

4 水素爆発防止対策

- ◇ 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

4.1 設置許可基準規則への適合方針

- 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第53条に適合するための設備として，静的触媒式水素処理装置等を設置する。

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

(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)

第五十三条 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。

- 上記の規則に基づき，重大事故等対処設備として以下の設備を設置する。
 - 水素排出設備（格納容器フィルタベント系）
 - 水素濃度制御設備（静的触媒式水素処理装置）
 - 原子炉建物水素濃度，静的触媒式水素処理装置動作監視装置
- さらに，自主対策設備として以下の設備を設置する。
 - 原子炉ウェル代替注水系
 - 原子炉建物ブローアウトパネル

4.2 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 (水素排出設備)

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

炉心の著しい損傷が発生した場合において，原子炉建物の水素爆発による損傷を防止するため，水素排出設備として格納容器フィルタベント系を設置する。

- 格納容器フィルタベント系は，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，原子炉建物原子炉棟内への水素ガスの漏えいを抑制し，格納容器から水素ガスを排出することができる設備

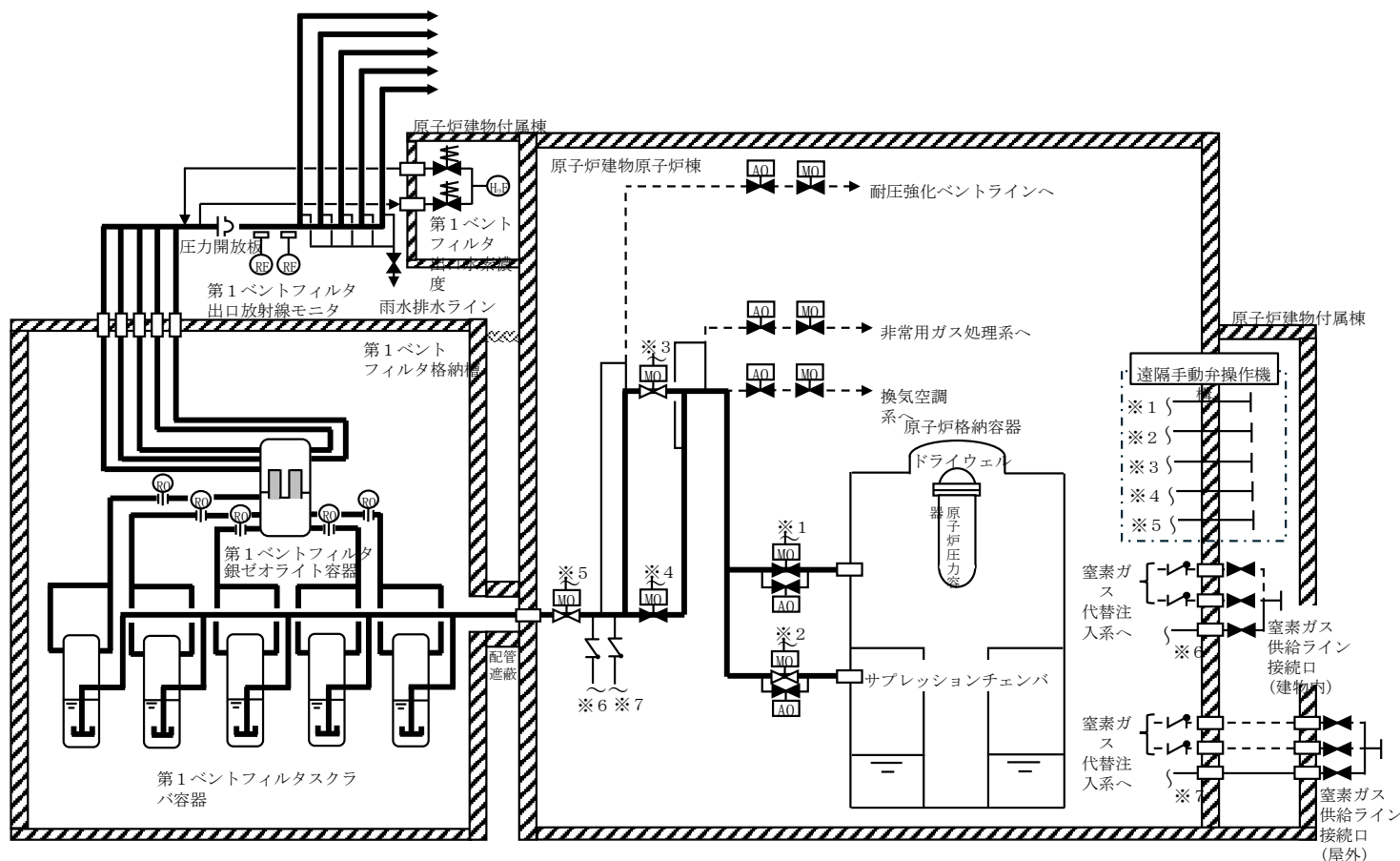


図4-1 格納容器フィルタベント系 概要図

4.2 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 (水素濃度制御設備 (1 / 2))

柏崎6/7号炉, 女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

炉心の著しい損傷が発生した場合において、原子炉建物の水素爆発による損傷を防止するため、水素濃度制御設備として静的触媒式水素処理装置 (PAR) を設置する。

- PARは原子炉格納容器から原子炉棟内に漏えいした水素ガスを触媒反応によって酸素ガスと再結合させる設備
- PARは起動時に運転員による操作の必要が無く、電源が不要。

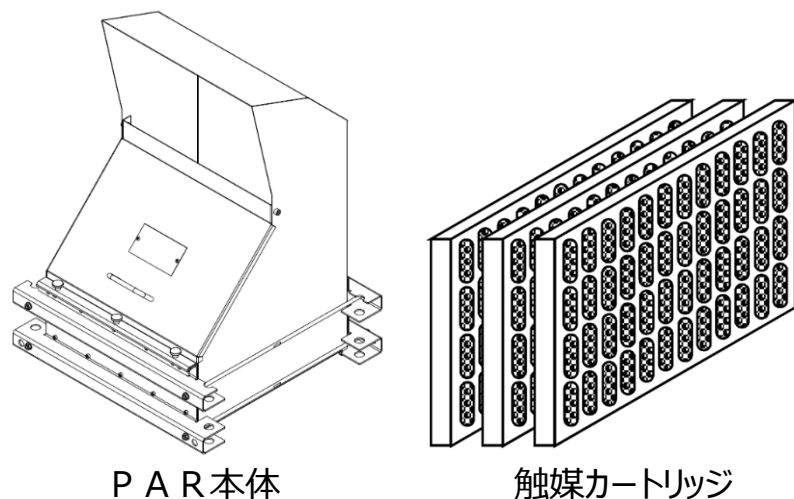


図4-2 PAR概要図

表4-1 PAR設計仕様

| 項目 | 仕様 |
|-----------------|--------|
| 水素処理性能 (kg/h/個) | 約0.50※ |
| 設置個数 (個) | 28 |
| 最高使用温度 (°C) | 300 |

