

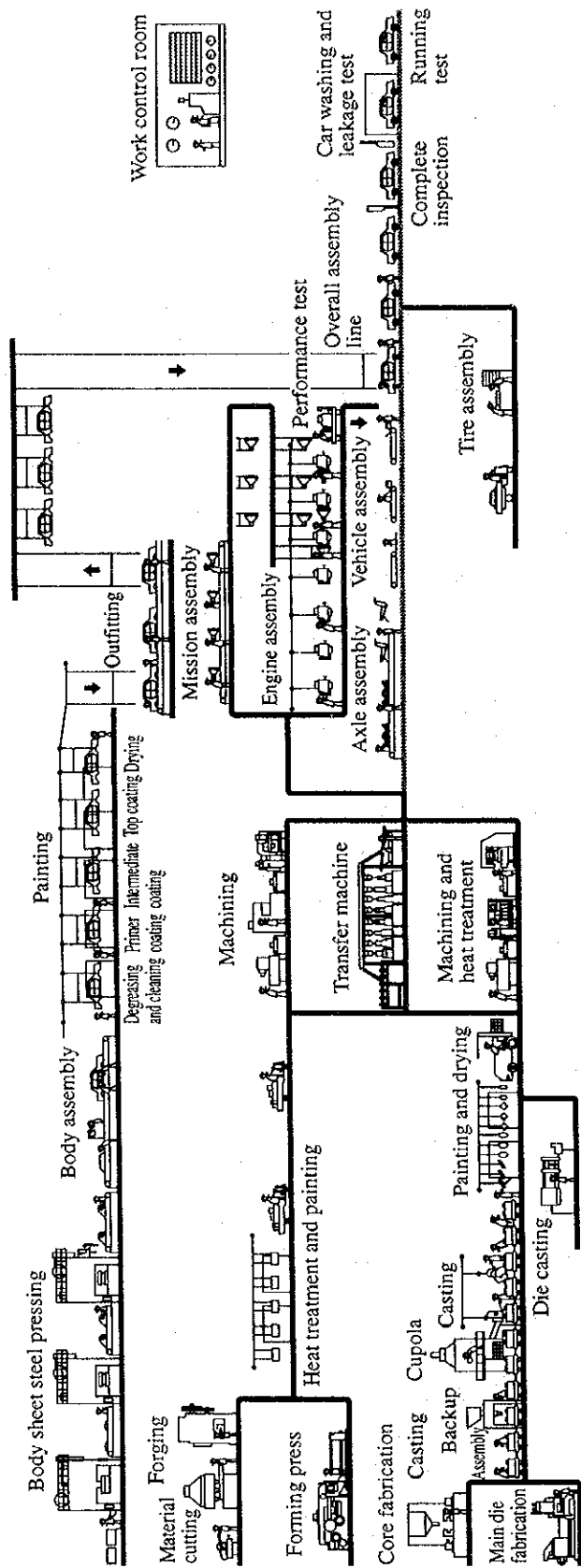
3. 機械工業の省エネルギー

3. 機械工業の省エネルギー

3.1 一般的な製造工程とエネルギーおよびエネルギー原単位

トラック製造業やトラクタ製造業などの一般の機械工業においては、Figure 3.1 のように素材から完成品に至るまで、いくつかの大きなプロセスに別れるが、Table 3.1 のように、それぞれのプロセスについて必ずしもメーカーが自社生産しているとは限らず、そのメーカーの得意とする技術やコストメリットなどを考慮して内製・外製を組み合わせている場合が多い。またそれぞれのプロセスで生産される完成品の原単位が全く異なることから、管理するエネルギー原単位も異なり、全てのプロセスを同一のエネルギー原単位で比較することは不可能と言え、プロセスごとのエネルギーを管理しながら、最終的な製品当りの総合原単位をとらえていくことが大切である。

Figure 3.1 General Production Process for Trucks and Tractors



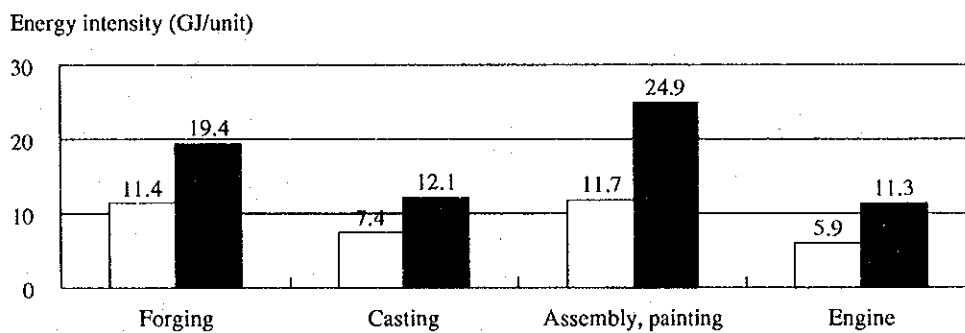
Source: "The Motor Industry of Japan"
by Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.

Table 3.1 Example of Internal/External Fabrication (Make or Buy) of Trucks and Tractors by Process

Manufacture	Internal/External fabrication (○ ... In-plant fabrication, × ... Purchasing/outsourcing)								
	Manufacture of material/part material				Intermediate process				Finishing Assembly
	Casting	Forging	Machining	Heat treatment	Instrumentation	Engine	Mission	Press	
Company A	○	○	○	○	×	○	○	○	○
Company B	×	×	○	○	×	○	○	○	○
Company C	×	×	○	○	×	×	×	○	○

参考までに主な工程別のエネルギー原単位例を (A) エネルギー管理の良い、(B) 管理が不十分な工場の2つで示す。

Figure 3.2 Energy Intensity by Process



以下、主な工程それぞれで使われるエネルギーの種類、および省エネルギーを進めるに当たっての管理すべき原単位について casting 溶解・機械加工・組立塗装工程についてまとめる。

一般的に、機械工業分野では鍛造や鋳造を外注製造している場合も多くこれらについては「鉄鋼業」のガイドラインを参考にしていきたい。

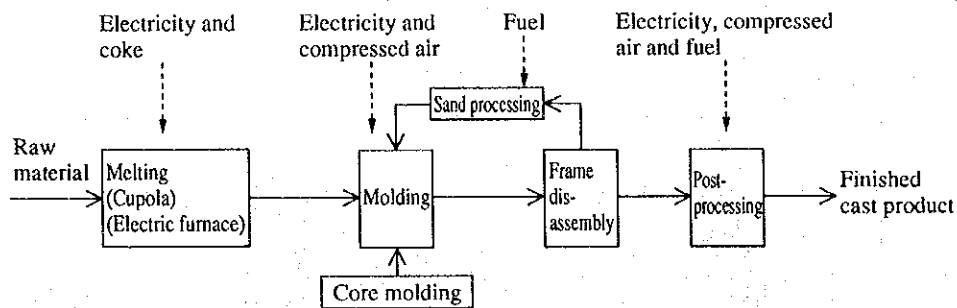
3.2 工程ごとの省エネルギーと管理指標

3.2.1 鑄造

(1) 一般的な工程の例

鑄造工程は、「溶解」「中子造型」「造型」「砂処理」「後処理」に分けられる (Figure 3.3) が、エネルギー消費の観点からは大きく「溶解」と「それ以外の工程」の2つに分けて管理すると良い。

Figure 3.3 General Casting Process and Major Energy Consumption by Process



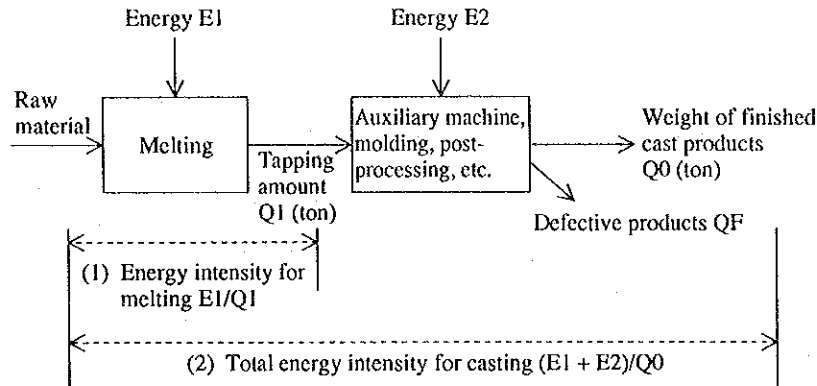
(2) エネルギー消費上の特徴

鑄造工程では、「溶解」に多量のエネルギーを消費する。溶解はキュポラ溶解が多く、コークスを使用する。また複数の材質を生産する場合には電気炉も使用されるが、この場合にも鑄造工程の電力のうち 60%近くが溶解電力である。造型、砂処理など溶解以外の工程においては、集じん機やファンなどの環境設備の消費が多い。またこれらの消費エネルギーは生産量による影響が少ない、いわゆる「固定エネルギー」であり、生産量が低下した場合には、鑄造エネルギー原単位を大きく低下させる要因となる。

(3) 工程内でのエネルギー原単位の考え方

上述のとおり鑄造の中でエネルギー消費の半分以上を占める「溶解」と、「鑄造全体」の2つの原単位管理が必要である。(Figure 3.4)

Figure 3.4 Energy Intensity of the Casting Process



a. 溶解原単位

溶解に消費されるエネルギーは生産量によって変動するエネルギー原単位として、重要であり、出湯量 1 トン当りに消費した溶解のためのエネルギー量で表す。電気炉の場合は、Figure 3.4 で $E1/Q$ (kWh/ton)、キュポラの場合は、コークス比 (%) で表す。管理目標としては、設備の種類によっても異なるが電気溶解の場合は、640kWh/ton 以下、キュポラの場合は、コークス比 12%以下が一般的である。

b. 鑄造総合原単位

造型・砂処理など溶解以外の工程では、集じん機やファンなどの環境設備や駆動用油圧ポンプなどで、電力の消費が大きい。これらは非生産時にも稼動し続けエネルギーを消費している場合が多く、固定的消費の多いエネルギーである。鑄造工程全体の管理としては、これらのエネルギーを消費してどれだけの鑄造完成品が生産できたか、という総合エネルギー原単位を把握して管理していく必要がある。この原単位は生産変動による影響がはっきり出てくるのが特徴である。

鑄造総合原単位 = (鑄造工程の総エネルギー) / (最終鑄造完成品重量)

で表し、Figure 3.4 では、 $(E1 + E2)/Q0$ (kJ/ton) である。

(4) エネルギー管理項目、省エネルギー項目

a. 管理面・運用面でのエネルギー管理項目、省エネルギー項目

1) 生産量に合わせたキュポラの操業 (集中稼働)

キュポラの実産計画と鑄造ラインの生産能力 (ライン速度) の両面から最適操業方法を決め、極力集中した生産体制にするのが良い。操業を連続して行えば、効率向上によってコークス比が低減でき、その分エネルギー消費が低減できる。

ただし、集中生産は必要分生産したら、次の生産までは完全閉鎖することが重要であり、中途半端な停止はかえって無駄なエネルギー消費を招く。

b. 設備改善等による省エネルギー

ここでは一般に行われている省エネ対策項目を中心に整理する。

- 1) 造形ラインでの油圧ポンプは、非稼働時はアンロード化する。
- 2) クーリングタワーのファンは、水温度レベルにより間欠運転する。
- 3) 集塵機は砂処理コンベアと連動して ON-OFF するか、または回転数制御を行い、負荷に応じた運転ができるようにする。
- 4) 排煙ファンなど、消し忘れの心配がある機器は「カレンダータイマ」を設置して自動的に ON-OFF 運転できるようにする。
- 5) 電力の立ち上げはライン稼働の直前に行う。

c. プロセス改善による省エネルギー

鑄造プロセスの詳細改善は、鉄鋼業のガイドラインを参照していただくこととし、ここでは「溶解」工程の比較を述べる。単にエネルギー消費だけでなく、品質やコストも含めて検討するのは言うまでもない。

1) 溶解炉の近代化

溶解炉は単にコストのみでなく、必要品質や操業形態によって下表の種類を使い分ける。キュポラは、一定した成分のものを連続して大量に生産する場合に総合効率の良さが発揮される訳であり、長期的に生産品目や生産

量を予測した上で最適溶解炉を導入する。
 溶解炉別のエネルギー消費の比較を Table 3.2 に示す。

Table 3.2 Comparison of Energy Resources and Consumption by Type of Melting Furnace

Type of furnace	Heat source		Energy efficiency per ton of iron	
Cold air cupola	Coke	150 kg	(4,520 MJ)	27 ~ 32 %
Hot air cupola	Coke	100 kg	(3,010 MJ)	38 ~ 45 %
Arc furnace	Electricity	550 ~ 660 kWh	(5,640 ~ 6,770 MJ)	59 ~ 65 %
Low-frequency furnace	Electricity	500 ~ 630 kWh	(5,120 ~ 6,460 MJ)	62 ~ 70 %
High-frequency furnace	Electricity	600 ~ 650 kWh	(6,150 ~ 6,660 MJ)	60 ~ 65 %

また、上の表をもとに、炉の変更を検討した例を以下に示す。

① 高周波炉の導入検討

前提条件	月間溶解量	1,600 トン
導入炉	高周波炉	3 トン×3 基
投資額	一式	約 7,500,000PLN
熱源	電力のため、受電は約 5,000kW 増加する。 (増加分 5,400kW、削減分保温炉電力 400kW) ただし、受電能力は十分にあるので既存受電設備で対応可能。	
操業方法	1 日当りの操業を注湯するラインと同じ 8 時間とした。 時間当り溶解量=9 トンとし、3 基に分割することで、保持炉を不要とする。	
エネルギー	現在キューポラ	
	溶解コークス	81,000GJ/y (1,600×0.14×12×30,144kJ/t)
	保持炉電力	8,700GJ/y (400kW×8h×22d×12m)
	合計	89,700GJ/y
	高周波炉の場合	
	溶解電力	118,000GJ/y (1,600×600kWh×12)
	エネルギー効果	+28,300GJ/y

(エネルギー量だけで見ると増加)

その他の効果

- ・品質が安定する。
- ・ドライ粉が使える (原材料の低減になる)
- ・メンテ費用の低減
- ・小型で済むため、設備スペースが少なくて済む (照明エネルギーその他の削減)
- ・キュポラのように、作業者の専門技能が不要となる。
- ・環境改善対策となる。
- ・操業時間を変えても、効率良く生産できる。

② 熱風キュポラの導入検討

前提条件	月間溶解量	1,600 トン
導入炉	熱風キュポラ	3 トン×3 基 or 10 トン×1 基 (Hot blast cupola with water cooling)
投資額	一式	約 9,500,000PLN (約 3 億円)
操業方法	現状と同等とした。(保持炉も同じ)	
エネルギー	現在キュポラ	
	溶解コークス	81,000GJ/y (1,600×0.14×12×30,144kJ/t)
	熱風キュポラ	
	溶解コークス	57,800GJ/y (1,600×0.10×12×30,144kJ/t)
	エネルギー効果	-23,200GJ/y

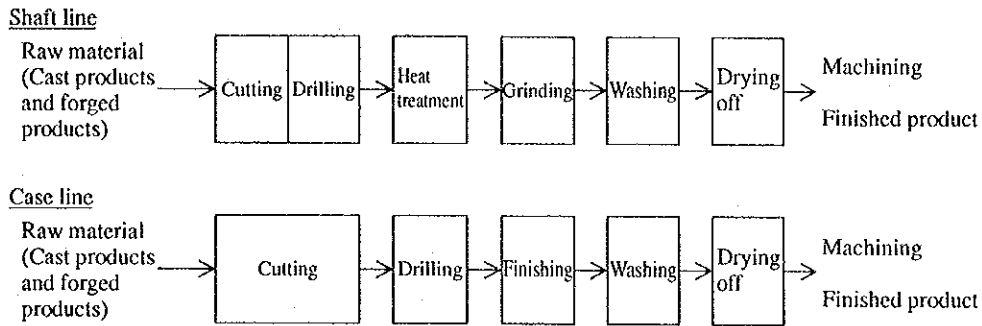
3.2.2 機械加工

(1) 一般的な工程の例

鑄造や鍛造工程から生産された素材の「切削」「研削」「洗浄」等を行う工程であり、部品ごとの素材投入から部品完成まで 1 つのラインで構成される場合が多い。

Figure 3.5 は自動車の部品加工ラインの例である。

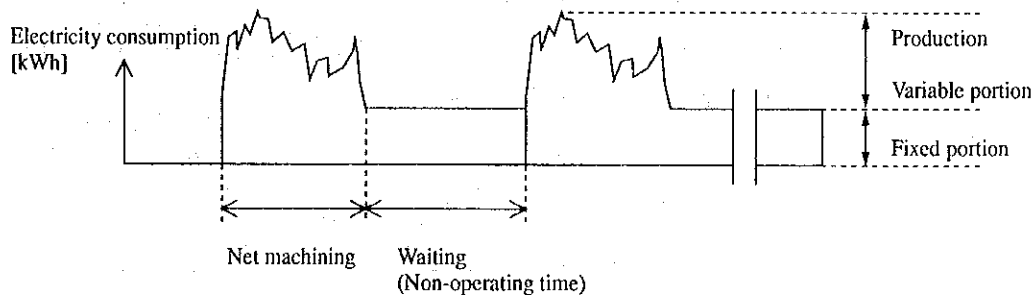
Figure 3.5 Example of Machining



(2) エネルギー消費上の特徴

ここで消費されるエネルギーのほとんどは動力用の電力と2次エネルギーとしての圧縮空気である。また各設備は油圧ポンプやクーラントポンプ、集じん機などの付帯設備を有し、Figure 3.6のように、これらが消費する電力も多い。また図からも明らかなように「固定分」のエネルギー消費が多いのも特徴である。

Figure 3.6 Electricity Consumption during 1 Cycle of Machining (For cutting machine)



(3) 工程内でのエネルギー原単位の考え方

Figure 3.6のように、非稼働時、すなわち次のワークを待っている間の消費電力も大きく、これらを含めて「製品1ヶ当りの総エネルギー」で管理される。

すなわち、1つのラインのエネルギー原単位は次のようになる。

$$\text{原単位} = Et / Pt \text{ (kJ/unit)}$$

Et = (一定期間中のライン全体の総消費エネルギー [電力、圧縮空気、燃料])

Pt = (一定期間中のラインの完成品数 unit)

ただし、ほとんどが電力消費で燃料は無視できるような量の場合は、簡易的に

電力のみの原単位 (kWh/unit) で管理していく場合もある。

また、現実的に1つのラインを総括した総消費電力の把握が難しい場合もあり、その場合はラインの中の標準的な設備1台のエネルギーを把握してその標準設備をもとに、ライン内設備台数や設備規模による換算比を決めてライン全体の消費を推測することも、1つの方法である。

(4) エネルギー管理項目、省エネルギー項目

a. 管理面・運用面でのエネルギー管理項目、省エネルギー項目

1) 「集中生産」と、「非生産時の徹底した閉鎖」

一般に機械加工においては、実際の加工とは無関係に消費される「固定分」のエネルギーが40～60%程度ある。この固定分とは Figure 3.7 の Q_w の部分であり、「クーラントポンプ」「油圧ポンプ」「潤滑油ポンプ」「ミストコレクタ」「油温調整機」「チップコンベア」「制御盤冷却ファン」などで、これらは設備の電源が ON したら、加工・非加工に関係なく運転される機器のエネルギーであり、本来は非加工時には不要なエネルギーである。

製品の生産エネルギー原単位 (I) は、これら非加工分も含まれるので下の式および Figure 3.8 のようになり、非加工時間 αt とその時の固定分エネルギー kE の積 Q_w だけ原単位は悪くなる。

$$\text{エネルギー原単位 } I = E(1 + \alpha \cdot k) \quad [\text{J/unit}]$$

Q_n : 正味加工1サイクルの消費電力量 ($E \times t$) kWh

Q_w : 待機中に消費する電力量 ($kE \times \alpha t$) kWh

E : 加工中の平均電力 kW

k : 加工中に対する待機中の平均電力比

t : 加工時間 minutes

α : 加工時間に対する待機時間比

Figure 3.7 Comparison between Energy Consumption during Machining and That during Non-machining

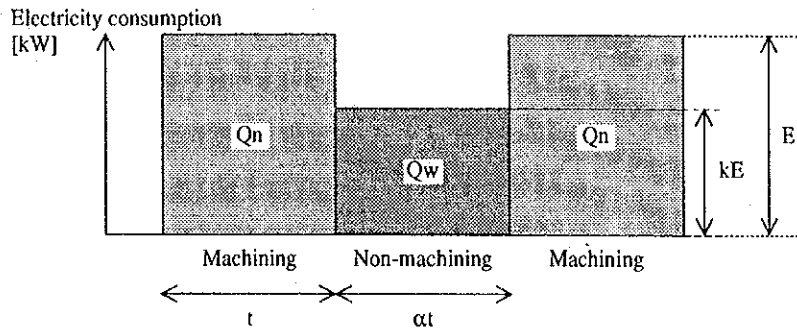
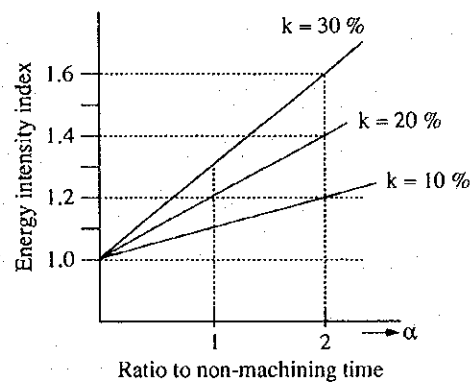


Figure 3.8 Energy Intensity Index including that during Non-machining



たとえば生産量が減って正味加工時間と同じだけのワーク待機時間が生じると $\alpha = 1$ であるから、固定分 k が 30%ある設備やラインでは原単位は、正味加工の 1.3 倍まで悪くなってしまふ。言いかえると生産量が少なくワーク待ち時間が大きいこの例では、集中生産して生産後は完全に電源を OFF することで、30%の省エネルギーが可能になる。このような集中生産の効果を算定するには、下記のような表を用いると良い。

Table 3.3 項目単位現状集中生産後効果

Item	Unit	Before improvement	After improvement by centralized production	Effect
(1) Production volume per month	piece	150	150	
(2) Machining time for a work piece (t)	min	30	30	
(3) Average waiting time (αt)	min	31	2	29
(4) Energy consumption during machining (Q_n)	kWh	12	12	
(5) Energy consumption during waiting for a work piece (Q_w)	kWh	4	0.2	-3.8
(6) Time during which equipment is ON	min	9,500	4,800	4,700
(7) Power consumption per month (7) = (1) × ((4) + (5))	kWh/m	2,400	1,830	-570
(8) No. of machines in a line	unit	20	20	
(9) Power consumption for the entire line per year (9) = (7) × (8) × 12	kWh/y	576,000	439,200	-136,800
(10) Electricity unit price	PLN/kWh	0.16	0.16	
(11) Electric charge per year	PLN/y	92,160	70,202	-21,958

2) 設備の機能維持 (故障によるロスタイムの低減)

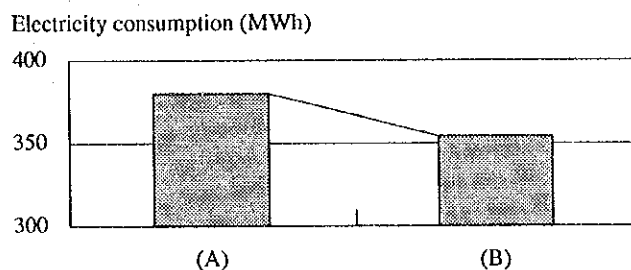
設備が故障すれば、その設備だけでなく前後の設備やライン全体まで停止する事になり、その間の固定エネルギーが無駄となる。設備をしっかりとメンテナンスして、故障停止させないことが大切であり、これはエネルギーコストだけでなく労務費の無駄などいろいろな面での無駄防止として重要な活動である。機械加工においては、設備故障による休止時間比率 (休止率) を、数%以下に抑えるような設備保全体制が必要である。

Table 3.4 と Figure 3.9 に部品加工工場における設備故障休止の違いによるエネルギー消費量の差を示す。

Table 3.4 Relationship between Rate of Downtime due to Troubles and the Difference in Monthly Power Consumption

	Troubles occur frequently	Troubles occur less frequently	Trouble reduction effect
Rate of downtime due to troubles	20 %	5 %	
Power consumption per month	380 MWh	354 MWh	-26 MWh

Figure 3.9 Relationship between Rate of Downtime due to Troubles and Difference in Monthly Power Consumption



