

## 9. プラスチック



## 9. プラスチック成形（押出成形）

### 9.1. プラスチック成形加工技術

高分子物を主とするプラスチック成形材料の加工技術（Processing technology）は、成形材料の調製、混合、ポリマー変性、成形材料構成物の表面処理などの変性操作、熔融、賦形、物理ないし化学変化（発泡、延伸、架橋、固化など）による加工操作、加工過程における成形物の物性改良操作、成形物の変形および表面加工のための2次加工操作に関する技術を対象とする。

プラスチック成形加工技術は、まず熱硬化性樹脂によってスタートした。そこでは加熱によって硬化すると同時に3次元構造になる熱硬化性樹脂の特性にマッチした加工法が進歩した。圧縮成形、積層成形、注型などである。一方、熱可塑性樹脂の出現、普及につれて、加熱により熔融され流動化する利点を生かした加工法が次々に開発されて現在にいたっている。押出成形、射出成形、延伸技術、発泡技術などである。この加工法の一部は熱硬化性技術にも応用されている。

現在実際に使用されている成形加工法と使用対象をまとめたのが Figure 9.1 である。

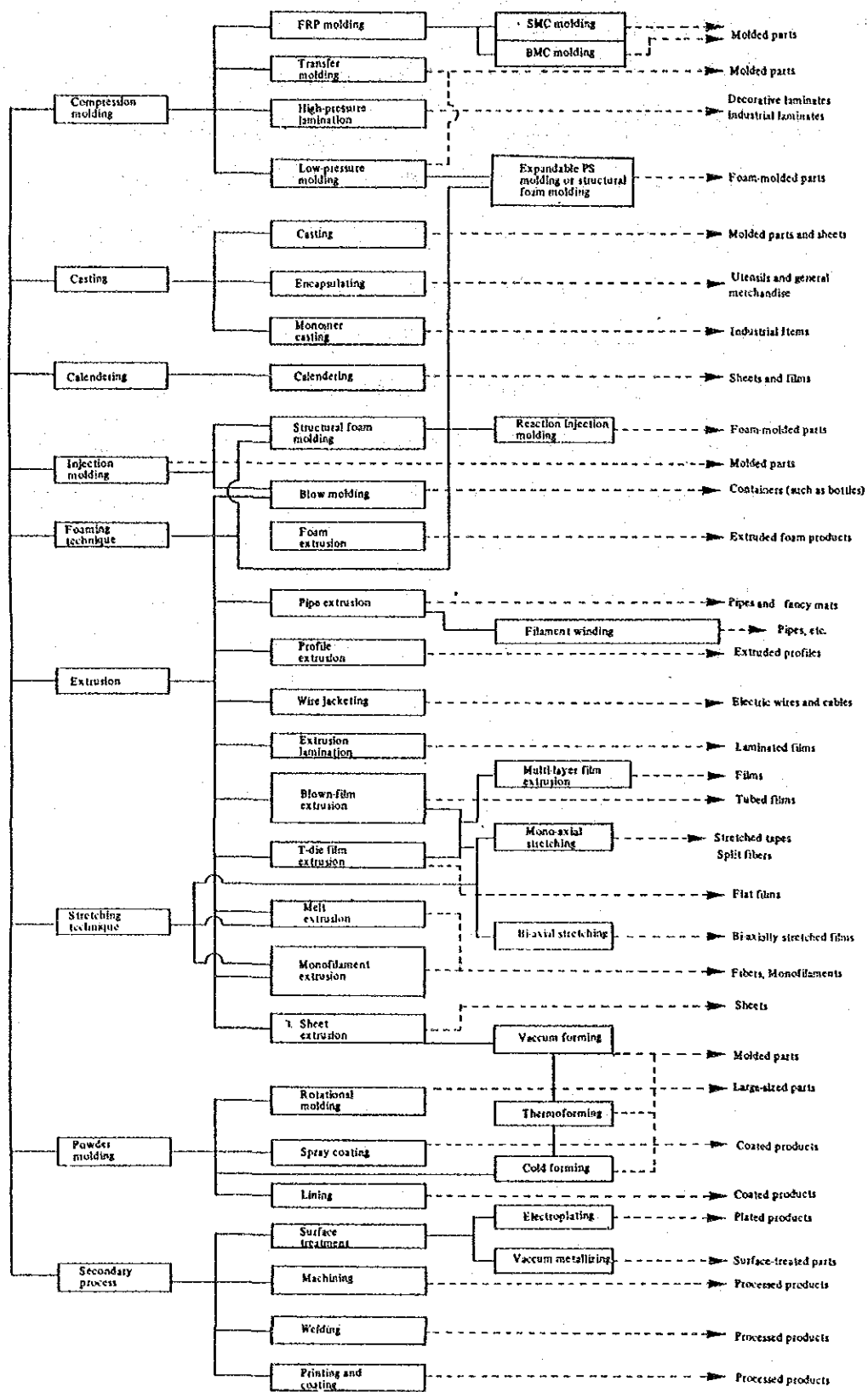


Figure 9-1 Plastics Processing Diagram

熱硬化性樹脂が主力であった頃は、圧縮成形と注型が主な加工法であったが、熱可塑樹脂の出現とともに能率的な射出成形、押出成形が主力に転換した。

押出成形は押出機 (extruder) を使って製品を連続的に加工する方法の総称である。したがって押出機による溶融、輸送の部分と、賦形、物性変化を行う応用技術の部分がある。押出成形の発展の過程を主に加工機械の変遷、多様化の形でFigure 9.2 に示した。また射出成形の場合も射出成形機の動向で表わしてみると、Figure 9.3 のようになる。

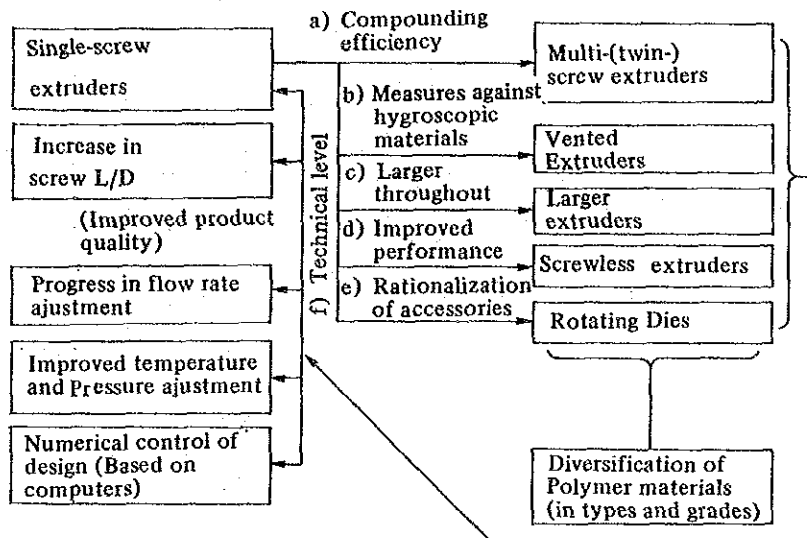


Figure 9-2 Progress in Extrusion Technology (or Extruders)

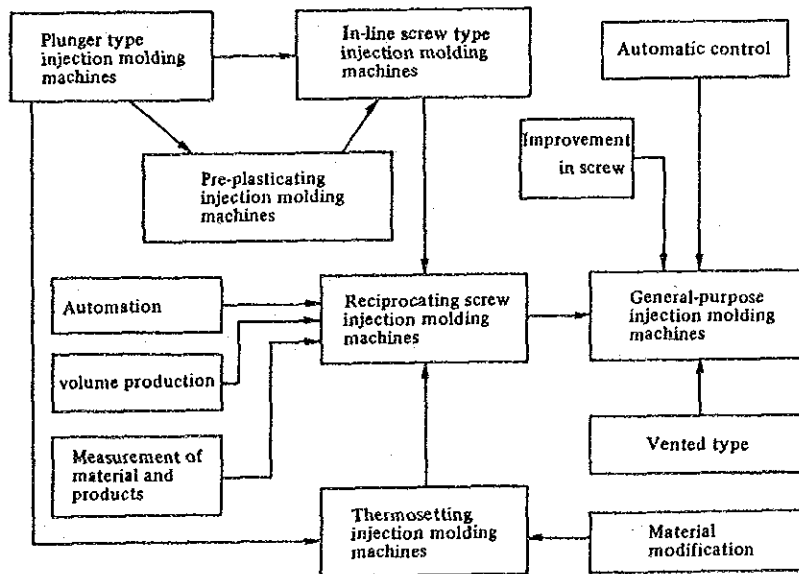


Figure 9-3 Progress of Injection Molding Machines

## 9.2. 押出成形設備

押出成形 (extrusion molding)とはスクリーを内蔵した押出機 (extruder) を使用し、それぞれ形状を異にした押出用ダイ (extrusion die)から、熱可塑性樹脂を加熱軟化させて加圧押し、パイプ、棒、プロファイル (異形)、シート、フィルム、モノフィラメントあるいは被覆電線のような製品を連続的に押し出し、これをサイザーで冷却固化して所望の製品を得る方法である。その一例として Figure 9-4 にパイプ、チューブ押出成形ラインを示す。

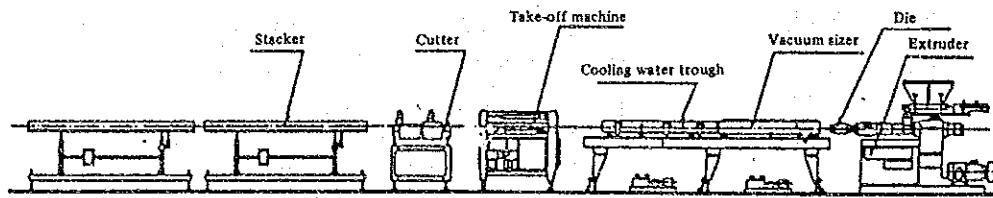


Figure 9-4 Pipe and Tube Extrusion System

この基本的な成形法から出発して、クッション材や合成木材などの発泡押出技術、多層フィルムシートなどの共押出 (Co-Extrusion) 技術、スチールワイヤー入りホースなどの複合技術、あるいはフレキシブルらせん管、ネットなどの非連続製品の押出技術などが開発されている。

一方ではフェノールやエポキシなどの熱硬化性樹脂の連続押出成形やさらにセラミックなど、スクリー押出機による連続押出の新しい技術が次々と開発されている。

押出機には1本のスクリーを用いる単軸スクリー式と2本以上のスクリーを用いる多軸スクリー式および特殊な原料混練用押出機がある。このうち単軸スクリーといわれる1本スクリー押出機が主として使用されており、2本スクリー押出機がこれに次いでいる。特殊押出機は混練用が主体でその目的に応じて各種のものがある。

### (1) 単軸 (1軸) スクリー押出機

1軸スクリー押出機は構造が簡単で、全てのプラスチックを押し出すことができるもので、その一例を Figure 9.5 に示す。駆動装置、シリンダー、スクリー加熱冷却装置、温度制御装置および圧力計などから成っている。

1軸スクリー-押出機にはベント式とノーベント式がある。Figure 9.5 に示した押出機はノーベント式であるが、シリンダーの中途にベント孔を設けたものがベント式である。ベント式では材料（ペレット又は粉体）と一緒に食いだまれた空気や材料中に含まれている揮発分をこの孔から取り除くことができる。

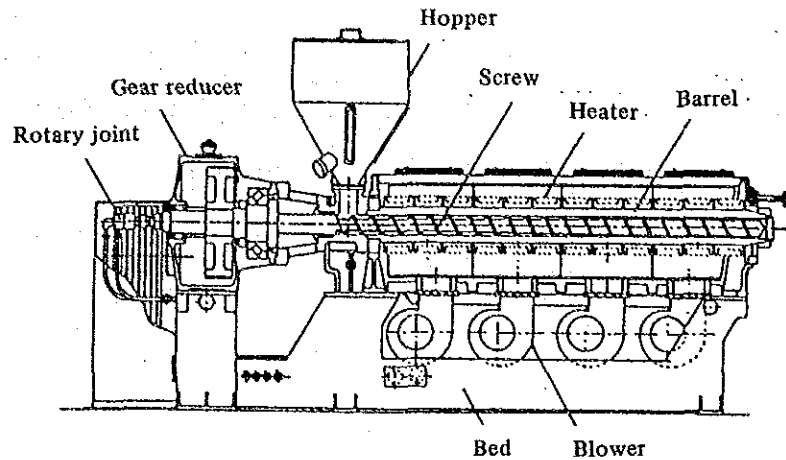
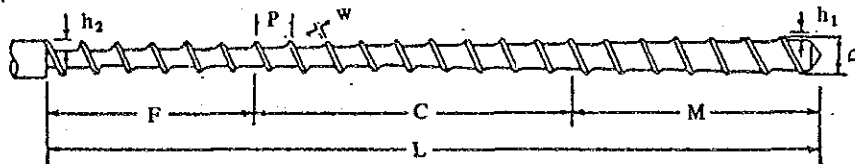


Figure 9-5 Single-Screw Extruder (Unvented)

Figure 9.6 は1軸スクリー-の基本構造で、材料供給部となる Feed Zone (F) と樹脂が圧縮され可塑化が始まる Compression Zone (C) と完全に熔融した材料が計量押出される Metering Zone (M) からなっている。この中でも重要なのは、圧縮比 (CR) と有効長(L/D) およびスクリー-山頂とシリンダー壁とのすき間である。



$$P = D \quad w = 1/10 \cdot P$$

$$\text{Compression ratio CR} = \frac{V_2}{V_1}$$

$V_1$  : Volume of space provided by the flight depth at the end of the metering section,  $h_1$  and one screw pitch.

