

# 「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」

## ②「ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発」

### (1)「革新的ガス化技術に関する基盤研究事業」

#### イ)「石炭ガス化発電用高水素濃度対応低NO<sub>x</sub>技術開発」

(中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

**分科会説明資料(公開)**

2010/ 8/19

株式会社 日立製作所

## I. 背景および目的

## II. 本研究の目標および実施工程

(1) 本研究の目標および大工程

(2) 本研究の実施内容

## III. 研究開発成果

(1) 開発目標に対する達成度

(2) 検討内容

## IV. 実用化の見通し

(1) 実用化の見通し

(2) 波及効果

## 背景

### ■社会的背景

- ・エネルギー安全保障の確立と低炭素社会への移行  
(グリーンイノベーションプログラムの推進)

### ■解決策

- ・石炭ガス化複合発電(IGCC\*<sup>1</sup>)にCO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS\*<sup>2</sup>)を組合せた  
高効率ゼロエミッション石炭火力発電の早期実現

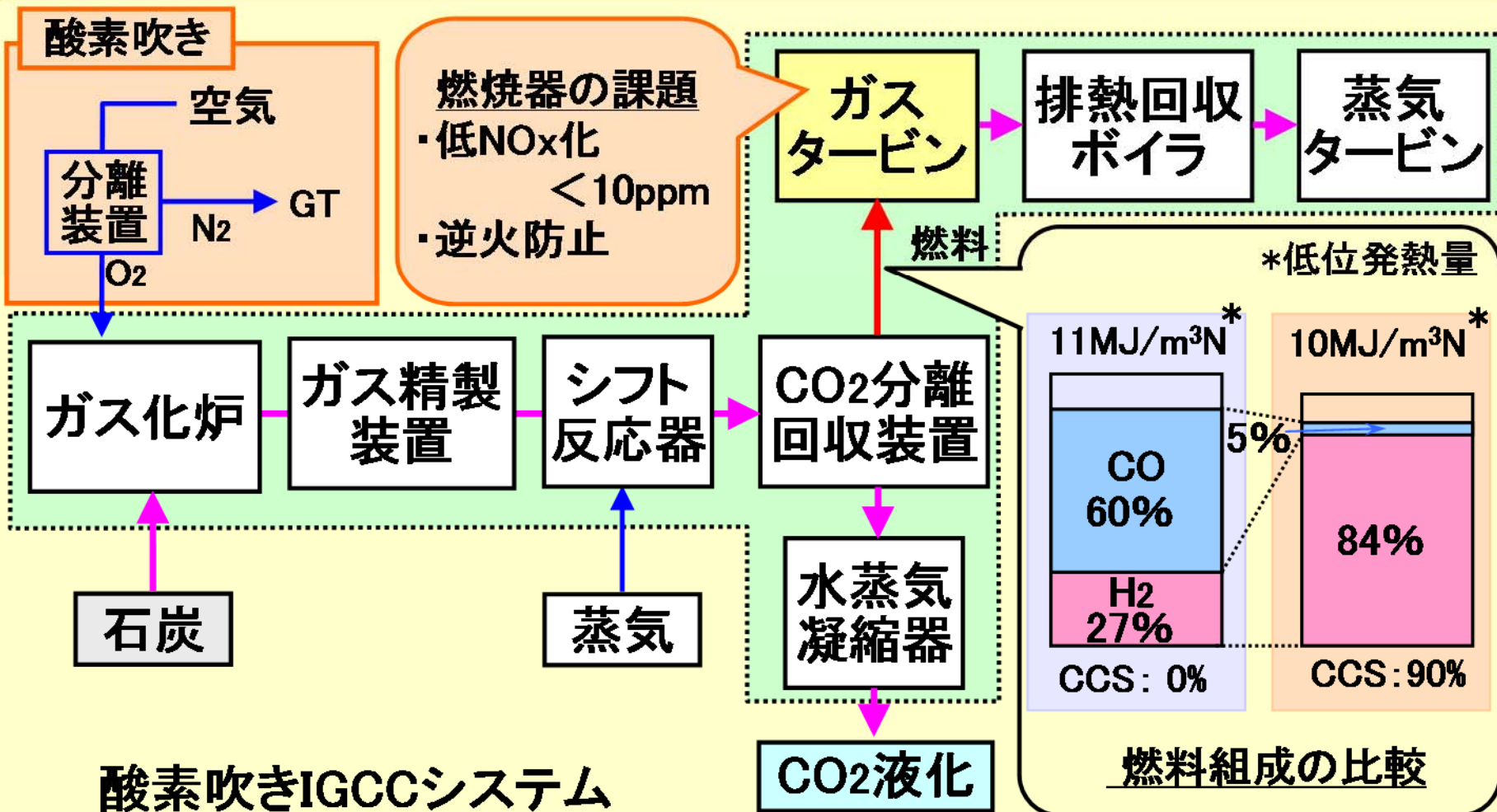
## 目的

### ■IGCCのキー構成要素であるガスタービンの高効率稼働

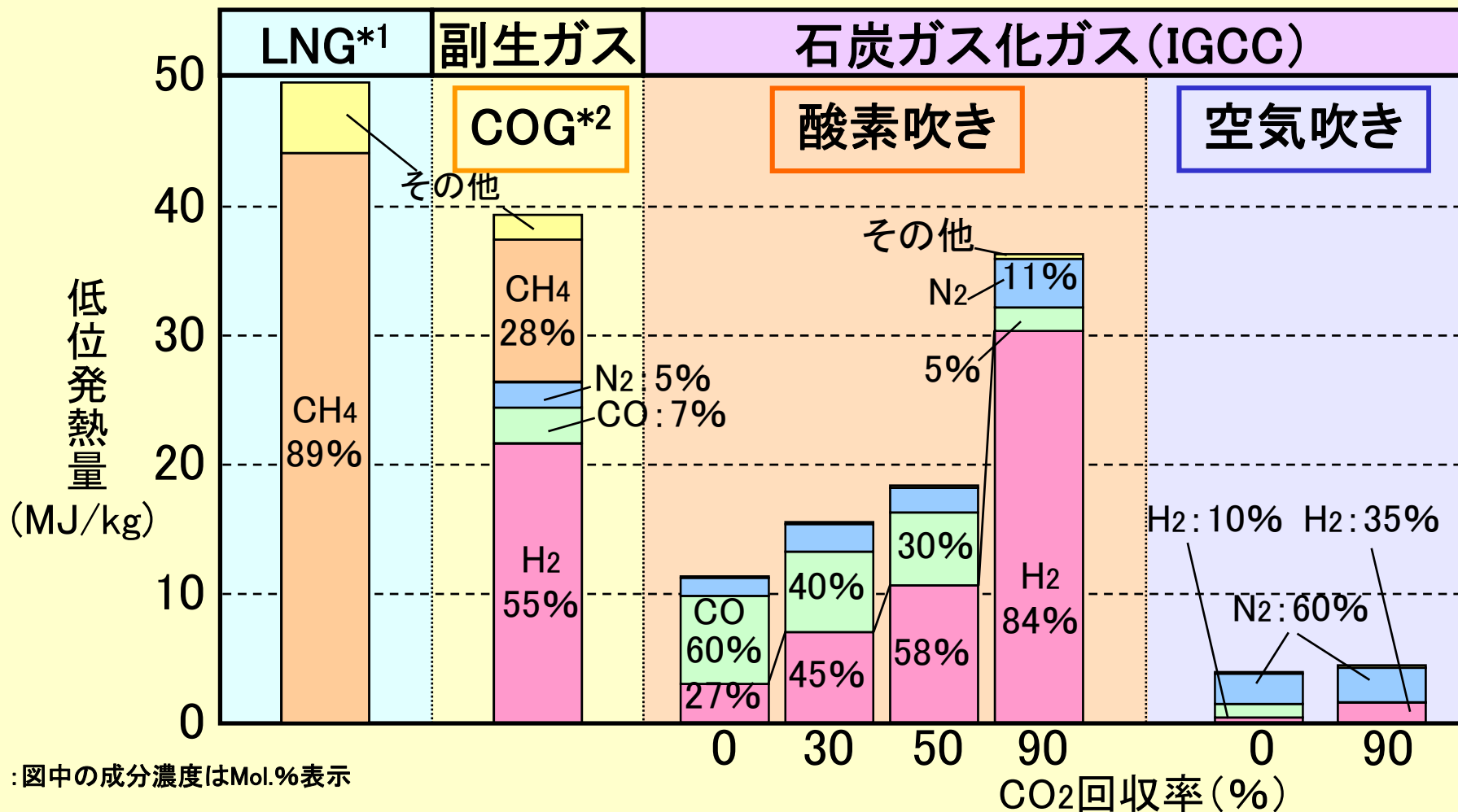
- ・CCS-IGCCではCO<sub>2</sub>回収率の変化に伴い幅広く水素濃度が変化
  - ・既存低NO<sub>x</sub>(予混合燃焼)技術では高水素濃度に伴う信頼性に問題あり
  - ・現状(拡散燃焼)技術はNO<sub>x</sub>低減に不活性ガスを噴射しプラント効率低下
- ⇒ **世界初の 高水素濃度対応ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼技術の開発**

\*<sup>1</sup>IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle, \*<sup>2</sup>CCS: Carbon dioxide Capture and Storage

- 小型装置でCO<sub>2</sub>回収効率が高い酸素吹きIGCC用ガスタービン
- 燃焼前回収方式による高水素濃度対応低NO<sub>x</sub>燃焼技術の開発



## ■ 石炭ガス化ガスはCO<sub>2</sub>回収率により燃料中のH<sub>2</sub>濃度が大きく変化



\* : 図中の成分濃度はMol.%表示

\*1 LNG: 液化天然ガス (Liquefied Natural Gas)

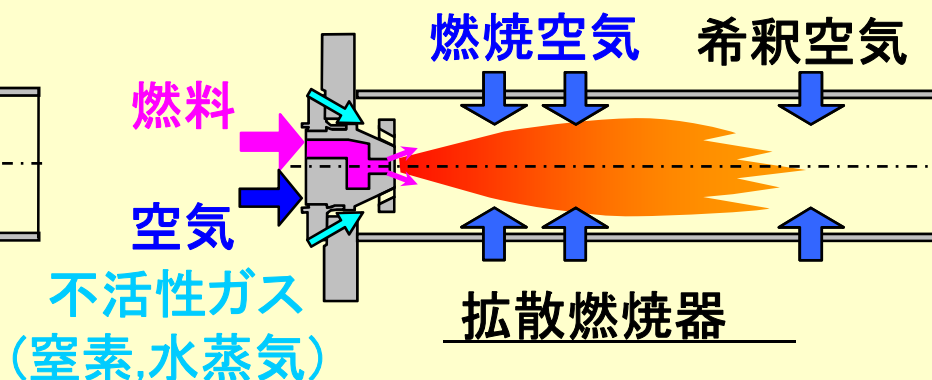
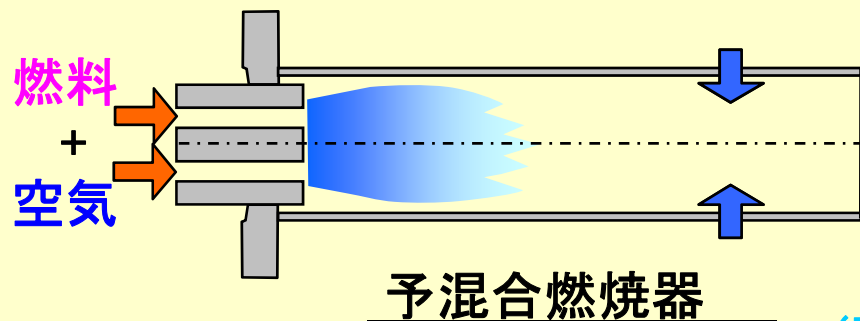
\*2 COG: コークス炉ガス (Coke Oven Gas)

: 出典: (1)水谷幸夫「燃焼工学」森北出版,

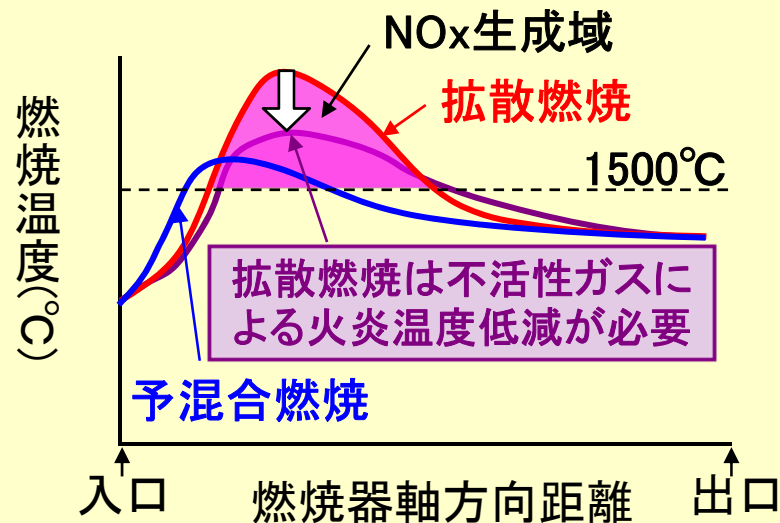
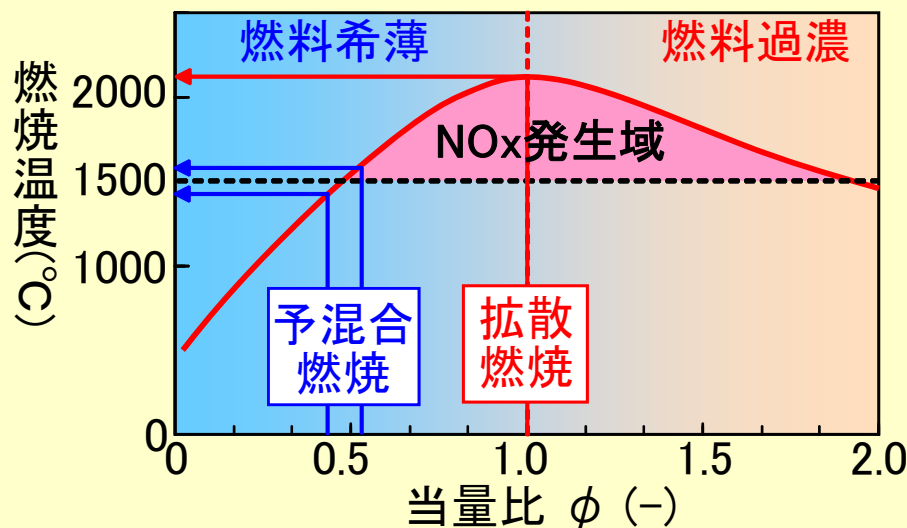
(2)NEDO:「平成16年度クリーン・コール・テクノロジー推進事業

石炭ガス化を核とするコプロダクションシステムに関する調査」調査報告書: (2005.3)

