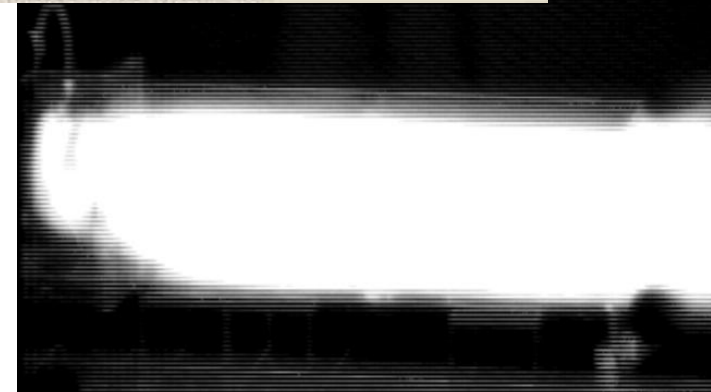
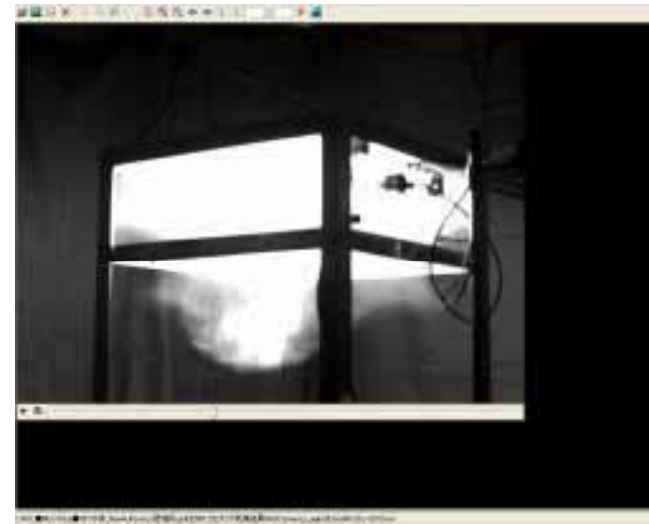


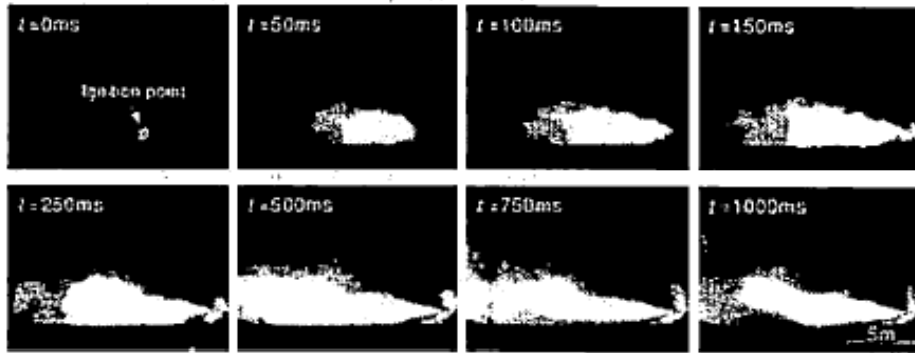
# 不活性ガスと水噴霧による水素燃焼抑制

九州大学 大学院工学研究院 井上雅弘



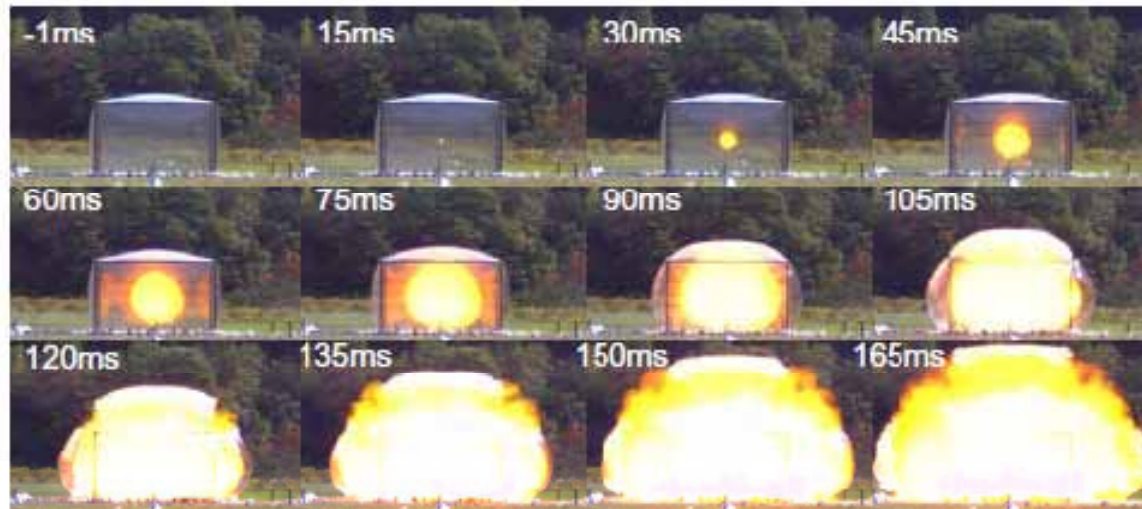


従来の研究  
メタンガスの爆発公開実験：公害資源研究所



(a) Exp. No.1-1 ( $x = 5 \text{ m}$ ,  $t_{ig} = 2 \text{ s}$ )

火炎伝播の時系列画像。着火点が5または10mの場合、火炎は上流側に伝播する。13.4または18mの場合は点火中は保炎するが伝播しない。出典：茂木他、35回安全工学シンポジウム

