

令和4年度原子力規制庁委託成果報告書

東京電力福島第一原子力発電所事故時の水素爆
発における可燃性有機ガスの影響に関する調査

長岡技術科学大学

令和5年3月

目 次

1. 事業名	1
2. 事業目的	1
3. 事業内容	1
3.1 概要	1
3.2 実施内容	1
4. 試験成果	3
4.1 試験装置	3
4.2 試験条件とプロセス	4
4.3 試験結果と考察	4
① 水素燃焼試験	4
② 混合気体燃焼試験	8
5. まとめ	15
6. 参考文献	17

1. 事業名

令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(東京電力福島第一原子力発電所事故時の水素爆発における可燃性有機ガスの影響に関する調査)事業

2. 事業目的

東京電力福島第一原子力発電所(以下「1F」という。)事故等を踏まえた重大事故時の対策や安全評価手法並びに安全対策の高度化に関連する技術的知見を取得する。本事業では、1F1号機及び3号機の原子炉建屋において発生した水素爆発に関して、デフラグレーション(deflagration、爆燃)を考慮した水素濃度等の条件による水素燃焼時の挙動及び可燃性有機ガスによる水素燃焼への影響を把握することを目的に、水素及び可燃性有機ガスの燃焼試験等を実施する。

3. 事業内容

3.1 概要

本事業では、水素及び可燃性有機ガスの燃焼(予混合燃焼)による水素燃焼時の挙動を把握するため、水素及び可燃性有機ガスの濃度条件等による燃焼挙動について、下記に示す項目を実施する。

- (1)水素等燃焼試験(予混合燃焼試験)の計画及び実施
- (2)燃焼試験結果の取りまとめ及び評価並びに1Fの水素爆発に対する考察
- (3)報告書の作成

3.2 実施内容

3.2.1 水素等燃焼試験(予混合燃焼)の計画及び実施

水素、可燃性有機ガス及び空気の混合気体による燃焼試験(予混合燃焼)の計画及び試験を行う。ここで、水素等燃焼試験として、次の2種類の燃焼試験(①水素燃焼試験、②混合気体(水素、可燃性有機ガス及び空気)燃焼試験)とする。水素等燃焼試験においては、水素燃焼時の挙動を把握するため、口径30cmの観察窓を有し、燃焼時の系内全体の挙動を観察・記録できる試験装置を用いて試験を行う。なお、試験の計画及び実施では、東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ[1]を参考とする。

①水素燃焼試験

デフラグレーション(deflagration、爆燃)を考慮した燃焼時の挙動を把握する試験を実施するため、水素濃度による燃焼時の圧力変化及び高速度カメラによる燃焼挙動等を測定する。また、試験パラメータは水素濃度とし、3 ケース実施する。

試験条件及び測定項目を以下に示す。

・試験条件

試験装置: 密閉型であり、燃焼時の圧力上昇に耐え、口径 30 cm の観察窓を有する。

燃焼状態: 予混合燃焼

着火位置: 中央部

水素濃度: 10 vol%、15 vol%、20 vol%

・測定項目

水素ガスの濃度及び温度、燃焼時の系内の圧力変化、高速度カメラによる燃焼挙動

②混合気体(水素、可燃性有機ガス及び空気)燃焼試験

①の水素燃焼試験の結果を踏まえ、水素燃焼時の可燃性有機ガス(メタン)の影響を把握するため、水素濃度、可燃性有機ガス濃度及び空気の混合気体による燃焼時の圧力変化並びに高速度カメラによる燃焼挙動等を測定する。また、試験パラメータは、水素濃度及び可燃性有機ガス濃度として、6 ケース実施する。ここで、混合気体の当量比は 1 以下とする。

試験条件及び測定項目を以下に示す。

・試験条件

試験装置: 密閉型であり、燃焼時の圧力上昇に耐え、口径 30 cm の観察窓を有する。

燃焼状態: 予混合燃焼

着火位置: 中央部

水素濃度: 10 vol%、15 vol%、20 vol%

可燃性有機ガス(メタン)濃度: 1 vol%、2 vol%

・測定項目

水素ガス及び可燃性有機ガスの濃度及び温度、燃焼時の系内の圧力変化、高速度カメラによる燃焼挙動

3. 2. 2 報告書の作成

上記3. 2. 1 について報告書にまとめる。報告書には、成果のみならず各試験における前提条件及びプロセスも記載する。

4. 試験成果

4.1 試験装置

本試験では、水素/空気混合気、水素/メタン/空気混合気を取り扱い、水素濃度とメタン濃度を变化させて、口径 30 cm の観察窓を有する密閉型容器内で燃焼試験を実施する。容器内に予混合気を充填し、中心点火することにより、球状のデフラグレーション (deflagration、爆燃) を観察し、水素濃度による燃焼時の挙動及びメタン濃度による水素燃焼への影響を把握する。ここでは、シュリーレン法により、火炎伝播の様子や火炎面形状を高速度撮影する。また、容器内の圧力変化を測定する。

図1は密閉型燃焼容器を示したものであり、表1はその基本仕様を示したものである。

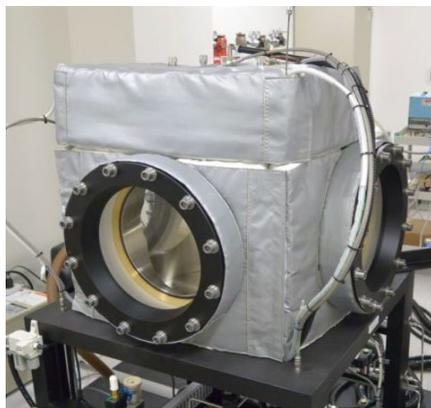


表1 密閉型燃焼容器の基本仕様

容器	容積	73 L
	材質	SUS
観察窓	直径	300 mm
	厚み	140 mm
	数	4

図1 密閉型燃焼容器

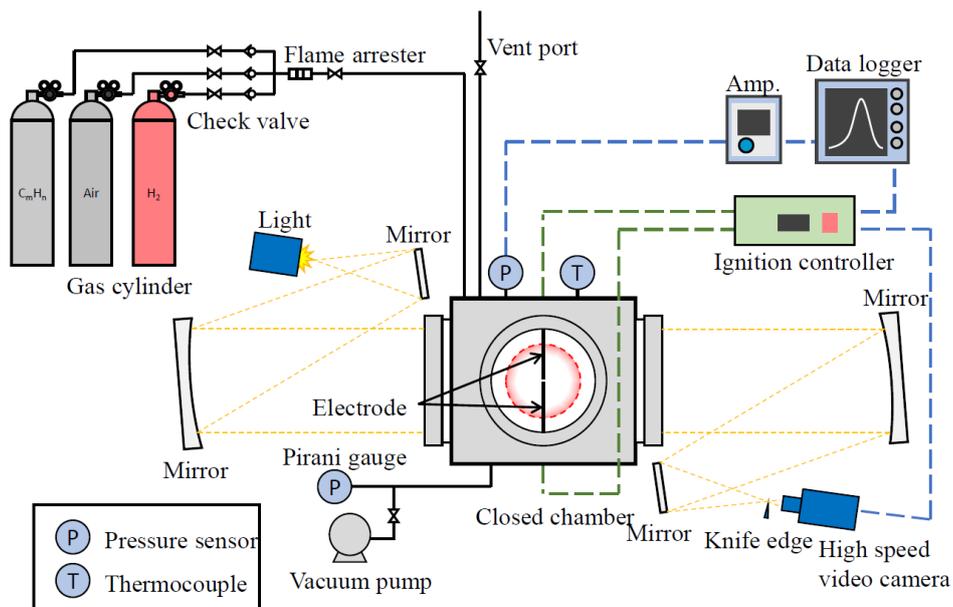


図2 燃焼試験システム

図2は燃焼試験システムを示したものである。燃焼容器には、ガス供給ライン、排気ライン、真空引きラインを設け、ガス供給ラインと排気ラインのすべての弁は、遠隔から電氣的に操作できるように設定している。真空引きやガス供給時の容器内部圧力の測定用としてピエゾ抵抗センサ(Keller PAA-23Y)、容器内部の混合気温度の測定用にシース熱電対(T-type)を設置している。燃焼時の容器内の急激な圧力変化を取得するため、圧電センサ(Kistler 6045A)を燃焼器上部に設けたポートに直接取り付け、圧電センサ用チャージアンプ(Kistler 5918A)より出力された電圧をデータロガー(キーエンス NR-600)によってサンプリング周波数 10 kHz で記録した。また、火炎形状および動的な伝播挙動を広範囲に取得するため、直径 350 mm の凹面鏡を有するシュリーレン法測定装置(溝尻光学工業所 SL-350)により観察した。シュリーレン画像は、高速度ビデオカメラ(Photron FASTCAM SA-X)を用いて、撮影速度 10000 fps、シャッター速度 20 μ s、および解像度 1024 \times 1024 pixels で撮影した。

