



第43回 1F事故分析検討会

資料 1 - 3

令和6年3月12日

令和5年度原子力施設等防災対策等委託費事業

**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**

国立大学法人 長岡技術科学大学
技学研究院 システム安全系

門脇 敏

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爆発現象に関して、水素濃度等及び可燃性有機ガス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濃度、初期ガス温度をパラメータとして、火炎色等確認試験(拡散燃焼試験)及び予混合燃焼試験を計画し実施する。

実施内容(予混合燃焼)

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。試験パラメータは水素濃度及び初期温度とし、6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、燃焼時圧力上昇に耐え、口径30cm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%

初期温度:25 °C、75 °C

・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等

実施内容(予混合燃焼)

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。試験パラメータは、ガス濃度(水素及び可燃性有機ガス)及び初期温度とし、12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、燃焼状態、着火位置は①と同様)

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%

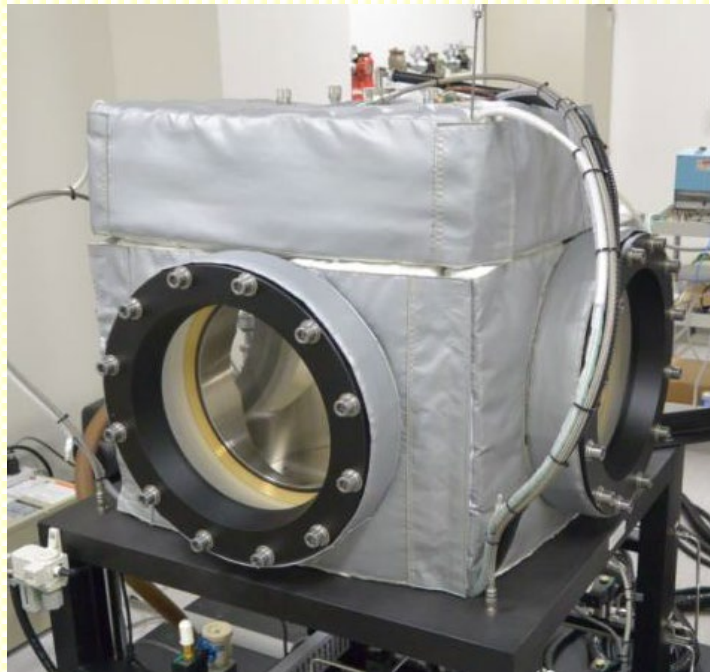
初期温度: 25 °C、75 °C

・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等

試験装置(予混合燃焼)

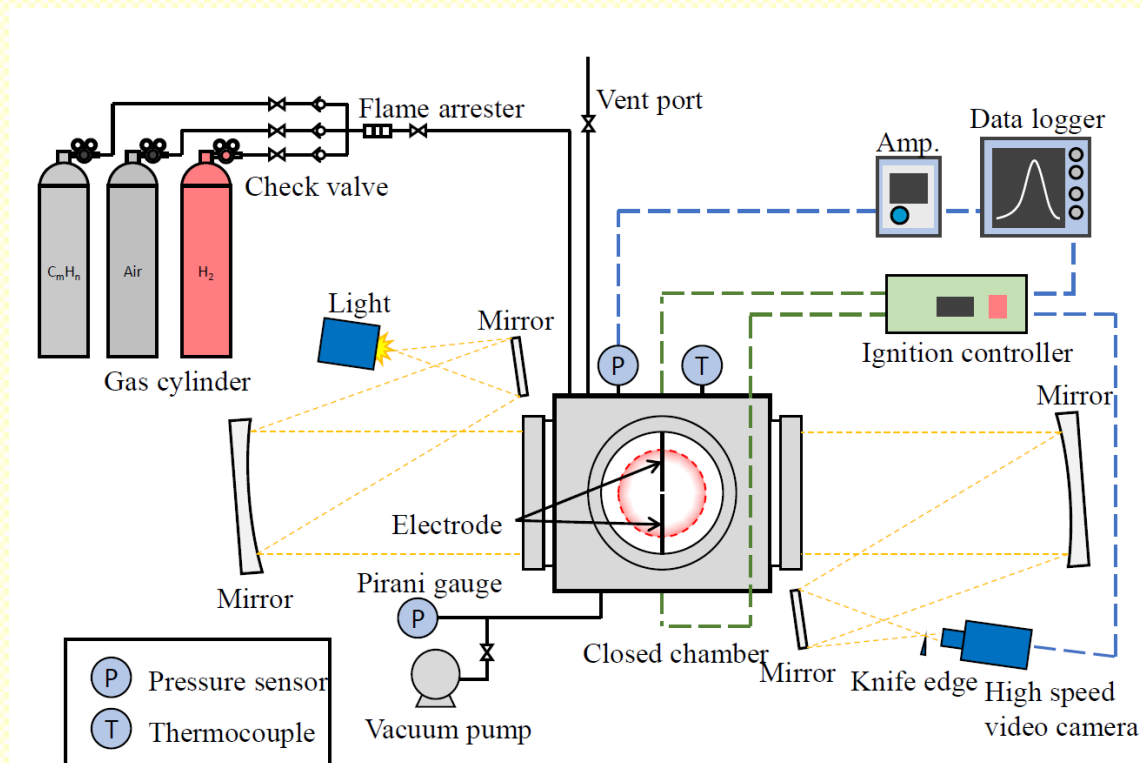
密閉型燃焼容器



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

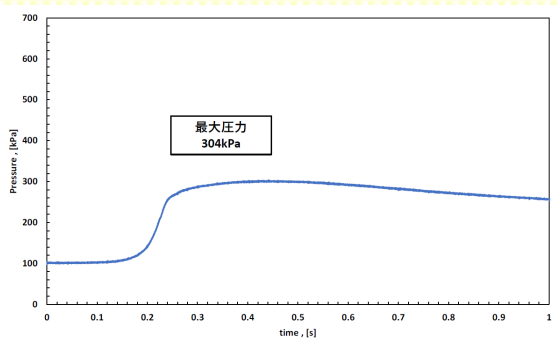
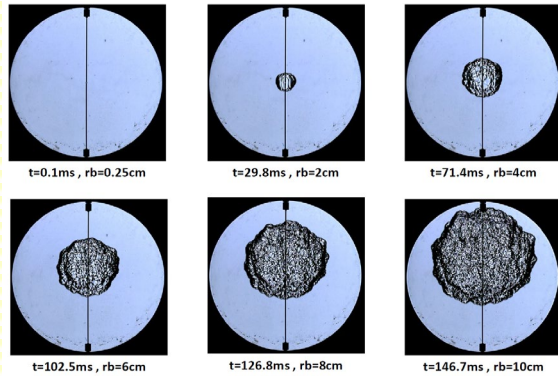
試験装置(予混合燃焼)

燃焼試験システム

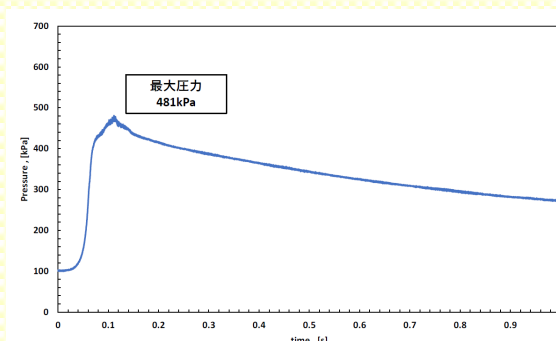
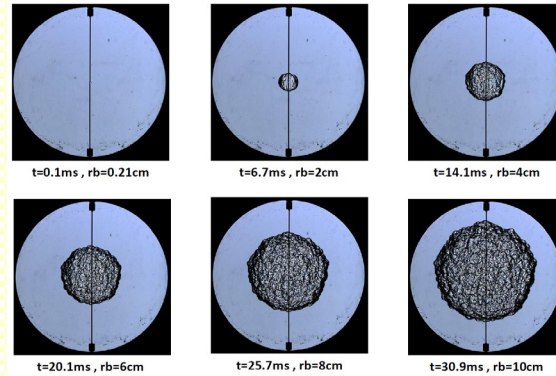


試験成果(予混合燃焼)

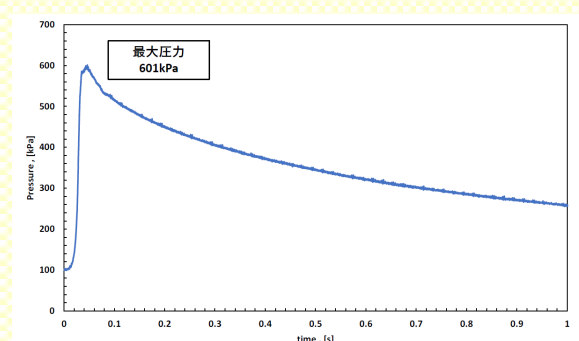
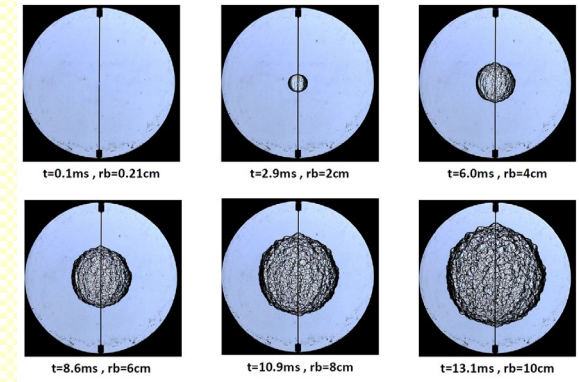
初期温度: 25 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)



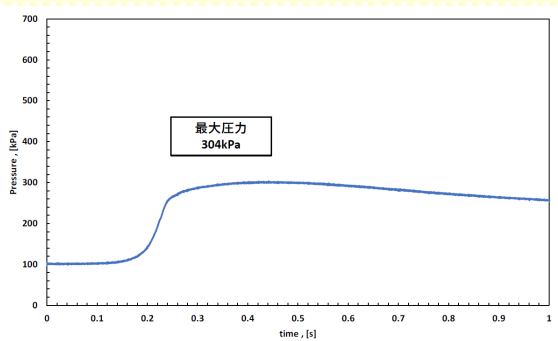
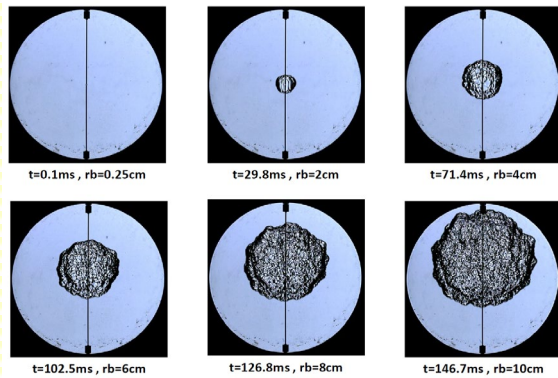
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 0 vol%)



