



アドバンス・シミュレーション 第3回 ・セミナー 2025

2025年 7月18日(金) 開催

プログラム

1. アドバンスソフト株式会社についてと、先生のご紹介 1
2. **招待講演**
「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 3
東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様
3. アドバンスソフトからの情報提供 34

講演概要

「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」

東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様

火災や爆発災害の発生防止や被害軽減をおこなうためには、現象を科学的に的確に把握する必要がある。災害の拡大過程は火災と爆発では異なっており、火災では比較的低速の可燃性固体に沿った火炎の燃え広がり現象、ガス爆発・粉じん爆発では高速の可燃性混合ガス・可燃性浮遊粉じん雲中の火炎伝ば現象が重要な過程となる。

本講演では、これらの現象に関する燃焼学的な検討結果について解説する。また爆発時の爆風の発生現象についても解説する。爆風の強度予測は、保安距離を法律や基準で定める時にも必要となり、その予測精度の向上は重要な課題となっている。



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17階西

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

URL: <https://www.advancesoft.jp/> E-mail: office@advancesoft.jp

アドバンスソフト株式会社についてと 先生のご紹介

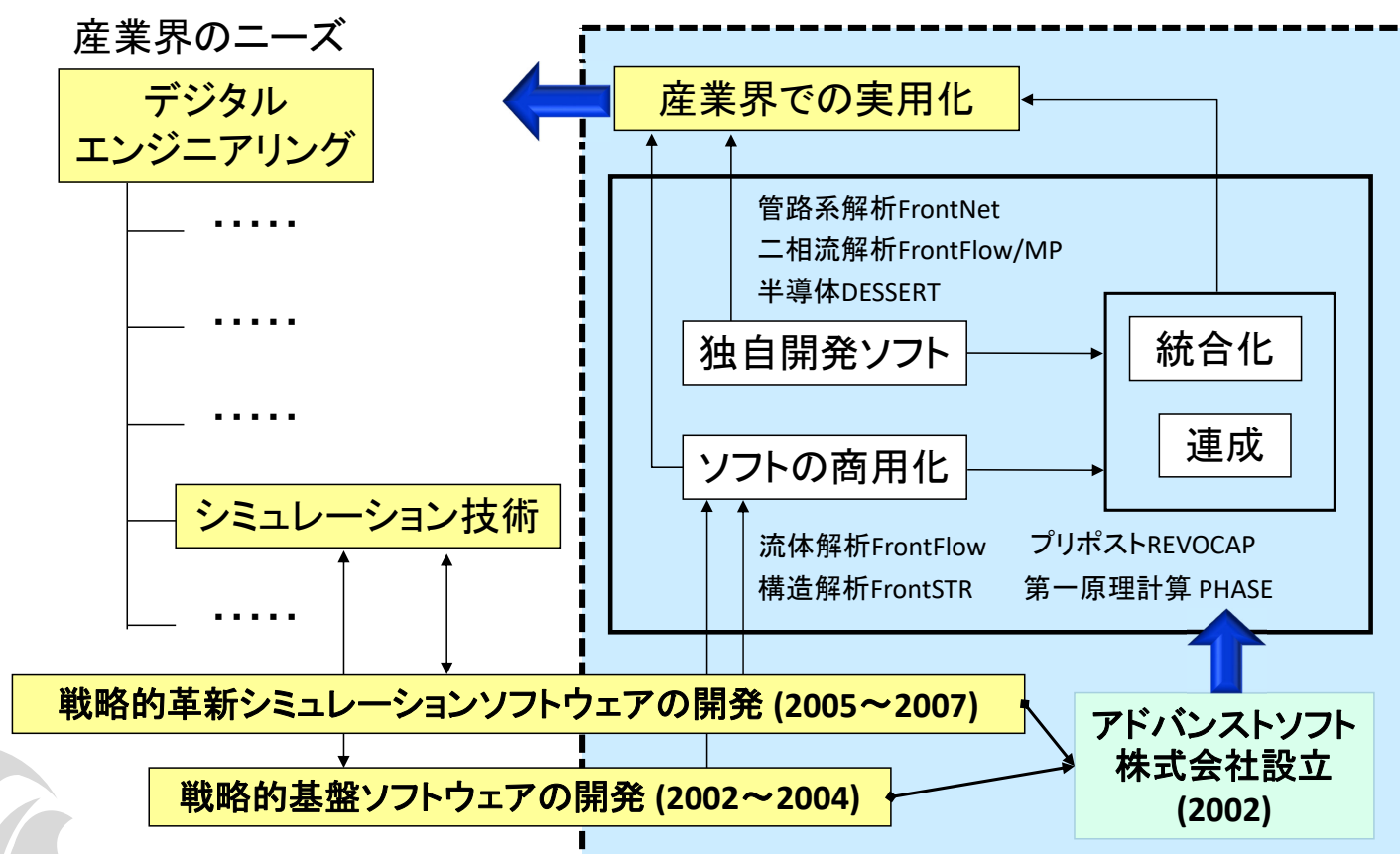
第3回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2025
(東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻
教授 土橋 律 様)

2025年7月18日 (金) 開催
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2025 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

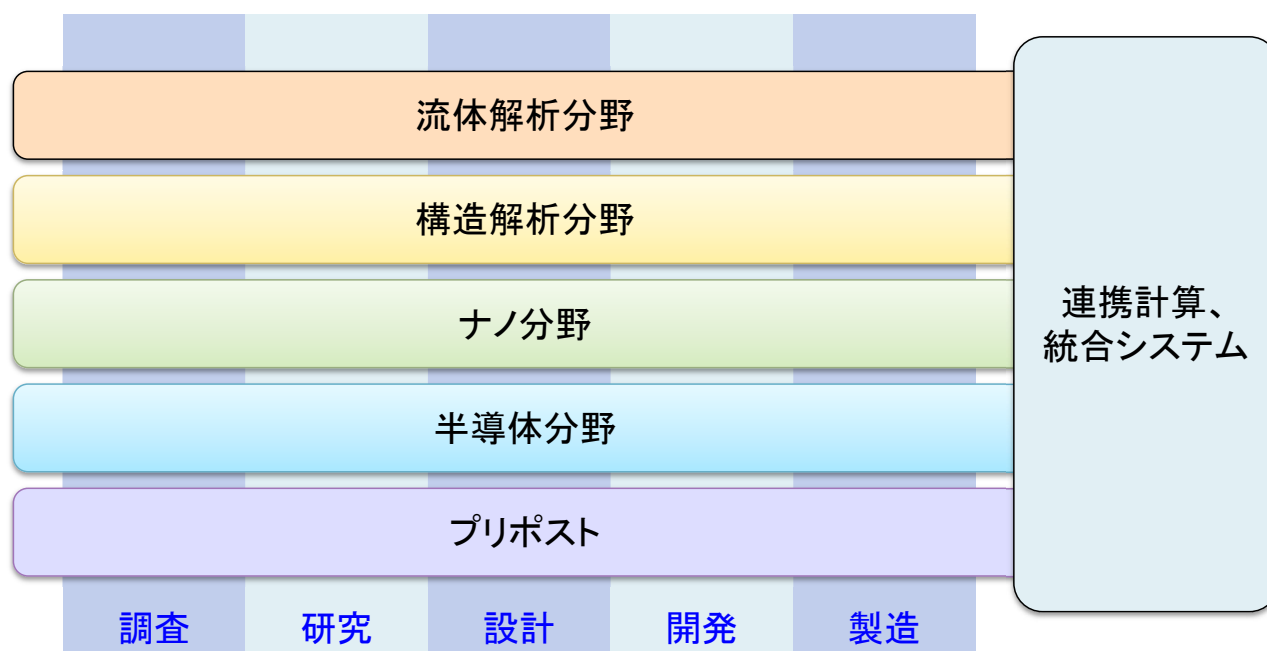
1

アドバンスソフトとは



Copyright ©2025 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

土橋 律 先生 のご紹介

ご経歴

1983年	東京大学大学院 工学系研究科 反応化学専門課程 修了。 富士写真フイルム株式会社 入社。
1990年	東京大学 工学部 反応化学科 助手。
1998年	東京大学 工学系研究科 化学システム工学専攻 講師、准教授を経て、
2005 – 2024年	東京大学 工学系研究科 化学システム工学専攻 教授。
2023年	東京理科大学 国際火災科学専攻 教授。

ご研究内容

専門は、燃焼学、安全工学。

火災・爆発災害のリスク低減への 燃焼研究の応用

東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻
土橋 律



本日の内容

- 燃焼現象と火災、爆発現象
- 火災、爆発災害の過程とリスク
 - 発生確率関係：燃焼限界を例に
 - 影響の大きさ関係：爆風圧を例に
- 燃焼の特異現象など

土橋は、シミュレーションの研究にはあまりかかわってきませんでしたので、シミュレーション結果の紹介ではなく、燃焼現象を考慮した安全管理の考え方や今後の課題などを中心にお話します。

燃焼による災害：火災・爆発

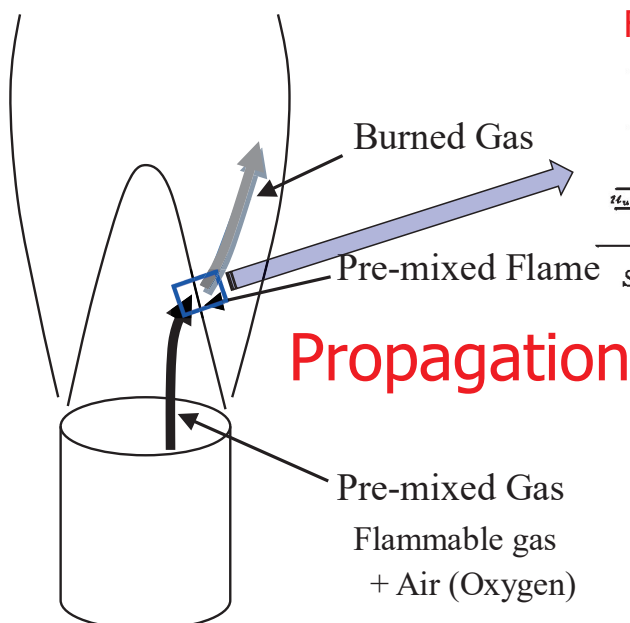
■ 燃焼研究の対象

- 燃焼装置の開発、改良（高性能、省エネ、低環境負荷）
- 安全への応用（燃焼による事故への対応）
燃焼による災害：火災、爆発（ガス爆発、粉じん爆発）

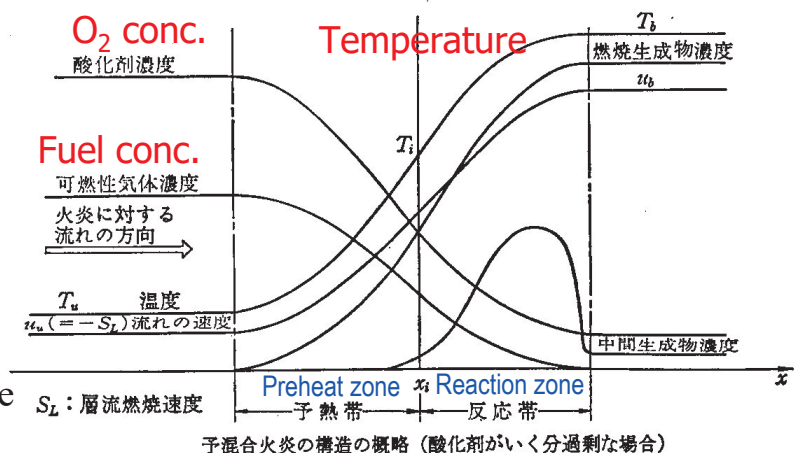
■ 燃焼の2つの形態と火災、爆発

- 予混合燃焼 → ガス爆発
- 非予混合燃焼（拡散燃焼） → 主に火災

予混合火炎（燃焼）と拡散火炎（燃焼）



予混合火炎



火炎帯（予熱帯＋反応帯）は $\sim 0.1\text{mm}$

- ・温度・濃度の急激な変化
- ・激しい輸送現象（熱、物質）
- ・化学反応発生

⇒シミュレーション困難

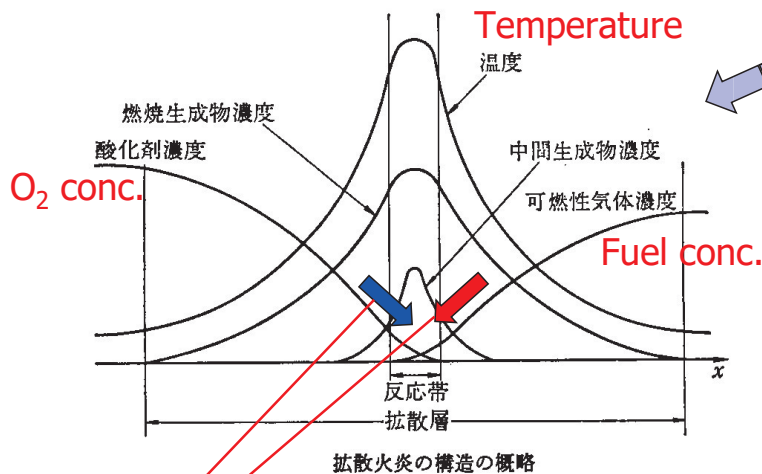
平野敏右：ガス爆発
予防技術、海文堂
(1983) より

予混合火炎(燃烧)と拡散火炎(燃烧)

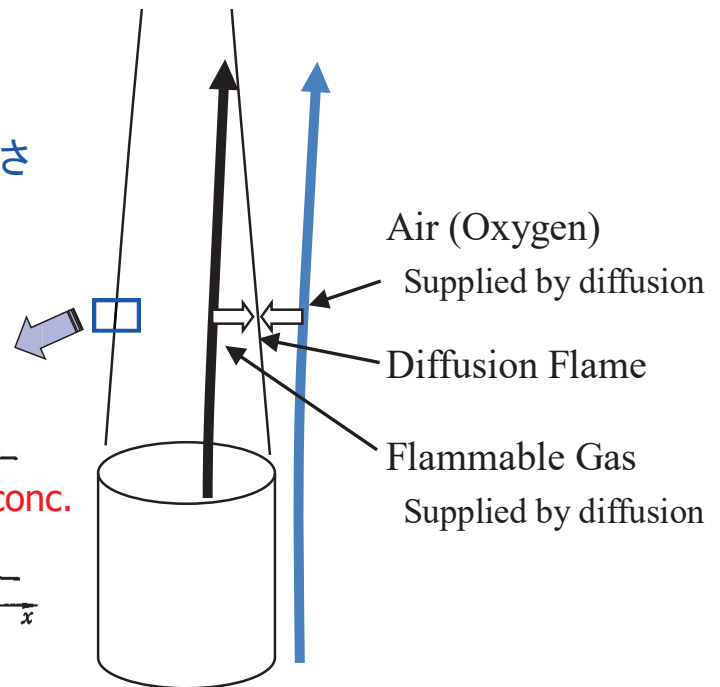
分子拡散速度支配の燃烧反応帯

⇒「拡散火炎」

非予混合燃烧も、乱流等の影響小さければほぼ拡散火炎



分子拡散



拡散火炎

予混合火炎(燃烧)と拡散火炎(燃烧)

	予混合火炎 (燃烧)	拡散火炎 (燃烧)
火炎 (燃烧帯) の形態	燃料と酸化剤は火炎に入る前に予め混合している	燃料と酸化剤が別々に火炎の両側から供給される
律速過程	化学反応, 熱伝導	分子拡散 燃料供給速度
火炎の進行、拡大	火炎は伝ばする “燃烧速度” が定義される (火炎伝ば)	火炎は伝ばしない 燃烧範囲は拡大する (燃え拡がり)
例	ブンゼンバーナー火炎の内炎 ガス爆發時の火炎	ろうそくの火炎 火災時の火炎

予混合火炎(燃烧)と拡散火炎(燃烧)

