

# 委員から頂いた質問事項への回答

(柏崎刈羽原子力発電所の安全対策の確認事項)

No.16 水素爆発対策

2022年11月4日

東京電力ホールディングス株式会社

# 1. 水素解析におけるノード・メッシュ数の妥当性

確認事項	水素爆発対策 (No.16)
ご質問に至る議論	<p><b>(令和3年度第2回技術委員会) 資料No.7-1</b> 原子炉建屋最上階に設置している静的触媒式水素再結合器 (PAR) の有効性について、原子炉建屋の水素解析結果及び局所エリアの水素滞留対策を提示し説明。</p> <p><b>(令和3年度第4回技術委員会) 資料No.6-1</b> 水素解析結果の妥当性を確認するため、解析条件の確認が必要とのご意見をいただき、原子炉建屋及び局所エリアの解析条件・解析結果を提示し説明。</p>
ご質問 (藤澤委員)	<ul style="list-style-type: none"> <li>メッシュというのは1ノードどのくらいのメッシュに切っておられるのですか。</li> <li>ノードの中でメッシュによって、場所によって変わるというのは、先ほど、拡散性が高いとか滞留の影響であまり変化しないという話とは何となく矛盾するような気がしたのです。ということは、私が何を考えているかという、ノードとかメッシュというものをいろいろ変えてみたときに、その結果はあまり変化しないということの確認はされているのでしょうか。 ノードとメッシュに対する依存性がどうなっているのかなと。要するに、解析結果がそういうものに関係しないのだということの説明が、まずあってほしいなと思ったのです。</li> </ul>
回答	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建屋解析モデルはオペレーティングフロアを100区画のノードに分割し、その他のエリアは2分割または分割せずにモデル化しています。オペレーティングフロアについては、分割した各区画毎の水素濃度に差はなく、水素が成層化していないこと、その他のエリアについては、空間容積が最大かつ下階で発生した水素が集約され滞留するオペレーティングフロアで成層化していないこと、また、局所エリア解析でも滞留が発生しないことを確認することで、本モデルのノード分割の妥当性を確認しています。</li> <li>局所エリア解析におけるメッシュ幅は1/3mとしており、メッシュ数は各エリアの空間容積にも依存し、約2,000～約6,000となります。 局所エリア解析の結果はメッシュ幅に依存しますが、感度解析においてメッシュ幅を変化させても水素濃度の挙動が類似していることを確認することで、メッシュ幅を1/3mとすることの妥当性を確認しています。</li> </ul>

## 1-2. 各解析の位置づけ（1/2）

- 原子炉建屋解析と局所エリア解析の位置づけ及びノード・メッシュ設定の考え方を以下の表に示す。

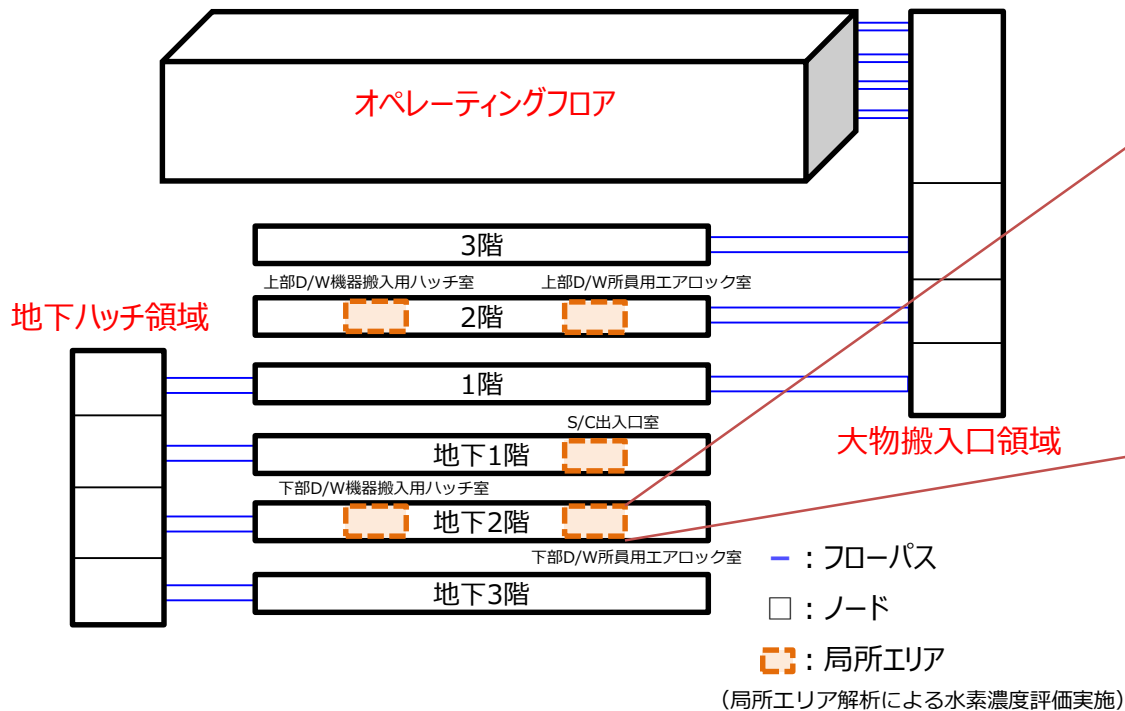
表：各解析の位置づけ及びノード・メッシュ数の設定

解析	解析の位置づけ	ノード・メッシュ設定の考え方
原子炉建屋解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建屋全体における水素濃度挙動の把握</li> <li>オペレーティングフロアにおける水素成層化の有無の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最終的に水素が滞留することになるオペレーティングフロアを100区画のノードに分割</li> <li>オペレーティングフロア以外は、平均水素濃度を把握する目的で各区画を1ノードでモデル化</li> </ul>
局所エリア解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所エリアにおける水素濃度挙動の把握</li> <li>水素対策の要否並びに有効性の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>メッシュ幅を変化させて解析を実施し、水素の挙動・濃度分布を確認し設定</li> </ul>