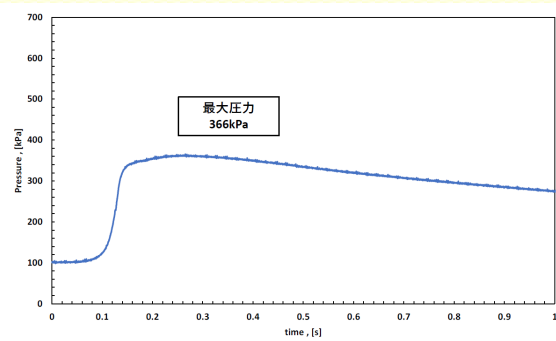
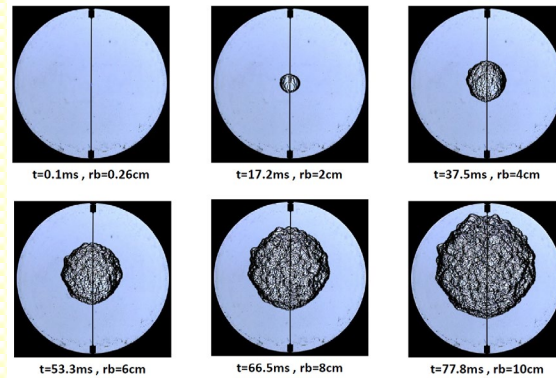
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 0 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

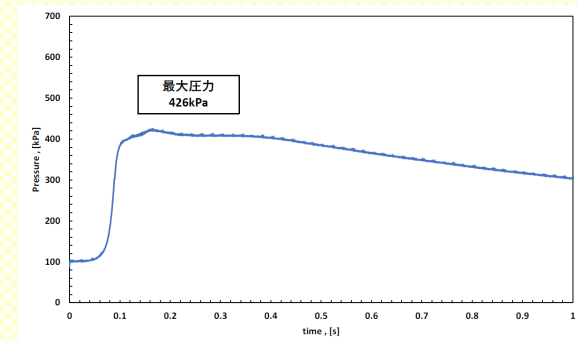
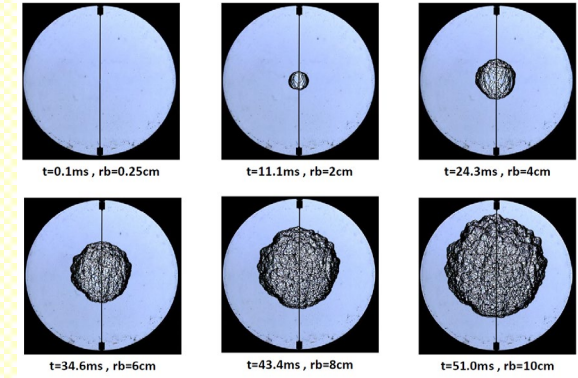
初期温度: 25 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)



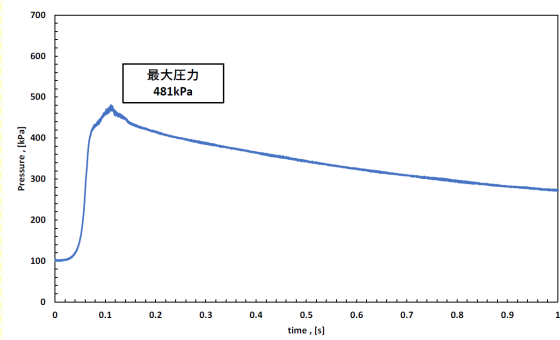
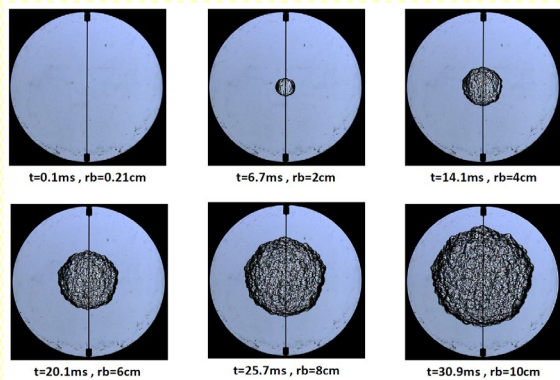
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 1 vol%)



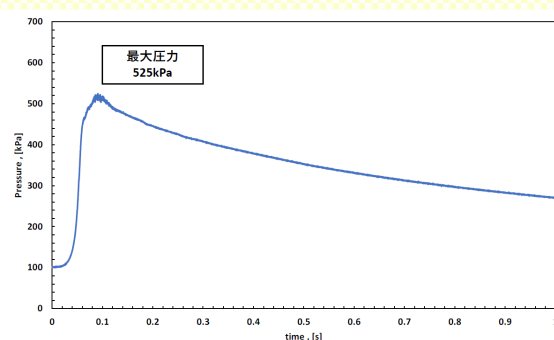
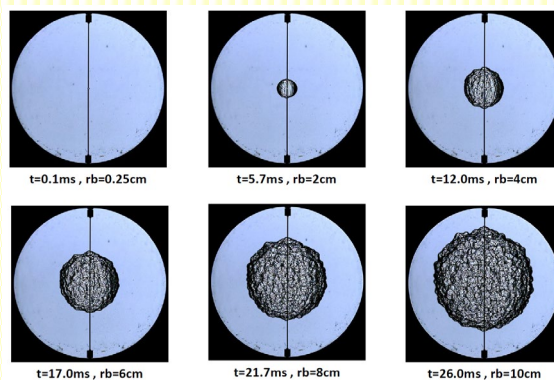
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

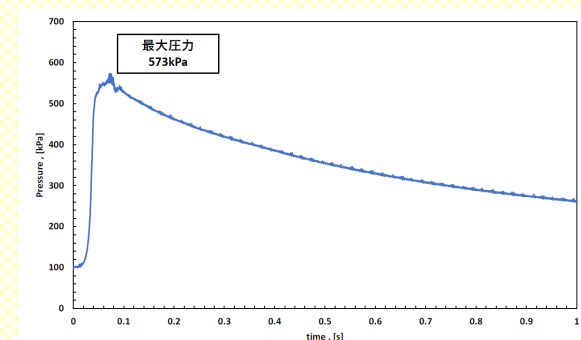
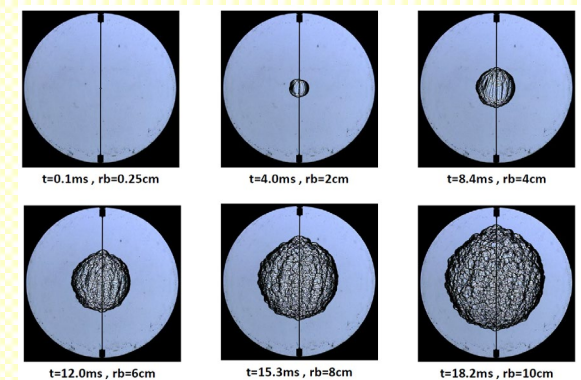
初期温度: 25 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 0 vol%)



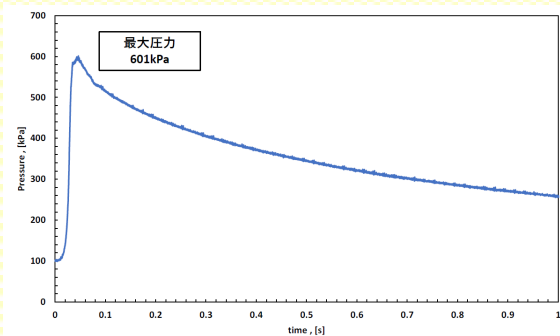
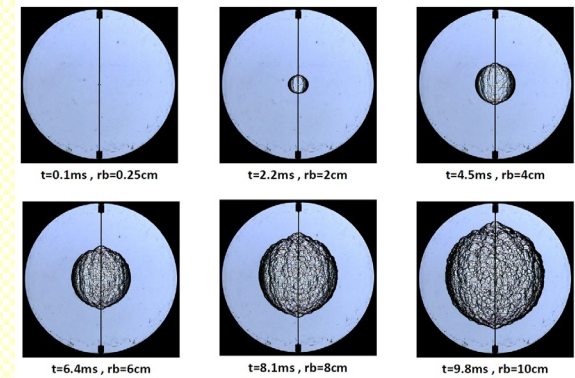
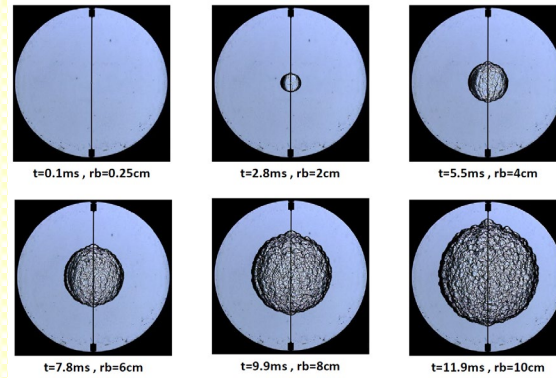
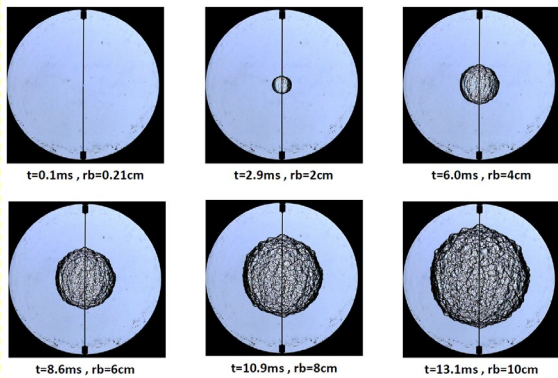
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 1 vol%)



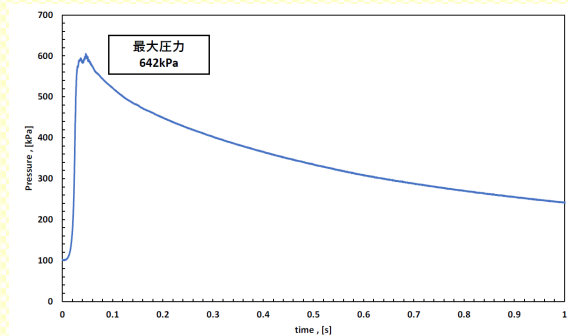
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

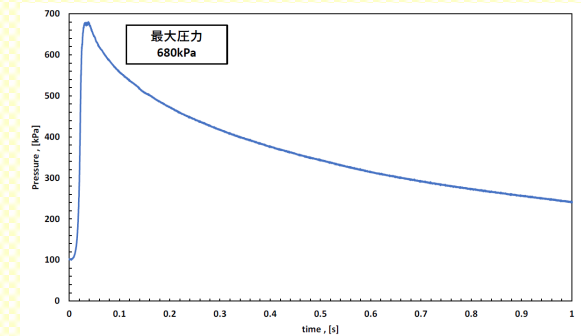
初期温度: 25 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 0 vol%)



