

水素製造貯蔵物質の
大気拡散挙動解析及び火災爆発影響評価

仕様書

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

エネルギー研究開発領域

高温ガス炉プロジェクト推進室

H T T R - 熱利用試験準備グループ

I. 一般仕様

1. 件名：水素製造貯蔵物質の大気拡散挙動解析及び火災爆発影響評価

2. 目的及び概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）では、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を受け、2030年までに大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術を開発するため、天然ガス水蒸気改質法による水素製造を行う熱利用試験施設をHTTR（高温工学試験研究炉）に接続し、高温ガス炉と水素製造施設の接続技術を確認するHTTR-熱利用試験を計画中である。

熱利用試験施設は水素やメタン等の可燃性ガスを保有するため、これらの可燃性ガスの漏えいに伴う爆発事象を想定し、原子炉施設を対象とした影響評価を行う必要がある。この爆発事象に伴う圧力波は、HTTRと熱利用試験施設を接続する配管内の閉鎖空間、配管外の開放空間又は閉鎖空間を伝播し、HTTRに影響を与えることが想定される。また、産業界では水素の貯蔵輸送技術として液化水素、アンモニア、有機ハイドライド等の水素キャリア技術開発が進められる。これらの化学物質は、可燃性、毒性を示し、原子炉施設周辺では通常取扱われない物質である。将来を見据え高温ガス炉で製造した水素をキャリア変化して施設周辺で大量に貯蔵する場合、原子炉施設及び運転員に与える影響を評価する必要がある。

本作業では、閉鎖空間の形状と圧力波の減衰比の相関を示すことを目的に、閉鎖空間内における圧力波伝播の解析を行う。また、昨年度に実施した熱利用試験施設を起因とした爆発影響評価（以下「昨年度評価」という。）の精緻化を行うことを目的に、燃焼速度モデルやメッシュサイズの最適化を行うとともに、最適化されたパラメータを反映し、熱利用試験施設を起因とした爆発影響評価を行う。加えて、原子炉施設近傍に設置される水素貯蔵設備を想定した貯蔵タンク（高圧水素、液化水素、アンモニア、有機ハイドライド）からの漏えい事象及び可燃性物質の爆発影響評価を行う。

3. 実施項目

- (1) 閉鎖空間における圧力波伝播の解析
- (2) 燃焼速度モデルの調整解析
- (3) 解析モデル及び解析条件の感度解析
- (4) 熱利用試験施設を起因とした爆発影響評価
- (5) 水素及び水素キャリア漏えい事象に対する大気拡散挙動の解析
- (6) 水素及び水素キャリアを対象とする爆発影響評価
- (7) 報告書の作成

4. 提出図書
- | | | |
|--------------------------|--|-----|
| (1) 実施工程表 | 契約締結後速やかに | 1 部 |
| (2) 実施計画書 | 契約締結後速やかに | 1 部 |
| (3) 委任又は下請負届 | 作業開始 2 週間前までに
(該当する場合、原子力機構指定様式を基に作成すること) | 1 部 |
| (4) 打合せ議事録 | 打合せの都度 | 1 部 |
| (5) 報告書 | 納期までに | 2 部 |
| (6) 報告書、入出力データ等を取めた CD-R | 納期までに | 2 式 |

(提出場所) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
 エネルギー研究開発領域 高温ガス炉プロジェクト推進室
 H T T R - 熱利用試験準備グループ (大洗駐在)

5. 提示情報、支給品及び貸与品
- (1) 提示情報：水素貯蔵関連物質の貯蔵条件、大気拡散条件
- (2) 支給品 : なし
- (3) 貸与品 :
- 令和 5 年度報告書「H T T R - 熱利用試験施設の
 爆発影響評価妥当性確認解析モデル等の作成」
- 令和 6 年度報告書「H T T R - 熱利用試験施設の爆発影響評価妥当性確認解析」

6. 実施場所：受注者側実施施設

7. 納期：令和 9 年 2 月 26 日

8. 納入場所

茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所
 H T T R 研究棟内指定場所

9. 検収条件

「4. 提出図書」の確認並びに、仕様書に定める業務が実施されたと原子力機構が認め
 た時を以て、業務完了とする。

10. 適用法規・規定等：該当なし

11. 特記事項

- (1) 受注者は原子力機構が原子力の研究・開発を行う機関であるため、高い技術力及び高い信頼性を社会的にもとめられていることを認識し、原子力機構の規程等を遵守し安全性に配慮し業務を遂行しうる能力を有する者を従事させること。
- (2) 受注者は業務を実施することにより取得した当該業務及び作業に関する各データ、技術情報、成果その他のすべての資料及び情報を原子力機構の施設外に持ち出して発表もしくは公開し、または特定の第三者に対価をうけ、もしくは無償で提供することはできない。ただし、あらかじめ書面により原子力機構の承認を受けた場合はこの限りではない。