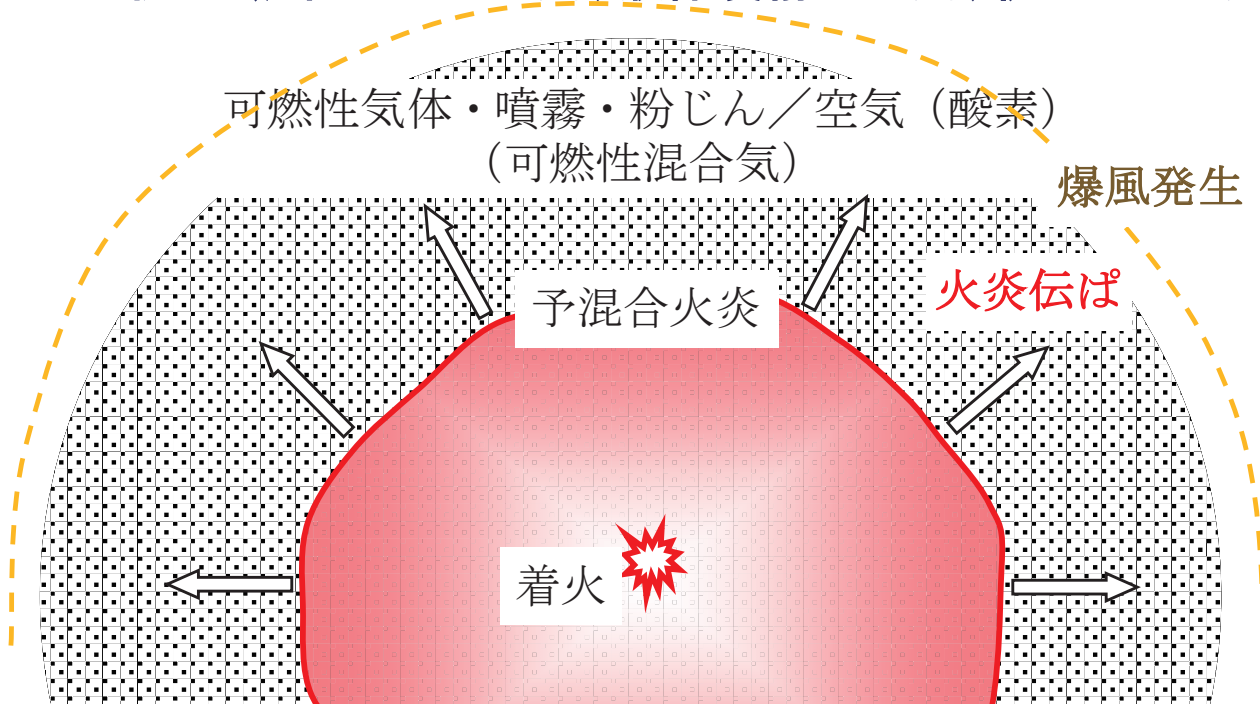
火炎が動くメカニズム

予混合火炎：火炎は **伝ばする (propagate)**
高速で伝ばする

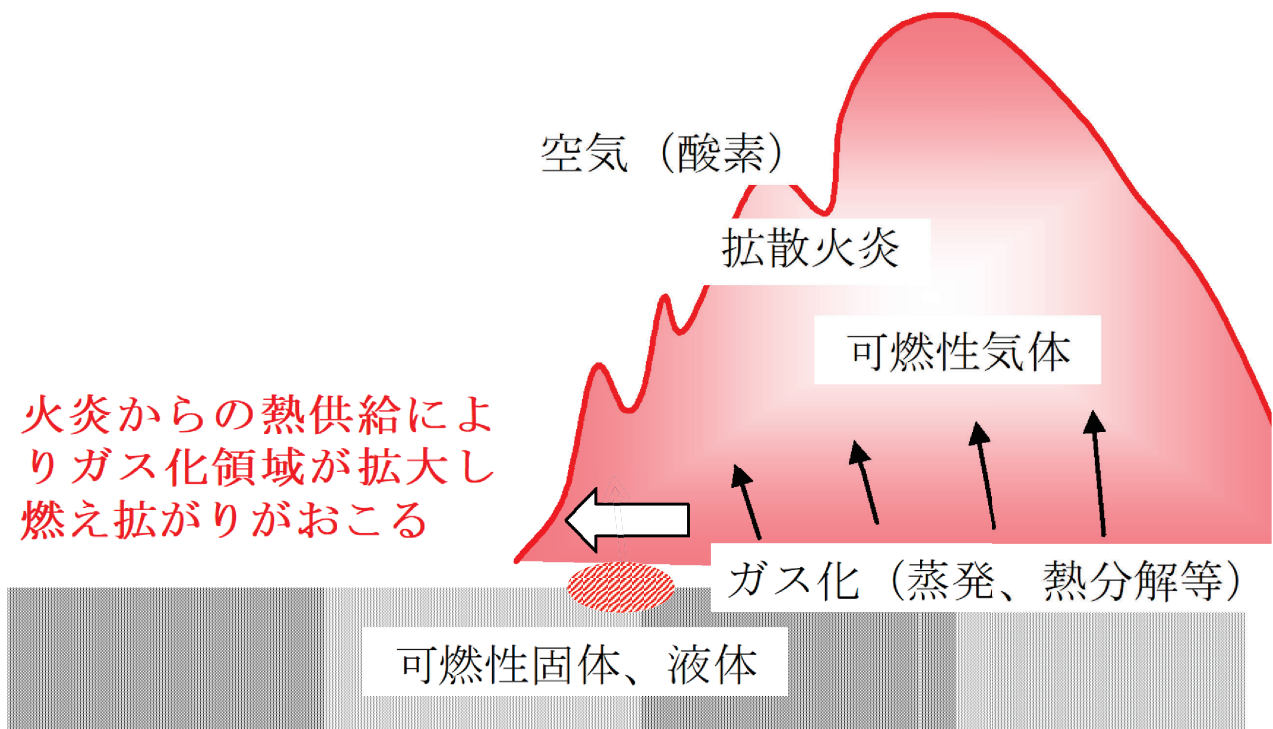
拡散火炎：伝ばはしない
燃烧範囲は**燃え広がり**機構で
拡大(火炎先端は移動する)
(**flame spreading**)

燃烧波の伝ば(開放空間中)

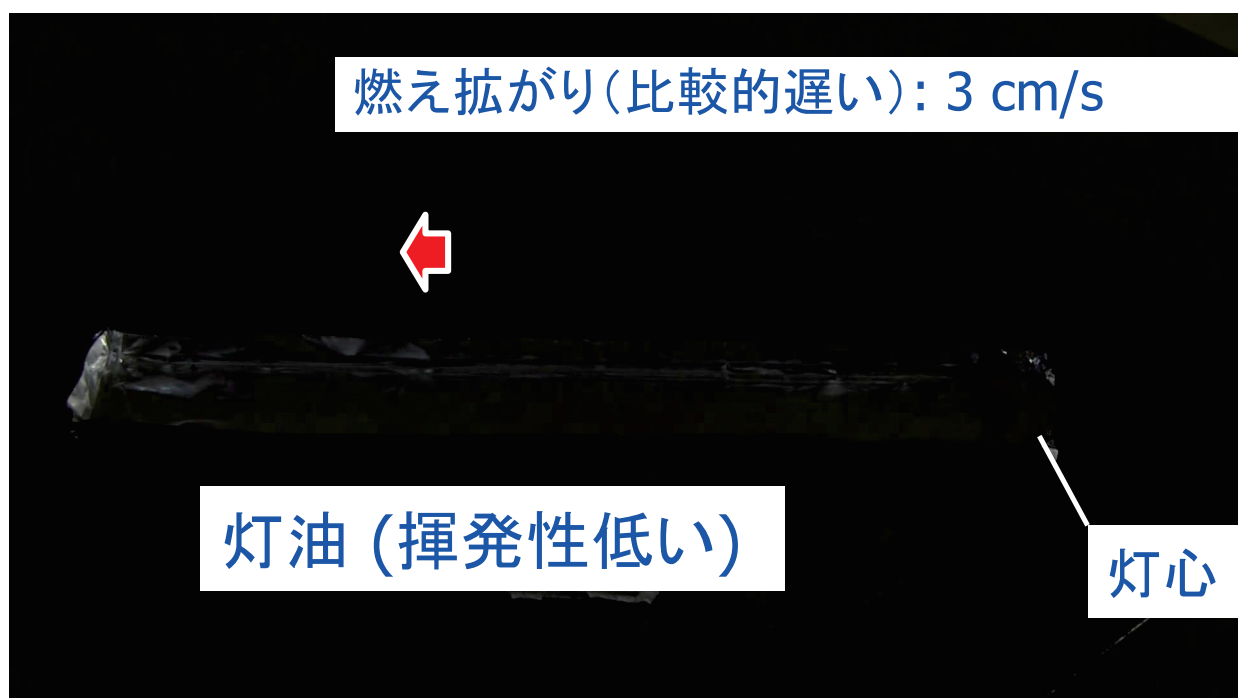
例：可燃性ガス／空気、液体噴霧／空気、粉じん／空気



引火点以下の環境における可燃性液体上の火炎の燃え広がり



火炎の燃え広がり (拡散火炎)



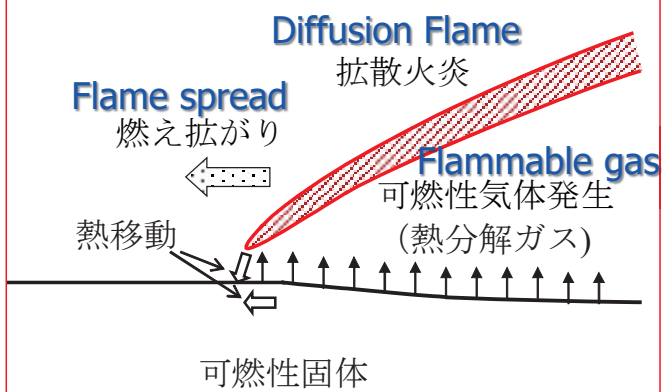
灯油：引火点は、約 50℃

火災とガス爆発

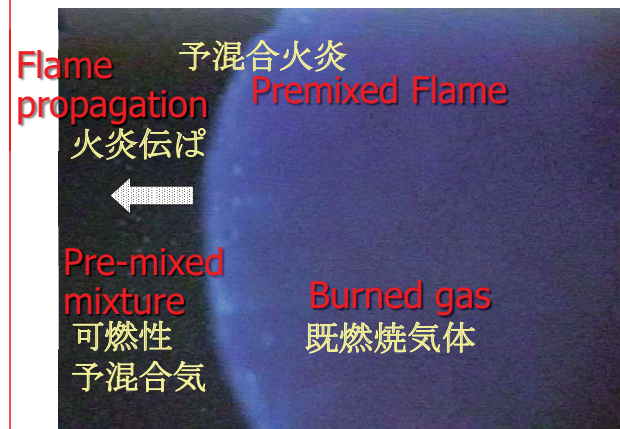
火災・爆発現象の拡大

Expansion of Fire/Explosion

火災時の燃え拡がり



ガス爆発時の火炎の伝ば



火災 Fire

拡散火炎の燃え拡がり

Spreading of Diffusion Flame

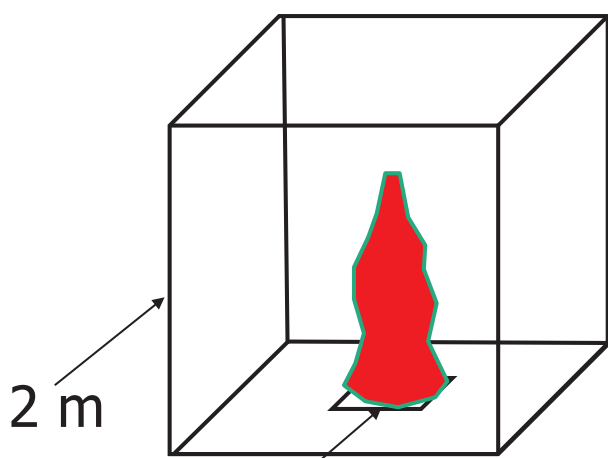
ガス爆発 Gas Explosion

予混合火炎の伝ば

Propagation of Premixed Flame

火災とガス爆発の違い

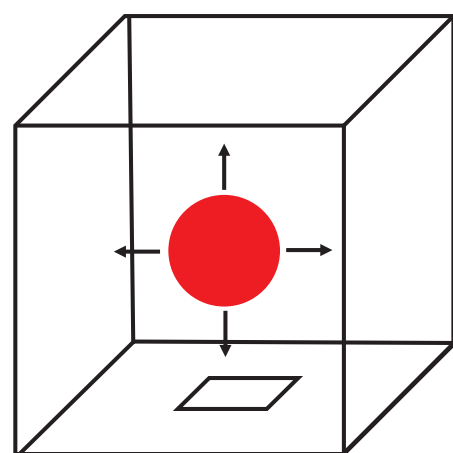
燃料とその量は同一：ヘプタン 1 kg



0.4 m square

火災

プール中の液体燃料
拡散火炎(燃焼)

