

# 終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「アンモニア直接燃焼」

研究題目「アンモニア燃焼炉の技術開発」

研究開発期間：平成 26 年 7 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

研究担当者：萩原 義之

所属研究機関：大陽日酸株式会社

## 目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	1
3. 研究開発実施内容	3
3-1. 10kW モデル試験炉における技術開発	3
3-2. 100kW モデル燃焼炉における技術開発	19
3-3. 衝突噴流式アンモニア混焼脱脂バーナの開発	46
3-4. まとめ	69
3-5. 今後の課題	70
4. 外部発表実績	71
5. 特許出願実績	73

## 図表一覧

図 1	10kW モデル試験炉の外観写真
図 2	10kW アンモニア燃焼バーナの外観写真
図 3	炉底面への放射伝熱量と酸化剤酸素濃度の関係
図 4	炉底面への放射伝熱量と酸化剤予熱温度の関係
図 5	試験バーナの概略（二段燃焼バーナ）
図 6	NO <sub>x</sub> 濃度と酸化剤酸素濃度の関係
図 7	酸素富化燃焼における二次酸化剤比率と NO <sub>x</sub> 濃度の関係
図 8	10kW モデル燃焼炉における二段燃焼による NO <sub>x</sub> 低減効果
図 9	100kW モデル試験設備の概略
図 10	100kW モデル燃焼炉の外観写真
図 11	放射熱流束計
図 12	都市ガス-アンモニア 30%混焼における酸化剤酸素濃度と平均放射熱流束の関係
図 13	アンモニア専焼における酸化剤酸素濃度と平均放射熱流束の関係
図 14	都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼における平均熱流束と酸化剤予熱温度の関係
図 15	試験バーナの外観写真
図 16	NO <sub>x</sub> 濃度に対するメインバーナから 2 次酸化剤ノズルの距離の影響
図 17	NO <sub>x</sub> 濃度に対する 2 次酸化剤比率の影響
図 18	NO <sub>x</sub> 濃度と酸化剤温度との関係
図 19	酸素富化 30%燃焼における NO <sub>x</sub> 濃度と排ガス中残存酸素濃度との関係
図 20	通常燃焼と二段燃焼における伝熱量分布の比較
図 21	鋼板加熱設備
図 22	鋼板加熱設備の外観

- 図 23 脱脂バーナの外觀写真
- 図 24 バーナ配置
- 図 25 脱脂バーナの燃焼状態
- 図 26 鋼板速度と鋼板温度の関係
- 図 27 鋼板速度 150mm/s における鋼板温度分布
- 図 28 脱脂バーナの適正配置における鋼板温度に対するアンモニア混焼の影響
- 図 29 溶融亜鉛めっき製造ライン
- 図 30 衝突噴流式脱脂炉実証設備の概略
- 図 31 脱脂炉
- 図 32 脱脂炉設置状況
- 図 33 脱脂バーナ大気燃焼試験設備
- 図 34 脱脂バーナ大気燃焼状態
- 図 35 鋼板の加熱状況
- 図 36 鋼板伝熱量および伝熱効率と脱脂バーナ燃焼負荷率の関係
- 図 37 換算鋼板温度と脱脂バーナ燃焼負荷率の関係

表 1 都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流を得る酸化剤酸素濃度

表 2 都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流を得る酸化剤予熱温度

表 3 都市ガス-アンモニア 30%混焼における加熱効率

表 4 複式脱脂バーナ最適条件

表 5 実証設備の仕様

## 1. 本研究の目的

大陽日酸はアンモニア燃焼を工業炉に適用する場合を想定して、現行の環境規制をクリアしながら火炎伝熱強化を達成する技術の開発を担当した。

アンモニア燃焼はカーボンフリーであるために炉内伝熱においては、燃焼過程で生成するすすからの固体放射による放射伝熱が期待できない。放射伝熱低下を補完する手法として、火炎温度の高温化を目指す必要があり、その解決の重要な技術の1つとして酸素富化燃焼を検討した。酸素富化燃焼は火炎温度の上昇をもたらすと同時に、燃焼速度の上昇に大きく寄与することから燃焼強化手法の1つとしても重要である。さらに、酸化剤を予熱することにより、火炎温度の上昇を目指す手法についても検討した。酸化剤予熱手法についても酸素富化燃焼同様に燃焼強化手法の1つとしても重要である。

## 2. 研究開発目標とマイルストーン

酸素富化および酸化剤予熱による火炎放射強化条件および低 NOx 化条件の抽出を完了し、10kWモデル燃焼炉において実験と検証を行い、火炎放射強化手法および低 NOx 化手法の適用効果の見極めを完了した。さらに、100kWモデル燃焼炉での火炎放射強化手法および低 NOx 化手法の検証を行い、工業炉において加熱効率 55%以上の達成の見通しを得ると同時に低 NOx 化手法を確立した。また、アンモニア混焼による工業炉分野への早期適用を目指し、上記成果を盛り込んだ開発として、亜鉛メッキ鋼板製造前処理プロセスにおける燃焼火炎による強制対流伝熱を利用した衝突噴流式脱脂バーナの性能の見極めを行い、実証設備導入についての検討を完了した。

### 【タイムスケジュール】

研究開発項目	初年度 (H26.7~H27.3)	2年度 (H27.4~H28.3)	3年度 (H28.4~H29.3)	4年度 (H29.4~H30.3)	5年度 (H30.4~H31.3)
1. 火炎放射強化機構の解明 ・酸素富化燃焼法の検討 ・酸化剤予熱手法の検討	(2.0) アンモニア酸素富化燃焼の基礎特性の把握				
	(2.0) 酸化剤予熱燃焼の基礎特性の把握				
2. 10kWモデル燃焼炉における火炎放射強化手法の開発 ・酸素富化条件の最適化 ・酸化剤予熱条件の最適化 ・低NOx化条件の見極め		(2.0) 10kWモデル燃焼炉での火炎放射強化実験の実施と評価	(2.0) 10kWモデル燃焼炉での火炎放射強化手法の最適化		
		(2.0) 10kWモデル燃焼炉での低NOx化条件の実験と評価	(2.0) 10kWモデル燃焼炉での低NOx化条件の最適化		
3. 100kWモデル燃焼炉における火炎放射強化手法の開発 ・酸素富化条件の最適化 ・酸化剤予熱条件の最適化 ・低NOx化条件の見極め			(2.0) 100kWモデル燃焼炉での火炎放射強化実験の実施と評価	(2.0) 100kWモデル燃焼炉での火炎放射強化手法の最適化	(2.0) 工業炉での火炎放射強化手法の確立
			(2.0) 100kWモデル燃焼炉での低NOx化条件の実験と評価	(2.0) 100kWモデル燃焼炉での低NOx化条件の最適化	(2.0) 低NOx化手法の確立

4. 単式衝突噴流式脱脂バーナの開発 ・鋼板加熱条件の最適化 ・脱脂条件の最適化	(2.0)	単式脱脂バーナでの強制対流伝熱強化手法の実験と評価 (2.0)			
		単式脱脂バーナでの脱脂条件の評価・見極め			
5. 商業生産設備用脱脂バーナの開発 ・複式脱脂バーナでの鋼板加熱・脱脂条件の最適化 ・商業生産ラインでの脱脂性能の見極め	(2.0)	複式脱脂バーナでの鋼板加熱・脱脂条件の実験と評価	(2.0)	複式脱脂バーナでの鋼板加熱・脱脂条件の最適化	
					(2.0) 商業生産ライン実証設備の検討完了

### 【マイルストーン】

- 初年度(H27.3) 目標 1. 酸素富化および酸化剤予熱による火炎輻射強化条件および低 NO<sub>x</sub> 化条件を抽出完了
- 2年度(H28.3) 目標 2. 10kW モデル燃焼炉での火炎輻射強化および低 NO<sub>x</sub> 化に対する酸素富化及び酸化剤予熱効果の検討完了
- 目標 4. 単式脱脂バーナでの鋼板加熱条件、脱脂条件適用の見極め完了
- 3年度(H29.3) 目標 2. 10kW モデル燃焼炉での火炎輻射強化条件、低 NO<sub>x</sub> 化条件適用の見極め完了
- 目標 3. 100kW モデル燃焼炉での火炎輻射強化および低 NO<sub>x</sub> 化に対する酸素富化及び酸化剤予熱効果の検討完了
- 目標 5. 複式脱脂バーナでの鋼板加熱条件、脱脂条件の評価完了
- 4年度(H30.3) 目標 3. 100kW モデル燃焼炉での火炎輻射強化および低 NO<sub>x</sub> 化条件適用の見極め完了
- 目標 5. 複式脱脂バーナでの鋼板加熱条件、脱脂条件の最適化完了
- 5年度(H31.3) 目標 3. 工業炉における加熱効率 55%以上の達成の見通しを得ると同時に低 NO<sub>x</sub> 化手法の確立
- 目標 5. 商業生産ライン実証設備の検討および導入効果の見極め完了

### 3. 研究実施内容

大陽日酸では、上述の課題を解決すべく、大阪大学、日新製鋼と共同研究を実施し、以下の項目を実施した。

#### 3-1. 10kW モデル試験炉における技術開発

##### 3-1-1. 10kW モデル試験炉における火炎輻射強化手法の検討

###### 1) はじめに

アンモニア燃焼では、燃料中にカーボンが含まれないため、火炎中で生成されるすすからの固体輻射が期待できない。また、アンモニアは燃焼性が悪く、且つ燃料中に窒素分を含むため、炭化水素系燃料に比較して火炎温度が低くなるため、火炎から輻射伝熱量が低下することが考えられる。

そこで、本項では、アンモニア燃焼における火炎輻射強化手法として、酸素富化および酸化剤予熱の効果について 10kW モデル燃焼炉を用いて検討した。

###### 2) 試験設備

###### a. 10kW モデル燃焼試験設備

図 1 に 10kW モデル燃焼試験設備の外観を示す。試験炉は、炉内寸法が $\square 300\text{mm} \times L1200\text{mm}$  で、炉壁に厚さ 100mm のセラミックファイバ製断熱ボードを内貼りしたものである。炉上面には、R 熱電対を軸方向 5 カ所に設置し、炉内の温度分布を測定できるようにした。放射熱流束は、炉下面から  $2\pi$  放射熱流束計を挿入して測定した。



図 1 10kW モデル試験炉の外観写真

### b. 10kW アンモニア燃焼バーナ

10kW アンモニア燃焼試験では、燃焼強化および輻射強化手法として酸素富化および酸化剤予熱の効果を検証するとともに、低NO<sub>x</sub>化手法の検討を行った。図2に試験バーナの外観を示す。試験バーナはアンモニア燃焼の基礎特性を把握するために、シンプルな二重管構造とし、中心に燃料ノズルを設け、その周りに酸化剤ノズルを配する構造とした。



図2 10kW アンモニア燃焼バーナの外観写真

## 3) 試験条件

### a. 酸素富化試験

本試験では、アンモニア燃焼において、輻射強化手法として酸素富化による効果を確認した。試験では、メタン-空気燃焼をベース条件とし、アンモニア燃焼では、酸素富化条件として酸化剤酸素濃度を20.95%、25%、30%の三条件で行った。

### b. 酸化剤予熱試験

本試験では、アンモニア燃焼において、輻射強化手法として酸化剤予熱による効果を確認した。試験では、酸化剤に空気をを用い、酸化剤温度として常温、300℃、500℃の三条件で行った。

## 4) 試験結果及び考察

### a. 酸素富化による輻射強化

図3に、アンモニア燃焼における炉底面への放射伝熱量と酸化剤酸素濃度の関係を示す。アンモニア燃焼において、酸化剤酸素濃度20.95~30%の範囲では、酸化剤酸素濃度を上げることにより、直線的に放射伝熱量が増加する傾向にあることが分かる。アンモニア燃焼において、酸化剤酸素濃度を28%まで上げることにより、メタン-空気燃焼と同等の放射伝熱量を得ることができ、輻射強化手法として酸素富化が有効であることを見極めた。

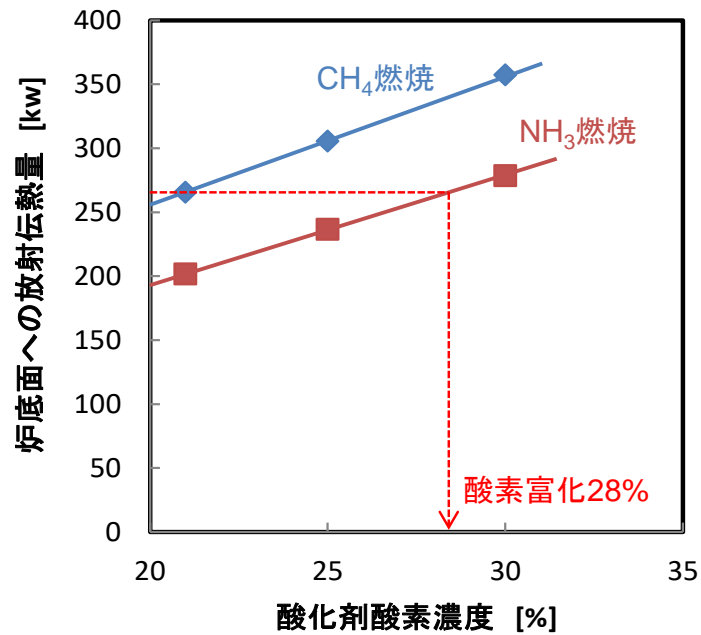


図3 炉底面への放射伝熱量と酸化剤酸素濃度の関係

b. 酸化剤予熱による輻射強化

図4に、アンモニア-空気燃焼における炉底面への放射伝熱量と酸化剤予熱温度の関係を示す。アンモニア-空気燃焼において、酸化剤温度を330℃まで上げることにより、メタン-空気燃焼と同等の放射伝熱量を得ることができ、輻射強化手法として酸化剤予熱が有効であることを見極めた。

