



「水素燃焼の制御を目指して」

安全で快適な水素社会を目指して
水素の燃焼をスマートに制御！

愛媛大学 大学院理工学研究科
機械工学コース
熱工学研究室

中原真也

Email: nakahara.masaya.mf@ehime-u.ac.jp



本日の内容

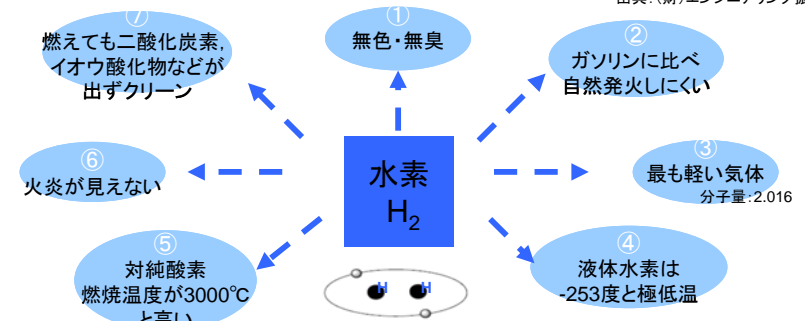
- ・水素の一般的な特徴&燃焼特性
- ・水素の燃料として活用動向(水素燃焼技術)
- ・水素燃焼の制御を目指して(研究紹介)
 - 水素乱流火炎の燃焼制御
 - 水素微小火炎の燃焼制御
 - 水素の安全利用
- ・まとめ

水素の燃料としての特徴

- ・反応しても二酸化炭素CO₂を発生しない：
- ・様々な原動機に使用できる：
エンジンや発電所のガスタービンなど燃焼機関
理論効率に優れる燃料電池
- ・水素は無尽蔵：
宇宙の元素のうち3/4は水素(質量比)
地球上では、海水中に大半が存在
副生水素(精油所、塩電解工場、製鉄所等:FC車500万台分)
水や天然ガスを初め様々な物質から作れる→2次エネルギー
ただし、外からエネルギーが必要
排熱や余剰電力等を有効利用！
- ・様々なエネルギーを水素として貯めることができる：
エネルギーのキャリアー(媒体)として活用。。。

水素の一般的に言われる特徴

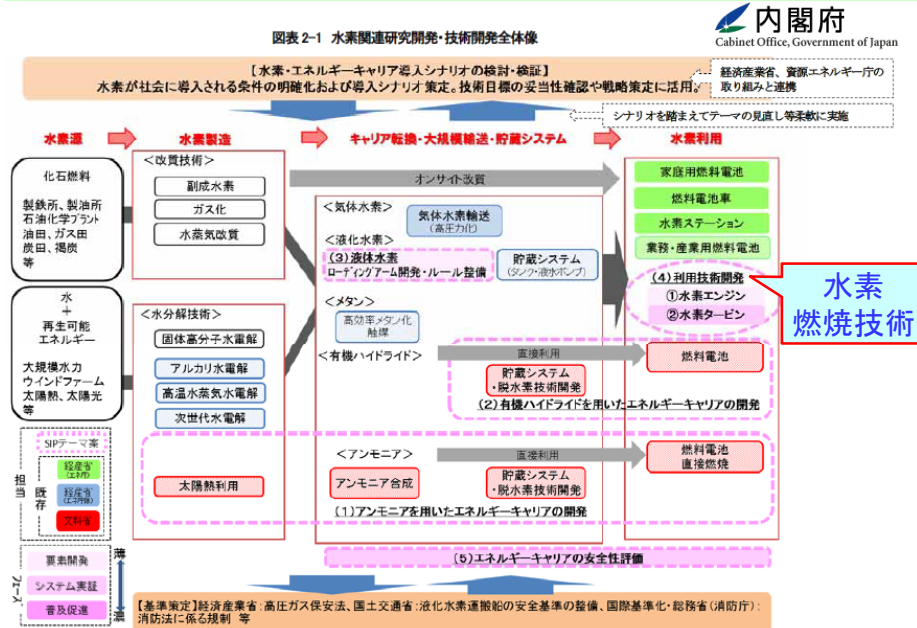
出典：(財)エンジニアリング振興協会



特徴的な基礎燃焼特性を有する水素 (燃料/空気混合気)

	可燃範囲 [vol% (当量比 φ)]	最大層流燃焼速度 [cm/s]	低発熱量 [MJ/kg]	最小着火エネルギー [mJ]	消炎距離 [mm]	CO ₂ &未燃炭化水素 未生成燃焼
水素 H ₂	4.0~75.0 (0.10~7.17)	291.2 (φ1.80)	120.0	0.02	0.6	○
メタン CH ₄	5.0~15.0 (0.5~1.69)	37.0 (φ1.06)	50.01	0.28	2.0	×
エタン C ₂ H ₆	3.0~12.5 (0.52~2.39)	40.1 (φ1.14)	47.51	0.24	1.8	
プロパン C ₃ H ₈	2.1~9.5 (0.51~2.51)	43.0 (φ1.14)	46.34	0.25	1.7	

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「エネルギーキャリア」



水素燃焼技術

水素発電の意義①(エネルギーとして)

低環境負荷 発電段階ではCO2を排出せず、水素の製造方法によってはCO2フリー電源に

エネルギーセキュリティ 燃料となる水素は多様なエネルギー源から製造可能

条件・留意事項

- 燃料電池と異なり、既存の化石燃料を用いた発電方法に比べて効率が低いわけではないため、この活用が直ちに省エネにつながるわけではない
- 安定かつ安価な水素供給が必要
- 環境負荷は水素の製造方法による

