

福岡水素エネルギー戦略会議 研究分科会

高圧水素の燃焼実験 および数値解析

2009年7月10日

武野計二

三菱重工業株式会社 高砂研究所

流動・燃焼研究室

水素の燃焼における特徴

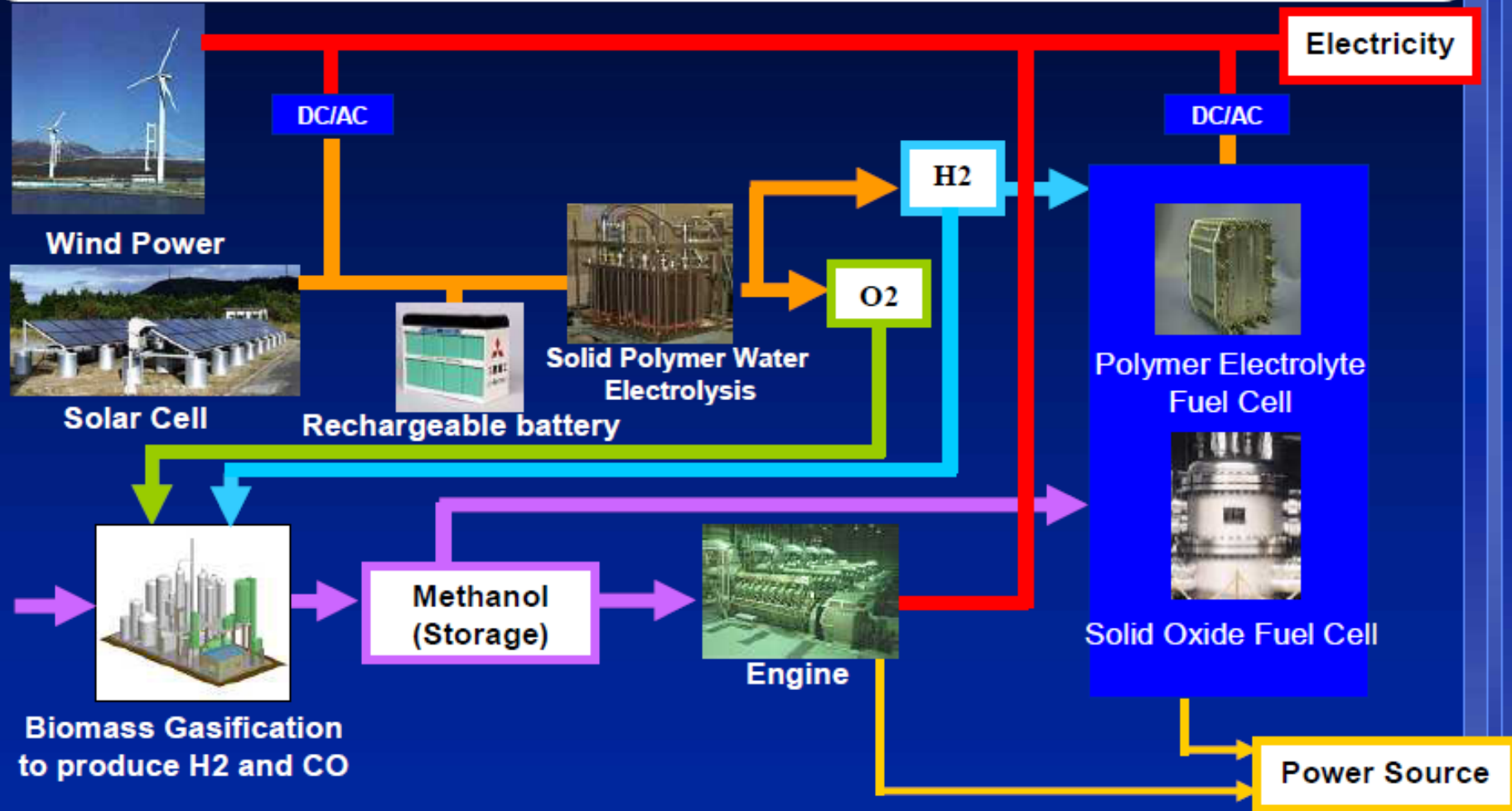
- ・水素は化石燃料や自然エネルギーを変換して製造
- ・気体水素の単位体積当たりのエネルギー密度が小さい
(メタンの1/3, プロパンの1/8以下)

貯蔵には高圧化や液化

(40MPa以上の高圧 or 20Kの保温)

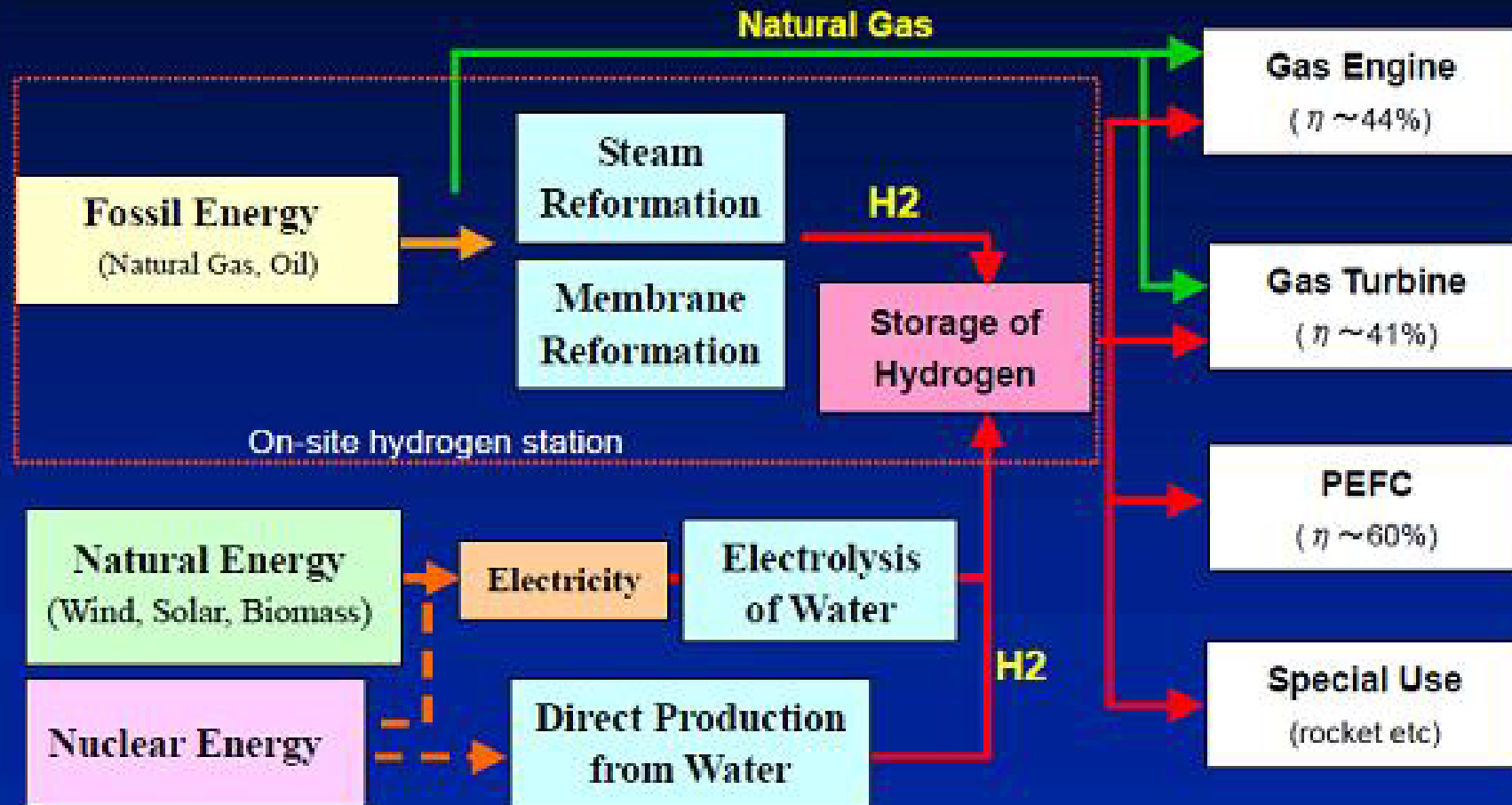
- ・気体の中で最小の密度と最大の拡散速度を持ち, 漏洩しやすい
- ・爆発範囲, 特にrich限界が75%と広い。最小着火エネルギー ~ 0.2mJ。爆轟に遷移し易い気体

Role of Hydrogen in Natural Energy System



If biomass gasification is combined, performance becomes higher (oxygen from electrolysis can be utilized and carbon from biomass can be fixed to liquid fuel).

Energy Chain through Hydrogen



As the final conversion device from hydrogen, PEFC has highest efficiency

発表内容

- 高圧水素の噴出における着火時の影響
 - ・ 高圧拡散火炎・・・スケール, 保炎
 - ・ 水素 / Air予混合気の爆発
- 安全対策事例

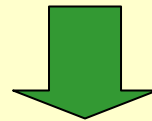
概要

分散利用の典型である水素供給ステーションでは現在、
高圧の気体水素による貯蔵・供給が検討

40～70MPa程度での貯蔵を計画

体積当たりの発熱量がメタンの約1/3, プロパンの約1/8

高圧水素の漏洩(噴出)は安全性評価における不具合想定
として必須の現象



周囲空気と拡散混合して予混合気形成された後に着火

爆発

即座に着火した場合

拡散火炎として燃焼

溶接欠陥やき裂を想定したピンホール(～1mm), 破断を想定した
破孔(～10mm)からの噴出・着火実験

燃焼状態(火炎形状, スケール), 周囲への影響度(火炎温度, 輻射熱)

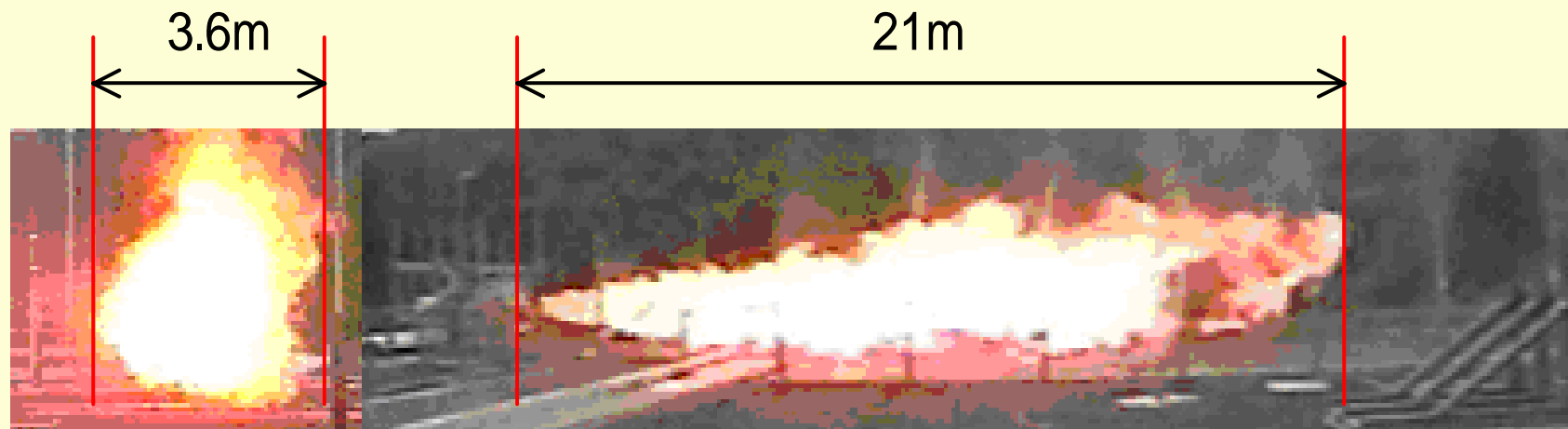
高压水素噴出・着火(拡散火炎)実験状況



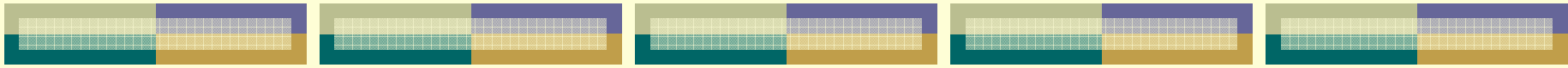
10mm 40 1MPa
28MPa 20m(長さ)



