

石炭火力発電用アンモニアバーナの 研究開発

大倉 莉奈*

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラル達成に向けた取り組みが様々な業界で加速している。昨年の COP28 (第 28 回 国連気候変動枠組条約締約国会議) の決定文書では、2030 年までにエネルギー効率改善率を世界平均で 2 倍にすることが盛り込まれた。更に大きな省エネ・脱炭素を実現するためには、これまでの努力に加えて、イノベーションによる技術革新・社会実装が必要である。こうした情勢を受け、わが国では 2024 年 5 月に「省エネルギー・非化石エネルギー転換技術戦略 2024」が策定された。

当社においては 2023 年 11 月に新研究施設である「熱技術創造センター」を開設し、脱炭素に向けた研究開発の取り組みを加速させており、特に脱炭素燃料のひとつである「アンモニア」を使用した「アンモニア燃焼技術開発」に注力している。アンモニアは、大気圧下における沸点が高く、比較的容易に液化するので、水素と比較して輸送や貯蔵が容易であるという利点がある。一方で一般的な炭化水素燃料に比べて燃焼性が低いことや、燃料に窒素成分が含まれていることから、燃焼時に多くの窒素酸化物が発生してしまうといった課題も多くある。

当社は工業炉用アンモニアバーナの研究開発を進めているが、その燃焼技術を火力発電用アンモニアバーナへ応用展開すべく研究開発に取り組んだ。NEDO「カーボン・リサイクル・次世代火力発電等技術開発 / アンモニア混焼火力発電技術開発・実証事業 / 要素研究 / 火力発電所での CO₂ フリーアンモニア燃料利用拡大に向けた研究開発」は、既設石炭ボイラでの CO₂ フリー燃料アンモニアの初期導入を効率的に行うため、アンモニアの利用側と供給側を一体的に検討し、燃料アンモニアの利用拡大を図ることを目的とした研究開発である。電源開発株式会社、一般財団法人電力中央研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人大阪大学とともに 2021 ~ 2023 年度までの 3 年間で実施した。本稿では、当社が担当したアンモニアバーナの開発について紹介する。

2. 100kW 級アンモニアバーナの開発

当社では、国立大学法人大阪大学 (以下、“大阪大学”と呼ぶ) と共同で実施した工業炉用アンモニアバーナの開発において、アンモニアのみで安定燃焼可能なこと、また NO_x 及び未燃アンモニアの排出量の低減が可能であるとの知見を得ている。これらの知見をもとに、燃焼試験を実施する

* 中外炉工業株式会社 GX プロジェクト燃焼技術開発部 兼 商品開発部 脱炭素技術課 R. Ookura

ことで、100kW 級アンモニアバーナのコンセプトを確立させた。その試験概要及び結果を以下に示す。

2.1 試験設備

本燃焼試験は、大阪大学が保有する 100 kW 級モデル工業炉¹⁾ に中外炉工業製 100 kW 級アンモニアバーナを設置し、実施した。本設備における主系統図を図 1 に仕様を表 1 に示す。燃焼炉の上部、側部、下部には各 5 箇所、計 15 箇所に炉内温度計測用 R 熱電対を設置している。(試験結果に示す炉内温度は、15 点の平均値を示す。)

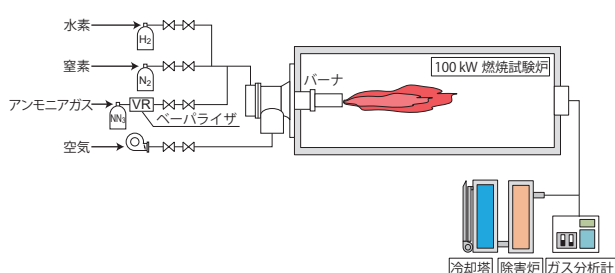


図 1 100 kW 級モデル工業炉 系統概略図

表 1 100 kW 級モデル工業炉 設備仕様

炉内容積	□ 850 mm × 3400 mm (L)
バーナ形式	ハイスピードガスバーナ+TG バーナ (中外炉工業型式: HSGB+TG)
バーナ燃焼量 (最大)	116 kW
アンモニア供給量 (最大)	30 m ³ N/h
炉内温度 (最大)	約 1300 °C

