

技術報告

自励振動現象を利用した放射伝熱型酸素富化バーナの開発

Development of the Oxygen-enriched Radiative Heat Transfer-Type
Combustion Burner using Self-induced Oscillation

山口 雅志* 斉藤 岳志* 山本 康之* 萩原 義之**
YAMAGUCHI Masashi SAITO Takeshi YAMAMOTO Yasuyuki HAGIHARA Yoshiyuki

自励振動現象を利用した、放射伝熱特性に優れた酸素富化バーナを開発した。振動周期を伸ばすことにより放射伝熱に適した火炎性状となることを明らかにし、バーナ構造の適正化により振動周期 1.0 s 以上における安定振動を達成した。さらに多段燃焼技術を組み合わせることで従来の酸素富化バーナと比較し 9.1 % の伝熱効率向上を達成し、同時に NOx 排出濃度を 55 ppm まで抑制できることを確認した。

We have developed the novel oxygen-enriched burner using self-induced oscillating phenomenon of jet flow which have excellent radiation heat transfer characteristics. We revealed the flame property suitable for radiation heat transfer is obtained by extending the oscillation cycle. Optimizing burner structure, we get stable oscillating flame on 1 second-oscillation cycle. In addition, combining multi-staged combustion technology, the burner can improve heat transfer efficiency by 9.1 % compared with conventional oxygen-enriched burner. We confirmed that the burner has low NOx emission level below 55 ppm.

1. はじめに

昨今工業炉業界では電力需給問題等を受け、一層の省エネルギー化が推進されている。酸素富化燃焼は少量の酸素を富化する事で火炎を高温化する事ができ、被加熱物に対して優れた伝熱特性を有するため、省エネルギー技術としてこれまで銅やアルミ等の非鉄金属の溶解、廃棄物焼却、セメント用キルン等で利用されている。近年は鉄鋼分野でも取鍋予熱やタンディッシュ予熱におけるエネルギー削減技術として積極的に提案されている。

当社ではタンディッシュ予熱用バーナとして、近年自励振動を利用した広範囲の加熱面を均一に直接加熱できる対流伝熱型の酸素富化バーナ「Innova-Jet® Swing」を開発した¹⁾。当該バーナは、流体のコアンダ効果をノズル構造で制御することにより、機械的駆動部なしに火炎の噴出方向を周期的に振動することを可能としたバーナである。火炎の加熱する領域が広くかつ振動による攪拌効果により、従来の直進火炎のバーナに比較して広範囲を均一加熱できる特徴を有する。

他の分野においても、広範囲の均一加熱を必要とす

るプロセスは多数存在し、例えば、加熱炉では火炎からの放射伝熱によりピレットなどの半製品を均一加熱している。加熱炉では、対流伝熱ではなく放射伝熱による加熱が必要となるため、既に開発した自励振動を利用した酸素富化バーナをそのまま適用することは難しく、放射伝熱によって広範囲を均一加熱できる火炎性状としなければならない。自励振動現象を利用した放射伝熱型酸素富化バーナを開発することで、従来の酸素富化バーナに比較して、より効果的に炉内を加熱可能とすることが期待できる。

放射伝熱による伝熱量を増加させるためには、一般的に火炎長を長くすることが有効である。過去に開発したタンディッシュ向けの対流伝熱型バーナでは、燃料と酸化剤との混合を促進し対流伝熱効率を高めるために火炎の振動を速めているが、振動が速くなるに伴い火炎長が短くなる傾向にあった。振動周期を長くすることにより火炎長の伸長が期待できるものの、振動周期と火炎長の関係性についてはこれまで定量的に評価した結果はない。また、加熱炉では NOx の排出量削減が強く求められるが、当該バーナにおいては振動現象と NOx 排出量の関係について議論されてこなかった。

* 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

そこで、まず振動周期を変化させた際の火炎特性について評価を行い、構造および燃焼条件の最適化により伝熱効率の向上と低 NOx 化を図った。本報告では、当社が実施した内容に関して、その詳細を報告する。

