

技術報告

高温酸素を利用した超音速酸素バーナランスの開発

Application of Pre-heated Oxygen to Supersonic Oxy-Fuel Burner

山口 雅志*

YAMAGUCHI Masashi

山本 康之*

YAMAMOTO Yasuyuki

萩原 義之**

HAGIHARA Yoshiyuki

製鉄分野の電炉プロセスにおいて原料の鉄スクラップの熔解を補助する目的で超音速酸素バーナランスが用いられている。本開発では酸素の予熱によるバーナランスの高性能化の取組み、予熱の効果について数値解析および実測により検証を行った。数値解析では酸素予熱による速度向上が確認でき、また鋼板の加熱試験では、従来に比較して鋼板を熔解するまでにかかる時間が最大で 50%短縮可能であることが分かった。さらに燃焼式酸素予熱装置を製作し、電気ヒータを用いた結果と比較評価したところ、燃焼式では酸素濃度が低下するデメリットがあるものの、500℃に予熱する条件では酸素濃度の高い電気ヒータ式と比較して同等の結果が得られた。

Supersonic oxygen burner is used in electrical arc furnace to assist melting scrap iron. In this study, we investigate the effect of applying preheated oxygen to a supersonic oxygen burner on heating performance by using numerical simulation and experiment. At first, the velocity distributions are evaluated by numerical calculation, and it is revealed that the use of high temperature oxygen makes the jet velocity higher than conventional room temperature oxygen burner. Secondary, we compare the time from the start of heating to the melting of the steel plate by prototype burner, and it is found that the use of high temperature oxygen can reduce the time by up to 50% compared to the use of room temperature oxygen. In addition, a combustion-type oxygen heater is manufactured and the effect of the decrease in oxygen concentration due to mixing with combustion gas is evaluated. Under the conditions of oxygen preheating to 500℃, same heating performance is obtained compared to the electric heater with a high oxygen concentration.

1. はじめに

製鉄分野の電炉プロセスにおいて、酸素バーナランスは 1960 年代に急速に普及し、現在では数多くの電炉で設置、使用されている。電炉での酸素バーナランスの機能は、炉内のコールドスポットの加熱による熔解促進であり、主に固体鉄スクラップを熔解する熔解期に使用されてきた。その後、超音速の酸素ジェット周囲に火炎を形成することで従来の酸素ジェットに比べ、その速度および濃度の減衰を大幅に抑制するバーナランスが提案されている。このバーナランスの採用により、従来精錬期において消耗型ランス等で直接熔鋼へ酸素を吹き込んでいた作業を省略する事ができ、効率的な電炉操業が可能になる。当社でも 2001 年度に超音速バーナランス SCOPE-Jet®を開発し、これまでに更なる性能改善に取り組んできた^{1),2)}。従来型の酸素ジェットと SCOPE-Jet®の概要を Fig.1 に示す。従来の酸素

ジェット、SCOPE-Jet®ともに、酸素ノズルをラバールノズルとすることで超音速酸素噴流を形成している。ラバールノズルは超音速流を生成するために工業的に広く用いられているノズルであり、流路を収縮した後に拡大する形状を特徴とする。従来の酸素ジェットでは、酸素を超音速で噴出した直後から周囲の雰囲気中に拡散し、噴流が減衰する。酸素ジェットの初速および酸素濃度を維持する領域をポテンシャルコアと呼称し、従来の酸素ジェットではポテンシャルコアはノズル出口径のおよそ 9 倍程度となる。一方 SCOPE-Jet®では、酸素ジェットの周囲に火炎を形成することでポテンシャルコアの伸長を実現している。火炎により雰囲気密度を小さくすることで酸素ジェットの減衰を防ぎ、出口径のおよそ 40 倍程度までポテンシャルコアを伸ばすことが可能となる。一般にラバールノズルにおけるマッハ数 M はノズル入口圧力 P_1 、出口圧力 P_2 および比熱比 γ で表され、次式の関係を持つ³⁾。

* 開発本部 山梨研究所 燃焼技術部 技術課

** 開発本部 山梨研究所 燃焼技術部

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left\{ \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right\}} \quad (1).$$

通常 P_2 は大気圧であり、 γ も一定とみなすと、マッハ数は P_1 に依存し、 P_1 が同じであればガス温度に寄らずノズル内のマッハ数は同一となる。ここで音速 a は気体定数 R 、ガス温度 T を用いて、

