

女川原子力発電所2号炉
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ついて
(審査会合における指摘事項の回答)

平成31年4月4日
東北電力株式会社

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1. はじめに
2. 審査会合での指摘事項に対する回答

**参考 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
(静的触媒式水素再結合装置)**

1. はじめに

- 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ついては、第258回審査会合（平成27年8月4日）において、対策の説明を行っている。
- 本日は、第258回審査会合及び第216回（平成27年4月7日）の原子炉格納容器圧力逃がし装置（原子炉格納容器フィルタベント系）に関する審査会合の指摘事項について回答を行う。

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.1)(1/3)

(1) 指摘事項

設置台数の算出根拠について、整理して説明すること。

(2) 回答

・静的触媒式水素再結合装置(以下、「PAR」という。)の設置台数は、原子炉格納容器からの水素ガス漏えい量に対して、PARの水素処理容量が上回るように設定し、その台数と配置について流動解析(GOTHICコード)にて確認することとしている。

① PAR設置台数の設定

PARの設置台数は必要台数評価条件より17台となり、必要台数に余裕を考慮し19台を設置する。

$$\begin{aligned} \text{必要台数} &= \text{水素ガス発生量} \times \text{原子炉格納容器漏えい率} \div \text{PAR1台あたりの水素処理容量} \\ &= 990\text{kg} \times ((10\%/day) \div (24\text{h}/day)) \div (0.25\text{kg}/\text{h}) = 16.5\text{台} \end{aligned}$$

表1 必要台数評価条件

項目	評価条件	設定理由
PAR1台あたりの水素処理容量	0.25kg/h	右式より算出
水素ガス発生量	有効燃料長被覆管100% (AFC100%) 990kg	有効性評価における水素ガス発生量を包絡する値として設定(有効燃料長被覆管100%のジルコニウム全量のジルコニウム-水反応により発生する水素量)
原子炉格納容器漏えい率	10%/day	2Pdにおける原子炉格納容器漏えい率約1.3%/dayに余裕を考慮して設定

$$DR = A \times \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \times \frac{P}{T} \times 3600 \times F_{inhibit} \times SF$$

DR	: 水素処理容量[kg/h]	
A	: 係数	<input type="text"/>
C _{H₂}	: PAR入口水素濃度[vol%]	4 vol%
P	: 雰囲気圧力[bar]	1.01325 bar
T	: 雰囲気温度[K]	373 K (100°C)
F _{inhibit}	: 反応阻害ファクター	0.5
SF	: スケールファクター	0.25

別添資料-3 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ついて
2. 静的触媒式水素再結合装置

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.1)(2/3)

②PAR設置場所の設定

配置にあたっては、オペレーティングフロアでの水素ガスの均一化、メンテナンスエリアの確保及び他設備との干渉を考慮し、オペレーティングフロアの壁近傍に水平方向及び上下方向それぞれに分散して19台を配置する。(図1)

③流動解析による妥当性確認【設計条件】

- ・①及び②を基に、設計条件(水素ガス発生量990kg, 原子炉格納容器漏えい率10%/day)にて原子炉建屋原子炉棟内における水素ガス挙動を評価した結果、原子炉建屋原子炉棟内の水素濃度はPARが起動することにより4vol%未滿に抑制されることを確認した。(図2)
- ・事象発生後約148時間でオペレーティングフロアの酸素が欠乏し、PARの起動酸素濃度(2.5vol%)を下回ることで処理が行われなくなり、水素濃度が上昇する結果となったが、この状態においても、酸素濃度が可燃限界未滿であることから、水素燃焼が発生することはない。
- ・原子炉建屋内水素濃度(オペレーティングフロア)が2.3vol%に到達した場合、原子炉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する運用としていることから、水素濃度が可燃限界に到達することはない。

