

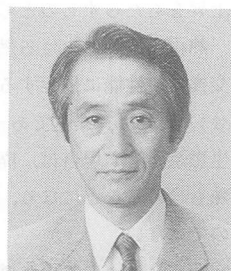
■ 展望・解説 ■

高温に予熱された空気を利用する燃焼

Combustion with Highly Preheated Air

香 月 正 司*

Masashi Katsuki



1. まえがき

工業炉などの煙道から廃熱を回収し、燃焼用空気を予熱するシステムは熱再生燃焼と呼ばれ、熱利用率を高める手段として利用されている。ところが燃焼に起因する大気汚染がやかましく叫ばれるようになり、その原因物質の生成・消滅機構が明らかにされるにしたがい、燃焼用空気の温度上昇とともに排気中の NO_x が増加することが明らかになった。したがって、熱再生燃焼による熱利用率の向上と NO_x 排出量の抑制は、同時には成立しないものとして一般に理解されてきた。

ところが、たまたま切替式蓄熱器と2段燃焼を組み合わせた実験工業炉において、1100Kから1400K程度の高温空気をを用いた燃焼をさせても、従来型炉より低い NO_x 排出量が観察されたという報告がある¹⁾。しかし、これまでこのような高温の空気をを用いて火炎を詳細に観察した例は見られないため、通常の大気温度の空気をを用いた場合と比較して何が異なるのか不明である。もし通常の燃焼が起こっているとすると、火炎温度はさらに高いものになっていると推測され、これまでの NO_x 生成に関する反応動学的知見²⁾から類推する限りでは、 NO_x 排出量が低く抑えられる理由を簡単に説明することはできない。

観察結果が事実であるとする、1100Kから1400Kという高温の空気をを用いた場合に、他にどのような条件が揃えば低 NO_x が実現するのか、あるいはそのときの燃焼形態や火炎構造がどのようなものであるかを明らかにする必要がある。また、このように極めて高温に予熱された空気を工業的に利用する燃焼法はこれまでにないものであり、新たに採用されるとすると、従来の燃焼技術と区別する呼び名も必要であろう。

2. 熱再生燃焼

煙道から排気とともに排出される熱を、蓄熱器あるいは熱交換器を介して燃焼用空気の予熱に利用する技術は熱再生燃焼と呼ばれる。(図-1)

この方法を用いれば、一定の被加熱物のある温度に加熱するのに必要な燃料量が少なくて済むので、熱再生燃焼は熱利用率を高める手段として一般に広く受け入れられている。このシステムに必要な大容量の熱交換器は、これまで熱交換効率が高くないものが多く、熱交換効率の高い回転式熱交換器は、漏れや耐久性に問題があった。それにもかかわらず、高い炉温を必要とするセメント製造やガラス融解設備には、実際に熱再生燃焼が利用されてきた。したがって一般には、熱再生燃焼では、回収される熱量の増加が熱利用率の向上をもたらすと同時に、燃焼過程全般の温度レベルの

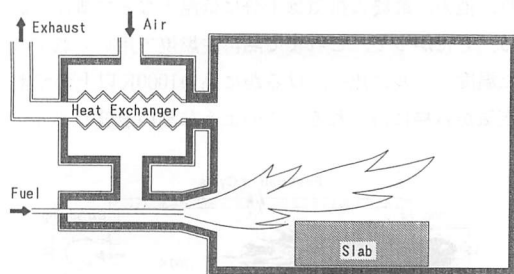


図-1 熱再生燃焼

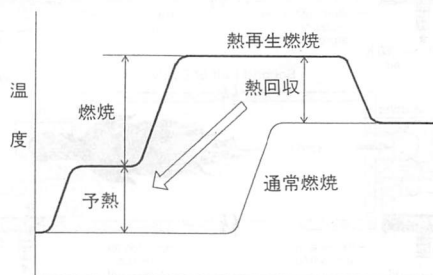


図-2 断熱1次元系における熱再循環による燃焼過程の温度変化

* 大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻教授
〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1

上昇をもたらすものと考えられてきた。(図-2)

