を用いて除去効率に与える影響を評価した結果、エアロゾルの密度の変化（ \square g/cm³）に対する除去効率の変化は小さいと評価できること、また、JAVA 試験で複数の種類のエアロゾル（ \square g/cm³）を用いた試験において除去効率に違いが見られていないことから、Framatome 社（旧 AREVA 社）製のフィルタ装置は重大事故等時に発生するエアロゾルの密度の変化に対して除去効率への影響は小さいと評価できる。

(1) ベンチュリスクラバの除去効率

a. エアロゾル密度と除去効率の関係

ベンチュリスクラバでは、ベンチュリノズルを通過するベントガスとベンチュリノズル内に吸い込んだスクラビング水の液滴の速度差を利用し、慣性衝突効果によってベントガスに含まれるエアロゾルを捕集する。参考図書 1 において、ベンチュリスクラバにおける除去効率は、以下の式によって表される。

$$P_t = \exp\left(-\frac{V^*}{V_g}\right) = \exp\left(-\frac{V^*}{V_L} \frac{Q_L}{Q_g}\right) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V^* = \int_0^T \eta_d |u_d - u_g| A_d dt \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\eta_d = \frac{K^2}{(K+0.7)^2} = \frac{1}{\left(1+0.7/K\right)^2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$K = \frac{2\tau_p |u_d - u_g|}{d_d} = \frac{2C\rho_p d_p^2 |u_d - u_g|}{18\mu d_d} \quad \dots \dots \dots (4)$$

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ここで、

P_t	: 透過率	τ_p	: 緩和時間
V^*	: 液滴通過ガス体積	A_d	: 液滴断面積
V_g	: ガス体積	K	: 慣性パラメータ
V_L	: 液滴体積	C	: すべり補正係数
Q_g	: ガス体積流量	μ	: ガス粘性係数
Q_L	: 液滴体積流量	ρ_p	: エアロゾル密度
η_d	: 捕集効率係数	d_p	: エアロゾル粒径
u_g	: ガス速度	d_d	: 液滴径
u_d	: 液滴速度		

これらから、透過率 P_t (除去係数 DF の逆数) は、慣性パラメータ K によって決まる捕集効率係数 η_d によって影響を受けることが分かる。

(4)式で表される慣性パラメータ K は、曲線運動の特徴を表すストークス数と同義の無次元数であり、その大きさは、エアロゾル密度 ρ_p 、エアロゾル粒径 d_p 、液滴径 d_d 、ガス粘性係数 μ 、液滴・エアロゾル速度差によって決まる。

エアロゾル粒径 d_p が同じ場合でもエアロゾル密度 ρ_p が増加すると、慣性パラメータ K が増加し、除去効率は増加する。

b. 重大事故等時に発生するエアロゾルの密度

格納容器に放出されるエアロゾルの密度は、エアロゾルを構成する化合物の割合によって変化する。NUREG1465 に記載されている割合を用いてエアロゾル密度を計算すると表 1 のとおり g/cm³ となる。

表 1 格納容器の状態とエアロゾルの密度

代表化学形態	炉内内蔵量 (kg)	Gap Release	Early-In-Vessel	Ex-vessel	Late-In-vessel	合計
CsI		0.05	0.25	0.30	0.01	0.61
CsOH		0.05	0.20	0.35	0.01	0.61
TeO ₂ , Sb※		0	0.05	0.25	0.005	0.305
BaO, SrO※		0	0.02	0.1	0	0.12
MoO ₂		0	0.0025	0.0025	0	0.005
CeO ₂		0	0.0005	0.005	0	0.0055
La ₂ O ₃		0	0.0002	0.005	0	0.0052
密度 (g/cm ³)						

※複数の代表化合物を持つグループでは、各化合物の平均値を使用した

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ここで、各化合物の密度は、以下の通り

CsI : 4.5g/cm³ (参考図書 2)

SrO : 5.1g/cm³ (参考図書 2)

CsOH : 3.7g/cm³ (参考図書 4)

MoO : 6.4g/cm³ (参考図書 2)

TeO₂ : 5.7g/cm³ (参考図書 3)

CeO₂ : 7.3g/cm³ (参考図書 2)

Sb : 6.7g/cm³ (参考図書 2)

La₂O₃ : 6.2g/cm³ (参考図書 2)

BaO : 6.0g/cm³ (参考図書 5)

c. エアロゾル密度の変化による影響

エアロゾル密度の変化による捕集効率係数 η_d の変化の計算例を以下に示す。エアロゾル密度は、前記 b. のとおり g/cm³ 付近であるが、ここでは、エアロゾル密度算出に用いた各化合物の密度から、エアロゾル密度 ρ_{p1} が g/cm³ のときの捕集効率係数 η_{d1} と、エアロゾル密度 ρ_{p2} が g/cm³ のときの捕集効率係数 η_{d2} との比を求める。

$$\frac{\eta_{d1}}{\eta_{d2}} = \frac{K_1^2 (K_2 + 0.7)^2}{K_2^2 (K_1 + 0.7)^2} \doteq \text{$$

ここでは、



とした。この結果から、密度の変化 () に対して捕集効率係数変化 (\doteq) は非常に小さく、除去効率に及ぼす影響が非常に小さいと評価できる。

これは、格納容器フィルタベント系の運転範囲において、ベンチュリノズル部における液滴・ガス速度差が大きいことから、重大事故時に想定されるエアロゾル密度の範囲では、速度差が支配的となるためと考えられる。

JAVA 試験では、複数の種類のエアロゾルで試験が行われている。それぞれの化合物の密度を以下に示す。

g/cm³ (参考図書 2)

g/cm³ (参考図書 6)



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



以上より、重大事故時における密度の変化が、フィルタ装置の除去効率に与える影響は小さく、その除去性能の評価は質量中央径（MMD）、空気力学的質量中央径（AMMD）どちらを用いても変わらない。

(2) JAVA 試験での除去効率

a. JAVA 試験の結果

JAVA 試験にて使用した  の質量中央径（MMD）の範囲は  となっているが、これら複数の種類のエアロゾルを用いた試験において除去効率に違いが見られていない。エアロゾルの粒径に対する除去係数を図1に示す。

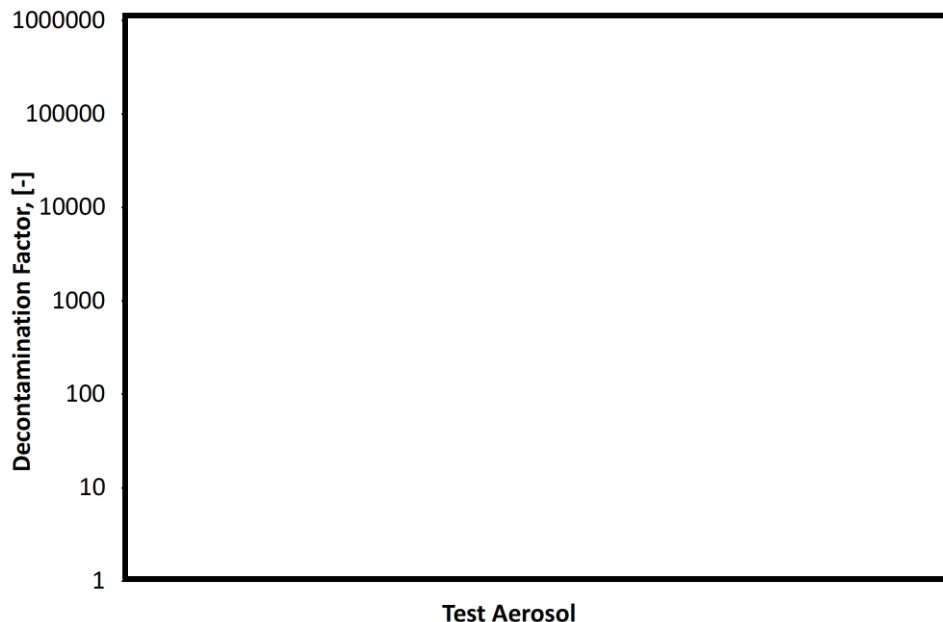


図1 エアロゾルの粒径に対する除去係数

b. 試験用エアロゾルと想定されるエアロゾルの空気力学径の比較

・質量中央径（MMD）

全質量の半分がその粒径よりも小さい粒子によって占められ、残りの半分がその粒径よりも大きい粒子によって占められる関係にある粒径

・空気力学径（AMMD）

その粒子と同じ沈降速度を持つ単位密度（ 1 g/cm^3 ）の球の直径であり、形状と密度について基準化したもの

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

MAAP コードによる評価では MMD を用いることから、以下の式により AMMD を MMD に換算する。

$$\text{AMMD} = \rho_p \text{ MMD}$$

ここで ρ_p はエアロゾルの密度 (g/cm^3) である。

MAAP 解析により得られた MMD と AMMD の関係を表 2 に、JAVA 試験で使
用した試験用エアロゾルの MMD と AMMD の関係を表 3 に示す。この結果、試験
用エアロゾルの MMD (約) と AMMD (約) は、
実機に想定される MMD (約) と AMMD (約)
のいずれについても、よく代表していると言える。

表 2 実機想定エアロゾルの MMD と AMMD

想定エアロゾル	MMD (d_p)	密度 (ρ_p) g/cm^3	AMMD ($d_p \sqrt{\rho_p}$)
	サプレッション・チェンバ からのベント： 約 <input type="text"/>	4.5	
		3.7	
		5.7	

表 3 試験用エアロゾルの MMD と AMMD

試験用エアロゾル	MMD (d_p)	密度 (ρ_p) g/cm^3	AMMD ($d_p \sqrt{\rho_p}$)

《参考図書》

1. OECD/NEA, “STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS” , (2009)
2. 理化学辞典第 4 版
3. 理化学辞典第 4 版増補版
4. Hazardous Chemicals Desk Reference
5. 理化学辞典第 3 版増補版
6. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications, Third Edition.
Edited by P.Kulkarni, P.A. Baron, and K. Willeke (2011)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考1) エアロゾルの粒径と除去係数の関係について

(1) 除去係数と重量及び放射能の関係

除去係数（以下、「DF」という。）は、フィルタに流入した粒子の重量とフィルタを通過した粒子の重量の比で表される。エアロゾルに放射性物質が均一に含まれている場合、DFはフィルタへ流入した粒子の放射能とフィルタを通過した粒子の放射能の比で置き換えることができる。

(2) 粒径分布（個数分布と累積質量分布）

エアロゾルは一般的に、単一粒径ではなく、粒径に対して分布を持つ。粒径に対する個数分布及び累積質量分布の関係を図1に示す。

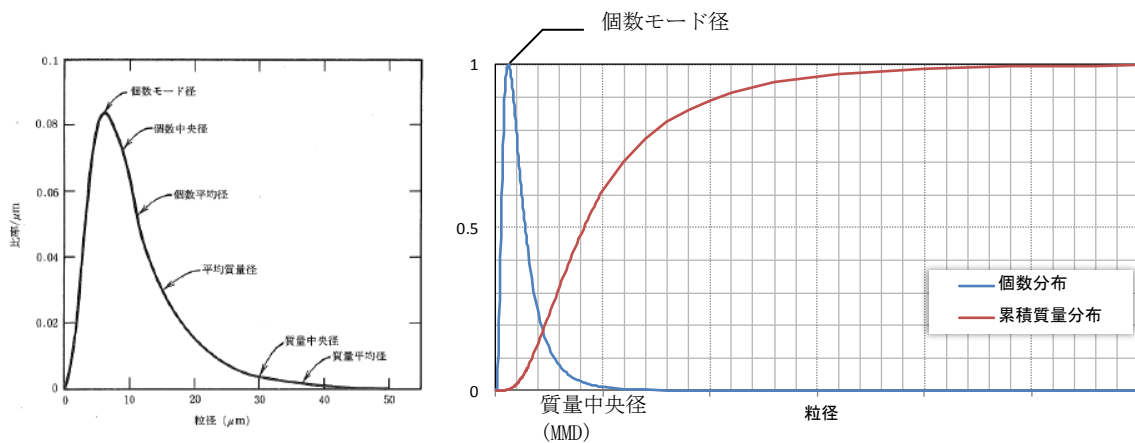


図1 個数分布と累積質量分布

(左図出典：W.C. ハイネズ, エアロゾルテクノロジー, (株)井上書院 (1985))

ここで,

個数モード径	最も存在個数の比率の多い粒径
質量中央径 (MMD)	全質量の半分がその粒径よりも小さい粒子によって占められ、残りの半分がその粒径よりも大きい粒子によって占められる関係にある粒径


を表す。図1のような粒径分布の場合、小さい粒径のエアロゾルの個数は多いが、総重量に占める割合は小さいことが分かる。よって、大きい粒径のエアロゾルに比べて小さい粒径のエアロゾルがDFに与える影響は小さい。

(3) JAVA 試験における除去係数と重量及び放射性物質の関係

ベンチュリスクラバでは、慣性衝突効果を利用しエアロゾルを捕集しており、重大事故等時におけるエアロゾルの密度変化を考慮しても、慣性衝突効果によるDFへの影響は小さいと評価している。また、Framatome社(旧AREVA社)製のフィルタ装置では、慣性衝突効果、さえぎり効果、拡散効果による除去機構によってエアロゾルを捕集するものであり、JAVA試験において、小さい粒径のエアロゾルを含む を使用した場合においても、高い除去効率を発揮することを確認している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考2) 質量中央径 (MMD) と空気力学的質量中央径 (AMMD)

分布を持つエアロゾルの粒径を表す方法として、質量中央径 (MMD) を使用する場合と、空気力学的質量中央径 (AMMD) を使用する場合がありますが、カスケードインパクターのような慣性衝突効果を利用した粒径の測定を行う場合にはAMMDで測定され、のような画像分析を利用した粒径の測定を行う場合にはMMDで測定される。Framatome社(旧AREVA社)製のフィルタは、慣性衝突効果の他に、さえぎり効果、拡散効果を利用したエアロゾルの捕集を行っており、フィルタ装置の除去性能の評価にはMMDを使用している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考3) 想定する事故シナリオについて

粒子状放射性物質の除去性能を確認する上で想定する事故シナリオとして、炉心損傷が発生する「冷却材喪失（大破断LOCA）+ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」を選定する。

1. 事象の概要（格納容器ベント時）

- (1) 大破断LOCAが発生し、格納容器内に冷却材が大量に漏えいする。
- (2) 更に非常用炉心冷却系（以下、ECCSという。）喪失、全交流動力電源喪失（以下、SBOという。）を想定するため、原子炉压力容器への注水ができず炉心損傷に至る。事象発生から30分後に低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉压力容器への注水を開始することで、原子炉压力容器破損は回避される。
- (3) その後、原子炉压力容器への注水及び格納容器へのスプレイを実施するが、事象発生から約32時間後に外部注水量制限値に到達し、格納容器フィルタベント系を用いたベントを実施する。

2. 想定事故シナリオ選定

想定事故シナリオ選定については事故のきっかけとなる起因事象の選定を行い、起因事象に基づく事故シナリオの抽出及び分類を行う。その後、重大事故等対策の有効性評価及び事故シナリオの選定を行う。

(1) 起因事象の選定

プラントに影響を与える事象について内部で発生する事象と外部で発生する事象（地震、津波、その他自然現象）をそれぞれ分析し、事故のきっかけとなる事象（起因事象）について選定する。

プラント内部で発生する事象についてはプラントの外乱となる事象として、従前より許認可解析の対象としてきた事象である運転時の異常な過渡変化（外部電源喪失等）及び設計基準事故（原子炉冷却材喪失等）を選定する。また、原子炉の運転に影響を与える事象として、非常用交流電源母線の故障、原子炉補機冷却系の故障等を選定する。

プラント外部で発生する事象については、地震・津波に加え、地震・津波以外の自然現象の53事象から地域性等を考慮して11事象（洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り・土石流、火山の影響、生物学的事象、森林火災）を選定する。また、設計基準を大幅に超える規模の事象発生を想定した上で、プラントに有意な頻度で影響を与えられられる場合は、考慮すべき起因事象とする。

(2) 起因事象に基づく事故シナリオの抽出及び分類

イベントツリー等により、事故のきっかけとなる事象（起因事象）を出発点に、事象がどのように進展して最終状態に至るかを、安全機能を有する系統の動作の成否を分岐として樹形状に展開し、事故シナリオを漏れなく抽出する。

抽出した事故シナリオを事故進展の特徴によって、表1のとおりグループ別に分類する。

表1 運転中の炉心損傷に係る事故シナリオグループ

運転中の炉心損傷に係る事故シナリオグループ	概要
崩壊熱除去機能喪失	崩壊熱の除去に失敗して炉心損傷に至るグループ
高圧・低圧注水機能喪失	低圧注水に失敗して炉心損傷に至るグループ
高圧注水・減圧機能喪失	高圧注水に失敗して炉心損傷に至るグループ
全交流動力電源喪失	電源を失うことにより炉心損傷に至るグループ
原子炉停止機能喪失	止める機能を喪失して炉心損傷に至るグループ
LOCA時注水機能喪失	LOCA時に注水に失敗して炉心損傷に至るグループ

(3) 重大事故等対策の有効性評価及び事故シナリオの選定

(2)で分類した事故シナリオのうち、出力運転中の原子炉における崩壊熱除去機能喪失、高圧・低圧注水機能喪失、高圧注水・減圧機能喪失、全交流動力電源喪失、原子炉停止機能喪失については、炉心損傷に至らないため、重大事故等対処施設が機能しても炉心損傷を避けられない事故シナリオは、LOCA時注水機能喪失のみとなる。

以上より、炉心損傷が発生するLOCA時注水機能喪失を想定事故シナリオとして選定した。なお、想定事故シナリオにおいてはサプレッション・チェンバの排気ラインを使用した格納容器ベント（以下、W/Wベントという。）を実施した場合と、ドライウエルの排気ラインを使用した格納容器ベント（以下、D/Wベントという。）を実施した場合の両方を想定するものとする。

また、発生するエアロゾルの量や粒径分布の不確かさを考慮しても格納容器フィルタベント系が性能を発揮できることを確認するために、原子炉圧力容器が破損するケース（高圧・低圧注水機能喪失シナリオで更に事象が進展し、炉心損傷及び原子炉圧力容器破損した後にD/Wベントを実施した場合）（※1）についても参考として示す。

※1 高圧・低圧注水機能喪失シナリオを選定した理由

原子炉圧力容器が破損し熔融炉心がペデスタルに落下すると、熔融炉心・コンクリート相互作用によりコンクリートのエアロゾル粒子が大量に生成さ

れ、格納容器ベント時に放出されるエアロゾル量や粒径分布に影響を与える。ここでは、熔融炉心・コンクリート相互作用の観点で厳しくなるシナリオを参考ケースとして選定するものとした。

熔融炉心・コンクリート相互作用の観点からは、ペDESTALに落下する熔融炉心の割合が多くなる原子炉圧力容器が低圧で破損に至るシーケンスが厳しくなる。表1に示す各事故シナリオグループのうち、高圧注水・減圧機能喪失、全交流動力電源喪失シナリオは、高圧の状態が維持されることから、参考ケースから除外した。

崩壊熱除去機能喪失シナリオ及び原子炉停止機能喪失シナリオは、重大事故等対処施設の機能喪失又は機能の遅延を仮定した場合において、格納容器が先行して破損するシナリオであり、格納容器フィルタベント系の性能を確認する上では適切なシナリオではないと考えられるため、参考ケースから除外した。

LOCA時注水機能喪失は、ペDESTALへの原子炉冷却材の流入の可能性があることから、熔融炉心・コンクリート相互作用の観点で厳しい事象ではないと考えられるため、参考ケースから除外した。

以上のことから、格納容器が健全な状態で原子炉圧力容器が低圧で破損に至り、また、ペDESTALへの原子炉冷却材の流入のない高圧・低圧注水機能喪失シナリオを参考ケースとして採用した。

高圧・低圧注水機能喪失シナリオは、重大事故等対処施設が機能すれば炉心損傷に至らず事象が収束するが、ここでは、原子炉圧力容器内の注水に失敗し、さらに熔融炉心・コンクリート相互作用が発生した場合の影響も確認するため、あえて原子炉圧力容器破損前のペDESTALへの水張りも行わない状態を想定する。また、原子炉圧力容器が破損して熔融炉心がペDESTALに落下した後は、ペDESTALへの注水を行った後にD/Wベントを実施するものとする。

なお、本評価では、コリウムシールドがない状態を仮定し、保守的に熔融炉心からプールへの熱流束は 800kW/m^2 相当で一定（圧力依存なし）としている。

(参考4) 発生するエアロゾルの種類について

格納容器ベント実施時には、核分裂生成物（安定核種を含む）やコンクリート、構造材の一部が格納容器フィルタベント系に流入する。これらは格納容器フィルタベント系に流入する際は、希ガスや気体状のよう素を除き、固体（エアロゾル粒子）として存在する。

想定するエアロゾルの種類及び想定事故シナリオ（W/Wベント）時に格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量を表1に示す。また、想定事故シナリオ（D/Wベント）時や、原子炉圧力容器が破損するケースで格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量を表2に示す。

表1 想定するエアロゾルの種類及び想定シナリオ（W/Wベント）時に格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量

核種グループ	各核種グループに対応する主な化学物質例	炉内内蔵量[kg] (安定核種を含む) ^{※1}	格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量 [kg] (安定核種を含む) ^{※2}
希ガス	Xe, Kr		—
CsI	CsI, RbI		約 1.3×10^{-4}
TeO ₂ , Te ₂ ^{※3, ※4}	TeO ₂ , Te ₂		約 1.2×10^{-4}
SrO	SrO		約 4.7×10^{-5}
MoO ₂	MoO ₂ , RuO ₂ , TcO ₂ , RhO ₂		約 4.4×10^{-5}
CsOH	CsOH, RbOH		約 1.9×10^{-3}
BaO	BaO		約 6.7×10^{-5}
La ₂ O ₃	La ₂ O ₃ , Pr ₂ O ₃ , Nd ₂ O ₃ , Sm ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ , NbO ₂ , AmO ₂ , CmO ₂		約 5.6×10^{-6}
CeO ₂	CeO ₂ , NpO ₂ , PuO ₂		約 1.3×10^{-5}
Sb	Sb		約 1.6×10^{-6}
UO ₂	UO ₂		約 1.4×10^{-3}
コンクリート/構造材	-		約 2.1×10^{-5}

※1 炉内内蔵量[kg]は、ORIGENコードを用いて評価した核種ごとの停止時炉内内蔵量に基づき、評価した値

※2 格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量は、炉内内蔵量[kg]と、格納容器フィルタベント系への放出割合(MAAP解析結果をNUREG-1465の知見を用いて補正)から評価した。想定シナリオ(W/Wベント時)ではTe₂及びUO₂の放出割合のMAAP解析結果はゼロであること

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

とから、後述する MAAP 解析の保守性は顕在化しておらず、NUREG-1465 の知見を用いた補正は必ずしも必要ないものと考えられる。しかしながら、ここでは、格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量を保守的に評価するために Te₂ 及び UO₂ の放出割合として MAAP 解析結果(ゼロ)そのものではなく、MAAP 解析結果を NUREG-1465 の知見を用いて補正した放出割合を採用した。

- ※3 表中の Te₂ の炉内内蔵量[kg]は、Te の全量が Te₂ の形態で存在する場合の値に相当する。
- ※4 ここでは TeO₂ と Te₂ の存在比率を考慮せず、TeO₂ と Te₂ の各々が表中の炉内内蔵量[kg]をもつものとして格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質量を評価した (Te の停止時炉内内蔵量を、ORIGEN コードを用いて評価した値よりも大きい値として想定することに対応)。本評価は格納容器フィルタベント系の設備設計に係る評価であることから、このような保守的な評価方法を採用した。なお、放出放射エネルギーの評価に当たっては、より現実的な想定として停止時炉内内蔵量は ORIGEN コードを用いて評価した値そのものを採用している。

表2 想定事故シナリオ (D/Wベント) 時及び原子炉圧力容器が破損するケース時に格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質質量

核種グループ	格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質質量 (安定核種を含む) ^{※1}	
	想定事故シナリオ (冷却材喪失(大破断LOCA) + ECCS 注水機能喪失 + 全 交流動力電源喪失シナリオ) (D/Wベント)	原子炉圧力容器が破損するケ ース(高圧・低圧注水機能喪 失シナリオ)(D/Wベント)
希ガス	—	—
CsI	約 9.7×10^{-2}	約 3.9×10^{-6}
TeO ₂ , Te ₂ ^{※2}	約 2.0×10^{-1}	約 8.1×10^{-5}
SrO	約 7.9×10^{-2}	約 3.1×10^{-5}
MoO ₂	約 7.3×10^{-2}	約 2.9×10^{-5}
CsOH	約 3.2	約 1.3×10^{-3}
BaO	約 1.1×10^{-1}	約 4.4×10^{-5}
La ₂ O ₃	約 9.4×10^{-3}	約 3.7×10^{-6}
CeO ₂	約 2.1×10^{-2}	約 8.3×10^{-6}
Sb	約 2.7×10^{-3}	約 1.1×10^{-6}
UO ₂	約 2.3	約 9.1×10^{-4}
コンクリート/構造 材	約 1.2×10^{-2}	約 3.9×10^{-7}

- ※1 格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質質量は、炉内内蔵量[kg]と、格納容器フィルタベント系への放出割合 (MAAP 解析結果を NUREG-1465 の知見を用いて補正) から評価した。

想定シナリオ(W/W ベント時)では Te_2 及び UO_2 の放出割合の MAAP 解析結果はゼロであることから、後述する MAAP 解析の保守性は顕在化しておらず、NUREG-1465 の知見を用いた補正は必ずしも必要ないものと考えられる。しかしながら、ここでは、格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質を保守的に評価するために Te_2 及び UO_2 の放出割合として MAAP 解析結果(ゼロ)そのものではなく、MAAP 解析結果を NUREG-1465 の知見を用いて補正した放出割合を採用した。

※2 ここでは TeO_2 と Te_2 の存在比率を考慮せず、 TeO_2 と Te_2 の各々が表中の炉内内蔵量[kg]をもつものとして格納容器フィルタベント系に流入する粒子状物質を評価した(Te の停止時炉内内蔵量を、ORIGEN コードを用いて評価した値よりも大きい値として想定することに対応)。本評価は格納容器フィルタベント系の設備設計に係る評価であることから、このような保守的な評価方法を採用した。なお、放出放射エネルギーの評価に当たっては、より現実的な想定として停止時炉内内蔵量は ORIGEN コードを用いて評価した値そのものを採用している。

a. 炉心状態の想定

格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾルを評価する際は、炉心状態として平衡炉心(サイクル末期)を想定している。

以下の(a)、(b)に示す通り、平衡炉心(サイクル末期)を想定して格納容器フィルタベント系に流入する核分裂生成物量を評価することで、その他の炉心状態を想定した場合の流入量を包絡することができる。

このことから、格納容器フィルタベント系に流入する核分裂生成物量の評価を行う際、炉心状態として平衡炉心(サイクル末期)を想定することは適切であると考えられる。

(a) 停止時炉内内蔵量

停止時炉内内蔵量は、平衡炉心の燃焼サイクル末期を想定して評価を実施している。

核分裂生成物(エアロゾル粒子として放出される可能性のある核分裂生成物も含む)の量は、運転が進み燃焼度が大きくなるに従い多くなる。平衡炉心(サイクル末期)の燃焼度はその他の炉心状態(初期装荷炉心や取替炉心)の燃焼度に比べ大きいため、平衡炉心(サイクル末期)の炉内の核分裂生成物内蔵量は、その他の炉心状態の核分裂生成物内蔵量を包絡する値を示す。

(b) 崩壊熱

溶融炉心からの放射性物質の放出割合は崩壊熱が大きいほど多くなり、崩壊熱は核分裂生成物内蔵量が多いほど大きくなる。(a)と同様の理由により、平衡炉心(サイクル末期)の崩壊熱はその他の炉心状態の崩壊熱を包絡する値を示す。このため、平衡炉心(サイクル末期)を想定した場合の、溶融炉心からの放射性物質の放出割合は、他の炉心状態を想定した場

合の放出割合を包絡する値を示す。

b. 評価に用いる放出割合

格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量は、炉内内蔵量[kg]と、格納容器フィルタベント系への放出割合を用いて評価している。

炉内内蔵量 [kg] は、ORIGEN コードを用いて評価した核種ごとの停止時炉内内蔵量に基づき評価しており、放出割合は、MAAP コードと NUREG-1465 の知見を利用し評価している。

MAAP コードでは、格納容器内における振る舞いの違い（揮発のし易さの違い等）を考慮し、放射性物質を複数の MAAP 核種グループに分類しており、格納容器フィルタベント系への放出割合を MAAP 核種グループごとに評価している。

冷却材喪失（大破断 L O C A）+ E C C S 注水機能喪失 + 全交流動力電源喪失シナリオ（W/Wベント）での MAAP 解析による放出割合の評価結果（事故発生から 168 時間後時点）を表 4 に示す。ただし、以下に示すとおり、表 4 の値は格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量の評価に使用していない。

表 4 によると、高揮発性核種（CsI や CsOH）の放出割合（ 10^{-6} オーダー）と比べ、中・低揮発性核種の放出割合が極めて大きい（ 10^{-5} オーダー）という結果となっている。

一方、TMI 事故や福島第一原子力発電所事故での観測事実から、事故が起こった場合に最も多く放出される粒子状の物質は、よう素やセシウム等の高揮発性の物質であり、中・低揮発性の物質の放出量は高揮発性の物質と比べ少量であることが分かっている。

表 5 は、TMI 事故後に評価された放射性核種の場所ごとの存在量であるが、希ガスや高揮発性核種（セシウムやよう素）が原子炉圧力容器外に全量のうち半分程度放出されている一方で、中・低揮発性核種はほぼ全量が原子炉圧力容器内に保持されているという評価となっている。

さらに、表 6 は、福島第一原子力発電所事故後に実施された発電所敷地内の土壤中放射性核種のサンプリング結果であるが、最も多く検出されているのは高揮発性核種（セシウムやよう素）であり、多くの中・低揮発性核種は不検出という結果となっている。

また、燃料からの核分裂生成物の放出及び移動挙動に関する実験結果より、各元素の放出挙動は以下のように整理されており^{*1}、希ガスが高温で燃料からほぼ全量放出されるのに対し、それ以外の核種の放出挙動は雰囲気条件に依存するとしている。

希ガス：高温にて燃料からほぼ全量放出される。

I, Cs : 高温にて燃料からほぼ全量放出される。放出速度は希ガスと同等。

Sb, Te : 高温にて燃料からほぼ全量放出される。また、被覆管と反応した後、被覆管の酸化に伴い放出される。

Sr, Mo, Ru, Rh, Ba : 雰囲気条件（酸化条件 or 還元条件）に大きな影響を受ける。

Ce, Np, Pu, Y, Zr, Nb : 高温状態でも放出速度は低い。

※1「化学形に着目した破損燃料からの核分裂生成物及びアクチノイドの放出挙動評価のための研究(JAEA-Review2013-034, 2013年12月)」

表4 評価結果は、これらの観測事実及び実験結果と整合が取れていない。これは、冷却材喪失（大破断LOCA）+ ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失シナリオにおいては、MAAP解析が中・低揮発性核種の放出割合を過度に大きく評価しているためであると考えられる。

MAAP解析の持つ保守性としては、炉心が再冠水し熔融炉心の外周部が固化した後でも、熔融炉心表面からの放射性物質の放出評価において熔融プール中心部の温度を参照し放出量を評価していることや、炉心冠水時において熔融炉心上部の水によるスクラビング効果を考慮していないことが挙げられる。MAAPコードの開発元であるEPRIからも、再冠水した炉心からの低揮発性核種の放出についてMAAP解析が保守的な結果を与える場合がある旨の以下の報告がなされている。

- ・炉心が再冠水した場合の低揮発性核種（Ru及びMo）の放出について、低温の熔融燃料表面付近ではなく、熔融燃料の平均温度を基に放出速度を算出しているため、MAAP解析が保守的な結果を与える場合がある。
- ・Moの放出量評価について、NUREG-1465よりもMAAPコードの方が放出量を多く評価する。

なお、高揮発性核種（セシウムやヨウ素）については、炉心熔融初期に炉心外に放出されるため、上述の保守性の影響は受けにくいものと考えられる。

以上のことから、冷却材喪失（大破断LOCA）+ ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失シナリオにおいて中・低揮発性核種の放出割合を評価する際、単にMAAP解析による評価結果を採用すると、放出割合として過度に保守的な結果を与える可能性があるため、他の手法を用いた評価が必要になると考えられる。

そこで、格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量を評価する際は、MAAP解析による放出量の評価結果以外に、海外での規制等にも活用されているNUREG-1465（米国の原子力規制委員会（NRC）で整備されたものであり、米国でもシビアアクシデント時の典型的な例として、中央制御室の居住性等の様々な評価で使用されている）の知見を利用するものとした。このことにより、

TMI 事故や福島第一原子力発電所事故の実態により見合った評価が可能となる。

なお、事故シーケンス「冷却材喪失（大破断 L O C A）+ E C C S 注水機能喪失 + 全交流動力電源喪失」において、原子炉注水機能が使用できないものと仮定した場合における、炉心損傷開始から、原子炉圧力容器が破損するまでの MAAP 解析事象進展（格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量評価における想定事故シナリオでは、当該事故シーケンスにおいて原子炉注水機能を使用することにより原子炉圧力容器破損には至らない）と NUREG-1465 の想定と比較は表 3 のとおりであり、NUREG-1465 の想定と MAAP 解析の事象進展に大きな差はなく、本評価において NUREG-1465 の知見は使用可能と判断した。

NUREG-1465 の知見を利用した場合の放出割合の評価結果を表 7 に示す。

表 3 MAAP 解析事象進展と NUREG-1465 の想定と比較

	燃料被覆管の損傷が開始し、ギャップから放射性物質が放出される期間	炉心溶融が開始し、溶融燃料が原子炉圧力容器破損するまでの期間
MAAP	約 5 分～約 28 分※ ¹	約 28 分～約 3.3 時間※ ²
NUREG-1465	～30 分	30 分～2 時間

※¹ 炉心損傷開始（燃料被覆管温度 1000K）～炉心溶融開始（燃料被覆管温度 2500K）

※² 原子炉注水機能が使用できないものと仮定した場合における原子炉圧力容器破損時間

各 MAAP 核種グループの放出割合の具体的な評価手法は以下に示す通り。

(a) 希ガスグループ、CsI グループ、CsOH グループ

希ガスを含めた高揮発性の核種グループについては、MAAP 解析の結果得られた放出割合を採用する。

なお、Cs の放出割合は、CsI グループと CsOH グループの放出割合※¹※²、及び、I 元素と Cs 元素の停止時炉内内蔵量より、以下の式を用いて評価する（詳細は別紙 50 参照）。

$$F_{Cs}(T) = F_{CsOH}(T) + M_I / M_{Cs} \times W_{Cs} / W_I \times (F_{CsI}(T) - F_{CsOH}(T))$$

ここで、

$F_{Cs}(T)$: 時刻 T におけるセシウムの放出割合

$F_{CsOH}(T)$: 時刻 T における CsOH グループの放出割合

$F_{CsI}(T)$: 時刻 T における CsI グループの放出割合

M_I : I 元素の停止時炉内内蔵量

M_{Cs} : Cs 元素の停止時炉内内蔵量

W_I : I の原子量 W_{Cs} : Cs の原子量

※1 MAAP コードでは化学的・物理的性質を考慮し核種をグループ分けしており、各グループの放出割合は、当該グループの停止時炉内内蔵量と放出重量の比をとることで評価している。

※2 各核種グループの停止時炉内内蔵量は以下の手順により評価している。

- ① ORIGEN コードにより核種ごとの初期重量を評価
- ② ①の結果をもとに、同位体の重量を足し合わせ、各元素の重量を評価する。
- ③ ②の結果を MAAP コードにインプットし、MAAP コードにて、各元素の化合物の重量を評価する。
- ④ 各化合物は表 1 に示す核種グループに属するものとして整理している。核種グループの炉内内蔵量は、当該の核種グループに属する化合物の炉内内蔵量の和として評価している。

(b) それ以外の核種グループ

中・低揮発性の核種グループについては、MAAP 解析の結果得られた放出割合は採用せず、MAAP 解析の結果から得られた Cs の放出割合と、希ガスグループの放出割合、及び、NUREG-1465 の知見を利用し放出割合を評価する。

ここで、放出割合の経時的な振る舞いは希ガスと同一（※1）とし、Cs の放出割合に対する当該核種グループの放出割合の比率は、168 時間経過時点において、NUREG-1465 で得られた比率に等しいとして、以下の評価式に基づき評価した。表 8 及び表 9 に、NUREG-1465 で評価された格納容器内への放出割合を示す。

$$F_i(T) = F_{\text{noble gass}}(T) \times \gamma_i / Y_{\text{Cs}} \times F_{\text{Cs}}(168\text{hr}) / F_{\text{noble gass}}(168\text{hr})$$

$F_i(T)$: 時刻 T における i 番目の MAAP 核種グループの放出割合

$F_{\text{noble gass}}(T)$: 時刻 T における希ガスグループの放出割合

γ_i : NUREG-1465 における i 番目の MAAP 核種グループに相当する核種グループの格納容器への放出割合

γ_{Cs} : NUREG-1465 における Cs に相当する核種グループの格納容器への放出割合

※1 中・低揮発性の核種グループは、事故初期の燃料が高温となっているとき以外は殆ど燃料外に放出されないものと考えられる。そのため、ベント後の燃料からの追加放出はほとんど無く、事故初期に格納容器内に放出され、格納容器気相部に浮遊しているものだけが大気中に放出され得ると考えられる。

ベントに伴い低揮発性核種は格納容器気相部からベントラインに流入するが、その流入の仕方、すなわち放出割合の経時的な振る舞いは、同じく格納容器気相部に浮遊しており壁面等からの追加放出がない希ガスの放出割合の振る舞いに近いと考えられる。

以上のことから、中・低揮発性の核種グループの「各時刻における放出割合」は、「各

時刻における希ガスグループの放出割合」に比例するものとした。

表4 MAAP解析による放出割合の評価結果
(エアロゾル量の評価に使用しない)

核種グループ	格納容器フィルタベント系への放出割合[-] (事故発生から168時間後時点。格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量の評価には使用しない)
希ガス	約 9.0×10^{-1}
CsI	約 3.5×10^{-6}
TeO ₂	約 1.3×10^{-8}
SrO	約 1.6×10^{-4}
MoO ₂	約 9.5×10^{-7}
CsOH	約 6.5×10^{-6}
BaO	約 7.6×10^{-5}
La ₂ O ₃	約 2.1×10^{-5}
CeO ₂	約 2.5×10^{-5}
Sb	約 3.0×10^{-6}
Te ₂	0
UO ₂	0
Cs ^{※1}	約 6.3×10^{-6}

※1 CsIグループとCsOHグループの放出割合から評価(評価式は別紙50参照)

表5 TMI事故後に評価された放射性核種の場所ごとの存在量

核種	(単位：%)								
	低揮発性			中揮発性			高揮発性		
	¹⁴⁴ Ce	¹⁴⁴ Eu	¹⁵⁴ Eu	⁹⁰ Sr	¹⁰⁶ Ru	¹²⁵ Sb	¹³⁷ Cs	¹³⁰ I	⁸¹ Kr
原子炉建屋									
原子炉容器	105.4	122.7	109.5	89.7	93.2	117.2	40.1	42	30
原子炉冷却系	—	—	—	1	—	0.2	3	1	—
地階水、気相タンク類	0.01	—	—	2.1	0.5	0.7	47	(47)†	54
補助建屋	—	—	—	0.1	—	0.7	5	7	—
合計	105	122	110	93	94	119	95	97	85

† 広範囲のI濃度測定値と多量のデブリ(おもに地階水沈殿物)のため、ここでの保持量は炉心インベントリを大きく上回る分析結果となってしまう。したがって、ここに保持されたIのインベントリはCsと同等であると考える。

出典：TMI-2号機の調査研究成果(渡会偵祐, 井上康, 榎田藤夫日本原子力学会誌 Vol. 32, No. 4 (1990))

表6 福島第一原子力発電所事故後に検出された土壌中の放射性核種

(単位: Bq/kg・乾土)

試料採取場所	【定点①】*1 グラント (西北西約500m)*2			【定点②】*1 野島の森 (西約500m)*2			【定点③】*1 産廃処分場近傍 (南南西約500m)*2		④5.6号機サービ スビル新 (北約1,000m)*2	⑤臨体廃棄物貯 蔵庫12棟近傍 (北約500m)*2	⑥南南西 約500m*2	⑦南南西 約750m*2	⑧南南西 約1,000m*2
	試料採取日	3/21	3/25	3/28	3/25	3/28	3/25	3/28	3/25	3/22	3/22	3/22	3/22
分析機関	JAEA	JAEA	日本分析 センター*3	JAEA	日本分析 センター*3	JAEA	日本分析 センター*3	JAEA	JAEA	JAEA	JAEA	JAEA	JAEA
測定日	3/24	3/28	3/30	3/28	3/30	3/28	3/30	3/28	3/28	3/25	3/25	3/24	3/25
核種	I-131(約8日)	5.8E+06	5.7E+06	3.8E+06	3.0E+06	3.9E+04	1.2E+07	2.6E+06	4.6E+05	3.1E+06	7.9E+05	2.2E+06	5.4E+06
	I-132(約2時間)	*4	*4	2.3E+05	*4	1.3E+02	*4	1.5E+05	*4	*4	*4	*4	*4
	Cs-134(約2年)	3.4E+05	4.9E+05	5.3E+05	7.7E+04	3.2E+02	3.5E+06	9.7E+05	6.8E+04	9.5E+05	8.7E+03	1.7E+04	1.6E+05
	Cs-136(約13日)	7.2E+04	6.1E+04	3.3E+04	1.0E+04	2.8E+01	4.6E+05	6.9E+04	8.6E+03	1.1E+05	1.9E+03	2.2E+03	2.5E+04
	Cs-137(約30年)	3.4E+05	4.8E+05	5.1E+05	7.8E+04	3.2E+02	3.5E+06	9.3E+05	6.7E+04	1.0E+06	2.0E+04	1.6E+04	1.6E+05
	Te-129m(約34日)	2.5E+05	2.9E+05	8.5E+05	5.3E+04	ND	2.7E+06	6.0E+05	2.8E+04	8.9E+05	9.5E+03	1.9E+04	1.7E+05
	Te-132(約3日)	6.1E+05	3.4E+05	3.0E+05	6.5E+04	1.4E+02	3.1E+06	2.0E+05	3.2E+04	1.9E+06	2.1E+04	3.9E+04	3.8E+05
	Ba-140(約13日)	1.3E+04	1.5E+04	ND	2.5E+03	ND	ND	ND	ND	8.0E+04	ND	ND	ND
	Nb-95(約35日)	1.7E+03	2.4E+03	ND	ND	ND	5.3E+03	ND	ND	8.1E+03	ND	ND	7.9E+02
	Ru-106(約370日)	5.3E+04	ND	ND	6.4E+03	ND	2.7E+05	ND	ND	6.8E+04	1.9E+03	ND	3.2E+04
	Mo-99(約68時間)	2.1E+04	ND	ND	ND	ND	6.6E+04	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Tc-99m(約6時間)	2.3E+04	2.0E+04	ND	ND	ND	4.5E+04	ND	1.8E+03	2.3E+04	ND	ND	8.3E+03
	La-140(約2日)	3.3E+04	3.7E+04	ND	2.3E+03	ND	9.7E+04	ND	2.5E+03	2.1E+05	4.2E+02	6.2E+02	7.8E+03
	Be-7(約53日)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.2E+04	ND	ND	ND
	Ag-110m(約250日)	1.1E+03	2.6E+03	ND	ND	ND	ND	ND	1.7E+02	1.8E+04	ND	ND	ND

出典：東京電力 HP (<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11040609-j.html>)

表7 NUREG-1465 の知見を用いた補正後の放出割合
(格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量を評価する際に使用)

核種グループ	格納容器フィルタベント系への放出割合[-] (事故発生から168時間後時点)
希ガス	約 9.0×10^{-1}
CsI	約 3.5×10^{-6}
TeO ₂	約 1.3×10^{-6}
SrO	約 5.0×10^{-7}
MoO ₂	約 6.3×10^{-8}
CsOH	約 6.5×10^{-6}
BaO	約 5.0×10^{-7}
La ₂ O ₃	約 5.0×10^{-9}
CeO ₂	約 1.3×10^{-8}
Sb	約 1.3×10^{-6}
Te ₂	約 1.3×10^{-8}
UO ₂	約 1.3×10^{-8}
Cs ^{※1}	約 6.3×10^{-6}

※1 CsI グループと CsOH グループの放出割合から評価 (評価式は別紙 50 参照)

表 8 NUREG-1465 での格納容器内への放出割合

核種グループ	格納容器への放出割合※ 1
Cs	0.25
TeO ₂ , Sb, Te ₂	0.05
SrO, BaO	0.02
MoO ₂	0.0025
CeO ₂ , UO ₂	0.0005
La ₂ O ₃	0.0002

※ 1 NUREG-1465 の Table 3.12 「Gap Release」の値と「Early In-Vessel」の値の和を参照（NUREG-1465 では、「Gap Release」、「Early In-Vessel」、「Ex-Vessel」及び「Late In-Vessel」の各事象進展フェーズに対して格納容器内への放出割合を与えている。格納容器フィルタベント系に流入するエアロゾル量評価における想定事故シナリオでは、原子炉圧力容器が健全な状態で事故収束するため、原子炉圧力容器損傷前までの炉心からの放出を想定する「Gap Release」及び「Early In-Vessel」の値の和を用いる。）

表 9 NUREG-1465 (抜粋)

Table 3.8 Revised Radionuclide Groups

Group	Title	Elements in Group
1	Noble gases	Xe, Kr
2	Halogens	I, Br
3	Alkali Metals	Cs, Rb
4	Tellurium group	Te, Sb, Se
5	Barium, strontium	Ba, Sr
6	Noble Metals	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
7	Lanthanides	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
8	Cerium group	Ce, Pu, Np

Table 3.12 BWR Releases Into Containment*

	Gap Release***	Early In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Duration (Hours)	0.5	1.5	3.0	10.0
Noble Gases**	0.05	0.95	0	0
Halogens	0.05	0.25	0.30	0.01
Alkali Metals	0.05	0.20	0.35	0.01
Tellurium group	0	0.05	0.25	0.005
Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Cerium group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

* Values shown are fractions of core inventory.

** See Table 3.8 for a listing of the elements in each group

*** Gap release is 3 percent if long-term fuel cooling is maintained.

JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について

Framatome 社（旧 AREVA 社）製のフィルタ装置は、JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験により、実機使用条件を考慮した性能検証試験を行っており、その結果に基づき装置設計を行っている。実機フィルタ装置については、使用条件において所定の性能が発揮されるように、JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験条件に包絡されるように設計されている。

ACE 試験は、米国 EPRI が中心となって行った ACE シビアアクシデント国際研究計画の中で実施している。

これらの試験について、実機フィルタ装置とのスケール適用性について以下に示す。

(1) JAVA 試験の概要

JAVA 試験は、Framatome 社（旧 AREVA 社）により、ドイツのカールシュタインにある大規模試験施設（以下、「JAVA 試験施設」という。）にて実施された。JAVA 試験では、実機の想定事象における種々のパラメータ（圧力・温度・ガス流量等の熱水力条件、エアロゾル粒径等のエアロゾル条件）について試験を行うことにより、フィルタ装置の使用条件において所定の性能が発揮されることを確認している。

図 1 に実機フィルタ装置と試験フィルタ装置の比較を示す。試験フィルタ装置は、高さ約 m、直径約 m の容器の中に、実機と同形状のベンチュリノズル（），及び実機と同構造の金属フィルタを内蔵している。

また、これら試験のフィルタ装置に流入したベントガスは、ベンチュリスクラバ、気相部、金属フィルタ、流量制限オリフィスの順に通過し、装置外部へ放出される経路となっており、実機と同じ順に各部を通過する。

(2) JAVA PLUS 試験の概要

JAVA PLUS 試験は、実規模を想定した有機よう素の除去性能を確認するため、Framatome 社（旧 AREVA 社）により、JAVA 試験施設を改造した施設にて実施された。

JAVA PLUS 試験では、実機と同仕様の銀ゼオライトを充填したフィルタを設置し、有機よう素の除去性能試験を実施している。

フィルタ装置に流入したベントガスは、ベンチュリスクラバ、気相部、金属フィルタ、流量制限オリフィス、銀ゼオライトフィルタの順に通過し、装置外部へ放出される経路となっており、実機と同じ順に各部を通過する。

(3) ACE 試験の概要

ACE 試験は、EPRI が中心となって行った ACE シビアアクシデント国際研究計画の中でエアロゾル及び無機よう素の除去性能検証試験が実施された。

図2に実機フィルタ装置と試験フィルタ装置の比較を示す。

試験フィルタ装置は、高さ m、直径 m の容器の中に、実機と同形状のベンチュリノズル () と、実機と同構造 (同一金属メッシュ構造、同一充填率) の金属フィルタを内蔵している。

なお、ACE 試験の試験装置の詳細な仕様、試験条件及び試験結果は、EPRI 及び Framatome 社 (旧 AREVA 社) の知的財産 (Intellectual Property) として開示が不可能であることから、フィルタ装置の設計及び性能検証には使用しない。

(4) スケール性の確認

JAVA 試験、JAVA PLUS 試験のスケール性を確認することで、実機への適用性を確認する。図2に実機と JAVA 試験装置 (JAVA PLUS 試験でも同一の容器を使用) 及び参考に ACE 試験装置の主要寸法の比較を示す。

試験フィルタ装置へ流入したガスは、装置の下端に設置されたベンチュリノズルを経由し、上部に設置された金属フィルタ、その後段に設置された銀ゼオライトフィルタ (JAVA PLUS 試験のみ) へ流れる構成であり、実機と同様の構成となる。

フィルタ装置の性能に影響を与える可能性のある主要なパラメータとしてガス流速が挙げられるが、ベンチュリノズルのガス流速を試験で確認された範囲内となるように実機のベンチュリノズルの個数を設定していることから、ベンチュリノズルの個数の違いによる影響はない。また、実機の金属フィルタの表面積についても、金属フィルタ内のガス流速を試験で確認された範囲内となるように設定していることから、金属フィルタの表面積の違いによる影響はない。JAVA 試験及び実機における物理パラメータと試験条件を表2、ベンチュリノズル部及び金属フィルタにおけるガス流速に対する除去係数を図3、4に示す。

実機の銀ゼオライトフィルタについては、JAVA PLUS 試験で得られた試験結果に基づき、想定されるよう素量を捕集するためベントガスが適切な滞留時間となるように銀ゼオライトの充填量を設定している。

以上より、試験の実機への適用性は確保できていると考えられる。

表3に JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の実機への適用性について、構成要素別にまとめる。

(5) 評価

以上より、JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験のスケール性については性能に影響する範囲について実機を模擬できていると評価できる。これらの試験は実機の使用条件についても模擬できており、試験結果を用いて実機の性能を評価することが可能であると考ええる。

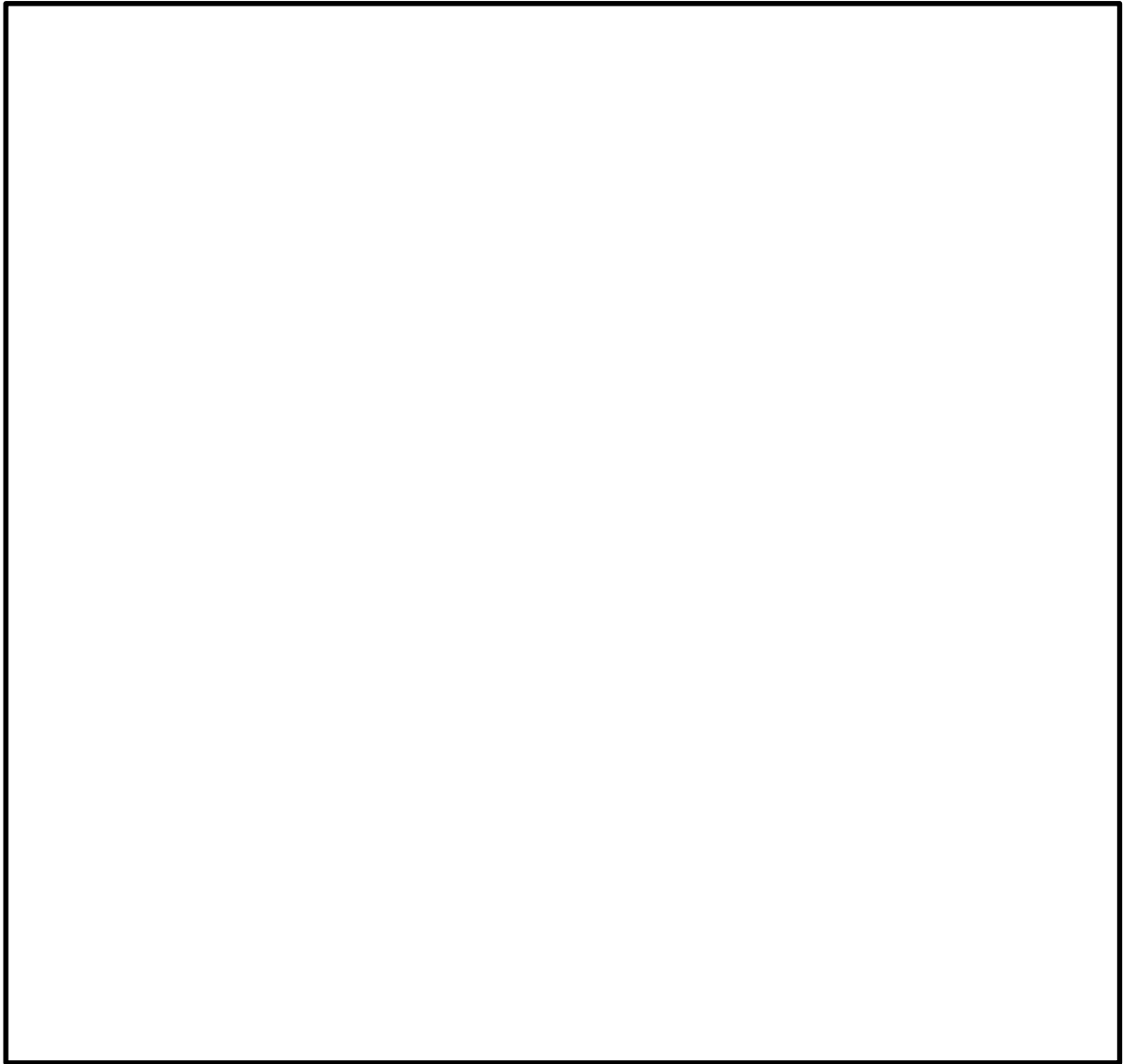


図 1 ACE 試験の設備概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 1 ACE 試験の試験条件及び結果

PROJECT	YEARS	Materials tested	Conditions Tested			Measured retention Efficiency %
			Pressure [bar abs]	Temperature [°C]	Gas composition % steam	
ACE	1989-1990	Cs	1.4	145	42	99.9999
		Mn	1.4	145	42	99.9997
		Total iodine (particles and gaseous)	1.4	145	42	99.9997
		DOP	1.2-1.7	ambient	0	99.978 - 99.992

出典：OECD/NEA, “Status Report on Filtered Containment Venting”, (2014)

実機

JAVA試験

ACE試験

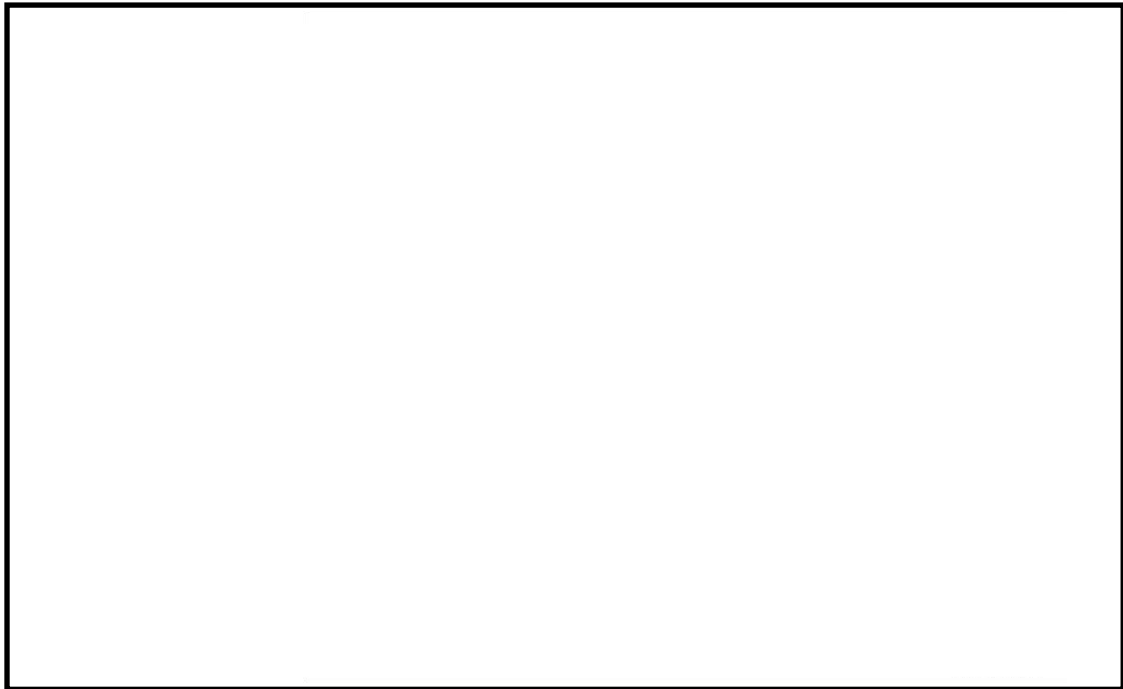


図 2 実機フィルタ装置と試験フィルタ装置の比較

表 2 JAVA 試験及び実機における運転範囲

項目	JAVA 試験	実機運転範囲
ベンチュリノズル部ガス流速		
金属フィルタ部ガス流速		

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

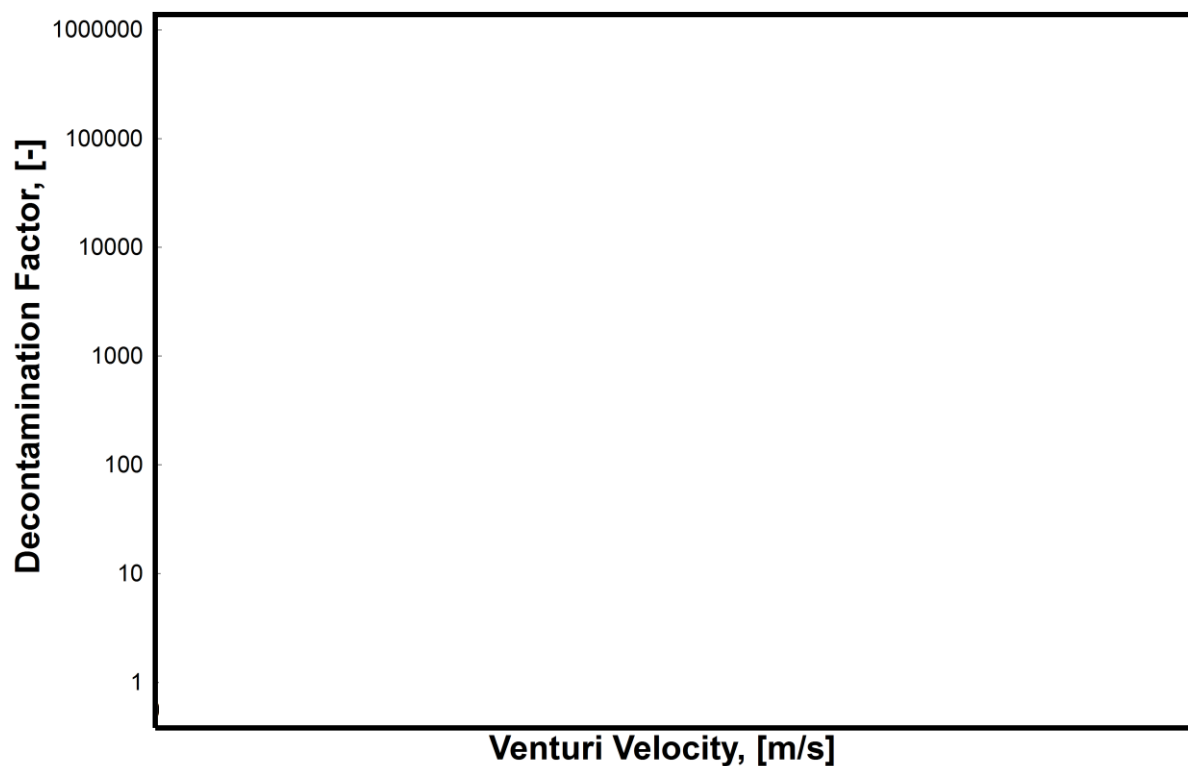


図3 ベンチュリノズル部におけるガス流速に対する除去係数

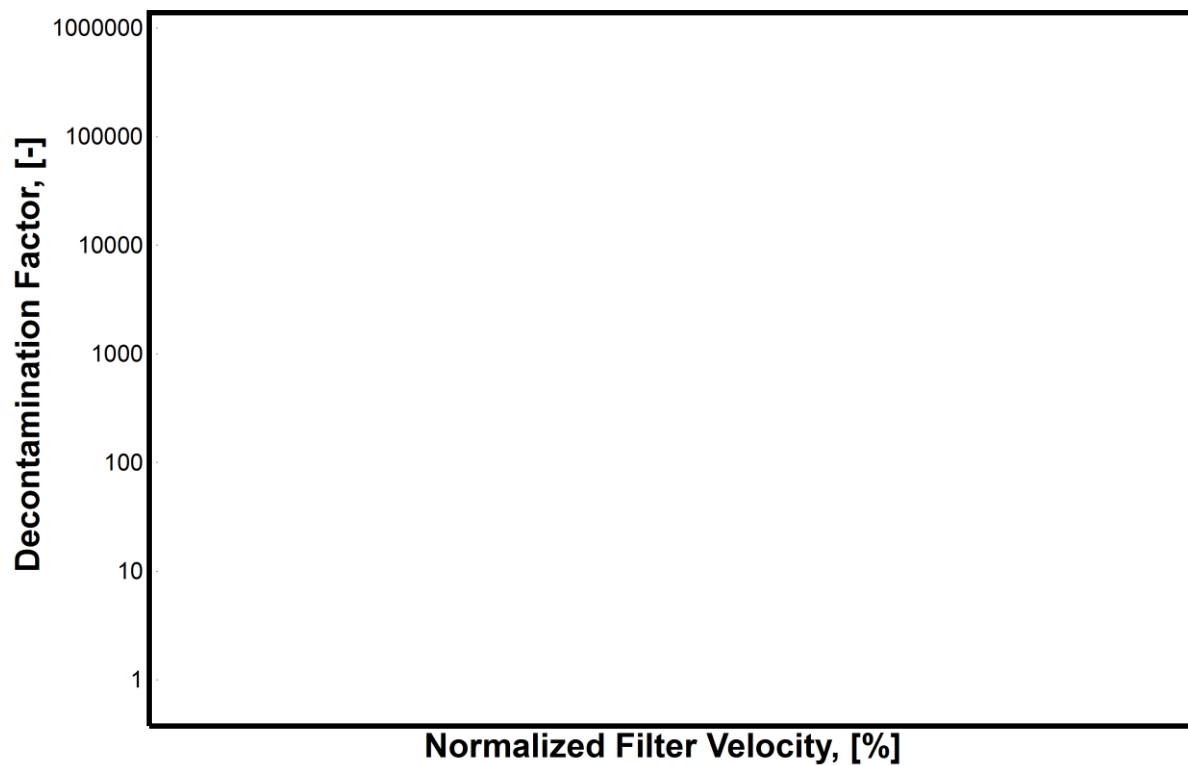


図4 金属フィルタにおけるガス流速に対する除去係数

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表3 実機に対する JAVA 及び JAVA PLUS 試験装置の適用性のまとめ

構成要素	相違			適用性	
	有無	JAVA (PLUS)	実機		
全体構成 (基数を含む)	無	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 試験フィルタ装置へ流入したガスは、ベンチュリノズルを経由し、金属フィルタ、後段に設置された銀ゼオライトフィルタ (JAVA PLUS 試験のみ) へ流れる構成であり、実機と同様の構成である。 試験装置は、実機と同様に、銀ゼオライトフィルタがスクラバ容器の外に設置されている。 	
	有	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 実機では、同一のスクラバ容器を4基並列に設置するが、ベントガスは均等に分配されるよう設計しているため、分離設置による影響はない。 	
スクラバ容器	高さ	無	約 <input type="text"/> m	約 <input type="text"/> m	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置と実機は、同じ高さの容器を使用している。
	断面積	有	約 <input type="text"/> m ² 又は 約 <input type="text"/> m ²	約 <input type="text"/> m ²	<ul style="list-style-type: none"> ベンチュリノズル部においてエアロゾル及び無機よう素の大部分を捕集するため、断面積の違いによる影響は小さい。なお、ベンチュリノズル1個あたりの断面積は、実機が約 <input type="text"/> m²、JAVA 試験が約 <input type="text"/> m² (<input type="text"/>) 又は約 <input type="text"/> m² (<input type="text"/>) である。
ベンチュリノズル	構造	無	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置と実機は同一形状 (寸法) のベンチュリノズルを使用している。
	個数	有	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<ul style="list-style-type: none"> 実機のベンチュリノズルの個数は、ベンチュリノズルのガス流速を試験で確認された範囲内となるように設定していることから、ベンチュリノズルの個数の違いによる影響はない。 実機のガス流速は約 <input type="text"/> m/s であり、JAVA 試験のガス流速は <input type="text"/> m/s である。
金属フィルタ	構造	無	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置と実機は同一仕様 (<input type="text"/>) の金属フィルタを使用している。
	表面積	有	約 <input type="text"/> m ² (<input type="text"/>)	約 <input type="text"/> m ² <input type="text"/>	<ul style="list-style-type: none"> 実機の金属フィルタの表面積は、金属フィルタ内のガス流速を試験で確認された範囲内となるように設定していることから、金属フィルタの表面積の違いによる影響はない。
スクラビング水	薬剤	無	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置と実機は同じ薬剤を使用している。なお、実機の pH は、試験で確認された性能を十分発揮できるように、高アルカリに設定している。
	水位	有	※	※	<ul style="list-style-type: none"> 試験では、ベンチュリノズル頂部近傍の水位において所定の性能が発揮できることを確認しているため、水位の違いによる影響はない。
銀ゼオライト容器	吸着剤	無	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 試験装置と実機は、同仕様の吸着材 (銀ゼオライト) を使用している。
	厚さ	有	約 <input type="text"/> mm	約 <input type="text"/> mm	<ul style="list-style-type: none"> ベントガスが適切な滞留時間となるように銀ゼオライトの充てん量を設定している。

※適用性の欄に相違点を記載

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(6) ベンチュリスクラバ及び金属フィルタにおける除去係数

Framatome 社（旧 AREVA 社）製のフィルタ装置（スクラバ容器）は、ベンチュリスクラバ及び金属フィルタを組み合わせることにより、所定の除去性能（DF）を満足するよう設計されている。

スクラバ容器におけるエアロゾルに対する除去効率は、ベンチュリスクラバと金属フィルタを組み合わせた体系で評価を行っており、JAVA 試験結果では、試験を実施した全域にわたって DF1,000 以上を満足していることを確認している。

JAVA 試験ではベンチュリスクラバ単独でのエアロゾル除去性能を確認している試験ケースもあり、実機運転範囲のガス流速において、ベンチュリスクラバ単独でも DF100 以上と評価される。ベンチュリスクラバ単独でのエアロゾル除去性能を表 4 に示す。

ベンチュリスクラバによるエアロゾル除去の主な原理は慣性衝突効果であり、一般的にガス流速が大きい方が除去効率は高く、ガス流速が小さい方が除去効率は低くなることから、実機運転範囲以下のガス流速におけるベンチュリスクラバ単独での除去性能は、実機運転範囲と比較して低下することが見込まれるが、後段の金属フィルタによる除去により、スクラバ容器全体としては試験を実施した全域にわたって要求される DF1,000 以上の除去性能を満足していると考えられる。

表 4 ベンチュリスクラバ単独でのエアロゾル除去性能

--

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考1) 性能検証試験に係る品質保証について

フィルタ装置の放射性物質除去性能は、JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験で用いたベンチュリノズル、金属フィルタ及び銀ゼオライトと同じ仕様・構造のものを、ISO9001 等に適合した品質保証体制を有する Framatome 社 (旧 AREVA 社) において設計・製作することにより、JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験と同じ性能を保証する。

(1) ベンチュリノズル

ベンチュリノズルの性能試験は、発注単位毎に % の抜取にて行われる。試験ノズル 1 個に対して同じ試験を 回実施した上で、大きな差異がないことを確認している。

(2) 金属フィルタ

金属フィルタは製品毎に性能試験を実施している。

(3) 銀ゼオライト

銀ゼオライトの性能試験は、納入品と同一のロット番号のものによる性能試験を実施している。

以上(1)～(3)より、個別の単体性能試験を評価しており、実機についても JAVA 試験、JAVA PLUS 試験結果と同じ性能が出ることを確認している。

➤ Framatome 社 (旧 AREVA 社) 品質保証体制

ベンチュリノズル、金属フィルタ及び銀ゼオライトフィルタを製作する Framatome 社 (旧 AREVA 社) は、フィルタベントシステム納入実績を多数有しており、原子力プラントメーカーとして下記の品質保証体制を有している。

- ・フィルタベントシステムの性能保証する Framatome 社 (旧 AREVA 社) は、品質管理システムとして ISO9001 を 2008 年に SGS 社から取得している。また、世界中の顧客要求品質要求に対応できるよう、ASME NPT, N. S Stamp, KTA1401, 1408, RCCM, RCC-E, EN ISO9001 などの認証も取得している。
- ・Framatome 社 (旧 AREVA 社) は、システム設計・製作に際し、品質保証含めてプロジェクトを横断的に管理する部門を設置しており、技術要求仕様、品質要求仕様を指示し製作仕様に盛り込む体制が整えられている。
- ・Framatome 社 (旧 AREVA 社) は、原子力製品のエンジニアリング及びプロジェクト管理を世界レベルで展開している。また、各種品質管理手順に従い外注先の品質管理を実施している。

また、Framatome 社 (旧 AREVA 社) は海外での先行 FCVS 実績を多数有している。納入実績を表 1 に示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表1 Framatome 社（旧 AREVA 社）のフィルタメント納入実績

Country	Name	Type	Status	Since
Germany				
Finland				
Switzerland				
Netherlands				
Korea, RO				
Canada				
Bulgaria				
P. R. China				

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考2) 隣接するベンチュリノズルから噴出されるガスの相互影響について

ベンチュリノズルは、分配管に対して直行する向きに設置されており、ノズル上部に設けた1本あたり2ヶ所の噴出口から、ベントガスを水平下向きに噴き出す。その噴出口を隣接するベンチュリノズルに向けないことで、隣接するベンチュリノズルに影響を与えない設計としている。ベンチュリノズルの配置図を図1に示す。

なお、JAVA試験において、2本の隣接するベンチュリノズルを設置した試験を実施した結果、1本の場合と比較して有意な性能差は見られず、試験を実施した全域にわたって、DF1,000以上の除去効率が得られている。ベンチュリノズル部におけるガス流速に対する除去係数を図2に示す。

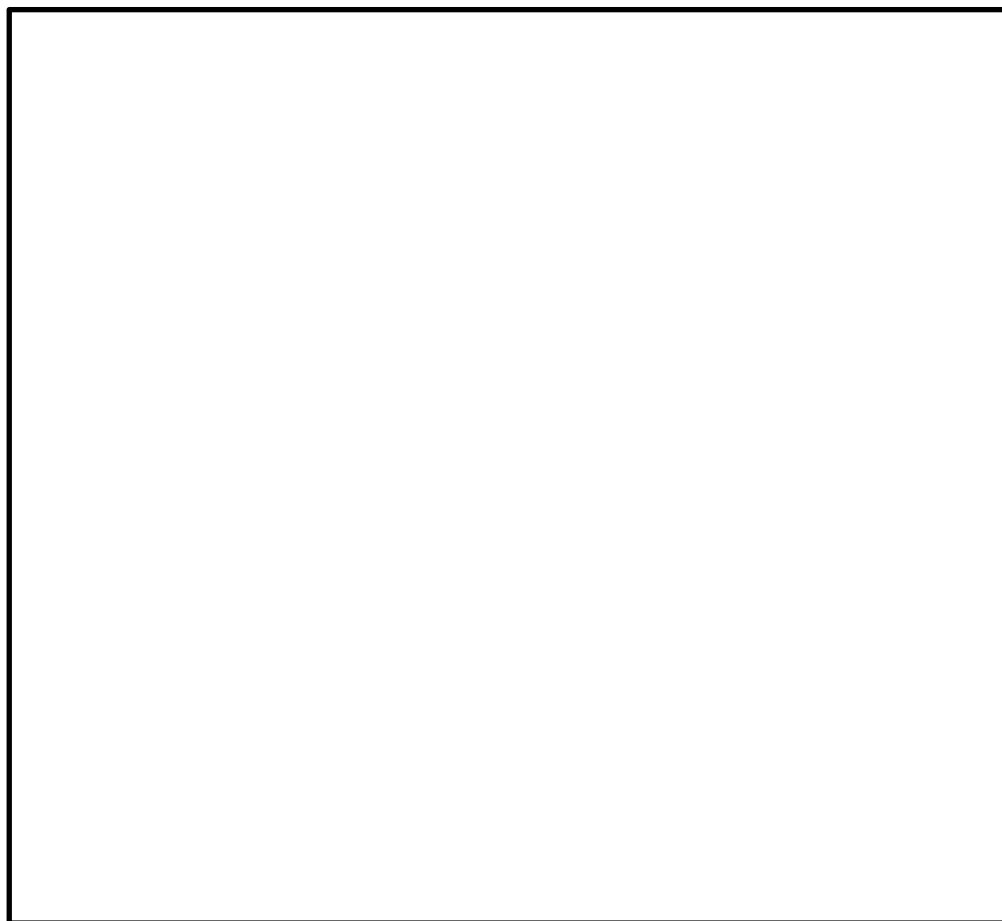


図1 ベンチュリノズルの配置図

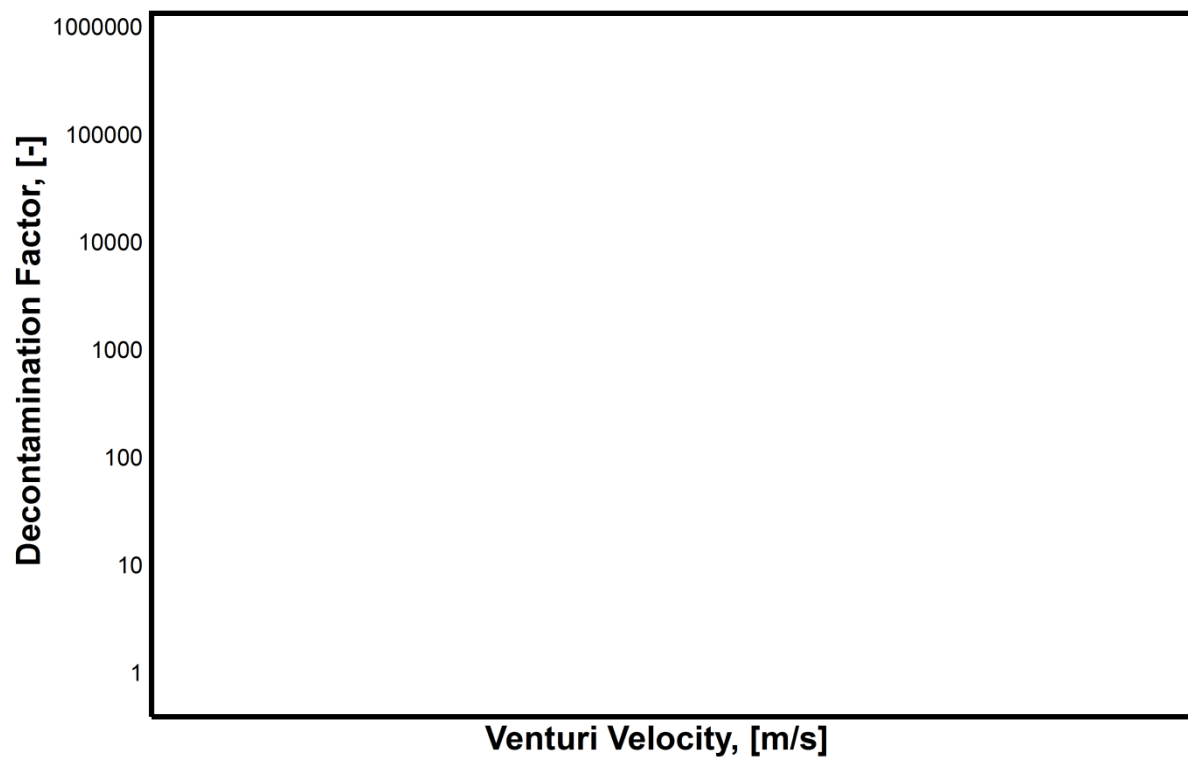


図2 ベンチュリノズル部におけるガス流速に対する除去係数

《参考図書》

1. 理化学辞典第4版

JAVA PLUS 試験結果を踏まえた銀ゼオライトフィルタの設計

ベントガスに含まれるガス状放射性よう素（無機よう素及び有機よう素）は、流量制限オリフィス下流に設置する銀ゼオライトフィルタを通過する際の化学反応にて捕集する。実機の銀ゼオライトフィルタの設計において、除去係数と滞留時間の関係式、JAVA PLUS 試験により得られた除去係数及び滞留時間を用いることから、JAVA PLUS 試験結果の実機への適用性について、以下にまとめた。

a. 銀ゼオライトフィルタにおけるガス状放射性よう素の捕集

ベントガスに含まれるガス状放射性よう素は、流量制限オリフィス下流に設置する銀ゼオライトフィルタを通過する際の化学反応にて捕集する。銀ゼオライトフィルタにおけるガス状放射性よう素の吸着速度は、総括物質移動係数 K を用いて以下のように表せる（参考図書 1, 2）。

$$r \frac{\partial q}{\partial t} = K(C - C^*) \quad \dots \dots \dots \text{(式 1)}$$

r : 吸着剤充填密度 q : よう素吸着量 K : 総括物質移動係数
 C : よう素濃度 C^* : よう素平均濃度

ここで、化学反応による吸着（不可逆反応）であることから、 $C^* = 0$ とみなし、式 1 は以下のように表せる。

$$r \frac{\partial q}{\partial t} = KC \quad \dots \dots \dots \text{(式 2)}$$

b. 除去係数と滞留時間

ガス状放射性よう素が銀ゼオライトフィルタを通過する際の物質収支は、吸着剤の微小ベッド厚さ Δz に対して、単位時間あたりのよう素濃度の低下率と吸収量が等しいとする式 3 で表すことができる（参考図書 3）。

銀ゼオライトフィルタ通過前後における物質収支のイメージを図 1 に示す。

$$-uA \Delta t \Delta C = r A \Delta z \Delta q \quad \dots \dots \dots \text{(式 3)}$$

u : ガス流速 A : ガス通過断面積 Δt : 単位時間
 ΔC : よう素濃度変化 r : 吸着剤充填密度 Δz : ベッド厚さ
 Δq : 単位質量あたりのよう素吸着量

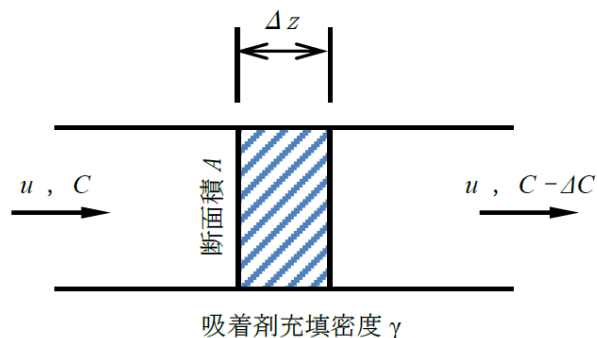


図1 銀ゼオライトフィルタ通過前後における物質収支のイメージ

ここで、左辺はガスに含まれる放射性よう素の変化量、右辺は銀ゼオライトフィルタで捕集した放射性よう素量を表す。 $\Delta z = u \Delta t$ より、両辺を $A \Delta t \Delta z$ で除し、微小変化を $\Delta \rightarrow \partial$ とすると、式3は以下のように表せる。

$$-\frac{\partial C}{\partial t} = r \frac{\partial q}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \text{(式4)}$$

式4に式2を代入すると、以下のように表せる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -KC \quad \dots \dots \dots \text{(式5)}$$

式5を積分し、 C_0 を初期よう素濃度とすると、以下のように表せる。

$$\frac{\log(\frac{C_0}{C})}{t} = \frac{\log(DF)}{t} = K \quad \dots \dots \dots \text{(式6)}$$

式6は銀ゼオライトフィルタをベントガスが通過する時間（滞留時間）に除去係数が依存することを示している。また、銀ゼオライトフィルタの厚さが一定であることを考慮すると、除去係数が銀ゼオライトフィルタを通過するベントガスの流速に依存することを示している。

c. 除去係数と滞留時間

銀ゼオライトフィルタの除去性能に影響を与え得るベントガス条件として、ベントガスの流速以外に、過熱度、蒸気割合、銀ゼオライトフィルタ温度、銀ゼオライトフィルタ圧力が考えられることから、これらの条件が式6の総括物質移動係数へ与える影響について JAVA PLUS 試験結果により評価する。

① 蒸気割合、銀ゼオライトフィルタ温度及び過熱度の影響



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表1 蒸気割合，銀ゼオライトフィルタ温度及び過熱度が
総括移動係数に与える影響

--

② 銀ゼオライトフィルタ圧力及び過熱度の影響

--

表2 銀ゼオライトフィルタ圧力及び過熱度が
総括移動係数に与える影響(1)

--

--

表3 銀ゼオライトフィルタ圧力及び過熱度が
総括移動係数に与える影響(2)

--

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



③ まとめ

ベントガス条件（過熱度，蒸気割合，銀ゼオライトフィルタ温度及び銀ゼオライトフィルタ圧力）が，総括物質移動係数へ与える影響について JAVA PLUS 試験結果に基づき評価した結果，総括物質移動係数が過熱度に依存することを確認した。なお，蒸気割合，銀ゼオライトフィルタ温度及び銀ゼオライトフィルタ圧力は，銀ゼオライトフィルタを通過するベントガスの過熱度を決定する因子となり得るものであり，これらのベントガス条件が総括物質移動係数に与える影響は，過熱度による影響に帰着するものと考えられる。

以上から，銀ゼオライトフィルタの除去性能の評価や設計においては，式 6 に示される滞留時間，ベントガスの過熱度への考慮が重要である。

d. JAVA PLUS 試験結果の実機への適用

銀ゼオライトフィルタの設計（必要ベッド厚の設計）においては，式 6 と JAVA PLUS 試験で得られた除去係数及び滞留時間を用い，実機の過熱度の運転範囲について，式 7 の関係から実機に要求する除去係数を得るために必要となる滞留時間を算出し，銀ゼオライトの必要ベッド厚を設定する。上記のとおり設計した島根 2 号炉の銀ゼオライトフィルタの有機よう素除去係数を図 2 に示す。過熱度の運転範囲全域において，要求する除去係数（DF50 以上）を満足している。



本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図2 JAVA PLUS 試験結果 (実機条件補正)

《参考図書》

1. 佐藤 忠正等 (北海道大学) 充填層における吸着速度について, 1958-12-18
2. 古谷英二等 単成分吸着における固定層吸着破過曲線と粒内有効拡散係数について, 1978 年 9 月 (明治大学工学部研究報告)
3. 竹内 「吸着分離—入門から操作設計まで」 (2000 年)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について

フィルタ装置を継続使用する際、粒子状放射性物質（エアロゾル）の除去に影響を与える可能性のある因子として以下の点を考慮する必要がある。

- ・ 粒子状放射性物質（エアロゾル）の再浮遊
- ・ フィルタの閉塞

(1) 粒子状放射性物質（エアロゾル）の再浮遊

a. ベンチュリスクラバにおけるエアロゾルの再浮遊

(a) 想定する状態

ベンチュリスクラバにおいて捕集されたエアロゾルが蓄積すると、ベンチュリスクラバ内のエアロゾル濃度は徐々に上昇する。ベンチュリスクラバでは、スクラビング水の沸騰やベントガスの気流により細かい液滴が発生し、その液滴に内包されるエアロゾルがフィルタ装置（スクラバ容器）下流側に放出されることが考えられる。

(b) 影響評価

フィルタ装置（スクラバ容器）は、ベンチュリスクラバの後段に金属フィルタが設置されている。この金属フィルタには、ベンチュリスクラバからの液滴を除去するための機構（プレフィルタ、湿分分離機構）及びドレンをベンチュリスクラバ内に戻すためのドレン配管が設置されている。そのため、ベンチュリスクラバで発生した液滴はメインフィルタに到達する前に除去される。また、液滴の微細化や蒸発によってエアロゾルが放出される可能性があるが、これはメインフィルタにて捕集される。

以上のとおり、フィルタ装置（スクラバ容器）は、ベンチュリスクラバでのエアロゾルの再浮遊に対して考慮した設計としている。

なお、JAVA 試験では、液滴が発生しやすいガス流速が大きい場合について試験を行っており、エアロゾルの除去係数が低下しないことを確認している。ベンチュリノズル部におけるガス流速に対する除去係数を図 1 に示す。

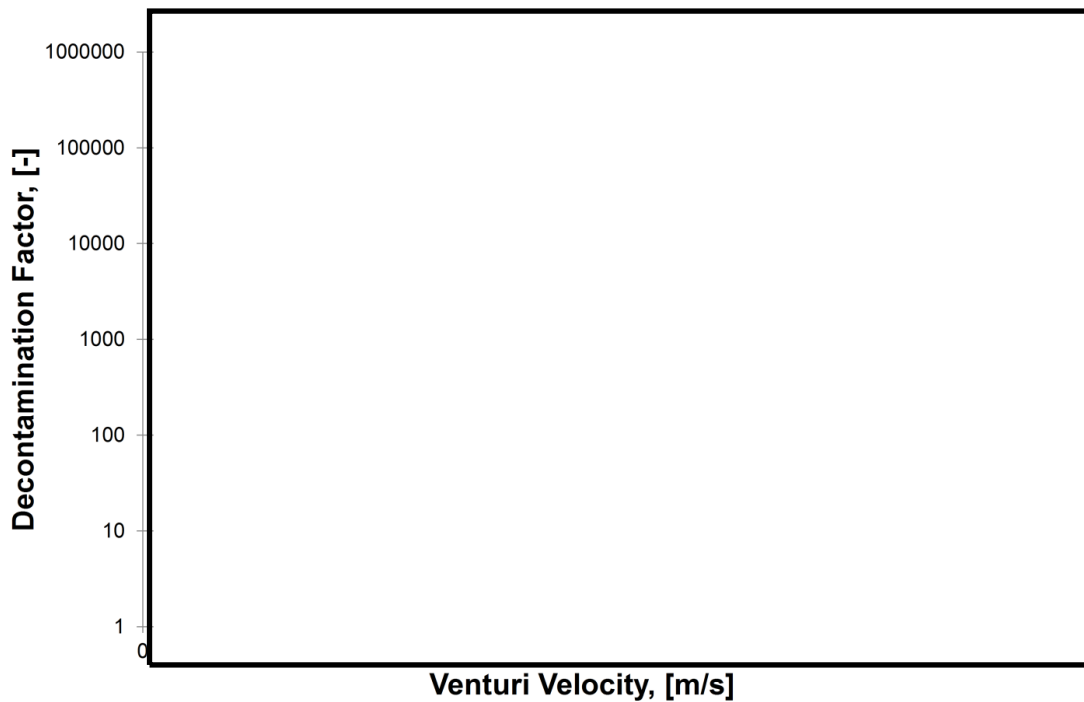


図1 ベンチュリノズル部におけるガス流速に対する除去係数

b. 金属フィルタにおけるエアロゾルの再浮遊

(a) 想定する状態

金属フィルタにおいて捕集されたエアロゾルが蓄積すると、崩壊熱によりフィルタ部の温度が上昇し、放射性物質の融点・沸点を超えた場合に液体・気体となる。これらの液体・気体がベントガスに流された場合、金属フィルタ下流側にエアロゾルが放出されることが考えられる。

(b) 影響評価

金属フィルタに捕集されたエアロゾルの崩壊熱による金属フィルタの上昇温度を、エアロゾルが再浮遊に至る温度と比較することで、この影響について確認した。

以下に評価に用いた条件とその結果を示す。

① 金属フィルタへのエアロゾル移行割合

フィルタ装置（スクラバ容器）では、ベンチュリスクラバにより大部分のエアロゾルが捕集される。このベンチュリスクラバによる除去性能を考慮して、金属フィルタへのエアロゾル移行割合は、フィルタ装置に移行する総量の 1/100 とする。（別紙 34 表 4）

② 冷却ガス条件

a. ベント後短期

金属フィルタに捕集されたエアロゾルの崩壊熱は、膨大な流量のベントガスによって冷却される。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b. ベント後長期

ベントガス流量が低下するベント後長期においては、格納容器を不活性化するために供給する窒素ガス及びスクラビング水に捕集されるエアロゾルの崩壊熱による蒸気によって冷却される。

c. ベント停止後

ベント停止後においては、格納容器フィルタベント系を不活性化するために供給する窒素ガス及びスクラビング水に捕集されるエアロゾルの崩壊熱による蒸気によって冷却される。

したがって、冷却源となるガス流量が最も小さくなるような条件を想定するため、スクラビング水に捕集される崩壊熱による蒸気量は考慮せず、システムを不活性化するために供給する窒素ガス流量のみを冷却ガス条件とする。圧力・温度条件はベント後長期を想定して大気圧及びその飽和温度とする。

- ・窒素ガス流量 = 100 m³/h[normal]
- ・窒素ガス比熱 = 1040 J/kg・°C
- ・窒素ガス密度 = 1.25 kg/m³[normal]

③ 評価結果

金属フィルタに捕集されたエアロゾルの崩壊熱による冷却ガスの上昇温度を評価することで簡易的に金属フィルタの上昇温度を評価する。金属フィルタ内で発生する崩壊熱の全量 [] が冷却ガスに移行したと仮定し、以下の評価式にて金属フィルタの上昇温度を評価した。

$$\text{上昇温度(°C)} = \frac{\text{金属フィルタ内の発熱量(W)}}{\text{比熱(J/kg°C)} \cdot \text{窒素ガス流量(m}^3\text{/s)} \cdot \text{窒素ガス密度(kg/m}^3\text{)}}$$

・上昇温度 ≒ [] °C

したがって、金属フィルタの温度はエアロゾルの再浮遊が起こるような温度 [] に対して十分に低く抑えることができる。

なお、長期的には、窒素ガスを停止することも考えられることから、窒素ガスを停止した場合の評価を実施した結果、問題ないことを確認している。(参考1)

(2) フィルタの閉塞

a. 想定する状態

(a) ベンチュリノズルにおけるエアロゾルによる閉塞

炉心損傷後のベント時には、放射性エアロゾルに加えて、炉内構造物の過温等により発生する非放射性エアロゾル、コアコンクリート反応により発生する CaO 等の非放射性エアロゾル等がフィルタ装置（スクラバ容器）に移行する可能性がある。これらのエアロゾルがベンチュリノズルの狭隘部を閉塞することが考えられる。

(b) 金属フィルタにおけるエアロゾルによる閉塞

炉心損傷後のベント時には、放射性エアロゾルに加えて、炉内構造物の過温等により発生する非放射性エアロゾル、コアコンクリート反応により発生する CaO 等の非放射性エアロゾル等がフィルタ装置（スクラバ容器）に移行する可能性がある。これらのエアロゾルが金属フィルタに付着して閉塞することが考えられる。

(c) 金属フィルタにおける液滴による閉塞

金属フィルタに移行するベントガスに含まれる液滴（湿分）は、

液滴を分離しているが、低流速では慣性力による衝突により液滴を分離する機能が低下することが考えられる。

b. 影響評価

(a) ベンチュリノズルにおけるエアロゾルによる閉塞

ベンチュリノズルにおける狭隘部は [] であり、これに対して流入するエアロゾルの粒径は [] と極めて小さい。ベンチュリノズルにおける狭隘部を通過するガス流速も高速であることから、閉塞が発生することはない。また、機械的破損によって生じる断熱材の破片等を含む [] 以上の粒径については速やかに格納容器内に落下するため、フィルタ装置へ流入することはない。

(b) 金属フィルタにおけるエアロゾルによる閉塞

フィルタ装置（スクラバ容器）において、ベンチュリスクラバで捕集されなかったエアロゾルは後段の金属フィルタに移行する。この金属フィルタに移行するエアロゾル量と金属フィルタの設計負荷量を比較し、閉塞が発生しないことを以下のとおり確認した。

① 金属フィルタの設計負荷量

金属フィルタは、エアロゾルを供給した場合、 g/m² まで閉塞によるリスクが極めて低い運用が可能であり、 g/m² まで急速な差圧の上昇が起こらず、金属フィルタの機能が確保できることが Framatome 社 (旧 AREVA 社) により検証されている。

② エアロゾル量

格納容器からのエアロゾル移行量を保守的に 300 kg とし、このエアロゾル重量に金属フィルタへのエアロゾル移行割合 1/100 を考慮すると、金属フィルタに移行するエアロゾル重量の最大は 3 kg となる。

③ 評価結果

(c) 金属フィルタにおける液滴による閉塞

JAVA 試験による金属フィルタにおけるガス流速に対する除去係数を図 2 に示す。金属フィルタにおけるエアロゾルの除去性能は運転範囲を下回る低速範囲 においても低下していない。

したがって、プレフィルタ及び湿分分離機構における、液滴分離が十分に実施でき、液滴 (湿分) によるメインフィルタの閉塞が発生することはない。

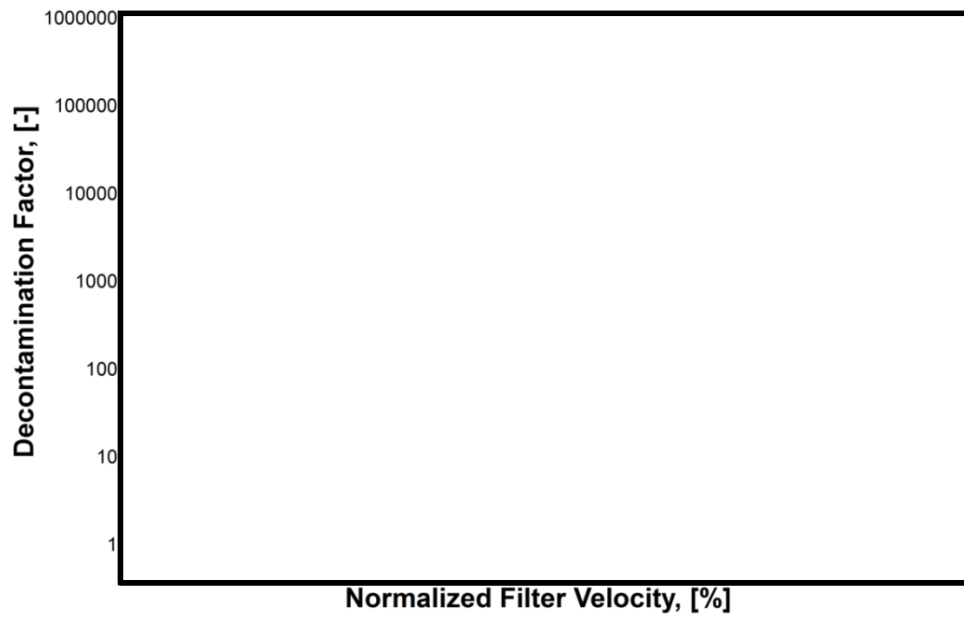


図2 金属フィルタにおけるガス流速に対する除去係数

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考1) ベント停止後の金属フィルタにおけるエアロゾルの再浮遊について

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。万一、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。このため、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。

1. 評価条件

(1) 金属フィルタの発熱量

有効性評価シナリオ（冷却材喪失（大破断LOCA）+ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失、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 [] となる。

ベンチュリスクラバのDF100以上を考慮し、ベンチュリ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 [] 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、 [] 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 [] に設定する。

また、崩壊熱は保守的に全量がメインフィルタのみから発熱するものとする。

(2) 解析モデル

解析モデルを図1に示す。解析モデルは2次元モデルとし、対称性を考慮して金属フィルタ部半分をモデル化範囲とした。解析モデルは金属フィルタ周辺部を模擬し、保温材、自然対流及び輻射を考慮した境界条件とした。また、スクラビング水が無い状況（流体は空気）を想定し、スクラバ容器内の初期温度60℃、周囲雰囲気温度60℃（一定）の温度条件とした。なお、発熱による温度上昇が保守的になる（周辺に熱が逃げにくく、金属フィルタ内に発熱した熱がこもる）よう、湿分分離機構はモデル化していない。

メインフィルタ及びプレフィルタはステンレス製メッシュであり、本解析ではステンレスの体積比率 [] %として密度、比熱、熱伝導率を設定した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

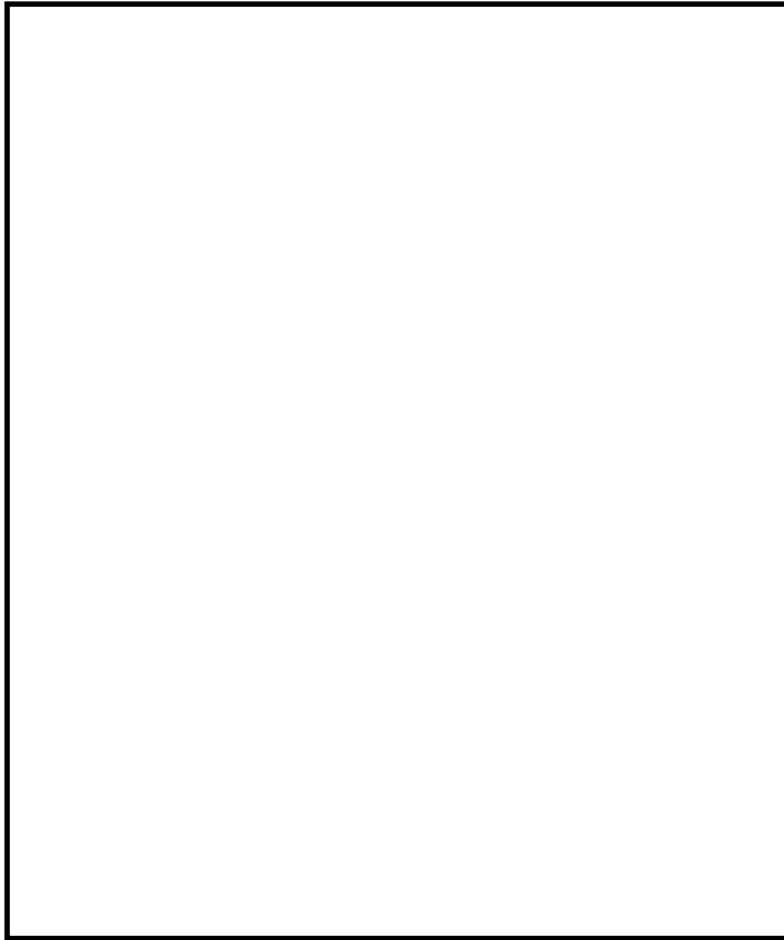


図1 解析モデル

(3) 解析条件

金属フィルタ部の発熱温度解析の条件を表1に示す。

表1 金属フィルタ部の発熱温度解析条件

項目	条件
解析コード	STAR-CCM+ (Ver. 10.06)
解析タイプ	定常計算 (自然対流)
乱流モデル	Realizable k-ε 2層モデル
差分スキーム	風上2次
雰囲気温度	60℃
圧力	101325Pa (大気圧) (ベント後, スクラビング水ドレン後を想定)
流体	空気 100% (スクラビング水無し)
保温材	考慮 <input type="text"/>
輻射	考慮

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2. 解析結果

金属フィルタ部の発熱解析結果を図2に示す。発熱源としたメインフィルタの最大温度は約□℃となった。

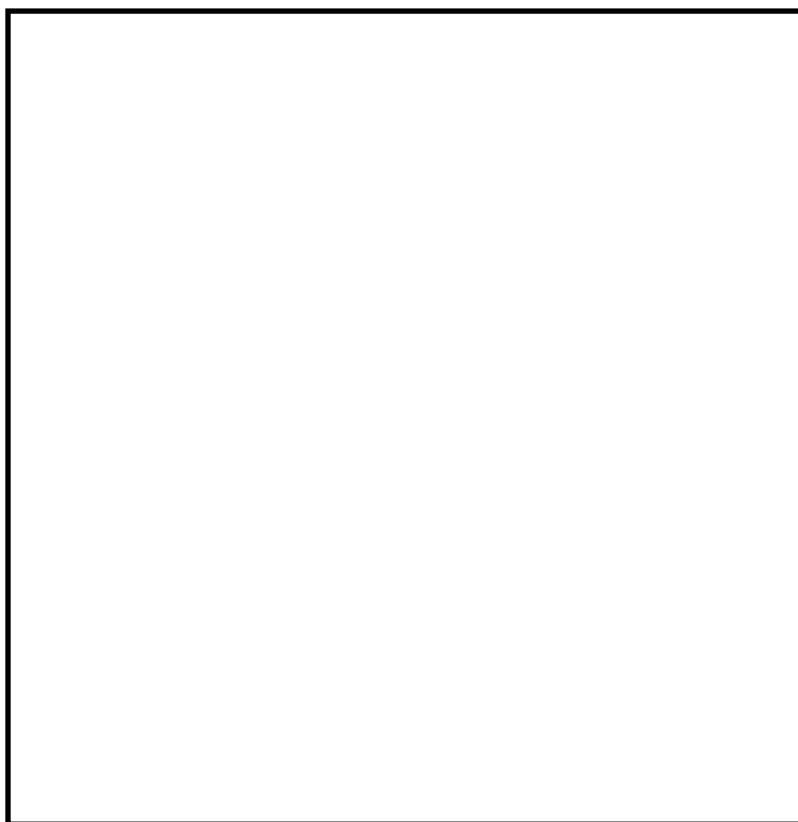


図2 温度分布解析結果

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は融点約272℃である。このため、金属フィルタに捕捉される放射性物質の崩壊熱が□kWの場合、金属フィルタのメインフィルタ部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可能性は低いと考えられる。

(参考2) ベンチュリノズルの脱落防止対策について

ベンチュリノズルは、図1に示す通り、取付ボルトにより接続されている。ベント中は、ベンチュリノズルから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ベンチュリノズルの取付ボルトが緩む恐れがある。取付ボルトが緩み、ベンチュリノズルが脱落してしまった場合、ベンチュリスクラバの除去効率が低下すると考えられる。

そこで、図2に示す通り、ベンチュリノズルの取付ボルトに舌付き座金を施し、フィルタ装置使用時のベンチュリノズルの取付ボルトの緩みを防止することとする。



図1 ベンチュリノズル構造図



図2 舌付き座金の取付け状態

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ベンチュリスクラバにおける無機よう素の再揮発・薬剤の容量不足について

フィルタ装置を継続使用する際、ガス状放射性よう素の除去に影響を与える可能性のある因子として以下の点を考慮する必要がある。

- ・ガス状放射性よう素の再揮発
- ・薬剤の容量不足

それぞれの因子について、影響評価を実施する。

(1) ガス状放射性よう素の再揮発

a. ベンチュリスクラバにおけるガス状放射性よう素の再揮発

(a) 想定する状態

気液界面における無機よう素の平衡については温度依存性があり、温度の上昇に伴い気相中に移行する無機よう素が増えることが知られている。高温のベントガスによりスクラビング水の温度が上昇した場合、スクラビング水中に捕集された無機よう素が気相中へ再揮発することが考えられる。

(b) 影響評価

ベンチュリスクラバでの無機よう素の除去係数の温度依存性について、NUREG/CR-5732 に類似の影響評価に関する知見が得られている（参考図書1）。

NUREG/CR-5732 によると、格納容器内のよう素の化学形態について、気相中のよう素と液相中のよう素の挙動は以下の2つの効果が組み合わさったものであることが知られている。

- ① 液相中における無機よう素 (I_2) とよう化物イオン (I^-) の平衡
放射線環境下において、液相中の無機よう素 (I_2) とよう化物イオン (I^-) の存在比は以下のように表される。

$$F(pH) = \text{equilibrium fraction} = \frac{[I_2]}{[I_2] + [I^-]} \quad \dots (1)$$

(1) 式の $[I_2]$ 及び $[I^-]$ は無機よう素 (I_2) 及びよう化物イオン (I^-) の濃度を表す。この平衡反応は pH に強く依存し、pH に対して図1 の関係を持つ。

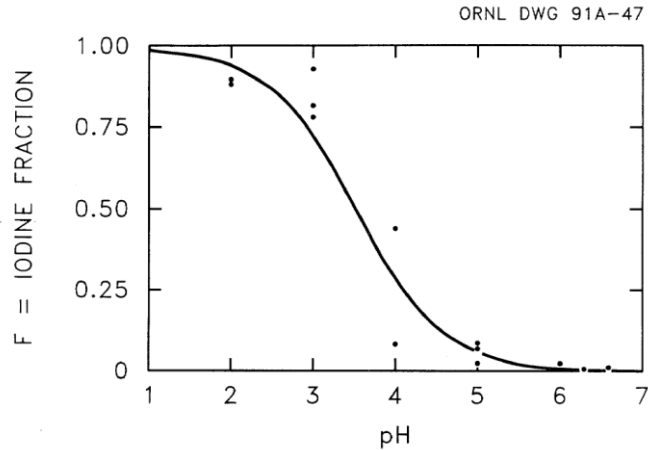


図1 液相中における I_2 と I^- の平衡と pH の関係

② 液相と気相の無機よう素 (I_2) の平衡

液相中における無機よう素 ($I_2(aq)$) と気相中における無機よう素 ($I_2(g)$) の存在比は以下のように表される。

$$P = \frac{[I_2(aq)]_{eq}}{[I_2(g)]_{eq}} \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式の P は気液分配係数, $[I_2(aq)]$ 及び $[I_2(g)]$ は液相中の無機よう素濃度及び気相中の無機よう素濃度を表す。この平衡は、以下の関係で温度に依存する。

$$\log_{10} P = 6.29 - 0.0149T \dots \dots (3)$$

(3) 式での T は絶対温度 [K] である。

以上①, ②より, 格納容器内のよう素の化学形態については, pH が低いと液相中の無機よう素の割合が増え, 温度が高い方が気相中の無機よう素の割合が増える関係にある。

ベンチュリスクラバでの気液界面における無機よう素の平衡についても, ②の温度依存性があり, 温度の上昇に伴い気相中に移行する無機よう素が増える(以下, 「気液分配係数の影響」という。)関係にあるものの, アルカリ性環境下では, ①よりスクラビング水中に存在する無機よう素 (I_2) が極めて少なくなるため, 無機よう素の気相部への移行量はスクラビング水の温度が上昇したとしても十分小さい値となる。

JAVA 試験では, 気液分配係数の影響を受けやすい高温状態での実験を行っており, スクラビング水の温度上昇による影響を配慮したものとなっている。表1にベンチュリスクラバにおける無機よう素除去性能試験結果 (JAVA 試験結果), 図2に除去係数と温度の関係を示す。

これより、アルカリ性環境下であれば、高温状態でも除去係数が 100 以上であることが確認されており、また、有意な除去係数の温度依存性は確認できない。

表1 ベンチュリスクラバにおける無機よう素除去性能試験結果

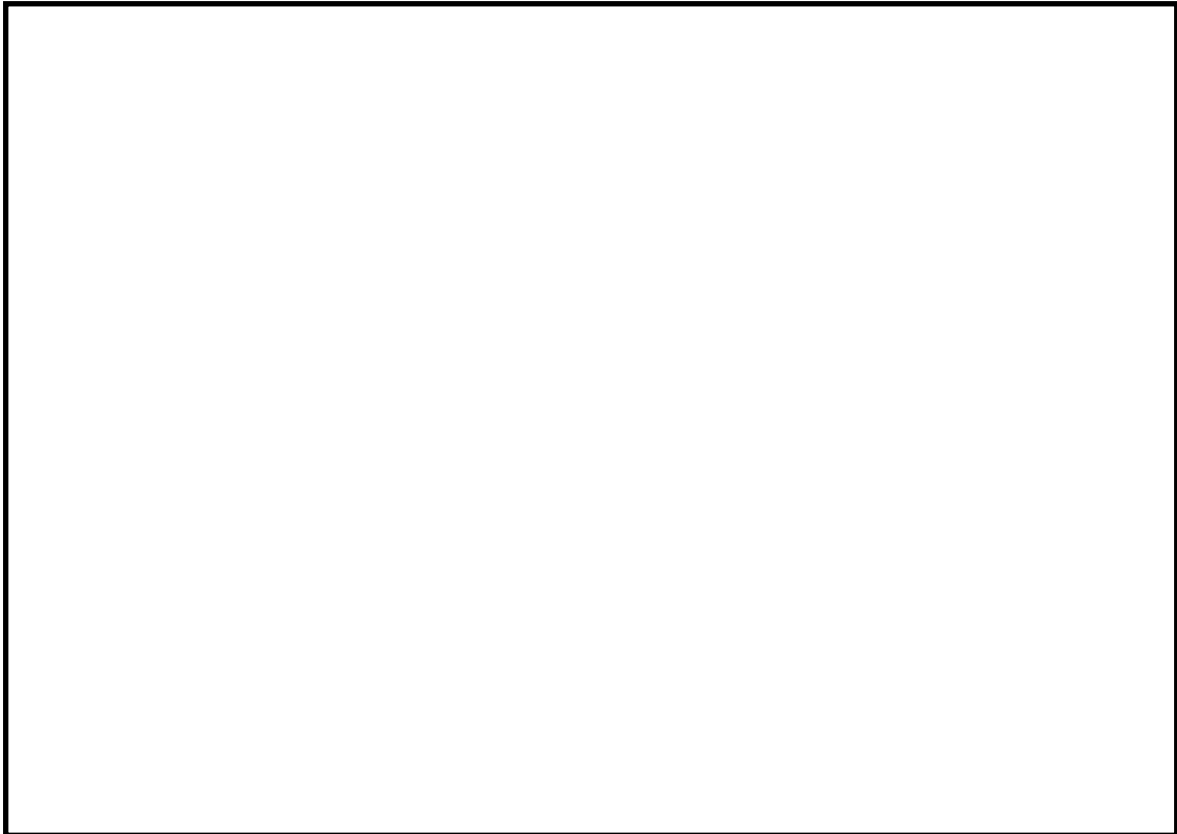


図2 無機よう素の除去係数と温度の関係(図中の数値は p H)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 薬剤の容量不足

a. 想定する状態

(1)式に示すとおり、無機よう素はベンチュリスクラバにて薬剤（ ）との反応により捕集されるが、薬剤の容量を超える無機よう素が流入した場合には、無機よう素は捕集されずに下流に流出されることが考えられる。

・・・(1)

b. 影響評価

スクラビング水に含まれる の量は、格納容器から放出される無機よう素の量に対して十分大きいことから、容量に達することはないことを以下のとおり確認した。

(a) スクラビング水の薬剤の保有量

スクラビング水に含まれる の割合は、ベント運転時の上限水位に対して であるため、 となり の量は となる。

(b) 無機よう素の流入量

ベンチュリスクラバに流入する無機よう素の量を以下のとおり設定した。

・ 事故時に炉内に内蔵されるよう素元素量

BWRプラントにおける代表炉心（ABWR）の平衡炉心末期を対象としたORIGEN2コードの計算結果に対して、島根2号炉の熱出力（2,436MW）を考慮して算出した結果、約18.1kgとする。

・ 格納容器への放出割合

NUREG-1465に基づき、格納容器内へのよう素の放出割合を61%とする（参考図書2）。

・ 格納容器に放出されるよう素の元素割合

Regulatory Guide 1.195に基づき、よう化セシウム5%、無機よう素91%、有機よう素4%とする（参考図書3）。

以上より、ベンチュリスクラバに流入する無機よう素（分子量 253.8g/mol） の量は となる。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(c) 評価結果

ベンチュリスクラバにおける無機よう素の反応はアルカリ環境下において(1)式に示すとおりであることから、ベンチュリスクラバに流入する無機よう素 [] の反応に必要な [] の量は [] となる。スクラビング水に含まれる [] の量は [] であることから、 [] が容量不足となることはない。

(3) 薬剤の管理について

[] は化学的に安定しており、系統待機中において、変質することがないことから、PWRにおける同目的の薬品タンクの水質確認頻度を考慮し、 [] の濃度が [] であることを定期事業者検査ごとに確認する。

また、上記管理について、原子炉施設保安規定に規定する。

<参考図書>

1. NUREG/CR-5732_ORNL/TM-11861 Iodine Chemical Forms in LWR Severe Accidents
2. NUREG-1465 “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants” Feb. 1995
3. Regulatory Guide 1.195, “Methods and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors”

(参考1) Regulatory Guide 1.195の適用について

有機よう素の生成割合は、Regulatory Guide 1.195 “Methods and Assumptions for Evaluating Radiological Consequences of Design Basis Accidents at Light Water Nuclear Power Reactors” で示されたよう素の存在割合を用い、4%を仮定している(参考図書1)。

格納容器中の無機よう素等から有機よう素への転換割合、重大事故時におけるpH調整と有機よう素の生成割合に関する評価を以下に示す。

a. 格納容器中の無機よう素等から有機よう素への転換割合

WASH-1233 “Review of Organic Iodide Formation Under Accident Conditions in Water-Cooled Reactors” では、粒子状よう素(CsI)を除く無機よう素等(I₂, HI, I)から有機よう素(CH₃I)への転換に関して、格納容器内を模擬した種々の実験結果に基づいて提案している(参考図書2)。

一方、NUREG-0772 “Technical Basis for Estimating Fission Product Behavior during LWR Accidents” において、上記のWASH-1233の実験結果を再度評価し、WASH-1233で示される有機よう素への転換割合は、有機よう素の生成を導くメカニズムの定義付けが十分ではなく、保守的としている(参考図書3)。

WASH-1233及びNUREG-0772に示されている、それぞれの有機よう素への転換割合を表1に示す。

表1 格納容器中の無機よう素等から有機よう素への転換割合

有機よう素	WASH-1233	NUREG-0772
非放射線場	1%未満	0.01%未満
放射線場	2.2%未満	0.02%未満
合計	3.2%未満	0.03%未満

NUREG-1465 “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants” では、無機よう素等から生成される有機よう素の転換割合として、WASH-1233で示される3.2%(合計)に基づき決定している(参考図書4)。しかし、WASH-1233では有機よう素の生成反応のみを考慮し、放射線による分解反応については考慮していないこと、格納容器内での有機よう素の生成割合を評価していることなどから、NUREG-0772のレビュー結果と同様、相当な保守性を持った値としている。

b. 重大事故時におけるpH調整と有機よう素の生成割合

NUREG/CR-5732 “Iodine Chemical Forms in LWR Severe Accidents” では、pHとよう素の存在割合について、pHの低下に伴って無機よう素等への生

成割合が増加する知見が示されており、pH調整が実施されている場合とpH調整が実施されていない場合のそれぞれについて、重大事故時のよう素形態に関して、複数のプラントに対するよう素の発生量を評価している（参考図書5）。pH調整が実施されている場合の結果を表2に、pH調整が実施されていない場合の結果を表3に示す。BWRプラント（Grand Gulf, Peach Bottom）では、重大事故時において、pH調整の実施の有無に限らず、有機よう素の生成割合は1%以下となっている。

表2 重大事故時にpH調整を実施した場合の有機よう素の生成割合

Table 3.6 Distribution of iodine species for pH controlled above 7

Plant	Accident	Fraction of total iodine in containment (%)		
		I ₂ (g)	I ₂ (l)	I ⁻ (l)
Grand Gulf	TC γ	0.05	0.03	99.92
	TQUV γ	0.01	0.03	99.96
Peach Bottom	AE γ	0.002	0.03	99.97
	TC2 γ	0.02	0.03	99.95

表3 重大事故時にpH調整を実施しない場合の有機よう素の生成割合

Table 3.7 Distribution of iodine species for uncontrolled pH

Plant	Accident	Fraction of total iodine in containment (%)		
		I ₂ (g)	I ₂ (l)	I ⁻ (l)
Grand Gulf	TC γ	26.6	15.3	58.0
	TQUV γ	6.6	18.3	75.1
Peach Bottom	AE γ	1.6	21.6	76.8
	TC2 γ	10.9	18.0	71.0

以上より、有機よう素の生成割合については不確定さがあるものの、Regulatory Guide 1.195で示されている4%は十分な保守性を有していると考えられることから、設計値として採用している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

《参考図書》

1. Regulatory Guide 1.195, “Methods and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors”
2. WASH-1233, “Review of Organic Iodide Formation Under Accident Conditions in Water-Cooled Reactors”
3. NUREG-0772, “Technical Basis for Estimating Fission Product Behaviour during LWR Accidents”
4. NUREG-1465 “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants” Feb. 1995
5. NUREG/CR-5732_ORNL/TM-11861 Iodine Chemical Forms in LWR Severe Accidents

銀ゼオライトフィルタにおけるよう素の再揮発，吸着飽和及び吸着材の変質 について

フィルタ装置を継続使用する際，ガス状放射性よう素の除去に影響を与える可能性のある因子として以下の点を考慮する必要がある。

- ・ガス状放射性よう素の再揮発
- ・銀ゼオライトフィルタの吸着飽和
- ・吸着剤の変質

それぞれの因子について，影響評価を実施する。

(1) 銀ゼオライトフィルタにおけるガス状放射性よう素の再揮発

a. 想定する状態

銀ゼオライトからのよう素の脱離反応は，400℃以上の高温状態において，数時間程度水素を通気した場合に起こることが知られている（参考図書1）。炉心損傷後のベント時には，水-金属反応及び水の放射線分解等により発生した水素を含むベントガスがフィルタ装置（銀ゼオライト容器）に流入し，銀ゼオライトフィルタに捕集されたガス状放射性よう素の崩壊熱によりフィルタ部の温度が上昇した場合，捕集されたガス状放射性よう素の脱離が生じ再揮発することが考えられる。

b. 影響評価

ガス状放射性よう素の発熱による銀ゼオライトフィルタの上昇温度を，捕集したガス状放射性よう素が再揮発に至る温度（400℃）と比較することで，この影響について確認した。

以下に評価に用いた条件とその結果を示す。

(a) 銀ゼオライトフィルタへのガス状放射性よう素移行割合

NUREG-1465に基づき，格納容器内へのよう素の放出割合を61%，Regulatory Guide 1.195に基づき，有機よう素生成割合を4%，無機よう素生成割合を91%とする（参考図書2，3）。また，フィルタ装置（スクラバ容器）では，ベンチュリスクラバにより大部分の無機よう素が捕集される。このベンチュリスクラバによる除去性能を考慮して，銀ゼオライトフィルタへの無機よう素移行割合は，フィルタ装置に移行する総量の1/100とする。

ここで，銀ゼオライトフィルタ内の発熱量については，可搬式窒素供給装置により窒素を供給する場合として事象発生7日後を想定し，事故時に炉内に内蔵されるよう素元素量に相当する崩壊熱約7MWに対して時間

減衰及び銀ゼオライトフィルタへのガス状放射性よう素移行割合を考慮し、ガス状放射性よう素は全て銀ゼオライトフィルタに吸着すると想定した。

(b) 冷却ガス条件

(i) ベント後短期

銀ゼオライトフィルタに捕集されたガス状放射性よう素の崩壊熱は、膨大な流量のベントガスによって冷却される。

(ii) ベント後長期

ベントガス流量が低下するベント後長期においては、銀ゼオライトフィルタに捕集されたガス状放射性よう素の崩壊熱は、減衰したガス状放射性よう素の崩壊熱に比べて流量が十分多いベントガスによって冷却される。

(iii) ベント停止後

ベント停止後においては、格納容器フィルタベント系を不活性化するために供給する窒素ガス及びスクラビング水に捕集されるエアロゾルの崩壊熱による蒸気によって冷却される。

したがって、冷却源となるガス流量が最も小さくなるような条件を想定し、スクラビング水に捕集される崩壊熱による蒸気量は考慮せず、系統を不活性化するために供給する窒素ガス流量のみを冷却ガス条件とする。圧力・温度条件はベント後長期を想定して大気圧及びその飽和温度とする。

- ・窒素ガス流量 = 100 m³/h[normal]
- ・窒素ガス比熱 = 1040 J/kg・°C
- ・窒素ガス密度 = 1.25 kg/m³[normal]

(c) 評価結果

銀ゼオライトフィルタに吸着されたガス状放射性よう素の崩壊熱による冷却ガスの上昇温度を評価することで簡易的に銀ゼオライトフィルタの上昇温度を評価する。銀ゼオライトフィルタ内で発生する崩壊熱の全量が冷却ガスに移行したと仮定し、以下の評価式にて銀ゼオライトフィルタの上昇温度を評価した。

$$\text{上昇温度(°C)} = \frac{\text{銀ゼオライトフィルタ内の発熱量(W)}}{\text{比熱(J/kg°C)} \cdot \text{窒素ガス流量(m}^3\text{/s)} \cdot \text{窒素ガス密度(kg/m}^3\text{)}}$$

銀ゼオライトフィルタでの発熱量及び冷却ガスの上昇温度の結果を表1に示す。

表1 銀ゼオライトフィルタでの発熱量及びガス上昇温度

銀ゼオライトフィルタでの発熱量（有機よう素）	
銀ゼオライトフィルタでの発熱量（無機よう素）	
上昇温度	

したがって、銀ゼオライトフィルタの温度はガス状放射性よう素の再揮発が起こるような温度（400℃以上（参考図書1））に対して十分に低く抑えることができる。

なお、長期的には、窒素ガスを停止することも考えられることから、窒素ガスを停止した場合の評価を実施した結果、問題ないことを確認している。（参考1）

また、事象発生約32時間後の希ガスによる照射線量を計算すると、希ガスの崩壊熱エネルギーは 8.05×10^6 [J]と見積もられ、よう素による崩壊熱 6.81×10^9 [J]よりも3桁低い値となるため、ほとんど影響はない。

(2) 銀ゼオライトフィルタの吸着飽和

a. 想定する状態

銀ゼオライトフィルタにおいて捕集されたガス状放射性よう素が蓄積すると、銀ゼオライトフィルタ内のガス状放射性よう素量が徐々に増加する。多量のガス状放射性よう素により銀ゼオライトフィルタが吸着飽和に達した場合、ガス状放射性よう素が捕集されずに系外へ放出されることが考えられる。

b. 影響評価

銀ゼオライトフィルタに流入するガス状放射性よう素量と銀ゼオライトフィルタの許容負荷量を比較し、吸着飽和に達することがないことを以下のとおり確認した。

(a) 銀ゼオライトフィルタへのガス状放射性よう素流入量

事故時に炉内に内蔵されるよう素元素量は約18.1 kgであり、NUREG-1465に基づき、格納容器内へのよう素の放出割合を61%、Regulatory Guide 1.195に基づき、有機よう素生成割合を4%、無機よう素生成割合を91%とする（参考図書2、3）。また、ベンチュリスクラバにおける無機よう素の除去性能を考慮し、銀ゼオライトフィルタへの無機よう素移行割合を1/100とする。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

銀ゼオライトフィルタに流入するガス状放射性よう素量を表2に示す。ガス状放射性よう素量は約[]である。

表2 銀ゼオライトフィルタに流入するガス状放射性よう素量

有機よう素流入量	[]
無機よう素流入量	[]

(b) 銀ゼオライトフィルタの許容負荷量

JAVA PLUS試験において、有機よう素 (CH_3I) を用いて銀ゼオライトの性能検証を行っている。JAVA PLUS試験では、銀ゼオライトを交換することなく有機よう素を[]以上注入しているが、銀ゼオライトの性能劣化は確認されていない。

JAVA PLUS試験における銀ゼオライトの充填量と有機よう素の注入量を表3に示す。

表3 JAVA PLUS 試験における銀ゼオライトの充填量と有機よう素の注入量

銀ゼオライト充填量	[]
有機よう素注入量	[]

銀ゼオライトフィルタの吸着剤の充填量は約[]であり、表3に示すJAVA PLUS試験における銀ゼオライトの充填量との比から、有機よう素 (CH_3I) の性能の劣化が確認されていない量を許容負荷量と仮定すると約[]となる。

(c) 評価結果

銀ゼオライトフィルタへのガス状放射性よう素流入量は約[]であり、銀ゼオライトフィルタにおける許容負荷量約[]に対して十分小さいことから、銀ゼオライトフィルタは吸着飽和に達することはない。

(3) 吸着材の変質

a. 想定する状態

銀ゼオライトフィルタの吸着材として使用する銀ゼオライトは、光照射又は高湿度の環境に長期間晒されると、変質してよう素除去性能が低下することが考えられる。

b. 影響評価

銀ゼオライトは、ステンレス鋼製の銀ゼオライト容器内に充填されるため、光が照射されることはなく、変質するおそれはない。

また、湿分による銀ゼオライトのよう素除去性能への影響については、密閉容器内にスクラビング水（水酸化ナトリウム及び[]

□)と銀ゼオライトを保管し、6カ月後及び15カ月後の除去効率の測定試験を行い、性能基準□を満たしていることを確認した。
(別紙 45)

<参考図書>

1. ORNL/TM-6607 “Literature Survey of Methods to Remove Iodine from Off-gas Streams Using Solid Sorbents”, Apr/10/1979
2. NUREG-1465 “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants” Feb. 1995
3. Regulatory Guide 1.195, “Methods and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors”

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考1) ベント停止後の銀ゼオライトフィルタにおけるよう素の再揮発について

フィルタ装置を使用すると、銀ゼオライト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。万一、スクラビング水の放射性分解により発生した水素が銀ゼオライトフィルタに流入し、銀ゼオライトフィルタの温度が400℃を超えてしまうと、捕集したガス状放射性よう素が銀ゼオライトフィルタから再揮発してしまう恐れがある。このため、銀ゼオライトフィルタの温度は400℃以下である必要がある。

フィルタ装置使用中は、銀ゼオライトフィルタにはベントガスが通気されることから、銀ゼオライト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、銀ゼオライト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銀ゼオライトフィルタの温度評価を行った。

1. 評価条件

(1) 銀ゼオライトフィルタの発熱量

銀ゼオライトフィルタ内の発熱量については、事象発生7日後を想定し、事故時に炉内に内蔵されるよう素元素量に相当する崩壊熱約7MWに対して時間減衰及び銀ゼオライトフィルタへのガス状放射性よう素移行割合を考慮し、ガス状放射性よう素は全て銀ゼオライトフィルタに吸着すると想定した発熱量3,684Wを保守側に切り上げた4,000Wとする。

(2) 解析モデル

解析モデルを図1に示す。解析モデルは対称性を考慮して2次元軸対称モデルとした。解析モデルは銀ゼオライトフィルタ周辺部を模擬し、保温材、自然対流及び輻射を考慮した境界条件とした。また、流体は空気を想定し、銀ゼオライト容器内の初期温度60℃、周囲雰囲気温度60℃(一定)の温度条件とした。なお、発熱による温度上昇が保守的になる(周辺に逃げにくく、金属フィルタ内に発熱した熱がこもる)よう、大気開放している出口配管を模擬していない。

