

既存燃焼炉の省エネルギーを図る 酸素富化燃焼制御システム

Oxygen-Enriched Combustion Control System for Saving Energy of Existent Combustion Furnace

谷口 正志* 入江 年優**

Masashi Taniguchi Toshimasa Irie

表原 靖男*** 磯田 徹***

Yasuo Omotehara Tohru Isoda

(2003年7月16日 受理)

キーワード：省エネルギー，高温燃焼炉，シャトル炉，酸素富化燃焼，制御システム

1. はじめに

電子部品焼成炉用耐火物としてのセラミックの焼成には，最高温度1700～1800℃の高温焼成炉が必要である。大量生産の場合にはトンネル炉が用いられ，多品種少量生産の場合にはシャトル炉が用いられている。このシャトル炉は燃料消費型の燃焼炉であるにもかかわらず，断続または不連続という操業形態から熱効率が非常に低く，地球温暖化の原因の一つであるCO₂の排出が膨大な量となっている。

酸素富化燃焼は単位時間当たりの燃料消費量は増加する場合もあるが，通常燃焼よりも昇温速度を大きくできるので，燃焼時間の短縮による総燃料消費量の低減が可能となるため，燃料消費型燃焼炉の省エネルギーが期待できる。当研究所では大学および企業と共同で，セラミック焼成用高温シャトル炉の熱効率改善を目的とした酸素富化燃焼技術の適応について研究し，適切な酸素濃度や酸素富化燃焼の適応域（酸素富化燃焼の開始および終了時期）などを明らかにし，大きな効率改善効果が得られることを報告した¹⁻⁵⁾。

ここでは実用的な酸素富化燃焼技術の確立を目指して，既存の燃焼炉への付加を前提とし，酸素濃度およ

び通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替え前後での空気比を一定に制御する酸素富化燃焼制御システムを開発したので報告する。

2. ガスバーナの流量および流量比制御⁶⁾

燃焼制御システムは負荷に追従して燃焼量（燃料流量）を変化させる燃焼制御を行うだけでなく，燃焼雰囲気安定させるために，燃料流量に比例して燃焼用空気流量を変化させる燃空比または空燃比制御（結果的に空気比制御）も行う。燃焼制御としては，温度調節器からの制御出力で流量制御弁を直接制御するダイレクト制御，温度調節器からの制御出力を流量制御の目標値とし，測定流量との差をなくすように制御するフィードバック制御などが行われている。空気比制御としては，燃料と燃焼用空気を同時に変化させる制御，燃料を先に変化させる燃料優先制御，燃焼用空気を先に変化させる空気優先制御が行われている。気体燃料を使用するガスバーナでは，これらの制御法を実現する流量および流量比（空気比）制御機構は，以下に示すように，炉の規模や用途などに応じて様々な方式が用いられている。従って，本システムの開発においても燃料ガス（都市ガス），燃焼用空気，酸素の流量および流量比制御の方式（ソフト面）と機構（ハード面）の決定が重要となる。

* システム技術部 制御システムグループ

** システム技術部 環境・エネルギーグループ

*** システム技術部

(1) モータレス制御方式

モータレス制御方式はボイラの小容量ガスバーナに用いられている方式で、コントロールモータのような機器を使用しないので、性能の割に安価である。燃焼制御は燃料ガスの供給を遮断弁で開閉するON/OFF制御が行われ、空気比制御は適当な値が得られるようにオリフィスなどで燃料ガスと燃焼用空気の流量を固定して行われる。

(2) 機械リンケージ方式

中大容量ガスバーナでは、性能だけでなく燃焼効率を求めて細かな空気比制御が要求される。機械リンケージ方式はこの要求に応じるために用いられている方式で、燃料ガスおよび燃焼用空気の流量を制御するバタフライ式などの流量制御弁と1台のコントロールモータをリンク機構で接続して燃焼制御と空気比制御を同時に行う。

燃料ガスと燃焼用空気の制御弁で流量特性が異なり、空気比の補正や調整に熟練を要するにもかかわらず、使用範囲全域で一定の空気比を維持することは困難である。このため、制御弁の流量特性を補正するカムを組み込み、細かな調整を容易にする方法もある。