規模の拡大も可能 火力発電に用いられるガスタービン同様に規模の拡大も可能 (燃料電池は規模とコストが比例するため現状では高コスト)

発電用水素ガスタービンの現状

	既存ガスタービン		新規開発ガスタービン
	拡散方式(水蒸気噴射)	予混合方式(ドライ型※)	ドライ型(※)
水素混焼	国内においても導入多数	5%程度まで可(実例なし)	一部メーカーで開発
水素専焼	イタリアで実証例あり	×(不可)	未開発

多様な燃料に対応、水素燃焼の実績多数

水・蒸気噴射により効率が低下

水・蒸気噴射しないため効率が低下しない

多様な燃料種への対応は困難

ドライ型(水・蒸気噴射しない)で水素リッチガスに対応したガスタービンの開発が今後必要

(※)ドライ(DLE: Dry Low Emission)型水や蒸気の噴射によらず燃焼温度を \downarrow と \downarrow NOx排出量を低減したもの

出典:「水素発電について」資源エネルギー庁 H26.3.26



水素乱流火炎の燃焼制御をめざして

水素予混合乱流燃焼速度の汎用予測モデルの開発

水素燃焼機器の高性能化技術

& 水素爆発事故の予測・予防技術の開発

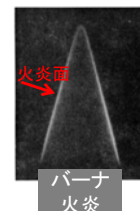
水素-炭化水素-酸素-希釈ガス

$$S_T = \left(S_L + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \alpha \cdot u' \right) (1 - K a_L)$$

予混合燃焼

工業的に利用される乱流燃焼

層流燃焼



燃焼速度: 単位面積の火炎面が消費する未燃混合気の体積

容器中-静止場-中心点火

伝ば火炎

層流火炎

既燃ガス

未燃混合気 ρ_u

層流燃焼速度 S_{L0}

A_{L0}

(a) 層流燃焼速度 Laminar Burning Velocity

乱流燃焼

容器中-乱流場-中心点火

乱流火炎

未燃混合気 $S_L(f_1)$

既燃ガス $S_L(f_2)$

乱流燃焼速度 S_T

A_T

$S_T \approx \frac{A_T}{A_{L0}} S_L(f)$

(b) 乱流燃焼速度 Turbulent Burning Velocity

単位容積・単位時間あたりの発熱量が増大 → 燃焼器の小型化・軽量化

バーナ火炎

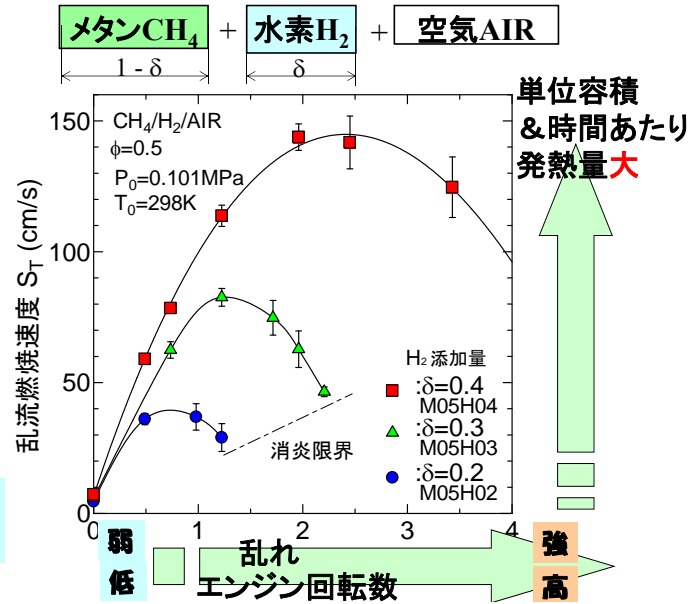
希薄炭化水素予混合気への水素添加による乱流燃焼の促進・改善効果

天然ガス等の希薄燃焼技術

低CO₂&低NO_x 燃焼技術, 熱効率の向上

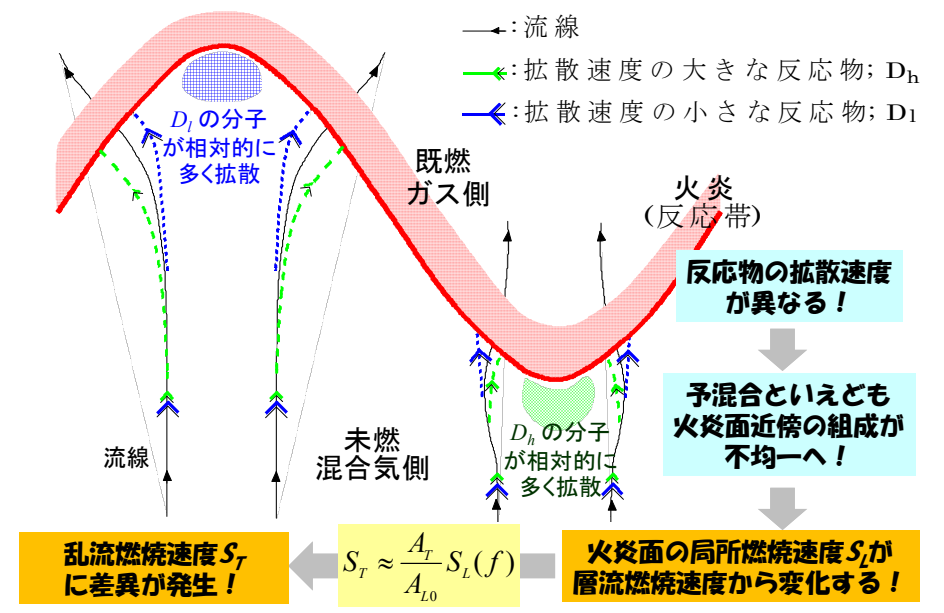
燃焼不安定 消炎, 失火, サイクル変動等

水素添加 希薄燃焼技術!



