

超低 NOx 酸素富化燃焼システム「Innova-Jet」

Ultra-Low NOx Oxygen-enriched Combustion System

羽路 智之* 飯野 公夫** 萩原 義之* 山本 康之*

HANEJI Tomoyuki IINO Kimio HAGIHARA Yoshiyuki YAMAMOTO Yasuyuki

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 NOx を抑制することが課題となるため、それに対応した超低 NOx 酸素富化燃焼システム「Innova-Jet」を開発した。本システムは、革新的な強制振動燃焼法（酸化剤中酸素濃度、酸素比を同時に振動）を適用・制御することにより、NOx の生成を抑制することを可能にしている。開発試験では、NOx を規制値以下まで大幅に低減できることを確認した。さらに、炉内ガスの攪拌効果により、炉内温度の均一化、伝熱効率の向上を図ることができ、省エネルギー技術として加熱炉に適用可能な酸素富化燃焼技術を確立した。

When oxygen-enrichment combustion is used to hot heating furnace, it is necessary to control NOx emission which occurs in large quantities. We have developed the ultra-low NOx oxygen-enriched combustion system “Innova-Jet” for applying this problem. “Innova-Jet” is using an innovative forced oscillation combustion method, and made it possible to control emissions of NOx. We found out that “Innova-Jet” could reduce NOx sharply and the temperature in a furnace is equalized by the churning effect of the gas in a furnace, and intermediary thermal efficiency improves in the development test. We established new oxygen-enrichment combustion technology applicable to a heating furnace as energy-saving technologies.

1. はじめに

現在、環境問題が重要視される中、地球温暖化が深刻な問題となっている。地球温暖化の主な原因物質である炭酸ガスは、化石燃料の燃焼によって大量に放出されており、より一層の省エネルギー技術の開発が期待されている。そのような中、省エネルギーおよび炭酸ガス排出量削減に貢献可能な技術として、酸素燃焼技術は各種の燃焼アプリケーションに用いられてきている^{1,2)}。

燃料にメタンを用いた場合における、酸素燃焼の特徴を Fig.1 に示す。酸素燃焼は酸化剤に窒素を含まないことにより、高温火炎が得られるため、融点の高い物質の溶解が可能になるとともに、加熱用途で使用する場合には、被加熱物との温度差を大きくできるため、高い伝熱効率を得られることになる。さらに、単位燃料あたりの燃焼排ガス量が、空気燃焼に比較して

1/4～1/5に減少するため、排ガス熱損を大幅に低減することができるという優れた特徴を有している。

酸素燃焼技術の導入は、高温を必要とする鉄鋼、非鉄金属業界を中心に、最近では、ガラス製造の分野においても加速度的に導入されており、省エネルギーに貢献している³⁾。その一方、加熱炉やボイラなど中低温度域のアプリケーションについては、酸素燃焼を導入する場合、現在の酸素コストでは経済的に難しいのが現状である。

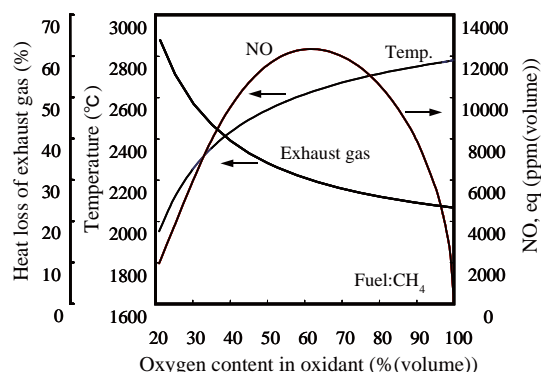


Fig.1 Characteristics of oxygen-enriched combustion

* 開発・エンジニアリング本部ガスアップセンター

** 開発・エンジニアリング本部ガスアップ戦略統括プロジェクト

燃料にメタンを用いた場合の、各排ガス温度による酸化剤の酸素濃度と燃料低減率の関係を Fig.2 に示す。なお、燃料低減率の定義は (1) 式とした。

$$R = \frac{F_{Air} - F_{O_2}}{F_{Air}} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 R : 燃料削減率 (%)
 F_{Air} : 空気燃焼での燃料使用量
 F_{O_2} : 酸素富化燃焼での燃料使用量