$V_2$  : Volume of space provided by the flight depth at the base of the screw,  $h_2$ , and one screw pitch.

(Note: In calculating the volume, take the round at flight base into account.)

$$\text{Screw length to screw diameter ratio} = \frac{L}{D}$$

L = Screw length  
D = Screw outside diameter  
F = Length of feed section  
C = Length of compression section  
M = Length of metering section

P = Screw pitch  
w = Flight width  
 $h_1$  = Flight depth at the end of screw  
 $h_2$  = Flight depth at the base of screw  
As a simple method, compression ratio can be expressed frequently in the ratio of the flight depth - that is,  $CR = h_2/h_1$ .

Note: The allowance between the top of the screw flight and inside of the barrel is to be between 0.07 and 0.09 mm.

Figure 9-6 Basic Design of Mono-Axial Screw

1軸押出機は一般にせん断効果は大きいが分散混合作用が小さく、フリクションにより樹脂が発熱し、樹脂温度の分布が不均一になりやすいため、高速成形とか条件が異なった場合はよほど適切なスクリーでない限り精度の高い成形品を得ることは難しい。そのためスクリーに各種の改良がなされている。

## (2) 多軸（2軸）スクリー押出機

2本あるいはそれ以上のスクリーを使用した押出機を多軸押出機というが、そのほとんどが2本スクリーである。スクリーには深溝型と浅溝型、噛合型と非噛合型があり、また回転方向も、同方向回転型と異方向回転型がある。

2軸押出機は、混練機能、押出性能が優れているが、駆動系やスクリー軸の機械的強度の限界により性能が決まることが多い。そのため駆動部のスペースが大きく、スラスト軸受や歯車の大きさの制約が少ない2軸コンカルスクリー押出機も開発されている。

## 9.3. 押出成形と省エネルギー

### (1) 押出成形に必要なエネルギー

押出成形に用いられている押出機においては、樹脂を可塑化する作用と樹脂を送る作用とが必要とされる。

樹脂の可塑化とは、固体の樹脂が加熱されて熔融体に至るまでの状態の変化過程を言う。また、送りは供給された樹脂が押出機の方法投入口（ホッパ）より吐出口に向かって加圧され、輸送されることを言う。

この他に樹脂は固体状態、可塑化過程あるいは熔融状態で混合・混練を受ける必要がある。

押出を行うに必要なエネルギーは、

- ① ホッパに供給された樹脂を熔融し、所要の温度にまで昇温するためのエンタルピー増加分に該当する熱エネルギー
- ② 樹脂を可塑化させる過程及び可塑化された後に樹脂にせん断を加え混練するための機械的エネルギー
- ③ 樹脂を1気圧から所要の圧力まで高めて押出すためのポンプ作用に必要な機械的エネルギー

である。このうち①の、樹脂を室温から所要温度にまで加熱し熔融させるためのエネルギーは、シリンダに設けられたヒータから熱伝導により供給される部分もある



が、②の可塑化される過程及び可塑化された後に樹脂に加えられるせん断による自己発熱の寄与も無視しえないものである。

③の樹脂を1気圧から所要の圧力まで高めて押出すためのポンプ作用に必要な機械的エネルギーは、計算してみると比較的小さい値となる。

実際にはスクリー駆動動力のかなりの部分がポンプ作用以外の作用、すなわち主として②の、樹脂を可塑化させる過程及び可塑化された後に樹脂にせん断を加え混練するための機械的エネルギーとして使用されるが、②項目の目的に使用された機械的エネルギーは摩擦熱として熱に変換される。また、ポンプ作用のエネルギーについてもダイ内流動の際の粘性摩擦が熱に変換される。

押出機の機能としては①②③の三つが必要であるが、エネルギー入力として、シリンダ加熱ヒータ、駆動モータの二つのエネルギー源でまかなっていることとなる。

省エネルギーという観点から言えばこの二つに着目する必要がある。

- 1) 駆動モータの電力利用効率の向上。
  - 2) 減速機、軸受など動力伝達系の機械的損失の減少。
  - 3) 押出機内で樹脂の受けるせん断量を許容しうる範囲で減らし、無駄な自己発熱を防止する。
  - 4) 温度調整に当たって加熱、冷却の繰返しを防止し、その回数を最小必要限とする。
  - 5) 熱放散を防ぐ。
- (2) スクリュー駆動

モータ馬力は使用する樹脂、スクリー形状により相当違いはあるが、一般的な目安として押出量1kg/h当り、メタクリル樹脂0.66HP、低密度ポリエチレン0.44HP、軟質塩化ビニル0.33HP、耐衝撃性ポリスチレン0.22~0.30HPと考えてよい。

駆動装置で重要なことは、無段変速範囲と高荷重下の速度安定性である。速度調整は、①機械的ギヤーボックス、②電氣的無段変速モータ（直流又は交流）によって行われるが、今日では①の機械的ギヤーボックスによる速度調整は殆んど無くなった。押出機用モータとしては可変速モータが使用されるが、そのうち多く使用されるものとして、渦電流継手付きモータ、直流モータ、可変周波数インバータモータなどがある。この中で電力利用効率の良いものは後の二者であって、渦電流継手モータは低速度領域で継手部のロスが大きく、省エネルギーの観点から好ましくない。

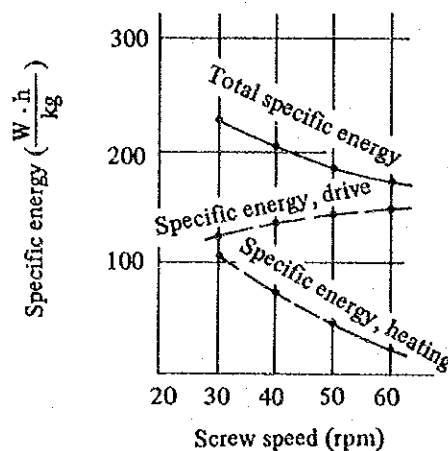
直流モータは、正確な速度コントロールができ、低速度でも高効率で、操作が簡単

である。普通の押出操作では、モータは定格の半分位で使用されることが多いので、低速度でも効率の良い直流モータが、高価ではあるが、エネルギー節約のために昨今では一般に使用されるようになって来た。

工場内の電圧変動に対し、交流モータは直接変動を受けるのに対して、直流モータは制御盤の定電圧装置により、電圧変動を安定化して使用する為、押出製品の寸法精度も向上するという効果がある。

### (3) シリンダーバレルの加熱・冷却

押出機に供給された材料は、シリンダーバレル内で熱を得て熔融し、ダイから製品として押出される。押出機の初期のものは、主としてヒータにより加熱されたシリンダーから材料に熱を与えて熔融させていた。押出機の性能が向上するにつれて、シリンダーバレル内での材料の摩擦熱による内部発熱が大きくなり、とくに硬質塩化ビニル樹脂、ABC樹脂では、内部発熱のみで熔融が行われる断熱押出操作に近くなる。そのため、押出機を外部から加熱すると同時に冷却も併用できる加熱冷却系が必要になってきた。ヒータは始動時にシリンダーの温度を加工温度にまで上げることと、操作中のフィードゾーンにある材料を加熱することに用いられ、バレル内の材料を熔融するための熱は、主としてスクリーウの機械的仕事を通じて与えられるようになりつつある。この現況を Figure 9.7 に示した。材料の温度上昇は、回転数が少ない時にはヒータによる熱が大部分であるが、回転数が増すにつれ、スクリーウ回転による内部発熱で行われることが分かる。



Extruder : Screw diameter = 90 mm  
L/D = 20  
Material used : Low-density polyethylene

Figure 9-7 Energy Balance of Extruder

押出機の加熱冷却系は、ある時間内に希望する操作温度にまで冷たい押出機をヒートアップすることと、バレルとスクリー温度を押出操作中最小の温度変動で希望する操作温度に維持することにより、押出物の温度、圧力と押出量の均一性を保持することに重要な役割を持っている。加熱・冷却系の不適当な設計あるいは調整はバレルあるいはスクリーに周期的な温度変動を生じ、押出された製品の均一性に悪い影響を与えることになる。シリンダーバレルの温度調整には、油加熱法と電気加熱法（抵抗加熱とインダクション加熱）が用いられる。その中でも、抵抗加熱方式が最も広く採用されている。

抵抗加熱方式では、バンドヒータ又はシース線アルミ鋳込みヒータが用いられる。使用温度が 350℃を越えるものに対しては、シース線真ちゅう鋳込みヒータ、鉄鋳込みヒータが用いられる。バンドヒータ、アルミ鋳込みヒータは、単位伝熱面積当たり 2～5 W/cm<sup>2</sup>のワット密度で設計されるのに対し、真ちゅう、鋳込みヒータでは 7～8 W/cm<sup>2</sup>までとなりうる。

スクリー内の樹脂の摩擦熱による加熱を防止し、シリンダー温度を適温に制御するために、シリンダーの強制冷却が行われる。強制冷却方式には、制御ゾーンごとに設けたプロワによる空冷、鋳込みヒータ内に同時に鋳込んだステンレスパイプ内、又はシリンダー外周に溝加工を行い、巻付けたパイプ内に、水又は油を流して冷却を行う液冷方式がある。

#### (4) 温度制御システム

加熱・冷却の制御は、各制御ゾーンの中央のシリンダー内壁に挿入した熱電対又は測温抵抗体の出力を、温度指示調節計(TIC)に入力して行う。

初期の加熱、冷却制御は加熱制御を主体とし、付加的に冷却制御を行うもので、ON-OFF制御が大半であった。

ヒータを加熱し、シリンダーに設けられたセンサが設定温度に達したことを感知したならば通電が切れてタイマが作動し、つづいて同タイマがタイムアウトしたならばファンが起動し、冷却が開始されるものが一般的であった。なお、上記によって冷却が進行したならば再びヒータが通電され、以後引続き加熱・冷却が繰返される。

このような方式によって加熱・冷却を行う場合には、加熱・冷却とも偏差修正動作が適正量より多少過度に行われ、次いで過度に行われた分に対して補正する動作が行われるので加熱・冷却が高頻度で交互に行われる。

この制御では温度が不均一になりやすいので、ほとんど姿を消し、P制御式（比例制御式）が一般化した。

さらに最近では、機能的に優れたPID動作（比例積分・微分制御方式）のものが普及してきた。また、制御精度の向上とエネルギー損失を少なくする観点より、冷却制御が加熱制御と同一水準で検討されるようになった。

その結果、最近加熱温度（ヒータ通電）と冷却過程（ファン通電）の双方にPID（比率-積分-微分）を採り入れたデュアルPIDと呼ばれるものが採用されるようになった。

このH/C-dual調節方式では、設定点において加熱も冷却も行わない機能（デッドバンド機能）と、加熱と冷却を同時に行える機能（オーバーラップ機能）を有しているのが特長である。

デュアルPIDでは、加熱過程にせよ冷却過程にせよ温度の偏差あるいはオフセットを極めて小さく保ちうるので、加熱用の設定点（上限設定点）と冷却用設定点（下限設定点）をそれぞれ設け、両設定点の間にわずかの不感帯（デッドバンド）を有するようにして、この帯域の温度で運転すれば加熱も冷却も行われない時間帯の割合が大幅に増え、省エネルギー効果が著しい。この装置の出力作動線図を Figure 9.8 に示す。

