

発表No.E-10

水素社会構築技術開発事業/大規模水素エネルギー利用技術開発 高濃度水素混焼／水素焚きボイラ・発電設備の技術開発

発表者名 高嶋 洋平

団体名 三菱重工パワーインダストリー株式会社、帝京大学

発表日 2022年7月29日

連絡先：高嶋 洋平

三菱重工パワーインダストリー株式会社

yohei.takashima.2y@mhi.com

事業概要

1. 期間

開始 : 2020年7月
終了（予定） : 2023年3月

2. 最終目標

- 製鉄所、ソーダ工場、化学プラント等では副生ガスとして低濃度から100%濃度までの水素が発生しており、工場の低炭素化、脱炭素化を目的に水素燃料の燃焼ニーズが高まっている。
- 安全、低NO_x、低コストで水素を混焼または専焼する技術を確認し、ボイラ排ガス中のCO₂排出量の低減またはゼロエミッション化を図ることを目的とする。
- これにより、持続可能な循環型社会の構築に向けて、低炭素化さらには脱炭素化に寄与する。

3. 成果・進捗概要

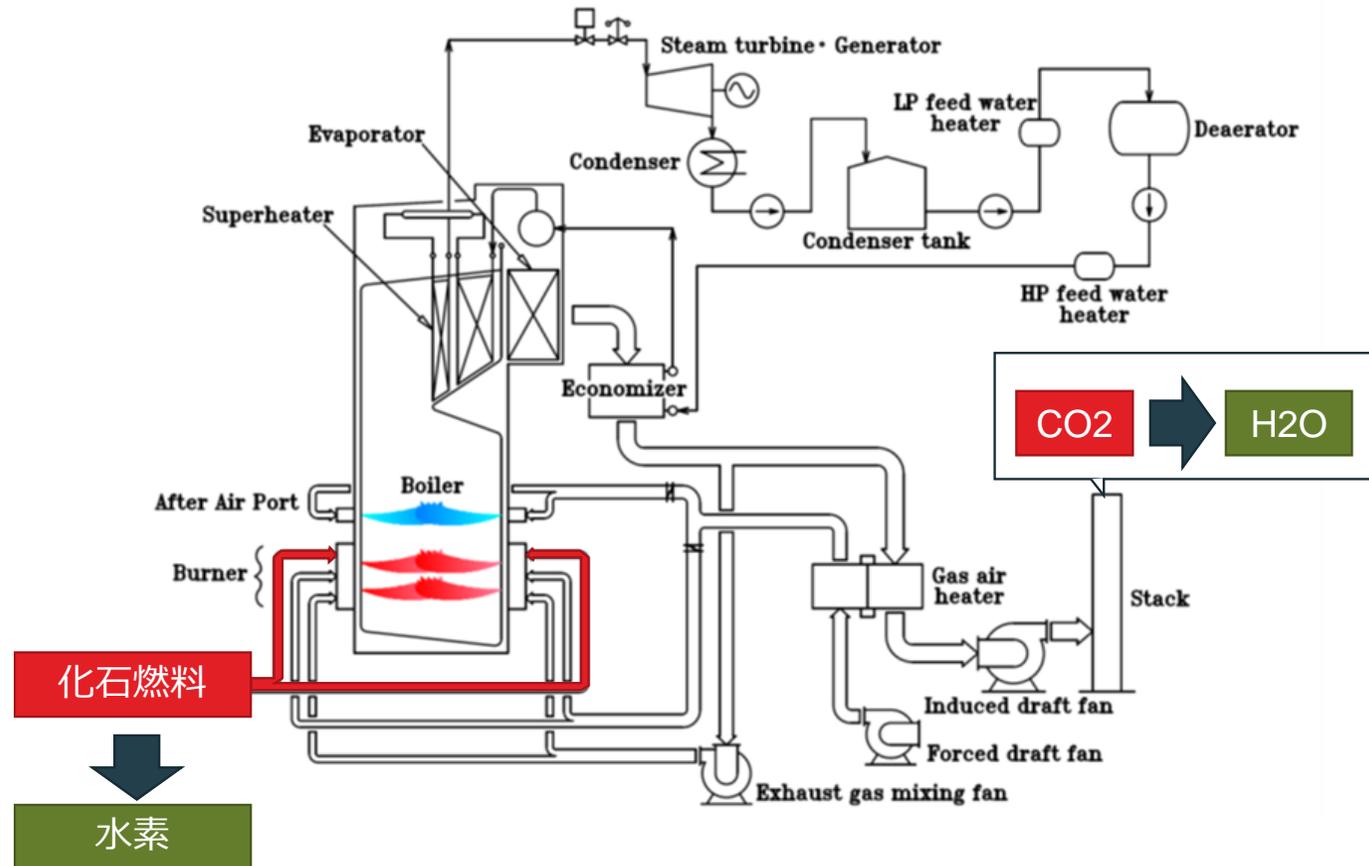
- 設備コンパクト化のため高圧供給される水素燃焼時の特性を確認・安定燃焼を実証。高圧水素燃焼の実機適用可能な技術を確認。
- 水素燃焼時の低NO_x技術効果を確認。水素専焼時の目標NO_x：60ppm以下達成の目途を得た。
- 水素および石炭混焼技術、GTCCプラントで用いられるダクトバーナでの水素利用技術を開発中。

目次

1. 事業の位置付け・必要性
2. 研究開発マネジメントについて
3. 研究開発成果について
4. 今後の見通しについて

1. 事業の位置付け・必要性

- 脱炭素社会にむけて水素利用の拡大が急務
- 世界で幅広く運用されているボイラが利用先として有望視される
- 既存のボイラ設備を有効利用し、経済的かつ迅速に水素導入が可能となる



1. 事業の位置付け・必要性

No	水素利用の解決が必要な課題	対策（本事業の取り組み）
(1)	単位体積当たりの発熱量小 (LPGと比較して8倍の容積) ⇒供給設備・燃焼設備が大型化 【経済性】	供給圧力の高圧化(体積低減)に対応する バーナ技術の開発 (従来圧力：100kPaからの高圧化)
(2)	燃焼速度大 ⇒燃焼振動、バーナ損傷の可能性 【安全性】	安定燃焼可能なバーナ技術の開発
(3)	火炎温度高 ⇒サーマルNO _x 発生量増 【環境性】	低NO _x バーナ技術の開発

2. 研究開発マネジメントについて

2. 1 研究開発の目標

2. 2 研究開発のスケジュールおよび実施体制

2. 1 研究開発の目標

No	課題	開発目標
1	水素ガス供給圧の高圧化 (設備コンパクト化)	広範囲のガス圧 (80~900*kPaG) での安定燃焼 * : 高圧ガス保安法の適用範囲外
2	逆火現象・ノズル焼損	広範囲でのガス圧での逆火・ノズル焼損回避条件の把握
3	燃焼振動抑制	$I_1 \leq 50\text{Pa}$ (I_1 : 共鳴周波数成分の振幅)
4	NOx低減	NOx低減技術の効果把握 目標NOx60*ppm以下 * : 5%O ₂ 換算ベース。貫流ボイラに対する東京都条例より。 大気汚染防止法では100ppm以下
5	石炭・水素混焼技術確立	水素混焼率50Cal%以上において NOxおよび灰中未燃分 : 石炭専焼時同等 排ガス中O ₂ : 石炭専焼時よりも低減
6	水素焚ダクトバーナ開発	排ガス酸素濃度10%以下での水素専焼 バーナ最低負荷と最大負荷の比率 1:10

