
「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」 の中間報告（2023年度成果）

2024年10月31日

目次

1. 経緯・目的
2. 解析モデル体系の構築
3. ベースケース解析
4. 感度解析
5. 考察
6. まとめ
7. 今後の進め方

1. 経緯・目的(1/3)

- 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析から得られた知見への対応として、水素防護対策に係るアクションプランを2022年11月に公表した
- アクションプランでは短期的対応と中長期的対応に分けて検討を進めることとしており、「第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合」（2023年6月21日開催）において、中長期的対応として位置付けた、「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」の検討方針についてご説明した（次ページ、会合資料抜粋参照）
- **水素滞留の可能性のある条件を策定すること**を目的として検討を進めており、中間報告として（2023年度分）の研究成果が取り纏められたため、当該内容についてご報告する

5. 今後の対応（中長期的対応）について

29

(2) 水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価

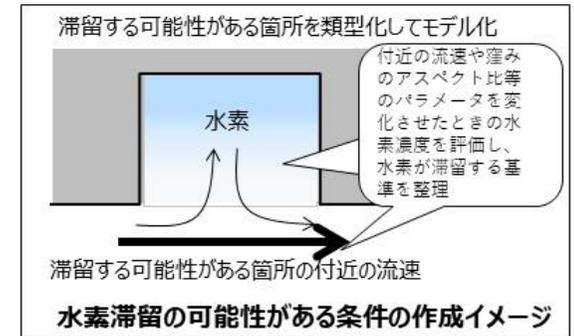
○目的

原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法を構築し、水素滞留の可能性のある条件を策定する。

今回ご報告範囲

○今後の取組計画・現在の取組状況

- 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築
 - ✓ プラントウォークダウン等から得られたデータを元に水素が滞留する可能性のある箇所の類型化
 - ✓ 類型化した箇所をモデル化し、解析コードにて滞留箇所付近流速、窪みのアスペクト比等のパラメータを変化させ、水素濃度を評価



➤ 水素滞留の可能性のある条件の策定

上記の評価結果、実機風速測定データ等から水素滞留の可能性のある条件を作成
(例:滞留箇所付近の流速、窪みのアスペクト比、一定条件を満たす場合には水素滞留の可能性あり等)

➤ 各プラントの評価

原子炉建屋内の全体解析を実施し、原子炉建屋各部の流速や水素濃度等を評価。
(各社プラントの対策 (PAR、BOP、トップベント、SGTS等) を考慮)

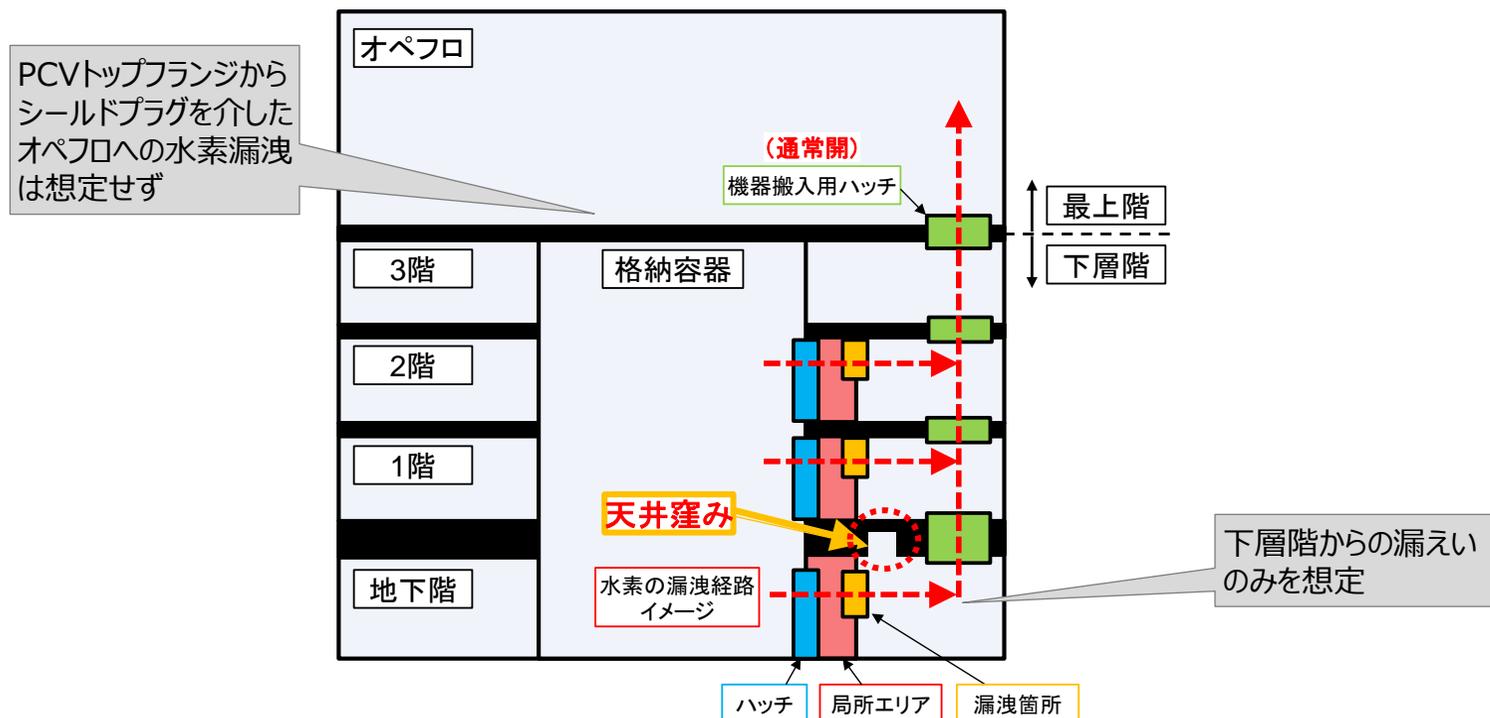
1. 経緯・目的(3/3)

- 報告する研究成果：
電中研報告NR24003「過酷事故時の沸騰水型原子炉建屋下層階における水素挙動評価 –下層階天井窪み部の解析モデル体系の構築と感度解析–」(2024/9/30公刊)
✓ <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=NR24003>
- 本報告書の目的：
アクションプランに示された過酷事故時の原子炉建屋下層階の天井窪み部等における水素の滞留・拡散挙動の評価手法の構築に向け、下層階フロア領域の解析モデル体系の構築、各種パラメータの感度解析、影響の大きい物理的な要因の特定を行う。
- 本報告書のスコープ：
原子炉建屋下層階において水素が滞留し得る天井窪み部の条件（位置・形状等）を定性的に抽出するために、PCVから水素が漏洩する箇所は下層階のみと単純化して想定し、主に天井窪み部の位置・形状に関するパラメータを対象とした感度解析を実施。

2. 解析モデル体系の構築(1/5)

想定する水素漏洩の流路

- 過酷事故時にPCVから原子炉建屋の下層階に水素が漏洩した場合を想定
 - ✓ 水素はPCVのハッチ・エアロック室等（局所エリア）のダクト・扉から下層階フロアに流出
 - ✓ 下層階フロアから機器搬入用ハッチ等（吹抜空間）を通じてオペフロに到達
- 水素が漏洩した下層階に天井窪み部がある場合を対象

