

燃焼技術分野における酸素利用 —酸素富化燃焼によるセラミックス焼成炉の迅速焼成化—

Use of Oxygen in the field of Combustion Technology —Rapid Firing in Ceramic Kiln by Oxygen-Enriched Combustion—

入江 年優* 表原靖男** 竹内信行***
Tbshimasa Irie Yasuo Omotehara Nobuyuki Takeuti
 渡辺博則**** 清飛羅一真***** 小川悦郎*****
Hironori Watanabe Kazuma Kiyohira Etsuro Ogawa
 津河成和***** 中塚 勉*****
Shigekazu Tsugawa Tsutomu Nakatsuka

(1999年9月10日 受理)

キーワード：セラミック焼成炉，酸素燃焼，酸素富化燃焼，熱精算，炉壁蓄熱量，炉内熱伝達，迅速焼成

1. はじめに

今世紀に入り人類の生産技術の飛躍的な発展と人口の爆発的な増加によって、二酸化炭素などがもたらす地球温暖化現象、フロンガスによるオゾン層の破壊、酸性雨など地球規模での環境破壊が深刻になっている。このような中で、1997年12月に京都において、COP3が開催され、「京都議定書」が採択された。日本の温室効果ガス削減値は、1990年比6%減という厳しい目標値が課せられ、今後特にエネルギー消費量の伸びが大きい民生部門を含め、産業部門においてもなお一層の省エネルギー技術の開発が求められている。

燃焼用空気に酸素を混合する酸素富化燃焼や純酸素で燃焼させる酸素燃焼は、簡単に高温場を得ることができるため、熱効率の改善から生産性の向上による

運転コストが節減できるなどその有利性は、古くから知られていた。しかし、酸素単価が高価であったため、一部の高温を必要とする焼成プロセスや溶断、溶接や従来より安価な酸素の利用ができた高炉、電気炉などの特殊な分野にしか利用されておらず、燃焼プロセス全体から見るとまだ限定利用の域を出ていなかった。

しかし、最近、酸素燃焼技術が注目を集めるようになった背景として次のようなことが考えられる。

地球環境問題に関連して

・排ガスのNO_x対策

生産工程の改善等により炉の稼働時間の短縮を図り、総量としてのNO_x排出量が低減できる。

・排ガスのCO₂対策

酸素燃焼することにより排ガス量が低減し、省エネルギーとなり、その結果CO₂排出量が削減される。

酸素の製造価格に関連して

・酸素の発生方式が、高価な液化酸素からPSA法による製造酸素に代わり、酸素の製造価格が下がった。

・自家発電設備が促進された結果、電力コストが低下し、酸素コストが低下した。

そこで、この酸素燃焼の特徴や利用の現状について解説すると共に、酸素富化燃焼について実験、検討した事項を報告する。すなわち、1700℃以上の高温を必

* システム技術部熱・燃焼グループ
 ** システム技術部
 *** 京都工芸繊維大学工芸学部物質工学科
 **** (株) ヨータイ
 ***** 大阪ガス(株)
 ***** 大同ほくさん(株)
 ***** (有) エヌイアール

要とするセラミック焼成炉を対象として、セラミック焼成炉の処理時間の短縮化と生産性向上のために大阪ガス(株)、(株)エイチイーシー、大同ほくさん(株)、(株)ヨータイ、京都工芸繊維大学、当研究所の6者で酸素富化燃焼に関する共同研究を行った事項について述べる。

2. 酸素燃焼の特徴

空気燃焼に対して酸素燃焼の基本原理は、燃焼空気の約80%を占める窒素分を除去して燃焼させることである。窒素分の持ち出す顕熱がないため、燃料の節減や高温燃焼が可能となり排ガス量が減少する。また、窒素がない分、燃焼ガス中の炭酸ガス、水蒸気分圧が高くなり輻射能が増大することにより、下記に示す特徴が見込まれる。

① 高温の火炎温度が得られる。

図1に重油(C₇H₁₂の形で代表できると仮定)の理論火炎温度と酸素濃度の関係を示す。燃焼用空気中の

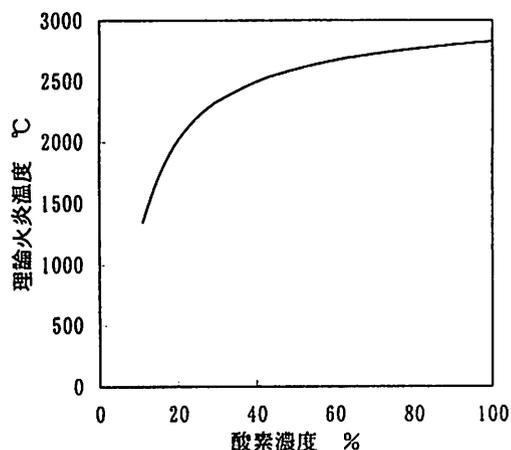


図1 理論火炎温度

酸素の割合を増すと、理論空気量、理論燃焼ガス量が減り、その結果火炎温度が上昇し、酸素燃焼の場合では2827°Cの高温火炎が得られている。この高温火炎は燃料や燃焼用空気などを予熱することにより得ることもできるが、酸素使用によって達成される火炎温度と同程度の温度を得るためには、非常に高温に予熱しなければならない。このために設備費が高くなる恐れがある。

② 省エネルギー化が図れる。

廃熱損失の主要部分を占める燃焼ガスの持ち出す熱量、すなわち排ガス損失熱Qは次式で表される。

$$Q = Gw C_p (T_e - T_o)$$

ここで、Gw: 1kgの燃料から発生する湿り燃焼ガス量

C_p: T_o ~ T_e間の平均低圧比熱

T_o: 基準温度

T_e: 排ガス温度

排ガス温度T_eは工業炉などでは被加熱物の温度以下にはできないため、排ガス損失熱Qはほぼ燃焼ガス量Gwに比例することになる。また、酸素富化燃焼や酸素燃焼のように、空気中の酸素濃度の割合が高くなると、前述のように理論空気量、理論燃焼ガス量は減少するので、従って排ガス損失熱Qも減少する。

