

大陽日酸における酸素燃焼技術開発

Development of oxy-fuel combustion technologies in TNSC

小林 伸明*

KOBAYASHI Nobuaki

当社の酸素燃焼技術は、1970年に米国より酸素バーナを技術導入することより始まり、その目的は時代と共に大きく変遷してきた。当初は工業炉の増産への利用、その後、省エネルギー、環境対策、さらに、近年ではカーボンニュートラルへの貢献と変革している。このような状況のもと、当社が50年間にわたって開発してきた主要な酸素燃焼技術を紹介し、今後、これらの技術をベースにどのように展開すべきかを述べる。

Our oxy-combustion technology began with the introduction of oxy-fuel burner from the United States in 1970, and its purpose has changed significantly with the changing times. Initially, the purpose was to increase production by using it for industrial furnaces, then to save energy and environmental measures, and in recent years it has changed to contribute to carbon neutrality. Under these circumstances, this paper introduces the major oxygen combustion technologies that we have been developed over 50 years, and describes how they should be developed based on these technologies in the future.

1. はじめに

産業における酸素の利用は、鉄の溶接、溶断から始まった。日本産業界において、酸素バーナが本格的に採用されるようになったのは、1970年初頭からである。当時は、高度成長時代の末期であり、鉄スクラップの溶融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ことで生産性を向上させ、増産へ寄与することが目的であった。

しかし、その後の第一次、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。それ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、省コストへと変化した。

1990年代に入ると化石燃料の世界的な消費量の増大に伴い、二酸化炭素の排出による地球温暖化、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た。それと共に酸素燃焼技術の役割も省エネルギーに加え、環境問題への貢献へと変革していった。また、1997年の京都議定書、2015年のパリ協定により、温暖化効果ガスの削減が重要な課題となり、更なるエネルギー効率の向上、化石燃料から再生可能エネルギーへの転換な

ど、環境問題が産業構造に大きな影響を与えるようになって来た。

このような世の中の動向に応じ、当社は顧客ニーズを的確に捉え開発を進めてきた。本稿では、酸素燃焼の基本的な特徴、約50年にわたって取り組んできた酸素燃焼技術を紹介し、昨今の市場、環境問題を踏まえて今後の展望を論じる。

2. 酸素燃焼の特徴、効果

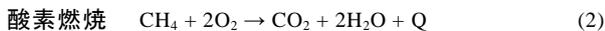
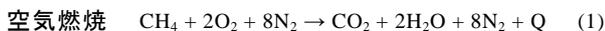
2.1 火炎温度とガス組成

酸素燃焼の特徴を空気燃焼と比較して示す。燃料としてメタンを用いた時の支燃性ガス中の酸素濃度と断熱状態における平衡火炎温度（断熱火炎温度）との関係を Fig.1 に示す。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 Fig.2 に示す。これらから、酸素燃焼は空気燃焼と比較して火炎温度が約800K高くなることに加え、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ことが判る。

メタンの燃焼において、空気燃焼と酸素燃焼の化学反応は Eq.(1) および Eq.(2)で示される。すなわ

* 技監

ち、Eq. (1) および Eq. (2) は、発熱反応である右辺に不活性ガスである窒素を含まない酸素燃焼が、エネルギー的に有利であることを示唆している。



火炎から被加熱物への伝熱形態には、直接的な伝熱である対流伝熱と間接的な伝熱である放射伝熱があり、それぞれ Eq.(3), Eq.(4)で示すことができる。

放射伝熱 $q = \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_s^4)$ (3)

対流伝熱 $q = h(T_f - T_s)$ (4)

- q : 熱流束 [W/m²]
- T_f : 火炎温度 [K]
- T_s : 被加熱物温度 [K]
- h : 熱伝達係数 [W/m²K]
- ε : 放射率 [-]
- σ : ステファン-ボルツマン定数 [W/m² K⁴]

酸素燃焼は空気燃焼と比較し火炎温度が約 800K 高くなり、Eq.(3)および Eq.(4)から、強制対流伝熱や放射伝熱の効率向上に大きく寄与することが判る。

また、Eq.(1)および Eq.(2)に示す通り、CH₄の燃焼火炎は CO₂ と H₂O の混合物である。CO₂ と H₂O の混合物は 1800~2300 K で一酸化炭素(CO), 水素(H₂), 酸素(O₂)に解離し、さらに、それ以上の温度では酸素原子(O), 水素原子(H), 水酸基(OH)などの状態に解離する。酸素バーナの火炎温度は 2300 K を超えるため、これらの熱解離が起こる。この火炎がセラミックス粒子等の被加熱物に衝突するとき、火炎の温度が低下し、この時、解離生成物が CO₂ と H₂O になるため解離潜熱を放出する。このため伝熱効率は一層増大する²⁾。

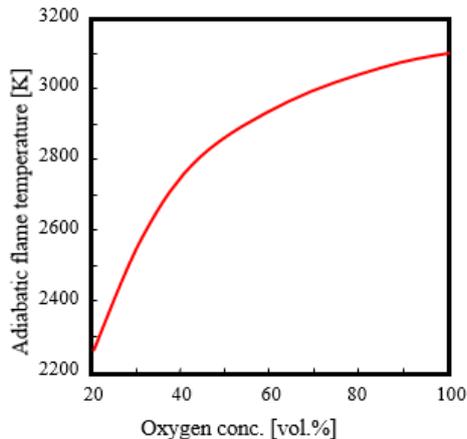


Fig. 1 Relationship between oxygen concentration and theoretical flame temperature

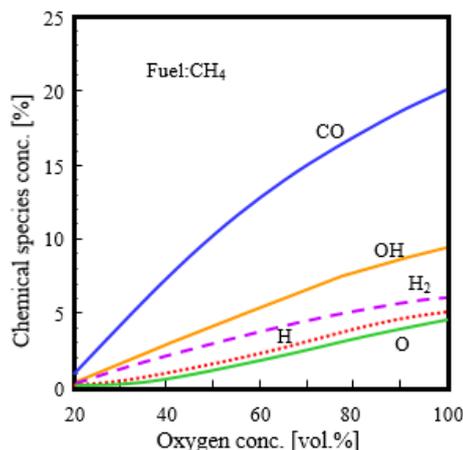


Fig. 2 Relationship between oxygen concentration and chemical species concentration in burnt gas

2.2 燃焼速度

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との関係を Fig. 3 に示す。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倍と非常に速くなり、高速な火炎を安定に形成することができる。被加熱物・溶融物に高温で高速な火炎を衝突させることで、高い強制対流伝熱と前述した解離生成物の再結合による潜熱も加わり、効率の高い伝熱が可能となる。また、比較的燃焼速度の低い燃料、例えばアンモニアなども安定に燃焼することができる。さらに、支燃性ガス量を燃料の燃焼に必要な化学量論比に対して増減させた状態で安定な燃焼を維持することができ、燃焼雰囲気酸化、還元雰囲気に制御できるため、使用用途に応じた燃焼特性を形成できる。

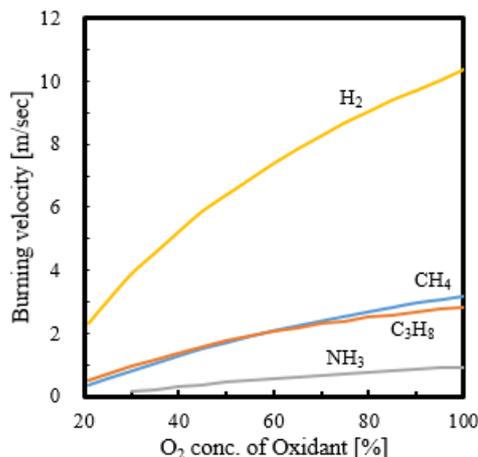


Fig. 3 Relationship between oxygen concentration in combustible gas and burning velocity

2.3 酸素燃焼のエネルギー効率

酸素燃焼では支燃性ガス中に窒素が含まれないため排ガス量も約 1/4 となる。排ガスが持ち去る熱量

が大きく減少し、大幅な省エネルギーが可能となる。

例えば、メタンを燃焼した場合の熱効率を（メタンの発熱量－排ガスの顕熱）／（メタンの発熱量）と定義したときの、排ガス温度と熱効率との関係を Fig. 4 に示す。この場合、熱効率は燃焼場（燃焼炉など）で使用される熱量の割合を示し、被加熱・溶融物への伝熱、炉体の加熱に利用される。