# 1-2. 各解析の位置づけ (2/2)

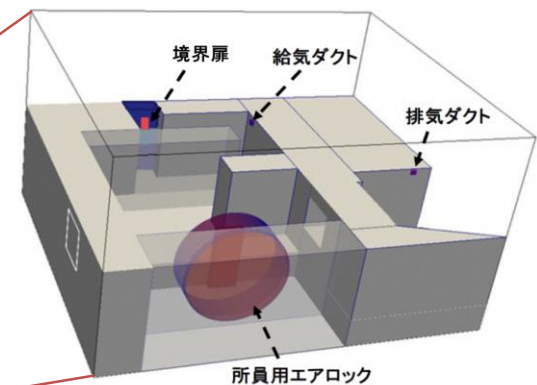
- 原子炉建屋解析と局所エリア解析の位置づけのイメージを以下に示す。

## 原子炉建屋解析モデル



建屋全体の水素濃度の挙動  
 原子炉建屋全体解析モデルにより評価

## 局所エリア解析モデル



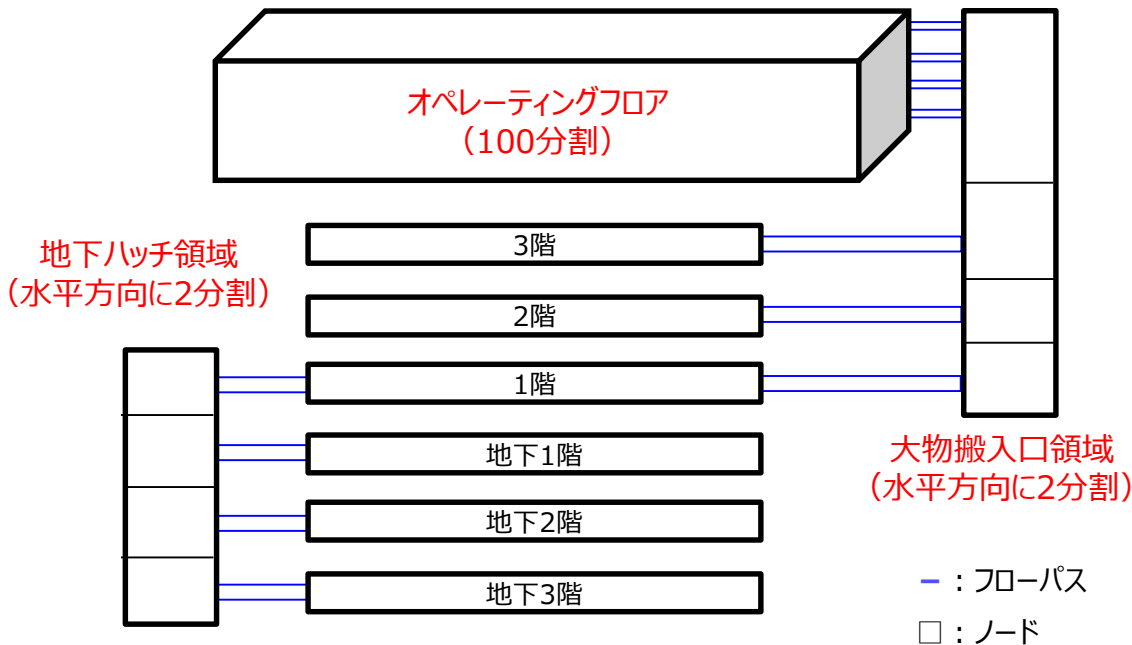
下部D/W所員用エアロック室の解析モデル

格納容器からの水素漏えい  
 による水素爆発リスクの高いエ  
 リアにおける水素濃度の挙動

局所エリア解析モデル  
 により評価

# 1-3. 原子炉建屋の解析モデル

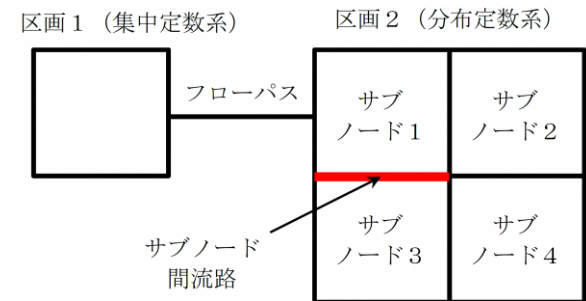
- PARを設置しているオペレーティングフロアは、水素の挙動、成層化の有無を詳細に確認するため、区画を複数ノード（100分割）でモデル化。
- 3階～地下3階は、局所エリアの解析により滞留が発生しないこと確認していることから、平均水素濃度を把握する目的で各区画を1ノードでモデル化。
- 大物搬入口・地下ハッチ領域は、自然対流をモデル化する目的で各区画を複数ノード(2分割)でモデル化。