2. 2 研究開発のスケジュールおよび体制

①研究開発スケジュール

No	課題	2020年度	2021年度	2022年度
1 2 3 4	水素ガス供給圧の高圧化 逆火現象・ノズル焼損 燃焼振動抑制 NOx低減	センターファイリング型 ■	マルチスポット型 角型 ■ ■	各バーナノズル型式に応じた検討・評価を実施
5	石炭・水素混焼技術確立		石炭水素混焼試験	■
6	水素焚きダクトバーナの開発		ダクトバーナ燃焼試験	■
7	小型燃焼炉整備および 試作用バーナ製作	センターファイリング型 ■	マルチスポット型 角型 ■	石炭バーナ改造 ダクトバーナ設備製作 ■ ■
8	燃焼解析	単孔ノズル ■	センターファイリング型 角型 ■ ■	石炭水素混焼 ダクトバーナ ■ ■

②研究開発体制

[助成先]

三菱重工パワーインダストリー(株)

(燃焼試験及び全体まとめ)

NEDO事業

[委託先]

学校法人 帝京大学
(植田利久教授)

(燃焼解析)

3. 研究開発成果について

3. 1 研究開発の目標及び進捗状況

3. 2 目標達成に向けたアプローチ

3. 3 研究開発の成果

3. 4 特許・学会発表

3. 1 研究開発の目標及び進捗状況

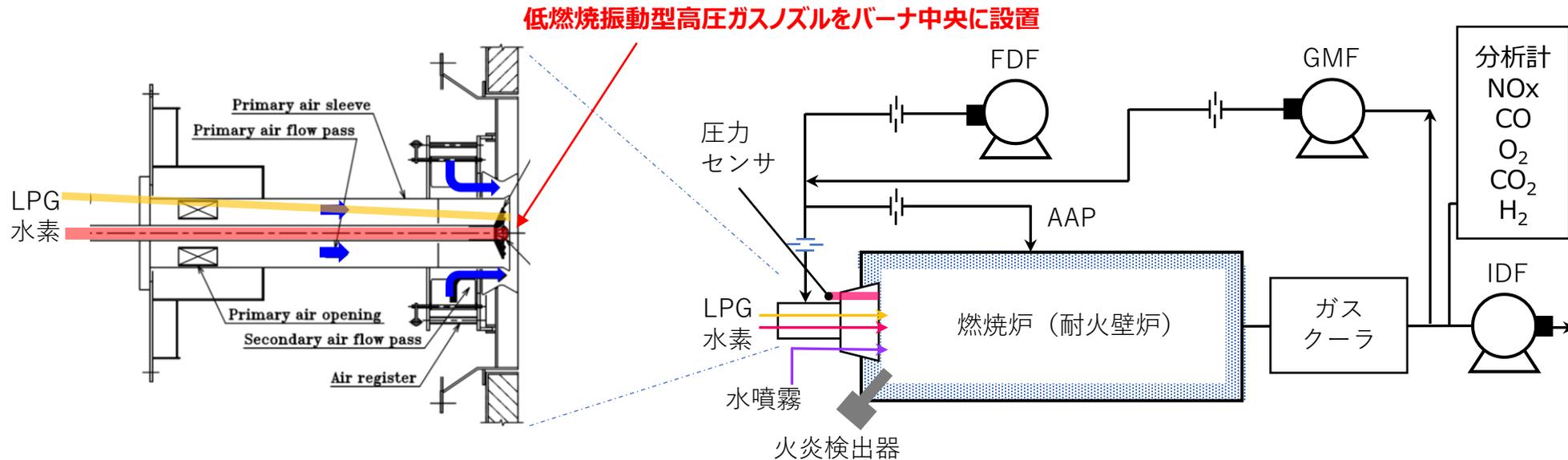
No	課題	開発目標	進捗状況
1	水素ガス供給圧の高圧化 (設備コンパクト化)	広範囲のガス圧 (80~900kPaG) での 安定燃焼	水素焚きで900kPaGまでの高圧化を目標として 燃焼試験で確認
2	逆火現象・ノズル焼損	広範囲でのガス圧での 逆火・ノズル焼損回避条件の把握	①基礎燃焼試験での確認 ②試験時及び試験後のノズル先端部状況確認
3	燃焼振動抑制	$I1 \leq 50\text{Pa}$ (I1 : 共鳴周波数成分の振幅)	燃焼試験時に燃焼振動解析装置にて確認
4	NOx低減	NOx低減技術の効果把握 目標NOx60*ppm以下 * : 5%O ₂ 換算ベース	低NOxバーナ (1次/2次空気の分割)、低NOx技術 を用いた燃焼試験で確認 ①二段燃焼 ②排ガス混合 ③水噴霧
5	石炭・水素混焼技術確立	水素混焼率50cal%以上 NOxおよび灰中未燃分 : 石炭専焼時同等 排ガス中O ₂ : 石炭専焼時よりも低減	実施中
6	水素焚きダクトバーナの開発	排ガス酸素濃度10%以下での水素専焼 バーナ最低負荷と最大負荷の比率 1:10	計画中

実施済の項目

3. 2 目標達成に向けたアプローチ

燃焼試験設備概要

バーナ型式	センターファイアリング型	NOx低減設備	
バーナ容量	水素：95m ³ N/h、LPG：10.9m ³ N/h (水素とLPGは同一入熱)	二段燃焼設備	アフターエアポート(AAP)有り
燃料噴射圧力	水素：80, 300, 500, 900kPaG (4種) LPG：80kPa	水噴霧設備	有り (4本)
火炎検出器	紫外線火炎検出器 (アズビルAUD300)	排ガス混合設備	GMF有り



水素バーナ構造
センターファイアリング型バーナ

燃焼試験設備構成
(三菱重工呉工場内設備)