(3) 均圧弁方式

均圧弁方式は中容量ガスバーナに用いられている方式で、1台のコントロールモータで燃焼用空気の流量制御弁を駆動し、その圧力変化をカバナ(均圧弁)の流量制御信号として使い、燃料ガス流量を制御する。

空気比の調整は機械リンケージ方式よりも容易であるが、空気圧力の変化は燃焼特性による影響も大きく、

小流量時に追従性と再現性が乏しいなど、様々な条件変化に対して空気比を精度よく一定に維持することは困難である。

(4) 直接流量制御方式

直接流量制御方式は省エネルギーや環境対策として求められる高精度な燃焼制御や空気比制御に対応するため、燃料ガスと燃焼用空気の流量を両方とも直接制御する方式である。各制御弁の流量特性を演算してモータの回転角を制御するため、容易に高精度な燃焼制御や空気比制御が可能である。近年のマイクロプロセッサやメモリの高速化、大容量化によって複雑な制御演算も可能になったが、高価であり、流量センサの測定誤差や応答時間などの影響が残ると制御精度が低下する。

安価な簡易型流量制御装置や、中大容量ガスバーナの省電力のため、インバータで送風機用電動機の回転数を制御し燃焼用空気の流量制御を行う方式もある。

3. 酸素富化燃焼制御システムの開発

図1に、前述のセラミック焼成用高温シャトル炉への酸素富化燃焼技術の適応に関する研究結果から決定した燃焼炉の動作模式図を示す。比較のため、酸素富化燃焼(実線)だけでなく通常燃焼(2点鎖線)も示している。

