

## 総合講演・報告3 「水素安全対策高度化」特別専門委員会

「水素安全対策高度化」特別専門委員会報告：  
原子力における水素安全対策の向上に向けてReport of the Special Committee on advanced hydrogen safety :  
Advancing hydrogen safety for nuclear plants

## (3) 水素挙動統合解析システムによる水素安全評価への展開

Development of hydrogen safety evaluation using the CFD code system for analyzing hydrogen behavior

\*原井 康考<sup>1</sup>, \*米田 次郎<sup>1</sup>, \*福田 龍<sup>1</sup><sup>1</sup>三菱重工

## 1. はじめに

段階的な試験の照合解析により、拡散混合と燃焼爆発（火炎加速を含む）の水素挙動のCFD解析に必要なモデル及び解法の適用の妥当性と必要な修正を行ってきた（表1）。これに基づき、PWR実機CV内での水素挙動解析を2020年度から実施している。CFDによる解析では、LP（集中定数系）解析コードでは確認できない水素の燃焼加速による動的荷重の発生に対する余裕を、拡散混合解析から得られる詳細な濃度分布も考慮しながら評価することができ、水素燃焼爆発時の安全性評価の質的向上を図ることができる。

表1 水素挙動解析システムの各種モデル類とモデルの妥当性確認・修正に用いられた試験

	拡散混合解析モデル（Fluentの例）		燃焼解析モデル（Open Foamの例）		
	乱流モデル	凝縮モデル スプレイモデル	層流燃焼モデル	+乱流燃焼モデル 圧力波成長解法	+自動着火 化学反応モデル
			Slow Deflagration	Fast Deflagration	DDT
単純体系 試験	PANDA (ST1-7-2) 他	TOSQAN (ISP47) (SARNET 101/113)	THAI (ISP49) NTS	ENACCEF	HTCF (~高温)
多区画・ 複雑体系 試験	NUPEC 混合 (M7-1,4-3:混合 M8-1:成層化)	NUPEC 混合 (M7-1,4-3:混合 M8-1:成層化)	NUPEC 燃焼 (Wet,Dry)	NUPEC 燃焼 (Dry15%) RUT (Wet)	RUT (Dry,Wet)

## 2. PWR実機CV内水素挙動解析

実機PWRのCV内の水素挙動と燃焼爆発に対する安全性を、拡散混合、燃焼及び火炎加速、CVの構造応答の解析を、相互の連関を踏まえて実施した。

## 2.1 CV内水素拡散混合挙動の解析と安全性に関わる評価

## 2.1.1 CV内循環流の形成の有無に着目したケーススタディ解析

個別の事故シーケンスに基づいた水素挙動の解析に先立ち、事故時に放出される水蒸気と水素がCV内に形成される循環流による移流効果で良好な混合が促進されることを、以下の複数の要因ごとにCFDによるパラメータ解析を実施して確認した。

- ・放出ガス、特に水蒸気が放出箇所から高速で噴出（LOCAでは原子炉冷却系圧力が高い状態では臨界流での噴出）されるため、頂部や側面での衝突を経由してそのまま循環流が形成されること。
- ・CV内の下部区画でのRV,SG,RCS配管などの発熱機器によりCV内雰囲気加熱され上昇の駆動力となること、一方頂部を中心とした比較的低温のCV壁面にて水蒸気凝縮を含む冷却が下降の駆動力となることで、CV内の上下で循環流が形成される。（図1及び図2）
- ・AM策としてCVスプレイ散布や再循環ユニット内部の凝縮冷却を介した自然対流冷却効果によりCV内に放出される気体の混合がさらに促進される。

個々の区画に着目すると、水素放出区画内では水素の放出継続中は、水素濃度の分布が顕著であるが、それ以外のほぼCV内の全区画では良好な混合により均一に近い濃度となる。

## 2.1.2 代表的な事故シーケンスにおける水素拡散混合挙動

対象とする事象は、炉心損傷及び水素発生が生じた後にCVスプレイ散布が成功するケースの代表とし

\*Yasutaka Harai<sup>1</sup> \*Jiro Yoneda<sup>1</sup> \*Ryo Fukuda<sup>1</sup>, <sup>1</sup>MHI.