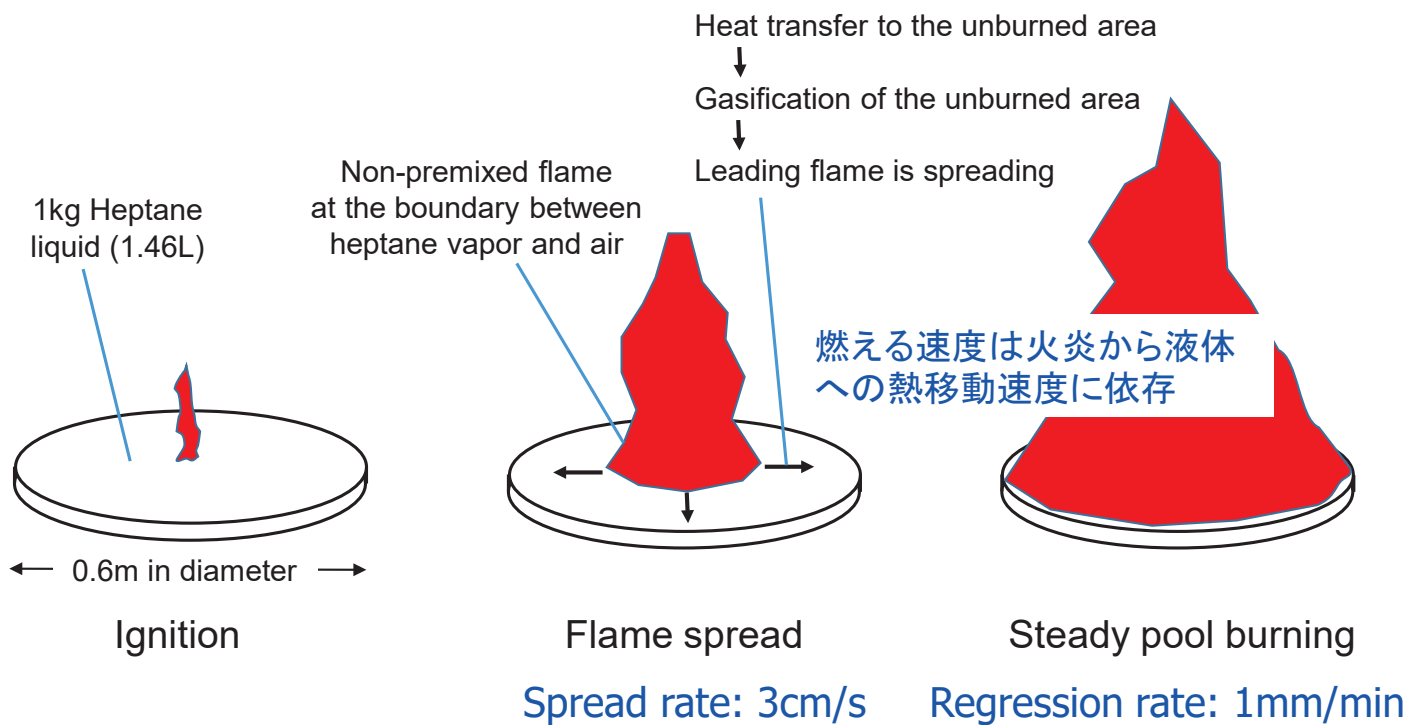


ガス爆発

可燃性気体
予混合火炎(燃焼)
火炎伝ば

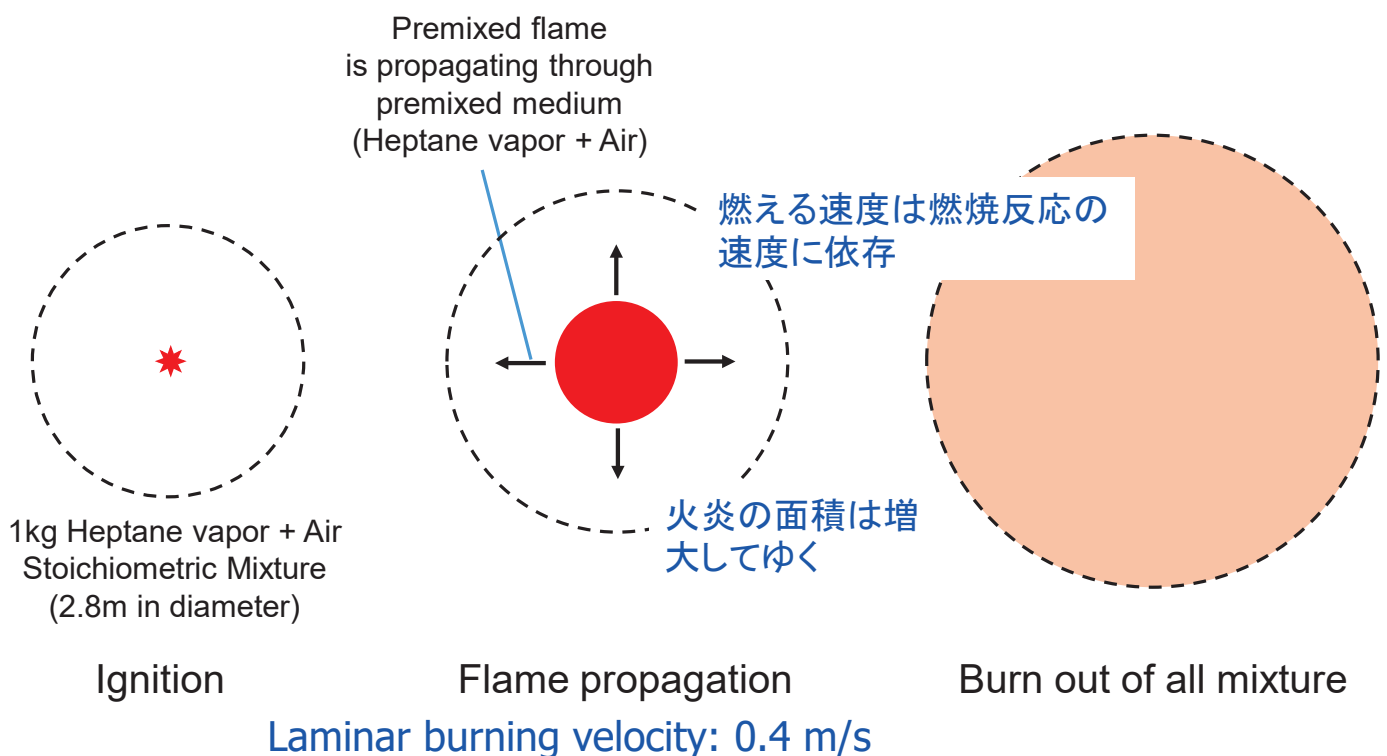
火災のシナリオと発熱速度 (HRR)

プールに入れたヘプタンの燃焼 (プール火災)



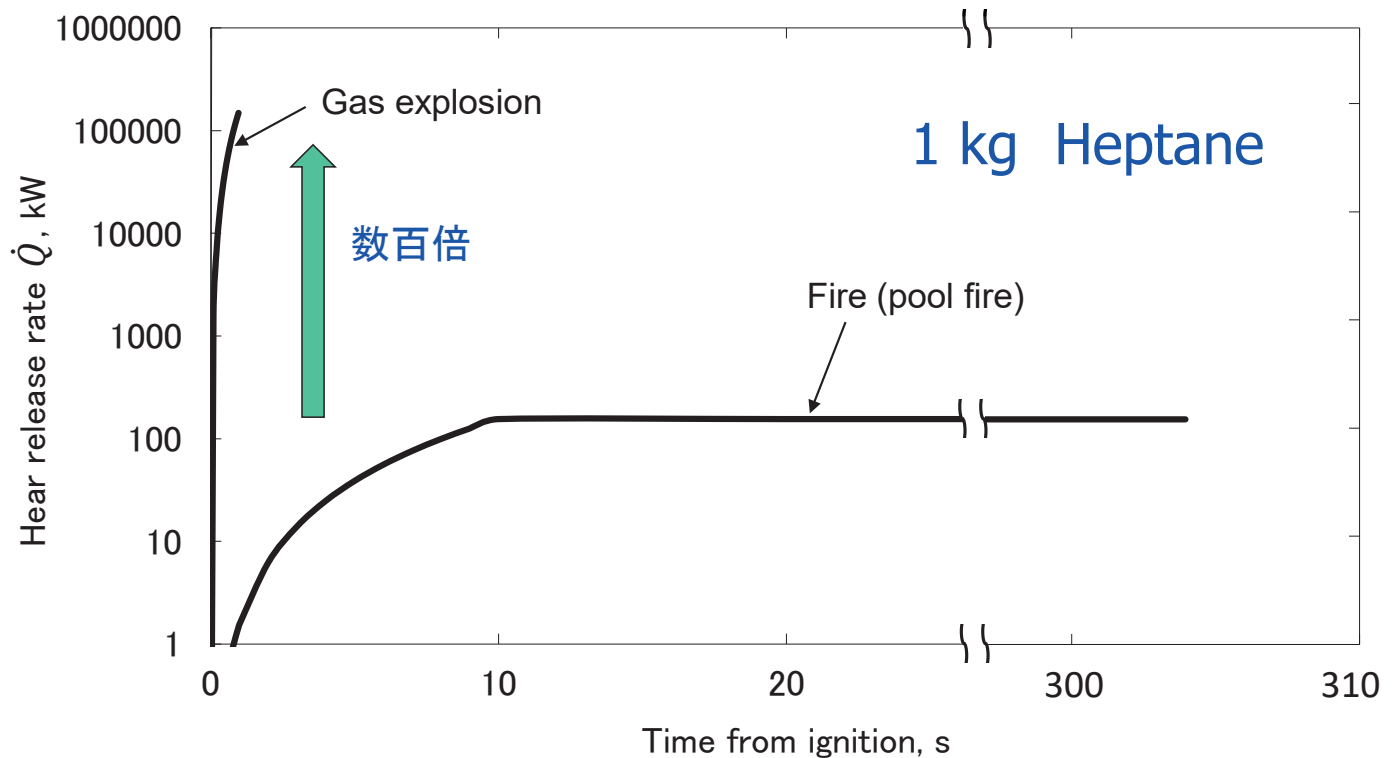
ガス爆発のシナリオと発熱速度 (HRR)

蒸発したヘプタンのガス爆発



HRR (Heat Release Rate) の変化

ガス爆発時のHRRは、火災時の数百倍を超える



火災と爆発

From Colored books
Wikipedia (Backdraft)

Fire
non-premixed

Explosion
Premixed

Fire

A fire, burning sufficiently rapidly for the burning mass to rise into the air as a cloud or ball.

Fire ball

The combustion of material emerging with significant momentum from an orifice.

Jet flame

The combustion of a flammable vapour and air mixture in which flame passes through that mixture at less than sonic velocity, such that negligible damaging overpressure is generated.

Flash fire

Backdraft

The abrupt burning of superheated gases in a fire caused when oxygen rapidly enters a hot, oxygen-depleted environment. It is typically seen as a blast of smoke and/or flame out of an opening of a building.

Vapor cloud explosion (VCE)

Gas explosion

The explosion resulting from an ignition of a premixed cloud of flammable vapour, gas or spray with air, in which flames accelerate to sufficiently high velocities to produce significant overpressure.

火災 (爆発?) : Hindenburg

1937/5/6, 36 Dead, 245m long, 20000 m³ Hydrogen
Manchester Township, New Jersey (USA)



Q Donate ∞ Create account Log in ...

Hydrogen safety

6 languages

Article Talk

Read Edit View history Tools

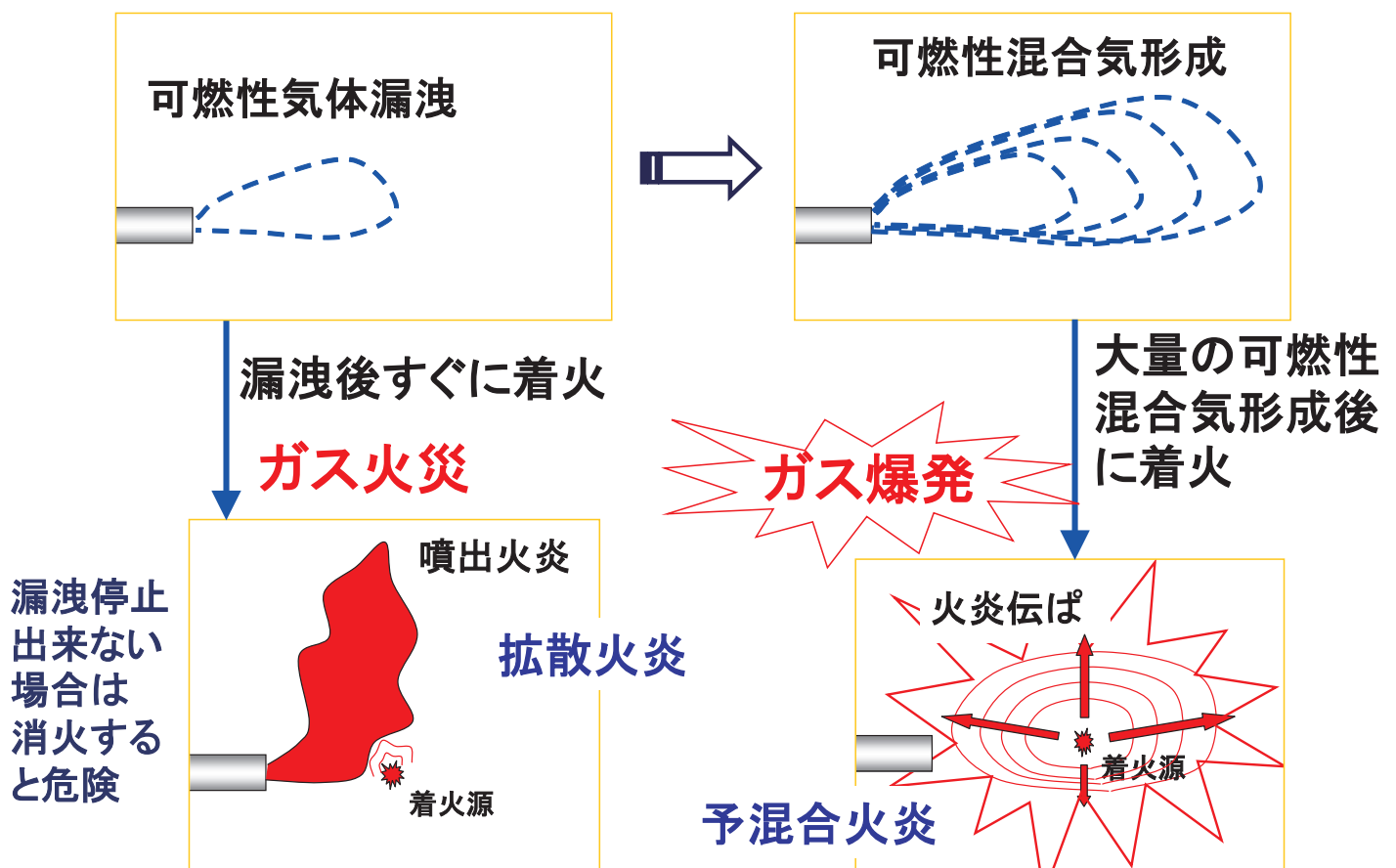
From Wikipedia, the free encyclopedia

Hydrogen safety covers the safe production, handling and use of [hydrogen](#), particularly [hydrogen gas](#) fuel and [liquid hydrogen](#). Hydrogen possesses the [NFPA 704](#)'s highest rating of four on the [flammability](#) scale because it is flammable when mixed even in small amounts with ordinary air. Ignition can occur at a volumetric ratio of hydrogen to air as low as 4% due to the oxygen in the air and the simplicity and chemical properties of the reaction. However, hydrogen has no rating for innate hazard for [reactivity](#) or [toxicity](#). The storage and use of hydrogen poses unique challenges due to its ease of leaking as a [gaseous](#) fuel, low-[energy ignition](#), wide range of combustible fuel-air mixtures, [buoyancy](#), and its ability to [embrittle metals](#) that must be accounted for to ensure safe operation.^[1]

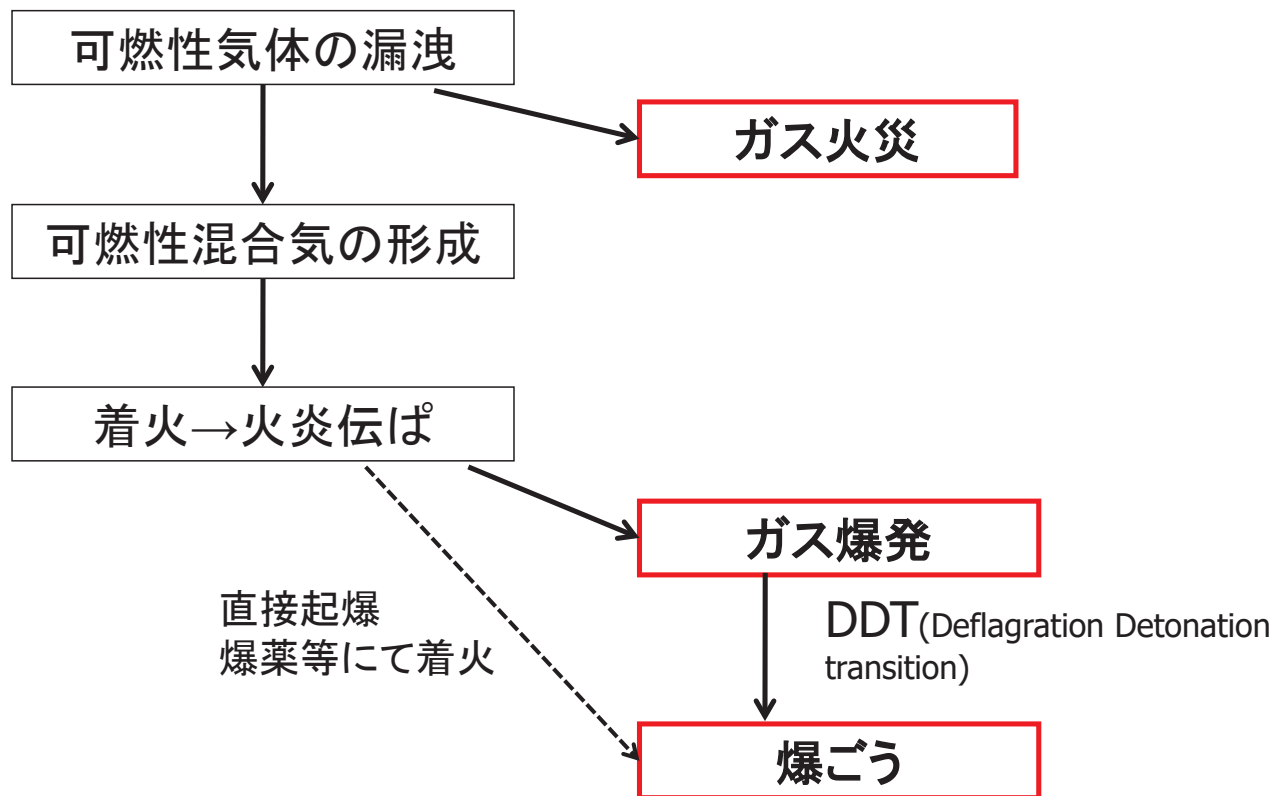


The Hindenburg disaster is an example of a large hydrogen explosion.