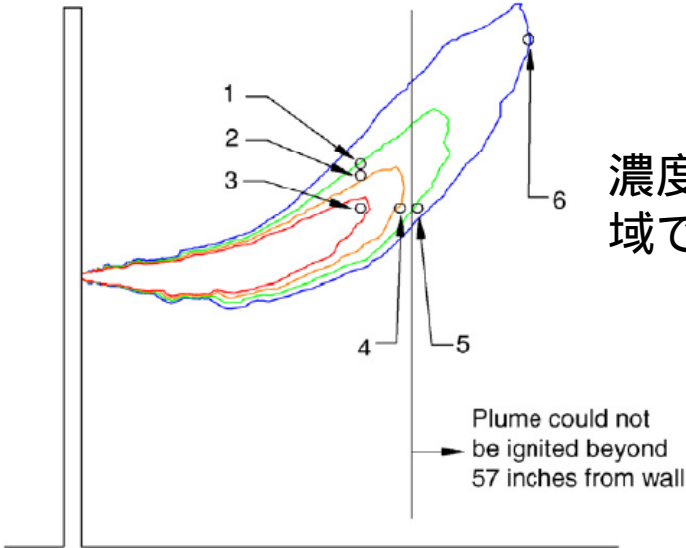


図C. 5. 1. 1-6 水素の電気火花着火時の爆発状況 (体積200m<sup>3</sup>、水素濃度30.7%)

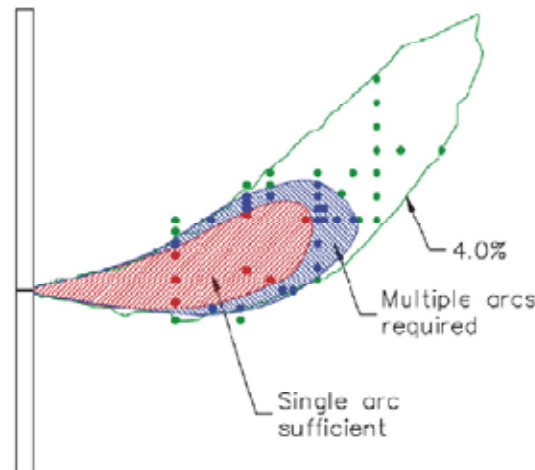
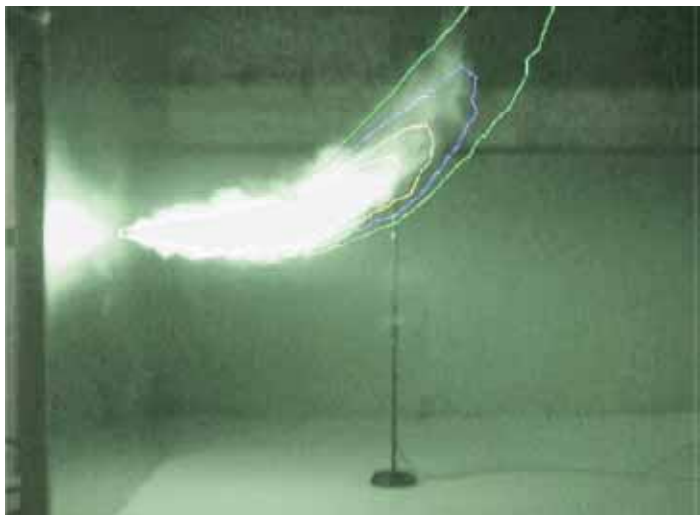
上：水素濃度30.7%、200m<sup>3</sup>の爆発  
 右：高圧で漏洩した水素の燃焼  
 出典：NEDO水素の有効利用ガイドブック



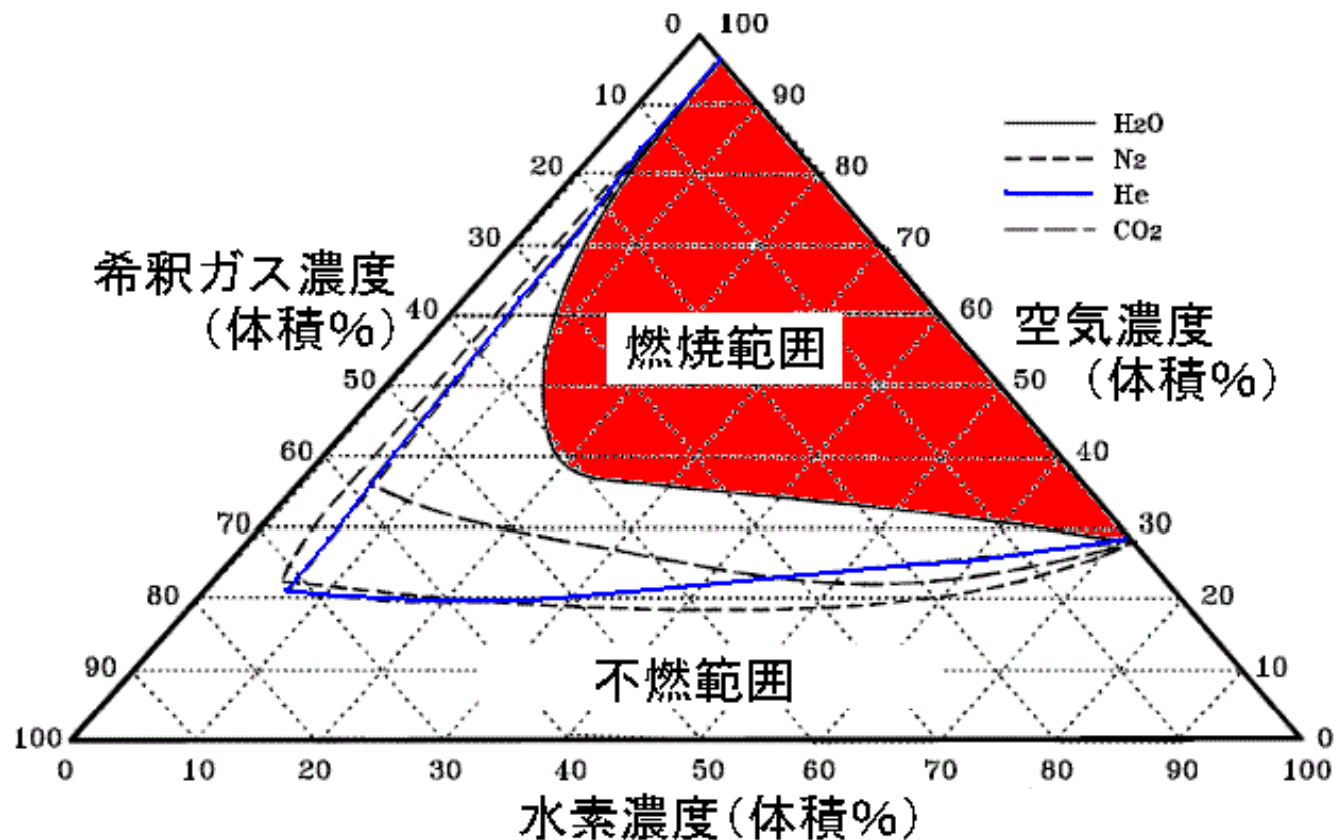
図C. 4. 2-2 燃焼状況 (d=10mm、P=28MPa) (Naによる炎色反応で着色)