4. 2 試験条件とプロセス

燃焼容器に充填する混合気は、初期温度 25°C (298 K)、初期圧力 1 気圧 (101.3 kPa)、所定の水素濃度 (10 vol%、15 vol%、20 vol%)、所定のメタン濃度 (0 vol%、1 vol%、2 vol%) とした。所定の水素濃度とメタン濃度になるように、分圧に関するドルトンの法則に基づいて気体を混合した。

燃焼試験では、容器内に水素/空気混合気、水素/メタン/空気混合気を充填した後、電極により容器の中心で点火し、高速度ビデオカメラによるシュリーレン撮影、及び圧電センサによる圧力測定を行った。燃焼試験は全体として 9 ケース実施し、燃焼時の系内の燃焼挙動と圧力変化を把握した。

4. 3 試験結果と考察

①水素燃焼試験

球状のデフラグレーションの伝播の様子を示したのが図3(上部)である。ここで、初期温度は 25°C、初期圧力は 1 気圧、水素濃度は 10 vol% であり、メタン濃度は 0 vol% である。点火後 0.1 ms のシュリーレン画像、及び火炎半径 $r_b = 2$ cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm のときの画像が示されている。火炎半径の増加と共に火炎面にセルが形成され、それが発達して複雑な形状になる様子が観察されている。このセルの形成は予混合火炎の固有不安定性に起因するものである[2]。また、球状の火炎が全体として上方へ移動することが確認される。これは浮力によるものであり、燃焼速度が小さい予混合火炎で顕著に現れる挙動である。本試験では、口径 30 cm の観察窓を有する燃焼容器を用いていることから、この条件下での浮力の影響を示すことが出来ている。燃焼現象を把握するには、十分広い観察窓を有する燃焼容器を用いる必要がある。

容器内の圧力変化を示したのが図3(下部)である。燃焼反応が進行すると共に、容器内圧力は急激に上昇する。燃焼反応が完了した後、圧力は下降する。これは、燃焼容器から周囲への熱損失により既燃ガス温度が低くなるからである。

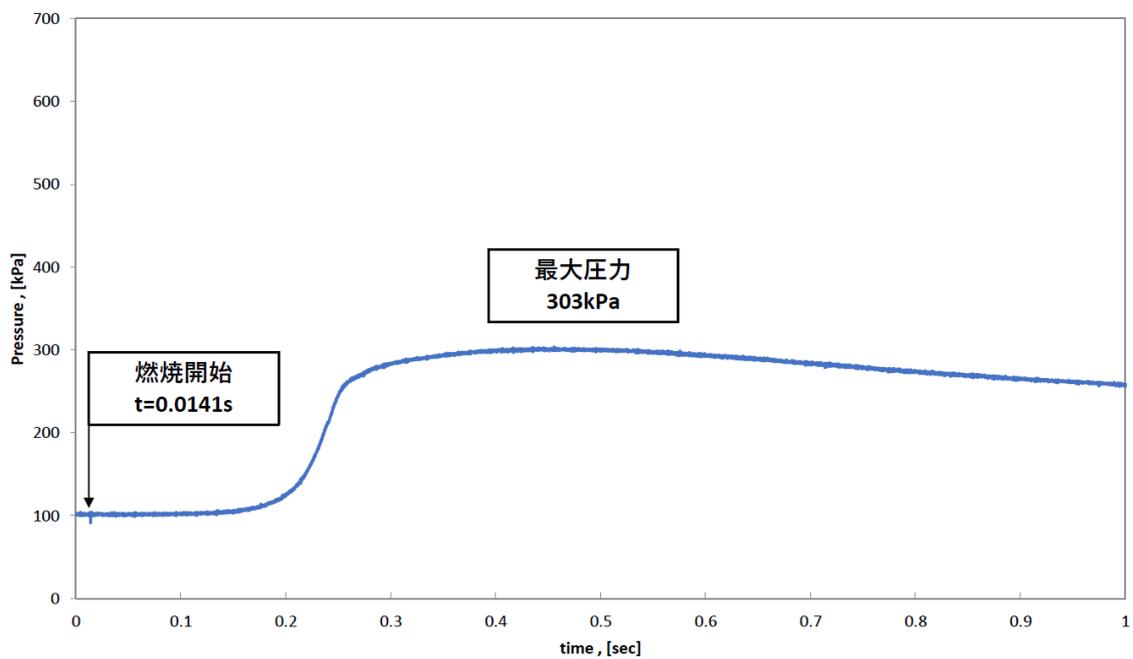
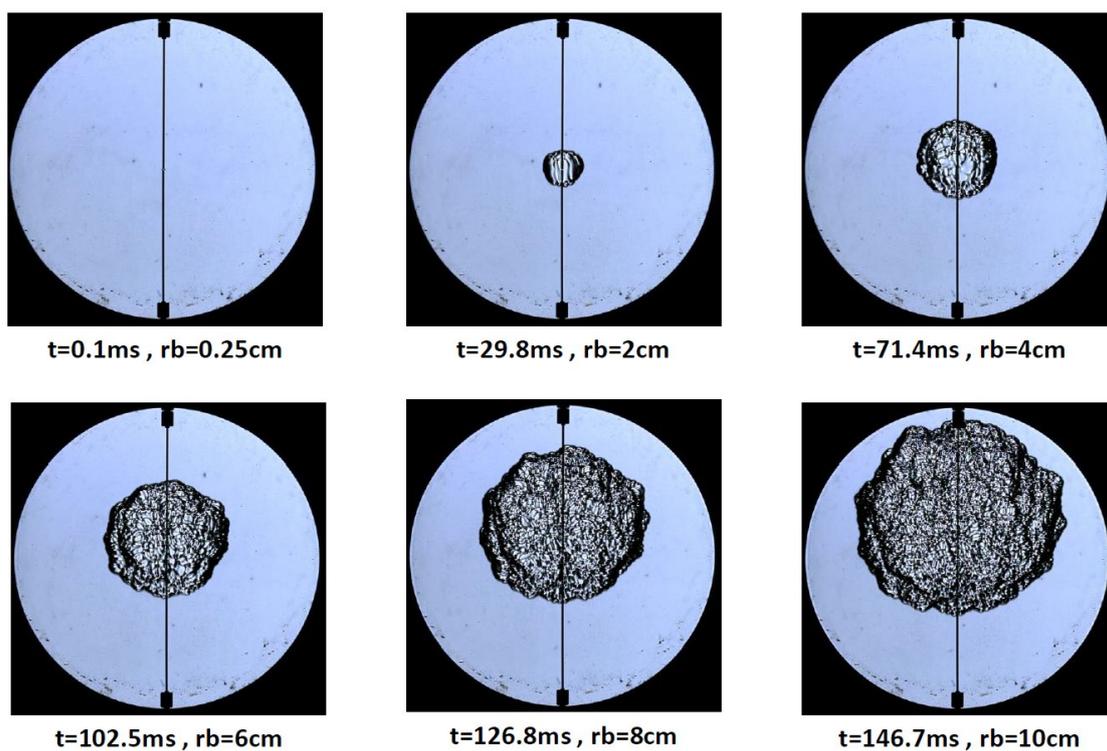


図3 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)

