

## ■ シリーズ特集 ■ 各部門における省エネルギー対策 (6)

# ガラス溶融炉の省エネルギー

## Energy Savings in Glass Melting Furnace

長岡 欣之介\*

Kinnosuke Nagaoka

### 1. はじめに

ガラスの年間生産量は約400万tであるが、製品には生産量が多いびんなどの容器ガラス、板ガラス、から、繊維ガラス、食器、生産量が少ない光学ガラスまで多岐にわたり、ガラスの種類にはソーダ・石灰ガラス（並ガラスとも呼ばれ総生産量の90%以上を占める）、ほうけい酸ガラス（硬質ガラス）、鉛ガラス、特別な成分から構成する特殊ガラスまで幅広い。

ガラスは後述のような工程をへて商品となるが、これらの諸工程が一つの工場内で一貫作業によって行なわれるという特徴をもっている（後加工については別工場で行なわれる場合がある）。これらの工程のうち、ガラス溶融には1400℃～1600℃という高温を必要するため、最も多量の燃料（主として重油）を使用しており、ガラス工場全体では比較的多量のエネルギーを消費している。

もともと、ガラスは特殊なものを除けばそれほど付加価値は高くなく、製造原価に占めるエネルギー費は大きいので、常に燃料の原単位を下げる考慮がなされてきたが、48年の石油ショック以降、従来の考え方を転換した省エネルギー策を実施し、かなりの効果をあげている。

ガラス溶融炉はガラス工場では最も重要な役割をもち、この良否が企業生命を支配する。しかし、未解明の分野も少なくなく、炉の寿命（数年以上）まで24時間連続運転するなどから新しい技術の実施には保守的にならざるを得ない面がある。一方、ガラス溶融炉からの排ガスに対してはSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、粉じん、ガラスの種類によって発生する有害物質に排出基準が設

けられ、その対策はほぼ確立されてきた。

ガラス溶融炉の省エネルギーもこれらの事情を十分考慮しながら実施しなければならないが、稼動中の炉に適用できるもの、稼動中に適用できないか適用しても効果が少なく炉を新築する際考慮すべきもの、未来技術に属するもの、などに分けられる。

### 2. ガラスの製造工程と溶融炉

ガラスの製造工程を図-1に示したが、溶融、成形、徐冷工程は連続工程でもある。

溶融、成形工程は少品種—多量生産に適した連続式タンク炉—機械成形方式と、多品種—少量生産に適したバッチ式の連帯式つば炉—人工成形方式に大別できる。前者は大手企業（一部中小企業にもある）が採用しており、タンク炉の大きさは生産品目、企業規模などによって幅広い分布をもつが、大型（概して容量100t以上で、板ガラス、及びびん、繊維ガラスの一部を製造している）、中、小型（びん、食器などの製造用）に分けられる。大型と中型ではバーナー、及びこれに予熱した二次空気を供給するための排ガスの熱回収装置（蓄熱室）の配置が異なり、大型ではサイド・ファイアリング方式、中型ではエンド・ファイアリング方式を採用している（ガラス繊維炉、及び小型炉の一部では蓄熱方式の代りに換熱方式を採用している）。図-2

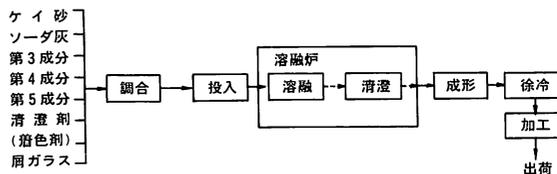


図-1 ガラスの製造工程

\* 大阪工業技術試験所第4部ガラス工学研究室室長

はサイド・ファイリング方式炉、図-3はエンド・ファイリング方式炉の概略を示した。

るつぼ炉方式は中小企業が採用しており、形状、引上量(2t/日)はほぼ一定している。図-4はるつぼ炉の概略を示した。

我国におけるタンク炉の稼働数は約210基、るつぼ炉のそれは250基余りと推定され、操業温度はタンク炉で約1550°C、るつぼ炉で約1400°Cと高温である。なお、ガラス工業が使用する重油は全国使用量の3%弱と推定されている。

### 3. ガラス溶融炉の熱効率

ガラス溶融炉は溶融槽、作業槽、フォハースから構成されているが、溶融槽は同様な構造で各種のガラスを溶融している。溶融槽内では投入した原料をガラス化する工程と、ガラス化した状態から脱泡、均質化をする清澄工程を行なわせ、作業槽、フォハースでは溶融槽内の高温のガラスを成形に適するよう徐々に降温する(るつぼ炉ではこれらの諸工程を時間経過で行なわせる)。