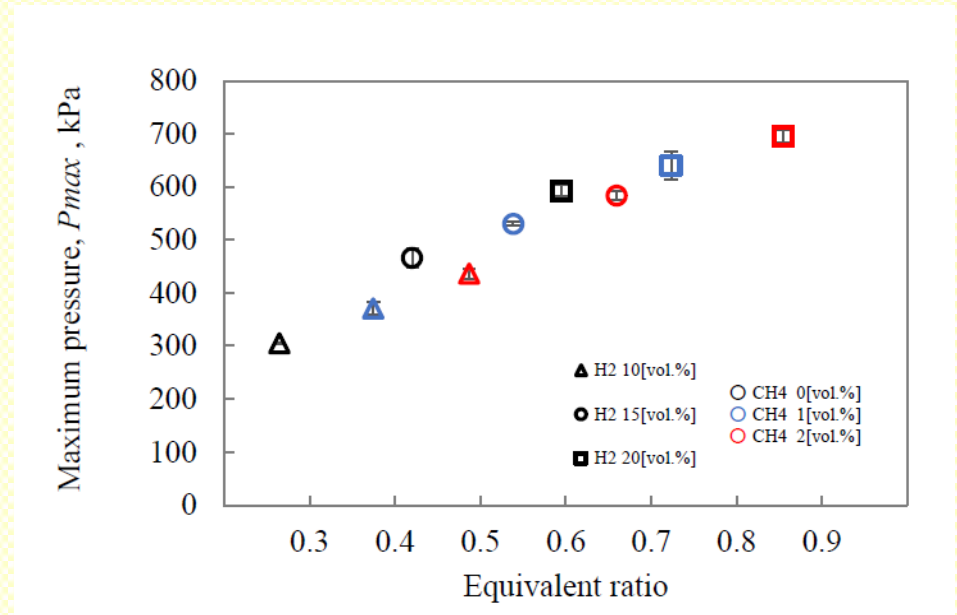
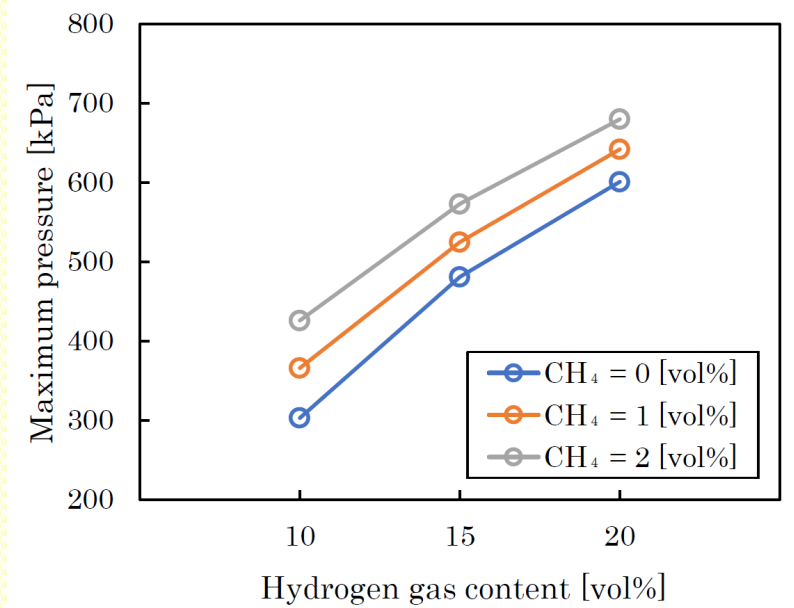
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 1 vol%)



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

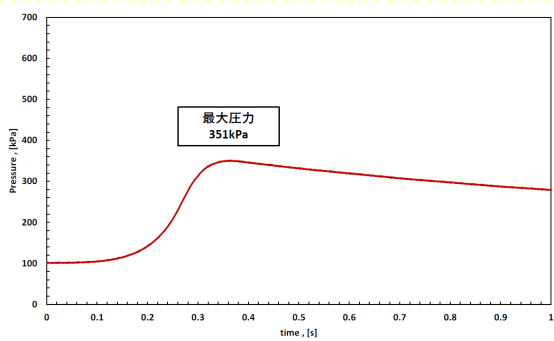
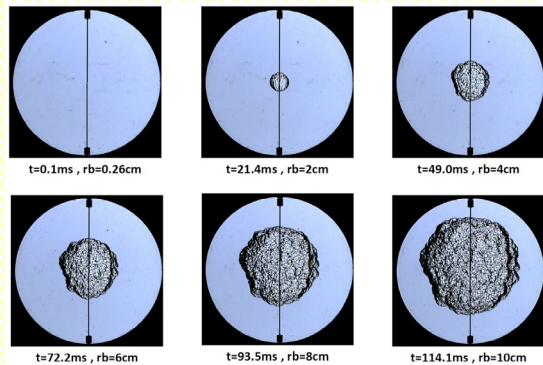
初期温度: 25 °C



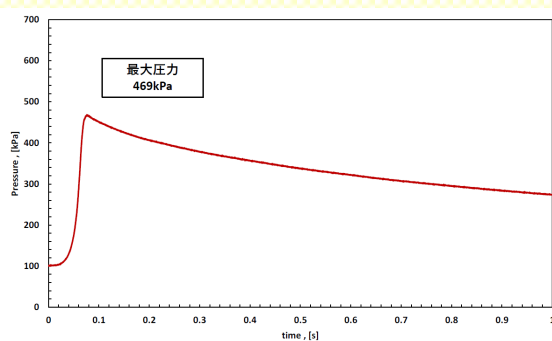
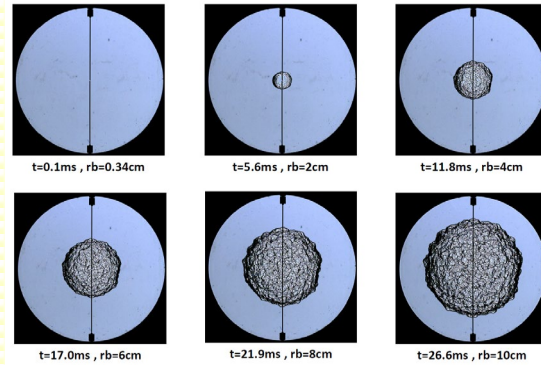
容器内の最大圧力

試験成果(予混合燃焼)

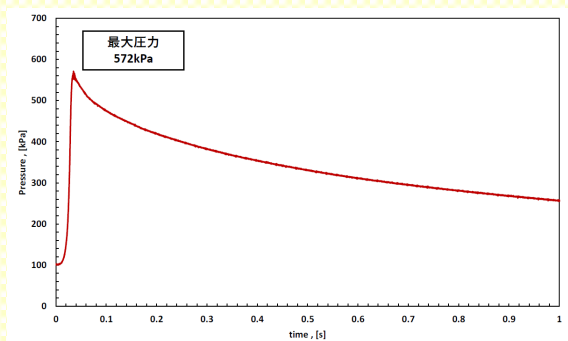
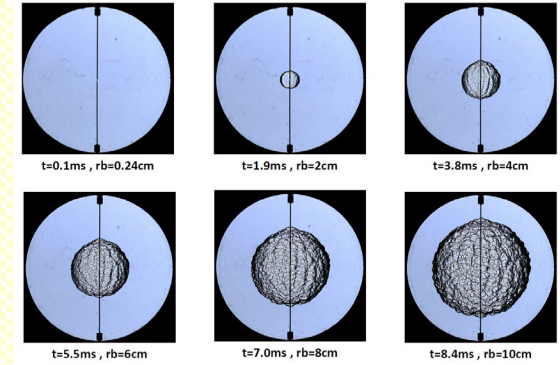
初期温度: 75 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)



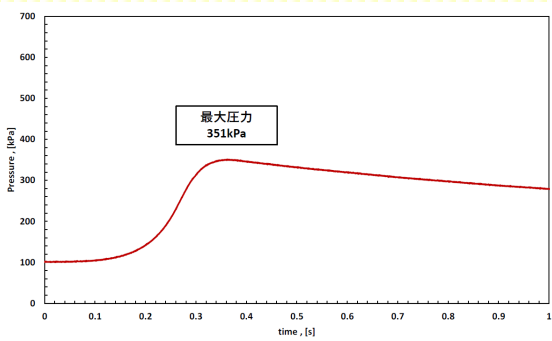
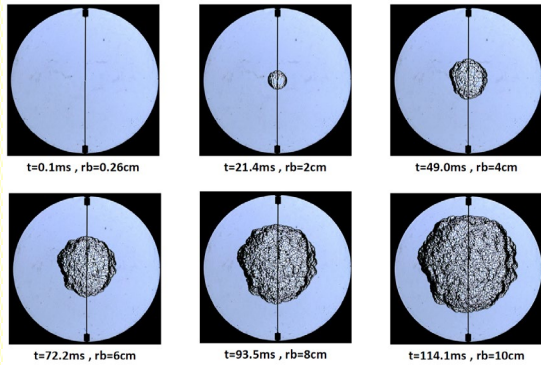
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 0 vol%)



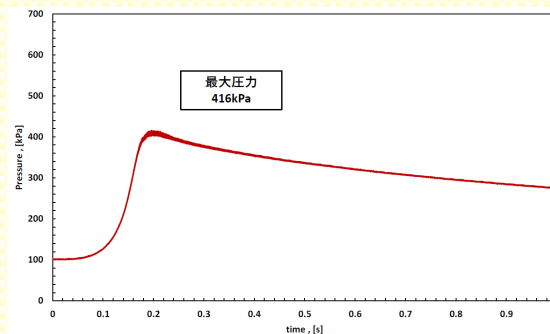
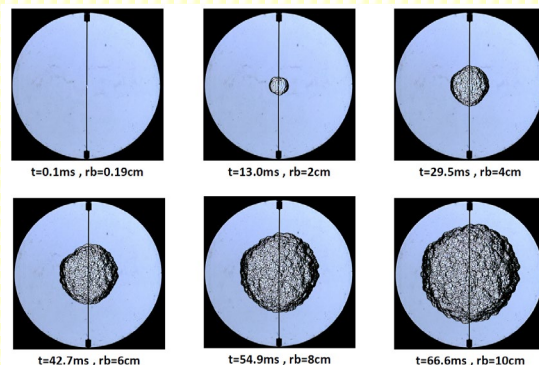
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 0 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

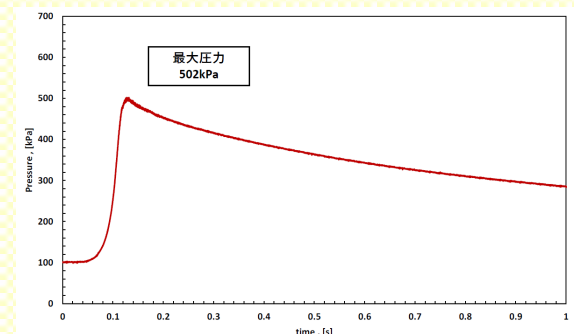
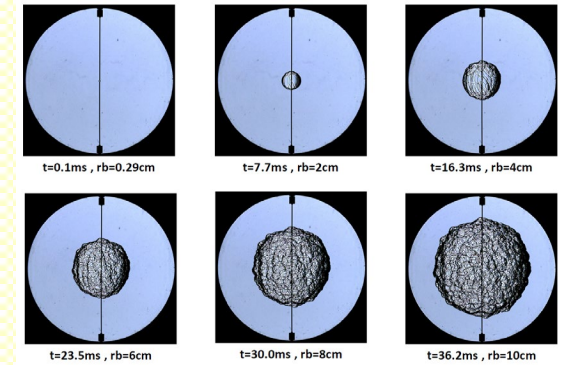
初期温度: 75 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)