て AEI を、スプレイが機能しないケースの代表として TED を選定している。

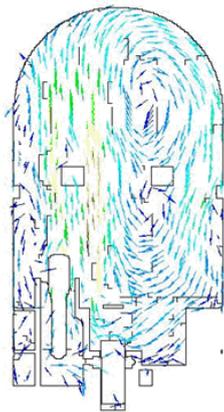


図1 下部からの循環駆動（発熱機器からの加熱）

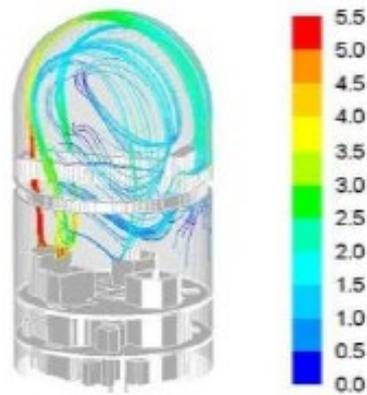


図2 頂部からの循環駆動（衝突、凝縮冷却）

### (1) AEI（大 LOCA+ECCS 失敗+CV スプレイ成功（可燃性雰囲気））

#### ・イグナイタが順調に作動するケース

破断口からの放出付近が 水素の濃度分布が顕著で局所的に高濃度となる。他の区画に水素が拡散・混合し可燃性域となる前に放出区画のイグナイタが着火雰囲気となる。放出区画を除く他の区画は頂部のドーム部を含め CFD 解析でも LP 解析と同様にほぼ均一な濃度となり良好な混合となっていることが確認されたが(図3)、可燃性濃度には至らずその前に放出区画のイグナイタで発生する水素が順次処理される。図4にイグナイタ位置での水素濃度の局所でのトレンドを放出区画とその他とで比較して示す。

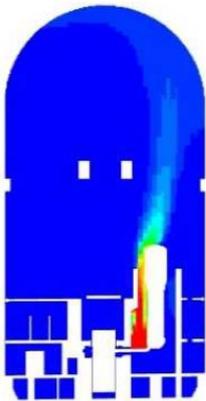
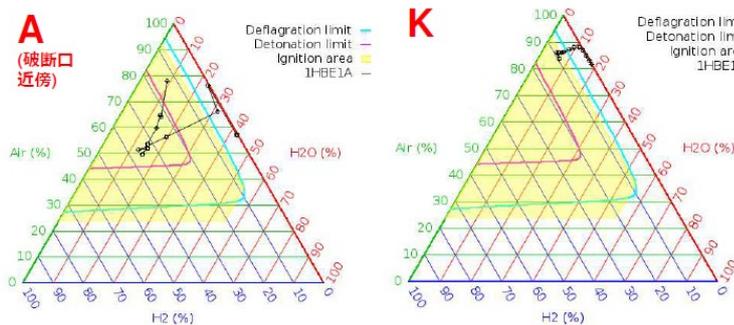


図3 AEI 水素濃度分布



放出区画内のイグナイタ位置

その他の区画内のイグナイタ位置

図4 3元図におけるイグナイタ位置での組成のトレンド

(黄色のハッチング領域がイグナイタ着火を想定した範囲)

#### ・イグナイタがすべて作動しないと極端な仮定のケース

75% Zr 反応に相当する水素放出量を仮定した場合、すべての区画に水素が行きわたり、すべてのイグナイタで着火可能な雰囲気となったが、破断口からの放出は止まり、図5に示すように CV 内でほぼ均一な濃度分布となる。σ 基準との照合でも、火炎加速が生じる箇所・区画は認められていない。ここで 75%Zr 反応相当の水素放出量は、炉心・燃料の高温水との酸化反応により生じる水素発生量として原子炉容器内と原子炉容器底部破損後の原子炉キャビティ水中からの発生に余裕を見込んだ量として設定している。