濃度4%程度の領域では着火しない



出典 : M.R. Swain, P.A. Filoso, M.N. Swain, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 287 295



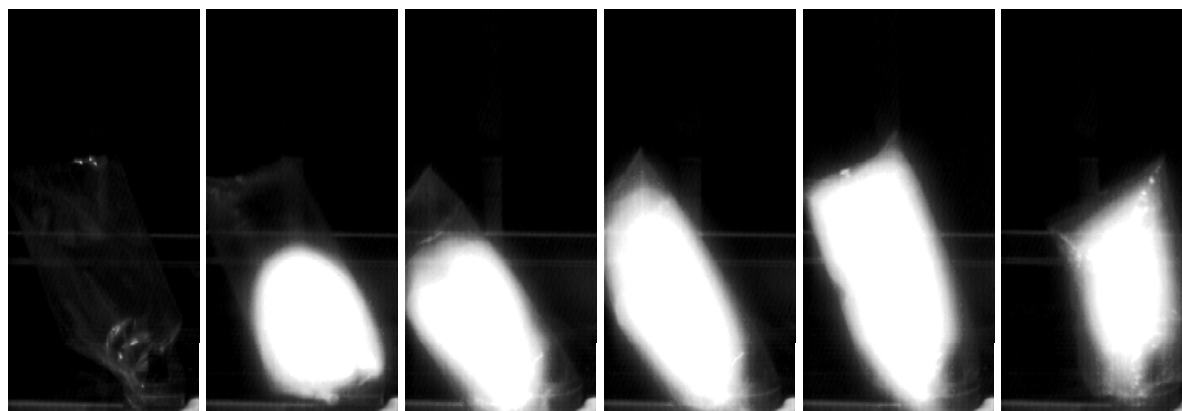
空気中の水素の燃焼に及ぼす希釈ガスの影響  
 $N_2$ , He,  $CO_2$ は1気圧 $25^{\circ}C$ 、 $H_2O$ は $149^{\circ}C$

出典

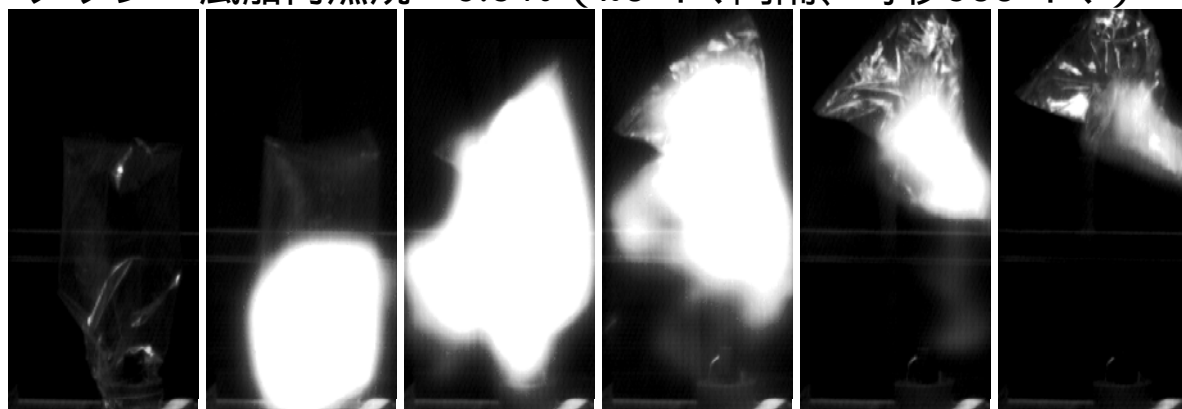
$N_2$ , He Coward, H.F. and G.W. Jones. Limits of Flammability of Gases and Vapors,  $CO_2$  Bureau of Mines Bulletin 503, N70-74476; AD-701575 (1952)

$CO_2$ : Jones, G.W. and G. St. J. Perrott. Oxygen Required for the Propagation of Hydrogen, Carbon Monoxide, and Methane Flames, Ind Eng. Chem., 19(9) (1927), pp. 985-989

$H_2O$ : Coley, G.D. and J.E. Field. Role of Cavities in the Initiation and Growth of Explosion in Liquids, Proceedings, Royal Society of London Series A, 335(1600), (1973), pp. 67-86