図2に重油燃焼の場合の燃焼用空気中酸素濃度と理論空気量および理論燃焼ガス量の関係を示す¹⁾。

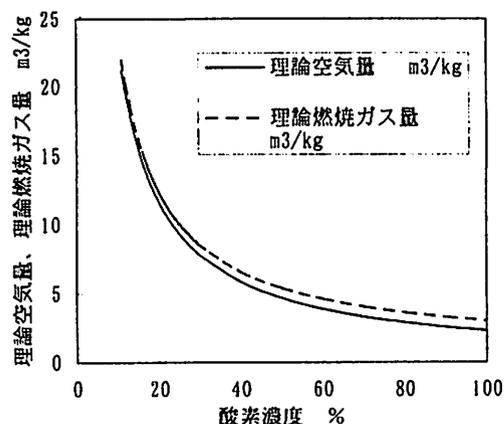


図2 理論空気量と理論燃焼ガス量

図3は酸素濃度21%、空気比λ=1.0の燃焼ガス量を100%とした場合の値を、空気比をパラメータとして酸素濃度の関係で示したものである²⁾。

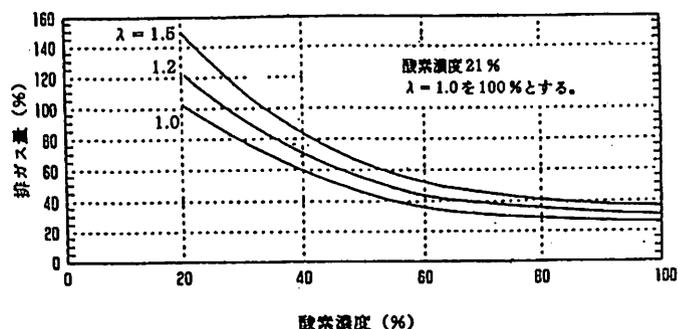


図3 酸素濃度と排ガス量

図4は重油の理論燃焼時の空気中の酸素濃度と排ガス損失の関係を示したものである¹⁾。排ガス温度一定として酸素富化燃焼を行った場合、酸素濃度の増加とともに排ガス損失が減少し、熱効率が向上するがこの傾向は排ガス温度の高いほど顕著である。したがって、高温炉ほど酸素富化の効果は大きい。酸素燃焼では空気中の窒素分がないため空気燃焼の場合より空気量は約72%少なくなる。したがっ

て、ボイラや炉の排ガス温度が同じであるとする、排ガス損失は約 72% 少なくなる。また、燃焼排ガスは水蒸気と CO₂ のみで、CO₂ の固定化が容易となる。

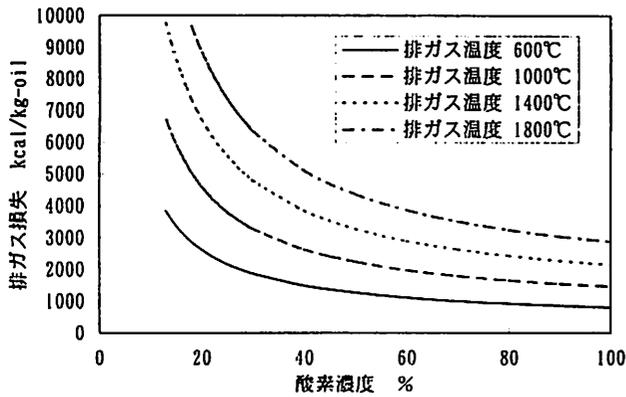


図4 排ガス損失

③生産能力が向上する。

燃焼ガス温度が 2000° K を超えると熱解離が顕著になるが、解離した燃焼ガスが被加熱面で冷却されると、再結合を起こし、表面で反応熱を発生する。これは、水蒸気が伝熱面で凝縮して蒸発潜熱を放出するのと類似現象で熱伝達率が飛躍的に増加することになる。

酸素燃焼での燃焼ガスは N₂ を含まないので CO₂、H₂O の分圧が大きくなり、空気を用いた燃焼に比べてガス放射量は大きい。また、図 1 に示したとおり重油燃焼の理論燃焼温度は 2800°C 以上にも達し、被加熱物との温度差が大きくなるので熱伝達量を飛躍的に増大させる。このため処理時間の短縮や処理量の増大など生産能力の向上が見込まれる。

④NO_x および CO₂ の排出量が低減する。

図 5 に燃焼用空気中の酸素濃度と NO 濃度の関係を示す³⁾。Thermal NO_x は燃焼用空気中に酸素を富化していくほど、燃焼温度の上昇とともに増加し、酸素濃度が約 60% の時に最大値を示す。しかし、酸素燃焼の 100% に近づくにつれ Thermal NO_x は減少し、酸素 100% で 0 ppm となる。Fuel NO_x については酸素を用いても同じ値になると考えられる。酸素富化燃焼および酸素製造方法に P S A 法を用いた酸素燃焼ではガス中に N₂ を含むので、NO_x 濃度の値としては通常の空気燃焼に比べてかなり大きくなる。しかし、生産性の向上による処理時間の短縮化や排ガス量の減少などの効果で、1 工程中で排出される NO_x の総量としては低減させることは可能である。