アンモニアは液化ボンベより温水式ベーパライザを通し、ガス化した後バーナへ供給している。窒素ガスは、ガスボンベよりバーナへ供給し、燃焼空気はブロワより供給している。

燃焼試験炉から未燃アンモニアガスを含んだ排ガスを大気へ放出することを防ぐ目的で、外部火炎により強制燃焼させて処理する設備として、大阪大学保有の燃焼式アンモニア除害炉（以下、“除害炉”と呼ぶ）及びその燃焼排ガスを冷却して大気に放出する排気設備を設置している。

2.2 バーナ構造仕様

100 kW 級アンモニアバーナのコンセプトは図 2 に示すように、「アンモニア・空気多段燃焼×巡回構造仕様」とした。100 kW 級アンモニアバーナ

の外観を写真 1 に示す。図 3 は、巡回構造仕様を示す。本図は、バーナにおける燃料ガス / 空気混合部を表し、バーナ保炎器内外にて空気をスワールさせる構造で、燃料ガスはバーナ保炎器 1 次側より吐き出し、吐出方向は空気流入方向に対して直交するため、燃料ガス / 空気の混合性は非常に高い。

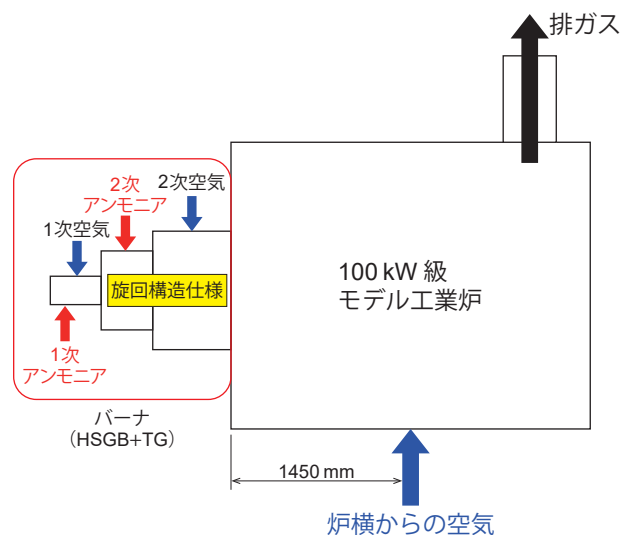


図 2 100kW 級アンモニアバーナコンセプト



写真 1 100 kW 級アンモニアバーナ外観

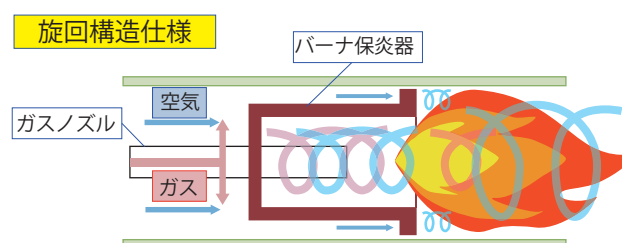


図 3 巡回構造仕様

2.3 燃焼試験結果

本アンモニアバーナにて、空気多段燃焼における有効性の確認及び、操業を想定した昇温時の挙動について確認した。炉横からの空気投入位置は、バーナ前板から 1.45 m である。

排ガス組成は、燃焼排ガスをサンプリングし、ガス分析計にてその組成を分析している。分析するガス成分は、 O_2 / NO / NO_2 / N_2O / NH_3 の 5 種類で、 O_2 は酸素分析計、残りは大阪大学保有の排ガス測定装置にて計測した。結果を以下に示す。