同左 6m位置に3mH×6mWの壁有り
28MPa 4.5(縦)×15(横)m



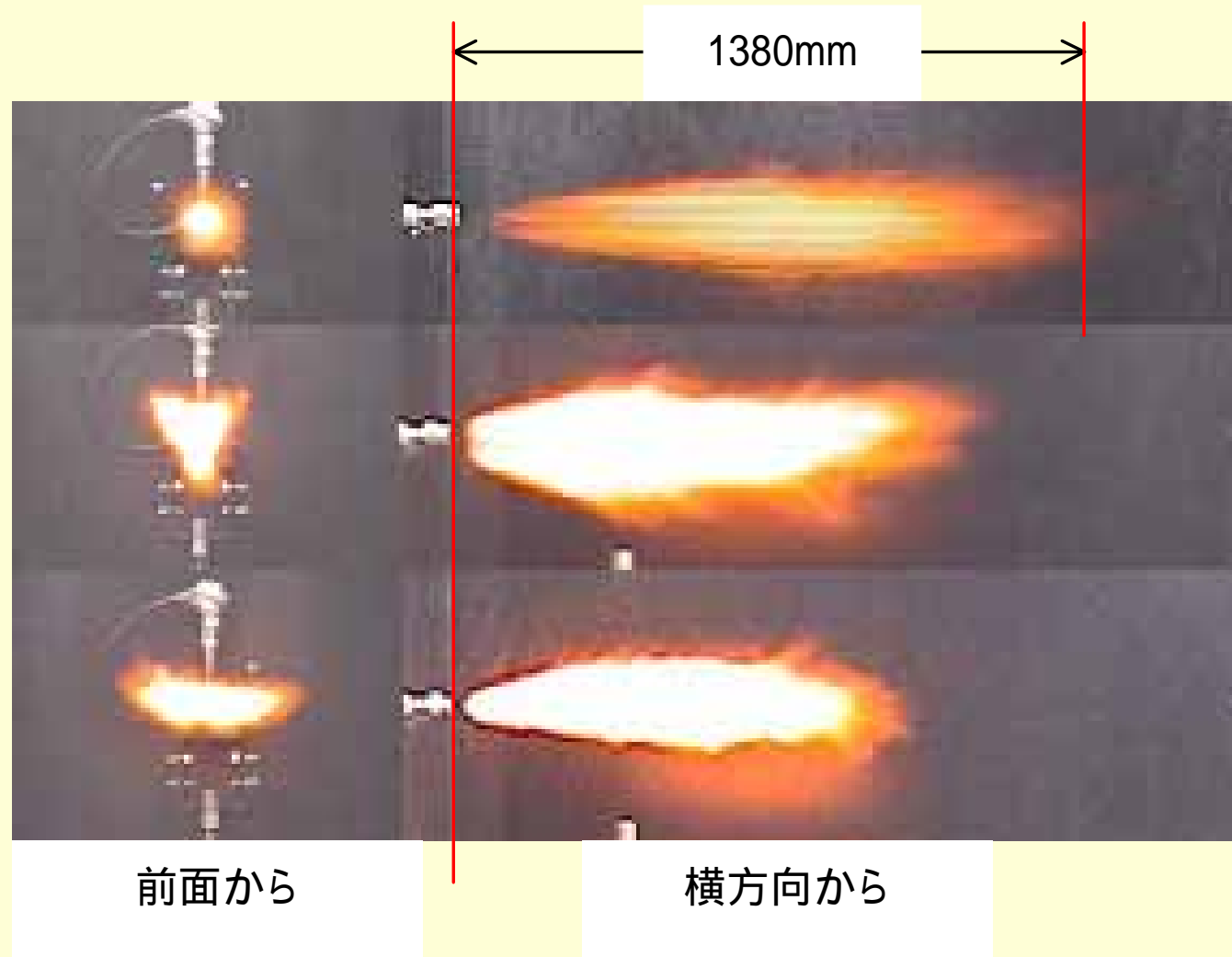
燃焼状況 (d=10mm , P=28MPa)
(Naによる炎色反応で着色)



丸形 ()
(直径 0.53mm)

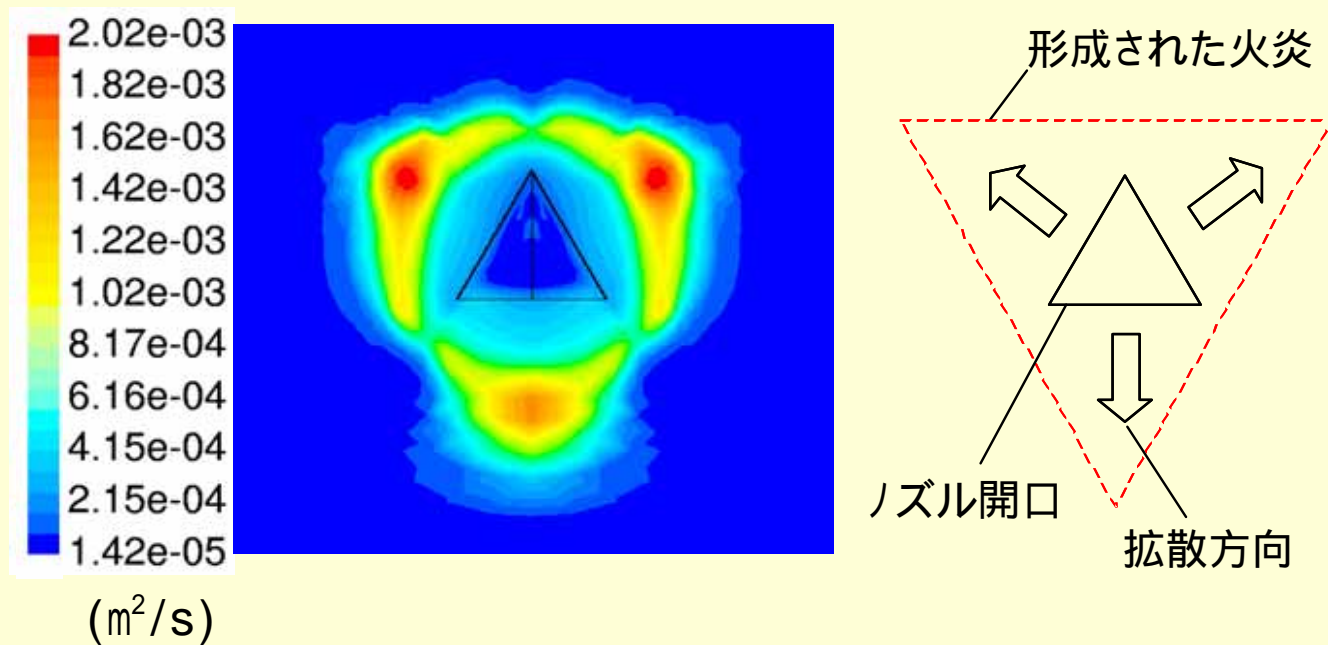
正三角形 ()
(一辺 0.7mm)

スリット形 ()
(幅 0.2 × 縦 1mm)

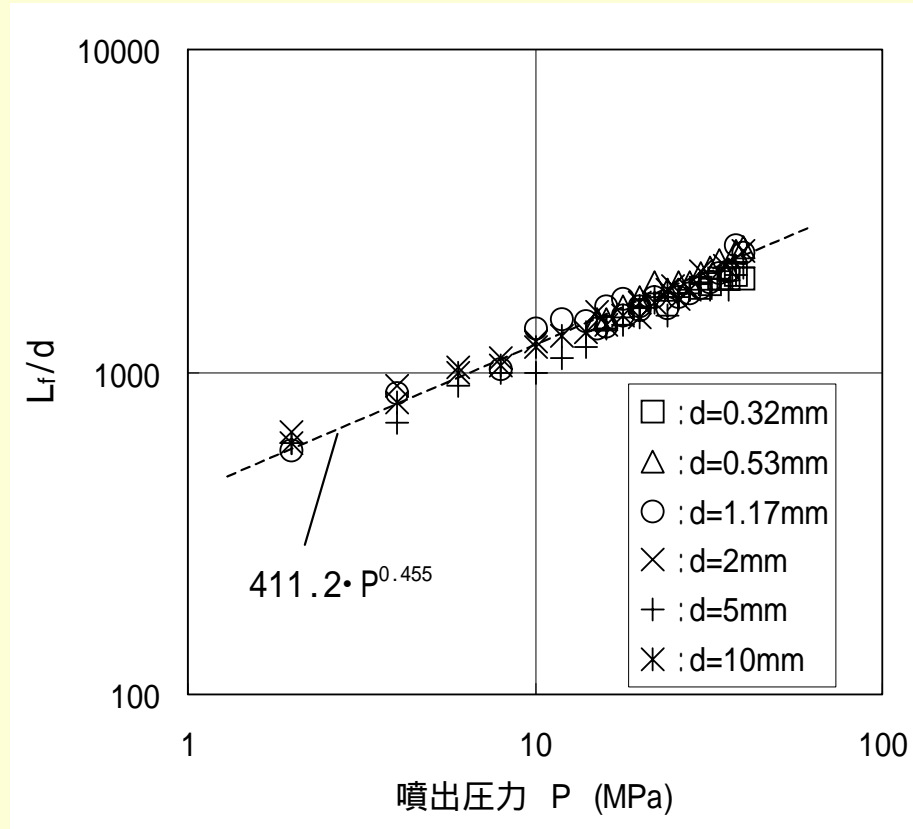
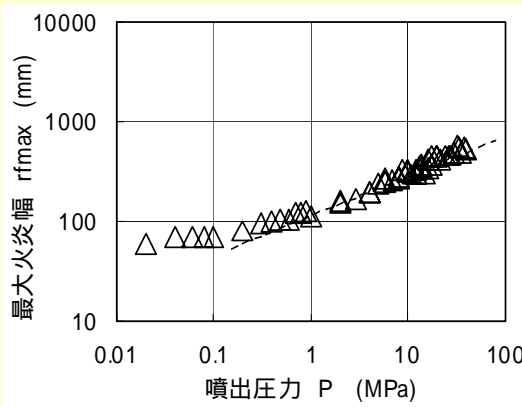
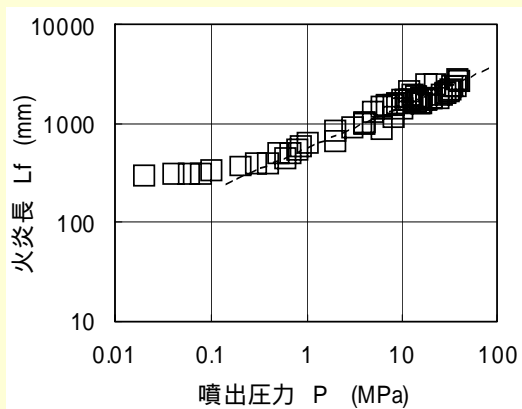
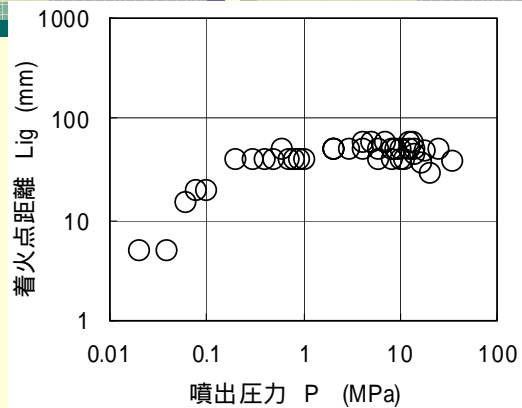


燃焼状況 (d=0.53mm) 及びノズル断面形状の影響
(Naによる炎色反応で着色)





三角形開口ノズル（一辺0.7mm）から水素噴出時の乱流拡散係数分布
 （P=40MPa, ノズル開口面から大気側へ0.1mm位置の断面）

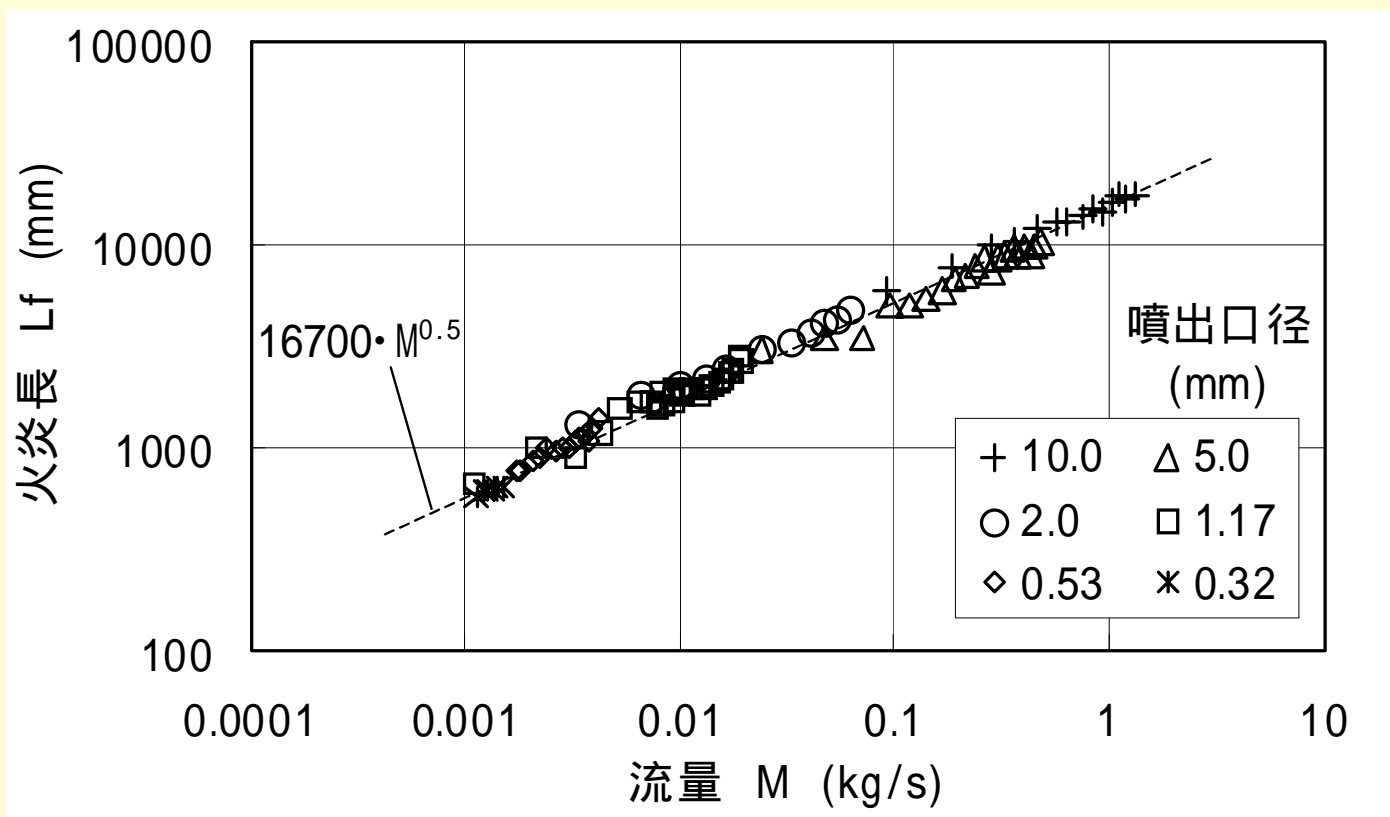


$$L_f / d = 411.2 \cdot P^{0.455}$$

$$r_{f \max} / d = 73.9 \cdot P^{0.521} \quad P : [MPa]$$

$$M = \frac{P_o A}{\sqrt{RT_o}} \sqrt{\kappa} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}}$$