Fig. 4 から、例えば排ガスの温度が 1700K の場合には、その熱効率は空気燃焼で約 40%、酸素燃焼では約 80% にもなる。この場合には効率が 2 倍となるので、エネルギーの消費量は 1/2 で、酸素燃焼により大幅な省エネルギーが可能となる。

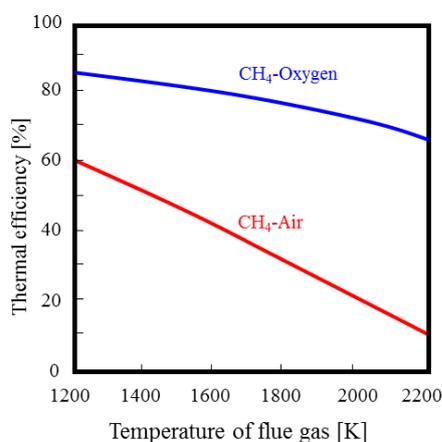


Fig. 4 Relationship between flue gas temperature and thermal efficiency in a furnace

2.4 酸素燃焼の解析

燃焼は、燃料の化学種の化学反応によって生じ、単純な燃料の燃焼速度だけでなく、燃焼場への燃料、支燃性ガスの供給方法の影響を大きく受ける。すなわち、バーナのノズル構造によって、火炎温度、流速、放射強度などが変わり、利用分野に適した火炎特性を有する必要がある。バーナノズル設計へのフィードバックのためにも火炎特性を把握することは重要で、その計測、解析が必要となる。

当社の酸素燃焼技術の開発は、灯油、重油などの石油系の液体燃料、天然ガス、プロパンなどの気体燃料及び微粉炭、チャーなどの固体燃料に対応してきた。また、酸素燃焼は非常に高温の反応場になるため、既存の測定方法を直接利用できない場合も多く、利用分野の燃焼雰囲気に適した計測方法を選択することで、開発を行ってきた。

(1) 燃焼場の計測

雰囲気温度の計測は一般的に熱電対などにより

直接温度測定が行われるが、火炎の計測では熱電対素子への放射熱の出入りにより正確なガス温度が測定できない、また、酸素燃焼火炎のように高温の火炎では熱電対の測定可能範囲を超えるなどの課題があった。このため、サクシオンパイロメータを改良して水冷式に変更して測定に利用した。その構造を Fig. 5 に示す。サクシオンパイロメータは雰囲気ガスを吸引しながら熱電対により温度を計測する方法で、放射の影響を除くことができ、また、水冷によりガス温度を熱電対による測定可能な範囲に低下させて計測する。このままでは正しいガス温度とならないので、別途、水冷によるガス温度の低下を、光学的手法を用いた計測機器にて補正した。

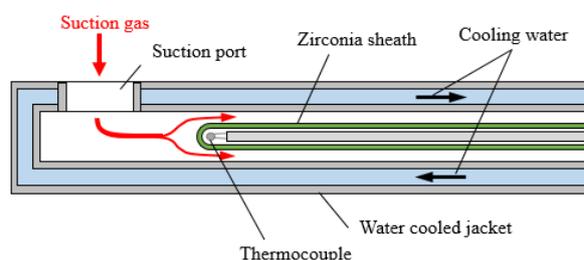


Fig.5 Schematic of the water-cooled suction pyrometer tip

更に詳細な火炎温度分布を得る測定法としては大きく二つに分けられる。一つは、レイリー散乱法、ラマン散乱法、CARS法、LIF法などレーザーを用い、多数の局所値を測定して分布を求めるものである。もう一つは、放射法、音速法、ホログラフィー法にCT(Computed Tomography)手法を組み合わせ、投影データから分布を求めるものである。これらの中で測定原理が比較的簡単な放射法を適用選択した。放射法では、H₂OやCO₂のガス放射あるいは吸収を利用する方法と、すす粒子等の固体放射を利用する方法がある。当社は、この放射法にCT手法を組み合わせ、火炎温度の二次元分布を測定する方法を開発した。

火炎中のガス流速の測定では、燃焼する燃料種によらず主に水冷式のピトー管を火炎中に直接挿入することにより、火炎各部の流速を測定した²⁾。

一方、液体燃料の燃焼は噴霧燃焼となるため、燃料の微粒化に伴う液滴の直径、分散などが燃焼状況に大きな影響を与えており、これらはバーナノズル設計に重要なパラメータとなる。このため、燃料の噴霧状況を、光学的手法を用いて測定した。噴霧測定法として、従来、高速度投影法、液浸法、レーザー回折法、ホログラム法などが用いられてきたが、局

所的な噴霧挙動や噴霧の時間的変動をとらえる場合には限界があるため、レーザーを用いた位相ドップラー法(PDA:Phase Doppler Anemometry)を用いた^{3,4)}。

PDA法の利点として、以下の2点が挙げられる。

- (1)非接触測定であるので場を乱さない
- (2)高空間・高時間分解能測定が可能である

PDA法は、レーザードップラー流速計(LDV:Laser Doppler Velocimeter)の原理を応用したものである。この原理とは、流体中に浮遊する粒子にレーザー光をあてることで、粒子から散乱される光がドップラー効果により粒子の移動速度に対応した周波数の変化を受け、この周波数の変化を検出することにより粒子の速度を求める方法である。

最適な燃焼方法を提供するバーナを開発するに当たっては、燃料の噴霧性状を把握することは非常に重要である。

さらに、工業炉等の使用場面を想定した場合に必要なとなる、具体的な火炎燃焼特性を評価する為に、放射熱流束測定と対流伝熱測定を行った。

放射熱流束測定には、 2π ファーンセラジオメーターを用い、大気解放もしくは炉内燃焼時の火炎からの放射熱流束分布を測定し、バーナ設計の妥当性評価や使用場面への適性を判断した。対流伝熱測定には、Fig.6に示す冷却水を流通させたCuパイプを組み合わせた水冷盤を製作し、水冷盤に火炎を衝突させた際の水温の変化から、伝熱量を測定する方法を用いた⁵⁾。

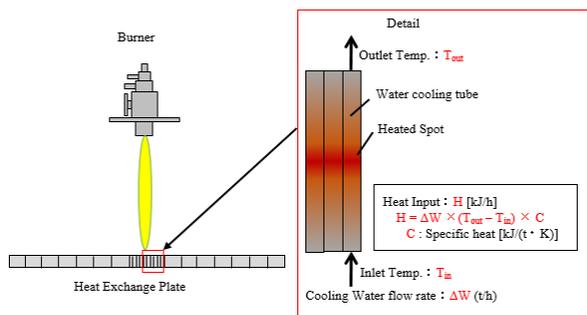


Fig.6 Experimental equipment for measuring heat transfer distribution

(2)燃焼場の解析

バーナの開発は、必要とする燃焼状態を得るために、設計、製作、燃焼試験を繰り返して進めている。また、工業炉に適応させるには、事前の手掛かり試験、実炉での試験などの手順を踏み、また、実炉では操業中の炉での試験となり、リスクを伴う。このため、開発のスピードアップ、実炉へのスムーズな適用、炉の設計へのフィードバックなどの目的で、

数値シミュレーションを活用してきた。

ガラス溶融炉、金属加熱炉、バーナ単体など、種々の分野で利用してきたが、代表的な例として、ガラス溶融炉へ酸素燃焼を適用した場合のシミュレーションについて、炉内温度分布をシミュレートした例をFig.7に示す⁶⁾。この解析コードは当社独自で開発した。開発当時は酸素燃焼に供することのできる汎用コードが無かったためである。現在ではいくつかの汎用コードを利用して、アプリケーション開発に利用している。

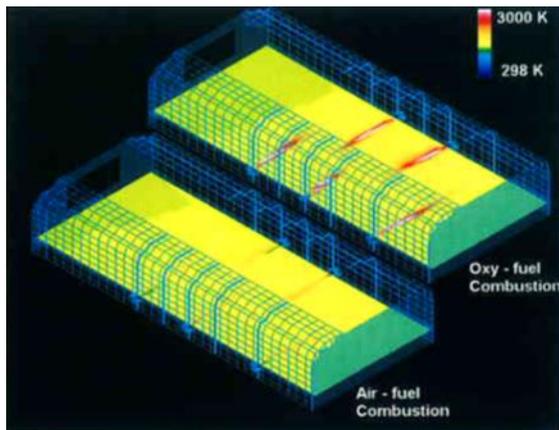


Fig.7 Temperature distributions in the glass furnace

3. 酸素燃焼技術の取組み(歴史)