熱再生燃焼における燃焼用空気温度は、蓄熱器や熱交換器の性能に依存するため、これまでの温度上昇はせいぜい500K程度であった。したがって、単に熱再生燃焼と呼ぶ場合は、廃熱を利用したわずかな空気予熱も含めることになり、特に新しい技術を意味するものではない。

もうひとつの熱再生燃焼の利用は、超過エンタルピ火炎の研究で注目を浴びた低発熱量燃料の燃焼、あるいは超希薄混合気の燃焼への利用である³⁾。これは常温の空気を用いたのではとうてい燃焼を継続できないような低発熱量燃料、あるいは超希薄混合気を定常的に安定燃焼させるために、熱再循環によって既燃ガスの熱を未燃混合気へ戻すもので、蓄熱器や熱交換器の代わりに輻射や熱伝導を利用する場合もあるが、いずれにしても排気側から未燃側への熱再循環によって、未燃混合気の温度レベルを上昇させたところで燃焼を行わせる点では熱再生燃焼である。

まえがきで述べた切替蓄熱式熱再生燃焼法は、図-3に示すように、蓄熱器とバーナを組み合わせた2組のセットを、1分程度の短時間に切り替え運転するもので、蓄熱器に対して排気と新気が逆方向に通過する非定常熱伝達の特性的効果で、極めて効率の高い熱回収が実現する。実際には、炉内から蓄熱器へ流れ込む排気の温度に近い高温に新気を予熱することが可能であり、他方、最終の排気は十分に低温となって排出される。したがって、これまで熱再生燃焼で用いられてきた温度レベルに比べ、はるかに高い1000K以上の予熱空気が容易に得られる。このような高い温度レベルに

予熱した空気を積極的に利用することは、熱再生燃焼としては新しい領域に入る。

3. 高温空気の定義

高温とか低温という言葉は常に相対的なものであって、使う人あるいは使う場面によって絶対的な温度レベルはまったく異なる。高温に予熱された空気を燃焼に利用するという場合、高温とは何度であると定義すればよいのだろうか。ある人は1000℃であるといい、別の人は800℃であると言ったとしても、それはわれわれが勝手に定めた目盛りの上できりのよい数字を挙げているに過ぎず、物理現象とは何の関係もない。

通常、燃焼に利用する炭化水素燃料は、高温になると熱分解し、それ自身物質が変化してしまうので、ここでは燃料は常温であるとする。この燃料が空気と出会って燃焼反応を起こすためには熱源が必要であり、一般にはパイロットバーナや保炎器背後の循環流によって高温の燃焼ガスを供給し、定常的に燃焼を持続させる手段としている。しかし、もし空気自身が極めて高温であれば、燃料と混合するだけで直ちに燃焼反応が開始することも可能となる。

そこで、燃料が自着火し、その後燃焼が持続し得る温度より高い場合を高温空気と呼び、この温度以下であれば、たとえ常温以上であっても単なる予熱空気と呼ぶようにしてはどうであろう。この自着火燃焼が起こる限界温度は燃料の種類によって当然変わるし、図-4に示すように、空気が不活性ガスのようなもので希釈されている場合には、その希釈ガスの種類や酸素濃度によっても変化する⁴⁾。このような定義を用いれば、きりのよい数字で限界温度を表すことはできないけれども、明確な意味を持たせることができる。すなわち、ある燃料が保炎手段なしに自着火燃焼を持続できる温