- 予混合燃焼器は低NO<sub>x</sub>であるが、逆火の危険性あり
- 拡散燃焼器はNO<sub>x</sub>排出量が多く、対策のためプラント効率低下



量論混合比



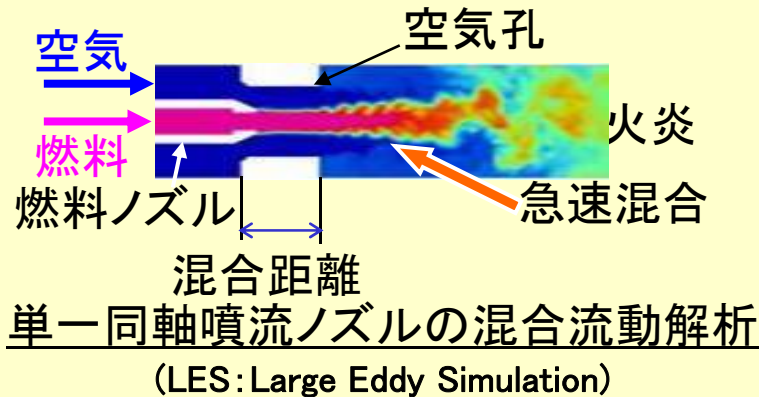


## ■ クラスタバーナーによる分散希薄燃焼で低NO<sub>x</sub>と耐逆火性を両立

### 多孔同軸噴流バーナー (クラスタバーナー)

- ・分散希薄燃焼による低NO<sub>x</sub>化
- ・耐逆火性に優れたバーナー
- ・幅広い組成範囲に対応可能

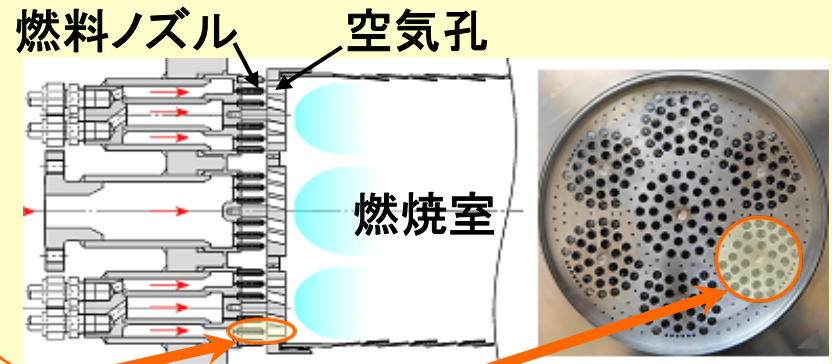
#### ・短い混合距離で急速混合⇒耐逆火性



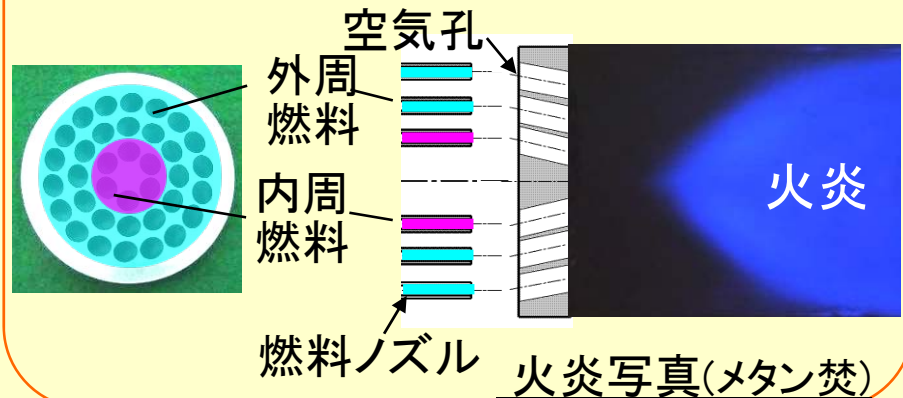
- ・高水素濃度燃料の課題  
発火しやすく、燃焼速度が速い  
⇒バーナーへの火炎付着



### ■ マルチクラスタバーナー(LNG焚き用)



#### ・内外周燃料比率制御で組成変化に対応



浮上火炎を形成し、バーナーへの火炎付着を防止

### I. 背景および目的

## Ⅱ. 本研究の目標および実施工程

### (1) 本研究の目標および大工程

### (2) 本研究の実施内容

## Ⅲ. 研究開発成果

### (1) 開発目標に対する達成度

### (2) 検討内容

## Ⅳ. 実用化の見通し

### (1) 実用化の見通し

### (2) 波及効果



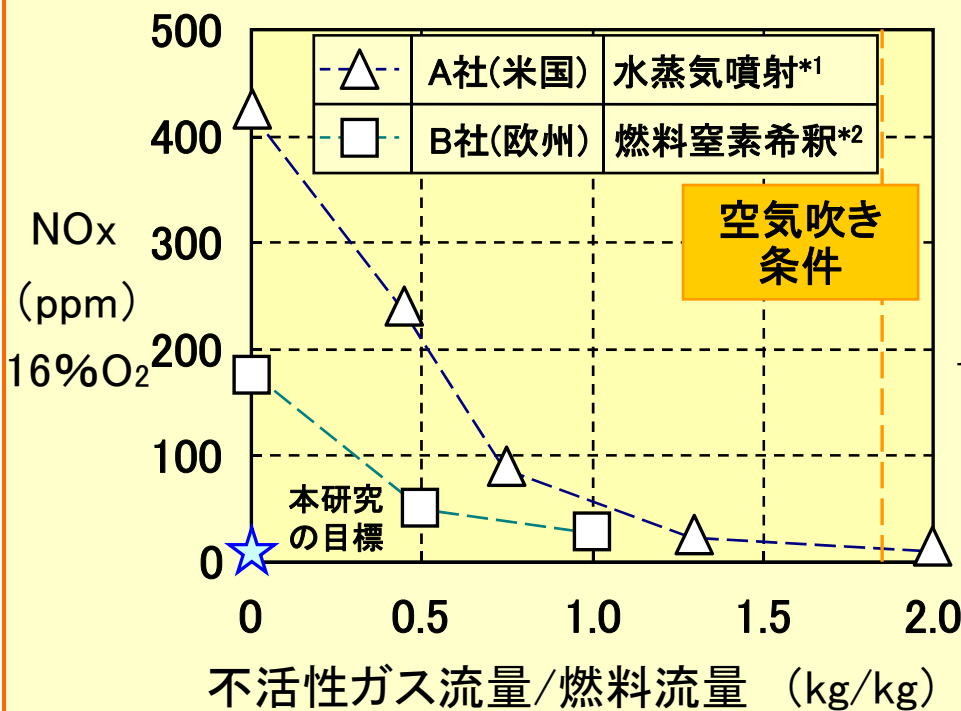
## ■ H20年～22年で要素技術を開発，今後は実用化に向け研究を加速

	FY2008 (H20)	FY2009 (H21)	FY2010 (H22)	FY2010 (H22)	FY2012 (H24)
クラスタバーナー 構造の最適化 (大気圧燃焼試験)	予備 検討	バーナー基本 構造の検討	バーナー基本 構造の最適化	中間評価 火炎内部 詳細計測	バーナー基本 構造の最適化②
マルチクラスタバーナー の検討 (中圧燃焼試験)	マルチクラスタバーナー 形式低NOx燃焼器 の設計・製作・試験準備		燃焼試験 縮小サイズ 燃焼器の 設計・製作	燃焼試験装置 改修・試運転 縮小サイズ燃焼器 中圧燃焼試験	実寸サイズ燃焼器 中圧燃焼試験 実寸サイズ燃焼器 高圧燃焼試験 (定格負荷 特性の検討) 実寸サイズ燃焼器 高圧燃焼試験 (部分負荷 運用性の検討)
乱流燃焼解析	基礎的の火炎による モデル検証・予備検討	クラスタバーナーの 乱流燃焼解析	マルチクラスタバーナー の乱流燃焼解析①		
数値目標	大気圧燃焼試験 NOx < 10ppm (@16%O <sub>2</sub> )		中圧燃焼試験 NOx < 10ppm (@16%O <sub>2</sub> )		実圧・実寸 NOx < 10ppm(@定格負荷) 燃焼効率 η a) η > 99%(@運用負荷) b) η > 99.9%(@定格負荷)
開発予算	93 (委託研究)	138 (委託研究)	87* (共同研究)		

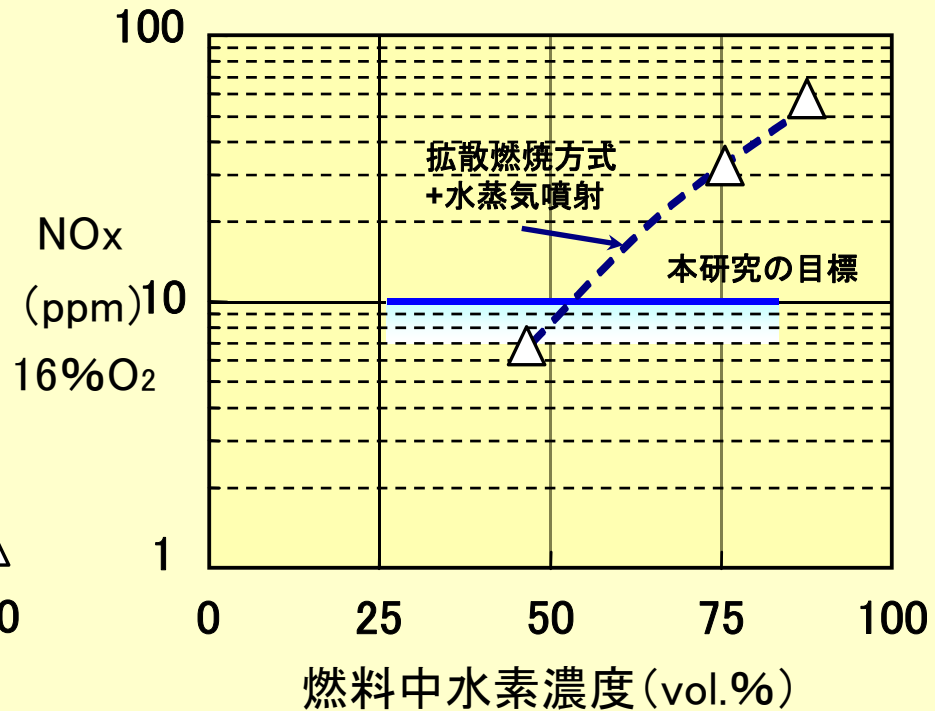
\*: ご指導により、一層実用化に向けた研究に比重をおくため共同研究に移行

- 不活性ガス(窒素, 水蒸気)の噴射などを用いず,  $\text{NO}_x < 10\text{ppm}$  の目標は**世界最高水準**
- $\text{CO}_2$ 回収率の変化に伴い幅広く変化する水素濃度に対応して全対象範囲で $\text{NO}_x < 10\text{ppm}$ とすれば, **革新的な低 $\text{NO}_x$ 技術**

: 出典;(1)R.A.Battista, et.al “Coal Gas Combustion Studies for IGCC Power Plants”, 12<sup>th</sup> Conference on Coal Gasification Power Plants (1993.10)  
(2)Frank Reiss, et.al “The Alstom GT13E2 Medium BTU Gas Turbine”, GT-2002-30108, ASME Turbo Expo 2002 (2002.6)