火炎形状計測結果例 (丸形ノズル, d=1.17mm)



噴出流量と火炎スケールの関係

自由噴流拡散火炎の理論

$$m_{fc} = m_{fc0} \exp\left(-\frac{4D}{ur_F^2} x\right)$$

$$-\left(\frac{4D}{ur_F^2}\right)x_F = \ln \xi$$

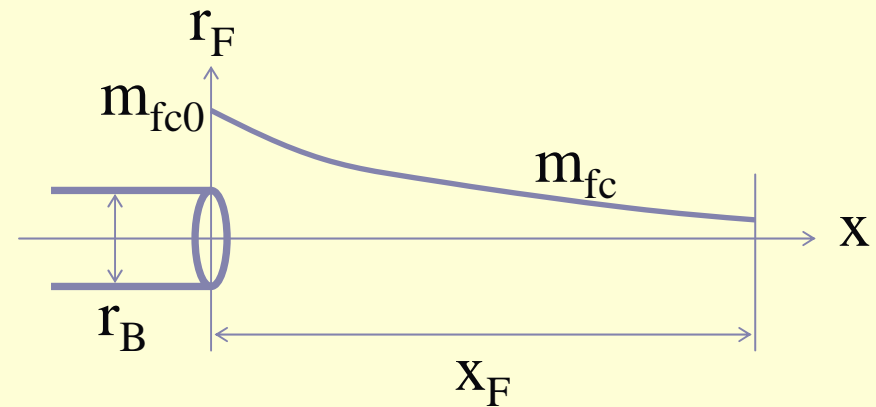
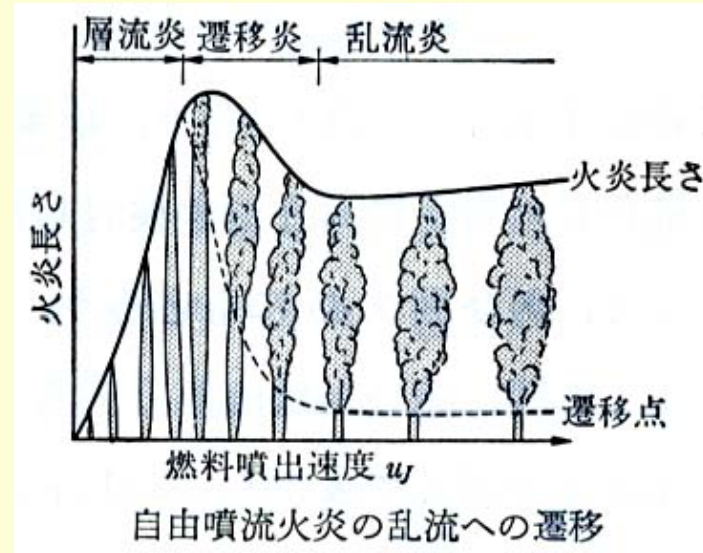
(消炎限界H₂分率)

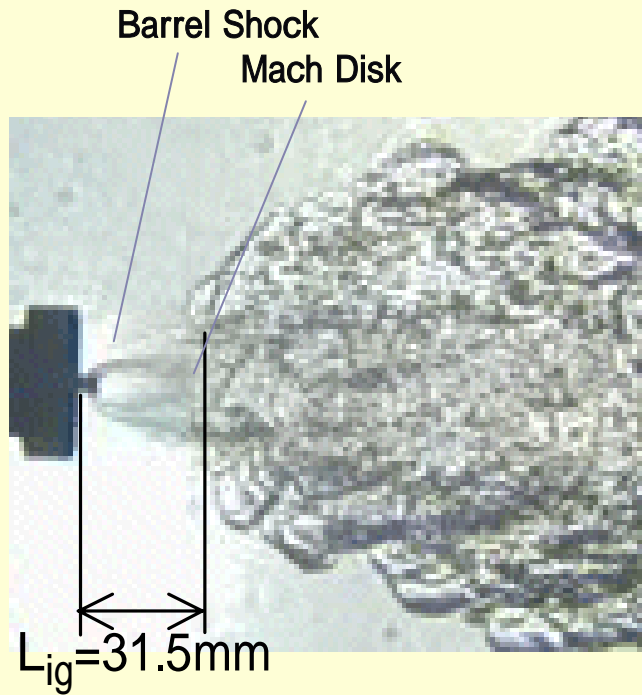
$$x_F \propto u \frac{r_B^2}{D}$$

$$D_T = l_T u' \propto r_B u$$

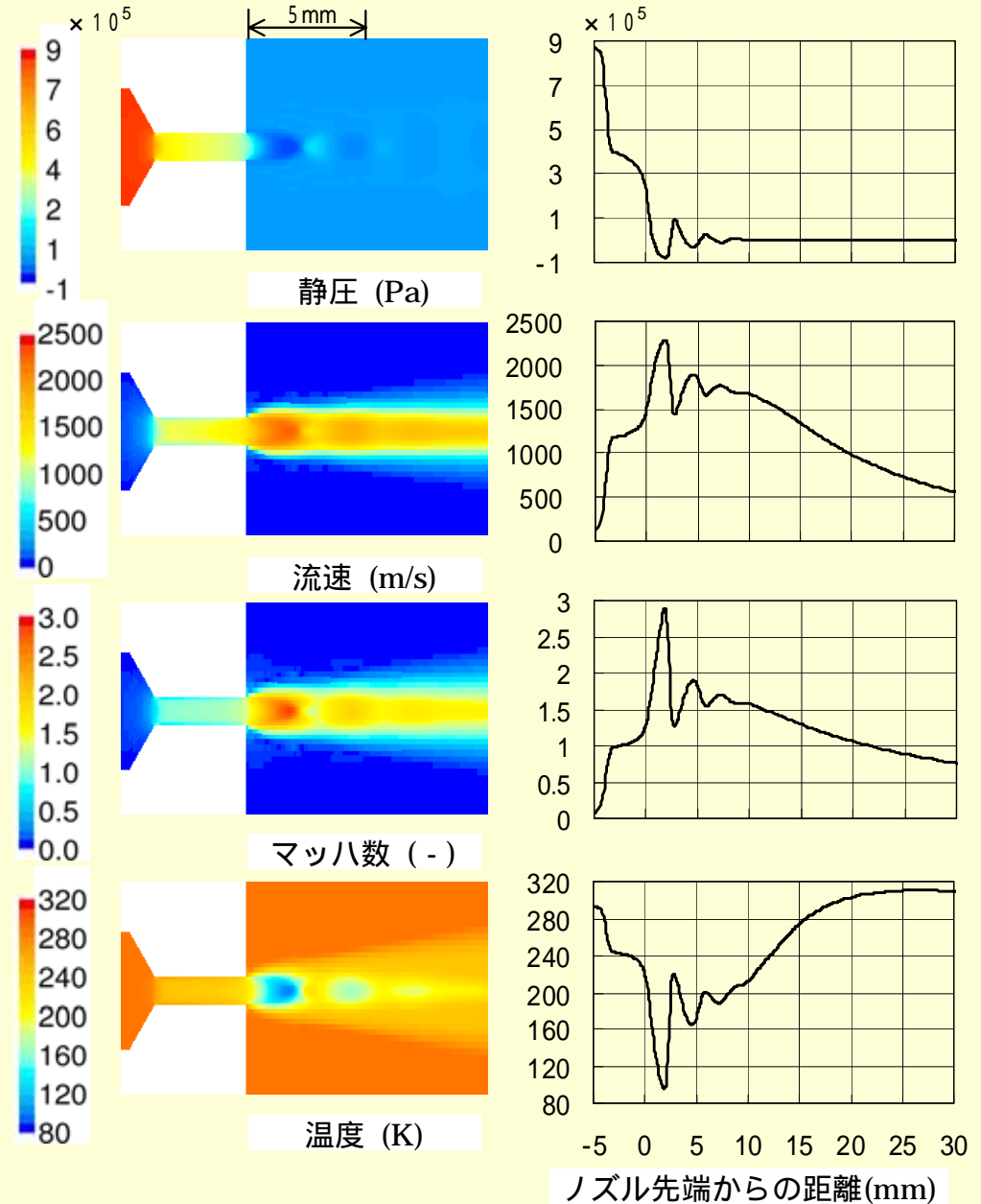
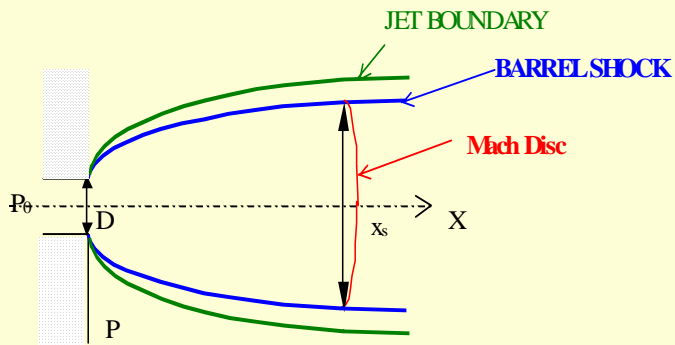
→ $x_F \propto r_B$

(拡散火炎長 ノズル孔径)





火炎基部のシュリーレン写真像
($d=1\text{mm}$, $P=1\text{MPa}$)



水素噴出時 ($P=1\text{MPa}$, $d=1\text{mm}$) のノズル近傍の流体力学的構造

亜音速領域では
 乱流拡散火炎のスケール(L)はdに比例
 流量(M)はノズル断面積(A)に比例

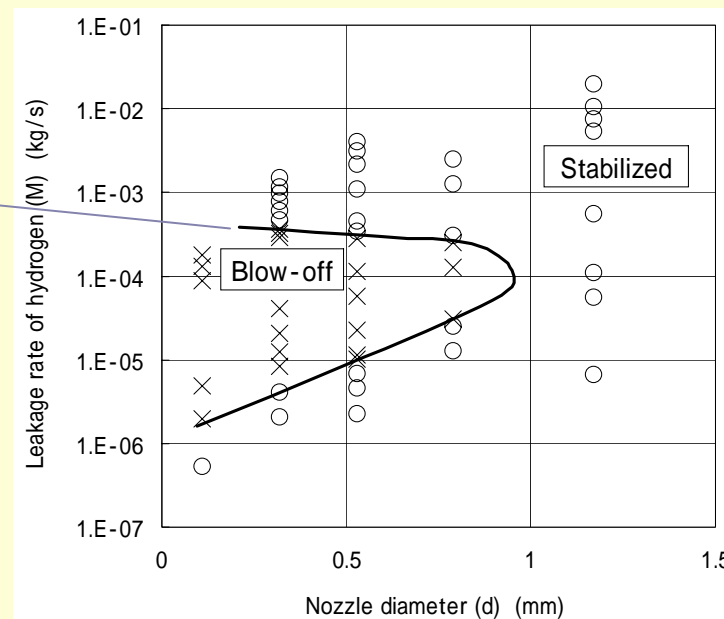
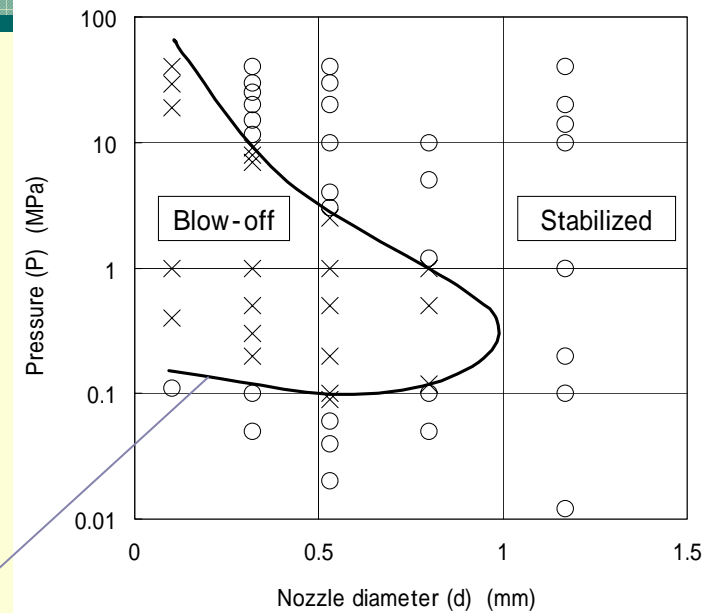
$$L \propto d \propto A^{0.5} \propto M^{0.5}$$

流速過大によるBlow-off

流量的制限によるBlow-off

[乱流火炎の局所的消炎・・・]

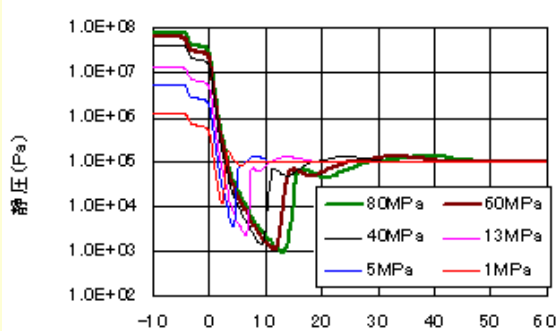
ここでの保炎の定義：
 火炎等の確実な着火源を噴流に近付けて
 着火させ、その着火源を遠ざけても定置火
 炎形成される場合