図：原子炉建屋解析モデルのイメージ

## 【GOTHICコードにおける形状モデリング】

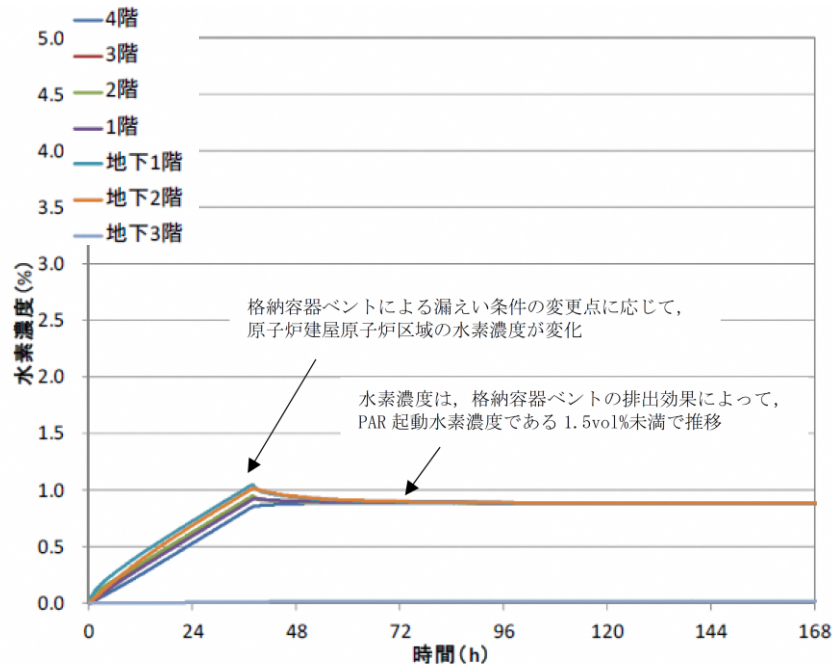
- 各区画を1ノードとして扱う集中定数系モデル、複数ノード（サブノード分割）として扱う分布定数系モデルがあり、解析内容に応じてモデル化することが可能。
- 分布定数系モデルにおいては、各サブノードの体積や高さ等の形状パラメータを設定することにより、当該部の3次元形状をモデル化することが可能。



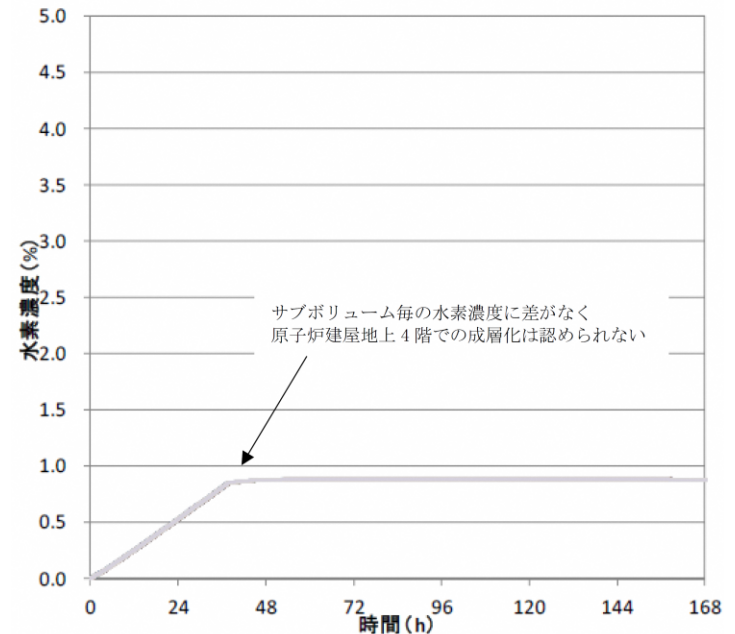
図：形状モデル例

# 1-4. 原子炉建屋解析におけるノード数の妥当性

- オペレーティングフロアについては、解析結果において分割した各区画（サブボリューム）毎の水素濃度に差はなく、水素は対流・拡散により成層化（局所的な滞留）していないことを確認することで、オペレーティングフロアの本モデルの妥当性を確認。
- その他のエリアについては、空間容積が最大かつ下階で発生した水素が集約され滞留するオペレーティングフロアで水素の成層化が発生していないこと、また、局所エリアの解析により滞留が発生しないこと確認することで、本モデルのノード分割の妥当性を確認。



(a) 原子炉建屋全域



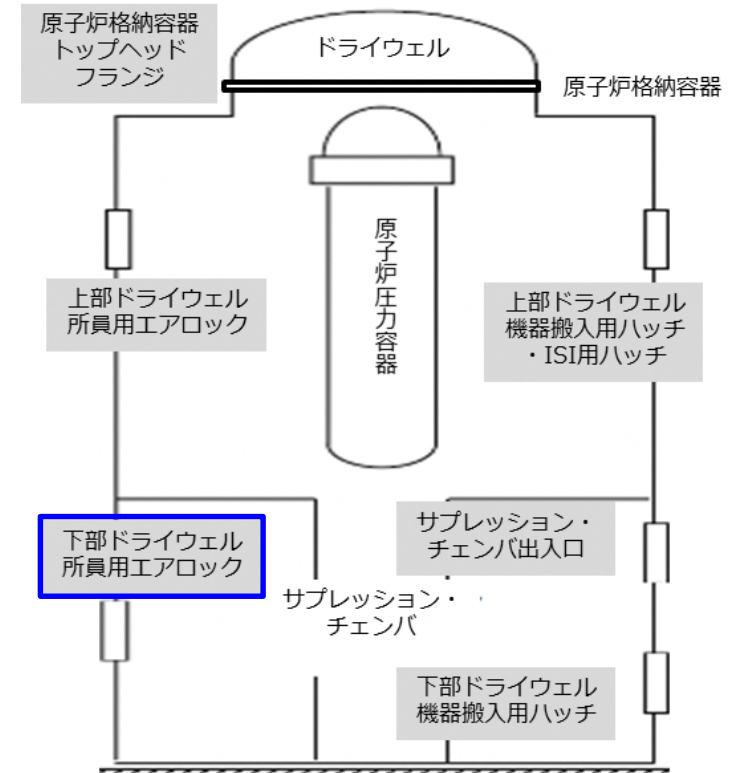
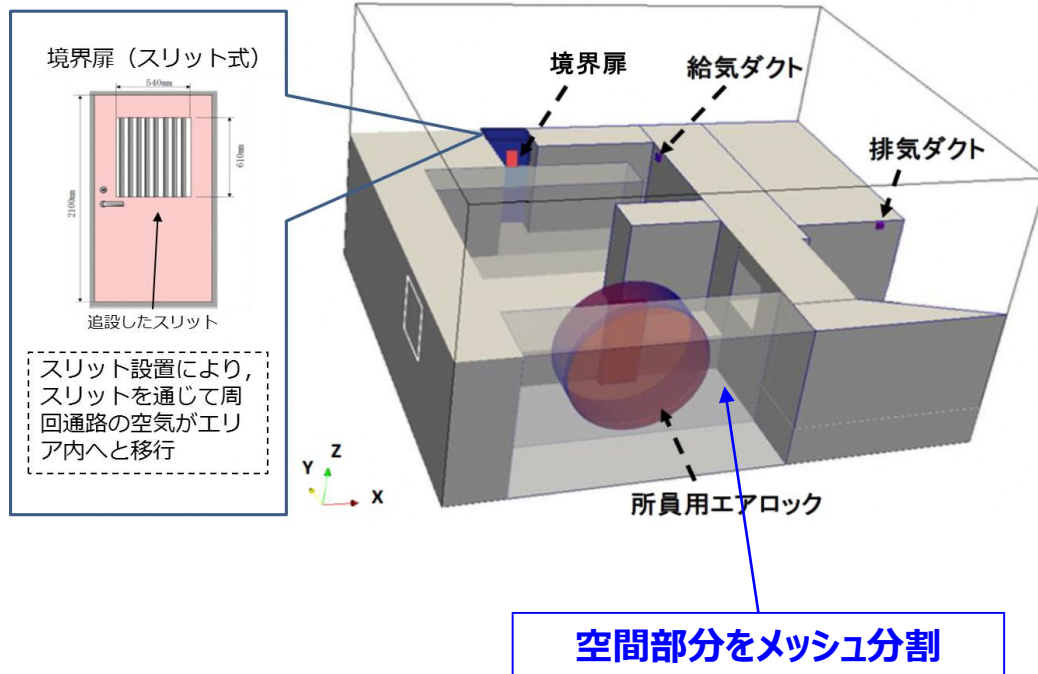
(b) オペレーティングフロア  
(サブボリューム別)