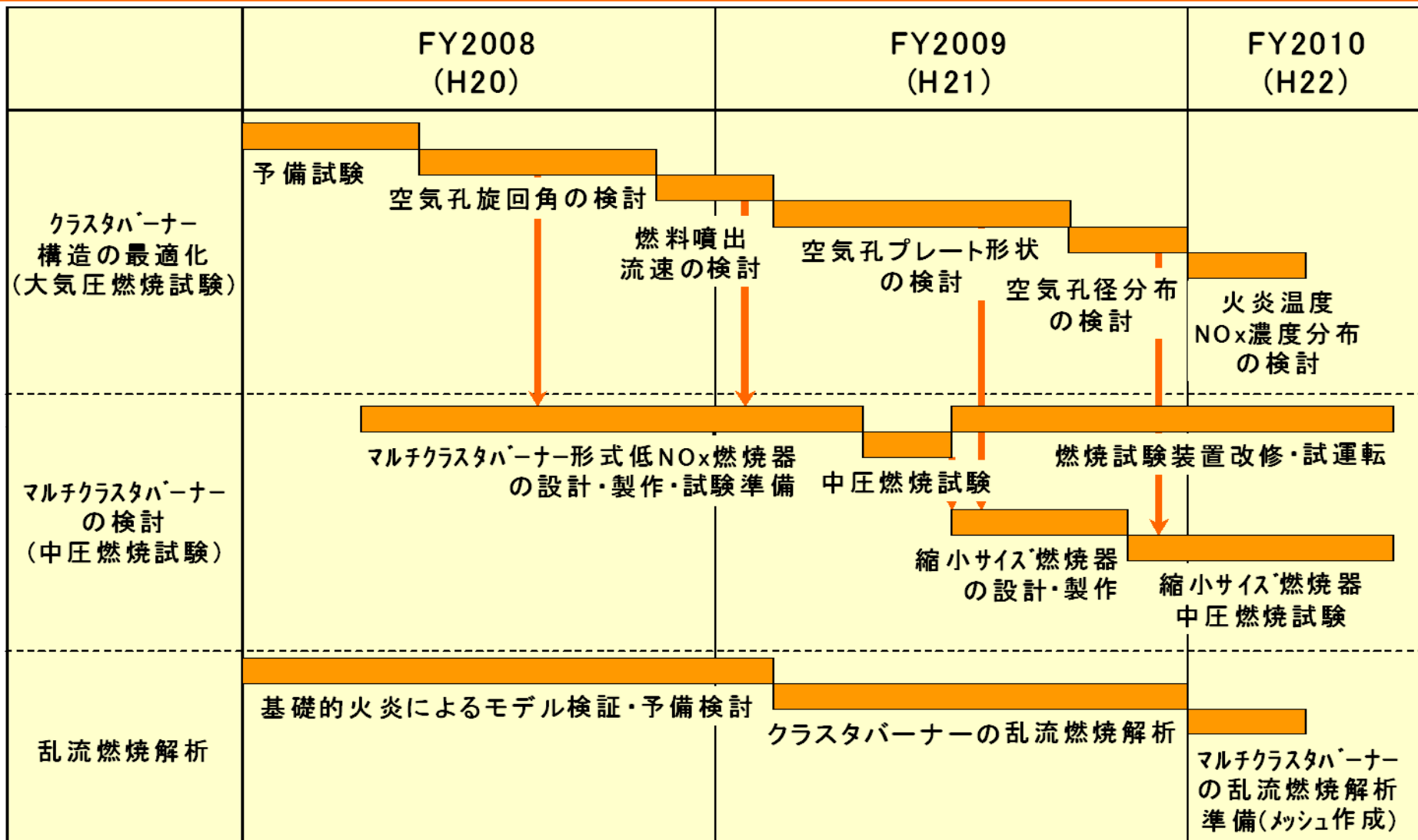


不活性ガスの効果



燃料中水素濃度の影響

## ■H20年～22年で要素技術を開発，中間評価数値目標を達成

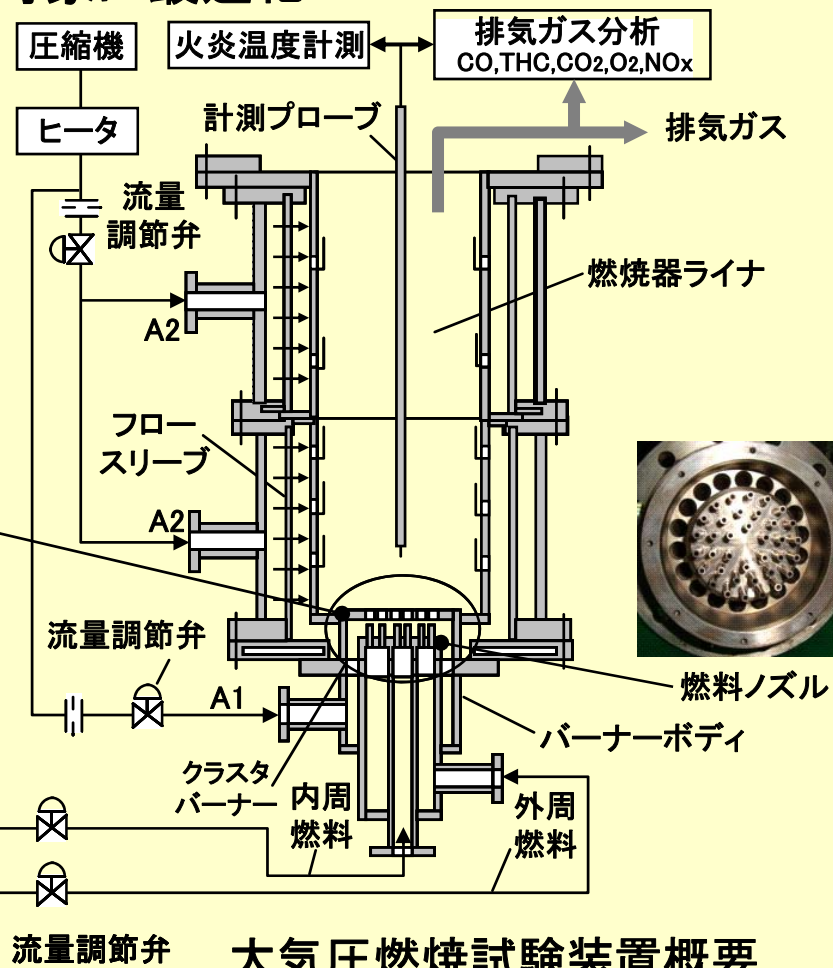


## ■ 大気圧(要素)燃焼試験によりクラスタバーナー構造を最適化

・空気孔旋回プレートの 旋回角, 空気孔プレート形状および燃料ノズルの燃料噴出流速(噴孔径)を対象に最適化



装置概観写真

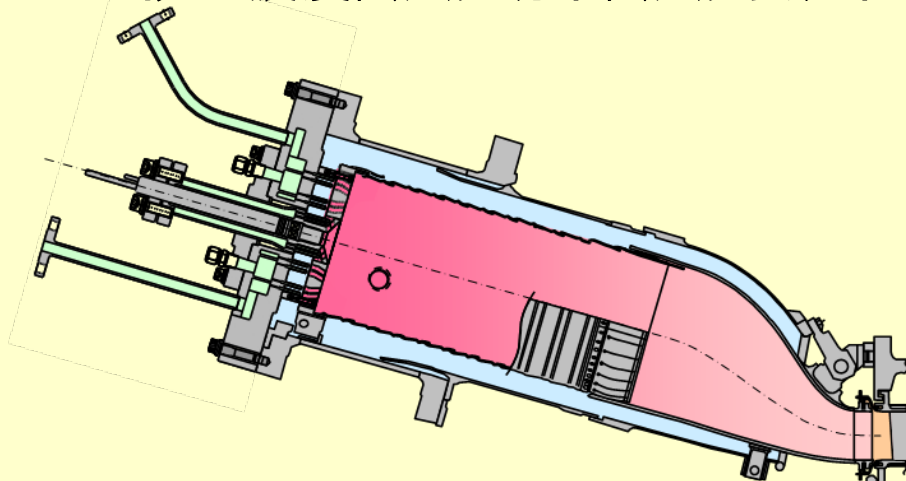


大気圧燃焼試験装置概要

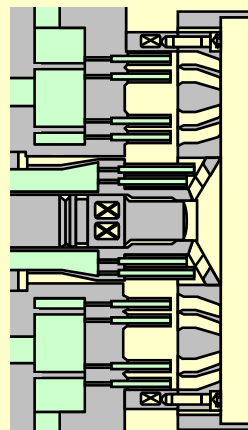


### ■ 実寸燃焼器による中圧燃焼試験により低NO<sub>x</sub>燃焼性能を検討

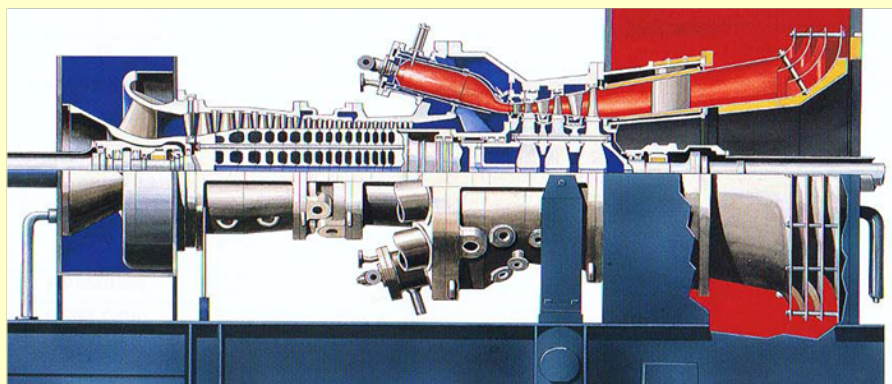
- ・NO<sub>x</sub>排出濃度，燃焼効率，燃焼安定性，各部メタル温度，火炎観察



マルチクラスタバーナー形式低NO<sub>x</sub>燃焼器



マルチクラスタバーナー



ガスタービン



中圧燃焼試験装置

## I. 背景および目的

## Ⅱ. 本研究の目標および実施工程

(1) 本研究の目標および大工程

(2) 本研究の実施内容

## Ⅲ. 研究開発成果

(1) 開発目標に対する達成度

(2) 検討内容

## Ⅳ. 実用化の見通し

(1) 実用化の見通し

(2) 波及効果

## ■凸型マルチクラスターバーナー燃焼器により目標達成

研究開発目標	成 果	達成度
<p>中圧燃焼試験 (0.6MPa) NO<sub>x</sub> &lt; 10ppm (@16%O<sub>2</sub>)</p>	<p>■ CCS 0%(H<sub>2</sub>濃度27%相当) 5.4ppm</p> <p>■ CCS30%(H<sub>2</sub>濃度45%相当) 5.8ppm</p> <p>■ CCS50%(H<sub>2</sub>濃度58%相当) 6.5ppm</p> <p>■ CCS90%(H<sub>2</sub>濃度84%相当) 9.2ppm</p>	<p>○ 達成</p>



### Ⅲ. 研究開発成果

#### (2) 検討内容

##### ① マルチクラスタバーナ中圧燃焼試験

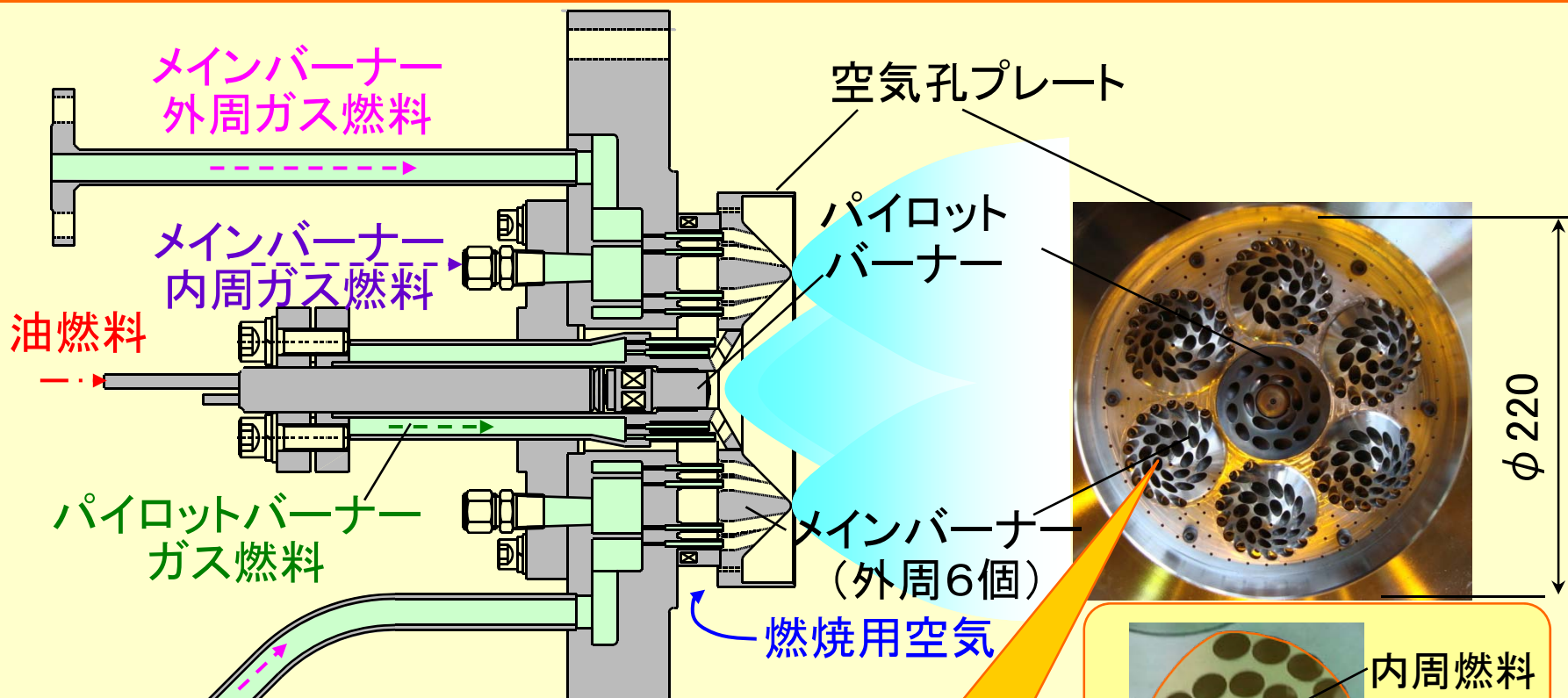
(a) 平板型マルチクラスタバーナー燃焼特性

(b) 凸型マルチクラスタバーナー燃焼特性

##### ② クラスタバーナの形状最適化(大気圧要素試験)

##### ③ 乱流燃焼解析

■ 空気孔プレートの変更し、各バーナーの燃料配分をパラメータに中圧条件(0.6MPa)にて試験



$$\text{メインバーナー外周燃料比率} = \frac{\text{メインバーナー外周燃料流量}}{\text{メインバーナー全燃料流量}}$$

## ■水素、メタン、窒素の3成分の試験用燃料により燃焼試験を実施

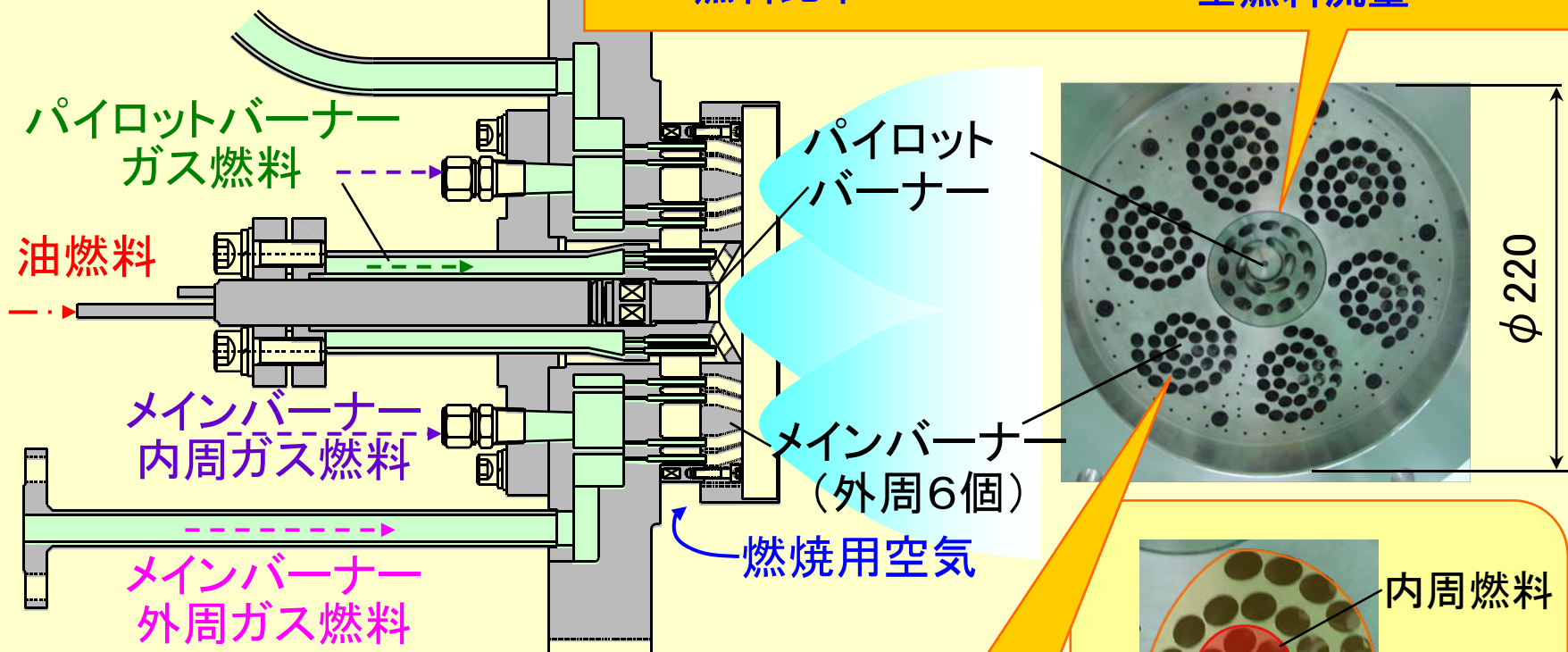
### 試験条件

項目		単位	CCS0 %	CCS30 %	CCS50 %	CCS90 %
空気流量		kg/s	2.9	2.9	2.9	2.9
空気温度		°C	387	387	387	387
燃焼器圧力		MPa	0.6	0.6	0.6	0.6
ガスタービン負荷		%	100	100	100	100
燃料 性状	水素	vol.%	40	55	65	84
	メタン	vol.%	18	16	6	2
	窒素	vol.%	42	29	29	14
	低位発熱量	MJ/m <sup>3</sup> N	11	12	9	10

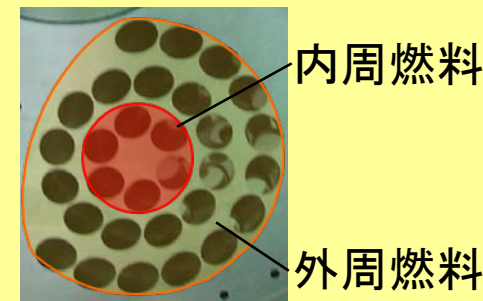
## ■各バーナーの燃料配分をパラメータに中圧条件(0.6MPa)にて試験

### 平板型バーナー

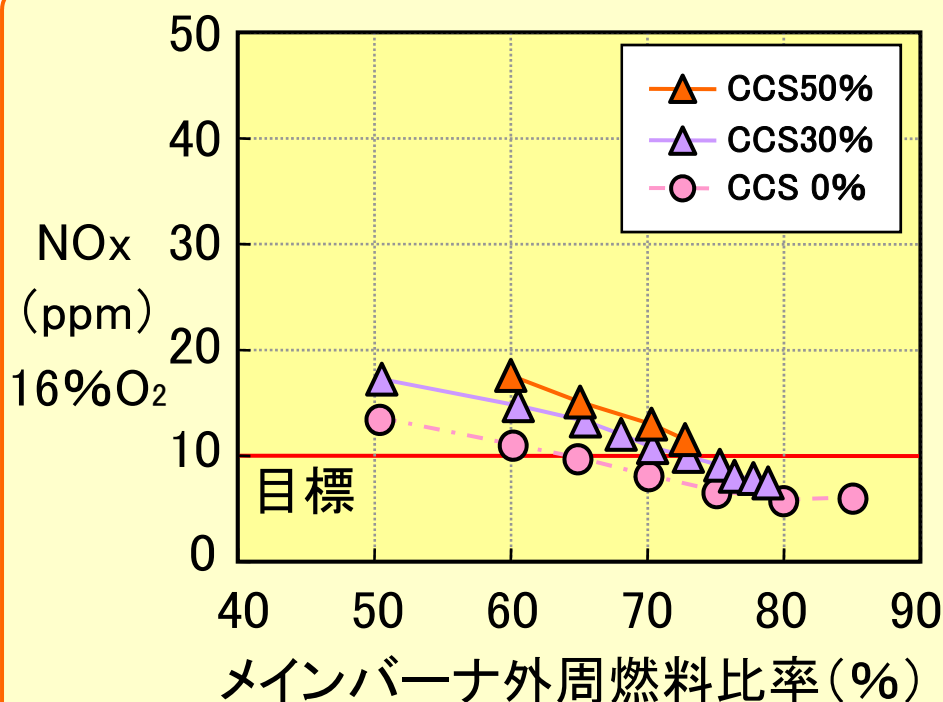
$$\text{パイロットバーナー燃料比率} = \frac{\text{パイロットバーナー燃料流量}}{\text{全燃料流量}}$$