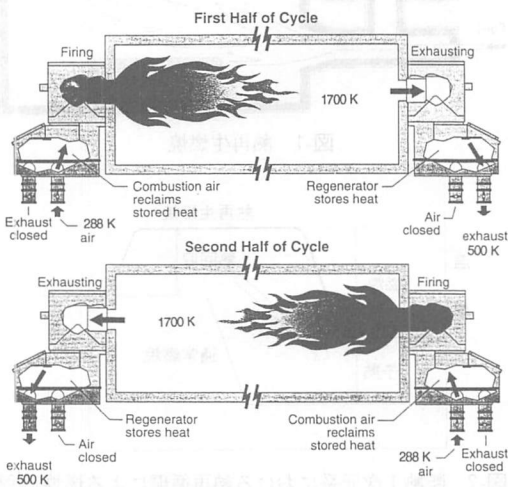


図-3 切替蓄熱式熱再生燃焼

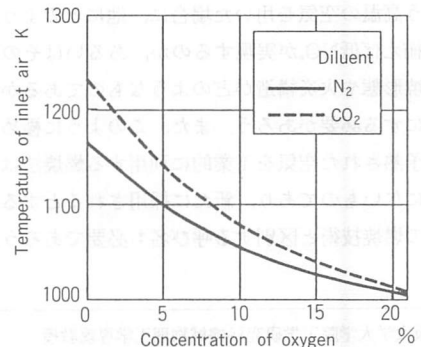


図-4 自着火燃焼の起こる限界空気温度

度以上の空気を高温空気と呼ぶ。

4. 熱再生によって得られた高温空気を用いる燃焼法の名称

先に述べたように、熱再生によって燃焼用空気を予熱しても、その温度レベルには特に言及しない従来の熱再生燃焼と区別するために、燃料が保炎手段なしに自着火燃焼を持続できる温度以上に予熱した高温空気を用いる熱再生燃焼に対して新たな名称を与えたい。

この燃焼法に対する名称として、これまでに提案されたものを列挙すると、

- 高温燃焼
- 予熱空気燃焼 (空気予熱燃焼)
- 高温空気燃焼
- 高温予熱空気燃焼 (高温空気予熱燃焼)
- 高温希釈燃焼
- 高温空間燃焼

などがある。

ここには熱再生燃焼という言葉が現れないが、高温空気を得る手段としては、熱再生だけが唯一ではない。したがって、燃焼法を分類するには他の予熱方法も含めて考えるべきであろう。したがって、熱再生という言葉はさらに細分する際に用いることにする。

高温燃焼という言葉を用意知識なしに聞けば、純酸素燃焼、アセチレン火炎、水素火炎など、火炎温度が高温になる場合の燃焼を連想させる。ところが、ここで高温という言葉で表現したいのは燃焼前の空気の温度であって、決して火炎温度を意味するのではない。この混同を避けるためには、高温燃焼だけでは言葉足らずの感じが残る。

同様に、空気予熱燃焼、予熱空気燃焼では、燃料の自着火温度以上という意味が含まれておらず、空気を少々予熱した場合の燃焼も含むことになってしまう。

高温という言葉に対して、先に定義した意味を持たせたうえで、高温に予熱した空気を用いる燃焼という意味を表すためには、上記の中では高温予熱空気燃焼もしくは高温空気予熱燃焼という名称が適していると考えられる。

高温希釈燃焼は、高温に予熱された空気を利用する燃焼において、NO_x生成量を抑制するためには、既燃ガスによる希釈が不可欠であるということを表そうとした呼称である。また高温空間燃焼は、このような既燃ガスによって希釈された場では、火炎帯すなわち反応領域が空間的に厚みを増すことを取り上げて、燃

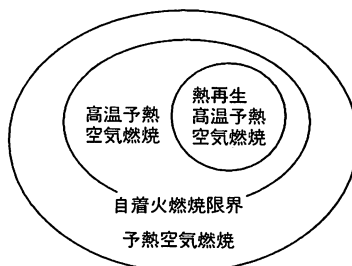


図-5 高温予熱空気燃焼の定義

焼反応が広く空間的に分散されることを強調した名称である。いずれにしても、ここで目的とする分類よりもっと限定された狭い範囲の燃焼技術を指していると思われる。

以上の理由から、高温空気を、ある燃料が保炎手段なしに自着火燃焼を持続できる温度以上の空気と定義した上で、高温予熱空気燃焼と分類し、その中で予熱手段に熱再生を利用する場合に、熱再生高温予熱空気燃焼と呼びたい(図-5)。したがって、高温予熱空気燃焼の中には低NO_xを実現できる燃焼法も、そうでないものも含まれており、単に従来のバーナを用いて高温予熱空気燃焼を行えば、多量のNO_xが排出されるはずである。