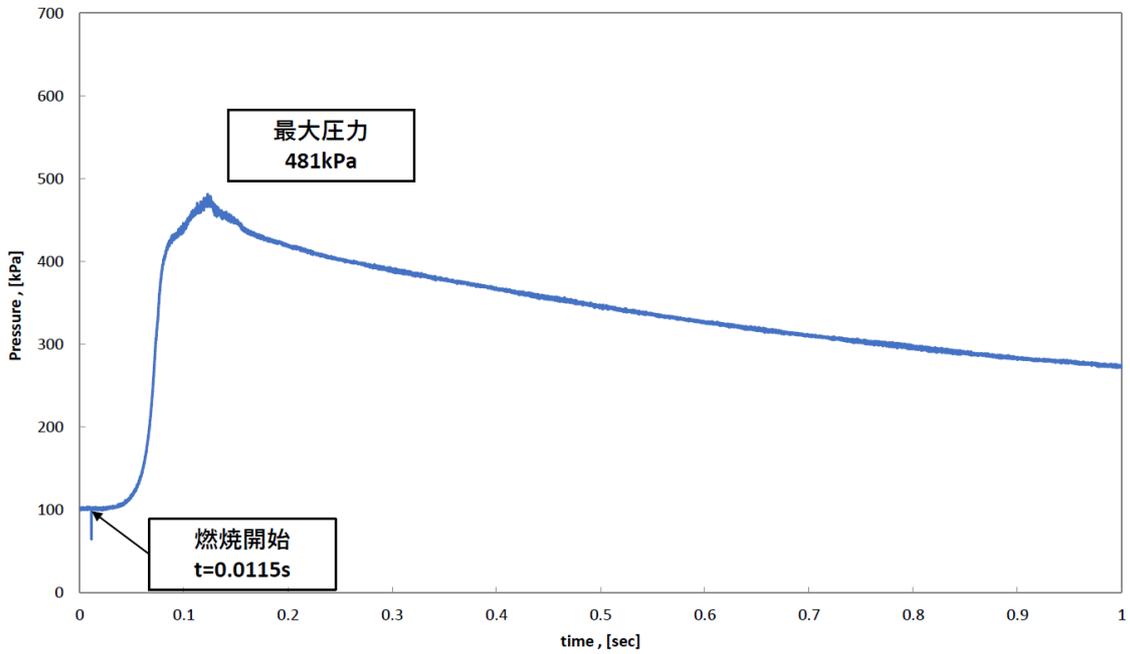
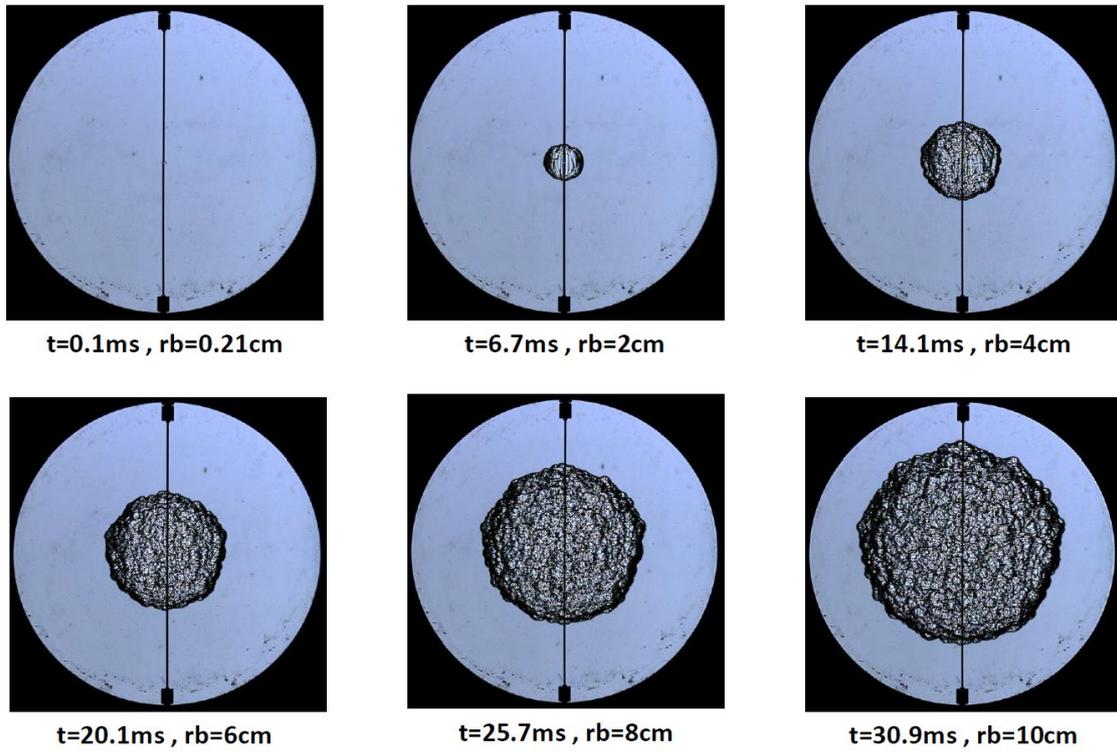


図4 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 15 vol%、メタン濃度 0 vol%)

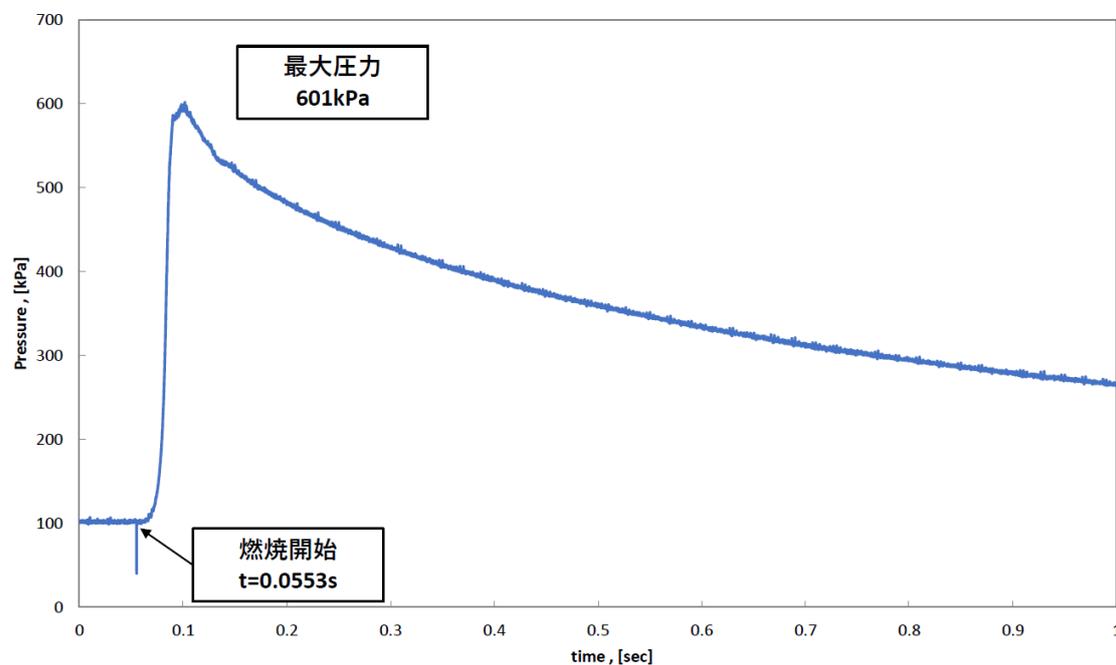
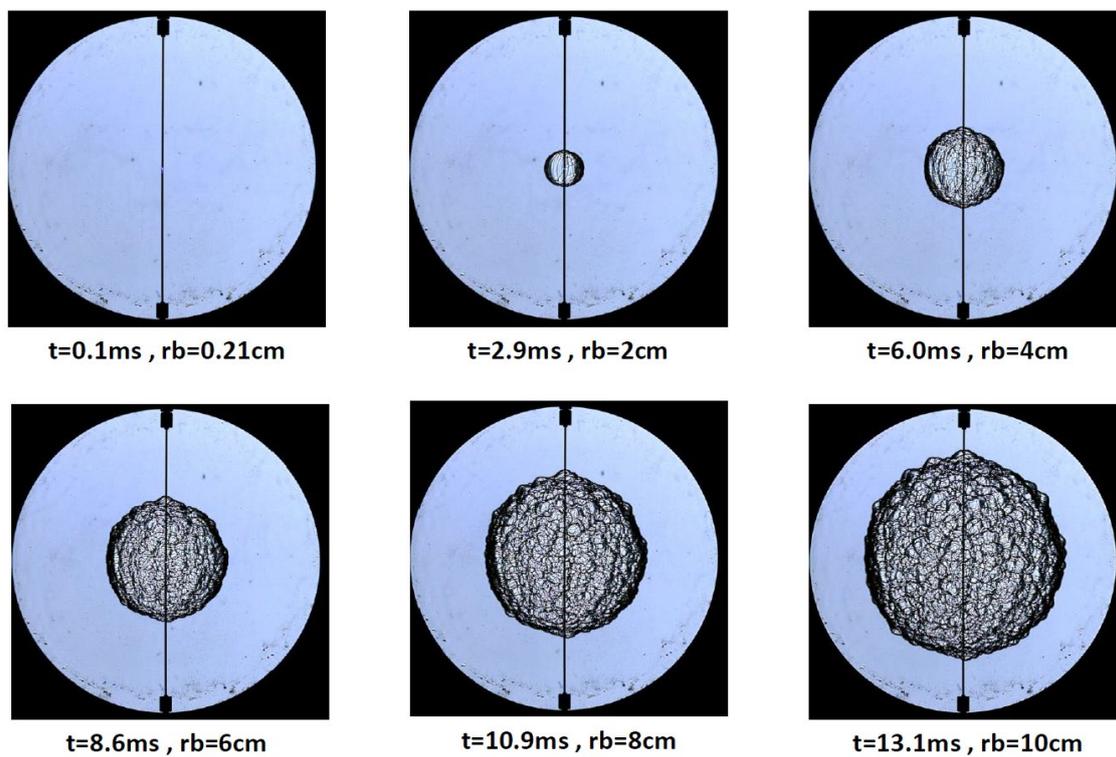