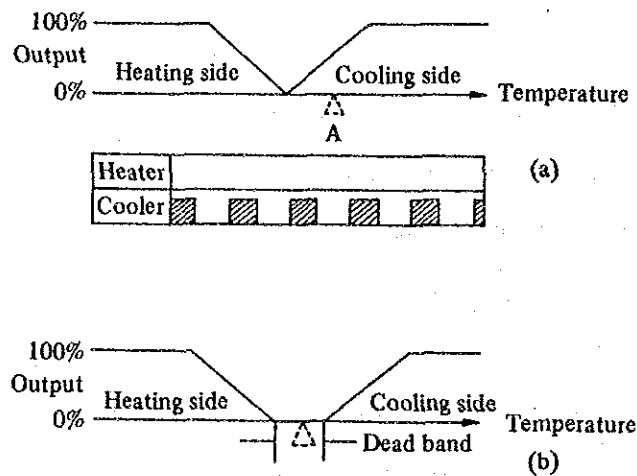


Figure 9-8 Diagram of Temperature Controller Output

同図(a)ではA点、すなわち冷却側でシリンダー温度が安定すると冷却制御だけでよいため、ヒータの電力は不要となる。一方同図(b)に示すようにデッドバンド機能により、B点で安定すると加熱・冷却両方の電力は不要となる。Figure 9.9に、制御方式の差による温度制御精度の差を示す。

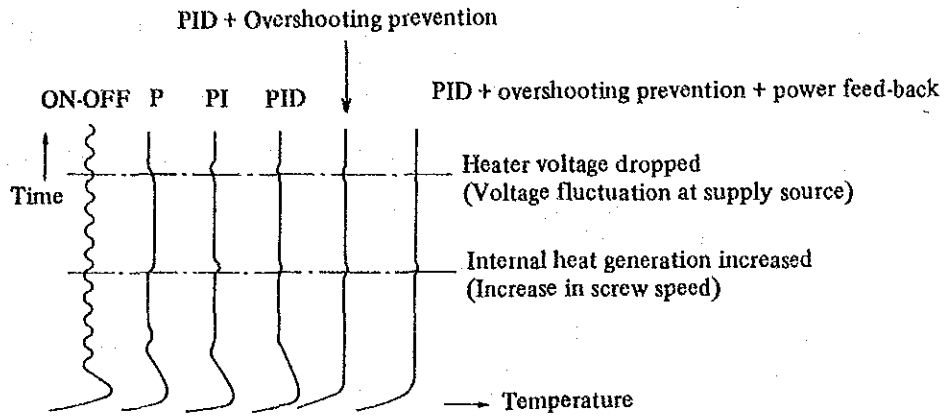


Figure 9-9 Comparison of Various Controlling Methods in Accuracy of Control

従来の比例制御方式とPID 制御方式をそれぞれ取付けた場合の消費電力の比較結果を Table 9.1 に示す。

Table 9-1 Comparison of Electric Consumption between Proportional Control and PID Control

Zone	Conventional Method (Proportional control)		Energy conscious method (PID control, with dead band)	
	Hours of heater energized and electric consumption	Hours of blower in action and electric consumption	Hours of heater energized and electric consumption	Hours of blower in action and electric consumption
C1	0.4h × 10kW = 4kWh	0.6h × 0.64kW = 0.38kWh	0.22h × 10kW = 2.2kWh	Not energized
C2	0.2h × 10kW = 2kWh	0.8h × 0.64kW = 0.51kWh	Not energized	0.5h × 0.64kW = 0.32kWh
C3	0.26h × 10kW = 2.6kWh	0.74h × 0.64kW = 0.47kWh	Not energized	0.5h × 0.64kW = 0.32kWh
C4	0.29h × 10kW = 2.9kWh	0.71h × 0.64kW = 0.45kWh	0.04h × 10kW = 0.4kWh	0.01h × 0.64kW = 0.01kWh
Total	11.5kWh	1.81kWh	2.6kWh	0.65kWh
	13.31kWh		3.25kWh	
Comparison	100%		Equivalent to 24.4% (Saving by 75.6%)	

Note : Cylinder diameter 50mm  
Heater 10kW × 4  
Blower 0.64kW × 4

従来の比例制御方式では、ヒータの電力消費量は 11.5kWh、ブロワーの電力消費量は1.81kWh で合計 13.31kWh となっている。これに対してPID 制御方式ではヒータ電力消費量は2.6kWh、ブロワー電力消費量は0.65kWh で、合計3.25kWh であった。比例制御方式を100 とした場合PID 制御は 24.4 となり75.6%の節約となる。

スクリー直径40mmφ、L/D =24の押出機を使用して LDPE を押出した時の、駆動力と加熱・冷却に要する電力を合計した比エネルギー（単位押出量を得るための電力量）をTable 9.2 に示す。この表から分かるように、直流モータとデュアルPID(加熱 PID-冷却PID)では、渦電流継手モータと加熱 P 制御の場合に比べて高速域では 26.96%、低速域では 59.32%の節電になる。

なお、理論限界エネルギーとしては、樹脂を熔融させるに必要な熱量 3.92kW とポンプ作用で吐出させるに必要なエネルギー 0.0691kW を加えた3.989kW を吐出量25kg/hr で割った 0.1595kW-hr/kg を使用した。

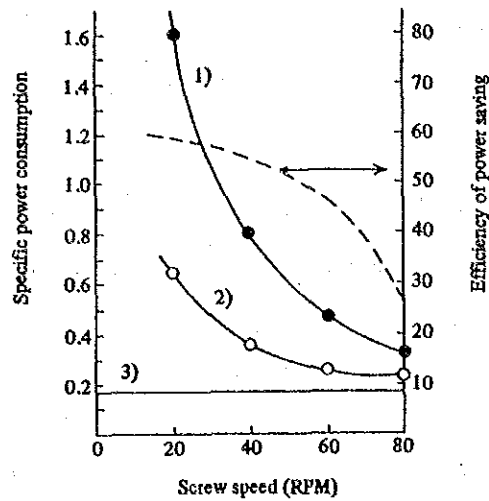
この表を見やすくするためにグラフ化したのがFigure 5.9.10 である。この図から分かるように、駆動モータと温度調節計を交換するだけでほぼ50%の省エネルギーが達成される。

Table 9-2 Comparison of Total Electric Energy Consumption by Driving and Heating/Cooling

Specific power consumption (kwh/kg)				
Screw speed (RPM)	20	40	60	80
DC motor + heater, PID controlled -- cooler, PID controlled	0.644	0.357	0.248	0.233
Ideal critical specific power consumption/ Actual specific power consumption	(24.77%)	(44.68%)	(64.31%)	(68.45%)
Eddy current coupling motor + heater, P controlled	1.583	0.788	0.465	0.319
Ideal critical specific power consumption/ actual specific power consumption	(10.08%)	(20.24%)	(34.30%)	(50.00%)
Power saved by adopting: DC motor + heater, PID controlled -- cooler, PID controlled	0.939	0.431	0.217	0.086
Power saved/eddy current motor + heater, p controlled	(59.32%)	(54.70%)	(46.67%)	(26.96%)

Note: The ideal critical specific power consumption was assumed to be 0.1595 kW-hr/kg. The saved power is equivalent to the difference in power consumption between eddy current coupling motor + P controlled heater combination and DC motor + PID controlled heater + PID controlled cooler combination.

- 1) Eddy current coupling motor + P controlled heater
- 2) DC motor + PID controlled heater - PID controlled cooler
- 3) Ideal critical specific power consumption



**Figure 9-10 Comparison of Total Electric Energy Required for Driving and Heating/Cooling**  
 (Efficiency of power saving indicates: Saved Power consumption/Power required for eddy current motor + P controlled heater)

#### 9.4. 押出成形材料と造粒

##### (1) PVC と配合剤

従来から硬質異形押出には懸濁重合のP1,000~1,300のストレートポリマーが、軟質PVCにはP1,300~1,500のストレートポリマーが、特殊なゴム弾性を必要とする場合はP2,500~3,500のストレートポリマーを使用する。

PVCの配合剤としては可塑剤、安定剤、滑剤、充てん剤および補強助剤などがあり、これらの配合により塩化ビニル樹脂に硬度、弾性、耐摩耗性、耐化学薬品性、耐油性、耐候性、耐燃性および無毒性などの諸性質を所望のごとく付与することができる。

軟質PVCに使用される可塑剤の種類は非常に多いが、フタル酸エステル系可塑剤としてはDOP(di-2-ethylhexyl phthalate)が代表的である。

PVC用の安定剤としては鉛塩、金属石鹼、有機スズ安定剤および安定化助剤などがある。

PVC窓枠などの建材は耐衝撃性を向上させるために各種の耐衝撃性向上剤が使用される。塩素化ポリエチレンは代表的で、その他エチレン酢ビ共重合体(EVA)、塩ビグRAFTマーおよびアクリレートなどであるが、これらは均一にしてかつ十分な分散、

混合、混練を行わなければならない。

## (2) PVC のブレンディングと造粒

配合は塩化ビニル加工の出発点であり、配合の優劣は押出加工の操作性に直接影響をおよぼすものである。

ブレンディングとは P.V.C.、可塑剤、安定剤などをブレンダーなどで混ぜることをいい、コンパウンディングとは、これら混合されたものを、混練ロールあるいは押出機で混練りして粒状とすることである。

配合工程から粒状または粉状混合物までの工程にはいろいろの方法が取られるが、これらのフローシートをFigure 9.11 に示す。

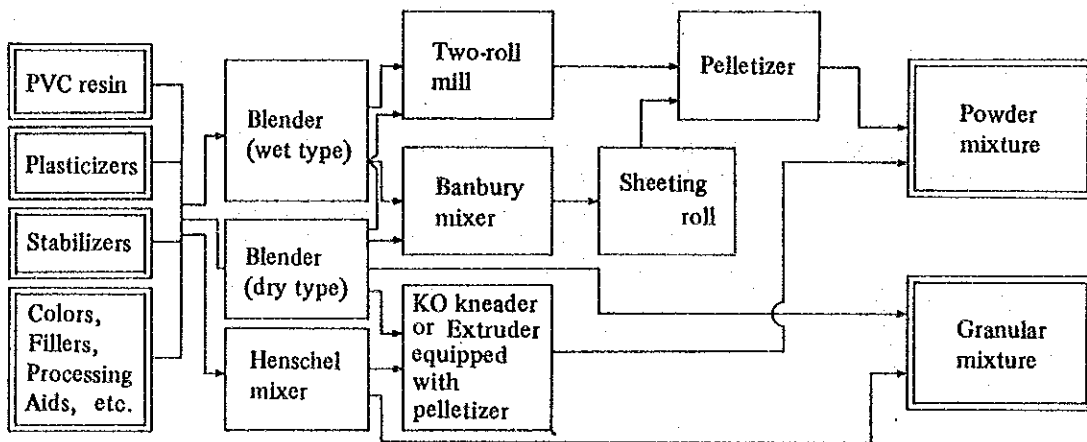


Figure 9-11 Compounding Process Flow Sheet

ブレンディングには一般的にヘンセルミキサーが用いられる。

ヘンセルミキサーは、リボンブレンダーとはやや趣を異にし、羽根の高速回転による摩擦熱により、樹脂を半ゲル化させて効能率にコンパウンディングするものである。

Figure 9.12 にヘンセルミキサーの内部構造を示す。



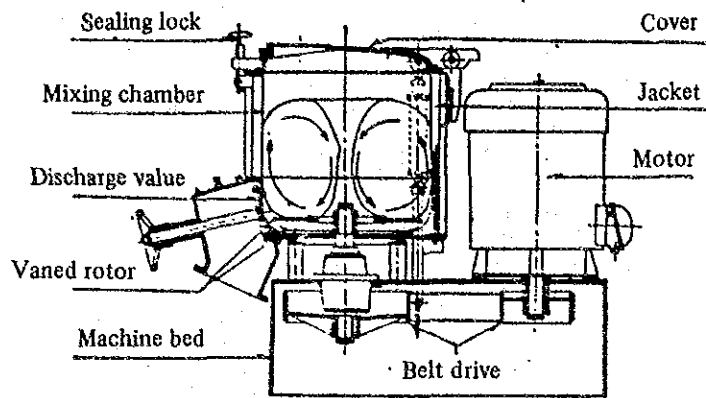


Figure 9-12 Construction of Henschel Mixer

本機は加熱装置と冷却装置をもつコンテナと超高速回転の特殊な形状をもつ攪拌羽根から成り、高馬力モータによる回転で、内部の混合物は図の矢印の方向に跳返り相互の衝突を行い、短時間に摩擦熱によるゲル化を完了する。これを冷却するために次の冷却ミキサーに導入され常温近くまで冷却される。