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (2)$$

で導出される。絶対温度の平方根に比例して音速が大きくなることを示し、例えば 500℃ の酸素では常温時に比較して音速が 1.6 倍程度となる。Eq.(1), (2) より、高温の酸素を噴出する場合、常温時に比較して、同じ入口圧力およびマッハ数であっても、音速の変化分だけ噴出速度が増大することが分かる。

一般的な設備の運用では、酸素ガスの供給圧力は貯槽やガス発生装置における圧力により上限が制限されるため、供給圧力はそのままに、噴出速度を増大させる本手法は有用と考えられる。特に電炉用の高速酸素バーナランスでは、速度が大きいほど貫通力が向上し、熔解時間短縮や電力原単位に寄与すると考えられ、したがって高温の酸素を用いることによるバーナランスの性能向上が期待できる。

本開発では、まず数値シミュレーションを用いて高温酸素によるバーナランスの酸素噴流の評価を実施した後に、試験用バーナランスを製作して鉄の加熱性能について評価を実施した。また直接燃焼方式の予熱装置を製作し、電気ヒータ式の酸素予熱との比較を行った。本報ではその詳細を報告する。

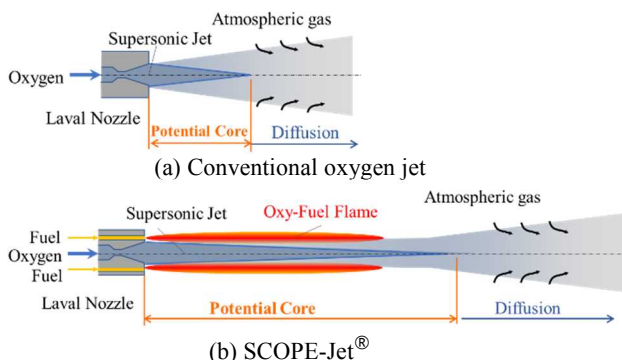


Fig.1 Schematic drawing of oxygen burner for EAF

2. 数値シミュレーション

2.1 解析条件

数値シミュレーションでは、バーナランスおよび

噴出後の領域を解析対象とした。解析領域を Fig.2 に示す。ガス流路のみを解析領域とし、固体領域は考慮しないものとした。大気開放場で障害物の無い状態を模擬し、噴出後の領域は径方向に 500mm、軸方向に 3000mm の空間を解析領域としており、解析領域の対称性から中心角 30° で切り出した領域を解析した。ラバールノズルは温度によって適正となる寸法が異なるため、バーナランスは 25℃用および 500℃用の 2 種類の解析形状を作成した。各温度におけるラバールノズルの寸法をベースとして、過去の実績からバーナランスの詳細構造を決定した。

本解析における条件を Table1 に示す。ガスは全て理想気体として取り扱い、バーナランスの流量は実機規模を想定して、中心酸素流量が 83.3Nm³/h、燃料ガスであるメタンが 8.3Nm³/h とした。ここで示す流量は中心角 30° における流量であり、全周分のそれぞれ 1000Nm³/h、100Nm³/h に相当する。メタンの流入温度は 25℃とし、酸素の温度を 25℃および 500℃と変化させた際の影響を評価した。自由流出境界における出口圧力は大気圧とし、ガスが流入する際には 25℃の空気組成のガスが流入するものとした。固体壁面は全て断熱境界とし、輻射も考慮しないものとした。乱流モデルには RNG k-ε モデルを用い、壁面近傍は対数則を用いた。燃焼モデルには堅牢性を考慮して渦消散モデルを採用した。本解析では、この渦消散モデルにより次の 4 段の燃焼モデルを使用した。

- 1) $H_2 + O_2 \Rightarrow 2 OH$
- 2) $CO + 2 OH \Rightarrow CO_2 + H_2O$
- 3) $H_2 + 2 OH \Rightarrow 2 H_2O$
- 4) $2 CH_4 + O_2 \Rightarrow 2 CO + 4 H_2$