2. 試験装置

2.1 バーナ構造

自励振動機構の模式図を Fig.1 に示す。本試験で用いたバーナでは、燃料ガスを自励振動により振動させる構造とした。ノズルは幅 D の燃料ノズルおよびテーパ角 α を有するスロート、連結部の空間であるコントロールポートで構成され、コントロールポートの両端を内径 D_{CT} 、長さ l_{CT} の同一の連結管を用いて繋ぐことにより自励振動現象を発現させることができる。振動のメカニズムやノズル形状、連結管の影響については従来より研究されてきており^{2)・4)}、当社においても対流伝熱型の酸素富化バーナの開発時に検討がなされ、安定した振動および火炎が得られるよう各箇所の寸法が最適化されている³⁾。バーナ外観の正面図を Fig.2 に示す。振動方向に合わせて、形状を変えた酸化剤用のノズルをスロートの上下および左右に配置した。燃料と酸化剤の混合効率を高めるとともに、火炎がリフトすることを抑制する構造となっている。

本バーナによる火炎の写真を Fig.3 に示す。火炎の向きを周期的に変化させることにより火炎が形成される領域が広がり、従来型のバーナでは困難であった幅広い加熱面積を達成できるとともに、振動に伴うガス攪拌効果による均一加熱が可能となっている。火炎の振動に機械的な駆動部は必要無く、シンプルなバーナ構造であることからメンテナンス性に優れる特長も有している。

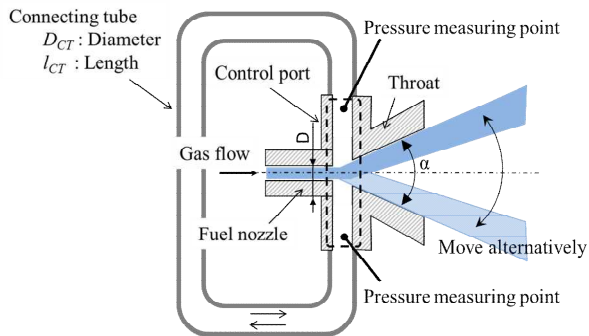


Fig.1 Schematic drawing of nozzle structure for self-induced oscillation

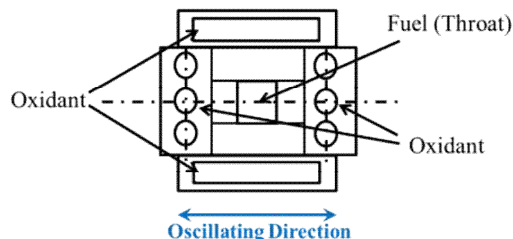


Fig.2 Front view of self-induced oscillation burner

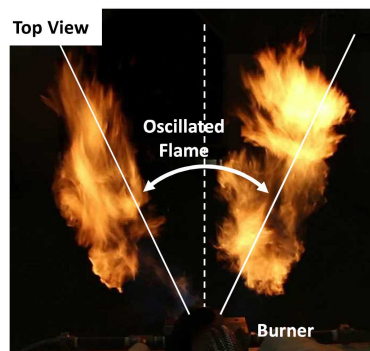


Fig.3 Shape of oscillated flame

2.2 試験設備

振動周期の測定には、Fig.1 に示す点において連結管両端の圧力を監視する手法を用いた。コントロールポートの両端にそれぞれ圧力センサを接続し、圧力変動の波形から自励振動の周期を導出する。また振動周期の影響を評価する際には、連結管に三方電磁弁を設け、タイマーを用いて流れの向きを周期的に切り替えた。疑似的な自励振動現象を強制的に作り出し、振動周期を制御することが可能となる。

伝熱量の測定、および NOx の測定では炉内でバーナの燃焼試験を実施する必要がある。本試験で用いた炉を Fig.4 に示す。伝熱量の測定試験では、加熱炉における被加熱物を想定し、炉の下部に伝熱管を 12 本配置した。伝熱管の内部を水が流通し、炉への出入り時の温度差により伝熱管への伝熱量 Q [W] を以下の式で導出した。

$$Q = C \sum (m \cdot \Delta T) \quad (1)$$

ここで C [J/(kg·K)] は水の比熱、 m [kg/s] は水の質量流量、 ΔT [K] は水の炉への流入出時の温度差である。バーナの燃焼量 Q_c [W] を用いて、