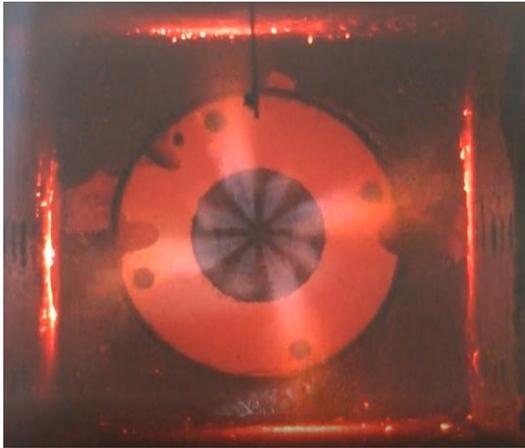
参考：LPG 10.9m³N/hは
蒸発量 約400kg/h相当

3. 3 研究開発の成果

① 高圧水素燃焼性

水素900kPaG燃焼試験時

- ・燃焼振動の兆候なし
- ・火炎のガスノズル近接によるノズル赤熱なし
- ・紫外線火炎検出器で火炎の安定検出可能



水素ノズル先端（燃焼試験後）

- ・火炎の影響によるガスノズルの損傷なし



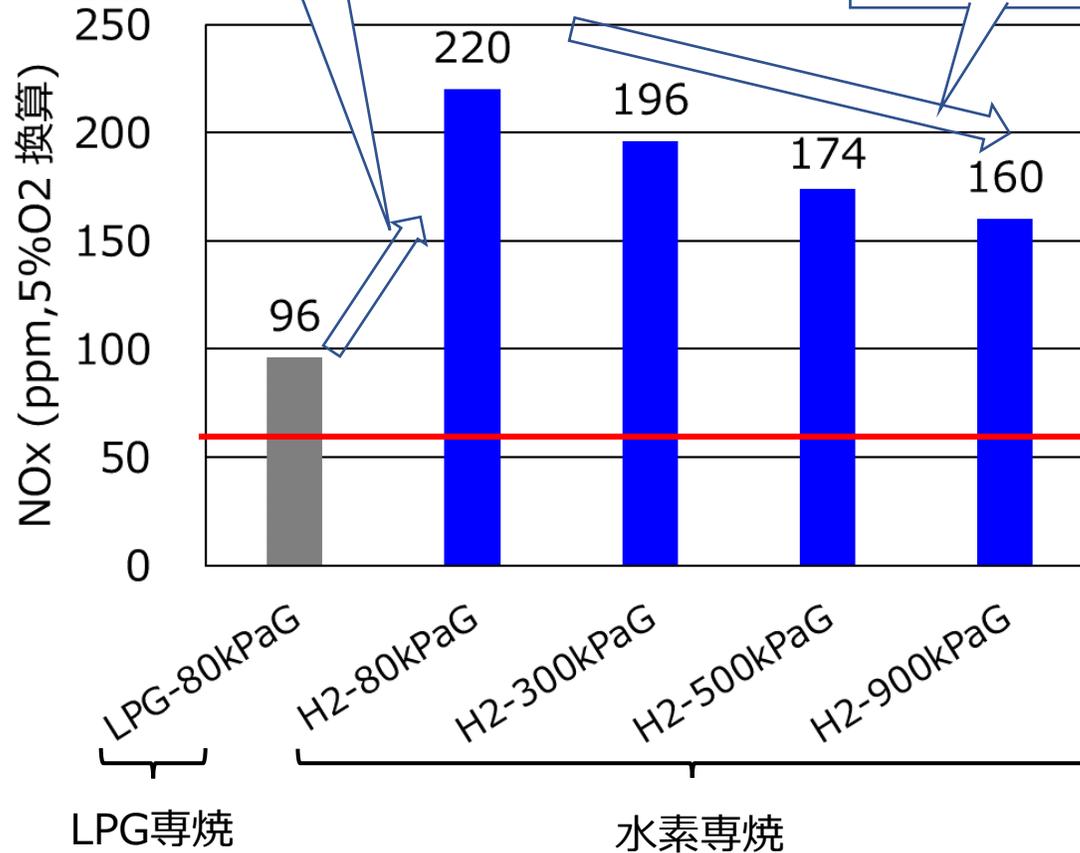
高圧水素燃焼時にも①安定燃焼、②安定した火炎検出可能、③ノズル損傷なし

3. 3 研究開発の成果

① 高圧水素燃焼性(NOx特性)

同一圧力の場合、**水素燃焼時のNOxはLPG専焼と比べて2.3倍**

水素供給圧の高圧化によりNOxが低減
(80kPaG→900kPaGで約30%低減)



【運転条件】
全空気比 : 1.1
バーナ空気比 : 1.1 (二段燃焼なし)

目標NOx60ppm

水素高圧化はNOx低減に寄与することを確認

3. 3 研究開発の成果

①高圧水素燃焼性(水素圧力900kPaG(高圧)時の特徴)

(1) 水素質量分率(水素の拡散)

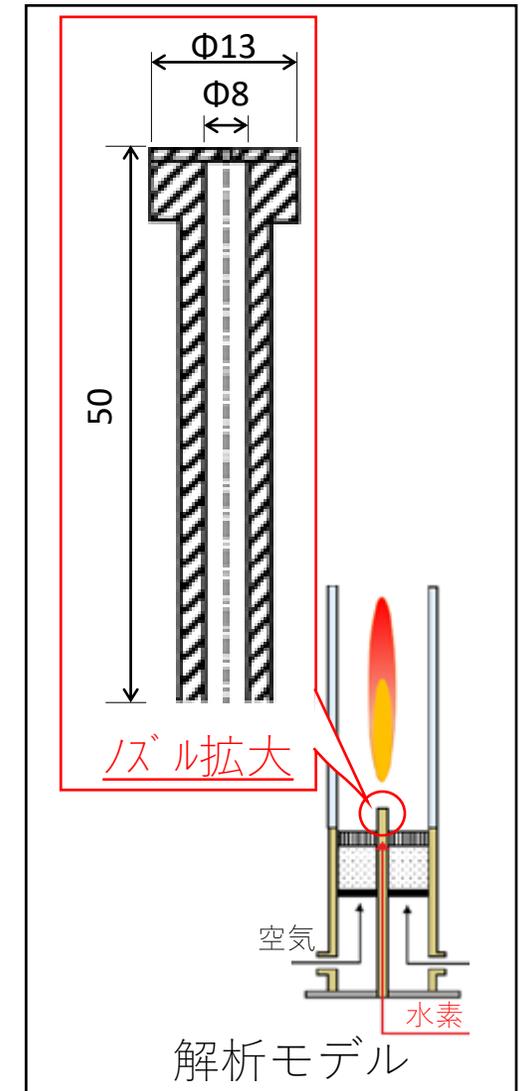
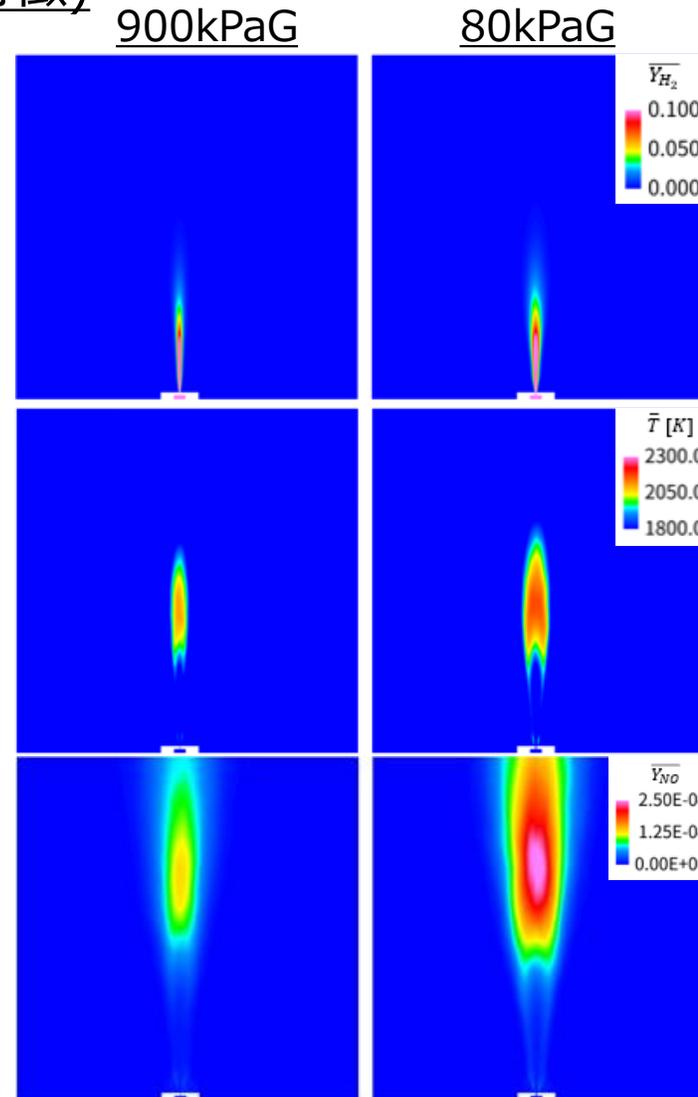
ノズル出口後流の高濃度領域が狭く濃度が小さく、
水素の拡散が強い