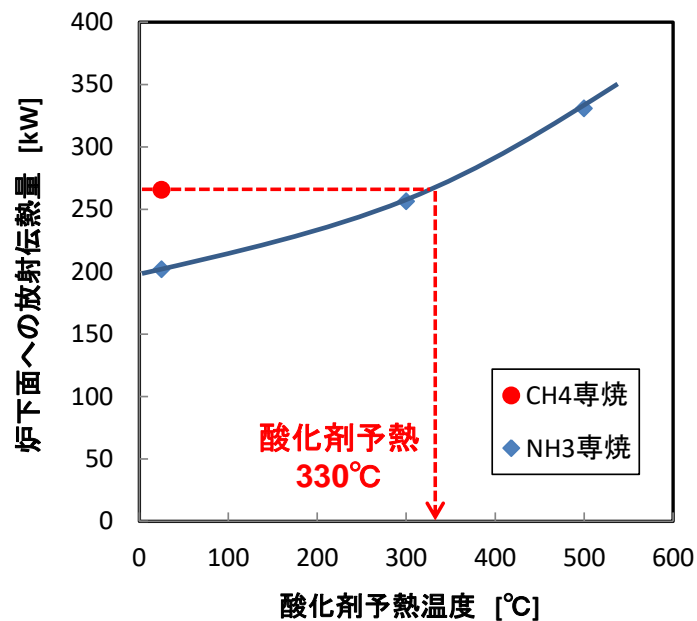


図4 炉底面への放射伝熱量と酸化剤予熱温度の関係



### 3-1-2. 10kW モデル試験炉における低 NO<sub>x</sub> 化手法の検討

#### 1) はじめに

メタン-アンモニア混焼あるいはアンモニア専焼では、NH<sub>3</sub>に起因した Fuel-NO<sub>x</sub> が生成され、都市ガス、LPG といった一般的なガス燃料に比較して、排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度が高くなることが懸念される。また、アンモニア燃焼の輻射強化を目的として、酸素富化および酸化剤予熱を行った場合、火炎温度が上昇し、更に NO<sub>x</sub> の生成が促進される可能性がある。

そこで、本項では、アンモニア燃焼において酸素富化した場合の NO<sub>x</sub> の生成特性を調べるとともに、二段燃焼による低 NO<sub>x</sub> 化の検討を行った。

#### 2) 二段燃焼バーナ

試験設備は、3-1-1. 2) 項に示した試験設備を用いた。図 5 に試験バーナの概略図を示す。試験バーナは、燃料と 1 次酸化剤ノズルを有するメインバーナを中央に設置し、その左右両側に 2 次酸化剤ノズルを配置し、二段燃焼を行える構造とした。

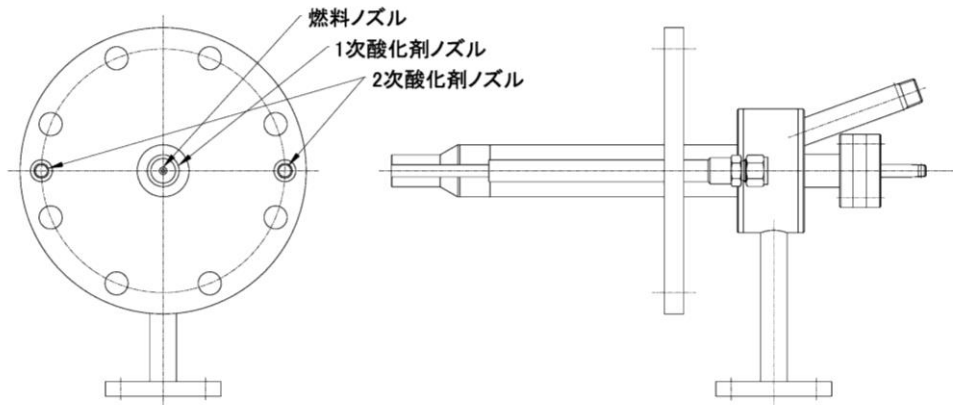


図 5 二段燃焼バーナの概略

#### 3) 試験条件

##### a. NO<sub>x</sub> 生成特性把握試験

アンモニア燃焼において NO<sub>x</sub> 生成特性に対する酸素富化、ならびに酸化剤予熱の影響を把握する試験を行った。試験は、メタン専焼とアンモニア専焼の条件において、酸化剤酸素濃度を 20.95% (空気) ~ 30% の範囲で変えて排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度を測定し、NO<sub>x</sub> 生成への影響を調べた。酸素比は 1.05 に固定した。

##### b. 低 NO<sub>x</sub> 化の検討試験

###### ① 二段燃焼による低 NO<sub>x</sub> 化

二段燃焼による低 NO<sub>x</sub> 化の検討を行った。試験は、メインバーナから供給する 1 次酸化剤と、メインバーナの左右に配置した 2 次酸化剤ノズルから吹き込む酸化剤の流量比率を変えて、排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度への影響を調べた。

## ② 2次酸化剤ノズル適正化によるNO<sub>x</sub>低減

メタン-アンモニア混焼およびアンモニア専焼において、2次酸化剤吹き込みノズルを適正化することによりNO<sub>x</sub>の低減を検討した。試験は、火炎温度が高くなりNO<sub>x</sub>が生成されやすい酸素富化30%の条件で行った。酸素比は1.05で固定した。二段燃焼条件は、2次酸化剤の流量比率を50%の条件に固定し、2次酸化剤ノズルを適正化してNO<sub>x</sub>の低減を図った。

### 4) 試験結果及び考察

#### a. アンモニア燃焼におけるNO<sub>x</sub>生成特性

図6に、NO<sub>x</sub>濃度と酸化剤酸素濃度の関係を示す。アンモニア燃焼では、メタン燃焼に比較して、大量のNO<sub>x</sub>が生成されることが分かる。これは、アンモニア燃焼の場合、アンモニアに含まれる窒素分に起因して、燃焼過程でFuel-NO<sub>x</sub>が生成されるためである。

酸素富化の影響は、酸化剤酸素濃度が高くなるのにもないNO<sub>x</sub>濃度は大きく増加する傾向を示すことが分かる。これは、酸化剤酸素濃度が高くなるにしたがって火炎温度が上昇することにより、NH<sub>3</sub>からNO<sub>x</sub>への転換率が上昇することに加え、Thermal-NO<sub>x</sub>の生成が多くなるためと考えられる。さらに、酸素富化に伴い燃焼排ガス量が減少するため、NO<sub>x</sub>濃度が高くなったものと考えられる。

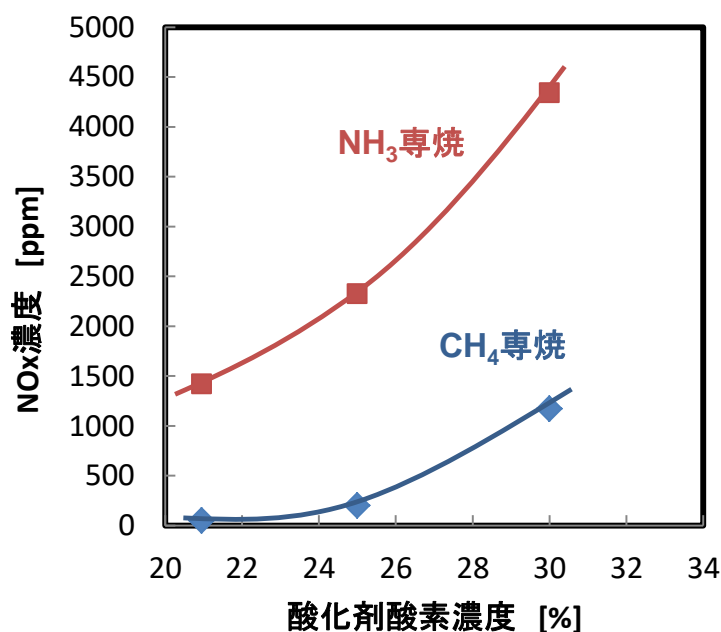


図6 NO<sub>x</sub>濃度と酸化剤酸素濃度の関係

## b. 低 NO<sub>x</sub> 化手法の検討

### ① 二段燃焼による低 NO<sub>x</sub> 化

図 7 に、酸素富化燃焼（酸化剤酸素濃度 30%）における 2 次酸化剤比率と NO<sub>x</sub> 濃度の関係を示す。試験条件は、酸化剤酸素濃度 30%、酸素比 1.05 である。メタン-酸素富化燃焼では、2 次酸化剤の比率の増加とともに NO<sub>x</sub> は減少する傾向にある。一方、アンモニア混焼率 30%およびアンモニア専焼の条件では、2 次酸化剤の比率 20~30%の範囲で NO<sub>x</sub> は急激に低下し、2 次酸化剤比率 40~50%のところで最小となる傾向を示した。さらに 2 次酸化剤の比率を増やすと、NO<sub>x</sub> は徐々に増加することが分かった。2 次酸化剤の比率を 50%以上にすると、燃料と 1 次酸化剤で形成される 1 次燃焼領域の温度が低くなるため、アンモニアが十分に燃焼分解されなくなり、後流で 2 次酸化剤と反応することにより NO<sub>x</sub> に転換されるものと考えられる。

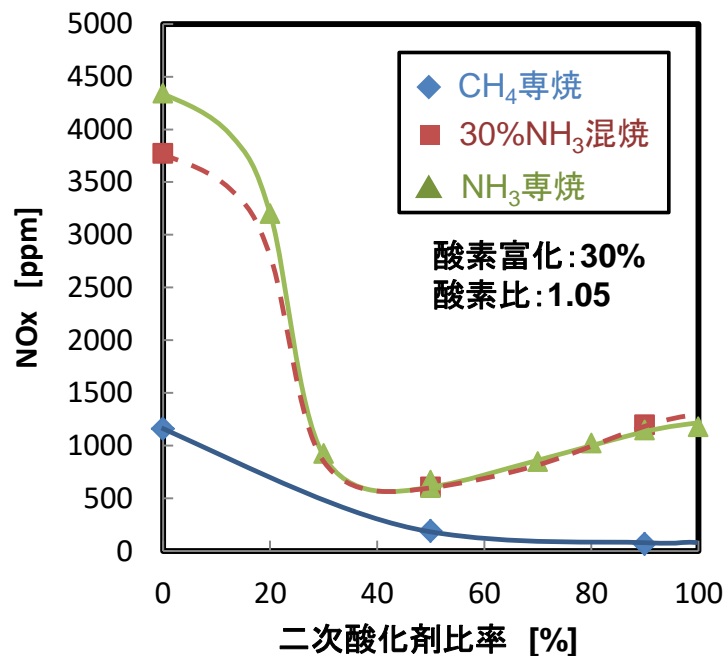


図 7 酸素富化燃焼における二次酸化剤比率と NO<sub>x</sub> 濃度の関係

### ② 2 次酸化剤ノズル最適化による NO<sub>x</sub> 低減

図 8 に、メタン-アンモニア混焼およびアンモニア専焼における二段燃焼による NO<sub>x</sub> 低減効果を示す。2 次酸化剤ノズルの吹き込みを最適化したノズル B1、B2 を用いることにより、NO<sub>x</sub> を大幅に低減することができ、メタン-アンモニア 30%混焼で 98ppm (O<sub>2</sub>11%)、アンモニア専焼で 99ppm (O<sub>2</sub>11%) まで低減でき、加熱炉の環境規制値 150ppm をクリアすることができた。

