

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

**(4) 水素挙動統合解析システム整備 進捗状況
－水素拡散混合挙動の照合解析、統合システムの構築－**

Present status of hydrogen behavior simulation code system development

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

*寺田 敦彦¹¹日本原子力研究開発機構**1. はじめに**

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、福島第一原子力発電所事故の経験や、事故から得られた教訓を踏まえ、原子炉のみならず廃止措置、廃棄物管理における水素安全評価・対策に適切に対応するための基盤技術の高度化を図ることを目的として、水素の発生から拡散、燃焼・爆発に至る挙動を予測する水素挙動統合解析システム整備を平成 24 年度 2 期（フェーズ 1 [1]：平成 24 年度～平成 27 年度、フェーズ 2：平成 28 年度～）にわたって進めている。本システムでは、既存の汎用コードを活用し、そこに新規にモジュールやプリ／ポストプロセッサを組み込むことで、一般の実用に堪える解析システムを整備するとともに、より高い汎用性と低コストでの導入が可能なオープンソースコードを活用したシステムの開発を並行して進め、原子力施設の水素防災計画に利用できる形での基盤技術の提供を目指している。

2. システムの構成

プラント設計におけるシミュレーションを用いた安全性評価においては、理論的および実験的な研究が活発に行われ、現象の解明とともにコンピュータ技術の目覚ましい進歩もあり、数値流体解析（CFD）手法を用いた数値解析による爆発現象を再現するモデルやこれを導入したシミュレーションコードが開発され、より実用的な現象解析および災害影響評価が可能になってきている。特に、原子力施設のシビアアクシデント時における格納容器内の水素挙動評価では、研究機関、事業者、製造メーカ等において各種システムコード（MELCOR、MAAP、GOTHIC 等）が活用されるとともに、OECD/NEA プロジェクト等の国際的な枠組みにおいては、CFD コードを含む検証や現象のより詳細な解明が進められているところである。

これらの状況を踏まえ、特に CFD 技術の活用に着目して、シビアアクシデントコードの仕様や課題等を調査し、広く産業界で活用されている汎用コードをベースにシビアアクシデント特有の現象（例えば、水蒸気凝縮雰囲気中での水素の混合・拡散等）について適合性の高いモデルを組み込むことで、実用レベルのシステム構築を早期に進めるとともに、実験データや機構論的な背景に基づいた、詳細な相変化や燃焼等の複雑な現象についてのモデル技術の高度化、事故進展挙動への展開、大規模計算への適用性、原子力分野以外の利用ユーザ層の獲得等を考慮して、オープンソースコードによる基盤技術の開発を進めてきた。以上の方針から、事故進展シナリオに基づいて発生した水素が漏洩拡散し、燃焼爆発が生じた場合の建屋・機器に対する影響評価を予測する水素挙動解析システムの基本構成を図 1 に纏めた。開発は、フェーズ 1 にて、シビアアクシデント時の水素挙動に係る汎用物理モデル導入により基本構成を整理し、現在のフェーズ 2 では、PWR 原子力発電施設を対象に、実用的な観点から考慮すべき現象（火炎伝播加速現象の評価技術、格納容器規模の現象への適用性）のモデル拡充を段階的に進めている。

*Atsuhiko Terada¹¹JAEA.

数値シミュレーションは、事故漏洩シナリオ（漏洩箇所、漏洩流体の組成、漏洩量等）に基づき、大きく分けて3つの解析フェーズ（水素ガスの漏洩・拡散を扱う移流拡散解析、着火から爆燃および爆風圧の伝播を扱う爆燃及び爆風伝播解析、爆風圧による構造物への影響評価解析）で構成され、統合的に建屋やプラント設備全般にわたって各種影響の検討を実施できる。特に、コード間のデータの受け渡しについては、インターフェースを用いて連結させることで、対象事象を一貫して解析できるように整備している。システムを構成する主要なコードは、汎用熱流体解析コード ANSYS FLUENT[2]、STAR-CCM+[3]、FrontFlowRed[4]、OpenFOAM[5]、FDS[6]、爆燃解析コード AutoReaGas[7]、FLACS[8]、FrontFlowFOCUS[9] 及び衝撃解析コード AUTODYN[10]、DYNA3D[11]、ImpetusAfea[12]等である。現在の第2期では、特に、汎用熱流体解析コード ANSYS FLUENT、OpenFOAM、衝撃解析コード AUTODYN を用いて、開発を進めている。これらのコードは、使用実績や検証事例、豊富な機能と高度な拡張性を有しており、欧州等の研究機関との連携も可能であるとともに、事業者や製造者、研究者含め利用者が多いことから選定した。コード間のインターフェースは、一時的なファイルの受け渡しをベースとしており、上記コード以外の利用ユーザにも、柔軟に対応可能な汎用的な仕様である。

