

# アスファルトプラントにおける二酸化炭素削減と日工におけるアンモニアバーナ開発(2)

田中 翔太・宗像 元・今田 雄司  
Tanaka Shota, Munakata Hajime, Konta Yuji,  
日工株式会社

## 概要

日本は、2020年10月に閣議決定した地球温暖化対策計画に基づき、温室効果ガスの排出量を2030年までに2013年比で46%削減することを目標とし、2050年には実質ゼロを目指すこととなった。このような社会情勢のなか、アスファルトプラントに目を転じると、合材を製造するときに排出する二酸化炭素のうち、骨材の乾燥加熱で消費する化石燃料からの排出量が実に75%を占めている。そのなかでも、水の蒸発で消費されるエネルギーが50%以上を占める。このことから、骨材の含水比管理やプレ乾燥が排出量削減に有効な省エネルギー技術となる。さらに、これらの省エネ技術とCO<sub>2</sub>フリー燃料へ転換することを組み合わせれば、大幅なCO<sub>2</sub>削減を実現することが可能になる。日工では、このCO<sub>2</sub>フリーの各種燃料を使用できるバーナの開発に取り組んでいる。その中でもアンモニアは、水素に比べて貯蔵や運搬が容易で、工業地帯や都市部から離れた位置にあるアスファルトプラントにも供給が可能である。加えて、アンモニアは、その工業的製法であるハーバーボッシュ法がすでに確立されており、火力発電所でのCO<sub>2</sub>フリー燃料としての需要が今後見込まれていることから、国内における流通量が増大して入手が容易になって行くことが期待できる。日工は、アスファルトプラントのカーボンニュートラルをはかるため、大阪大学赤松研究室とアンモニアの燃焼に関する共同研究を行い、出力100kWまでのバーナ燃焼試験を実施しその成果を得ている。そして、来年度は、出力500kWのバーナ燃焼試験を行い、国内のアンモニア供給体制と順次歩調を合わせる形で実機スケールの出力5MW以上のバーナ開発と、それに適合するアスファルトプラントの開発を進めて行く計画である。本稿では、2021年4月～2022年12月に行った燃焼試験について報告する。

## 1. はじめに

2018年10月の気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change:以下、IPCC)の1.5℃特別報告書によると、世界全体の平均気温を産業革命以前より+1.5℃の上昇を抑えることで、気候変動への影響のリスクを著しく減少させることができるとしている<sup>1)</sup>。日本は2016年にパリ協定に批准し、2020年10月には地球温暖化対策計画として、温室効果ガスの排出量を2030年までに2013年比で46%削減、2050年には実質ゼロを目指すことを閣議決定した<sup>2)</sup>。このような環境への取り組みを世界規模で推進している中、日工でもCO<sub>2</sub>削減の取り組みを開始した。2021年にはサプライチェーン排出量算定におけるScope1、2、3を調査し、CO<sub>2</sub>排出量を2030年に50%削減、2050年には実質ゼロを実現することを目標として掲げている<sup>3)</sup>。

日本国内の2020年のCO<sub>2</sub>排出量は、10億4,400万t-CO<sub>2</sub>/yで、産業部門の排出量は3億5,300万t-CO<sub>2</sub>/yであり、国内総排出量の30%以上を占める<sup>4)</sup>。これに対して、

2021年度の国内のアスファルトプラント(以下AP)からのCO<sub>2</sub>排出量は、約130万t-CO<sub>2</sub>/yであり<sup>5)</sup>、日工製APによるCO<sub>2</sub>排出量を試算すると約90万t-CO<sub>2</sub>/yであると推定される。2021年に実施した調査結果より、日工におけるScope1、2のCO<sub>2</sub>排出量は5,056 t-CO<sub>2</sub>/yであり、日工製APによるCO<sub>2</sub>排出量は、Scope1～3での大きな割合を占めている。