燃料低減効果は、排ガス温度の上昇および酸素濃度 21～40% までの範囲で大きく上昇する。したがって、酸素コストと、効率向上による燃料低減効果との兼ね合いから、酸素濃度 30～40% 程度までの酸素富化燃焼であれば十分導入が可能であり、省エネルギー技術として炭酸ガス低減に貢献できる。しかし、酸素富化燃焼では、Fig.1 に示したように酸化剤の酸素濃度が 30～40% の範囲で、NO_x 濃度も大幅に増加するため、

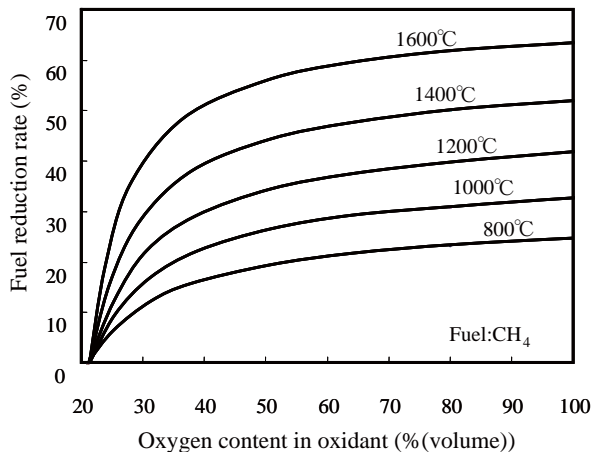


Fig.2 Relationship between oxygen content in oxidant and fuel reduction rate

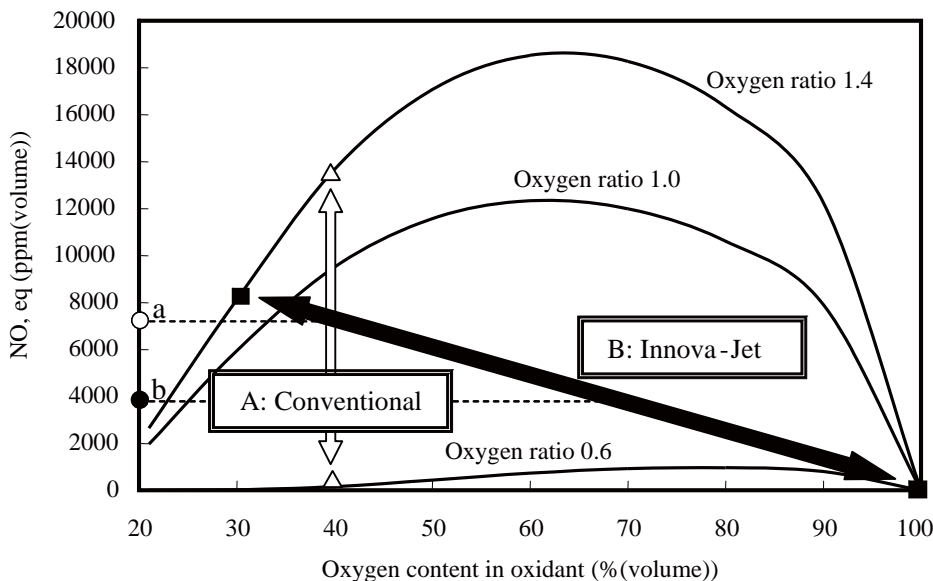


Fig.3 Influence of oxygen content in oxidant on NO_x

工業炉に導入する際には、大気汚染防止法で定められる排出基準値以下に NO_x 濃度を抑制する必要がある。

従来の NO_x 生成抑制に関する技術としては、排ガス再循環、希薄燃焼、多段燃焼などが挙げられ、工業用から民生用に至るまで広く応用されているものの、いずれも、空気燃焼もしくは純酸素燃焼を前提とした技術であり、酸素富化燃焼において NO_x を十分に抑制できる燃焼技術が求められている。