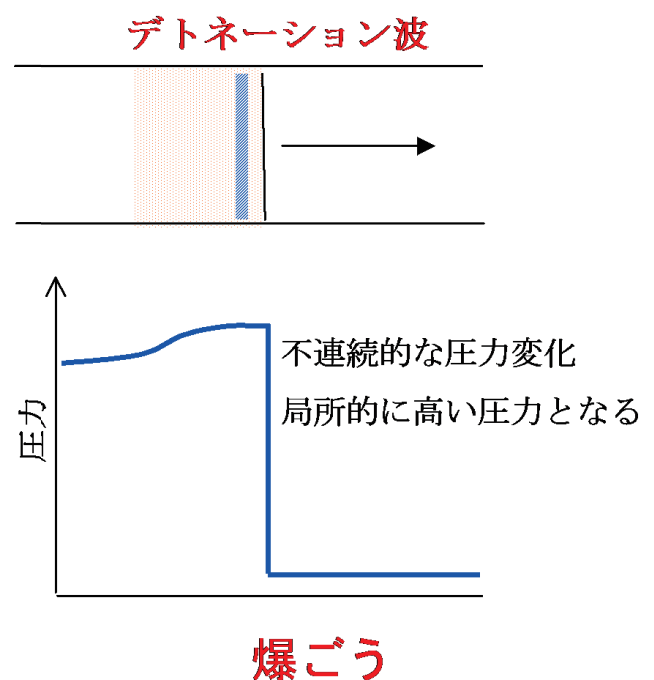
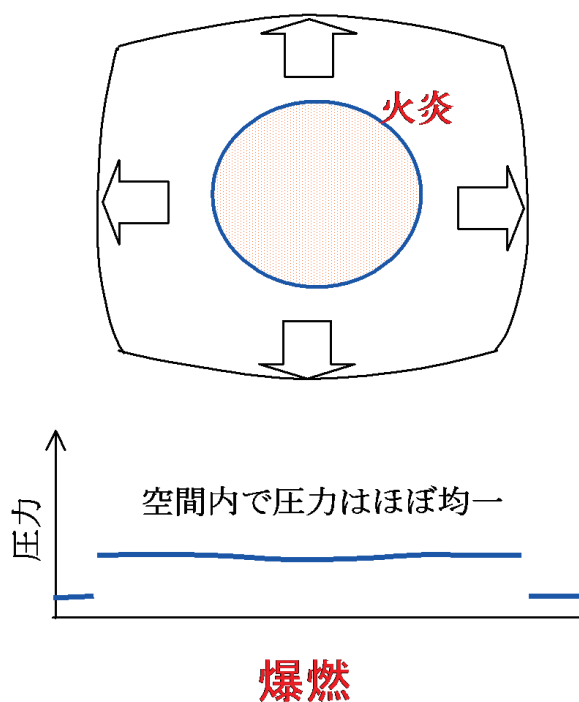
可燃性気体漏洩の事故シナリオ



危険現象の過程



爆燃(デフラグレーション)と爆ごう(デトネーション)の違い



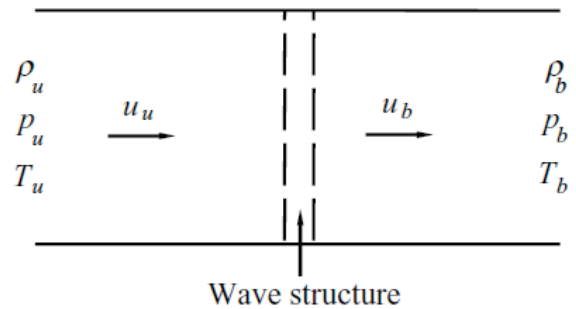
Rankine-Hugoniot Solution

Conservation

Mass $\rho_u u_u = \rho_b u_b = f$ ①

Momentum $\rho_u u_u^2 + p_u = \rho_b u_b^2 + p_b$ ②

Energy $h_u + \frac{1}{2}u_u^2 = h_b + \frac{1}{2}u_b^2$ ③



where f is the constant mass flux through the wave,

where $v = 1/\rho$ is the specific volume.

Rayleigh line

②と① $(p_b - p_u) = -(\rho_u u_u)^2 \left(\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_u} \right) = -f^2(v_b - v_u)$

③と① $h_b - h_u = -\frac{1}{2}(\rho_u u_u)^2 \left(\frac{1}{\rho_b^2} - \frac{1}{\rho_u^2} \right) = -\frac{1}{2}f^2(v_b - v_u)(v_b + v_u)$

以上2式 $h_b - h_u = \frac{1}{2}(v_b + v_u)(p_b - p_u)$ Hugoniot line

Rankine-Hugoniot Solution

Rayleigh lineの傾きは速度に比例(符号は逆)

Hugoniot lineに接する条件が最も安定(CJ条件)

音速を超える爆ごと、音速未満の爆燃の2つの解が存在する

普通に着火しても爆燃にしかないが、燃焼速度が速いと爆燃から爆ごうに遷移することがある(DDT)

- ・水素やアセチレン等
圧力放散の計算式が使えない
- ・酸素濃度が高い場合
水電解のクロスリークでは、
水素/酸素混合気が形成

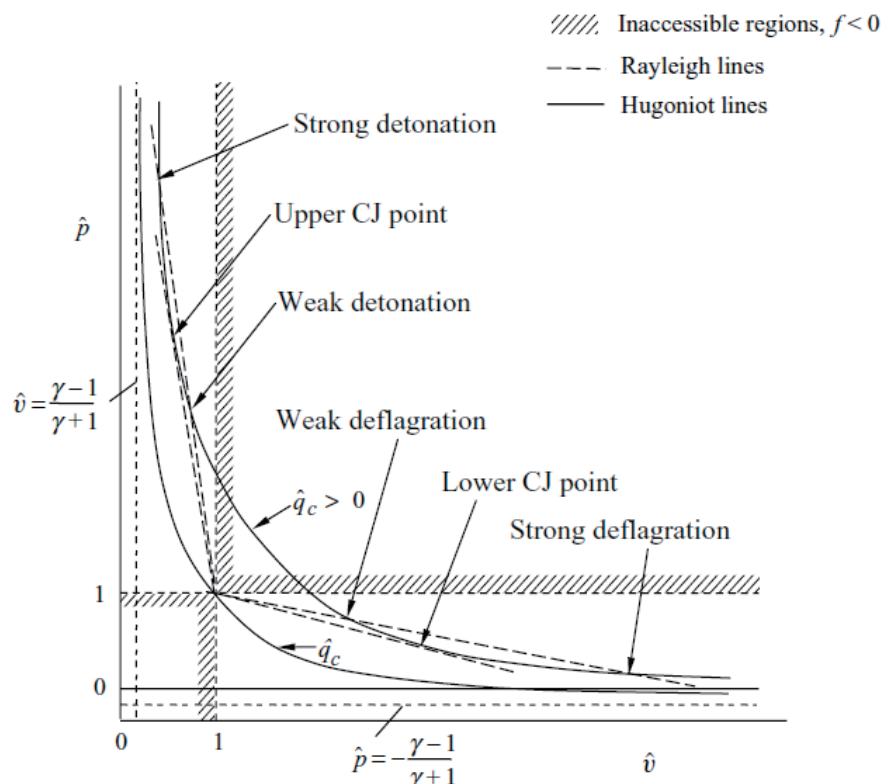


Figure 7.1.2. Schematic identifying the Rankine-Hugoniot solutions.

ガス爆発現象の過程と発生する被害

可燃性気体

↓ 漏洩・空気と混合

可燃性混合気

↓ 着火

火炎伝播 → 焼損、火災

↓ → 有害な爆発跡ガス発生

体積膨張 → 爆風（圧力波、開放空間）

↓

圧力上昇（密閉空間）

↓

構造物変形・破壊

↓

爆風（圧力波）、飛散物

発生可能性

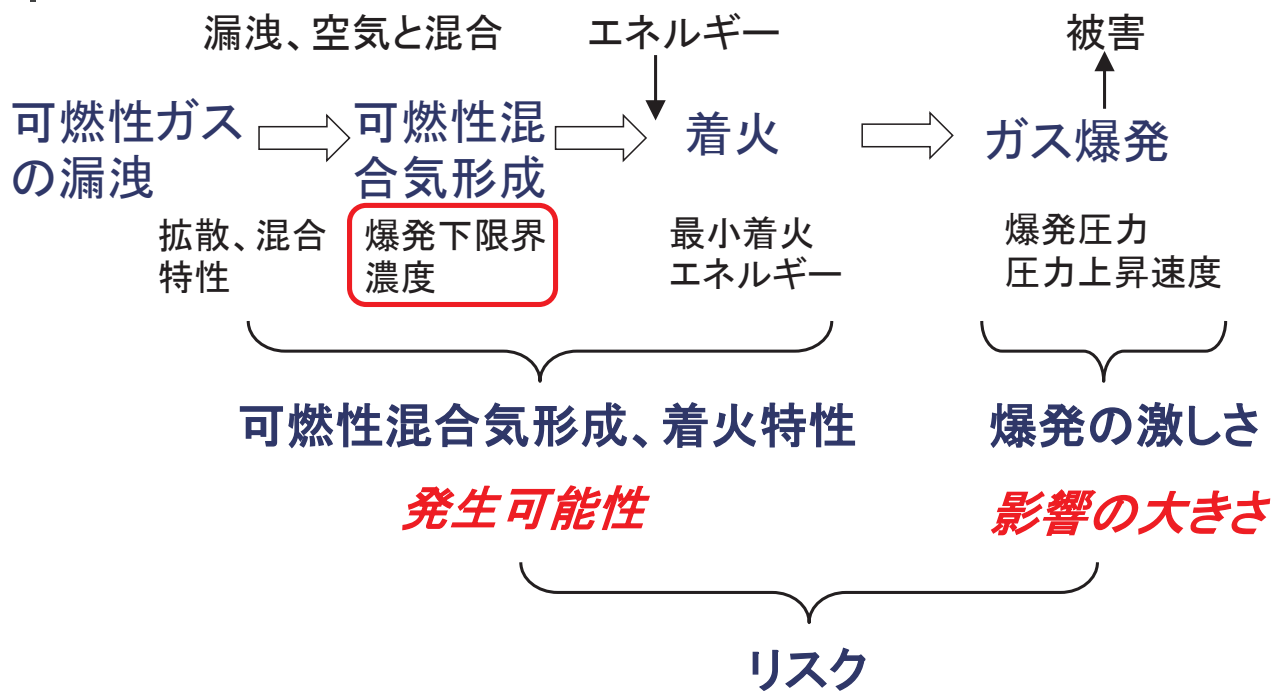
影響の大きさ

ガス	爆発範囲 (爆発限界)	最小着火エネルギー	消炎距離	燃焼速度 (最大値)	圧力上昇速度, K_G -value	燃焼熱	発熱速度 (層流火炎単位面積当り)	デトネーション発生に必要なテトリルの量
水素	4.0 % ～75 %	0.02 mJ	0.6 mm	2.8 m/s	55 MPa m/s	290 kJ/mol	10 MJ/s m ²	about 1.5 g
CNG メタン	5.0 % ～15 %	0.3 mJ	2.0 mm	0.4 m/s	5.5 MPa m/s	890 kJ/mol	1.5 MJ/s m ²	22000 g
プロパン	2.1 % ～9.5 %	0.3 mJ	1.7 mm	0.4 m/s	7.5 MPa m/s	2200 kJ/mol	1.6 MJ/s m ²	80 g

リスク高い

at unit area of
laminar flame front

事故シナリオとリスク評価



$$\text{リスク} = \text{発生可能性} \times \text{被害の大きさ}$$

可燃性混合気への着火

可燃性気体／空気混合気の燃焼限界

(大気圧・室温上方伝ば)

可燃性気体	下 (vol%)	限 [当量比]	上 (vol%)	限 [当量比]
メタン	5.0	[0.50]	15.0	[1.69]
エタン	3.0	[0.52]	12.5	[2.39]
プロパン	2.1	[0.51]	9.5	[2.51]
ブタン	1.6	[0.50]	8.4	[2.85]
ペンタン	1.5	[0.58]	7.8	[3.23]
ヘキサン	1.1	[0.50]	7.5	[3.66]
ヘプタン	1.05	[0.56]	6.7	[3.76]
オクタン	1.0	[0.60]	6.5	[4.27]
2,2,4-トリメチルペンタン (イソオクタン)	1.1	[0.66]	6.0	[3.80]
ヘキサデカン	0.43	[0.50]	—	[—]
エチレン	2.7	[0.40]	36.0	[8.04]
プロピレン	2.0	[0.44]	11.1	[2.67]
アセチレン	2.5	[0.31]	100.0	[∞]
シクロヘキサン	1.3	[0.57]	8.0	[3.74]
ベンゼン	1.3	[0.49]	7.1	[2.74]
トルエン	1.2	[0.52]	7.1	[3.27]
メタノール	6.0	[0.46]	36.0	[4.03]
エタノール	3.3	[0.49]	19.0	[3.36]
1-プロパノール	2.2	[0.48]	13.7	[3.40]
1-ブタノール	1.4	[0.41]	11.2	[3.60]
水素	4.0	[0.10]	75.0	[7.17]
一酸化炭素	12.5	[0.34]	74.0	[6.80]
酸化エチレン	3.6	[0.44]	100.0	[∞]
酢酸	4.0	[0.40]	19.9	[2.37]
ホルムアルデヒド	7.0	[0.36]	73.0	[12.9]
アセトン	16.0	[—]	25.0	[—]

高圧ガス保安法での燃焼限界

高圧ガス保安法及び関係政省令等の運用及び解釈について(内規)
令和3年4月23日

(2) 一般高圧ガス保安規則の運用及び解釈について

第2条関係

第1項第1号中可燃性ガスについて [略]

第1項第1号中爆発限界について

① フルオロカーボン等(分子中にハロゲンと炭素の結合を有するガス又は分子中にハロゲンと炭素の結合を有するガスと他のガス(空気又は酸素を除く。)を混合したガス)の爆発限界にあたっては、EN 1839 (2017) 4.3 (Method B) に示される球形の密閉容器を用いる測定方法を標準とし、燃焼による圧力変化によって爆発の有無を判定する。爆発濃度があるフルオロカーボン等の場合は、爆発限界の下限濃度で試験を3回行い、いずれも爆発しないことを確認すること。一方、爆発濃度がないフルオロカーボン等の場合は、各濃度で試験を1回ずつ行い、いずれも爆発しないことを確認すること。なお、測定に当たっては、次の(イ)～(チ)に掲げる条件により実施すること。

.....