### (2) TED（SBO+ECCS 失敗+2 次系冷却失敗+CV スプレイ（代替スプレイのみ））

CV スプレイの不作動を仮定するため、事故発生直後から水蒸気の放出が凝縮されることなく継続し、その後水素が放出される。水素は CV 内の最下部階の加圧器ラブチャーディスクの破損部から放出が始まる前に、すでにそれ以前に放出されている水蒸気によって CV 内全域に形成されていた循環流による移流効果(図1, 図2 参照) とともに、図6に示すように CV 内にほぼ均一に混合し、非燃性雰囲気のまま水蒸気、水素が CV 内にいきわたり蓄積される。

### ・CV スpray 散布に伴う水蒸気凝縮効果と水素燃焼域・火炎加速域到達までの時間余裕

水素及び水蒸気の放出後の拡散・混合挙動解析を引き継いで、代替スプレイ又は本体大容量スプレイの機能復活によるスプレイ散布時間と水蒸気の凝縮に伴う、CV 内の雰囲気可燃性又は火炎加速の可能性が生じる（ $\sigma$  基準照合結果）までの時間猶予に着目した解析を実施している。

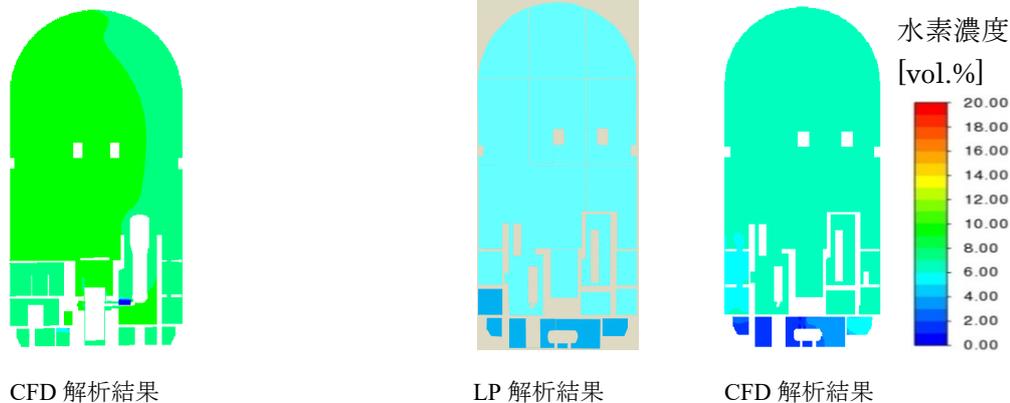


図5 AEI（イグナイタ不作動仮定）時水素濃度分布

図6 TED 時の水素濃度分布

#### 2.1.3 LP 拡散混合解析との比較検討

事故シーケンス時の拡散混合挙動では、LP 解析と CFD 解析では、ともに、AEI、TED シーケンスのそれぞれにおいて、CV 内で良好な混合挙動が確認され、CV 内のほとんどすべての下部区画及び上部のドーム空間部で、水素、水蒸気の濃度は均一化されていることが確認された。ただし、事故発生開始に近い時点で水素が破断口から放出が開始される時点では、放出区画内では水素の非均一分布と局所的な高濃度スポットの存在が顕著となることから、CFD 解析結果であきらかとなり、LP 解析では確認できない点であることから、この点に着目して燃焼解析を実施している。図5ではAEI シーケンスでのイグナイタの不作動を仮定した場合での Zr と反応した水素の放出が完了した時点での水素濃度分布を LP 解析結果と比較している。

## 2.2 CV 内水素燃焼爆発挙動の解析と安全性に関わる評価

### 2.2.1 仮想的組成のもとでの CV 内 DDT 発生挙動の確認

予混合均一条件のもと、水素・水蒸気組成、着火位置を変えたさまざまなケースにおいて燃焼に伴う強い圧力波の生成と動的荷重の発生につながる火炎加速の有無に着目して CFD による燃焼解析を行った。水蒸気を含む極端な組成（ドライ条件）では、現行の水素濃度基準 13% を超えると DDT の発生が実機解析でも確認されること、水蒸気の増加に伴い燃焼の進行は著しく緩慢となり火炎加速の発生が生じにくくなることから 3Lp 及び 4Lp とともに確認された。結果を解析事例として表2にまとめて示す。

