

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

## 柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7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

平成27年8月

東京電力株式会社

## 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

### <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屋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（静的触媒式水素再結合器）について
    - 2.2.1 静的触媒式水素再結合器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 静的触媒式水素再結合器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
    - 2.2.2 静的触媒式水素再結合器の効果について
      - 添付 5 オペレーティングフロア大物搬入口ハッチの構造について
      - 添付 6 原子炉建屋内における成層化について
      - 添付 7 格納容器頂部注水系の効果を考慮した水素挙動について
    - 2.2.3 静的触媒式水素再結合器の性能試験について
      - 添付 8 国内容器試験について
      - 添付 9 静的触媒式水素再結合器 動作監視装置について
      - 添付 10 原子炉建屋小部屋における水素爆発防止対策について
  - 2.3 水素濃度監視設備について
    - 2.3.1 水素濃度監視設備の設計方針について
      - 添付 11 原子炉建屋水素濃度計の適用性について
  - 2.4 格納容器頂部注水系について
    - 2.4.1 格納容器頂部注水系の設計方針について
    - 2.4.2 格納容器頂部注水系の効果について
  - 2.5 参考文献

- 参考資料 1 福島第一原子力発電所 1 号機現地調査状況
- 参考資料 2 PAR による再結合反応の律速段階について
- 参考資料 3 GOTHIC コードについて

< 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柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 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屋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屋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 に示す。

表 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屋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、原子炉建屋運転床（以下、オペレーティングフロアという。）に静的触媒式水素再結合器（以下、PAR という。）を設置し、重大事故等発生時に原子炉格納容器（以下、格納容器という。）から原子炉建屋内に水素が漏えいした場合において、原子炉建屋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。

水素濃度監視設備としては、原子炉建屋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、当該水素濃度計については、常設代替直流電源設備（AM 用直流 125V 充電器、AM 用直流 125V 蓄電池）から給電可能な設計とする。

また、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として、格納容器頂部の過温破損を防止し、原子炉建屋への水素漏えいを抑制するために格納容器頂部注水系を設置する。格納容器頂部注水系は、重大事故等発生時に原子炉建屋外から代替淡水源（防火水槽又は淡水貯水池）の水、若しくは海水を可搬型代替注水ポンプにより原子炉ウェルに注水することで格納容器頂部を冷却できる設計とする。

## 2. 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

### 2.1 概要

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。柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7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、炉心の著しい損傷が発生した場合に備え、格納容器の破損を防止することが対策となる。柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉は、格納容器過温破損防止設備として代替格納容器スプレイ冷却系、改良EPDM製シール材、格納容器頂部注水系、格納容器過圧破損防止設備として格納容器圧力逃がし装置並びに代替循環冷却系を設置する設計とする。これらの対策により、原子炉建屋への水素漏えいを抑制し、あるいは原子炉建屋を経由せず大気に水素を排出する。

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、事故時に格納容器内で発生した水素が原子炉建屋内に漏えいした場合に備え、原子炉建屋内において水素を処理することが対策となる。柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉は、水素濃度制御設備としてPARをオペレーティングフロアに設置する。この対策により、漏えいした水素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、大量の水素が原子炉建屋に漏えいしてしまった場合にも、PAR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延長し、設備の復旧や対応手段の検討を実施する時間を確保できることから、更なる水素爆発リスクの低減を図ることが出来る。このようにして確保した時間の中で、例えば、格納容器圧力逃がし装置による格納容器ベントを行うことで、原子炉建屋の水素濃度も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 に整理する。

本章では、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の原子炉建屋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 PAR に関する説明を「2.2 水素濃度制御設備（静的触媒式水素再結合器）について」で示す。

また、原子炉建屋の水素濃度を監視するために、原子炉建屋に設置する水素濃度監視設備に関する説明を「2.3 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対策である格納容器頂部注水系に関する説明を「2.4 格納容器頂部注水系について」で示す。格納容器頂部注水系は、重大事故等発生時に格納容器頂部の過温破損を防止し、原子炉建屋への水素漏えいを抑制するために設置するものである。これは格納容器トップヘッドフランジのシール材の高温劣化を防ぐ目的であるが、一方で格納容器トップヘッド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。従って、格納容器頂部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】

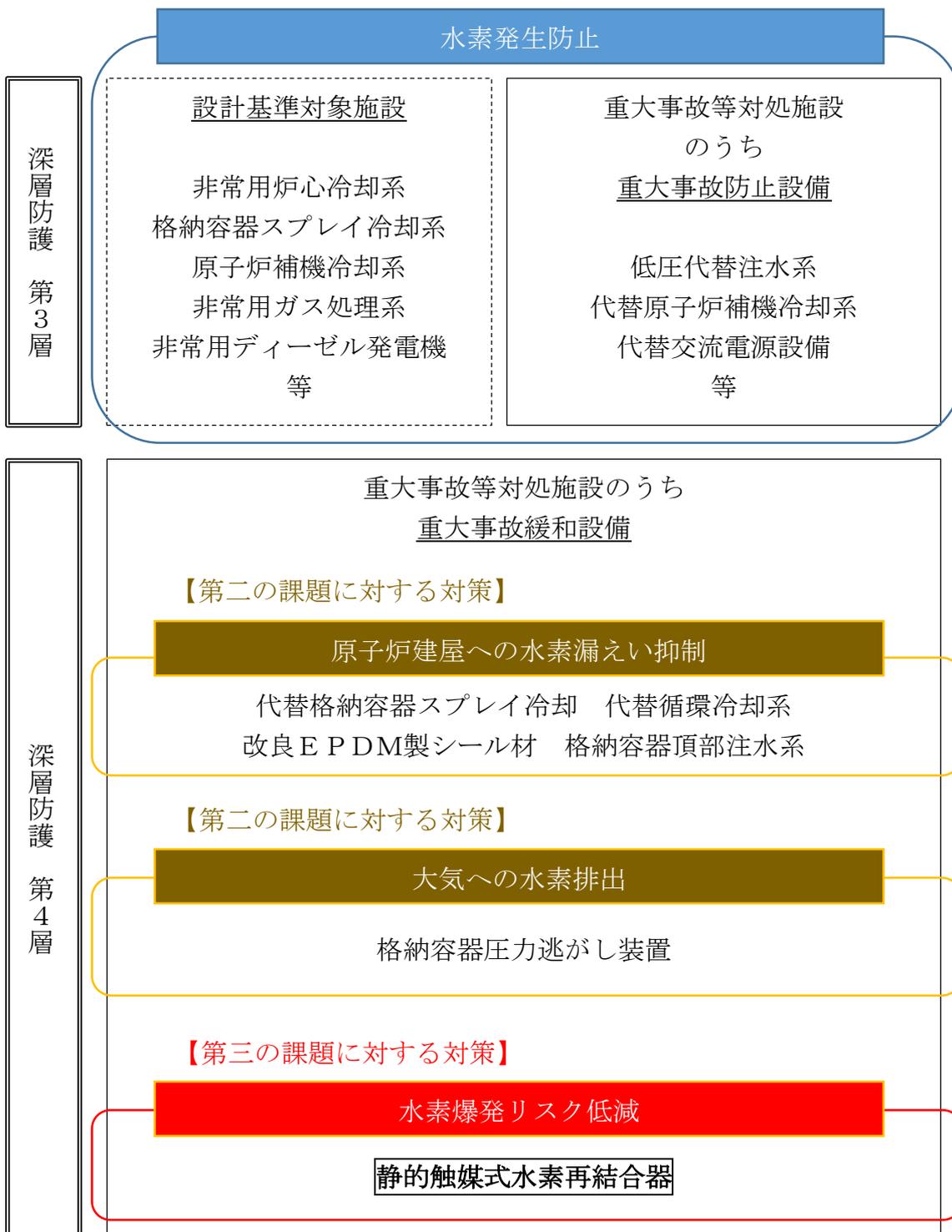


図 2-1 水素対策の観点で整理した深層防護第3層・第4層設備

## 2.2 水素濃度制御設備（静的触媒式水素再結合器）について

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況では、格納容器のフランジ部等を通じて水素が原子炉建屋内に漏えいする可能性がある。原子炉建屋内に漏えいした水素は、比重の関係でオペレーティングフロアまで上昇し、オペレーティングフロア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が原子炉建屋内に蓄積し、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、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の原子炉建屋水素爆発防止対策として、オペレーティングフロアに、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

静的触媒式水素再結合器 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，酸素）を再結合させて、雰囲気を可燃限界以下に維持する設備である。PAR は触媒反応により受動的に運転される設備であり、電源及び起動操作は必要とせず、水素，酸素があれば自動的に反応を開始する設備である。

PAR は、概要図を図 2-2 で示している通り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。柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 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。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。

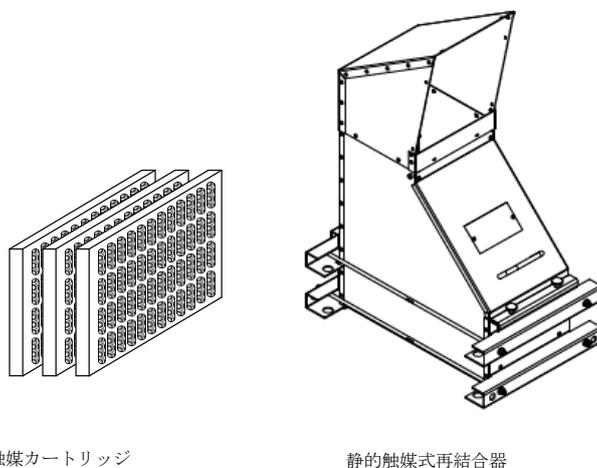


図 2-2 静的触媒式水素再結合器(PAR)の概要図



図 2-3 PAR-11 写真

表 2-1 NIS PAR の納入実績

No.	国名	発電所名	炉型	備考
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

## (2) PARハウジング

PARのハウジングは図2-4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。

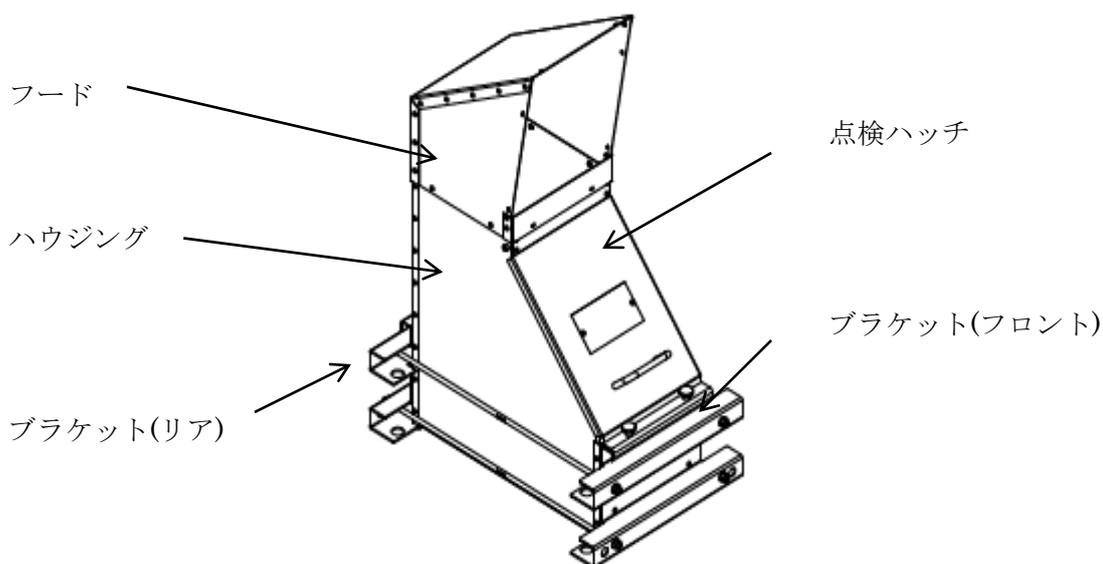


図 2-4 PARハウジングの構造

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、取付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。

## (2) 触媒

NIS 社製 PAR の触媒はパラジウムであり、基盤となる材料が酸化アルミニウム（アルミナ）である。概要図を図 2-5 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、酸素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、水素と酸素が触れる表面積が大きいことが特徴であり、よう素等の被毒物質が流入した際に、球状であることから全表面が被毒物質で覆われ難い構造になっている。これら触媒粒の量は、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。

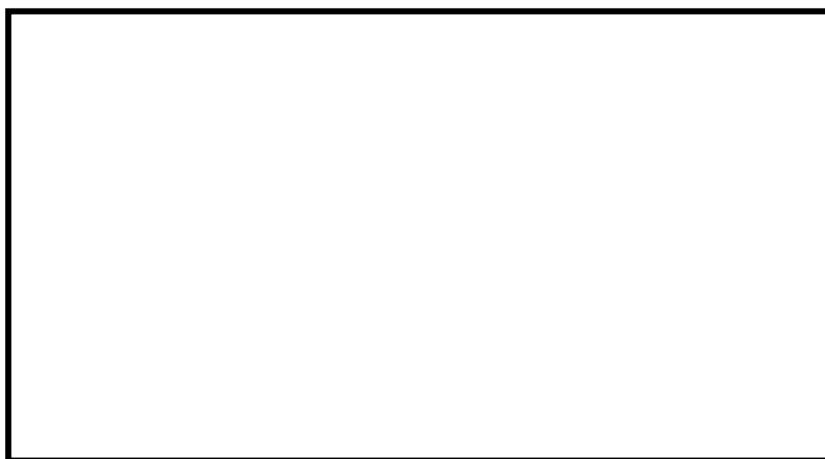


図 2-5 触媒の概要図

## (3) 触媒カートリッジ

触媒カートリッジは、図 2-2 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、オペフロの空気を触媒と接触させるために多数の長穴が開けられている。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 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。柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉においては、設置場所に配慮して、触媒カートリッジが PAR 1 台につき 11 枚設置される PAR-11 タイプ(図 2-2 参照)を採用している。

(4) PAR の主要仕様

柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉では NIS 社製 PAR (PAR-11 タイプ) を採用しており、表 2-2 で主要仕様を示す。

表 2-2 主要仕様 (PAR-11 タイプ 1 台)

静的触媒式水素再結合器			
種 類	触媒反応式		
水素処理容量	0.25kg/h/個以上 (水素濃度 4%, 大気圧, 温度 100℃)		
最高使用温度	300℃		
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		
	触媒材質の充填質量		
カートリッジ枚数		11 枚	
触媒の材料			
基盤材	酸化アルミニウム		
触媒材質	パラジウム		
表面積			
形 状	球状		
直 径			
充填密度			

## 2.2.1 静的触媒式水素再結合器の設計方針について

### 2.2.1.1 基本設計方針

PAR 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屋に水素ガスが漏えいした際に、原子炉建屋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屋へ漏えいする水素ガスの量を考慮した場合においても、オペレーティングフロアの水素濃度を可燃限界未満に抑制できることを PAR 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重大事故のシナリオの中で、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 38 時間後まで継続することから、格納容器から原子炉建屋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、PAR の基本設計方針を以下の通り定める。

#### (1) PAR による水素処理容量について (PAR の必要台数について)

下表に示す条件で格納容器から原子炉建屋内に水素が漏えいする事象で、オペレーティングフロアの水素、酸素濃度が可燃限界未満となる水素処理機能を有すること。すなわち、この水素処理機能が確保できる PAR 台数を定め、事故環境下における触媒被毒による性能低下を考慮し、必要台数に余裕を持たせた台数とする。表 2-3 で示す通り、PAR 設計条件は有効性評価シナリオ（格納容器過圧・過温破損シナリオ）で想定する格納容器漏えい率、水素発生量、水素漏えい終了時間より十分保守的に設定しており、原子炉建屋水素爆発防止対策を強化している。

表 2-3 PAR 設計条件（水素漏えい）

No	項目	設計条件	(参考) 格納容器過圧・過温破損シナリオ
1	格納容器漏えい率	10%/日	約 1.0%/日 : AEC 式 (2Pd 時)
2	水素発生量	AFC (燃料有効部被覆管) 100%相当の水素発生量 : 約 1600kg	約 700kg (AFC 約 31%相当の水素発生量)
3	水素漏えい終了時間 (格納容器ベント)	— (格納容器ベントなし)	約 38 時間後

① 格納容器漏えい率 (10%/日) について

重大事故等発生時で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を AEC (Atomic Energy Commission) の式を用いて求める。格納容器漏えい率は格納容器圧力に応じて変化するが、重大事故等発生時には、格納容器圧力が設計圧力の 2 倍 (以下, 2Pd) 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、事故時におけるガス組成 (水素濃度包絡条件, 水素 33%:窒素 21%:水蒸気 46%) を踏まえると AEC の式から約 1.0%/日となる。この値は重大事故等対策の有効性評価のシナリオにおける最大値であることから、これに余裕を見て、10%/日と設定する。

$$L = L_0 \cdot \sqrt{\frac{(P_t - P_a) \cdot R_t \cdot T_t}{(P_b - P_a) \cdot R_b \cdot T_b}}$$

L0 : 設計漏えい率

Pt : 事故時の格納容器圧力

Pb : 設計圧力

Pa : 格納容器外の圧力

Rt : 事故時の気体定数\* (\*事故時の気体の平均分子量が小さい程 Rt は大きくなる)

Rb : 空気の気体定数

Tt : 事故時の格納容器内温度

Tb : 設計格納容器内温度

② 水素発生量 (AFC 100%) について

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発生する水素の量は、表 2-3 の通り約 700kg (AFC 約 31%相当の水素発生量) であるが、水素発生 of 主要因であるジルコニウム-水反応に着目し、余裕を見た水素発生量を設定する。ジルコニウム-水反応は 900℃以上で活発になることから、加熱源である燃料有効部の被覆管全て (AFC 100%) が反応すると仮定することで、保守的な水素発生量を評価することが可能である。

この場合の水素発生量は、表 2-3 の通り約 1600kg であり、格納容器過圧・過温破損シナリオにおいて発生する水素の量と比較して保守的な設定となっていることが確認できる。

なお、これらの条件を用いて設定した PAR 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 2700kg）と MAAP コードによる評価結果（水素発生量約 600kg）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 MAAP コードによる評価結果を用いている。加えて、全燃料被覆管の 75%が水と反応した場合に生じる水素（水素発生量約 1500kg）が格納容器内に生じた場合を仮定した評価も実施している。

いずれのケースも格納容器は健全であることから、格納容器漏えい率は、格納容器過圧・過温破損シナリオ同様に格納容器圧力が 2Pd に到達したと仮定し、かつ①で示したガス組成のうち水蒸気分が全て水素に置き換わったと仮定した場合の約 1.5%/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水素発生量は PAR 設計条件である約 1600kg（AFC100%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 45%が水と反応した場合の発生量に相当）を上回る約 2700kg となる場合もあるが、格納容器漏えい率は PAR 設計条件の方が 6 倍以上（約 1.5%/日に対して 10%/日）大きくなる。このため、最終的に原子炉建屋内に漏えいする単位時間あたりの水素量は、PAR 設計条件の方が多くなる。従って、PAR 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) PAR の設置場所について

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況では、格納容器のフランジ部等を通じて水素が原子炉建屋内に漏えいする可能性がある。原子炉建屋内に漏えいした水素は、比重の関係でオペレーティングフロアまで上昇し、オペレーティングフロア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が原子炉建屋内に蓄積し、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（参考資料 1 参照）。この事故知見を踏まえて、PAR は水素が最も蓄積されると想定されるオペレーティングフロアに設置する。

### 2.2.1.2 設計仕様

PARの基本設計方針に基づき、設計仕様は以下の通りとする。設計仕様の根拠を次に述べる。

表 2-4 PAR 設計仕様

項目	6号炉	7号炉
水素処理容量 (PAR 1個あたり)	0.250 kg/h/個	0.250 kg/h/個
PAR 必要台数 (設置台数)	54台以上 (56台)	54台以上 (56台)

#### (1) 水素処理容量 (PAR 1個あたり) の設定根拠

##### ① PAR の基本性能評価式

柏崎刈羽原子力発電所 6号炉及び 7号炉においては、設置場所に配慮して、触媒カートリッジが PAR 1台につき 11枚設置される PAR-11タイプを採用する。メーカーによる開発試験を通じて、NIS社製 PARの1個あたりの水素処理容量は、水素濃度、雰囲気圧力、雰囲気温度に対して、以下の式で表される関係にあることを示している。

$$DR = A \times \left( \frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \times \frac{P}{T} \times 3600 \times SF \quad \dots\dots\dots (式 1)$$

- $DR$  : 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)
- $SF$  : スケールファクター

スケールファクターSFについて、当社は PAR-11タイプを採用するため、PARには各々11枚の触媒カートリッジが装荷されるため「11/88」となる。スケールファクターの妥当性については「2.2.3 静的触媒式水素再結合器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、PAR の水素処理容量を算出する

・水素濃度  $C_{H_2}$

水素の可燃限界濃度 4%未満に低減するため、4%とする。

・圧力  $P$

重大事故時の原子炉建屋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 (1.01325 bar) 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、0.250 kg/h/個 (水素濃度 4%, 大気圧=1.01325 bar, 温度 100°C=373.15K) となる。

(2) 個数の設定根拠

①実機設計における性能評価式

実機設計 (PAR の個数を踏まえた設計) においては、反応阻害物質ファクターを乗じた式(2)を用いる。反応阻害物質ファクターとは、重大事故時に格納容器内に存在するガス状水素による PAR の性能低下を考慮したものであり、当社の設計条件においては、保守的に格納容器内設置例での知見に基づいて「0.5」とする。

$$DR = A \times \left( \frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \times \frac{P}{T} \times 3600 \times SF \times F_{inhibit} \times F_{lowO_2} \dots\dots\dots (式 2)$$

- $DR$  : 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<sup>-5</sup>Pa)
- $T$  : 温度 (K)
- $SF$  : スケールファクター
- $F_{inhibit}$  : 反応阻害物質ファクター (-)

## 1) 必要個数の計算

格納容器からの水素漏えい量を以下のように想定し、これと水素処理量が釣り合うように個数を設定する。なお必要個数の評価に当たっては、静的触媒式水素再結合器の水素処理容量に重大事故時の反応阻害物質ファクターとして0.5を乗じた水素処理量を用いる。

- ・ 水素の発生量：約 1600 kg
  
- ・ 原子炉格納容器の漏えい率：10%/日
  
- ・ 反応阻害物質ファクター  $F_{inhibit}=0.5$  （保守的にPCV内設置例での知見に基づき設定した値）
  
- ・ 水素処理量 = 0.250 kg/h/個 × 0.5  
= 0.125 kg/h/個
  
- ・ 必要個数 = (約 1600 kg × 10 %/日) / (24 h/日) / 0.125 kg/h/個  
= 53.3 個

これより、PARの必要台数は54台以上を設置台数とする。なお、実際のPAR設置台数は、余裕を見込み6号炉に56台、7号炉に56台設置する。

## 2) 原子炉建屋が可燃限界以下になることの確認

基本設計方針が、「格納容器から原子炉建屋内に水素が漏えいする事象で、オペレーティングフロアの水素、酸素濃度が可燃性限界以下となる水素処理機能を有すること」であるため、PARの個数が上記算定結果の54個において、オペレーティングフロアが可燃限界以下であることの確認を次の通り実施する。

### ① 評価方法

原子炉建屋（オペレーティングフロア）雰囲気の水素濃度等は図2-6に示すモデルにより評価する。モデルでは評価対象の空間内は均一に混合するものとして、質量、エネルギーバランスにより、水素濃度、温度の時間変化を評価する。

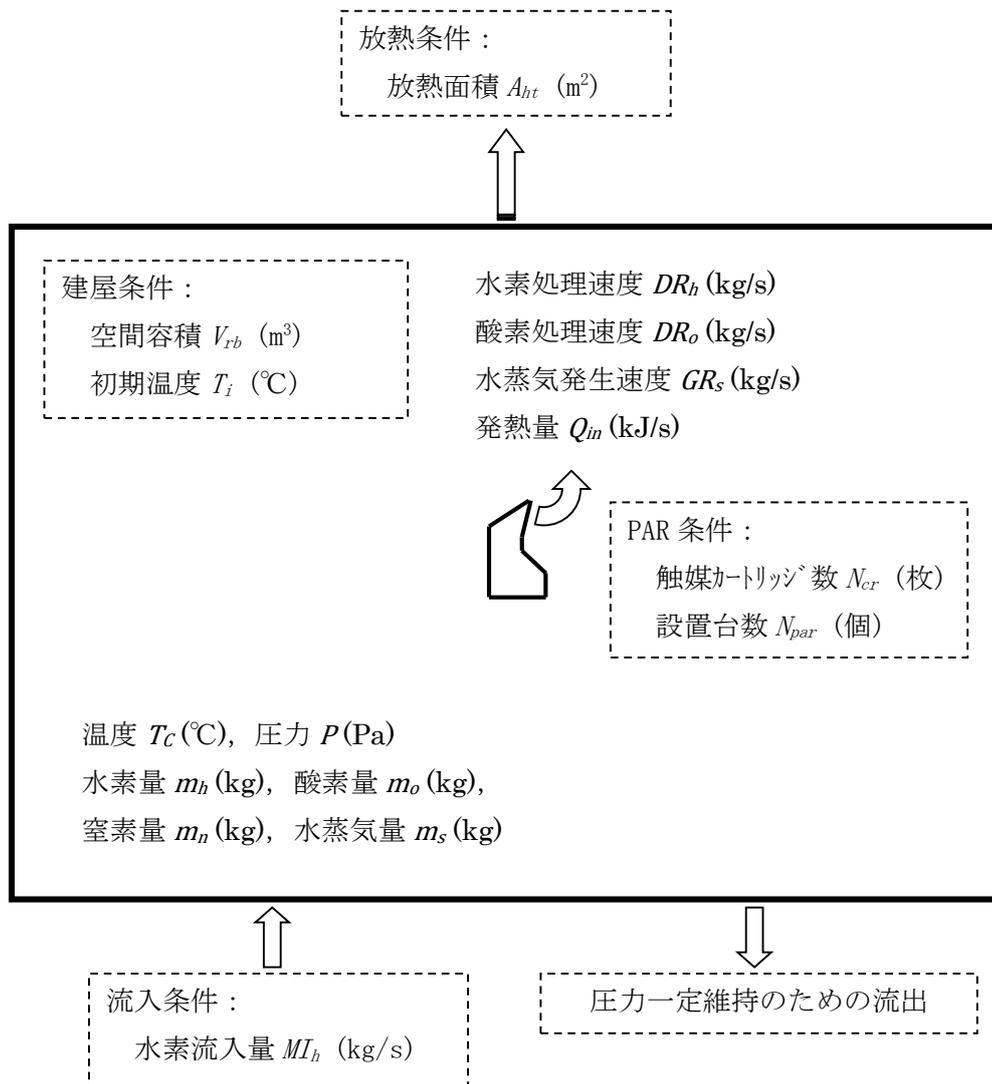


図 2-6 原子炉建屋（オペレーティングフロア）雰囲気の評価モデル

## ②評価条件

- ・機能が要求される状態

重大事故時等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。従って、格納容器の健全性が維持されることにより、原子炉建屋への気体の漏えい率は格納容器設計漏えい率（0.4%/day）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%/day）の状態の水素ガスが原子炉建屋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

PAR については以下の条件で評価する。

・水素処理容量： 0.250 kg/h/個

・個 数： 54

本評価に使用するその他の条件を表 2-5 に示す。

表 2-5 評価条件

分類	項目	単位	条件
PCV 条件	PCV 容積	m <sup>3</sup>	13310
	想定 PCV 漏えい率	%/day	10
PCV 内雰囲気条件 (固定)	圧力	kPa	721
	温度	°C	200
	水素濃度	%	33
	酸素濃度	%	0
	窒素濃度	%	21
	水蒸気濃度	%	46
建屋条件 (初期条件)	空間容積 (評価範囲)	m <sup>3</sup>	42500
	初期温度	°C	40
	初期圧力	Pa	101325
	初期酸素濃度	%	19.47
	初期窒素濃度	%	73.24
	初期水蒸気濃度	%	7.29
放熱条件	外気温	°C	40
	放熱面積	m <sup>2</sup>	5200
	熱通過率	W/m <sup>2</sup> /K	1.36
PAR 条件	起動水素濃度	%	1.5
	起動酸素濃度	%	2.5
	反応阻害物質ファクター	-	0.5

③評価結果

図 2-7 に原子炉建屋 (オペレーティングフロア) 雰囲気の水素濃度の時間変化, 図 2-8 に雰囲気温度の時間変化, 及び図 2-9 に原子炉建屋 (オペレーティングフロア) からのガスの流出量の時間変化を示す。

PCV からのガスの漏えいにより雰囲気温度が上昇するが, 外気への放熱とのバランスにより, 雰囲気温度は一時的に約 42°C の一定値に近づく。PCV から漏えいする水素により, 原子炉建屋 (オペレーティングフロア) 雰囲気の

水素濃度は上昇するが、約8時間後に1.5%に到達すると、静的触媒式水素再結合器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。原子炉建屋（オペレーティングフロア）からのガスの流出量は、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とともに、PCVからのガスの漏えい量の約0.04kg/sに近づく結果となっている。

PCV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、雰囲気温度は最終的に約71°Cの一定値に近づく。一方、PCVからの水素の漏えい量、水素の再結合処理量、及び原子炉建屋（オペレーティングフロア）からの水素の流出量のバランスにより、雰囲気の水素濃度は最終的に約3.5vol%の一定値に近づく結果となっている。

以上より、静的触媒式水素再結合器54台の設置により、本評価条件において原子炉建屋（オペレーティングフロア）雰囲気の水素濃度を可燃限界である4vol%未満に低減でき、原子炉建屋の水素爆発を防止することが出来る。

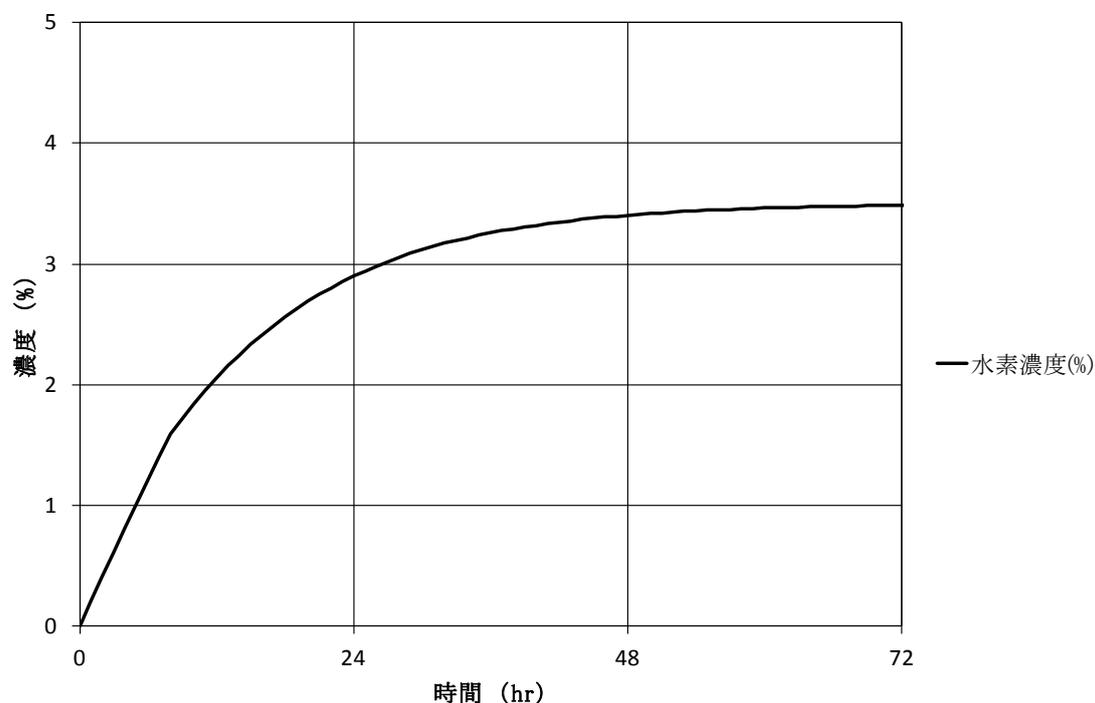


図 2-7 原子炉建屋（オペレーティングフロア）水素濃度の時間変化



図 2-8 原子炉建屋（オペレーティングフロア）温度の時間変化



図 2-9 原子炉建屋（オペレーティングフロア）からのガスの流出量の時間変化

### (3) PAR の設置位置について

PAR は水素を処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。従って、オペレーティングフロアにある程度散らばりをもたせて PAR を配置することで、オペレーティングフロアの水素ガスが自然対流を起こし攪拌され、水素ガスが PAR 全体に行き渡る流れとなる。PAR 配置の散らばりについては、オペレーティングフロアの壁面に配置しても、中央に配置しても自然対流による攪拌効果により水素ガス濃度に大きな違いは無いことが判っている。また、この攪拌効果を高めるために、PAR の設置高さを全て同じレベルにするのではなく、なるべく上下方向 2 段に分けることが事前評価で確認できている。よって、PAR の設置位置は、PAR 取付作業性も考慮し、オペレーティングフロア壁面に全数設置することとし、設置スペースを考慮して極力上下方向 2 段に分けて配置する。

### (4) PAR 設置の設計フロー

以上のことから、PAR の個数を設定し、現場取付作業性を考慮して設置位置を設定するが、最終的にはこの配置で水素処理効果を評価して、「空間水素濃度に偏りが無いこと」、「可燃限界以下となること」を確認する。確認の結果、性能要求が満足できない場合は、PAR の配置変更、台数の再検討を行い、再度水素処理効果を評価して設計の妥当性を確認する。これら PAR 設置の設計フローを図 2-10 に示す。これらの検討の結果、最終決定した 6 号炉の PAR 配置を図 2-11、7 号炉の PAR 配置を図 2-12 に示す。これら設置位置の妥当性については、「2.2.2 静的触媒式水素再結合器の効果について」で PAR の設置位置をモデル化した解析で示す。

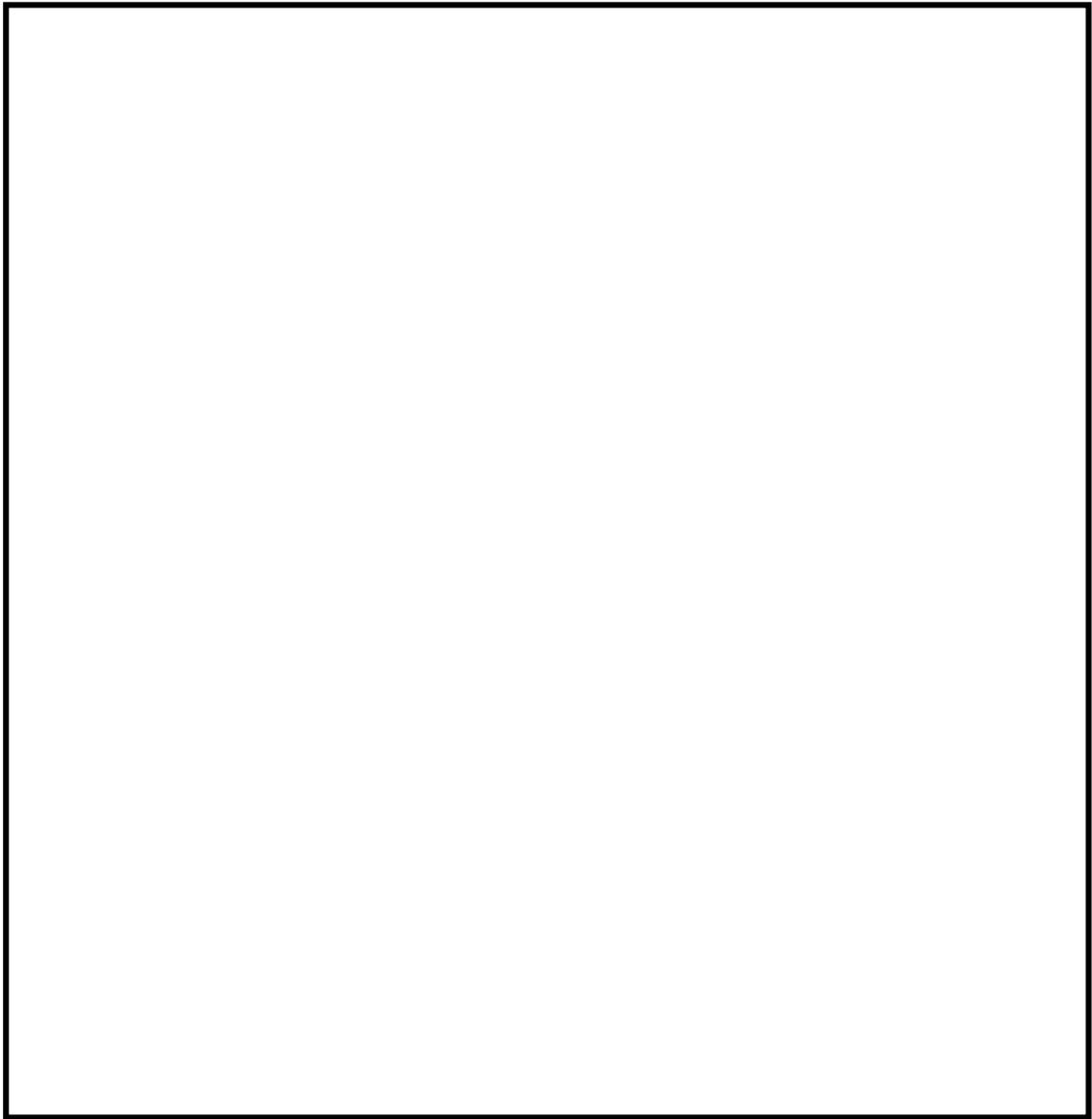


図 2-10 PAR 設置の設計フロー

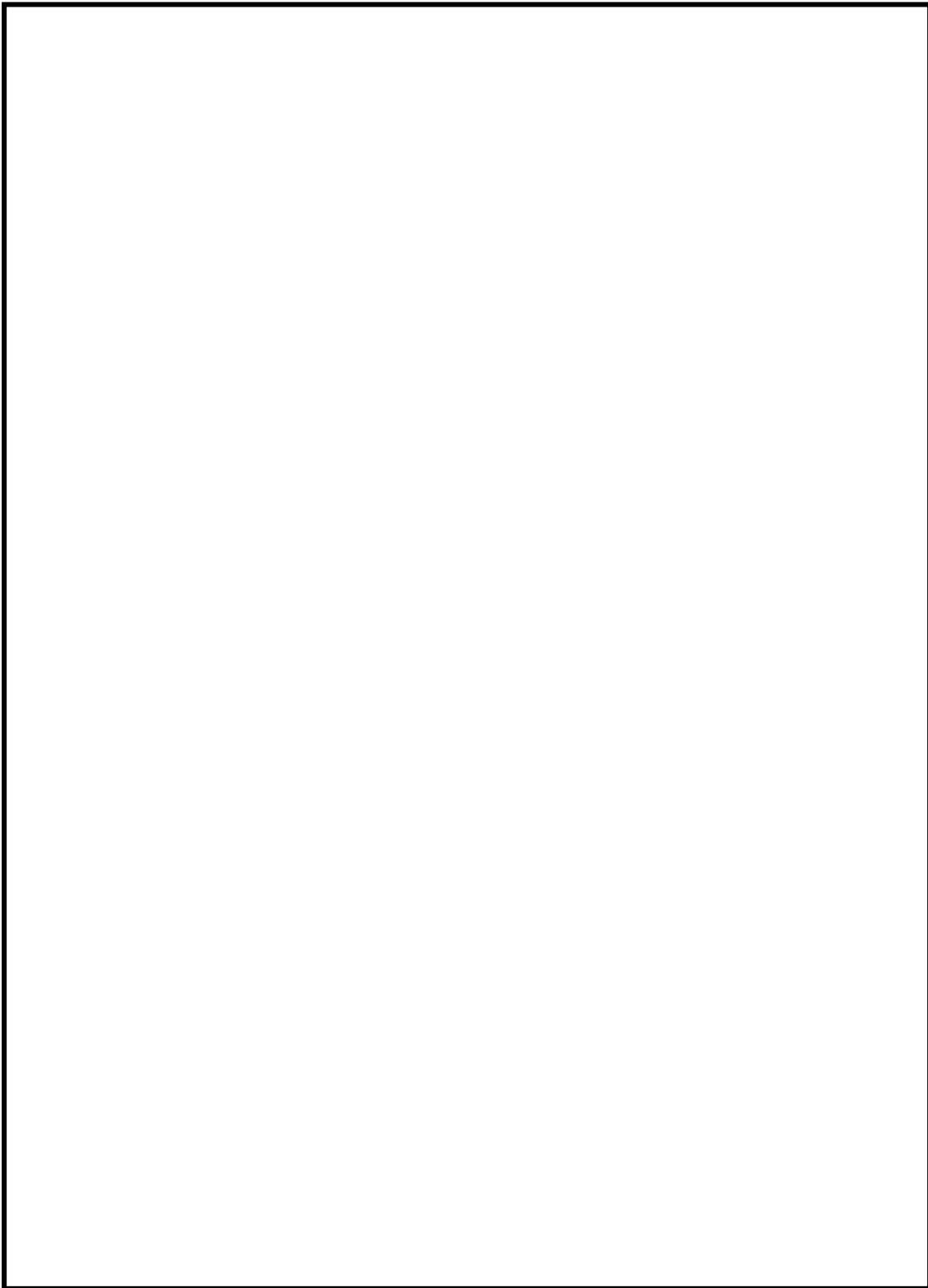


図 2-11 6号炉 PAR 配置 (①設置高さ, ②台数)