APで使用されるエネルギーの内訳は、骨材の乾燥加熱による燃料消費が75%、保温や機械駆動、事務所等での電力消費が17%、重機燃料その他が8%となっている<sup>6)</sup>。そして、骨材の乾燥加熱の熱源に、液体燃料であるA重油や灯油、気体燃料である都市ガス13A(メタンを主成分とする天然ガス)やLPG(液化石油ガス:liquefied Petroleum Gas)などの化石燃料が用いられている。これらの化石燃料を、全てカーボンニュートラル燃料に代替することで、APから排出されるCO<sub>2</sub>の75%を削減することができる。

このような背景の下、これまでに日工は、木質タールや廃グリセリンのような高粘度の液体バイオマス燃料を燃焼させる

ことができるバーナや、一般廃棄物由来の炭化燃料<sup>7)</sup>や粉碎したもみ殻<sup>8)</sup>などの固体バイオマス燃料を燃焼させることができるバーナを開発してきた。

さらにイノベーションを起こすべく政府が主導する「グリーン成長戦略」において、燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しない水素やアンモニアを燃料として利用することに注目が集まっている。日工では、これらの燃料に対応した水素バーナとアンモニアバーナの開発に着手している。

加えて、日工では、APで利用可能なアンモニアバーナを早く社会実装するために、アンモニア燃焼技術の研究で最も進んでいると言われている大阪大学の赤松研究室と共同で開発を進めている。本稿では、2021年4月～2022年12月に実施したアンモニアバーナの燃焼試験で得られた成果について報告する。

## 2. アンモニア燃焼試験

### 2.1 アンモニアの特性

アンモニアは、水素に比べて輸送や貯蔵が容易であり、将来的に工業分野で大量利用が可能な燃料として注目されている。また、海外からの輸入も液体アンモニアの形態で運搬するため、そのまま燃料へ利用できれば経済合理性に優れている。

各燃料の熱的性質と燃焼特性を表1に示す。表より、アンモニアは燃焼速度がメタンに比べると1/5程度と遅く、火炎温度もメタンの火炎に比べて低いことから、燃料としては火炎を維持し難い特性がある。

また、アンモニアは窒素を含んでいるため、燃焼するとフューエルNO<sub>x</sub>が生成し易い。APは大気汚染防止法の中で乾燥炉に分類され、NO<sub>x</sub>は、首都圏以外などでは酸素濃度16%換算値で230ppmを規制値として設けられている。しかしながら、APにアンモニアバーナを導入する場合には、慣例上、既存バーナのNO<sub>x</sub>値を上回ることは受け入れ難くなると考えられる。

さらに、アンモニアには毒性があるため、燃焼排ガスに残存する未燃アンモニアの無害化や供給系統からの漏れ検知などの安全対策が求められる。以上のことから、アンモニアバーナの開発には、「保炎の安定化」、「低NO<sub>x</sub>化」、「未燃アンモニアの無害化」などに関する新たな技術が必要となる。

表1 各燃料の熱的性質と燃焼特性<sup>9)</sup>

| 燃料                | アンモニア<br>NH <sub>3</sub> | プロパン<br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | メタン<br>CH <sub>4</sub> | 水素<br>H <sub>2</sub> |
|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|
| 大気圧における沸点(°C)     | -33.3                    | -42.1                                 | -161.6                 | -252.9               |
| 20°Cにおける液化圧力(atm) | 8.5                      | 8.5                                   | 常気体                    | 常気体                  |
| 低発熱量(MJ/kg)       | 18.6                     | 46.6                                  | 50.2                   | 120.4                |
| 可燃当量比範囲(-)        | 0.63~1.40                | 0.51~2.51                             | 0.50~1.69              | 0.10~7.17            |
| 最大燃焼速度(m/s)       | 0.07                     | 0.43                                  | 0.37                   | 2.91                 |
| 発火点(°C)           | 651                      | 432                                   | 537                    | 500                  |
| 最高断熱火炎温度(°C)      | 1750                     | 2020                                  | 1970                   | 2120                 |

## 2.2 アンモニアバーナの概要

都市近郊部で運用されているAPは、小型の30t/hから大型の120t/hまでの骨材乾燥能力を有する機種が主流を占めている。そして、これらのAPに適合するバーナの出力は、実に3～12MWの範囲に及び、APの機種ごとに出力が異なるバーナが必要となる。