3. 現在の取り組み

システムを構成する各コードには、蒸気凝縮や水素燃焼等の各種モデルと熱化学物性データを実装し、既存の実験データとの照合解析を行って、メッシュ密度や境界条件等のユーザ独自の設定効果の影響とともに、モデルの適合性を事例とともにマニュアル等に整理する計画である。現在の工学的な主要な取り組みは、火炎伝播加速現象に係る評価技術と格納容器規模へのアプリケーション機能の適用性確認であるが、背景となるフェーズから整備を進めてきた基盤技術の拡充として、水蒸気凝縮雰囲気中での密度差浮力による混合拡散への影響、不活性ガス（水蒸気、二酸化炭素）雰囲気中での燃焼速度データの整理、構造連成機能の整備を実施している。本報告では、と基盤技術の拡充に係る概要を以下に示す。

(1) 水蒸気凝縮雰囲気中での含む密度差浮力による水素混合拡散への影響

事故漏洩シナリオに基づき、水素ガスが所定の場所から漏洩するとした移流拡散解析を実施する場合、水素ガスの漏洩状況（位置、容積、方向等）や大量の水蒸気が蒸発・凝縮する周囲環境等によって、発生が懸念される成層化の生成消失過程等のプロセスを正確に予測する必要がある。その際、密閉空間中の冷却壁面や空間雰囲気中での水蒸気の凝縮や密度差に起因する浮力乱流のモデル化が重要となる。そこで、既存の研究事例をもとに壁面や空間中での凝縮量やスプレー等の外的作用の影響により生じる凝縮量等を算出する伝熱物質移動モデル[13]を、従来活用されている RANS モデルと組み合わせて用いている。その一例として、格納容器規模の大規模解析への CFD モデル適用検討の前段として行っている NUPEC 混合拡散試験[14]の照合解析事例を紹介する。さらに、代数応力モデル[15]を用いて、レイノルズ応力の非等方性や、乱流物質流束とレイノルズ応力との関係性等の観点から、定式化に向けた整理の取り組みも進めている。

(2) 不活性ガス（水蒸気）雰囲気中での燃焼速度データの整理

シビアアクシデント時の格納容器内は、大量の水蒸気が蒸発・凝縮される雰囲気であることから、漏洩した水素の燃焼挙動を正確に予測する際には、比較的薄い濃度側から広範囲の濃度分布と水蒸気の影響を考慮する必要がある。そこで、燃焼特性の基礎データとなる層流燃焼速度を整理するとともに、火炎伝播初期の球状火炎に生じる不安定性の効果を実験的に明らかにして定式化して、燃焼モデルとして整理している。比較のために不活性ガス種として、二酸化炭素についても同様な整理を行っている[16]。

(3) 構造連成

水素拡散解析から得られた水素ガス濃度分布から推定される爆轟時に生じるエネルギーや爆風伝播解析で得られた爆風圧を荷重条件として、構造物への作用評価を行うインターフェースを整備している。汎用商用コードを取り扱う場合、コードの公開制限から衝撃解析の圧力応答にみられる一方向連成解析が主に限定されるが、FrontFlowFOCUS-DYNA3D や FLACS-ImpetusAfea といったコード間で双方向弱連成機能が実現できることを確認した[17]。現在、FLUENT-OpenFOAM-AUTODYN コード間のデータ受け渡しによる