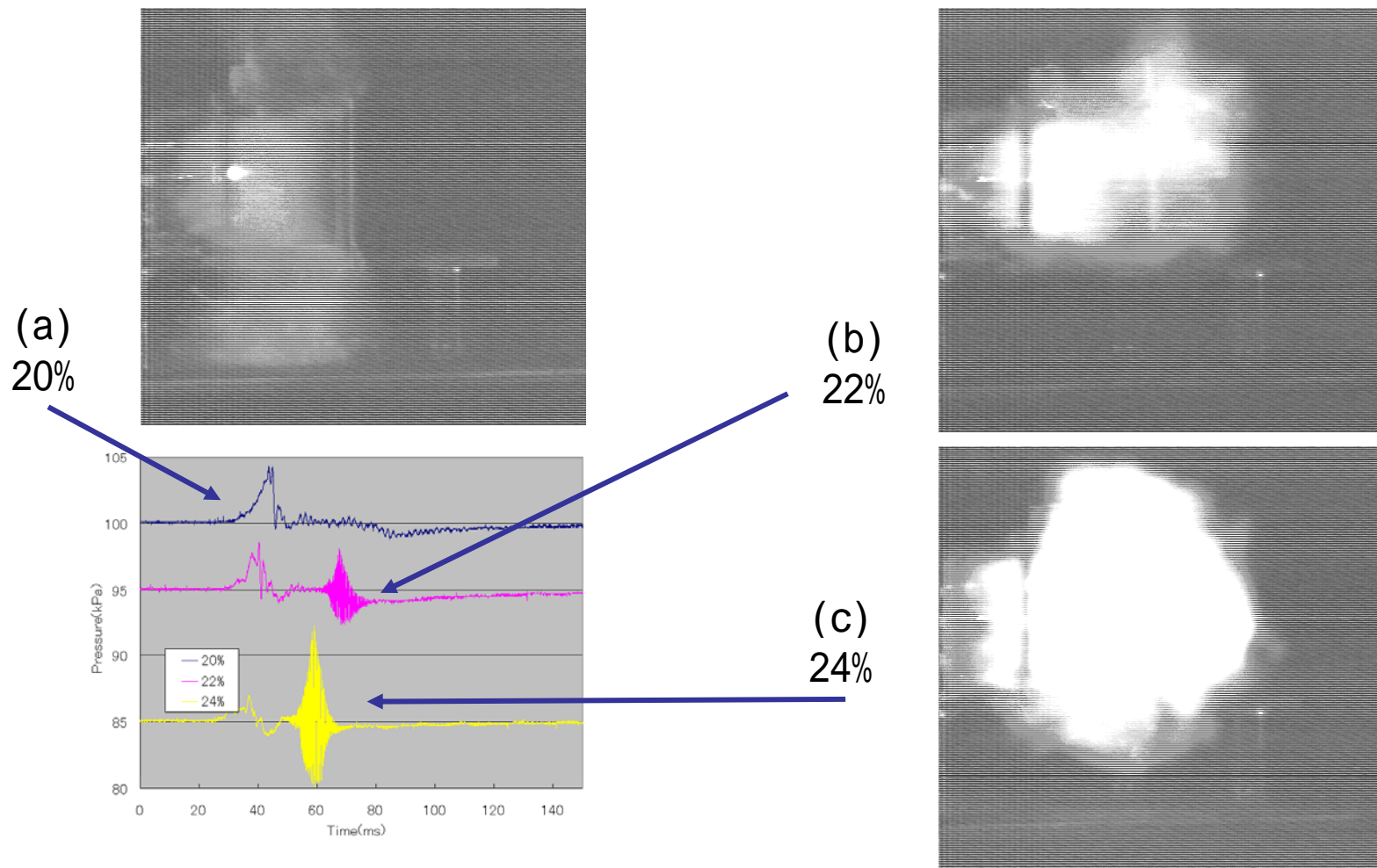


メタン・風船内燃焼・9.5% (20コマ間隔、毎秒500コマ)



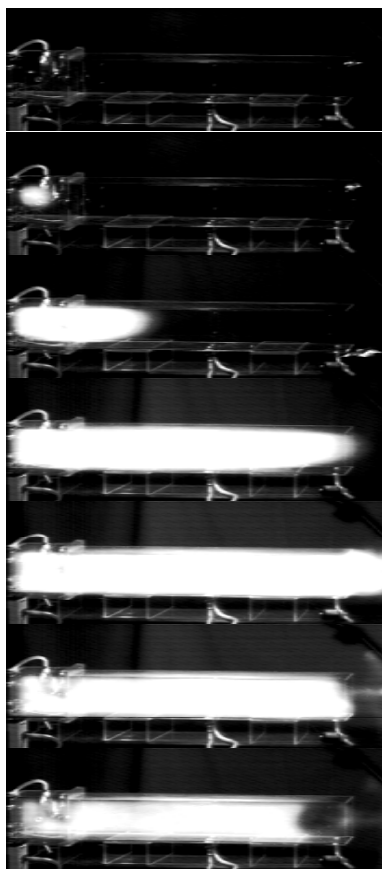
水素・風船内燃焼30% (5コマ間隔、毎秒500コマ)

[Video:H2Ball](#)

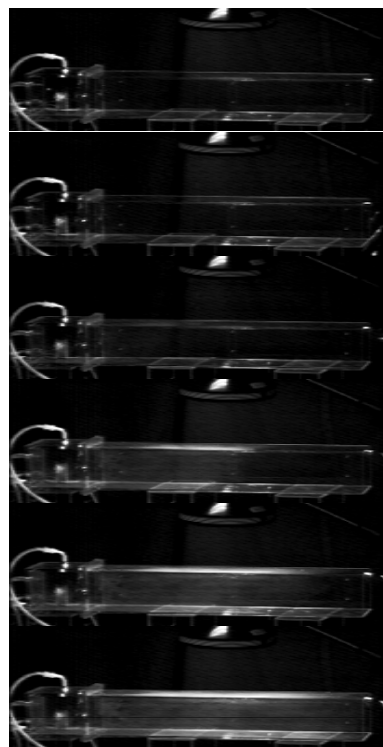


Video:H2Box

濃度による水素燃焼の差異は大きい。10%以下の濃度では燃焼したかどうかさえわからず、容器壁面に水滴が付着するので確認できる程度。低濃度と高濃度での威力が著しく異なる。