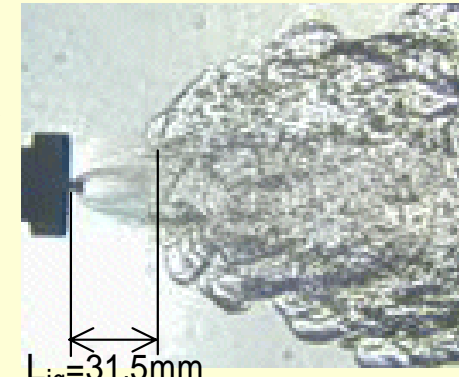
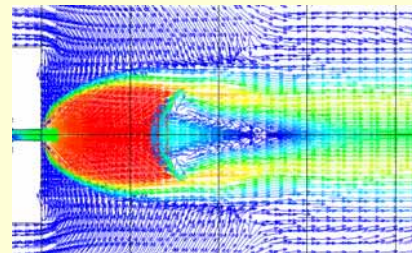
保炎範囲の噴出口径，圧力，及び流量への依存性

火炎基部の構造検討

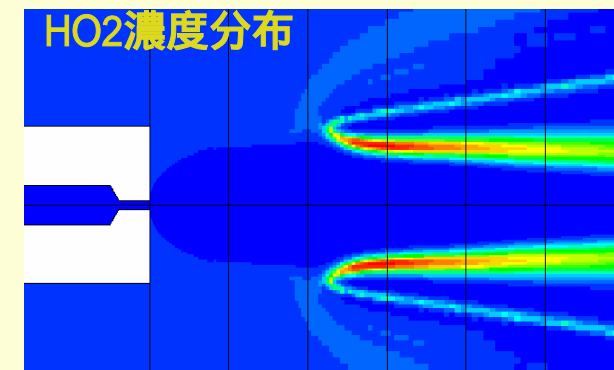
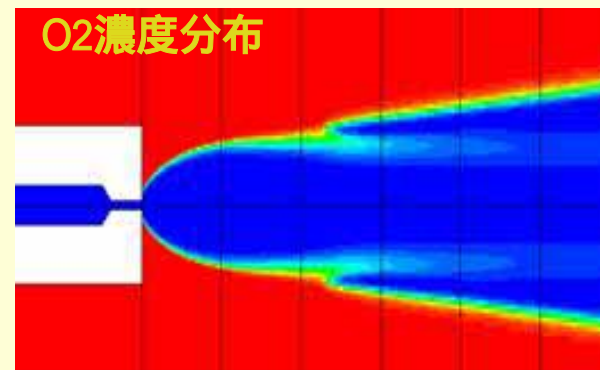
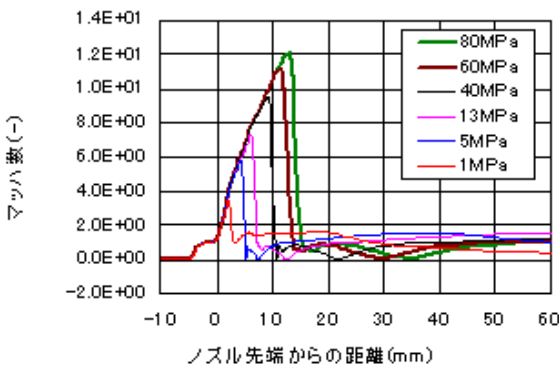
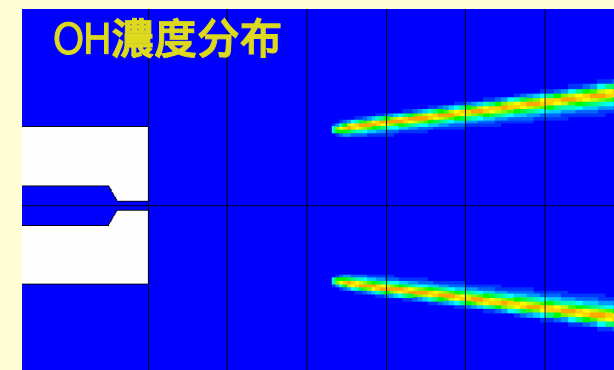
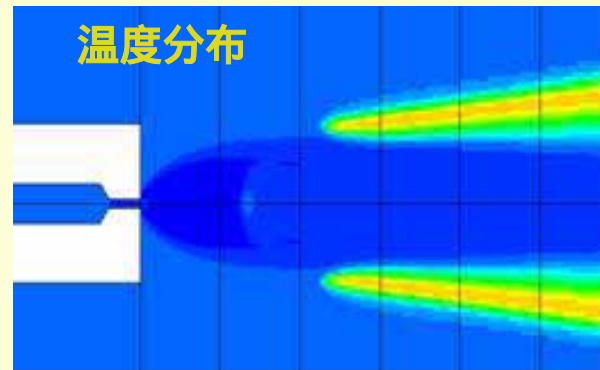
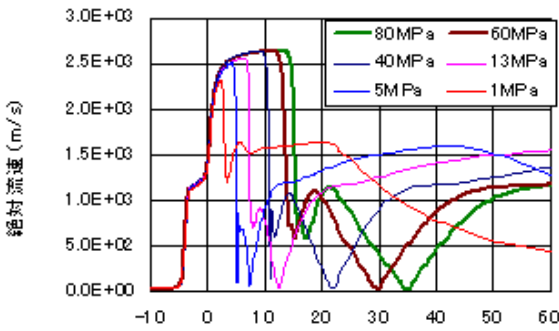
- ・H₂/O₂素反応(7段)を考慮した拡散火炎計算結果例(d=1mm, P=40MPa)
- ・乱流計算:k-ε, EDC(Eddy Dissipation Concept)により流体計算とカップリング



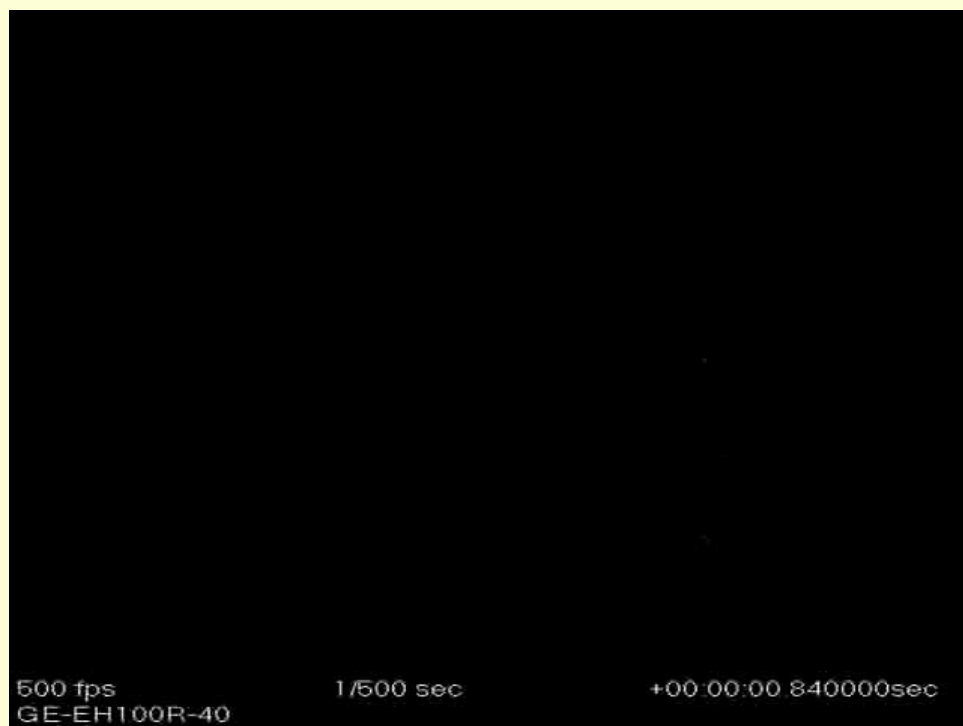
流線



シュリーレン写真



高圧噴出水素への着火実験状況(爆発)



10mm , 40MPa , tign=0.1s
Vfmax ~ 300m/s
P(6m) ~ 5kPa

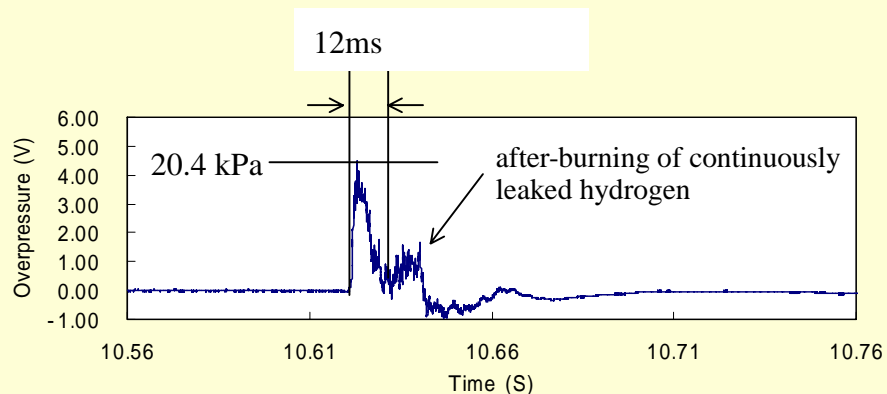


10mm , 40MPa , tign=0.5s
Vfmax ~ 950m/s
P(6m) ~ 70kPa

爆発の典型的連続写真 (40MPa, 10mm, 24m相当, td=51ms)

No.	0	1	2	3	4	5	6
カウンタ	1.316	1.318	1.320	1.322	1.324	1.326	1.328
経時(ms)	0	2	4	6	8	10	12
写真							
火炎形状							
長さ(m)		0.10	1.00	1.39	1.65	1.78	1.85
高さ(m)		0.10	0.72	1.2	1.39	1.47	1.68
No.	7	8	9	10	11	12	13
カウンタ	1.330	1.332	1.334	1.336	1.346	1.356	1.366
経時(ms)	14	16	18	20	30	40	50
写真							
火炎形状							
長さ(m)	1.92	1.94	1.95	1.97	1.89	1.69	1.64
高さ(m)	1.75	1.83	1.91	1.86	1.9	1.79	1.68

時間遅れ (t_{ign}) を伴う着火 爆発



着火点から4m位置における圧力波形
($P=40\text{MPa}$, $d=10\text{mm}$, $t_{ign}=2\text{s}$)

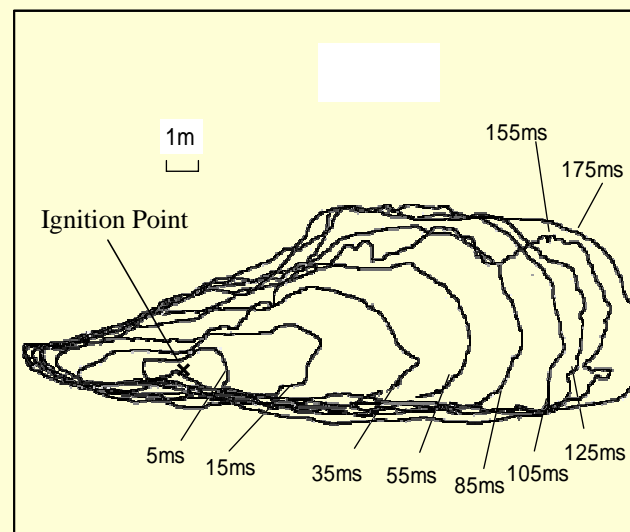
圧力波の立ち上がりが爆燃としては極めて速い。

最大火炎伝播速度は950m/s程度であり、予混合気流れの速度(約250m/s)を考慮しても、正味の火炎伝播速度は700m/s程度。

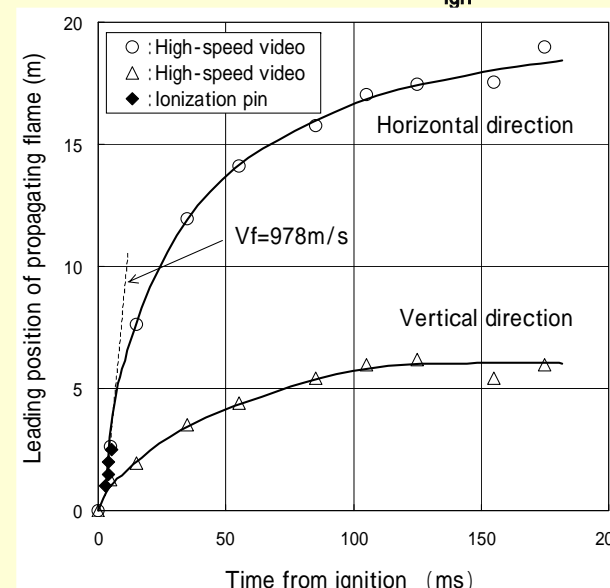
高圧噴出による初期乱流混合により、着火直後から強い乱流予混合燃焼が起こった為と考えられる。