連成解析機能の整備を進めている。

4. おわりに

本報では、水素の発生から拡散、燃焼・爆発に至る水素挙動をシミュレーション評価するシステムの概要を紹介した。また、コード開発の一環として取り組んでいる、水蒸気凝縮を含む密度差浮力による水素混合拡散への影響、不活性ガスによる燃焼速度への影響、及び構造連成機能等の要素技術開発の一例を示した。今後、実用的なシステム構築の観点から、実験結果による検証を行いつつ、シビアアクシデント時の複雑な水素挙動の解析に向けた基盤技術の拡充を進めていく計画である。

本報告は、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る。

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.
- [2] ANSYS 社、ANSYS FLUENT Ver19.2、<http://www.ansys.com/>
- [3] Siemens 社、STAR-CCM+、<https://mdx.plm.automation.siemens.com/star-ccm-plus>
- [4] NufD 社、NufD/FrontFlowRed、<http://www.nufd.jp/> またはアドバンスソフト社、Advance/FrontFlowRed、<http://www.ad-tech.co.jp/>
- [5] ESI 他、OpenFOAM、<http://www.openfoam.com/>
- [6] NIST、FDS、http://www.nist.gov/el/fire_research/fds_smokeyview.cfm
- [7] 例えば、A.C.van den berg,et.al.,”AutoReaGas-A CFD-TOOL FOR GAS EXPLOSION HAZARD ANALYSIS”,
<https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00971910>
- [8] GexCon 社、FLACS Ver9、<http://www.gexcon.co.uk/>
- [9] アドバンスソフト社、Advance/FrontFlowFocus、<http://www.ad-tech.co.jp/>
- [10] ANSYS 社、ANSYS AUTODYN Ver19.2、<http://www.ansys.com/>
- [11] Kennedy,T. DYNA3D,W-7405-ENG-48,<https://www.osti.gov/biblio/5359111-dyna3d>
- [12] IMPETUS-Afea 社、IMPETUS Afea Solver、<https://www.impetus-afea.com/>
- [13] 寺田敦彦他、“水素挙動解析システムの構築に向けた取り組み”、日本原子力学会 2015 年秋の大会.
- [14] 原子力発電機構、重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する総括報告書」、平成 15 年 3 月
- [15] H. Sugiyama, "Numerical Analysis of Turbulent Flows by Means of Algebraic Reynolds Stress and Turbulent Heat Flux Models", Proc. 6th ICCHMT.
- [16] Influence of CO2 Addition on the Cellular Structure of H2-O2 Premixed Flame, The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2017
- [17] 寺田敦彦他、“水素挙動解析システムの構築に向けた取り組み”、2015 日本流体力学会年会

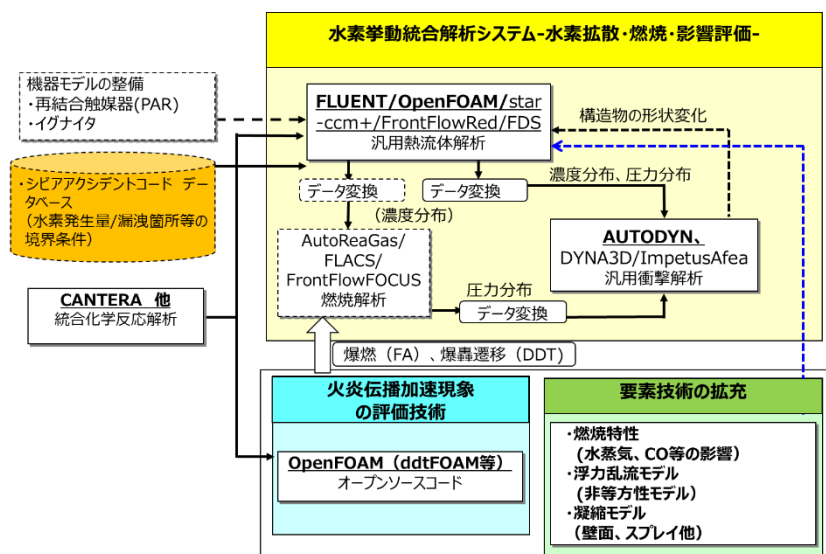


図1 水素挙動統合解析システムの基本構成