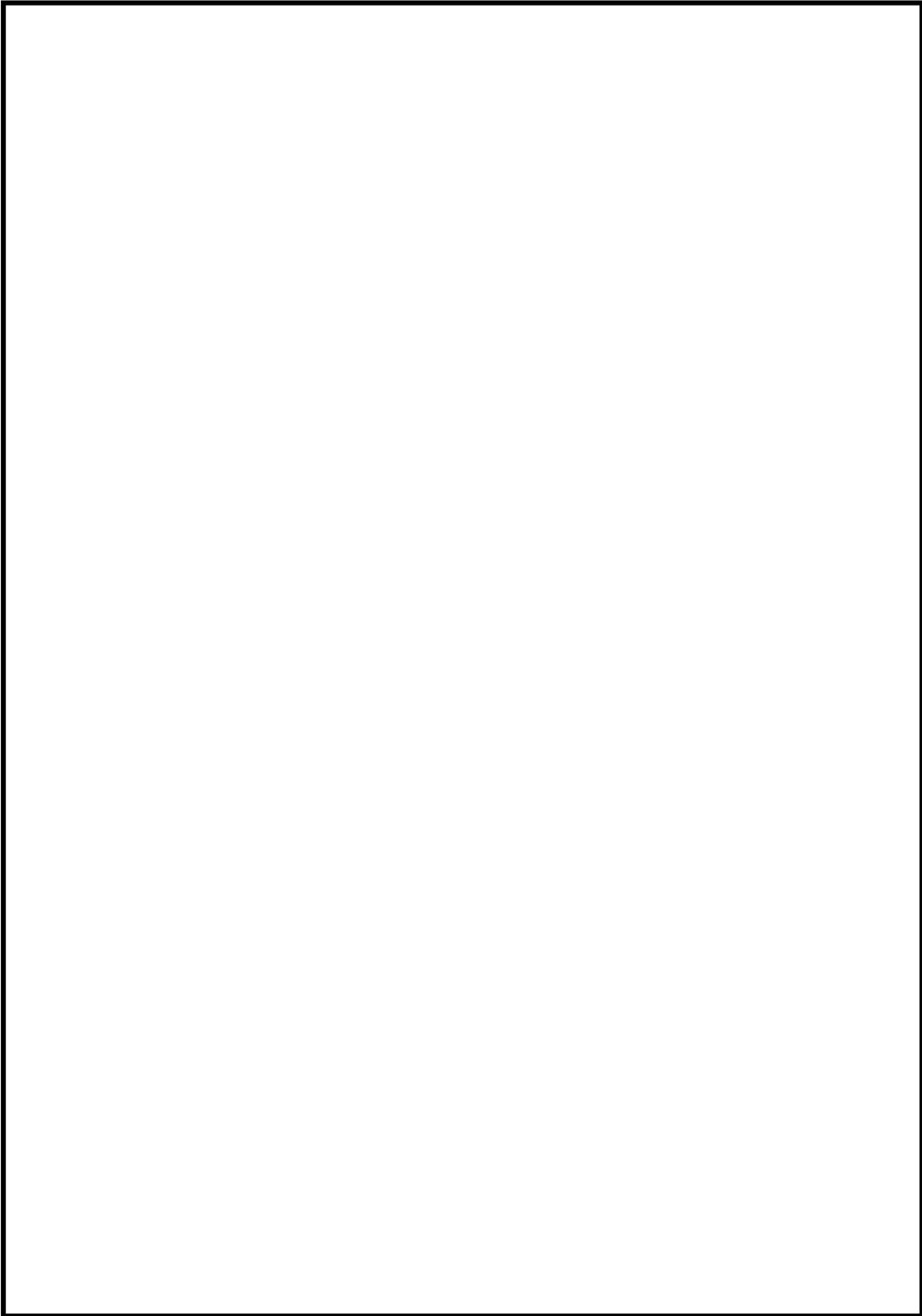


図 2-12 7号炉 PAR 配置 (①設置高さ, ②台数)

## 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

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、OG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）のペ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、OG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、PARの触媒は、製造段階でアルミナのペ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る。

以下に、浜岡原子力発電所で起きた事象概要、推定原因、PAR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OG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OG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、出力一定保持していたところ、OG系で水素濃度の上昇を示す警報（設定値2%）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、出力一定保持していたところ、OG系で系統内の水素濃度の上昇を示す警報（設定値2%）が点灯し、水素濃度が可燃限界（4%）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OG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

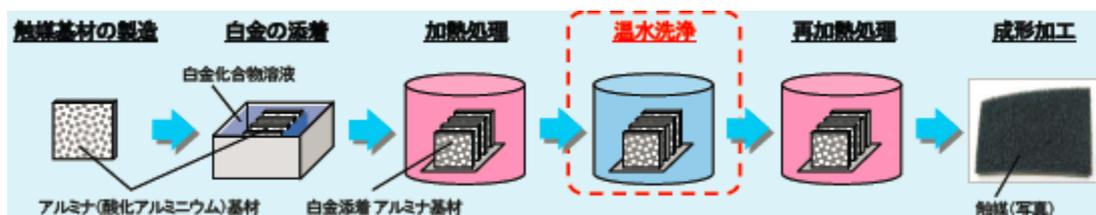
排ガス再結合器触媒の概略製造工程を図（添付1-1）※に示す。平成8年以降、触媒の製造工程の一部を変更しており（原子力発電所向けのみに、触媒中の塩

素に起因する系統機器・配管の応力腐食割れ対策として施される触媒の脱塩処理工程について、温水洗浄の時間を長くした、それ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； $AlO(OH)$ または $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ）となる割合が多くなっていることが認められた。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（添付1-2）※）。

## (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（有機ケイ素化合物の一つ）が存在していることが認められた。シロキサンの発生源を調査した結果、4号機においては平成18年の低圧タービン点検で、5号機においては平成19年以降に低圧タービン等で使用を始めた液状パッキンに含まれるシロキサンが揮発することで排ガス再結合器に流入する可能性があることが確認された。

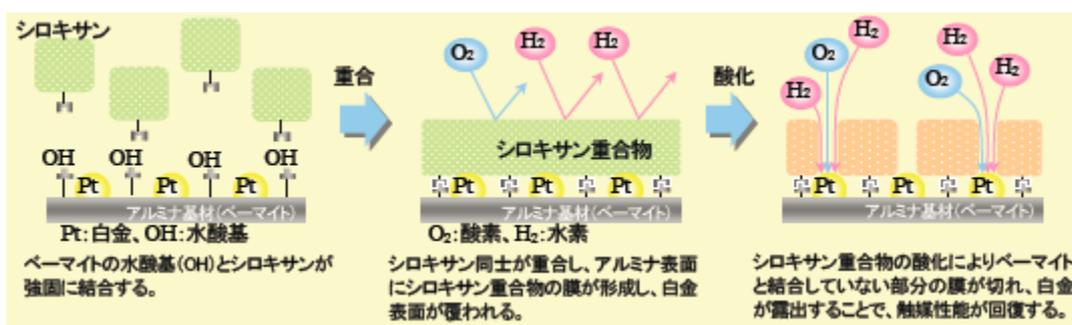
また、ベーマイトが多い触媒ほどシロキサンの影響が大きいことや、触媒の温度が上昇するとシロキサン重合物が酸化し、膜が切れ、白金の活性表面積が増加するため、触媒の性能が回復することも確認された（図（添付1-3）※）。



図（添付1-1） 排ガス再結合器触媒の概略製造工程



図（添付1-2） 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(添付1-3) シロキサンによる触媒表面の変化状況 (イメージ)

※ 図(添付1-1~3)は参照文献(a)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の触媒を比較した表を表(添付1-1)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, 両者共に $\gamma$ アルミナを使用している。

表(添付1-1) PARとOG系排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	$\gamma$ アルミナ	$\gamma$ 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

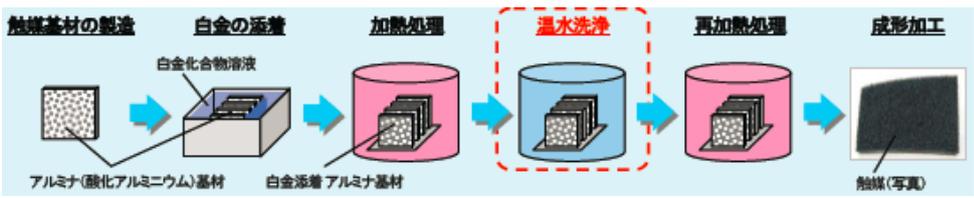
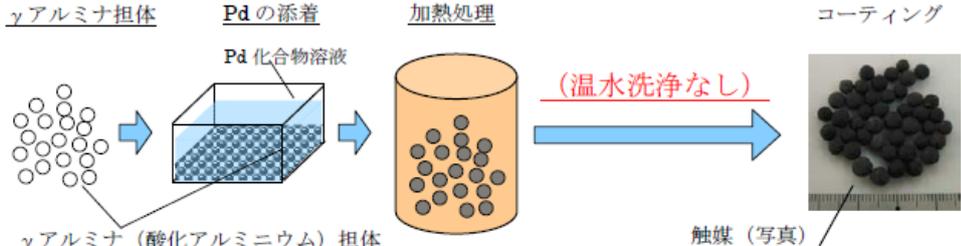
浜岡原子力発電所0G系の水素濃度上昇事象に対する原因調査において、触媒の特性に起因する性能低下として、以下の知見（アルミナのベーマイト化）が得られている。

- ・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0G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(添付1-2)に示す。0G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(添付1-2) 触媒の製造プロセスの比較

触媒	製造プロセス
0G系 排ガス 再結合 器	
PAR	

### (3) 触媒の成分分析

上記(2)に記載した理由から、PAR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、NIS社製PARの触媒に対して①X線回折(XRD)分析、②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、PAR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一つ)の存在が報告されている。現在、シロキサンの使用は原則禁止しているものの、過去に弁や機器等の点検で使用されていることがわかっている。成分分析の結果より、PAR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るが、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いる。

試験は、密閉空間内でPAR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おり、シロキサン曝露有無により水素処理性能に有意な差はなかった。このことからPAR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る。

## 静的触媒式水素再結合器の最高使用温度について

## 1. はじめに

PAR の最高使用温度は 300°C 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、「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、設置許可基準規則）において次のように定義されている。

## 第二条 2 項 三十九

「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は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、原子炉建屋オペレーティングフロアに静的触媒式水素再結合器を設置する。当社としては、原子炉建屋の水素爆発を防止するために、オペレーティングフロアを可燃限界以下に抑えることを設計方針としており、水素濃度を 4% 以下に抑制することが、静的触媒式水素再結合器の主たる機能である。

よって、静的触媒式水素再結合器は、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% 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°C の設定理由

静的触媒式水素再結合器の設置位置はオペレーティングフロアであるため、雰囲気温度よりも再結合反応時の静的触媒式水素再結合器自体の温度が高くなる。静的触媒式水素再結合器の強度計算として、ハウジング、取付ボルトの強度を評価するために、最高使用温度として 300°C を設定している。

最高使用温度 300°C の設定については、Sandia National Laboratory (SNL) における試験（参照文献 (b)）及び OECD/NEA の THAI Project で行われた試験（参照文献 (e), (f), (g)）を参照している。

### 3.1 SNL 試験

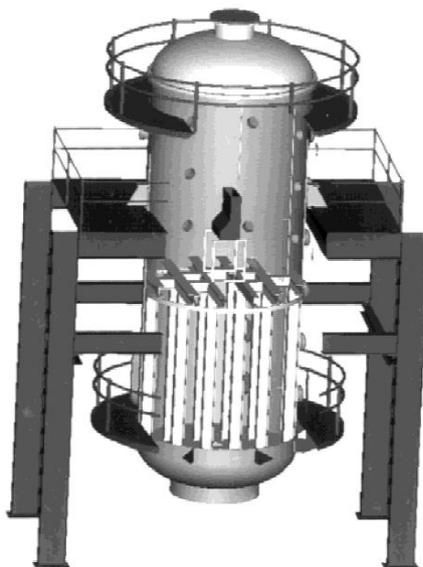
#### (1) 試験概要

NIS 社製 PAR (PAR-11) を用いた SNL 試験の試験装置概要は図(添付 2-1~2), 試験に用いた PAR を図(添付 2-3) に示す。



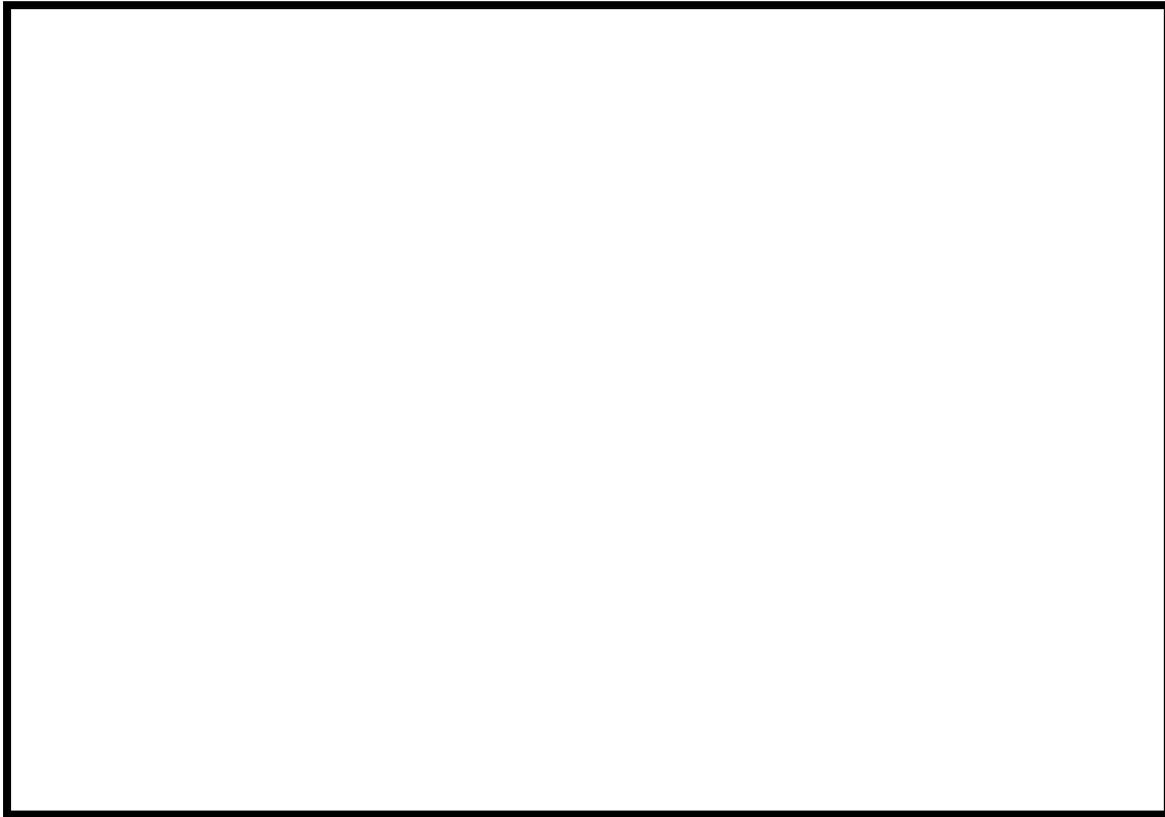
図(添付 2-1) The Surtsey vessel

※参照文献(b)より抜粋



図(添付 2-2) PAR location in the Surtsey vessel

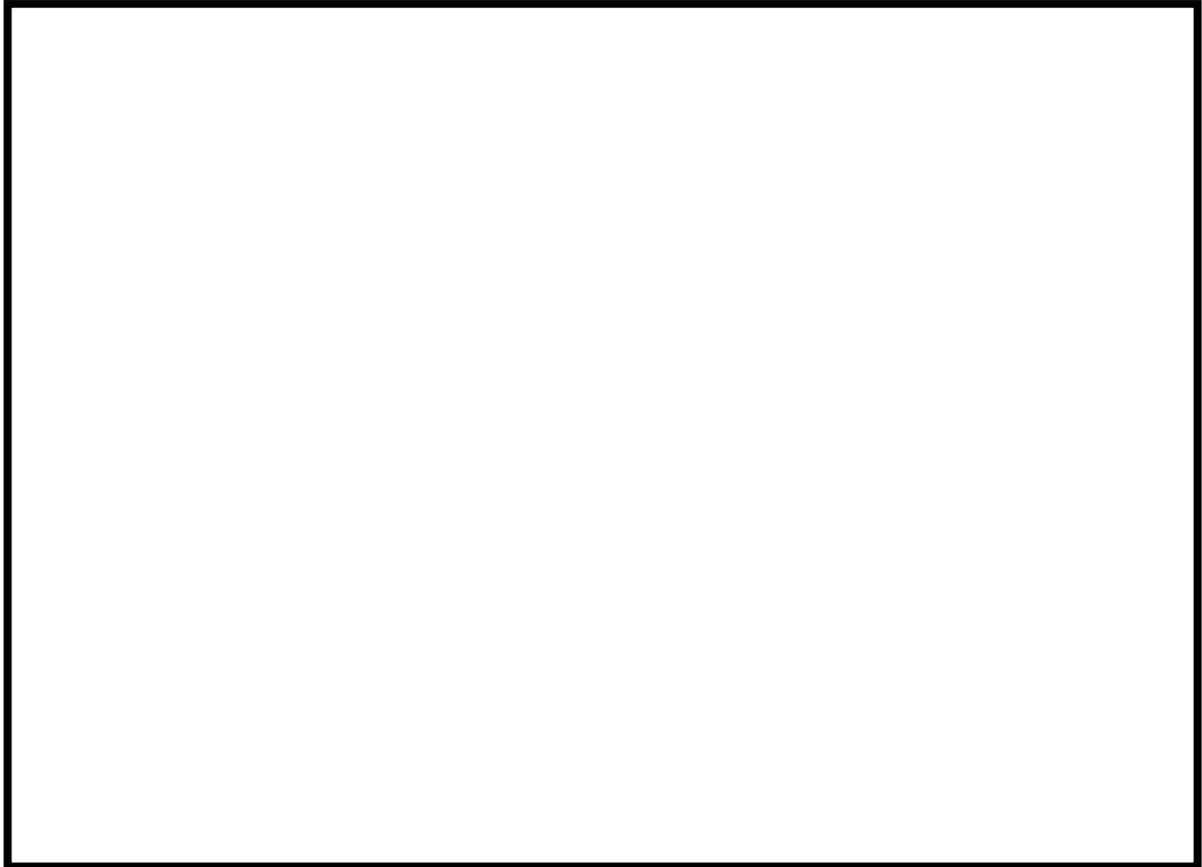
※参照文献(b)より抜粋



図(添付 2-3) SNL で行われた試験用 PAR 概要

(2) 試験結果と最高使用温度 300℃の妥当性

本試験は、試験装置の水素濃度と PAR 出入口の温度差  $\Delta T$  の関係を示している。この結果を参照すると、水素濃度 4%のときの PAR 出入口の温度差は約 160℃であることが確認できる。これを目安として、当社のオペレーティングフロアの雰囲気最大を 100℃と想定したとしても、水素濃度 4%時の PAR 出口温度は 260℃である。これらの結果と、ハウジング及び取付ボルトの位置を踏まえ、最高使用温度として 300℃と設定することは妥当と考えている。



図(添付 2-4) 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 試験装置を図(添付 2-5), 試験に使用された PAR を図(添付 2-6), 試験条件を表(添付 2-1)に示す。

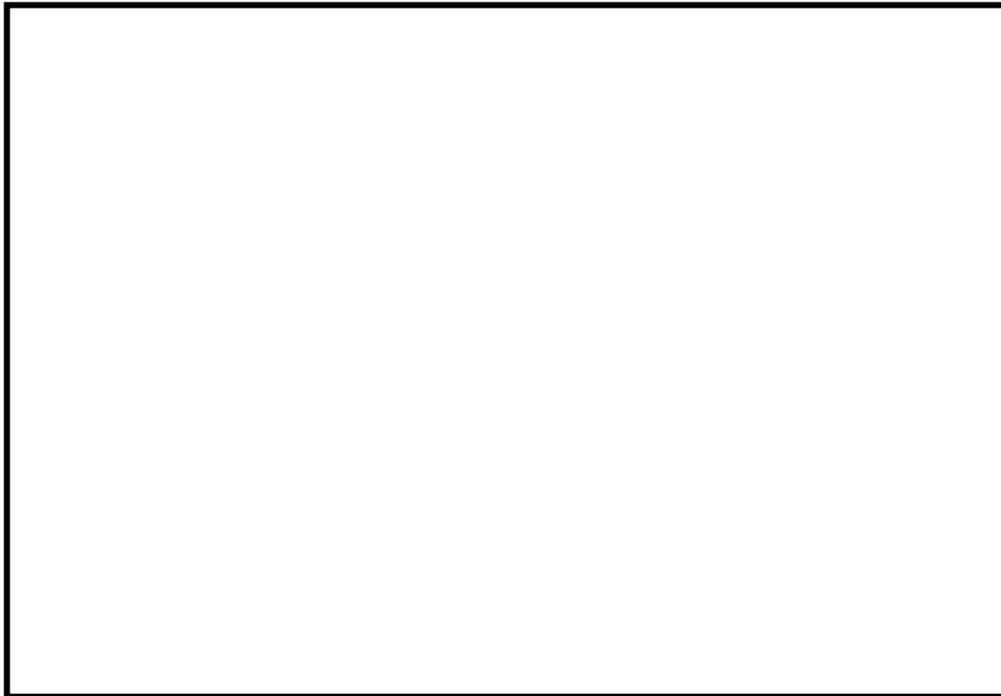
表(添付 2-1) : THAI Project での試験条件

試験番号	圧力	温度	水蒸気濃度	酸素濃度	水素注入速度



図(添付 2-5) THAI 試験装置

※参照文献(e)より抜粋

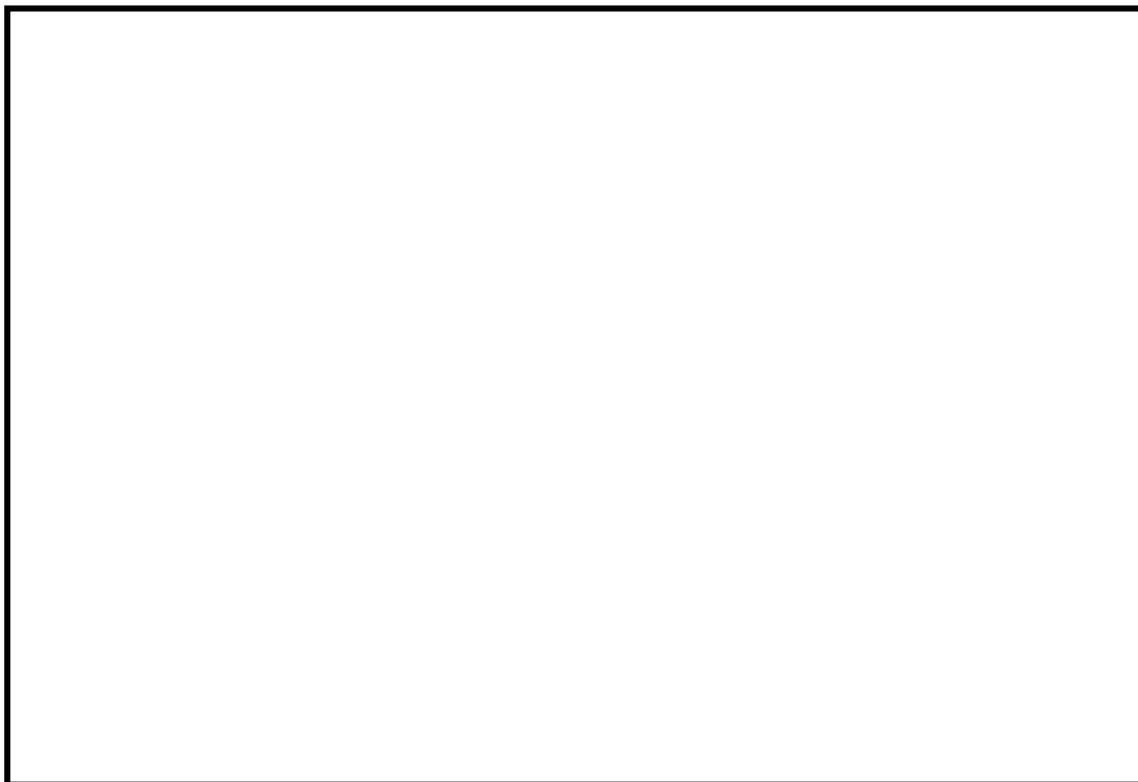


図(添付 2-6) 試験に使用した NIS PAR

※参照文献(e)より抜粋

(2) 試験結果と最高使用温度 300℃の妥当性

水素濃度一定状態での PAR 内部温度，ガス温度の時系列変化が THAI 試験 (HR-15) にて得られている。試験結果を図(添付 2-7)に示す。

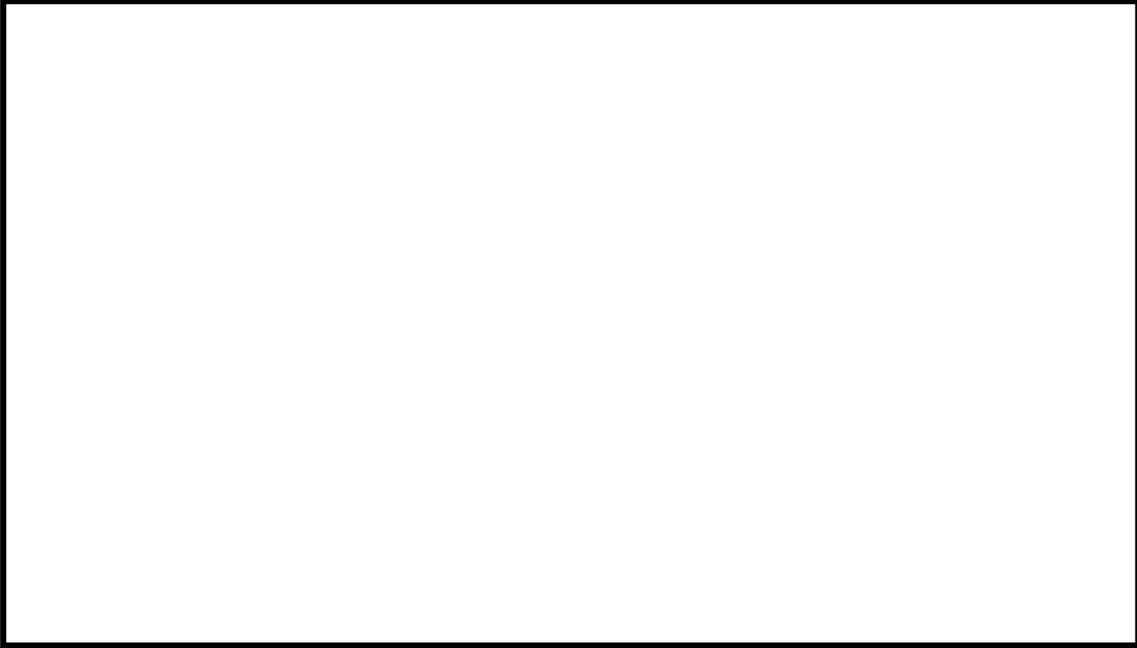


図(添付 2-7) HR-15 PAR 内部温度，ガス温度の時系列変化

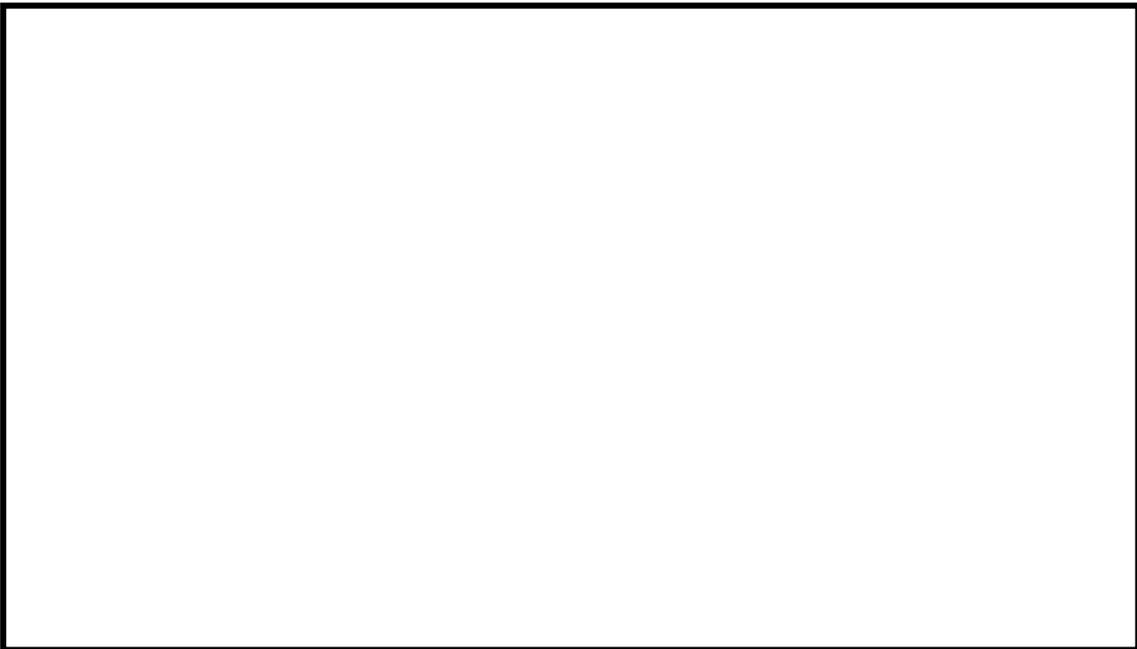
※参考文献(e)より抜粋

図(添付 2-7)において 115～130 分頃の時間帯で水素濃度を一定に保っているが，このとき PAR 内部温度，ガス温度は数分程度の時間遅れはあるものの，ほぼ一定値に保たれていることがわかる。また，水素濃度上昇時に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，水素濃度低下時には反応熱は低下するが，各部の放熱速度などの影響により温度低下は遅れる傾向にあることが確認できる。

次に，直接，筐体の温度を計測している THAI 試験結果 (HR-40) を図(添付 2-8)，図(添付 2-9)に示す。図(添付 2-8)が水素注入量と水素濃度の時系列，図(添付 2-9)が筐体温度の時系列をあらわしている。



図(添付 2-8) HR-40 水素注入量と水素濃度の時系列  
※参考文献(g)より抜粋



図(添付 2-9) HR-40 筐体温度の時系列  
※参考文献(g)より抜粋

図より、106分から126分までの約20分間は、水素濃度は常時4%を超えているが、126分時点での水素濃度低下時の水素濃度4%における筐体温度は約295℃であり、最高使用温度300℃に対して低い値である。よって、HR-15及びHR-40の試験結果を踏まえると、水素濃度4%一定状態での筐体温度は295℃よりも低いと考えられる。また、本試験においてはPAR入口温度が柏崎刈羽原子力発電所のオペフロ環境条件である100℃よりも高い(\*1)ことも考慮すると、最高使用温度が保守的であることが確認できる。

\*1：126分時のPAR入口温度



## PAR 製作誤差による処理能力への影響

PAR は水素と酸素が触媒効果により再結合して水素処理する構造であるため、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。PAR の水素処理能力は、開発段階から様々な試験によって確認されているが、現在の PAR 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。従って、表(添付 3-1)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能力は確保できると考える。

表(添付 3-1) PAR 製造上の確認項目

性能因子	確認項目	確認方法
接触面積	触媒カートリッジの寸法, 配置	・カートリッジ寸法, 配置が設計通りであることを確認（*）
	触媒に接触する実効的な流路長さ	・封入される触媒重量の確認 ・外観上, 触媒粒がカートリッジ満杯であることを確認
触媒性能	触媒の品質管理	・封入される触媒の粒径, 触媒表面積の確認
流量	ハウジング形状	・ハウジング形状が設計通りであることを確認

\* : PAR の開発時から、触媒カートリッジの高さ及び、触媒カートリッジの間隔は変更していない。

表(添付 3-1)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(添付 3-2) PAR 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	
2	触媒カートリッ ジ	外観	
		総触媒重量 (1 枚)	

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している。

## PAR 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PAR性能の維持管理を行うことが可能である。

## (1) PARの性能確保に必要な確認項目

PARの水素処理性能は、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PAR性能を維持管理できると考える。表(添付4-1)にPARの性能確保に必要な確認項目と確認方法を示す。

表(添付4-1) PARの性能確保に必要な確認項目

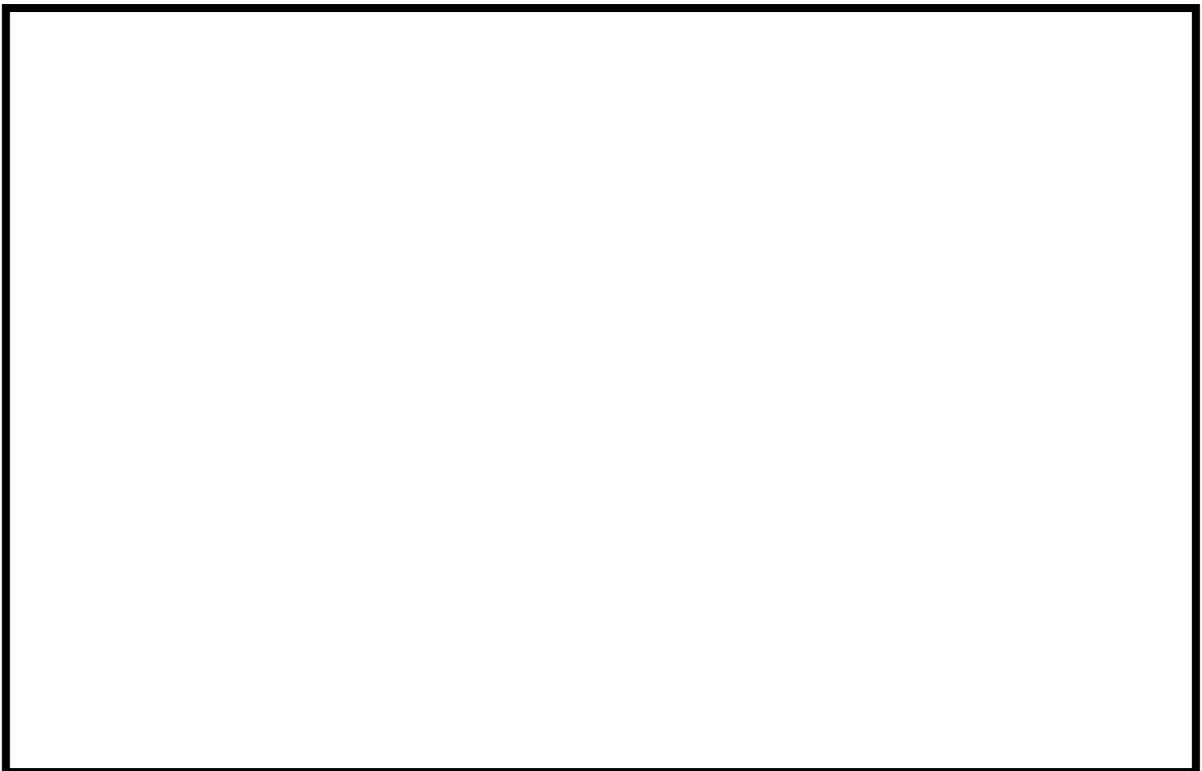
性能因子	確認項目	確認方法
接触面積	触媒カートリッジの寸法, 配置	・カートリッジ寸法, 配置が設計通りであることを確認
	触媒に接触する実効的な流路長さ	・封入される触媒重量の確認 ・外観上, 触媒粒がカートリッジ満杯であることを確認
触媒性能	・触媒製造時の品質管理 ・触媒の劣化	・封入される触媒の粒径, 触媒表面積の確認 ・検査装置による水素処理機能検査
流量	ハウジング形状	・ハウジング形状が設計通りであることを確認

## (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(添付 4-1), 系統概略図を図(添付 4-2)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°C/20 分もしくは 20°C/30 分) を計測することで, 性能低下の有無を確認する。



図(添付 4-1) 検査装置外観



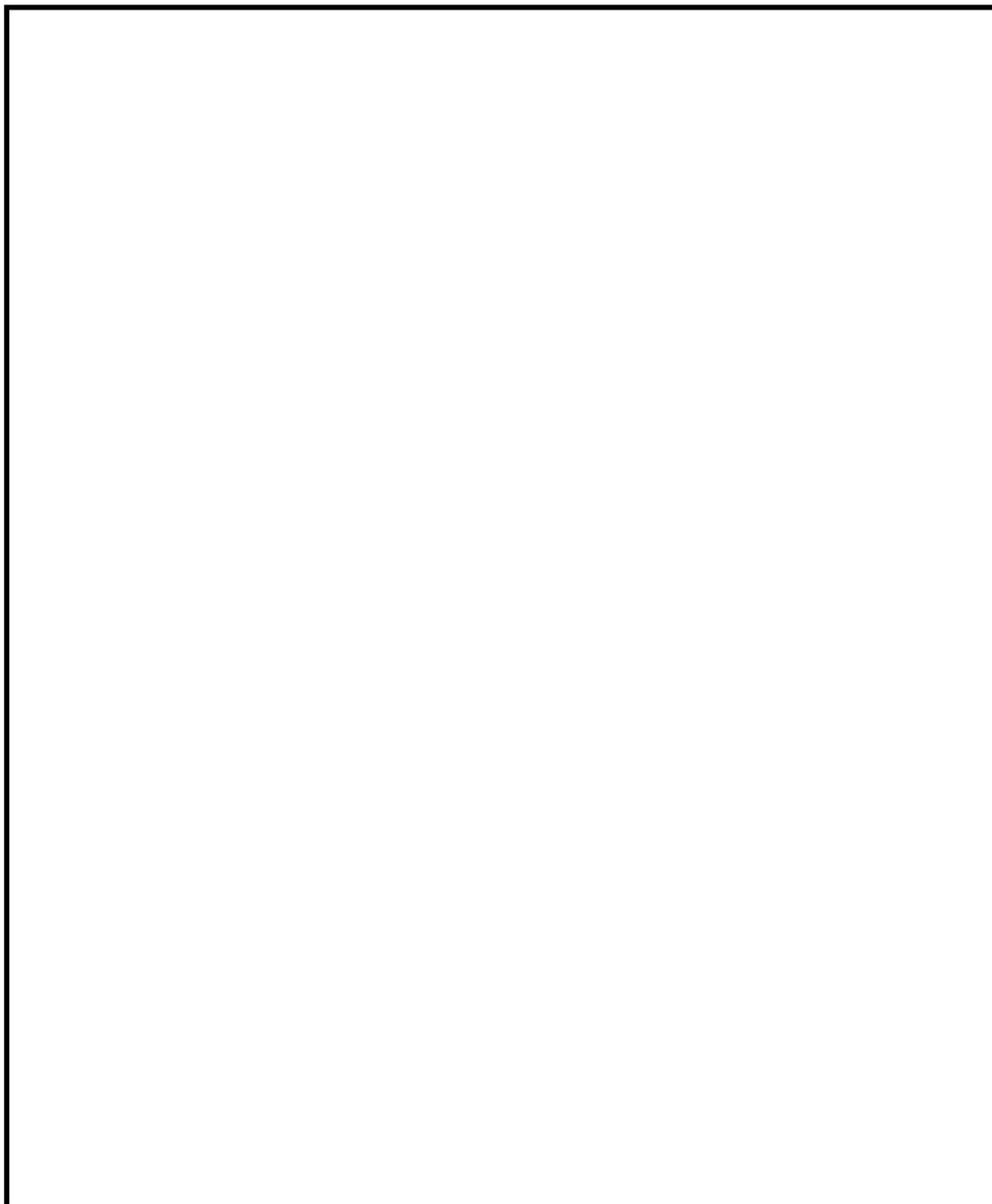
図(添付 4-2) 検査装置系統概略図

### 2.2.2 静的触媒式水素再結合器の効果について

2.2.1 に基づき設置した PAR の効果について、7 号炉を代表に解析コードを用いて確認した結果を示す。

#### 2.2.2.1 解析コード，解析モデル

解析コードは，汎用熱流動解析コード GOTHIC (Ver. 7. 2a) を使用する。



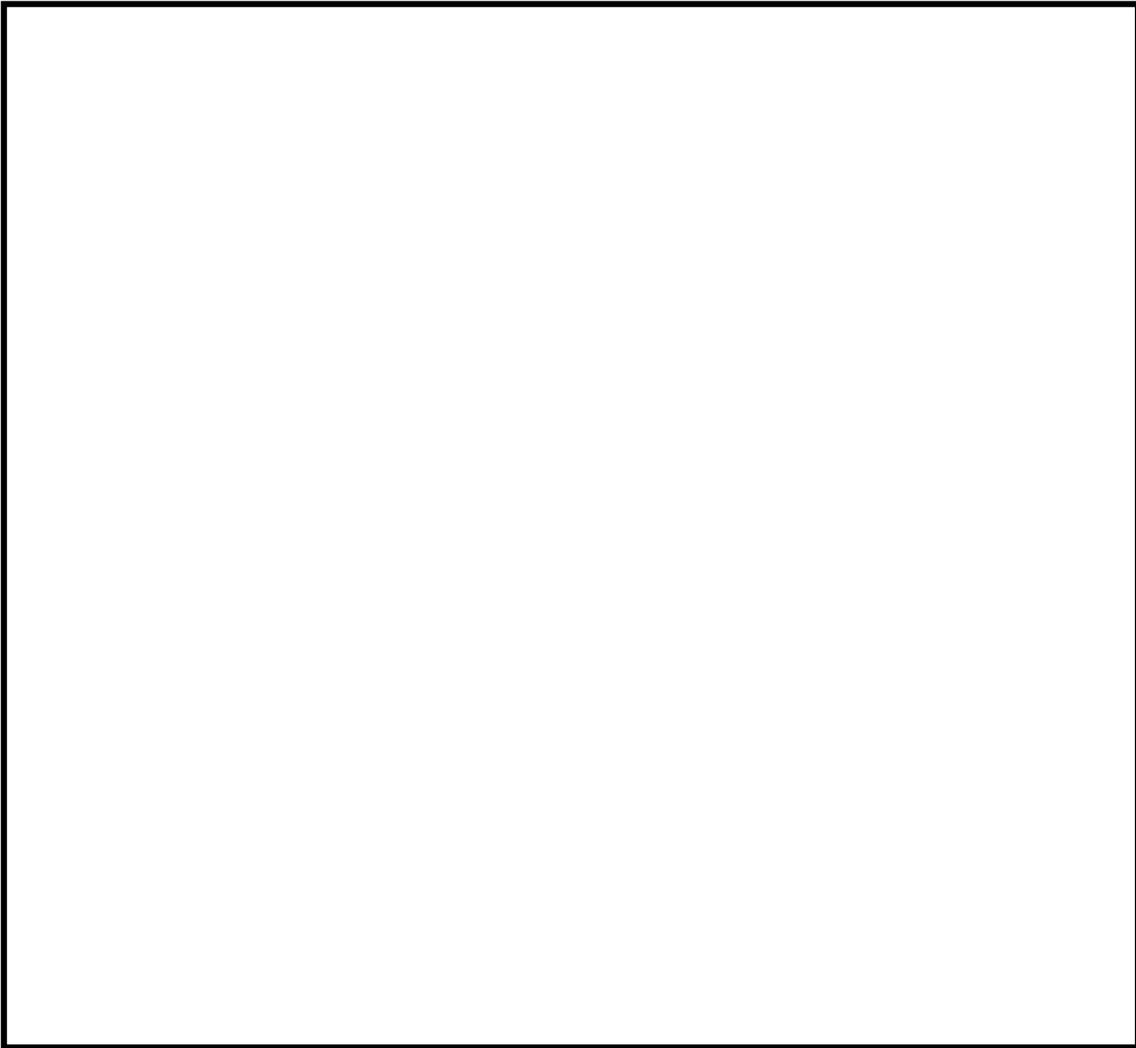


図 2-13 7号炉原子炉建屋の GOTHIC 解析モデル

表 2-6 格納容器内ガス漏えい想定箇所

漏えいフロア	漏えい箇所
4階	トップヘッドフランジ
2階	上部ドライウェル機器搬入用ハッチ
	上部ドライウェル所員用エアロック
	ISI 用ハッチ
地下1階	S/C 出入口
地下2階	下部ドライウェル機器搬入用ハッチ
	下部ドライウェル所員用エアロック