一般に CO₂ は、生産能力の向上により工程時間が短縮

された結果、燃料節減、省エネルギー化が図られ、したがって、その排出量を低減させることができる。

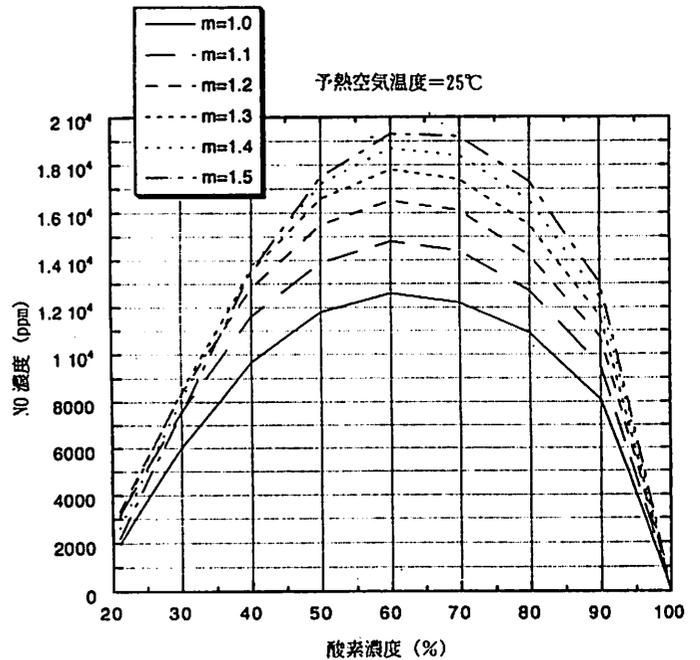


図5 酸素濃度と NO 濃度の変化

3. 酸素燃焼利用の現状

酸素燃焼はアメリカやヨーロッパ等の環境先進国で、燃料削減によるコストダウンや溶解能力アップの目的は勿論ではあるが、主として NO_x や CO₂ 削減を目的としてガラス溶解炉等のほとんどの大型炉で採用され、我が国においても高付加価値ガラス溶解炉で採用され始めた。

酸素富化燃焼に関しては、我が国では従来よりキュボラや一部のセラミックスの焼成に用いられているが、アメリカやヨーロッパでは能力アップ手段としてアルミ溶解やセメントキルンに採用されており、我が国においても灰溶融炉や焼却炉のダイオキシン対策と併せて酸素富化燃焼の用途を見直す動きが見られる。以下に酸素燃焼或いは酸素富化燃焼を採用している主なる分野の現状を記す。

<ガラス製造業>

約 5 年前より電気硝子、光学ガラス、液晶パネル等の高級ガラスの溶解炉では、酸素燃焼が採用されており、数年後には高級ガラスの全ての溶解炉で酸素燃焼が採用されると予想されている。また、近年、ファイバガラス等の中級ガラスでも採用するケースも現れており、最終的には瓶ガラスや板ガラスにも採用が見込まれる。環境庁も酸素燃焼を採用している工場に対して、NO_x

総量規制の概念を導入し、濃度規制に対する特例を認める方針を打ち出したことが酸素燃焼採用の契機となっている。

<溶解業（キュボラ）>

キュボラは固体燃料のコークスを燃料とし、約1600℃で溶解するため、酸素富化燃焼に適しておりメリットが大きい。20年以上前から100基以上のキュボラで採用されている。主な目的は溶解能力アップとコークス節減によるランニングコストダウンである。最近では燃料としてLPガスを用いる酸素燃焼キュボラも開発されている。

<灰溶融・焼却処理業>

現在、社会問題となっている産業廃棄物の灰溶融では高温燃焼が必要であり、酸素燃焼が主流となるか、プラズマが主流となるかの判断が難しい局面であり、メーカーも両方式で対応中である。焼却ではダイオキシン対策として酸素富化燃焼が期待される。

<アルミ、非鉄金属業>

今後、酸素燃焼或いは酸素富化燃焼が期待される分野である。アルミ等は溶解温度が鉄やガラス等のセラミックスより低く、酸素燃焼の検討が最も遅れていた分野である。しかしながら、アメリカ等では既に酸素富化燃焼が採用されており、我が国でも景気の回復共に溶解能力アップの手軽な手段として検討されると思われる。又、今年より酸素燃焼によるアルミ溶解の1号機が稼働するため、業界の注目を集めている。

<その他>

近年、ISO14000の取得工場が年々多くなるに従って、従来は産業廃棄物処理で対応していた工場廃液等を廃液燃焼設備で自社処理するケースも多くなり、酸素富化燃焼の採用を検討する企業も多くなっている。

セメントキルンの酸素富化燃焼は我が国において約30年前、焼成能力向上手段として多くのキルンで採用されていたが、その後、低成長期への移行とともに中止状態となっていた。しかしながら、アメリカで再び見直し機運が高まっており、我が国においてもその傾向が現れている。

4. 酸素富化燃焼実験^{4, 5)}

(1) 通常操業時の燃焼特性（通常空気燃焼（1））

実機セラミック焼成炉としては、図6に示すバッチ式シャトルキルンを使用し、L4.1×W4.1×H3.2m（内容積4m³）の大きさで、燃焼室は3ゾーンからなり、各ゾーンには25万kcal/HrのLNG用バーナが炉幅

4.1mに対向する形で1対設置されている。

シャトルキルンの焼成ヒートパターンは、操業開始から20時間経過までの温度勾配は31.6℃/Hr、次いで38時間経過まで27.8℃/Hr、48時間経過まで20℃/Hr、62時間まで14.3℃/Hrで、約1700℃に昇温し、