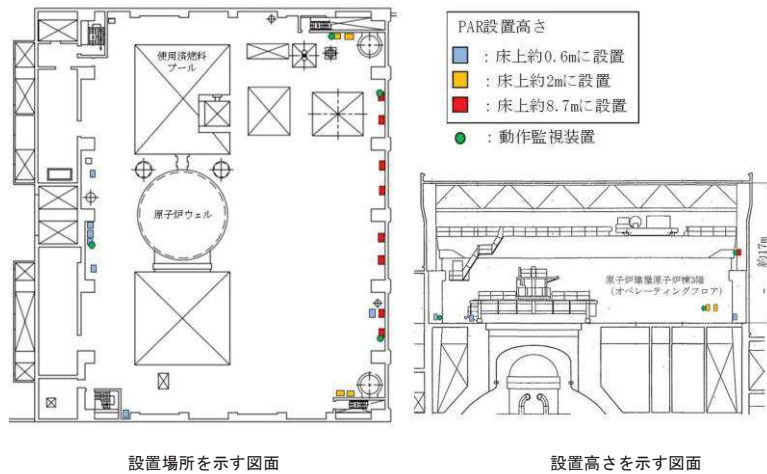


図1 PAR配置図

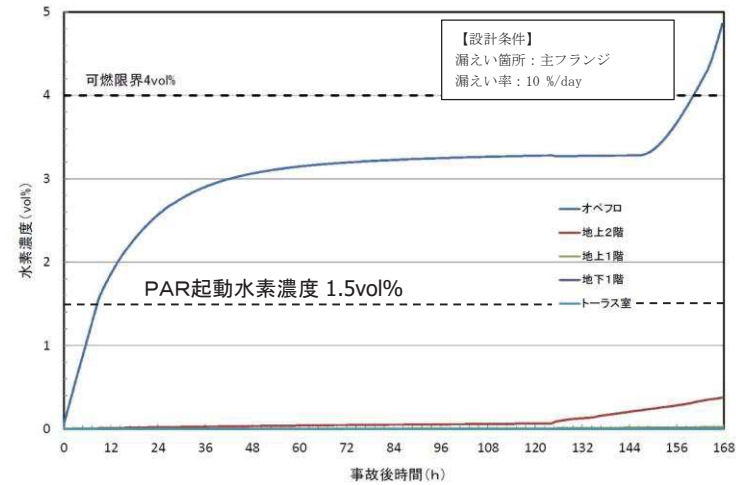


図2 設計条件による原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.1)(3/3)

(参考)

- 格納容器破損モードのうち、「雰囲気圧力・温度による静的負荷(格納容器過圧・過温破損)」における代替循環冷却系を使用する場合又は代替循環冷却系を使用できない場合(原子炉格納容器フィルタベント系を使用する場合)にて原子炉建屋原子炉棟内における水素ガス挙動を評価した結果、原子炉建屋原子炉棟内の水素濃度はPARが起動することなく、4vol%未満に維持されることを確認した。(図3及び図4)

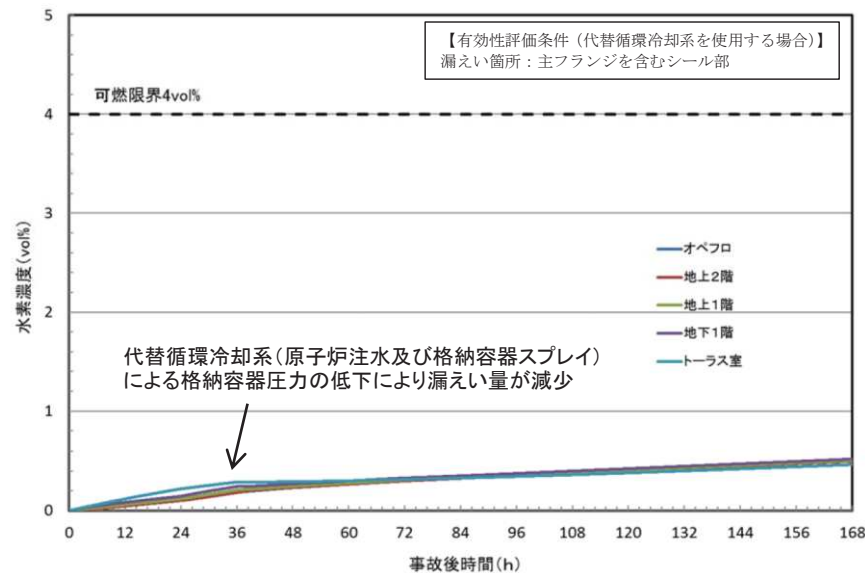


図3 原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動
(代替循環冷却系を使用する場合)