そこで当社では、酸素富化燃焼において NO_x を大幅に低減する技術として、強制振動燃焼を利用した新しいコンセプトの超低 NO_x 酸素富化燃焼システム「Innova-Jet」を開発した。

2. 超低 NO_x 酸素富化燃焼技術のコンセプト

Fig.3 に、開発した低 NO_x 燃焼法 (以下、Innova-Jet と記す。) のコンセプトを示す。本図は、酸素比 0.6, 1.0, 1.4 の条件における酸化剤の酸素濃度と NO 平衡濃度との関係である。酸素比とは、一定量の燃料に対して量論比の何倍の酸素が供給されたかを表す量である。従来の振動燃焼法 (以下、従来燃焼法と記す。) では、燃料あるいは酸化剤の一方もしくは両方の流量を変動させることによって、図中 [A] で示すように酸素比を振動させている。つまり、同じ酸素濃度条件において燃料過濃燃焼と燃料希薄燃焼を周期的に切り替えることによって平均 NO 濃度を図中 [a] まで抑制するものである^{4,5)}。Innova-Jet では、図中 [B] で示すように、酸化剤の酸素濃度を振動させると同時に、酸素比も振動させる。つまり、高酸素濃度 - 低酸素比燃焼と低酸素濃度 - 高酸素比燃焼を周期的に切り替えることによって、平均 NO 濃度を図中 [b] までさらに抑制するものである。

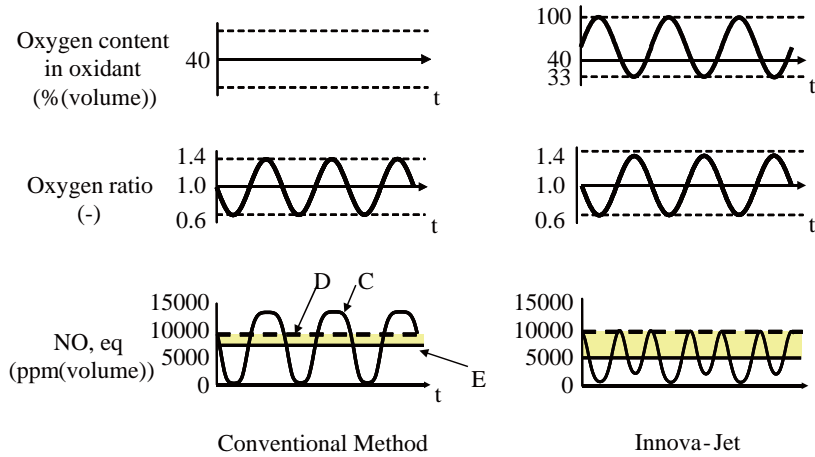


Fig.4 Procedure of Innova-Jet

Innova-Jet の酸化剤酸素濃度と酸素比の振動パターンおよび、そのときの NO 生成状態を Fig.4 に示す。本運転パターンは、酸素濃度を 33～100%、酸素比を 0.6～1.4 の間で周期的に変化させ、平均で酸素濃度 40%、酸素比 1.0 としている。図中の NO 濃度 [C] は、平衡計算により求めた値であり、[D] は酸素濃度 40%、酸素比 1.0 での NO 濃度である。また、[E] は振動燃焼時の NO 濃度の平均値である。Fig.4 より、Innova-Jet では、NOx が発生しやすい高酸素比の時に、酸素濃度を下げることによって NOx の生成を抑制でき、従来法に比較して、大幅に NOx を低減できる可能性があることが予測された。

Fig.4 の予測結果を確認するために、ラボスケール設備（燃焼量 10kw 規模）を使って、NOx の生成に対する基本的な振動パラメータ（酸素比振幅、酸化剤酸素濃度振幅、振動周期）を変えた試験を実施し、Innova-Jet の NOx 低減効果を確認した。試験バーナは、単純二重管構造のものを用いた。結果の一例として、Fig.5 に、従来燃焼法、定常燃焼（40% 酸素富化）および Innova-Jet における NOx 濃度と炉内温度の関