図5 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 20 vol%、メタン濃度 0 vol%)

水素濃度が 15 vol% と 20 vol% のときのシュリーレン画像を示したのが、図4と図5の上部である。水素濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大している。これは予混合火炎の燃焼速度が大きくなるからである[3]。また、容器内の最大圧力は上昇する(図4と図5の下部参照)。これは断熱火炎温度が高くなるからである[4]。なお、水素濃度 20 vol% における燃焼後の圧力変化が大きいのは、火炎温度が高いため周囲への熱損失が大きくなるからである。

②混合気体燃焼試験

水素濃度 10 vol%、メタン濃度 1 vol%、2 vol% におけるデフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化を示したのが図6(メタン濃度 1 vol%)と図7(メタン濃度 2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、メタン濃度 0 vol%、1 vol%、2 vol% において、それぞれ、0.265、0.375、0.487 である。メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大し、容器内の最大圧力は上昇する。前者は予混合火炎の燃焼速度が大きくなることによるもので、後者は断熱火炎温度が高くなることによるものと思われる。

水素濃度が 15 vol% のときの試験結果を示したのが図8(メタン濃度 1 vol%)と図9(メタン濃度 2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、メタン濃度 0 vol%、1 vol%、2 vol% において、それぞれ、0.420、0.539、0.660 である。また、水素濃度が 20 vol% の試験結果を示したのが図10(メタン濃度 1 vol%)と図11(メタン濃度 2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、それぞれ、0.595、0.723、0.855 である。メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大するが、火炎面のセルの凹凸は僅かではあるが滑らかになっている。この要因としては、メタン添加による固有不安定性への影響が考えられるが、そのメカニズムについては精査する必要がある。さらに、メタン添加が火炎伝播の加速に影響を与えるものと考えられる。この加速現象に関しても、詳細な検討が必要である。なお、メタン添加による火炎面の凹凸の僅かな違いは、口径 30 cm の観察窓を用いていることから明らかになったものであり、小さい観察窓では明確に違いをキャッチすることは困難である。

図12は、容器内の最大圧力を示したものであり、水素濃度及びメタン濃度が高くなると共に、単調に上昇する。最大圧力の上昇は、水素爆発による破壊力を強めることに直結するものである。東京電力福島第一原子力発電所の水素爆発においては、可燃性有機ガスが含まれていると考えられており[1]、爆発の際の破壊力は水素のみの場合より強くなったものと推察される。したがって、水素爆発現象における可燃性有機ガスの影響を精査することは、1Fの水素爆発の現象を明らかにする上で、必要かつ重要である。

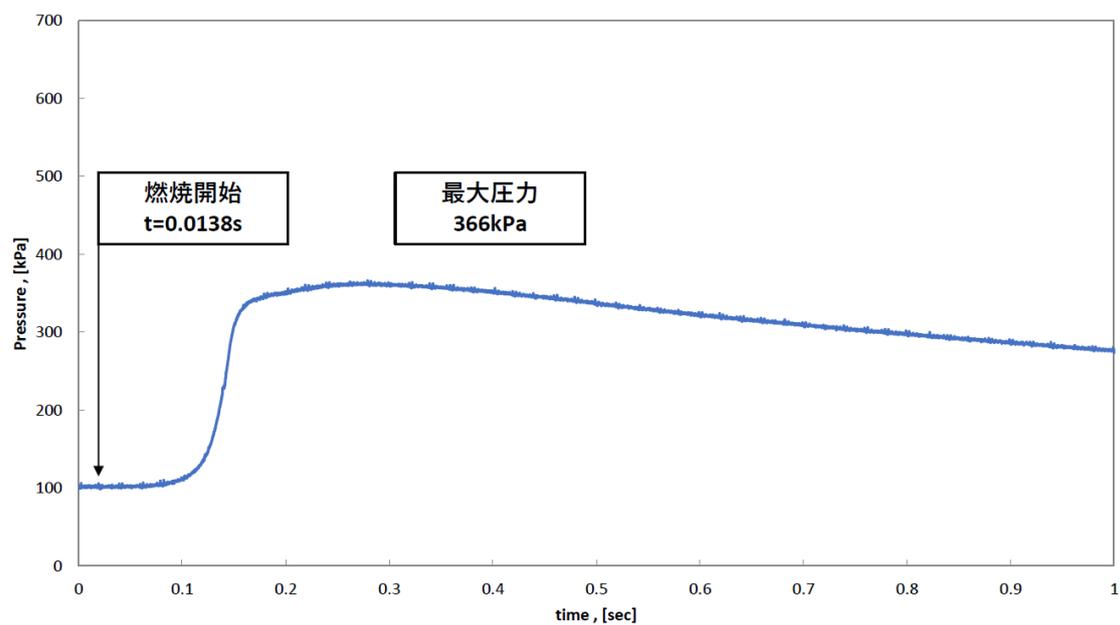
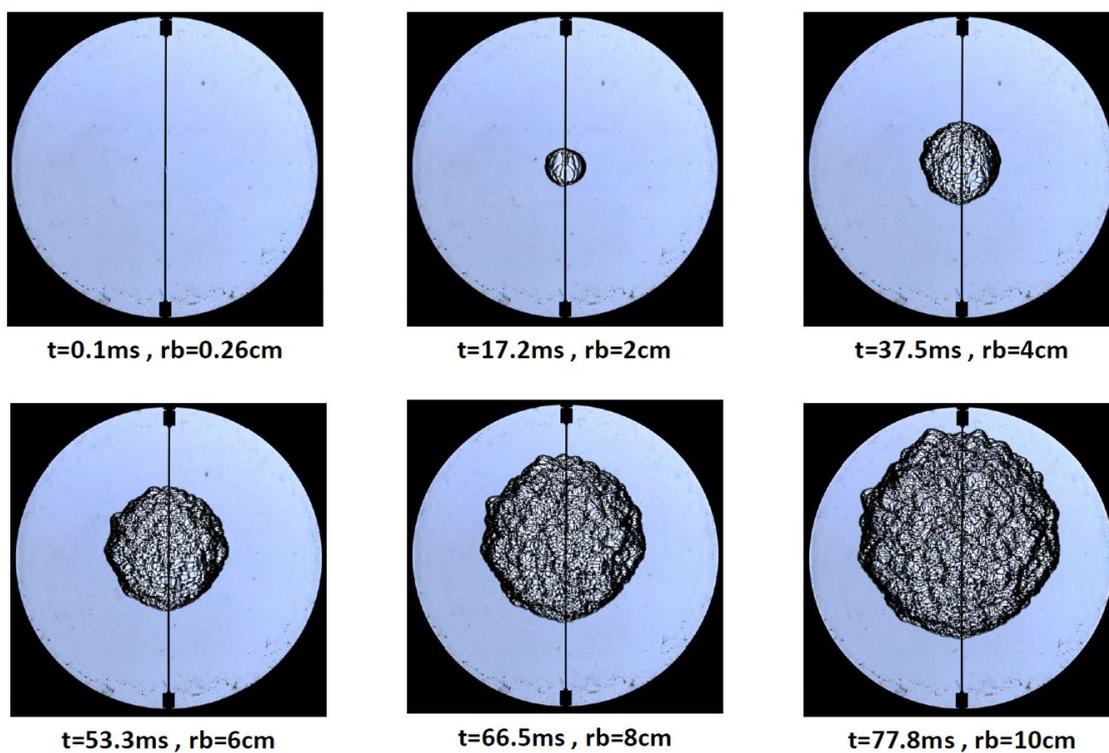