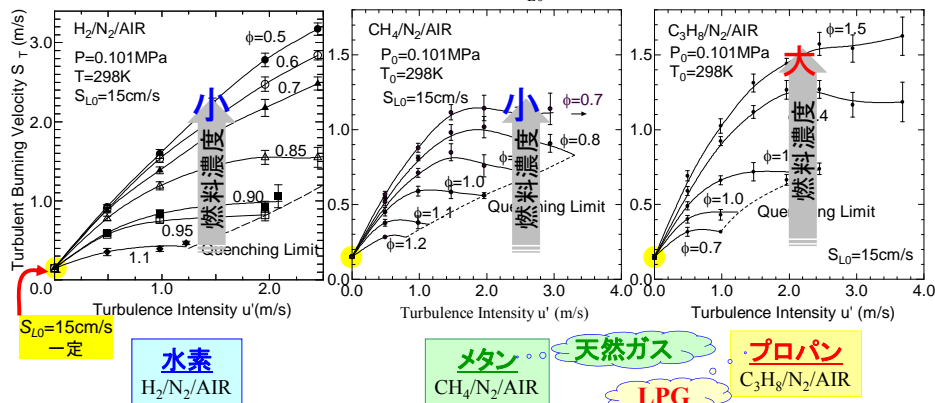
乱流火炎での選別拡散効果の重要性

Preferential Diffusion Effect



乱流燃焼速度 S_T に及ぼす燃料の種類の影響

乱れ強さ u' と乱流燃焼速度 S_T の関係
 当量比 ϕ の異なる層流燃焼速度 S_{L0} を揃えた混合気

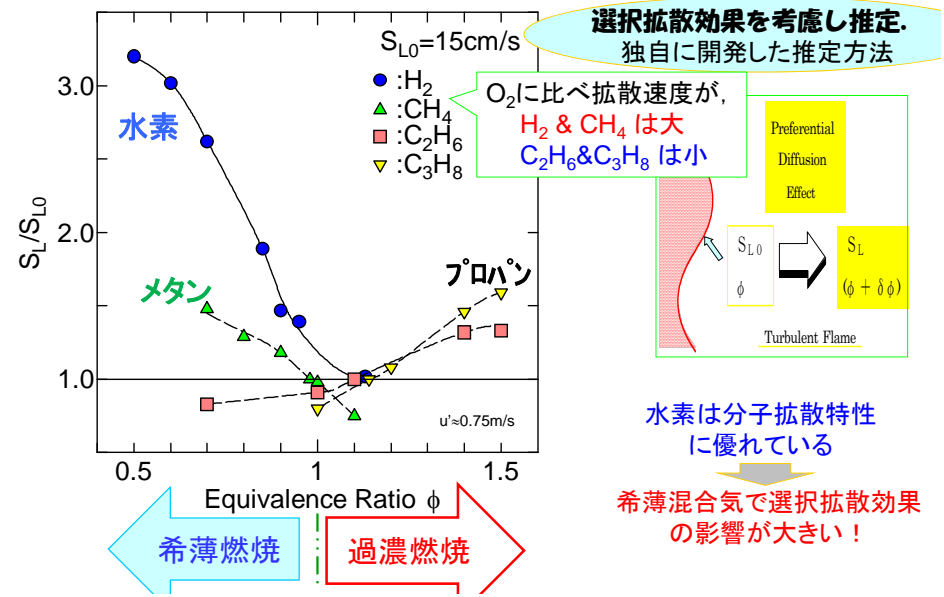


当量比 ϕ の減少に伴い, 同一 u' での S_T は,
 H₂ & CH₄ 混合気の場合は増加
 C₃H₈ 混合気の場合は減少

分子拡散係数:
 $H_2 \gg CH_4 > O_2 > C_3H_8$

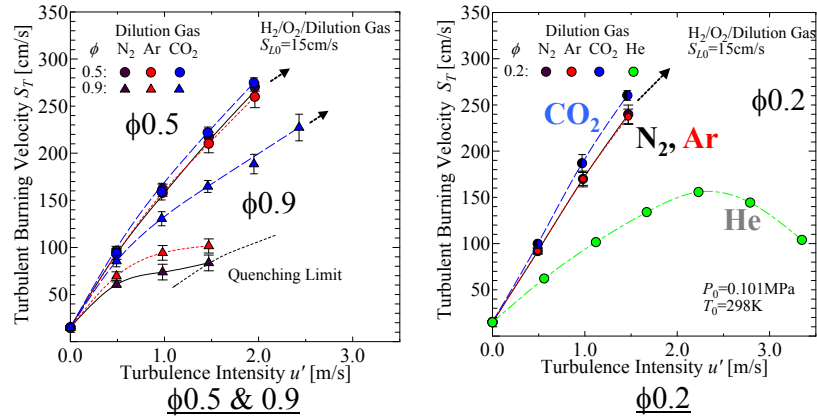
乱流燃焼時の局所燃焼速度に及ぼす燃料の影響?