$$\eta = Q/Q_c \times 100 \quad (2)$$

で得られた η [%] を伝熱効率と定義する。また炉より排气されたガスをサンプリングし、NOx 排出濃度の測定を実施した。

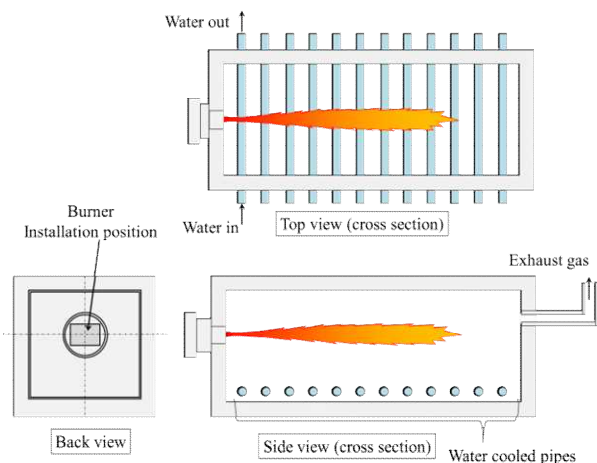


Fig.4 Schematic drawing of experimental furnace

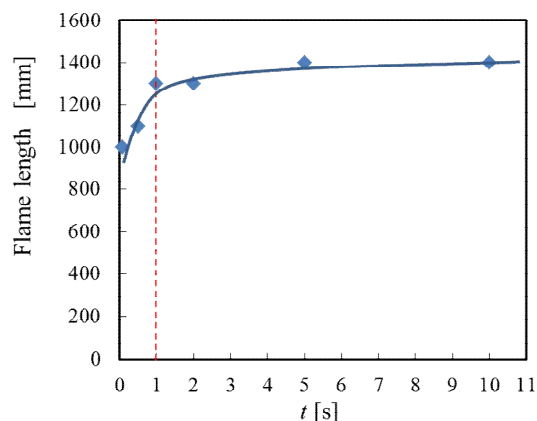


Fig.5 Relationship between oscillating cycle and flame length

3. 振動周期が与える影響

3.1 振動周期が火炎特性に与える影響

まずはじめに、振動周期と火炎長、NOx 排出濃度の関係性を調べた。試験条件を Table 1 に示す。本試験では連結管による自励振動現象は利用せず、強制的に振動周期 t [s] を制御する手法を用いた。Fig.5 に試験により得られた t と火炎長の関係を示す。 t を長くすることにより火炎長を伸ばすことが可能であることが確認でき、 t が 1.0 s 以上において火炎長は一定と判断できる結果を得た。このとき火炎長は振動の無い定常火炎と同等となっている。また、 t が炉内での NOx 排出濃度に与える影響について、得られた結果を Fig.6 に示す。ここでは最も周期の短い $t=0.07$ [s]の結果を基準とした。 t が長くなると NOx 濃度が減少し、火炎長の結果と同様に 1.0 s 以上で一定となる傾向となった。これらの結果より、自励振動現象を利用した放射型バーナでは 1.0 s 以上の振動周期が必要となることが分かった。

Table 1 Experimental conditions

Connecting tube	Forced oscillation
Fuel	LPG
Fuel flow rate	8 Nm ³ /h
Oxygen ratio	1.05
Oxygen conc. in oxidant	40 vol%