当社は、1970年に米国 Air Reduction 社から酸素バーナの技術を導入した。この酸素バーナは、燃料となる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、空気バーナと共に溶融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。米国ではアルミニウムの溶融に使用するケースが多かったが、国内では主にスチールスクラップ電気炉の省エネルギー用として使用された。その他、アルミニウム溶融炉、耐熱セメント溶融炉、アルミナの焼結用キレン等に使用された。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だ。

1976年には、当時の労働省産業安全研究所と共同でポリ塩化ビフェニール(PCB)の燃焼分解技術に取り組み、補助燃料なしにPCB自身を燃料としてその分解率として99.99999%を達成した⁷⁾。本バーナは、一般の重油等の燃料を用いても高温・高速の火炎が得られるために、酸素バーナ「スーパー OFB-L型」として商品化した。本技術が、当社の酸素燃焼技術の原点であり、Fig.8(次頁)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。

技術開発	キーテクノロジー	1970	1980	1990	2000	2010	2020
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		←	→			
鉛溶鋳OFB利用	OFB配置最適化		←	→			
Fe-Ni酸素ランス	鋳石中の燃焼技術		←	→			
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		←	→	←	→	
鑄鉄溶解回転炉	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	自動振動・広範囲加熱				←	→	
アンモニア・水素燃焼	燃料対応					←	→

Fig. 8 History of oxy-combustion technologies developed by TNSC

Fig. 9 に各技術の適応先を示す。当社は、金属分野を主体にガラス、エネルギー、廃棄物分野などへの適応に取り組んできた。

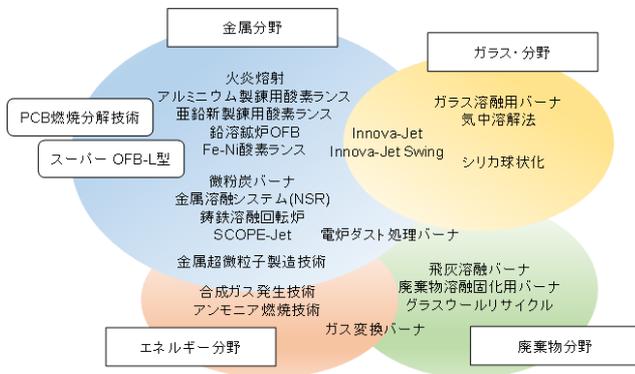


Fig. 9 Oxy-combustion technology initiatives

1980年代に入ると、当社は酸素燃焼を利用した様々な応用技術の開発に取り組み始めた。特に、金属分野では新規取組みを活発に行った。「火炎溶射」は転炉の炉壁を熱間で補修する目的で開発した技術である。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。この方法による補修層は、従来の湿式によるものと比べ、5~7倍の耐用性が確認された⁸⁾。

「アルミニウム製錬用酸素ランス」は、アルミナを直接還元してアルミニウムを製造する溶鋳炉の羽

口に、1073~1273Kの高温酸素を吹き込む技術である。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て耐用できる水冷ジャケット技術を確立した^{9, 10)}。「亜鉛新製錬用酸素ランス」は溶融還元用の原料鋳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：マッハ数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。「鉛溶鋳炉 OFB」は溶鋳炉羽口へ酸素バーナを設置することで、鉛溶鋳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」はニッケル含有鋳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る。高温鋳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技術と、高温の粒状鋳石の流動によるバーナの水冷ジャケットの摩耗対策及び水漏れ対策の技術を確立した¹¹⁾。

同時期に、オイルショックから石油代替エネルギーの検討が開始され、当社は埋蔵量が豊富な石炭の燃焼技術の開発に着手した。予熱した高温の酸素を用いることにより、微粉炭を重油-酸素バーナと同等の燃焼特性を有する「高温酸素を用いた微粉炭バーナ」を開発し¹²⁾、続いてその応用として、酸素バーナのみを用いて鉄スクラップを溶融する「金属溶融システム (NSR)」の開発を行った¹³⁾。本技術

開発では、酸素バーナによる鉄スクラップの熔融技術に加え、製錬の基礎技術を習得し、その後の鉄鋼分野へのアプリケーション開発に生かした。

金属分野では、さらに、鉄スクラップを熔融するアーク式電気炉 (EAF) 向けに、効率向上、電力代替を目的とした「高速酸素バーナランス SCOPE-JET」を、加熱炉、取鍋などの高効率予熱向けに「Innova-Jet」を開発して市場に投入した。これらについては後述する。

1990 年からは、技術開発の方向性を、酸素バーナ単体の開発から、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、世界的な二酸化炭素の削減に対する意識の高まりと、PSA 方式酸素製造装置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こととなった。それまでターゲット市場となっていた金属分野においては、火炎のガス速度が速い対流伝熱型の酸素バーナが主に用いられていたため、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ことを目的とした開発を行ってきた。しかし、ガラス熔融炉においては、バーナからの放射伝熱が重要となる。そこで、放射伝熱を高める方法として火炎中のすすの発生量及び滞留時間に着目し、液体燃料の微粒化方法及び、酸素の吹き込み速度を最適化した「ガラス熔融用バーナ」を開発した。この技術により、酸素燃焼をガラス熔融炉に適用することで、省エネルギー、低 NOx、高品質化を達成した^{6,14)}。

前述した「火炎溶射」は、高温の酸素火炎中で、セラミックス粒子を加熱・熔融する技術であり、これは後述する「シリカ球状化装置 CERAMELT」の基礎技術となった。CERAMELT は粉体供給から熔融処理、捕集まで一連のシステムで構成されている。本技術は、シリカのみならずアルミナ、フェライト、ガラス粉等電子材料などの熔融に展開した¹⁵⁻¹⁸⁾。その他にも火炎中で粉体を処理する技術として、焼却炉から発生する飛灰を処理する「飛灰熔融バーナ¹⁹⁾」、電炉で発生するダストを熔融する「廃棄物熔融固化用酸素バーナ²⁰⁾」、断熱材に使用されるグラスウールを熔融リサイクルする「グラスウールリサイクルシステム²¹⁾」などに応用展開し、産業廃棄物分野での実績を上げてきた。

また、最近では、前述したガラス業界においても革新的ガラス製造技術「気中溶解法」の開発が進め

られている²²⁾。この開発における重要な要素技術の一つとしても、ガラス原料粉体を酸素燃焼火炎中に投入し、高効率で加熱・熔融する酸素バーナ技術が揚げられており、酸素燃焼火炎を利用した粉体処理技術の可能性が拡大している²³⁾。

廃棄物分野ではエネルギー回収のためガス化熔融炉が実用化された。当社は、酸素中で燃料の燃焼速度が速くなり酸化還元制御が容易となる特性を利用して、廃棄物の熱分解ガス、熱分解オイル、チャーを部分燃焼して、水素、一酸化炭素を発生させる「ガス変換バーナ」の開発を行った²⁴⁾。さらに、火炎中で高温の還元雰囲気形成できることから、金属化合物を火炎中で還元処理することにより、金属超微粒子を製造する「金属超微粒子製造技術」の開発へ応用展開した。本技術はニッケル、銅などの酸化物を 100nm 以下の超微粒子とすることができるため、積層セラミックコンデンサ、導電性ペースト向けとして期待が大きい²⁵⁻²⁷⁾。さらに、これらの燃焼制御技術をもとに、天然ガスを部分酸化して合成ガスを得る技術の開発を行った²⁸⁾。

以上のように、当社は各分野からのニーズを的確に把握し、それらを開発へフィードバックし、市場に対応する手順で酸素燃焼技術の深化を図ってきた。

4. 主な酸素燃焼技術

前項では、酸素燃焼技術開発の変遷について述べた。本項ではそれらの中でキーとなった技術について、詳細に説明する。

4.1 高温酸素を用いた微粉炭バーナ

従来、酸素燃焼に用いられる燃料は、灯油、重油等の液体燃料と、LPG、水素等の気体燃料であった。その後、オイルショックを契機に石油代替エネルギーの観点から石炭が見直されるようになった。しかし、石炭は固体であり、液体燃料・気体燃料に比べると燃焼速度が遅く、スチールスクラップ等の金属熔融など、高温の火炎を必要とする用途には不向きであった。

当社は、この燃焼性が劣る点を、予熱した高温酸素を用いることにより燃焼速度を高め、高温の火炎を得ることで解決できるのではないかと考えた。そこで、高温酸素発生プロセスの開発、高温酸素に用いる金属・セラミックス材料の選定と耐久性試験、微粉炭の基礎燃焼特性の把握²⁹⁻³¹⁾および微粉炭酸素