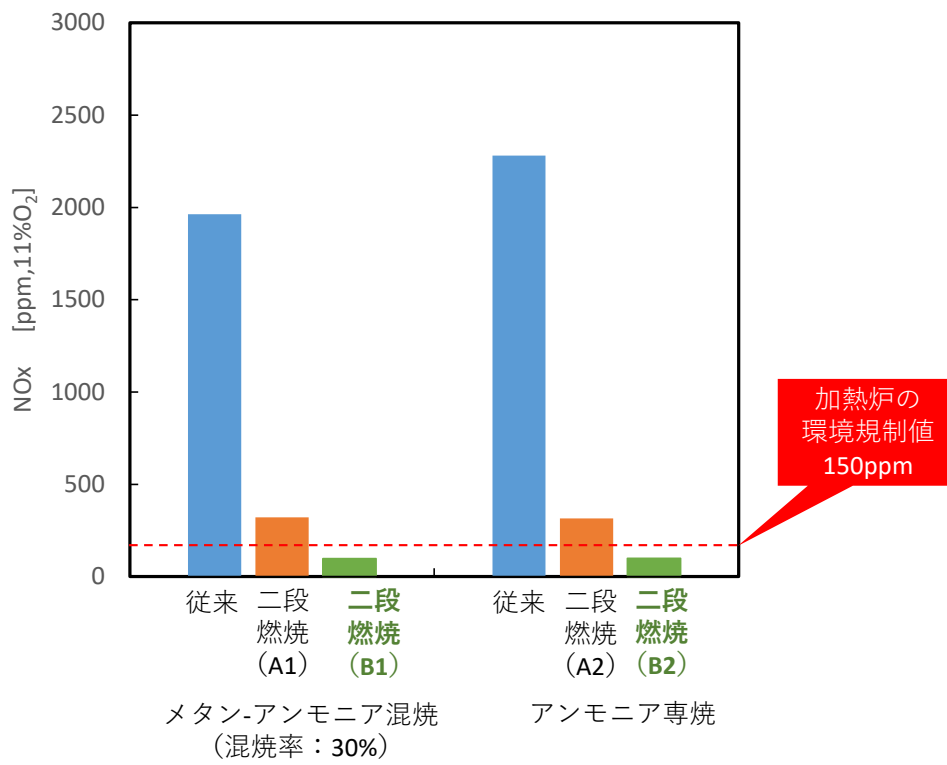


図8 10kWモデル燃焼炉における二段燃焼によるNOx低減効果

### 3-2. 100kWモデル燃焼炉における技術開発

#### 3-2-1. 100kWモデル燃焼炉における火炎輻射強化手法の検討

##### 1) はじめに

10kWモデル燃焼炉試験において、火炎輻射強化手法として酸素富化および酸化剤予熱の有効であることが確認できたことから、10倍の規模にスケールアップした100kWモデル燃焼炉を用いて、実機バーナの輻射特性を評価できる規模で、火炎輻射強化に対する酸素富化および酸化剤予熱の効果を検討した。

##### 2) 試験設備

###### a. 100kWモデル燃焼試験設備

図9に100kWモデル燃焼試験設備の概略を示す。また、図10に100kWモデル燃焼炉の外観写真を示す。

本設備は、主に100kWモデル燃焼炉、流量制御盤、除害設備で構成される。燃焼炉は、炉内寸法が□850mm×L3400mmで、炉壁に厚さ100mmのセラミックファイバ製断熱ボードを内貼りしたものである。炉内壁温度は、炉の上面、側面、下面に、R熱電対を軸方向5カ所にそれぞれ設置し、炉内の温度分布を測定できるようにした。放射熱流束は、炉の下面に測定ポートを軸方向5カ所設け、放射熱流束計を挿入して測定した。流量制御盤は、二段燃焼を想定して酸素と空気をそれぞれ2系統で供給できるようにし、各系統の酸素と空気は流量制御盤で混合してバーナに供給するようにした。燃焼炉の排ガスは、除害設備により燃焼処理して排気するようにした。

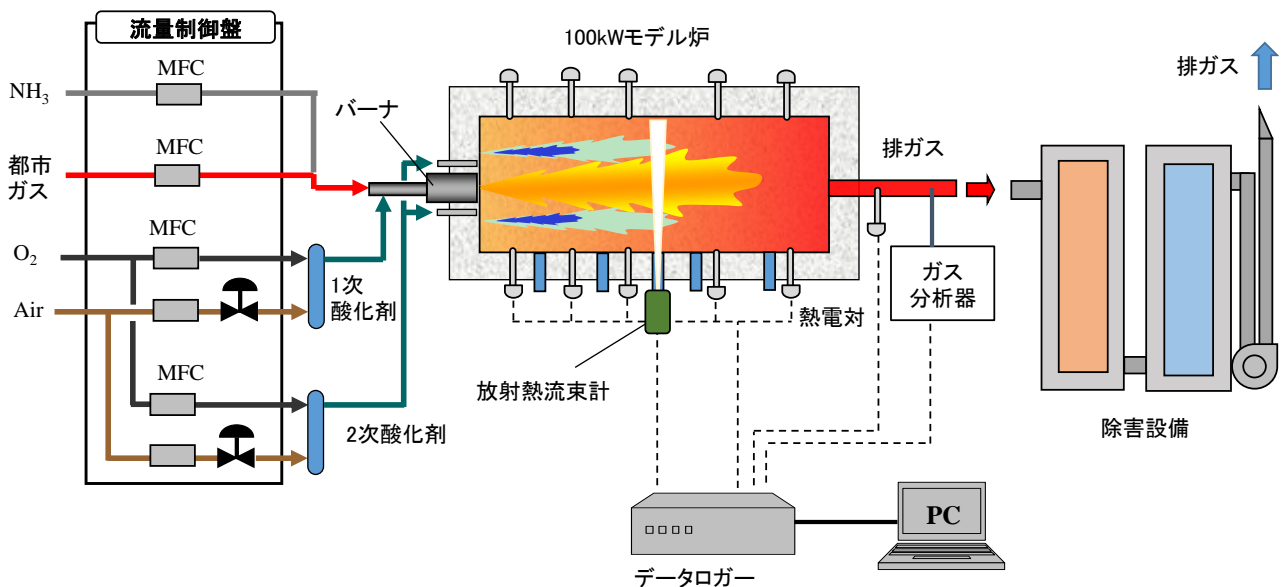


図9 100kWモデル試験設備の概略



図 10 100kW モデル燃焼炉の外観写真

b. 放射熱流束計

図 11 に放射熱流束計の概略構造を示す。放射熱流束計は、内径 10mm×長さ 300mm の水冷ジャケットの底部に放射熱流束センサーを取り付けることにより、センサーに入射する放射熱流束の立体角を小さくすることにより、局所の放射熱流束を測定できるようにした。放射熱流束センサーは、Captec Enterprise 製 CAPTHERM-R を用いた。水冷ジャケットの内面は、黒体塗料でコーティングした。

放射熱流束計は窒素ガスでパージし、水冷ジャケット内への高温ガスの侵入と、結露を防止するようにした。

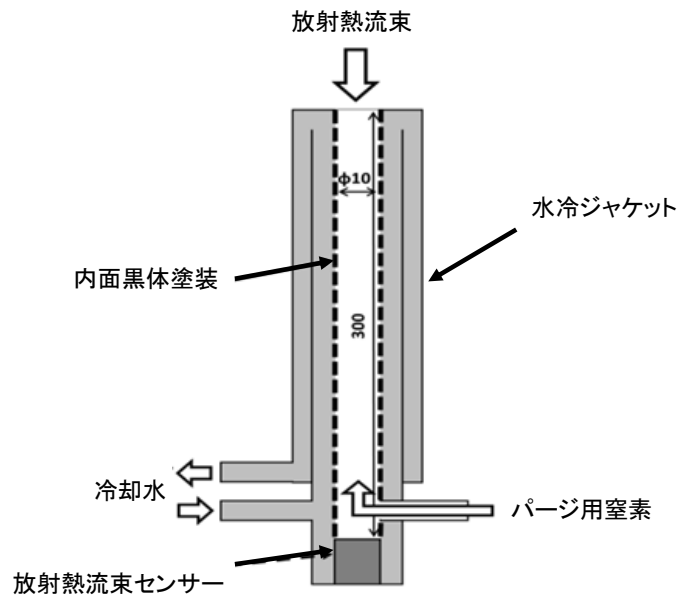


図 11 放射熱流束計

### c. 試験バーナ

100kW アンモニア燃焼試験では、燃焼強化および輻射強化手法として酸素富化および酸化剤予熱の効果を検証するとともに、低NO<sub>x</sub>化手法の検討を行った。試験バーナは、10kW モデル燃焼用バーナと同様のシンプルな二重管構造とした。バーナ構造は、中心に燃料ノズルを設け、その周りに酸化剤ノズルを配する構造とした。

### 3) 試験条件

一般的に工業炉では、排熱を利用して酸化剤（空気）を予熱しているケースが多い。そのため、本試験では、酸化剤温度を常温、300℃、500℃に予熱した条件で酸素富化による輻射強化を確認した。ベース条件は、都市ガス空気燃焼を対象とした。燃焼量は100kWに固定し、酸素比1.05で燃焼させた。都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア燃焼の試験は、酸素富化条件として酸化剤酸素濃度を20.95%、25%、30%の三条件で行った。アンモニア混焼率は、30%に固定した。

なお、輻射強化を検討する試験では、酸化剤は1次酸化剤ノズルから全量供給した。

### 4) 試験結果および考察

#### a. 酸素富化による輻射強化

図12および図13に、都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼における酸化剤酸素濃度と平均放射熱流束の関係をそれぞれ示す。平均熱流束とは、軸方向に5カ所で測定した熱流束を平均した値である。都市ガス-アンモニア混焼、アンモニア専焼ともに、平均放射熱流束は酸化剤酸素濃度に対して、リニアに上昇する傾向を示した。また、酸化剤温度を上げた場合、平均放射熱流束は平行に上昇する結果を示した。表1に都市ガス空気燃焼と同等の放射熱流束を得るのに必要な酸化剤酸素濃度を示す。工業炉において500℃レベルの比較的高温まで空気を予熱した都市ガス-空気燃焼に対しても、都市ガス-アンモニア混焼で24.0%、アンモニア混焼で27.2%まで酸素富化することにより、都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流束が得られることが確認できた。

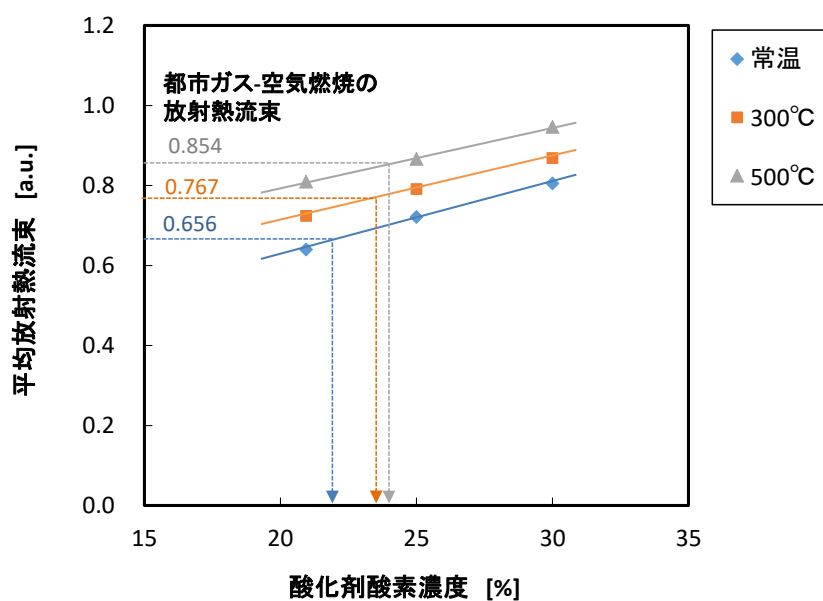


図 12 都市ガス-アンモニア 30%混焼における酸化剤酸素濃度と平均放射熱流束の関係

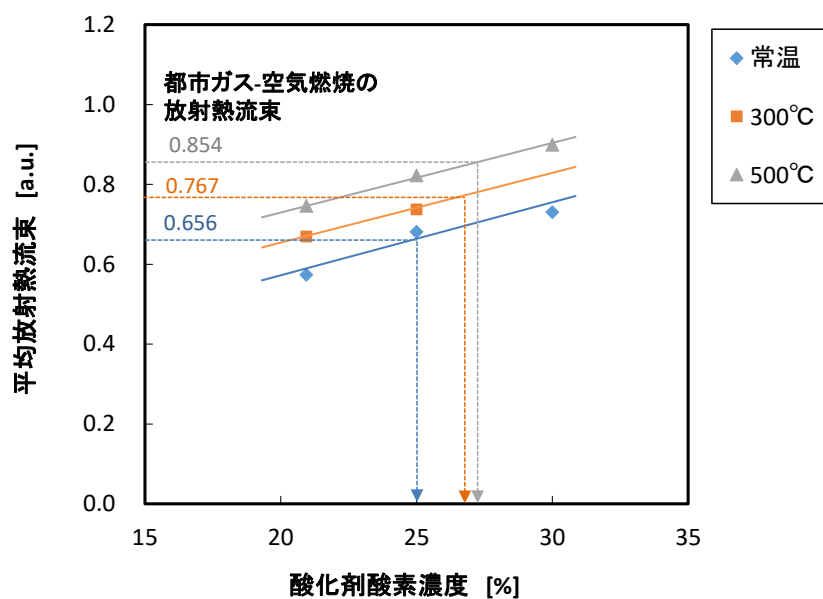


図 13 アンモニア専焼における酸化剤酸素濃度と平均放射熱流束の関係

表 1 都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流を得る酸化剤酸素濃度

酸化剤温度	都市ガス-空気燃焼 の平均放射熱流束 [a. u.]	酸化剤酸素濃度 [%]	
		都市ガス-アンモニア混焼	アンモニア専焼
常温	0.656	21.7	25.0
300°C	0.767	23.6	26.8
500°C	0.854	24.0	27.2



b. 酸化剤予熱の効果

工業炉において酸化剤（空気）予熱をしていないケースに都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼を適用した場合の輻射強化手法として酸化剤予熱の効果を検討した。