(2) 温度

水素の拡散が強いため、燃焼場の高温領域が縮小し
燃焼温度も低下

(3) NO質量分率

燃焼場の高温領域が小さく燃焼温度も低いため、
サーマルNO_xの発生が抑制されNO生成量低下



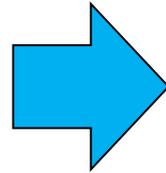
燃焼解析による高圧水素燃焼時の低NO_xメカニズムを説明

3. 3 研究開発の成果

②バーナ安定燃焼(最低負荷)



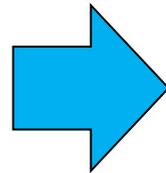
95Nm³/h (定格@900kPaG)



約1Nm³/h (TDR*¹ :1/95)



95Nm³/h (定格@80kPaG)



約1Nm³/h (TDR*¹ :1/95)

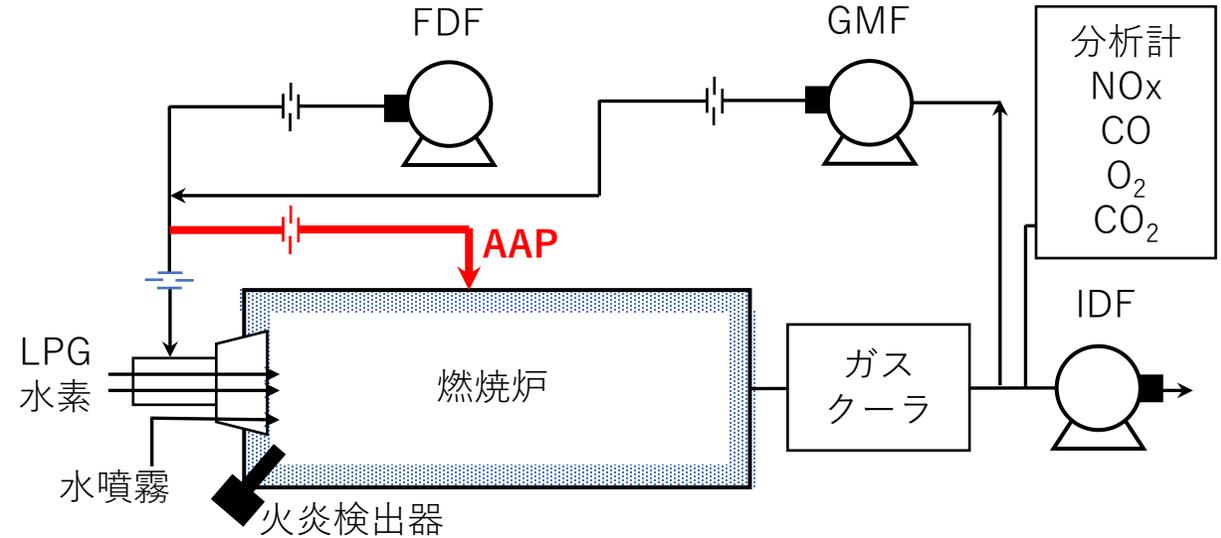
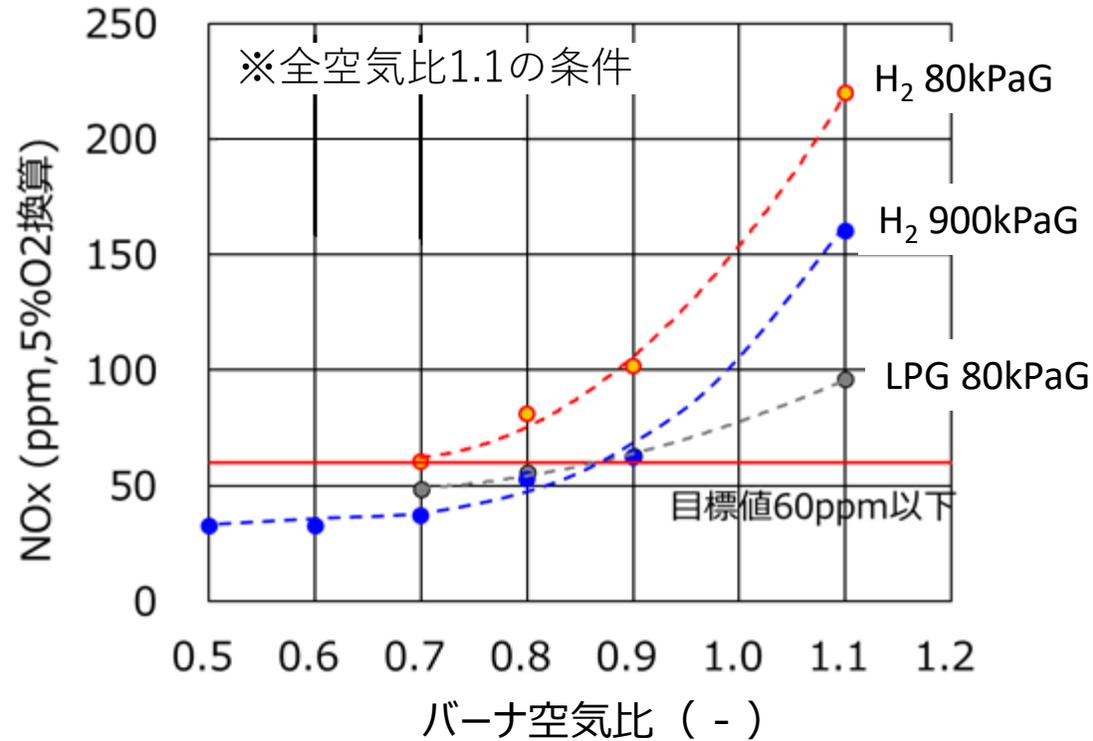
TDRが約1 : 100と極めて広い範囲での安定着火を確認

* 1 : TDR (ターンダウンレシオ : 燃焼負荷の可変範囲で最小負荷と最大負荷の比率)

3. 3 研究開発の成果

③NOx低減(二段燃焼)