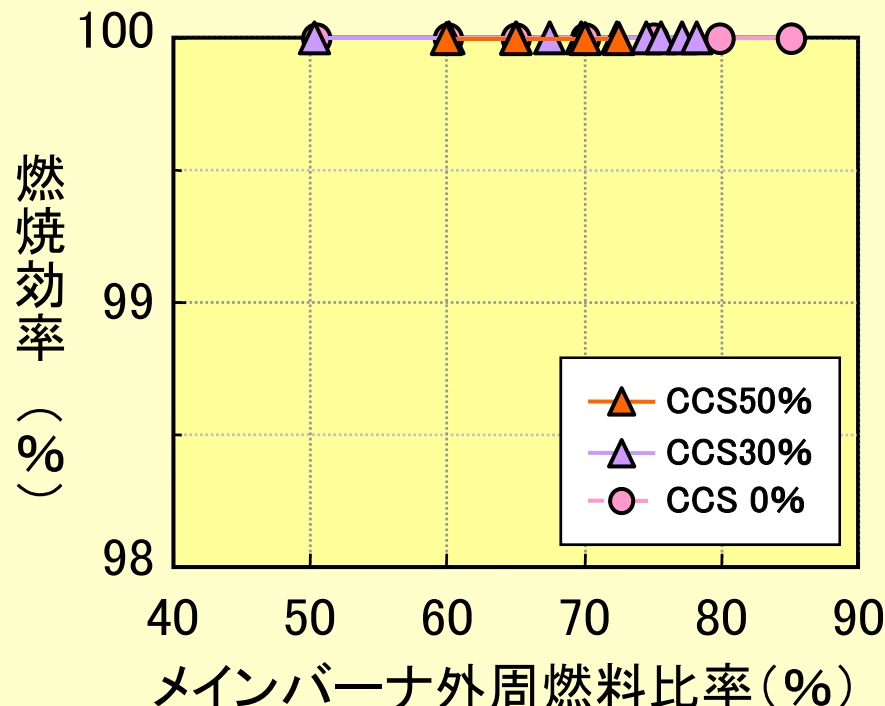
$$\text{メインバーナー外周燃料比率} = \frac{\text{メインバーナー外周燃料流量}}{\text{メインバーナー全燃料流量}}$$



- 広範囲な水素含有燃料に対し、同一バーナー構造で逆火なく燃焼できることを確認
- CCS 0% , 30%燃料のNO<sub>x</sub>排出濃度は、5.9ppm, 7.6ppm(16%O<sub>2</sub>)であり目標値10ppm以下を達成, CCS50%燃料は11.5ppm
- 燃焼効率は99.99%以上であり、安定燃焼を確認

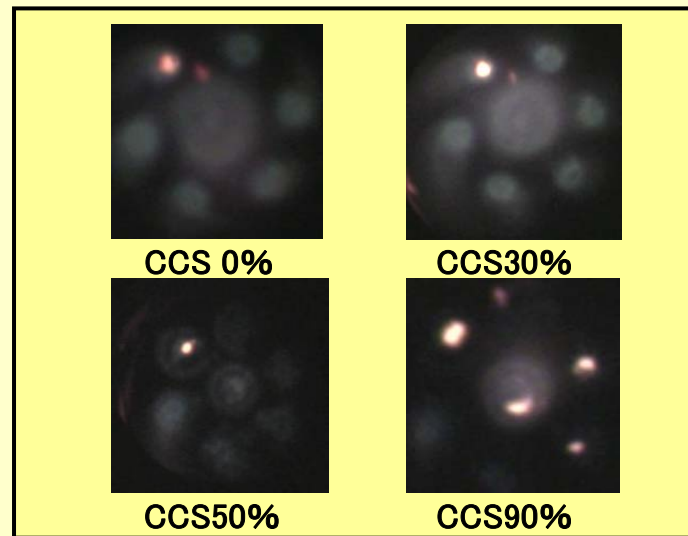
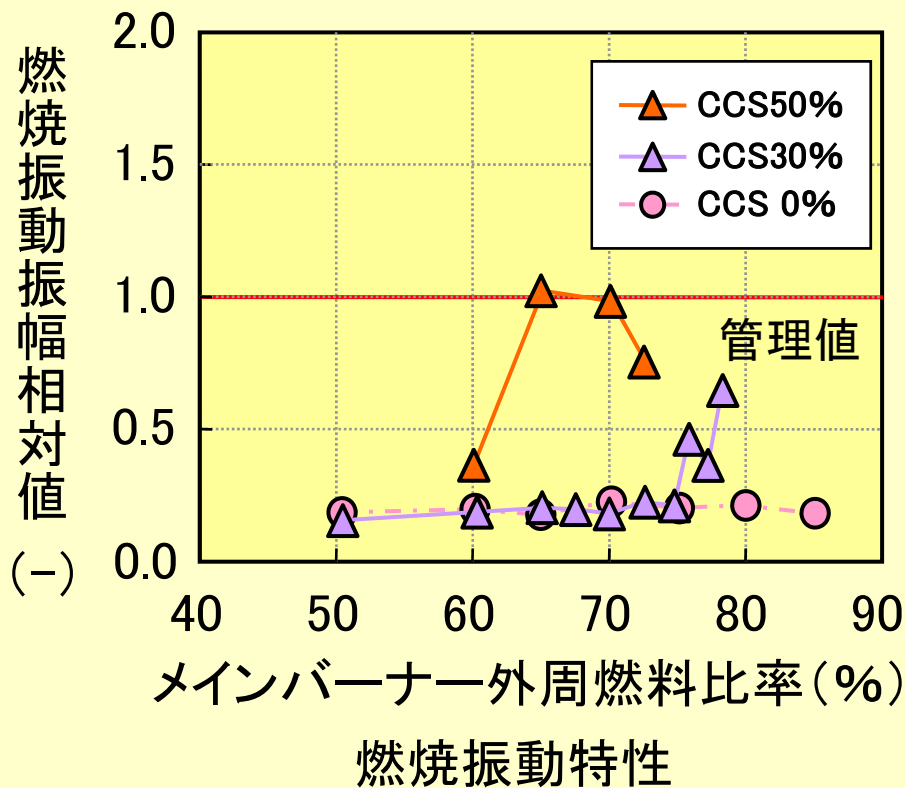


NO<sub>x</sub>排出特性



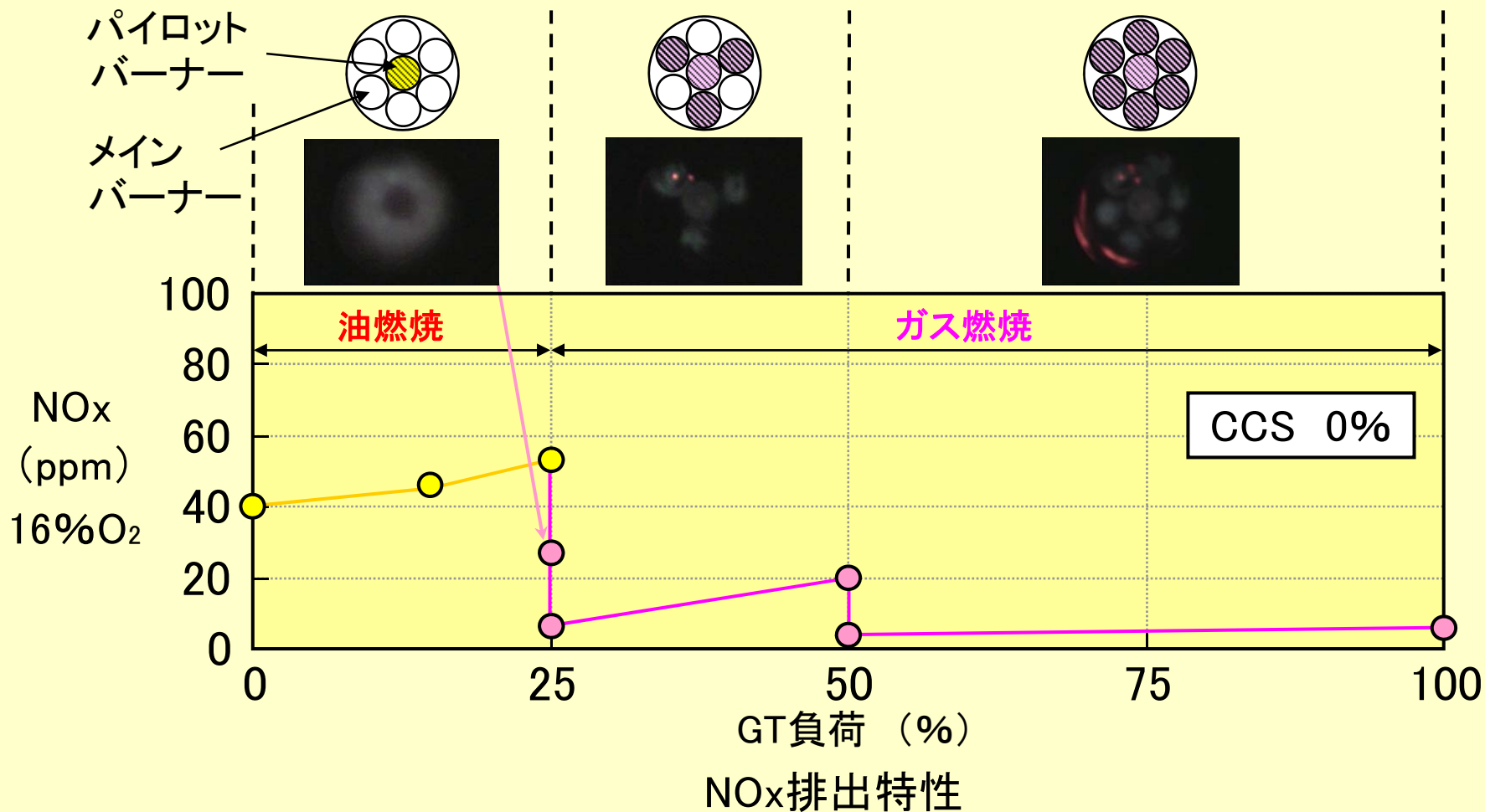
燃焼効率

- CCS30%燃料よりCO回収率(水素濃度)の高い場合, 燃焼振動に対する裕度の拡大が必要
- メインバーナー中央メタル温度の低減対策が必要
- CCS90%燃料に対してはバーナー信頼性の強化が必要



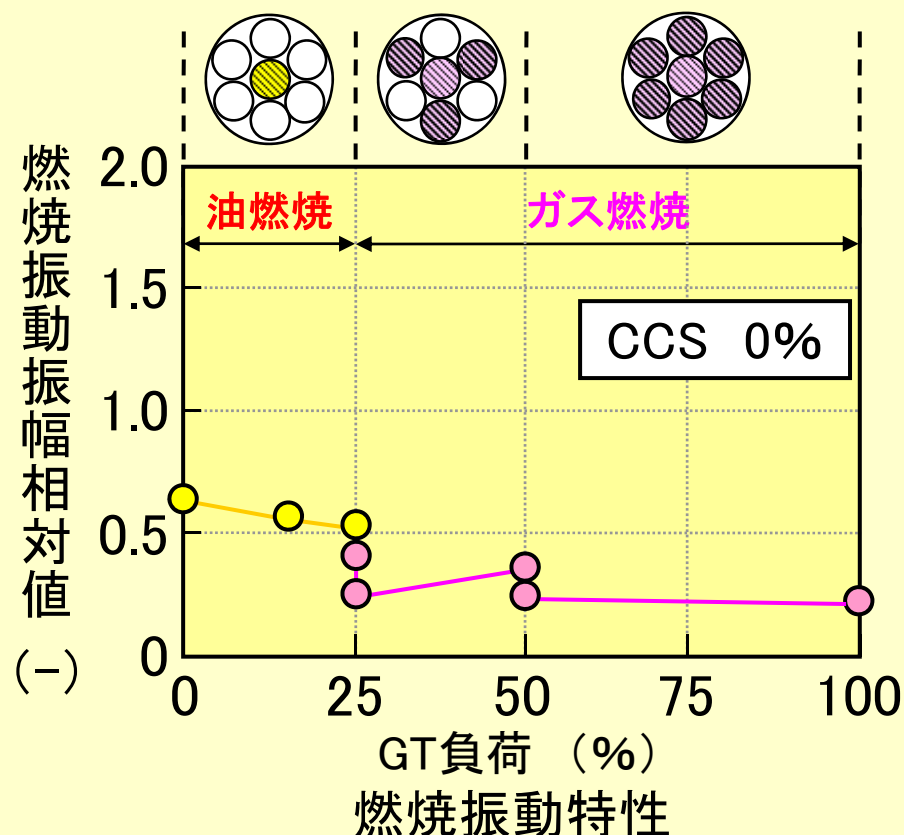
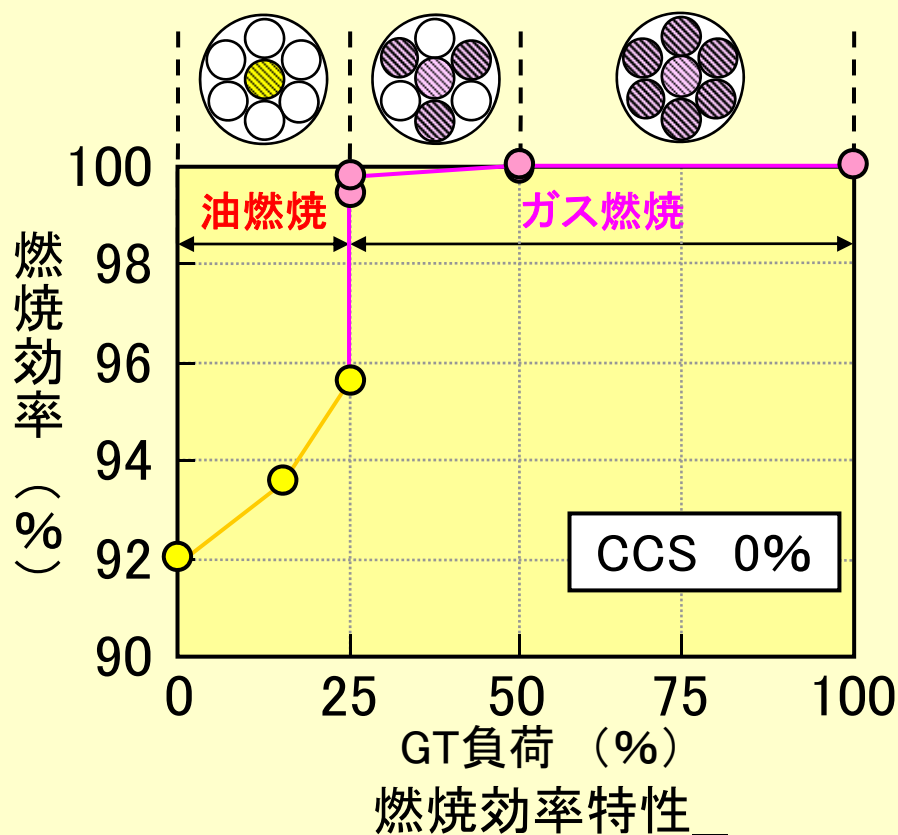
火炎監視画像