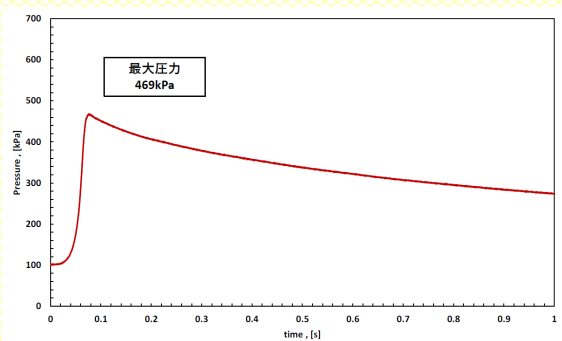
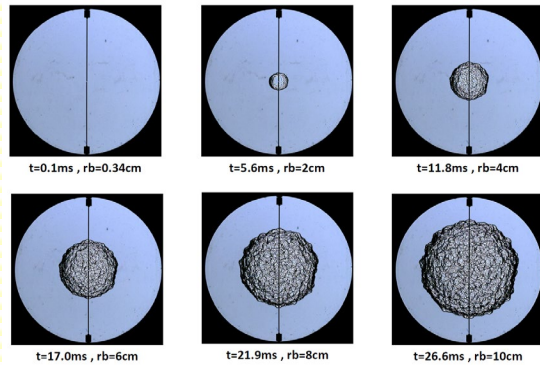
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 1 vol%)



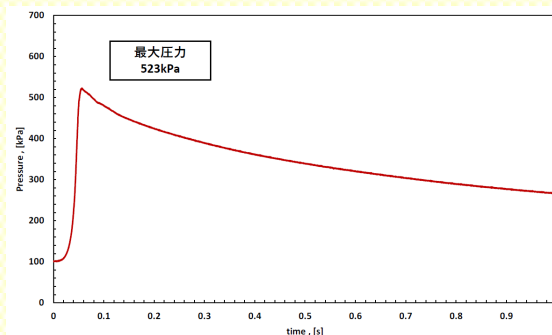
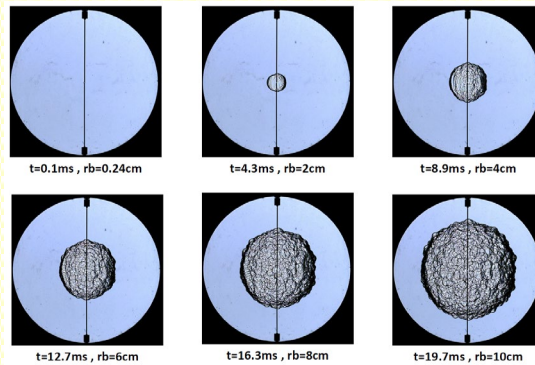
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

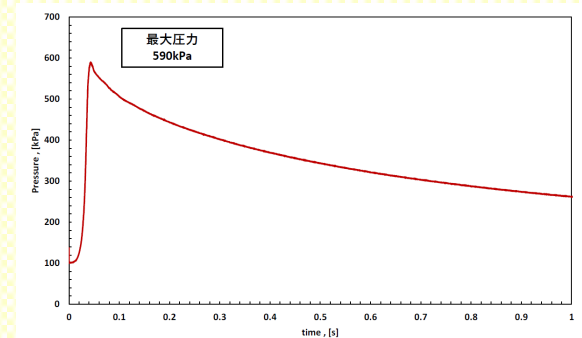
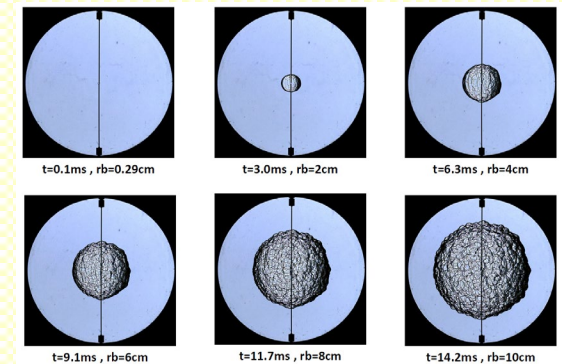
初期温度: 75 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 0 vol%)



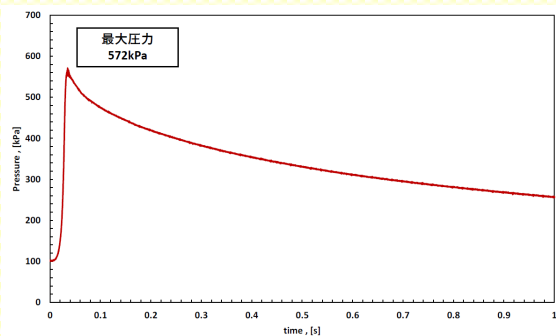
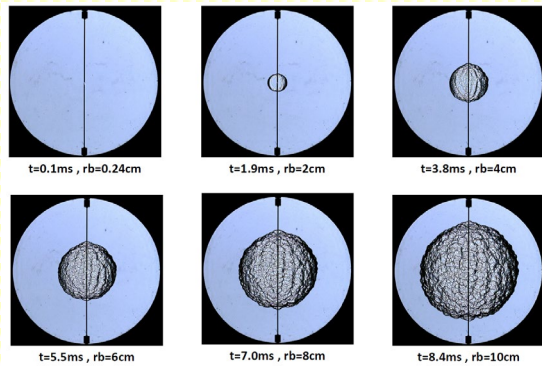
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 1 vol%)



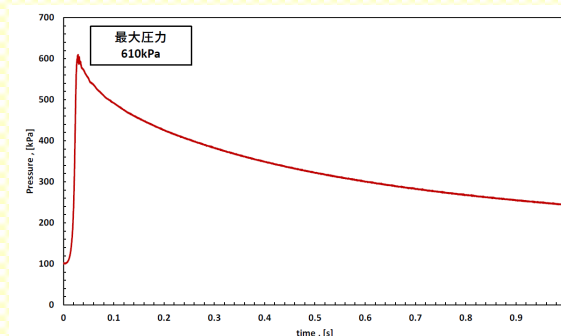
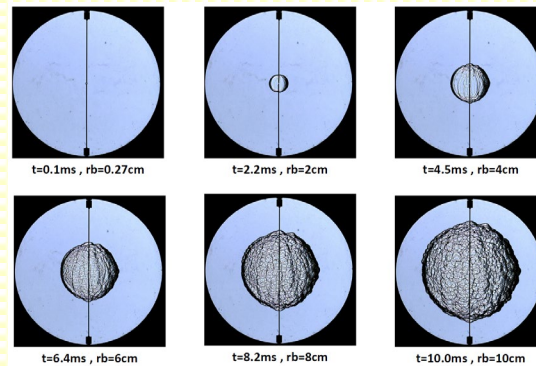
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

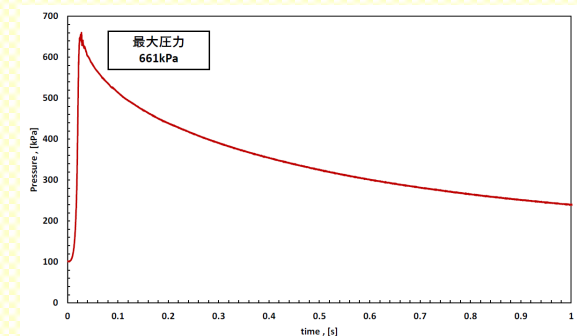
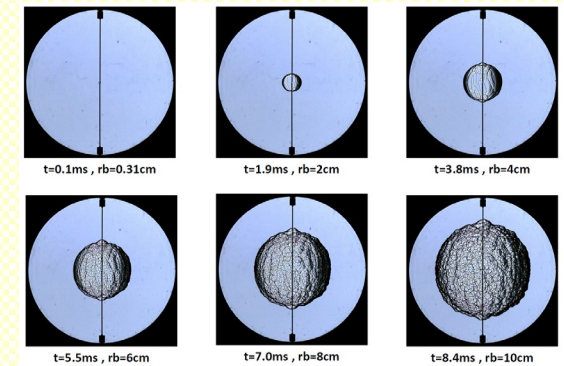
初期温度: 75 °C



シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 0 vol%)



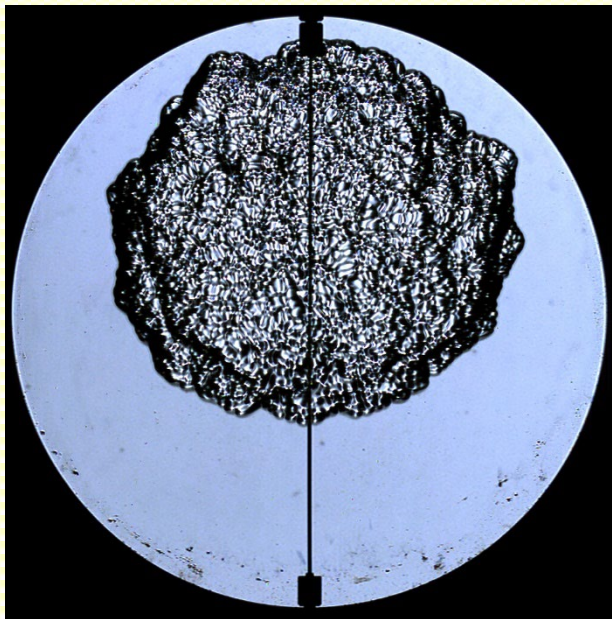
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 1 vol%)



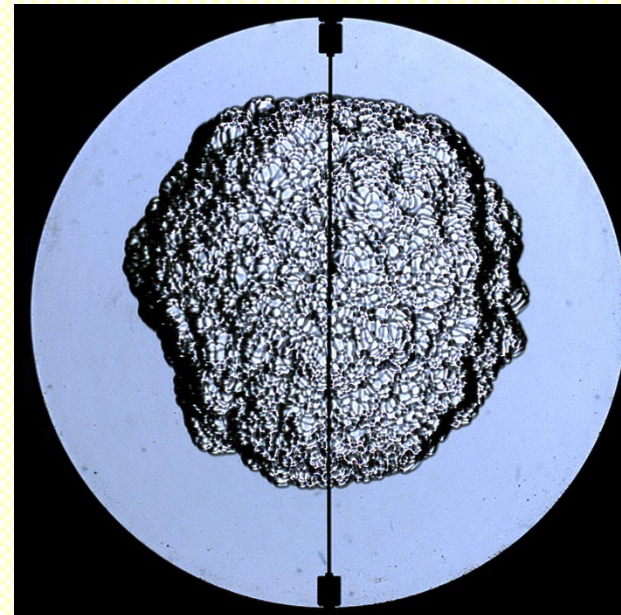
シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度 20 vol%、メタン濃度 2 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