乱流火炎の実際の燃焼速度(平均局所燃焼速度 S_L)



水素混合の乱流燃焼速度に及ぼす希釈ガス N₂, Ar, He & CO₂ の影響

H₂-O₂-希釈ガス混合気の乱流燃焼速度特性



• N₂の乱流燃焼速度 S_T に比べて (同一乱れ強さ u' & 同一層流燃焼速度 S_{L0})
 アルゴン: Ar → ほぼ同一かやや増大 (拡散速度 D ≈ O₂ & N₂)
 二酸化炭素: CO₂ → 増大 (D < N₂)
 ヘリウム: He → 著しく減少 (D > N₂)

乱流燃焼速度 S_T の予測モデル式

簡便な式

従来の研究とことなり、層流燃焼速度 S_{L0} ではなく乱流火炎の局所燃焼速度 S_L を基準に!

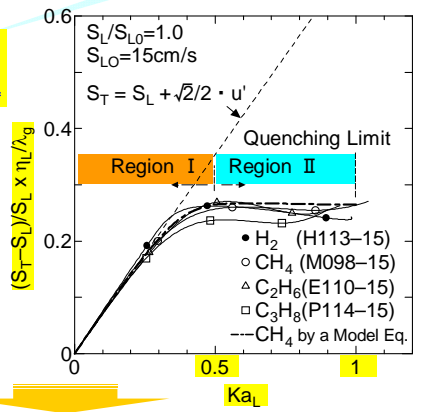
$$0 < Ka_L \leq 0.5 \text{ [Region I]}$$

$$S_T = \left(S_L + \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha \cdot u' \right) (1 - Ka_L^2)$$

+ 火炎表面積増加効果(+) - 火炎伸長効果(-)

$$0.5 < Ka_L \leq 1.0 \text{ [Region II]}$$

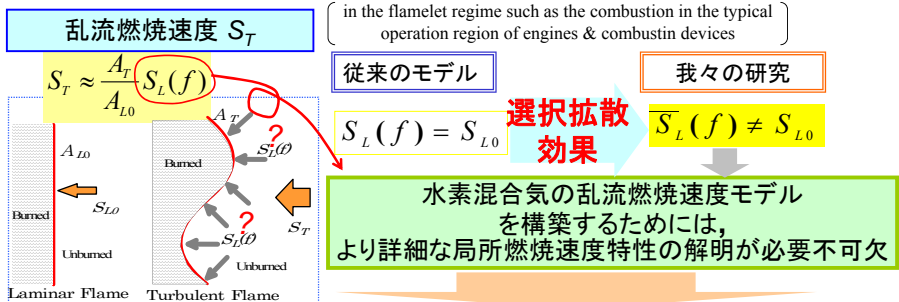
$$S_T = \left(\frac{3}{8\sqrt{2}} \alpha \frac{\lambda_g}{\eta_L} + \frac{3}{4} \right) S_L$$



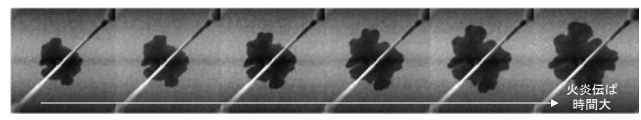
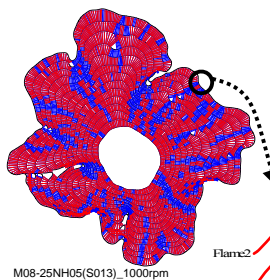
S_T: 乱流燃焼速度,
 S_L: 選択拡散効果を考慮し推定した乱流火炎の平均局所燃焼速度,
 u': 乱れ強さ,
 α: 形状係数 [(L_r + η_L)/L_φ]²,
 Ka_L: S_L に基づくカーロピッツ数 [=u'/λ_g · η_L/S_L],
 L_r: 乱れの縦方向積分尺度,
 η_L: 予熱帯厚さ [a_L/S_L],
 λ_g: 乱れのテイラー尺度,
 a_L: 局所当量比を考慮した熱拡散率