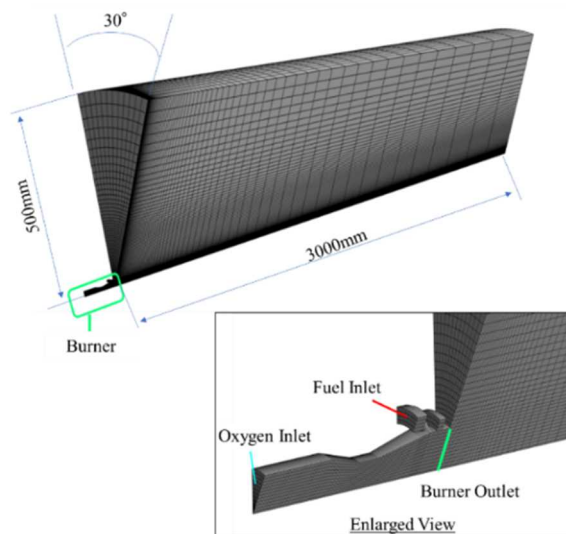


Fig.2 Computational domain

Table 1 Calculation condition

Item	Condition
Gas model	Ideal gas model
Oxygen	
Flow rate	83.3 Nm ³ /h
Temperature	25°C, 500°C
Fuel	
Species	Methane
Flow rate	8.3Nm ³ /h
Temperature	25°C
Outer Space	
Outlet Pressure	101kPa abs.
Inflow	Air (O ₂ :21mol%,N ₂ :79mol%)
Turbulent model	RNG k-ε Standard wall function
Combustion model	EBU model

2.2 解析結果

Fig.3 にマッハ数分布を示す。Fig.3(a)が酸素の流入温度 25°Cの結果であり、Fig.3(b)が 500°Cの結果である。ノズルから噴出時のマッハ数が流出後ほぼ一定の長さに保たれており、その後減衰する様子が確認できる。酸素 25°Cおよび 500°Cの間で分布形状は概ね同じであり、ポテンシャルコア長さも同等程度と評価できる。Fig.4 に温度分布を示す。中央の酸素噴流の周囲が火炎で覆われ、高温部が形成されていることが分かる。高温部は酸素 500°Cの方がわずかに短くなっており、火炎長が短くなることを推測される。また Fig.5 に速度分布を示す。マッハ数分布がほぼ同様であることから、温度が高く音速が大きい 500°Cの条件の方が 25°Cに比較して高速となっていることが分かる。減衰するまでの距離はほぼ同一であるが、減衰するまでの区間は酸素予熱により酸素噴流を高速化可能であることが確認された。

