

---

# 「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」 2024年度成果

2025年6月  
原子力エネルギー協議会  
(ATENA)

1. 本検討の背景
2. 経緯・目的
3. 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築
  - 天井窪み部「6類型」の取扱い
4. 水素滞留の可能性がある条件の策定
  - 簡易評価フローの構築
5. まとめ
6. 今後の進め方

- 原子炉建屋の水素防護対策としては、新規規制基準対応の中で、格納容器からの漏えい箇所として想定しているハッチ等がある部屋（以下、「局所エリア」という。）や、滞留箇所として想定しているオペフロに対し、水素濃度計を設置して濃度を監視しつつ、PARによる処理を基本としているが、それでも建屋内の水素濃度が上昇した場合を考慮し、SGTS等による排気やフィルタベントにより格納容器から建屋への水素漏えいを抑制することとしている。さらに、局所エリアについては、扉スリッド化、扉開放等の手順を整備し、オペフロについては、BOP、トップベント等の水素爆発防止対策を実施している。
- これらの水素濃度が上昇した場合の対策は、これまでの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から、下層階に水素が滞留する可能性が示されたことを踏まえてのものである。これまでの新規規制基準対応の中で水素防護対策も含めた数多くの安全対策を実施しており、水素爆発に至る可能性は極めて低いと考えられるが、更なるリスク低減を図るため、下層階の水素滞留への対策を検討することとした。
- 短期的対応では、下層階の水素滞留が懸念される場合に備えた対応として必要な時にHVACを活用できるようにするため、AMGの改定、手順の整備等を実施済。
- 中長期的対応として「下層階の水素滞留の可能性」がある箇所に対して対策要否を判断するため、まずは、実プラントのプラントウォークダウンを行い、水素滞留の可能性のある箇所として天井窪み部等を選定した。
- 次に、そもそも、格納容器から漏洩した水素は、新規規制基準適合審査において局所エリア・下層階・搬入口を通じてオペフロに導かれることは確認しているものの（局所エリア及びオペフロについては設備（水素濃度計等）・手順を整備し、水素防護対策を実施）、更なる安全性向上の観点から、下層階の天井窪み部等への水素滞留の可能性を確認する。そのために、天井窪み部における水素濃度の詳細評価手法を構築することによって、SA環境において水素滞留の可能性のある条件を策定し、対策要否を検討していく。
- また、設計上想定しているSA環境を超える状況における水素滞留の可能性については、今後確認していく予定である。

- ▶ 公表する研究成果：  
電中研報告NR24009「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 –下層階における水素濃度に対する簡易評価フローの構築–」(2025/5/9公刊)  
✓ <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=NR24009>
- ▶ 本研究の目的：  
原子炉建屋下層階に漏洩した水素の濃度が可燃限界を超え得ることに伴う詳細評価等の要否を効率的に判定可能な簡易評価フローを構築し、同フローの一要素として多様なパラメータを考慮した機械学習モデル※を活用した水素濃度予測手法を開発する。
- ▶ 本研究のスコープ：  
既報（電中研報告NR24003）において国内BWRプラントの平均的な条件等を考慮して構築した解析モデル体系に基づき、許認可解析のSA条件の範囲で、原子炉建屋内でPCV外側の局所エリアを介した下層階への水素漏洩を想定して、下層階天井付近の水素濃度を評価。

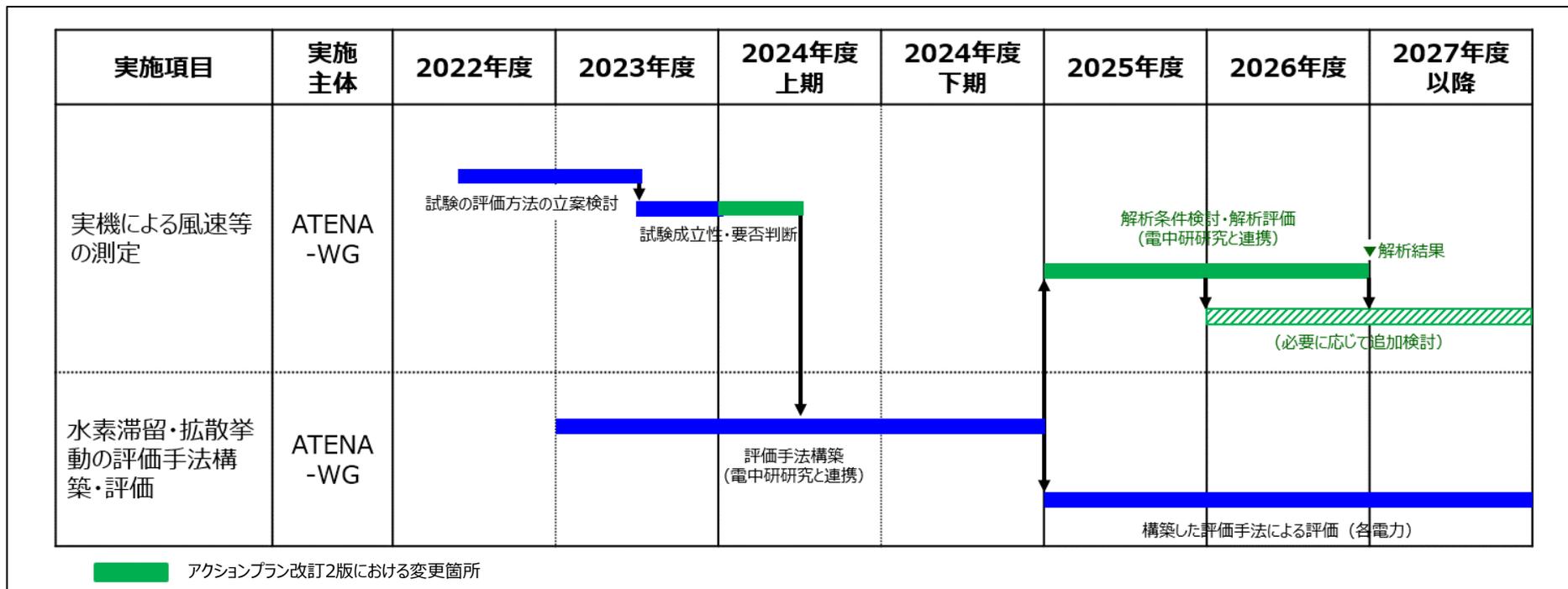
※ 機械学習とは、大量のデータをもとに、その中に含まれるパターンや規則性をコンピュータが学習し、未知のデータに対して予測や分類などの処理を行うアルゴリズムの事。本研究では、多数存在する天井窪み部を簡易に評価するため、任意の入力パラメータ条件から水素濃度を予測する機械学習モデルを構築した。概要はP17を参照