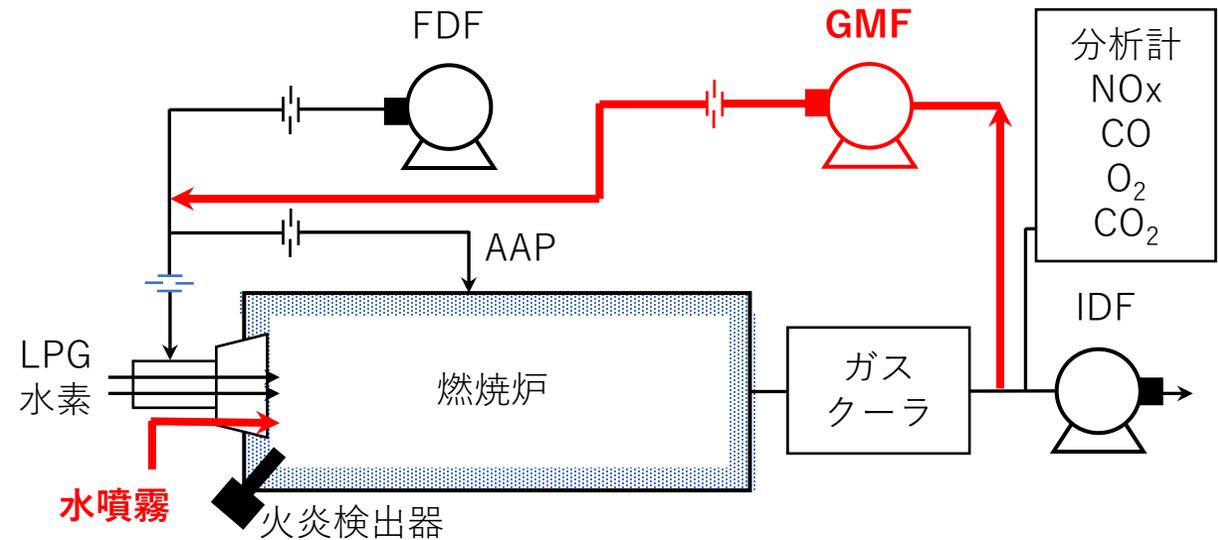
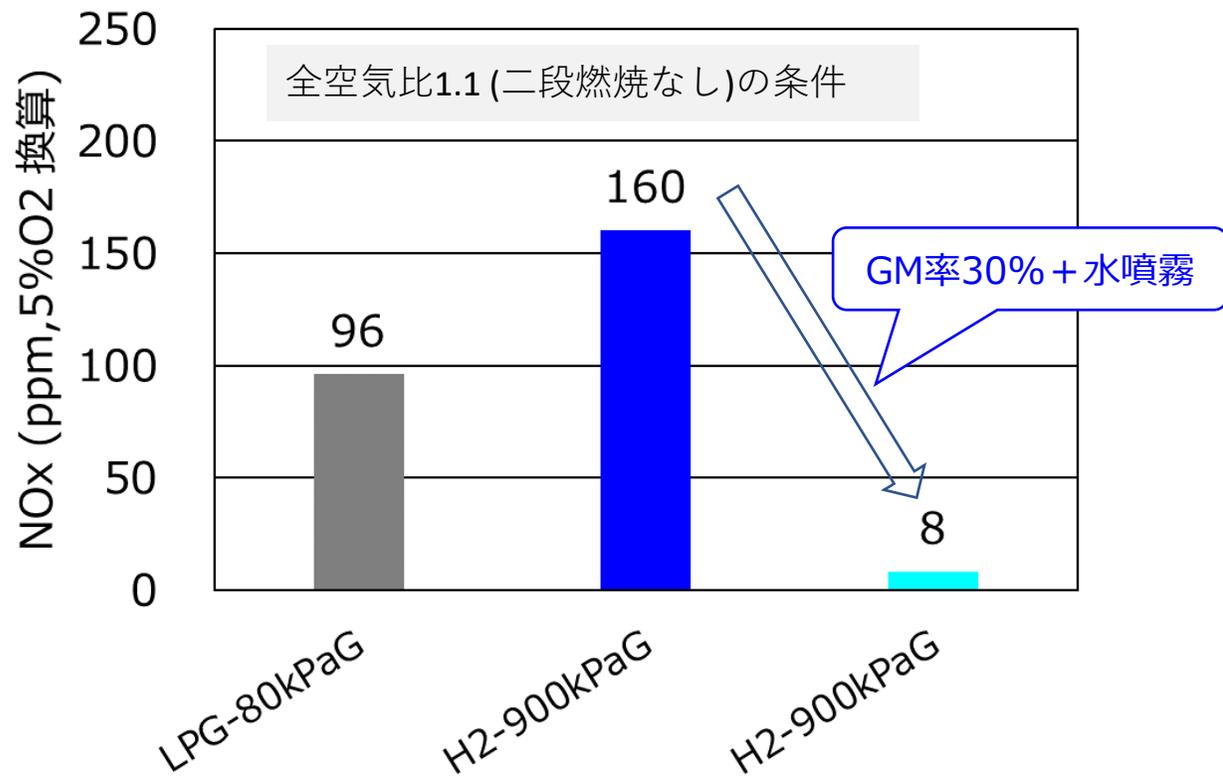
- LPG : バーナ空気比0.7でCOが大幅増加⇒**0.7以下は運用不可**
- **水素(900kPaG) : バーナ空気比0.5での安定燃焼を確認**



水素燃焼は低空気比で安定燃焼、低NOx運用が可能

3. 3 研究開発の成果

③NOx低減(GM+水噴霧の組合せ)

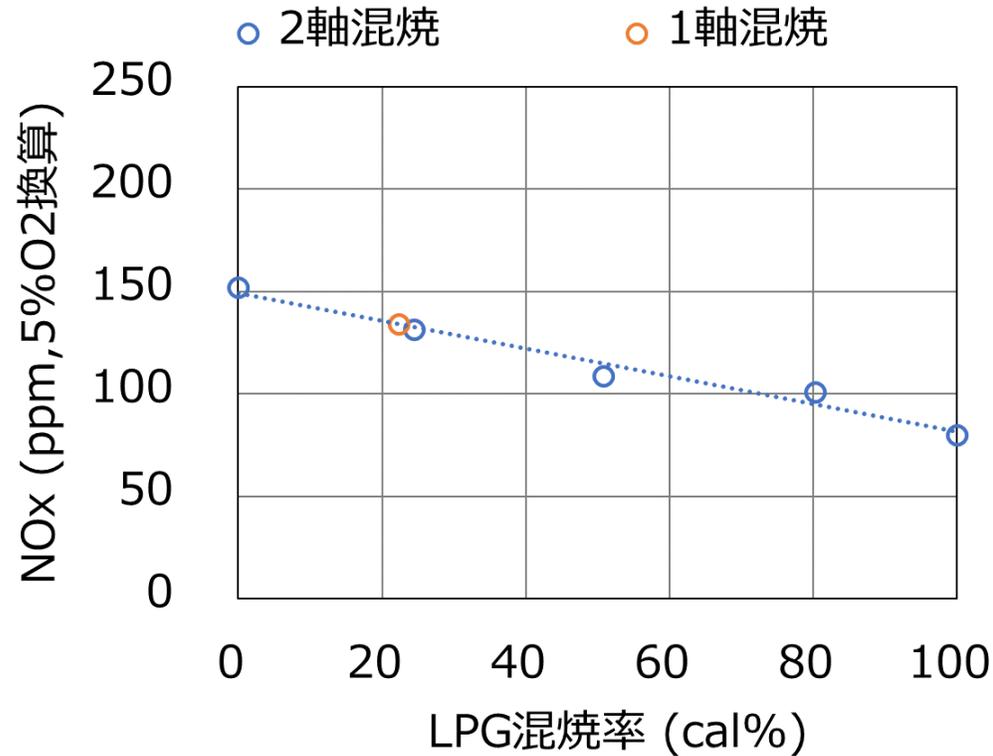


NOx低減技術を組み合わせることで大幅なNOx低減が可能

3. 3 研究開発の成果

④水素／LPG混合特性

- 二軸混焼試験でNOx濃度は、LPGの混焼比率を増加するに伴い低下
- 一軸混焼試験と二軸混焼で、混焼率に対するNOx特性はほぼ同等



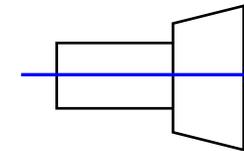
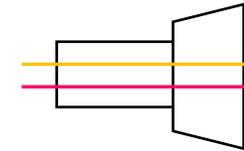
2軸混焼