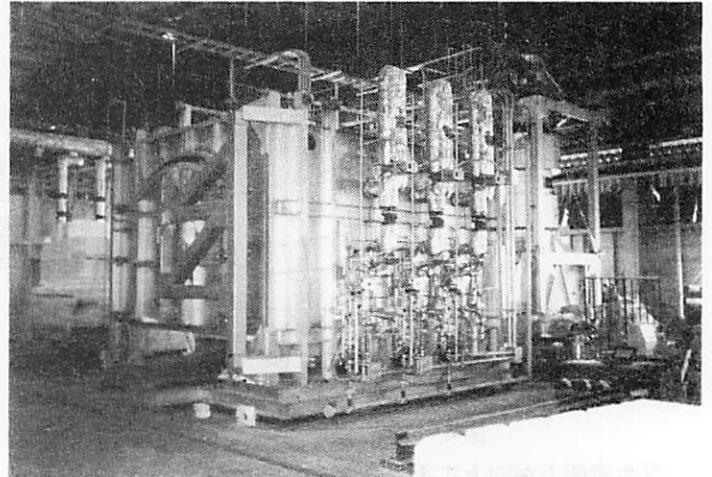


図6 シャトルキルンの外観図

4時間保持してその後、自然冷却するように設定されている。従って、1バッチ当たりの焼成時間は、昇温から保持時間を含めると約66時間をかけて焼成処理されている。設定したヒートパターンに基づく各ゾーンの天井温度およびバーナ前火垣温度分布を図7示す。

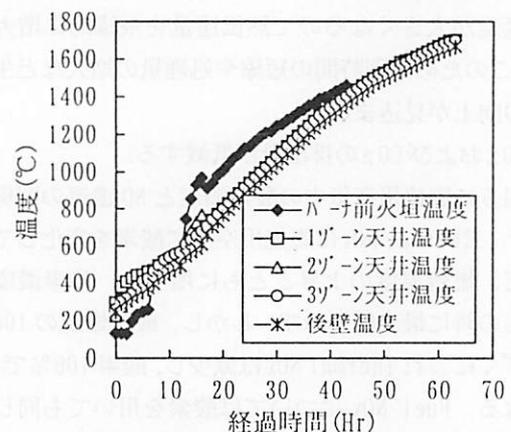


図7 シャトルキルンの炉温

各ゾーンの温度は非常に正確にコントロールされていることが分かる。

図8には、このゾーンの平均温度、煙道、煙突、燃焼予熱空気温度を示す。燃焼予熱空気温度は煙突温度575℃に対して、最大で263℃の熱が回収されている。

図9は燃焼経過時間に対するバーナの燃焼量、燃焼用空気量、漏入空気量、空気比の関係を示す。焼成初期段

階（20 時間後まで）では、異常な過剰空気気味になっているのは、セラミックス焼成品に付着したパラフィン系とデンプン系の有機質およびステアリン酸付着物を燃焼除去するために、故意に空気量を過多にして燃焼させているからである。空気量を絞って燃焼させると、付着物が未燃カーボンとなってセラミックス製品に付着し、シミを発生するためである。また、図中には、シャトルキルン台車下部からの煙道部へ漏入する空気量も示したが、この空気量は全燃焼用空気量の約 30% 前後となっていた。したがって、煙道部で測定している空気比は、実際の炉内での値より 30% 大きな値になっていると思われる。

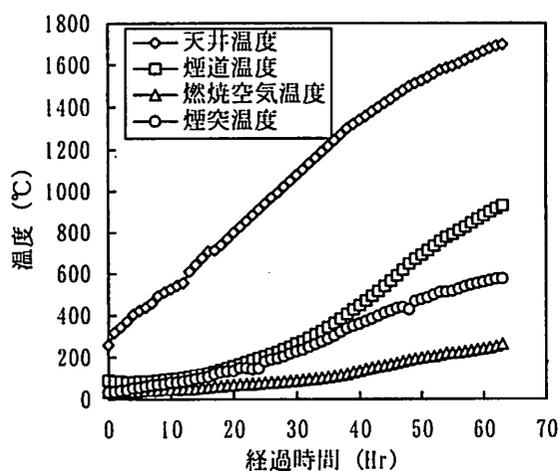


図 8 炉温と燃焼用空気温度

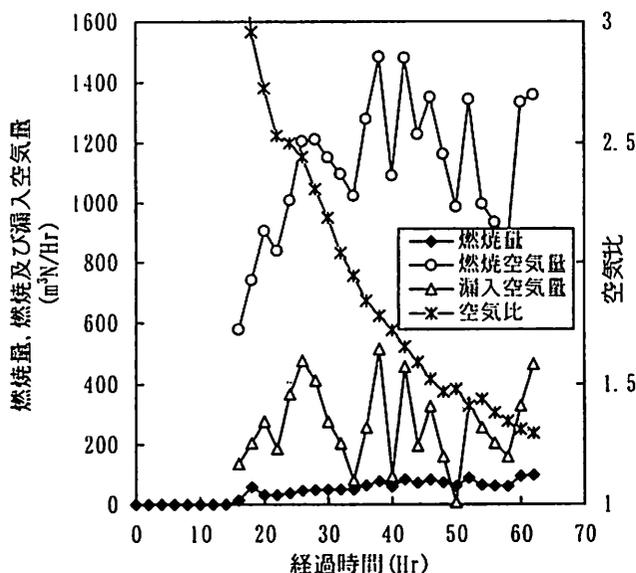


図 9 シャトルキルンの燃焼特性

(2) 酸素富化時の燃焼特性（酸素富化燃焼（Ⅱ））

酸素富化燃焼実験では酸素源として、液体酸素を使用

した。液体酸素は排熱交換器により予熱された燃焼用空気管路に供給し、またバーナにはこの酸素供給量（富化量）だけ燃料を増加させる必要から、バーナ近傍の空気バルブ上流側空気管路と燃料調節用ガバナの管路を連結し、その差圧を取って、自動的に燃焼量をコントロールするように改造した。酸素富化量は液体酸素ポンペにより供給し、その酸素濃度は各バーナ入口の燃焼用空気管路で測定した。