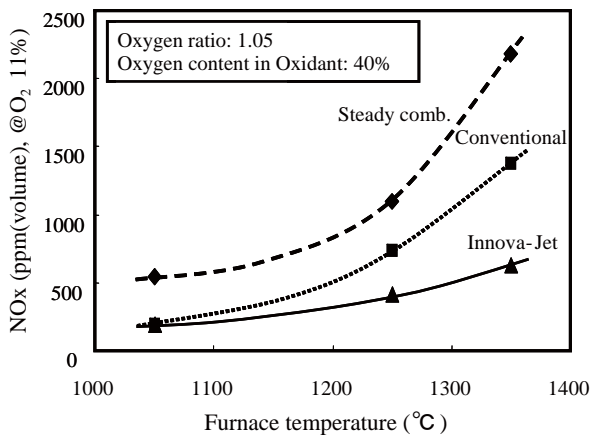


Fig.5 Comparison of temperature dependence on NOx

係を示す。Innova-Jet では、他の燃焼法と比較して全ての温度域において NOx を低く抑えられることがわかる。特に、温度の高い条件において、従来燃焼法が定常燃焼と比較して 37% の低減率であるのに対し、Innova-Jet では、定常燃焼に対して 73%、従来燃焼法に対して 57% と高い NOx 低減効果が得られた。これは、NOx が生成しやすい燃料希薄（高酸素比）燃焼時の酸化剤の酸素濃度を下げることによって、NOx が生成しやすい温度域を避けて燃焼させることができるためである。

3. NOx 低減機構

Innova-Jet による NOx 低減機構について、反応解析（解析ツール：CHEMKIN、素反応モデル：GRI-Mech3.0）により検討した。解析モデルを Fig.6 に示す。NOx 生成反応においては、燃焼炉内の循環流が影響することから、本解析では燃焼炉内を火炎領域（Flame

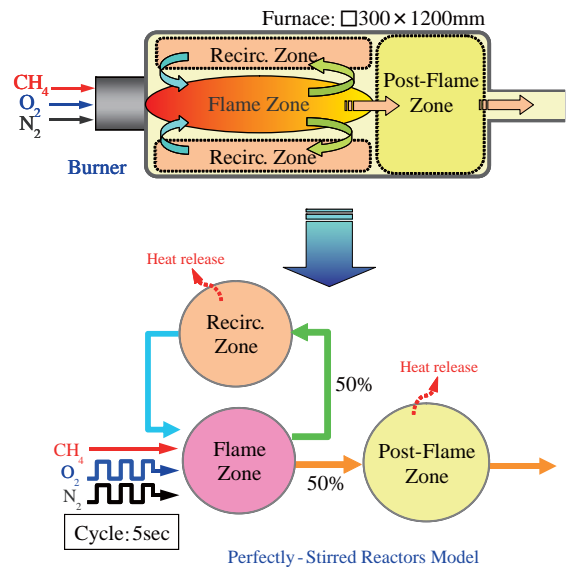


Fig.6 Combustion modeling for rate-of-production analysis by CHEMKIN

Zone), 再循環領域 (Recirc. Zone), 後流領域 (Post-Flame Zone) の三つの領域に区分し, 各領域を完全混合反応器とした。各領域の容積および再循環領域への循環ガス流量については, 予め試験炉のCFD定常解析を行い, 算出した。

反応解析の結果を Fig.7 に示す。定常燃焼法, 従来燃焼法, Innova-Jet の三条件について, NO_x 生成・消滅反応に関連する素反応のうち, 寄与度の大きい素反応の生成速度を比較した。Thermal-NO_x の生成には, 主に Zeldovich 機構 R178, R179, R180 に加え R214, R215 による反応を介して生成される。この反応解析により, Innova-Jet では, NO_x の全ての生成反応において生成速度が抑制されていることを確認した。特に R178, R180, R215 は, NO_x 低減に大きく寄与する。本解析から, Innova-Jet が NO_x 低減の手法として有効であることを理論的に確認した。