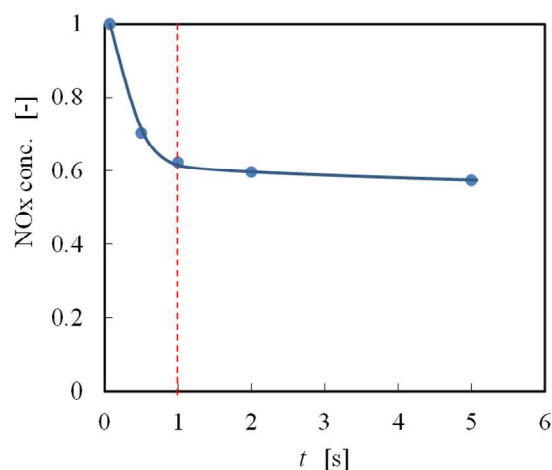


Fig.6 Relationship between oscillating cycle and NOx concentration

4. 振動の長周期化

4.1 連結管構造の影響の調査

過去の開発において、振動を安定化するためのノズル構造の最適化を完了したが、振動周期に関しては前項で述べた振動周期 1.0 s に対して不十分な状況である。高曾ら⁴⁾の研究によると、自励振動の周期を長くするためには、連結管を長くすることが有効であることが分かっている。そこで次に径の異なる 3 種類の連結管を用いて、連結管長さを徐々に長くしながら振動の周期を測定する試験を実施した。連結管が一定の長さ以上となると自励振動が不安定となるため、その際はそれ以上長い条件の試験は省略するものとした。

Table 2 に試験の条件を示す。使用した連結管の

内径は 0.93D, 1.43D, 1.60D の 3 種とした。バーナの燃料種は LPG とし, 流量は 8 Nm³/h とした。酸化剤は酸素濃度 40 vol% の酸素富化空気とし, 酸素比が 1.05 となる流量を供給する。これらガス条件を固定し, 連結管長さを変化させた際の振動周期について測定を行った。

Fig.7 に連結管長さが振動周期に与える影響を示す。ここで横軸は連結管長さ l_{CT} を連結管内径 D_{CT} で除したものをを用いた。連結管が長いほど振動周期が長くなるのが分かる。連結管の内径が異なる条件それぞれにおいて, 同様の傾向を示している。Fig.8 に連結管内径と振動周期の関係を示す。連結管の内径が小さいほど振動周期が長くなる傾向が得られた。Fig.7 および Fig.8 に示したプロットは全て安定した自励振動状態を得られた条件であり, 連結管の内径が小さいほど, 安定な自励振動を得られる連結管長さの範囲が狭くなる結果となっている。

本試験においては, 目標である振動周期の 1.0 s 以上を達成し, 最大 1.6 s の周期で安定した振動状態を維持しながら十分に長い火炎を得る事が出来た。

Diameter of connecting tube D_{CT}	0.93D, 1.43D, 1.60D
Fuel	LPG
Fuel flow rate	8 Nm ³ /h
Oxygen ratio	1.05
Oxygen conc. in oxidant	40 vol%

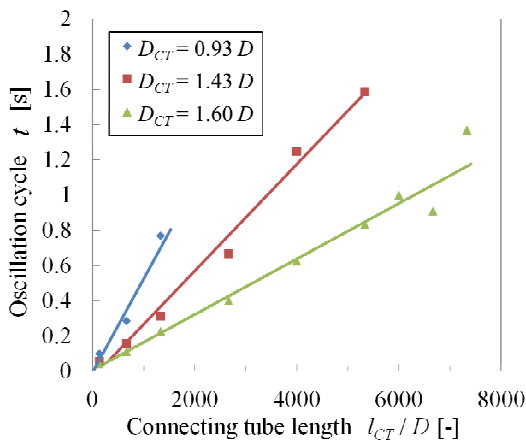


Fig.7 Relationship between connecting tube length and oscillation cycle

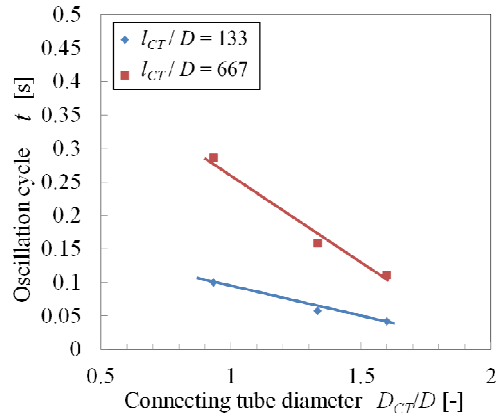


Fig.8 Relationship between connecting tube diameter and oscillation cycle

4.2 無次元数による評価

自励振動現象における連結管に関する評価手法として, 高曾らは等価管路長 l_e [m] の利用を提案している。等価管路長とは, 管路全体をある基準断面積 A_0 [m²] に置き換えたときに相当する管路長のことであり, 式(3)で与えられる。