12. 検査員及び監督員

- (1) 検査員 一般検査
管財担当課長
- (2) 監督員 実施内容及び提出図書の確認
エネルギー研究開発領域 高温ガス炉プロジェクト推進室
HTTR-熱利用試験準備グループ員

13. グリーン購入法の推進

- (1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達に関する法律）に適用する環境物品（事務用品、OA 機器等）の採用が可能な場合は、これを採用するものとする。
- (2) 本仕様に定める提出図書（納入印刷物）は、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

14. その他

- (1) 受注者は発注者と緊密な連絡を取り合いつつ作業を行うこと。また、発注者が必要と認めた場合には、随時、技術打合せを行うこと。
- (2) 本仕様書に関して疑義が生じた場合には、双方協議の上、発注者が指示する。

II. 技術仕様

1. 解析コード

本作業で行う解析評価は、解析コード「NuFD/FrontFlowRed」を用いること。「NuFD/FrontFlowRed」は、受注者側で用意すること。

2. 閉鎖空間における圧力波伝播の解析

屋外での可燃性ガスの爆発によって生じた圧力波が、閉鎖空間を構成する躯体とそれを貫通する配管の間隙を通り、閉鎖空間に入り、閉鎖空間内を伝播する現象を想定する。本作業では、閉鎖空間の形状と圧力波の減衰比の相関を示すことを目的に、閉鎖空間内を伝播する圧力波の解析を行う。解析モデルは、直方体で模擬した躯体部（約 4 m×約 3.5 m×約 52.25 m）、高温配管を模擬した円筒部（ Φ 約 0.4572 m×約 53.25 m）及び閉鎖空間を構成する躯体と高温配管貫通部の間隙を模擬した円環部（ Φ 約 0.5572 m×約 1 m）の各 1 個から構成される。解析モデルの作成に必要な寸法は、原子力機構が提示する。解析モデルは、閉鎖空間内に敷設される高温配管を模擬した円筒部を設ける「実断面積モデル」及び円筒部を設けず、躯体部の寸法を調整する「有効断面積モデル」の 2 つを作成する。解析ケース及び評価条件を表 1 に示す。

①実断面積モデル（4 ケース）

円環部でのすべり、すなわち、圧力損失の影響を考慮しない場合において、円環外径を 50 mm ずつ大きくした場合の圧力波伝播の解析を 3 ケース行う（表 1 の No. 1-1~1-3）。本解析にあたっては、初期条件として円環部端（圧力波入口面）に圧力値を与え、円環部及び躯体部における圧力波伝播を解析し、躯体部端（圧力評価面）に作用する圧力値（最大値、平均値）を評価する。また、得られた解析結果をプロットしたグラフ（縦軸：躯体部端に作用する圧力値、横軸：圧力波入口面に対する圧力評価面の面積比）を作成し、原子力機構が提示する手計算結果を合わせてプロットする。円環部の寸法と圧力波の減衰比（圧力波入口面に対する圧力評価面の圧力の比）に相関があることを確認する。

続いて、円環部での圧力損失の影響を考慮した場合の圧力波伝播の解析を 1 ケース行う（表 1 の No. 1-4）。円環外径は、表 1 の No. 1-1 と同じとする。また、得られた解析結果を基に円環部でのすべりを考慮することで躯体部端における圧力値が緩和されることを確認する。

②有効断面積モデル（1 ケース）

圧力波伝播の解析を 1 ケース行う（表 1 の No. 1-5）。円環外径は、表 1 の No. 1-1 と同じとする。また、表 1 の No. 1-1 と No. 1-5 の解析結果を比較し、高温配管の模擬方法が躯体部端における圧力値の解析結果に与える影響を確認する。

表1 圧力波伝播の解析ケース

解析ケース	円環外径	円環すべり	閉鎖空間断面積
No. 1-1	557.2 mm	あり	実断面積モデル
No. 1-2	607.2 mm	あり	実断面積モデル
No. 1-3	657.2 mm	あり	実断面積モデル
No. 1-4	557.2 mm	なし	実断面積モデル
No. 1-5	557.2 mm	あり	有効断面積モデル