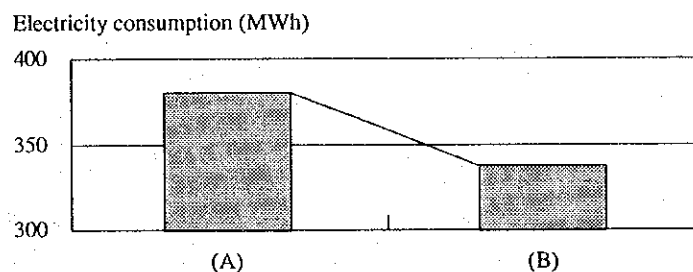
3) 設備の品質安定化 (設備不良による製品不良の低減・・・歩留まり向上)
 設備トラブルによって製品不良が発生するとその前の工程で消費してきたエネルギーは全て無駄となる。そればかりでなく、材料コストや作り直しの人件費など大きな無駄が発生してしまう。1ヶの製品不良が発生した場合の損失費を決めて、不良発生部門に請求できるようなくみにして、不良低減の意識を持たせることが有効である。

Table 3.5 と Figure 3.10 に部品加工工場における製品不良発生の違いによるエネルギー消費量の差を示す。

Table 3.5 Relationship between Defective Product Rate and the Difference in Monthly Power Consumption

	Many defective products occur	Few defective products occur	Effect of defective product reduction
Defective product rate	20 %	5 %	
Monthly power consumption	380 MWh	337 MWh	-43 MWh

Figure 3.10 Relationship between Defective Product Rate and the Difference in Monthly Power Consumption



4) 工程間の生産調整 (無駄のないエネルギー配分)

いろいろな工程が同時に稼動すれば、電力や圧縮空気、水など大量のエネルギー供給が必要となり、エネルギー供給設備の能力も大きくなる。

また同時に生産が低下すれば大きなエネルギー供給設備から少ないエネルギーを供給することとなり、効率が低下する。また電力契約においては、ある瞬間のために基本料金の高い契約をすることはエネルギーコストを増加させるので、できる限りエネルギー消費を平準化するような生産計画が望ましい。そのためには、エネルギー管理部門はエネルギーコストの低減を目的として、工場全体の生産調整にも関与すべきである。

5) 生産の同期化

生産を同期化させるということは「必要なものを、必要な時に、必要な量だけ」生産することであり、それによって余分な在庫が減る。

余分な在庫を持てば、スペースが必要となり、そこに照明・空調などのエネルギーや、施設などの維持費用がかかる。さらには集中生産の場合万一製品不良が発生しても次工程で発見された時には既に連続した大量の不良が発生してしまっているなど、マイナス面が多く、生産の同期化は大きなメリットがある。

6) 安価なエネルギーの選択

電力は期間や時間帯によって電力単価が異なるのが一般的であり、しかもその単価差はかなり大きい。同じ生産をするなら少しでも安い電力単価を選択すべきであり、特に電力消費の大きい設備については、この活用によって消費エネルギーは同じでも、30~50%の電力コスト低減が図れる。またこのことは電力供給側に対しても負荷の平準化による安定供給のために貢献できるものである。

7) 作業の標準化・・・人のミスによる製品不良の低減

作業する人によって作業のスピードや正確さが異なれば、エネルギー消費も異なってくる。最適な作業方法を決め、標準化することで、一番早いスピードで、かつ正確に生産していくことはエネルギー原単位の改善そのものである。作業者の意識を高め、不良低減を協力で推進するには、作業者

別に出来高や不良率を把握できるようなシステムを採用することも大切である。

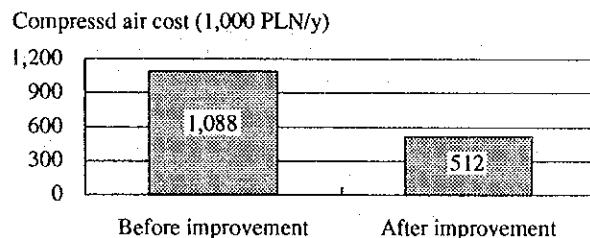
b. 設備改善等による省エネルギー

1) 圧縮空気漏れの低減

機械加工におけるエネルギーロスの代表的なものに圧縮空気漏れがある。原因の多くは、ホース接手などの接続部からの漏れであるが、個別に見ると大きな漏れ量ではないため、放置されている場合が多い。しかしこの圧縮空気漏れは生産中にも発生しているため、1年間では多大なコストとなるので、基本的な省エネルギー活動として漏れのチェックおよび防止は非常に重要である。漏れによる損失エネルギー量は、夜間や休日など設備を使用していない時のコンプレッサ電力消費量や元バルブを閉めた後の圧力低下の速さによって圧縮空気の漏れ量共々把握できる。最も簡単に把握できる方法は、全く稼働しない休日に各圧縮空気のヘッダー元バルブなどを閉めずにおいて、生産していない時に実際に消費しているコンプレッサ電力消費量を測定することである。この測定結果は平日の生産時にも常に漏れている分なので、24時間連続して発生する損失エネルギーとして把握することができる。

実際に、大量の圧縮空気漏れが放置されていた工場の改善効果例を Figure 3.11 に示す。

Figure 3.11 Energy Consumption Effect of Air Leakage Measures



(例) 鍛造工場

面積：50,000m²

圧縮空気単価	0.02PLN/m ³
対策前	55×10 ⁶ m ³ /y
対策後	29×10 ⁶ m ³ /y

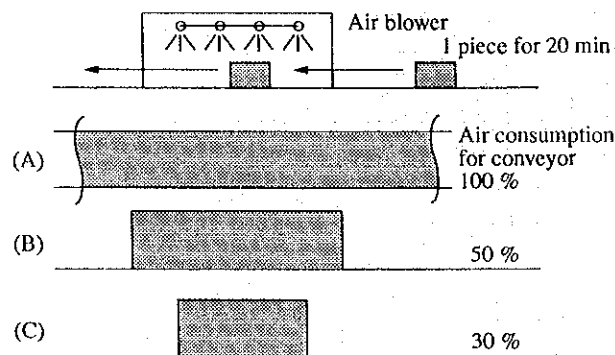
2) エアブローの効率化

洗浄後の水切りなどでは大量の圧縮空気を消費する。しかし本当に水切りに寄与した圧縮空気は以外に少なく、半分以上は空中に放出されているだけである。この何も役に立たず放出されている圧縮空気を低減する方法には下記があり、30%~50%の圧縮空気低減が図れる。

① ワンサイクルブロー

エアブローすべき箇所だけをブローし、あとはエアを停止することが重要で、ワークが固定される場合はロボットで正確に必要な箇所のみブローする。ワークが移動する場合は、ワークを正しく検出して、ブロータイミングを正しく設定することが大切である。エアブロー装置にワークが入った時にブロー開始し、装置から出てきたらエアブロー停止するサイクルは、装置内で無意味なエア放出もあり、まだ完全とは言えない。ブローすべき箇所がノズルの先を通過するタイミングを適確にとらえることが、成果を左右する。一般的に部品のエアブロー時間は5~10分程度が多いので、1日に数百ケも加工する場合以外は、待機時間のほうが大きく、連続ブローの設備においては、圧縮空気消費量を50%以上低減することができる。Figure 3.12は、ワンサイクルブローによる圧縮空気消費量の比較例である。

Figure 3.12 Air Consumption during Air Blowing



(条件)

生産数	20分に1ヶ
エアブロー装置通過時間	10分
正味ブロー有効時間	6分

- (A) ワークの有無に関係なくエアブローしている場合
- (B) 装置を通過する時のみブロー
- (C) ノズルの下を通過する時のみブロー

② 省エネノズルの採用

水切りをしたい箇所だけを集中して強力にエアブローするためには小径で方向性の良い省エネルギー型ノズルを用いると良い。(Figure 3.13) 圧縮空気吐出量はノズル径の2乗に比例するので、最少の穴径・最少のノズル数でブローすることが有効である。

Figure 3.13 Shape of an Air Blow Nozzle

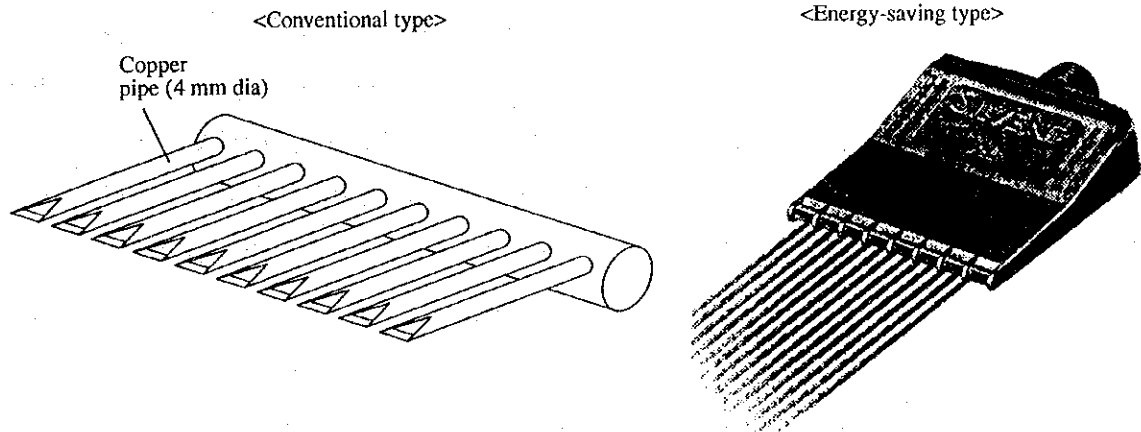
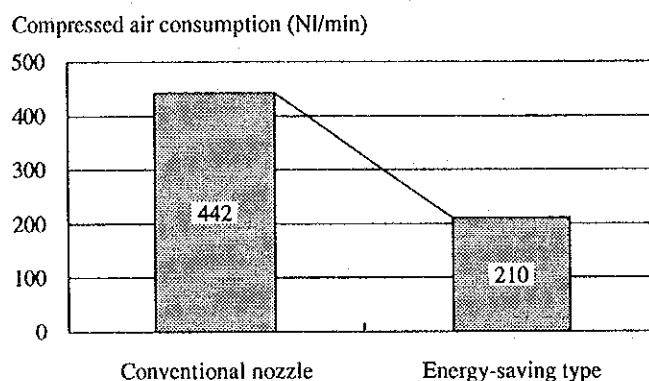


Figure 3.14 は従来の銅管ノズルと最近の省エネルギー型ノズルによるエア消費の比較で、エネルギー消費 50%以下だけでなく、騒音レベルも低減する。

Figure 3.14 Comparison of Compressed Air Consumption between a Conventional Copper Nozzle and an Energy-saving Nozzle



(比較条件)

銅管直径	3mm×2本
圧力	0.3MPa

3) 設備故障の低減

前項でも述べたが設備故障は前後の工程まで停止させる場合が多く、大きなエネルギーロスの原因となる。故障の多い設備の故障原因を良く解析し、改善していくことが大きな効果を生む省エネルギー活動でもある。

改善にはコストがかかるが、(4)-a.-2) の設備の機能維持による省エネのところでも述べたような大きな効果が期待できる。その他にも労務費の低減・修繕費用の低減などが図れる。

4) 付帯設備の容量・能力の適正化

加工設備の付帯設備には、油圧ポンプ・クーラントポンプ・集塵機・チップコンベアなどがあり、これらで消費するエネルギーは加工中と待機中合わせると、全体の70%近くにもなる。これら付帯設備の選定にあたっては、十分に必要容量を検討し、次の項で述べる節電回路などと合わせて、極力付帯設備のエネルギー消費を抑えることが大切である。何の省エネルギー対策がされていない設備と、省エネ対策をしてある設備では30~50%のエネルギー消費の違いが発生する。

5) 付帯設備も負荷の変動に応じた制御を行う

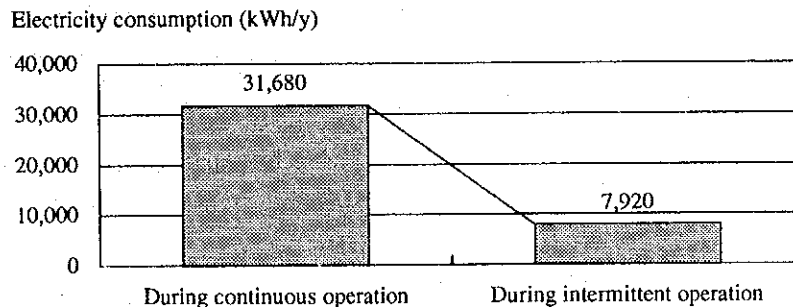
付帯設備の容量を適正化しても、必要ない時に運転してはやはりエネルギー消費は無駄となる。

それぞれに適した制御の方法があり、主なものを下記に示す。

付帯設備名	省エネの制御方法
チップコンベア	排出される切粉の量に応じて間欠運転するか、または回転数制御を行う。
油圧ポンプ	待機中は油圧ポンプを停止させる。または小型油圧ポンプを付けて切り替えて圧力を保つ。
クーラントポンプ	主軸の回転に連動させるなどして、切削中のみポンプを ON するように制御する。
集塵機	主軸の回転に連動させるなどして、切削中のみ集塵を ON するように制御する。

例として、24 時間連続運転していた 5.5kW のチップコンベアモーターを切粉の発生量に合わせて 5 分 ON-10 分 OFF という間欠運転にした場合の効果を Figure 3.15 に紹介する。

Figure 3.15 Comparison of Power Consumption for Chip Conveyor



6) 個別設備毎にエネルギー原単位管理して省エネルギーの意識を高め、改善に結びつける。

設備の省エネルギー改善を行うためには、その設備でのエネルギー消費の無駄を把握することから始める。また改善後の効果を把握するためにも消費の大きい主要設備には、電力量計などを設置するべきである。

そして代表的な製品 1 ケ当りの生産に必要なエネルギーは把握しておくべきである。

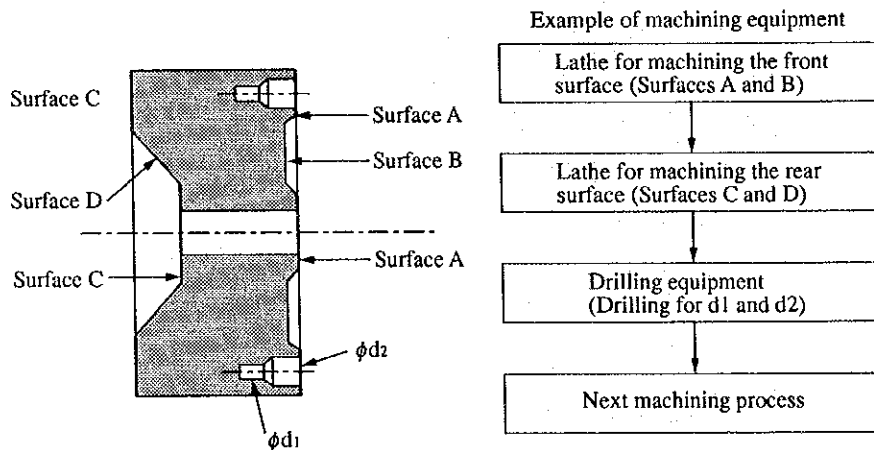
具体的な管理方法をいくつか紹介する。

- ① 新しく設備を導入する場合、電気容量が 50kVA 以上の設備には電力量計 kWh メーターを設置するよう、設備仕様書に織り込む。
- ② 新しい設備の検収には、代表製品を 1 ケ加工した時の消費電力量を提出させる。
- ③ 加工中や待機中という状態を作業者に知らせて、無駄な待機時間が発生しないように、状態表示ランプを設置する。

c. プロセス改善による省エネルギー

設備そのものでなく、素材や加工方法を工夫することで工程を少なくすることができる。設備の消費エネルギーの減少だけでなく、生産スペースの縮小による暖房や空調エネルギーの低減が可能となり、更には建屋・土地の有効利用が図れ、効果は大きい。以下、Figure 3.16 の部品加工を例にして改善内容を紹介する。

Figure 3.16 Example of Machining Parts and Machining Process (Flywheel)



1) 材料改善による工程削減

鋳物素材の品質向上など、加工前の材料を改善することによって工程を減らすことができ、その分エネルギー消費を低減できる。

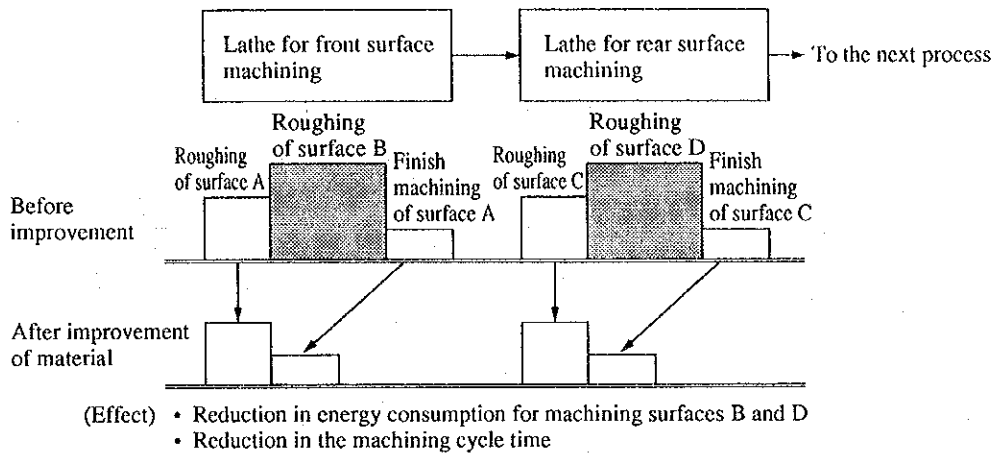
例えば、Figure 3.16 のようなフライホイールの加工において、従来は B、D の面まで加工していたものでも、鋳物表面がきれいであれば加工する必

要がないため、加工工程を省略でき、設備も少なく済む。

また残った加工箇所においても、素材品質を安定させて削り代を少なくすれば、工程削減や加工のサイクルタイムが短縮でき省エネルギーになる。

(Figure 3.17)

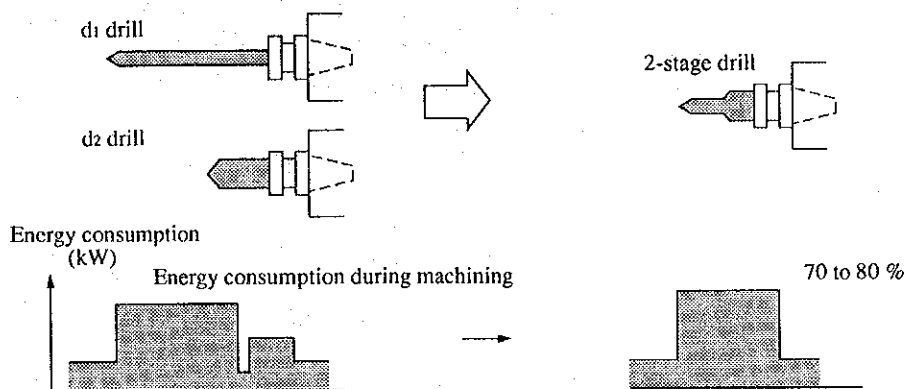
Figure 3.17 Energy Conservation through Reduction of Processes by Material Improvement



2) 加工方法の改善による工程削減

加工が必要な工程でも、加工を工夫して2回の加工を1回で完了させれば消費エネルギーは半分で済む。例えば Figure 3.16 の D では、従来は径 d_1 のドリル加工の後、径 d_2 のドリル加工をしていた。これを Figure 3.18 のように工具を改善して2段の径を持つ1本ドリルを使用すれば、1回の加工で済む。

Figure 3.18 Reduction of Processes by Improvement of Tools



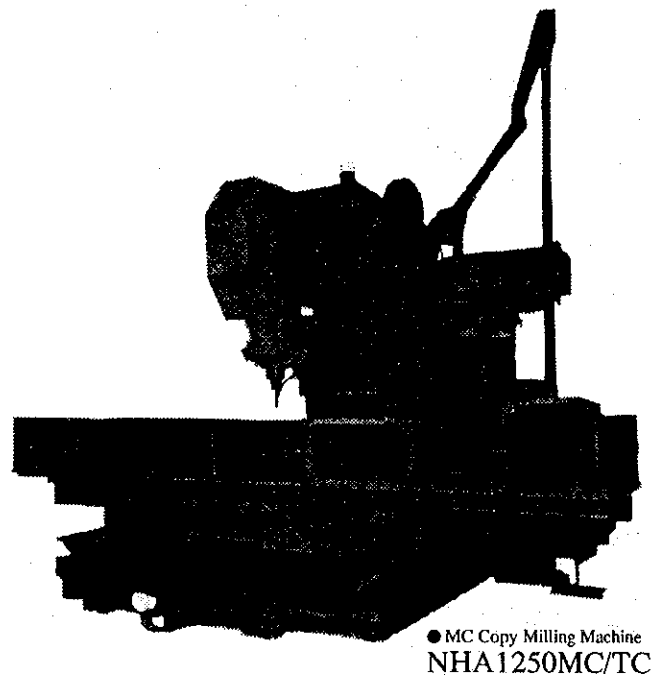
このような改善は下記のようにいろいろあるので、工程設計を行う生産技術者と検討して、品質を保証しながら最適工法を検討する。

- ① 要求される最小限の品質を明確にして必要以上の仕上げをしない。
(最終仕上げまでの加工工程数を減らす)
- ② 工具を改善して1回の削り代を大きく取れるようにする。
- ③ 工具・工法を改善して同時に複数工程分の加工を行う (多軸穴明け等)

3) 複合工程加工設備の導入による設備台数削減

最近では、1台の設備で穴あけから旋削など複数の加工工程が可能な設備が開発されている。(Figure 3.19) これらを導入することは省エネルギーだけでなく、下記のような効果がある。特に生産量が少ない場合には効果が大きい。

Figure 3.19 Combined Machine Tool



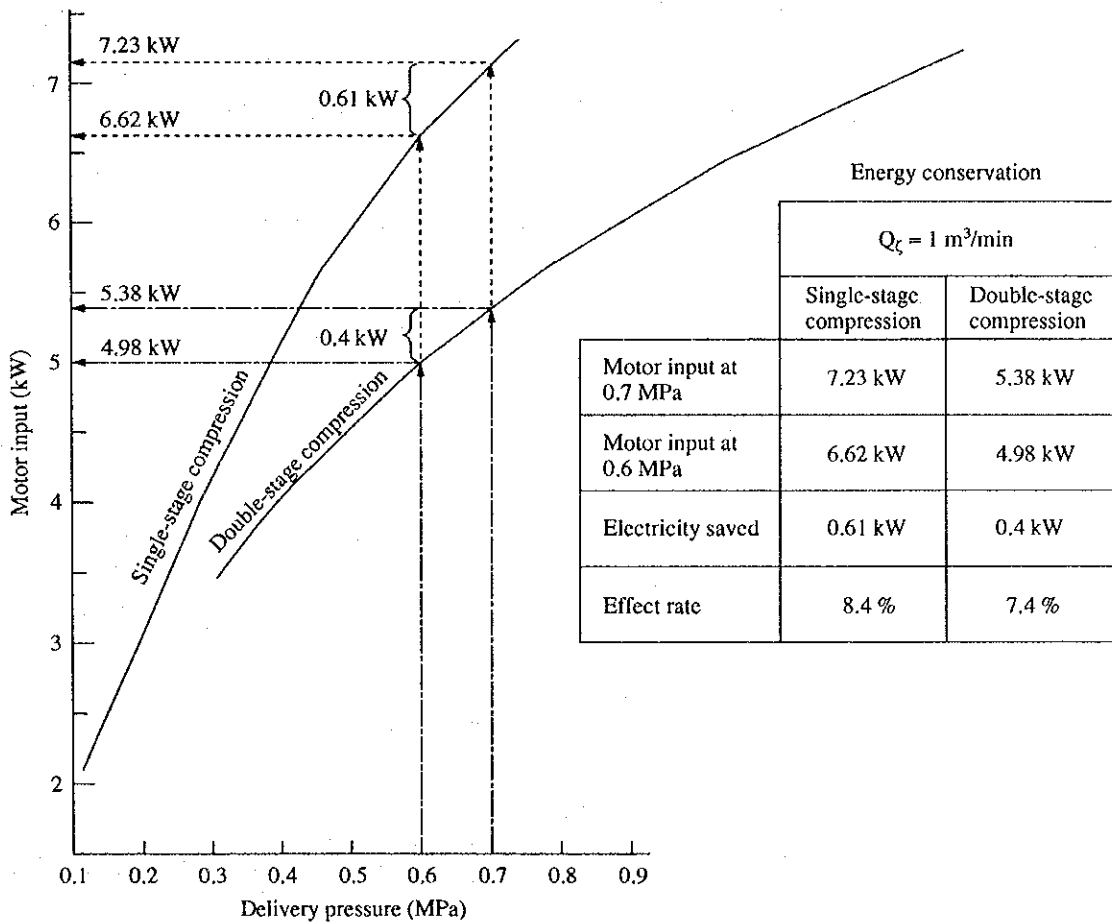
- ① 設備台数が少なくて済み、エネルギー消費が低減できる。
- ② 設備台数が少なくて済み、生産スペースが縮小できる。
- ③ 各設備の稼働率が向上する。

