

連携記事

鉄鋼分野における酸素燃焼技術開発の歴史

History of Oxy-fuel Combustion Technology Development for the Steel Industry

萩原義之 大陽日酸(株)
 Yoshiyuki Hagihara 開発本部 山梨研究所
 燃焼技術部 部長

1 はじめに

酸素バーナは、日本産業界において1970年初頭より本格的な利用が開始された。当時は、高度成長時代であり、鉄スクラップの溶解再生用電炉の補助バーナに代表されるように、従来の工業炉に酸素バーナを併用する事で生産性を向上させる事が目的であった。また、高度成長に伴う排水や大気汚染等の公害問題が起こったのもこの頃であった。しかし、第一次、第二次石油ショックを境にして日本の産業は低成長時代に入ると同時に石油が高騰し、酸素バーナの役割も増産から省エネルギー、省コストへとその役割が変化した。

1990年代に入って化石燃料の世界的な消費量の増大に伴う、炭酸ガス排出による温暖化、窒素酸化物による酸性雨の問題と、地球上の限られた資源を有効に利用するリサイクル問題等が提起され、それと共に酸素燃焼技術の役割も増産か

ら省エネルギーに加え環境問題への貢献へと変革した。

本連携記事では、酸素燃焼の基本的な特徴、約50年をわたって大陽日酸(株)が取り組んできた酸素燃焼技術を紹介し、昨今の市場環境を踏まえて今後の展望を論じる。

2 酸素燃焼の基本的な特徴

2.1 断熱理論火炎温度とガス組成

燃料にメタンガスを用いた時の支燃性ガス中の酸素濃度と断熱理論火炎温度の関係を図1に示す。また、支燃性ガス中の酸素濃度と平衡ガス組成、特に、ラジカル物質の濃度との関係を図2に示す。