初期温度: 25°C



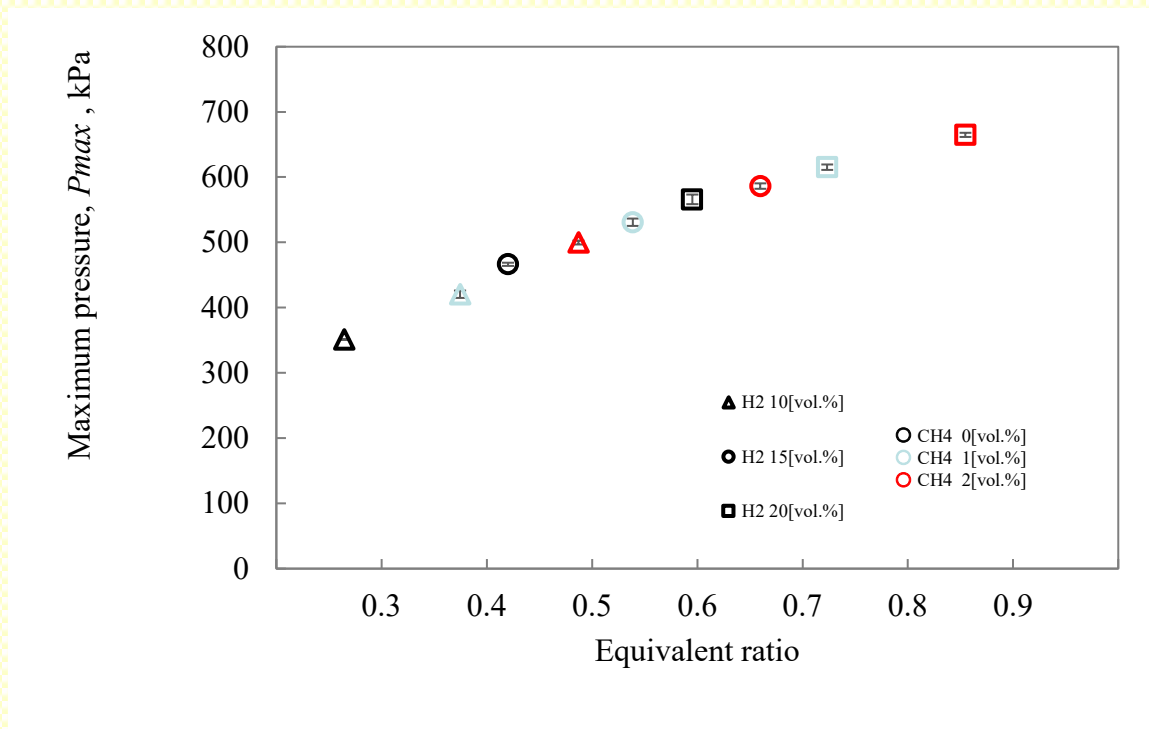
初期温度: 75 °C



シュリーレン画像
(水素濃度 10 vol%、メタン濃度 0 vol%)

試験成果(予混合燃焼)

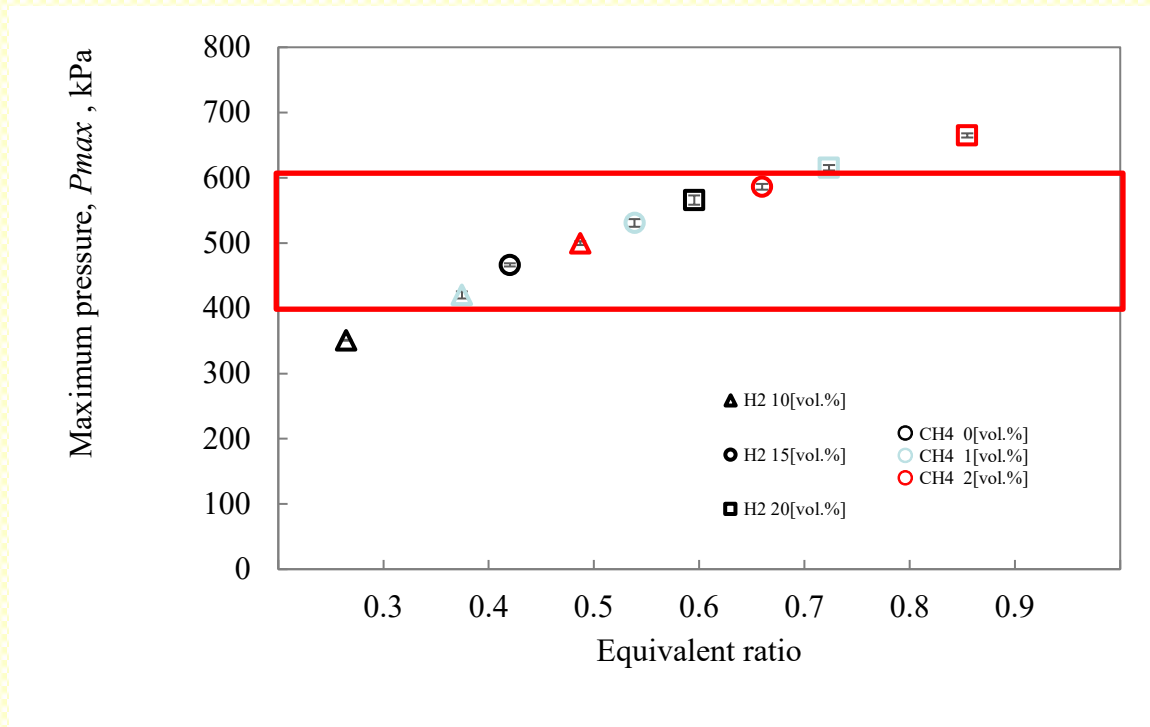
初期温度: 75 °C



容器内の最大圧力

試験成果(予混合燃焼)

初期温度: 75 °C



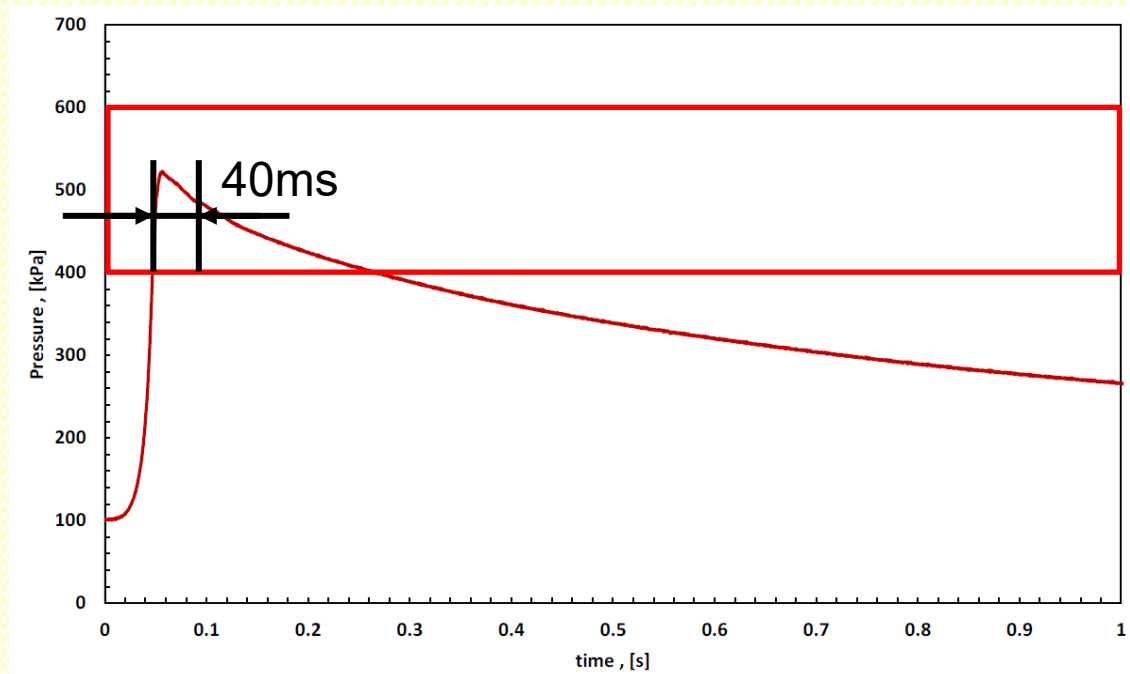
防衛大学校市野先生の解析
〈2021年中間取りまとめ〉

3号機3階天井部の梁の損傷に関して, 大梁とその周囲の床板に300~500kPa(ゲージ圧)程度の圧力が20~40ms程度の間作用すると, 大梁に観察された変形と同程度の変形が生じる。

容器内の最大圧力

試験成果(予混合燃焼)

圧力変化(初期温度: 75 °C)



容器内圧力変化

(水素濃度 15 vol%、メタン濃度 1 vol%)

防衛大学校市野先生の解析
〈2021年中間取りまとめ〉

3号機3階天井部の梁の損傷
に関して、大梁とその周囲の
床板に300~500kPa(ゲージ
圧)程度の圧力が20~40ms
程度の間作用すると、大梁に
観察された変形と同程度の変
形が生じる。

試験成果(予混合燃焼)

初期温度 [°C]	水素濃度 [%]	メタン濃度 [%]	最高圧力 [kPa]	初期温度 [°C]	水素濃度 [%]	メタン濃度 [%]	最高圧力 [kPa]
25	10	0	305.1	75	10	0	351.1
	10	1	370.7		10	1	420.5
	10	2	436.4		10	2	499.7
	15	0	466.3		15	0	466.4
	15	1	530.4		15	1	530.8
	15	2	583.7		15	2	586.3
	20	0	592.5		20	0	565.8
	20	1	640.0		20	1	615.2
	20	2	695.3		20	2	664.8

フランスICARE/CNRSとの共同研究

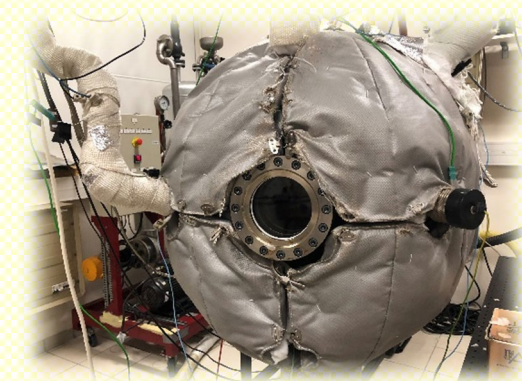
海外の関連する組織との交流が必要である。フランスの関連組織ICARE/CNRSは、本事業にも関係するガス爆発の分野において、水蒸気を含めたガスを扱える密閉型容器を用いて実験を遂行しており、世界でもガス爆発特性に関する知見を有する数少ない研究機関の一つである。この研究機関と水素爆発に係わる情報を交換すると共に、共同での水素爆発試験の実施等を検討することが有用である。

In the near future, if accepted, we would like to perform the experiments to elucidate the effects of inert gas, i.e. **water vapor** and **nitrogen**, on the dynamic behavior of hydrogen/methane/air lean premixed flames.

Effects of water vapor --> ICARE/CNRS, France

Effects of nitrogen --> Our university, NUT, Japan

We hope Japanese-French collaborative research !!