①着火から1300℃(目標温度1)までは通常燃焼を行う。

②目標温度1から1700℃(目標温度2)までは酸素濃

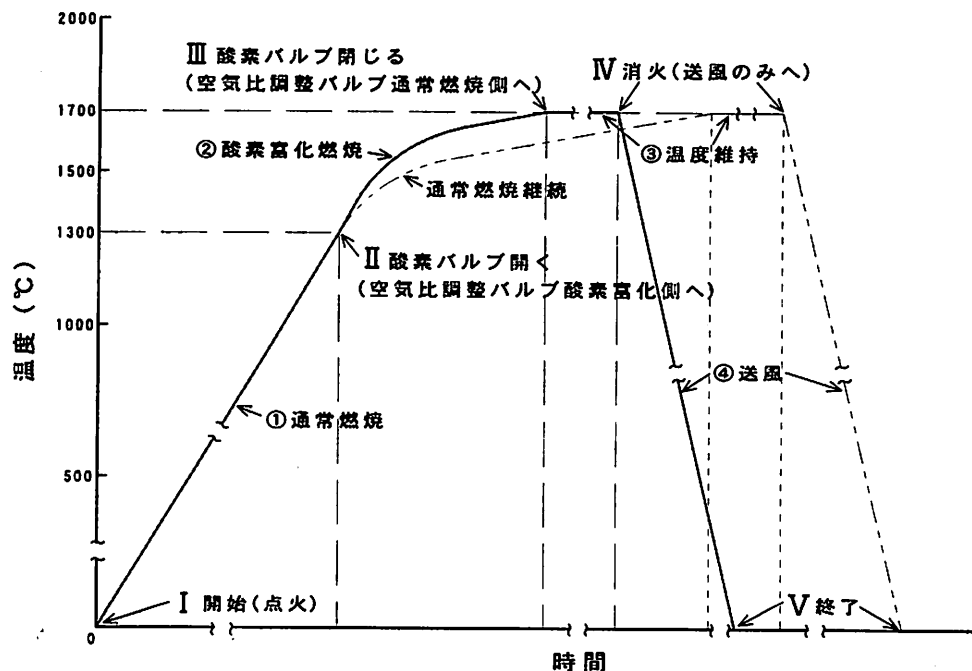


図1 酸素富化燃焼システムの動作模式図

度24%で酸素富化燃焼を行う。

- ③目標温度2に達したら通常燃焼を行い、その温度を一定時間維持する。
- ④一定時間が経過したら消火し、送風のみで冷却する。

なお、通常燃焼と酸素富化燃焼を操業途中で切り替える場合、必要がない限り切り替え前後で空気比を一定に制御しなければならない。ただし、ここで言う空気比は、通常燃焼の場合には従来の理論空気量に対する実際の燃焼用空気量の比である。しかし、酸素富化燃焼の場合には、燃焼用空気への酸素投入により酸素量が増すため、実際の燃焼用空気量を通常空気と同じ酸素濃度20.98%の空気量に換算した値から算出する仮想的な空気比である。理論酸素量に対する燃焼用酸素量の比である酸素比が使われる場合もあるが、空気比の方が一般的であるので、こちらを使用する。

図1に示すような動作を行う酸素富化燃焼制御システムを開発するために、炉内寸法0.47×0.47×0.51mの小型実験炉を作製した。図2にその外観を示す。バーナはシャトル炉用バーナ(大阪ガス(株)製)で、最大燃焼量は290kWである。燃焼制御および空気比制御方式は、炉内温度のみを目標として燃焼用空気流量を直接変化させるダイレクト燃焼制御および空気優先制御方式、流量および流量比制御機構は、均圧弁方式の燃焼用空気の動圧を利用したガバナによる空気-都市ガス流量比制御機構など、実用炉と同様の制御系を持っている。ただし、排ガスによる燃焼用空気の余熱設備は備えていない。燃焼制御用の温度測定点は炉内中央部に設けた。排ガスは煙突で屋外に導いたが、非常に高温の排ガスによる煙道の焼損を防ぐため、煙道内に外気を吸い込む構造にして排ガスの冷却を行った。

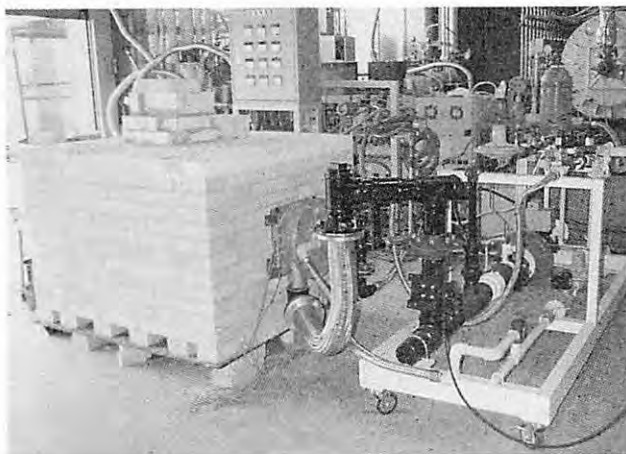


図2 小型実験炉の外観

都市ガス、燃焼用空気、酸素のすべての流量制御を、電動流量制御弁を用いて、フィードバック制御方式および直接流量制御方式で行う酸素富化燃焼システムは既に存在している。このシステムは酸素濃度および空気比を正確かつ自由に制御できる優れたシステムであるが、システム価格、特に電動流量制御弁が非常に高価である。また、このような燃焼制御システムを既存の燃焼炉に適用するためには、大規模な改造が必要となる場合がある。以上の点と酸素富化燃焼の適応分野の拡大を考慮し、開発するシステムの基本仕様を以下のように決定した。

- ①既存の燃焼炉に追加できる。
- ②機器の追加や交換などの改造が少ない。
- ③安価で汎用性のあるシステムとする。

(1) 流量制御および空気比制御

本システムが制御するのは、炉内温度と所定の空気比および酸素濃度に応じた都市ガス、燃焼用空気、酸素の各流量である。先に述べたように、本実験炉は燃焼量に応じた送風量制御およびガバナを用いた空気比制御を行っているので、改造を少なくするために、それらを生かしたシステムを考えた。燃焼用空気への酸素投入に関して、バーナはガスを混合するという点ではミキサと同類と考えられるので、空気-酸素混合用ミキサをバーナと見なせば、空気-酸素系の流量比(酸素濃度)制御は空気-都市ガス系と同様の機器構成で原理的に可能である。この発想に従って配管の改造を行った。図3に改造した配管図を示す。図中には基本的な機器のみを示しており、破線で囲んだ部分が改造部である。ミキサにはメインバーナ(19)と同様の混合方式である低圧ミキサ(16)を採用した。