図 2-14 7号炉オペレーティングフロアのサブボリューム分割イメージ

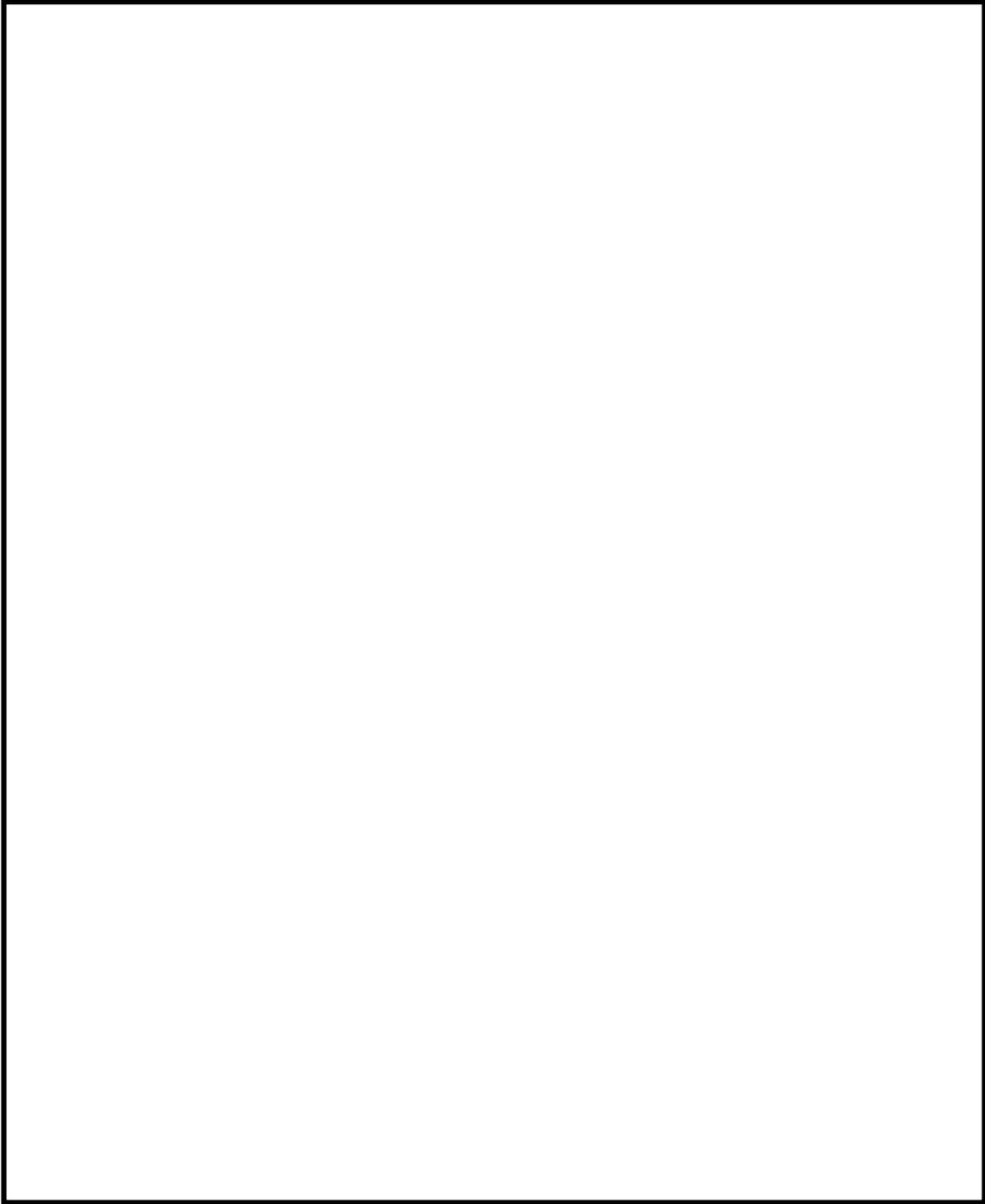


図 2-15 7号炉 PAR 設置サブボリューム番号と PAR 入口・出口の関係

## 2.2.2.2 解析条件

### (1) PCV 漏えい条件

PCV から原子炉建屋への漏えい条件として、「①有効性評価代表シナリオ包絡条件」、「②設計条件」、「③循環冷却シナリオ包絡条件」のいずれかを用いる。

#### ① 有効性評価代表シナリオ包絡条件

PCV からの漏えい条件を表 2-7 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、格納容器破損防止対策の有効性評価（ベント時刻変更後）の MAAP 解析結果である図 2-16、図 2-17、図 2-18（図中でのベント時刻の包絡条件は 48 時間）から決定した。

圧力は、PCV ベント想定時刻（38 時間）までは格納容器限界圧力（620kPa[g]）、PCV ベント想定以降は、格納容器最高使用圧力×0.5（155kPa[g]）を想定する。

温度は、PCV ベント想定時刻までは、格納容器限界温度（200℃）、PCV ベント想定時刻以降は、格納容器最高使用温度（171℃）を想定する。

ガス組成について、PCV ベント想定時刻までは、保守的に②設計条件と同じとし、PCV ベント想定時刻以降は、PCV 内は全て蒸気と仮定し、蒸気のみ漏えいが継続するものとする。

PCV ベント想定時刻までの格納容器漏えい率は、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、マージンを加えて 1.5%/day とする。PCV ベント想定時刻以降は、AEC の式より算出した 0.5%/day とする。

#### ② 設計条件

PCV からの漏えい条件を表 2-8 に示す。PCV ベントは想定せず、また、PCV 漏えい率 10%/day が一定で漏えいする保守的な条件を設定する。

#### ③ 循環冷却シナリオ包絡条件

PCV からの漏えい条件を表 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、格納容器破損防止対策の有効性評価シナリオに対して代替循環冷却ラインを用いた

除熱を考慮した場合の MAAP 解析結果である図 2-19, 図 2-20, 図 2-21, 図 2-22 から決定した。

圧力は, 24 時間までは格納容器限界圧力 (620kPa[g]) とし, その後は段階的に 465kPa[g], 格納容器最高使用圧力 310kPa[g] と低下することを想定する。

温度は, 84 時間までは格納容器限界温度 (200℃) とし, その後は格納容器最高使用温度 (171℃) に低下することを想定する。

ガス組成については, 水素濃度を MAAP 結果包絡値で一定とし, 窒素濃度を事象発生前の全量が PCV 内に残っていると仮定して算出し, 残りを全て水蒸気とする。

格納容器漏えい率は, 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を包絡する値である 1.5%/day (0~24 時間), 1.0%/day (24~84 時間), 0.75%/day (84 時間以降) とする。

## (2) 漏えい箇所

漏えい箇所として, 4 階 (オペレーティングフロア) のみから漏えいする条件と, 4 階, 2 階, 地下 1 階, 地下 2 階の各フロアから表 2-10 に示す割合で漏えいする条件の 2 条件とする。表 2-10 で示す割合とは, リークポテンシャルであるフランジ部, エアロックの開口部周長の割合を示している。これら 2 条件の全漏えい量は同じとする。

表 2-7 PCV からの漏えい条件 (有効性評価代表シナリオ包絡条件)

項目	解析条件	
	ベント想定時刻(38h)まで	ベント想定時刻以降
圧力	620 kPa[g] (2 Pd)	155 kPa[g] (0.5 Pd)
温度	200 °C	171 °C
水蒸気分率	46 %	100 %
水素分率	33 %	0 %
窒素分率	21 %	0 %
格納容器漏えい率	1.5 %/day (1.0 %/day)	0.5 %/day (0.5 %/day)

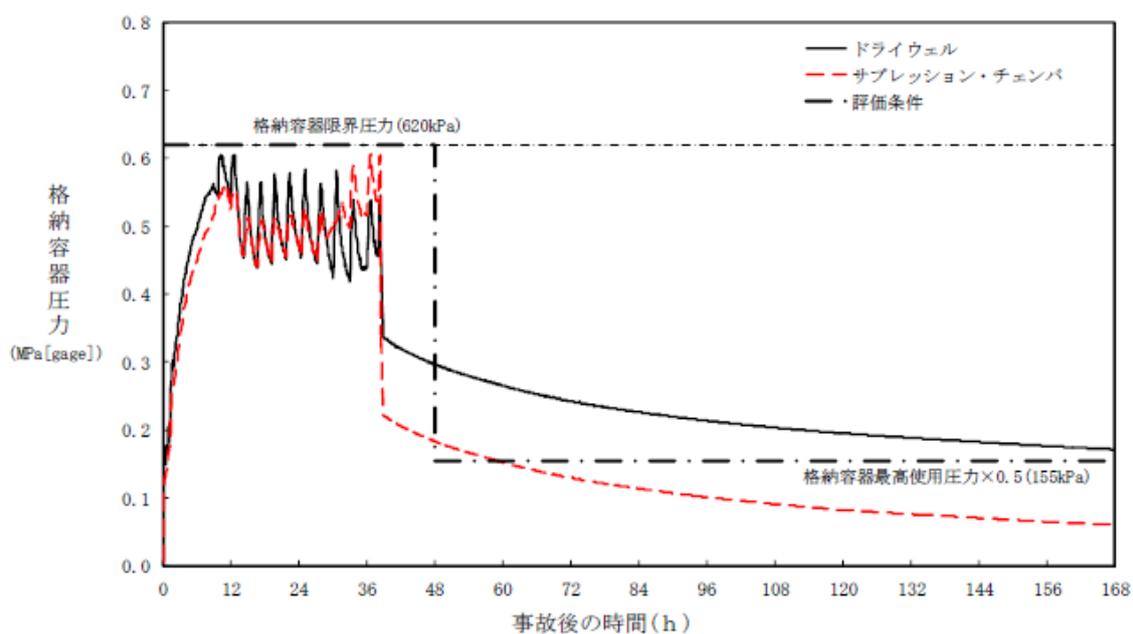


図 2-16 PCV 圧力 (格納容器過圧・過温シナリオ)

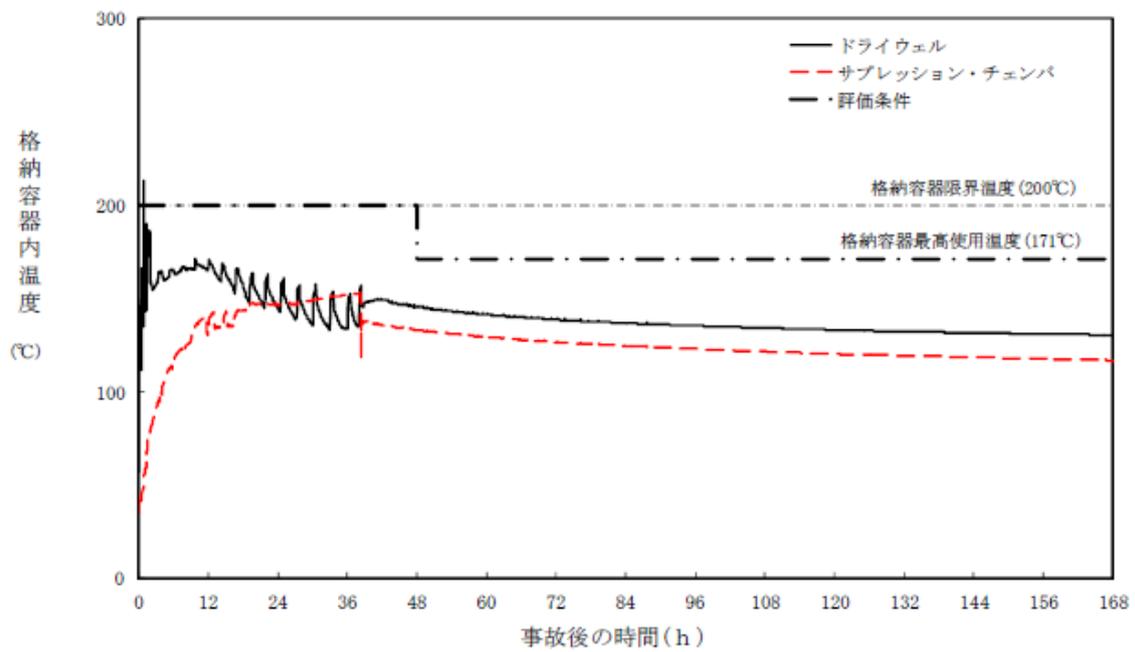


図 2-17 PCV 温度 (格納容器過圧・過温シナリオ)

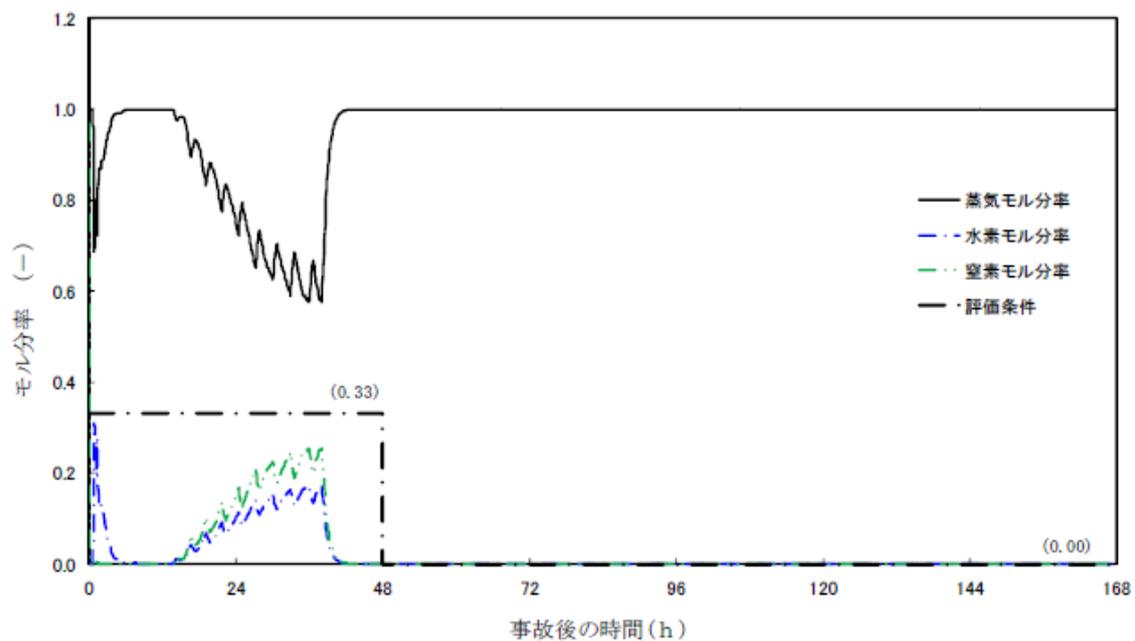


図 2-18 PCV ガス組成 (格納容器過圧・過温シナリオ)

表 2-8 PCV からの漏えい条件（設計条件）

項目	解析条件
圧力	620 kPa[g] (2 Pd)
温度	200 °C
水蒸気分率	46 %
水素分率	33 %
窒素分率	21 %
格納容器漏えい率	10 %/day

表 2-9 PCV からの漏えい条件（循環冷却シナリオ包絡条件）

項目	D/W			S/C		
	0~24h	24~84h	84~168h	0~24h	24~84h	84~168h
圧力	620 kPa[g] (2 Pd)	465 kPa[g] (1.5 Pd)	310 kPa[g] (1 Pd)	620 kPa[g] (2 Pd)	465 kPa[g] (1.5 Pd)	310 kPa[g] (1 Pd)
温度	200 °C		171 °C	200 °C		171 °C
水蒸気分率	46 %	41 %	33 %	40 %	35 %	27 %
水素分率	33 %			39 %		
窒素分率	21 %	26 %	34 %	21 %	26 %	34 %
格納容器 漏えい率	1.5%/day	1.0%/day	0.75%/day	1.5%/day	1.0%/day	0.75%/day
備考	4 階、2 階の漏えい条件			地下 1 階、地下 2 階の漏えい条件		

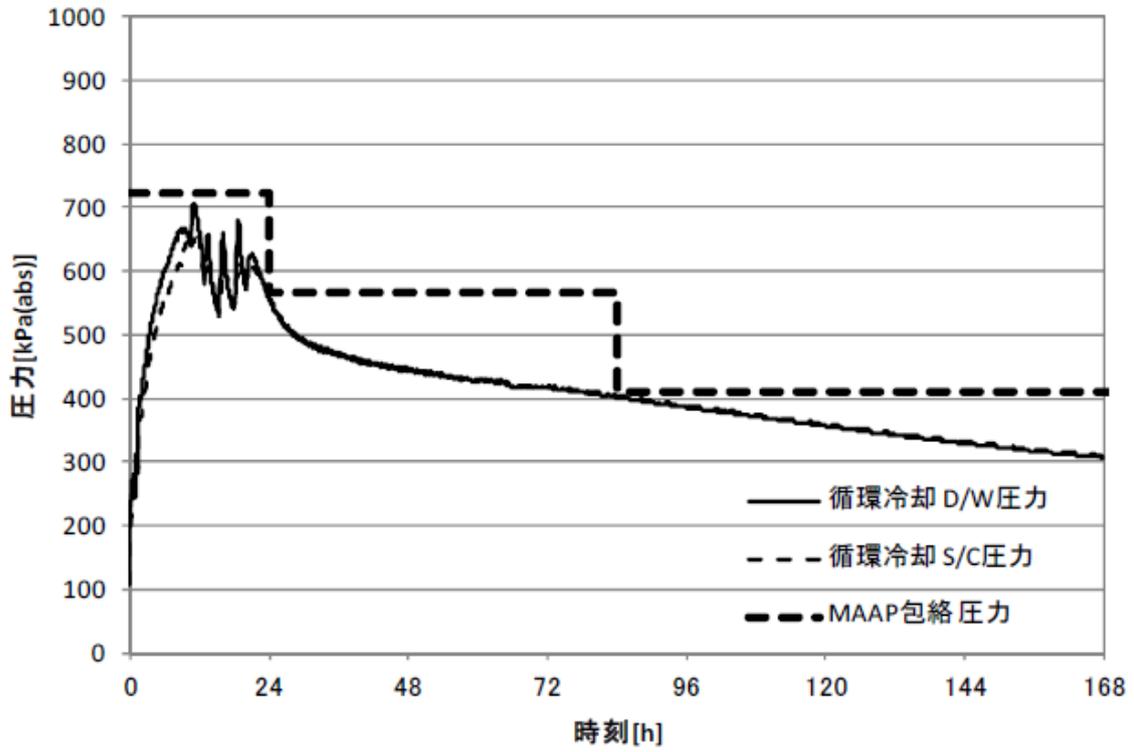


図 2-19 PCV 圧力 (循環冷却シナリオ)

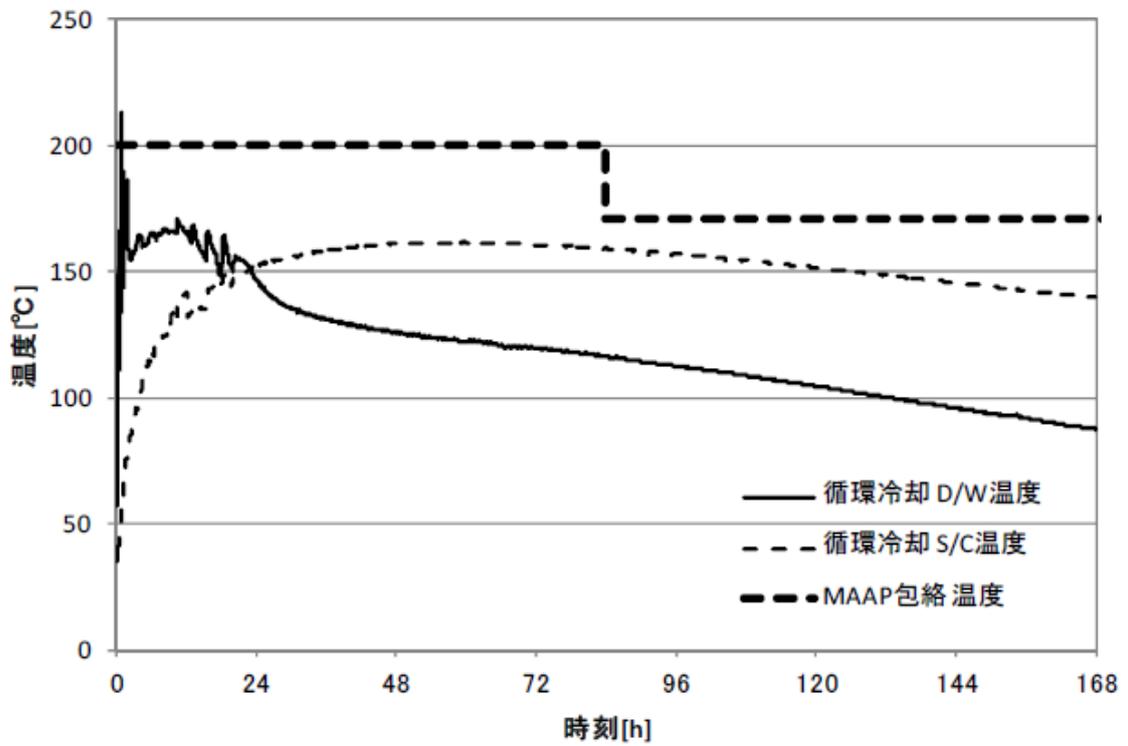


図 2-20 PCV 温度 (循環冷却シナリオ)

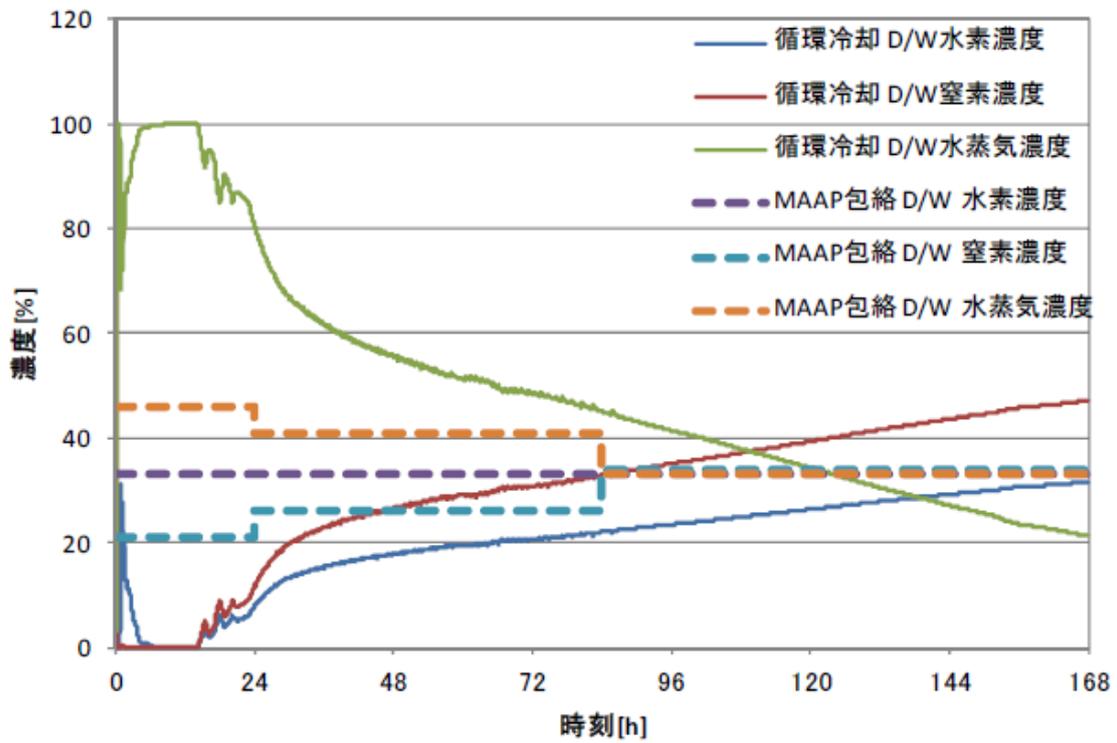


図 2-21 PCV (D/W) ガス組成 (循環冷却シナリオ)

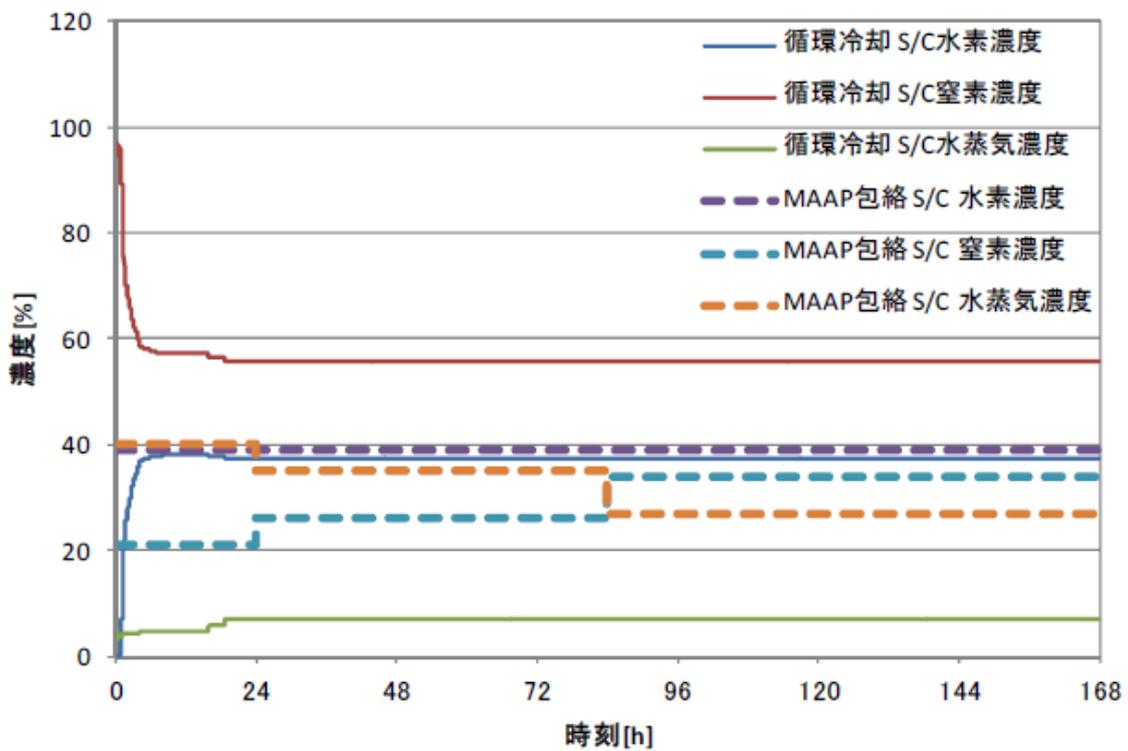


図 2-22 PCV (S/C) ガス組成 (循環冷却シナリオ)

表 2-10 水素漏えい量の分配条件

漏えいフロア	漏えい箇所	口径[mm]	周長[mm]※1	周長割合※2	漏えい量割合※3
4F	PCV 主フランジ				
2F	所員用エアロック				
	ISI 用ハッチ				
	機器搬入用ハッチ				
B1F	S/C 出入口				
B2F	機器搬入用ハッチ				
	所員用エアロック				

※1 所員用エアロックの周長は、エアロック扉内側の矩形部分の周長とする。その他は、漏えい箇所の口径[mm]から周長[mm]（口径[mm]×円周率）を算出する。

※2 周長割合=漏えい箇所の周長/各漏えい箇所の周長合計値。

※3 各フロアの周長割合合計値を各フロアの漏えい量割合とする。「MAAP 包絡」の漏えい量に漏えい量割合の数値を乗じた値を各フロアの漏えい量とする。

### (3) PAR 解析条件

PAR の解析条件を表 2-11 に纏める。

表 2-11 PAR の解析条件

No	項目	説明	入力値
1	PAR の性能 (NIS 製 PAR-11) (1) 水素処理容量 DR	$DR = A \times \left( \frac{C_{H_2}}{100} \right)^{1.307} \times \frac{P}{T} \times 3600 \times SF$ DR : 水素処理容量 (kg/h/個) A : 定数 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> CH <sub>2</sub> : PAR 入口水素濃度 (vol%) P : 圧力 (10 <sup>-5</sup> Pa) T : 温度 (K) SF : スケールファクター	—
	(2) 反応阻害 ファクター F <sub>inhibit</sub>	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)
	(3) 低酸素 ファクター F <sub>lowO2</sub>	低酸素ファクターは以下の通りとする。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。  $F_{lowO_2} = 0.7421 \left( \frac{C_{O_2}}{C_{H_2}} \right)^3 - 0.6090 \left( \frac{C_{O_2}}{C_{H_2}} \right)^2 + 0.7046 \left( \frac{C_{O_2}}{C_{H_2}} \right) - 0.026$ CO <sub>2</sub> : 酸素濃度 (%)	—
	(4) 起動水素濃度 CH <sub>2on</sub>	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 1.5%※とする。感度解析のため 1.0%の条件でも実施する。	1.5% または 1.0%
	(5) 起動酸素濃度 CO <sub>2on</sub>	同上	2.5%
	(6) 起動遅れ	考慮しない	—
2	PAR 個数 (1 ノード)	56 個 : 実際の設置個数	56 個
3	PAR 設置位置	サブボリューム分割モデルに使用。 PAR 取付位置図より該当するノード内に設置する。	—

※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 1.5%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るれば、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ゆくため、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量への影響は小さい。

(4) その他解析条件

表 2-12 に原子炉建屋の条件, 圧力境界条件, 流出条件, 及び放熱条件を示す。

表 2-12 解析条件

No	項目	解析条件	備考
1	原子炉建屋の条件 (1) 圧力 (初期条件)  (2) 温度 (初期条件)  (3) 組成 (初期条件)  (4) 空間容積 (固定)  (5) ハッチ開口面積 (固定)	大気圧条件  40℃  相対湿度 70%の空気  4 階 : 36100m <sup>3</sup> 3 階 : 3400m <sup>3</sup> 2 階 : 2200m <sup>3</sup> 1 階 : 3900m <sup>3</sup> 地下 1 階 : 1200m <sup>3</sup> 地下 2 階 : 7100m <sup>3</sup> 地下 3 階 : 6100m <sup>3</sup>  4 階-3 階 : 44.5m <sup>2</sup> 3 階-2 階 : 60.6m <sup>2</sup> 2 階-1 階 : 57.5m <sup>2</sup> 1 階-地下 1 階 : 11.02m <sup>2</sup> 地下 1 階-地下 2 階 : 7.25m <sup>2</sup> 地下 2 階-地下 3 階 : 4.05m <sup>2</sup>	オペレーティングフロア (4 階) の容積は, 低減率 0.85 とする。(躯体分, 機器配管分を差し引いた値)  オペレーティングフロア以外の容積は, 二次格納施設内の区画の床面積×高さにより算出  原子炉建屋のハッチ寸法より算出
2	圧力境界条件 (1) 圧力 (固定) (2) 温度 (固定) (3) 酸素濃度 (固定) (4) 窒素濃度 (固定)	101.325kPa 40℃ 21% 79%	大気圧  乾燥空気の組成 同上
3	流出条件 (1) 位置	4 階	原子炉建屋の気密性を考慮し設定
4	放熱条件 (1) 内壁熱伝達率 (原子炉建屋燃料取替床-壁面) (2) 壁厚さ (固定)  (3) 壁内熱伝導率 (固定) (4) 壁の比熱 (固定) (5) 壁の密度 (固定) (6) 外壁熱伝達率 (壁面-外気)  (7) 外気温 (固定) (8) 放熱面積 (固定)	凝縮熱伝達及び自然対流熱伝達を考慮  下部壁 : □ mm 上部壁 : □ mm 天井 : □ mm  1.5W/m/K 1kJ/kg/K 2400kg/m <sup>3</sup> 5W/m <sup>2</sup> /K  40℃ 下部壁 : 514.8m <sup>2</sup> 上部壁 : 2281.6m <sup>2</sup> 天井 : 2360.16m <sup>2</sup>	コンクリートの物性 同上 同上 原子炉建屋の外壁面における自然対流熱伝達率を想定

### 2.2.2.3 解析結果

2.2.2.2 で示した解析条件の組み合わせから、表 2-13 に示す 4 ケースを選定し、解析を行った。なお、ケース 1 については、感度解析として PAR 反応開始水素濃度を 1.0%とした場合の解析も実施した。

表 2-13 解析ケース

	ケース 1 (漏えい箇所としてオペフロのみを想定)	ケース 2 (漏えい箇所としてオペフロと下層階を想定)	ケース 3 設計裕度の確認	ケース 4 代替循環冷却ライン使用時の影響確認
モデル	原子炉建屋 全階を模擬したモデル			
シナリオ	有効性評価シナリオ (PCV 過圧・過温)		シナリオレス (保守的評価)	循環冷却シナリオ (PCV 過圧・過温)
漏えい箇所	オペフロのみ	オペフロ+下層階	オペフロのみ	オペフロ+下層階
格納容器漏えい率	1.5%/day (AEC 式:約 1.0%)	1.5%/day (AEC 式:約 1.0%)	10%/day	1.5%/day
PAR 反応開始濃度	1.0% & 1.5%	1.5%	1.5%	1.5%

これらの解析ケースは以下の観点で選定を行った。

ケース 1 : 2.2.1.1 において PAR の設計における必要条件とした格納容器過圧・過温破損シナリオにおいて、オペレーティングフロアの水素濃度を可燃限界未満に抑制できることを確認する。

ケース 2 : ケース 1 と同様のシナリオにおいて、オペレーティングフロアのみ PAR を設置することが妥当であることを確認する。

ケース 3 : ケース 1・2 のシナリオを超え、PAR の設計条件に相当する水素発生量・格納容器漏えい率となった場合には、格納容器からの異常な漏えいが発生している状態であることから、格納容器ベントを実施することが基本的な戦略となる。このような対応を行うための十分な時間を確保できることを確認する。

ケース 4 : 新たに導入を決定した代替循環冷却ライン使用時の原子炉建屋水素濃度に対する影響を確認する。

(1) ケース 1-1

有効性評価代表シナリオ（格納容器過圧・過温シナリオ）における PAR の効果を確認するため、漏えい箇所をオペレーティングフロア（4階）のみとして、より多くの水素が PAR 設置エリアに直接到達する条件とした場合の水素濃度の時間変化を評価した。解析結果を図 2-23、図 2-24 に示す。

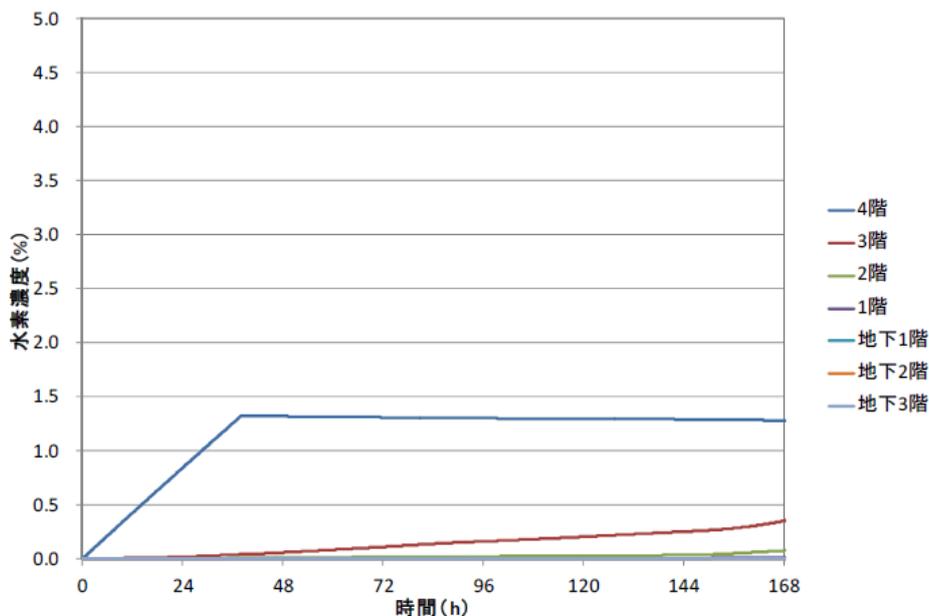


図 2-23 ケース 1-1 水素濃度の時間変化（原子炉建屋全域）

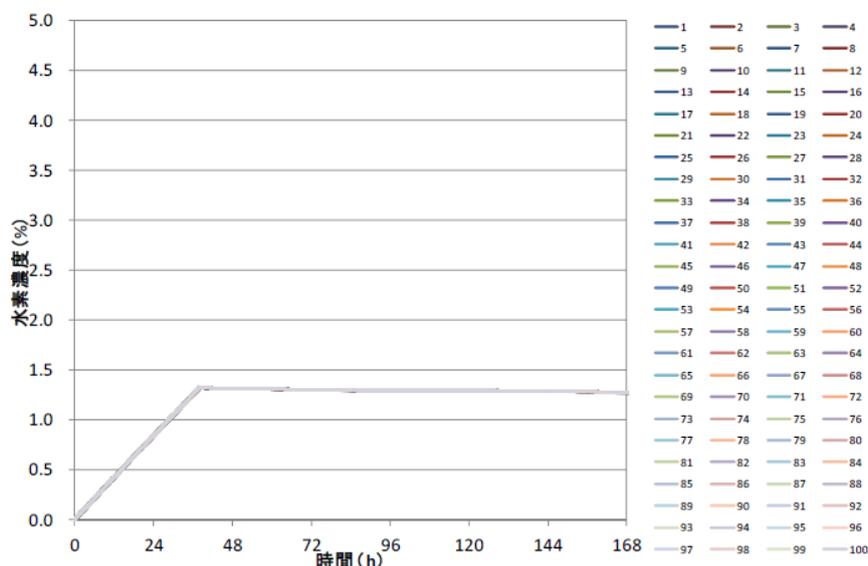


図 2-24 ケース 1-1 水素濃度の時間変化（オペレーティングフロア）  
（サブボリューム別）

本ケースにおいては、水素濃度が PAR 反応開始濃度に到達する前に PCV ベント時刻となったため、PAR が起動しないまま事象収束となった。

(2) ケース 1-2

ケース 1-1 において PAR が起動しなかったことから、感度解析として PAR 反応開始水素濃度を 1.0%に変更して、水素濃度の時間変化を評価した。解析結果を図 2-25, 図 2-26 に示す。

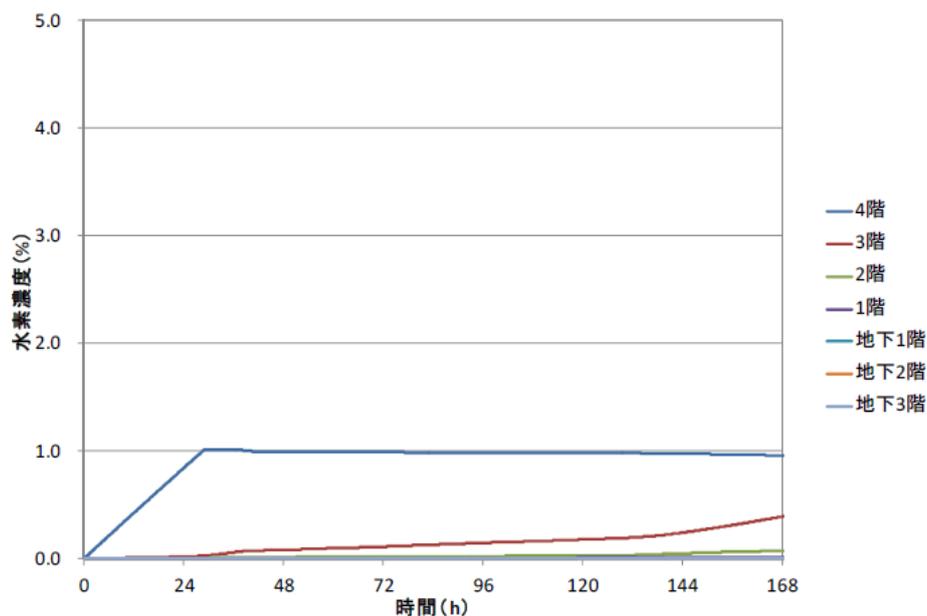


図 2-25 ケース 1-2 水素濃度の時間変化 (原子炉建屋全域)

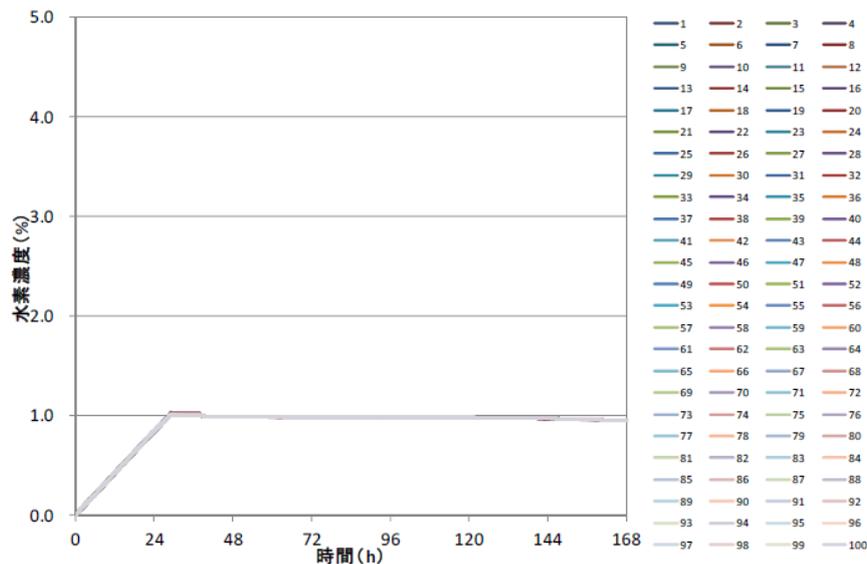


図 2-26 ケース 1-2 水素濃度の時間変化 (オペレーティングフロア)  
(サブボリューム別)

本ケースにおいては、水素濃度が 1.0%に到達した時点で PAR による水素処理が開始されることにより、原子炉建屋内の水素濃度上昇が抑制され、可燃限界に至ることなく事象収束することを確認できた。



なお、本解析においてはオペレーティングフロア以外の階を1ノードとして設定しているが、下層階の小部屋にて水素漏えいが発生した場合においても、当該区画は通路部またはオペレーティングフロアとダクト等にて繋がっていることを確認しており、時間遅れは発生しうるものの、本解析と同様の挙動を示すものと考える。

(4) ケース 3

設計裕度の確認を行うため、有効性評価シナリオに対して十分保守的に設定した仮想的な条件である PAR 設計値（水素発生量 AFC100%相当及び格納容器漏えい率 10%/day）を用いて評価した水素が全量 PAR 設置エリアであるオペレーティングフロア（4階）のみから漏えいするとして、水素濃度の時間変化を評価した。解析結果を図 2-29、図 2-30 に示す。