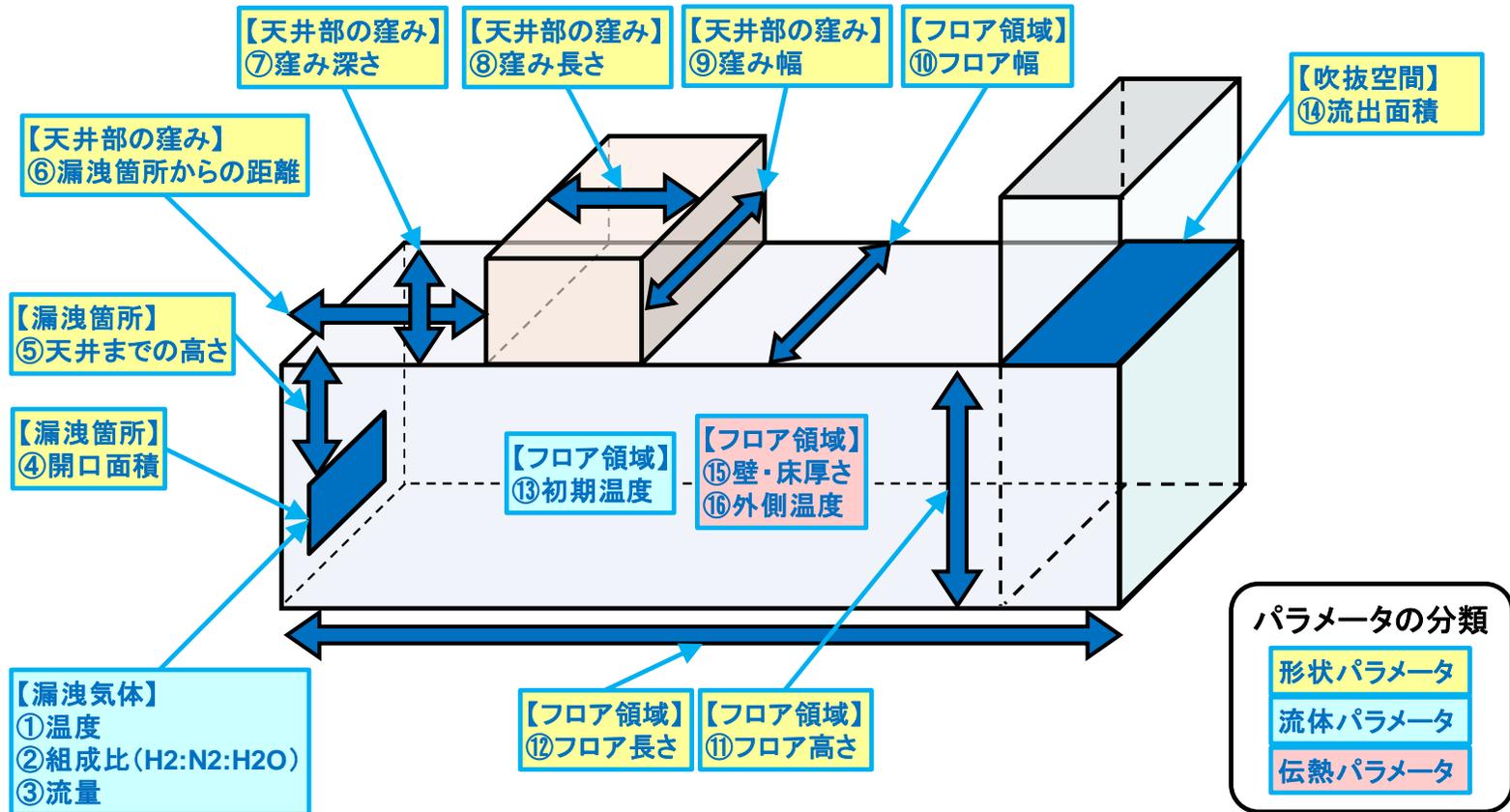


原子炉建屋下層階に水素が漏洩した場合の流路イメージ [電中研報告NR24003を引用し追記]

2. 解析モデル体系の構築(2/5)

下層階において設定するパラメータ

- 下層階フロアにおいて、天井窪み部の水素濃度に影響を与える可能性が考えられる、形状・流体・伝熱パラメータ (①~⑯) を設定



解析モデル体系において設定するパラメータ [電中研報告NR24003]

2. 解析モデル体系の構築(3/5)

各パラメータに係るベースケース条件設定

- 2022年度の水素防護対策に係るアクションプランの成果である国内BWRプラントウォークダウンのデータを活用してベースケースの条件を設定
 - ✓ 国内各社の代表プラントにて、各形状パラメータの寸法情報を収集
 - ✓ 漏洩箇所形状としてプラントで最も多いダクトを選択
 - ✓ 概ね平均的な値あるいは保守的な値をベースケース解析条件として設定

形状パラメータ	プラントウォークダウン(PWD)データ			ベースケース
	最大値	最小値	平均値	
④開口面積(ダクト)	0.7 m ²	0.02 m ²	0.11 m ²	0.1 m²
⑤天井までの高さ	5.0 m	0.0 m	0.9 m	1.0 m
⑥漏洩箇所からの距離	67.5 m	0.0 m	12.7 m	0.0 m
⑦窪み深さ	3.3 m	0.3 m	1.4 m	1.5 m
⑧窪み長さ	23.3 m	1.0 m	9.0 m	1.5 m
⑦/⑧	1.2	0.02	0.2	1.0
⑨窪み幅	8.9 m	1.4 m	5.2 m	5.0 m
⑩フロア幅	9.6 m	1.1 m	5.3 m	5.0 m
⑪フロア高さ	7.0 m	2.3 m	4.7 m	5.0 m
⑫フロア長さ	96.5 m	3.4 m	50.0 m	50.0 m
⑭流出面積	60.6 m ²	4.1 m ²	32.4 m ²	30 m²