空気配管の最上流に燃焼量を変化させる送風量制御用コントロールバタ弁(12)があり、コントロールモータ(13)で制御する。その下流にある都市ガス用ガバナ(2)への圧力抽出点や都市ガス用ガバナへの加圧調整用コントロールバタ弁(38)などは、酸素富化のない通常の燃焼制御システムとほぼ同様である。本システムでは、都市ガス用ガバナへの圧力抽出点上流に低圧ミキサを設け、空気-都市ガス系と同様の位置関係になるように、酸素用ガバナ(10)への圧力抽出点および酸素用ガバナへの加圧調整用バタフライバルブ(17)を配置した。

酸素濃度は、酸素供給能力(圧力と流量)の範囲内で、事前に自由に設定可能(プリセット可変)である。さらに、低圧ミキサへの酸素配管を複数にし、それぞれを電磁弁で開閉すれば、選択式ではあるが酸素濃度が可変にできる。また、低圧ミキサの代わりにベンチ

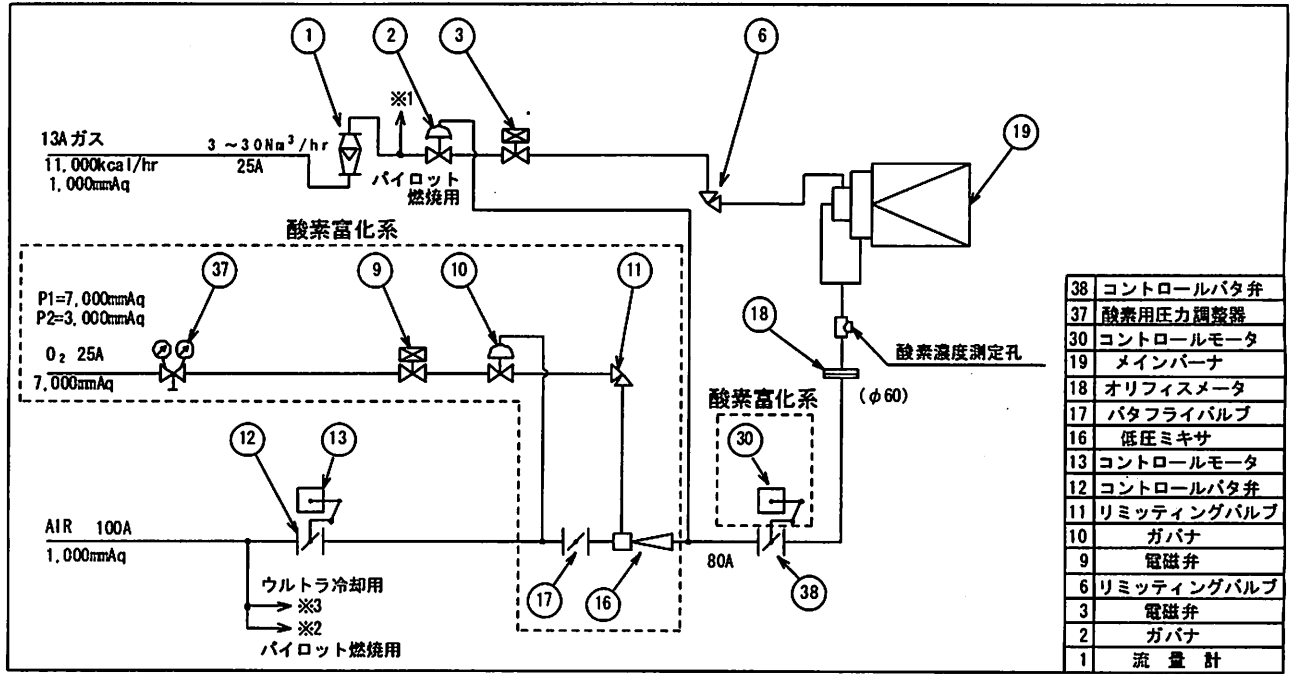


図3 酸素富化燃焼システムの配管図 (抜粋)