3. 燃焼速度モデルの調整解析

本作業では、燃焼速度モデルの妥当性を示すことを目的に、実験結果と解析結果の比較検証によるモデル係数の調整を行う。具体的には、はじめに、爆発事象の実験結果が整理された文献調査を行い、実験結果と解析結果の比較検証を行うにあたって適切な文献を選定する。文献の選定にあたっては、以下の項目を満足するような文献を選定すること。

- ・数メートル規模の構造物を対象とした実験結果を含むこと
- ・燃料としてメタンを用いた実験結果を含むこと
- ・複数の着火地点を対象とした実験結果を含むこと

次に、選定した文献を基に実験体系を再現した解析モデルを作成し、実験体系を模擬した解析を行う。本解析にあたっては、着火地点を固定し、燃焼速度モデルのモデル係数を変更した解析を3ケース行い、実験結果と解析結果の比較検証を行う（表2のNo. 2-1～2-3）。比較検証では、実験結果を最も再現したモデル係数をベースに、モデル係数の設定値が解析結果に与える影響を分析し、爆発事象が構造物に与える影響を保守的に評価できるよう、ベースとしたモデル係数を調整する。

最後に、選定したモデル係数を基に着火地点を変更した解析を2ケース行い、実験結果と解析結果の比較検証を行う（表2のNo. 2-4及び2-5）。比較検証では、いずれの解析ケースにおいても実験結果を再現しつつ爆発事象が構造物に与える影響を保守的に評価できることを確認するとともに、着火地点の感度解析を行う。

表2 調整解析ケースのイメージ

解析ケース	燃焼速度モデル	着火地点
No. 2-1	モデル係数 A	A 地点
No. 2-2	モデル係数 B	
No. 2-3	モデル係数 C	
No. 2-4	No. 2-1～2-3 の解析結果のうち、 最も再現性のあるモデル係数	B 地点
No. 2-5		C 地点

4. 解析モデル及び解析条件の感度解析

本作業では、昨年度評価を対象に、解析モデルのパラメータや解析条件のパラメータに対する感度解析を行い、十分な解析精度が得られるパラメータを特定する。解析モデルのパラメータに対する感度解析では、解析モデルが十分な解像度を有することを確認するため、(1)メッシュサイズや(2)時間刻み幅を変更した感度解析を行う。解析条件のパラメータに対する感度解析では、解析結果に大きな感度があり、条件設定の不確かさが大きい(3)初期乱流強度を変更した感度解析を行う。本作業で用いる解析モデル及び解析条件は昨年度評価と同じものとし、原子力機構が貸与する。

(1) メッシュサイズ

解析モデルの中に着目点を設け、メッシュサイズを変更した解析を3ケース行い(表3のNo.3-1~3-3)、複数地点を対象に、横軸に総メッシュ数(又はメッシュサイズの逆数)、縦軸に当該地点における圧力及び温度をプロットしたグラフを作成する。作成したグラフを基に圧力及び温度に与える影響が十分に小さくなるメッシュサイズを特定する。

(2) 時間刻み幅

最適化したメッシュサイズを反映し、時間刻み幅を変更した解析を3ケース行い(表3のNo.3-4~3-6)、(1)の複数地点のうち一地点を対象に、横軸に時間刻み幅の逆数、縦軸に当該地点における圧力及び温度をプロットしたグラフを作成する。作成したグラフを基に圧力及び温度に与える影響が十分に小さくなる時間刻み幅を特定する。

(3) 初期乱流強度

最適化したメッシュサイズ及び時間刻み幅を反映し、初期乱流強度を変更した解析を5ケース行う(表3のNo.3-7~3-11)。ここでは、爆発事象が原子炉施設に与える影響を保守的に評価するため、原子炉建家壁面に作用する圧力を大きめに評価するような初期乱流強度を特定する。初期乱流強度の設定値に関しては、風工学の知見や数値流体力学のガイドラインを参考にし、原子力機構と協議の上決定すること。

表 3 感度解析ケースのイメージ

解析ケース	メッシュサイズ	時間刻み幅	乱流強度
No. 3-1	サイズ A	刻み幅 A'	値 A''
No. 3-2	サイズ B		
No. 3-3	サイズ C		
No. 3-4	No. 3-1～3-3 の解析 結果に基づき、 最適化した値	刻み幅 B'	
No. 3-5			
No. 3-6			
No. 3-7		No. 3-4～3-6 の解析 結果に基づき、 最適化した値	値 B''
No. 3-8			値 C''
No. 3-9			値 D''
No. 3-10			値 E''
No. 3-11			