図6 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 10 vol%、メタン濃度 1 vol%)

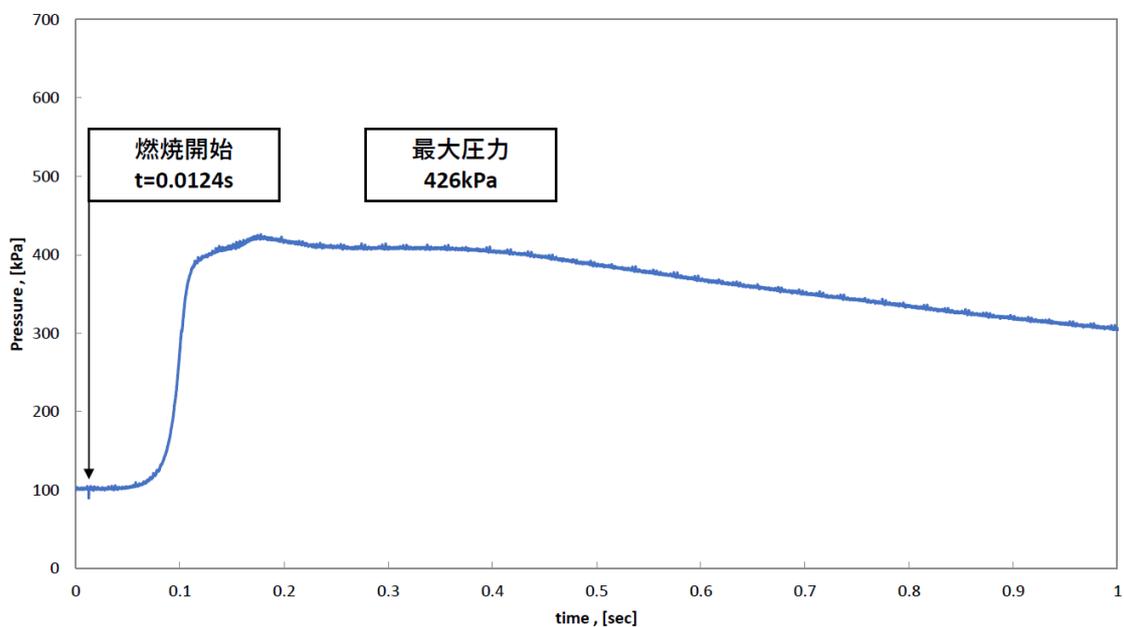
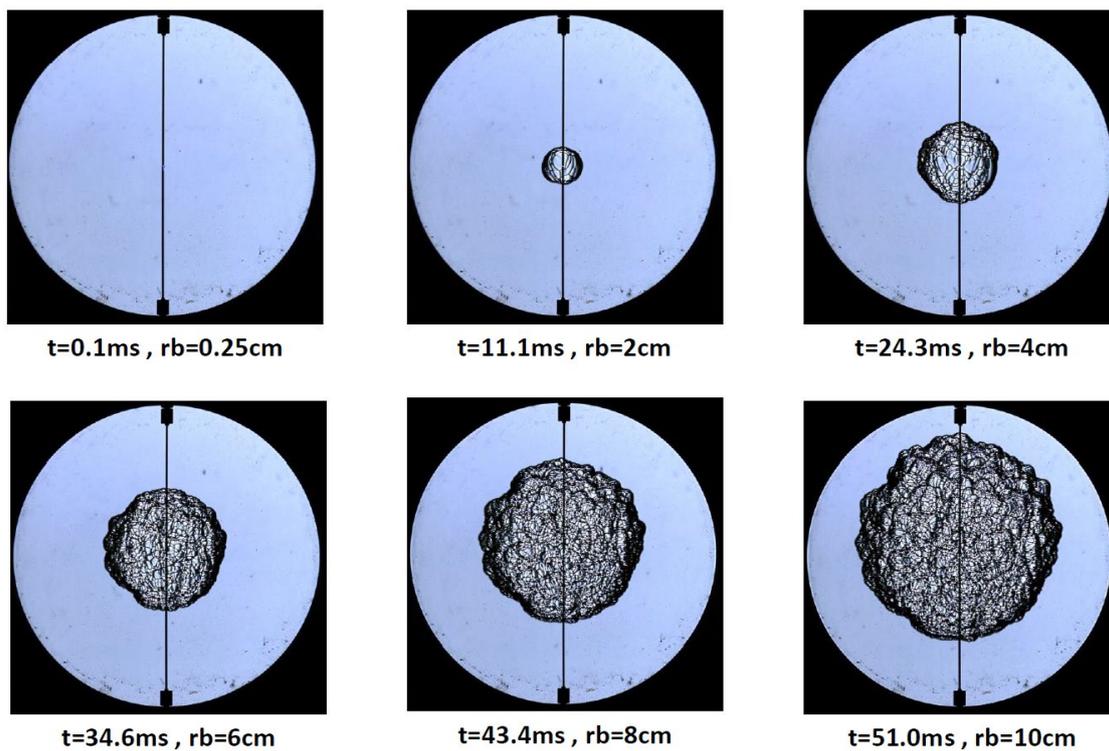


図7 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 10 vol%、メタン濃度 2 vol%)