バーナの開発¹²⁾を進めた。

微粉炭燃焼規模 150kg/h において、酸素予熱温度の燃焼率に及ぼす影響を Fig.10 に、火炎温度に及ぼす影響を Fig.11 に示す。Fig.10 から酸素の予熱温度が高くなるとともに燃焼率も高くなり、酸素予熱温度 1073K の場合、燃焼率はノズルからの距離 0.5m の位置で 0.75、1.0m の位置で 0.97 となった。また、Fig.11 に示すように、常温の酸素による火炎温度 2500K に対し、酸素を予熱することにより 2900K 以上の高温火炎が得られることを見出した。

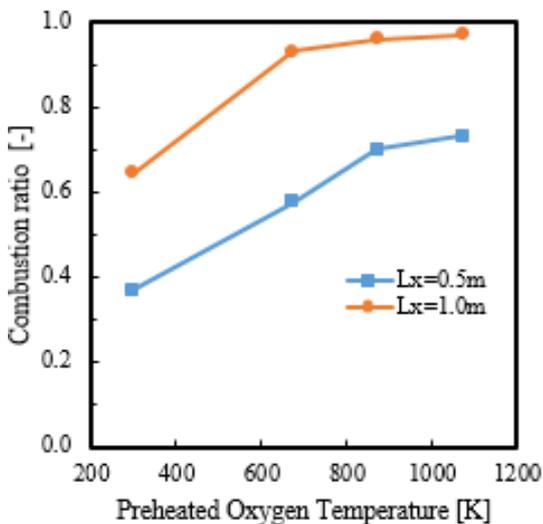


Fig.10 Effect of oxygen preheated temperature on combustion rate

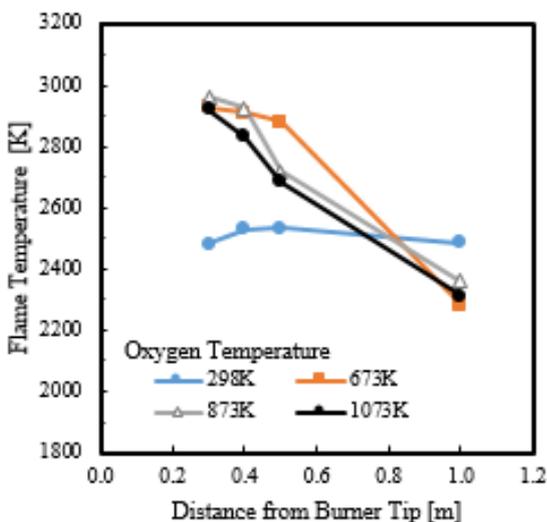


Fig.11 Effect of oxygen preheated temperature on flame temperature

これら結果を基にスケールアップを行い、高性能な微粉炭バーナ（微粉炭 500kg/h、酸素 750Nm³/h）を開発した。必要な酸素予熱温度は微粉炭の燃焼規

模により異なり、570~1070K の範囲である。

本技術は、微粉炭を、高温酸素を用いて安全に、効率的に燃焼する技術として関連業界、学会等で高い評価を受け、次項で示す金属溶融技術の基盤となった。また、酸素予熱方法に関し、熱交換による間接加熱方法、酸素中で燃料を燃焼して直接酸素を加熱する方法などを開発し、酸素予熱の基礎技術を確立した¹²⁾。

4.2 金属溶融システム「NSR」

日本の粗鋼生産量の約 30%が、鉄スクラップをリサイクルして生産されている。この大部分は電気を利用したアーク式電気炉（EAF）で溶融再生されており、非常に多量の電力を消費する。

電気は高質なエネルギーで利用しやすいが、発電時に投入されたエネルギーをベースに考えると、鉄スクラップの有効熱効率は約 25%と低くなる。当社は通商産業省（当時）の補助事業で、2800K 以上の高質なエネルギーが得られる酸素燃焼のみで直接鉄スクラップを溶融再生する基礎技術を確立した³²⁻³³⁾。

本技術は、酸素バーナに投入した熱の 50~60%が有効に利用されるプロセスであり、大幅な省エネルギーが可能となった。

この酸素バーナのみで鉄スクラップを溶融再生する炉の基本構造を Fig.12 に示す。溶融再生炉は、溶融部、湯溜部および保持炉から構成されており、それぞれの部位には複数の酸素バーナが設けられている。燃料としては、気体、液体、固体燃料が状況に応じて選択できる。

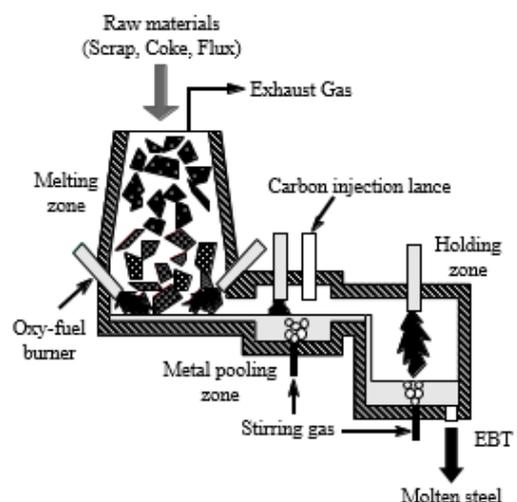


Fig.12 Schema of NSR process

熔融部炉頂より副資材とともに装入された鉄スクラップは、炉下部に設けられた複数の酸素バーナで連続的に熔融され、湯溜部、保持部へと流れ込む。保持部では一時的に溶鋼が保持され、製錬・昇温され 1870K 以上で間欠的に出鋼される。湯溜部と保持部より発生する全ての燃焼排ガスは熔融部の鉄スクラップ層を通過するため、熔融部の炉頂から出る排ガス温度は 500~600K と低く、熱効率の高いプロセスとなっている。パイロット規模の熔融能力 6t/h で、本プロセスの熱効率、炭素 (C)、リン (P) などの成分の制御性、ダスト排出特性などを調査した。その結果、一般的な EAF と比較すると約 40% の省エネルギーを達成したことが判った (Fig.13)。

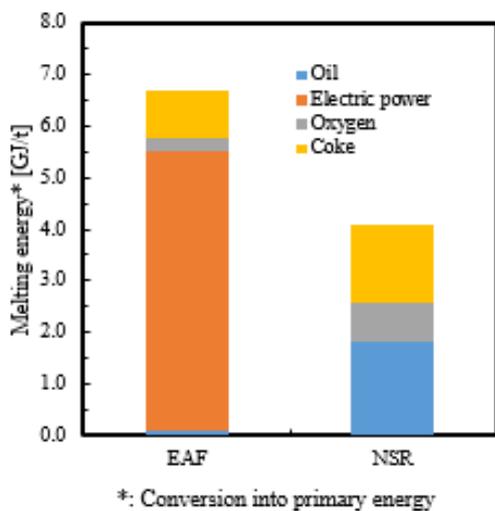


Fig.13 Comparison of melting energy

当社が考案した新プロセスは連続式であったため当時のニーズにマッチしなかったこと、耐火物の耐久性など開発要素が残っていたことから、実用化までは至らなかった。しかしながら、本開発から得られた知見は、その後の電炉分野への応用に生かすことができた。

4.3 高速酸素バーナランス : SCOPE-JET

当社は、金属熔融で培った技術を基に、鉄スクラップの熔融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³⁴⁻³⁷⁾。SCOPE-JET は、酸素燃焼バーナと、酸素を溶鋼に吹き込むランスの機能を併せ持つバーナランスである。

Fig.14 に超音速酸素噴流の概念図を示す。本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でき、さらに超音速酸素

ジェットの速度および酸素濃度の減衰を大幅に抑制することができる。

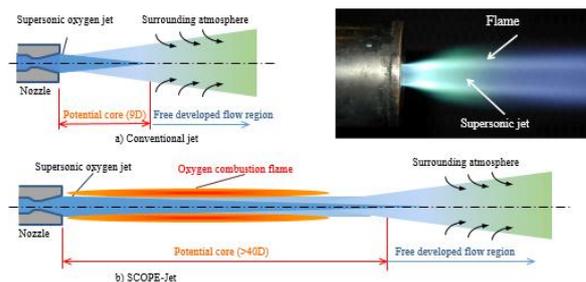


Fig.14 Schematic diagram of supersonic oxygen jet

SCOPE-JET は、2003 年より電炉の補助熔融技術として市場展開した。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、Fig.15 に示すように鉄スクラップが投入された直後の「熔融期」では酸素バーナとして機能してスクラップ熔融を促進させ、スクラップが溶け落ちた「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大きく寄与することができた。