- ガス化炉運用開始まで起動用燃料(油)焚き部分負荷で待機
- ガスタービン負荷に応じてメインバーナーの着火本数を制御

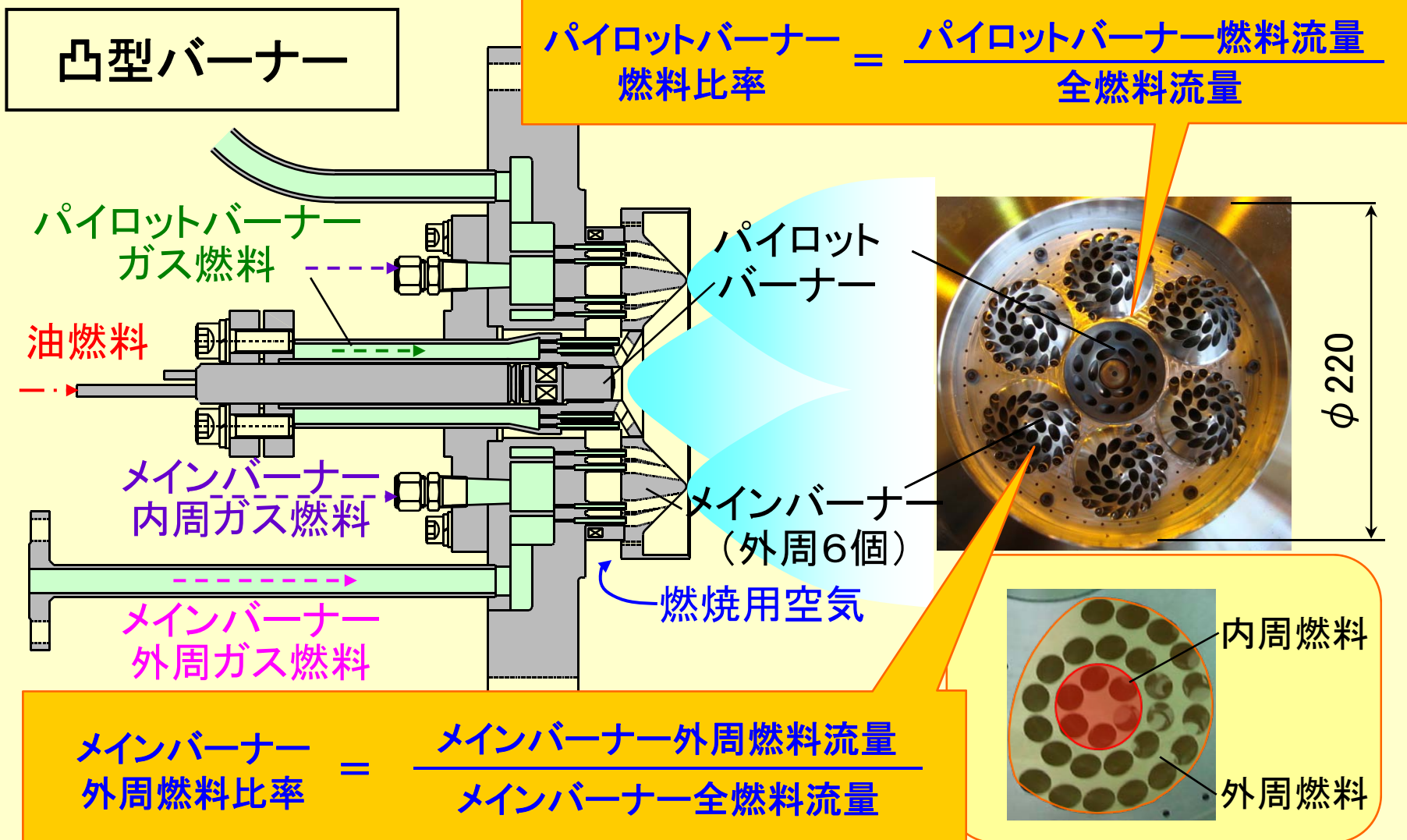




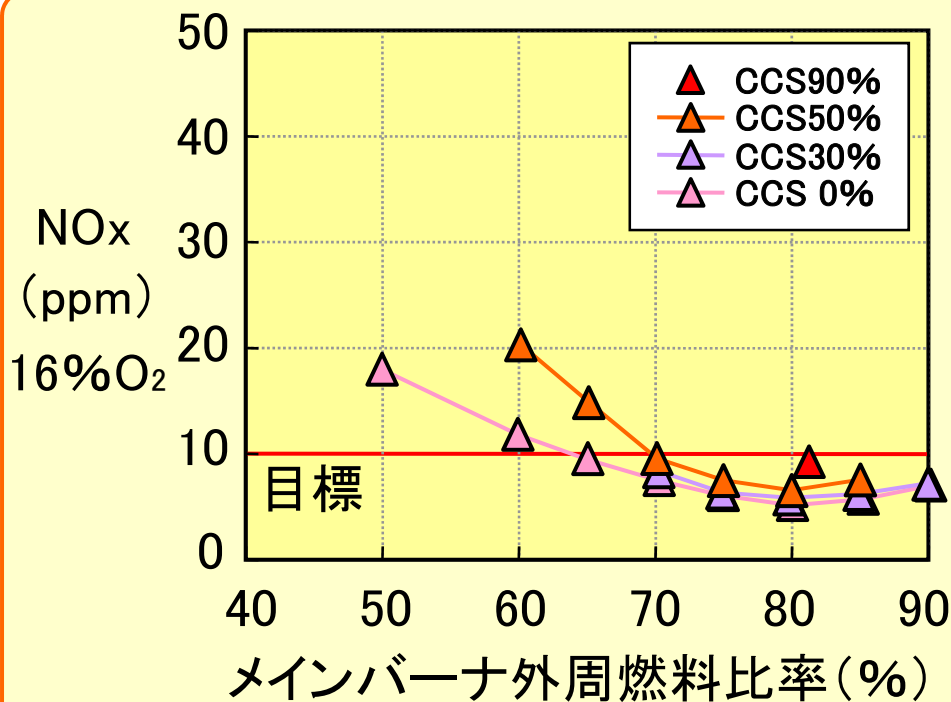
- 起動用燃料(油)焚き部分負荷燃焼の燃焼効率の改善が必要  
⇒ 油噴霧ノズルの微粒化特性改善により対策
- 燃焼振動振幅は管理値に対して十分低く、部分負荷燃焼時も燃焼安定性は良好



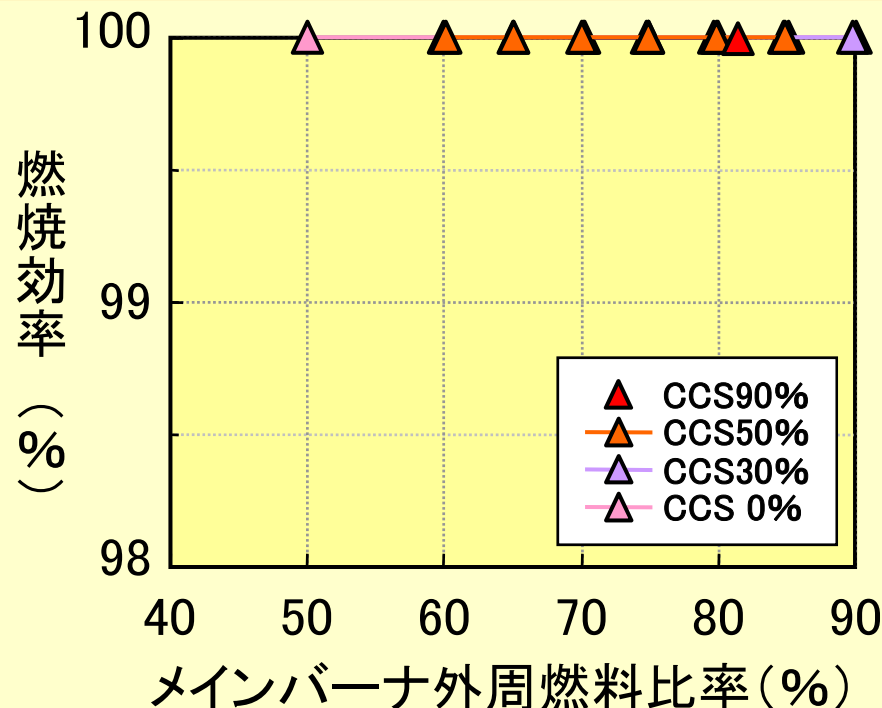
## ■各バーナーの燃料配分をパラメータに中圧条件(0.6MPa)にて試験



- 広範囲な水素含有燃料に対し、同一バーナー構造で逆火なく燃焼できることを確認
- CCS 0%, 30%, 50%, 90%燃料におけるNO<sub>x</sub>排出濃度は、5.4ppm, 5.8ppm, 6.5ppm, 9.2ppm(16%O<sub>2</sub>)であり、目標値10ppm以下を達成
- 燃焼効率は99.99%以上であり、安定燃焼を確認

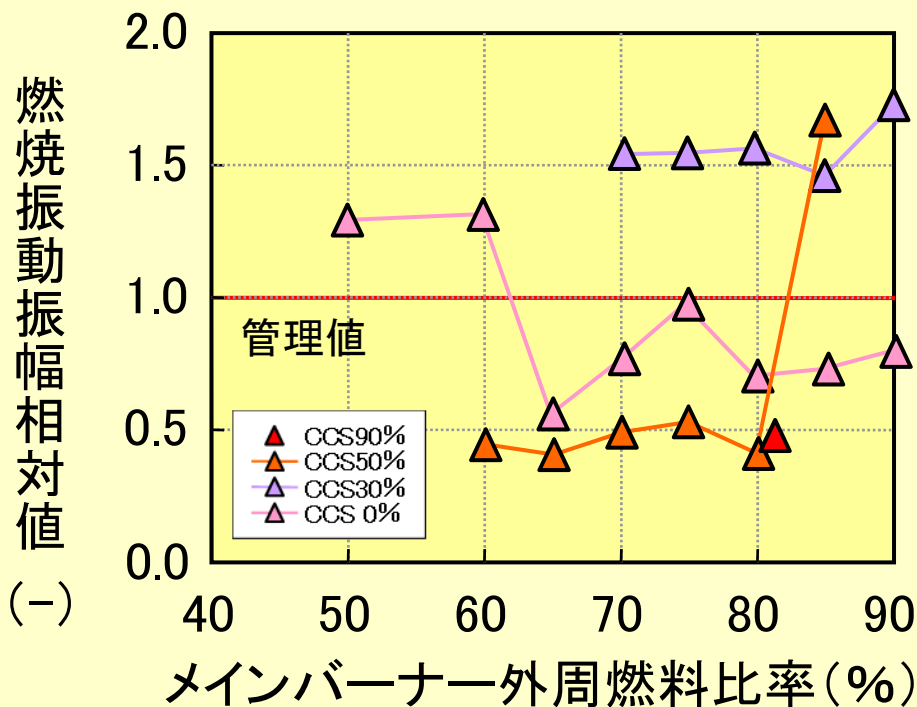


NO<sub>x</sub>排出特性



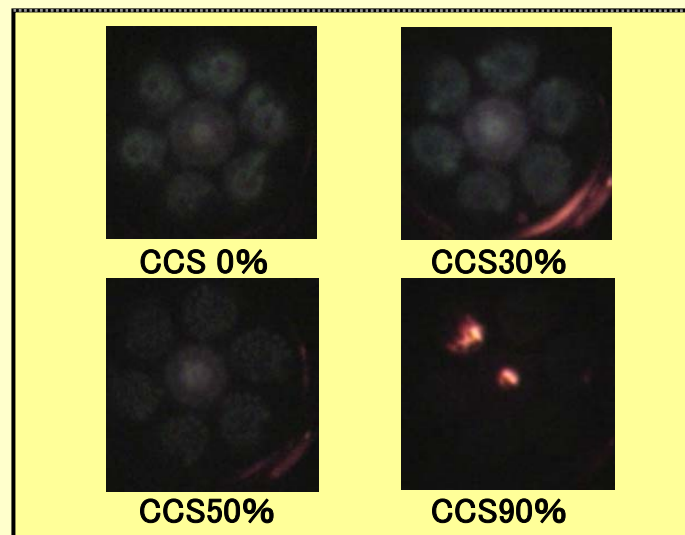
燃焼効率

## ■ 燃焼振動振幅が管理値を超える場合があり、燃焼振動特性の改善が必要



(-)