図 14 に、都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼における酸化剤予熱温度と平均放射熱流束の関係を示す。また、表 2 に都市ガス空気燃焼と同じ平均放射熱流束が得られる酸化剤予熱温度を示す。平均放射熱流束は、酸化剤予熱温度を上げることにより、リニアに高くなる傾向を示した。本結果から、都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流束を得るのに、都市ガス-アンモニア混焼では 82.6℃、アンモニア専焼では 256.2℃まで酸化剤を予熱する必要があることが分かった。

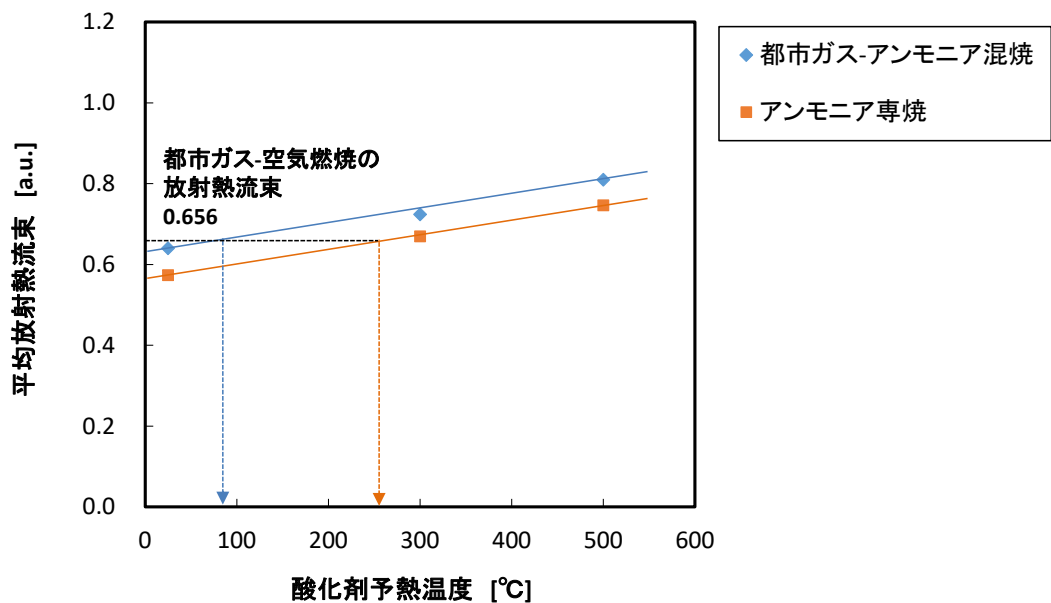


図 14 都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼における平均放射熱流束と酸化剤予熱温度の関係

表 2 都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流を得る酸化剤予熱温度

都市ガス-空気 燃焼時の 酸化剤温度	都市ガス-空気燃焼 の平均放射熱流束 [a. u.]	酸化剤予熱温度 [°C]	
		都市ガス-アンモニア混焼	アンモニア専焼
常温	0.656	82.6	256.2

### 3-2-3. 100kW モデル燃焼炉における低 NO<sub>x</sub> 化の検討

#### 1) はじめに

10kW モデル燃焼炉では、二段燃焼の最適化を行うことにより、NO<sub>x</sub> 排出濃度をメタン-アンモニア混焼で 98ppm (11%O<sub>2</sub> 換算)、アンモニア専焼で 99ppm (11%O<sub>2</sub> 換算) まで抑制することができた。

そこで、10 倍規模にスケールアップした 100kW モデル燃焼炉を用いて、10kW モデル試験炉の結果を考慮して二段燃焼による NO<sub>x</sub> 低減効果を検討し、金属加熱炉における NO<sub>x</sub> の環境基準をクリアすることを目標に研究開発を実施した。

#### 2) 試験バーナ

図 15 に試験バーナの概略図を示す。試験バーナは、メインバーナを中央に設置し、その左右両側に 2 次酸化剤ノズルを配置し、二段燃焼を行える構造とした。2 次酸化剤ノズルは、取り付け位置を変えることにより、メインバーナから 2 次酸化剤ノズルの距離を変えられるようにした。

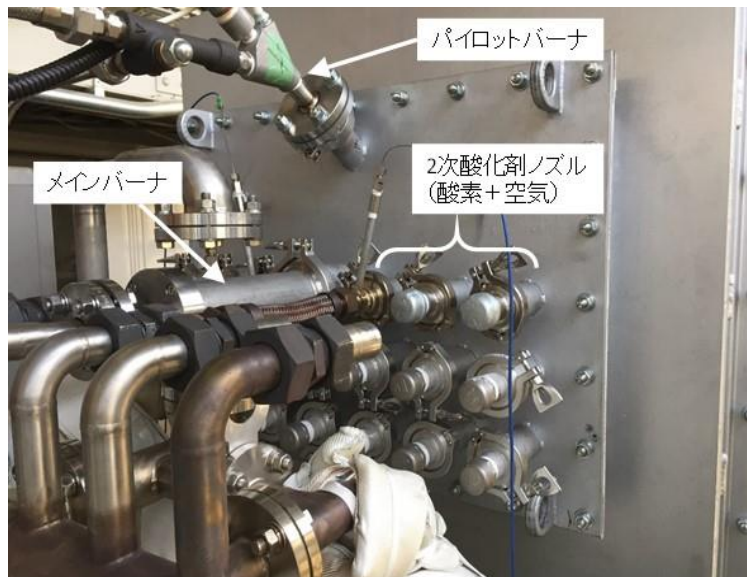


図 15 試験バーナの外観写真

#### 3) 試験条件

100kW モデル燃焼炉試験では、メインバーナ-2 次酸化剤ノズルの距離及び 2 次酸化剤比率を変えて NO<sub>x</sub> 濃度への影響を調べ、最適条件の見極めを行った。試験は、都市ガス-アンモニア 30%混焼、酸化剤酸素濃度 30%、酸素比 1.05 に固定して行った。

また、一般的に工業炉では、排熱を利用して酸化剤 (空気) を予熱しているケースが多い。そのため、本試験では、酸化剤温度を常温、300℃、500℃に予熱した条件で NO<sub>x</sub> 濃度への影響を確認した。試験は、都市ガス-アンモニア 30%混焼とアンモニア専焼で行った。

さらに、酸化剤を予熱した条件において低 NO<sub>x</sub> を図ることを目的として、NO<sub>x</sub> 濃度に対する排ガス中残存酸素濃度の影響を調べた。残存酸素濃度は、酸化剤流量を変えて調整した。

#### 4) 試験結果および考察

##### a. 2次酸化剤ノズル配置の影響 (アンモニア 30%混焼)

本試験では、都市ガス-アンモニア 30%混焼においてメインバーナから2次酸化剤ノズルの距離を100～300mmの範囲で変えてNO<sub>x</sub>生成への影響を確認した。

図16に、メインバーナから2次酸化剤ノズルの距離とNO<sub>x</sub>濃度の関係を示す。10kWモデル試験と同様に、二段燃焼を行うことによりNO<sub>x</sub>は大きく低減されることを確認した。これは、メインバーナにより形成される1次燃焼領域が、酸素不足の状態となり還元雰囲気形成されるためである。

NO<sub>x</sub>の低減効果は、メインバーナから2次酸化剤ノズルを離すほど大きくなっている。これは、1次燃焼量領域への2次酸化剤の混合を遅くすることにより、NO<sub>x</sub>の低減を図ることが出来ることを示している。

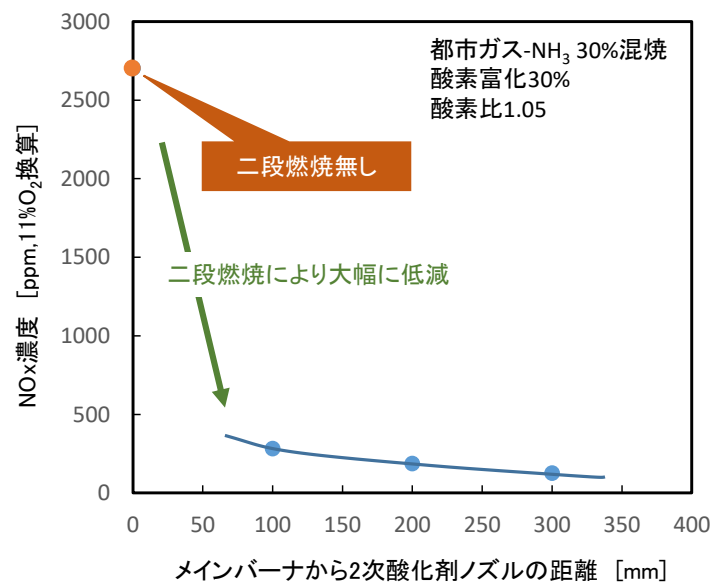


図16 NO<sub>x</sub>濃度に対するメインバーナから2次酸化剤ノズルの距離の影響

##### b. 2次酸化剤流量比率の影響

本試験では、都市ガス-アンモニア 30%混焼においてメインバーナから2次酸化剤ノズルの距離を300mmに固定して、1次酸化剤と2次酸化剤の比率を0～90%の範囲で変えてNO<sub>x</sub>生成への影響を確認した。

図17に、2次酸化剤比率とNO<sub>x</sub>濃度の関係を示す。NO<sub>x</sub>濃度は、2次酸化剤比率を増加すると急激に低下し、2次酸化剤比率50%付近で最小となる傾向を示した。さらに2次酸化剤の比率を増やすと、NO<sub>x</sub>は徐々に増加することが分かった。この傾向は、10kWモデル炉試験と同様の傾向であった。2次酸化剤の比率を50%以上にすると、燃料と1次酸化剤で形成される1次燃焼領域の温度が低くなるため、アンモニアが十分に燃焼分解されなくなり、後流で2次酸化剤と反応することによりNO<sub>x</sub>に転換されるものと考えられる。

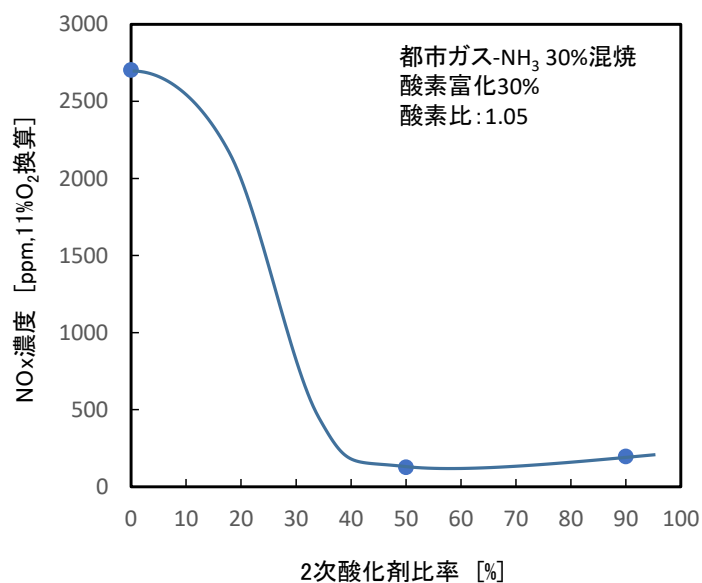


図 17 NO<sub>x</sub> 濃度に対する 2 次酸化剤比率の影響

c. 酸化剤温度の影響

本試験では、都市ガス-アンモニア 30%混焼とアンモニア専焼の二条件で、酸化剤温度を常温～500℃の範囲で変えて NO<sub>x</sub> 生成への影響を調べた。バーナ条件は、メインバーナから 2 次酸化剤ノズルの距離を 300mm とした。2 次酸化剤比率は 50%に固定した。

図 18 に、酸化剤温度と NO<sub>x</sub> 濃度の関係を示す。都市ガス-アンモニア 30%混焼では、酸化剤温度を上げるのに伴い NO<sub>x</sub> 濃度は高くなる傾向にある。一方、アンモニア専焼では、酸化剤温度 300℃までは NO<sub>x</sub> 濃度はほぼ一定で、300℃を越えると NO<sub>x</sub> 濃度は上昇する傾向を示した。

