

## 総合講演・報告2「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  
Advancing hydrogen safety for nuclear plants(2) 水素挙動統合解析システム整備  
—CFD解析システムの役割と活用・整備の進め方—

Present status of hydrogen behavior simulation code system development

- CFD analysis relating to dispersion behavior and Establishment as Integral code system-

\*福田 龍<sup>1</sup><sup>1</sup>三菱重工

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所事故の反省と教訓を踏まえ、過酷事故時の水素燃焼爆発による原子炉格納容器及び原子炉建屋の破損のリスクを低減させるために、産業界では、地震・津波対策、原子炉損傷防止対策や水素緩和措置を含むプラント設備・機器等の強化、安全解析における設備等の強化の有効性の評価、現場での作業員の対応手順及びプラント状態の監視、及び各種の訓練など、多角的な取り組みが行われてきている。このなかで、水素の発生、拡散・混合、燃焼爆発とその伝播に係る解析については、システムコードや集中定数系コードによる解析が中心であった。PWRでは、原子炉格納容器が広大な容積を有しており、水素の濃度が希釈され低濃度に抑制できる一方で、BWRのような窒素による燃焼に対する不活性化は施されていないため、原子炉格納容器内で局所的に大量の水素が滞留しないこと及び原子炉格納容器内での水素の燃焼が生じた場合の燃焼の伝播や圧力上昇に対する評価が重要となる。

## 2. CFDによる水素挙動解析のメリットと役割

## ・格納容器内の水素燃焼挙動解析

これまでの集中定数系コード等による解析では、格納容器全体を解析すべく大きなノード分割に基づき、水素発生量や断熱条件などの保守的な条件で、多様な過酷事故シナリオに対応して、水素の濃度分布や静的な格納容器内の圧力上昇の評価が行われてきている。ここで、水素燃焼が激しくなり、いわゆる火炎加速が生じて火炎面の急激な熱膨張により発生しうる衝撃波等の強い圧力波による動的な荷重の発生の可能性については、過去の保守的な燃焼実験データベースに基づき水素爆轟への遷移（DDT）が発生しないことを、格納容器内の水素濃度によって評価している。

一方、より詳細な空間メッシュによる数値流体解析（CFD）手法を用いた数値解析では、近年の計算機技術の進歩と相まって、PWRの格納容器のような大きな体系に対しても、燃焼と圧力変動の挙動に影響する局所の空間形状や子細な水素濃度分布を考慮した、水素の燃焼爆発評価が現実的な計算時間と計算コストの範囲で可能となりつつある。さらにCFDでは、DDTに代表される火炎加速による動的荷重の発生の有無や程度を、燃焼解析と圧力波の伝播解析により、評価することも可能である。動的荷重については、さらに、衝撃波を生じものの爆轟には至らない強い爆燃に留まる場合や、爆轟が生じても形状効果等で爆轟が継続しない場合には、ともに燃焼の最前線である火炎面が衝撃波から遅れ、衝撃波の距離による減衰とともに格納容器や内部の構造物への衝撃が軽減されるが、CFDではこの効果の評価も可能である。CFDによるこのような燃焼と圧力の伝播に係る評価は、水素安全に対するこれまでの集中定数系による苛酷事故対策の有効性評価の信頼性を高める役割を担うものと期待される。

Ryo Fukuda<sup>1</sup><sup>1</sup>Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

#### ・原子炉建屋内の水素の拡散混合挙動解析

また、格納容器とは異なり、耐圧設計の施されていない原子炉建屋内では、万一、格納容器から漏えいした水素の燃焼爆発が生じれば、火炎加速による動的荷重の発生によらず、燃焼に伴う静的な圧力上昇により、福島第一原子力発電所の事故のような構造破壊に至る可能性が考えられる。このため、原子炉建屋内については、水素の拡散・混合に係る詳細な挙動を CFD 解析によって行い、関連する設備の作動と相まって、水素が局所的に蓄積せず可燃性濃度に至らないことの評価の信頼性を高めていくことが、PWR に限らず重要である。

### 3. 国内の水素安全対策の考え方に即した CFD 解析の用途と重点開発項目

CFD 解析システムは保守的かつ簡易的な従来の解析を補完する役割として有効活用していくことが期待されるが、その開発においては、国内の水素安全対策の考え方を踏まえながら、具体的な評価の活用例を想定しながら進めてきている。

#### ・水素放出後短時間の水素安全対策

国内の既存の PWR では、原子炉容器破損後の原子炉キャビティ内に本設の格納容器スプレイによる水張りを行った後、落下する溶融炉心の冷却によりキャビティのコンクリートとの反応の促進を防止することが、格納容器破損防止に係る基本的な考えである。この考え方は水素安全対策とも関連しており、格納容器内に放出される水素は、スプレイの作動による水蒸気の凝縮で可燃性雰囲気であり、水素の発生が考えられる区画を中心に設置されたイグナイタで、発生の都度、順次燃焼処理される。CFD では、水素発生箇所付近の水素の顕著な濃度分布の下で着火・燃焼した際の圧力上昇等の挙動を詳細に評価することが可能である。このためには、拡散解析結果を受け継いだ燃焼解析への受け渡しの計算体系の構築が重要となる。