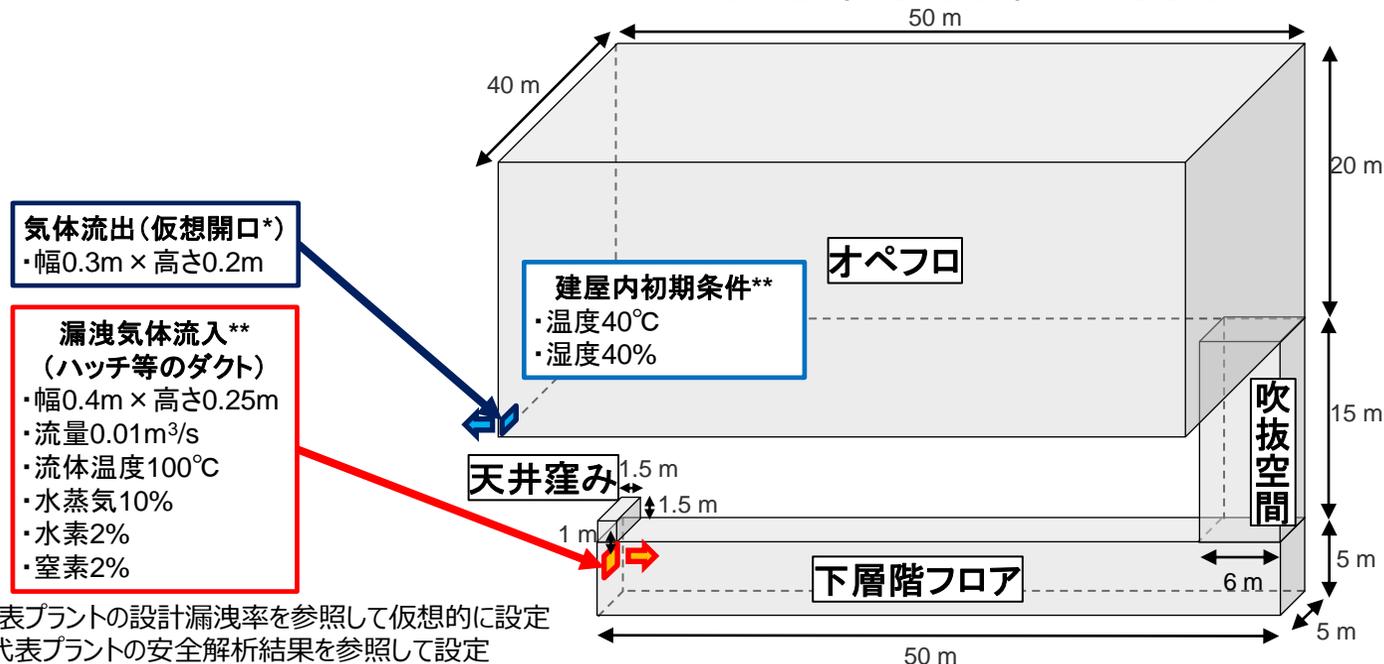
※④～⑨は主にダクトのデータを対象

形状パラメータのプラントウォークダウンデータとベースケース解析の条件 [電中研報告NR24003を引用し追記]

2. 解析モデル体系の構築(4/5)

解析体系

- 下層階にて水素が滞留し得る天井窪みの条件を評価する解析体系を設定
 - ✓ 下層階から吹抜空間～オペフロまでモデル化し、吹抜空間内の自然対流を現実的に評価
 - 評価において着目するのは下層階の天井窪みにおける水素濃度
 - ✓ 新規規制基準適合性審査での条件（SA条件）にて、PCVのハッチ・エアロック室等のダクトから下層階フロアへの水素の漏洩を想定
 - ✓ SGTS、PAR、ブローアウトパネル・トップベント等の水素防護対策は考慮しない

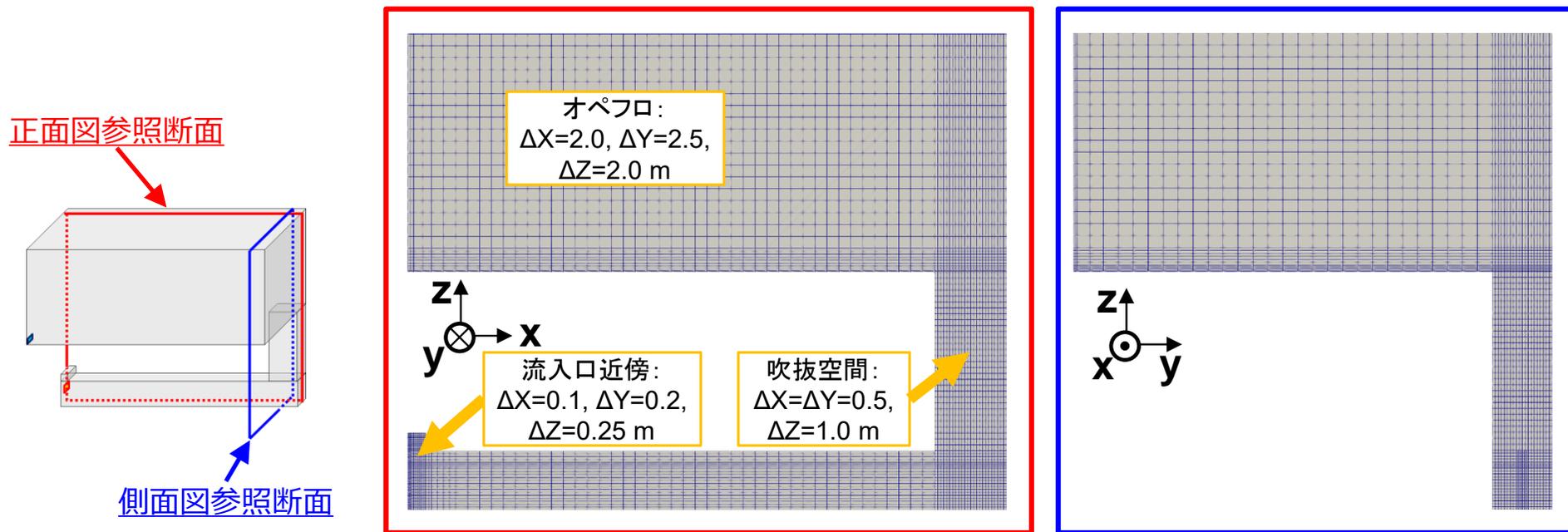


下層階フロア水素滞留・拡散挙動を評価する解析体系の概要（ベースケース条件）

2. 解析モデル体系の構築(5/5)

GOTHIC解析モデル

- GOTHICコードver.8.3を用いて解析体系をモデル化
 - ✓ 解析メッシュ数：約20,000
 - ✓ 時間刻み幅：0.3秒
 - ✓ コードに装備される標準的な解析手法を採用（乱流モデル、壁面凝縮モデル、空間差分）

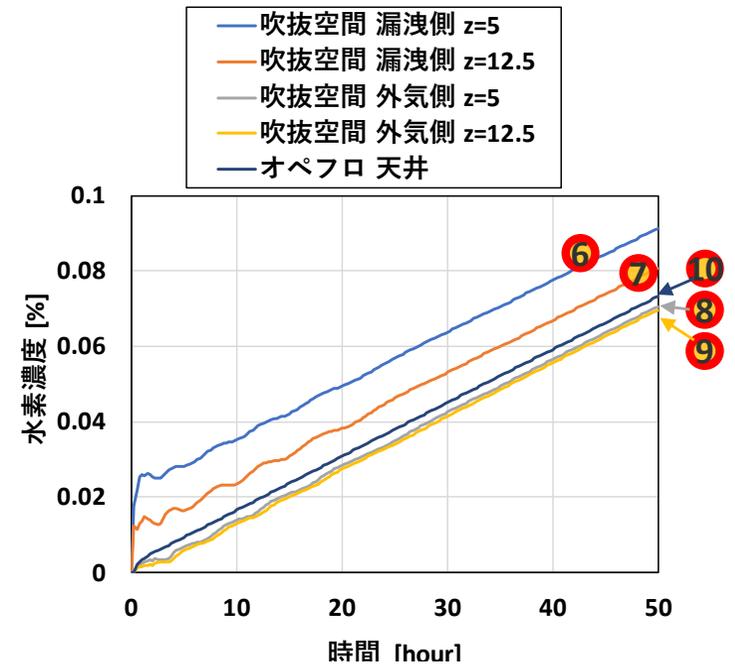
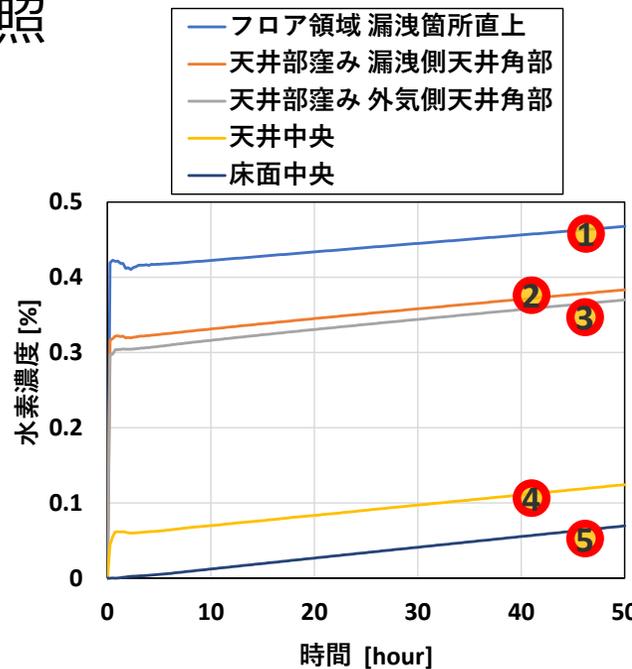
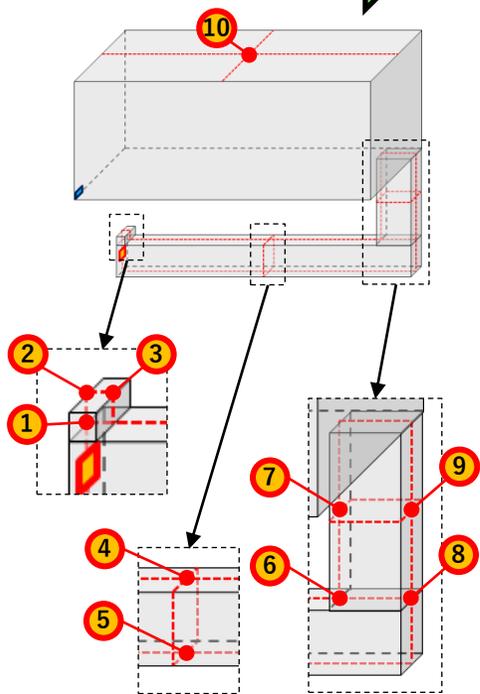