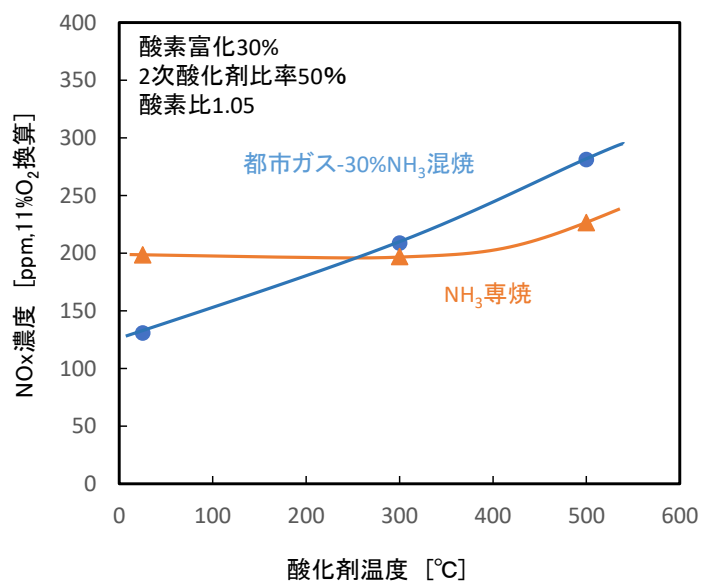


図 18 NO<sub>x</sub> 濃度と酸化剤温度との関係

#### d. 排ガス中残存酸素濃度の影響

本試験では、酸化剤流量を下げるにより排ガス中残存酸素濃度を下げて、NO<sub>x</sub> 濃度への影響を調べた。バーナ条件は、メインバーナから2次酸化剤ノズルの距離を300mmとした。燃焼条件は、酸化剤温度500℃、酸化剤酸素濃度30%、2次酸化剤比率50%に固定した。

図19に、都市ガス-アンモニア30%混焼とアンモニア専焼における排ガス中残存酸素濃度とNO<sub>x</sub>濃度の関係を示す。残存酸素濃度を下げるにより、NO<sub>x</sub>濃度を下げることが出来ることを確認した。都市ガス-アンモニア30%専焼では排ガス中残存酸素濃度を0.91%まで、アンモニア専焼では0.51%まで下げることにより、加熱炉の環境基準である150ppmをクリアすることが出来た。

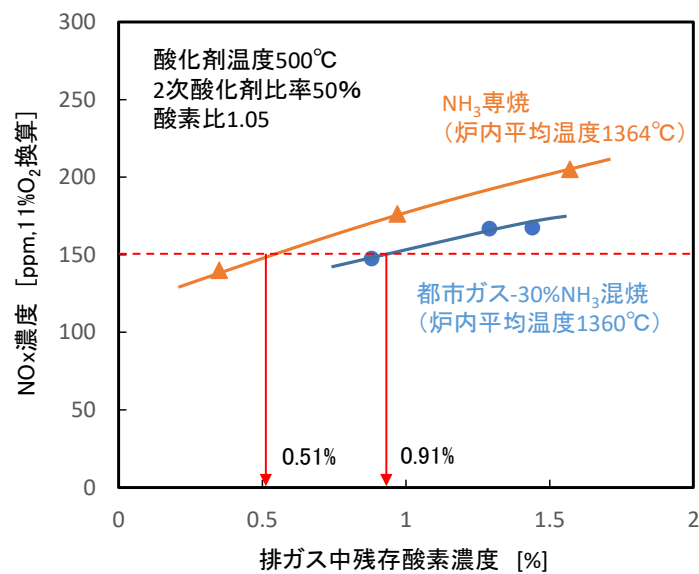


図19 酸素富化30%燃焼におけるNO<sub>x</sub>濃度と排ガス中残存酸素濃度との関係

以上の結果から、アンモニア燃焼において、低NO<sub>x</sub>化手法として二段燃焼法を適用し、条件を最適化することにより、加熱炉のNO<sub>x</sub>環境基準150ppmをクリアする成果を得た。

### 3-2-2. アンモニア燃焼における加熱効率の検討

#### 1) はじめに

前節にて実機バーナの輻射特性を評価できる 100kW モデル燃焼炉を用いて、火炎輻射強化において酸素富化および酸化剤予熱が有効であることを確認した。

本開発では、鉄鋼向け加熱炉の熱効率 55%を目標値として掲げており、100kW モデル燃焼炉において、アンモニア燃焼に酸素富化および酸化剤予熱を適用した場合の加熱効率の評価を行った。なお、加熱効率の算出方法等は、大阪大学の終了報告書参照。

#### 2) 加熱効率測定用 100kW モデル燃焼試験設備

本試験では、3-2-1.2) で示した燃焼試験設備のモデル試験炉の下部にφ20mm の水冷伝熱管を 12 本設置し、加熱効率を測定できるようにした。水冷伝熱管には、冷却水流量を測定する流量計と入口・出口の水温を測定する測温抵抗体を設けた。

#### 3) 試験条件

試験は、都市ガス-アンモニア 30%混焼の条件において、通常燃焼（二段燃焼なし）と二段燃焼した場合について、加熱効率を評価した。酸化剤温度は 500℃とした。二段燃焼の条件として、2 次酸化剤比率は NO<sub>x</sub> が最も低くなる 50%とした。

#### 4) 試験結果

図 20 に水冷伝熱管への伝熱量分布を示す。伝熱量分布は、通常燃焼では、バーナに近い領域で伝熱量が低く、後流で伝熱量が高くなる傾向を示した。それに対して、二段燃焼を行った場合では 0~1.5m の範囲で伝熱量が高くなっており、上流側の伝熱量が高くなっており、伝熱強化が図られていることが分かる。また、二段燃焼では全体的フラットな伝熱量分布になっており、より均一な加熱ができるものと考えられる。

次に加熱効率を評価した。加熱効率は、12 本の水冷伝熱管への伝熱量の合計を燃料投入熱量で除して求めた。表 3 に加熱効率を示す。二段燃焼を行うことにより、加熱効率は 55%を得ることができ、目標効率を達成した。

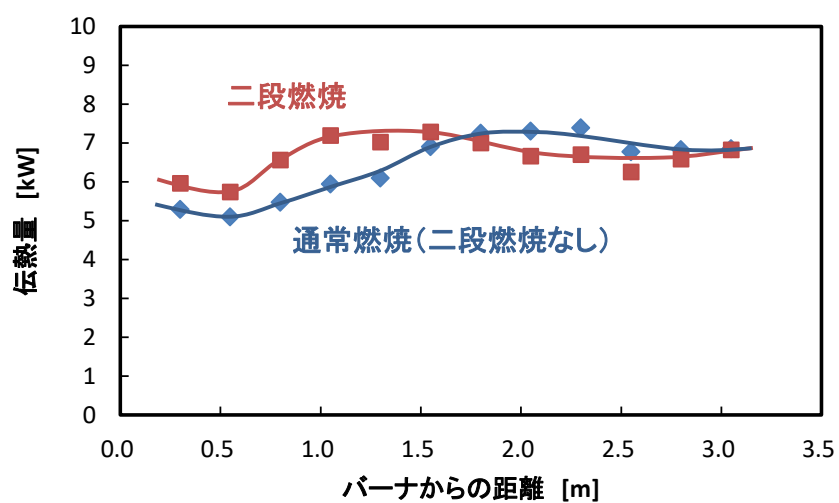


図 20 通常燃焼と二段燃焼における炉内壁温度分布の比較

表 3 都市ガス-アンモニア 30%混焼における加熱効率

		通常燃焼 (二段燃焼なし)	二段燃焼
加熱効率	[%]	53.8	55.0

### 3-3. 衝突噴流式アンモニア混焼脱脂バーナの開発

#### 3-3-1. アンモニア混焼脱脂バーナの開発

##### 1) はじめに

アンモニア混焼による工業炉分野への早期適用を目指し、亜鉛メッキ鋼板製造前処理プロセスにおける燃焼火炎による強制対流伝熱を利用した衝突噴流式脱脂炉およびバーナ装置の開発と実証設備の導入を検討する。

はじめに、衝突噴流式脱脂バーナを設計、製作、設置し、強制対流伝熱に関する実験と検証を行い、強制対流伝熱手法の最適条件を見出すと同時に、鋼板表面の最適な酸化・還元状態の適用を見極める。次に、実機を見据えた脱脂バーナの配置を検討した。

##### 2) 試験設備

###### a. 鋼板加熱設備

図 21 に鋼板加熱設備の概略を示す。また、図 22 に鋼板加熱設備の外観写真を示す。本設備は、脱脂バーナ、バーナ架台、鋼板走行設備、鋼板冷却フード、排気フード、流量制御盤で構成される。脱脂バーナはバーナ架台に固定され、バーナ高さ、角度を任意に調整することができる。脱脂バーナに供給する燃料・酸素（2 系統）の流量は、流量制御盤（マスフローコントローラ）にて調節した。脱脂バーナの燃焼排ガスは排気フードにより吸引され、設備外に漏れないようにした。鋼板サンプル（W600mm×L1000m×t0.6mm）は、鋼板台車に固定し火炎中を一定速度で通過できるようにした。鋼板温度は、鋼板の裏面に取り付けられた熱電対（10mm 間隔）により測定した。

鋼板加熱試験は、脱脂バーナに点火・所定燃焼条件に設定後、走行台車を移動させることにより火炎中を所定の速度で通過させ加熱した。火炎を通過した鋼板は、鋼板冷却フード内に運び込まれ、酸化防止のために窒素ガスで 5 分間冷却した。

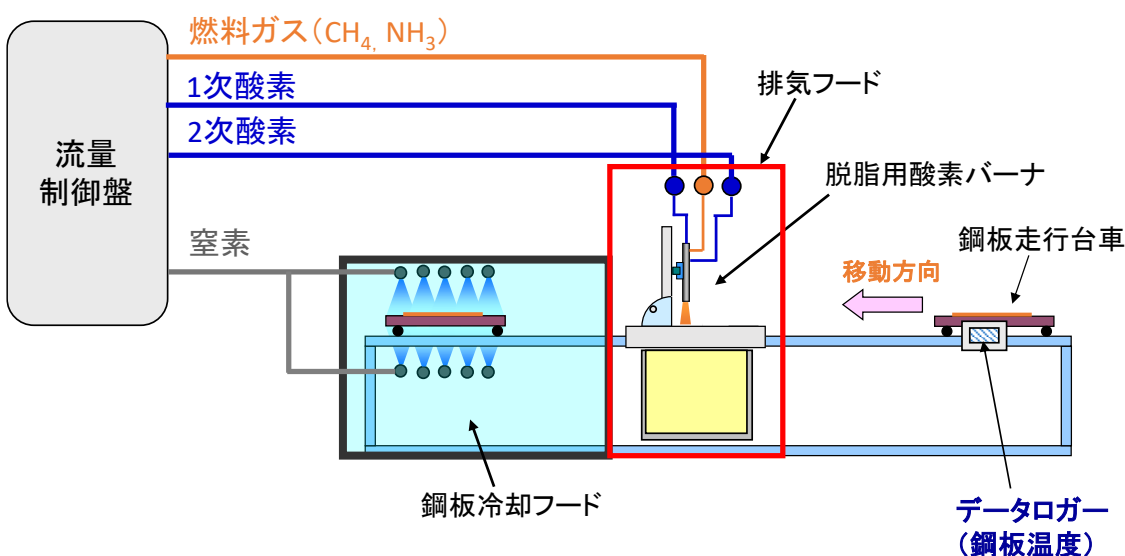


図 21 鋼板加熱設備





図 22 鋼板加熱設備の外観

b. 脱脂バーナ

図 23 に脱脂バーナの外観写真を示す。脱脂バーナは、火炎を鋼板表面に直接衝突させることにより、鋼板表面に付着した油脂を加熱・燃焼して除去するため、バーナには高い対流伝熱性能が求められる。本バーナは、ノズルから燃料と酸素を高速で噴出させ、酸素燃焼により高速・高温の火炎を形成する。



図 23 脱脂バーナの外観写真

### 3) 試験条件

#### a. 脱脂バーナの検討

本試験では、バーナと鋼板面の距離は 200mm とし、バーナ角度は鋼板面に対して  $70^\circ$  に固定した。バーナ燃焼条件は、燃焼量を 35kW に固定し、メタン専焼、メタン-アンモニア 10%混焼、メタン-アンモニア 30%混焼の 3 条件とした。

本試験は、バーナを所定の燃焼条件にて燃焼させた後、鋼板を走行させ、火炎中を通過させることにより鋼板を加熱した。加熱性能は、鋼板の裏面に取り付けられた熱電対で鋼板温度を測定し、その最高到達温度および温度分布にて評価した。

#### b. 脱脂バーナの配置検討

図 24 に脱脂バーナの配置を示す。本検討では、広い領域を均一に加熱することを目的として、脱脂バーナを複数並べ、加熱性能に対するバーナ間隔とバーナ列間距離の影響を検討し、バーナ配置の最適化を行った。