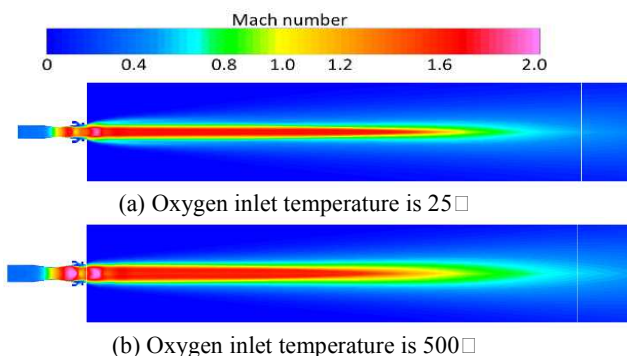


Fig.3 Mach number distributions

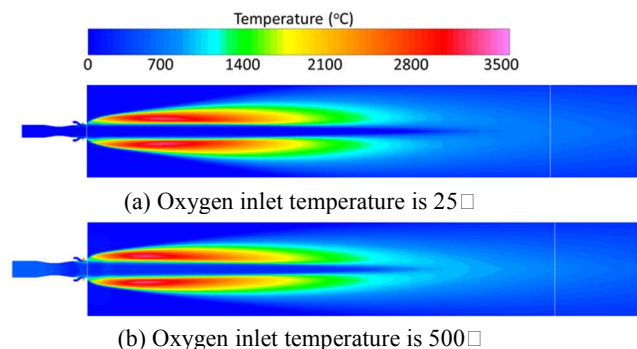


Fig.4 Temperature distributions

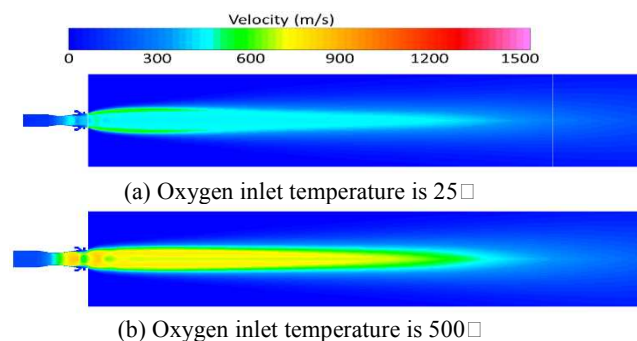


Fig.5 Velocity distributions

3. 燃焼試験

3.1 試験設備および試験条件

数値解析により酸素予熱による噴流の高速化が確認できたため、続いて解析結果を元に試験用のバーナランスを製作し、実際の燃焼場を評価した。バーナランスノズルは酸素温度が 25°C用の従来型ノズル A と 500°C用のノズル B の 2 種を製作した。Fig.6 に試験設備の概要を示す。酸素の予熱には電気式のヒータを用いた。酸素をヒータに供給し、バーナランス入口における温度を熱電対により監視しながらヒータの出力を調整した。バーナランスの下流側には鋼板を設置し、鋼板が加熱開始から熔解するまでの時間を計測した。鋼板は SS400 材の肉厚 t3.2mm の板を用いており、バーナランス出口から鋼板までの距離 L を変化させ、熔解可能な距離および熔解にかかる時間を比較し、バーナランスの加熱性能を評価した。

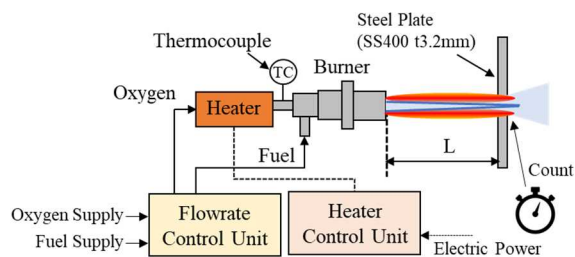


Fig.6 Experimental facility

Table2 に燃焼条件を示す。数値解析では酸素流量を 1000Nm³/h としていたが、本試験では電気ヒータの最大出力が 40kW までの制約があり、酸素を 500℃まで予熱できるようにバーナランスの仕様を酸素流量 200Nm³/h とし、ノズル A では 25℃で、ノズル B では 500℃でそれぞれ噴出速度がマッハ 2.0 になるよう設計した。ノズル A では予熱せずに常温の酸素を用い、ノズル B では常温から最大 500℃までに酸素を予熱して試験を行った。燃料は常温の天然ガスを用い、流量は 20~45Nm³/h とした。

Table 2 Combustion conditions

Item	Condition
Buner nozzle	A: Designed for 25℃ B: Designed for 500℃
Oxygen	
Flow rate	200 Nm ³ /h
Temperature	A: Room temperature, B: Room temperature ~ 500℃
Fuel	
Species	Natural gas
Flow rate	20~45 Nm ³ /h
Temperature	Room temperature

3.2 試験結果および考察

火炎の外観を Fig.7 に示す。Fig.7(a)は 25℃用のノズル A を用いて常温の酸素を燃焼させた火炎であり、Fig.7(b)はノズル B で酸素温度 500℃の火炎である。各ガス流量は酸素 200Nm³/h、天然ガス 20Nm³/h である。図に示す通り、高温の酸素を用いると火炎長が短くなるのが分かる。また Fig.8 に示すように、ノズル B において酸素の温度を徐々に高くした際にも、高温ほど火炎長が短くなる傾向が確認された。酸素が高温となることで燃焼反応が促進され、短い距離で燃焼が完了したためと考えられる。

次に鋼板を溶解した結果を Fig.9 に示す。バーナランス先端からの距離 L と溶解にかかる時間の関係性を示しており、バーナランス先端からの距離はノズル A の出口径 D で正規化した値を用いた。燃焼条件は酸素 200Nm³/h、天然ガス 45Nm³/h であり、従来型のノズル A で常温の酸素を燃焼した結果と 500℃用のノズル B で 500℃の酸素を燃焼した結果を比較した。本結果より酸素を予熱することで大幅に溶解時間を短縮していることが分かる。溶解時間が最小となる鋼板の距離 $L/D=32$ の条件では、酸素 500℃にすることで溶解時間が 50%程度短縮できる結果を得た。また $L/D=55$ 程度ま