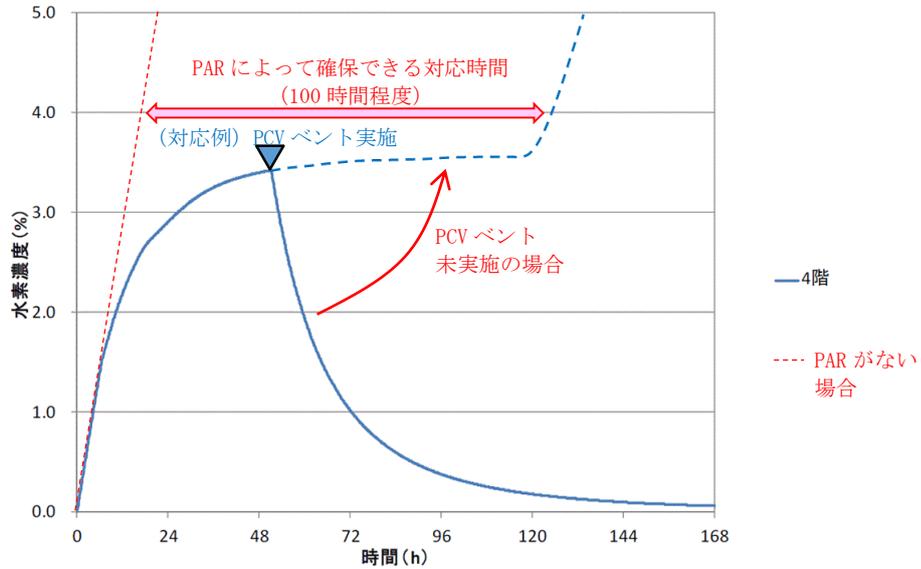


図 2-29 ケース 3 水素濃度の時間変化（オペレーティングフロア）

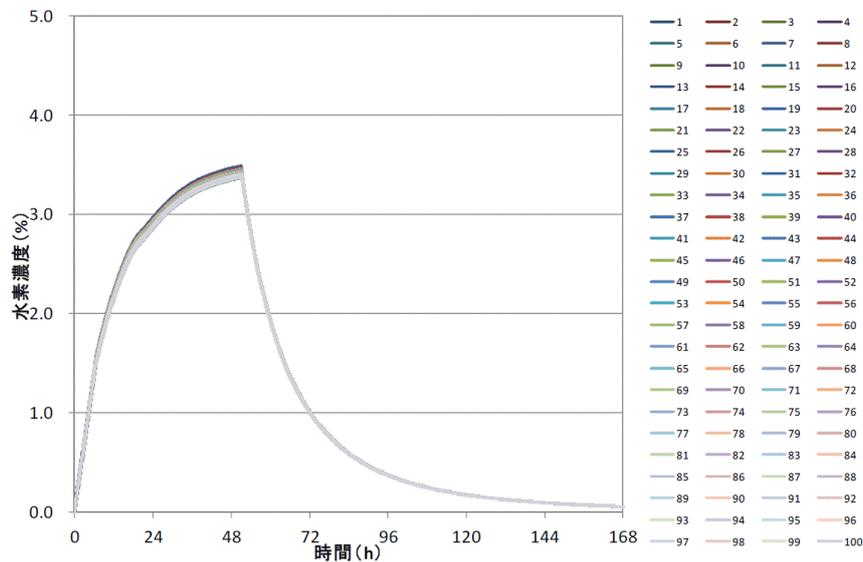


図 2-30 ケース 3 水素濃度の時間変化（オペレーティングフロア）  
（格納容器ベント実施ケース，サブボリューム別）

図 2-29, 図 2-30 から, 設計条件の水素発生量に対して PAR による水素処理が効果を発揮し, 原子炉建屋内の水素濃度上昇が抑制され, 可燃限界に至ることなく事象収束することを確認できた。また, 図 2-29 に示したとおり, PAR の設置によって水素濃度が 4% に到達するまでの時間は 100 時間程度延びていることから, 設備の復旧や対応手段の検討を実施する時間を確保できることも確認できた。10%/day という格納容器漏えい率は格納容器からの異常な漏えいが発生している状態を意味しているため, 例えば, この時間の中で格納容器からの異常な漏えいによる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。格納容器からの異常な漏えいによる格納容器ベント操作の概要を図 2-31 に示す。

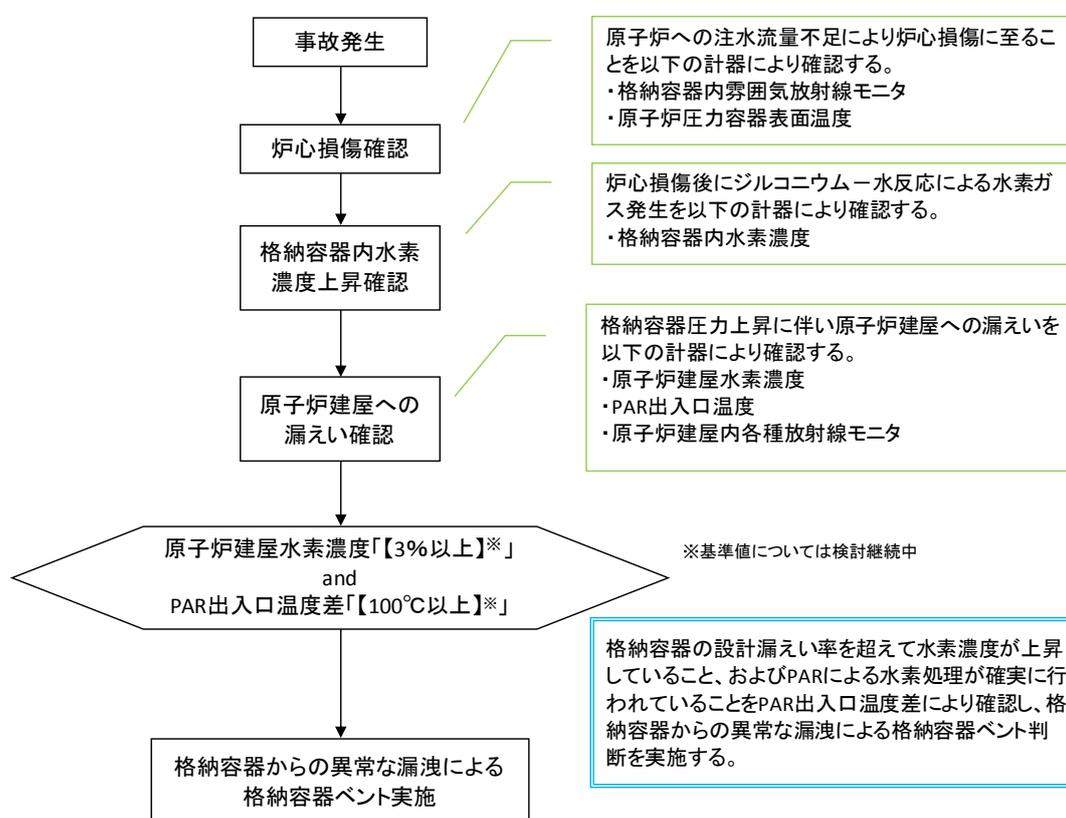


図 2-31 格納容器からの異常な漏えいによる格納容器ベント操作概要

なお, 図 2-29 の格納容器ベント未実施ケースにおいて, 事象発生後 120 時間程度からオペレーティングフロアで水素濃度の上昇が発生しているが, これは大量に発生した水素を処理し続けた結果, 酸素が欠乏したことにより, PAR の反応開始酸素濃度を下回ってしまい, PAR による水素処理が停止したこ

とで起こっているものである。この状態においても酸素濃度が可燃限界未満であることから、水素燃焼が発生することはない。

また、本ケースにおいては、オペレーティングフロア内全域で水素が攪拌され、フロア全域で水素処理が行われていることを確認するため、流速ベクトルを評価した。解析結果を図 2-32 に示す。

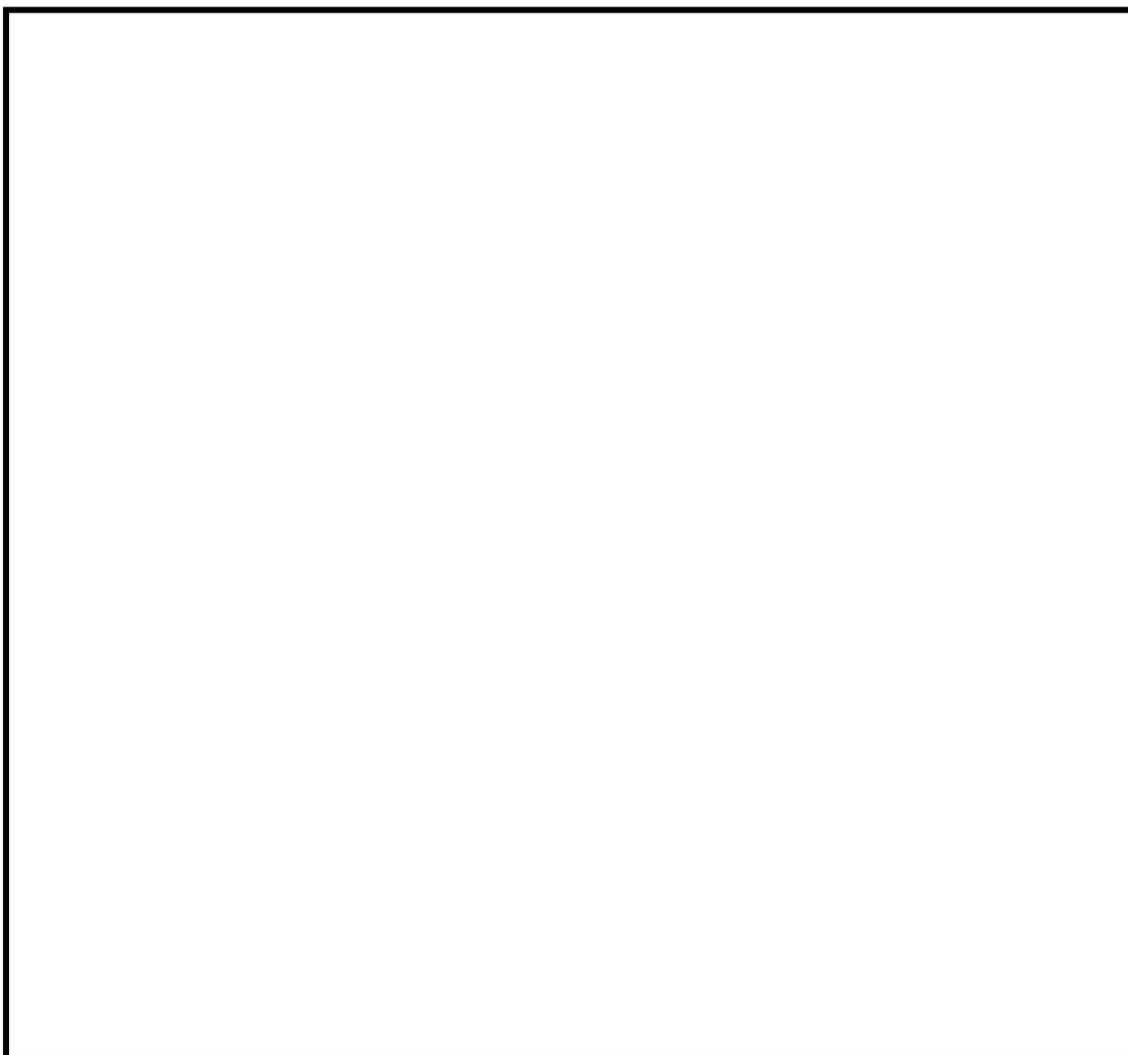


図 2-32 ケース 3 オペレーティングフロア流速ベクトル

図 2-32 から、PAR による水素処理によって上昇流が発生し、オペレーティングフロア内全域が攪拌されることを確認できた。

(5) ケース 4

代替循環冷却ライン使用時の影響確認を行うため、ケース 2 の評価シナリオを循環冷却シナリオに変更して、水素濃度の時間変化を評価した。解析結果を図 2-33, 図 2-34 に示す。

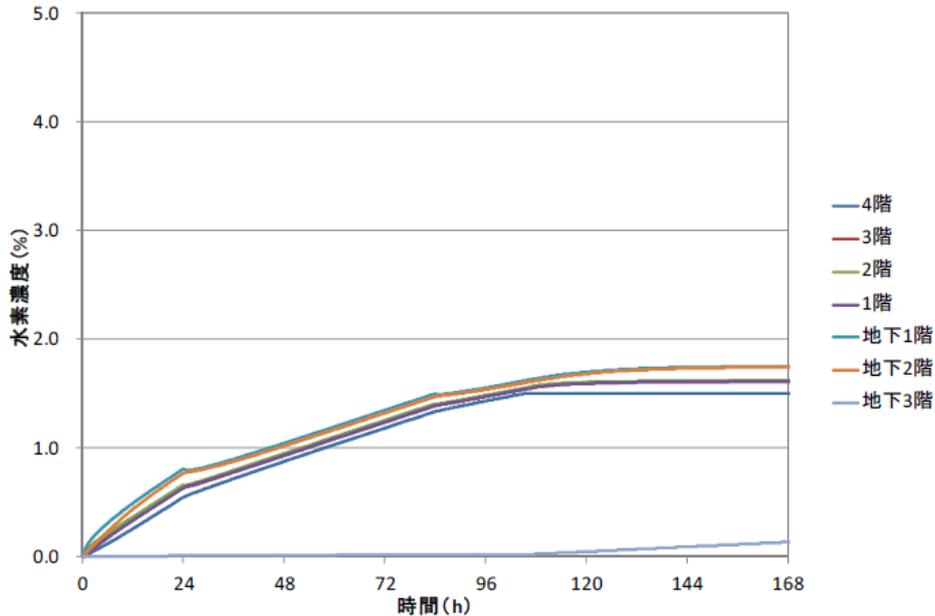


図 2-33 ケース 4 水素濃度の時間変化 (原子炉建屋全域)

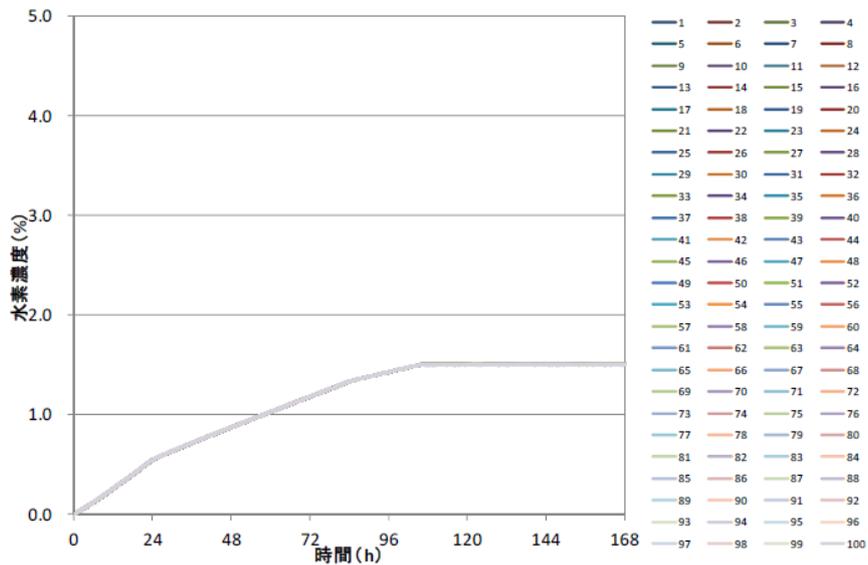
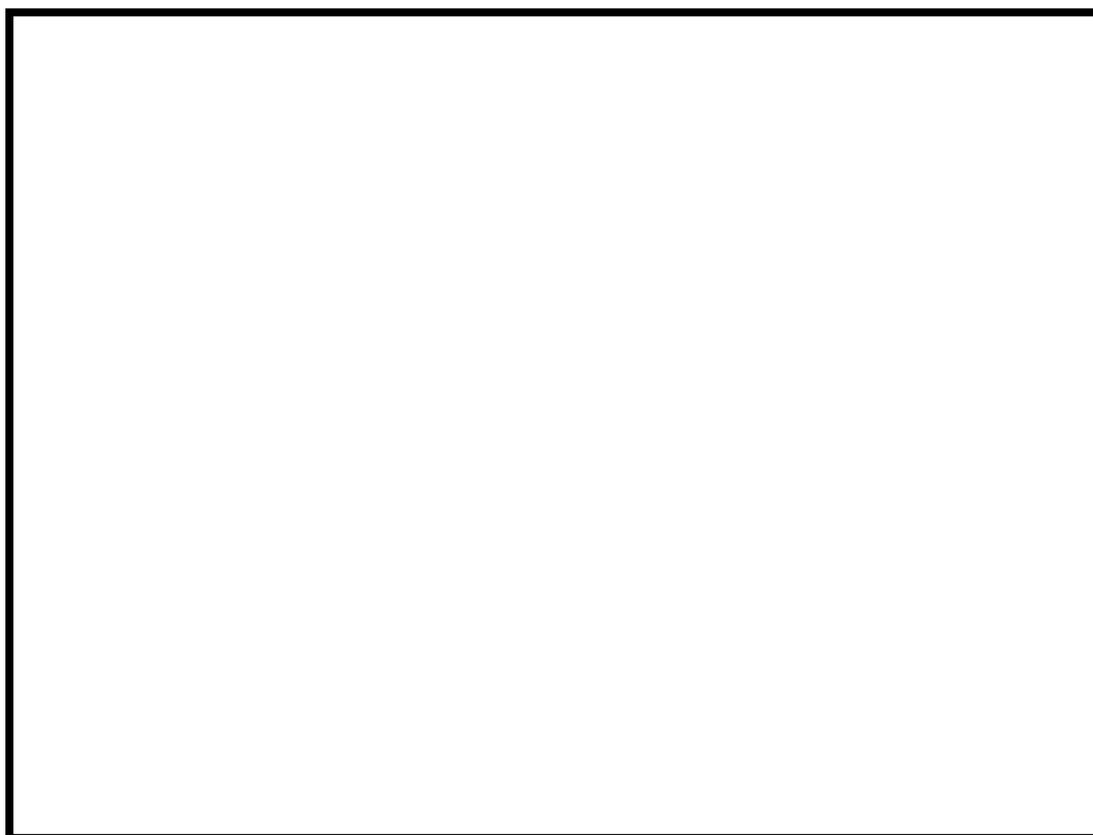


図 2-34 ケース 4 水素濃度の時間変化 (オペレーティングフロア)  
(サブボリューム別)

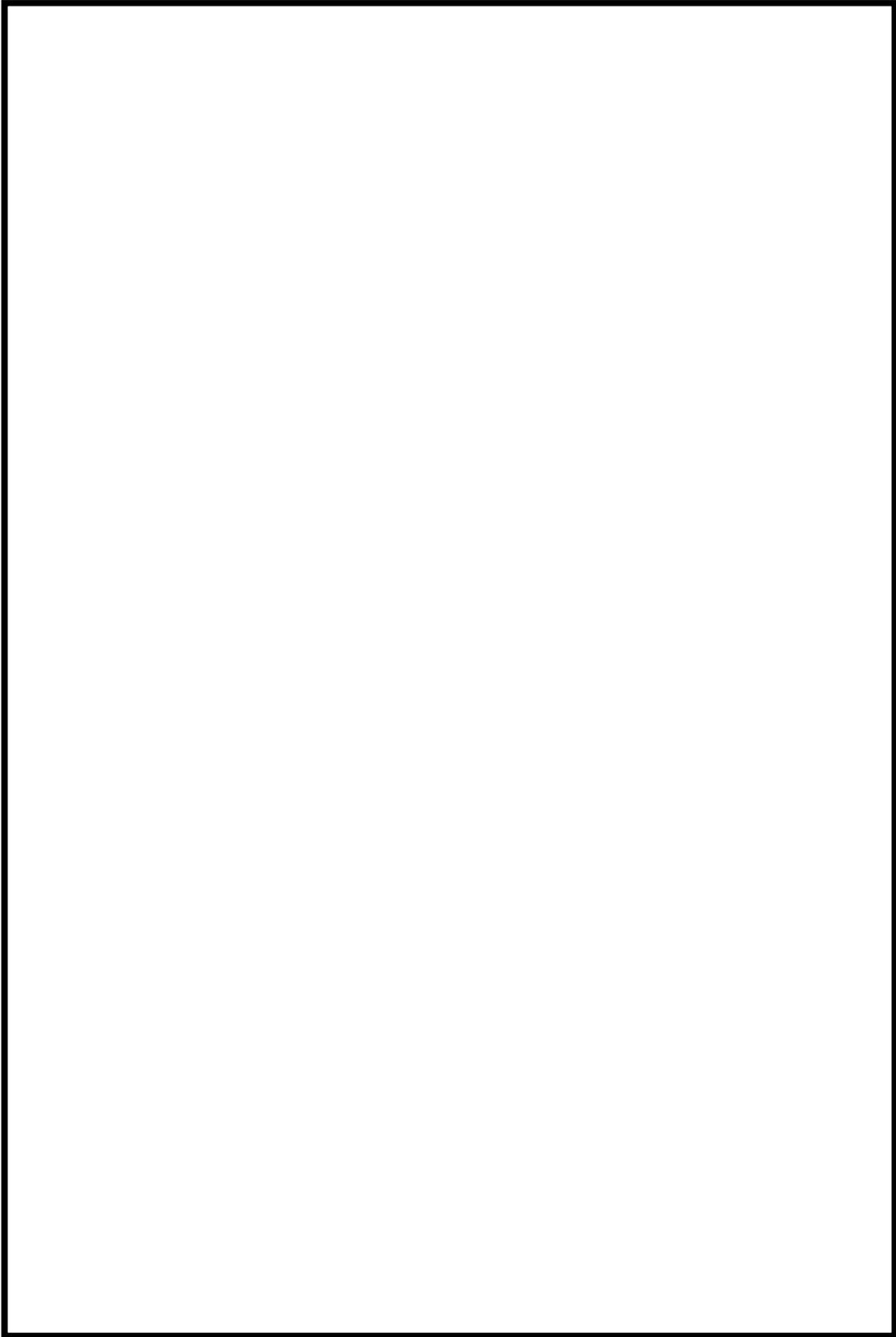
本ケースにおいても、水素濃度が 1.5%に到達した時点で PAR による水素処理が開始されることにより、原子炉建屋内の水素濃度上昇が抑制され、可燃限界に至ることなく事象収束することを確認できた。

## オペレーティングフロア大物搬入口ハッチの構造について

柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉の原子炉建屋オペレーティングフロア大物搬入口用ハッチカバーは、4分割伸縮折畳式ハッチカバーである。代表で6号炉のハッチカバーの外観を図(添付5-1)、構造を図(添付5-2)に示す。ハッチカバーは片側からワイヤーで引っ張ることで開動作、緩めることで閉動作する構造であり、開状態においてはストッパーピンを入れておくことで意図しない閉動作を防止する構造になっている。なお、今後は地震動等によるワイヤーの切断、ストッパーピンの破断がおきた場合においても、開状態を維持できるよう、ハッチカバーの固縛等を実施していく予定である。



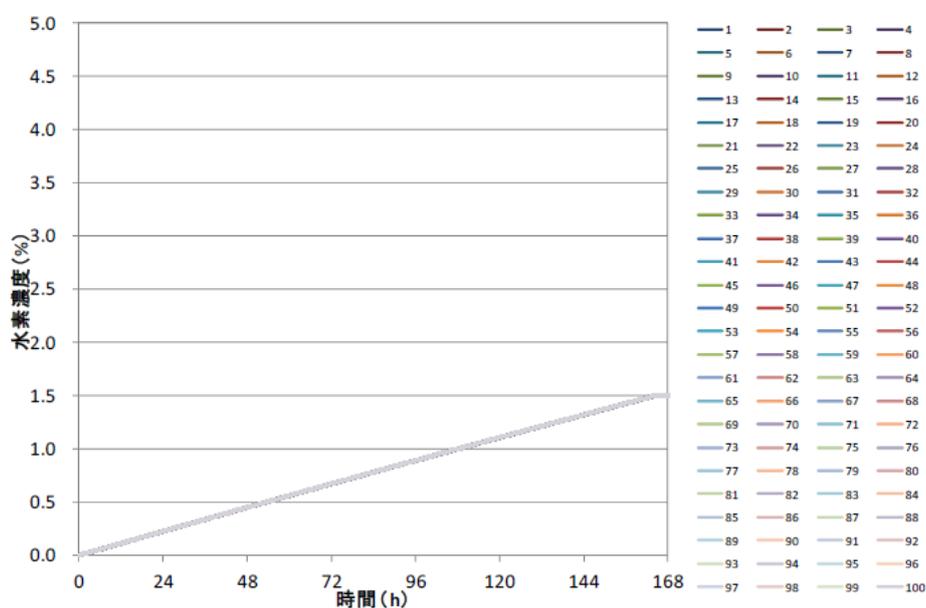
図(添付5-1) ハッチカバー外観



図(添付5-2) ハッチカババー構造図

## 原子炉建屋内における成層化について

2.2.2.3 (4) において、PAR による水素処理によって上昇流が発生し、オペレーティングフロア内全域が攪拌されることを確認しているが、格納容器からの漏えい量が小さい場合に PAR 起動前の対流が発生せず、オペレーティングフロア内で成層化することがないか確認を行うため、格納容器漏えい率を設計漏えい率である 0.4%/day (一定) とした場合の評価を GOTHIC にて実施した。格納容器漏えい率以外の条件は 2.2.2.3 (4) と同様である。水素濃度の解析結果を図(添付 6-1)に示す。



図(添付 6-1) 水素濃度の時間変化 (オペレーティングフロア)  
(サブボリューム別)

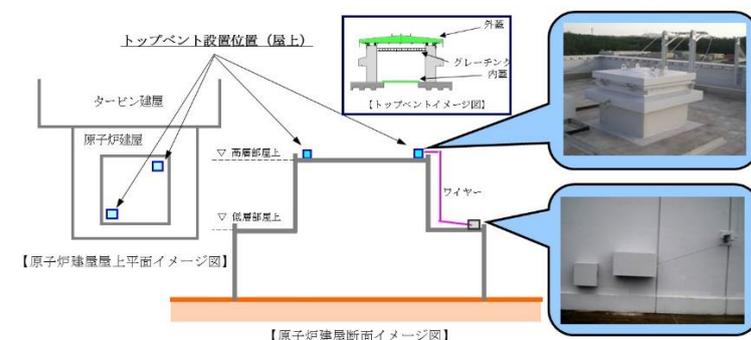
図(添付 6-1)から、PAR 起動前においてもサブボリューム毎の水素濃度の差はほとんどなく、漏えい量を設計漏えい率相当まで小さくした場合でも成層化は起こらないことを確認できた。このことから、オペレーティングフロア内での対流は、漏えいガスの運動に起因した流動ではなく、高温ガスが流入することで発生する温度差による対流が支配的であると推定できる。

従って、格納容器から漏えいするガスが高温である限り対流は発生し、成層化は起こらないと考える。

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を設置していないオペレーティングフロア天井部にて水素濃度が上昇するものと考えられることから、水素濃度監視設備及びPAR動作監視装置にて検知する。天井部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1.5%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と判断できる。

成層化を検知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、外気を取り込み対流の発生を促すための大物搬入口等の原子炉建屋1階外扉の開放操作、水素を排出するための自主設備である原子炉建屋トップベント（図(添付6-2)参照）の開放操作が挙げられるが、状況に応じて使い分ける必要がある。水素濃度の時間変化や炉心・格納容器の冷却状況を各種パラメータによって確認しつつ、各対策の準備状況を勘案し、かつ津波襲来の可能性等の外部条件を踏まえて、総合的に判断して適切な対応を選択する。

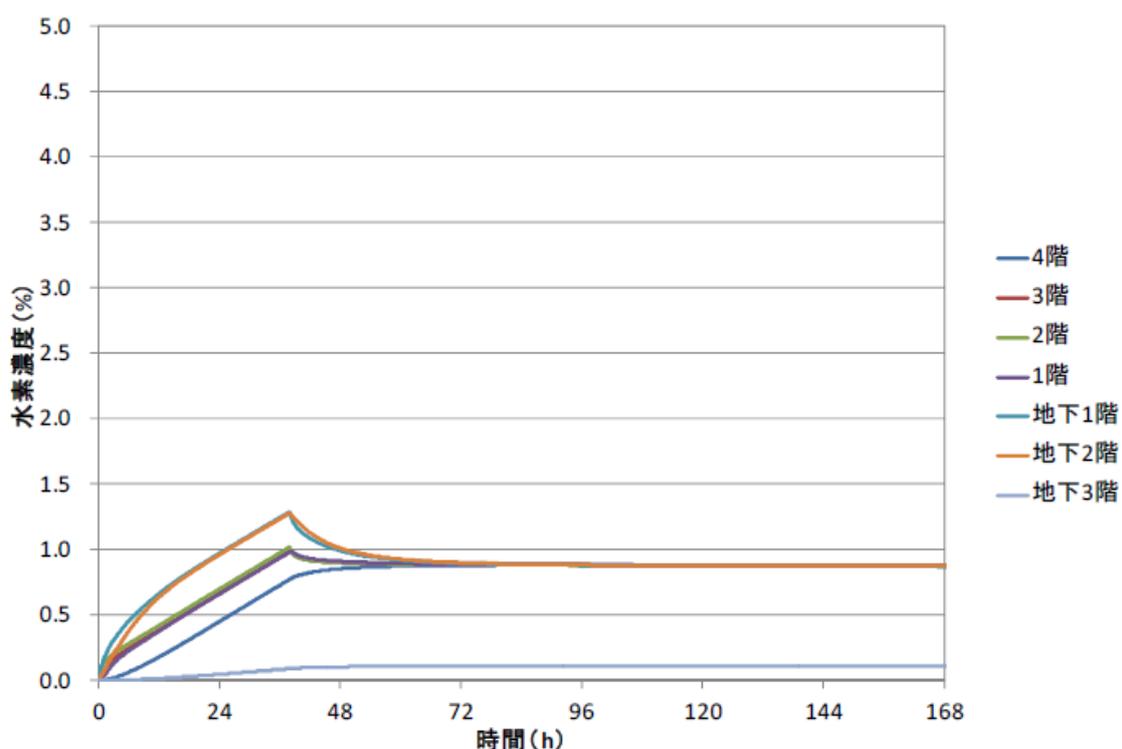
なお、非常用ガス処理系による換気は、水素を排出できるという点では有用であるが、系統内での水素爆発の可能性を否定できないことから、可能な限り使用しない。系統内の気体温度が水素着火温度である約500℃になることは考えられず、また、福島第一原子力発電所事故における水素爆発は雰囲気温度が約500℃になって起こったとは考えられない。そのため、福島第一原子力発電所事故では、不燃限界濃度を超える水素が存在する環境であったと想定され、機器の動作時などの金属摩擦や貴金属の触媒作用、静電気の放電、電気設備・機器からの漏電等の要因で着火した可能性が高いと考えられる。柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉の非常用ガス処理系は、オペレーティングフロア吸込口付近の水素濃度監視及び当該水素濃度による起動/停止判断手順といった水素爆発防止措置をとっておらず、電動の動的機器であるファンを用いることから、上述の通り、成層化対応中の水素爆発のリスクがあると判断している。



図(添付6-2) 原子炉建屋トップベント

## 格納容器頂部注水系の効果を検討した水素挙動について

2.2.2.3 (3) において、下層階にて水素が漏えいした場合の建屋内挙動を確認したが、2.4 に示す格納容器頂部注水系の効果等によりオペレーティングフロアに直接水素が漏えいしなくなった場合の建屋内挙動を確認するため、漏えい箇所を下層階（2階，地下1階，地下2階）のみとし、PCV 主フランジを除く周長割合で全漏えい量を分配した場合の評価を GOTHIC にて実施した。漏えい箇所以外の条件は 2.2.2.3 (3) と同様である。水素濃度の解析結果を図（添付 7-1）に示す。



図(添付 7-1) 水素濃度の時間変化 (原子炉建屋全域)

図(添付 7-1)から、下層階のみから水素が漏えいした場合においても、大物搬入口領域及び地下ハッチ領域を通じて原子炉建屋全域で水素濃度が均一化され、オペレーティングフロア（4階）まで水素が到達することを確認できた。

### 2.2.3 静的触媒式水素再結合器の性能試験について

本章では、PAR の既往研究で示された性能試験について説明する。前章で示した解析における PAR 性能評価式の妥当性を示す「(1) PAR の水素低減性能試験について」と、PAR の性能阻害ファクターによる性能影響を示す「(2) PAR の触媒性能低下要因の影響について」に分類し、既往の試験結果をもとに PAR 性能について示す。

#### (1) PAR の水素低減性能試験について

PAR の性能確認は、国際的な実証試験においても行われており、NRC による Sandia National Laboratory (SNL) における試験ではメーカーの小型 PAR について試験を行い、性能確認が行われている (参照文献(b))。この試験結果で示す PAR の水素処理特性と、NIS 社製 PAR の下記に示す性能評価式を比較することで、性能評価式の妥当性を示す。

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

$DR$	: 水素処理容量 (kg/h/個)
$A$	: 定数 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span>
$C_{H_2}$	: PAR 入口水素濃度 (vol%)
$P$	: 圧力 ( $10^{-5}$ Pa)
$T$	: 温度 (K)
$SF$	: スケールファクター

#### ① 試験装置概要

SNL で行われた PAR の水素低減性能試験に使用した試験装置の全体写真を図 2-35、試験装置内の PAR 配置を図 2-36 に示す。本試験では PAR-88 (PAR 1 基に付き 88 枚の触媒カートリッジ) の 1/2 スケール (PAR-44)、1/4 スケール (PAR-22)、1/8 スケール (PAR-11) の PAR を使用して試験している。当社が設置する PAR は PAR-11 であることから、1/8 スケールの試験装置を参照する。

なお、本試験では高さ 500mm の煙突 (チムニ) が取り付けられた PAR を用いて試験を実施している。



図 2-35 The Surtsey vessel

※参照文献(b)より抜粋

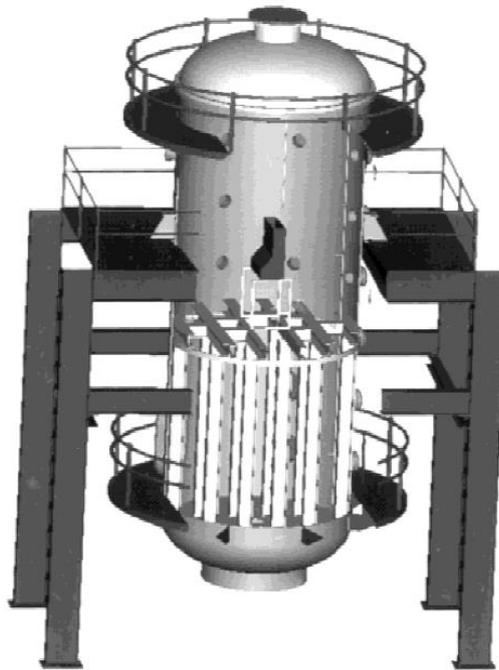


図 2-36 PAR location in the Surtsey vessel

※参照文献(b)より抜粋

## ② 試験条件及び結果

PAR の水素低減性能試験における試験結果を図 2-37, 38 に示す。図 2-37 は低水素濃度時の水素濃度と水素処理速度の関係を示したものである。水素濃度試験雰囲気は表 2-14 の通りであり、当社は PAR-11 を使用していることから試験条件「PAR-6 (1/8 scale)」を参照する。試験結果は、スケール毎に正規化した水素処理速度データを示している (1/8 スケールの PAR は 8 倍)。また、性能評価式により得られた結果が図中にあるが、試験条件は「1bar 空気, 1bar 蒸気」であることから、「1 bar air/1 bar steam」を参照する。これら試験結果と性能評価式による計算結果を比較すると、試験結果の値の方が大きくなっていることが確認されている。

従って、性能評価式は保守的であることが確認できる。

表 2-14 試験雰囲気

試験	スケール	雰囲気
PAR-4	1/2	1 bar 空気, 1 bar 蒸気
PAR-5	1/4	1 bar 空気, 1 bar 蒸気
PAR-6	1/8	1 bar 空気, 1 bar 蒸気

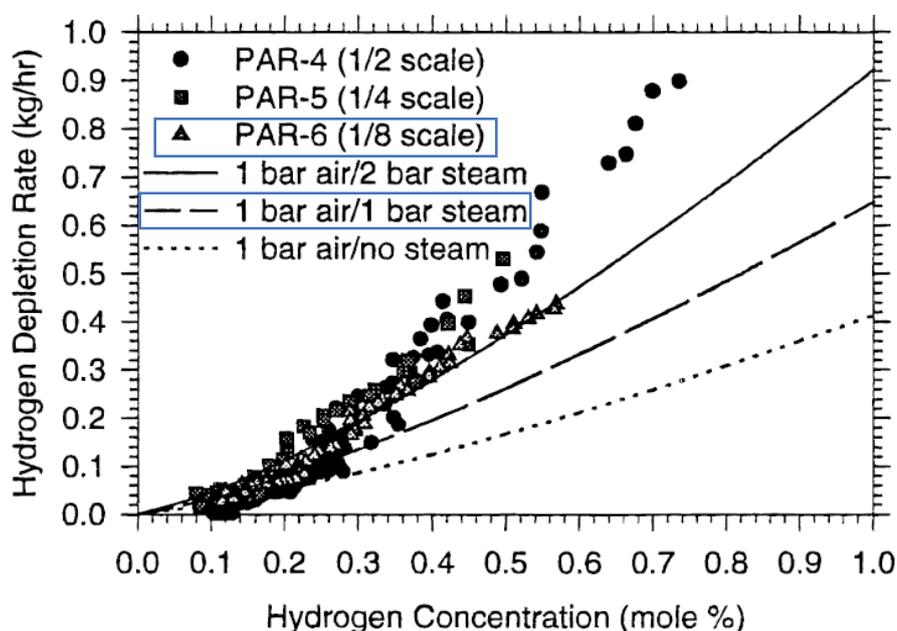


図 2-37 SNL で行われた試験結果 (低水素濃度)

※参照文献(b)より抜粋

図 2-38 は高水素濃度時の水素濃度と水素処理速度の関係を示したものである。水素濃度試験雰囲気は表 2-15 の通りであり、当社は PAR-11 を使用していることから試験条件「PAR-8R (1/8 scale)」を参照する。試験結果は、スケール毎に正規化した水素処理速度データを示している (1/8 スケールの PAR は 8 倍)。また、性能評価式により得られた結果が図中にあるが、試験条件は「1bar 空気, 1bar 蒸気」であることから、「1 bar air/1 bar steam」を参照する。これら試験結果と性能評価式による計算結果を比較すると、試験結果の値の方が大きくなっていることが確認されている。

従って、性能評価式は保守的であることが確認できる。

表 2-15 試験雰囲気

試験	スケール	雰囲気
PAR-8R	1/8	1 bar 空気, 1 bar 蒸気
PAR-12	1/4	1 bar 空気, 1 bar 蒸気
PAR-13	1/2	1 bar 空気, 1 bar 蒸気

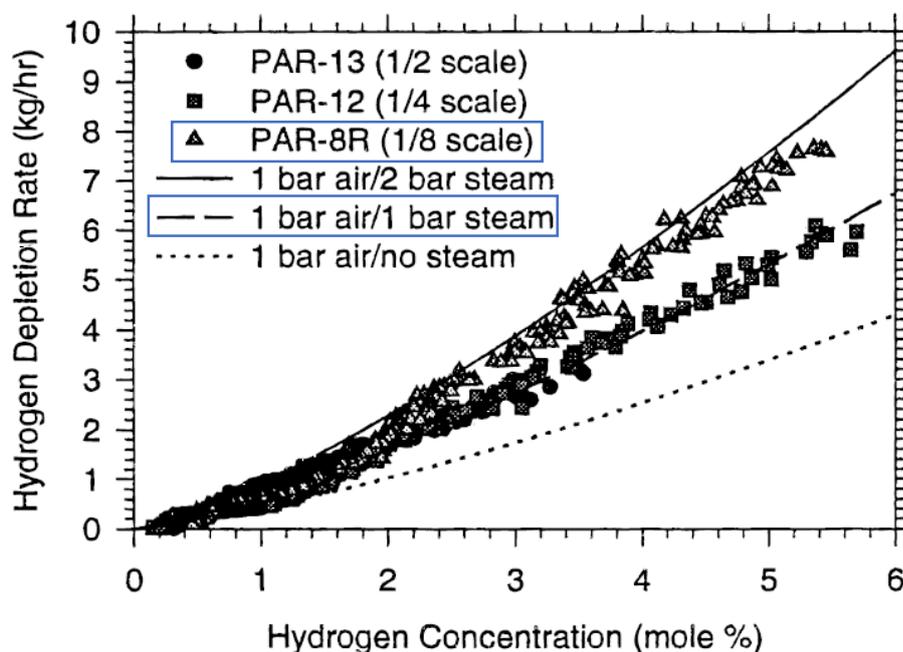


図 2-38 SNL で行われた試験結果 (高水素濃度)

※参照文献(b)より抜粋

### ③ チムニの影響について

水素低減性能試験において、PARにチムニー(煙突)を取り付けることにより、水素低減性能が大きくなることが確認されている。煙突が取り付けられていない場合、高さ500mmの煙突が取り付けられた場合、高さ1000mmの煙突が取り付けられた場合の水素低減性能の係数について、製造メーカー社内の試験プログラムの中で確認されており、煙突が取り付けられていない場合と比較して高さ500mmの煙突が取り付けられた場合は1.15程度、高さ1000mmの煙突が取り付けられた場合は1.25程度という数字が報告されている。

SNLで行われた試験では、高さ500mmの煙突が取り付けられたPARで水素低減性能試験を実施している。当社のPARは煙突が取り付けられていないため、図2-37、図2-38で示す水素処理容量(kg/h)を $1/1.15$ することで当社PARの構造を考慮した場合の水素処理容量と比較できる。

水素濃度4%時に着目すると、チムニの影響を考慮しても、当社の水素処理容量である0.25kg/hよりも十分大きな値であることから、当社の水素処理容量は妥当であると考えられる。

### (2) PARの触媒性能低下要因の影響について

PARで用いるPd-Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub> (パラジウム-アルミナ担持) 触媒の触媒性能が低下する要因として、触媒の反応阻害物質の被毒が考えられる。この触媒における反応阻害物質としては核分裂生成物に含まれるハロゲンや、水が考えられる。ハロゲンについては、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着目し、被毒による影響をBattelle Model Containmentの試験(参照文献(c))により確認する。

また、水については、事故時に原子炉建屋に格納容器ガスが漏えいしたときに、水蒸気環境となるため、水蒸気による性能影響をSNLの試験(参照文献(b))及びTHAI試験(参照文献(e), (f))により確認する。

① よう素による性能影響確認

NIS 社製 PAR のよう素による影響は, Battelle Model Containment の試験 (参照文献(c)) で過去に示されている。試験装置概要を図 2-39 に示しているが, 容器内 (10m<sup>3</sup>) に設置した PAR の下から, 3g のよう素をすべて気化させ, よう素の影響を確認する試験を実施している。