タンク炉において、燃料原単位に及ぼす因子として次のようなものがあげられる。

- (1) 炉が大きくなるほど放熱面積の割合が小さくなり原単位は小さくなる。
- (2) 一つの炉では引上率が大きくなるほど燃料原単位は小さくなるが、概して泡、すじなどの欠点は多くなる(これら欠点の許容度は商品によって異なるが、欠点が多いと成形時の歩止りを低下させる)。
- (3) 溶融温度(100ポイズの粘度となる温度)が高いが

ラスを溶融する炉では燃料原単位は大きくなる。

表1<sup>1)</sup>は容量100tのびんを製造するタンク炉の各工程でのエネルギー必要量をびん1t当りに換算して示したもので、下欄は電力を一次エネルギー(2,480kcal/kWH)に換算したときのエネルギー百分率を示してあるが、溶融工程で最も多くのエネルギーを消費していることがわかる。

ガラス溶融に必要な理論的な熱量はガラス組成、引上温度、カレットの混入率などで異なるが、ソーダ石灰ガラスで約500kcal/kgである。したがって表1の炉での熱効率は約20%に過ぎない。また、るつぼ炉におけるそれは約数%と著しく低い。この原因として

- (1) 炉壁からの熱損失が大きい：炉を高温で操業する

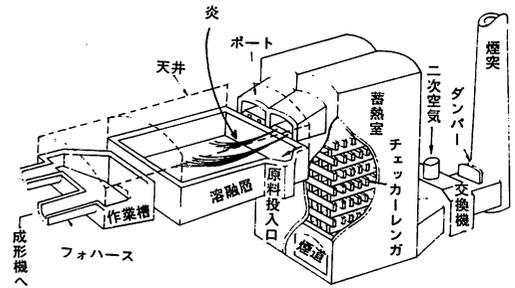


図-3 エンドファイリング方式炉の概略図

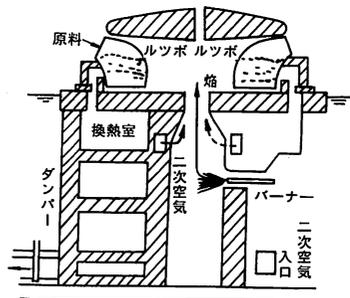


図-4 連帯式るつぼ炉の断面図

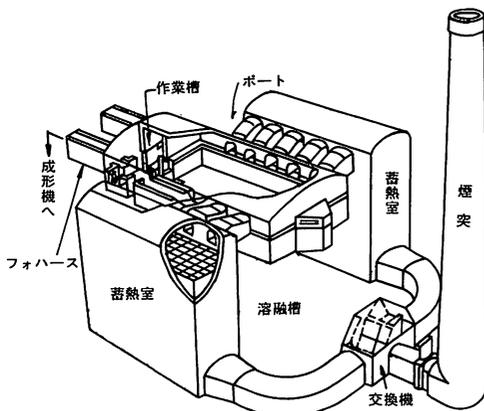


図-2 サイドファイリング方式炉の概略図

表1 びん1t当りの工程別所要エネルギー<sup>1)</sup>

| 工 程            | 原 料  | 溶 融   | 製びん   | 印 刷   | 計     |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 電力 (kWH)       | 83   | 34.1  | 121   | 43    | 281.1 |
| 重油 (ℓ)         | 4    | 219.5 | —     | —     | 233.5 |
| LPG (kg)       |      |       | 12.2  | 22.2  | 34.4  |
| 一次エネルギー百分率 (%) | 7.58 | 67.07 | 13.86 | 11.48 | 100   |
|                |      | 82.8  | 17.1  |       | 100   |

ので、耐火物の損傷を避け、ガラス品質の確保、炉寿命の延長をはかるため保温を行なわなかった。

- (2) 重油の炎からのガラスへの熱伝達が悪い：炎の片面だけしかガラスの加熱に使われない、ガラス原料は粉体の混合物で熱の不良導体である。
- (3) 清澄工程では泡を浮上させるためガラスを高温に長時間保持する必要がある。
- (4) 蓄熱室を出た排ガスはなお数百度の高温であるがそのまま煙突へ放出されている：排ガス中にダストが多いため適当な熱回収法がない。  
などのガラス炉特有の事情があった。  
一方、るつぼ炉では、るつぼ壁を通してガラスを加熱すること、完備した熱回収装置を持っていないことなどがあげられる。