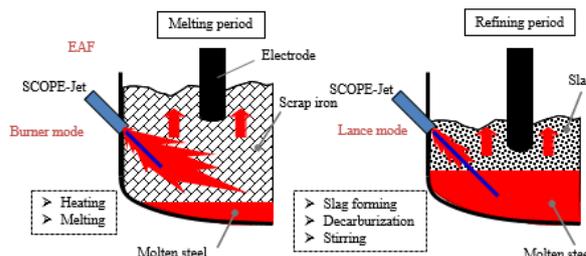


Fig.15 Schematic diagram of SCOPE-JET operation in electric arc furnace

SCOPE-JET は、燃料として都市ガス、LPG 等のガス燃料、灯油、重油等の液体燃料に加え、コークス炉ガス (COG: Cokes Oven Gas) 等の低圧・低カロリー燃料にも対応している。また、酸素ジェットの噴出速度も、開発当初はマッハ数 1.5 であったが、現在ではマッハ数 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。

4.4 超低 NOx 酸素富化バーナ Innova-Jet

高温の加熱炉に酸素富化燃焼を適用する場合、炉内の温度上昇に伴い生成される窒素酸化物 (NOx) を抑制することが課題となる。この課題を解決したのが、酸素富化燃焼時において NOx を大幅に低減する酸素富化バーナ Innova-Jet である³⁸⁻⁴¹⁾。本バーナは、酸化剤中の酸素濃度と酸素比を周期的に変化さ

せるという当社独自の振動燃焼を用い、通常の酸素富化燃焼と比較して NOx の排出量を 1/20 まで低減した (Fig.16)。また、支燃性ガスの流量を周期的に大きく変動させることにより、炉内ガスの攪拌が行われ、伝熱効率も約 10% 向上した。本技術は取鍋予熱等に適用され、30~40% の燃料削減効果が得られた。

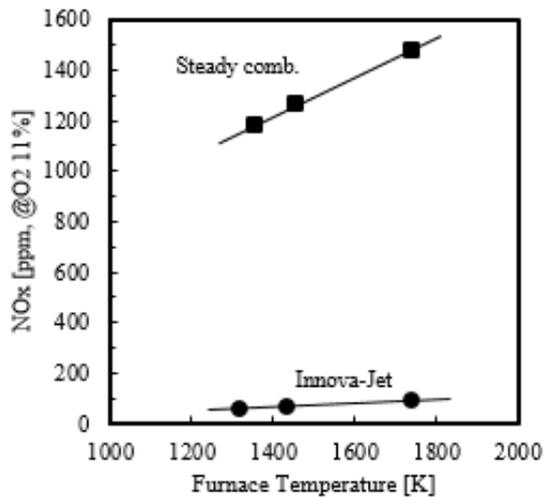


Fig.16 Comparison of NOx emission characteristics between conventional oxygen-enriched combustion and Innova-Jet

酸素燃焼や酸素富化燃焼は、排ガス量の低減で熱効率を向上できる。その一方で、高い火炎温度により局所的な高温が生じやすく、温度分布を均一に制御する技術が求められる。この課題を解決すべく、当社は自励振動現象を利用した Innova-Jet Swing を開発した⁴²⁻⁴⁵⁾。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ことで、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 (Fig.17)。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ることができ、加熱領域を拡大できる。一例として、火炎が左右に振動する様子を Fig.18 に示す。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構造となり、メンテナンス性にも優れている。

適用対象の一例として、タンディッシュ*予熱において、40%酸素富化の運転条件で空気燃焼と比較し、燃料使用量を 40%削減できることを確認した。

*タンディッシュ：連続鋳造機で取鍋から鋳型に注がれる溶鋼を途中で一時受け止め、介在物を更に取り除く受け皿。

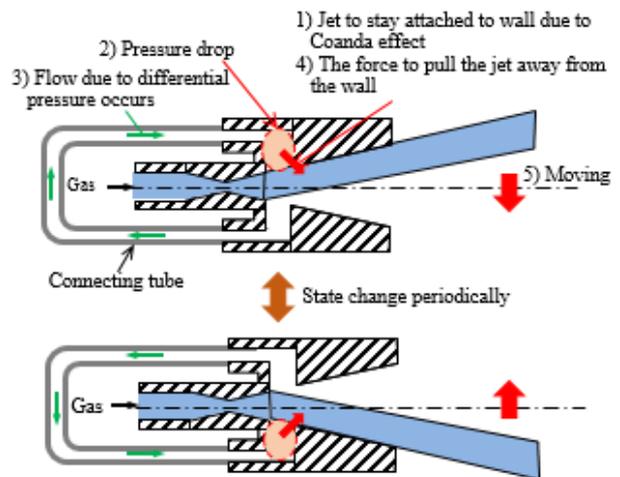


Fig.17 Schematic diagram of self-induced oscillation nozzle

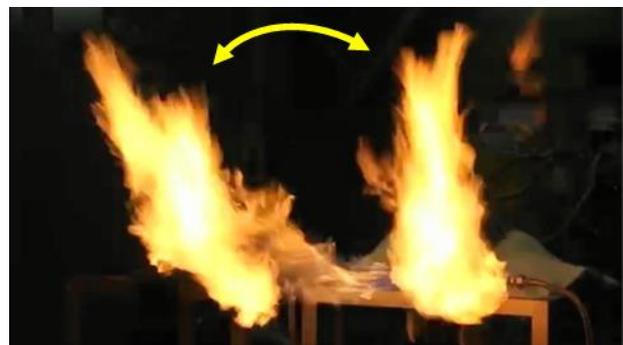


Fig.18 Combustion state of self-induced oscillation burner

4.5 シリカ球状化技術 CERAMELT

本技術は、前述した火炎熔射補修技術を応用し、酸素燃焼火炎の中にセラミックスの粉碎品を投入し溶融処理する技術である¹⁵⁾。

半導体の小型化、高性能化などにより、半導体デバイスは高集積が進んでいる。これに伴い半導体封止方法も変遷してきた。半導体の封止は、外部環境からの保護、強度の付加の観点から行われ、従来、封止材として粉碎溶融シリカをフィルターとして配合したエポキシ樹脂が使用されていた。しかし、集積度の向上に伴い、高密度充填などの目的で、流動性を向上させた球状の非晶質シリカが多く利用されるようになった。

この球状化シリカを得る方法は、高温の酸素燃焼火炎中に高純度シリカ粉を投入し、火炎中で完全に溶融し、ガラス化して球状にするものである。高純度シリカの融点は 1923K と高く、溶融体の粘性が高く完全に溶融して球状化およびガラス化するためには、高温での十分な滞留時間が必要である。当社は、この球状化に適した火炎特性を形成するバーナとシ

システムを開発し、球状化技術を確立した。システムのフローを Fig.19 に示す。

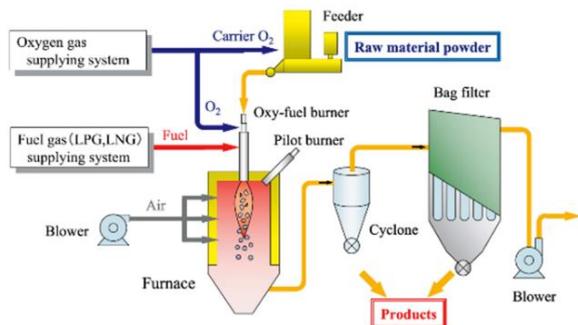
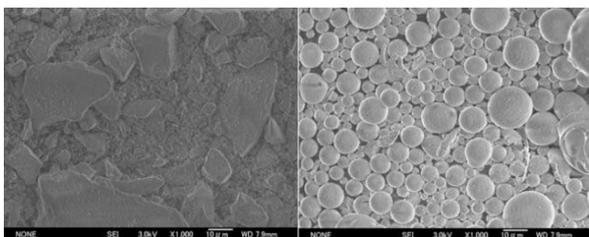


Fig.19 Schematic diagram of apparatus

原料シリカおよび球状化したシリカの形状を Fig.20 に示す。原料シリカは結晶質であり、処理後の球状化シリカのガラス化率は 97%以上と高品位な製品が得られる。