選択拡散効果を考慮した平均局所燃焼速度 S_L を基準値にすることにより、包括的に乱流燃焼速度の予測が可能

連続2次元火炎断層写真を用いた局所燃焼速度の直接的検討

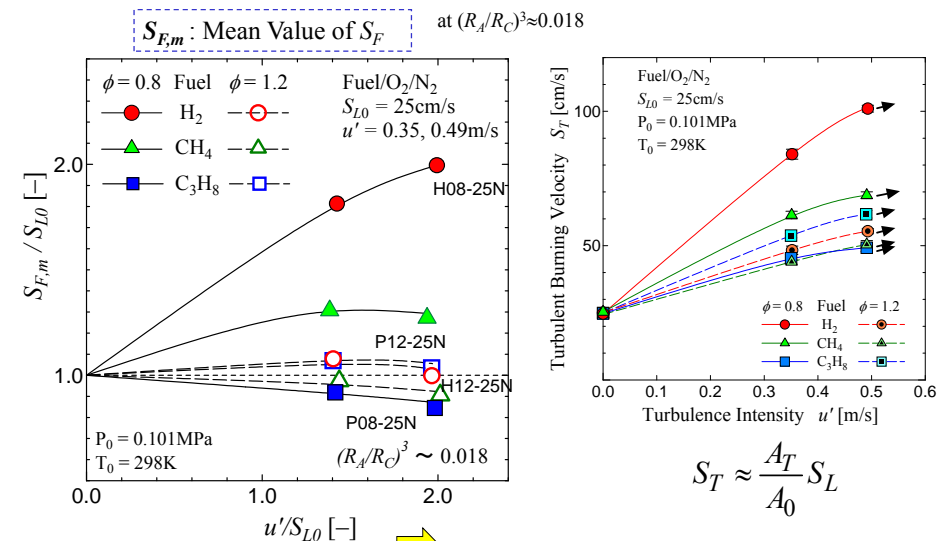


連続2次元連続火炎写真撮影法による直接的な乱流火炎の局所燃焼速度の検討



換算局所火炎変位速度 S_F
 Local Flame Displacement Velocity
 $S_F = (\rho_b / \rho_u) \times V_F$

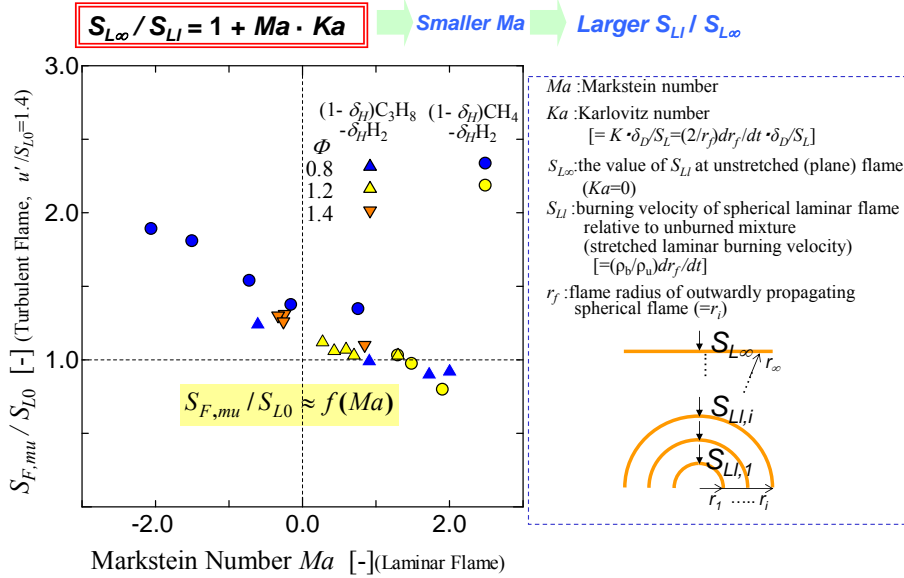
S_F の平均値 S_{F,m} (u'/S_{L0} の影響)



characteristic chemical reaction time : η₀/S_{L0}
 characteristic flow time : L_φ/u'

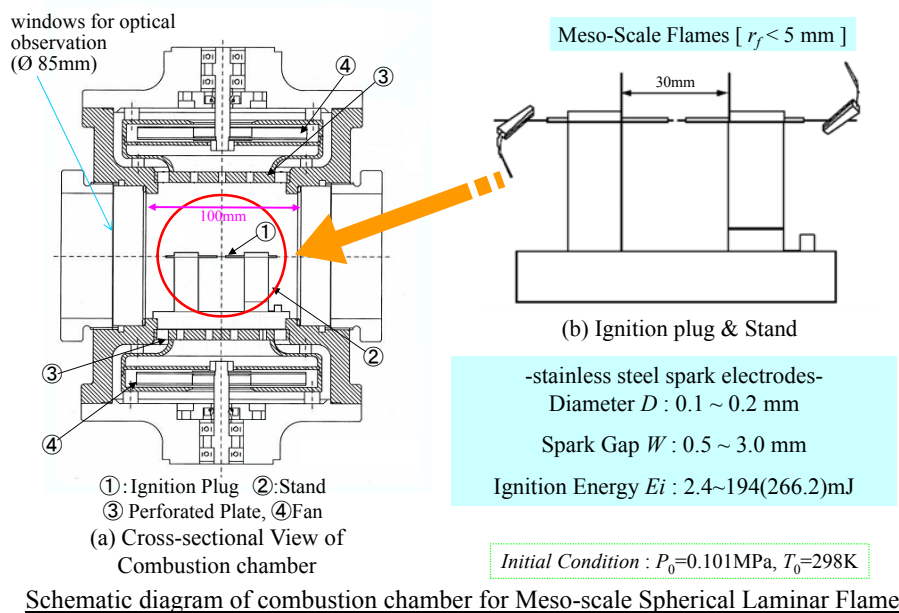
Leaner H₂ or CH₄ & Richer C₃H₈ mixtures S_{F,m} is larger. This trend is correspond well with that of S_T.