- 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」の検討方針を示した。（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、2023年度実施分の中間報告として2024年10月31日に、評価対象とする原子炉建屋の下層階を含む解析モデル体系や、GOTHICコードを用いた感度解析結果として水素滞留への寄与が大きいパラメータ等についての研究成果を公表した。
- 今般、**水素滞留の可能性のある条件**を、各プラントの下層階における漏洩気体等の条件から**簡易に抽出する手法**に関する研究成果（2024年度実施分）が取り纏められたため、当該内容について公表する。

### 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



### 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

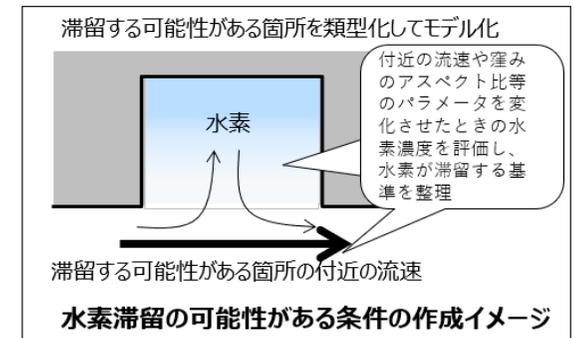
##### ○目的

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。

##### ○今後の取組計画・現在の取組状況

前回（23年度成果）  
の公表内容

- **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**



今回（24年度成果）  
の公表内容

- **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）

2023年6月21日開催 原子力規制委員会「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」資料4-1 水素防護対策の検討状況について（原子力エネルギー協議会等資料）より抜粋

### ➤ 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築

□ 直方体の天井窪みを想定したモデル体系（以下、「簡易モデル体系」という。）を構築し、寸法形状や伝熱特性、漏えい気体の気体特性を整理し、天井窪み部の水素濃度に影響を与える物理的な要因を特定



8

□ 簡易モデル体系における天井窪み「6類型」の取り扱いについて整理



9

~

10

### ➤ 水素滞留の可能性のある条件の策定

□ 水素滞留によりその濃度が可燃限界に至る可能性があるか予測することができる「簡易評価フロー」の開発



11

~

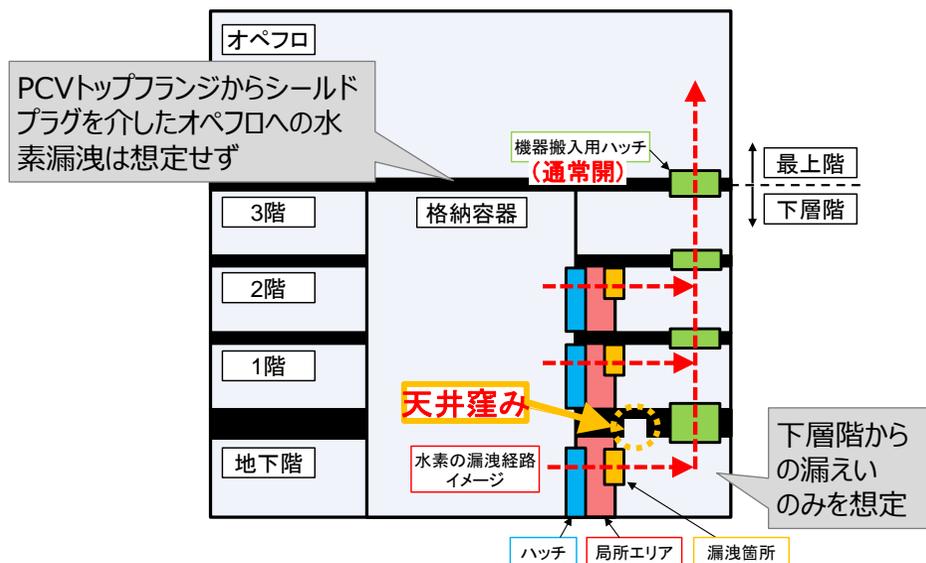
17

□ : 23年度成果

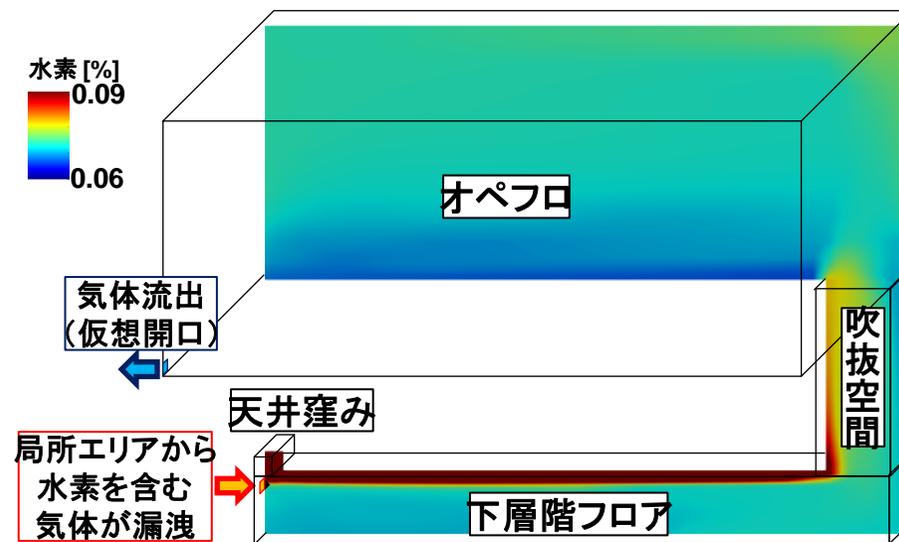
□ : 24年度成果

### 前回報告時の概要

- 下層階から吹抜空間～オペフロまでモデル化(簡易モデル体系)したGOTHIC解析を実施
- 許認可解析のSA条件を参照した解析により以下の傾向を把握
  - ✓ 下層階に漏洩した水素は吹抜空間における自然対流により建屋内で循環して希釈される
  - ✓ 天井窪み部の体積が小さいほど水素濃度が高い ⇒「6類型」の取扱いの整理へ (p.9~10)
  - ✓ **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い**
  - ✓ **天井窪みよりも上流側の天井付近の水素濃度が高い**



原子炉建屋下層階への水素漏洩時の流路イメージ  
[電中研報告NR24003を引用し追記]



簡易モデル体系とGOTHIC解析例  
[電中研報告NR24003を引用し追記]

### 3. 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築

天井窪み部「6類型」の取扱い（1 / 2） [2024年度実施事項]