GOTHIC解析モデルのメッシュの正面図(左)と側面図(右) [電中研報告NR24003]

3. ベースケース解析(1/2)

水素濃度の時間変化

- 建屋内の水素濃度は、ある程度の時間経過後は、全体的に徐々に増加
 - ✓ 建屋内全体の気体循環と水素の拡散が一定程度促進していることを示唆
 - ✓ 外気流入がないため、建屋内の水素濃度は漏洩気体濃度(2%)程度まで増加して収束する見込み
- 天井窪み付近(下図①②③)の水素濃度は建屋内の他の位置よりも比較的高いが、天井窪み内(②③)よりもその上流側に位置する漏洩箇所直上(①)の方が水素濃度は高い → P20参照



ベースケース解析におけるモデル体系各位置の水素濃度の時間変化

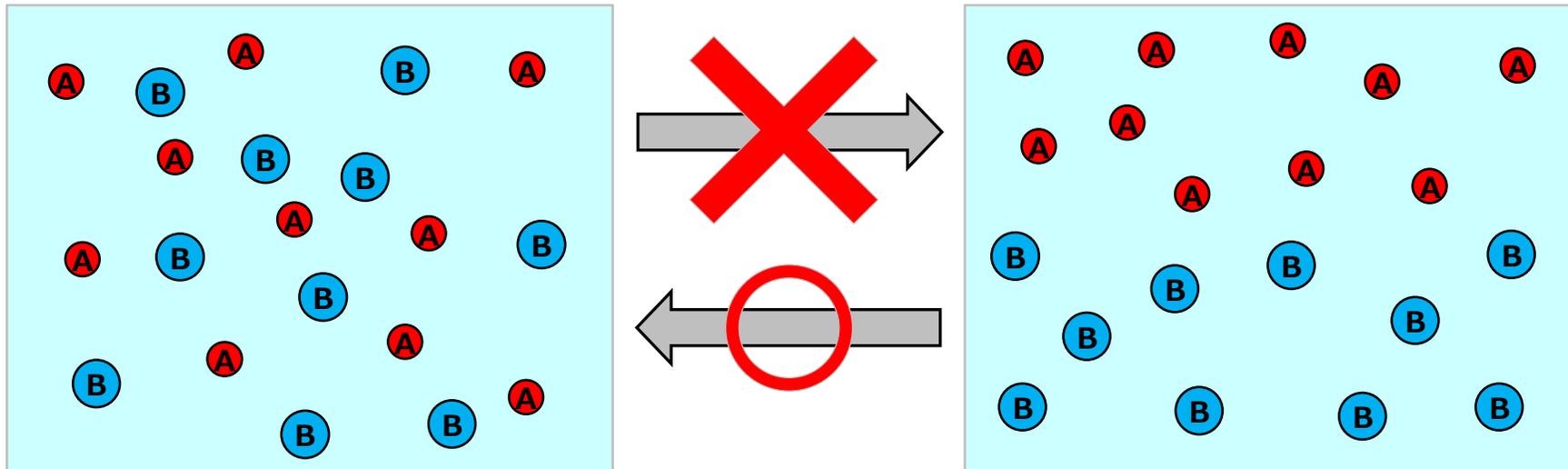
[電中研報告NR24003を引用し追記]

(補足) 気体の挙動について(1/2)

混合気体の挙動

一度混合した気体は、成分毎に自然に分離することはない

- ✓ 気体の混合は不可逆過程 (エントロピー (乱雑さ) の増大)
- ✓ 例えば空気の主成分である窒素と酸素が静止状態で自然に分離することはない



気体成分Aと気体成分B (分子量 : $A < B$) が混合した状態 (左) と分離した状態 (右)

(補足) 気体の挙動について(2/2)

気体の移流 (浮力による自然対流) と拡散

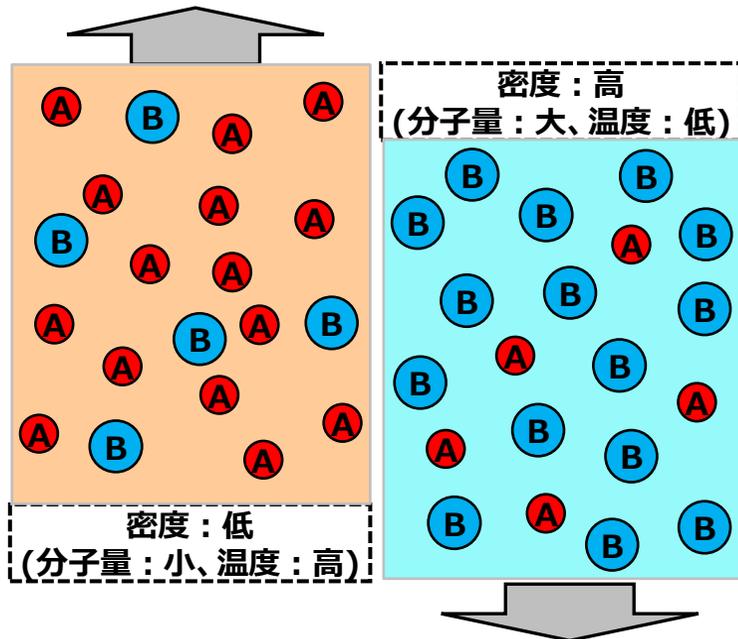
自然対流は混合気体の密度差が駆動力

✓ 気体密度は平均分子量に比例・温度に反比例

⇒ 理想気体の状態方程式： $P = \frac{\rho R^* T}{M} \rightarrow \rho \propto \frac{M}{T}$

(P:圧力, ρ:密度, M:分子量, R*:一般気体定数, T:絶対温度)