酸素富化燃焼（Ⅱ）では、操業開始から炉温が 800℃ になる 20 時間経過までは、セラミック焼成品の熱歪みやクラックを防止するために従来の温度勾配で徐々に昇温し、その後、酸素濃度 23% に設定した富化空気を注入し、34 時間経過まで 50℃/Hr で昇温した。続いて、炉温 1500℃ になると再び普通空気に戻した後、48 時間経過まで 14.3℃/Hr で、約 1700℃ の高温に昇温し、4 時間保持して、1 バッチ当たりの焼成時間を約 52 時間（従来の焼成時間と比較して、14 時間に短縮）になるように変更した。

(3) 酸素富化時と同ヒートパターンにした場合の燃焼特性（通常空気燃焼（Ⅲ））

本実験では、酸素富化燃焼を行うと高温燃焼が得られる事から省エネ化と操業時間の短縮化を図る目的で、通常燃焼時とは異なる昇温曲線（改善したヒートパターン）で実験を行った。しかし、酸素富化せずとも改善したヒートパターンで、十分に省エネ効果があるとも考えられるので、ここでは改善したヒートパターンのみで実験を行った結果を図 10 中に通常空気燃焼（Ⅲ）として示す。図から、炉内温度は設定されたヒートパターンに対し明らかに高温域の 1400℃ 近傍から 1700℃ まで追従しないことがわかった。

(4) 高温域における酸素富化時の燃焼特性（酸素富化燃焼（Ⅳ））

セラミック焼成炉における酸素富化の注入温度域のシミュレーション結果から、同酸素富化量を注入するにも高温域で注入した方が省エネ効果が大きいことが分かった。

酸素富化燃焼（Ⅳ）では、酸素富化燃焼実験（Ⅱ）と同様に、酸素濃度を 23% に設定し、操業開始から 30 時間経過までは、通常燃焼時の昇温速度で行い、その後（炉天井温度で 1100℃）酸素を注入し、40 時間（1600℃）経過まで 50℃/Hr、48 時間経過まで 14.3℃/Hr で、約 1700℃ に昇温し、4 時間保持して、1 バッチ当たりの焼成時間を約 48 時間（前述の酸素富化燃焼実験と同様、14 時間に短縮）になるように変更した。

(5) 通常燃焼と酸素富化燃焼との比較検討

通常燃焼時と酸素富化燃焼時の炉天井温度を図 10 に示す。

酸素富化燃焼では通常燃焼時のヒートパターンと比較して、昇温速度を上げたヒートパターン設定にスムーズに追従し、焼成されていることが分かる。しかし、酸素富化燃焼(Ⅱ)と同ヒートパターンに設定した通常燃焼方式(Ⅲ)では、やはり 1400℃以上の高温域では設定通りのヒートパターンにならず、十分に焼成されないことがわかった。

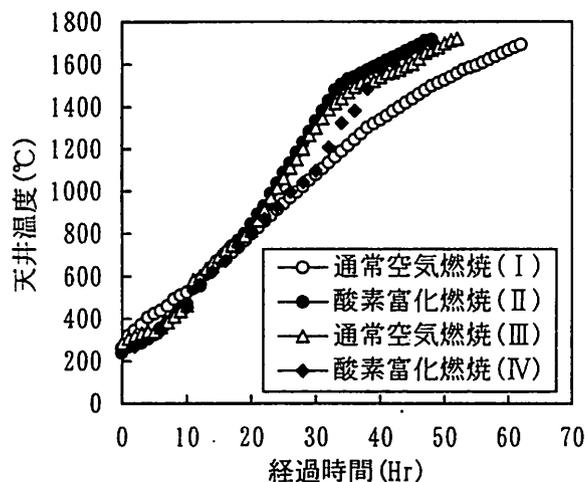


図 10 酸素富化時の炉天井温度

酸素富化燃焼時の省エネルギー効果を検討するための炉天井温度と積算燃料消費量の関係を図 11 に示す。

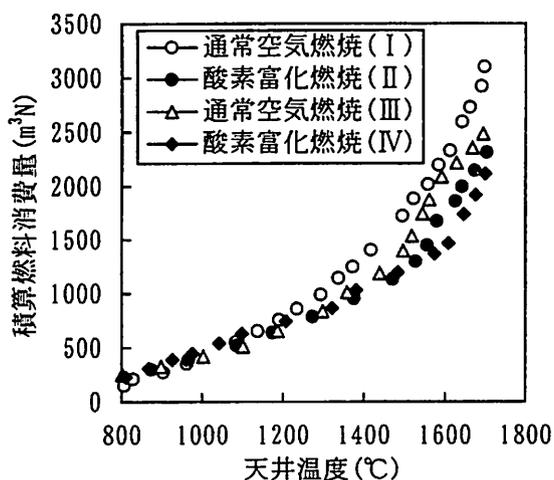


図 11 酸素富化時の炉天井温度と燃料消費量

酸素富化燃焼(Ⅱ)では通常空気燃焼(Ⅰ)の場合に比べ、1バッチ当たり 787m³N の燃料使用量が削減(25.4%の削減率)できたが、更に高温域(1100℃以降)で富化させた酸素富化燃焼(Ⅳ)では、987m³N の燃料が削減(31.8%の削減率)できた。

他方、液体酸素の使用量は前者(Ⅱ)で 447m³N、後者(Ⅳ)で 410m³N を使用したことから、高温域で酸素を富化させた方が酸素使用量が少なく、燃料削減率が高くなることがわかった。また、この燃料使用量に対する炉の操業経過時間を検討した結果を図 12 に示す。