これらから酸素燃焼は空気燃焼比較して火炎温度が約800℃高くなる事に加え、高温の火炎中にラジカル物質が大量に含まれている特徴を有する。

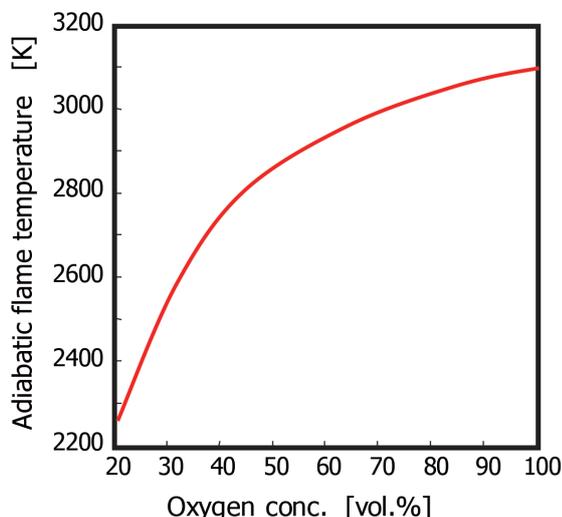


図1 支燃性ガス中の酸素濃度と断熱理論火炎温度

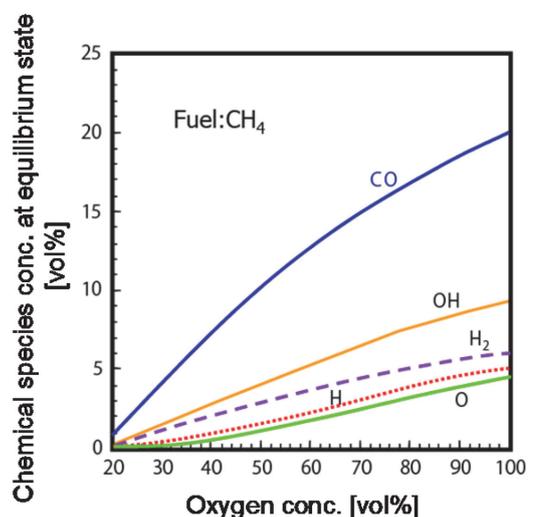


図2 支燃性ガス中の酸素濃度と燃焼ガス中の化学種濃度

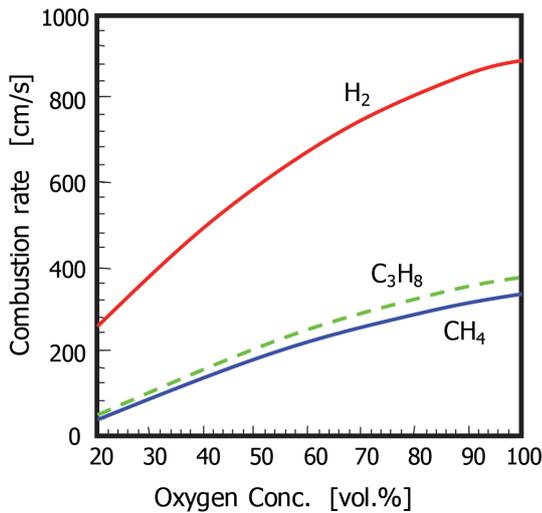


図3 支燃性ガス中の酸素濃度と燃焼速度

火炎温度の上昇は、強制対流伝熱や放射伝熱の効率向上に大きく寄与する。また高温の火炎中で生成したラジカル物質は、火炎が被加熱物・溶融物に衝突するとき、安定物質への発熱反応が生じ、伝熱を促進する特徴がある。これは、強制対流伝熱、放射伝熱でもない第三の伝熱形態が存在する事になる¹⁾。

2.2 燃焼速度

図3に支燃性ガス中の酸素濃度と代表的なガス燃料の燃焼速度の関係を示す。酸素燃焼では空気燃焼に比べ、その燃焼速度は3倍から6倍と非常に早くなり、高速な火炎を安定に形成する事が出来る。これにより被加熱物・溶融物に高温で高速な火炎を衝突させ、高い強制対流伝熱と前述した第三の伝熱も加え、効率の高い伝熱が可能となる。また、燃焼速度、火炎中のガス組成を酸化、還元雰囲気制御出来るため、使用用途に応じた燃焼特性を形成できる。

2.3 酸素燃焼による省エネルギー

酸素燃焼では空気燃焼に比べて火炎温度が800℃以上高くなり、前述した第三の伝熱が利用でき、更に支燃性ガス中に窒素が含まれないために排ガス量も約1/4と少なくなり、大幅な省エネルギーが可能となる。

図4に示すような燃焼炉での熱利用効率を想定し、図5に排ガス温度をパラメータに燃焼炉内で利用される熱効率の関係を示す。

この熱効率は、図4に示す通り、燃焼炉に投入される熱と炉内で利用可能な熱の比であり、例えば排ガスの温度が1400℃の場合には、その熱効率は空気燃焼で約40%、酸素燃焼では80%にもなる。ただし、炉壁熱損失も有効熱に含まれている。