- ④ 長時間の無人運転ができるようになり、暖房エネルギーの低減が図れる。また省人化にもなる。
- ⑤ 品質管理がやりやすくなる。

4) 圧縮空気圧力の設定変更による省エネルギー

工場圧縮空気の設定圧力を 0.1MPa 下げると、コンプレッサの消費電力は 7～8%低減する。(Figure 3.20) したがって圧縮空気は必要最低限の圧力で使用することが望まれる。しかし、圧縮空気の圧力を下げると、エアシリンダの作動不良やエアネジ締め機のトルク低下など様々な問題が予想される。事前にエアを使用している部門と協議し、かつ 0.01MPa 程度ずつ少しずつ下げていって問題が発生しないことを確認しながら使用圧力を変更していくことが重要である。

Figure 3.20 Energy Required for Generating Compressed Air of $Q = 1 \text{ m}^3/\text{min}$



5) 品質を向上させて「工程を廃止」する省エネルギー

生産工程の中には、本来なくても良いが「品質」を保つために余分に設置している工程がある。工程中間に必要な以上の洗浄機があったり、荒加工と仕上げ加工の間に「中加工」があったりする。これらは前工程での品質が確実に確保されれば廃止できるものが多く、品質向上は省エネルギーにも大きく貢献する。

3.2.3 組立（エンジン組立、車体組立）・塗装・乾燥工程

(1) 一般的な工程の例

組立には、エンジンやミッションなどのコンポーネント組立と車体を完成させるボデー組立があり、メインラインとユニットごとのサブ組立ラインから構成され、エネルギーを消費する設備としては個別の設備とそれらを結ぶ搬送ラインで構成される。

また塗装工程は、「乾燥炉」「塗装ブース」という大型の汎用設備複数台つながって構成される。

それぞれの代表的な工程の例を、Figure 3.21 と Figure 3.22 に示す。

Figure 3.21 Overview of the Assembly Process

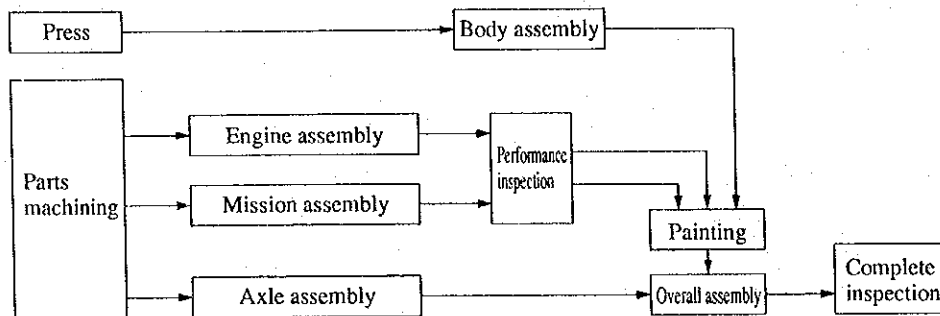
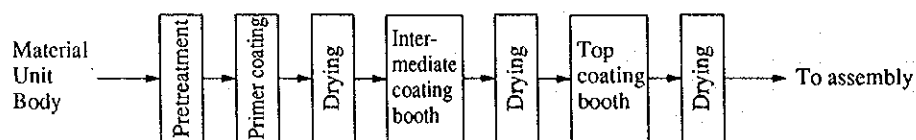


Figure 3.22 Overview of the Painting Process

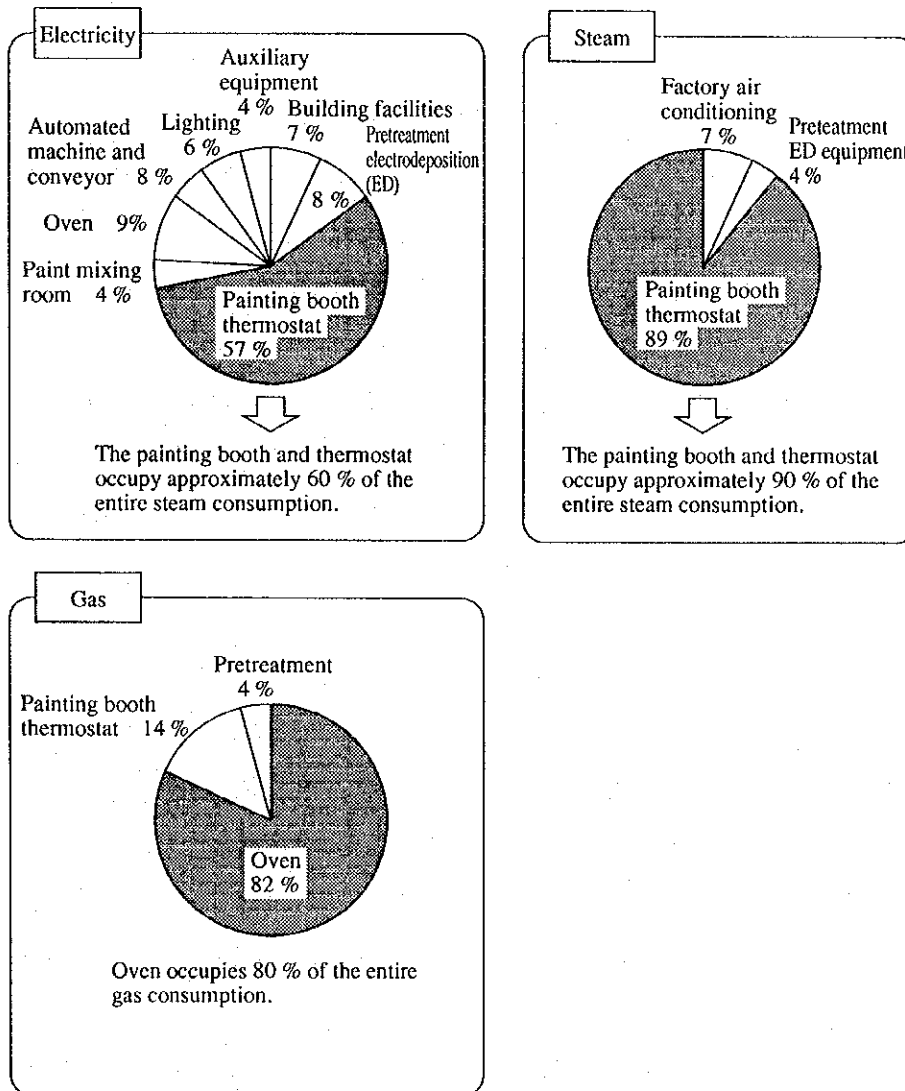


(2) エネルギー消費上の特徴

組立工程の消費エネルギーはほとんどが電力であり、大きくは溶接用とその他の設備動力用がある。溶接用電力はほぼ生産量に比例しているが、設備動力用は空調・照明・換気・冷却水ポンプなどで、非稼働時にも消費されるものが多く、改善の着眼点が多い。

また塗装工程では電力・蒸気 (温水)・ガスが主な消費エネルギーである。それぞれのエネルギーがどんなところで使われているかを示したのが Figure 3.23 である。

Figure 3.23 Percentages of Energy Consumption by Equipment
(Example of Company A in the cold region)



Source : " Energy Minimizing Manual in TOYOTA ", The Energy Conservation Center, Japan

(3) エネルギー原単位の考え方

一般的にトラクタやトラックなどの車両を組み立てる工程や塗装工程では、エネルギー原単位は「製品 1 台当たりの原単位」で管理される。工程で使用される生産設備は割合と大型の汎用設備が多いので、電力消費など測定しやすいが、空調・換気・照明など小規模で広範囲な設備もあり、工程全体の本当のエネルギー消費量を把握するのは簡単ではないが、組立や塗装工程が設置されている建屋単位でのエネルギー消費量をベースとした製品 1 台当たりのエネルギー原単位は把握しておく必要がある。

(4) エネルギー管理項目、省エネルギー項目

a. 管理面・運用面でのエネルギー管理項目、省エネルギー項目

1) 非稼働時の設備停止徹底による省エネルギー

前にも述べたように、組立や塗装工程でのエネルギー消費の特徴は「非稼働時にも消費される固定分の設備が多い」ことである。

言い換えれば、稼働時と非稼働時を検知して、非稼働時には徹底して設備を停止することが一番大きな省エネルギーとなる。

最も理想的なのは、集中生産をすることで非稼働時間を少なくし、必要生産量が確保できたら、空調・照明・換気も含めて完全に設備を OFF することである。これについては、前項 3.3.2 の (4)-a-1) と同様であるので前項を参照していただきたい。

2) 設備の最適運転の教育

作業する人は、与えられた環境、すなわち作業温度や明るさが過剰な場合でも、「無駄」ということを意識しないで作業に専念する。

空調や照明は設備が設置されている分だけ運転する習慣になっている。しかし以下に述べるような「省エネの意識付け」により、省エネルギー活動を推進するよう教育していくことが大切である。

- ① その日の温度や明るさに応じて照明、空調を適正レベルとするよう調整する。

- ② 空調・換気・照明・ポンプなど、できるだけ生産開始の直前に起動し、生産が終わったらすみやかに停止する。
- ③ 照明など作業者を対象とした設備や機器は、そこを離れる場合はこまめに消す習慣をつける。
- ④ 圧縮空気漏れはエネルギーのロスだけでなく、ネジ締め工程などではトルク不安定の原因にもなり、品質にも影響するので放置しないよう教育する。
- ⑤ 時間外や休日の一部操業は、空調・照明などのエネルギー損失が多いことを理解させ、部分稼働を極力少なくする。

b. 設備改善等による省エネルギー

1) 乾燥炉の出入りロスキマを少なくする

乾燥工程では、出入り口からの「放熱」というロスが大きく、この出入り口のスキマを小さくすることで、省エネルギーが図れる。

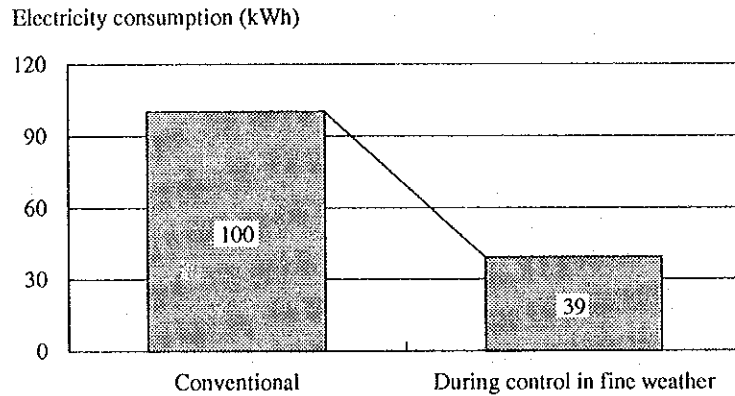
具体的には、下記のような方法で対策する。

- ① ワークの形状に合わせて、最小のスキマにする。
- ② 自動開閉式のトビラを設置し、ワークが通過する時だけ解放する。

2) 乾燥エアブロー設備の自動制御 (天候に応じた制御)

車両のワックス塗装ムラ防止のためのエアブローは、一定運転されている場合が多いが、本当に必要な風量は晴天の日と雨天の日では異なるものである。品質を確認しながら「晴天」「曇天」「雨天」時の乾燥に必要な風量を把握し、回転数制御を行って、60%の省エネを図った例もある。(Figure 3.24)

Figure 3.24 Electricity Consumption for Air Blow Motor for Drying



3) エアブローの短縮

組立工程での洗浄後エアブローや乾燥工程でのエアブローなどは、加工工程での対策と同様、エアブロー設定時間の短縮やブロー開始検出位置の変更による最小限ブローを行うことで省エネが図れる。

本件に関しては前項 3.2.2 (4)-b.-2) を参照願いたい。

4) 設備の汎用性向上による設備台数削減

組立前洗浄などでは、エンジン・ミツション・その他の部品などワークの形状や大きさに合わせて別々の洗浄機が設置されているケースが多い。しかしこれらの設備はコンベアやノズルなどを改善することによって、1台の洗浄機でカバーできる場合もあり、設備台数低減による省エネルギーが期待できる。さらに、設備スペースの縮小や設備稼働率の向上など付帯効果も大きい。

c. プロセス改善による省エネルギー

1) 工程間距離の短縮

組立や塗装は一般的にはコンベアなどによって一定速度または一定時間ごとに進んでいく工程である。工程間や設備間隔を長くすると、空調・照明・換気などの対象空間が増えて無駄なエネルギーを消費するだけである。このような組立ラインは「作業性」や「安全性」「品質」を確認して、できるだけ工程間の距離をつめることで省エネルギーを図るべきである。

Figure 3.25、および Figure 3.26 は、組立ラインの 10 工程を 5m 間隔から 2m 間隔に詰めた場合の効果例である。

Figure 3.25 Example of Rearrangement for Reduction of Assembly Process Interval

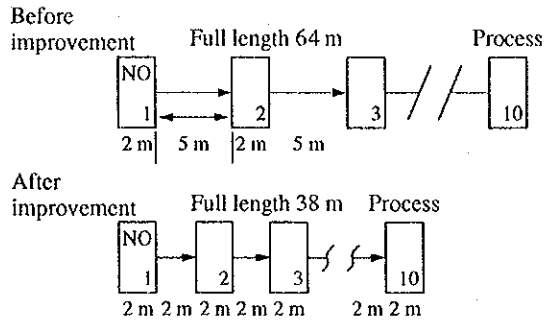
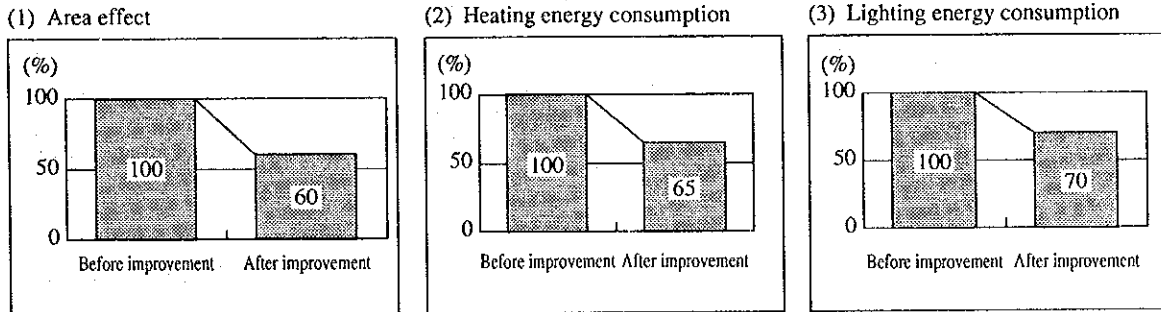


Figure 3.26 Example of Improvement Effect of Rearrangement for Reduction of Assembly Process Interval



3.3 機械工業全体に共通した省エネルギー項目

(1) 管理面・運用面でのエネルギー管理項目、省エネルギー項目

a. 組織的な省エネルギー活動

機械工業というのは、鉄鋼や化学に比べて直接作業者が多く、「作業者の意識と作業者の技術」によってエネルギー消費が左右される、という特徴がある。つまりエネルギーを有効に使うためには、「組織的な省エネルギー活動」が必要であり、この効果は費用を投じて行う個々の設備改善やプロセス改善よりも大きい。

一般的には「全員参加による省エネルギー活動」などと称されており具体的には以下のような活動をして、省エネルギーの意識付け・省エネルギーを目的とした設備改善やプロセス改善を支えるものである。

省エネルギーチームでの実施事項

- 1) 使用部門および供給部門の両方で、それぞれエネルギー管理責任者を決めて、効率良いエネルギー利用をさせる。
- 2) エネルギー管理するための「指標」を決め、毎月の結果把握・公開をする。
- 3) エネルギー消費のパトロールを行い、無駄の摘出や改善指示を行う。
- 4) エネルギーを効率良く使用するための従業員教育をする。

また活動を進めるに当たっての着眼点を下記に紹介する。

- 1) 「やめる」(例：仕上げの不要な面の加工)
- 2) 「減らす」(例：冷却水の流量・照明機器の数)
- 3) 「下げる」(例：工場圧縮空気の設定圧力・乾燥設定温度)
- 4) 「止める」(例：晴天時の照明・休日の圧縮空気供給)
- 5) 「替える」(例：電力からガス変更・ワークの材質・炉の断熱材材質)
- 6) 「直す」(例：圧縮空気漏れ)

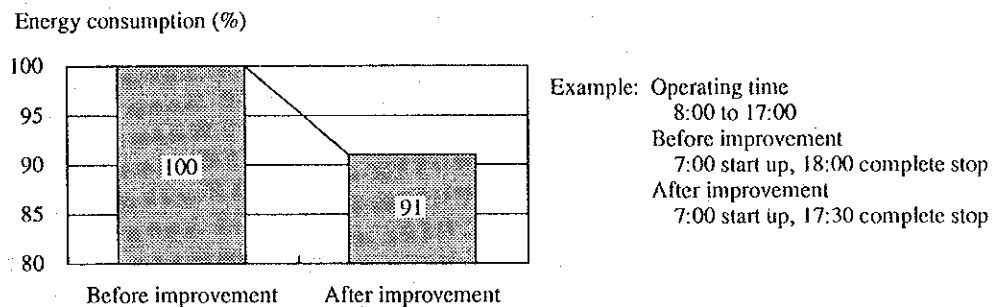
(2) 設備改善等による省エネルギー

a. 各施設・設備の立ち上げ時間・停止時間の適正化

ポンプ・コンプレッサ・空調・照明・換気設備などの週初めの立ち上げは、実際の必要時間よりは早めに行っている場合が多い。

これらは全て稼働直前に立ち上げるよう「カレンダータイマー」を設置して管理すると省エネになる。Figure 3.27 は、1 シフトのみの操業の場合で立ち上げと停止を 30 分ずつ縮めた場合の例で、約 9%の省エネルギー効果がある。

Figure 3.27 Energy Conservation by Improvement of Start-up and Halt Time



(例)

操業時間 8:00～17:00

従 来：7:00 立上げ、18:00 完全停止

改善後：7:30 立上げ、17:30 完全停止

2) 排水処理施設の省エネルギー

機械工業では、塗装ブース排水の処理などのために「排水処理施設」で消費されるエネルギーは大きい。特にブロワーや圧縮空気による曝気槽でのエア消費は多量である。これらは攪拌方式の改善や散気管構造の改善により、消費空気量を 20～40%位低減できる。

最新の排水処理技術に注目して改善内容を検討するとよい。

3) コンプレッサの最適制御 (最適タイプと台数制御)

機械工業においては、電力消費のうち、10～15%位が圧縮空気を作るためのコンプレッサ電力である。

コンプレッサの種類には「レシプロ」「スクリーン」「ターボ」タイプがあるが、現在はスクリーン型とターボ型が主流である。

この2種類には下記のような特徴があり、負荷の変動を考慮した組み合わせにより、効率良いエネルギー消費で運転できる。

① スクリュー型

空気消費量が下がれば、モーター消費電力も下がるので、負荷の変動が大きい場合に適している。

② ターボ型

大容量ではスクリーン型よりコスト面で有利で音も小さいが、空気消費量が減ってもエネルギー消費は一定なので、空気消費量変動には適しない。

Figure 3.28 は生産工場における圧縮空気消費量の変動、Figure 3.29 はコンプレッサの組み合わせと消費電力の比較例であり、適正な組み合わせと台数制御を行った場合は、約19%位の省エネが図れる。

Figure 3.28 Fluctuation in Air Consumption in a Factory

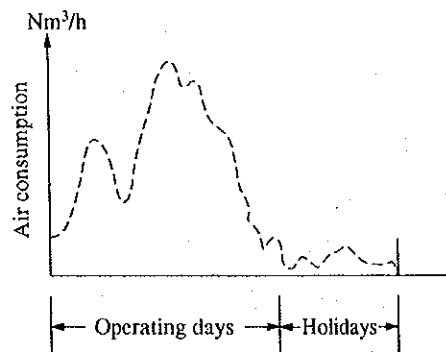
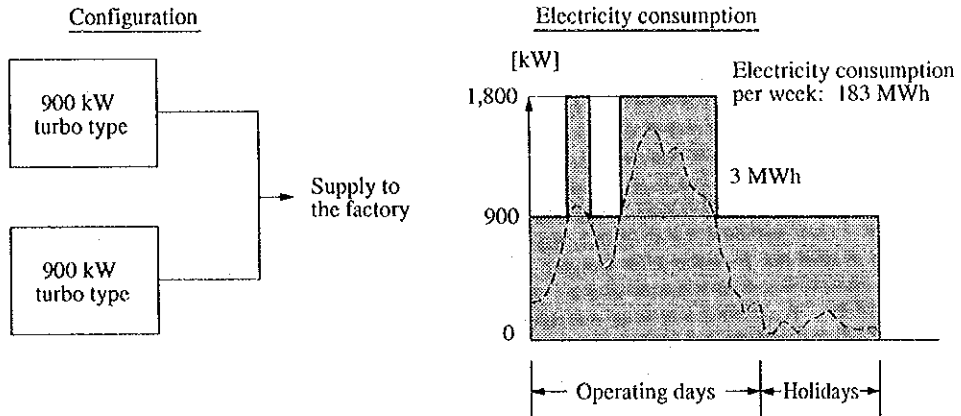
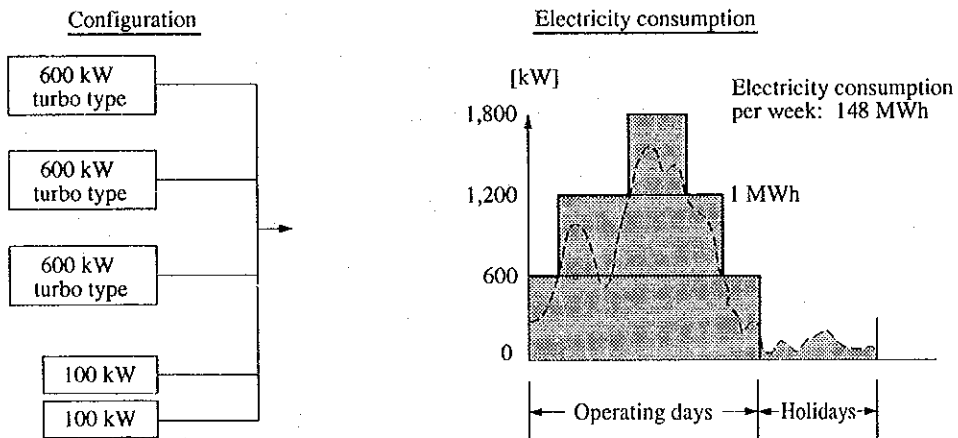


Figure 3.29 Compressor Combination Patterns and Electricity Consumption

(A) When two large compressors are used



(B) When three large turbo compressors and two small screw compressors are used



(3) プロセス改善による省エネルギー

a. 設定値の適正

生産工程においては、それぞれの設備に対していろいろな「設定値」がある。これらの設定値は設備やワークの種類・設備環境などによって異なるが、省エネルギーの観点から見直すべき項目を下記に示す。

設定値の見直しに当たっては、「品質」「安全性」「作業性」などをしっかりと確認しながら少しずつ変更していくことが大切である。

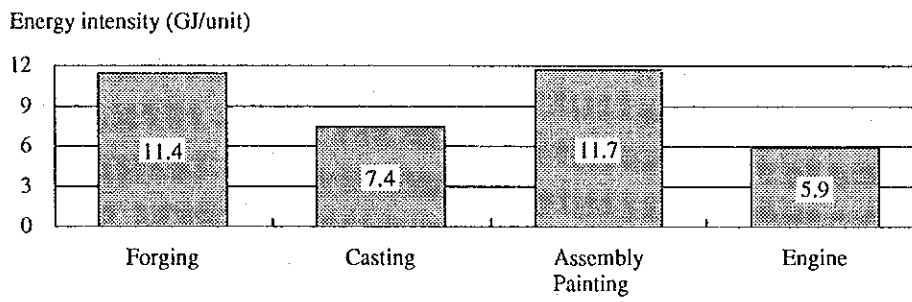
設定値の見直しによって、省エネルギーが図れるもの。

- 1) 圧縮空気の圧力
- 2) エアブローの流量・ブロー時間
- 3) 冷却水の温度・水量
- 4) 蒸気の圧力
- 5) 洗浄液温度
- 6) 洗浄シャワーの量 (ノズルの大きさ・数)
- 7) 乾燥温度・乾燥ファン風量
- 8) 設備起動・停止の時刻
- 9) 作業場の温度・湿度・照度
- 10) 熱処理炉の温度
- 11) 加工精度
- 12) 油圧ポンプの油御・圧力
- 13) クーラントの吐出圧・吐出量・吐出時間
- 14) その他の給気ファン・排気ファンの風量

