



工業炉向けアンモニア-酸素燃焼技術の開発

Development of oxy-fuel combustion technology for industrial furnace

手操周平* 南亮介* 村上真二*
TEGURI Shuhei MINAMI Ryosuke MURAKAMI Shinji

1. はじめに

国内のCO₂排出量は約10.4億トンであり、そのうち工業炉からの排出量は約1.3億トンで全体の12%を占める。カーボンニュートラル社会の実現に向け、当社はこれまで酸素燃焼による省エネルギー化により工業炉のCO₂排出量削減に貢献してきた。しかしカーボンニュートラル達成には、カーボンフリー燃料の利用が必要である。

この課題に対応するため、当社は2021年度よりNEDO委託事業「工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発」を推進している。本プロジェクトでは、カーボンフリー燃料であるアンモニアを工業炉に適用するため、酸素燃焼技術を組み合わせたアンモニア-酸素燃焼技術を開発し、輻射伝熱による熱伝達が主体となるガラス溶解炉での実証試験を実施する。ガラス溶解炉は、工業炉の中でもより高温で操業され、品質面での要求が厳しいため、本技術開発から得られた知見は、鉄鋼加熱炉やアルミ溶解炉など他の工業炉への展開にもつながる。

本報では、200kW規模のアンモニア-酸素燃焼の燃焼特性評価、およびガラス溶解炉での実証試験により、伝熱強化およびNO_x抑制を実現するアンモニア-酸素バーナを開発したので、紹介する。



図1 ガラス溶解炉内のバーナ燃焼状態（重油-空気燃焼、交番燃焼）

2. 技術紹介

2.1 アンモニア燃焼技術

カーボンフリー燃料としては、水素やアンモニアが注目されている。表1に化石燃料であるメタンと水素、アンモニアの物理的な特徴の一例を示す²⁾。アンモニアは水素と比較して容易に液化できるため輸送や貯蔵面で優れており、水素キャリアとしての利用に加え、直接燃焼による熱利用も期待されている。しかし、アンモニア燃焼の工業炉への適用にはアンモニアは燃焼速度が遅く燃焼性が低い、輻射強度が弱く伝熱性能が低いことに加え、燃焼時に大量のNO_xが発生し易いという課題がある。

これらの課題解決には、酸素燃焼による火炎強化と、ステーキング燃焼によるNO_x低減が効果的である。酸素燃焼とは、酸化剤中の酸素濃度を高める燃焼方式であり、燃焼速度の遅いアンモニア火炎においても火炎温度や燃焼速度を上昇させ、燃焼の安定化が可能である²⁾。またステーキング燃焼とは、酸素を段階的に供給することで、バーナ近傍の一次燃焼領域で燃料過濃火炎を形成し、ステーキング酸素による二次燃焼領域で燃料希薄火炎を形成し完全燃焼に至る燃焼方式であり、これによりNO_x排出量の低減が可能となる(図2)³⁾。

本技術では、酸素燃焼とステーキング燃焼をアンモニア燃焼に適用し、伝熱効率55%以上、NO_x排出濃度360ppm(酸素濃度15%換算)以下の達成を目標に技術開発を実施した。

表1 アンモニアの熱物性および燃焼特性

燃料種		NH ₃	CH ₄	H ₂
沸点	[°C]	-33	-162	-253
低位発熱量	[MJ/Nm ³]	14.1	35.8	10.8
断熱火炎温度	[°C]	1750	1970	2120
燃焼速度	[m/s]	0.07	0.37	2.91

* 技術開発ユニット 山梨ソリューションセンター 酸素燃焼開発部 開発課

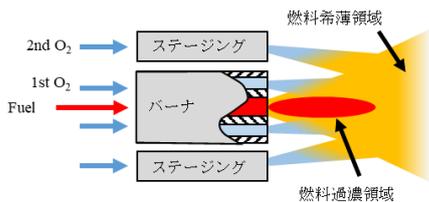


図2 バーナ概要

2.2 試験炉を使った性能評価

2.2.1 試験概要

本バーナを用いて、図3に示す当社の保有の200kW規模の試験炉にて、アンモニアの燃焼特性を評価した(図4)。試験炉は反射炉を模擬しており、炉の天井および底面に設置した複数の熱電対により炉内温度を計測し、排ガスの一部を煙道からサンプリングし排ガス組成を評価した。また炉底部には被加熱物を模擬した水冷銅管を設け、その抜熱量から被加熱物への伝熱評価を行った(図5)。