15%ドライに代表される極端な組成条件で火炎加速が生じる場合、主に燃焼の進行が1方向に加速されやすい形状の外周部の区画での周方向での燃焼や SG 等の機器と区画壁との間隙部を鉛直方向に進む燃焼において、火炎前方の圧力波が衝撃波に増大し、そこから爆轟に遷移しやすい傾向にあることが、事前の予測通り確認された。DDT 発生の場合の火炎の伝播の状況を 3Lp の例として図8に示す。

CV のような複雑な形状では火炎は分岐等複雑な経路をたどるため、燃焼実験のような火炎伝播速度を指標とする火炎加速の程度の定義は容易ではなく、図7に示すような燃焼反応による CV 内の温度上昇に基づき判断するのは有効となるものと考えられる。

### 2.2.2 代表的な事故シーケンスにおける水素燃焼爆発挙動

2.1.2 の拡散解析を引き継いで濃度分布が生じている条件で燃焼挙動を詳細に把握すべく解析を実施した。

#### (1) AEI（大 LOCA+ECCS 失敗+CV スpray 成功（可燃性雰囲気））

##### ・イグナイタが順調に作動するケース

放出区画内に設置されたイグナイタのみが着火領域内に達した時点での燃焼開始となり、区画内では局所的に高濃度、DDT 領域内となるスポットが存在するが、極めて緩慢な燃焼に留まり、CV 内のその他の区画に伝播していかず燃焼が終了する。このケースは PWR の水素燃焼で最も確からしいシナリオであり、図9

に示す火炎伝播の時間変化の様子は、2.2.1の図8の仮想的な DDT 発生解析結果との違いが明確である。

・イグナイタがすべて作動せず水素が蓄積後に着火との極端な仮定のケース

各区分ではほぼ可燃領域の水素濃度以上で良好に混合され、CV 内全体に大量の水素が可燃性雰囲気のまま

表2 PWR CV 内 仮想的組成での解析結果例

	15% 水素 (ドライ)	13% 水素 (ドライ)	15%水素 + 15%水蒸気
3 Lp	DDT	Fast Deflagration	Slow Deflagration
4 Lp	DDT	Fast Deflagration	Slow Deflagration

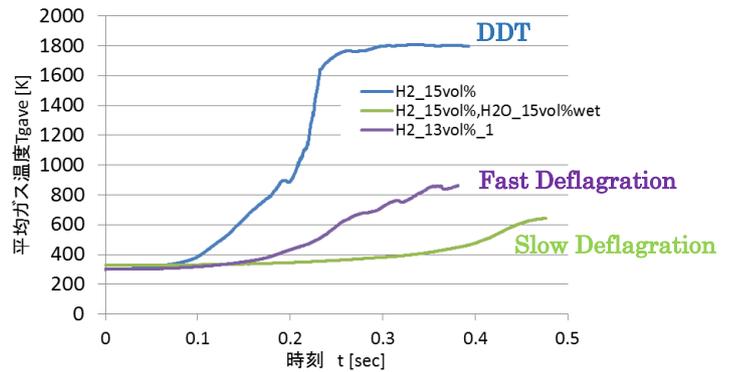
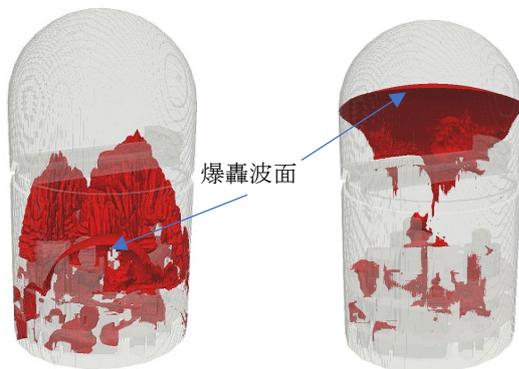