※水素濃度4.0vol%, 大気圧, 温度100°Cにおいて

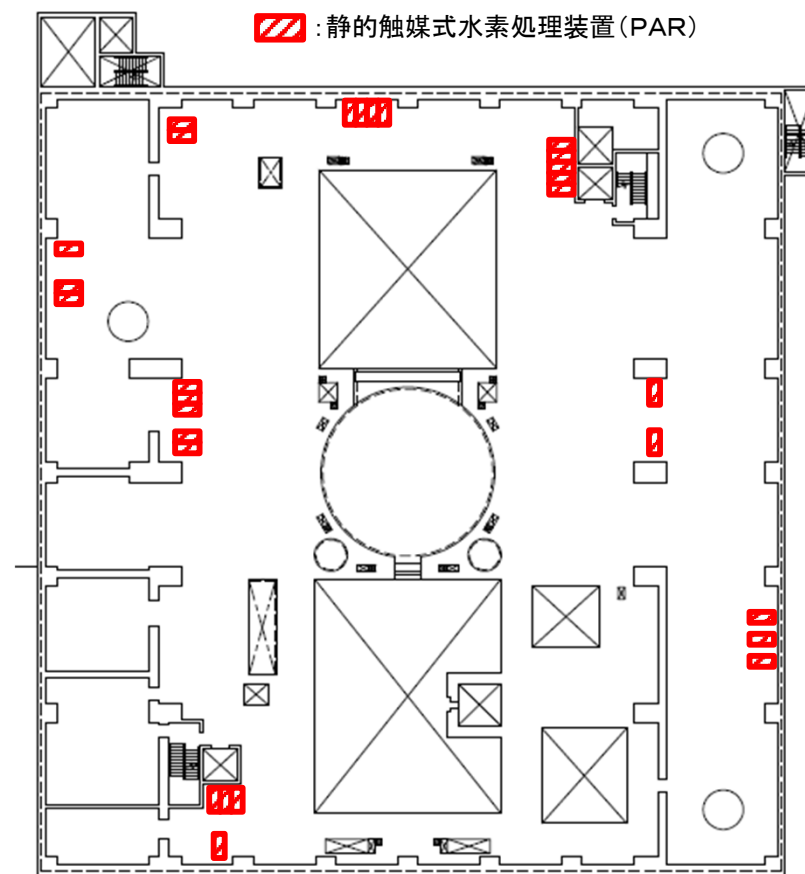


図4-3 PAR配置図
(原子炉建物原子炉棟地上5階 (燃料取替階))

4.2 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 (水素濃度制御設備 (2 / 2))

柏崎6/7号炉, 女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

P A Rの作動状態を確認するため, 静的触媒式水素処理装置動作監視装置を設置する。

- P A Rの入口側及び出口側の温度計により, P A Rの作動状態を中央制御室から監視可能な設計とする。
- 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。
- 28個のP A Rのうち位置的分散を考慮した2個のP A Rに熱電対式の温度計を設置する。

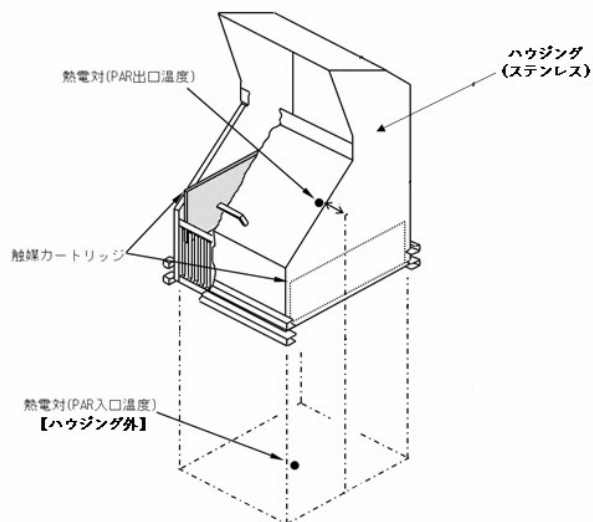


図4-4 静的触媒式水素処理装置動作監視装置の
取付位置概要図

表4-2 静的触媒式水素処理装置動作監視装置 主要仕様

| 項目 | 仕様 |
|---------|-------|
| 検出器の種類 | 熱電対 |
| 設置個数(個) | 4※ |
| 計測範囲(℃) | 0~400 |

※ 2個のP A Rの入口側及び出口側に熱電対を設置

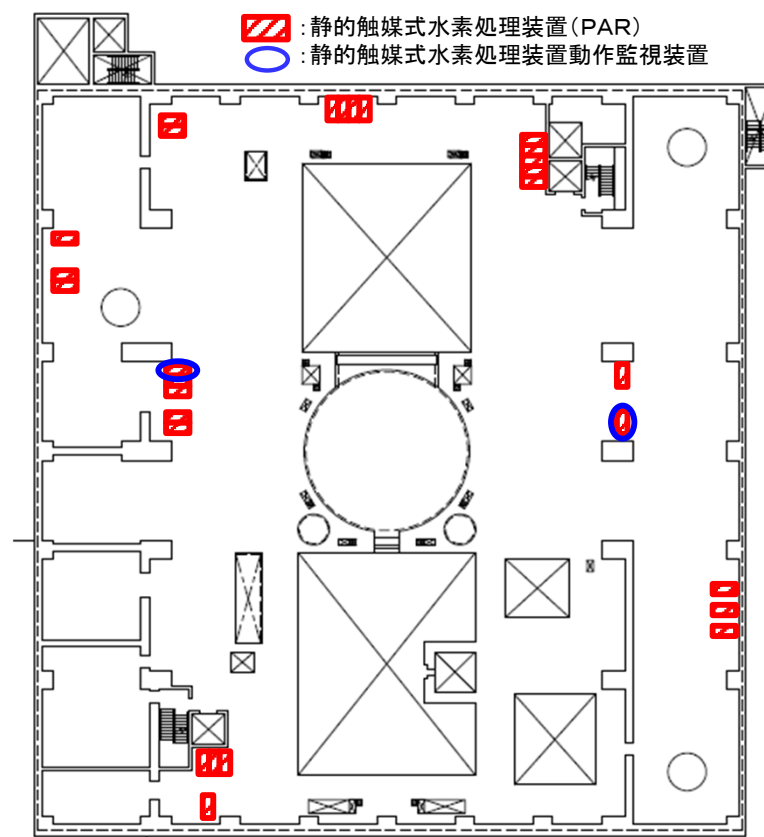


図4-5 静的触媒式水素処理装置動作監視装置配置図

4.2 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 (原子炉建物水素濃度)

柏崎6/7号炉, 女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

炉心の著しい損傷が発生した場合において、水素濃度が変動する可能性のある範囲で水素濃度を監視することを目的として、原子炉建物原子炉棟内に水素濃度計を設置する。

- 原子炉建物原子炉棟地上5階（燃料取替階）の天井付近に設置。
- 非常用ガス処理系停止を判断するため、非常用ガス処理系吸込配管付近に設置。
- 局所エリアに漏えいした水素ガスを計測するため、原子炉建物原子炉棟地上3階、地上1階、地下1階に設置。
- 中央制御室において連続監視可能。
- 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。