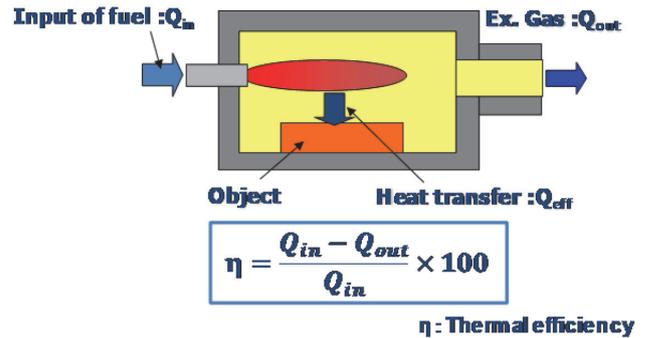


図4 燃焼炉における熱効率の概念図

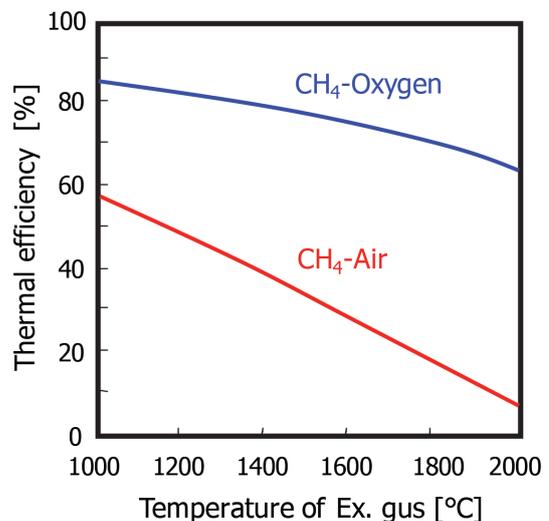


図5 燃焼炉における排ガス温度と熱効率

3 当社の酸素燃焼技術

太陽日酸(株)は、1970年に米国Air Production社から酸素バーナの技術を導入した。この酸素バーナは、燃料(主に重油)と酸素をノズル先端に噴出し拡散混合燃焼させる方式で、空気バーナと共に熔解炉や焼結炉に取付け、炉の生産性を高めるのが役割であった。アメリカでは、アルミニウムの溶解に使用するケースが多かったが、国内では主に電気炉の省エネルギー用として使用された。その他、アルミニウム熔解炉、耐熱セメント熔解炉、アルミナの焼結用キルン等に使用された。しかし、時代の変遷とともにその用途が多様化した為、1975年から当社独自の開発に取り組んでいった。1976年には当時の労働省産業安全研究所と共同でPCBの燃焼分解技術に取り組み、その分解率として99.99999%を達成した²⁾。本バーナは、一般の重油等の燃料に対しても高温・高速の火炎が得られるために、当社酸素バーナ「スーパーOFB®-L型」として商品化された。本技術が、当社の酸素燃焼

技術の原点であり、図6に示すとおりその後の50年に続く技術開発の礎となっている。

1980年に入ると、酸素燃焼を応用した様々な応用技術の開発に取り組み始めた。「火炎溶射」はLPG-酸素火炎中に粉体耐火物を投入し、火炎中で溶融させ炉の損傷部に高速で溶着させる技術であり、従来の湿式補修層に比べて、5~7倍の耐用性がある事を確認した³⁾。「アルミニウム製錬用酸素ランス」は、アルミナからアルミニウムを直接還元する溶鋼炉の羽口に対して、800-1000℃の高温酸素を吹き込む技術であり、その開発において、高温酸素発生プロセスの基礎技術と超高温雰囲気にも耐用できる水冷ジャケット技術が確立した。「亜鉛新製錬用酸素ランス」は溶融還元用の原料鉱石とコークスを高速の酸素噴流に乗せて炉底の溶融体に吹き込むインジェクションランス(酸素噴流:マッハ1~1.5)であり、その後の超音速酸素燃焼技術の開発の原点となっている。「鉛溶鉱炉OFB[®]」は溶鉱炉羽口へ酸素バーナを設置し、鉛溶鉱炉におけるコークス原単位の低減と炉底の未溶融部を溶融する応用技術である。また、「Fe-Ni酸素ランス」はニッケル含有鉱石を溶融還元する電気炉における熱補償用として酸素バーナを使用する技術であり、高温鉱石の中に酸素バーナを約2m挿入して効率よく燃焼させることと、高温の粒状鉱石の流動によるバーナ的水冷ジャケットの摩耗対策及び水漏れ

対策の技術が確立された⁴⁾。

また、液体・ガス燃料と比較して燃焼速度の遅い固体燃料(微粉炭)を高温酸素で燃焼速度を高め高温火炎を形成する微粉炭バーナを開発した⁵⁾。本技術は、微粉炭を高温酸素で安全に、効果的に燃焼する技術として関連業界、学会等で高評価を受けた。

1990年からは、技術開発の方向性を、単なる酸素バーナの開発から、市場に特化した「アプリケーション」の開発へと切り替えていった。特に、京都議定書の発効による、世界的なCO₂削減に対する意識の高まりと、PSA方式の登場による酸素価格の低下が、それまで酸素燃焼の導入が盛んであった金属分野に加え、ガラス、セラミックス分野にも、その利用のすそ野を広げていく事になった。それまでターゲット市場となっていた金属・非鉄分野においては、対流伝熱型の酸素バーナが主に用いられていた為、燃料と酸素の混合を促進し、燃焼速度を高めて火炎温度を上昇させる事を目的とした技術開発が行われてきた。しかし、ガラス溶解炉においては、バーナからの輻射伝熱が重要となる。そこで、火炎中の煤の発生量及び滞留時間を長くするために、液体燃料の微粒化方法及び、酸素の吹き込み速度を開発した。この技術により、酸素燃焼をガラス溶解炉に適用する事で、省エネルギー、低NOx、高品質化を達成した⁶⁾。