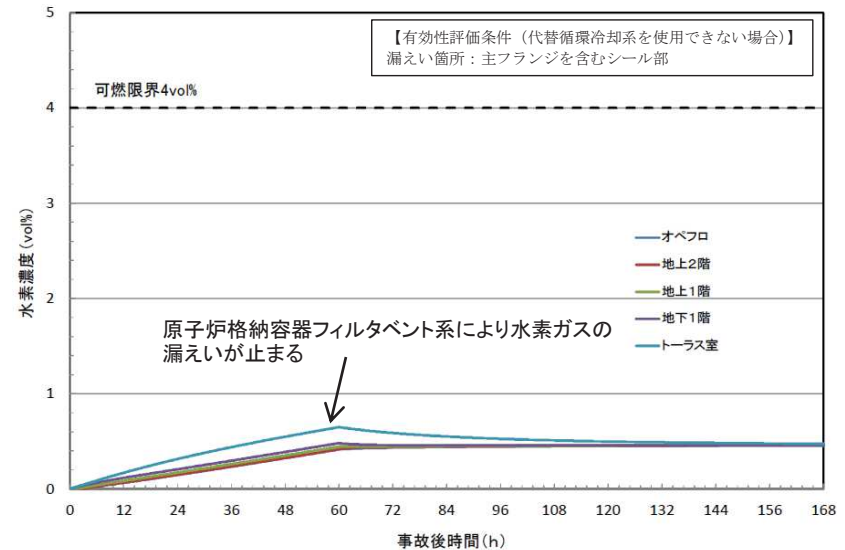


図4 原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動
(代替循環冷却系を使用できない場合)

別添資料-3 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ついて
2. 静的触媒式水素再結合装置及び別紙11 有効性評価における原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.2)

(1) 指摘事項

GOTHICコードを用いた水素挙動解析に係る原子炉建屋の解析モデル(ケース2)において、ウェル注水していることの考慮の必要性について説明すること(水蒸気の影響等)。

(ウェル注水により発生した水蒸気の水素ガス挙動への影響を説明するよう求められたもの。)

(2) 回答

- ・自主対策設備である原子炉格納容器頂部注水系により、原子炉ウェルに注水された水が沸騰し、オペレーティングフロアに水蒸気が発生した場合の水素挙動を評価した。
- ・原子炉ウェルへの注水によりドライウェル主フランジからオペレーティングフロアへ水素ガスは直接漏えいしない。また、原子炉ウェルの水が沸騰し水蒸気が発生したことで、下層階に漏えいした水素ガスのオペレーティングフロアへの流入が緩やかになり、オペレーティングフロアの水素濃度の上昇が抑制される。
- ・下層階は水素濃度が上昇するが、最終的に対流により均一化し、可燃限界に至ることはないことを確認した。

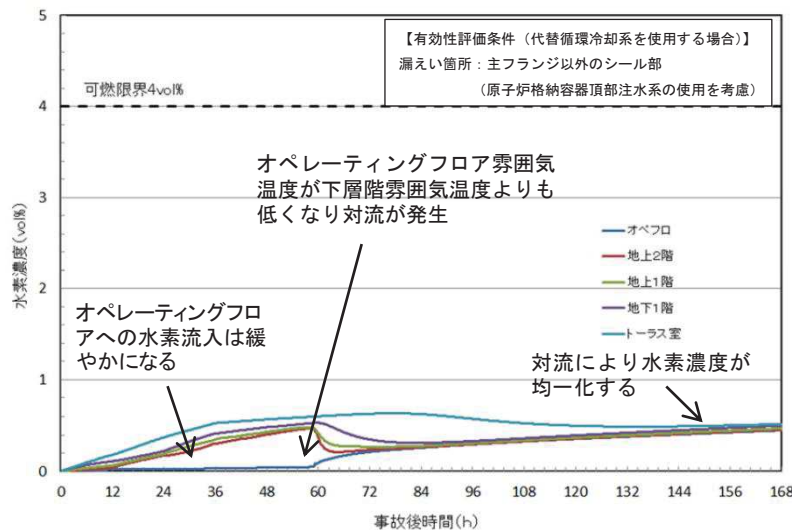


図5 原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動 (代替循環冷却系を使用する場合)