② フルオロカーボン等以外の爆発限界については、EN 1839 (2017) 4.2 (Method T) に示される円筒形開放容器を用いる測定及び判定方法または EN 1839 (2017) 4.3 (Method B) に示される球形の密閉容器を用いる測定及び判定方法を標準とし、次の(イ)～(ハ)に掲げる条件により実施すること。ただし、既知のガスについては、必ずしも測定し直す必要はないが、今後測定する場合の標準として推奨する。

(イ) 温度 $23.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$

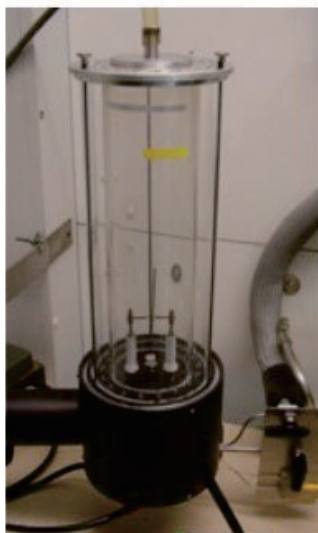
(ロ) 絶対圧力 $101.3 \pm 0.7\text{kPa}$

(ハ) 絶対湿度 0.15g/kg 未満

燃焼限界測定、2つの方法

EN 1839 (B), Bomb Method

- Closed spherical vessel
- Volume 14 dm^3
- Mixture preparation: partial pressure
- Ignition source: fusing (exploding) wire
- Criterion: pressure rise of $\geq 5\%$



燃焼限界は物性値ではなく、発熱速度と放熱速度のバランスで決まる限界条件
→ 測定装置や条件で影響を受ける(特に放熱)
シミュレーションでの算出は難しい

EN 1839 (T), Tube Method

- Open vessel
- Glass cylinder ($D=80\text{ mm}$, $L=300\text{ mm}$)
- Mixture preparation: Partial pressure and purging of the glass tube
- Ignition source: High voltage spark
- Criterion: Flame detachment (visually)

BAMのHPより

ルシヤトリエの法則

混合気体の燃焼下限界濃度 L_m

$$L_m = \frac{100}{\left\{ \sum_i (C_i / L_i) \right\}}$$

X_i は可燃性気体中の i 成分の濃度 (vol%)

L_i は i 成分の燃焼下限界濃度 (vol%)

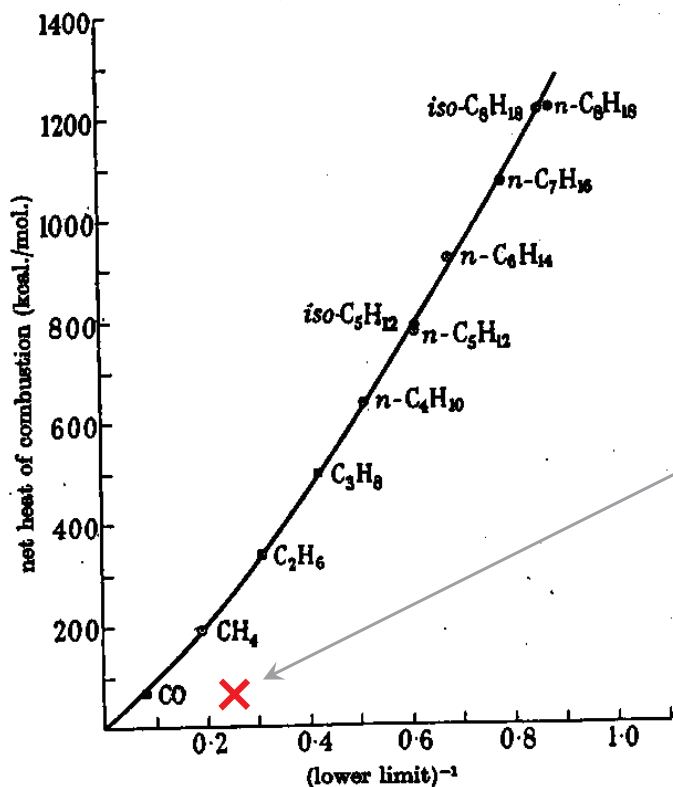
例	メタン	($L=5.0\%$)	80%
	プロパン	($L=2.1\%$)	10%
	ブタン	($L=1.6\%$)	10%

$$L_m = \frac{100}{\frac{80}{5.0} + \frac{10}{2.1} + \frac{10}{1.6}} = \frac{100}{27} = 3.7 \text{ (vol\%)}$$

Burgess Wheeler の法則

$$L \text{ (vol\%)} \cdot Q \text{ (kJ / mol)} \cong 4600 \text{ ((vol\%) (kJ / mol))}$$

L : 燃焼下限界濃度 Q : 可燃性ガスの燃焼熱

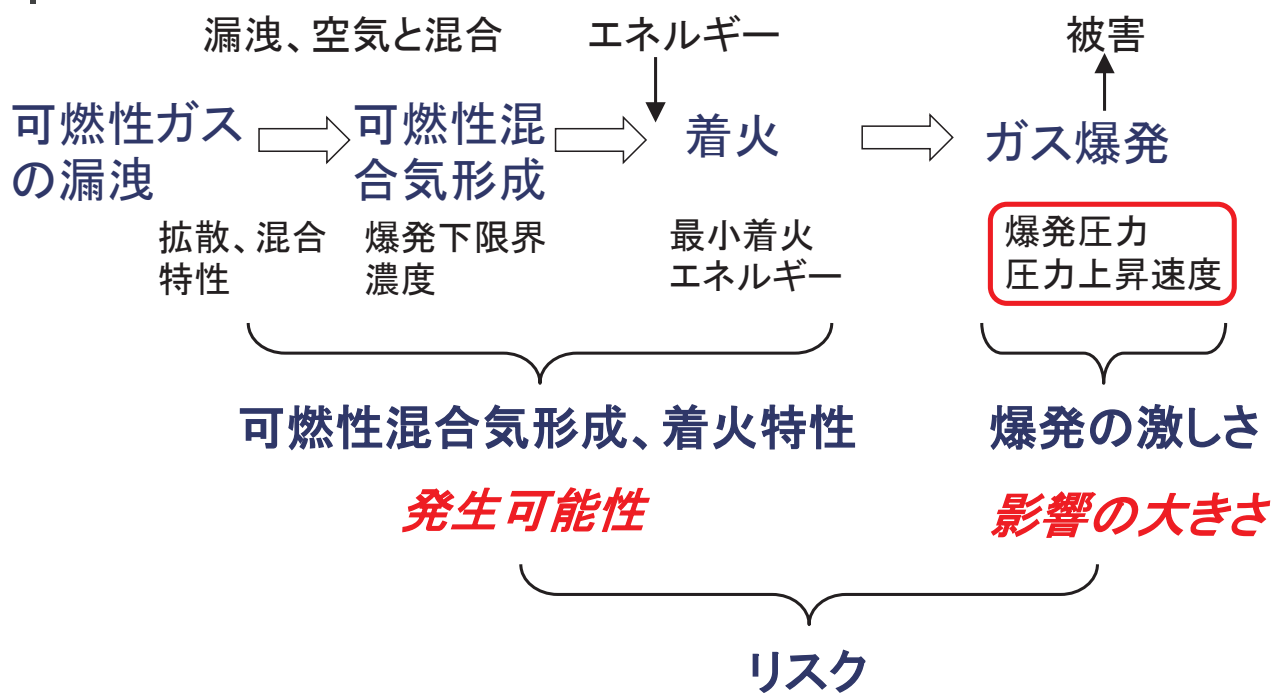


ルシヤトリエの法則は、
Burgess Wheelerの法則
から導かれるため、
水素には使えない

水素 は法則に合わない
下限界: 4 vol%
燃焼熱: 58 kcal/mol

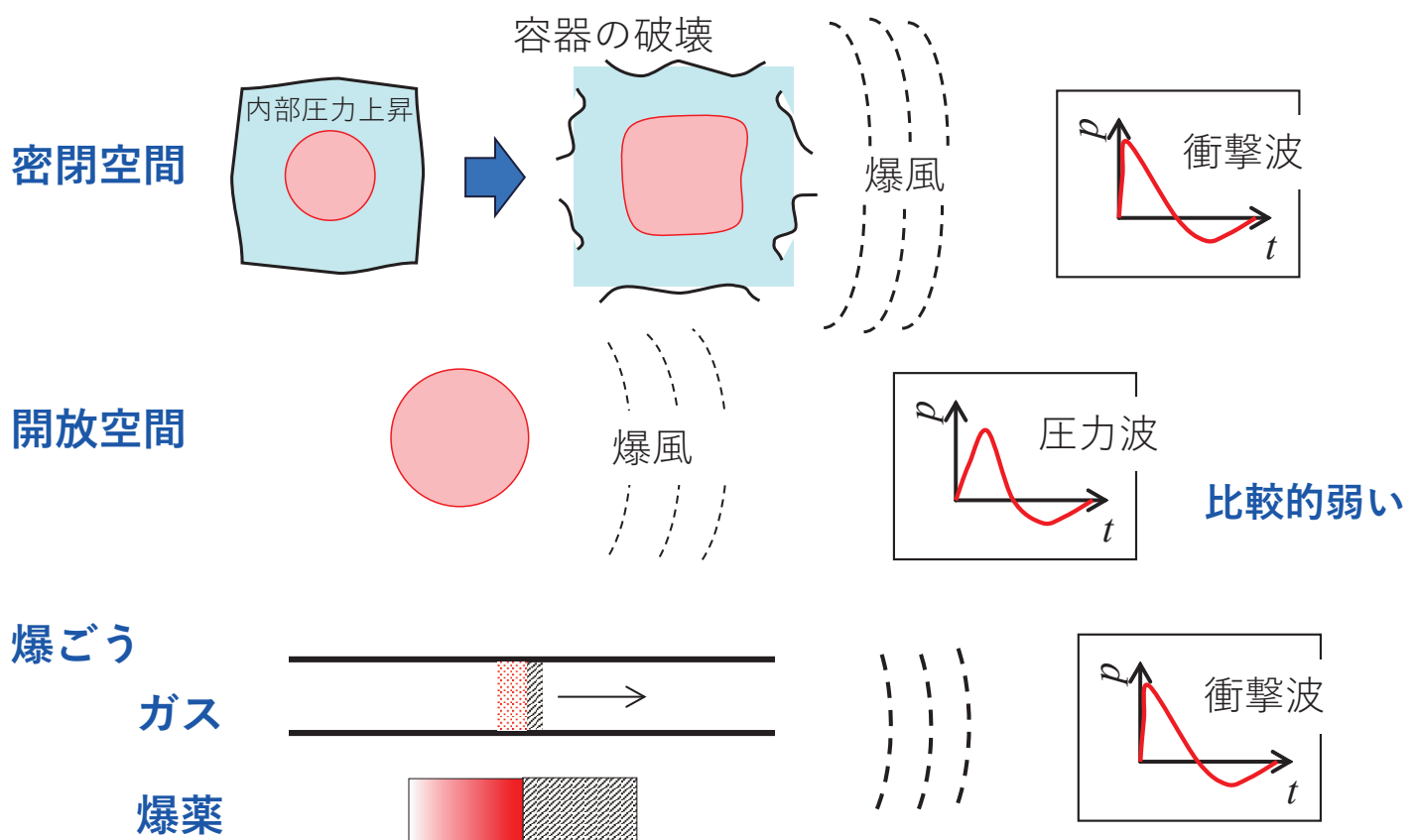
水素混合ガスの下限界の
予測は課題

事故シナリオとリスク評価



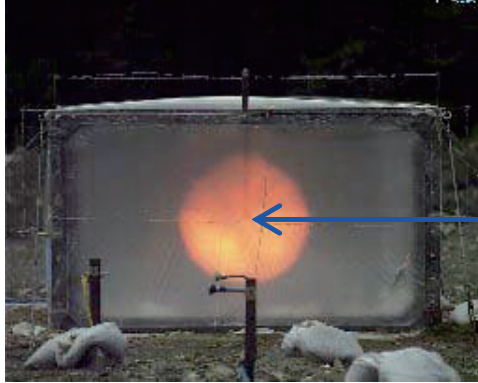
$$\text{リスク} = \text{発生可能性} \times \text{被害の大きさ}$$

密閉および開放空間での爆発による爆風

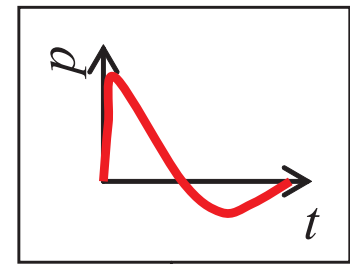


開放空間におけるガス爆発からの爆風の測定実験

Mixture was filled in a tent of thin plastic sheet (almost unconfined condition)



R



Pressure sensor
(side-on)

Large Scale Experiments

More than 1 m³ in the volume of mixture

Measurements : Blast overpressure (side-on)

Flame front behavior

爆風強度の予測モデル

Scaling Models

TNT equivalency model

TNO multi-energy model

Modified Baker model

⇒ 何れも基本的にはエネルギー放出量で推定する
もともと爆薬の爆風を予測するために開発された
(爆ごう用)

爆燃に適用するには補正パラメーターを用いる必要
がある

TNTモデル

TNT equivalency model

Scaled distance $Z = \frac{R}{W^{1/3}}$

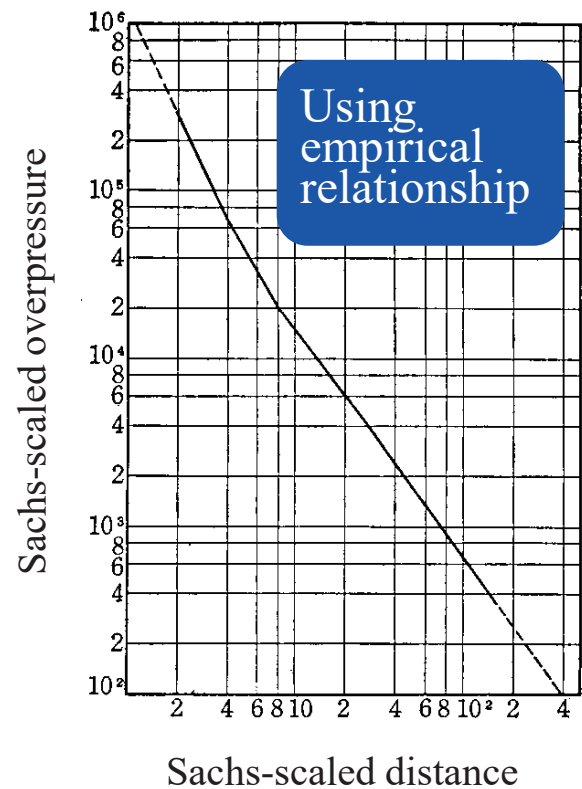
TNO multi-energy model (Modified Baker model)

Sachs-scaled distance

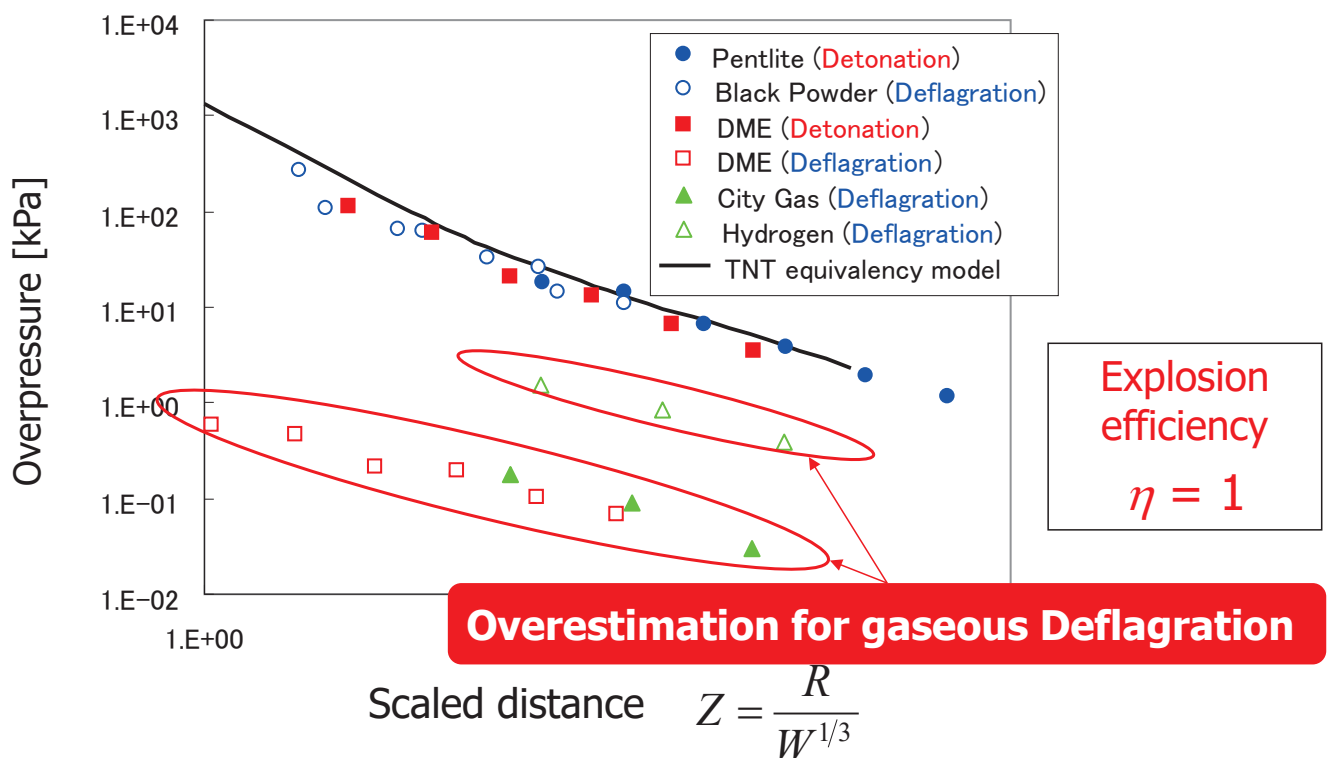
$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