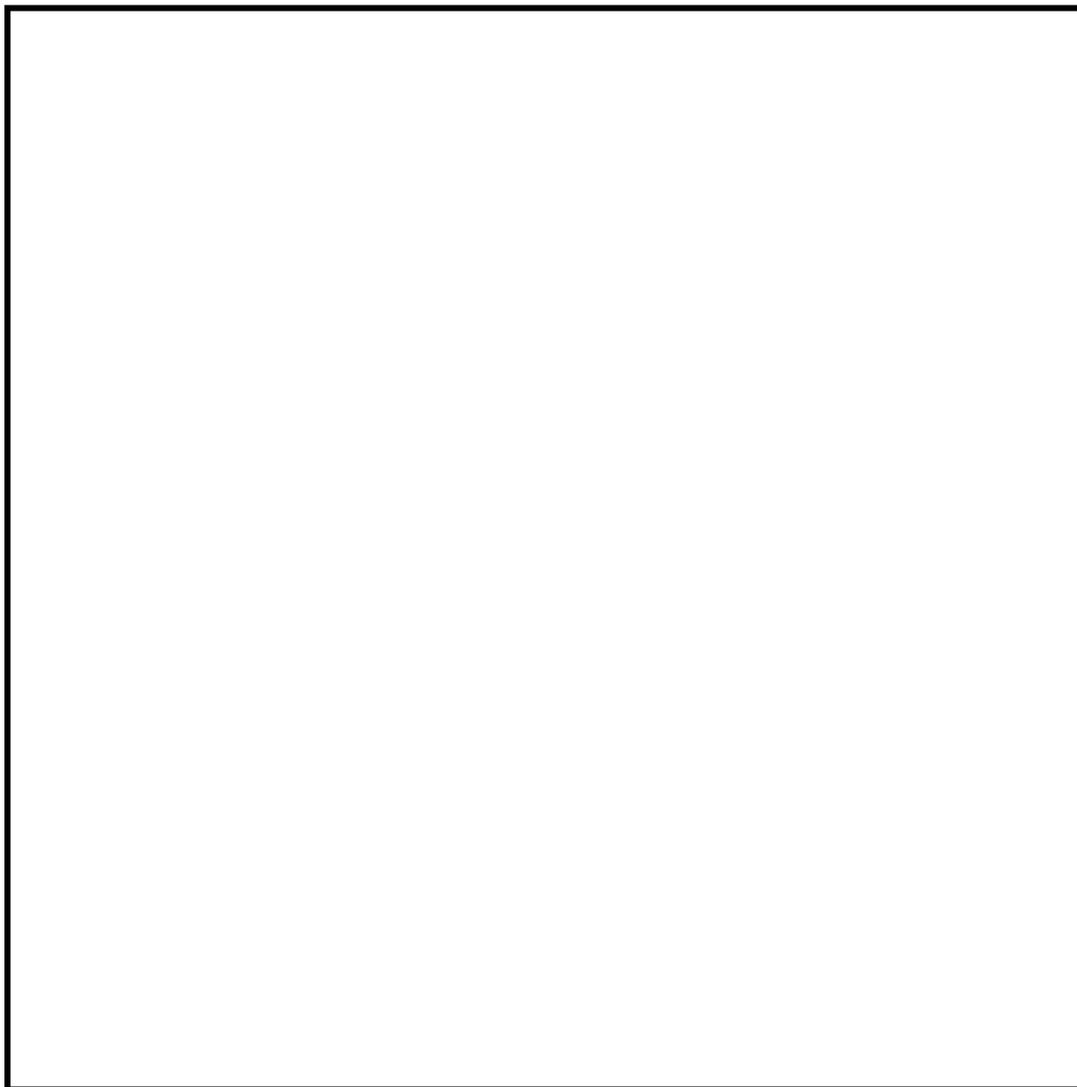


図 2-39 Battelle Model Containment 試験装置概要

※参照文献(c)より抜粋

試験条件は表 2-16, 試験結果は図 2-40 に示しており, よう素環境下における PAR 動作時の水素濃度の低下傾向をプロットしている。なお, 図中には比較対象として, よう素がない場合の試験データに基づくフィットカーブも示してある。この結果を踏まえると, 平均よう素濃度 0.3g/m<sup>3</sup> の環境においても, NIS 社製 PAR の水素処理性能は 25%以上低下しないことが言える。なお, 本試験装置は NIS 社

製 PAR  による試験結果であり、本試験装置と PAR-11 (柏崎刈羽 6/7 号機納入品) ではスケーリングファクターは異なるが、スケーリングファクターがいくつであっても、PAR 内の流速は一律であり、触媒カートリッジ一枚あたりのよう素に晒される量は同じであることから、スケーリングファクターとよう素による被毒量に関係はなく、本試験結果は PAR-11 に対しても適用可能と考える。

表 2-16 Battelle Model Containment 試験条件

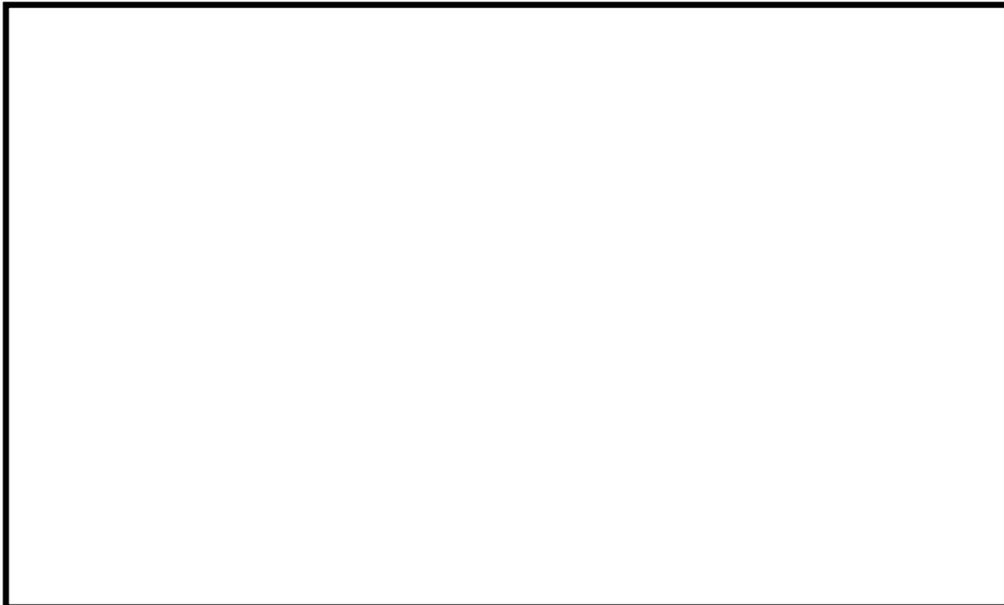


図 2-40 Battelle Model Containment 試験結果

※参照文献(c)より抜粋

次に、6 号炉及び 7 号炉において、重大事故時に格納容器内ガスが原子炉建屋に漏えいした際の原子炉建屋オペレーティングフロアに存在するよう素濃度を算定する。表 2-17 に示す保守的な条件で建物内全よう素濃度を算定したところ、 $68.92\text{mg}/\text{m}^3$  となり、Battelle Model Containment 試験条件である  $300\text{mg}/\text{m}^3$  以下

のよう素濃度であることから、性能低下は25%以上低下しないものと考えられる。6号炉及び7号炉のPAR設置台数は、性能阻害ファクターにより性能低下が50%あるものと想定し、台数が決められている。よって、これらの結果から、よう素による性能低下は想定されるものの、PAR台数に余裕を見込んでいることから、原子炉建屋の水素爆発防止対策としての機能への影響はないと考えられる。

表 2-17 原子炉建屋オペレーティングフロアよう素濃度の算定条件

No	項目	単位	無機よう素	有機よう素	備考
①	初期インベントリー	kg	29.1		
②	PCV放出率	-	100%		
③	無機よう素割合	-	91%	4%	
④	DF	-	20	1	
⑤	建物放出量	kg	1.3241	1.1640	PCV内よう素が全量建物放出される保守的想定
⑥	建物容積	m <sup>3</sup>	36100		オペフロ容積
⑦	建物内各よう素濃度	mg/m <sup>3</sup>	36.677	32.244	
⑧	建物内全よう素濃度	mg/m <sup>3</sup>	68.92		

本試験は、表 2-16 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、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。従って、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 2-41 参照）。圧力と水蒸気濃度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無いと考えられる。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水蒸気濃度の PAR 性能への影響」で後述する通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、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の事故時に想定される環境と比較し、よう素濃度、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と考えられる。

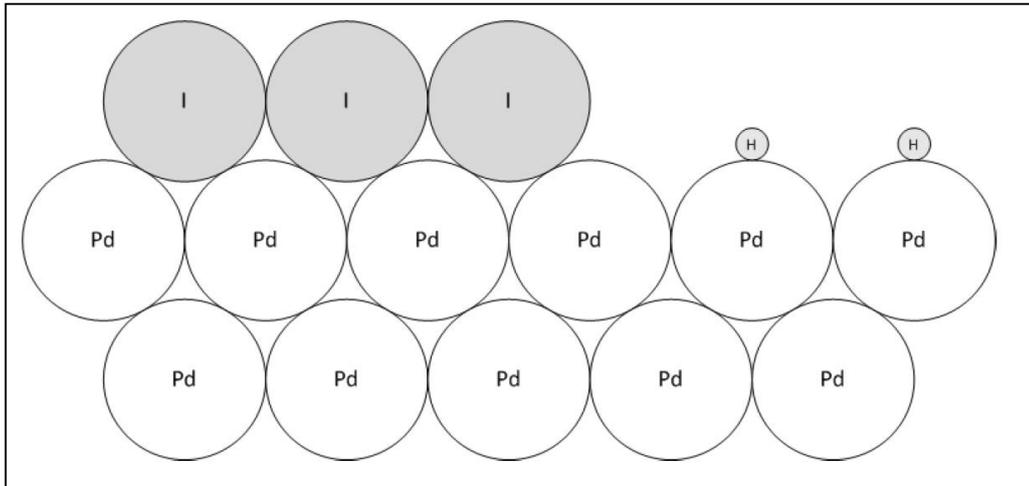


図 2-41 パラジウムへのよう素の結合の概略図

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（参照文献(d)）より確認されている（図 2-42 参照）。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える。



図 2-42 再結合効率と温度の関係

※参照文献(d)より抜粋

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。

## ②水蒸気濃度の PAR 性能への影響

NRC による SNL における試験では、PAR の起動における水蒸気の影響を確認している。空気と水蒸気が約 50% ずつの環境下にて 0~6% 水素濃度の水素を注入した場合において、PAR は性能を発揮することが確認されており、水蒸気濃度 50% 以下であれば性能に影響は見られない。



Fig. 5. The Surtsey vessel.

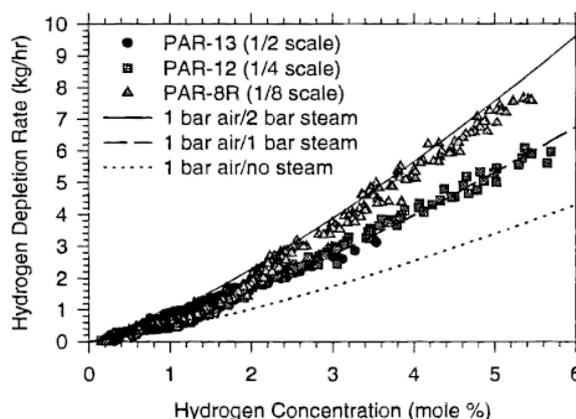


Fig. 10. Normalized depletion rate at high hydrogen concentrations.

## 図 2-43 : SNL で行われた試験結果

※参考文献(b)より抜粋

なお、重大事故時に原子炉格納容器から 10%/day でガスが原子炉建屋に漏えいした場合のオペレーティングフロアの水蒸気濃度の評価結果を図 2-44 に示す。評価結果から PAR 設置位置における水蒸気濃度は 20% 以下であり、PAR 性能は水蒸気濃度 50% 以下では影響が見られない試験結果からも、水蒸気による影響は問題ないと考えられる。

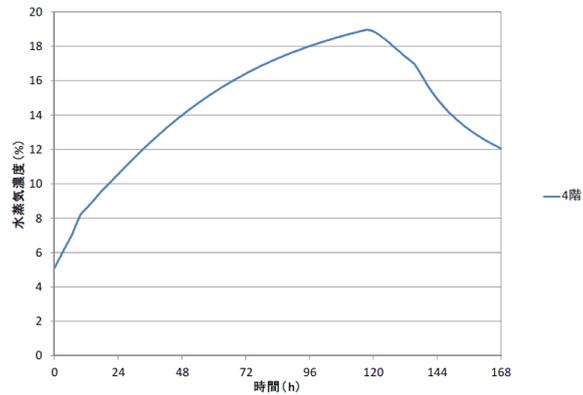


図 2-44 オペレーティングフロア水蒸気濃度 (10%/day 漏えい条件)

また、重大事故発生時に使用済み燃料プールの冷却機能が喪失し、使用済み燃料プール温度が上昇し、大量の水蒸気が発生した場合についても、触媒粒に疎水コーティングが施されていることから有意な性能劣化は起こらないと考えている。また、水蒸気濃度が大幅に高まると、オペレーティングフロアは水蒸気に満たされ PAR が作動しない環境になるとともに、可燃限界未満となる。

なお、水蒸気濃度が高まる前に PAR の作動が始まっている場合は、触媒温度が高温になるため、水蒸気の付着を防ぐことができるため、PAR 性能への影響はないと考えている。

③水素再結合反応開始の遅れの影響について

水素再結合反応の開始については OECD/NEA の THAI Project で行われた試験（参照文献 (e), (f), (g)）を用いて影響を確認する。THAI 試験装置を図 2-45～47 に示す。

THAI Project で行われた試験においては、次の 6 つのケースにおいて水素再結合反応を開始する水素濃度の確認を行っている。

表 2-18 : THAI Project での試験条件

試験番号	圧力	温度	水蒸気濃度	酸素濃度	水素注入速度

これらの結果から、概ね 1%以下の水素濃度で PAR が起動していることが確認できる。

一方で、PAR の効果を示すための GOTHIC による解析条件として、水素再結合反応は水素濃度 1.5%にて開始することとしている。従って、解析評価上 PAR の起動に対して余裕を持たせているが、その評価結果においても原子炉建屋を可燃限界以下に抑えることができている。よって、水素再結合反応開始の遅れの影響について、問題ないと考えている。

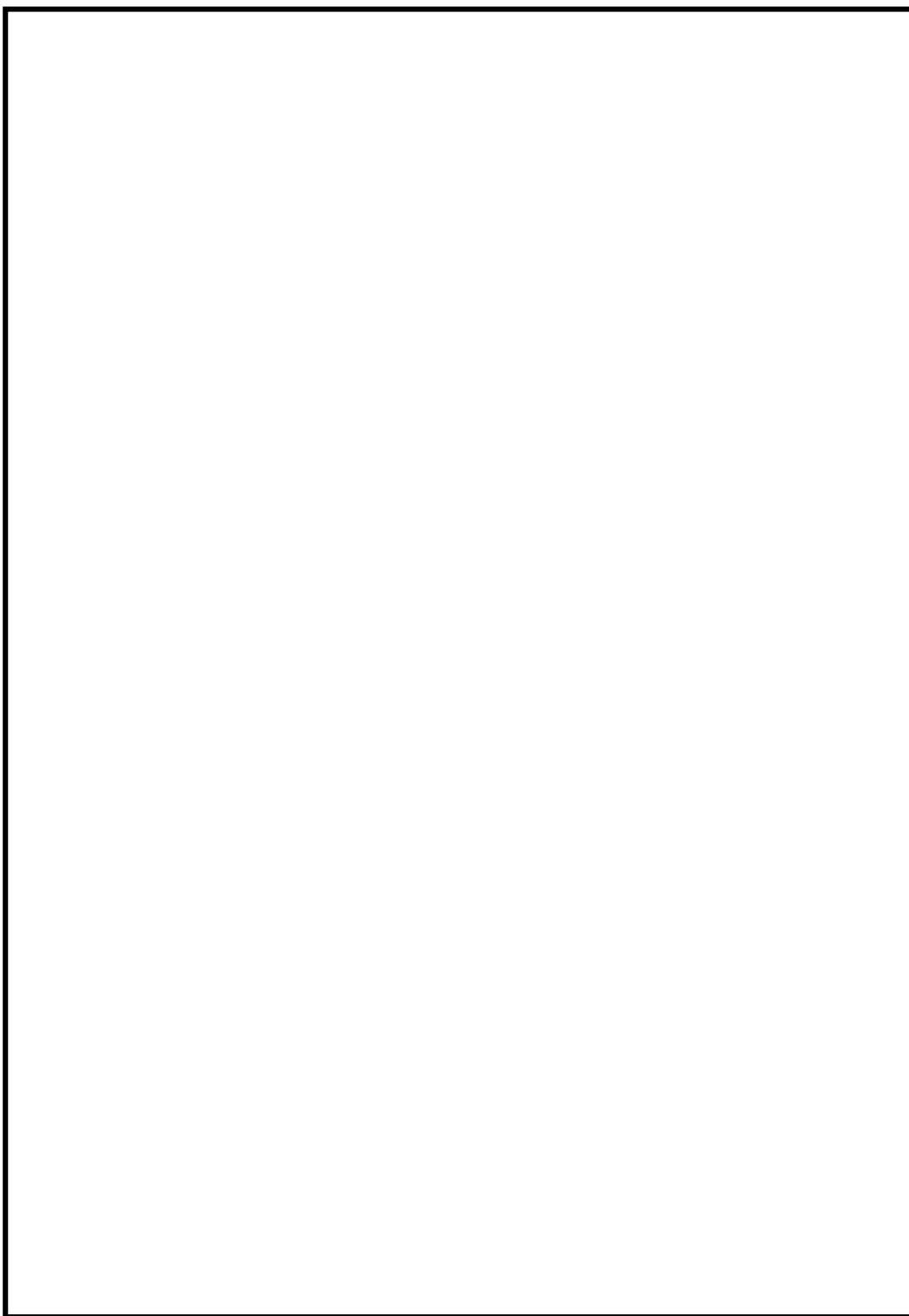


図 2-45 THAI test vessel

※参考文献(e)より抜粋

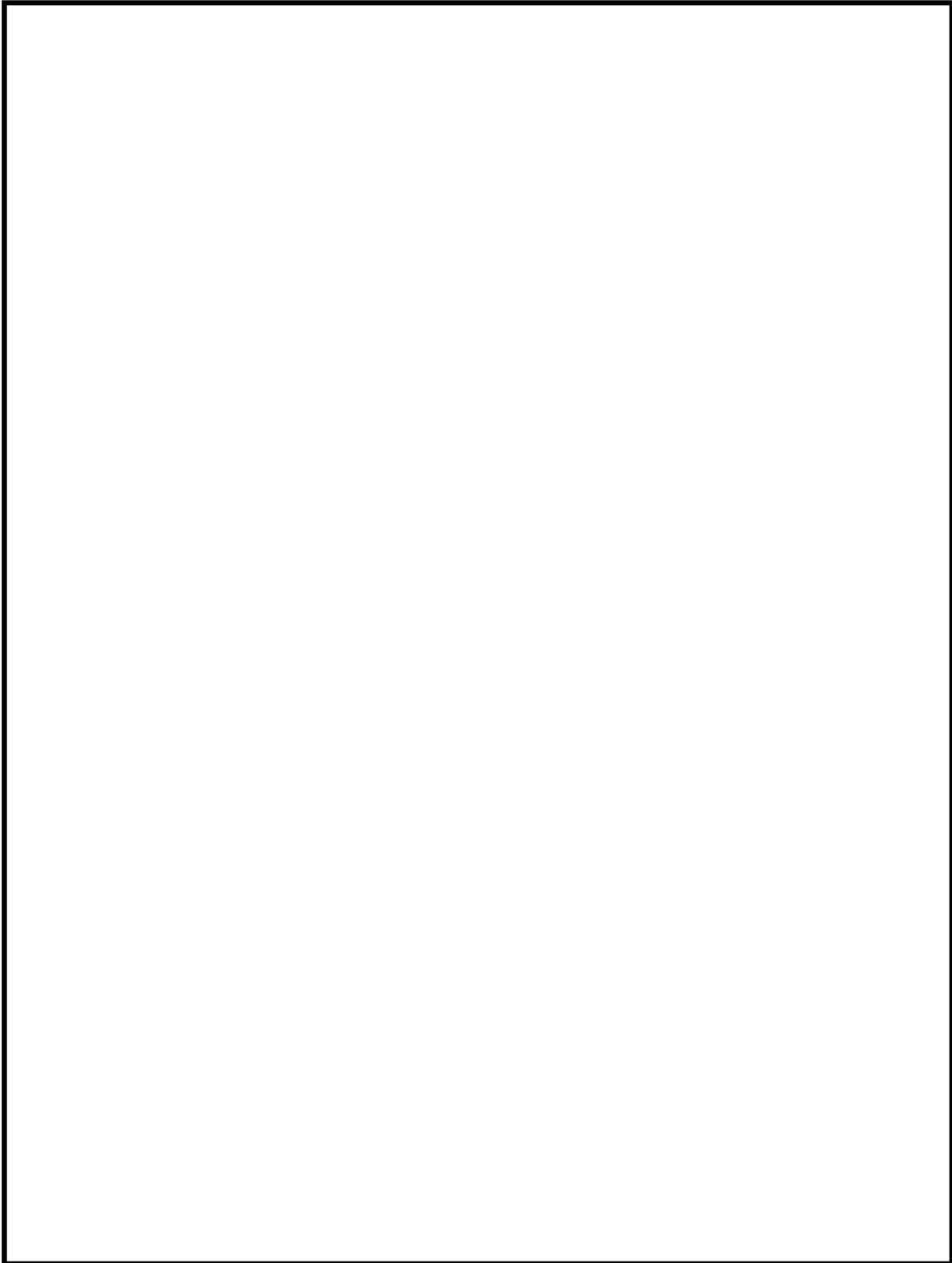


図 2-46 HR test vessel configuration with NIS PAR  
※参考文献(e)より抜粋

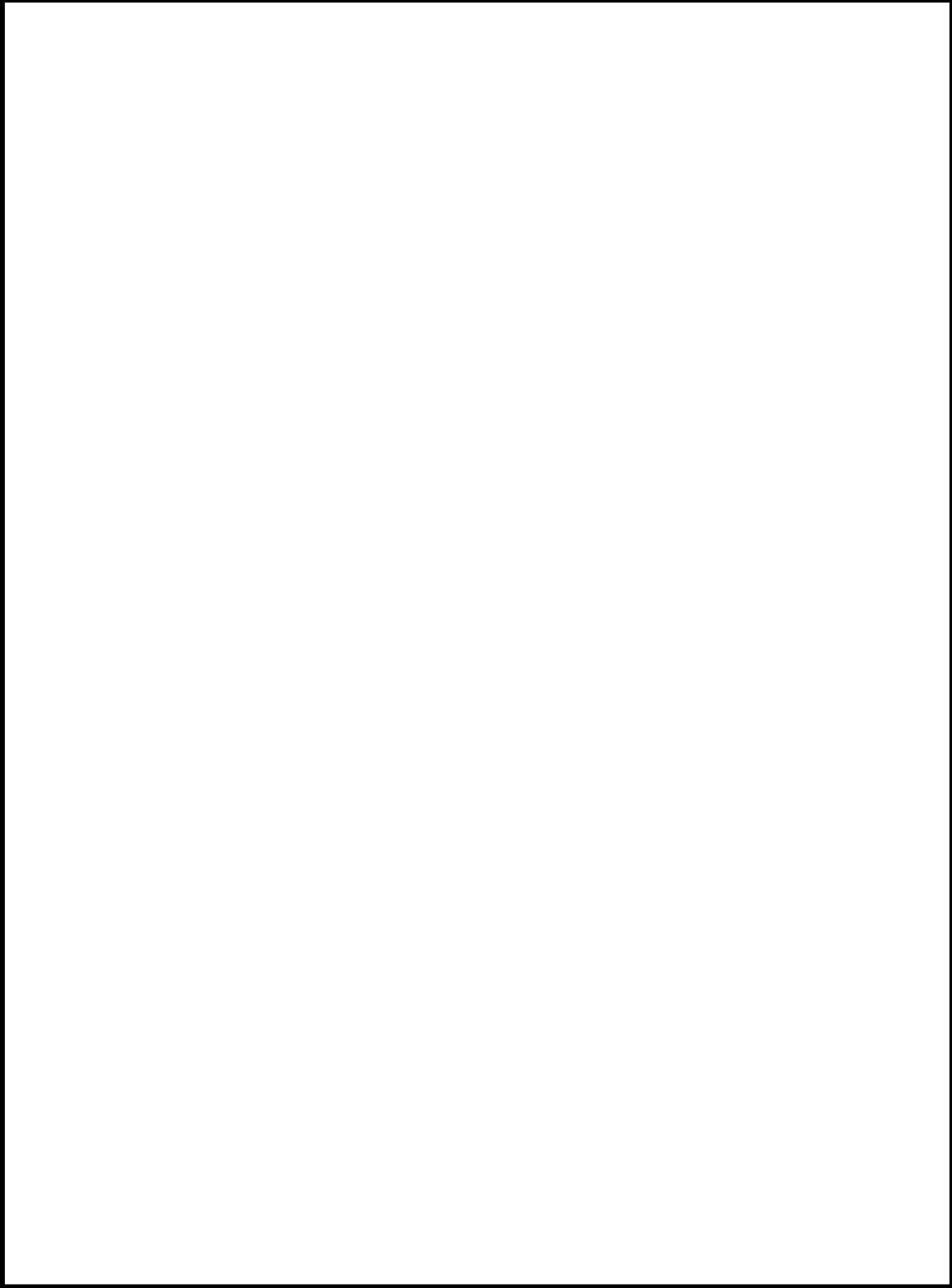


図 2-47 : NIS PAR instrumentation  
※参考文献(e)より抜粋

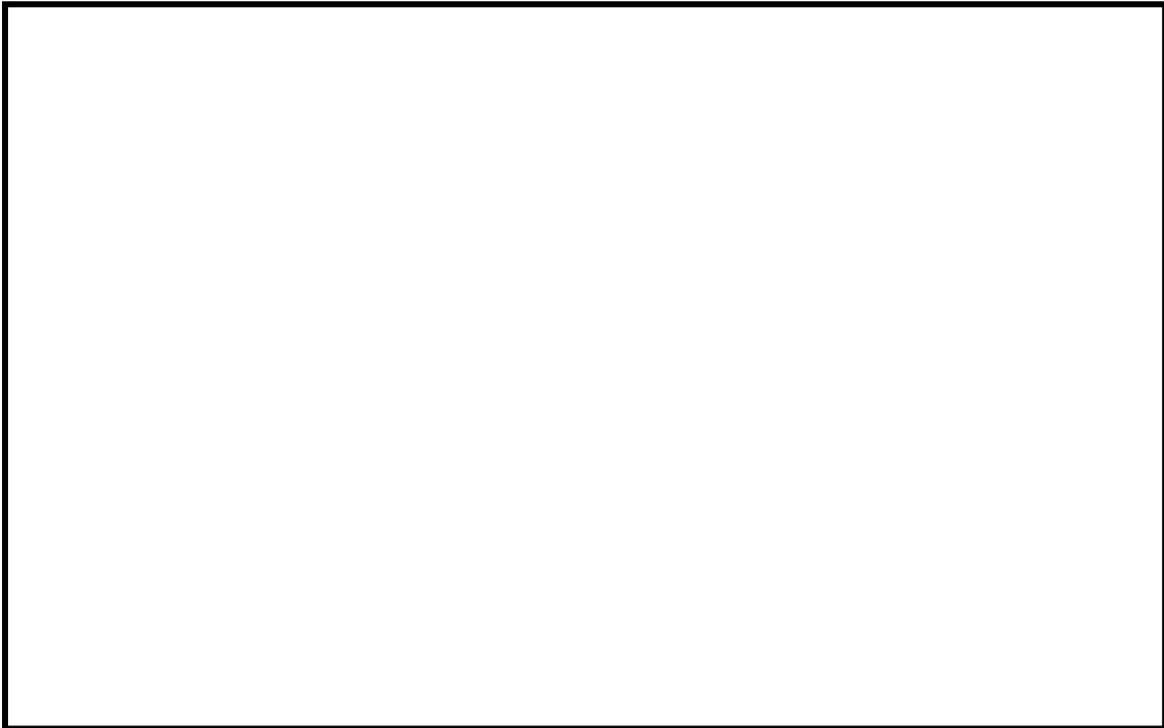


図 2-48 THAI HR-14: Recombiner temperatures  
※参照文献(e)より抜粋

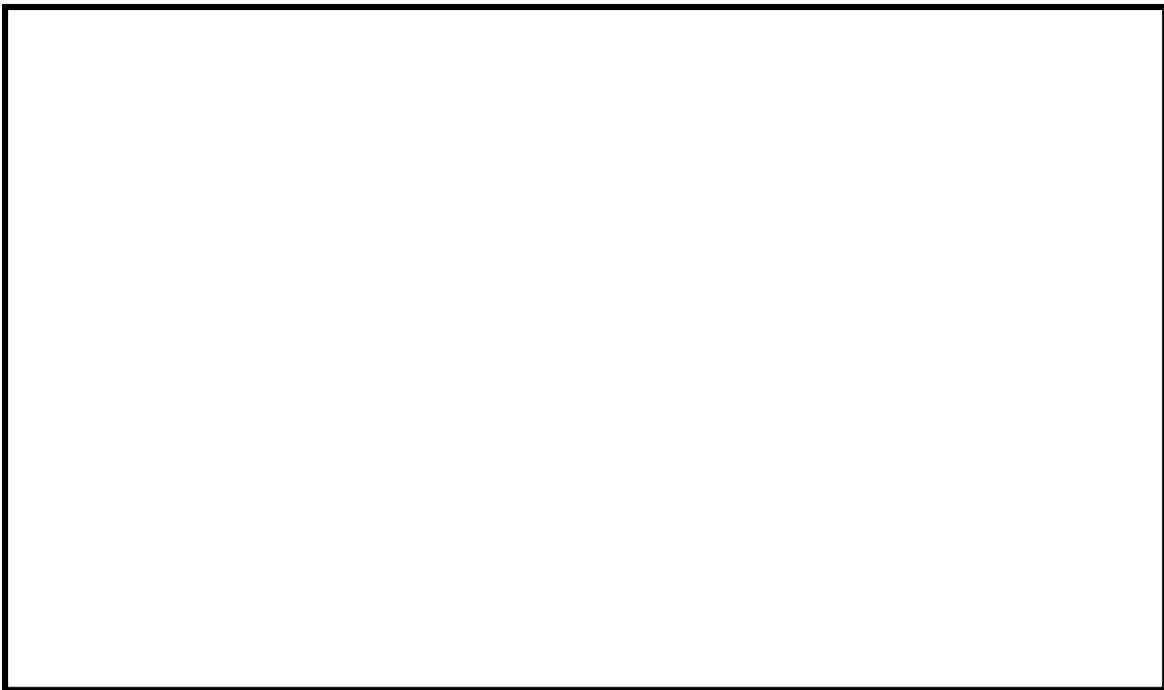


図 2-49 THAI HR-14: Recombiner temperatures  
※参照文献(e)より抜粋

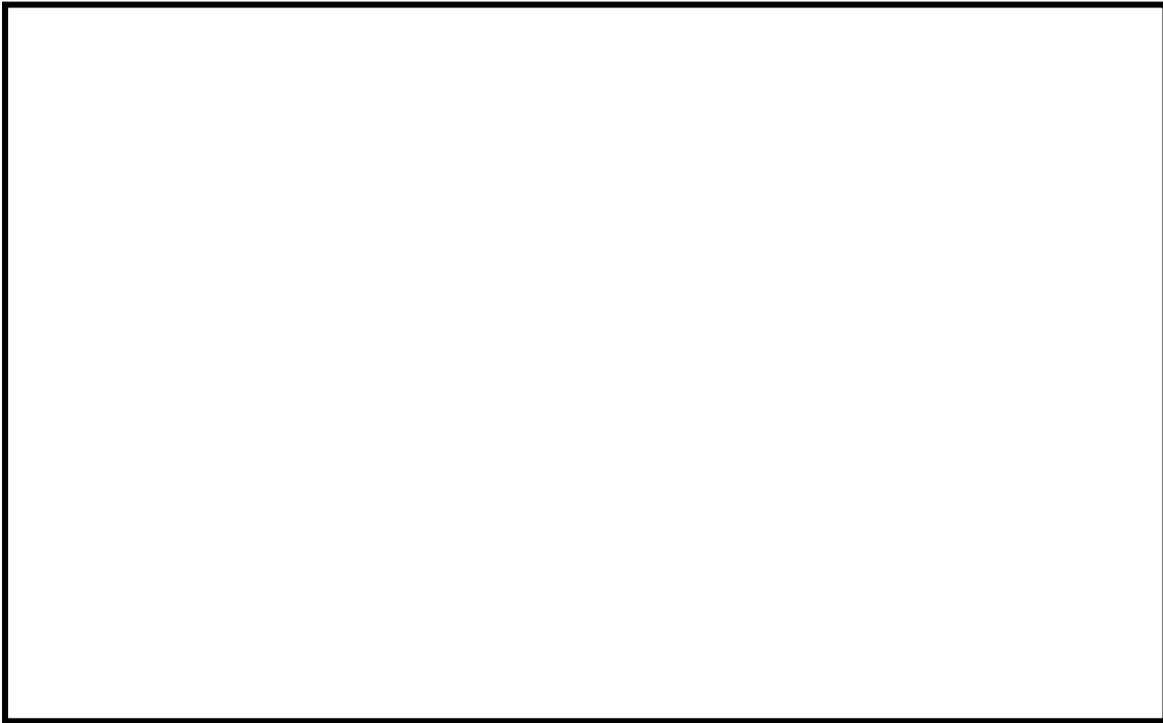


図 2-50 THAI HR-14: Hydrogen concentrations( “wet” ) in PAR inlet and outlet  
※参照文献(e)より抜粋

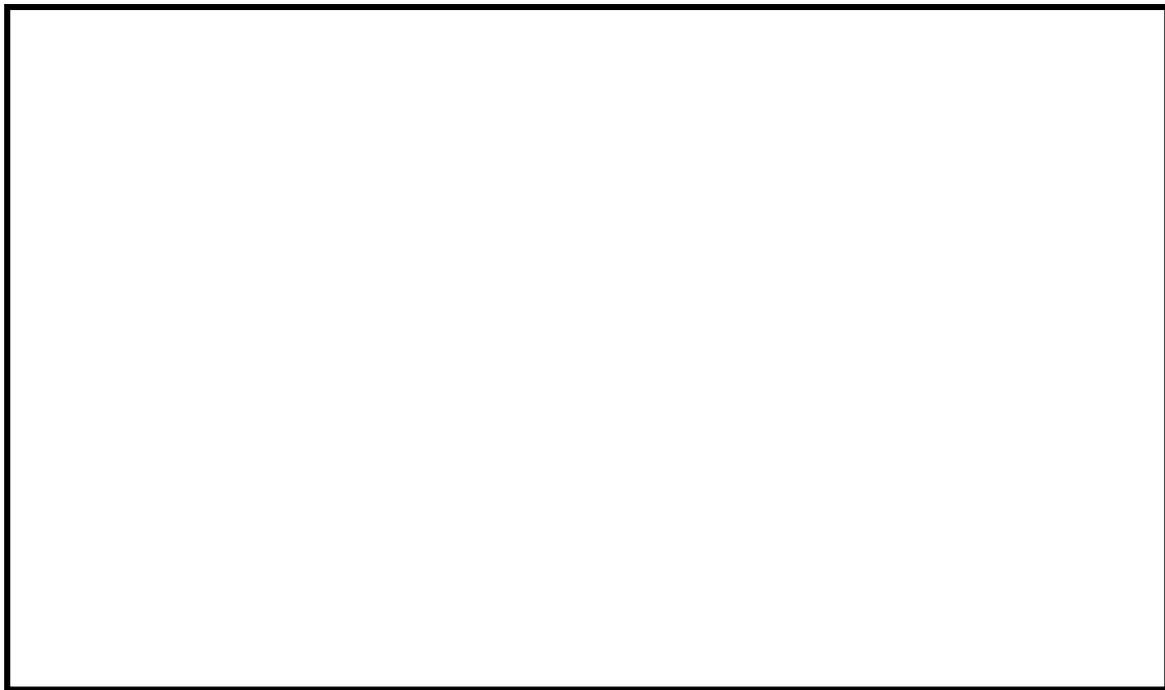


図 2-51 THAI HR-14: Flow velocity and oxygen surplus ratio at PAR inlet channel  
※参照文献(e)より抜粋

## 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 FCS 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 (参照文献 (h))、その試験装置、試験条件等を以下にまとめた。

## 1. 試験装置

図 (添付 8-1) に容器試験装置の外観を、図 (添付 8-2) 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、ガス分析系、真空排気装置等から構成されている。図 (添付 8-3) に試験容器を示す。試験容器は、内径 1.5[m]、内高 3.5[m]、容積 5.76[m<sup>3</sup>]であり、内部に図 (添付 8-4) に示す PAR を設置している。PAR 内部には、高さ 20[cm] × 幅 20[cm] × 厚さ 1[cm] の触媒カートリッジ 5 枚が格納されている。

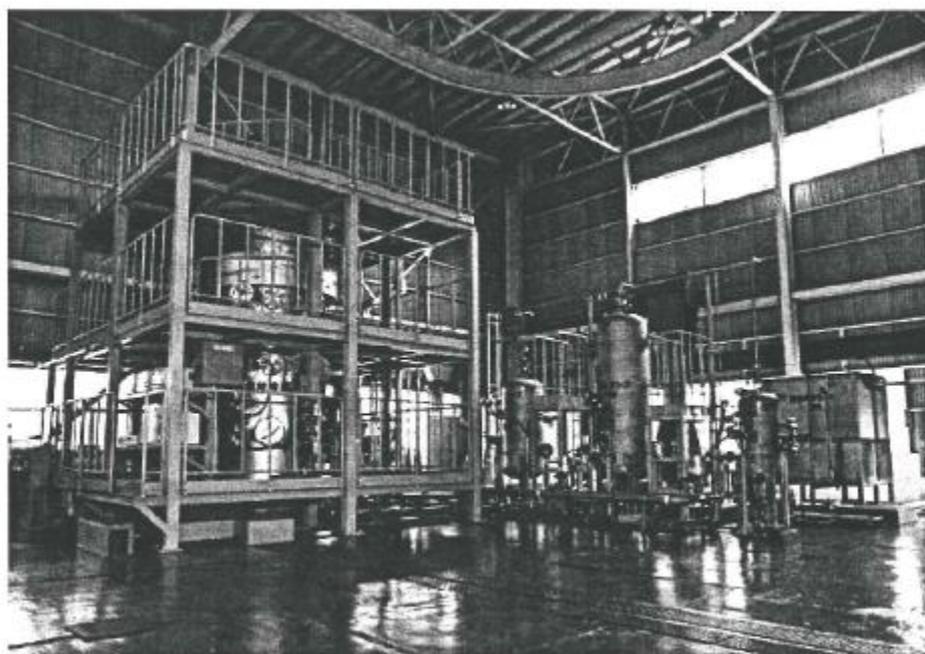
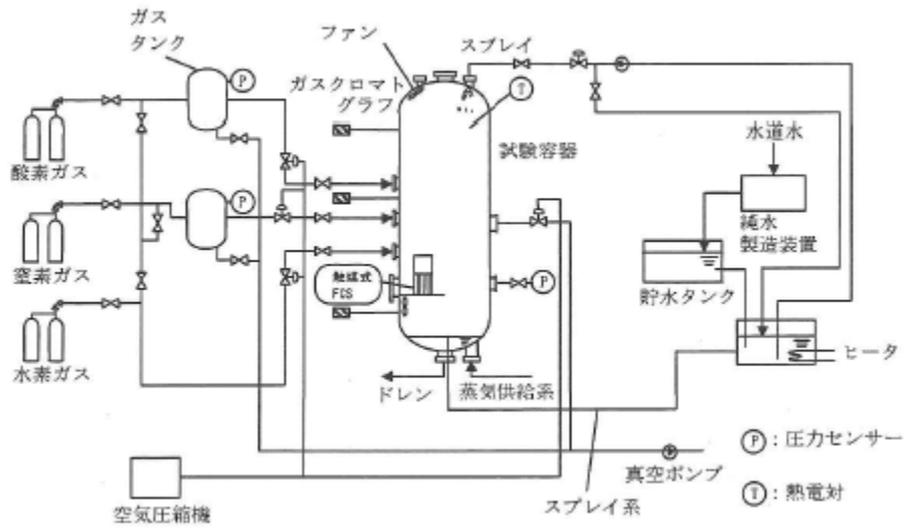


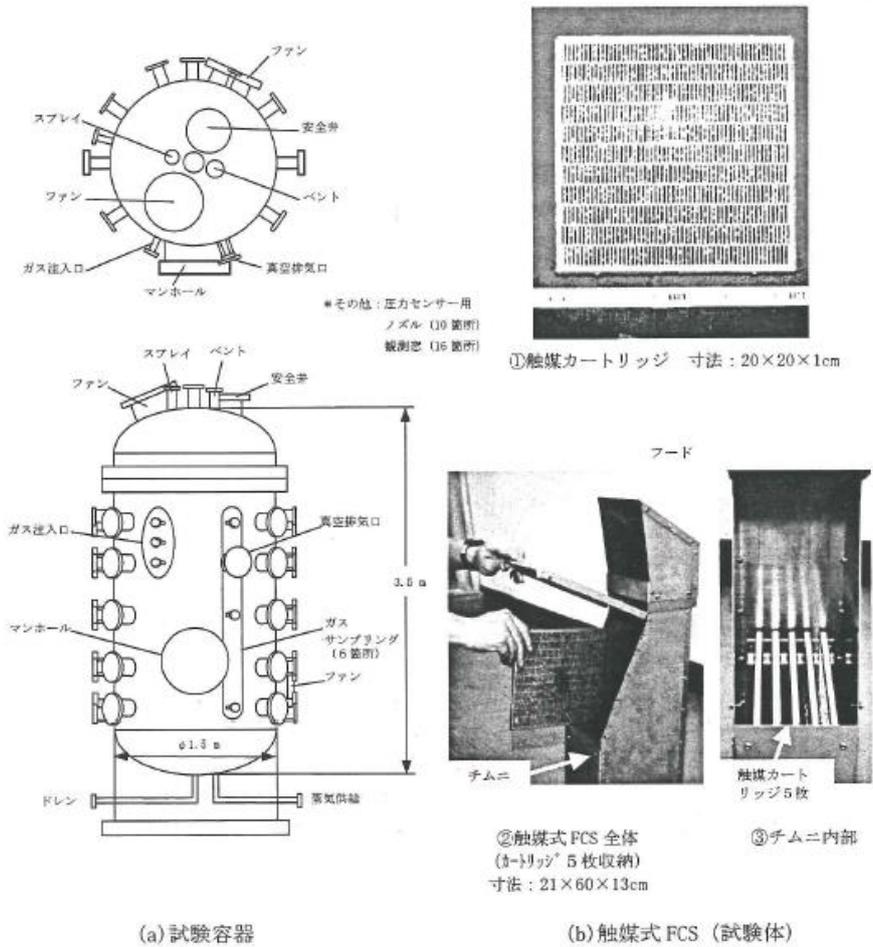
図 (添付 8-1) 試験装置外観

※参照文献 (h) より抜粋



図(添付8-2) 試験装置系統図

※参照文献(h)より抜粋



図(添付8-3) 試験容器

※参照文献(h)より抜粋

図(添付8-4) PAR (試験体)

ここで、本試験にて用いている試験PARとPAR-11（柏崎刈羽原子力発電所6/7号炉で採用），PAR-22，PAR-44，PAR-88の触媒カートリッジの比較を表(添付8-1)に示す。PARのスケールファクターは、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-11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、スケールファクターを算出できる。

本試験においてはこのスケールファクターを使用することで、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(添付8-1) 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	PAR-88に対する入口部開口面積の比	スケールファクター
	枚数	間隔	幅×高さ×厚さ				
PAR-88	88	1cm	45×20×1cm	1	7568cm <sup>2</sup>	1	1
PAR-44	44	1cm	45×20×1cm	0.5	3784cm <sup>2</sup>	0.5	0.5
PAR-22	22	1cm	45×20×1cm	0.25	1892cm <sup>2</sup>	0.25	0.25
PAR-11	11	1cm	45×20×1cm	0.125	946cm <sup>2</sup>	0.125	0.125
国内試験用PAR	5	1cm	20×20×1cm	0.0568	190cm <sup>2</sup>	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(添付8-2)にスプレー無しで実施された試験条件を示す。