#### 4. ガラス溶融炉の省エネルギーの歴史

ガラス溶融タンク炉は約100年の歴史を持つが、その間大巾な構造の変化はなかった。しかし、高性能耐火物（特に電鍍耐火物）の発展、及び燃料の石炭（水性ガス）から重油への転換などにより、高温操業が可能になり、これに伴って溶融能（溶融槽面積当りの引上量）は向上し、燃料原単位は著しく減少（過去50年間で約 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ ）した。この推移からすると、操炉温度を高くすると省エネルギーは達成できるようであるが、炉材の発展もほぼ一段落しており、高温操業に伴う大気汚染（特に $\text{NO}_x$ 濃度の増加）も考慮しなければならない時代を迎えているので、限界に達していると考えられる。そこで、前述の熱効率を小さくしているガラス溶融炉の特殊事情を改良するのが今後の主なる方向と考えられる。

#### 5. ガラス溶融炉の省エネルギー

##### 5.1 熱損失の減少

###### (1) 有効な断熱方法の採用

ガラス溶融タンク炉内は高温のガラスを保持しており、溶融ガラス表面からの揮発物、及びこれと排ガス成分との反応物、原料から発生するダストなどが多く、炉内の耐火物は苛酷な条件に曝されている。断熱を行なうことは必然的に耐火物の損傷を増加させ、耐火物が損傷されるとガラスにすじ、泡を増加させるだけでなく、炉の寿命を短くする。また、炉の天井は低コスト及びアーチ型にしやすいケイ石レンガが多く使われているが、ケイ石レンガは約 $1600^\circ\text{C}$ を越すと急激に崩壊する。これらの事情が

あるため、従来は断熱を施さないのが普通であった。

しかし現在では天井は勿論、損傷が激しい一部を除いて徹底的に断熱が施行されてきた。

新炉を建設する際には天井のケイ石レンガの代りに高性能の電鍍レンガを使用し完全に保温する方式が採用されつつある。

###### (2) 燃焼管理

溶融槽内のガラスの温度、温度分布は燃料の燃焼状態に支配され、この状態は得られるガラスの品質に微妙に、あるときは大きく影響される。このため、バーナー種類の選択、二次空気供給方法、例えば二次空気供給口（ポート）とバーナーとの組み合わせなどを含めた燃焼条件の設計、操業には極めて慎重にならざるを得ないが、省エネルギーのほか $\text{NO}_x$ 濃度を減少させる方法も模索しなければならなくなった。一定品質のガラスを得ながら、省エネルギー、低 $\text{NO}_x$ 化が達成できるバーナーとしてびんガラス製造用の炉でのレイドローバーナー<sup>2)</sup>、板ガラス用の炉での高油圧バーナー<sup>3)</sup>などが採用されはじめた。また、従来のバーナーでも $\text{NO}_x$ 、及び省エネルギー対策として排ガスの酸素濃度の管理が重要視されてきた。図-5<sup>4)</sup>はびん製造用の炉で品質一定のガラスを230t/日の引上量を得るときの酸素濃度、重油使用量の関係を示したもので、酸素濃度が1.3～3%の範囲で重油を燃焼させると燃料使用量は少なくなっている。一方、 $\text{NO}_x$ 濃度は酸素濃度を小さくするほど低いが、酸素濃度を低くし過ぎると燃焼は不安定になり（この酸素濃度濃度の下限はバーナーの形式、炉構造などによって異なる）、ガラスによっては色調を悪くする。これらから、燃焼管理が従来の経験を主とするものでは精度不足で、酸素センサーを使用す

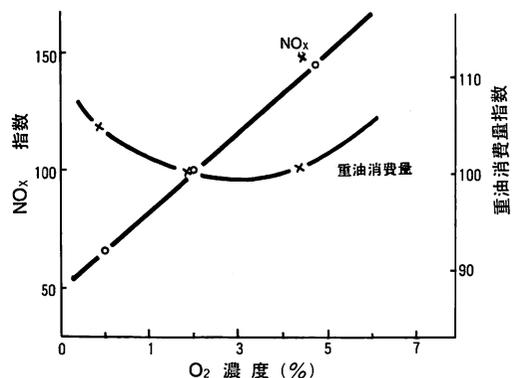


図-5 排ガスの酸素濃度の $\text{NO}_x$ 、重油使用量との関係

る方法に代ってきた。

この外にも、炉内及び蓄熱室内への三次空気（直接炉内へ吸引される冷空気）防止のための例えば目地塗りの徹底、バーナー廻りの孔の閉塞、サイド・ファイリング方式での各ポート毎の燃焼管理が行なわれている。