冷却されたパウダーはミキシングロール、バンバリーミキサー又は押出機を用いてペレット状に造粒されるが、一般には押出機方式がとられる。

押出機としては、一般の一軸、二軸押出機、コ・ニーダーなどが一般に使用されている。

これらの機械を用いてペレットを製造する場合のカット方式として、コールドカット法およびホットカット法がある。

このうち、もっとも多く実用化されているのは、ストランドカットと空中ホットカットである。

Figure 9.13 に空中ホットカット造粒装置の例を示す。

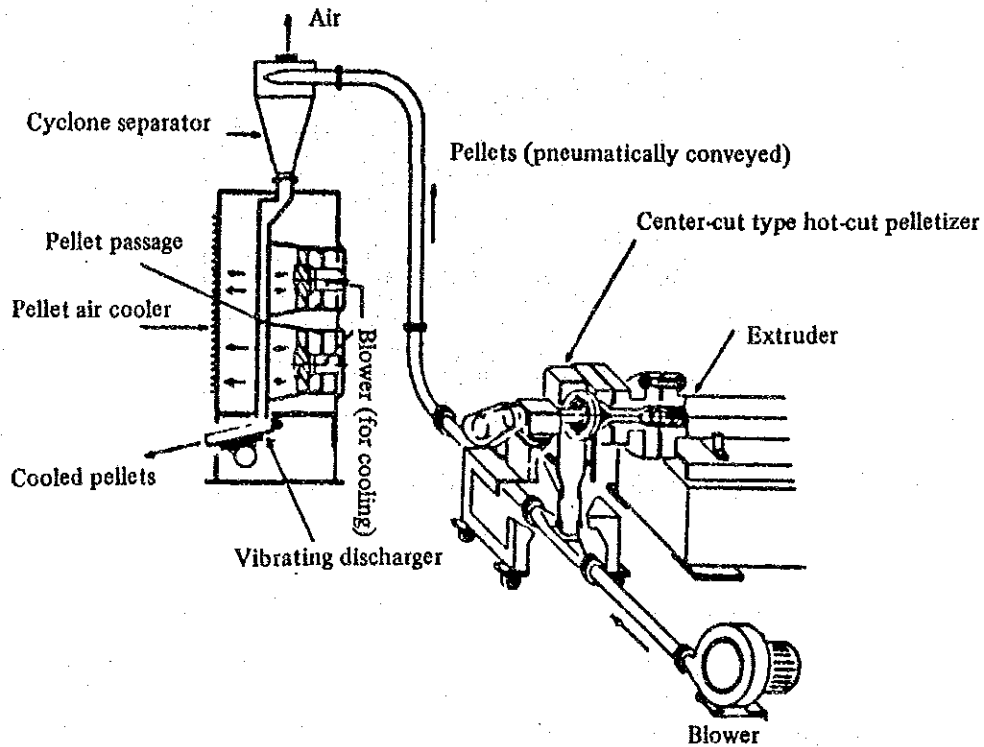


Figure 9-13 Hot-Cut Pelletizer (Cut-in-air Type)

#### 9.5. 押出形成における自動化技術

押出形成は射出成形に比べて自動化がおこなわれている。これは成形方法が多岐にわたっており、一部を除いて多品種少量生産であることなど理由は多々あったが、最近では世界的にみて押出成形の自動化が急速に進んでいる。

##### (1) パイプ、ホース類の肉厚多点計測と寸法管理

押出形成の自動化は、まず製品の寸法計測から始まる。一般的なシート、フィルムの厚みや幅、パイプの直径など簡単なものの計測は古くから行われているが、小口径でソフトなパイプの連続多点計測は非常にむずかしく、なかなか実用化されていなかった。最近開発された超音波計測機は、最小外径5mmφ、最小肉厚0.5mmのソフトチューブでも円周8点の高速連続計測が可能といわれている。この装置は、冷却水槽の中で超音波によって寸法計測するもので、チューブの各部の厚みの最小値と最大値の間で規格値となるよう、引取機または押出機にフィードバックする機構となっている。偏肉自動調節装置と組み合わされることによって完全自動化ができる。計測数値はレコーダーに記録されているので、品質管理に役立つ。

(2) 樹脂供給の制御と製品重量制御装置

押出成形における製品の寸法制御は一般には製品寸法を計測し、これを押出機又は取引機にフィードバックすることにより行われる。しかし最近、原料の供給と押出量を一定になるようコントロールすることにより、寸法を制御しようとする新しい方法が開発されている。

原料供給装置は、ストレージホッパー、軽量ホッパー、フラップ、レベルセンサーおよび警報装置などからなっており、樹脂の押出量を常に一定とするように、スクリー回転にフィードバックするようになっている。

この装置では、樹脂の押出量すなわち1 m当たりの重量(g/m) および1時間当たりの押出量 (kg/h) を設定することにより、一定の寸法 (一定の重量) の押出成形品を規定の能力で押出成形することが可能である。

(3) パイプ押出のラインコントロールシステム

Figure 9.14 は押出成形ラインの総合プロセス制御装置で、モニターは、温度、スクリー回転、フィーダ回転、樹脂圧力、引取機、巻取機および切断機などの周辺装置の状態を、一目瞭然に表示するようになっており、自動昇温、自動スタートあるいは自動停止などが可能である。

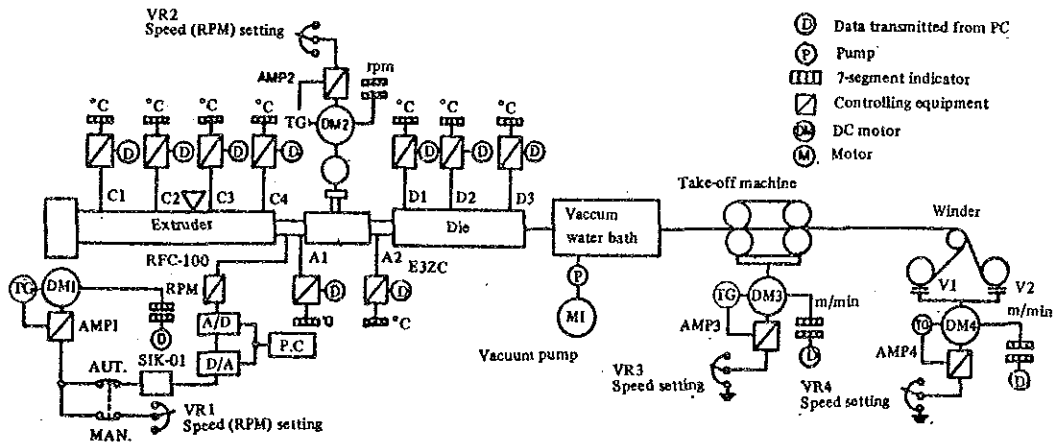


Figure 9-14 Automated Flexible Tube Production Line

さらにべつの例では、①超音波厚み計測装置、②パイプの偏肉自動調節装置、③原料の秤量・供給・押出自動制御システム、④キャリブレーター真空自動調節装置、⑤樹脂圧力自動調節装置、⑥樹脂圧力自動調節装置、⑦樹脂温度、スクリュートルク自動調節装置など自動制御された押出機が有機的に結合して、すべてのシステムがコンピューターコントロールされ、完全無人化されたパイプ成形装置もある。

## 10. 鑄 鋼



## 10 鋳鋼

### 10.1 エネルギー使用の特徴

#### 10.1.1 製造工程と主要設備

鋳物製品は機械・設備・車輛等の部品から日用品に至る広い範囲に使用されている。

材料としては鉄、銅、アルミニウムなどがある。このうちの鉄系の鋳物については含有する炭素の量によって性質が異なるので、炭素2%以下を鋳鋼、以上を鋳鉄と区分している。さらに鋳鋼品も普通鋳鋼の他に合金元素を加えた特殊鋳鋼品がある。例えばニッケル、クロムを加え耐食性を改良したステンレス鋼、マンガンを加え耐摩耗性を改良した高マンガン鋼などである。鋳鉄も炭素並びに珪素の含有率によって性質が異なりそれぞれに対応した用途に用いられる。また、マグネシウムを添加して含まれている黒鉛を球状化し、応力集中を減らすことによって強度を高めたダクタイル鋳鉄や、鋳造後の熱処理によって球状に近い黒鉛として強度を高めたMalleable Cast Iron がある。

製造工程をFigure 10-1 に示す。

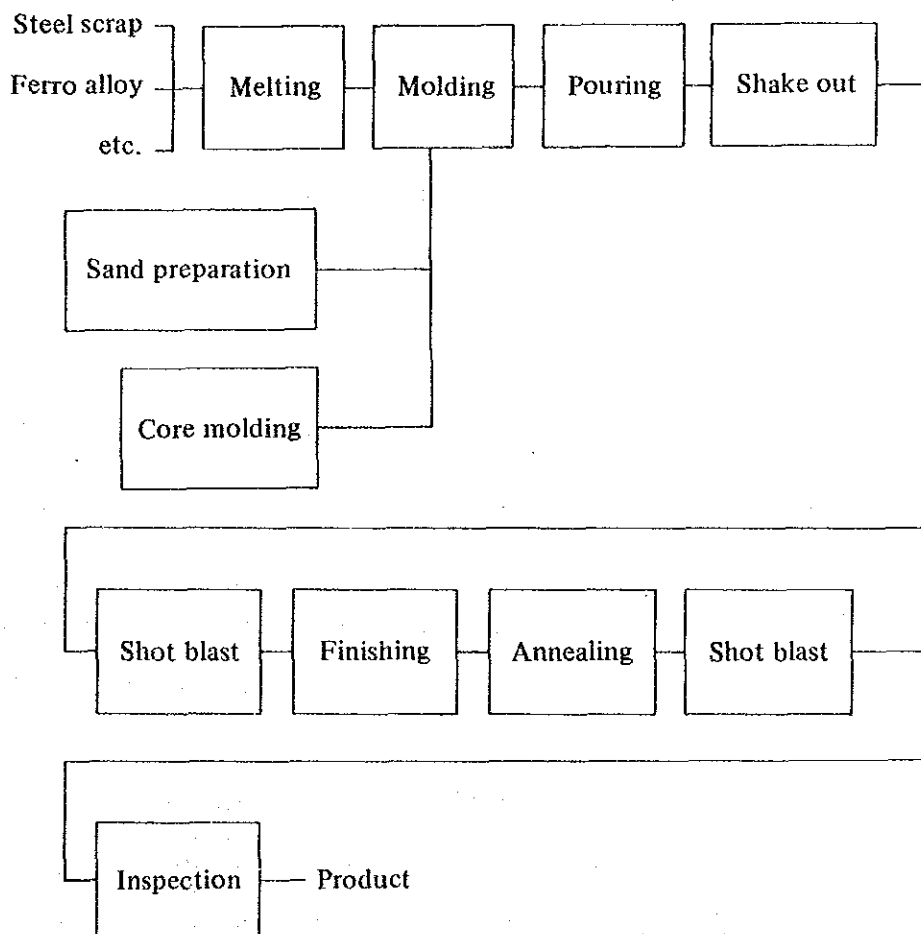


Figure 10-1 Manufacturing Process Chart for Cast Steel

現在鑄鋼の製造に使われている溶解設備はアーク炉と誘導炉である。Figure 10-2 に溶解炉分類を示す。

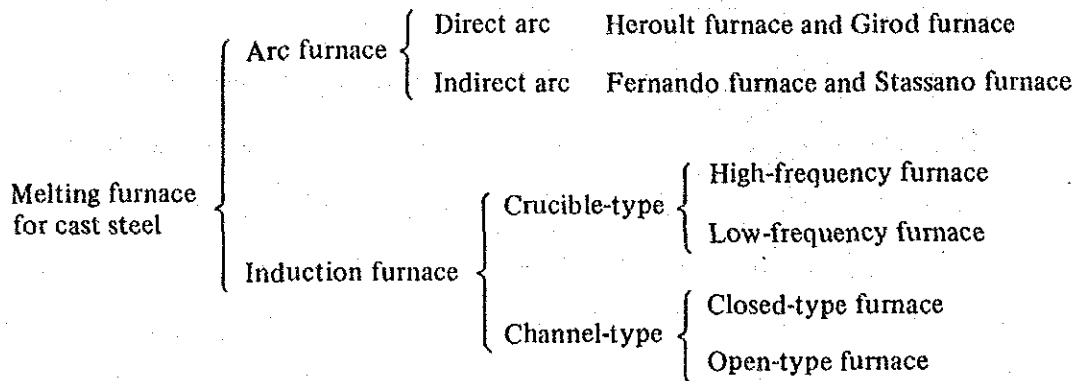


Figure 10-2 Melting Furnace for Cast Steel

### (1) アーク炉

アーク炉はエルー型式が一般的で、Figure 10-3 のような構造をしている。3 本の人造黒鉛電極と装入鉄屑との間に発生する 3 相交流のアーク熱と鉄屑に発生する抵抗熱により炉内鉄屑を溶解する。