3.4 日本の機械工業のエネルギー原単位水準

最初に述べたように、機械工業を代表するトラックやトラクタなどの製造業では、そのメーカーの得意とする技術やコストメリットを生かして鍛造・鋳造・熱処理などの工程を内部製作または外注化しているため、必ずしも同じ見方でのエネルギー把握は難しいが、エネルギー管理がしっかりしている代表工場を例に、Figure 3.30 にプロセス別エネルギー原単位を紹介する。

Figure 3.30 Energy Intensity by Process in Middle-size Tractor Manufacturing in Japan (GJ/unit)



4. 窯業の省エネルギー

4. 窯業の省エネルギー

4.1 ガラス工業の省エネルギー

4.1.1 まえがき

ガラスを作る工場は、溶融炉の形式から次の 2 種類がある。

- (1) 原料をタンク窯で溶解し、板ガラス、ガラスビン、チューブ、食器および繊維に成形して、大量生産型のガラス製品を作る工場
- (2) 原料をるつぼ窯で溶解し、人工成形にて、ガラスビン、実験器具、食器などの多品種少量のガラス製品を作る工場

タンク窯を有するガラス工場の特徴は、最大のエネルギー消費設備はタンク窯であり、連続式成形機による生産を行っていることである。

これに対し、るつぼ窯を有する工場は、作業面での切替えがしやすく、多品種少量生産に適している。

ここではタンク窯を有するガラス工場における各プロセスの省エネルギー対策を説明する。

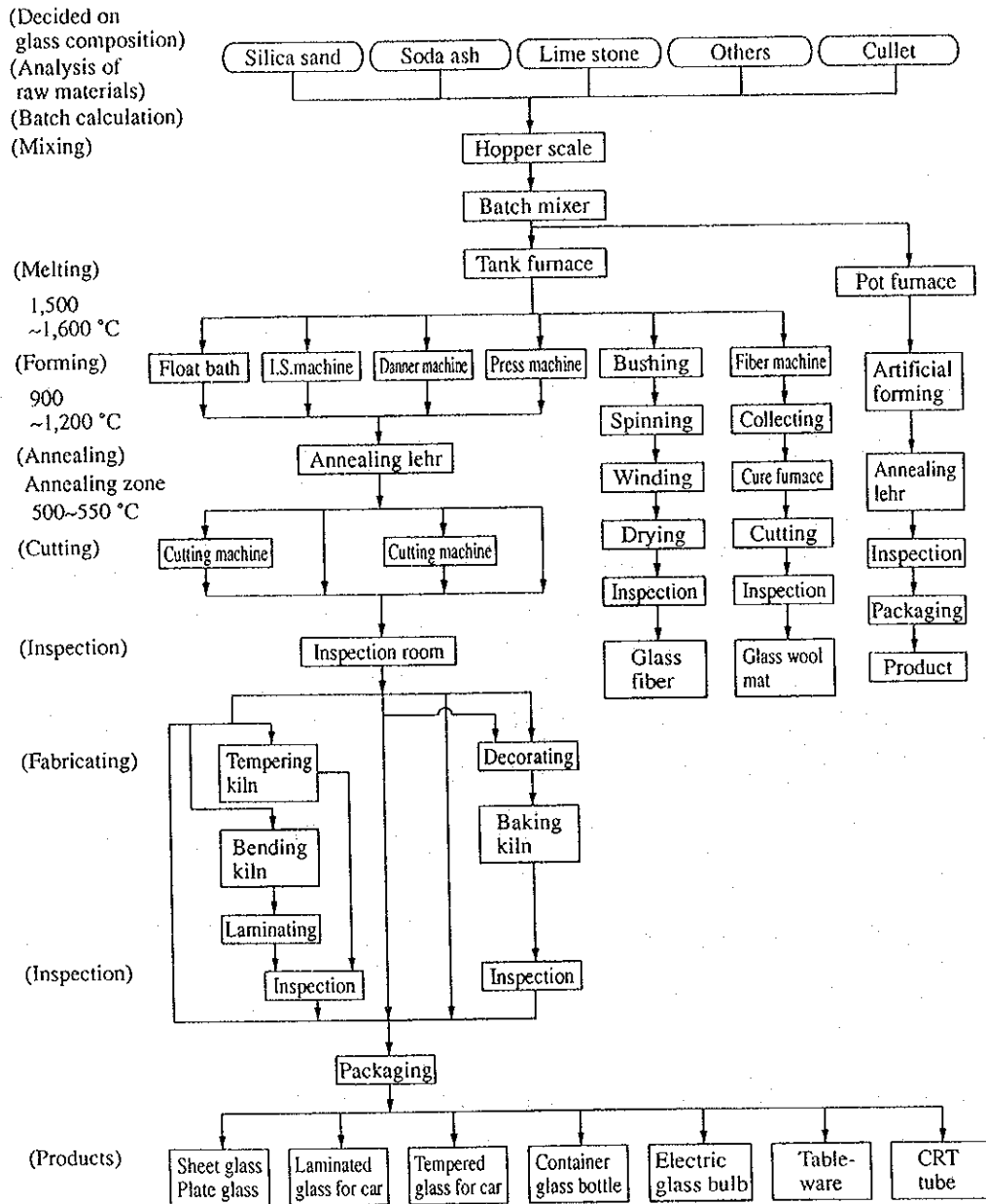
4.1.2 ガラス製造工場のプロセス概要と全般の省エネルギーの進め方

(1) ガラスの製造工程

ガラスの製造法はガラスの種類、品質、生産量により異なるが、基本的には目標成分の設定、原料の調合、溶融、成形、徐冷の一連の工程により行われる。

種類によってはその後、各種の加工または処理が行われる。ガラス製造工程図を Figure 4.1.1 に示す。

Figure 4.1.1 Glass Manufacturing Process



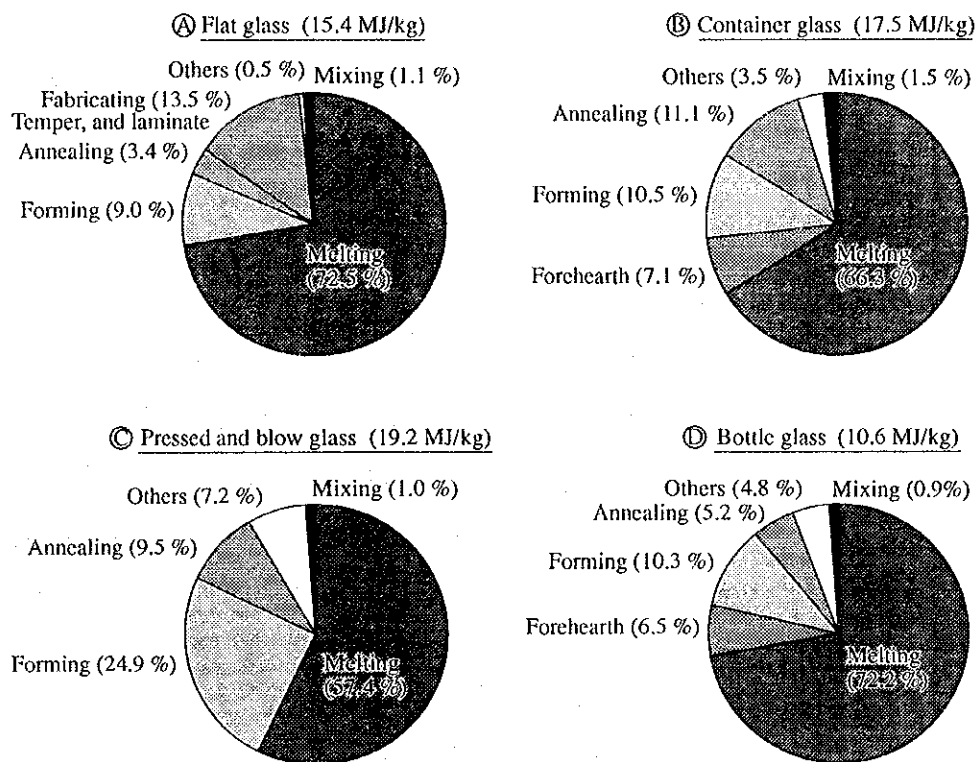
(2) ガラス製造工場のエネルギー使用状況

ガラス製造工場の工程別エネルギー使用割合は、Figure 4.1.2 に示すように約 4 分の 3 を溶解窯が占めている。

したがって省エネルギーの主眼は溶解窯におくことになる。

Figure 4.1.2 Share of Total Energy Consumption (10.258 kJ/kWh)

- Ⓐ Flat glass : USA data in 1980
- Ⓑ Container glass : USA data in 1980
- Ⓒ Pressed and blow glass: USA data in 1980
- Ⓓ Bottle glass : Average of bottle glass factories in Japan in 1984



(3) ガラス製造工場全般の省エネルギー

a. 管理の充実と省エネルギー

ガラス製造工場全体の生産管理、品質管理、設備管理およびエネルギー管理を充実させることが操業・設備の安定化、エネルギーの効率化の基本となる。

管理手法として日本においては、TQC と TPM 方式が採用され成果をあげ得ているがポーランドにおいても同法または類似の管理手法を導入し省エネルギーを推進されるよう推奨する。

注： TQC： Total Quality Control

全社の全部門で全員が QC 活動を進め、会社目標を達成する活動。

TPM： Total Productive Maintenance

全員参加によるトータルシステムとしての生産保全。設備のライフサイクル効率を最高にする設備計画・使用・保全を含む全部門、トップから第一線従業員まで全員参加。

b. 歩留向上と省エネルギー

省エネルギーの評価は、製品当たりのエネルギー原単位であるので歩留向上が省エネルギーとなる。

歩留とは引上量に対する製品量という狭義の歩留が一般的であるが、ここでは稼働率を含めた広義の歩留をいう。

歩留向上には、TQC の強化による安定操業と TPM の強化による事故ロスの減少、色替ロス減少などによる稼働率の向上が必要である。

c. 溶解負荷と省エネルギー

単位面積当たりの溶解量を溶解負荷という。溶解負荷を最大にすることが省エネルギーになる。しかし、それには成型能力に十分余裕があり、追従できることが必要である。

溶解負荷の基準は製品品種によって異なる。因みに型板ガラスは普通板ガラスやフロートガラスより約 40%溶解負荷を上げられる。びんガラスにおいては、同普通板ガラス比が約 90%も溶解負荷を上げることができる。また、同じ品種のガラスでも要求品質の差によって溶解負荷が変わる。例えば、建築用ガラスと鏡用ガラスでは約 10%の差がある。

溶解負荷は溶解能力によって変わる。溶解能力は窯槽構造、操業技術、管理技術、原料などを総合した結果として決まる。

d. スケールメリットと省エネルギー

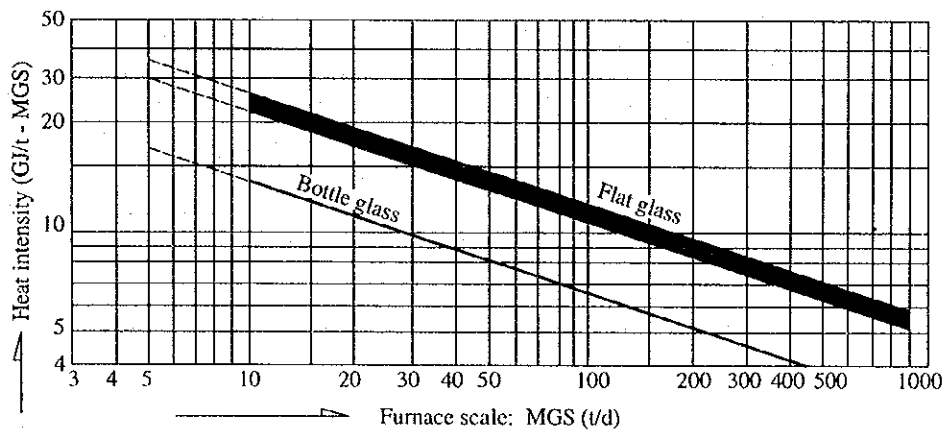
窯の大きさが大きい程、単位面積当たりの溶解量は増加する。溶解量が増加するという事は、溶解量当たりのエネルギーが減少し、省エネルギーになる。

タンク窯は溶解量が 1 日当たり 5t 程度の小窯から 800t のフロートガラス用の大窯まで範囲が広い。

溶解用燃料原単位も例えば 50GJ/t から 5GJ/t までと幅が広い。窯を大きくすること、即ち、小さな窯を集約して大きな窯にするには莫大な投資が必要となり現実的でないように思えるが、例えば日本の板ガラスの経験が示すようにフロート法という画期的な成型法の導入と相俟って、1973 年から 10 年間で窯数が 29 窯から 17 窯に減少した。即ち、1 窯当たり平均 250t/d の溶解量が 400t/d 以上にスケールアップした。この事によるエネルギー原単位の減少は 15%に相当する。

窯の大きさのファクターとして基準溶解量を横軸にとり、縦軸に溶解量当たりの重油原単位をとれば対数目盛で略直線の関数が得られる。これを Figure 4.1.3 に示す。なお、フロート法に関しては、Figure 4.1.25 を参照されたい。

Figure 4.1.3 Relationship between Heat Intensity and Scale of Melting Furnace



Note: MGS means the amount of molten glass based on the cullet rate of 25 %. It is obtained using the following equation

$$\text{MGS} = \left\{ \frac{434 - C \%}{400 + C \%} \right\} \times 1.04 \times \text{MG}$$

where

$$C \% = \left\{ \frac{\text{Cullet (t/d)}}{(\text{Batch} + \text{Cullet})(\text{t/d})} \right\} \times 100$$

MG: Molten glass (t/d)

4.1.3 ガラス製造工場の各プロセスと省エネルギーの進め方

- (1) 目標組成の設定と省エネルギー

ガラスの組成はその種類により多種多様であり、まず所要の物性値・品質、作業性、原料コストに応じた組成の設定が必要である。

一般に経験則をもとに基本組成を設定し、試験溶融によって製品の物性値と、溶融性、失透温度、温度 - 粘度曲線、作業温度範囲、徐冷点、ひずみ点などの確認を行い、必要な修正を施して目標組成を決定する。溶融条件、着色の有無などにより、適当な酸化剤、溶解促進剤、着色剤などの選定および添加量の設定を行う。

Table 4.1.1 Compositions of Various Glass Products

	Flat glass and Container glass Soda-lime glass	Special glass Hard borosilicate Pyrex	CRT Tube panel	Glass fiber E	Glass wool Rotary	Lead glass Crystal
SiO ₂	70 - 74	80 - 81	60 - 62	53 - 55	62 - 64	55 - 56
Al ₂ O ₃	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	1.5 - 2.0	14 - 15	2 - 3	0.15 - 0.2
Fe ₂ O ₃	0.1 - 0.5	0.0	0.0 - 0.1	0.2 - 0.3	0.2 - 0.3	0.0
CaO	7 - 12	0.0 - 0.5	1.5 - 2.0	21 - 23	8 - 9	1.5 - 2.0
MgO	1 - 4	0.0	0.5 - 1.0	0.4 - 0.5	2 - 3	0.0
Na ₂ O	13 - 16	4.0 - 4.5	7 - 9	0.3 - 0.4	16 - 17	3 - 4
K ₂ O	0.5 - 1.5	0.0	7 - 8	0.2 - 0.3	1.0 - 1.5	12 - 13
Li ₂ O	0.0	0.0	0.0 - 1.0	0.0	0.0	0.0
TiO ₂			0.4 - 0.5	0.1 - 0.3		
ZrO ₂			0.0 - 3.0			
BaO			5.5 - 10	0.5 - 0.6		
ZnO						
SrO			10 - 12			
PbO						24 - 26
CeO ₂			0.2 - 0.4			
B ₂ O ₃		12 - 13		7.5 - 8.5	4 - 5	0.5 - 1.0

省エネルギーとしては、溶解性を重視し、各種組成の基本の範囲内でアルカリ成分の増加、リチウムの添加、更にボロン添加、増量などが行われる。

(2) 原料配合設備

a. 原料の調合工程

製造品種のガラス組成に合わせて珪砂、ソーダ灰、石灰石、ドロマイトなどを混合し、これに清澄剤、着色剤、消色剤など少量の副原料および適量の屑ガラス (カレット) を配合して調合原料とする。

原料調合工程でのエネルギー使用量は、破碎機、混合機、ベルトコンベア、バケットエレベータなどによる電力であり、工場全体の約 1%に相当する。

なお、ガラス製造工場におけるエネルギー使用状況に関しては、Figure 4.1.2 Share of Total Energy Consumption を参照のこと。

b. 操業改善・設備改善による省エネルギー

1) 機器の運転管理：アイドリング停止

2) カレットの使用比率

製品品質に悪影響を与えない範囲で、カレットの配合を多くすれば、溶融エネルギーを減らすことができる。カレット添加率と所要熱量の関係を Figure 4.1.4、Table 4.1.2 に示す。

Figure 4.1.4 Addition Rate of Cullet vs Fuel Saving Rate

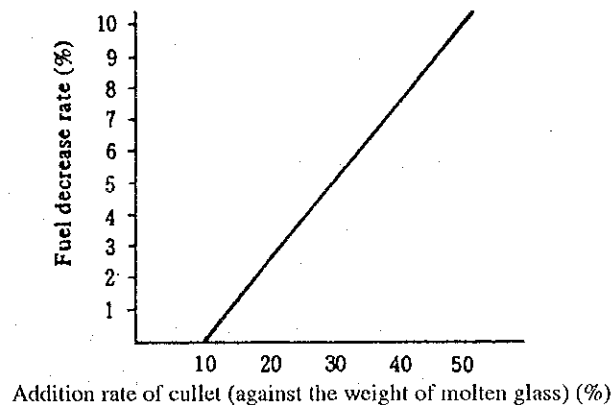


Figure 4.1.4 によれば、カレット比率を 10% 増加させると、エネルギー消費を 2.5% 低下させることができる。

Table 4.1.2 Heat Required for Production of Various Kinds of Glass (Theoretical Value)

Kind of glass	Temperature °C	Heat required for melting glass (kJ/kg glass)					
		Cullet addition rate %					
		0	20	40	60	80	100
Tableware glass	1,400	2,411	2,273	2,135	1,997	1,859	1,721
	1,250	2,219	2,081	1,943	1,804	1,666	1,528
Sheet glass	1,500	2,604	2,456	2,308	2,159	2,011	1,863
	1,400	2,462	2,314	2,166	2,017	1,869	1,721
	1,150	2,110	1,962	1,814	1,665	1,517	1,369
Laboratory appliances	1,400	2,127	2,016	1,906	1,795	1,685	1,574
	1,300	1,997	1,887	1,776	1,665	1,555	1,444
Lead glass	1,400	2,077	1,976	1,876	1,775	1,675	1,574
	1,100	1,637	1,537	1,436	1,336	1,235	1,135

日本の製びん業界におけるカレットの使用比率は 1996 年には 65%であった。この内工場発生カレットは 25%以下であるが、残りの 40%以上は市中回収のリサイクルカレットが占めている。(製品に対する比率である。) 但し、リサイクルカレット精選を行わないとカレット中の不純物が未溶解欠点や着色の原因となるので注意が必要である。また、粉カレットは泡欠点増加の原因となるので避けること。

3) 清澄剤の適切な使用

バッチ溶解熱量は製品組成によって変わるが、必ずしも熱量の少ない組成が省エネルギーにはならない。例えば、アルカリ分を減じると、溶解熱量は計算上低下するが、実際は溶解性が悪化するので、溶解温度を上げるか投入量を減じる必要があり省エネルギーにはならない。

清澄剤の使用は清澄時間を短縮させ、結果的に省エネルギーとなる。炉の状況に応じて種類、量の選択を行わねばならない。

清澄剤の量を減じた場合は溶解温度を上げるか、溶解量を減らさないと欠陥が増加する。溶解温度を 10℃上げればエネルギー消費は、約 2%増加する。

4) 珪砂粒度の最適化

ガラスの主原料である珪砂は、不純物の少ない高品質のものが要求されるが、溶解上は粒度分布が適切でなければ余分なエネルギーが必要になる。

経験上、最適な珪砂は 500 ミクロン以上の粗粒が無く、177~250 ミクロンに粒度分布のピークのある珪砂である。

500 ミクロン以上の粗粒が 5~15%含まれている珪砂を 500 ミクロン以上を除いて使用した場合に、2~8%エネルギー消費を低減した例がある。

(3) 溶融設備

a. 溶融工程

調査原料は、1,500℃程度に保たれている溶解窯に投入され、上部空間の火炎の輻射熱により加熱されて溶融し、更に清澄が行われて泡が分離される。この時、炉内の未溶融ないし低温の材料が作業槽に流入しないように、中央部が高温になるような温度分布を保つ。

次にガラス溶融窯の例としてエンドポートタイプの中型びんガラス溶解窯とサイドポートタイプの型板ガラス溶解窯を Figure 4.1.5、4.1.6 に示す。

Figure 4.1.5 Outline Sketch of Middle-Size Tank Furnace (End-Port Type)

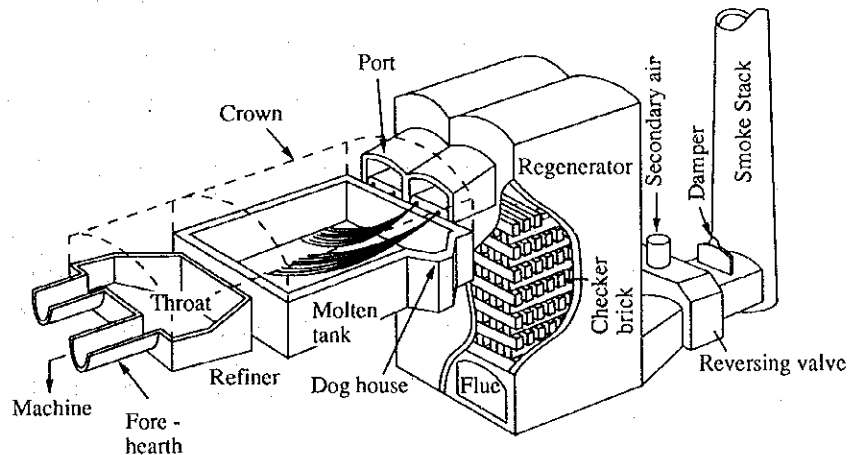
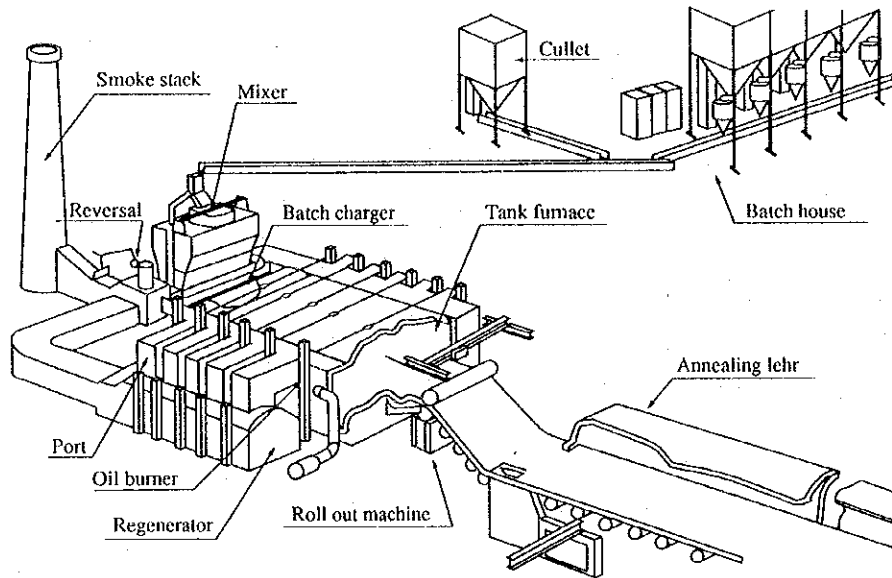


Figure 4.1.6 Outline Sketch of Tank Furnace (Side-Port Type)



ガラスの溶融には、1,500℃程度の高温が必要なので、燃焼用の空気は燃焼排ガスとの熱交換により予熱しておく必要があり、Figure 4.1.5、4.1.6 に示した蓄熱室かレキュペレータが用いられる。また、燃料を用いる代りに、あるいはその補助として溶融中のガラスに電極を挿入し直接通電して加熱する方法もある。