表4-3 原子炉建物水素濃度 設計仕様

| 検出器の種類 | 熱伝導式水素検出器 |
|-------------|--|
| 個数 (個) | 8 |
| 計測範囲 (vol%) | 0~20 |
| 設置場所※ | 原子炉建物地上5階 (3) 原子炉建物地上3階 (2) 原子炉建物地上1階 (1) 原子炉建物地下1階 (2) |

※ () 内は個数を示す

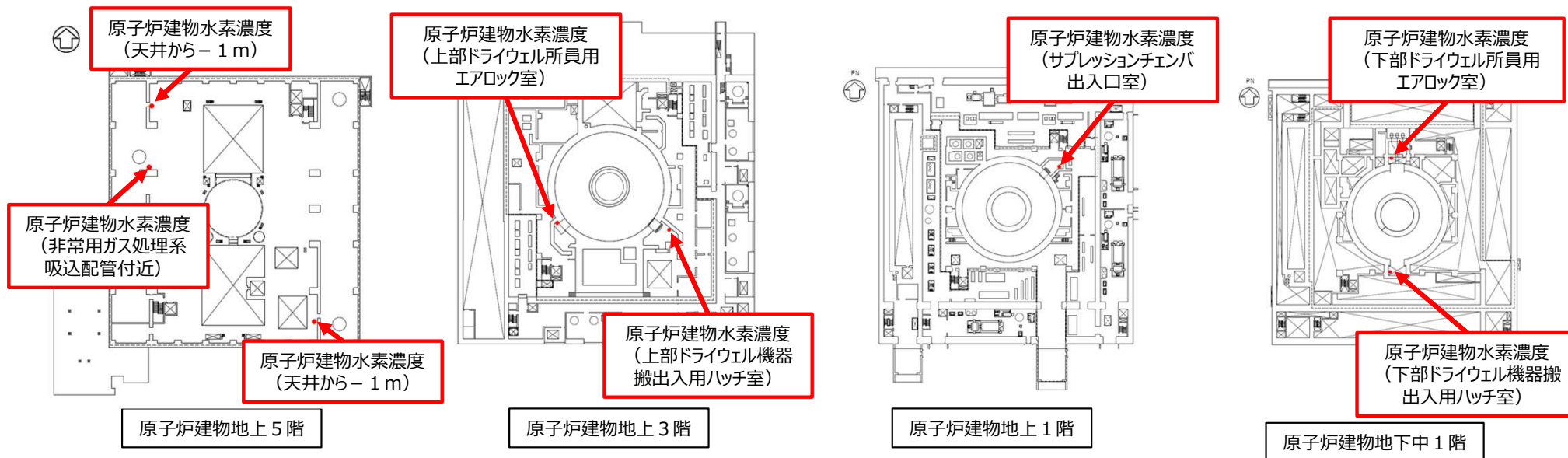


図4-6 原子炉建物水素濃度の設置場所

4.3 PARの設計方針（1 / 4） （PAR設置個数及び設置箇所）

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

- PARの設置個数は，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仮設定し，その設置個数と設置箇所において，水素濃度解析（GOTHIC解析）を実施し，「原子炉棟内で水素濃度が可燃限界未満となること」及び「水素濃度に偏りが無いこと」を確認した上で最終決定している。
- 各ステップにおける具体的な考え方を次頁以降に示す。

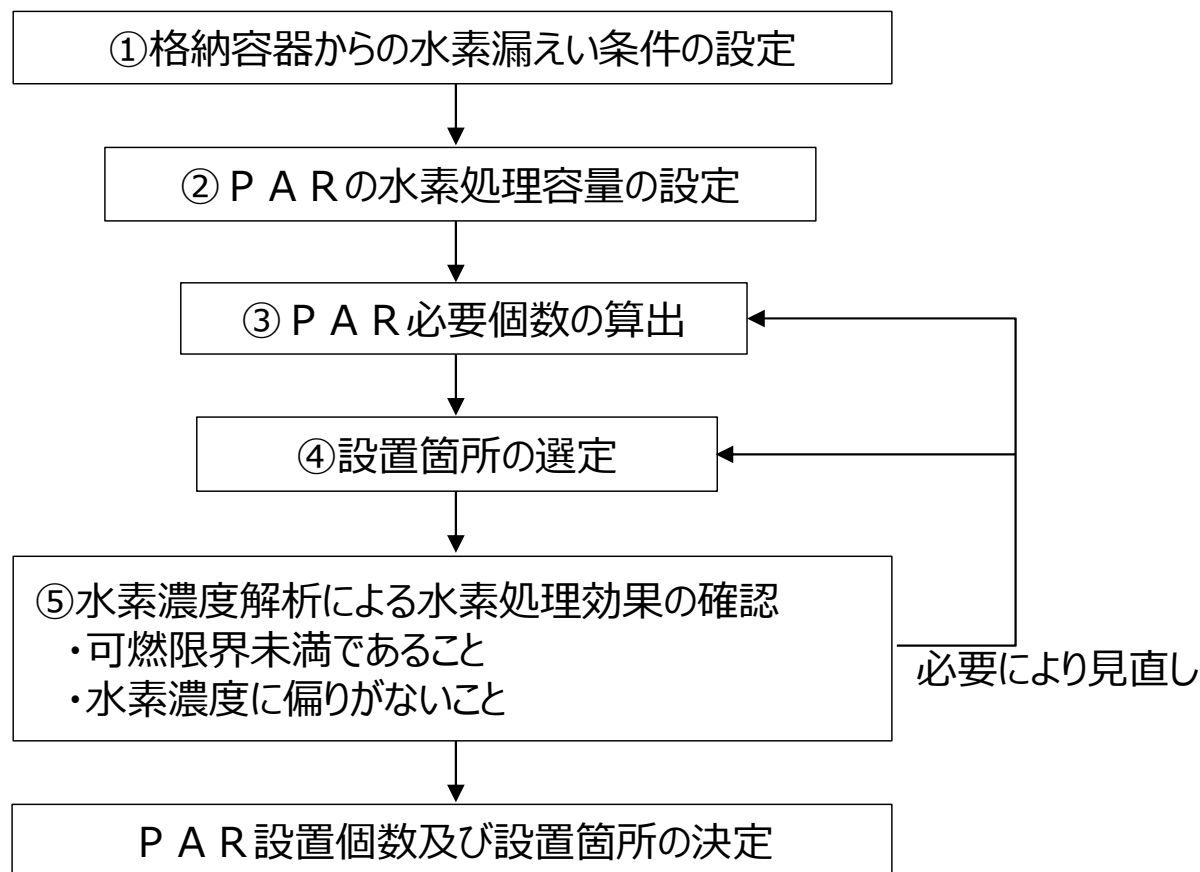


図4-7 PARの設計フロー

4.3 P A Rの設計方針（2 / 4） （P A R設置個数）

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

➤ 格納容器からの水素漏えい条件及びP A Rの水素処理容量を設定する。（ステップ①及び②）

表 3-4 P A R必要個数評価条件

| | 項目 | 評価条件 | 設定の考え方 |
|-----------------------------|----------|------------|--|
| ステップ① 格納容器からの 水素漏えい条件 | 水素発生量 | 1,600kg | 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 (燃料有効部被覆管100%のジルコニウムが全量ジルコニウム-水反応することで発生する水素量に相当) |
| | 格納容器漏えい率 | 10%/日 | 2 Pdにおける格納容器漏えい率約1.1%/日に余裕を考慮して設定 |
| ステップ② P A Rの水素 処理容量 | 設計水素処理容量 | 0.25kg/h/個 | 性能評価式より算出 |