アーク炉の特長は次のとおりである。

- a. 高温が得られるとともに、投入電力の制御が容易である。
- b. 酸化、還元精錬いずれも容易に行われる。
- c. 鉄原料の質に対する制約が少ない。
- d. 特殊鋼、普通鋼いずれも製造できる。

炉室は鋼板製炉殻を耐火物で内張りした炉壁及び炉床と、枠に煉瓦積みした炉蓋とで構成され、出鋼時には傾動できるようになっている。

炉壁を構成する耐火物は塩基性炉においてはマグネシア煉瓦で、炉床にはさらに Magnesia Clinker または Dolomite Clinker をスタンプする。酸性炉においては珪石煉瓦を用いる。塩基性炉の場合はアーク熱を保持するほか、塩基性スラグによる製鋼反応を行い得る機能を持っている。

電極は支腕に取り付けられたクランプで支持され、電極制御装置によって電力が一定となるように自動的に上下するようになっている。また、操業中に電極と炉体との隙間から高温ガスが噴出するのを抑えて、電極の酸化消耗を防ぐため Economizer と称する水冷環が電極孔につけられている。



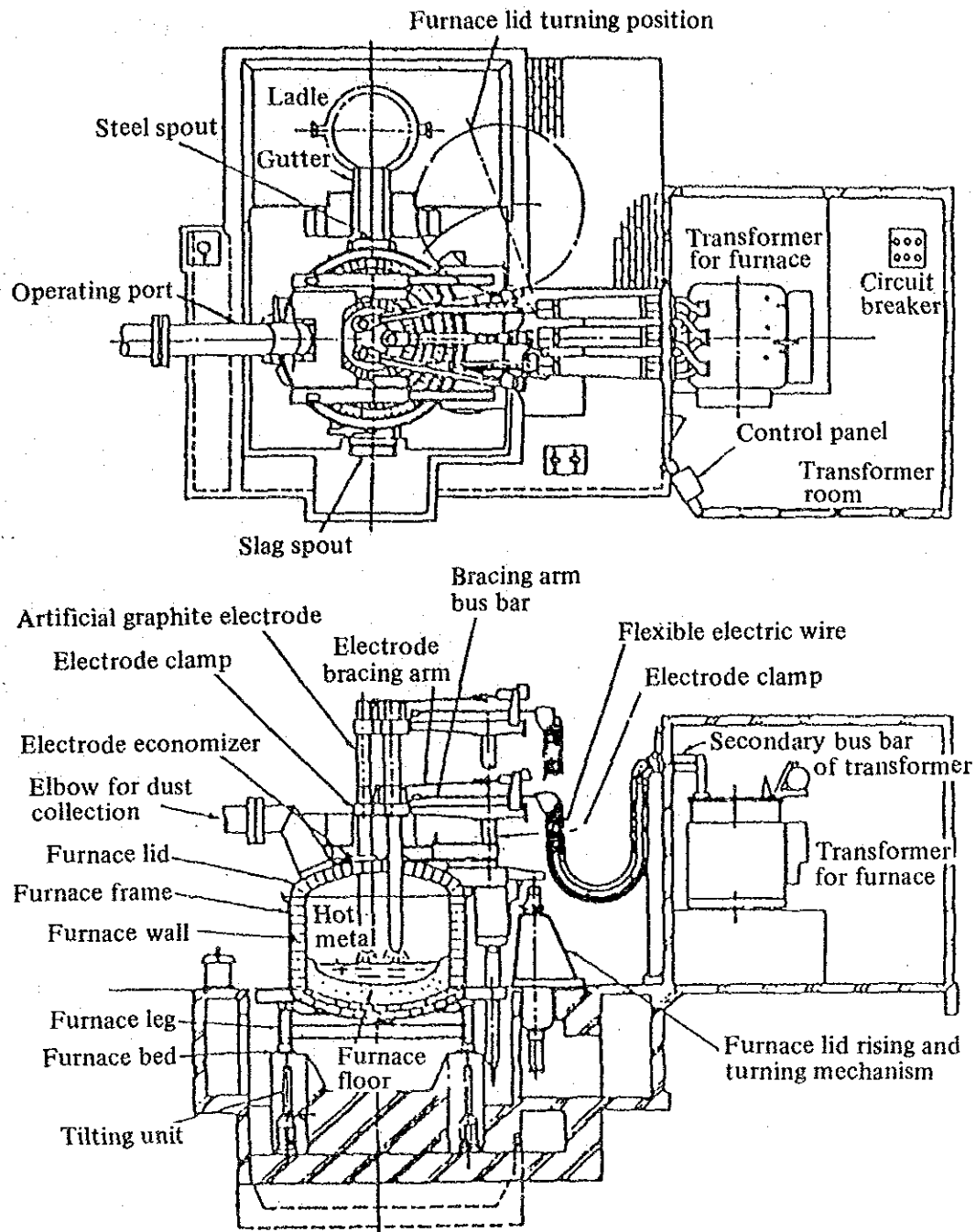


Figure 10-3 Body Structure of Arc Furnace for Steel Making

アーク炉への材料投入は小型炉は別として一般的には炉頂から行われるので、炉蓋及び電極装置は移動できるようになっている。

変圧器には大容量のReactanceが接続されていて、炉で大きな電流が流れても外部送電線に衝撃電流が流れないようにしている。

2次側母線は銅板または水冷鋼管で、接続するケーブルも水冷されるのが普通である。

付帯設備としては発生ガスおよび建家内空気の塵をBag Filterまたは静電方式で除く集塵設備、あるいは発生ガスの顕熱を材料の予熱に利用する廃熱回収設備がある。

Table 10-1は炉容と変圧器容量のおおよその関係を示す。

Table 10-1 Relation between Furnace Capacity, Required Dimensions and Electric Equipment of Furnace

Nominal furnace capacity (10 <sup>3</sup> kg)	Outside diameter of furnace frame (m)	Depth of steel bath (mm)	Electrode diameter (mm)	Transformer capacity (MV · A)			Secondary voltage (RP furnace) (V)
				RP	HP	UHP	
2	2.178	300	175	1.5	—	—	180/80
5	2.743	400	200 ~ 250	3	5	—	200/100
10	3.353	400	300 ~ 350	5	7.5	—	220/100
20	3.962	450	350 ~ 400	7.5	12	15	240/100
30	4.572	650	400 ~ 450	12	18	22	270/120
50	5.182	750	450 ~ 500	18	25	30	330/130
60	5.486	850	500	20	27	35	400/130
70	5.791	850	500	22	30	40	400/130
80	6.096	900	500	25	35	45	430/130
100	6.400	950	500 ~ 550	27	40	50	460/160
120	6.706	1,000	550 ~ 600	30	45	60	500/200
150	7.010	1,000	600	30	50	70	500/200
170	7.315	1,050	600	35	60	80	500/200
200	7.620	1,100	600	40	70	100	560/200
400	9.754	1,200	700	—	—	150	

Note: RP: Regular power HP: High power UHP: Ultra-high power

## (2) 誘導炉

誘導炉は誘導加熱の原理を利用して、特殊鋼、鋳鉄、銅その他の高級金属、合金の溶解を行う装置で、溶鋼の保持、昇温、脱酸素、成分調整などにも用いられるが、アーク炉のようなスラグによる精錬は行われない。

誘導炉の特徴は次の通りである。

- a. 材料が直接発熱するので熱効率が高く、高温溶解に適している。
- b. 加熱のために酸素を必要としないので、密封して真空溶解することもできる。
- c. 溶鋼が電磁力により自動的に攪拌されるので、成分や温度の調整が容易で、品質や歩留りがよい。
- d. 材料のみが発熱するので、高温部分が少なく、排ガス量も少ないので作業環境がよい。
- e. 合金元素の歩留まりが高く、安定している。従って高合金鋼の溶解に有利である。

誘導炉は構造及び電源周波数から次の3種類に分類される。

高周波炉	坩堝型	150 ~ 10,000 Hz
低周波炉	坩堝型	50, 60 Hz
低周波炉	溝型	50, 60 Hz

高周波炉と低周波炉を比べると、高周波炉は周波数変換装置が必要なため、電源損失がやや大きい、高入力が可能で、熱損失が少なく、Starting blockが不要で、起動時の電力消費も少ないので効率的である。周波数の平方根に反比例するため攪拌力はゆるやかで、炉体の侵食も少なく、合金元素の歩留まりがよく、成分や温度の均一化、脱硫反応などに対して有効に働く。このような省エネルギー性、使い易さから高周波炉の採用比率が高まってきている。

Table 10-2に高周波炉と低周波炉の電力消費の比較結果を示す。

Table 10-2 Comparison Energy Saving-Type High-Frequency Furnace with Crucible-Type Low-Frequency Furnace

Equipment	Electric power (kW) – capacity (t) Frequency (Hz)	Low-frequency furnace	High-frequency furnace	Remark
		800-3 50	800-1 500	
Materials for melting Molten metal discharging temperature (°C) Operation		Ordinary cast iron 1,500 8 h/day, 22 days/month	same as left	
Initial Batch	Electric power consumption rate (kWh/t)	650	620	
	Melting time (min)	209	58	
	Number of batch	1	1	
Normal Operation	Electric power consumption rate (kWh/t)	580	565	
	Melting time (min)	73 min/1.5 t	45	
	Number of batch	3	8	
Holding	Holding electric power (kW)	120	85	
	Holding time (min)	10	6	
	Electric power consumption rate (kWh/t)	12.3	8.5	
	Times	4	9	
Operating time (min)		468 (7.8 h)	472 (7.86 h)	
Total electric energy consumption (kWh)		4,640	5,216.5	
Production (t/day)		6.5*	9	
Total melting capacity (t/h)		0.84	1.14	
Unit electric power consumption rate for total melting (kWh/t)		714	579.6	
Installation space (X, Y, Z) (m)		6 × 7.5 × 4h	6 × 5.2 × 2.5h	
Total quantity of refractories used (kg)		approx. 1,100	approx. 500	
Tonnage of expected passage (t)		700	430	
Consumption (kg) of refractories per ton of molten metal		1.57	1.16	

\* Deduct 1/2 of residual molten metal quantity and 1 ton for Starting Block for low-frequency furnace.