Sachs-scaled overpressure

$$\bar{P} = \frac{P_s}{P_0}$$



TNTモデルと実測値との比較



法令でのTNTモデルの概念の使用

■ 高圧ガス保安法における保安距離(例)

コンビナート等保安規則 第5条

$$X = 0.480 \times \sqrt[3]{K \cdot W}$$

X 有しなければならない距離(単位 メートル)の数値(保安距離)

K ガスの種類及び常用の温度の区分に応じて別表第二に掲げる数値

W 貯蔵設備又は処理設備の区分に応じて次に掲げる数値(貯蔵量)

TNTモデルの概念を使っている

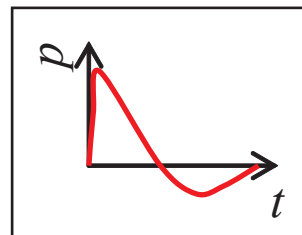
爆ごう(Detonation) と 爆燃(Deflagration)

Detonation



非常に短時間にエネルギー放出が起こる

衝撃波



Scale Model

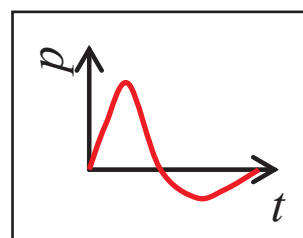
適用可能

Deflagration



エネルギー放出は爆ごうに比べて長い時間で起こる

圧力波



補正係数が必要となる

Detonation : 最大圧力は 全放出エネルギーのみに依存

Deflagration : 全放出エネルギーのみならず 放出速度にも依存

音響学の式(音波に適用する式)

The blast overpressure at the position R from the explosion point is equated by the theory of acoustics;

$$p(t) = \frac{\rho}{4\pi R} (\varepsilon - 1) \left[\frac{d\dot{Q}}{dt} \right]_{t-\tau}$$

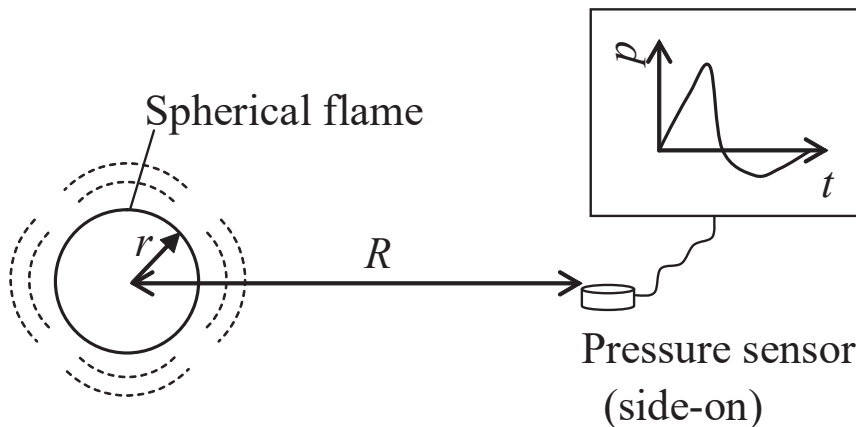
p : pressure

t : time

ρ : density

ε : volumetric expansion ratio

$\dot{Q}$: volumetric rate of combustion



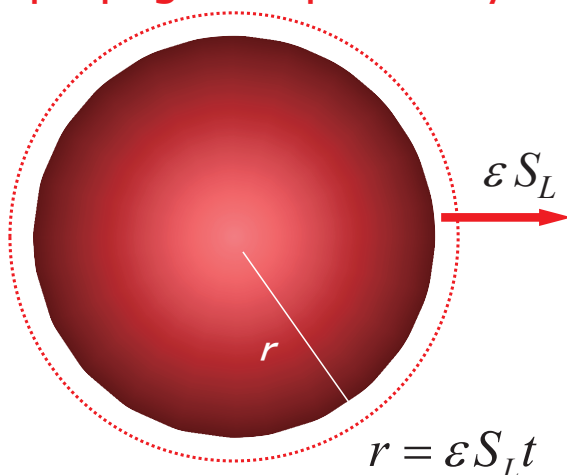
層流燃焼速度で伝ばする場合

$$p(t) = \frac{\rho}{4\pi R} (\varepsilon - 1) \left[\frac{d\dot{Q}}{dt} \right]_{t-\tau}$$

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

$$r = \varepsilon S_L t$$

Laminar flame propagates spherically



$$p(t) = 2 \frac{\rho}{R} \varepsilon^2 (\varepsilon - 1) S_L^3 t$$

$$p_{MAX} = 2 \frac{\rho}{R} \varepsilon (\varepsilon - 1) r_q S_L^2$$

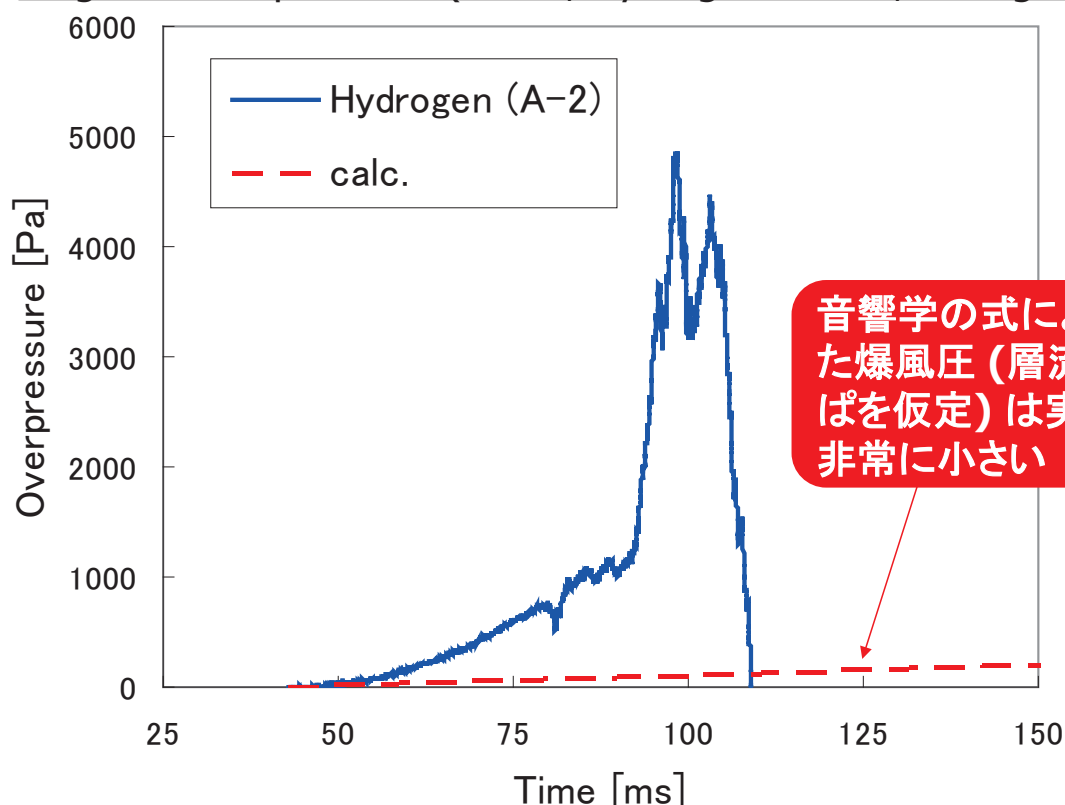
S : burning velocity

ε : volumetric expansion ratio

r_q : flame radius at quenching

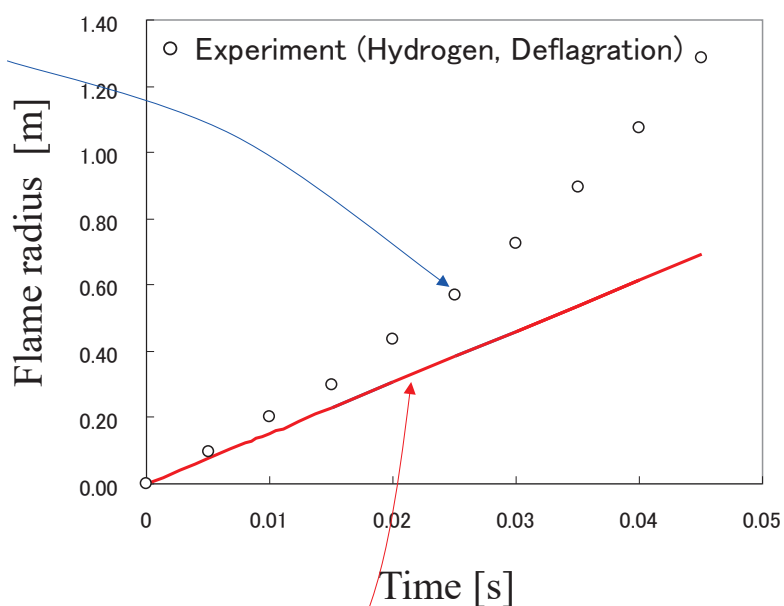
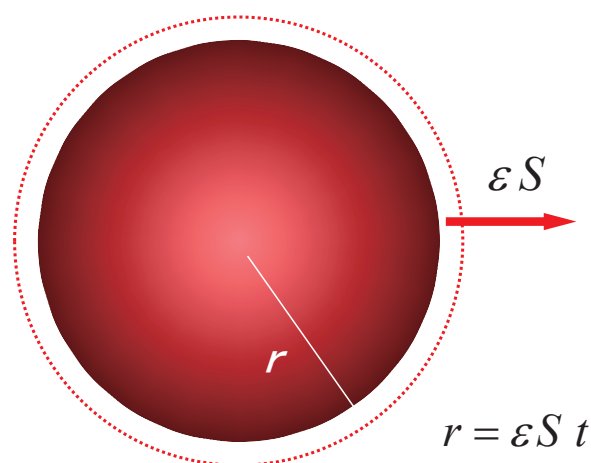
実験での測定データとの比較

Large scale experiment (9.4m³, Hydrogen 30.2%, Deflagration)



火炎伝ば挙動

大規模実験で実測した
火炎伝ば挙動



層流火炎が球状伝ばした場合の計算値

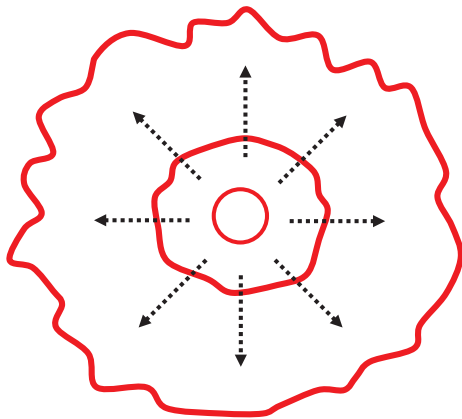
火炎の乱れの影響

火炎の
乱れ

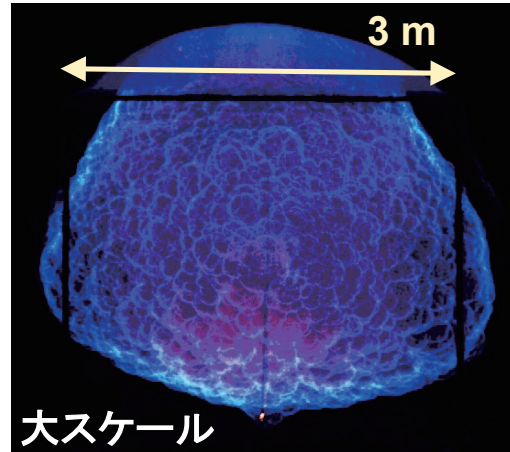
火炎面積の
増大

火炎伝ぱの加速

火炎の乱れは、火炎伝ぱにしばしば大きな効果を有する



混合ガスは静止
均一な混合ガス



自発的に発生した火炎の乱れ

火炎の乱れの発生原因

気流の乱れ → 噴流、障害物通過等
濃度不均一
火炎の不安定性

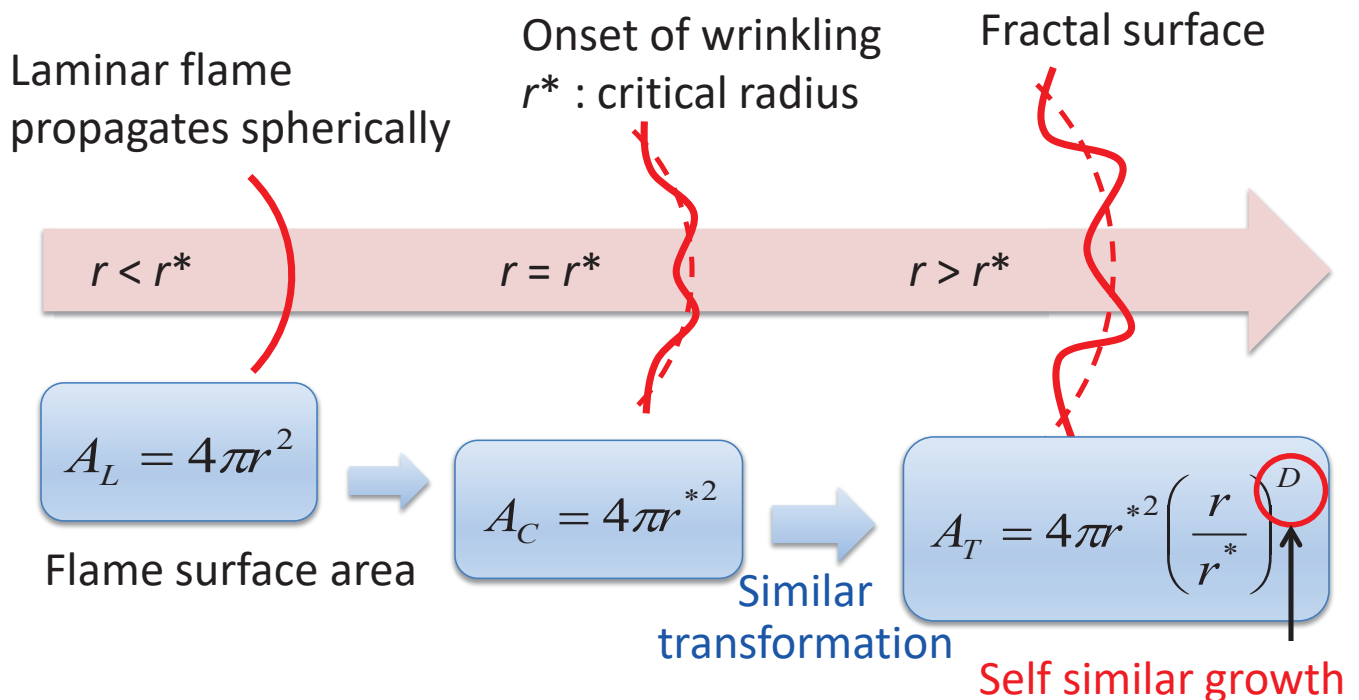
- Diffusive-Thermal Instability
(拡散－熱的不安定)
- Hydrodynamic Instability
(流体力学的不安定)
- Body-Force Instability
(外力不安定)

火炎面の不安定性

Known flame front instabilities

- **Diffusive-thermal instability**
preferential diffusion enhances the inst.
- **Body-force instability**
when body-force is acted to flame front
- **Hydrodynamic instability**
induced by the expansion of gas at flame

Hydrodynamic instability: Self similar (Fractal manner)



D : Fractal dimension

$D = 7/3$: from experimental data (Y. A. Gostintsev, 1988)
and direct numerical simulation (Liberman, 2004)