これらのバーナで使用する燃料は、都市ガスが供給されている都市部を除いて、その大多数がA重油での運用となっている。図1は、日工製オイルバーナの構造を示したものである。図より、燃油は、昇圧ポンプで加圧して高圧噴霧方式のノズルを介して噴霧される。霧化した燃油は、燃焼空気の流れにより保炎器の前面に生じる負圧領域に巻き込まれファイアボールを形成する。このファイアボールが熱源となり、ノズルから噴霧した燃油が次々とガス化して燃焼に至る。同時に、送風機で供給する燃焼空気の静圧を高めることにより、保炎器外部から吐出する燃焼空気の流速を高めて乱流とし、ミックスチャンパー内でガス化した燃油と燃焼空気との混合攪拌を促進させている。このことより、燃焼効率の向上をはかるとともに、燃焼速度を上昇させることにより火炎長さを短くしている。それゆえに、APでは、図2に示すように乾燥キルンの端部に直接バーナを取り付けて燃焼室を不要とし、キルン内部に形成される火炎からの輻射伝熱と熱風からの接触伝熱により骨材の乾燥加熱を行っている。

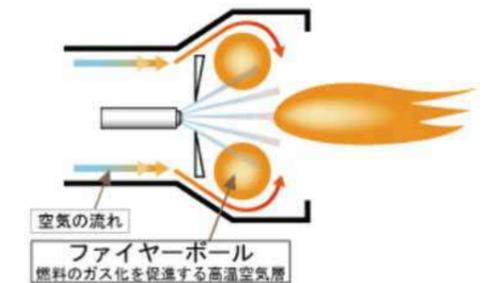


図1 日工製オイルバーナの構造<sup>10)</sup>

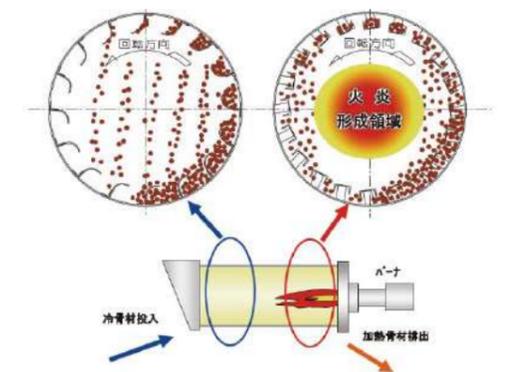


図2 APのバーナ及び乾燥キルン<sup>11)</sup>

本開発で対象とするAP用アンモニアバーナは、上記で述べた従来バーナの特性を継承させる必要がある。ただし、開発の初期段階における不確定要素を抽出し、各種データを収集するために、あえて図3に示すようにオイルバーナの先端に燃焼室を設け、そこにアンモニアを供給して、A重油と混焼させる方式を採用している。そして、前項でも触れたように、アンモニアバーナをAPに適応させるためには、APに未燃アンモニアの除害設備や脱硝装置を増設せずに規制値をクリアすることができるアンモニアの燃焼技術が必要となる。

未燃アンモニアの対策については、アンモニアより燃焼速度が速く、安定した火炎を形成することができる燃料との混焼により、燃焼速度の遅いアンモニアの燃焼効率を高めることを検討した。現在、APで使用されている燃料は、一部の都市ガスを除くと、大部分がA重油等の液体燃料である。そのため、燃料代替への導入のし易さを考慮し、A重油との混焼試験を優先した。

なお、APではリサイクル材から発生する臭気成分を分解する直燃式脱臭装置が設置されることはあるが、燃焼速度が遅いアンモニアを処理するには滞留時間が不足する。そのため、これを除害装置として利用するのは難しいと考えられる。

NO<sub>x</sub>の低減については、一般的にNO<sub>x</sub>対策技術として確立している二段燃焼方式を採用している。この二段燃焼方式は、一段目燃焼で空気比を1以下に下げCOを発生させ、これによりNO<sub>x</sub>を還元してN<sub>2</sub>に戻した上で、二段目の燃焼で不足する空気を供給して未燃分を燃焼させる方式である。空気不足の緩慢燃焼が支配的となることから、局部的に出現する高温部が減少しサーマルNO<sub>x</sub>の生成を抑制する効果も合わせて期待できる。二段目の燃焼で空気を供給する位置は図3に示すとおりである。