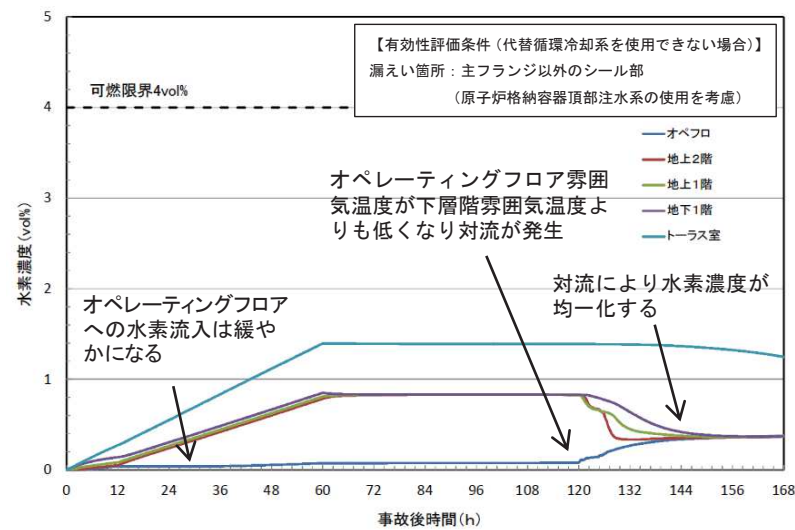


図6 原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動 (代替循環冷却系を使用できない場合)

別添資料-3 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ついて

2. 静的触媒式水素再結合装置及び別紙11 有効性評価における原子炉建屋原子炉棟内の水素ガス挙動

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.3)

(1) 指摘事項

開維持とする機器ハッチについて、開状態の維持が可能であることと、工認対象とするかを含めて整理すること。
 (下層階に漏えいした水素ガスは大物搬入口ハッチ等を経由しオペレーティングフロアへ導くこととしているため、大物搬入口ハッチの意図しない閉動作による流路の妨げがないことを示すよう求められたもの。)

(2) 回答

- ・大物搬入口ハッチはワイヤーロープにより壁に固定することで、全開状態を維持できる。
- ・大物搬入口ハッチが地震により閉動作しないことの説明については、工事計画書に記載する。