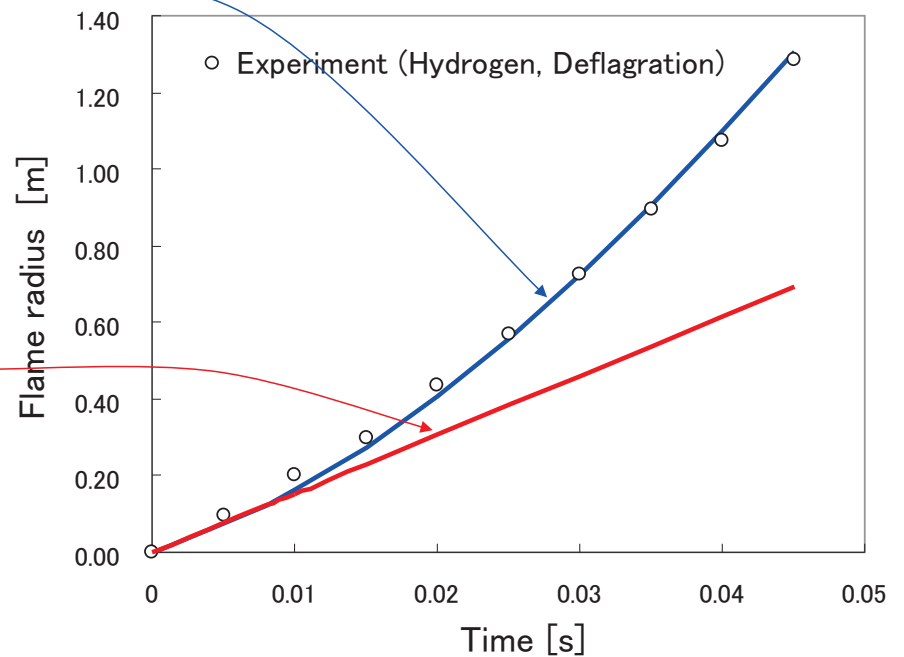
火炎乱れによる加速のモデル化

With turbulent model

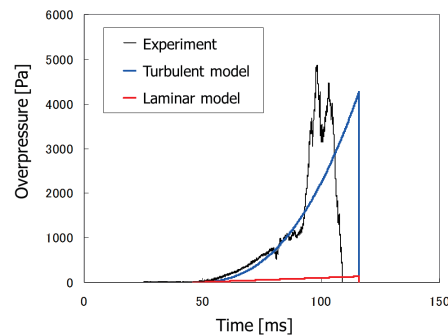
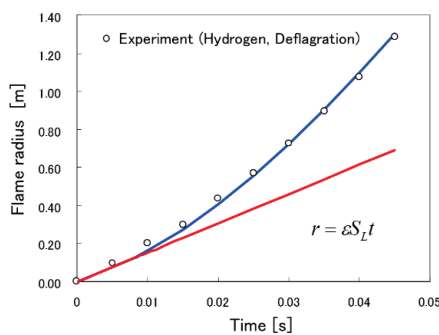
$$S_T = \max\left(S_L, \frac{3}{2} \frac{A}{\varepsilon} t^{1/2}\right)$$

Without turbulent model

$$S_T = S_L$$



層流および乱流(自発的乱れ)での火炎伝ば挙動



$$p(t) = \frac{\rho}{d} (\varepsilon - 1) \left\{ 2r\varepsilon S^2 + r^2 \frac{dS}{dt} \right\}$$

Laminar flame propagation

$$r \propto t$$

$$S = \text{constant}$$

$$p(t) \propto t$$

$$p_{Max.} \propto S^2$$

Self-similar growth model

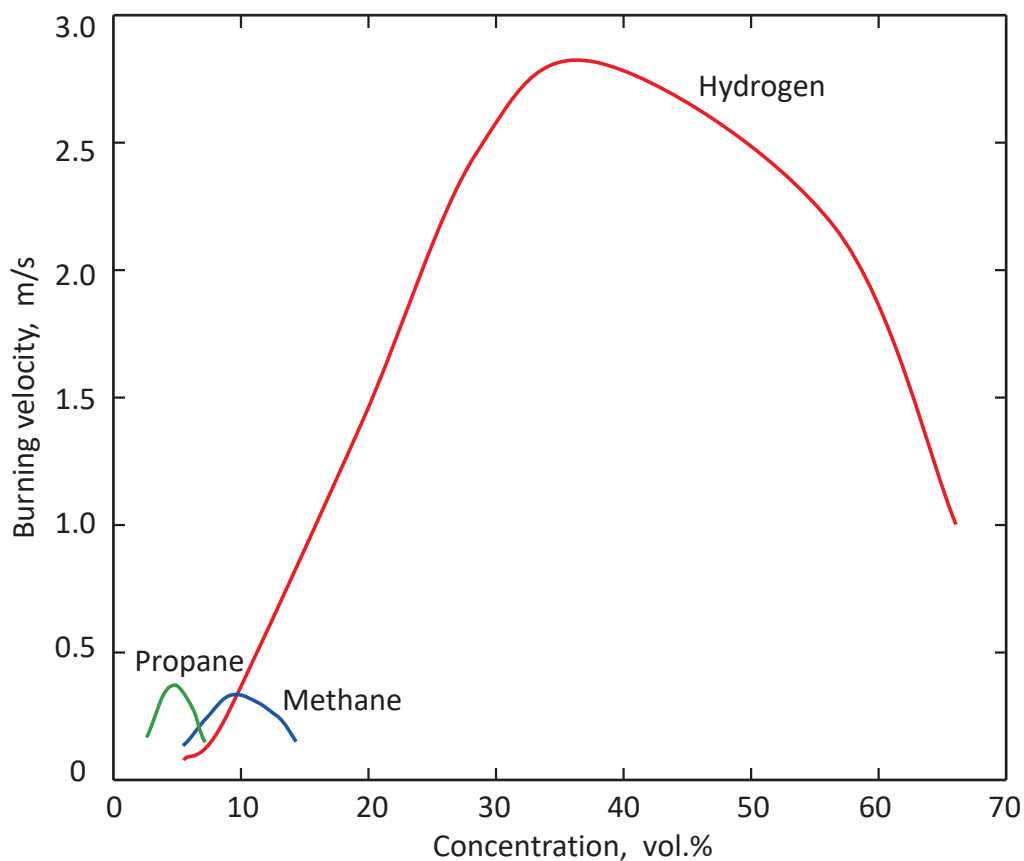
$$r \propto t^{1.5}$$

$$S_T \propto t^{0.5}$$

$$p(t) \propto t^{2.5}$$

$$p_{Max.} \propto S^{2.67}$$

水素の燃焼速度

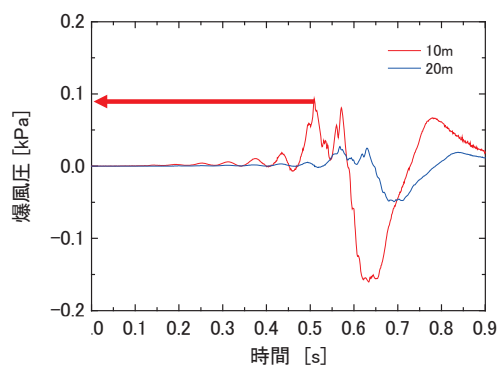
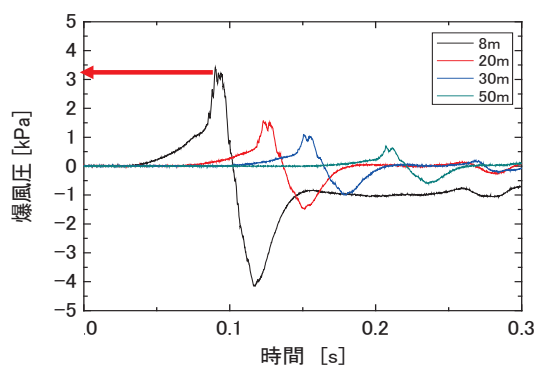


東京大学土橋・茂木研究室での実験結果

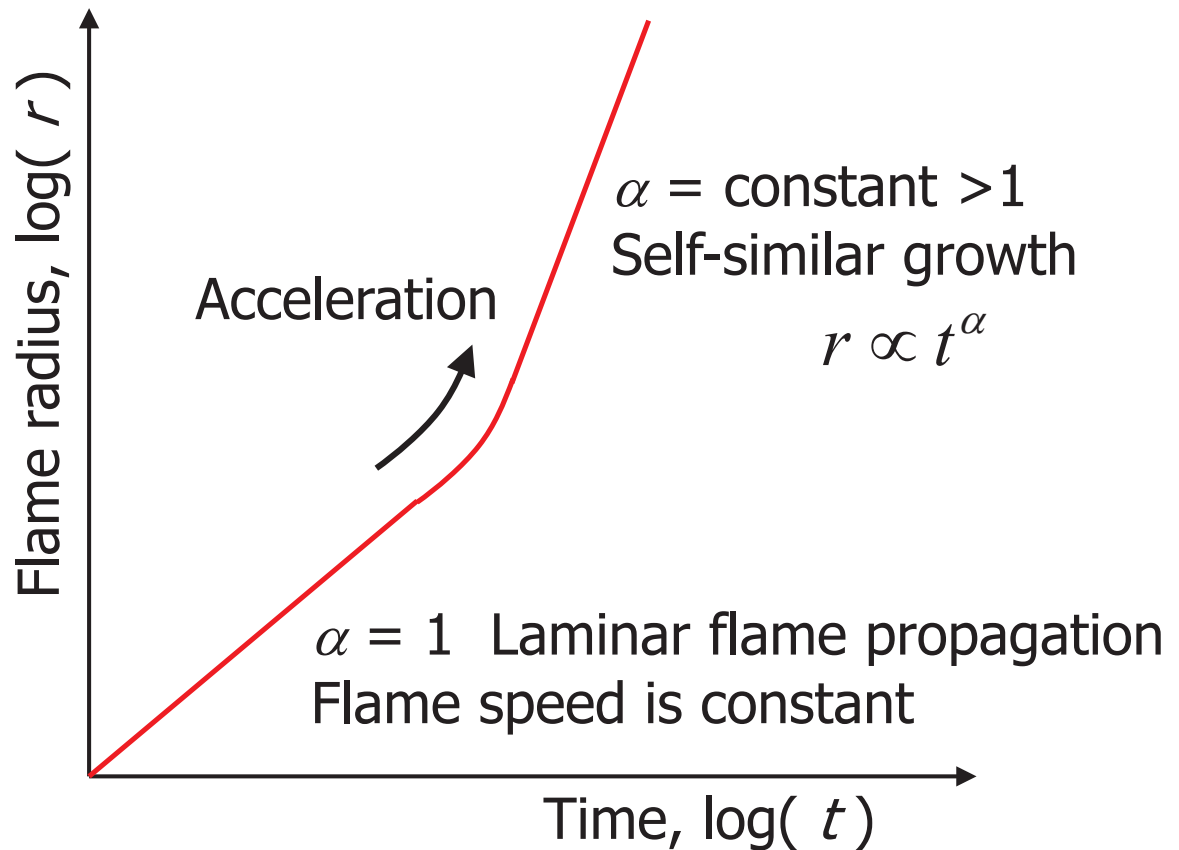
水素とプロパンのガス爆発の比較(開放系)

水素/空気 30%

プロパン/空気 4%



Acceleration exponent α : Slope on log-log plots of r - t diagram



火炎のスケールと不安定性(予想)

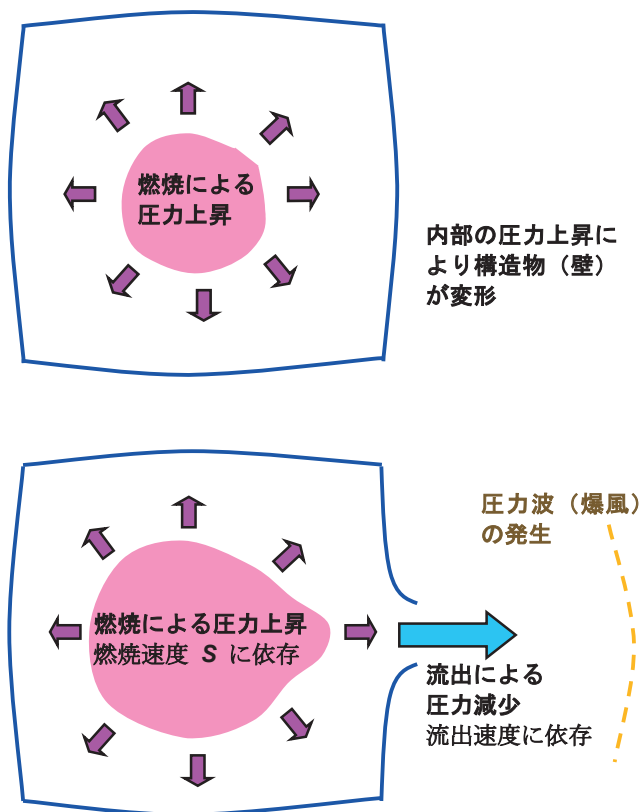
Scale (flame size) Peclet number	< 400	<1700	>1700	Much larger
Diffusive- thermal instability	 $Le < 1$			
Hydrodynamic instability			 Self-similar manner	Suppressed ?

Hydrogen Diameter ~ 1 m
Methane Diameter ~ 2.5 m

大スケールではHydrodynamic instabilityが主導か

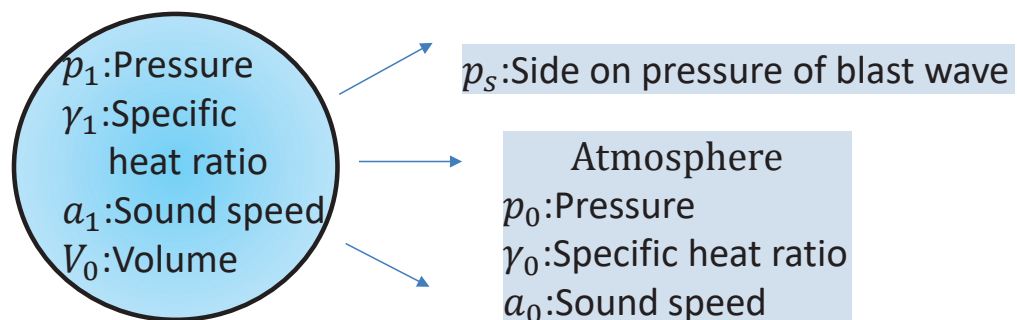
密閉空間中の火炎の伝ば

爆発による圧力上昇による力は非常に大きいため、通常は構造物が破壊し開口（窓）が発生する



～容器破壊時に発生する爆風強度（燃焼反応無し）～

Baker studied the blast waves from bursting sphere vessels in which pressures were larger than ambient pressure (W.E.Baker, 1977).