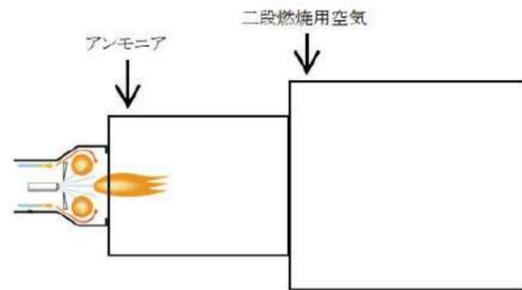


図3 テストバーナの構造

2.3 10kW,100kW燃焼試験設備

大阪大学赤松研究室のアンモニア燃焼試験設備で試験が可能な出力レンジは、10kWと100kWである。何分にも、有害なアンモニアの取り扱いに不慣れであること、未燃アンモニアの処理、フューエルNO<sub>x</sub>析出量の抑制、燃焼速度が遅いことによる保炎不足の改善など、その他の不確定要素

を抽出するために、敢えて小型の10kW規模の試験から実施している。そして、この小規模試験の結果に基づき、10倍にスケールアップした100kW規模の試験を行っている。本開発で用いた燃焼試験設備のフローを図4に示す。10kW、100kWそれぞれの燃焼試験設備には、内面セラミック施工された炉が設置されており、内部の温度分布や排ガス分析が可能である。そして、炉を出た排ガスは、未燃アンモニアが発生した場合に除去する除害炉、排ガスを冷却する冷却塔を経て大気へ放出される。燃焼試験設備の各所には、火炎を確認できるように耐熱ガラス仕様のサイトホールを設置している。図5に出力100kWの燃焼試験の様子を示す。

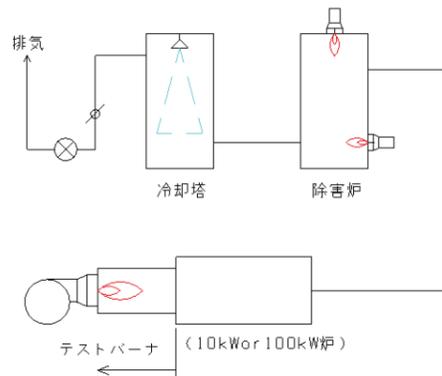


図4 10kW, 100kW燃焼設備フロー



図5 100kW燃焼試験の様子

2.4 燃焼排ガス測定器

本燃焼試験では、アンモニア燃焼排ガスの測定を行った。測定項目及び測定方式は表2に示す。測定はテストバーナ出口及び炉の各所で連続的に行った。アンモニアはNO<sub>x</sub>を還元する作用を持つ為、NO<sub>x</sub>とアンモニアの相互影響を確認できるように、量子カスケードレーザーを用いたNO<sub>x</sub>とアンモニアを同時測定が可能な測定器（堀場製作所製、MEXA1400QL-NX）を使用した<sup>12)</sup>。また、NO<sub>x</sub>の中でもCO<sub>2</sub>の約300倍の温室効果があるといわれているN<sub>2</sub>O（亜酸化窒素）にも着目して試験を行った。なお、以降全てのNO<sub>x</sub>の値は酸素濃度で16%の換算値である。

表2 測定項目及び測定方式一覧

| 測定項目  | 測定方式            |
|---|-----------------|
| O <sub>2</sub>  | ジルコニア酸素濃淡電池式    |
| CO, CO <sub>2</sub>                                     | ダンベル磁気力式        |
| NO <sub>x</sub>   | 非分散形赤外線吸収法      |
| NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> | 減圧形化学発光法        |
|   | 量子カスケードレーザ赤外分光法 |