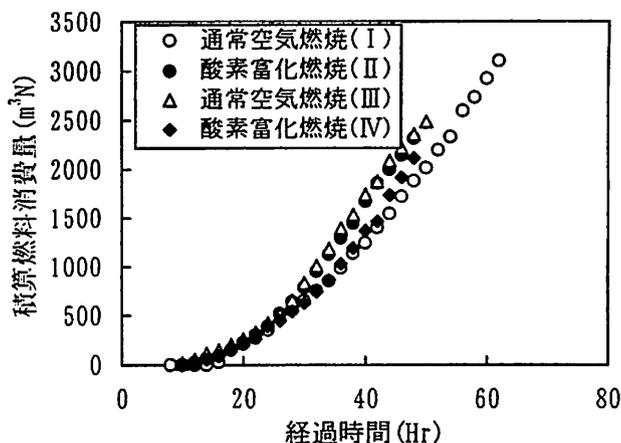


図 12 1700℃焼成までの操業経過時間と燃料消費量

通常操業時間と比較すると、通常空気燃焼(Ⅱ)と酸素富化燃焼(Ⅳ)では 14 時間の炉焼成短縮となった。すなわち、燃料削減量、酸素使用量、炉稼働性等から省エネルギーコストの概略計算を行うと次のようになる。

酸素濃度 23%富化による燃料削減量は 987m³N/バッチ(省エネ率は 31.8%)、この時の燃料削減費は 987m³N/バッチ×35 円/m³N=34,545 円/バッチ

---①

また、使用する液体酸素量は、

410m³N/バッチ×30 円/m³N=12,300 円/バッチ

---②

差引エネルギー費(①-②)の削減費は 22,245 円/バッチとわずかであるが、酸素富化させることにより高温燃焼が可能となり、この分、焼成時間が 14 時間の短縮(現在 62 時間焼成)となり、その結果、人件費の削減、炉の稼働率の増加、生産性の向上等、省エネルギー効果が大きくなる。

通常燃焼時に炉から発生する NO_x 濃度は、炉温 1300℃から急激に大きくなり、1700℃の焼成完了時点で 1800ppm となった。これに対し、酸素富化燃焼時には、NO_x 濃度のピーク値は同じであるが、NO_x 濃度は通常空気燃焼の約 3 倍程度となり、問題となる。

5. 熱精算による酸素富化燃焼効果の検討⁶⁾

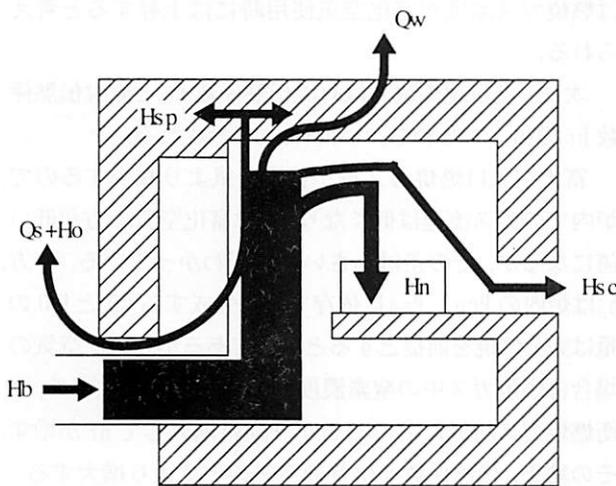
次に、シャトルキルンの熱精算を行い、酸素富化の省

エネルギー効果を主として排ガス顕熱の減少量を通して検討した結果について述べる。

(1) 全加熱過程における熱精算

不連続炉の熱効率を算出するには熱勘定が必要となる。図13は不連続炉の熱勘定の概念図を示す。ここで各記号の意味は以下の通りである。

- Hb: 燃料の持ち込む熱量 (発熱量+燃料の顕熱)
- Ho: 炉の開口部から炉内ガスが放出されるとき漏れたガスが持ち出す熱量
- Qs: 炉の開口部から熱放射によって炉内から外部に失われる熱量
- Hsp: 炉壁自体の昇温に使用される蓄熱量
- Qw: 炉の外表面から放射と対流により失われる炉壁損失熱量 (外表面損失)
- Hn: 被熱物 (道具レンガなども含む) に与えられる熱量
- Hsc: 燃焼排ガスが持ち去る熱量 (顕熱と潜熱)



$$Hb = Ho + Qs + Hsp + Qw + Hn + Hsc$$

図13 不連続炉の熱精算の概念図

図13において、広義の熱効率とは被熱物と治具レンガを含む材料 M(kg)が最高温度に達するまでに吸収した熱量 Hn(kcal)を供給した全熱量 Hb(kcal)で除した値をいう。

$$\text{熱効率 } \eta = Hn/Hb$$

今 $Hn = M \cdot Cp \cdot (Tm(\max) - Tm0)$ とすれば

$$M (\text{被熱物 } 4000\text{kg} + \text{治具レンガ } 2000\text{kg}) = 6000\text{kg}$$

$$Cp = 0.26 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} (1.1\text{kJ/kgK})$$

$$Hn = 6000 \times 0.26 \times (1700 - 20)$$

$$= 2.62 \times 10^6 \text{ kcal}$$

(普通空気使用時)

$$Hb1 = 3477 \times 11000 = 38.25 \times 10^6 \text{ kcal}$$

$$\eta_{\text{air}} = Hn/Hb1 = (2.62/38.25) \times 100 = 6.85\%$$

(富化空気使用時)

$$Hb1 = 2842 \times 11000 = 31.26 \times 10^6 \text{ kcal}$$

$$\eta_{\text{enrich}} = Hn/Hb2 = (2.62/31.26) \times 100 = 8.38\%$$

すなわち、富化空気を 800~1500°Cの間に使用したことにより、熱効率は絶対値で 8.38-6.85=1.53% 増加し、割合では (8.38-6.85)/6.85=22.3% 向上した。酸素富化空気の使用は、迅速焼成と省エネルギーに大きく寄与したけれども、富化空気の酸素濃度を 21%から 23%まで、2%増加させただけで、なぜこのような効果が出るのか、燃焼工学の立場から考察する。