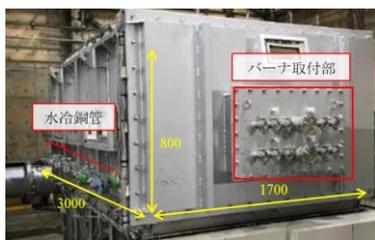


図3 試験炉



図4 試験炉内のアンモニア火炎様子

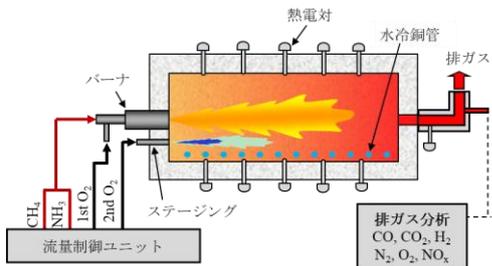
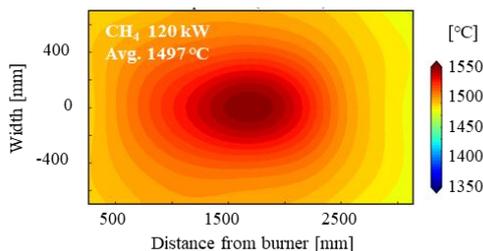


図5 試験設備

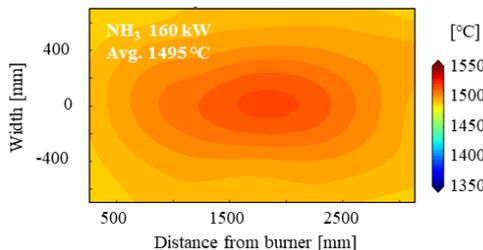
2.2.2 炉内温度

図6にメタン燃焼およびアンモニア燃焼の炉内天井温度分布の結果を示す。これらはいずれもステージング燃焼をしないバーナ本体にのみ酸素を供給し燃焼した結果である。ガラス溶解炉の炉内環境を再

現するため、炉内温度が 1500 °Cとなるように、メタン燃焼では 120 kW, アンモニア燃焼では 160 kW に燃焼量を調整した。また、完全燃焼に至る理論酸素量に対する投入酸素量の比を表す酸素比は 1.05とした。メタン燃焼と比較してアンモニア燃焼では、最高温度は低く、その位置はバーナからより遠い位置に移動している。これは、アンモニアの燃焼速度が小さいため、バーナから遠い位置で燃焼が完結したと考察できる。



(a)



(b)

図6 炉内天井温度分布：(a)メタン (b)アンモニア

2.2.3 NOx 排出量

炉内温度 1500 °Cにおけるメタン燃焼およびアンモニア燃焼の NOx 排出量の結果を図7に示す。なお、アンモニア燃焼のみステージング燃焼の影響を比較した。また、大気汚染防止法で定める排ガス中の酸素濃度による NOx 換算式(1)により、板ガラス製造のガラス溶解炉の排出基準である酸素濃度 15%で換算して表記した。

メタン燃焼と比較してアンモニア燃焼では、NOx 濃度が 10 倍程度に上昇していることが分かる。これにステージング燃焼を組み合わせ、さらに最適化することにより NOx 排出量を大きく抑制でき、目標とする 360 ppm 以下を達成することが確認された。

$$C = (21 - O_n) / (21 - O_s) \times C_s \quad (1)$$

C: 排出基準と比較する窒素酸化物の濃度 [ppm]

O_n: 施設種類ごとに定められた標準酸素濃度 [%]

O_s: 排出ガス中の酸素濃度 [%]

C_s: 排出ガス中の窒素酸化物の濃度 [ppm]

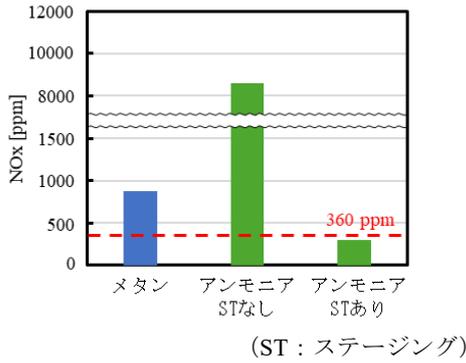


図 7 NOx 排出量

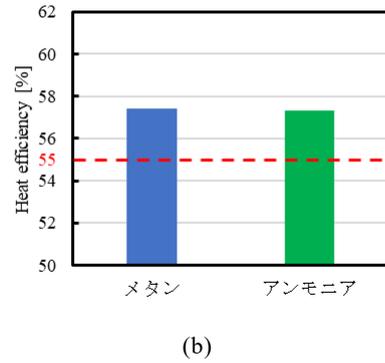
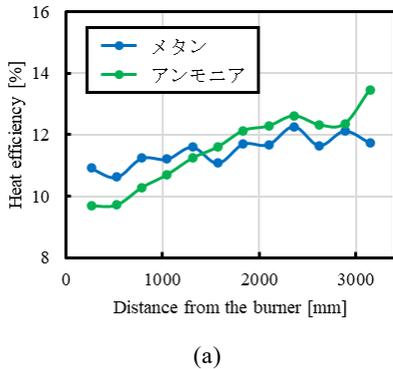