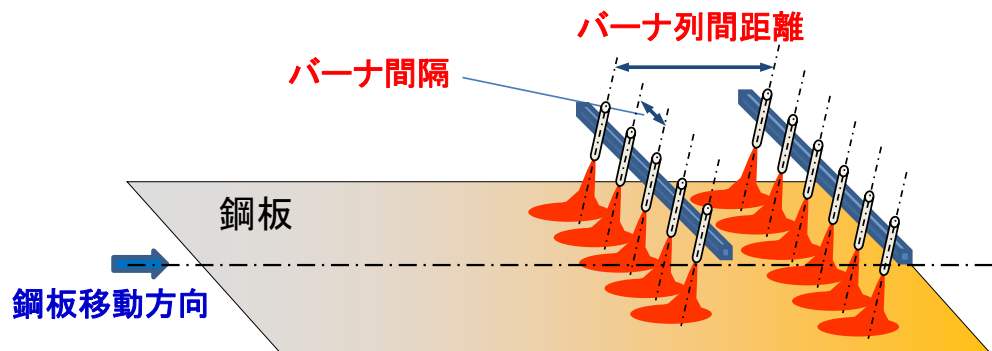


図 24 バーナ配置

### 4) 試験結果および考察

#### a. 脱脂バーナの検討（鋼板加熱性能に対するアンモニア混焼の影響）

図 25 に、脱脂バーナでアンモニアを混焼した場合の燃焼状態を示す。メタン専焼では、安定したシャープで高速の火炎が形成されていることが分かる。アンモニアを 10%混焼させた場合、火炎上流部にオレンジの発光が見られるほかは、火炎形状に大きな変化は見られず、火炎長も同程度である。なお、オレンジ色の発光は、アンモニア燃焼において生成される  $\text{NH}_2$  ラジカルによるものである。 $\text{NH}_2$  ラジカルの発光は、火炎長の半分のところで見えなくなっていることから、火炎中でアンモニアの燃焼は完結しているものと考えられる。燃焼状態の観察から、アンモニアを 10%混焼させても燃焼状態にはほとんど影響がないものと考えられる。アンモニアの混焼率を 30%まで上げた場合、 $\text{NH}_2$  ラジカルの発光がより火炎後流まで見られることから、アンモニアの燃焼領域が伸びているものと考えられる。火炎の長さについては、混焼率を 30%まで上げて変わらないことから、燃焼状態には影響していないものと考えられる。

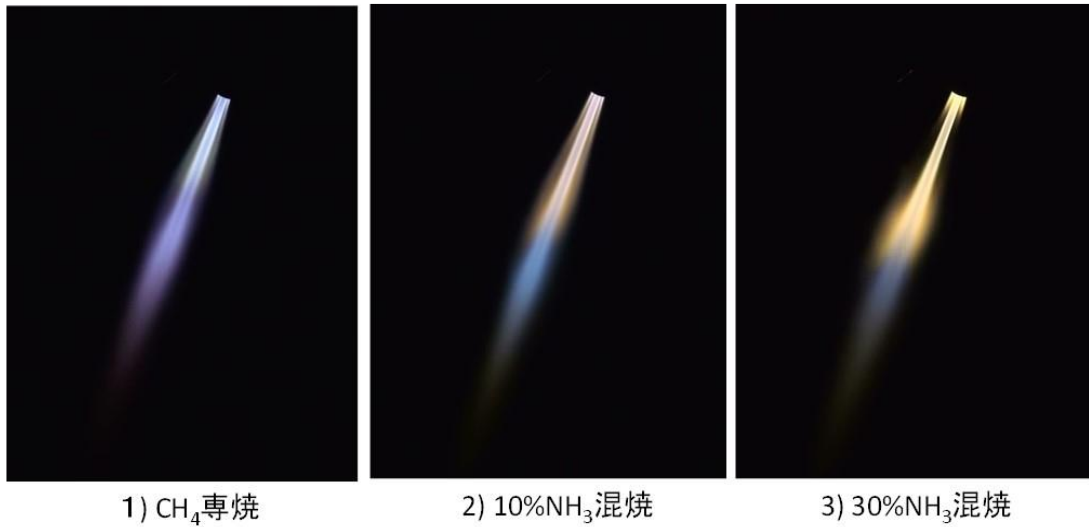


図 25 脱脂バーナの燃焼状態

図 26 に、酸素比 1.1 の燃焼条件で鋼板を加熱した場合の鋼板速度と鋼板温度の関係を示す。なお、鋼板温度は、各鋼板速度において到達した最高温度である。鋼板速度を速くすると鋼板の単位面積当たりの伝熱量が小さくなるため、鋼板温度は低下する傾向にある。本結果から、アンモニア混焼率 10% の条件では、メタン専焼より若干高くなる傾向にある。これは、発熱量当たりの体積が大きいアンモニアを混焼させることにより、ノズルからの燃料噴出速度が速くなったことが要因の一つとして考えられる。アンモニア混焼率 30% に増やした場合の鋼板温度は、メタン専焼とほぼ同じになっている。これは、混焼率を増やすことにより燃料の噴出速度は速くなるものの、燃焼性が低下するため、同等の加熱性能になったものと考えられる。

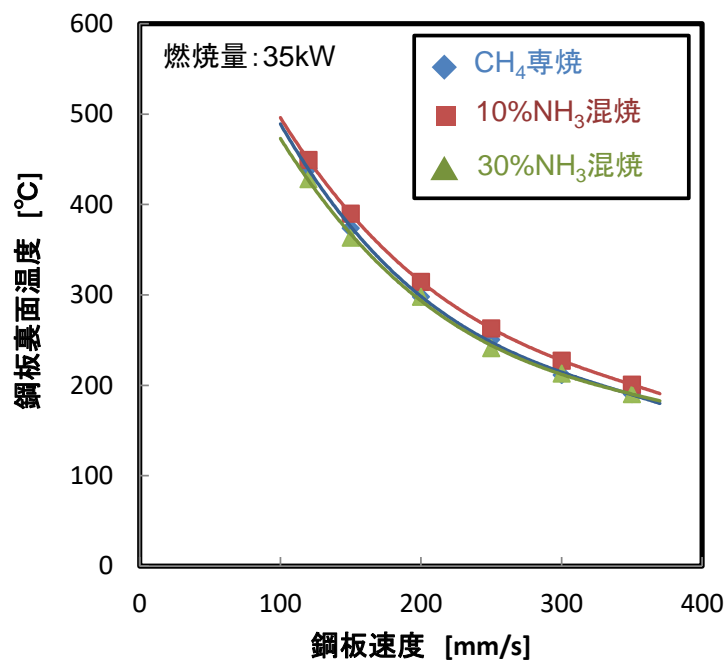


図 26 鋼板速度と鋼板温度の関係

図 27 に、鋼板を 150mm/s で走行させた場合の鋼板温度分布を示す。横軸は、鋼板中心軸からの距離である。アンモニア混焼率が 10% の条件では、メタン専焼に比較して、鋼板温度が全体的に高くなる傾向にあり、伝熱性能が若干向上することが分かる。アンモニア混焼率を 30% まで上げた場合、メタン専焼とほぼ同じ温度分布となることが分かる。

以上の結果から、脱脂バーナにおいて、アンモニアを混焼した場合、混焼率 30% まではメタン専焼と同等の加熱性能が得られたことから、伝熱の面においては、アンモニアを混焼しても問題ないことが見極められた。

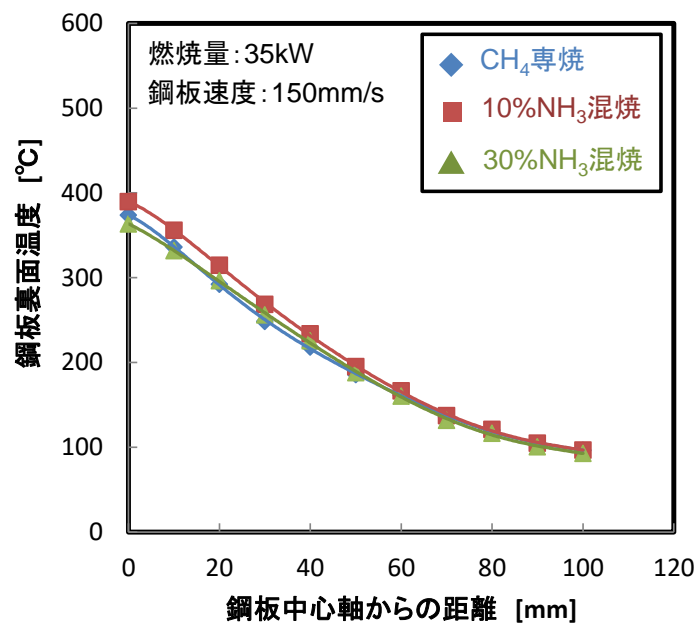


図 27 鋼板速度 150mm/s における鋼板温度分布

b. 脱脂バーナの配置検討

図 28 にバーナ配置を最適化した条件（バーナ間隔 60mm、バーナ列間距離 200mm）での鋼板温度分布を示す。本結果から、アンモニア混焼の条件においても温度分布が変わることなく、ほぼ均一加熱ができることを確認した。

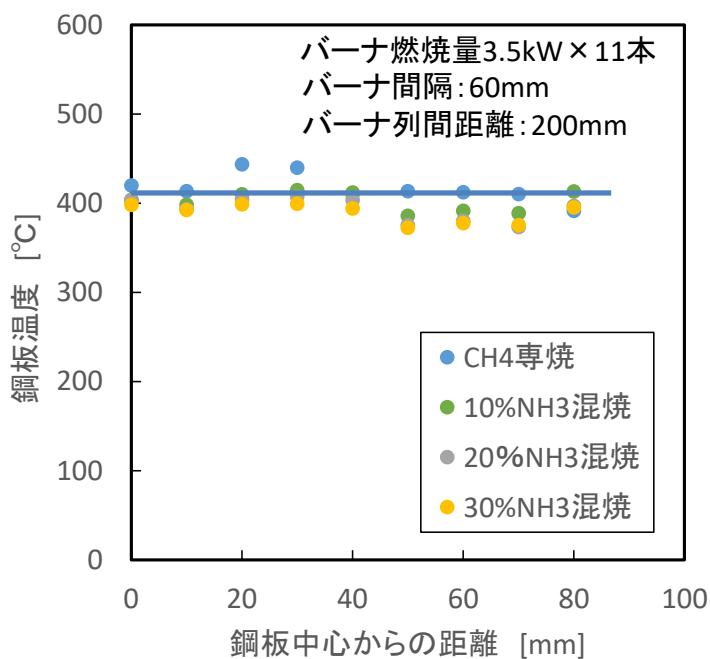


図 28 脱脂バーナの適正配置における鋼板温度に対するアンモニア混焼の影響

脱脂バーナの技術開発において、バーナ燃焼条件およびバーナ配置を変えて、鋼板加熱性能および脱脂性能の評価を実施し、表 4 に複式脱脂バーナにおいて最適化した条件を示す。

表 4 脱脂バーナ配置の最適条件

バーナ配置	バーナ間隔	60mm
	バーナ列間距離	200mm
	バーナ高さ	200mm

### 3-3-3. 実証設備および導入効果の検討

#### 1) 実証設備の検討

日新製鋼株式会社堺製造所の溶融亜鉛めっき鋼板製造ラインに設置する実証試験では、脱脂プロセスからめっきプロセスまで一気通貫での実証試験を行うのに必要最小限の設備を導入し、プロセス検証、製品品質に及ぼす影響等の検証を行った。

図 29 に溶融亜鉛めっき製造ラインの概略を示す。衝突噴流式脱脂炉は、NOF（無酸化炉）の入口に設置し、連続的に流れている鋼板を加熱・脱脂して NOF に入れるようにする。

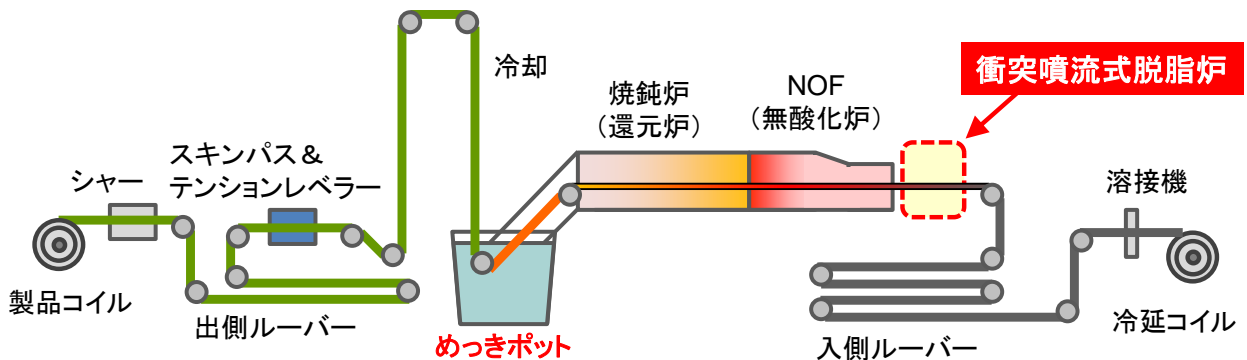


図 29 溶融亜鉛めっき製造ライン

亜鉛めっき鋼板製造プロセスでは、鋼板の幅方向に一部だけを局所的に加熱すると、鋼板のテンションが不均一になるため、鋼板の蛇行、ちぎれなどが生じるため、鋼板全体を加熱する必要がある。そこで、実証設備では、実際の製造ラインで流れている鋼板の中で、最小板厚 0.2mm、最小幅 900mm の鋼板を加熱脱脂できる設備として仕様を検討した。