材料に生ずる 2 次電流は周波数が高いほど材料表面に集中する。従って炉容が大きくなるにつれ、低い周波数が選ばれることになる。Table 10-3 に炉容と周波数、入力、溶解時間、電力消費の一般的な関係を示す。

Table 10-3 Example of the Capacity and Performance of Recent Thyristor Inverter Type High-Frequency Furnace

Electric power (kw)	Frequency (Hz)	Furnace capacity (kg)	Cast iron melting		Steel melting	
			Melting time (min)	Power consumption rate (kwh/t)	Melting time (min)	Power consumption rate (kwh/t)
200	3,000	50	10	620	11	670
300	3,000	100	12	600	13	645
600	1,000	300	16	545	18	585
800	1,000	500	20	540	22	580
1,200	1,000	1,000	28	535	30	570
1,600	1,000	1,500	31	530	33	565
1,800	500	2,000	37	530	39	565
2,400	500	3,000	41	525	44	560

溝型炉は閉路鉄心を用いているので力率、効率が高く、断熱もし易いが、操業休止時にも溝部に溶鋼を常時保持しておく必要がある。電力密度が小さいので、溶解よりも昇温や保持に適している。

Figure 10-4 に坩堝型炉の構造を示す。

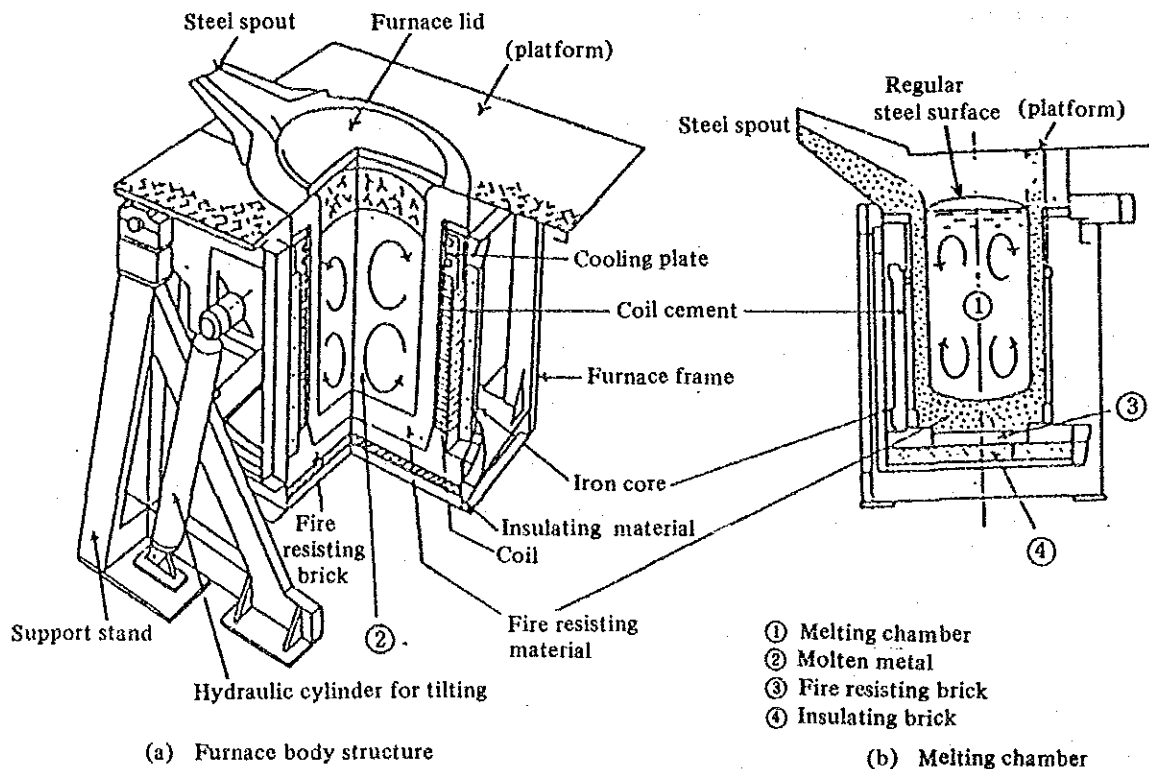


Figure 10-4 Cross Section of Crucible Induction Furnace (Example)

銅管を巻いたコイルの内側に導体(金属地金)をおき、交番電流をコイルに流すと、コイルの内側に交番磁界が生じ、電磁誘導作用により渦電流が金属中に流れ、ジュール熱により金属が加熱され溶解する。

また、この渦電流はコイル電流と反対方向に流れるため、溶鋼とコイルとの間に反発力を生じ、溶鋼は攪拌される。

Figure 10-5 に溝型炉の構造を示す。

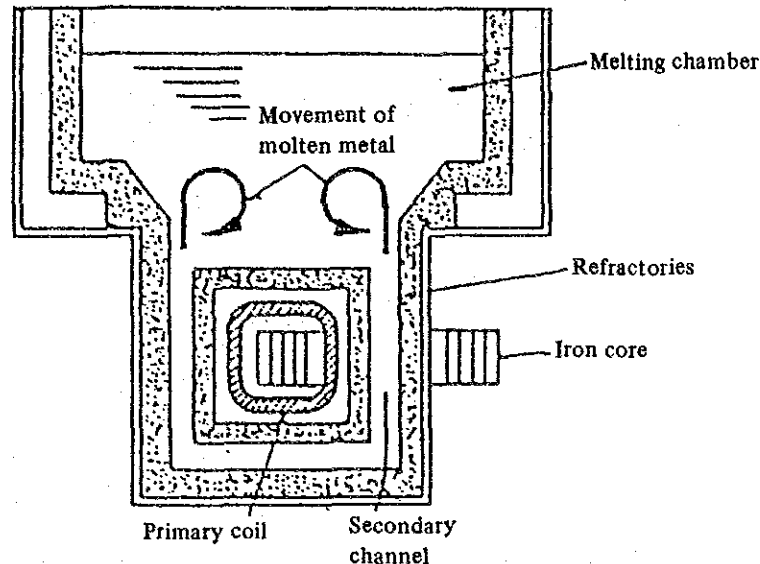


Figure 10-5 Cross-Section Chart for Channel-Type Furnace

溶鋼を保持する溶解室と溶鋼に熱エネルギーを供給する2次溝(発熱室)から形成されていて、2次溝は耐火材、閉路鉄心、1次コイル等から構成されている。

コイル、鉄心は炉材からの熱伝導や自身の発熱などによって熱的に損傷されないように水冷または風冷により強制冷却されている。

商用電源から所用の周波数に変換する方法は、かつては電動機、発電機の組合せによる物が用いられたが、現在では殆どサイリスタ型が用いられるようになった。この方法ではサイリスタインバータを用い、商用周波数の電源をいったん直流にし、ついで所用の周波数に変換し、さらに高周波整合変圧器、力率改善用コンデンサを経て炉に給電される。この方式では周波数を自由に変えられるため、負荷のインピーダンス変化に整合する範囲が広く、常に最大電力を供給できる特長がある。

コイルは誘導抵抗を持ち、その値は周波数が高いほど大きくなる。これにより生じる電流の位相遅れを補償するため多数のコンデンサーを接続する。

大容量炉、電力密度の高い炉の場合はコイルの外側に鉄心を配置して磁束の帰路と

し、鋼製炉枠の加熱を防ぎ、コイルの振動を緩和し、コイルを補強する役目も持っている。

(3) 熱処理炉

金属加工編参照

10.1.2 エネルギー使用の状況

日本のアーク炉の電力原単位の推移をFigure 10-6に、炉容別の電力原単位をTable 10-4に示す。

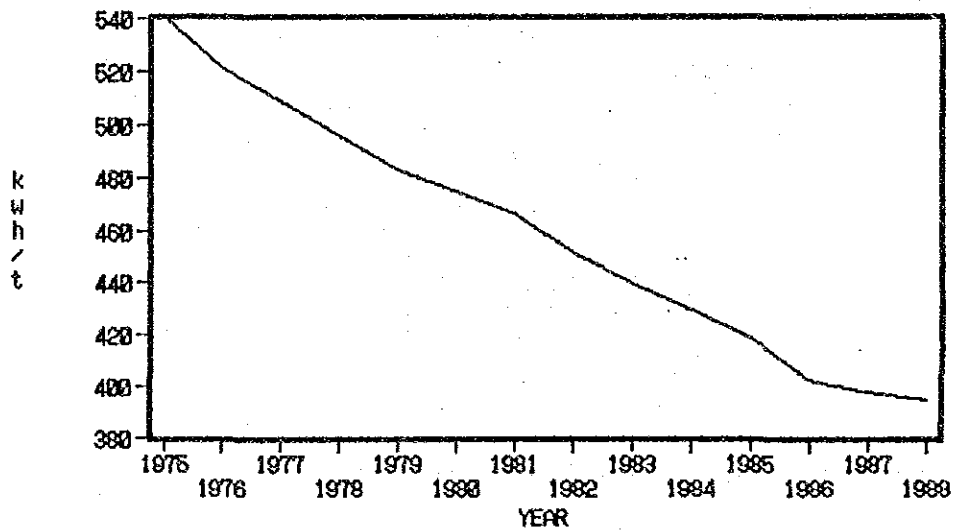


Figure 10-6 Electric Power Consumption Rate of Japanese Arc Furnace

Table 10-4 Average Electric Power Consumption Rate for Mild Steel

Furnace capacity	10 t	15 t	30 t	60 t	80 t
Electric power consumption rate kWh/ton of good-quality ingot	550	520	480	440	410

また、日本の鋳鍛鋼業界における塩基性アーク炉の電力原単位実績（1977）の回帰式は次のとおりである。

$$\text{電力原単位} = \frac{399}{0.88 \times C + 2.44} + 574 \text{ kWh/t 装入}$$

ここで C：炉容

アーク炉の熱収支の例をTable 10-5に示す。

高周波誘導炉による溶解の標準的な電力原単位はTable 10-3に示した。

Table 10-5 Heat Balance of Arc Furnace

Item		Kind of steel				Furnace capacity				Total	
		Mild steel (N = 7)		Special steel (N = 11)		30~50 t furnace (N = 7)		50t or more furnace (N = 11)			
		10 <sup>3</sup> kcal/ steel dis- charge t	%	10 <sup>3</sup> kcal/ steel dis- charge t	%	10 <sup>3</sup> kcal/ steel dis- charge t	%	10 <sup>3</sup> kcal/ steel dis- charge t	%	10 <sup>3</sup> kcal/ steel dis- charge t	%
Heat input	Heat quantity of electric power	373.0	59.1	438.3	61.5	437.6	62.2	398.2	59.8	412.9	60.6
	Calorific value of fuel	24.9	3.9	16.7	2.3	6.7	1.0	29.4	4.4	20.7	3.0
	Oxidation heat of electrode	25.7	4.1	34.3	4.8	35.9	5.1	28.9	4.3	32.1	4.7
	Oxidation heat of charged raw materials	192.4	30.5	208.4	29.2	204.5	29.0	199.5	30.0	201.5	29.6
	Heat of slag formation	11.2	1.8	12.6	1.8	15.0	2.1	10.2	1.5	12.1	1.8
	Others	3.6	0.6	2.7	0.4	4.4	0.6	-	-	1.7	0.3
	Total heat input	630.8	100	713.0	100	704.1	100	666.2	100	681.0	100
Heat output	Potential heat of molten steel	339.6	53.8	347.5	48.7	342.9	48.7	344.7	51.8	344.0	50.5
	Potential heat of slag	46.5	7.4	55.0	7.7	63.4	9.0	44.2	6.6	51.7	7.6
	Heat loss on transformer and secondary conductor	28.1	4.4	37.9	5.3	46.4	6.6	26.7	4.0	34.5	5.1
	Sensible heat of exhaust gas	111.0	17.6	115.9	16.3	115.1	16.3	112.2	16.8	112.4	16.5
	Heat carried out by cooling water	30.3	4.9	72.3	10.1	49.7	7.1	59.9	9.0	56.1	8.2
	Others (heat release from furnace body, radiant heat at time of additional charging, etc.)	75.3	11.9	84.4	11.8	86.6	12.3	78.5	11.8	82.3	12.1
	Total heat output	630.8	100	713.0	100	704.1	100	666.2	100	681.0	100

## 10.2 エネルギー使用の合理化

電気炉製鋼における省エネルギーの基本は炉熱効率、生産性、製品歩留まりの向上によって無効出熱を減少するとともに、排熱の有効利用を図ることである。

### 10.2.1 アーク炉

Table 10-6にアーク炉の省エネルギー項目を示す。

Table 10-6 Items on Energy Conservation for Arc Furnace

Decrease of heat input	Substitution of heat input	Auxiliary combustion of oil Oxygen injection Preheating scrap by fuel
	Utilization of waste heat	Preheating scrap by exhaust gas Utilization of hot return scrap
	Lowering molten steel temperature	Increasing of ladle brick temperature Prevention of heat release by ladle lid
Reduction of heat loss	Improvement of facilities	Increasing of furnace capacity Adoption of high power system Improvement of automatic electrode controller Reduction of resistance of secondary conductor and electrode Reduction of openings on furnace body Insulation
	Improvement of operation	Removing impurities of charging scrap Quick charging of scrap and other raw material Optimum input of power Speeding up of analysis for molten steel Shortening time for maintenance Prevention of electrode breakage Elimination of waiting time for crane etc. Effective operation of dust collector
Improvement of product yield		Selection of good quality raw material Reduction of miscasting Decrease of residual molten metal
Utilization of waste heat		For scrap preheating Utilization of hot water for living, air conditioning, boiler feed water etc.