#### ・水素放出後中長時間での水素安全対策

格納容器スプレイの不作動を仮定したケースでは、格納容器内は水蒸気の凝縮が促進されず、水素が放出されても、非燃性の雰囲気のもと、水蒸気と水素の蓄積により格納容器内の圧力が上昇するため、格納容器の破損防止のため、小容量の代替スプレイ等による適切な水蒸気凝縮による圧力増加の抑制と水素の非燃性雰囲気の維持が、代表的な対策となる。ここでは、水蒸気の凝縮による格納容器内の非燃性雰囲気と圧力を詳細に評価することが CFD の補完的役割となる。このためには、スプレイに伴う水蒸気凝縮及び水素の混合挙動のモデルの導入が重要となる。また水素の非燃性雰囲気が維持される環境では、静的な触媒反応による水素再結合装置 (PAR) が、イグナイタと比べ緩やかに格納容器内の水素量を軽減していく。以上の水素発生後の比較的長時間の対策については、格納容器内の水素の濃度と圧力を測定・監視しながら、安全に必要な措置がとられるべく過酷事故時の管理手順が策定されている。この手順の信頼性の向上と活用の幅を広げるために、多様な条件での集中定数系解析とともに、CFD の詳細解析を補完して活用することは有用となると考えられる。

さらに過度の水蒸気凝縮により可燃性雰囲気となり、蓄積された多量の水素が着火した場合の燃焼挙動については、NUPEC 燃焼試験での知見が得られている。一方で解析に関しては、安全裕度の定量化に至るだけの知見は十分でなく、過酷事故時の運転手順に具体的に追加・反映できるまでには至っていない。このことより、集中定数系解析とともに、CFD による補完的な詳細解析により、大量の水素の燃焼によるリスク又は安全余裕の適切な評価と管理手順活用の拡大にも寄与できるものと期待される。このためには水蒸気を含んだ水素の燃焼モデルの導入が重要となる。

#### ・火炎加速が生じにくいことの説明性の向上

これまでの DDT に代表される火炎加速が認められた燃焼試験は、当量比 1 に近い高水素濃度 (水素空気系で 30% 水素濃度) や火炎の伝播が 1 方向に加速されやすい管やダクト形状の条件に集中しており、格納容器内では、水素濃度や水蒸気含有の雰囲気や各区画形状などから、火炎加速及びそれに基づく強い圧力

波の発生・継続は生じにくいと考えられる。このことを、燃焼解析で直接評価するためには CFD による解析が必要となる。このためには、格納容器内で特に火炎の伝播が比較的一定方向に集中しやすい狭い間隙部などの部位に対して、過度の保守性を排除しかつ適切な保守性を有する条件、具体的には適度な水蒸気を含みながら保守的な水素濃度の予混合均一条件で燃焼解析を複数実施することが有効と考えられる。

以上のような具体的な CFD 解析の活用事例を念頭に、重要となるモデルや解析技術を中心に、解析システムの構築を進めている。

#### 4. CFD 解析システムの開発手順と現状

前項で重要と考えられるモデルや解析技術は、要素試験、大型体系及び複雑体系の順番に関連する実験の照合解析を通じて、妥当性の確認と予測性の向上に努めてきている。近年は、大型体系として RUT 燃焼試験や複雑体系として NUPEC の燃焼試験や拡散混合試験の照合解析を進め、実機 CFD 解析システムへのモデル等の導入の最終段階に近づいている。

ここで、燃焼試験の照合においては、火炎の伝播速度に着目して、加速が生じない遅い爆燃、燃焼ガスの音速レベルまで加速が生じる早い爆燃及び超音速に至る爆轟への遷移の3段階に応じて、段階的に燃焼モデルの整備を進めてきている。拡散・混合試験の照合においては、意図的に非凝縮性ガスの局所滞留である成層化が生じるケースと循環流が形成され非凝縮性ガスの濃度が均一に向かうケースの両方に対して実施し、乱流モデル、凝縮モデルやスプレイによる効果のモデル化等を進めてきている。

以上を踏まえ、試解析として実機格納容器を対象とした拡散混合解析及び予混合均一濃度条件での水素の燃焼解析も実施している。これらについては、シリーズ後掲で報告する。

#### 5. おわりに

本 CFD 解析システムの構築は、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共通基盤整備のための技術開発事業（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。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(水素安全対策高度化)報告書」2012-2017.