ユリミキサが使用できれば、酸素濃度の安定度は下がるかもしれないが、一部の機器が省略可能である。

都市ガス、燃焼用空気、酸素の流量測定および流量調整は、通常の燃焼制御システムと同様の方法で行った。都市ガス流量はフロート式流量計(1)で測定し、空気流量はオリフィスメータ(18)を利用して測定した。酸素は酸素濃度測定孔からジルコニア式酸素濃度計(第一熱研(株)製; 図中にはない)へ燃焼用空気を抽出して濃度を測定した。都市ガスおよび酸素の流量調整は、それぞれのガバナへの加圧調整用バタ弁(38, 17)の開度調整と、都市ガス用リミッティングバルブ(6)および酸素用リミッティングバルブ(11)の開度調整で行った。

空気比は炉内環境を酸素不足にするか酸素過剰にするかを決定する要素であるが、炉の内容物も炉内環境に影響するため、空気比の設定値は用途や操業状況によって異なる。本システムは開発中のシステムであるため、安全に余裕を見て、酸素富化燃焼時に酸素供給側の異常で酸素濃度が下がった(通常濃度に戻った)場合に、炉内に残った未燃ガスが煙道で再燃しないように、酸素供給側異常時でも空気比が1.1を下回らない、少し大きめの1.35程度の空気比に調整した。

(2) 酸素富化前後の空気比制御

酸素富化時には燃焼用空気中の酸素量が増すため、そのままでは空気比(仮想的な空気比)が上昇する。従って、空気比を下げて通常燃焼時と同じ値を維持するために、燃焼用空気量を減少させるか都市ガス量を

増加させる必要がある。本システムでは、都市ガス量を増加させるため、都市ガス用ガバナへの圧力を上昇させた。具体的には、通常燃焼時と酸素富化燃焼時で同一の空気比となるように、前もって都市ガス用ガバナへの加圧調整用コントロールバタ弁(38)の開閉位置を確定し、その2点間をコントロールモータ(30)で移動させた。このバタ弁を空気比調整バルブと名付けた。この方法は、元の燃焼制御システムの方式と機構を生かしたために、通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替え時に送風量のみを増減させるのが困難なためである。なお、コントロールモータ(30)の代わりに直動または揺動シリンダやモータ、ステップモータなどの制御用モータを使うことも可能である。

炉内温度を一定に制御する場合、酸素富化開始時および終了時の過渡的な変化は以下ようになる。

- ・酸素富化開始
 空気比調整バルブ酸素富化側へ→ 都市ガス量増加
 → 炉内温度上昇→ 送風量減少→ 都市ガス量減少
 → 炉内温度低下
- ・酸素富化終了
 空気比調整バルブ通常側へ→ 都市ガス量減少
 → 炉内温度低下→ 送風量増加→ 都市ガス量増加
 → 炉内温度上昇

本システムでは、空気比調整バルブ駆動用コントロールモータの動作範囲が、空気比調整バルブの動作範囲に比べて非常に大きかったため、動作途中で、空気比が一時的に設定値より大きくなり、再び設定値に戻

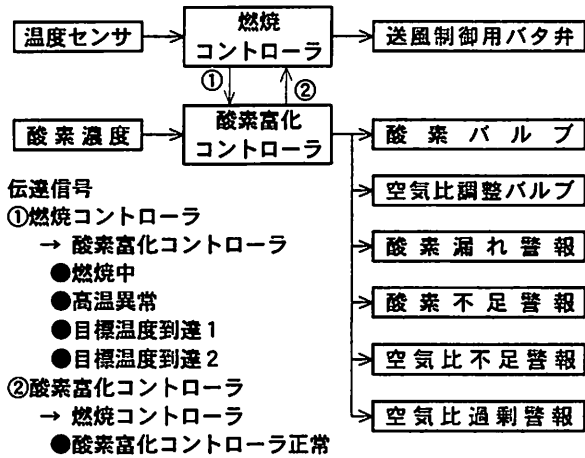


図4 酸素富化燃焼システムの制御系構成図

という変化をさせた。本来は空気比調整バルブの動作範囲に合った動作機構にすべきであるが、汎用機器を使用するために、汎用のコントロールモータおよびリンク機構を基本仕様そのまま使用した。逆に空気比が設定値より小さくなる方向に動作させなかったのは、3(1)で述べたのと同様に、炉内に残った未燃ガスが煙道で再燃するのを防ぐためである。