Chamber at ICARE/CNRS

実施内容(拡散燃焼)

火炎色等確認試験(拡散燃焼)の計画及び実施

水素及び可燃性有機ガスの火炎色等確認試験(拡散燃焼)の計画及び試験を行う。試験条件範囲及び測定項目を以下に示す。

・試験条件範囲

試験装置: ガス流量を調整し、拡散燃焼を一定時間維持

燃焼状態: 拡散燃焼

水素濃度: 0 vol% ~ 100 vol%

可燃性有機ガス(メタン)濃度: 0 vol% ~ 100 vol%

不活性ガス(窒素)濃度: 0 vol% ~ 50 vol%

・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(火炎色及び煙・煤等)、赤外線放射温度計等による火炎の温度分布

試験装置(拡散燃焼)

ブンゼンバーナー



バーナー内径: 11 mm

実験条件

総流量 Q : 1.0L/min (流速: 0.18m/s), 2.0L/min (流速: 0.35m/s)

$H_2-CH_4-N_2$: 100-0-0, 90-10-0, 70-30-0, 50-50-0,
 30-70-0, 10-90-0, 0-100-0 [%]

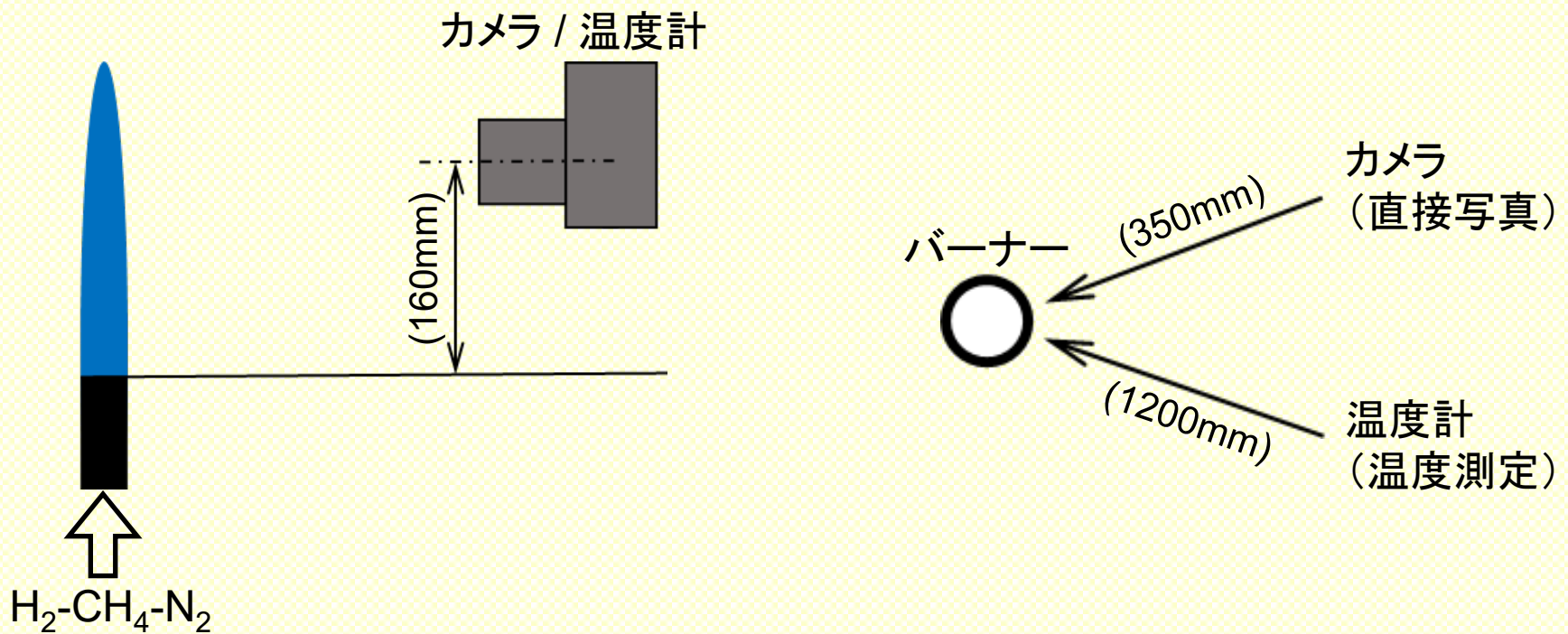
75-0-25, 67.5-7.5-25, 52.5-22.5-25, 37.5-37.5-25,
 22.5-52.5-25, 7.5-67.5-25, 0-75-25 [%]

50-0-50, 45-5-50, 35-15-50, 25-25-50,
 15-35-50, 5-45-50, 0-50-50 [%]

撮影条件

シャッタースピード [s]	1/15
F値	7.1
ISO感度	4000

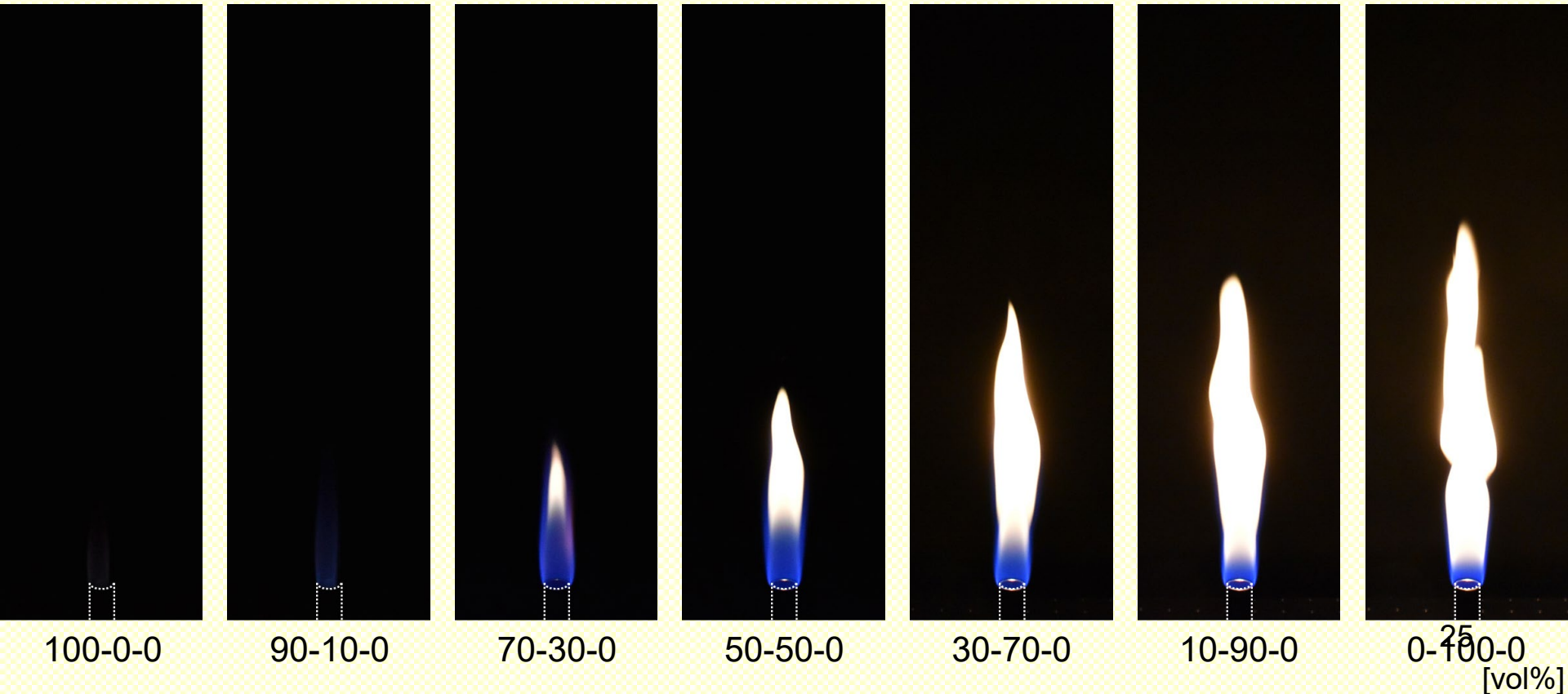
試験装置(拡散燃焼)



試験成果(拡散燃焼)

直接写真 水素-メタン火炎 総流量1.0L/min

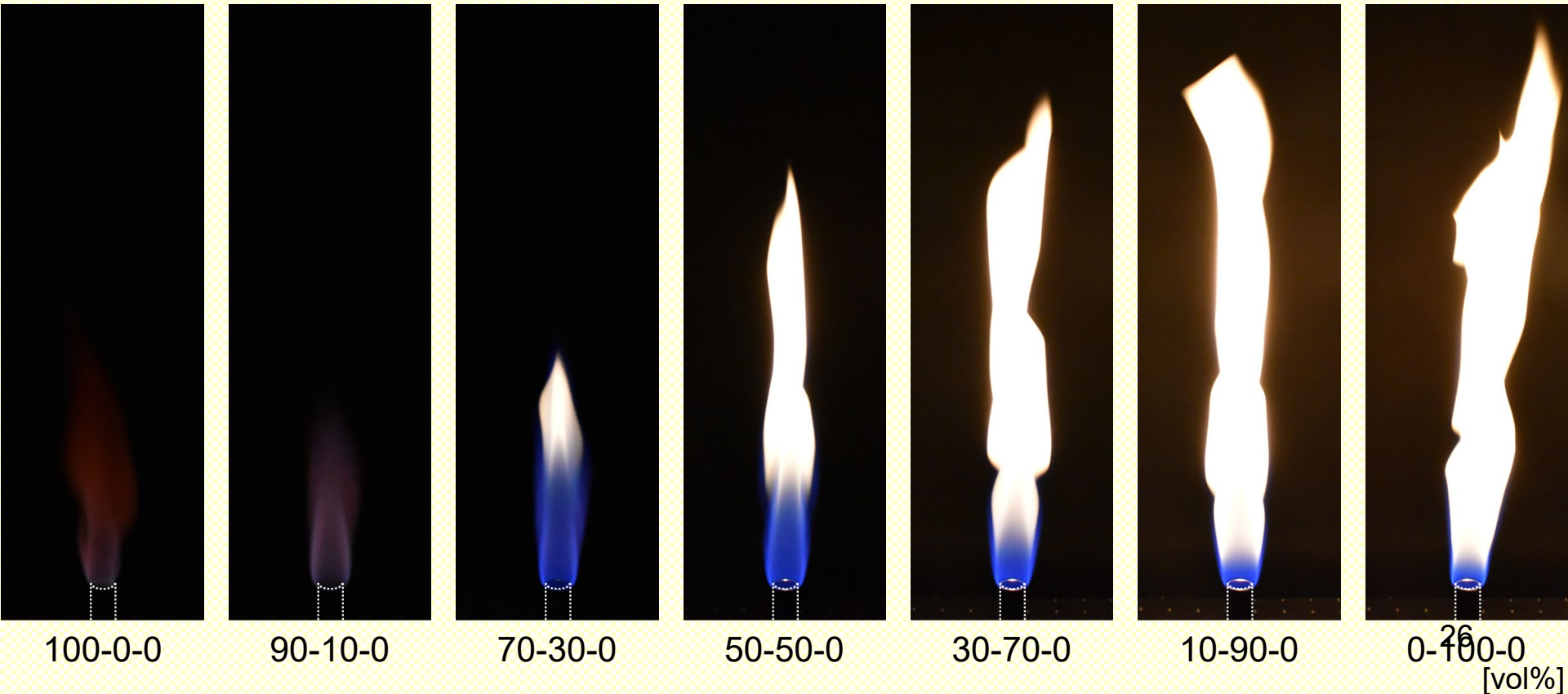
シャッタースピード : 1/15 [s]