図14に加熱過程別の熱精算結果を示す。

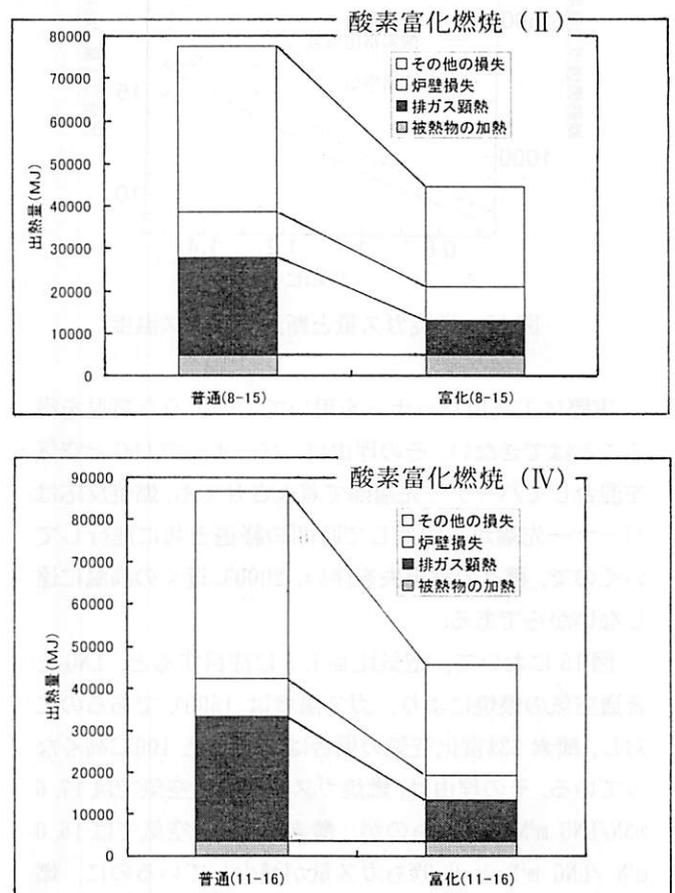


図14 加熱過程別の熱精算

この図から、全出熱量の減少即ち省エネルギー効果に及ぼす排ガス顕熱の減少の重要性が明らかである。

(2) 酸素富化空気を使用したときの燃焼工学上の効果

酸素富化空気が燃焼ガス量と火炎温度に与える影響を図15に示す。

実際の工業用ガスバーナで炉内が低温 (700°C程度以下) のとき、 $m=1.0$ で燃焼させると不完全燃焼が生じて、未燃物の CO や H₂ が発生することが多いが、この図では反応は完全に進行すると考えている。

LNG の理論空気量による燃焼の場合、燃焼ガス量と燃焼ガス温度に注目すると、普通空気での燃焼時には

$$\text{燃焼ガス量 } G_0 = 12.058 \text{ (m}^3\text{N / LNG- m}^3\text{N)}$$

$$\text{燃焼ガス温度 } T_f = 1950 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

と計算される。酸素 23%の富化空気を使用すると、

$$\text{燃焼ガス量 } G_0 = 11.10 \text{ (m}^3\text{N / LNG- m}^3\text{N)}$$

$$\text{燃焼ガス温度 } T_f = 2040 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

となる。

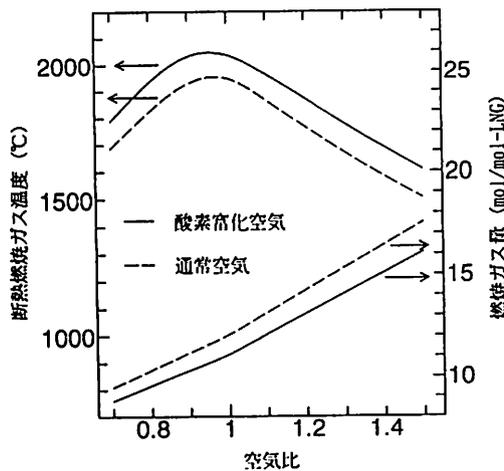


図 15 燃焼ガス量と断熱燃焼ガス温度

実際に工業用バーナーを用いてこのような高温を得ることはできない。その理由は、バーナーで LNG と空気を混合してバーナー先端部で着火させても、燃焼反応はバーナー先端から開始して時間の経過と共に進行していくので、種々の熱損失を伴い、2000°C 近くの高温に達しないからである。

図 15 において、空気比 $m=1.5$ に注目すると、LNG と普通空気の燃焼により、ガス温度は 1500°C であるのに対し、酸素 23% 富化空気の場合は 1600°C と 100°C 高くなっている。その理由は、燃焼ガス量が普通空気では 17.6 m³N/LNG m³N であるものが、酸素 23% 富化空気では 16.0 m³N /LNG m³N と 9.0% もガス量が減少しているのに、燃料から発生する発熱量は同一なためである。このように、富化空気を使用すれば、平衡論的に高温になるばかりでなく、燃焼反応も速くなるので、炎の短炎化に大きく寄与する。以上のように、図 15 から、富化空気燃焼が炉内ガスの高温化と排ガス量の減少に働く状態がよく理解できる。

(3) 酸素富化燃焼における炉内熱伝達について

先に述べた空気比 $m=1.5$ での普通空気燃焼と富化空気燃焼の熱勘定を考える。富化空気の排ガス量が 6% 減少したことは、排ガス温度が一定ならば、H_{sc} 排ガス損失が 6% 減少することを意味する。従って、図 13 の熱勘