技術開発	キーテクノロジー	1970	1980	1990	2000	2010
技術導入		○				
PCB分解	高速・高温火炎形成	←	←			
火炎溶射	火炎中への粉体搬送	←	←			
アルミ製錬酸素ランス	酸素予熱		←	←		
亜鉛製錬酸素ランス	微粉コークス吹込		←	←		
鉛溶鉱OFB利用	OFB配置最適化		←	←		
Fe-Ni酸素ランス	鉱石中の燃焼技術		←	←		
微粉炭-高温酸素バーナ	高速・高温火炎形成		←	←		
ガラス溶解用バーナ	高放射伝熱化		←	←	←	
シリカ球状化	火炎形状制御		←	←	←	
電炉ダスト処理	火炎中の粉体大量処理		←	←	←	
金属溶解NSR	高効率・高歩留		←	←	←	
鋳鉄溶解回転炉	高効率・高歩留		←	←	←	
飛灰溶融バーナ	火炎中粉体処理		←	←	←	
廃棄物部分酸化	燃焼制御		←	←	←	
SCOPE-Jet [®]	超音速酸素噴流				←	←
ガラス気中溶解バーナ	火炎中伝熱効率向上				←	←
Innova-Jet [®]	振動燃焼・低NOx				←	←
Innova-Jet [®] Swing	自励振動・広範囲加熱				←	←

図6 酸素燃焼技術開発の歴史

また、「シリカ球状化装置」は、火炎熔射技術を応用し、珪石の粉碎品をLPG-酸素火炎中で溶融し、ガラス化すると同時に球状化した後空気で急冷して取り出す事で、球状化した粉体を効率よく回収する技術である。半導体封止材に用いられる、球状シリカ製造設備「CERAMELT[®]」として市場展開され、半導体パッケージの小型化に大きく寄与している。更にアルミナ、フェライト、ガラス粉等電子材料分野において数多く活用されている⁷⁻¹¹⁾。

その他にも、電気炉で発生するダストを酸素燃焼火炎中に投入して加熱溶融する技術として「廃棄物溶融固化用酸素バーナ」や、電気炉代替技術として、酸素バーナのみで鉄スクラップを溶融する技術としての「金属溶解NSR」を開発してきた¹²⁻¹⁴⁾。

4 鉄鋼分野向け酸素燃焼技術開発

2000年に入ると、産業界でも酸素燃焼に対する認識は、「省エネルギー技術」として一般的となり、酸素バーナのメーカーも数多くみられるようになってきた。そこで当社では、特徴的な燃焼制御技術を使った、鉄鋼分野向けのアプリケーションの開発を重点的に進めた。

4.1 高速酸素バーナランス¹⁵⁾

鉄スクラップの溶解再生用電炉向けの省エネルギー技術として、超音速の酸素ジェットを形成するバーナランスSCOPE-Jet[®]を開発した(図7)。当社的高速酸素バーナランスの特徴は、シンプルなノズル構造にある。きわめて簡易なノズル構造で、超音速酸素ジェットとその周囲に安定した火

炎を形成する事ができ、さらに超音速酸素ジェットの速度及び酸素濃度の減衰を大幅に抑制することが出来、2003年より電炉の補助溶解技術として市場展開された。従来の助燃バーナと異なり、電炉の製鋼プロセスにおいて、鉄スクラップが投入された直後の「溶解期」では酸素バーナとして機能しスクラップ溶解を促進させ、スクラップが解け落ちた「精錬期」では酸素ランスとして機能する。その結果、電炉製鋼プロセスの生産性向上と、エネルギー原単位削減に寄与する(図8)。

高速酸素バーナランスの開発は市場投入後も継続され、都市ガス、LPG等のガス燃料、灯油、A重油等の油燃料に加え、COG等の低圧・低カロリー燃料にも対応させた。また、酸素ジェットの噴出速度も、開発当初はマッハ1.5であったが、現在ではマッハ2.0まで性能向上し、精錬期の酸素ランスとしての機能を強化した。

4.2 振動燃焼による低NO_x酸素富化バーナの開発¹⁶⁻¹⁹⁾

高温の加熱炉に酸素富化燃焼を適用する場合、大量に生成されるNO_xを抑制する事が課題となる。当社は独自の振動燃焼と酸素富化燃焼を組合せ、酸素富化燃焼においてNO_xを大幅に低減する酸素富化バーナInnova-Jet[®]を開発した。この低NO_x酸素富化バーナは、酸化剤中の酸素濃度と酸素比を周期的に変化させるという独自の振動燃焼を用い、通常の酸素富化燃焼と比較してNO_x排出量を1/20まで低減した。また、支燃性ガスの流量を周期的に大きく変動させる事で、炉内ガスの攪拌が行われ、伝熱効率も約10%向上している(図10)。取鍋予熱等に適用され、30 - 40%の燃料削減効果が得られている。