2.5 燃焼試験パラメータ

本燃焼試験で実施するパラメータ（要因と水準）を表3に示す。表より、バーナ出力（kW）は、10kW、75kW、100kW、125kWの4つの水準を選定している。出力が10kWと100kWの2種類のバーナを用い、75kW、100kW、125kWの3つの水準に関しては、出力が100kWのバーナで燃焼試験を実施している。混焼率（%）は、A重油とアンモニアを含めた総発熱量に対するアンモニアの発熱量と定義し、10～70%の水準の範囲で燃焼試験を実施している。空気比（-）は、炉出口を基準とする空気比Aと空気比Bの2つの水準を選定している。そして、これらの空気比は、1.0<空気比A<空気比Bの関係が成り立つ。二次空気比（-）は、二段燃焼の二段目で供給する空気比を示し、空気比0、空気比a、空気比bの3つの水準を選定している。そして、これらの二次空気比は、0<空気比a<空気比bの関係が成り立つ。当然のことながら、二次空気比0のときは、一段燃焼であることを意味する。また、表への記述はないが、二段燃焼の一段目に相当する一次空気比が存在し、これらの間には、空気比=一次空気比+二次空気比の関係が成り立つ。

表3 燃焼試験パラメーター一覧

| バーナ出力(kW)        | 混焼率(%) | 空気比(-) | 二次空気比(-) |
|------------------|--------|--------|----------|
| 10, 75, 100, 125 | 10~70  | A~B    | 0, a, b  |

3. 燃焼試験結果と考察

3.1 10kW燃焼試験結果と考察

出力が10kWのバーナにおいて、出力と空気比とを固定した条件の下、アンモニア混焼率10%と30%の火炎の状態を図6及び図7に示す。図より、アンモニア混焼率30%の火炎は、10%の火炎と比較して燃え難いアンモニアが増加したことによって、色の薄い火炎が燃焼室全体に広がり、火炎長も伸びることが確認できる。ここで、図の右端に輝度が高く白っぽく見える領域がA重油の火炎であると思われる。これらのことから、液体燃料であるA重油が先行して燃焼し、それに追従して気体であるアンモニアが燃焼しているものと考えら

れ、いかにアンモニアの燃焼速度が遅いかが伺い知れる。一般的に、気体燃料の燃焼速度は、液体燃料よりも速いことが知られている。



図6 アンモニア10%混焼火炎



図7 アンモニア30%混焼火炎

つぎに、アンモニア混焼率が30%と50%における一段燃焼と二段燃焼の違いによる排ガス中のNO<sub>x</sub>の値を図8に示す。図より、一段燃焼では、NO<sub>x</sub>が300ppm以上を示しているが、二段燃焼では200ppm以下に減少している。さらに、両者ともアンモニア混焼率が高い方が低いNO<sub>x</sub>値を示す傾向が伺われる。さらに、アンモニアの混焼率が70%に達しても、安定した保炎効果が得られ、未燃アンモニアを検出できなかった。以上のことから、出力10kWの燃焼試験において、空気比、混焼率、二段燃焼などをパラメータとするNO<sub>x</sub>濃度の傾向と基礎的データを取得することができた。

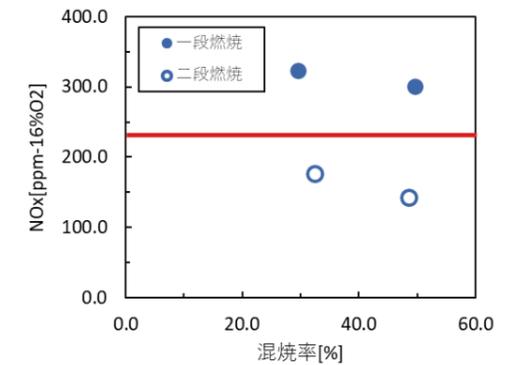


図8 各混焼率での一段燃焼と二段燃焼による排ガス中のNO<sub>x</sub> (10kW)

3.2 100kW燃焼試験結果と考察

一段燃焼と二段燃焼の違いにおいて、出力水準である75kW、100kW、125kWの各燃焼試験を実施し、そのときの空気比をAからBに変化させた場合のNO<sub>x</sub>の値を図9に

示す。ただし、混焼率は70%であり、二段燃焼の二次空気比は固定とする。図より、出力が10kWの燃焼試験と同様に、二段燃焼を行うことによってNO<sub>x</sub>が減少する傾向が確認できる。そして、限定的ではあるが、都市ガス燃焼と同等にまでNO<sub>x</sub>を下げる事ができる条件を見出している。また、一般的に知られているように、一段燃焼と二段燃焼の両者において、空気比と出力が増大することにより、NO<sub>x</sub>濃度が上昇する傾向も確認している。