5. 熱利用試験施設を起因とした爆発影響評価

本作業では、第 3 項で調整した燃焼速度モデルのモデル係数、第 4 項で調整したメッシュサイズや時間刻み幅、乱流強度を昨年度評価の解析モデル及び解析条件に反映し、爆発事象が原子炉施設に与える影響を評価する。具体的には、単独爆発事象を対象に 4 ケース（表 4 の No. 4-1 及び 4-2、4-4 及び 4-5）、同時爆発事象を対象に 2 ケース（表 4 の No. 4-3 及び 4-6）の計 6 ケースに関して解析を行い、単独爆発事象と同時爆発事象との間で加成的性が成立するか確認する。加成的性の成立性の確認にあたっては、表 4 の No. 4-1 及び No. 4-2 の各解析結果の和と No. 4-3 の解析結果、そして、表 4 の No. 4-4 及び No. 4-5 の各解析結果の和と No. 4-6 の解析結果をそれぞれ比較し、各値が一致するか否か、一致しない場合は単独爆発事象の重ね合わせによる解析結果と同時爆発事象による解析結果の大小関係を明らかにする。

表 4 熱利用試験施設を起因とした解析ケース

解析ケース	爆発源
No. 4-1	液化天然ガス (LNG) タンクの単独爆発
No. 4-2	水蒸気改質器の単独爆発
No. 4-3	LNG タンクと水蒸気改質器の同時爆発
No. 4-4	LNG タンクの単独爆発（※No. 4-1 と位置が異なる）
No. 4-5	水素バッファータンクの単独爆発
No. 4-6	LNG タンクと水素バッファータンクの同時爆発

6. 水素及び水素キャリア漏えい事象に対する大気拡散挙動の解析

貯蔵タンク内の物質がタンクから漏えいした際の大気拡散挙動の解析を行う。解析モデルの大きさ、時間刻みは第5項と同様とするが、解析モデルには評価対象物質を含む貯蔵タンク1基のみを配置する。水素キャリアは、高圧水素、液化水素、液体アンモニア、有機ハイドライドに係る2成分（トルエン、メチルシクロヘキサン）であり、貯蔵量は水素換算で同物質量の貯蔵を想定する。

原子力機構より別途提示する寸法情報を基に、各タンクモデルを作成する。貯蔵量、貯蔵条件も原子力機構より別途提示する。大気拡散挙動の解析は表5に示す15（=5成分×3条件）ケースを解析する。気象条件は、原子力機構が別途提示する。

貯蔵タンク周辺の成分濃度分布の時間変化、及びタンクからの距離に応じた成分濃度の時間変化を評価する。成分が有毒物質であれば防護判断基準値を上回るか判定する。

表5 水素及び水素キャリアの大気拡散挙動評価ケース

解析ケース	水素キャリア	貯蔵形態	気象条件
No. 5-1-1, 2, 3	高圧水素	気体	無風及び原子力機構提示条件 (各3ケース)
No. 5-2-1, 2, 3	液化水素	液体	
No. 5-3-1, 2, 3	アンモニア	液体	
No. 5-4-1, 2, 3	トルエン	液体	
No. 5-5-1, 2, 3	メチルシクロヘキサン	液体	

7. 水素及び水素キャリアを対象とする爆発影響評価

第6項と同様の解析モデル、時間刻み、貯蔵タンク構造、貯蔵条件を設定し、高圧水素、液化水素、液体アンモニア、トルエン、メチルシクロヘキサンいずれかを貯蔵するタンクに対して、それぞれ爆発影響評価解析を行う。表6に示す水素キャリアを貯蔵する各貯蔵タンクを着火地点とする爆発事象を想定する。爆発事象に対してタンク周辺の圧力変化及び温度変化を評価し、貯蔵タンクに対する距離の影響を調査する。各化学物質由来の爆風圧が原子炉建家に対して影響を及ぼさない距離を算定する。

表6 水素及び水素キャリアの爆発影響評価ケース

解析ケース	水素キャリア	貯蔵形態
No. 6-1	高圧水素	気体
No. 6-2	液化水素	液体
No. 6-3	アンモニア	液体
No. 6-4	トルエン	液体
No. 6-5	メチルシクロヘキサン	液体

8. 報告書の作成

前項までの実施内容をまとめた報告書を作成する。報告書の文章はMicrosoft Word、図表はMicrosoft Excel (いずれもWindows版)、あるいは同等の互換性を有するソフトウェアで作成すること。