5. NO_xの生成

種々のガスタービン燃焼器について、入口空気温度とNO_x排出量の関係を調べてみると、図-6に示すように、温度上昇とともにNO_x排出量は飛躍的に増加する

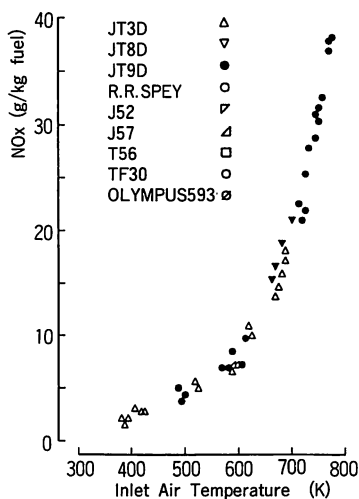


図-6 入口空気温度に対するGT燃焼器からのNO_x排出量

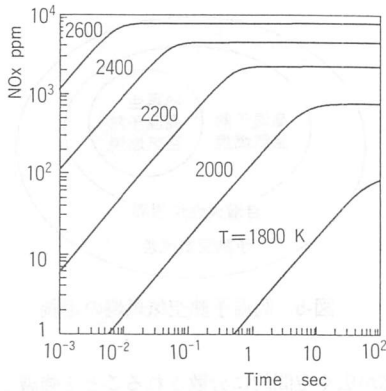


図-7 NOの生成に及ぼす火炎温度の影響

という傾向が見られる⁵⁾。この場合の空気温度範囲は最高800K程度であるが、予熱された空気を用いて普通に燃焼させれば火炎温度が上昇し、その結果NO_xが多量に生成されると考えてよいであろう。また、このことはNO_x排出量に対する空気温度の影響として一般に広く理解されている。

同じ当量比の混合気であっても、混合気の初期温度によって燃焼時の火炎温度が変化する。図-7は量論炭化水素-空気混合気(当量比1)がそれぞれ異なる温度に保たれた場合に生成するNOの生成速度と平衡濃度を示したもので⁶⁾、火炎が高温になれば滞留時間が短くても多量のNOが生成されることが分かる。加熱炉に代表される工業炉の多くは、非予混合燃焼を採用することが多いので、図の条件である予混合火炎とはやや異なるが、燃料と空気が混合する過程において、ほぼ量論混合比付近で燃焼反応が起こると考えると、工業炉の中でこれとまったく異なる現象が起こって

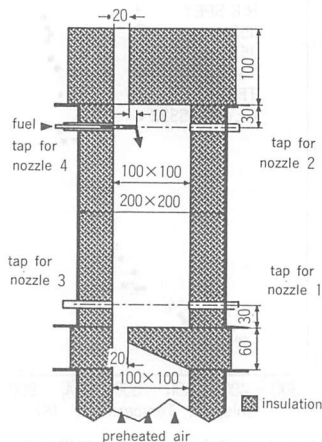


図-8 供試燃焼器

るとは考えにくい。以上は、予熱空気を用いた場合にも常温の空気を用いた場合と同様の燃焼が起こっているという仮定の下になされた推論である。

しかしここで、もし燃料の自着火温度以上の高温に予熱された空気を用いるとどうなるであろう。先の推論と同様に、もし燃料が新しい空気と混合する過程で常に量論混合比付近で燃焼するならば、同量の燃料を燃し切るには同じくらいの反応帯(火炎領域)が現われるはずで、そこで生成されるNO_xも似たような量となるはずである。ところが供給空気量と燃料量を同量に設定しても、両者の混合過程を変化させるだけで、NO_x排出量が大きく影響を受けるという観察結果が得られた^{7, 8)}。

ここでその概略を示すと、図-8に示すような燃焼器に下方から高温予熱空気が流入し、燃焼室内には大きな循環流が形成されるようになっている。燃料の供給は図に示された1から4のうちのいずれか1か所から燃料ノズルが挿入され、循環流に向けて燃料が噴射されるようになっている。

