

## ■ 技術報告 ■

## 酸素富化膜燃焼システム

Oxygen Enriched Combustion System Utilizing Membrane

清水 昭 史\*

Shoji Shimizu

## 1. はじめに

ガラス溶解炉，セラミック焼成炉などの高温域で操業される工業炉は多くのエネルギーを消費している。そのため各種の省エネルギー技術の研究がなされ実用されているが，その手法の1つに，酸素濃度の高い空気を燃焼用空気として使用する技術がある。酸素濃度の高い空気を得る方法としては，深冷分離法による液体酸素や，P S A法による酸素取得の方法がある。

我々は，酸素選択性透過膜を用いた酸素富化燃焼システムを数年前から研究し，このたび小規模ではあるが実用化にいたった。この酸素富化膜燃焼システムについて報告する。

なおこの技術は，松下技研㈱および松下電器産業㈱との共同研究によるものである。

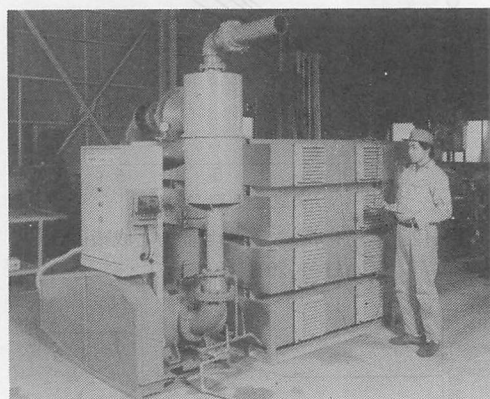
## 2. 酸素富化膜燃焼システムについて

本システムは図-1に示すように，次の要素から構成されている。

- 酸素富化膜室
- 吸引ブロー
- 燃焼用ブロー
- バーナおよび加熱炉
- 制御装置

## (1) 酸素富化膜室

酸素富化膜室には，酸素選択性透過膜を取付けた富化膜セルが，多数枚収納されている。この膜セルはそれぞれヘッダーに連結されていて，吸引ブローへと導通している。膜室へ取入れる空気は，フィルターにてゴミをろ過したのち，膜セルの間を流通し窒素富化空気となって排出される。この空気量は取得する酸素富