## 簡易モデル体系における天井窪み「6類型」の取扱い

- **類型A・B・C・F**：2023年度の感度解析結果から、定性的に水素挙動の傾向が類推できるため、**簡易モデル体系で評価**
  - ✓ 感度解析では天井窪みの寸法（縦・横・深さ）や漏洩箇所からの垂直・水平距離の影響を確認
- **類型E**：別途解析結果（次頁）から、横穴内の水素濃度は天井窪み内と同等もしくは低い傾向を確認したため、**簡易モデル体系で評価**
- **類型D**：貫通孔において流路が急縮小する体系であることを踏まえて、類似する**ブローアウトパネル体系に対する検討（2025年度～）に合わせて評価**

プラントウォークダウンの結果に基づき類型化された滞留する可能性のある形状

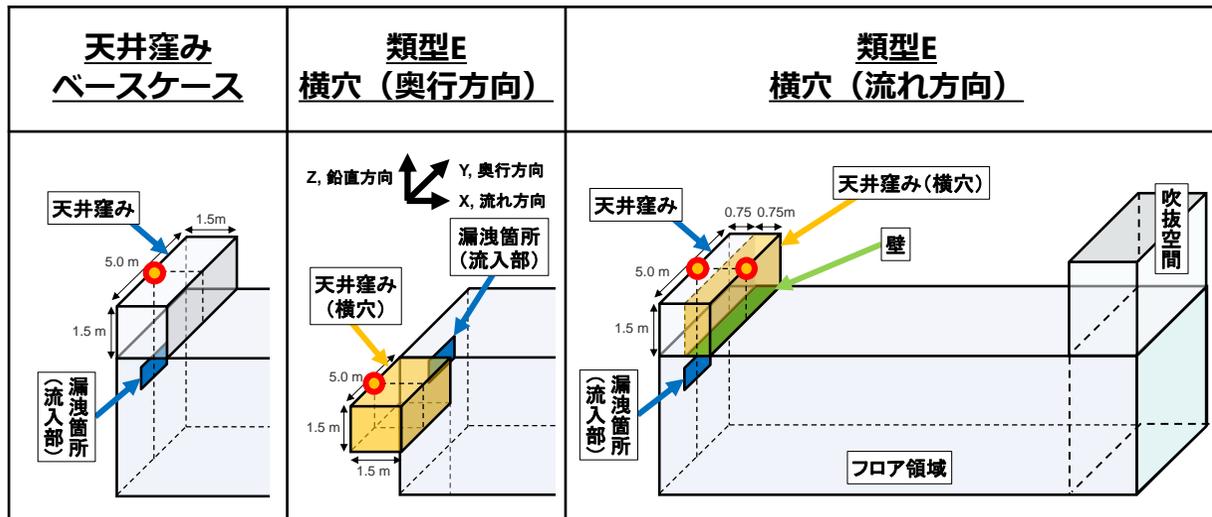
[類型A]	[類型B]	[類型C]	[類型D]	[類型E]	[類型F]
デッキプレート	気体の移行を妨害する天井の出張り	躯体の窪み	空調ダクトの貫通孔が天井付近に設置されていない小部屋	壁・天井等で区切られて生じた横穴（横穴部）	壁・天井により区切られた区画（階段室）
					

# 3. 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築

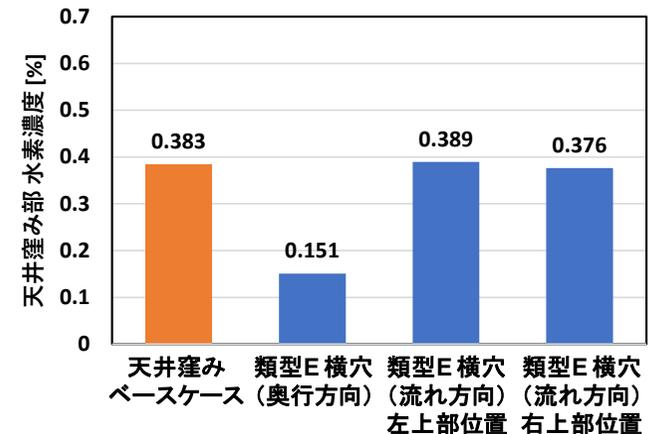
天井窪み部「6類型」の取扱い (2 / 2) [2024年度実施事項]

## 類型Eに対する評価

- 流れ方向と奥行方向の横穴を再現したGOTHIC解析を実施
- 横穴内の水素濃度はベースケース条件とほぼ同等もしくは低い傾向
  - ✓ 水素が周囲の空气中に拡散して水素濃度が低下し、横穴での水素濃度の顕著な増加には至らなかったと想定
- 水素濃度の保守的な評価の観点で、類型E（横穴）は類型A、B、C、Fと同様に、簡易モデル体系による評価で包括的に評価可能と判断



左図●(赤丸)における水素濃度



類型Eの水素濃度の解析結果  
[電中研報告NR24009を引用して追記]

### 簡易評価フローの構築の経緯

- 水素防護対策を要する箇所の合理的・効率的な抽出に対するニーズ
  - ✓ 各プラントの原子炉建屋に評価対象箇所の候補は数多く存在
  - ✓ 想定されるパラメータ（漏洩気体条件、対象箇所の形状寸法条件等）は多様
- 評価対象箇所に対する個別のGOTHIC解析の代替手段に対するニーズ
  - ✓ GOTHICモデル体系構築から解析実行・結果処理の所要時間は1週間程度/ケース
- 当初取組計画「水素滞留の可能性のある条件の策定」（クライテリアの評価）



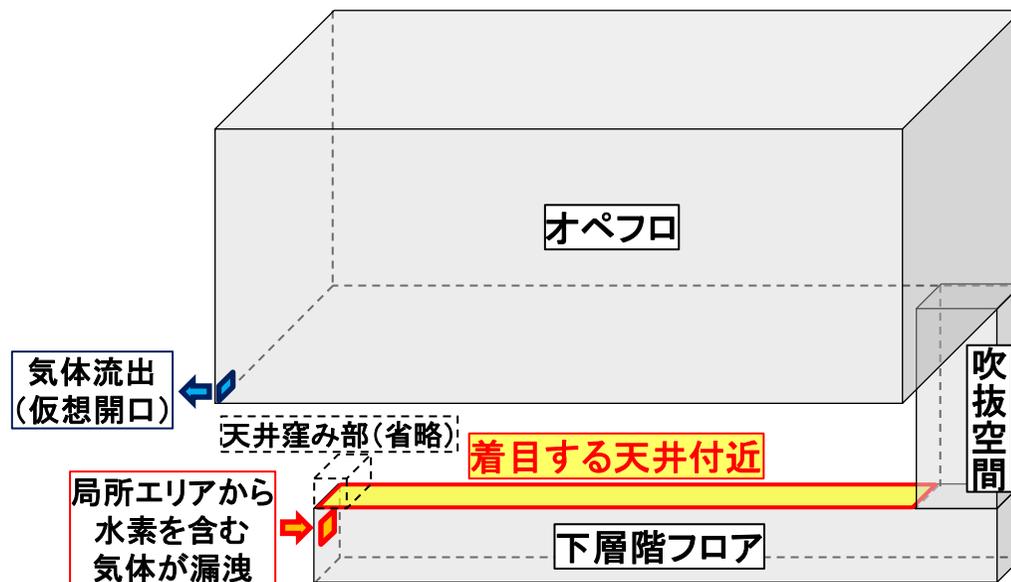
### 下層階の水素濃度が可燃限界を超え得るか否かを簡易に評価するフローを構築することとした