溶融炉の耐火物は、ガラスに接触する下部では耐食性のある $ZrO_2 - Al_2O_3 - SiO_2$ 系の電鍍レンガ、上部は珪石質レンガが用いられる。

バーナは、大型の炉では窯の両サイド、中型の炉では軸方向に配置されている蓄熱室から出ている吹出に設置される。バーナの燃焼サイドは一定時間毎 (通常 15~20 分毎) に交互に切替える (Figure 4.1.5 Outline Sketch for Middle-size Tank Furnace 参照)。

蓄熱室は燃焼中のバーナサイドは燃焼用空気の予熱に用いられ、反対側は燃焼排ガスを通してチェックレンガに熱を蓄える。一般に蓄熱方式の方がレキュペレータよりも熱回収率が高い。詳細については本章 4) 排熱回収を参照されたい。

b. 操業改善、設備改善による省エネルギー

1) 空気比の適正化

ガラスの溶解は 1,500℃程度の高温で行われるが、このような高温では放射による伝熱が支配的である。即ち、火炎温度を高くする程、熱伝達量が大きくなる。火炎温度は過剰空気量の増加と共に低下するので不完全燃焼を起さない範囲で空気比を低下させなければならない。

また、排熱回収後の燃焼排ガスでも、なお 500℃程度の温度を持っているので排ガス量を減らすことも大切である。

空気比の減少は排ガス量の減少になる。

空気比改善により、排ガス量が G_1 から G_2 に減少した場合、排ガス損失の減少による燃料量減により更に排ガス量が減少するので、この場合の燃料節減率は次式のようなになる。

$$\text{燃料節減率} = \frac{100R(1 - \frac{G_2}{G_1})}{100 - RG_2/G_1}$$

(但し、Rは改善前の排ガス損失割合(%))

日本の溶解窯では、通常空気比は、 $m = 1.05 \sim 1.10$ まで下げている。

空気比は、設備改善や計装・制御改善により下げることができるが、人力による燃焼管理だけでも対自動制御比70%程度は下げることが可能である。また、空気比の低下は NO_x 低減対策としても効果が大きい。

次に、進入空気の防止も省エネルギーとして重要である。原料投入口、バーナ周辺、視窓などから洩れ込む空気は、排ガス量を増加させるのみでなく、低温のために窯内温度を下げる。一方、窯外への開口部から輻射熱の放散も大きい。

対策としては、開口部はできるだけ少なく且つ小さくすること。更に、レンガの目地、間隙などのシールの徹底が必要である。

操業上は、煙道ダンパの調節による炉圧の正圧維持 ($>0.05 \text{ mmAq at Glass level}$) が必要である。

2) 火炎放射率の改善

ガス燃焼の場合の伝熱は主として透明な無輝炎からの放射によるもので、高温の炭酸ガス、水蒸気その他の 3 原子ガスの放射による。

一方、重油燃焼の場合は輝炎放射であって、燃焼過程に炎の中に形成される浮遊炭素粒子からの固体放射の役割が大きい。

放射伝熱の中の放射率 ϵ の値は燃焼の初期に Figure 4.1.7 に示すように重油で 0.6~0.8、天然ガスで 0.3~0.4 と差がある。実際の炉では炎からの放射のみでなく、炉壁からの再放射もあるため影響は緩和されるが、放射伝熱量はガスの方が少なくなる。

C 重油燃焼を行っている窯を天然ガス燃焼に切替えた場合に、通常エネルギー消費は約 5%増加する。

このため Figure 4.1.8 のようにポートの途中に Baffle を設け、その後部に燃料ガスを吹き込み、やや空気不足の状態では燃焼させて微少な炭素粒子を生成させ、炉内でそれを 2 次燃焼して輝炎としている例も報告されているが一般的とはいえない。

Figure 4.1.7 Relationship of Flame Emissivity and C/H Ratio in Fuel

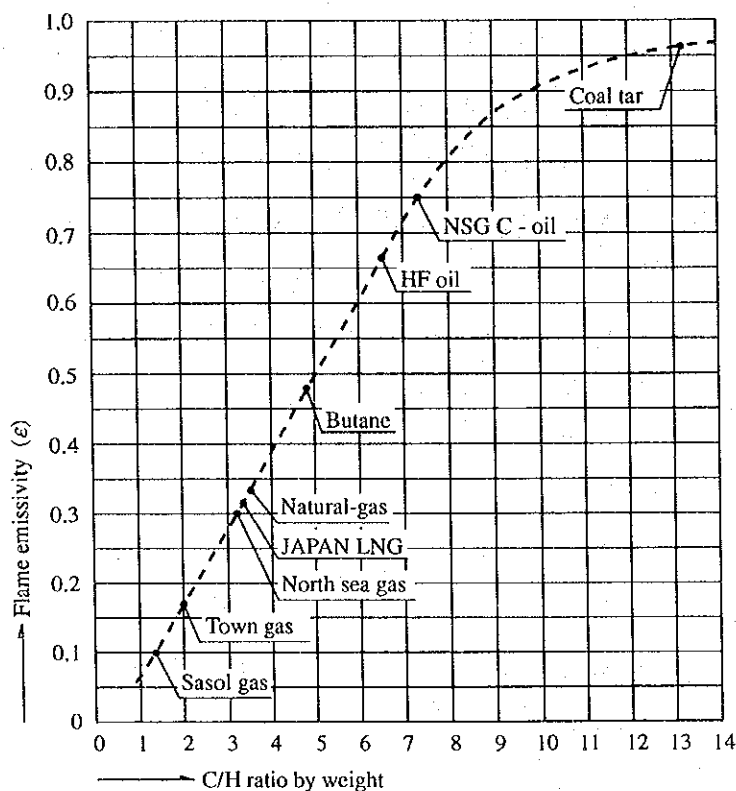
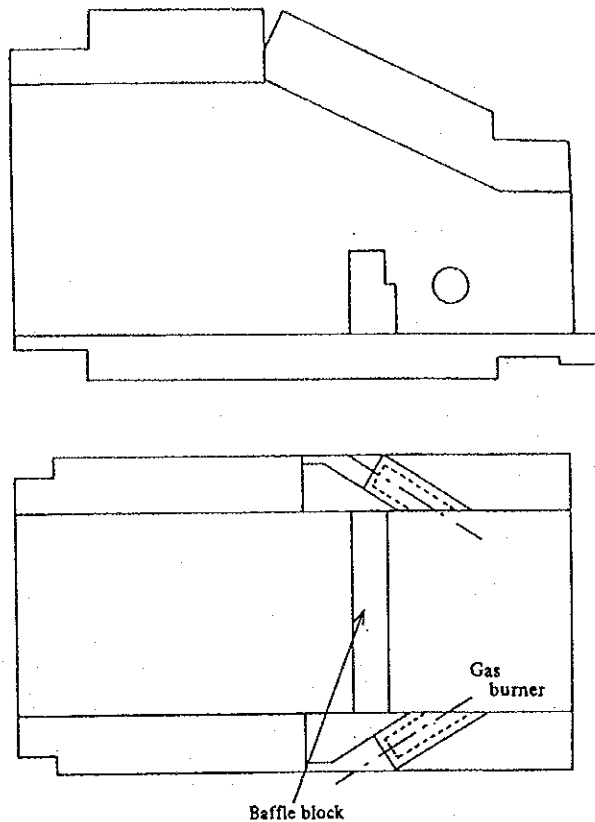


Figure 4.1.8 Baffle Block in the Port



3) 断熱強化

溶融炉の耐火物は温度の点でも、内容物による侵食の点でも極めて苛酷な条件にあり、従来十分な保温がなされず、ガラス液面部の外面は空気冷却も行っていた。しかし、熱精算図からも明らかなように炉壁からの放熱は損失の大きな部分を占めているので、高級耐火物を用いて断熱を強化する方向にある。即ち、天井部ではアルカリやアルミナ含有量の少ない Super Duty 珪石レンガ、側壁、炉床ではアルミナ・ジルコニア・シリカ系の電鍍レンガを内側に張り、その外を粘土質レンガ、断熱レンガまたはセラミックファイバで覆っている。

炉壁からの放散熱量は直接熱流計により測定するか、炉壁外面温度を測定して輻射と対流による放散熱量を計算して求めるか、また、炉壁の外面温度は炉壁構成耐火物の材質と厚さと内面温度から算出することもできる。

次に 1 例として日本のびん窯の炉壁断熱強化前後の放熱量計算値を Figure 4.1.9、4.1.10 および Table 4.1.3 に示す。

Figure 4.1.9 Furnace Parts before and after Heat Insulation

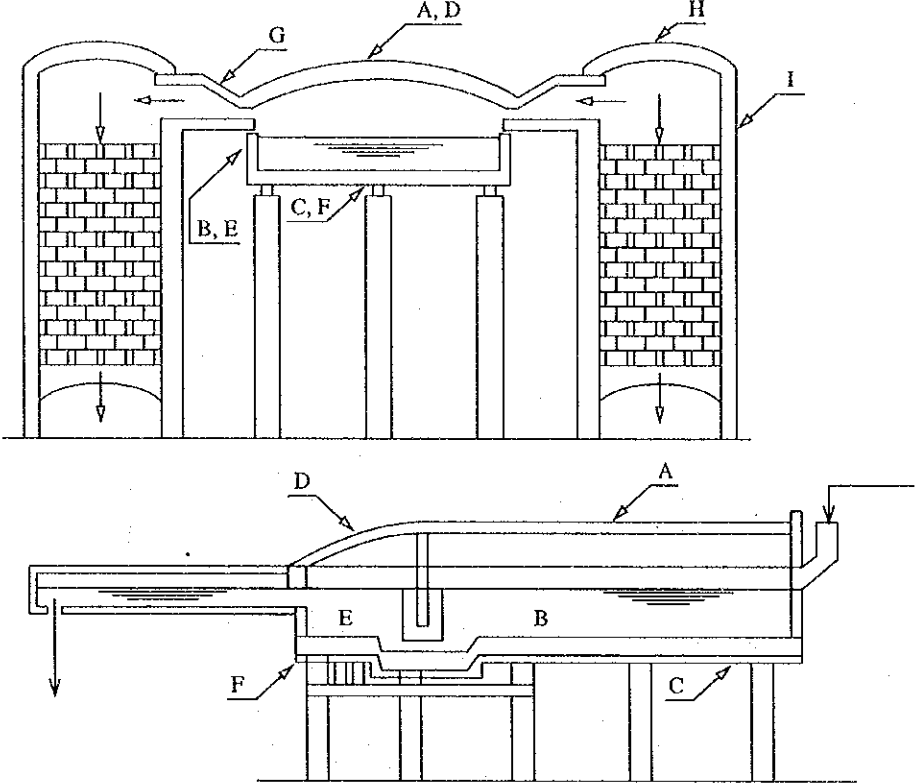


Figure 4.1.10 Comparison between Old and New Designs for Furnace Insulation

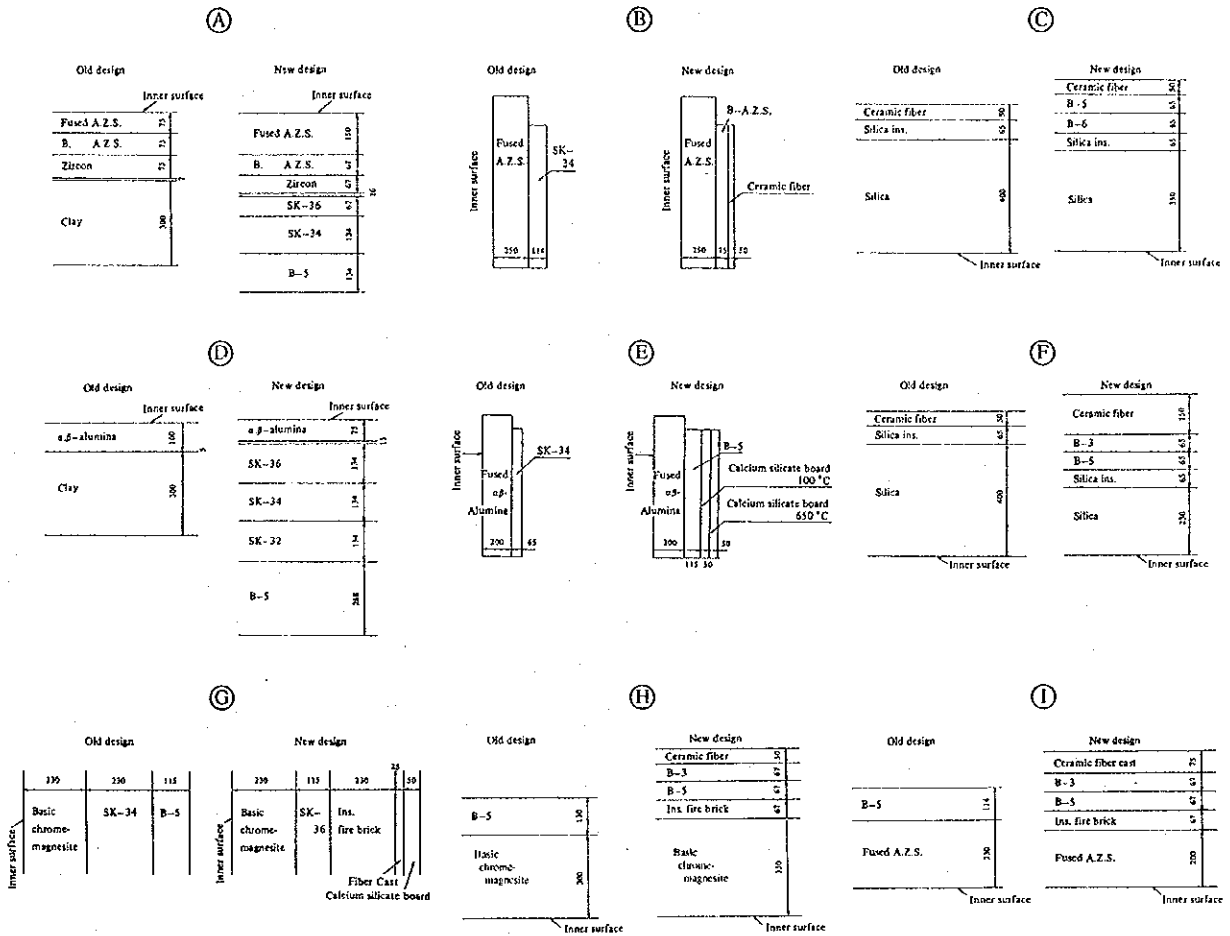


Table 4.1.3 Comparison of Heat Loss by Insulation

		Inner surface temperature (°C)	Outer surface temperature (°C)	Amount of heat loss (kJ/m ² h)	Wall heat loss reduction ratio (%)
Ⓐ Melting tank Crown	Old	1,550	132	5,066	42.8
	New	1,550	100	2,897	
Ⓑ Melting tank Side	Old	1,350	285	22,462	74.4
	New	1,350	141	5,761	
Ⓒ Melting tank Bottom	Old	1,350	225	17,966	72.6
	New	1,350	130	4,915	
Ⓓ Refining tank Crown	Old	1,250	115	3,860	67.8
	New	1,250	70	1,243	
Ⓔ Refining tank Side	Old	1,200	330	30,455	95.2
	New	1,200	74	1,457	
Ⓕ Refining tank Bottom	Old	1,100	250	17,275	89.2
	New	1,150	80	1,867	
Ⓖ Port Crown	Old	1,500	155	6,896	62.3
	New	1,500	95	2,600	
Ⓗ Regenerator Crown	Old	1,450	128	4,802	67.8
	New	1,450	76	1,545	
Ⓙ Regenerator Side (Upper part)	Old	1,450	118	4,065	28.7
	New	1,450	100	2,897	
Average					66.8

Table 4.1.3 の Wall heat loss reduction ratio の単純平均は 66.8% となり、耐火物表面からの放熱損失は大幅に改善される。炉壁からの放熱は、耐火物の表面から放熱の他に、レンガの目地からの放熱および支持金物からの放熱があり、レンガの目地と支持金物からの放熱損失はかなり大きいので、炉壁全体からの放熱損失の改善効果は、66.8% より小さい数字となる。

4) 排熱回収

溶融窯では高温を必要とするため、燃焼排ガスの排熱を回収して燃焼用 2 次空気の予熱に利用する。排熱回収装置としては蓄熱室またはレキュペレータのいずれかが用いられるが、小型炉以外は一般に蓄熱室が用いられる。

① レキュペレータ

レキュペレータとしてはセラミックレキュペレータもあるが接合部での洩

れやチューブ内での開塞のため、タンク窯ではあまり用いられていない。メタルレキュペレータとしては、ダスト詰りのない型が多く用いられている。空気予熱温度は最高でも 800℃であり熱回収率は低い。しかし、設備費が安く、スペースも多く必要としないので小型炉に用いられる。Figure 4.1.11 に各種のメタルレキュペレータを示す。

Figure 4.1.11 Various Types of Recuperator

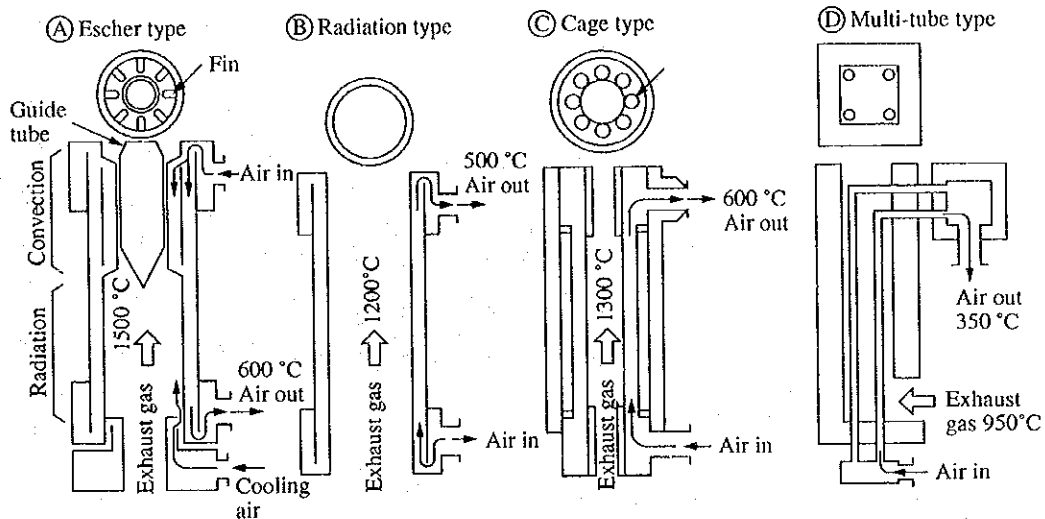


Figure 4.1.11 に示すように、レキュペレータの型式により空気予熱温度が異なるが、通常レキュペレータによる熱回収率は 20~25%で、事項に述べる蓄熱室の約半分である。

② 蓄熱室

蓄熱室では、通常 1,150~1,300℃程度に 2 次空気が予熱され、熱回収率は通常 35~55%である。

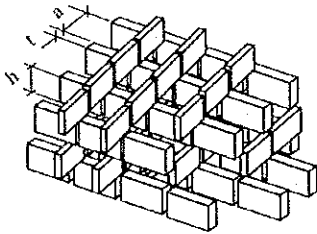
蓄熱室での熱回収率は空積レンガの肉厚を薄くすること、空積レンガの間を流れる排ガスの流速を高めること、蓄熱室の高さを高くし、チェッカ量を増加することにより向上する。

次に空積レンガの積み方と単位伝熱面積について Figure 4.1.12 に示す。

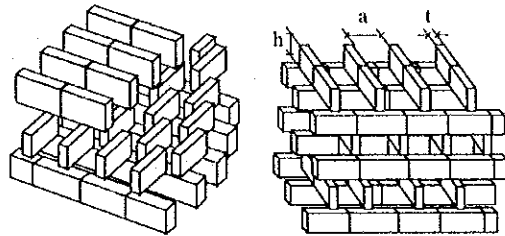
Figure 4.1.12 Types of Checker Work and Unit Surface Area for Heat Conduction

(A) Straight Pigeon Hole

$$A = \frac{a-t+2(a+t) \cdot h}{(a+t)^2 \cdot h} \times 1000 \text{ (m}^2/\text{m}^3\text{)}$$

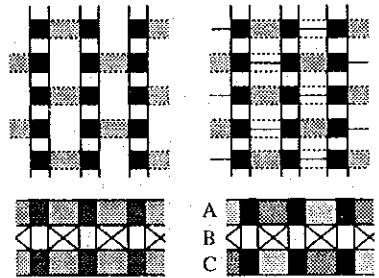


(B) MAERZ Pigeon Hole

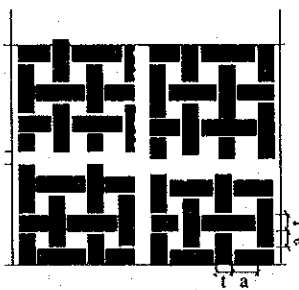
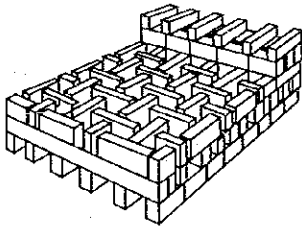


MS : STV

MQ : QUINCONCE



(C) Open Basket Weave (OBW)

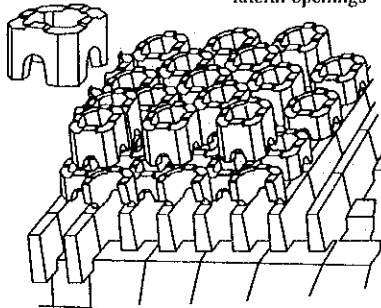


$$A_{00} = \frac{2(a+t) \cdot h + 2t \cdot h + (a-t) \cdot h}{(a+t)^2 \cdot h} \times 1000$$

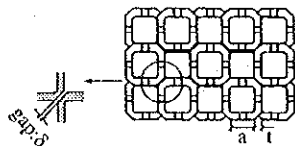
$$A = A_{00} + \frac{a \cdot t}{(a+t)^2 \cdot h} \times 1000$$

(D) Chimney Box Type (VEITSCHER)

Closed blocks with lateral openings

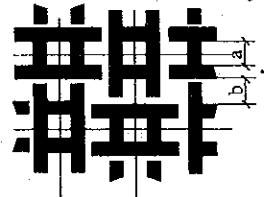
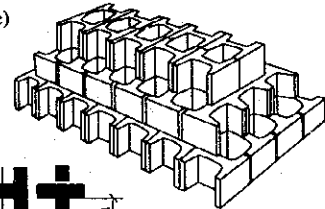


$$A = \frac{4a}{(a+t)^2} \times 1000$$



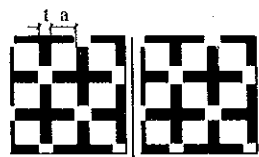
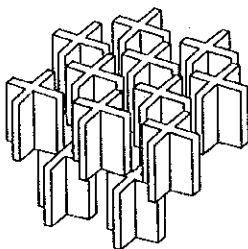
$$A = \frac{4a - 0.485t}{(a+t)^2} \times 1000 \quad (\delta = 10 \dots \dots \times 0.88)$$

(E) Interweave (National Reference)



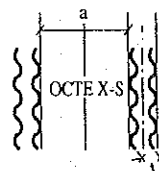
$$A = \frac{8(a+b)}{(a+b+2t)^2} \times 1000$$

(F) Cruciform (SEPR)



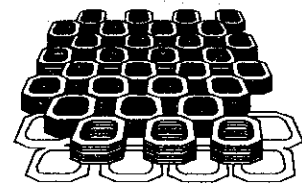
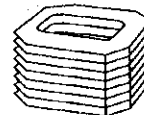
$$A = \frac{4 \cdot a}{(a+t)^2} \times 1000$$

(G) OCTEX-S (Toshiba Monoflux)



$$A = \frac{4.8 \cdot a - 0.582t}{(a+t)^2}$$

(gap $\delta = 10 \dots \dots \times 0.88$)

