312 高温空気燃焼技術を用いた石油燃料の環境低負荷燃焼技術の開発

Development of Low Emission Combustion Technology of Petroleum with High Temperature Air Combustion Technology

○下 紳郎、佐藤 正志(石油産業活性化センター)、荒明 但宏(日本ファーンズ工業)
正 伊藤 義人、鶴田 直樹、正 吉川 邦夫(東工大)

Nobuo SHIMO, Masashi SATOH, Petroleum Energy Center,
Advanced Technology and Research Institute, 1-4-10, Ohnodai, Midori-ku, Chiba
Tadahiro ARAAKE, Nippon Furnace Kogyo Kaisya, Ltd.
Yoshito ITOH, Naoki TURUTA, Kunio YOSHIKAWA, Tokyo Institute of Technology

Combustibility of petroleum was investigated with high temperature air combustion technology. Ultra low NOx emission ($\sim 10\text{ppm}$) was achieved both for the kerosene and heavy oil A as fuels using a 0.4MW class test furnace. Thermal NOx was extremely reduced as decreasing the air ratio and fuel NOx was also reduced when the combustion was conducted at low oxygen concentration. Introducing the high temperature ($\sim 1000^\circ\text{C}$) steam could decrease the NOx emission. As decreasing the air ratio, the flame was enlarged and flameless oxidation was observed. Under the low NOx combustion condition, uniform distribution of temperature and chemical species were confirmed.

Key Words : High Temperature Air Combustion, Ultra Low NOx Emission, Flameless Oxidation, Uniform Distribution

1. 序

高温空気燃焼は高効率で低環境負荷の燃焼技術として知られており、鉄鋼関係の工業炉を中心として実用化が進められ、さらに他の用途への展開も検討されている。¹⁾ また基礎的な面から高温空気燃焼を解明しようとする検討も進められたが、²⁾ 主としてガス燃料を用いたものが多く、液体燃料である石油燃料の検討例はほとんど知られていなかった。我々はこれまで 10kW 程度の燃焼量の小型燃焼評価装置を用い、基礎的な面からの検討を進め、以下の点を明らかにしてきた。³⁾ すなわち石油燃焼においても高温空気燃焼によりガスと同等の低 NOx 燃焼性を示す。高温空気燃焼現象の解明を行い、低 NOx 燃焼を示す高温空気燃焼条件では、温度分布や化学種分布が一様になる。希釈ガスの NOx 低減効果は $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{Ar}$ の順に大きく、これはこれらのガスの比熱の違いがもたらす断熱火炎温度の違いとして説明できること。またこれら希釈ガスの違いにより火炎の色が、それぞれパープル、グリーン、輝炎および青炎と変化する。燃料油性状(蒸留性状、アロマ分含有量)によらず低 NOx 燃焼であり、またフェル NOx を低減する可能性もあることを明らかにしてきた。さらに実用化を想定した石油燃料を用いた高温空気燃焼技術の開発を進めるためには、燃焼量の大きな燃焼炉での検討が必要である。そこで 0.4MW クラスの燃焼炉を用いた石油の高温空気燃焼の検討を開始した。

2. 実験装置と実験方法

図 1 に石油の噴霧燃焼が可能な高温空気燃焼炉の外観写真およびバーナ部を示す。高温空気燃焼炉には、燃料、燃焼用空気、抜熱用空気、アトマイズ用蒸気、高温水蒸気が供給される。主要な機器は、燃焼炉本体(高温空気燃焼バーナ、火炎状態を観測するための窓、排ガスをサンプリングする孔が設置)、燃料油タンク、蒸気過熱器、蒸気発生器(貫流ボイラ)、および空気供給ユニット(プロア、制御機器駆動用コンプレッサー)、排気ファンである。また装置の運転を制御するシステム、プロセスデータ、排ガスデータ、温度データを表示するシステム、温度分布を自動的に計測するための制御システム、観測窓に不活性ガスを供給するシステムが付帯されている。

燃料油として、灯油、A 重油および C 重油の燃焼が可能である。蒸気によりアトマイズされた燃料油はバーナセンター部分から噴霧される。燃焼量は 20~45 l/hr である。一次空気 ($40\text{m}^3/\text{hr}$) は燃料油噴射口の周りの噴射口から供給される。燃料油噴射口および一次空気噴出し口の上部にパイロットバーナが設置されている。燃焼用空気 ($200\text{m}^3/\text{hr} \sim 600\text{m}^3/\text{hr}$) は周囲に配置された 6ヶ所の空気供給/排ガス排出口から供給される。空気供給/排ガス排出口の内部にはハニカム状の蓄熱体 ($144\text{mm} \phi \times 300\text{mm} \text{L}$) が設置されており、排ガスにより顕熱が蓄えられ、バルブ