#### [簡易評価フローの設計思想]

- 局所エリアからの漏洩気体条件を参照し、**できるだけ多くの箇所を簡易的に除外**
- 多様なパラメータを考慮した**GOTHIC解析結果を学習した機械学習モデルを活用**することにより、水素防護対策を要する可能性のある箇所を**短時間で合理的・効率的に抽出**（一例として柏崎刈羽7号炉では約80ケースを削減できる見込み）
- 天井窪み部の水素挙動を踏まえ、**天井窪み部の上流側の天井付近における水素濃度に着目**して保守的に評価し、且つモデル体系を合理化

### 簡易モデル体系における天井窪み部の取扱い (合理化)

- 本評価条件範囲では、天井窪み部よりも上流側の「天井付近」に着目することにより保守的な評価が可能と判断
  - ✓ 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
  - ✓ 天井窪み部の中に冷却源があり水蒸気が凝縮しても水素の滞留は生じにくい
- 簡易モデル体系では天井窪み部を省略し、天井付近の水素濃度分布を評価
  - ✓ これまで考慮していた天井窪み部の位置・形状に関するパラメータを省くことにより評価を効率化



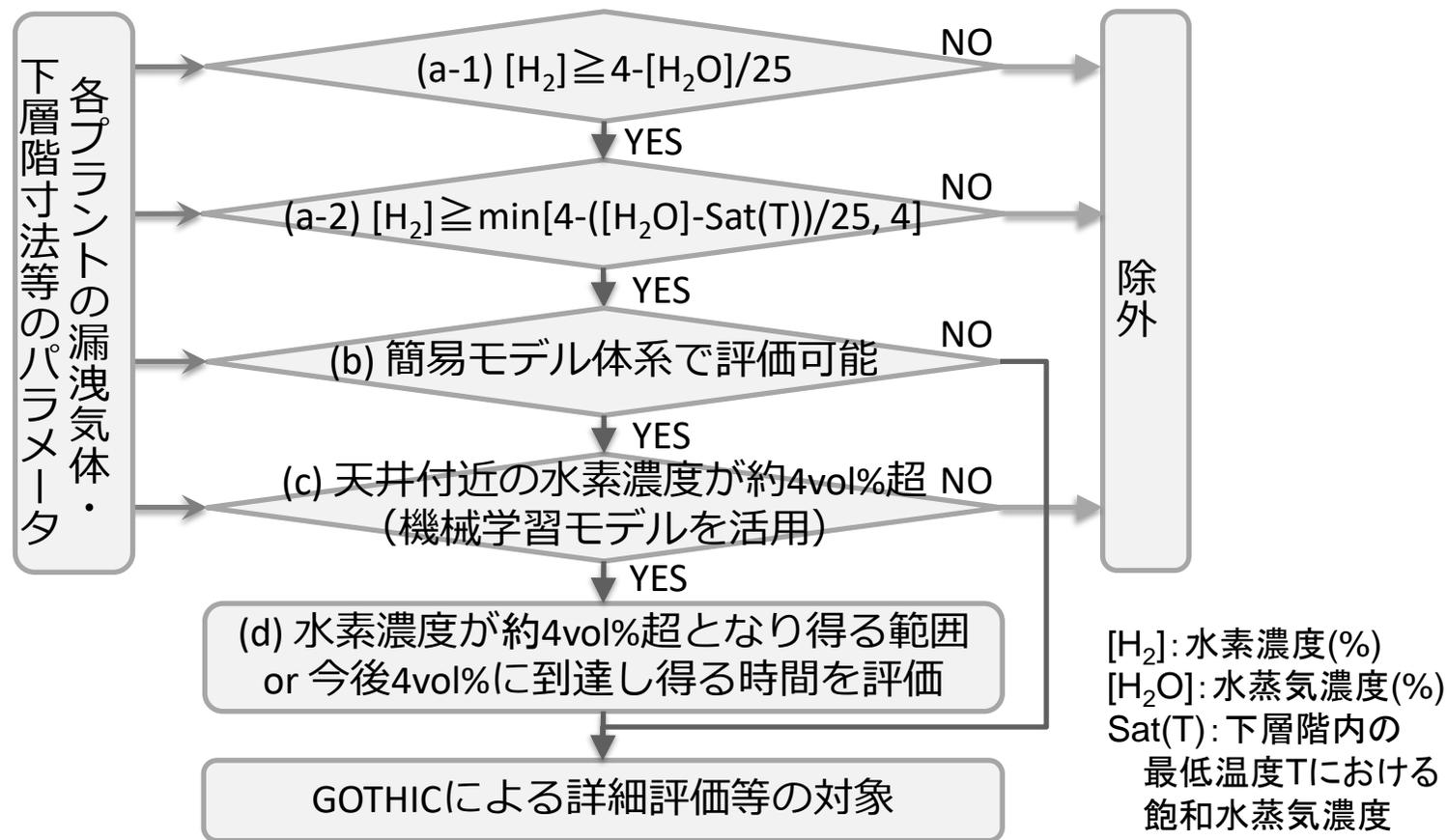
下層階から天井窪み部を省略した簡易モデル体系 [電中研報告NR24009を引用して作図・追記]

# 4. 水素滞留の可能性のある条件の策定

簡易評価フローの構築 (3 / 7) [2024年度実施事項]

## 簡易評価フローの概要

- 原子炉建屋下層階の水素濃度が可燃限界 (4vol%) を超え得ることに伴う詳細評価等の要否を効率的に判定可能な簡易評価フローを構築
  - ✓ 各BWRプラントの多くの条件は判断項目(a-1)もしくは(a-2)で除外可能