写1 酸素富化空気供給装置

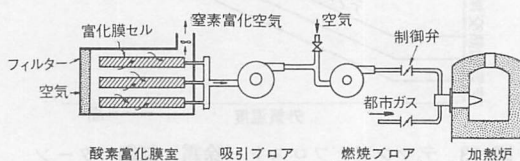


図-1 酸素富化膜燃焼システム

化空気量の数倍を要するが，これは膜面上の酸素分圧をあまり下がらないようにするためである。

膜室は「膜室ユニット」として標準化されており，仕様は次のとおりである。

○膜室ユニットの仕様

型 番 OEA-28-74

外形寸法 1600 W × 1500 L × 370 H

酸素濃度 28 %

酸素富化空気量 74 m<sup>3</sup>/H

必要吸引圧力 -7600 mm Aq

重 量 約80 kg

この膜室ユニットを複数台使用することにより，取得する酸素富化空気量の増加がはかれる。

酸素富化膜を取付けた膜セルは，巾30cm，長さ100cm，厚さ0.8cmの大きさで，ポーラスな平板の両面に

\*大阪ガス㈱営業技術センター，工業用技術チームマネージャー

〒550 大阪市西区千代崎3-2-95

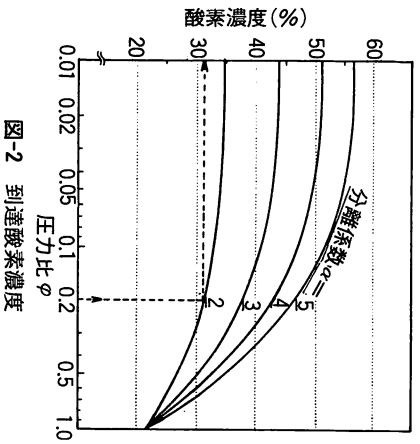


図-2 到達酸素濃度

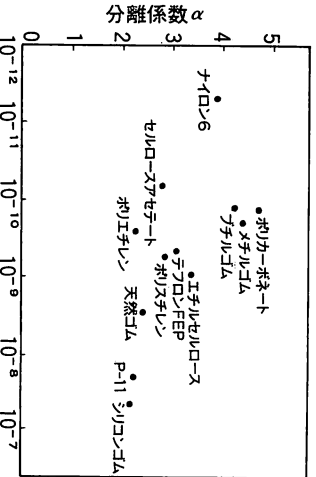


図-3 高分子膜の酸素分離係数と透過係数

膜が取付けられている。

膜により得られる酸素濃度は、膜の分離係数 $\alpha$ と、膜の面の圧力比 $\phi$ により定まる。図-2にこの関係を示す。分離係数が大きいほど、また圧力比が小さいほど高濃度の酸素富化空気が得られるが、圧力比の方はあまり小さくしても酸素濃度の上昇具合はそう増加しない、圧力比とは、膜の面における絶対圧力の比であり、吸引系の場合、 $-0.8$ 気圧に減圧すると、圧力比 $\phi = 0.2$ となる。

一方膜の分離係数の大きい素材としては、種々合成されている。これらを図-3に示す。横軸の酸素透過係数 $P_{O_2}$ は、大きいほどよく酸素を透過し、その膜により得られる酸素富化空気量が多くなる。

膜により得られる気体の量は次式で示される。

$$q = \frac{P_i \cdot A \cdot P_i \cdot A \cdot t}{l}$$

ここで  $P_i$  気体  $P_i$  の透過係数

$$(\text{cc} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{cm Hg})$$

$4 P_i$  膜面の気体の分圧差 (cmHg)

$A$  膜の面積 ( $\text{cm}^2$ )

$t$  時間 (sec)

## 2 膜厚 (cm)

したがって、膜の面積あたり取得できる酸素富化空気量を多くするには、膜素材として酸素透過係数の大きいものを使用し、薄く製膜し、かつ膜の面の圧力差を大きくすれば良い。膜素材としては、分離係数 $\alpha$ が大きく、透過係数 $P_{O_2}$ が大きいほど良いが、このような素材は見つかっておらず、一般的には、図-3に示すように、分離係数の大きいものは、透過係数が小さい傾向にある。

本システムに使用している酸素富化膜は、シリコン系高分子膜で、分離係数 $\alpha = 2$ 、酸素透過係数 $P_{O_2} = 3 \times 10^{-8}$ である。膜の厚みは $0.1 \mu$ 以下と非常に薄いために、厚さ約 $20 \mu$ の有孔膜により支持補強されている。

## (2) 吸引プロロフ

膜の面に圧力差を持たせると、酸素富化空気が得られるが、圧力差をつけるためには、膜に對して、加圧する方法と減圧する方法が考えられる。加圧系ではかなり昇圧することが可能で、膜の面の圧力差は大きくできて有利に思えるが、取得した酸素空気 $1 \text{ m}^3$ あたりのプロロフ動力を見ると、減圧系の方が少なくなると、また膜室の外壁は減圧系の場合には、耐圧容器にする必要がなく、安価となりかつ安全性が高くなる。

このため、本システムでは減圧系としているが、吸引プロロフは、圧力比 $\phi = 0.2 \sim 0.3$ になるよう設定している。プロロフの型式としては、多翼回転型プロロフやナツシュ型のプロロフを使用している。

## (3) 燃焼用プロロフ

燃焼用プロロフは、バーナや配管系、制御系の圧力抵抗に抗するだけの吐出圧力があれば良いが、本システムでは図-1に示すように、吸引プロロフの吐出口と直結せず、空気のダイリユーションパイプと弁を設けて、接続する。通常の空気でダイリユーションすることにより、酸素濃度を調整することができる。本システムでは、膜により得られるだけ酸素濃度を高く取得していき、これを通常空気で希釈して、希望の酸素濃度として使用する方式としている。