図：水素濃度の時間変化（有効性評価シナリオ（代替循環を使用しない場合））

# 1-5. 局所エリア解析におけるメッシュ数

- 解析例として、「下部D/W所員用エアロック室」の解析モデルイメージ、メッシュ幅/メッシュ数を以下に示す。

メッシュ幅：約1/3m メッシュ数：5,953

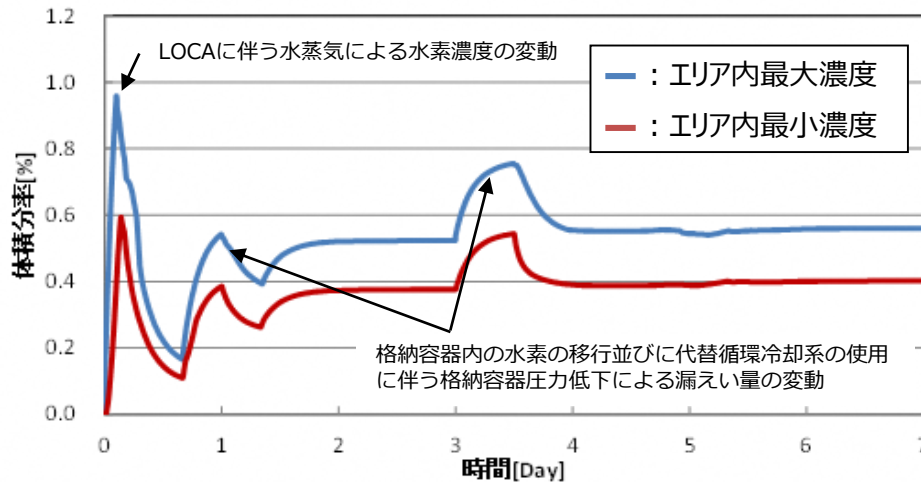


図：下部ドライウェル所員用エアロック室の解析モデルイメージ

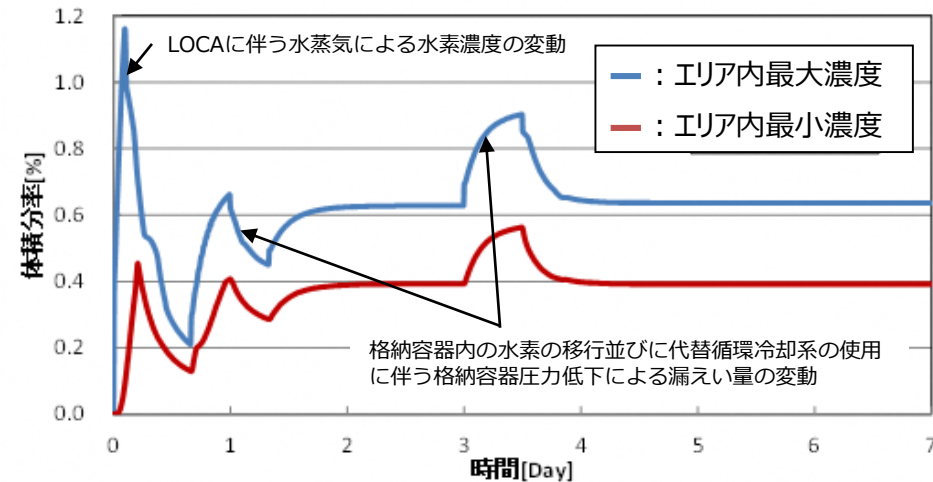
図：解析における原子炉格納容器からの水素漏えい箇所

# 1-6. 局所エリア解析におけるメッシュ数の妥当性

- 局所エリア解析結果の代表として、空間容積が最大である「下部D/W所員用エアロック室」について、メッシュ幅を約1m及び約1/3mとしたときの水素濃度の時間変化を図に示す。
- 水素濃度はメッシュ幅に依存するものの、水素濃度の時間変化、並びに、水素濃度が最大／最小となる時間が類似していることから、当該メッシュ幅で局所エリア内の水素の挙動・濃度分布は十分に把握できており、メッシュ幅を約1/3mとすることは妥当であると考えられる。
- 水素濃度の最大値を示す水素漏えい箇所近傍では、メッシュ幅が小さくなるにつれて、当該メッシュの水素濃度は漏えいするPCVガス組成値に近づくと考えられる。



(a) 水素濃度の時間変化 (メッシュ幅約1m)