(1) 空気多段燃焼における有効性の確認

炉横からの投入空気率が変化した際の NO_x 及び未燃アンモニアガス濃度を図 4 に示す。本試験では、試験炉出口での N_2O は検出されなかった。図 4 から、炉横から空気を投入し空気拡散燃焼になることで、 NO_x は低下する傾向にあった。また投入空気率 20 % の条件では、 NO_x 値が最も低下した。いずれの条件も未燃アンモニアガスは 0 ppm であり、空気多段燃焼における有効性を確認した。

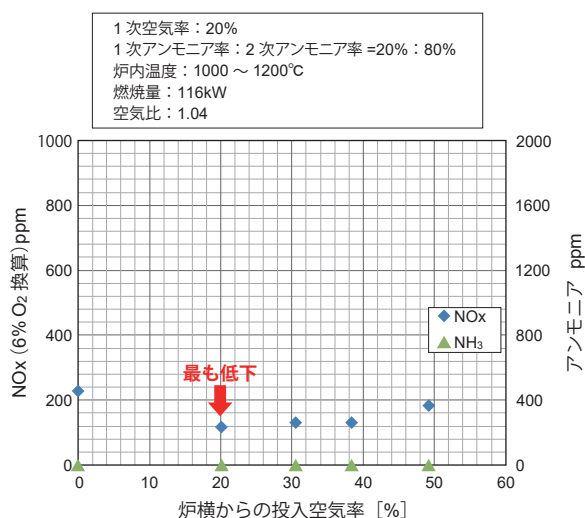


図 4 炉横からの投入空気率変化による NO_x 、アンモニア

(2) 操業を想定した挙動確認

図 5 に、操業を想定した昇温時の挙動、すなわち炉温変化による NO_x 及び N_2O 、未燃アンモニアガス濃度を示す。アンモニア専焼による点火直後には数千 ppm の未燃アンモニアガスが発生したが、点火から昇温までアンモニアにて専焼可能であることが確認できた。また、約 200 ~ 900℃ の温度域において、低炉温域では未燃アンモニアガスが発生したが、その温度域における火力発電の操業

では、現状では化石燃料による昇温を想定とるので問題ないと考える。約 900℃ ~ の温度域が火力発電向けの想定温度とする。図 5 から炉内温度 900℃ を超えた際、炉横から空気を投入し、空気多段燃焼をさせることで、 NO_x 値 = 約 150 ppm (6% O_2 換算) まで低減可能であることを確認した。未燃アンモニアガス及び N_2O は 0 ppm であった。その時の燃焼条件を表 2 に示す。なお、空気比とは、燃料の理論空気量に対する実際に投入した空気量の質量比を意味している。

したがって、火力発電所の操業を想定した炉内温度域 (約 900℃ ~) では、図 2 の 100 kW 級アンモニアバーナ及び表 2 の燃焼条件において、アンモニアにおける燃焼安定性が確認でき、排ガス特性としても、本 NEDO 研究目標値である NO_x 値 = 150 ppm (6% O_2 換算) を達成できた。