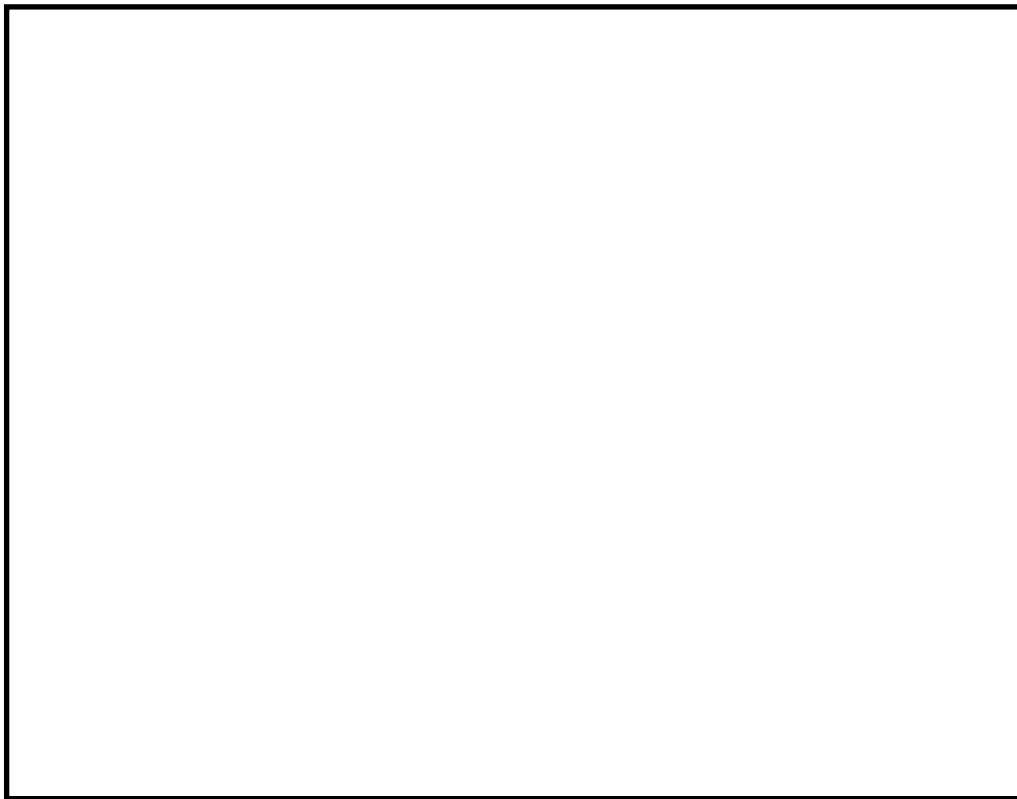


図1 解析モデル

(3) 解析条件

金属フィルタ部の発熱温度解析の条件を表1に示す。

表1 金属フィルタ部の発熱温度解析条件

項目	条件
解析コード	STAR-CCM+ (Ver. 10.06)
解析タイプ	定常計算 (自然対流)
乱流モデル	Realizable $k-\epsilon$ 2層モデル
差分スキーム	風上2次
雰囲気温度	60°C
圧力	101325Pa (大気圧) (ベント後, スクラビング水ドレン後を想定)
流体	空気 100%
保温材	考慮 <input type="text"/>
輻射	考慮

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2. 解析結果

銀ゼオライトフィルタ部の発熱解析結果を図2に示す。発熱源とした内側フィルタ温度約□□℃，外側フィルタ温度約□□℃となり，水素がある場合放射性よう素が再揮発する温度400度以下となることを確認した。



図2 温度分布解析結果

格納容器内の圧力が計測できない場合の運用について

格納容器内の圧力が計測できない場合には、格納容器雰囲気温度を計測し、飽和圧力に換算することにより操作判断を行うこととする。このため、表 1 及び図 1 に示すような飽和温度と飽和圧力の換算表等を手順書類に記載する。

具体的には、重大事故等発生時に格納容器への注水等が十分である場合においては、格納容器雰囲気は飽和状態に近い状態であることから、図 2 に示す格納容器雰囲気温度計のうち、より飽和状態に近いと考えられるサプレッション・チェンバ空間部に設置した格納容器雰囲気温度計（図 2 の⑩及び⑪）の計測値を飽和圧力に換算する。

ただし、有効性評価で想定する範囲を超える場合ではあるが、重大事故等発生時に格納容器への注水等が不十分な場合は、格納容器雰囲気温度が格納容器圧力に対する飽和温度以上になるとともに、熔融炉心からの輻射熱等によって局所的に格納容器雰囲気温度が大きく上昇する可能性がある。

このような場合は、すべての格納容器雰囲気温度計の最大値を圧力換算する。この運用により、格納容器雰囲気温度に対する圧力換算値は実際の格納容器圧力と同等又はそれ以上となることから、格納容器の限界圧力を下回る最高使用圧力の 2 倍（853kPa [gage]）に到達する前のベントが可能であると考ええる。

表1 飽和温度と飽和圧力の換算表

飽和温度 [°C]	飽和圧力 [kPa]	
	絶対圧力	ゲージ圧力
100	101	0
105	121	20
110	143	42
115	169	68
120	199	97
125	232	131
130	270	169
135	313	212
140	362	260
145	416	314
150	476	375
153.9	528	427 (1 Pd)
155	543	442
160	618	517
165	701	599
170	792	691
175	892	791
177.8	954	853 (2 Pd)
180	1003	901

参考：日本機械学会蒸気表 [1999年]

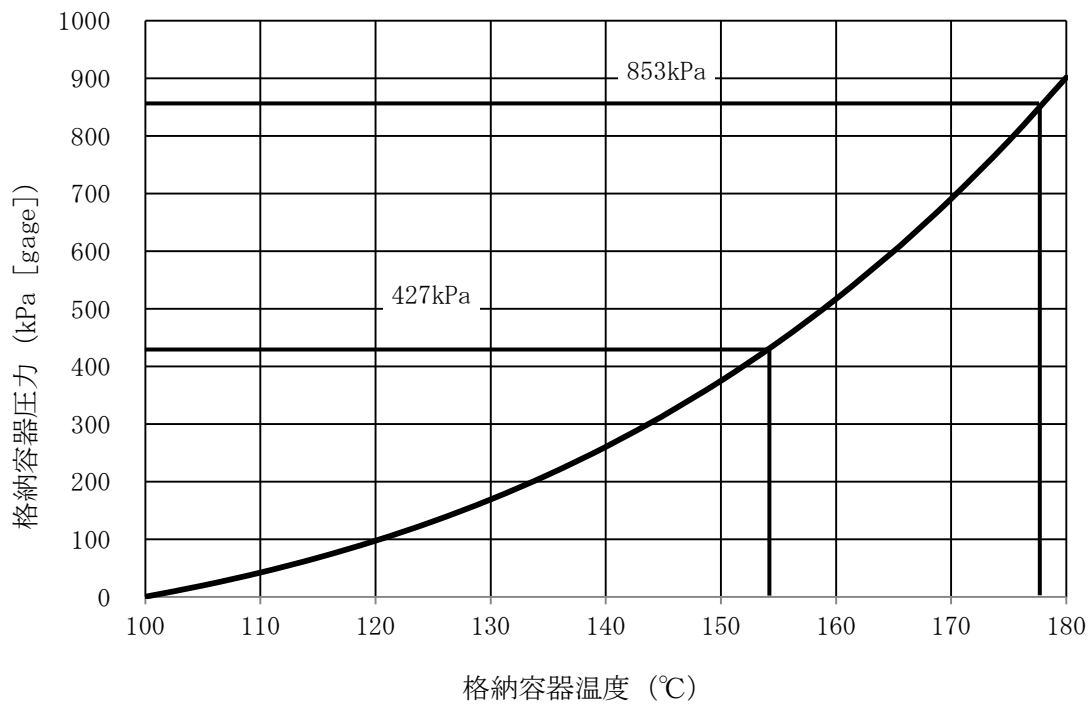
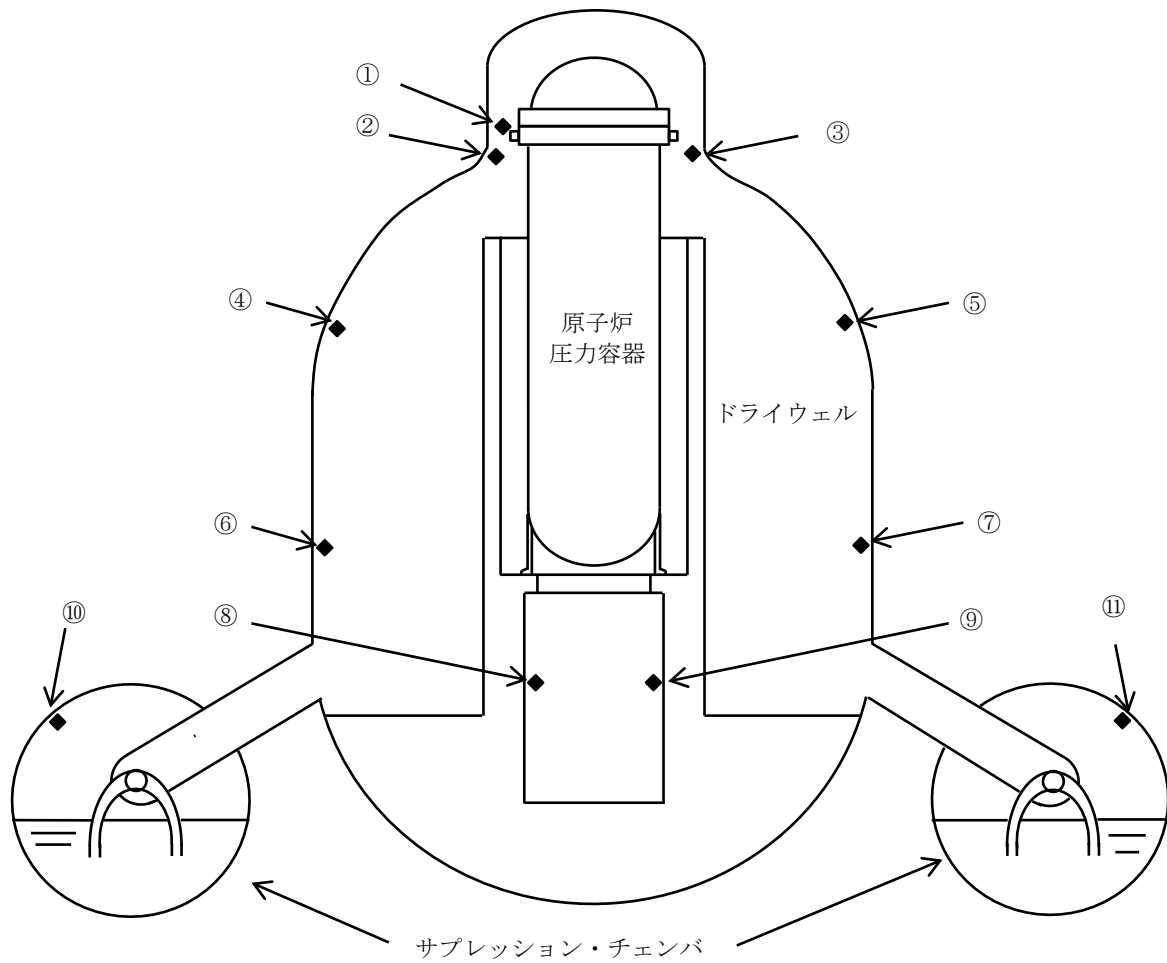


図1 飽和温度と飽和圧力の換算グラフ



番号	名称	設置場所	測定範囲
①, ②, ③	ドライウエル温度 (SA)	フランジ高さ近傍	0~300℃
④, ⑤	ドライウエル温度 (SA)	TAF高さ近傍	0~300℃
⑥, ⑦	ドライウエル温度 (SA)	RPV底面高さ近傍	0~300℃
⑧, ⑨	ペDESTAL温度 (SA)	ペDESTAL上部	0~300℃
⑩, ⑪	サプレッション・チェンバ温度 (SA)	サプレッション・チェンバ頂部近傍	0~200℃

図2 格納容器雰囲気温度計の計測点

有効性評価における炉心損傷の判断根拠について

炉心損傷の判断基準は、設計基準事故の状態を有意に超えるとともに、炉心損傷の判断が遅くならないよう、追加放出量の 10 倍に相当する F P が燃料から放出された状態を設定しており、以下の理由から妥当と考えている。

- ① 島根 2 号炉では、設計基準事故における原子炉冷却材喪失時の評価では燃料棒の破裂は発生していない。そのため、設計基準事故時の追加放出量を超える放出量を確認した場合には、設計基準事故を超える状態と判断されること。
- ② 炉心冷却が不十分な事象において、格納容器雰囲気放射線モニタのガンマ線線量率が追加放出量の 10 倍に相当する値に至る場合には、その後、ごく短時間で 10 倍に相当する値を大きく上回る線量率に至っていること。また、これは、大量の F P が格納容器内に放出されたことを意味しており、これ以降、格納容器の健全性を確保することが極めて重要となること(図 1 の線量率の上昇を参考)。
- ③ 追加放出量の 10 倍の F P が放出された時点では、有効性評価における評価項目(燃料被覆管最高温度 1,200℃以下、酸化量 15%以下)に至っていない可能性もあるが、上記②のとおり、炉心冷却が不十分な事象において、追加放出量の 10 倍に相当する F P が放出された以降の事象進展は非常に早く、有効性評価において炉心損傷と判断する時間との差異が小さいと考えられること。

なお、「炉心損傷」と判断した場合は、格納容器スプレイの運用を変更することとしており、ベントの運用について変更はない。(表 1)

また、格納容器雰囲気放射線モニタの使用不能の場合は、「原子炉压力容器表面温度：300℃以上」を炉心損傷の判断基準として手順に追加する方針である。

原子炉压力容器表面温度は、炉心が冠水している場合には、逃がし安全弁動作圧力(安全弁機能の最大 8.35MPa [gage])における飽和温度約 299℃を超えることはなく、300℃以上にはならない。一方、原子炉水位の低下により炉心が露出した場合には過熱蒸気雰囲気となり、温度は飽和温度を超えて上昇するため、300℃以上になると考えられる。上記より、炉心損傷の判断基準を 300℃以上としている。

表 1 炉心損傷の有無による格納容器スプレイ及びベント運用

炉心損傷の有無	格納容器スプレイ実施基準	ベント実施基準
炉心損傷がない場合	格納容器圧力 334kPa [gage] ~ 384kPa [gage]	サプレッション・プール水位 が通常水位+約 1.3m 到達
炉心損傷を判断した場合	格納容器圧力 588kPa [gage] ~ 640kPa [gage]	サプレッション・プール水位 が通常水位+約 1.3m 到達

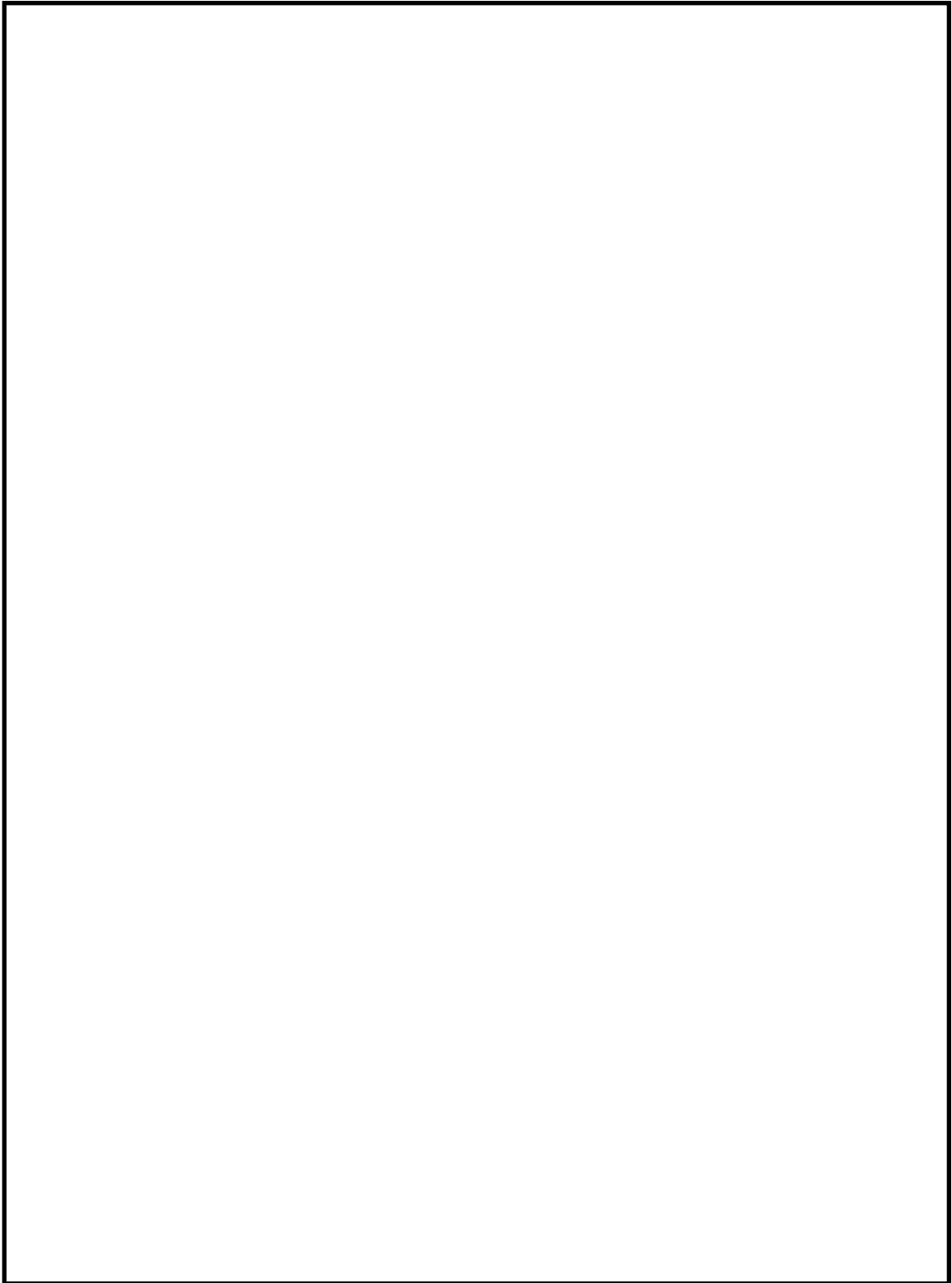


図1 炉心損傷判定図

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

格納容器スプレイが実施できない場合のベント運用について

(1) 格納容器スプレイが実施できない場合における対応について

炉心損傷を判断した場合、格納容器圧力が 640kPa [gage] (1.5Pd) に到達した時点で格納容器代替スプレイを実施することで、格納容器圧力の上昇を抑制し、ベント実施するまでの格納容器内に存在する希ガスの減衰期間を確保することとしている。

ただし、万が一、何らかの要因により格納容器スプレイが実施できない場合には、希ガスの減衰時間が十分に確保されていない場合においても、格納容器破損の緩和のため、ベント操作に移行する。

(2) 格納容器スプレイが実施できない場合のベント判断基準

格納容器スプレイの手段として、重大事故等対処設備（設計基準拡張）である、残留熱除去系、重大事故等対処設備である、格納容器代替スプレイ系（常設）、残留熱代替除去系及び格納容器代替スプレイ系（可搬型）があるが、これらすべての機能喪失を確認した時点でベント実施を判断し、速やかにベント操作を開始するため、第1弁及び第2弁の開操作を実施する。なお、格納容器スプレイの失敗については、系統流量が必要流量以上流れないこと又は必要流量以上流れていた場合においても格納容器の圧力抑制ができない場合に判断する。

ベント停止手順について

(1) 格納容器フィルタベント系によるベント停止の判断について

格納容器フィルタベント系によるベントを停止した後は、以下の機能が必要となるため、以下の機能が全て使用可能と判断した場合にベント停止の判断を実施する。

a. 格納容器の除熱機能（残留熱除去系等）

- ・格納容器内に残存する核分裂生成物から発生する崩壊熱を除去し、最終的な熱の逃がし場へ熱を輸送するため

b. 格納容器への窒素供給機能（窒素供給設備）

- ・残留熱除去系の運転に伴う蒸気凝縮により、格納容器内が負圧になることを防止するため
- ・水の放射線分解によって発生する水素及び酸素の濃度が可燃限界濃度に到達することを防止するため

c. 格納容器内の可燃性ガス濃度制御機能（可燃性ガス濃度制御系）

- ・水の放射線分解によって発生する水素及び酸素の濃度が可燃限界濃度に到達することを防止するため

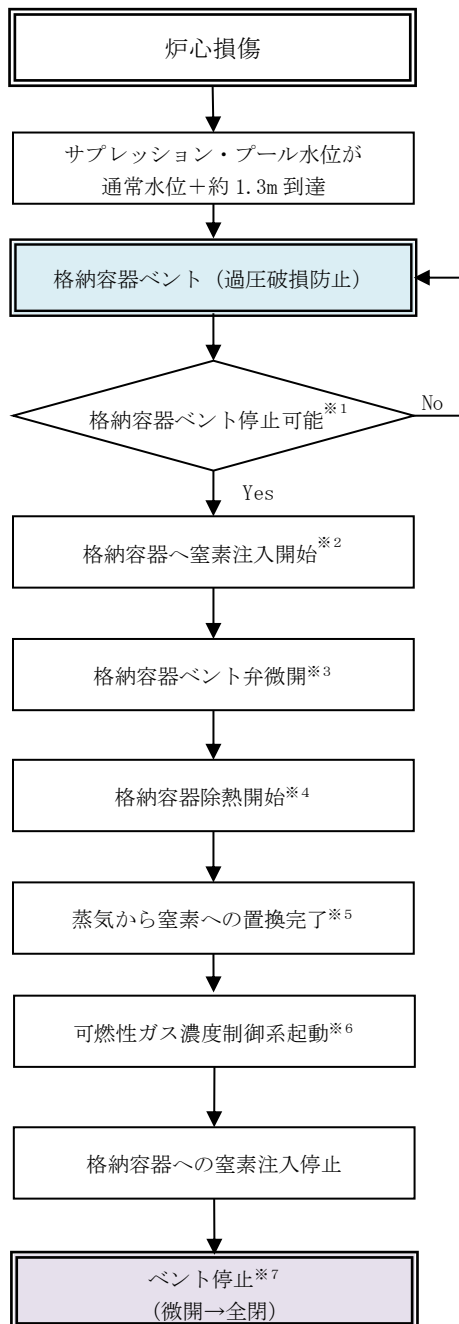
(2) ベント停止手順について

ベント停止フローを図1に示す。

(3) ベント停止手順の有効性について

ベント停止手順の有効性を確認するために、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において事象発生後約1ヶ月まで格納容器フィルタベント系による除熱を行った後、可搬型格納容器除熱系による除熱とした場合の格納容器パラメータ推移を評価した。ここで可搬型格納容器除熱系の流量は、事故発生30日後の崩壊熱を上回る $60\text{m}^3/\text{h}$ とし、格納容器フィルタベント系を微開（流路面積3%開）とするとともに、可搬式窒素供給装置より窒素ガスを $100\text{m}^3/\text{h}$ [normal]注入する。図2に格納容器圧力、図3にサプレッション・チェンバ水温並びに図4及び図5に格納容器内気相濃度の推移を示す。

図2に示すとおり、窒素ガスを注入することにより、可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱後の格納容器圧力は負圧に至ることなく、また格納容器ベントを微開とすることにより、格納容器圧力は上昇しない。また、図4及び図5に示すとおり、格納容器内の水素ガス及び酸素ガスの濃度は、可燃限界未満で推移する。



- ※1：格納容器の除熱機能，格納容器への窒素供給機能及び可燃性ガス濃度制御機能が使用可能であると判断した場合，格納容器ベント停止の判断を実施する。
- ※2：格納容器除熱時に格納容器内が負圧に至ることを防止する観点から，ドライウエル又はサブプレッション・チェンバに窒素を供給する。
- ※3：ベント弁の開度を微開することにより，窒素封入による格納容器の圧力上昇を抑制するとともに，可燃性ガス濃度の上昇を抑制することが可能。
- ※4：格納容器内気相はほぼ蒸気であるため，除熱による蒸気凝縮量が窒素供給量を上回った場合，格納容器圧力が負圧となる可能性があるため，格納容器圧力13.7kPa [gage] -245kPa [gage]の間となるように熱交換器への通水量を調整することで格納容器圧力が負圧になることを防止しながら窒素置換を実施する。また，格納容器圧力が13.7kPa [gage]まで低下した場合には，負圧を防止するため格納容器除熱を停止する。
- ※5：サブプレッション・プール水温が100℃未満となり，除熱量を調整しても格納容器圧力が245kPa [gage]に到達する場合には，蒸気分圧がほとんど失われ，窒素によって格納容器圧力が上昇している状況であると判断する。
- ※6：残留熱除去系又残留熱代替除去系による格納容器除熱により可燃性ガス濃度制御系の起動可能な圧力まで格納容器圧力を低下させる。
- ※7：格納容器の状態は，窒素置換されていることによって負圧のおそれはなく，水の放射線分解によって発生する水素及び酸素は可燃性ガス濃度制御系によって処理され，残留熱除去系又は残留熱代替除去系による格納容器除熱が継続されている状態である。

図1 格納容器ベント停止フロー

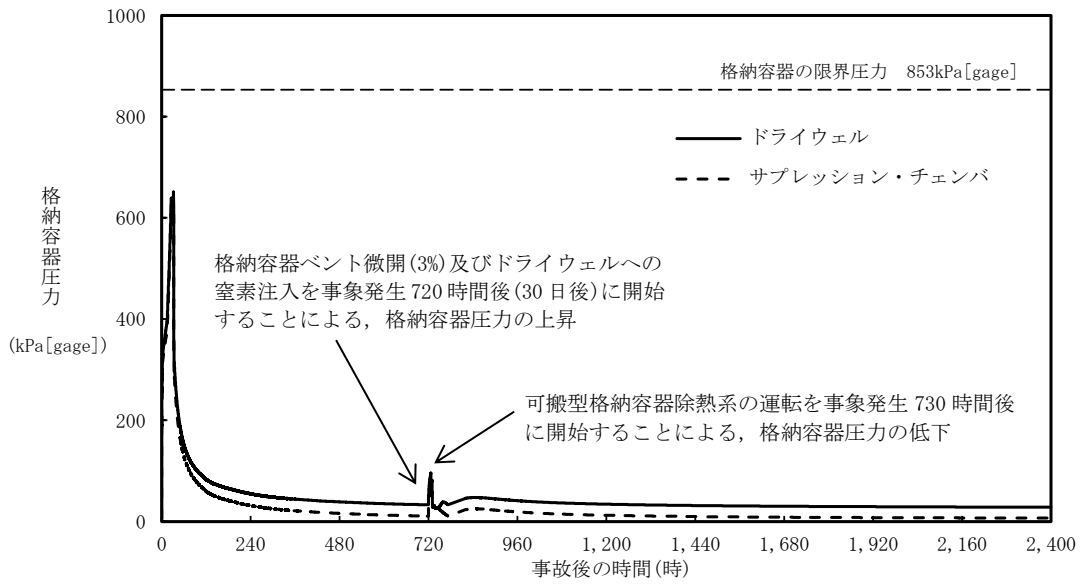


図2 格納容器圧力の推移

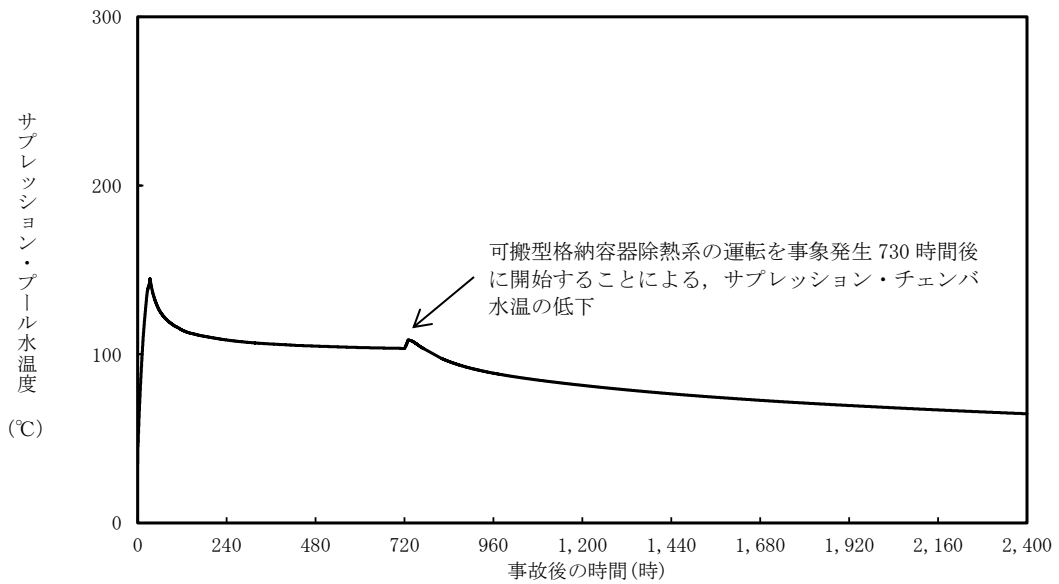


図3 サプレッション・プール水温度の推移

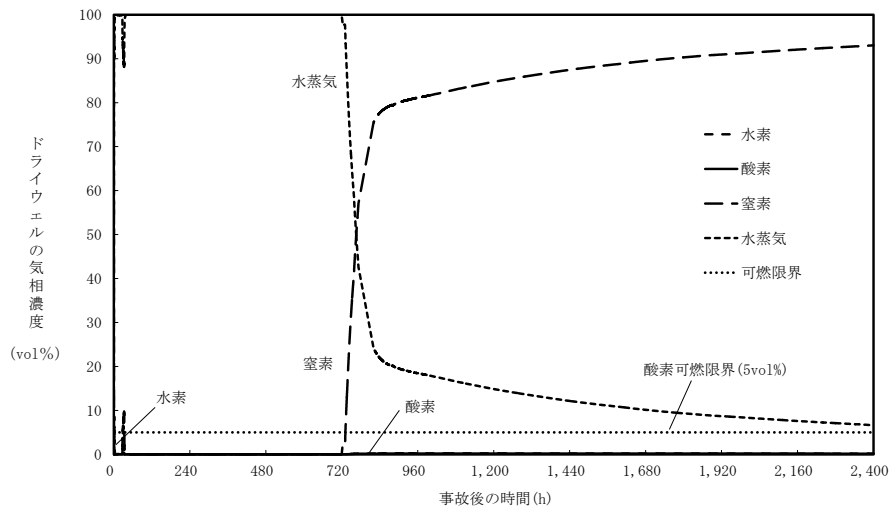


図4 ドライウエルの気相濃度の推移(ウェット条件)

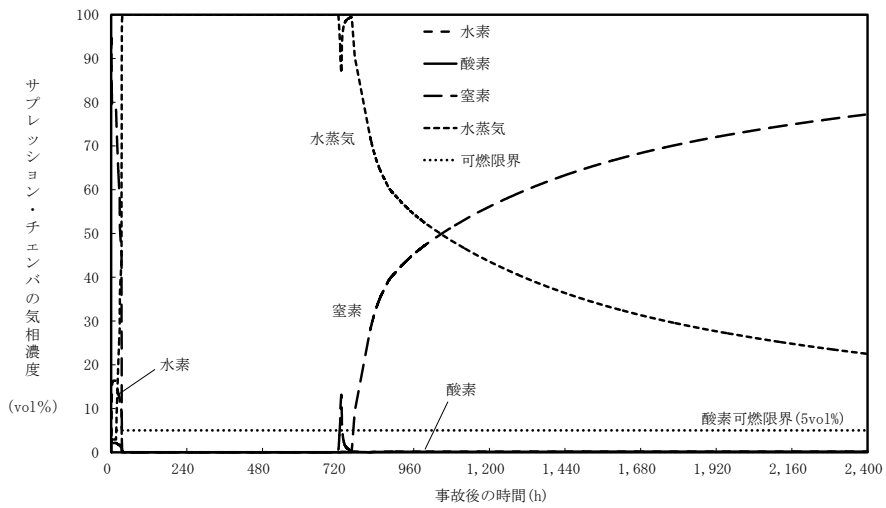


図5 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移(ウェット条件)

(4) 可燃性ガス濃度制御系について

可燃性ガス濃度制御系については、設計基準事故対処設備として位置付けており、重大事故等発生時の格納容器雰囲気における耐性を有さないものである。可燃性ガス濃度制御系の仕様を表1に、系統概略図を図6に、設置場所を図7に示す。

表1 可燃性ガス濃度制御系の主な仕様

項目	設計	備考	
耐震クラス	Sクラス		
入口ガス条件	運転温度	$< 121^{\circ}\text{C}$	運転許可インターロック設定値
	運転圧力	$< 177\text{kPa}$	運転許可インターロック設定値
	水素濃度	$\leq 4.0\text{vol}\%$	
	酸素濃度	$\leq 2.0\text{vol}\%$	
再結合効率	95%	水素濃度 2.0vol%時	

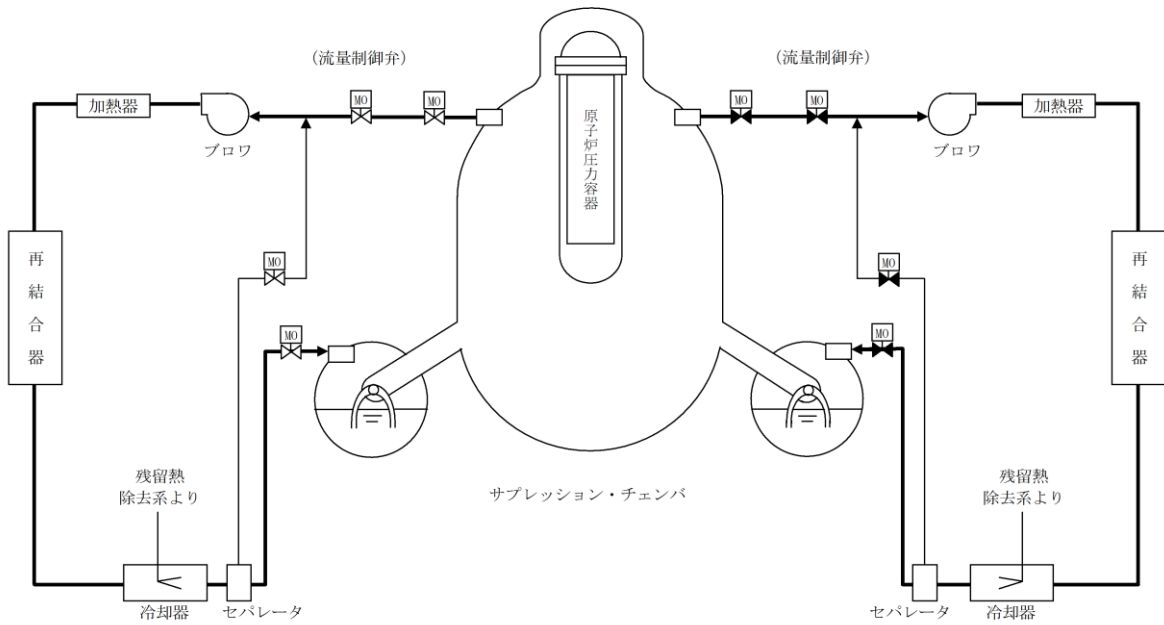


図6 可燃性ガス濃度制御系の系統概略図

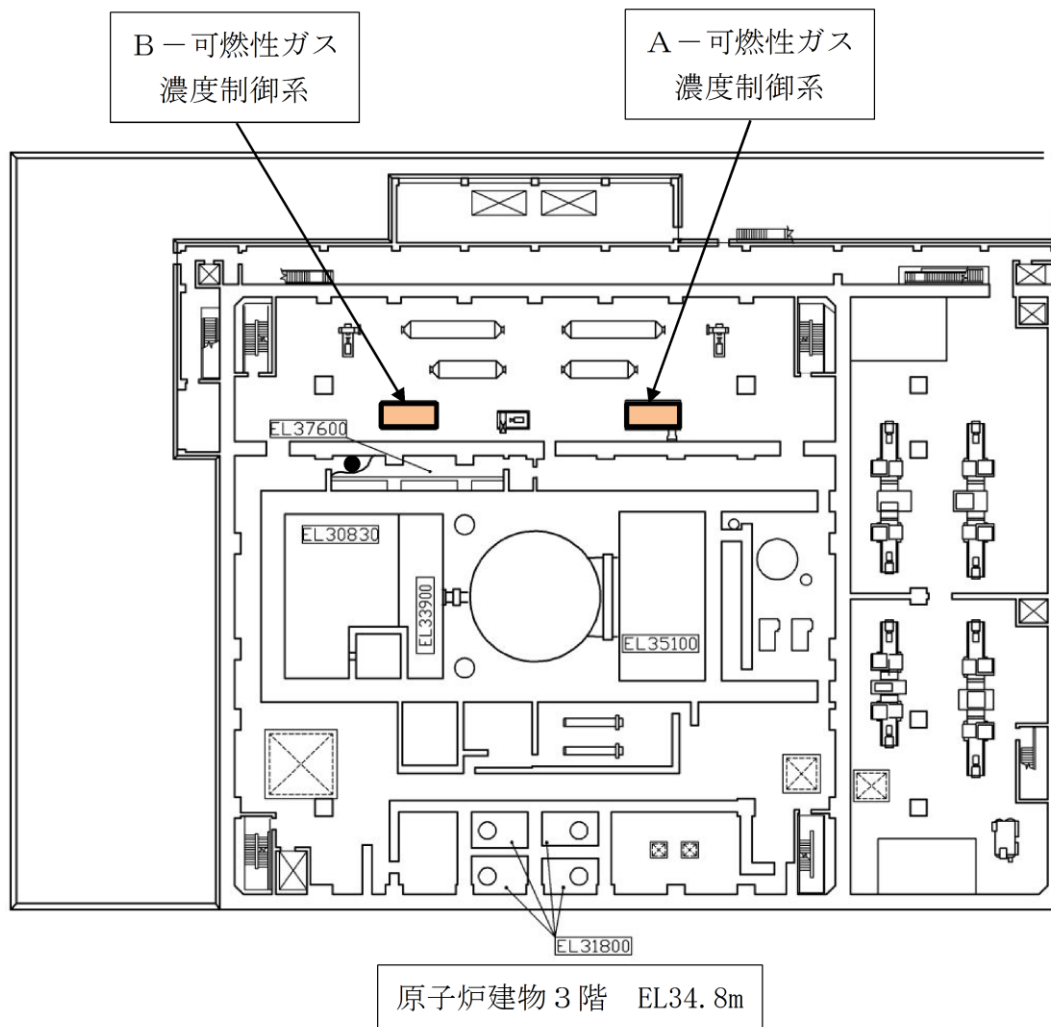


図7 可燃性ガス濃度制御系の設置場所

(5) ベント実施中及びベント停止後の格納容器負圧防止対策について

a. ベント実施中における格納容器負圧防止対策について

通常運転中は格納容器内に窒素を封入しているが、ベント実施中は窒素を含む格納容器内の非凝縮性ガスが排出され、格納容器内は崩壊熱により発生する蒸気で満たされた状態となる。その状態で格納容器代替スプレイ系（可搬型）による格納容器スプレイを実施すると、蒸気の凝縮により格納容器圧力が負圧になるおそれがあるが、ベント実施前に格納容器代替スプレイ系（可搬型）を停止する運用としているため、ベント実施中に格納容器圧力が負圧になることはない。

b. ベント停止後における格納容器負圧防止対策について

ベント停止時は、最初に可搬式窒素供給装置により格納容器内に窒素注入を開始し、その後、残留熱除去系又は残留熱代替除去系を用いた格納容器除熱を開始する。除熱による蒸気凝縮量が窒素供給量を上回った場合、格納容器圧力が負圧に至る可能性があるため、除熱量（熱交換器のバイパス流量）を調整し格納容器圧力を13.7kPa [gage] -245kPa [gage] の間でコントロールすることで格納容器圧力を正圧に維持しつつ、格納容器気相部を蒸気雰囲気から窒素雰囲気へ置換する。また、格納容器圧力が13.7kPa [gage] まで低下した場合には、負圧を防止するため格納容器除熱を停止する。格納容器内気相部が窒素雰囲気へ置換された以降は、格納容器が負圧となることはない。

また、窒素供給装置以外の手段として、設計基準対象施設ではあるが、窒素ガス制御系による格納容器への窒素供給が可能である。格納容器への窒素供給手段の概略図を図8に示す。

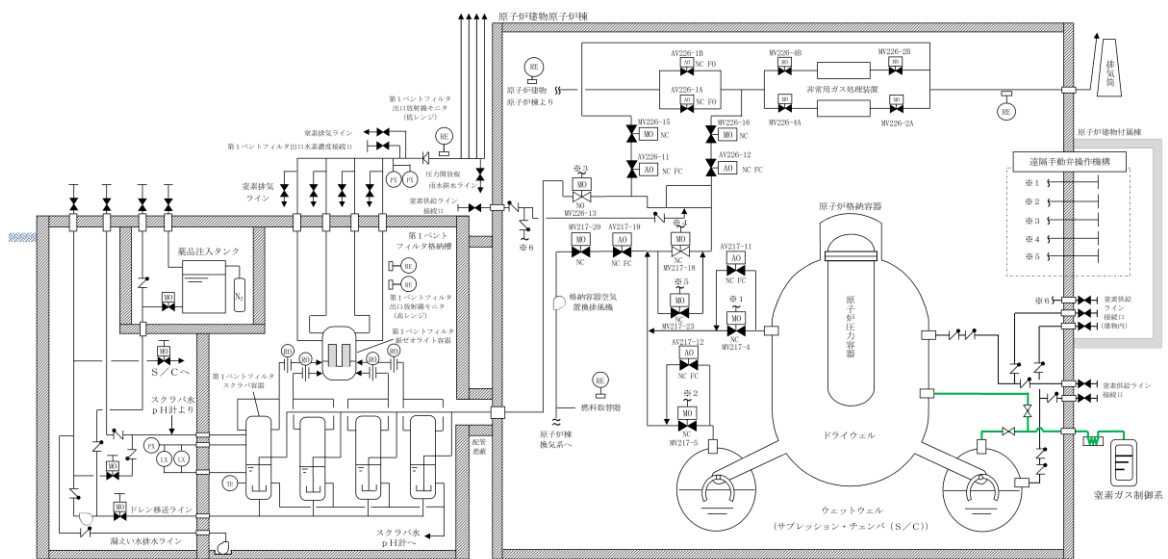


図8 格納容器への窒素供給手段の概略図

格納容器 pH制御について

格納容器フィルタベント系を使用する際、格納容器内が酸性化することを防止し、サプレッション・プール水中に捕集されたよう素の再揮発を抑制するために、サプレッション・プール水 pH制御系等により格納容器内に薬液を注入する手段を整備している。

サプレッション・プール水 pH制御系は、図 1 に示すように、圧送用窒素ポンベにより薬液タンクから水酸化ナトリウムを圧送し、サプレッション・チェンバにスプレイする構成とする。

サプレッション・プール水 pH制御系使用後に、残留熱代替除去ポンプを使用することにより、サプレッション・プール水を薬液として、ドライウェルスプレイ配管からドライウェルにスプレイすることが可能である。また、通常運転中より予めペDESTAL内にアルカリ薬剤を設置することにより、原子炉冷却材喪失事故発生直後においても格納容器内の酸性化を防止することが可能である。

更に、次項に示す通り、格納容器内に水酸化ナトリウムを注入することにより、格納容器へ及ぼす悪影響はないことを確認している。

薬液タンクに貯蔵する薬液は、格納容器内に敷設されたすべ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、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。また、ペDESTAL内に設置するアルカリ薬剤は、ペDESTAL内に敷設されたすべ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、ペDESTAL内の蓄水が酸性化することを防止するために必要な容量とする。

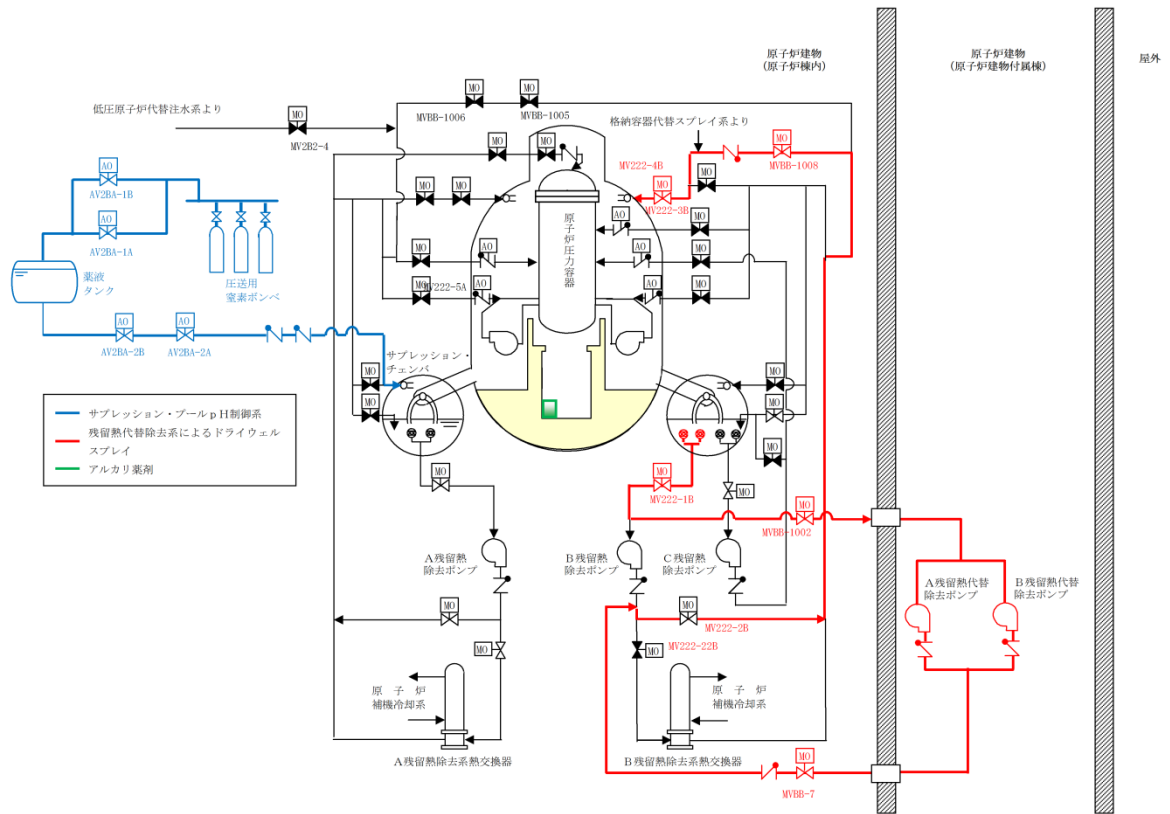


図1 格納容器 pH制御 概略系統図

(1) 格納容器バウンダリに対する影響

薬液をサプレッション・チェンバに注入した場合、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 wt%, pHは約 となる。

またサプレッション・チェンバへ所定量の薬液を注入した後は、薬液を含まない低圧原子炉代替注水槽、輪谷貯水槽（西1）及び輪谷貯水槽（西2）の水を低圧原子炉代替注水ポンプ又は大量送水車により注水することで、薬液注入配管のうち材質が炭素鋼である残留熱除去系配管について、薬液が局所的に滞留・濃縮することはない。

格納容器の鋼材として使用している炭素鋼のアルカリ腐食への耐性を図2、3に示す。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。

また、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材に変更しているが、この改良EPDM材について事故環境下でのシール性能を確認するため、表1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。

なお、サプレッション・チェンバにある電気配線貫通部は低圧用のみであり、モジュール部がサプレッション・チェンバ外にあること及びサプレッション・チェンバ内外とも接続箱に覆われていることから、pH制御による影響はない。

一方、ドライウエルに設置されている高圧用電気配線貫通部については、低圧用電気配線貫通部と同様に、格納容器内外とも接続箱に覆われていることから、pH制御による影響はない。

表1 改良EPDM材耐アルカリ性確認試験

--

これらから、pH制御薬液による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図4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℃以上であれば相変化は起こらず、析出することはない。

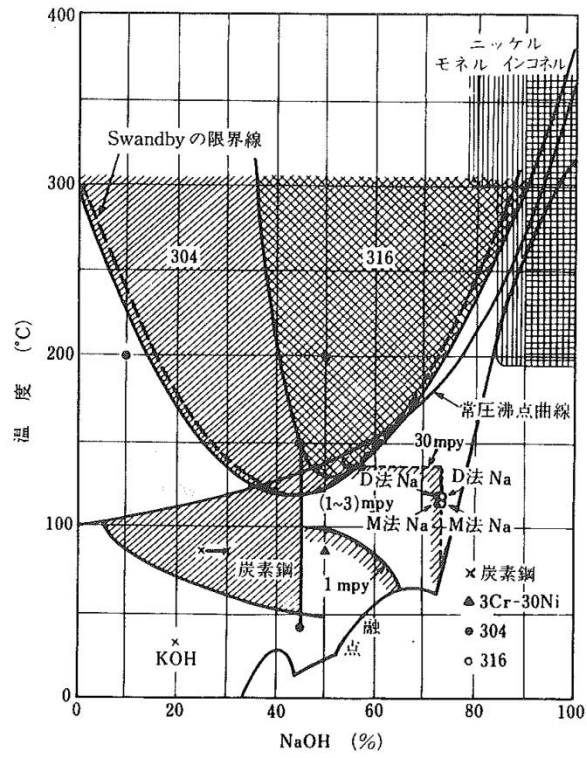


図2 アルカリ腐食割れに及ぼす温度、濃度の影響^[1]

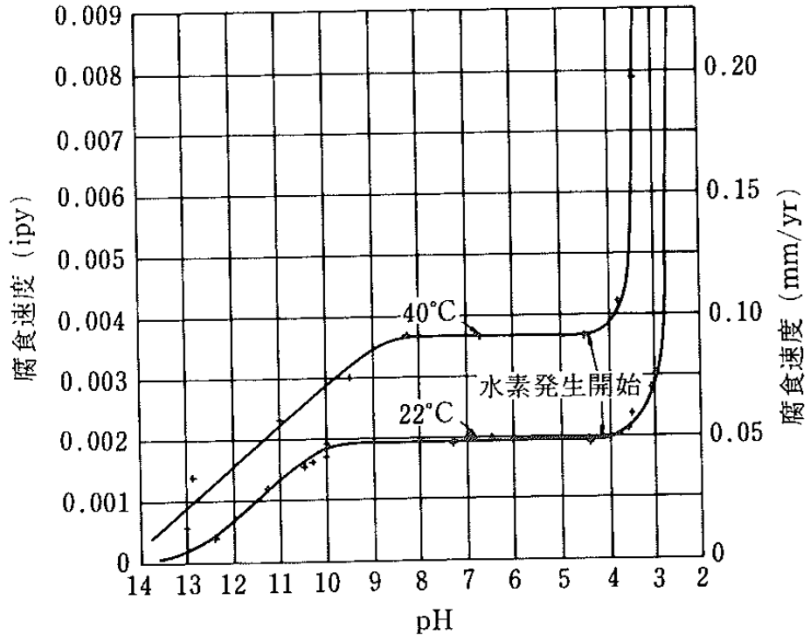


図3 炭素鋼の腐食に及ぼす pH の影響^[1]

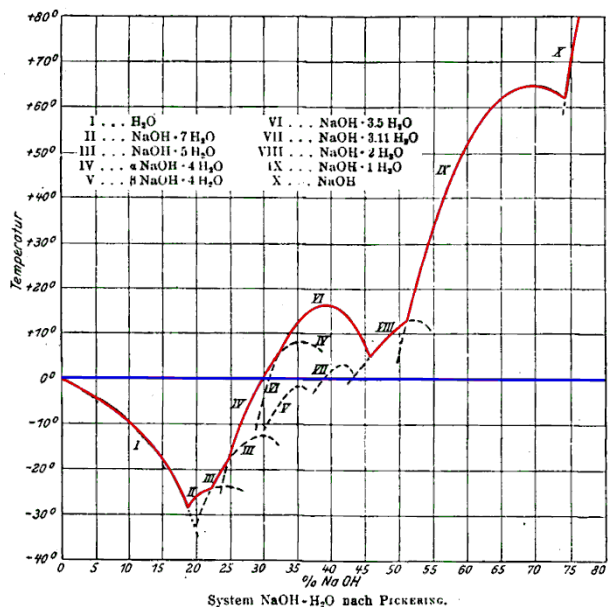


図4 水酸化ナトリウムの水系相平衡図^[2]

(2) 水素の発生について

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、水酸化ナトリウムに被水すると式①に示す反応により水素が発生する。

また、格納容器内のグレーチングには、亜鉛によるめっきが施されている。亜鉛も両性金属であり、式②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サブプレッション・チェンバ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すべ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。



a. 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、これらの亜鉛の全量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】

- ・ドライウェル グレーチング表面積：約 3,135m²
- ・サブプレッション・チェンバ グレーチング表面積：約 930m²

- ・ 亜鉛メッキ膜厚：80 μm
(JIS H8641-2007 溶解亜鉛メッキ厚判定基準値(最大値)76 μm より)
- ・ 亜鉛密度：7.2g/cm³
- ・ 亜鉛原子量：65.38

【計算結果】

上記条件より、亜鉛量はドライウエルで約 1,806 kg、サプレッション・チェンバで約 536 kg となり、合計約 2,350 kg となる。そして、式②よりこの亜鉛が全量反応すると、水素の発生量は約 73 kg となる。

b. 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保温材の外装材やドライウエルクーラー (DWC) のアルミフィンである。そのため、これらのアルミニウムの全量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】

- ・ 保温材に含まれるアルミニウムの体積：約 0.5843m³
- ・ アルミニウム密度：2.7g/m³
- ・ DWCに含まれるアルミニウムの質量：約 1,761kg

【計算結果】

上記条件より、原子力格納容器内に存在するアルミニウム量は、約 3,339 kg となる。そして、式①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 374 kg となる。

c. 水素発生による影響について

ジルコニウム-水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シナリオで約 210 kg であり、薬液注入により亜鉛とアルミニウム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。

《参考文献》

- [1] 小若正倫「金属の腐食損傷と防食技術」アグネ承風社, 2000年
- [2] Gmelins Handbuch der anorganischer Chemie, Natrium, 8 Auflage,
Verlag Chemie, Berlin 1928

設備の維持管理についての補足事項

1. 機能確認における外観点検の確認内容について
機能確認における外観点検の確認内容を表 1 に示す。

表 1 開放点検における点検の確認内容

対象機器	機能	点検の確認内容
ベンチュリノズル	フィルタ性能	<ul style="list-style-type: none"> ■ 表面に強度に影響を及ぼす恐れのあるき裂, 変形, 腐食及び摩耗がないこと。 ■ 性能に影響を及ぼす恐れのあるノズル穴の異物による閉塞, ノズル穴の変形がないこと。
金属フィルタ		<ul style="list-style-type: none"> ■ 表面に強度に影響を及ぼす恐れのあるき裂, 変形, 腐食及び摩耗がないこと。 ■ 性能に影響を及ぼす恐れのある金属フィルタの異物による閉塞, 溶接部の割れ, 腐食がないこと。
多孔板	整流機能	<ul style="list-style-type: none"> ■ 表面に強度に影響を及ぼす恐れのあるき裂, 変形, 腐食及び摩耗がないこと。 ■ 性能に影響を及ぼす恐れのある整流板穴の異物による閉塞, 穴の変形がないこと。
オリフィス	流量調整機能	<ul style="list-style-type: none"> ■ 表面に強度に影響を及ぼす恐れのあるき裂, 変形, 腐食及び摩耗がないこと。 ■ 性能に影響を及ぼす恐れのあるオリフィス穴の異物による閉塞, 穴の変形がないこと。

2. フィルタ性能の確認方法

待機中, 定期的に, 以下の(1)～(3)の項目を確認することでフィルタ性能が維持されていることを確認する。

(1) 窒素封入圧力確認

窒素封入圧力を [gage] 程度に維持することで, 容器内部の不活性状態が維持され, ベンチュリノズル及び金属フィルタの腐食の発生を防止していることを確認する。

(2) スクラビング水位確認

スクラビング水位が通常水位 (1700mm～1900mm) で維持されていることを確認する。

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) スクラビング水性状確認

スクラビング水をサンプリング測定することで、水酸化ナトリウムが規定のpHを維持している事を確認する。

3. 点検周期の考え方

4.5 格納容器フィルタベント系の維持管理の表 4.5-1 に示す点検周期は、表 2 に示すように機能や設置環境の類似した既設類似機器を踏襲して決定する。なお、この点検周期は、今後の保全活動を実施する中で適切な周期の見直しを行うこととする。

容器及び容器内部構造物に対する、アルカリ性の薬液を注入することによる腐食の影響対策としては、本装置が通常待機状態であること、及び、耐腐食にすぐれたステンレス材等の材料を使用していることから、窒素封入による不活性状態を維持することにより容器内部構造物の腐食の発生を防止していることの確認を定期的に行うことで適切に維持できると考えられる。

表2 点検周期の決定根拠

対象機器	機能／設置環境			類似機器	点検周期
	型式／機能	材料	内部流体		
スクラバ容器	フィルタ等	ステンレス鋼	スクラビング水／窒素ガス	原子炉冷却材浄化系 ろ過脱塩器	65M
内部構造物 ・ベンチュリノズル ・金属フィルタ ・多孔板	フィルタ等	ステンレス鋼	スクラビング水／窒素ガス	原子炉冷却材浄化系 ろ過脱塩器 内部構造物	65M
銀ゼオライト容器	フィルタ等	銀ゼオライト	窒素ガス	非常用ガス処理系 活性炭フィルタ	1C (機能確認)
伸縮継手	変位吸収機構	ステンレス鋼	窒素ガス／外気	—	10C
流量制限オリフィス	配管類	ステンレス鋼	窒素ガス	—	10C
圧力開放板	弁類	ステンレス鋼	窒素ガス／外気	窒素ガス制御系 圧力開放板	5C
配管	配管類	炭素鋼	窒素ガス／外気	窒素ガス制御系 配管	10C
		ステンレス鋼	スクラビング水／窒素ガス	気体廃棄物処理系 配管	10C
弁	弁類	炭素鋼	窒素ガス／外気	窒素ガス制御系 弁類	1C (機能確認) 78M (分解点検)
		ステンレス鋼	スクラビング水／窒素ガス	気体廃棄物処理系 弁類	1C (機能確認) 78M (分解点検)

※点検周期のMは「月」、Cは「サイクル」を示す。

銀ゼオライトフィルタへのスクラビング水の影響について

格納容器フィルタベント系の待機時のフィルタ装置内の環境が、スクラビング水により飽和蒸気となることが想定されるが、この環境で銀ゼオライトフィルタの有機よう素の除去性能が低下することがないかを確認する。

(1) 系統待機時における銀ゼオライトフィルタへのスクラビング水の影響について

プラント運転中を通して格納容器フィルタベント系の系統待機時は、スクラバ容器内がスクラビング水によって飽和蒸気的环境となり、銀ゼオライトは長期間、湿分環境下で保管される。

この保管状況において湿分による銀ゼオライトのよう素除去性能への影響を確認するため、密閉容器内にスクラビング水（水酸化ナトリウム及び ）と銀ゼオライトを表 1 に示す環境で保管し、よう素除去効率を 6 カ月後及び 15 カ月後に測定を実施した結果と銀ゼオライトの保管の様子を各々表 2 と図 1 に示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表1 銀ゼオライトの試験条件

項目	試験条件	実機環境を考慮した適用性
温度	室温	実機のフィルタ装置は、地下の第1ベントフィルタ格納槽に設置され、温度変化は小さいと考えられることから、実機を包絡する条件であり、適用性がある。
圧力	大気圧	実機の圧力は [] 程度であり、圧力が低い方がスクラビング水が蒸発しやすく湿度が高くなると考えられることから、実機を包絡する条件であり、適用性がある。
封入ガス組成	窒素 95%以上 (酸素 5%未満)	実機の系統は、格納容器内雰囲気と同等の酸素濃度 4%以下と考えられることから、実機を包絡する条件であり、適用性がある。
スクラビング水組成	NaOH 水溶液 []	実機の濃度は [] であり、濃度が低い方がスクラビング水は蒸発しやすく湿度が高くなると考えられることから、実機を包絡する条件であり、適用性がある。
	[]	実機の濃度と同等であり適用性がある。

表2 銀ゼオライトの除去効率経時変化

有機よう素の除去効率		
初期	6 か月後	15 か月後
[]		

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図1 銀ゼオライトの保管の様子

試験結果によると6カ月及び15カ月後における銀ゼオライトの除去効率は、性能基準（除去効率99%）を満たしており、実機においてもプラント運転中を通して性能は維持されると考える。

格納容器からの異常漏えい時における対応について

(1) 格納容器からの異常漏えい時における対応方針

事故時に炉心損傷を判断した際は、格納容器の過圧破損の防止又は格納容器内での水素燃焼を防止するため、サブプレッション・プール水位が通常水位＋約 1.3m に到達した場合又は格納容器酸素濃度がドライ条件で 4.4vol% 及びウェット条件で 1.5vol% に到達した場合は、格納容器フィルタベント系におけるベントを実施することとしている。

一方、万が一、ベントを実施する前に、格納容器からの異常な漏えいにより、原子炉建物原子炉棟（以下「R/B」という。）内に放射性物質が放出されるような状況になれば、大気へ放出される放射性物質の総量を可能な限り防止する対応として、格納容器フィルタベント系によるベントを実施することとしている。この対応により、フィルタ装置を介した放射性物質の放出経路を形成することで、大気へ放出される放射性物質の総量を低減し、公衆への影響を緩和する運用とする。

また、異常な漏えい発生時において、格納容器から漏えいする水素により、R/B 水素濃度が上昇する場合には、原子炉建物水素爆発を防止する観点から、格納容器フィルタベント系によるベントを実施し、格納容器内の水素を排出することによって水素漏えいを抑制し、水素爆発防止を図る運用とする。

(2) 格納容器の異常漏えい時における運用方法

可搬式モニタリング・ポスト及び原子炉建物原子炉棟内の放射線モニタの指示値が急激な上昇が発生した場合又は原子炉建物水素濃度指示値が 2.5vol% に到達した場合には、格納容器からの異常な漏えいが発生していると判断し、格納容器フィルタベント系によるベントを実施する。

ベントについては、ドライウェル内に存在する粒子状物質のサブプレッション・プール水でのスクラビングによる捕集効果に期待するため、サブプレッション・チェンバ側からのベントを実施する。仮に格納容器からの漏えい発生個所がドライウェル側であっても、サブプレッション・チェンバからのベントによりドライウェル圧力を低下させることで、格納容器からの漏えいを抑制することが可能である。

また、非常用ガス処理系については、当該系統内での水素爆発発生防止の観点から、原子炉建物水素濃度指示値が 1.8vol% に到達した時点で停止する。

(3) ベント実施基準設定の考え方

可搬式モニタリング・ポスト及び原子炉建物原子炉棟内の放射線モニタの指示値が急激に上昇する場合には、格納容器から異常な漏えいが発生していると判断する。

R/B水素爆発防止の観点からは、水素の可燃限界(4vol%)に計器誤差(±1.1vol)及び運転操作の余裕時間(0.4vol%=3時間)を踏まえ、原子炉建物水素濃度指示値が2.5vol%に到達した時点でベント実施を判断する。また、ベント実施基準の2.5vol%に対し、運転操作の余裕時間(0.4vol%=3時間)を踏まえ、原子炉建物水素濃度指示値が2.1vol%に到達した時点でベント準備を判断する。

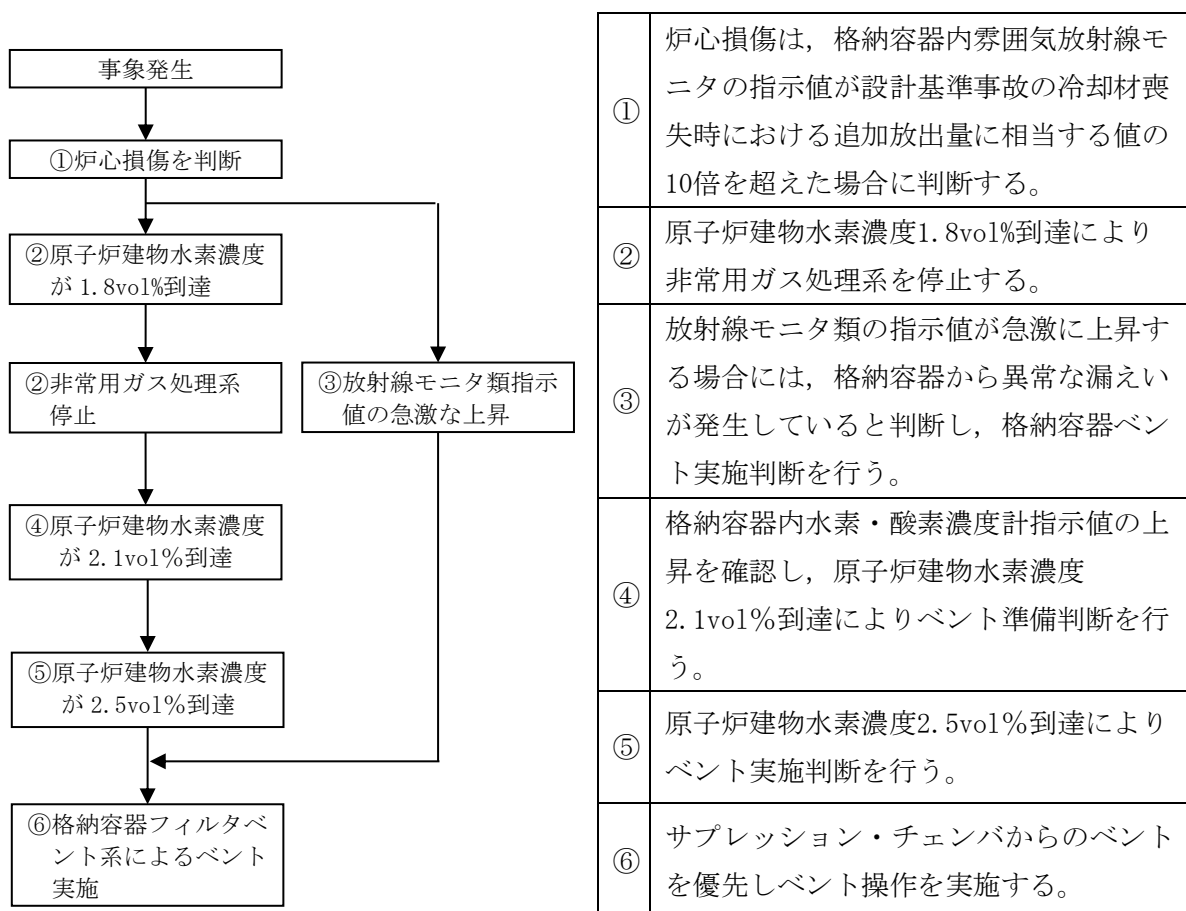


図1 格納容器の異常な漏えいによるベント実施フロー

ベント実施によるプルーム通過時の要員退避について

(1) プルーム通過時における要員退避の考え方

炉心損傷後のベント実施時には、放出されるプルームの影響によって発電所周辺の放射線線量率が上昇する。そのため、プルーム通過時において、重大事故等に対処する要員は、緊急時対策所及び中央制御室待避室で待避又は発電所構外へ一時退避する。緊急時対策所及び中央制御室待避室については、空気加圧することでプルームの流入を抑え、放射線影響を低減させる。発電所構外への一時退避については、発電所から離れることでプルームの拡散効果により放射線影響を低減させる。

(2) 必要要員数

発電所にて重大事故等に対処する要員は 101 名である。プルーム通過時の必要要員である 69 名は緊急時対策所又は中央制御室待避室で待機することとしており、それ以外の 32 名については発電所構外へ退避する。

(3) 移動時間

発電所構外へ一時退避する場合には、原子力事業所災害対策支援拠点等へ退避することとしている。これらの施設は、発電所から約 12～13km の地点に立地しており、最も遠い施設まで徒歩による一時退避を行う場合の所要時間は約 4 時間と評価している。

緊急時対策所へ待避する場合の移動時間については、アクセスルートのうち、緊急時対策所から最も距離のある地点（放水接合槽）から緊急時対策所へ図 1 に示すアクセスルートを徒歩移動によって待避した場合の移動時間は約 50 分である。

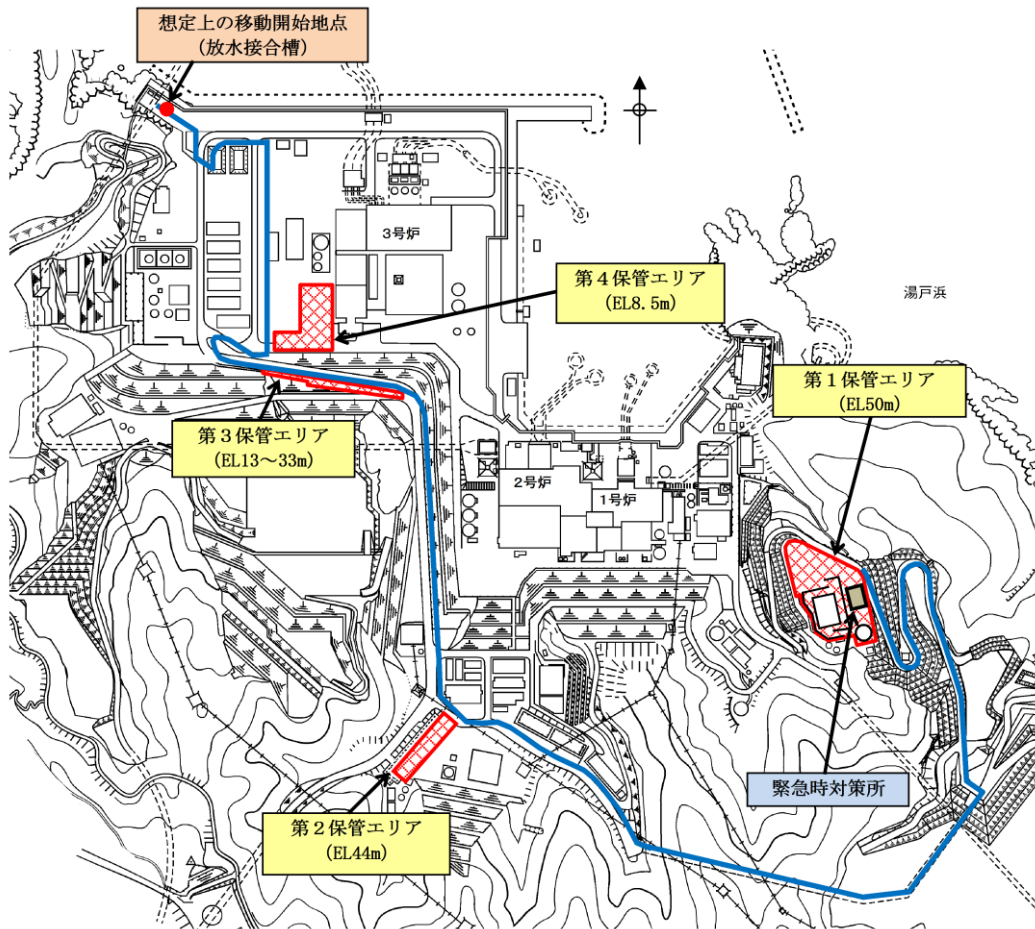


図1 放水接合槽から緊急時対策所への最も距離のあるアクセスルート

(4) 有効性評価シナリオでの退避タイミング

- a. サプレッション・プール水位が通常水位+約 1.3m 到達によるベント
 有効性評価のうち、炉心損傷後のベントシナリオである「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用しない場合）」における要員一時退避及び待避開始時間及びベント時間の関係を表1に、ベント実施に係る対応の流れを図2に示す。

表1 静的負荷におけるベント準備時間及びベント時間の退避

項目	基準	事象発生からの到達時間
発電所構外への一時退避	格納容器圧力 640kPa[gage]到達	約 27 時間後
緊急時対策所への待避	サプレッション・プール水位が通常水位+約 1.2m 到達	約 31 時間
ベント操作	サプレッション・プール水位が通常水位+約 1.3m 到達	約 32 時間後

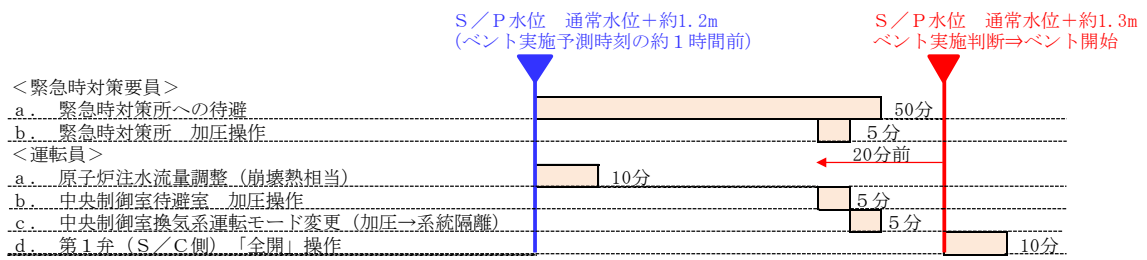


図2 ベント実施に係る対応の流れ

表1に示すとおり、発電所構外への一時退避及び緊急時対策所への待避については、移動開始からベント操作まで約5時間あることから最も遠い退避施設への退避が可能であり、緊急時対策所への待避については、移動開始からベント操作まで約1時間*あることからベント実施判断基準到達までに緊急時対策所への待避可能である。そのため、ベント操作開始に影響を与えることはない。また、中央制御室の運転員については、ベント実施後速やかに中央制御室待避室へ待避する。

※緊急時対策要員：待避時間（約50分）及び緊急時対策所の加圧操作時間（約5分）に余裕を考慮し設定

運転員：原子炉への注水流量調整（約10分）及び中央制御室待避室の加圧操作時間（約5分）を踏まえ、緊急時対策要員の待避開始と同じタイミングに設定

表2及び図3に示すとおり、プルーム通過時の待避期間(評価上10時間)において、実施する必要のある現場操作及び作業がないため、要員が待避することに対する影響はない。

表2 ベント実施の待避期間中における格納容器の状態及び操作

作業項目	待避期間中における状況	作業の要否
原子炉注水	低圧原子炉代替注水系（常設）による注水を継続	待避期間における流量調整（崩壊熱相当）は不要
格納容器スプレイ	ベント実施前に停止	—
電源	ガスタービン発電機により給電	自動燃料補給により作業不要
水源	低圧原子炉代替注水槽の水を使用	待避期間中における補給は不要
燃料	大型送水ポンプ車を使用	流量調整により待避期間における燃料補給は不要

b. 格納容器酸素濃度ドライ条件で 4.4vol%及びウェット条件で 1.5vol%到達によるベント

炉心損傷後においては、格納容器内での水素燃焼を防止する観点から、格納容器酸素濃度がドライ条件において 4.4vol%及びウェット条件で 1.5vol%に到達した場合、ベント操作を実施することとしている。

雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用する場合）においては、水素及び酸素の発生割合（G値）の不確かさが大きく、あらかじめ待避基準を設定できないため、酸素濃度の上昇速度からドライ条件で 4.4vol%及びウェット条件で 1.5vol%到達時間を予測し、退避を実施する。また、退避開始からプルーム通過時の退避時において、実施する必要がある現場操作及び作業がないため、要員が退避することに対する影響はない。

エアロゾルの粒径分布が除去性能に与える影響について

JAVA 試験における試験用エアロゾルの粒径は、JAVA 試験装置からエアロゾルをサンプリングし、で観察することにより、粒径分布を測定している。過酷事故解析コード (MAAP コード) より得られる粒径について、JAVA 試験において得られたエアロゾルの粒径との比較検証を行い、想定される粒径分布の全域を包絡できていることを確認することで、重大事故等時に想定されるエアロゾルの粒径分布においても、JAVA 試験と同様の除去性能 (DF 1,000 以上) が適用可能であることを確認した。

(1) エアロゾルの粒径分布の妥当性

a. JAVA 試験における粒径分布

JAVA 試験においては、を試験用エアロゾルとして用いており、それぞれの質量中央径 (MMD) は以下のとおりである。



JAVA 試験に用いられた試験用エアロゾルの粒径の測定は、JAVA 試験装置のフィルタ装置前段の配管部からサンプリングしたエアロゾルを、観測を用いてエアロゾル粒子の量と粒径を測定し、粒径分布を求めている。による測定誤差は、である。試験用エアロゾルの粒径分布を図 1 に、JAVA 試験装置のサンプリングラインを図 2 に、サンプルガスの取出し部分の概要を図 3 に示す。

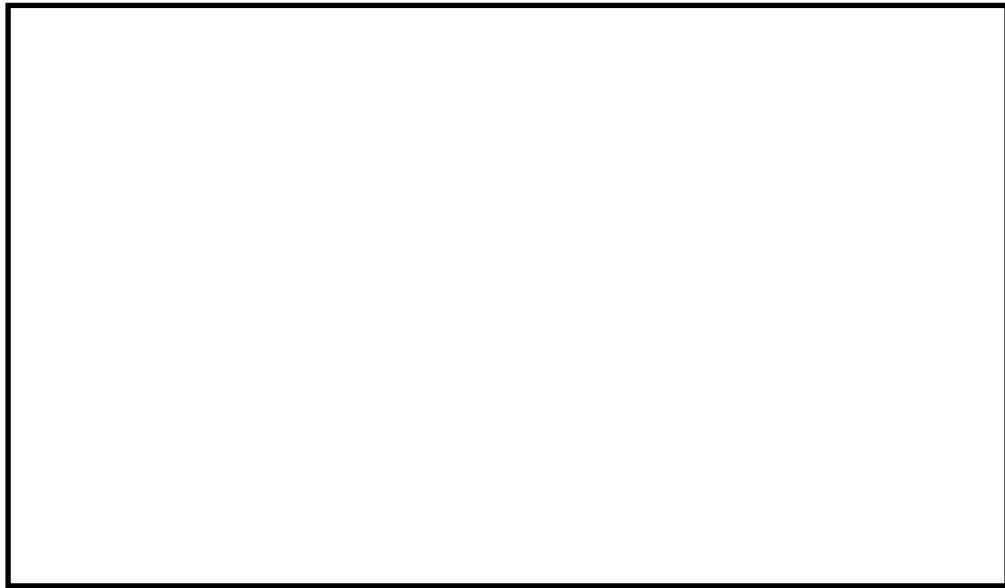


図1 試験用エアロゾルの粒径分布



図2 JAVA試験装置のサンプリングライン

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図3 サンプルガスの取出し部分概要図

(2) 重大事故時に想定される粒径分布

重大事故が発生した際に格納容器に放出されるエアロゾルの粒径は、凝集効果及び沈着効果の自然現象に加えて、格納容器スプレイ効果やサプレッション・プール水におけるスクラビング効果といった除去機構により粒径分布の幅が限定される。

MAAPコードではこれらの効果を考慮してエアロゾルの粒径分布を評価している。

a. 凝集効果及び沈着効果

エアロゾルの粒径分布は、凝集効果及び沈着効果により、安定状態では、ある粒径に中心をもつような分布が形成される（参考図書1）。エアロゾルの粒径分布形成のイメージを図4に示す。以下に、凝集効果及び沈着効果について示す。

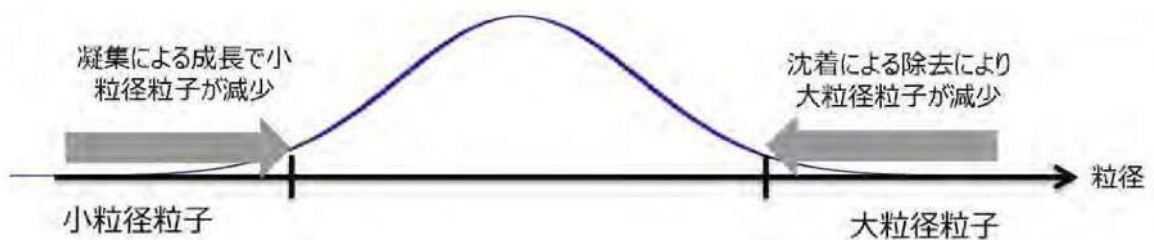


図4 エアロゾル分布形成のイメージ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(a) 凝集効果

小粒径の粒子はランダムな運動（ブラウン運動：Brownian Diffusion）により，他の粒子と衝突し凝集することでより大きな粒子へと成長する。小粒径の粒子は特に大粒径の粒子と衝突し凝集する傾向が見られる。凝集効果の例を図5に示す。

横軸は粒径 (D_{p1})，縦軸はブラウン運動による凝集係数 (Brownian coagulation coefficient) を表しており，凝集係数が大きい場合に凝集効果が大きいことを意味する。凝集係数は凝集する相手の粒子の粒径 (D_{p2}) により変化するため， D_{p2} の違いによる凝集係数が複数の曲線で示されている。 $D_{p2} > D_{p1}$ の場合， D_{p1} が小さくなると凝集係数は大きくなる。

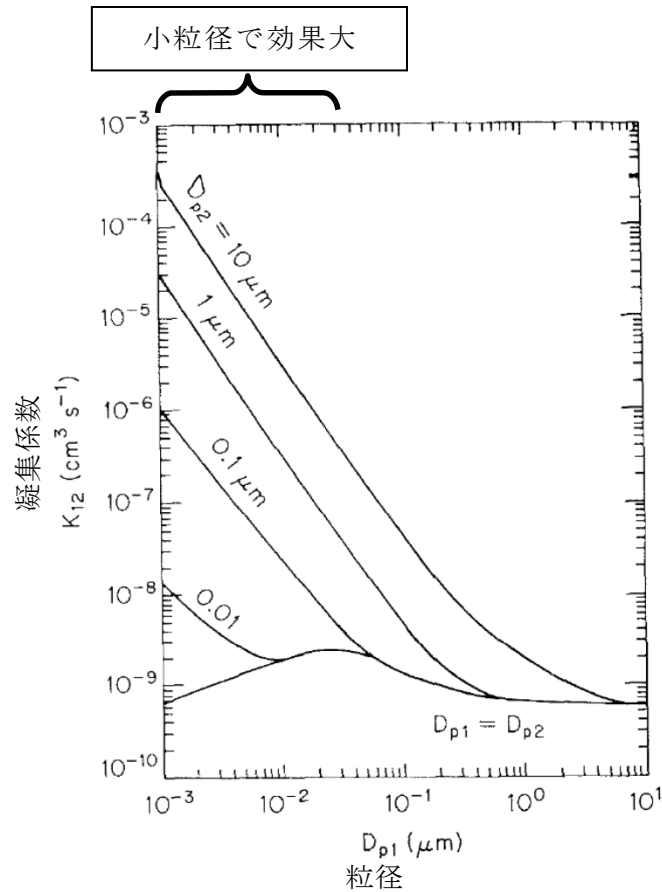


図5 凝集効果の例 (参考図書2)

(b) 沈着効果

大粒径の粒子は重力の影響によって比較的沈着し易く、床・壁に付着することで減少する傾向が見られる。粒子の密度が一定と仮定した場合には、粒子径が大きいほど沈着効果を期待することができる。沈着効果の例を図6に示す。

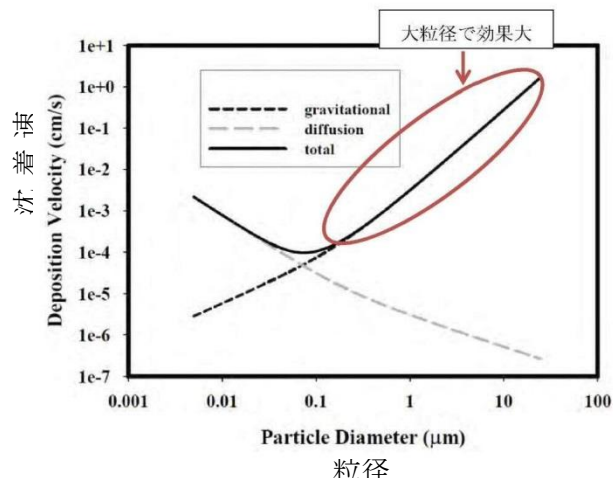


図6 沈着効果の例 (参考図書1)

b. 格納容器内でのエアロゾル除去

格納容器内では、格納容器スプレイ効果やサプレッション・プール水におけるスクラビング効果によって、エアロゾルが除去される。以下に、格納容器スプレイ効果及びサプレッション・プール水におけるスクラビング効果について示す。

(a) 格納容器スプレイ効果

格納容器スプレイでは、水滴が落下する間に、さえぎり効果、拡散効果及び慣性衝突効果の除去メカニズムが働く。

図7では格納容器スプレイを継続することによる格納容器内のエアロゾルの粒径分布の変化の例を示す。初期の段階 (DF=1.1) では、エアロゾル粒径は最大値が約 $1\mu\text{m}$ で幅の広い分布を持っているが、格納容器スプレイを継続すると、大粒径の粒子と小粒径の粒子が効率的に除去され、粒径分布の最大値は小さくなり、また分布の幅も小さくなる。

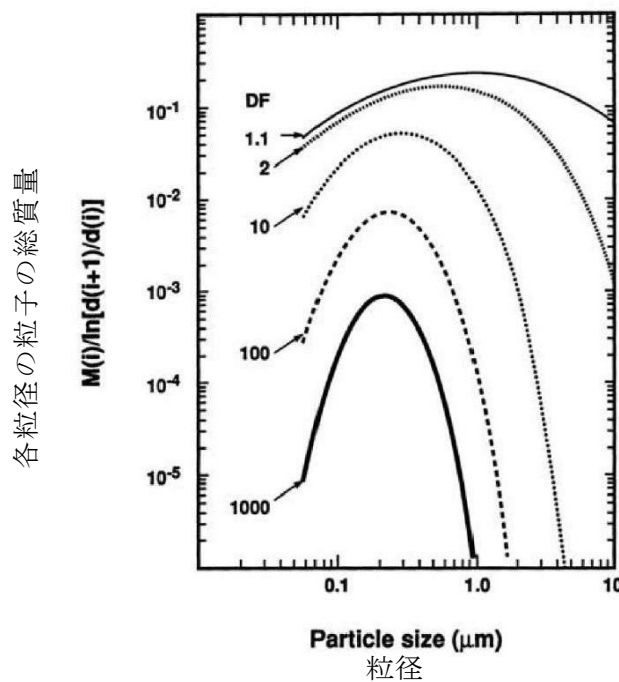


図7 格納容器スプレイ継続による格納容器内の粒径分布の変化 (参考図書1)

(b) サプレッション・プール水におけるスクラビング効果

サプレッション・プール水におけるスクラビングでは、気泡が上昇する間に図8に示すような種々の除去メカニズムが働く。安定した気泡内のエアロゾル除去は、重力沈降、慣性衝突が支配的となるため、粒径が大きいエアロゾルが効果的に除去される。サプレッション・プール水におけるスクラビングによるエアロゾル除去原理のイメージを図8に、サプレッション・プール水におけるスクラビングによる除去性能の実験結果の例を図9に示す。

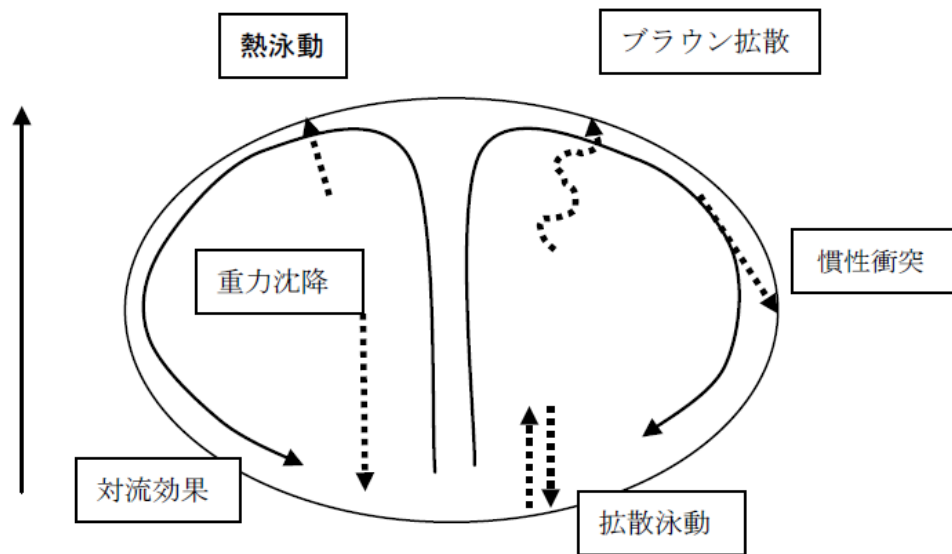


図8 サプレッション・プール水におけるスクラビングによるエアロゾル除去原理

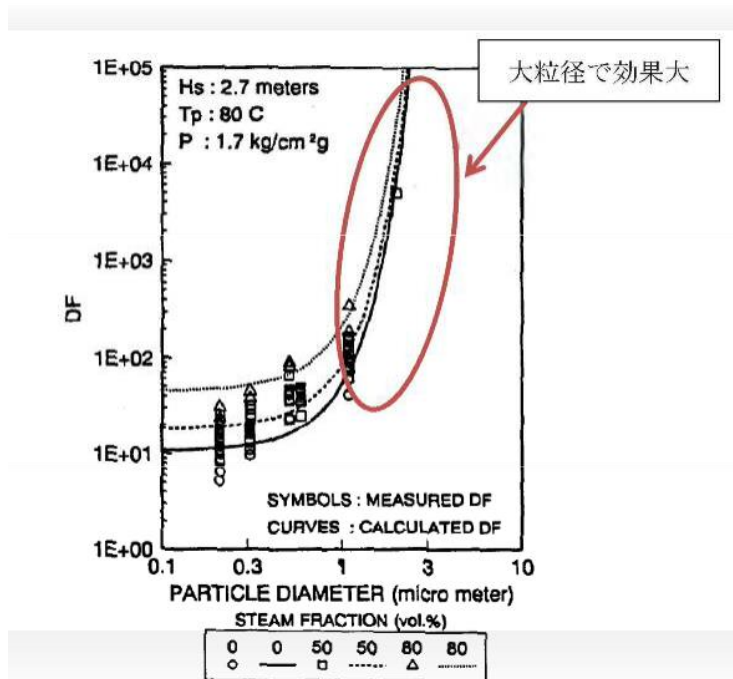


図9 サプレッション・プール水のスクラビングによる除去性能の例 (参考図書3)

c. 重大事故等時に想定される粒径分布

重大事故等時に想定される粒径は、上記 a. b. に示したエアロゾルの除去効果により主にサブミクロン（0.1 から 1 μm 程度）になると考えられる。その代表径として、粒径分布の MMD を 0.5 μm にもつ粒径分布を重大事故等時に想定される粒径分布とした。

(参考1) エアロゾル粒径と除去係数の関係

除去係数(以下、「DF」という。)は、フィルタ装置に流入したエアロゾル重量とフィルタ装置から放出したエアロゾル重量の比として、以下の式で表される。また、表1にベント位置の違いによる粒径分布を示す。

$$DF = \frac{M_{\text{流入したエアロゾル重量}}}{M_{\text{放出したエアロゾル重量}}} = \frac{\int M(\phi)_{\text{流入したエアロゾル粒径}} d\phi}{\int M(\phi)_{\text{放出したエアロゾル粒径}} d\phi}$$

表1 想定事故シナリオのエアロゾル粒径分布

想定事故シナリオ	ベント時間 [h]	ベント位置	質量中央径 (MMD) [μm]	幾何標準偏差 σ g [-]	エアロゾル量 [g]
雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)	32	W/W		0.19	1.8
		D/W		0.27	3,500

ドライウェルからのベントを行う場合は、サブプレッション・プール水におけるスクラビング効果による大粒径のエアロゾルの除去が行われないことから、上式のフィルタ装置に流入したエアロゾルの重量が大きくなる。このため、ドライウェルからのベントを行う場合は、サブプレッション・チェンバからのベントを行う場合と比較して、高いDFが確保される。

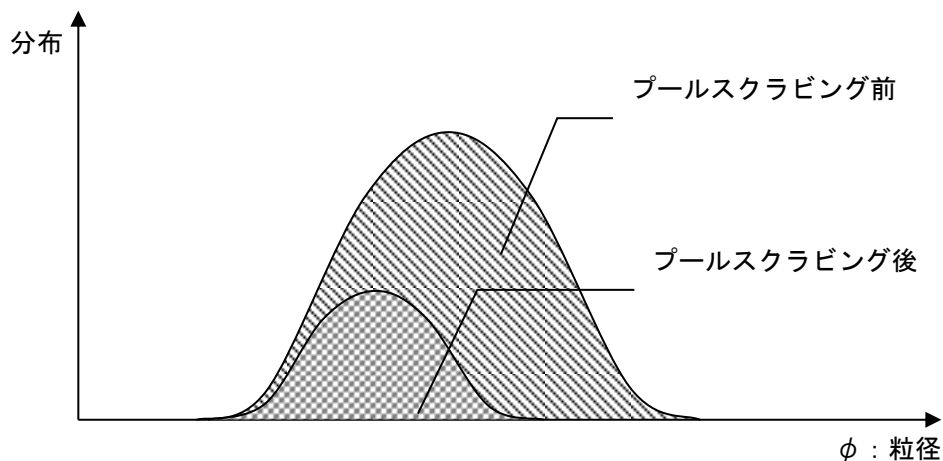


図1 プールスクラビングによる粒径分布の変化のイメージ

(1) 試験用エアロゾル粒径分布の妥当性

JAVA試験では、様々な分布を持つ複数のエアロゾルを使用している。これらの試験用エアロゾルとMAAPにより想定される粒径分布の比較を図2に示す。

一方、ウェットウェルベントでは、サプレッション・プール水でのスクラビング効果により粒径の大きいエアロゾルが除去されるため、ドライウェルベントに比べフィルタ装置のDFが低くなることが考えられる。

この比較により、使用した試験用エアロゾルにて、MAAPにより想定される粒径分布の全域を包絡できていることが確認でき、これらの試験用エアロゾルで試験を行うことで、想定粒径全体の性能を確認することができる。また、図2からサプレッション・チェンバからのベントと比較し、ドライウェルからのベントでは、より大きな粒径のエアロゾルが存在することから、高いDFが期待できる。



図2 試験用エアロゾルとMAAPより想定される粒径分布の比較

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

《参考図書》

1. NEA/CSNI/R(2009)5 STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS
2. California Institute of Technology FUNDAMENTALS OF AIR POLLUTION ENGINEERING
3. 22nd DOE/NRC Nuclear Air Cleaning and Treatment Conference
Experimental study on Aerosol removal effect by pool scrubbing,
Kaneko et al. (TOSHIBA)

(参考2) 粒径分布の妥当性について

JAVA 試験の試験用エアロゾルと MAAP により想定される粒径分布を、図1のとおりに比較することにより、使用した試験用エアロゾルにて MAAP により想定される粒径分布の全域を包絡できていることを確認している。

一方、MAAP により想定される粒径分布は、炉心状態、事故後の経過時間及び格納容器内におけるエアロゾル粒子の濃度の違いにより、変化することが考えられるため、その影響について考察した。



図1 試験用エアロゾルと MAAP より想定される粒径分布

(1) 炉心状態

MAAP 解析においては、エアロゾル量を保守的に評価するため、炉心状態として燃焼サイクル末期を想定している。

炉心状態としてサイクル末期を想定した場合、初装荷炉心と比べ、格納容器内に放出される核分裂生成物の総量は大きくなり、格納容器内のエアロゾル粒子の濃度が高くなる。エアロゾル粒子の濃度が高くなると、エアロゾル粒子同士の衝突の頻度が高くなり、より大きい粒径のエアロゾル粒子が生成されやすくなる。その結果として、格納容器内の粒径分布はより大きい方向にシフトすることになる。

ウェットウェルベントの場合、エアロゾルはスクラバ容器に流入する前にサプレッション・プールでスクラビングされ、より粒径の大きい粒子が特に多く除去されるため、初装荷炉心の粒径分布との差異が小さくなることから、炉心状態が粒径分布に与える影響は限定的と考える。

(2) 事故後の経過時刻

エアロゾルの流入量が多い時間帯はベント直後であることから、粒径分布としてベント直後を想定している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ベント後長期においては、ベント直後と比較して、格納容器内の粒径分布が変化することが考えられるが、前項に示したとおり、ウェットウェルベントの場合、エアロゾルはスクラバ容器に流入する前にサプレッション・プールでスクラビングされ、より粒径の大きい粒子が特に多く除去されるため、スクラビング前の粒径分布の差異が、スクラビング後はより小さくなることとなる。

したがって、ベント時間帯の違いが粒径分布に与える影響は限定的と考える。

(3) 中・低揮発性核種の放出割合の変更

別紙 33（参考 4）に示したとおり、スクラバ容器に流入するエアロゾル量を評価する際、放出割合として単に MAAP 解析により得られた放出割合の評価結果を採用するのではなく、NUREG-1465 の知見を利用している。このことは、原子炉圧力容器から格納容器内に流入する中・低揮発性核種のエアロゾル量をより少なく評価していることに相当している。そのため、上記の評価手法を取り入れることで、格納容器内のエアロゾル濃度は小さく評価され、エアロゾル粒子の粒径分布は小さい方向にシフトすると考えられるが、前項に示したとおり、ウェットウェルベントの場合、エアロゾルはスクラバ容器に流入する前にサプレッション・プールでスクラビングされ、より粒径の大きい粒子が特に多く除去されるため、スクラビング前の粒径分布の差異が、スクラビング後はより小さくなることとなる。

したがって、中・低揮発性核種の放出割合の変更することが粒径分布に与える影響は限定的と考える。

適合性審査において確認を行う事項（第50条等，FCVS）
に対する記載事項について

適合性審査において確認を行う事項に対する各資料の回答記載箇所について次項に示す。

基準規則 (本文)	基準規則 (解釈)	確認ポイント
第1項 a) 設置		a-1. 設置目的
		a-2. 位置、構造、設備
		a-3. 設計条件
		a-3-1. 条件
		a-3-2. 材料
		a-3-3. 必要となる資機材
		a-4. 隔離弁等の信頼性
		・隔離弁としての信頼性
		・ベント弁としての信頼性
		a-5. ベント手順
		a-5-1. 手順着手の判断基準
		a-5-2. ベント実施の判断基準
a-5-3. 操作手順		
第1項 b) i) 低減		a-6. 操作性
		a-7. 使用後の考慮事項
		a-8. 監視・計測
		a-9. 保守管理
		a-10. 海外の先進事例との比較
		a-11. 引用文献、品質保証の妥当性
		a-12. その他
		・ヨウ素対策の許認可上の位置付け
		・CV減圧速度の確認
		・基敷の違いによる考察
		・凝縮水の排水
		・間欠運転実施時の考慮事項
b-1-1. 除去対象及び除去原理		
b-1-2. 性能試験方法		
・試験条件		
・試験粒子		
・計測器		
b-1-3. 性能試験結果		
・条件毎の除去効率		
・部位毎の除去効率		
・粒径分布による影響		
・運転範囲との関係の確認。		

基準規則 (本文)	基準規則 (解釈)	確認ポイント
		b-1-4. 試験のスケール性
		b-1-5. 待機中の除去性能維持
		・水位、pH
		b-1-6. 使用時の除去性能維持
		・水位、pH
		・目詰まり、圧損
		b-1-7. 長時間使用時の性能維持
		・長期使用時の検討事項
		・崩壊熱の影響
		b-1-8. 使用後の保持性能の維持
		・再揮発、再浮遊
		b-1-9. その他
第1項 b) ii) 防爆		b-2-1. 防爆に対する基本方針
		b-2-2. 系統内の可燃性ガスの滞留防止
		・配管の設計
		・容器の設計
		・監視設備
		・窒素供給設備
		b-2-3. ベント使用前
		・窒素バージ
		・計測
		b-2-4. ベント使用初期
		・系統内の水蒸気凝縮
		・装置下流側の対向流
b-2-5. ベント使用長期及び使用後		
b-3-1. 他への悪影響の確認 (SGTS、耐圧強化ベント)		
b-4-1. 負圧破損防止の確認		

基準規則 (本文)	基準規則 (解釈)	確認ポイント
48条 43条 1項1号 1項2号 1項3号 1項4号 1項5号 1項6号 2項1号 2項2号 2項3号	第1項 b) v) 人カ 第1項 b) vi) 人カ 放射線防 護 第1項 b) vi) 圧力 開放板 第1項 b) vi) CVと 水没評価 第1項 b) ix) 使用 後の放射 線防護 審査会合 主な論点 d) 43条 1項1号 1項2号 1項3号 1項4号 1項5号 1項6号 2項1号 2項2号 2項3号	b-5-1. 対象弁
		b-5-2. アクセシビリティ及び作業環境
		b-5-3. 人カ操作の妥当性
		b-6-1. 放射線防護対策
		b-6-2. 線量評価
		b-7-1. ラブチャージャーディスクの設定圧の確認
		b-8-1. ベントラインの取り出し位置及び水没評価
		b-9-1. フィルタ装置の放射線防護対策
		・線量低減目標
		・線量低減対策
		b-9-2. 線量評価
		一般公衆被ばく低減対策 外的事象に対する耐性 事故後の周辺作業の成立性 48-1. 敷地境界での線量評価 43-1-1. 環境条件 43-1-2. 操作性 43-1-3. 試験又は検査 43-1-4. 切り替え性 43-1-5. 悪影響防止 43-1-6-1. 使用時の操作性 43-1-6-2. 使用後の放射線防護対策 43-2-1. 容量の妥当性 43-2-2. 共用の禁止 43-2-3. DB設備との同時の機能喪失

NP設置許可基準規則 (本文)	設置許可基準規則(解説)	確認ポイント	具体的な確認内容	審査資料記載箇所
<p>(原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)</p> <p>第五十条 発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために必要な設備を設けなければならない。</p>	<p>第50条(原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)</p> <p>1 第50条に規定する「原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために必要な設備」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。</p> <p>a) 格納容器圧力逃がし装置又は格納容器再循環モニタを設置すること。</p>	<p>a-1. 設置目的</p> <p>a-2. 位置、構造、設備</p> <p>a-3. 設計条件 a-3-1. 条件 ・設計条件がリスト化され、設定根拠の妥当が妥当か。特に、フィルタベントの最高使用温度及び圧力、設計流量、静的・動的負荷を確認。</p>	<p>①原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために格納容器圧力逃がし装置を設置する方針を確認。 →具体的な低下は、有効性評価で確認。</p> <p>① 設備範囲が特定された上で設備構成が妥当なものか。</p> <p>②設置場所、排気位置、原子炉建屋との接合関係を確認。</p> <p>③基本仕様(主配管、主要弁、フィルタ装置、圧力開放板、オリフイス、伸縮継手のスペース)の確認。</p> <p>①設計条件として、以下の項目が示されているか。 ☆フィルタベント装置のスペース ・フィルタベントの最高使用温度 ・静的・動的負荷を踏まえたフィルタベントの最高使用圧力及び耐圧設計方針 ・設計流量 ・除去性能 ・フィルタ装置のエアロゾル最大保持量 ・フィルタ装置の有機、無機ヨウ素最大保持量 ・熱負荷条件(設置区画のコンクリートの耐久性、局所的な温度上昇含む) ・機器クラス ・耐震クラス ☆格納容器側の条件 ・格納容器内の雰囲気制御 ・格納容器内で発生する最大熱量及び水蒸気量 ・発生最大エアロゾル量及びガス状物質の量 ・発生可燃性ガスの種類と最大量 ・発生化学種の種類</p>	<p>審査資料記載箇所</p> <p>①本文1 概要</p> <p>① 本文2 設計方針</p> <p>② 本文2.1 系統設計 本文2.7.3 配管及び弁類</p> <p>③ 本文2.7 格納容器フィルタベント系</p> <p>① ☆フィルタベント装置のスペース ・本文2.6 設計条件 【最高使用温度・圧力、耐圧設計方針、設計流量、熱負荷条件】 ・本文2.7.2 フィルタ装置【除去性能】 ・別紙36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの開塞について【エアロゾル保持量】 ・別紙37 ベンチュリスクラバにおける無機ヨウ素の再揮発・薬剤の容量不足について【無機ヨウ素保持量】 ・別紙38 銀ゼオライトフィルタにおけるヨウ素の再揮発、吸着飽和及び吸着材の変質について【有機ヨウ素保持量】 ・別紙14 格納容器フィルタベント系の漏えいに対する考慮について【機器・耐震クラス】</p> <p>☆格納容器側の条件 ・別紙9 格納容器フィルタベント系の系統設計条件の考え方について【雰囲気制御・熱量・水蒸気量】 ・別紙36【発生エアロゾル量】 ・別紙37,38【ガス状物質の量】 ・別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について【発生可燃性ガスの種類と最大量】 ・別紙9 格納容器フィルタベント系の系統設計条件の考え方について【発生化学種の種類】</p>

	<p>②各設計条件の設定根拠を確認し、妥当なものとなっているか。特に、以下を確認。</p> <p>②-1 フィルタメントの最高使用温度の設定の考え方の妥当性の確認。</p> <p>②-2 耐圧設計方針において、対象部位がリスト化され(配管、容器、内部構造物)、動的・静的負荷が適切に考慮する方針(部品の固定を含む)としているか。(特に、低温のスクラビング水、低温の入口及び出口配管、ウォーターハンマーなどの蒸気凝縮の効果の考慮が妥当か。)また、フィルタメントを長期使用した場合の振動を考慮したスクラビングノズルの構造健全性を確認。</p> <p>②-3 格納容器圧力逃がし装置の排出可能な蒸気量が重大事故等の発生時に格納容器内で発生する蒸気量よりも大きいことを確認。</p> <p>②-4 ベント系の圧損 格納容器圧力が最高使用圧力において要求流量以上確保できることを確認。</p> <p>②-5 格納容器側の条件の不確かさを踏まえた最高使用温度及び圧力となっているか。</p> <p>②-6 線が設置区画に移行する場合には、区画の温度制限、他の機器への悪影響を考慮しているか。</p>	<p>②-1 別紙9 格納容器フィルタメント系の系統設計条件の考え方について</p> <p>②-2 本文2.7 格納容器フィルタメント系【耐圧対象部位】 別紙9 格納容器フィルタメント系の系統設計条件の考え方について【荷重の考慮】 別紙36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について【スクラビングノズルの健全性】</p> <p>②-3 別紙9 格納容器フィルタメント系の系統設計条件の考え方について</p> <p>②-4 別紙25 流量制限オリフィスの設定方法について</p> <p>②-5 別紙9 格納容器フィルタメント系の系統設計条件の考え方について</p> <p>②-6 本文2.6 設計条件</p>
<p>a-3-2. 材料 ・強度 ・耐食性</p>	<p>①フィルタメントシステムが使用又は待機中の圧力、温度、荷重、放射線、腐食の条件に対して耐性のある材料を用いる設計とされているか。(特に、ヨウ素化学種による金属フィルタの腐食について検討しているか。)</p> <p>②既設のとおりあい部等に放射線配管を使用する場合は、腐食等の影響の検討がなされ、適切に対応しているか。</p>	<p>①本文2.7.1 系統構成 別紙14 格納容器フィルタメント系の漏えいに対する考慮について 別紙20 ステンレス構造材、膨張黒鉛パッキンの妥当性について</p> <p>②別紙14 格納容器フィルタメント系の漏えいに対する考慮について 別紙44 設備の維持管理についての補足事項</p>
<p>a-3-3. 必要となる資機材</p>	<p>①運転に必要な動力源(電源、加圧空気)、水源、薬剤などが適切に準備されるか。</p>	<p>①本文2.8.3 補給設備 別紙21 スクラビング水の保有水量について 別紙31 電源構成の考え方について</p>
<p>a-4. 隔離弁等の信頼性 ・隔離弁としての信頼性 ・ベント弁としての信頼性</p>	<p>①隔離弁として信頼性の高い構造であるか、多重化されていることを確認。 ②ベント弁として信頼性の高い構造、並列化。 ・開放手段をリスト化し、各々について信頼性を確認。 ・並列化(例: ウェットウェルラインとドライウェルライン、各弁でバイパスラインを設ける)</p>	<p>①本文2.6 設計条件 本文2.7.3 配管及び弁類 ②別紙7 主ライン・弁の構成について</p>

<p>a-5. ベント手順 a-5-1. 手順着手の判断基準</p>	<p>①ベント手順着手の判断基準が適切に設定されているか。 以下の観点から確認を行う。 ・利用可能なパラメータを使用しているか。 ・余裕時間を考慮して作業可能な時間に手順着手の判断が可能か。 ②炉心損傷の判断根拠が妥当であるか。</p>	<p>①本文 4 運用方法 4.1.1 炉心が損傷していない場合 4.1.2 炉心が損傷している場合 4.1.3 格納容器フィルタベント系操作手順について ②別紙 40 有効性評価における炉心損傷の判断根拠について</p>
<p>a-5-2. ベント実施の判断基準</p>	<p>①ベント実施の判断の考え方が適切に設定されているか。 特に、事象発生からの時間的な観点と、炉心損傷前か後の観点。 ☆炉心損傷前の判断の妥当性。→（その後に炉心損傷にいたってしまつた場合、再度隔離弁を閉められるか。） ☆炉心損傷後の判断の妥当性。</p>	<p>①本文 4.1.3 格納容器フィルタベント系操作手順について ②別紙 40 有効性評価における炉心損傷の判断根拠について</p>
<p>a-5-3. 操作手順 ・事前準備 ・ベント実施 ・ベント実施後</p>	<p>①ベント準備手順が妥当か。 ・ベント実施後の状況を考慮した窒素供給設備の準備 ・スクラバ水供給準備 ・pHの確認 ・ベント使用時に他系統と隔離する弁が確実に閉とする手順と なっているか。 ②耐圧強化ベント、フィルタベント、代替フィルタベントの運用方法、優先順位が妥当か確認。また、耐圧強化ベントの位置付けが明確にされているか。 ③隔離弁操作の順番が示され、その順番が妥当か。 ④隔離弁の操作内容の確認。（調整開運用又は全開。限界圧力までに実施される手順となっているか。） ⑤ベント停止までの流れが示され、それが妥当か。</p>	<p>①本文 4.1.3 格納容器フィルタベント系操作手順について ②別紙 7 主ライン・弁の構成について ③、④本文 4.1.3 格納容器フィルタベント系操作手順について ⑤別紙 42 ベント停止手順について</p>
<p>a-6. 操作性</p>	<p>①手順上必要な作業の妥当性が掲げられているか確認。主な作業は次のとおり。 ・可搬設備の移動（寄りつき） ・可搬設備の接続作業 ・現場で計器を確認する作業 ②隔離弁の人力操作以外の作業（可搬設備の寄りつき、接続作業）のアクセス性、作業環境（温度、湿度、線量）が示されているか。 ③②の作業環境を踏まえて給水操作、pH管理の作業性を確認。及び予想される注水、補充等の作業に要する時間とベント操作への影響評価の確認。</p>	<p>①本文 4.2 現場における操作について 別紙 53 ベント実施時の影響を踏まえた接続口の優先順位について ②別紙 8 ベント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について ③別紙 8 ベント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について</p>

			<p>④中央制御室からの操作の妥当性を確認。</p> <p>①使用後のスクラバ水のS/Cへの移送方針を確認。</p> <p>②フィルタベントからの漏えい対策（排水を含めて）が適切に検討されているか確認。また、フィルタベント装置の漏えい対策として配管接続部や弁などに用いられるガスケットについて材質などの選定の考え方を確認。</p> <p>③格納容器内に水が溜まっている状態において、耐震上の考慮から格納容器内の水を抜く場合の排水口が設けられているかを確認。</p> <p>④窒素供給設備の使用のタイミング、使用期間の確認。</p>	<p>④本文 4.1.3 格納容器フィルタベント系操作手順について</p> <p>①別紙 17 格納容器フィルタベント系使用後の保管管理</p> <p>②別紙 14 格納容器フィルタベント系の漏えいに対する考慮について</p> <p>③サブプレッジョン・プール水を廃棄物処理建物に送るための手順を整備している。なお、事象収束後においては、耐震上の要求はないものと考えている。</p> <p>④別紙 2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p>
a-7. 使用後の考慮事項	<p>①監視項目毎の目的が挙げられ、以下の項目がリスト化されているか。</p> <p>☆フィルタ装置の性能を確認するための監視</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フィルタ装置水位、圧力、温度、スクラバ水のpH、保持されたFPの確認のためのフィルタ装置の放射線量、通気されているかの確認のためのラプチャードスク後の圧力 ☆放射線の監視 ・装置下流側の放射線量、装置下流側の流量 ☆防爆のための監視 ・水素濃度 <p>②測定位置、計測範囲が妥当か。</p> <p>③監視計器について、多重性・多様性の観点が適切に検討されているか。</p> <p>④中央制御室以外での状態監視の考え方を確認。</p> <p>⑤計装設備の電源について、容量を踏まえ必要な期間にわたり測定が可能であることを確認。</p>	<p>①別紙 26 格納容器フィルタベント系の計装設備の網羅性について</p> <p>・別紙 30 ベント実施時の放射線監視測定の方え方について</p> <p>②、③</p> <p>・別紙 26 格納容器フィルタベント系の計装設備の網羅性について</p> <p>・別紙 30 ベント実施時の放射線監視測定の方え方について</p> <p>④本文 2.8.1 計装設備</p> <p>⑤別紙 31 電源構成の考え方について</p>		
a-8. 監視・計測 ・測定項目 ・測定位置 ・多重性、多様性 ・中操以外での監視 ・計装電源	<p>①点検及び試験方法（弁開閉試験、ドレンポンプ作動試験、漏えい試験）が妥当であることを確認。</p> <p>②点検周期の考え方を確認。特にラプチャードディスクの交換頻度が妥当か。</p> <p>③どの程度の寿命を想定しているか。（減肉発生時の対処方針等）</p>	<p>①本文 4.5 格納容器フィルタベント系の維持管理</p> <p>・別紙 44 設備の維持管理についての補足事項</p>		
a-9. 保守管理				

			<p>①海外のFONSと比べて、遜色ない設備となっているか確認。(NEAレポート(例：フィルタバント装置上流側の逆止弁、パイパスラインのラプチャードイスク)、諸外国の規制基準との比較)</p> <p>①引用文献、品質保証の妥当性</p> <p>②性能検証等にかかる品質保証は確立されているか。</p>	<p>①別紙7 主ライン・弁の構成について</p> <p>①引用文献は適切なものを使用し、適宜記載している</p> <p>②別紙34 JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について</p>
a-10. 海外の先進事例との比較		<p>①検討していくとしたヨウ素放出低減対策は、今回の審査範囲に含まれているか。</p> <p>②フィルタへの熱吸収(スクラバタイプの水への熱吸収など)やフィルタ容器、配管での熱損失などを考慮(バント時の水蒸気/非凝縮性ガス生成、出力、圧カレバナルなどに依存)して、CV減圧速度の差の違による考察</p> <p>・凝縮水の排水</p> <p>・間欠運転実施時の考慮事項</p>	<p>①本文1 概要</p> <p>②有効性評価、解析コードで回替</p> <p>別紙25 流量制限オリフィスの設定方法について</p>	
a-11. 引用文献、品質保証の妥当性		<p>③系統内にフィルタ容器が複数ある場合の考慮事項の確認。</p> <p>・スクラバ水のpHの均一性</p> <p>・水位(連結管)</p> <p>・容器毎の非均一なエアロゾルの流入による影響(線量の偏り。)</p> <p>④管内の凝縮水の排水対策を確認。</p> <p>⑤間欠運転を実施する場合には、一般公衆被ばくの可能な限りの低減や再浮遊の観点などが考慮されているか。</p>	<p>③別紙13 フィルタ装置(スクラバ容器)の基数の違いによる影響について</p> <p>④本文2.8.5 排水設備</p> <p>別紙53 バント実施時の影響を踏まえた接続口の優先順位について</p> <p>⑤対象外(間欠運転は想定していない)</p>	
b) 上記a)の格納容器圧力逃がし装置とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。		<p>①除去対象核種と形態を明確にしているか。</p> <p>②エアロゾル除去プロセスを複数のステージに分解し、それぞれについて物理メカニズムを考慮した除去原理となっているか。</p> <p>③②と同様にヨウ素の除去についても物理メカニズムを考慮した除去原理となっているか。</p>	<p>①別紙22 フィルタ装置の各構成要素における機能について</p> <p>②別紙22 フィルタ装置の各構成要素における機能について</p> <p>③別紙22 フィルタ装置の各構成要素における機能について</p> <p>別紙35 JAVA PLUS 試験結果を踏まえた銀ゼオライトフィルタの設計</p>	
i) 格納容器圧力逃がし装置は、排気中に含まれる放射性物質を低減するものであること。		<p>①除去性能試験の条件が妥当なものか。</p> <p>・ 蒸気条件</p> <p>・ スクラバ水温、</p> <p>・ 金属フィルタ、ヨウ素フィルタについては、当該部位の温度。</p> <p>・ pH</p>	<p>①本文3.2 運転範囲</p> <p>本文3.3.1 性能検証試験の概要</p> <p>別紙34 JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について</p>	

		<p>②試験用エアロゾルの妥当性の確認。特に、実験に用いたエアロゾル粒径について、不確かさを踏まえてエアロゾルの粒径分布の妥当性を確認。また、ドライウェルメントを想定した粒径分布も確認。(エアロゾル負荷量も同様に確認。)</p> <p>③粒径同じでも質量が違えばD/Fに及ぼす影響についての考え方を確認。</p> <p>④試験における微粒子の粒径測定等について確認。</p> <p>①流量、蒸気割合、水位、水温、エアロゾル粒子特性の関数としてのエアロゾル除去効率を示しているか。</p> <p>②フィルタバント装置の性能に関し、各部位毎の除去効率を確認。</p> <p>③エアロゾル除去性能について、D/Fの粒径依存性(低粒径でD/Fが下がる)や粒径分布の影響も踏まえて、確実に目標D/F値を確保できることを確認。</p> <p>④試験範囲と運転範囲が整合しているか確認。工学的な判断で運転範囲の妥当性を判断している場合、その根拠が示されているか確認。</p> <p>⑤間欠運転を行う場合には、浮遊/溶融エアロゾルが除去効率に与える影響を検討し、妥当な対応をしているか。配管への付着または配管内の凝縮水の影響について検討し、妥当な対応をしているか。</p> <p>⑥ペント開始時に流入する酸性物質(植酸、窒素酸化物、二酸化炭素)に対するpHへの影響。</p> <p>⑦海外における実験結果との比較を行っている場合、適切な比較となっているか確認。</p>	<p>②、③、④</p> <p>・別紙 48 エアロゾルの粒径分布が除去性能に与える影響について</p> <p>①本文 3.3.2 粒子状放射性物質の除去性能検証試験結果及び評価 別紙 22 フィルタ装置の各構成要素における機能について</p> <p>②別紙 22 フィルタ装置の各構成要素における機能について</p> <p>③別紙 48 エアロゾルの粒径分布が除去性能に与える影響について</p> <p>④別紙 48 エアロゾルの粒径分布が除去性能に与える影響について</p> <p>⑤対象外 (間欠運転は想定していない)</p> <p>⑥別紙 23 スクラビング水のpHについて</p> <p>⑦対象外(海外における実験結果との比較を行っていない。)</p>
<p>b-1-3. 性能試験結果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・条件毎の除去効率 ・部位毎の除去効率 ・粒径分布による影響 ・運転範囲との関係の確認。 	<p>b-1-4. 試験のスケール性</p> <p>①実際の運用方法を考慮しても当該試験の結果が成立するかを確認。また、試験規模から実規模へスケールアップした際に想定される問題点及びその対策が整理されているか確認。</p> <p>②スクラバノズルからの吹き出しが隣接ノズルに影響を与えないか確認。</p>	<p>別紙 34 JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について</p>	

				<p>①スクラバ水のpH、水位の管理を確認。(薬液補給によるpH管理値を設け、適切に管理可能か確認。)</p> <p>②13ヶ月の待機状態を考えたスクラバ水質の経時変化を考慮したフィルタベント装置の性能の維持の妥当性を確認。</p> <p>①不介入時間(例:24時間)についての考え方を確認。</p> <p>②使用時の凝縮、蒸発による水位変動を考慮したpH管理に対する考え方を確認。</p> <p>③スクラビング水の水位上昇に与える悪影響を適切に検討し、液滴セパレータ及び金属フィルタが水没しない設計となっているか。</p> <p>④フィルタの目詰まりの発生の可能性を検討し、適切な容量等を設定していることを確認。(スクラバノズルや金属フィルタ表面積の妥当性も確認。)また、空中に漂った断熱材も考慮し、フィルタベント装置の入口及び出口の閉塞がないことが示されているか。さらに、保持されたエアロゾルに埋まったスパーチャユニットの除去可能性について検討しているか。</p> <p>⑤液滴セパレータを用いる場合、いかなる流動条件においても、液滴セパレータの能力を超える液滴を発生しないことを確認。さらに、液滴セパレータの液滴除去性能を全運転条件範囲で示しているか確認。</p> <p>⑥金属フィルタでの湿分による圧損への影響を検討し、問題がないことを確認。</p> <p>⑦顕ゼオライトを使用する場合、通常運転条件よりも、面速度がかなり速い熱流動条件を含めて、蒸気の凝縮/湿分による吸収特性への影響を検討しているか。(顕ゼオライトを使用する場合、高温やウエット運転での不調がないことを確認。)</p> <p>①長時間使用し続けた場合のDFへの影響、耐久時間等のスペックについて確認。</p> <p>②フィルタベントを長期に使用する場合に検討すべき項目(例えば、スクラバ水の粘性のDFへの影響、水位変動によるpHへの影響等)について考慮されているか。</p>	<p>①別紙23 スクラビング水のpHについて</p> <p>別紙21 スクラビング水の保有水量の設定根拠について</p> <p>②本文4.5 格納容器フィルタベント系の維持管理</p> <p>①本文2.2.2 機器設計</p> <p>別紙21 スクラビング水の保有水量の設定根拠について</p> <p>②別紙23 スクラビング水のpHについて</p> <p>③別紙21 スクラビング水の保有水量の設定根拠について</p> <p>④別紙36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>⑤別紙36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>⑥別紙36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>⑦別紙35 JAVA PLUS 試験結果を踏まえた顕ゼオライトフィルタの設計</p> <p>①本文3.3.3.4 フィルタ装置に関する留意事項</p> <p>②別紙12 スクラビング水の粘性の変化が除去性能に与える影響について【粘性のDFへの影響】</p> <p>別紙23 スクラビング水のpHについて【水位変動によるpHへの影響】</p>
b-1-5. 待機中の除去性能維持 ・水位、pH					
b-1-6. 使用時の除去性能維持 ・水位、pH ・目詰まり、圧損					
b-1-7. 長時間使用時の除去性能の維持 ・長期使用時の検討事項 ・腐蝕熱の影響					

			<p>③本文2.8 附帯設備 別紙 21 スクラビング水の保有水量の設定根拠について</p> <p>④別紙 35 JAVA PLUS 試験結果を踏まえた銀ゼオライトフィルタの設計</p> <p>⑤別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>①別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>別紙 37 ベンチュリスクラバにおける無機よう素の再揮発・薬剤の容量不足について</p>
	<p>③ベント総統最長時間を検討されているか。(フィルタベントの使用時間の想定も確認。)</p> <p>④銀ゼオライトを使用する場合、長期連続運転においても蒸気の凝縮/湿分による吸収特性への影響を検討しているか。(銀ゼオライトを使用する場合、高温やウエット運転での不調がないことを確認。)</p> <p>⑤FP 保持部での崩壊熱の温度上昇、局所的な温度上昇による影響が設備、除去性能に悪影響を及ぼさないことを検討しているか。本影響を検討する際に、格納容器圧力が急上昇、ベント流量が大幅に増加すること、水スクラバを想定し、感度解析を実施しているか。</p>	<p>①捕集若しくは吸着したFPの再揮発、再浮遊の可能性(移動特性)を検討し、それらの対応が適切になされているか。(特に、物理特性、化学特性に言及し、検討していることを確認。また、銀と化学的に結びついたヨウ素の水素による剥離効果、放射性ヨウ素と希ガスの局所β線照射による影響も考慮しているか。)</p>	<p>①別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>②別紙 11 フィルタ装置における化学反応熱について</p> <p>③別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>④別紙 34 JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について</p> <p>⑤本文2.6 設計条件 本文3.2 運転範囲</p>
	<p>b-1-8. 使用後の保持性能の維持 ・再揮発、再浮遊</p>	<p>①エアロゾルの非均一な沈着はないか。仮にあった場合、どのように対応しているか。</p> <p>②装置内での化学反応について、発熱反応か吸熱反応かを示すとともに、装置の性能への影響について評価し、適切な対応がとられているか。また、反応生成物の影響の有無も確認する。</p> <p>③格納容器からの最大のエアロゾル発生量(MCC)を考慮しても除去性能が維持されることを確認。</p> <p>④異なる圧力における流量、そして種々の気体組成に対して感度を評価しているか。</p> <p>⑤除去性能の結果を示す上で、ウエットウエルベント条件、ドライウエルベント条件、格納容器スプレイ条件(スプレイあり、なし、沈着率など含め)を明確化しているか。</p>	<p>①別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>②別紙 11 フィルタ装置における化学反応熱について</p> <p>③別紙 36 エアロゾルの再浮遊・フィルタの閉塞について</p> <p>④別紙 34 JAVA 試験及び JAVA PLUS 試験の適用性について</p> <p>⑤本文2.6 設計条件 本文3.2 運転範囲</p>
<p>ii) 格納容器圧力逃がし装置は、可燃性ガスの爆発防止等の対策が講じられていること。</p>	<p>b-2-1. 防爆に対する基本方針</p> <p>b-2-2. 系統内の可燃性ガスの滞留防止 ・配管の設計 ・容器の設計</p>	<p>①防爆に対する対象設備が明確に示され、それが妥当か。</p> <p>②対応すべき可燃性ガスを明確に示され、それが妥当か。</p> <p>①水素の滞留対策として、連続上り勾配にすることや、U字管などの滞留箇所がないことを確認。</p> <p>②フィルタベント装置、銀ゼオライト容器内の水素滞留がないことを確認。</p>	<p>別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p> <p>①別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p> <p>②別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p>

		<p>・監視設備 ・窒素供給設備</p>	<p>③ベントシステム内に発火源（動的機器、静電気）のないこと、及び自己点火温度に到達するのを避けるなどシステムの点火源をできる限り減らす対策を検討し、対応しているか。 ④水素濃度計設置の目的を確認。 ⑤水素濃度計の原理及び誤差を確認し、水素濃度計設置の目的にあっているか。 ⑥水素濃度測定位置は妥当か。 ⑦フィルタベント装置の交流電源を必要とする設備（水素濃度のサンプリングに用いる交流電源駆動のポンプ等）について交流電源喪失時の考え方を確認。 ⑧可燃性ガス制御のため、モニタリング装置は測定機能を果たし、信頼でき継続的に測定できるか。 ⑨計測の時間遅れを考慮しているか。 ⑩窒素ガス供給装置の供給原理、供給流量の妥当性を確認。</p>	<p>③別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について ④本文2.8.1 計装設備 別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について ⑤別紙 27 格納容器フィルタベント系の計装設備の概略構成図 ⑥別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について ⑦本文2.8.2 電源設備 別紙31 電源構成の考え方について ⑧別紙 26 格納容器フィルタベント系の計装設備の網羅性について ⑨別紙 28 第1ベントフィルタ出口水素濃度計の計測時間遅れについて ⑩2.8.4 可撤式窒素供給装置 別紙32 窒素供給装置の容量について</p>
	<p>b-2-3. ベント使用前 ・窒素パージ ・計測</p>	<p>①窒素ガスによる系統内の置換を行う手順となっているか。 ②パージ完了の判断基準の妥当性を確認。また、N₂置換が維持されるかどうかの妥当性を確認。</p>	<p>①別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について ②別紙 26 格納容器フィルタベント系の計装設備の網羅性について</p>	
<p>b-2-4. ベント使用初期 ・系統内の水蒸気凝縮 ・装置下流側の対向流</p>	<p>①配管内での水蒸気凝縮による水素濃度の上昇及び燃焼の可能性を適切に検討しているか。 ②放出口における水素対策を検討し、適切に対応しているか。（もろじゅにおける1F事故後の水素対策及び一般化学プラントを参考。）（圧力開放板が開放されたときの過渡的な状態でも問題ないか。ベント初期の濃度の高い水素を排出する際に排気側の対向流に対する考え方が妥当か。）</p>	<p>別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p>		
<p>b-2-5. ベント使用長期及び使用後</p>	<p>①放射線分解で発生する水素濃度を定量的に示しているか。 ②①の発生量で水素濃度が燃焼領域に至らないことを確認。 ③窒素ガスによる水素パージの方法とタイミングの妥当性を確認。また、ベント装置停止時の隔離弁の操作が水素滞留を起さないような順番での操作となっていることを確認。 ④窒素ガスによるパージ操作完了の判断基準を確認。</p>	<p>別紙2 水素の滞留に対する設計上の考慮について</p>		
<p>iii) 格納容器圧力逃がし装置の配管等は、他の系統・機器（例えばSGTS）や他号機の格納容器圧力逃がし装置等と共用しないこと。ただし、他</p>	<p>b-3-1. 他への悪影響の確認（SGTS、耐圧強化ベント）</p>	<p>①本文2.6 設計条件 別紙7 主ライン・弁の構成について</p>		