以下に2～3の例について述べる。

#### (1) 石油の助燃

大容量のアーク炉では炉内のスクラップの溶解を促進するため、アークから最も遠い Cold Spot部の炉壁に孔を開けて首振りバーナを設置し、石油を燃焼する。



Figure 10-7 にバーナの設置状況を、Figure 10-8 に燃料消費量と電力消費量の関係を示す。発電の熱損失を考えると、熱源を電力から燃料に転換することは省エネルギーになる。

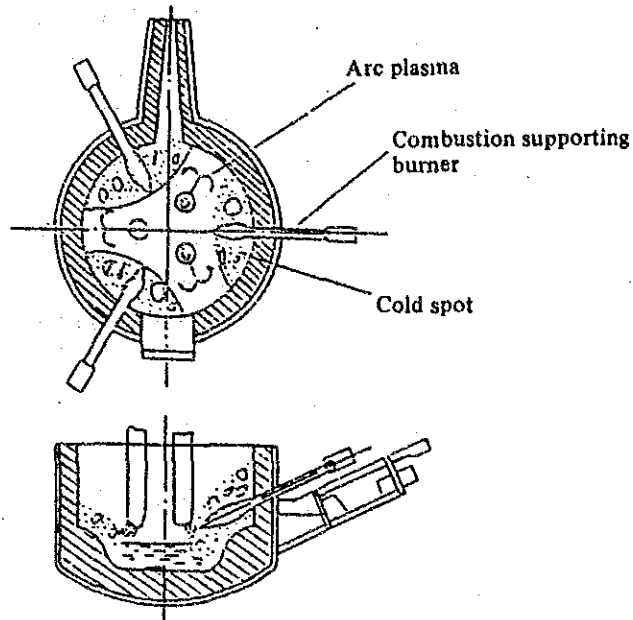


Figure 10-7 Example of Installation of Combustion Supporting Burner

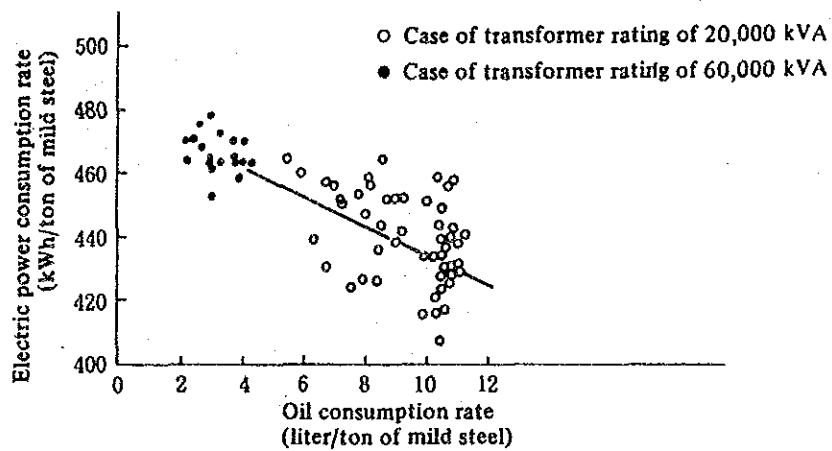


Figure 10-8 Oil Consumption Rate and Electric Power Consumption Rate Showing the Effect of Combustion Supporting (per ton of mild steel)

(2) 酸素吹き込み

溶解初期に酸素を吹き込み、スクラップを切断して溶解を促進し、溶け落ち後は鋼浴に吹き付け、炭素や珪素などの酸化熱を利用して溶解時間の短縮を図る。アーク炉では、固定的な熱損失が多いので、溶解時間の短縮を図ることが省エネルギーになる。

Figure 10-9 に酸素原単位と電力原単位の関係を示す。

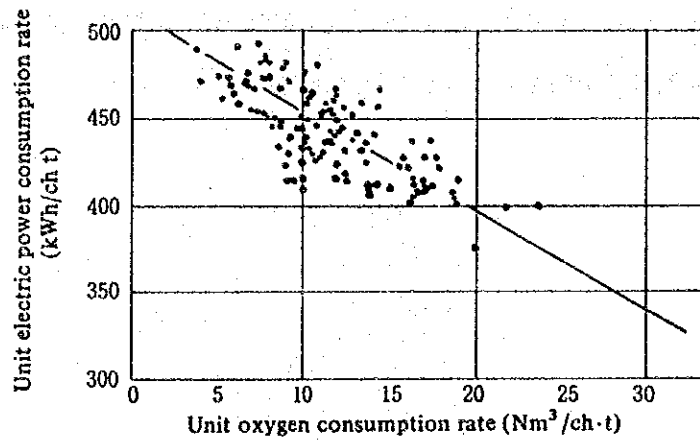


Figure 10-9 Relationship between Unit Oxygen Consumption Rate and Unit Electric Power Consumption Rate in Oxygen Enriching Operation

(3) スクラップ予熱

アーク炉に装入する前のスクラップを予熱することで、燃料を燃焼して予熱する方法と、アーク炉排ガスを利用する方法とがある。

Figure 10-10は、スクラップ装入バケットをアーク炉排ガスで加熱するスクラップ予熱装置の1例である。

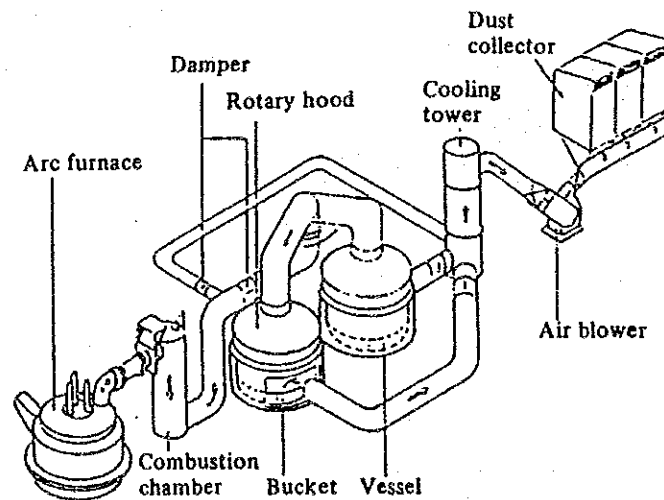


Figure 10-10 Scrap Preheater Using Arc Furnace Exhaust Gas for Heating Scrap in Charging Bucket

装入用バケットに充填されたスクラップは、集じん装置の排ガス燃焼室と冷却塔の間に設けられたベッセル内に置かれる。集じん機用送風機で引かれたアーク炉の排ガスは、ベッセル内のスクラップを加熱した後、集じん機を通して大気に放出される。

Table 10-7に、アーク炉排ガスによるスクラップ予熱の省エネルギー効果の例を示す。

Table 10-7 Example of Energy Saving Effect in Scrap Preheating by Arc Furnace Exhaust Gas

Applicable furnace	Reduction of unit electric power consumption rate (kWh/t)	Reduction of electrode wear amount (kg/t)	Shortening of steel making time (min.)
30 t	30.6	0.17	10
30 t	36	0.7	8
50 t	40 ~ 50	0.2 ~ 0.4	5 ~ 8
60 t	40 ~ 45	0.2 ~ 0.3	5 ~ 7

また、工場内で発生する鋼屑は熱い間にアーク炉に戻せば省エネルギーになる。

(4) 炉体開口部の放熱抑制

アーク炉は炉体側壁に出滓口、出鋼口などの開口部がある。これらの開口部は、使用時以外は閉止しておくべきであるが、シールが悪かったり、閉め忘れていたりすると炉内に冷風が進入して熱損失の原因となる。開口部の閉鎖のみにより4%の電力原単位が低減された例がある。

(5) 炉修時の放熱抑制

アーク炉では出鋼の都度炉内を点検し、炉床部など溶解時に損傷した箇所の補修を行うが、この間に炉体蓄熱の放散が起こるのでできるだけ速やかに補修を終わるようにしなければならない。大型炉では炉材吹き付け補修機を備えて補修時間の短縮を図っている。

(6) 電力投入の最適化

電力消費量は1チャージの時間が短いほど少なくなる。従って、スクラップで周りが覆われている段階ではアーク電力が最大となるような電圧、電流値とする。スクラップの溶解が進み炉壁が露出するようになると、炉壁の溶損を防ぐため低電圧、大電流のショートアーク操業とするのが普通であったが、最近では銅製ジャケット水冷炉壁の採用によりロングアーク操業が可能になってきた。

それぞれの炉の形状、スクラップ装入法に応じて電力、炉壁の消耗、電極の消費量が総合的に最適なるような電力 Input programを見いだすようにしなければならない。

10.2.2 誘導炉

Table 10-8に誘導炉の省エネルギー項目を示す。

Table 10-8 Items on Energy Conservation for Induction Furnace

Decrease of heat input	Lowering molten steel temperature	Preheating of ladle brick Prevention of heat release by ladle lid Avoiding overheating
Reduction of heat loss	Improvement of facilities	Selection of optimum frequency Reduction of resistance of cable and busbar Closing gap of cover Improvement power factor Increasing efficiency of frequency convertor
	Improvement of operation	Removing impurities of charging scrap Dense charging of scrap Optimum size of starting block Shortening idle time (temperature measurement, analysis, waiting ladle etc.) Optimum coil cooling Optimum hot metal remaining

(1) 力率改善用コンデンサ

誘導炉の力率は、坩堝型低周波炉で約20%、高周波炉で 5~10%と低く、従って大容量の力率改善用コンデンサを使用する。

コンデンサのうち、特殊絶縁油入りフィルム型のは鉱油入り紙コンデンサに比べて誘電体損失が約1桁少ない。例えば、1,000 Hz用では鉱油入り紙コンデンサの  $\tan \delta = 0.26$  に対して、特殊絶縁油入りフィルム型では  $\tan \delta = 0.025$  である。

600kw、1t、1,000 Hzの高周波炉のコンデンサは約 7,000 KVAであるから、両者の間には約16.4kwの損失差がある。

(2) 周波数変換装置

高周波炉の周波数変換装置としては、従来電動発電機式が多く利用されている。しかし最近では、サイリスタ式の高周波インバータが経済的な価格で入手できるようになった。

電動発電機の変換効率 は 1,000Hz、600kW で約85%であり、サイリスタインバータの場合には同一仕様で約95%で、約10%の差がある。

更にサイリスタインバータは、周波数を自動的に変えて負荷インピーダンスのマッチングを行うため、電動発電機に比べて負荷率が高く、溶解時間も短縮できる。電動発電機をサイリスタインバータに変換することにより、約15%の省エネルギーが図れる。

(3) 水冷ケーブル及びブスバー

電力回路は低電圧大電流回路であるため、導体としてのブスバー及び水冷ケーブルを使用している。特に、水冷ケーブルは電流密度が10~15A/mm<sup>2</sup>であるので、配線損失が大きい。

1例として、1,200kW -5t-1,200Vのるつぼ形低周波炉の炉電流は、約5,000 Aで400 mm<sup>2</sup>-6 mの水冷ケーブルを往復で2本使用しているが、この本数を倍にすると約1%の省エネルギーが図れる。

(4) 装入材料

誘導炉ではスラグの温度が低く、流動性が乏しいため精錬は行われない。従って、化学成分の明確な、清浄な原料を使用しなければならない。

材料中には鋳物砂や酸化物等の不純物が含まれていることが多い。このような原料をそのまま炉に装入すると、砂や酸化物も溶融することになり、消費電力の増加、除滓作業のための熱損失、炉材の寿命低下、スラグの炉壁付着による入力低下、材料の棚吊りなどの弊害を生ずる。例えば、溶解材料中に1%の砂や酸化物が混入している場合に、電力原単位で約10kwh/tの増加となる。

電流の浸透深さは周波数に反比例するので、高周波炉では材料はなるべく小さくして、炉に密に装入する。装入方法は最初に炉底にドライ粉、ポンチ屑など溶解し易いものを密に装入し、後の装入材により炉底を傷めないようにする。溶解が進んでからは棚吊りが起きないように、炉径の1/3以下の寸法の材料を選んで、注意しながら追加装入を行う。

合金鉄はTable 10-9のように通常水分の他に相当量の水素を含有しているので、これが溶鋼に入るのを防ぐため、装入前に予熱して除いておく必要がある。Figure 10-11に加熱温度と合金鉄の水素含有量の関係を示した。約600℃で3時間程度加熱することにより、水素を4 ppm以下にすることができる。