表(添付8-2) 試験条件

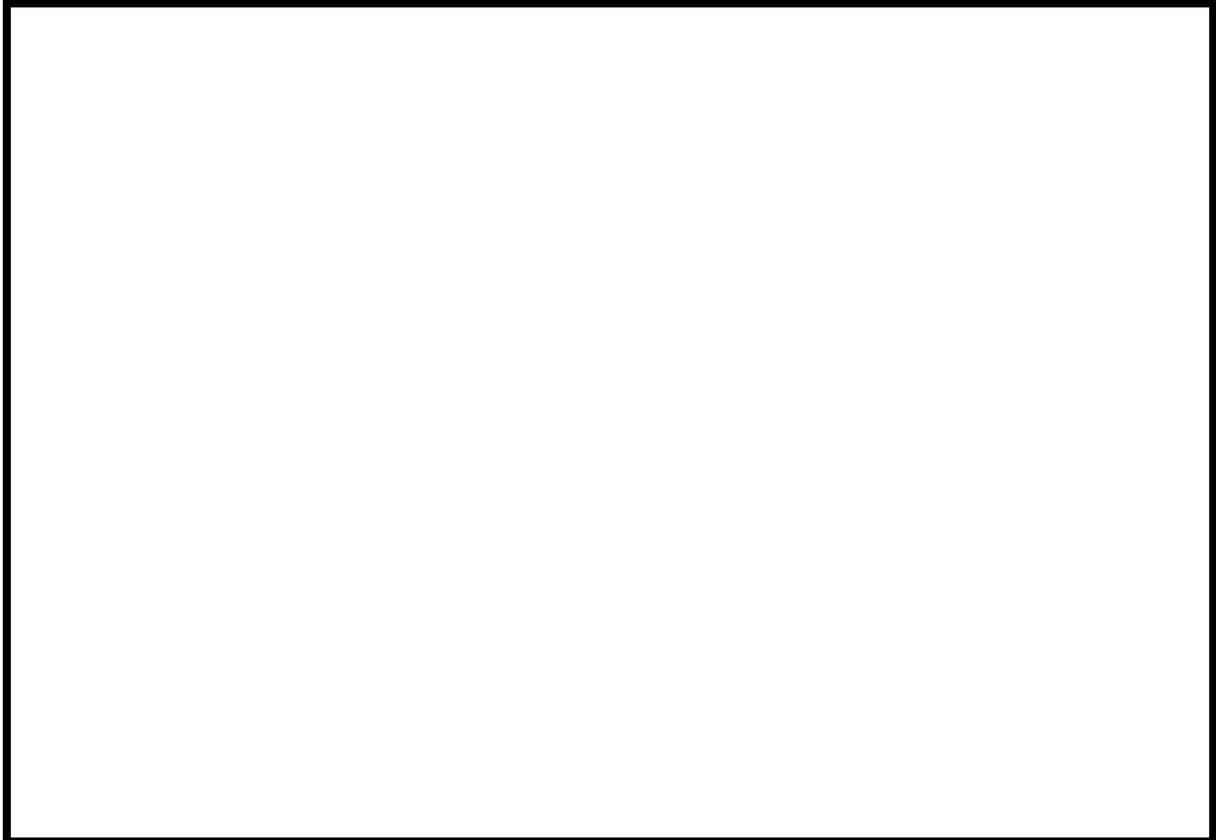
RUN No.	スプレー流量 (L/min)	水素濃度 (vol%)	酸素濃度 (vol%)	圧力 (MPa)	温度 (K)
RUN-2	—	0.5~3	3.5	0.13	333

## 3. 試験方法と試験手順

試験容器内を約0.13[kPa]（約1[torr]）まで減圧した後、所定の分圧になるように窒素及び酸素ガスを注入し、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、水素を容器に注入してPARによる水素、酸素の再結合反応状態について確認する。

#### 4. 試験結果

図(添付8-5)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(添付8-5) 試験結果と水素処理性能評価式を用いた算出値の比較

※参考文献(h)より抜粋

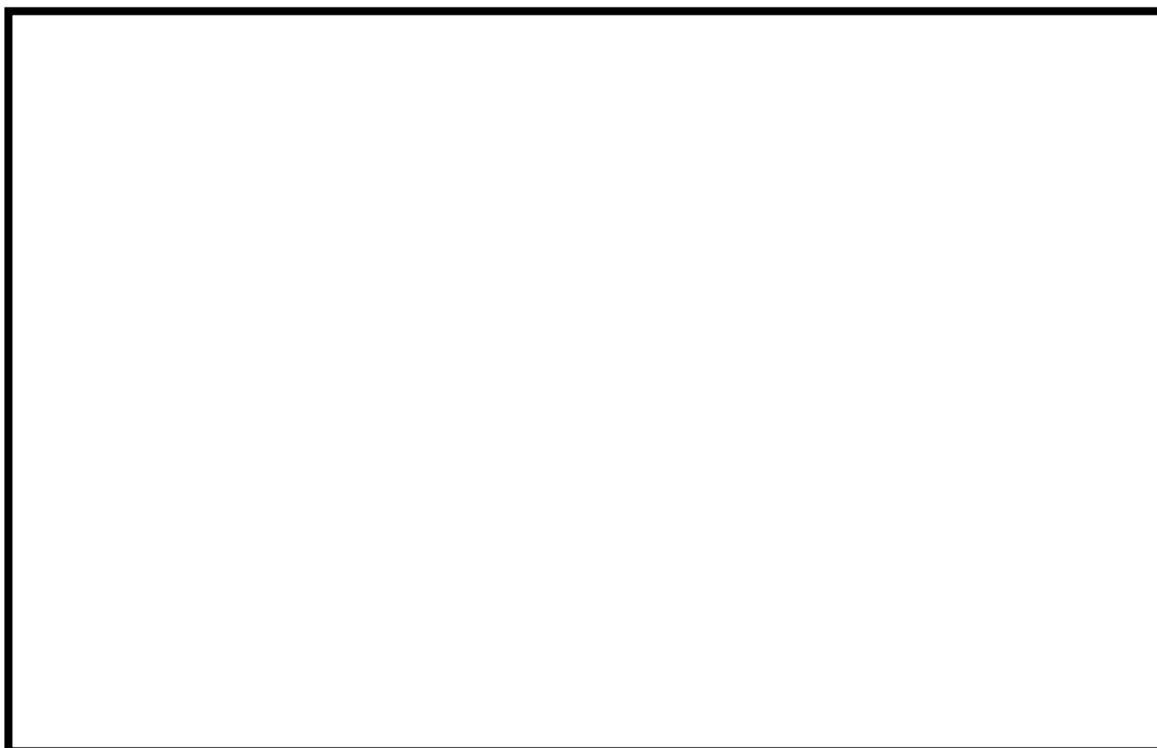
## 静的触媒式水素再結合器 動作監視装置について

## (1) 目的

静的触媒式水素再結合器（以下、PARという。）は、原子炉建屋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。

PARは、触媒における再結合反応により水素を除去する設備であるので、水素濃度の上昇に従って装置の入口側と出口側の差温度が上昇する（図(添付9-1)、図(添付9-2)）ことから、PAR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、PAR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、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、原子炉建屋内に設置されているPAR（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PAR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(添付9-1) SNLで行われた試験用PAR 概要

※参考文献(b)より抜粋

 : 枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



図(添付 9-2) SNL で行われた試験結果 (PAR 温度と水素濃度の関係)

※参照文献(b)より抜粋

：枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

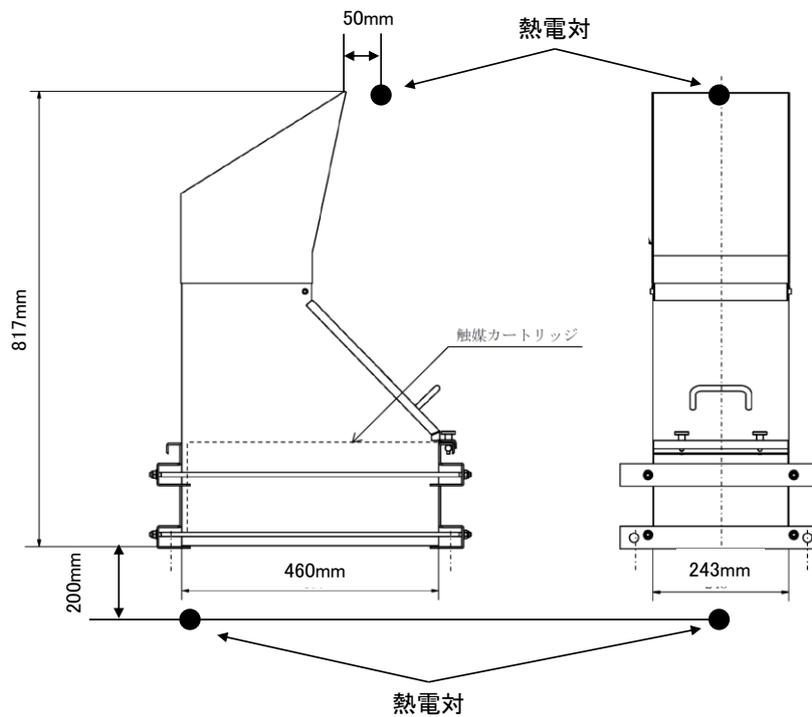
## (2) 設備概要

PAR2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入口及び出口近傍に熱電対シースを取り付け、ガス温度を測定できるようにしている。

実験結果 (図(添付9-2)) において、触媒部での水素再結合反応に伴い、水素濃度1.0%程度でPAR入口と出口のガス差温度は約40K、水素濃度4.0%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。

なお、PAR の入口側及び出口側温度計と原子炉建屋水素濃度計の関係を考慮した PAR 動作監視方法について、PAR 実機モデルでの評価等も踏まえて改善検討を行っていく。



図(添付9-3) PARへの熱電対取り付け位置

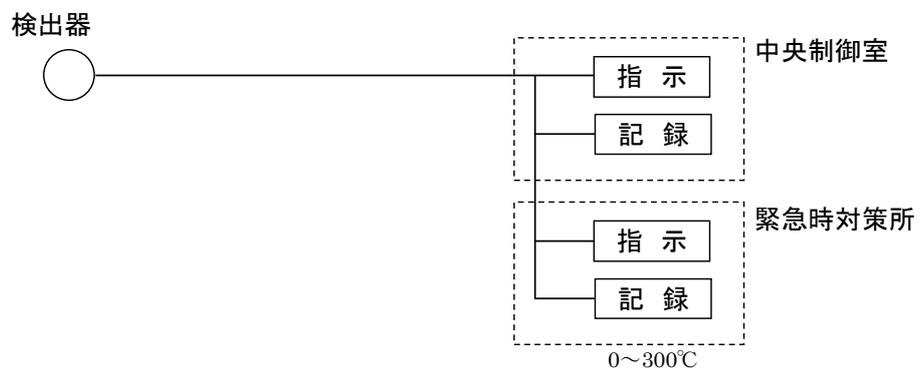
PARへの熱電対取り付け位置は、サポートとの干渉を考慮したPAR筐体付近への取り付け性、固定性、保守性等を考慮してPAR入口側及び出口側のガス温度が測れる位置としている（図(添付9-3)）。

熱電対シースは外径4.8mm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。

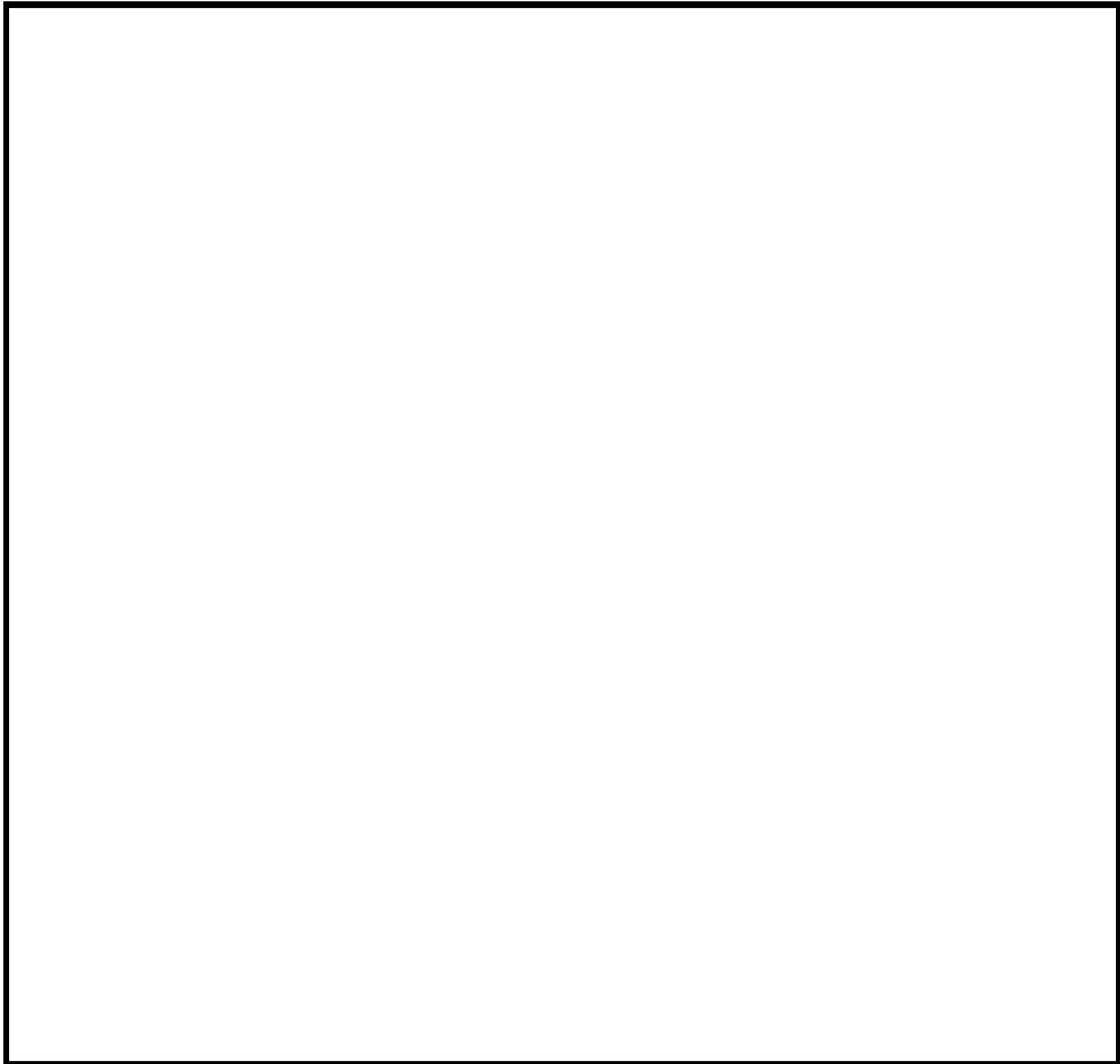
測定温度は、中央制御室及び緊急時対策所に指示及び記録される（図(添付9-4)）。

表(添付9-1) 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
PAR入口温度計	熱電対	0～300℃	原子炉建屋4階	2
PAR出口温度計	熱電対	0～300℃	原子炉建屋4階	2

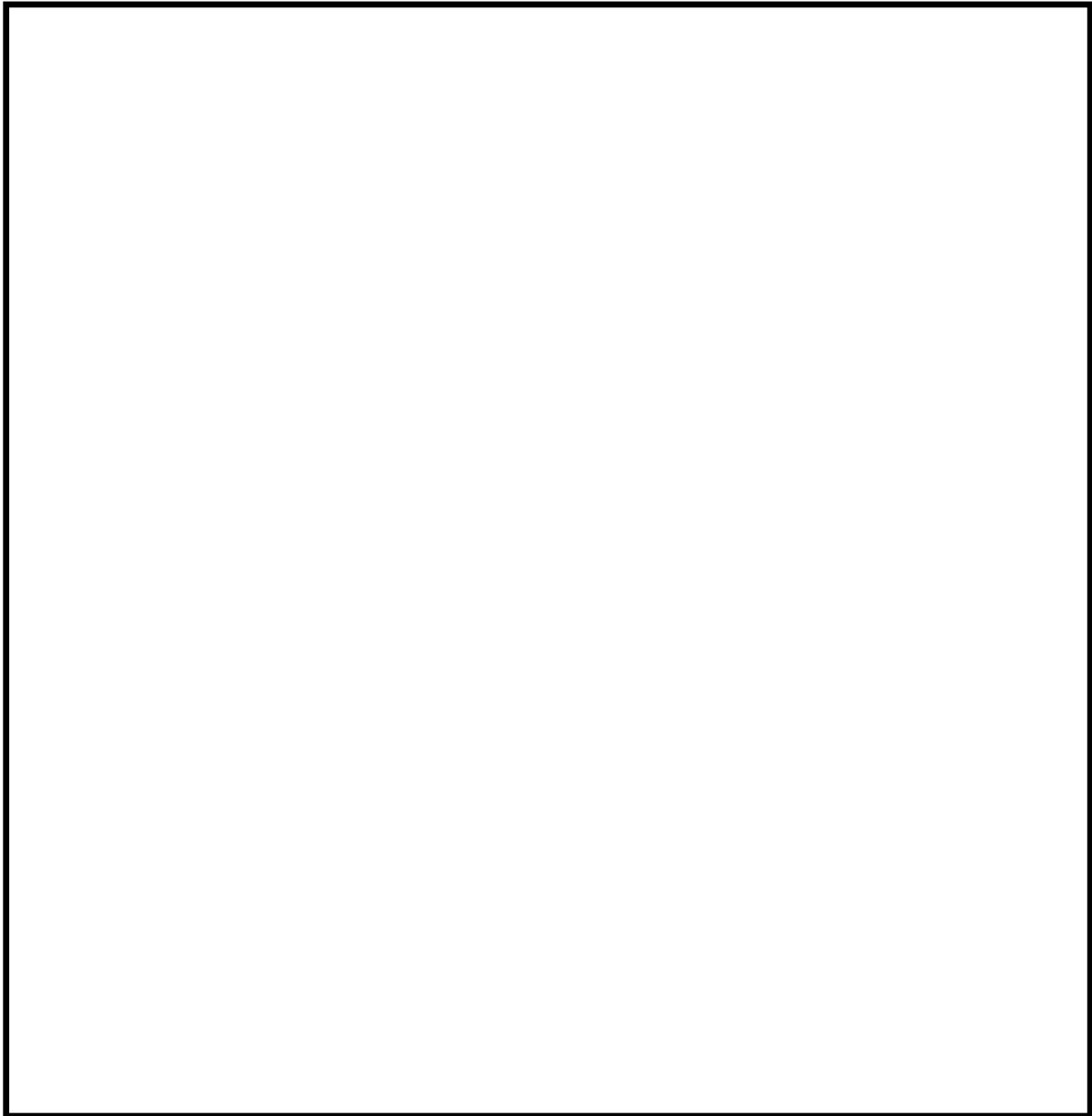


図(添付 9-4) PAR 動作監視装置の概略構成図



図(添付 9-5) 機器配置図 (6号炉)

: 防護上の観点から公開できません



図(添付 9-6) 機器配置図 (7 号炉)

: 防護上の観点から公開できません

## 原子炉建屋小部屋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を処理するためにオペレーティングフロアに PAR を設置し、格納容器トップヘッド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から漏えいする水素をオペレーティングフロアで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、小部屋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小部屋について

重大事故時において、格納容器から水素が漏えいする可能性がある箇所は格納容器ペネトレーションと考えられる。格納容器ペネトレーションのうち、重大事故時において格納容器過温・過圧によるシール機能への影響が考慮されるものとして、格納容器変形に伴い開口が比較的生じるトップヘッドフランジ、機器搬入用ハッチ、エアロックがあり、水素漏えいは主にここから発生するものと考えられる。よって、水素影響を考慮すべきトップヘッドフランジ以外の漏えいポテンシャルと考えるペネトレーションで、小部屋にあるものを抽出した結果、表（添付 10-1）が水素影響を考慮すべき小部屋と考える。

表(添付 10-1) 水素影響を考慮すべき小部屋 (6号炉及び7号炉)

漏えいフロア	漏えい箇所
2 階	上部ドライウエル機器搬入用ハッチ
	上部ドライウエル所員用エアロック
	ISI ハッチ
地下 1 階	S/C 出入口
地下 2 階	下部ドライウエル機器搬入用ハッチ
	下部ドライウエル所員用エアロック

### 3. 小部屋のダクトについて

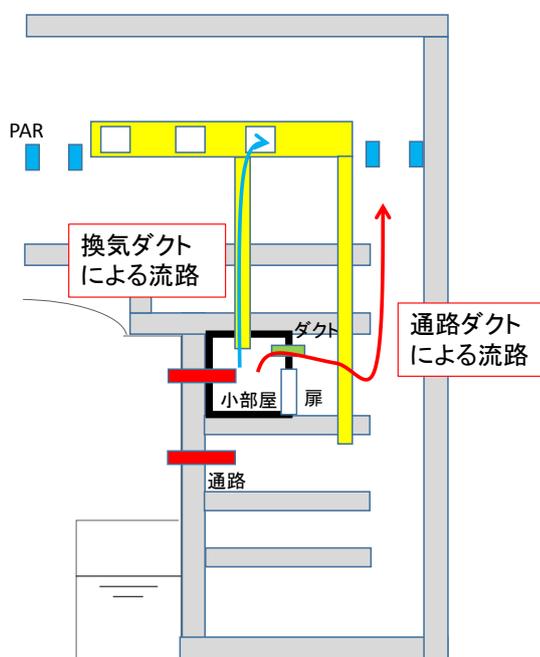
水素影響を考慮すべき小部屋について、水素がオペレーティングフロアに流れる流路の有無を調査した。各小部屋には、各階の通路に繋がるダクト（以下、通路ダクトという）と、オペレーティングフロアに繋がるダクト（以下、換気ダクトという）がある。

#### 1) 通路ダクトについて

各階の通路は、各フロアに設置されたハッチにより、最地下階からオペレーティングフロアまで各階に開口部がある。そのため、通路ダクトにより通路部に抜けた水素は、オペレーティングフロアに流れる流路があるため、オペレーティングフロアに設置された PAR により水素処理されることが期待できる。

#### 2) 換気ダクトについて

換気ダクトはオペレーティングフロアに繋がるダクトであるため、小部屋の水素はオペレーティングフロアに流れる流路がある。よって、この流路を通過してオペレーティングフロアに設置された PAR により水素処理されることが期待できる。



図(添付 10-1) 通路ダクト，換気ダクトによる流路のイメージ

水素影響を考慮すべき小部屋について、通路ダクト、換気ダクトの有無を整理した結果を6号炉については表(添付10-2)、7号炉については表(添付10-3)に示す。

表(添付10-2) 小部屋の通路ダクト・換気ダクト有無 (6号炉)

貫通部	通路ダクトの有無	換気ダクトの有無	備考
上部ドライウエル機器搬入用ハッチ	有	有	
上部ドライウエル所員用エアロック	有	有	
ISI ハッチ	有	有	
S/C 出入口	有	有	
下部ドライウエル機器搬入用ハッチ	無※	有	※隣部屋との境界は、気密性のない遮蔽体 隣部屋に通路ダクトあり
下部ドライウエル所員用エアロック	有	有	

表(添付10-3) 小部屋の通路ダクト・換気ダクト有無 (7号炉)

貫通部	通路ダクトの有無	換気ダクトの有無	備考
上部ドライウエル機器搬入用ハッチ	有	有	
上部ドライウエル所員用エアロック	有	有	
ISI ハッチ	有	有	
S/C 出入口	有	有	
下部ドライウエル機器搬入用ハッチ	有	有	
下部ドライウエル所員用エアロック	無※	有	※隣部屋に繋がるダクトあり。 隣部屋に通路ダクトあり

これらのダクトは耐震性を考慮して設計したものではないが、水素の流れを遮断するような完全閉塞を起こすことは工学的に考えられないことから、水素の流路として考慮する。

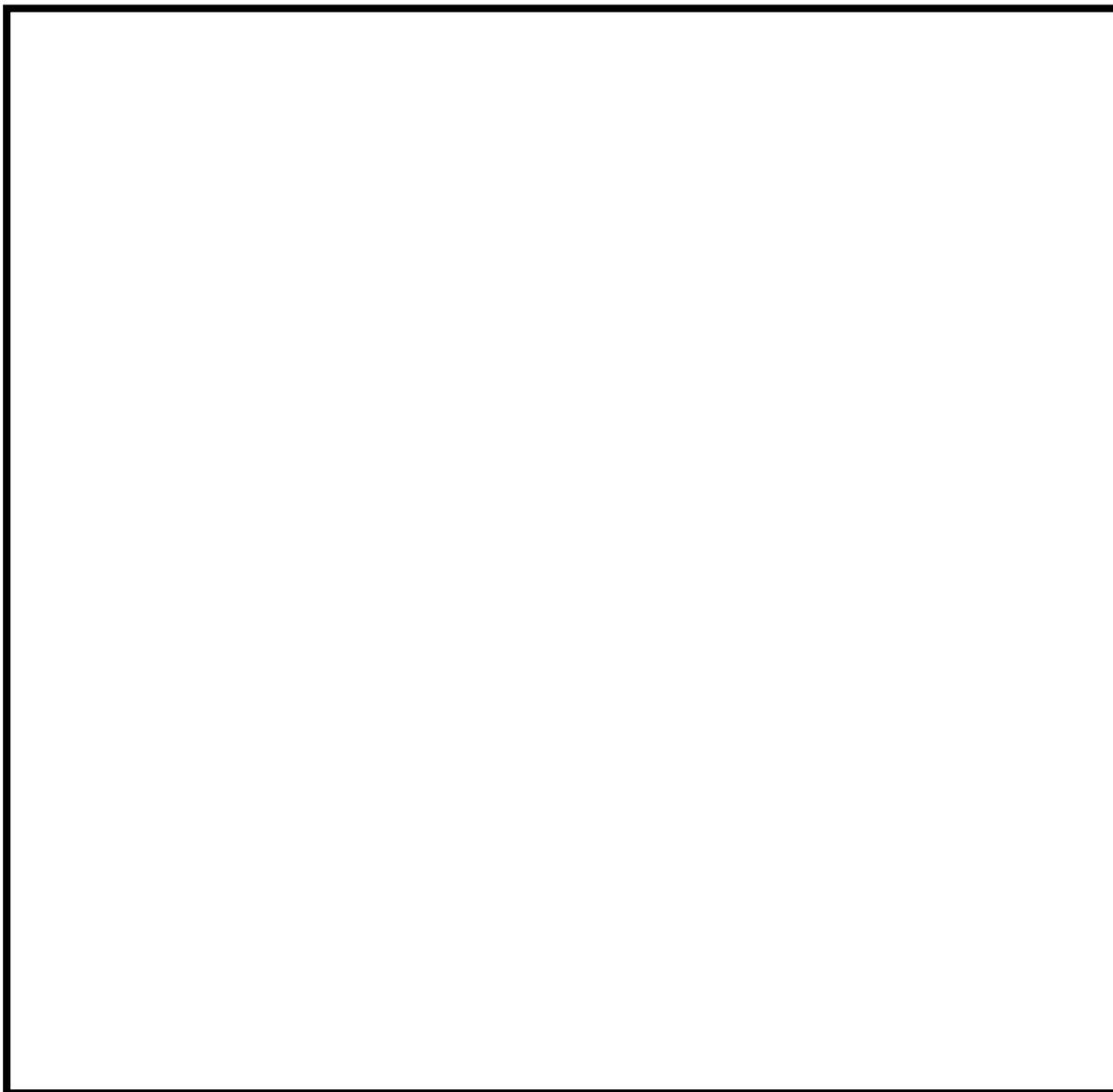
#### 4. 小部屋の水素対策について

小部屋に漏えいした水素は、表(添付10-2)及び表(添付10-3)で示すようにオペレーティングフロアに水素が流れる流路の有無を確認し、水素影響の考慮が必要になると判断した場合は、オペレーティングフロアに繋がる流路等を検討し、水素濃度の上昇を抑制する。

## 5. 小部屋の水素濃度の評価例について

小部屋における水素影響について，換気ダクトの効果を確認するため，下部ドライウェル機器搬入用ハッチを設置している部屋を例として，2.2.2同様，汎用熱流動解析コードGOTHICを用いて評価した結果を以下に示す。

解析モデルのイメージ図を図(添付10-2)に示す。



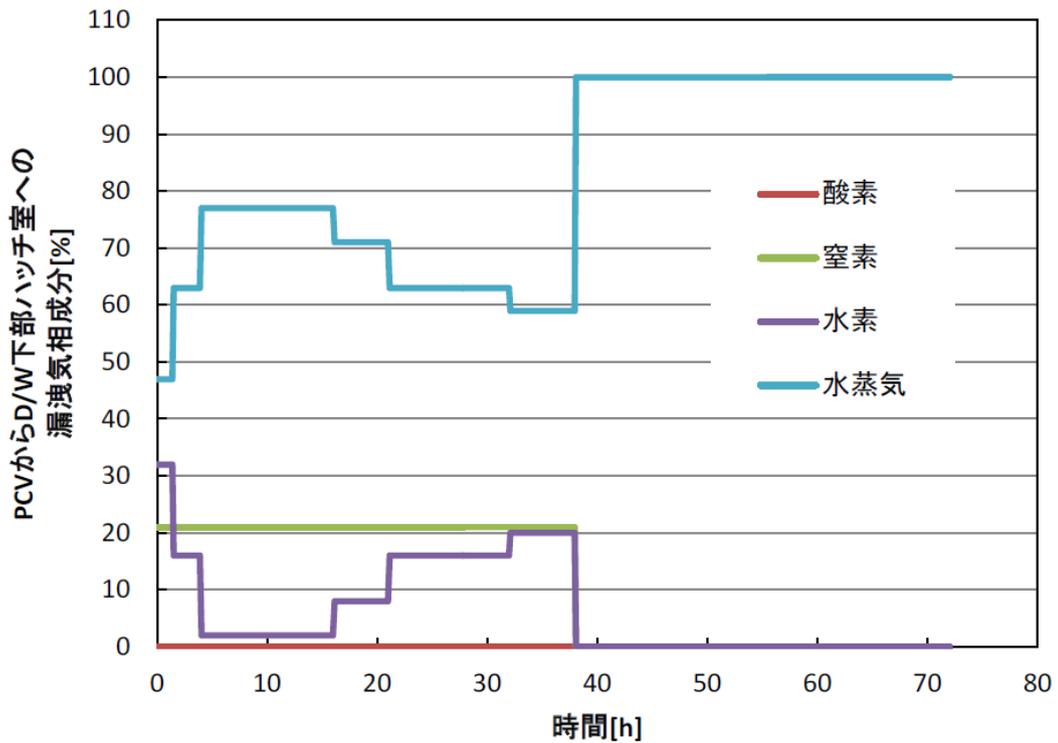
図(添付10-2) 下部ドライウェル機器搬入用ハッチ室 解析モデルイメージ

格納容器から室内へのガス漏えい条件は、2.2.2.3のケース2に示す「①有効性評価代表シナリオ包絡条件」かつ「オペフロ+下層階」漏えい条件から水素濃度の時間変化をより細かく設定した表(添付10-4)、図(添付10-3)を用い、事故後72時間までの評価を行う。なお、保守的に格納容器ベント実施(38時間)までは2.2.2.2の「①有効性評価代表シナリオ包絡条件」同様、格納容器限界圧力(620kPa[g])、格納容器限界温度(200℃)、格納容器漏えい率1.5%/day一定とし、格納容器ベント実施後は2.2.2.2の「①有効性評価代表シナリオ包絡条件」と同じ条件とする。

表(添付10-4) 格納容器からハッチ室へのガス漏えい条件

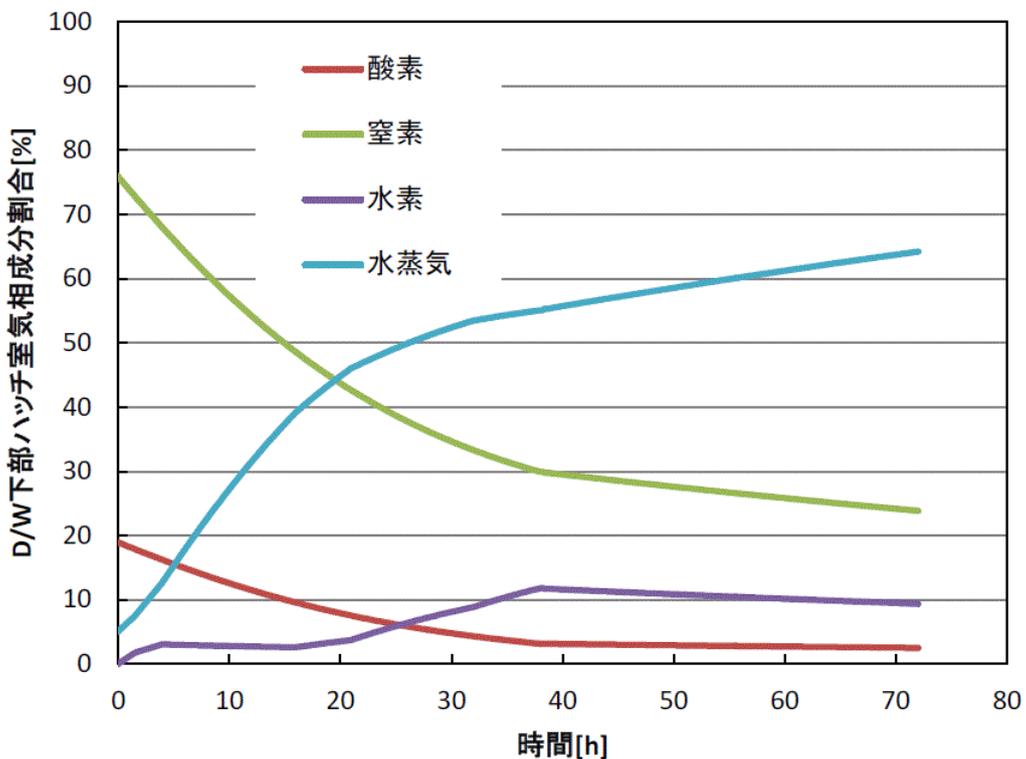
項目	解析条件			
	0～1.5時間	1.5～4時間	4～16時間	16～21時間
圧力	620kPa[g] (2Pd)	620kPa[g] (2Pd)	620kPa[g] (2Pd)	620kPa[g] (2Pd)
温度	200℃	200℃	200℃	200℃
水蒸気分率	47%	63%	77%	71%
水素分率	32%	16%	2%	8%
窒素分率	21%	21%	21%	21%
格納容器漏えい率	1.5%/day	1.5%/day	1.5%/day	1.5%/day

項目	解析条件		
	21～32時間	32～38時間	38～72時間
圧力	620kPa[g] (2Pd)	620kPa[g] (2Pd)	155kPa[g] (0.5Pd)
温度	200℃	200℃	171℃
水蒸気分率	63%	59%	100%
水素分率	16%	20%	0%
窒素分率	21%	21%	0%
格納容器漏えい率	1.5%/day	1.5%/day	0.5%/day



図(添付 10-3) 格納容器からハッチ室への漏えいガス成分割合 (%)

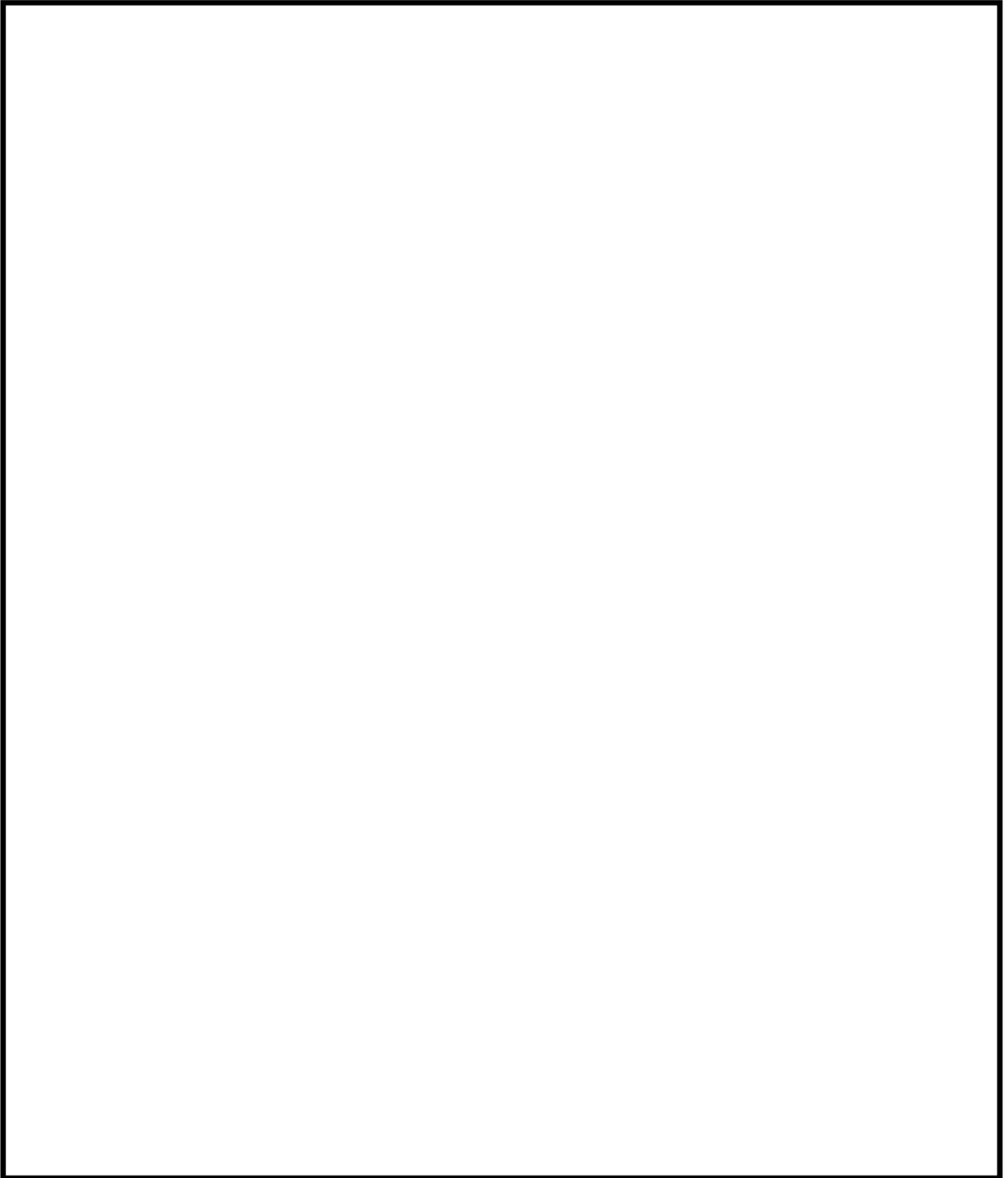
解析結果を図(添付 10-4)に示す。



図(添付 10-4) ハッチ室気相成分割合 (水素濃度最大箇所)

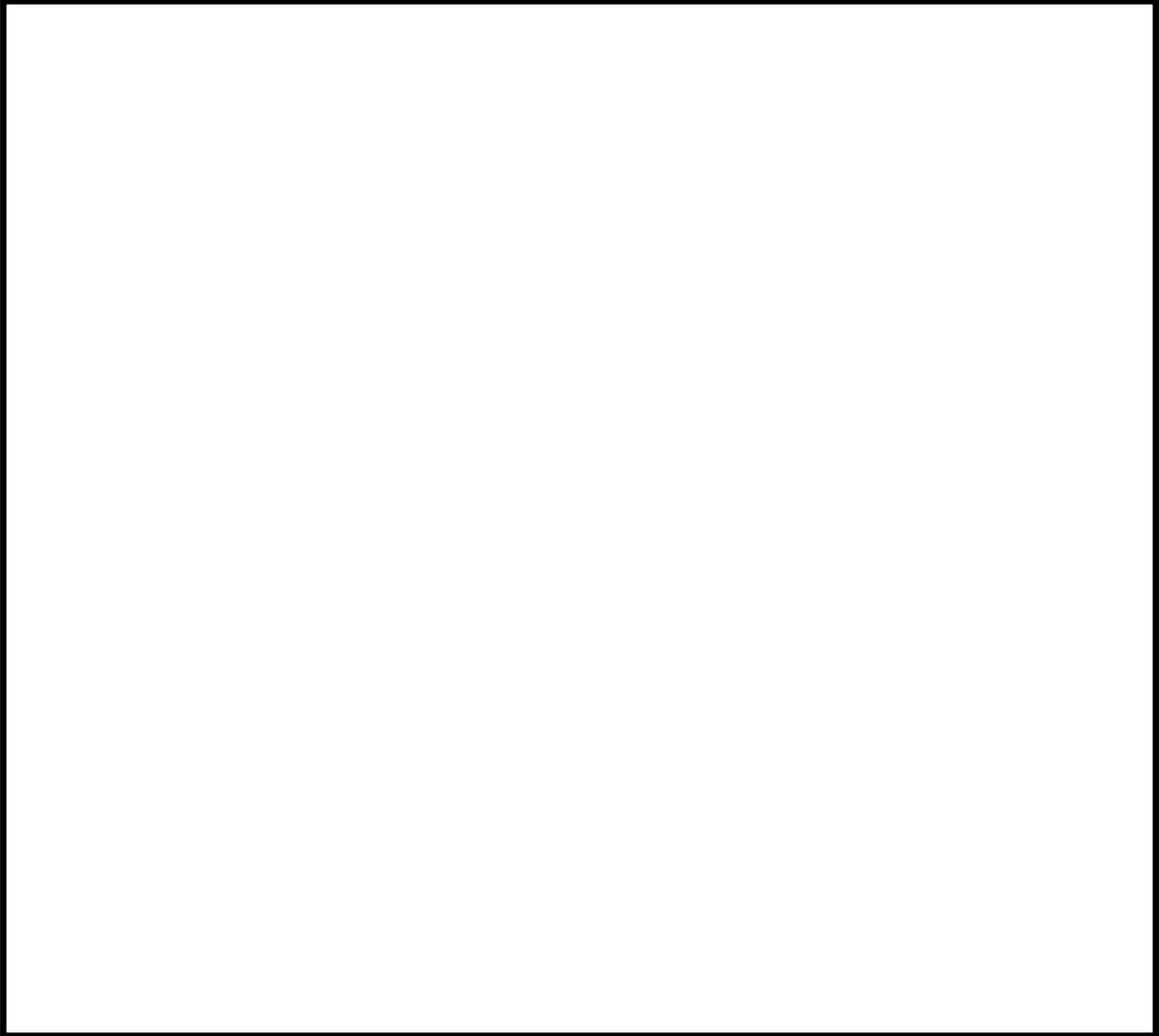
格納容器ベント実施前（38 時間）までは格納容器から漏えいする水蒸気・窒素・水素の混合気体によってハッチ室内の空気（窒素・酸素）が押し出され、格納容器ベント実施後は同様に格納容器から漏えいする水蒸気によってハッチ室内の空気（水蒸気・窒素・酸素・水素）が押し出されていることから、ハッチ室内に漏えいした水素は換気ダクトを通じて PAR を設置しているオペレーティングフロアに導かれることを確認できた。

なお、小部屋に漏えいした水素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屋の損傷を防止するために有益な情報になることから、表(添付 10-2)及び表(添付 10-3)に示す小部屋に漏えいした水素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、水素が最終的に滞留するオペレーティングフロアでの水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建屋全体での水素影響を把握することが可能となる。



