



工業炉における脱炭素・低炭素に貢献する 燃焼技術の紹介

中外炉工業(株) プラント事業本部
サーモシステム事業部 **河野 友郎**

1. はじめに

日本では現在、約40,000基の工業炉が稼働しており¹⁾、そこから排出される二酸化炭素の量は国内総排出量の約17%²⁾を占める。鑄造・鍛造業界においても多くの工業炉が稼働しており、ここでは大量の化石燃料が消費されているので、脱炭素や低炭素に貢献する燃焼技術を導入することの意義は大きい。

本稿では、当社が取り組んできた水素およびアンモニアを利用した脱炭素燃焼技術の現状を紹介すると共に、足元の二酸化炭素排出削減に役立つ低炭素燃焼技術も併せて紹介する。

2. 既存ガス燃料と水素およびアンモニアの物性の違い

水素が脱炭素燃料として利用できることは知られているが、アンモニアも脱炭素燃料として利用できる。しかしそれらの物性は既存ガス燃料(LNGやLPG)とは異なるので、水素やアンモニアの物性に適した燃焼機器の開発が必要になる。

表1にメタン(LNGの主成分)、プロパン(LPGの主成分)と、水素およびアンモニアの物性値を示す。メタンやプロパンと比較して、水素は燃焼

速度が速く、火炎温度が高いことから、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、火炎温度が低いため、非常に燃えにくい燃料である。このため、同じ脱炭素燃料でも水素とアンモニアの燃焼機器に求められる性能や技術課題は大きく異なる。

3. 水素燃焼技術について

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年よりトヨタ自動車(株)殿と共同で開始した。本章では水素バーナーの技術課題とその解決方法ならびに現状の水素バーナー商品ラインナップを紹介する。

3-1 水素バーナーの開発

水素を工業用バーナーの燃料として利用するための技術課題としては、安全面への配慮とNO_x対策が挙げられる。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反面、燃焼速度が極めて速く逆火が起こりやすい。また、NO_xに関しては水素燃焼火炎温度が高いことからNO_x発生量(主にサーマルNO_x)の増加が懸念された。

表1 メタン、プロパンと水素、アンモニアの物性値比較³⁾

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

水素バーナー開発に際して、ベースとなるバーナーにはノズルミックス式のHSGB型バーナーを選定した。ノズルミックス式バーナーとは、燃料をノズルから吐出させた後に空気と混合させる燃焼方式のバーナーで、燃料と空気が別々のノズルから供給されるため逆火が起きにくい。また既存ガス燃料用のHSGB型バーナーは通常、不完全燃焼による煤や一酸化炭素の発生、失火を防ぐためにノズルにおける燃料の吐出方向を空気と直交させ、積極的に混合できる構造となっている。もしこのままの形状で水素を燃焼させると混合が過剰に促進され、急激な燃焼とそれに伴う火炎温度上昇により、NO_x発生量の増加や部品の焼損が起こる。そこで、図1に示すように、水素の吐出方向を変更して水素と空気が緩慢に混合す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発生量を都市ガス13A燃焼時と同等レベルにまで低減にさせるとともに、バーナー部品の焼損も解消した。

当社では水素バーナーの工業分野への普及に向けて、様々な用途の工業用バーナーにて水素化を進めている。上述のHSGB型バーナー(図2、左)のほかに、自動車用塗装乾燥炉に多くの実績のある低温オープン向けの多段燃焼バーナーであるDGB型ダブルコーンバーナー(図2、中央)、燃焼

管を加熱し、放射熱を利用して炉内を加熱するCRB型コンセントリックラジアントチューブバーナー(図2、右)などが水素バーナー化可能な商品のラインナップとなる。また、2022年4月より当社堺事業所(大阪府堺市)内にW型およびU型のラジアントチューブバーナーを搭載した、水素燃焼デモ試験機を展示しており、多くのユーザー様に見学頂いている。今後も工業炉の脱炭素化を目指して、水素バーナーの開発を進め、顧客のニーズに応じたラインナップを増やしていく予定である。

3-2 水素バーナー燃焼時の安全対策

工業用バーナーにて水素燃焼させるにあたり、最も注意が必要となるのが、逆火である。燃料をノズルから吐出させた後に空気と混合させ燃焼させるノズルミックス構造を採用することで、逆火の可能性は低くなっているが、立ち上げ時等の水素配管に空気が混在した状態でバーナーを点火すると、水素の燃焼速度が極めて速いことから火炎が配管まで戻る逆火が発生する。また消火後においても、ノズルのガス吐出口から空気が水素配管内に入り込み、水素と空気が混在した状態になり、高温となった炉内の雰囲気やノズル温度を着火源として、配管内燃焼が発生すること