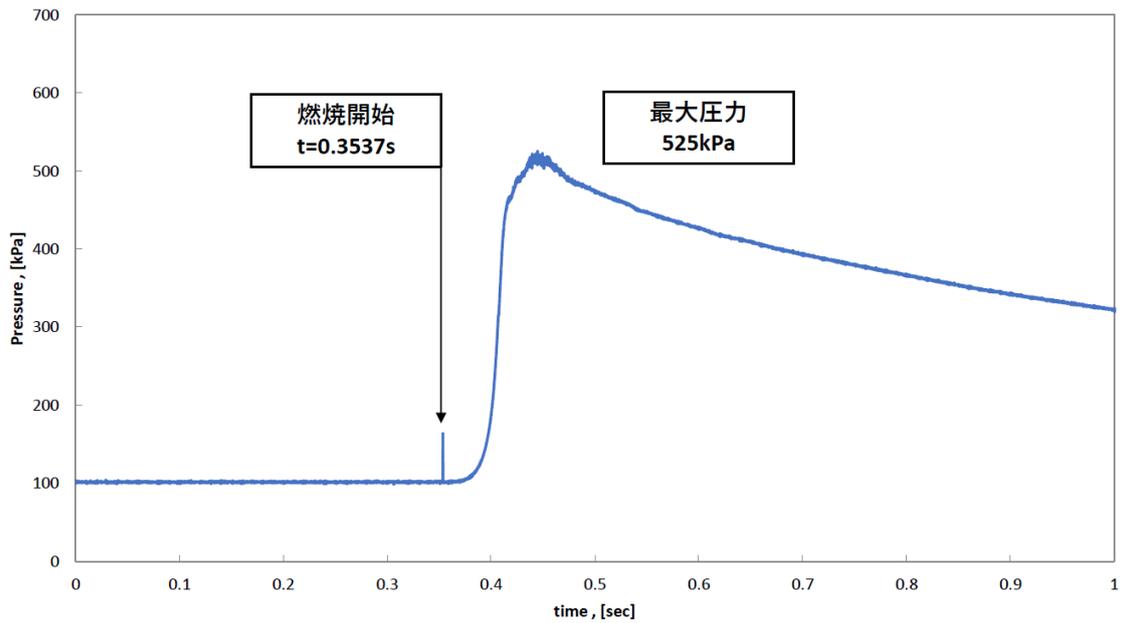
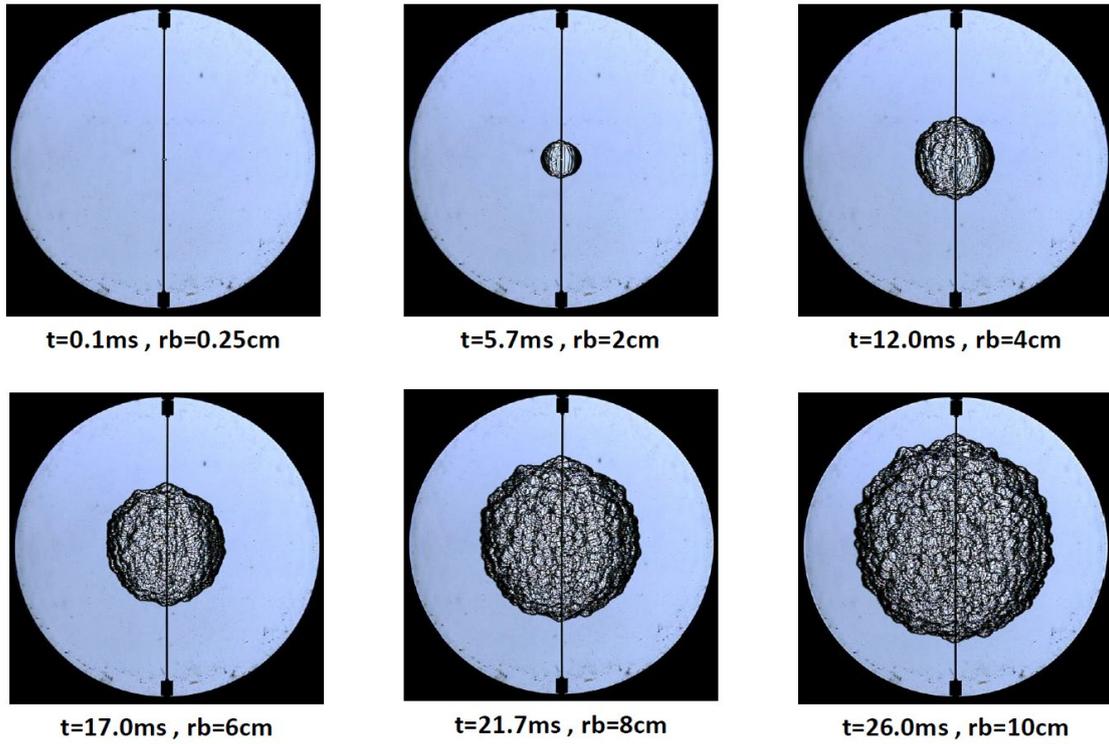


図8 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 15 vol%、メタン濃度 1 vol%)

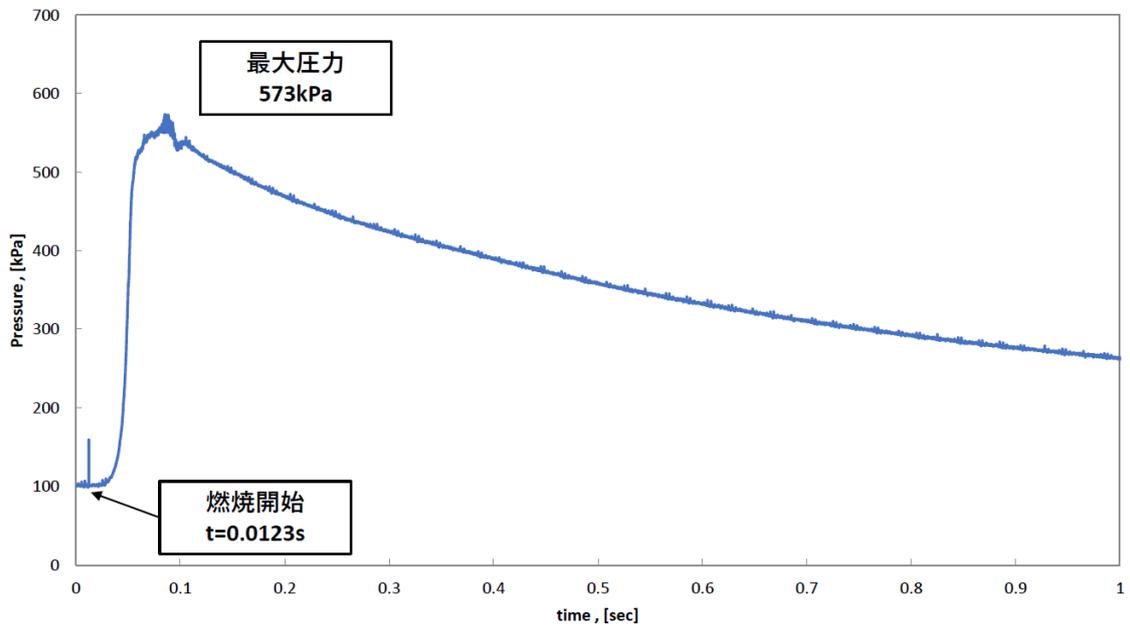
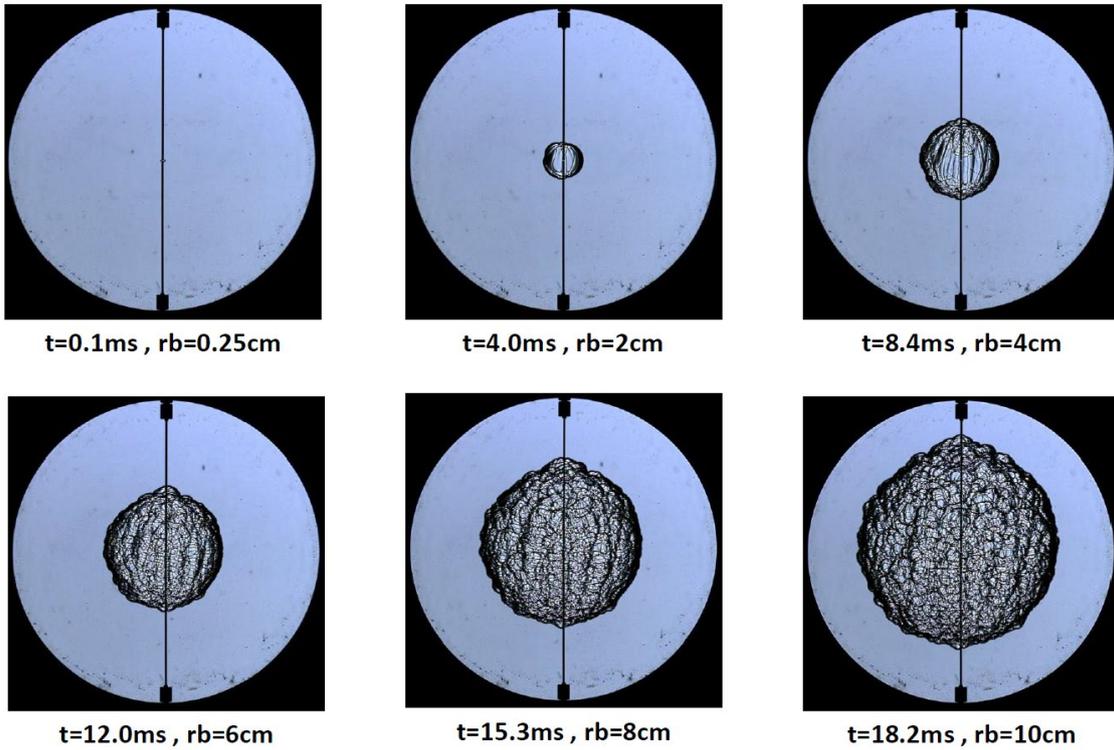


図9 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 15 vol%、メタン濃度 2 vol%)