(a) Raw material (b) products

Fig.20 Pictures of raw material and products

近年、半導体の高度化に伴い、球状化システムは粒径の異なる多種多様な材料への対応が求められており¹⁶⁻¹⁸⁾、開発のスピードアップのために効率的なアプローチが必要となってきた。そこで、当社は数値シミュレーションを利用して酸素火炎内での粉体挙動を予測する技術を開発した⁴⁶⁾。

シミュレーションの一例を Fig.21 に示す。粒径の異なる二種類の原料 (15 μm , 5 μm) について解析を行なうことで、粒子の運動量に起因する分散性の違いが小粒径に対する加熱性能に影響を及ぼす可能性を見出した。これらをバーナ設計にフィードバックした結果、実験との整合性が得られた。当社は数値シミュレーションを用いて酸素燃焼火炎中における粉体の流動および温度挙動を予測する技術を確立した。

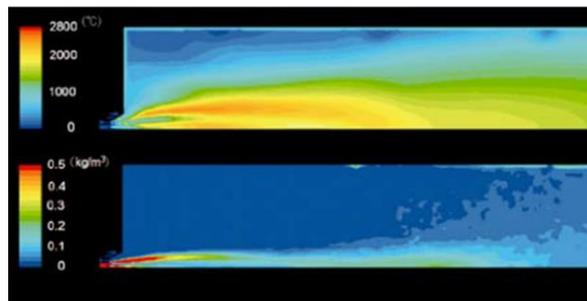


Fig.21 Contour of gas temperature and particle concentration

4.6 ガラス分野向け酸素バーナ

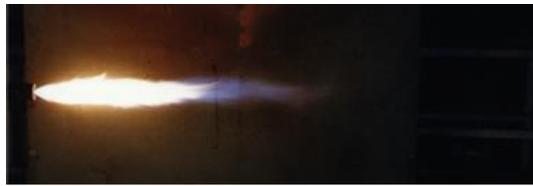
一般にガラス業界では、ガラス原料を大量の燃料を使用して空気燃焼で溶融している。この業界での環境面の主な課題は、省エネルギー、燃焼に起因する NOx 発生抑制である。加えて空気燃焼は熱効率が低いため、大型の熱回収装置・蓄熱炉が必要とされる。その改築時には、ホウ素や鉛、着色剤や添加材に含まれる重金属で汚染された大量のレンガ・産業廃棄物が発生するので、これらの削減も課題となる。

欧米では、日本に先駆け、主に NOx 発生抑制を目的に空気燃焼から酸素燃焼への代替が行われてきた。欧米の燃料は主に天然ガスであり、液体燃料が中心の日本のガラス業界では、この欧米技術を直接導入することが困難であった。このため環境問題への取り組みに積極的な国内のガラスメーカーが欧米の酸素燃焼への代替技術に注目し、1990 年から当社と重油を燃料としたガラス溶融用酸素バーナの共同開発に取り組み、約 2 年後に実用化を果たした。

ガラス溶融の伝熱形態は主に燃焼火炎からガラス、炉壁への放射伝熱である。この火炎からの放射伝熱能を高めるために、重油の霧化粒径・噴霧方法および酸素の導入方法を詳細に検討し、当社の放射伝熱型酸素バーナ「スーパー OFB-LR」のベースを築き上げた¹⁴⁾。標準型「スーパー OFB-L」と本バーナの火炎状況の比較を Fig.22 に、火炎からの放射熱流束の比較を Fig. 23 に示す。放射型バーナは標準型の 5 倍以上の放射伝熱量を有している。

この放射伝熱型酸素バーナをガラス溶融炉に適用することにより、Table 1 に示す結果を得ることができた。本技術は従来の空気燃焼と比較して、重油の原単位を 40%以上削減し、NOx も 60%減少した。さらに、ガラス品位に大きく影響するガラス中の気泡量も 75%削減することができた。

このような大きな効果を得て、日本で初めての酸素燃焼によるガラス溶融窯が誕生したのである。その後ガラス業界では積極的な酸素燃焼技術の検討が進み、特に付加価値の高いガラス種に導入が進んだ。



Super OFB-L



Super OFB-LR

Fig.22 Comparison of oxy-fuel burner flame

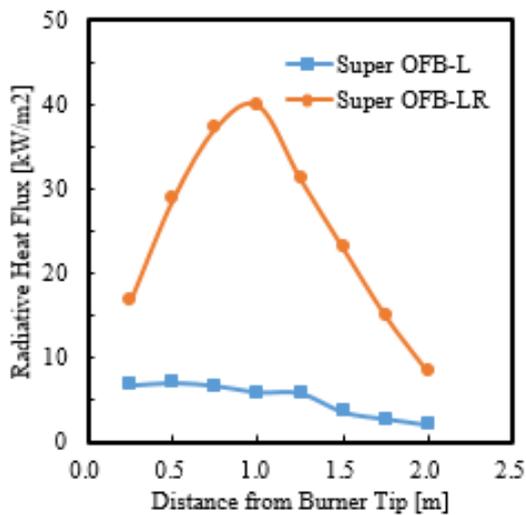


Fig.23 Comparison of radiative heat flux distribution of flames

Table 1 Example of effects of oxy-combustion in a glass melting furnace

	Oxy-combustion	Air combustion
Oil consumption [-]	59	100
Seeds [-]	25	100
NOx emissions [-]	40	100

4.7 合成ガス発生技術

エネルギー源として原油より可採年数が長く、産出国が一部の地域に限られない天然ガスやシェールガスを利用するため、これらのガスから液体燃料を製造する技術 (GTL: gas to liquids) が開発されている。このプロセスでは、天然ガスなどを合成ガス (H₂, CO) に変換する必要がある、その方法の一つに部分酸化法がある。

当社では、天然ガス、プロパンなどの気体燃料を部分酸化し、合成ガスを製造する技術を開発した^{28,47)}。ラボ試験装置のフローを Fig.24 に示す。

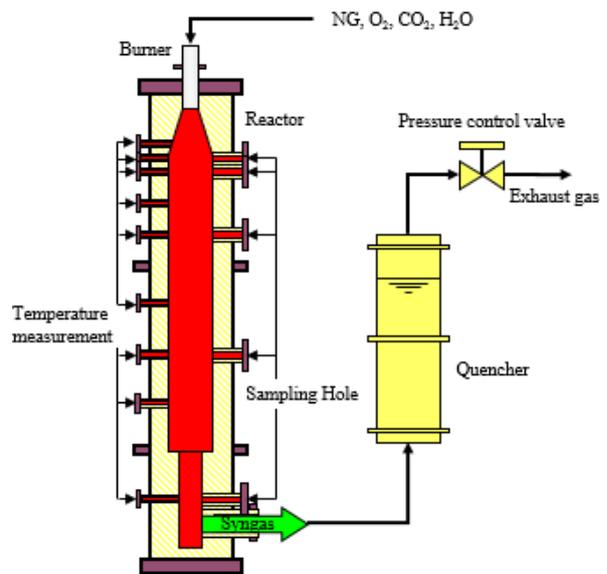


Fig.24 Schematic diagram of test equipment (lab scale)

本装置を用いて、炉内圧力が大気圧から 2.3MPa までの、反応効率、生成する合成ガスの H₂/CO 比の制御性、すすの発生特性、燃焼室負荷などを調査した。炉内の温度分布 (ガス温度、炉内壁温度) の一例を Fig.25 に示す。圧力が高くなるとバーナ近傍でガス温度が高温となり、高圧化により燃焼負荷を高めることが可能となる。得られた合成ガス組成の一例を平衡計算結果と共に Table 2 に示す。一部未反応のメタンが残留しているが、実験値は、この残留メタン量を考慮した平衡計算結果とよく一致しており、プロセス設計の基本データが得られた。この残留メタンは反応炉の下流に触媒を設置することで、分解できることを確認した。

ラボ試験結果を基に、経済産業省のジメチルエーテル (DME) の直接合成プロジェクト⁴⁸⁾において、本技術を合成ガス発生装置へ提供した。本プロジェクトは DME を 100ton/日製造する実証プラントである。このプラントでの合成ガス発生装置は、運転圧

力 2.3MPa において、合成ガス量 14,000Nm³/h (H₂/CO=1.0) の規模となった。当社はこのプロジェクトを通じ、スケールアップ技術と長期安定運転技術を確立した。

なお、本技術は、天然ガスなどの燃料、CO₂、H₂O を原料として合成ガスを発生するもので、回収された CO₂ を用いることにより、CO₂ リサイクルにも貢献できる。