$$l_e = \int_1^2 \left(\frac{A_0}{A} \right) ds. \quad (3)$$

ここで A [m²] は連結管の断面積であり, 微小区間 ds を連結管の端部 1 から反対側の端部 2 まで積分することで等価管路長を得る。本試験において連結管の内径は位置によらず一定としているため, バーナ本体部の流路を無視できるものとするとき式(3)は簡略化され,

$$l_e = \frac{A_0}{A} \cdot l \quad (4)$$

となる。ここで l [m] は連結管の長さを示す。本報告では, 更に等価管路長 l_e を燃料吹出口の幅 D [m] により無次元化した値を無次元等価管路長 l_{en} として以下の式で与えるものとした。

$$l_{en} = \frac{l_e}{D} \quad (5)$$

また振動周波数あるいは振動周期の評価においては, 以下の式で与えられるストローハル数が有用であることが知られている。

$$St = \frac{D}{lU} \quad (6)$$

このとき, U [m/s] は燃料吹出口における燃料ガス速度である。Fig.7 の結果を式(5)および式(6)により整理し, その関係性を示したものが Fig.9 である。無次元等価管路長の増加に従いストローハル数の逆数が線形に上昇し, かつ連結管内径が異

なる条件でも同じ傾向が示された。バーナ設計では必要な燃焼量によりバーナの大きさが変わるため、異なる形状寸法においても同じ指標で整理可能である本手法は非常に有用である。

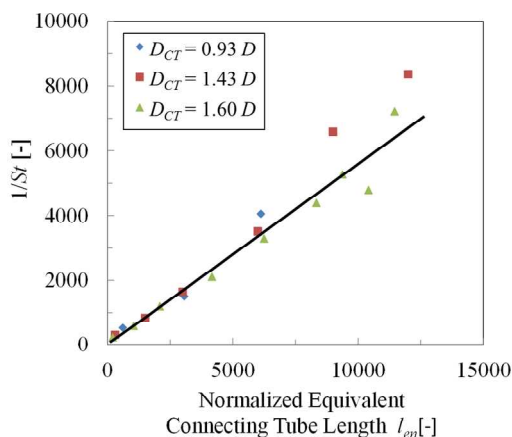


Fig.9 Evaluation by normalized parameter

5. 燃焼状態の最適化

5.1 酸化剤吹き出しの最適化の検討

前節において、連結管長さを長くすることにより目標とする振動周期 1.0 s を達成できたが、実用としては酸化剤の供給手法を最適化することによる伝熱効率の向上および NOx 排出濃度の低減が必要である。

酸素燃焼あるいは酸素富化燃焼を実際に使用する場合の燃焼方式として、多段燃焼技術がある。例えば、多段燃焼の一つであるアンダーショットと呼ばれる手法では、バーナの下側に酸化剤ノズルを配置して火炎の下側に酸化剤を添加することにより火炎の下側の温度を高くすることで、下部にある被加熱物への伝熱量を増加させることができる。また NOx の抑制技術としても多段燃焼が広く採用されている。酸化剤を燃料吹出口と離れた位置より供給することにより、炉内雰囲気をも多く巻き込みつつ燃料を段階的に燃焼することができ、NOx 生成の抑制が可能となる。

そこで、バーナに付随する酸化剤ノズルを一次酸化剤ノズルとし、一次酸化剤に加えて二次酸化剤ノズル、三次酸化剤ノズルを設置し、多段燃焼の効果の確認および最適化を実施した。Fig.10 に本試験で用いた各ノズル位置を示す。二次酸化剤ノズルはバーナ直下に設置し、バーナの開き角 $\alpha=30^\circ$ に合わせ酸化剤が開き角 30° で水平方向に噴出する構造とした。三次酸化剤ノズルはさらに下側に配置した。Table 3 に試験を実施したガス条件を示す。条件 1 は比較用として、定常な直進