				②耐圧強化ペントラライン等への水素のリークの検知性やAO弁、MO弁の開閉の考え方を確認。 ①使用に際して原子炉格納容器が負圧に至ることはないか確認。 一有効性評価、格納容器破損防止で確認 ②炉心損傷後のペントでは、ペント後大量の冷たい水が格納容器内の圧力容器貫通後の溶融物へ注入され、格納容器内が負圧になる可能性がある。そのような負圧破損防止のための、スプレイの禁止が手順に明確化されているか。 ①人力操作が必要な対象弁として、フィルタペントシステムの全ての弁が対象となっているか確認。 ①人力でペントする場合のアクセス性、作業環境（温度、湿度、線量）を確認し、人力での操作が成立するか確認。（間欠運転を行うことを考えている場合、そのときの成立性も同様に確認。） ①人力操作による訓練結果を確認。 ②トルクは弁前後の差圧を考慮する等、実際の現場操作に即した条件での評価を行っているか確認。 ③余裕時間を考慮した作業開始時間と作業時間になっているか確認。 ①隔離弁操作に対する遮蔽又は隔離等の放射線防護対策の詳細を確認。 ② 力操作が可能な線量範囲となっているか確認。 ①格納容器圧力逃がし装置の使用の妨げにならないよう、十分に低い圧力に設定されたラプチャーディスク(原子炉格納容器の隔離機能を目的としたものではなく、例えば、配管の窒素充填を目的としたもの)を使用しているか確認。 ②ラプチャーディスクの信頼性を確認。 ③ペント配管内の結露水等の凍結によるラプチャーディスクへの影響を確認。	②別紙7 主ライン・弁の構成について ①有効性評価のうち剪断気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損） ②本文 4.4 格納容器フィルタペント系の運用に係る考慮事項 ①本文 4.2 現場における操作について 別紙4 格納容器フィルタペント系隔離弁の人力操作について ①本文 4.2 現場における操作について 別紙8 ペント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について ①、② ・別紙4 格納容器フィルタペント系隔離弁の人力操作について ③本文 4.1.3 格納容器フィルタペント系操作手順について ① 本文 2.7.3 配管及び弁類 別紙8 ペント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について 別紙8 ペント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について ①本文 2.7.3 配管及び弁類 別紙5 圧力開放板の信頼性について ②別紙5 圧力開放板の信頼性について ③別紙5 圧力開放板の信頼性について
への悪影響がない場合を除く。 iv) また、格納容器圧力逃がし装置の使用に際しては、必要に応じて、原子炉格納容器の負圧破損を防止する設備を整備すること。 v) 格納容器圧力逃がし装置の隔離弁は、人力により容易かつ確実に閉操作ができること。 vi) 炉心の著しい損傷時においても、現場において、人力で格納容器圧力逃がし装置の隔離弁の操作ができるよう、遮蔽又は隔離等の放射線防護対策がなされていること。 vii) ラプチャーディスクを使用する場合は、バイパス弁を併置すること。ただし、格納容器圧力逃がし装置の使用の妨げにならないよう、十分に低い圧力に設定されたラプチャーディスク(原子炉格納容器の隔離機能を目的としたものではなく、例えば、配管の窒素充填を目的としたもの)を使用する場合はラプチャーディスクを強制的に手動で破壊する装置を設置する場合を除く。	b-4-1. 負圧破損防止の確認 b-5-1. 対象弁 b-5-2. アクセス性及び作業環境 b-5-3. 人力操作の妥当性 b-6-1. 放射線防護対策 b-6-2. 線量評価 b-7-1. ラプチャーディスクの設定圧の確認				

<p>viii) 格納容器圧力逃がし装置は、最終的にも溶融炉心及び水没の影響を受けやすい場所に接続されていること。</p> <p>ix) 使用後に高線量となる第一等からの被ばくを低減するための遮蔽等の放射線防護対策がなされていること。</p>	<p>b-8-1. ベントラインの取り出し位置及び水没評価</p> <p>b-9-1. フィルタ装置の放射線防護対策 ・線量低減目標 ・線量低減対策</p>	<p>① ドライウェルベントラインの取り出し位置が炉心を水没させ位置よりも上に設置されているか。</p> <p>② ウェットウェルベントラインの水没評価について、減圧時のブール水の体積膨張を考慮しているか。</p> <p>① 被ばくを低減すべき目標値が妥当か。</p> <p>② 使用後のフィルタ及び配管の遮蔽等の放射線防護対策の詳細を確認。</p> <p>③ フィルタ装置内のF P量、配管のF P量の妥当性を確認。</p> <p>④ スクラバ水の漏えいによる放射線防護対策が講じられていることを確認。</p> <p>⑤ フィルタベントの格納槽の壁の貫通口も妥当な設計となっているか確認。</p>	<p>①別紙7 主ライン・弁の構成について</p> <p>②別紙6 格納容器減圧に伴うベント管からサブレッション・チェンバへの冷却水の流入について</p> <p>①、②、③</p> <p>・別紙8 ベント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について</p> <p>④対象外(フィルタ装置は地下格納槽に設置しているため)</p> <p>⑤別紙14 格納容器フィルタベント系の漏えいに対する考慮について</p>
<p>審査会における主要な論点</p>	<p>b-9-2. 線量評価</p> <p>一般公衆被ばく低減対策</p>	<p>① フィルタ装置遮蔽壁周辺の線量評価方法の妥当性を確認。</p> <p>② 低減すべき目標値に照らして被ばく結果が妥当であるか。</p> <p>① 一般公衆の被ばくをできる限り低減する方策がとられていることを確認。特に、水で除去が困難なガス状放射性物質の低減対策について検討の上、説明されているか。(放出高さ及び水で除去が困難なガス状放射性物質の低減対策について検討がなされているか。)(排気筒ではなく原子炉建屋屋上から放出を行う場合、その理由について、定量的に確認。)</p>	<p>別紙8 ベント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について</p> <p>①本文 4.3 一般公衆の被ばくを可能な限り低減するための運用</p> <p>別紙1 ベント方法及び放出位置を変更することによる公衆被ばくへの影響について</p>
<p>(最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)</p> <p>第四十八条 発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備が有する最終ヒートシンクへ熱を輸送する機能が喪失した場合において炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損(炉心の著しい損</p>	<p>外的事象に対する耐性</p> <p>事故後の周辺作業の成立性</p> <p>48-1. 敷地境界での線量評価</p>	<p>① 収納建屋等の外部事象に対する耐性を確認。(原子炉建屋外に施設するフィルタベントについて、自然現象・航空機衝突といった外部事象に対し、原子炉建屋内に施設することと同等以上の耐性を有するか。)特に、ドライウェル側からベントする場合に、フィルタ装置と同等と言えるか。</p> <p>① 事故後の周辺作業環境等復旧作業を制約する要因がないことを確認。</p>	<p>①別紙15 格納容器フィルタベント系の外部事象に対する考慮について</p>
<p>第四十八条 発電用原子炉施設には、設計基準事故対処設備が有する最終ヒートシンクへ熱を輸送する機能が喪失した場合において炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損(炉心の著しい損</p>	<p>事故後の周辺作業の成立性</p> <p>48-1. 敷地境界での線量評価</p>	<p>① 有効性評価における敷地境界での線量評価方法及び結果が妥当なものか確認。(ソースターム、評価日数等)特に、フィルタベント時の被ばく評価について、放出条件を総合的に検討しているか。</p> <p>② 炉心損傷前にフィルタベント、または耐圧強化ベントを使用した場合の線量評価も確認。</p>	<p>①別紙8 ベント実施に伴う現場操作地点等における被ばく評価について</p> <p>別紙1 ベント方法及び放出位置を変更することによる公衆被ばくへの影響について</p>

<p>傷が発生する前に生ずるものに限る。)を防止するため、最終ヒートシンクへ熱を輸送するために必要な設備を設けなければならない。</p>	<p>こと。 b) 重大事故防止設備は、設計基準事故対処設備に対して、多重性又は多様性及び独立性を有し、位置的分散を図ること。 c) 取水機能の喪失により最終ヒートシンクが喪失することを想定した上で、BWR においては、サブプレッションプールへの熱の蓄積により、原子炉冷却機能が確保できる一定の期間内に、十分な余裕を持って所内車載代替の最終ヒートシンクシステム (UHSS) の繋ぎ込み及び最終的な熱の逃がし場への熱の輸送ができること。加えて、残留熱除去系 (RHR) の使用が不可能な場合について考慮すること。 d) 格納容器圧力逃がし装置を整備する場合は、本規程第 50 条 1 b) に準ずること。また、その使用に際しては、敷地境界での線量評価を行うこと。</p>	<p>43-1-1. 環境条件</p>	<p>①想定される重大事故等が発生した場合における温度、放射線、荷重その他の条件が整理されているか。</p>	<p>①本文 5.1.5 第 43 条 重大事故等対処設備 別紙 16 地震による損傷の防止に関する耐震設計方針の説明</p>
<p>(重大事故等対処設備) 第四十三条 重大事故等対処設備は、次に掲げるものでなければならない。 一 想定される重大事故等が発生した場合における温度、放射線、荷重その他の使用条件において、重大事故等に対処するために必要な機能を有し、発揮するものであること。</p>	<p>第 43 条 (重大事故等対処設備) 1 第 1 項から第 3 項までに規定する「想定される重大事故等」とは、本規程第 37 条において想定する事故シーケンスグループ (炉心の著しい損傷後の原子炉格納容器の機能に期待できるものにあつては、計画された対策が想定するもの。)、想定される格納容器破損モード、使用済燃料貯蔵槽内における想定事故及び想定する運転停止中事故シーケンスグループをいう。</p>			

<p>二 想定される重大事故等が発生した場合において確実に操作できるものであること。</p>	<p>43-1-2. 操作性</p>	<p>①a-6の操作性及びび人力操作の妥当性の項目で確認。</p>	<p>—</p>
<p>三 健全性及び能力を確認するため、発電用原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができるものであること。</p>	<p>43-1-3. 試験又は検査</p>	<p>①a-9の項目で確認。</p>	<p>—</p>
<p>四 本来の用途以外の用途として重大事故等に対処するために使用する設備にあっては、通常時に使用する系統から速やかに切り替えられる機能を備えるものであること。</p>	<p>43-1-4. 切り替え性</p>	<p>①系統内の取り合い箇所がイベント使用時のラインナップ可能な設計となっていることを確認。(例えば、常時閉及び電源喪失時にはフェイルクローズとなるなど。)</p>	<p>①本文5.1.5 第43条 重大事故等対処設備 別紙7 主ライン・弁の構成について</p>
<p>五 工場等内の他の設備に対して悪影響を及ぼさないものであること。</p>	<p>43-1-5. 悪影響防止</p>	<p>①b-3-1の項目で確認。</p>	<p>—</p>
<p>六 想定される重大事故等が発生した場合において重大事故等対処設備の操作及び復旧作業を行うことができるよう、放射線量が高くなるおそれが少ない設置場所の選定、設置場所への遮蔽物の設置その他の適切な措置を講じたものであること。</p>	<p>43-1-6-1. 使用時の操作性</p>	<p>①a-6の操作性及びび人力操作の妥当性の項目で確認。</p>	<p>—</p>
<p>七 想定される重大事故等が発生した場合において重大事故等対処設備の操作及び復旧作業を行うことができるよう、放射線量が高くなるおそれが少ない設置場所の選定、設置場所への遮蔽物の設置その他の適切な措置を講じたものであること。</p>	<p>43-1-6-2. 使用後の放射線防護対策</p>	<p>①b-9-1及びびb-9-2の項目で確認。</p>	<p>—</p>
<p>八 想定される重大事故等が発生した場合において重大事故等対処設備のうち常設のもの(重大事故等対処設備のうち可搬型のもの(以下「可搬型重大事故等対処設備」という。))と接続するものにあつては、当該可搬型</p>	<p>43-2-1. 容量の妥当性</p>	<p>①a-3の設計条件の妥当性で確認。</p>	<p>—</p>

<p>重大事故等対処設備と接続するために必要な発電用原子炉施設内の常設の配管、弁、ケーブルその他の機器を含む。以下「常設重大事故等対処設備」という。)は、前項に定めるもののほか、次に掲げるものでなければならぬ。</p> <ul style="list-style-type: none"> 一 想定される重大事故等の収束に必要な容量を有するものであること。 				
<p>二 二以上の発電用原子炉施設において共用するものでないこと。ただし、二以上の発電用原子炉施設と共用することによって当該二以上の発電用原子炉施設の安全性が向上する場合であって、同一の工場等内の他の発電用原子炉施設に対して悪影響を及ぼさない場合は、この限りでない。</p>		43-2-2. 共用の禁止	① 機毎に設置されることを確認。	①本文5.1.5 第43条 重大事故等対処設備
<p>三 常設重大事故防止設備は、共通要因によって設計基準事故対処設備の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、適切な措置を講じたものであること。</p>	<p>4 第2項第3号及び第3項第7号に規定する「適切な措置を講じたもの」とは、可能な限り多様性を考慮したものをいう。</p>	43-2-3. D B設備との同時の機能喪失	① D B設備との同時の機能喪失にいたる可能性のある共通要因が網羅的に挙げられ、それらに対して妥当な設計となっている。	①本文5.1.5 第43条 重大事故等対処設備 別紙15 格納容器フィルタメント系の外部事象に対する考慮について

セシウムの放出割合の評価方法

1. セシウムの放出割合

(1) CsI の形態で存在しているセシウム

全よう素が CsI の形態で存在するものとして整理する。CsI の形態で存在しているセシウムの重量は以下のとおりとなる。

CsI の初期重量[kg]

$$= \text{よう素元素初期重量[kg]} + \text{CsI 初期重量中のセシウム重量[kg]}$$

$$= MI + MI/WI \times WCs$$

$$\text{CsI 初期重量中のセシウム重量[kg]} = MI/WI \times WCs$$

ここで,

MI : よう素元素初期重量[kg]

WI : よう素原子量[-]

WCs : セシウム原子量[-]

(2) CsOH の形態で存在しているセシウム

全セシウムが CsI と CsOH の形態で存在するものとして整理する。CsOH の形態で存在しているセシウムの重量は以下のとおりとなる。

CsOH 初期重量中のセシウム重量[kg]

$$= MCs - \text{CsI 初期重量中のセシウム重量[kg]}$$

$$= MCs - MI/WI \times WCs$$

ここで,

MCs : セシウム元素初期重量[kg]

(3) セシウムの放出量

MAAP 解析により CsI と CsOH の格納容器外への放出割合を評価

$$\text{セシウムの放出重量[kg]} = MI/WI \times WCs \times X + (MCs - MI/WI \times WCs) \times Y$$

X : CsI 放出割合 (MAAP 解析により得られる)

Y : CsOH 放出割合 (MAAP 解析により得られる)

(4) セシウムの放出割合

1. (3) で得られたセシウムの放出量から，セシウムの放出割合を評価
セシウムの放出割合 = セシウムの放出量 / セシウム元素初期重量

$$\begin{aligned} &= MI/WI \times WC_s/MC_s \times X + (1 - MI/WI \times WC_s/MC_s) \times Y \\ &= Y + MI/MC_s \times WC_s/WI (X - Y) \end{aligned}$$

高温使用時におけるフランジ漏えい評価について

格納容器フィルタベント系の使用状態において、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℃, 853kPa)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が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。(図1)

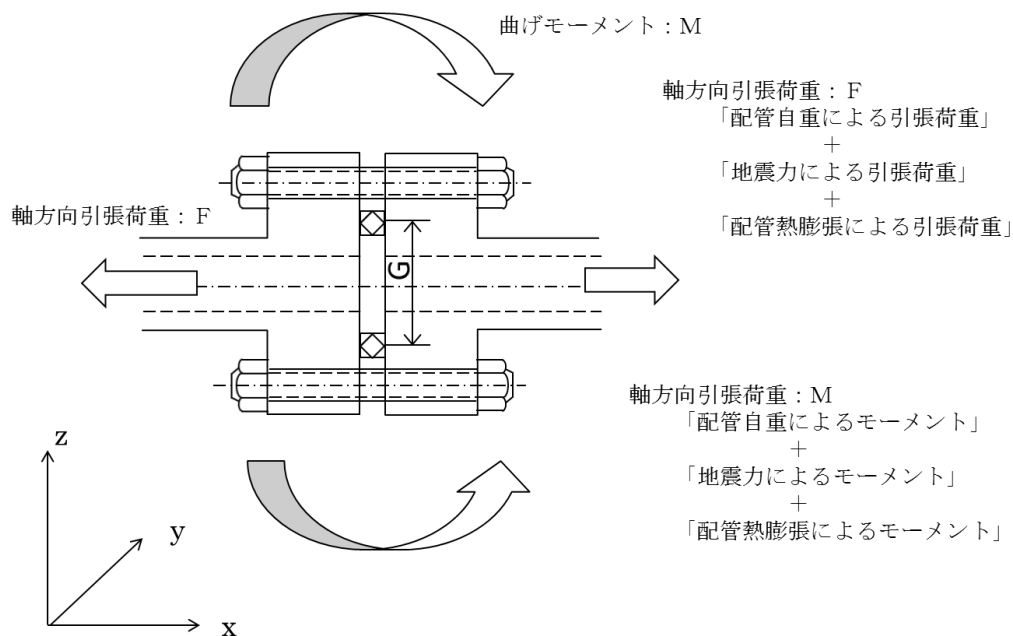


図1 フランジにかかる配管荷重

「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。

$$\sigma = mp + \alpha P_e \leq \sigma_a \quad \dots (1)$$

σ : ガスケット開口圧力 [MPa]

m : ガスケット係数 [-]

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 : ボルトの初期締付け力によるガスケット面圧 [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 : ガスケット接触面の平均直径 [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_x 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配管軸直角 2 方向のモーメント M_y 及び M_z の二乗和平方根 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スケット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、格納容器フィルタベント系の配管応力解析モデルにて、自重、地震荷重、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 xyz 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ランジに作用し、更に内圧として最高使用圧力（0.853MPa）が印加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（表 1 参照）。よって、格納容器フィルタベント系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。

表1 フランジ漏えい評価結果

--

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

格納容器雰囲気温度によるベントの運用について

(1) 格納容器雰囲気温度の監視について

格納容器雰囲気温度計は、ドライウエルに31点、サプレッション・チェンバに6点の計37点を設置しており、各所に分散して配置することにより格納容器全体の雰囲気温度を監視することができる。このうち、重大事故等発生時における監視を確実なものとするため、重大事故等発生時の格納容器内の環境条件においても計測可能な温度計を、ドライウエルに7点、サプレッション・チェンバに2点に分散し、格納容器内の雰囲気温度を一様に計測することとしている。

重大事故等発生時の格納容器内の環境条件においても計測可能な温度計の計測点を図1に示す。

(2) 局所的な温度上昇

格納容器雰囲気温度が局所的に大きく上昇する要因としては、原子炉圧力容器が高圧状態で破損する際に熔融炉心が飛散し、格納容器内に熔融炉心が付着することなどが考えられるが、原子炉圧力容器破損前に原子炉圧力容器を減圧することにより、このような状況に至る可能性を低減する。また、原子炉圧力容器が破損した場合には、熔融炉心がペDESTAL部に落下するが、ペDESTALはドライウエル床面より掘り下げられた構造となっているため、熔融炉心はペDESTALに保持され、ドライウエル床面に流出することはない。さらに、格納容器スプレイ実施時には格納容器雰囲気が冷却されること及び格納容器への注水等による熔融炉心の冷却に伴い発生する蒸気により格納容器内では自然対流が起きていることを踏まえると、熔融炉心からの輻射熱等により格納容器雰囲気温度が局所的に大きく上昇する可能性は低い。また、格納容器圧力限界圧力を下回る最高使用圧力の2倍（853kPa [gage]）到達までにベントを実施することとしているが、853kPa [gage] に対する飽和温度が約178℃であることを踏まえると、過温破損に至ることはないと考えられる。

なお、格納容器圧力が計測できない場合は、「別紙39. 格納容器内の圧力が計測できない場合の運用について」に記載のとおり、格納容器雰囲気温度によりベントを判断することとしている。

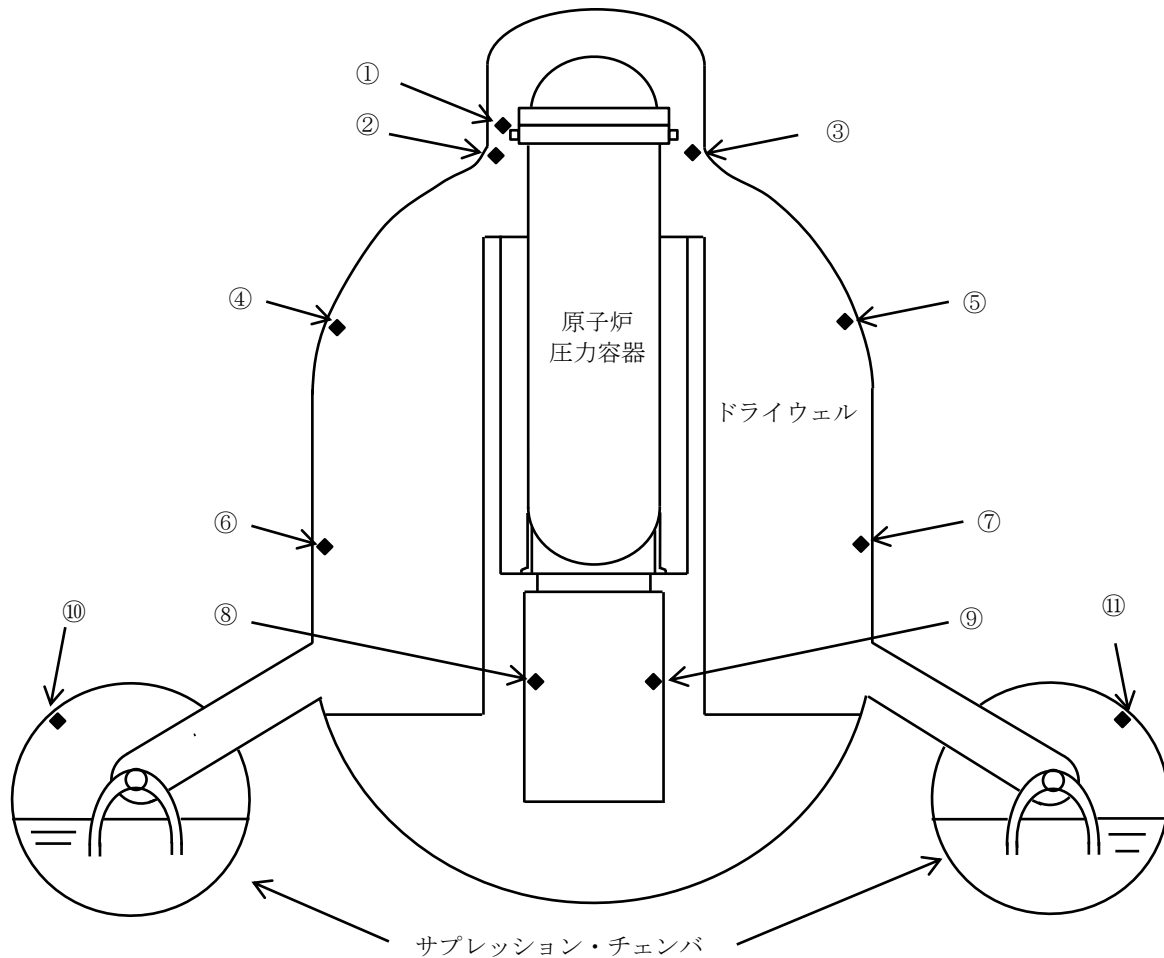
(3) 格納容器破損のおそれがある場合の影響緩和のためのベント実施について

炉心部の燃料、ペDESTALに落下した熔融炉心及び格納容器内を冷却するため、格納容器への注水等に期待するが、十分な注水等ができない場合には、格納容器雰囲気が過熱状態になり、格納容器雰囲気温度が格納容器圧力に対する飽和温度以上になるとともに、熔融炉心からの輻射熱等により格納容器雰囲気温度が局所的に大きく上昇し、格納容器が過温破損に至るおそれがある。このように、重大事故等対処設備が健全に機能せず、格納容器の健全性

が脅かされる可能性が高い状況では、格納容器フィルタベント系からのベントを実施し、フィルタ装置を介した放射性物質の放出経路を形成することで、格納容器の過温破損時に大気へ放出される放射性物質の総量を低減させる運用とする。

ベントの実施は過圧破損防止の観点では有効な手段であるが、格納容器雰囲気の過熱状態による温度上昇に対しては一定の抑制効果はあるものの過温破損そのものを防止できる手段ではない。したがって、格納容器温度上昇に対するベントにおいて、過温破損の観点では可能な限り格納容器内に存在する希ガスの減衰に期待するため、格納容器の限界温度に到達するおそれのある「格納容器温度 200℃以上において温度上昇が継続している場合」をベント実施判断基準として設定した。格納容器温度の上昇継続を判断基準として設定した理由は、200℃以上にて温度上昇が継続する場合には、格納容器過温破損に至る可能性があり、事前に環境緩和のための格納容器ベントを実施するためである。

なお、格納容器が過温破損するような状況では、格納容器温度が全体的に上昇することが考えられること及び計器故障等による誤ベントを防止する観点から、図1に示すドライウェルに設置した温度計の指示値のうち2点が200℃以上にて温度上昇が継続する場合において、格納容器フィルタベント系からのベントを実施することとする。



番号	名称	設置場所	測定範囲
①, ②, ③	ドライウエル温度 (S A)	フランジ高さ近傍	0~300℃
④, ⑤	ドライウエル温度 (S A)	T A F 高さ近傍	0~300℃
⑥, ⑦	ドライウエル温度 (S A)	R P V 底面高さ近傍	0~300℃
⑧, ⑨	ペDESTAL温度 (S A)	ペDESTAL上部	0~300℃
⑩, ⑪	サブプレッション・チェンバ 温度 (S A)	サブプレッション・チェンバ 頂部近傍	0~200℃

図1 格納容器雰囲気温度計の計測点

ベント実施時の影響を踏まえた接続口の優先順位について

ベント実施後は、ベントガスに含まれる放射性物質が格納容器フィルタベント系出口配管に付着するため、出口配管立ち上がり部周辺での作業及び移動に影響が出る可能性がある。

このため、格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺の線量評価を実施するとともに、評価結果を踏まえた優先順位の考え方を以下に示す。

1. 格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺での作業について

R/B 南側に設置してある格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺で、ベント実施後に想定される作業を考慮した可搬型設備の配置図を図1に示す。



図1 ベント実施後に想定される可搬型設備の配置

2. 格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺の被ばく評価について

R/B 南側の格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺で、ベント実施直後に実施する作業は無いが、出口配管立ち上がり部から 10m 地点 (R/B 南側接続口付近)において事故後約 43 時間(ベント後 10 時間)及び事故後 7 日時点、出口配管立ち上がり部から 1m 地点において事故後 7 日, 30 日, 60 日後の線量率を評価した。なお、作業エリアの比較のため、R/B 西側接続口付近についても評価した。線源には有効性評価(格納容器過圧・過温破損)の「冷却材喪失(大破断 L O C A) + E C C S 注水機能喪失 + 全交流動力電源喪失」シナリオにおける W/W ベント使用時の放出量を用いている。

表 1 に示す評価結果のとおり、短時間のアクセス等は可能な線量率であると考えられる。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表1 格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺の線量評価結果

評価場所	事故後時間	線量率 (mSv/h) ^{※1} (うち、配管寄与分)
評価点 A (格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部 (雨水排水ライン)) から 10m 地点 (R/B 南側接続口付近)	約 43 時間 (ベント後 10 時間)	約 13 (約 2.5)
	7 日 (168 時間)	約 5.0 (約 0.8)
評価点 A (格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部 (雨水排水ライン)) から 1 m 地点	7 日 (168 時間)	約 85 (約 81)
	30 日	約 9.2 (約 5.1)
	60 日	約 6.2 (約 2.1)
評価点 B (R/B 西側接続口付近)	約 43 時間 (ベント後 10 時間)	約 9.0 (約-) ^{※2}
	7 日 (168 時間)	約 3.7 (約-) ^{※2}

※1 R/Bからの直接線・スカイシャイン線，クラウドシャイン，グランドシャイン，吸入摂取（PF50 全面マスク着用）に加えて，W/W ベントに伴い格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部に浮遊する放射性物質及び雨水排水ライン配管に蓄積する放射性物質（格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部に付着する放射性物質が全て地上近くの雨水排水ライン配管に移動するものと想定）を考慮して評価している。格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部に付着する放射性物質量は，配管を流れる放射性物質（希ガスを除く）が，配管長 100mあたり 10%の割合で付着するものとした。

※2 格納容器フィルタベント系出口配管を直視できない場所のため，配管による線量はない。

3. 可搬型設備を使用した接続口の優先順位について

表1の線量評価結果から，R/B 南側接続口付近の線量率に対して格納容器フィルタベント系出口配管の影響はあるが，R/B 南側のアクセスルートの通行及び南側接続口エリアでの作業は可能である。また，R/B 西側接続口エリアでの作業も可能であることから，接続口の優先順位については作業員被ばくを考慮せず，以下に示す考えをもとに設定している。なお，可搬型設備の設置については，ベント実施前に完了している。

①大量送水車：原子炉注水流量が多い配管を優先して使用する。

- (1) 南側接続口（残留熱除去系（A）注入配管）
- (2) 西側接続口（残留熱除去系（B）注入配管）

②原子炉補機代替冷却系（移動式代替熱交換設備）

：運転員の系統構成（屋内）における操作対象弁が少ないものを優先して使用する。

- (1) 南側接続口（原子炉補機冷却系（B系：2弁））
- (2) 西側接続口（原子炉補機冷却系（A系：4弁））

その他、R/B 南側においては、長期的な対応として可搬式窒素供給装置による FCVS ラインへの窒素パージのための可搬型設備の起動操作等の作業が考えられるが、R/B 南側接続口エリアでの作業と同様、可搬型設備の設置エリアでの作業は可能である。

(参考1) 蒸気凝縮によるドレンについて

格納容器フィルタベント系を使用した際には、ベント開始直後から系統内で蒸気凝縮によるドレンが発生するが、ベントガス流量が約 以上であればベントガスがドレンを随伴し排出するため、ベント後はフィルタ装置下流で発生するドレンについては出口配管の放出端より排出されるが、ベントガス流量が少なくなるとドレンは排出できなくなり、出口配管立ち上がり部の雨水排水ラインにドレンが溜まることとなる。

雨水排水ラインが満水となった場合、溢れたドレンは格納容器フィルタベント系配管を通過して銀ゼオライト容器まで戻る構成としており（図1参照）、その後、銀ゼオライトフィルタ出口側のドレンラインからスクラバ容器連結管（液相部）に流入する（図2、3参照）。また、銀ゼオライトフィルタのドレンラインには逆止弁を設置していることから、スクラバ容器連結管からスクラバ容器の金属フィルタ及び銀ゼオライトフィルタを通らずにベントガスが流出することがない構成としている（図3参照）。

なお、格納容器フィルタベント系配管は、フィルタ装置下流は放出端に向かって連続上り勾配としていることからドレンが配管の途中で溜まることはない。

また、「2. 格納容器フィルタベント系出口配管立ち上がり部周辺の被ばく評価について」表1の線量評価結果から、線量率のうち出口配管寄与分は短半減期核種が支配的であり、60日後には線量率が減衰するため、基本的に雨水排水ラインのドレンについては処理する必要はないが、事故収束後に雨水排水ラインのフランジに可搬ホースを接続し、ドレンをスクラバ容器等に移送することで処理可能である。



図1 格納容器フィルタベント系立ち上がり部（雨水排水ライン）

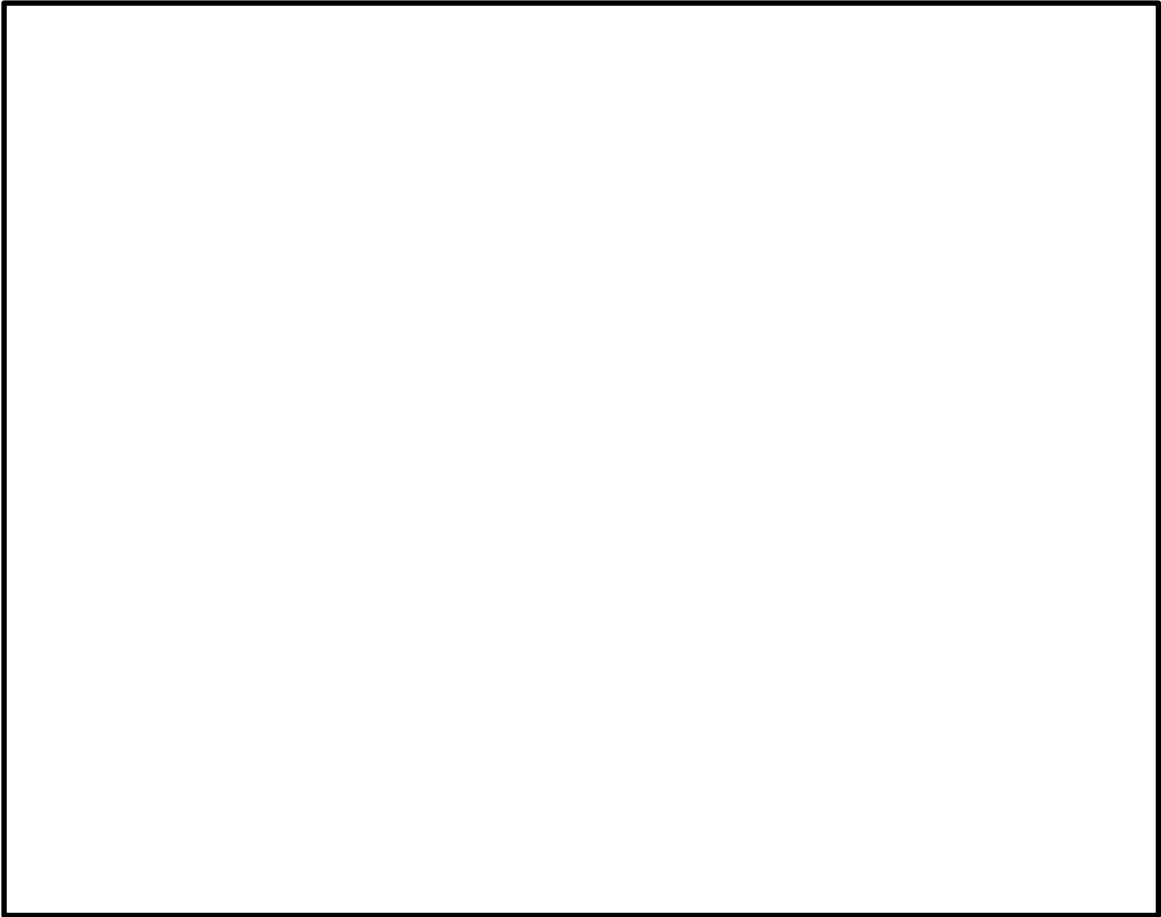


図2 銀ゼオライト容器内のドレンの流れ

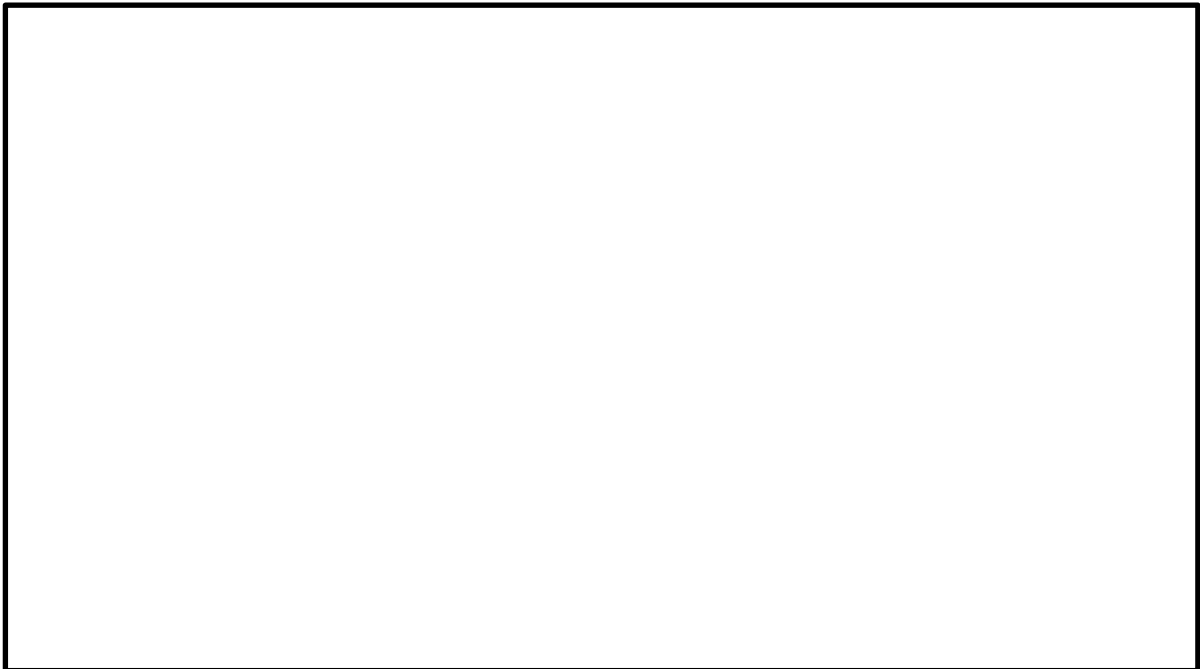


図3 銀ゼオライト容器からスクラバ容器間のドレンライン

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

<銀ゼオライト容器からスクラバ容器へのドレンの排出について>

ベント後にはスクラバ容器と銀ゼオライト容器には圧力差が生じるため、銀ゼオライトフィルタ出口側ドレンラインにおいて、以下の水位が形成される。

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \dots \text{(式1)}$$

H：銀ゼオライトフィルタ出口側ドレンラインに形成される水位

h_1 ：スクラバ容器のスクラビング水位

h_2 ：スクラバ容器と銀ゼオライト容器の圧力差に相当する水位

h_3 ：ドレンラインで発生する圧力損失に相当する水位

格納容器破損防止対策の有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用しない場合）」において、ベントガスによりドレンを出口配管の放出端から排出できなくなる時点の圧力差で水位を評価した結果、図4に示すとおり、ドレンラインに形成される水位は、最大でも銀ゼオライトフィルタ下端以下となる。

ドレン発生量は少ないため、ドレンラインで発生する圧力損失はほぼゼロであり、式1に示す h_3 に相当する水位は無視できるため、 h_1 及び h_2 に相当する水位までドレンが溜まれば、ドレンはスクラバ容器に排出される。

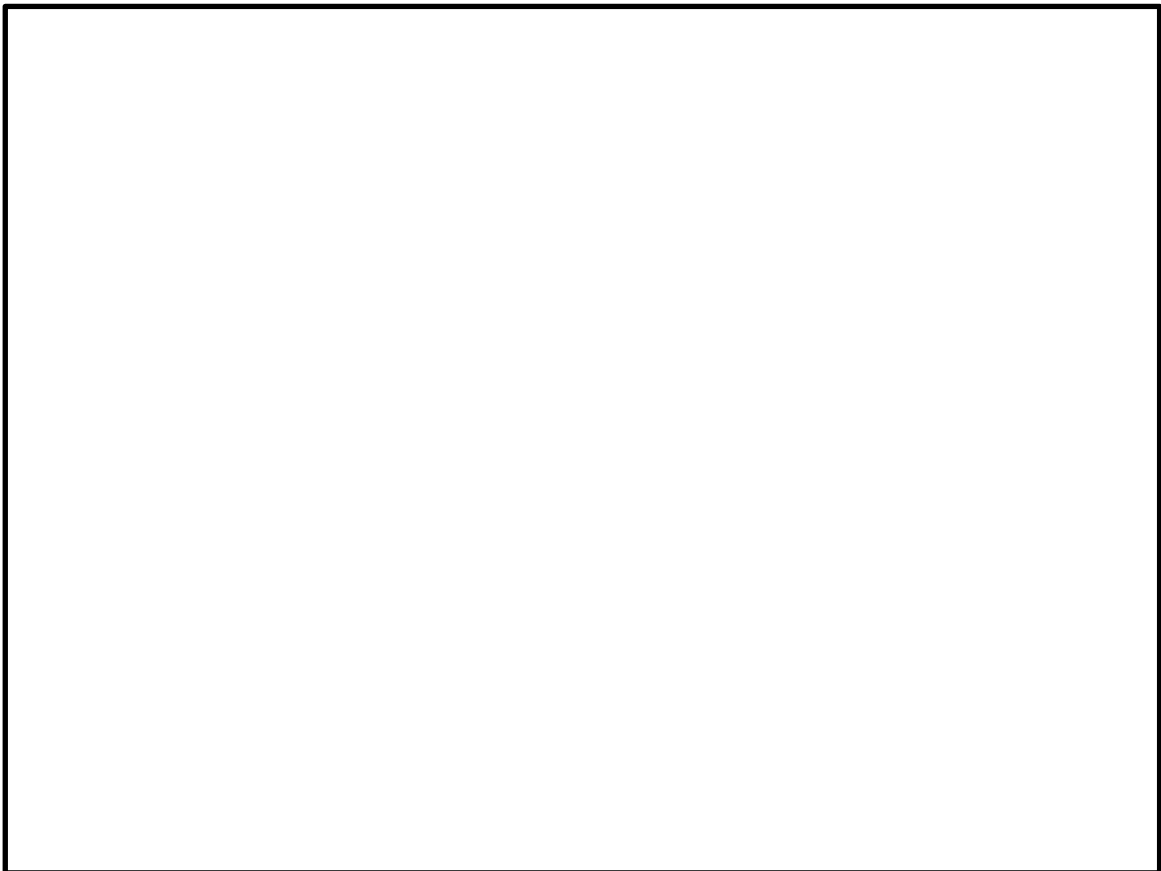


図4 銀ゼオライトフィルタドレンラインに形成される水位の評価結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(参考2) ドレン排出可能なベントガス流速について

島根2号炉の格納容器フィルタベント系出口配管で発生するドレンをベントガスによって排出できるかどうかは、以下の考え方に基づいて判断することができる。

1. 出口配管からドレン排出可能なベントガス流速について

垂直管内で上向きにガスが流れる場合に、ガスに随伴してドレンが排出される現象については、配管口径が小さい場合には気相流速 (j_G) に依存するが、配管口径が約 [] 以上の領域では Ku 値 (Kutateladze 数[-]) に依存し、[] となる (参考図書1)。

ここで、Ku 値は以下の式で表される。

$$Ku = \frac{\rho_G^{0.5} \cdot j_G}{(g \cdot \sigma (\rho_L - \rho_G))^{0.25}}$$

ρ_G : 気相密度 (0.598[kg/m³]) ※1

ρ_L : 液相密度 (958.1[kg/m³]) ※1

g : 重力加速度 (9.80665[m/s²])

j_G : 気相流速 [m/s]

σ : 表面張力 (0.0589[N/m]) ※1

※1 : 括弧内は大気圧のときの値を表す。

島根2号炉の格納容器フィルタベント系出口配管 (立ち上がり部) は 300A の配管であるため、ベントガス流速が [] を満足する [] より大きい場合に、出口配管内のドレンがベントガスに随伴されて排出されることとなる。

2. ベントガスによって凝縮水を排出できなくなるタイミングについて

ベントガス流速は以下の式で表される。

$$v = W_{\text{vent}} / (\rho \times A)$$

v : ベントガス流速 [m/s]

W_{vent} : ベントガス流量 [kg/s]

ρ : ベントガス密度 [kg/m³]

A : 配管断面積 [m²]

島根2号炉の格納容器フィルタベント系出口配管におけるベントガス流速とベントガス流量の関係を図1に示す。図1より、ベントガス流速 [] に対応するベントガス流量は約 [] となる。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

格納容器破損防止対策の有効性評価のうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用しない場合）」のベントガス流量の推移を図2に示す。図2より、島根2号炉のベントガス流量が□となる時点は事故後約97時間となるため、ベントガスによってドレンを排出できなくなるのは事故後約97時間後と評価できる。



図1 出口配管におけるベントガス流速及び質量流量の関係

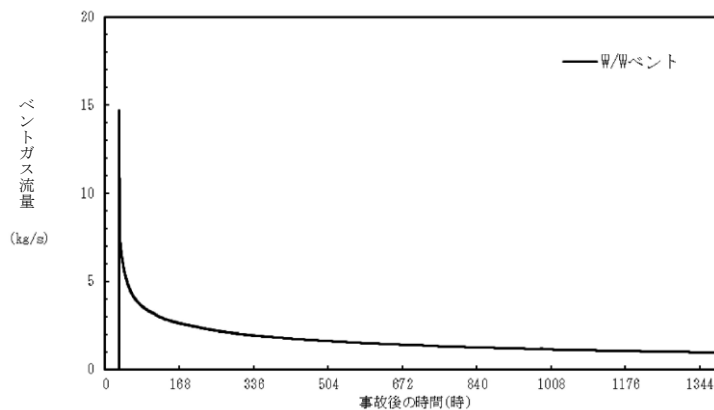


図2 「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用しない場合）」におけるベントガス流量の推移

《参考図書》

1. Richter H. J, Flooding in tubes and annuli, Int. J. Multiphase flow, 7, 647-658(1981)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

別添資料－ 2

残留熱代替除去系を用いた代替循環冷却
の成立性について

<目次>

1. 残留熱代替除去系の構成	1
1.1 設置目的	1
1.2 設備構成の概略	2
1.3 系統設計仕様	4
1.3.1 機械設備	4
1.3.2 計測制御設備	5
1.3.3 電源設備	24
2. 残留熱代替除去系の成立性確認	28
2.1 有効性評価シナリオの成立性	28
2.1.1 残留熱代替除去系の運用について	28
2.1.2 残留熱代替除去系の有効性について	28
2.2 残留熱代替除去系の操作性	29
2.2.1 残留熱代替除去系運転のために必要な系統・機器とアクセス性	29
2.2.2 操作の概要について	36
2.3 系統運転時の監視項目	43
2.3.1 水素ガス及び酸素ガス発生時の対応について	43
3. 本系統の運用にあたって考慮すべき項目	49
3.1 放射線による影響について	49
3.2 系統の健全性について	50

別紙

1. 格納容器水素濃度・酸素濃度の測定原理と適用性について
2. 循環流量の確保について
3. 長期的に維持される格納容器の状態(温度・圧力)での適切な地震力に対する格納容器の頑健性の確保の考え方について
4. 系統のバウンダリに対する影響評価について
5. 系統が高線量となった場合の影響について

参考

1. 重大事故等時の長期安定冷却手段について

1. 残留熱代替除去系の構成

1.1 設置目的

残留熱代替除去系は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」の第五十条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）のうち、原子炉格納容器内の圧力及び温度を低下させるために必要な設備であり、格納容器ベントを実施する場合においても、ベント時間を遅延させることが可能な設備である。

重大事故等時においては、サプレッション・チェンバを水源とした残留熱除去系が使用できない状況も想定されるが、格納容器フィルタベント系を使用する場合は、外部水源による原子炉注水及び格納容器スプレイを継続し、サプレッション・プール通常水位+約 1.3m 到達により、格納容器スプレイを停止し、格納容器ベント操作を実施することにより、フィード・アンド・ブリード冷却を継続することとなる。

上記に対し、残留熱代替除去系を使用する場合、残留熱代替除去系の原子炉格納容器除熱機能により、格納容器圧力の上昇を抑制でき、かつ、サプレッション・チェンバを水源とすることにより、水位上昇を抑制できることから、原子炉格納容器の過圧破損を防止することができ、また、有効性評価の範囲においてはベント回避が可能となる。残留熱代替除去系による原子炉格納容器除熱を継続中において、水の放射線分解によって発生する水素ガス及び酸素ガスの濃度が上昇し、原子炉格納容器内の酸素ガス濃度がドライ条件において 4.4vol%及びウェット条件において 1.5vol%に到達した場合には、原子炉格納容器内での水素燃焼を防止する観点から格納容器ベントを実施するが、残留熱代替除去系を使用しない場合と比較し、大幅にベント時間を遅延させることができる。

1.2 設備構成の概略

残留熱代替除去系の系統概要は以下のとおりである。

- ・本系統は、サブプレッション・チェンバを水源とし、残留熱代替除去ポンプによる原子炉及び原子炉格納容器の循環冷却を行うことができる系統である。
- ・系統水は、サブプレッション・チェンバから、残留熱除去系の配管を通り、残留熱代替除去ポンプに供給される。残留熱代替除去ポンプにより昇圧された系統水は、残留熱除去系熱交換器及び残留熱除去系配管を通り、原子炉圧力容器への注水及び格納容器スプレイに使用される。また、原子炉圧力容器への注水ができず、原子炉圧力容器の破損を判断した場合は、格納容器スプレイ及び格納容器スプレイによる原子炉格納容器下部の熔融炉心の冷却を行うことも可能とする。
- ・原子炉圧力容器及び原子炉格納容器内に注水された系統水は、原子炉本体や原子炉格納容器内配管の破断口等から、ベント管を経てサブプレッション・チェンバに流出することにより、循環冷却ラインを形成する。
- ・なお、重大事故等時における想定として、非常用炉心冷却系等の設計基準事故対処設備に属する動的機器は、機能を喪失していることが前提条件となっていることから、本系統は、全交流動力電源が喪失した場合でも、代替交流電源設備からの給電が可能な設計とする。
- ・前述のとおり、本系統はサブプレッション・チェンバを水源として、原子炉圧力容器への注水及び格納容器スプレイとして使用する系統であるが、重大事故等時におけるサブプレッション・チェンバのプール水の温度は 100 °C を超える状況が想定され、高温水を用いて原子炉圧力容器又は原子炉格納容器へ注水を行った場合、原子炉格納容器に対して更なる過圧の要因となりえる。

このため、残留熱代替除去系の使用においては、原子炉補機代替冷却系からの冷却水の供給により、残留熱除去系熱交換器を介した冷却機能を確保する。

残留熱代替除去系の機能を確保する際に使用する系統からの核分裂生成物の放出を防止するため、残留熱代替除去系による循環ラインは閉ループにて構成する。

なお、残留熱代替除去ポンプの有効吸込水頭確保の観点から、残留熱代替除去ポンプ設置場所に近い B - 残留熱除去系に接続する設計とする。

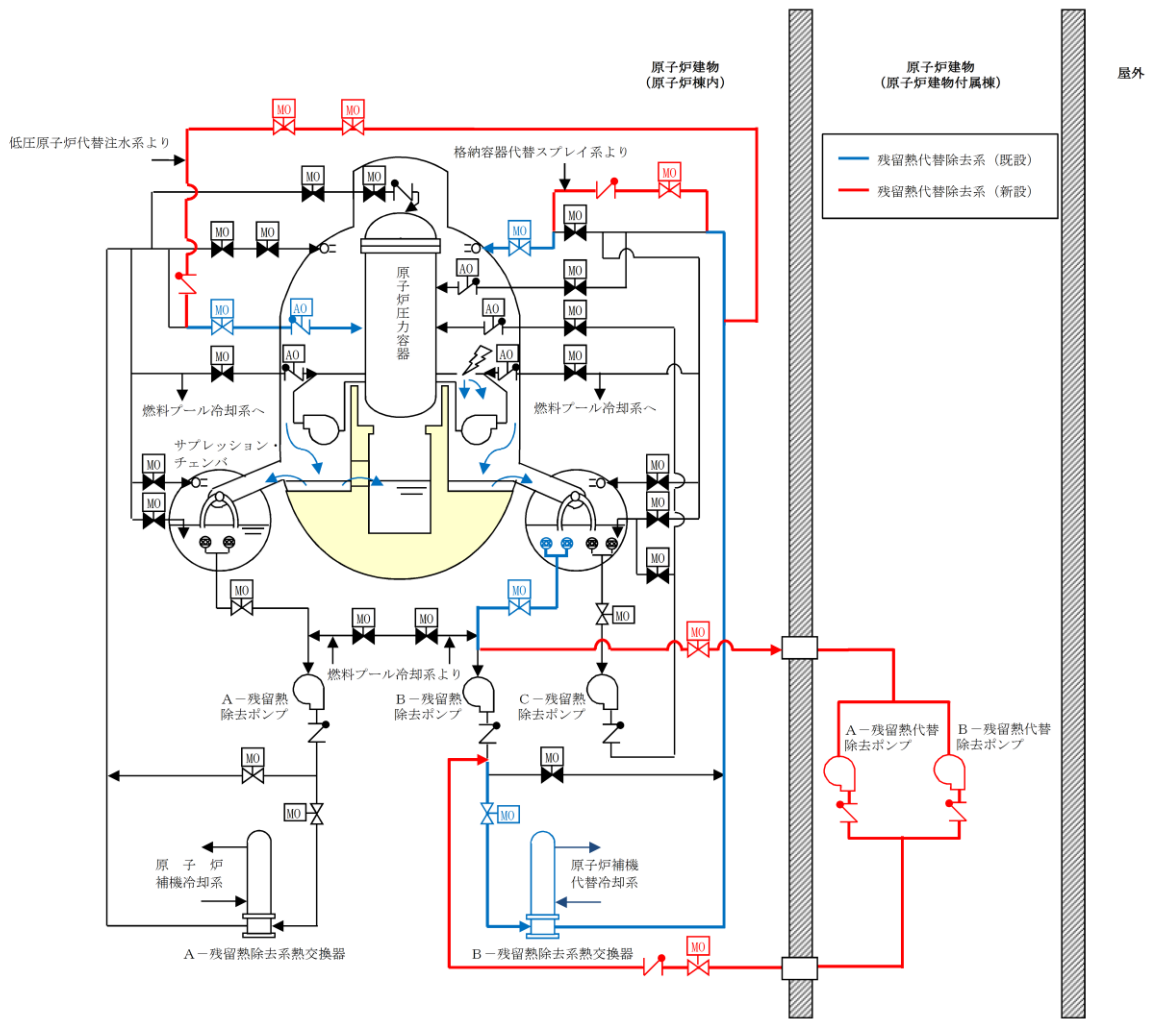


図 1.2-1 残留熱代替除去系の設備概要※

※上図は原子炉冷却材喪失事故（LOCA）を想定しているため原子炉压力容器へ注水した水は破断口から溢れ出しサブプレッション・チェンバに流入する。LOCA以外の場合は逃がし安全弁の排気管を通してサブプレッション・チェンバに流入することになる。

1.3 系統設計仕様

1.3.1 機械設備

残留熱代替除去系について、格納容器過圧・過温破損を防止するとともに、格納容器ベントを実施することなく、原子炉格納容器からの除熱を行うことができるよう設計する。

<設計条件>

当該系統起動後、原子炉格納容器限界温度・圧力（200℃・853kPa）を超えないようサブプレッション・チェンバを水源とし、原子炉への注水及び格納容器スプレーができること。

<主要仕様>

主要仕様は、以下に示すとおりである。

残留熱代替除去系

系統流量 : 150m³/h

(原子炉注水流量:30m³/h, 格納容器スプレー流量:120m³/h)

水源 : サプレッション・チェンバ

除熱手段 : 原子炉補機代替冷却系

1.3.2 計測制御設備

残留熱代替除去系について、使用時の状態を監視するため、流量計、温度計、水位計及び圧力計を設置する（図 1.3.2-1 参照）。これらの監視パラメータは、中央制御室及び緊急時対策所で監視可能な設計としている。

①設計方針

残留熱代替除去系により有効に除熱できていることを確認するため、原子炉格納容器の熱バランスを把握できる監視設備を設置する。残留熱代替除去系運転時の原子炉格納容器の熱バランスは、原子炉格納容器内部の温度と、残留熱代替除去系統により除熱される量を確認することで把握が可能である。よって、サプレッション・プール水温度及び水位、原子炉格納容器内の温度及び圧力並びに除熱量を確認するための残留熱代替除去系の系統流量（原子炉圧力容器への注水量及び原子炉格納容器へのスプレイ流量）、残留熱除去系出口温度を監視できる設計とする。

また、原子炉格納容器へのスプレイによる格納容器下部への注水を確認するための残留熱代替除去系の系統流量（原子炉格納容器への注水流量）を監視できる設計とする。

以上より、下記で示す㉑～㉒の計器を設置する。

- ・ 系統流量：㉑残留熱代替除去系原子炉注水流量
 ㉒残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量
- ・ 残留熱除去系熱交換器入口温度：㉓サプレッション・プール水温度（S A）
- ・ 残留熱除去系熱交換器出口温度：㉔残留熱除去系熱交換器出口温度
- ・ 原子炉格納容器内の温度：㉕ドライウエル温度（S A）
- ・ 原子炉格納容器内の圧力：㉖ドライウエル圧力（S A）
 ㉗サプレッション・チェンバ圧力（S A）
- ・ 残留熱代替除去系の水源：㉘サプレッション・プール水位（S A）

また、残留熱代替除去ポンプの運転状態を監視するため、下記で示す㉙の計器を設置する。

- ・ 残留熱代替除去ポンプの運転状態：㉙残留熱代替除去ポンプ出口圧力

なお、上記に加え、残留熱除去系熱交換器二次側の温度、流量等を原子炉補機代替冷却系側で確認することにより、システム全体の熱バランスを把握することが可能である。

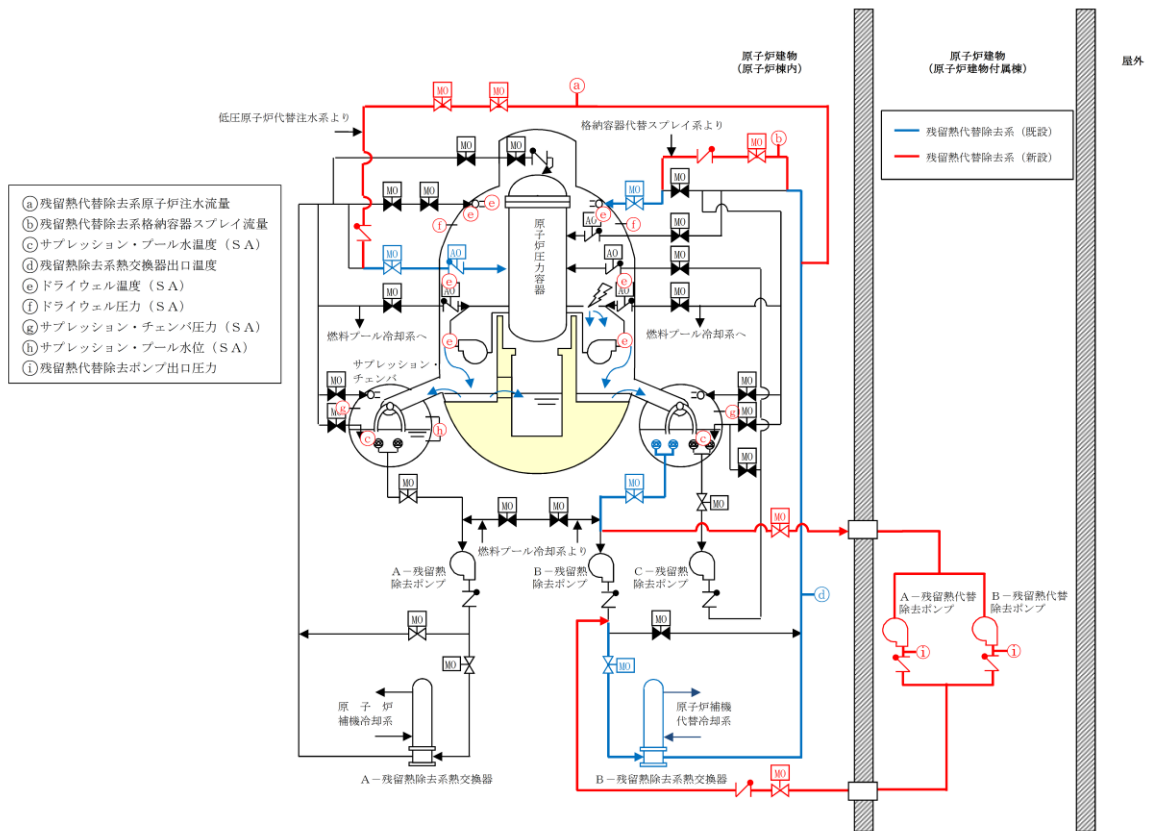


図 1.3.2-1 残留熱代替除去系使用時の概略図

②計測設備の仕様について

a. 機器仕様

計測設備の主要仕様を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 残留熱代替除去系運転に必要な計測設備の主要仕様

監視計器	計測範囲	計測範囲の根拠	個数	監視場所
㉔ 残留熱代替除去系原子炉注水量 ^{※1}	0～50m ³ /h	残留熱代替除去系原子炉注水の最大注水量 (30 m ³ /h) を監視可能。	1	中央制御室 (緊急時対策所)
㉕ 残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量 ^{※1}	0～150m ³ /h	残留熱代替除去系格納容器スプレイの最大注水量 (120m ³ /h) を監視可能。	1	中央制御室 (緊急時対策所)
㉖ サプレッション・プール水温度 (SA) ^{※1}	0～200℃	原子炉格納容器の限界圧力 (2Pd : 853kPa [gage]) におけるサプレッション・プールの飽和温度 (約 178℃) を監視可能。	2	中央制御室 (緊急時対策所)
㉗ 残留熱除去系熱交換器出口温度	0～200℃	残留熱代替除去系の運転時における, 残留熱除去系熱交換器出口温度の最高使用温度 (185℃) を監視可能。	1	中央制御室 (緊急時対策所)
㉘ ドライウェル温度 (SA) ^{※1}	0～300℃	原子炉格納容器の限界温度 (200℃) を監視可能。	7	中央制御室 (緊急時対策所)
㉙ ドライウェル圧力 (SA) ^{※1}	0～1000kPa (abs)	原子炉格納容器の限界圧力 (2Pd : 853kPa [gage]) を監視可能。	2	中央制御室 (緊急時対策所)
㉚ サプレッション・チェンバ圧力 (SA) ^{※1}	0～1000kPa (abs)	原子炉格納容器の限界圧力 (2Pd : 853kPa [gage]) を監視可能。	2	中央制御室 (緊急時対策所)
㉛ サプレッション・プール水位 (SA) ^{※1}	-0.80～5.50m ^{※2}	ウェットウェルベント操作可否判断を把握できる範囲を監視可能。	1	中央制御室 (緊急時対策所)
㉜ 残留熱代替除去ポンプ出口圧力 ^{※1}	0～3MPa [gage]	重大事故等時における, 残留熱代替除去ポンプの最高使用圧力 (2.5MPa [gage]) を監視可能。	2	中央制御室 (緊急時対策所)

※1 : 新規設置する監視計器

※2 : 基準点はサプレッション・プール通常水位 (EL5610)

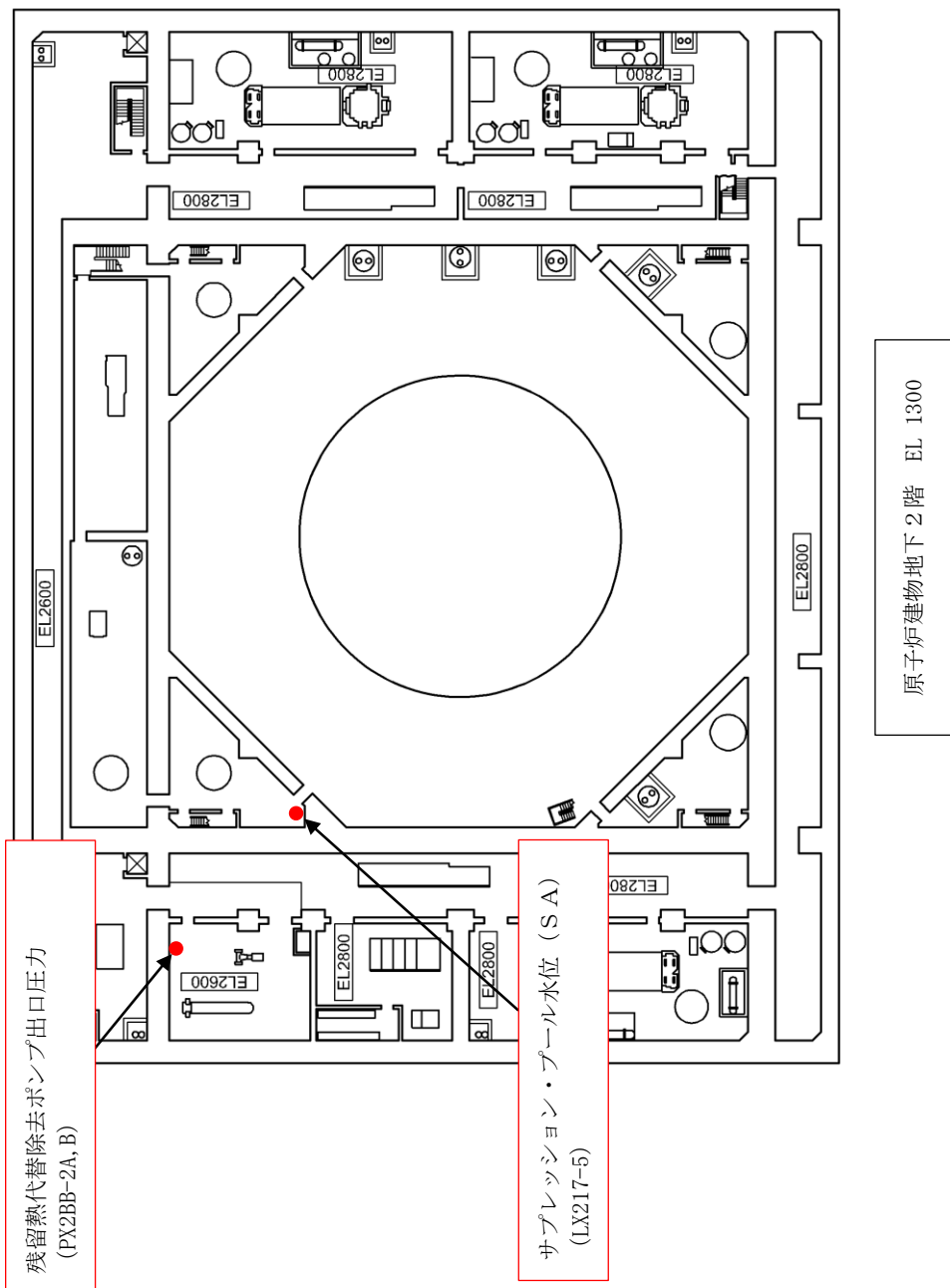


図 1.3.2-2 機器配置図 (原子炉建物地下2階)

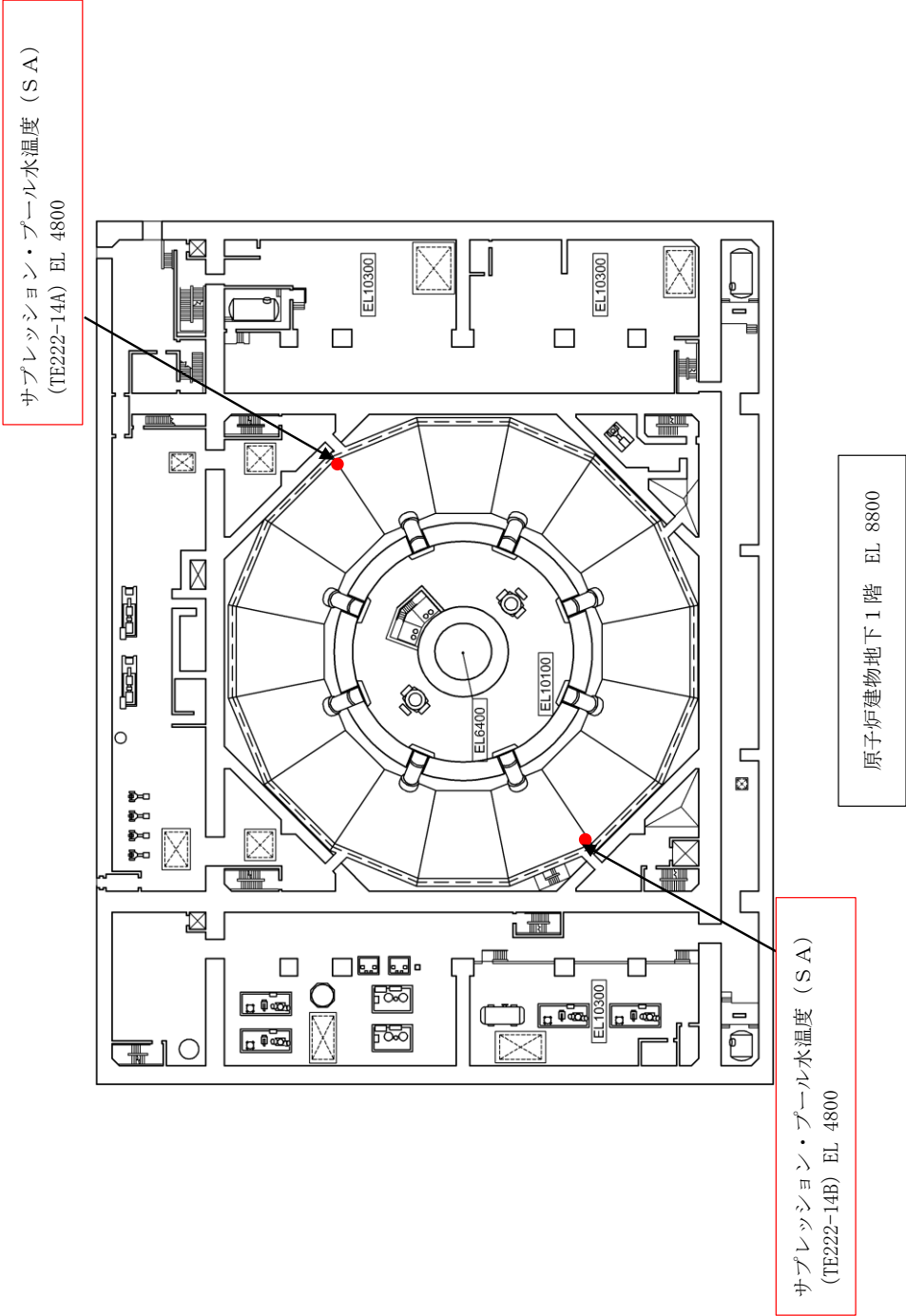


図 1.3.2-3 機器配置図 (原子炉建物地下1階)

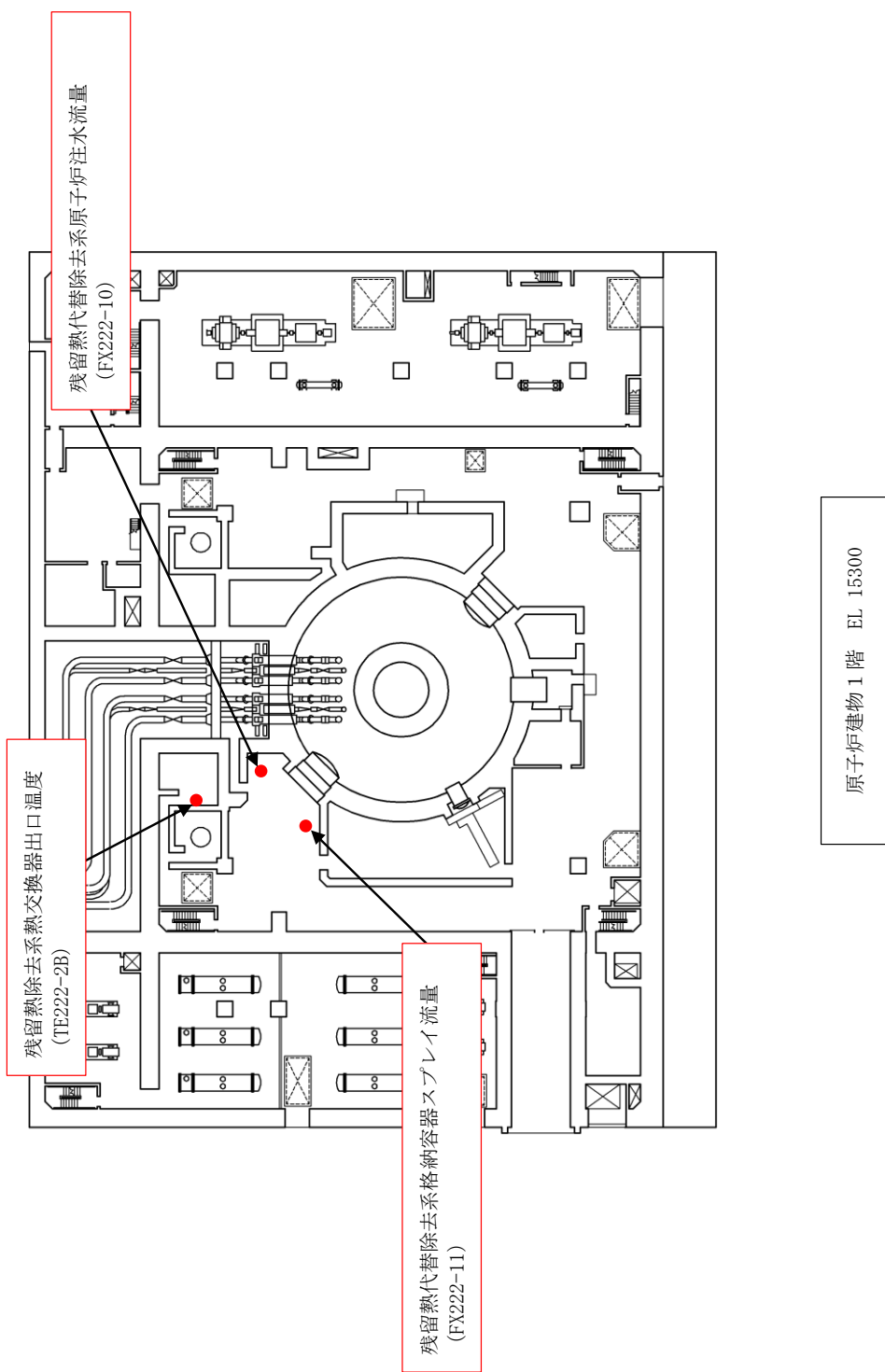


図 1.3.2-4 機器配置図 (原子炉建物 1 階)

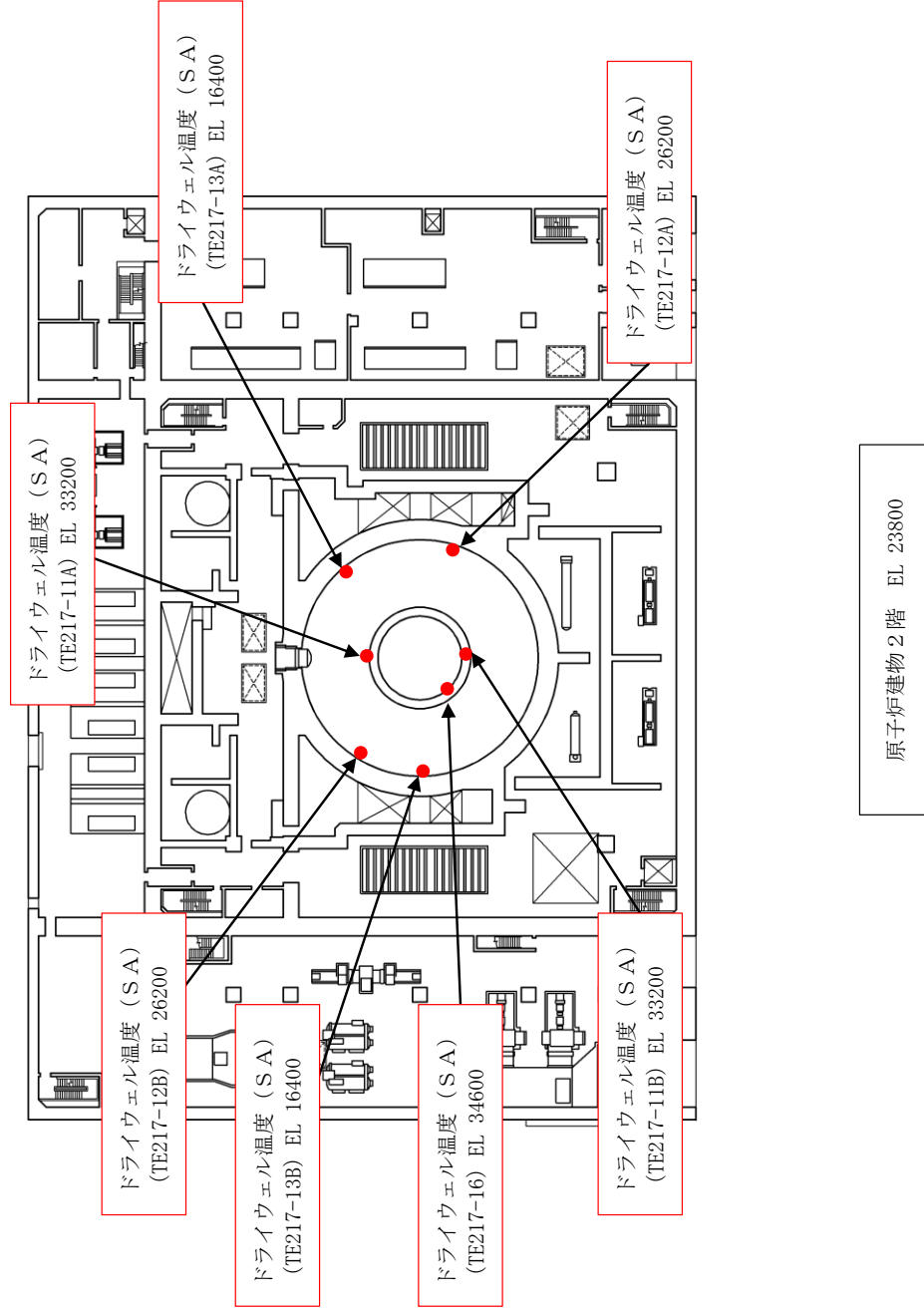


図 1.3.2-5 機器配置図 (原子炉建物2階)

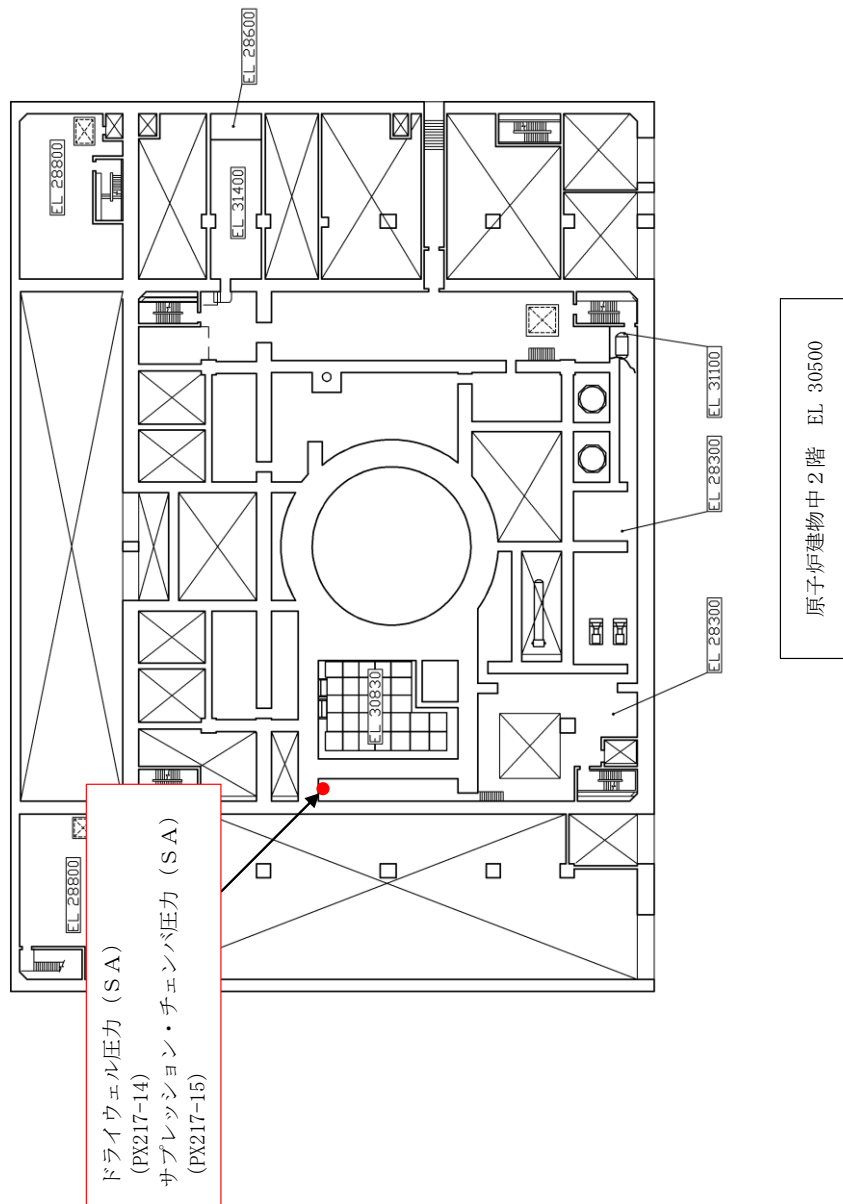


図 1.3.2-6 機器配置図 (原子炉建物中2階)

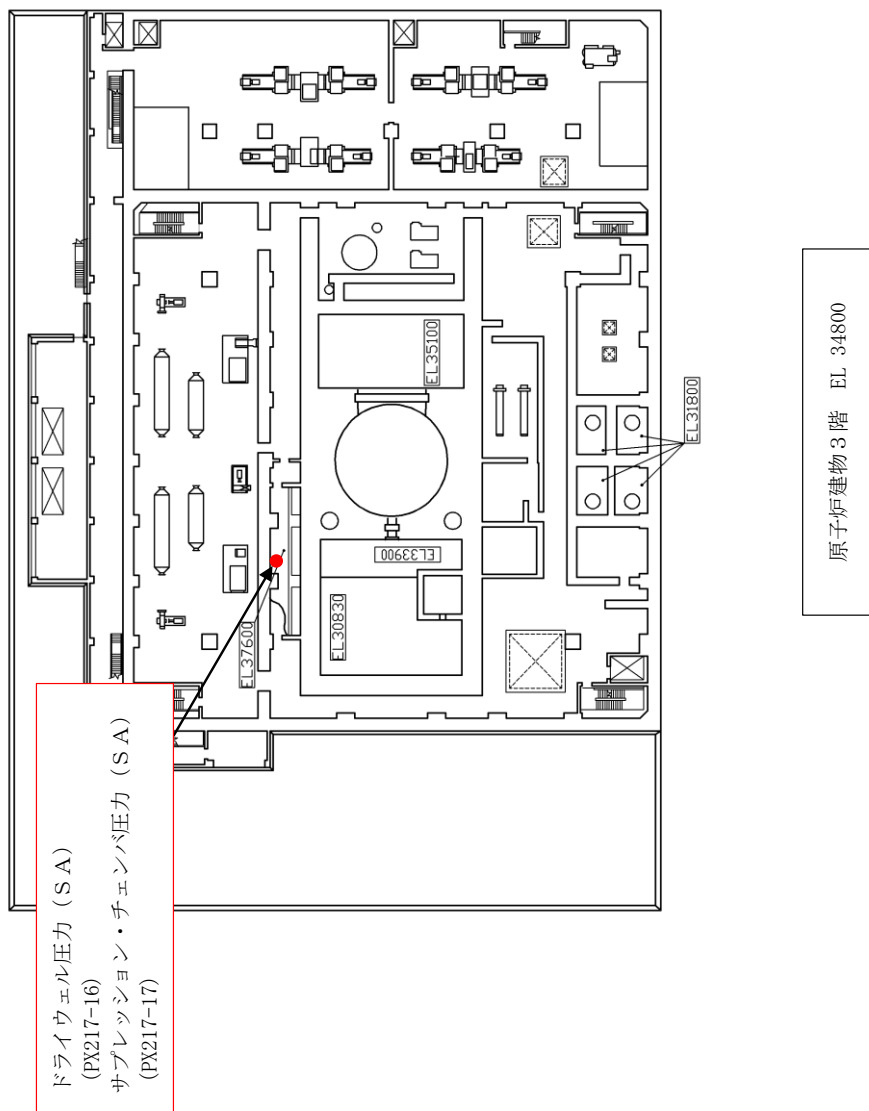


図 1.3.2-7 機器配置図 (原子炉建物 3 階)

原子炉格納容器内における、サブプレッション・プール水温度（S A）の位置を図 1.3.2-8 に示す。

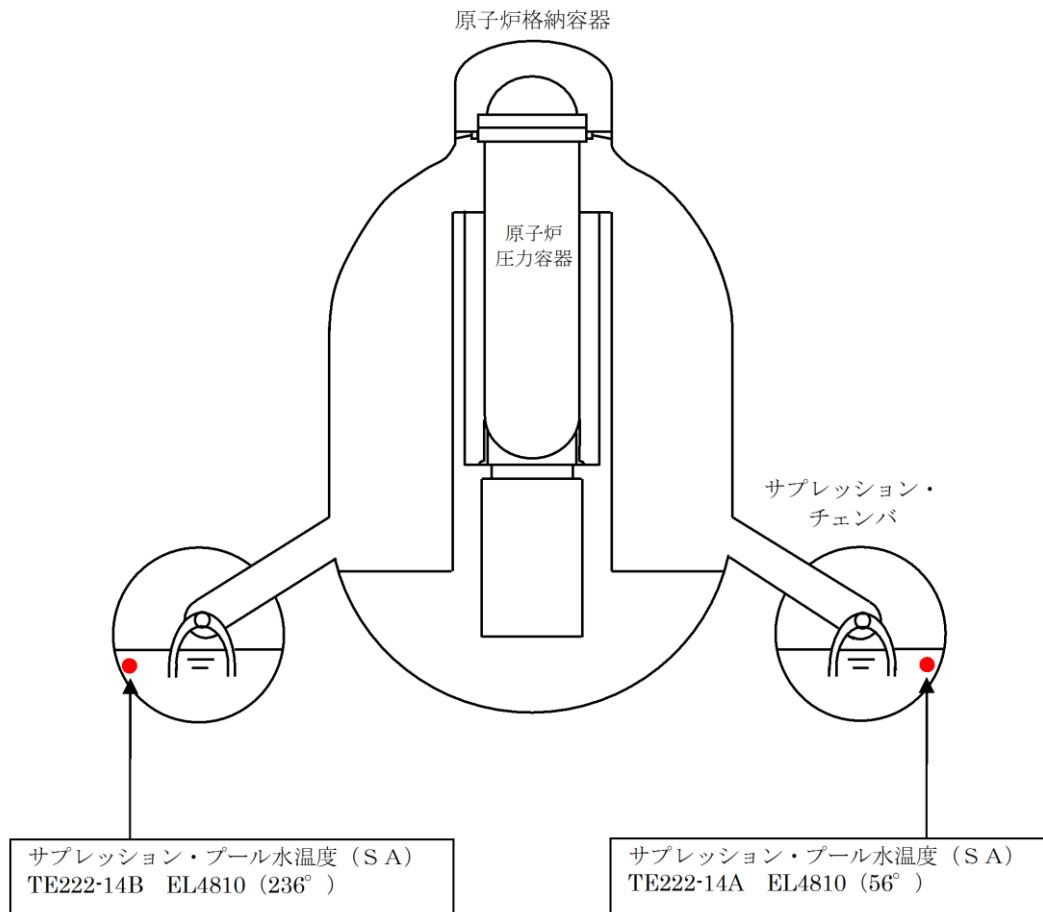


図 1.3.2-8 サブプレッション・プール水温度（S A）の位置

c. システム構成

④残留熱代替除去系原子炉注水流量

残留熱代替除去系原子炉注水流量は、重大事故等対処設備の機能を有しており、残留熱代替除去系原子炉注水流量の検出信号は、差圧式流量検出器からの電流信号を演算装置にて流量信号へ変換する処理を行った後、残留熱代替除去系原子炉注水流量を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 1.3.2-9「残留熱代替除去系原子炉注水流量の概略構成図」参照。)

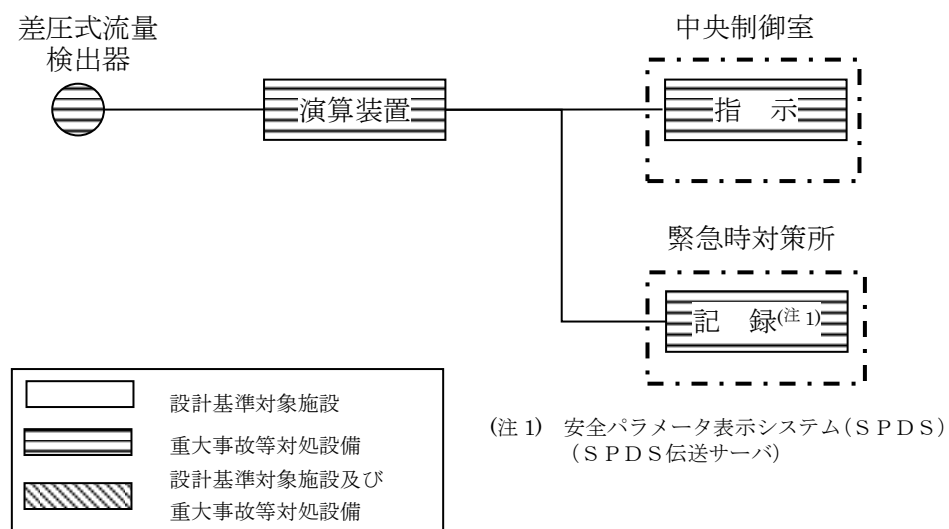


図 1.3.2-9 残留熱代替除去系原子炉注水流量の概略構成図

⑤ 残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量

残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量は、重大事故等対処設備の機能を有しており、残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量の検出信号は、差圧式流量検出器からの電流信号を演算装置にて流量信号へ変換する処理を行った後、残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 1.3.2-10「残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量の概略構成図」参照。)

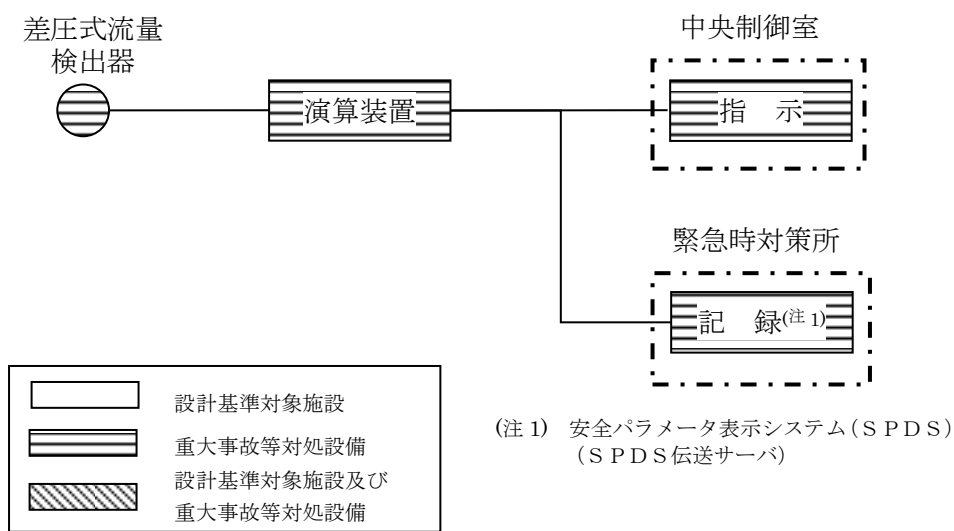


図 1.3.2-10 残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量の概略構成図

◎サブプレッション・プール水温度（SA）

サブプレッション・プール水温度（SA）は、重大事故等対処設備の機能を有しており、サブプレッション・プール水温度（SA）の検出信号は、测温抵抗体の抵抗値を演算装置にて温度信号に変換する処理を行った後、サブプレッション・プール水温度（SA）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図 1.3.2-11「サブプレッション・プール水温度（SA）の概略構成図」参照。）

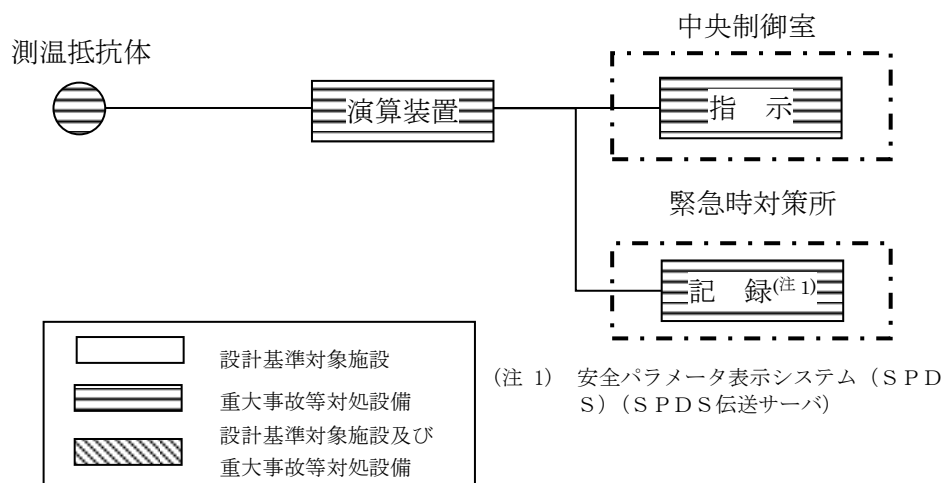


図 1.3.2-11 サプレッション・プール水温度（SA）の概略構成図

④残留熱除去系熱交換器出口温度

残留熱除去系熱交換器出口温度は，設計基準対象施設及び重大事故等対処設備の機能を有しており，残留熱除去系熱交換器出口温度の検出信号は，熱電対からの起電力を，演算装置にて温度信号に変換する処理を行った後，残留熱除去系熱交換器出口温度を中央制御室に指示し，緊急時対策所にて記録する。（図 1.3.2-12「残留熱除去系熱交換器出口温度の概略構成図」参照。）

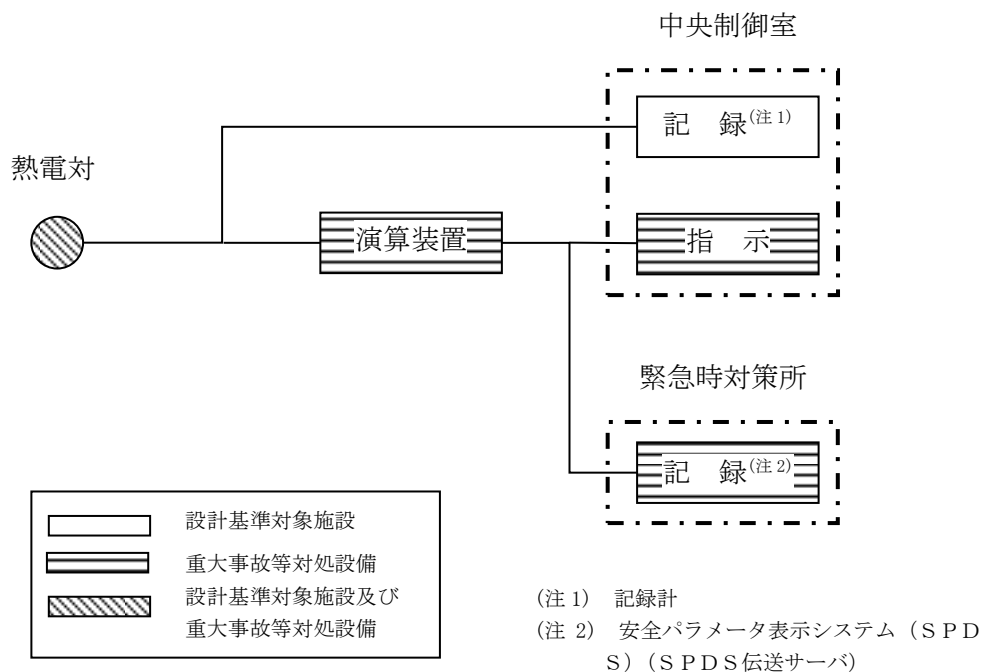


図 1.3.2-12 残留熱除去系熱交換器出口温度の概略構成図

④ドライウエル温度（S A）

ドライウエル温度（S A）は、重大事故等対処設備の機能を有しており、ドライウエル温度（S A）の検出信号は、熱電対からの起電力を、演算装置にて温度信号に変換する処理を行った後、ドライウエル温度（S A）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図 1. 3. 2-13「ドライウエル温度（S A）の概略構成図」参照。）

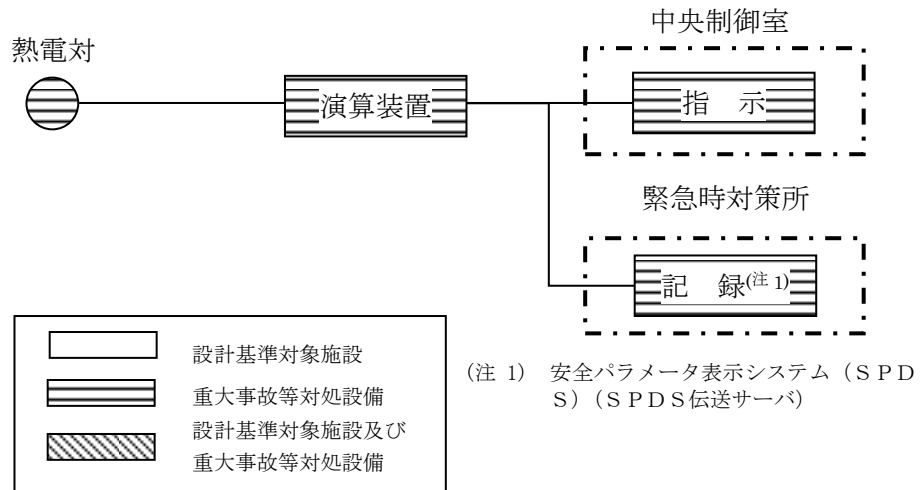


図 1. 3. 2-13 ドライウエル温度（S A）の概略構成図

④ドライウエル圧力（SA）

ドライウエル圧力（SA）は、重大事故等対処設備の機能を有しており、ドライウエル圧力（SA）の検出信号は、弾性圧力検出器からの電流信号を中央制御室の指示部にて圧力信号へ変換する処理を行った後、ドライウエル圧力（SA）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図 1.3.2-14「ドライウエル圧力（SA）の概略構成図」参照。）

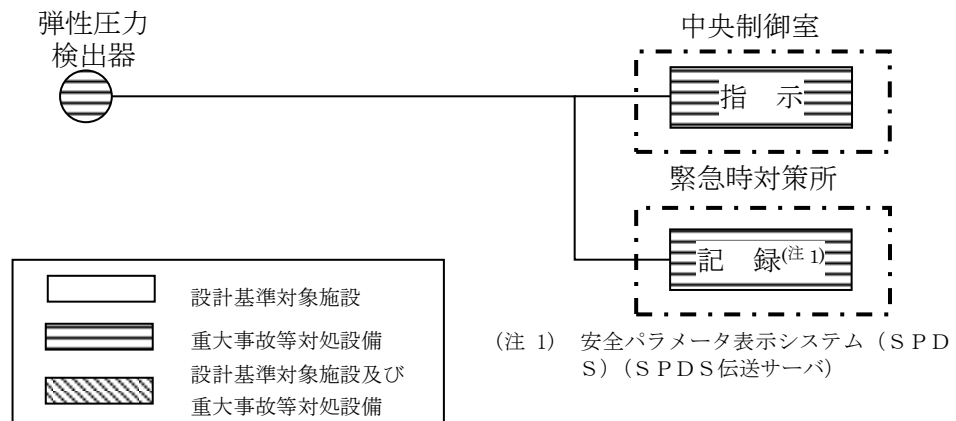


図 1.3.2-14 ドライウエル圧力（SA）の概略構成図

㊦ サプレッション・チェンバ圧力 (S A)

サプレッション・チェンバ圧力 (S A) は、重大事故等対処設備の機能を有しており、サプレッション・チェンバ圧力 (S A) の検出信号は、弾性圧力検出器からの電流信号を中央制御室の指示部にて圧力信号へ変換する処理を行った後、サプレッション・チェンバ圧力 (S A) を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 1.3.2-15「サプレッション・チェンバ圧力 (S A) の概略構成図」参照。)

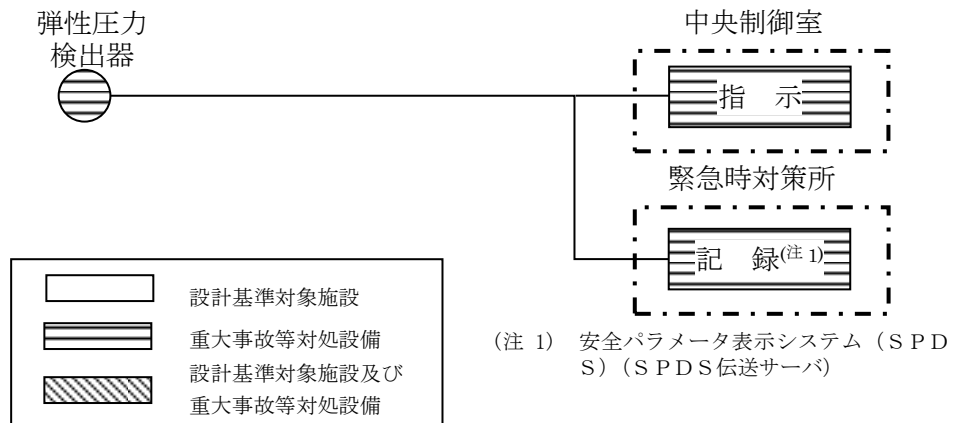


図 1.3.2-15 サプレッション・チェンバ圧力 (S A) の概略構成図

④ サプレッション・プール水位 (SA)

サプレッション・プール水位 (SA) は、重大事故等対処設備の機能を有しており、サプレッション・プール水位 (SA) の検出信号は、差圧式水位検出器からの電流信号を中央制御室の指示部にて水位信号へ変換する処理を行った後、サプレッション・プール水位 (SA) を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 1.3.2-16「サプレッション・プール水位 (SA) の概略構成図」参照。)

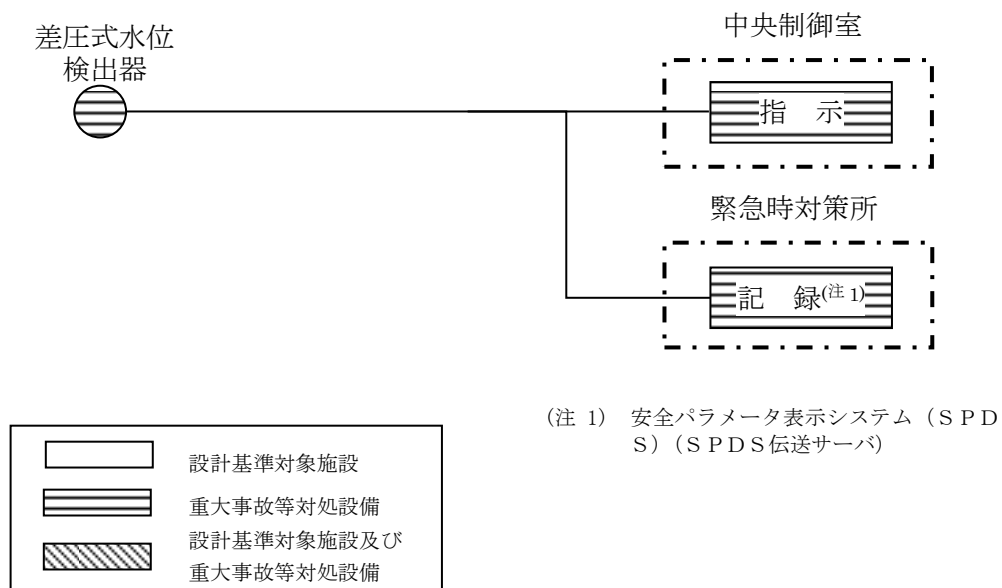


図 1.3.2-16 サプレッション・プール水位 (SA) の概略構成図

①残留熱代替除去ポンプ出口圧力

残留熱代替除去ポンプ出口圧力は、重大事故等対処設備の機能を有しており、残留熱代替除去ポンプ出口圧力の検出信号は、弾性圧力検出器からの電流信号を中央制御室の指示部にて圧力信号へ変換する処理を行った後、残留熱代替除去ポンプ出口圧力を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 1.3.2-17 「残留熱代替除去ポンプ出口圧力の概略構成図」参照。)

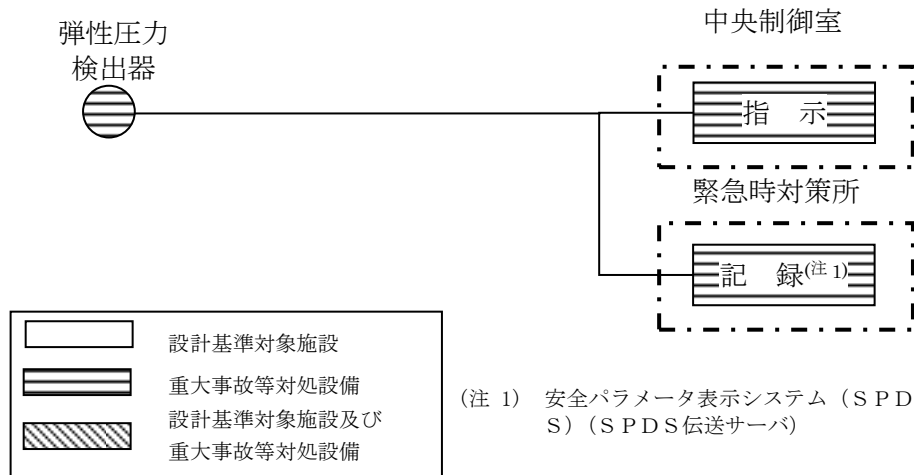


図 1.3.2-17 残留熱代替除去ポンプ出口圧力の概略構成図

1.3.3 電源設備

① 概要

残留熱代替除去系の使用時に必要な電動機，計測制御設備，電動駆動弁を動作させるため，常設代替交流電源設備から代替所内電気設備を経由して必要な電力を供給する設計としており，非常用所内電気設備が使用不能の場合においても，必要な電力を供給できる設計としている。

② 電源供給負荷

残留熱代替除去系の使用時に必要な負荷は図 1.3.3-1 及び表 1.3.3-1 に示すとおりである。

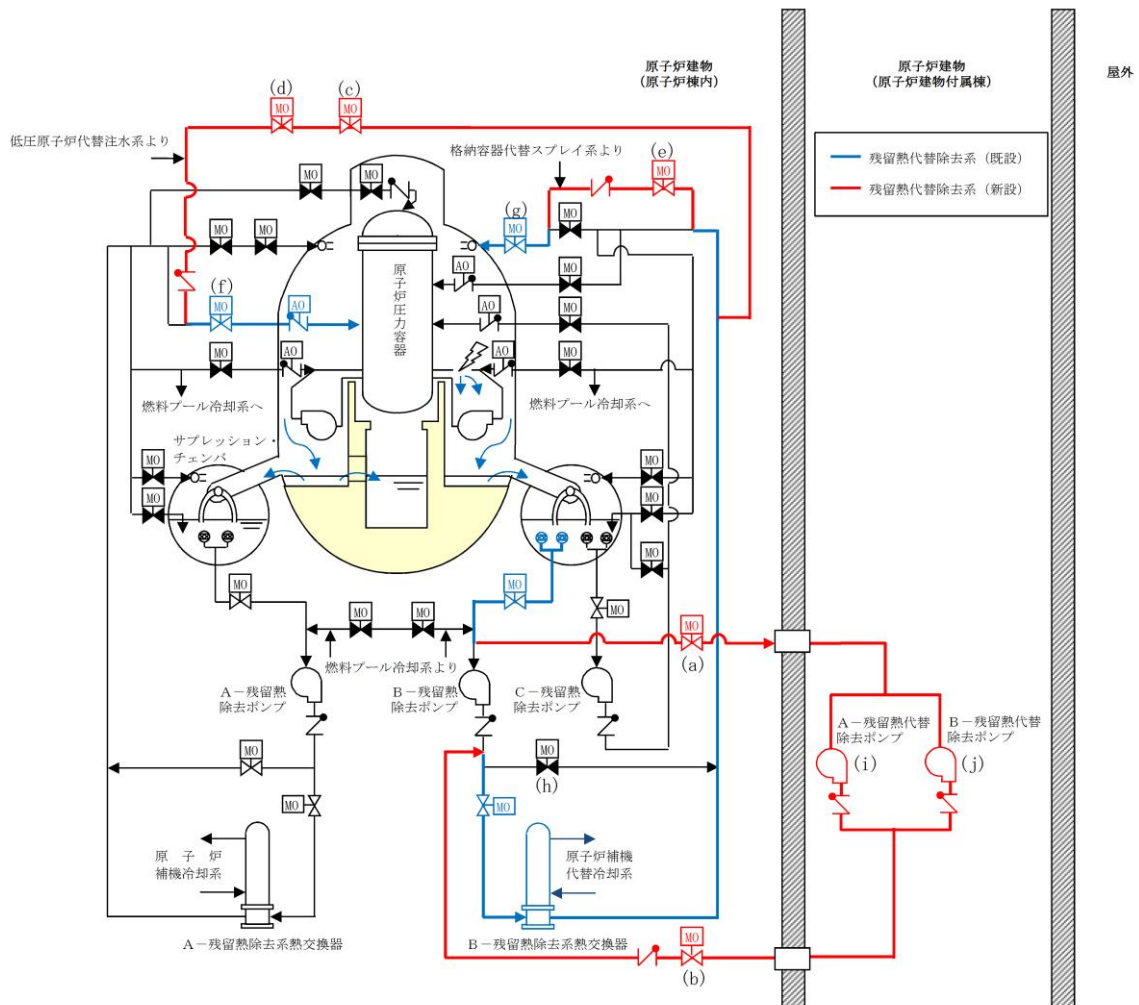


図 1.3.3-1 残留熱代替除去系概略図

表 1.3.3-1 残留熱代替除去系の電源供給負荷

図番	負荷	通常時の 電源供給元	代替所内電気設備 使用時の電源供給元
(a)	RHR RHARライン入口止 め弁 ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(b)	RHARライン流量調節弁 ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(c)	RHR A-F L S R連絡ライ ン止め弁 ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(d)	RHR A-F L S R連絡ライ ン流量調節弁 ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(e)	RHR PCVスプレー連絡ラ イン流量調節弁 ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(f)	A-RHR注水弁	C2-C/C	SA2-C/C ^{※1}
(g)	B-RHRドライウェル第2ス プレー弁	D2-C/C	SA2-C/C ^{※1}
(h)	B-RHR熱交バイパス弁	D2-C/C	SA2-C/C ^{※1}
(i)	A-残留熱代替除去ポンプ ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
(j)	B-残留熱代替除去ポンプ ^{※3}	SA2-C/C ^{※1}	SA2-C/C ^{※1}
—	計測制御設備 ^{※2}	SA1-C/C ^{※1}	SA1-C/C ^{※1}

※1：SA-L/Cより受電する。

※2：以下のパラメータを監視する。

- ・残留熱代替除去系原子炉注水流量
- ・残留熱代替除去系格納容器スプレー流量
- ・サブプレッション・プール水温度（SA）
- ・残留熱除去系熱交換器出口温度
- ・ドライウェル温度（SA）
- ・ドライウェル圧力（SA）
- ・サブプレッション・チェンバ圧力（SA）
- ・サブプレッション・プール水位（SA）
- ・残留熱代替除去ポンプ出口圧力

※3：残留熱代替除去系設置に伴い設置する設備

③単線結線図

残留熱代替除去系の単線結線図は図 1. 3. 3-2 に示す通りである。

全交流動力電源喪失時における残留熱代替除去系の電源供給元は、次のとおりとする。

- a. 常設代替交流電源設備（ガスタービン発電機）から代替所内電気設備（緊急用 M/C, SA-L/C, SA1-C/C, SA2-C/C）を經由して、残留熱代替除去系の運転に必要な設備に電源供給を行う。（図 1. 3. 3-2）

なお、通常時に非常用所内電気設備の負荷である設備については、代替所内電気設備からの電源供給に切替えて電源供給を行う。

2. 残留熱代替除去系の成立性確認

2.1 有効性評価シナリオの成立性

2.1.1 残留熱代替除去系の運用について

残留熱代替除去系は、1.2に示すとおりサプレッション・チェンバを水源とした原子炉注水及び原子炉格納容器の除熱が可能な系統であり、サプレッション・チェンバの水位上昇を抑制できる。

残留熱代替除去系の運転に当たり、原子炉補機冷却系（原子炉補機冷却海水系を含む。）又は原子炉補機代替冷却系による冷却水供給を必要とするが、格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器の除熱が必要となるまでに残留熱代替除去系への冷却水供給を確保することが可能であることから、原子炉格納容器の除熱に当たっては残留熱代替除去系を優先して使用する運用としている。

2.1.2 残留熱代替除去系の有効性について

残留熱代替除去系の有効性については、「島根原子力発電所2号炉重大事故等対策の有効性評価」の「3.1 雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」における、「冷却材喪失(大破断LOCA)+ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」シナリオにて事象を通じて限界圧力に到達することなく、格納容器ベントを回避することが可能となることを確認している。また、「3.2 高圧溶融物放出/格納容器雰囲気直接加熱」における、「過渡事象+高圧炉心冷却失敗+原子炉減圧失敗+炉心損傷後の原子炉減圧失敗+原子炉注水失敗+DCH発生」シナリオにおいても事象を通じて限界圧力に到達することなく、格納容器ベントを回避することができることを確認している。

なお、高圧・低圧注水機能喪失に対しては、重大事故等対処設備である高圧原子炉代替注水系による原子炉注水を行うことで、原子炉減圧を実施することなく、炉心損傷は回避可能である。また、格納容器フィルタベント系によるベント実施により格納容器の健全性は維持され、周辺の公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えることはない。高圧原子炉代替注水系の有効性については、「島根原子力発電所2号炉重大事故等対策の有効性評価」の「2.3.2 全交流動力電源喪失(TBU)」にて確認している。

2.2 残留熱代替除去系の操作性

2.2.1 残留熱代替除去系運転のために必要な系統・機器とアクセス性

残留熱代替除去系運転時あるいは運転後において、以下の操作並びに作業が確実に実施できることが必要である。

- (1) 残留熱代替除去系運転継続に必要な操作、監視ができること
- (2) 格納容器ベント操作ができること

(1) 残留熱代替除去系運転継続に必要な操作、監視

残留熱代替除去系運転開始前の系統構成は、中央制御室からの電動駆動弁の遠隔操作のため、操作への放射線による大きな影響はない。

また、運転開始時の残留熱代替除去ポンプの起動は中央制御室から遠隔で操作が可能な設計としているため、操作への放射線による大きな影響はない。

残留熱代替除去系運転を開始した後は、残留熱代替除去ポンプの運転状態を残留熱代替除去ポンプ出口圧力により監視する。また、系統流量の監視は、原子炉注水流量を残留熱代替除去系原子炉注水流量で、格納容器スプレイ流量を残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量にて監視する。

残留熱代替除去系運転による系統水冷却状況を、残留熱除去熱交換器出口温度及びサプレッション・プール水温度（SA）により確認する。

残留熱代替除去系運転の効果を、原子炉水位・ドライウエル圧力（SA）、ドライウエル温度（SA）、サプレッション・チェンバ圧力（SA）、サプレッション・プール水位（SA）により確認する。

これらのパラメータは中央制御室及び緊急時対策所で監視が可能な設計としているため、残留熱代替除去系運転により配管廻りの放射線量が上昇した場合においても監視が可能である。

また、残留熱代替除去系運転時には原子炉注水流量及び格納容器スプレイ流量を調整する場合は、流量調整弁の操作により行うが中央制御室からの遠隔で操作が可能な設計としているため、放射線量が上昇した場合においても操作が可能である。（表 2.2.1-1 及び図 2.2.1-1 参照）

その他の作業としては、原子炉補機代替冷却系の運転状態確認及び大型送水ポンプ車への給油作業がある。これらは屋外作業であり格納容器ベント操作前であるため高線量になることはなく、温度・湿度等についても問題になることはなく作業環境は維持されている。

表 2.2.1-1 残留熱代替除去系における操作対象弁・監視対象機器

対象弁・監視機器	実施時期	操作概要	場所	図番
RHR R HARライン入口止め弁	運転開始前	弁開	中央制御室	(a)
R HARライン流量調節弁	運転開始時	弁開	中央制御室	(b)
RHR A-F L S R連絡ライン止め弁	運転開始前	弁開	中央制御室	(c)
RHR A-F L S R連絡ライン流量調節弁	運転開始時	弁開	中央制御室	(d)
RHR PCVスプレイ連絡ライン流量調節弁	運転開始時	弁開	中央制御室	(e)
A-RHR注水弁	運転開始前	弁開	中央制御室	(f)
B-RHRドライウェル第2スプレイ弁	運転開始前	弁開	中央制御室	(g)
B-RHR熱交バイパス弁	運転開始前	弁開	中央制御室	(h)
計測制御設備※ ¹	運転時		中央制御室 緊急時対策所	—

※1：以下のパラメータを監視する。

- ・残留熱代替除去系原子炉注水流量
- ・残留熱代替除去系格納容器スプレイ流量
- ・残留熱除去系熱交換器出口温度
- ・サプレッション・プール水温度 (S A)
- ・残留熱代替除去ポンプ出口圧力
- ・原子炉水位
- ・ドライウェル圧力 (S A)
- ・ドライウェル温度 (S A)
- ・サプレッション・チェンバ圧力 (S A)
- ・サプレッション・プール水位 (S A)

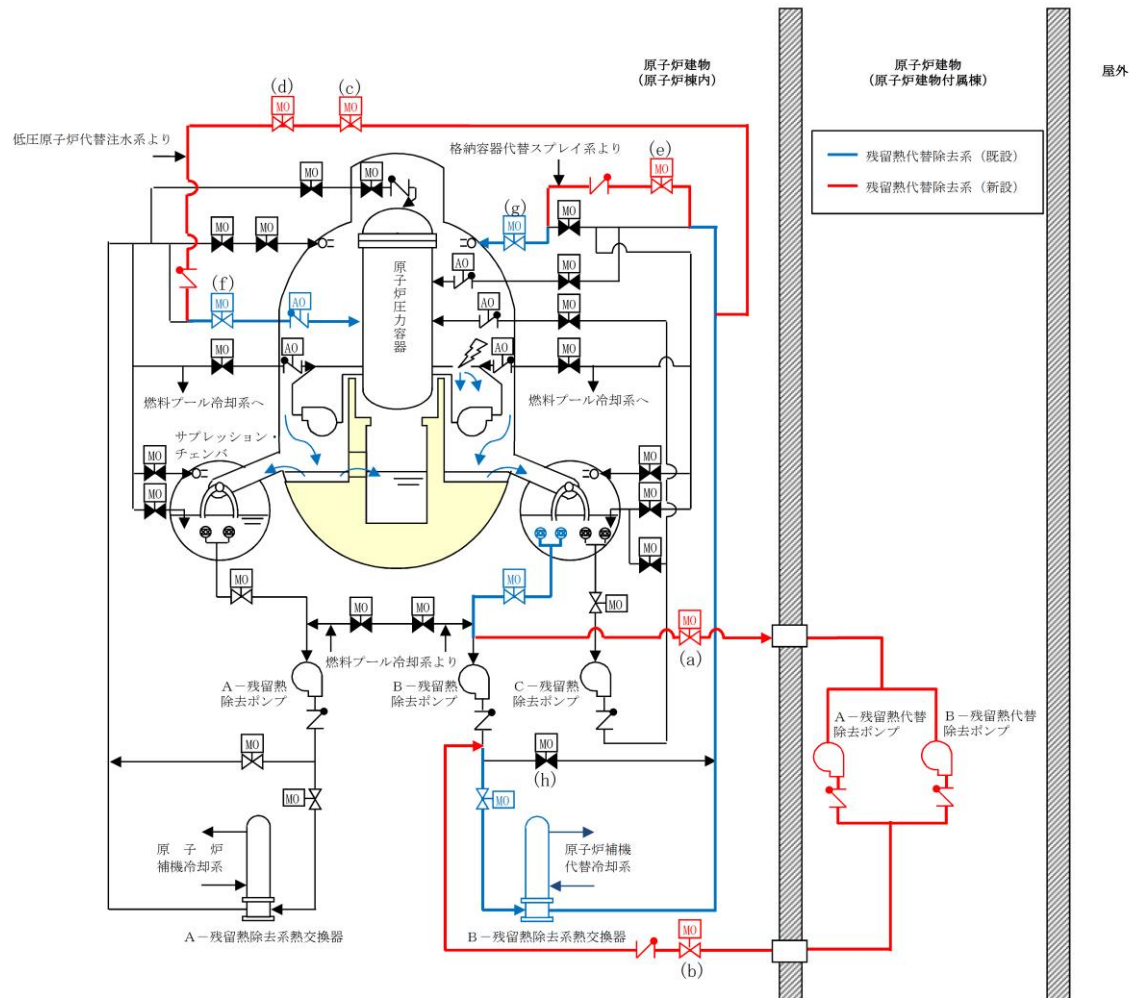


図 2.2.1-1 残留熱代替除去系概要図

(2) 格納容器ベント操作

格納容器ベント操作について、操作対象弁は図 2. 2. 1-2 のとおりであり、これらの操作対象弁と残留熱代替除去系配管の主たる流路の位置関係を表 2. 2. 1-2 及び図 2. 2. 1-3～図 2. 2. 1-5 に示す。これらの操作弁は中央制御室から遠隔操作可能な設計であるため、残留熱代替除去系運転後の放射線量上昇による操作への影響はない。なお、何らかの理由によりベント操作弁が中央制御室から遠隔操作不能となる場合は、放射線量上昇による影響が小さい原子炉建物付属棟において遠隔手動操作で開閉する方法を備えている。なお、これらの操作位置は原子炉建物付属棟であっても、残留熱代替除去系運転により高線量となる配管との位置が比較的近い箇所もあるため、放射線量上昇によるアクセス性及び弁操作性を考慮し、必要に応じて放射線防護対策を施す。

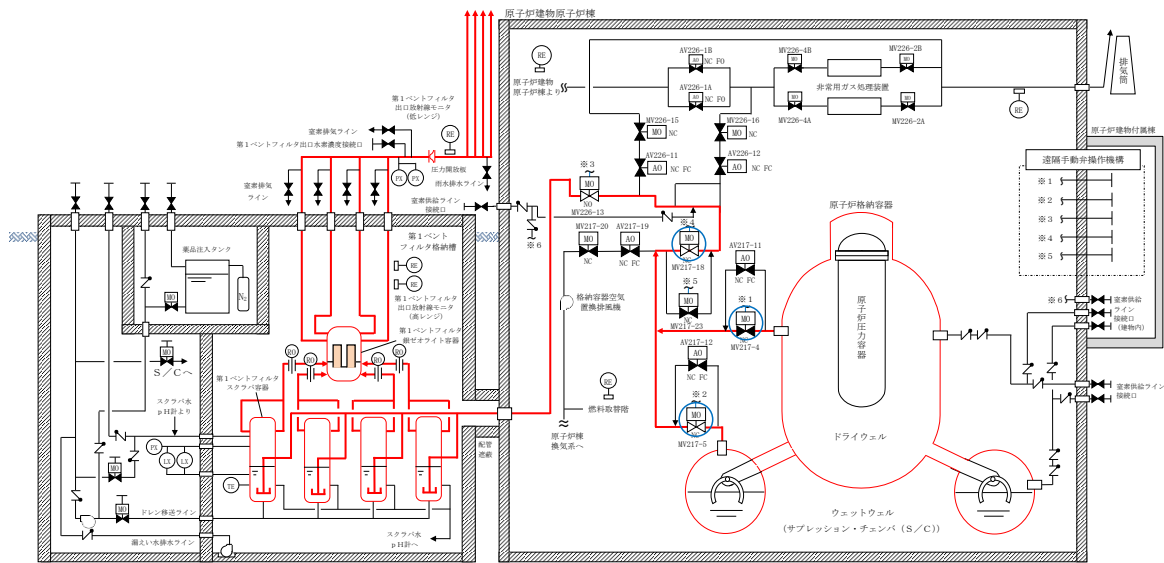


図 2. 2. 1-2 格納容器フィルタベント系系統概要図

表 2. 2. 1-2 ベント操作に必要な操作弁と配置

MV217-5 (第1弁 S/C)	弁①(第 2. 2. 1-3 図)
MV217-4 (第1弁 D/W)	弁②(第 2. 2. 1-4 図)
MV217-18 (第2弁)	弁③(第 2. 2. 1-4 図)

○ 弁設置位置 ○ 遠隔操作位置 (手動)

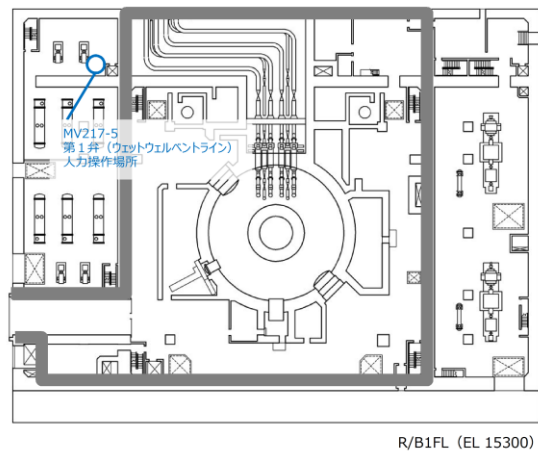
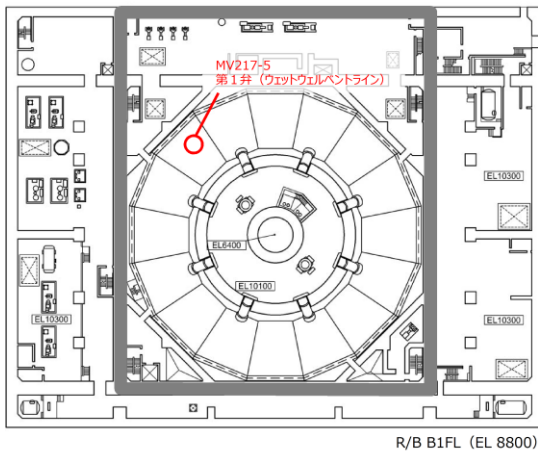


図 2. 2. 1-3 機器配置図

○ 弁設置位置 ○ 遠隔操作位置 (手動)

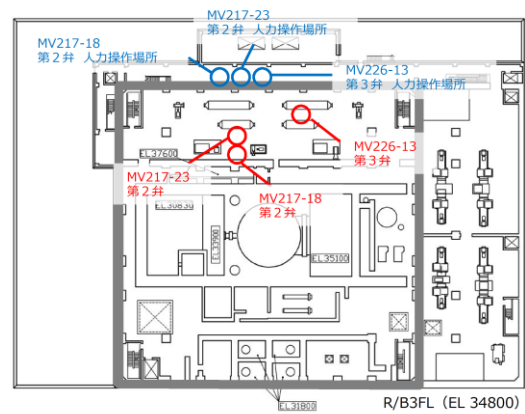
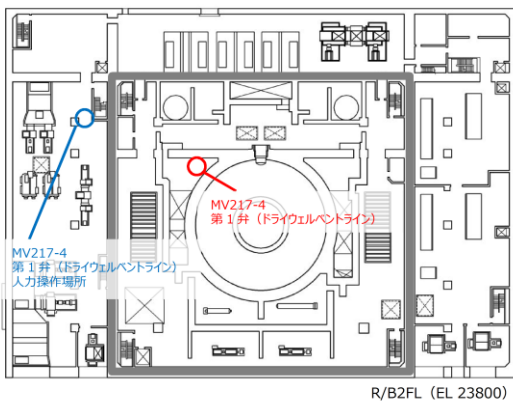


図 2. 2. 1-4 機器配置図

(3) 残留熱除去系の復旧作業

残留熱代替除去系は、残留熱除去系による冷却機能を喪失した場合に使用する系統であり、残留熱除去系が復旧するまで運転継続することを目的としている。よって、残留熱代替除去系運転による放射線量上昇の影響があっても、残留熱除去系復旧作業ができることを示す。