定図において、燃料 (LNG) が炉内に持ち込む熱 H_b は、どちらの場合もほぼ同一とみなせることから、炉壁と被熱物に与えた熱量 H_n 、($H_{SP}+Q_w$) が増大したことになる。供給熱量 H_b が同一なのに、酸素 23% 富化空気を使用するだけで、炉内における熱伝達が増加しう理由について以下に考察する。

まず第 1 に、火炎から被熱物と炉壁への伝熱量は次式で示される。

$$H_{SP} = A \cdot h \cdot (T_g - T_s) \quad (1)$$

$$H_n = A \cdot h \cdot (T_g - T_n) \quad (2)$$

ここで、 T_s は炉壁内面の温度、 T_g は燃焼ガスの実際の温度、 A は加熱面積 (m²)、 h は炉内伝熱係数 (kW/m²K) である。

これらの式で、実際の燃焼ガス温度 T_g は断熱火炎温度よりも低いけれども、 T_f に比例すると考えて良い。今考えている例の場合、断熱火炎温度は普通空気では 1510°C、富化空気では 1610°C であるから、その差の 100°C は実現できないまでも少なくとも 20~30°C 以上は燃焼ガス温度が富化空気使用時には上昇すると考えられる。

次に、熱伝達係数 h は対流伝熱係数 h_c と放射伝熱係数 h_r の和、すなわち、 $h = h_c + h_r$ で示される。

富化空気は燃焼ガス量が普通空気より減少するので、炉内でのガス流速は低くなり、 h_c は富化空気の方が低い値になるが、その差は小さいことがわかっている。一方、 h_r は炉内の P_{CO_2} 、 P_{H_2O} に依存する。生成する CO_2 と H_2O の量は完全燃焼を前提とすると不変であるが、富化空気の場合は燃焼ガス中の窒素濃度が減少することにより、平衡燃焼ガス組成における P_{CO_2} 、 P_{H_2O} は増大して h_r が増す。その結果、伝達係数 h は普通空気のときより増大する。

以上のように、(1)、(2) 式の h と T_g が富化空気のとき増加するので、炉内の伝熱が促進され、その結果として、炉内温度の時間あたりの上昇率が増加し、迅速焼成が達成される。

9. おわりに

酸素燃焼に関する特徴、酸素利用に関する現状を解説すると共に、その過渡的段階における酸素富化燃焼について、セラミック焼成炉の実炉を使用し、酸素富化実験、および熱精算による省エネルギー効果等の検討を行った。

この結果、酸素富化空気の使用は排ガス顕熱の著し減少を生じ、燃料消費量の大きな減少を引き起こすことが明らかとなった。また、酸素富化空気の使用はより高

温域で使用するにより、効果が増すこともわかった。これらの結果を熱工学的に考察し、火炎温度の高温化と排ガス中の CO₂ と H₂O 濃度の増加による熱伝熱伝達量の増加が、酸素富化による迅速焼成の達成の要因であることを示した。

参考文献

- 1) 省エネルギー燃焼技術; 省エネルギーセンター編・省エネルギーセンター刊(1984)
 - 2) 東京ガス(株)技術資料
 - 3) 大同ほくさん(株)技術資料
 - 4) 入江他; 酸素富化による省エネルギー, 第6回資源環境連合部会研究発表会 p97(1998)
 - 5) 入江他; 酸素富化燃焼にによるセラミック焼成炉の迅速焼成, 無機マテリアル学会, 第97回学術講演会 p40(1998)
 - 6) 竹内他; 高温シャトル窯の昇温速度に酸素富化空気が与える効果, 耐火物 Vol151, No 7 (1999)
- ・ 小林; 日本バーナ研究会会報, No. 78 (1995)
 - ・ 今吉他; 日本酸素技報, No. 2 (1983)
 - ・ 飯野他; 日本酸素技報, No. 13 (1994)
 - ・ (株)ロビー資料
 - ・ 島村; 酸素富化排ガス利用燃焼, 工業加熱, Vol24, No 3 (1987-5)
 - ・ 川井; 酸素/窒素分離装置, 省エネルギー, Vol46, No13 (1994)
 - ・ 池田; 酸素富化燃焼の火炎特性について, 工業加熱, Vol24, No 5
 - ・ 酸素富化膜燃焼技術研究組合; 酸素富化膜の開発とその燃焼システムへの応用(1)(2), 工業加熱, Vol23, No5-6 (1986)
 - ・ 松尾; 酸素富化燃焼, 工業加熱, Vol29, No6 (1992)
 - ・ 坂田; 酸素富化空気の製造と応用について, 工業加熱, Vol20, No 1 (1983)
 - ・ 井藤他; 酸素富化燃焼の省エネルギー効果と課題, 省エネルギー, Vol34, No 9 (1982)
 - ・ 村上他; 鋼材加熱の溜の酸素燃焼技術の開発, 工業加熱, Vol33, No 3 (1996)
 - ・ C. E. Baukal; Industrial Heating, (1992) 22
 - ・ B. M. Gibbs; J. Inst. Energy. 74 (June-1983)
 - ・ G. Tuson, R. Higdon and R. D. Moore; Ceram. Eng. Sci. Proc., 13, (3)1-17, (1992)
 - ・ B. Jurcik, L. Philippe, S. Wayman and R. Ruiz; Ceram. Eng. Sci. Proc., 17, (2) 36-46 (1996)
 - ・ T. K. Dankert and G. B. Tuson; Ceram. Eng. Sci. Proc., 17, (2) 47-54, (1996)
 - ・ M. G. Carvalho and M. Nogueira; Ceram. Eng. Sci. Proc., 17, (2)121-131, (1996)
 - ・ M. Gridley; Am. Ceram. Soc. Bull., 76 (5) 53-57 (1997)
 - ・ J. R. Holman 著, 平田 賢訳: 伝熱工学(丸善) pp. 114-119 (1982)