LPG

水素

1軸混焼

LPG+水素

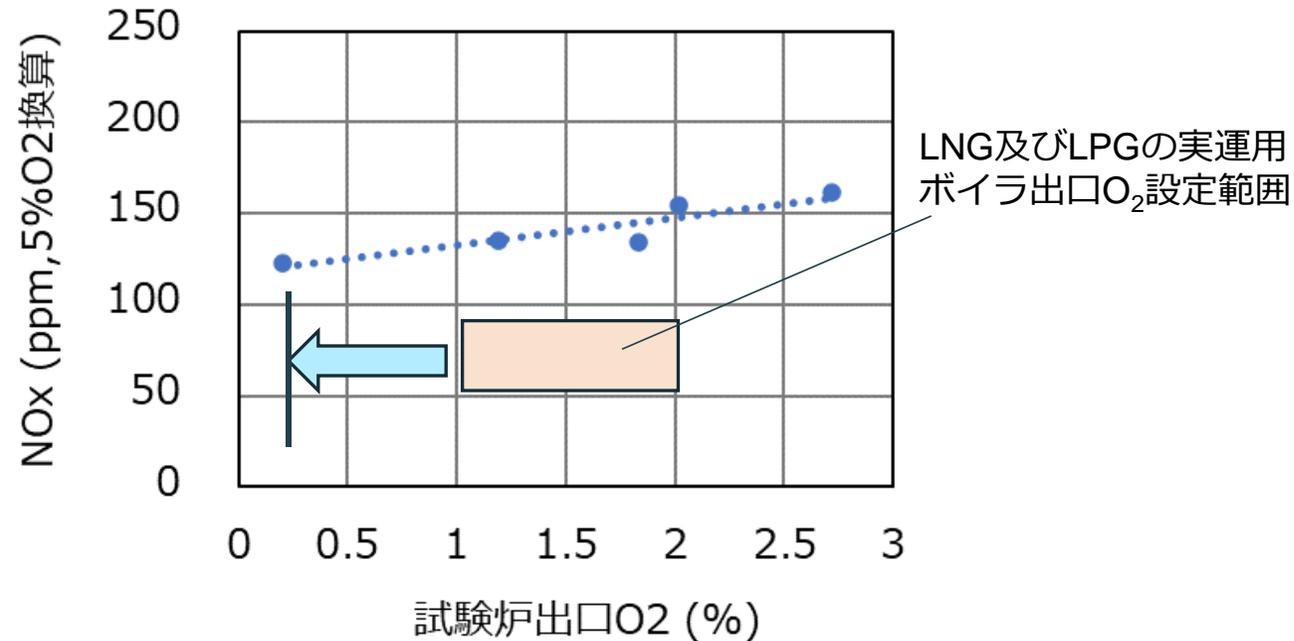


水素/LPG混合特性

3. 3 研究開発の成果

④水素／LPG混合特性

- O₂濃度0.2%でも安定した火炎検出
- 排ガス中のCO及び水素濃度は0ppm



試験炉出口O₂濃度低減特性(1軸混焼、LPG20Cal%混焼時)