(b) 水素濃度の時間変化 (メッシュ幅約1/3m)

図：下部D/W所員用エアロック室 (代替循環ケース) における局所エリア解析結果



## 2. 水素が集中的に漏えいした場合の水素濃度

確認事項	水素爆発対策 (No.16)
ご質問に至る議論	<p><b>(令和3年度第2回技術委員会) 資料No.7-1</b></p> <p>原子炉建屋最上階に設置している静的触媒式水素再結合器 (PAR) の有効性について、原子炉建屋の水素解析結果及び局所エリアの水素滞留対策を提示し説明。</p> <p><b>(令和3年度第4回技術委員会) 資料No.6-1</b></p> <p>水素解析結果の妥当性を確認するため解析条件の確認が必要とのご意見をいただき、原子炉建屋及び局所エリアの解析条件・解析結果を提示し説明。</p>
ご質問 (橋爪委員)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建屋の中の水素濃度なので、結果を見ると、1%とかで水素濃度が上がりませんという結果なのですが、もしこれが集中的にどこかで発生すると4%を超えてしまうとか、何かそのようなことにはならないのですか。</li> <li>• 例えばなのですが、全部厳しい条件にする必要はないと思うのですが、考えられる通常のシナリオで発生した水素は、すべて、例えば、どこか1か所から漏れたとすると、大丈夫なのです。</li> <li>• 水素発生量はとても大きくしているからいいのだというのは1つの考え方ですが、普通に漏れた、普通に水素が発生する、普通の評価です。そこでは保守性は別になくてもいいと思うのですが、それが最悪、一番弱いところから随分漏れたとするとこうなりますという評価はそれほど大変ではないのかと思ったのです。</li> </ul>
回答	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ご指摘のように特定の箇所から集中的に漏えいが発生する可能性は否定できないため、評価上最も厳しい箇所からの集中漏えいを想定した解析を行い、一部の解析ケースにおいて最大水素濃度が可燃限度4%を超えるものの、爆燃領域には入らないことを確認しました。</li> </ul>

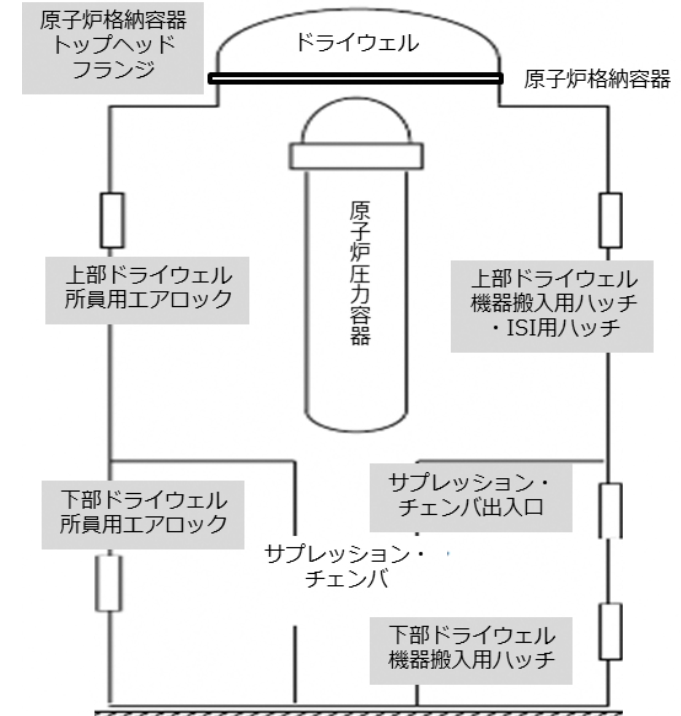
## 2-1. 水素が分散して漏えいした場合の評価

- 水素が分散して漏えいした場合の評価においては、漏えい箇所の周長が長ければ、漏えいが発生するリスクや漏えい量が多くなることを考慮して、全漏えい量を各漏えい箇所の周長割合で分配して評価し、各エリアの水素濃度が可燃限度4%を超えないことを確認。
- 漏えい量の分配に対する不確かさを考慮して、格納容器からの漏えい率や水素発生量を評価値より大きく設定。

フロア	エリア名称	解析における漏えい箇所	漏えい量 (周長) 割合
4階	オペレーションフロア	原子炉格納容器トップヘッドフランジ	約0.5
2階	上部ドライウェル 機器搬入用ハッチ室	上部ドライウェル機器搬入用ハッチ	約0.12
		ISI用ハッチ	約0.01
	上部ドライウェル 所員用エアロック室	上部ドライウェル所員用エアロック	約0.08
地下 1階	サプレッション・チェンバ 出入口室	サプレッション・チェンバ出入口	約0.1
地下 2階	下部ドライウェル 機器搬入用ハッチ室	下部ドライウェル機器搬入用ハッチ	約0.11
		下部ドライウェル 所員用エアロック室	約0.08

格納容器漏えい率の最大値【格納容器圧力:設計圧力の2倍/格納容器温度:200℃】

評価結果	約1%/day
解析条件	最大1.5%/day



図：解析における原子炉格納容器からの水素漏えい箇所

## 2-2. 水素が集中的に漏えいした場合の評価対象エリア

- 水素が集中的に漏えいした場合の評価を実施するにあたり、以下の観点から評価対象エリアを選定。
  - ① ドライウェル（D/W）とサプレッション・チェンバ（S/C）からそれぞれ選定すること。
  - ② 既実施の解析において、最も水素濃度が上昇したエリアを選定すること。
  - ③ フランジ部の開口量評価の結果、許容開口量※1に対して最も裕度の小さいものから選定すること。
  - ④ 空間容積が最小のエリアを選定すること。
- D/W 側は「上部 D/W 機器搬入用ハッチ室」、S/C 側は「S/C 出入口室」を選定。