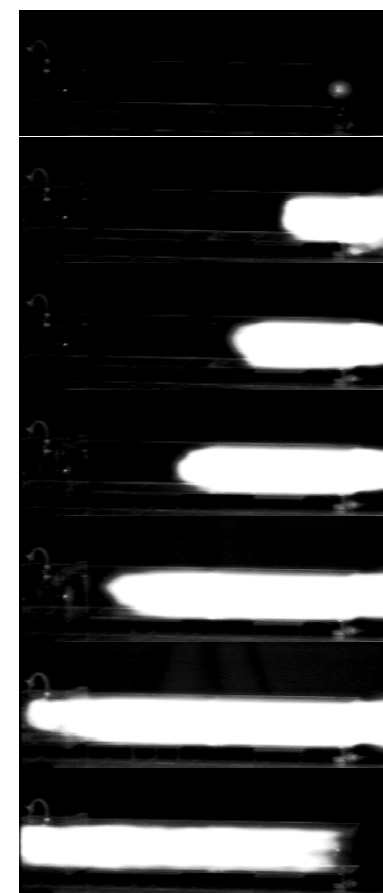
メタン・内側着火・10%  
(4コマ間隔、毎秒250コマ)



水素・内側着火・10%  
(20コマ間隔、毎秒250コマ)



水素・内側着火・22%  
(1コマ間隔、毎秒250コマ)

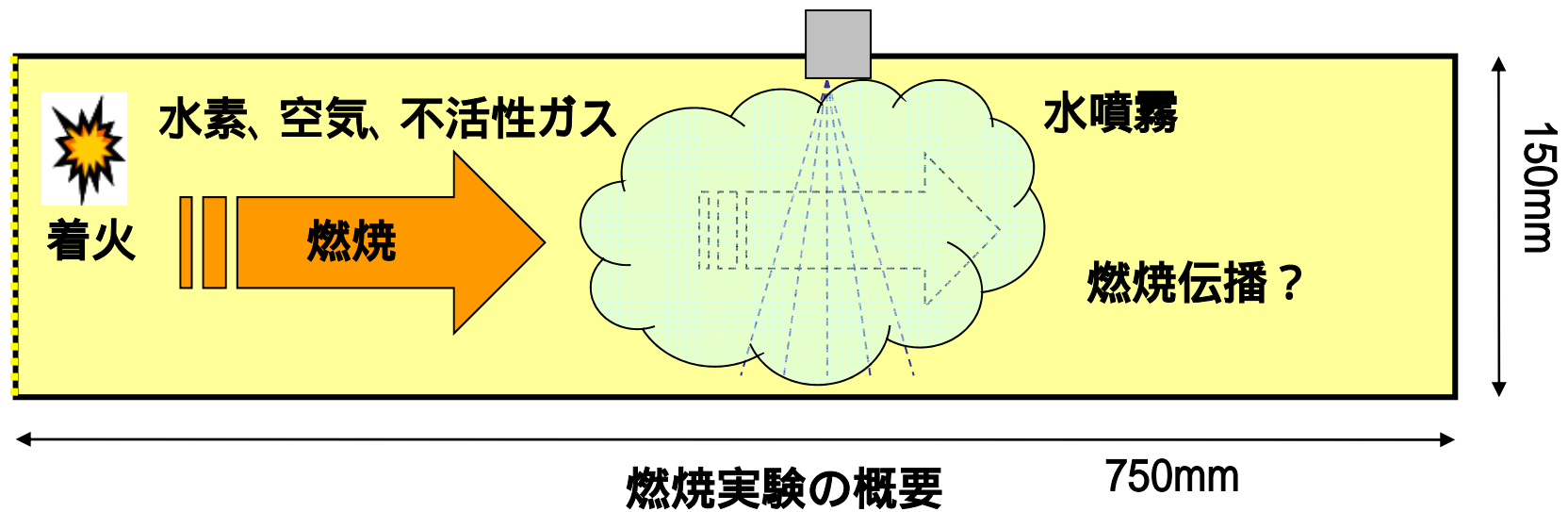
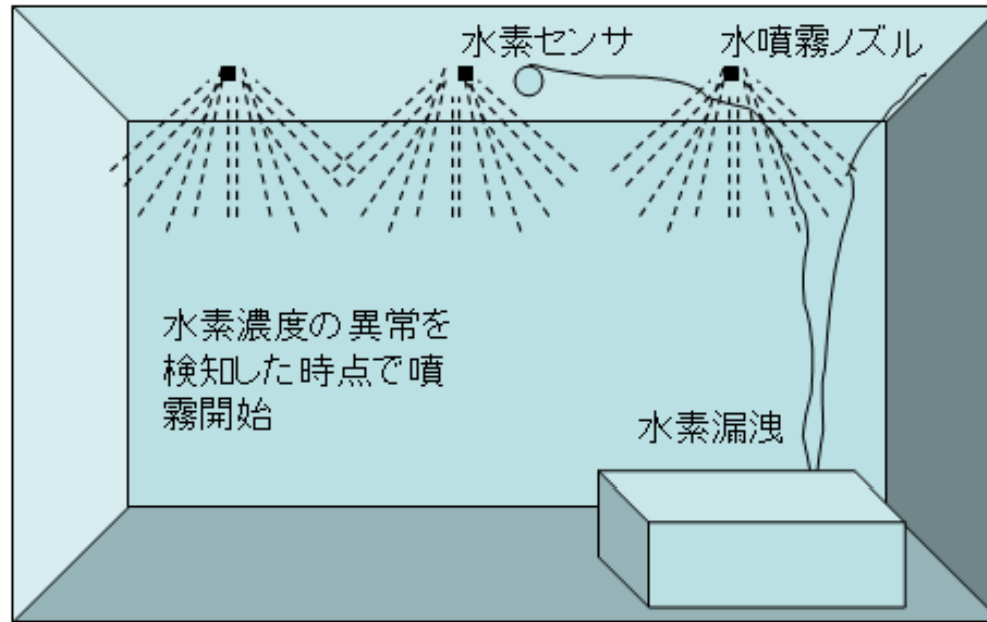


水素・外側着火・30%  
(5コマ間隔、毎秒250コマ)