## (4) バーナおよび加熱炉

酸素富化濃度が低い場合は、通常のバーナでたいいて使用できるが、既設炉へ適用する場合は、事前にチェックする必要がある。また炉構造からも制約が生じることもある。

酸素富化すると火炎温度が上昇することにより、窒素酸化物の排出濃度が増加する。一例として通常のト

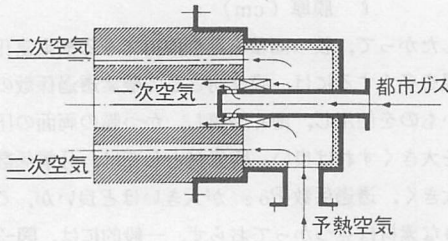


図-4 PAX バーナの構造

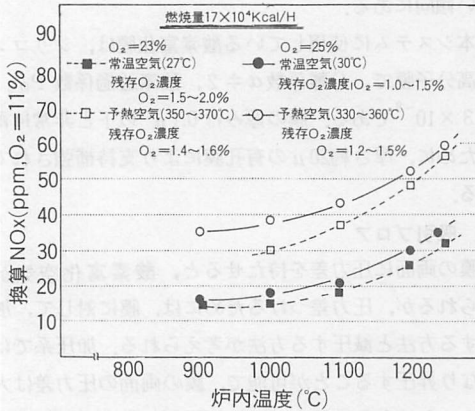


図-5 PAX バーナの炉内温度と NO<sub>x</sub> 値

ンネルバーナで燃焼させた場合、酸素濃度27%の場合に通常値の数倍にもなった。この対策として予熱空気用低 NO<sub>x</sub> バーナとして開発された PAX バーナを応用して、好結果を得ている。図-4にこのバーナの構造を示す。二段燃焼と排ガス自己再循環を組合せたバーナである。図-5に NO<sub>x</sub> 値のデータを示す。酸素濃度が25%でかつこの酸素富化空気を約 350 °C に予熱して燃焼させたと、炉温 1200 °C に於て約 50 ppm と少ない値が得られている。このバーナでは酸素濃度の増加よりも、予熱空気温度の上昇の方が、NO<sub>x</sub> 値の増加に対して、よりセンシティブである。

(5) 制御装置

膜に与える圧力差および圧力比により、得られる酸素富化空気量および酸素濃度が定まる。したがって、使用する膜セルの枚数と、吸引ブローアの吸引圧力と風量の関係からおのずと定まる。酸素富化空気量の量および濃度の制御にはいろいろの方法が考えられるが、吸引ブローアの回転数制御や、バイパス制御などが一般的である。

3. 省エネルギー効果

(1) 省エネルギーについて

酸素富化燃焼システムの省エネルギー効果について

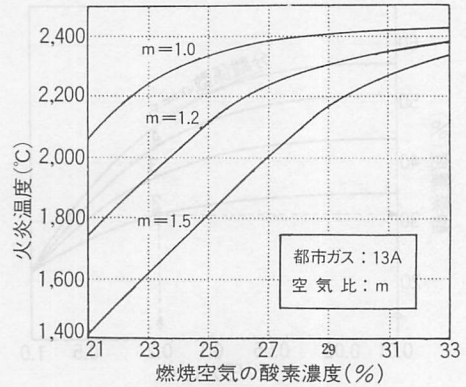


図-6 酸素富化燃焼の理論断熱火炎温度

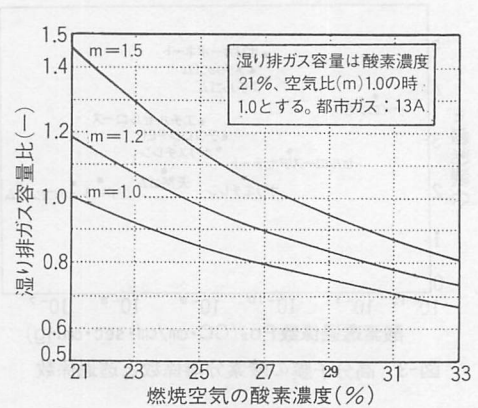


図-7 酸素濃度と排ガス容量比

は、次の二つの要素がある。

- 燃焼ガスの容積が減るため火炎温度が上昇する。
- 排ガス量が減るため排ガス損失熱量が減る。

まず火炎温度の上昇についてみると、火炎温度が上昇すると、被加熱物と火炎温度との温度差が大きくなり、熱伝達量が増大する。図-6に天然ガス燃焼における火炎温度の変化を示す。酸素濃度が高くなると、火炎の温度が上昇していくが、酸素濃度が高濃度になるにしたがい、火炎温度の上昇割合は小さくなっている。このため、効率良く酸素富化燃焼を行うには、酸素濃度は23~28%程度で良いと考えられる。バーナの空気比は理論値に近い方が良いのはいうまでもない。

次に排ガス量の減少についてみると、富化された酸素に見合うだけの空気中の窒素分が減少することであり、この状況を図-7に示す。この図は、通常空気燃焼における排ガス量を1として、酸素濃度の上昇に伴い排ガス量の減少傾向を示したものである。27%の酸素濃度では、空気比 m = 1.0 のとき、約 20% の排ガス量が減少する。

加熱設備において、酸素富化空気を使用することに

よる省エネルギーは、以上の2点の相乗効果によると考えられるが、熱伝達量の増大による効果は、加熱時間の短縮ができ、生産性の向上がはかれるので、この効用を活用すべきである。