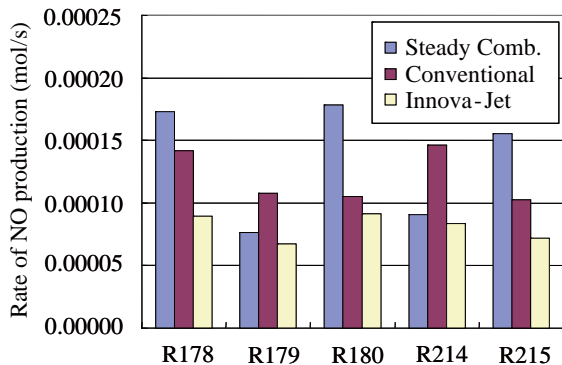
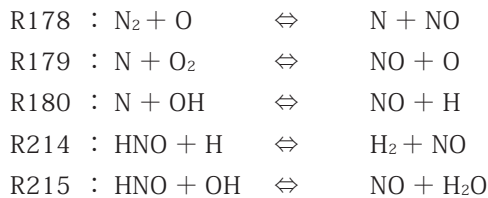


Fig.7 Rate of NO production analysis

4. ベンチスケール試験

4.1 試験設備および試験条件

Fig.8 に試験設備の概略を示す。試験炉は, 炉内寸法が 850mm × L3400mm で, 炉壁に厚さ 100mm のセラミックファイバ製断熱ボードを内張りしたものである。炉底面には, 熱電対を設置し, 炉内の温度分布を測定できるようにしている。また, 炉底面に直径 8mm の水冷抜熱体を 250mm 間隔で長手方向に 12 本設置し, 下面への伝熱量分布を測定できるようにしている。支燃性ガスは空気に酸素を混合する代わりに, 試験では酸素と窒素の混合ガスを用いた。流量操作盤は, 酸素ラインと窒素ラインの制御弁により, 酸化剤の流量, 酸素濃度ならびに振動周期をコントロールした。試験用バーナとしては, Fig.9 に示すように, Innova-Jet とステージング燃焼法を組み合わせた構造のバーナを用いた。バーナの運転条件は燃料と 1 次酸化剤の流量は一定とし, 2 次酸化剤 (ステージング) の酸素と窒素の流量のみを変動させた。2 次酸化剤の流量パターンと酸素比および酸化剤酸素濃度の運転パターンを Fig.10 に示す。2 次酸化剤の流量は, 矩形波的に変動させた。

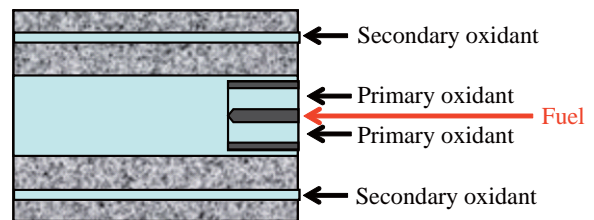
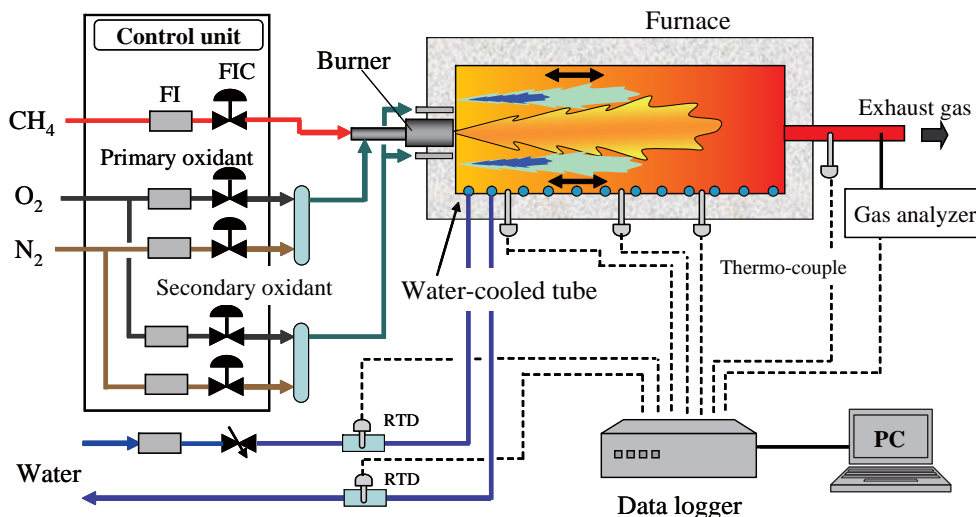