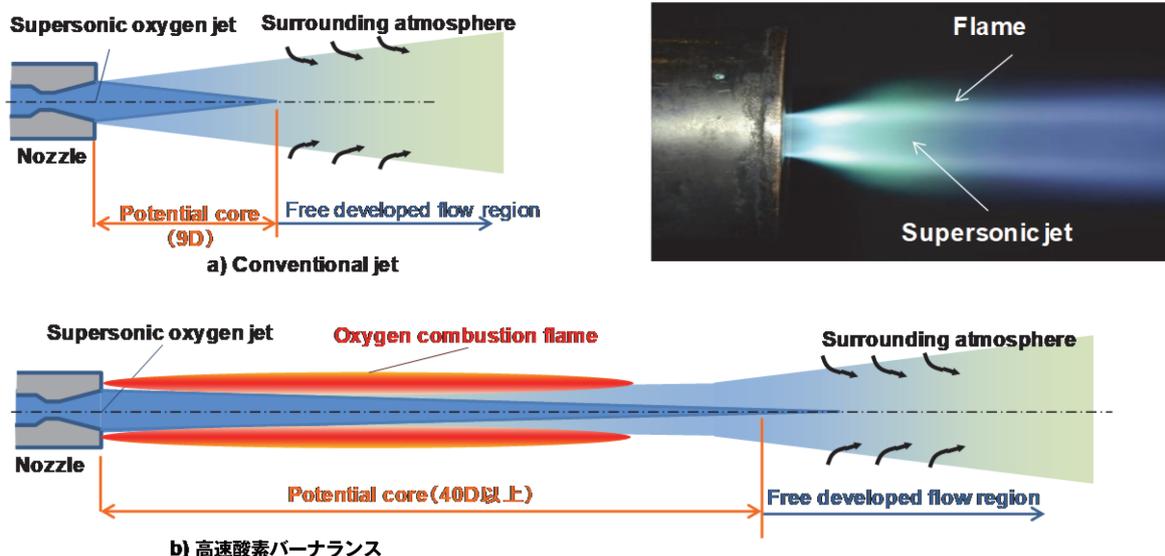


図7 超音速酸素噴流の概念図

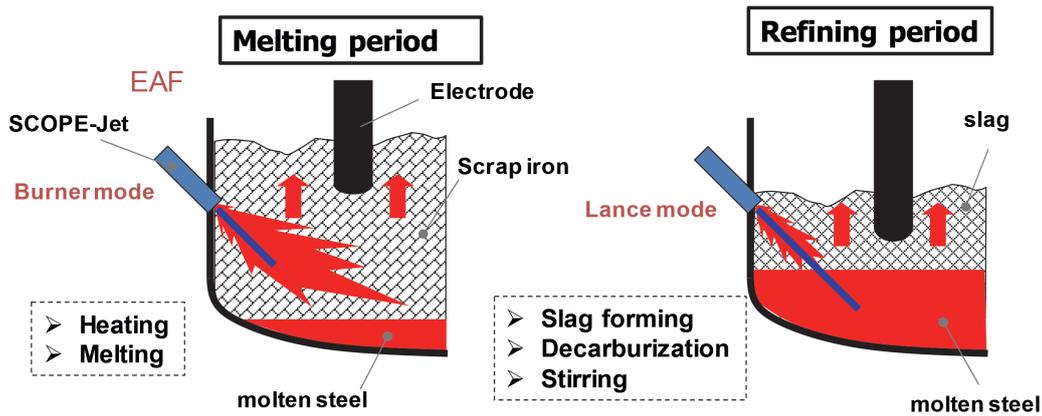


図8 電炉製鋼における高速酸素バーナランスの運用概念図

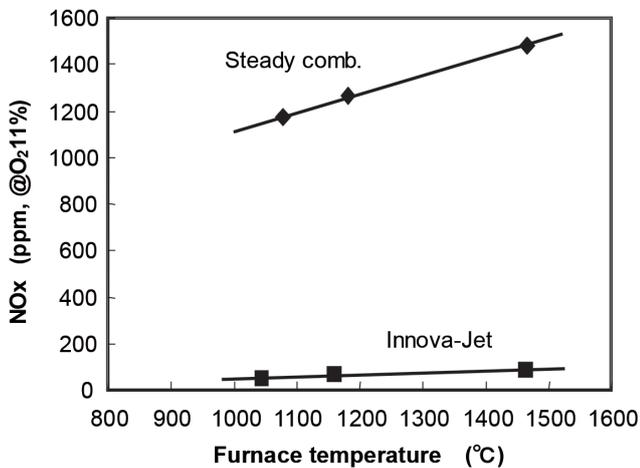


図9 従来の酸素富化燃焼と低NOx酸素富化バーナのNOx排出特性比較

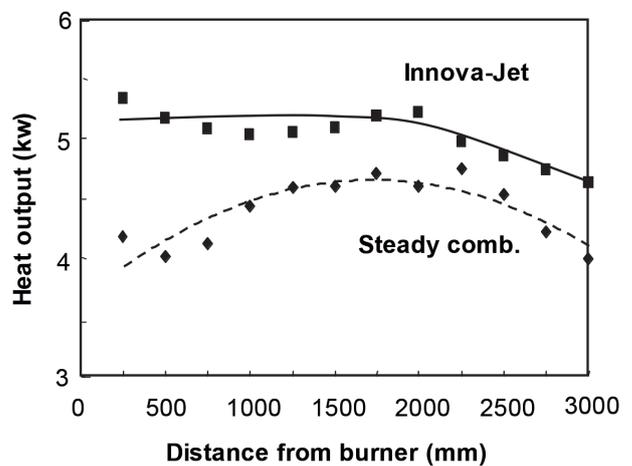


図10 従来の酸素富化燃焼と低NOx酸素富化バーナの伝熱特性の比較

4.3 自励振動現象を利用した火炎振動技術の開発²⁰⁻²⁴⁾

酸素燃焼や酸素富化燃焼は、排ガスによる熱損失を低減できるが、その一方で高い火炎温度により局所的に高温になりやすく、温度分布を均一にコントロール高い技術が求められる。この課題を解決すべく、自励振動現象を利用して火炎を振動（スイング）させ、広範囲に均一加熱するのがInnova-Jet® Swingである。自励振動現象とは、流体が付近の壁にそって流れる「コアンダ効果」に、流体を壁から引きはがす力を励起する特殊なノズル構造を組みわせる事で、外部からの操作なしに自発的に流体が振動する現象である（図11）。この現象をバーナ火炎に応用することで火炎の向きを周期的に変化させ、火炎により加熱できる領域を拡大する事が出来る。また、本バーナでは機械的な駆動部を必要としないためシンプルなバーナ構造をとることができ、メンテナンス性にも優れている。

この技術の適用対象の一例としては、タンディッシュ予熱

がある。40%酸素富化の運転条件において、空気燃焼と比較して燃料使用量を40%削減できる事が確認されている。

5 酸素燃焼技術の展望

CO₂排出量を大幅に削減する為には、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要である。しかし、水素は貯蔵や輸送に関して技術的ハードルを多く抱えており、純水素を使用したシステムの構築は困難をとまなう。その為、エネルギーを水素として含む化学物質（エネルギーキャリア）に変換し、これを消費地まで運搬して貯蔵し、必要な時に最適の形でエネルギーに戻すシステムの構築が必要となる。このエネルギーキャリアとしてアンモニアが注目されている。アンモニアは、肥料原料や汎用化学品原料として大量に使用され、その製造はHaber-Bosch法として確立されている。沸点が-33°C、常温では8気圧で液化するので水素と比較して