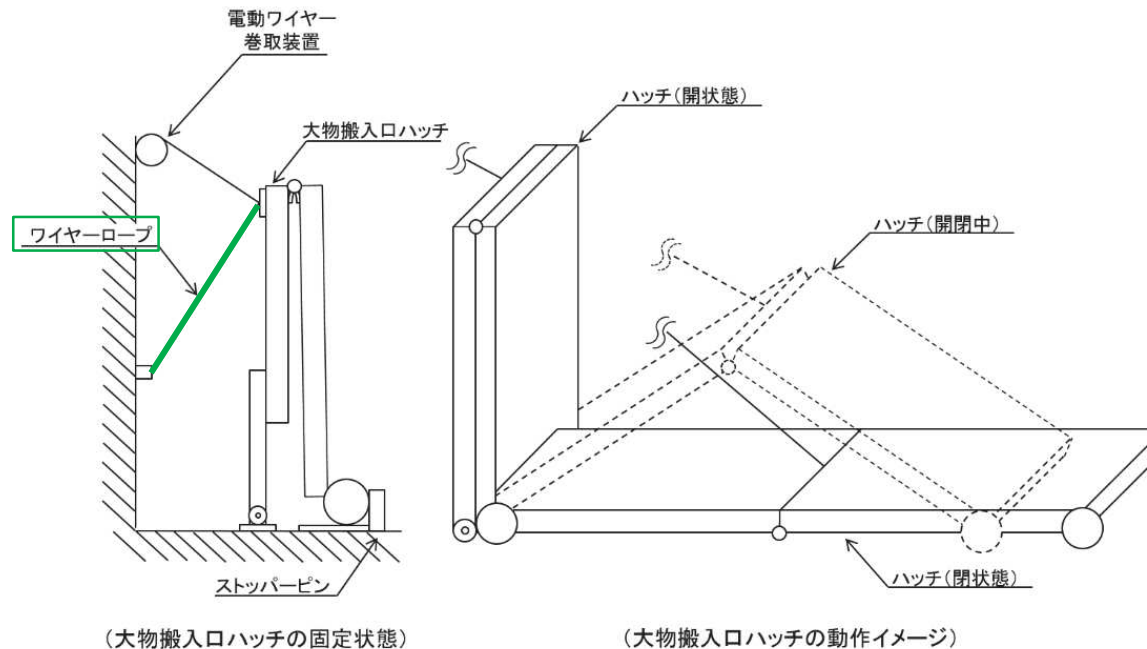


図7 大物搬入口ハッチ イメージ図

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.4及びNo.5)

(1) 指摘事項

- ・PAR設置時の検査として、触媒の重量検査だけで性能が担保されるのか説明すること。
(PARの性能が確実にできているということ、どの検査で確認しているかについて整理を求められたもの。)
- ・PARの触媒の活性が失われないことを説明すること。

(2) 回答

- ・PARの水素処理性能は、内部を通過するガス流量、触媒性能及び触媒の接触面積によって決まるため、設置時において性能確保に必要な項目を確認する。(表2)
- ・供用開始後において、PARを設置するオペレーティングフロアの雰囲気環境は空気、室温条件であり、化学薬剤等の触媒活性を低下させるような要因はなく、雰囲気環境は触媒にとって良好であり、触媒活性の低下はないものとするが、触媒活性の低下がないことを確認するために、定期的に試験装置で触媒活性の健全性を確認する。

表2 設置時におけるPAR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
内部を通過するガス流量	・触媒カートリッジ収納ハウジング寸法	・触媒カートリッジ収納ハウジング寸法が設計どおりであることを確認
触媒性能	・触媒製造時の品質管理 ・触媒の劣化	・直径、表面積、材料成分を確認 ・試験装置による触媒活性の確認
触媒の接触面積	・触媒カートリッジの寸法、配置	・触媒カートリッジ寸法、配置が設計どおりであることを確認
	・触媒に接触する流路長さ	・外観上、触媒カートリッジに触媒が満杯に封入されていることを確認 ・封入される触媒重量を確認

別添資料-3 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ついて

2. 静的触媒式水素再結合装置及び別紙13 静的触媒式水素再結合装置の製造誤差による処理能力への影響及び品質管理

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.6及びNo.7)(1/2)

(1) 指摘事項

- ・漏えい検知設備の設置場所の妥当性, 漏えい判断のしきい値, 漏えい時の対応方針(SGTS使用など)について, 説明すること。
- ・局所エリアにおける水素異常漏えいの検知方法を説明すること。

(2) 回答

- ・原子炉格納容器から原子炉建屋原子炉棟内へ水素ガスが漏えいした場合, 水素ガスを含むガスが高温のため, 原子炉建屋原子炉棟内における水素ガスはオペレーティングフロアに導かれる。そのため, 水素ガスが最終的に滞留するオペレーティングフロアの水素濃度を監視することで, 原子炉建屋原子炉棟内全体の水素影響を把握することが可能であることから, オペレーティングフロアに水素濃度検出器を設置する。
- ・一方, 局所エリア及びトラス室に漏えいした水素ガスの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屋の損傷を防止するための有益な情報となることから, 水素ガスの漏えいが想定される局所エリア(バルブラッピング室, 所員用エアロック前室, 計装ペネトレーション室及びCRD補修室)及びトラス室に原子炉建屋水素濃度監視設備として水素濃度検出器を設置し, 事故時の監視性能を向上させることとしている。(表3)
- ・原子炉建屋水素濃度監視設備は, 電源が喪失した場合に代替電源設備から受電が可能であり, また, 中央制御室において監視が可能である。