残留熱代替除去系では、サプレッション・チェンバからの吸込み及び原子炉格納容器内へのスプレイとして、残留熱除去系のB系を使用することを想定（原子炉への注水はA系を想定）している。このため、残留熱除去系の復旧に際しては、残留熱代替除去系運転の影響を受ける可能性が最も低いA系を復旧することを想定する。

A－残留熱除去ポンプ類の復旧のためには、機能喪失要因にもよるが原子炉建物地下2階のA－残留熱除去ポンプ室又は原子炉建物地下1階のA－残留熱除去ポンプ室の上部ハッチまでアクセスすることができる必要がある。

図2.2.1-5に示すとおり、残留熱代替除去系により高線量となる配管は、A－残留熱除去ポンプ室及び上部ハッチ付近から十分離れていることから、アクセスは可能である。

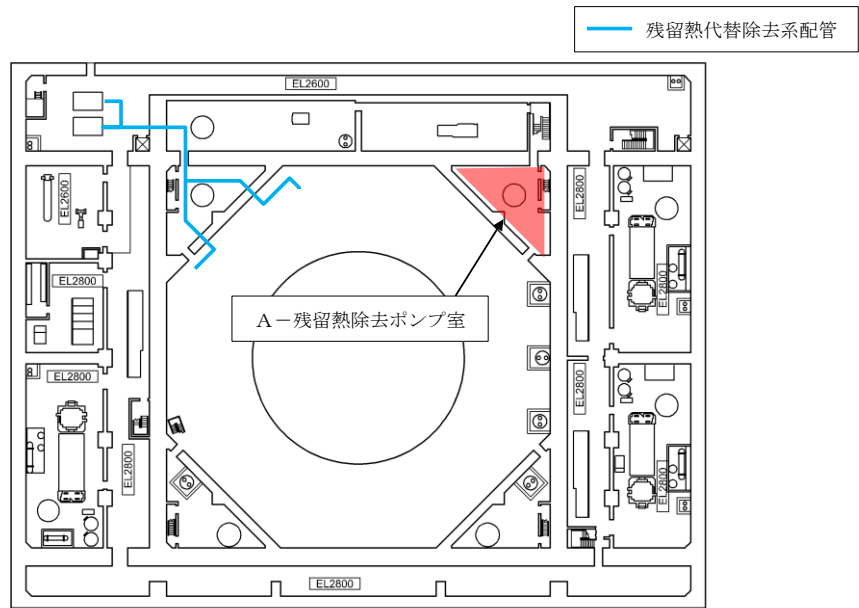


図 2.2.1-5 機器配置図 (原子炉建物地下2階) (1 / 2)

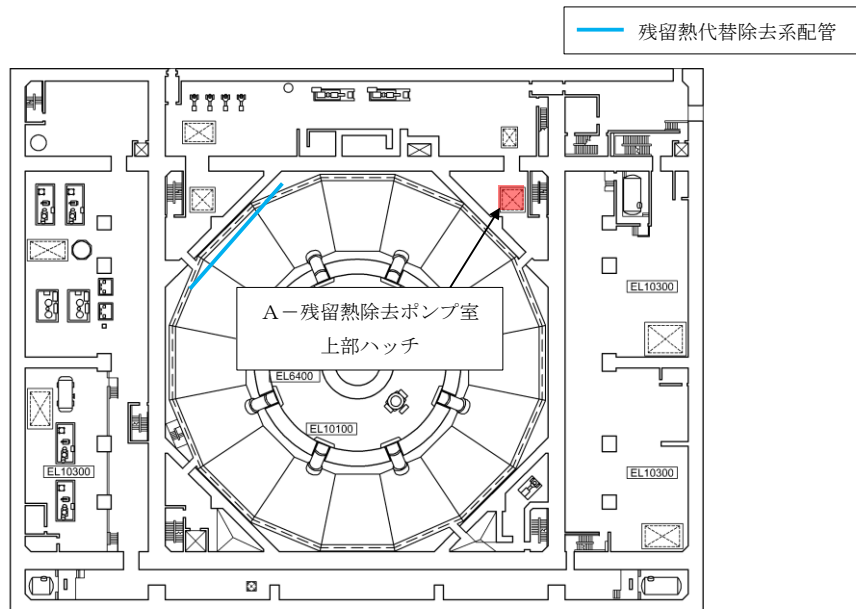


図 2.2.1-5 機器配置図 (原子炉建物地下1階) (2 / 2)

2.2.2 操作の概要について

格納容器破損モード「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」（残留熱代替除去系を使用する場合）及び「高压熔融物放出／格納容器雰囲気直接加熱」の手順の概要を図 2.2.2-1～3 に、必要な要員と作業項目を図 2.2.2-4～6 に示す。

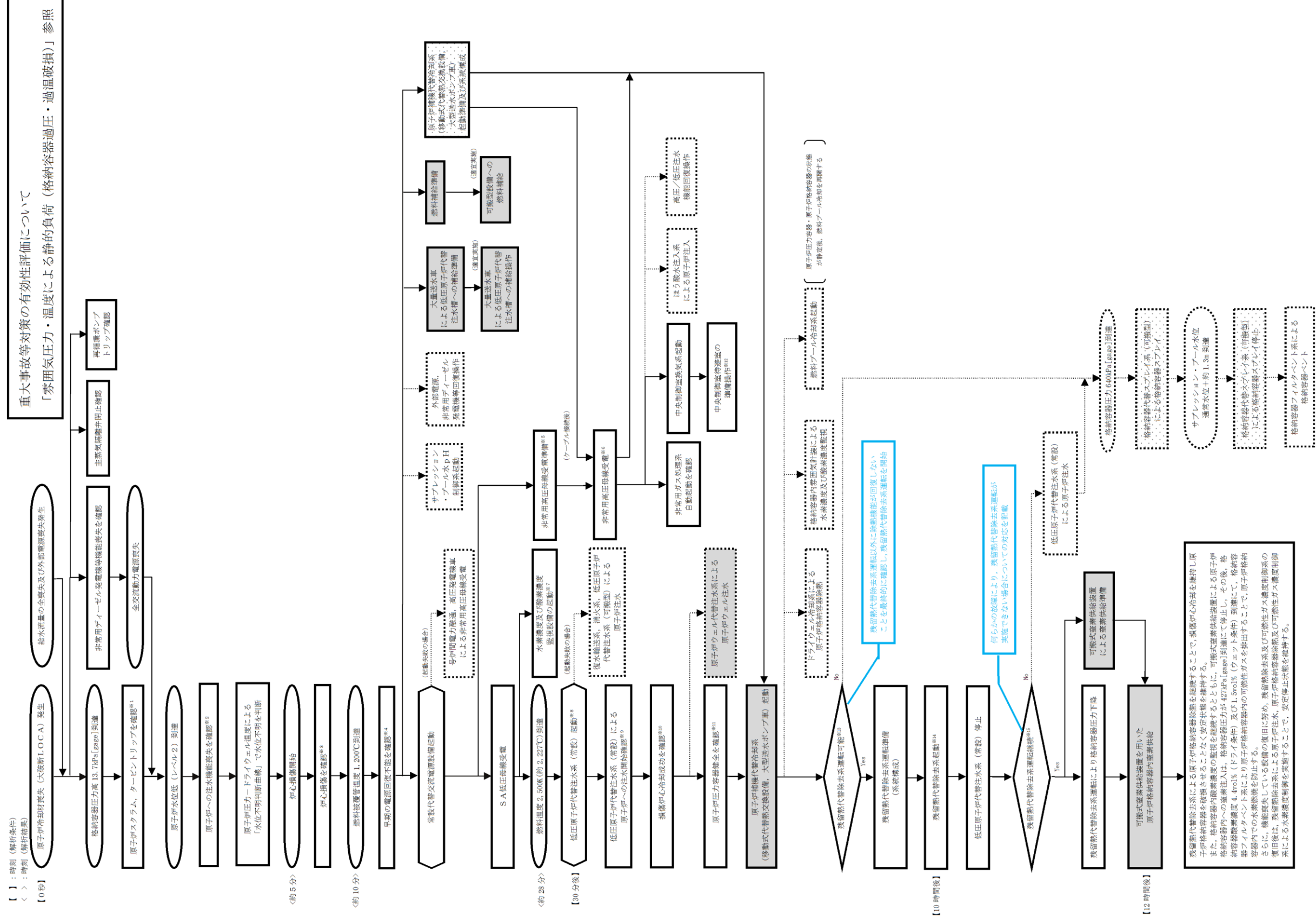


図 2.2.2-1 残留熱代替除去系運転の手順概要（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の場合）「全体図」

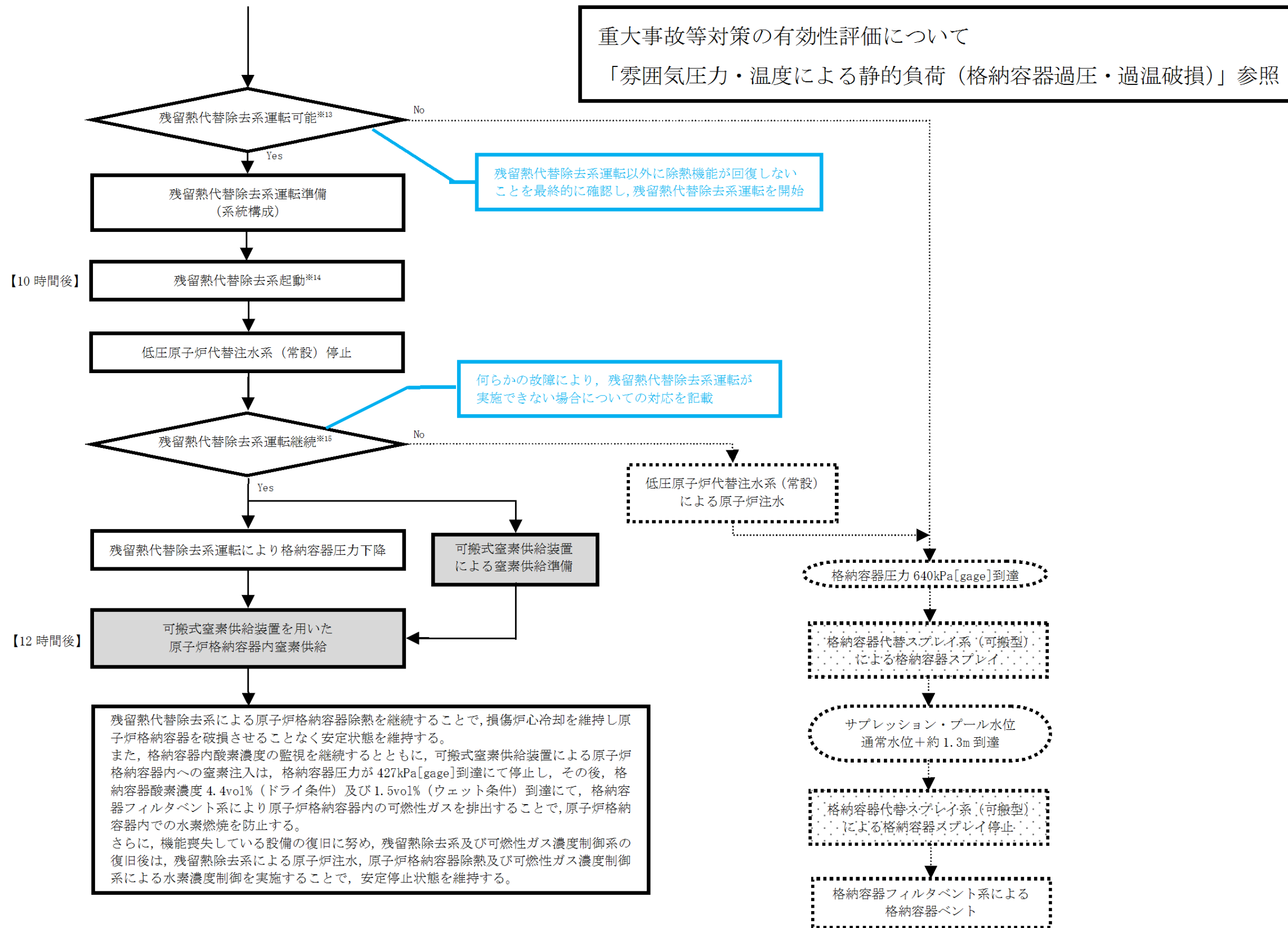


図 2.2.2-2 残留熱代替除去系運転の手順概要（「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」の場合）「抜粋図」

2.3 系統運転時の監視項目

2.3.1 水素ガス及び酸素ガス発生時の対応について

(1) 想定水素ガス及び酸素ガス発生量

a. 監視が必要となる状況と監視計器に求められる性能

有効性評価の事故シーケンス選定のプロセスにおいて、重大事故等対処設備に期待しても炉心損傷を回避できず、有効性評価の対象とすべき評価事故シーケンスとしては、現状、「冷却材喪失（大破断LOCA）＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」のみを選定している。

よって、この「冷却材喪失（大破断LOCA）＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」への対応の中で想定される水素濃度及び酸素濃度を監視できる能力を備えることが、重大事故等時の水素濃度及び酸素濃度の監視に最低限要求される性能となる。

b. 重大事故等時の原子炉格納容器内の環境と水素濃度及び酸素濃度

「冷却材喪失（大破断LOCA）＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」事故時における各パラメータの推移は、雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）（残留熱代替除去系を使用する場合）の有効性評価において示すとおりである。これに加え、必要な水素濃度及び酸素濃度の監視能力を決定する上で必要な情報であるドライウエル及びサブレーション・チェンバの気体の組成の推移を図2.3.1-1及び図2.3.1-2に示す。

c. 重大事故等時の水素濃度及び酸素濃度の監視計器に求められる性能

①計測目的について

一般に気相中の体積割合で5 vol%以上の酸素ガスと共に水素ガスが存在する場合、水素濃度4 vol%で燃焼、13 vol%で爆轟が発生すると言われている。この観点から、少なくとも水素濃度は4 vol%、酸素濃度は5 vol%までの測定が可能であることが必要である。

②測定が必要となる時間

図2.3.1-1及び図2.3.1-2のとおり、解析上は事象発生から12時間後に原子炉格納容器への窒素供給を実施することで、事象発生から約168時間後まで酸素濃度が可燃限界である5 vol%を超えることは無く、原子炉格納容器内での水素燃焼は生じない。

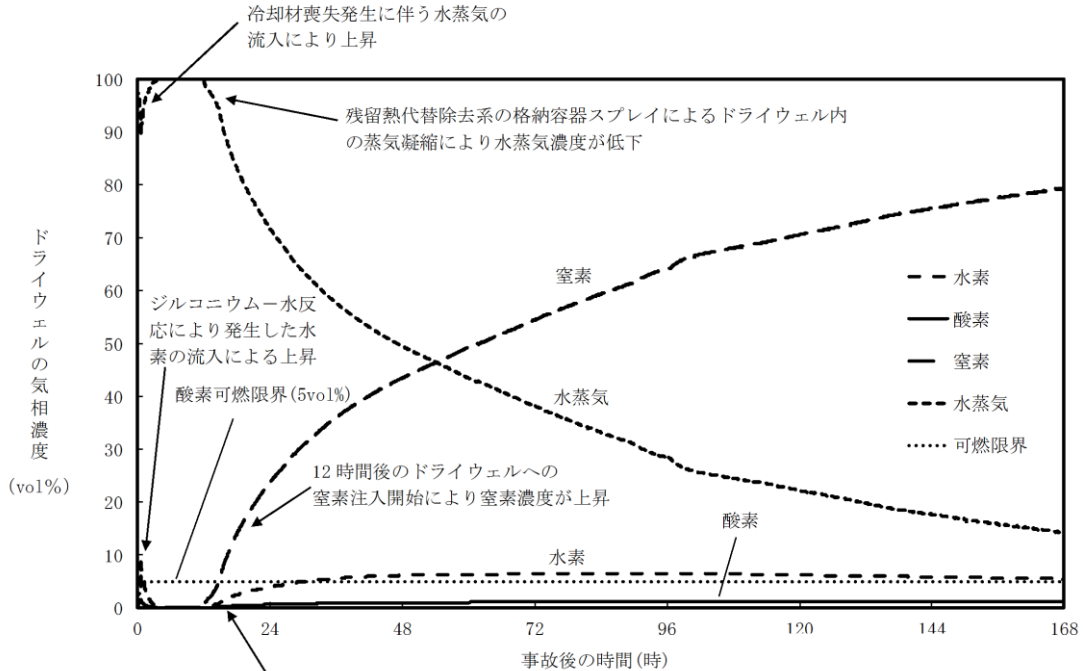
しかしながら、徐々にではあるが、水の放射線分解により水素濃度及び酸素濃度は上昇し続けることから、格納容器内水素濃度（SA）及び格納容器内酸素濃度（SA）起動後（事象発生から約2時間）、水素濃度及び酸素濃度を継続して監視可能としている。

なお、「冷却材喪失（大破断LOCA）＋ECCS注水機能喪失＋全交流動力電源喪失」事故時において、G値を設計基準事故対処設備である可燃性ガス濃度制御系の性能を評価する際に用いたG値（沸騰状態：G(H₂)=0.4, G(O₂)=0.2, 非沸騰状態：G(H₂)=0.25, G(O₂)=0.125)とした場合についても、原子炉格納容器内の酸素濃度が4.4vol%（ドライ条件）に到達するのは、事象発生から約85時間後である。また、窒素封入の切替え操作（原子炉格納容器内の酸素濃度4vol%到達時）は、事象発生から約49時間後である（図2.3.1-3及び図2.3.1-4参照）。これより、格納容器内酸素濃度（SA）を起動する事象発生から約2時間までに原子炉格納容器内の酸素濃度が可燃限界（5vol%）に到達することはない。

さらに、過圧破損の回避を目的とした格納容器ベントを実施することにより、発生する蒸気とともに原子炉格納容器内の非凝縮性ガスのほとんどは格納容器ベントを通じて排出されることとなることから、酸素濃度の監視は必要とはならない。

③耐環境条件

「冷却材喪失（大破断LOCA）+ ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」事故時における各パラメータの推移を踏まえても測定可能であることが必要である。



残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウエル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウエルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

図 2.3.1-1 ドライウエルの気相濃度の推移（ウェット条件）
格納容器過圧・過温破損（残留熱代替除去系を使用する場合）

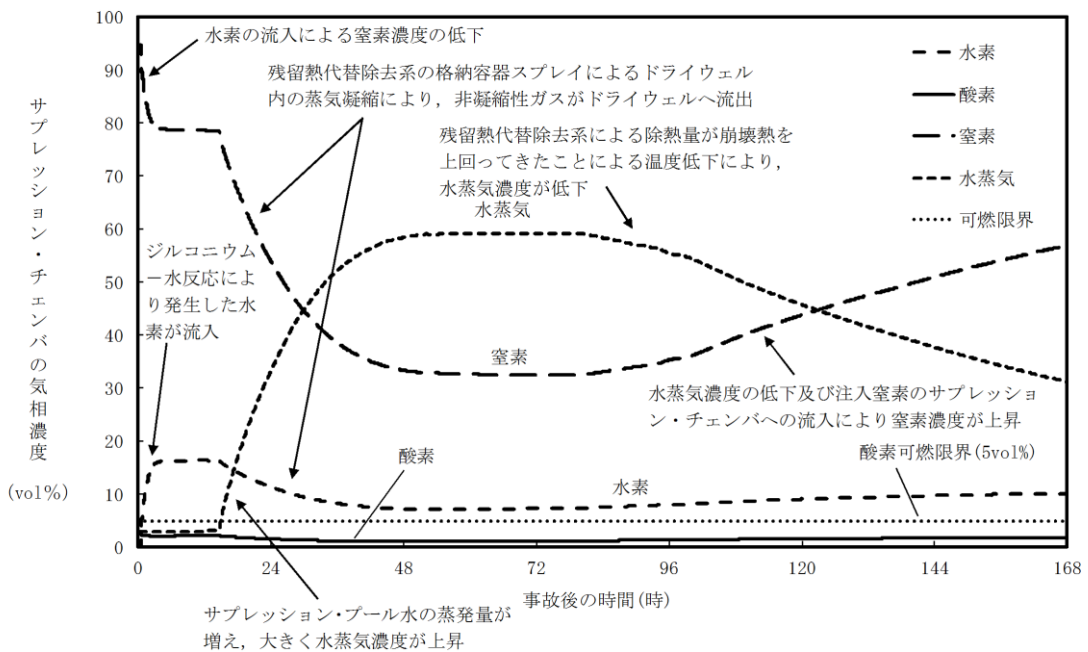
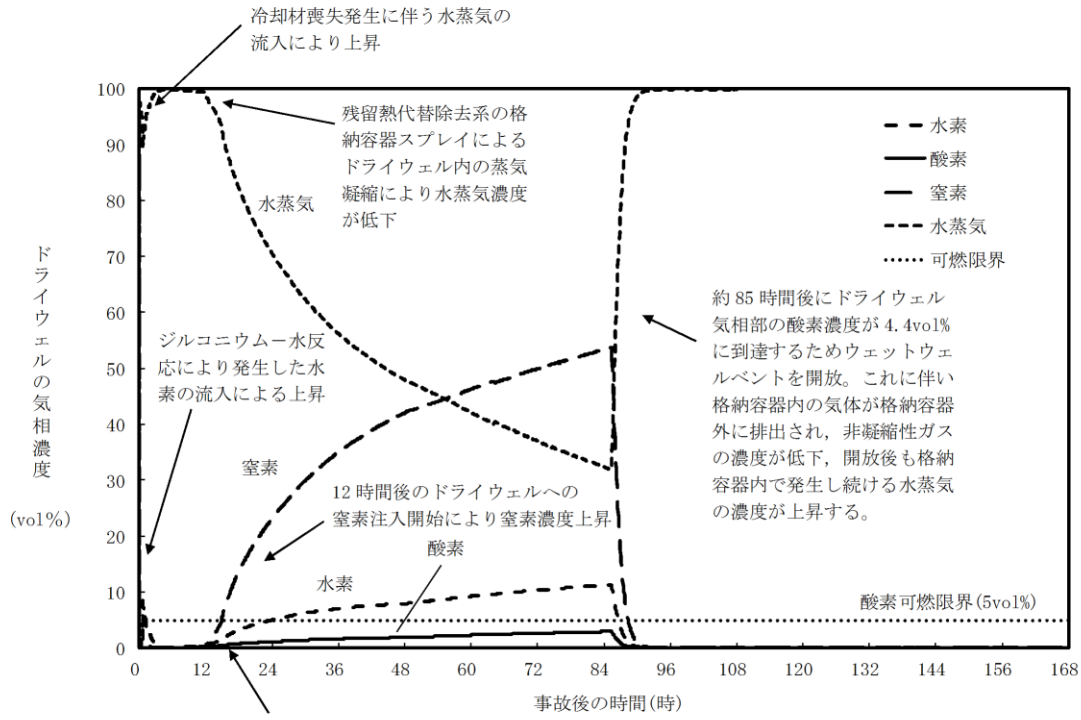


図 2.3.1-2 サプレッション・チェンバの気相濃度の推移（ウェット条件）
格納容器過圧・過温破損（残留熱代替除去系を使用する場合）



残留熱代替除去系の格納容器スプレイによるドライウエル内の蒸気凝縮により、サブプレッション・チェンバ内の非凝縮性ガスがドライウエルへ流入し、非凝縮性ガスの濃度が上昇

図 2.3.1-3 G 値を設計基準事故ベースとした場合のドライウエルの気相濃度の推移 (ウェット条件)

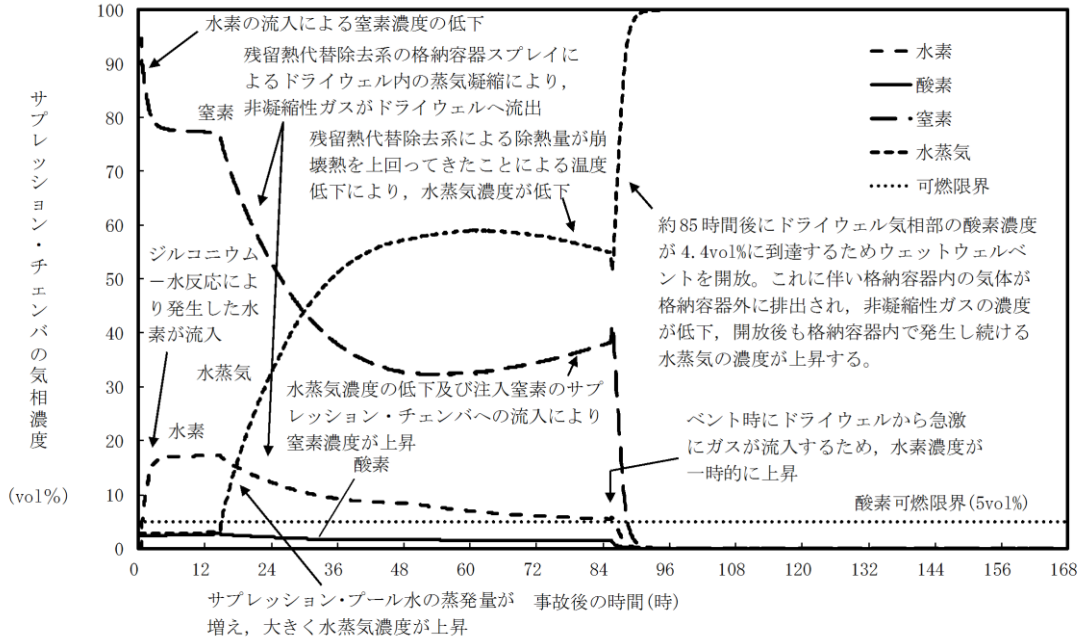


図 2.3.1-4 G 値を設計基準事故ベースとした場合のサブプレッション・チェンバの気相濃度の推移 (ウェット条件)

(2) 水素濃度及び酸素濃度の監視方法

水素濃度は4 vol%, 酸素濃度は5 vol%までの測定が可能であることが必要であることから、「冷却材喪失(大破断LOCA)+ECCS注水機能喪失+全交流動力電源喪失」(残留熱代替除去系を使用する場合)における原子炉格納容器内の水素濃度及び酸素濃度の監視は、以下の設備により実施する。

表 2.3.1-1 計装設備の主要仕様

名称	検出器の種類	計測範囲	個数	取付箇所
格納容器水素濃度 (SA)	熱伝導式 水素検出器	0~100vol%	1	原子炉建物中2階
格納容器酸素濃度 (SA)	磁気力式 酸素検出器	0~25vol%	1	原子炉建物中2階
格納容器水素濃度 (B系)	熱伝導式 水素検出器	0~5%/ 0~100%	1	原子炉建物3階
格納容器酸素濃度 (B系)	熱磁気風式 酸素検出器	0~5%/ 0~25%	1	原子炉建物3階

(3) 水素ガス及び酸素ガスの処理方法

有効性評価では、機能喪失を仮定した設備の復旧には期待せず、重大事故等時の環境下におけるG値に基づき、7日間以内に水素ガスと酸素ガスの両方の濃度が可燃限界に到達しないことを確認している。

しかしながら、ここでは7日間以内に水素ガスと酸素ガスの両方の濃度が可燃限界に達した場合と事象発生後8日目以降の水素ガス及び酸素ガスの扱いについて以下に示す。

a. 7日間以内に水素ガスと酸素ガスの両方の濃度が可燃限界に到達した場合

機能喪失を仮定した設備の復旧には期待しないという前提においては、原子炉格納容器内の水素ガス及び酸素ガスを処理する方法は格納容器ベントによって原子炉格納容器外へ放出する手段となる。よって、酸素濃度が5 vol%に至るまでに格納容器ベントを実施する。なお、格納容器ベントの実施により蒸気と共に非凝縮性ガスは排出され、その後の原子炉格納容器内の気体組成は水蒸気がほぼすべてを占めることとなる。

残留熱代替除去系等が復旧し、原子炉格納容器圧力制御が可能になった場合にあっても、仮に酸素濃度が5 vol%に到達するおそれがある場合、格納容器ベントを通じて非凝縮性ガスを原子炉格納容器外へ排出することとなる。このとき格納容器スプレイによって、原子炉格納容器内圧力が低い状態での排出となるが、炉心崩壊熱による蒸気発生は長時間継続するため、その蒸気とともに非凝縮性ガスは同時に排出され、原子炉格納容器内に残る水素

ガス及び酸素ガスは無視し得る程度となり、可燃限界に至ることはない（「重大事故等対策の有効性評価，3.4 水素燃焼，添付資料 3.4.1 G 値を設計基準事故ベースとした場合の評価結果への影響」参照）。

b. 事象発生後 8 日目以降の水素ガス及び酸素ガスの処理方法

この場合、機能喪失を仮定した設備の復旧又は外部からの支援等に期待することができ、多様な手段を確保することができる。

まず、可燃性ガス濃度制御系の復旧を試みることで、水の放射線分解により発生する酸素ガスを処理する。また、a. と同様に格納容器ベントによる排出も可能であり、水素ガス及び酸素ガスの処理については多様な手段を有する。

(4) 代替パラメータによる原子炉格納容器内の酸素濃度の推定

原子炉格納容器内の酸素濃度を把握する目的としては、事故後の原子炉格納容器内の水素ガスが燃焼を生じる可能性の把握である。

原子炉格納容器内の酸素濃度の主要パラメータである格納容器酸素濃度（SA）の計測が困難になった場合、代替パラメータの格納容器酸素濃度により推定する。

有効性評価においては、代替パラメータの格納容器酸素濃度は、原子炉補機代替冷却系が復旧する事象発生から約 10.5 時間後から計測が可能である。

3. 本システムの運用にあたって考慮すべき項目

3.1 放射線による影響について

①耐放射線に関する設計考慮について

残留熱代替除去系は、重大事故時に炉心損傷した場合の放射線影響を考慮して設計を行う。具体的には、放射線による劣化影響が懸念される有機材（シール材等）が使用されている機器について、残留熱代替除去系を運転する環境における放射線影響を考慮して設計する。

残留熱代替除去系を運転する際の放射線量については、簡易解析評価の結果、運転時間90日とした場合に、代表的な配管表面部において積算放射線量は約 kGyであることが目安としてある。よって、残留熱代替除去系の運転操作に必要な機器で、放射線による劣化影響が懸念される機器（電動機、ケーブル、シール材等）については、運転環境下における当該部位の放射線量を考慮して機能確保可能な設計とする。

②水の放射線分解による水素影響について

炉心損傷後の冷却水には、放射性物質が含まれていることにより、水の放射線分解による水素等の可燃性ガスの発生が想定されるが、残留熱代替除去系運転中は配管内に流れがあり、また、冷却水が滞留する箇所がないことから、配管内に水素が大量に蓄積されることは考えにくい。

残留熱代替除去系の運転を停止した後は、可燃性ガスの爆発防止等の対策として、系統水を入れかえるためにフラッシングを実施することとしており、水の放射線分解による水素発生を防止することが可能となる。具体的には残留熱除去ポンプのB-RHRポンプトラス水入口弁を閉じ、残留熱代替除去系に大量送水車から外部水源を供給することにより、系統のフラッシングを実施する。

3.2 系統の健全性について

(1) 残留熱代替除去系運転時の系統水漏えいの可能性

残留熱代替除去系は残留熱除去系と組み合わせて重大事故等対処設備として系統を構成しているものである。

残留熱代替除去系を使用する場合に流路となる残留熱除去系の配管，弁及び熱交換器については，残留熱除去系として使用する場合と同様に流路として使用する設計であること及び残留熱除去系の設計条件を超えない範囲で使用するため，系統水が漏えいすることはない。残留熱代替除去系の流路を図3.2-1に示す。

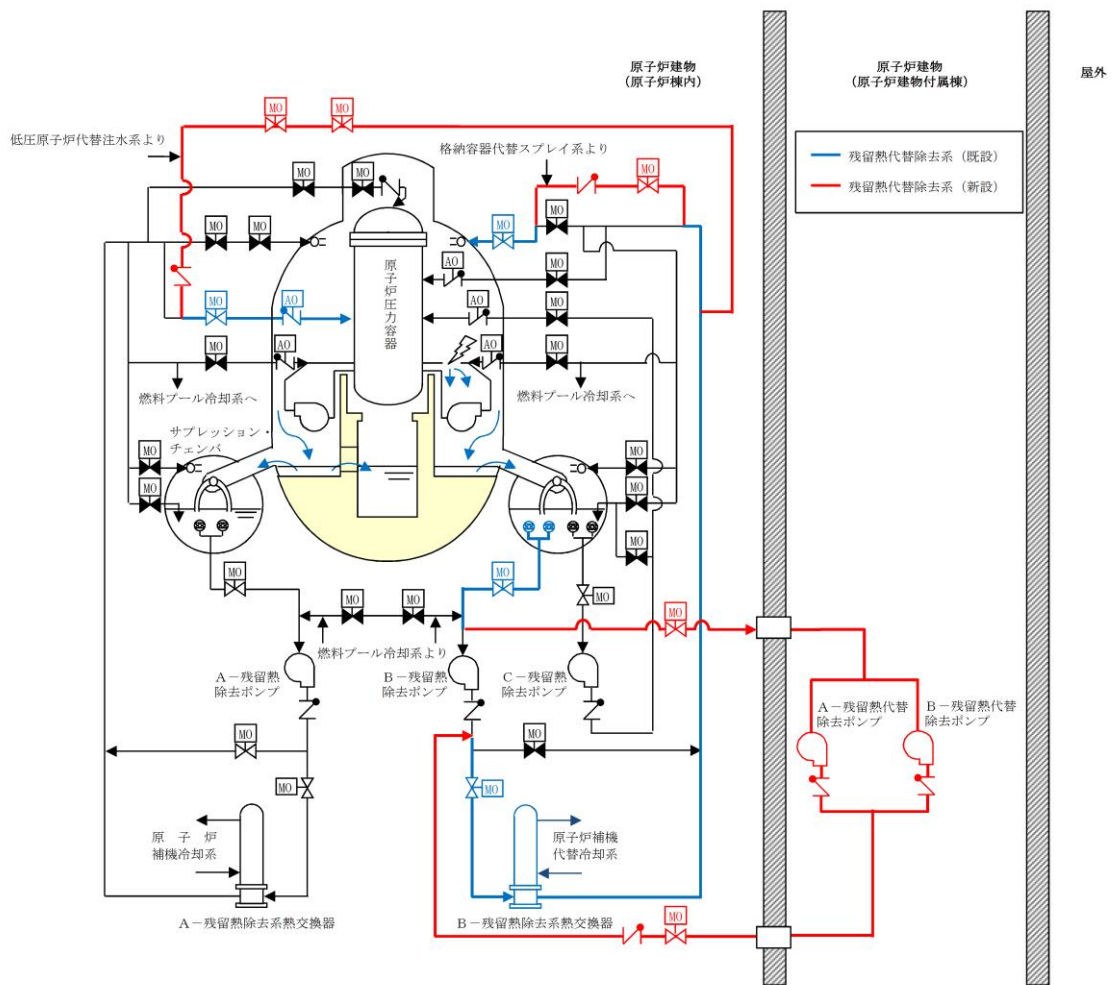


図 3.2-1 残留熱代替除去系系統概要図

格納容器水素濃度・酸素濃度の測定原理と適用性について

1. 格納容器水素濃度（S A）について

(1) システム構成

格納容器水素濃度（S A）のシステム概要を図1に示す。格納容器水素濃度（S A）は、重大事故等対処設備の機能を有しており、格納容器水素濃度（S A）の検出信号は、熱伝導式水素検出器からの電流信号を演算装置にて水素濃度信号へ変換する処理を行った後、格納容器水素濃度（S A）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図2「格納容器水素濃度（S A）の概略構成図」参照。）

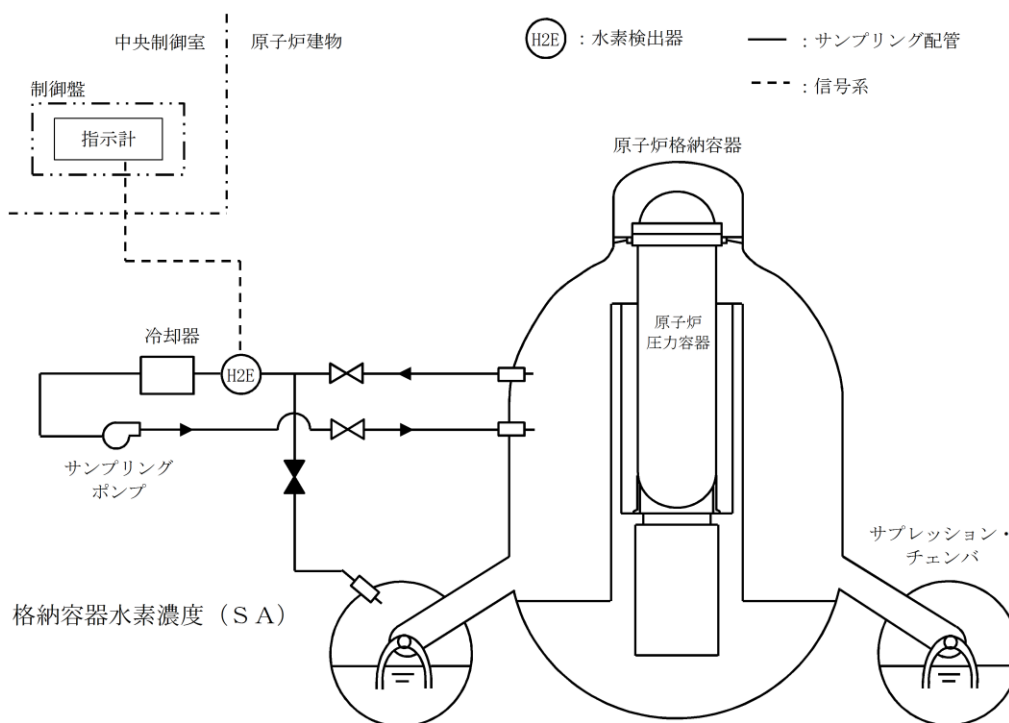


図1 格納容器水素濃度（S A）システム概要

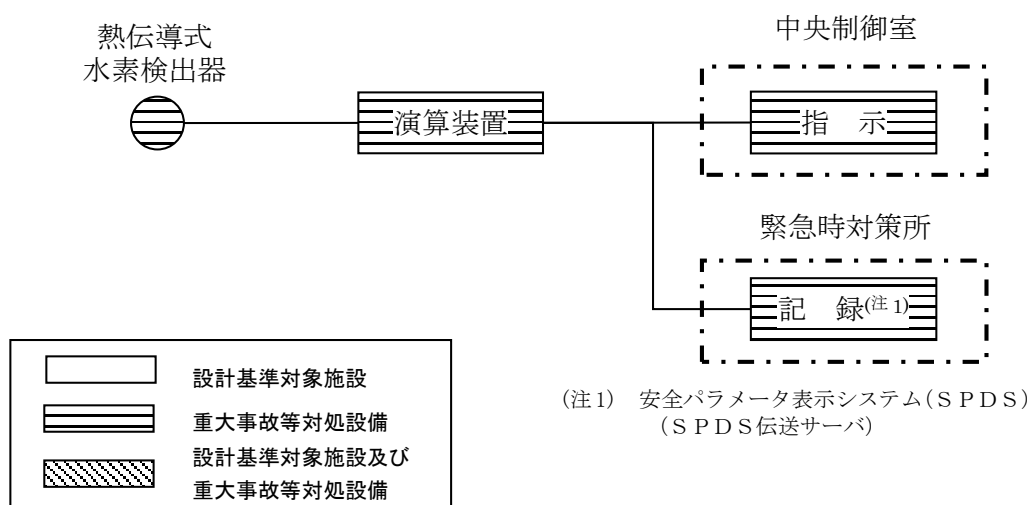


図2 格納容器水素濃度 (SA) の概略構成図

(2) 測定原理

原子炉格納容器内の水素濃度を測定するために用いる格納容器水素濃度 (SA) は、熱伝導式のものをを用いる。熱伝導式の水素検出器は、図3に示すとおり、検知素子と補償素子 (サーミスタ) でブリッジ回路が構成されている。検知素子の部分のみに測定対象ガスが流れ、補償素子に測定対象ガスが流れない構造としている。

水素濃度の測定部より電圧を印加して検知素子と補償素子の両方のサーミスタを一定温度に加熱した状態で、検知素子側に水素を含む測定ガスを流すと、測定ガスが熱を奪い、検知素子の温度が低下することにより抵抗が低下する。

この検知素子の抵抗が低下することによりブリッジ回路の平衡が失われ、図3のAB間に電位差が生じる。この電位差が水素濃度に比例する原理を用いて、水素濃度を測定する。

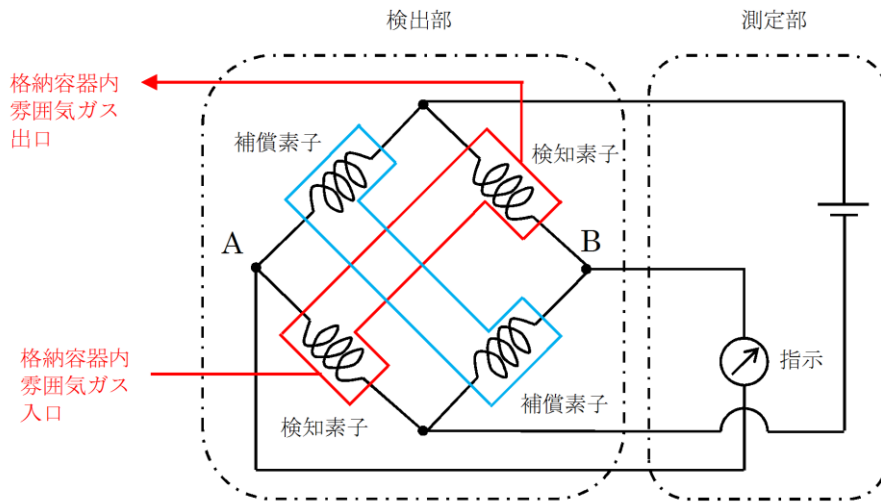


図3 格納容器水素濃度 (S A) 検出回路の概要図

(3) 設置場所

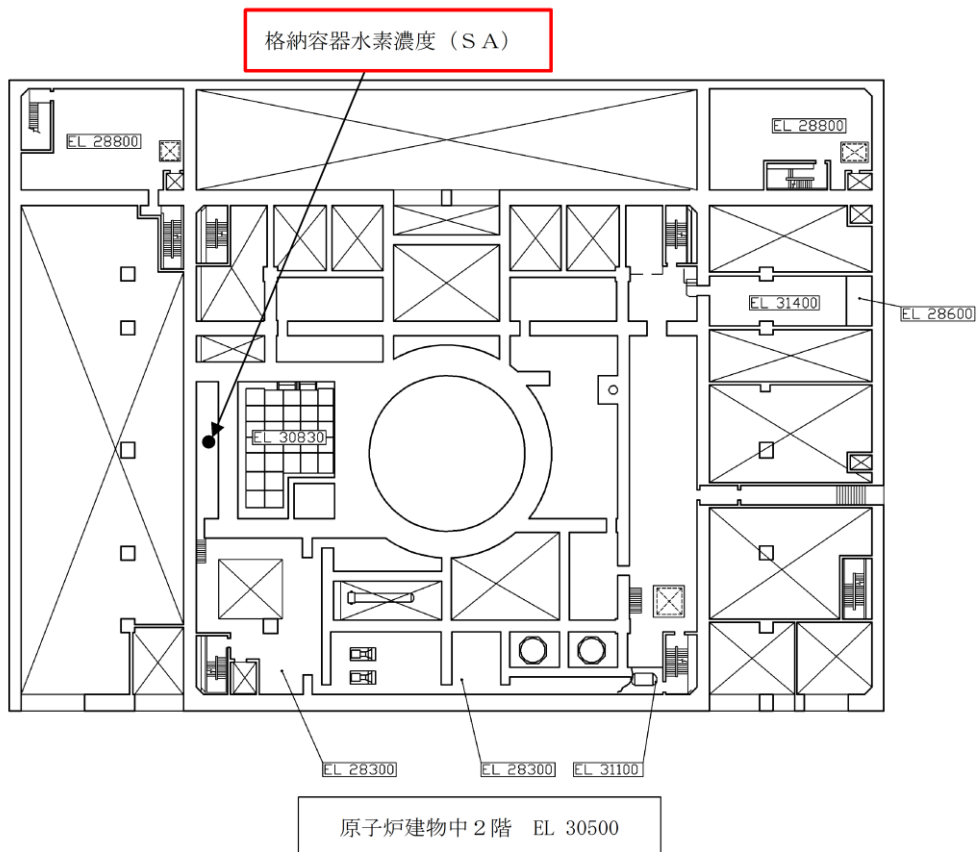
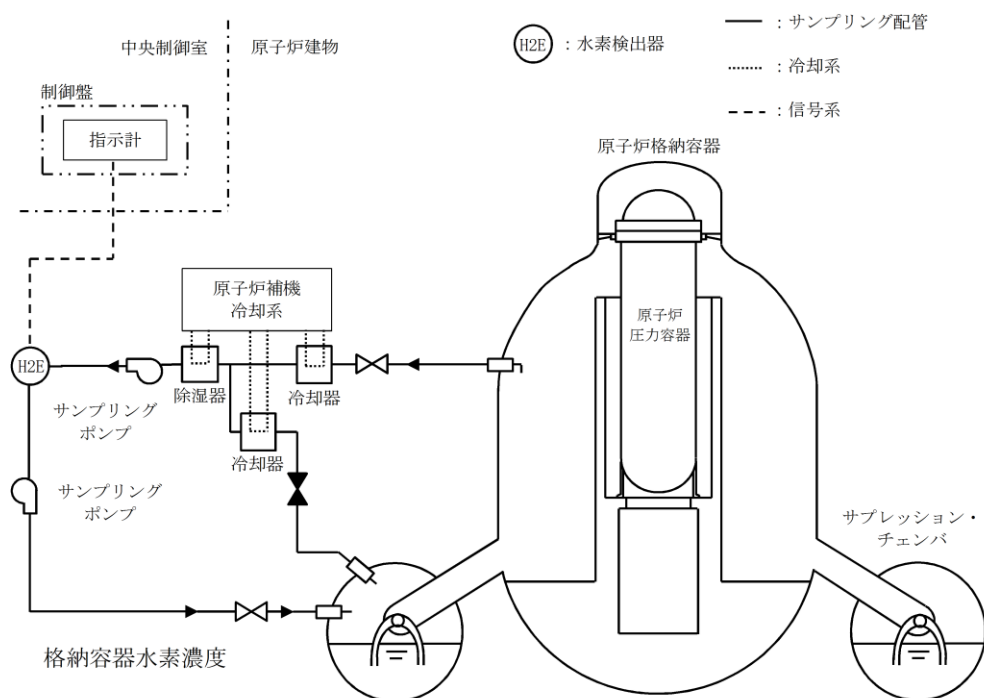


図4 機器配置図 (原子炉建物中2階)

2. 格納容器水素濃度（B系）について

(1) システム構成

格納容器水素濃度（B系）のシステム概要を図5に示す。格納容器水素濃度（B系）は、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備の機能を有しており、格納容器水素濃度（B系）の検出信号は、熱伝導式水素検出器からの電圧信号を、前置増幅器で増幅し、演算装置にて水素濃度信号へ変換する処理を行った後、格納容器水素濃度（B系）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図6「格納容器水素濃度（B系）の概略構成図」参照。）



※2系列のうちB系を示す。

図5 格納容器水素濃度（B系）システム概要

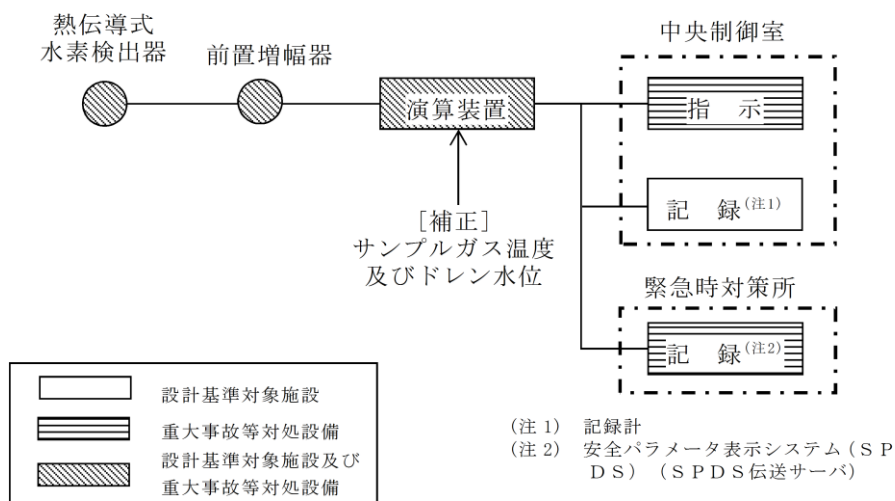


図6 格納容器水素濃度（B系）の概略構成図

(2) 測定原理

原子炉格納容器内の水素濃度を測定するために用いる格納容器水素濃度（B系）は、熱伝導式のものを用いる。熱伝導式の水素検出器は、図7に示すとおり、検知素子と補償素子（サーミスタ）、及び2つの固定抵抗でブリッジ回路が構成されている。検知素子の部分に、サンプリングされたガスが流れるようになっており、補償素子には基準となる標準空気が密閉されており測定対象ガスとは接触しない構造になっている。

水素濃度計指示部より電圧を印加して検知素子と補償素子の両方のサーミスタを一定温度に加熱した状態で、検知素子側に水素を含む測定ガスを流すと、測定ガスが熱を奪い、検知素子の温度が低下することにより抵抗が低下する。この検知素子の抵抗が低下するとブリッジ回路の平衡が失われ、図7のA B間に電位差が生じる。この電位差が水素濃度に比例する原理を用いて、水素濃度を測定する。

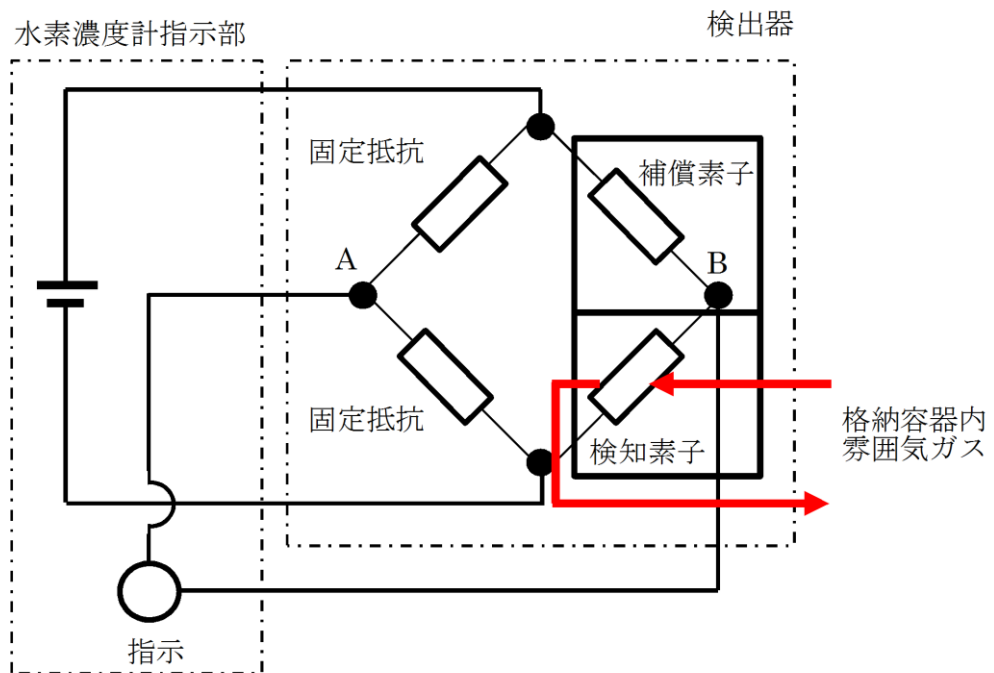


図7 格納容器水素濃度（B系）検出回路の概要図

(3) 設置場所

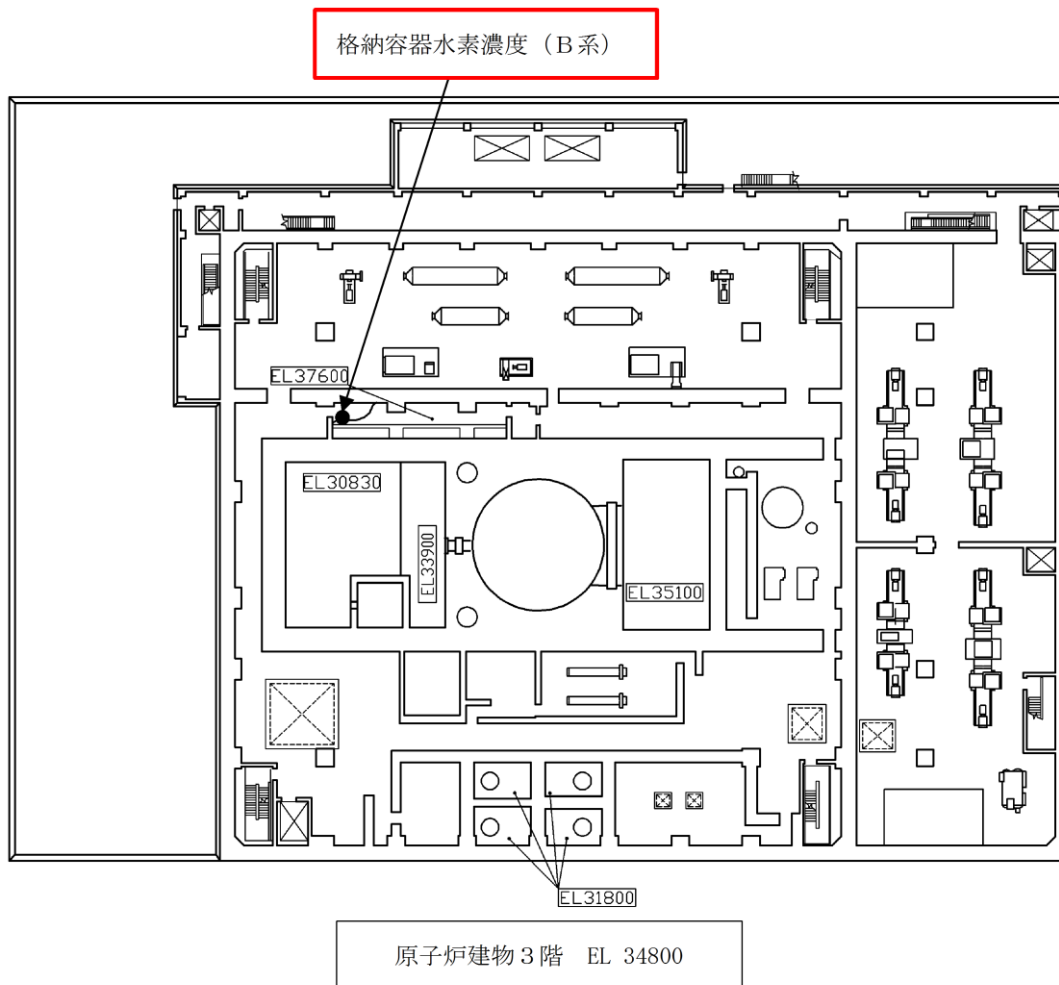


図8 機器配置図 (原子炉建物3階)

3. 格納容器酸素濃度 (S A) について

(1) システム構成

格納容器酸素濃度 (S A) のシステム概要を図 9 に示す。格納容器酸素濃度 (S A) は、重大事故等対処設備の機能を有しており、格納容器酸素濃度 (S A) の検出信号は、磁気力式酸素検出器からの電流信号を演算装置にて酸素濃度信号へ変換する処理を行った後、格納容器酸素濃度 (S A) を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。(図 10「格納容器酸素濃度 (S A) の概略構成図」参照。)

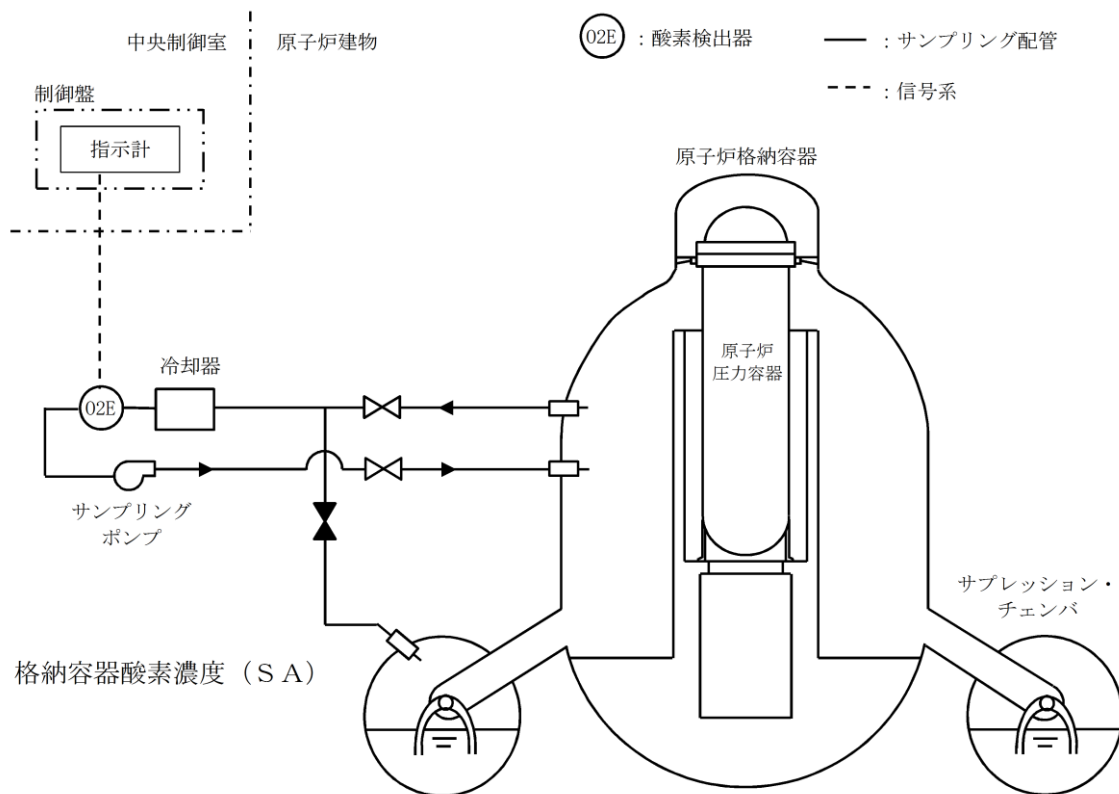


図 9 格納容器酸素濃度 (S A) システム概要

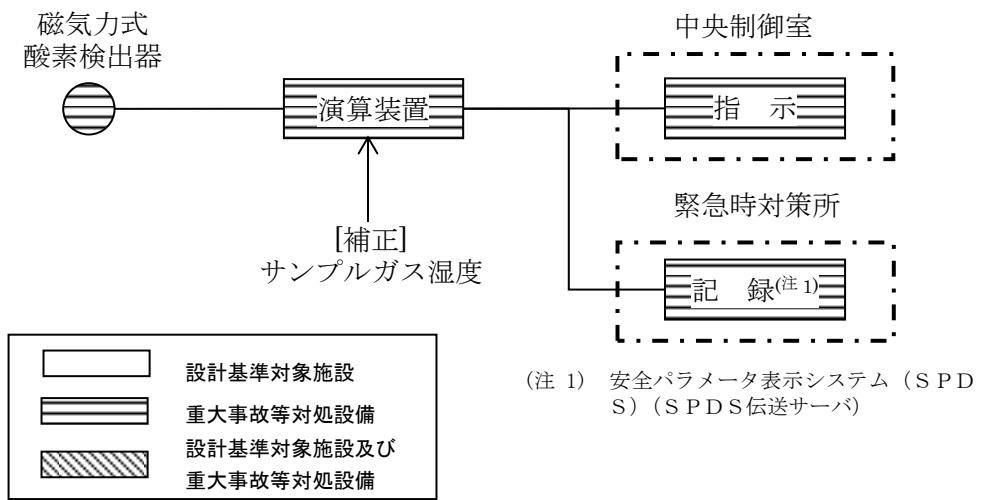


図10 格納容器酸素濃度 (SA) の概略構成図

(2) 測定原理

原子炉格納容器内の酸素濃度を測定するために用いる格納容器酸素濃度 (S A) は、磁気力式のものをを用いる。

磁気力式の酸素検出器は、図 11「格納容器酸素濃度 (S A) の原理図」に示すとおり、吊るされた2つの球体、くさび型状の磁極片、LEDからの光を受光素子へ反射する鏡等で構成されている。また、格納容器酸素濃度 (S A) の検出回路を図 12「格納容器酸素濃度 (S A) 検出回路図」に示す。

初期状態において球体は上から見て右回りに傾いた位置で静止している。ガラス管内に強い磁化率を持つ酸素分子が流れ込むと、磁場に引き寄せられ、磁極片の先端部に酸素分子が引き寄せられる。磁極片先端部に引き寄せられた酸素分子により2つの球体が磁極片先端部から端部へ押し出され、右回りに回転する。これにより、LEDからの光を受光素子への光量が一定となるように制御しており、受光素子への光量が変化する。増幅器は受光素子への光量の変化を検知するとフィードバック電流を増加させる。球体はフィードバック電流がコイルを流れることで発生するカウンターモーメントを受けて光量が一定となる初期位置で静止する。このフィードバック電流が酸素濃度に比例する原理を用いて酸素濃度の測定を行う。(図 13「格納容器酸素濃度 (S A) の動作原理イメージ」参照)。

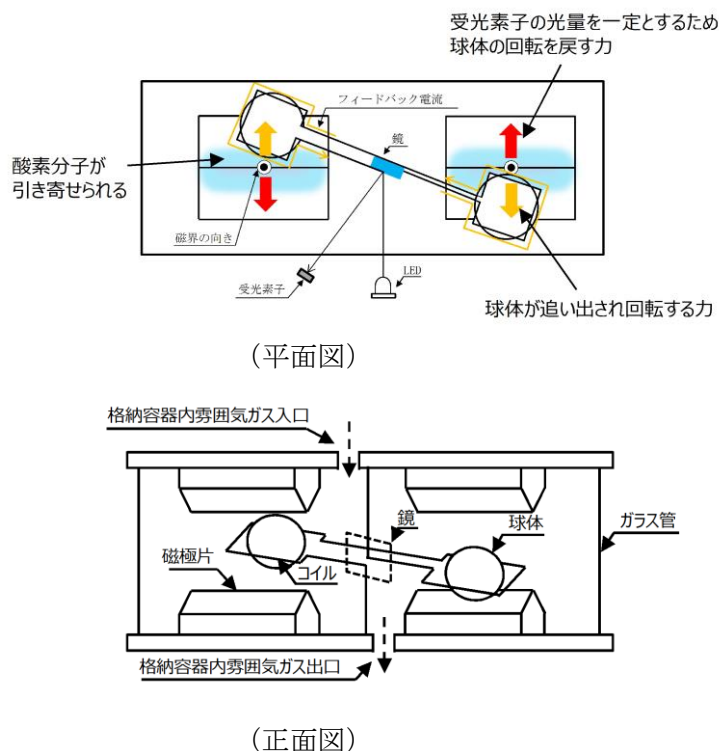


図 11 格納容器酸素濃度 (S A) の原理図

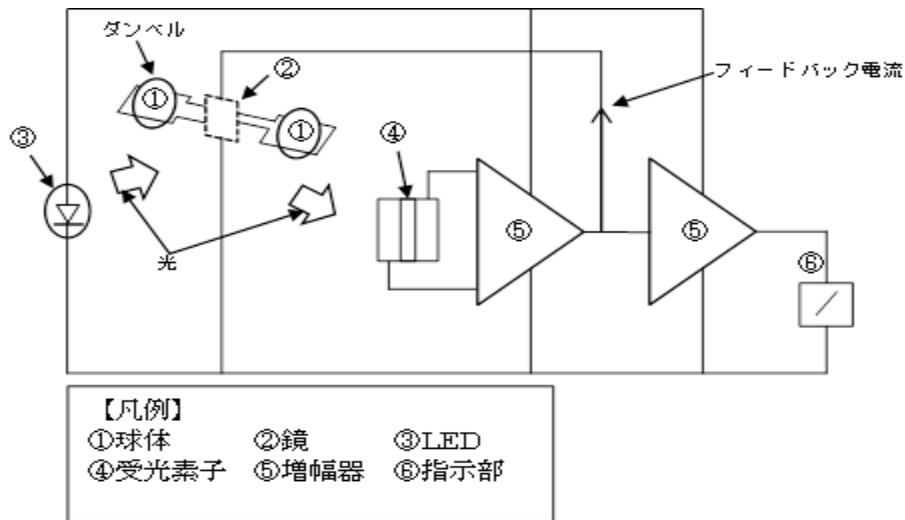


図 12 格納容器酸素濃度 (S A) の検出回路図

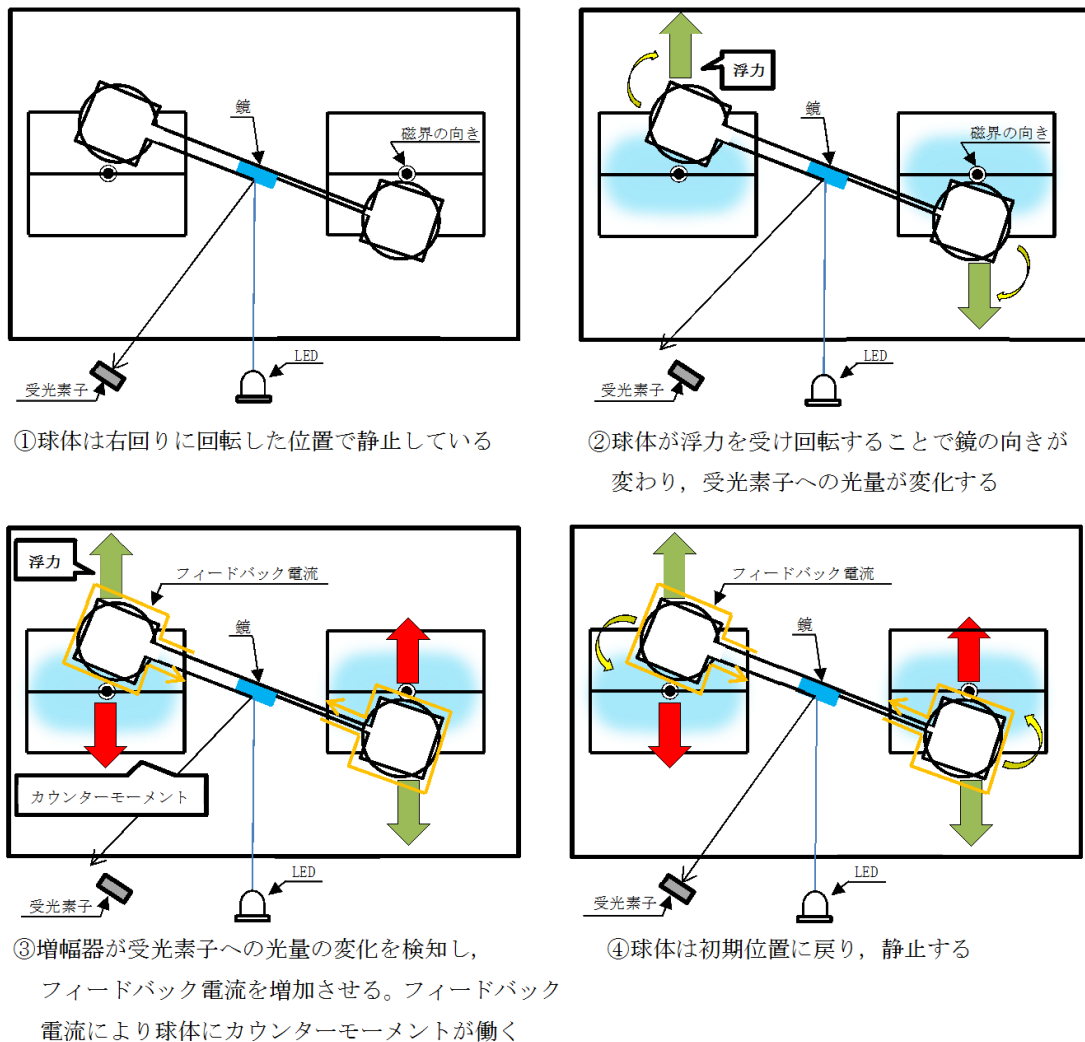


図 13 格納容器酸素濃度 (S A) の動作原理イメージ

(3) 設置場所

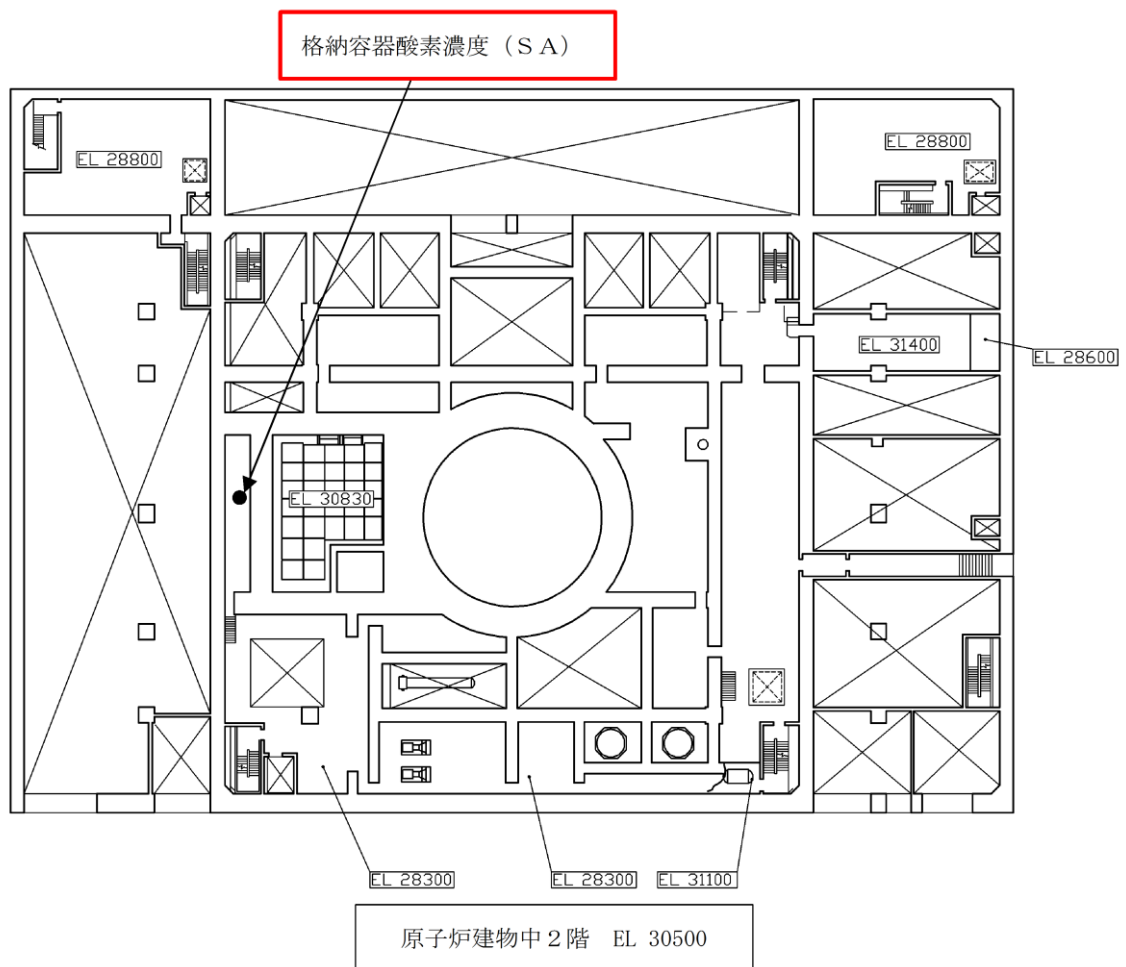
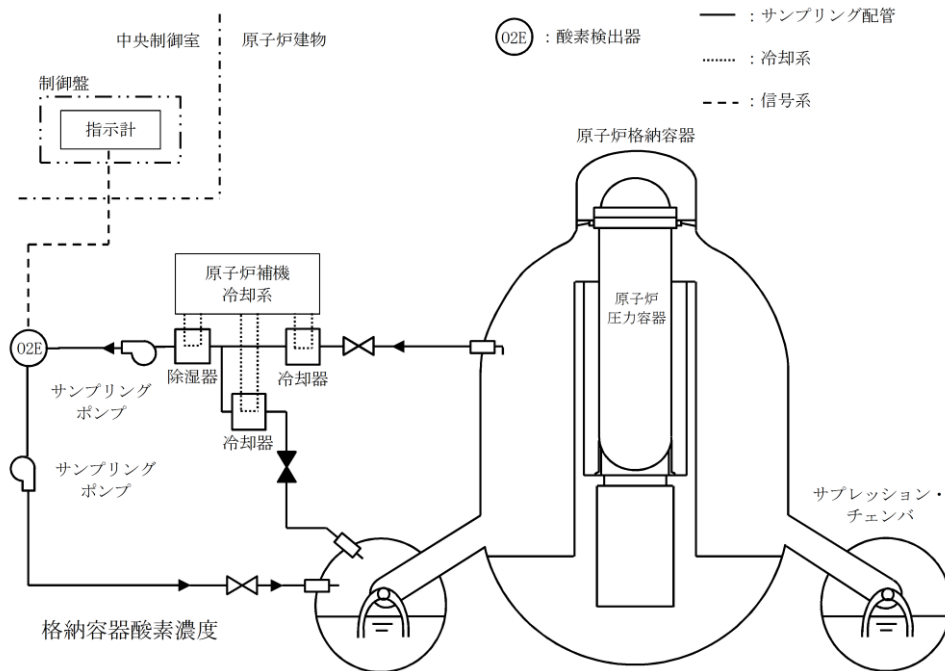


図 14 機器配置図 (原子炉建物中 2階)

4. 格納容器酸素濃度（B系）について

(1) システム構成

格納容器酸素濃度（B系）のシステム概要を図 15 に示す。格納容器酸素濃度（B系）は、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備の機能を有しており、格納容器酸素濃度（B系）の検出信号は、熱磁気風式酸素検出器からの電圧信号を、前置増幅器で増幅し、演算装置にて酸素濃度信号へ変換する処理を行った後、格納容器酸素濃度（B系）を中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。（図 16「格納容器酸素濃度（B系）の概略構成図」参照。）



※ 2 系列のうち B 系を示す。

図 15 格納容器酸素濃度（B系）システム概要

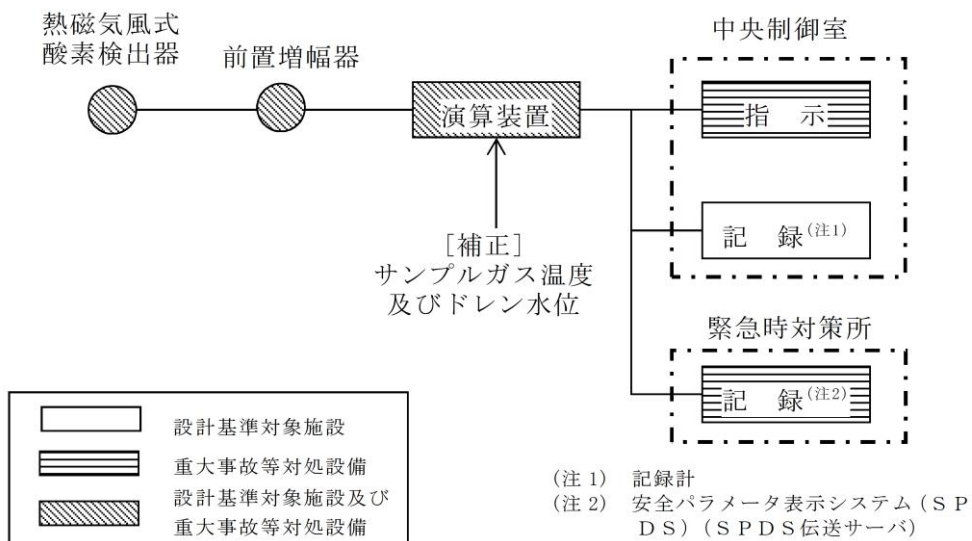


図 16 格納容器酸素濃度（B系）の概略構成図

(2) 測定原理

原子炉格納容器内の酸素濃度を測定するために用いる格納容器酸素濃度（B系）は、熱磁気風式のものを用いる。熱磁気風式の酸素検出器は、図 17 に示すとおり、サーミスタ温度素子（発風側素子、受風側素子）及び2つの固定抵抗でブリッジ回路が構成されており、検出素子及び補償素子は一定温度で保温されている。

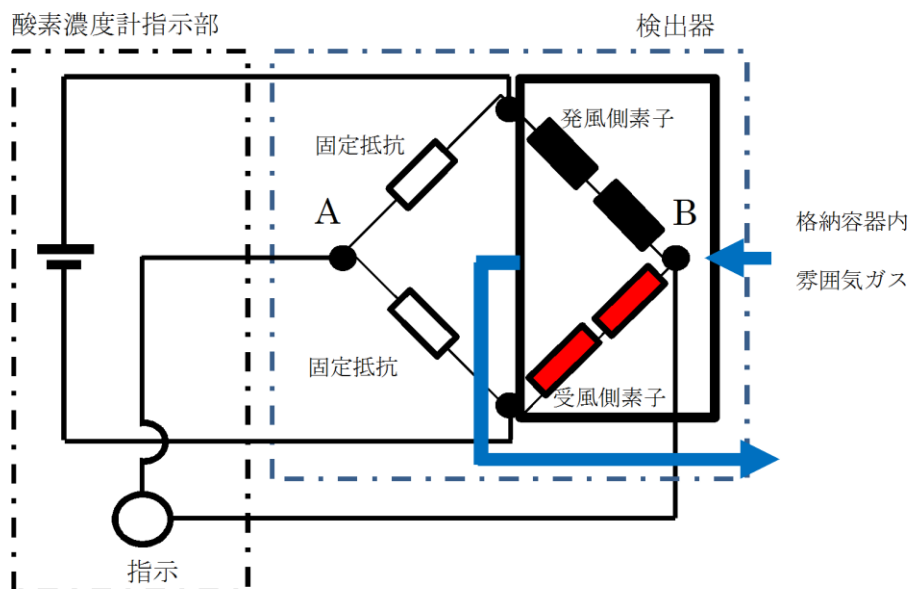
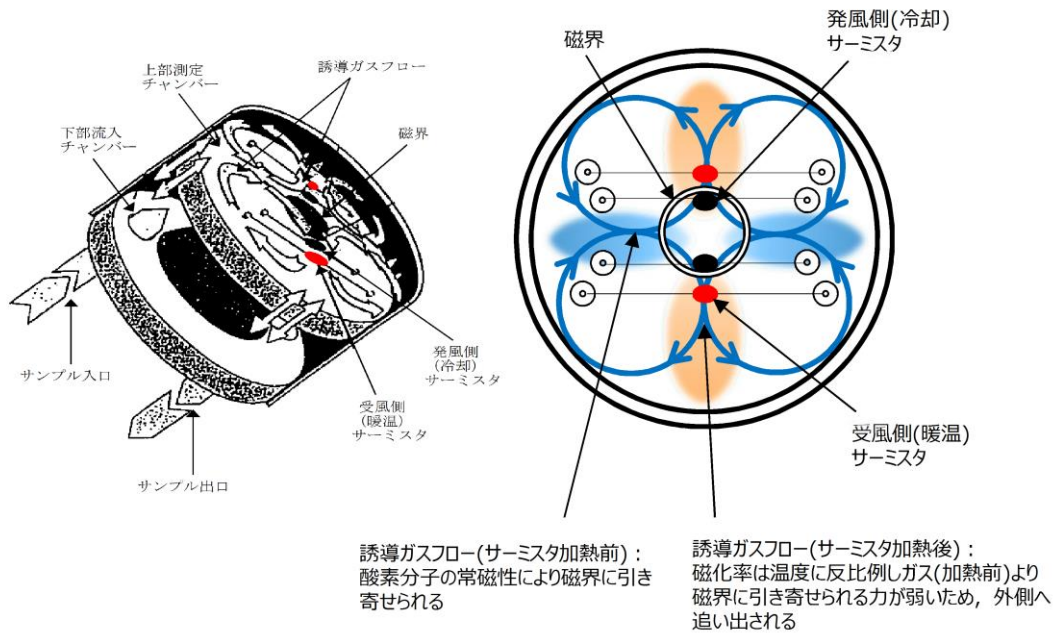


図 17 格納容器酸素濃度（B系）検出回路の概要図

格納容器酸素濃度（B系）の原理図を図 18 に示す。酸素濃度計は2層構造のチャンバーで構成されており、サンプル入口より下部流入チャンバー内にサンプルガスが流入する。サンプルガスの大部分は下部流入チャンバーを通過しサンプル出口へ流出するが、少量のサンプルガスは上部測定チャンバー内に流入する。酸素は極めて強い常磁性体であることから、上部測定チャンバーに流入したサンプルガスは磁界中心部に引き寄せられ、加熱された発風側素子により温度が上昇する。磁化率は温度に反比例することから、後から流入してくる低温のサンプルガスにより、高温となったサンプルガスは磁界中心部から追い出されることとなる。発風側素子は低温のサンプルガスに熱を奪われることで冷やされることとなり、磁界外の受風側素子は発風側素子が奪われた熱を受け取り、暖められることとなる。



(立体図)

(平面図)

図 18 格納容器酸素濃度 (B系) の原理図

チャンパー内に酸素を含む原子炉格納容器内雰囲気ガスを流すと、磁気風により発風側素子の温度が下がることで、発風側素子の抵抗は小さくなる。一方、受風側素子の温度が上がることで、受風側素子の抵抗は大きくなる。発風側素子と受風側素子の抵抗値が変化することで、ブリッジ回路の平衡が変化し、図 17 の AB 間に電位差 (電流) が生じる。この電位差が酸素濃度に比例する原理を用いて、酸素濃度を測定する。

(3) 設置場所

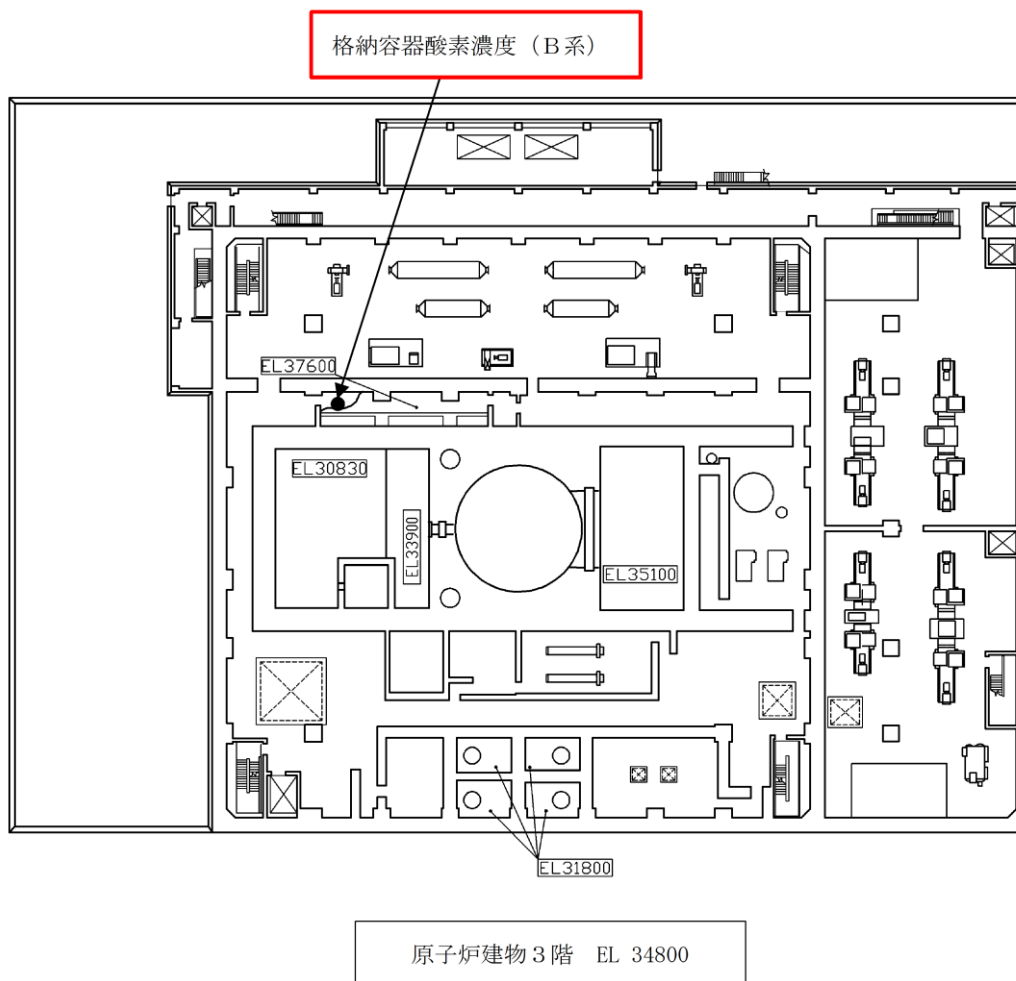


図 19 機器配置図 (原子炉建物 3階)

循環流量の確保について

残留熱代替除去系の必要容量は、「2.1 有効性評価シナリオの成立性」で有効性が確認できている循環流量 $150\text{m}^3/\text{h}$ （原子炉注水： $30\text{m}^3/\text{h}$ 及び格納容器スプレイ： $120\text{m}^3/\text{h}$ ）以上とする。よって、残留熱代替除去系は循環流量 $150\text{m}^3/\text{h}$ 以上を確保する。残留熱代替除去ポンプは、補足説明資料 50-7 に示すとおり、循環流量 $150\text{m}^3/\text{h}$ 以上を確保できるものを設置する。評価にあたっては「(1) ポンプの NPSH (Net Positive Suction Head) 評価」で系統圧力損失を考慮した有効 NPSH が残留熱代替除去ポンプの必要 NPSH を満足することを確認する。また、残留熱代替除去系運転時の系統閉塞による性能低下を防止するために「(2) 系統の閉塞防止対策」で閉塞防止対策を示す。

(1) ポンプの NPSH 評価

ポンプがキャビテーションを起こさず正常に動作するためには、流体圧力や吸込配管圧力損失等により求められる「有効 NPSH」が、ポンプの「必要 NPSH」と同等かそれ以上であること（有効 NPSH \geq 必要 NPSH）を満足する必要がある、有効 NPSH と必要 NPSH を比較する NPSH 評価により確認を行う。

本評価では、図 1 の系統構成を想定し、格納容器内圧力、サブプレッション・プール水位と残留熱代替除去ポンプ軸レベル間の水頭差及び吸込配管圧力損失（残留熱除去系ストレナの圧力損失を含む）により求められる有効 NPSH と、残留熱代替除去ポンプの必要 NPSH を比較することで評価する。

残留熱代替除去系においては、格納容器内圧力が変動することが想定され、これに伴い有効 NPSH が変動することとなるため、ここでは、有効 NPSH を満足できる格納容器内圧力の下限を示す。評価条件を図 2、表 1 に示す。

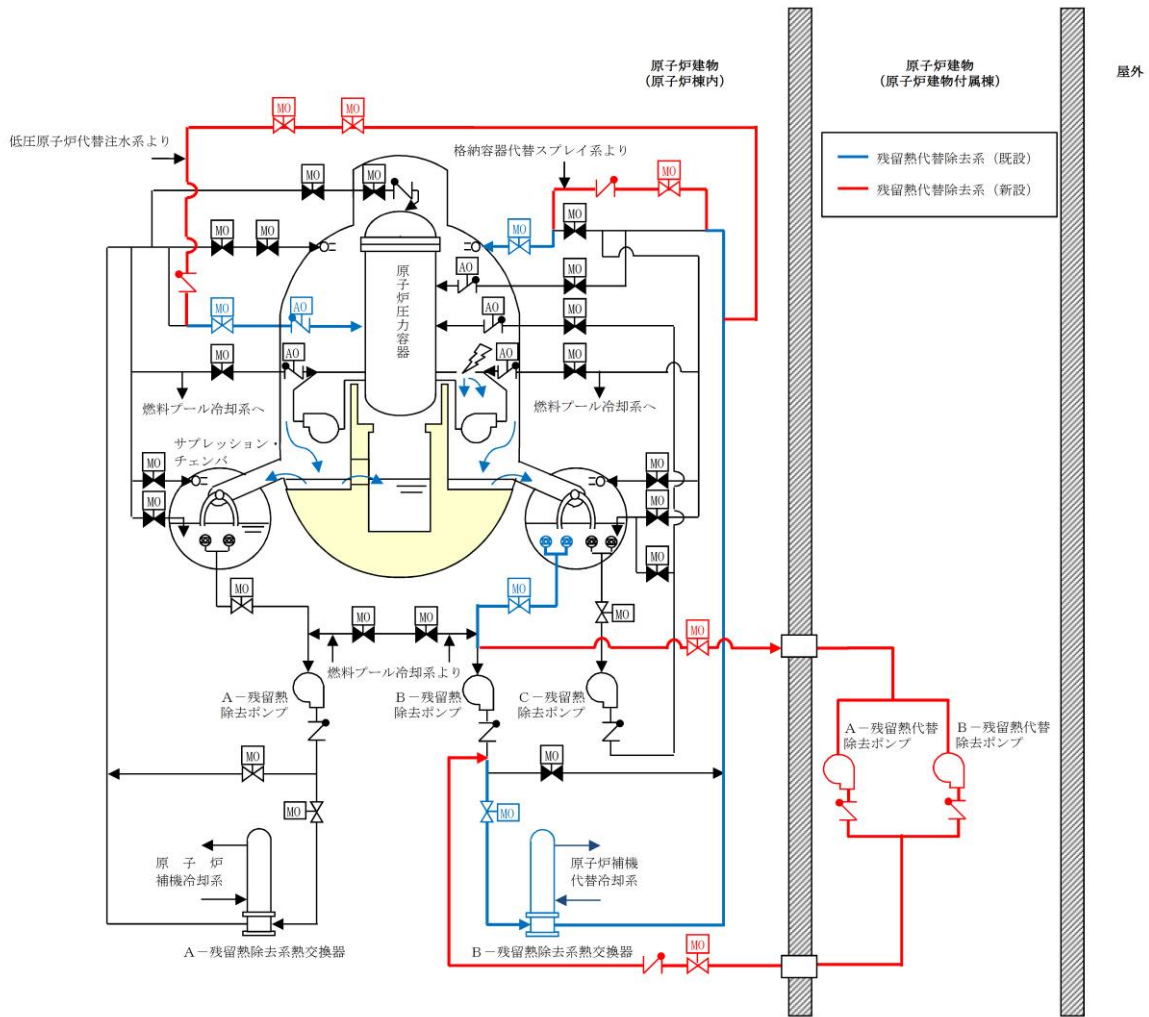


図1 残留熱代替除去系系統概要図

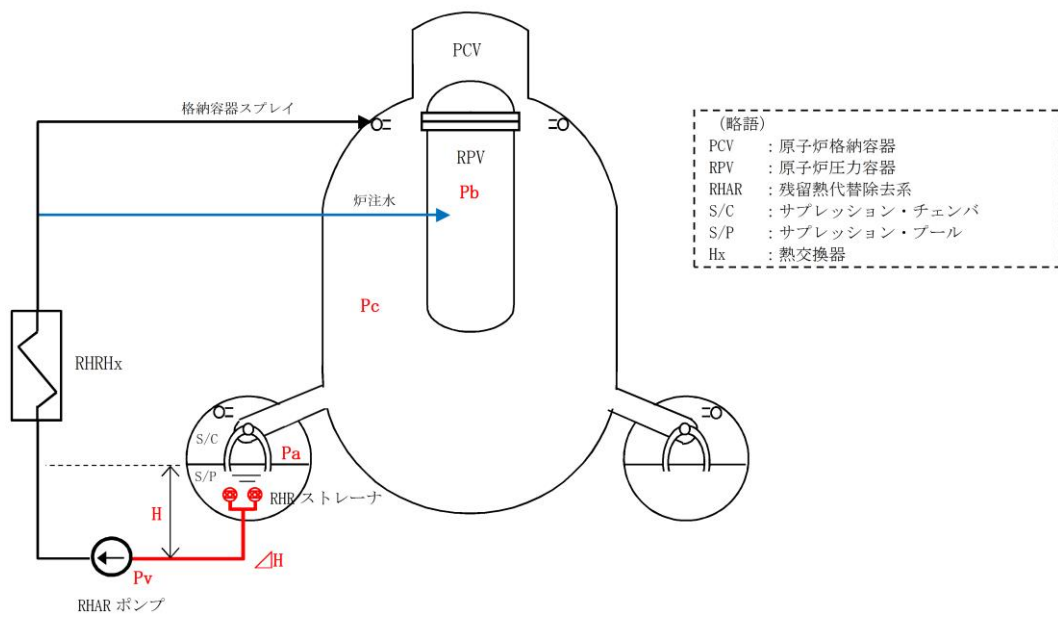


図2 NPSH 評価条件図

表1 NPSH 評価条件

項目		2号炉	設定根拠
Pa	S/C 圧力		(本評価では、NPSH 評価を成立させる S/C 圧力の下限を求めるものである)
Pv	残留熱代替除去ポンプ入口温度での飽和蒸気圧(水頭換算値)		有効性評価解析値であるピーク温度 132℃の飽和蒸気圧力
H	S/P 水位と残留熱代替除去ポンプ軸レベル間の水頭差		S/P 水位レベル(LWL): <input type="text"/> とポンプ軸レベル: <input type="text"/> の差
ΔH	吸込配管圧損 (ストレーナ込)		ポンプ流量 150m ³ /h における圧損値
	残留熱代替除去ポンプの必要 NPSH		ポンプ定格流量時の必要 NPSH

表1の条件を元に、(有効 NPSH) ≥ (必要 NPSH) の式より、有効 NPSH が必要 NPSH を満足できるか確認する。

$$(有効 NPSH) = Pa - Pv + H - \Delta H \geq (必要 NPSH)$$

$$Pa \geq \text{ MPa [gage]}$$

上記の結果を踏まえ、格納容器内圧力が MPa [gage] 以上の状態であれば残留熱代替除去ポンプの必要 NPSH を満足する。重大事故等時においては、格納容器内圧力が MPa [gage] 以上であることから、残留熱代替除去系は成立する。

また、残留熱代替除去系の運転が長期的に継続可能なことの例として、「残留熱代替除去系運転を 30 日間継続した場合の評価結果例」を示す。

〈残留熱代替除去系運転を 30 日間継続した場合の評価結果例〉

「2.1 有効性評価シナリオの成立性」の格納容器過圧・過温破損(残留熱代替除去系を使用する場合)において、循環流量 150m³/h にて残留熱代替除去系を 30 日間運転継続した場合の格納容器圧力の推移の評価結果例を図3に示す。

図3より、事故30日後の格納容器圧力は約0.4MPa [gage]であるため、上記NPSH 評価結果の MPa [gage] 以上であり、残留熱代替除去系の運転は継続可能である。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

なお、長期的に安定状態を維持するにあたり、原子炉格納容器が隔離されている又は隔離した場合、水-放射線分解により発生する可燃性ガスの濃度制御が必要となる。この濃度制御は、事故後 12 時間後において、可搬式窒素供給装置により、格納容器内に窒素ガスを注入し酸素濃度を抑制することにより、水素が可燃限界濃度に到達することなく長期安定停止状態を維持することが可能となる。

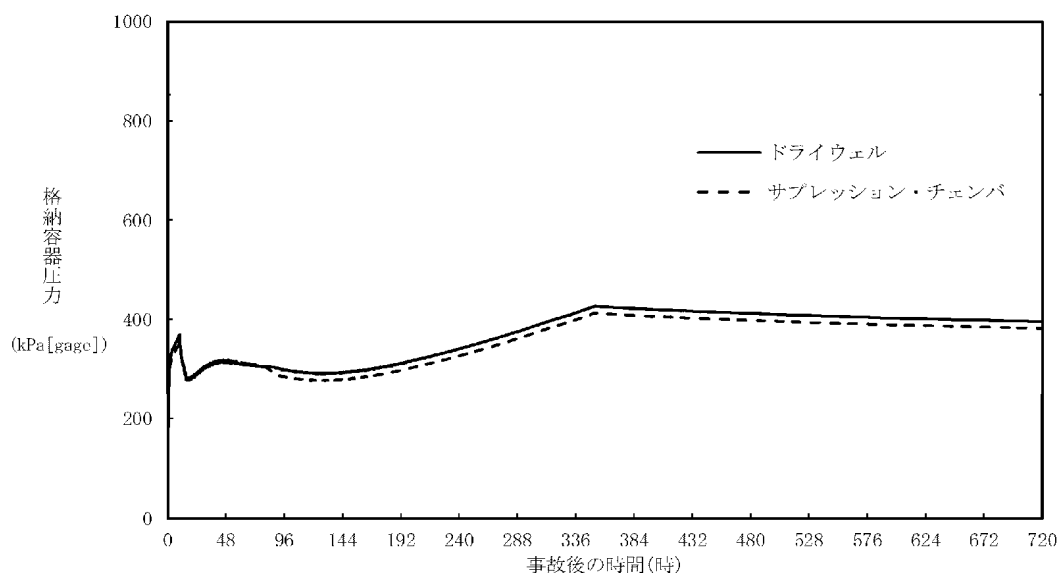


図3 格納容器圧力の推移(循環流量 150m³/h にて残留熱代替除去系を30日間運転継続した場合)

(2) 系統の閉塞防止対策

a. 系統の閉塞評価について

残留熱代替除去系において系統機能喪失に繋がる閉塞事象が懸念される箇所は、流路面積が小さくなる残留熱除去系ストレーナ、格納容器スプレイノズル部が考えられる。

格納容器スプレイノズル部については、最小流路面積部に異物が詰まることを防止するために、残留熱除去系ストレーナ孔径が最小流路面積以下になるように設計している(表2参照)。

表2 残留熱除去系ストレーナについて

残留熱除去系ストレーナ孔径	
格納容器スプレイノズル最小流路サイズ	

よって、残留熱代替除去系の閉塞防止に関する説明は、「b. 残留熱除去系ストレーナの閉塞防止対策について」に記載する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b. 残留熱除去系ストレーナの閉塞防止対策について

残留熱除去系ストレーナの閉塞防止対策として、多孔プレートを組み合わせた大型ストレーナを採用するとともに、原子炉格納容器内の保温材のうち事故時に破損が想定される繊維質保温材は撤去することとしているため、繊維質保温材の薄膜効果^{※1}による異物の捕捉が生じることはない。

また、重大事故等時に原子炉格納容器内において発生する可能性のある異物としては保温材(パーライト等)、塗装片、スラッジが想定されるが、LOCA時のブローダウン過程等のサブプレッション・プール水の流動により粉碎され粉々になった状態でストレーナに流れ着いたとしても、繊維質保温材がなく、薄膜効果による異物の捕捉が生じる可能性がないことから、これら粉状の異物がそれ自体によってストレーナを閉塞させることはない。

なお、本システムの成立性評価として「(1) ポンプのNPSH評価」でNPSH評価を実施しているが、この評価はストレーナを設置した際の工事計画書において評価した手法と同様の手法を用いて評価したものである。評価においては、繊維質の付着を考慮したストレーナの圧損評価を実施しており、残留熱代替除去ポンプ定格流量時の必要NPSHを満足していることから、本システムの成立性に問題がないことを確認している(表1参照)。

また、残留熱代替除去系を使用開始する時点ではサブプレッション・チェンバ内の流況は十分に静定している状態であり、ストレーナメッシュの通過を阻害する程度の粒径を有する異物はサブプレッション・チェンバ底部に沈着している状態であると考えられる^{※2}。

重大事故等時には、損傷炉心を含むデブリが生じるが、仮に原子炉圧力容器外に落下した場合でも、原子炉圧力容器下部の圧力容器ペDESTAL内に蓄積することからサブプレッション・チェンバへの流入の可能性は低い。万が一、圧力容器ペDESTAL内からオーバフローし、ベント管を通じてサブプレッション・チェンバに流入する場合であっても、金属を含むデブリが流動により巻き上がることは考えにくく^{※3}、ストレーナを閉塞させる要因になることはないと考えられる。

このため、苛酷事故環境下においても残留熱除去系ストレーナが閉塞する可能性を考慮する必要はないと考えている。

さらに、仮にストレーナ表面にデブリが付着した場合においても、ポンプの起動・停止を実施することによりデブリは落下するものと考えられ^{※4}、加えて、長期冷却に対する更なる信頼性の確保を目的に、次項にて示すストレーナの逆洗操作が可能な設計としている。

※1：薄膜形成による粒子状デブリの捕捉効果について

「薄膜形成による粒子状デブリの捕捉効果」とは、ストレーナの表面のメッシュ(約1～2mm)を通過するような細かな粒子状のデブリ(スラッジ等)が、繊維質デブリにより形成した膜により捕捉され圧損を上昇させ

るという効果をいう。(図4参照)

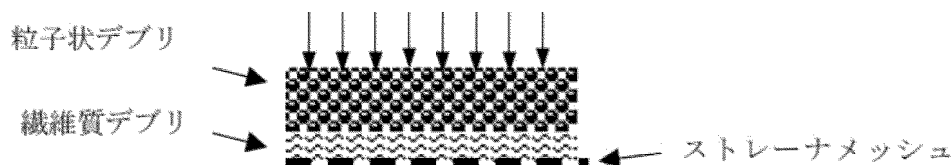


図4 薄膜形成による粒子状デブリの補足効果のイメージ

繊維質保温材の薄膜形成については、NEDO-32686 に対する NRC の安全評価レポートの Appendix E で実験データに基づく考察として、「1/8 inch 以下のファイバ層であれば、ファイバ層そのものが不均一であり、圧力損失は小さいと考えられる」と記載されている。また、R.G. 1.82 においても「1/8 inch. (約 3.1 mm) を十分下回るファイバ層厚さであれば、安定かつ均一なファイバ層ではないと判断される」との記載がされており、薄膜を考慮した圧力損失評価は必要ないと考えられる。LA-UR-04-1227 においても、この効果の裏付けとなる知見が得られており、理論厚さ 0.11inch (2.79mm) において、均一なベッドは形成されなかったという見解が示されている。故に、繊維質保温材の堆積厚さを評価し十分薄ければ、粒径が極めて微細な塗装片等のデブリは全てストレーナを通過することとなり、繊維質保温材と粒子状デブリの混合状態を仮定した圧損評価は不要であると考えられる。

また、GSI-191 において議論されているサンプスクリーン表面における化学的相互作用による圧損上昇の知見に関して、上述のとおり繊維質保温材は使用されておらず、ストレーナ表面におけるデブリベット形成の可能性がないことから、化学的相互作用による圧損上昇の影響はないと考えられ、残留熱代替除去系による長期的な冷却の信頼性に対して影響を与えることはないと考えられる。

表3 NUREG/CR-6224 において参照されるスラッジ粒径の例

Table B-4 BWROG-Provided Size Distribution of the Suppression Pool Sludge		
Size Range μm	Average Size μm	% by weight
0-5	2.5	81%
5-10	7.5	14%
10-75	42.5	5%

※2：残留熱代替除去系の使用開始は事故後約 10 時間後であり、LOCA 後のブローダウン等の事故発生直後のサブプレッション・チェンバ内の攪拌は十分に静定しており、大部分の粒子状異物は底部に沈着している状態であると考えられる。また、粒子径が 100 μm 程度である場合に浮遊す

るために必要な流体速度は, 理想的な球形状において 0.1m/s 程度必要であり(原子力安全基盤機構(H21. 3), PWRプラントのLOCA時長期炉心冷却性に係る検討), 仮にストレーナメッシュを閉塞させる程度の粒子径を有する異物がプール内に存在していた場合においても, ストレーナ表面流速は約 0.008m/s ($150\text{m}^3/\text{h}$ の時)程度であり, 底部に沈降したデブリがストレーナの吸い込みによって生じる流況によって再浮遊するとは考えられない。

- ※3 : RPV 破損後の溶融炉心の落下先は圧力容器ペDESTAL内であり, 残留熱代替除去系の水源となるサプレッション・チェンバへ直接落下することはない。RPV へ注水された冷却水は圧力容器ペDESTAL内へ落下し, ベント管を通じてサプレッション・チェンバへ流入することとなる(図5参照)。粒子化した溶融炉心等が圧力容器ペDESTAL内に存在している場合にストレーナメッシュを閉塞させる程度の粒子径を有する異物が流動によって圧力容器ペDESTAL内から巻き上げられ, 更にベント管からストレーナまで到達するとは考えにくく, 溶融した炉心等によるストレーナ閉塞の可能性は極めて小さいと考えられる。

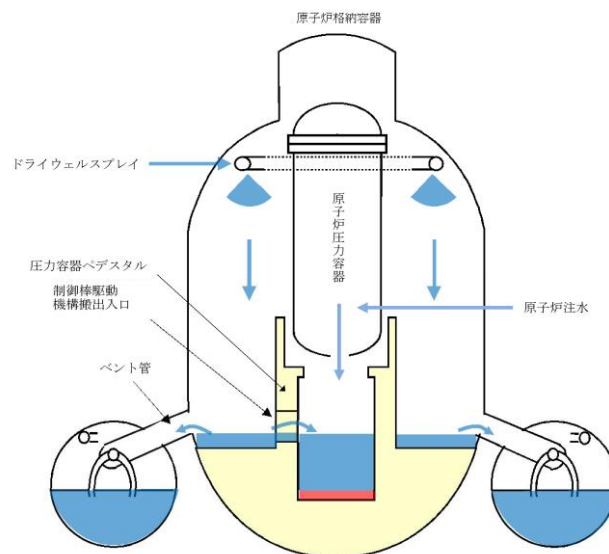


図5 原子炉圧力容器破損後の残留熱代替除去系による冷却水の流れ

- ※4 : GSI-191における検討において, サンプスクリーンを想定した試験においてポンプを停止させた際に付着したデブリは剥がれ落ちるとの結果が示されている(図6参照)。

当該試験は PWR サンプスクリーン形状を想定しているものであるが, BWR のストレーナ形状は円筒形であり(図7参照), ポンプの起動・停止によるデブリ落下の効果は更に大きくなるものと考えられ, 注水流量の低下を検知した後, ポンプの起動・停止を実施することでデブリが落下し, 速やかに冷却を再開することが可能である。

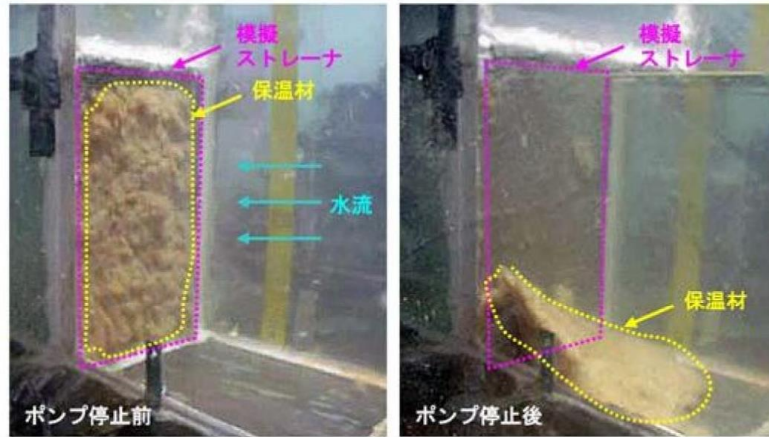


図6 ポンプ停止により模擬ストレナから試験体が剥がれ落ちた試験
 (April 2004, LANL, GSI-191: Experimental Studies of Loss-of-Coolant-Accident-Generated Debris Accumulation and Head Loss with Emphasis on the Effects of Calcium Silicate Insulation)

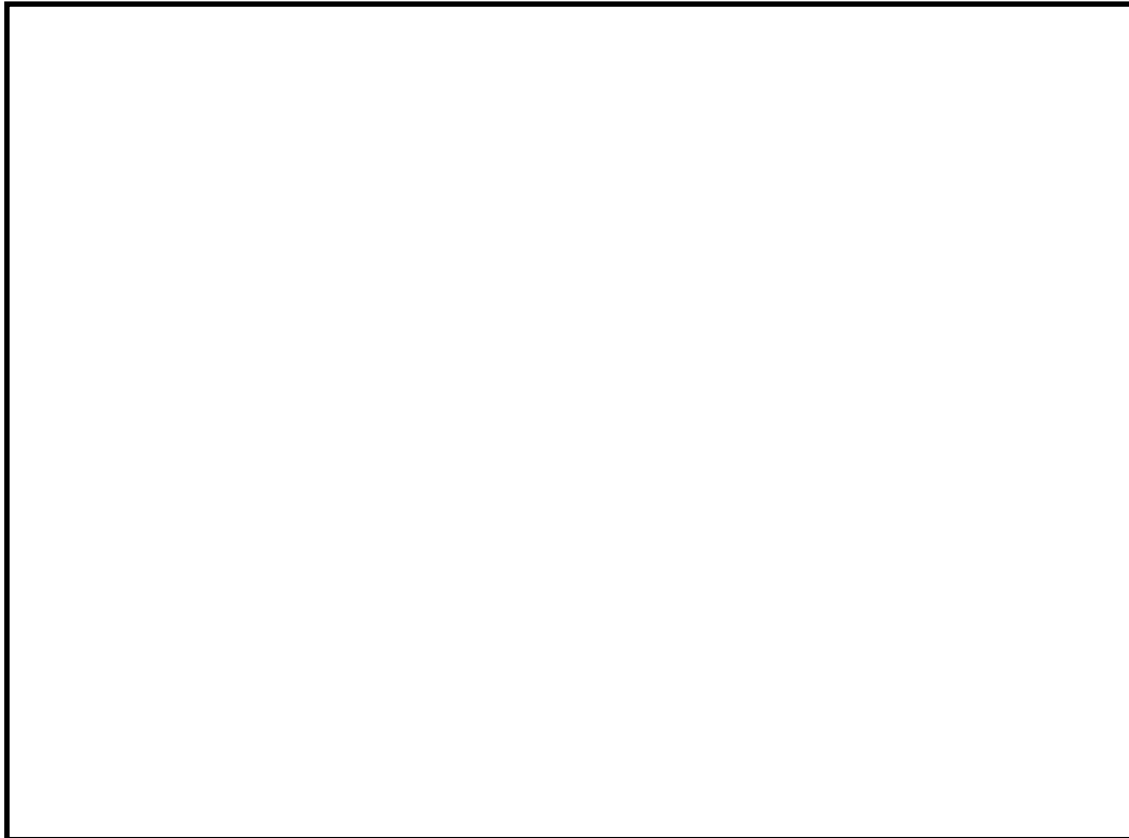


図7 島根2号炉残留熱除去系ストレナ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

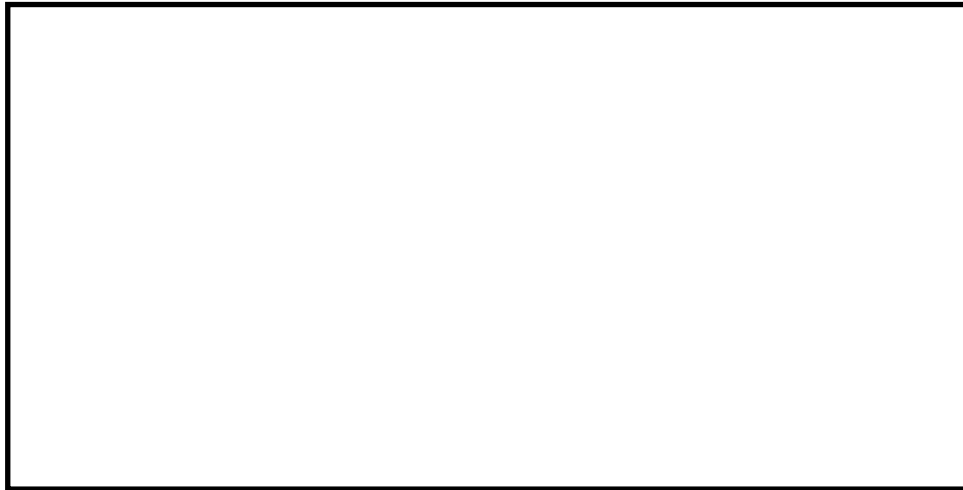


図8 島根2号炉残留熱除去系ストレーナ(据付状態)

c. 閉塞時の逆洗操作について

前述b. の閉塞防止対策に加えて、残留熱代替除去系運転中に、仮に何らかの異物により残留熱除去系ストレーナが閉塞したことを想定し、残留熱除去系ストレーナを逆洗操作できる系統構成にしている。系統構成の例を図9に示しているが、外部接続口から構成される逆洗ラインの系統構成操作を行い、大量送水車を起動することで逆洗操作が可能な設計にしている。

したがって、残留熱代替除去系運転継続中に流量監視し、流量傾向が異常に低下した場合は残留熱代替除去ポンプを停止し、逆洗操作を実施する。

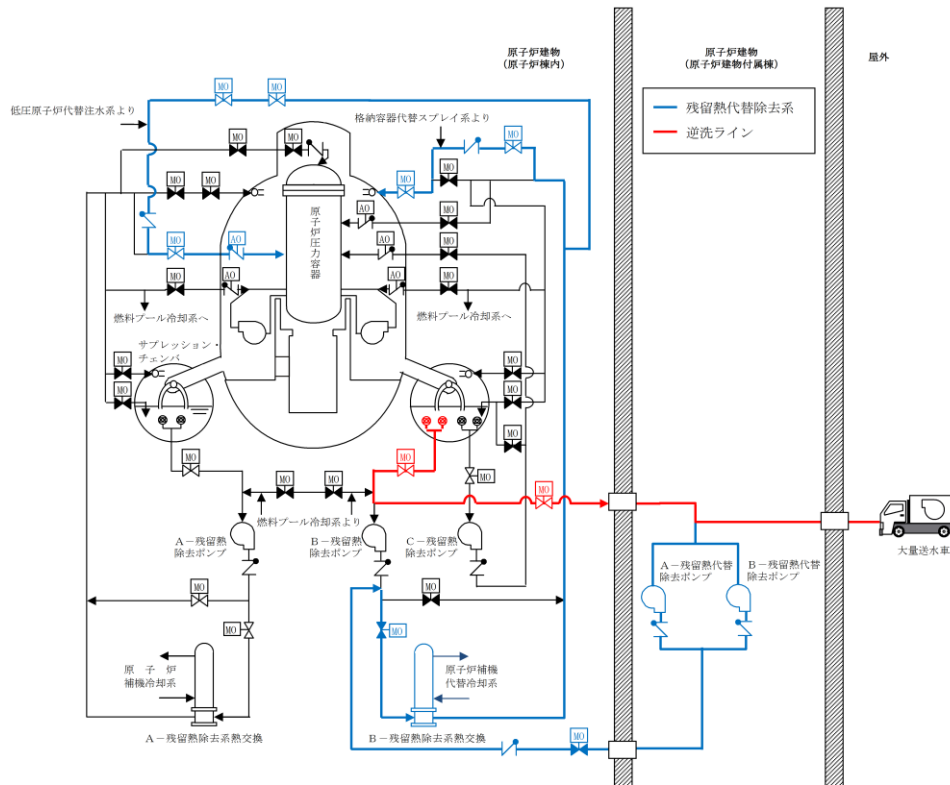


図9 残留熱除去系ストレーナ逆洗操作の系統構成について

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

長期的に維持される格納容器の状態(温度・圧力)での適切な地震力に対する格納容器の頑健性の確保の考え方について

重大事故等時における格納容器の耐震評価にあたって、対象となる事故シーケンスは、格納容器温度・圧力条件が厳しい格納容器破損防止の事故シーケンスである、「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)残留熱代替除去系を使用する場合」及び「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)残留熱代替除去系を使用しない場合」が対象となる。

「別紙－ 2 循環流量の確保」で示したとおり、残留熱代替除去系の運転は長期的に継続可能と考えられるが、この場合、格納容器の温度・圧力が比較的高い状態で長期的に維持されることから、適切な地震力に対する格納容器の頑健性の確保が必要である。

よって、格納容器の耐震評価に際しては、

①事故後の運転状態 V(L)^{*1}(10^{-2} ～ 2×10^{-1} 年)における適切な地震力との組合せ評価

②事故後の運転状態 V(LL)^{*2}(2×10^{-1} 年以降)における適切な地震力との組合せ評価

を行うこととなる。

※ 1 : 運転状態 V(L) : 重大事故等の状態のうち長期的(過渡状態を除く一連の期間)に荷重が作用している状態

※ 2 : 運転状態 V(LL) : 重大事故等の状態のうち V(L) よりさらに長期的に荷重が作用している状態

系統のバウンダリに対する影響評価について

1. はじめに

残留熱代替除去系を使用する場合に、系統内の弁、配管及びポンプのバウンダリに使用されているシール材について、放射線影響や化学影響によって材料が劣化し、漏えいが生じる可能性がある。これらの影響について、下記のとおり評価を行った。

2. シール材の影響評価

(1) 評価対象

残留熱代替除去系を使用する場合に、サブプレッション・チェンバからの流体が流れる経路として、配管、弁及びポンプがあるため、これらの機器においてバウンダリを構成する部材である「配管フランジガスケット」、「弁グランドシール」「ポンプメカニカルシール」「ポンプケーシングシール」を対象に評価を行った。

(2) 放射線による影響

残留熱代替除去系は、重大事故時に炉心損傷した状況で系統を使用することとなる。このため、系統内を高放射能の流体が流れることとなり、放射線による劣化が懸念される。

上記(1)に示す部材のうち、配管フランジガスケット及び弁グランドシールには、膨張黒鉛又はステンレス等の金属材料が用いられている。これらは無機材料であり、高放射線下においても劣化の影響はないか、又は極めて小さい。このため、これらについては放射線による影響はないか、又は耐放射線性能が確認されたシール材を用いることにより、シール性能が維持されるものとする。

また、残留熱代替除去ポンプのバウンダリを構成する部材（メカニカルシール、ケーシングシール等）のシール材についても同様に、耐放射線性に優れた材料を選定する。

(3) 化学種による影響

炉心損傷時に発生する核分裂生成物の中で化学的な影響を及ぼす可能性がある物質として、アルカリ金属であるセシウム及びハロゲン元素であるよう素が存在する。このうち、アルカリ金属のセシウムについては、水中でセシウムイオンとして存在しアルカリ環境の形成に寄与するが、膨張黒鉛ガスケット及び金属ガスケットはアルカリ環境において劣化の影響はない。このため、セシウムによる化学影響はないものとする。

一方、ハロゲン元素のよう素については、無機材料である膨張黒鉛ガスケットや金属ガスケットには影響がないため、漏えい等が生じることはないものとする。

のと考える。

また、残留熱代替除去ポンプのバウンダリを構成する部材（メカニカルシール、ケーシングシール等）のシール材についても同様に、化学種に対する耐性に優れた材料を選定する。

3. まとめ

以上より、残留熱代替除去系の流路においてバウンダリを構成する部材である「配管フランジガスケット」「弁グランドシール」を対象に評価を行った結果、無機材料である膨張黒鉛及び金属ガスケットには影響がないと評価できる。

また、残留熱代替除去系に使用する「ポンプメカニカルシール」「ポンプケーシングシール」についても耐性に優れた材料を選定する。

これにより、流路からの漏えいの発生を防止する。

以上

系統が高線量となった場合の影響について

残留熱代替除去系の運転に伴い、系統が高線量となることが想定されるが、高線量となった場合には、放射線による「操作性・アクセス性」の影響、及び「機器」に対する放射線劣化影響が考えられる。

「操作性・アクセス性」に関する影響としては以下の影響が考えられる。

- ・残留熱代替除去系の系統構成，起動操作，運転継続に必要な操作・監視への影響
- ・残留熱代替除去系が機能喪失した場合に必要な操作への影響
- ・残留熱代替除去系運転時に必要な復旧作業（残留熱除去系の復旧作業）への影響

「機器」に対する放射線劣化影響としては以下の影響が考えられる。

- ・残留熱代替除去系において使用する機器のうち，放射線劣化影響が懸念される機器（シール材，電動機，計器，ケーブル）への影響

上記の影響について，確認結果を表1に示す。

表1 高線量となった場合の操作性・アクセス性，機器への影響

確認項目		放射線影響	
操作性・アクセス性	残留熱代替除去系の系統構成，起動操作，運転継続に必要な操作・監視	系統構成	運転開始前の系統構成は，中央制御室からの電動駆動弁の遠隔操作の他，原子炉補機代替冷却系の操作が必要であるが，弁操作は運転開始前の実施であり，原子炉補機代替冷却系操作は屋外作業であり，格納容器ベント操作前であるため，アクセス及び操作への放射線による影響はない。(29, 30 頁参照)
		残留熱代替除去ポンプの起動	運転開始時の残留熱代替除去ポンプの起動は中央制御室から遠隔で操作が可能な設計としているため，操作への放射線による大きな影響はない。(29, 30 頁参照)
		パラメータ監視	運転を開始した後の運転パラメータの監視は，中央制御室及び緊急時対策所で監視が可能な設計としているため，放射線による大きな影響はない。(29, 30 頁参照)
		流量調整	残留熱代替除去系運転時の原子炉注水及び格納容器スプレイの流量を調整する場合は，流量調整弁の操作により行うが，中央制御室から遠隔で操作が可能な設計としているため，放射線による大きな影響はない。(29, 30 頁参照)
		その他操作	その他の作業として，原子炉補機代替冷却系の運転状態確認及び大型送水ポンプ車への給油作業があるが，これらは屋外作業であり格納容器ベント操作前であるため，放射線による大きな影響はない。(29, 30 頁参照)

確認項目		放射線影響
操作性・アクセス性	残留熱代替除去系が機能喪失した場合に必要な操作	格納容器 ベント
	残留熱代替除去系運転時に必要な復旧作業(残留熱除去系の復旧作業)	
機器	シール材(配管, 弁, ポンプ, 熱交換器)	放射線による劣化影響が懸念される左記の機器については, 運転環境下における当該部位の放射線量を考慮して残留熱代替除去系の系統機能確保可能な設計とする。(49 頁参照)
	電動機(弁, ポンプ)	
	ケーブル	
	計器	

〔参考 9〕 重大事故等時の長期安定冷却手段について

重大事故等時の原子炉格納容器除熱としては、原子炉格納容器を最高使用温度以下に除熱することを基本としている。炉心損傷に至る重大事故等時、残留熱代替除去系により格納容器内温度は緩やかに低下し約177時間後には、サプレッション・チェンバ水温度が最高使用温度の104℃を下回る（「重大事故等対策の有効性評価について「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」（別紙1）安定状態の維持について」参照）。

しかし、残留熱除去系熱交換器が使用できない場合は、残留熱代替除去系が使用できないため格納容器フィルタベント系により格納容器の除熱を行う。格納容器フィルタベント系による除熱では、格納容器圧力の低下は早いものの、格納容器温度の低下は残留熱代替除去系より遅く、サプレッション・チェンバ水温度が最高使用温度の104℃を下回るのは約587時間後となる（「重大事故等対策の有効性評価について「2.1 高圧・低圧注水機能喪失」（別紙1）安定状態の維持について」参照）。

そのため、格納容器内温度低減対策として残留熱除去系熱交換器が使用できない場合の除熱手段を検討した。検討にあたっては事故発生約30日後の崩壊熱が除熱可能であることを目標とした。重大事故等時において、格納容器フィルタベント系による格納容器除熱を実施している場合、残留熱除去系の補修による原子炉格納容器の除熱機能を復旧する。また、残留熱除去系の機能回復が長期間実施できない場合、可搬ポンプ及び可搬熱交換器を用いた除熱手段である「1. 可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱」を構築する。既設設備である残留熱除去系の使用を優先するが、復旧が困難な場合はこの可搬型格納容器除熱系による除熱を実施する。本書では、それらの実現可能性と実施した場合の効果について確認している。

なお、これらに加え原子炉格納容器を直接除熱することはできないが原子炉圧力容器を除熱することにより間接的に原子炉格納容器を除熱する「原子炉補機代替冷却系を用いた原子炉浄化系（以下、CUWという）による原子炉除熱」を構築する。CUW系による原子炉除熱については〔参考 9－補足 1〕に示す。

参考 1 表 重大事故等時における格納容器除熱

除熱手段	備考
残留熱代替除去系による除熱	
格納容器フィルタベント系による除熱	
残留熱除去系の補修による除熱復旧	
可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱	本資料 1. で成立性を示す
原子炉補機代替冷却系を用いた CUW による原子炉除熱	補足 1 で成立性を示す

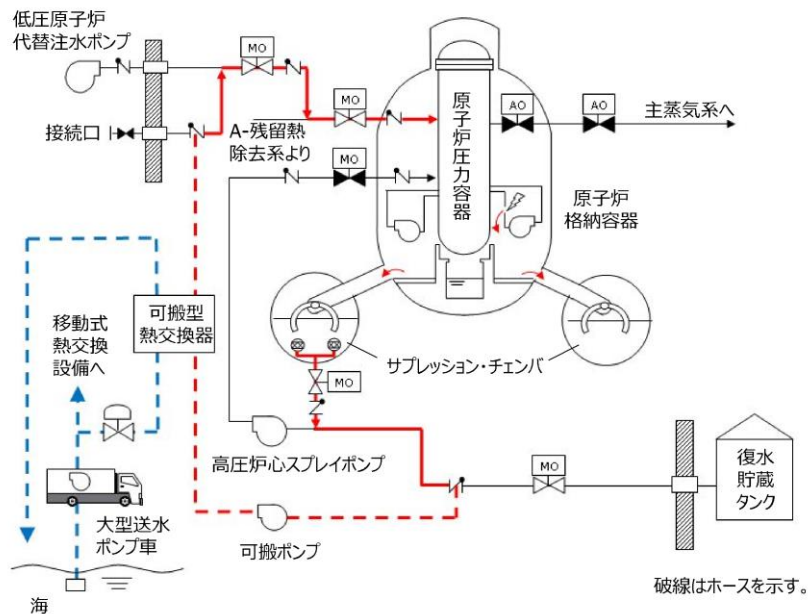
本表は事故時における除熱手段の配備状況を示すものであり、除熱手段の優先順位を示すものではない

1. 可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱

<実現可能性>

重大事故等時において、格納容器ベントによる格納容器除熱を実施している場合、残留熱除去系の補修によるサプレッション・プール水冷却モードの復旧を実施する。また、残留熱除去系の復旧が困難な場合に可搬設備等により構成される可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱を構築する。可搬型格納容器除熱系は、高圧炉心スプレイ系（以下、HPCSという）配管から耐熱ホース・可搬ポンプを用いて可搬熱交換器にサプレッション・チェンバのプール水を供給し、そこで除熱した水を低圧原子炉代替注水系の原子炉注水ラインで原子炉圧力容器に注水するライン構成であり、可搬設備を運搬・設置する等の作業があるが、長納期品については事前に準備しておくことにより、1ヵ月程度で系統を構築することが可能であると考えられる。

可搬型格納容器除熱系について、可搬ポンプの吸込み箇所は、HPCSポンプの吸込配管にある「HPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁」とし、耐熱ホースで接続する構成とする。可搬ポンプの吐出については、耐熱ホースを用いて原子炉建物大物搬入口に設置する可搬熱交換器と接続する構成とし、可搬熱交換器の出口側については低圧原子炉代替注水系の原子炉注水配管にある「FLSR可搬式設備A-注水ライン逆止弁」と耐熱ホースで連結する構成とする。これらの構成で、可搬ポンプによりサプレッション・チェンバのプール水を可搬熱交換器に送水し、そこで除熱した水を原子炉圧力容器に注水する系統を構築する。なお、可搬熱交換器の二次系については、大型送水ポンプ車により海水を通水できる構成とする。



参考1図 可搬型格納容器除熱系の系統概略図

参考 2 表 可搬型格納容器除熱系構築に必要な作業

作業	所用時間
HPCS ポンプ吸込みラインの逆止弁と低圧原子炉代替注水系注水ラインの逆止弁の上蓋取り外し，耐熱ホース取付	これらの作業は，1 ヶ月程度で準備可能と考えている。
可搬ポンプ準備	
可搬熱交換器準備	
通水試験等	