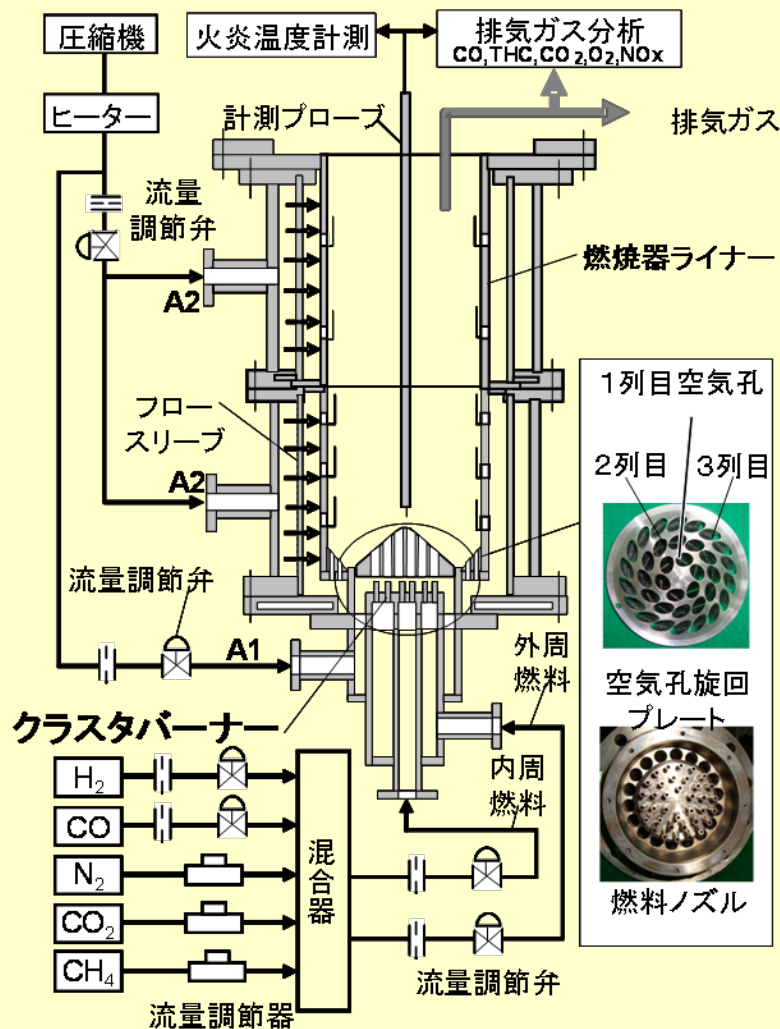
燃焼振動特性



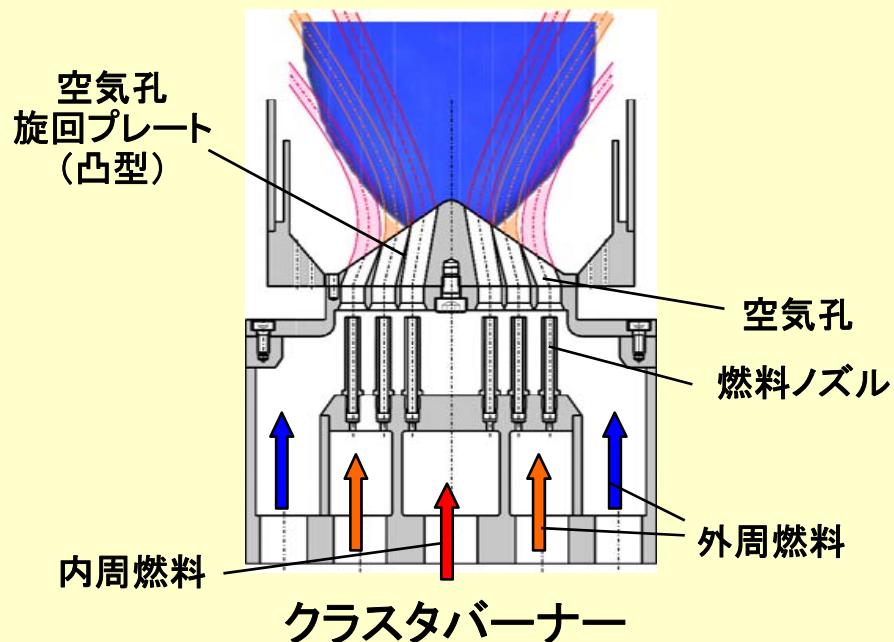
火炎監視画像

## ■大気圧要素燃焼試験にてクラスタバーナー構造を最適化

クラスタバーナーと大気圧要素試験装置



最適化構造の検討



	主要検討項目	目的
1	空気孔旋回角度	火炎形状の調整, 燃焼安定性
2	燃料ノズル先端形状	空気, 燃料の混合度調整
3	空気孔旋回プレート形状	火炎形状の調整, 燃焼安定性
4	空気孔径	火炎形状の調整, 燃焼安定性

## ■水素, メタン, 窒素の3成分で試験用燃料を調整

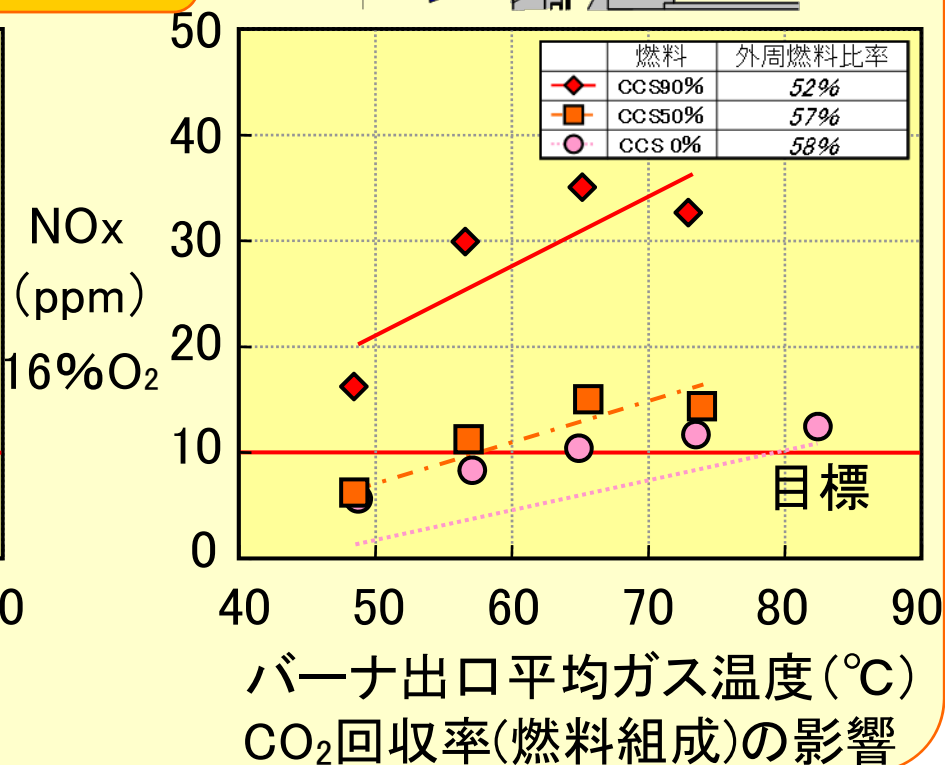
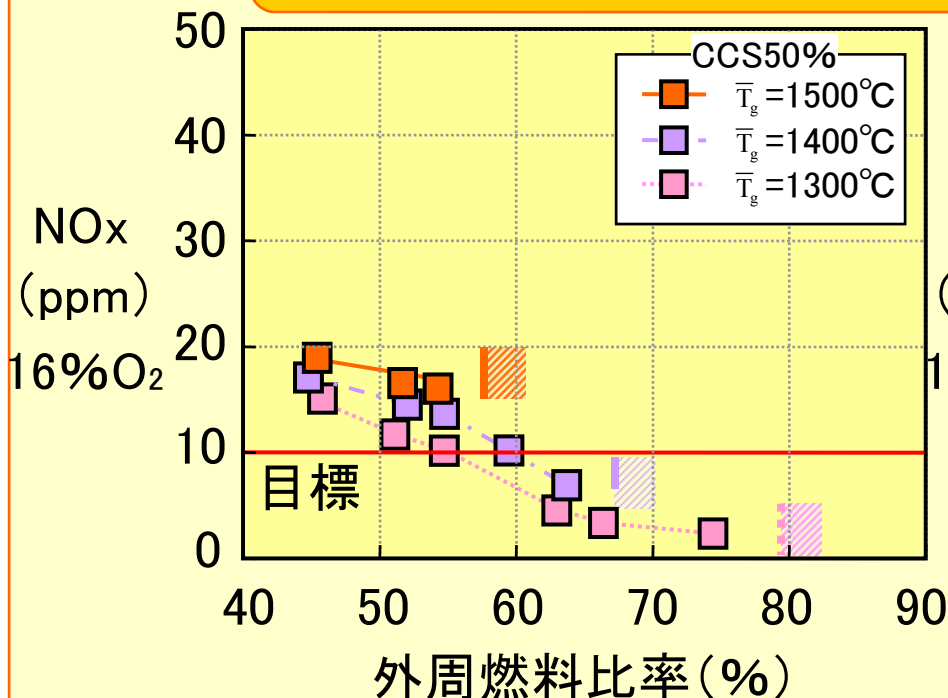
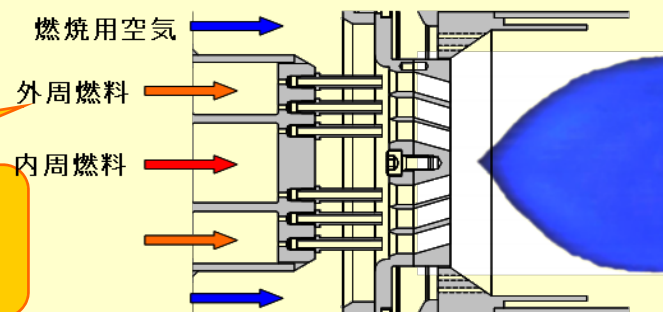
### 試験条件

項目	単位	CCS0%	CCS30%	CCS50%	CCS90%	
実機水素濃度	vol.%	27	46	58	84	
実機低位発熱量	MJ/m <sup>3</sup> N	11	11	11	10	
空気流量	m <sup>3</sup> N/h	157(Type-P:170)				
空気温度	°C	350				
バーナー出口温度	°C	1500°C				
燃料 性状	水素	vol.%	40	55	65	84
	メタン	vol.%	18	16	6	2
	窒素	vol.%	42	29	29	14
	低位発熱量	MJ/m <sup>3</sup> N	11	12	9	10

## ■バーナーの燃料配分をパラメータにバーナー形状の効果を検討

■試験データ例：  
燃料ノズル噴孔 φ3.0

$$\text{外周燃料比率} = \frac{\text{外周燃料流量}}{\text{バーナー全燃料流量}}$$

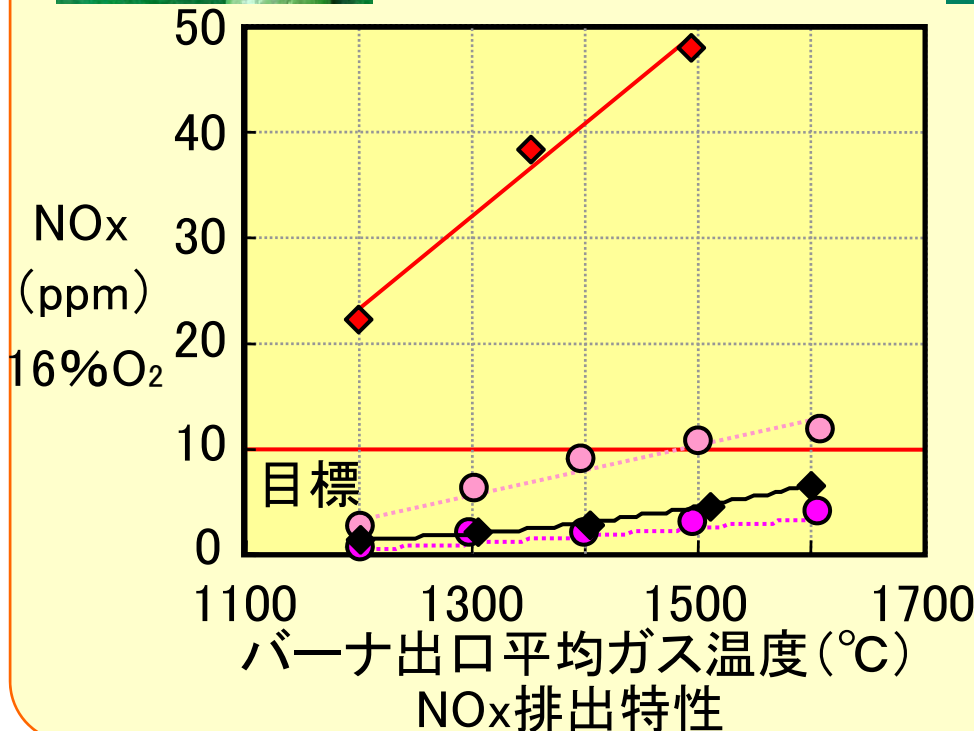




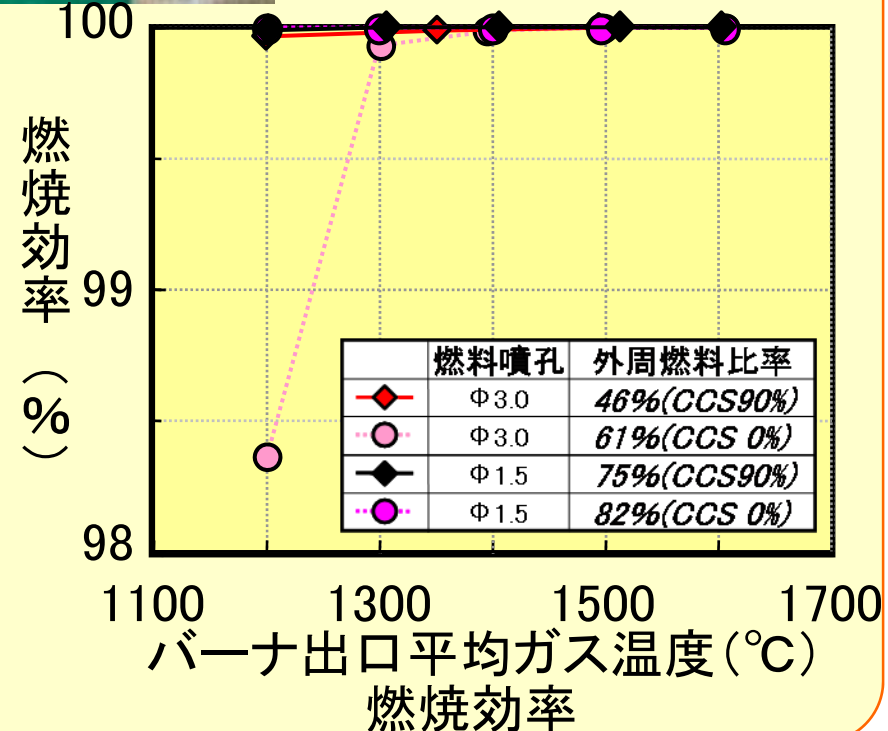
- 燃料噴孔を縮小し、燃料噴流の貫通を強化して後流への混合気侵入を防止
- 燃焼騒音の発生を抑制でき、外周燃料比率を増加でき低NO<sub>x</sub>燃焼を実現



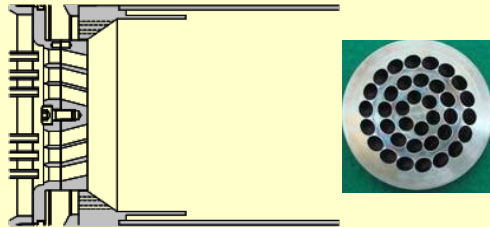
燃料ノズル噴孔:  $\phi 3.0$



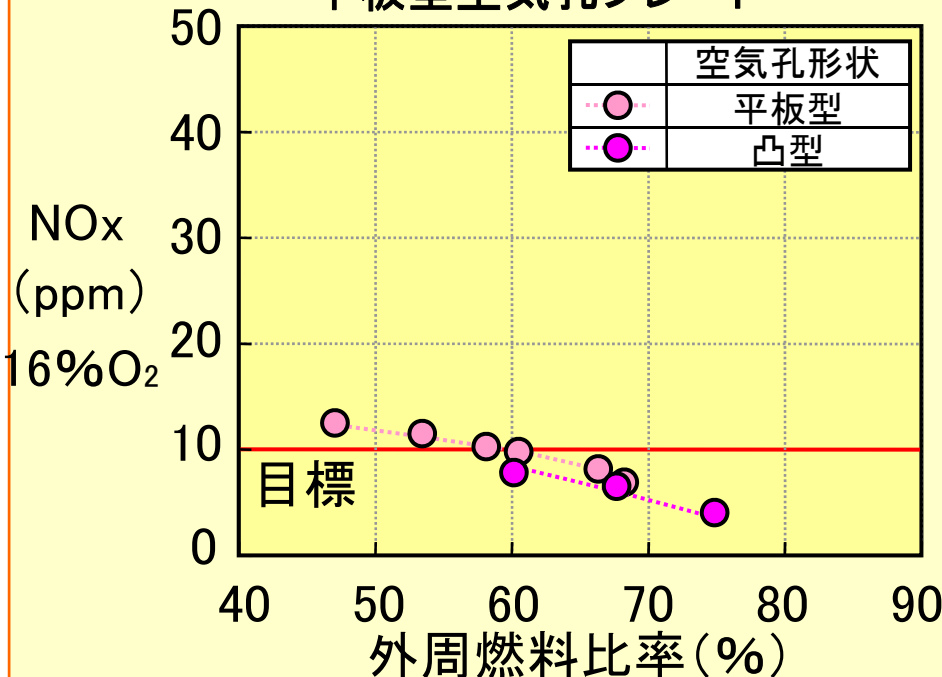
燃料ノズル噴孔:  $\phi 1.5$



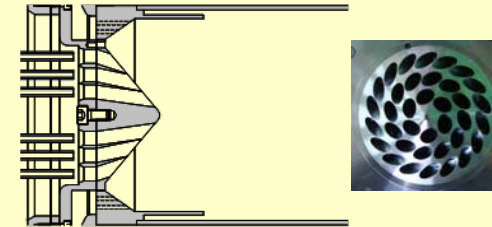
■凸型空気孔プレート形状により、空気孔プレートへの火炎付着を防止でき、外周燃料比率を高く設定可能となり低NO<sub>x</sub>燃焼を実現