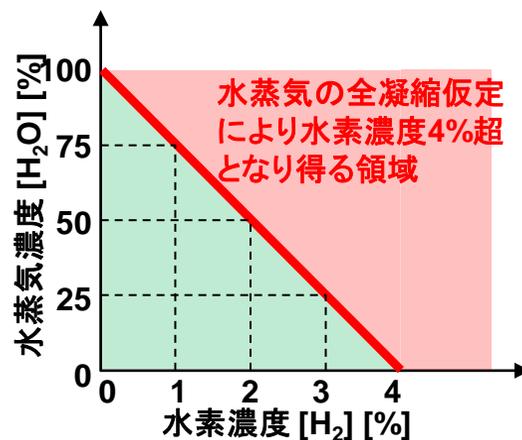
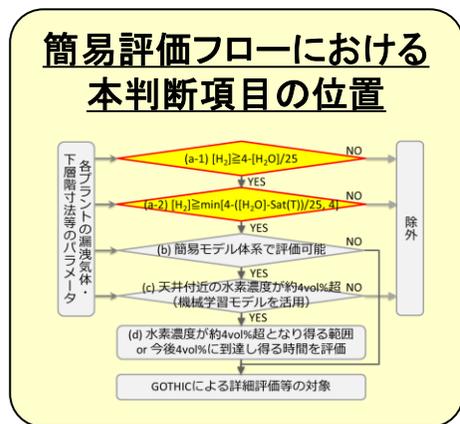


# 4. 水素滞留の可能性のある条件の策定

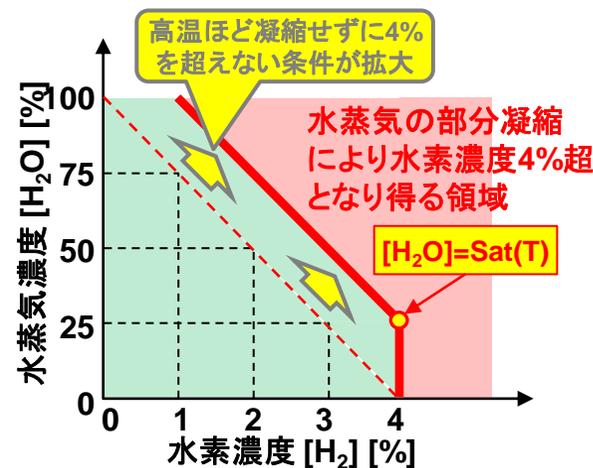
簡易評価フローの構築 (4 / 7) [2024年度実施事項]

## 判断項目(a) 水蒸気凝縮に伴い水素濃度が4%超か？

- 漏洩気体中の水蒸気的全凝縮もしくは部分凝縮を仮定することにより、水素濃度が4vol%超となり得るか否かを保守的に判定
  - ✓ (a-1) : 漏洩気体の水素濃度・水蒸気濃度の入力のみでスクリーニング
  - ✓ (a-2) : フロア領域内の推定最低温度のみ追加してスクリーニング



(a-1) 漏洩気体中の水蒸気的全凝縮仮定により水素濃度が4%超となり得る条件 [電中研報告NR24009]



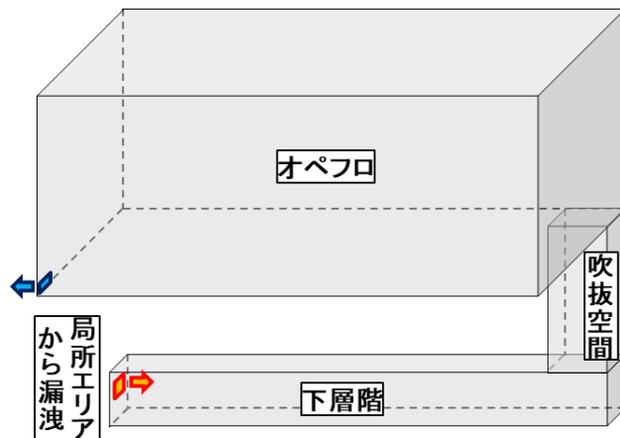
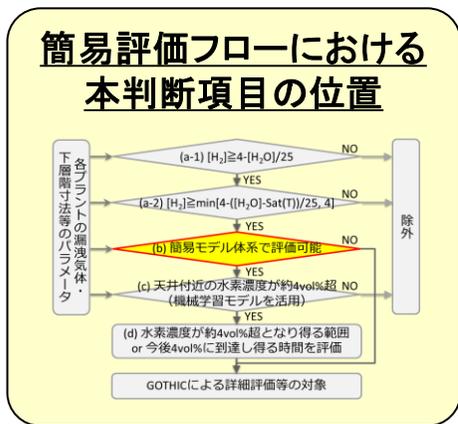
(a-2) 漏洩気体中の水蒸気の部分凝縮により水素濃度が4%超となり得る条件 [電中研報告NR24009]

# 4. 水素滞留の可能性のある条件の策定

簡易評価フローの構築 (5 / 7) [2024年度実施事項]

## 判断項目(b) 簡易モデル体系で評価可能な条件か？

- 評価可能な体系の条件
  - 水素の漏洩経路 (下図) : 局所エリア⇒下層階⇒吹抜空間⇒オペフロ
  - プラントウォークダウンで抽出された「6つの類型化形状」(類型Dを除く)
- 評価可能なパラメータの条件
  - 許認可解析上の「SA条件」
    - ✓ 各BWRプラントの局所エリアから想定する漏洩気体の水素・水蒸気濃度を包絡



簡易モデル体系の概要

[電中研報告NR24009を引用して作図・追記]

評価可能な流体・伝熱パラメータ条件

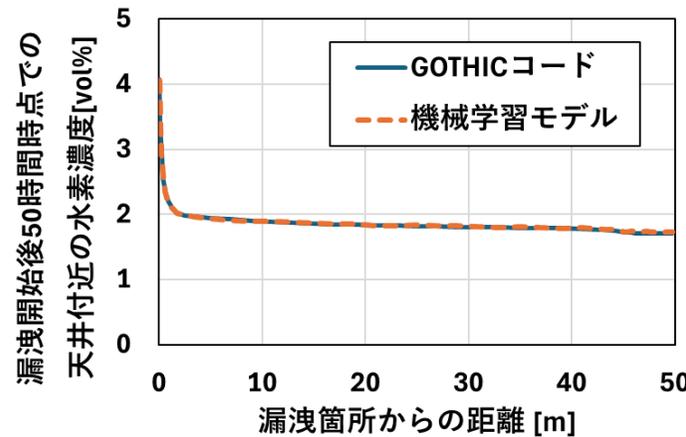
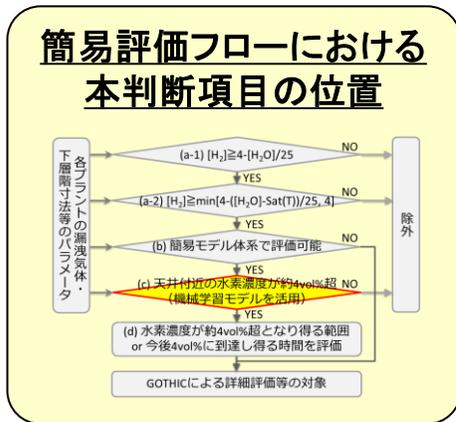
漏洩気体条件	温度	$\leq 100^\circ\text{C}$
	水素濃度	$\leq 7\%$
	水蒸気濃度	$\leq 40\%$
下層階	流量	$\leq 0.02\text{m}^3/\text{s}$
	初期温度	$40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$
	壁・床外側温度	$40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$