図1 燃焼炉全体外観写真(左)およびバーナ部分(右)

の切り替えにより空気が供給され 1000°C 程度の高温空気を燃焼炉内に導入する。6ヶ所の空気供給/排ガス排出口のうち、4ヶ所は排気モードとなり、2ヶ所が供給空気モードとなる。切り替えは任意に設定できるが、現在は5秒毎に切り替わり、連続した2ヶ所から高温空気が供給されるようなパターンに設定されている。したがって1つの蓄熱体では、20秒連続して排気ガスにより蓄熱され、10秒連続で空気により放熱されることになる。蒸気過熱器から発生した過熱蒸気は一次空気供給口の外側に設置された2ヶ所の噴出口から炉内に供給される。

3. 結果と考察

(1) 火炎写真と NO_x 排出値

空気比が 1.5 よりも大きいところでは観察可能な火炎(輝炎)が観測されるが、空気比が 1.5 より小さくなると明らかな火炎は観測されず、炉内全体でゆっくりとした燃焼が起こっており“flameless oxidation”と呼ばれる燃焼状態が観測された。図2は空気比を変えて NO_x 排出値(O₂=0%換算)をプロットしたものである。燃料は灯油であり燃焼量を 25~40 l/hr で変化し、炉内の温度は放熱空気の量を調整して一定に

図2 空気比と NO_x 排出値
(炉内温度 800~1000°C、灯油流量 25~40l/hr)

保って計測した。NO_x 排出値は空気比が低くなるにつれて急激に減少し、理論空気量近辺で 10ppm 程度にまでなっている。また温度が高くなるにつれて増加していることがわかる。灯油の燃焼量には依存せず、炉内の温度を一定に保つことにより NO_x 生成量が制御されていることがわかる。

(2) 高温水蒸気の投入効果

燃焼排ガス中には、燃料の未燃物、燃焼に関与しなかった空気(酸素、窒素)、空気完全燃焼により生成する炭酸ガス、不完全燃焼により生成する一酸化炭素とともに、水蒸気も生成する。生成した水蒸気は炭酸ガスと同様不活性ガスとして燃焼を安定化させる。またその比熱は窒素よりも大きく、燃焼火炎の断熱温度を下げるができる。また水蒸気を添加することにより、より低酸素濃度の燃焼場を形成することができる。さらに水蒸気改質反応により、カーボンを経水素と一酸化炭素に変換する可能性もある。そこで高温の水蒸気の効果を検討するため、貫流ボイラで発生した蒸気を蒸気過熱器に送り、600~1000°C に過熱して燃焼炉に投入し、水蒸気の投入効果を検討した。以下、蒸気流量および蒸気温度が NO_x 低減に及ぼす効果について述べる。

図3は蒸気流量と NO_x 排出値の関係を、空気比を変えて測定した結果を示したものである。蒸気投入量が増加するにつれて低減量は増加するが、リニアではないことがわかる。特に低空気比の場合には、蒸気を投入しない場合の NO_x 排出値も低いため、蒸気投入量を増加させてもそれほどの低減効果は見られない。一方、空気比の高い場合には低減効果はかなり大きいことが明らかとなった。

次に蒸気温度が NO_x 生成に及ぼす影響について検討した結果を述べる。図4は蒸気温度を変化させて投入した時の NO_x 排出値を示す。蒸気温度が下がるにつれてわずかに NO_x 排出値は低下しているが、あまり大きな効果はない。おそらく蒸気投入により部分的に火炎温度が低下したものと考えられるが、投入した蒸気の流量から考えて、その効果はそれほど大きくないものと思われる。

図3 空気比の違いによる蒸気流量のNOx低減効果

図4 蒸気温度がNOx生成に及ぼす影響

(3) 炉内温度分布計測

以上述べてきたように、極めてNOx排出値の低い高温空気燃焼の現象が観測される場合には、明らかな火炎は観測されず、炉内が均一になっているものと予測される。そこで燃焼条件を変えて、炉内温度分布計測を行った。計測は10本の熱電対を同時に駆動し、抜熱管の位置(500mm)から50mmずつ中心に向かって計測した。合計110点のデータを二次元炉内温度分布として表現したが、ここで便宜上燃焼炉は上下対称と考え、測定は0~500mmのみを行い、-50~-500の値は50~500の値をそのまま用いた。

図5は燃焼空気量の違いが炉内分布に及ぼす影響を検討した結果である。灯油流量30l/hrに対して、(a)は燃焼空気量が500m³/hrであり(b)は300m³/hrの場合である。空気比はそれぞれ1.77および1.04である。炉内温度は900℃に調整した。この図からわかるように、空気比が高い場合にはバーナノズル先端から500~1000mmのところに高温部分があり、これは火炎の輝炎の部分とほぼ一致している。一方空気比が理論空気量に近い場合には、こうした高温部分の発生は見