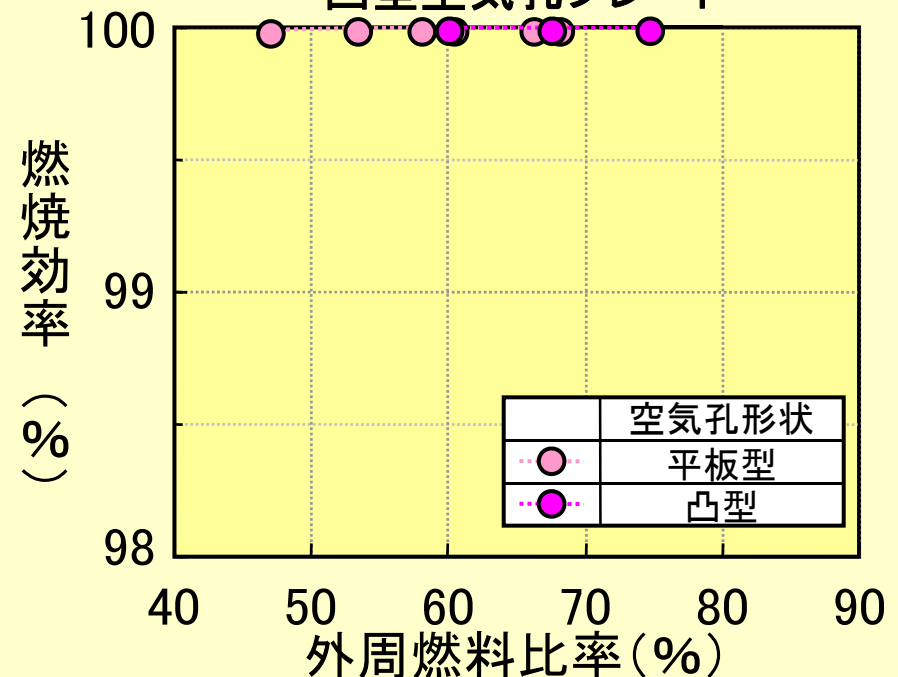
平板型空気孔プレート



NO<sub>x</sub>排出特性



凸型空気孔プレート



燃焼効率

## Hyperbolic Tangent関数で反応進行度 $c$ 分布を近似する予混合燃焼モデル

燃料の混合分率  $f$  :  $f = f_0$  (一定値)

反応進行度  $c$  : 
$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (D + D_t) \frac{\partial \rho c}{\partial x_j} \right) + \omega$$

成分の質量分率  $Y_i$  :  $Y_i = (1 - c)Y_{i,u} + cY_{i,b}$  (添え字 u : unburnt, b : burnt)

予混合燃焼モデル: 
$$\omega = \frac{8\rho_u Su}{\delta} c^2(1 - c)$$

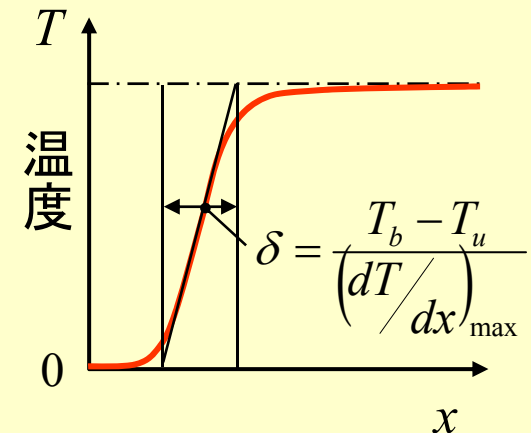
$D$  : 拡散係数,  $\omega$  : 反応速度

ここに、 $Su$  : 層流燃焼速度、 $\delta$  : 層流火炎の厚さ

$\rho_u$  : 未燃焼ガス密度、 $c$  : 反応進行度

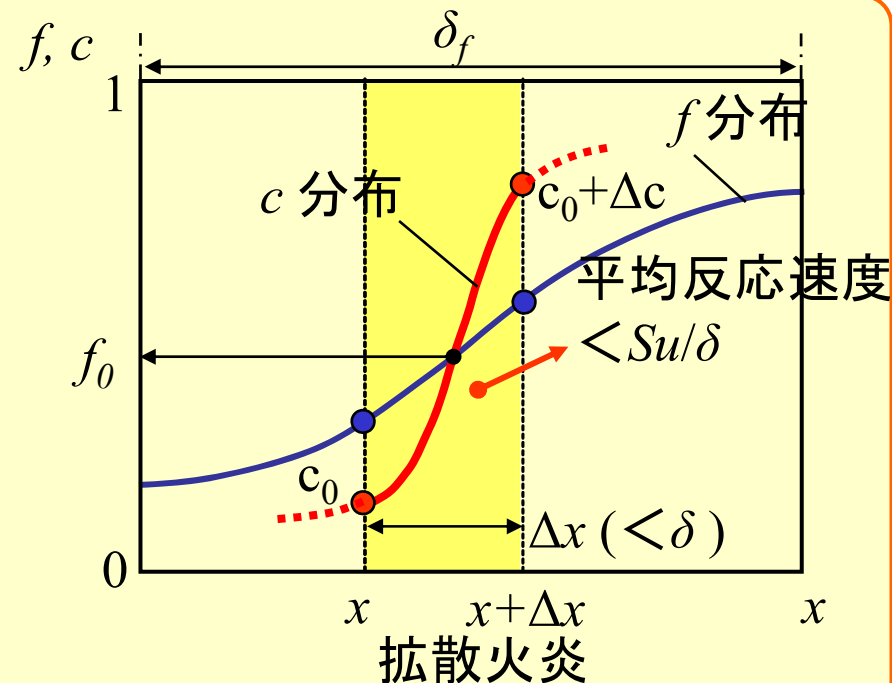
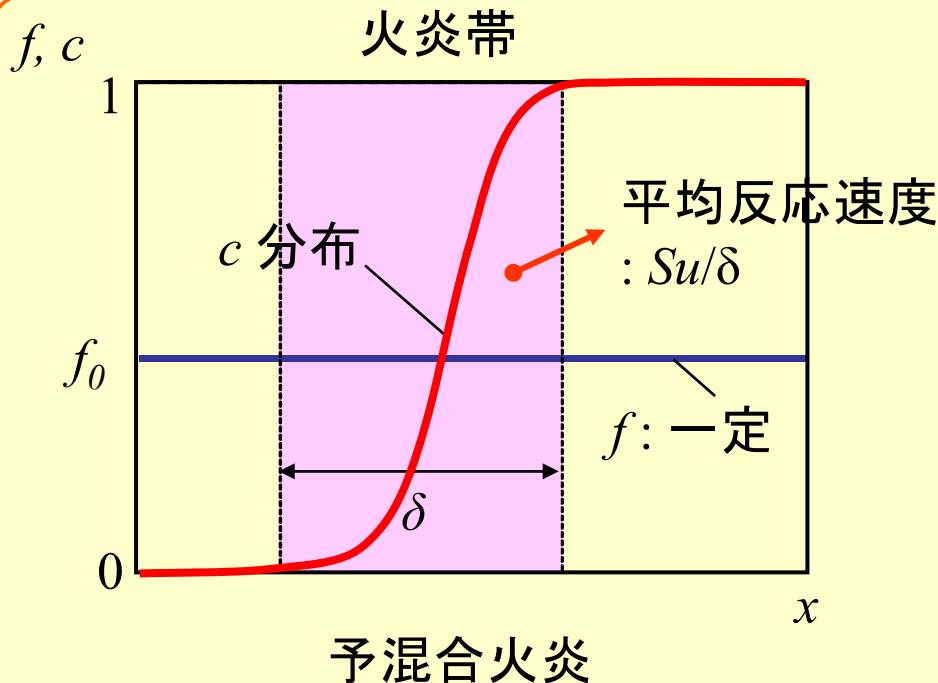
### ■ 特徴:

- ①  $Su/\delta$ を通じて、空気温度、圧力、燃空比を考慮
- ② 乱流拡散係数  $D_t$ を通じて、乱流の影響を考慮
- ③ 層流、乱流に共通で適用可能



火炎帯厚さ  $\delta$  の定義

- 予混合燃焼モデルを拡張し、拡散燃焼に対応
- 予混合～拡散まで対応可能な「統一的燃焼モデル」を開発



統一的燃焼モデル:

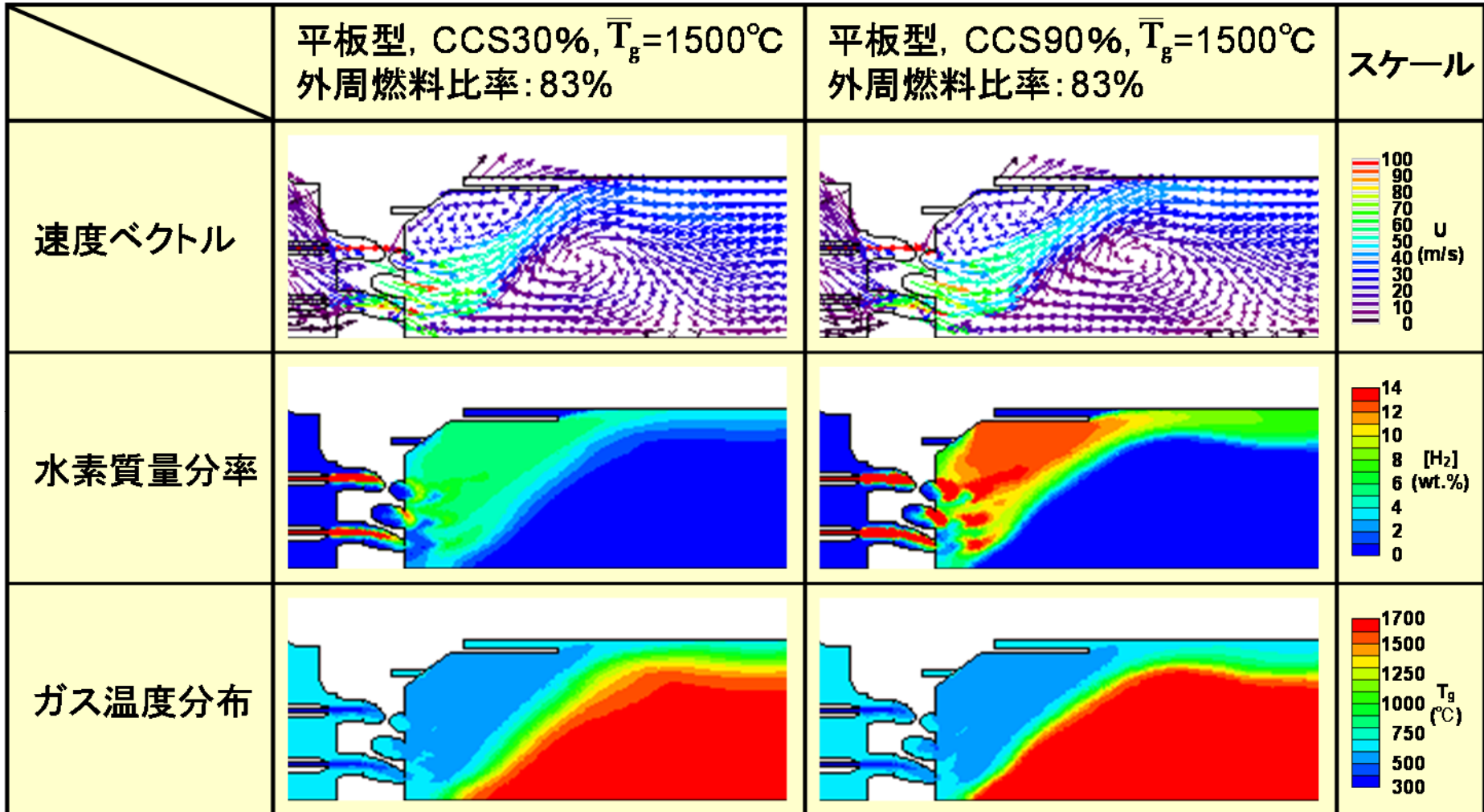
$$\omega(x) = \frac{8\rho_u Su}{\delta} c^2(1-c) \cdot \frac{1}{2} \frac{\hat{\alpha}(1+\hat{\alpha}c)}{(1+\hat{\alpha}(2c-1))^2} \left( \frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2f}{dx^2} \right) \left( \frac{df}{dx} \right)^{-1}$$

予混合部分

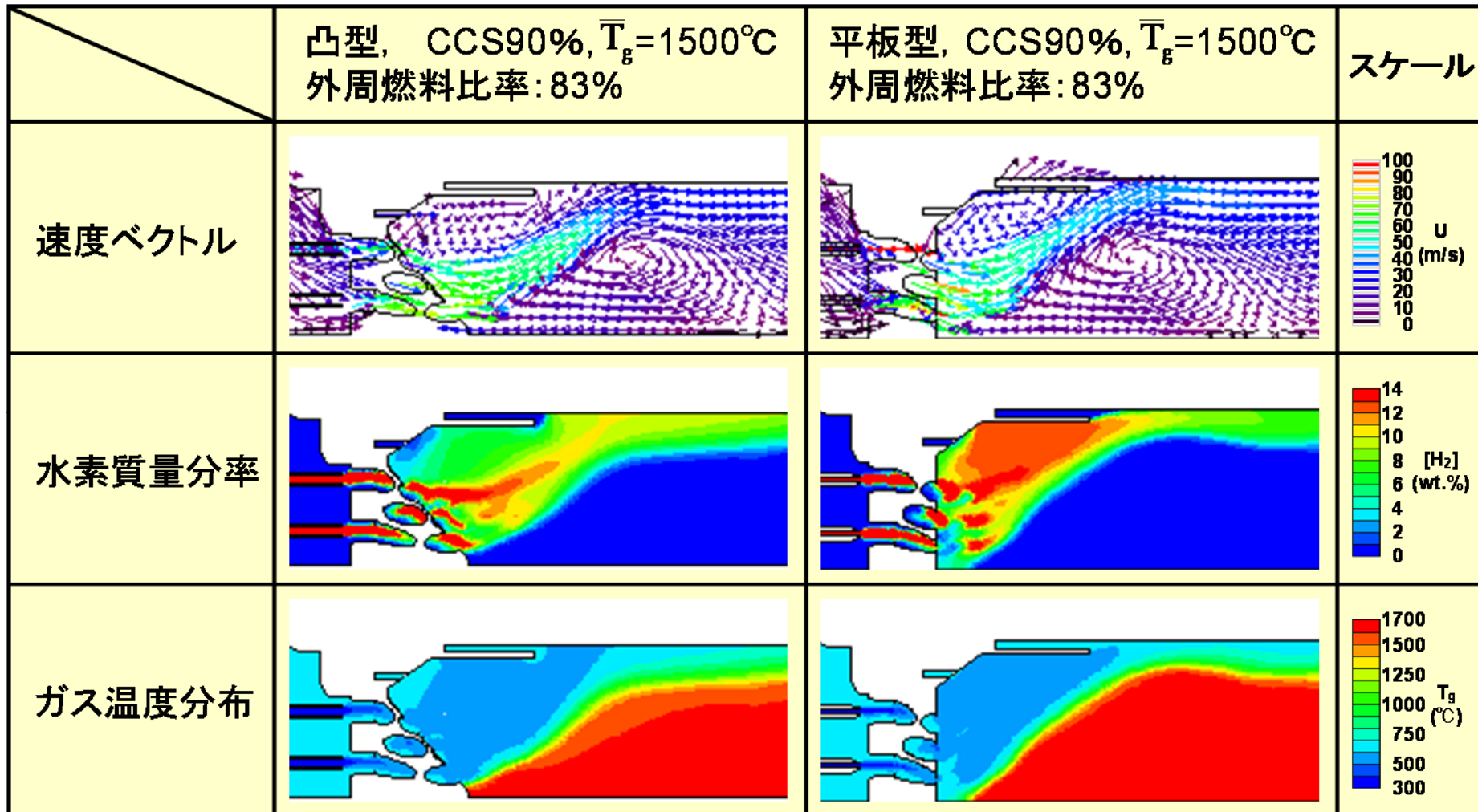
$f$  の分布に伴う修正項

$$\hat{\alpha} = \tanh \left( \frac{2 \frac{df}{dx}}{\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2f}{dx^2}} \right)$$