Fig.9 Burner image



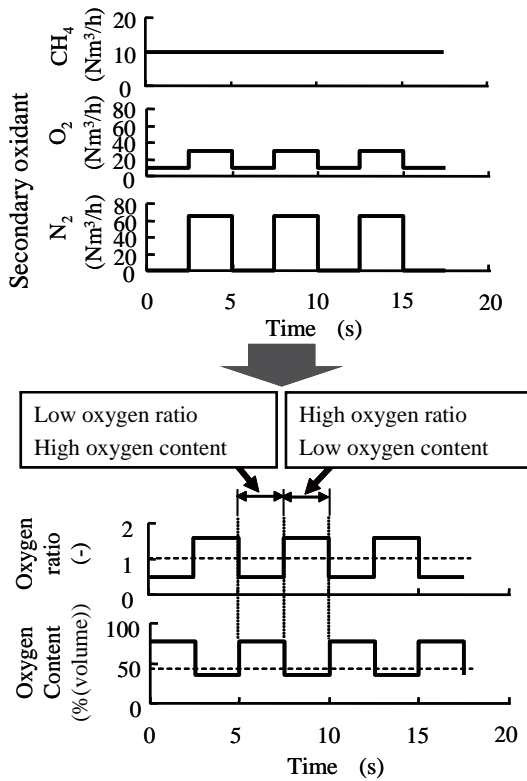


Fig.10 Control pattern of burner

Table.1 に試験条件を示す。燃料にはメタンを用いた。表中の Con.1, Con.2 は、低酸素比 - 高酸素濃度と高酸素比 - 低酸素濃度の燃焼条件である。試験では、平均酸素比が 1.05, 酸化剤酸素濃度が 40% になるように二つの燃焼条件を決定した。

NOx 排出特性を把握する試験では、水冷抜熱体を設置せず、No.1～3 の条件で燃焼量を変えて炉内温度の影響を確認した。伝熱特性把握試験は、No.4 の条件で水冷抜熱体を設置し、そのときの炉内温度が 1200℃ 程度であった。

Table.1 Experimental condition

Run No.	1	2	3	4
CH ₄ (m ³ (normal)/h)	3.5	5.0	8.0	11.0
Primary/Secondary flow rate	1/9			
Oxygen ratio (-)	Con.1	0.58		
	Con.2	1.62		
	Ave.	1.05		
Oxygen content	Con.1	79.3		
in oxidant	Con.2	36.3		
(%(volume))	Ave.	40.0		
Oscillating cycle (s)	5			

4.2 炉内燃焼状況

Fig.11 に定常燃焼時と Innova-Jet を用いた場合の火炎の状況を示す。なお、炉内温度は、両条件とも

1150℃ 程度である。定常燃焼時では、輝度の高い火炎が目視でき、温度の高い領域が形成されていることがわかる。一方、Innova-Jet では、フレームレス燃焼の状態となり、火炎は見られない。これは、低酸素比 - 高酸素濃度燃焼時には、燃料の熱分解により煤が生成されるものの、酸素不足のために燃焼反応が進行せず、温度が高ならないため火炎が目視できなかったものとする。また、高酸素比 - 低酸素濃度燃焼時には、酸素濃度の低い二次酸化剤が大量かつ高速で吹き込まれることによって、燃料と酸化剤が炉内全体で混合し、緩慢に燃焼するためフレームレスの燃焼状態になったものと推察される。