Markstein Number Ma と乱流火炎の $S_{F,mu}$ の関係



水素微小火炎の燃焼制御をめざして 着火&燃焼 促進技術の開発研究 PowerMEMS*用超小型燃焼器の開発

微小スケール水素伝ば球状層流火炎の燃焼特性



微小火炎の火炎半径 r_f & 燃焼速度 S_{Ll} の定義

外向きに伝ばする微小球状層流火炎の写真例

H05-25N
 $\phi=0.5$
 $E_i=11.4\text{mJ}$

0.2 ms 0.7 ms 1.2 ms 1.7 ms 2.2ms 2.7ms

火炎半径&燃焼速度の定義

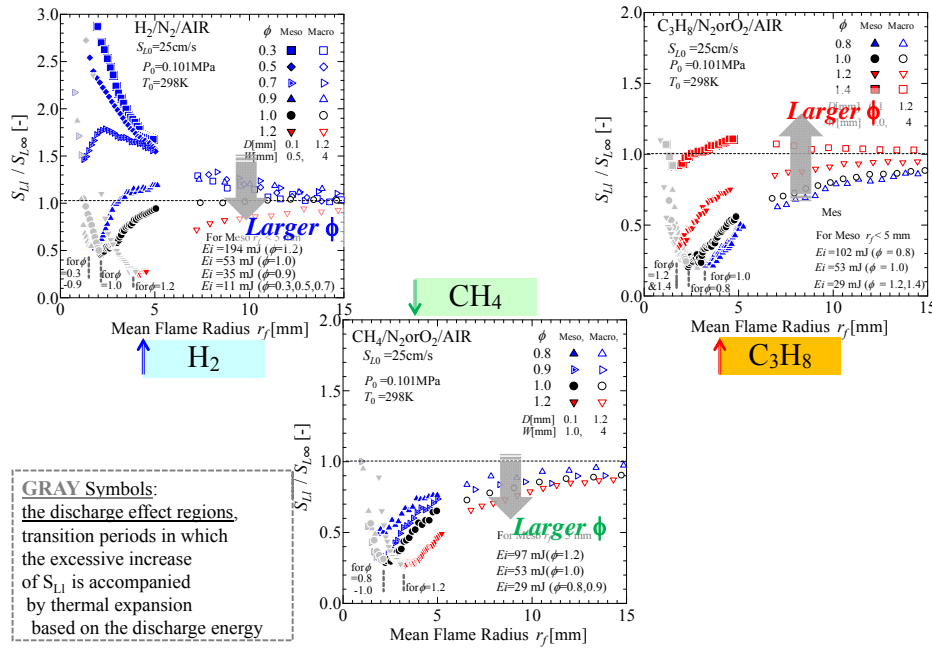
平均火炎半径 r_f
 $r_f = (H+Z)/4$

平均燃焼速度 S_{Ll} [cm/s]
 $S_{Ll,i} = (\rho_b/\rho_u) \times V_{Ll,i}$

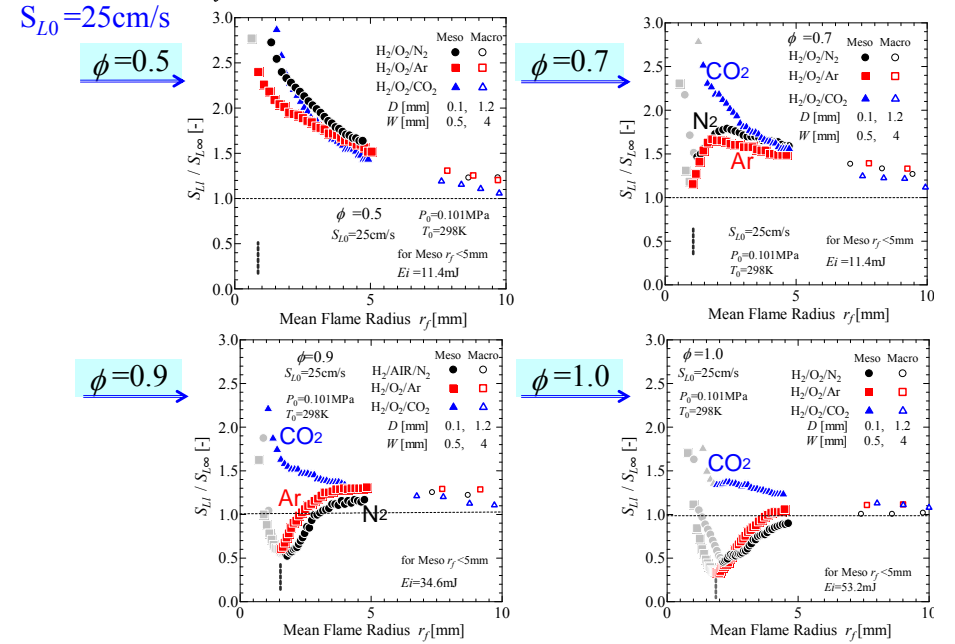
$S_{L\infty}$: 火炎伸長がない時の S_{Ll} (at $Ka=0$) $[\approx S_{L0}]$

$r_{f,i}$: Flame Radius
 $V_{Ll,i}$: Flame Propagation Speed
 $[=(r_{f,i+1} - r_{f,i})/dt]$
 dt : acquisition rate
 ρ_b : density of burned gas
 ρ_u : density of unburned mixture