これらの改善が主なる原因で、びんガラス炉の燃料原単位は図-6<sup>4)</sup>に示したように次第に減少（約20%）している。板ガラスの炉での原単位はこれらにより、約70%に<sup>5)</sup>、最近の新聞紙上では引上率の向上などにより50~60%になったと報じている。

5.2 熱回収装置の高効率化

ガラス溶融炉では燃料原単位を下げるため、必ず蓄（換）熱室を附属させており、蓄熱室は図-2、図-3に示したように巨大で、二次空気は1250℃付近まで昇温している。図-7にタンク炉の熱精算図の一例<sup>4)</sup>を示したが、蓄熱室での熱回収は60%に近い。板ガラスを製造する炉の蓄熱室のチェッカー高さや二次空気予熱温度との関係を図-8<sup>6)</sup>に示したが高いほど有効である。蓄

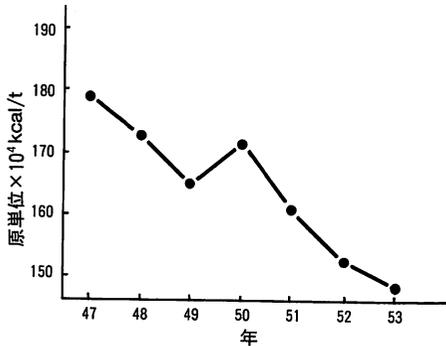


図-6 燃料原単位（溶融総エネルギー/全溶融量）の推移

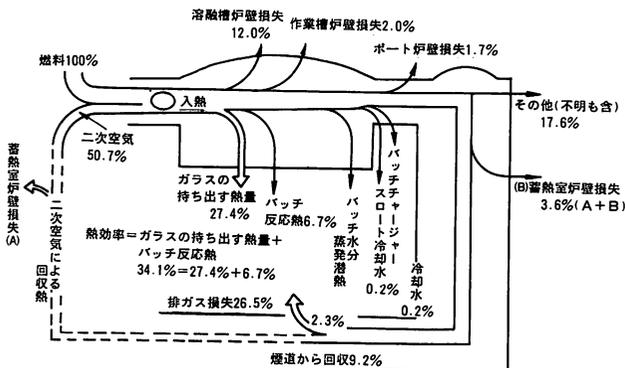


図-7 ガラス溶融炉の熱精算の一例

熱室関係の建設費は炉本体のそれに匹敵するようになっており、レイアウトの関係もあって大きくすることはむずかしくなっている。しかし、チェッカーレングスを高耐蝕性、高熱伝導率をもつ電鍍レガを使用する方法が採用されつつある。

5.3 蓄熱室出口排ガスの顕熱の利用

蓄熱室出口の排ガス温度は数百度と高いが、この熱の有効利用も重要である。一部排熱ボイラーが設備されているが、排ガスにダストが多いこと、脱硫、脱粉じんのため電気収じん機へ入る排ガス温度を300℃付近に保たなければならないことから現状では有効に利用されていない。アルカリ分を含有するダストが多い排ガスからの熱回収方法の開発が急がれる。

また、大抵のガラス溶融炉では溶融槽から出る高温排ガスの熱回収は蓄（換）熱室だけで行ない、二次空気の予熱に使用しているが、廃熱ボイラーを主なる回収装置とし、これに換熱装置をさらに併用するという方式もなされている<sup>7)</sup>。廃熱ボイラーは自家消費用の発電、その他に利用し、換熱装置は二次空気の加熱に使用される。これらにより70%の熱効率が達成されたとしているが、図-9に示した熱精算図は蓄熱方式とこの方式の比較を行ったものである。

しかし、廃熱ボイラーで回収した熱をどのように利用するか、日本では換熱装置を出た排ガス温度で大気汚染物質の除去が可能かなどの問題があり、装置全体の信頼度もまた重要と考えられる。

