

工業炉の脱炭素化に向けたアンモニア燃焼技術開発の紹介

服 部 成 真



Shigemasa HATTORI
中外炉工業(株)商品開発
部開発探索課課長補佐。
2008年京都大学大学院
工学研究科都市環境工学

専攻修士課程修了。同年中外炉工業入社、プラント事業部で冷延鋼板連続光輝焼鈍炉の設計、生産設計部で冷延鋼板連続焼鈍ライン、塗装ライン、各種熱処理設備の設計に従事。2019年から現職で、アンモニア事業展開を中心に新規事業開発を担当。

1 はじめに

工業炉における高温加熱プロセスは、あらゆる産業の製造現場において必要不可欠である一方、大量の化石燃料が消費されている。工業炉とは、主として鉄鋼、自動車、電気、電子、窯業、化学工業および環境関連の産業分野で、材料や部品を加熱によって物理的・化学的・機械的性質を変化させるための加熱設備の総称である。日本では現在、約4万基の工業炉が稼働しており¹⁾、国内総排出量の約17%^(脚注)を占める主要な二酸化炭素排出源となっている。工業炉は加熱方式で電気式工業炉と燃焼式工業炉に二分される。バーナーを用いて炉内を直接的あるいは間接的に加熱する燃焼式工業炉からは約6,600万t/yr(約6.2%)^(脚注)の二酸化炭素が排出されており、日本における2050年のカーボンニュートラルに向けて、産業界の脱炭素化対策が急速に進むと予測されるなか、工業炉分野において化石燃料依存からの脱却に挑戦する意義は大きい。

アンモニアは液化が容易であり、単位体積当たりの水素貯蔵能力が高く、水素エネルギーキャリアとしての活用が見込まれているが、近年では水素と同様、燃焼時に二酸化炭素を排出しないカーボンフリー燃料として直接燃料利用できることが

ら、産業界において関心が高まっている。

中外炉工業株式会社は、工業炉および工業炉用バーナーの総合エンジニアリングメーカーである。バーナーとは、燃料を燃焼させて熱エネルギーを発生させる機器のことで、一般的な化石燃料であるガスや油が使用されることが多いが、副生ガスなど発熱量が低く燃やりにくい燃料も使用されることがある。当社ではさまざまな燃料の燃焼技術を有しており、創業以来、省エネ型バーナーや低NO_xバーナー、さらには水素バーナーなど、時代のニーズに呼応する開発および製品化実績を有し、工業炉における省エネルギー化や脱炭素化に貢献してきた。

2 省エネ型バーナー、水素バーナー

本章では当社の省エネ型バーナーおよび水素バーナー(2016～2018年トヨタ自動車株式会社との共同開発)を概説する。リジェネバーナーおよびラジエントチューブバーナーは、各種工業炉で広く使用されており、後述するアンモニア燃焼技術開発においても、ターゲットとしている機種である。

2.1 リジェネバーナー

リジェネバーナーとは、2台のバーナーを1つのペアとして所定のサイクル時間で交互に燃焼させる直接加熱式のバーナーである(図1)。それぞれのバーナーは蓄熱器を有しており、一方の

脚注) 一般社団法人工業炉協会集計による国内工業炉における2018年度の燃料消費量統計データをもとに、当社が算出した数値である。

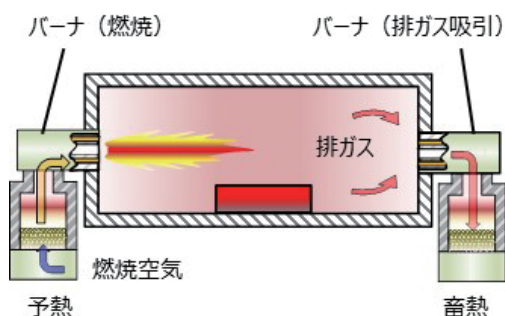


図1 リジェネバーナー

バーナーが燃焼している間、他方のバーナーは高温になった燃焼排ガスを吸引して蓄熱器にその熱を蓄える。燃焼させるバーナーが切り替わると、蓄熱器を通過する燃焼空気が、燃焼排ガス温度と同等の高温まで予熱されることで、燃焼排ガスが含有する熱エネルギーを効率よく回収・利用できる仕組みとなっている。この燃焼サイクルを繰り返すことで、従来の空気燃焼式汎用バーナーと比較して約50%の省エネ効果も期待できる。主として鉄鋼加熱炉や鍛造炉、アルミ溶解炉などに適用される。