✓ 分子量の小さい気体分子のみが選択的に上昇することはない



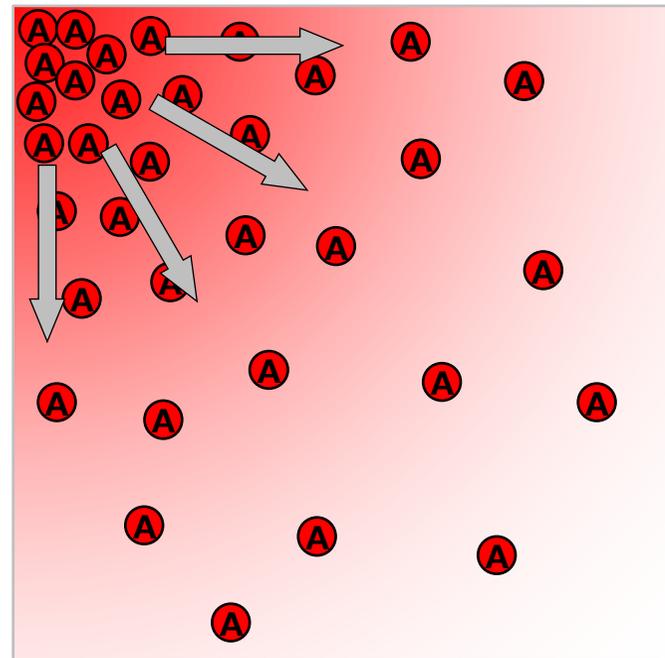
浮力による混合気体の自然対流のイメージ

拡散は気体成分の濃度勾配が駆動力

✓ 拡散する方向：高濃度⇒低濃度 (均一化)

✓ 分子運動による拡散 (分子拡散)

✓ 流体の渦運動による拡散 (乱流拡散)

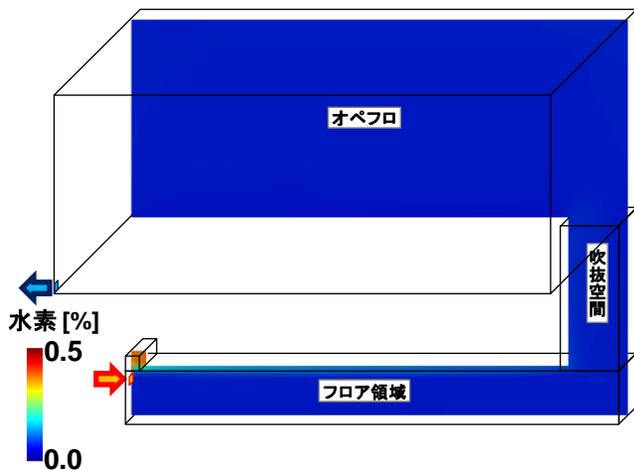


気体成分Aが拡散するイメージ

3. ベースケース解析(2/2)

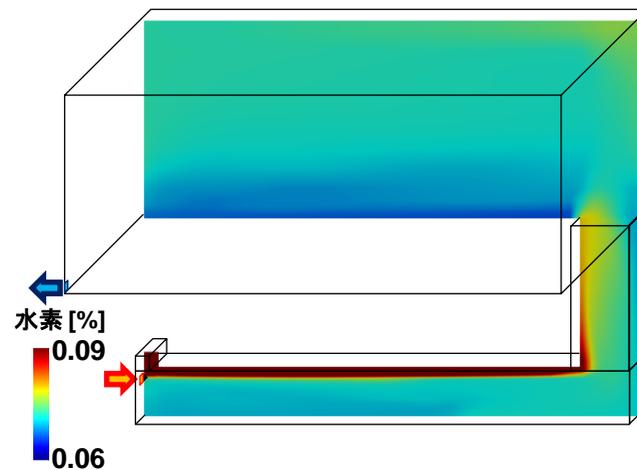
水素濃度・気体速度分布

- GOTHIC解析モデル体系において漏洩した水素の滞留・拡散挙動の傾向を確認
 - ✓ 漏洩した水素は浮力により天井窪み内に流入し下層階フロアの天井に沿って吹抜空間へ移行
 - ✓ 吹抜空間内において水素を含む低密度気体による自然対流の生成
 - ✓ 下層階フロアの水素濃度が建屋内の気体循環により希釈される傾向



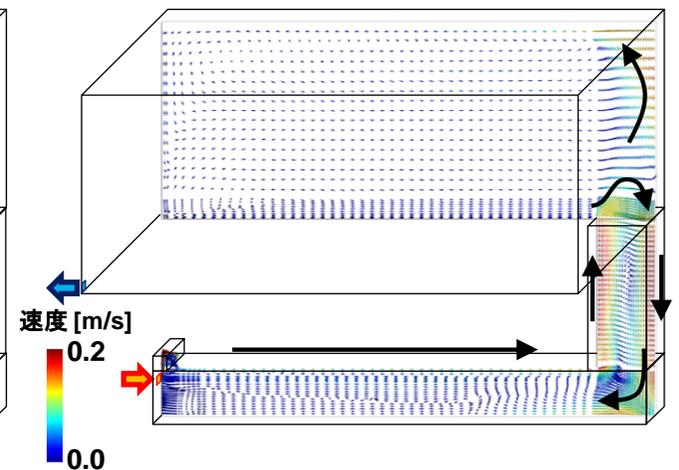
(a)水素濃度分布

(カラーコンター範囲：0~0.5%)



(b)水素濃度分布

(カラーコンター範囲：0.06~0.09%)