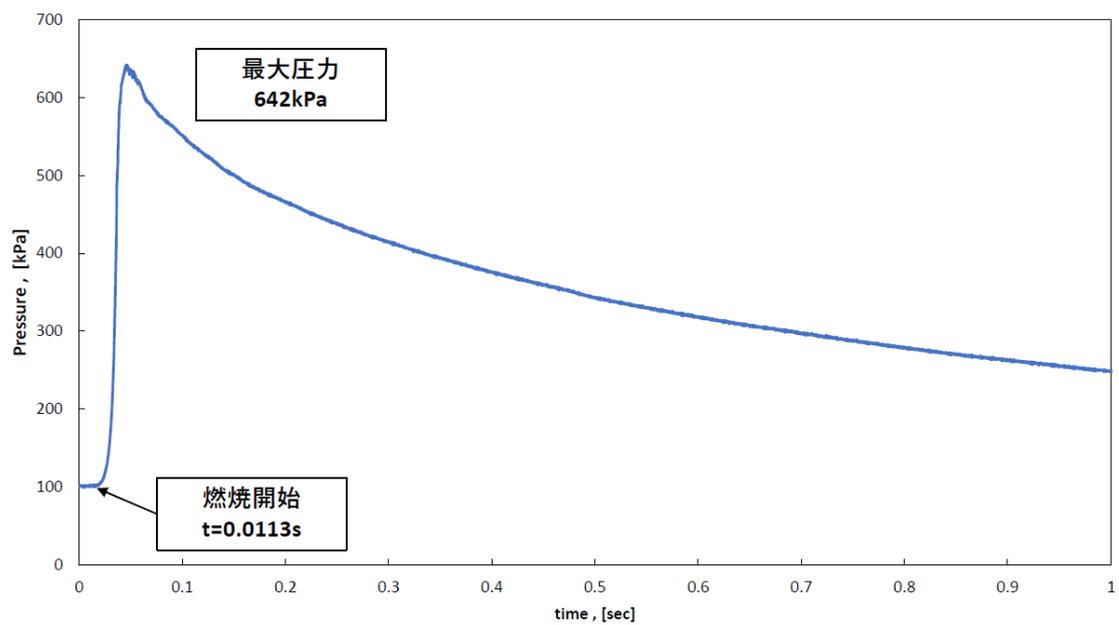
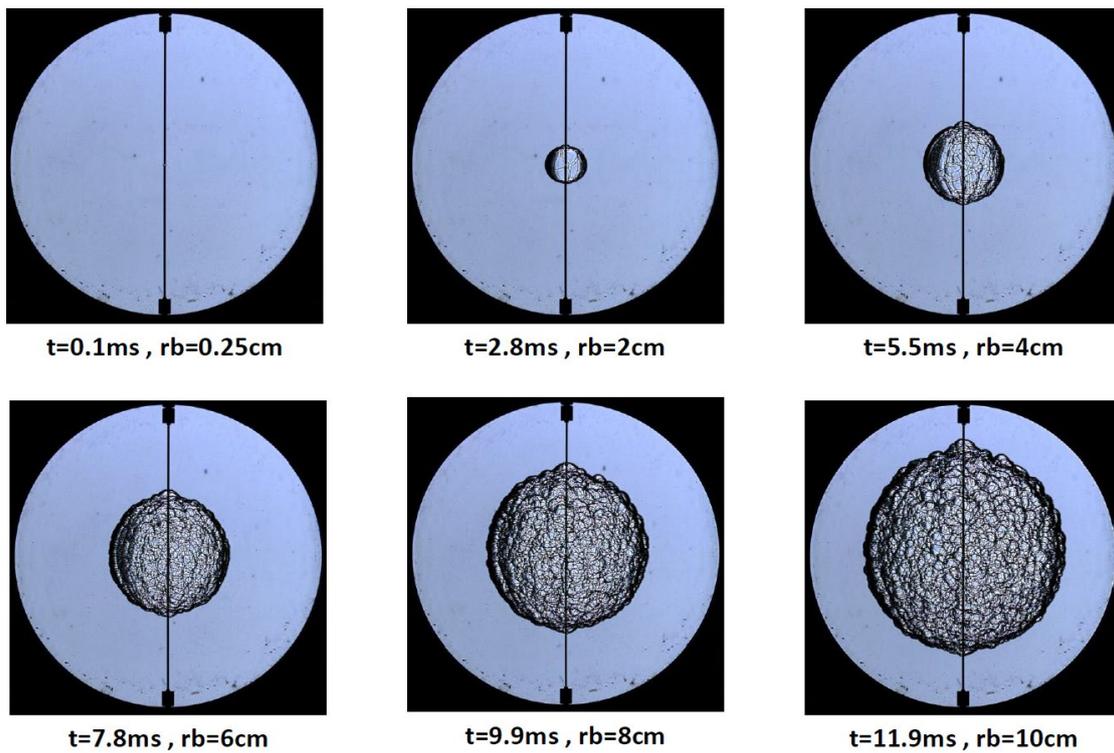


図10 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 20 vol%、メタン濃度 1 vol%)

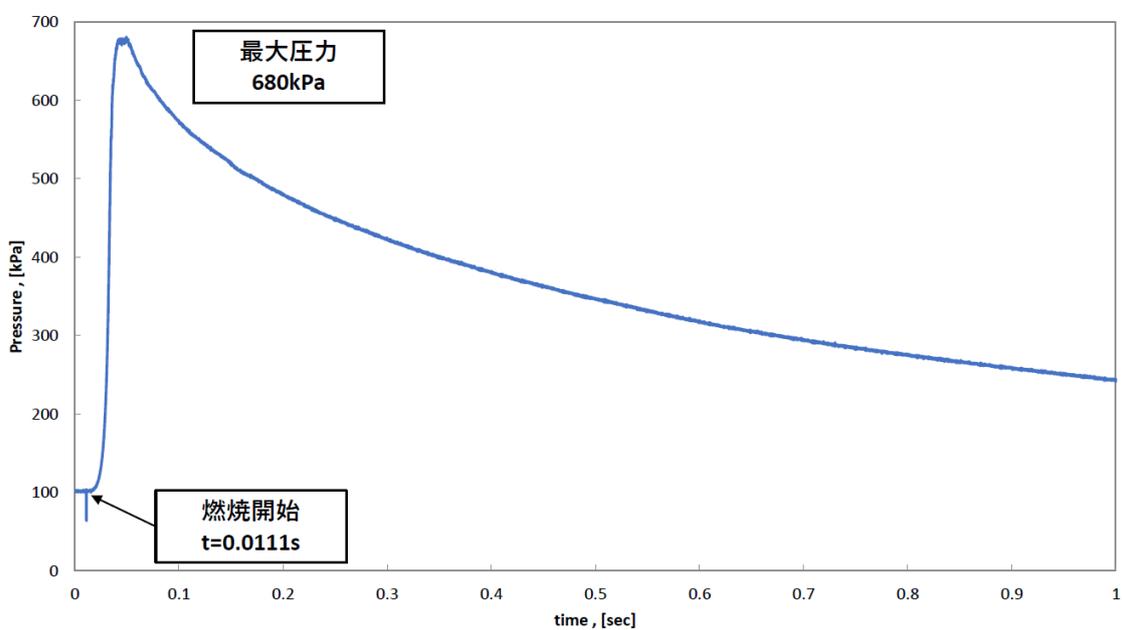
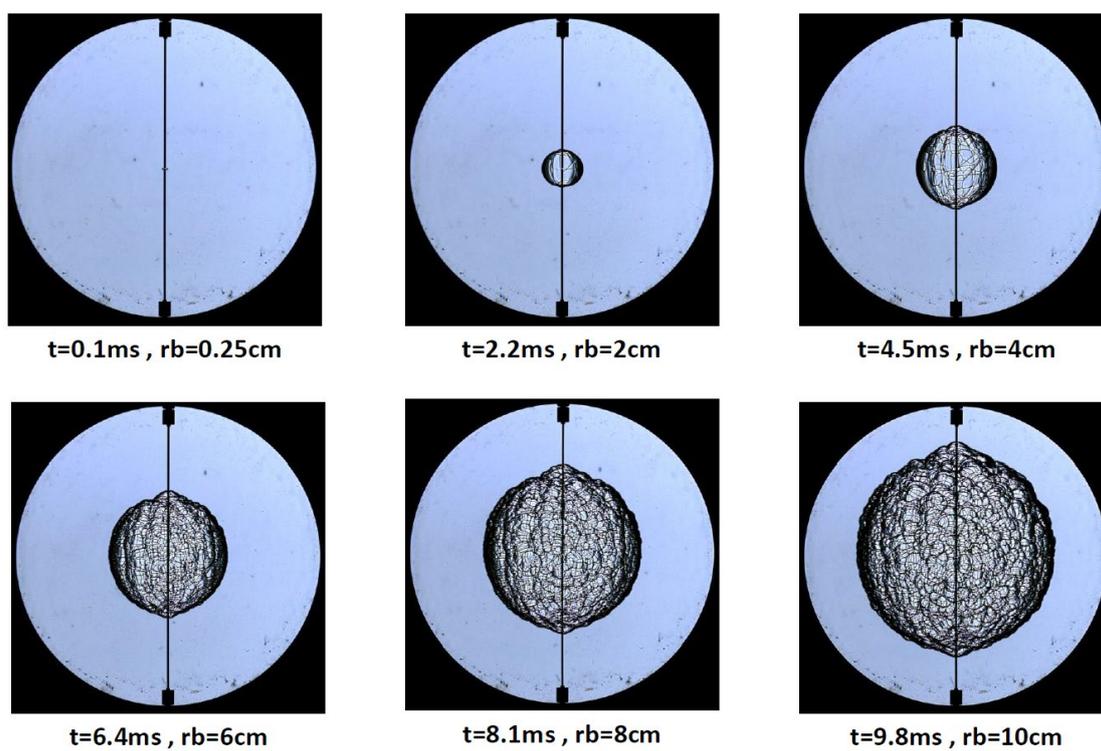