# 4. 水素滞留の可能性のある条件の策定

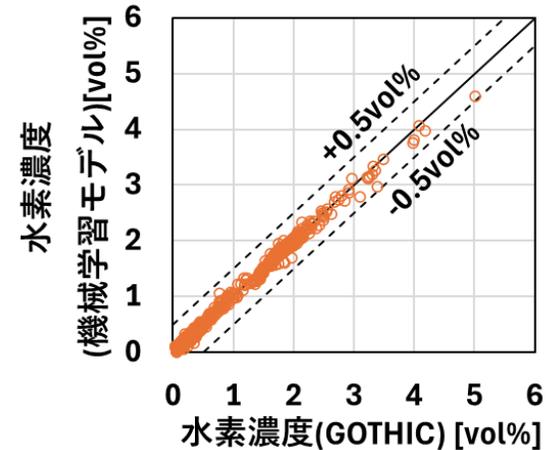
簡易評価フローの構築 (6 / 7) [2024年度実施事項]

## 判断項目(c) 天井付近の水素濃度の予測値が4%超か？

- 主要なパラメータを考慮して下層階天井付近の水素濃度分布を予測し、予測誤差を保守的に加味して4%を超え得るかを判定
  - 漏洩開始後50時間時点で4%未満の場合は「保守的な目安値」を超え得るかを判定
- 下層階天井付近の水素濃度分布予測のために機械学習モデルを開発
  - 簡易モデル体系に対するGOTHIC解析200ケースを学習・検証に活用
  - 機械学習モデルの予測値は、GOTHICの解析値と誤差±0.5vol%以内で良い一致



(a)天井付近の水素濃度分布の例



(b)天井付近の解析格子における水素濃度

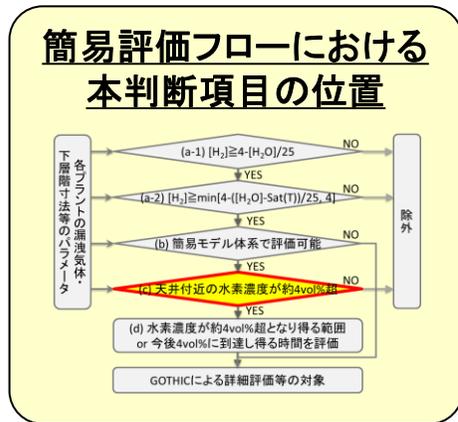
GOTHICによる解析値と機械学習モデルによる予測値の比較 [電中研報告NR24009を引用して追記]

# 4. 水素滞留の可能性のある条件の策定

簡易評価フローの構築 (7 / 7) [2024年度実施事項]

## 判断項目(c)補足：機械学習モデル

- 機械学習：人間が明示的なルールや関数を与えることが困難な課題に対して、大量のデータをもとに、その中に含まれるパターンや規則性を機械（コンピュータ）自身が学習し、未知のデータに対して予測や分類などの処理を行うアルゴリズム
- 本研究では、GOTHIC解析の入力条件と水素濃度分布の出力結果のセット200ケースを学習・検証に用いて、任意の入力パラメータ条件から水素濃度分布を予測可能な機械学習モデルを構築



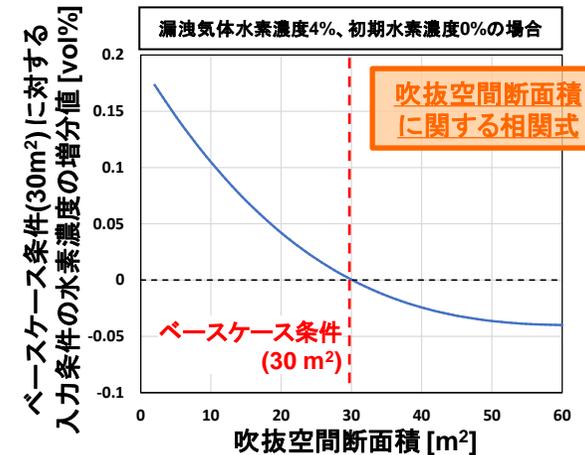
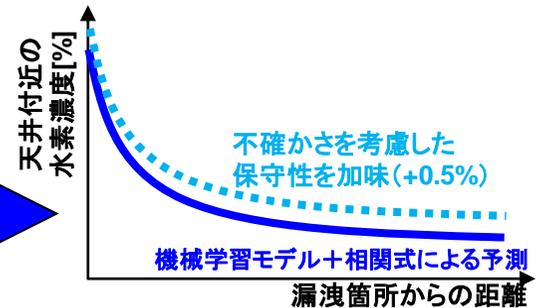
### 入力パラメータ条件

- 【漏洩気体】温度 40°C~100°C
- 【漏洩気体】水素濃度 1%~7%
- 【漏洩気体】水蒸気濃度 5%~40%
- 【漏洩気体】流量 0m<sup>3</sup>/s~0.02m<sup>3</sup>/s
- 【フロア領域】初期温度 40°C~60°C
- 【フロア領域】初期湿度 40%, 100%
- 【フロア領域】初期水素濃度 0%, 1.5%
- 【フロア領域】漏洩箇所高さ 0m~3m
- 【吹抜空間】断面積 2m<sup>2</sup>~60m<sup>2</sup>

機械学習モデル

各種パラメータを考慮し GOTHIC解析200ケースの水素濃度分布を出力

吹抜空間断面積に関する相関式



機械学習モデル構築の概要 [NR24009を引用して作図・追記]

アクションプランに示された原子炉建屋下層階における水素滞留・拡散挙動の評価手法の構築に向けた以下の成果を得た。

- 天井窪み「6 類型」の取り扱いとして、類型A・B・C・E・Fについては簡易モデル体系で評価し、類型Dについてはブローアウトパネル体系の検討に合わせて評価するとの整理を行った。
- 局所エリアの外側にある下層階の単一フロアへの漏洩を想定した水素の濃度が可燃限界4vol%を超えるか否かを判定し、GOTHICコードによる詳細評価等の要否を効率的に判定可能な簡易評価フローを構築した。