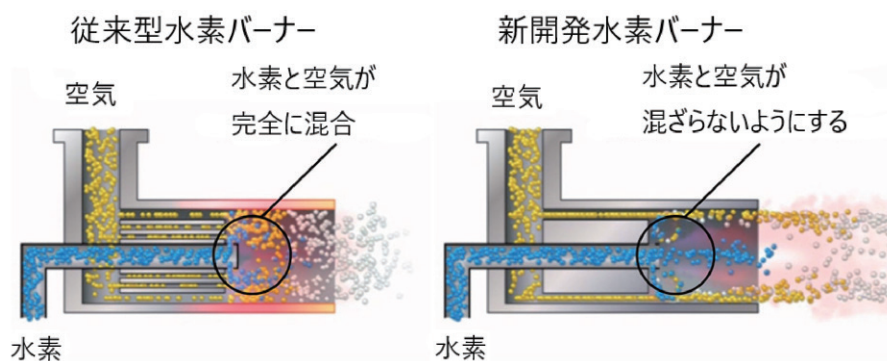


図1 HSGB型水素バーナー燃焼模式図⁴⁾

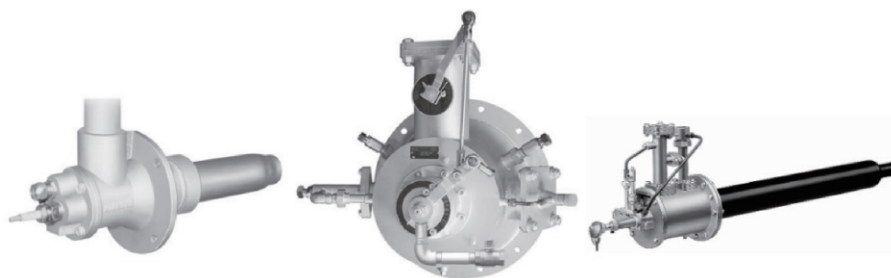


図2 水素バーナー商品ラインナップ

もある。こういった逆火、配管内燃焼を防ぐために、点火前、消火後には窒素パージの実施を必須とした。点火時には、水素配管内の空気を窒素で押し出してから水素を流し、また消火時には、水素配管内の水素を窒素で押し出して、水素配管内の水素を窒素に置換しておくことで、水素と空気の混在が起こらないようにした。

なお、2022年11月現在、水素燃焼設備の安全に関する法規・指標は整備されていない。したがって、工業炉への広範な水素バーナーの適用を進めるには、今後、安全技術指標や燃焼安全規格等において既存のガス燃料と同等の安全指標整備が必要と考える。

3-3 水素と都市ガスの混焼

水素燃焼としての技術は確立できているが、水素がインフラ、コストの面で都市ガスレベルに到達するにはまだ時間がかかる。よって当社では水素が安定的に供給できるまでの繋ぎの手段として、水素と都市ガスとの混焼技術を確認している。都市ガスに水素供給能力に合わせて水素を混焼させることで、都市ガス100%燃焼と比較し二酸化炭素削減になる。当社のEBC-i制御システム（自動空燃比制御システム：図3）を活用することにより、水素-都市ガス混焼での最適な空燃比制御が可能となる。

4. アンモニア燃焼技術について

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紹介する。

4-1 アンモニアバーナーの開発コンセプト

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第一期（2014～2018年度）では、工業用アンモニアバーナー開発におい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年までにカーボンニュートラル達成を目指すには混焼技術では不十分だと考える。また、酸素富化燃焼は、酸素製造にコストが掛かるため、経済性の観点から多用途での社会実装において障壁になる可能性がある。

そこで当社では、アンモニア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、化石燃料との混焼や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。