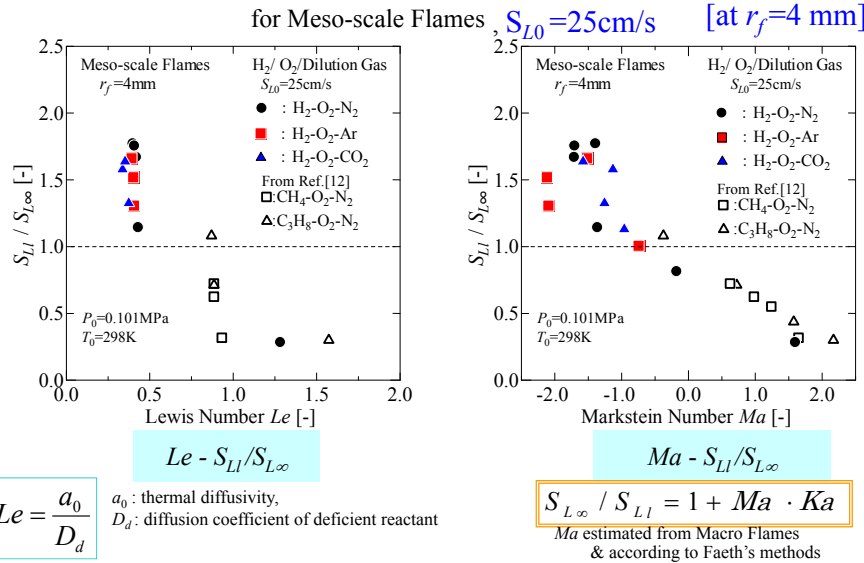
火炎半径 r_f と燃焼速度 $S_{Ll}/S_{L\infty}$ の関係 (燃料の影響)



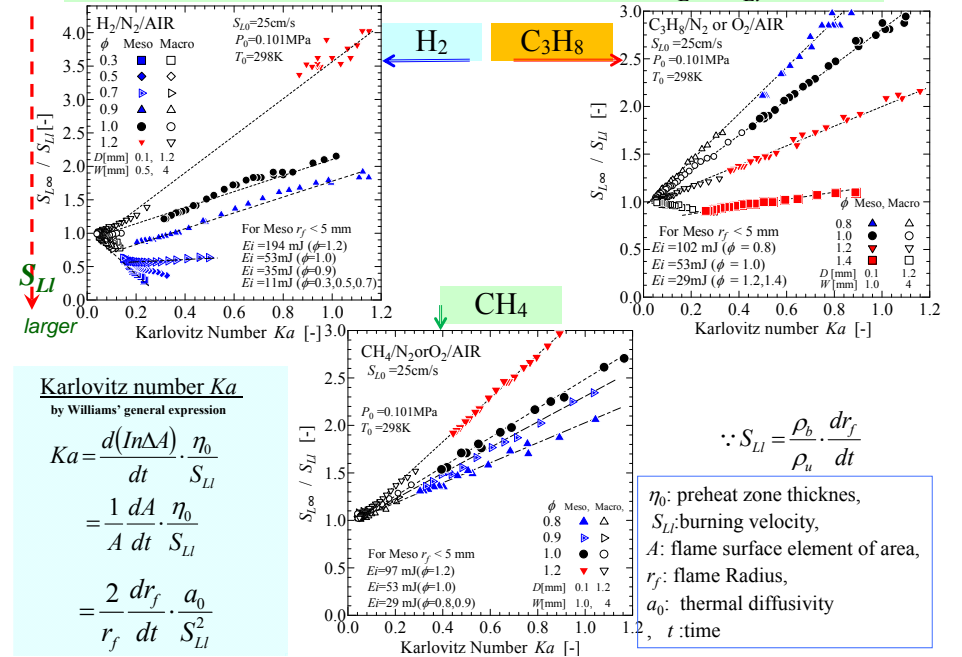
火炎半径 r_f と燃焼速度 $S_{Ll}/S_{L\infty}$ の関係 (希釈ガスの影響)



微小火炎の燃焼速度 $S_{Ll}/S_{L\infty}$ (at $r_f=4\text{ mm}$) とルイス数 Le またはマークスタイン数 Ma との関係



Karlovitz数 Ka (火炎伸長率) と燃焼速度 $S_{L\infty}/S_{Ll}$ の関係



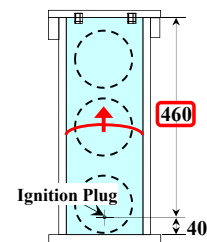


水素の安全利用をめざして 水素爆発・爆ごう防止技術開発のための 伝ば火炎の燃焼機構の解明

- 1937年5月6日 ドイツの飛行船ヒンデンブルグ号の事故
- 米国ニュージャージー州レイクハースト海軍飛行場
- 平成3(1991)年5月16日 宇宙開発事業団角田ロケット開発センター
水素爆発事故(LE-7)
- 平成13(2001)年11月7日 中部電力(株)浜岡原子力発電所1号機
余熱除去系蒸気凝縮系配管の破断
- 平成16(2004)年2月21日 中部電力(株)浜岡原子力発電所2号機
2号機タービン建屋上発電機水素ガス排出配管出口付近における火災
- 平成17(2005)年12月7日 九州大学水素ステーション(伊都キャンパス)
高圧水電解水素ステーションでの配管の破断
- 平成23(2011)年3月12日 福島第一原子力発電所 1号機
- 平成23(2011)年3月14日 福島第一原子力発電所 3号機