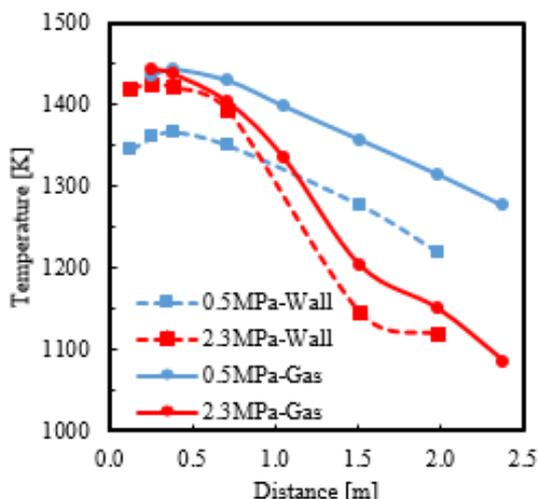


Fig.25 Temperature distribution in the furnace

Table 2 Syngas composition by laboratory test (2.3MPa)

	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	Temp. [K]
Measured	22.2	28.1	16.2	22.5	6.2	1312
Equilibrium value	22.6	29.1	17.4	24.3	6.6	1310

4.8 アンモニア燃焼技術

酸素燃焼技術は、前述したように大幅な省エネルギーを達成できることから、二酸化炭素の排出量抑制に大きく貢献できる。更なる排出量の削減には、再生可能エネルギーの大規模利用やカーボンフリー燃料の普及が必要である。この代表的なものとして水素があげられるが、その貯蔵や輸送といった供給面において、エネルギー密度を上げるために、液化、高圧の技術が必要となる。このため、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考えられている。日本においては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、従来から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 240K、常温では 0.857MPa で液化するので、水素と比較して液化が容易である。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ことで、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：Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）より、アンモニア燃焼炉の技術開発を受託した。アンモニアは構造に N を含有するので、そのまま燃焼すると NO_x を排出する。当社は自社で培った技術を基に、ノズル構造、燃焼方法を最適化することで、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。さらに、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み（Fig.26, Fig.27）、実際の亜鉛メッキ鋼板製造工程での実証試験にて、その有用性を確認した^{49,50}。

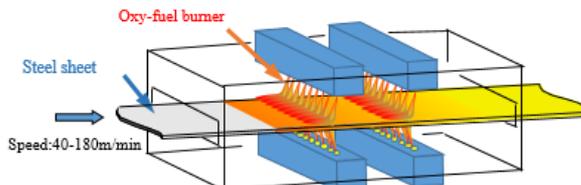


Fig.26 Evaluation test furnace with oxy-fuel burner

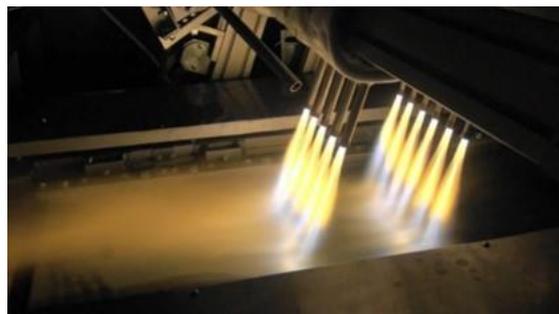


Fig.27 Combustion state of ammonia

5. 酸素燃焼の将来展望

酸素燃焼は時代と共に、まず増産技術として利用が始まり、省エネルギー・省コスト技術として、更には環境負荷低減技術として、その役割が変遷してきた。現在では、カーボンニュートラルに、酸素燃焼技術でいかに貢献するかがキーワードとなると考える。

それらは、革新的な省エネルギー技術、二酸化炭素回収およびカーボンフリーエネルギーへの対応である。

5.1 酸素燃焼による革新的な省エネルギー

前述したように、空気燃焼を酸素燃焼に変更することで、燃料の使用量を半分近くに低減できる。これは燃料に化石燃料を利用する場合、二酸化炭素の発生量が半分になることを意味している。また、酸素燃焼専用の炉への変更、廃熱回収とそれによる原料、酸素の予熱などにより、更なる省エネルギーが可能となる。

酸素燃焼では（前述したように）、空気燃焼と比較して 3000K 程度の非常に高温で高質な燃焼場が得られる。温度条件から考えると、例えば高温が必要なプロセス、中温で良いプロセスおよび廃熱回収などを組み合わせ、エネルギーをカスケードに利用することも有効であると考えられる。このためには、新たな要素技術、プロセスの提案、開発が不可欠である。

酸素燃焼技術を実際に利用する場合には、その経済性から酸素の製造に要するエネルギー、酸素の価格を合わせて考慮する必要がある。プロセスから排出される廃熱を酸素製造のエネルギーに利用することにより、省エネルギーおよびコスト低減を達成できるシステムを構築する必要がある^{51,52)}。

この様に、酸素燃焼と他の技術の組み合わせにより、工業プロセスにおいて、更なる省エネルギーが可能となる。

5.2 二酸化炭素回収

化石燃料を酸素燃焼した場合、利用するプロセスから発生する特有のガスを除けば、その燃料の成分によるが、燃料の燃焼後に排出されるガスはほとんどが水蒸気と二酸化炭素である。水蒸気は熱回収プロセスで水として容易に除去できるため、残りは高濃度の二酸化炭素である。これにより、二酸化炭素の回収、再利用、固定化 (CCUS) を行うことができる。また、その他のガスを含む場合は、当社の技術であるガスの分離⁵³⁾、精製技術を利用することにより、CCUS が容易となる。

今後、工業プロセスで使用されるカーボンフリーエネルギーは、水素、アンモニアなどのカーボンフリー燃料と電力が主体となると考える。しかし、多くのプロセスは、エネルギーを一度に変換することは難しく、種々のエネルギーを組み合わせながら (ハイブリッド) 進んでゆくと考える。このため、そのプロセスへのニーズ、課題を的確に捉えて、酸素燃焼技術を提案してゆく必要がある。

6. まとめ

酸素燃焼の基本的な特徴、当社の酸素燃焼技術開発、市場への取り組みを述べた。昨今のカーボンニュートラルへの取り組みにおいて、酸素燃焼技術は省エネルギーに貢献する重要な技術の一つである。前述したように、空気燃焼を酸素燃焼に変更することで、燃料原単位が約 1/2 になり、また、酸素製造時の二酸化炭素の発生を加味しても大幅な省エネルギーとなり、二酸化炭素発生量の削減に大きく寄与できると考える。短期的に考えれば、空気燃焼で実施されている現状のプロセスを酸素燃焼に置き換えるだけでも大幅な省エネが可能である。

同時に、酸素燃焼は水素、アンモニアなどのカーボンフリー燃料にも対応でき、両方を平行して進めてゆくことが、カーボンニュートラルに貢献できると考える。今後、更に技術レベルを向上して、市場ニーズに対応した利用技術開発を的確にかつ迅速に対応して行きたい。