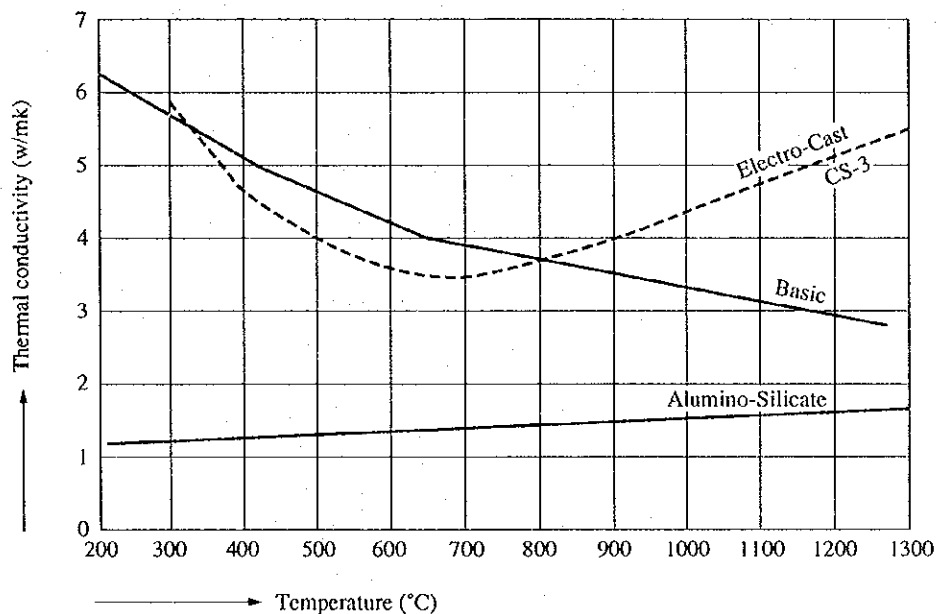


空積レンガは、従来 75mm 厚のレンガで格子積 (Pigeon Hole) が主体であったが、最近は 40~50mm 厚のレンガで OBW 型から Chimney BOX 型や Cruciform 型になっている。

したがって、単位容積当たりの伝熱面積が約 60%増加している。

次に空積レンガの材質について。空積レンガは、長年使用すると排ガス中ダストとの反応によって崩壊し、空隙を詰まらせて熱交換面積を減少させる。このため溶融窯の寿命とマッチするよう、耐食性の良いマグネシアレンガや電鍍レンガが使われるようになってきている。また、マグネシアレンガおよび電鍍レンガは、従来使用されていたアルミノシリケートレンガに比べて、熱伝導率が 2 倍以上である (Figure 4.1.13 参照)。このことは、熱回収率の向上 (空気予熱温度上昇) にも大きく寄与している。

Figure 4.1.13 Heat Conductivity of Checker Refractory

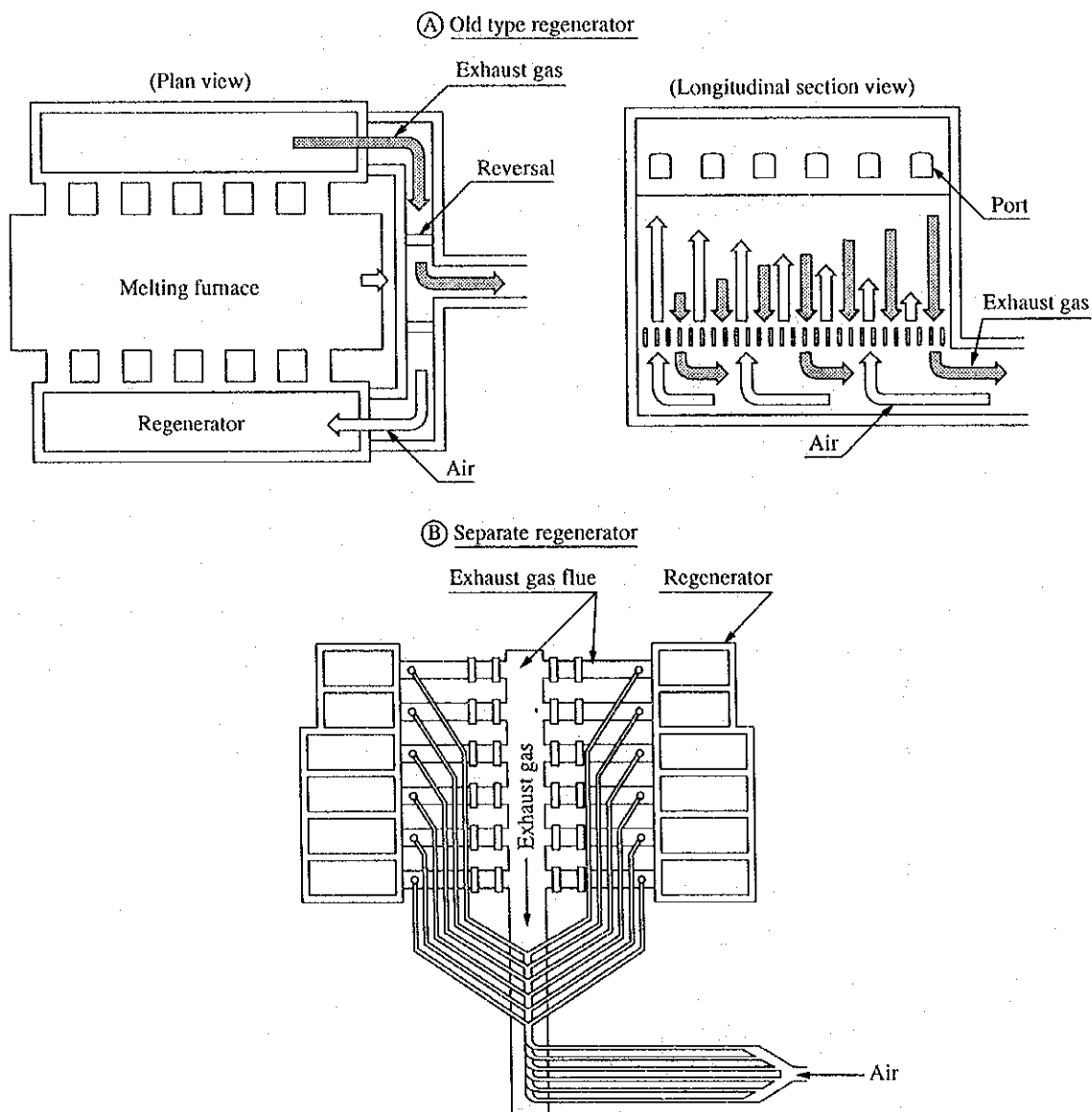


次に蓄熱室の構造についてサイドポートタイプのタンク窯においては、従来、No.1 ポートから最終ポートまで、中に仕切り壁が無く、1 つの細長い部屋になっていた。したがって、排ガスは No.1 ポート側に多く流れ、予熱空気は最終ポート側に多く流れる傾向があり、熱交換効率のアンバランスが生じ過剰空気率の制御も難しくなる。

したがって、ポート毎に仕切り壁を設けて分割し、各ポートが独立して制

御できる構造にしたのがセパレート蓄熱室であり、排ガスと2次空気間の熱交換効率を高めると共に各ポート毎の過剰空気の調節が容易になり2~5%の省エネルギーが期待できる。Figure 4.1.14 に従来型蓄熱室とセパレート蓄熱室のイラストを示す。

Figure 4.1.14 Old Type Regenerator and New Separate Regenerator



③ 排熱ボイラ

蓄熱室を出た排ガスは、なお、約 500℃の顕熱を有しているので排熱ボイラを設置して蒸気または、温水として回収することが可能である。

日本の板ガラス製造用の大型窯では、多くの場合排熱ボイラを設備し蒸気として回収し重油の加熱や噴霧用に使用されている。

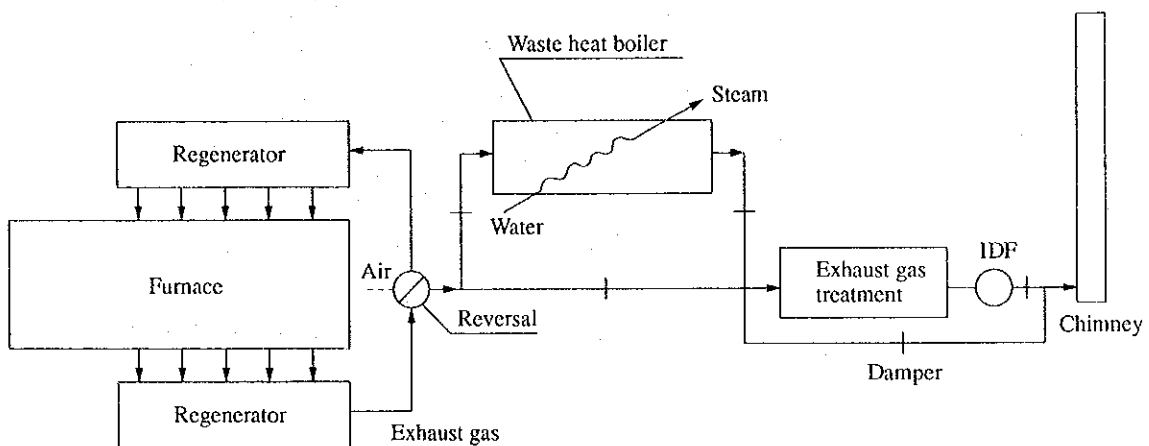
排ガスは全量使用する必要はなく、蒸気の需要量に見合っただけ煙道ダンパー操作で排熱ボイラに供すればよい。

次に実施例を示す。

排ガス量	: 35,000m ³ _N /h	給水温度	: 24℃
入口温度	: 483℃	蒸発量	: 4.1t/h
出口温度	: 223℃	蒸気圧力	: 15kg/cm ²
回収熱量	: 10%	蒸気温度	: 193℃

排ガスのフローシートと排熱ボイラの位置を、Figure 4.1.15 に示す。

Figure 4.1.15 Flow Sheet of Exhaust Gas and Waste Heat Boiler



5) 電気溶融

① 電気溶融とは

ガラスは 800℃前後で導体となるので溶融炉に電極を挿入し、ガラスに直接通電し加熱する方法である。また、燃料加熱炉において、補助的に使用して引上量を増加や温度の調整を行う場合これをブースターと称する。

この電力は、引上量 3t/d 増加させるのに約 100kW 必要である。

1kWh 当たりの熱量を 10,258kJ として燃料原単位が 7.3MJ/kg-MG 以上の場合は、ブラスター使用は、省エネルギーになる。

以降は、全電気溶融をベースに記述する。

② 電気溶融の経済的境界

電気溶融は小型炉の方が経済的である。その境界点は、次式による。

$$Y = 3.16 X \quad \text{但し} \quad \begin{cases} Y = \text{溶解量 MGt/d} \\ X = \frac{41,449 X \text{ Fuel Price/kJ}}{\text{Elec.Price/kWh}} \end{cases}$$

例えば $Y = 65$ と計算された時は、65t/d 以下の場合は、全電気溶融の方が経済的である。

更に電気溶融が大気汚染が少なく、温度管理が容易で高品質のものが得やすい特徴がある。電気溶融炉は Figure 4.1.16 に示すようにコールドトップであるので Figure 4.1.17 に示すように揮発性原料の損失が少ない。

Figure 4.1.16 Heat Loss from Oil-/Gas-fired and Electrically heated Furnaces

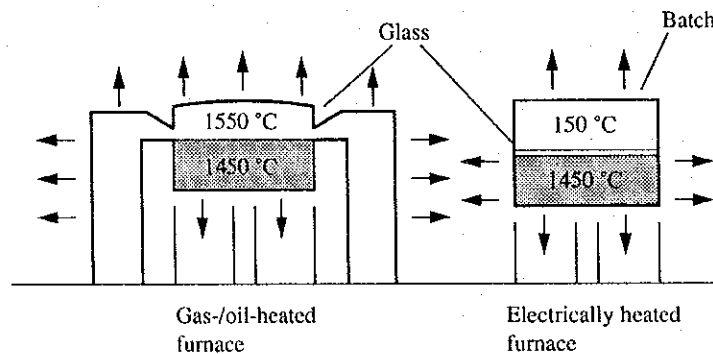
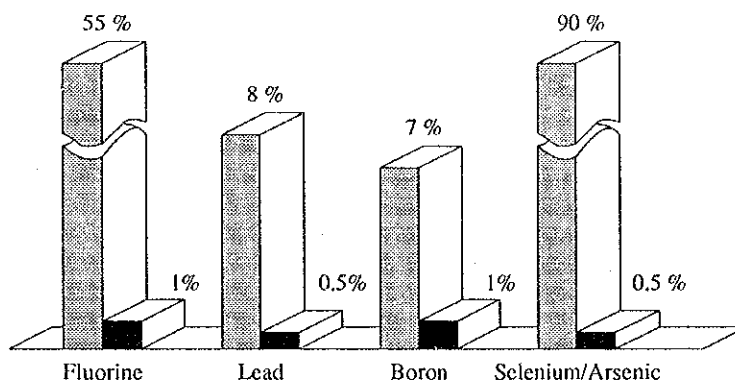


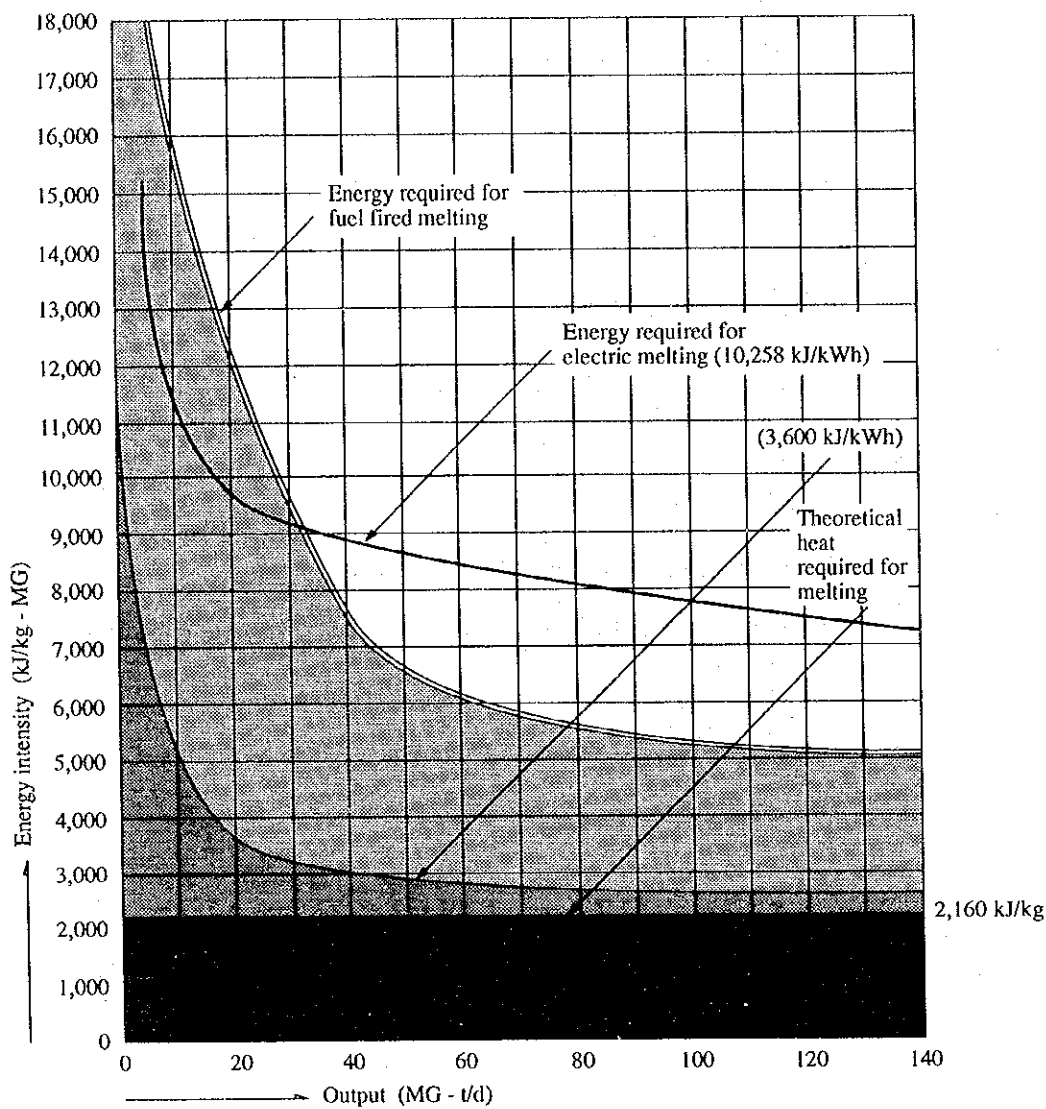
Figure 4.1.17 Comparison of Volatile Losses from Oil/Gas and Electrically heated Furnaces



③ 電気溶融炉と燃料加熱炉のエネルギー原単位

電気溶融炉と燃料加熱炉のエネルギー原単位を Figure 4.1.18 に示す。

Figure 4.1.18 Comparison of Energy Requirements for Oil/Gas-fired and Electrically-heated Furnaces



④ 電気溶融炉の熱収支

Table 4.1.4 に電気溶融炉の出熱の割合の例を示す。

Table 4.1.4 Heat Output Ratio of Electric Melting Furnace

Capacity Molten glass	750 kg 400 kg/d		- 60 t/d	
	Heat output (kJ/h)	Rate (%)	Heat output (MJ/h)	Rate (%)
Heat loss from crown arch	334	0.07	513	2
Heat loss from furnace bottom	70,170	13.7	2,667	13
Heat loss from furnace side wall	62,023	12.1	-	-
Heat loss from throat wall etc.	93,631	18.2	3,077	15
Sub total	226,158	44.1	6,257	30
Heat for vitrification	-	-	616	3
Heat for glass heating	162,023	31.6	13,335	65
Sub total	162,023 (0.948 kWh/kg)	31.6	13,951 (0.544 kWh/kg)	68
Loss by water cooling for electrode	124,702	24.3	410	2
Total	512,883 (3.000 kWh/kg)	100.0	20,618 (0.804 kWh/kg)	100

電気溶融窯の熱効率^⑤は60t/d規模の窯でも65%であり、燃料加熱窯で264t/d規模の窯の44%より高い。(参照 Table 4.1.4)

また、Figure 4.1.18 に示すように、MG (Molten Glass) 60t/d 規模の窯では、電力を 10,258kJ/kWh で換算すれば、燃料加熱窯の方がエネルギー原単位が良い。MG 30t/d で電気溶融窯と同等のエネルギー原単位となる。

⑤ 電極材料と清澄剤

電気溶融炉で使用する電極材料は一般的には金属モリブデンである。モリブデン電極はガラスの清澄剤として使用されている芒硝、亜硫酸などにより侵蝕され、消耗が大きいので使用には注意が必要である。また、硬質ガラスは一般に Boro-Silicate Glass であり、 B_2O_3 を多く含んでいる。このため上記のような清澄材を用いると発砲して品質を悪化させる危険がある。したがって、硬質ガラスの場合は通常食塩が使用されるが食塩の場合耐火煉瓦炉材の侵食が発生しやすいので注意を要する。

⑥ 電気溶融炉の実例

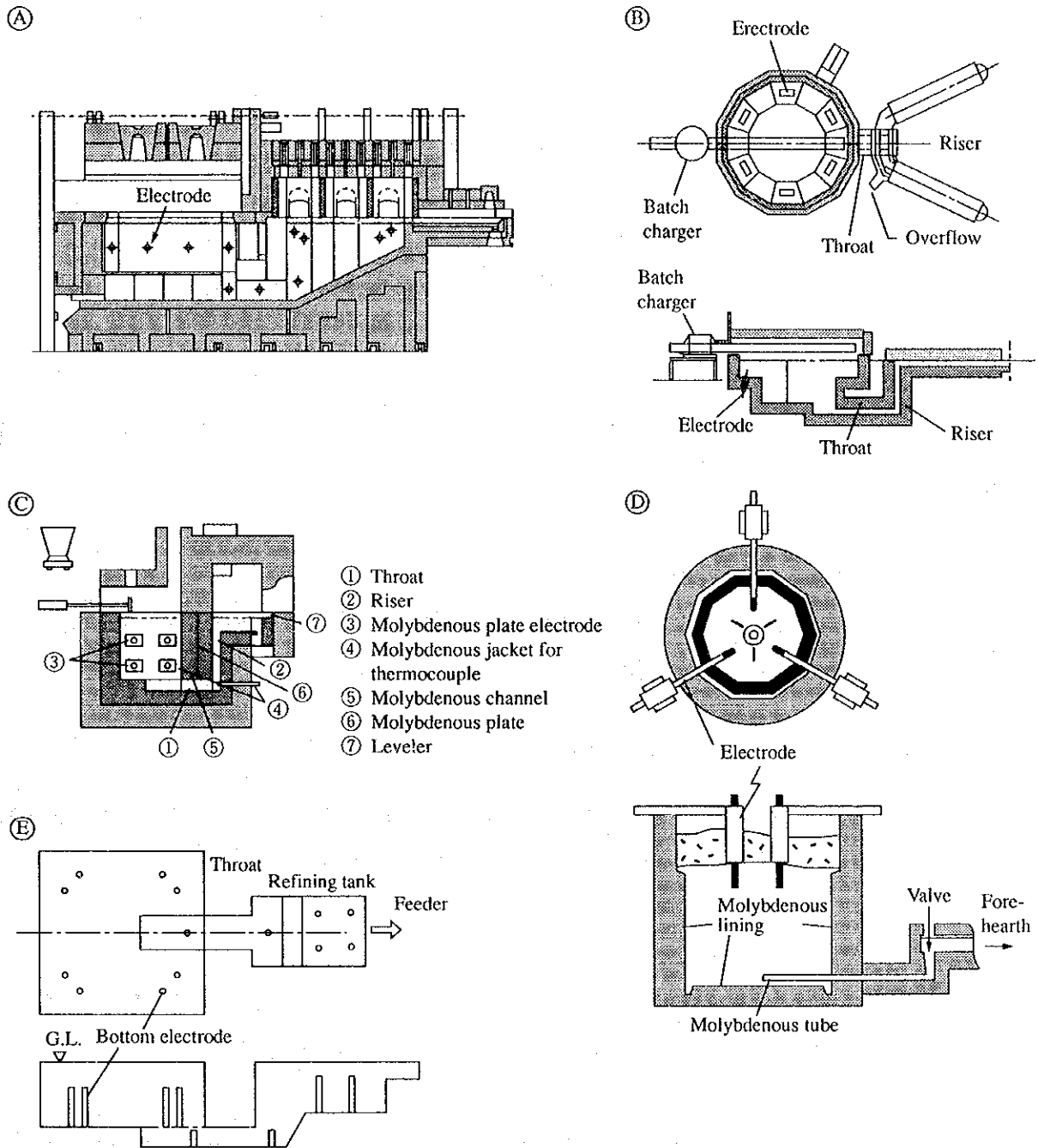
電気溶融炉の実例について Table 4.1.5、Figure 4.1.19 に示す。

電極挿入方法は、炉壁サイドから挿入するサイド電極、Figure 4.1.19-A,C および底から挿入するボトム電極、Figure 4.1.19-B,参考図 E とがあるが特殊なものとして Figure 4.1.19-D のようなトップ電極もある。

Table 4.1.5 Various Types of Electric Furnace

Maker	Glass	MG (t/d)	Melting load (t/m ² -d)	Electric intensity (kWh/kg)
Ⓐ Staneck	Hard borosilicate	6	—	1.7
Ⓑ KTG	Hard borosilicate	72	2	—
Ⓒ (Old) USSR	Hard borosilicate	1.4 - 1.8	1.46 - 1.88	1.5
Ⓓ C.G.W	Pyrex	7.9	5	0.9 (Temperature 1,800 °C)
Ⓔ	Reference figure – Bottom electrode			

Figure 4.1.19 Various Types of Electric Furnace



5) 酸素燃焼

酸素燃焼には空気に酸素を添加して燃焼させる酸素富化燃焼と 100%近い酸素濃度で燃焼させる純酸素燃焼とがあるが省エネルギーとしての観点からは、純酸素燃焼が望ましい。

① 酸素燃焼の特徴

・ 排ガス量の減少

純酸素燃焼では排ガス量が 5 分の 1 になり、排ガロスが減少すると共に空気予熱の必要がなくなるので蓄熱室や換熱室が不要になる。

・ 火炎温度の上昇

燃焼反応熱が窒素に奪われなく、高温が発生し、溶解効率の向上になる。

・ 燃焼速度の上昇

燃料粒子と酸素粒子の衝突のチャンスが増え、過剰空気率の減少、燃焼効率の向上になる。

・ NO_xの低減

火炎温度の上昇による NO_x の上昇よりもガス量減少の効果が大きく、結果的に NO_x は低減する。

・ 解離潜熱の利用

火炎温度 2,000℃以上では燃焼ガス中の CO₂、H₂O が解離し、低温被熱物表面で再結合し、最高 4,000℃の高熱を発する。

② 酸素燃焼による省エネルギー

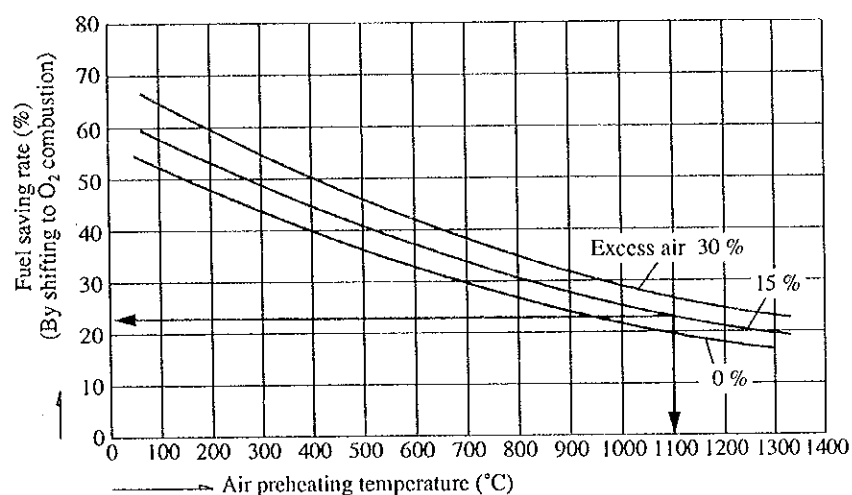
酸素燃焼は、燃焼室の小さい小型窯、溶解に高温を要する組成の窯、2 次空気の予熱温度が比較的低いレキュペレータ設置の窯においては、省エネルギー効果が大きい。