れず、バーナの反対側が100℃程度高いゆるやかな温度分布が観測された。このことから高温空気燃焼の条件になると、温度分布が均一になり、NOxの低減が図れたと考えることができる。

図5 炉内温度二次元分布像(燃焼空気量の違い)

(a) 燃焼空気量 500m³/hr (b) 燃焼空気量 300m³/hr
灯油流量 30l/hr、炉内温度 900℃

つぎに蒸気の投入効果を検討した結果を図6に示す。燃焼空気量は500m³/hrであり、(a)は蒸気を投入しない場合、(b)および(c)は1000℃の高温水蒸気をそれぞれ2kg/hr、11kg/hr投入した場合の温度分布を示す。投入量が増えるにつれて炉内の温度分布が均一になっていることがわかる。

一方空気比が低くもともとNOx生成も低い燃焼条件では高温水蒸気を投入しても均一性はそれほど変化なかった。水蒸気の投入効果は(2)で述べたNOx排出値の結果とよく一致している。すなわち、空気比の高いところでは局所的な高温部の生成が観測されNOxの排出値が高いが、空気比の低い高温空気燃焼の領域になると、もともと温度分布は均一でありNOx排出も抑えられているので、水蒸気を投入してもそれほど大きな効果をもたらすことはないものと考えられる。

図6 炉内温度二次元分布像(投入蒸気量の違い)

高温水蒸気量(a) 0kg/hr (b) 2kg/hr (c) 11kg/hr
燃焼空気量 500m³/hr 灯油流量 30l/hr、炉内温度 900℃、
高温水蒸気温度 1000℃

(4) 燃料油種の違いの検討

これまで述べてきた検討結果は、主として灯油を燃料とした場合の検討結果であるが、A重油の高温空気燃焼においてもほぼ同等の結果が得られている。すなわち、空気比の高いところでは灯油よりもやや強い輝炎が観測されたが、NOxの排出値はほとんど同じかやや低い値であった。低空気比の高温空気燃焼状態になると、灯油と同等に、明らかな火炎の観測されない均一な燃焼状態となり灯油並みのサーマルNOxの排出値であった。A重油は通常窒素分を平均して200ppm程度含んでおり、これらの化合物からフェュエルNOxが20ppm程度生成することが経験的に知られているが、高温空気燃焼

ではこのフュエル NO_xの低減の可能性も見出している。現在、その詳細について検討中である。また煤塵の発生も少ない可能性があるが、この点についても現在検討を進めているところである。

4. まとめ

- (1) 空気比が高いところでは、バーナー付近に輝炎の部分が観測されるが、空気比の低いところになると、輝炎はほとんど消えはっきりとした火炎の形が観測されない flameless oxidation の現象が観測された。
- (2) NO_x排出値は空気比が高くなるにつれて増加する。加熱空気を調整して炉内温度を一定に保った場合、燃焼量によらず同じ NO_x排出値を示すことが明らかとなった。また炉内温度が高くなるにつれて増加する。
- (3) 高温水蒸気を投入した結果、NO_x排出値は低減することが明らかとなった。蒸気量が増加するにつれて、低減量は増えるがリニアではない。また蒸気の温度には依存しないことが明らかとなった。
- (4) 温度分布計測を行った結果、低酸素濃度の高温空気燃焼条件になると局所的な高温部分は観測されないことがわかった。また蒸気投入によっても局所的な高温部は消滅し、均一に分布することが明らかとなった。
- (5) 灯油とA重油では高温空気燃焼性に大きな違いはない。すなわちA重油を用いた場合には、空気比の高いところでは灯油燃焼の場合よりも強い輝炎の発光が観測されるが、低空気比の燃焼条件では灯油とほぼ同様の結果が得られた。

本研究は、経済産業省の補助金をもって（財）石油産業活性化センターの研究事業として行われたものである。

参考文献

- 1) 高温空気燃焼技術フォーラム講演論文集、東京（2001）
- 2) Katsuki, M. and Hasegawa T., “ The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air. “, Proc. 27th Symp. (Int.) on Combustion, Burgess A.R. and Dryer F.L., co-ed., The Combustion Institute, Pennsylvania, vol.2, pp. 3135-3146 (1998).
- 3) Shimo N., Itoh Y. and Yoshikawa K., “ Development of Clean Combustion Technology for Many Kinds of Fuel Oil. “, Proc. 4th Int. Symp. High Temperature Combustion and Gasification, 35 (2001).