【性能評価式】

$$DR = A \cdot \left(\frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \cdot \frac{P}{T} \cdot 3,600 \cdot SF \cdot F_i$$

DR：水素処理容量 (kg/h/個)

A：定数

C_{H_2} ：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 (-)

F_i ：反応阻害物質ファクタ (-)

➤ P A Rの必要個数を算出する。（ステップ③）

$$\begin{aligned} \text{必要個数} &= \text{水素発生量} \times \text{格納容器漏えい率} / 24(\text{h/日}) / \text{設計水素処理容量} \\ &= 1,600(\text{kg}) \times 10(\%/日) / 24(\text{h/日}) / 0.25(\text{kg/h/個}) \\ &= 26.7\text{個} \end{aligned}$$

①～③より，P A Rの必要個数は27個以上となり，余裕を考慮して設置個数を28個と仮設定する。

4.3 PARの設計方針（3 / 4） （PAR設置箇所）

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

- PARの設置箇所を選定する。（ステップ④）
- 以下の考え方を踏まえてPARは燃料取替階に設置する。
- 燃料取替階における設置箇所は周辺設備への影響を考慮して選定する。

【基本的な考え方】

- 原子炉棟内に漏えいした水素ガスは比重の関係で原子炉建物原子炉棟地上5階（燃料取替階）に上昇する。
- 燃料取替階の水素挙動としては，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，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。
- PARを上層部に設置した場合，PARからの排気は天井までの移動距離が短くなるため十分冷却されず，燃料取替階全体の自然循環流が弱まる。その結果，高温かつ水素濃度の低い排気ガスが天井付近に蓄積し，格納容器から漏えいした水素ガスの上昇が抑制され，再結合処理量が低下する可能性がある。

以上のことから，より自然循環流が発生しやすい燃料取替階の下層部へ設置することとし，以下の考慮事項も踏まえ，PARの設置位置を選定する。

【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，PAR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，PARの周囲に安全機能を損なう設備がないことを確認する。
- 定期事業者検査等において，通行や点検作業の支障とならない箇所に設置する。

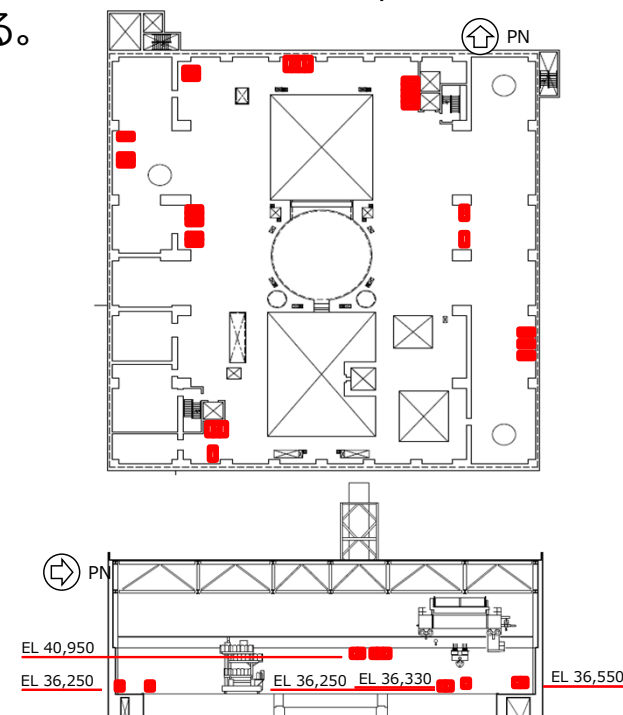


図4-8 PAR配置図

4.3 PARの設計方針（4 / 4） （水素処理効果の確認）

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

- 水素濃度解析により水素処理効果を確認する。（ステップ⑤）
- ステップ①～④を基に水素濃度解析を行った結果，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，水素濃度に偏りが無いことを確認した。