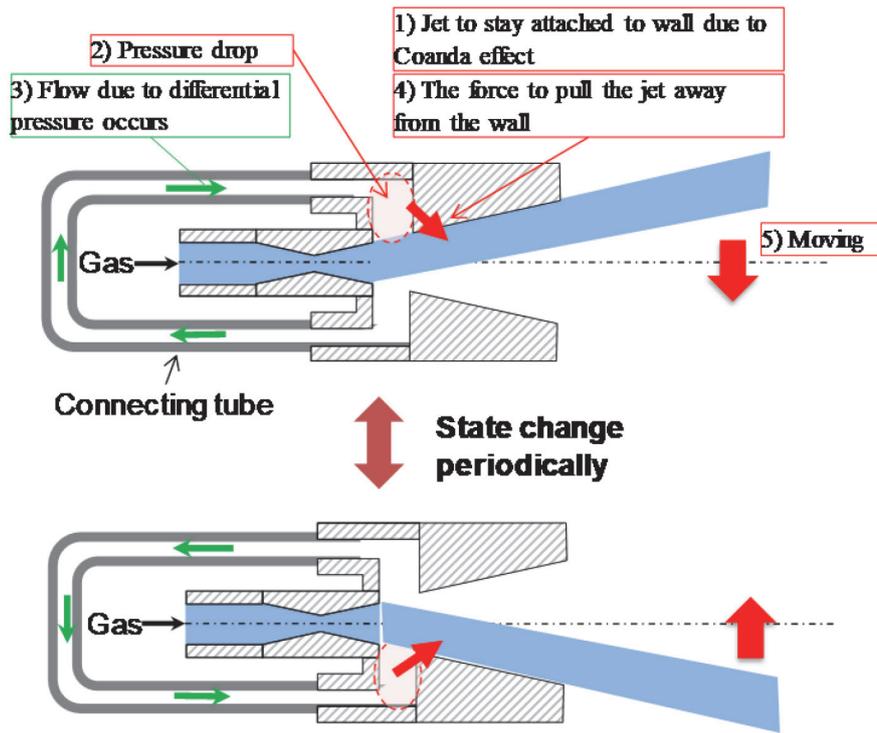


図11 自励振動現象の模式図

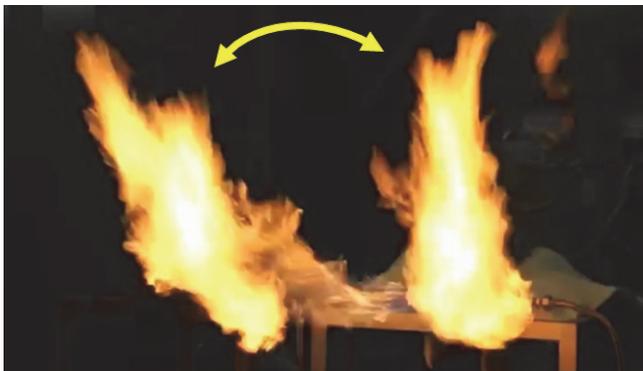


図12 自励振動を用いたバーナの火炎

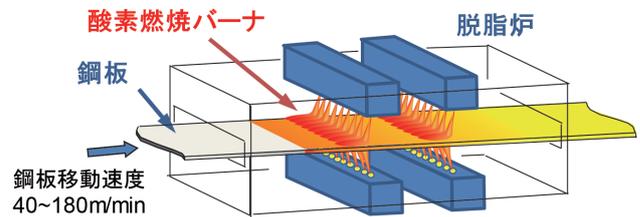


図13 衝突噴流式脱脂炉の模式図

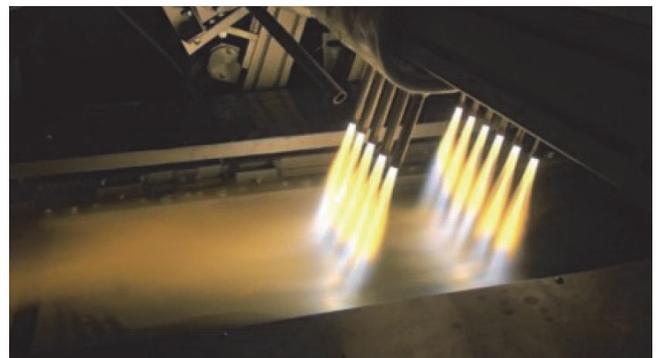


図14 アンモニア酸素燃焼火炎

液化がはるかに容易である。また、工業炉を所有する事業所には一定規模のアンモニア輸送、貯蔵インフラが既に存在するため、炭化水素系燃料代替として用いる事で、カーボンフリーの工業炉を構築できる。

当社は、内閣府主導の戦略的イノベーションプログラム (SIP) より、アンモニア燃焼炉の技術開発を受託した。開発においては、現行の環境規制をクリアしながら火炎伝熱強化を達成する技術の開発を行った。更に、アンモニア混焼による工業炉分野への早期適用を目指し、亜鉛メッキ鋼板製造前処理プロセスにおける燃焼火炎による強制対流伝熱を利用した衝突噴流式脱脂炉及びバーナ装置の開発に取り組んだ。(図13、図14) 受託開発の中で日鉄日新製鋼(株)の亜鉛メッキ鋼板