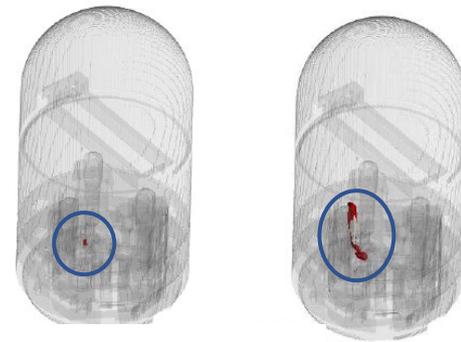
図7 火炎加速の程度に応じた CV 内雰囲気温度の上昇



着火 0.2 秒後

着火 0.226 秒後

図8 15%ドライ組成での火炎面の伝播状況 (3Lp)



着火 0.1 秒後

着火 1.0 秒後

図9 事故シーケンス (AEI) での燃焼状況 (3Lp)

蓄積された状況で、一方で放出開始直後のような放出区分付近での局所的に高濃度のスポットがない状態で燃焼解析を実施した。着火点は、仮想的な燃焼解析で顕著な火炎加速が認められた最下層階での外周区分画とした。現在までの進捗では、火炎加速 (FA, DDT) は生じておらず、また静的な圧力上昇についても断熱完全燃焼を仮定したうえで、限界圧力 (2 Pd) に余裕がある。計算を継続して、静的及び動的な負荷に対する CV 健全性の確認とともに、最終的に、PWR の CV の広大な容積による水素濃度の希釈効果及び燃焼開始前の良好な混合による、水素燃焼に対する安全性への大きく寄与していることを確認する予定である。

## (2) TED (SBO+ECCS 失敗+2 次系冷却失敗+CV スプレー (代替スプレィのみ))

CV スプレーによる水蒸気の凝縮が進み、保守的に CV 内平均での組成が火炎加速発生リスクを表す  $\sigma$  基準を超過した時点まで着火が起こらないとの保守的な仮定の下、燃焼解析を予定している。AEI のイグナイタ不作動を仮定した燃焼解析結果と合わせ、これらの結果は事故時の水素処理と CV 内圧低減の運転管理における信頼性との自由度の向上に反映していく。

### 2.2.3 LP 燃焼解析との比較検討

事故シーケンス時の水素燃焼挙動では、CFD 解析で火炎加速が生じない結果となったことを踏まえ、燃焼に伴う CV 内の静的な圧力上昇と温度上昇について、LP 解析と比較を行った。ともに断熱条件での解析であり、両者はほぼ同等か、若干 CFD の結果が高めの圧力となった。

## 2.3 水素燃焼爆発時の CV 局所の構造応答解析と CV 隔離機能維持の評価

### 2.3.1 火炎加速発生時の CV 健全性解析

2.2.1 の仮想的に水素濃度を高めて DDT 又は早い爆燃 (FA) の火炎加速を発生させた燃焼解析結果を引き継いで CV の構造応答解析を行った。具体的には燃焼解析結果として得られる、CV 内壁面各所での圧力の時刻歴に基づき、荷重の時刻歴として歪進展の弾塑性解析を行い、破損限界歪と比較した。

歪解析の対象は、3Lpの鋼製CV、4Lpの鋼製ライナ部、プレストレスコンクリート部と鉄筋部を対象として、JSMEの「シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン」で規定されている破損歪を、歪速度による増加を考慮せずに使用している。

3Lpを例に15%ドライの仮想的組成によりDDTが発生した燃焼解析から引き継ぐ局所の圧力変化を図10に示すが、衝撃波によるパルス的に5000kPa以上のピークが生じるが、瞬時に低下し、その後700kPa程度に緩やかに低下した時点で歪が破損歪（約15%）に到達し、CVの局所が破損する結果となった。水素濃度を現行のDDT防止からの制限濃度の13%ドライ組成の燃焼解析を引き継いだ歪解析では、破損歪の半分程度にとどまり非破損の結果となった。4LpPCCVでは、15%ドライ濃度でDDTが発生し最後まで伝播したケースにおいて、ライナー部、鉄筋コンクリート部及び予加圧されたコンクリート部とも、破損歪に至らない結果が得られた。以上の解析結果を表3に整理する。