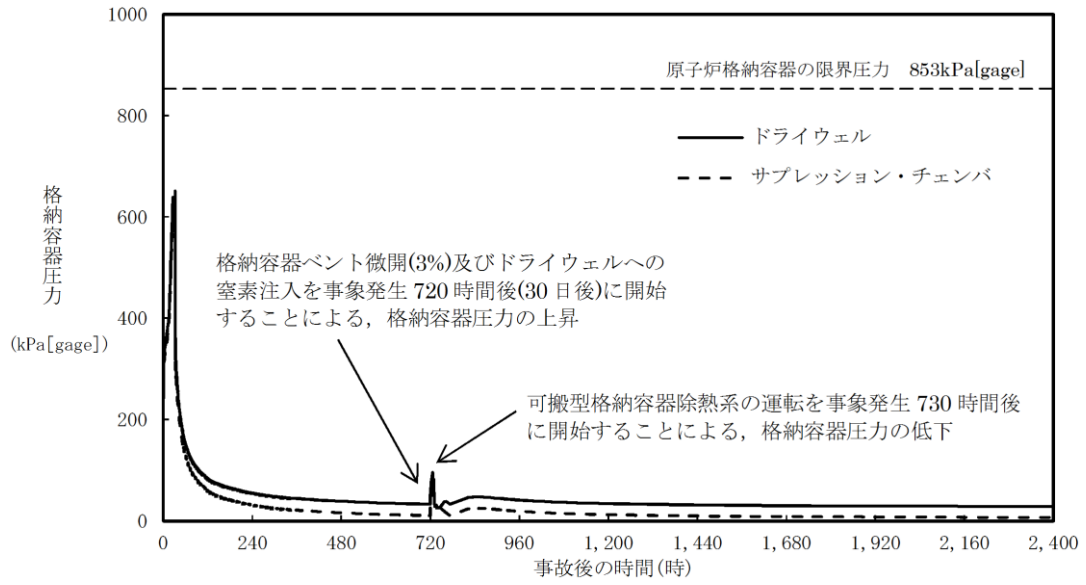
<効果>

「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）」において事象発生後約 1 ヶ月まで格納容器フィルタベント系による除熱を行った後，可搬型格納容器除熱系による除熱とした場合の格納容器パラメータ推移を評価した。ここで可搬型格納容器除熱系の流量は，事故発生30日後の崩壊熱を上回る $\square \text{ m}^3/\text{h}$ とし，格納容器フィルタベント系は微開（流路面積 3 %開）とするとともに可搬式窒素供給装置により窒素ガスを $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 注入する。

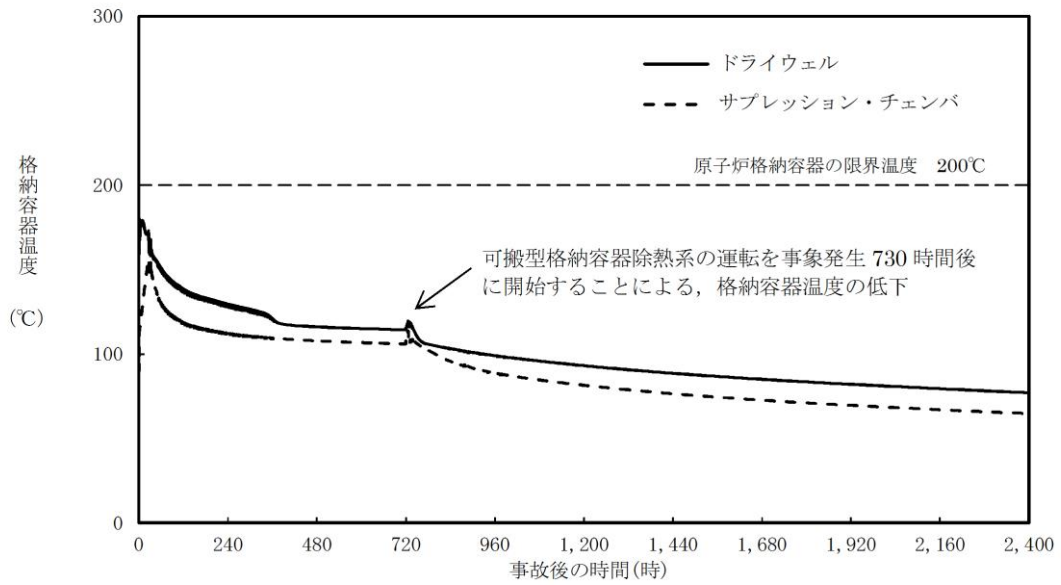
参考 2～4 図に格納容器圧力，格納容器気相部温度，サブプレッション・チェンバ水温の推移を示す。参考 3 図及び参考 4 図に示すとおり，格納容器気相部温度，サブプレッション・チェンバ水温を低減させることができる。

なお，本評価のように，格納容器フィルタベント系により格納容器圧力が低下している状態では，格納容器ベント実施時に原子炉格納容器内の非凝縮性ガスが排出され，原子炉格納容器内は崩壊熱により発生する蒸気で満たされる状態となる。こうした状況において除熱系（可搬型格納容器除熱系）の運転を開始する場合，サブプレッション・チェンバ水温が 100°C を下回ると，飽和蒸気圧に従い格納容器圧力は負圧となる可能性がある。よって，可搬型格納容器除熱系の運転を開始する際には，格納容器フィルタベント系は微開としたうえで，可搬式窒素供給装置より窒素ガスを注入し，格納容器圧力が負圧とならないよう制御する運用とする。

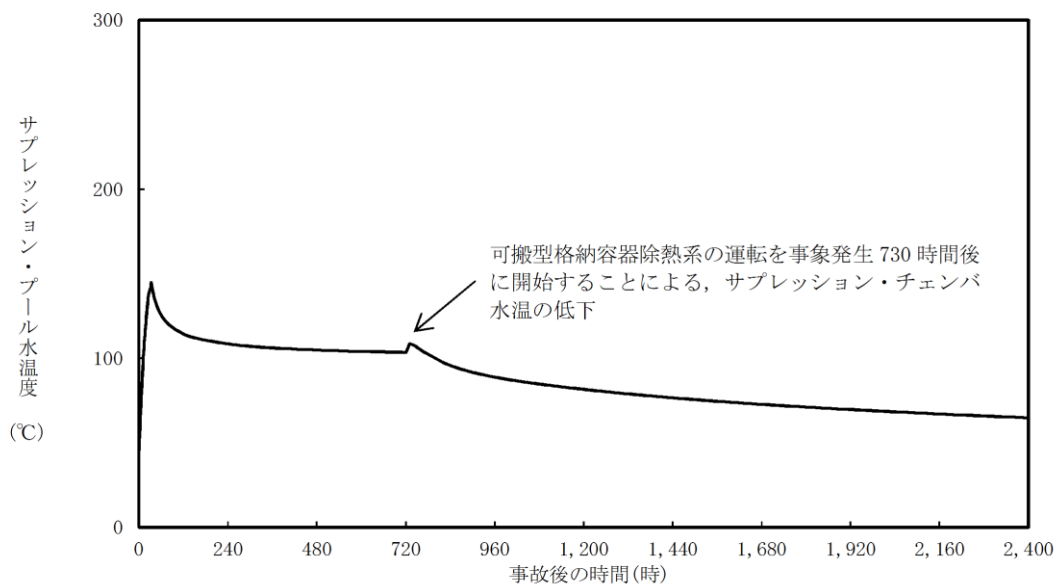
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



参考 2 図 格納容器圧力の推移



参考 3 図 格納容器気相部温度の推移



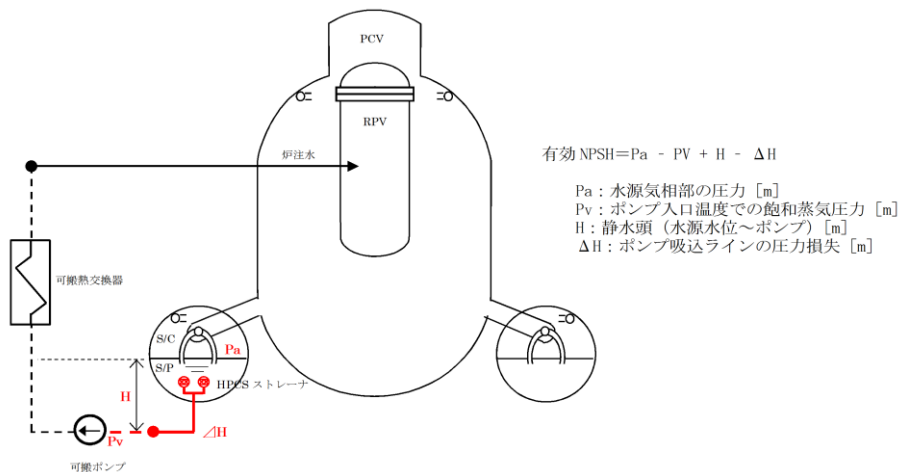
参考4図 サプレッション・チェンバ水温の推移

<系統成立性評価>

可搬型格納容器除熱系は、事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できる設計とし、本章ではその系統成立性評価を示す。評価にあたっては「①可搬ポンプのNP SH (Net Positive Suction Head) 評価」で原子炉建物地下2階に設置する可搬ポンプの必要NP SHが系統圧力損失を考慮して有効NP SHを満足することを確認する。次に「②流量評価」で系統圧力損失を考慮して、本系統で確保可能な系統流量を評価し、その流量で可搬熱交換器による除熱可能な除熱量を「③除熱量評価」で示し、本系統が事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できることを確認し、系統成立性を示す。

① ポンプのNP SH評価

ポンプがキャビテーションを起こさず正常に動作するためには、流体圧力や吸込配管圧力損失等により求められる「有効NP SH」が、ポンプの「必要NP SH」と同等かそれ以上であること（有効NP SH \geq 必要NP SH）を満足する必要がある。有効NP SHと必要NP SHを比較するNP SH評価によりポンプの成立性を確認する。本評価では参考5図の系統構成を想定し、格納容器内圧力（S/C）、サプレッション・チェンバのプール水位と可搬ポンプ吸込口レベル間の水頭差、吸込配管（HPCS常設配管及び耐熱ホース）圧力損失により求められる有効NP SHと、可搬ポンプの必要NP SHを比較することで評価する。有効NP SHの評価式は以下のとおりであり、評価結果は参考3表に示すとおり、ポンプのNP SH評価は成立する。



参考5図 可搬型格納容器除熱系のNPSH評価

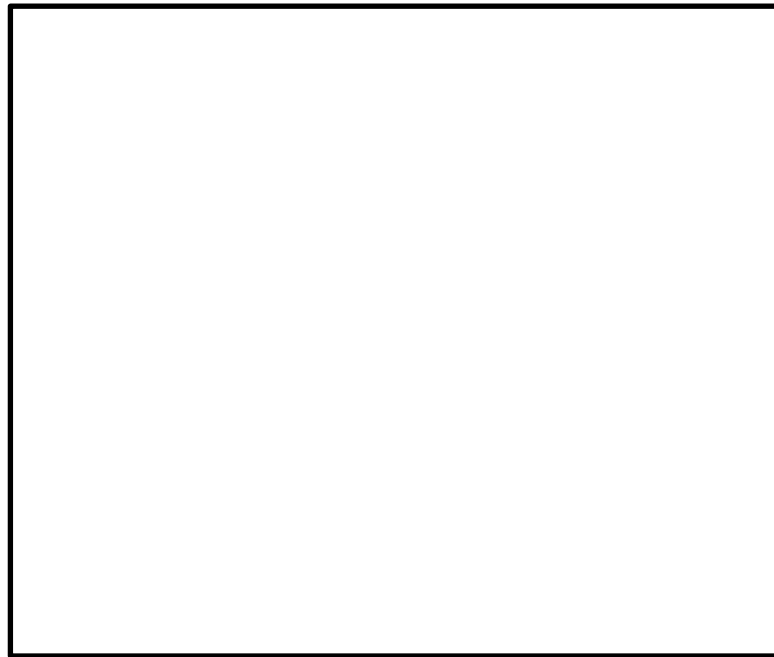
参考3表 NPSH評価結果

項目		2号炉	設定根拠
Pa	サプレッション・チェンバ圧力 (水頭圧換算値)	11.6m	安全解析における事故発生30日後のS/C圧力の水頭圧換算
Pv	可搬ポンプ入口温度での飽和蒸気圧 (水頭圧換算値)	12.0m	安全解析における事故発生30日後のS/P水温105°Cでの飽和蒸気圧
H	S/P水位と可搬ポンプ軸レベル間の水頭差	3.9m	安全解析における事故発生30日後のS/P水位 (EL. 5778) とし、可搬ポンプ吸込口レベルは原子炉建物地下2階床上0.5mを想定しEL. 1800とする。
ΔH	吸込配管圧損 (HPCS配管)		HPCSストレーナ～耐圧ホース取付箇所までの配管の圧損 (<input type="text"/> m ³ /h)
	吸込配管圧損 (耐圧ホース)		可搬ポンプ吸込み側の耐熱ホースの圧損 (<input type="text"/> m ³ /h)
	HPCSストレーナ圧損		HPCSストレーナの圧損
合計			
有効NPSH		3.1m	Pa-Pv+H-ΔH
必要NPSH		2.0m	可搬ポンプの必要NPSH
成立性評価		○	有効NPSH ≥ 必要NPSH

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

② 流量評価

可搬ポンプ及び可搬熱交換器を用いた可搬型格納容器除熱系の系統流量は、後述する評価により m³/h以上確保可能であることを確認している。本章では、その評価結果について示す。流量確認方法としては、可搬ポンプの「性能曲線」（揚程と流量の関係図）と参考 1 図の系統構成を想定した場合の「システム抵抗曲線」との交点がポンプの動作点となるため、ポンプの動作点の流量を確認する。その結果は参考 6 図に示すとおり、 m³/h以上確保可能であることを確認した。参考として、系統流量 m³/h時の圧力損失を参考 4 表に示す。



参考 6 図 可搬型格納容器除熱系の流量評価結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

参考4表 圧力損失内訳

除熱手段（評価ルート）		2号炉
流量		
配管・弁類圧力損失	常設ライン	
	耐圧ホース	
	可搬熱交換器	
静水頭	水源	EL. 5778 (安全解析における事故発生30日後のS/P水位)
	注入先	
圧力差	水源	1.4m
	注入先	2.9m
		1.5m
システム抵抗（圧力損失）		

③ 除熱量評価

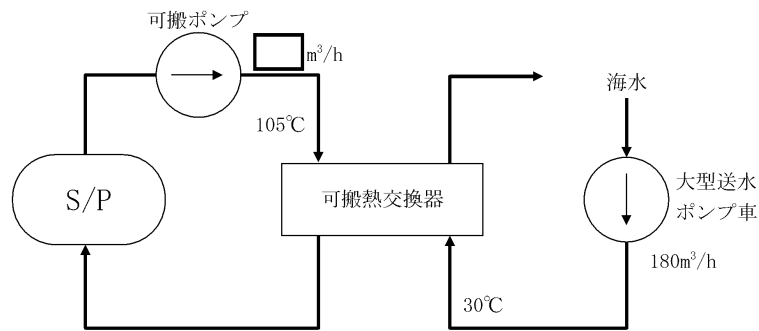
上述②の評価結果のとおり、可搬型格納容器除熱系の流量は m³/h以上が確保可能であることから、その時の系統の除熱量を評価した。

評価条件は参考5表に示すとおりであり、可搬熱交換器の性能及び大型送水ポンプ車による海水側の条件を踏まえて本系統の除熱量を評価したところ、事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できることを確認した。

参考5表 可搬熱交換器の除熱量評価条件

可搬熱交換器	淡水系	1次側入口温度	105℃
		1次側流量	<input type="text"/> m ³ /h
	海水系	海水温度	30℃
		海水流量	180m ³ /h

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



参考7図 可搬型格納容器除熱系の除熱量評価図

以上の「①ポンプのNPSH評価」、「②流量評価」、「③除熱量評価」の結果から、可搬型格納容器除熱系は事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱するための系統流量が確保可能なシステムであることを確認した。

<具体的な手順の概要>

(1) 可搬型格納容器除熱系の概要

可搬ポンプ、可搬熱交換器を用いた可搬型格納容器除熱系の概要を以下に示す。

HPCSポンプ室(EL.1300)のHPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁の上蓋を取り外し、上蓋フランジに耐熱ホースが接続できる仮蓋を取り付け、その仮蓋に耐熱ホースを接続する。

HPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁に取り付けた耐熱ホースを、HPCSポンプ室に設置した可搬ポンプの吸込側フランジに連結し、可搬ポンプ吐出側フランジに取り付けた耐熱ホースを原子炉建物1階大物搬入口(EL.15300)に設置した可搬熱交換器の入口側フランジに連結する。また、原子炉建物1階

(EL.15300)のFLSR可搬式設備A-注水ライン逆止弁の上蓋を取り外し、上蓋フランジに耐熱ホースが接続できる仮蓋を取り付け、その仮蓋に耐熱ホースを接続し、可搬熱交換器出口側フランジに連結する。このように系統を構成することで、サプレッション・チェンバのプール水を可搬ポンプ及び可搬熱交換器を用いて原子炉圧力容器に注水することが可能となる。可搬型格納容器除熱系を構成する耐熱ホース等は、作業時の被ばく線量を考慮した配置に設置する。

なお、可搬型格納容器除熱系の使用にあたっては、サプレッション・チェンバのプール水からの汚染水を通水する前に復水輸送ポンプで非汚染水による水張りを実施し、可搬部位の健全性確認を行う。参考8図に系統水張りの概要図を示す。

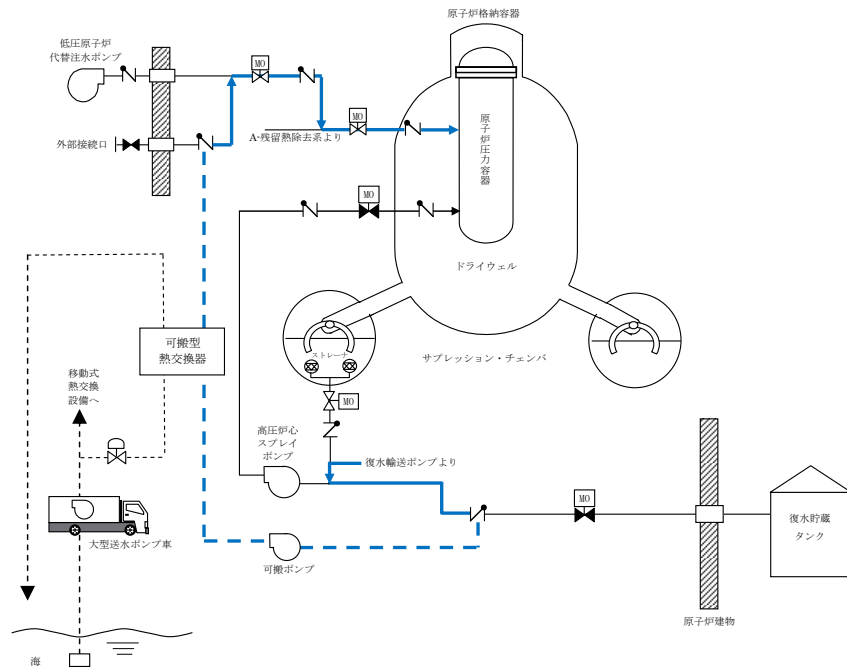
また、可搬熱交換器の二次系については、屋外に大型送水ポンプ車とホースを配備して連結し、大型送水ポンプ車を起動することで海水を通水する。

系統水張りによる健全性確認が完了した後、HPCSポンプトラス水入口弁を開操作し、低圧原子炉代替注水系から原子炉圧力容器へ注水し循環することにより除熱する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

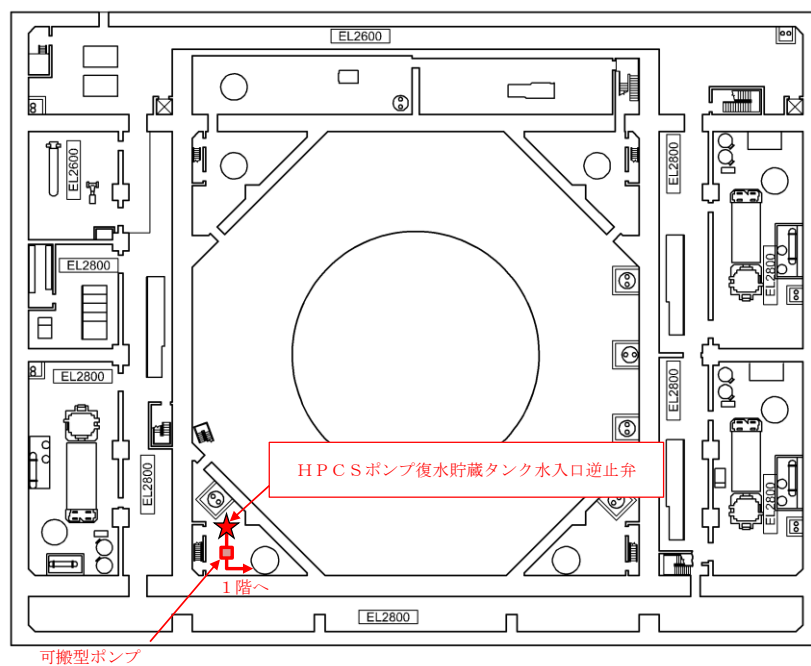
可搬ポンプ、可搬熱交換器を用いた可搬型格納容器除熱系の除熱可能量は、事故発生30日後の崩壊熱「約3.9MW」を上回る系統設計とする。

系統を構成する機器の配置イメージを以下に示す。また、系統を構成する機器の仕様等は参考6表のとおりである。



参考8図 復水輸送系を用いた系統水張り概要図

PN

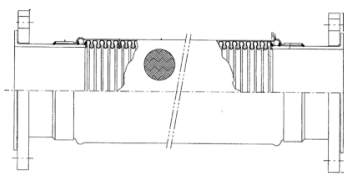
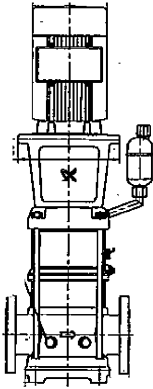
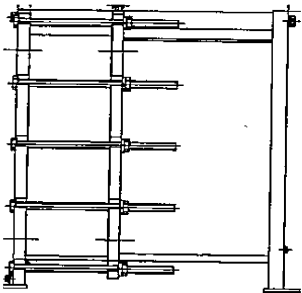

参考9図 原子炉建物地下2階 機器配置図



参考10図 原子炉建物1階 機器配置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

参考6表 可搬型格納容器除熱系の機器仕様

構成機器	仕様等		備考
可搬機器			
耐熱ホース（フレキシブルメタルホース） ※弁接続部の仮蓋含む	口径 150A 圧力 1.6MPa 温度 450℃ 口径 100A 圧力 1.7MPa 温度 450℃		150A：H P C S ポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁～可搬ポンプまで 100A：可搬ポンプ～F L S R 可搬式設備A－注水ライン逆止弁
可搬ポンプ	容量 約60m ³ /h 全揚程 約86m		
可搬熱交換器	除熱量 3.9MW以上		
大型送水ポンプ車	容量 1,800m ³ /h 吐出圧力 1.4MPa		
既設機器			
復水輸送ポンプ	容量 85m ³ /h 全揚程 70m	—	復水輸送系

※機器図は一般例を示すものである。

※詳細設計に伴い機器仕様の変更が必要な場合は、仕様を変更する。

(2) 作業に伴う被ばく線量

炉心損傷で発生した汚染水はサプレッション・プール水中にあるが、高圧炉心スプレイ系については、サプレッション・チェンバ側のポンプ入口弁が通常時開となっているため、HPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁にはサプレッション・プール水が流入していることが考えられる。ただし、高圧炉心スプレイ系については、運転している場合には炉心損傷を防止でき、運転が停止した後に炉心損傷に至ることが考えられる。このため、炉心損傷によってサプレッション・プール水が汚染する段階では、高圧炉心スプレイ系の系統内は流動がない状態であり、汚染したサプレッション・プール水が作業エリアに敷設されている配管系まで流入しないことも考えられる。

また、FLSR可搬式設備A-注水ライン逆止弁は低圧原子炉代替注水槽を水源とする低圧原子炉代替注水系で満たされているため直接汚染水に接することはない。

HPCSポンプ室内(EL.1300)におけるHPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁付近の雰囲気線量は、格納容器からの漏えいに起因する室内の空間線量率及び線源配管からの直接線による線量率により約12.8mSv/hとなる。〔参考9-補足2〕

HPCSポンプ復水貯蔵タンク水入口逆止弁への耐熱ホース接続作業については、準備作業、後片付けを含めて作業時間は約10時間程度(5人1班で作業)と想定しており、遮蔽等の対策を行い、作業員の交代要員を確保し、交代体制を整えることで実施可能である。

原子炉建物1階(EL.15300)におけるFLSR可搬式設備A-注水ライン逆止弁付近の雰囲気線量は、格納容器からの漏えいに起因する室内の空間線量率により約3.3mSv/hとなる。〔参考9-補足2〕

FLSR可搬式設備A-注水ライン逆止弁への耐熱ホース接続作業については、準備作業、後片付けを含めて作業時間は約10時間程度(5人1班で作業)と想定しており、遮蔽等の対策を行い、作業員の交代要員を確保し、交代体制を整えることで実施可能である。

原子炉建物大物搬入口における可搬熱交換器配備箇所の雰囲気線量は、格納容器からの漏えいに起因する室内の空間線量率により約5.2mSv/hとなる。〔参考9-補足2〕

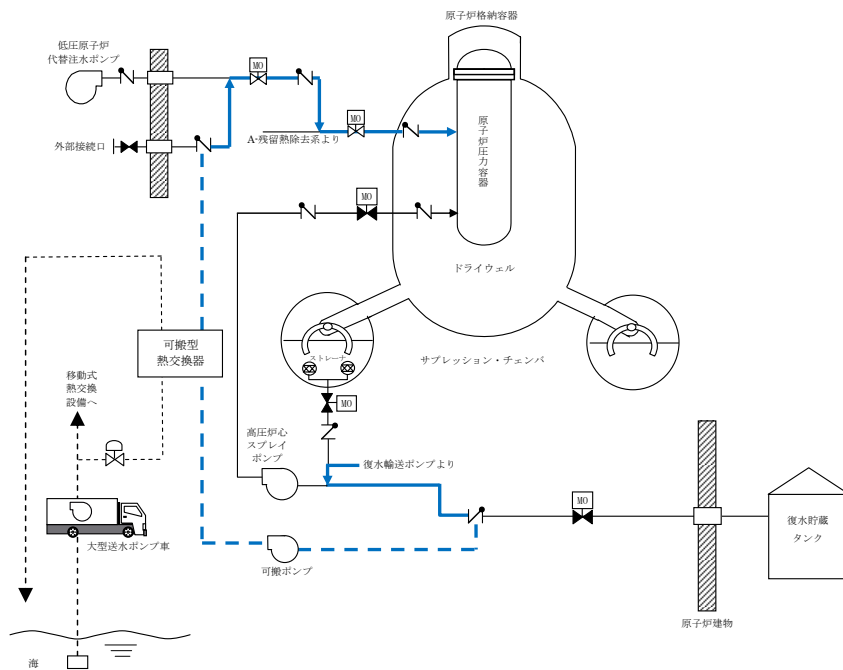
可搬熱交換器への耐熱ホース接続作業については、準備作業、後片付けを含めて作業時間は約10時間程度(5人1班で作業)と想定しており、遮蔽等の対策を行い、作業員の交代要員を確保し、交代体制を整えることで実施可能である。

(3) フランジ部からの漏えい発生時の対応

系統のフランジ部からの漏えい発生等の異常を検知した場合は、直ちに可搬ポンプを停止し復水輸送ポンプからの非汚染水によりフラッシングを実施する。

フラッシングにより現場へのアクセスが可能になった後、増し締め等の補修作業を実施する。

非汚染水によるフラッシングの系統イメージを以下に示す。



参考11図 復水補給水系からの洗浄水ラインを使用したフラッシング

- I. 可搬型格納容器除熱系の循環運転で使用した弁を全て全閉とする
- II. 高圧炉心スプレー系の洗浄水弁，FLSR注水隔離弁，A-RHR注水弁を開操作し，復水輸送系の水が耐熱ホース，可搬ポンプ及び可搬熱交換器を経由し，原子炉压力容器へ流入することで，系統をフラッシングする
- III. サブプレッション・チェンバのプール水位に影響しない範囲で，空間線量が下がるまでフラッシングを実施する
- IV. フラッシングにより漏えいフランジ近辺の空間線量が十分低下した場合，漏えいフランジ部にアクセスする
- V. 漏えいフランジの増し締めを行い，系統を復旧する

〔参考9－補足1〕長期安定性の維持のためにFPCとCUW補助熱交換器使用の可能性について

長期安定性の維持のためにFPC熱交換器又はCUW補助熱交換器による格納容器除熱が可能であるかの検討を行った。ただし、FPC熱交換器については、これを用いて格納容器除熱を実施するラインを構成することで燃料プールの冷却が行えなくなるため、格納容器除熱としては使用しないこととする。なお、FPC熱交換器を用いてサプレッション・チェンバのプール水を除熱するためには、FPCポンプを使用する必要があるが、FPCポンプは原子炉建物中2階に設置されており、水源であるサプレッション・チェンバとのレベル差が大きく、ポンプNPSH評価が成立しないため、使用は困難と考えている。一方で、CUW補助熱交換器による格納容器除熱手段については系統成立性が確認できたため使用可能と判断した。詳細の成立性評価について以下に示す。なお、CUW非再生熱交換器は原子炉補機冷却系の常用負荷に接続されているため、より実現可能性の高い格納容器除熱系として非常用負荷に接続されているCUW補助熱交換器を用いた系統を検討する。

(1)原子炉補機代替冷却系を用いたCUW系による原子炉除熱
〈実現可能性〉

CUW系は通常運転中に原子炉冷却材の浄化を行う系統であり、重大事故等時に原子炉水位の低下（レベル3）により隔離状態になる。

また、通常は原子炉補機冷却系を冷却水として用いているが、本除熱手段では原子炉補機代替冷却系を用いることで冷却水を確保する。

耐熱ホース等はCUW系では使用する必要がなく、弁操作による系統構成のみで運転可能である。

CUW系は原子炉圧力容器が水源であり、CUW補助ポンプは原子炉圧力が低圧時にも冷却材の循環を行うことが可能であるが、大LOCA事象のように原子炉水位を十分に確保できない場合は運転することができない。

CUW系による原子炉除熱の条件を満たしたうえで、原子炉補機代替冷却系を用いたCUW系による除熱可能量は事故発生30日後の崩壊熱「約3.9MW」を上回る。

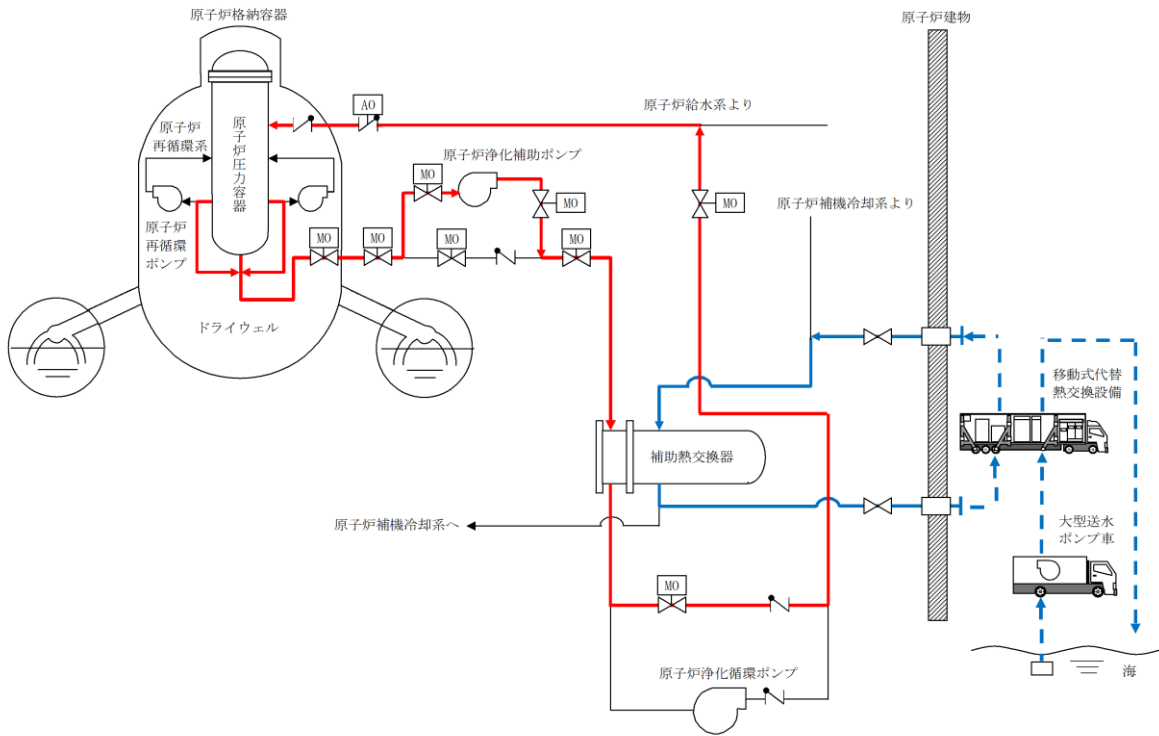


図1 原子炉補機代替冷却系を用いたCUW系による原子炉除熱 系統概要図

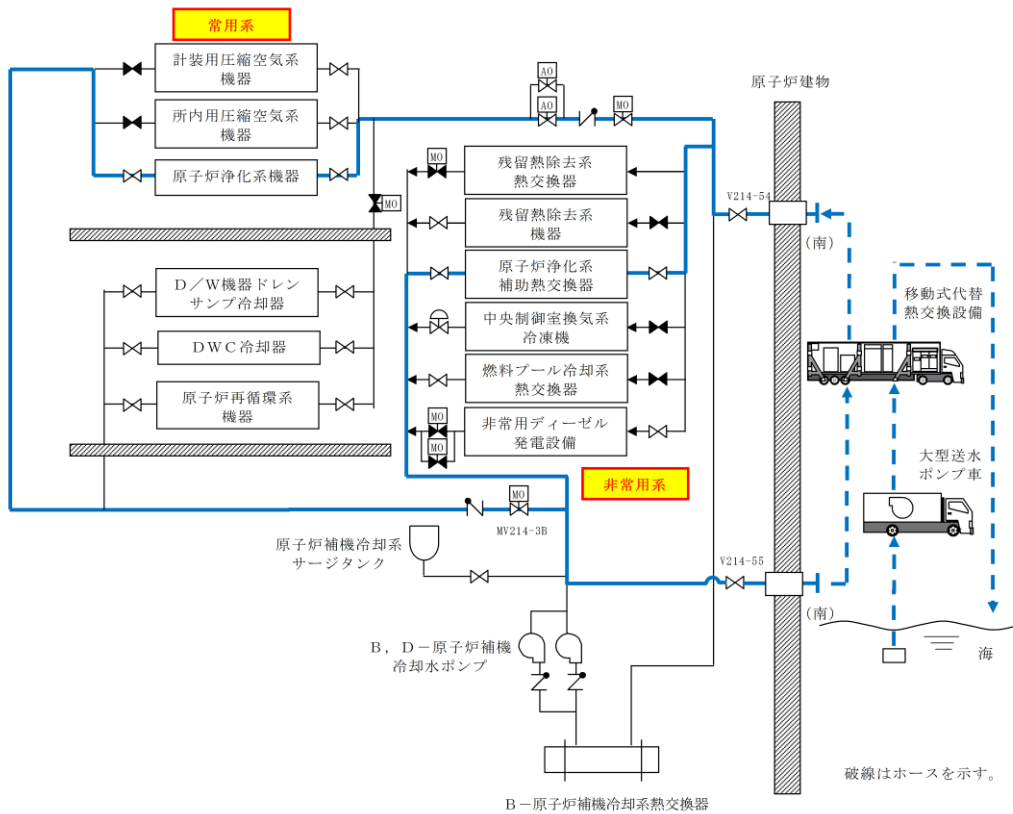


図2 原子炉補機代替冷却系 (CUW除熱ライン) 系統概要図

<効果>

除熱量は事故発生30日後の崩壊熱「約3.9MW」を上回ることから「1. 可搬型格納容器除熱系による格納容器除熱」の参考2～4図にて示した同等の除熱効果が得られる。

<系統成立性評価>

原子炉補機代替冷却系を用いたCUW系による原子炉除熱は、事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できることとし、本章ではその系統成立性評価を示す。評価にあたっては「①CUW補助ポンプのNPSH(Net Positive Suction Head)評価」で原子炉建物地下1階に設置されているCUW補助ポンプの必要NPSHが系統圧力損失を考慮して有効NPSHを満足することを確認する。次に「②流量評価」で系統圧力損失を考慮して、本系統で確保可能な系統流量を評価する。このとき、CUW補助ポンプについては基本的に通常運転時と使用条件が変わらないため定格流量は確保可能であり、改めて評価する必要はない。一方で、従来流路として考慮していなかった常用系ラインを通水することとなる原子炉補機代替冷却水ポンプについては流量評価を行い、その流量で原子炉補機代替冷却系による除熱可能な除熱量を「③除熱量評価」で示し、本系統が事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できることを確認し、系統成立性を示す。

①CUW補助ポンプのNPSH評価

ポンプがキャビテーションを起こさず正常に動作するためには、流体圧力や吸込配管圧力損失等により求められる「有効NPSH」が、ポンプの「必要NPSH」と同等かそれ以上であること（有効NPSH \geq 必要NPSH）を満足する必要がある。有効NPSHと必要NPSHを比較するNPSH評価によりポンプの成立性を確認する。本評価では図3の系統構成を想定し、原子炉圧力、原子炉水位とCUW補助ポンプ軸レベル間の水頭差、吸込配管圧力損失により求められる有効NPSHと、CUW補助ポンプの必要NPSHを比較することで評価する。有効NPSHの評価式は以下のとおりであり、評価結果は表1に示すとおり、ポンプのNPSH評価は成立する。

有効 NPSH = Pa - Pv + H - ΔH

- Pa : 水源気相部の圧力[m]
- Pv : ポンプ入口温度での飽和蒸気圧力[m]
- H : 静水頭 (水源水位～ポンプ) [m]
- ΔH : ポンプ吸込ラインの圧力損失[m]

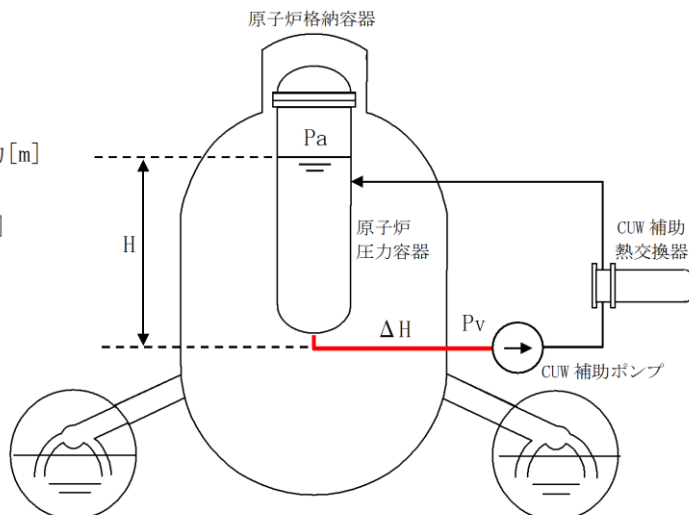


図3 CUW系による原子炉除熱のNPSH評価

表1 NPSH評価結果

項目		2号炉	設定根拠
Pa	原子炉圧力	13.2m	安全解析における事故発生30日後の原子炉圧力 (0.028MPa) の水頭圧換算値
Pv	CUW補助ポンプ入口温度での飽和蒸気圧力 (水頭圧換算)	12.0m	安全解析における事故発生30日後の原子炉冷却材温度 (105℃) の飽和蒸気圧
H	原子炉水位とCUW補助ポンプ軸レベル間の水頭差		原子炉水位は「原子炉水位低 (レベル3) (EL. 29840)」とし、ポンプ軸レベルはEL. とする。
ΔH	吸込配管圧損 (CUW配管)		定格流量228m ³ /h時のポンプ吸込配管圧損
有効NPSH			Pa - Pv + H - ΔH
必要NPSH			CUW補助ポンプの必要NPSH
成立性評価		○	有効NPSH > 必要NPSH

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

② 流量評価

原子炉補機代替冷却系を用いたC U W系による原子炉除熱の、原子炉補機代替冷却系の系統流量は、後述する評価により m³/h以上確保可能であることを確認している。本章では、その評価結果について示す。

流量確認方法としては、原子炉補機代替冷却水ポンプの「性能曲線」（揚程と流量の関係図）と図2の系統構成を想定した場合の「システム抵抗曲線」との交点がポンプの動作点となるため、ポンプの動作点の流量を確認する。その結果は図4に示すとおり、ポンプ動作点が m³/h以上であることから、本系統流量は m³/h以上確保可能であることを確認した。

参考として、系統流量 m³/h時の圧力損失を表2に示す。



図4 C U W系による原子炉除熱 原子炉補機代替冷却系 系統流量評価結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表2 圧力損失内訳

除熱手段（評価ルート）		2号炉
流量		
配管・弁類圧力損失	常設ライン	
	淡水ホース	
	代替熱交換器	
静水頭	水源	—
	注入先	—
圧力差	水源	—
	注入先	—
システム抵抗（圧力損失）		

③ 除熱量評価

上述②の評価結果のとおり，CUWによる原子炉除熱の，原子炉補機代替冷却系システム流量は m³/hが確保可能であることから，システムの除熱量を評価した。

評価条件は表3に示すとおりであり，CUW補助熱交換器及び移動式代替熱交換設備の性能，大型送水ポンプ車による海水側の条件を踏まえて本システムの除熱量を評価したところ，事故発生30日後の崩壊熱相当（約3.9MW）を除熱できることを確認した。

表3 移動式熱交換設備の除熱量評価条件

移動式代替熱交換設備	淡水系	淡水側入口温度	<input type="text"/> °C
		淡水側流量	<input type="text"/> m ³ /h
	海水系	海水温度	30°C
		海水流量	780m ³ /h

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

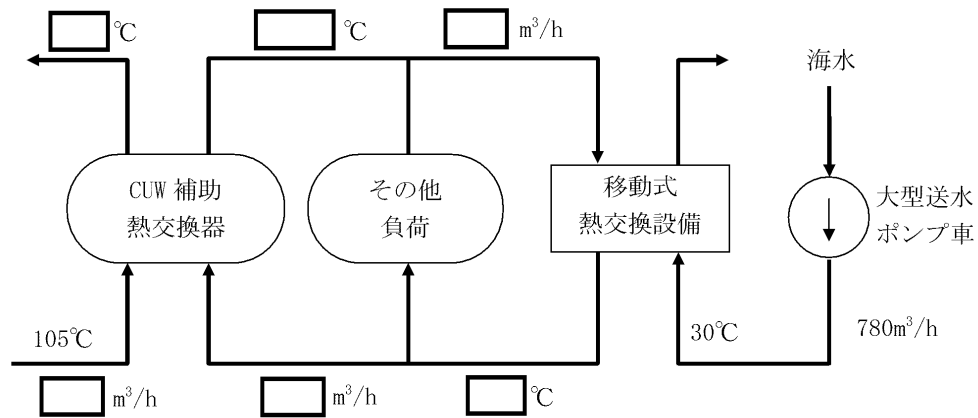


図5 CWU系による原子炉除熱の除熱量評価図

以上の「①ポンプのNPSH評価」, 「②流量評価」, 「③除熱量評価」の結果から, 原子炉補機代替冷却系を用いたCWU系による原子炉除熱は事故発生30日後の崩壊熱相当(約3.9MW)を除熱するための系統流量が確保可能なシステムであることを確認した。

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

〔参考9－補足2〕作業エリアの線量評価について

各作業エリアにおける線量評価は「格納容器からの漏えいに起因する室内の線量率」と「線源配管からの直接線による線量率」の寄与を合わせて評価するものとする。

1. 評価の方法

(1) 格納容器からの漏えいに起因する線量率

原子炉棟内の線量率は、「雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温）」において、格納容器ベントを実施した場合の事故発生30日後の原子炉建物内の放射エネルギーを考慮し、サブマージョンモデルにより計算する。格納容器から漏えいした放射性物質は原子炉棟内に一様に分散しているものとし、原子炉棟内から環境中への漏えいはないものとして計算した。表1に各作業エリア空間容積を示す。

$$D = 6.2 \times 10^{-14} \cdot \frac{Q_{\gamma}}{V} \cdot E_{\gamma} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot R}) \cdot 3600$$

ここで、

D : 外部被ばくによる放射線量率 (Gy/h) ※1

※1 Gy から Sv への換算係数は1とする。

6.2×10^{-14} : サブマージョンモデルによる換算係数 $\left(\frac{\text{dis} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Gy}}{\text{MeV} \cdot \text{Bq} \cdot \text{s}}\right)$

Q_{γ} : 原子炉建物内の存在量 (Bq : ガンマ線実効エネルギー 0.5MeV 換算値)

V : 原子炉建物内の空間容積 (101,000m³)

E_{γ} : γ 線エネルギー (0.5MeV/dis)

μ : 空気に対する γ 線のエネルギー吸収係数 ($3.9 \times 10^{-3}/\text{m}$)

R : 評価対象エリアの空間と等価な半球の半径 (m)

V_F : 評価対象エリアの空間容積 (m³)

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_F}{2 \pi}}$$

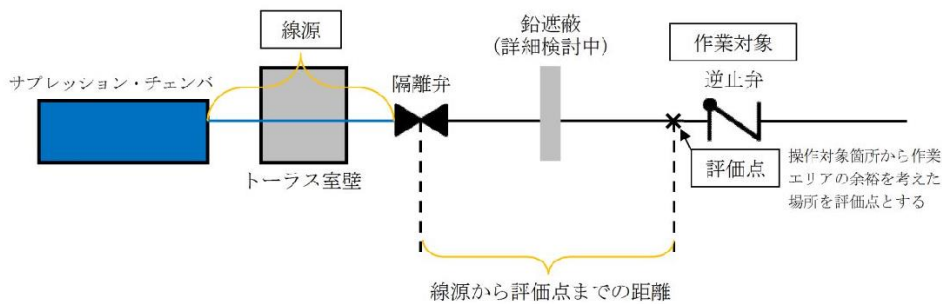
表1 各作業エリア空間容積

作業エリア	作業エリアの空間容積 V_F (m ³)
HPCS ポンプ室	600
大物搬入口	3800
原子炉建物1階(F L S R可搬式設備 操作対象弁付近)	1000

(2) 線源配管からの直接線による線量率

図1に示すとおり、炉心損傷により発生する汚染水は、格納容器貫通部とサブプレッション・プール側一次隔離弁までの配管に存在することになるため、当該配管は線源となる。線源配管からの直接線による線量率は、必要な遮蔽対策を実施することによって、約10mSv/h以下に低減させる。線量率はQADコードを用いて図1中の評価モデルの体系により評価を実施した。表2に線源配管からの直接線の寄与を10mSv/h以下とするために必要な鉛遮蔽の厚さを示す。

<作業対象、評価点、線源配管の配置概要図>



<評価モデル図>

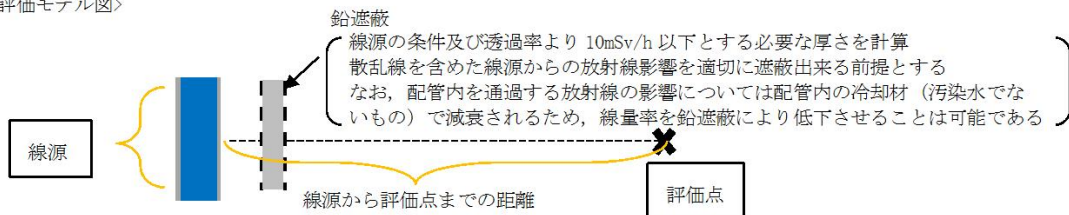


図1 線量評価概念図

表2 線量率評価条件及び必要な鉛遮蔽体厚さ

作業エリア	線源 (S/P～隔離弁までの配管長さ)	線源から評価点までの距離	線源配管からの直接線による線量率を10mSv/h以下にするために必要な鉛遮蔽厚さ
HPCSポンプ室	約3.3m	約2.9m	約8cm

2. 評価結果

「1. 評価方法」に基づき、各作業エリアにおける線量率を評価した。表3に各作業エリアにおける線量率を示す。

表3 各作業エリアにおける線量率

作業エリア	格納容器からの漏えいに起因する線量率	線源配管からの直接線による線量率	合計線量率
HPCSポンプ室	約2.8mSv/h	約10mSv/h	約12.8mSv/h
大物搬入口	約5.2mSv/h	—※1	約5.2mSv/h
原子炉建物1階(FLSR可搬式設備操作対象弁付近)	約3.3mSv/h	—※1	約3.3mSv/h

※1：線源配管が存在しないため、考慮不要

〔参考9－補足3〕窒素ガス制御系 系統概要図

可搬型格納容器除熱系をインサービスする場合は、格納容器ベントを微開とし、窒素ガス制御系の窒素ガス供給装置あるいは可搬式の窒素供給装置により窒素ガスを注入し格納容器除熱による格納容器圧力低下を抑制する。図1に窒素ガス制御系の窒素ガス供給装置により窒素ガスを格納容器に注入する系統の例を示す。

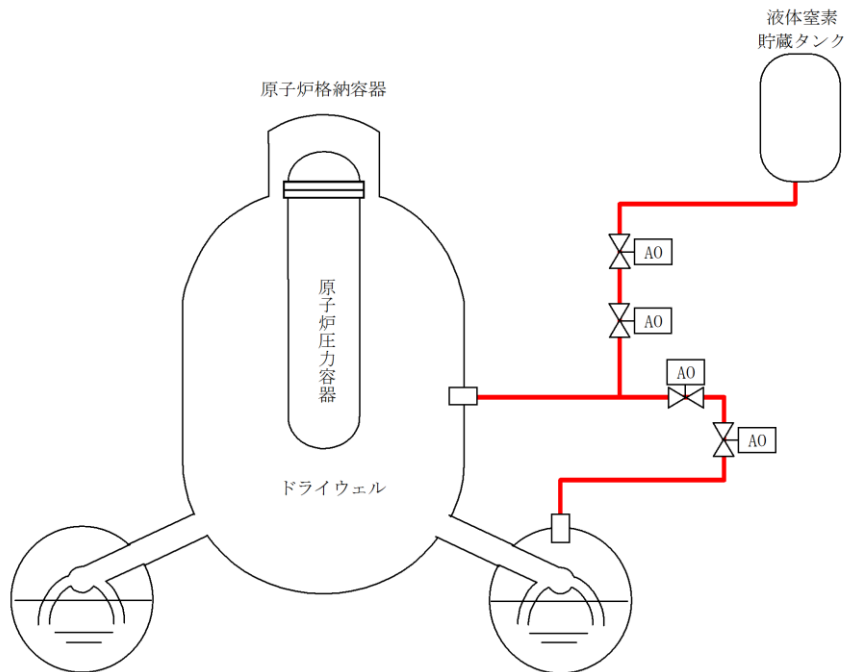


図1 窒素ガス制御系 系統概要図

別添資料－ 3

水素爆発による原子炉建物等の損傷を
防止するための設備について

〈目 次〉

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 適合のための設計方針

2. 水素爆発による原子炉建物等の損傷を防止するための設備
 - 2.1 概要
 - 2.2 水素濃度制御設備（PAR）について
 - 2.2.1 PARの設計方針について

添付1 浜岡原子力発電所4/5号機で発生したOG系トラブルについて
添付2 PARの最高使用温度について
添付3 PAR製作誤差による処理能力への影響
添付4 PARの検査・点検について
添付5 水素処理容量に関する説明について
添付6 PAR周辺機器に対する悪影響防止について
 - 2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析

添付7 原子炉建物原子炉棟内における成層化について
添付8 運用面を考慮した場合の原子炉建物原子炉棟の水素挙動及び対策について
添付9 局所エリアにおける水素爆発防止対策について
 - 2.2.3 PARの性能試験について

添付10 国内容器試験について
添付11 PAR動作監視装置について
添付12 KALI試験, SNL試験の試験データ適用性について
 - 2.3 原子炉建物水素濃度監視設備について
 - 2.3.1 原子炉建物水素濃度監視設備の設計方針について

添付13 原子炉建物水素濃度の適用性について

- 2.4 原子炉ウェル代替注水系（自主対策設備）について
 - 2.4.1 原子炉ウェル代替注水系の設計方針について
 - 2.4.2 原子炉ウェル代替注水系の効果について
 - 2.4.3 原子炉ウェル代替注水による格納容器への影響について
 - 2.4.4 原子炉ウェル代替注水系の監視方法について

2.5 参照文献

- 参考資料1 格納容器の漏えい箇所の選定について
- 参考資料2 原子炉建物原子炉棟4階大物搬入口及びトラス室上部ハッチについて
- 参考資料3 PARによる再結合反応の律速段階について
- 参考資料4 GOTHICコードについて
- 参考資料5 重大事故等時に発生が想定されるガス等による被毒について
- 参考資料6 PAR設置箇所の考え方について
- 参考資料7 粒子状物質の触媒性能への影響について
- 参考資料8 原子炉ウェル排気ラインの影響及び対策について

〈概要〉

1. において、設置許可基準規則、技術基準規則の要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する島根原子力発電所 2 号炉における適合性を示す。

2. において、水素爆発による原子炉建物等の損傷を防止するための設備に関する基準適合性について説明する。

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

水素爆発による原子炉建物等の損傷を防止するための設備に関する設置許可基準規則第 53 条の要求事項並びに当該要求事項に該当する技術基準規則第 68 条の要求事項を表 1.1-1 に示す。

表 1.1-1 設置許可基準規則第 53 条, 技術基準規則第 68 条要求事項

設置許可基準規則 第 53 条	技術基準規則 第 68 条	備考
発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋その他の原子炉格納容器から漏えいする気体状の放射性物質を格納するための施設（以下「原子炉建屋等」という。）の水素爆発による損傷を防止する必要がある場合には、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備を設けなければならない。	発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋その他の原子炉格納容器から漏えいする気体状の放射性物質を格納するための施設（以下「原子炉建屋等」という。）の水素爆発による損傷を防止する必要がある場合には、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備を施設しなければならない。	—

設置許可基準規則：実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

技術基準規則：実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則

1.2 適合のための設計方針

炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建物等の水素爆発による損傷を防止するために、水素濃度制御設備及び水素濃度監視設備を設置する設計とする。

水素濃度制御設備としては、原子炉建物原子炉棟 4 階に静的触媒式水素処理装置（以下、「PAR」という。）を設置し、重大事故等時に原子炉格納容器（以下、「格納容器」という。）から原子炉建物原子炉棟内に水素ガスが漏えいした場合において、原子炉建物原子炉棟内の水素濃度上昇を抑制し、水素爆発を防止する設計とする。また、PARは運転員による起動操作を行うことなく、水素ガスと酸素ガスを触媒反応によって再結合できる装置を適用し、起動操作に電源が不要な設計とする。なお、PARの動作確認を行うためにPARの入口側及び出口側に温度計を設置する設計とする。また、静的触媒式水素処理装置入口温度及び静的触媒式水素処理装置出口温度は、中央制御室にて監視可能であり、常設代替直流

電源設備又は可搬型直流電源設備から給電が可能な設計とする。

水素濃度監視設備としては、原子炉建物原子炉棟内に水素濃度計を設置し、想定される事故時に水素濃度が変動する可能性のある範囲で監視できる設計とする。なお、当該水素濃度については、中央制御室にて監視可能であり、常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備から給電可能な設計とする。

これらの設備に加え、水素爆発による当該原子炉建物等の損傷を防止するための自主対策設備として、ドライウェル主フランジの過温破損を防止し、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制するために原子炉ウェル代替注水系を設置する。原子炉ウェル代替注水系は、重大事故等時に原子炉建物外から代替淡水源（輪谷貯水槽）の水、若しくは海水を大量送水車により原子炉ウェルに注水することでドライウェル主フランジを冷却できる設計とする。

2. 水素爆発による原子炉建物等の損傷を防止するための設備

2.1 概要

東京電力（株）福島第一原子力発電所事故において発生した水素爆発は、第一に電源喪失に伴う注水・除熱機能の喪失によって炉心損傷が起こりジルコニウム-水反応による大量の水素発生に至ってしまったこと、第二に除熱機能の喪失によって格納容器破損が起こり大量の水素ガスが原子炉建屋に漏えいしてしまったこと、第三に原子炉建屋に漏えいした水素ガスに対する対応手段がなかったことによって起こったものである。そのため、水素爆発防止のためには、これら3つの課題に対してそれぞれ対策を施す必要がある。

第一の課題である大量の水素発生の防止については、炉心損傷を防止することが対策となる。島根原子力発電所2号炉は、設計基準事故対処設備に加えて、重大事故等が発生した状況において炉心の著しい損傷を防止するために、高圧注水機能の強化、原子炉減圧機能の強化、低圧注水機能の強化、格納容器冷却機能の強化等を行い、炉心損傷による大量の水素発生を防止する設計とする。

第二の課題である大量の水素ガスの原子炉建屋への漏えいの防止については、上述の炉心損傷防止対策を踏まえてもなお、重大事故等時に備え、格納容器の破損を防止することが対策となる。島根原子力発電所2号炉は、格納容器過温破損防止設備として格納容器代替スプレイ系、改良E P D M製シール材、原子炉ウェル代替注水系、格納容器過圧破損防止設備として格納容器フィルタベント系並びに残留熱代替除去系を設置する設計とする。これらの対策により、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制し、あるいは原子炉建物原子炉棟を経由せず大気に水素ガスを排出する。

第三の課題である原子炉建屋に漏えいした水素ガスに対する対応手段の確保については、格納容器過温・過圧破損防止対策を踏まえてもなお、格納容器には設計上漏えい率を考慮していることから、重大事故時に格納容器内で発生した水素ガスが原子炉建物原子炉棟内に漏えいした場合に備え、原子炉建物原子炉棟内において水素ガスを処理することが対策となる。島根原子力発電所2号炉は、水素

濃度制御設備としてP A Rを原子炉建物原子炉棟4階に設置する。この対策により、漏えいした水素ガスと空気中の酸素を再結合させ、水素爆発リスクを低減する。

なお、格納容器からの異常な漏えいが発生し、大量の水素ガスが原子炉建物原子炉棟に漏えいしてしまった場合にも、P A Rは効力を発揮し、水素濃度が可燃限界に至るまでの時間を遅らせ、設備の復旧や対応手段の検討に必要な時間の確保に寄与できる。その間、例えば、格納容器フィルタベント系による格納容器ベントを行うことで、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制し、P A Rの効果とあいまって水素濃度を低減させることが可能である。

以上、第一から第三の課題それぞれに対する対策を施すことにより、福島第一原子力発電所事故において発生した原子炉建屋の水素爆発を防止する。これらの対策の関係を図 2. 1-1 に整理する。

本章では、島根原子力発電所2号炉の原子炉建物水素爆発防止対策のうち、設置許可基準規則第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）に該当する設備の基準適合性を説明する。

最初に第三の課題に対する対策であるP A Rに関する説明を「2. 2 水素濃度制御設備（P A R）について」で示す。

また、原子炉建物原子炉棟の水素濃度を監視するために、原子炉建物原子炉棟に設置する水素濃度監視設備に関する説明を「2. 3 原子炉建物水素濃度監視設備について」で示す。

さらに、第二の課題に対する自主対策設備である原子炉ウェル代替注水系に関する説明を「2. 4 原子炉ウェル代替注水系（自主対策設備）について」で示す。原子炉ウェル代替注水系は、重大事故等時にドライウェル主フランジの過温破損を防止し、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制するために設置するものである。これはドライウェル主フランジのシール材の高温劣化を防ぐ目的であるが、一方でドライウェル主フランジシール材を耐環境性に優れた改良E P D M製シール材に変更する対策も施しており、閉じ込め機能を強化している。したがって、原子炉ウェル代替注水系は更なる水素漏えい抑制対策という位置づけであるが、シール材の熱劣化要因を低減することが可能であり、水素漏えい抑制対策として効果的である。

【第一の課題に対する対策】

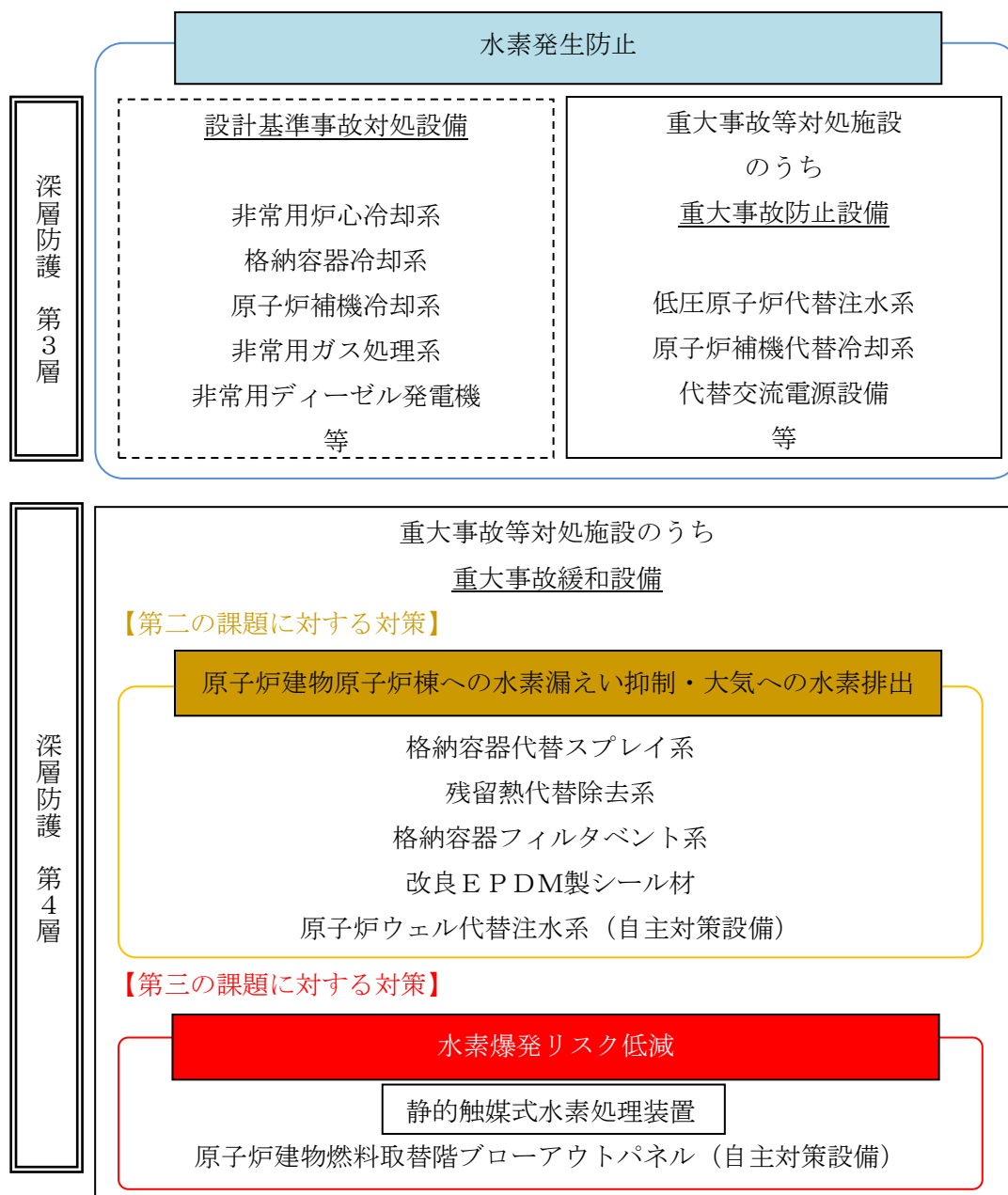


図 2.1-1 水素対策の観点で整理した深層防護第3層・第4層設備

2.2 水素濃度制御設備 (PAR) について

炉心の著しい損傷が発生した場合、格納容器内に水素ガスが蓄積した状況では、格納容器のフランジ部等を通じて水素ガスが原子炉建物原子炉棟内に漏えいする可能性がある。原子炉建物原子炉棟内に漏えいした水素ガスは、比重の関係等で原子炉建物原子炉棟4階まで上昇し、原子炉建物原子炉棟4階に滞留することが予想される。福島第一原子力発電所事故においても、格納容器から漏えいした水素ガスが原子炉建屋内に蓄積し、原子炉建屋オペレーティングフロアを中心として大規模な水素爆発を起こしている。この事故知見を踏まえて、島根原子力発電

所2号炉の原子炉建物水素爆発防止対策として、原子炉建物原子炉棟4階に、水素濃度上昇を抑制することができるPARを水素濃度制御設備として設置する。

(1) PARについて

PARはPassive Autocatalytic Recombinerの略であり、触媒反応を用いて可燃性ガス（水素ガス、酸素ガス）を再結合させて、雰囲気可燃限界未満に維持する設備である。PARは触媒反応により受動的に水素処理する設備であり、電源及び起動操作は必要とせず、水素ガス、酸素ガスがあれば自動的に反応を開始する設備である。

PARは、構造図を図2.2-1で示しているとおりのハウジングと触媒カートリッジで構成されており、PWRやBWRのシビアアクシデント時に発生する水素対策として世界的に広く採用されている設備である。島根原子力発電所2号炉については、国内BWRプラント適用に向けた被毒物質影響の知見が得られている独国のNIS社製PARを採用している。NIS社製PARの納入実績は表2.2-1のとおりである。

なお、NIS社が製造するPARは、国際的な性能試験、さまざまな国の性能試験をパスしており、欧米をはじめ世界的に性能が確認されている。

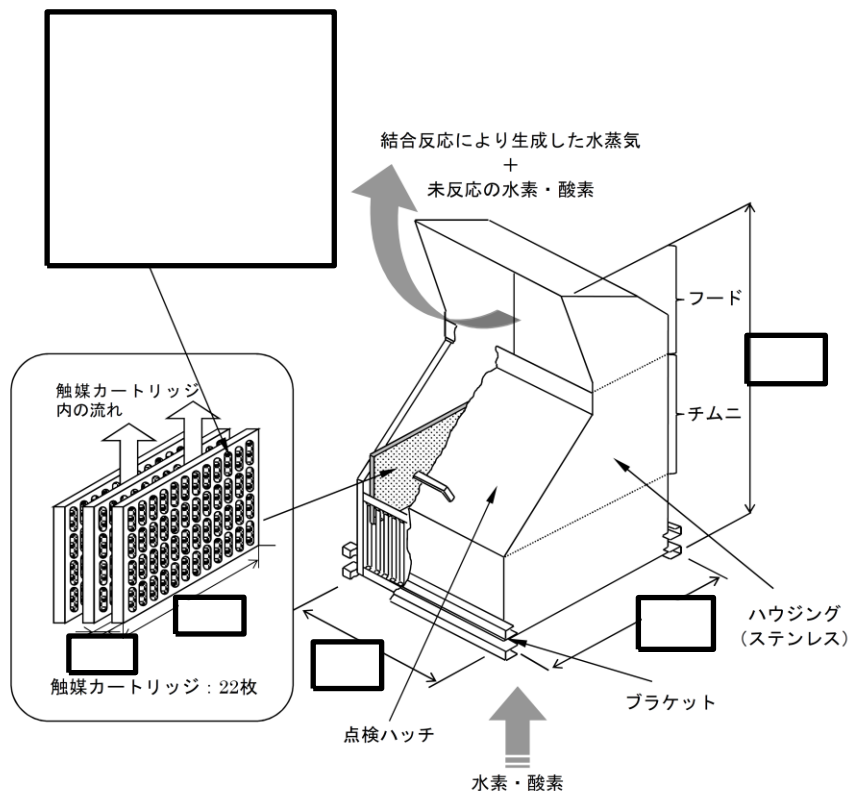


図2.2-1 PARの構造図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図 2.2-2 PAR 写真

表 2.2-1 N I S PAR の納入実績

No.	国名	発電所名	炉型	備考
1	USA	Indian Point	PWR	
2	USA	Surry	PWR	
3	Germany	Gundremmingen	BWR	
4	Germany	Philippsburg	PWR	
5	Germany	Biblis	PWR	
6	Hungary	Paks	PWR	
7	USA	Vogtle	PWR	
8	Slovenia	KRSKO	PWR	
9	日本	柏崎刈羽	BWR	
10	日本	島根	BWR	
11	Brazil	Angra	PWR	
12	Czech Republic	Temelin	PWR	
13	日本	志賀	BWR	
14	日本	女川	BWR	
15	Spain	Asco	PWR	
16	Ukraine	Zaporizhia	VVER	ロシア型加圧水型原子炉

(2) PARハウジング

PARのハウジングは図 2.2-1 に構造を示しているが、箱型のステンレス鋼板によるフレーム構造を採用しており、以下の機能を持っている。

- ・触媒カートリッジを内部に設置すること。
- ・ガスを誘導すること。

PARハウジングは、触媒カートリッジを水素処理に適切な間隔に保持し、水素処理に適切なガス流れとなるよう設計されている。

ハウジング前面の点検ハッチは、触媒カートリッジの点検及び性能試験時に取外し、取付けを容易にするものであり、通常運転時は、点検ハッチをハウジング本体に固定して使用する。

ハウジングに固定されているブラケットは、PAR本体を設置する構造物、又は支持架台に固定するために用いられる。

ハウジング上部に設置されるフードは、PARの上部に位置する構築物に、水素処理を行ったPAR出口ガスの排熱が直接当たらないようにするために、ガス流れ方向を変える役割をもつ。

(3) 触媒

N I S社製PARの触媒はパラジウムであり、基盤となる材料は酸化アルミニウム（アルミナ）である。概要図を図 2.2-1 に示しているが、基盤となる材料をパラジウムの溶液に浸透させてシェル状の触媒を形作っており、直径約 mm の球状の形をしている。また、疎水コートにより高湿度な雰囲気から触媒を保護し、水素ガス、酸素ガスが触媒に接触し易くする構造になっている。

また、球状に触媒が存在するためカートリッジ内部に隙間空間ができ、さらに触媒が多孔質なため、水素ガスと酸素ガスが触れる表面積が大きいことが特徴である。さらに、よう素等の触媒性能阻害物質は分子量が大きいことから拡散が遅く、カートリッジ内部の隙間空間や多孔質の粒子内部に到達し難いため、触媒全表面が触媒性能阻害物質で覆われ難い構造になっている。触媒粒の量は、PARの水素処理容量に合わせて調整され、触媒カートリッジに充填される。

(4) 触媒カートリッジ

触媒カートリッジは、図 2.2-1 で示す形状をしており、カートリッジ内部に触媒を充填しており、原子炉建物原子炉棟 4 階の空気と触媒を接触させるために多数の長穴が開けられている。また、カートリッジが内側の触媒を保護することで触媒の全表面が触媒性能阻害物質で覆われ難い構造になっている。この触媒カートリッジには、PAR の水素処理容量に合わせた触媒量が充填される。完成した触媒カートリッジを必要数、適切な間隔で PARハウジング内に取り付けることで PAR は完成品となる。触媒カートリッジが多いタイプの PAR の方が、1 台あたりの水素処理容量が多いが、その分サイズも大きくなる。島根原子力発電所 2 号炉においては、触媒カートリッジが PAR 1 台につき 22 枚設置される PAR-22 タイプ（図 2.2-2 参照）を採用している。

(5) PAR の主要仕様

島根原子力発電所 2 号炉では N I S 社製 PAR (PAR-22 タイプ) を採用しており、表 2.2-2 で主要仕様を示す。

表 2.2-2 主要仕様 (PAR-22 タイプ 1 台)

PAR	
種類	触媒反応式
水素処理容量 (添付 5 に詳細記載)	約 0.50kg/h/個 (水素濃度 4 vol%, 大気圧, 温度 100°C)
最高使用温度 (添付 2 に詳細記載)	300°C
ハウジング	
材料	ハウジング
	ブラケット
寸法	高さ
	幅
	奥行
質量	
触媒カートリッジ	
材料	外装パーツ
	リベット等小物部品
寸法	幅
	高さ
	厚さ
質量	触媒カートリッジ全質量
	触媒の充填質量
カートリッジ枚数	22 枚
触媒の材料	
基盤材	酸化アルミニウム
触媒	パラジウム
表面積	
形 状	球状
直 径	
充填密度	

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.2.1 P A R の設計方針について

2.2.1.1 設計方針

P A R は、炉心の著しい損傷が発生した場合において格納容器から原子炉建物原子炉棟に水素ガスが漏えいした際に、原子炉建物原子炉棟の水素濃度の上昇を抑制し、水素爆発を防止するための設備である。水素ガスの量は事故シナリオに依存するが、重大事故等対策の有効性評価のシナリオのうち、格納容器過圧・過温破損シナリオにおいて原子炉建物原子炉棟へ漏えいする水素ガスの量を考慮した場合においても、原子炉建物原子炉棟4階の水素濃度を可燃限界未満に抑制できることをP A R の設計における必要条件としている。これは、炉心損傷に伴う水素発生が想定される事故シナリオの中で、格納容器圧力・温度が高い値で推移し、かつその状態が格納容器ベントを実施する約32時間後まで継続することから、格納容器から原子炉建物原子炉棟への水素ガスの漏えい量が多くなるためである。

この必要条件を満たした上で、当社は、さらに厳しい条件下での水素漏えいを想定して、P A R の設置個数・場所の設定を図2.2.1.1-1に示すとおり定める。

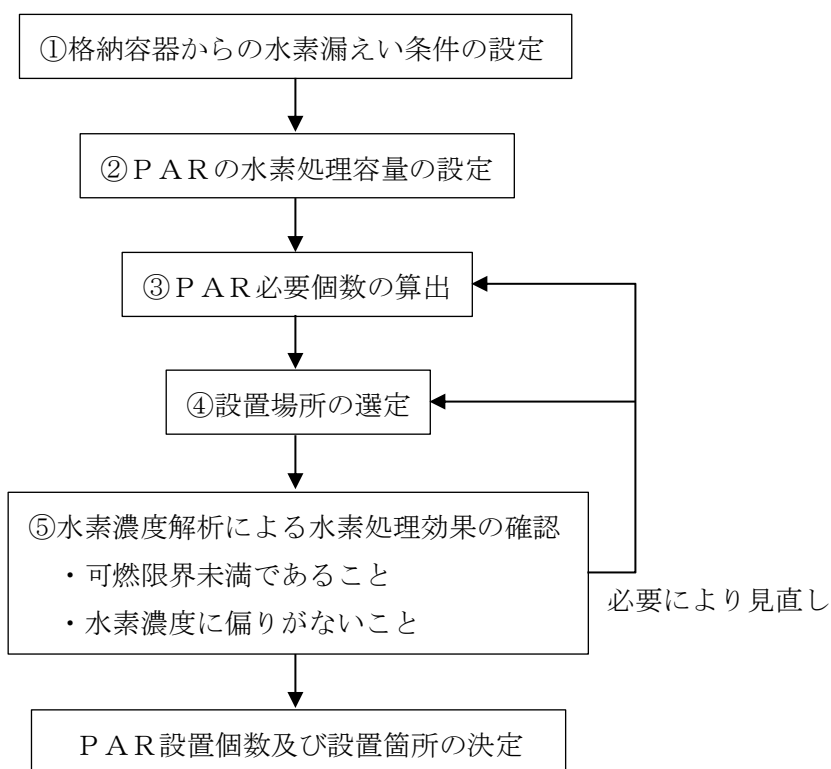


図2.2.1.1-1 P A R の設計フロー

(1) 水素漏えい条件

水素漏えい条件は表 2.2.1.1-1 に示すとおり、有効性評価結果を踏まえた条件より十分保守的に設定している。

表 2.2.1.1-1 P A R 設計条件における水素漏えい条件

項 目	P A R 設計条件	【参考】有効性評価を踏まえた条件	
		格納容器ベントケース	R H A R ケース
水素発生量	A F C * 100% 相当 (約 1,000kg)	A F C * 20% 相当 (約 200kg)	A F C * 20% 相当 (約 200kg)
格納容器漏えい率	10%/日 (一定)	約 1.3%/日 (最大)	約 0.87%/日 (最大)
水素漏えい終了時間	— (格納容器ベント無し)	約 96 時間後	— (格納容器ベント無し)

※ A F C : 燃料有効部被覆管

① 格納容器漏えい率について

重大事故等時に格納容器圧力が設計圧力を超える場合の格納容器漏えい率は以下の A E C (Atomic Energy Commission) の式から設定する。重大事故等時は、格納容器圧力が最高使用圧力の 2 倍 (以下、「2Pd」という。) を超えないよう運用するため、2Pd における格納容器漏えい率が最大漏えい率となり、事故時条件として 200°C, 2Pd, A F C 100% 相当の水素発生量を想定した場合におけるガス組成 (水素 : 17%, 窒素 : 16%, 水蒸気 : 67%) を踏まえると A E C の式から約 1.3%/日となるが、さらに過酷な条件として 10%/日を仮定し、P A R を設計する。

(A E C の式)

$$L = L_0 \cdot \sqrt{\frac{(P_t - P_a) \cdot R_t \cdot T_t}{(P_b - P_a) \cdot R_b \cdot T_b}}$$

- L : 格納容器漏えい率
- L₀ : 設計漏えい率
- P_t : 格納容器内圧力
- P_a : 格納容器外圧力
- P_b : 格納容器設計圧力
- R_t : 事故時の気体定数
- R_b : 空気の気体定数
- T_t : 格納容器内温度
- T_b : 格納容器設計温度

② 水素発生量について

有効性評価結果を踏まえた条件（大L O C Aシナリオ）では、事象発生30分後に低圧原子炉代替注水系（常設）による原子炉注水を開始し、直ちに炉心は冷却されるため、発生水素量はA F C 20%相当となるが、さらに過酷な条件として、A F C全量（A F C 100%相当（全炉心内のジルコニウム量の約40%相当））が水素発生のも因であるジルコニウム-水反応すると仮定し、P A Rを設計する。

なお、これらの条件を用いて設定したP A R設計条件は、重大事故等対策の有効性評価シナリオのうち、格納容器内での水素燃焼による影響に着目した水素燃焼シナリオと比較しても保守的な設定であることを確認している。

水素燃焼シナリオの評価においては、「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」に記載されている「全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応」した場合（水素発生量約1,900kg）とM A A Pコードによる評価結果（水素発生量約200kg）を比較し、格納容器内の酸素濃度や圧力挙動を踏まえ、水素燃焼の観点から厳しい評価結果となるM A A Pコードによる評価結果を用いている。

いずれのケースも格納容器は健全である（200℃、2Pdを超えない）ことから、格納容器漏えい率は、設計漏えい率を基に、格納容器圧力が2Pdに到達したと仮定して評価した約1.3%/日を下回る。

以上から、水素燃焼シナリオにおける格納容器内の水素発生量は、P A R設計条件である約1,000kg（A F C 100%相当の水素発生量であり、全炉心内のジルコニウム量の約40%が水と反応した場合の発生量に相当）を上回る約1,900kgとなる場合もあるが、格納容器漏えい率はP A R設計条件の方が7倍以上（約1.3%/日に対して10%/日）大きくなる。このため、最終的に原子炉建物原子炉棟内に漏えいする単位時間あたりの水素量は、P A R設計条件の方が多くなる。したがって、P A R設計条件は水素燃焼シナリオと比較しても十分保守的であると判断できる。

2.2.1.2 設計仕様

P A R の設計方針に基づき設定した P A R の設計仕様を表 2.2.1.2-1 に示す。

表 2.2.1.2-1 P A R 設計仕様

項 目	仕 様
水素処理容量	約 0.50kg/h/個
P A R 設置個数	18 個
設置箇所	原子炉建物原子炉棟 4 階

(1) 水素処理容量について

P A R の水素処理容量は、以下の基本性能評価式によって表される。

(P A R の基本性能評価式)

$$DR = A \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \cdot \frac{P}{T} \cdot 3,600 \cdot SF \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.1-1)}$$

- DR : 再結合効率 (kg/h/個)
- A : 定数
- C_{H_2} : P A R 入口水素濃度 (vol%)
- P : 圧力 (10^5 Pa)
- T : 温度 (K)
- SF : スケールファクタ

(式 2.2.1-1) は、メーカーによる開発試験を通じて、温度、圧力、水素濃度等の雰囲気条件をパラメータとした水素処理容量の相関式であり、水素処理容量は単位時間当たり P A R 内部を通過し、酸素と結合し水蒸気になる水素の重量を示している。

スケールファクタは、触媒カートリッジの寸法及び間隔を開発当時と同じとすることを前提とし、開発試験時に使用された触媒カートリッジ枚数 (88 枚) に対して、実機で使用する P A R の触媒カートリッジ枚数の比として設定されている。島根原子力発電所 2 号炉で使用する P A R の触媒カートリッジ枚数は 22 枚であり、スケールファクタは「22/88」となる。スケールファクタの妥当性については「2.2.3 P A R の性能試験について」で示す。

これらに以下の条件を想定し、P A R の水素処理容量を算出する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

・水素濃度 C_{H_2}

水素ガスの可燃限界濃度 4 vol%未滿に低減するため、4 vol%とする。

・圧力 P

重大事故等時の原子炉建物原子炉棟の圧力は格納容器からのガスの漏えいにより大気圧より僅かに高くなると考えられるが、保守的に大気圧 (101,325 Pa) とする。

・温度 T

保守的に 100°C (373.15 K) とする。

以上により、PAR 1 個あたりの水素処理容量は、約 0.50kg/h/個 (水素濃度 4 vol%, 大気圧, 温度 100°C) となる。

(2) PAR 設置個数

PAR の実機設計においては、PAR の設置環境を踏まえ、(式 2.2.1-1) に反応阻害物質ファクタ (F_i) を乗じた (式 2.2.1-2) を用いる。

反応阻害物質ファクタとは、重大事故等時に格納容器内に存在するガス状よう素による PAR の性能低下を考慮したものであり、島根原子力発電所 2 号炉の実機設計における水素処理容量は、PAR の水素処理容量 (0.50kg/h/個) に保守的に 0.5 を乗じ、0.25kg/h/個とする。

なお、ガス状よう素による PAR の性能低下については 2.2.3(5) に詳述する。

(実機設計における性能評価式)

$$DR = A \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \cdot \frac{P}{T} \cdot 3,600 \cdot SF \cdot F_i \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.1-2)}$$

DR : 水素処理容量 (kg/h/個)

A : 定数

C_{H_2} : PAR 入口水素濃度 (vol%)

P : 圧力 (10^5 Pa)

T : 温度 (K)

SF : スケールファクタ (-)

F_i : 反応阻害物質ファクタ (-)

これに表 2.2.1.1-1 で設定した水素漏えい条件を踏まえ、必要個数を以下のとおり算出する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

$$\begin{aligned}
 \text{必要個数} &= \text{水素発生量} \times \text{格納容器漏えい率} / 24 (\text{h/日}) / \text{設計水素処理容量} \\
 &= 1,000 (\text{kg}) \times 10 (\%/日) / 24 (\text{h/日}) / 0.25 (\text{kg/h/個}) \\
 &= 16.7 \text{ 個}
 \end{aligned}$$

P A Rの必要個数は 17 個以上となり、余裕を考慮して設置個数を 18 個と仮設定する。

また、P A Rの設計方針として原子炉建物原子炉棟内の水素濃度が可燃限界未満になるようにP A Rを設置することから、上記で設定したP A R設置個数に対して評価を行った。

① 評価方法

原子炉建物原子炉棟内に漏えいした水素は、比重の関係により原子炉建物原子炉棟 4 階まで上昇し、原子炉建物原子炉棟 4 階に滞留することが予想されるため、原子炉建物原子炉棟 4 階に対して評価を実施する。なお、評価に用いるモデルは、図 2.2.1.2-1 のとおりである。評価対象の空間内は、均一に混合するものとして質量及びエネルギーバランスにより、水素濃度及び温度の時間変化を評価する。

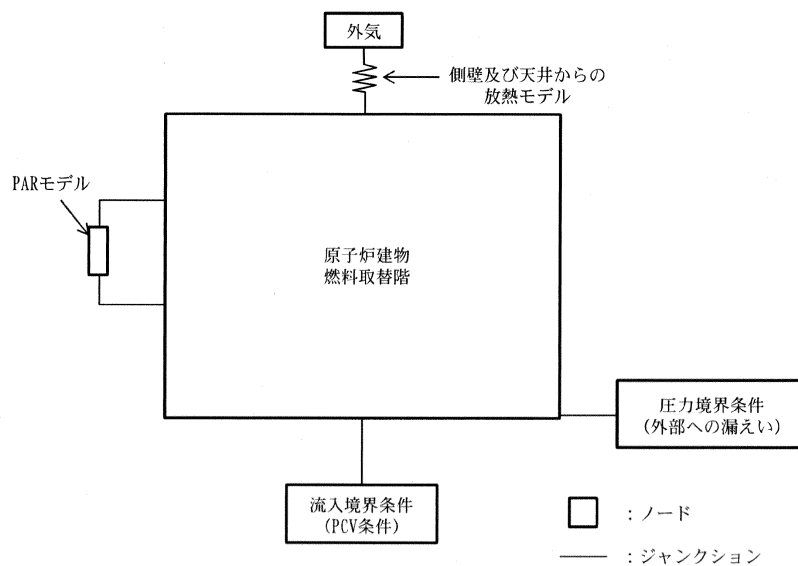


図 2.2.1.2-1 評価モデル

② 評価条件

- ・機能が要求される状態

重大事故等時で炉心の著しい損傷が発生した場合において、格納容器破損を防止するための重大事故等対処設備により、炉心損傷後であっても格納容器の健全性を維持するための措置を講じている。したがって、格納容器の健全性が維持されることにより、原子炉建物原子炉棟への気体の漏えい率は、格納容器設計漏えい率 (0.5%/日) に維持されることになる。しかしなが

ら、本設備の機能が要求される状態としては、重大事故等時で不測の事態を考慮し、格納容器設計漏えい率を大きく上回る格納容器漏えい率(10%/日)の状態では素が原子炉建物原子炉棟へ漏えいする事象を想定する。

・水素低減性能に関する評価条件

P A Rについては、以下の条件で評価する。

- ・水素処理容量：0.5kg/h/個
- ・個数：18

本評価に使用するその他の条件を表 2.2.1.2-2 に示す。

表 2.2.1.2-2 評価条件

分類	項目	単位	条件
格納容器条件	格納容器容積 想定格納容器漏えい率	m ³ %/日	12,600 10
格納容器内雰囲気条件	圧力 温度 水素濃度 酸素濃度 窒素濃度 水蒸気濃度	kPa [gage] °C vol% vol% vol% vol%	853.179 (2Pd) 200 17 0 16 67
建物条件	空間容積 (原子炉建物原子炉棟 4 階) 初期温度 初期圧力 (大気圧) 初期酸素濃度 初期窒素濃度 初期水蒸気濃度	m ³ °C kPa [gage] vol% vol% vol%	41,300 40 0 19.47 73.24 7.29
放熱条件	外気温 放熱面積 熱通過率	°C m ² W/m ² /K	40 7,000 5.03
P A R 条件	起動水素濃度 起動酸素濃度 反応阻害物質ファクタ	vol% vol% —	1.5 2.5 0.5

③ 評価結果

原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度の時間変化を図 2.2.1.2-2 に、原子炉建物原子炉棟 4 階の雰囲気温度の時間変化を図 2.2.1.2-3 に、原子炉建物原子炉棟 4 階からのガス流出量の時間変化を図 2.2.1.2-4 に示す。

原子炉建物原子炉棟 4 階の雰囲気温度は、格納容器からのガスの漏えいにより上昇するが、外気への放熱とのバランスにより、一時的に約 43°C の一定値に近づく。原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度は、格納容器から漏えいする水素により上昇するが、約 12 時間後に 1.5vol% に到達すると、P A R による水素の再結合処理が開始し、水素の再結合による発熱で雰囲気温度がさらに上昇する。原子炉建物原子炉棟 4 階からのガス流出量は、雰囲気温度の上昇率に応じて膨張した気体分だけ増加するが、雰囲気温度が一定値に近づくにつれて、格納容器からのガスの漏えい量である約 0.06kg/s に近づく結

果となる。雰囲気温度は、格納容器からの漏えいエネルギー、水素の再結合による発熱及び外気への放熱量のバランスにより、一定値に近づく傾向がみられる（168時間後において、約57°C）。一方、雰囲気の水素濃度は、格納容器からの水素の漏えい量、水素の再結合処理量及び原子炉建物原子炉棟4階からの水素の流出量のバランスにより、最大値2.8vol%となった後、減少に転じる結果となっている。

以上より、PAR18個の設置により、本評価条件において、原子炉建物原子炉棟4階の水素濃度を可燃限界である4vol%未満に低減でき、原子炉建物原子炉棟の水素爆発を防止することができる。

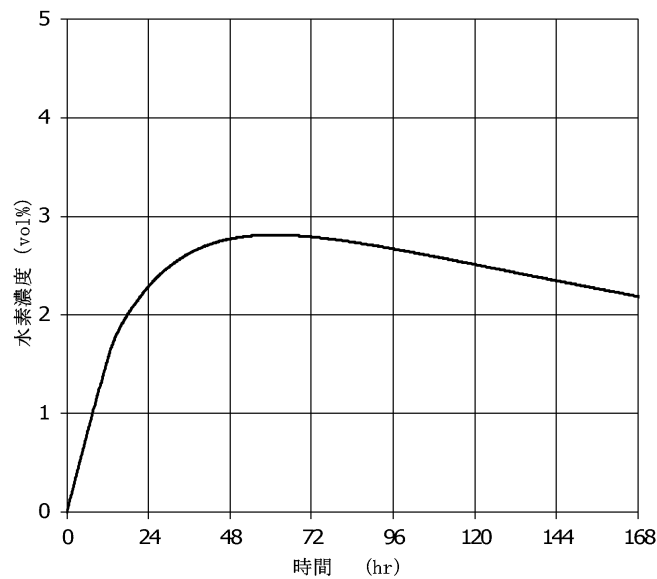


図 2. 2. 1. 2-2 原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度の時間変化

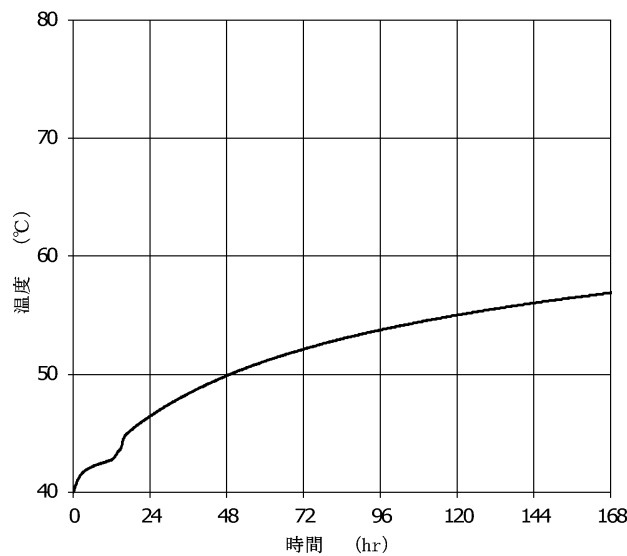


図 2. 2. 1. 2-3 原子炉建物原子炉棟 4 階の雰囲気温度の時間変化

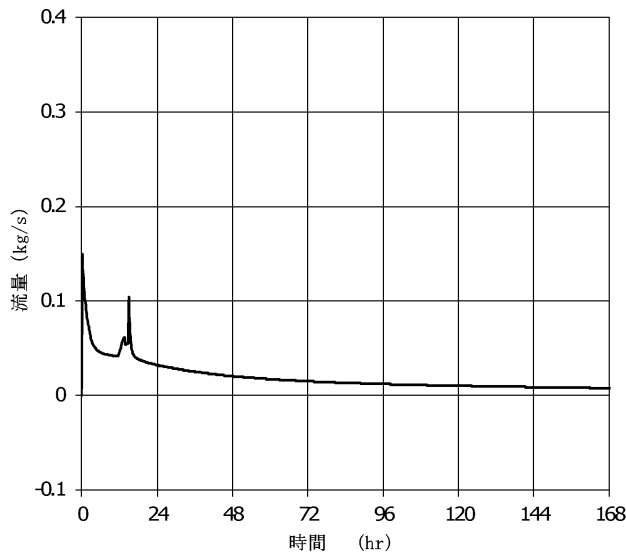


図 2.2.1.2-4 原子炉建物原子炉棟 4 階からのガス流出量の時間変化

(3) P A R 設置箇所

炉心の著しい損傷が発生し、格納容器内に水素が蓄積した状態では、格納容器のフランジ部等を通じて水素が原子炉建物原子炉棟内に漏えいする可能性がある。原子炉建物原子炉棟内に漏えいした水素は、比重の関係で原子炉建物原子炉棟 4 階まで上昇し、原子炉建物原子炉棟 4 階に滞留することが予想される。

P A R は、水素が最も蓄積されると想定される原子炉建物原子炉棟 4 階に設置する。P A R 設置箇所の考え方の詳細は参考資料 6 に示す。

設置箇所の平面図を図 2.2.1.2-5、断面図を図 2.2.1.2-6 に示す。

なお、P A R の動作状況を監視することができるよう P A R に温度計を設置する（添付 11）。

【考慮事項】

- ・耐震性確保のため、支持構造物に十分な強度をもって固定できる箇所に設置する。
- ・十分に性能を発揮できるよう、P A R の給排気に十分な空間が確保できる箇所に設置する。
- ・結合反応時に発生する熱の影響により、P A R の周囲に安全機能を損なう設備がないことを確認する。
- ・定期検査等において、通行や点検作業の支障とならない箇所に設置する。

(4) 設置箇所・個数の決定

設置個数は(3)設置箇所の方針に基づき、2.2.2の原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析により、PARの設置位置を模擬し、原子炉建物原子炉棟の水素濃度が可燃限界未満となること、水素濃度に偏りがないことを確認し18個とする。

図2.2.1.1-1に示す「③PAR必要個数の算出及び④設置場所の選定」は、「2.2.1.2(2) PAR設置個数」に示すとおり、原子炉建物原子炉棟4階が可燃限界未満になるPAR必要個数を決定し、「2.2.1.2(3) PAR設置箇所」に示すとおり、PARによる気流の攪拌効果及び施工性を踏まえて配置を決定する。しかしながら、この時点では原子炉建物原子炉棟4階を1点のモデルとした簡易評価結果による設置個数及び配置の決定であるため、仮決定の位置付けとなる。この仮決定結果をインプット条件とし、流動解析により「空間水素濃度に偏りはないか」及び「空間水素濃度は可燃限界未満を維持できるか」を確認し、「③PAR必要個数の算出及び④設置場所の選定」の仮決定結果が妥当であるかを示し、最終決定する設計フローとする。設置位置の妥当性については、「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」でPARの設置位置をモデル化した解析に示す。

これらの検討の結果、PARは、図2.2.1.2-5及び図2.2.1.2-6に示すとおりに設置する。

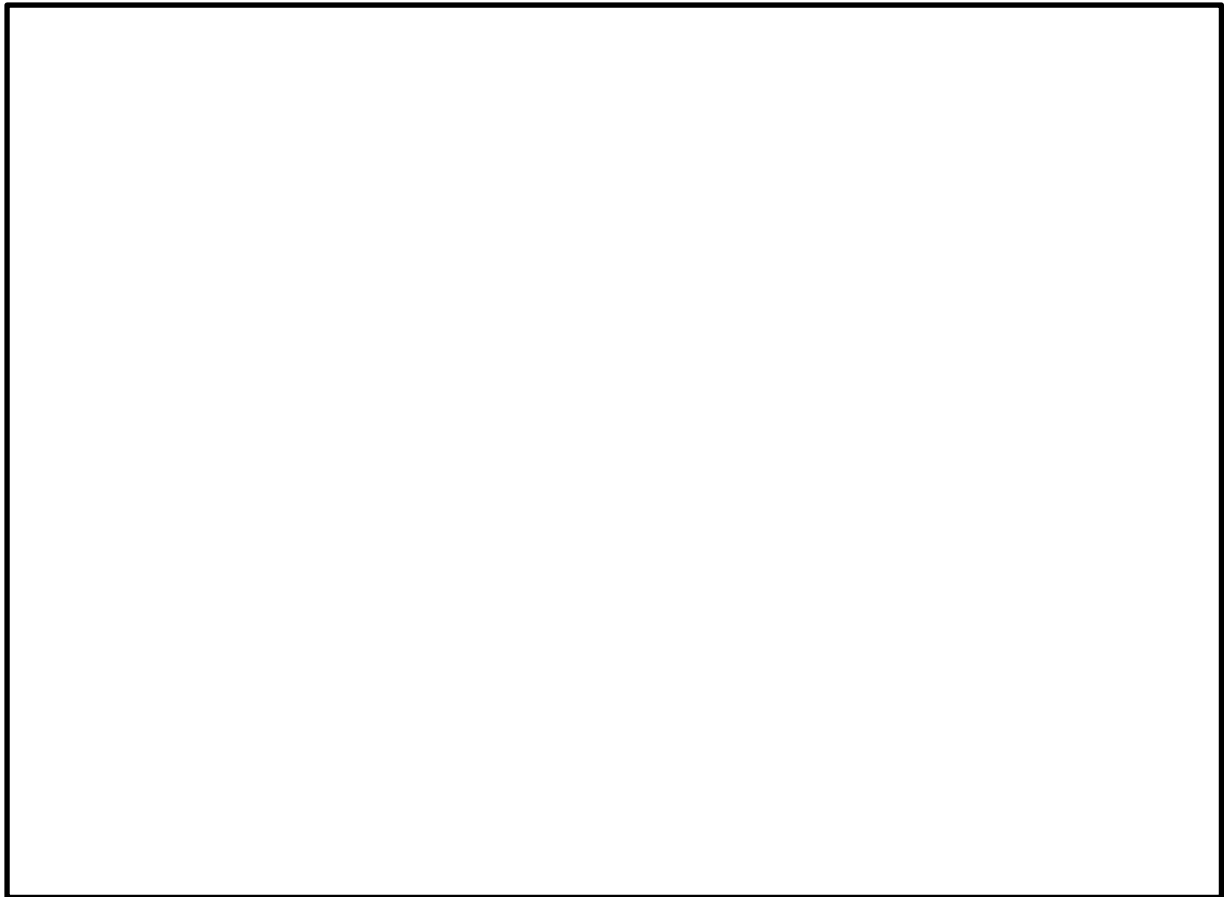


図 2.2.1.2-5 設置箇所 平面図

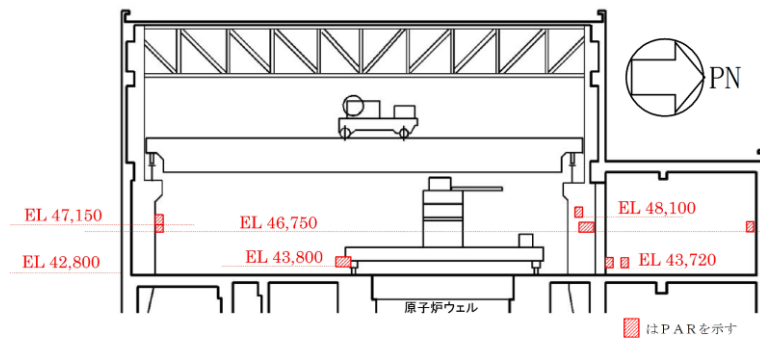


図 2.2.1.2-6 設置箇所 断面図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

浜岡原子力発電所 4 / 5 号機で発生した O G 系トラブルについて

浜岡原子力発電所 4 号機及び 5 号機で気体廃棄物処理系（以下「O G 系」という。）の水素濃度が上昇する事象が発生したが、推定原因として、製造段階での触媒担体（アルミナ）のベーマイト化及びシロキサンが存在が挙げられており、2 つの要因が重畳した結果、O G 系の排ガス再結合器触媒の性能低下に至ったものと報告されている。これに対し、P A R の触媒は、製造段階でアルミナのベーマイト化が大きく進行する可能性が無いことを確認した。このことから、浜岡原子力発電所 4 号機、5 号機 O G 系排ガス再結合器で発生したような、触媒の水素処理性能が大きく低下するような事象が発生することは無いと考えられる。

以下に、浜岡原子力発電所で起きた事象概要、推定原因、P A R 触媒への対応の必要性について示す。

1. 浜岡原子力発電所 O G 系水素濃度上昇事象の概要

(1) 浜岡原子力発電所 5 号機の事象（平成 20 年 11 月 5 日発生）

調整運転開始後に O G 系で系統内の水素濃度が上昇する事象が確認され、同系統内の希ガスホールドアップ塔 A 塔にて温度上昇が確認されたため、原子炉を手動停止した。本事象の原因調査と対策検討を実施し、調整運転を再開し、出力を一定保持していたところ、O G 系で水素濃度の上昇を示す警報（設定値 2 vol%）が点灯し、その後も水素濃度が上昇傾向を示したことから、原子炉を手動停止した。

(2) 浜岡原子力発電所 4 号機の事象（平成 21 年 5 月 5 日発生）

調整運転開始後、出力を一定保持していたところ、O G 系で系統内の水素濃度の上昇を示す警報（設定値 2 vol%）が点灯し、水素濃度が可燃限界（4 vol%）を超えたため、原子炉を手動停止した。

2. 浜岡原子力発電所 O G 系水素濃度上昇事象の推定原因

水素濃度上昇の原因となる排ガス再結合器触媒の性能低下に関して、以下の二つの要因が確認された。

(1) 触媒の特性に起因する性能低下

排ガス再結合器触媒の概略製造工程を図 1^{*}に示す。平成 8 年以降、触媒の製造工程において脱塩処理のために行う温水洗浄の時間を長くしたことにより、触媒のアルミナ（酸化アルミニウム： Al_2O_3 ）基材の結晶形態に変化が生じ、ベーマイト（水和アルミニウム酸化物： $AlO(OH)$ 又は $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ）となる割合が多くなっているという特性が認められた。また、ベーマイトが多い触媒は、プラントの運転に伴い、アルミナ表面に添着された白金の活性表面積が減少することを確認した（図 2^{*}）。

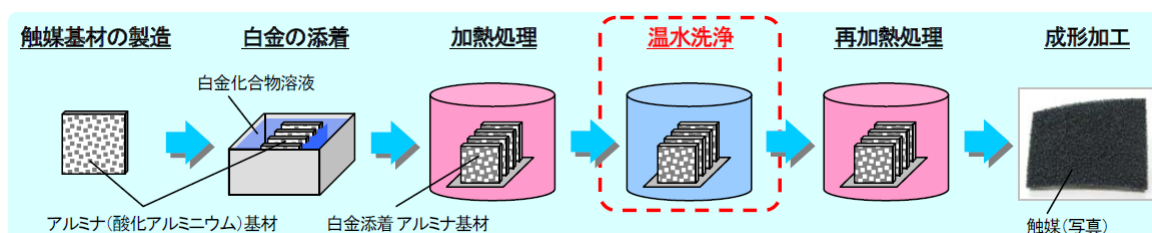


図1 触媒の製造工程（概要）

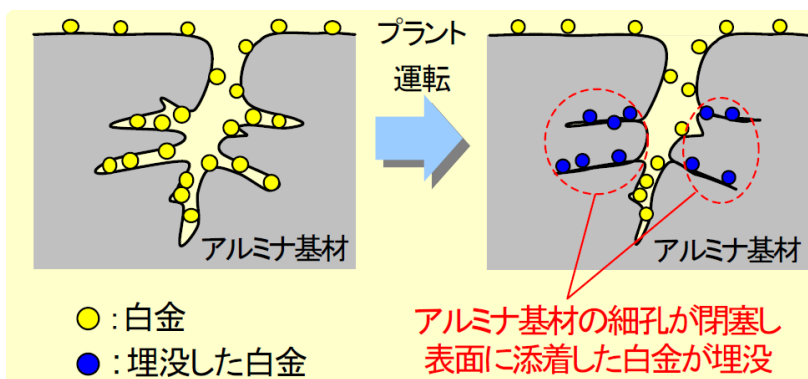


図2 ベーマイトが多い触媒における白金の活性表面積の減少（イメージ図）

(2) 触媒性能阻害物質による性能低下

実機から取り出した触媒の成分を分析した結果、触媒の性能を低下させるシロキサン（有機ケイ素化合物）が触媒の表面に存在していることが認められた。シロキサンの使用状況を調査した結果、4号機においては平成18年以降に、5号機では平成19年以降に低圧タービン等で使い始めた液状パッキンに含まれており、シロキサンが液状パッキンから揮発することで排ガス再結合物に流入する可能性があることが確認された。

また、液状パッキンを用いた再結合物の模擬試験から、温水洗浄時間の長い触媒ほどシロキサンによる触媒の性能低下の影響が大きいことや、触媒の温度が上昇するとシロキサン重合物が酸化し、膜が切れ、白金の活性表面積が増加するため、触媒の性能が回復することも確認された（図3*）。

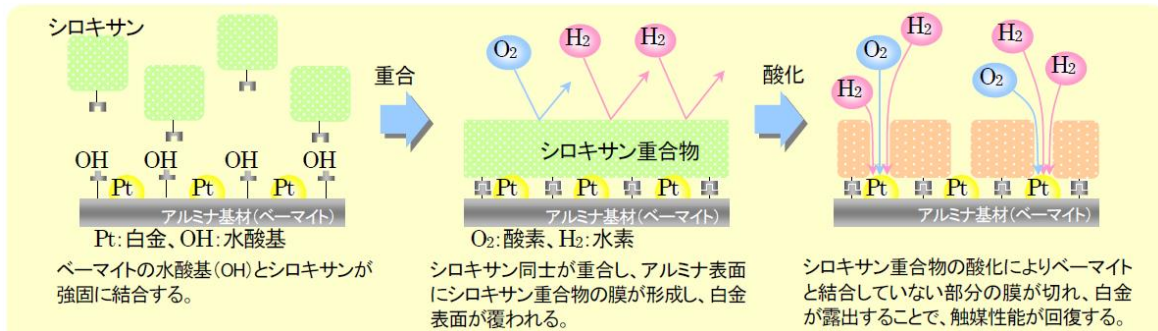


図3 シロキサンによる触媒表面の変化状況 (イメージ)

※図1～3は参考文献1より引用

3. PAR触媒への対応の必要性について

浜岡原子力発電所4号機, 5号機OG系排ガス再結合器の触媒の水素処理性能が大きく低下した事象は, アルミナのペーマイト化及びシロキサンの存在という2つの原因が重畳した結果発生した。このことから, 2つの原因のうちどちらか1つの原因が該当しなければ, 同様の事象は起きないと考えられ, 以下の確認結果から, 浜岡原子力発電所4号機, 5号機OG系排ガス再結合器で発生したような, 触媒の水素処理性能が大きく低下するような事象が発生することは無いと考えられる。

(1) 触媒の比較

浜岡原子力発電所4号機, 5号機で使用されているOG系排ガス再結合器の触媒とPARの触媒の比較を表1に示す。触媒の種類は, セラミック触媒と金属触媒で異なっており, 触媒貴金属も異なる。OG系排ガス再結合器で使用されている触媒は, ニッケルクロム合金を基材としてその上にアルミナを添着させた板状の担体を用いているのに対し, PARの触媒は, 球状アルミナを担体として使用しており, 形状も異なる。ただし, 触媒の担体であるアルミナについては, 両者ともに γ アルミナを使用している。

表1 PARとOG系ガス再結合器触媒の比較

項目	PAR	OG系排ガス再結合器
種類	セラミック触媒	金属触媒
触媒貴金属	パラジウム	白金
担体	γ アルミナ	γ アルミナ (ペーマイト含む)
製造時の温水洗浄の有無	無し	有り

(2) 触媒の製造プロセスの比較

浜岡原子力発電所OG系の水素濃度上昇事象に対する原因調査において、触媒の特性に起因する性能低下として、以下の知見（アルミナのベーマイト化）が得られている。

- ・ベーマイトを多く含む触媒については、使用履歴や触媒毒であるシロキサンの影響により、触媒性能が低下しやすい
- ・ベーマイトが多く含まれた要因は、触媒の製造プロセスにおいて、温水洗浄の時間を長くしていた

浜岡原子力発電所OG系排ガス再結合器の触媒とPARの触媒の製造プロセスの比較を表2に示す。OG系排ガス再結合器の触媒は、製造プロセスにおいて、応力腐食割れ対策として脱塩素処理のため温水洗浄 [] を施しており、この温水洗浄の時間を長くしたために、ベーマイトに変化する量が増えたと推定されている。通常の触媒では、応力腐食割れ対策を考慮する必要がないことから温水洗浄の工程は必要なく、PARの触媒に関しても、温水洗浄の工程は無い。

このため、製造段階において、PARの触媒担体（アルミナ）のベーマイト化が大きく進行する可能性は無い。

表2 触媒の製造プロセスの比較

触媒	製造プロセス
OG系 排ガス 再結合器	<p>触媒基材の製造 白金の添着 白金化合物溶液 加熱処理 温水洗浄 再加熱処理 成形加工 アルミナ(酸化アルミニウム)基材 白金添着 アルミナ基材(以下同じ) 触媒(写真)</p>
PAR	<p>γアルミナ担体 Pdの添着 加熱処理 コーティング Pd化合物溶液 (温水洗浄なし) γアルミナ(酸化アルミニウム)担体 触媒(写真)</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) 触媒の成分分析

上記(2)に記載した理由から、P A Rの触媒について、アルミナのベーマイト化が大きく進行する可能性は無いが、過去に、N I S社製P A Rの触媒に対してX線回折(X R D)分析、熱重量分析を実施し、成分分析により触媒中のベーマイトの有無について確認を行っている。成分分析の結果、P A Rの触媒に有意なベーマイト成分は含まれておらず、アルミナのベーマイト化は進行していなかった。

(4) シロキサンの影響について

浜岡原子力発電所4号機、5号機O G系排ガス再結合器の触媒の水素処理性能が大きく低下した事象の原因の一つとして、有機シリコン系シール材に含まれるシロキサン(有機ケイ素化合物)の存在が報告されている。成分分析の結果より、P A Rの触媒については、ベーマイトが検出されなかったため、アルミナのベーマイト化及びシロキサンの存在という2つの原因が重畳せず、同様の事象が発生することは無いと考えられる。また、過去にシロキサンの触媒性能への影響についても試験を行っており、密閉空間内でP A R触媒をシロキサン試薬に曝露し、曝露後の再結合反応による温度上昇時間を確認することにより、水素処理性能への影響を確認している。試験の結果、シロキサン曝露有無による水素処理性能に有意な差はなかった。このことからP A R触媒はシロキサンによる被毒の影響を受けないことが確認されている。

P A R の最高使用温度について

1. はじめに

P A R の最高使用温度は 300℃に設定している。以下に、その考え方について示す。

2. 最高使用温度の考え方

最高使用温度は、設置許可基準規則において次のように定義されている。

設置許可基準規則第二条第 2 項第三十九号

「最高使用温度」とは、対象とする機器、支持構造物又は炉心支持構造物がその主たる機能を果たすべき運転状態において生ずる最高の温度以上の温度であって、設計上定めるものをいう。

設置許可基準規則第 53 条（原子炉建屋等の水素爆発防止対策）の基準適合のための設計方針として、原子炉建物原子炉棟 4 階に P A R を設置する。当社としては、原子炉建物原子炉棟の水素爆発を防止するために、原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度を可燃限界未満に抑えることを設計方針としており、水素濃度を 4 vol%以下に抑制することが、P A R の主たる機能である。

よって、P A R は、水素濃度によって温度が異なることが判っているため、主たる機能を果たすべき運転状態の最大水素濃度 4 vol%における温度を最高使用温度と定義する。

3. 最高使用温度 300℃の設定理由

P A R の設置位置は原子炉建物原子炉棟 4 階で水素再結合反応により発熱するため、雰囲気水素濃度の上昇により温度も上昇する。P A R の設置目的は原子炉建物原子炉棟の水素爆発防止であるため、水素ガスの可燃限界濃度である 4 vol%時における P A R の温度 300℃を最高使用温度とする。

最高使用温度 300℃の設定については、Sandia National Laboratory で行われた試験（S N L 試験）及び、OECD/NEA の THAI Project で行われた試験（T H A I 試験）を参照している。

3.1 SNL試験

(1) 試験概要

NIS社製PAR(PAR-22)を用いたSNL試験の試験装置概要を図1, 試験に用いたPARを図2に示す。

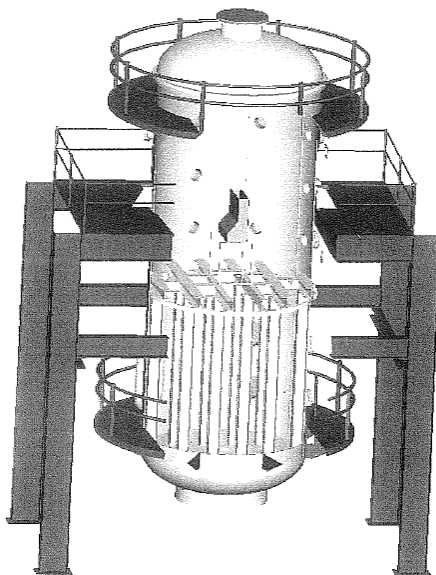


図1 SNL試験 試験装置概要



図2 SNL試験 試験用PAR概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 試験結果と最高使用温度 300℃の妥当性

試験結果を図3に示す。本試験は試験装置の水素濃度とPAR出入口の温度差 ΔT の関係を示している。この結果を参照すると、水素濃度4 vol%のときのPAR出入口の温度差は174℃となる。ここで周囲温度を重大事故時の原子炉建物原子炉棟4階の環境を踏まえ、保守的に100℃とすれば排ガスの温度は274℃となり、最高使用温度の300℃を下回る結果となる。



図3 SNLで行われた試験結果（PAR温度と水素濃度の関係）

3.2 THAI試験

(1) 試験概要

THAI試験はOECD/NEAのTHAI Projectにて、各メーカーのPARの性能の確認のため実施された試験である。試験装置及び試験体の概要を図4に示す。



図4 試験装置及び試験体の概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

- (2) 試験結果と最高使用温度 300℃の妥当性
試験体の温度測定点を図5に示す。



図5 試験体の温度計測点

図5に示すとおり，THAI試験ではPAR各部の温度を測定しており，PARの最高使用温度を設定するうえでは，PAR内部を通過するガス温度のうち，触媒の反応熱が加味される触媒通過後の排気温度を考慮する。

試験では，注入口から水素を供給して試験装置内の水素濃度を上昇させた後，水素供給を停止して試験装置内の水素濃度を低下させ，PAR各部の温度の時間変化を確認している。図6はPAR入口水素濃度と各部温度の時間変化を示したもので，図7は各部の温度履歴をPAR入口水素濃度に対して図示したものである。

試験開始から115～130分の水素濃度が一定の時は，発熱量は変わらず温度は変化しない。水素濃度上昇時は反応熱が増加するが，各部の熱容量等の影響により温度上昇は遅れる。また，水素濃度低下時は反応熱が低下するが，各部の放熱速度等の影響により温度低下は遅れる傾向にある。

図6及び図7より，ガス温度の中でも高い温度で推移している測定点 でも，水素濃度4 vol%の温度は水素濃度低下時においても300℃を下回っていることが分かる。

したがって，島根原子力発電所2号炉に設置するPARの最高使用温度を300℃とすることは妥当と考えられる。

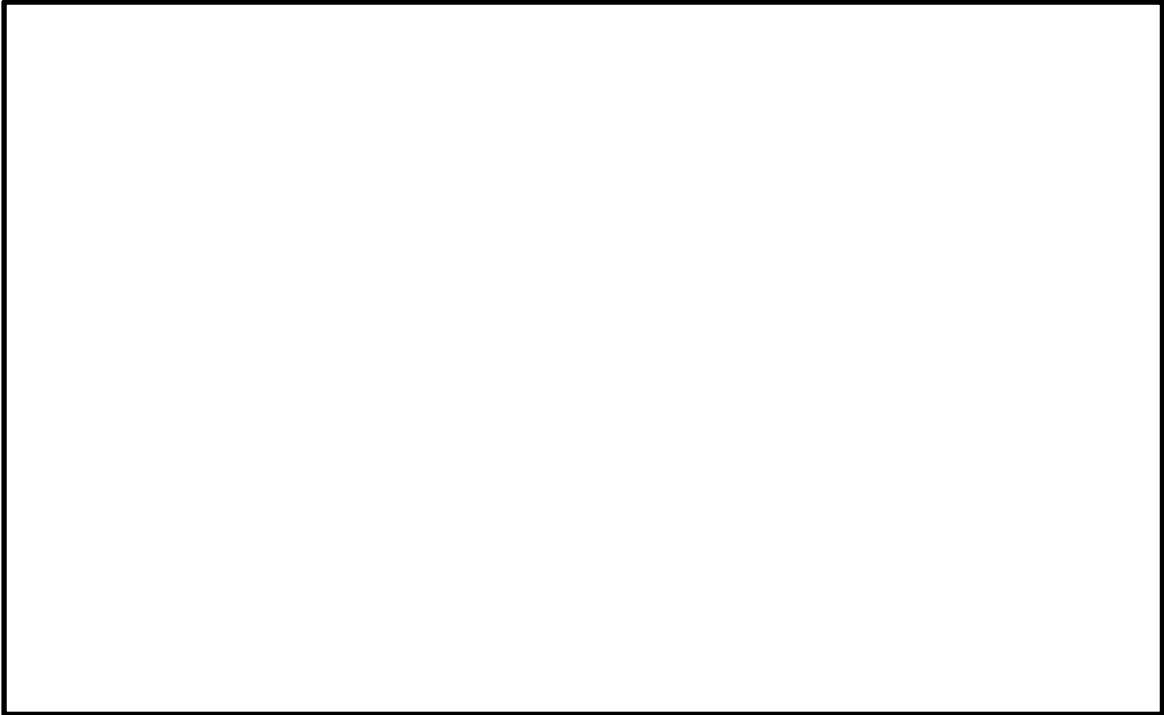


図6 PAR温度及び入口水素濃度の時間変化

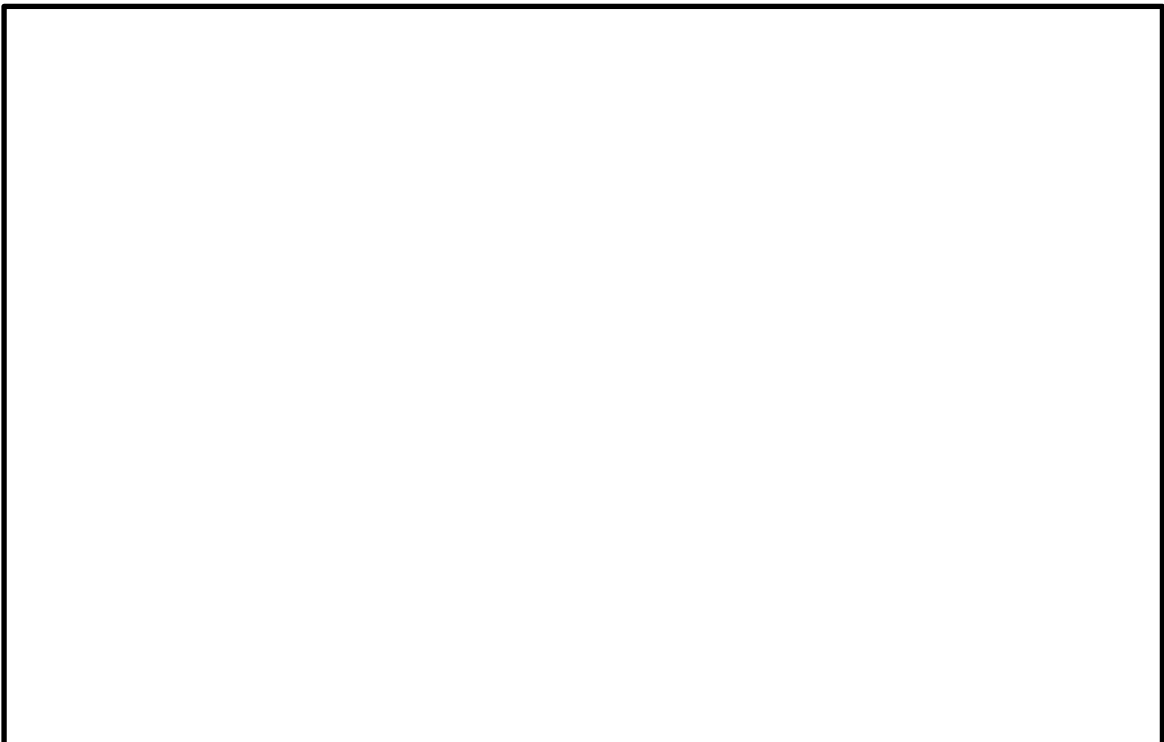


図7 PAR温度及び入口水素濃度の関係

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

P A R 製作誤差による処理能力への影響

P A Rは水素ガスと酸素ガスが触媒効果により再結合して水素処理する装置であるため、水素処理性能は、内部を通過する水素量（流量）と触媒自体の性能及びガス流れと触媒の接触面積によって決まってくる。P A Rの水素処理性能は、開発段階から様々な試験によって確認されており、現在のP A Rの製造メーカーでは開発時から以下に示す製造上の確認項目を原則として変更していない。したがって、表1に示す仕様や製造方法が共通である開発段階からの様々な試験結果が利用可能であり、様々な試験結果を踏まえて決定された性能評価式に基づく水素処理性能は確保できると考える。

表1 P A R 製造上の確認項目

性能因子	確認項目	確認方法
触媒性能	触媒製造時の品質管理 触媒の劣化	<ul style="list-style-type: none"> 封入される触媒の粒径，触媒表面積の確認，材料成分の確認 検査装置による水素処理機能検査
触媒の接触面積	触媒カートリッジの寸法，配置	<ul style="list-style-type: none"> カートリッジ寸法，配置が設計どおりであることを確認
	触媒に接触する実効的な流路長さ	<ul style="list-style-type: none"> 外観上，触媒粒がカートリッジ満杯であることを確認 封入される触媒重量の確認
内部を通過するガス流量	ハウジング形状	<ul style="list-style-type: none"> ハウジング形状が設計どおりであることを確認

※：P A Rの開発時から，触媒カートリッジの間隔は変更していない。

表1で示すカートリッジ寸法，配置及びハウジング形状については，設計図で指定された製作誤差範囲であることを確認することにより担保する。触媒単体及び触媒に接触する実効的な流路長さについては以下の品質管理を行うことで性能を担保する。

表2 P A R 製造上の管理値

	対象	項目	管理値
1	触媒単体	触媒直径	
		触媒表面積	
		材料確認	
2	触媒カートリッジ	外観	
		総触媒重量（1枚）	
		触媒の反応性	

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

よって、上記に示す品質管理を行うことで、製造誤差を考慮しても、PAR設計仕様の性能に影響を与えないことを確認する。

触媒については、製造メーカーが表2で示す品質管理を行い、これを事業者が記録確認することにより性能を担保している。品質管理については、設計上必要な触媒量が適切に充填されていることを触媒単体の直径、表面積、材料成分で確認するとともに、触媒カートリッジ1枚の総触媒重量を確認することで管理を行う。

また、触媒量が適切に充填されていることが確認できても、その触媒の製作環境、保管環境により、触媒の酸化（パラジウムの酸化）による機能低下、触媒被毒による機能低下等で触媒の活性が損なわれる可能性があるため、触媒活性を確認するために触媒カートリッジを抜き取りで、触媒製造1ロット分につき1枚を、専用試験装置にかけて水素ガスと酸素ガスの再結合反応をさせたときの温度上昇を確認し、触媒活性を確認する品質管理を行う。専用試験装置は添付4の図1及び図2で示すとおりであり、触媒カートリッジに水素ガス（3.0vol%）を流し、実際に再結合反応をさせたときの温度が「20分で10℃上昇すること」又は「30分で20℃上昇すること」を判定基準として触媒活性の有無を確認できる試験であり、仮に触媒活性が著しく低下している場合は $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ の発熱反応が生じない、あるいは発熱反応が低下するため判定基準を満足できない結果となる。よって、本試験を工場製作の最終段階で実施することにより、触媒活性の健全性を確認することができる。

そして、工場出荷後に事業者として触媒活性の健全性を確認するために、PAR使用開始前に触媒活性の確認を、添付4の図1、図2に示す専用試験装置にて抜き取りで実施する。触媒カートリッジを検査装置内にセット後、水素ガス（1.3vol%）を含む試験ガスを供給し、再結合反応による温度上昇率（NIS社による推奨判定値：10℃/20分もしくは20℃/30分）を計測することで、性能低下の有無を確認する。なお、工場における性能試験については国外で実施されるため水素濃度3.0vol%にて試験を行うが、PAR使用開始前の触媒活性確認は国内で行うため、国内の一般的な水素ボンベ（水素濃度1.3vol%）を用いて試験を行う。国外の工場試験よりも水素濃度が低い条件であり、水素処理能力が低い（触媒温度上昇が低い）状態で試験を行うことになるが、判定基準は保守的に水素濃度3.0vol%時と同じ判定値を用い性能管理を行う。

また、使用開始後について、PARを設置する原子炉建物原子炉棟4階内の雰囲気は空気であり、触媒を化学変化させるような強い酸化剤や酸、塩のようなその他の化学的薬剤もなく、温度は室温であり、PARに機械的荷重をかけること

もないので、雰囲気環境は触媒にとって良好であり、雰囲気環境による触媒活性の低下は無いものと考えている。しかしながら、事業者として触媒活性の低下がないことを確認するために、定期的に添付4の図1，図2に示す専用試験装置により抜き取りで触媒活性の健全性を確認する運用とする。測定方法はPAR使用開始前の試験と同様に、触媒カートリッジを検査装置内にセット後、水素ガス（1.3vol%）を含む試験ガスを供給し、再結合反応による温度上昇率（NIS社による推奨判定値：10℃/20分もしくは20℃/30分）を計測することで、性能低下の有無を確認する。

※触媒性能確認時の抜き取り枚数に対する考え方について

触媒カートリッジは、触媒粒の製造とカートリッジへの充填という工程にて製造されており、工場における触媒性能試験は、触媒粒1ロット分につき1枚のカートリッジを抜き取り性能確認することで品質確認可能である。根拠は以下に示すとおりである。触媒粒は

工程で製造され、触媒粒が均一的に製造されることを触媒製造メーカーで保証していることから、触媒製造メーカーによる検査、証明書で品質確認された触媒粒は、同じロットで製造されたものについて大きな性能のバラつきがないと考えられる。そして、触媒カートリッジを製造する際は、同じロットで製造された触媒粒のみを用いてカートリッジに充填していくことから、同一ロットの触媒で製造された触媒カートリッジ性能は同様であると考えられる。そのため、触媒性能試験は製造時の触媒1ロット分毎につき1枚の触媒カートリッジを抜き取り確認することで十分である。

なお、PAR使用開始前の試験及び使用開始後の試験の抜き取り数については、検査要領を定める際に適切に設定する。

P A R の検査・点検について

設置段階及び供用開始以降，以下に示す項目を確認することにより P A R 性能の維持管理を行うことが可能である。

1. P A R の性能確保に必要な確認項目

P A R の水素処理性能は，内部を通過するガス流量と触媒自体の性能，及びガス流れと触媒の接触面積によって決まってくるため，これらに影響を与える各パラメータについて，検査・点検時に確認することで P A R 性能を維持管理できると考える。表 1 に P A R の性能確保に必要な確認項目と確認方法を示す。

表 1 P A R の性能確保に必要な確認項目

性能因子	確認項目	確認方法
触媒性能	触媒製造時の品質管理 触媒の劣化	<ul style="list-style-type: none"> ・封入される触媒の粒径，触媒表面積の確認，材料成分の確認 ・検査装置による水素処理機能検査
触媒の 接触面積	触媒カートリッジの寸法， 配置	<ul style="list-style-type: none"> ・カートリッジ寸法，配置が設計どおりであることを確認
	触媒に接触する実効的な 流路長さ	<ul style="list-style-type: none"> ・外観上，触媒粒がカートリッジ満杯であることを確認 ・封入される触媒重量の確認
内部を通過する ガス流量	ハウジング形状	<ul style="list-style-type: none"> ・ハウジング形状が設計どおりであることを確認