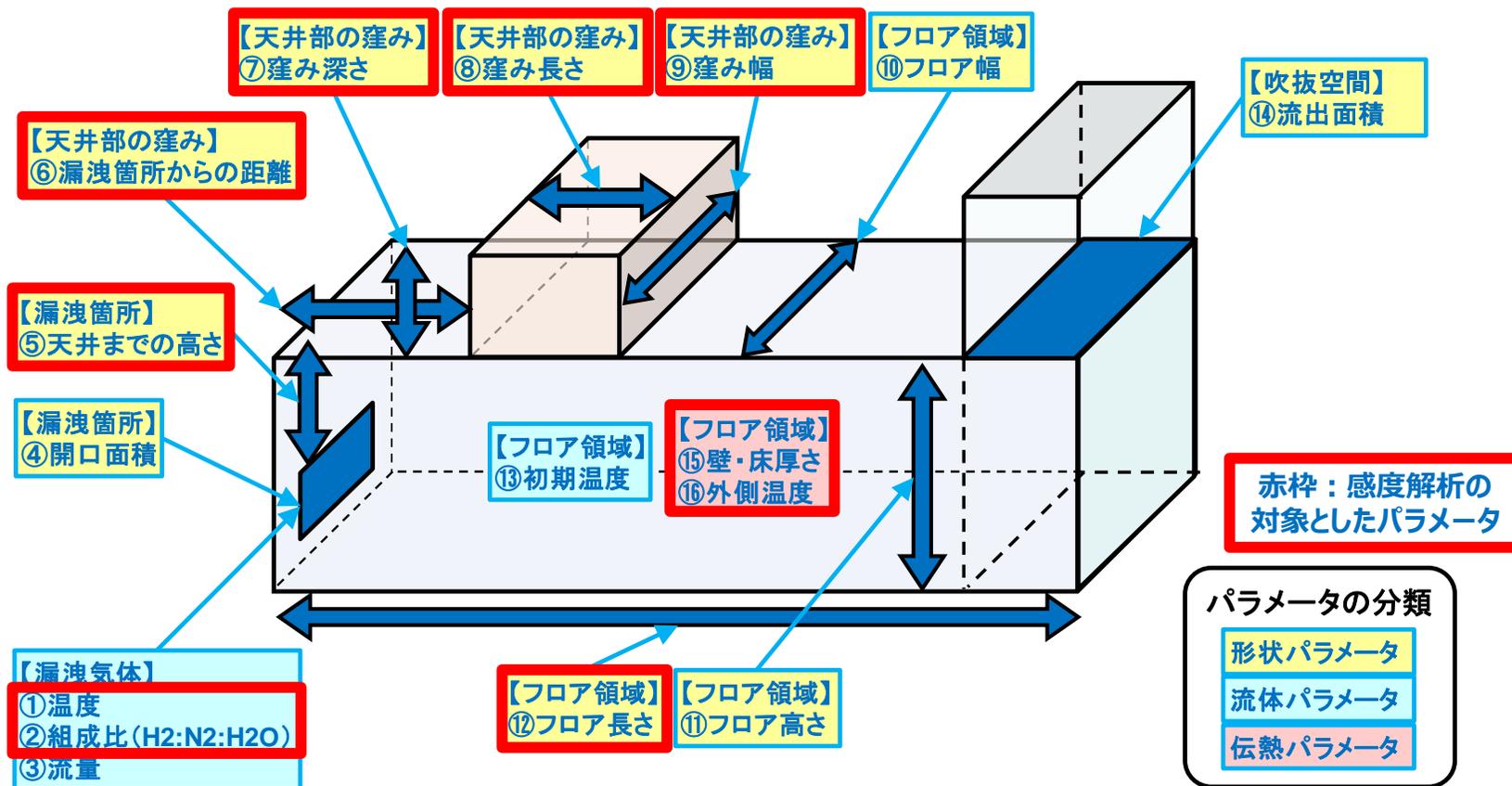
(c)気体速度分布

ベースケース解析結果例 (漏洩開始後50時間経過時点) [電中研報告NR24003を引用し追記]

4. 感度解析(1/5)

対象とするパラメータ

- 感度解析で対象とするパラメータとして、主に天井窪み部に係る形状パラメータを抽出



解析モデル体系において設定するパラメータ [電中研報告NR24003を引用し追記]

4. 感度解析(2/5)

パラメータの設定

- ベースケース解析の条件を基準として、感度解析におけるパラメータの範囲を、プラントウォークダウンのデータや安全解析結果等を参照して設定

パラメータ	ベースケース	感度解析
①漏洩気体温度	100°C	80, 120°C
②漏洩気体組成比(水蒸気)	10%	50, 70%
③漏洩気体流量	0.01 m ³ /s	変更なし
④開口面積(ダクト)	0.1 m ²	変更なし
⑤天井までの高さ	1.0 m	0.0, 3.0 m
⑥漏洩箇所からの距離	0.0 m	10, 20 m
⑦窪み深さ	1.5 m	0.3, 3.0 m
⑧窪み長さ	1.5 m	0.5, 5.0 m
⑨窪み幅	5.0 m	1.0, 3.0 m
⑩フロア幅	5.0 m	変更なし
⑪フロア高さ	5.0 m	変更なし
⑫フロア長さ	50 m	10, 100 m
⑬フロア初期温度	40°C	変更なし
⑭流出面積	30 m ²	変更なし
⑮壁厚さ:フロア天井・床面	500 mm	1000, 2000 mm
:フロア側壁・正面壁(流出側)	1000 mm	1200, 1600 mm
⑯壁外面温度:フロア天井・床面	40°C	60, 80°C
:フロア側壁・正面壁(流出側)	40°C	60, 80°C

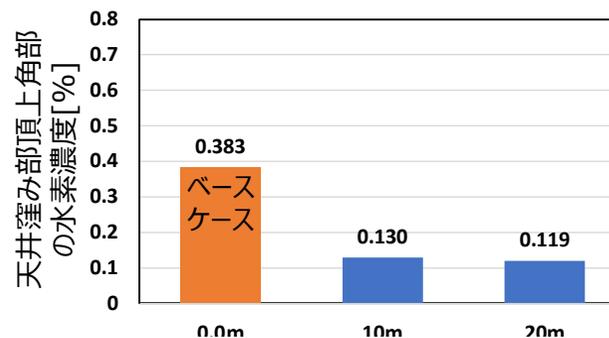
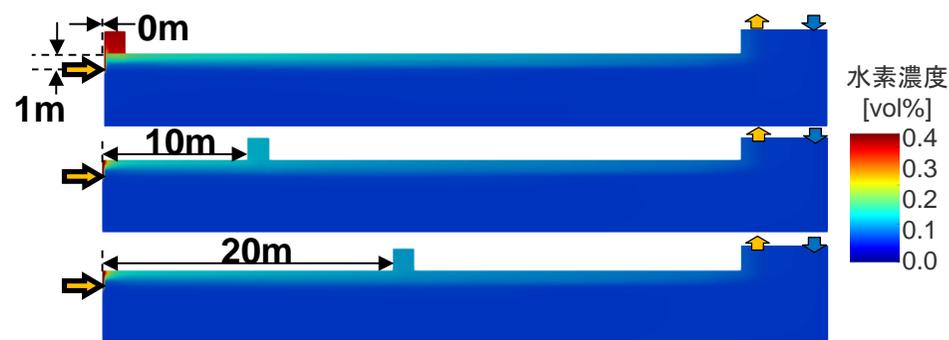
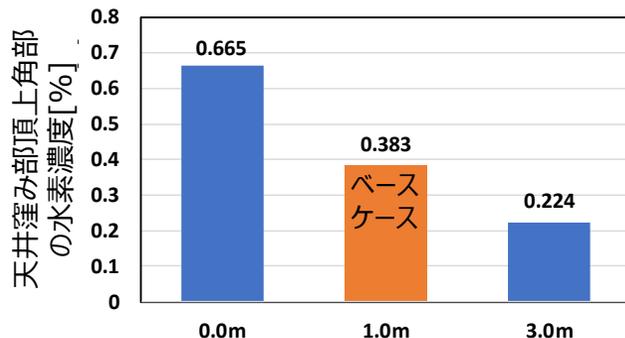
解析モデル体系において設定するパラメータ [電中研報告NR24003]

4. 感度解析(3/5)

漏洩箇所からの距離の影響

漏洩箇所から天井窪みまでの距離（高さ、水平方向とも）が近いほど窪みの水素濃度が高くなることを確認

- ✓ 漏洩箇所からの距離が長くなるほど水素が周囲気体に拡散し水素濃度が低下するため
- ✓ 漏洩箇所から天井窪みまでの高さ(⑤)・水平距離(⑥)のパラメータの感度が顕著に高い



(a) 漏洩箇所から天井窪みまでの高さ（垂直距離）(⑤)の影響

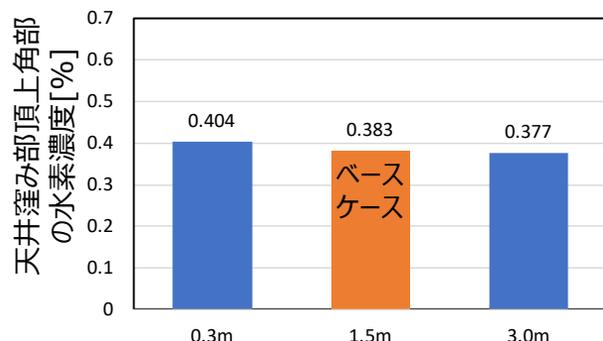
(b) 漏洩箇所から天井窪みまでの水平距離(⑥)の影響

漏洩開始後50時間経過時点の感度解析結果（水素濃度分布） [電中研報告NR24003を引用し追記]