## 今後のATENAの水素防護対策に係るアクションプラン（2025年度～）

- 構築した水素滞留・拡散挙動の評価手法による評価（各電力）
  - ✓ 構築した簡易評価フローや詳細評価等により、SA条件下で対応を要する箇所を確認
- ブローアウトパネル・トップベント開放による水素挙動の確認
  - ✓ 「設計上想定しているSA環境を超える条件」下の原子炉建屋内の水素挙動の確認、実機適用に向けた課題検討

実施項目	実施主体	2022年度	2023年度	2024年度 上期	2024年度 下期	2025年度	2026年度	2027年度 以降
実機による風速等の測定	ATENA-WG		試験の評価方法の立案検討	試験成立性・要否判断		解析条件検討・解析評価 (電中研研究と連携)	解析結果 (必要に応じて追加検討)	
水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価	ATENA-WG			評価手法構築 (電中研研究と連携)		構築した評価手法による評価（各電力）		

■ アクションプラン改訂2版における変更箇所

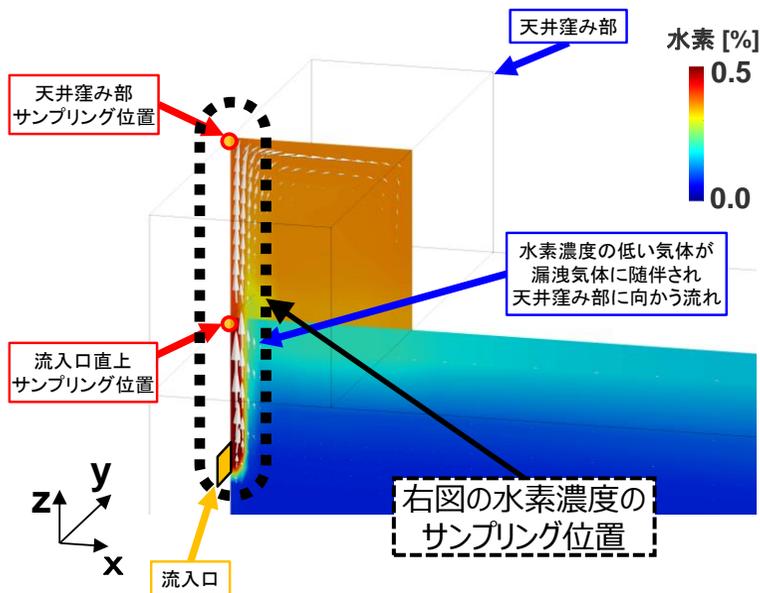
### **2025年度の当面の実施事項**

- GOTHICコードによるブローアウトパネル体系のモデル作成と評価
  - ✓ ブローアウトパネルの大きさ・位置の設定
  - ✓ 原子炉建屋内の境界条件・初期条件の設定
  - ✓ オペフロのみを対象とした予備解析
  - ✓ 下層階～オペフロを対象とした本解析
- 「類型D」体系における水素挙動の評価
- ブローアウトパネル体系の小規模実験の詳細検討・設計
  - ✓ 想定する実機条件の同定、相似則を踏まえた実験規模の設定
  - ✓ 実験装置の仕様策定
  - ✓ 実験装置の製作

以下、参考

## 天井窪み部の水素濃度を評価するにあたり着目すべき個所の特定

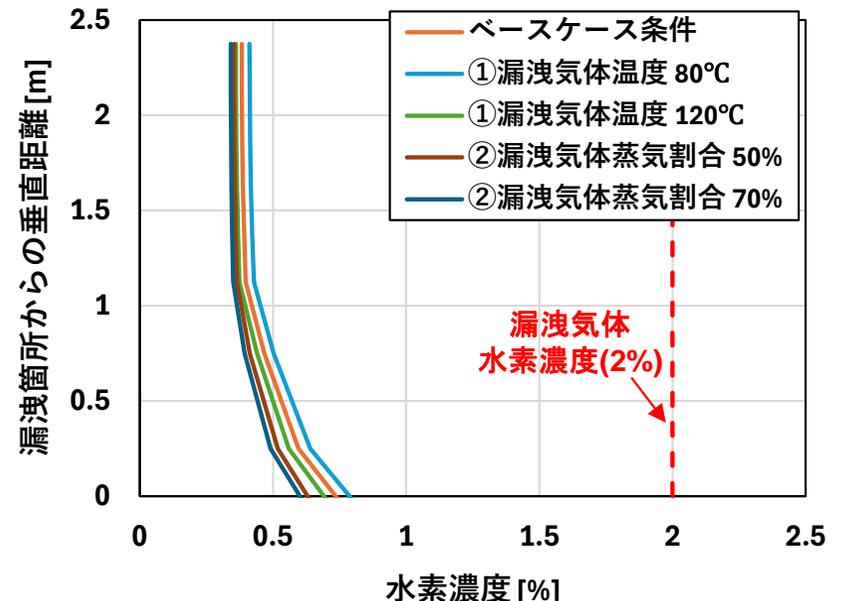
- 漏洩箇所から天井窪み部まで水素濃度分布は単調減少（拡散の影響）
- 天井窪み部の中よりもその上流側の「天井付近」における水素濃度の方が高い  
したがって着目すべき箇所として「天井付近」を特定



※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NR24003を引用し追記]



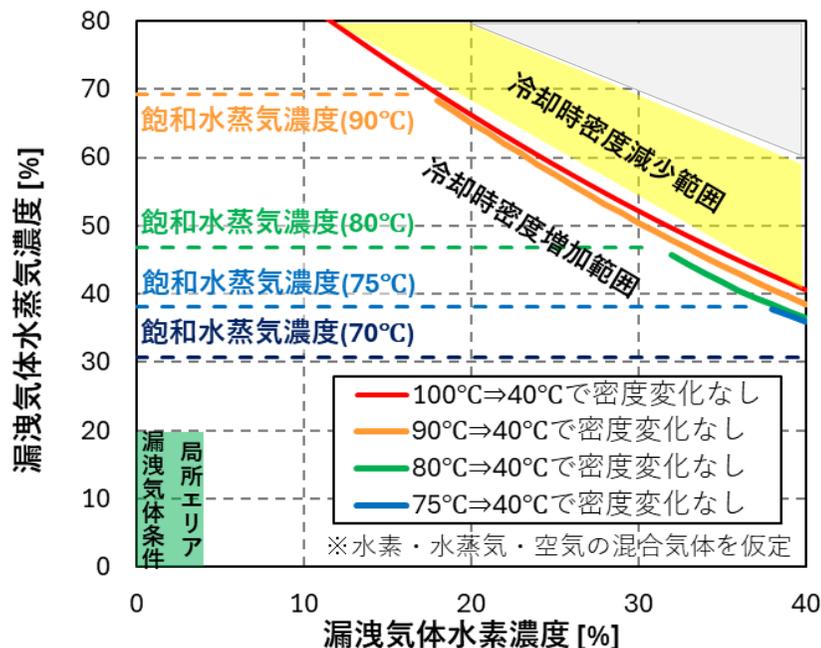
### 漏洩箇所から直上天井窪み部までの水素濃度分布 (GOTHIC解析結果)