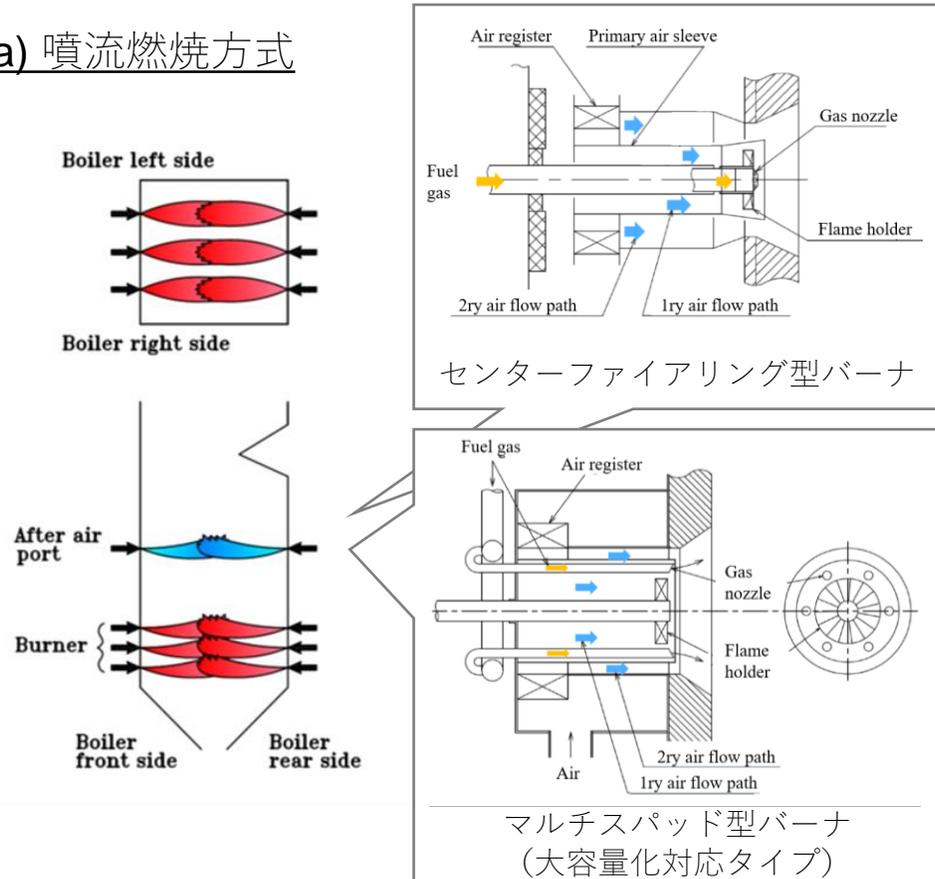
水素混焼時は低O₂濃度の条件でも安定した燃焼を確認

3. 3 研究開発の成果

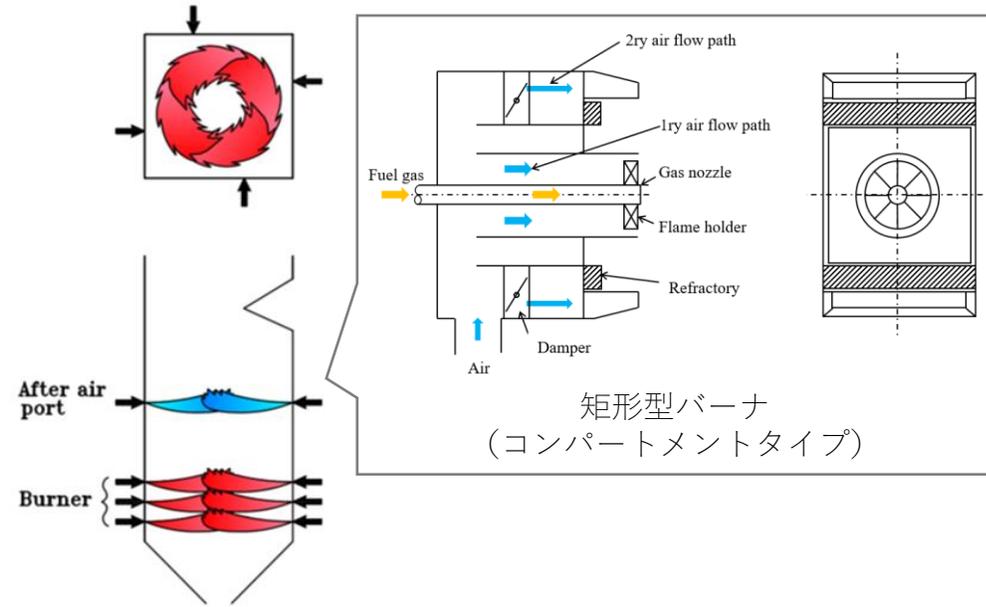
⑤ノズル型式によるNOx特性

- ボイラには大別して噴流燃烧方式と旋回燃烧方式がある
- 各燃烧方式に適したバーナタイプでの技術開発が必要

(a) 噴流燃烧方式

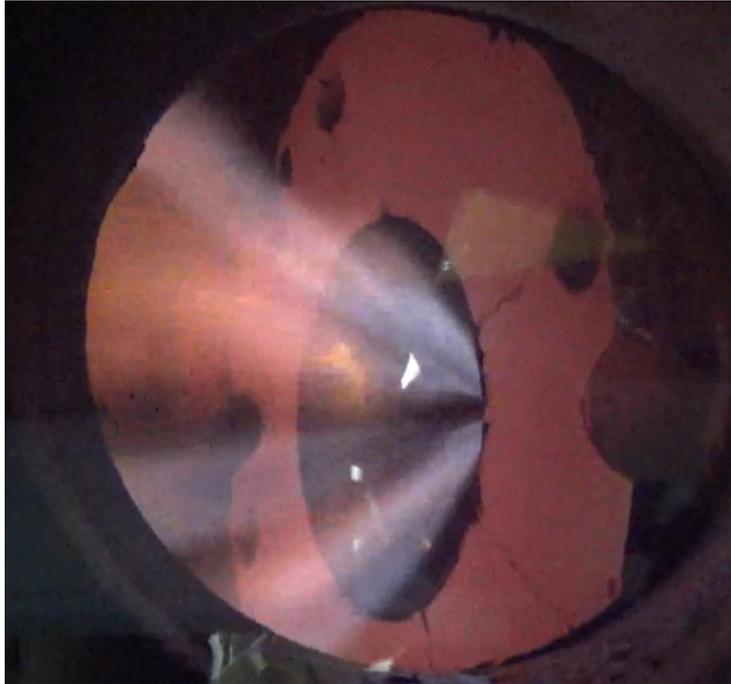


(b) 旋回燃烧方式

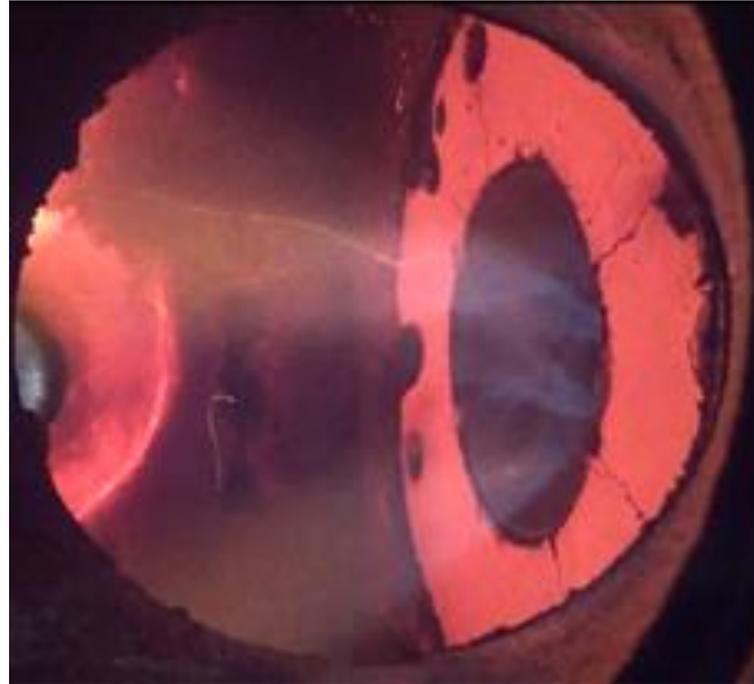


3. 3 研究開発の成果

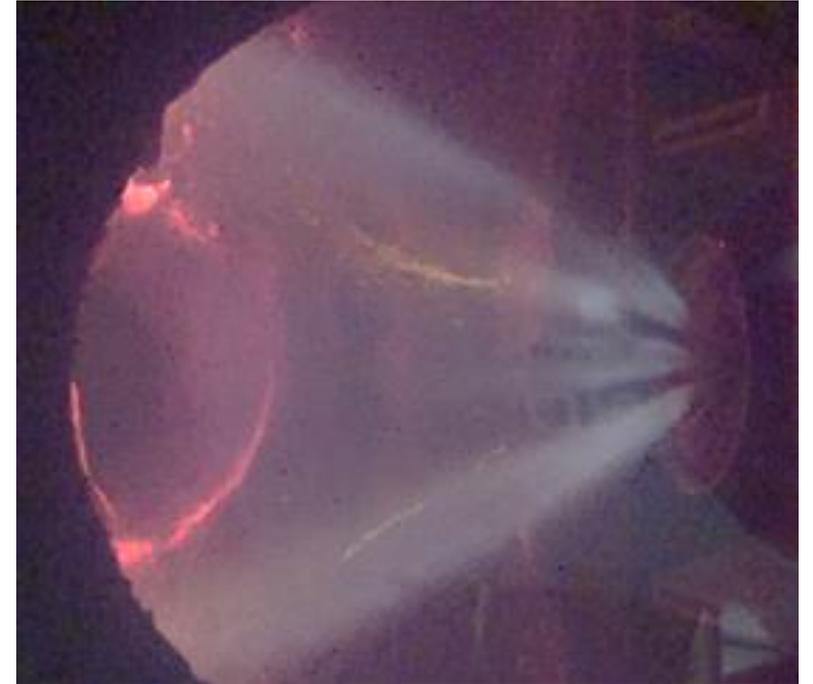
⑤ノズル型式による燃焼状況



センターファイリング型



マルチスパッド型



矩形型

水素専焼、900kPaG時燃焼状態

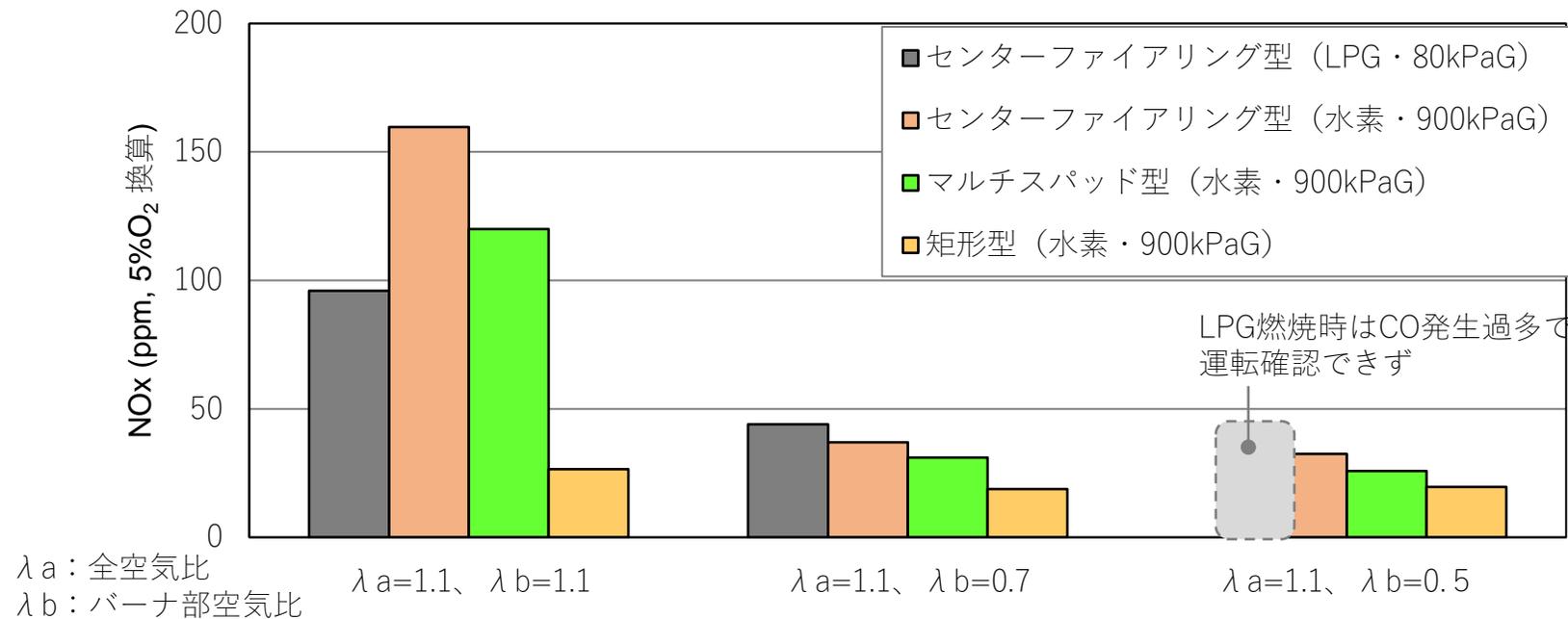
各バーナ型式で安定した燃焼状態を確認

3. 3 研究開発の成果

⑤ノズル型式によるNOx特性

- マルチスパッド型バーナのNOx低減を確認 **【燃料投入位置分散で火炎温度低減】**
- 矩形型バーナは大幅なNOx低減を確認 **【二次空気最適投入で火炎温度低減】**
- 水素燃焼時はバーナ部空気比を0.5へ低減しても安定燃焼可能 **【水素燃焼の特性※を活用】**