エリア	フランジ	②水素濃度 最大値	③フランジ 開口裕度※2	④エリア 空間容積
① D/W				
上部ドライウェル 機器搬入用ハッチ室	上部ドライウェル 機器搬入用ハッチ	3.2%	1.4	121m <sup>3</sup>
	ISI用ハッチ		32.1	
上部ドライウェル 所員用エアロック室	上部ドライウェル 所員用エアロック	2.9%	3.5	170m <sup>3</sup>
下部ドライウェル機器 搬入用ハッチ室	下部ドライウェル 機器搬入用ハッチ	0.8%	2.0	119m <sup>3</sup>
下部ドライウェル所員用 エアロック室	下部ドライウェル 所員用エアロック	1.2%	3.5	239m <sup>3</sup>
① S/C				
サプレッション・チェンバ 出入口室	サプレッション・チェンバ 出入口	2.7%	2.7	71m <sup>3</sup>

### ※1 許容開口量

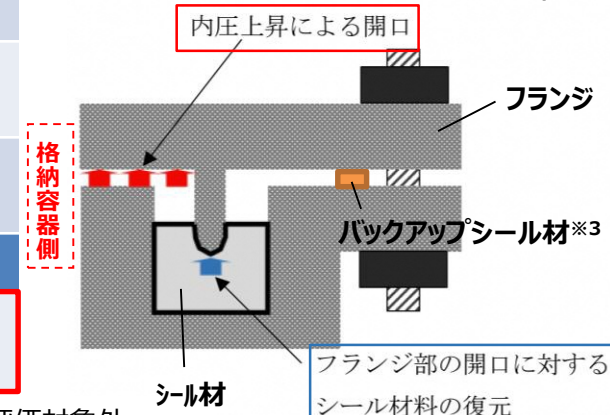
フランジ部の開口に対するシール材料の復元によりシール機能を維持できる開口量

### ※2 フランジ開口裕度

許容開口量に対するフランジ部の開口量の割合

### ※3 バックアップシール材

長期におけるシール機能健全性を補強するためフランジ面全周に塗布（バックアップシール材によるシール機能の向上は解析上考慮していない）



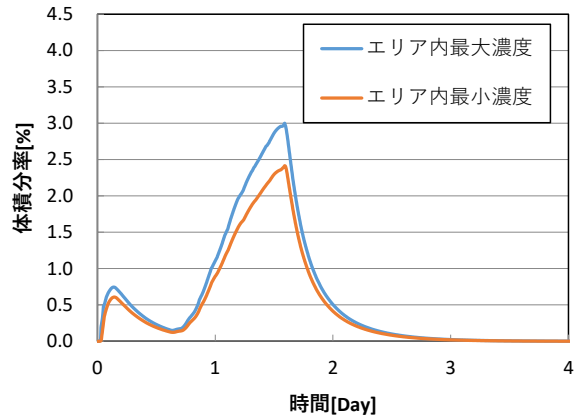
※格納容器トップヘッドフランジは、漏えい先のオベフロにおいてPAR等の対策を実施済であるため評価対象外

## 2-3. 水素が集中的に漏えいした場合の評価結果

- 解析における格納容器からの漏えい条件や局所エリアの条件については、内包される保守性を低減し、より現実的な解析を実施。  
(格納容器漏えい率を実際の漏えい率試験データを用いて設定する 等)
- 水素がD/W 側「上部 D/W 機器搬入用ハッチ室」において集中的に漏えいした場合において、水素濃度が4%を超えないことを確認した。一方、S/C 側「S/C 出入口室」において集中的に漏えいした場合は水素濃度4%を超えるものの、燃焼判定図から爆燃領域には入らないことを確認した。

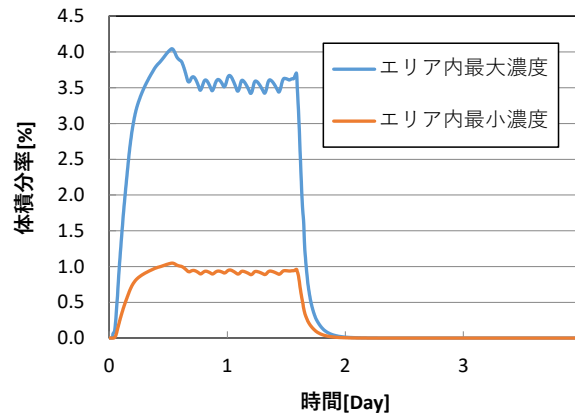
(D/W側 1 エリアに集中的に漏えいした場合)

最大水素濃度：3.00%



(S/C 側 1 エリアに集中的に漏えいした場合)

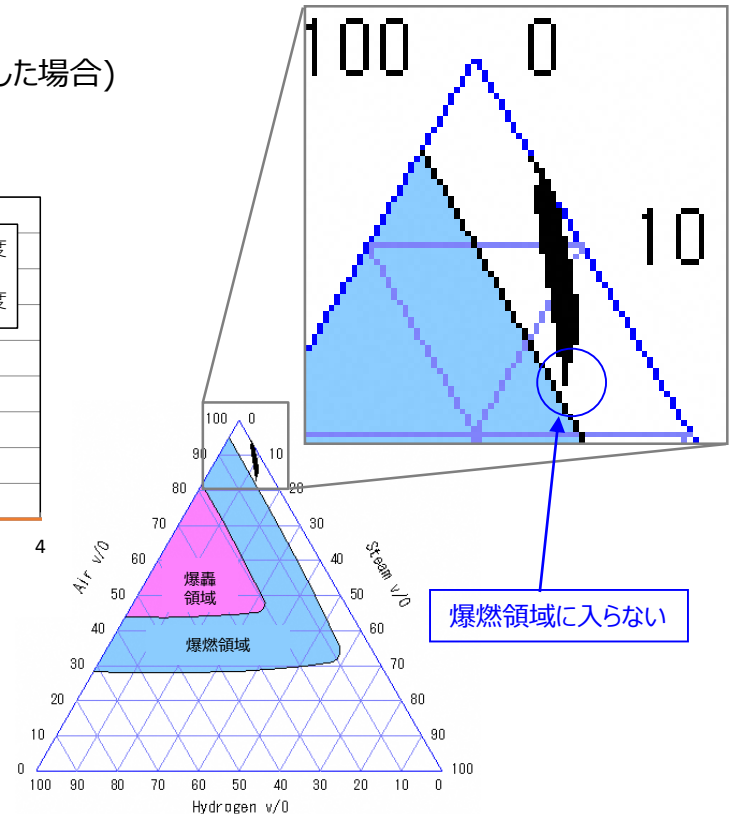
最大水素濃度：4.05%



図：上部ドライwel機器搬入用ハッチ室  
解析結果※

図：サプレッション・チェンバ出入口室  
解析結果※

※局所エリア解析は7日間分実施しているが、上部ドライwel機器搬入用ハッチ室及びサプレッション・チェンバ出入口室とも約3日目以降に水素濃度上昇はないため、4日目以降の結果を省略している。