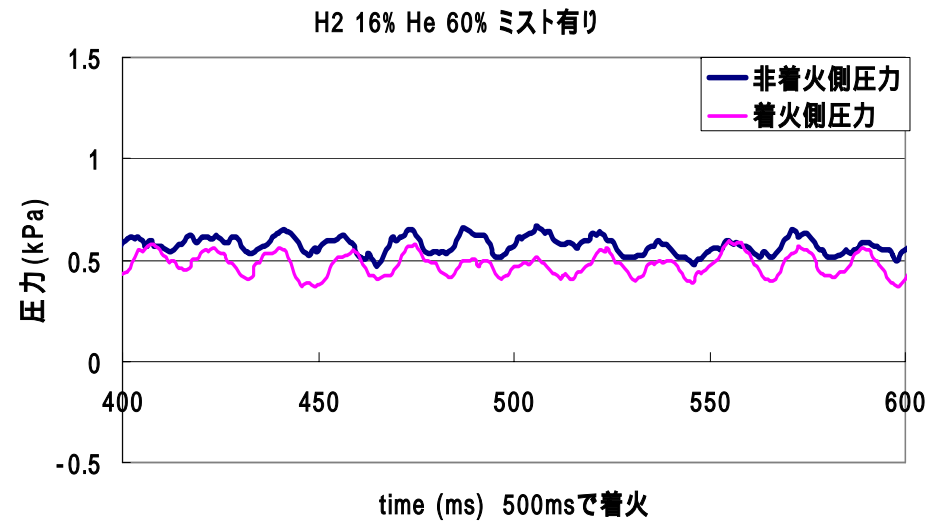
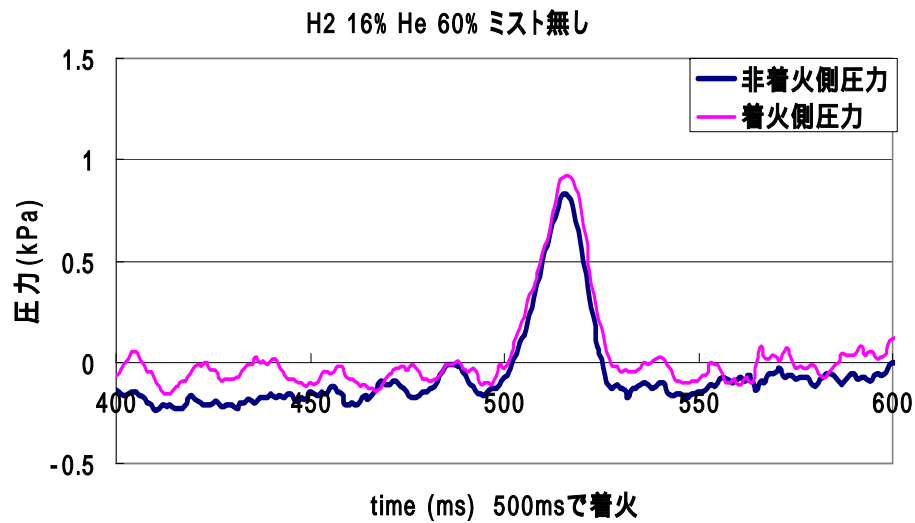
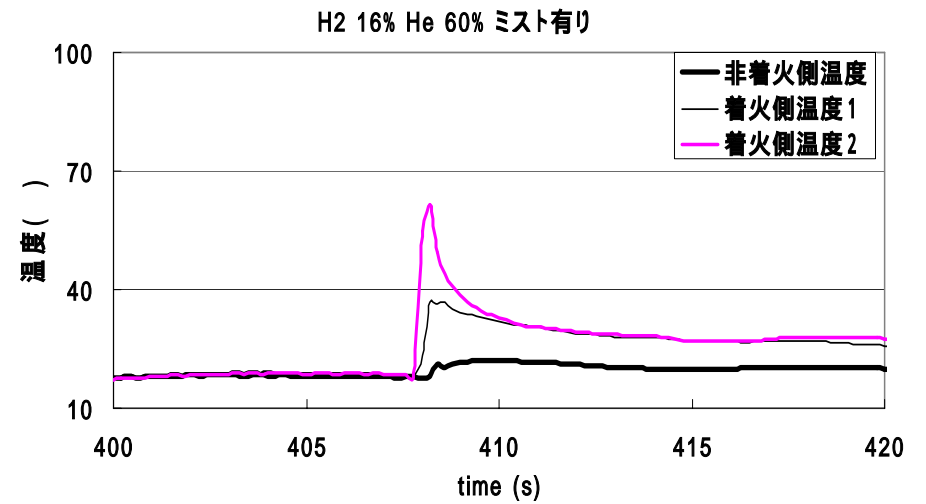
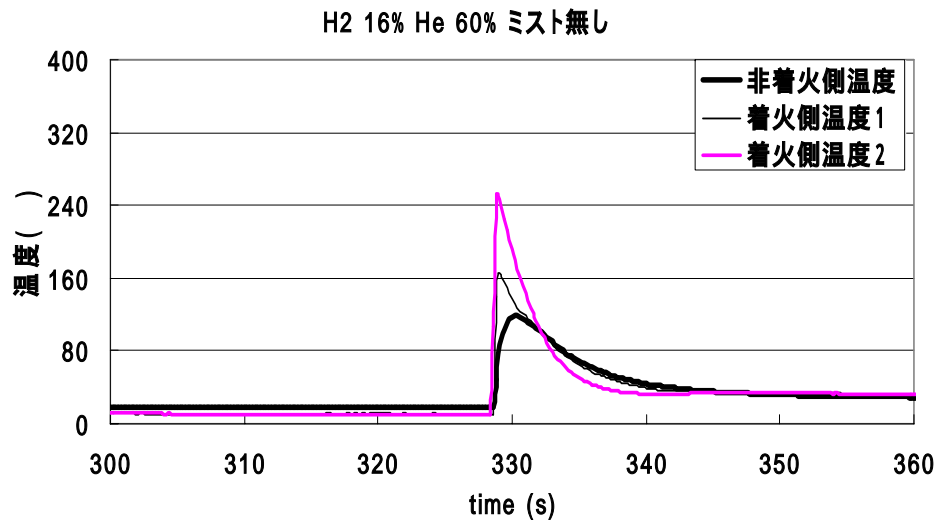
Video:H2Duct

水素のダクト内燃焼: 一辺が120 mmの正方形断面のダクトに水素・空気混合気を満たし点火。水素はメタンと比べてはるかに燃焼速度が速い。水素10%は炎は見えない。