図 8 炉下面伝熱効率 : (a)伝熱量分布, (b)伝熱効率 (全領域)

2.2.4 伝熱効率

図 8 にメタン燃焼およびアンモニア燃焼の炉下面への伝熱量分布と伝熱効率を比較した結果を示す。なお、伝熱効率は投入熱量に対する総括伝熱量の割合を表す。燃焼条件は、メタン、アンモニアともに燃焼量は 240 kW、酸素比は 1.05 であり、炉内温度は約 1200 °C である。伝熱量分布を比較すると、アンモニア燃焼ではバーナ近傍で伝熱量が小さく、炉下流側で伝熱量が大きいことがわかる (図 8(a))。これは、図 6 から解るとおり、アンモニア火炎は温度が低く、火炎からの輻射が小さいため、バーナ近傍では伝熱量が低下したと考察できる。一方、同発熱量を得るためにアンモニアはメタンの約 2.5 倍の流量が必要となる。そのため、燃焼排ガス量が増加し、炉下流側では対流伝熱が発達した結果、伝熱量が上昇したと考察できる。炉下面全領域での伝熱効率を比較すると、メタン燃焼とアンモニア燃焼で同等であり、いずれも目標とする 55% 以上を達成した (図 8(b))。



(a)

2.3 実証試験

当社 200 kW 試験炉の試験結果をもとに、ガラス溶解炉での実証試験を実施した。図 9 にガラス溶解炉の概要を示す。本試験では、既設の重油-酸素バーナ 10 本の下流側に、200 kW 級アンモニア-酸素バーナを 2 基設置し、最大 48 時間の連続試験を実施した。図 10 には試験期間中の煙道排ガス中の NOx 挙動を示す。比較として、同バーナによる都市ガス燃焼の結果も示すが、いずれの燃焼条件において NOx の上昇は確認されなかった。本実証試験は、ガラス溶解炉での世界初の取り組みであり、アンモニア-酸素燃焼の工業炉への適用が期待される。

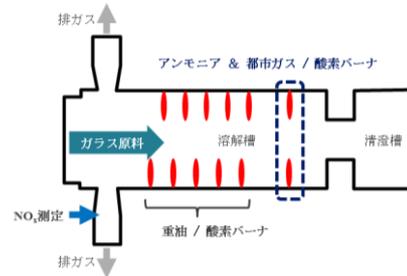


図 9 ガラス溶解炉概要

出展：赤木亮介, 4th Symposium on Ammonia Energy (2025)

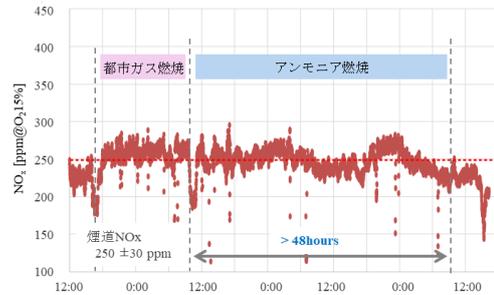


図 10 煙道 NOx 排出挙動

出展：今井英之, ニューガラスフォーラム / GlassTrend 共催セミナー (2024)

3. まとめ

本報ではカーボンニュートラル社会実現に向け、カーボンフリー燃料であるアンモニアを工業炉へ適用するためのアンモニア-酸素燃焼技術について紹介した。アンモニアは輻射伝熱が弱い、燃焼するとNO_xが大量に発生するという懸念があったが、当社の酸素燃焼技術を組み合わせることにより工業炉への適用が示唆された。今後はスケールアップ技術の確立を目指すとともに、様々な工業炉に適用可能なアンモニア-酸素燃焼技術を完成させ、カーボンニュートラル社会の実現に貢献したいと考えている。

4. 謝辞

「工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発」の推進に当たっては、NEDOの支援を受けている。プロジェクト推進に際して、アンモニア-酸素燃焼の基礎特性評価及びNO_x発生メカニズムの解明に関して、国立大学法人東北大学流体科学研究所（小林教授、早川研究室の皆様）、国立研究開発法人産業技術総合研究所に多大な協力を頂いている。技術の実証評価に際してはAGCに、ガラス生産炉を実験の場として提供いただいている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省。2022年度の温室効果ガス排出・吸収量（詳細）。2024/4/12。
- 2) 小林秀昭, 早川晃弘, 日本燃焼学会誌 58: 41-48 (2016)。
- 3) Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K. D., K. A. and Okafor, E. C., Proc. Combust. Inst. 37: 109-133 (2019)。