※ **スーパ-OFB**, **SUPER OFB**, SCOPE-JET, Innova-Jet,

CERAMELT は大陽日酸の登録商標です。

参考文献

- 1) 関宏次. 日本酸素における酸素燃焼技術開発の歴史. 日本酸素技報,1996,15,p2-12.
- 2) 今吉照一, 西野正剛. 純酸素バーナ (スーパーOFB) の特性. 日本酸素技報,1983,2,p35-43.
- 3) 鈴木一路, 諏訪俊雄, 飯野公夫. 酸素燃焼において燃料の微粒化特性が燃焼状態に及ぼす影響. 微粒化シンポジウム講演論文集,1997,.6,p47-52.
- 4) 飯野公夫, 村上真二, 赤松史光, 香月正司. 高压下におけるメタン-酸素同軸乱流非予混合火炎の流動場特性に関する研究. 大陽日酸技報,2005,24,p34-40.
- 5) 飯野公夫, 近野直治, 讚井 宏. ガラス溶解用酸素バーナの開発. 日本酸素技報,1994,13,p17-21.
- 6) 岡森克高. ガラス熔融炉内酸素燃焼のシミュレーション. 日本酸素技報,2000,19,p22-29.
- 7) 平野 堯, 今吉照一, 桜井澄雄. ポリ塩化ビフェニールの酸素焼却処理. 日本酸素技報,1985,4,p13-21.
- 8) 諏訪俊雄, 小長谷義明. LD 転炉, コークス炉の溶射補修技術. 日本酸素技報,1984,3,p1-12.
- 9) 諏訪俊雄, 小林伸明, 平野 堯. 日本酸素. 特許第 1905216号
- 10) 諏訪俊雄, 小林伸明, 平野 堯. 日本酸素. 特許第 1940269号
- 11) 諏訪俊雄, 小林伸明, 近野直治. フェロニッケル製錬電気炉省電力酸素ランス技術. 日本酸素技報,1991,10,p61-67.
- 12) 三宅博之, 諏訪俊雄, 小長谷義明, 小林伸明, 讚井宏, 國井大藏. 酸素予熱装置を用いた微粉炭バーナーの実用化開発. 日本酸素技報, 1989,8,p33-40.
- 13) 小林伸明, 飯野公夫, 五十嵐弘, 山本康之. 酸素燃焼による金属熔融システム技術の開発 (第1報). 日本酸素技報,1995,14,p22-32.
- 14) 飯野公夫, 近野直治, 讚井 宏. ガラス溶解用酸素バーナの開発. 日本酸素技報,1994,13,p17-21.
- 15) 矢嶋尊, 村上伸吾, 三宅新一. 酸素燃焼による酸化物粒子の球状化技術. 日本酸素技報,1998,17,p43-53.
- 16) 村上真二, 鈴木一路, 萩原義之. 高融点材料用球状化システム. 大陽日酸技報, 2009,28,p34-35.
- 17) 三宅新一, 木野村暢一, 鈴木喬. 酸化物粒子の球状化技術と複合材料. 無期マテリアル,1998,5,p612-621.
- 18) MIYAKE,S.; KINOMURA,N.; SUZUKI,T.; SUWA, T.Fabrication of spherical magnetite particles by the flame fusion method.J.Mater.Sci.1999,34,p2921-2928
- 19) 山田進, 金藤鉦一郎, 三宅新一. 飛灰熔融炉に適用する酸素燃焼バーナの開発. 工業加熱,2003,40(2),p23-28.
- 20) 三輪守, 岡本徹夫, 坪倉淳一, 小泉維昭. 大同特殊鋼, 日本酸素. 特許第 3584434号
- 21) 山本康之, 飯野公夫, 平 博司, グラスウール廃材再原料化装置の開発. 大陽日酸技報, 2004,23,p61-66
- 22) 酒本修, 伊勢田徹. ガラス熔融工程における省エネルギー技術. 伝熱.2010,49(207),p14-18.
- 23) 藤本隆之, 山本康之, 萩原義之, 飯野公夫. 高効率粉体直接熔融バーナの開発. 大陽日酸技報,2012,31,p1-6
- 24) 飯野公夫, 三宅新一, 矢嶋尊. 日本酸素. 特許第 3574967号
- 25) 大陽日酸. 酸素燃焼による画期的な金属ナノ粒子合成技術を開発. 大陽日酸ニュースリリース. 2014-01-14.
- 26) 櫻本裕二, 五十嵐弘, 藤本隆之, 松村孝之. 酸素燃焼法による金属ナノ粒子製造技術.JETI,2014,62(7),p27-30.
- 27) 藤本隆之, 櫻本裕二, 松村孝之, 五十嵐弘. 酸素燃焼による複合ナノ粒子合成技術の開発. 大陽日酸技報,2014,33,p1-6
- 28) 飯野公夫, 三宅新一, 矢嶋尊, 村上伸吾. 大陽日酸. 特許第 4406495号
- 29) 小林伸明, 鈴木喬, 諏訪俊雄. 微粉炭単粒子燃焼におよぼす酸素温度・酸素濃度の影響. 石膏と石灰,1994,(250),p13-19.
- 30) 小林伸明, 鈴木喬, 諏訪俊雄. 高酸素濃度中における微粉炭単粒子の燃焼機構. 無期マテリアル,1994,1(253),p33-39.
- 31) KOBAYASHI N.; SUZUKI T.; SUWA T.Combustion Behavior and Surface Characteristics of Pulverized Coal particle. Inorganic Materials,1995,2(255),p115-120.
- 32) 五十嵐弘, 諏訪俊雄, 有賀敬記, 小林伸明, 牧敏道ら. 酸素バーナによる金属連続溶解技術の開発. 日本酸素,NKK.1999,12(1),p135.
- 33) 五十嵐弘, 小林伸明, 中林宏行. 酸素燃焼による金属熔融技術の開発 (NSR Process). 日本酸素技報,2000,19,p30-37.
- 34) 諏訪俊雄, 小林伸明, 五十嵐弘. 日本酸素. 特許第 4077534号
- 35) 鷺見郁宏, 川畑涼, 菊地良輝, 五十嵐弘, 中林宏行, 小林伸明. 超音速酸素ジェット挙動に及ぼす高温場の影響. 材料とプロセス,2001,14 (4) ,p876.
- 36) 五十嵐弘, 阿部智信, 三宅新一, 鷺見郁宏, 菊地良輝. 高速酸素バーナランス (SCOPE-JET) の開発. 日本酸素技報,2003,22,p7-12.
- 37) 山口雅志, 山本康之, 萩原義之. 高温酸素を利用した超音速酸素バーナランスの開発. 大陽日酸技報, 2019,38,p28-33

- 38) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之. 超低 NOx 酸素富化燃焼システム「Innova-Jet」. 大陽日酸技報,2011,30,p1-6
- 39) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之. 超低 NOx 酸素富化燃焼法の開発. 第 48 回 燃焼シンポジウム前刷集, 2010,p566.
- 40) 羽路智之, 飯野公夫, 萩原義之, 山本康之. 超低 NOx 酸素富化燃焼技術の開発. 第 49 回 燃焼シンポジウム前刷集,2011,p396.
- 41) Y.Hagihara,Y.Haneji,Y.Yamamoto and K.Iino.Ultra-Low NOx Oxygen-enriched Combustion System using Oscillation Combustion Method.Energy Procedia,2017,(120),p189.
- 42) 齊藤岳志, 清野尚樹, 山本康之, 萩原義之. 自励振動を利用した対流伝熱型酸素富化バーナの開発. 大陽日酸技報,2016,35,p1-7
- 43) 齊藤岳志, 山口雅志, 山本康之, 萩原義之. 自励振動現象の燃焼機器への適用-自励振動を利用した放射伝熱型酸素富化燃焼バーナ. 第 55 回 燃焼シンポジウム前刷集,2017,p492.
- 44) 山口雅志, 齊藤岳志, 山本康之, 萩原義之. 自励振動現象の燃焼機器への適用-振動周期の影響とその制御. 第 55 回 燃焼シンポジウム前刷集,2017,p494.
- 45) M.Yamaguchi,T.Saito,Y.Yamamoto and Y.Hagihara. Development of the Oxygen-enriched Burner using Self-induced Oscillation. J.Thermal Sci.Eng. Appl.,2019,11,051022-1
- 46) 山本康之, 萩原義之, 北村祐一郎. シミュレーションを用いた酸素燃焼火炎内での粉体挙動の予測. 大陽日酸技報,2008,27,p6-11
- 47) 鈴木 一路, 小林伸明, 山本康之. 大陽日酸. 特許第 4936817 号
- 48) 大野陽太郎, 吉田雅裕, 鹿田勉, 猪越治, 小川高志, 井上紀夫. DME (ジメチルエーテル) の新直接合成技術と利用技術. JFE 技報,(6),2004,p70-75.
- 49)Murai,R.Omori,R.Kano,Y.Tada,H.Higashino,N.Nakatsuka,J.Hayashi,F.Akamatsu,K.Iino and Y.Yamamoto.The radiative characteristics of NH3/N2/O2 non-premixed flame on a 10kW test furnace.Energy Procedia,2017,(120),p325.
- 50) 沼田真明, 松田泰三, 萩原義之, 山本康之. 『アンモニア燃焼炉の技術開発』衝突噴流式アンモニア混焼脱脂バーナの技術開発. 日本燃焼学会誌,2019,61(198),p326-330.
- 51) 諏訪俊雄, 小林伸明, 三宅新一. 酸素燃焼とその展望. 工業加熱,2002,39(3),p3-12.
- 52) 森 章, 中山広之. スチームタービン駆動 PSA 式酸素製造装置. 日本酸素技報,2001,20,p62-63.
- 53) 足立貴義, 富岡孝文, 長谷川卓也. 二酸化炭素回収型バイオガス PSA 技術. 大陽日酸技報,2013,32,p22-23.