図：サプレッション・チェンバ出入口室  
燃焼判定図  
(水素/空気/水蒸気)

### 3. 今後の水素防護対策の検討について

確認事項	水素爆発対策（No.16）
ご質問に至る議論	<p><b>【令和2年度第9回技術委員会】（資料No.6-1）【佐藤委員】</b>            PARの有効性が期待できるのか、詳細な検証のエビデンス（漏洩の想定/流路/滞留）を提出してもらい、確認する必要がある。</p>
ご質問 (藤澤委員) (中島委員) (鈴木元衛委員)	<p><b>【令和2年度第9回技術委員会】（資料No.6-1の5、資料No.6-2の1）</b>            原子力規制委員会の事故調査中間報告では、最上階（オペフロ）下階での水素爆発が報告されており、藤澤委員の水素拡散シミュレーション結果とも整合する。最上階（オペフロ）以外の対策や、水素濃度検知装置やPARの設置場所が最上階のみで有効なのかなど疑問があり、そのような観点から柏崎刈羽での対策についてご説明いただきたい。</p>
回答  令和3年度 第2回 技術委員会	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 原子炉建屋最上階に設置しているPARが有効に機能するよう、水素が滞留する箇所を特定し対策を講じていることをご説明。            （PARの設置位置／格納容器からの水素漏えい箇所の想定／局所エリアへの水素滞留対策）</li> <li>• 水素は局所エリア内に留まることなく、原子炉建屋最上階へと移行しPARが有効に機能することを解析により確認していることをご説明。            （原子炉建屋最上階への水素流路／原子炉建屋水素濃度解析結果）</li> </ul>
追加 回答	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 令和4年度第38回原子力規制委員会において、「沸騰水型原子炉における原子炉建屋の水素防護対策に係る規制上の取扱いの考え方」が示されました。</li> <li>• 「現行の規制基準において原子炉格納容器の破損防止を目的としている原子炉格納容器ベントについて、その目的に原子炉建屋の水素防護が追加」されることとなりましたが、当社は既に原子炉格納容器ベントを水素防護対策設備として手順を整備しています。</li> <li>• また、「水素爆発のリスクの更なる低減の観点から、原子炉施設ごとの特徴に応じた対策を自律的かつ計画的に実施することを事業者に求める」としており、水素防護対策について追加の対策も含め検討を継続して参ります。</li> </ul>

## 3-1. 水素防護に関する現行の基準及び対策設備

- 現行の基準においては、水素濃度制御設備又は水素排出設備を設置することが求められており、当社は水素濃度制御設備として静的触媒式水素再結合器(PAR)を設置し、水素排出設備となるブローアウトパルおよび原子炉建屋トップベントを自主対策設備として設置。
- 原子力規制委員会において、「沸騰水型原子炉における原子炉建屋の水素防護対策に係る規制上の取扱いの考え方」が示され、現行の規制基準において原子炉格納容器の破損防止を目的としている原子炉格納容器ベントについて、その目的に原子炉建屋の水素防護が追加されることとなった。

### 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

第53条に規定する「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」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。

a) **水素濃度制御設備**（制御により原子炉建屋等で水素爆発のおそれがないことを示すこと。）又は**水素排出設備**を設置すること。

#### 【水素濃度制御設備】



静的触媒式水素再結合装置(PAR)

#### 【水素排出設備（自主対策）】

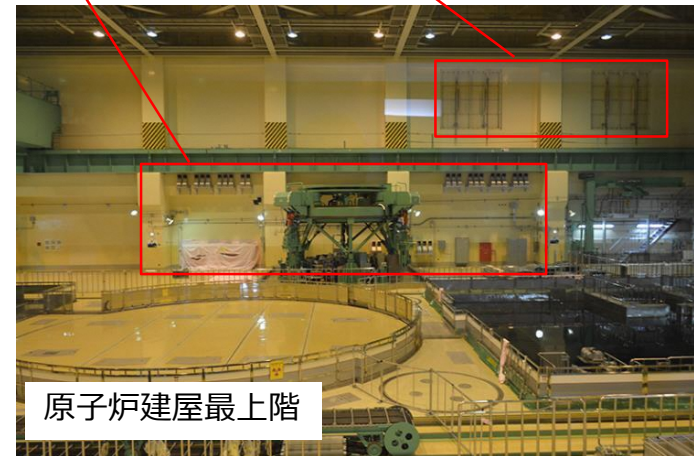
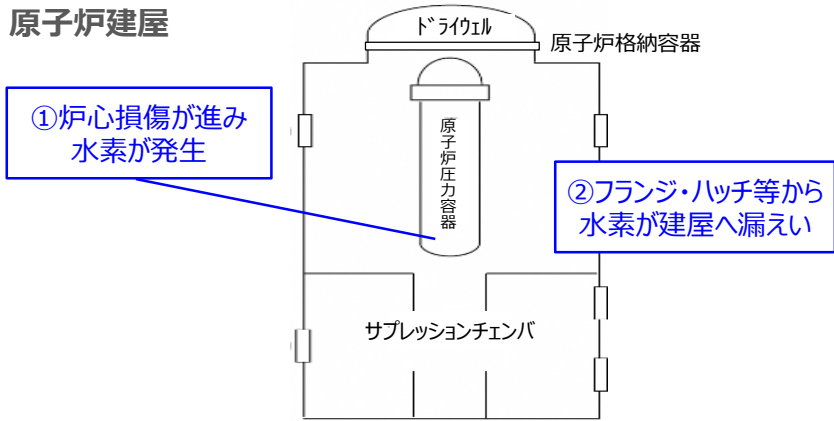