2.2 ラジアントチューブバーナー

ラジアントチューブバーナーは、チューブ内における燃焼によりチューブ外面からの輻射熱を利用して炉内を間接的に加熱するため、炉内の雰囲気気を自由に選択することが可能である（図2）。主として連続ガス浸炭炉（Continuous Gas Carburizing Furnace：CCF）や窒化炉といった熱処理設備、冷延鋼板連続焼鈍設備（Continuous Annealing Line：CAL）や連続亜鉛メッキライン（Continuous Galvanizing Line：CGL）など大型

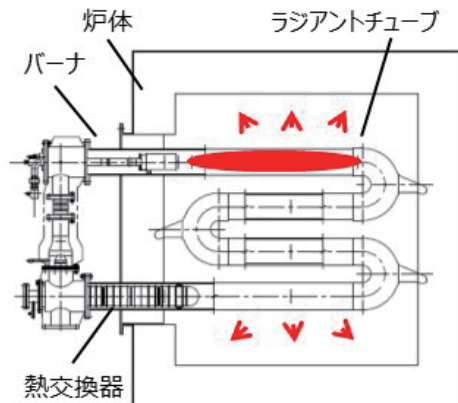


図2 ラジアントチューブバーナー

鉄鋼プロセス炉などに適用される。

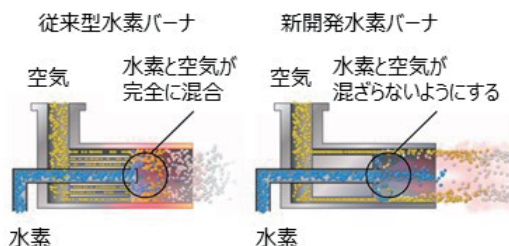
また、高効率レキュペレーターを設置し、高温の燃焼排ガスと常温の燃焼空気の間で熱交換を行うことで、10～25%程度の省エネ効果が期待できる。

2.3 水素バーナー

水素は燃焼時に二酸化炭素を排出しないカーボンフリー燃料であることから、当社では工業炉の脱炭素化を目指した水素燃焼技術の開発を2016年より開始した。水素を工業炉用バーナーの燃料として適応させるための技術課題として、安全面への配慮と NO_x 対策があげられる。水素は広い可燃範囲をもち、反応性に富んだ燃料であることから、燃焼反応を安定させやすい半面、燃焼速度が極めて速く逆火が起こりやすい。 NO_x は主に空気中の窒素と酸素が高温で反応することで生成され、燃焼場の温度が高いほど NO_x 発生量は増加する（サーマル NO_x ）。水素は燃焼速度が速いことから局所的な温度上昇により、 NO_x 発生量が多くなりやすい。

これらの特性を踏まえて、水素燃焼に適したバーナーとして、逆火の起こりにくいノズルミックス式を選定した。また工業炉用バーナーは通常、不完全燃焼によるすすや一酸化炭素の発生、失火を防ぐために、燃料と空気を直交させ、積極的に混合できる構造となっているが、水素を燃焼させた場合、混合が過剰に促進され、 NO_x の発生量の増加につながる。そこで、図3のように水素と空気を緩慢に混合できる構造に改良することで、急激な燃焼反応を抑制し、火炎温度のピークを下げ、 NO_x 発生量の低減（都市ガス13Aと同等）に成功した。

なお、水素を工業炉バーナーの燃料として使用する際の安全規則は整っていない。そのため、既



出所）文献²⁾を一部変更

図3 水素バーナー燃焼模式図

存の化石燃料に適用される「JIS B 8415 2020 工業用燃焼炉の安全通則」に沿った水素使用時のガイドラインの策定が今後必要となる。

3 アンモニア燃焼技術開発

アンモニア利用による脱炭素化の機運が高まりを見せるなか、当社では2019年より工業炉用アンモニアバーナーの開発に着手した。本章では、当社の開発コンセプトおよびこれまでの成果を中心に、2021年度より実施中の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）における研究開発の概要を紹介する。

3.1 燃料としてのアンモニアの特徴

表1に一般的な工業用燃料である都市ガス13A（主成分：メタン）とアンモニアおよび水素の物性値を示す。水素は先に述べたとおり、メタンと比較して、燃焼速度が速く、火炎温度が高い、非常に燃えやすい燃料と言える。一方、アンモニアは燃焼速度が遅く、火炎温度が低い、非常に燃えにくい燃料である。このため、同じカーボンフリー燃料でも安定燃焼に求められる燃焼方法は両者の間で大きく異なる。