2. 水素処理機能検査

水素処理機能検査用の検査装置の外観を図 1，系統概略図を図 2 に示す。触媒カートリッジを検査装置内にセット後，水素ガスを含む試験ガスを流量 1,500ℓ/h で供給し，再結合反応による温度上昇率（N I S 社による推奨判定値：10℃/20 分もしくは 20℃/30 分）を計測することで，性能低下の有無を確認する。この判定値は，P A R 製造メーカーの既往の試験，経験を踏まえて，触媒に要求される活性を有すると判断できる基準として設定したものである。このように触媒活性を有することを確認し，併せてハウジング形状が設計どおりであることを確認することで，設計で定める水素処理容量が確保できることが確認可能である。

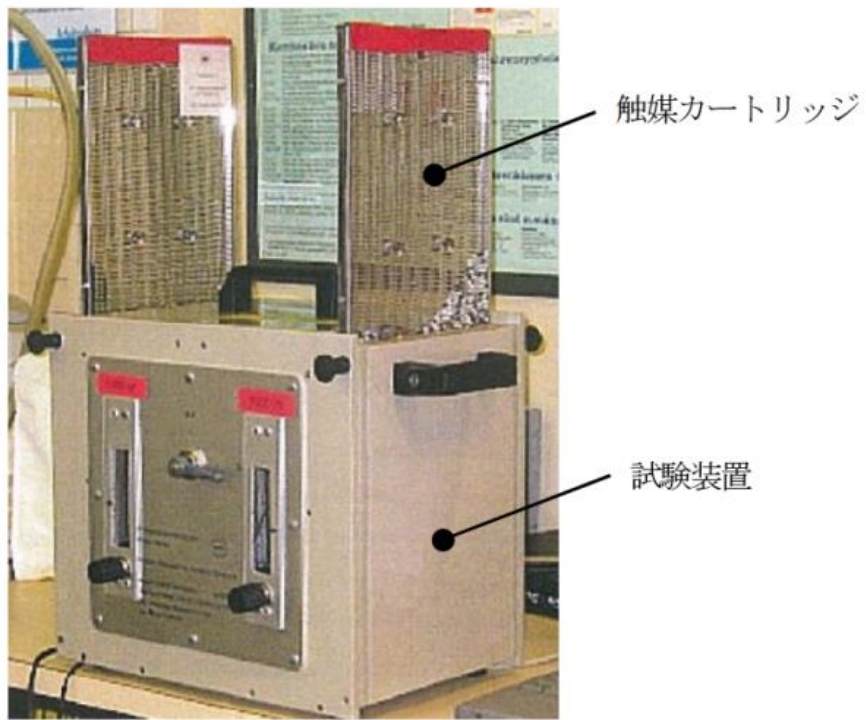


図1 検査装置外観

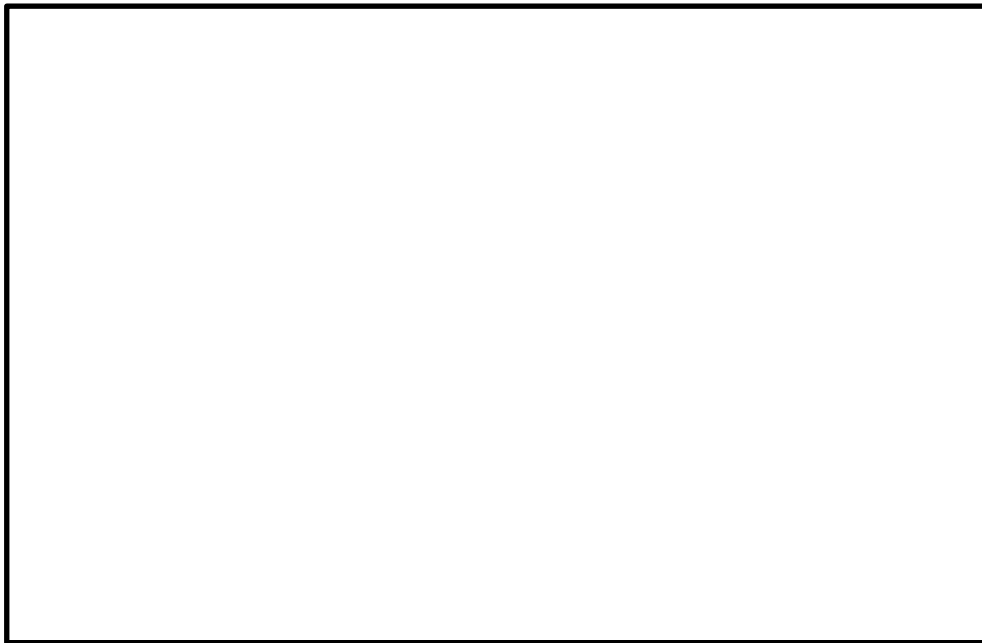


図2 検査装置系統概略図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

水素処理容量に関する説明について

主要仕様である水素処理容量約 0.50kg/h/個（水素濃度 4 vol%，温度 100℃，大気圧）は，P A R 設置環境が大気圧で温度 100℃の条件において，P A R 入口水素濃度が 4 vol%の際に，P A R により水素処理できる能力を示している。よって，その条件における P A R 入口水素濃度と出口水素濃度の差から，P A R 1 個あたり約 0.50kg/h で水素処理できる能力があることを示している。

この値は，N I S 社製 P A R の性能評価式（式 1）に水素濃度 4 vol%，大気圧，温度 100℃及びスケールファクタ 22/88 を入力した際に得られる水素処理容量である。P A R の性能評価式で示すとおり，水素処理容量は水素濃度，圧力，温度により変動するため，主要仕様として記載する容量は，表 1 に示す理由で設定した環境条件における水素処理容量を定格値として定めている。

$$DR = A \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \cdot \frac{P}{T} \cdot 3,600 \cdot SF \quad \dots \dots \dots (式 1)$$

- DR : 再結合効率 (kg/h/個)
- A : 定数
- C_{H₂} : P A R 入口水素濃度 (vol%)
- P : 圧力 (10⁵Pa)
- T : 温度 (K)
- SF : スケールファクタ

表 1 容量算出の条件設定理由

項目	設定値	設定理由
水素濃度 C _{H₂}	4 vol%	水素の可燃限界濃度 4 vol%未満に低減するため 4 vol%とする
圧力 P	大気圧 (101, 325Pa)	重大事故時の原子炉建物原子炉棟の圧力は，原子炉格納容器からのガスの漏えいにより大気圧より僅かに高くなると考えられるが，保守的に大気圧（101, 325Pa）とする。
温度 T	100℃ (373. 15K)	重大事故時の原子炉建物原子炉棟環境を踏まえ，保守的に 100℃（373. 15K）とする。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

なお、式1で示すPARの性能評価式は、EPR I (Electric Power Research Institute) とEDF (Electricite de France) により、Cadrache 研究所のKAL I /H2 施設で行われたKAL I 試験で妥当性が確認されているものである。KAL I 試験の試験装置概要を図1に示しているが、PAR入口水素濃度とPAR出口水素濃度を測定しており、その水素濃度差から水素処理容量 (kg/h/個) を試験データとして得ている。これら試験データをもとに、式1で示すPARの性能評価式の妥当性が確認されている。

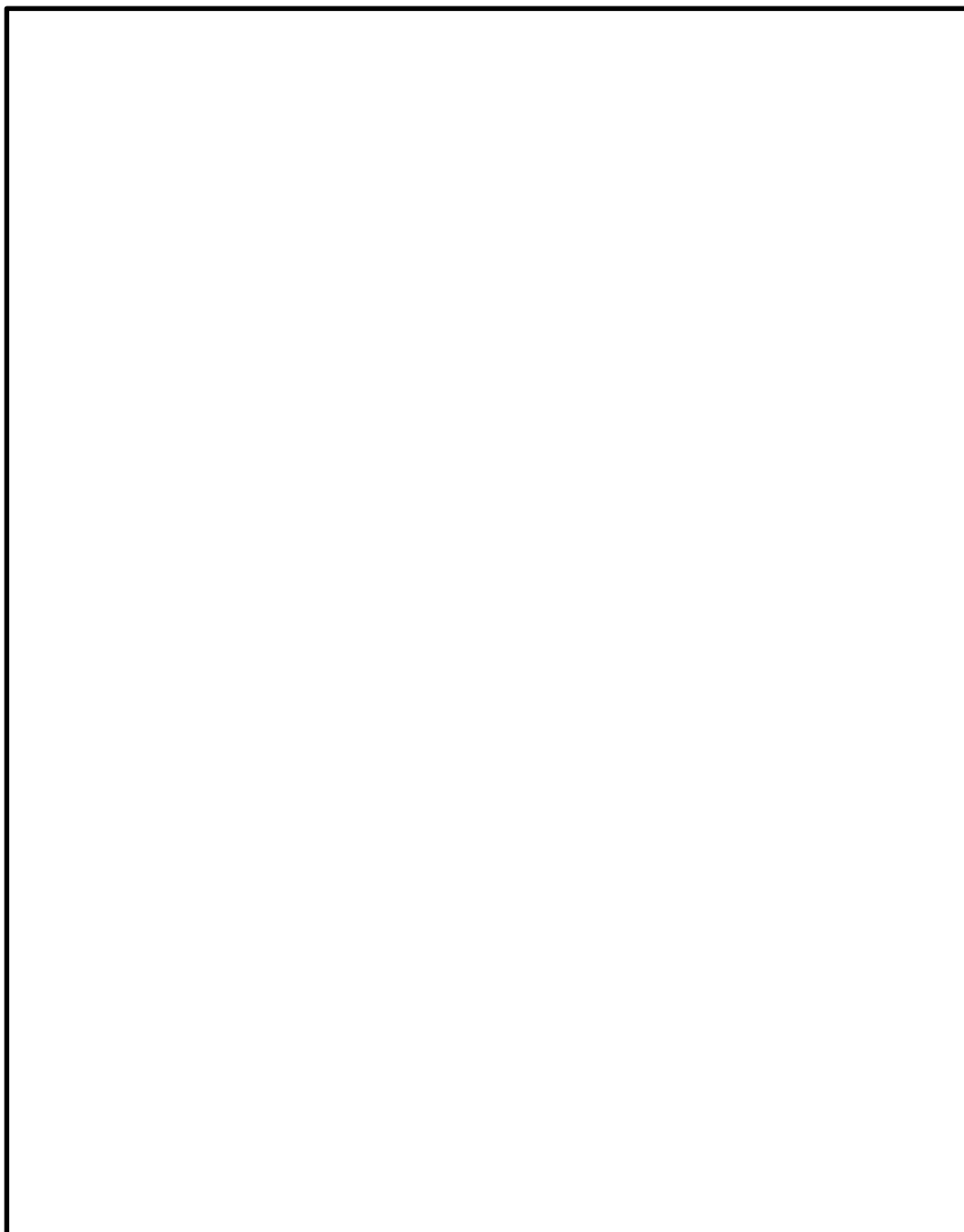


図1 KAL I 試験の計測位置

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

P A R 周辺機器に対する悪影響防止について

P A R は水素処理が始まると触媒温度が上昇するため、P A R の温度上昇が周辺機器に影響を与えないための P A R 設置方針を検討した。P A R の温度上昇が周辺機器に影響を与える評価項目としては「① P A R ハウジングからの熱輻射による熱影響評価」と「② P A R 排気ガスによる熱影響評価」があり、それらの検討結果を以下に示す。

① P A R ハウジングからの熱輻射による熱影響評価

P A R ハウジングが最高使用温度である 300℃ の状態で、ハウジングからの熱輻射による温度と距離の関係を評価した結果を図 1 に示す。

温度は、原子炉建物原子炉棟 4 階の対流熱伝達率により結果が異なる。対流熱伝達率 h は、ユルゲスの式より気流速度 $v \leq 5 \text{ m/s}$ の場合には $h = 5.6 + 4.0v$ で示される。原子炉建物原子炉棟 4 階の気流速度は、P A R が起動する P A R 設計条件（漏えい率：10%/日）のケースにおける最大流速（約 0.35m/s）を踏まえて、 $v = 0 \sim 1.5 \text{ m/s}$ と仮定しユルゲスの式に代入すると、 $h = 5.6 \sim 11.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ となる。したがって対流熱伝達率は $5.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ 及び $11.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ の 2 ケースで評価を行った。

評価の結果から、いずれの対流熱伝達率においても P A R より 1 m 離すことで熱影響は 100℃ 以下となる。

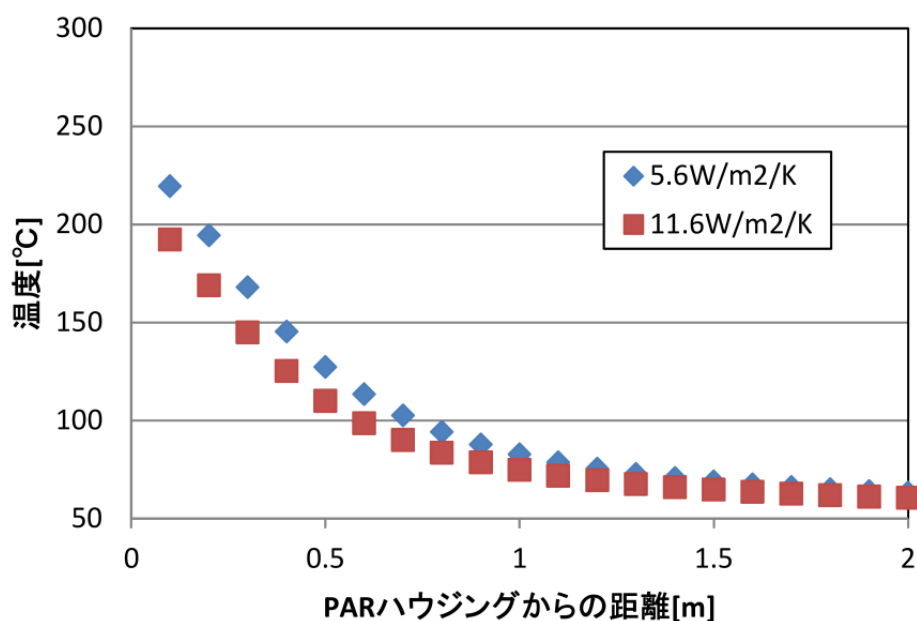


図 1 P A R 輻射熱による温度影響と距離の関係について

② P A R排気ガスによる熱影響評価

P A Rの上方の排気口からは水素処理を行った高温の出口ガスが排気されるが、P A Rハウジング上部にはフードが設置されており、出口ガスの流れ方向を変えていることから、P A R上方に位置する構築物に直接排気の影響を与えることはないため、排気口から数メートル離れば排気による熱影響は十分に小さくなると考えられる。

上記①、②の結果から、P A R配置検討にあたっては以下を考慮することとしている。

< P A R周辺機器への熱影響防止の方針 >

- P A R周辺（排気口方面を除く）に、熱影響により安全機能を損なう設備がないことを熱影響評価結果を踏まえて確認する。
- P A R排気口方面には、高温ガスが流れることから、付近に安全機能を損なう設備がないことを確認する。

以上の方針から、原子炉建物原子炉棟4階に設置する重大事故等対処設備についてはP A Rによる熱的な悪影響がないことを確認する方針としている。水素濃度監視設備については、原子炉建物原子炉棟4階の上部壁面に設置しており、P A R設置位置から10m以上離れているため、P A Rの温度上昇による水素濃度監視機能への影響はない。

2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析

P A Rの効果について、水素濃度解析を実施し、P A R設計条件における原子炉建物原子炉棟の水素濃度が可燃限界未満となることを確認する。

また、有効性評価結果を踏まえた条件における原子炉建物原子炉棟の水素濃度の挙動についても併せて確認する。

(1) 解析コード

汎用熱流動解析コードG O T H I C (Ver. 8.1) を使用する。

(2) 想定漏えい箇所

各解析における想定漏えい箇所を表 2.2.2-1 及び図 2.2.2-1 に示す。P A Rの設計条件では格納容器バウンダリ構成部ハッチ類シール部 8 箇所のうち口径及び許容開口量に対する裕度から漏えいポテンシャルが最も大きいと考えられるドライウェル主フランジから全量漏えいすることを想定する。有効性評価結果を踏まえた条件では当該 8 箇所から分散して水素が漏えいすることを想定する。

漏えい箇所の選定の考え方については参考 1 に示す。

表 2.2.2-1 想定漏えい箇所

フロア	想定漏えい箇所	設計条件	有効性評価結果を踏まえた条件
原子炉建物 原子炉棟 4 階	ドライウェル主フランジ (1 箇所)	○	○
原子炉建物 原子炉棟 2 階	逃がし安全弁搬出ハッチ (1 箇所)		○
原子炉建物 原子炉棟 1 階	機器搬入口 (2 箇所)		○
	所員用エアロック (1 箇所)		○
	制御棒駆動機構搬出ハッチ (1 箇所)		○
原子炉建物 原子炉棟 地下階	サプレッション・チェンバ アクセスハッチ (2 箇所)		○

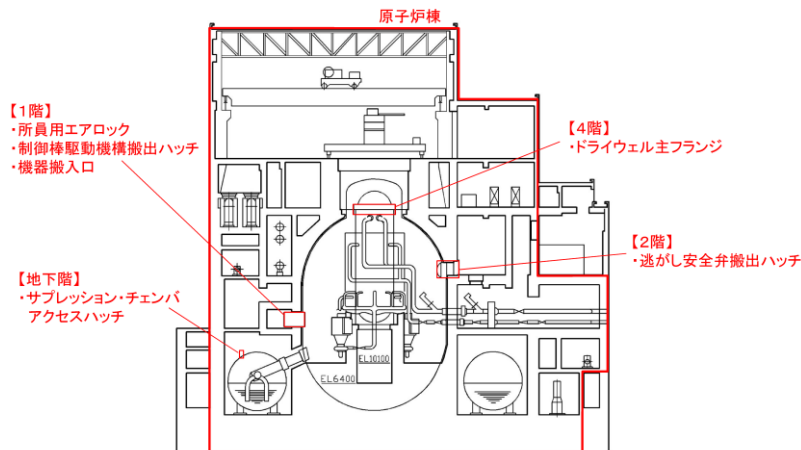


図 2.2.2-1 想定漏えい箇所

(3) 解析モデル

解析モデルを図 2.2.2-2 に示す。各フロア（地下階～4 階）をそれぞれ 1 ボリュームとし、1 階～4 階については大物搬入口の領域を介して、地下階及び 1 階についてはトーラス室上部ハッチの領域を介して連結している。

P A R を設置している原子炉建物原子炉棟 4 階においては、90 個のサブボリュームに分割し、設置位置に該当する各サブボリュームに P A R を模擬したモデルを設定している。（図 2.2.2-3, 2.2.2-4）

大物搬入口及びトーラス室上部ハッチの領域については、各フロアと同様に 1 ボリュームとしており、各フロア間の自然対流を模擬するためいくつかのサブボリュームに分割している。

(4) 原子炉ウエル排気ラインについて

水素濃度解析においては、ドライウエル主フランジから漏えいする水素ガスが原子炉ウエル上部から原子炉建物原子炉棟 4 階に全量放出される条件で解析を実施している。しかし、原子炉ウエル内には原子炉建物原子炉棟 3 階の原子炉棟換気系ダクトに接続している原子炉ウエル排気ラインがあり、当該排気ラインを通じて原子炉ウエル上部以外の箇所に水素ガスが流入する可能性があることから、水素濃度解析への影響について検討を行った。

検討の結果、水素濃度解析に対して、軽微ではあるものの影響があることが判明したため、原子炉ウエル排気ラインを通じて原子炉建物原子炉棟 3 階以下へ水素ガスが流入しないよう防止対策を図ることとする。詳細は参考資料 8 に示す。

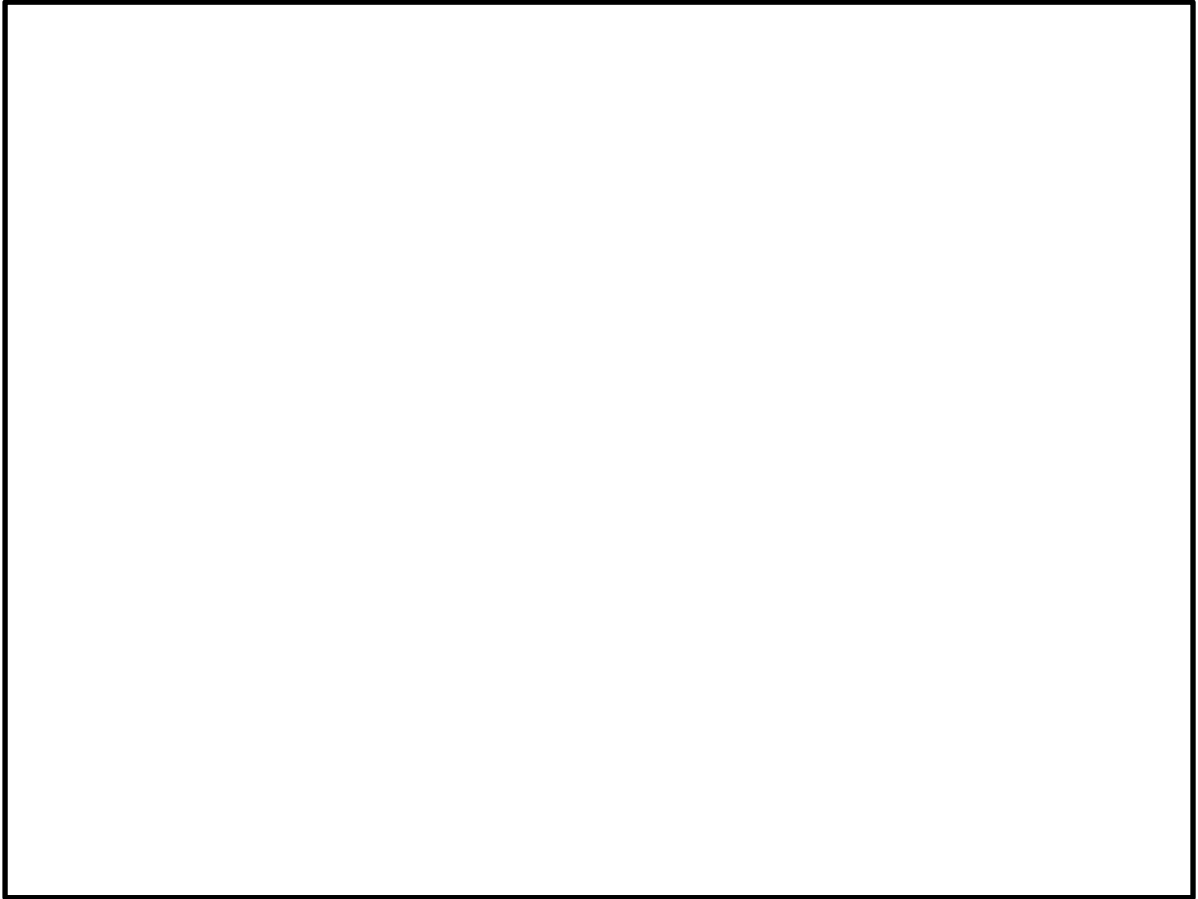


図 2.2.2-2 解析モデル

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

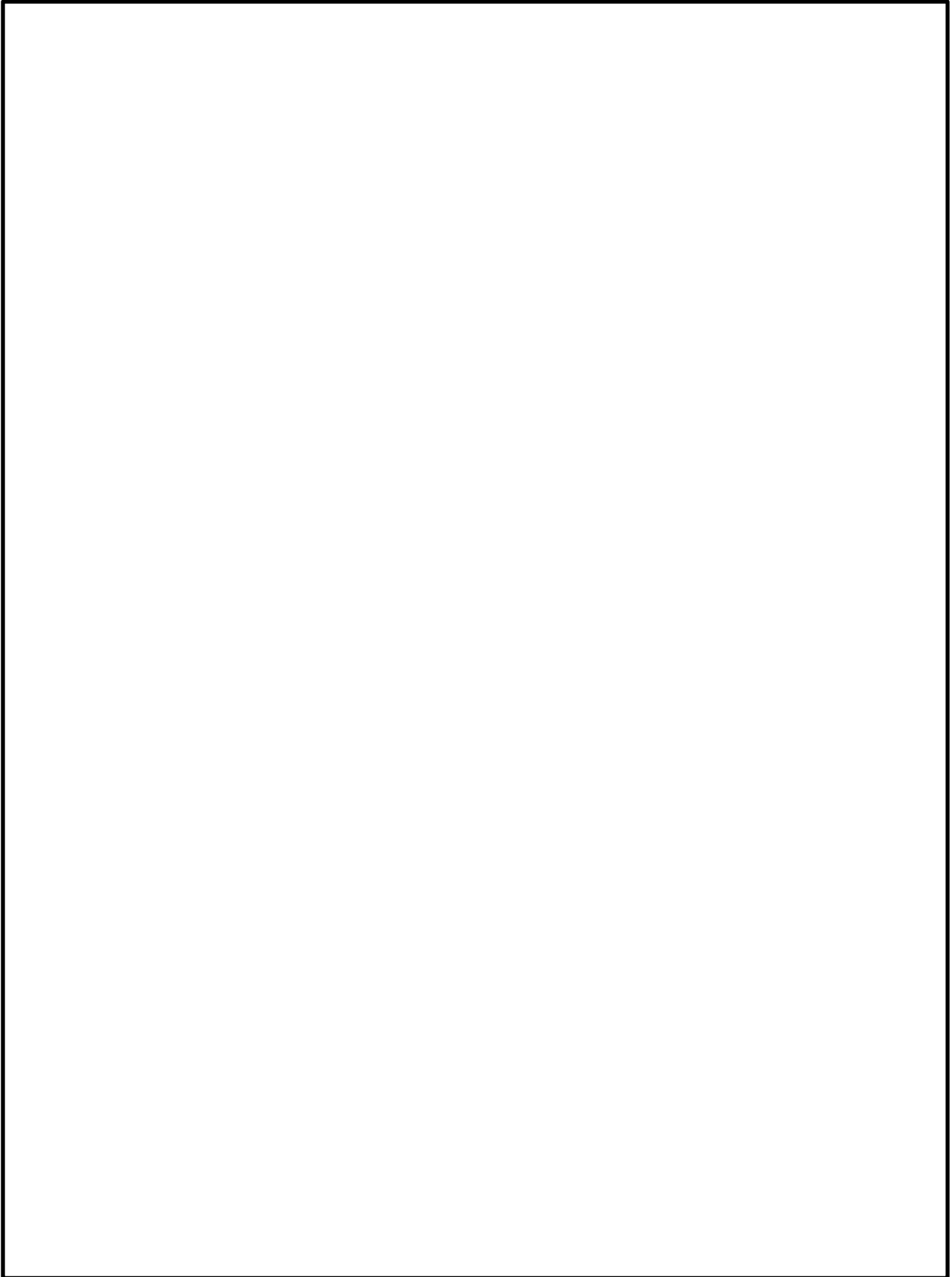


図 2.2.2-3 解析モデル

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

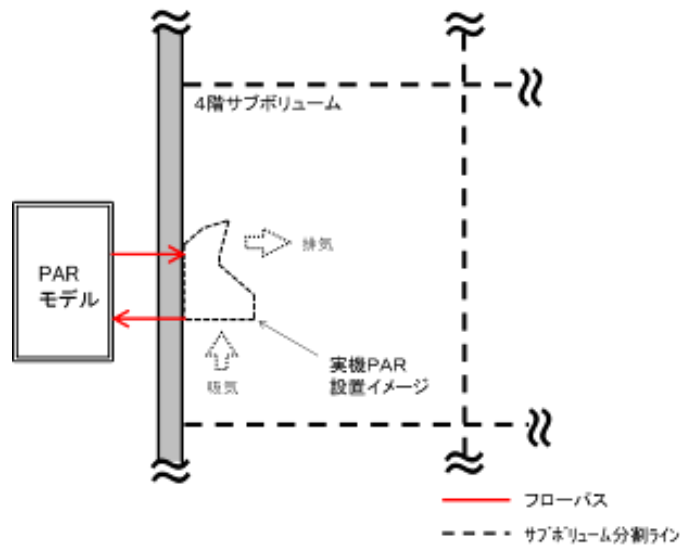


図 2.2.2-4 各サブボリュームとPARモデルの関係

(5) 水素漏えい量の分配条件

表 2.2.2-2 にフロアにおける漏えい量の分配比率を示す。

設計条件では、格納容器漏えい率 10%/日でドライウエル主フランジから全量漏えいするとしているため、全量原子炉建物原子炉棟 4 階に流入する。

有効性評価結果を踏まえた条件では、格納容器からの漏えい量を各想定漏えい箇所の周長比に応じて按分し、そのフロアで合計した値をそのフロアの流入量とする。

表 2.2.2-2 各フロアの漏えい量の比率

フロア	想定漏えい箇所	個数	口径 [mm]	周長 [mm]	漏えい量の分配比率	
					設計条件	有効性評価結果を踏まえた条件
原子炉建物 原子炉棟 4 階	ドライウエル 主フランジ	1			1	
原子炉建物 原子炉棟 2 階	逃がし安全弁 搬出ハッチ	1			0	
原子炉建物 原子炉棟 1 階	機器搬入口	2			0	
	所員用エアロック 制御棒駆動機構 搬出ハッチ	1				
原子炉建物 原子炉棟 地下階	サプレッション・ チェンバ アクセスハッチ	2			0	

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(6) 格納容器漏えい条件

格納容器から原子炉建物原子炉棟への漏えい条件として、「①設計条件（ベント無し）」、「②設計条件（ベント有り）」、「③有効性評価結果を踏まえた条件（過圧・過温，残留熱代替除去系を使用しない場合）」（以下，ベントケースとする。），「④有効性評価結果を踏まえた条件（過圧・過温，残留熱代替除去系を使用する場合）」（以下，RHARケースとする。）のいずれかを用いる。

① 設計条件（ベント無し）

格納容器からの漏えい条件を表 2.2.2-3，表 2.2.2-4 に示す。格納容器ベントは想定せず，また，保守的に漏えい率は 10%/日で一定とする。

表 2.2.2-3 格納容器漏えい条件（設計条件，ベント無し）

圧力 (kPa [gage])	853 (2.0Pd)
温度 (°C)	200
漏えい率 (%/日)	10

表 2.2.2-4 ガス組成（設計条件，ベント無し）

水素濃度 (vol%)	17 ※ ¹	図番号 図 2.2.2-5
窒素濃度 (vol%)	16 ※ ¹	
水蒸気濃度 (vol%)	67 ※ ¹	

※ 1：初期条件を示す。

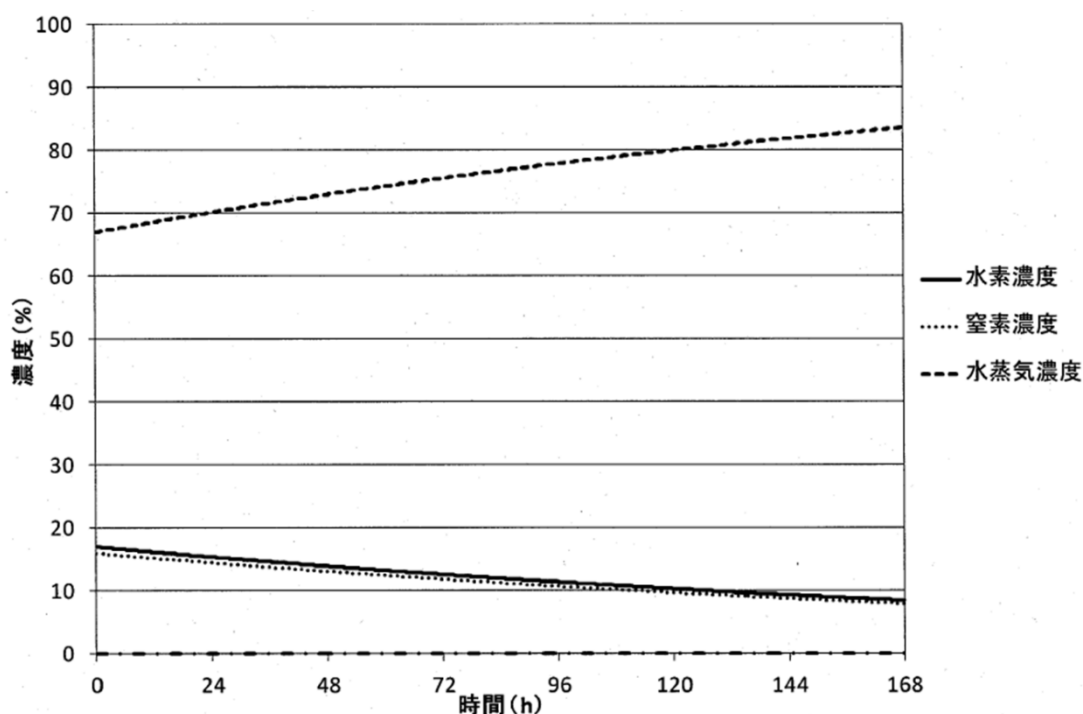


図 2.2.2-5 漏えいガス組成の時間変化（設計条件，ベント無し）

② 設計条件 (ベント有り)

格納容器からの漏えい条件を表 2.2.2-5, 表 2.2.2-6 に示す。本ケースでは、「①設計条件 (ベント無し)」と同じ条件で格納容器ベントの実施を想定する。具体的には、格納容器ベント実施タイミングを、原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度が 2.5% に到達した時刻から、格納容器ベントの想定操作時間である 3 時間が経過した時点とする。また、格納容器ベント実施後の条件については、「③ベントケース」に記載しているベント実施後の条件を設定する。

表 2.2.2-5 格納容器漏えい条件 (設計条件, ベント有り)

事故後経過時間 (hr)	0~38	38~168
圧力 (kPa [gage])	853 (2.0Pd)	85.3 (0.2Pd)
温度 (°C)	200	171
漏えい率 (%/日)	10.0	0.5

表 2.2.2-6 ガス組成 (設計条件, ベント有り)

事故後経過時間 (hr)	0~38	38~168	図番号
水素濃度 (vol%)	17 ※1	0	図 2.2.2-6
窒素濃度 (vol%)	16 ※1	0	
水蒸気濃度 (vol%)	67 ※1	100	

※1 : 初期条件を示す。

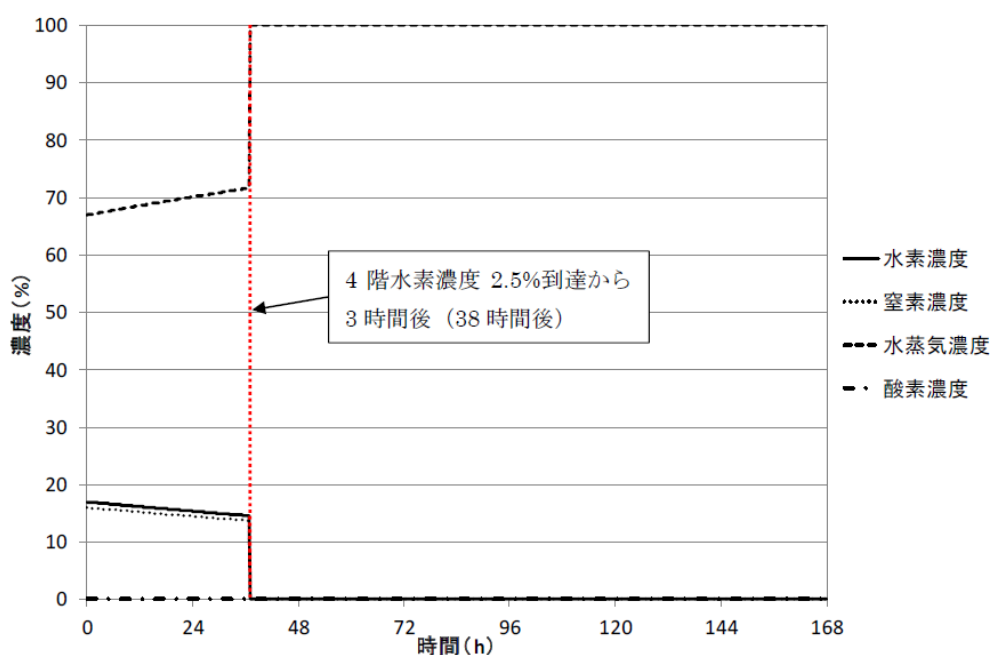


図 2.2.2-6 漏えいガス組成の時間変化 (設計条件, ベント有り)

③ ベントケース

格納容器からの漏えい条件を表 2.2.2-7 から表 2.2.2-9 に示す。漏えいするガスの圧力、温度、ガス組成（水蒸気分率、水素分率、窒素分率）は、格納容器破壊防止対策の有効性評価のMAAP解析結果である図 2.2.2-7 から図 2.2.2-10 より決定している。

圧力は、事故発生後から解析上の格納容器ベント想定時刻である 96 時間まではMAAP解析結果を包絡するよう条件を設定する。具体的には、事故発生後から 15 時間までは最高使用圧力（427kPa[gage]）、15 時間から 96 時間までは、格納容器限界圧力（853kPa[gage]）、96 時間以降は最高使用圧力×0.2（85.3kPa[gage]）を想定する。

温度は、解析上の格納容器ベント想定時刻までは、格納容器限界温度（200℃）、それ以降は格納容器最高使用温度（171℃）を想定する。

ガス組成については、事故発生後から 96 時間まではMAAP解析結果の水素ガス濃度を包絡するように条件を設定する。また、漏えい量を多く見積もる観点から、水素以外の組成を水蒸気として取り扱う。96 時間以降は、格納容器内はすべて水蒸気と仮定し、水蒸気のみ漏えいが継続するものとする。

格納容器漏えい率について、事故後 96 時間までの間は上記の圧力、温度、ガス組成を用いてAECの式より算出した値に対して保守的に切り上げた値を設定する。96 時間以降は水蒸気のみ漏えいとなるため、AECの式より算出した値とする。

表 2.2.2-7 格納容器漏えい条件（ベントケース）

事故後経過時間(hr)	0～15	15～96	96～168	図番号
圧力(kPa[gage])	427 (1.0Pd)	853 (2.0Pd)	85.3 (0.2Pd)	図 2.2.2-7
温度(℃)	200		171	図 2.2.2-8
漏えい率(%/日)	0.5	1.3	0.5	—

表 2.2.2-8 D/W 内ガス条件（ベントケース）

事故後経過時間(hr)	0～2	2～40	40～96	96～168	図番号
水素濃度(vol%)	10	4	8	0	図 2.2.2-9
窒素濃度(vol%)	0	0	0	0	
水蒸気濃度(vol%)	90	96	92	100	

表 2.2.2-9 S/C 内ガス条件（ベントケース）

事故後経過時間(hr)	0～48	48～96	96～168	図番号
水素濃度(vol%)	17	8	0	図 2.2.2-10
窒素濃度(vol%)	0	0	0	
水蒸気濃度(vol%)	83	92	100	

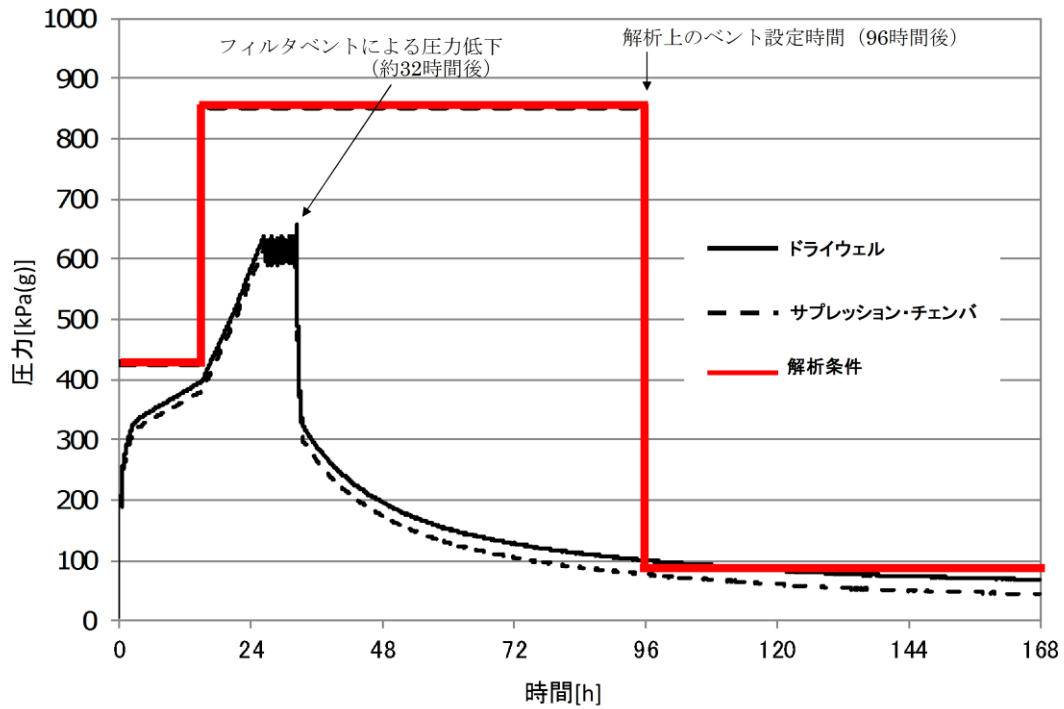


図 2.2.2-7 格納容器圧力条件 (ベントケース)

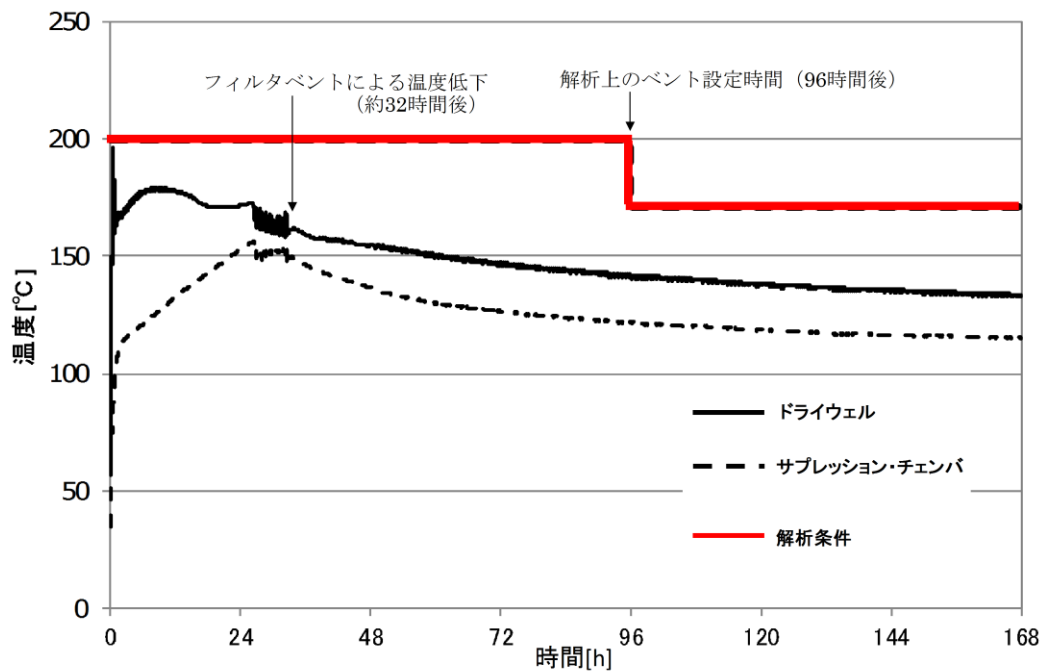


図 2.2.2-8 格納容器温度条件 (ベントケース)

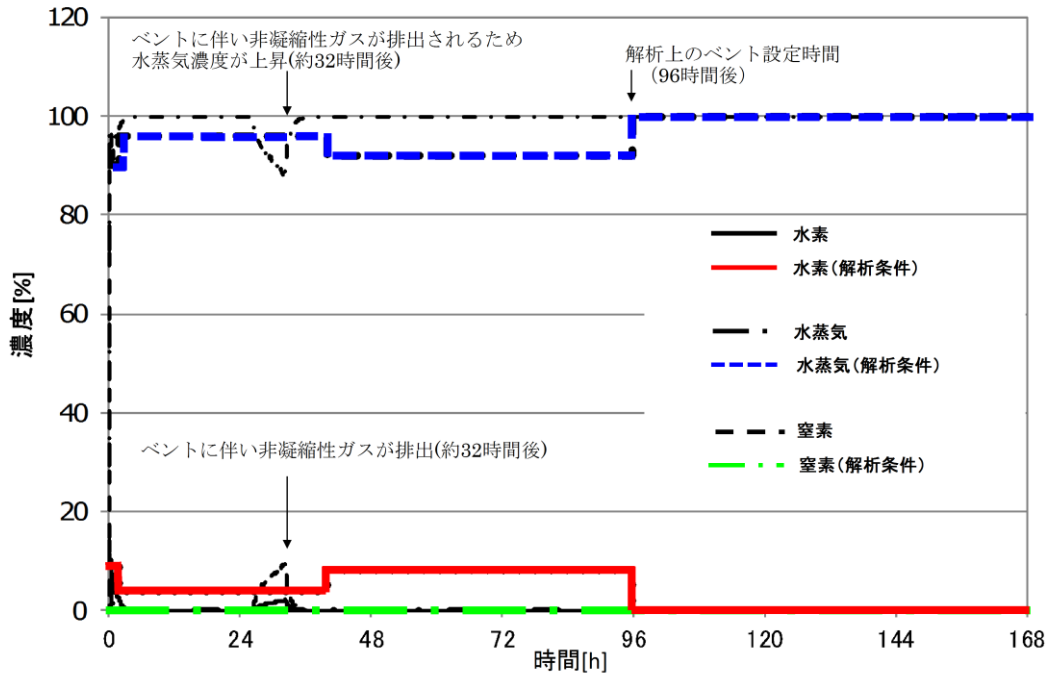


図 2. 2. 2-9 D/W 内ガス条件 (ベントケース)

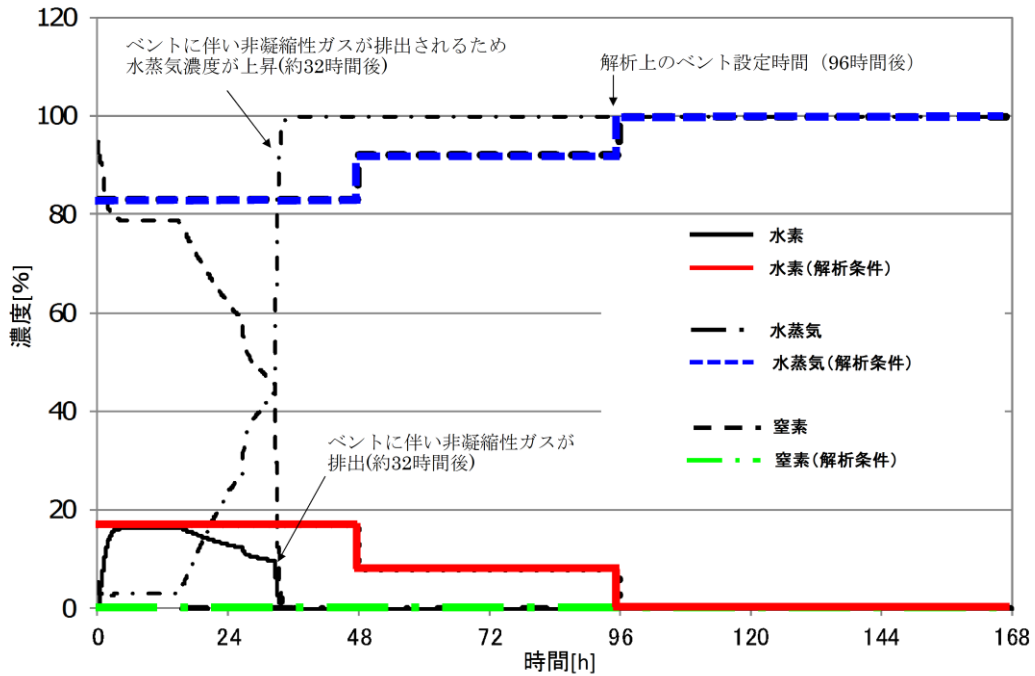


図 2. 2. 2-10 S/C 内ガス条件 (ベントケース)

④ RHAR ケース

格納容器からの漏えい条件を表 2.2.2-10 から表 2.2.2-12 に示す。漏えいするガスの圧力、温度、ガス組成（水蒸気分率、水素分率、窒素分率）は、格納容器破壊防止対策の有効性評価シナリオに対して残留熱代替除去系を使用した除熱を考慮した場合のMAAP解析結果である図 2.2.2-11 から図 2.2.2-14 より決定している。

圧力は、MAAP解析結果を包絡するよう条件を設定する。具体的には、残留熱代替除去系の格納容器スプレイによる圧力低下が想定される時刻である事故後 15 時間までは 384.3kPa[gage]、15 時間以降は 341.6kPa[gage] を想定する。

温度は、MAAP解析結果を包絡するよう条件を設定する。具体的には、事故発生後から 15 時間までは格納容器限界温度（200℃）、それ以降は残留熱代替除去系の格納容器スプレイによる温度低下を考慮し 150℃を想定する。

ガス組成については、MAAP解析結果の水素ガス濃度を包絡するように条件を設定する。また、漏えい量を多く見積もる観点から、水素以外の組成を水蒸気として取り扱う。

格納容器漏えい率については、上記の圧力、温度、ガス組成を用いてAECの式より算出した値に対して保守的に切り上げた値としている。

表 2.2.2-10 格納容器漏えい条件（RHAR ケース）

事故後経過時間(hr)	0～1	1～15	15～24	24～168	図番号
圧力(kPa[gage])	384.3 (0.9Pd)		341.6 (0.8Pd)		図 2.2.2-11
温度(℃)	200		150		図 2.2.2-12
D/W 漏えい率(%/日)	0.85	0.82	0.73		—
W/W 漏えい率(%/日)	0.87		0.78	0.76	

表 2.2.2-11 D/W 内ガス条件（RHAR ケース）

事故後経過時間(hr)	0～1	1～168	図番号
水素濃度(vol%)	15	7	図 2.2.2-13
窒素濃度(vol%)	0	0	
水蒸気濃度(vol%)	85	93	

表 2.2.2-12 S/C 内ガス条件（RHAR ケース）

事故後経過時間(hr)	0～24	24～168	図番号
水素濃度(vol%)	20	15	図 2.2.2-14
窒素濃度(vol%)	0	0	
水蒸気濃度(vol%)	80	85	

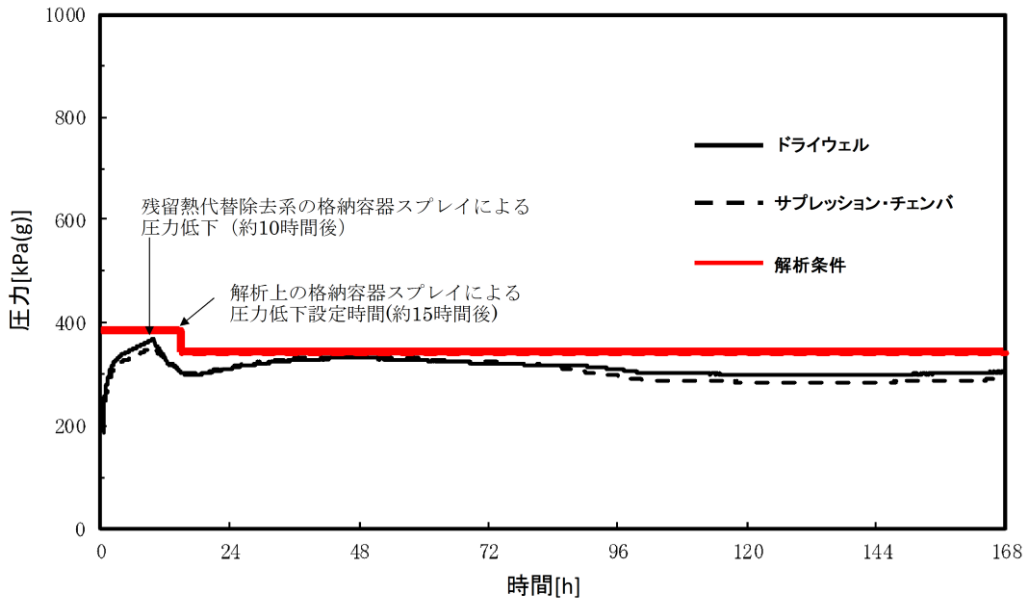


図 2.2.2-11 格納容器圧力条件 (RHAR ケース)

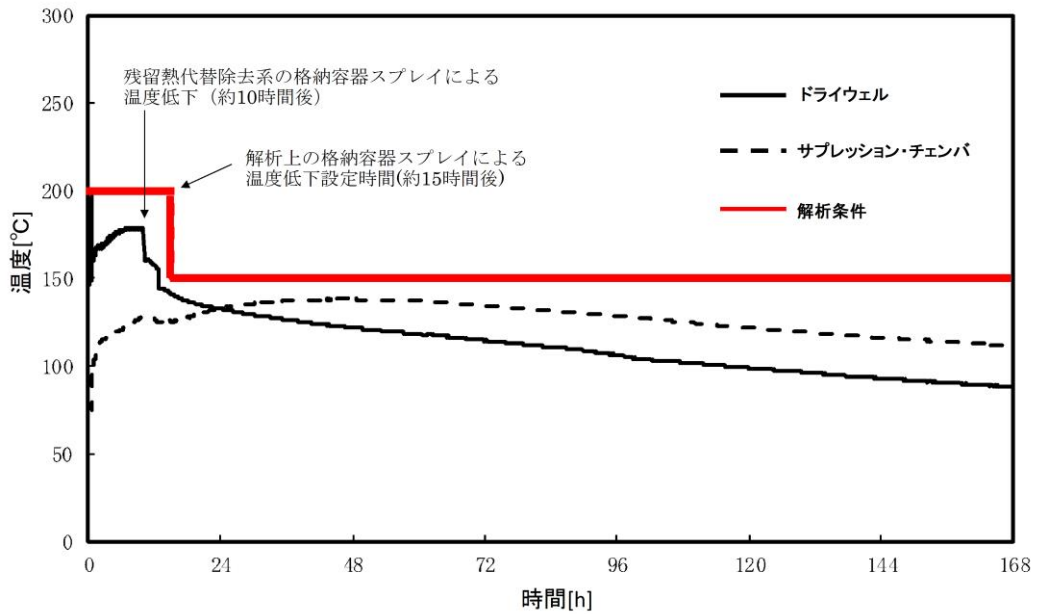


図 2.2.2-12 格納容器温度条件 (RHAR ケース)

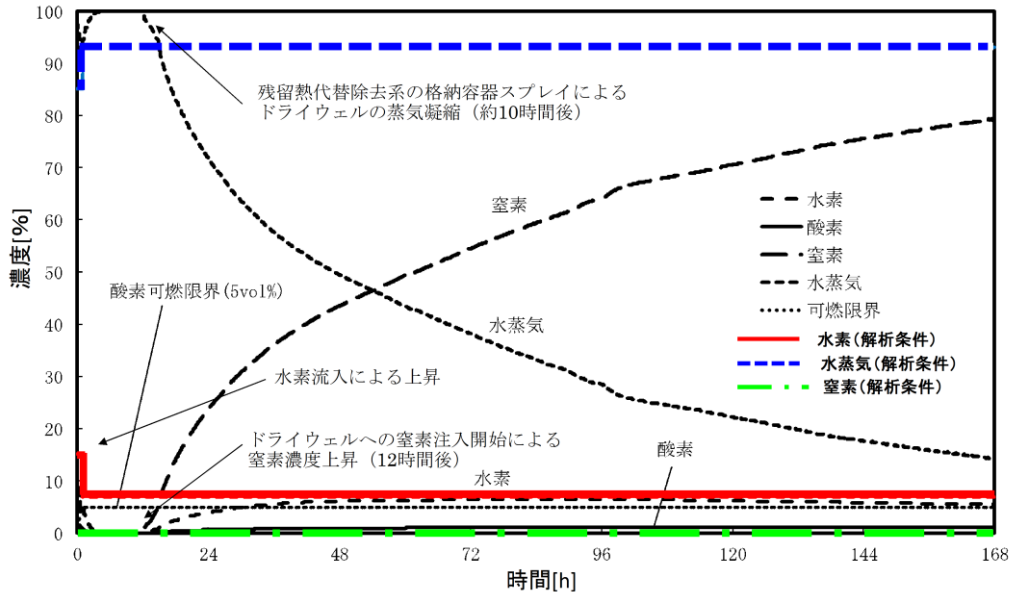


図 2.2.2-13 D/W 内ガス条件 (RHAR ケース)

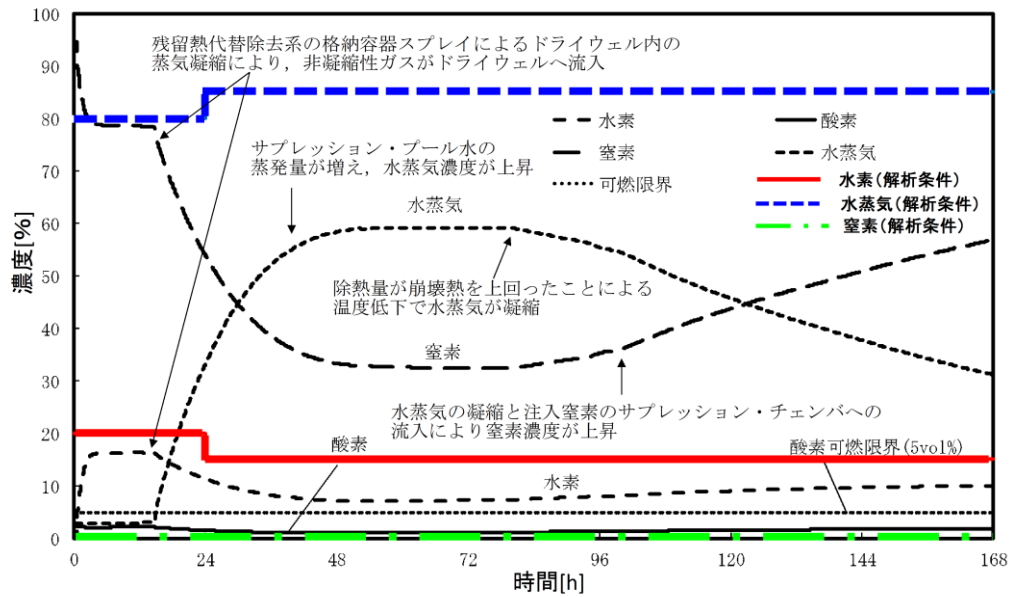


図 2.2.2-14 S/C 内ガス条件 (RHAR ケース)

(7) P A R解析条件

P A Rの解析条件を表 2.2.2-13 に示す。また、その他の解析条件を表 2.2.2-14 に示す。

表 2.2.2-13 P A Rの解析条件

No	項目	説明	入力値
1	P A Rの性能 (N I S製P A R-22) (1)体積流量Q	「NUCLEAR TECHNOLOGY VOL. 112」の式(1)を使用。(P A R 1個あたり) $Q = a \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100}\right)^b \cdot 3600$ Q : 体積流量 (m ³ /hr/個) a : 定数 (m ³ /s) ※P A R-22の場合: 0.67 × (22/88) = 0.1675 C _{H2} : 水素濃度 (vol%) b : 定数 (0.307)	—
	(2) P A R処理性能 ファクタ η	「NUCLEAR TECHNOLOGY VOL. 112」の式(3)に示す η の値を使用。	0.846
	(3) 反応阻止物質 ファクタ	製造上の性能のばらつき、プラント通常運転中及び事故時の劣化余裕を考慮する。	0.5 (事故初期より一定)
	(4) 低酸素ファクタ	低酸素ファクタは以下のとおりとする。ただし、1 以上の場合は全て1、0 未満の場合は全て0とする。 $F_{lowO_2} = 0.7421 \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right)^3 - 0.6090 \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right)^2 + 0.7046 \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right) - 0.026$ C _{O2} : 酸素濃度 (vol%)	—
	(5) 起動水素濃度	国内試験で起動が確認されている範囲に余裕を見た値として 1.5vol% とする。	1.5vol%
	(6) 起動酸素濃度	同上。	2.5vol%
	(7) 起動遅れ	考慮しない。	—
	(8) 再結合効率	$W_{H_2} = \eta \cdot F_{inhibit} \cdot F_{lowO_2} \cdot Q \cdot \min(N_{H_2}, 2N_{O_2}) \cdot M_{H_2}$ $= F_{inhibit} \cdot F_{lowO_2} \cdot \min(N_{H_2}, 2N_{O_2}) / N_{H_2} \cdot DR$ W _{H2} : 再結合率 (kg/hr/個) N _{H2} : 単位体積あたりの水素モル数 (mol/m ³) N _{O2} : 単位体積あたりの酸素モル数 (mol/m ³) M _{H2} : 水素分子量 (kg/mol) DR : 反応阻害物質と低酸素条件を考慮しない再結合効率 (kg/hr/個)	—
2	P A R個数	18 個: 実際の設置個数	18 個
3	P A R設置位置	P A R 取付位置図より該当するサブボリューム内に設置する。	—

※時間遅れ（保守的な条件）を考慮した場合の反応熱による温度影響

反応開始を想定している水素濃度 1.5vol%到達以前の発熱量がある場合、この発熱量は水素の再結合が生じた結果であり、起動の時間遅れを無視して水素濃度上昇開始時に水素の処理が開始するものとすれば、水素濃度は低めに推移するものと考えられる。ただし、水素濃度時間変化は水素の漏えい量とPARの処理量がバランスする濃度に向かって漸近していくため、反応開始後の水素濃度のトレンドや最大濃度には反応開始のタイミングの影響は小さいと考えられる。PAR自体の処理量の観点からは、反応開始時のPAR内部の温度上昇は内部のガスの浮力を増加させて吸入ガス量を増加させるので、当初は処理量が増加する側に働くが、吸入ガス量の増加に伴ってPAR内部も冷却されるため、時間遅れを伴って定常状態の処理量に漸近するので、反応開始時の反応熱の水素処理への影響は小さい。

表 2.2.2-14 その他の解析条件

分類	項目	設計条件	有効性評価結果を踏まえた条件		備考
			ベントケース	RHARケース	
格納容器条件	空間容積	12,600m ³			
原子炉建物	圧力	0 kPa [gage] ※1			
原子炉棟条件	温度	40℃ ※1			
	組成	水素 : 0 vol% ※1 酸素 : 19.47 vol% ※1 水蒸気 : 7.29 vol% ※1 窒素 : 73.24 vol% ※1		湿度 100%の空気	
	空間容積	4階 : 41,300m ³ 3階 : 9,000m ³ 2階 : 10,900m ³ 1階 : 13,700m ³ 地下階 : 18,400m ³			
	開口面積	4階-3階 : 39m ² 3階-2階 : 39m ² 2階-1階 : 39m ² 1階-地下階 : 3.24m ²			
外気条件	圧力	0 kPa [gage]			
	温度	40℃			想定最高温度
	組成	酸素 : 21 vol% 窒素 : 79 vol%		乾燥空気	
流出条件	位置	4階			原子炉建物原子炉棟の気密性を考慮
放熱条件	内壁熱伝達率	凝縮熱伝達及び自然対流熱伝達を考慮			
	壁厚さ	4階下部壁 :			
		4階上部壁 :			
		4階天井壁 :			
	壁面熱伝導率	1.5W/m/K			コンクリートの物性値
	壁の比熱	1 kJ/kg/K			同上
	壁の密度	2,400kg/m ³			同上
	外壁熱伝達率	5 W/m ² /K			自然対流熱伝達を考慮
外気温	40℃				
	放熱面積	4階下部壁 : 478.82m ² , 474.37m ² 4階上部壁 : 634.84m ² , 470.82m ² 4階天井壁 : 2146.62m ² , 720.92m ²			

※1 : 初期条件を示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(8) 解析結果

① 設計条件（ベント無し）における解析結果

各フロアの水素濃度の時間変化を図 2.2.2-15 に示す。全フロアにおいて可燃限界未満であることを確認した。

原子炉建物原子炉棟 4 階については、ドライウェル主フランジからの漏えいにより、雰囲気の水素濃度が急激に上昇するが、P A R による処理量が増加するため、水素濃度の上昇は次第に鈍化し、事故後 57 時間付近で水素濃度は約 2.7% をピークとして、その後減少し続ける。

3 階以下の下層階については、直接格納容器からの流入はないが、大物搬入口の領域を通じて原子炉建物原子炉棟 4 階から水素が流入してくることにより、水素濃度が上昇する傾向を示すが、原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度の減少に漸近しながら上昇は次第に鈍化し、2 階の水素濃度については、やがて減少に転じる。また、3 階の水素濃度については、事象発生から約 192 時間までは水素濃度が上昇傾向を示しているが、約 192 時間以降は上昇傾向が緩やかになり、次第に減少傾向に変わる。

これは、原子炉格納容器から原子炉建物原子炉棟への漏えいガスに含まれる水素濃度が図 2.2.2-5 に示すとおり時間経過とともに減少すること及び原子炉建物原子炉棟 4 階の空間容積で漏えいガスに含まれる水素ガスの処理に必要な酸素濃度（起動酸素濃度：2.5vol%）が十分確保されていることから、原子炉格納容器から漏えいした水素ガスが P A R により継続的に処理され、減少しているものと考えられる。

また、原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化を図 2.2.2-16 に示す。全てのサブボリュームにおいて水素濃度はほぼ均一に推移する。

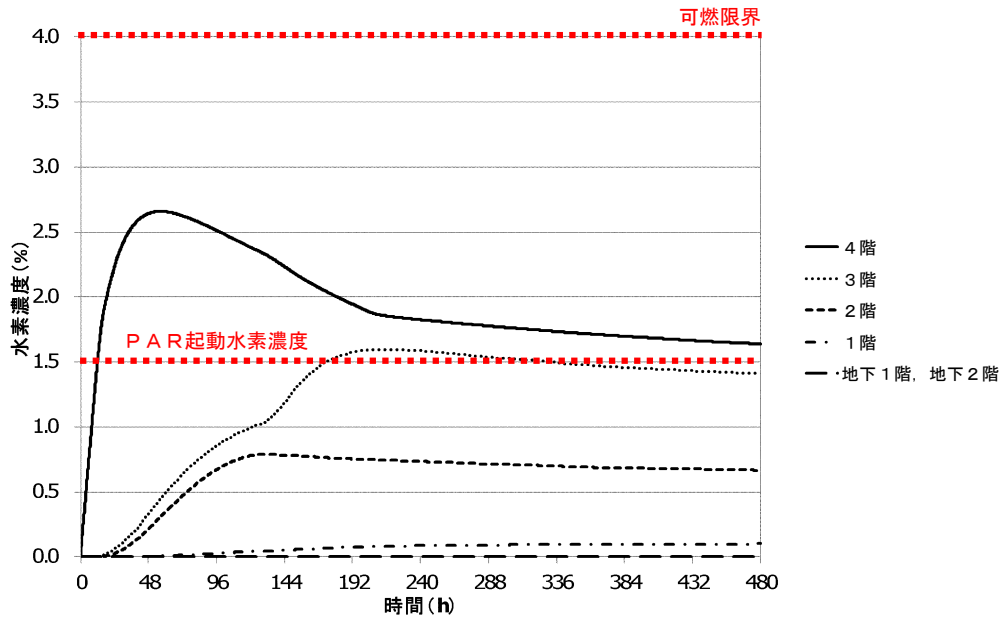


図 2. 2. 2-15 各フロアの水素濃度の時間変化 (設計条件, ベント無し)

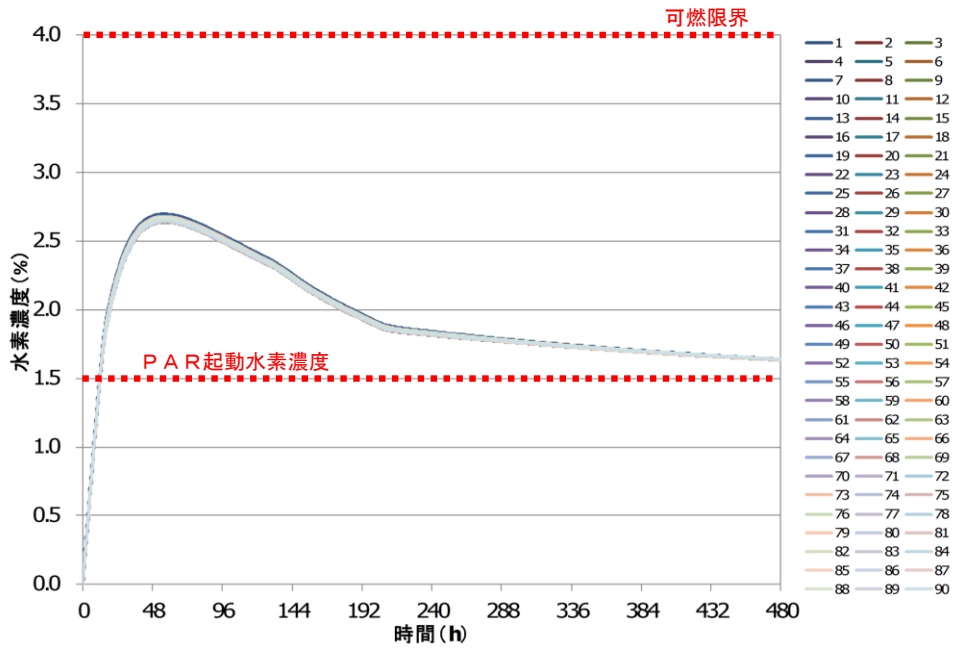


図 2. 2. 2-16 原子炉建物原子炉棟 4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化 (設計条件, ベント無し)

② 設計条件（ベント有り）における解析結果

設計条件において格納容器ベントを実施した場合の解析結果を図 2.2.2-17, 図 2.2.2-18 に示す。全フロアにおいて可燃限界未満であることを確認した。

原子炉建物原子炉棟 4 階については、格納容器ベント実施後、PAR による水素処理によって水素濃度が 1.5% まで急速に低下する。このため、異常な漏えいが発生している状態において格納容器ベントを行うことで、水素濃度を低減させることが可能である。

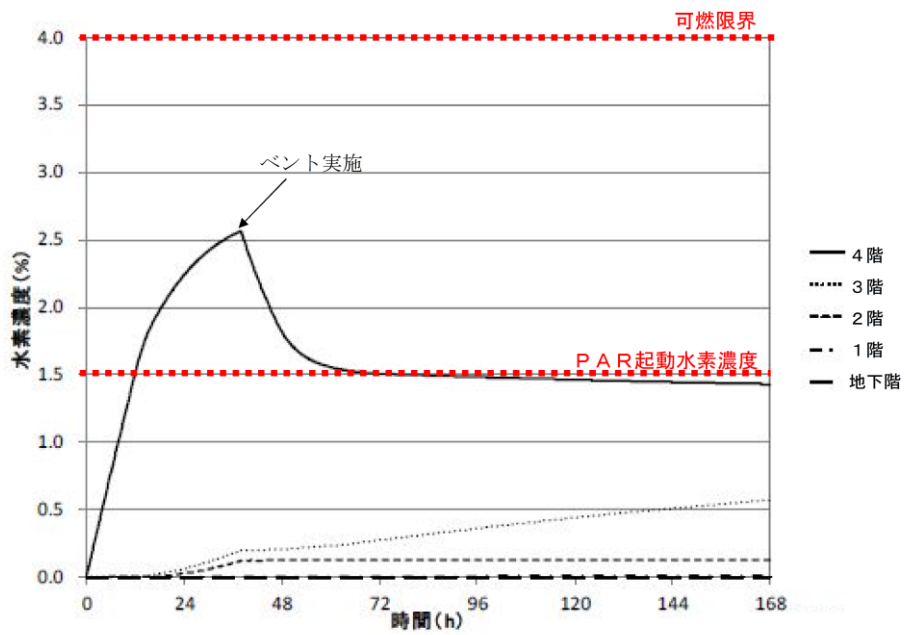


図 2. 2. 2-17 各フロアの水素濃度の時間変化（設計条件，ベント有り）

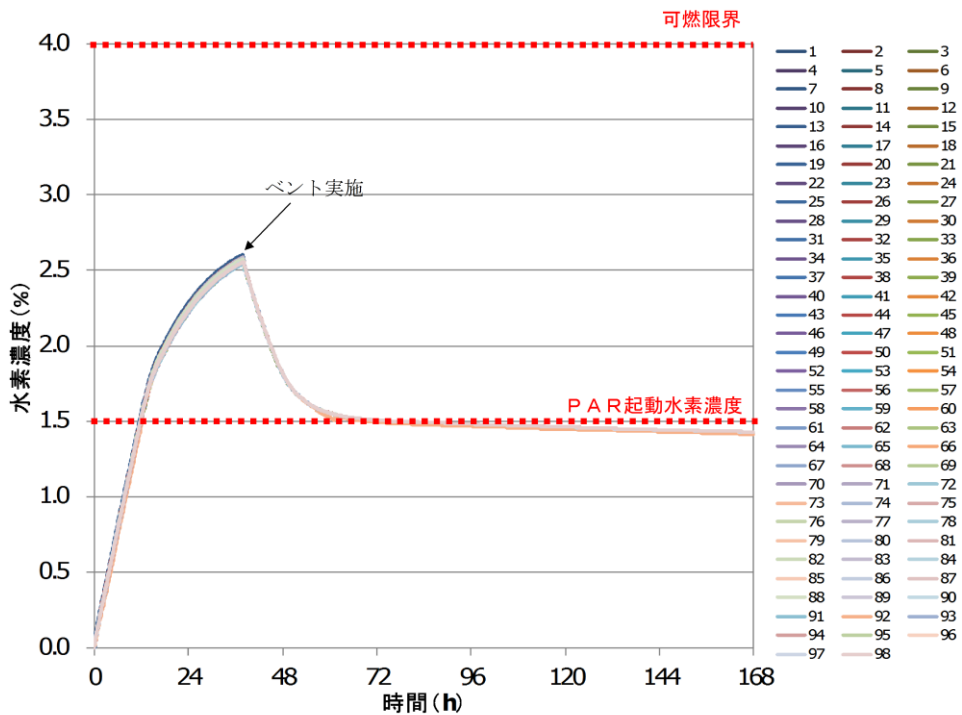


図 2. 2. 2-18 原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化（設計条件，ベント有り）

③ ベントケースにおける解析結果

各フロアの水素濃度の時間変化を図 2.2.2-19 に示す。全フロアにおいて可燃限界未満であることを確認した。

また、原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化を図 2.2.2-20 に示す。全てのサブボリュームにおいて水素濃度はほぼ均一に推移する。なお、本ケースにおいて P A R は起動しない結果となった。

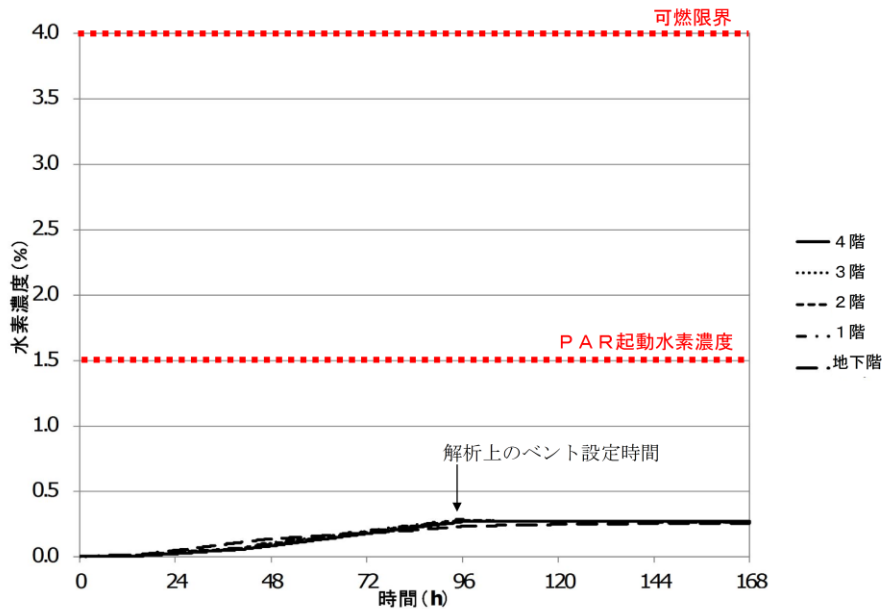


図 2.2.2-19 各フロアの水素濃度の時間変化 (ベントケース)

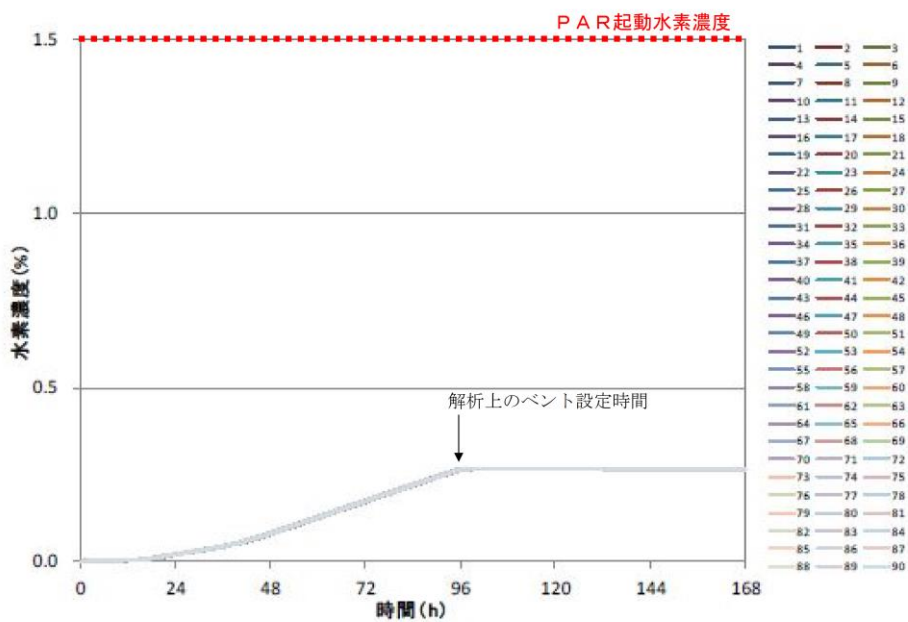


図 2.2.2-20 原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化 (ベントケース)

④ R H A R ケースにおける解析結果

各フロアの水素濃度の時間変化を図 2. 2. 2-21 に示す。全フロアにおいて可燃限界未満であることを確認した。

また、原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化を図 2. 2. 2-22 に示す。全てのサブボリュームにおいて水素濃度はほぼ均一に推移する。なお、本ケースにおいて P A R は起動しない結果となった。

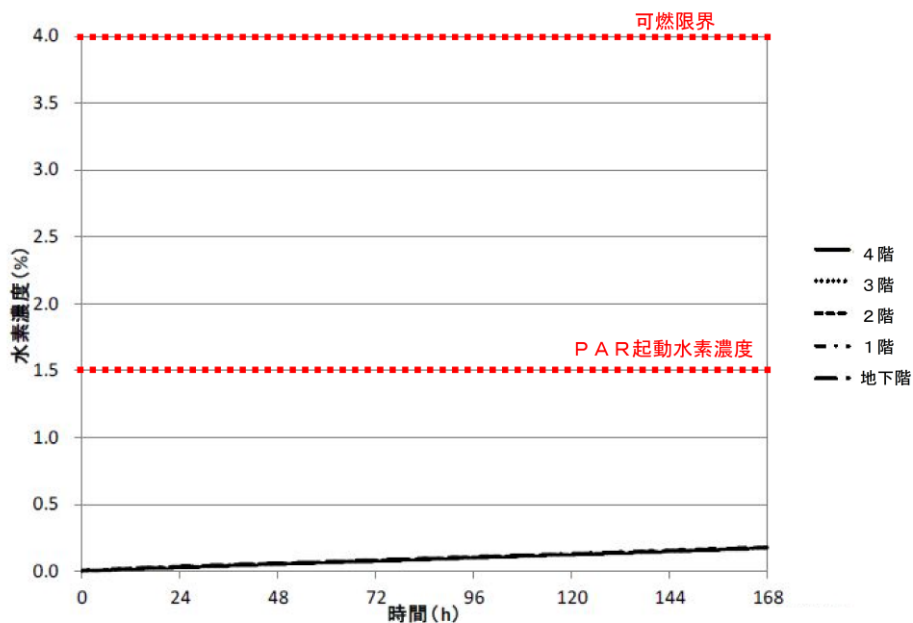


図 2. 2. 2-21 各フロアの水素濃度の時間変化 (R H A R ケース)

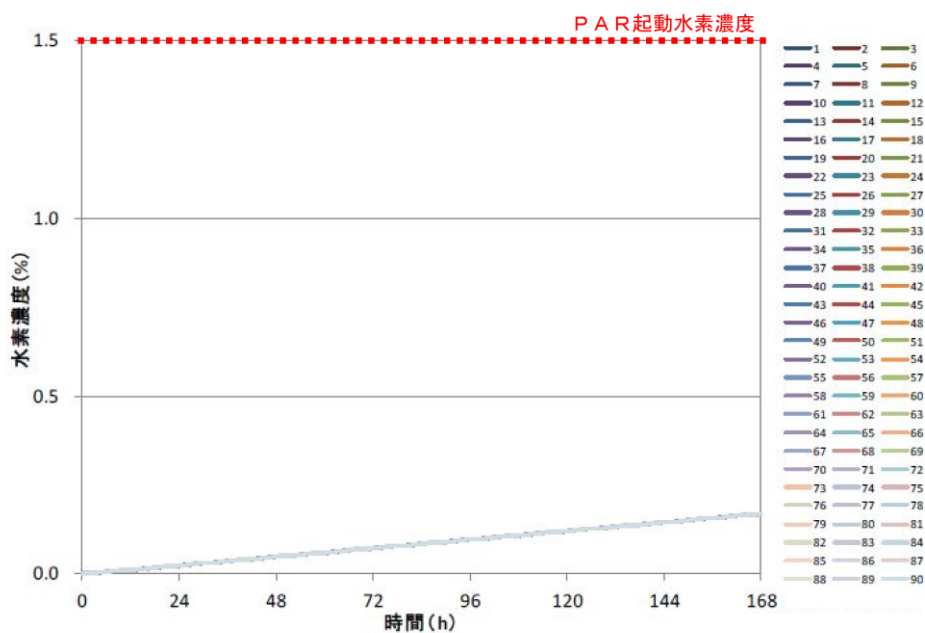


図 2. 2. 2-22 原子炉建物原子炉棟 4 階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化 (R H A R ケース)

(9) 解析まとめ

P A R設計条件では、原子炉建物原子炉棟4階に設置した18個のP A Rで、原子炉建物原子炉棟内の水素濃度が可燃限界未満となることを確認した。

なお、有効性評価を踏まえた条件においても原子炉建物原子炉棟内の水素濃度が可燃限界未満となることを確認しているが、区画されたエリアに格納容器からの想定漏えい箇所があるS R V補修室、C R D補修室及び所員用エアロック室について、個別に解析を行い、水素濃度が可燃限界未満となることを確認している。

(添付9)

原子炉建物原子炉棟内における成層化について

格納容器漏えい率を 10%/日とした設計条件における解析では、原子炉建物原子炉棟 4 階の水素濃度は、ほぼ均一となる（漏えいした水素が空間内で成層化しない）ことを確認している。ここでは、成層化しやすい条件として表 1 のケースにおける空間内の水素挙動を確認する。

解析モデルは、本文「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」にて使用した解析モデルを使用する。解析モデルを図 1 に示す。

表 1 解析ケースの概要

解析ケース	解析ケースの概要
①微小漏えいケース	ドライウェル主フランジからの微小漏えい（漏えい率：0.5%/日，0.05%/日）を想定する。 《考慮した保守性》 ・原子炉建物原子炉棟 4 階への流入速度が小さくなるため対流効果が抑制される。
②全蒸気凝縮ケース	格納容器から漏えいした瞬間，全ての水蒸気が瞬時に凝縮することを仮定する。 《考慮した保守性》 ・凝縮した水蒸気分，漏えいガスの流入速度が小さくなるため対流効果が抑制される。

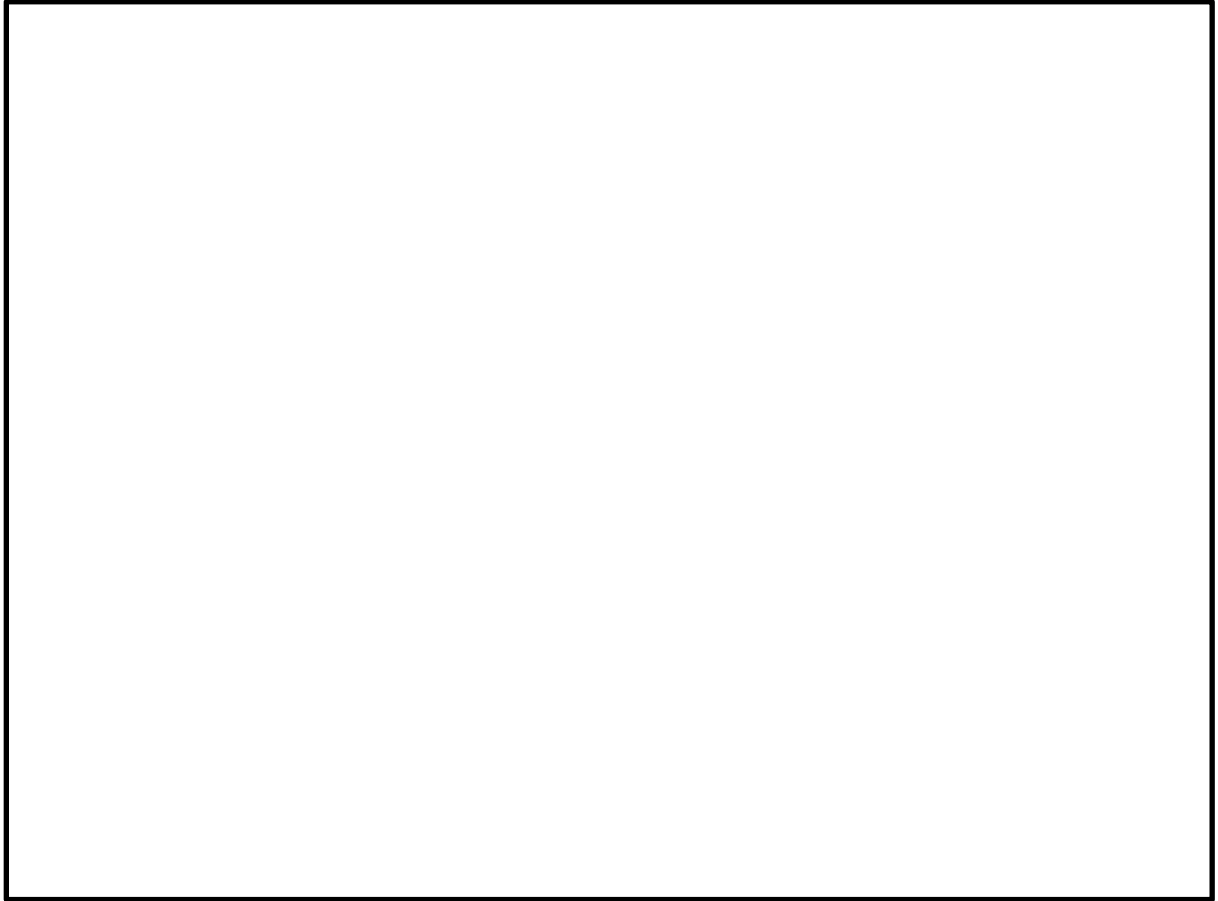


図 1 (本文図 2.2.2-2) 解析モデル

1. 微小漏えいケース

(1) 解析条件

本文「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」に示している設計条件における解析に対し、表2に示すとおり、より小さい格納容器漏えい率として0.5%/日、0.05%/日を条件として設定する。

表2 主要な解析条件

漏えい率 (%/日)	実施ケース		設計条件
		0.5	0.05

(2) 解析結果

図2及び図3に格納容器漏えい率(0.5%/日及び0.05%/日)における原子炉建物原子炉棟4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化を示す(参考として、設計条件(格納容器漏えい率10%/日)の解析結果を再掲する)。水素濃度は格納容器漏えい率に関わらずほぼ均一に分布し、成層化は見られない。

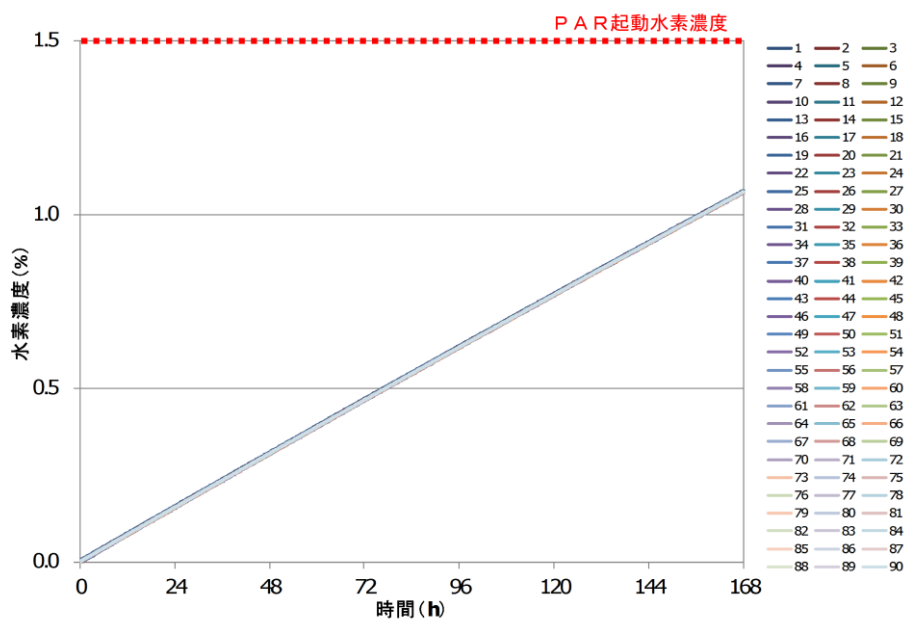


図2 原子炉建物原子炉棟4階のサブボリュームの水素濃度の時間変化
(設計条件, 格納容器漏えい率0.5%/日)

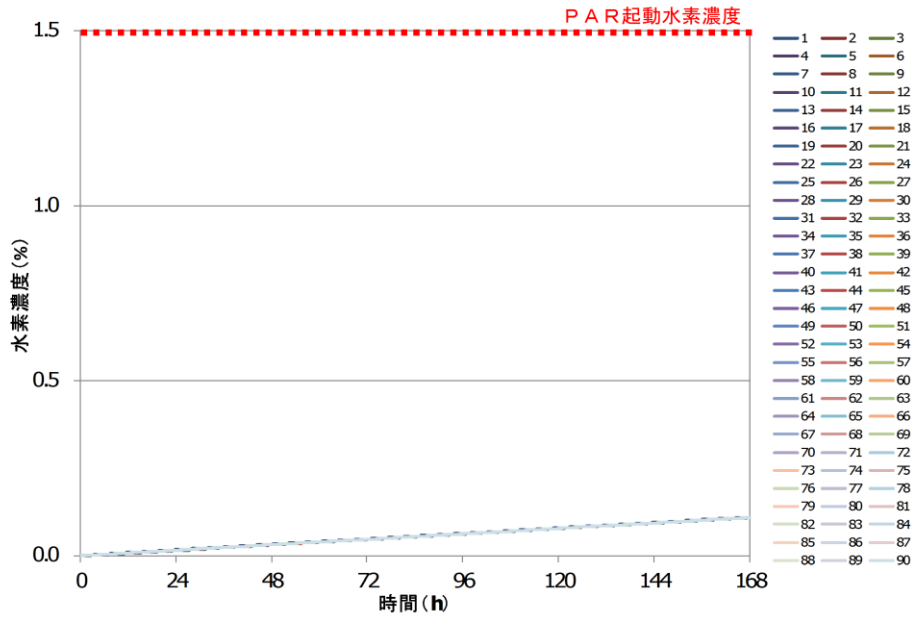
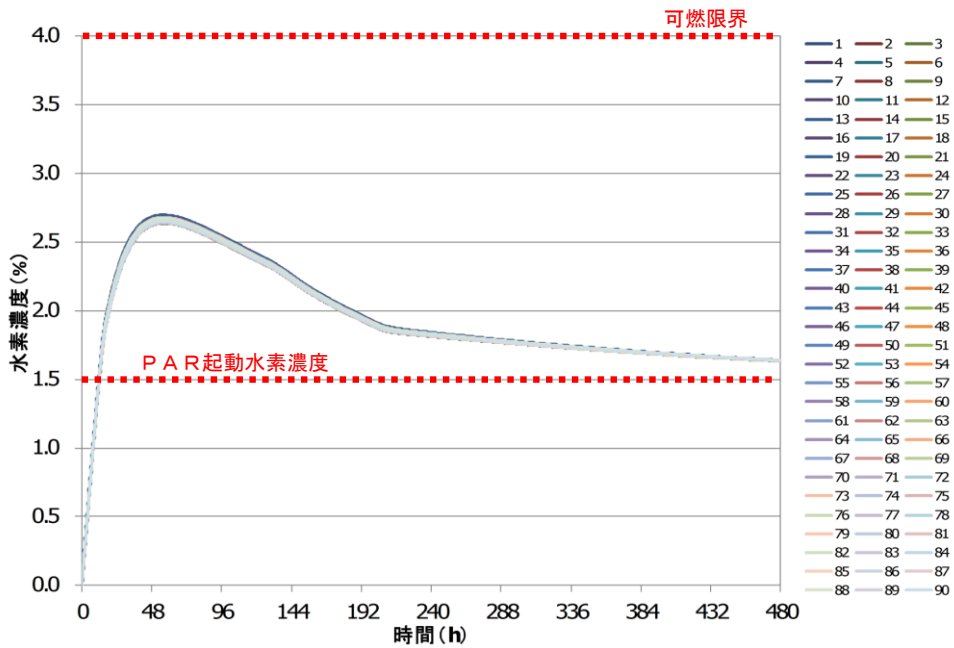


図3 原子炉建物原子炉棟4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化
(設計条件, 格納容器漏えい率 0.05%/日)



【参考】本文図 2.2.2-16 原子炉建物原子炉棟4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化 (設計条件, ベント無し)

2. 全蒸気凝縮ケース

(1) 解析条件

格納容器からの漏えい条件は表3に示すとおり、本文「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」のベントケースと同じ条件とする。ただし、保守的な評価を行うため、格納容器から漏えいした瞬間、全ての水蒸気が瞬時に凝縮することを仮定する。具体的には漏えいガスの水蒸気分を除いた水素ガスが100℃で流入することとする。

表3 格納容器漏えい条件

分類	項目	有効性評価結果を踏まえた条件
格納容器条件	圧力 温度 漏えい率	本文表 2.2.2-7
	水素濃度 窒素濃度 水蒸気濃度	D/W : 本文表 2.2.2-8 S/C : 本文表 2.2.2-9

(2) 解析結果

図4に全蒸気凝縮ケースにおける原子炉建物原子炉棟4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化を示す。水素濃度は4 vol%を下回る。また、ほぼ均一に分布し、成層化は見られない。

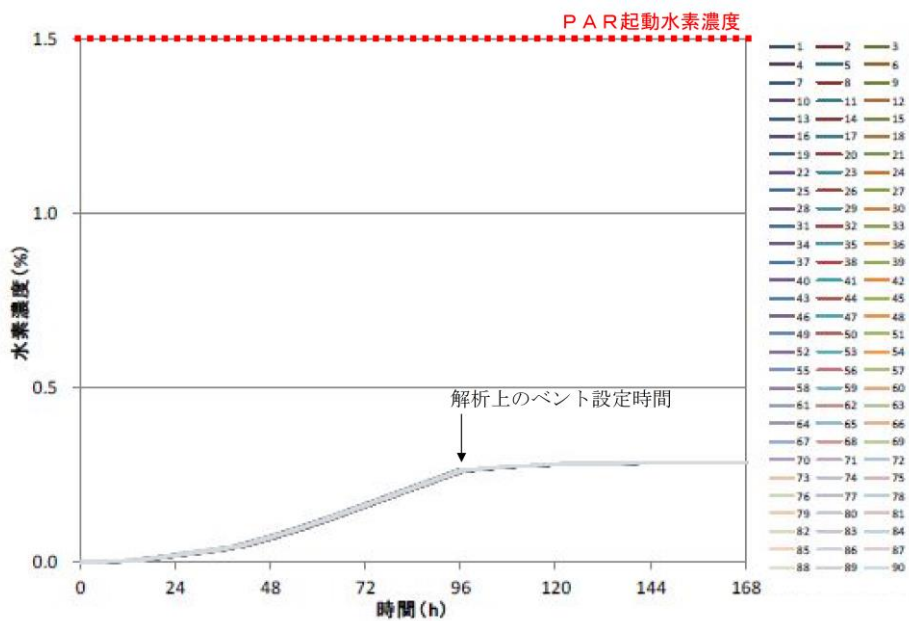
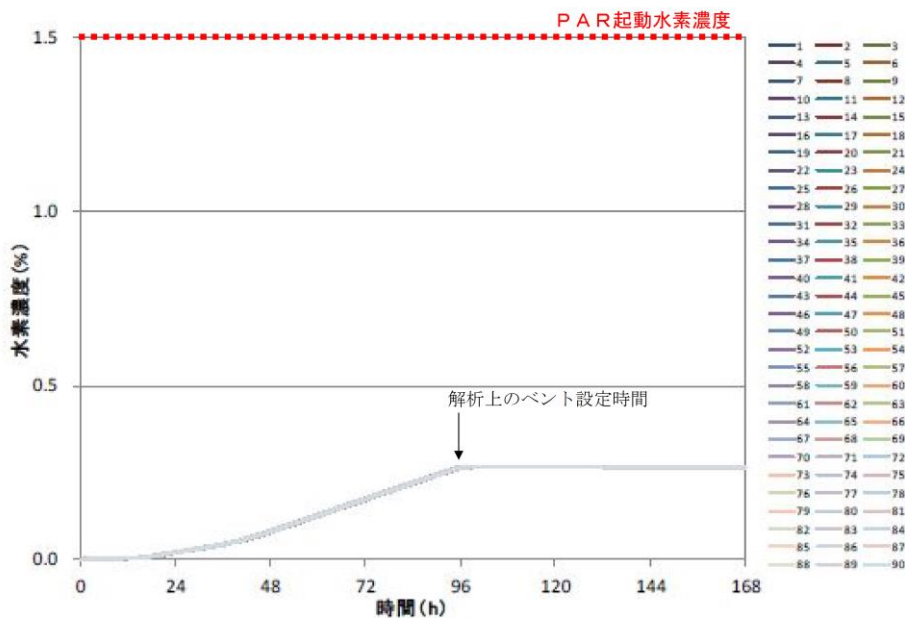


図4 原子炉建物原子炉棟4階全サブボリュームの水素濃度の時間変化
(ベントケース, 全蒸気凝縮)



【参考】 図 2. 2. 2-20 原子炉建物原子炉棟4階の全サブボリュームの水素濃度の時間変化 (ベントケース)

それでもなお、仮に成層化が発生してしまった場合には、PARを設置していない原子炉建物原子炉棟4階の天井付近にて水素濃度が上昇するものと考えられる。このことから、天井付近に設置した水素濃度監視設備における水素濃度がPAR起動確認濃度1.5vol%を上回っているにも関わらず、PAR動作監視装置にてPARの動作を確認できない場合には、天井部付近の水素ガスがPAR設置位置まで到達していないこととなるため、成層化が発生している可能性がある判断できる。

成層化が発生している可能性がある判断した場合の対応としては、水素発生源を断つための格納容器ベント操作(格納容器ベント実施基準:原子炉建物原子炉棟内のいずれかの水素濃度監視設備にて水素濃度2.5vol%^{※1})、水素ガスを排出するための自主対策設備である原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル(図5)の開放操作^{※2}が挙げられる。

- ※1 格納容器ベント実施基準とする原子炉建物水素濃度2.5vol%は、可燃限界(4vol%)に計器誤差(±1.1vol%)及び運転操作の余裕(0.4vol% = 3時間)を考慮した値として設定。
- ※2 格納容器ベントを実施しても原子炉建物水素濃度が低下しない場合

格納容器ベント操作については、格納容器の圧力・温度が最高使用圧力(427kPa[gage])・最高使用温度(171℃)を上回っており、かつ水素濃度監視設備において水素濃度の上昇傾向を捉えた段階で、格納容器の閉じ込め機能の劣化兆候を示していると考えられることから、遅滞なく準備を実施し、成層化が発生している可能性がある判断した段階においては速やかに行うこととなる。

なお、非常用ガス処理系による換気は、水素ガスを排出できるという点では有用であるが、系統内での水素爆発の可能性を否定できない。そのため、島根原子力発電所2号炉の非常用ガス処理系は、原子炉建物原子炉棟2階吸込配管近傍に水素濃度計を設置することで水素濃度監視を強化するとともに、原子炉建物原子炉棟2階吸込配管近傍の原子炉建物水素濃度による起動/停止判断手順を整備することで、水素濃度が高い環境下で非常用ガス処理系は使用しない運用としている。

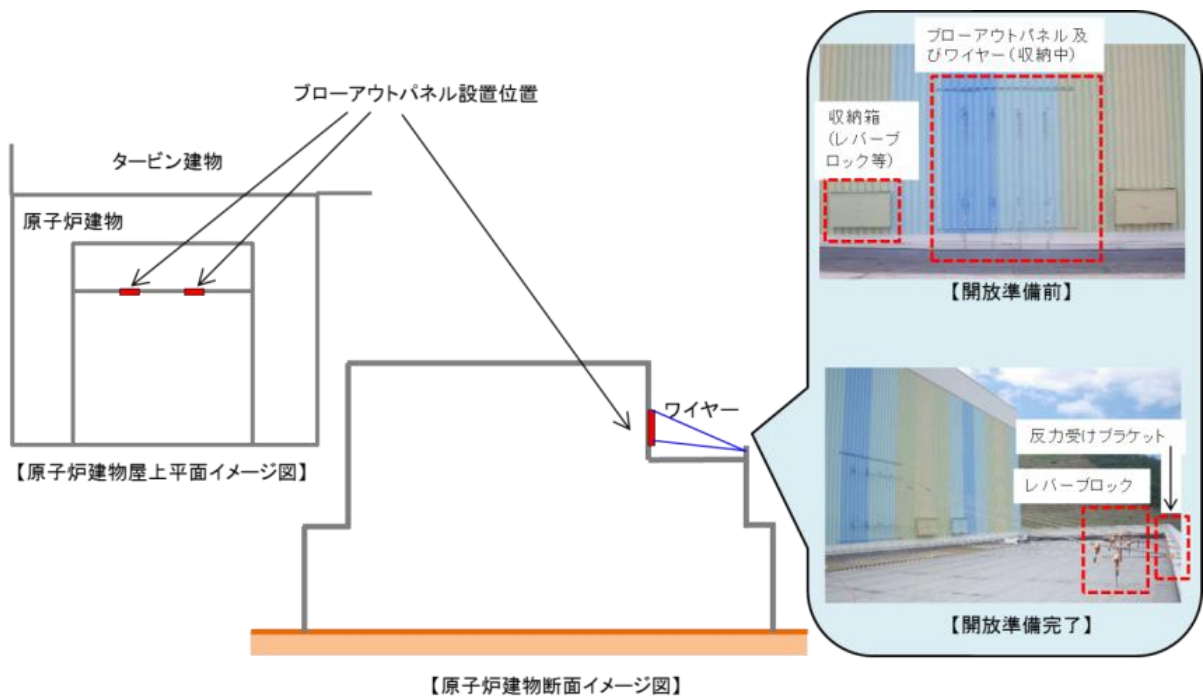


図5 原子炉建物燃料取替階ブロアアウトパネル

運用面を考慮した場合の原子炉建物原子炉棟の水素挙動及び対策について

有効性評価結果を踏まえた条件では、「冷却材喪失（大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する事故」をベースに条件設定しているが、運用面を考慮したパラメータスタディとして、表1に示す2ケースを想定し原子炉建物原子炉棟の水素挙動を確認する。

また、原子炉建物原子炉棟の水素解析結果をもとに、自主対策設備も含めた格納容器からの水素漏えい時の対策フローを示す。

表1 実施ケース

実施ケース	実施ケースの想定	有効性評価を踏まえた条件での想定
原子炉ウェル注水ケース ①ベントケース ②RHARケース	原子炉ウェル注水によりドライウェル主フランジから漏えいしない	原子炉ウェル注水は期待せず、ドライウェル主フランジから漏えいする
格納容器ベント遅延ケース	格納容器ベントが遅延し、限界温度・圧力が継続する	事象発生 32 時間後を包絡する 96 時間後に格納容器ベントを実施する

1. 原子炉ウェル注水ケース

有効性評価結果を踏まえた条件に対し、以下の条件をパラメータとして設定する。

(1) 漏えい量の分配条件

有効性評価結果を踏まえた条件に対し、表2に示すとおり、ドライウェル主フランジからの漏えい量が他の漏えい箇所に分配されるよう設定する。

表2 各フロアの漏えい量の比率

フロア	想定漏えい箇所	漏えい量の分配比率	
		原子炉ウェル注水ケース	有効性評価結果を踏まえた条件
原子炉建物 原子炉棟 4 階	ドライウェル主フランジ		
原子炉建物 原子炉棟 2 階	逃がし安全弁搬出ハッチ		
原子炉建物 原子炉棟 1 階	機器搬入口		
	所員用エアロック		
	制御棒駆動機構搬出ハッチ		
原子炉建物 原子炉棟地下階	サプレッション・チェンバ アクセスハッチ		

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 解析結果

① ベントケース

各フロア水素濃度の時間変化を図1に示す（参考として、有効性評価結果を踏まえた条件の解析結果を再掲する）。

全フロアにおいて水素濃度は可燃限界未満であることを確認した。

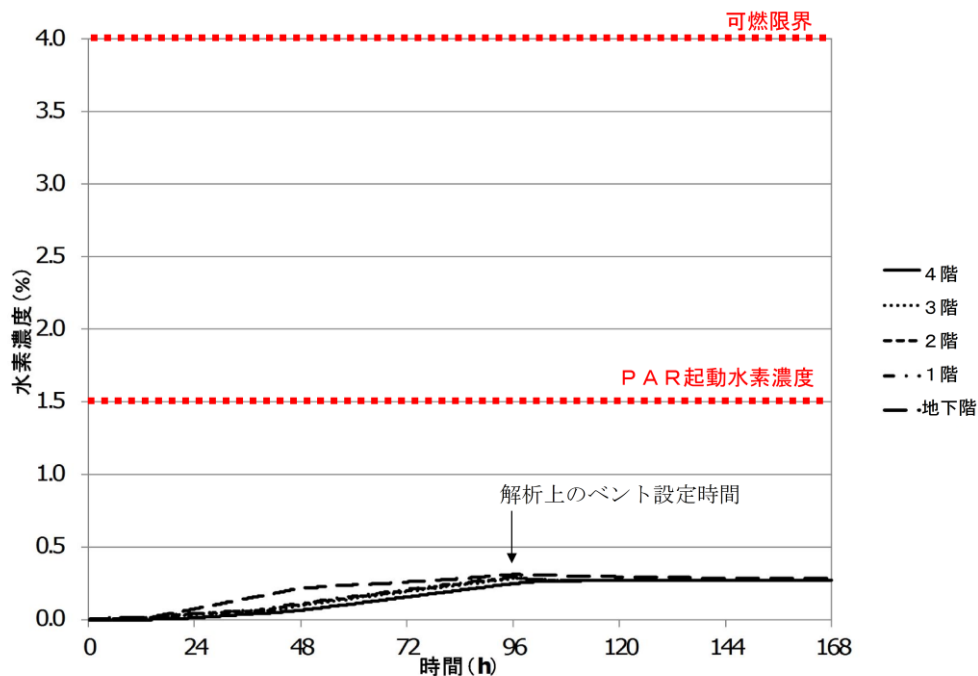


図1 各フロアの水素濃度の時間変化（ベントケース，原子炉ウエル注水あり，沸騰なし）

また，原子炉ウエルへの注水に伴い，原子炉ウエルに溜まった水が蒸発し，原子炉建物原子炉棟4階へ水蒸気が流入した場合の原子炉建物原子炉棟内の水素挙動への影響を確認するため，蒸気発生を考慮した場合の評価結果を図2に示す。なお，原子炉建物原子炉棟4階への水蒸気流入条件以外は，図1に示した解析と同条件である。

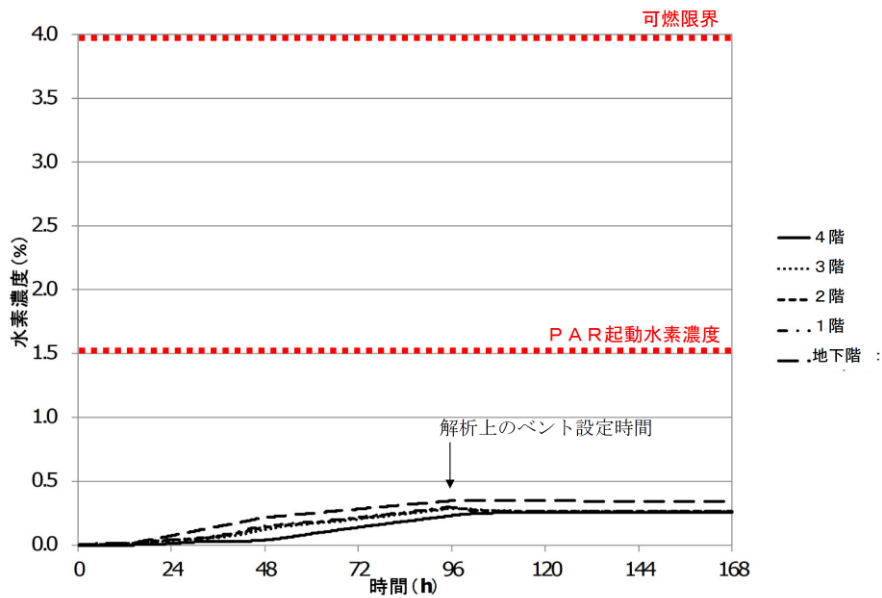
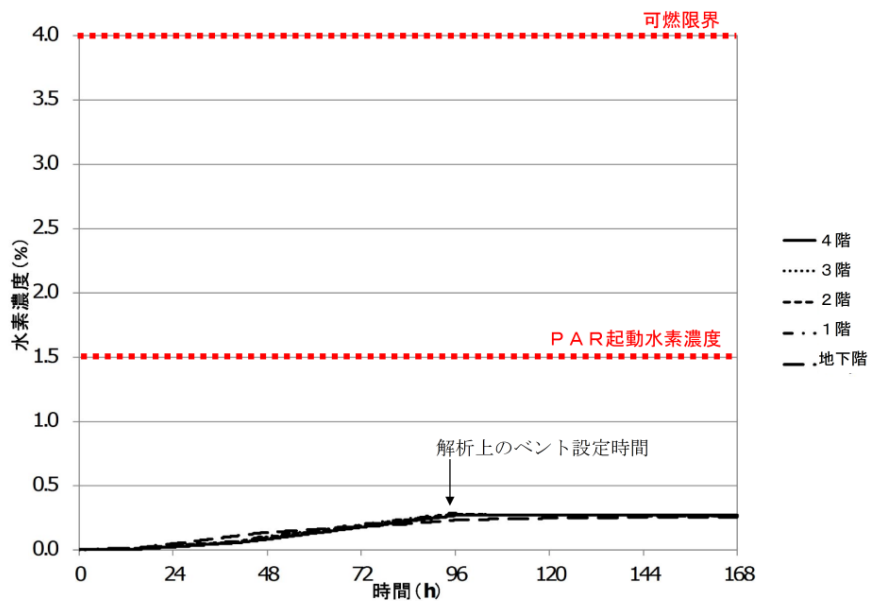


図2 各フロアの水素濃度の時間変化（ベントケース，原子炉ウェル注水あり，沸騰あり）



【参考】図 2. 2. 2-19 フロアの水素濃度の時間変化（ベントケース）

図1及び図2より，原子炉ウェルに溜まった水が蒸発し水蒸気として流入することにより，原子炉建物原子炉棟4階への水素流入は緩やかになるが，大物搬入口及びトラス室上部ハッチを通じて原子炉建物原子炉棟3階以下で水素濃度が均一化される効果と相まって，可燃限界未満となることを確認した。

② R H A R ケース

各フロア水素濃度の時間変化を図3に示す。全フロアにおいて水素濃度は可燃限界未満であることを確認した。

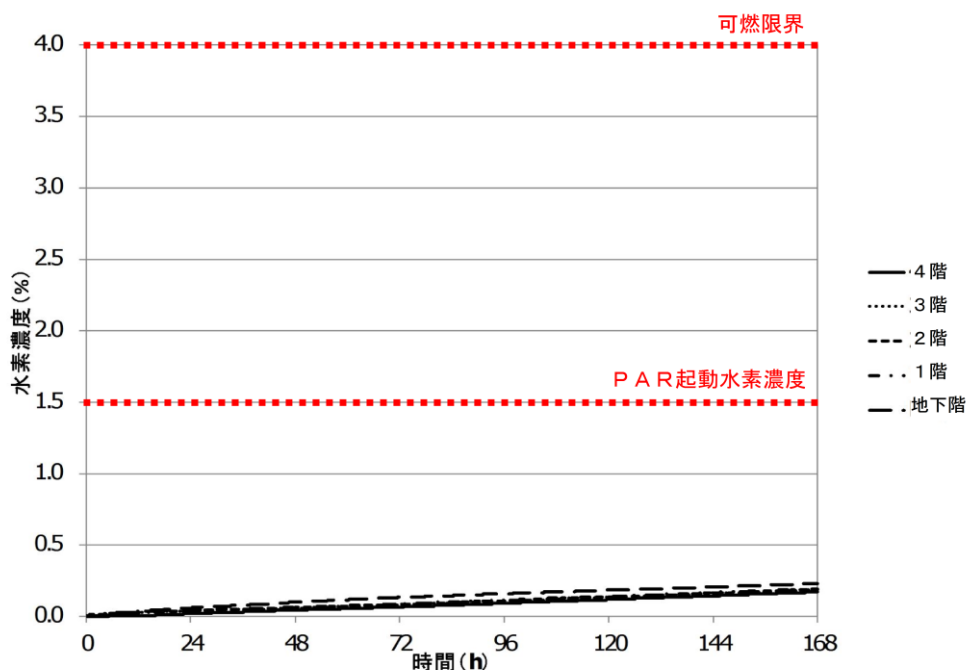


図3 各フロアの水素濃度の時間変化（R H A R ケース，原子炉ウェル注水あり，沸騰なし）

また①と同様，原子炉ウェルへの注水に伴い，原子炉ウェルに溜まった水が蒸発し，原子炉建物原子炉棟4階へ水蒸気が流入した場合の原子炉建物原子炉棟内の水素挙動への影響を確認するため，蒸気発生を考慮した場合の評価結果を図4に示す。なお，原子炉建物原子炉棟4階への水蒸気流入条件以外は，図3に示した解析と同条件である。

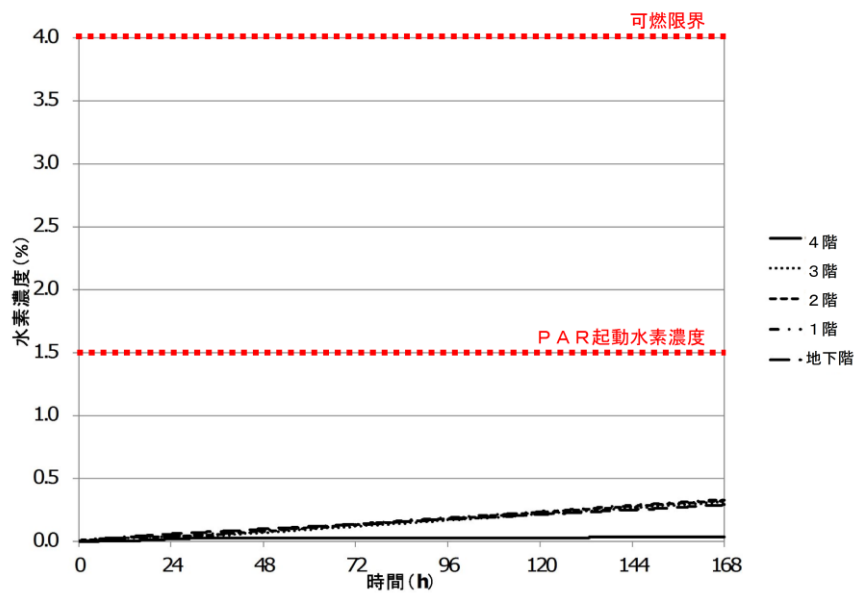
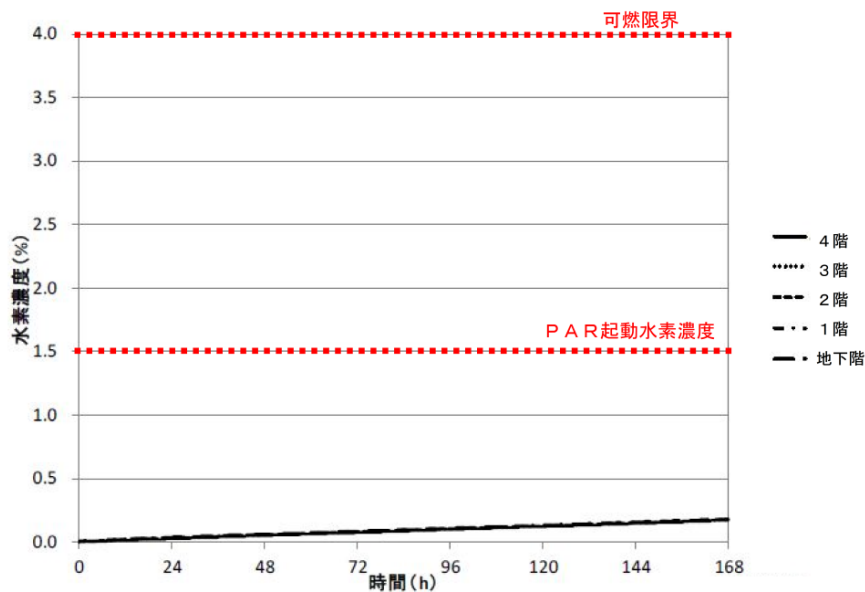


図4 各フロアの水素濃度の時間変化（RHARケース，原子炉ウェル注水あり，沸騰あり）



【参考】図 2. 2. 2-21 各フロアの水素濃度の時間変化（RHARケース）

図3及び図4より，①と同様，原子炉ウェルに溜まった水が蒸発し水蒸気として流入することによって，原子炉建物原子炉棟4階への水素流入が緩やかになるが，大物搬入口及びトラス室上部ハッチを通じて原子炉建物原子炉棟3階以下で水素濃度が均一化される効果と相まって，可燃限界未満となることを確認した。

2. 格納容器ベント遅延ケース

ベントケースに対し、格納容器条件を表3に示すとおり設定する。なお、解析上のベント設定時間（事故後96時間）直前の格納容器条件が、96時間以降についても継続する条件としている。

(1) 解析条件

圧力、温度及びD/W・S/Cガス組成を図5から図8に示す。

表3 解析条件

分類	項目	格納容器ベント遅延ケース		有効性評価結果を踏まえた条件
		96h以降	0～96h	
格納容器条件	圧力 (kPa[gage])	853	本文表 2.2.2-7	
	温度 (°C)	200		
	漏えい率 (%/日)	1.3		
	水素濃度 (vol%)	8	D/W : 本文表 2.2.2-8 S/C : 本文表 2.2.2-9	
窒素濃度 (vol%)	0			
水蒸気濃度 (vol%)	92			

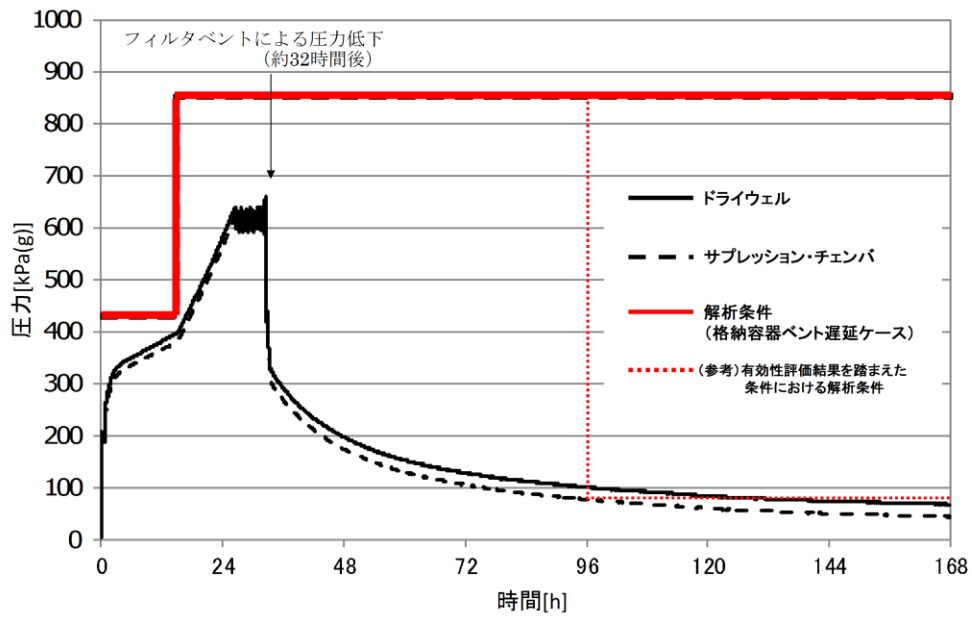


図5 格納容器圧力条件 (格納容器ベント遅延ケース)

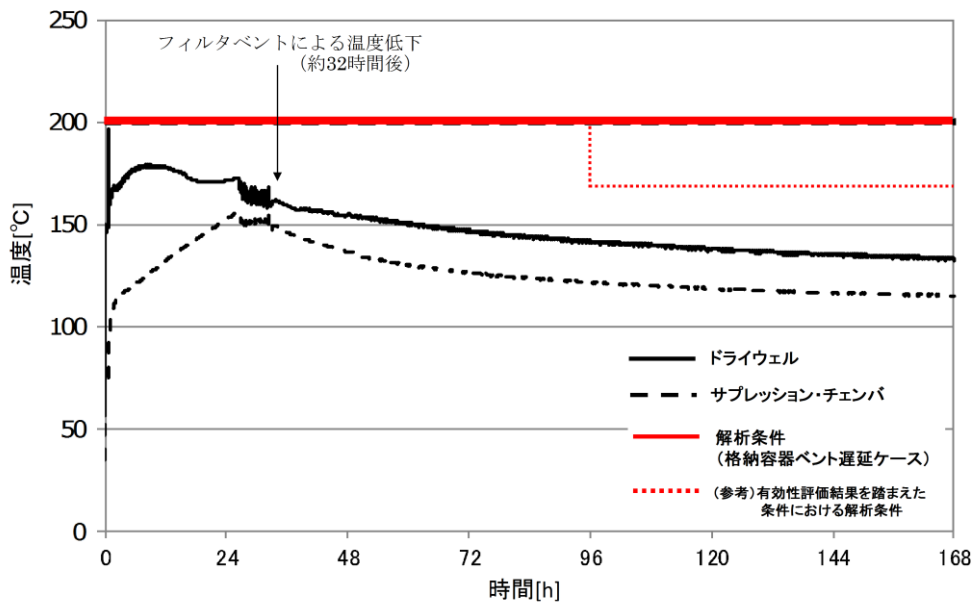


図6 格納容器温度条件 (格納容器ベント遅延ケース)

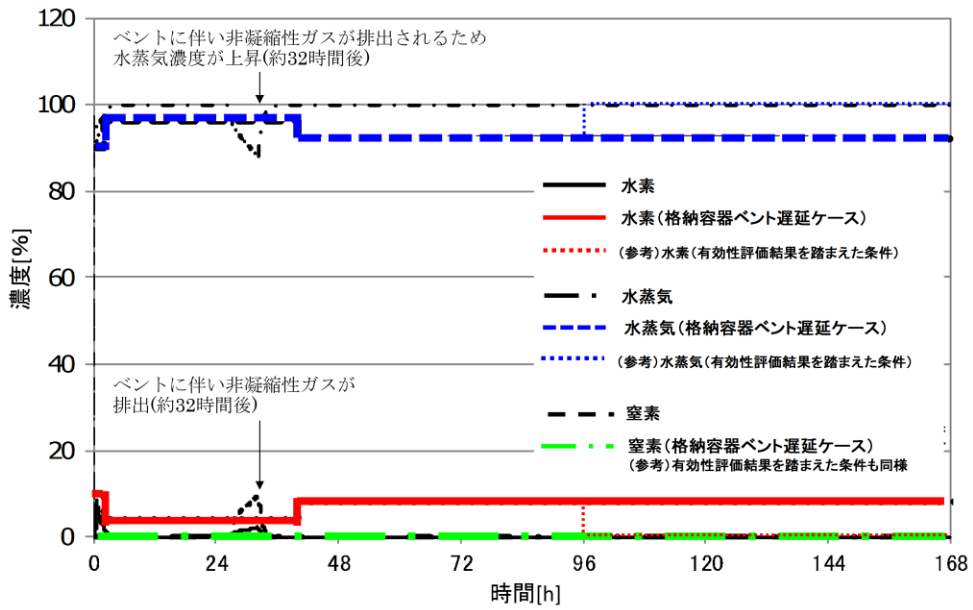


図7 D/W内ガス条件 (格納容器ベント遅延ケース)

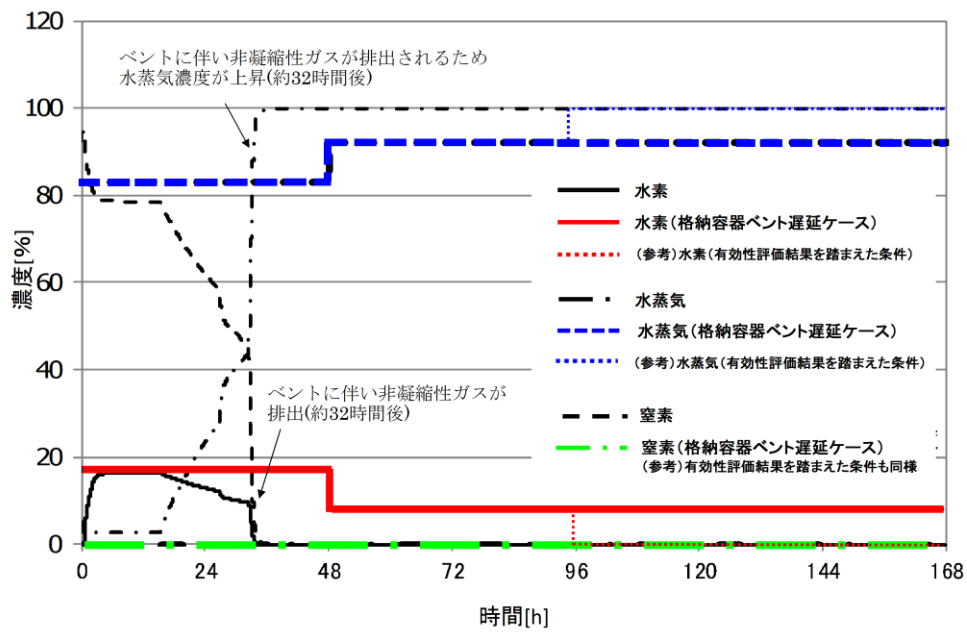


図8 S/C内ガス条件 (格納容器ベント遅延ケース)