5.4 熱伝達の上向

従来の加熱方法と異なりガラスを内部から加熱し、熱伝達を良くする方法も検討されている。その一つと

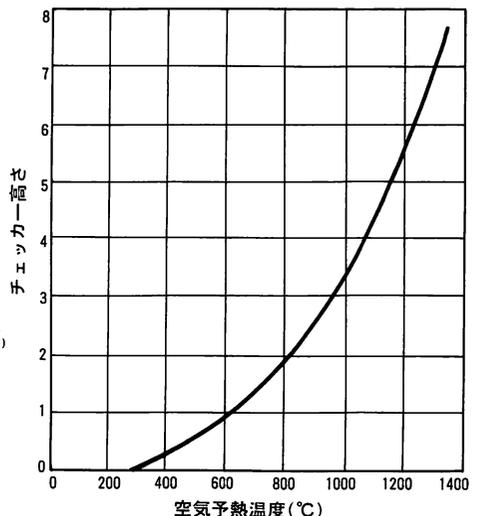


図-8 蓄熱室のチェッカー高さと空気予熱温度

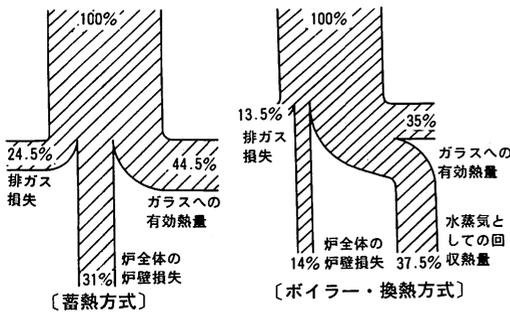


図-9 蓄熱方式とボイラー・換熱併用方式の比較

して、水溶液の加熱に実用化している液中燃焼方式をガラス炉へ適用する実験がされはじめている<sup>8)</sup>。この方法は、高負荷燃焼バーナーを炉底、又は炉壁に斜めに装着し、バーナーから得られる高温の炎、又は燃焼ガスを溶融ガラス中に噴出して加熱するものである。

実験例及び我れ我れの経験によると、ガラスの攪拌効果が著しく、熱効率、溶融能は大巾に向上できるが、ガラス中に泡を残すことから有効な清澄方法の開発、加熱原理を異にするので炉のデザインの決定、バーナーの信頼性の向上などを解決しなければならないようである。

なお、ガラスを内部から加熱する方法として後述の直接通電加熱方式がある。

5.5 滞在時間の減少、引上率の向上

(1) 清澄方式の改良

省エネルギー型の清澄方法はより低い温度で、より短時間に脱泡することである。ガラス工業では清澄剤と呼ばれる物質（酸化アンチモン、食塩、ぼう硝など）を使用しているが、これらの物質は高温で大きい蒸気圧をもつか、分解してガスを発生するもので、清澄剤から発生した大きい気泡にガラス化した状態で内部に混在している微小泡を附着させ、大きい泡として浮上速度を大きくしている。この化学的方法だけでなく実際の炉に適用できるような物理的手段などの新しい清澄促進手段の開発が望まれる。

(2) バブラーの使用

引上率を向上すれば燃料原単位は向上するが、その手段の一つとしてバブラーがある。バブラーとは炉底部から細い管をガラス中にそう入し、この管中に気体を送入し、大きい泡を浮上させ炉内の攪拌を行なうもので、通常、投入した原料がガラス化する

領域に設置する。泡の浮上によって、炉底部の低温ガラスを表面に浮上させること、及び原料バッチ層をゆり動かすことの両面からガラスへの熱伝達は向上する。また、炉内の攪拌によって均質なガラスが得られやすくなり、この面では引上率が向上する。しかし、液中燃焼バーナーほどではないが、浮上気泡が表面で破裂するとき新たに泡を発生するので慎重に適用する必要がある。数%の省エネルギーになるとされている<sup>9)</sup>。

(3) 原料のペレット化

ガラス原料は粉体であるが、粒状にすれば、熱伝達あるいは原料の予熱にも有効であると考えられる。この際、粒度の細かい原料を使用すればガラス化速度は速くなる。既に市販品があり一部に実用化されているが、溶融槽面積が360ft<sup>2</sup>のびんを製造する炉での結果では<sup>10)</sup>、引上量は110t/日から150t/日に増加でき、燃料原単位は約200ℓ/tから約150ℓ/tに減少できたとしている。一方、造粒は原料が湿った状態で行なうので、乾燥して、ある程度強度を持たせる必要があり、その工程で燃料を使用するので、それほど省エネルギーにならない。このため、乾燥工程に蓄熱室を出た高温の排ガスを使用し、乾燥時の昇温したままで炉内に投入するイン・プラント方式が有力視されている。