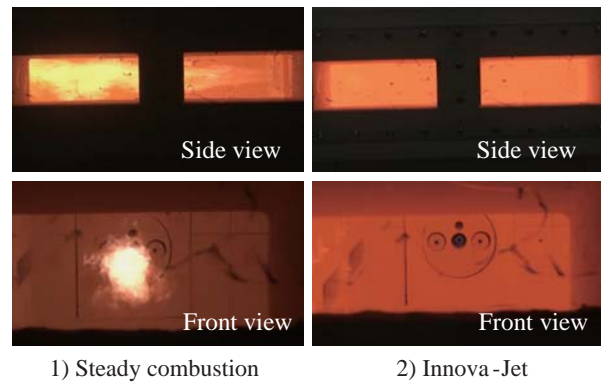


Fig.11 Combustion situation

4.3 NOx 排出特性

Fig.12 に定常燃焼法と Innova-Jet を用いた場合の NOx 排出特性を示す。燃焼条件は、時間平均の酸素比 1.05, 酸化剤酸素濃度 40%, 振動周期 5 秒である。Fig.12 に示すように、炉内温度 1450℃ において、定常燃焼法では 1480ppm であるのに対し、Innova-Jet では 79ppm と、NOx が従来の約 1/20 以下に低減できることが確認された。なお、CO 濃度は、全ての条件で 50ppm 以下であった。

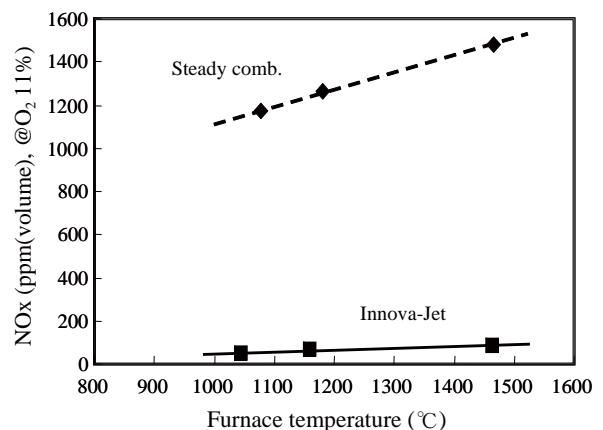


Fig.12 NOx emission levels of Innova-Jet

4.4 炉内温度分布

Fig.13およびFig.14に、定常燃焼と Innova-Jet を用いた場合の炉内温度分布を示す。Fig.13に示すように、2000mm までの位置において、定常燃焼では最高温度 1469℃から 32℃ (図中 ΔT_S) の温度低下幅があるのに対し、Innova-Jet では最高温度 1470℃から 10℃ (図中 ΔT_I) と軸方向の温度低下幅が小さくなっていることがわかる。また、Fig.14から、炉の横方向の温度分布がフラットになっている。Fig.11に示した火炎の状況から分かるように、Innova-Jet では二次酸化剤の流量を大きく変動させて振動燃焼を行うため、炉内の燃焼ガスの攪拌が促進され、炉内温度が均一化されたものと考えられる。