(2) 解析結果

各フロアの水素濃度の時間変化を図9に示す（参考として、有効性評価結果を踏まえた条件の解析結果を再掲する）。

全フロアにおいて水素濃度は可燃限界未満であることを確認した。

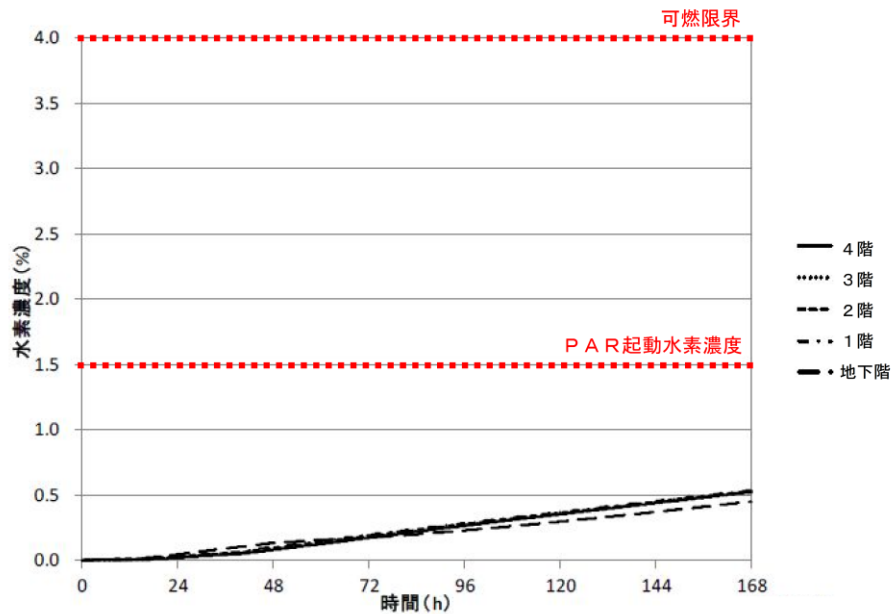
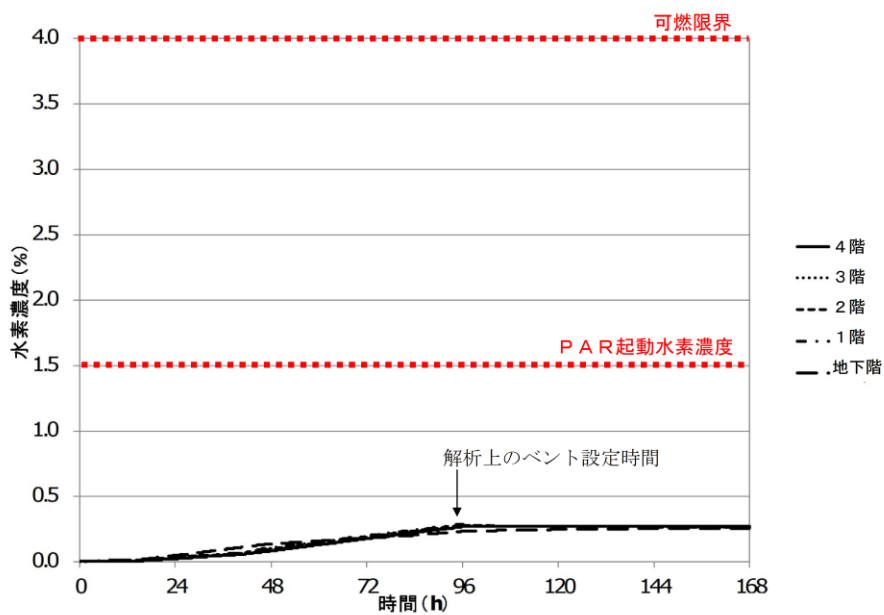


図9 各フロアの水素濃度の時間変化（格納容器ベント遅延ケース）



【参考】図 2. 2. 2-19 各フロアの水素濃度の時間変化（ベントケース）

3. 水素漏えい時の対策

有効性評価結果を踏まえた条件における原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析では、局所エリアを含めて水素濃度が可燃限界未満となること、原子炉建物原子炉棟4階の全てのサブボリュームにおいて水素濃度に偏りが無いこと、格納容器ベント実施により水素発生源を断ち、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制できることを確認している。

また、P A R設計条件における原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析では、P A Rによる水素処理による原子炉建物原子炉棟の水素上昇を抑制できること、原子炉建物原子炉棟4階の全てのサブボリュームにおいて水素濃度に偏りが無いことを確認している。

これらの解析結果を踏まえ、格納容器設計漏えい率を超えるような異常な漏えいが発生した場合には、格納容器フィルタベント系による格納容器ベントを実施し、原子炉建物原子炉棟内の水素濃度上昇を抑制することが有効と考える。また、局所エリアへ設置する水素濃度計により格納容器からの水素漏えいを早期に検知することが可能であり、原子炉建物原子炉棟4階に設置する水素濃度計とともに原子炉建物原子炉棟内全体での水素影響を把握することが可能である。自主対策設備も含めた水素漏えい時の対策の全体フローを図10に、フローに記載している判断基準の考え方を以下に示す。

【判断基準の考え方】

① 異常な漏えいを抑制するため格納容器ベントを実施

水素濃度が 1.5vol% を超えると P A R の作動、水素処理による水素濃度上昇の抑制効果を見込むことができ、また、格納容器の設計漏えい率を超えた状態では水素とともに放射性物質も漏えいする可能性が高いため、早期に格納容器ベント操作へ移行する方が有効と考え、水素濃度 2.5vol% に到達した時点でベント実施を判断する。また、ベント実施基準の 2.5vol% に対し、運転操作の余裕時間 (0.4vol% = 3 時間^{*1}) を踏まえ、水素濃度 2.1vol% に到達した時点でベント準備を判断する。

※1：図 11 に示す解析結果から、傾きが大きくなるよう読み取った水素濃度上昇率 (約 3.2vol%/24 時間 \div 0.133vol%/時間) を基に設定した値 (0.4/0.133 \div 3 時間)

② 非常用ガス処理系の停止

非常用ガス処理系は、格納容器から漏えいしたガスに含まれる放射性物質を低減しつつ、水素を大気へ放出することで原子炉建物原子炉棟の水素濃度上昇を抑制でき、また、水素の成層化を防ぐ換気効果を有することから、運転可能な場合は使用する。ただし、非常用ガス処理系は防爆仕様ではないため、系統内での水素爆発のリスクを回避する必要がある、可燃限界を下回る水素濃度 1.8vol%^{*2} を非常用ガス処理系の停止基準とする。

※2：非常用ガス処理系内の蒸気凝縮による水素濃度上昇 (約 1.36 倍^{*3}) を考慮し、水素濃度計の計器誤差 ($\pm 1.1\%$) を加味した上で、可燃限界の 4vol% に到達しない基準として設定 (4/1.36-1.1 \div 1.8vol%)

※3：原子炉建物原子炉棟 2 階の重大事故等時に想定される環境条件 (温度：66℃、湿度：100%) における水蒸気 (蒸気濃度：約 26%) が全て凝縮するとした場合の倍率 (1/(1-0.26) \div 1.36 倍)

③ 原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放

P A R による水素処理や格納容器ベントによる水素処理にも関わらず、原子炉建物原子炉棟への水素が漏洩する場合には、原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネルを開放することにより水素濃度上昇を抑制する。P A R による水素処理や格納容器ベントによる水素上昇の抑制効果を考慮し、原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放は格納容器ベントを実施してもなお水素濃度が低下しない場合に実施する。なお、図 11 に原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放による燃料取替階の水素濃度の時間変化を示すが、格納容器ベントの判断基準である水素濃度 2.5vol% から、原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放の判断及び準備時間を踏まえても、可燃限界到達までには十分に時間

的余裕があることから，原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネルの開放操作は可能であり，原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放後は燃料取替階の水素濃度の低減が期待できる。

④ 原子炉ウェル代替注水系による原子炉ウェル注水

ドライウェル主フランジからの水素ガス漏えいを抑制するため，原子炉格納容器内の温度の上昇が継続し，171℃に到達した場合において，原子炉ウェル代替注水系が使用可能であれば原子炉ウェル代替注水系による原子炉ウェルへの注水を実施する。

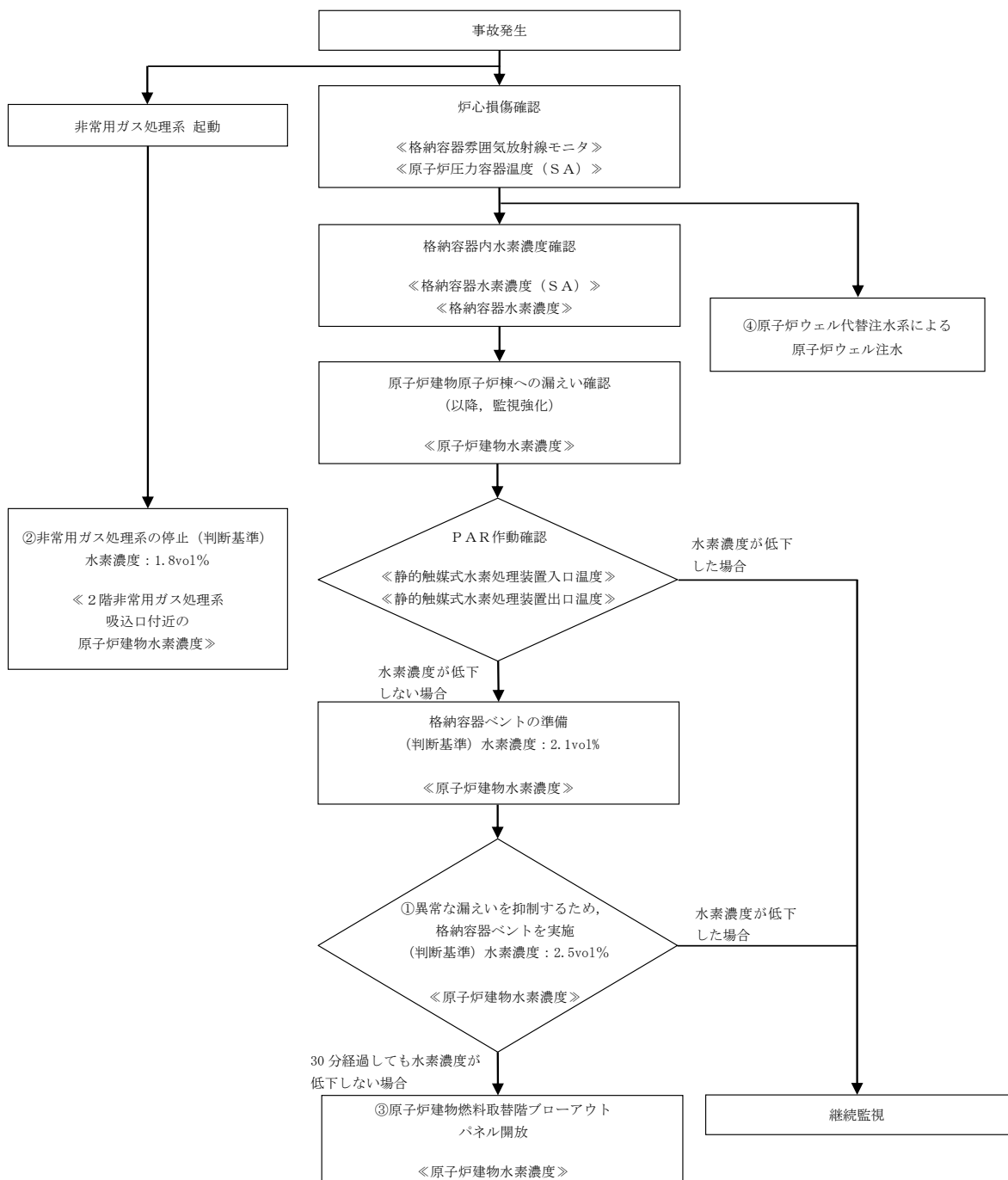


図 10 水素漏えい時の対策フロー

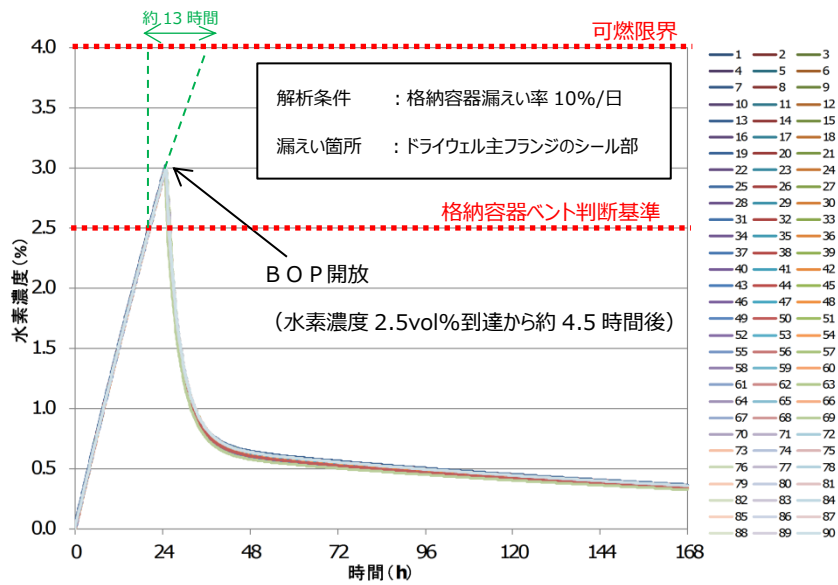


図 11 原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル開放による水素濃度の時間変化 (P A R 及び格納容器ベント不作動時)

局所エリアにおける水素爆発防止対策について

1. はじめに

当社は、格納容器から漏えいした水素ガスを処理するために原子炉建物原子炉棟4階にPARを設置し、ドライウェル主フランジ並びにそれ以外の格納容器漏えいポテンシャルがある箇所から漏えいする水素ガスを原子炉建物原子炉棟4階で再結合処理することで、原子炉建物原子炉棟の水素濃度上昇を抑制する。格納容器漏えいポテンシャルがある箇所には、局所エリアになっている箇所もあるため、そこでの水素ガス濃度の影響について説明する。

2. 水素影響を考慮すべき局所エリアについて

格納容器のバウンダリ構成部である構造部及びシール部に対して、「限界温度・圧力評価」にて設定した限界温度及び、限界圧力を踏まえると、シール部の限界よりも構造部の限界の方が十分裕度があることが確認されており、格納容器からの漏えい箇所としては、シール部を選定している。(参考資料1)

このうち、水素影響を考慮すべき局所エリアにあるものを抽出した結果を表1に示す。また、それらの配置を図1及び図2に示す。

表1 水素影響を考慮すべき局所エリア

漏えいフロア	想定漏えい箇所	評価対象区画
原子炉建物 原子炉棟2階	逃がし安全弁搬出ハッチ	S R V補修室
原子炉建物 原子炉棟1階	制御棒駆動機構搬出ハッチ	C R D補修室
	所員用エアロック	所員用エアロック室

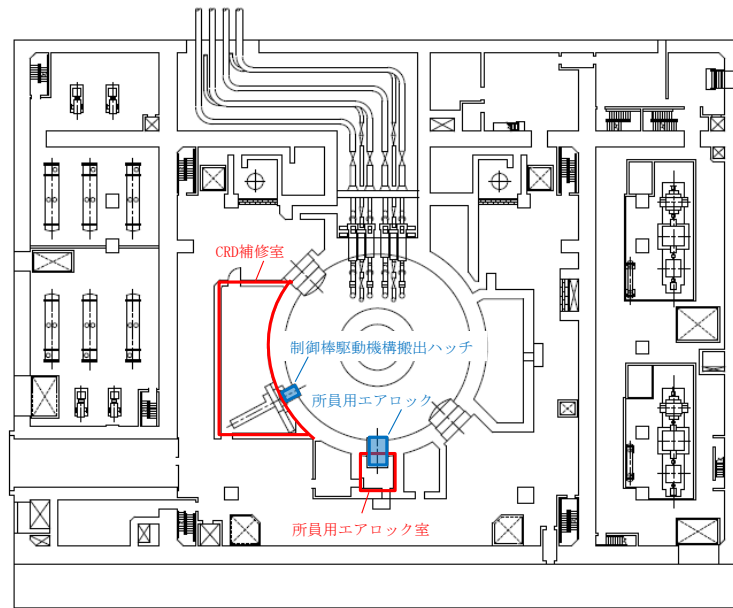


図1 評価対象区画（原子炉建物1階）



図2 評価対象区画（原子炉建物2階）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3. 解析モデル

SRV補修室，CRD補修室の解析モデルを図3に示す。また，所員用エアロック室の解析モデルを図4に示す。所員用エアロック室の解析モデルについては，エリアの雰囲気が循環することによる希釈効果を天井及び側面の換気ダクトをモデル化することで模擬する。



図3 解析モデル（SRV補修室，CRD補修室）

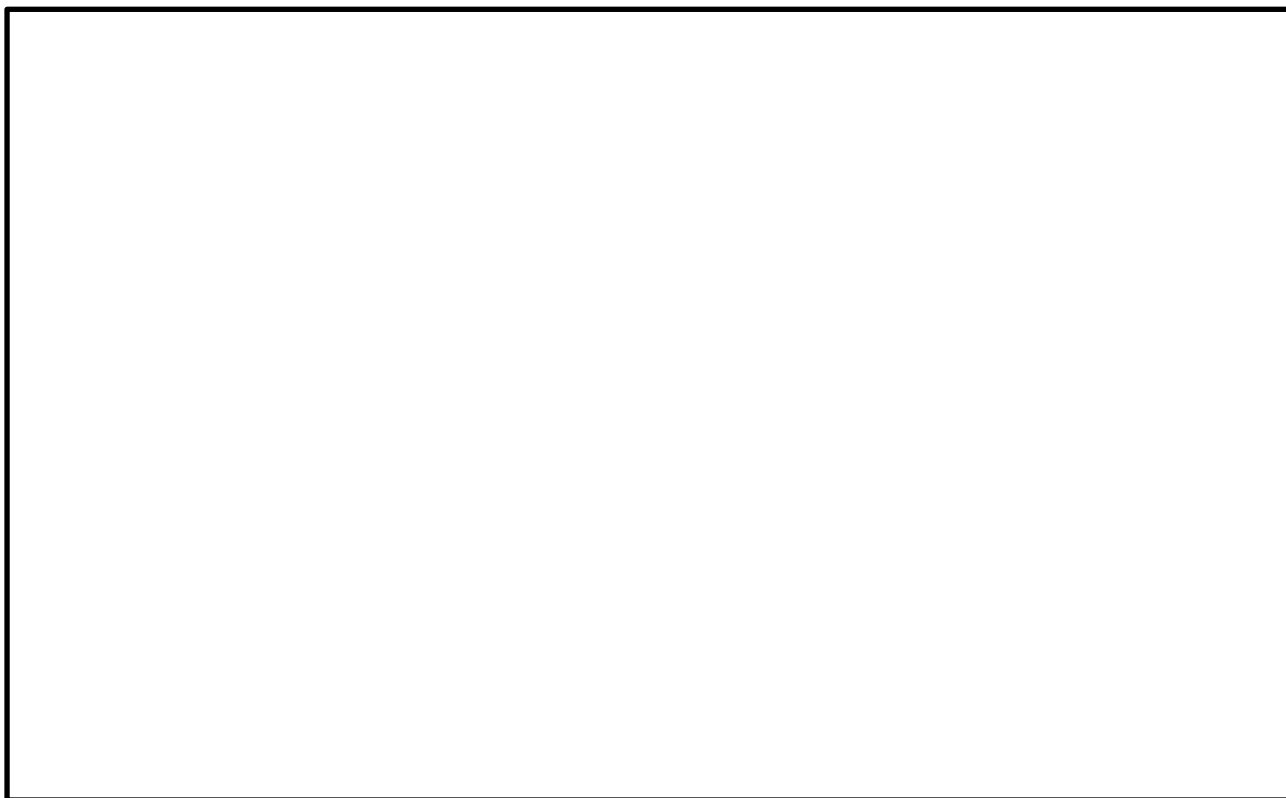


図4 解析モデル（所員用エアロック室）

4. 解析条件

格納容器からの漏えい条件は表2に示すとおり、本文「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」の有効性評価結果を踏まえた条件と同じとする。ただし、保守的な評価を行うため、格納容器から漏えいした瞬間、全ての水蒸気が瞬時に凝縮することを仮定する。具体的には漏えいガスの水蒸気分を除いた水素ガスが100℃で流入することとする。

評価対象区画の流入境界条件については、各想定漏えい箇所 の 周長比 に 応 じて 按 分 し た 値 を、 その 評 価 対 象 区 画 の 流 入 量 と す る。

また、評価対象区画の容積を表3に示す。

表2 格納容器からの漏えい条件

分類	項目	有効性評価結果を踏まえた条件	
		ベントケース	RHARケース
格納容器条件	圧力 温度 漏えい率	本文表 2.2.2-7	本文表 2.2.2-10
	水素濃度 窒素濃度 水蒸気濃度	本文表 2.2.2-8	本文表 2.2.2-11

表3 評価対象区画の容積

S R V 補修室	1,076m ³
C R D 補修室	379m ³
所員用エアロック室	37m ³

5. 解析結果

① ベントケース

S R V補修室，C R D補修室及び所員用エアロック室の解析結果を，それぞれ図5から図7に示す。

いずれの区画についても，水素濃度の可燃限界4 vol%を下回る。

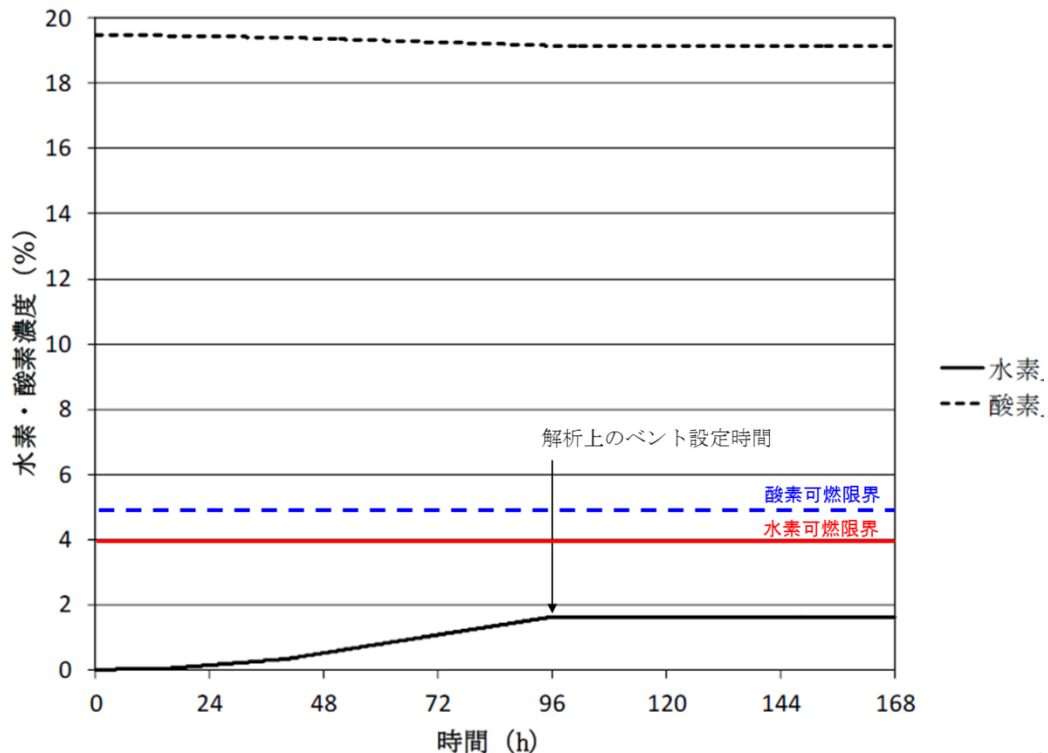


図5 水素・酸素濃度の時間変化（S R V補修室）

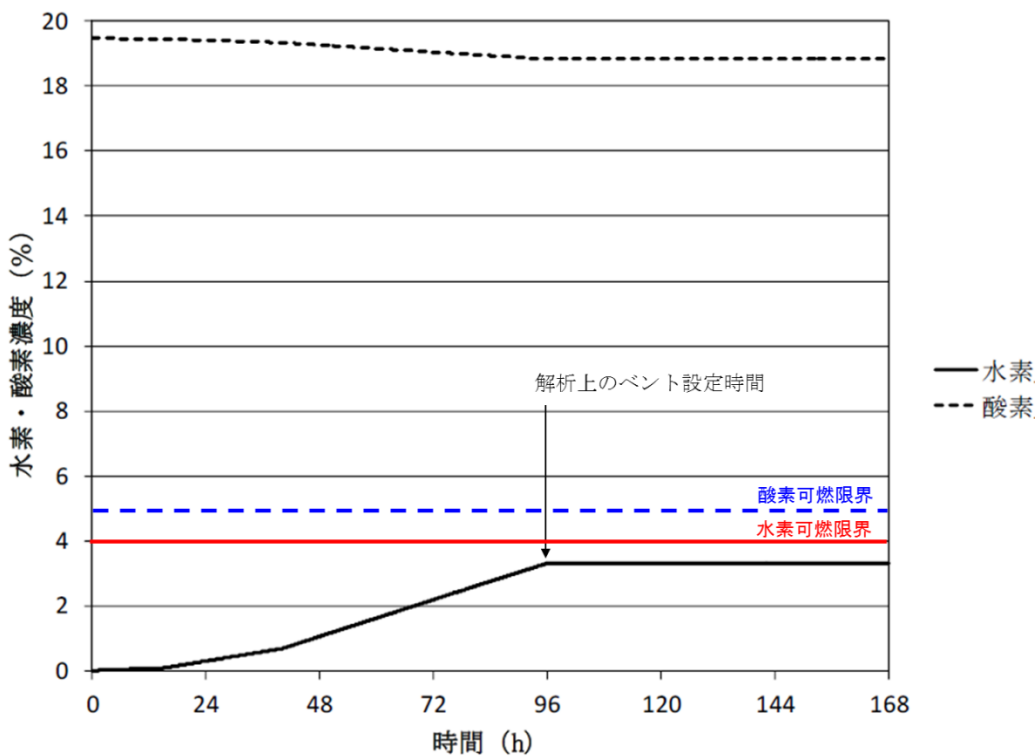


図6 水素・酸素濃度の時間変化（C R D補修室）

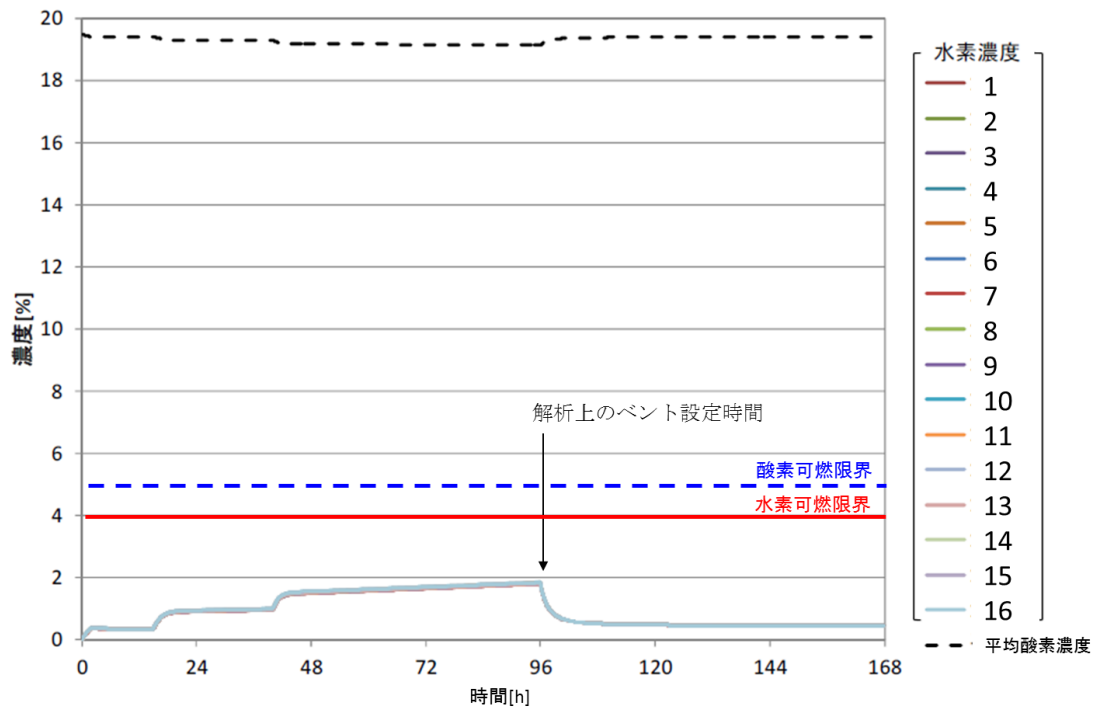


図7 水素・酸素濃度の時間変化 (所員用エアロック室)

② RHAR ケース

S R V 補修室, C R D 補修室及び所員用エアロック室の解析結果を, それぞれ図8から図10に示す。

いずれの区画についても, 水素濃度の可燃限界4 vol%を下回る。

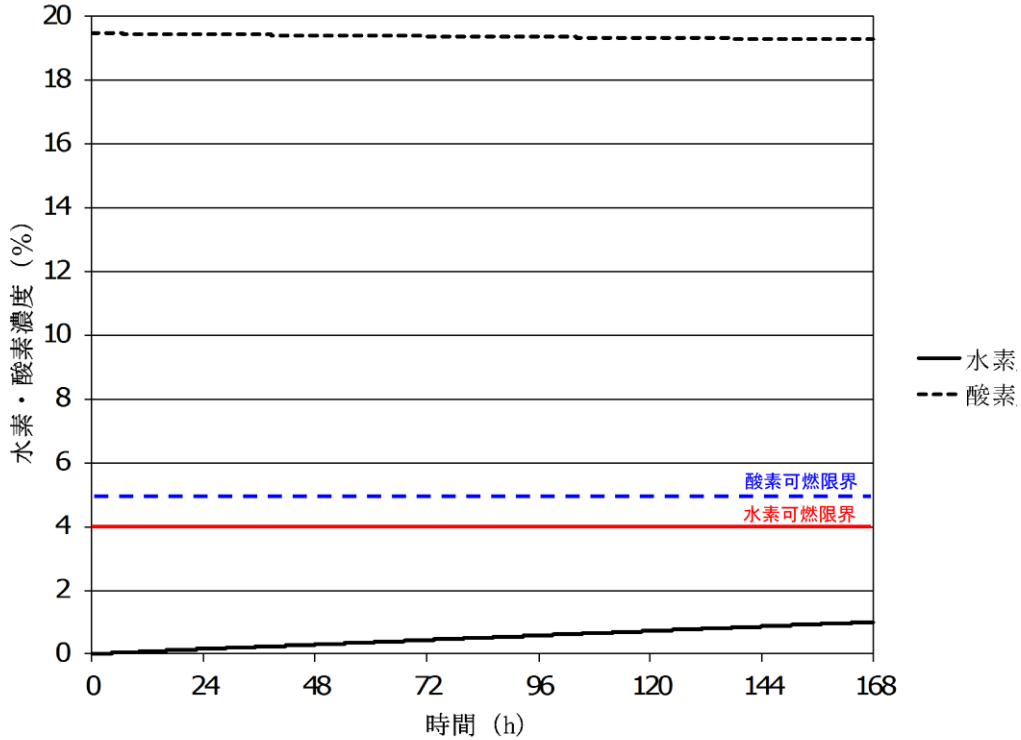


図8 水素・酸素濃度の時間変化 (S R V 補修室)

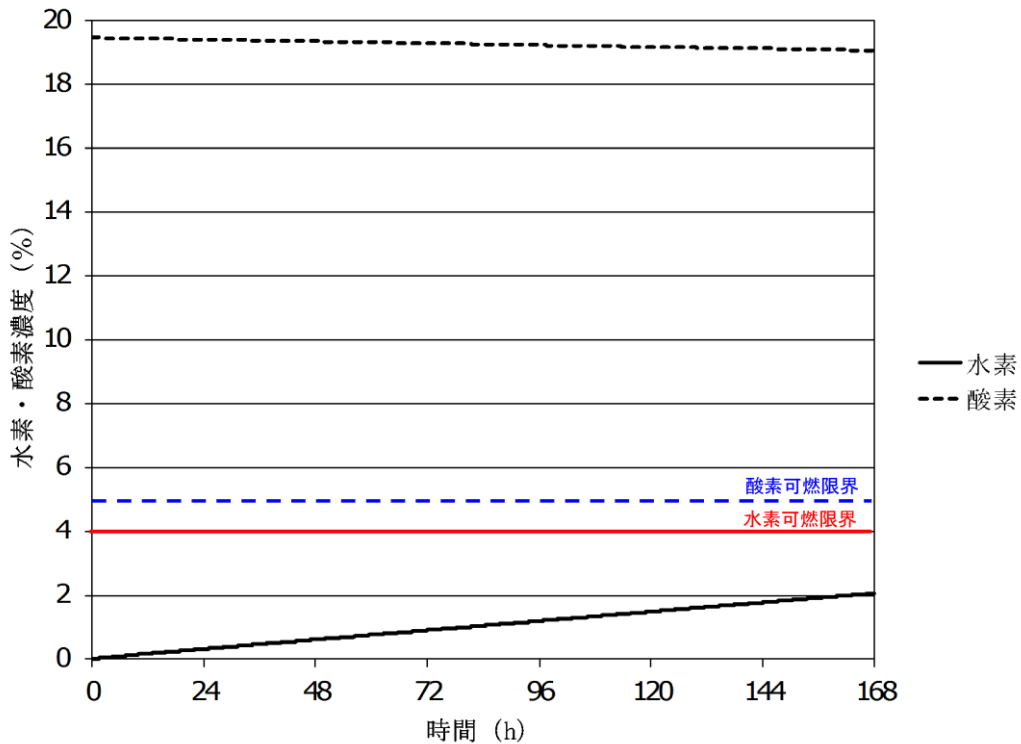


図9 水素・酸素濃度の時間変化 (C R D 補修室)

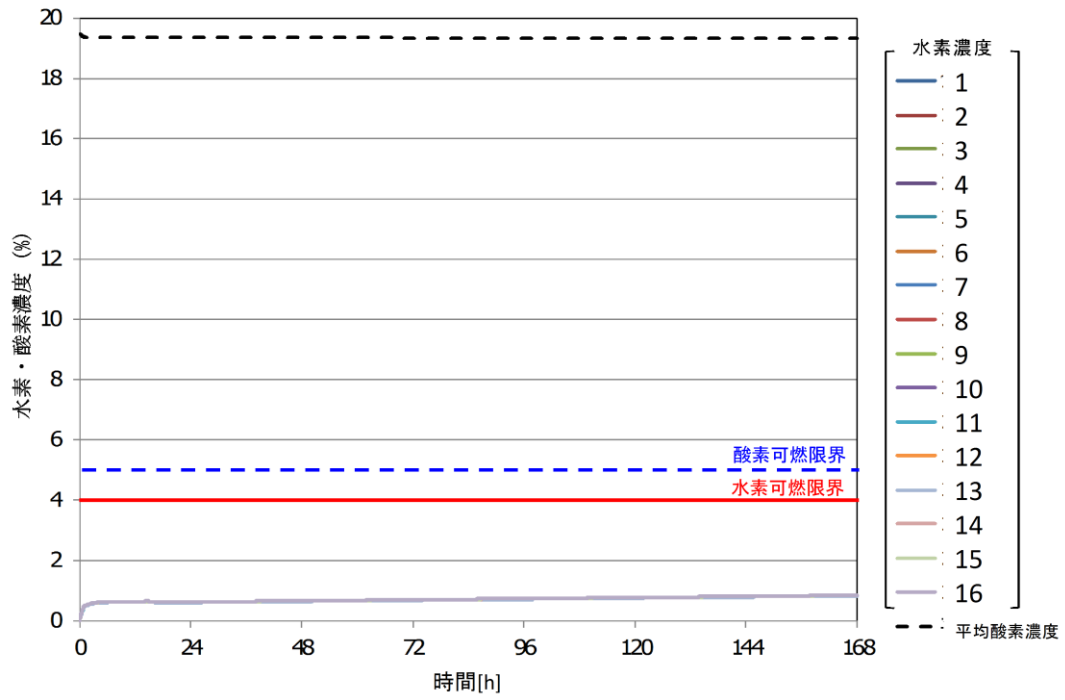


図 10 水素・酸素濃度の時間変化（所員用エアロック室）

6. 評価結果

局所エリアであるSRV補修室、CRD補修室及び所員用エアロック室について、特別な水素対策を行わない状態において局所エリアへの水素流入を保守的に評価した結果、水素濃度は可燃限界を下回ることを確認した。

以上のことから局所エリアにおいては、水素濃度が可燃限界未満となることを確認しているが、局所エリアに漏えいした水素ガスを早期検知及び滞留状態を把握することは、水素爆発による原子炉建物の損傷を防止するために有益な情報になることから、表1に示す局所エリアに漏えいした水素ガスを計測するための水素濃度計を設置し、事故時の監視機能を向上させる。設置場所を図11に示す。これにより、格納容器内にて発生した水素ガスが漏えいするポテンシャルのある箇所での水素濃度と、水素ガスが最終的に滞留する原子炉建物原子炉棟4階での水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建物原子炉棟全体での水素影響を把握することができる。

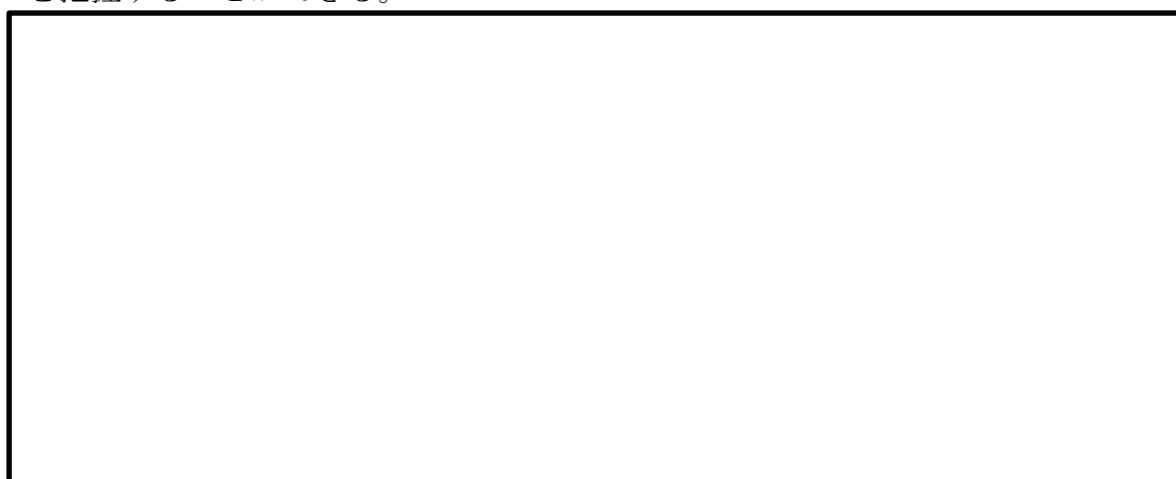


図11 局所エリア用の原子炉建物水素濃度の設置場所（1／2）

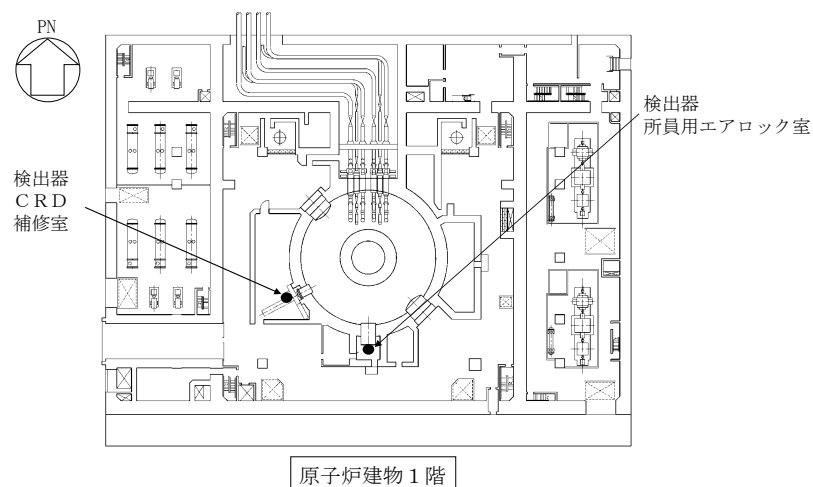


図11 局所エリア用の原子炉建物水素濃度の設置場所（2／2）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.2.3 P A R の性能試験について

メーカーによる開発試験により P A R の基本性能評価式が設定され、様々な環境下での P A R の性能確認のため、国際的な実証試験が実施されている。以下に性能評価式の導出、様々な環境下における P A R の性能評価等を示す。

(1) P A R の水素濃度低減性能試験について

基本性能評価式の設定、P A R 設置位置の違いによる性能評価を目的とし、P A R 開発試験として、Battelle MC 試験が実施されている。

試験条件を表 2.2.3-1、試験体概要を図 2.2.3-1 に示す。複数の部屋に区画された試験装置内に P A R を設置したのち、水素を注入し、各部屋での水素濃度等を測定している。

図 2.2.3-2 は、R 5 の部屋に P A R を設置し、雰囲気蒸気条件にしたのちに R 5 の部屋へ水素を注入したケースの試験概要を示している。この試験ケースにおける各部屋の水素濃度変化を図 2.2.3-3 に示す。触媒反応によって生じる対流等の効果により、水素濃度分布はほぼ均一になっていることが分かる。得られた試験結果をもとに、P A R の入口・出口における水素濃度の差より算出した再結合効率を図 2.2.3-4 に示す。再結合効率は約 85% (0.846) となっている。

この試験を通じて基本性能評価式は設定されており、以下に導出過程を示す。メーカーにおいて、P A R への流入量と水素濃度の相関は以下の式で表されると仮定している。

$$Q = a \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^b \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-1)}$$

Q : P A R への流入量 (m³/s)

C_{H₂} : 水素濃度 (vol%)

a : 定数

b : 定数

単位時間あたりの水素処理容量は、単位時間あたりに P A R へ流入する水素量と P A R の性能を示す再結合効率により表され、以下となる。

$$DR = Q \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right) \cdot \gamma \cdot \eta \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-2)}$$

DR : 水素処理容量 (kg/s)

γ : 水素密度 (kg/m³)

η : 再結合効率

試験における測定値による水素処理容量は以下となる。

$$DR = \frac{dC_{H_2}}{dt} \cdot V_C \cdot \gamma \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-3)}$$

$\frac{dC_{H_2}}{dt}$: 水素濃度変化率

V_C : 試験容器体積 (m³)

(式 2.2.3-2) 及び (式 2.2.3-3) より, 試験における P A R への流入量は, 水素濃度変化の測定値から求まる。

$$Q = \frac{dC_{H_2}}{dt} \cdot V_C / \left(\frac{C_{H_2}}{100} \cdot \eta \right) \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-4)}$$

(式 2.2.3-4) による流入量と, その時の水素濃度のデータより, (式 2.2.3-1) の定数 a, b はフィッティングにより決定される。

$$a = 0.67$$

$$b = 0.307$$

(式 2.2.3-1), (式 2.2.3-2) より水素処理速度は以下のように表される。

$$DR = a \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{b+1} \cdot \gamma \cdot \eta \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-5)}$$

ここで, 水素密度は気体の状態方程式にしたがい, 次式で表される。

$$\gamma = \frac{P}{T \cdot R_{H_2}} \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-6)}$$

P : 圧力 (10⁵Pa)

T : 温度 (K)

R_{H₂} : 水素の気体定数 (10⁵J/kg·K)

(式 2.2.3-5), (式 2.2.3-6) により, P A R の水素処理容量は次式で表される。

$$DR = \frac{a \cdot \eta}{R_{H_2}} \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{b+1} \cdot \frac{P}{T} \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2.3-7)}$$

$$\frac{a \cdot \eta}{R_{H_2}} = A = \boxed{}, \quad b + 1 = 1.307$$

(式 2.2.3-7) にスケールファクタを乗じたものが (式 2.2.1-1) に示す P A R の基本性能評価式となる。

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 2.2.3-1 試験条件

試験名称		Battelle MC 試験	
試験体			
試験条件	温度		
	圧力		
	水蒸気濃度		
	水素濃度		

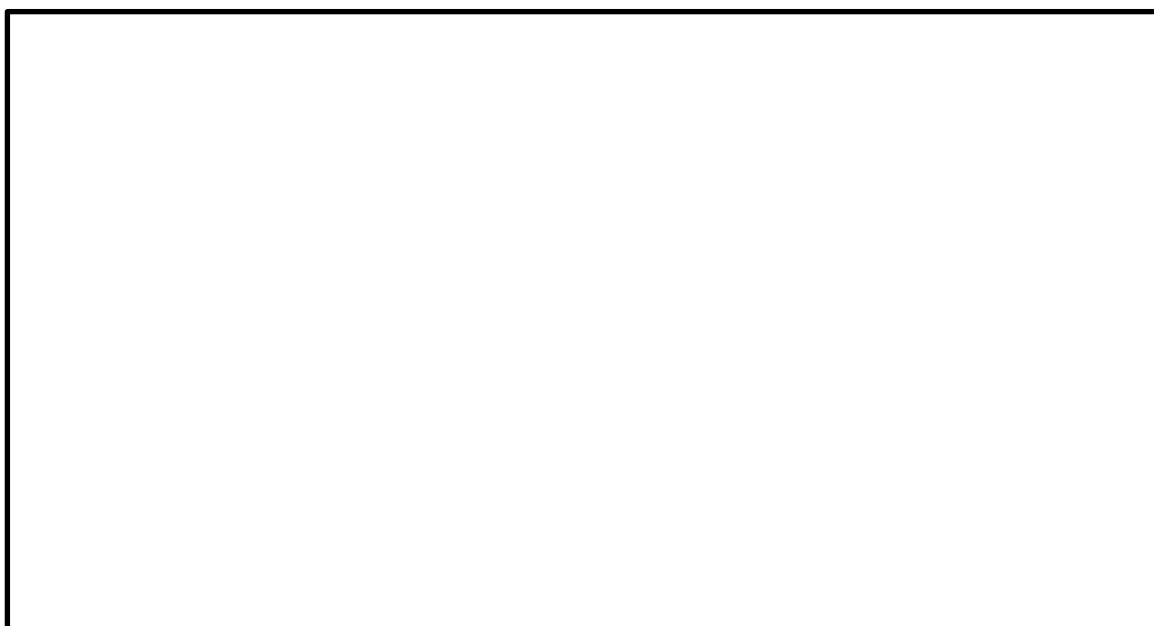


図 2.2.3-1 試験体概要図



図 2.2.3-2 試験概要図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

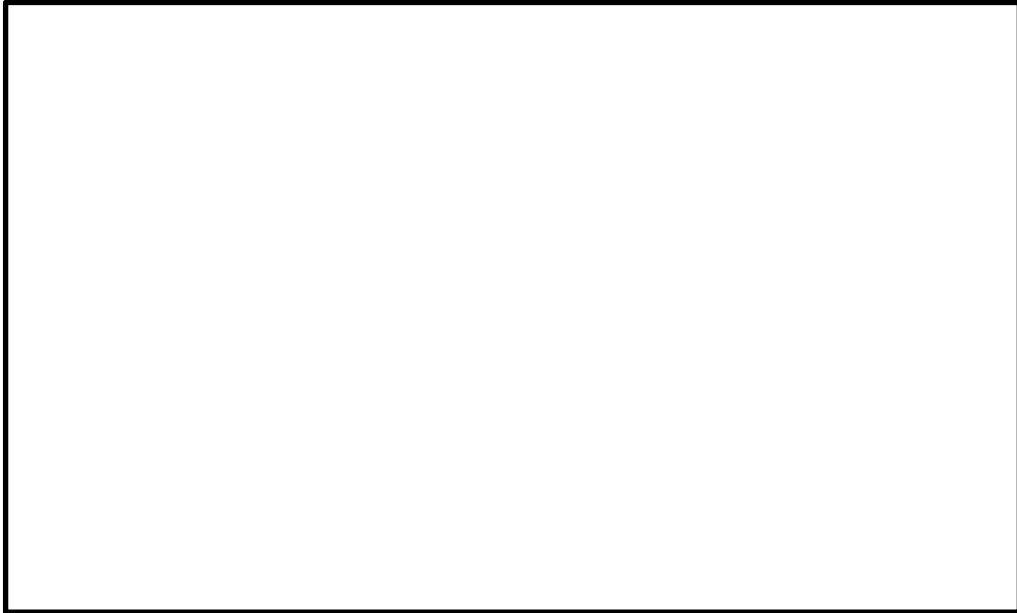


図 2.2.3-3 試験結果（各部屋の水素濃度変化）

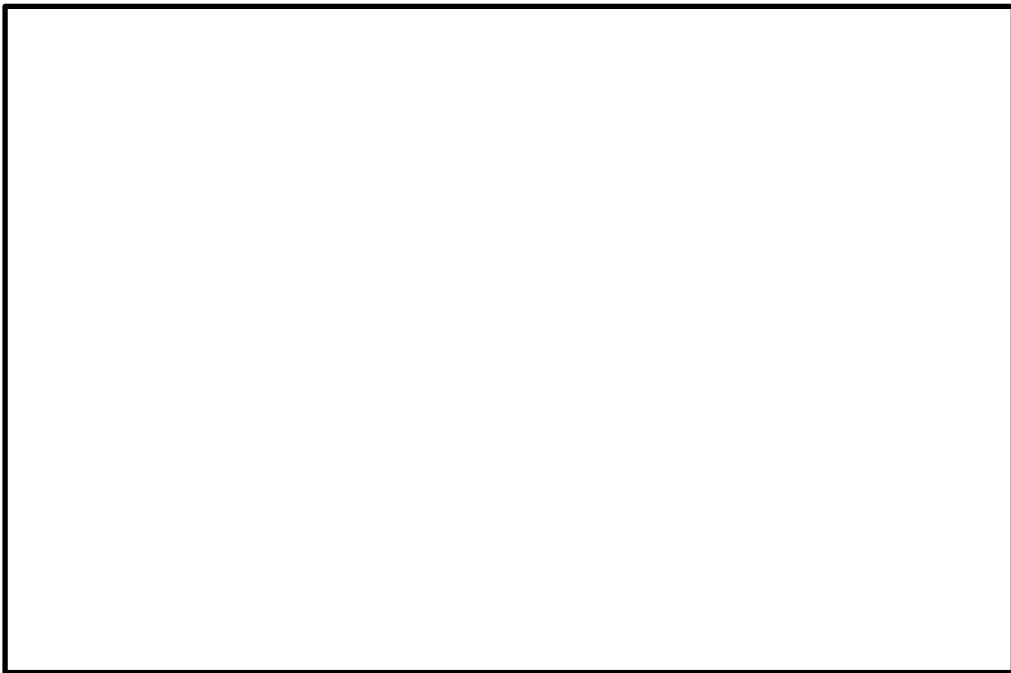


図 2.2.3-4 試験結果（再結合効率の算出）

(2) 雰囲気の違いによる P A R の性能影響

E P R I と E D F の合同により、C E A（フランス原子力庁）の Cadarache 研究所の K A L I 施設を用い、圧力、温度、蒸気等の雰囲気条件の違いによる影響の有無を確認するため、K A L I 試験が実施されている。試験条件を表 2.2.3-2 に、試験体の概要を図 2.2.3-5 に、試験装置の概要を図 2.2.3-6 に示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 2.2.3-2 試験条件

試験名称	K A L I 試験					
試験体						
試験条件				温度		
				圧力		
				水蒸気濃度		
	水素濃度					

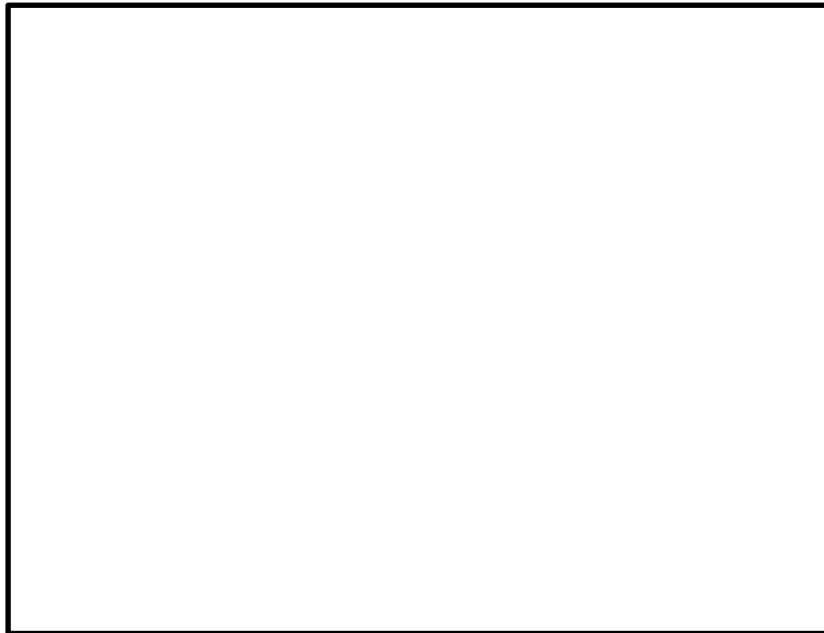


図 2.2.3-5 試験体概要図



図 2.2.3-6 試験装置概要図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

① 蒸気環境下での影響

蒸気環境下での影響について確認した試験条件を表 2.2.3-3 に、試験結果を図 2.2.3-7 に示す。ドライ条件下と比べて、蒸気条件下での P A R の性能は同等であり、蒸気による影響はないと考えられる。

なお、燃料プールの沸騰により大量の蒸気が発生した場合、蒸気により水素は希釈され、原子炉建物原子炉棟内の水素濃度及び酸素濃度は低下し、可燃限界に達することはないと考える。

表 2.2.3-3 試験条件（蒸気環境による影響）

試験ケース	温度	圧力	水素濃度	蒸気濃度
N8/2				
N9/2				



図 2.2.3-7 試験結果（蒸気環境下での影響）

② 低酸素環境下での影響

K A L I 試験において、低酸素濃度条件下での影響について確認されており、試験条件を表 2.2.3-4 に、試験結果を図 2.2.3-8 に示す。試験条件としては、初期水素濃度及び酸素濃度以外は同じ雰囲気条件で行っており、図 2.2.3-8 に示すように、酸素濃度が低い場合、水素と酸素による再結合反応が進まなくなることから、P A R の性能が低下していることが分かる。また、N4/2 の試験ケースで酸素が十分であると想定して基本性能評価式を用いて水素処理容量を算出した場合、N6/22 及び N13/7 の試験結果と相違ないことから、低酸素環境下では P A R の性能が低下するといえる。

島根原子力発電所 2 号炉の場合、水素発生量に比べて十分な酸素量を有していることを確認しており、酸素濃度による影響はない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 2.2.3-4 試験条件（酸素濃度による影響）

試験ケース	温度	圧力	初期水素濃度	初期酸素濃度
N4/2				
N6/22				
N13/7				

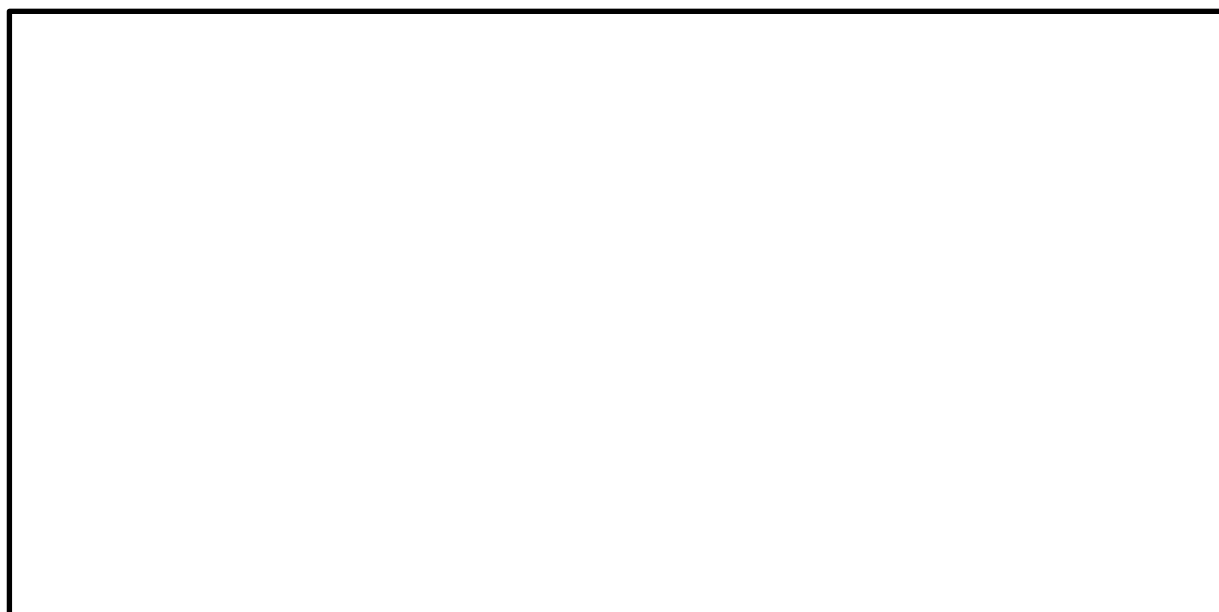


図 2.2.3-8 試験結果（酸素濃度による影響）

(3) スケールファクタの妥当性

触媒カートリッジ 88 枚の試験体（1/1 スケール）を用いた Battelle MC 試験結果に基づき基本性能評価式が設定され、その後、触媒カートリッジの寸法及び設置間隔を保ったままカートリッジ枚数が 44 枚（1/2 スケール）、22 枚（1/4 スケール）、11 枚（1/8 スケール）である小型化された P A R が開発された。

これらの小型 P A R は、単位流路面積あたりの触媒カートリッジ表面積が同一となるよう、ハウジングの開口面積の比も 1/2、1/4、1/8 としていることから、流量（水素処理容量）がカートリッジ枚数に比例するものとして、スケールファクタが設定されている。また、試験等のために触媒カートリッジの高さ以外の寸法を変更している場合でも、触媒カートリッジの設置間隔を同じにすることで、同様にスケールファクタはハウジングの開口面積の比で整理できる。基本性能評価式（式 2.2.3-7）にこのスケールファクタを乗じたものが小型 P A R の基本性能となる。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

KAL I 試験では、小型 PAR よりもさらに流路面積の小さい試験体で性能が確認されている。試験結果とスケールファクタを考慮した基本性能評価式との比較を図 2.2.3-9 に示す。図中の点線は、基本性能評価式を用いて試験条件及び水素濃度から算出し、スケールファクタ (1/40) を考慮したものである。解析上 PAR の動作を期待している水素濃度の範囲 (1.5%~4.0%) において、試験結果と基本性能評価式 (点線) はよく合っており、スケールファクタが妥当であることを示している。

Battelle MC 試験, KAL I 試験ならびに島根原子力発電所 2 号炉で使用する PAR の仕様の比較を表 2.2.3-5 に示す。触媒カートリッジ部やチムニ部のハウジングの高さは同じで、違いは触媒カートリッジ枚数またはハウジング開口面積であることから、スケールファクタとしては 0.025~1 の範囲であれば適用可能と考える。島根原子力発電所 2 号炉で使用する PAR は 1/4 スケールでこの範囲内にあることから、スケールファクタ及び基本性能評価式は適用可能である。

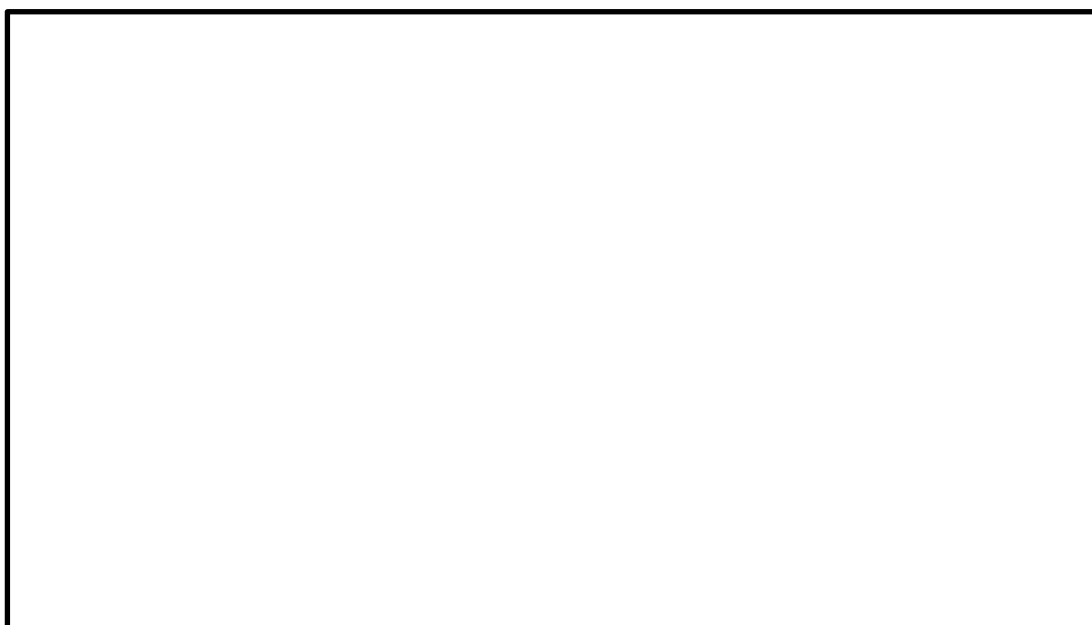


図 2.2.3-9 KAL I 試験結果と基本性能評価式との比較

表 2.2.3-5 PAR の仕様比較

	Battelle MC 試験	KAL I 試験	島根原子力発電所 2 号炉
PAR モデル	PAR-88	試験用 PAR	PAR-22
触媒カートリッジ枚数	88 枚		22 枚
ハウジング開口面積			
スケールファクタ	1 (88/88)	0.025	0.25 (22/88)
延長チムニの有無	なし (標準チムニ)	なし (標準チムニ)	なし (標準チムニ)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(4) PARの反応開始遅れの影響

PARの結合反応の開始水素濃度について、NRC（米国原子力規制委員会）の委託により Sandia 国立研究所（SNL）にて実施されたSNL試験にて確認されている。表 2.2.3-6 に試験条件及び反応開始水素濃度を示す。雰囲気条件の違いに関わらず、水素濃度 1 vol%未満でPARによる結合反応を開始している。

GOTHICによる原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析においては、PARによる反応開始水素濃度を 1.5vol%に設定しており、水素濃度を高く見積もることができる。反応開始遅れを考慮しない場合（反応開始水素濃度：0 vol%）の水素濃度変化との比較を図 2.2.3-10 に示す。反応開始水素濃度を高く設定した解析結果においても、原子炉建物原子炉棟の水素濃度を可燃限界未満に抑制しており、反応熱による影響で最高使用温度（300℃）を上回ることはないため、PARの反応開始遅れの影響はない。

表 2.2.3-6 SNL試験の試験条件及び反応開始水素濃度

試験番号	圧力 (bar)	温度 (°C)	水蒸気濃度 (%)	酸素濃度 (%)	反応開始水素濃度 (vol%)
PAR-1	2.1	17	0	21	0.3
PAR-2	2.1	24	0	21	0.15
PAR-3	2.1	102	52	10	0.4

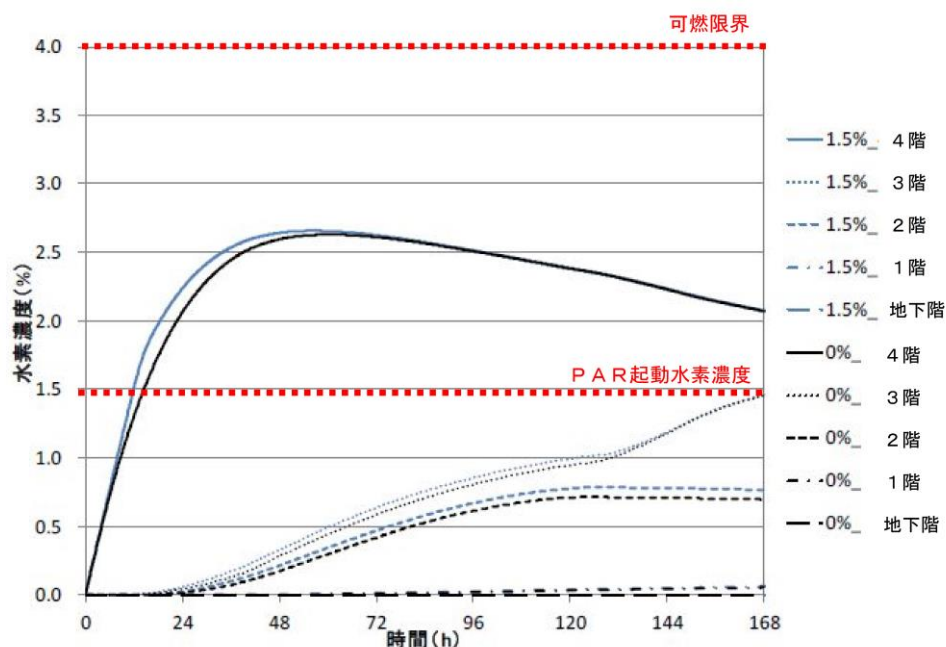


図 2.2.3-10 反応開始遅れによる水素濃度の時間変化の比較

(5) 反応阻害物質ファクタについて

炉心損傷を伴う重大事故時において、格納容器内によう化セシウム等の粒子状放射性物質、ガス状よう素、蒸気等が発生する。これらが原子炉建物原子炉棟へ漏えいした場合、P A R の性能に影響を与える可能性があるため、影響評価を行う必要がある。

粒子状放射性物質については、沈着や格納容器スプレイにより除去されることから、原子炉建物原子炉棟4階への漏えい量は十分小さく、影響はないと考えられる。また、2.2.3(2)①に示したように、蒸気環境下による性能への影響はないと考えられる。

したがって、影響因子としてはガス状よう素を対象とし、以下のとおりP A R の性能への影響を評価する。

事故時に炉内に内蔵されるよう素元素量は約18.1kgであり、NUREG-1465に基づき、格納容器内へのよう素の放出割合を61%、Regulatory Guide 1.195に基づき、無機よう素生成割合を91%、有機よう素生成割合を4%とする。また、格納容器内の自然沈着による除去効果については、CSEでの実験結果に基づき、事象発生後2時間までは除去効果を考慮せず、2時間以降はDF200を考慮する。

このとき、格納容器の漏えい率を一律10%/日、原子炉建物原子炉棟4階へ全量漏えいすると仮定した場合、ガス状よう素濃度は約11mg/m³となる。

よう素による影響を確認するために行われたBattelle MC試験の試験条件を表2.2.3-7に、試験結果を図2.2.3-11に示す。試験は、蒸気環境下において空間に対するよう素割合約300mg/m³で実施しており、約25%性能低下していることが確認されている。

試験条件と比べて島根原子力発電所2号炉で想定されるガス状よう素濃度は十分に小さく、影響は小さいと考えるが、よう素環境下でのP A R の性能低下を考慮し、反応阻害物質ファクタとして「0.5」を設定する。

なお、反応阻害はよう素が触媒に付着することで起こるものであり、スケールファクタが変わっても、P A R 内部の流速は一律であり、付着するよう素の割合は変わらないため、ガス状よう素による影響評価にスケールファクタを考慮する必要はない。

表 2.2.3-7 試験条件（よう素の影響）

温 度	圧 力	初期水素濃度	蒸気濃度	よう素濃度
120℃	2bar	4 vol%	50～70vol%	300mg/m ³



図 2.2.3-11 試験結果（よう素の影響）

本試験は、表 2.2.3-7 に示す条件でよう素による触媒性能低下の影響を確認しているが、本試験結果が実機条件に適用できるかを確認するために、本試験結果における水蒸気濃度、温度及び圧力の影響について示す。

触媒の被毒は、強力な化学吸着による触媒反応の阻害によって発生する。したがって、よう素による被毒は、よう素によるパラジウム原子の物理的な閉塞により発生する（図 2.2.3-12）。水蒸気濃度及び圧力は、パラジウム表面に結合しているよう素の状態を変えることができないため、基本的には水蒸気濃度と圧力は、よう素による被毒効果に与える影響はないと考えられる。なお、水蒸気については、触媒に被膜ができること等による物理的な触媒性能低下の影響が考えられるが、それについては「2.2.3 (2)① 蒸気環境下での影響」とおり、有意な影響はないことを確認している。さらに、触媒粒には疎水コーティングが施されていることから、水蒸気による性能低下を防ぐ設計考慮がなされている。

また、本試験条件は、島根原子力発電所 2 号炉の事故時に想定される環境と比較し、よう素濃度、水蒸気濃度は保守的な条件となっている。これらを踏まえ、本試験結果における水蒸気濃度、圧力が与える大きな影響はない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

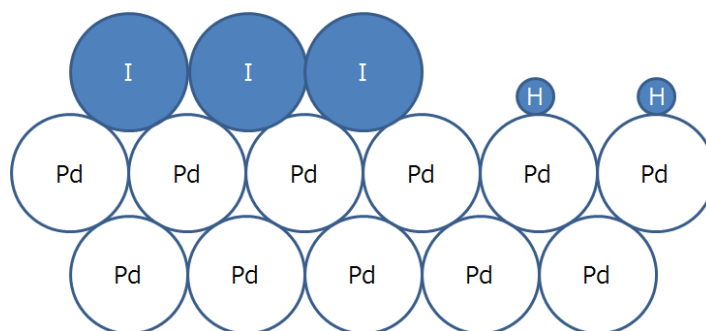


図 2. 2. 3-12 パラジウムへのよう素の結合の概略図

一方，温度については，触媒周りの温度が 200℃付近の高温になると，吸着されたパラジウムとよう素が分離し，パラジウムは触媒機能を回復する知見が既往研究より確認されている（図 2. 2. 3-13）。これは，温度が上がったことにより化学結合状態が壊れてパラジウムとよう素が分離する状況になったことによるものと考えられる。

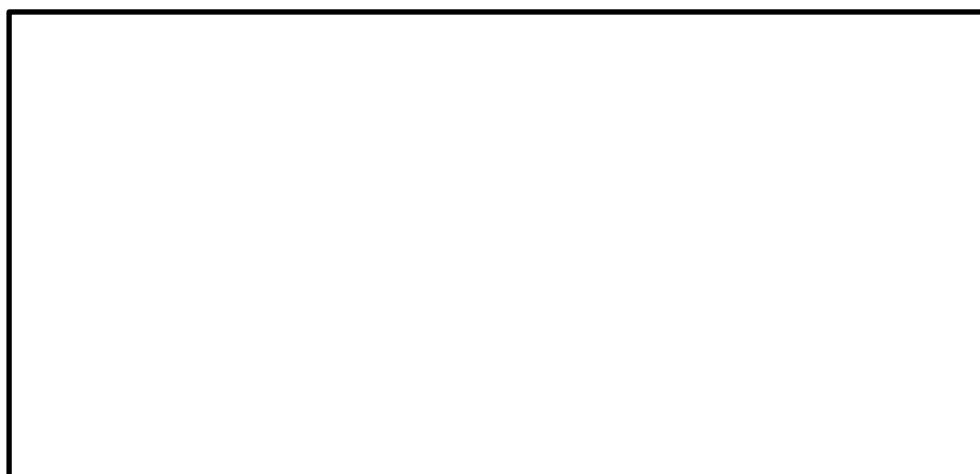


図 2. 2. 3-13 再結合効果と温度の関係

PARは，再結合反応を始めると，触媒温度が上昇し触媒自体は 200℃を超える高温状態になる。NIS社製PAR触媒は，粒型の触媒粒をカートリッジに敷き詰めた構造になっており，被毒物質に全ての触媒が覆われることを防ぐことが設計上配慮されている。よって，被毒されていない部分は再結合反応が始まり，それに伴い触媒粒の温度が上昇することで，被毒された部分の吸着されたパラジウムとよう素が分離することで触媒機能が回復する傾向になると考えられる。すなわち，よう素による被毒は再結合反応開始時に影響するものであるが，反応が開始すると，触媒温度上昇が支配的となり，試験条件としての温度は，影響を無視できるものと考えられる。よって，本試験結果で示す触媒性能低下評価において，温度条件は大きな影響を与えるものではない。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

国内容器試験について

平成 11 年 1 月から平成 13 年 5 月までの期間で電力共通研究「触媒式 F C S 再結合装置適用性研究 (PHASE2)」が実施された。この研究において、水素処理速度式の妥当性確認を目的の一つとして、縮小モデルを用いた国内容器試験が実施されており、その試験装置、試験条件を以下にまとめた。

1. 試験装置

図 1 に容器試験装置の外観を、図 2 に系統図を示す。試験装置は、試験容器、ガス注入系、ガス供給設備、ガス分析計、真空排気装置等から構成されている。

図 3 (a) に試験容器を示す。試験容器は、であり、内部に図 3 (b) に示す P A R を設置している。P A R 内部には
の触媒カートリッジ 5 枚が格納されている。



図 1 試験装置外観

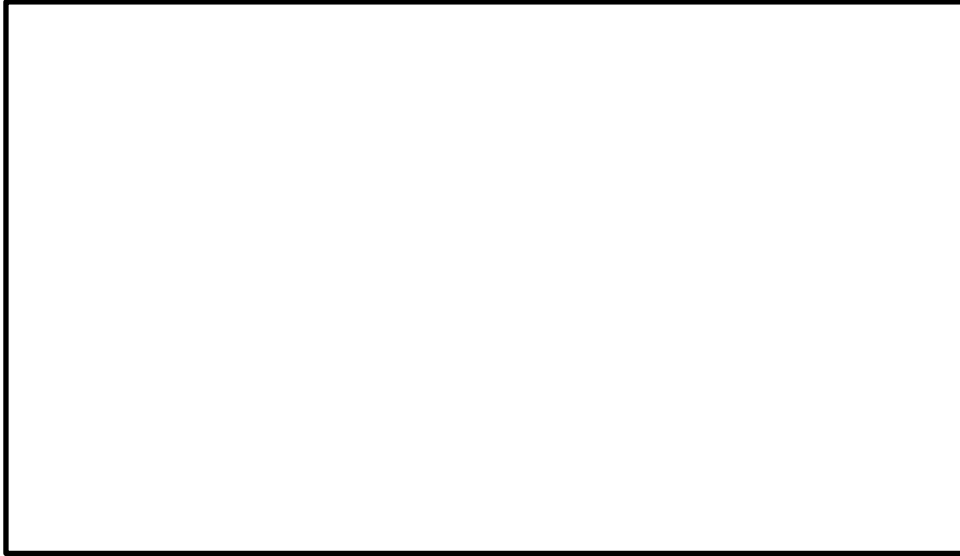


図2 試験装置系統図

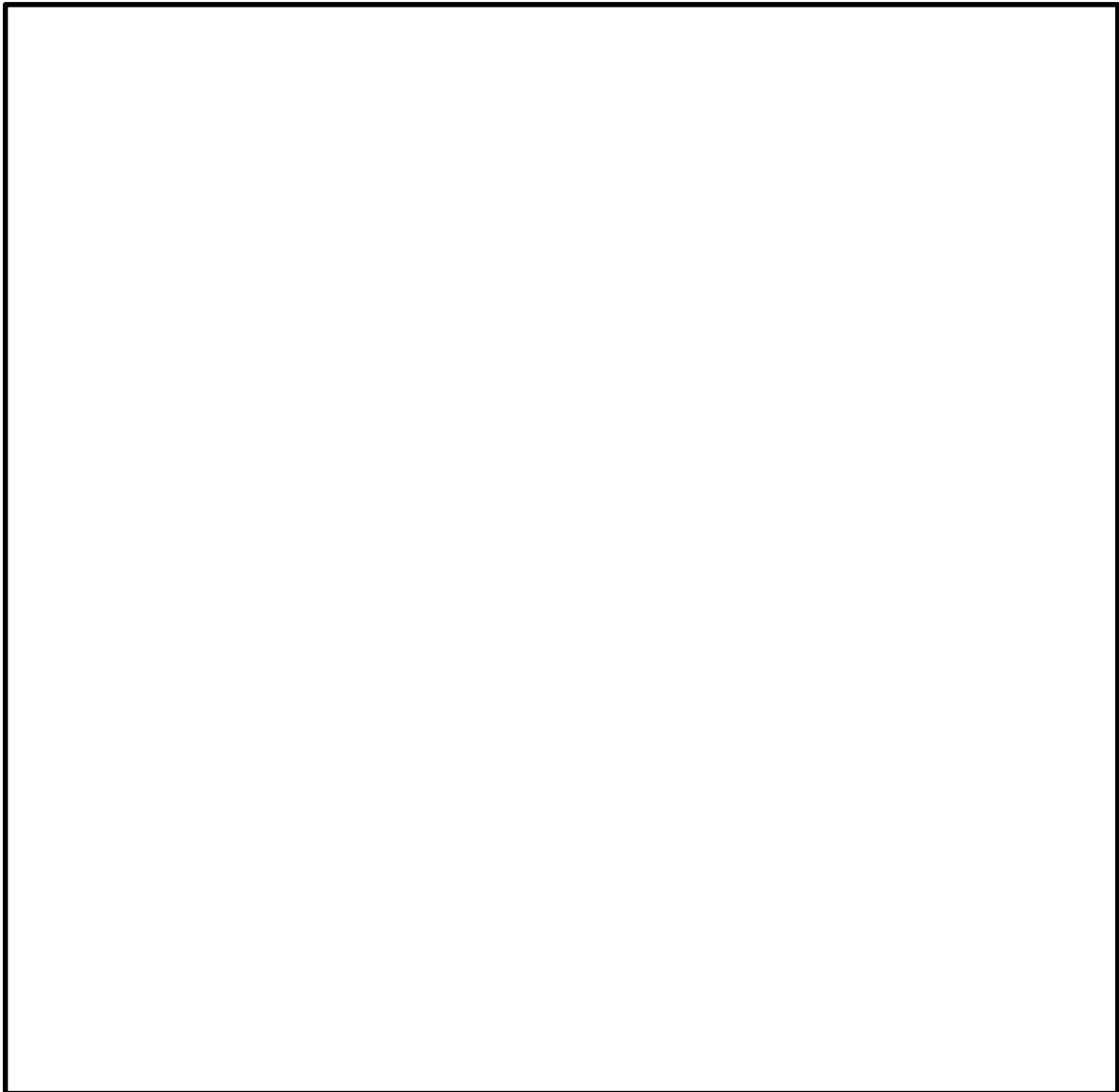


図3 試験容器及びPAR（試験体）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ここで、本試験に用いている試験PARとPAR-11, PAR-22（島根原子力発電所2号炉で採用）、PAR-44, PAR-88の触媒カートリッジの比較を表1に示す。PARのスケールファクタは、触媒カートリッジの寸法及び配置間隔を開発時から変えないことを条件として、NIS開発試験時に使用されたプロトタイプPARのカートリッジ枚数（88枚）に対する、使用するPARのカートリッジ枚数の比として、水素処理性能が規定できるものとするものである。また、本試験にて用いている試験PARとPAR-22では、カートリッジの幅寸法が異なるが、幅寸法を変更している場合には、入口部開口面積の比で整理し、スケールファクタを算出できる。

本試験においてはこのスケールファクタを使用することで、実機の縮小モデルにより、水素処理性能評価式の妥当性等を検証している。

表1 触媒カートリッジの比較

PARタイプ	触媒カートリッジ			PAR-88 に対するカ ートリッジ 枚数の比	入口開 口面積 [cm ²]	PAR-88 に対する入 口開口面積 の比	スケー ルファ クタ
	枚数	間隔 [cm]	幅×高さ×厚さ [cm]				
PAR-88	88			1		1	1
PAR-44	44			0.5		0.5	
PAR-22	22			0.25		0.25	
PAR-11	11			0.125		0.125	
国内試験用 PAR	5			0.0568		0.0251	0.0251

2. 試験条件

本試験においては、原子炉格納容器内の条件を模擬し、スプレー流量等の試験パラメータを変化させて試験を実施しているが、表2にスプレー無しで実施された試験条件を示す。

表2 試験条件

RUN No.	スプレー流量 [l/min]	水素濃度 [vol%]	酸素濃度 [vol%]	圧力 [MPa]	温度 [K]
RUN-2	—	0.5~3	3.5	0.13	333

3. 試験方法と試験手順

試験容器内を約0.13kPa（約1torr）まで減圧した後、所定の分圧になるように窒素ガスを注入し、その後、試験容器周りの加熱ヒータにより試験温度条件に設定する。最後に、水素ガスを容器に注入してPARによる水素ガス、酸素ガスの再結合反応状態について確認する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4. 試験結果

図4に試験結果と水素処理性能評価式を用いた算出値の比較を示す。図4より、試験結果に対して水素処理性能評価式から求めた値は、保守側となっていることが確認できる。

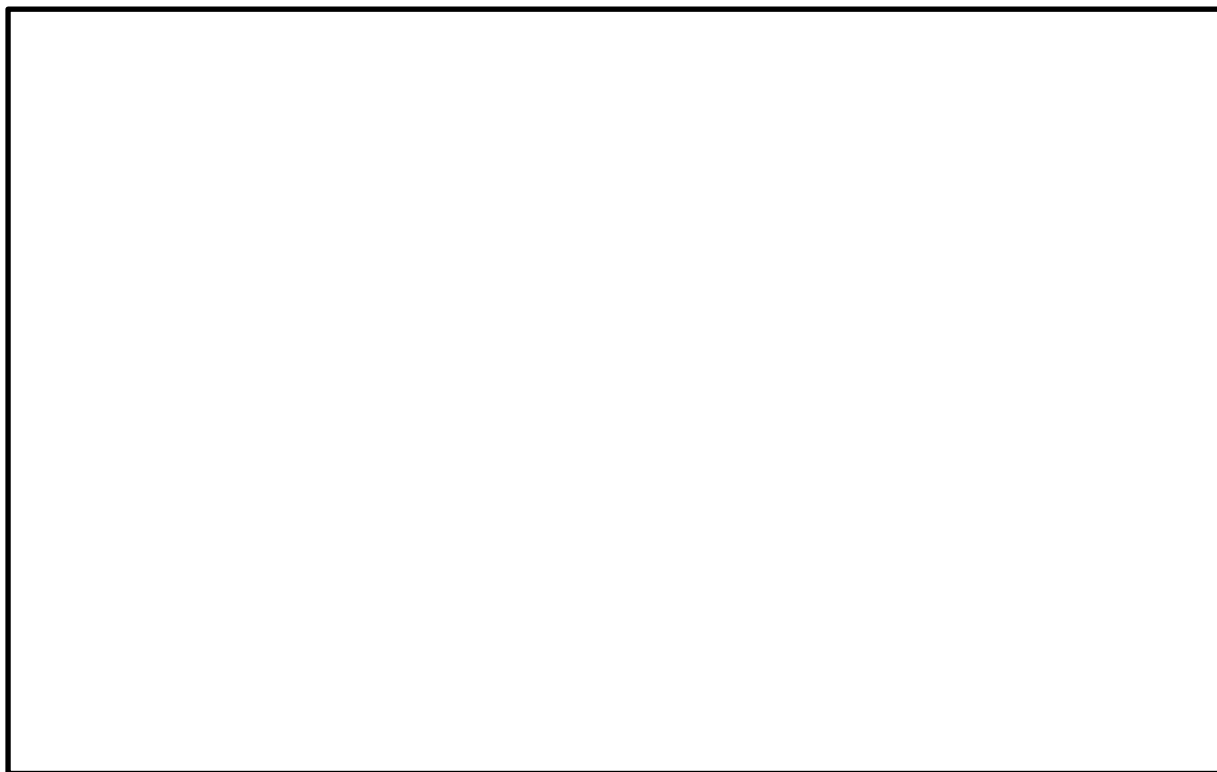


図4 試験結果と水素処理性能評価式を用いた算出値の比較

P A R 動作監視装置について

1. 目的

P A R は、原子炉建物原子炉棟内の水素濃度上昇に従い自動的に作動する装置であり、電源や運転員による操作の不要な設備である。

P A R は、触媒における再結合反応により水素ガスを除去する設備であるので、水素濃度の上昇にしたがって装置の入口側と出口側の差温度が上昇する（図 1，図 2）ことから、P A R に温度計を設置することにより、水素処理の状況を把握することができ、P A R による水素処理が行われていることを確認することができれば、重大事故対処時の有効な情報となると考えられる。

このことから、原子炉建物原子炉棟 4 階に設置されている P A R （2 個）に、熱電対を入口側と出口側に取り付け、中央制御室にて P A R の温度を確認できるようにし、重大事故対処時の監視情報の充実を図る。

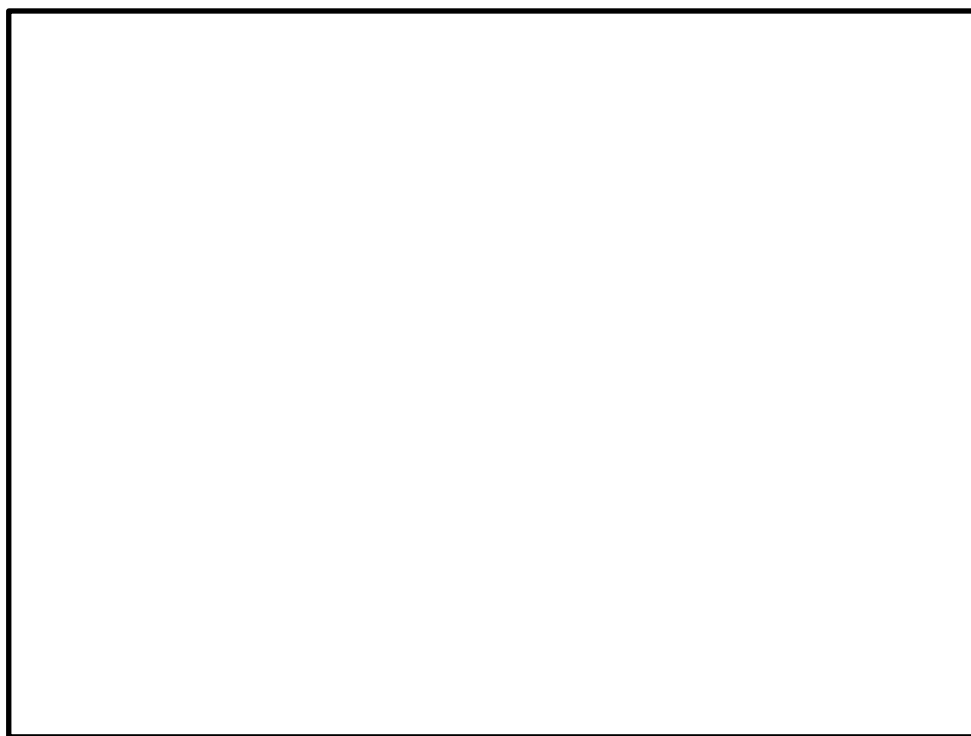


図 1 SNL で行われた試験用 P A R 概要

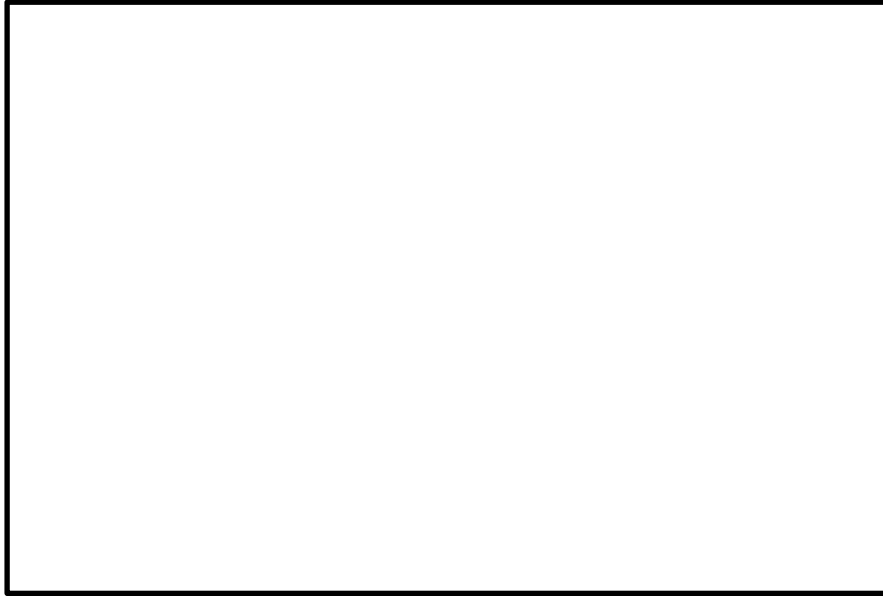


図2 SNLで行われた試験結果（PAR温度と水素濃度の関係）

2. 設備概要

PAR 2個に対し、入口側及び出口側に熱電対を取り付け、事故時のPARの測定温度を中央制御室にて監視できるようにする。

熱電対の設置位置は、PAR入口近傍及び触媒カートリッジ上方に熱電対シーすを取り付け、ガス温度を測定できるようにしている。

試験結果(図2)において、触媒部での水素再結合反応に伴い、水素濃度1 vol%程度でPAR入口と出口のガス温度差は約40K、水素濃度4 vol%程度でPAR入口と出口のガス差温度は約170Kになっており、PARの入口側と出口側の差温度が明確であることから、PAR動作を把握することができる。

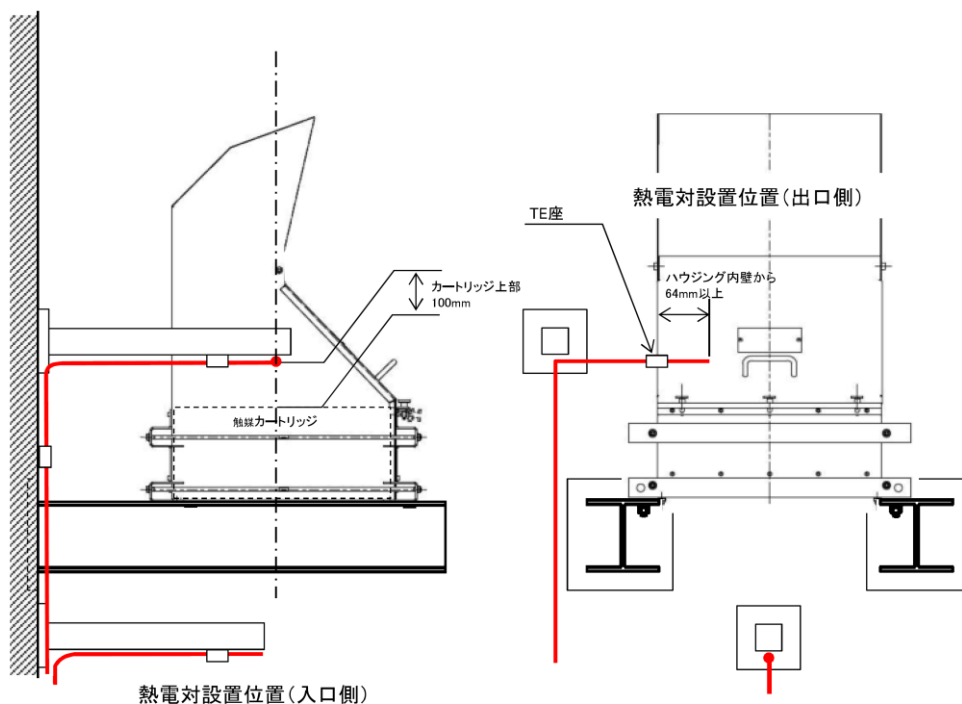


図3 PARへの熱電対取付位置概要図

PARへの熱電対取り付け位置は、サポートとの干渉を考慮したPAR筐体付近への取り付け性、固定性、保守性等を考慮してPAR入口側及び出口側のガス温度が測れる位置としている(図3)。

熱電対シースは外径3.2mmであり、PARへの流路影響の観点から水素除去性能へ影響を及ぼすものではない。また、出口側の熱電対シースは300℃以上の耐熱性を有しており、PARによる水素処理時に発生する熱の影響を考慮しても問題はない。

測定温度は、中央制御室に指示し、緊急時対策所に記録される(図4)。

表1 PAR入口・出口温度計の主要仕様

名称	種類	計測範囲	取付箇所	個数
静的触媒式水素処理装置入口温度	熱電対	0~100℃	原子炉建物 原子炉棟4階	2
静的触媒式水素処理装置出口温度	熱電対	0~400℃	原子炉建物 原子炉棟4階	2

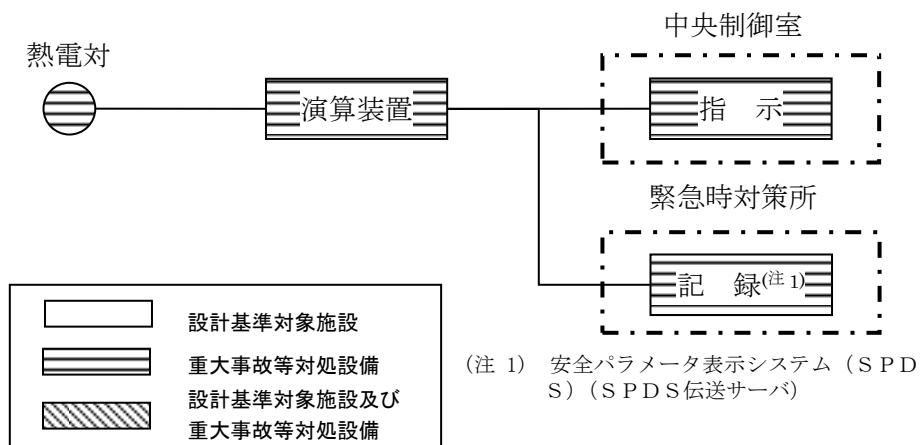


図4 PAR入口・出口温度計の概略系統図

3. PAR動作監視装置 (PAR入口・出口温度計) の設置場所

PARは水素ガス进行处理する際の熱でガス温度が上昇するため、PAR装置で上昇気流が発生する。したがって、原子炉建物原子炉棟4階の水素ガスが自然対流を起こし拡散されることから、原子炉建物原子炉棟4階に配置したPAR全体に水素ガスが行き渡り、一様に触媒反応を起こして温度が上昇すると想定している (「2.2.2 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析」参照)。

以上を考慮して、PAR動作監視装置 (PAR入口・出口温度計) の設置場所は、位置的分散を考慮して、原子炉建物原子炉棟4階に配置した2個のPARに設置している。(図5)



図5 PAR入口・出口温度計の配置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

KAL I 試験, SNL 試験の試験データ適用性について

本章では, KAL I 試験及びSNL 試験を用いて示した項目について, 試験データの適用性を示す。KAL I 試験及びSNL 試験は表 1 に示す項目に対して試験データを用いている。

表 1 KAL I 試験及びSNL 試験を説明に使用した項目について

	説明項目	使用した試験データ	
		KAL I 試験	SNL 試験
(1)	性能評価式の適用性	○	—
(2)	蒸気環境下での影響	○	—
(3)	PARの反応開始遅れの影響	—	○

KAL I 試験では実機PARと同様にチムニを延長していないPARを用いているが, SNL 試験ではチムニを延長したPARを用いている。


試験データの適用性についてはこの延長チムニの有無による試験適用性を示す。

1. PARの反応開始遅れの影響

PARの反応開始遅れを確認するために, SNL 試験のデータを用いている。SNL 試験に用いたPARと当社に設置するPARの比較を表 2 に示す。いずれもNIS社製のカートリッジ枚数が 22 枚タイプであり, 入口サイズが多少異なるものの同程度のサイズである。大きく異なる箇所としてはチムニの有無であり, 当社設置のPARはチムニが無いタイプであるのに対し, SNL 試験に用いたPARは 形チムニを有するタイプを用いている。

ただし, ここで確認すべき事項は, 水素ガス流入に対してPARの反応開始時間・定格容量に達する時間までにどれだけ遅れがあるかである。チムニは, 触媒反応時に発生する熱によるPAR内の上昇気流を増強させることで水素処理能力を向上させるものであり, 触媒反応が開始される初期についてはチムニの効果はない。つまり, PARの反応開始初期の発熱による温度変化, 定格の水素処理能力を發揮するまでの時間を確認する際は, 水素処理容量を向上させるために取付けているチムニの有無は大きく関係しない。よって, 触媒反応開始の遅れの影響を確認するためにSNL 試験を用いることに問題はない。

表2 実機とSNL試験のPAR比較について

項目	島根原子力発電所2号炉	SNL試験
PAR外形		
PAR製造社	N I S社	N I S社
カートリッジ枚数	22枚	22枚 (88枚タイプの1/4スケール)
入口サイズ	幅： <input type="text"/> 奥行： <input type="text"/>	幅： <input type="text"/> 奥行： <input type="text"/>
延長チムニ	なし	

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.3 原子炉建物水素濃度監視設備について

2.3.1 原子炉建物水素濃度監視設備の設計方針について

炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建物原子炉棟の水素濃度が変動する可能性のある範囲で測定するための設備として原子炉建物水素濃度を設置する。

(1) 設計方針

原子炉建物水素濃度は炉心の著しい損傷が発生し、ジルコニウム-水反応等で短期的に発生する水素ガス及び水の放射線分解等で長期的に緩やかに発生し続ける水素ガスが格納容器から原子炉建物原子炉棟へ漏えいした場合に、原子炉建物原子炉棟において、水素濃度が変動する可能性のある範囲で測定を行い、中央制御室において連続監視できる設計とする。また、原子炉建物水素濃度は電源が喪失した場合においても常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備からの給電が可能な設計とする。

(2) 主要仕様

原子炉建物水素濃度の主要仕様を表 2.3.1-1 に示す。原子炉建物水素濃度は原子炉建物原子炉棟の水素濃度を触媒式または熱伝導式水素濃度検出器を用いて電気信号として検出する。検出された電気信号を演算装置にて水素の濃度信号に変換した後、中央制御室に指示し、緊急時対策所にて記録する。図 2.3.1-1 に概略構成図を示す。

表 2.3.1-1 原子炉建物水素濃度の主要仕様

名称	検出器の種類	計測範囲	個数	取付箇所
原子炉建物水素濃度	触媒式水素検出器	0～10vol%	1	原子炉建物原子炉棟地下1階 ・ トーラス室：1個
	熱伝導式水素検出器	0～20vol%	6	原子炉建物原子炉棟4階 ・ 床から5m：1個 ・ 天井から-1m：1個
				原子炉建物原子炉棟2階 ・ 非常用ガス処理系吸込配管近傍：1個 ・ SRV補修室：1個
				原子炉建物原子炉棟1階 ・ CRD補修室：1個 ・ 所員用エアロック室：1個

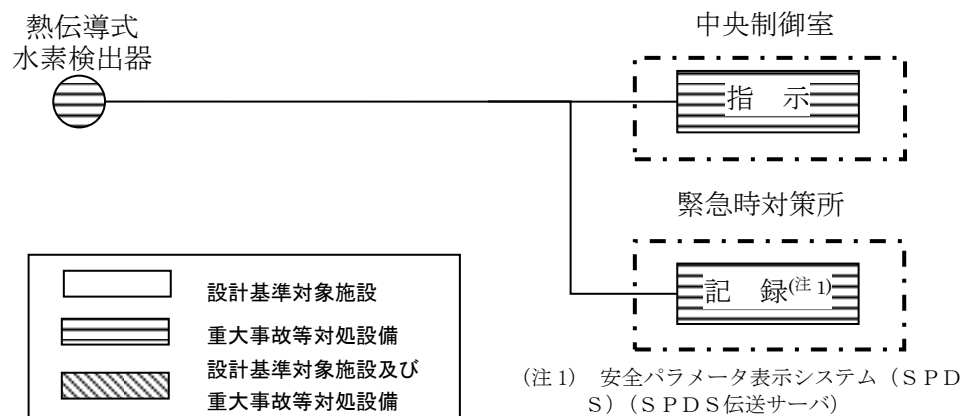
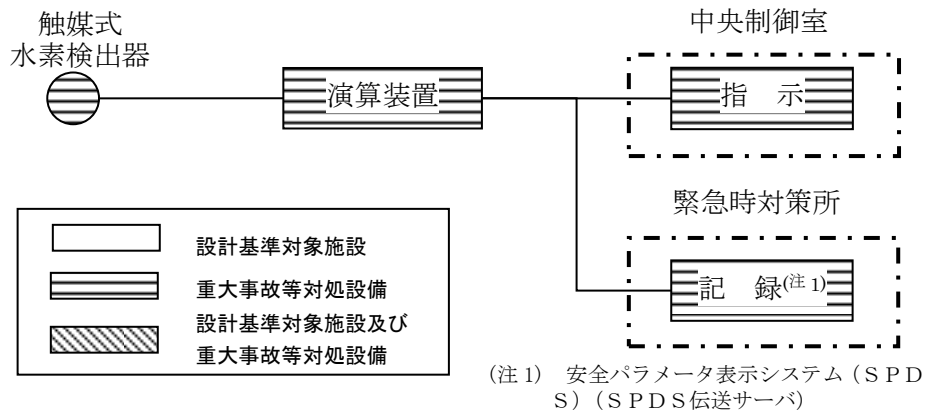


図 2.3.1-1 原子炉建物水素濃度の概略構成図

(3) 設置場所

原子炉建物水素濃度の検出器の設置場所を図 2.3.1-2 から図 2.3.1-5 に示す。なお、添付 9 にて記載した局所エリア及びトーラス室に漏えいした水素ガスを早期検知及び滞留状況を把握することは、水素爆発による原子炉建物の損傷を防止するために有益な情報になることから、局所エリア及びトーラス室に漏えいした水素ガスを計測するため水素濃度計を設置し、事故時の監視性能を向上させる。これにより、格納容器内にて発生した水素ガスが漏えいするポテンシャルのある箇所での水素濃度と、水素ガスが最終的に滞留する原子炉建物原子炉棟 4 階での水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建物原子炉棟全体での水素影響を把握することが可能となる。なお、トーラス室の水素ガスの挙動としては、格納容器から漏えいした高温の気体による上昇流（エネルギーとしては 1kW 程度）と、上昇した気体が天井および側壁にて冷却されることで発生する下降流により、トーラス室の雰囲気全体を混合する自然循環流が生じ、水素濃度はほぼ均一になると考えられるため、図 2.3.1-5 に示す設置場所に 1 台設置する。

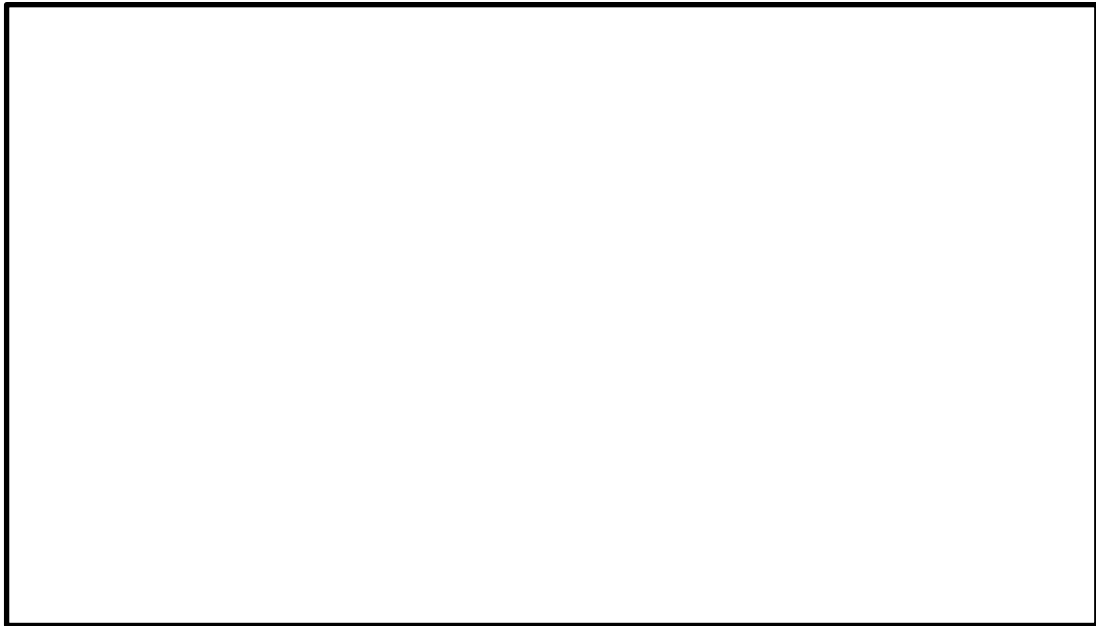


図 2.3.1-2 原子炉建物水素濃度の設置場所（原子炉建物 4 階）



図 2.3.1-3 原子炉建物水素濃度の設置場所（原子炉建物 2 階）

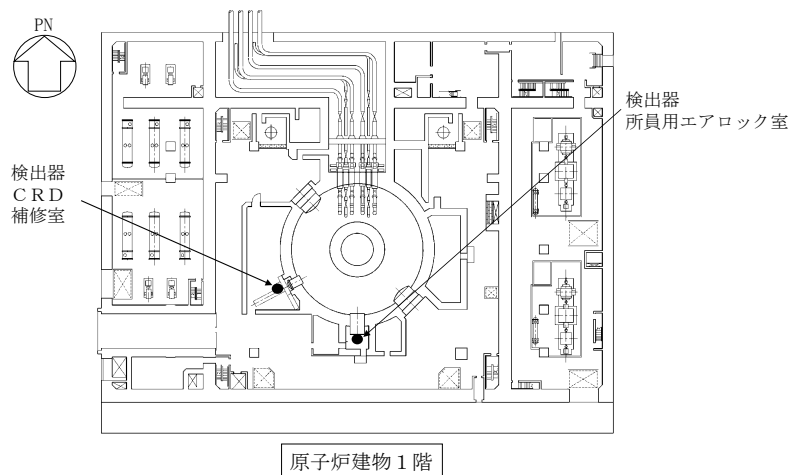


図 2.3.1-4 原子炉建物水素濃度の設置場所（原子炉建物 1 階）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

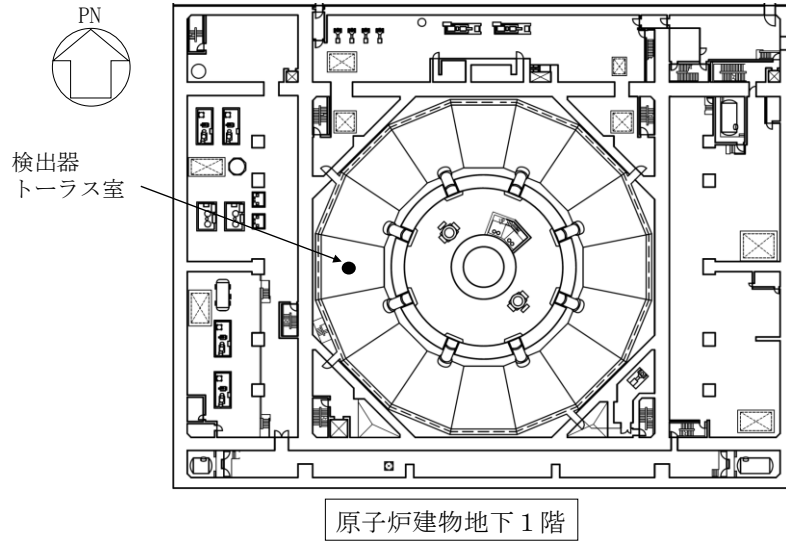


図 2.3.1-5 原子炉建物水素濃度の設置場所（原子炉建物地下1階）

(4) 代替電源の確保

原子炉建物水素濃度監視設備は、常設代替交流電源設備又は可搬型代替交流電源設備から電源供給が可能な設計とする（図 2.3.1-6）。

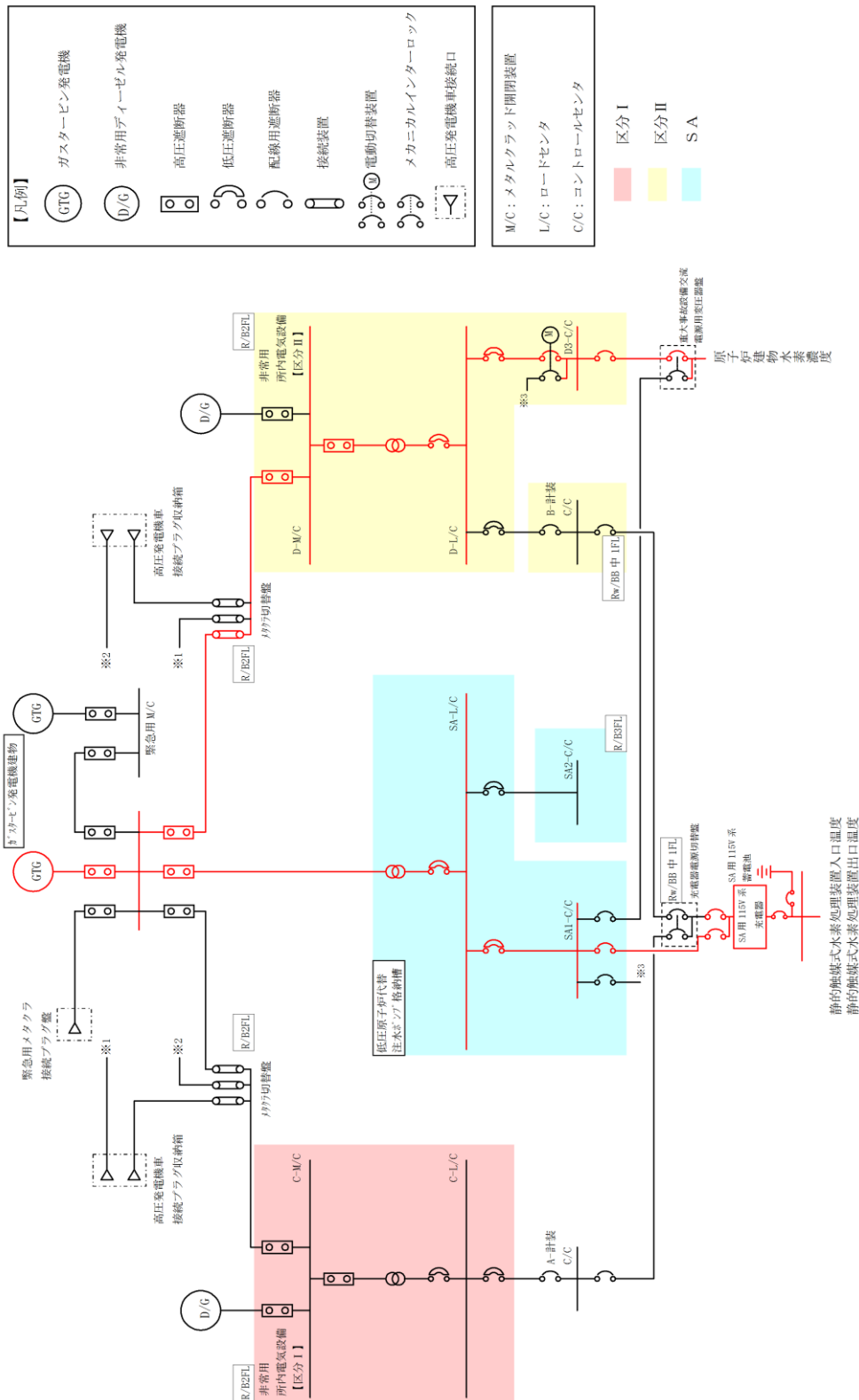


図 2.3.1-6 単線結線図

原子炉建物水素濃度の適用性について

原子炉建物水素濃度は、炉心の著しい損傷が発生した場合に、原子炉建物原子炉棟内に発生する水素ガスを監視する目的で、水素濃度が変動する可能性のある範囲で測定できる設計としている。

1. 計測範囲の考え方

炉心損傷時に格納容器内に発生する水素ガスが原子炉建物原子炉棟に漏えいした場合に、PARによる水素濃度低減（可燃限界である4 vol%未満）をトレンドとして連続的に監視できることが主な役割であることから、原子炉建物水素濃度（触媒式）では0～10vol%、原子炉建物水素濃度（熱伝導式）では0～20vol%を計測可能な範囲とする。

2. 測定原理

(1) 原子炉建物水素濃度（触媒式）

原子炉建物原子炉棟地下1階のトールラス室に設置する水素濃度計は、触媒式水素検出器を用いる。触媒式水素検出器は、図1に示すとおり、触媒活性材でコーティングされた検知素子と補償素子、及び2つの固定抵抗でブリッジ回路が構成されている。水素が検知素子に触れると触媒反応により空気中の酸素と結合（接触燃焼）し、発熱して検知素子温度が上昇する。検知素子温度が上昇することにより、素子の抵抗値が変化すると図1のブリッジ回路のAB間の出力信号が変化する。水素と酸素の結合による発熱量は水素濃度に比例するため、検知素子の温度変化による抵抗値変化を水素濃度として測定できる。

また、水素による検知素子の温度上昇と環境温度の上昇を区別するため、素子表面に触媒層を有さない補償素子により環境温度の変化による検知素子の抵抗値変化は相殺される。

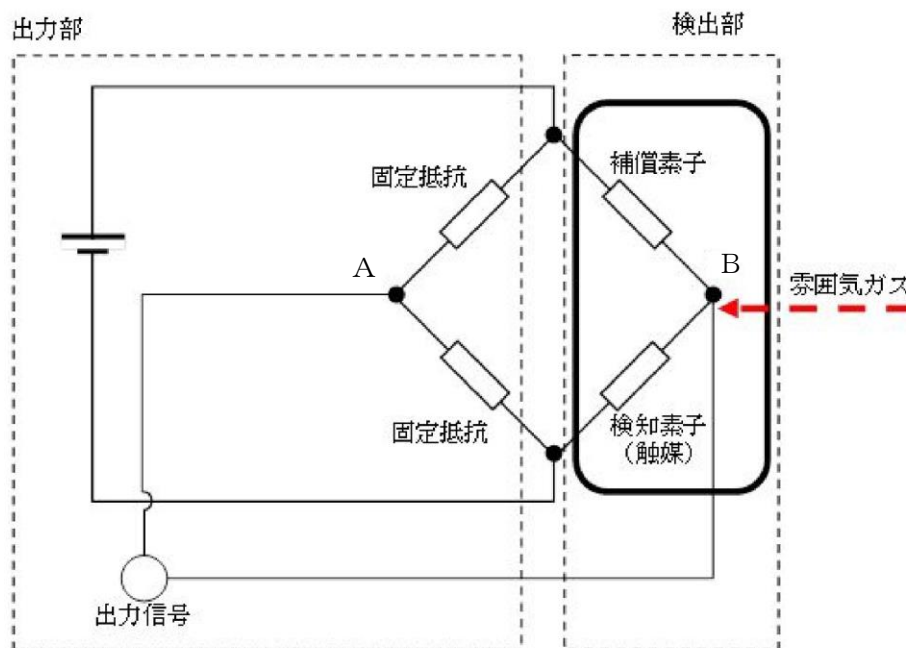


図1 原子炉建物水素濃度（触媒式）検出回路の概要図

(2) 原子炉建物水素濃度（熱伝導式）

原子炉建物原子炉棟4階天井及び中間付近、2階及び1階に設置する水素濃度計は、熱伝導式水素検出器を用いる。

熱伝導式水素検出器は、検知素子と補償素子が図2のようにホイートストンブリッジ回路に組み込まれている。検知素子側は、原子炉建物内雰囲気ガスが触れるようになっており、補償素子側は基準となる標準空気が密閉され、測定ガスは直接接触しない構造になっている。このため、水素が検知素子に接触することで、補償素子と接触している基準となる標準空気との熱伝導度の違いから温度差が生じ、抵抗値が変化し、ブリッジ回路の平衡がくずれ、信号出力が得られる。検知素子に接触するガスの熱伝導度は、水素濃度に比例するため、検知素子の温度変化による抵抗値変化を水素濃度として測定できる。

また、補償素子の標準空気容器の外側には測定ガスが同様に流れ、温度補償は考慮された構造となっている。

熱伝導式水素検出器は、標準空気に対する測定ガスの熱伝導率の差が大きいことを利用しているものである。水素の熱伝導率は、約 $0.18\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ at 27°C である一方、酸素、窒素は、約 $0.02\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ at 27°C と水素より1桁小さく、これらのガス成分の変動があっても水素濃度測定に対する大きな誤差にはならない。

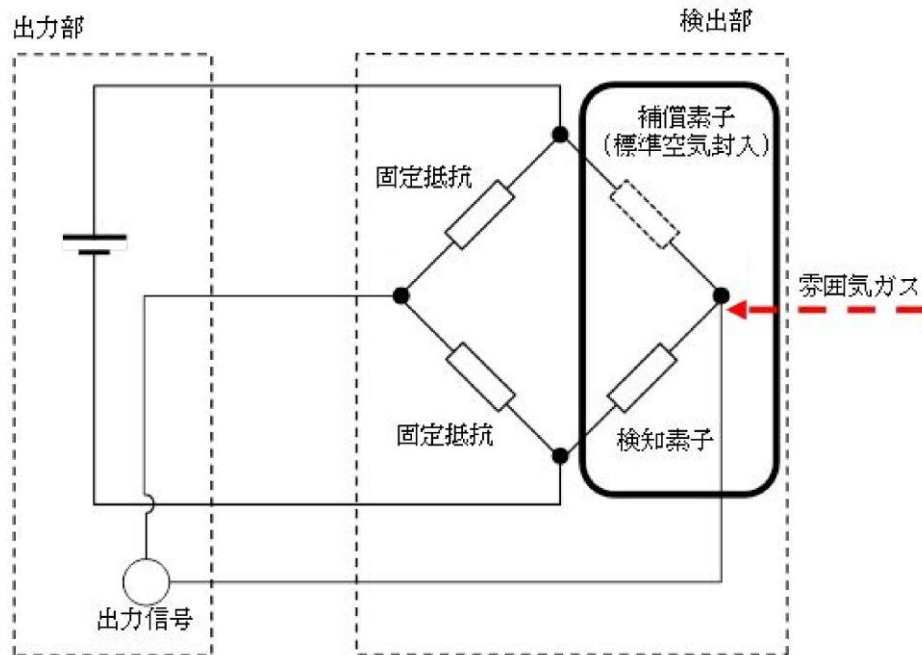


図2 原子炉建物水素濃度（熱伝導式）検出回路の概要図

3. 設置場所

炉心の著しい損傷が発生した場合が発生し、格納容器内に水素ガスが蓄積した状況では、格納容器のフランジ部等を通じて水素ガスが原子炉建物原子炉棟内に漏えいする可能性がある。原子炉建物原子炉棟内に漏えいした水素ガスは、比重等の関係で原子炉建物原子炉棟4階まで上昇し、原子炉建物原子炉棟4階に滞留することが予想される。また、PARは水素ガス进行处理の際の熱でガス温度が上昇するため、PAR内部で上昇気流が発生する。したがって、原子炉建物原子炉棟4階の水素ガスが自然対流を起こし拡散される。

以上を考慮して、水素濃度計の設置場所は、水素ガスが最も蓄積されると想定される原子炉建物原子炉棟4階に配置している。

また、非常用ガス処理系を使用する場合、原子炉建物原子炉棟4階まで上昇せず、非常用ガス処理系に流入する可能性があることから、非常用ガス処理系の吸込み配管がある、原子炉建物原子炉棟2階に設置している。

なお、添付9にて記載した局所エリア及びトラス室に漏えいした水素ガスを早期検知及び滞留状況を把握することは、水素爆発による原子炉建物の損傷を防止するために有益な情報になることから、局所エリア及びトラス室に漏えいした水素ガスを計測するため水素濃度計を設置し、事故時の監視性能を向上させる。これにより、格納容器内にて発生した水素ガスが漏えいするポテンシャルのある箇所での水素濃度と、水素ガスが最終的に滞留する原子炉建物原子炉棟4階での水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建物原子炉棟全体での水素影響を把握することが可能となる。

4. 原子炉建物水素濃度検出器の選定について

原子炉建物水素濃度検出器は、設置個所における重大事故等時の環境を考慮する必要がある。トールス室においては、トールス室の想定環境温度が 120℃であることから、想定環境温度に対して耐性の高い触媒式水素検出器を選定する。

原子炉建物原子炉棟 4 階及び局所エリアにおいては、想定環境温度が 66℃であることから、想定環境温度を踏まえ熱伝導式水素検出器を選定する。

5. 原子炉建物水素濃度検出器の耐環境性について

設置場所の環境条件は以下のとおり。なお、水素濃度検出器設置場所の環境条件設定については、有効性評価を踏まえた条件を解析条件として算出している。

(「2.2.2 (6) P A R 解析条件」)

表 1 事故時想定環境条件と試験条件

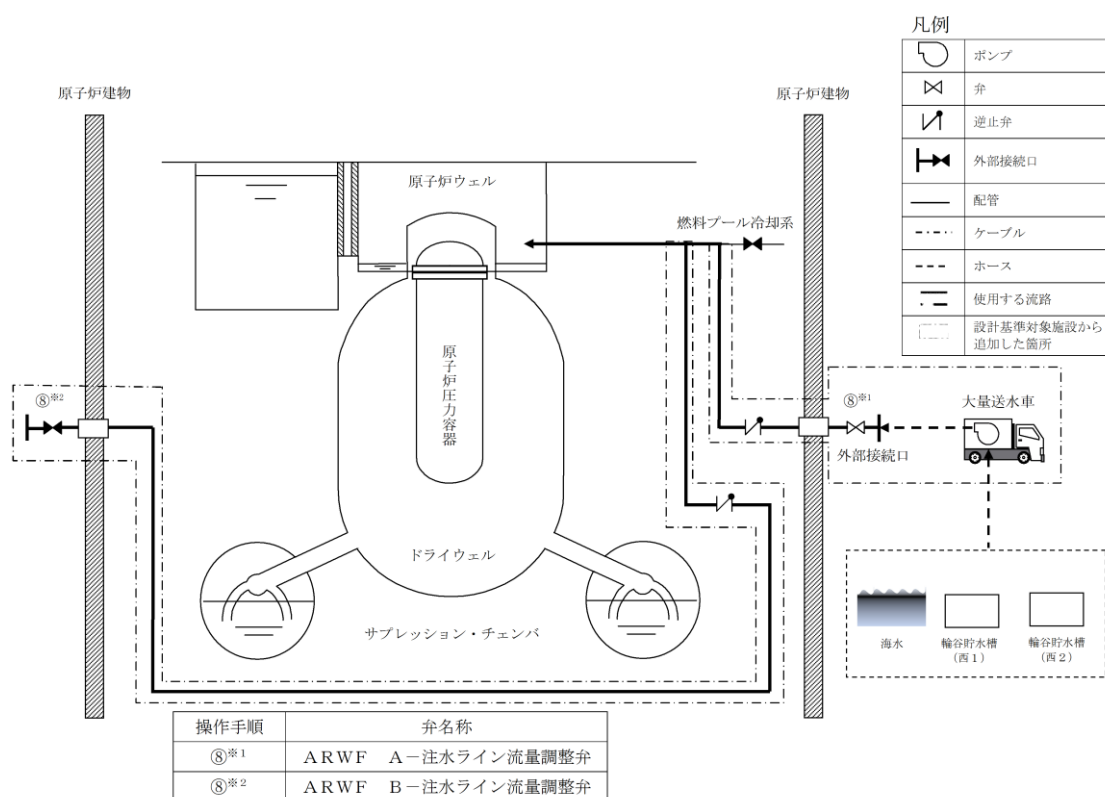
対象	事故時想定環境※	耐環境試験結果
原子炉建物水素濃度 (触媒式)	温 度 : 120℃ 湿 度 : 100%RH 積算放射線量 : 0.28kGy	耐環境試験温度 : <input type="text"/> 耐環境試験湿度 : <input type="text"/> 耐環境試験放射線量 : <input type="text"/>
原子炉建物水素濃度 (熱伝導式)	温 度 : 66℃ 湿 度 : 100%RH 積算放射線量 : 0.28kGy	耐環境試験温度 : <input type="text"/> 耐環境試験湿度 : <input type="text"/> 耐環境試験放射線量 : <input type="text"/>

※ 想定環境は、詳細評価により今後見直す可能性がある。

2.4 原子炉ウェル代替注水系（自主対策設備）について

原子炉ウェル代替注水系は、重大事故等時において、ドライウェル主フランジを冷却することで格納容器外への水素漏えいを抑制し、原子炉建物の水素爆発を防止する機能を有するものであり、自主対策設備として設置する。ドライウェル主フランジは図 2.4-1 に示すように、原子炉ウェルに水を注水することで、ドライウェル主フランジシール材を外側から冷却することができる。ドライウェル主フランジのシール材は事故時の過温・過圧状態に伴うフランジ変形時に、シール材が追従できない程の劣化があると、閉じ込め機能を喪失する。このシール材は、以前はシリコンゴムを採用していたが、格納容器閉じ込め機能の強化のために耐熱性、耐蒸気性、耐放射線性に優れた改良E PDM製シール材に変更し閉じ込め機能強化を図っている。改良E PDM製シール材は 200℃蒸気が 7 日間継続しても閉じ込め機能が確保できることを確認しているが、シール材の温度が低くなると、熱劣化要因が低下し、閉じ込め機能もより健全となり、原子炉建物原子炉棟への水素漏えいを抑制できる。

このことから、設置許可基準規則第 53 条（原子炉建物水素爆発防止）に対する自主対策設備として、重大事故等時に原子炉ウェルに注水し、格納容器外側からドライウェル主フランジを冷却し水素漏えいを抑制することを目的として、原子炉ウェル代替注水系を設置する。



記載例○：操作手順番号を示す。

○^{※1}：同一操作手順番号内に複数の操作又は確認を実施する対象弁がある場合、その実施順を示す。

図 2.4-1 原子炉ウェル代替注水系の概要図

2.4.1 原子炉ウエル代替注水系の設計方針について

原子炉ウエル代替注水系は、原子炉ウエルに水を注水し、ドライウエル主フランジシール材を格納容器外部から冷却することを目的とした系統である。原子炉ウエル代替注水系は、大量送水車、接続口等で構成しており、重大事故等時において、代替淡水源（輪谷貯水槽（西1）及び輪谷貯水槽（西2））の水、又は海水を原子炉ウエルに注水しドライウエル主フランジを冷却することで、ドライウエル主フランジからの水素漏えいを抑制する設計とする。したがって、事故時に速やかにドライウエル主フランジシール材を冠水させるように原子炉ウエルに水を張ることが必要であり、その際の必要注水量は冠水分と余裕分も見込み約 30m³以上とする。これを注水開始から約2時間で達成できることを設計方針としており、原子炉ウエル注水の系統流量は 15m³/h以上とする。これを達成するために、原子炉ウエル代替注水系のポンプは大量送水車を採用する。また、大量送水車を接続する接続口は、位置的分散して複数設置する。原子炉ウエル代替注水系の主要仕様を表 2.4.1-1 に示す。

表 2.4.1-1 原子炉ウエル代替注水系主要仕様

大量送水車	
台数	1
容量	168m ³ /h/台以上 (吐出圧力 0.85MPa において) 120m ³ /h/台以上 (吐出圧力 1.4MPa において)

2.4.2 原子炉ウエル代替注水系の効果について

重大事故等時における格納容器過温・過圧事象において、ドライウエル主フランジの閉じ込め機能を強化するために格納容器限界温度（200℃）が7日間継続したとしても健全性が確認できる改良EPDM製シール材を取り付ける。よって、ドライウエル主フランジからの水素ガス漏えいポテンシャルは低減しているが、原子炉ウエル注水により原子炉ウエルに常温の水を注水することで冷却効果が得られるため、水素ガスの漏えいをさらに抑制することが可能である。よって、原子炉ウエル代替注水系は、原子炉建物の水素爆発防止対策の1つとして効果的である。

2.4.3 原子炉ウエル注水による格納容器への影響について

原子炉ウエル代替注水系は、原子炉格納容器温度が 200℃のような過温状態で常温の水を原子炉ウエルに注水することから、ドライウエル主フランジを急冷することにより格納容器閉じ込め機能に影響が無いかについて評価を行った。

(1) 評価方法

格納容器過温時に原子炉ウエルに注水することで、低温の水がドライウエル主フランジに与える熱的影響を評価する。格納容器への影響としては鋼材部の熱影響が考えられるため、影響する可能性がある部位としてはドライウエル主フランジ及びドライウエル主フランジ締付ボルトが挙げられる。このうち、体積が小さい方が水により温度影響を受けるため、評価対象としてドライウエル主フランジ締付ボルトを選定し、ドライウエル主フランジ締付ボルトの急冷による熱的影響を評価する。

(2) 評価結果

原子炉ウエル注水によるドライウエル主フランジ締付ボルト冷却時の発生応力について表 2.4.3-1 に示す。評価結果から、ボルトが 200℃から 20℃まで急冷された場合でも、応力値は降伏応力を下回っておりボルトが破損することはない。