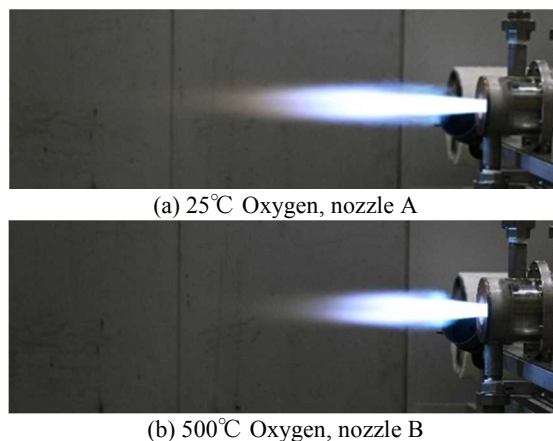


Fig.7 Flame appearances

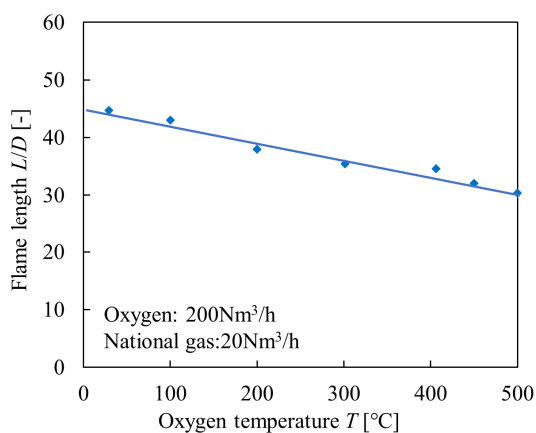


Fig.8 Flame length

では両条件とも鋼板を溶解可能であり、これより L/D が長い条件では溶解が困難となった。前述の通り酸素を予熱すると火炎長が短くなるが、鋼板の溶解可能な距離に大きく影響せず、酸素 500℃で常温時と同等あるいはそれ以上の距離で溶解可能であることが分かった。

Fig.10 にノズル B を用いて酸素の温度を変化させた際の溶解時間を示す。鋼板との距離は $L/D=32$ 、燃料流量は 45Nm³/h である。本結果より、予熱温度が高いほど溶解時間が短縮できることが分かる。酸素を高温とすることにより、速度が上昇して鋼板に対する伝熱が促進されること、および衝突する噴流自体が高温となることにより鋼板の加熱が進むと考えられる。

Table3 にノズル A を用いて天然ガス 45Nm³/h、ノズル B で天然ガス 40Nm³/h および 45Nm³/h の 3 条件の比較結果を示す。天然ガスの発熱量を 40.6MJ/Nm³ として燃料によるエネルギーを導出し、ヒータによる酸素予熱に費やすエネルギーとの総和を溶解時間と共に示している。Case1 と Case3 の総エネルギーは同程度であるが、Case1 の方が燃料流量が多く、Case3 では燃料が少ない代わりに酸素の予熱にエネルギーを割いている。Table3

の比較により、天然ガス 40Nm³/h から 45Nm³/h に増量しても有意な差はなく、酸素を高温とした際の効果が非常に大きいことが分かる。つまり、同じ 40kW 分のエネルギーを追加する際に、燃料として追加するよりも酸素を予熱することに使用する方が効果が大きいことが明らかとなった。