火炎を形成する従来型酸素富化バーナによる試験を実施したものである。条件 2, 3 では二次酸化剤の流量を変化して伝熱効率への影響を確認した。条件 4, 5, 6 では二次酸化剤に加え、更に三次酸化剤を組み合わせることで燃焼状態の最適化を図った。このとき一次酸化剤は保炎のために必要な流量のみとし、二次酸化剤、三次酸化剤でそれぞれ全酸化剤流量の 57 vol%, 38 vol% の酸素流量を供給する。流量を固定とし、ノズル径を変更することにより吹出し流速を変化させた。条件 4 における流速を基準として 3.7 倍まで速度を上げ、その影響を確認した。全ての条件において、酸素流量の合計値は固定であり、各ノズル間の流量比および酸化剤中の酸素濃度を操作している。

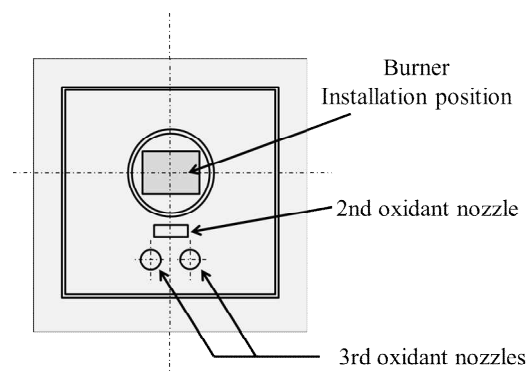


Fig.10 Nozzle position (back view of furnace)

Table 3 Experimental condition

Case No.	1*1	2	3	4	5	6
Fuel (LPG)						
Fuel flow rate [Nm ³ /h]	13	13	13	13	13	13
1st oxidant						
O ₂ flow ratio*2 [vol%]	100	30	10	5	5	5
O ₂ conc. [vol%]	40	40	40	40	40	40
2nd oxidant						
O ₂ flow ratio [vol%]	-	70	90	57	57	57
O ₂ conc. [vol%]	-	40	40	60	60	60
3rd oxidant						
O ₂ flow ratio [vol%]	-	-	-	38	38	38
O ₂ conc. [vol%]	-	-	-	30	30	30
Velocity*3 [-]	-	-	-	1.0	2.0	3.7

*1 In case 1, conventional burner which forms steady straight flame is used.

*2 O₂ flow ratio of each nozzles when the total O₂ flow rate is 100.

*3 Velocity ratio of 3rd oxidant in each cases when the velocity in case 4 is 1.0.

5.2 多段燃焼の効果の検証

Table 4 に二次酸化剤が伝熱効率に与える影響を示す。二次酸化剤を用いることにより従来バーナに比較して伝熱量が増加し、二次酸化剤の流量を 70 vol%から 90 vol%に上げることでさらに伝熱量が増加する結果となった。ノズル下部より酸化剤を吹き込むことによりアンダーショットの効果が得られ、火炎の下側が高温となり、高温部と伝熱管との距離が縮まることで放射伝熱量が大きくなったと考えられる。Fig.11 にバーナの軸方向の伝熱量分布を示す。二次酸化剤を利用することにより、炉内の特にバーナに近い領域で従来ノズルより伝熱量が増加していることが分かる。また条件 3 では条件 2 に比較してバーナ付近では伝熱量が落ちるが、バーナから遠い位置において伝熱量が上回り総量としては条件 3 の方が伝熱量が大きい結果となった。二次酸化剤の流量が大きいほど、つまり流速が大きいほど火炎下側における高温部の領域が伸び、伝熱量が増加しているものと考えられる。本結果より、多段燃焼技術が伝熱効率の向上に有効であることが確認された。

Table 4 Effect of 2nd oxidant (heat transfer efficiency)

Case No	2nd oxidant flow ratio [vol%]	Heat transfer efficiency η [%]
1	0	46.0
2	70	48.5
3	90	48.7

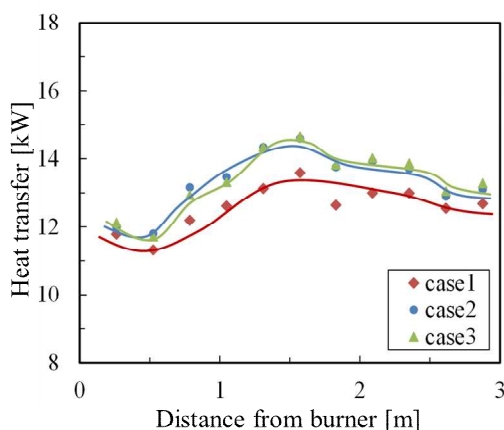


Fig.11 Effect of 2nd oxidant (heat transfer distributions)