試験成果(拡散燃焼)

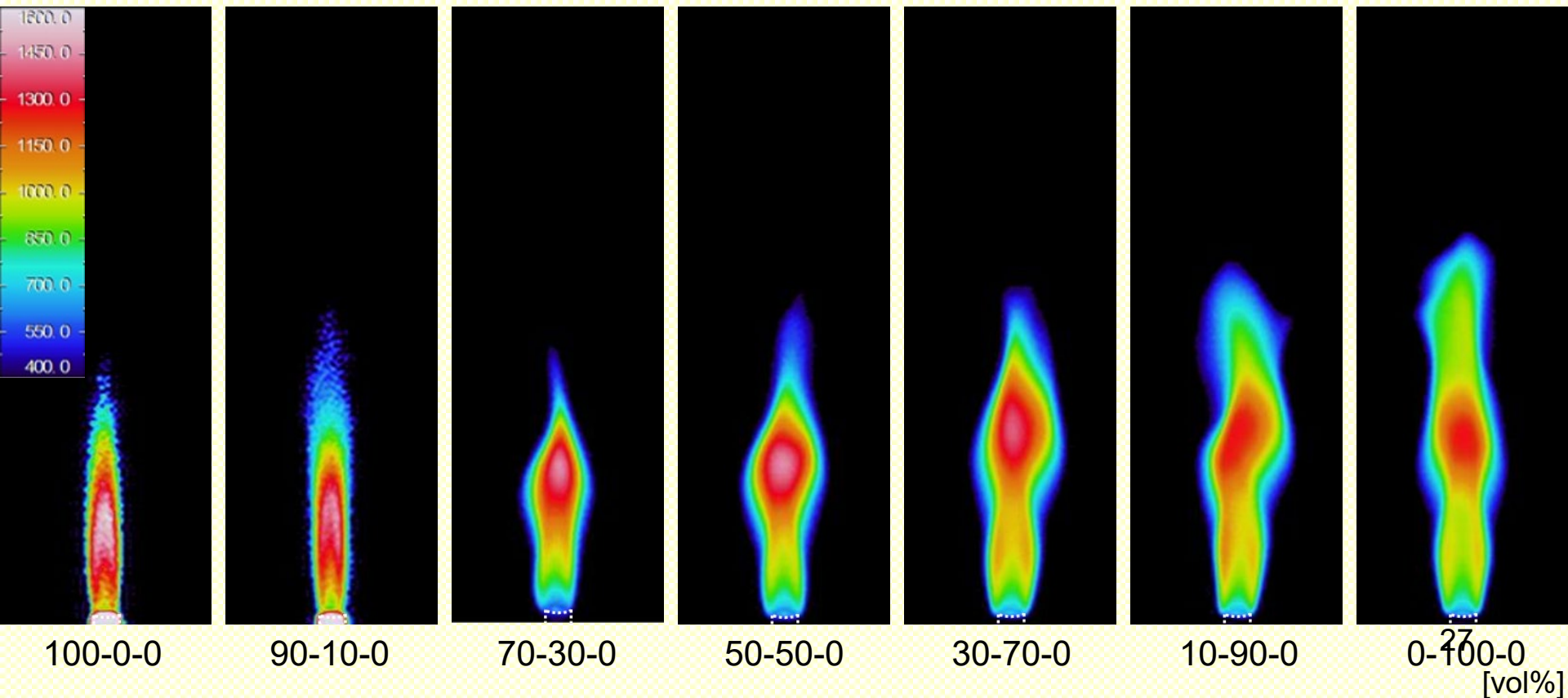
直接写真 水素-メタン火炎 総流量2.0L/min

シャッタースピード : 1/15 [s]



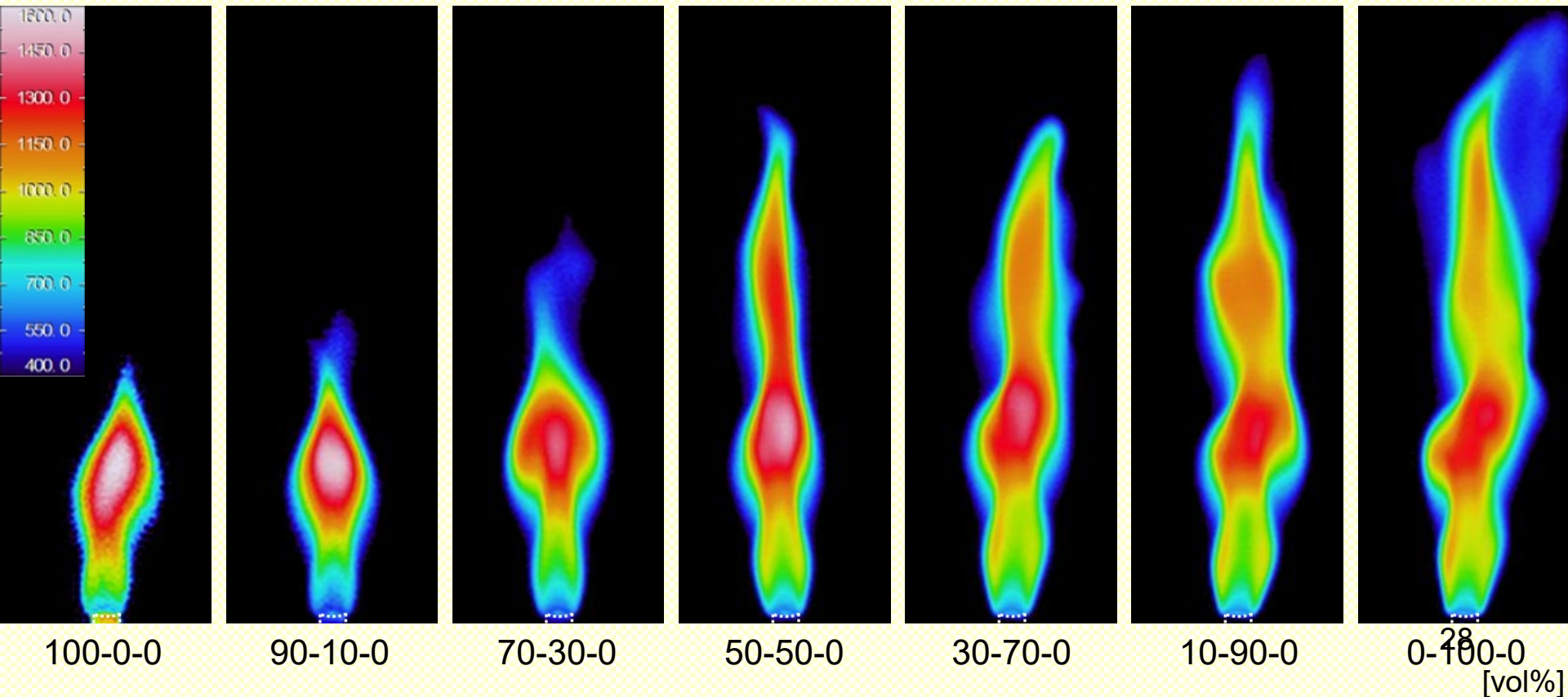
試験成果(拡散燃烧)

温度分布 水素-メタン火炎 総流量1.0L/min



試験成果(拡散燃烧)

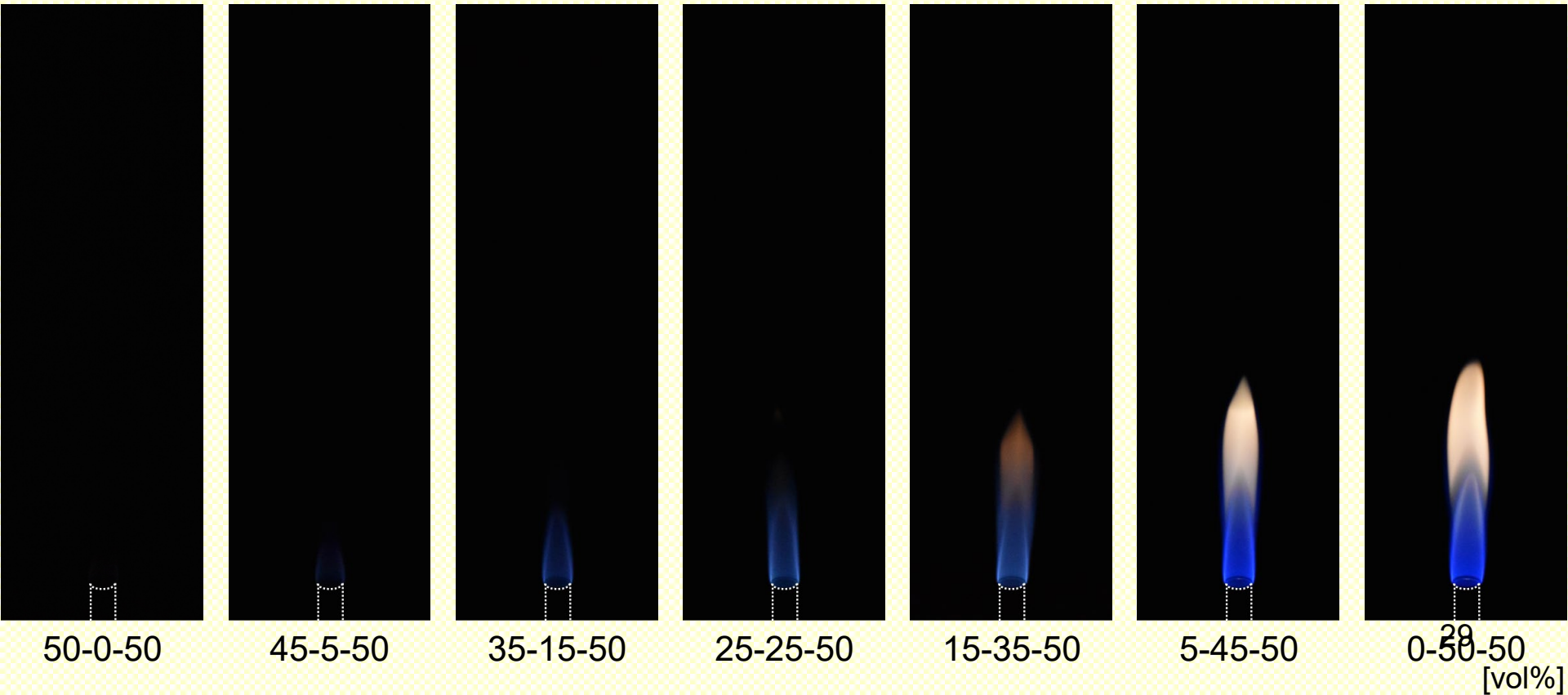
温度分布 水素-メタン火炎 総流量2.0L/min



試験成果(拡散燃焼)