10mmの大開口条件(非定常噴出)では、噴出後の着火時刻が早い程、最大過圧は大きい傾向。

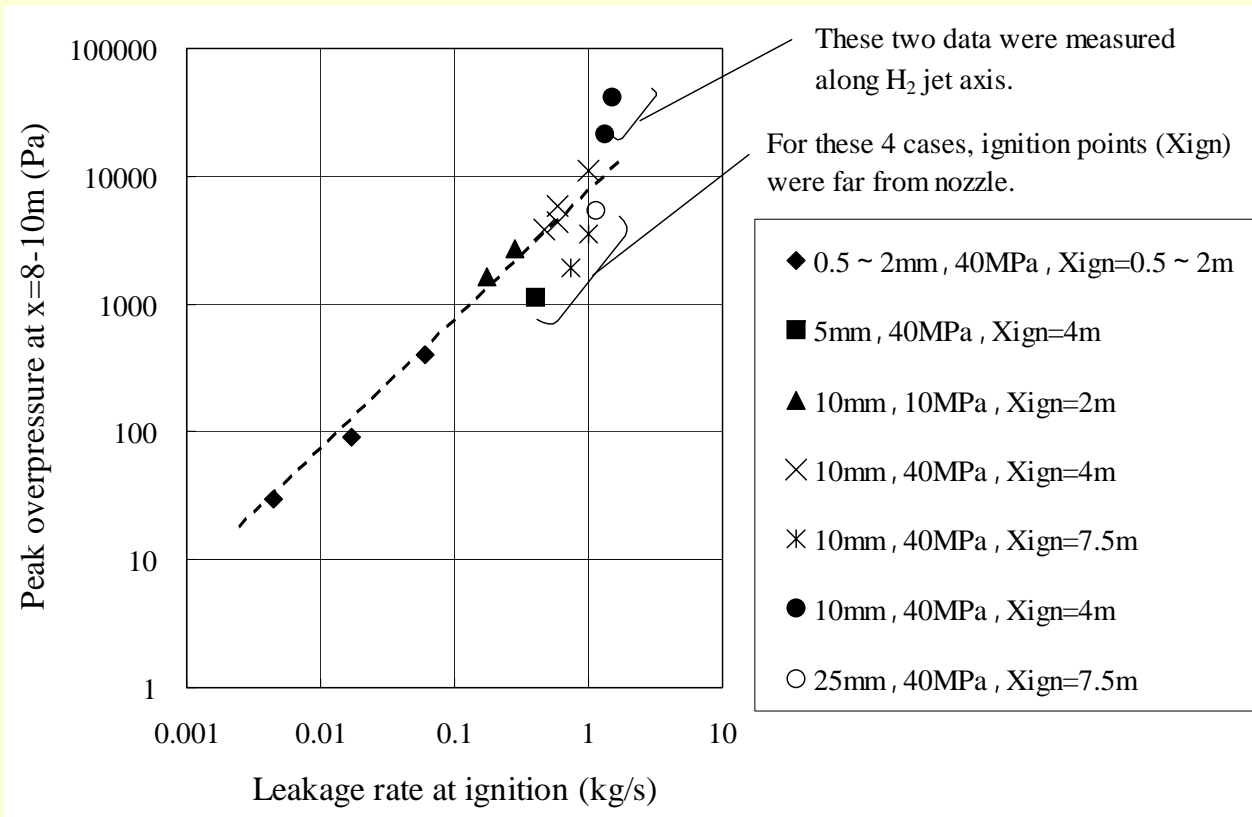
これは、噴出総量より、噴出質量速度(乱流エネルギー)が効いていることを表す。



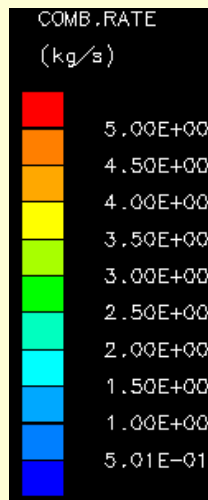
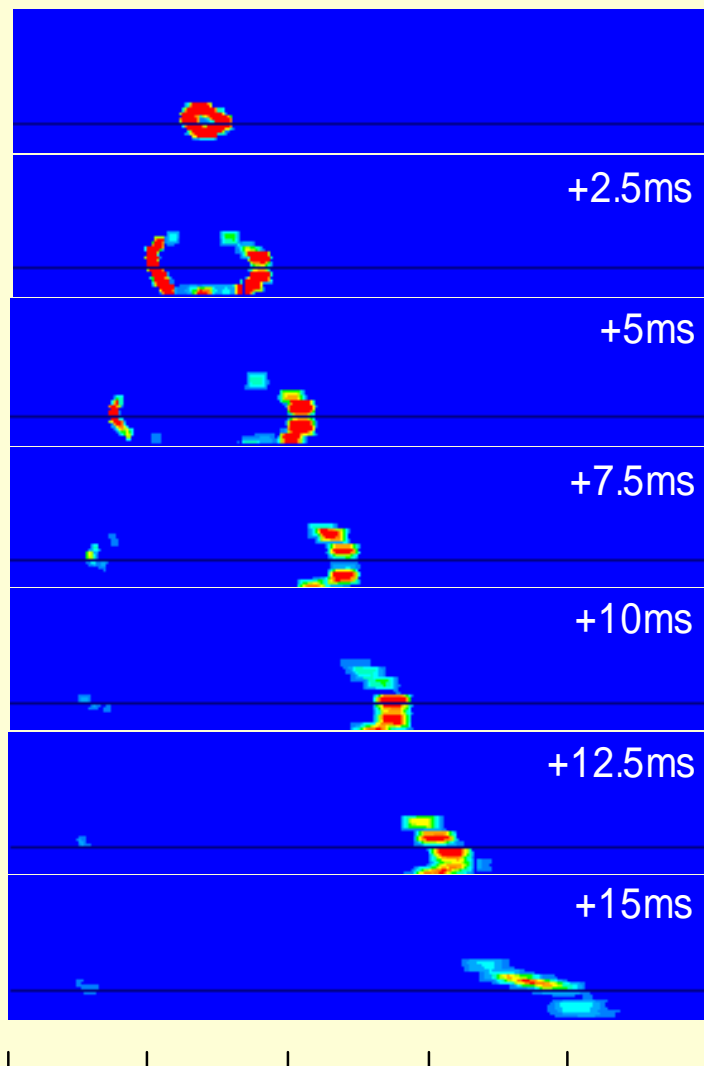
高速度ビデオで捉えた火炎先端位置の移動状況
($P=40\text{MPa}$, $d=10\text{mm}$, $t_{ign}=2\text{s}$)



火炎先端位置の時間変化
($P=40\text{MPa}$, $d=10\text{mm}$, $t_{ign}=2\text{s}$)



着火時の水素噴出流速と最大過圧の関係

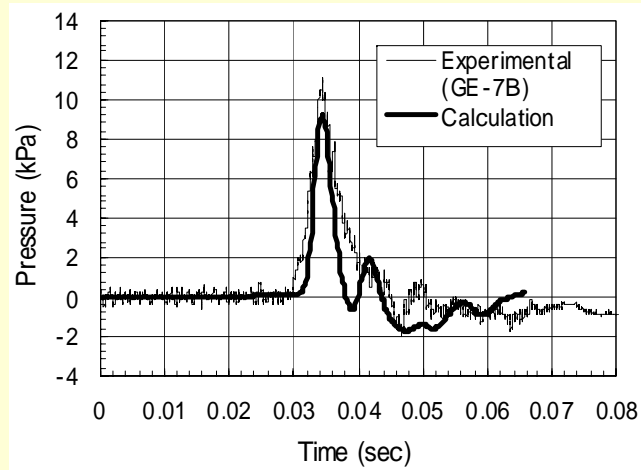


0 5 10 15 20 25 [m]

$$S_t = T_c \cdot 1.8u^{0.412} \cdot L_t^{0.196} \cdot S_{ll}^{0.784} \cdot \nu^{0.196}$$

$$S_{ll} = S_l(1 + F_c R_f)$$

$$R_c = \rho \cdot \frac{S_t^2}{D_f} \cdot \min[m_{fu}, m_{O_2}/s, m_{pr}/(1+s)]$$



爆発シミュレーションにおける初期条件として、噴流・拡散計算で求めた初期乱流特性値を使用。圧力波形状，絶対値，火炎伝播速度 (~700m/s)をほぼ再現できた(乱流モデルはRANS)。

但し， $T_c=2.5$ の比例定数の導入が必要

Leの影響を加味

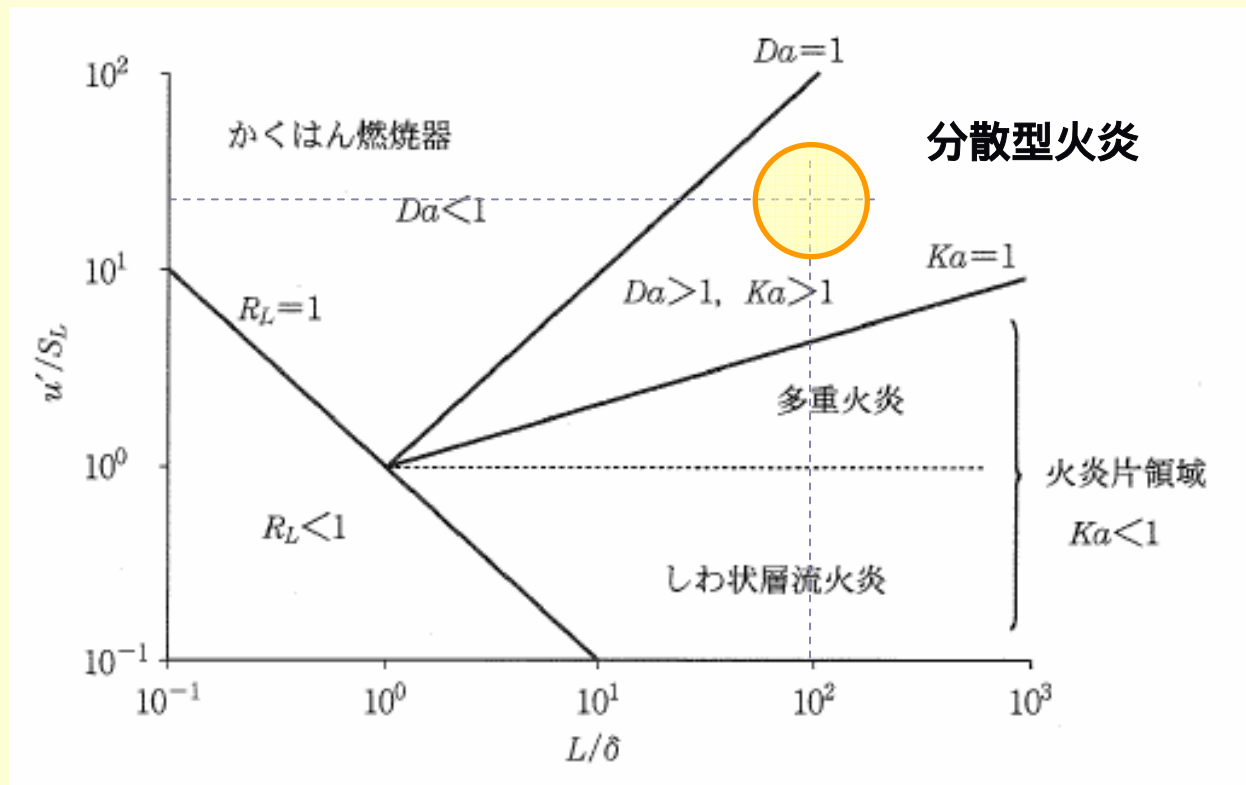
180mm							
60mm							
0mm							
-60mm							
-180mm							
		120mm	280mm	440mm	600mm	760mm	920mm

02/17/04
18:17:38

RATE 1000
EXP 50 ux
FRM 0
ET
000000.0000
COLOR DAY
COLOR

ID 15
PLAY STOP
-> 15

d=0.5mm , P=40MPa



代表的な値として,

$$\sim 5 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$S_L \sim 2 \text{m/s}$$