以上の結果により、酸素を高温とすることが鋼板の加熱性能に対し大きく寄与することが分かった。

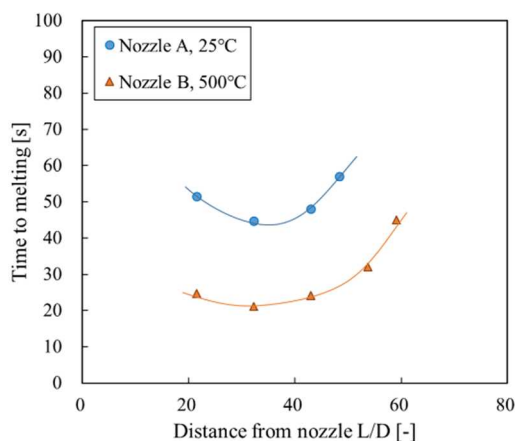


Fig.9 Time required for melting

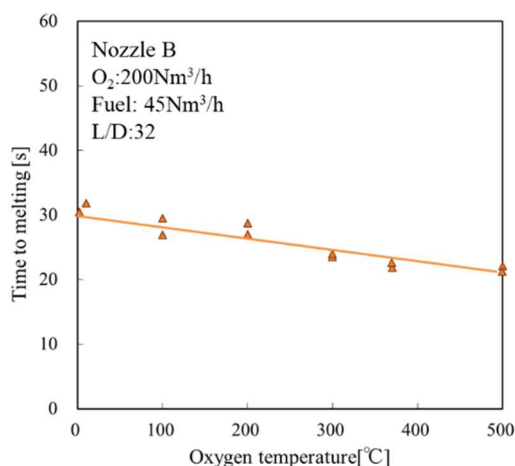


Fig.10 Effect of oxygen temperature

Table 3 Total energy

Case	1	2	3
Burner nozzle	A	B	B
O₂ temperature [°C]	25	500	500
Fuel flowrate [Nm³/h]	45	45	40
Fuel energy [kW]	508	508	451
Heater energy [kW]	-	40	40
Total energy [kW]	508	548	491
Time to melting at L/D = 32 [s]	44.7	22.1	21.9

4. 酸素予熱装置

4.1 直接燃焼式酸素予熱装置の製作

ここまで、酸素の予熱には温度の安定性を考慮して電気式のヒータを用いて評価を進めてきた。酸素を予熱する手段としては、他には例えば、炉からの排ガスと熱交換することにより間接的に予熱する熱交換式や、燃焼ガスと酸素とを直接混合する直接燃焼式がある⁴⁾。電気式では、大きな出力が必要となる大流量の場合や高温のガスが要求される場合において、設備規模が大きくなることでコスト面でのデメリットが生じ、あるいは条件によっては適用不可となることも考えられる。熱交換式によって酸素を間接的に予熱する場合は予熱に時間を要することから、予熱した酸素を断続的に利用したい場合には不向きである。また熱交換に用いた排ガスを回収するための設備を要するため、やはり導入コストが高くなるというデメリットがある。一方で直接燃焼式では、燃焼ガスの分だけ酸素濃度が下がるデメリットがあるものの、設備規模が小さく済み、また予熱にかかる時間も短いため、装置の断続的な運転にも適している。本開発で想定する電炉等での用途を考慮すると、大流量でかつ操業の中で何度も燃焼条件を変化させる必要があるため、電気式や熱交換式は不適であり、燃焼式の予熱装置が必要と判断される。そこで本開発では、ここまで評価を進めてきた高温酸素用のバーナランスに加え、燃焼方式の酸素予熱装置を設計製作し、適用可否について検証を行った。

Fig.11 に酸素予熱装置の概略構造を示す。予熱装置用の酸素バーナランスによって生成された高温の燃焼ガスと燃焼で消費されずに残った酸素ガスを混合することにより高温の酸素を発生させる構造となる。予熱用の酸素バーナランスは燃料ガスを内側と外側から酸素で挟み込む流路構造を取り、本構造により燃焼室において広い運転範囲に渡り安定して火炎を維持可能となる。ここで生成された燃焼ガスと最外周側の酸素と予熱室にて混合することにより高温の酸素を発生させ、下流に接続した超音速バーナランスへ直接供給する。