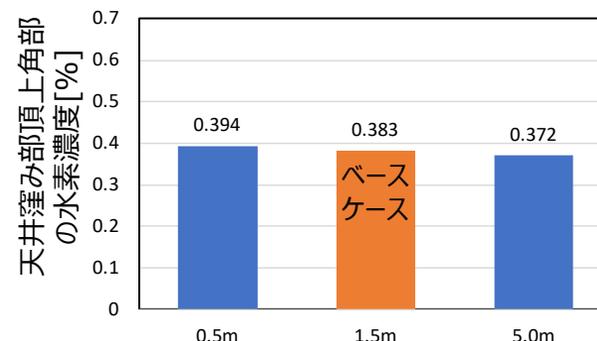
4. 感度解析(4/5)

その他の形状パラメータの影響

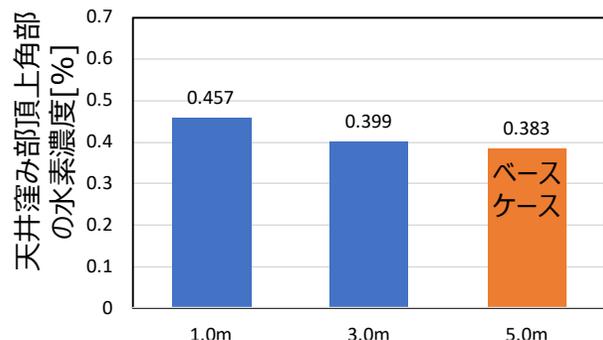
- 天井窪み部の深さ・長さ・幅の寸法が増加すると水素濃度はやや減少する傾向
 - ✓ 天井窪み内に水素が拡散する範囲が広がり希釈されやすくなるため
- 下層階フロアが長くなると水素濃度はやや増大する傾向
 - ✓ 漏洩気体が冷却されやすく吹抜空間での密度差が減少し循環流量が減少するため



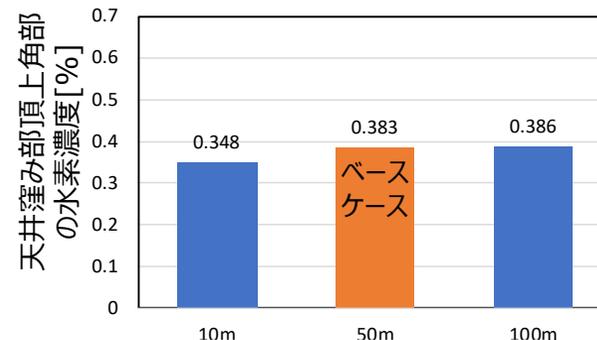
(a)天井窪み深さ(⑦)の影響



(b)天井窪み長さ(⑧)の影響



(c)天井窪み幅(⑨)の影響



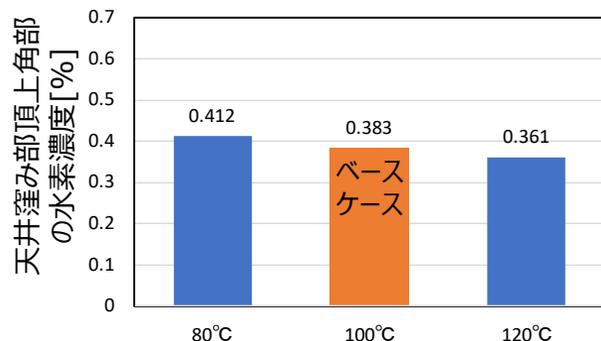
(d)フロア長さ(⑫)の影響

漏洩開始後50時間経過時点の感度解析結果 (水素濃度分布) [電中研報告NR24003を引用し追記]

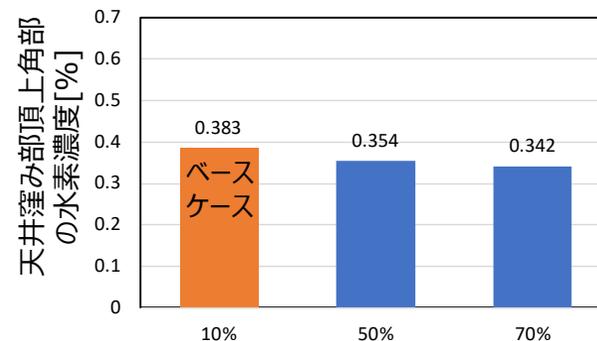
4. 感度解析(5/5)

流体・伝熱パラメータの影響

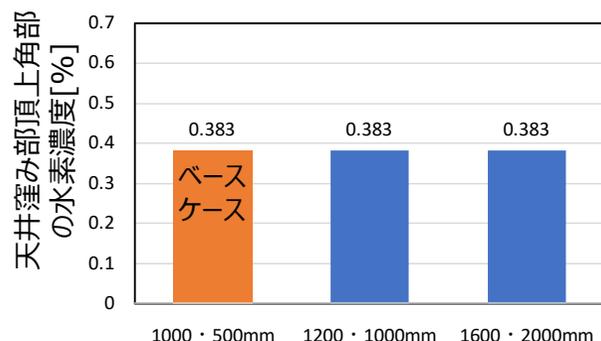
- 漏洩気体の温度の上昇・水蒸気比率の増大により水素濃度はやや減少する傾向
 - ✓ 漏洩気体の密度が低くなり吹抜空間での密度差が増大し循環流量が増大するため
- 壁外面温度が上昇すると水素濃度は減少する傾向
 - ✓ 漏洩気体が冷却されにくく吹抜空間での密度差が増大し循環流量が増大するため



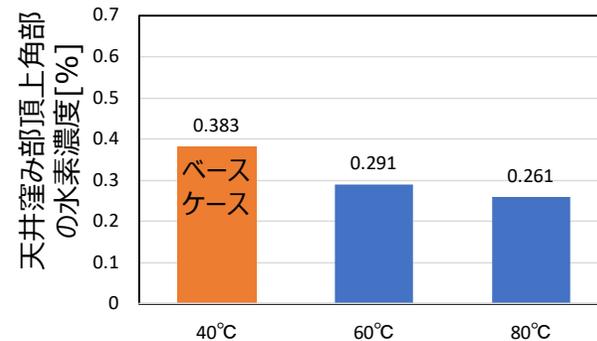
(a) 漏洩気体温度(①)の影響



(b) 漏洩気体中水蒸気比率(②)の影響



(c) 壁面厚さ(⑮)の影響



(d) 壁外面温度(⑯)の影響

漏洩開始後50時間経過時点の感度解析結果 (水素濃度分布) [電中研報告NR24003を引用し追記]

5. 考察(1/2)

天井窪み部の水素濃度に影響を与える物理的要因

- 感度解析結果の分析から、天井窪み部の水素濃度が増加する物理的な要因を抽出
 - (a) 漏洩気体密度の上昇による吹抜空間で発生する対向流の循環流量の減少
 - (b) 漏洩気体の下層階で空間中に拡散する量の減少
 - (c) 天井窪み部の寸法の減少

※水蒸気の凝縮により水素濃度が相対的に増加する可能性はあるが、本報告書における評価条件の範囲では、水蒸気凝縮の影響は小さかった

水素濃度が増加する物理的要因	物理的要因に影響を与えるパラメータ
(a) 循環流量の減少	①漏洩気体温度、②漏洩気体組成比(水蒸気) ⑫フロア長さ、⑯壁外面温度
(b) 拡散量の減少	⑤天井までの高さ、⑥漏洩箇所からの水平距離
(c) 天井窪み部寸法の減少	⑦窪み深さ、⑧窪み長さ、⑨窪み幅