表 5 に実証設備の仕様を示す。また、図 30 に衝突噴流式脱脂実証設備の概略を示す。鋼板速度は、実機製造ラインでめっき性を評価できる最低速度から 50m/min とした。鋼板の加熱温度、バーナ配置は、脱脂バーナの最適条件から決めた。実証設備では、脱脂バーナ 31 本（前列 16 本+後列 15 本）を 2 列に配置し、中央の 5 本のみをアンモニア混焼できるようにした。脱脂炉では、脱脂炉側面に 4 本の点火バーナを設置し、脱脂バーナに点火する形式とした。

表 5 実証設備の仕様

		実証設備
鋼板条件	鋼板幅	900mm
	鋼板厚さ	t0.2mm      t0.4mm
	鋼板速度	50m/min
	加熱温度	400℃      200℃
脱脂バーナ	燃焼量	34.8kW/本
	バーナ本数	31本 (前列16本+後列15本)
脱脂炉	燃焼量	1078kW
	都市ガス流量	91.0Nm <sup>3</sup> /h (混焼率30%)
	アンモニア流量	13.3Nm <sup>3</sup> /h
	酸素流量	241Nm <sup>3</sup> /h

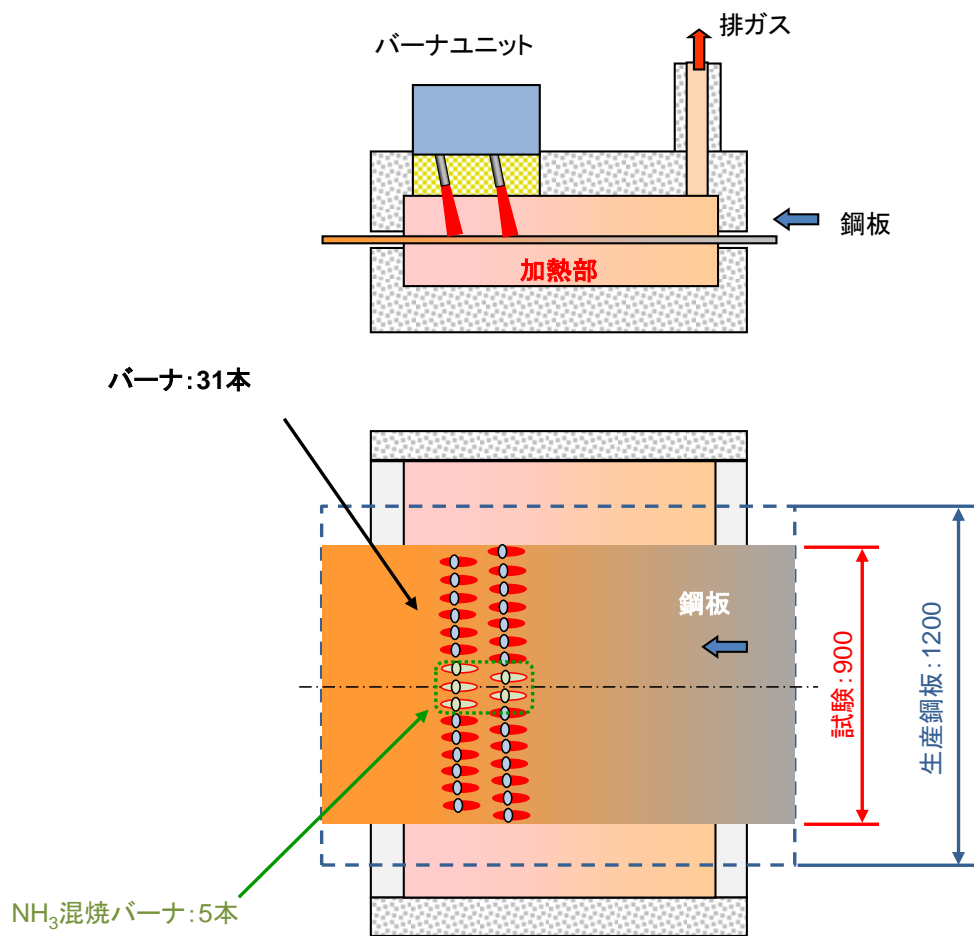


図 30 衝突噴流式脱脂炉実証設備の概略

1) 実証設備

図 31 に日新製鋼株式会社堺製造所に設置した脱脂炉の外観を示す。また、図 32 に熔融亜鉛めっき鋼板製造ラインのNOF（無酸化炉）の前に設置した状況を示す。

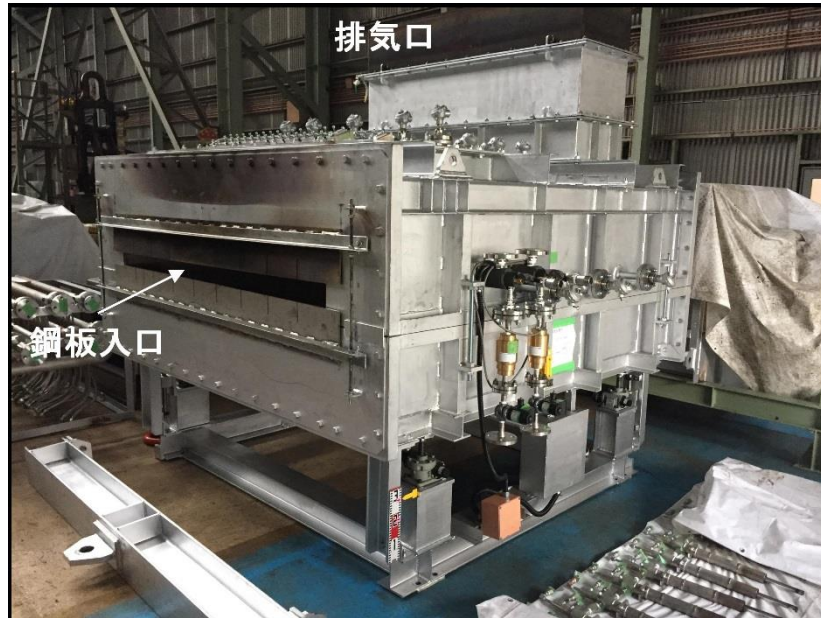


図 31 脱脂炉



図 32 脱脂炉設置状況



### 3) 脱脂バーナの 대기燃焼試験

脱脂バーナを脱脂炉に設置する前に 대기開放にて点火・燃焼確認試験を実施した。図 33 に 대기燃焼試験設備の外観を示す。実証試験で使用する脱脂バーナ 31 本および点火バーナ 4 本を、実証設備と同じレイアウトに配置して 대기燃焼試験を実施した。点火バーナにより脱脂バーナに安定して点火できることを確認した。

図 34 に、脱脂バーナを定格燃焼した場合の燃焼状態を示す。燃焼試験の結果、火炎長が揃った均一な火炎を得られることを確認した。

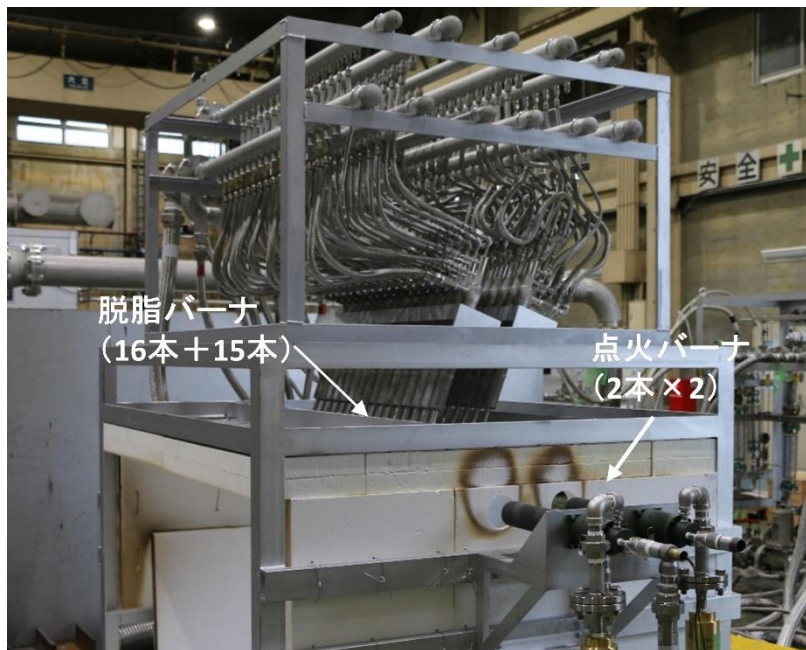


図 33 脱脂バーナ 대기燃焼試験設備

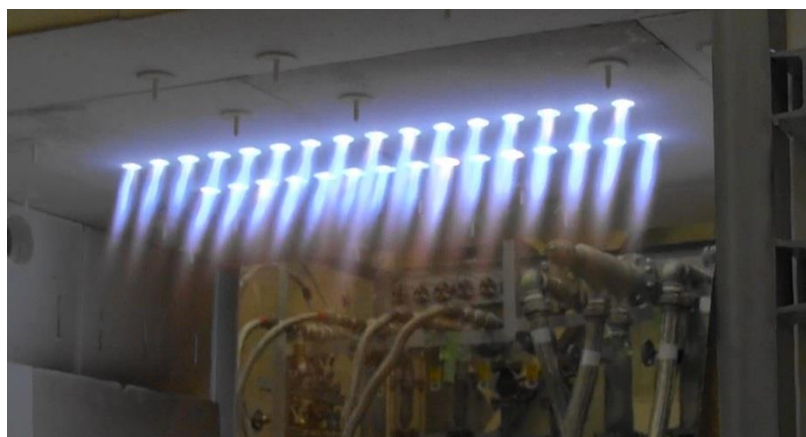


図 34 脱脂バーナ 대기燃焼状態

#### 4) 実証試験

実証試験では、バーナ燃焼負荷率を 60～80%の範囲で変えて鋼板加熱性能を評価した。

図 35 に、実証炉での鋼板の加熱状況を示す。鋼板表面に脱脂バーナ火炎が均一に衝突している状況が確認できた。鋼板表面に付着している油脂は、バーナ火炎により蒸発し、炉内で燃焼している状況が観察された。

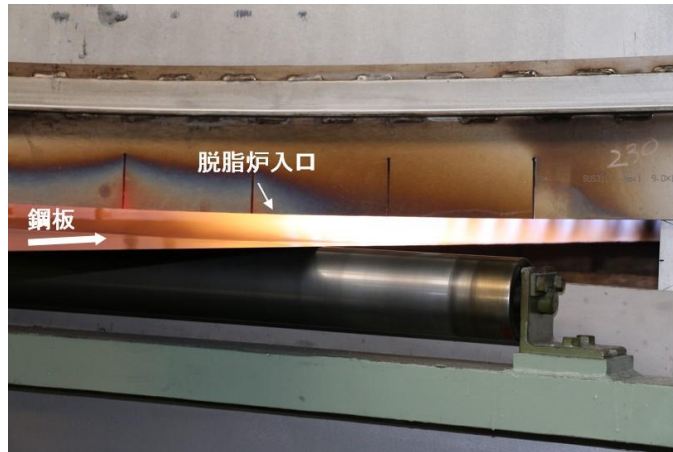


図 35 鋼板の加熱状況

図 36 に鋼板伝熱量および伝熱効率と脱脂バーナ燃焼負荷率の関係を示す。伝熱効率は、鋼板伝熱量をバーナ燃焼量で除した値である。実証炉では、バーナ燃焼負荷率を上げることにより、鋼板への伝熱量はリニアに増加しており、伝熱効率は一定であることが分かる。このことは、バーナ燃焼負荷率による鋼板温度の調節性に優れていることを示している。

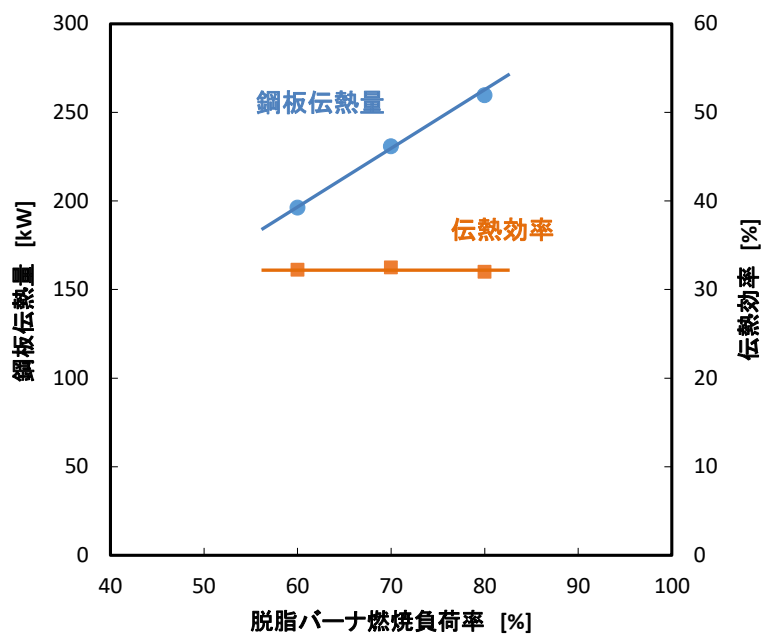


図 36 鋼板伝熱量および伝熱効率と脱脂バーナ燃焼負荷率の関係

実証試験では、鋼板厚さ 0.4mm、0.6mm の鋼板を用いたため、厚さ 0.2mm の鋼板を加熱した場合の温度を鋼板伝熱量から算出した。図 37 に、鋼板厚さ 0.2mm、鋼板速度 50m/min の条件に換算した場合の鋼板温度を示す。本図から、脱脂バーナの燃焼負荷率を 70%以上にすることにより、実証機の想定仕様である鋼板温度 400℃まで加熱できることが確認できた。