災害研究から防災研究へ。人間に安全な燃焼抑制方法 燃焼と爆発：ロケットエンジン  
一定割合の水素混合気体を作成。その後ミスト噴霧。スパーク。



燃焼温度と圧力;左消炎せず。右消炎

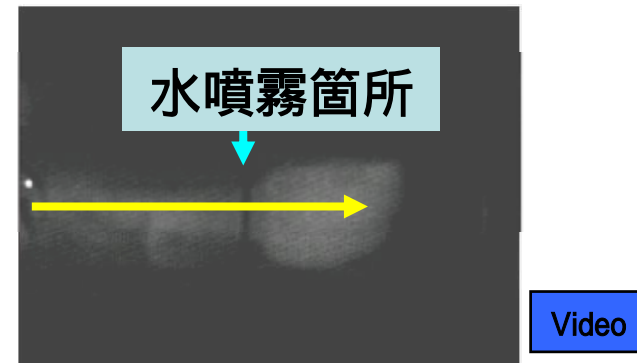
水素 - 空気の混合気体に窒素、二酸化炭素、ヘリウムなどの不活性ガスおよび水噴霧を加えると、燃焼伝播の防止が可能である。また、防止できない場合でも、その威力が相当小さくなる。



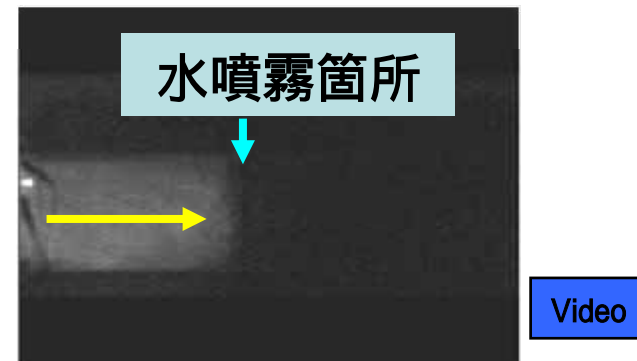
燃焼容器



水噴霧ノズル



炎が水噴霧箇所を通過。  
水素16%、水噴霧+He50%



炎が水噴霧箇所で消滅。  
水素16%、水噴霧+He55%

## 水素8%、8ノズルの場合：各ガスの伝播限界濃度と燃焼速度。

ガス	He	CO2	N2	CO2+He	CO2+He	CO2+N2	CO2+N2
伝播限界濃度*1 (%)	20	25	35	5+15	10+10	5+15以上	10+10以上
最少燃焼速度*2 (m/s)	0.127	0.094	0.141	0.113	0.102	0.132	0.105

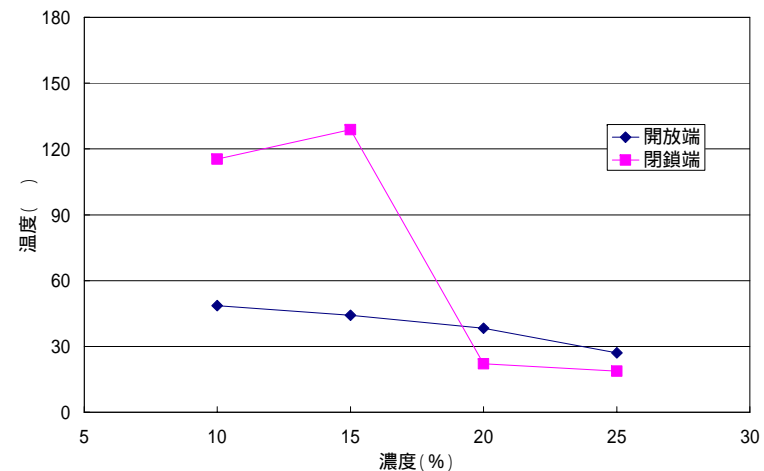
1 燃焼伝播を防止できる最少ガス濃度 (体積%)