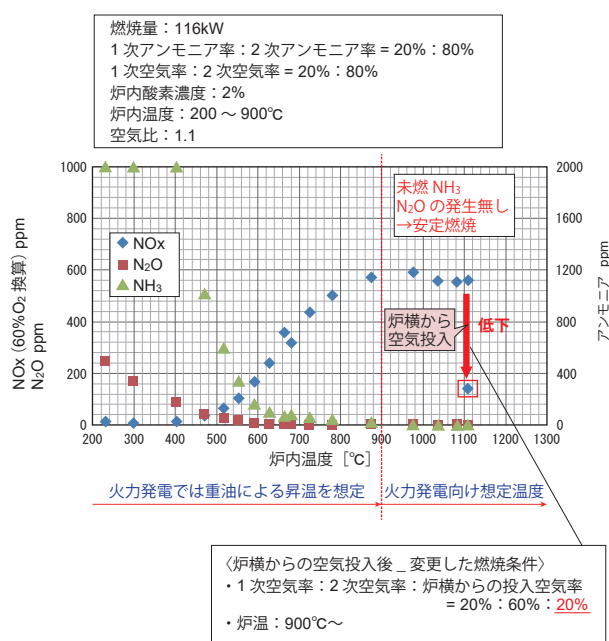


図 5 操業を想定した昇温時の挙動確認 _ 炉内温度変化による NO_x 、 N_2O 、アンモニア

表 2 火力発電向け想定温度域での最適燃焼条件

項目	値
燃焼量	116kW
1 次アンモニア率：2 次アンモニア率	20 % : 80 %
1 次空気率：2 次空気率：炉横からの投入空気率	20% : 60% : 20%
炉内酸素濃度	2 %
炉内温度	約 900℃ ~
空気比	約 1.10

3. 760 kW 級アンモニアバーナの開発

本項では、2 項で紹介した 100 kW 級アンモニアバーナ燃焼試験で得られた燃焼特性の知見と設計コンセプトを基に、760 kW 級にスケールアップを行った。そのバーナにて燃焼試験を実施し 760 kW 級アンモニアバーナのバーナ構造を確立させた。その試験概要及び結果を以下に示す。

3.1 試験設備

本燃焼試験は、一般財団法人電力中央研究所（以下“電力中央研究所”と呼ぶ）が保有する 760 kW シングルバーナ炉²⁾ で実施した。シングルバーナ炉の系統概略図²⁾ を図 6 に示す。シングルバーナ炉に関する寸法は、長さ 8.0 m、内径 0.85 m である。火炉内の設定圧力は -0.4 kPaG である。また、低 NO_x 燃焼を行うために、バーナから 3.0 m 離れた位置に二段燃焼用空気注入ポートが設置されており、二段燃焼用空気率（全注入空気量に対する二段燃焼用空気量の比率）を 30 % に設定している²⁾。

火炉から排出される燃焼排ガスは、水冷式ガスクーラ、空気予熱器、脱硝装置、温度調節器を経由した後、バグフィルタで除塵される。除塵された燃焼排ガスは IDF で吸引され、苛性ソーダ吸

収液によるアルカリ洗浄装置で脱硫された後、煙突から排出される²⁾。また、アンモニア供給設備の外観写真を写真 2 に示す。最大アンモニア供給量は 150 kg/h であり、シングルバーナ炉での定格負荷にてアンモニアにて専焼可能な供給量となっている。アンモニアは、容器置場内に置かれた 1000 kg 液化アンモニア容器から取り出され、減圧された後、温水式気化器により気化される。気化された後、バーナへ供給している。