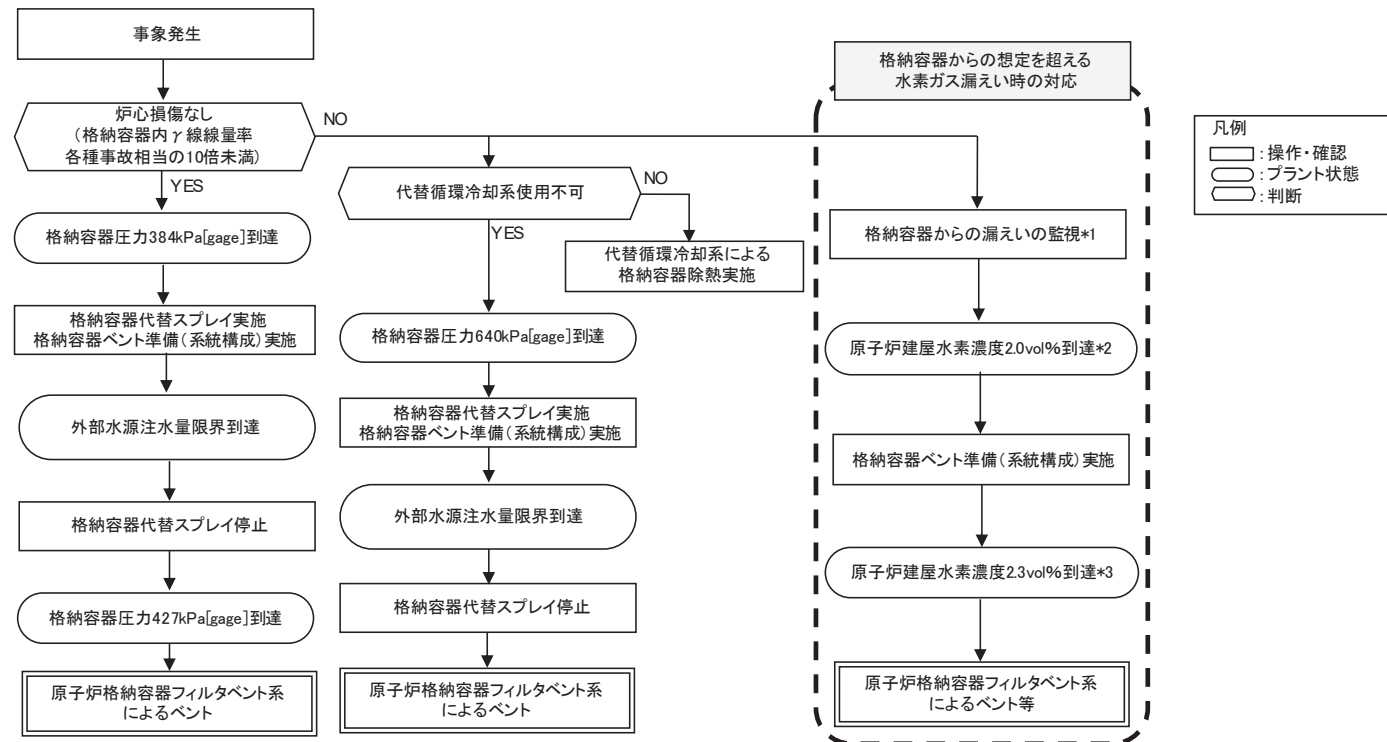
表3 原子炉建屋水素濃度監視設備の主要仕様

名称	検出器の種類	計測範囲	個数	取付箇所	誤差
原子炉建屋内 水素濃度	触媒式 水素検出器	0~10vol%	2	オペレーティングフロア (床面から約16mの高さに設置)	±0.25vol% (0~4vol%)
			1	トラス室	±0.5vol% (4~10vol%)
	気体熱伝導式 水素検出器	0~10vol%	4	局所エリア (バルブラッピング室, 所員用エ アロック前室, 計装ペネトレーシ ョン室及びCRD補修室)	±0.5vol%

別添資料-3 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ついて
3. 原子炉建屋水素濃度監視設備及び別紙14 原子炉建屋水素濃度監視設備

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.6及びNo.7)(2/2)

- 炉心損傷を判断した場合には、原子炉建屋内水素濃度、静的触媒式水素再結合装置動作監視装置、原子炉建屋内各種放射線モニタにより、原子炉建屋原子炉棟内への漏えいを確認する。また、原子炉格納容器から原子炉建屋原子炉棟内へ想定を超える水素ガスの漏えいが確認された場合、原子炉格納容器フィルタベント系による原子炉格納容器ベントを実施する。