(3) 酸素富化制御

図4に制御盤の構成図を示す。既存の燃焼コントローラの改造を最小限に抑えるため、燃焼コントローラとは別に酸素富化コントローラを構築し、その間を必要な信号で結ぶ構成とした。燃焼コントローラは従来通りの燃焼制御を行い、酸素富化コントローラは自身を含む酸素系に関わる表示と操作、および通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替えを行う。燃焼状態の切り替え動作は、通常燃焼時には空気比調整バルブを通常燃焼側に置くと共に酸素供給を停止する。酸素富化燃焼時には空気比調整バルブを酸素富化側へ置くと共に酸素供給を行う。

両コントローラ間で授受する信号は、最低でも酸素富化燃焼の適応域の指示(開始および終了指示)および安全確保のための信号が必要である。本システムでは、燃焼コントローラの外部信号入出力仕様と改造規模を考慮して、入出力合わせて図中の5本(●印)とした。その内容を以下に示す。必須の記述がある信号は、安全確保に最低限必要な信号である。

- 燃焼中(必須)：燃焼が正常に行われていることを示す。異常時には燃焼コントローラが燃焼を中止させるため、燃焼状態を通常燃焼状態にする。
- 高温異常：燃焼炉の保護のために設定した最高温度(今回は1800℃)に達したことを示す。燃焼継続か中止かに関わらず、燃焼状態を通常燃焼状態にする。
- 目標温度到達1：酸素富化燃焼開始温度(今回は

1300℃)に達したことを示す。燃焼状態を酸素富化燃焼状態にする。

- 目標温度到達2：酸素富化燃焼終了温度(今回は1700℃)に達したことを示す。燃焼状態を通常燃焼状態にする。
- 酸素富化コントローラ正常(必須)：酸素系が正常に動作していることを示すが、正常の範囲は事態の危険度によって判断する。危険な場合(異常時)には、燃焼状態を通常燃焼状態にすると共に燃焼コントローラを通じて燃焼を中止させる。それ以外の場合には、酸素系は正常とし、指定された燃焼状態にすると共に警報を出す。燃焼は継続させる。

以上のように、燃焼中止などの異常時には燃焼状態を通常燃焼状態にし、酸素供給を絶つ必要がある。また、通常燃焼のみを行う場合には、酸素富化コントローラを含む酸素系が動作している必要はない。従って、酸素の供給停止をより確実にし、不要時に酸素系を動作させないため、電源投入時および異常時には、自動的に通常燃焼状態に戻るような制御系を構築した。

燃焼コントローラには、機器とプログラムの両面で、5本の信号授受に必要な改造を行った。酸素富化コントローラには、システム開発という本研究の性格上、制御内容およびセンサやアクチュエータの変更、増減に対応できるようプログラマブルコントローラを使用し、表示や操作用機器を組み込んだ。制御内容や使用機器が確定していれば、プログラマブルコントローラに限らず、適当な制御機器を使用してよい。なお、酸素富化コントローラの機能は安全装置を含めて必要最小限と思われるものに絞り込んだ。例えば、酸素圧力計の用途は酸素濃度計で代用できるため、ここでは酸素圧力計は設置していない。また、図中には燃焼コントローラに備わっている安全装置などは示していない。

酸素富化コントローラのプログラムは、燃焼コントローラとの信号授受、通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替え制御、酸素系に関する表示や操作の制御を行うと共に、電源投入時や作業終了時には通常燃焼状態となるように作成した。また、酸素系が正常かどうかの判断は実用炉の都合に合わせた。例えば、酸素富化燃焼中の酸素濃度不足への対処として、燃焼継続か中止かは一概に確定できないが、本システムでは酸素不足の警報は出すが、通常燃焼で燃焼を継続するようにした。