$$u' \sim 40 \text{m/s}$$

$$\sim 5 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$Ka \sim 1.5$$

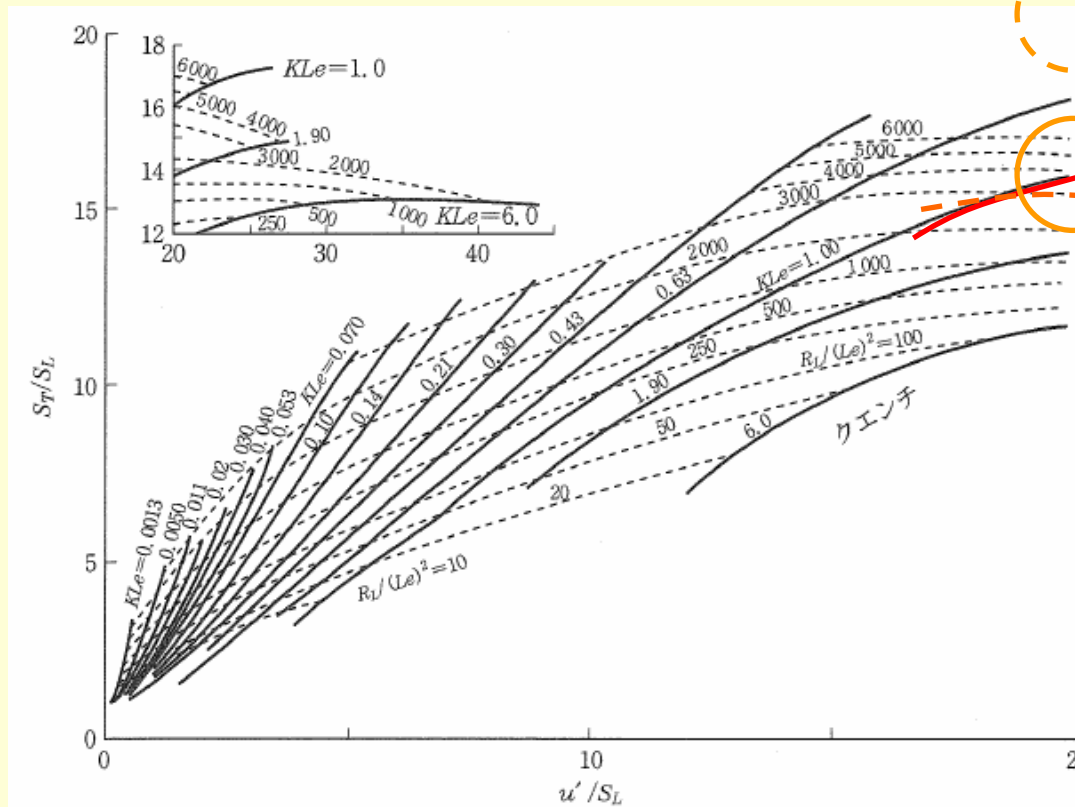
$$Da \sim 5$$

$$L / \delta \sim 10^2$$

$$u' / S_L \sim 20$$

Borghiの乱流火炎構造ダイアグラム

$$(Ka = u' / S_L, Da = S_L / u' \cdot L / \delta)$$



Bradleyによる乱流燃焼速度の一般関係図

代表的な値として,

$$\sim 5 \times 10^{-5} \text{m}$$

$$S_L \sim 2 \text{m/s}$$

$$u' \sim 40 \text{m/s}$$

$$\sim 5 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$Le \sim 0.7$$

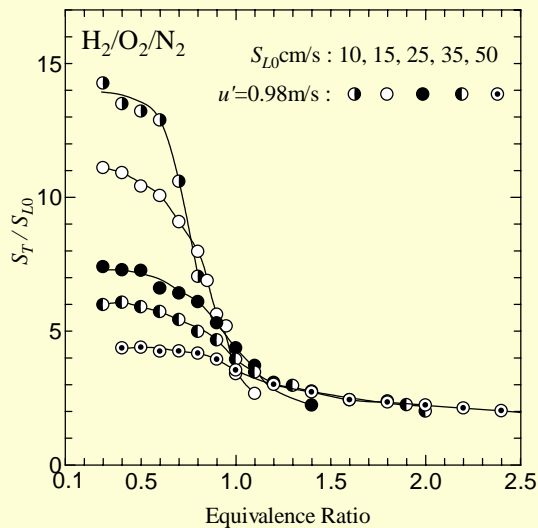
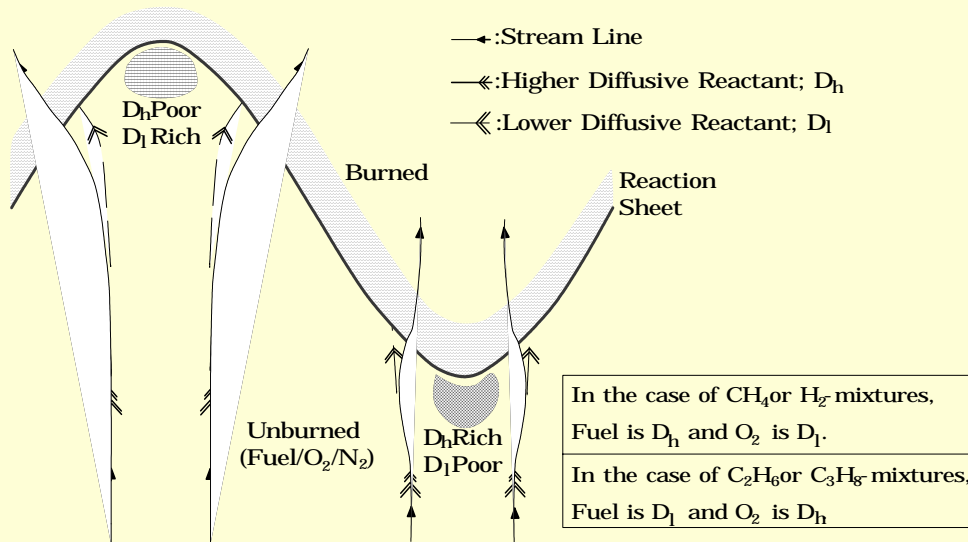
$$Ka \sim 1.5$$

$$(Ka \cdot Le \sim 1.1)$$

$$u' / S_L \sim 20$$

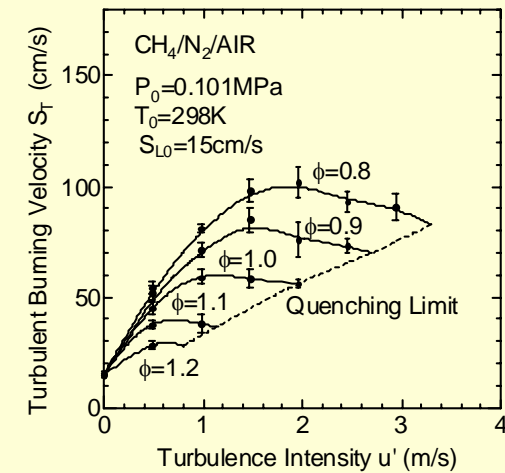
$$R_L \sim 2500$$

爆発解析 - 乱流燃焼モデルの改良 (1/2)

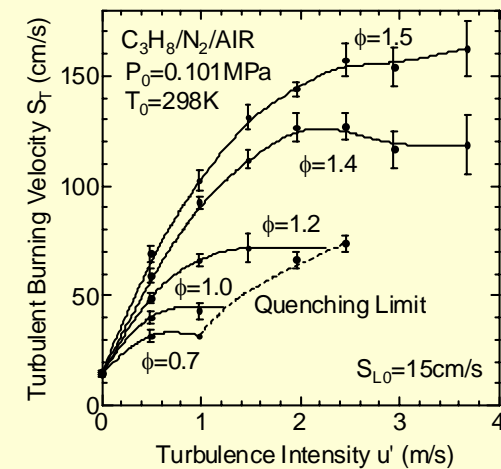


S_T/S_{L0} と ϕ の関係 ($u' = 0.98$ m/s)

- 層流燃焼速度を15 cm/sに揃えた当量比 ϕ の異なるメタンおよびプロパン人工空気混合気の乱れ強さ u' と乱流燃焼速度 S_T との関係では、層流燃焼速度が等しいにも関わらず同一乱れ強さで乱流燃焼速度が当量比により大きく異なる。
- これは、火炎面での選択拡散によって起こる現象であり、水素/Air予混合気でも、当量比の小さい領域で燃焼速度は増加する。
- この現象を、爆発シミュレーションに組み込み、特に希薄域での精度向上を図った。



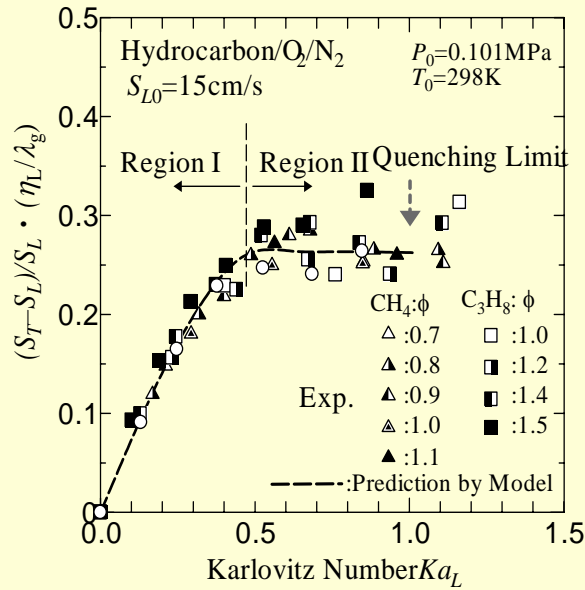
(a) メタン



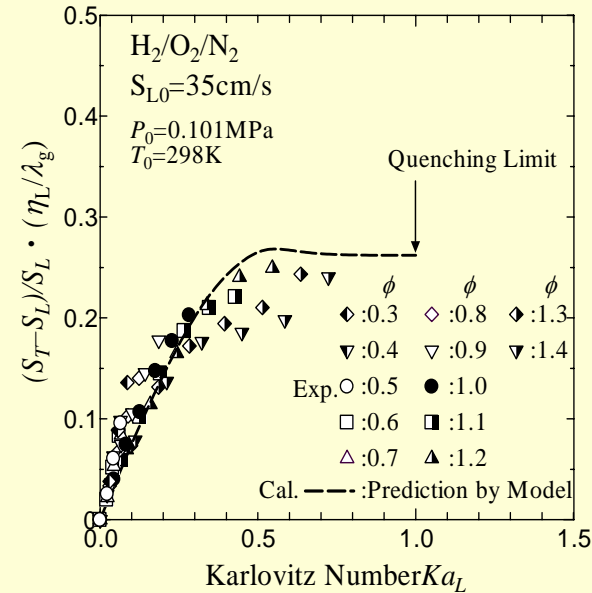
(b) プロパン

層流燃焼速度を揃えた炭化水素 - 酸素 - 窒素混合気の乱流燃焼速度特性 ($S_{L0} = 15$ cm/s)

爆発解析 - 乱流燃焼モデルの改良 (2/2)



$S_L(\text{Fuel}, \phi, S_{L0})$ を基準とした
乱流燃焼速度の整理(CH₄ & C₃H₈)



$S_L(\text{Fuel}, \phi, S_{L0})$ を基準とした
乱流燃焼速度の整理(H₂, $S_{L0}=35\text{cm/s}$)

$$0 < \text{Ka}_L \leq 0.5$$

$$S_t = (S_L + \frac{\sqrt{2}}{2} a_m \cdot \alpha \cdot u') (1 - \text{Ka}_L^2)$$

$$0.5 < \text{Ka}_L \leq 1.0$$

$$S_t = (\frac{3}{8\sqrt{2}} \alpha \frac{\lambda_g}{\eta_L} + \frac{3}{4}) S_L$$

・実験により乱流燃焼速度特性を把握・評価, 乱流燃焼速度特性を決定する重要な因子である乱流燃焼時の選択拡散効果を考慮した平均局所燃焼速度を提案し、Karlovitz数により場合分けされた以下の式により乱流燃焼速度を定量化 (Brayの式からの精度向上)

$$S_t = 1.8u^{0.412} \cdot L_t^{0.196} \cdot S_L^{0.784} \cdot \nu^{-0.196}$$

Brayの式

まとめ

1. 噴出火炎に関して(噴出直後の着火)

火炎スケール(L)は、ノズル径及びM(流量)^{0.5}にほぼ比例。理想ノズルに対する実験式として、 $L=399.2 \cdot d \cdot P^{0.5}$ (d:ノズル径, P:[MPa])が得られた。

水素噴出後に形成されるショック面(Mach Disk)の背後で保炎されている。そのショック面の背後に亜音速ノズルが存在すると考えると、火炎スケールが $P^{0.5}$ 及び $M^{0.5}$ に比例した関係が説明できる。

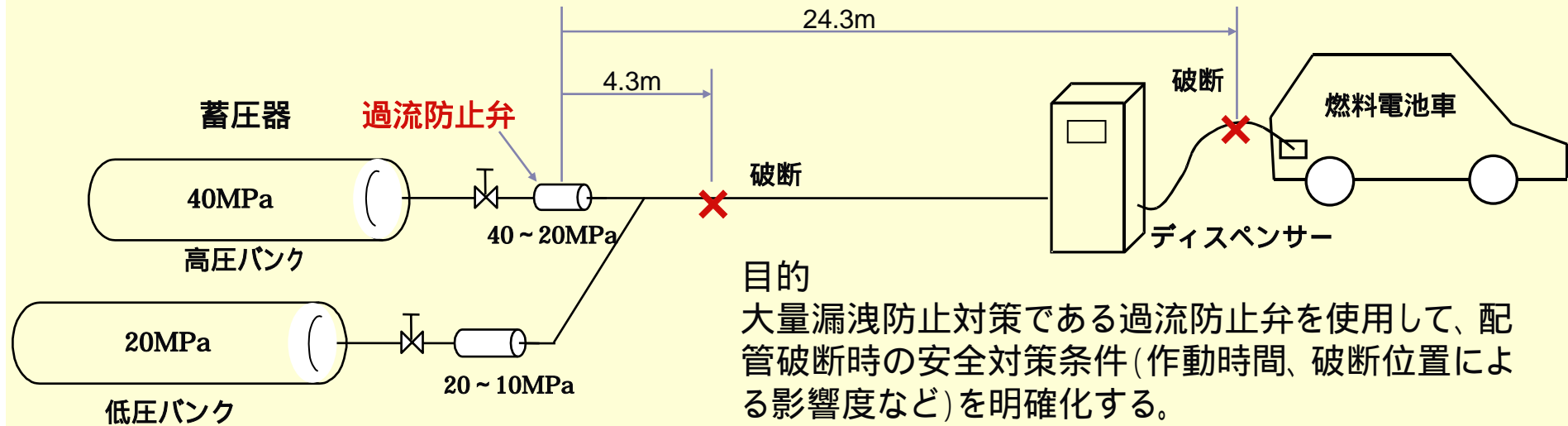
2. 爆発に関して(時間遅れを伴う着火)

圧力波の立ち上がりは爆燃としては極めて速いが、これは高圧噴出による初期乱流混合により、着火直後から強い乱流予混合燃焼が起こる為と考えられる。これは、噴出後の着火時刻が早い程、最大過圧は大きい傾向におること等の結果より裏付けられる。

噴流計算の結果(乱流特性値)を初期条件として、爆発シミュレーションを行い、圧力波形状、絶対値、火炎伝播速度(～700m/s)をほぼ再現できた(乱流モデルはRNS)。但し、2.5程度の比例定数の導入が必要であり、 Le の影響のモデル化など、今後の課題である。

$P=40\text{MPa}$ の水素噴出に着火した伝播火炎の乱流特性値は、Borghiniの相関図における分散火炎領域に当たる($Ka>1$, $Da<1$)。