6. 電気溶融炉<sup>11)</sup>

6.1 原理と特徴

ガラスは高温になると次第に粘度は低下し、導電性になる。そこで、高温のガラス中に電極をそう入し、

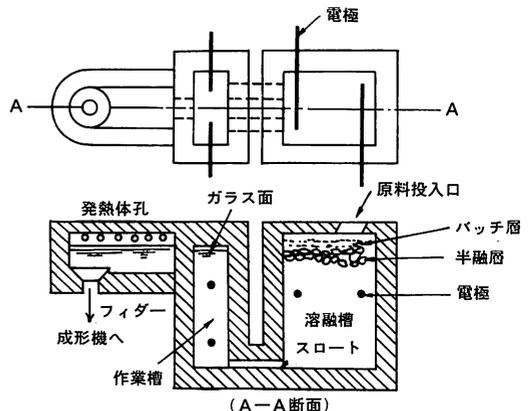


図-10 電気溶融炉の基本型

これに交流を与えるとガラス内部でジュール熱が発生し、ガラスを加熱、溶融できるようになる。溶融に必要な全熱量をこの直接通電加熱によって得ている炉を全電気溶融炉と呼んでいるが、ガラス溶融時に公害発生が最も少ない溶融炉として最近著しく発展してきた。この炉の基本型式を図-10に示したが、省エネルギーの立場からはガラスを内部から加熱すること、溶融槽の全表面を熱伝導が悪い原料パッチで覆って断熱を完全にしていること、燃料を使用しないので、排ガスが持ち去る顕熱がないこと、などから熱効率が高いのが特徴である。

## 6.2 電気溶融炉と燃料炉の使用エネルギーの比較

電気溶融炉は燃料炉に比較すれば高効率であるが、我が国で供給される電力の主要部分は火力発電によっているので、電力を一次エネルギーに換算する必要がある。表1では火力発電時の効率、及び送電時の損失を考慮して1 kWhは重油0.26ℓに相当すると計算している。

さて、表2は超小型タンク炉について電気溶融炉と燃料炉の効率を大阪工業技術成験所での実験から比較したもので、電気溶融炉の方が省エネルギーである。一方、大型炉についてはどうであろうか、容量100tの炉における電力原単位は報告者によってかなり変化があるが850~900 kWh/t(ガラス)とみなされる。この値を重油に換算すると0.221~0.234ℓ(重油)/kg(ガラス)となる。表1のびんガラスの例からフォハースの加熱に使用する燃料を差引くと、0.21ℓ/kgとなるので、大型炉においては電気溶融炉ではほぼ省エネルギーにはならないと判断される。燃料炉では前述のように約30%の省エネルギーを達成しており、水力、原子発電による電力を考慮しても省重油にもならないと考えられる。これらは炉容量によっても事情が変わることを示している。

一方、電極による直接加熱の原理を利用する方式と

表2 超小型タンク炉の燃料原単位の比較

| 使用燃料         | LPG    | A重油    | 電力   |
|--------------|--------|--------|--|
| 炉容量(kg)      | 750    | 750    | 740  |
| 引上量(kg/日)    | 360    | 360    | 400  |
| 所要熱量 kcal/kg | 14,401 | 23,500 | 4.2 kWh<br>(3,600 kcal)<br>一次エネルギー換<br>算値 10,416 |
| 効率*(%)       | 3.5    | 2.1    | 13.8   |

\* 理論値 500 (kcal/kg)

して電気ブスターがある。この方法は燃料を使用する炉に補助的に直接通電加熱を併用するもので、炉の大きさを一定にしながら引上量を臨時に、あるいは恒久的に増加させる方法としてびんを製造する炉ではかなり多用されているが、1t/日の引上量の増加させるに要する電力は25 kW/h(600 kWh/日)~28.8KW/h(688 kWh/日)で、重油156~178ℓに相当する。この計算からブスターを使用することは少くとも100t以下の炉では省エネルギーになり、燃料原単位が大きい小型の燃料炉ほどその効果が大きくなると推定される。