- 円錐形状浮上火炎の形成状況など，定性的傾向を再現
- CCS90%での火炎帯厚さの縮小，火炎の上流側への移動を再現



- 凸型形状とすることでクラスタバーナー外周部の空気流動が変化
- 空気孔外周部の高水素濃度領域が消滅し，高温ガス領域が縮小



## ■ 2010/7月までに寄稿3件，特許7件を出願

	H20 (FY2008)	H21 (FY2009)	H22 (FY2010)
寄稿	0	2	1
特許	3	4	0



## 特許リスト

No.	名称	国内/国外
1	ガスタービンの燃料供給方法	国内
2	燃焼器、燃焼器の燃料供給方法及び燃焼器の改造方法	国内
3	ガスタービンの運転方法及びガスタービン燃焼器	国内
4	水素含有燃料対応燃焼器および、その低NO <sub>x</sub> 運転方法	国内
5	ガスタービン燃焼器の制御装置およびガスタービン燃焼器の制御方法	国内
6	ガスタービン燃焼器	国内
7	ガスタービン燃焼器	国内

## 寄稿リスト

No.	名称	発表誌名など	査読	発表年月日
1	水素リッチ燃料焚き低NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発	火力原子力発電 第60巻-10号(pp80-85)	無	2009/10/15
2	水素リッチ燃料焚き多孔同軸噴流バーナの 大気圧燃焼特性	第37回ガスタービン 定期公演論文(pp31-36)	無	2009/10/21
3	Applicability of a Multiple-Injection Burner to Dry Low-NO <sub>x</sub> Combustion of Hydrogen-Rich Fuels	ASME Turbo Expo 2010 GT2010-22286	無	2010/6/16

## I. 背景および目的

## II. 本研究の目標および実施工程

- (1) 本研究の目標および大工程
- (2) 本研究の実施内容

## III. 研究開発成果

- (1) 開発目標に対する達成度
- (2) 検討内容

## IV. 実用化の見通し

- (1) 実用化の見通し
- (2) 波及効果

## ■実機ガスタービンに搭載可能な実寸燃焼器による開発を実施



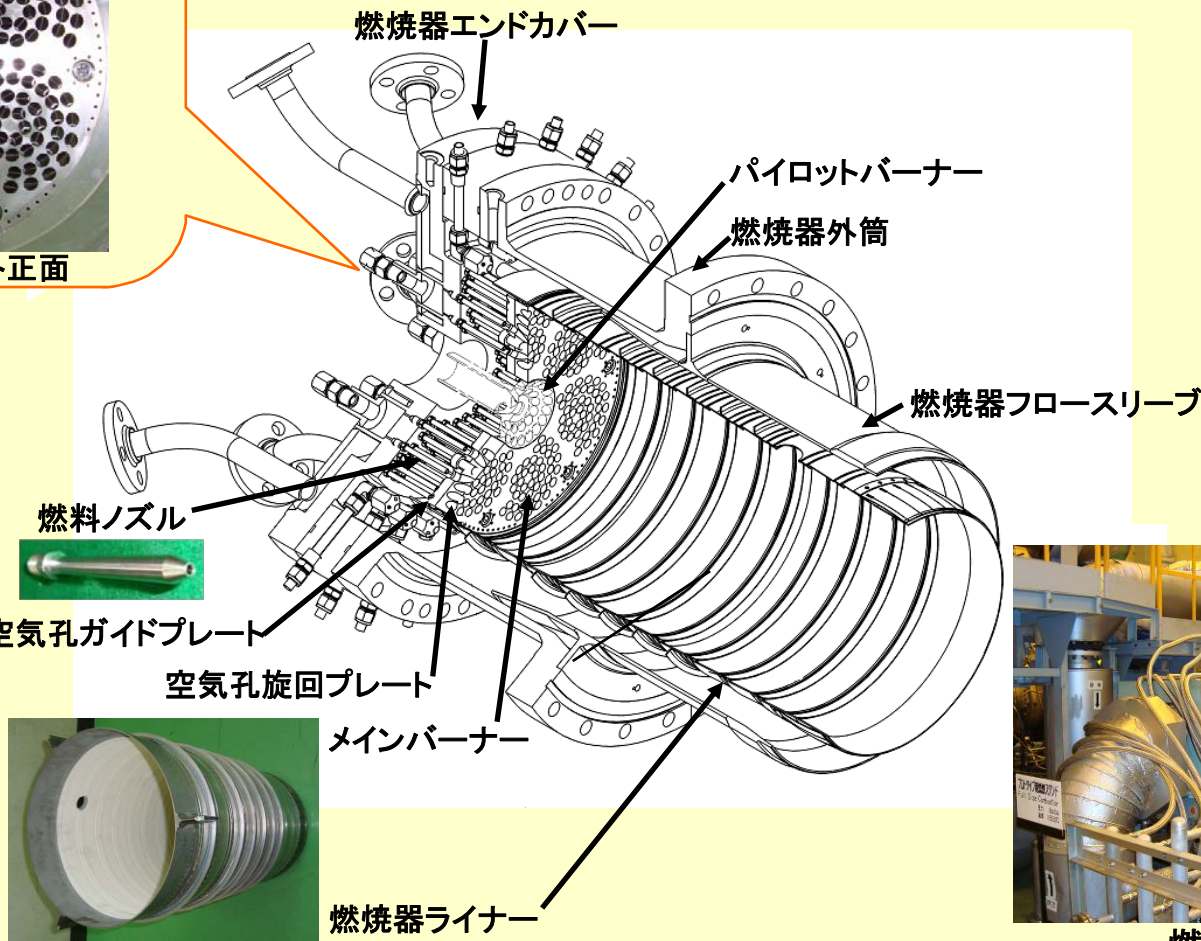
空気孔プレート正面



メインバーナー

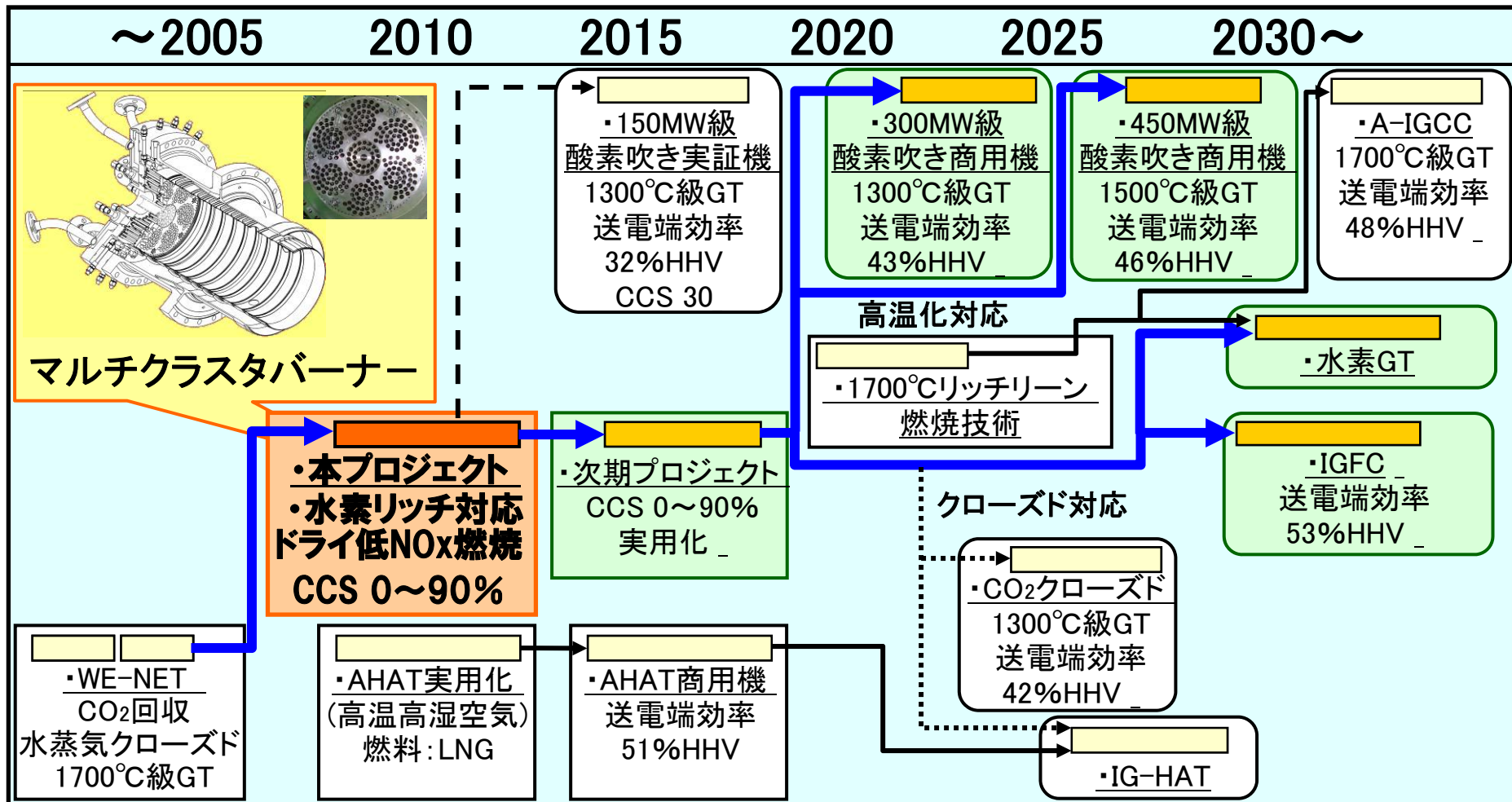


パイロットバーナー

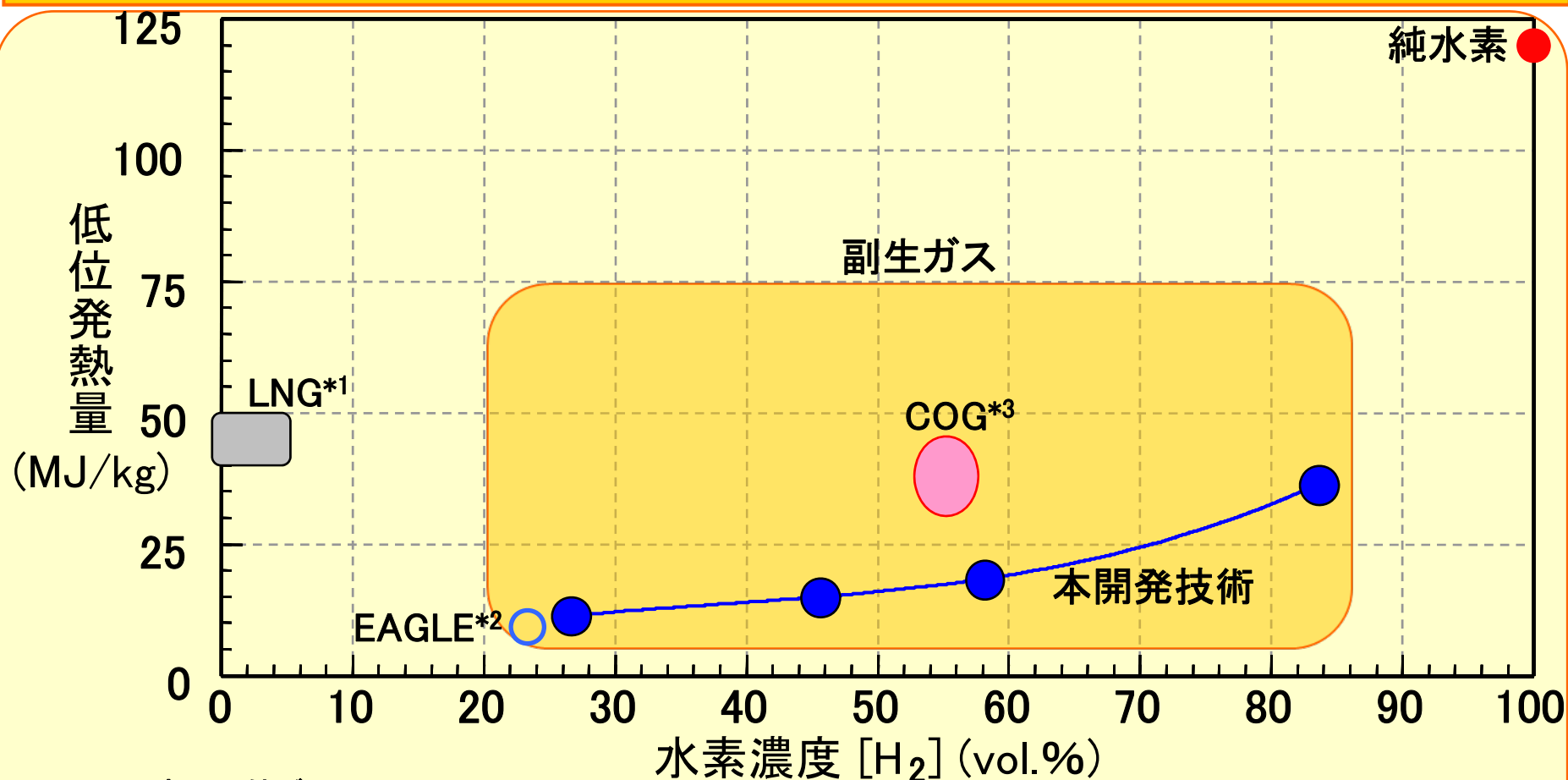


燃焼スタンド

■ クラスタバーナーは将来システムのCO<sub>2</sub>クローズドGT, IG-HATとの親和性が良く, 広く展開可能な燃焼基盤技術である。



- 同等な水素含有燃料に適用し, **低炭素社会の早期実現**に寄与
- 未利用水素含有燃料を高効率に利用し, **資源の有効活用**に寄与



\*1LNG: 液化天然ガス (Liquefied Natural Gas) \*2EAGLE: coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity

\*3COG: コークス炉ガス (Coke Oven Gas)

# HITACHI

## Inspire the Next