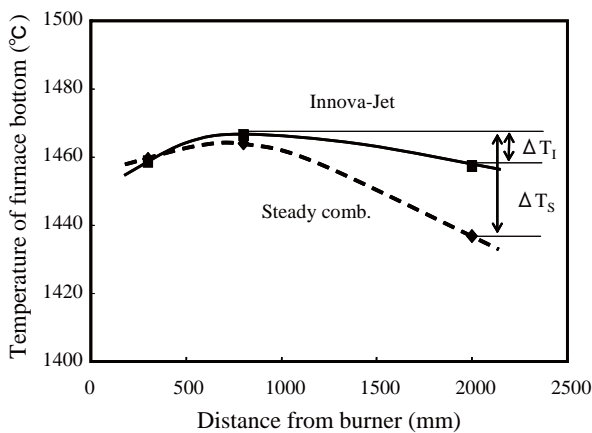


Fig.13 Axial temperature distribution

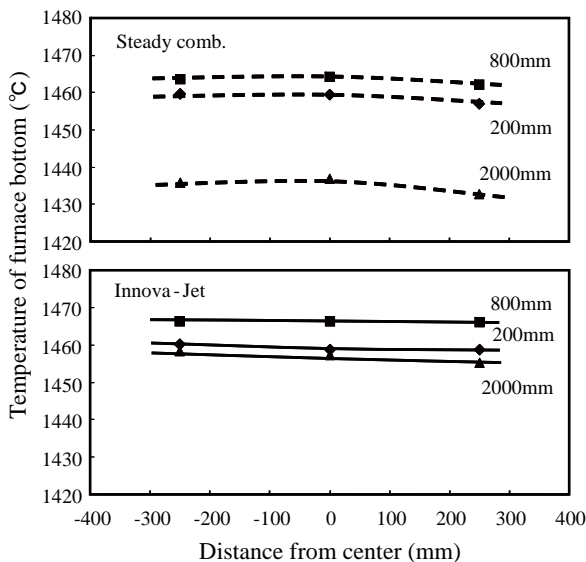


Fig.14 Horizontal temperature distribution

4.5 伝熱量分布

Fig.15に、定常燃焼時と Innova-Jet を用いた場合の水冷抜熱体への伝熱量分布を示す。バーナから 3000mm までの位置において、伝熱量の総計が定常燃焼では 53.1kW であるのに対し、Innova-Jet では

60.0kW と約 13.0% の伝熱効率が向上していることがわかった。特にバーナから 1000mm までの領域において伝熱量の向上が顕著である。また、バーナから 2000mm の領域において、伝熱量はほぼ一定になる傾向にある。これは、先に述べたように振動燃焼させることによって、炉内温度が均一化されたためと考える。本結果は、下面の被加熱部をより均一に加熱できることを示しており、Innova-Jet では、加熱炉および溶解炉など均一な加熱が求められるものに対して、より適した火炎特性が得られる。

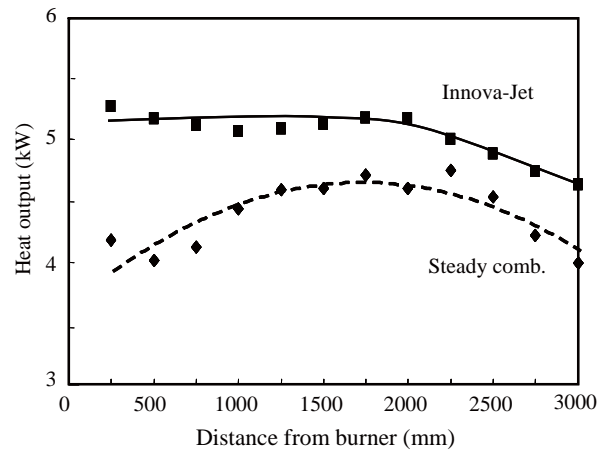


Fig.15 Effect on heat output by Innova-Jet

5. まとめ

本実験において、以下の結果を得た。

- (1) 酸化剤の酸素濃度と酸素比を同時に振動させる本開発コンセプトが、NO_x 低減の手法として有効であることを反応解析による理論的観点とベンチスケール試験から確認した。
- (2) Innova-Jet により、炉内の燃焼ガスの攪拌が促進されることで、炉内温度の均一化、伝熱効率の向上を達成した。
- (3) Innova-Jet により、高温の加熱炉などに酸素富化燃焼法を適用することが可能となった。

参考文献

- 1) 五十嵐弘, 阿部智信, 三宅新一, 鷺見郁宏, 菊地良輝: 日本酸素技報, No.22, p.7-12 (2003)
- 2) 諏訪俊雄, 小林伸明, 三宅新一: 工業加熱, Vol.39, No.3, p.3-12 (2002)
- 3) 飯野公夫, 近野直治, 讚井宏: 日本酸素技報, No.13, p.17-21 (1994)
- 4) 毛笠明志, 宮藤 章, 辻下正秀: 日本機会学会論文集(B編), Vol.68, No.675, p.269-274 (2002)
- 5) R.Ruiz, S.Drogue, H.Abbasi and J.Wagner: International Gas Research Conference, vol.2, p.2242-2249 (1995)