日本において、空気予熱温度 450℃、空気過剰率 30%の窯を酸素燃焼に切替えて燃料消費量を 50%削減した例がある。

次に空気予熱温度と空気過剰率が既知の窯を酸素燃焼に切替えた場合の燃料節減率との関係を求め Figure 4.1.20 に示す。

この図から例えば空気予熱温度が 1,100℃、空気過剰率 15%の窯を酸素燃焼に切替えた場合の省エネルギーは 23%となる。

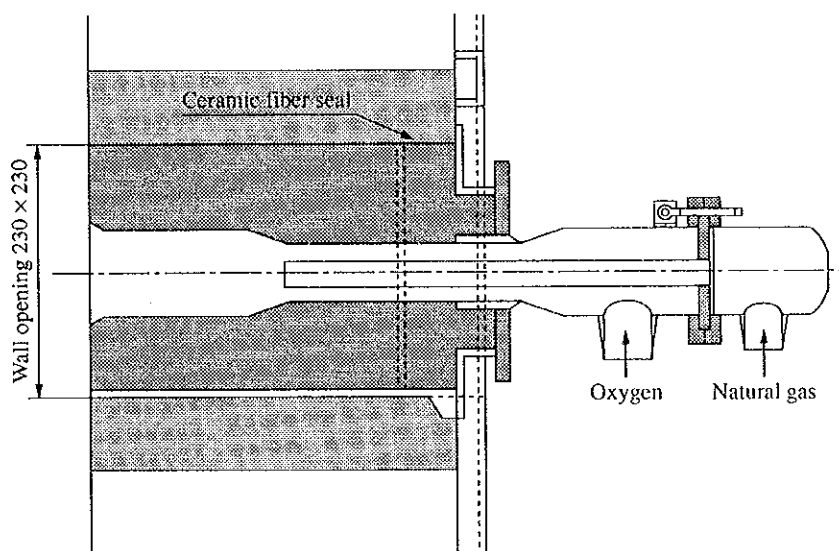
Figure 4.1.20 Fuel Saving Rate by Oxygen Combustion



③ 酸素バーナ (Oxy / Fuel burner)

酸素バーナとしては、従来被熱物の表面に直接吹付け解離熱を利用して溶解効率を上げる Troidal バーナ、Dragon バーナが有名であったが、ガラス業界では実用化は殆どされていなかった。ところが近年 Air Liquid 社 (仏) が開発した Alglass バーナは、次の特徴を持っており実用的であるので広くガラス業界で採用されるようになった。Figure 4.1.21 にバーナの 1 例を示す。

Figure 4.1.21 Sketch of Alglass Burner



④ 酸素発生装置

燃焼用酸素については、液体酸素を購入使用する方法もあるが発生装置を設置する方が経済的である。

発生装置としては、種々の方法があるが酸素バーナ用としては吸着法が適している。

吸着法には PSA 式 (Pressure Swing Adsorption) と VSA 式 (Vacuum Swing Adsorption) とがある。

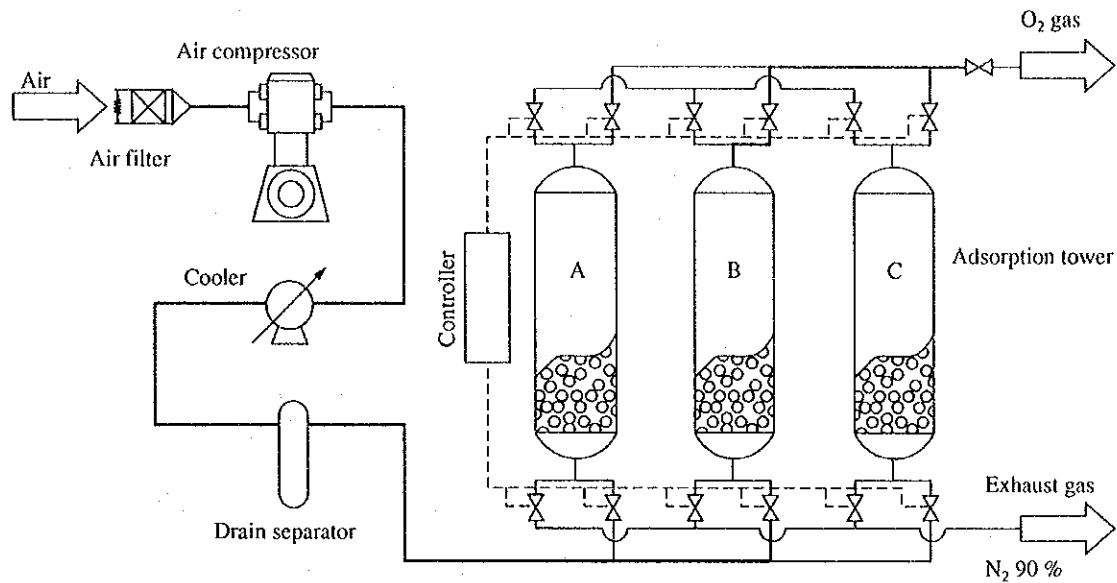
VSA 式は PSA 式と大差ないので Figure 4.1.22 に PSA 式のフローシートを示す。

図のエアコンプレッサーは VSA 式ではブロアーでよいが、発生酸素ガスを圧送するところに必要によりコンプレッサーが設置される。

吸収塔にはモレキュラーシーブ (Molecular Sieves) とアルミナゲル (Alumina Gel) が充填されており、空気中の N_2 、 H_2O 、 CO_2 、HC が吸着される。吸着塔の再生は VSA 式の場合は、真空ポンプで減圧することにより排ガスを脱着し大気に放出する。

装置の運転は完全自動化されバックアップとして液体酸素供給装置と組合せ安全供給体制をとっている。

Figure 4.1.22 Flow Sheet of PSA System



Capacity : 20 t/d
 O₂ Purity : 90 to 93 %
 Pressure : 1.2 kg/cm²
 Electric consumption: 0.46 kWh/kg O₂

(4) フォアハース

a. フォアハース工程

溶解槽からスロートを経て作業槽に入り、溶融・清澄を終えたガラスはフォアハースに供給される。フォアハースはびん窯での呼称であるが、その他のガラスでも成型機にガラスを供給するところとして類似のところがありフォアハウス、キャナル、フィダーなどと呼ばれている。

フォアハースは成型に適した温度に調節するところであり、多類の小型バーナがある。また、直接通電による電気加熱を行う場合もある。

b. 操業改善、設備改善による省エネルギー

フォアハースも溶解窯と同じく空気比制御、断熱強化が省エネルギー対策となる。

次にガスバーナの燃焼方式を 1)→2)→3)と変更して大幅な省エネルギーを達成した例を示す。

1) ベンチュリーミキサー、プレミックス方式

ガスと空気の混合にベンチュリーミキサーを使用したプレミックスバーナ方式：

欠点はゾーン間でガスと空気の干渉があり、どこかのゾーンで調節すると他のゾーンの空気比が変わってしまう。逆火の恐れあり。

2) ノズルミックス方式

ミキサーを使わずバーナ部でガスと空気を混合するノズルミックス方式：

欠点は逆火しないので過剰空気率を低く抑えて燃焼させることはできるが一本の配管で複数のバーナに空気またはガスを供給しているため、特定バーナの調整が他のバーナに影響を与えるというガスおよび空気のゾーン間干渉は残り、調整に多大の労力が必要である。

3) プレミキサー、プレミックス方式

ミキシングバルブとプロアーからなるプレミキサーを使用したプレミックス方式：

長所は全ゾーンのバーナを同じ空燃比で燃焼できる。

1本当たりの燃焼量を大きくし、バーナの数を減らし逆火を防止する。

1)の方式に比べて、64%の省エネルギーになる。

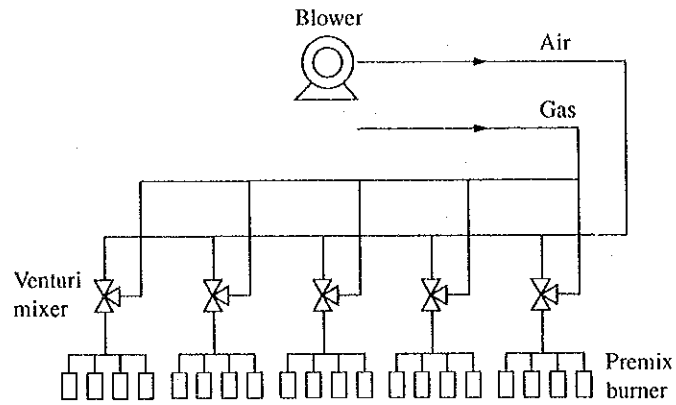
省エネルギーの結果を Table 4.1.6 に、各燃焼方式の設備比較を Figure 4.1.23 に示す。

Table 4.1.6 Result of Energy Conservation in Forehearth

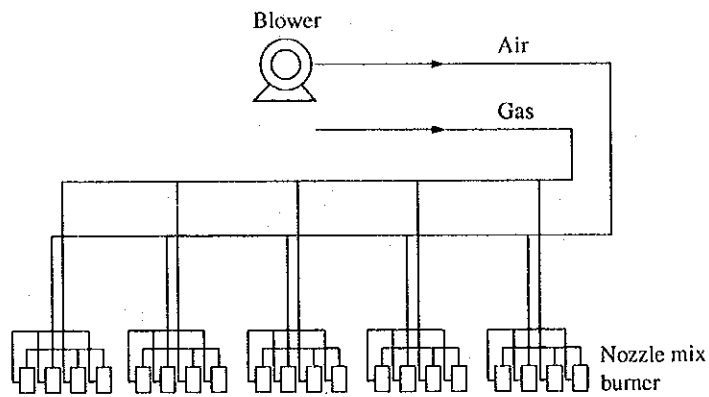
System	Oxygen in exhaust gas	Fuel gas consumption	Fuel saveing ratio
Ⓐ Venturi mixer and premix	8 %	85 m ³ N/h	0
Ⓑ Nozzle mix	6 %	65 m ³ N/h	23.5 %
Ⓒ Premixer and premix	1 %	30 m ³ N/h	64.7 %

Figure 4.1.23 Various Types of Combustion System

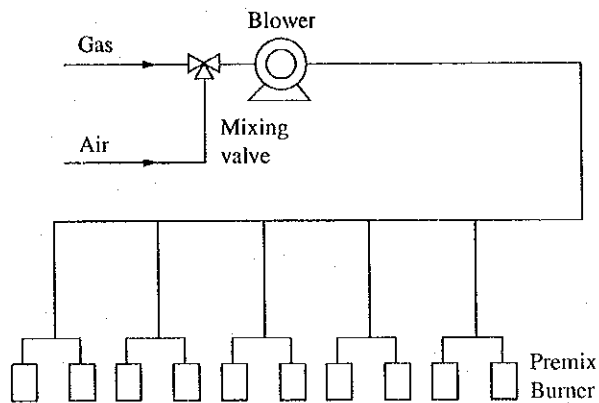
(A) Venturi mixer and premix system



(B) Nozzle mix system



(C) Premixer and premix system



(5) 成型設備

a. 成型工程

ガラスの成型法は、製造する品種により異なり多岐にわたるが機能的に大別すると、プレス (押型)、ブロー (吹型)、ドロー (引伸し)、ロール (圧延) に分けられる。これらを用いて種々の形状の製品を高いインデックスで生産している。

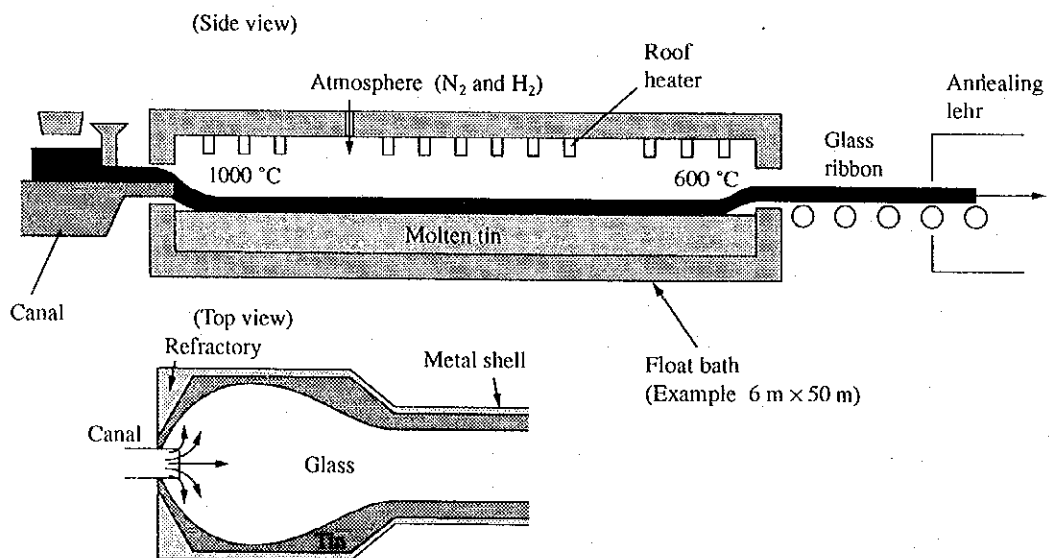
ガラス成型の本質は、ガラスの粘度が高温から常温までの温度域で急激に増大することを利用する点にある。

本稿では、板ガラスの主体を占めるフロート法とロールアウト法および容器ガラス成型法のうち、びんの I.S.マシンによる成型法と食器ガラスなど小規模な容器ガラス製造法について記述する。

1) フロート法

フロートガラスの製造法で熔融金属 (錫) を満たしたバスの中に熔融ガラスを導入しフローティングさせることにより平坦化させる方法で Figure 4.1.24 に例を示す。フロートバスの中には還元性ガス ($N_2 + H_2$) が満たされており、熔融錫の酸化を防止している。

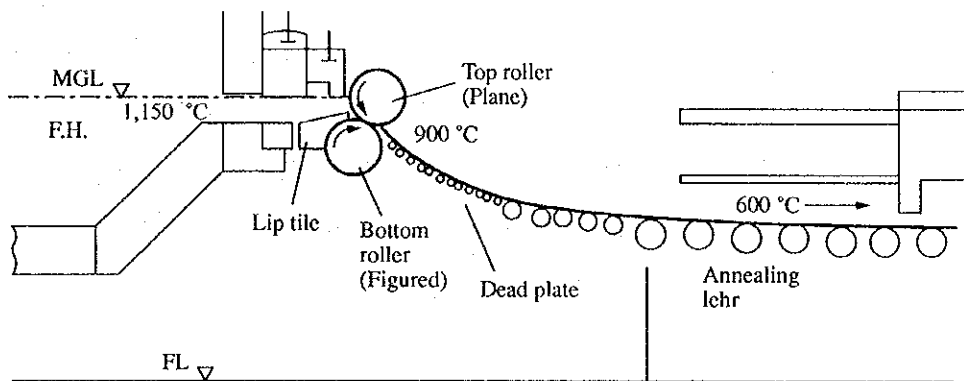
Figure 4.1.24 Float Process



2) ロールアウト法

型板ガラス、網入ガラスの製造法で 1 対のロールの間に溶融ガラスを導入し、圧延成型する方法であり Figure 4.1.25 に例を示す。通常下ロールにパターンが刻まれており、ロール間でガラスが圧延された時ガラスの下面に型柄が付くようになっている。

Figure 4.1.25 Rollout Process



3) びんガラスの成型法

びんガラスの成型法は多岐にわたっており、その分類法もいろいろあるが大別すると人工成型法と機械成型法に分けられる。

人工成型法は手吹き法と押し型法に分けられる。

機械成型法は、素地の供給法としてゴフ供給式とガラス吸込み式に分けられ、更にどちらの方式も回転テーブル型と独立セクション型に分けられる。

びんガラスの成型は、溶融ガラスを粘弾性範囲に移行させながら、冷却することで固化することを利用する。製びん機は熱交換器の 1 つで金型がその役割を果たしている。

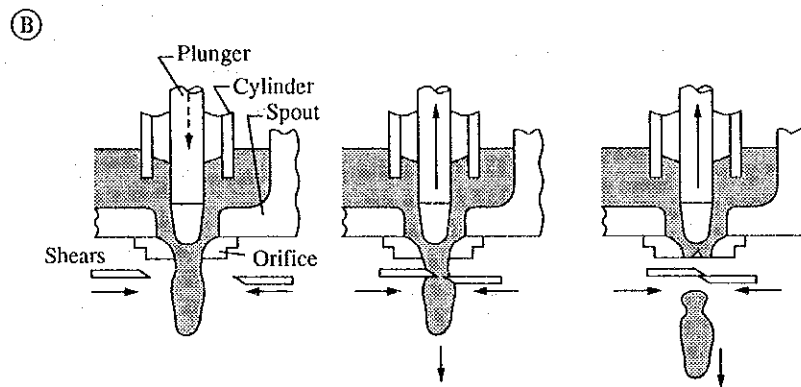
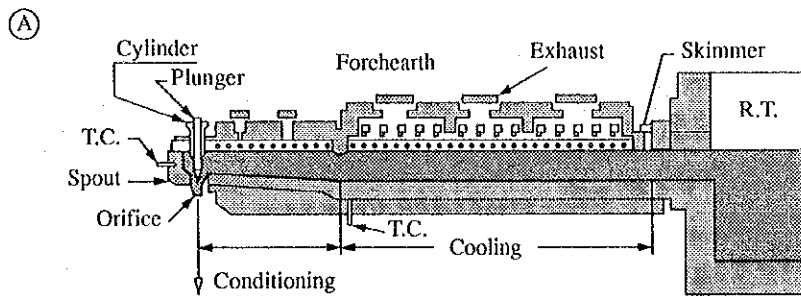
I.S.マシンは、独立セクションの Individual Section の略である。

I.S.マシンは、各セクションが各々独立して動かせることが特徴である。金型の取替えのときでもそのセクションだけを止められる特徴を持っている。この機械は、当初は 4 セクションであったが、4、5、6、8 と増えて、現

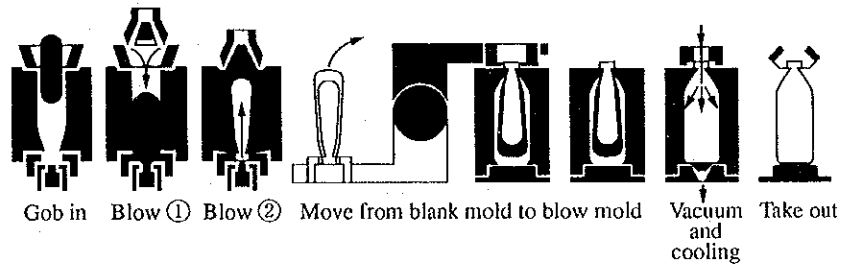
在は 10 セクション機も使われている。また、各セクションはシングル (single)、ダブル (double)、トリプル (triple)、クワッドループキャビティ (quadruple cavity) と同時にびん 4 本が吹製できるようになり、生産量が急速に増大してきた。この I.S.マシンは、現在世界中で最も多く使われている機種である。

I.S.マシンによる成型工程は、Figure 4.1.26-A,B,C に示すが、ガラスの種 (ゴブ : gob) はフィダーでブランク型に挿入される。成型は最初にブローイングによるか、あるいは型からプレッシング作用によるかいずれかによって始まる。次に逆位置にあるパリソン (parison) はブランク型から離れ、回転して正位置に戻しブロー型に入り、そこで成型仕上げが行われる。その間に次のパリソンがブランク型で成型されはじめている。仕上げられた製品は取出し装置で定置板に移され、部分的に冷却されまとめてコンベアで徐冷窯に送り込まれる。

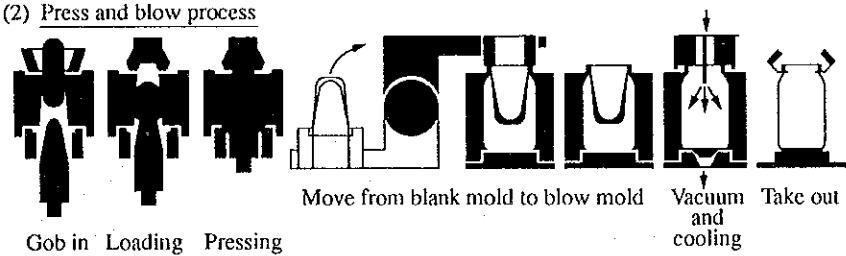
Figure 4.1.26 IS Machine Process



(C) (1) Blow and blow process



(2) Press and blow process



4) 食器ガラス成型法

多品種少量生産の手造りと量産機械型とあるが原理は共通である。

ガラス素地の取出し供給法については、びん成型と同様のゴフ方式の他に巻取り方式 (人力巻取、autogatherer) とチューブ方式 (作業槽より直接チュ

ープによりガラスを流下させモールドで受ける) とがある。

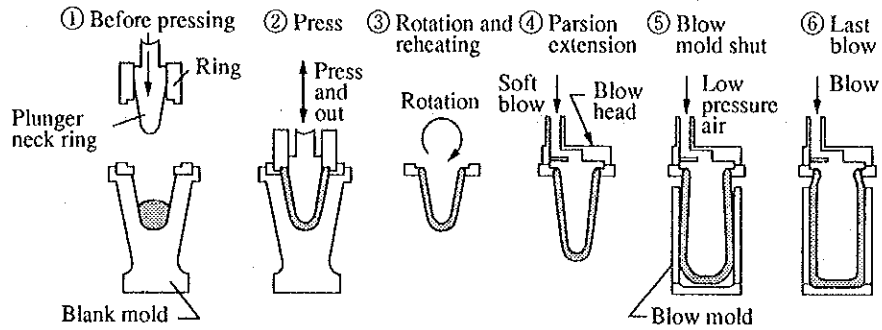
成型方法では、

- ① 型吹き (回し吹き): 一般的方法
- ② 型吹き (吹き込み): 複雑な多角形模様をつける肉簿製品
- ③ プレス成型: 金型に模様を彫刻する模様付き皿、鉢、肉厚コップなど。
- ④ 遠心成型 (Spining): 型を急速に回転し流し込んだガラスを遠心力で型に沿って広げる。平滑な内表面が得られる。
- ⑤ 全自動機械成型機: 代表的な成型機は、型吹きに Hart ford 社の H-28 機、プレス成型に Lynch 社の MDP 機がある。その他脚付コップ成型用に特殊な組合せ機械がある。