4. 酸素富化燃焼制御システムの動作実験

本システムでは通常燃焼と酸素富化燃焼の自動切り替えが行えるだけでなく、元の燃焼炉の性能も維持し

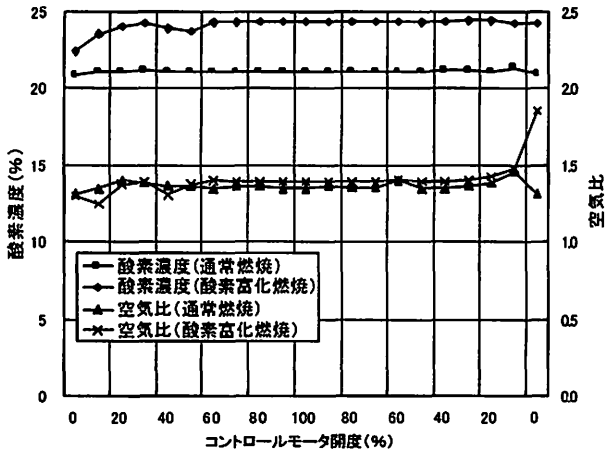


図5 酸素濃度と空気比

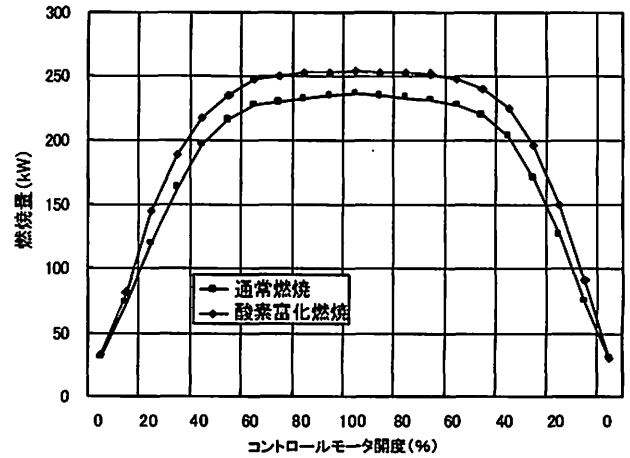


図6 燃焼量

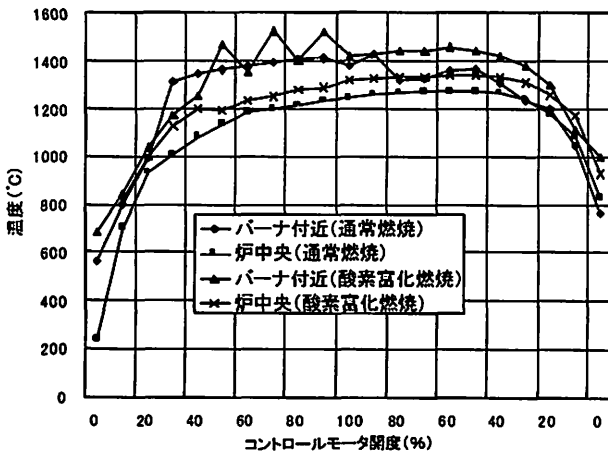


図7 炉内温度

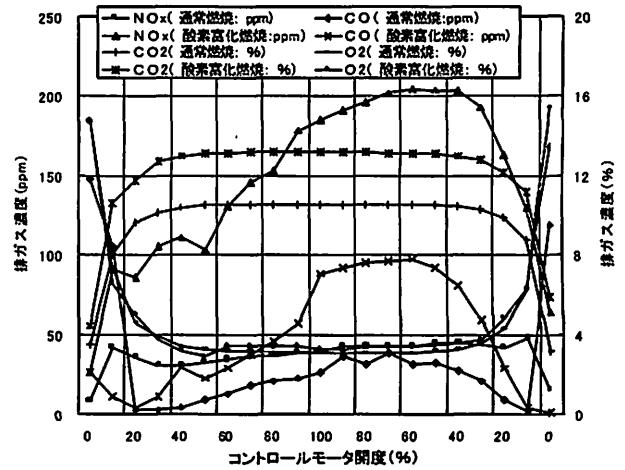


図8 排ガス濃度

なければならぬので、最低限、以下の3点が達成されていなければならない。

- ① 燃焼量の変動に対して酸素濃度を一定に保つ。
- ② 通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替え前後で仮想的な空気比を一定に制御する。
- ③ 元の燃焼炉の最大燃焼量を確保する。