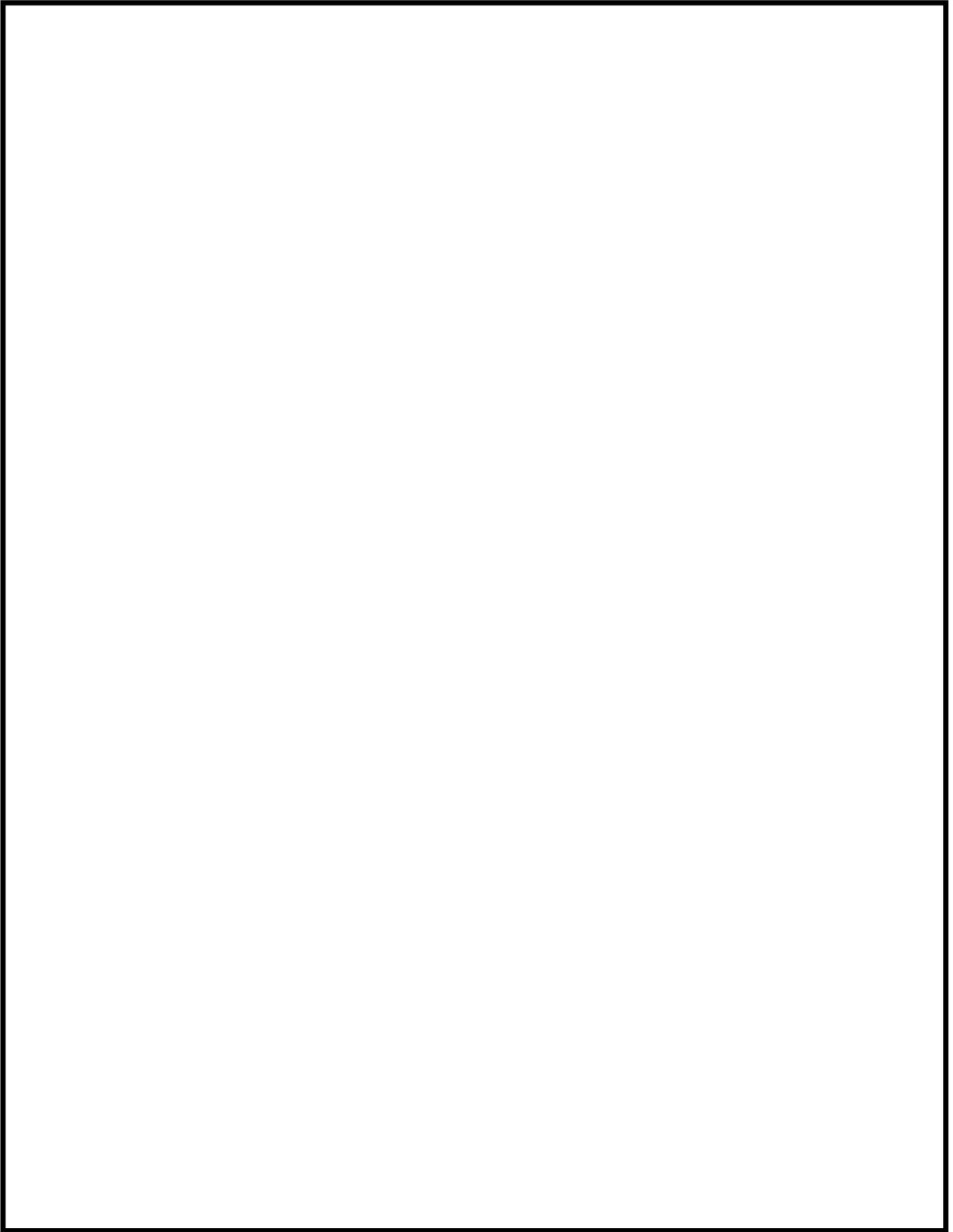
図(添付 10-5) 機器配置図 (6号炉)

: 防護上の観点から公開できません



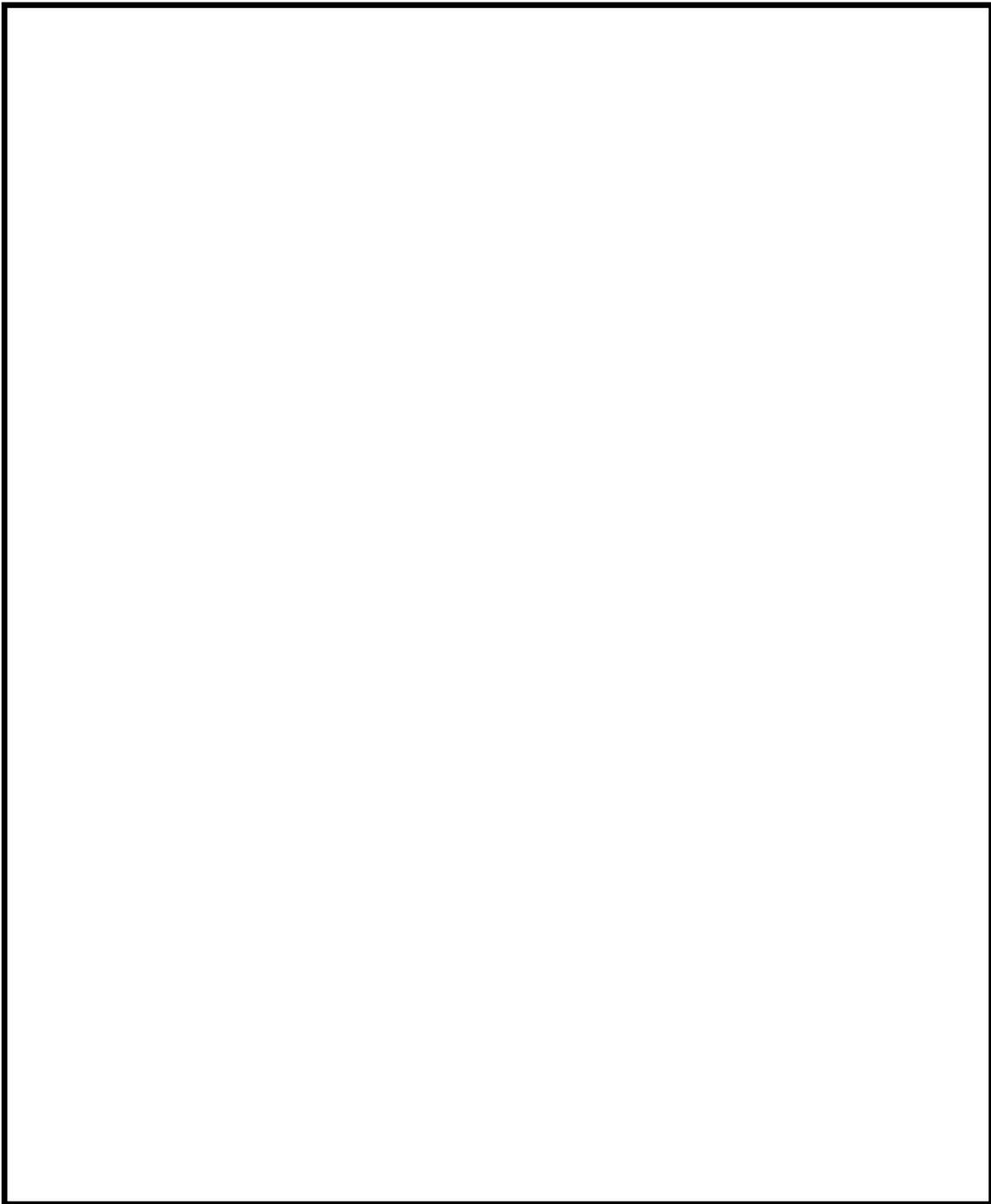
図(添付 10-6) 機器配置図 (6号炉)

: 防護上の観点から公開できません



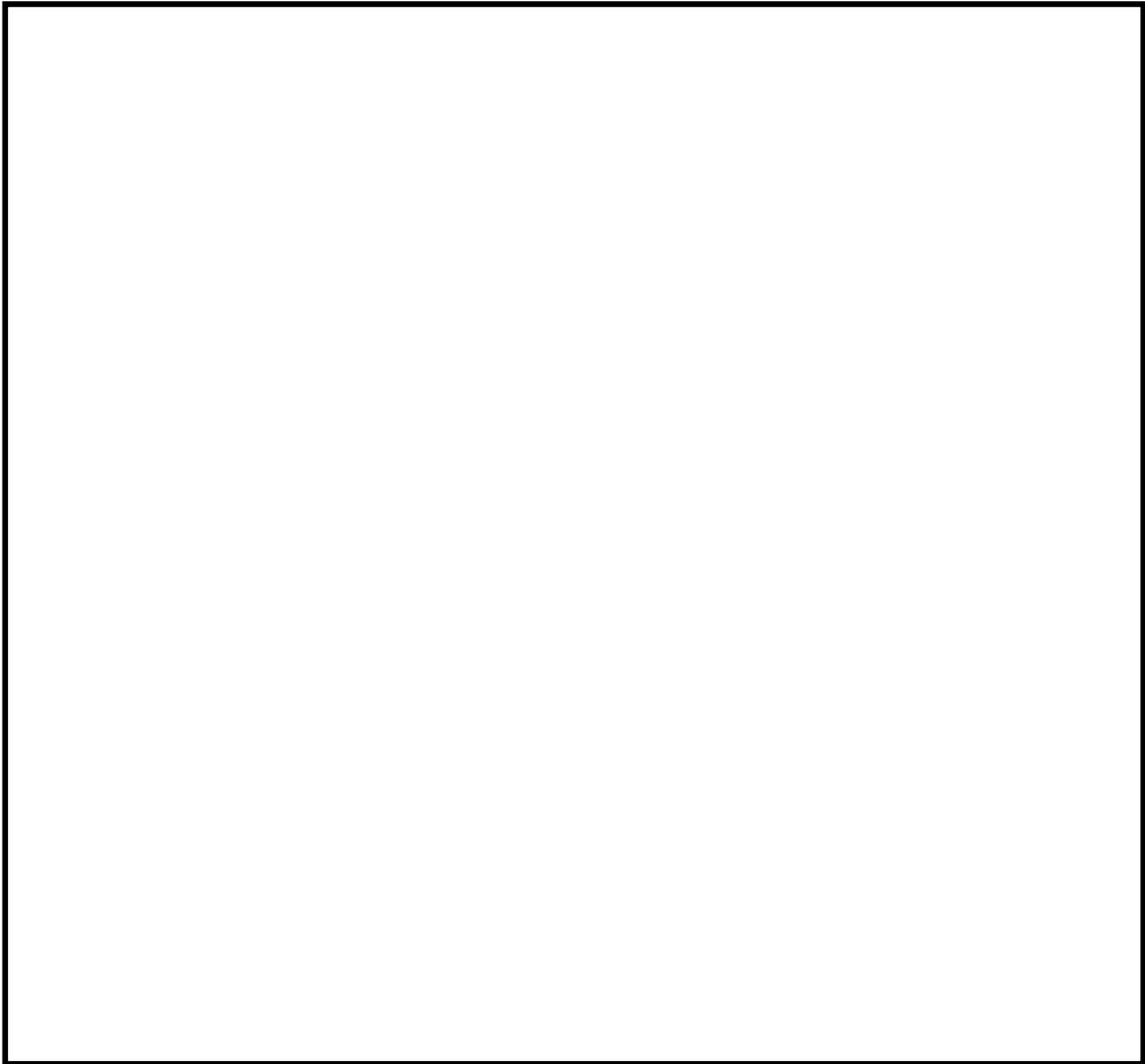
図(添付 10-7) 機器配置図 (6号炉)

: 防護上の観点から公開できません



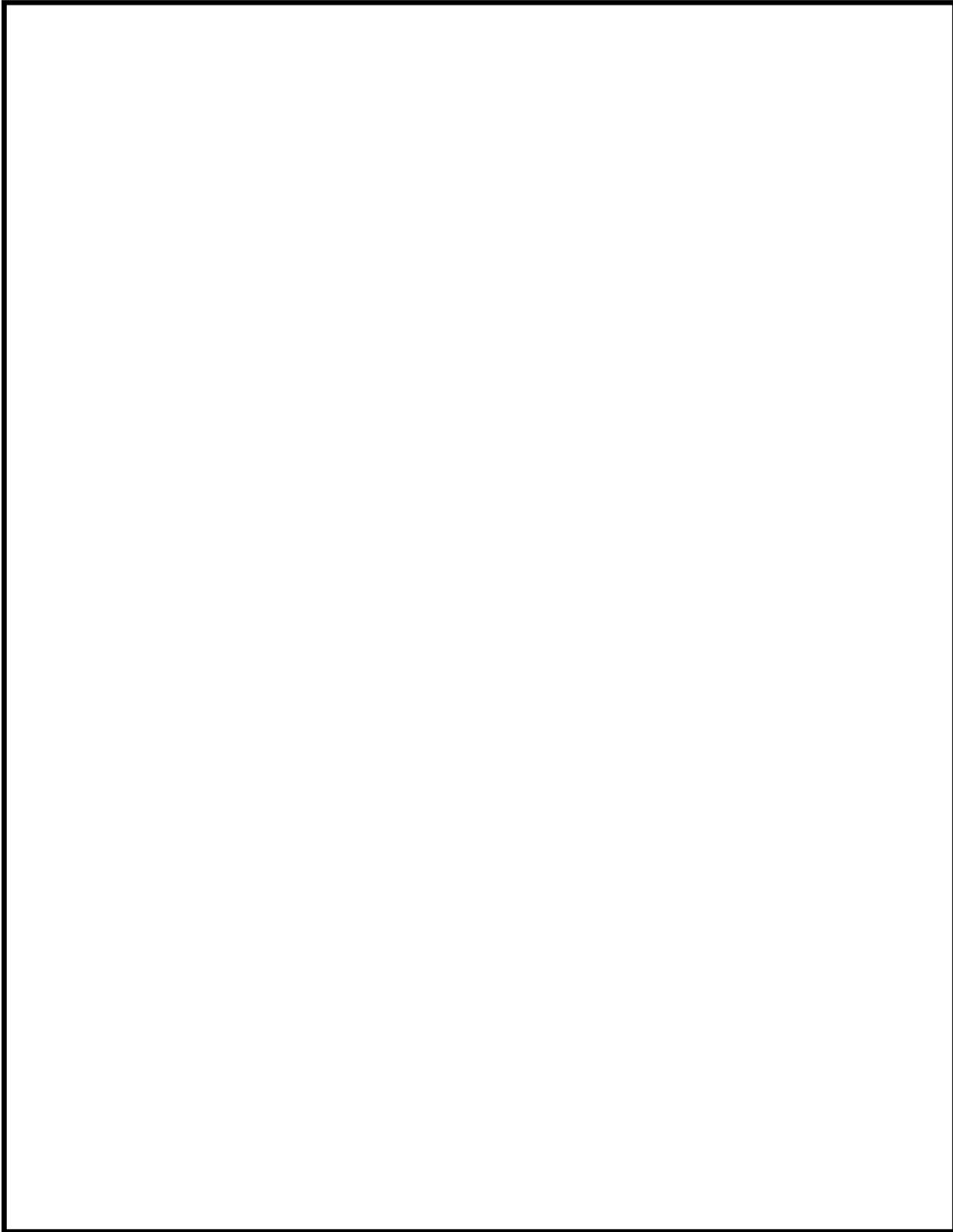
図(添付 10-8) 機器配置図 (7号炉)

 : 防護上の観点から公開できません



図(添付 10-9) 機器配置図 (7号炉)

 : 防護上の観点から公開できません



図(添付 10-10) 機器配置図 (7号炉)

 : 防護上の観点から公開できません

## 2.3 水素濃度監視設備について

### 2.3.1 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屋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屋水素濃度計を設置する。

#### (1) 設計方針

原子炉建屋水素濃度計は炉心の著しい損傷が発生し、水-ジルコニウム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屋へ漏えいした場合に、原子炉建屋において、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、原子炉建屋水素濃度計は電源が喪失した場合においても代替電源設備からの給電が可能な設計とする。

#### (2) 設備概要

##### a. 機器仕様

検出器：熱伝導度方式

計測範囲：水素濃度0～20vol%

個数：2

設置場所：原子炉建屋4階

##### b. 配置場所

図 2-52, 図 2-53 の通り

なお、添付 10 にて記載した小部屋（図(添付 10-5)～図(添付 10-10)）に漏えいした水素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屋の損傷を防止するために有益な情報になることから、小部屋に漏えいした水素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、水素が最終的に滞留するオペレーティングフロアでの水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建屋全体での水素影響を把握することが可能となる。

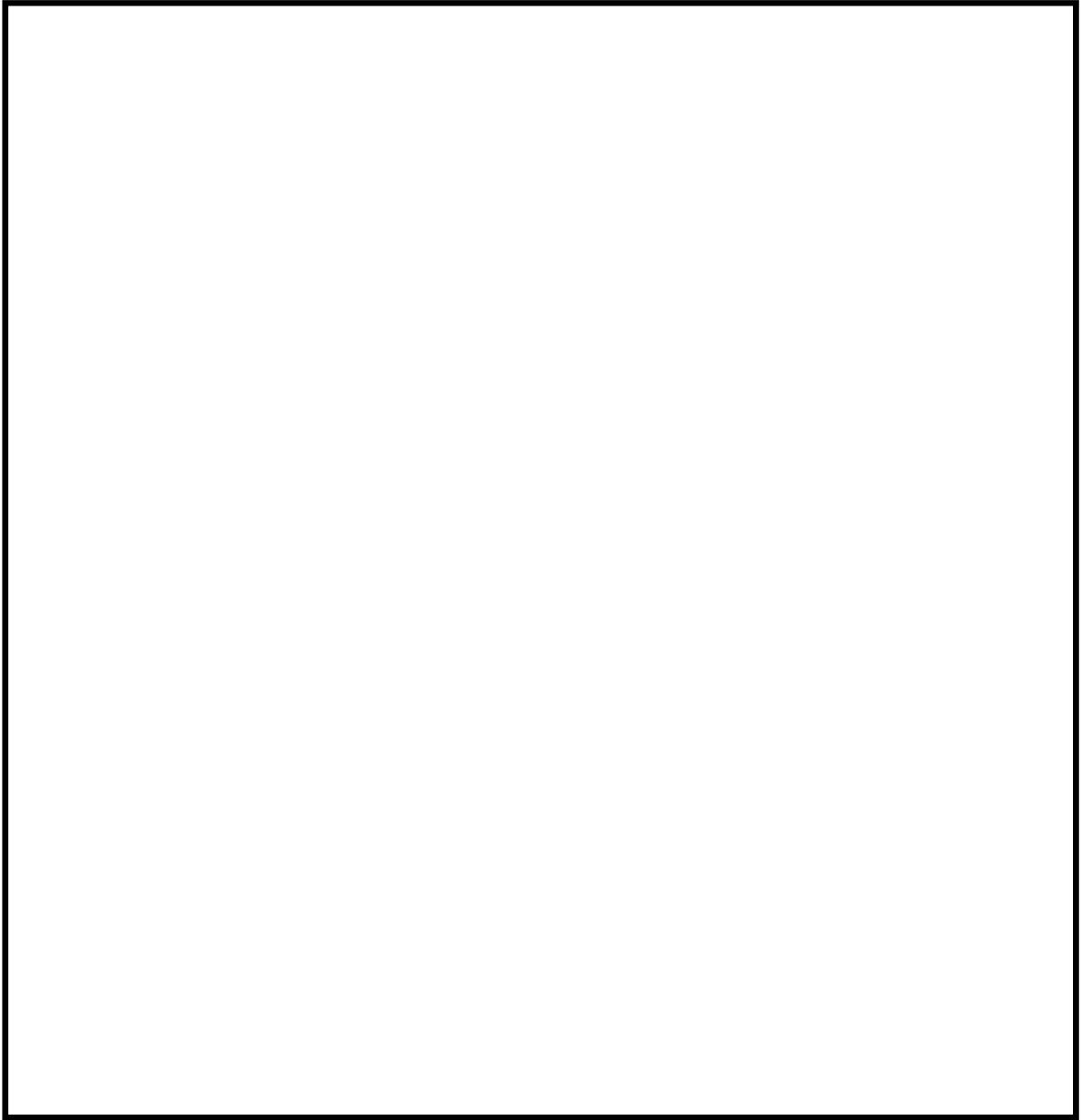


图 2-52 機器配置図 (6 号炉)

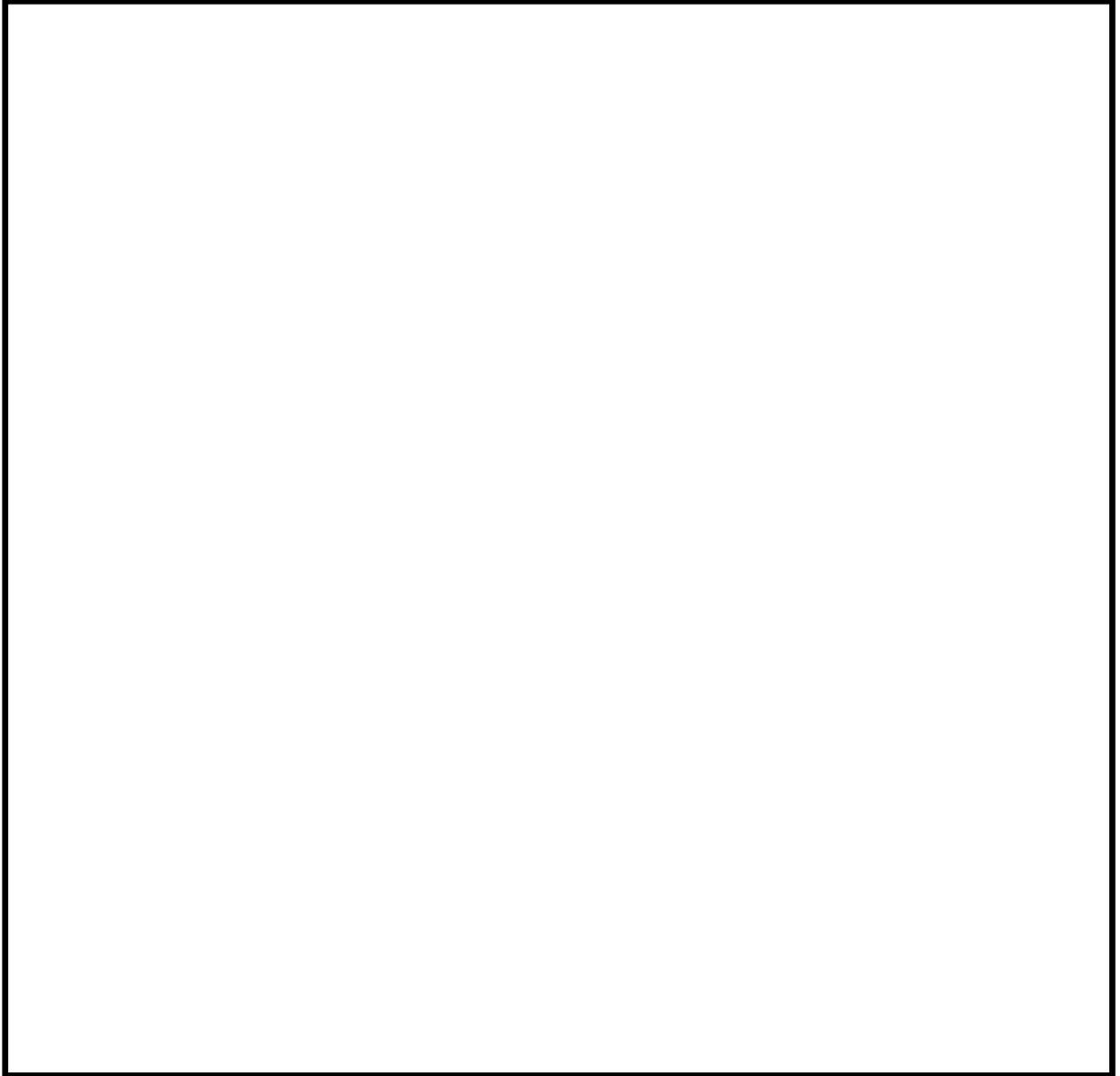


図 2-53 機器配置図 (7号炉)

: 防護上の観点から公開できません

### c. システム構成

原子炉建屋水素濃度計は、熱伝導度方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は、演算器にて水素濃度信号に変換することで、中央制御室及び緊急時対策所に指示及び記録される。原子炉建屋水素濃度計のシステム構成を図2-54に示す。

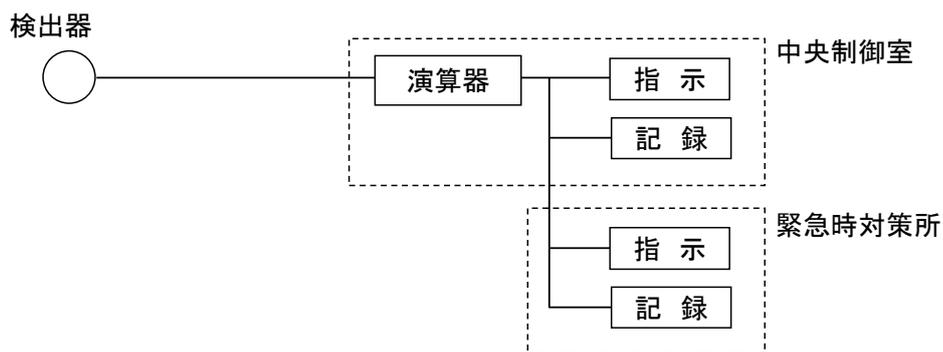


図 2-54 原子炉建屋水素濃度計の概略構成図

### (3) 代替電源の確保

原子炉建屋内の水素濃度を測定するために必要な計器の電源は、非常用電源から給電可能となっており、全交流動力電源喪失の場合にも、常設代替直流電源設備（AM用直流125V充電器，AM用直流125V蓄電池）から給電可能としている。

## 原子炉建屋水素濃度計の適用性について

原子炉建屋水素濃度計は、炉心の著しい損傷が発生した場合に、原子炉建屋内に発生する水素を監視する目的で、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

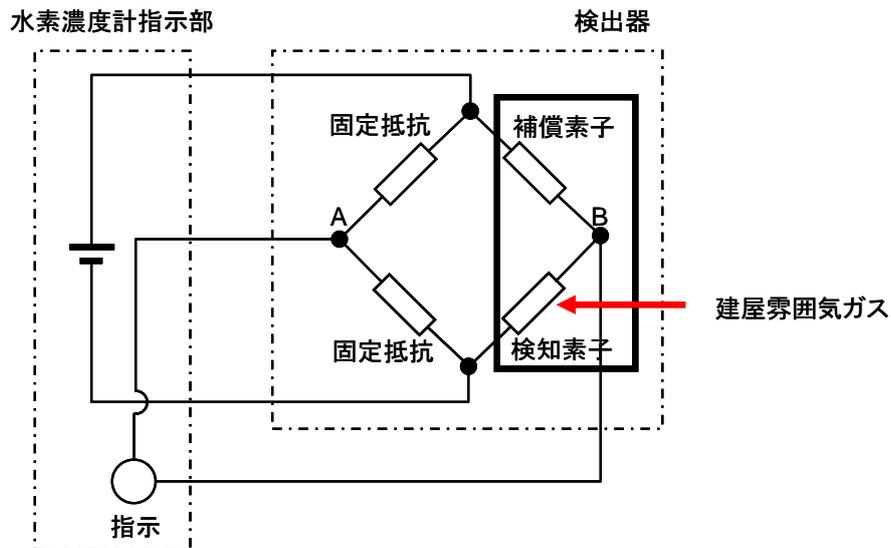
炉心損傷時に原子炉格納容器内に発生する水素が原子炉建屋に漏えいした場合に、PARによる水素濃度低減（可燃限界である4%未満）をトレンドとして連続的に監視できることが主な役割であることから、0～20vol%を計測可能な範囲とする。

## (2) 水素濃度計の測定原理

原子炉建屋内の水素濃度を測定するために用いる水素濃度計は、熱伝導度式のものを用いる。

熱伝導度式の水素検出器は、図(添付 11-1)に示すとおり、白金線のフィラメントで構成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。検知素子の部分に、原子炉建屋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ており測定対象ガスは直接接触しない構造になっている。(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。)

熱伝導度式水素検出器は、標準空気に対する測定ガスの熱伝導率の差を検出する方式のものであり、酸素、窒素などの空気中のガスに対し、水素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  $27^\circ\text{C}$ である一方、酸素、窒素は、約 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  at  $27^\circ\text{C}$ 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計測に対する大きな誤差にはならない。



図(添付 11-1) 水素濃度計検出回路の概要図

### (3) 水素濃度計の設置場所

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況では、格納容器のフランジ部等を通じて水素が原子炉建屋内に漏えいする可能性がある。原子炉建屋内に漏えいした水素は、比重の関係でオペレーティングフロアまで上昇し、オペレーティングフロアに滞留することが予想される（「2.2.1.1 (2) PAR の設置場所について」参照）。また、PAR は水素を処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。従って、オペレーティングフロアの水素ガスが自然対流を起こし拡散される（「2.2.1.2 (3) PAR の設置位置について」参照）。

以上を考慮して、水素濃度計の設置場所は、水素が最も蓄積されると想定されるオペレーティングフロアの天井付近に位置的分散して配置している。

なお、添付10にて記載した小部屋に漏えいした水素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屋の損傷を防止するために有益な情報になることから、小部屋に漏えいした水素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、水素が最終的に滞留するオペレーティングフロアでの水素濃度の両方を監視できることとなり、原子炉建屋全体での水素影響を把握することが可能となる。

(4)水素濃度計の耐環境性について

水素濃度計の設置場所（原子炉建屋4階）について，重大事故等時の環境下で最も設置雰囲気環境が厳しいと想定される有効性評価の「格納容器過圧・過温シナリオ」で評価した事故時想定環境（想定環境は，2.2.2.3 解析結果 ケース1，2，4を包絡する条件で設定）は表(添付11-1)の通りであり，上記の環境条件においても健全性が確保できていることを確認している。

表(添付11-1) 事故時想定環境条件と試験条件

事故時想定環境		試験条件
温度	約45℃	□℃
相対湿度	約100%RH	□%RH
積算放射線量	約200Gy*	□Gy

\*積算放射線量の詳細評価結果は追而

□：枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

## 2.4 格納容器頂部注水系について

格納容器頂部注水系は、炉心の著しい損傷が発生した場合において、格納容器頂部を冷却することで格納容器外への水素漏えいを抑制し、原子炉建屋の水素爆発を防止する機能を有する。格納容器頂部は図 2-55 に示すように、原子炉ウェルに水を注水することで、格納容器トップヘッドフランジを外側から冷却することができる。格納容器トップヘッドフランジは事故時の過温・過圧状態に伴うフランジ開口で、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 EPDM 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 EPDM 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、原子炉建屋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（原子炉建屋水素爆発防止）の適合方針として、重大事故時に原子炉ウェルに注水し、格納容器外側からトップヘッドフランジシール材を冷却し水素漏えいを抑制することを目的として、原子炉格納容器頂部注水系を設置する。

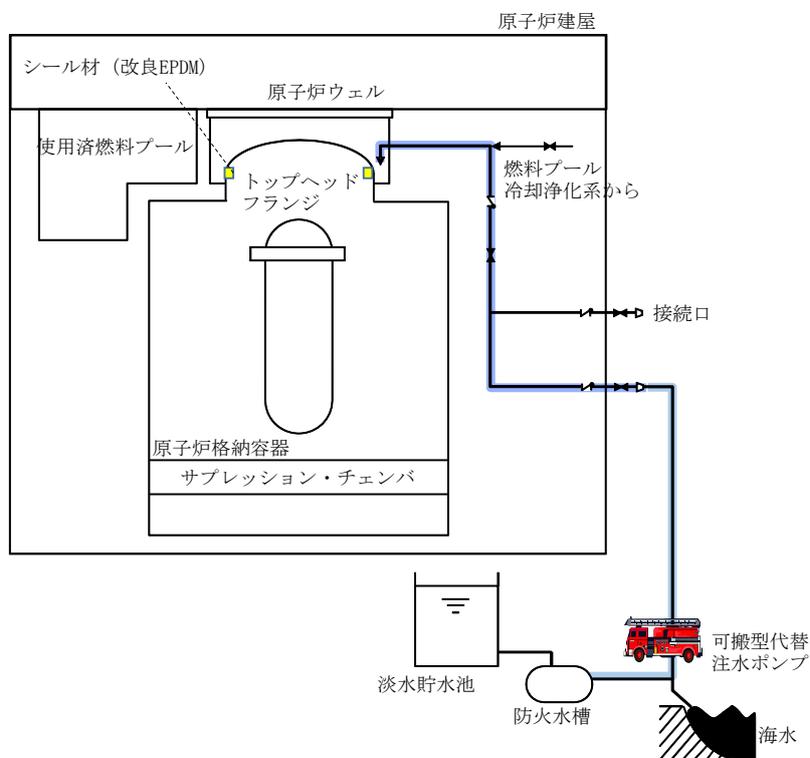


図 2-55 格納容器頂部注水系の概要図

#### 2.4.1 格納容器頂部注水系の設計方針について

格納容器頂部注水系は、原子炉ウェルに水を注水し、トップヘッド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。格納容器頂部注水系は、可搬型代替注水ポンプ、接続口等で構成しており、炉心の著しい損傷が発生した場合において、代替淡水源の水又は海水を原子炉ウェルに注水し格納容器頂部を冷却することで、格納容器頂部からの水素漏えいを抑制する設計とする。従って、事故時に速やかにトップヘッドフランジシール材を冠水させるように原子炉ウェ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 100m<sup>3</sup> 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、格納容器頂部注水の系統流量は 50m<sup>3</sup>/h 以上とする。これを達成するために、格納容器頂部注水系のポンプは可搬型代替注水ポンプ (A-2 級) を採用する。また、可搬型代替注水ポンプを接続する接続口は、位置的分散して複数設置する。

表 2-19 格納容器頂部注水系主要仕様

可搬型代替注水ポンプ (6 号炉及び 7 号炉共用)	
台 数	11 (うち 7 台は予備)
容 量	120m <sup>3</sup> /h/台以上 (吐出圧力 0.85MPa において) 84m <sup>3</sup> /h/台以上 (吐出圧力 1.4MPa において)

#### 2.4.2 格納容器頂部注水系の効果について

重大事故時における格納容器過温・過圧事象において、トップヘッド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、トップヘッド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、格納容器頂部注水により原子炉ウェ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、格納容器頂部注水系は、原子炉建屋の水素爆発防止対策の 1 つとして効果的である。

## 2.5 参照文献

- (a) 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」
- (b) Thomas K. Blanchat, Asimios C. Malliakos, “TESTING A PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINER IN SURTESY TEST”, Nuclear Technology Vol.129 March 2000
- (c) Behrens U. et al., “EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE BEHAVIOR OF THE NIS-DEVELOPED CATALYST MODEL MODULE UNDER VARIOUS SYSTEM CONDITIONS AND ARRANGEMENTS”, Battelle Institute, Volume I and II, March 1991
- (d) “EFFECTS OF INHIBITORS AND POISONS ON THE PERFORMANCE OF PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINERS (PARs) FOR COMBUSTIBLE GAS CONTROL IN ALWRs”, the EPRI ALWR Program, May 1997
- (e) T. Kanzleiter, “QUICK LOOK REPORT HYDROGEN RECOMBINER TESTS HR-14 TO HR-16 (TESTS USING A NIS PAR), AREVA, AECL AND NIS PAR COMPARISON”, OECD-NEA THAI Project, 150 1326-HR-QLR-4, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, October 2009
- (f) S. Gupta, E. W. Schmidt-Naujok, “QUICK LOOK REPORT HYDROGEN RECOMBINER TESTS WITH NIS PAR (HR-40, HR-41, and HR-42)”, 70211-HR40-42-QLR, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, November 2013
- (g) S. Gupta, E. Schmidt, G. Langer, “TECHNICAL REPORT PAR PERFORMANCE TESTS, TESTS WITH NIS PAR HR-40, HR-41, HR-42”, 1501420-TR-HR-40-42, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, July 2014
- (h) 「沸騰水型原子力発電所 触媒式可燃性ガス濃度制御系について」株式会社 日立製作所 HLR-109 平成18年12月

# 福島第一原子力発電所1号機現地調査状況

## 参考資料1

➡ 原子炉建屋入域ルート

【日時】 2015年2月21日（土）  
13時00分頃～14時00分頃  
（4階：約30分）  
【場所】 1F1号機R/B

原子炉建屋1階

原子炉建屋2階

原子炉建屋3階

原子炉圧力計  
IC戻り配管及び隔離弁

吹き抜け部

IC凝縮水配管

(1) ほう酸水注入（SLC）系状況  
 > SLC周辺では一部空調ダクトに変形、脱落があったものの、主要機器に損傷は見受けられなかった

(2) 非常用復水器（IC）蒸気隔離弁

(2) IC蒸気管ベントライン

(3) 機器ハッチ周辺

(4) IC本体周辺  
 > 4階は南側の損傷が激しく北側は軽微であった  
 > 保温材などは損傷しているものの、機器自体に損傷は見受けられなかった

(5) 北側ガレキ及び天井状況

IC(A)水位計 IC(B)水位計

IC本体北側

IC本体中央部

IC本体南側

IC入口隔離弁(A)

IC蒸気管ベントライン

原子炉建屋4階

## PAR による再結合反応の律速段階について

NIS製PARの水素処理は、設計上想定している入口水素濃度0～4%の範囲において、拡散律速となっており、その処理速度は水素及び酸素粒子の拡散速度がボトルネックとなり決まってくる。このことは図1に示すTHAI試験(HR-15, HR-40, HR-41, HR-42)の結果から確認できる。図1は入口水素濃度と水素処理速度の関係をあらわしているが、いずれの試験においても入口水素濃度0～4%の範囲で、入口水素濃度の上昇に伴い水素処理速度も上昇していることがわかる。これは水素濃度の上昇による水素粒子数の増加が直接的に水素処理速度の上昇につながっている結果であると考えられる。更に水素濃度を上昇させた場合、一般的には、ある一定のレベルで拡散律速から反応速度律速に遷移し、水素濃度を上昇させても処理速度は上昇しなくなるものと予想される。なお、HR-42の入口水素濃度6～9%付近において傾きが緩やかになっていることが確認されるが、これは反応速度律速遷移によるものではなく、酸素欠乏（酸素粒子数の減少）による影響であると考えられる。これを裏付けるものとして、その後、赤矢印で示す時点から酸素供給を開始しているが、それ以後、処理速度が再上昇していることが確認できる。

また、他の試験結果と比較し、HR-42のみ傾きが大きく異なっているが、これはHR-42のみカートリッジ11枚中の6枚を抜いた状態で試験が実施されていることによる。

表1 THAI試験の試験条件

試験番号	圧力	温度	水蒸気濃度	酸素濃度	水素注入速度



図1 Recombination rate for tests with NIS-PAR



図2 触媒温度と再結合効率の関係 (参考)

次に、HR-40の実験データから触媒温度と再結合効率（[入口水素濃度-出口水素濃度]／入口水素濃度）の関係を参考としてプロットしたものを図2に示す。触媒温度の上昇に対し、再結合効率に特に上昇傾向は見られず、全範囲において反応速度律速段階ではないことが確認できる。

[参照文献]

- S. Gupta, E. Schmidt, G. Langer, “TECHNICAL REPORT PAR PERFORMANCE TESTS, TESTS WITH NIS PAR HR-40, HR-41, HR-42” , 1501420-TR-HR-40-42, Becker Technologies GmbH, Eschborn, Germany, July 2014

## GOTHICコードについて

## 1. はじめに

建屋水素対策の有効性を評価するための原子炉建屋内水素流動解析に「GOTHIC」コードを用いている。「GOTHIC」コードは、米国EPR I (Electric Power Research Institute) 開発の汎用熱流動解析コードである。以下に「GOTHIC」コードを本評価に用いることの妥当性を示す。

## 2. 本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、および液体分散相（液滴）の三相について、各々、質量、運動量、エネルギーの3保存式を解く、完全三流体（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モデルにより取り扱われ、これにより、凝縮・沸騰現象や、液滴による気体の引き込み等、複雑な混相流現象を模擬することができる。また、特殊モデルとして、ファンや水素結合器などの機器のモデルが組み込まれており、これらの機器固有の物理現象を模擬できる。

本解析コードは、このような基本構成により、原子炉建屋内の気液混相の熱流動を取り扱うことができる。

## (2) 流体

前記のように、本解析コードは各種液体の流動、気体の流動及び相変化を取り扱うことができる。このうち気体については、蒸気を含む様々なガスが混合した多成分ガスの取り扱いが可能であり、水素、窒素、酸素などガスを考慮可能である。

## (3) 伝熱

各流体相間の伝熱（エネルギー移動）は、(1)で記述したように構成式モデルで考慮される。それ以外の壁面等の構造体への伝熱は、構造体をヒートシンクとしてモデル化し、これらと流体間の伝熱および構造体内部の熱伝導を考慮できる。

流体と熱構造体間の伝熱は、熱伝達モデルにより評価する。熱伝達モデルには、自然対流、強制対流熱伝達、凝縮熱伝達モデルなどが組み込まれており、壁面等での蒸気の凝縮、水の沸騰や流体・構造物間の熱伝達を考慮可能である。

## (4) 形状モデリング

各区画を1ノードとして扱う集中定数系モデル、複数ノード（サブノード分割）として扱う分布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（サブノードモデル）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、各サブノード

の体積や高さなど、また、サブノード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、乱流モデルおよび分子拡散モデルが組み込まれており、乱流拡散およ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。これらにより、各サブノードの質量・運動量・エネルギーの保存式を計算することにより、三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。

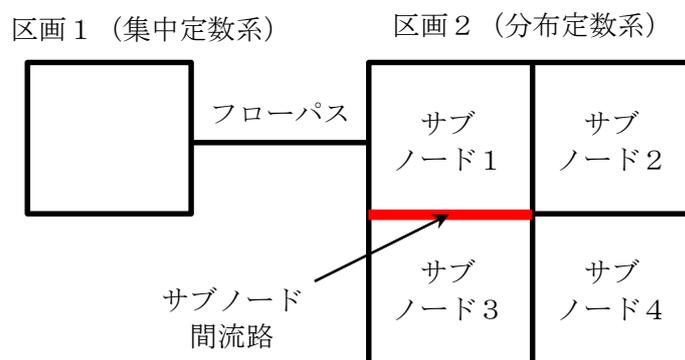


図 2-1 形状モデル例

(5) 境界条件

流量を指定する流出入口境界や、圧力を指定する圧力境界、熱流束や温度境界条件などが設定可能である。

(6) 機器モデル

ファンや水素結合器などの機器を模擬可能である。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およ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. 本計算機コードの妥当性確認

原子炉建屋内水素流動解析に本計算機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三次元的な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) 三次元流動・濃度解析

原子炉建屋内では、格納容器などから漏えいしたガスが拡散し、また、雰囲気ガスと混合する。

建屋水素対策の有効性評価では、オペレーティングフロアに対して、多ノード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ノード間への拡散・混合を解析可能である。

ガス拡散・混合に関する代表的な総合効果試験として NUPEC 試験があり(図 3.1-1 参照)、表 3.1-1、図 3.1-2~4 に示す試験体系において、ガス放出の有無、放出ガス種類(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 35 ケースの試験が行われており、雰囲気温度やガス濃度分布が測定されている。ここでは、水蒸気と水素の両方が放出され、かつスプレイを想定しない点で建屋水素対策の条件に近い 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 試験条件は以下の通りである。

- |                |                        |   |
|----------------|------------------------|---|
| 1. 初期圧力        | : 101 [kPa(abs)]       | ・ |
| 2. 初期温度        | : 28 [°C]              |   |
| 3. 破断流量の蒸気成分   | : 0.33 [kg/s] (30分で停止) |   |
| 4. 破断流量のヘリウム成分 | : 0.03 [kg/s] (30分で停止) |   |
| 5. 破断位置        | : 図 3.1-3 参照           |   |
| 6. スプレイ        | : なし                   |   |