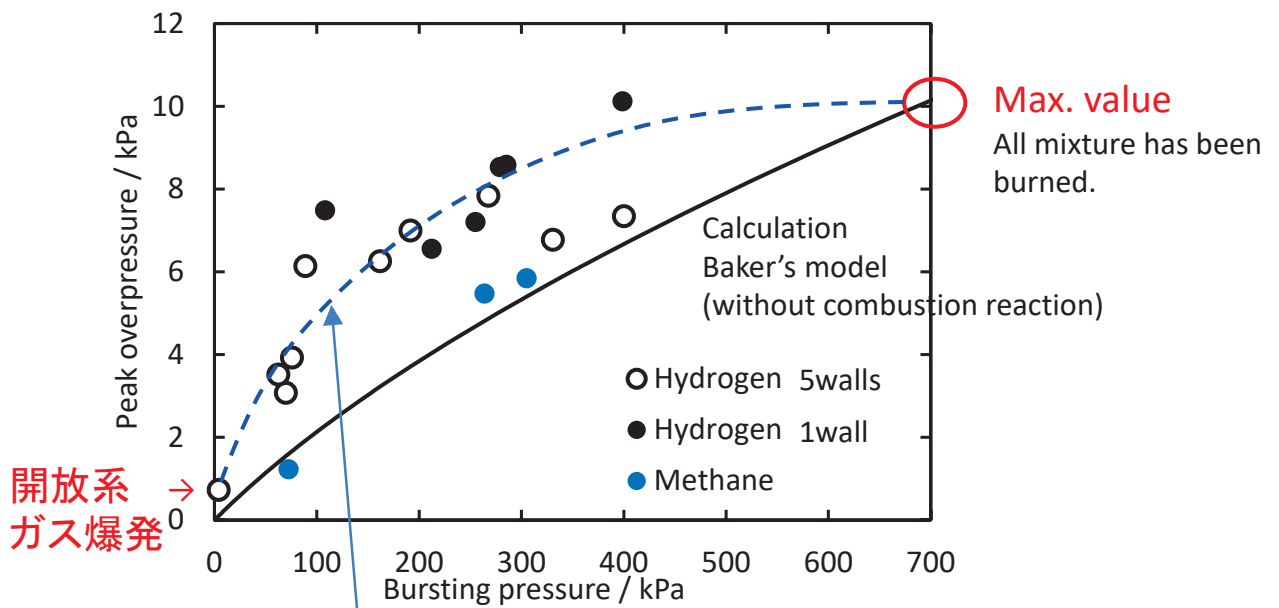


$$p_1 = p_s \left[1 - \frac{(\gamma_1 - 1)(a_0/a_1)(p_s/p_0 - 1)}{\{2\gamma_0[2\gamma_0 + (\gamma_0 + 1)(p_s/p_0 - 1)]\}^{1/2}} \right]^{\frac{-2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}}$$

The pressure of blast wave decreased as propagating away. The decrease curve is correspond to that of high explosive using energy $E = \frac{p_1 - p_0}{\gamma_1 - 1} V_0$

燃焼反応が無い場合（単なる容器破壊）の爆風圧強度の予測式

容器破壊圧力と爆風圧最大値 (最大過圧)の関係



In the case of Hydrogen, combustion effect enhance the peak overpressure.

衝撃波にそれより遅く伝ばする火炎の挙動がどのように影響するかを明らかにすることは課題

爆発リスク低減の具体的対策

圧力上昇対策

・圧力放散 (Venting)

Rupture disk、Explosion vent

(一定圧力で開放する)

装置の上部を軽量な物質で作る方法もある



Rupture disk

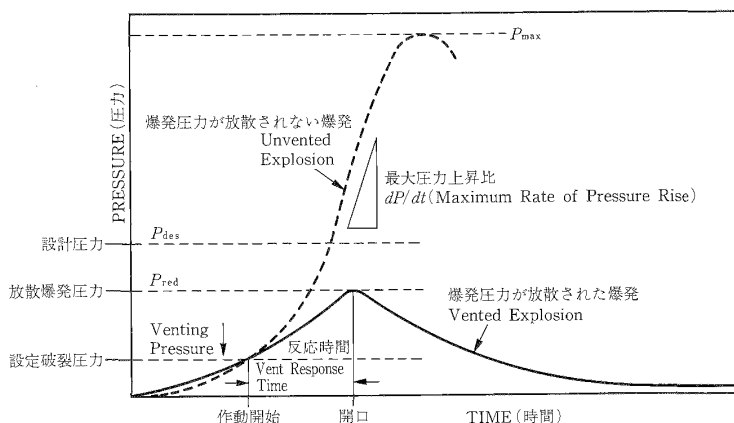
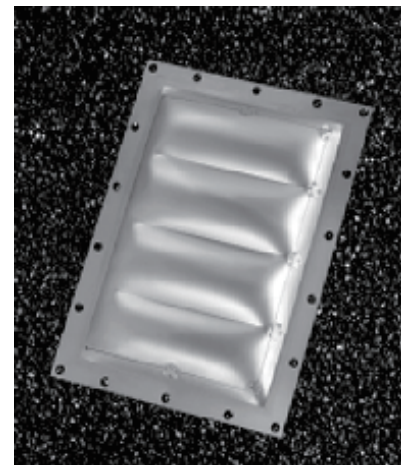


図3 爆発放散口の効果

安全工学、32-6、p.434 (1993)



爆発リスク低減の具体的対策

Vent面積の簡易計算法(NFPA68 (2013)の例)

Low Inertia Vent Closures (Vent の慣性力が弱い、かつ P_{red} が 0.1bar 以下)

$$A_{v0} = A_s C / \sqrt{P_{red}}$$

$$C = \frac{S_u \rho_u \lambda}{2 G_u C_d} \left[\left(\frac{P_{max} + 1}{P_0 + 1} \right)^{1/\gamma_b} - 1 \right] (P_0 + 1)^{1/2}$$

表3 スイフトの式用定数

可燃物	C [kPa] ^{1/2}
無水アンモニア	0.13
メタン	0.37
プロパンの 1.3 倍以下の燃焼速度のガス	0.45
爆発クラス St-1 の粉じん	0.26
爆発クラス St-2 の粉じん	0.30
爆発クラス St-3 の粉じん	0.51

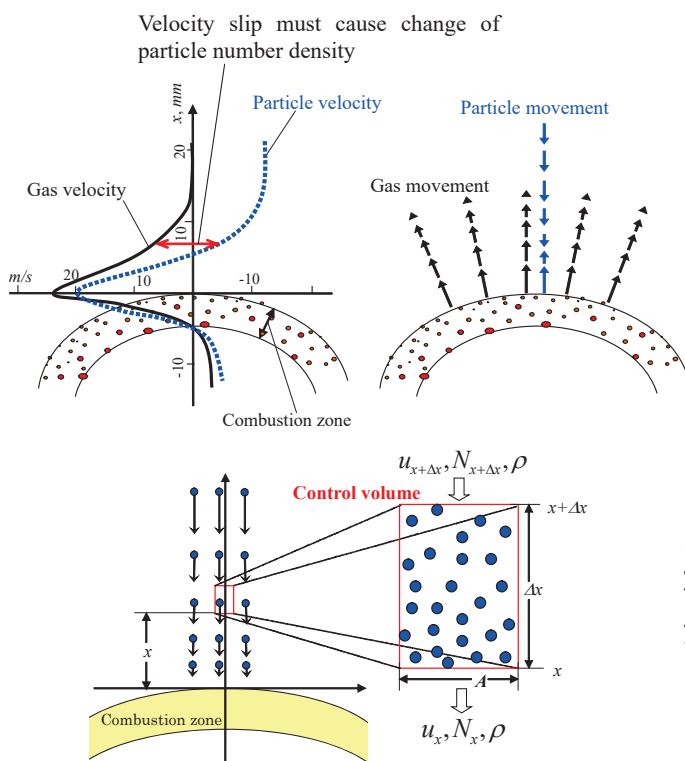
32-6, p.434 (1993)

Vent面積はやや大きめに出る(安全サイド)

- ・規格は年々複雑化している
ある条件では必要Vent面積が小さくてすむ
- ・現在は水素にはこの規格は使えない
爆こうが発生する可能性がある
⇒シミュレーションが可能であれば効率的設計が可能

粉じん爆発での特異現象

■ 垂直の円筒容器内での鉄粉の粉じん爆発実験



Flammability lean limit

Fuel gas	Lean limit Equivalence ratio	Dust	Lean limit Equivalence ratio
Methane	0.50	Adipic acid	0.28
Ethane	0.52	Lactose	0.22
Ethylene	0.40	Poly-ethylene	0.17
Benzene	0.49	Sulfur	0.10
Methanol	0.46	Aluminum	0.29
Ethanol	0.49	Iron	0.35

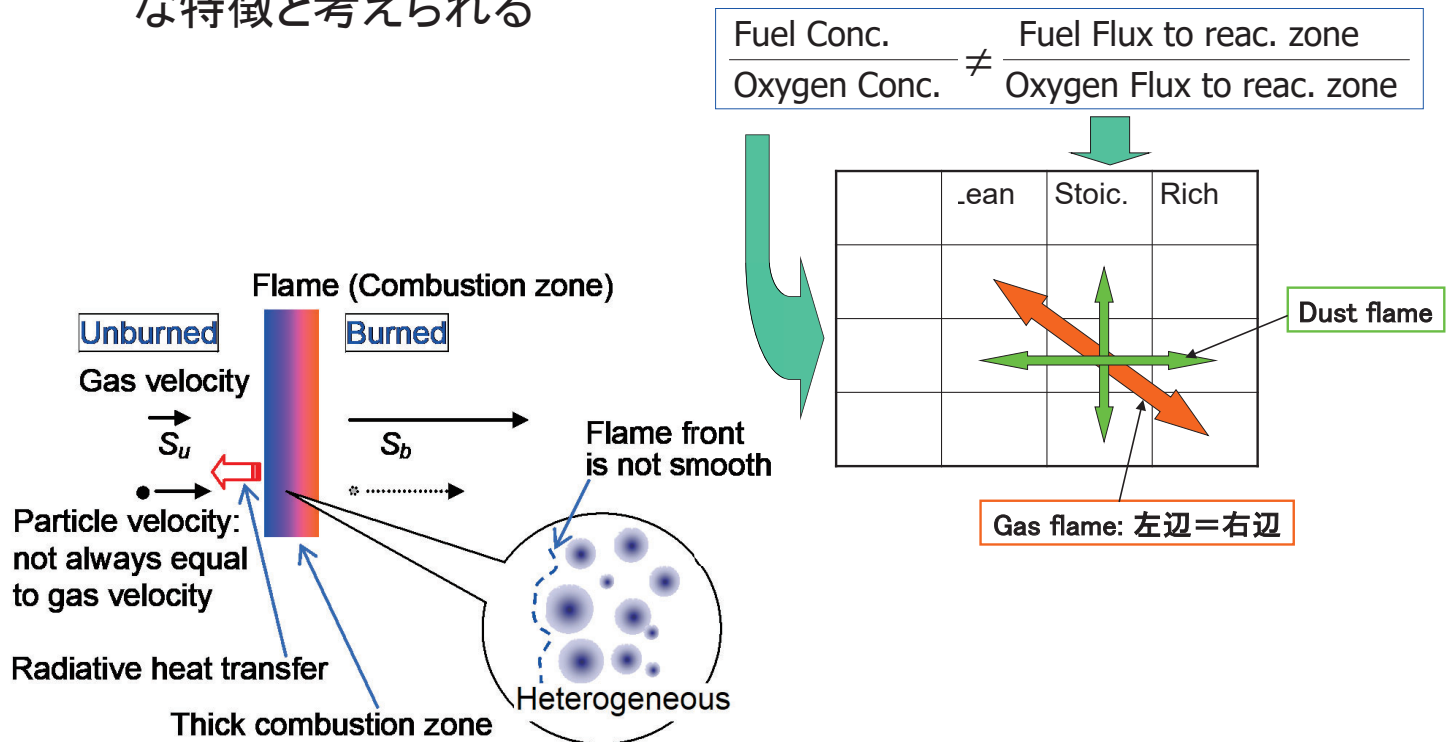
□ □ □ → Smaller

火炎に近づくとも鉄粒子間の距離は小さくなる。粉じんの粒子間距離は燃焼下限に影響すると考えられる。

J.H. Sun, R. Dobashi, T. Hirano, Combustion and Flame, 134, pp.381-387 (2003).

粉じん爆発での特異現象

- 粒子と気体の速度差は、粉じん爆発時の伝ば火炎の特異的な特徴と考えられる



保険会社での火災・爆発の安全研究

世界的にはコンサルタントや保険会社の安全技術力が自主的安全活動(自主保安)にうまく活用されている

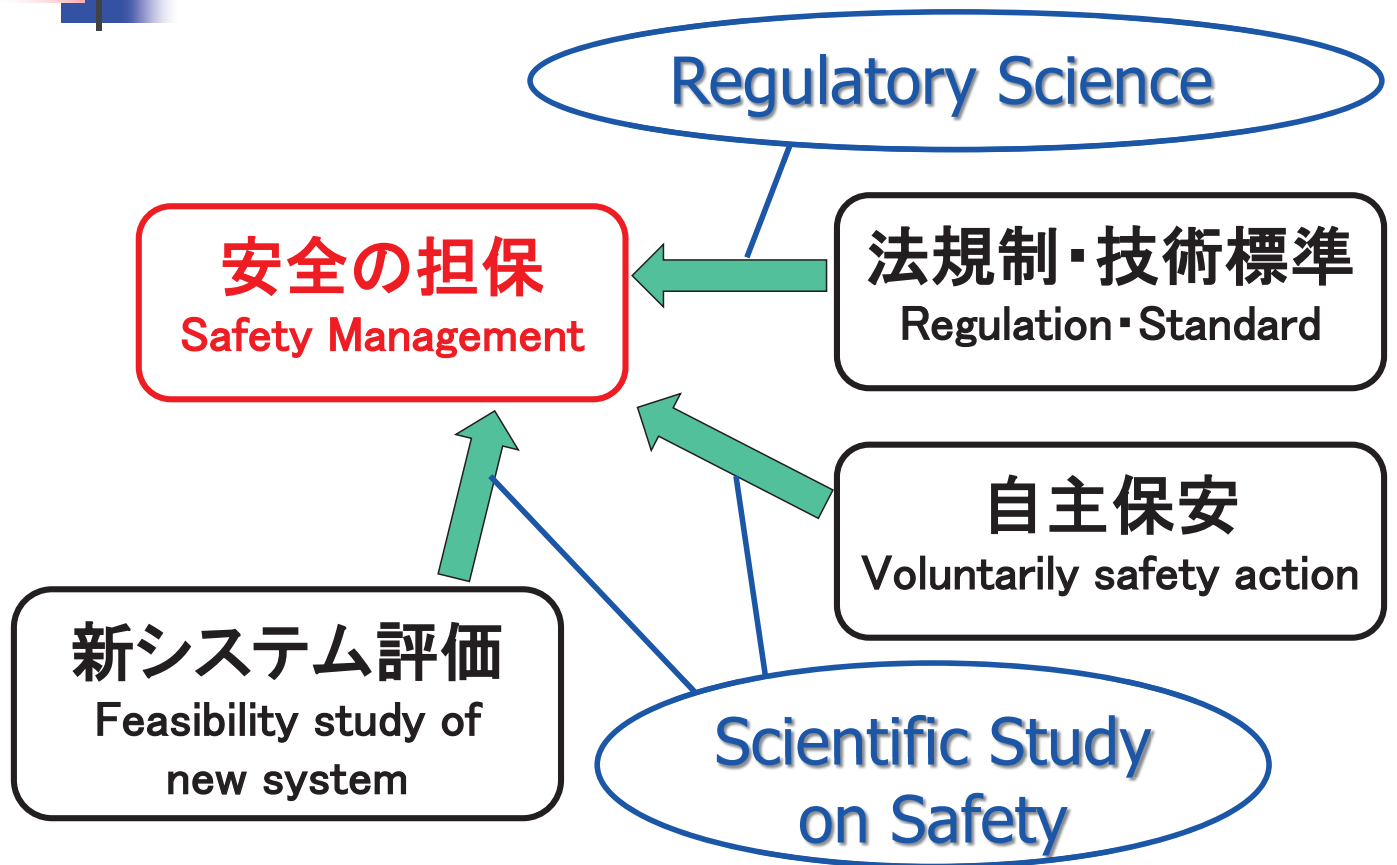
RESEARCH CAMPUS - FM GLOBAL



保険契約時に安全審査し、保険会社の提言で改善をおこなうことで、保険料が下がる(自主保安のインセンティブ)



安全担保の枠組み



アドバンスソフト
からの情報提供

1. 今後のセミナー予定
2. セミナー資料のダウンロード
3. アーカイブ動画のご案内

Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

今後のセミナー予定

第4回

2025年8月1日（金）
14：00～15：30

「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」

文部科学省 研究振興局 参事官（情報担当）付
計算科学技術推進室 室長 栗原 潔 様

受付中

第5回

2025年9月12日（金）
14：00～15：30

「量子技術を応用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」

九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門
准教授 久谷 雄一 様

受付中

Copyright ©2024 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

下記のURLから、過去のセミナー資料をダウンロード可能です。
<https://www.advancesoft.jp/download/>



Copyright ©2024 Advansoft Corporation. All rights reserved.

YouTubeにて、セミナーのアーカイブ動画を配信中
<https://www.youtube.com/user/advancesoft>



Copyright ©2024 Advansoft Corporation. All rights reserved.



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立てる用途に限定して無料配布しています。
このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。
このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。