- *1: 原子炉建屋内水素濃度(触媒式: 地上3階・地下2階, 気体熱伝導式: 地上1階・地下1階), 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置, 原子炉建屋内各種放射線モニタ等により確認する
- *2: 原子炉建屋水素濃度(オペレーティングフロア)2.0vol%到達により, 水素爆発による原子炉建屋の損傷を防止するため, 格納容器ベント準備を実施する
- *3: 原子炉建屋水素濃度(オペレーティングフロア)2.3vol%到達により, 水素爆発による原子炉建屋の損傷を防止するため, ベント実施を判断する

図8 原子炉格納容器からの想定を超える水素ガス漏えい時の対応フロー

2. 審査会合での指摘事項に対する回答(指摘事項No.8)

(1) 指摘事項

自主的設備を含めた水素漏えい時の対策の全体像を説明すること。

(2) 回答

・深層防護の第4層の格納容器破損防止対策を講じたとしても原子炉格納容器内で発生した水素ガスが原子炉建屋原子炉棟内に漏えいした場合に備え、以下の対策を実施する。

- 静的触媒式水素再結合装置(PAR)
原子炉格納容器内で発生した水素ガスが原子炉建屋原子炉棟内に漏えいした場合に原子炉建屋原子炉棟内で水素を処理
- 原子炉格納容器フィルタベント系
原子炉格納容器から原子炉建屋原子炉棟内へ想定を超える水素ガス漏えいが確認された場合には、PARによる水素処理に加えて、原子炉格納容器フィルタベント系によるベントを行い、原子炉格納容器から原子炉建屋原子炉棟内への水素ガス漏えいを抑制
- 原子炉建屋ベント設備【自主対策設備】
水素ガスの成層化等により水素爆発に至る可能性のある場合にオペレーティングフロアの天井部分から水素ガスを排出

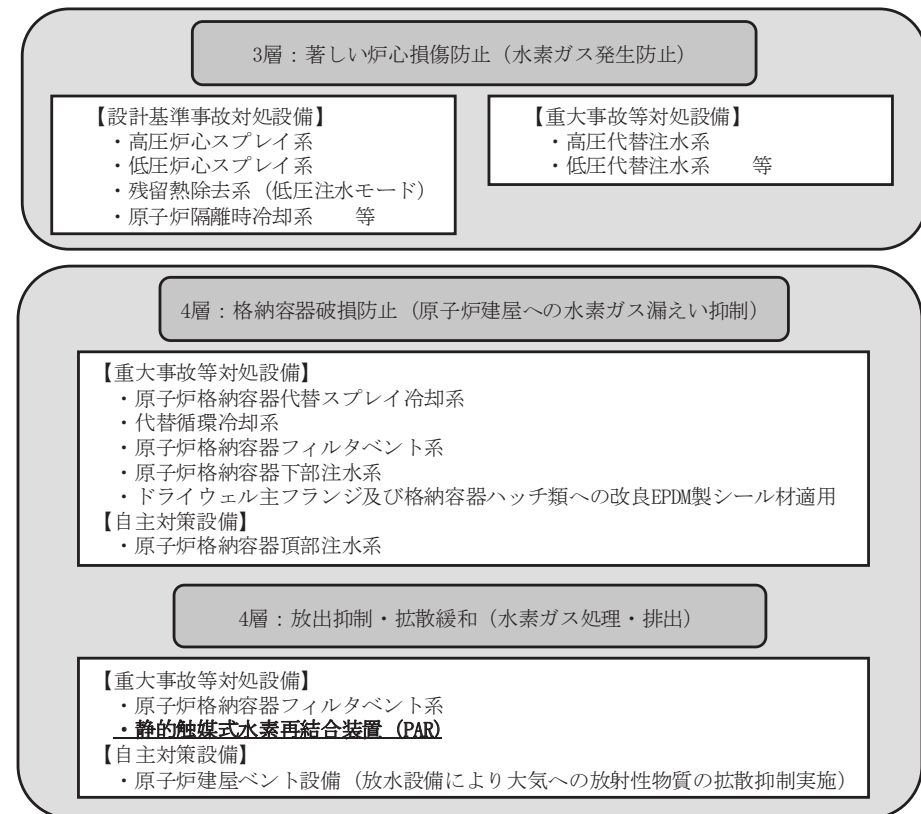


図9 女川原子力発電所2号炉の深層防護の第3層及び第4層設備

別添資料-3 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ついて
4. 原子炉建屋水素爆発防止対策

参考 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(静的触媒式水素再結合装置)