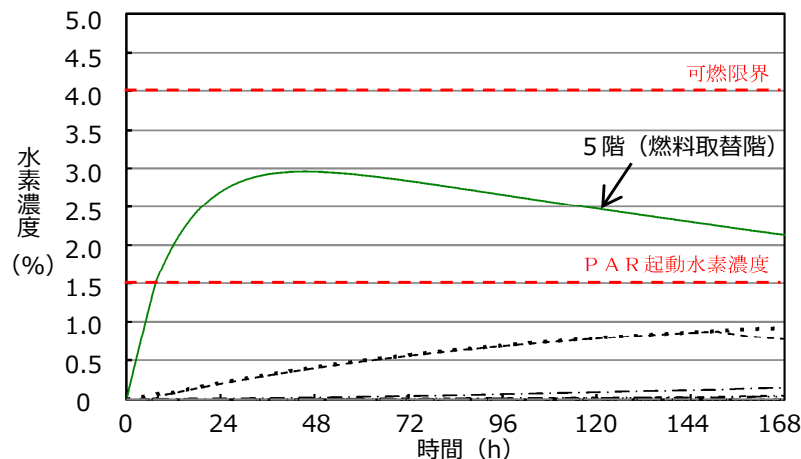


図4-9 各エリアの水素濃度の時間変化※

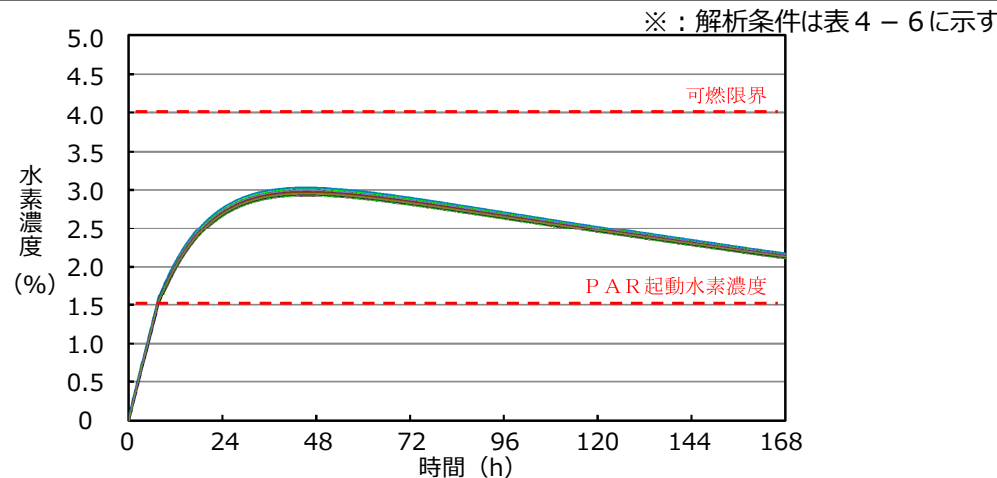


図4-10 燃料取替階の水素濃度の時間変化※
（燃料取替階を100個のサブボリュームに分割して解析）

①～⑤の結果より，
PARの設置個数（28個）
及び設置箇所を決定した。

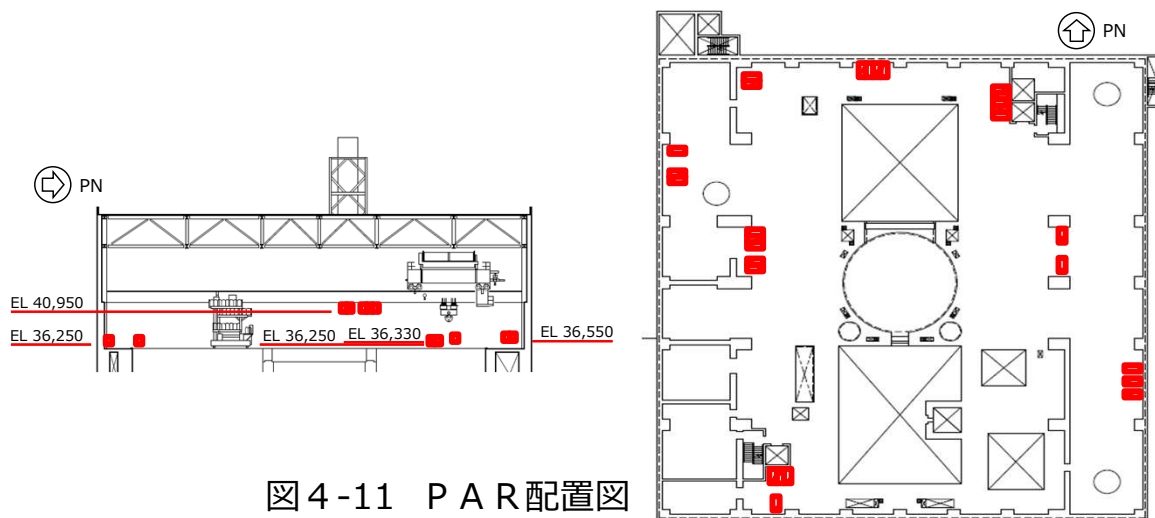


図4-11 PAR配置図

4.4 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析 (1 / 3) (格納容器からの水素漏えい箇所)

柏崎6/7号炉, 女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

- 格納容器からの水素漏えい箇所として, ドライウェル主フランジ・格納容器ハッチ類のシール部を選定している。
- P A R 設計条件では, 燃料取替階の水素量が最も多くなる条件として, ドライウェル主フランジから水素ガスが全量漏えいする状況を想定。
- 有効性評価結果を踏まえた条件では, ドライウェル主フランジ・格納容器ハッチ類から漏えいし, 開口部を通じて燃料取替階へ流れる状況を想定。

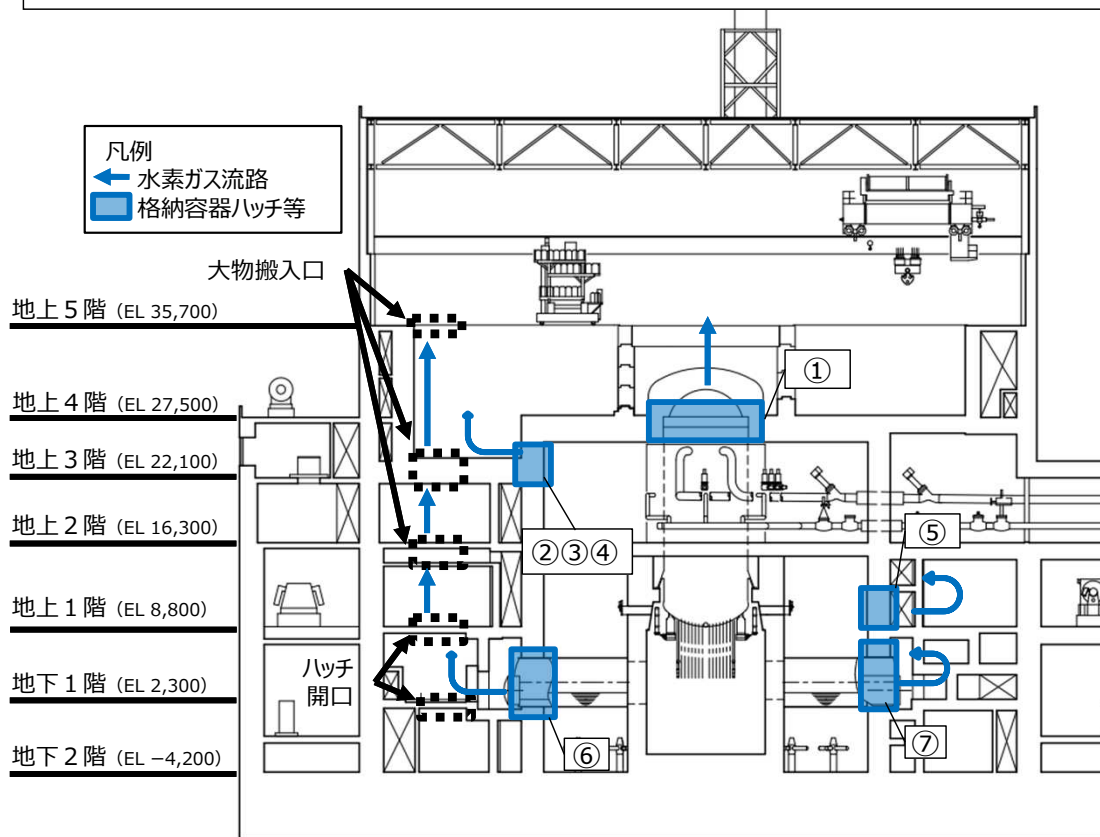


図 4-12 水素ガス流路のイメージ図

表 4-5 水素ガスの漏えい箇所

| 漏えいフロア | 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 地上 5 階 | ① ドライウェル主フランジ | ○ | ○ |
| 原子炉建物 原子炉棟 地上 3 階 | ② 機器搬出入用ハッチ ③ I S I 用ハッチ ④ 所員用エアロック | - | ○ |
| 原子炉建物 原子炉棟 地上 1 階 | ⑤ サプレッションチェンバ出入口 | - | ○ |
| 原子炉建物 原子炉棟 地下 1 階 | ⑥ 機器搬出入用ハッチ ⑦ 所員用エアロック | - | ○ |

4.4 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析（2 / 3） （解析条件）

柏崎6/7号炉，女川2号炉，
島根2号炉と同様の方針

- 設計条件ではベント無し・有りの2ケースについて解析を実施。
- 有効性評価を踏まえた条件では，循環冷却ケース及び格納容器ベントケースについて解析を実施。
- 設計条件における水素発生量は，保守的に燃料有効部被覆管100%がジルコニウム-水反応すると仮定して約1,600 kgを設定。