写真 2 アンモニア供給設備の外観（電力中央研究所保有）

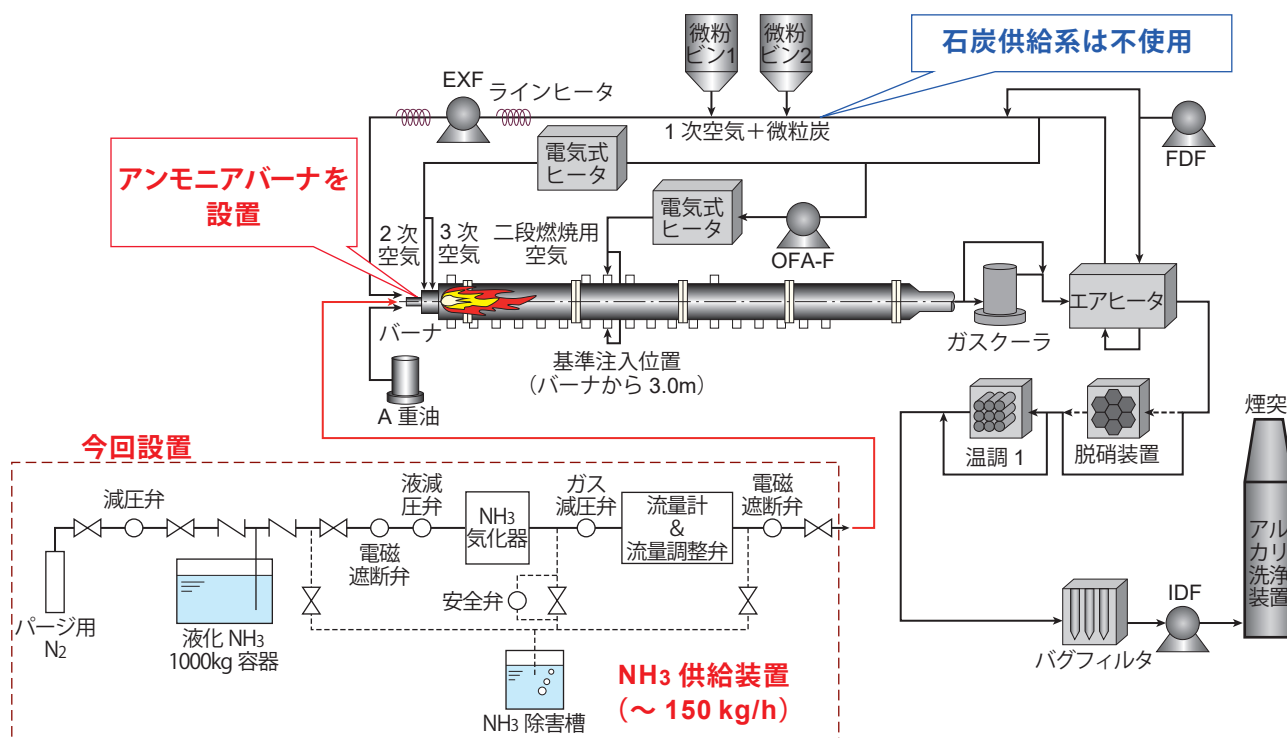


図 6 シングルバーナ炉（電力中央研究所保有）系統概略図

3.2 バーナ構造仕様

3タイプ(タイプA, タイプB, タイプC)のバーナ構造を図7に示す。図8に旋回構造仕様と緩慢構造仕様を示す。本図は、バーナにおける燃料ガス/空気混合部を示したもので、旋回構造仕様は、バーナ保炎器内外にて空気をスワールさせる構造で、燃料ガスはバーナ保炎器1次側より吐き出し、吐出方向は空気流入方向に対して直交なため、燃料ガス/空気の混合性は非常に高い。緩慢構造仕様は、バーナ保炎器の外側より空気を供給し、燃料ガスはバーナ保炎器2次側より吐き出し、吐出方向は空気流入方向に対して平行なため、燃料ガス/空気の混合性は低い。

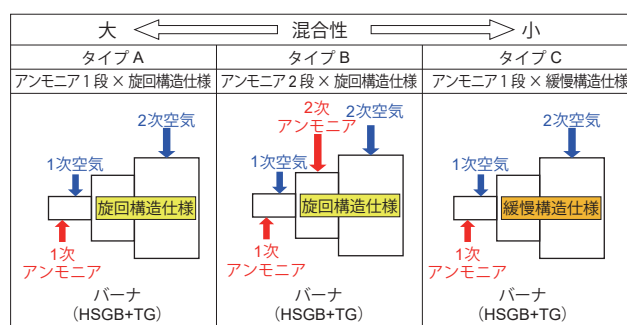


図7 760kW級アンモニアバーナ
(タイプA, タイプB, タイプC)