安全対策例 過流防止弁



実験結果

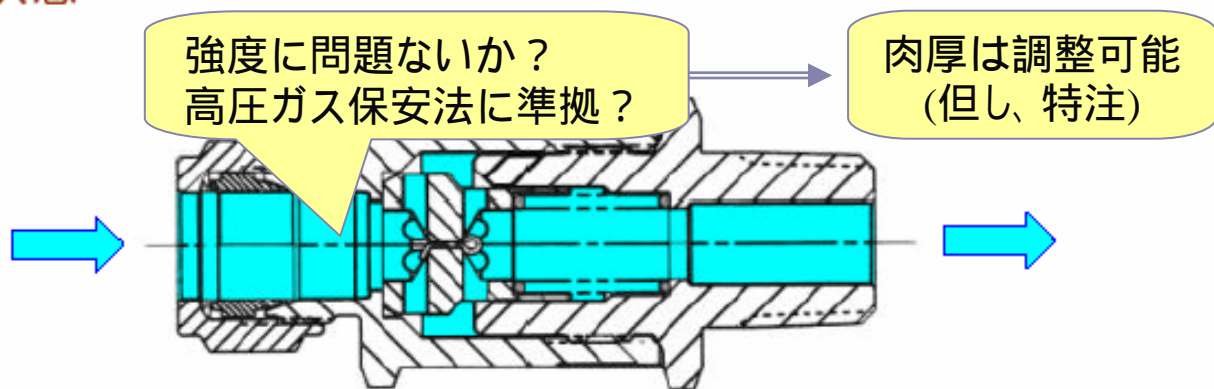
作動時間

過流防止弁の作動時間は数ミリ秒であった。

爆風圧

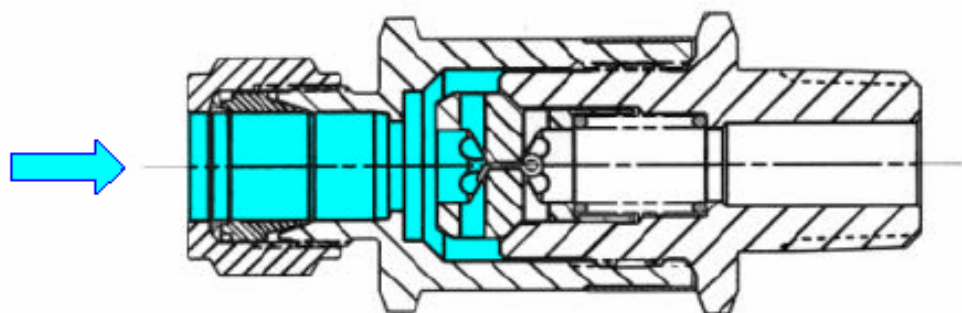
過流防止弁から24.3m離れた位置で破断した場合、破断位置から6m地点(敷地境界)における爆風圧は20kPa未満。

開状態



通常はスプリング力によってポペットが開状態に保持されています。

閉状態

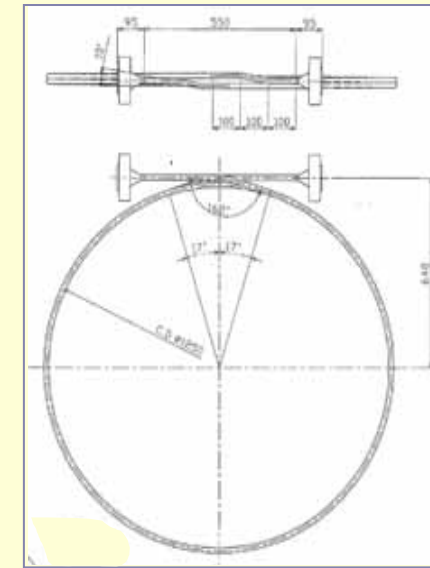
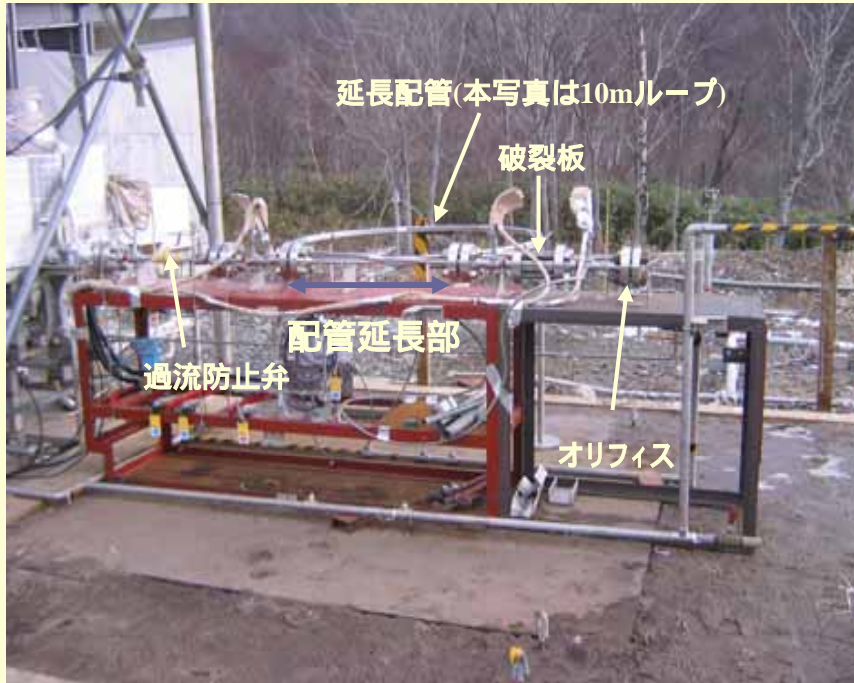


流量が設定値以上になるとポペットが閉止します。

参考
Swagelok社製も実施
(完全に遮断しないタイプ)

図は、
Circle Seal Controls社製

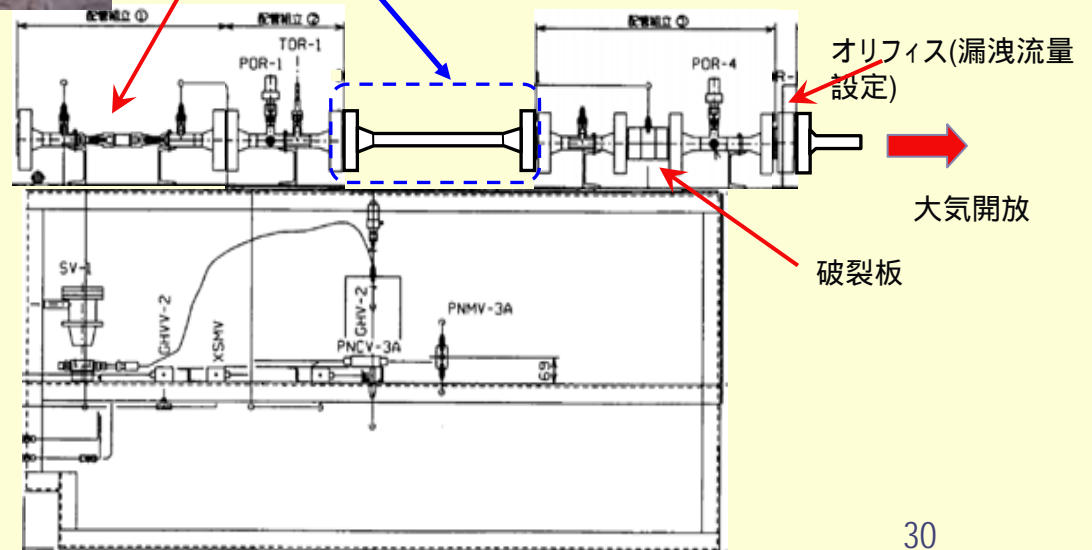
実験装置 & コンフィグレーション



ループ配管図

コンフィギュレーションに
合わせ、延長配管を挿入

過流防止弁



コンフィギュレーション

想定 配管長さ	延長配管	備考
4.3m	延長なし	
8.8m	1m × 21.2mm	
14.3m	10m × 10.9mm	10mループ
24.3m	20m × 10.9mm	20mループ

(b) 残留ガス影響度確認実験用装置

水素実在気体効果の影響検討

- 高圧下では、水素ガスは理想気体と異なる挙動を示す
- 水素ガスの実在気体に対する状態方程式を用いて、ノズル内での状態量変化を1次元的に解析し、漏洩流量への実在気体効果の影響を検討した

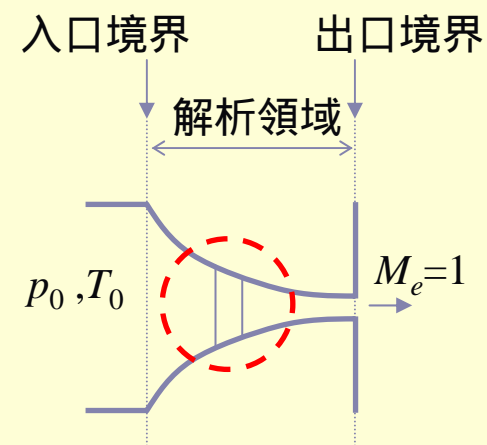
Peng-Robinson式 (PR式)

$$p = \frac{\rho \mathcal{R} T}{\mathcal{M} - b\rho} - \frac{a\rho^2\alpha}{\mathcal{M}(\mathcal{M} + b\rho) + b\rho(\mathcal{M} - b\rho)}$$

$$a = \frac{0.45724 \mathcal{R}^2 T_c^2}{p_c}, \quad b = \frac{0.07780 \mathcal{R} T_c}{p_c}$$

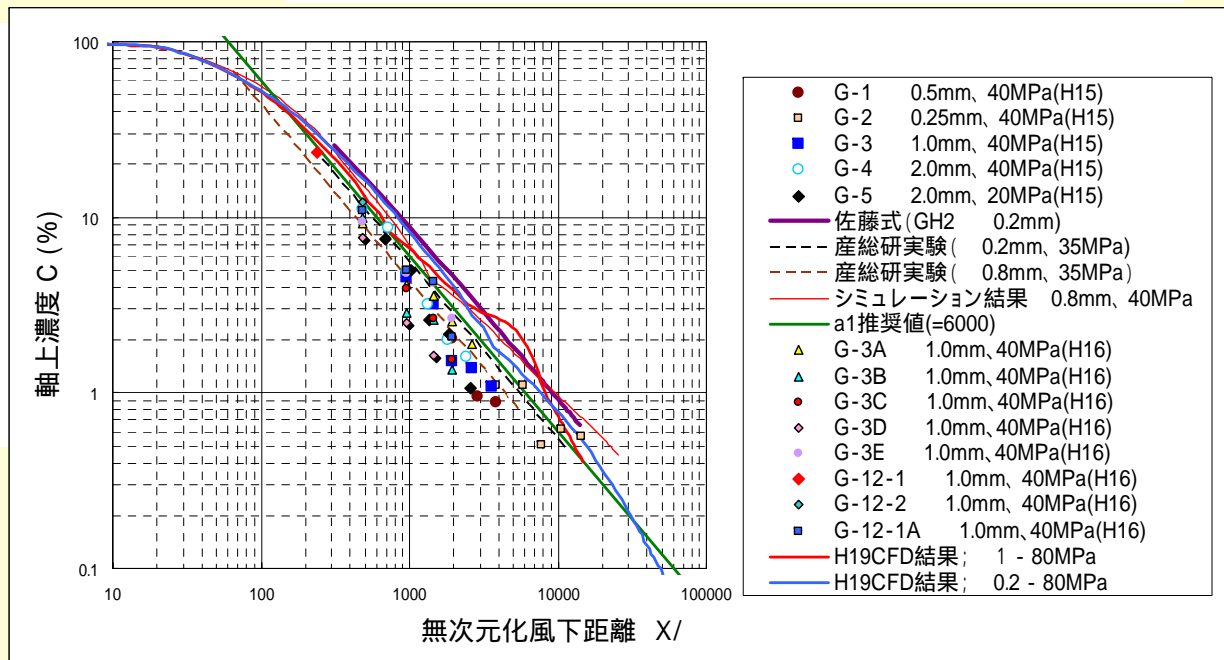
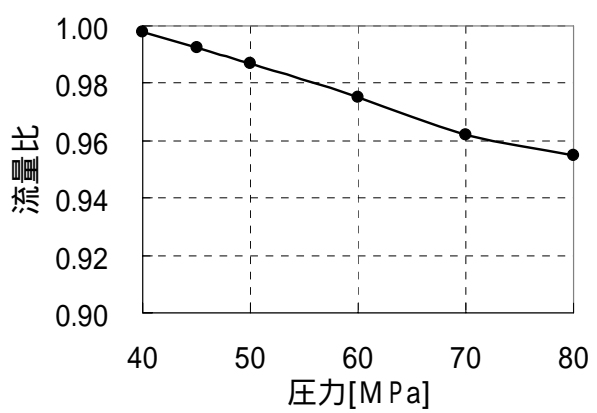
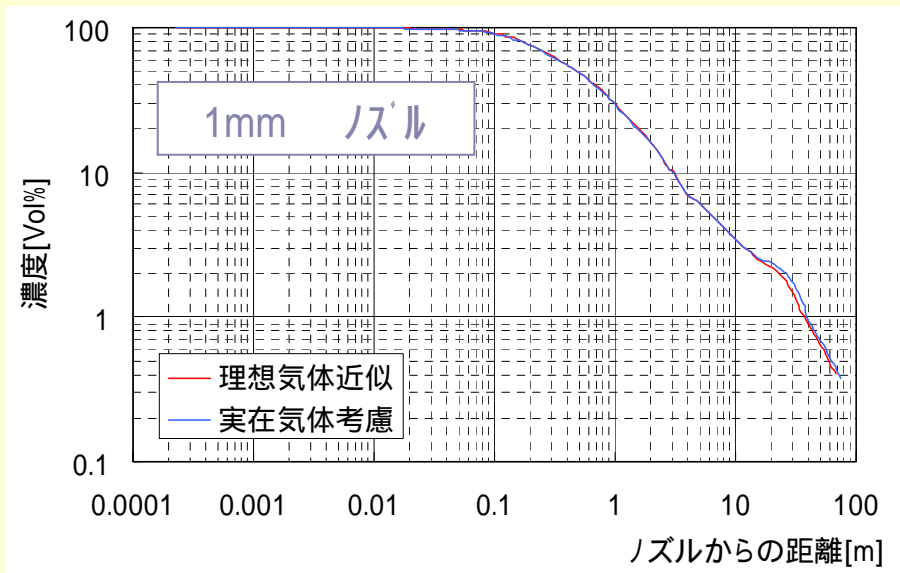
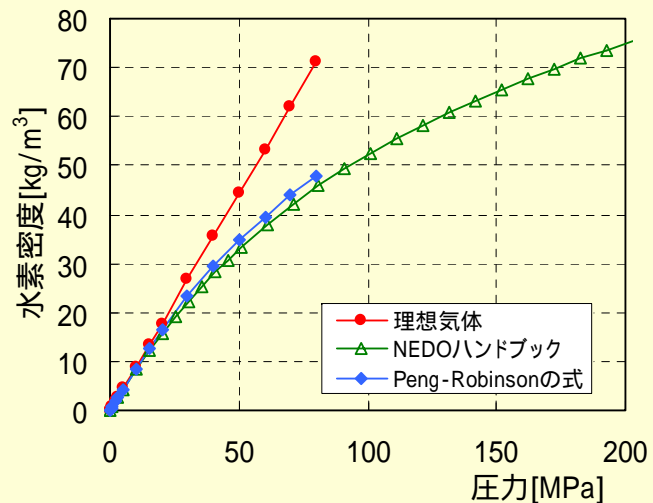
$$\alpha = \left[1 + m \left\{ 1 - (T/T_c)^{1/2} \right\} \right]^2, \quad m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