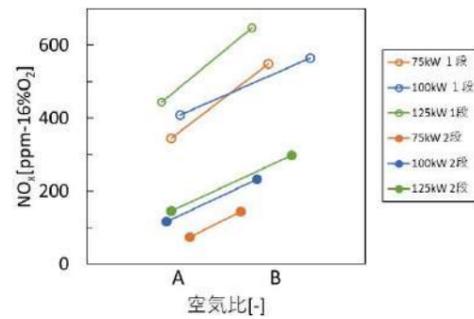


図9 各出力での空気比とNO<sub>x</sub>の傾向

一方、アンモニア燃焼で生成することが懸念されるN<sub>2</sub>O(亜酸化窒素)は、75kWでは10~15ppm程度確認できたが、100、125kWでは1ppm以下の数値であった。化石燃料の燃焼におけるN<sub>2</sub>Oの生成は、燃焼温度に強く依存し、高温燃焼ではN<sub>2</sub>Oの値が低くなる事が知られている<sup>13)</sup>。本燃焼試験においても、温度が低い低出力時にN<sub>2</sub>Oの生成量が増加する傾向を確認しているため、今後の燃焼試験においてN<sub>2</sub>Oの生成量の増減に注意を要する。

つぎに、二段燃焼において二次空気比を変化させた場合のNO<sub>x</sub>の値を図10に示す。二次空気比(二次空気比a<二次空気比b)が大きくなるにつれて、二段燃焼によるNO<sub>x</sub>の還元作用が向上し、NO<sub>x</sub>が減少することが確認できた。

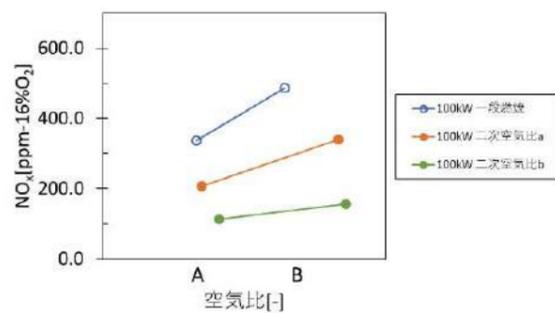


図10 二次空気比とNO<sub>x</sub>の関係

### 3.3 シミュレーションソフトによる検証

シミュレーションソフトのSTAR-CCM+(SIEMENS製)を用いて、100kWテストバーナの簡易モデルでアンモニアの燃焼をシミュレーションした。ある2つの条件でシミュレーションしたときの未燃アンモニアの分布を図11に示す。実際の燃焼と比較する為、このシミュレーションに近い条件で燃焼させ、各図の点①~④でアンモニアを実測したところ、点③でのみ、アンモニアが500ppm程度検知され、実測との整合性が確認できた。このSTAR-CCM+でのシミュレーションの精度をより高めることで、燃焼室の設計の最適化などに寄与できると考えている。

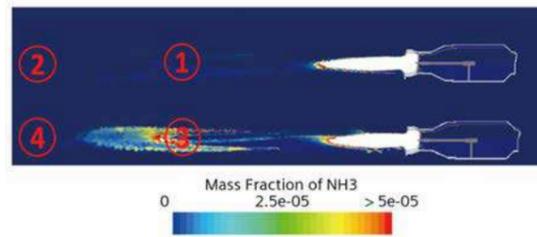


図11 未燃アンモニアシミュレーション

### 4. AP導入に向けた課題と将来展望

AP実機へ設置するには様々な課題が残っている。本燃焼試験で使用したテストバーナから実機サイズへ大型化した時の再現性の確認や、より低NO<sub>x</sub>燃焼技術の開発はもちろん必要である。それに加えて、APのバーナは連続で3~4時間の稼働を間欠で行うことが多く、急加熱と急冷などの動きが多いところや、被乾燥物の供給量や状態の変化に対応した、ターンダウン比1:5程度の出力レンジが求められるところがある。本燃焼試験の100kWテストバーナでは、出力を75kWから125kWまで変化をさせており、ターンダウン1:1.6までは確認できていると言える。なお、バーナのターンダウン比とは、バーナ出力の可変範囲を示すもので、最小と最大の出力の比で表す。