5.2 多段燃焼による燃焼状態の最適化

二次酸化剤に加え、三次酸化剤を用いた結果を Table5 に示す。三次酸化剤を組み合わせることでさら

に伝熱効率が向上することが確認でき、最も酸化剤速度の大きい条件 6 において伝熱効率 η は 50.2 %で最大となった。これは従来バーナに比較して 9.1 %の伝熱効率の向上となる。二次酸化剤の更に下側より酸化剤を供給することにより、アンダーショットの効果を強化し、より伝熱管に近い位置において火炎の高温領域を形成したことが要因と考えられる。

伝熱効率の最大値を得た条件 6 と従来バーナの結果である条件 1 の伝熱量分布を比較比較した結果を Fig.12 に示す。従来バーナに比較し、炉内全体で伝熱量を改善できていることが分かる。

また、多段燃焼技術を用いたことによる NOx 削減効果について、評価結果を Table 6 に示す。酸素濃度 11 vol%換算値において 54.5 から 61.7 ppm の低 NOx が実現できており、期待された多段燃焼技術の効果が確認できた。三次酸化剤の流速を上げると NOx 濃度が微増する傾向があるが、最も高速であり、伝熱効率が最大となった条件 6 においても NOx 排出濃度は 61.4 ppm に留まり、実用上問題の無い十分低い結果が得られた。

Table 5 Effect of multi-staged oxidant (heat transfer efficiency)

Case No	2nd oxidant flow ratio [vol%]	3rd oxidant velocity [-]	Heat transfer efficiency η [%]
1	-	-	46.0
4	57	1.0	49.1
5	57	2.0	49.5
6	57	3.7	50.2

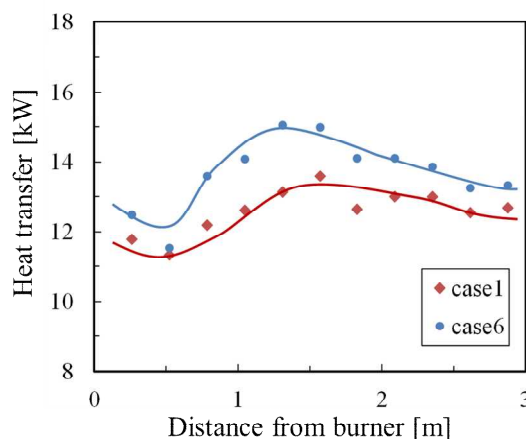


Fig.12 Effect of multi-staged oxidant (heat transfer distributions)

Table 6 NOx concentration

Case No.	NOx [ppm, 11 %O ₂]
4	54.5
5	61.7
6	61.4

6. まとめ

自励振動現象を利用した放射型酸素富化バーナの開発を実施し、以下の結果を得た。

振動周期を 1.0 s 以上にすることで、定常火炎と同等の火炎長を得ることが分かった。また連結管の長さ及び径を適切に選択することで、1.0 s 以上の振動周期を得ることができた。このとき、無次元等価管路長およびストローハル数を用いて評価することで、簡易に連結管構造を含むバーナの設計が可能である。更に多段燃焼技術を利用することで伝熱効率の向上を実現した。酸化剤条件の最適化により、従来のバーナに比較して伝熱効率は 9.1 % 向上し、またこのとき NOx 排出量は 61.4 ppm と十分に低い値となった。

本研究成果をもって従来バーナに比較し、低 NOx を維持したまま伝熱効率を向上させる放射型酸素富化バーナの開発を完了した。加熱炉等への適用において十分なメリットを生むものと考えられ、今後の実用、展開が期待される。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Viets, H., AIAA., 13-10, 1975, 1375.
- 3) Raman, G, Rice, E. J., Cornelius, D.M., Trans. ASME, J. Fluids Eng., 116, 1994, 508.
- 4) 高曾, 阿部, 河口. フリップフロップノズル噴流の自励振動の解明 (振動に及ぼす連結ダクト長さの影響). 日本機械学会講演論文集, No. 038-1, 2003, pp69-70.