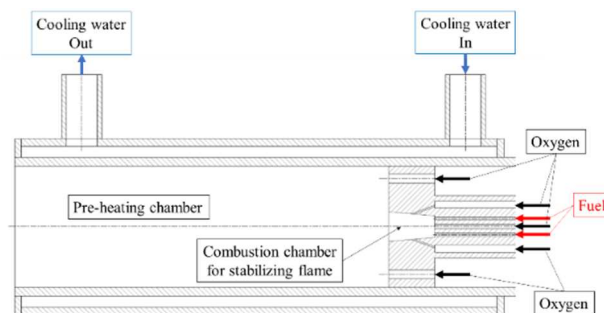


Fig.11 Schematic drawing of oxygen heater

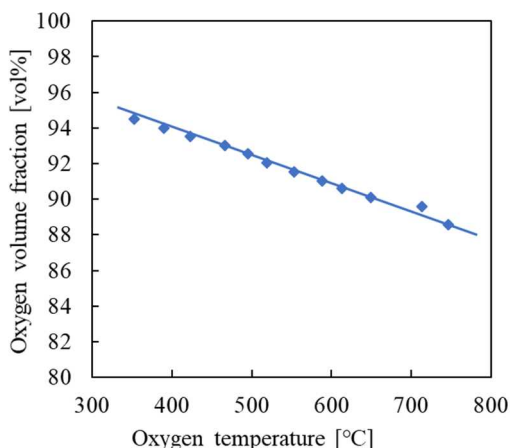


Fig. 12 Oxygen volume fraction

4.2 酸素予熱装置の評価

予熱装置に連結させた超音速バーナランスの入口温度を計測し、酸素濃度の関係性を示した結果が Fig.12 である。予熱温度を高温にするほど大きな燃焼量が必要であるため、CO₂および H₂O の発生量が増えることにより酸素濃度が低下する。酸素の供給源の酸素濃度を 99.6vol%として供給ガス量から酸素濃度を試算すると、500°Cに予熱した際にはおよそ 93.3vol%となった。

Fig.13 に本予熱装置を用いて、前節同様に鋼板の加熱融解試験を実施した結果を示す。酸素濃度 99.6vol%のまま予熱できる電気ヒータを用いた結果と比較して、鋼板の融解時間は全ての範囲において同等の結果となった。前記の通り燃焼式の予熱装置では酸素濃度が低下するものの、500°Cの条件においては濃度低下による影響は見られず、濃度低下の無い条件と同等の性能が得られることが確認できた。

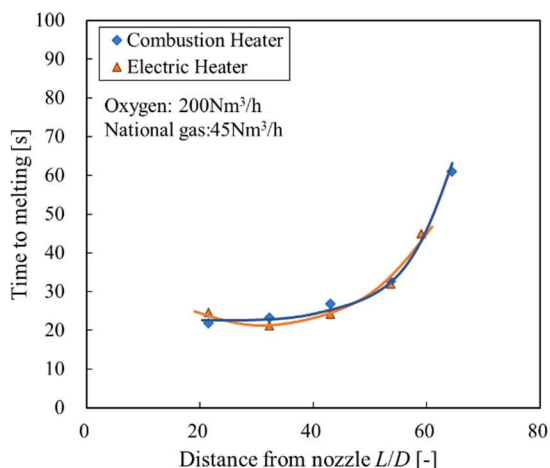


Fig. 13 Result of combustion heater

5. まとめ

本開発では、電炉向け超音速酸素バーナランスの酸素を予熱することによる性能向上に関して、数値シミュレーションと燃焼試験を用いて評価を行った。数値シミュレーションにより酸素噴流の速度を可視化したところ、酸素温度によらずマッハ数分布は同程度であるが、高温ほど音速が大きくなるため、酸素を高温にすることで噴出速度が大きくなる結果を得た。また酸素バーナランスにより鋼板を加熱し、その融解に要する時間を比較した結果、500°Cに予熱された酸素を用いると常温時に比較して最大で 50%融解時間が短縮できることが分かった。このとき投入エネルギーを燃料流量の増加ではなく酸素の予熱に費やすことにより、バーナランスの加熱性能を向上させることが確認できた。加えて直接燃焼式の酸素予熱装置を製作し、酸素濃度が低下する影響について評価したところ、酸素温度 500°Cの条件では、酸素濃度 93.3vol%になる燃焼式と 99.6vol%の電気ヒータ式とで同等の結果が得られ、大流量に対応可能で応答性が良いことを考慮すると燃焼式の酸素予熱装置が有用であることが分かった。

これらの結果より、本設備を電炉で用いた場合に原料の融解時間を短縮および時間短縮による電力消費量の削減が期待できる結論を得た。

参考文献

- 1) 五十嵐弘, 阿部智信, 三宅新一, 鷲見郁宏, 菊地良輝. 日本酸素技報, 2003, 22, p7-12.
- 2) 山口雅志, 斉藤岳志, 山本康之, 萩原義之. 第 56 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2018, F126.
- 3) 松尾一泰. 圧縮性流体力学, 1994, pp26-96.
- 4) 三宅博之, 諏訪俊雄, 小長谷義明, 小林伸明, 讚井宏, 國井大藏. 日本酸素技報, 1989, 8, pp33-40.