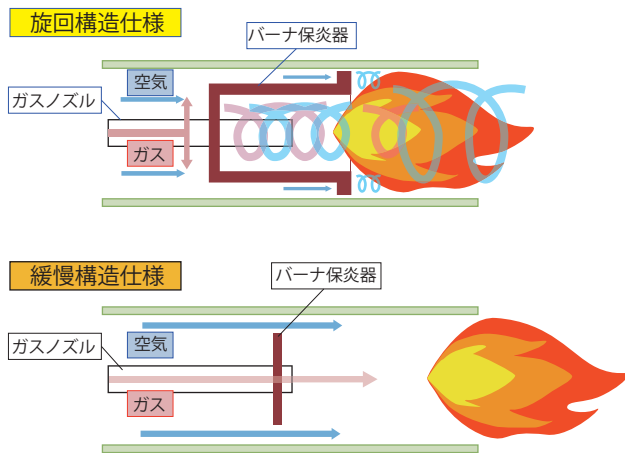


図8 旋回構造仕様と緩慢構造仕様

3.3 燃焼試験結果

図7の3タイプ(タイプA, タイプB, タイプC)のバーナ構造変化による排ガス性能確認試験を実施し、最適構造を見極めた。排ガス組成は、燃焼排ガスをサンプリングし、ガス分析計にてその組成を分析している。分析するガス成分として、 O_2 / CO_2 / CO / NO_x の4種類は、電力中央研究所保有の連続分析計にて計測し、 O_2 / NH_3 / H_2 / H_2O /

N_2 / NO / N_2O の7成分に関しては電力中央研究所保有のMicro GC及びFTIRを用いた連続分析系にて同時計測した。結果を以下に示す。

タイプA, タイプB, タイプCの各酸素濃度(1~4%)におけるバーナ空気比変化による NO_x , 未燃アンモニアガス濃度を図9, 図10, 図11に示す。各タイプにおける燃焼条件を表3に示す。本験では、試験炉出口での N_2O は検出されなかった。なお、バーナ空気比は以下の式(1)にて定義する。

バーナ空気比 [—]

$$= \frac{1 \text{ 次空気量} + 2 \text{ 次空気量}}{\text{アンモニア投入量に対する理論空気量}} \quad \text{式(1)}$$

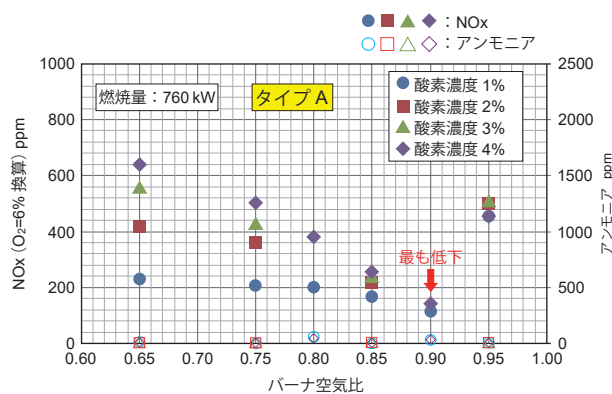


図9 バーナ空気比変化による NO_x , アンモニア (タイプA)

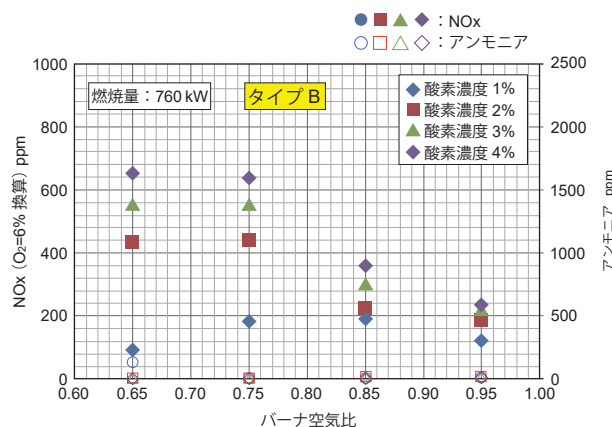


図10 バーナ空気比変化による NO_x , アンモニア (タイプB)