3.2 バーナー開発コンセプト

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第1期（2014～2018年度）では、工業炉用バーナーにおいて、アンモニア燃焼技術の課題克服に向けて、燃焼空気中の酸素濃度を高めた酸素富化燃焼技術を用いた化石燃料との混焼技術等の開発が行われた。しかし、化石燃料との混焼は工業炉の低炭素化に寄与するものではあるが、日本が2050年の達成を目指すカーボンニュートラルには直結しない。また、酸素富化燃焼は、酸素製造コストがかかるため、経済性の観点から社会実装におい

て障壁になる可能性が高い。

そこで当社では、アンモニア燃料利用による工業炉の脱炭素化を早期実現させるためには、これまで検討されてきた二酸化炭素排出を伴う化石燃料との混焼や高コストの酸素富化燃焼ではなく、空気とアンモニアのみによる汎用的なアンモニア専焼技術の確立が必要であると考えた。

3.3 アンモニア燃焼における課題

アンモニアを工業炉用バーナーの燃料として適応させるための技術課題として、点火性、燃焼安定性の確保、低NO_x化および、未燃アンモニア対策があげられる。

先述のとおり、アンモニアは既存の化石燃料と比較して、非常に燃やしやすい燃料である。従って、バーナー構造を検討する際は、水素とは真逆の発想、すなわち空気と燃料であるアンモニアを積極的に混合させる燃焼法の検討が必要となる。また、燃焼過程において生成する環境に有害なNO_xには、燃焼空気中に含まれる窒素と酸素が高温状態で反応することで生成するサーマルNO_xと、燃料成分中の窒素分が酸化して生成するフューエルNO_xが存在する。アンモニア燃焼においては、サーマルNO_xに加えてフューエルNO_xも生成するため、窒素分を含まない従来の化石燃料に比べてより高度な低NO_x燃焼技術が求められる。さらに、アンモニアは臭気強く、悪臭防止法に基づく特定悪臭物質の1つとして、大気への放出は厳しく規制されていることから、燃焼排ガス中の未燃アンモニア除去が必要となる。

3.4 これまでの成果と課題

当社では2019年より、大阪大学の赤松史光教授らの研究グループとともに、工業炉におけるアンモニア専焼技術開発を開始した。試験には大阪

表1 燃料の物性値比較

	都市ガス 13A	水素	アンモニア
低位発熱量 [MJ/m ³ N]	40.6	10.8	14.1
密度 [kg/m ³ N]	0.819	0.09	0.76
理論空気量 [m ³ N/m ³ N]	10.76	2.39	3.59
理論排ガス量 (wet) [m ³ N/m ³ N]	11.82	2.89	4.84
理論排ガス量 (dry) [m ³ N/m ³ N]	9.66	1.89	3.34
燃焼速度 [m/s]	0.37 (メタン)	2.91	0.07
着火温度 [℃]	630 (メタン)	520	650
断熱火炎温度 [℃]	1,950 (メタン)	2,110	1,750
燃焼限界 [体積%]	5.5～14 (メタン)	4～75	16～27

大学が所有する 100kW アンモニア燃焼試験炉を使用した（図 4）。アンモニア専焼バーナーの開発にはこれまで当社が培ってきた製鉄所などで使用されている高炉ガス（Blast Furnace Gas : BFG）や転炉ガス（Linz-Donawitz converter Gas : LDG）といった低発熱量燃料の副生ガス燃焼技術を応用した。具体的な手法として、燃焼空気または燃料であるアンモニアに旋回をかけることで、空気とアンモニアの混合を促進させ、さらに NO_x 対策として二段燃焼法などを最適条件にて組み合わせることで、アンモニア専焼により、以下の成果を得ている。

- 常温での直接点火が可能
- 実炉稼働温度である 1200℃ まで昇温が可能
- 都市ガス 13A と同等レベルの低 NO_x 燃焼が可能

ただし、上記を達成できるのは限定された燃焼条件であり、汎用的なアンモニア専焼技術の実用化に向けては、下記を含めた技術課題が残っている。

- 国内外での環境負荷低減規制の強化を想定したさらなる低 NO_x 化に向けた燃焼技術開発
- 燃焼排ガス中の未燃アンモニア低減技術開発
- アンモニア燃焼による被加熱物（製品）および炉構成部材への影響検証
- タイプの異なるバーナーごとの最適燃焼方法の検討