- ・PARは、炉心の著しい損傷が発生した場合に、運転員による起動操作を行うことなく、原子炉格納容器から原子炉建屋原子炉棟内に漏えいした水素ガスを触媒反応により酸素ガスと再結合させる設備
- ・PARの動作確認を行うために、動作監視装置としてPARの入口側及び出口側に温度検出器を設置



PAR外観

静的触媒式水素再結合装置

PARの主要仕様

種類	触媒式
容量	0.5 kg/h/個 (水素濃度4.0vol%, 大気圧, 温度100°C)
個数	19台

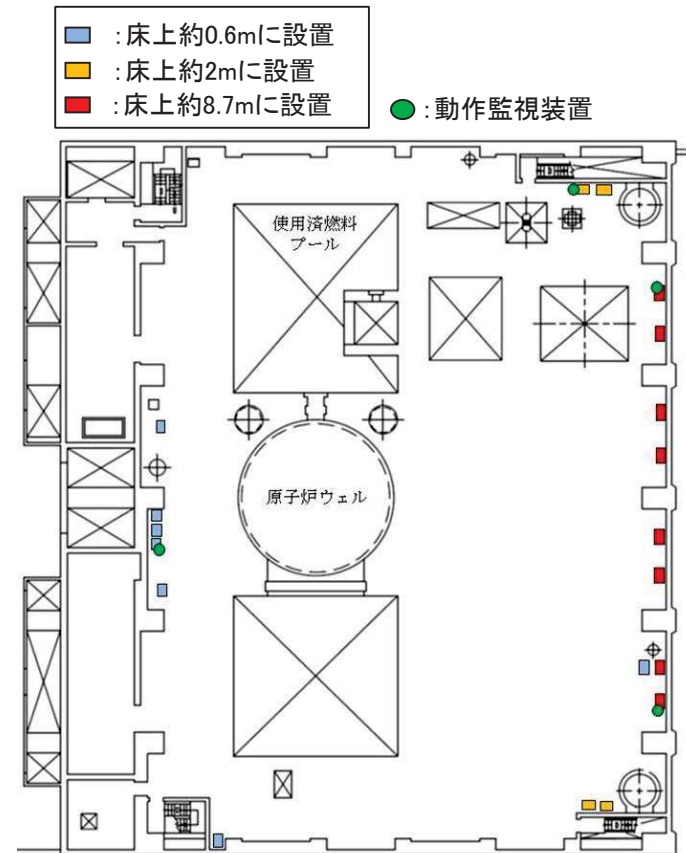
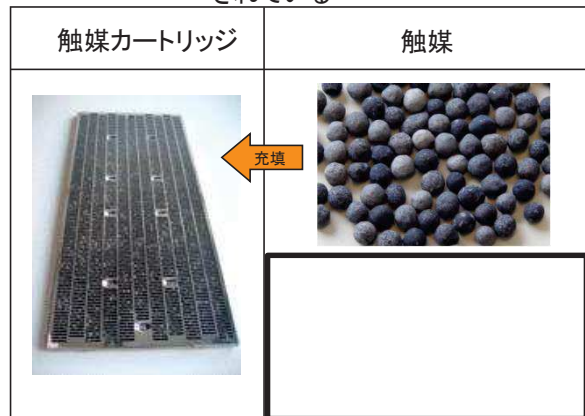
動作監視装置の主要仕様

種類	熱電対
計測範囲	0~500°C
個数	8個(4個のPARの入口側及び出口側に設置)



触媒カートリッジ収納ハウジング内部

22枚の触媒カートリッジが収納されている



配置図(オペレーティングフロア)

別添資料-3 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ついて
2. 静的触媒式水素再結合装置及び別紙12 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。