以上より、PCV リーク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屋内水素流動解析に本コードを適用するのは妥当である。

表 3.1-1 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 ヘリウム, 蒸気放出位置)
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

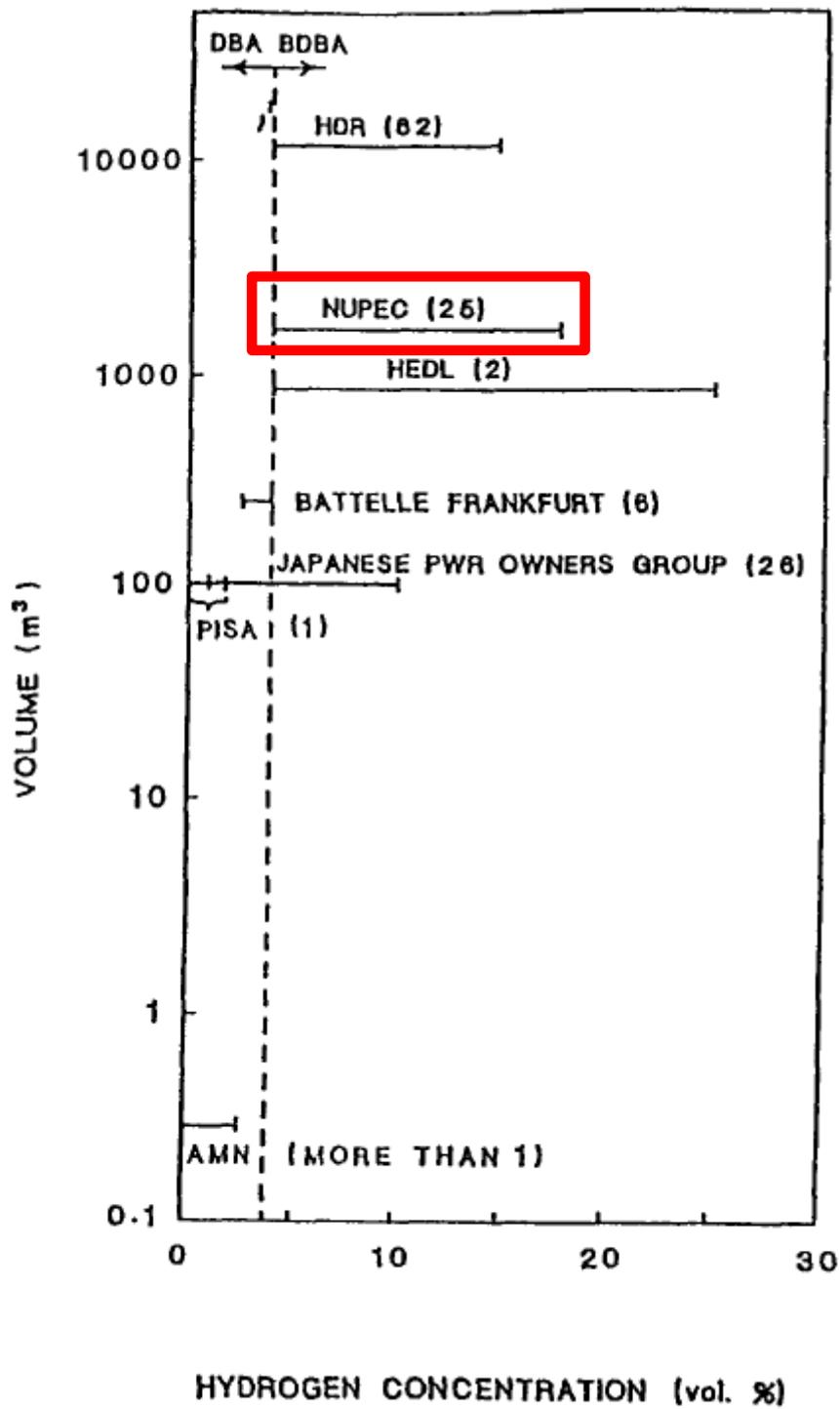


図 3.1-1 水素濃度の範囲と試験スケール(出典：[1] Fig. 3-1)

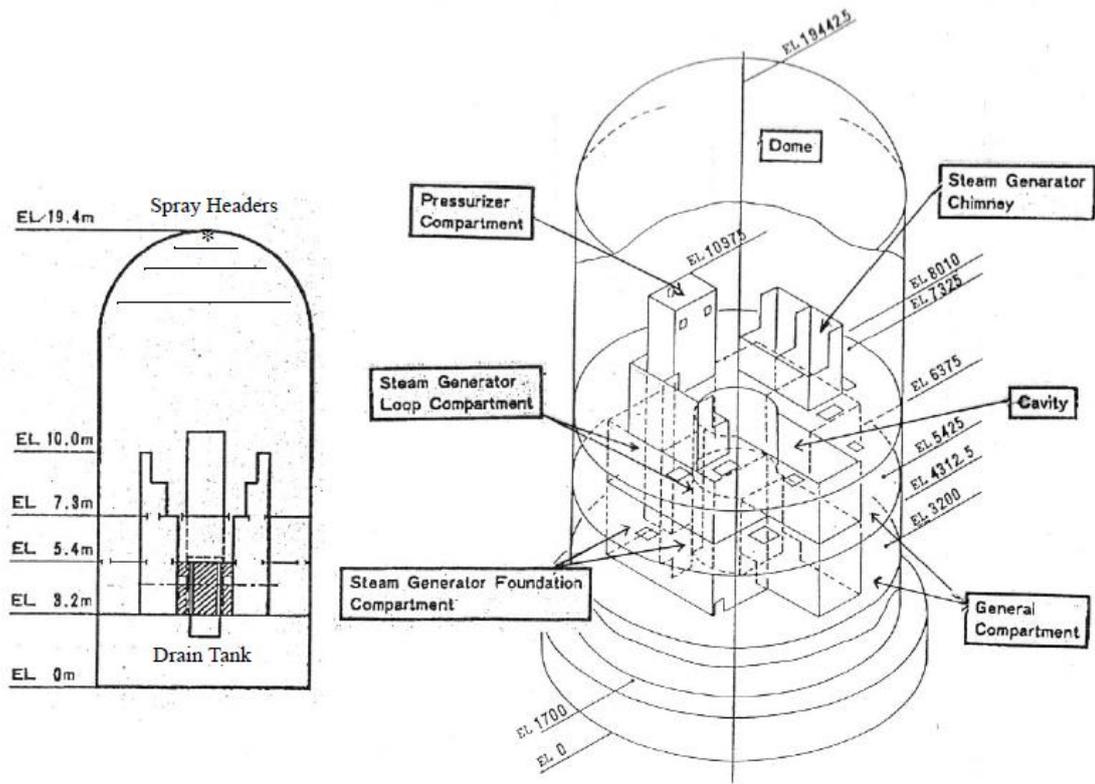


図 3.1-2 NUPEC 試験体系の概要(出典：[2] Fig.16-1)

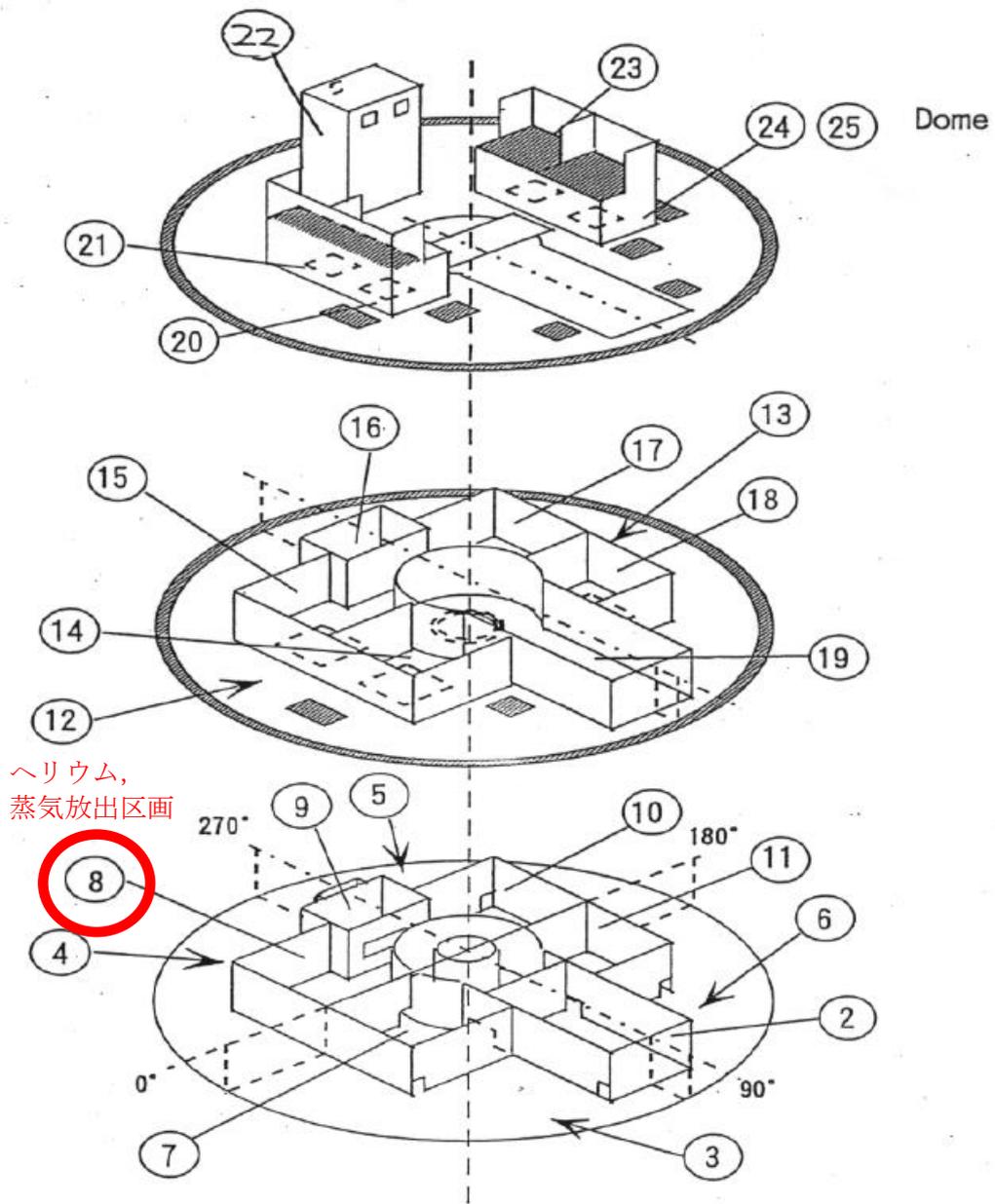


図 3.1-3 NUPEC 試験体系における区画と開口部(出典：[2] Fig.16-2)

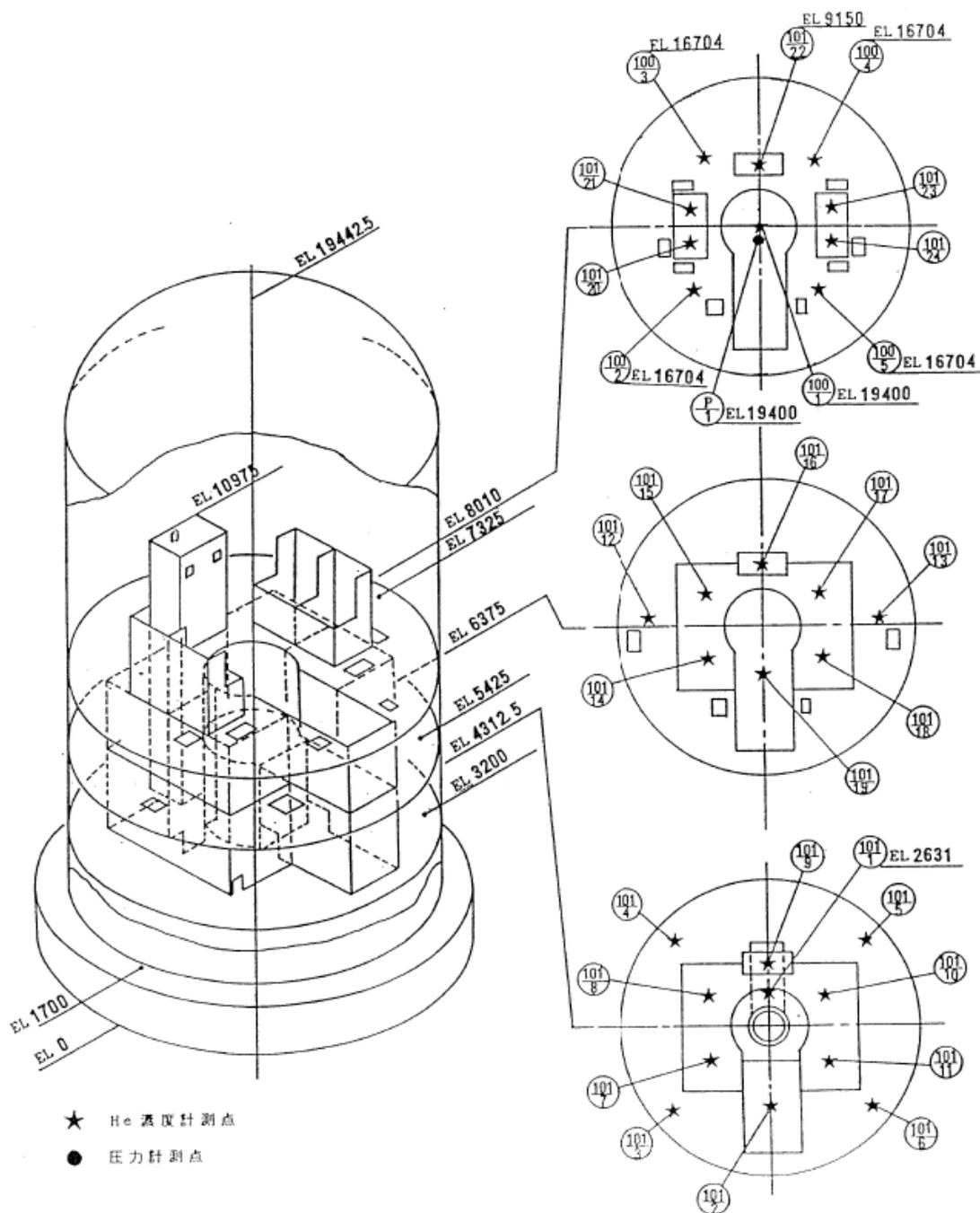
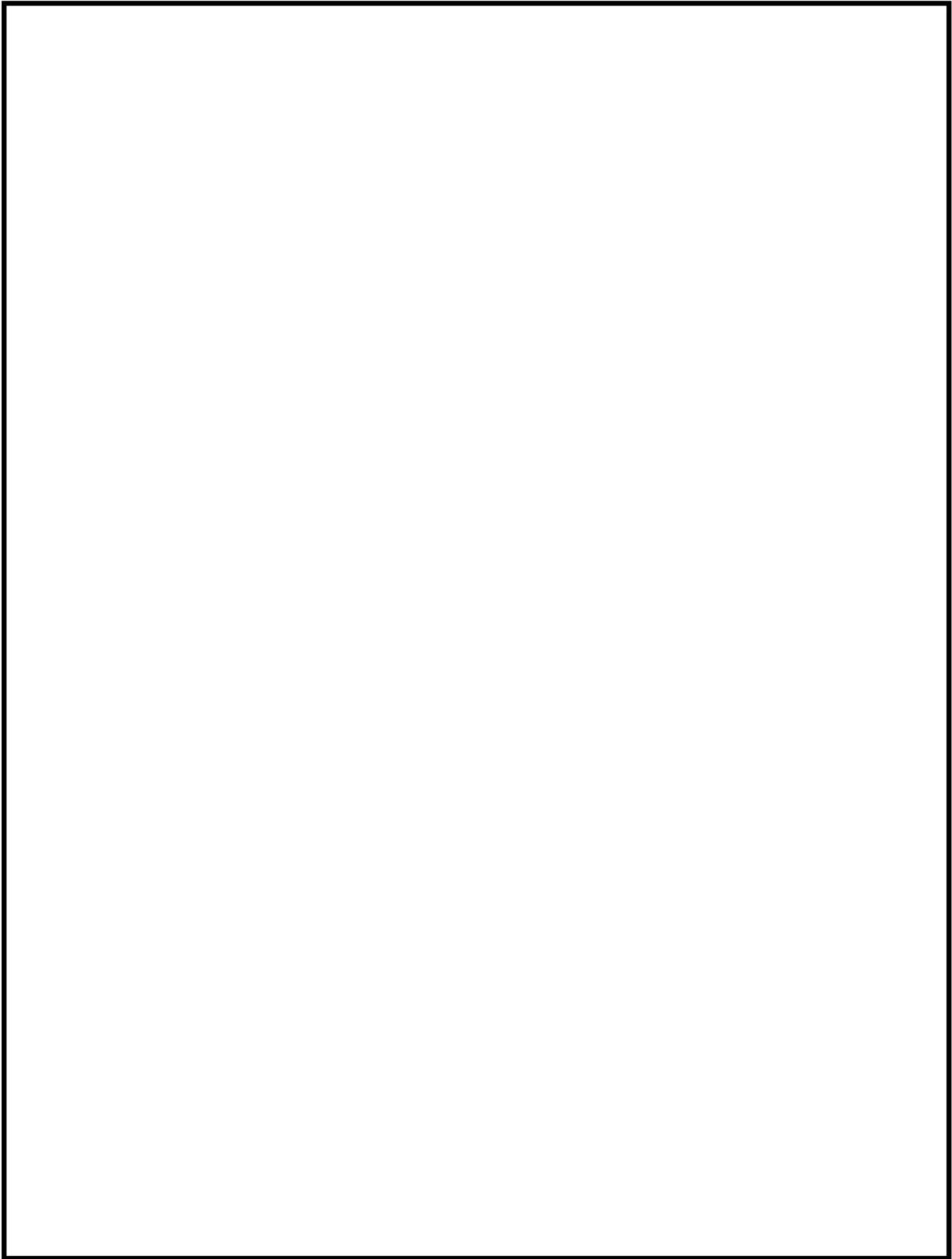
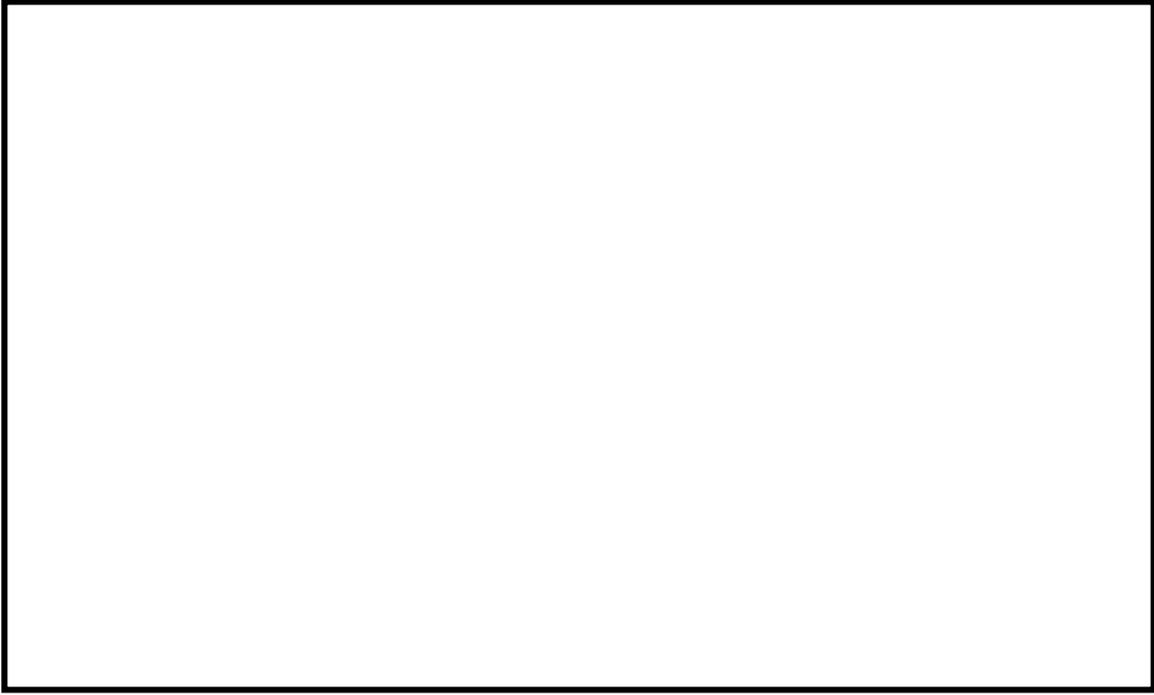
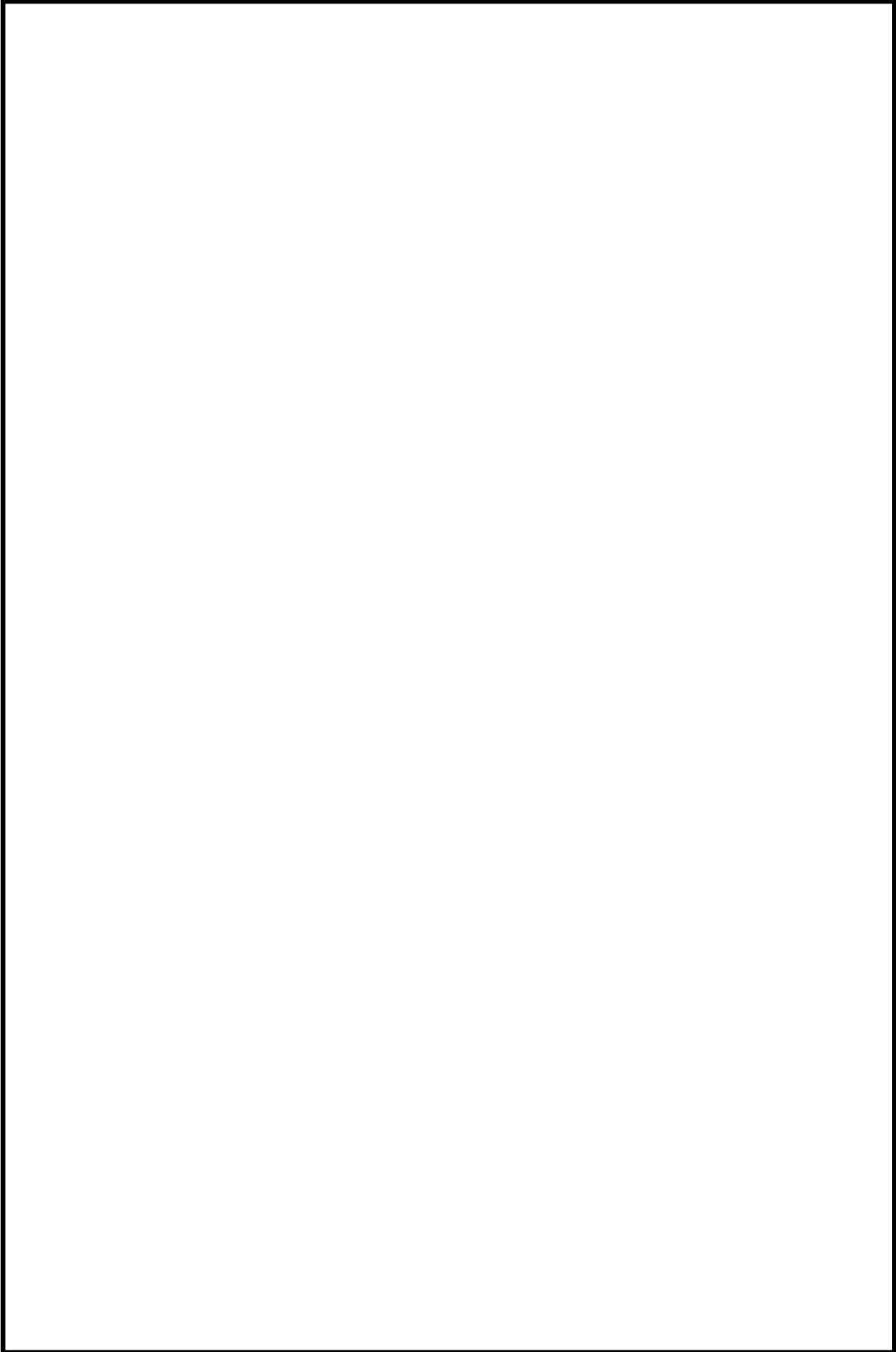
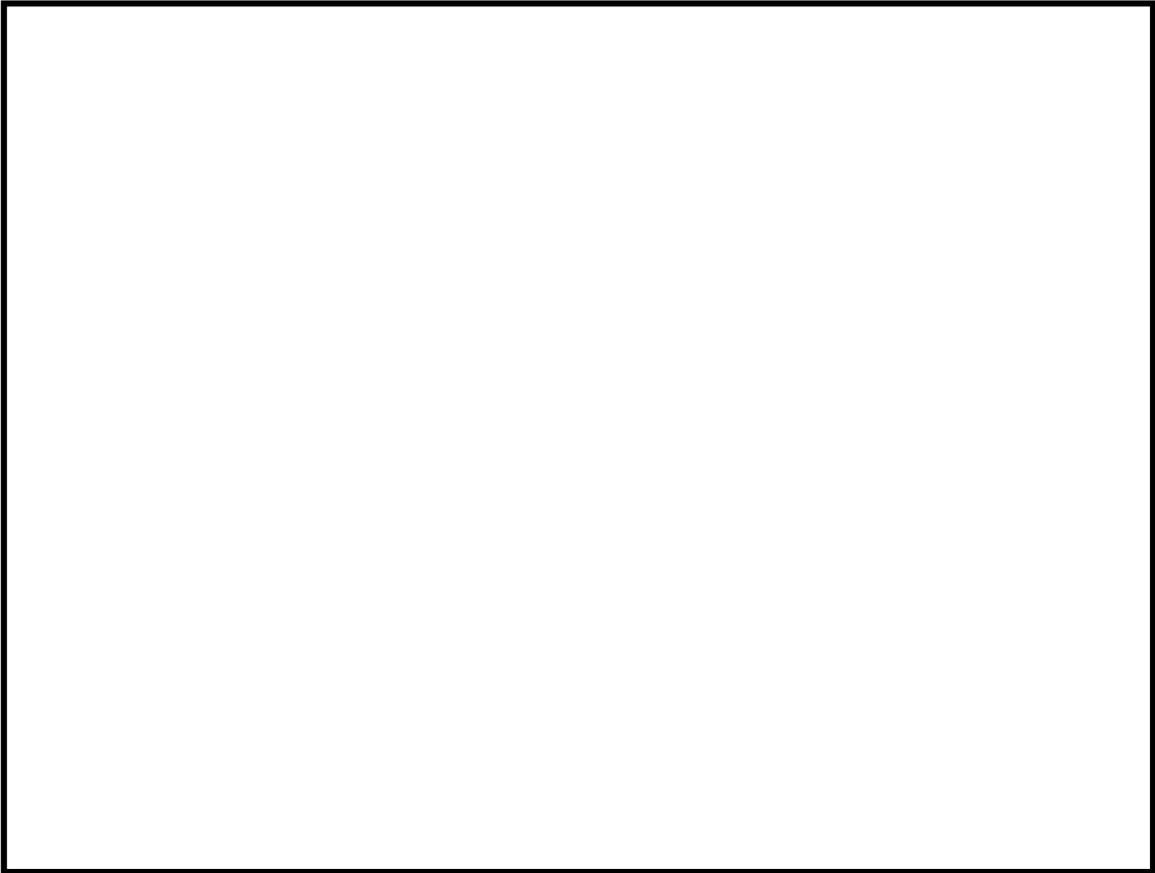


図 3.1-4 NUPEC 試験体系におけるヘリウム濃度および圧力の計測点  
(出典：[3] 図 3.1.4)









(2) 水蒸気の壁面熱伝達による凝縮

格納容器などからの漏えいに含まれる高温の水蒸気は、壁面との熱伝達により凝縮される。

建屋水素対策の有効性評価に用いた凝縮熱伝達モデルとして、GOTHIC コードに内蔵されている 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 (図 3.2-1)。

本モデルで評価された凝縮熱伝達率の試験データとの比較を図 3.2-2 に示す。ここで試験は、内田、ウィスコンシン大学や Debhi MIT などで行われたものであり、試験パラメータは以下の通り広範囲である。



図より、ほとんどの試験データを約 20%以内で再現しており、原子炉建屋内水素流動解析において想定されるパラメータ範囲が以下のように試験範囲に収まっていることから、本モデルを適用するのは妥当である。



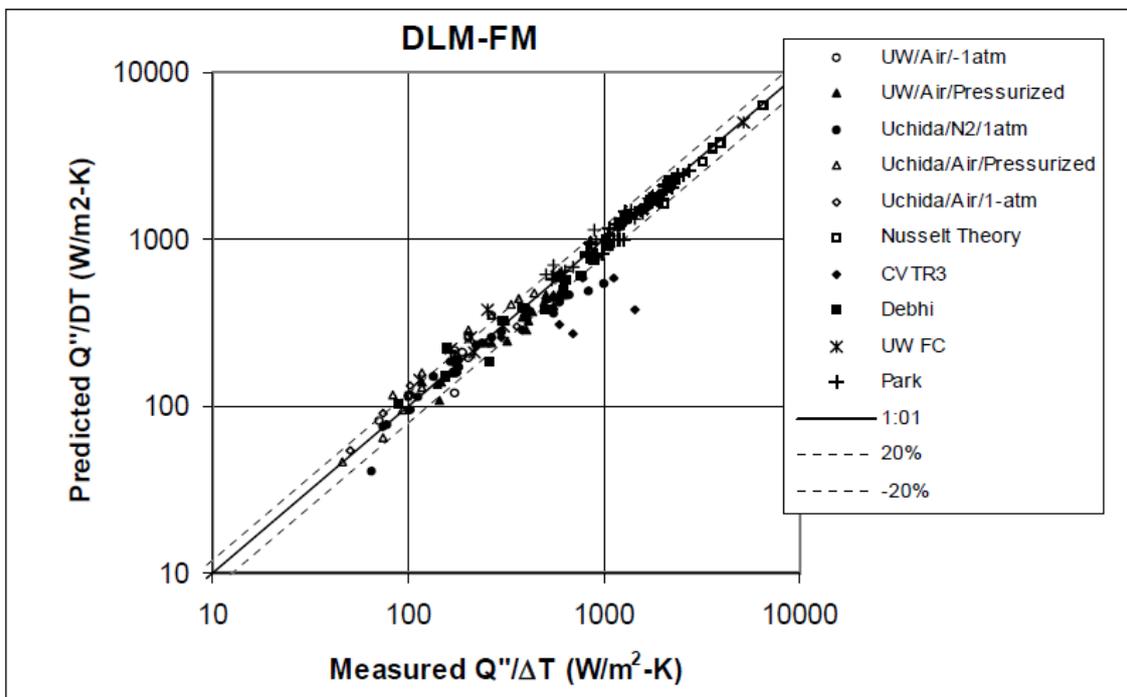


図 3.2-2 DLM-FM モデルの試験データとの比較(出典 : [2] Fig. 5-40)

(3) 構造体内部熱伝導

オペレーティングフロアにおける壁や天井において、建屋内側からの放熱で熱伝導が生じる。

GOTHIC コードに内蔵されている構造体熱伝導モデルは、一次元的に熱伝導方程式に従って計算される。

円筒の体系において、本モデルで評価した温度の時間変化の解析解との比較を図 3.3-1 に示す。円筒内の初期温度を 500[F]、円筒周りの流体温度を 200[F]とする条件で、円筒中心の時間変化を評価したものであり、解析解とよく一致している。

これより、本モデルを高温の PCV リークを想定する原子炉建屋内水素流動解析に適用するのは妥当である。

1. 熱伝導率 : 12 [Btu/hr-ft-R]
2. 定圧比熱 : 0.1 [Btu/lbm-R]
3. 密度 : 400 [lbm/ft<sup>3</sup>]
4. 円筒径 : 2 [in]
5. 円筒内の初期温度 : 500 [F]
6. 円筒周りの流体温度 : 200 [F]

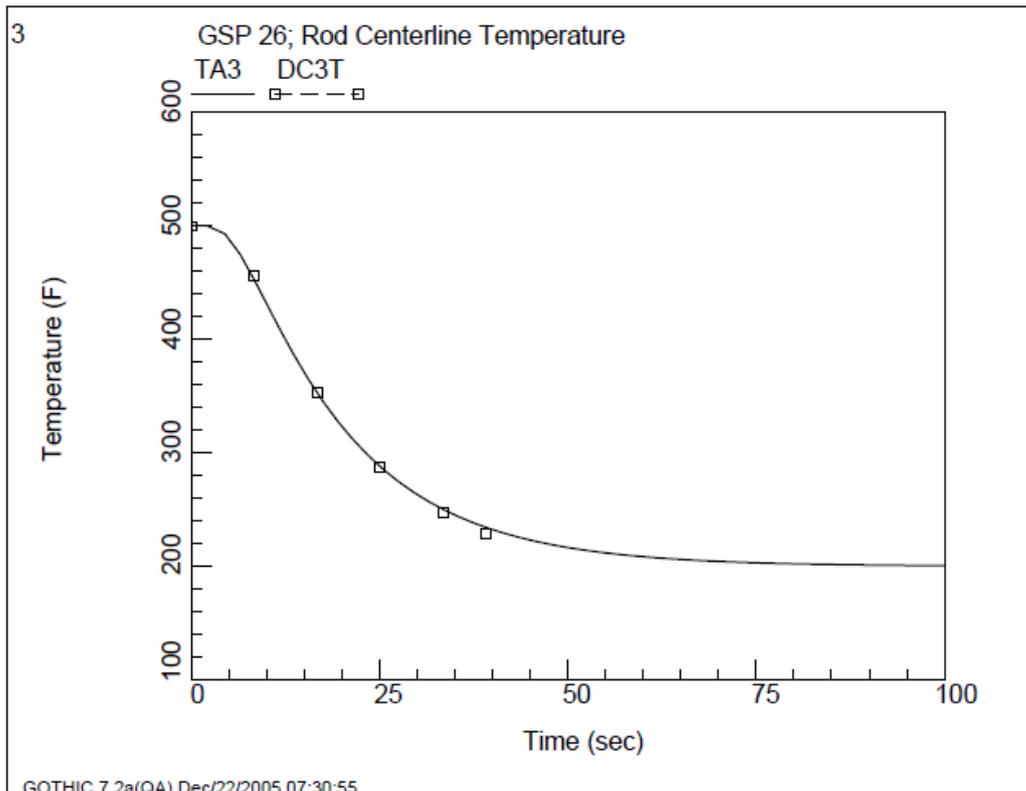


図 3.3-1 円筒中心温度の 1 次元熱伝導モデルによる計算結果(変数名 : TA3)と解析解(変数名 : DC3T)との比較 (出典 : [2] Fig. 4-8)

#### (4) PAR モデル

オペレーティングフロア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、GOTHIC 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。

- ・GOTHIC 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、PAR の水素・酸素再結合を取り扱えるか否か。
- ・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否か。

以下では、これらの観点に対しての考察・検討を示す。

##### ① PAR の自然循環流量の扱い

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、および上昇流に対する流動抵抗の発生等、複雑な熱流動現象が発生していると考えられる。

SNL で行われた試験<sup>(4)</sup>で PAR の水素処理量の基本式についての妥当性検証においては、PAR の入口において計測された水素濃度、気体圧力、気体温度（図 3.4-1）を相関式への入力値として与えており、これによって相関式の妥当性が確認された。すなわち、PAR 内部の複雑な熱流動現象の結果としての水素処理速度を、PAR の入口において計測された水素濃度、気体圧力、気体温度（図 3.4-1）の関数として整理して与えたものが、2.2.1.2 の（式1）水素処理速度相関式である。すなわち、（式1）は PAR 内の浮力や流動抵抗などの PAR の自然循環流動およ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 の自然循環流量を陰に含んだ形で、当該 PAR 水素処理速度を得ることができるように配慮されている。

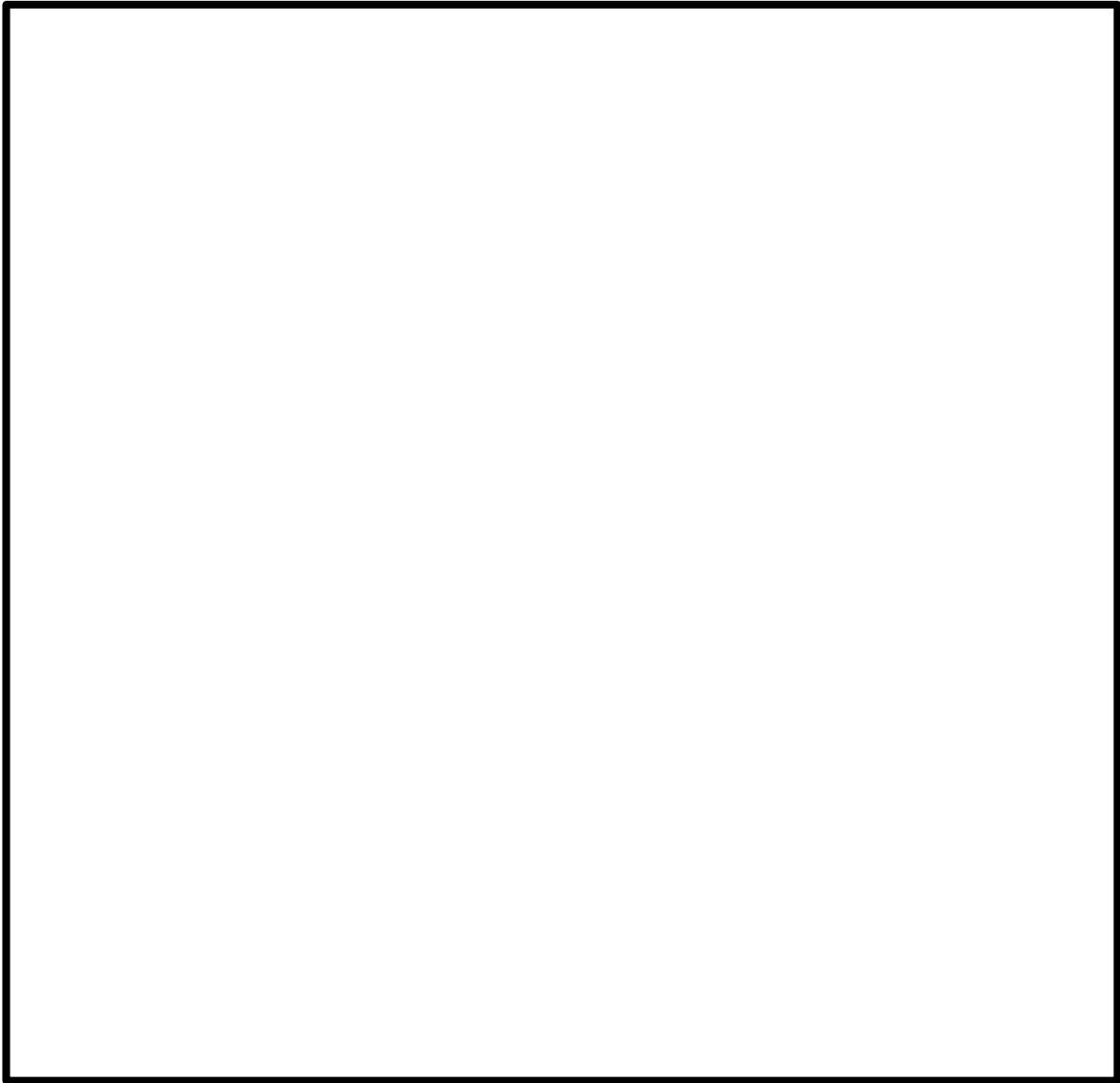


図 3.4-1 SNL で行われた試験の計測位置<基本式入力値>

## ②GOTHICにおけるPARのモデル化

2.2.1.2の(式1)のNIS社製のPARによる水素処理相関式は、以下の2項に分けて記述されたFisherの相関式<sup>(5)</sup>による。

まず、再結合熱によるPAR内の温度上昇により、PAR内外に温度差が発生する。温度差によって発生する浮力の効果により、PAR入口からPAR内にガスが自然に引き込まれる。その体積流量は浮力と流動抵抗のバランスで決まり、NIS社製PARについてPAR入口の水素濃度の関数として以下の相関式により記述される。

$$Q = 0.67C_H^{0.307}$$

Q : PAR入口体積流量(定常状態)( $m^3/s$ )

$C_H$  : PAR入口水素体積濃度(-)

次に、PAR入口から引き込まれたガスは、PAR内に設置されたカートリッジにより水素・酸素の再結合反応を生じる。NIS社製PARについて水素処理速度は、PAR内に引き込まれるガスの体積流量、PAR入口の水素濃度などの関数として以下の相関式により記述される。

$$R = \varepsilon \cdot Q \cdot \rho_H$$

$\varepsilon$  : 水素処理効率係数(-)

R : 水素処理質量速度( $kg/s$ )

$\rho_H$  : PAR入口水素質量密度( $kg/m^3$ )

さらに、 $\rho_H$ については、

$$\rho_H = C_H \cdot P / R_H T$$

P : PAR入口圧力(Pa)

$R_H$  : 水素気体定数(質量表示)( $J/kg \cdot K$ )

T : PAR入口気体温度(K)。

### ③GOTHIC 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 の水素処理速度相関式を忠実にモデル化していることを示した。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、適正な水素処理速度を計算できることを示した。

2.2.2 で示した、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 の大きさに比して大きく、PAR 入口部を局所的にモデル化はしていない。よて、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。

2.2.2 で示した、GOTHIC の解析モデルにおいては、PAR はフローパスの入口と出口を同じサブノードに接続している。すなわち、PAR の設置部周辺について、局所的な、気体温度、水素、酸素等ガス濃度、および気体圧力の分布は一様であり、PAR 入口について局所性は考慮していない。これによる PAR の入口条件への影響を考察する。

#### ・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ノードに排出され混合する。そのため、同サブノードの水素濃度は、実際の PAR 入口の水素濃度よりも低くなり、水素処理速度が実際よりも小さくなると考えられる。

#### ・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ノードに排出され混合する。そのため、同サブノードの酸素濃度は、実際の PAR 入口の酸素濃度よりも低くなり、低酸素ファクターの影響を受けやすくなる。

#### ・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、オペフロ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、オペフロ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。

・ 気体圧力

解析においては、サブノード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 の自然循環流量については、PAR 入口条件に縮約された水素処理速度相関式により、
- ・ PAR 周囲を比較的粗メッシュであることについては、その設定が PAR の水素処理量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、およ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, “Final Comparison Report on ISP-35 : NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1)”, CSNI Report NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.  
<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1994/csni-r1994-29.pdf>
- [2] Electric Power Research Institute, Inc., “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2a(QA)”, NAI 8907-09 Rev 9, January 2006
- [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] Thomas K. Blanchat, Asimios C. Malliakos, “TESTING A PASSIVE AUTOCATALYTIC RECOMBINER IN SURTESY TEST”, Nuclear Technology Vol.129 March 2000
- [5] Karsten Fischer, Qualification of a passive catalytic module for hydrogen mitigation, Nuclear Technology, Vol.112, p.58-62, 1995