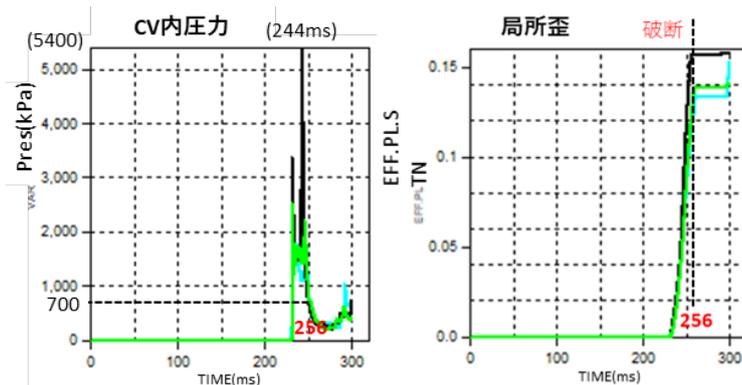


表3 火災加速発生時 CV壁面の弾塑性歪解析結果の例

	評価部位	15% Dry (DDT)	13% Dry (FA)
3 Lp SCV	鋼製 CV	> 破損歪 (破損)	< 破損歪
4 Lp PCCV	鋼製ライナー部 プレストレスコンクリート 鉄筋部	< 破損歪 ↑ ↑	(未評価)

図10 DDT発生時にCV歪が破損歪を超過した例（15%ドライ条件）

### 2.3.2 水素発生事故シーケンス時のCV健全性

燃焼解析でDDTが生じたケースにおいても必ずしもCVの局所歪が破損歪に至るとは限らない事例が確認されたことは、燃焼解析において火災加速が生じていない事故シーケンス時の水素燃焼爆発においては、発生する動的荷重は小さく、構造応答解析を実施せず燃焼解析結果で火災加速が生じないことを確認することで、CVの健全性の維持が確認できると考えられる。

### 2.4 CFDによる実機CV内水素挙動解析で得られた成果

これまでの実機CFD解析により、SA事故シーケンスではCV等への動的荷重が大きくなるDDT及び火災加速の発生に対して大きな余裕があること、現行のDDT発生防止の水素濃度基準値（13vol%）が複雑かつ大型構造のPWR CV内の水素燃焼に対して適切であることがあらためて確認することができ、それを踏まえてLPコードによる水素濃度のCV内分布、燃焼に伴う静的な圧力上昇と温度上昇の評価は、適切な保守性を有しながらCFDの結果とも整合がとれており、適切な手法であることをあらためて確認することができた。

### 3. 今後の実機CFD解析について

PWRのCV内の水素挙動解析について、以下の検討を進めることで安全余裕がより明確になり、安全性向上の評価及び安全管理の高度化につなげていくことができると考えられる。

- ・拡散混合挙動については、事故時に考えられる物理現象とAM策作動について、不作動等の厳しい仮定をどれだけ重畳させた場合にCV内の局所成層化が生じうるのかの視点からの検討を進めていく。
- ・燃焼爆発挙動については、DDTが生じる条件と実機事故シーケンスとの間で大きな安全余裕があることがCFD解析により明白になったことを踏まえ、FAの発生との余裕を把握することが安全性の向上につながるものとして検討を進めていく。
- ・構造解析については、FA発生時に強い圧力波がCV内のどの領域に伝播し継続していくかに着目して、CV内の安全機能を有する機器・系統の健全性への影響の有無と影響範囲を評価できるようにしていく。上記のような検討が、さらなる安全性向上とそれに裏付けされたAMGの高度化に資すると期待される。

### 4. おわりに

本検討は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業「原子力の安全性向上に資する技術開発事業（水素安全対策高度化）」の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表す。