臨界圧力 p_c [Pa]	1.30×10^6
臨界温度 T_c [K]	33.25
偏心係数 [-]	-0.216
気体定数 \mathcal{R} [J/(kmol·K)]	8314.5
分子量 \mathcal{M} [kg/kmol]	2.0159

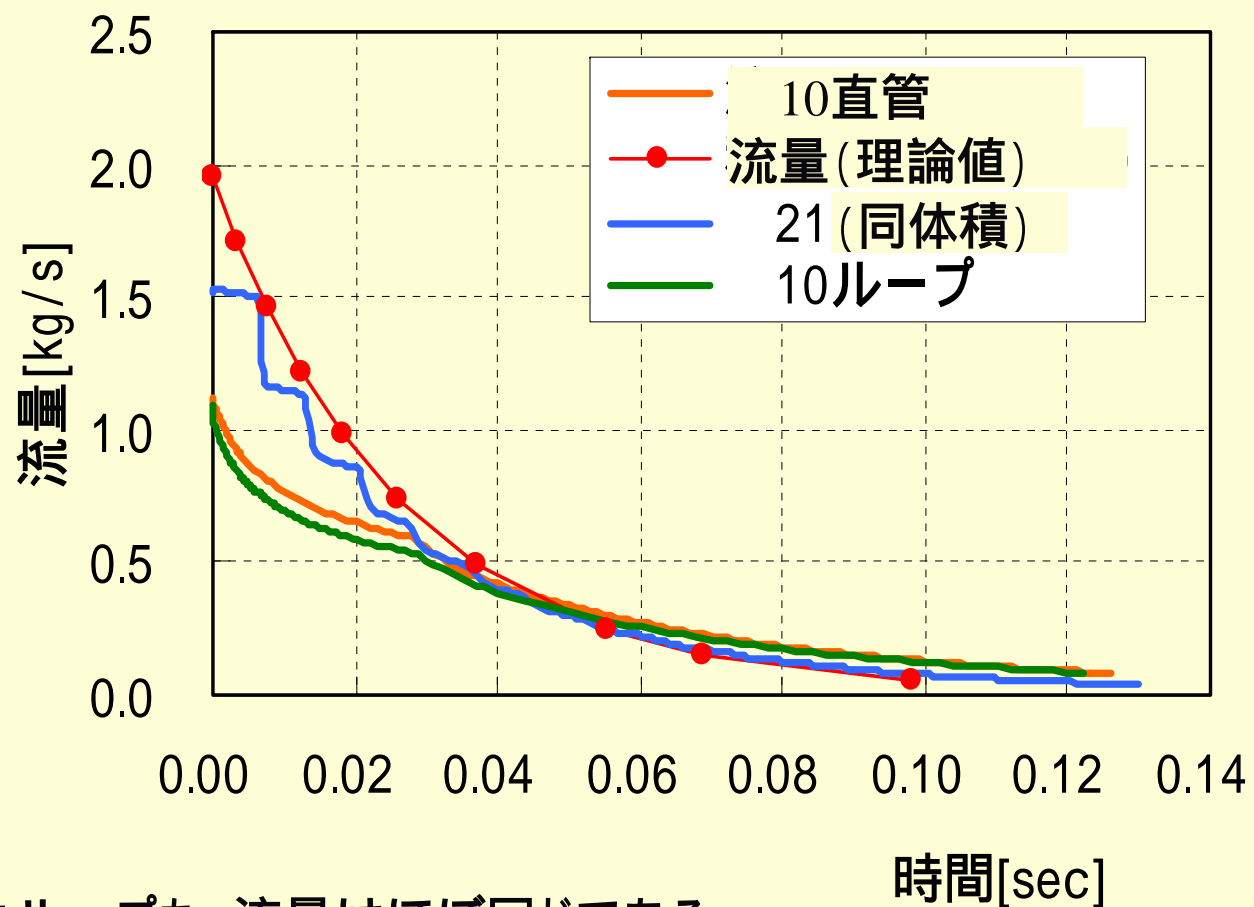


ノズル内での膨張過程での、連続の式、運動量の式、エネルギーの式を1次元的に解く事で、状態量の変化を解析した。

実在気体の噴出・拡散



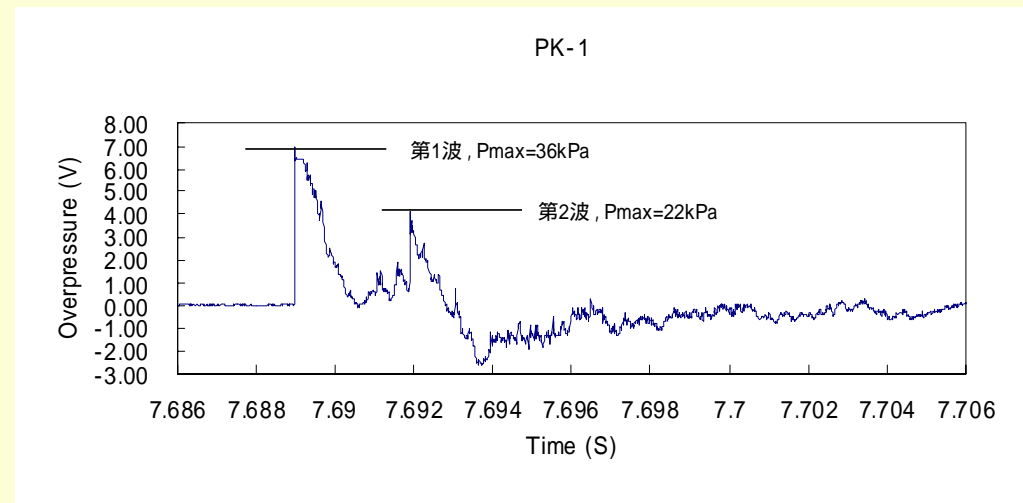
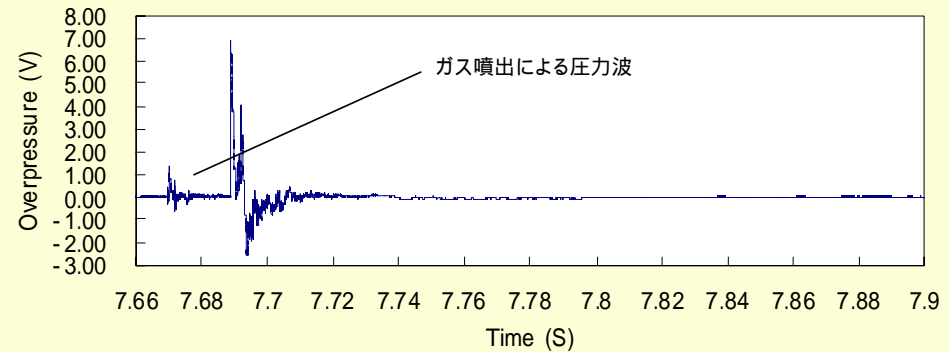
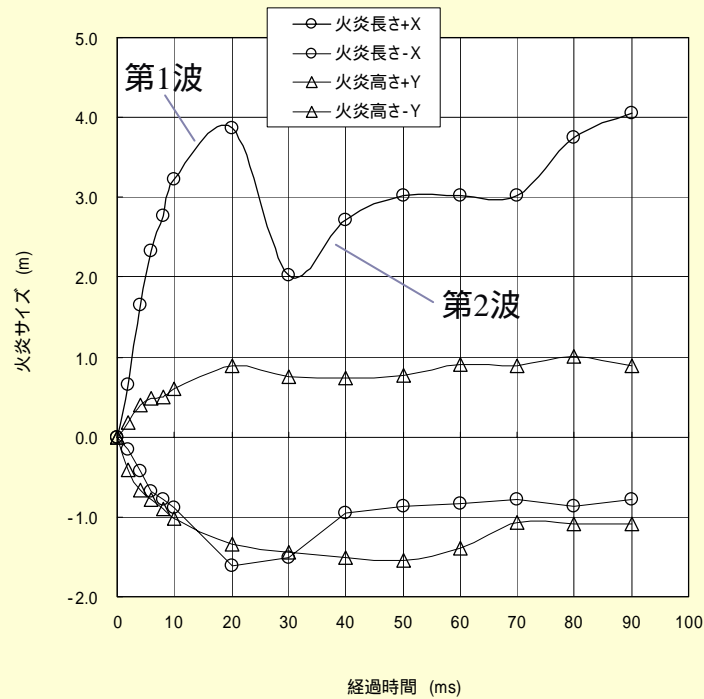
非定常CFD解析(配管からの流出流量)



- ・直管もループも、流量はほぼ同じである。
- ・配管径が大きいと、初期の流量が大きくなる。

爆発の典型的圧力波形 (40MPa, 10mm, 24m相当, td=51ms)

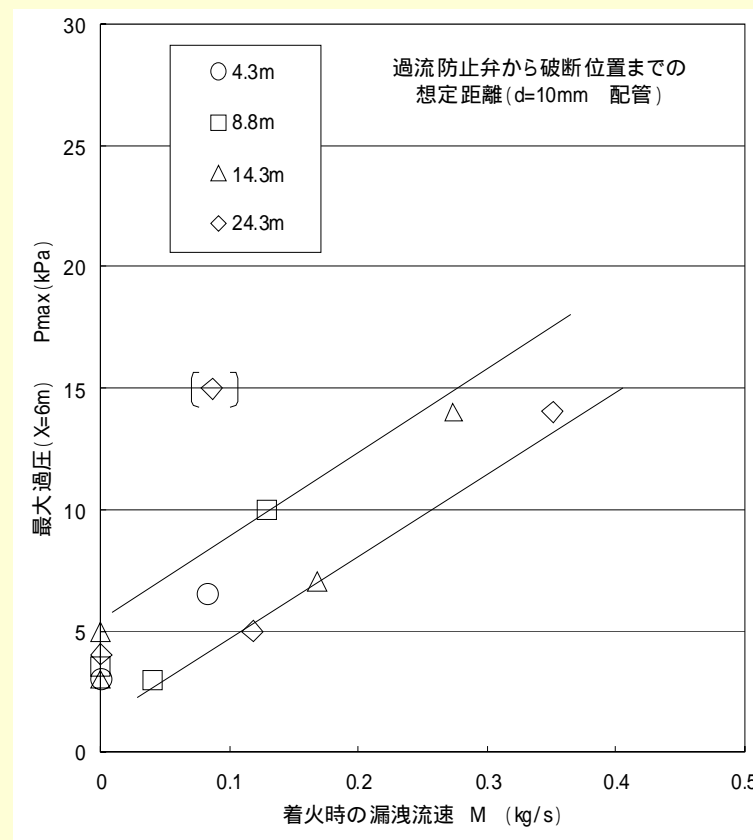
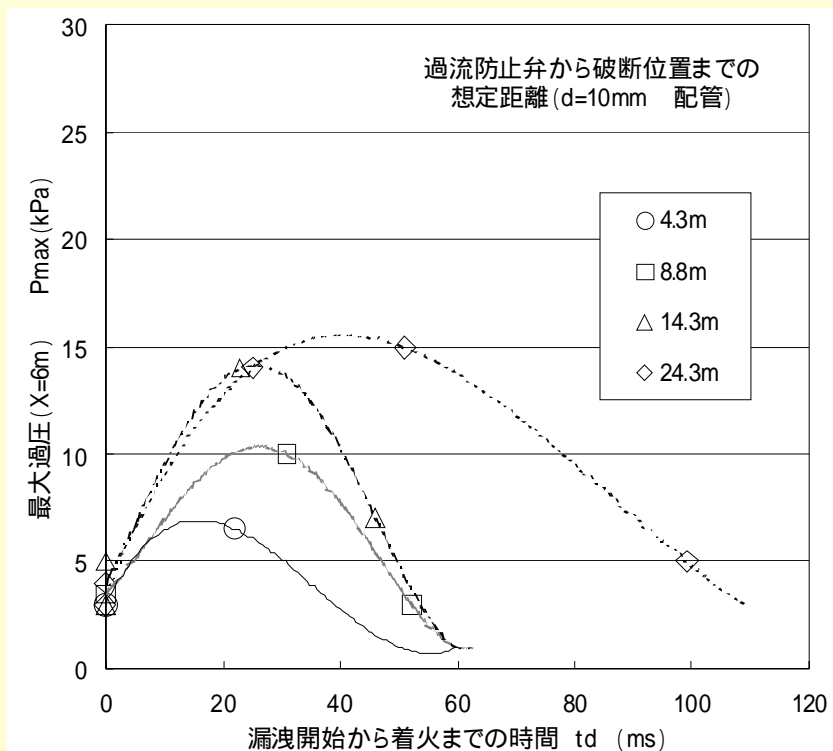
PK-1



着火遅れを伴う爆発の場合には, 3つの圧力ピークが見られる
 高压水素の噴出時に生じる圧力波
 予混合気爆発による圧力波
 連続放出している水素噴流の爆発による圧力波

過流防止弁の着火タイミング

着火遅れ時間(漏洩開始から着火までの時間)と最大過圧との関係



最大過圧は、 t_{ign} によって大きく変化し、水素の全量が放出するまでの時間より早期に着火した場合に、最大となる傾向がある

その最大となる着火遅れ時間は、想定した配管長が長くなるほど大きくなり、着火した時点における漏洩流量 (kg/s) と最大過圧には相関が見られる