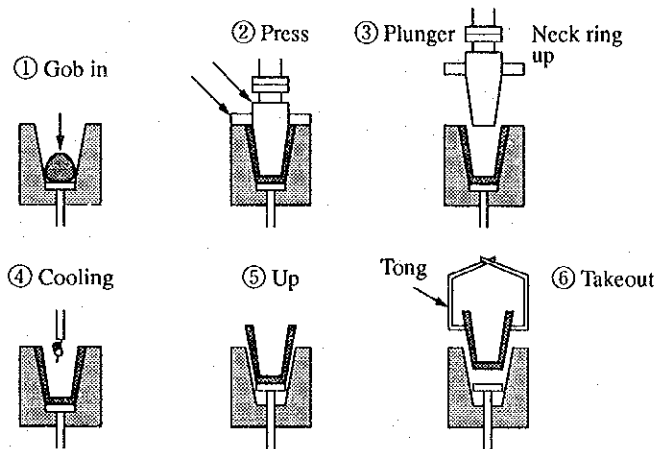
次に Figure 4.1.27-A,B,C に各種成型法を示す。

Figure 4.1.27 Various Types of Forming Processes

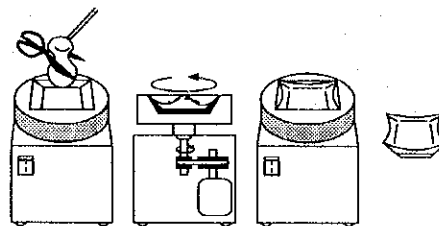
(A) Hartford H - 28



(B) Pressing



(C) Spinning (Hand made)



b. 操業改善、設備改善による省エネルギー

成型工程においては、機能第一で省エネルギーは付随的にならざるを得ないが、共通問題として無駄を省くことである。

成型工程のエネルギーの殆どは電力であり、Figure 4.1.28 に示すように工場電力の約半分以上が成型工程で占めている。

1) 機械・設備、コンプレッサー、送風機など、効率的配置と運転の効率

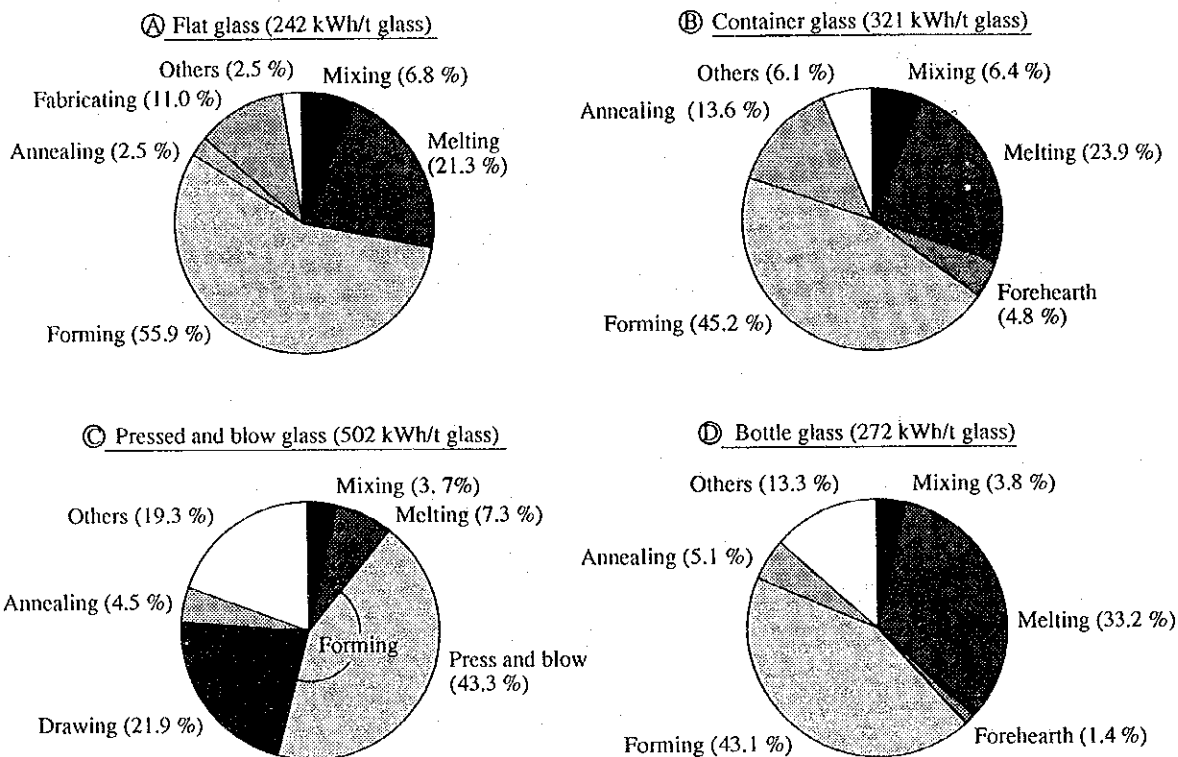
化による省電力。

2) 板ガラス・フロートバスの保温強化による放熱防止。

3) 管理強化、コンピュータ制御に伴なう歩留向上による省エネルギー。

Figure 4.1.28 Sharing Electricity Consumption

- Ⓐ Flat glass : USA data in 1980
- Ⓑ Container glass : USA data in 1980
- Ⓒ Pressed and blow glass: USA data in 1980
- Ⓓ Bottle glass : Average of bottle glass factories in Japan in 1984



(6) 徐冷設備

a. 徐冷工程

成型された製品は、熱的歪みが残らないよう徐冷炉で徐冷される。徐冷温度および時間はガラス組成、製品の肉厚などによって異なるが、一般に徐冷温度は 550~400℃の範囲である。徐冷されたガラスは冷却され徐冷炉を出る。徐冷炉を出た製品は、検査を受け、梱包、出荷される。また一部の

品物は再加工程に送られる。

徐冷炉はバッチ式の炉もあるが、板ガラスの場合は、ロール、びんなどの容器ガラスの場合は、メッシュベルトを持つトンネル型の連続炉である。徐冷炉の構造は従来のレンガ積みのものから最近では断熱材を貼った鉄板構造のものもある。また、加熱方法としては、ガス加熱のものと電気加熱のものが大半であるが、重油加熱式のものもあり、この場合はマッフルやラジアントチューブを用いた間接加熱方式がとられている。

b. 操業改善、設備改善による省エネルギー

1) 持ち込み熱の増加

成型を終えた製品の温度は、なお 600℃以上であるので、この熱を逃さずに徐冷炉に持ち込めば、加熱は殆ど不要になる筈である。そのためには、

- ・成型機と徐冷炉の距離を短くする。
- ・成型機を出た製品は、速やかに徐冷炉に装入する

2) 放熱防止

高温の間は徐冷する必要があるので、次ぎのような点に留意する。

- ・高温部の断熱並びに熱風漏洩防止
- ・装入口からの冷風侵入抑制
- ・製品寸法、生産量にマッチした炉断面形状
- ・装入製品の間隔短縮

3) 直接加熱方式の採用

徐冷炉では加熱温度域が 600℃以下で、間接加熱による放射伝熱では効率が悪い。このため、ガス燃料を使う場合は直火加熱方式とすること。

4) メッシュベルトの熱容量低下

メッシュベルト加熱に要する熱量が意外に大きいという 1 例を次に示す。

製品の処理 : 630kg/h

製品の平均比熱 : 0.252

製品が徐冷炉に入る温度 : 400℃
徐冷温度 : 550℃

この場合製品を加熱するのに要する熱量 Q_1 は、

$$Q_1 = 0.252 \times (550 - 400) \times 630 \times 41,868 = 99,704 \text{kJ/h}$$

上記製品を 1,500m/m のベルトで炉内搬送するものとし、

ベルトの重量 : 20kg/m²
ベルトの走行速度 : 380mm/min
炉に入る前の温度 : 常温 15℃
炉内での最高加熱温度 : 550℃
平均比熱 : 0.132

この場合、ベルトを加熱するのに要する熱量 Q_2 は、

$$Q_2 = 0.132 \times (550 - 15) \times 20 \times 0.38 \times 1.5 \times 60 \times 4,184 = 202,239 \text{kJ/h}$$

となり、製品を加熱する熱量の倍以上がベルトを加熱するために消費される。この熱量を節約するためには、なるべくベルトの線径を細くしたり、ピッチを疎にしたりして、単位面積当たりのベルト重量を軽くすることが考えられる。

その他、排ガスにより復路のメッシュベルトを予熱することも行われる。

5) 冷却域での省エネルギー

徐冷域を出たガラスは、冷却域で冷やされるができるだけ早く冷やしたいために通常強制冷却が行われる。

フロートガラスの徐冷炉のように、間接冷却で多くの冷却ファンが設置されている場合、ファンの集合化やインバータ制御により省エネルギーを行った例がある。

6) 徐冷炉の熱量原単位

徐冷炉の熱量原単位は製品の装入温度・形状・肉厚およびそれらの変化回数、操業時間、処理量、炉型式などによって大きく変化する。参考として日本でのいくつかの例を見ると、大部分は 1,500~3,500kJ/kg の範囲にあるが、大型のものでは 200kJ/kg と極端に低いものもある。したがって、成型品種が異なれば原単位の比較は意味がない。

次に参考として、各種ガラスの徐冷点、歪点と、各種製品の徐冷所要時間を Table 4.1.7、4.1.8 に示す。

Table 4.1.7 Annealing Point and Strain Point of Various Glasses

	Annealing point	Strain point
Alumino-Silicate glass (Example)	715 °C	665 °C
Boro-Silicate glass (Pyrex)	565 °C	520 °C
Soda-Lime glass	530 °C - 550 °C	480 °C - 510 °C
Lead glass (PbO 30 %)	440 °C	390 °C

Table 4.1.8 Standard Annealing Time of Various Products

Glass block (max. 95 mm × 145 mm × 300 mm)	240 minutes
Plate glass (25 mm × 250 mm × 250 mm)	120
Plate glass (19 mm thickness)	52 - 62
Tableware glass	30 - 50
TV bulb (14 inches)	45
Large size bottle	45
Electric bulb	15

4.1.4 日本のガラス工業の省エネルギー成果

(1) 板ガラス、びんガラスのエネルギー原単位の推移

日本のガラス工業の主体である板ガラスとびんガラスのエネルギー原単位の推移を Figure 4.1.29、4.1.30 に示す。

Figure 4.1.29 Trend of Energy Intensity Index in Sheet Glass Manufacturing

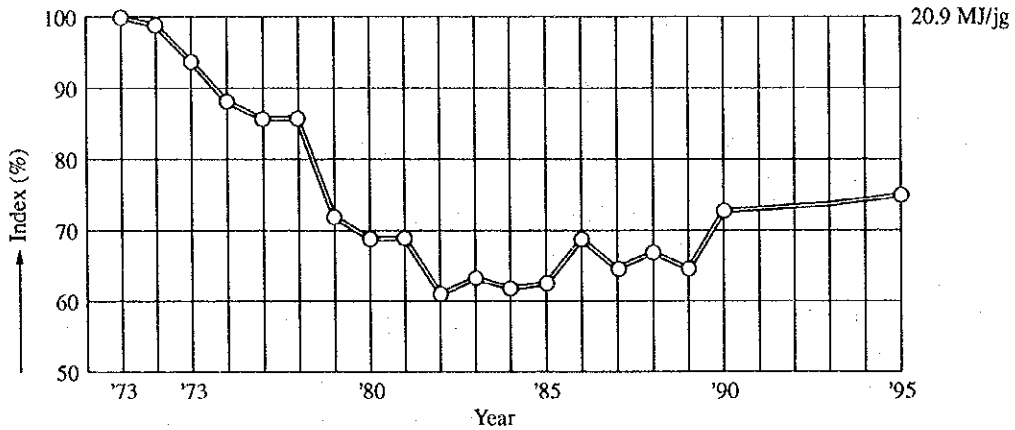
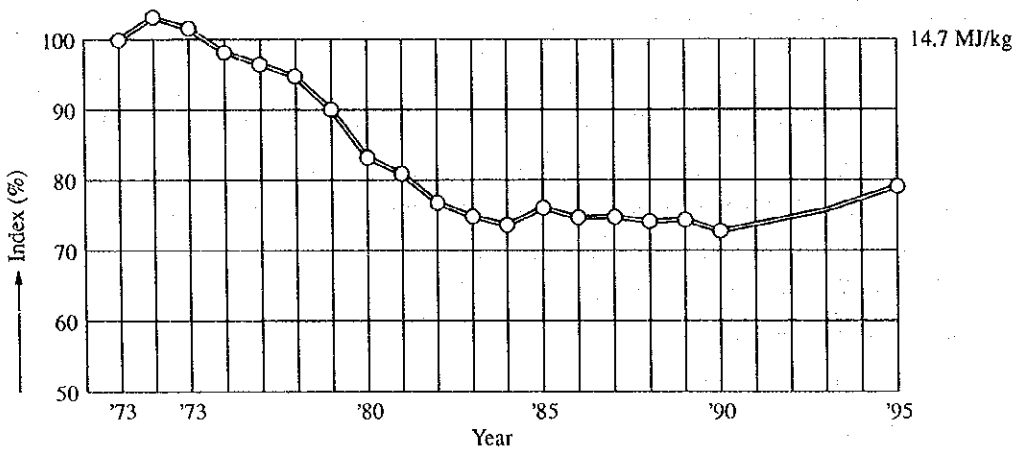


Figure 4.1.30 Trend of Energy Intensity Index in Bottle Glass Manufacturing

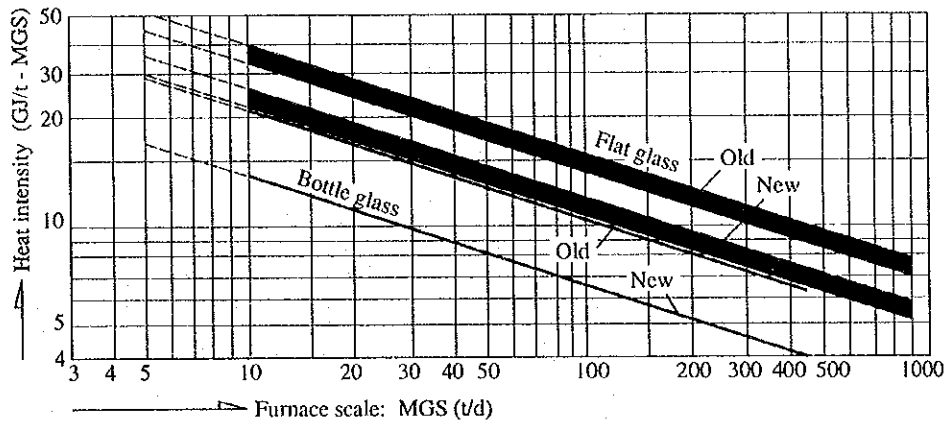


ガラス 1kg 当たりのエネルギー原単位は 1973 年を 100 とすると 1983 年で板ガラスは 65、びんガラスは 75 に低下している。その後は、横這い傾向である。世界のガラス製造業のエネルギー原単位を比較すると日本、ヨーロッパ、アメリカのエネルギー原単位が最も低くほぼ同等レベルとなっている。

(2) ガラス溶解窯のエネルギー原単位の改善

ガラス製造エネルギーの主体を占める溶解エネルギー原単位を Figure 4.1.3 を用いてプロットすると Figure 4.1.31 となる。

Figure 4.1.31 Relationship of Heat Intensity and Scale of Melting Furnace Old v.s. New



(3) エネルギー原単位改善の解析

a. ガラス溶解窯の熱精算の対比

省エネルギー対策実施以前に設計された窯と最近の窯の熱精算の対比を板ガラスの主体を占めるフロートガラス窯とびん窯について行い Figure 4.1.32、4.1.33 および Table 4.1.9 に示す。

Figure 4.1.32 Heat Balance Chart for Float Glass Melting Tank

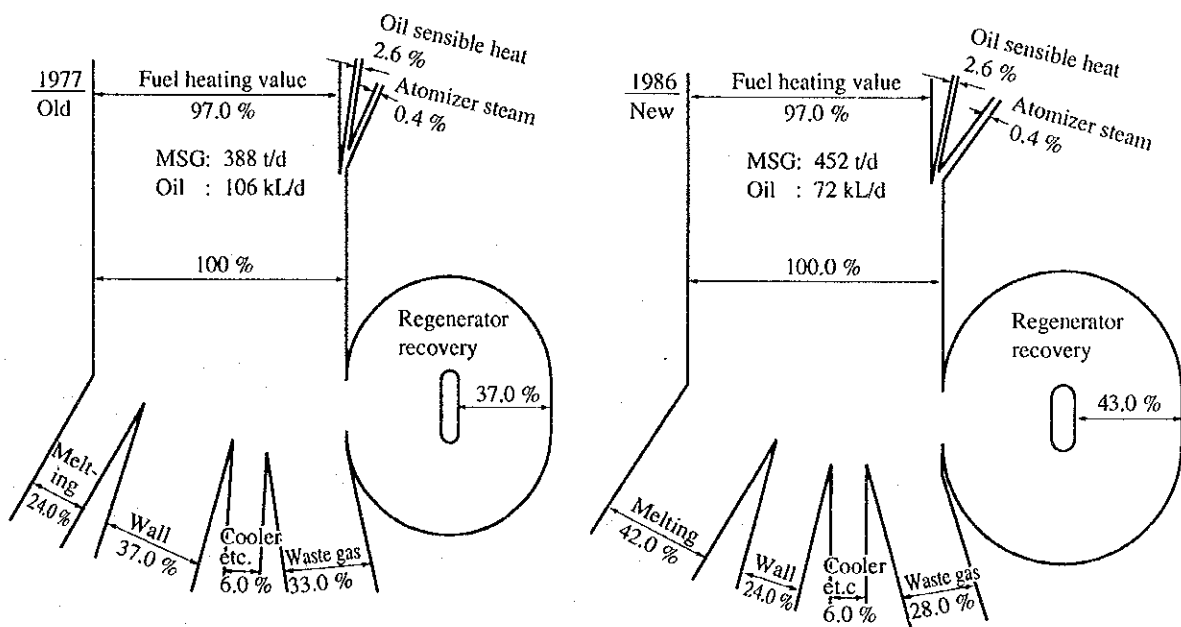


Figure 4.1.33 Heat Balance Chart for Bottle Glass Melting Tank

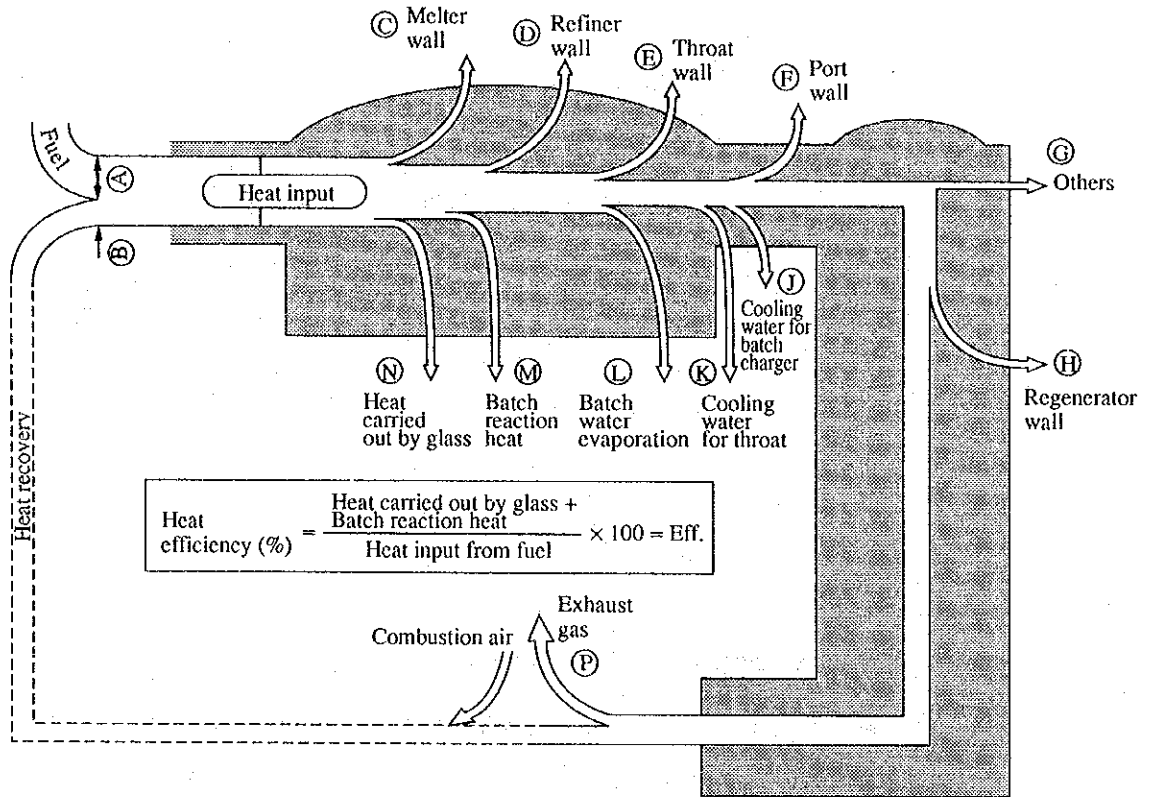


Table 4.1.9 Comparison of Heat Balance Data between Old Design and New Design

	Before	Old Design		New Design
	1973	1973	1973	1983
MG (t/d)		121	266	264
Fuel (GJ/h)		25.6	61.3	51.1
A Fuel input	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %
B Regenerator recovery	46.6 %	54.0 %	50.7 %	56.6 %
C Melting tank Wall	27.2 %	10.8 %	12.0 %	5.8 %
D Refining tank Wall	2.8 %	2.1 %	2.0 %	0.8 %
E Throat Wall	0.0 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
F Port Wall	2.7 %	1.7 %	1.7 %	1.4 %
G Others	18.0 %	15.9 %	21.1 %	27.0 %
H Regenerator Wall	8.9 %	7.8 %	9.0 %	4.2 %
(Total of wall loss)	(59.6 %)	(38.4 %)	(45.9 %)	(39.3 %)
J Batch cooler	0.9 %	0.2 %	0.2 %	0.0 %
K Throat cooler, etc.	2.1 %	0.6 %	0.2 %	0.3 %
(Total of cooler loss)	(3.0 %)	(0.8 %)	(0.4 %)	(0.3 %)
L Batch water		1.4 %	2.3 %	2.5 %
M Batch reaction		11.3 %	6.7 %	12.6 %
N Glass carried out		28.4 %	27.4 %	31.4 %
(Total: Efficiency)	(19.1 %)	(39.7 %)	(34.1 %)	(44.0 %)
P Exhaust loss	18.3 %	19.7 %	17.3 %	13.9 %

b. 省エネルギー成果総括

1) 板ガラスの省エネルギー

日本の代表的板ガラス製造業 3 社におけるエネルギー使用原単位例を Figure 4.1.30 に示した。図より明らかなように 1973 年からの 10 年間で約 35% 低下した。

その後横這い傾向にあるのは省エネルギー対策が一段落したことで、需給の関係で溶解負荷が軽減したためである。

次に省エネルギー 35% の内訳を要因別に大別する。

特に板ガラスの場合は、他のガラスと異なり、フロート法という新成型法

への転換と時期を同じくしたため窯の大型化によるスケールメリットによる省エネルギー効果が大きく寄与している。

・窯槽の統合によるスケールメリット	15%
・窯槽の断熱、保温の強化	10%
・蓄熱室改善による熱回収の向上	5%
・管理、技術の向上による製品歩留の向上	5%

2) びんガラスの省エネルギー

びんガラスのエネルギー原単位は、Figure 4.1.30 に示したとおり 1973 年から 10 年間で約 25%低下した。その後の横這い傾向は板ガラスと同じ理由である。びんガラスのエネルギー原単位の低減割合が板ガラスより少ないのは、板ガラスと異なりスケールメリット効果が少ないことと、溶解以外のエネルギー比率が大きいからである。

次に省エネルギー 25%の内訳を示すと下記のとおりとなる。

・窯槽の断熱、保温の強化	10%
・蓄熱室改善による熱回収の向上	5%
・溶解負荷の向上およびスケールメリット	5%
・カレット使用量増加	3%
・管理、技術の向上による製品歩留の向上	2%

3) その他ガラスの省エネルギー

日本のガラス工業製品の総量は最近、需要が横這い状況であり、年間 5,300,000 t 程度の生産量である。

品目別に見ると、板ガラスが約 27%、びんガラス (大手 9 社) で約 38%、ガラス繊維が約 13%を占める。残分 22%はその他のガラス製品に分類される。その他ガラスのエネルギー消費原単位を推定すると下記の結果が得られる。

全ガラス平均: 19 MJ/kg、板ガラス: 16 MJ/kg、びんガラス: 11 MJ/kg、ガラス繊維: 25 MJ/kg、その他ガラス: 33 MJ/kg であった。

その他ガラスの中にはブラウン管用ガラスのように比較的大きいタンク窯

で製造しているものもあるが、殆どは溶解量が 100t/d 以下の小さい窯である。因みにガラス繊維の溶解窯は殆どが数 10t/d のユニットメルトーと称するタンク窯である。

次にその他ガラスで実施された省エネルギー対策について述べる。

- ・断熱保温の強化
- ・蓄熱室、換熱室の改善による熱回収の増加
- ・操業・設備・エネルギー管理の充実、溶解負荷の向上、歩留の向上による省エネルギー

以上は共通的な項目であるが、特に小窯において効果をあげている対策としては、

- ・電気熔融窯への転換による省エネルギー

日本の場合は、溶解量 10 t/d 以下でないと経済的メリットは出ないが、品質上および公害防止の観点から 20 t/d 規模でも実施されている例がある。

- ・酸素バーナ燃焼による省エネルギー

酸素バーナについては、溶解量 5t/d の窯で燃料消費量がちょうど半分に減じた例がある。