図-9は空気温度と燃料噴射量を一定として、空気流量を変化させた場合の排気煙道におけるNO_x排出量を示したものである。燃料ノズルの位置を移すと、空気流量の変化に対するNO_xの排出傾向が大きく変化し、ノズル位置1および2の場合と、3の場合ではまったく逆の傾向が現われている。また、ノズル位置4にするとNO_x排出量は極端に減少し、空気および燃料の流量から計算される供給空気比(供給当量比の逆数)が変わってもほとんど変化しない。いずれの場合も煙道において未燃の燃料はまったく観測されないので、燃焼効率はほぼ100%と考えてよく、同じ燃料が同じ

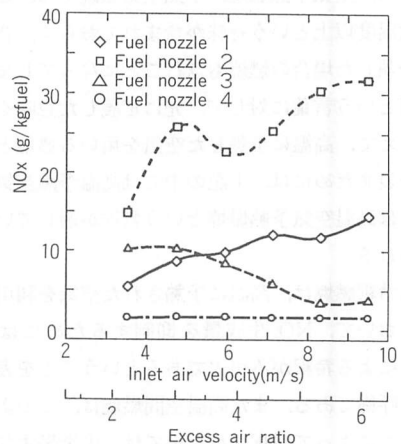


図-9 NO_x排出量に及ぼす空気比の影響

空気流量の下で燃焼しているにもかかわらず、NO_x排出傾向がこれほど大きく変化するという事は、燃焼形態も大きく異なっていると推測される。

NO_x排出量が減少する理由として、

火炎温度の低下

酸素濃度の低下

NO_xの還元

などが考えられるが、ここでは新しく流入する高温空気と燃焼器内の既燃ガスおよび燃料の間の混合が重要な因子となっていると考えられる。すなわち、同じ高温空気を用いても、燃焼室内の既燃ガスの循環量の増加、すなわち希釈による酸素濃度の低下があると、火炎の輝度は次第に消失し、青、緑青、から不透明に近い火炎色に変化し、このときのNO_x排出量は急激に少なくなる⁹⁾。この観測事実と、過去の低NO_x燃焼の手段である

予混合燃焼

希薄燃焼

排気再循環

2段燃焼

などを付き合わせて考えると、この実験において無意識の内に実現していた低NO_xの条件は、燃焼器内の既燃ガスによって空気および燃料の希釈が十分に行われた低酸素濃度下での希薄燃焼であると考えられる。したがって、当然火炎温度も著しく低下していると推測される。

空気比、すなわち入口空気流速の増加に伴ってNO_x排出量が低下するという観測結果の理由を考えると、流入空気が持ち込む運動量の増加によって循環ガス量が増加するため、希釈燃焼すなわち低酸素燃焼が起こると同時に、通常の燃焼であればバーナ基部に存在する高温の火炎を、強い剪断によって吹き消す結果になることも原因の一つであろう。これは燃料の自着火温度以上の高温空気を用いるからこそ実現できる燃焼法で、常温空気を用いる場合には、吹き消えが起こる流速条件であることを意味している。

6. 供給空気比と断熱火炎温度

供給される空気と燃料から計算される空気比は、加熱炉の燃焼状態を規定する一つの特性値である。しかし実機での燃焼過程では、被加熱物への熱移動が火炎温度を左右する重要な要因となる。空気と燃料が量論比でバーナに供給され、これがほとんど炉内ガスの循環がない状態で燃焼したとすると、ほぼ断熱火炎温度

に到達するはずである。他方、断熱状態に保たれた炉内の既燃ガス（空気比1）に対して少量の高温空気と燃料が量論比ですばやく混合した希釈状態を考えると、この混合気も見かけの空気比は1であることに変わりはない。これが燃焼すれば、火炎温度は空気比1の断熱火炎温度に到達する。ところが、温度が低下した既燃ガスで希釈を受けた空気比1の混合気は、もはや空気比1の断熱火炎温度に到達することはできない。すなわち、温度低下をきたした多量の既燃ガスで希釈を受けた混合気は、供給空気比から予測される断熱火炎温度よりはるかに低い火炎温度となる。