表4-6 水素濃度解析条件

| パラメータ | 設計条件 | | 有効性評価を踏まえた条件 | |
|--------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | ベント無し | ベント有り | 過圧・過温 (循環冷却ケース) | 過圧・過温 (ベントケース) |
| 水素発生量 | 約1,600 kg ^{※1} | | 約540 kg | |
| 格納容器漏えい率 | 10 %/日 | 10 %/日 ^{※2} 0.15 %/日 ^{※3} | 0.89 %/日 ^{※4} | 0.91 %/日 ^{※2, ※4} 0.38 %/日 ^{※3, ※4} |
| 水素漏えい終了時間 | — | 約21時間後 | — | 約34時間後 |
| P A R 起動水素濃度 | 1.5 vol% | | | |
| 漏えい箇所 | ドライウェル主フランジ | | ドライウェル主フランジ 格納容器ハッチ類 | |

※1：燃料有効部被覆管100%のジルコニウムが全量ジルコニウム-水反応することで発生する水素量に相当

※2：ベント実施までの値 ※3：ベント実施後の値 ※4：ケース中の最大値

4.4 原子炉建物原子炉棟の水素濃度解析 (3 / 3) (解析結果)

女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

(グラフ凡例)

- 5階オペロ
- ⋯ 4階及び中5階ホウ酸水注入ポンプ・貯蔵タンクエリア
- 3階通路南側及び西側
- 2階通路車,南側及び西側
- 1階通路北側
- 1階通路車,南側及び西側
- 地下1階通路北側
- 地下1階通路車,南及び西側
- ⋯ 地下1階RIP/CRD補修室
- 地下2階通路北車側
- 地下2階通路北西,西及び南側

- P A R設計条件では, 水素濃度が1.5vol%に到達するとP A Rが水素処理を開始し, 水素濃度の上昇は緩やかになり, 減少に転じる。(最大水素濃度約2.96%)
- また, 格納容器ベントを実施することにより水素濃度が減少する。
- 有効性評価を踏まえた条件では, いずれのエリアにおいても水素濃度はP A R起動水素濃度 (1.5 vol%) に到達しない。

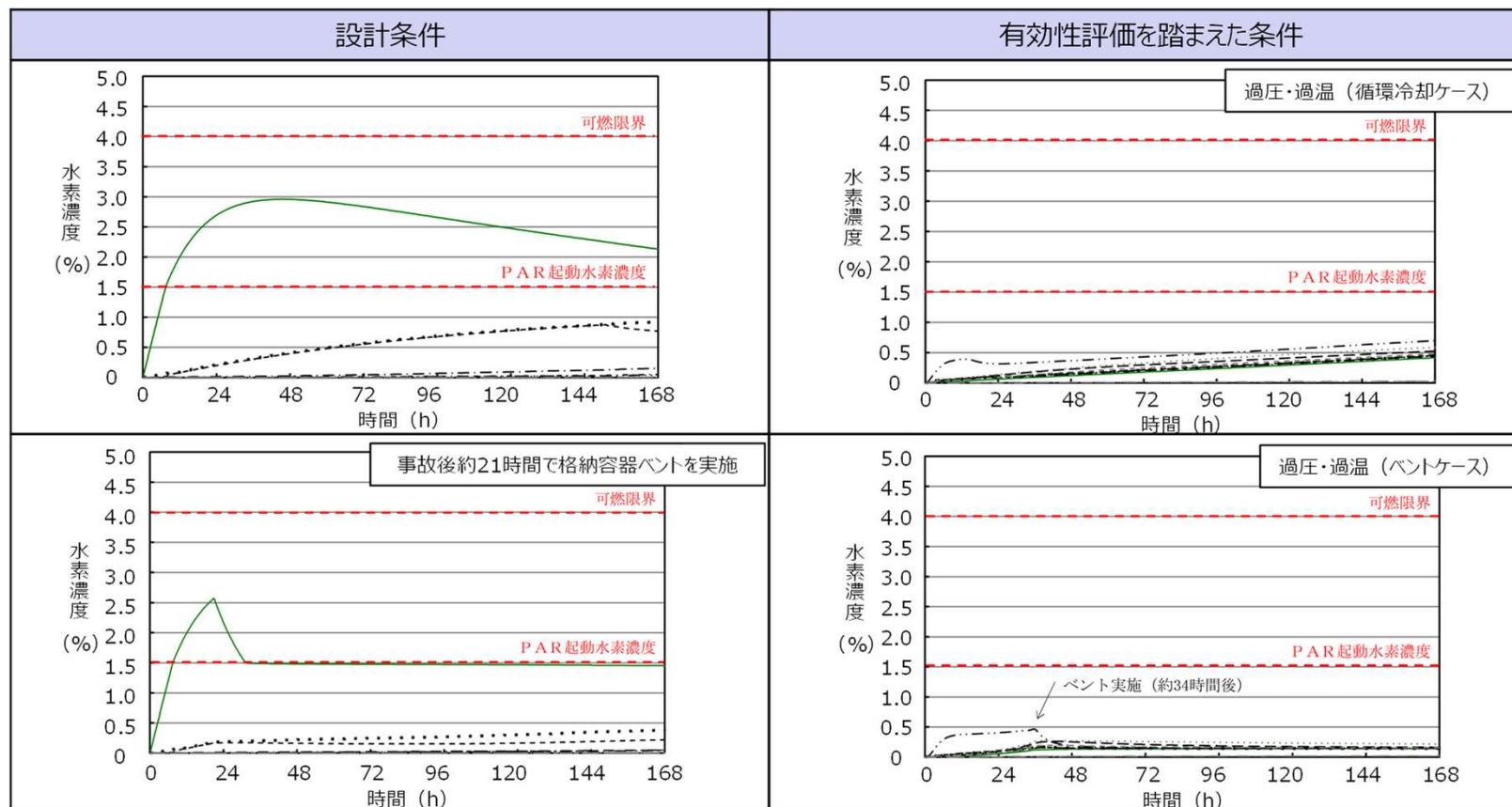


図 4-13 水素濃度解析結果

4.5 原子炉建物水素爆発防止対策の運用

柏崎6/7号炉, 女川2号炉,
島根2号炉と同様の方針

➤ 原子炉建物原子炉棟内の水素濃度が上昇した場合は、フローに従い対策を実施する。

【運用の概要】

①非常用ガス処理系の停止

非常用ガス処理系は水素ガスを大気へ放出するとともに、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。防爆仕様ではないため吸込み配管付近の水素濃度が上昇した場合には運転を停止し、系統内での水素爆発を防止する。

・停止基準：1.2vol%（可燃限度4%に対し、計器誤差等を考慮した値）

②格納容器ベントの実施

格納容器内の水素ガスを排出することで、原子炉建物原子炉棟内への水素ガス漏えいを抑制する。

・実施基準：2.5vol%※（可燃限度4%に対し、計器誤差等を考慮した値）

・準備の判断基準：2.1vol%（運転操作の余裕時間を踏まえた値）

※ベント実施基準の妥当性について、裕度評価により確認を実施

③原子炉建物ブローアウトパネルの開放

P A R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水素ガスが漏えいする場合には、原子炉建物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。