(2) 省エネルギー事例

○セラミック焼成

図-8に示す小型の高温炉を使用して、まず空炉における省エネルギー効果について測定した。冷炉から昇温し、ガスバーナの燃料投入量および、空気比を一定としてテストした。炉にはレキュベレータが取り付けられているので、通常空気および酸素富化空気の場合にも空気は約350℃に予熱されている。炉が設定温度に達するまでの燃料消費量を比較してデータを整理したものを図-9に示す。同じ酸素富化濃度において、炉温が上昇するほど、省エネルギー率が上昇している。これは火炎温度の上昇による効果によるものと考えられる。したがって炉温の高い炉へ酸素富化燃焼システムを適用するのが効果的であることを示している。また酸素濃度は高い方が省エネルギー効果が大きい、経

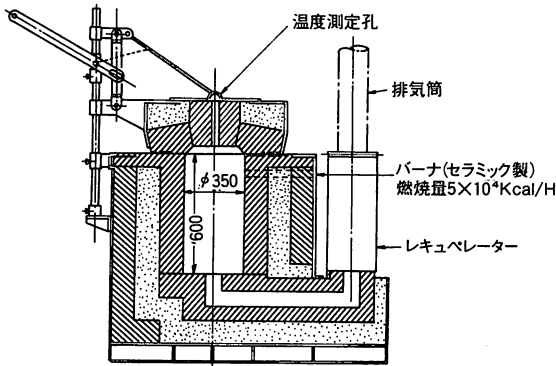


図-8 高温炉

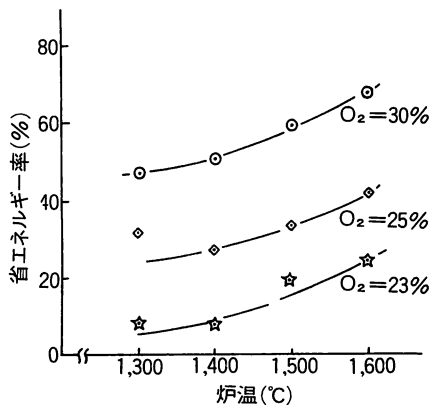


図-9 炉温と省エネルギー率 (空炉の場合)

表1 セラミック焼成試験結果

	ヒートパターン1	ヒートパターン1	ヒートパターン2	備 考
O <sub>2</sub> 濃 度	通常空気 21%	28%	26%	
ガス消費量	17.6 m <sup>3</sup>	13.0 m <sup>3</sup>	13.3 m <sup>3</sup>	都市ガス 13A
焼 成 時 間	6.5 H	6.5 H	5.5H	
最大ガス量 (瞬間)	6.4 m <sup>3</sup> /H	4.9 m <sup>3</sup> /H	6.8 m <sup>3</sup> /H	
排ガス中の残存O <sub>2</sub> 濃度	0~0.3%	0~0.3%	0~0.3%	
排ガス温度 (max)	860℃	680℃	790℃	レキュベレータ出口
予熱空気温度 (max)	365℃	305℃	345℃	
消費エネルギー比	100	73.9	75.6	
省エネルギー率	-	26.1%	24.4%	

表2 ガラス溶解炉

2号炉	原単位 (N m <sup>3</sup> /kg)	比 率
通常空気燃焼 (O <sub>2</sub> =21%)	1.38	100
酸素富化空気燃焼 (O <sub>2</sub> =26.0%)	1.18	85.5

済性を考慮に入れるべきで、必ずしも高濃度が有利とはいえない。

次にこの高温炉にセラミック製品を入れて焼成テストを行った。この結果を表1に示す。ヒートパターン1は、従来の通常の焼成パターンで、3時間で1000℃に昇温後、30分保持し、その後3時間で1600℃に昇温するものである。ヒートパターン2は、3時間で1000℃に昇温し、30分保持の後、昇温を早くし、2時間で1600℃に昇温するヒートパターンである。まず従来のヒートパターンで、酸素濃度を28%に富化して焼成した結果26.1%の省エネルギー化になった。次に、昇温を早くして、5.5時間焼成したところ、酸素濃度26%で、24.4%の省エネルギー化になり、この方が有利であることが解った。