表 2.4.3-1 ドライウエル主フランジ締付ボルトの熱収縮による応力評価結果

項目	記号	単位	値	備考
材料	—	—	SNCM439	ドライウエル主フランジ締付ボルトの材料
ヤング率	E	MPa	192,000	
熱膨張率	α	1/K	1.25×10^{-5}	
温度差	ΔT	K	180	水温 20℃とし、格納容器温度 200℃時の温度差
ひずみ	ε	—	2.26×10^{-3}	$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$
応力	σ	MPa	434	$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$
設計降伏点	Sy	MPa	754	SNCM439 (200℃)
設計引張応力	Su	MPa	865	SNCM439 (200℃)

また、原子炉ウエル注水は原子炉ウエルに注水しドライウエル主フランジを冷却するため、格納容器を除熱することによる格納容器負圧破損への影響が懸念される。この格納容器の負圧破損に対する影響について検討した結果、原子炉ウエルに注水しドライウエル主フランジを冷却することによる格納容器除熱効果は小さく、崩壊熱に対して十分低いことが確認できており、格納容器を負圧にするような悪影響はない。

(3) まとめ

上記の結果から、原子炉ウェル注水による急冷により格納容器閉じ込め機能に悪影響を与えることはない。また、低炭素鋼の延性-脆性遷移温度は一般的に約-10℃以下であり、水温はこの温度領域以上であるので脆性の影響もないと考えられる。

2.4.4 原子炉ウェル代替注水系の監視方法について

原子炉ウェル代替注水系の使用時における監視は、大量送水車付属の流量計、原子炉ウェル水位計と、ドライウェル温度（SA）（ドライウェル上部温度）により行う。大量送水車で注水する際に流量計で注水流量を調整し、原子炉ウェル水位計により原子炉ウェル水位を監視すると同時に、ドライウェル温度（SA）（ドライウェル上部温度）の指示によりドライウェル主フランジが冷却されていることを確認し、原子炉ウェル代替注水系の効果を監視する。

2.5 参照文献

No.	文 献	参照箇所
1	中部電力株式会社 2009年6月23日プレスリリース参考資料 「浜岡原子力発電所4, 5号機 気体廃棄物処理系における水素濃度の上昇に対する原因と対策について」	添付1 浜岡原子力発電所4/5号機で発生したOG系トラブルについて
2	Thomas K. Blanchat and Asimios C. Malliakos “Testing a Passive Autocatalytic Recombiner in the Surtsey Facility” , Nuclear Technology vol. 129, Mar. 2000	添付2 PARの最高使用温度について
		2.2.3 (4) PARの反応開始遅れの影響
		添付11 PAR動作監視装置について
3		
4		
5		
6		
7		
8		

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

格納容器の漏えい箇所の選定について

格納容器の水素の漏えい箇所は、以下の考え方に基づき選定している。

1. 格納容器バウンダリ構成部を踏まえた選定

格納容器のバウンダリ構成部である構造部及びシール部に対して、「限界温度・圧力評価」にて設定した限界温度及び、限界圧力を踏まえると、シール部の限界よりも構造部の限界の方が十分裕度があることが確認されている。

このことから、格納容器からの漏えい箇所としては、シール部からの漏えいを選定する。

2. 機能喪失要因を踏まえた選定

シール部の機能喪失要因としては、格納容器内圧の上昇に伴いハッチ類のフランジ部で生じる「変形」とシール材の「高温劣化」による機能低下がある。このうちシール材の「高温劣化」は、劣化により材料そのものにリークパスが生じる場合と、材料そのものにリークパスは生じないものの、変形に対する追従性が低下する場合の2つが想定される。

表1に評価対象部位とそれぞれの部位に対して想定される機能喪失要因を整理した結果を示す。ハッチ類（シール部）と配管貫通部（シール部）は、材料そのものにリークパスが生じない場合であっても、フランジの変形と高温劣化による追従性の低下が重畳することでシール機能喪失に至る可能性があることから、電気配線貫通部及び格納容器隔離弁よりも相対的にシール機能喪失のポテンシャルが大きい。

本評価では、圧力と温度の上昇に対応して格納容器の漏えい率を設定していること及び上述のとおりシール機能の喪失要因として変形と高温劣化の重畳が支配的であることから、シール部の機能喪失要因として「変形」を伴う機器を選定する。

1. 及び2. から、ハッチ類（シール部）と配管貫通部（シール部）を選定する。

表 1 評価対象部位における機能喪失要因

評価対象部位		機能喪失要因		
		構造部	シール部	
格納容器本体	一般部	延性破壊	—	
	構造不連続部	延性破壊	—	
	ドライウェル基部	延性破壊	—	
	ベント管ベローズ	疲労破壊	—	
ドライウェル主フランジ	フランジ	延性破壊	変形, 高温劣化	
	ボルト	延性破壊	—	
ハッチ類	機器搬入口	円筒胴	延性破壊	変形, 高温劣化
		鏡板	座屈	—
	所員用エアロック	円筒胴	延性破壊	—
		隔壁	延性破壊	変形, 高温劣化
	逃がし安全弁搬出ハッチ	円筒胴	延性破壊	変形, 高温劣化
		鏡板	座屈	—
	制御棒駆動機構搬出ハッチ	円筒胴	延性破壊	—
		鏡板	延性破壊	—
		フランジ	延性破壊	変形, 高温劣化
		ボルト	延性破壊	—
配管貫通部	接続配管	延性破壊	—	
	スリーブ	延性破壊	—	
	ボルト締め平板	延性破壊	—	
	フランジ	延性破壊	変形, 高温劣化	
	ボルト	延性破壊	—	
	セーフエンド	延性破壊	—	
	ベローズ	疲労破壊	—	
電気配線貫通部	アダプタ	延性破壊	—	
	ヘッド	延性破壊	—	
	モジュール	—	高温劣化	
原子炉格納容器隔離弁	耐圧部	延性破壊	—	
	シール部	—	高温劣化	

注) : 非選定の評価対象部位を示す。

3. 開口量評価を踏まえた選定

2. で選定した評価対象部位について、「限界温度・圧力評価」におけるシール部の開口量評価結果を表 2 に示す。また、評価対象部位の位置を図 1～4 に示す。

配管貫通部のうち、X-23A～E 及び X-107 は、口径及び開口量が小さく、開口量に対する許容開口量の裕度も大きいことから、漏えいポテンシャルは十分に低いと考えられる

ため、水素の想定漏えい箇所としては対象外としている。また、X-107については、既に水素の想定漏えい箇所としているX-5と同じ所員用エアロック室内に設置されており、仮にX-107から水素が漏えいした場合でも、所員用エアロック室内の水素濃度は0.07 vol%程度の上昇に留まり、X-5からの漏えいによる水素濃度の最大値1.84vol%と比較して、水素濃度への寄与は十分に小さいと判断できる。

以上から、格納容器からの水素の漏えい箇所として6部位を選定する。

4. 各解析条件における漏えい箇所

各解析条件で想定する漏えい箇所は以下としている。

<PARの設計条件>

表2より、許容開口量に対する裕度及び口径から漏えいポテンシャルが最も大きいと考えられるドライウェル主フランジを漏えい箇所とする。

<有効性評価結果を踏まえた条件>

3. で選定した6部位を漏えい箇所とする。

表2 シール部の開口量評価結果

評価対象部位		①開口量 (mm)	②許容開口量 (mm)	裕度 (②/①)	口径 (mm)
ハ ッ チ 類	ドライウェル 主フランジ	機器搬入口で代表評価			—
	機器搬入口 (X-4A, B)				
	所員用 エアロック(X-5)				
	逃がし安全弁 搬出ハッチ(X-3)				
配 管 貫 通 部	制御棒駆動機構 搬出ハッチ(X-6)	機器搬入口で代表評価			—
	サプレッション・チェ ンバアクセスハッチ (X-7A, B)				
	TIP ドライブ (X-23A～E)				
	ISI 用ハッチ (X-107)				

注) : 非選定の評価対象部位を示す。

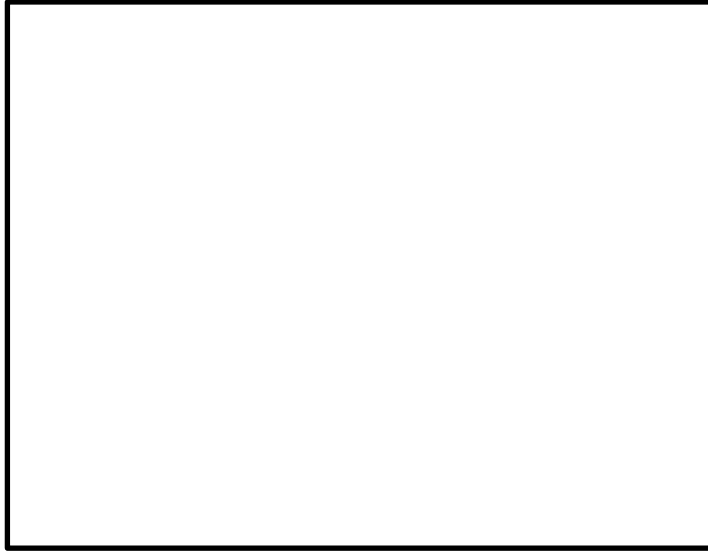


図1 評価対象部位位置図 (原子炉建物4階)

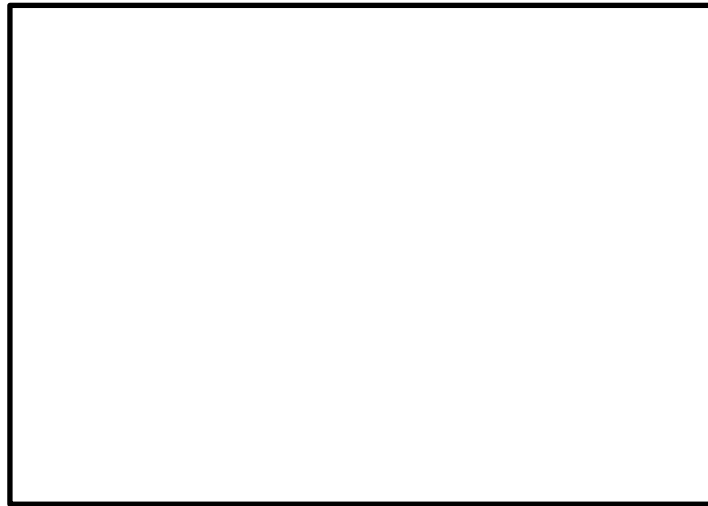


図2 評価対象部位位置図 (原子炉建物2階)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

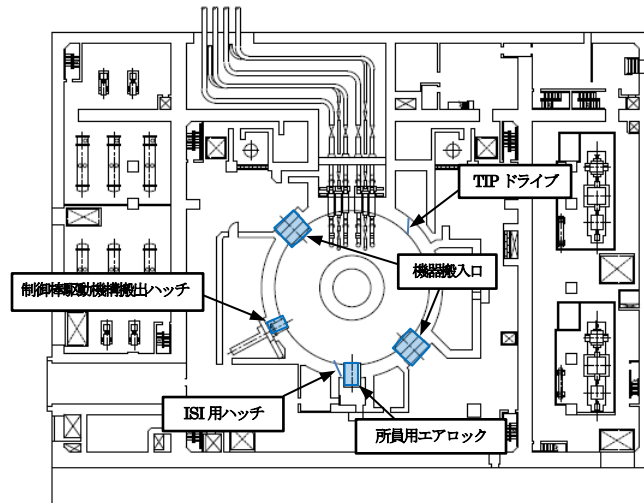


図3 評価対象部位位置図 (原子炉建物1階)

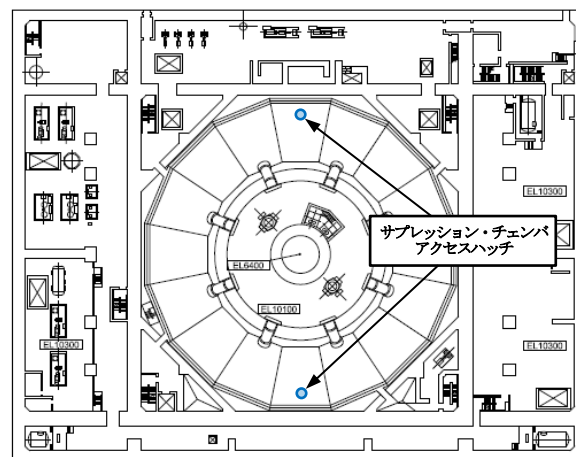


図4 評価対象部位位置図 (原子炉建物地下階)

原子炉建物原子炉棟 4 階大物搬入口及びトーラス室上部ハッチについて

島根原子力発電所 2 号炉の原子炉建物原子炉棟 4 階の大物搬入口はグレーチングであり、通常運転中に地震が発生しても閉鎖することはない。原子炉建物原子炉棟 4 階平面図を図 1 に、グレーチング敷設状況を図 2 に示す。

また、トーラス室上部ハッチは内部溢水対策によりグレーチングハッチに変更したため、大物搬入口と同様に通常運転中に閉鎖することはない。原子炉建物 1 階平面図を図 3 に、トーラス室上部ハッチ開口状況を図 4 に示す。

なお、原子炉建物原子炉棟 4 階大物搬入口及びトーラス室上部ハッチに係る記載については、詳細設計段階において検討する。

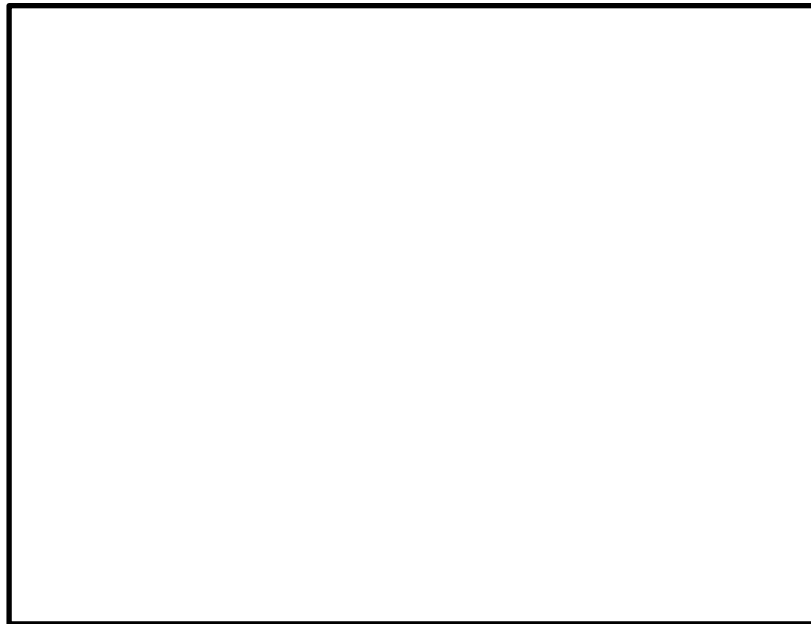


図 1 原子炉建物 4 階 平面図



図 2 大物搬入口外観

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

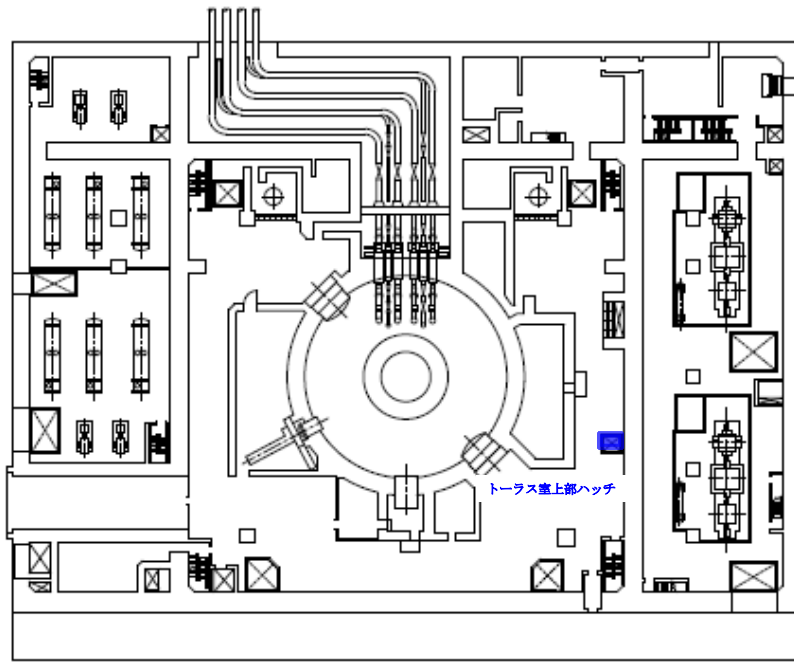


図3 原子炉建物1階 平面図

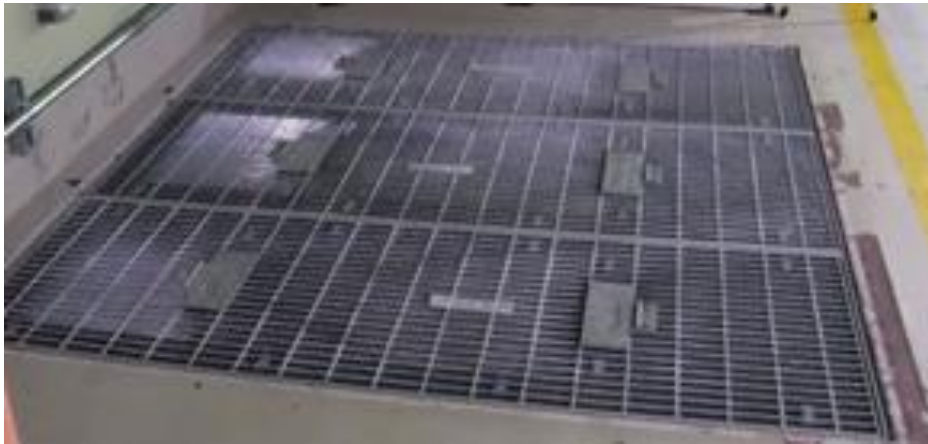


図4 トラス室上部ハッチ外観

PARによる再結合処理の律速過程について



このように内部に大量の触媒を充填したN I S社製PARの触媒カートリッジの構造上の特長から、カートリッジ内部に到達した水素は速やかに再結合され、処理量は触媒カートリッジ間の流路のガス主流からカートリッジ表面への拡散速度により律速されるものと推定される。

この場合には動作中のPARでは、ガスの入口に近いカートリッジ下部では主流の水素濃度が高いうえに、濃度境界層が未発達であるために多くの水素がカートリッジ内に到達し再結合され反応熱が多く生成する一方、出口に近いカートリッジ上部では、主流の水素濃度が低下すると共に、濃度境界層が発達することにより、カートリッジに到達する水素が少なく、発熱も少ないと予想される。(図1)

図2に示すK A L I試験では、触媒カートリッジの温度については上流側（カートリッジ下部）で高温となるのに対して、ガス温度については下流側（カートリッジ上部）で高温となっており、上記を裏付ける結果となっている。（触媒表面での反応が支配的であれば、ガス中の水素濃度、境界層の影響は小さく、触媒が一様に充填されているので触媒の温度分布も平坦となると考えられる。）

以上より、PAR内部での水素処理の過程では、触媒担体の細孔内での拡散やパラジウム触媒表面での反応は律速ではなく、ガス中の拡散が支配的であると判断できる。

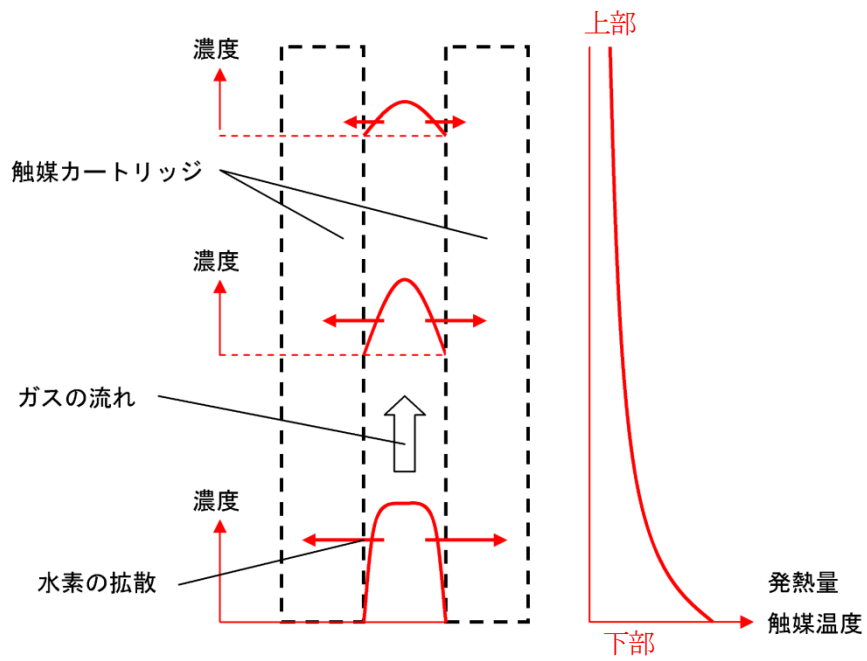


図1 PAR流路内濃度分布と触媒温度分布（概念図）

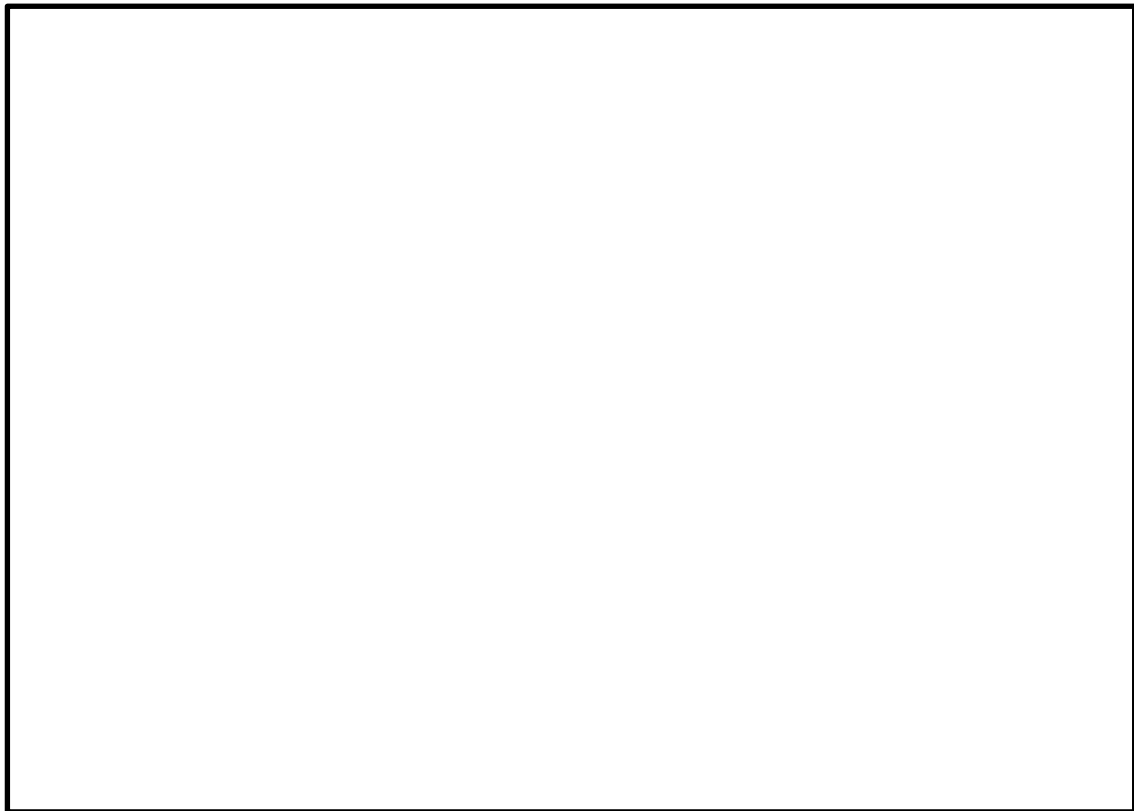


図2 PAR内部分布の例（KALI試験 N06-22）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

GOTHICコードについて

1. はじめに

原子炉建物水素対策の有効性を評価するための熱流動解析において、米国EPR I (Electric Power Research Institute) により開発された汎用熱流動解析コード「GOTHIC (Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments)」を用いている。以下に本解析コードを用いる妥当性を示す。

2. 計算機コードの特徴

(1) 概要

本解析コードは、気相、液体連続相、及び液体分散相（液滴）の3相について、各々、質量、運動量、エネルギーの3保存式を解く、完全3流体（9保存式）解析コードである。

各相間の質量、運動量、エネルギーの移動は構成式で表され、これにより、凝縮・沸騰現象や、液滴による気体の引き込みなど、複雑な混相流現象を模擬することができる。また、ファン・水素再結合器などの機器モデルが組み込まれており、これらの機器の機能を模擬できる。

このような基本構成により、原子炉建物内における気液混相の熱流動を取り扱うことができる。

(2) 流体

前述のように、本解析コードは気相及び液相の熱流動を取り扱うことができる。このうち気相については、蒸気だけでなく水素、窒素、酸素などの様々なガスが混合した多成分ガスとして取り扱うことができる。

(3) 伝熱

流体の各相間の伝熱（エネルギー移動）は、(1)で記述したように構成式で表される。

流体と壁面等の構造体との間の伝熱は、壁面熱伝達モデルにより評価する。壁面熱伝達モデルは、自然対流熱伝達、強制対流熱伝達、凝縮熱伝達などのモデルが組み込まれており、流体と構造物との間の熱伝達、壁面近傍の蒸気の凝縮などを考慮できる。

また、構造物内部の熱伝導を考慮できる。

(4) 形状モデル

本解析コードの形状モデル例を図1に示す。GOTHICでは、区画を複数ボリューム（サブボリューム分割）として扱う分布定数系モデルと、区画を1ボリュームとして扱う集中定数系モデルがあり、解析内容に応じて適切にモデル化することが可能である。

このうち、分布定数系モデル（サブボリュームモデル）は、いわゆる直交系の構造格子モデルであり、3次元の流体挙動が計算される。分布定数系モデルにおいては、各サブボリュームの体積や高さなど、また、サブボリューム間の流路面積や水力等価直径などの形状パラメータを設定することにより、当該部の3次元形状をモデル化することが可能である。さらに、乱流モデル及び分子拡散モデルが組み込まれており、乱流拡散及び分子拡散による質量・運動量・エネルギーの移動を考慮可能である。また、壁面摩擦モデルや局所圧力損失モデルにより、壁面と流体との相互作用や、流路内の構造物を通過することによる運動量・エネルギーの損失を考慮可能である。さらに、各相間の界面を通じた質量、運動量、エネルギーの移動が考慮されている。各サブボリュームについてこれらのモデルを含む質量・運動量・エネルギーの保存式を計算することにより、3次元熱流動を評価する。

集中定数系においては、各区画・各相について質量とエネルギーの保存式が計算される。一方、集中定数系の区画間の流れはフローパスモデルで模擬する。フローパスは、各相について1次元の運動量の保存式が計算され、壁面摩擦モデル、局所圧力損失モデル、各相間の界面を通じた運動量の移動などが考慮されている。また、区画と境界条件とを接続することにより、境界との流体の流入・流出が計算される。フローパスは1次元の流れであるが、場合によって、これらを複数設置することにより、区画間の循環流れ等も模擬することができる。

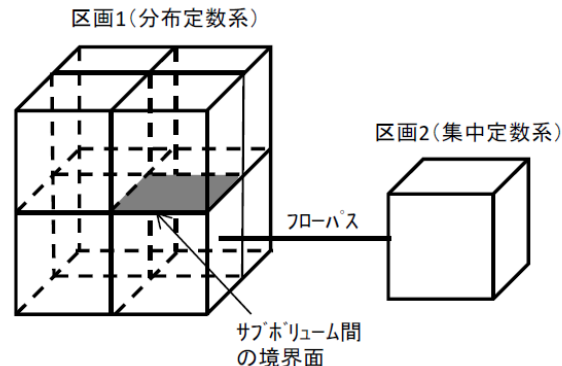


図1 形状モデル例

(5) 境界条件

流出入口境界から流入する流体の種類、流量、エネルギーなどを設定できる。また、圧力境界条件により、境界での流体の圧力などを設定できる。一方、熱伝導体の境界においては、境界での熱流束、温度などを設定可能である。

(6) 機器モデル

ファンや水素再結合器などの機器を模擬できる。ファンモデルは、フローパスに流入・流出する流量を制御できる。水素再結合器モデルは、当該モデルに流入する水素と酸素の結合反応及び上記結合反応によって生じる反応発熱を制御できる。

3. 本解析コードの妥当性確認

原子炉建物水素対策の有効性を評価するための熱流動解析に本解析コードを用いることの妥当性を確認するため、基本的な物理現象である3次元流動によるガスの流動・拡散現象、ガスの熱流動と水素ガス濃度変化への影響が大きい水蒸気の壁面熱伝達による凝縮及び構造体内部熱伝導、PARモデルに着目する。

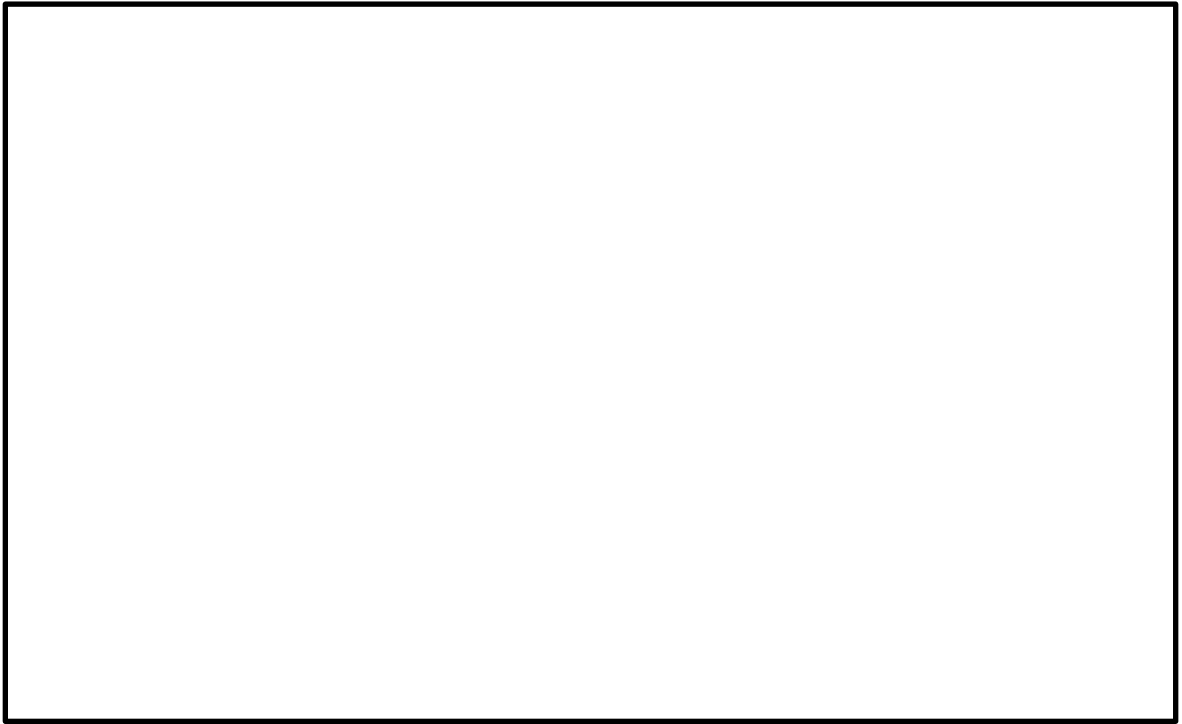
(1) 3次元流動解析への適用性

原子炉建物内では、格納容器などから漏えいしたガスが拡散し混合する。原子炉建物水素対策の有効性評価では、原子炉建物原子炉棟4階に対して、複数ボリューム分割できる分布定数系モデルを適用することで、水素や水蒸気などガスのボリューム間の拡散・混合を解析可能である。

ガスの拡散・混合に関する代表的な総合効果試験として NUPEC 試験がある（図2参照）。NUPEC 試験は、表1及び図3～5に示すように、25の区画に分割された試験体系において、ガス放出の有無、放出ガスの種類（水蒸気または水素の代替としてのヘリウム）やスプレイの有無などを考慮した試験が行われ、雰囲気圧力・温度やガス濃度分布が測定されている。ここでは、水蒸気及び水素の代替としてのヘリウムの両方を放出し、かつスプレイを想定しない点で、原子炉建物水素対策の想定条件に近い試験ケース Test M-4-3 を対象に、解析の試験データとの比較を行った。

Test M-4-3 の試験条件を以下に示す。

- ・初期圧力：101(kPa(abs))
- ・初期温度：28(°C)
- ・蒸気の放出条件：0.33(kg/s) (1800sec で停止)
- ・ヘリウムの放出条件：0.03(kg/s) (1800sec で停止)
- ・ガス放出区画：図4参照
- ・スプレイ：無し



以上より，格納容器漏えいによる水素や水蒸気の放出を想定して，ガス拡散・混合を評価する原子炉建物水素流動解析に本解析コードを適用するのは妥当である。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表1 NUPEC試験体系の内部区画 (出典:[1]Table3-2)

ノード番号	区画
1	炉内計装チェイス
2	CV サンプ ポンプ室
3	一般部(下部) C
4	一般部(下部) D
5	一般部(下部) A
6	一般部(下部) B
7	SG 基礎部 C
8	SG 基礎部 D (Test M-4-3 ガス放出区画)
9	CV 冷却材 ドレンタンク
10	SG 基礎部 A
11	SG 基礎部 B
12	一般部(上部) C, D
13	一般部(上部) A, B
14	SG ループ室 C
15	SG ループ室 D
16	加圧器室(下部)
17	SG ループ室 A
18	SG ループ室 B
19	キャビティ
20	SG 煙突部 C
21	SG 煙突部 D
22	加圧器室(上部)
23	SG 煙突部 A
24	SG 煙突部 B
25	ドーム部

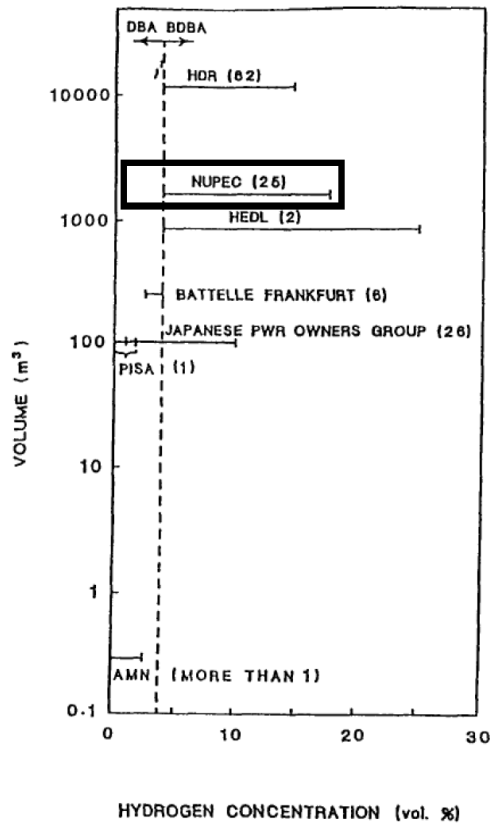


図2 水素濃度の範囲と試験スケール (出典: [1]Fig. 3-1)

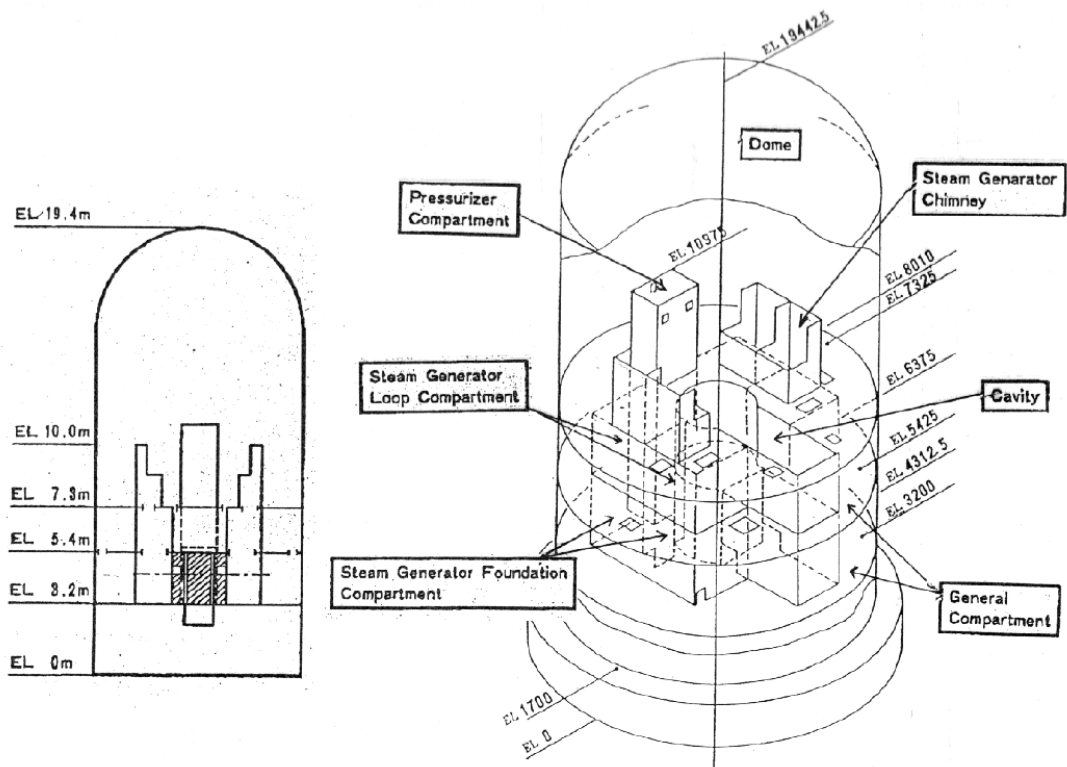


図3 NUPEC 試験体系の概要 (出典: [2]Fig. 17-1)

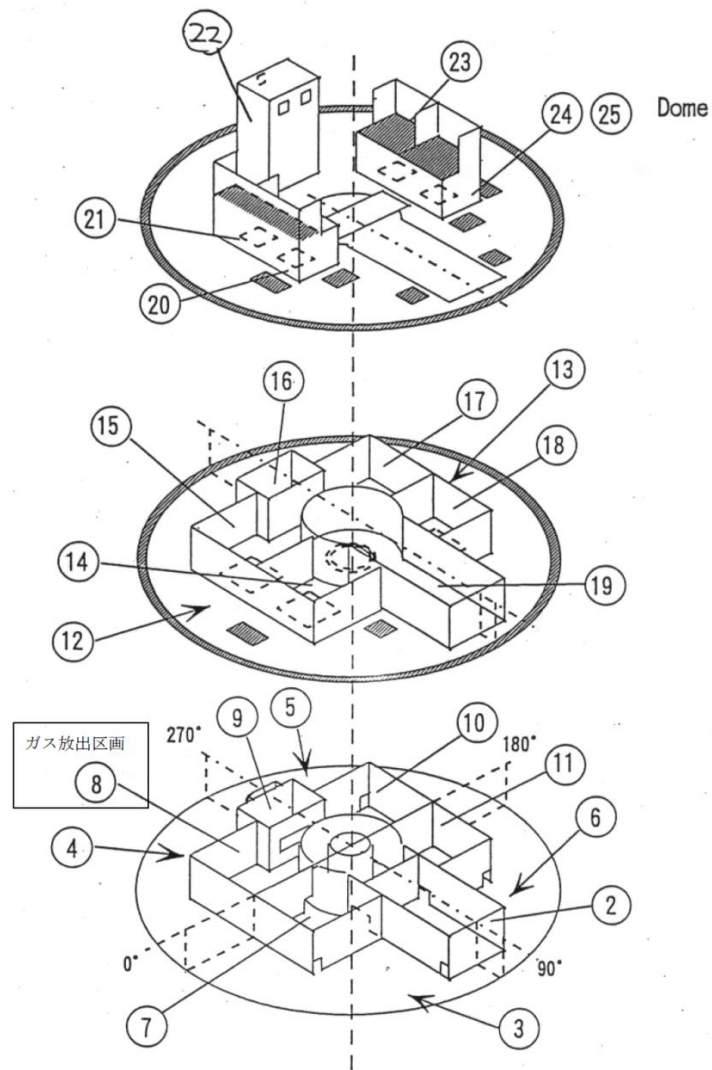


図4 NUPEC試験体系における区画と開口部 (出典：[2]Fig. 17-2)

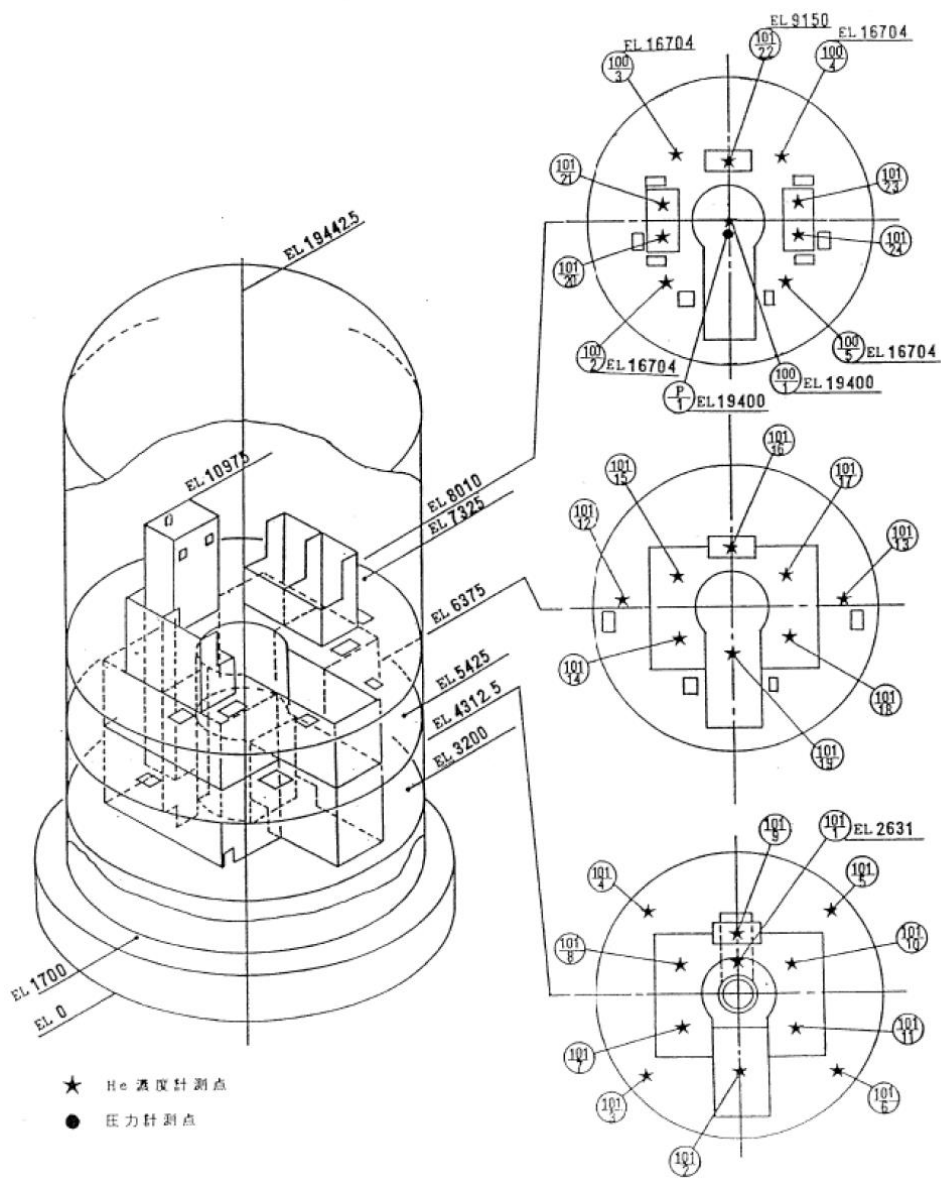


図5 NUPEC 試験体系におけるヘリウム濃度及び圧力の計測点 (出典 : [3] 図 3. 1. 4)

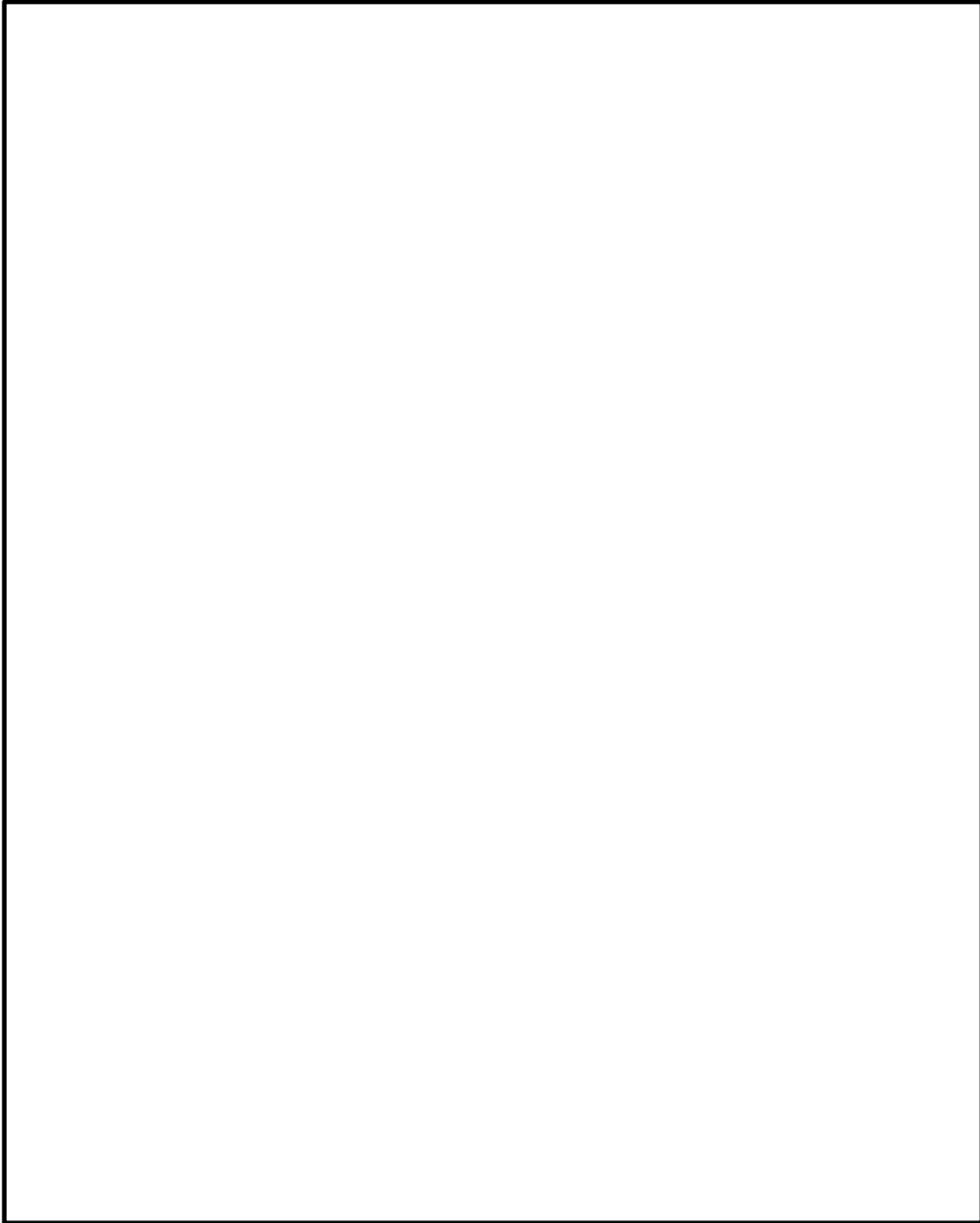


図6 NUPEC試験の解析モデル概要（出典：[2]Fig.17-3）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

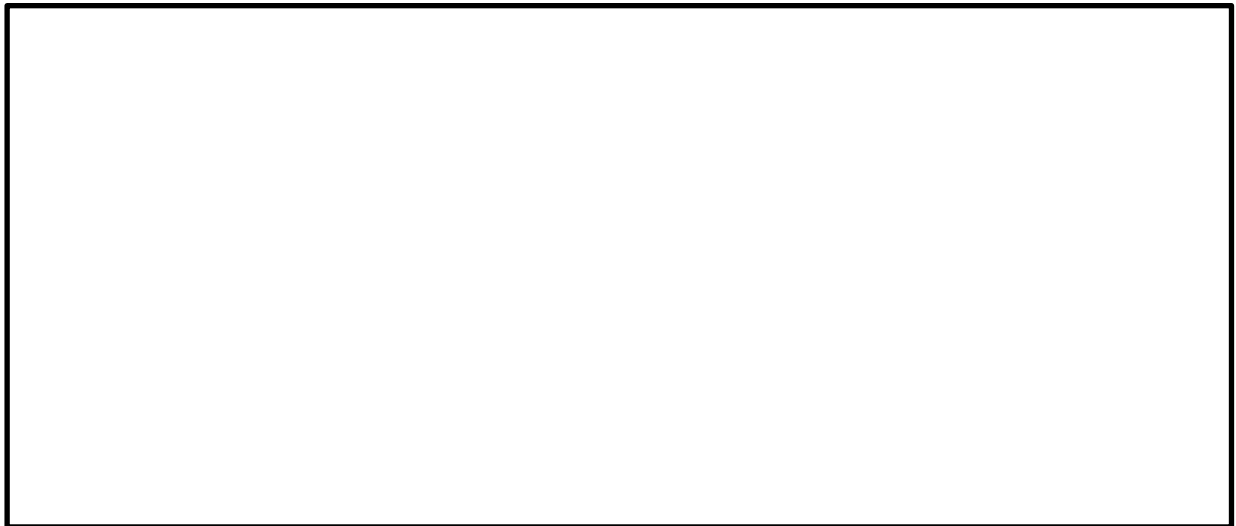


図7 NUPEC試験の解析モデルにおける分布定数系によるノード分割（出典：
[2]Fig. 17-4)

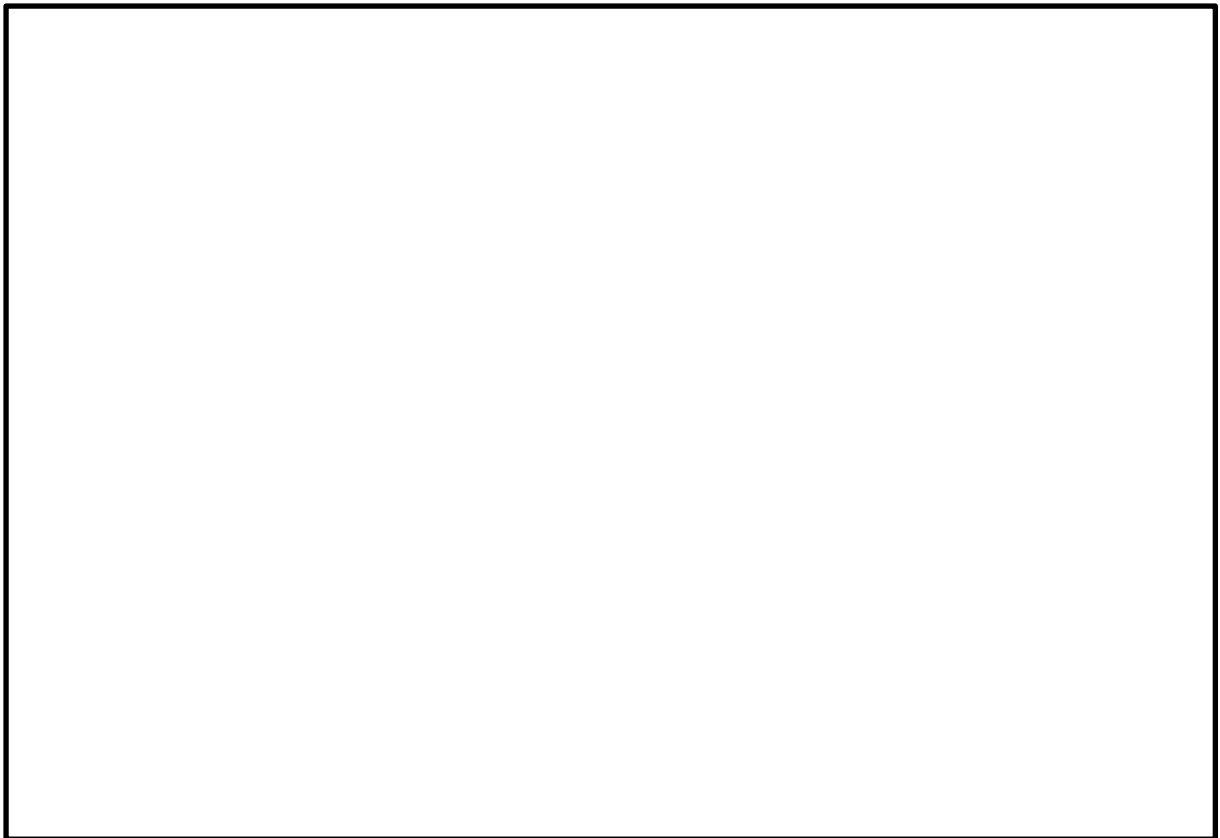


図8 格納容器圧力（出典：[2]Fig. 17-16)

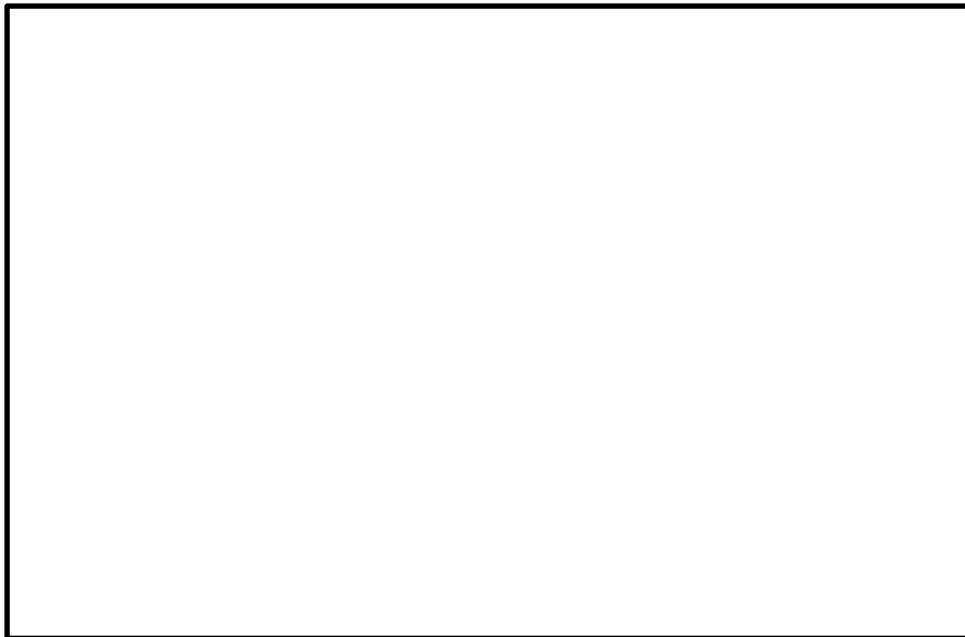


図9 格納容器温度 (出典：[2]Fig. 17-17)



図10 ヘリウム濃度 (出典：[2]Fig. 17-19)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 水蒸気凝縮(壁面熱伝達)への適用性

凝縮熱伝達モデルとして、DLM-FM モデル(Diffusion Layer Model with enhancement due to film roughening and mist generation in the boundary layer)を使用した。本モデルは、液膜の擾乱や壁面付近での液滴発生を考慮した最適評価モデルである。

本モデルで評価した凝縮熱伝達について、個別効果試験データとの比較を図 11 に示す。比較する試験パラメータの範囲を以下に示す。



図 11 に示すとおり、ほとんどの試験データに対して約 20%以内で予測できている。原子炉建物水素対策の有効性評価で想定されるパラメータ範囲は、以下に示すように試験パラメータの範囲を概ね満たすことから、本モデルを適用するのは妥当である。

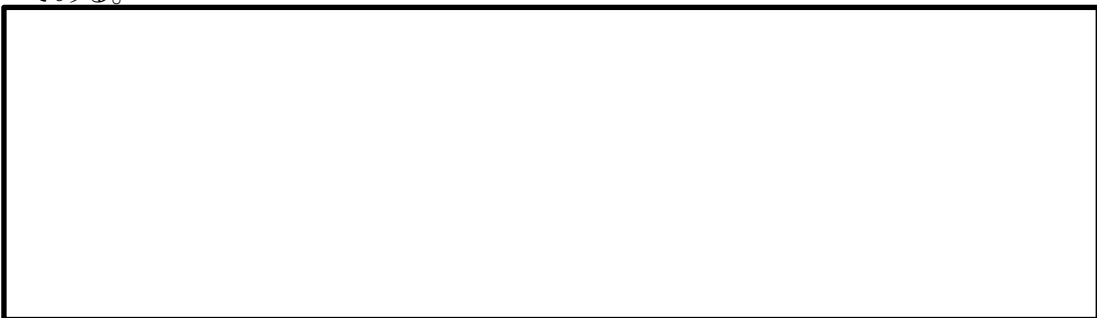


図 11 DLM-FM モデルの試験データとの比較 (出典：[2]Fig. 5-40)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) 構造体内部熱伝導

原子炉建物原子炉棟4階の壁及び天井の構造体を熱伝導体とみなし、GOTHICコードに内蔵されている1次元熱伝導モデルを使用している。

円筒の熱伝導体において、熱伝導体の初期温度を500(F)、熱伝導体周りの流体温度を200(F)とした条件で、GOTHICコードで評価した円筒中心の温度の時間変化と理論解との比較を図12に示す。GOTHICコードは理論解とよく一致しており、原子炉建物水素対策の有効性評価の中で、構造体内部熱伝導へ本モデルを適用することは妥当である。

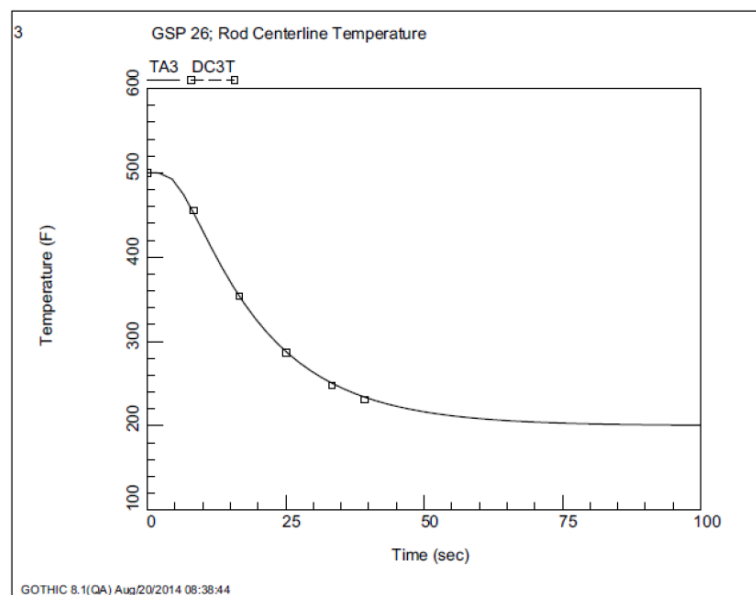


図12 円筒中心温度の1次元熱伝導モデルによる計算結果(変数名: TA3)と解析解(変数名: TC3T)との比較(出典: [2] Fig. 4-11)

(4) PARモデル

原子炉建物原子炉棟4階のような相対的に広大な空間に設置されたPARによる水素再結合挙動を、本解析コードによって適切に行えるかどうかについては、以下の2つの点に着目して検討する必要がある。

- ・本解析コードでモデル化するPARにおいて、本来、PAR内部で生じているような局所的な熱・流動影響を伴う水素・酸素再結合を取り扱えるか
- ・PARの大きさに対して、相対的に空間スケールの大きい「粗メッシュ」モデルによっても、適正なPAR流入気体条件(水素、酸素濃度、気体温度、圧力)を与えることができるか

以下では、これらの観点に対しての考察・検討を示す。

① PAR内の局所流動の扱い

PARの内部においては、カートリッジにおける水素・酸素の再結合開始に伴い、カートリッジでの再結合熱の流入気体への伝熱、伝熱に伴う気体の浮力による上昇流の発生、及び上昇流に対する流動抵抗の発生等、複雑な熱流動が発生していると考えられる。

KAL I 試験^[4]でのPARの水素処理量の基本式についての妥当性検証解析においては、試験容器容積とPARの入口において計測された水素濃度の変化、気体温度及び容器内の気体圧力（図13）より求めた処理速度の実験値と、試験条件（温度、圧力は代表値）を相関式への入力値として与えて算出した処理速度を比較しており、これによって相関式の妥当性が確認された。すなわち、PAR内部の複雑な流動の結果としての水素処理容量をPARの入口において計測された水素濃度、気体温度及び気体圧力の関数として整理して与えたものが、水素処理容量相関式である。水素処理容量相関式はPAR内の浮力や流動抵抗などの局所流動及び水素処理特性を内包しており、PAR入口条件として水素濃度、気体圧力、気体温度を与えれば、これらのPAR内部の局所性を陰に含んだ形で、当該PAR水素処理容量を得ることができるように配慮されている。

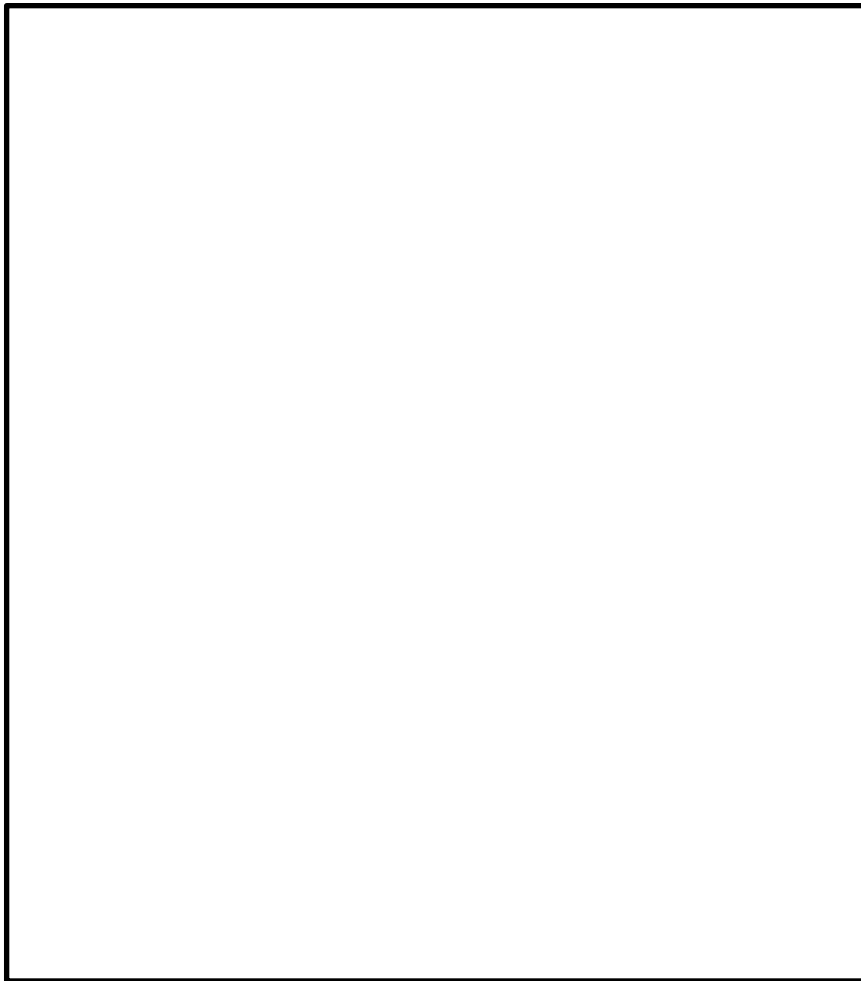


図 13 K A L I 試験の計測位置

② G O T H I C における P A R のモデル化

G O T H I C においては、N I S 社製の P A R による水素処理相関式を、機器モデルの一つである Volumetric Fan モデル及び Hydrogen Recombiner モデルで模擬している。G O T H I C における P A R の組み込みロジックを図 14 に示す。

まず、Volumetric Fan モデルによる体積流量の制御を使用して、Fischer^[5]の相関式に示される P A R 入口から自然に引き込まれる体積流量を模擬し、次に、Hydrogen Recombiner モデルを使用して、Volumetric Fan モデルで模擬した体積流量、P A R 入口の水素濃度などのパラメータから上記の相関式で計算される水素処理容量を模擬している。

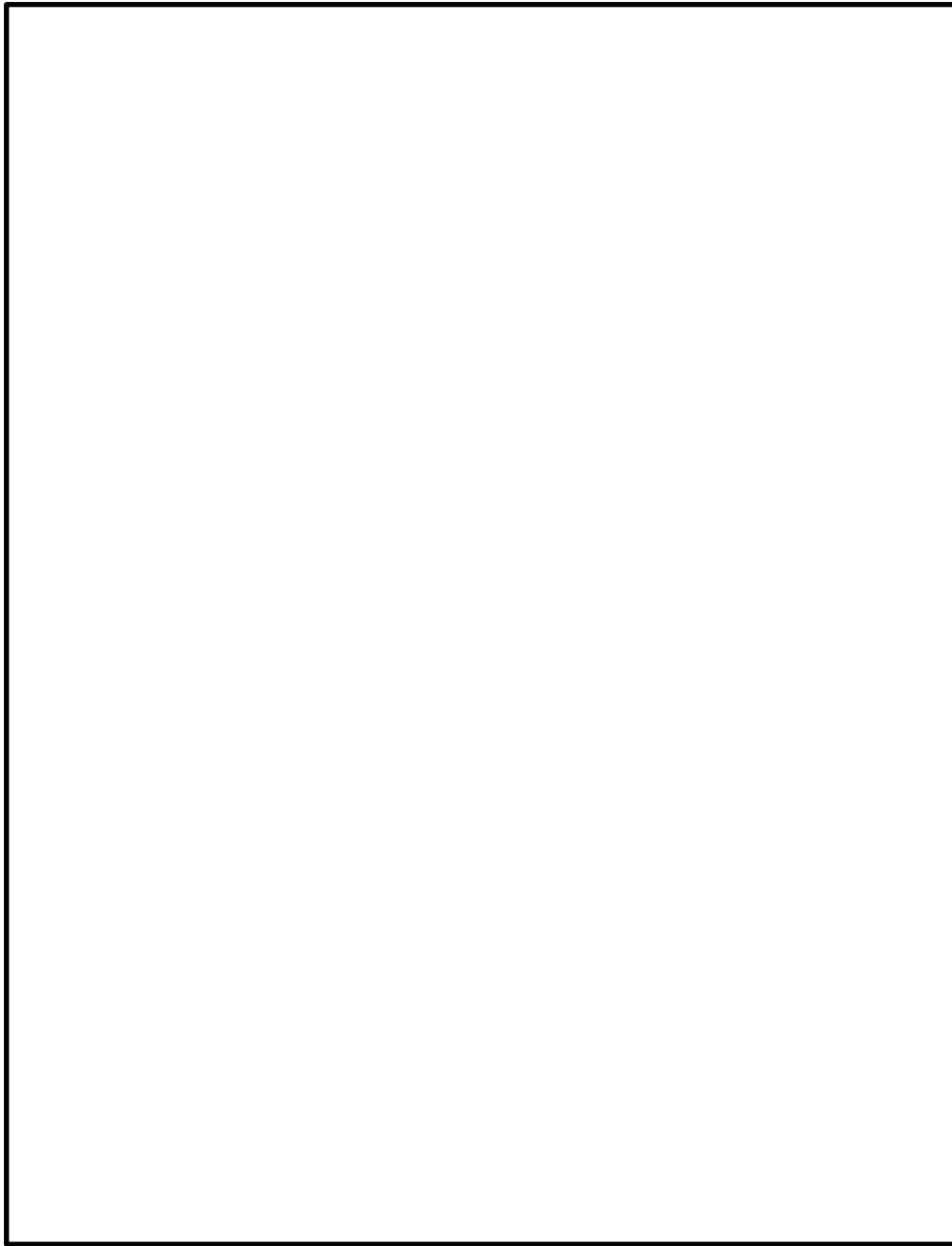


図14 PARの組み込みロジック

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

③ GOTHICのオペフロ解析モデルとPARモデルの関係

上記②により、GOTHICコードにおいて、PARの水素処理容量相関式を忠実にモデル化していることが確認された。また、①により、PAR入口の水素濃度、気体圧力、気体温度を与えれば、適正な水素処理容量を計算できることが確認された。

GOTHICによるPARの解析においては、オペフロ内のサブボリュームの大きさは、PARの大きさと比較して大きく、PAR入口部を局所的にモデル化はしていない。すなわち、PARの水素処理量を適正に評価するためには、PARの入口条件を適切に評価する必要がある。これについて考察を行った。

PARモデルでは、フローパスの入口と出口を同じサブボリュームに接続し、同サブボリュームの水素濃度・酸素濃度・温度をPAR入口の条件として使用している。PARが設置される実機建物体系では、作動中のPAR排気は周囲雰囲気と比べて高温であるので、上方へ立ち昇って行き、PARの周囲に留まることはないと考えられるため、このようにPAR設置ボリュームに排気を混合させるモデル化は、以下に示すとおり保守的な設定と考える。

・ 水素濃度

PARで処理され水素濃度が低くなったガスが、フローパスの出口より同サブボリュームに排出され混合する。そのため、同サブボリュームの水素濃度は、実際のPAR入口の水素濃度よりも低くなり、相関式で計算した水素処理容量が小さくなるため保守的な設定と考える。

・ 酸素濃度

PARで処理され酸素濃度が低くなったガスが、フローパスの出口より同サブボリュームに排出され混合する。そのため、同サブボリュームの酸素濃度は、実際のPAR入口の酸素濃度よりも低くなり、PARの起動の観点で保守的な設定と考える。ただし、島根原子力発電所2号炉の場合、水素発生量に比べて十分な酸素量を有しており、酸素濃度による影響はない。

・ 気体温度

GOTHICモデルにおいては、PARの水素・酸素再結合による発生熱量が、サブノード内の気体全体を加熱するため、PAR出口温度については、実際よりも低く評価され、浮力による上昇速度が実際よりも小さくなる。これは、原子炉建物原子炉棟4階内の気体の混合性を小さくする。水素濃度分布の局所化や成層化の観点からは、原子炉建物原子炉棟4階内の気体の混合性が促進されないほうが一般に厳しい評価となると考えられる。

また、PARに流入する気体温度の観点からは、実際よりも高温な気体がPARに流入することになり、これはPARの水素処理速度を実際よりも低下させる方向に作用するため保守的な設定と考える。

- ・ 気体圧力

解析においては、サブボリューム内の気体圧力は一定である。一方、実際の流動においては、圧力に分布がある。しかしながら、解析対象としているような、解放空間における空間内の圧力差は小さく、圧力分布を均一に扱っている影響は僅少と考えられる。

④ PAR設置状態における総合的な解析能力

3. (1) に示したNUPEC試験についての解析は、上記の①～③が適合する状況で行われたものであり、この結果は、3. (1) で先述のように、GOTHICで適切なPAR解析を行い得ることを示している。

以上から、GOTHICコードによるPAR解析については、

- ・ PAR内の局所性については、PAR入口条件に縮約された水素処理容量相関式により、
- ・ PAR周囲を比較的粗メッシュで扱っていることについては、その設定がPARの水素処理量や原子炉建物原子炉棟4階内のガス混合性を低く見積もる定性的傾向があることにより、
評価モデルとしては適正であることを示した。

また、総合的な評価能力については、3. (1) の実験解析により、適切な解析能力があることを示した。

以上の検討から、GOTHICにおけるPARのモデル化、及び同モデルを用いての水素・酸素再結合解析は適正に実施できる。

参考文献

- [1] NUPEC, “FinalComparison Report on ISP-35: NUPEC Hydrogen Mixing and DistributionTest (TestM-7-1)”, CSNI Report NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.

- [2] Electric Power Research Institute, Inc., “GOTHIC THERMAL HYDRAULICS ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 8.1(QA)”, NAI 8907-09 Rev 14, September 2014

- [3] 独立行政法人原子力安全基盤機構溶接部等熱影響部信頼性実証試験(原子炉格納容器)に関する報告書(平成4年度), 平成5年3月

- [4] EPRI and EDF, “Generic Tests of Passive Autocatalytic Recombiners (PARs) for CombustibleGas Control in Nuclear Power Plants”, June 1997.

- [5] K. FISCHER, “QUALIFICATION OF A PASSIVE CATALYTIC MODULE FOR HYDROGEN MITIGATION”, Nuclear Technology VOL.112, Oct. 1995

重大事故等時に発生が想定されるガス等による被毒について

パラジウムを触媒として使用するN I S製のP A Rに対しては、ハロゲンをはじめとする反応阻害物質による水素処理性能への影響が知られていることから、反応阻害物質として炉心損傷時の核分裂生成物のハロゲンの大部分を占めるよう素による影響について確認を行っている。

一方、よう素以外の重大事故等時に発生が予想されるガス等によるパラジウム触媒への被毒について、Southern Nuclear Engineering (SNE)の試験にて評価が行われていることから、その試験結果を基に格納容器から原子炉建物原子炉棟内にガス等が放出された場合の影響について確認を行った。

1. 対象とする化学物質

1997年5月22日にEPRI(米国電力研究所)によって発行された文献によると、Southern Nuclear Engineering (SNE)の試験において、プラントで一般的に使用される化学物質(有機溶剤、機械油等)とL O C A後の核分裂生成物がパラジウム触媒の水素除去効率へ及ぼす影響について評価を行っている。

対象とした化学物質は表1のとおりであり、加圧水型軽水炉の格納容器内で存在または発生しうる一般的に使用される化学物質とL O C A後の核分裂生成物(ハロゲンを除く)を、触媒活性への影響に関わらず選定している。

なお、ここでは格納容器から原子炉建物原子炉棟内への漏えいを想定し、表1のうちガスと揮発性の高い液体について、パラジウム触媒に与える影響の確認を行う。

表1 SNE試験で確認した化学物質

--

2. 試験方法

SNE 試験では、図 1 に示す試験装置を用い、一定時間水素及び化学物質を触媒試験体に通過させ入口及び出口の水素濃度を測定することで、触媒試験体の水素処理性能の変化を測定している。触媒試験体は円筒形の触媒ペレットを充填したものを使用している。試験条件を表 2 に示す。



図 1 試験装置概要

表 2 試験条件

入口温度	
入口水素濃度	
入口流量	
触媒の種類	
触媒寸法	
化学物質濃度	
試験時間	

3. 試験結果

ガス及び揮発性の高い液体について、パラジウム触媒に対する水素処理性能の低下率を確認したところ、図2のとおりであり、性能低下は 未満であった。



図2 ガス及び揮発性の高い液体の水素処理性能低下率

4. 重大事故等時に発生が想定されるガス等による影響

SNE 試験結果により、よう素以外の重大事故等時に発生が想定されるガス等はパラジウム触媒の水素処理性能に対し有意な影響を及ぼさないと考える。

なお、化学物質のうち一酸化炭素を想定した場合、島根原子力発電所2号炉において、MCCIにより発生する一酸化炭素は、原子炉建物原子炉棟4階に全量漏えいすることは考えにくいですが、仮にPARの触媒に対して最も厳しい条件である原子炉建物原子炉棟4階へ全量漏えいするとした場合、一酸化炭素濃度は約 $1.5 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 程度であり、SNE 試験条件の に比べて十分に低い濃度であることが確認された。また、PARの個数は、反応阻害ファクタとして保守的に0.5（50%の性能低下）を考慮して算出している。

P A R設置箇所の考え方について

1. P A R設置箇所の考え方（階層）

原子炉建物原子炉棟内の水素ガス流路のイメージ図を図1，図2に示す。格納容器の各ハッチ等から漏えいした水素を含む高温のガスは，原子炉建物原子炉棟4階に上昇すると考えられることから，原子炉建物原子炉棟4階にP A Rを設置する。

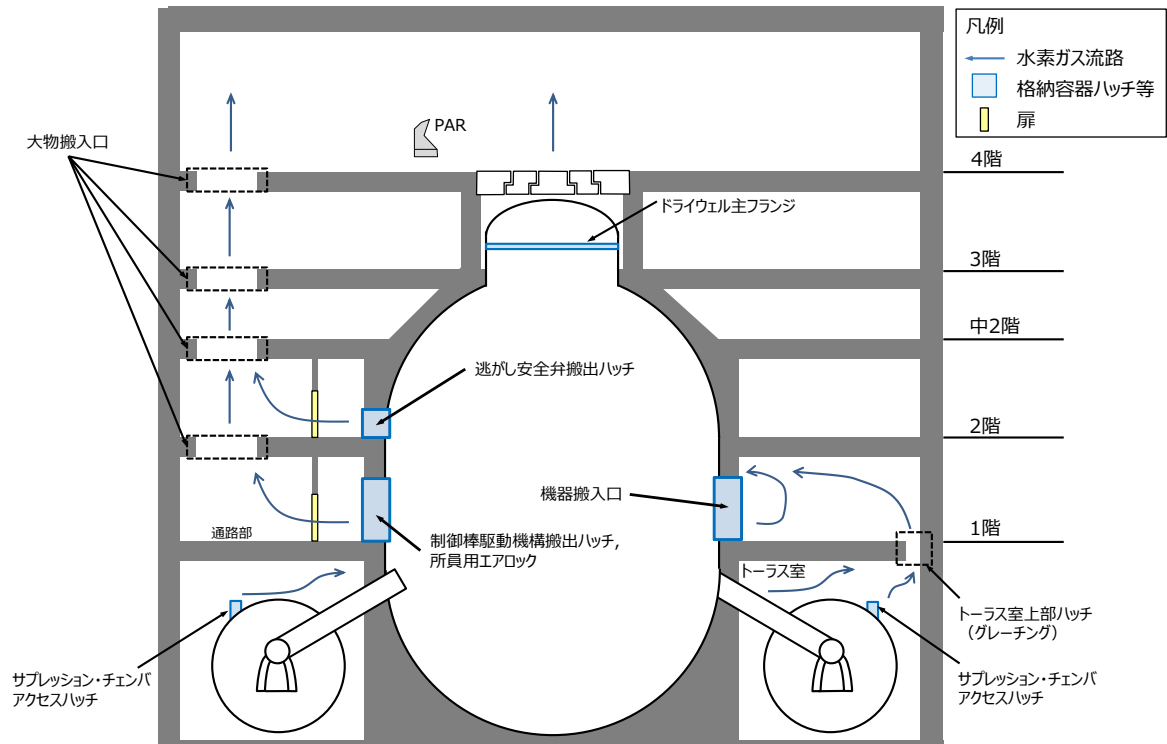


図1 水素ガス流路のイメージ図（原子炉建物原子炉棟（断面図））

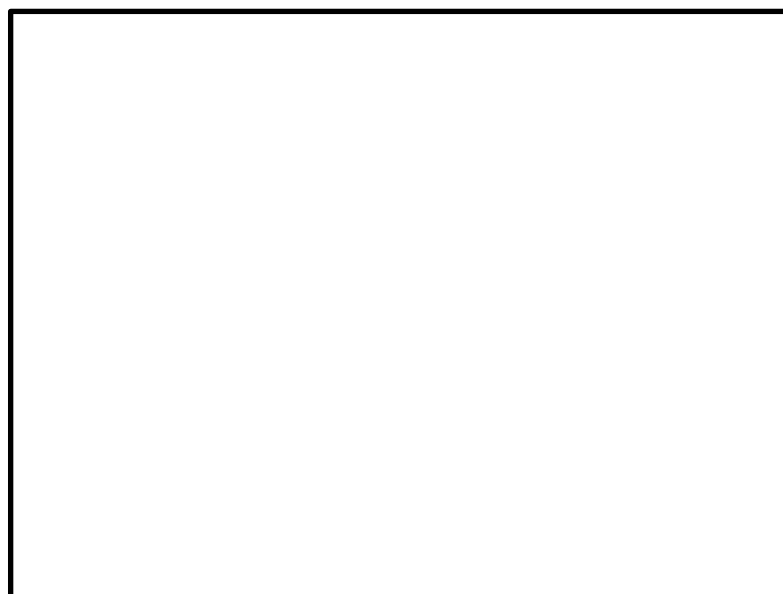


図2 水素ガス流路のイメージ図（原子炉建物1階 平面図）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2. PAR設置箇所の考え方（高さ方向）

電共研^{※1}において、PARをオペフロの下層部に設置した場合と上層部に設置した場合の解析を実施している。解析条件を表1に、解析モデルを図3及び図4に、境界条件を図5に示す。また、解析結果の断面位置を示した解析モデル拡大図を図6に、解析に用いたPARモデル形状を図7に、解析結果（水素濃度分布）を図8-1, 8-2に、解析結果（温度分布）を図8-3, 8-4に示す。

図8-1に示すとおり、PARを下層部に設置した場合、格納容器から漏えいした高温の気体及びPARの再結合処理に伴う高温の排気による上昇流と、上昇した気体が天井及び側壁にて冷却されることで発生する下降流により、オペフロの雰囲気全体を混合する自然循環流が生じ、水素濃度がほぼ均一になっている。

一方、PARを上層部に設置した場合は、図8-2に示すとおり、PARからの排気は、再結合反応により発生するエネルギー（1,000kW程度）が大きいのに対して天井までの移動距離が短いため天井及び側壁で十分冷却されず、オペフロの雰囲気全体を混合する自然循環流とはならない。その結果、高温かつ水素濃度の低いPARの排気ガスが天井付近に蓄積し、温度成層効果により、格納容器から漏えいした水素の上昇が抑制され、PAR下端レベルより下側に高濃度の水素が蓄積する結果となっている。（詳細は、【図8-2に対する考察】参照。）

以上のことから、高さ方向のPARの設置箇所は、より自然循環流が発生しやすいオペフロ（原子炉建物原子炉棟4階）の下層部へ設置することとする。なお、島根2号炉のGOTHIC解析におけるオペフロの雰囲気全体の流速ベクトルは、図8-5に示すとおり、オペフロ雰囲気全体を混合する自然循環流が発生していることがわかる。

※1：電共研「シビアアクシデント時の水素処理技術の開発」（平成26年3月）

【図8-2に対する考察】

- ①格納容器から漏えいした高温のガスは、PARで再結合処理され、水素濃度が低いガスがPAR上部より排気される。このとき、水素-酸素の再結合反応により、PARからの排気は格納容器から漏えいしたガスよりも高温^{※2}となる。

※2：水素濃度1vol%では約40K、水素濃度4vol%では約170K上昇する。（添付11 図2参照）

- ②PARの設置レベル（床から14.5m）から天井（床から17.5m）までの移動距離が短く、PARからの排気が天井及び側壁で十分に冷却されないため、オペフロの雰囲気全体を混合する自然循環流が発生しづらく、PARからの高温かつ水素濃度の低い排気が天井付近に徐々に蓄積する。（温度成層化：図8-4参照。）
- ③温度成層化はPAR入口レベルを境界として徐々に進行し、水素濃度の低下とともにPARの再結合処理量がしだいに低下してくる。
- ④一方、格納容器からは継続して高温のガスが漏えいしてくることから、PAR入口レベルよりも下層部において水素濃度はしだいに上昇し、温度成層化が進展することとなる。なお、PARの排気で成層化された上層部の領域と比較し、格納容器からの漏えいガスは温度が低く密度が大きいことから、PARの排気で成層化された上層部には流入しづらく、オペフロの水素は処理されにくくなる。

表 1 解析条件

分類	項目	条件

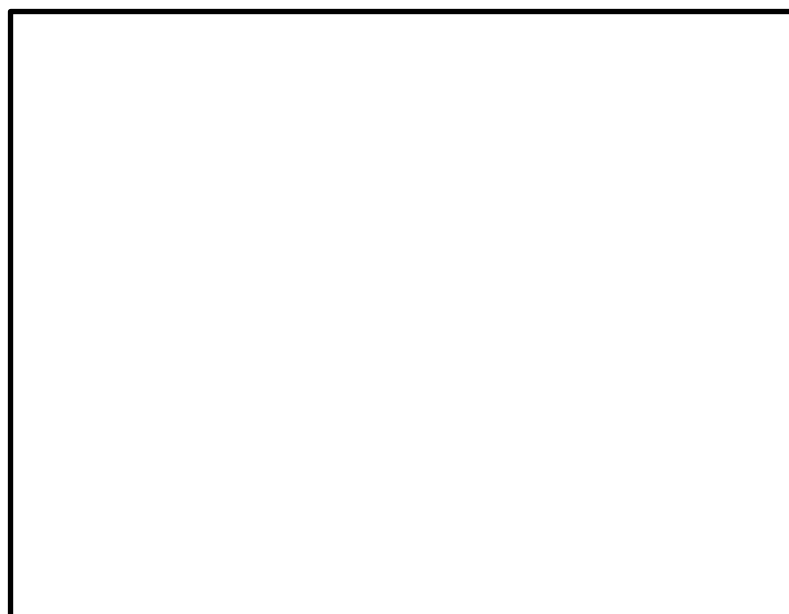


図 3 解析モデル (平面図)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

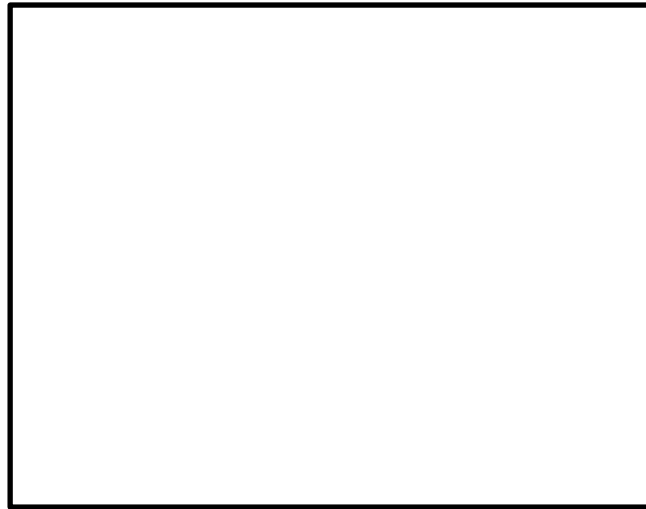


図4 解析モデル（断面図）



図5 境界条件

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

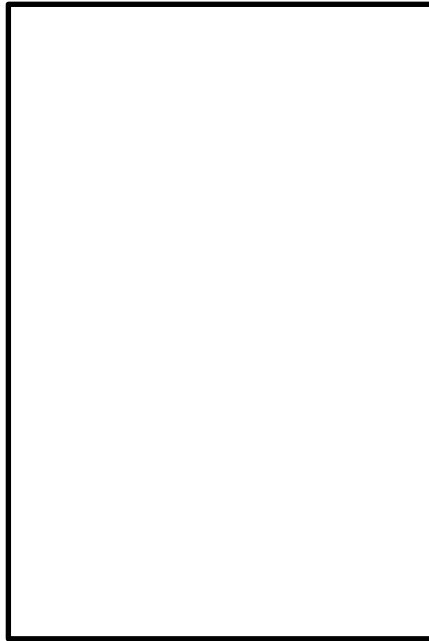


図6 解析モデル拡大図 (平面図)



図7 PARモデル形状

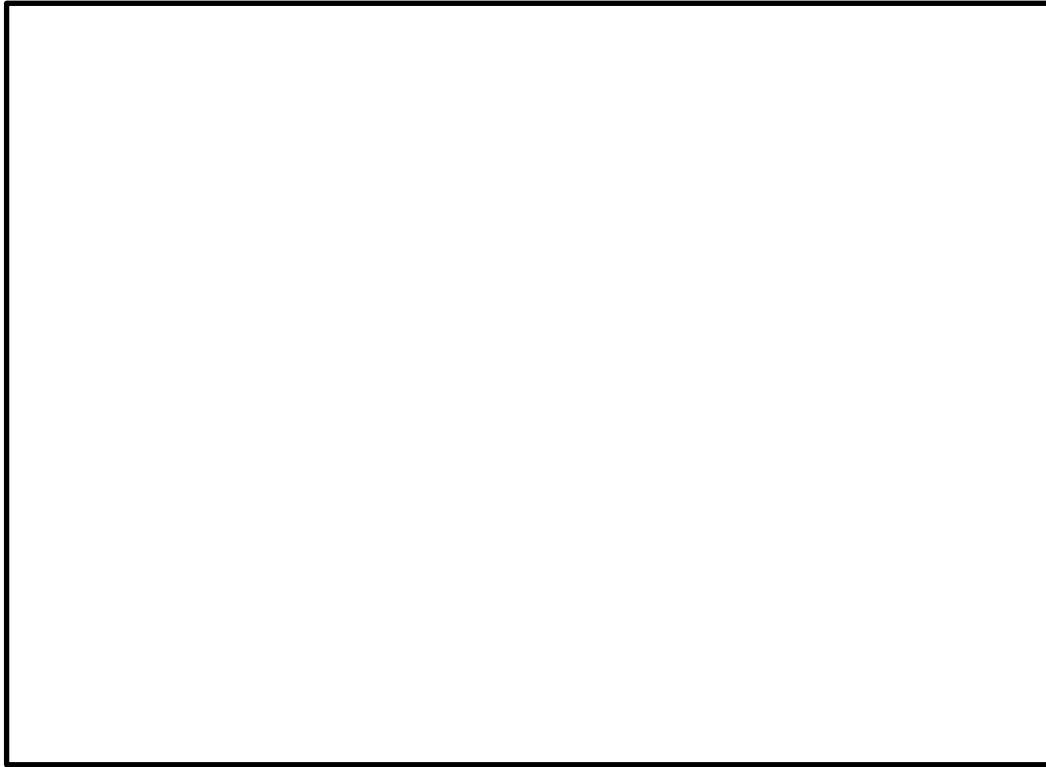


図 8-1 PARを下層部に設置した場合（水素濃度分布）

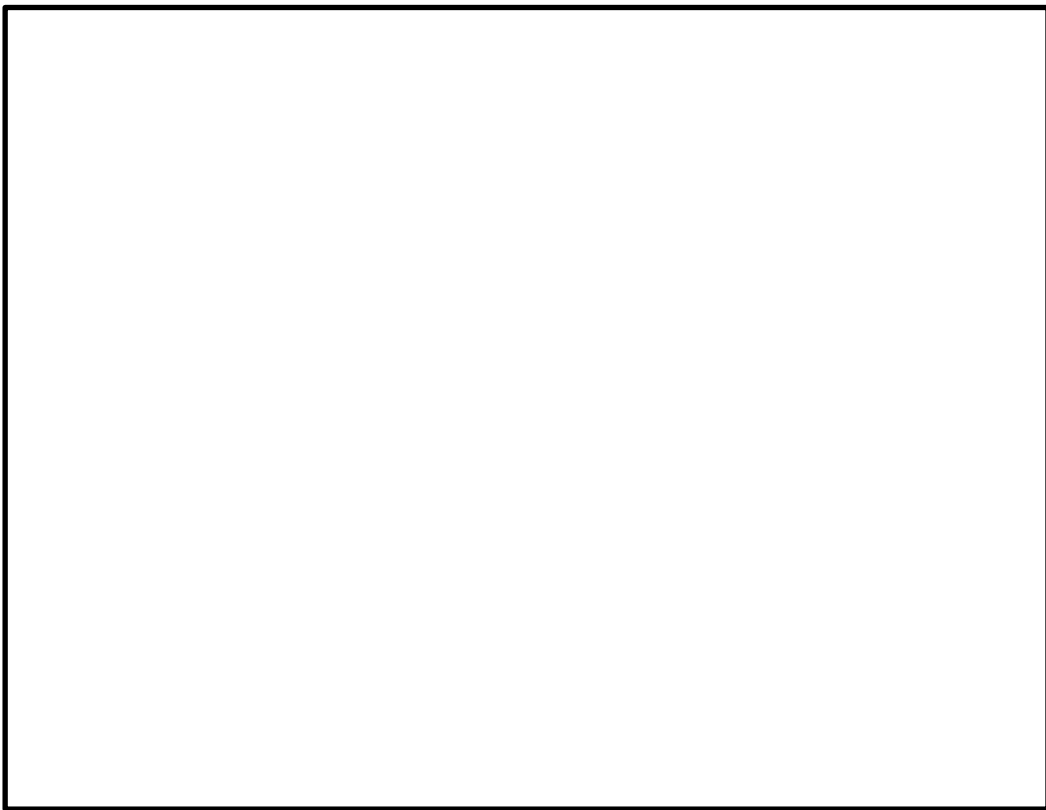


図 8-2 PARを上層部に設置した場合（水素濃度分布）

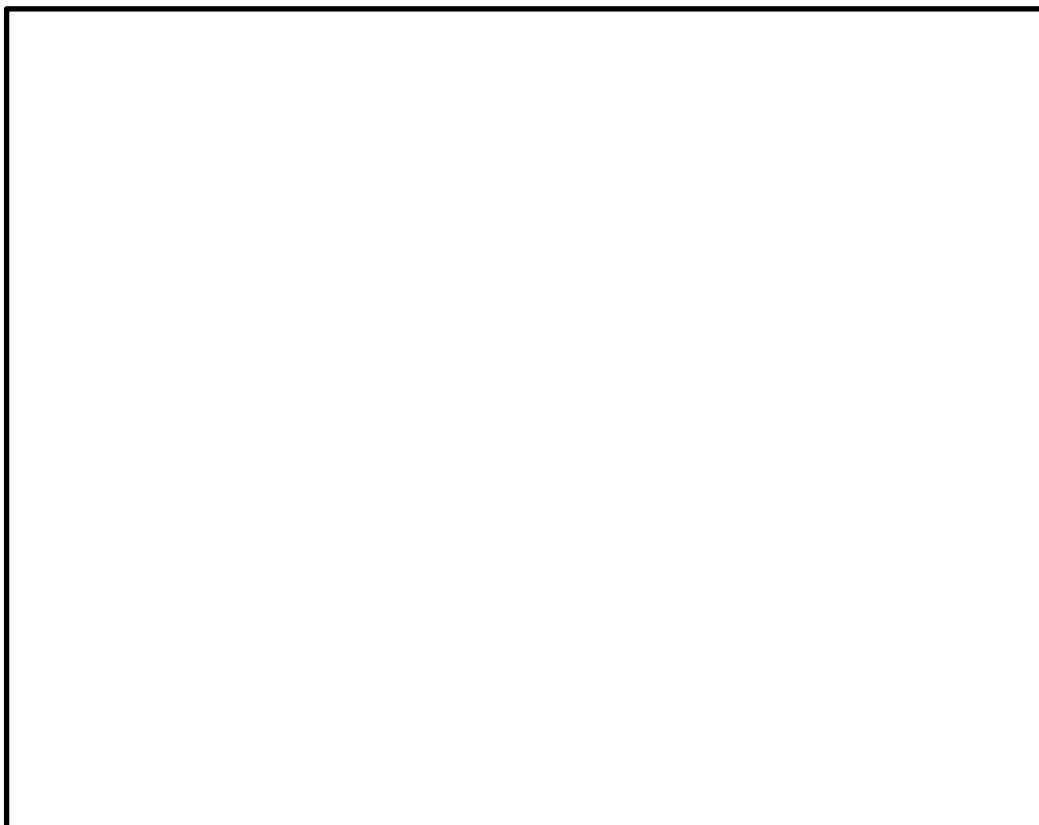


図 8-3 PARを下層部に設置した場合（温度分布）



図 8-4 PARを上層部に設置した場合（温度分布）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

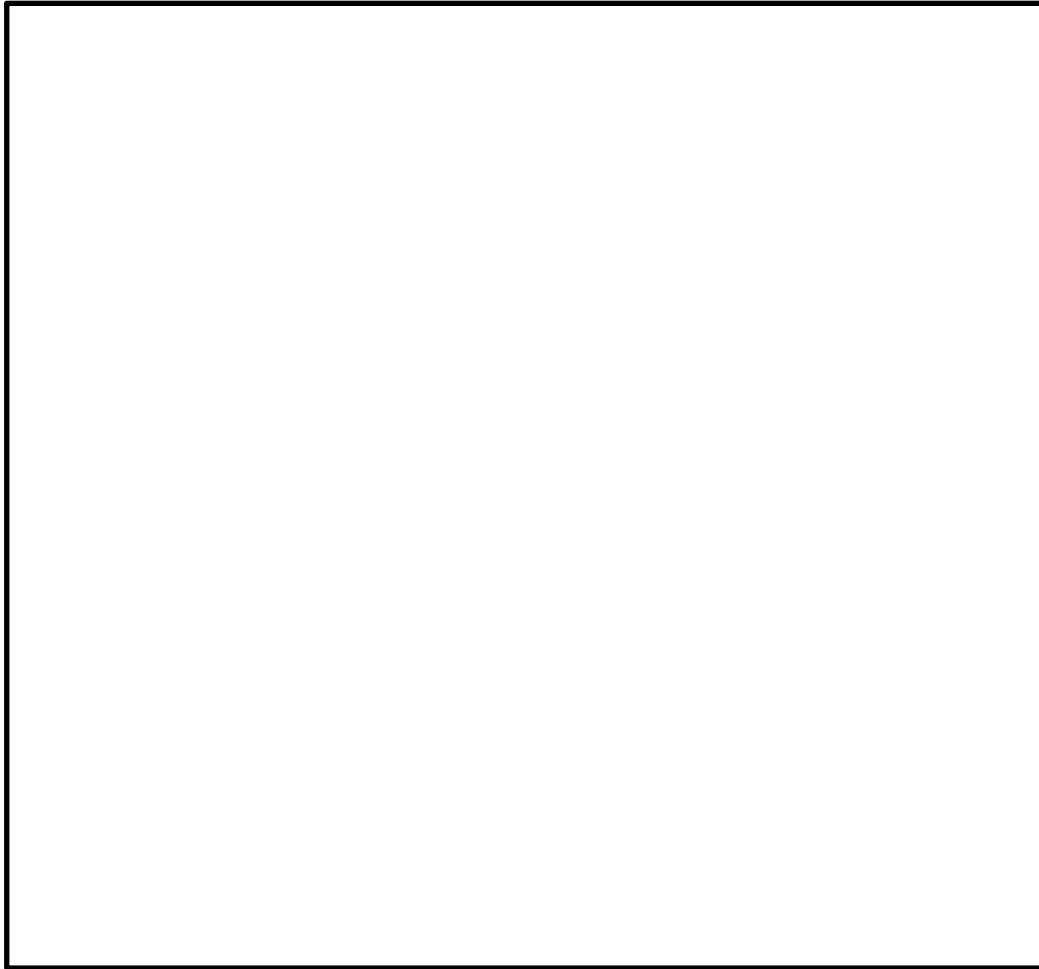


図8-5 島根2号炉 PAR設計条件の水素濃度解析における流速ベクトル図

3. PAR設置箇所の考え方（水平方向）

原子炉建物原子炉棟4階の下層部について，現場調査した結果を図9に示す。着色部については，下記①～③の理由で，設置困難箇所であることを確認した。

<設置困難箇所の理由>

- ①定期検査等において，通行や他設備の点検作業の支障となる。(図中 部)
- ②水素濃度，放射線量の監視の支障となる。(図中 部)
- ③冷却機等の既存設備に干渉する。(図中 部)

設置困難箇所以外から，PARの点検スペースが比較的確保しやすい箇所を抽出した上で，燃料取替エリアと原子炉補助エリアの空間容積比を考慮した台数のPARを可能な範囲で分散配置させるように設置箇所を選定した。

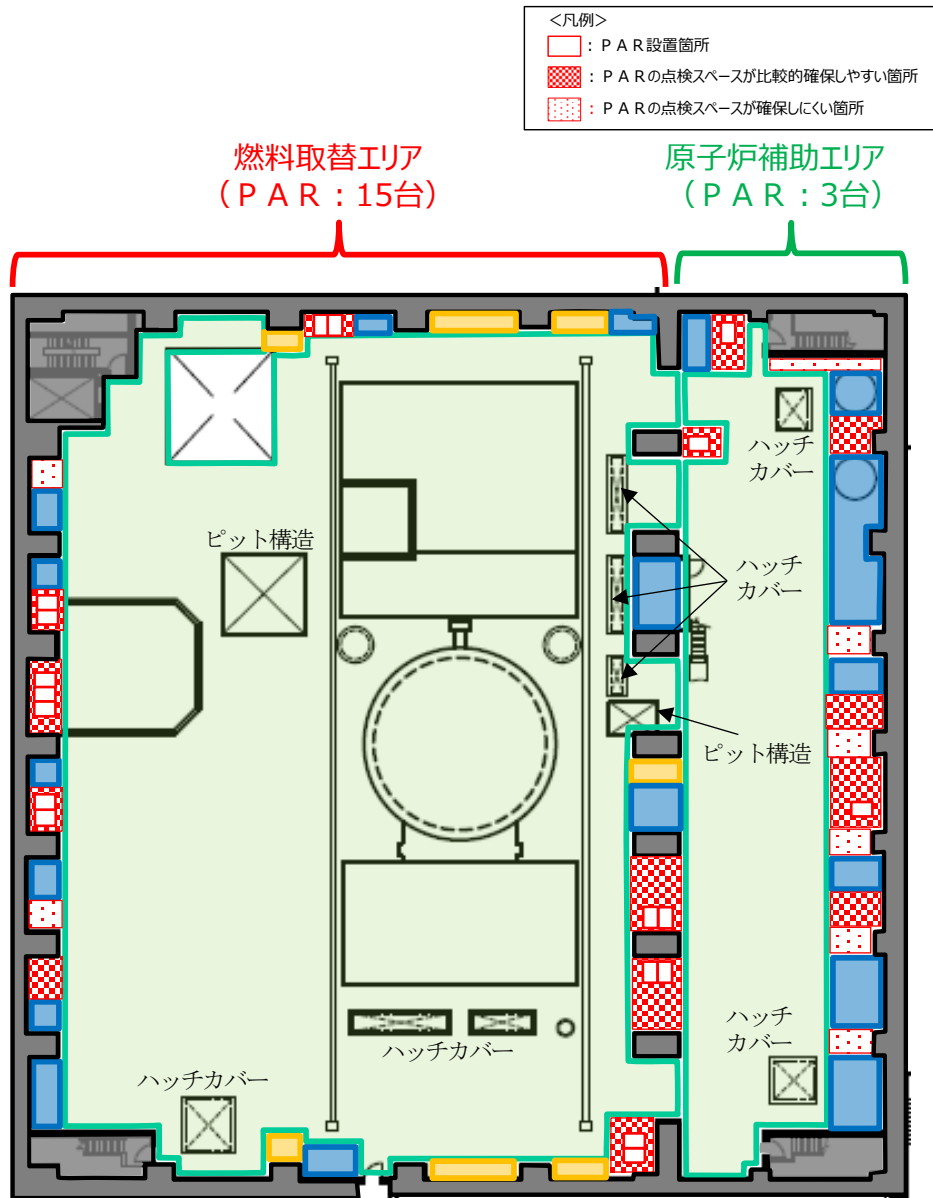


図9 現場調査結果 (原子炉建物原子炉棟4階)

4. 解析モデル設定の考え方

原子炉建物原子炉棟4階の形状を踏まえたサブボリュームの分割の考え方を表2に示す。また、表2の考え方に基づき設定した解析モデルを図10に示す。

表2 サブボリューム分割の考え方

水平方向 (第1, 2層)	高さ方向 (断面図)

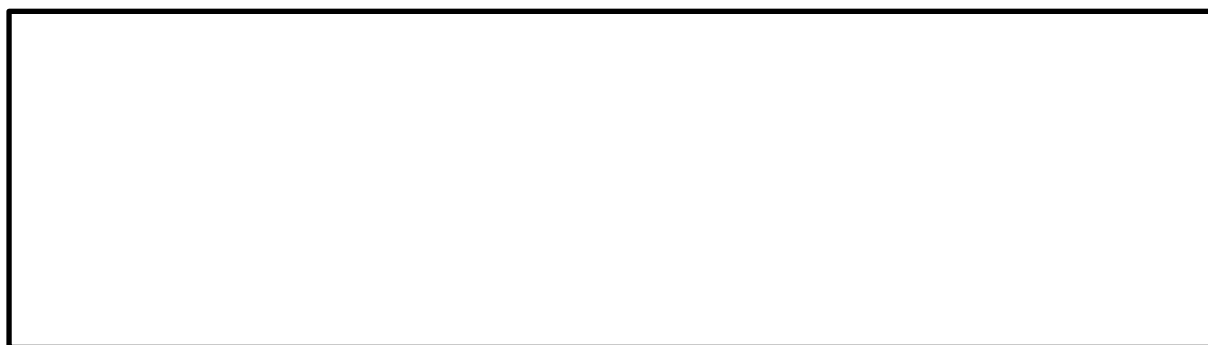


図10 解析モデル

上記1.～3.に基づきPARを設置し、4.の解析モデルに基づき水素濃度解析を実施した結果、原子炉建物原子炉棟4階における水素濃度は図2.2.2-15, 16に示すとおり可燃限界未満になることを確認したことから、PAR設置箇所は妥当であると考えられる。

粒子状物質の触媒性能への影響について

触媒の性能低下は、粒子状物質によるパラジウム物理的閉塞により発生するものであり、以下2点の理由により、触媒性能への影響は小さいと考える。(図1)

- ①PAR内部(カートリッジ間)に発生する上昇気流により、PARの下部から上部へ運ばれる粒子状物質は、触媒カートリッジを鉛直に設置することで、拡散しやすいガス状物質とは異なり、触媒面への付着(触媒性能低下)が抑制される。
- ②カートリッジ内部には触媒を充填しているため、水素及び酸素に比べて粒径が大きい粒子状物質(約 $1\mu\text{m}$ ^{※1})は、開口部近傍の触媒面に付着するが、粒径が小さい水素(約 0.28nm)及び酸素(約 0.34nm)は、より内側の触媒面にて反応するため、触媒性能は低下しにくい構造となっている。

※1:NUREG/CR-5966より、格納容器内で発生する粒子状物質の粒径は約 $1\mu\text{m}$ を中心に存在しており、小さいものでも約 $0.01\mu\text{m}$ と水素、酸素に比べて大きい値となっている。(図2)

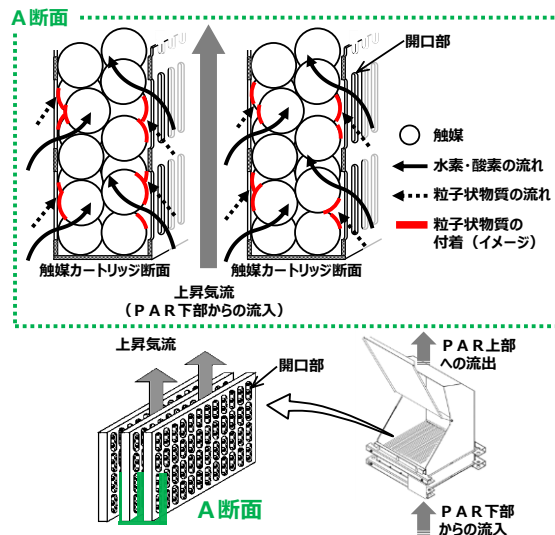


図1 触媒カートリッジへの流入概略図

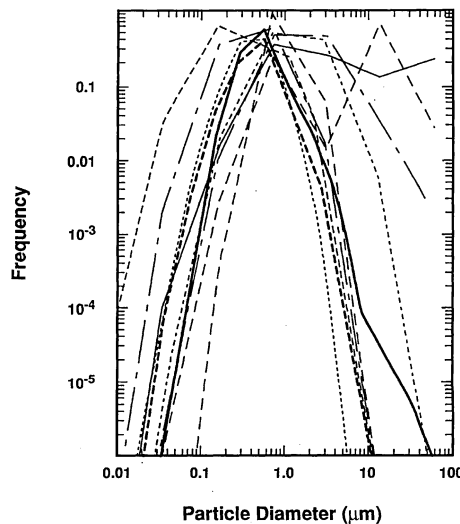


図2 格納容器内の粒子状物質の粒径分布 (NUREG/CR-5966より)

粒子状物質は、格納容器内での沈着や格納容器スプレイによりほぼ除去されることから、原子炉建物原子炉棟への漏えい量はごく少量と考えられ、原子炉建物原子炉棟4階に全量漏えいすることは考え難い。仮にPARの触媒に対して最も厳しい条件である原子炉建物原子炉棟4階へ全量漏えいとした場合、粒子状物質の濃度は約 $3.2 \times 10^{-5} \text{g/m}^3$ である。

一方、フランスの原子力研究センター (Cadarache) において、フランス電力会社 (EDF) 及び原子力安全防護研究所 (IPSN) が主体となり、粒子状物質による触媒性能への影響を確認するために H2PAR 試験^{※2}が実施されており、試験条件を表1に示す。また、試験装置の概要、試験用 PAR の概要、試験結果及び粒子状物質の粒径分布をそれぞれ図3～6に示す。H2PAR 試験では、粒子状物質濃度を (島根原子力発電所2号炉で想定される粒子状物質濃度の約 10^5 倍) で実施し、PAR の性能低下が小さいことが確認されている。

以上のことから、島根原子力発電所2号炉で想定される粒子状物質がPARの触媒性能へ及ぼす影響は小さいと考える。

※2 : RAPPORT D' EXPERIENCE H2PAR ESSAIS E17 et E21 (INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE, DEPARTEMENT DE PROTECTION DE L' ENVIRONNEMENT)

表1 試験条件

試験番号	温度	圧力	粒子状物質

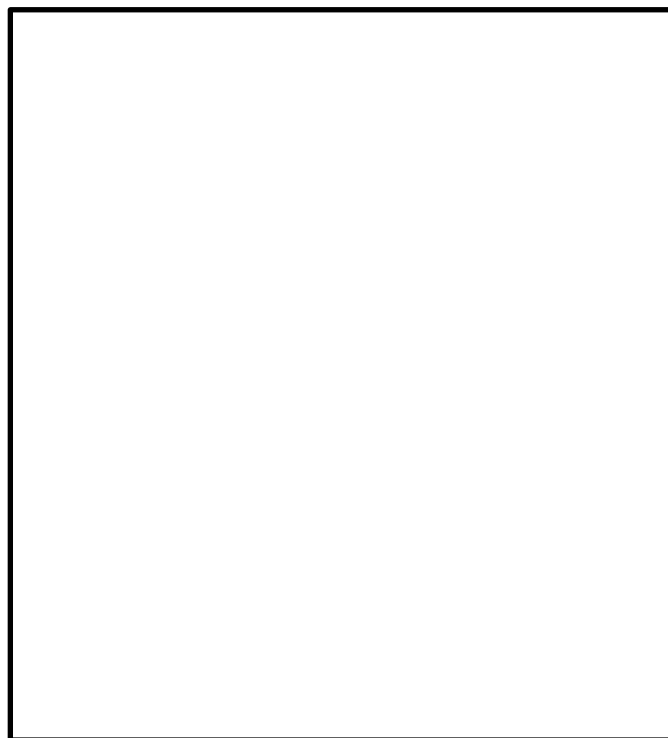


図3 試験装置概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

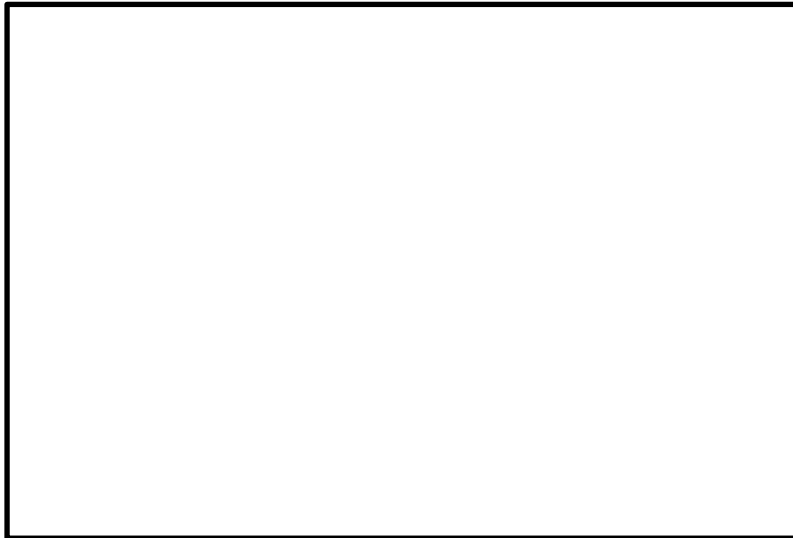


図4 試験用PAR概要



図5 試験結果 (粒子状物質の影響)

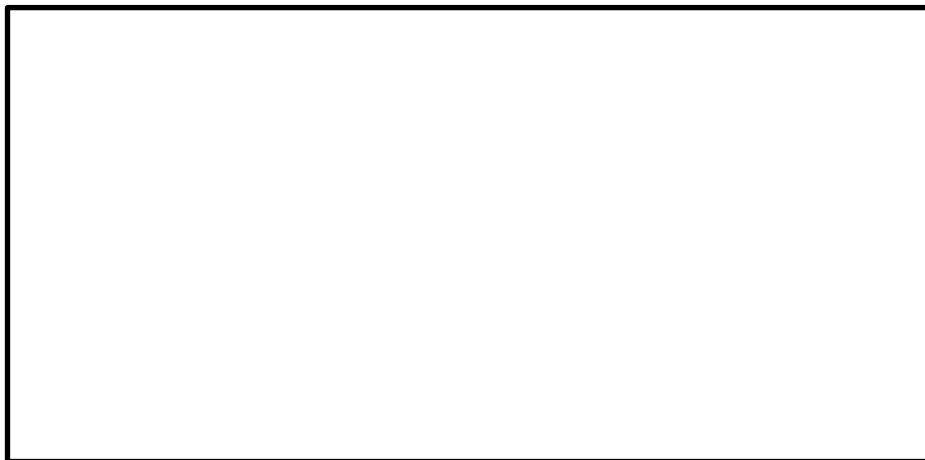


図6 粒子状物質の粒径分布

原子炉ウェル排気ラインの影響及び対策について

1. 概要

汎用熱流動解析コード GOTHIC を用いた水素濃度解析では、ドライウェル主フランジから漏れいする水素ガスは原子炉ウェル上部から原子炉建物原子炉棟 4 階に全量が放出される条件で解析を実施しているが、原子炉ウェル排気ラインを通じて原子炉ウェル上部以外の箇所に水素ガスが流入する可能性があることから、当該排気ラインが水素ガスの挙動に与える影響及び今後の対策について検討を行った。

原子炉ウェル排気ラインのルートを図 1，2 に示す。

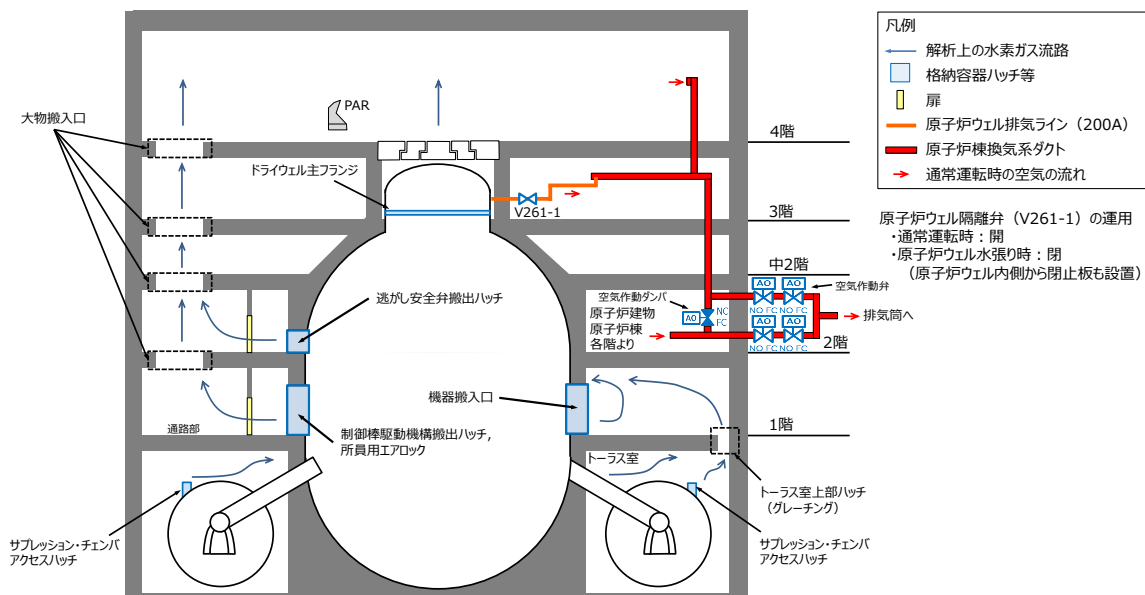


図 1 原子炉ウェル排気ラインのルート (概要図)

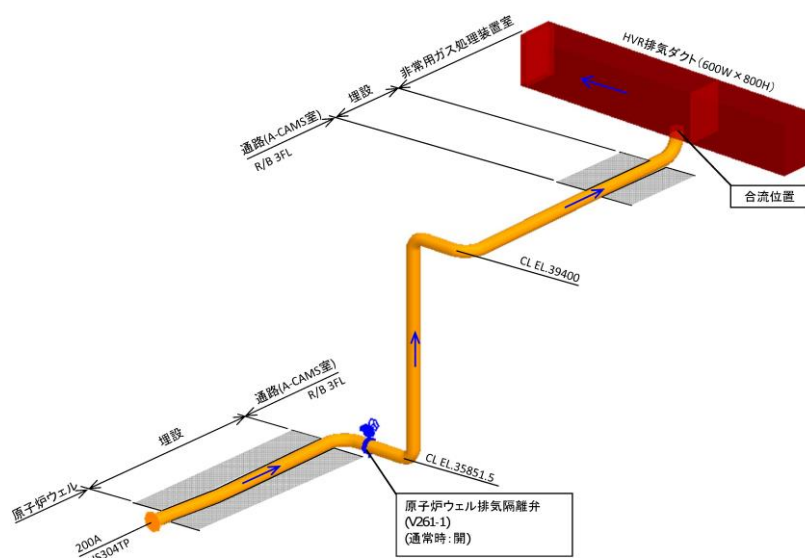


図 2 原子炉ウェル排気ラインのルート (アイソメ図)

2. 原子炉ウェル排気ラインの水素ガスの挙動に与える影響

(1) 重大事故等時にドライウェル主フランジから水素ガスが漏えいした際の挙動の考察

ドライウェル主フランジから原子炉ウェルに漏えいした水素ガスは、原子炉ウェルシールドプラグのスリット、気水分離器・蒸気乾燥器ピットへの隙間及び原子炉ウェル排気ラインを通じて、ほぼ原子炉建物原子炉棟4階に拡散すると考える。

また、原子炉ウェル排気ラインは、原子炉建物原子炉棟3階の原子炉棟換気系ダクトに接続され、主排気筒に導かれる手前で原子炉建物原子炉棟4階に開口している。さらに、事故時に原子炉棟換気系が停止している状態において、ドライウェル主フランジから漏えいするガスは、水素・蒸気を含み、かつ温度が高いため、比較的密度が小さく下側に流れにくいことから、原子炉建物原子炉棟3階以下に流入するとしても若干量であると考えられる。

(2) 水素濃度解析への影響

上記(1)のとおり、水素ガスが原子炉建物原子炉棟3階以下に流入する可能性は低いと考えるが、仮に原子炉建物原子炉棟4階に流れ込む水素量のうち若干量が原子炉建物原子炉棟3階以下に流入することを想定する場合、解析モデルへの影響としては、流入条件として原子炉建物原子炉棟各階に与える漏えい量の配分が若干変更になるのみで、漏えい総量は変わらない。

なお、ベントケース、RHARケースのどちらの解析結果も原子炉建物原子炉棟4階から原子炉建物原子炉棟地下階までよく混合し、ほぼ同じ水素濃度で変化する結果となっているため、漏えい量の配分が若干変更になっても結果への影響は軽微であると考えられる。

(3) 現在の重大事故等対策の有効性（水素濃度計の設置位置、非常用ガス処理系停止基準への影響）

水素ガスが原子炉建物原子炉棟3階以下に流入する可能性は低く、仮に原子炉建物原子炉棟3階以下への水素ガスの流入を想定した場合でも、原子炉建物原子炉棟各階の水素濃度の解析結果への影響は軽微であるため、原子炉建物原子炉棟4階、局所エリア、原子炉建物原子炉棟2階の非常用ガス処理系吸込口付近に設置する水素濃度計の設置方針及び非常用ガス処理系停止基準を変更する必要はないと考えられる。

3. 今後の対策

原子炉ウェル排気ラインを通じて水素ガスが原子炉建物原子炉棟3階以下に流入するとしても若干量と考えられるが、原子炉建物原子炉棟3階以下へ水素ガスが流入することを防止するため、原子炉ウェル隔離弁（V261-1）のフェイルクローズの空気作動弁への変更又は原子炉ウェル排気ラインの吸込口の閉止を実施する。

なお、原子炉ウェルには開口として、原子炉ウェル排気ラインの他に、原子炉ウェルシールドプラグがある位置に原子炉棟換気系ダクトの吸込口（14箇所）があったが、スロッシング対策でダクト出口側を閉止済である。

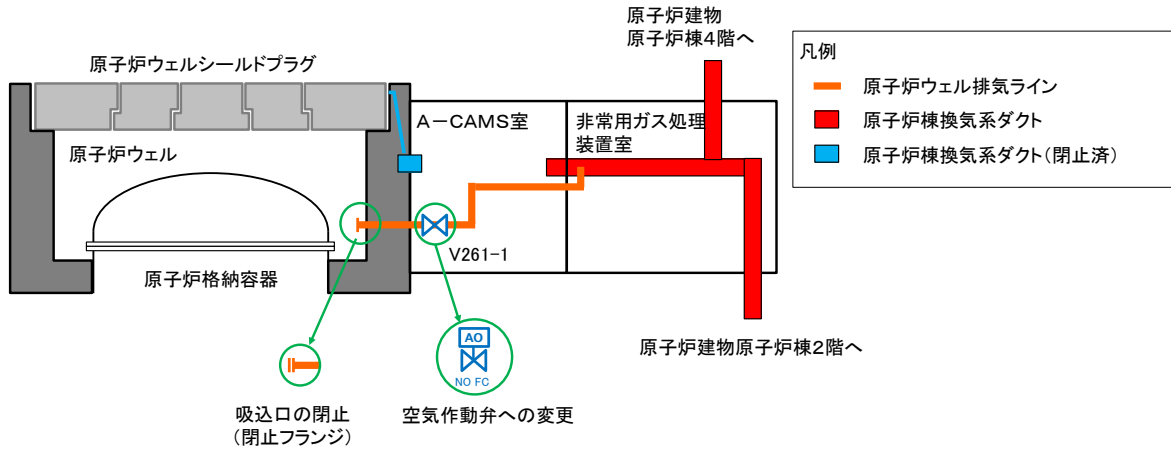


図3 原子炉ウェル排気ラインの対策イメージ

参考として、原子炉ウェル排気ラインの現場写真を図4に、原子炉ウェルシールドプラグの構造を図5に示す。

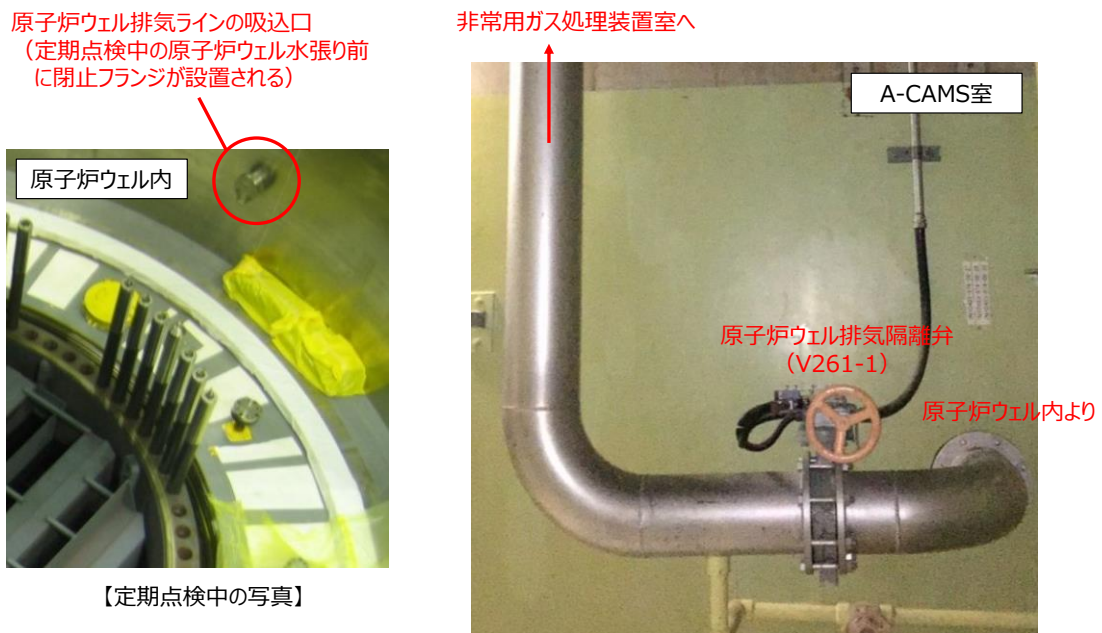


図4 原子炉ウェル排気ラインの現場写真

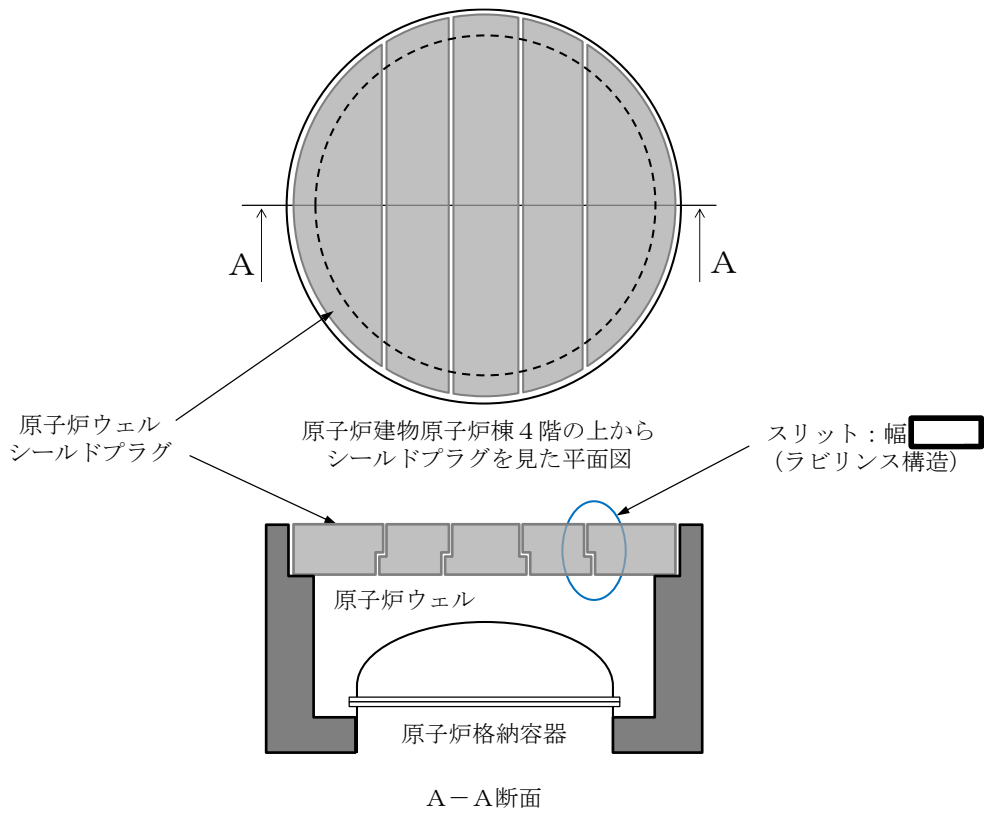


図5 原子炉ウェルシールドプラグの構造

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。