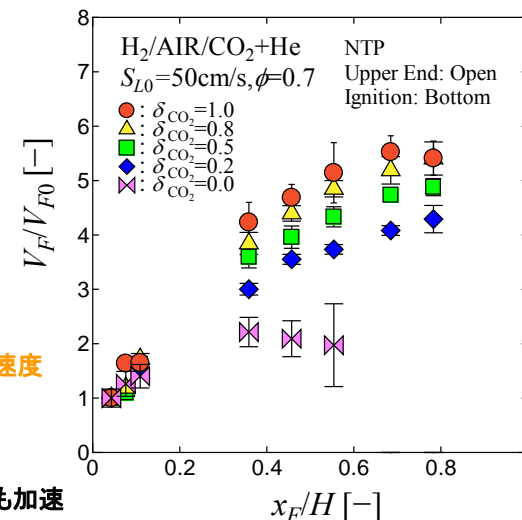
無次元火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元火炎伝ば距離 x_F/H ($\phi=0.7$)

狭隘空間型



各混合気の水炎伝ば速度
の増加率を評価

開放端近傍の水炎伝ば速度は、
点火初期の5倍以上にも加速



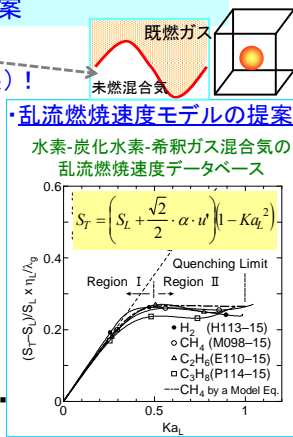
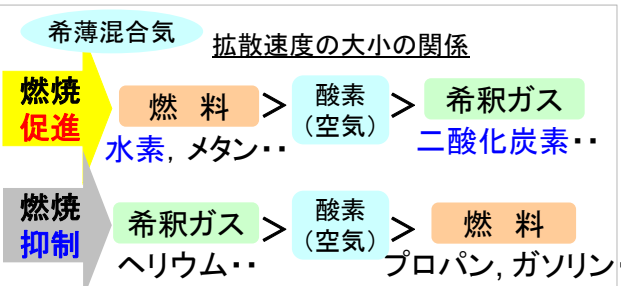
H : 点火栓位置から燃焼器開放端部
までの距離460 mm V_{F0} : 火炎が燃焼器の側壁や底面に達していない
位置 $x_F=20$ mmにおける伝ば速度

これまでの研究成果のまとめ

- ①半径5mm以下の微小な火炎の燃焼特性を把握・評価する手法を開発
- ②200種類以上の燃料-酸素-希釈ガス混合気の乱流燃焼速度特性や分子拡散を考慮した局所燃焼速度特性の把握・評価
- ③局所燃焼速度を基準とした乱流燃焼速度整理式を提案

・乱流伝播火炎 & 微小層流伝播火炎 = 湾曲した火炎
分子拡散特性が重要な因子 (乱流燃焼場: 選択拡散効果)!

予混合気: 燃料 + 酸素(空気) + 希釈ガス



分子拡散特性 (or 選択拡散効果)に着目した、
層流・乱流場での燃焼制御技術の開発が可能

中原真也: 水素燃焼関連の主たる論文

- (1) 水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度に与える局所燃焼速度特性の影響
中原 真也, 松尾 佳憲, 大元 喜雄, 佐伯 翼, 阿部 文明
日本機械学会論文集(B編), 81巻, 822号(2015) 1頁-13頁
- (2) Effect of Dilution Gas on Burning Velocity of Hydrogen-Premixed Meso-scale Spherical Laminar Flames
Masaya NAKAHARA, Fumiaki ABE, Kenichi TOKUNAGA and Atsushi ISHIHARA,
Proceedings of the Combustion Institute, Volume 35(2015), pp. 639-646
- (3) 水素-酸素-アルゴン理論混合気の乱流燃焼速度に与える局所燃焼速度特性の影響
中原真也, 西部祥平, 松尾佳憲, 大元喜雄, 阿部文明
日本機械学会論文集(B編), 79巻, 804号(2013) 1675頁-1684頁
- (4) Fundamental burning velocities of meso-scale propagating spherical flames with H₂, CH₄ and C₃H₈ mixtures
Masaya NAKAHARA, Fumiaki ABE, Kenichi TOKUNAGA and Atsushi ISHIHARA
Proceedings of the Combustion Institute, Volume 34(2013) pp.703-710
- (5) 水素-酸素-希釈ガス混合気の微小球状伝ば層流火炎の基礎燃焼速度特性
中原真也, 大西義明, 西原司, 阿部文明
日本機械学会論文集(B編), 78巻, 793号(2012) 1640頁-1649頁
- (6) 水素添加プロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的検討
中原真也, 橋本 淳, 白砂貴盛, 月川正善
日本機械学会論文集(B編), 75巻, 760号(2009) 2550頁-2557頁
- (7) 水素混合気の局所燃焼速度に基づく乱流燃焼速度の整理に関する研究
中原真也, 城戸裕之
日本機械学会論文集(B編), 74巻, 746号(2008) 2229頁-2235頁
- (8) Effect of Stretch on Local Burning Velocity of Premixed Turbulent Flames
Masaya NAKAHARA, Hiroyuki KIDO, Takamori SHIRASUNA and Koichi HIRATA
Journal of Thermal Science and Technology, Vol.2, No.2 (2007) pp.268-280
- (9) トンネル状空間を伝ばする水素予混合火炎の基礎燃焼特性に関する実験的検討
中原真也, 熊谷守晃, 安川哲平, 城戸裕之
水素エネルギーシステム, Vol.32, No.3(2007) 24頁-31頁
- (10) 選択拡散効果を考慮した乱流燃焼速度の整理
城戸裕之, 中原真也
日本機械学会論文集(B編), 63巻, 614号(1997) 3477頁-3483頁