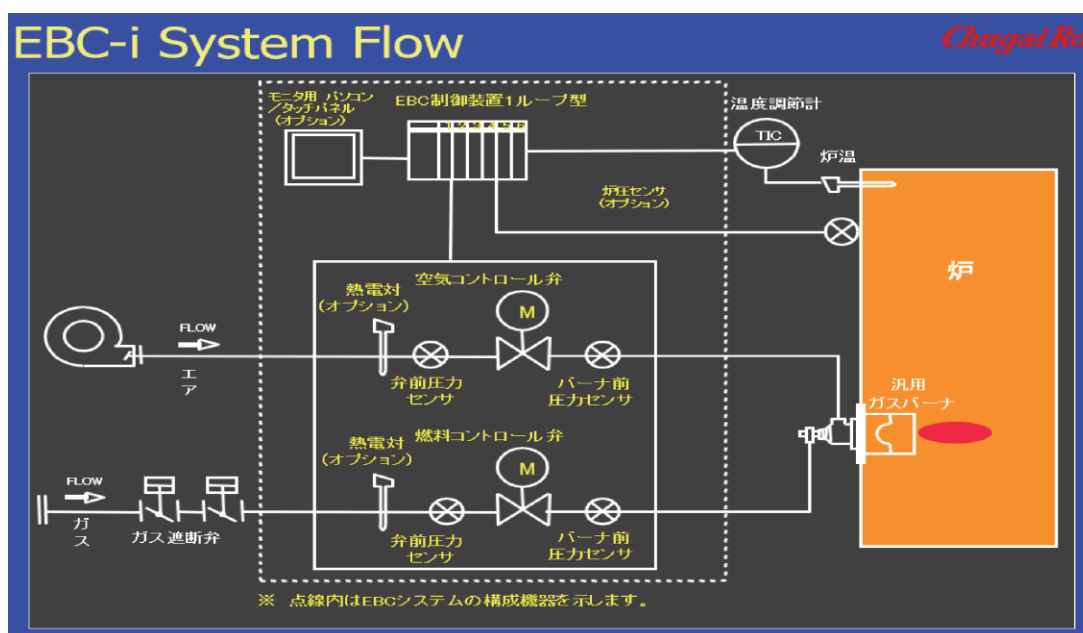


図3 EBC-iシステムフロー図

4-2 アンモニア燃焼における課題

アンモニアを工業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挙げられる。

先述のとおり、アンモニアは既存ガス燃料と比較して、非常に燃やしにくい燃料である。したがって、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（燃料成分中の窒素分が酸化して生成する）も生成するため、窒素分を含まない従来のガス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一つとして、大気への放出は厳しく規制されていることから、燃焼排気ガス中の未燃アンモニア除去が必要となる。

4-3 これまでの成果(大阪大学共同開発)

当社では2019年より、国立大学法人大阪大学・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や転炉ガスといった低発熱量燃料の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

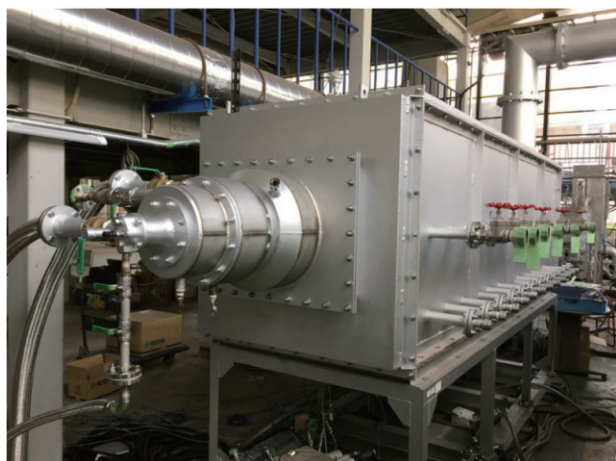


図4 100kW アンモニア燃焼試験炉

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
- 実炉稼動温度である1,200℃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

一方で上記を達成できる燃焼条件はまだ限定的である。そこで当社は2021年より大阪大学、東京大学と共同でNEDOのエネルギー・環境新技術先導研究プログラムの中で、アンモニア専焼技術の実用化に向けた課題の抽出とその克服のための研究開発を継続している。

なお、2022年11月現在、水素同様、アンモニア燃焼設備の安全に関する法規・指標は整備されておらず、こちらも、安全技術指標や燃焼安全規格等において既存のガス燃料と同等の安全指標整備が必要と考える。

5. 低炭素のための燃焼技術 (省エネルギー燃焼技術)