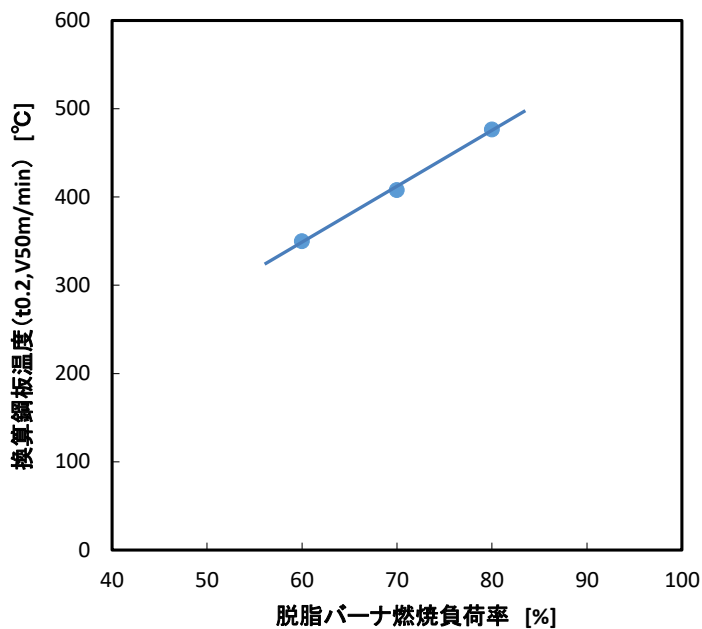


図 37 換算鋼板温度と脱脂バーナ燃焼負荷率の関係  
(鋼板厚さ t0.2mm, 鋼板速度 50m/min の条件に換算)

### 3-4. まとめ

大陽日酸では、10kW および 100kW モデル試験炉を用いて、アンモニア燃焼における火炎輻射強化および低 NOx 化の検討を行った。また、工業炉分野に対してアンモニア燃焼の早期適用を目指し、亜鉛メッキ鋼板製造前処理プロセスに衝突噴流式アンモニア混焼脱脂バーナを適用した場合の鋼板加熱に対する実験と検討を行った。以下に得られた結果を示す。

#### (1) 火炎輻射強化手法の開発

- 10kW および 100kW モデル燃焼炉において、都市ガス-アンモニア混焼およびアンモニア専焼において、酸素富化および酸化剤予熱の二つの方法で火炎輻射強化を図ることができることを確認し、輻射強化手法として有効であることを見極めた。
- 工業炉において 500°C レベルの比較的高温まで空気を予熱した都市ガス-空気燃焼に対しても、都市ガス-アンモニア混焼で 24.0%、アンモニア混焼で 27.2%まで酸素富化することにより、都市ガス-空気燃焼と同等の放射熱流束が得られることができ、酸素富化が有効であることを確認した。
- 空気予熱していない都市ガス-空気燃焼に対して、同等の放射熱流束を得るのに、都市ガス-アンモニア混焼では 82.6°C、アンモニア専焼では 256.2°Cまで酸化剤を予熱する必要があることが分かった。輻射強化手法として酸化剤予熱が有効であることを確認した。
- 100kW モデル試験炉において二段燃焼を適用することにより、都市ガス-アンモニア 30%混焼、酸化剤予熱温度 500°Cの条件にて、目標加熱効率 55%を達成した。

#### (2) 低 NOx 化手法の開発

- 都市ガス-アンモニア 30%混焼、酸化剤酸素濃度 30%の条件において、二段燃焼法の条件パラメータであるメインバーナ-2次酸化剤ノズル距離、2次酸化剤比率、2次酸化剤流速の影響を調べた。その結果、メインバーナ-2次酸化剤ノズルの距離を大きくするほど NOx の低減効果が大きいことを確認した。2次酸化剤比率は、50%で NOx 濃度は最も低くなることが分かった。
- 都市ガス-アンモニア 30%混焼およびアンモニア専焼において、酸化剤を予熱することにより NOx 濃度は高くなる傾向にあることが分かった。
- 排ガス中残存酸素濃度を下げることにより、酸化剤温度を 500°C程度まで予熱した条件でも金属加熱炉の NOx 環境基準 150ppm をクリアできることを確認した。

#### (3) 衝突噴流式アンモニア混焼脱脂バーナの技術開発

- 脱脂バーナを用いて、鋼板を均一に効率よく加熱できるバーナおよびその配置を検討し、脱脂バーナを千鳥に 2列配置し、バーナ間隔を 60mm にすることにより鋼板を均一に加熱できることを確認した。さらに、バーナ列間距離を 200mm にすることで最も高い加熱性能が得られることを確認した。
- アンモニア混焼率を変えて鋼板加熱性能への影響を確認し、アンモニア混焼率 30%まではメタン専焼と同等の加熱性能が得られることを確認した。

- ・ 脱脂バーナの実証試験設備の検討を完了し、実機溶融亜鉛めっき鋼板製造ラインにて実証試験を行い、脱脂バーナにより鋼板を所定温度まで加熱できることを確認した。

### 3-5. 今後の課題

大陽日酸では、アンモニア燃焼を工業炉に適用する場合を想定して、現行の環境規制をクリアしながら火炎伝熱強化を達成する技術の開発を担当した。本研究開発により、アンモニア燃焼の伝熱強化については酸素富化および酸化剤予熱により、都市ガスと同等の加熱効率を得る技術を開発した。また、アンモニア燃焼で課題となる NO<sub>x</sub> については、二段燃焼を適用し、最適化することで加熱炉の環境基準をクリアした。

但し、工業炉に適用するためには、従来の炭化水素系燃料に比べて単位発熱量当たりのコストの高さが課題となる。この点については、CO<sub>2</sub> 削減効果に対する何らかのインセンティブと共に、技術的にはアンモニア燃焼による付加価値を見出す必要があると考える。

#### 4. 外部発表実績

##### (1) 論文発表

<査読付き> 1件

- 1) R. Murai et al, The radiative characteristics of NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> non-premixed flame on a 10 kW test furnace, Energy Procedia, vol. 120, August 2017, Page 325-332, ISSN: 18766102

##### (2) 学会、展示会等発表

<招待講演>

記載事項なし

<口頭発表> 国内1件、海外2件

- 1) 有田 航, 村井隆一, 東野秀隆, 中塚記章, 林 潤, 飯野公夫, 武石裕行, 赤松史光, 10kW 試験炉における NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 非予混合火炎のふく射特性に関する研究, 第91期日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集, (2016.3.12), 42-45.
- 2) Ryuichi Murai, Ryohei Omori, Ryuki Kano, Yuji Tada, Hidetaka Higashino, Noriaki Nakatsuka, Jun Hayashi, Fumiteru Akamatsu, Kimio Iino, Yasuyuki Yamamoto, The radiative characteristics of NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> non-premixed flame on a 10kW test furnace INFUB-11<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 2017.4.21
- 3) Ryuichi Murai, Ryohei Omori, Ryuki Kano, Yuji Tada, Hidetaka Higashino, Noriaki Nakatsuka, Jun Hayashi, Fumiteru Akamatsu, Kimio Iino, Yasuyuki Yamamoto, Yoshiyuki Hagiwara NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> non-premixed flame in a 10 kW experimental furnace - characteristics of radiative heat transfer - NH<sub>3</sub> fuel conference 2017, 2017.11.1
- 4) Ryuki Kano, Yuji Tada, Hidetaka Higashino, Ryuichi Murai, Noriaki Nakatsuka, Fumiteru Akamatsu, Yasuyuki Yamamoto, Yoshiyuki Hagiwara and Kimio Iino Influence of Combustion Characteristics of Ammonia in Combustion Furnace on Heating Efficiency, Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, 2018. 6.17
- 5) Yuji Tada, Ryuki Kano, Hidetaka Higashino, Ryuichi Murai, Noriaki Nakatsuka, Fumiteru Akamatsu, Yasuyuki Yamamoto, Yoshiyuki Hagiwara and Kimio Iino Heat transfer Characteristics of an Impinging Flame on ammonia and methane combustion, Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, 2018. 6.17

<ポスター発表> 国内7件

- 1) R. Murai et al, The radiative characteristics of NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> non-premixed flame on a 10 kW test furnace, 11<sup>th</sup> European International Furnaces and Boilers(2017 4/21, ALBUFEIRA Portugal)
- 2) Ryuichi Murai, Ryohei Omori, Ryuki Kano, Yuji Tada, Hidetaka Higashino, Noriaki Nakatsuka, Jun Hayashi, Fumiteru Akamatsu, Kimio Iino, Yasuyuki Yamamoto, Yoshiyuki Hagiwara, NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> non-premixed flame in a 10 kW experimental furnace

- characteristics of radiative heat transfer -

AIChE2017, Nov. 1, 2017

- 2) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2015  
「アンモニア燃焼炉の技術開発」  
日本科学未来館  
平成 27 年 7 月 2 日
- 3) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2016  
「アンモニア燃焼炉の技術開発」  
日本科学未来館  
平成 28 年 7 月 20 日
- 4) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2016  
「衝突噴流式脱脂バーナの開発・アンモニア混焼噴流衝突式脱脂炉の技術開発」  
日本科学未来館  
平成 28 年 7 月 20 日
- 5) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2017  
「アンモニア燃焼炉の技術開発」  
一橋大学一橋講堂  
平成 29 年 7 月 26 日
- 6) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2017  
「衝突噴流式脱脂バーナの開発・アンモニア混焼噴流衝突式脱脂炉の技術開発」  
一橋大学一橋講堂  
平成 29 年 7 月 26 日
- 7) SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム 2018  
「衝突噴流式脱脂バーナの開発・アンモニア混焼噴流衝突式脱脂炉の技術開発」  
浅草橋ヒューリックホール&ヒューリックカンファレンス  
平成 30 年 10 月 19 日

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等>

記載事項なし

(3) プレス発表

1) プレス発表 1

[発表題名]

“工業炉分野で化石燃料の代替燃料、アンモニアの社会実装に一步近づく  
NO<sub>x</sub> の発生量を抑制する「アンモニア燃焼技術」を開発“

[発表年月日]

平成 28 年 10 月 31 日

[発表機関]

日経（企業報道部）

日刊工業新聞（第二産業部）

化学工業日報

重化学工業通信社

電波新聞

産業タイムズ社

産業ガス業界紙（ガスレビュー、ガスメディア、産報出版、新報）

LP ガス関連業界紙（石油化学新聞社、石油産業新聞社、産業報道出版、石油ガス・ジャーナル）

フジサンケイビジネスアイ（日本工業新聞社）

[概要]

大陽日酸株式会社、大阪大学大学院工学研究科教授の赤松史光らの研究グループは、アンモニア燃焼の工業炉分野への適用を目指して、共同研究を実施しており、この度アンモニアを燃料として、NO<sub>x</sub> の発生を環境基準以下まで抑制し、同時に火炎の伝熱強化を達成する燃焼技術の開発に成功した。これにより、産業分野でのエネルギー消費量のおよそ 25%を占める各種工業炉分野に対してアンモニア燃焼を適用させ、CO<sub>2</sub> の排出量を大幅に削減する事を可能にした。

## 2) プレス発表 2

[発表題名]

“工業炉における CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けた、アンモニア燃焼利用技術を開発  
連続垂鉛めつき鋼板製造工程における実証評価に目途 “

[発表年月日]

平成 29 年 6 月 26 日

[発表機関]

日経（企業報道部）

日刊工業新聞（第二産業部）

化学工業日報

重化学工業通信社

電波新聞

産業タイムズ社

産業ガス業界紙（ガスレビュー、ガスメディア、産報出版、新報）

LP ガス関連業界紙（石油化学新聞社、石油産業新聞社、産業報道出版、石油ガス・ジャーナル）

フジサンケイビジネスアイ（日本工業新聞社）

[概要]

大陽日酸株式会社、日新製鋼株式会社、大阪大学大学院工学研究科教授の赤松史光らの研究グルー



プは、連続溶融亜鉛めっき鋼板製造工程における連続焼鈍炉の前処理として、アンモニアの燃焼エネルギーを有効利用できる「アンモニア混焼衝突噴流式脱脂炉」のバーナ開発に成功し、最適加熱条件を確立し、産業分野でのエネルギー消費量のおよそ 25%を占める各種工業炉分野に対してアンモニア燃焼を適用させ、CO<sub>2</sub>の排出量を大幅に削減することが可能な技術の実証評価に目途をつけた。

(4) マスメディア等取材による公表  
記載事項なし

5. 特許出願実績  
記載事項なし