・実施基準：格納容器ベント実施後30分経過しても水素濃度が低下しない場合

④原子炉ウエル注水

ドライウエル主フランジからの水素ガス漏えいを防止するため、格納容器内の温度の上昇が継続し、原子炉ウエル代替注水系が使用可能であれば、注水を実施する。

・実施基準：格納容器内温度171℃

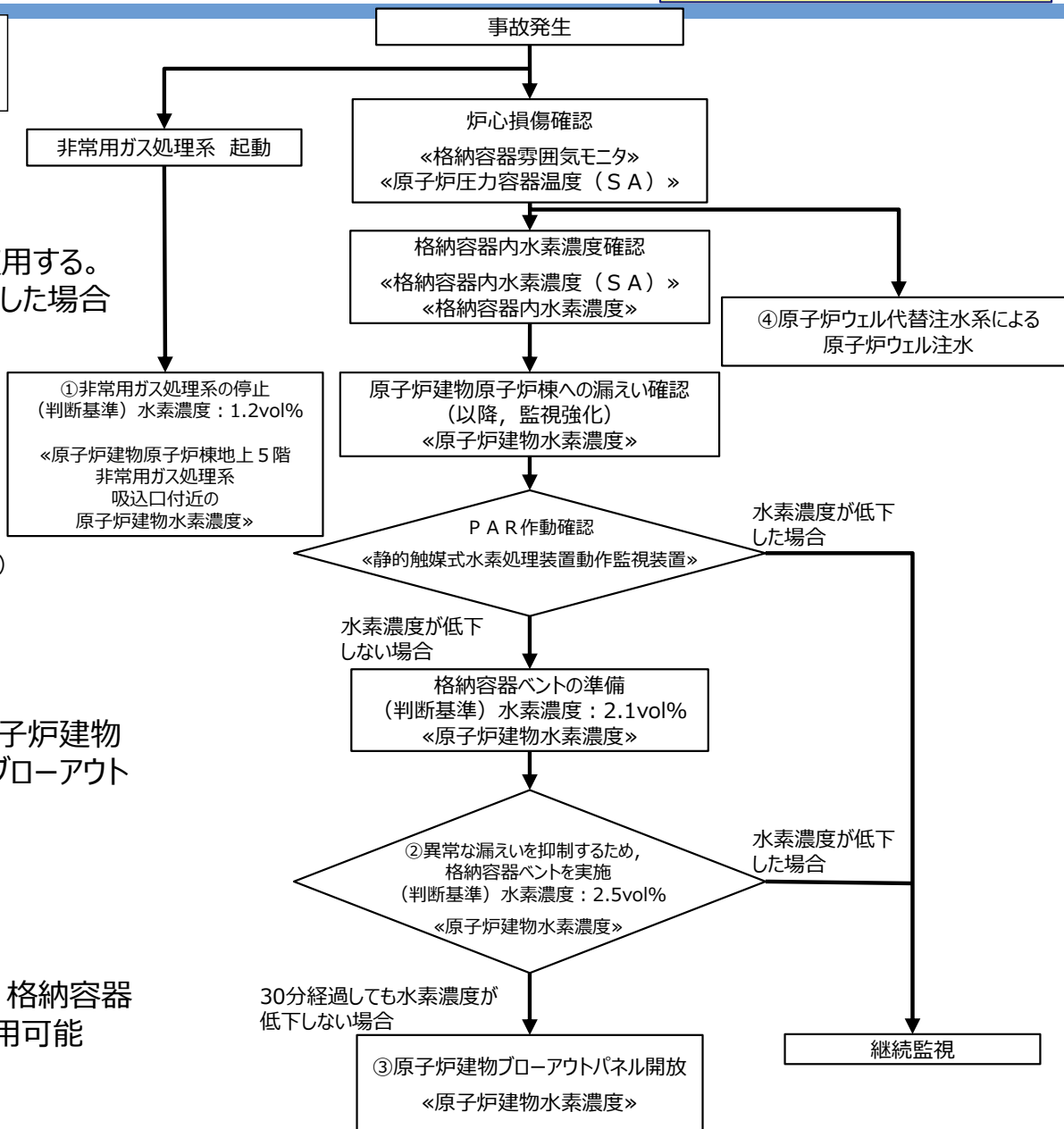
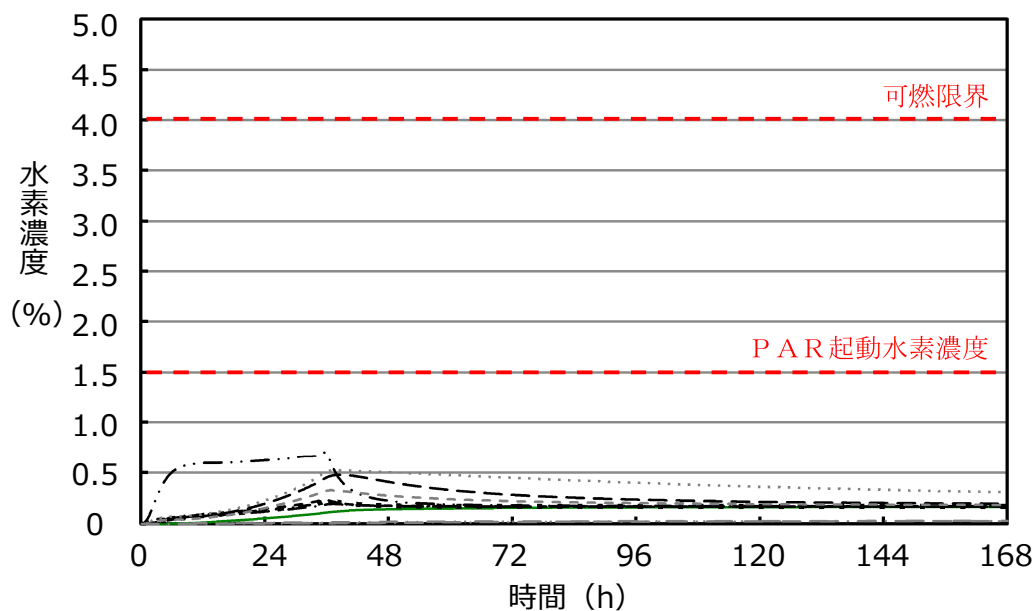