## 7. ガラス組成、原料からの省エネルギー

### 7.1 ガラス組成

ガラス組成の選択には得られるガラスの特性のほか成形方式に適合した粘度-温度勾配をもつことも重要視され、成形機、特に高速度成形機の発展に伴ってこれらの粘度特性は除々に変化してきた。溶融温度を低くすることは省エネルギーになるが、その効果の著しいアルカリ分の増量はガラスの耐水性を悪くするだけでなく、原料費の増大をもたらす。これらを考慮しながらの省エネルギー型のガラス組成も検討されはじめています。

### 7.2 カレットの使用

カレットとは自社内での不良品、回収(リサイクル)したくずガラスなどを言うが、既にガラス状態になっているので、溶融に必要な理論的熱量は通常の原料の約%と小さく、カレットの多用は省エネルギー、省資源の両面にわたって間違いなく有効である。図-11はびんガラス炉での実績<sup>12)</sup>を示したもので、カレット使用量に比例して燃料使用量は減少している。しかし、リ

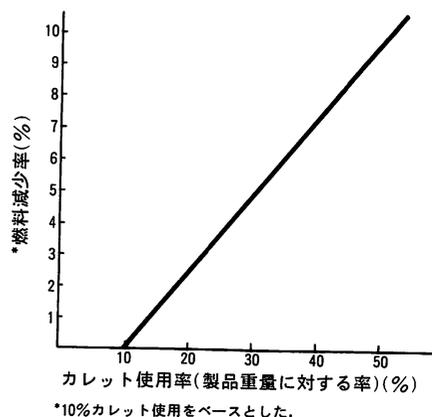


図-11 カレット使用率と燃料削減率

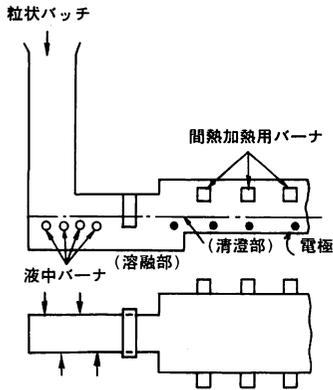


図-12 粒状原料；液中燃焼バーナー併用炉

サイクルカレットが主体になるので、異種ガラス、異物の混入を避けがたく、多量に用いると製品ガラスの品質に悪影響する。この面では選別技術の開発が望まれている。

なお、鉄鋼業から出るスラグに溶融促進の作用があるとされ、省エネルギー法の一つとして試験されているようである。

## 8. 省エネルギー型ガラス溶融炉

図-12は粒状原料、液中燃焼バーナーを組み合わせた炉で、清澄部には間接加熱バーナーと電極による直接加熱を併用してある。清澄部の排ガスを粒状原料の加熱に使用する場合には液中燃焼バーナーは酸素富化燃焼とするなどを行えばトータルとしては著しい省エネルギーが達成されると期待される。

## 9. おわりに

以上の方法は一般窯炉に共通なものとガラス炉特有のものに分けることもできる。

ガラス工場においても目的とする品質をもちながらトータルとして如何に安価に商品を製造するかへの努力が払われているが、燃料の高騰は省エネルギーの重要性を再確認したことになる。断熱の施行は従来の考え方を転換させたが、今後は省エネルギーのため大型投資、例えば蓄熱室の大型化、高性能化、燥炉管理用の電算機の導入なども課題になると思われる。

新しい省エネルギー技術の実用化にはガラス炉の特殊性を考えると基礎的な実験を積み重ねて有効性、信頼性を確認し、経済性の試算に必要な資料の整備などを行っておく必要があろう。

## 文 献

- 1) 日本製鋼協会技術委員会編：製造エネルギーから見た各種容器（昭和49年）
- 2) レイドロー・ドリュエ社資料による。
- 3) 特開昭53-6313
- 4) 吉川，他：セラミック 15〔5〕359（1980）
- 5) 森：セラミック 13〔3〕213（1978）
- 6) 加藤：第7回高温材料技術講習会テキスト 窯業協会，昭和49，12）
- 7) K.Becker, Ceramic Industry〔3〕24（1975）
- 8) 鈴木，他：窯業協会東海支部研究発表会講演要旨集（1980，11）
- 9) L.Penverthy et al., Glass Ind 41 274（1960）
- 10) J.Yamamoto et al., Glass Ind 49〔9〕491（1968）
- 11) 例えば長岡：工業加熱 13〔6〕18（1976）
- 12) 渡辺，他：セラミック 13〔3〕206（1978）