ブローアウトパル



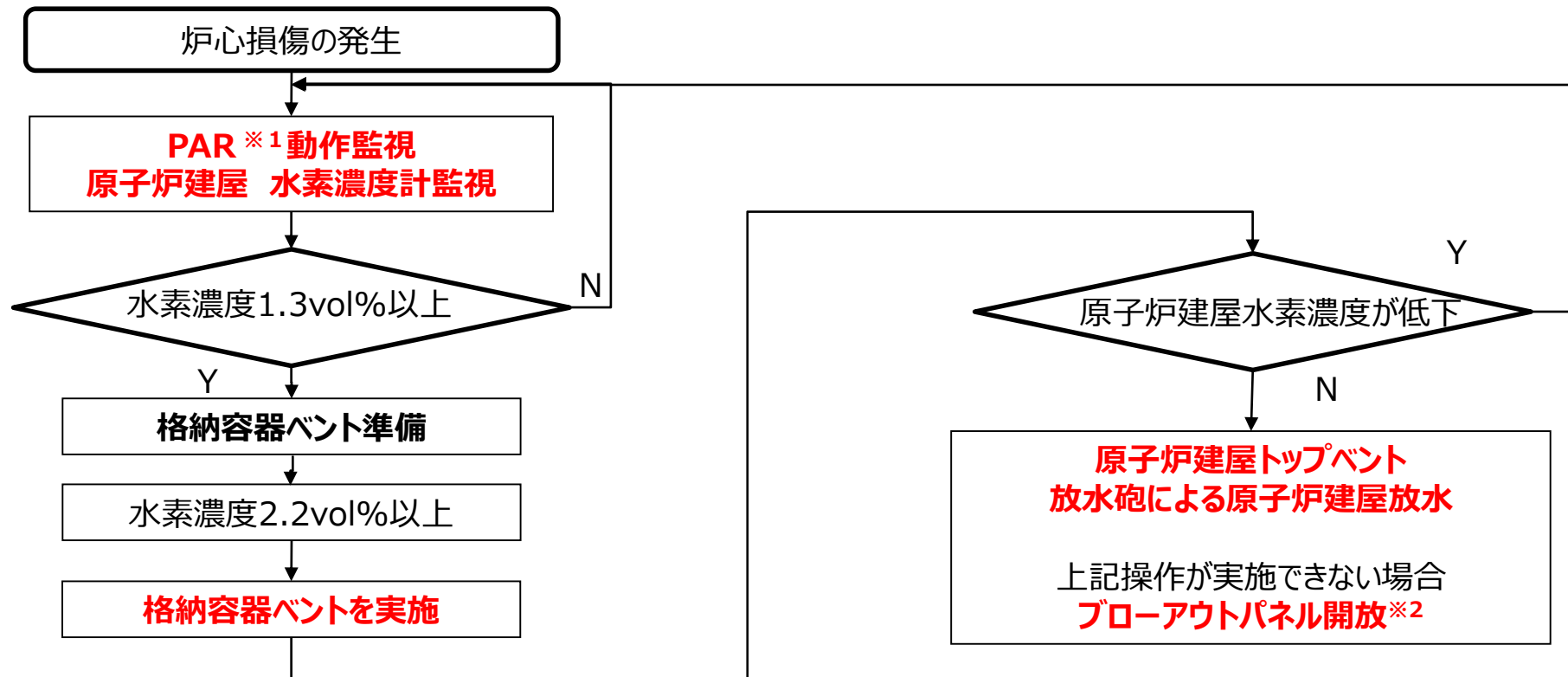
原子炉建屋トップベント

#### 原子炉建屋



## 3-2. 原子炉建屋水素濃度上昇時の対応フロー

- 当社は既に原子炉格納容器ベントを水素防護対策設備として手順を整備している。
- 放射性物質の放出を抑制する観点から、PARによる処理を優先し、それでも水素濃度が上昇する場合は原子炉格納容器ベントを実施。ベント実施後も原子炉建屋内の水素濃度が低下しない場合、「原子炉建屋トップベント」又は「ブローアウトパネル」を開放。



※ 1 燃料有効部被覆管の全量のジルコニウムが反応して発生する水素(約1600kg)を処理する能力

※ 2 設備の改造により遠隔操作が可能となったため原子炉建屋トップベントより優先して使用する手順に変更予定

## 3-3. 水素防護対策検討の進め方

- 水素防護対策の検討については、BWR事業者で共通的なアプローチとなることから、BWR事業者およびATENAで検討。

ATENA : Atomic Energy Association 原子力エネルギー協議会

### ATENA

#### 各水素対策案の簡易評価の実施

水素濃度、被ばく量の観点から対策案の特徴を整理

### 各事業者

#### プラントウォークダウンの実施

水素が滞留するおそれのある場所の特定

#### アクションプランの作成 ~ 2022年11月

- ✓ 検討項目の抽出
- ✓ 各検討項目の実施スケジュール策定  
(短期、中長期の仕分け)

#### 事業者共通の取組の実施

- ✓ 短期的な水素防護対策案の検討・実施  
短期的な対策案の検討結果を踏まえ標準ガイドを作成
- ✓ 中長期的な水素対策案の検討・実施  
原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法開発・評価  
詳細評価を踏まえ標準ガイドを改訂

〔短期的対応〕 アクションプラン作成後 ~

#### 水素防護対策の検討実施

対策を多段に組み合わせ、マネジメントとして手順に反映

〔中長期的対応〕 2023年度 ~ 予定

#### 追加的な水素防護対策の検討実施

詳細評価を踏まえた対策を検討・実施