2 燃焼が防止できなかった実験条件のなかで、最も遅い燃焼速度。

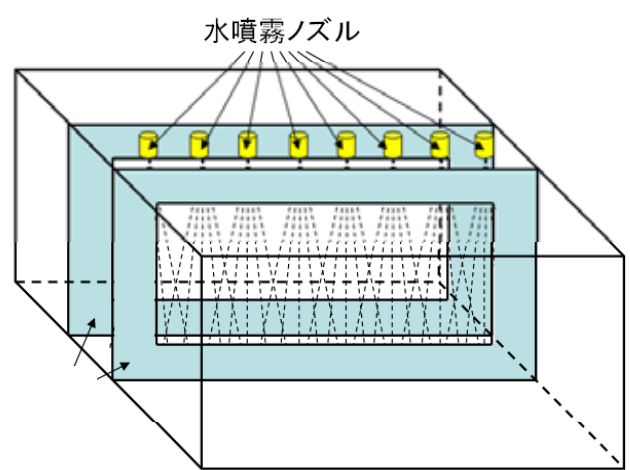
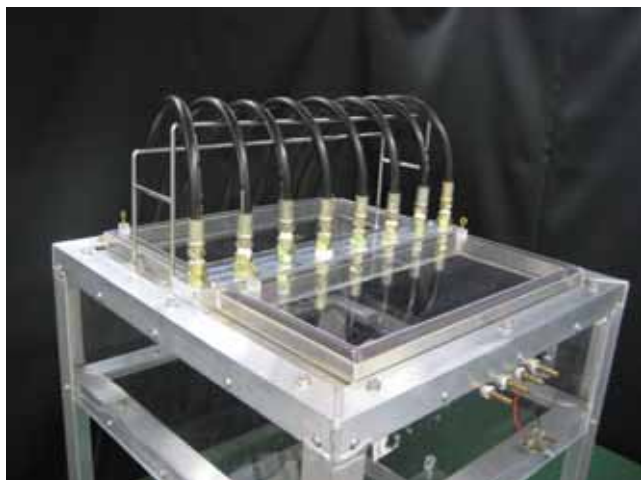
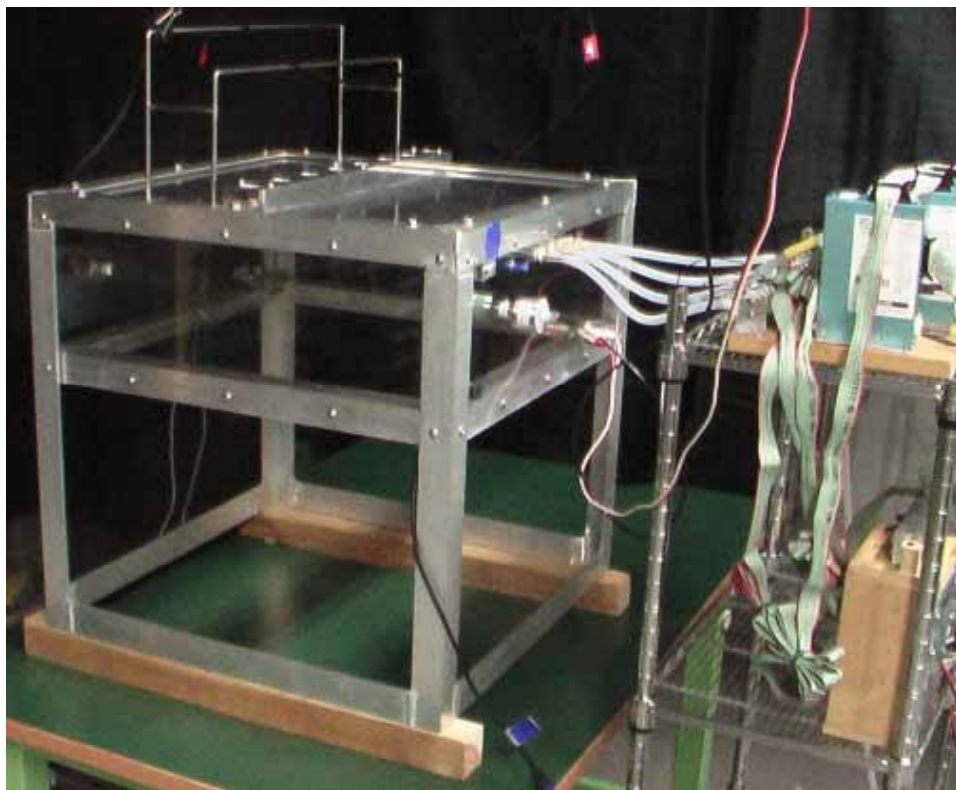
## 水素16%、8ノズルの場合：各ガスでの伝播限界濃度と燃焼速度。

ガス	He	CO2	N2	CO2+He	CO2+He	CO2+N2	CO2+N2
伝播限界濃度 (%)	60	45	55	5+50	10+45	5+50	10+45
最少燃焼速度 (m/s)	0.337	0.157	0.225	0.205	0.225	0.397	0.337

水素8%、4ノズルの場合のヘリウム濃度と開放端、および閉鎖端の最高温度。開放端側から着火。He濃度15%以下では閉鎖端の温度が100以上に上昇するが、He濃度20%以上では30以下。燃焼伝播が防止されている。



中型（断面が500mm×170mm、長さ500mm）の燃焼容器を用いて、水素、空気、ヘリウムを所定の濃度に混合した後、水噴霧（平均粒径16ミクロン、1ノズル当たり水量；50mL/min）を行い、噴霧中にダクトの一端で着火。



## 中型容器による燃焼実験結果

### 燃焼伝播防止は

- 水素8%時、水噴霧とヘリウム濃度 22 ~ 24 % で可能。  
( 噴霧時間は30s、噴霧中着火 )、
- 水素16%時、水噴霧とヘリウム濃度 60 ~ 62 % で可能。  
( 同上条件 )。

### 燃焼が伝播した場合の、水噴霧の有無と容器内の温度・圧力 ( 非着火側、水素16% ( 以下同様 ) )

噴霧	なし	あり
温度	111	26
圧力kPa	0.33	0.91
温度 ( He60%あり )	68	29
圧力kPa ( He60%あり )	0.66	0.07

水噴霧をすると、温度は大きく低下。  
圧力は ( 燃焼伝播時 ) 増大 ( Heなし ) または減少 ( He 60% )。

## 噴霧時間と容器内の温度・圧力

噴霧時間sec	10	20	30
温度	44.2	31.3	17.5
圧力kPa	0.624	0.44	0.493

時間が長くなると、温度上昇は明らかに減少。圧力はやや減少の傾向。

## 噴霧中あるいは噴霧停止後着火と容器内の温度・圧力

	噴霧中	噴霧停止後
温度	25.9	31.3
圧力kPa	0.91	0.44

噴霧中着火が温度は低いが、圧力は大きく1 kPa近くまで上昇。

\*

中型容器による燃焼実験結果

## 着火までの時間と容器内の温度・圧力

着火までの時間sec	3	5	10
温度	16.0	35.7	29.2
圧力kPa	0.50	0.35	0.31

3秒は温度上昇が小さい。5秒と10秒では温度上昇が大きく、かつ、ばらつく。  
3秒は圧力は他より大きい。



小型および中型の燃焼容器を用いて、水素、空気、ヘリウムなどを所定の割合に混合した後、水噴霧を行い、噴霧中に容器の一端で着火する水素燃焼伝播実験を行い、水素8%、16%で、燃焼が停止する条件を見いだした。

小型容器による実験では、水噴霧ノズルは150mm × 150mmの断面に対して8本のノズルを使用した。中型では小型の約3.8倍の断面積に同じ8本のノズルを使用した。ノズル密度は少ないが、小型容器での実験とほとんど同じヘリウム濃度で水素燃焼を抑制ならびに防止できることを確認した。

被害低減の観点から、水噴霧があると温度は確実に低下するので好ましいが、圧力は場合によっては上昇することがある。これは水噴霧による気流の乱れが燃焼を促進するためと考えられる。

ご清聴有難うございました。