製造工程において実証試験を行いその有用性を確認した^{25,26)}。

今後の酸素燃焼技術利用においては、CO₂の大幅な削減に向けて、水素系燃料利用技術の開発と実用化が重要になると考える。

6 まとめ

1970年の技術導入から50年を経て、大陽日酸(株)の酸素燃焼技術は、鉄鋼分野をはじめとする様々な産業分野における環境負荷低減技術として活用されるに至った。地球温暖化ガスであるCO₂削減が高く望まれている状況の中、今後も酸素燃焼技術に寄せられる期待は増大するであろう。

参考文献

- 1) 今吉照一, 西野正剛: 日本酸素技報, (1983) 2, 35.
- 2) 平野亮, 今吉照一, 桜井澄雄: 日本酸素技報, (1994) 13, 17.
- 3) 諏訪俊雄, 小長谷義明: 日本酸素技報, (1984) 3, 1.
- 4) 諏訪俊雄, 小林伸明, 近野直治: 日本酸素技報, (1991) 10, 61.
- 5) 三宅博之, 諏訪俊雄, 小長谷義明, 小林伸明, 讃井宏, 國井大蔵: 日本酸素技報, (1989) 8, 33.
- 6) 飯野公夫, 讃井宏, 近野直治: 日本酸素技報, (1994) 13, 17.
- 7) 三宅新一, 諏訪俊雄, 鈴木喬: 無機マテリアル, 3 (1996) 262, 219.
- 8) 三宅新一, 諏訪俊雄, 鈴木喬: 無機マテリアル, 5 (1998) 277, 612.
- 9) 矢島尊, 村上伸吾, 三宅新一: 日本酸素技報, (1998) 17, 43.
- 10) 山本康之, 萩原義之, 北村裕一郎: 大陽日酸技報, (2008) 27, 6.
- 11) 村上真二, 鈴木一路, 萩原義之: 大陽日酸技報, (2009) 28, 34.
- 12) 五十嵐弘, 諏訪俊雄, 小林伸明, 菊池良輝, 杉山健: 材料とプロセス, 8 (1995) 1, 177.
- 13) 小林伸明, 飯野公夫, 五十嵐弘, 山本康之: 日本酸素技報, (1995) 14, 22.
- 14) 五十嵐弘, 小林伸明, 中林宏行: 日本酸素技報, (2000) 19, 30.
- 15) 五十嵐弘, 阿部智信, 三宅新一, 鷺見郁宏, 菊池良輝: 日本酸素技報, (2003) 22, 7.
- 16) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之: 大陽日酸技報, (2011) 30, 1.
- 17) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之: 第48回 燃焼シンポジウム前刷集, (2010), 566.
- 18) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之: 第49回 燃焼シンポジウム前刷集, (2011), 396.
- 19) Y.Hagihara, Y.Haneji, Y.Yamamoto and K.Iino: Energy Procedia, 120 (2017), 189.
- 20) 斉藤岳志, 清野尚樹, 山本康之, 萩原義之: 第54回 燃焼シンポジウム前刷集, (2016), USB memory.
- 21) 斉藤岳志, 山口雅志, 山本康之, 萩原義之: 第55回 燃焼シンポジウム前刷集, (2017), 492.
- 22) 山口雅志, 斉藤岳志, 山本康之, 萩原義之: 第55回 燃焼シンポジウム前刷集, (2017), 494.
- 23) T.Saito, Y.Yamamoto and Y.Hagihara: Proc. The Iron & Steel Technology Conference and Exposition (AISTech2019), Pittsburgh, Association for Iron & Steel Technology, Warrendale, (2019), USB memory.
- 24) M.Yamaguchi, T.Saito, Y.Yamamoto and Y.Hagihara: Journal of Thermal Science and Engineering Application, 11 (2019), 051022-1.
- 25) R.Murai, R.Omori, R.Kano, Y.Tada, H.Higashino, N.Nakatsuka, J.Hayashi, F.Akamatsu, K.Iino and Y.Yamamoto: Energy Procedia, 120 (2017), 325.
- 26) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP): 「エネルギーキャリア」終了報告書, 「アンモニア燃焼炉の技術開発」, <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-3.pdf>

(2019年9月26日受付)