天井窪み部の水素濃度に影響を与える物理的要因 [電中研報告NR24003]

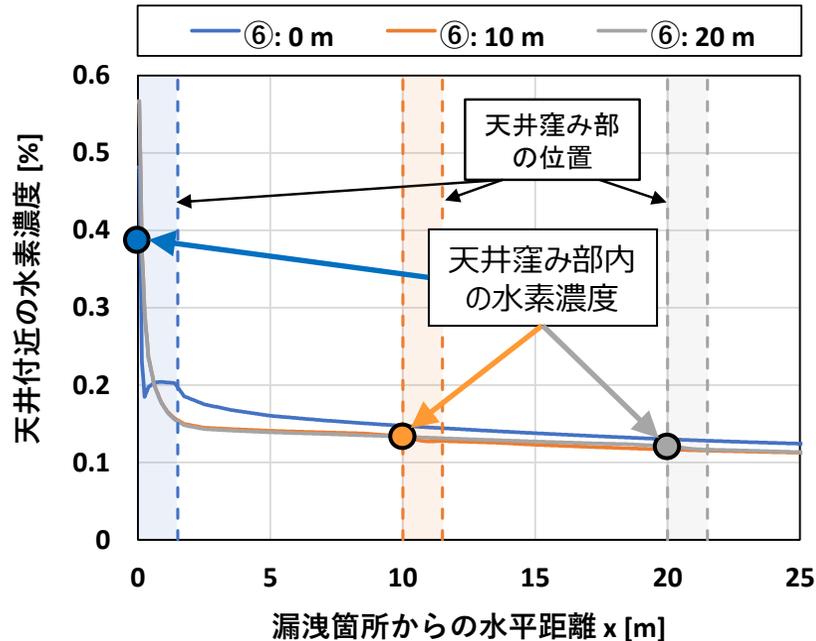
5. 考察(2/2)

天井窪み部と天井付近の水素濃度比較

本評価条件範囲では、天井窪み部ではなく「天井付近」の水素濃度に着目すればよい

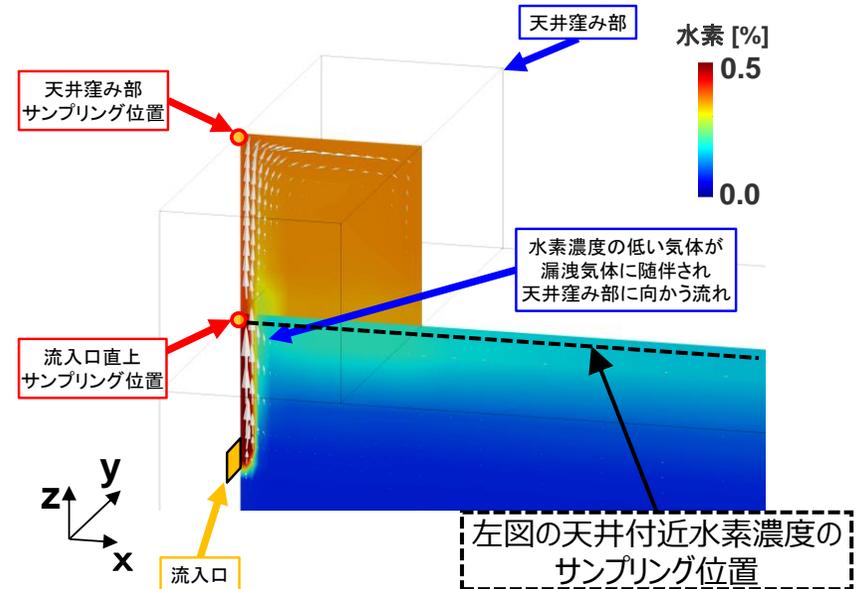
- ✓ 水素を含む高温の漏洩気体は相対的に低密度なため上昇しつつも、周囲気体に拡散し希釈される
- ✓ 天井窪み部内にて冷却源による水蒸気の顕著な凝縮がない限り、天井窪み部の中よりもその上流側の「天井付近」における水素濃度の方が高いため、「天井付近」の水素濃度で保守的な評価が可能

(⑥ : 漏洩箇所から天井窪み部までの水平距離)



漏洩箇所から天井窪み部までの水平距離の感度解析における天井付近の水素濃度分布

[電中研報告NR23004を引用し追記]



※天井窪み部下端の水素濃度コンターの不連続性は解析メッシュ粗さとポスト処理ソフトの仕様に起因

ベースケース解析における天井窪み部周辺の水素濃度分布と速度ベクトル分布

[電中研報告NR23004を引用し追記]

6. まとめ

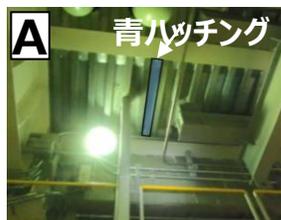
アクションプランに示された過酷事故時の原子炉建屋下層階の天井窪み部等における水素滞留・拡散挙動の評価手法の構築に向けた以下の成果を報告

- 実機のプラントウォークダウンのデータや安全解析評価結果等を基に、実機プラントの原子炉建屋の寸法形状や流体・伝熱特性の代表値をベースケースとする解析モデル体系を、GOTHICコードを用いて構築した。
- 構築した解析モデル体系を用いて、天井窪み部の水素の滞留・拡散挙動に関する形状・流体・伝熱の各種パラメータの感度解析を実施した結果、天井窪み部における水素濃度に対して、漏洩箇所から天井までの高さ天井窪みまでの垂直距離のパラメータの感度が高いことがわかった。
 - ✓ 漏洩箇所から天井窪みまでの距離が近いほど窪みにおける水素濃度が高くなることを確認した。
- 感度解析結果の分析から、天井窪み部の水素濃度が増加する物理的な要因として、漏洩気体密度の上昇による吹抜空間で発生する対向流の循環流量の減少、漏洩気体の下層階で空間中に拡散する量の減少、天井窪み部の寸法の減少、の3種に大別されることがわかった。

7. 今後の進め方(1/2)

本解析モデル体系を用いた今後の実施事項

- まだ影響評価をしていないパラメータに対する感度解析の追加
 - ✓ 漏洩箇所の面積、吹抜空間の面積・高さ、建屋内空間の初期温度 等
 - ✓ 天井窪みの上面温度（顕著な冷却源を模擬）
- 天井窪み部において着火限界以上の濃度の水素が滞留し得る具体的な条件（クライテリア）の簡易評価
- 天井窪み「6 類型」に対する評価への対応



デッキプレート
(天井を見上げた図)



気体の移行を妨害
する天井の出っ張り
(小部屋 (CRD
補修室))



天井部の躯体の窪み
(周回通路から見上げた図)



空調ダクトの貫通
孔が天井付近に
設置されていない
小部屋
(エアロック室)



壁等で区切
られた横穴
(横穴部)



壁等で区切られた
区画
(階段室)

7. 今後の進め方(2/2)

今後のATENAの水素防護対策に係るアクションプラン

- 2024年度（水素滞留・拡散挙動の評価手法構築）
 - 天井窪み部において水素が滞留し得る具体的な条件（クライテリア）の簡易評価
- 2025年度～（構築した評価手法による評価、BOP・トップベント開放による水素挙動の確認）

BOP・トップベント開放による原子炉建屋下層階を含めた水素挙動の確認、実機適用に向けた課題検討