[電中研報告NR24009]

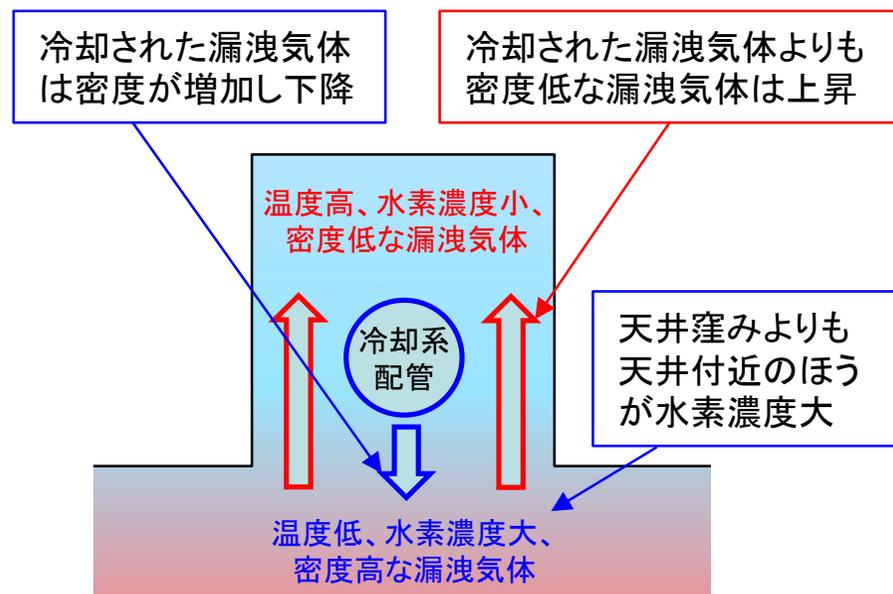
## 天井窪み部に冷却源がある場合の影響

- 天井窪み内の局所的な冷却により水蒸気が凝縮しても、本評価条件範囲では気体密度は増大する傾向にあるため、水素の滞留は生じにくい
  - ✓ 冷却により混合気体の密度が減少するのは水素・水蒸気が共に濃度が高い場合に限定

この様な体系においても「天井付近」に着目した評価が有効であることを確認



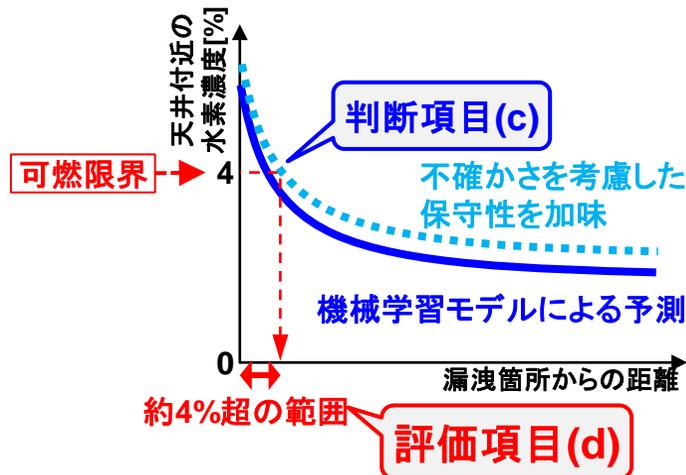
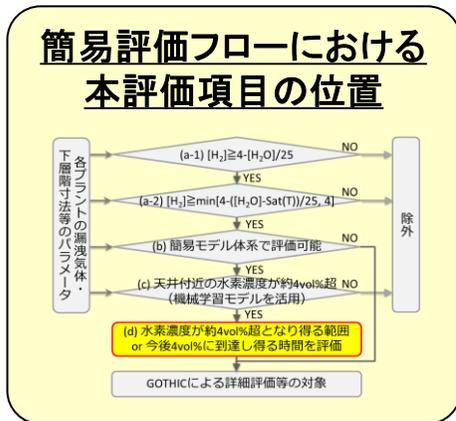
冷却時に混合気体密度が減少して水素が上方に滞留し得る条件範囲  
[電中研報告NR24009を引用して追記]



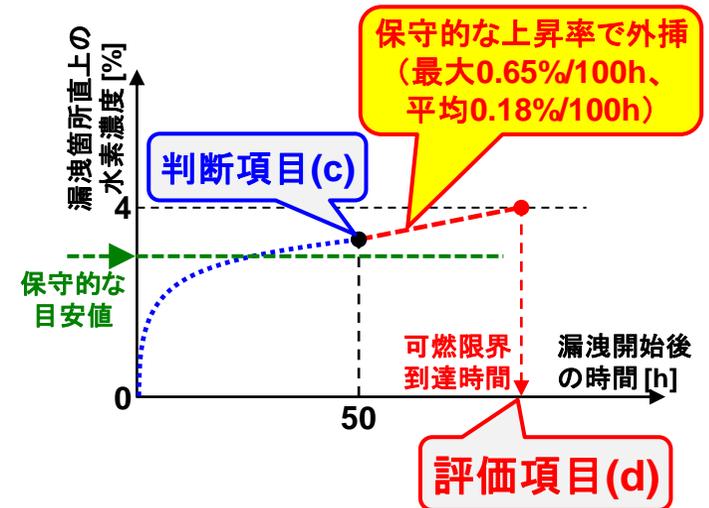
漏洩気体が天井窪み内で冷却される場合の  
気体の流れのイメージ  
[電中研報告NR24009]

## 評価項目(d) 水素濃度4%超の範囲 or 4%到達時間

	判断項目(c): 50時間時点で約4%超	判断項目(c): 50時間時点で「目安値」超
評価事項	水素濃度分布の予測から水素濃度が約4%超となる範囲（漏洩箇所からの距離）	漏洩箇所直上（天井付近）の水素濃度が4%に到達する時間
備考	機械学習モデルを活用した予測に、保守的な不確かさを加味して評価	水素濃度の上昇率は徐々に減衰するため、漏洩開始後50時間時点の結果を踏まえた上昇率を用いて、可燃限界に到達する時間を保守的に評価



漏洩開始後50時間時点で  
水素濃度が約4%超となる場合の評価  
[電中研報告NR24009]



漏洩開始後50時間時点で  
水素濃度が目安値超となる場合の評価  
[電中研報告NR24009]