直接写真 水素-メタン-窒素火炎 総流量1.0L/min

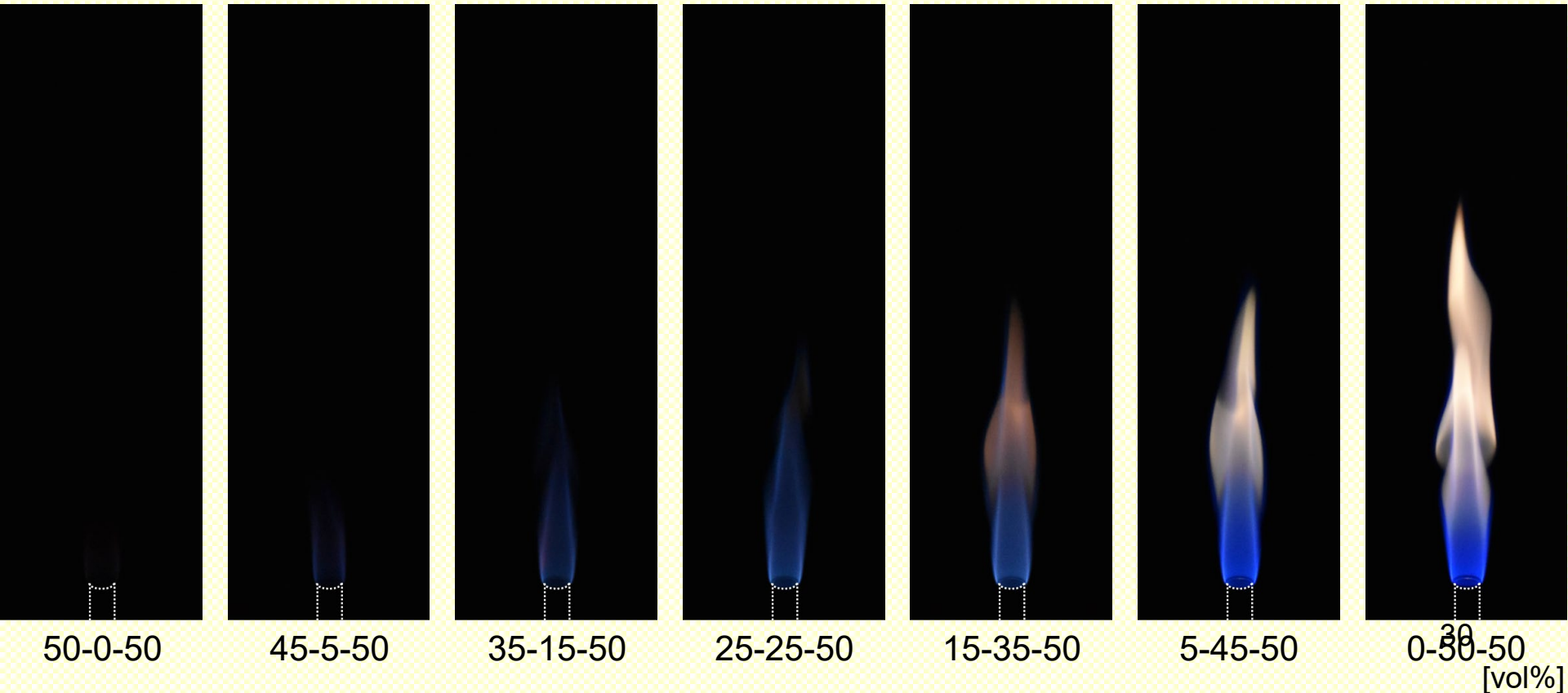
シャッタースピード : 1/15 [s]



試験成果(拡散燃焼)

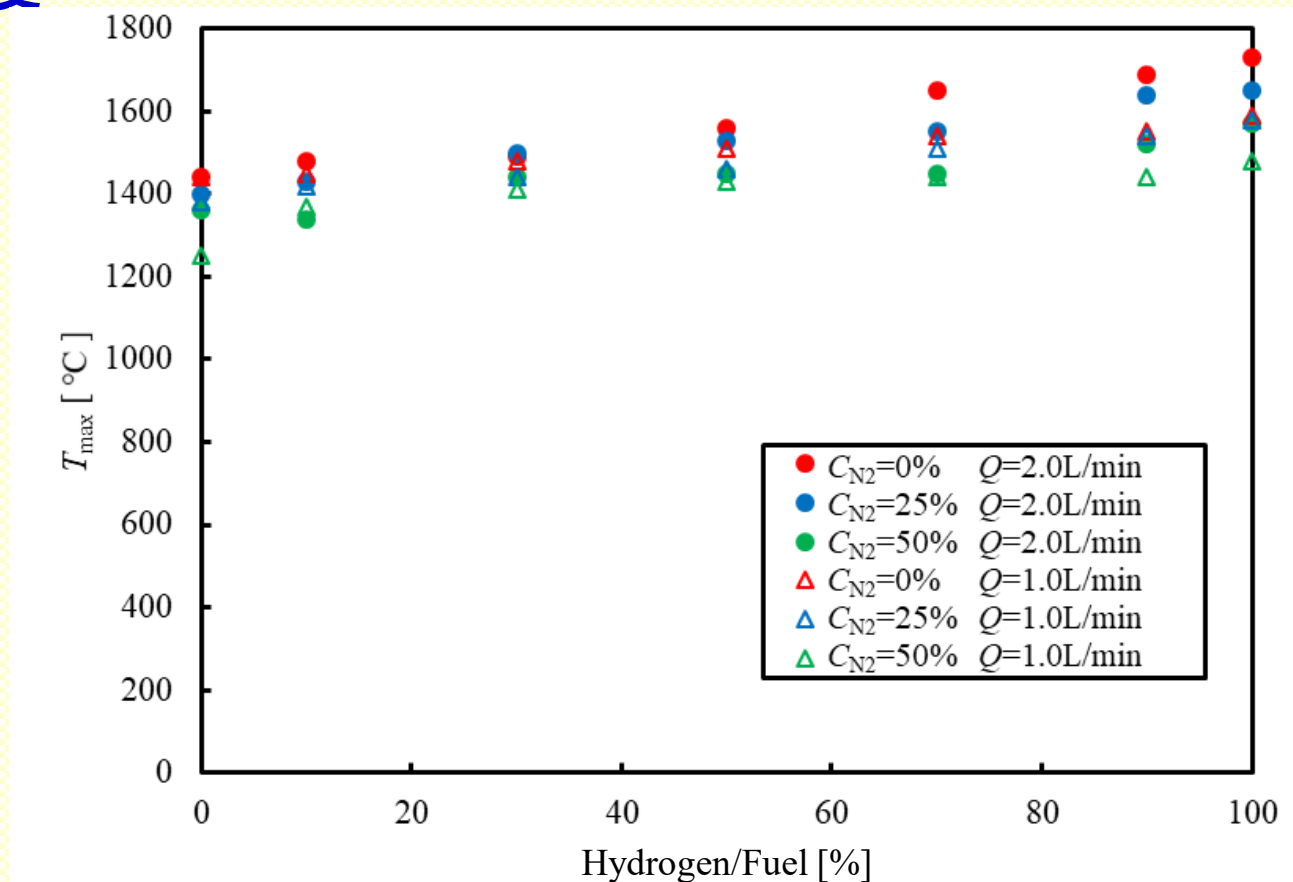
直接写真 水素-メタン-窒素火炎 総流量2.0L/min

シャッタースピード : 1/15 [s]



試験成果(拡散燃焼)

最高温度



まとめ

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爆発現象に関して、水素濃度等及び可燃性有機ガス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濃度、初期ガス温度をパラメータとして、火炎色等確認試験（拡散燃焼試験）及び予混合燃焼試験を計画し実施した。そして、以下の結果と知見を得た。

（予混合燃焼）

- ・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。セルの形成は、火炎の固有不安定性によるものである。
- ・水素濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大する。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。これは混合気の発熱量が大きくなり、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、後者は火炎温度が高くなることによるものである。

まとめ

- ・初期温度が高くなると、火炎の伝播速度は増大する。これは予混合火炎の燃焼速度が大きくなるからである。
- ・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(つまり当量比が大きくなる)と共に、ほぼ単調に上昇する。これは混合気の発熱量が大きくなり、火炎温度が高くなるからである。
- ・容器内圧力変化(時間履歴)の結果を、防衛大学校市野先生の解析結果と比較し、3号機3階天井部の梁の損傷に関して、両者に整合性が有ることを確認した。

(拡散燃焼)

- ・燃料にメタンが含まれている場合、オレンジ色の輝炎が観察されると共に、バーナー出口近傍では青色の炎が観察される。前者は遊離した炭素から発せられるものであり、後者はCH発光によるものである。
- ・燃料が水素のみの場合、薄い赤い炎が観察される。これは暗室における試験において確認されるものであり、屋外では水素火炎を目視で確認することは困難である。
- ・燃料に窒素を添加すると、火炎の色は薄くなり、火炎温度は低下する。

まとめ

(今後の展望)

- ・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。
- ・水素-メタン-空気予混合気の燃焼を取り扱っているが、不活性ガスとしての水蒸気や窒素の添加の影響を調べる必要がある。不活性ガス添加に係る知見は、1Fの水素爆発のメカニズムを把握し防爆対策を施す上で、非常に重要な情報となる。
- ・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。

関連する文献など

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, 2021年3月5日, <https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>
2. 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(2023年版), 2023年3月7日, <https://www.nra.go.jp/data/000425218.pdf>, <https://www.nra.go.jp/data/000425219.pdf>
3. Williams, F. A., Combustion Theory, Second Edition (1985), p. 349, Addison-Wesley, Reading, CA.
4. Lewis, B. and Elbe, G., Combustion, Flames and Explosions of Gases, Third Edition (1987), p. 396, Academic Press, Orlando, FL.
5. Law, C. K., Combustion Physics (2006), p. 41, Cambridge University Press, New York.
6. 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.
7. Okafor, E. C., Hayakawa, A., Nagano, Y., Kitagawa, T., Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen-methane-air, International Journal of Hydrogen Energy (2014), Vol. 39, Issue 5, pp. 2409-2417.

関連する文献など

8. Ma, Q., Zhang, Q., Chen, J., Huang, Y., Shi, Y., Effects of hydrogen on combustion characteristics of methane in air, *International Journal of Hydrogen Energy* (2014), Vol. 39, pp. 11291–11298.
9. 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.
10. 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.
11. Lei, B., Wei, Q., Pang, R., Xiao, J., Kuznetsov, M., Jordan, T., The effect of hydrogen addition on methane/air explosion characteristics in a 20–L spherical device, *Fuel* (2023), Vol. 338, 127351.
12. Kadowaki, S., Katsumi, T., Sato, D., Noguchi, H., Zemba, A., Iwanaga, K., Abe, S., Characteristics of spherically expanding hydrogen–methane–air lean premixed flames in a closed chamber: aiming to elucidate the hydrogen explosion at Fukushima Daiichi₃₆ Nuclear Power Station, *Mechanical Engineering Letters* (2024), Vol. 10, 23–00586.



令和6年3月12日

**令和5年度原子力施設等防災対策等委託費事業
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**

《 ご清聴ありがとうございます 》