○ガラス溶解炉

小型のガラス溶解炉において、実用運転を行った。この溶解炉は、550ポンドの単独つば窯で、煙道には、レキュベレータが取り付けられていて、燃焼用空気は、約550℃に予熱されている。溶解は1日2チャージで、12時間溶解である。表2に酸素濃度26%における省エネルギー率を示す。原単位とは、ガラス1kg溶解するに要する都市ガス量m<sup>3</sup> (4500 kcal/m<sup>3</sup>のガス) で表わしている。結果約15%の省エネルギー化になった。次に溶解時間を短縮して行った結果を表3に示す。25.3%の酸素空気にて、約27%の省エネルギー化となった。やはり、昇温を早くすれば、省エネルギー効果が大きいことが判明した。

表3 ガラス溶解炉（溶解時間短縮した場合）

2号炉	原単位 (Nm <sup>3</sup> /kg)	比率
通常空気燃焼 (O <sub>2</sub> =21%)	1.38	100
酸素富化空気燃焼 (O <sub>2</sub> =22.7%)	1.15	83.3
酸素富化空気燃焼 (O <sub>2</sub> =25.3%)	1.01	73.2

表4 必要電力

酸素濃度	空気1Nm <sup>3</sup> /Hあたりの電力
28%	0.10 kw
25%	0.057
23%	0.029

#### ○鍛造加熱炉

鍛造加熱炉において、炉内寸法、高さ1.2m、巾1.2m、長さ1.8mの炉に、鋼材を入れ1200℃まで加熱した。バーナの燃焼量は25万kcal/Hで、燃焼用空気は350℃に予熱している。結果、通常燃焼では、鋼材を加熱するのに220分要したものが、25%酸素富化空気では170分に短縮され、加熱に要した熱量は、655×10<sup>3</sup>kcalから493×10<sup>3</sup>kcalへと減少し、約25%の省エネルギー化になった。これは、昇温時間が短縮された結果、炉体蓄熱が約19%減少し、排ガス損失が約39%減少したためである。

#### (3) 1次エネルギーの省エネルギー効果

以上のように、燃料の省エネルギー効果は、充分効果の大きいものであったが、一方、この膜システムでは吸引プロア用に電力を要する。この必要電力量を表4に示す。膜で取得した酸素富化空気を通常空気希釈しているため、酸素濃度が低いほど必要電力量は小さくなっている。発電に要する1次エネルギーを1KWHあたり2450kcalとして、前述の例における効果を表5に示す。酸素濃度25～28%で、燃料を24～27%節約できているが、発電に要するエネルギーを差し引くと、12～18%の1次エネルギーの省エネルギー化になっている。したがって本システムは省エネルギー技術として、非常に有効であると考えられる。

#### 4. 酸素富化膜燃焼システムの特長

本システムは以下の特長を有する。

##### ○安全性が高い

酸素濃度が最高30%程度であり、これ以上絶対に高くなることはない。この程度の酸素富化空気では、通

表5 1次エネルギーの省エネルギー率

	酸素濃度 (%)	燃料の省エ ネルギー率 (%)	1次エネルギ ーの省エネ ルギー率 (%)
ガラス溶解炉	25.3	26.8	18.5
〃	22.7	16.7	11.9
セラミック焼成	28.0	26.1	12.0
鍛造加熱	25.0	24.7	13.3

常空気とほぼ同様に扱えるので、非常に安全性の高いシステムである。

##### ○酸素濃度が安定している

本システムにより得られる酸素濃度は、吸引圧力により定まり、この圧力変動がなければ非常に安定した濃度を保っている。したがって燃焼用には最良のシステムである。

##### ○起動停止が容易である

吸引プロアの起動および停止のみで良く、無人運転が可能で取扱いが容易である。また起動後数秒にて、安定した酸素富化空気を得られる。

##### ○設置場所が小さく軽量である。

他の酸素取得の方式に比べ、設置場所が小さく、使用する現場近くにおくことができる。また膜室は軽量であり、2階等への設置もできる。

#### 5. おわりに

本システムは実用の緒についたばかりであり、今後さらに応用範囲を拡大するために、ひきつづき研究開発が必要である。課題としては、まず、酸素富化膜には

##### ○分離係数の高いもの

##### ○酸素透過係数の大きいもの

が要望され、また吸引ポンプとしては、

##### ○消費電力の低減

が必要である。そして、システム全体では

##### ○大容量の燃焼への対応

##### ○設備コストの低減

が要求される。

本システムは、すでに実施されて来たあらゆる省エネルギー技術に附加して、さらに省エネルギー化のはかれるシステムであり、非常に重要な技術である。前述の課題を順次改善、開発して、広く利用していく努力をつづけていく計画である。