通常の工業炉の燃焼にあっても、ある程度このような現象は起きていると考えられる。すなわち、バーナ付近ではあまり炉内ガスの希釈を受けない状態で燃焼が行われるが、大半の燃料が消費されたのち、わずかに残った燃料と空気が既燃ガス中に散在する炉の後半部では、後の例に近い状態になっている。したがって、高温予熱空気燃焼では、高温空気と既燃ガスの混合が低NO_x化の重要な因子になると述べたが、実際にはこの既燃ガスの循環量と被加熱物への放熱がNO_x抑制の支配因子であるといえる。

7. 高温予熱空気燃焼のための新低NO_x技術

燃焼に供される空気の温度とNO_x排出量の関係概念的に示したのが図-10である。通常燃焼にしろ、低NO_x対策を組み入れた燃焼にしろ、NO_x排出量は空気温度の上昇とともに増大する傾向は変わらず、これまで排出規制を満たすための低NO_x技術として排気再循環、多段燃焼、希薄燃焼などが採用されてきた。これらの燃焼方式に対して予熱空気を用いればNO_x排出量は増加してしまうので、規制値を満足する範囲でしか

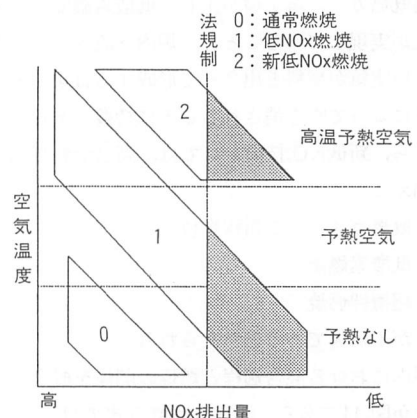
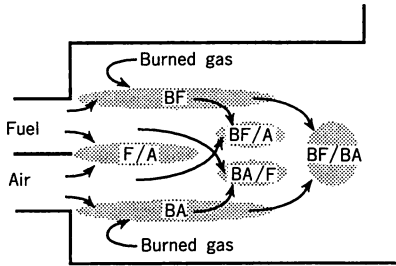


図-10 NO_x排出量と空気温度の関係



(a) 通常燃焼

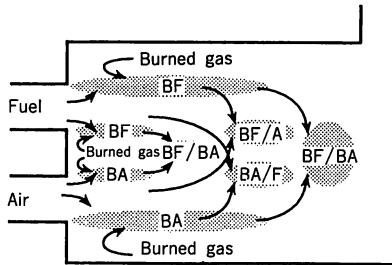
(b) 高温予熱空気を用いた場合の低NO_x燃焼

図-11 炉内燃焼と混合過程の概念

予熱温度を高めることができなかつたわけである。さらにこの燃焼方式を踏襲したまま高温予熱空気を用いれば、NO_x排出量は飛躍的に増加してしまうことは明らかであり、規制値を満たすためには新低NO_x技術が必要となる。

従来の予熱空気の温度レベルをはるかに越える高温空気をいながら、たまたま極めて高速の入口空気流速と2段燃焼を組み合わせたところ、予想に反して従来の2段燃焼よりNO_x排出量が低下したという報告例¹⁾について考えると、この場合の燃焼は、先にも述べたように、流入する空気の高運動量によって多量の炉内既燃ガスの再循環が生じ、低酸素濃度下での希薄燃焼が実現していることと、炉内へ流入して間もない新しい空気が燃料と出会う形成するはずの火炎が強剪断によって吹き消されることに特徴がある。このことから、新低NO_x技術としては、高温予熱空気の使用に加えて

既燃ガスによる希釈燃焼

低酸素燃焼

超攪拌燃焼

などが不可欠であると考えられる。

炉内における混合過程と燃焼の関係的概念的に示したのが図-11である。通常の燃焼方式では、バーナ近傍において供給された燃料(F)と空気(A)の間で

燃焼(F/A)が起こり、その後しだいに既燃ガス(B)で希釈された空気(BA)と燃料(F)、もしくは既燃ガスで希釈された燃料(BF)と空気(A)の間で燃焼(BA/F, BF/A)が起こるようになり、炉の後半部では既燃ガスで希釈された燃料(BF)と既燃ガスで希釈された空気(BA)の間で燃焼(BF/BA)が起こる。バーナ近傍での燃焼(F/A)は炉内での最高温度を示し、排出されるNO_xの大部分はこの領域で生成されると考えられる。しかし、炉内の燃焼を持続させるためにはこの部分の燃焼が不可欠であり、この領域の火炎が消された場合にはもはや下流部での燃焼は存続しない。