来期は、より実機に近い500kW出力のバーナで、燃焼試験を行う予定であり、前述した課題はこの燃焼試験の中で解決したいと考えている。500kW出力のバーナは、AP以外の用途で日工製品のNMD-100<sup>14)</sup>の乾燥キルン用のバーナとして使用することができるため、AP以外へのアンモニアバーナの展開も進めていく。必要に応じて、脱硝設備や除害炉の開発も検討する。

また、これからのカーボンニュートラル燃料の動向次第では、A重油を使用中のAPでは、対A重油で、CO<sub>2</sub>を25%削減できる都市ガスや、15%削減できるプロパンへの燃料転換へ進む可能性も考えられる。そのため、液体燃料との混焼試

験と並行して気体燃料との混焼試験も進行中である。

### 5. おわりに

大阪大学赤松研究室のアンモニア燃焼試験設備において、出力100kWまでの燃焼試験を実施した。本燃焼試験によって、アンモニアバーナ開発に求められる「保安の安定化」、「低NO<sub>x</sub>化」、「未燃アンモニアの無害化」などに関する新たな技術に対して、アンモニアより燃焼速度が速く、安定した火炎を形成することができる燃料との混焼や二段燃焼が有効である傾向が確認できた。限定的ではあるが、都市ガス燃焼と同等にまでNO<sub>x</sub>を下げる事ができる条件も見出している。また、STAR-CCM+を用いたシミュレーションを実測と比較し、定性的には整合性が取れている為、今後の設計最適化に寄与できると期待している。

現在は液体燃料との混焼試験と並行して気体燃料との混焼試験も進行中であり、来期は、より実機に近い500kW出力のバーナを用いてAPへ導入可能なバーナの開発を目指す。

### References

1. 公益財団法人地球環境戦略研究機関 2019 「IPCC1.5℃特別報告書」ハンドブック 背景と今後の展開[改訂版]
2. 環境省 地球温暖化対策計画(令和3年10月22日閣議決定) <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>
3. 日工株式会社 2021統合レポート2021 51-55
4. 環境省 2020年度(令和2年度)の温室効果ガス排出量(速報値)について <https://www.env.go.jp/press/110272.html>
5. 一般社団法人日本アスファルト合材協会 2022アスファルト合材 NO144 30-31
6. 川村 克裕 2021 アスファルトプラントにおける低炭素化への取組み 道路建設 50-54
7. 川崎重工業ら 2020 令和2年度環境省委託事業 令和2年度中小廃棄物処理施設における先導的廃棄物処理システム化等評価・検証事業報告書(炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理におけるエネルギー回収評価事業)成果報告書
8. 北野祐樹ら 2022 もみ殻混焼バーナの開発 NIKKO TECHNICAL REPORT NO.003, 43-50
9. 小林 秀昭ら 2016 カーボンフリーアンモニア燃焼 日本燃焼学会誌第58巻183号 41-48
10. 日工 製品紹介 WELLバーナ <https://www.nikko-net.co.jp/product/heat-dry/ntb.html>

11. 蓬萊 秀人 2022 アスファルトプラントにおける二酸化炭素排出削減技術の変遷と展望 NIKKO TECHNICAL REPORT NO.003, 7-32
12. 赤松 史光 アンモニア燃焼の基礎特性解明と基盤技術開発 SIP エネルギーキャリアアンモニア直接燃焼 終了報告書
13. 守富 寛ら 1994 化石燃料燃焼における亜酸化窒素の生成機構 化学工学論文集 20巻6号 849-856
14. 日工 製品紹介 マルチドライヤ <https://www.nikko-net.co.jp/product/heat-dry/multidriyer.html>

### 筆者紹介



TANAKA Shota  
田中 翔太  
2015年入社  
開発部 開発1課



MUNAKATA Hajime  
宗像 元  
2019年入社  
開発部 開発1課



KONTA Yuji  
今田 雄司  
2002年入社  
開発部 開発1課