そこで、小型実験炉を使用して燃焼実験を行った。通常燃焼および酸素富化燃焼において、燃焼コントローラの制御出力を0~100%まで10%毎に変化させて送風量制御用コントロールバタ弁(12)の開度を変え、都市ガス量、燃焼用空気量、酸素濃度、炉内温度の測定および排ガス分析を行った。燃焼状態の安定とガス分析計(株堀場製作所製)までの配管を考慮して、測定は開度変更3分後に行った。

図5~図8に実験結果を示す。酸素富化時の酸素濃度および通常燃焼時と酸素富化燃焼時の空気比はほぼ一定に制御されており、最大燃焼量もほぼ目的値に達している。また、酸素富化燃焼の方が炉内温度が高くなっており、測定のタイミングから燃焼開始後の経

過時間はほぼ同じと考えられるので、酸素富化燃焼の方が昇温速度が大きいことが確認できる。しかし、空気比が1.4近くの高い値に設定されている影響も加わってか、排ガス中のNO_x濃度も5倍程の大きな値となっている。

なお、空気比の算出に用いた通常空気の酸素濃度は20.98%である。さらに、都市ガス13Aの理論空気量は11.0m³/m³、真発熱量は41.6MJ/m³Nである(大阪ガス(株)の資料)。従って、最大燃焼量290kWに必要な都市ガス流量は25.1m³N/hである。

5. おわりに

高温シャトル炉の実用的な酸素富化燃焼技術の確立を目指して、既存の燃焼炉への付加を前提とした酸素富化燃焼制御システムの開発を行った。小型実験炉を使用した実験の結果、酸素濃度および通常燃焼と酸素富化燃焼の切り替え前後での仮想的な空気比(通常空気と同じ酸素濃度の空気量に換算してから算出した

値)を一定に制御できるだけでなく、元の燃焼炉の最大燃焼量が維持できることが確認された。最後に本システムの利点と欠点を示す。

- ① 燃焼時間短縮と総燃料消費量低減が可能である。
- ② 既存の燃焼設備に追加可能である。
- ③ 使用する機器が豊富で比較的安価である。
- ④ 構造が簡単で、しかも既存の燃焼設備と同様の構成であるため、仕組みが分かりやすく、蓄積したノウハウが利用しやすい。ただし、都市ガス、燃焼用空気、酸素の流量が互いに影響し合うので、流量および流量比調整が従来よりは複雑になる。
- ⑤ 排ガス中のNO_x濃度が大きく増加するので、適応範囲の絞り込みなどで総排出量を低減するか、NO_x除去設備が必要となる。

参考文献

- 1) 入江年優, 磯田徹, 表原靖男, 竹内信行, 中塚勉, 渡辺博則, 清飛羅一真, 小川悦郎, 津河成和: 平成12年度大阪府立産業技術総合研究所研究発表会要旨集, 110 (2001)
- 2) 入江年優, 表原靖男, 竹内信行, 渡辺博則, 清飛羅一真, 小川悦郎, 津河成和, 中塚勉: 耐火物, **53**, 11, 632 (2001)
- 3) 竹内信行, 石田信伍, 渡辺博則, 入江年優, 表原靖男, 小川悦郎, 清飛羅一真, 津河成和, 中塚勉: *Journal of the Society of Inorganic Materials*, **8**, 295 (2001)
- 4) 入江年優, 表原靖男, 竹内信行, 渡辺博則, 清飛羅一真, 小川悦郎, 津河成和, 中塚勉: 平成11年度大阪府立産業技術総合研究所報告, **13**, 15 (1999)
- 5) 竹内信行, 石田信伍, 渡辺博則, 入江年優, 表原靖男, 小川悦郎, 清飛羅一真, 津河成和, 中塚勉: 耐火物, **51**, 7, 411 (1999)
- 6) 日本バーナ研究会研究開発委員会編: 燃焼装置の先端技術, 日本バーナ研究会 (2002)

1) 入江年優, 磯田徹, 表原靖男, 竹内信行, 中塚勉, 渡