ここまでは水素やアンモニアによる脱炭素燃焼技術について紹介してきた。しかしながら水素やアンモニアによる脱炭素燃焼技術が普及するには技術的課題解決に加えて水素やアンモニアの価格と安定供給の課題解決も必要であり、それにはもう少し時間が必要である。そこで本章では、足元の二酸化炭素排出削減に貢献する低炭素燃焼技術(=省エネルギー燃焼技術)を紹介する。

5-1 空気比管理インターフェイス： Lamuda-i (ラムダアイ)

工業用燃焼炉における最大の熱エネルギー損失は「排気ガスからの熱エネルギー損失」であるが、燃焼の空気比を正確かつタイムリーに管理できればその損失を低減できる。例えば炉温1300℃の鍛造炉において空気比を1.3から1.1に改善すると熱エネルギー損失が25%低減する。これは二酸化炭素排出量の25%削減と同義であり、「省エネルギー燃焼技術=低炭素燃焼技術」となる。具体的な空気比管理手法としては排気ガス中の酸素濃度を測定することが効果的だが、市場には応答性、耐久性、価格の全てを満足する酸素濃度測定装置が無かったのでLamuda-i (ラムダアイ)を開発した(図5)。その特徴は、

- センサー部は自動車用の排気ガス酸素センサー

流用により高い応答性を実現

- 本体部は酸素濃度計測機能に加え、校正、エラー表示、アナログ出力などの機能を完備
- 価格は従来の常設型酸素濃度測定装置の1/4～1/3

図6にLam μ da-i(ラムダアイ)を用いた空気比

制御例を示す。Lam μ da-i(ラムダアイ)と排気ガスサンプリング装置を一体化したシステムを炉およびバーナーの空気比制御に組み込んだものである。測定した酸素濃度から現状の空気比を計算し、流量制御の設定空気比との差を補正する制御システムである。



図5 Lam μ da-i(ラムダアイ)本体とセンサー部

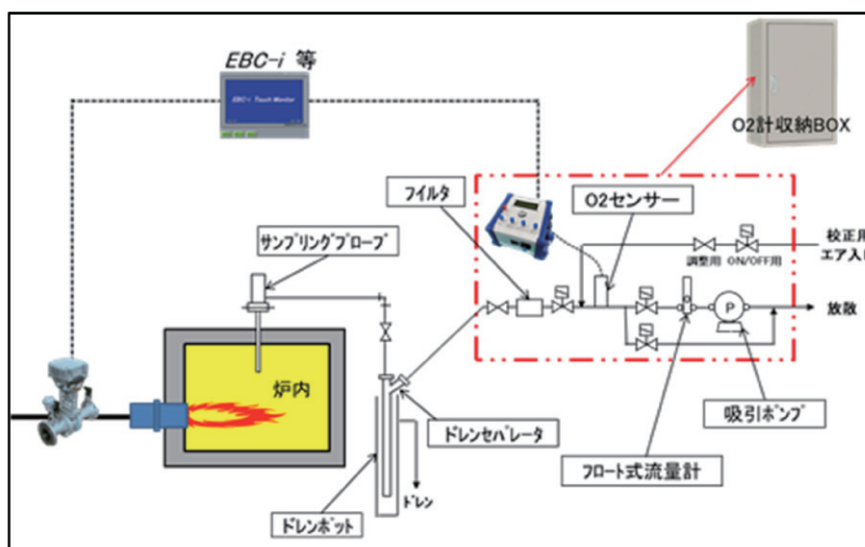


図6 Lam μ da-i(ラムダアイ)を用いた空気比制御例

6. おわりに

本稿では、当社が取り組んできた水素およびアンモニアの燃焼技術と、空気比管理インターフェイスであるLam μ da-i(ラムダアイ)を紹介した。これらの技術が鋳造・鍛造業界の脱炭素や低炭素に向けた課題解決の一助になれば幸いである。

最後になるが、当社は2023年11月にカーボンニュートラルへの貢献を目指す新たな研究施設「熱技術創造センター」の新設を決定した(図7)。



図7 熱技術創造センター完成予想図

同センターは当社堺事業所内に設けられ、脱炭素・低炭素の燃焼技術開発のみならず全個体電池電解質などの注目素材処理の技術開発も推進し、カーボンニュートラル需要への全方位対応を加速させる所存である。

参考文献

- 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) 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。
- 3) 小林秀昭、早川晃弘；日本燃焼学会誌、58、(183)、41(2016)。
- 4) 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>(2022.11.7)

(当社にて加筆)