

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

(4) 水素挙動統合解析システムの公開について

Public release of the CFD code of hydrogen behavior

*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の構築・整備を進めてきた[1][2][3]。特に、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）に対処するためにシステムの拡充を行っている。本報告では、水素挙動統合解析システムの概要と公開に向けた取組みを紹介する。

2. システムの概要

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、製造メーカー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、欧州を中心に 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説明が進められている。これらの状況を踏まえ、特に CFD 技術の活用注目して、システムコードを補完する水素挙動解析システム（図1）の整備を進めてきた。

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）に基づいたシステムコードの計算結果を初期条件として、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、着火から爆燃及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）を通して、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よう、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作成し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た。システムを構成する主要なコードは、既存の汎用熱流体解析コード ANSYS FLUENT[4]、世界的に利用者が増大しているオープンソースコード（OpenFOAM[5]）に加えて汎用衝撃解析コード AUTODYN[6]である。本事業では、新たに図1に示す※部分の開発を行った。水蒸気雰囲気中での水素ガスの移流解析や燃焼解析をするために必要な蒸気凝縮（空間、壁面、スプレー）モデル、水素燃焼モデル、機器モデル（再結合触媒、イグナイター、再循環ユニット）に関するユーザ定義関数を作成し、ANSYS FLUENT で計算できるようにした。これらのモデルは既存の試験データで検証したものである。また、火炎が亜音速に達する早い爆燃や爆轟に遷移する DDT の解析に関しては、DDTFOAM[7]をベースに水蒸気特有の燃焼反応特性を素反応モデルを用いた化学反応計算を基にテーブル化するとともに解適合格子法（AMR）を活用した大規模計算の効率化を行い、OpenFOAM で計算ができるようにした。これにより、汎用熱流体解析コードとオープンソースコードでの解析が可能なシステムとした。さらに、構造物の健全性評価を行うために、AUTODYN には、FLUENT または OpenFOAM の燃焼解析結果として得られた爆風圧分布を境界条件

*Atsuhiko Terada¹ ¹JAEA.

とするためのインターフェースプログラムを作成している。また、ベント等建造物の脆弱部破損後の水素の移流拡散、燃焼挙動についても、インターフェースを介してメッシュを再構築することで連成解析が可能な処理を設けている。

3. 公開に向けた取り組み

本システムは、上述したように既存の汎用コードとオープンソースコードで構成される。システムを構成する各コードに新たに導入した蒸気凝縮や水素燃焼等の各種モデルや熱化学物性データに係るプログラム及びコード間インターフェースプログラム（図1※部分）は、各コードのマニュアルを補完する仕様と使い方を整理した拡張マニュアルと、既存の実験データとの照合解析を行った良好事例やメッシュ密度、境界条件、物理モデル等の解析結果への影響を整理したガイドラインとともに、次年度以降、原子力機構の PRODAS[8]を通して、安全性向上に向けた有効的な活用を希望する事業者、メーカー、研究機関等に提供する予定である。また、システムにて得られる成果を実用的な活用の観点で編集した「原子力における水素安全対策高度化ハンドブック（第2巻）」を併せて刊行する。

4. おわりに

本報では、水素挙動統合解析システムの概要と公開に向けた取り組みを紹介した。今後、事業者、メーカー、研究機関等のユーザが当該システムを活用できるよう、サポート等に貢献するとともに、水素安全に係る様々なアプリケーションへのシステムの活用が展開できるように取り組んでいく。

水素挙動統合解析システムの構築・整備と公開に向けた活動は、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]経済産業省資源エネルギー庁「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）報告書」2018-2019.
- [3]経済産業省資源エネルギー庁「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）報告書」2020.
- [4] ANSYS 社、ANSYS FLUENT Ver19.2、<http://www.ansys.com/>
- [5] ESI 他、OpenFOAM、<http://www.openfoam.com/>
- [6] ANSYS 社、ANSYS AUTODYN Ver19.2、<http://www.ansys.com/>
- [7] ETTNER, Florian; VOLLMER, Klaus G.: SATTELMAYER, Thomas.” Numerical simulation of the deflagration-to-detonation transition in inhomogeneous mixtures ”, Journal of combustion,2014.
- [8] PRODAS、<https://prodas.jaea.go.jp/PRAD8001>

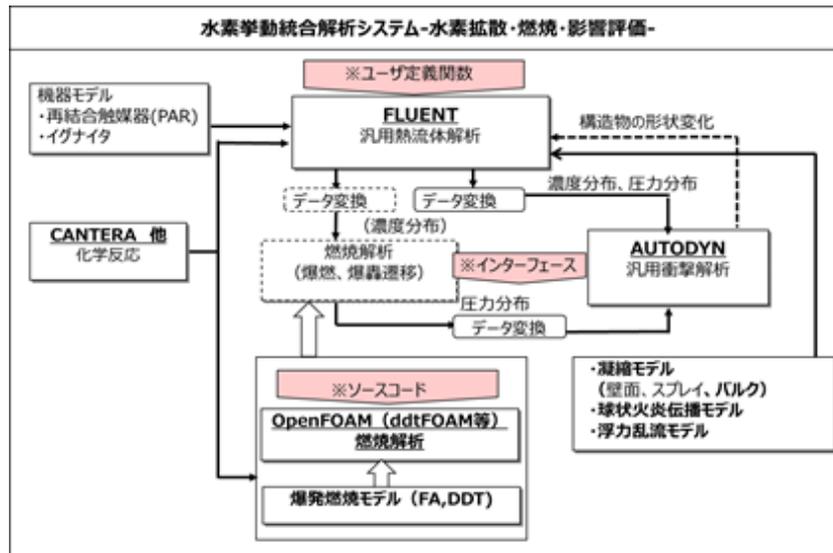


図 1.水素挙動統合解析システムの基本構成