※空気比0.6近傍で燃焼速度最大



3. 3 研究開発の成果

No	課題	開発目標	確認結果
1	水素ガス供給圧の高圧化 (設備コンパクト化)	広範囲のガス圧(80~900kPaG) での水素の安定燃焼	<ul style="list-style-type: none"> •水素圧力80~900kPaでの燃焼試験を実施。900kPaGでも安定燃焼可能であることを確認。 •水素圧力を上昇させることで、NOx低減効果を得られることを確認。また、燃焼解析により低NOx化のメカニズムを解明した。
2	逆火現象・ノズル焼損	広範囲でのガス圧の水素燃焼時の 逆火・ノズル焼損回避条件の把握	<ul style="list-style-type: none"> •広範囲のガス圧での水素燃焼試験を実施し、試験後のノズル先端部状況から焼損が無いことを確認。 •バーナのTDRは約100 : 1を確認。
3	燃焼振動抑制	$I1 \leq 50\text{Pa}$	<ul style="list-style-type: none"> •燃焼振動解析装置にて燃焼振動の問題がないことを確認した。
4	NOx低減	NOx低減技術の効果把握 目標NOx60*ppm以下	<ul style="list-style-type: none"> •水素専焼時の下記低NOx技術の効果について確認。 (①二段燃焼 ②排ガス混合、③水噴霧) •水素 + LPG混焼では火炉出口O₂濃度0.2%という、LPG専焼では安定燃焼が難しい極低O₂条件でも安定燃焼可能であることを確認。 •噴流燃焼および旋回燃焼用バーナノズルにおけるNOx特性を確認。 •上記組合せで水素専焼時の目標NOx60ppmは実機でも達成可能な見込み。

各バーナ型式で全開発目標の達成を確認

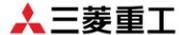
3. 4 特許・学会発表

○特許：11件出願 3件特許取得

○学会発表・プレスリリース

出願番号	発明名称
2021-106740	二段燃焼装置
2021-106750	ガスバーナ
2021-106744	ボイラ水冷壁構造
2021-106851	ガスバーナ及びボイラ
2021-106762	ガスバーナ及び燃焼装置
2021-106793	ガスバーナ及び燃焼装置
特許7037697号	水素濃度検知&制御
2021-160794	ガスバーナ、及び燃焼設備
2021-161026	ガスバーナ、及び燃焼設備
特許7042960号	AAPへの排ガス再循環(低NOx)
特許7042960号	ウインドボックスO2監視+排ガス量調整

日時	発表・学会名称
2021年1月	ICOPE2021 (日本機械学会)
2021年12月	日本技術士会
2022年2月	三菱重工プレスリリース
2022年5月	ガスレビュー誌に寄稿
2022年7月	動力エネルギー技術シンポジウム (日本機械学会)



HOME - ニュース - 産業用ボイラー向け水素焚きバーナー技術の実用化にめど水素の高圧供給 (900kPa) で安定燃焼、低NOx・低コストを実現

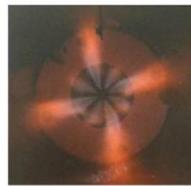
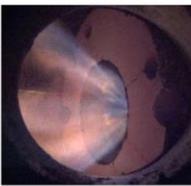
PRESS INFORMATION

産業用ボイラー向け水素焚きバーナー技術の実用化にめど
水素の高圧供給 (900kPa) で安定燃焼、低NOx・低コストを実現

2022-02-28

f t in

- ◆ NEDOによる「水素社会構築技術開発事業」プロジェクトに参加、産学官連携でも成果
- ◆ 製鉄所や化学工場から排出される水素ガスを電力や蒸気として有効利用し、既存の産業用ボイラー設備を脱炭素化

伊正室より撮影 伊正室より撮影
 水素専焼時の燃焼状況 (水素供給圧力: 900kPaG、バーナー型式: センターファイアリング型)

三菱重工グループの三菱重工パワーインダストリー株式会社 (社長: 松田 直一郎、本社: 横浜市中区) は、濃度100%の水素を低コストの設備投資で高効率に安定利用できる、産業用ボイラー向け水素焚きバーナー燃焼技術の開発・実用化にめどをつけました。本件は、2020年度に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業「水素社会構築技術開発事業 (大規模水素エネルギー利用技術開発)」(本事業) を通じ、成果を得たものです。

水素は、従来主流のボイラー燃料であるLNG (液化天然ガス) やLPG (液化石油ガス) に比べ、体積当たりのエネルギー密度が小さく、コンパクトな設備でボイラーに必要な熱量を供給するためには、高圧による大量供給技術が不可欠となります。

今回は、三菱重工グループ独自の低NOx (窒素酸化物) ガスバーナー技術をベースに採用し、水素の燃焼メカニズムを分析して最適化することにより、従来の最大供給圧力100kPaに対して900kPaまでの供給圧力での安定燃焼を達成。さらに、同一バーナーで0.1kPaから900kPaの広範囲 (ターンドアウン比: 約1/100 (注1)) にわたる圧力範囲の水素でも、安定した火炎を形成し安全に運転できることを検証しました。水素の高圧化によるNOx発生抑制に加え、二段燃焼方式などの採用で、LPG燃料と比べて大幅なNOx低減率実現が可能となり、目標としていた東京都の規制値である60ppm (注2) 以下を達成し、さらに10ppm以下へ

4. 今後の見通しについて

(1) 実用化・事業化のイメージ

- ・本事業の成果は、産業用小・中・大型の水素混焼/専焼焚きボイラ・発電設備に順次適用予定。
- ・当面は副生水素が多量に発生する化学工場、製鉄所及び石油化学系の工場用ボイラ及び燃料転換による低炭素化を目的とした既設ボイラへの適用を進める。
- ・水素供給インフラが整備されれば、順次新規ボイラに適用予定。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的な取り組み

- ・2024年度に化学工場の蒸発量170t/hクラスの巡回燃焼石炭焚ボイラを石炭/水素混焼焚（水素入熱ベースで最大50%）に改造する計画を進めている。
- ・水素の供給圧力を高圧化(最大900kPaG)することで、既設の副生ガス配管を流用する方針とする。

(3) その他、顕著な経済・技術・社会的な効果

- ・本事業の成果を適用することで、ボイラにおける経済的な水素利用を促進することができる。
- ・持続可能な循環型社会構築の一環として、ボイラ排ガス中CO₂量の低減・ゼロエミッション化に伴う低炭素化、さらには脱炭素化に貢献できる。また低NO_x化が可能となり環境負荷軽減にも貢献。