図11 デフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化
 (初期温度 25°C、初期圧力 1 気圧、水素濃度 20 vol%、メタン濃度 2 vol%)

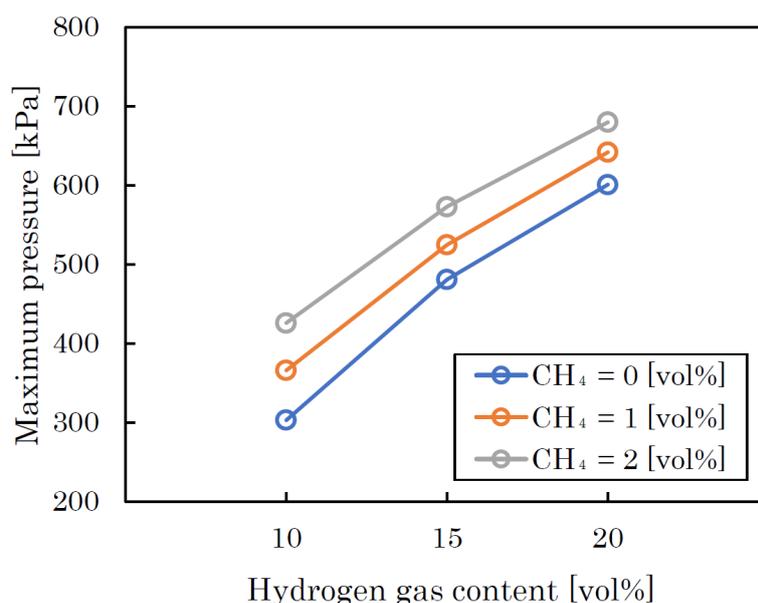


図12 容器内の最大圧力

5. まとめ

本事業では、水素、メタン及び空気の予混合気による燃焼試験を実施し、水素球状伝播火炎の動的挙動を観察し、水素濃度とメタン濃度が火炎挙動に与える影響を精査した。そして、以下の結果と知見を得た。

- ・火炎半径の増加と共に火炎面にセルが形成され、それが発達して複雑な形状になる。このセルの形成は従来の燃焼実験[5-6]でも観察され、JAEAの研究グループの数値計算[7]においても確認されている。
- ・水素濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大している。これは予混合火炎の燃焼速度が大きくなるからである。また、容器内の最大圧力は上昇する。これは断熱火炎温度が高くなるからである。
- ・メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大し、容器内の最大圧力は上昇する。前者は予混合火炎の燃焼速度が大きくなることによるもので、後者は断熱火炎温度が高くなることによるものと思われる。
- ・容器内の最大圧力は、水素濃度及びメタン濃度が高くなると共に、単調に上昇する。最大圧力の上昇は、水素爆発による破壊力の強化に結びつくことから、1Fの水素爆発における可燃性有機ガスの影響を精査することは非常に重要である。

各試験の条件下での試験回数を増やすことにより、再現性を確認すると共に、データの精度を高める必要がある。また、初期温度を上昇させて試験を実施し、その効果を定量的に明らかにすることも必要である。さらに、可燃性有機ガスの添加による最大圧力の上昇への影響を精査し、1Fの水素爆発に対する考察を深化させることは有用である。

海外の関連する組織との交流が必要である。フランスの関連組織 ICARE/CNRS は、本事業にも関係するガス爆発の分野において、水蒸気を含めたガスを扱える密閉型容器を用いて実験を遂行しており、世界でもガス爆発特性に関する知見を有する数少ない研究機関の一つである。この研究機関と水素爆発に係わる情報を交換すると共に、共同での水素爆発試験の実施等を検討することが有用である。

本事業では、実験室レベルでの水素爆発の基本的な現象を観察している。実機等における爆発現象を把握することは、次のステップとなる。その際、スケールの効果を考慮することが肝要である。

ここでは、水素及び可燃性有機ガスの予混合燃焼を取り扱っているが、拡散燃焼を取り扱い、火炎色等の確認試験を実施することが必要である。得られる試験結果は、火炎の挙動や温度分布等を明らかにすることに繋がり、1Fの水素爆発を理解する上で有用である。

具体的には、バーナーを用いた拡散燃焼を実施し、水素及び可燃性有機ガスの火炎色等確認試験を行うことになる。試験条件範囲及び測定項目としては、以下が適当と考えられる。

・試験条件範囲

試験装置：水素ガス及び可燃性有機ガス流量を調整し、拡散燃焼を一定時間維持する。

燃焼状態：拡散燃焼

水素ガス：濃度(数 vol%～数十 vol%)に関して、複数項目

可燃性有機ガス(メタン)：濃度(数 vol%～数十 vol%)に関して、複数項目

・測定項目

水素ガス及び可燃性有機ガスの流量及び温度、記録用カメラによる燃焼挙動

赤外線放射温度計等による火炎の温度分布

水素及び可燃性有機ガスの拡散燃焼について、バーナー等の試験装置を組み立て、予備的な試験を行った。火炎色等確認試験により、火炎の挙動や温度分布等が明らかになり、それらは1Fの水素爆発を理解する上で有用となる。

6. 参考文献

1. 原子力規制委員会, 東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ, 令和3年3月5日, <https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>
2. Williams, F. A., *Combustion Theory*, Second Edition (1985), p. 349, Addison-Wesley, Reading, CA.
3. Lewis, B. and Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Third Edition (1987), p. 396, Academic Press, Orlando, FL.
4. Law, C. K., *Combustion Physics* (2006), p. 41, Cambridge University Press, New York, NY.
5. Lamoureux, N., Chaumeix, N., Paillard, C. E., Laminar flame velocity determination for H₂-air-He-CO₂ mixtures using the spherical bomb method, *Experimental Thermal and Fluid Science* (2003), Vol. 27, pp. 385-393.
6. Katsumi, T., Kobayashi, H., Aida, T., Aiba, K., Kadowaki, S., Outward propagation velocity and acceleration characteristics in hydrogen-air deflagration, *International Journal of Hydrogen Energy* (2017), Vol. 42, pp. 7360-7365.
7. Thwe Thwe Aung, Terada, A., Hino R., Nagaishi, R., and Kadowaki, S., Simulation of the self-propagating hydrogen-air premixed flame in a closed-vessel by an open-source CFD code, *Journal of Nuclear Science and Technology* (2022), Vol. 59, No. 5, pp. 573-579.

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。