図 3-14 水素漏えい時の対策フロー

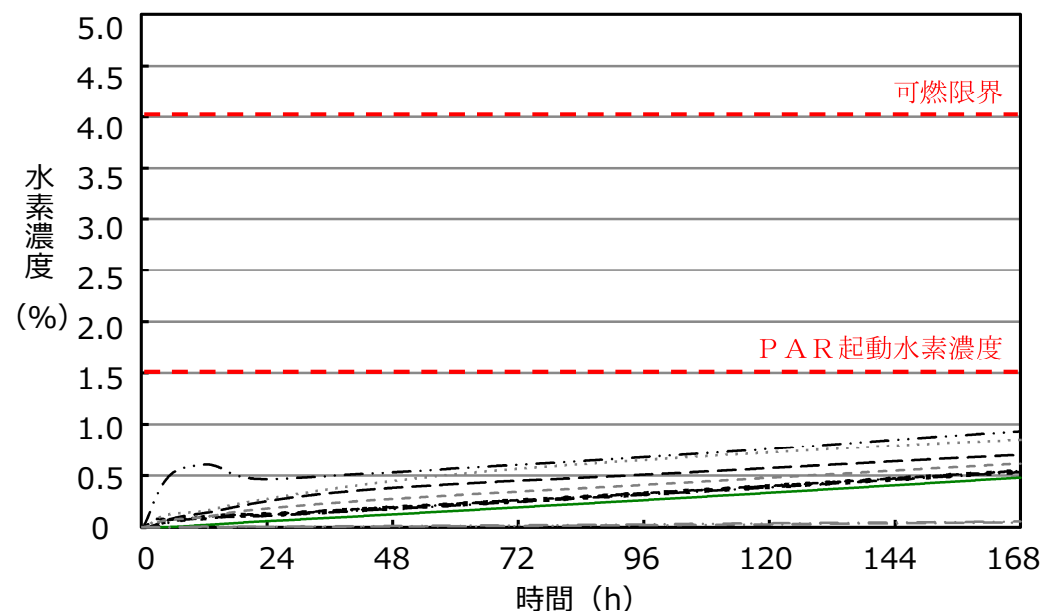
- 有効性評価を踏まえた条件 (ベント・循環冷却ケース) において, 自主対策設備である原子炉ウェル代替注水系の使用を想定。
- ドライウェル主フランジが冷却されるため, 水素ガス漏えい条件は下層階のハッチ類のみを想定。
- 原子炉建物原子炉棟地上 5 階の水素濃度は P A R 起動水素濃度 (1.5 vol%) に到達しない。

(グラフ凡例)

- 5 階オベフロ
- ⋯ 4 階及び中 5 階ホウ酸水注入ポンプ・貯蔵タンクエリア
- - - 3 階通路南側及び西側
- - - 2 階通路東, 南側及び西側
- - - 1 階通路北側
- - - 1 階通路東, 南側及び西側
- - - 地下 1 階通路北側
- - - 地下 1 階通路東, 南及び西側
- ⋯ 地下 1 階 R I P / C R D 補修室
- - - 地下 2 階通路北東側
- - - 地下 2 階通路北西, 西及び南側

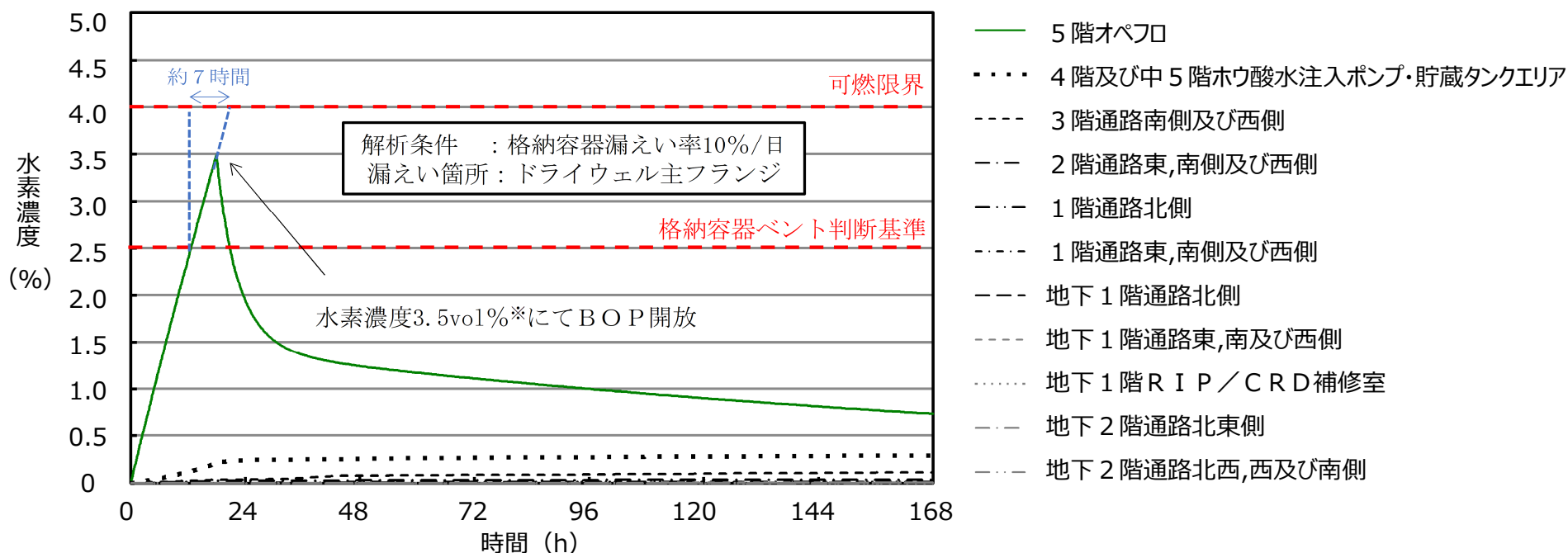


ベントケース (ウェル注水)



循環冷却ケース (ウェル注水)

- PAR及び格納容器ベント不作動時において，自主対策設備である原子炉建物ブローアウトパネルの開放を想定。
- 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約7時間の時間的余裕がある。



※ : 0.21vol\%/h (10%/日条件における水素上昇速度) \times (2時間40分 (BOP現場開放時間) + 30分 (ベント失敗判断時間)) + 2.5vol\% (格納容器ベント基準) = 3.2vol\% を包絡する値

原子炉建物ブローアウトパネル開放による水素濃度の時間変化
(PAR及び格納容器ベント不作動時)

(参考) 水素の流路となるハッチ

- 大物搬入口ハッチ（原子炉建物地上5階）及び原子炉建物南西ハッチ（地上1階～地下2階）は、水素ガスの流路となる。
- 大物搬入口ハッチには折畳式ハッチカバーが設置されているが、通常運転中に地震が発生した場合でも開状態を維持できるように、固縛等の措置を講じることとしている。
- 原子炉建物南西ハッチは、グレーチング構造に変更予定であるため、通常運転中に閉鎖することはない。



大物搬入口ハッチ外観

(参考) 先行プラントとの主な相違事項

| 項目 | 柏崎6/7号炉 | 女川2号炉 | 島根2号炉 | 島根3号炉 | 相違理由 |
|---------------------------|---------|----------|----------|---------|---|
| P A R 設置個数 | 56台 | 19個 | 18個 | 28個 | 【設備の相違】(柏崎6/7) 触媒カートリッジの枚数が異なるため、P A R 1 個当たりの水素処理容量及びP A R の必要個数に相違が生じる。 【設備の相違】(女川2,島根2) 炉心損傷時の水素発生量が異なるため、P A R の必要個数に相違が生じる。 |
| 原子炉建物水素 濃度の測定原理 | 熱伝導式 | 触媒式・熱伝導式 | 触媒式・熱伝導式 | 熱伝導式 | 【設備の相違】 島根2は他の設置場所より環境条件が厳しいトーラス室において、温度、放射線への耐性が高い触媒式水素検出器を選定していたが、島根3号炉では格納容器の構造上トーラス室が存在しないため、熱伝導式のみを採用している。 |
| 格納容器ベント 判断基準 (水素濃度) | 2.2% | 2.3vol% | 2.5vol% | 2.5vol% | 【設備及び運用の相違】 考慮している計器誤差及び格納容器ベントに係る運転操作時間が異なるため、ベント実施の判断基準となる水素濃度に相違が生じる。 |