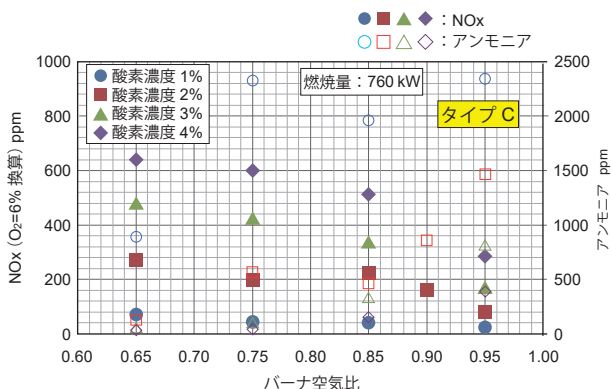


図11 バーナ空気比変化による NO_x , アンモニア (タイプC)

図 9 から、タイプ A での試験においては、「酸素濃度 1 %」及び火力発電の操業時の条件である「酸素濃度 4 %」どちらの条件においても、微還元燃焼域であるバーナ空気比 0.90 程度で、NO_x 値 (6% O₂ 換算) = 約 140 ppm で極小値となり、本研究目標値である NO_x 値 = 150 ppm (6% O₂ 換算) を達成できた。タイプ A のバーナは混合性の高い構造であるので、アンモニアガスと空気の混合が促進され、燃焼性が向上する。微還元燃焼域 (バーナ空気比 0.90 程度) での反応完結後の滞留時間が長く、脱硝効果のある中間生成物が発生し³⁾、その発生した中間生成物と二段燃焼空気が反応することで、NO_x 値が低下したと推察する。

図 10 から、タイプ B での試験においては、バーナ空気比を上げるにつれて、NO_x 値は低下する傾向であるが、火力発電の操業時の条件である「酸素濃度 4 %」での NO_x 値は高く、NO_x 値 (6% O₂ 換算) = 約 240 ppm であった。これは、タイプ B のバーナはタイプ A のバーナより混合性が悪い構造であるため、アンモニアガスと空気の混合性が悪くなり、微還元燃焼域での中間生成物の発生量が少なかったことから、NO_x 値は高かったと推察する。

図 11 から、酸素濃度が低い条件では、どの空気比においても、未燃アンモニアが非常に多く検出された。タイプ C のバーナは緩慢構造仕様であるので、アンモニアと空気の混合性が非常に悪い。よって、アンモニアが燃え切れなかったと推察する。いずれの酸素濃度の時 (1 ~ 4 %) も、NO_x 値もしくは未燃アンモニアが高く検出された。

したがって、混合性の高い構造であるタイプ A のバーナが、最適構造であることを見極めた。

4. まとめ

100 kW 級アンモニアバーナから 760 kW 級アンモニアバーナへのスケールアップ手法の取得及び石炭火力発電用 760 kW 級アンモニアバーナの最適構造を見極めた。

今後、アンモニアバーナの研究開発に携わるにあたり、これらの知見を最大限活かし、脱炭素社会に貢献していきたい。

— 謝辞 —

この成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務 (JPNP16002) の結果から得られたものある。ここに記して謝意を表する。

— 参考文献 —

- 1) 国立大学法人大阪大学, アンモニア燃焼の基礎特性解明と基盤技術開発, SIP 成果報告書, 2014-2019
- 2) 一般財団法人 電力中央研究所, エネルギーキャリア / アンモニア直接燃焼 / 既設火力発電所におけるアンモニア利用に関する検討, SIP 終了報告書, 2015-2019
- 3) Kikuchi, Kenta and Ryuichi Murai and Tsukasa Hori and Fumiteru Akamatsu (2022) "Fundamental Study on Ammonia Low-NO_x Combustion Using Two-Stage Combustion by Parallel Air Jets," MDPI, pp. 1-11.

表 3 燃焼条件

項目	値
燃焼量	760 kW
1 次アンモニア率 : 2 次アンモニア率	タイプ A・タイプ C → 100% : 0% タイプ B → 15% : 85%
1 次空気率 : 2 次空気率	15 % : 85 %
炉内酸素濃度	1 ~ 4 %
バーナ空気比	0.65 ~ 0.95
二段燃焼用空気率	30 %