一方、高温予熱空気を用いる燃焼では、供給される高温空気と燃料がいきなり反応すれば極めて高温の火炎が形成されてしまうので、このような火炎を作らないことが基本である。具体的には、燃料と空気の流入口を離し、両者が直接混合する以前にできるだけ炉内の既燃ガスによる希釈を促進し、低酸素濃度下で燃焼反応が起こるようにすることが重要である。したがって、バーナ基部に火炎を作らないための高流入速度、多量の既燃ガスの再循環を形成するに十分な流入運動量と炉形状が必要で、従来のようにバーナで燃焼させた高温のガスを炉内へ送り込むのではなく、炉全体を反応器として最適設計することが要求される。

8. 結び

切替蓄熱式の廃熱回収システムを用いれば、排気とともに外界へ捨てられる熱が極端に減少し、炉内へ流入する新気の温度はほぼ炉内温度に近いほどの高温となる。すなわち、炉の出口が熱的にせき止められた状況が実現し、これはそのまま省エネルギーにつながる。一方、このようにして予熱された燃焼用空気は、従来工業用燃焼機器に利用してきた温度レベルとはまったく異なる高温であるため、これを利用する燃焼技術は未経験の領域であると言ってよい。紹介したように、燃焼の制御しだいでは、予想外の低NO_x燃焼も可能であるという魅力的な一面が見えているので、この未踏の領域を積極的に開拓して行くことが望まれる。

文献

- 1) Hasegawa, T. and Hoshino, T., Study on a Fuel Staged Combustion Mechanism for High Performance Burner Design, Paper presented at the Japan Flame Research Committee Conference, (1992).

- 2) 日本機械学会編, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成と抑制法, (1980).
- 3) たとえば, Liloyd, S.A. and Weinberg, F.J., Limits to Energy Release and Utilisation from Chemical Fuels, Nature, 257(1975), 367~370.
- 4) Katsuki, M. and Ebisui, K., Possibility of Low Nitric Oxides Emission from Regenerative Combustion Systems Using Highly Preheated Air, Proc. The First Asia-Pacific Conf. on Combust., (1997), 294~297.
- 5) Lipfert, F.W., Correlation of Gas Turbine Emission Data, ASME Paper, 72-GT-60, (1972).
- 6) 高城敏美; 燃焼に伴う窒素酸化物の生成, 高温学会誌, 5巻, 1号(1979), 2~10.
- 7) 香月正司, 戎井健悟; 高温空気燃焼における火炎構造の変化とNO_x排出特性, 第34回燃焼シンポジウム, (1996), 441~443.
- 8) 戎井健悟, 香月正司; 高温空気燃焼における燃焼形態の変化とNO_x排出特性, 日本機械学会講演論文集, No.974-1(1997), 13-49~50.
- 9) 笠原正広, 長谷川敏明; 高温空気燃焼の特性, 第34回燃焼シンポジウム, (1996), 642~644.

協賛行事ごあんない

「第2回高温エネルギー変換システムおよび 関連技術に関する国際シンポジウム」

会議名: 第2回高温エネルギー変換システムおよび関連技術に関する国際シンポジウム

(Second International Symposium on Advanced Energy Conversion System and Related Technologies, RAN98)

開催地: 名古屋大学シンポジオン (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

期間: 1998年12月1~3日(3日間)

主催: 名古屋大学高温エネルギー変換研究センターおよび(社)化学工学会

内容: 高温エネルギー変換技術に関して4種のオーガナイズドセッション(ガスタービン, 先端燃焼技術, 廃棄物燃焼・熱処理技術, エネルギー変換場測定・可視化技術)と一般セッションがある。

問い合わせ先: RAN98事務局

名古屋大学 高温エネルギー変換研究センター内

〒464-01 名古屋市千種区不老町 Tel: 052-789-3913 Fax: 052-789-3910

E-mail: narai@mhlab.nuce.nagoya-u.ac.jp