また水素同様、工業炉バーナーの燃料として使用の際の安全ガイドラインの策定も必要となる。

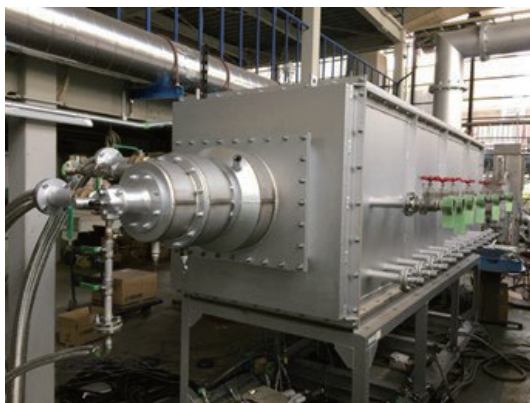


図 4 100kW アンモニア燃焼試験炉

3.5 NEDO における研究開発概要の紹介

3.5.1 工業炉用専焼バーナー開発

工業炉におけるアンモニア専焼技術の実用化に向けた取り組みとして、当社では現在、NEDO による補助の下、「NEDO 先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム」において「革新的アンモニア燃焼による脱炭素工業炉の開発」を実施している。

大阪大学の赤松史光研究室および東京大学の鈴木雄二研究室とともに、国内外の工業炉において広範な適用が見込まれるラジアントチューブバーナーおよびリジェネバーナーを対象に 2021 年度から 2022 年度までの 2 年間で、前章にあげた課題の克服を目指すとともに、2023 年度以降の実証プロジェクト化を目指している。

図 5 に 1 年目に開発したラジアントチューブバーナー試験炉を示す。炉内にてバーナーを燃焼させる直接加熱式のバーナーと異なり、直径百数十 mm のチューブ内という限られたスペースでのアンモニア専焼はハードルが高かったものの、安定燃焼化へのめどが立っている。試験内容および成果の詳細は、開発実施中であることから、ここでの紹介は控えさせていただく。また、リジェネバーナーにおけるアンモニア専焼技術開発に関しては 2022 年度より実施中である。

3.5.2 石炭火力発電用専焼バーナー開発

さらに当社では、石炭火力発電所の微粉炭焚ボイラー用の大容量アンモニア専焼バーナー開発をスタートさせた。こちらは、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研究開発・実証事業/CO₂フ



図 5 ラジアントチューブバーナー燃焼試験炉

リーアンモニア燃料 火力発電所での利用拡大に向けた研究開発」において、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、大阪大学とともに2021～2023年度の3年間で実施する。石炭火力発電所から発生する二酸化炭素量は、国内総排出量の約25%³⁾を占めており、国を挙げての対策が取られている。

当社が携わる実証事業では、工業炉用に開発したアンモニア専焼バーナーのスケールアップを行い、バーナー専焼試験を行う。続いて試験ボイラーにて、アンモニア専焼バーナーと微粉炭バーナーの併用で、炉内混焼における最適化を検討する。そこから得られた結果と、実機ボイラー内での混焼シミュレーション結果をもとに、実機ボイラーにおける炉内混焼時の最適条件を検証する。

こちらに関しても、試験内容および成果の詳細は、開発実施中であることから、ここでの紹介は控えさせていただく。次回、本誌にてアンモニア特集が組まれた際、両バーナー開発進捗に合わせた成果をご紹介させていただきたい。

4 おわりに

本稿では、当社が現在行っているアンモニア専焼技術開発について、その概要を紹介した。筆者は、当社におけるアンモニア燃焼技術開発起案当初から携わっており、ここ数年来の脱炭素化への世界的潮流と、そのなかでの燃料としてのアンモ

ニアに対する注目度、期待度の高まりを肌で感じている。特に、2020年10月の菅前首相の所信表明演説におけるカーボンニュートラル宣言以降、NEDOにおいてもアンモニアを燃料として利用するための課題克服に向けた研究開発プロジェクトが複数立ち上がっている。当社含め、各プロジェクトにおける実施者の努力が実を結べば、2030年および2050年の二酸化炭素排出削減目標達成に向けて、燃焼加熱プロセスにおける脱炭素化を必要とする各産業界において、燃料としてのアンモニア利用は有望な選択肢の1つとなりうる。

当社では引き続き、工業炉および火力発電分野におけるアンモニア燃焼技術開発を継続し、早期社会実装を目指す。また、アンモニアに限らず水素や省エネ化技術を各分野へ応用展開することも検討している。弊社が保有する燃焼技術が、カーボンニュートラルに向けた課題解決の一助になることを願ってやまない。

引用文献

- 1) (株)野村総合研究所, 平成26年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業(工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査)報告書, (2015).
- 2) トヨタ自動車(株), プレス発表, 2018年11月8日. <https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/25255692.html> (2022.5.9)
- 3) 環境省, 2018年度(平成30年度)の温室効果ガス排出量(確報値), 2020年4月.