Table 10-9 Hydrogen Contained in Alloy Iron

Alloy iron	7.5% Ferrosilicon	Low C ferrochromium	High C ferro-manganese	Low C ferro-manganese	Silicomanganese	Silico-chromium	Electrolytic nickel
Hydrogen (ppm)	9.8 ~ 17.6	4.3 ~ 6.0	7.6 ~ 18.1	8.2	14.4	6.0 ~ 9.4	0.2
Shape (mm)	40 ~ 60	100 ~ 150	60 ~ 100	25 ~ 40	40 ~ 60	40 ~ 60	Thickness 10

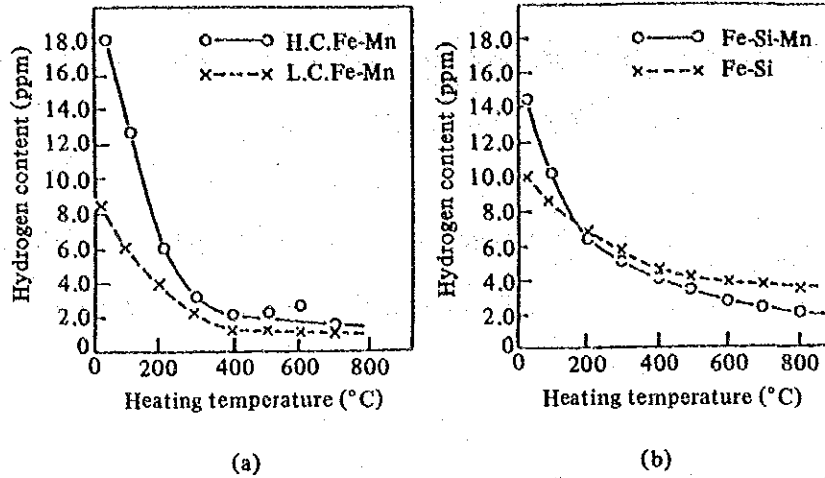


Figure 10-11 Effect of Heating Temperature (Heat Retaining for 3 Hours) on Hydrogen Content in Alloy Iron

(5) 装入材料の予熱

装入材料を約 500°Cに予熱することにより、約10%の電力節約になった例がある。

Table 10-10 は材料予熱炉設置前後の比較を、Figure 10-12は 3t 高周波炉用 Pre-heater の設置例を示す。

Table 10-10 Comparison of Factors before and after Installation of Oscillating Type Preheater

	Before the installation of preheater	After the installation of preheater	Improvement rate after installation
Energizing time per day	17 - 18 hours	15 - 16 hours	Decrease of 12 - 18%
Molten metal output time per day	14 - 15 hours	12 hours and 19 minutes	
Amount of molten metal output per month	340 t	420 t	Increase of 23.5%
Unit electric power consumption rate for melting	684 kWh/t	596 kWh/t	Decrease of 12.9%
Fuel (kerosene)	-	20.1 l/t	

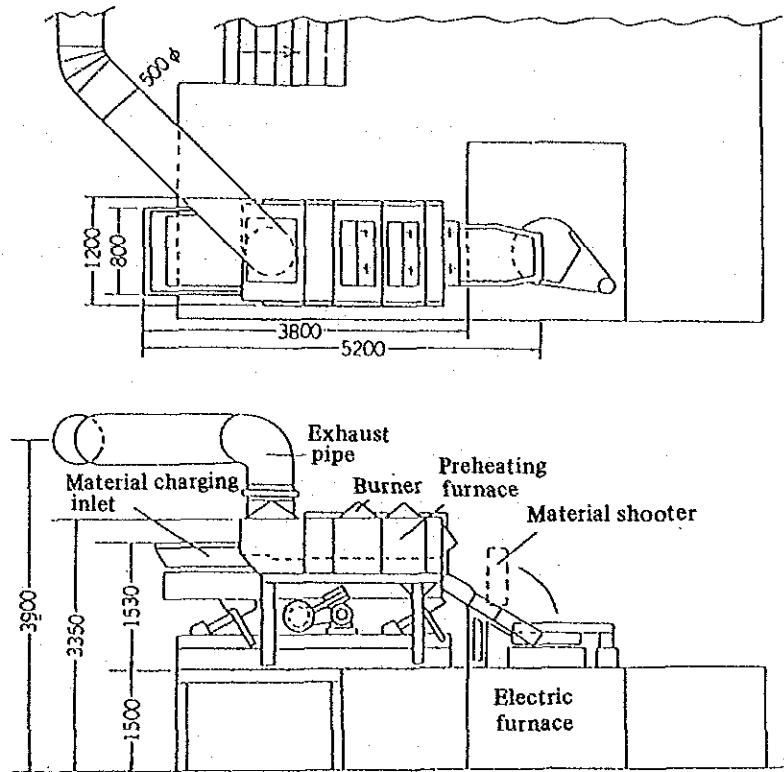


Figure 10-12 Example of 3-Ton High Frequency Furnace and Preheater of 700 kg/rpm

(6) 温度管理

一般的に湯回り不良になるのを恐れて、出鋼温度を高くしがちであるが、取り鍋を予熱しておき、出鋼温度目標をできるだけ下げようとする。50℃の温度差で15~20 kWh/t の電力差を生じる。また、高周波炉は昇温速度が早く、2~3分で60~90℃温度上昇するので、測温や注湯までの段取りをよくして、過度の加熱を防ぐ必要がある。なお、温度計は定期的に校正し、正確を期す。

### (7) 炉口からの放熱防止

高温物体からの熱放射は面積に比例し、絶対温度の4乗に比例するから、溶鋼面からの放射熱損失は非常に大きい。溶解中はできるだけ炉蓋を閉めるようにすべきである。

例えば、8tの低周波炉では1,500℃の溶鋼からの熱放射損失は約150kWであり、10分間炉蓋を開放しておくと、約10kwh/t 電力原単位が悪化する。

炉蓋の開閉による保温電力の差をFigure 10-13に示す。

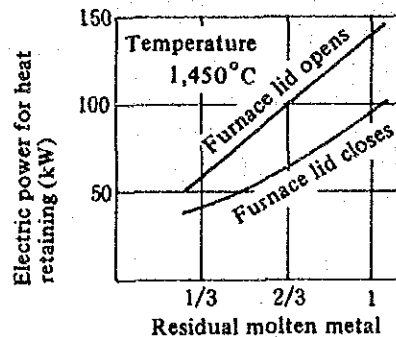


Figure 10-13 Effect of Furnace Lid on Electric Power for Heat Retaining (Used the 2-ton Crucible-Type Low-Frequency Furnace at 600 kW for Measurement)

### (8) コイル冷却

冷却水の給水温度が低いと炉壁を冷やすが、コイル銅管やケーブルの損失減少の効果の方が大きい。従って、結露による障害が無い限り多量の冷却水によりコイルやケーブルを冷却したほうがよい。

例えば、1,200kW、500Hz、2tの炉では10℃につき約0.8~0.9%の効率向上になる。

また、冷却排水は50℃程度の温水となるので、暖房、洗浄水等に利用できる。

### (9) 運転の連続化

炉は多量の耐火材を使用しているので、その蓄熱量が大きく、なるべく連続操業するのが望ましい。例えば、炉壁温度を1,500℃にするのに耐火材を約2.7t使用している8t低周波炉では約650kwh、耐火材を約0.7t使用している2t高周波炉では約170kwhの電力を必要とする。

## 10.2.3 鑄造

### (1) 取り鍋

取り鍋は断熱の良いものを使用し、運搬中は蓋をして温度降下を防ぐ。また、鑄造



の段取りをよくし、待ち時間を少なくする。

鑄造後の空鍋にも蓋をして放熱を防ぐ。

予熱する場合は出鋼時間に合わせて行い、必要以上に長い時間加熱しないようにする。

予熱も鍋に蓋をした状態で行い、放熱を防ぐ。

## (2) 鑄 型

設計を工夫し、バリの少ない鑄型とすることにより注湯量を減らすことができる。

また、有機薬品を利用し、熱硬化によらない方法で鑄型を作れば燃料が節減できる

## 11. 機械加工

## 11 機械加工

### 11.1 エネルギー使用の特徴

#### 11.1.1 製造工程と主要設備

機械加工によって作られる製品の種類は極めて多く、製造工程も多岐にわたるが、一般化すれば次のようになる

素材成型・・・・・・鋳造、鍛造、塑性加工

casting, forging, plastic working

二次成型・・・・・・プレス加工、曲げ、絞り、転造

press, bending, drawing, rolling

切断・接合・・・・・・熱切断、剪断、溶接

cutting, shearing, welding

除去・・・・・・切削、研削

cutting, grinding

仕上げ・・・・・・バリ取り、熱処理、裏面皮膜、塗装

組立

機械加工工場の製造工程の一例をFigure 11.1 に示す。

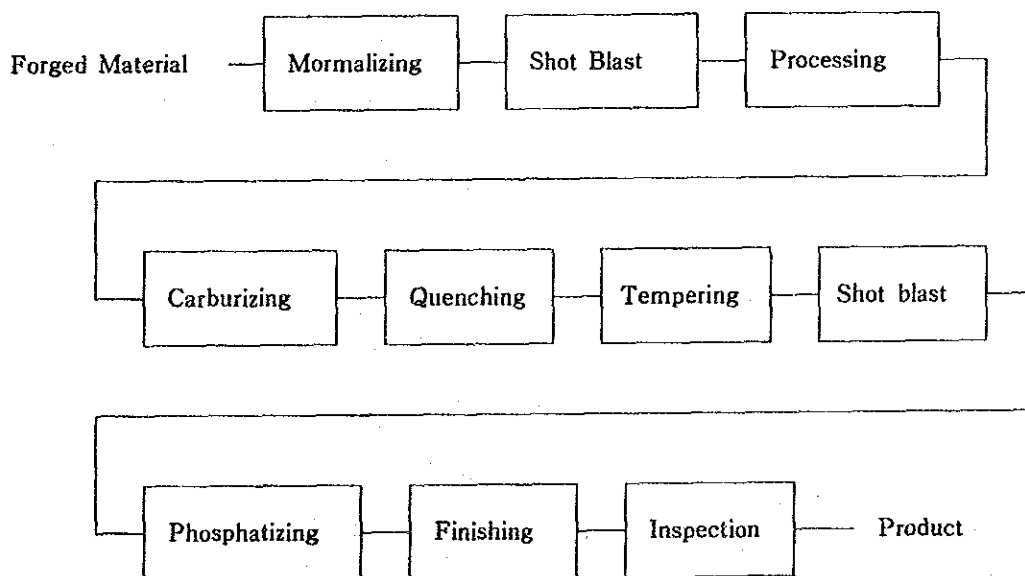


Figure 11-1 Manufacturing Process Chart for Machine Processing

鋼は鉄と炭素その他の元素との合金であり、組成、温度によって安定な状態が異なり、機械的な性質も変化する。熱処理は材料に所要の性質を付与するため一定の温度、保持時間、加熱冷却速度、雰囲気等の条件で処理することで、Table 11.1のような種類がある。

Table 11-1 Types of Heat Treatment

Broad division	Medium division		Subdivision
Regular heat treatment	Annealing		Complete annealing Spherulitic annealing Unstressing annealing Low temperature annealing Diffusion annealing Bright annealing Box annealing
	Normalizing		Regular normalizing Double normalizing
	Hardening		Regular hardening Graduated hardening Air-blast quenching Oil hardening Water hardening Press hardening Bright hardening
	Tempering		Low temperature tempering High temperature tempering Temper hardening Press tempering Bright tempering
Isothermal heat treatment	Isothermal annealing		Isothermal annealing
	Isothermal normalizing		Isothermal normalizing
	Isothermal hardening		Marquench Austempering
	Isothermal tempering		Isothermal tempering Martempering
Surface heat treatment	Chemical heat treatment	Carburizing	Solid carburizing Liquid carburizing Gas carburizing Carbonitriding
		Nitriding	Gas nitriding Liquid nitriding Salt soft nitriding Gas soft nitriding
		Sulphurizing	High temperature sulphurizing Low temperature sulphurizing
	Physical heat treatment	Surface hardening	High frequency hardening Flame hardening

熱処理条件は処理目的、炭素含有量、寸法等によって多様であるが、一般的には Figure 11.2 のようである。

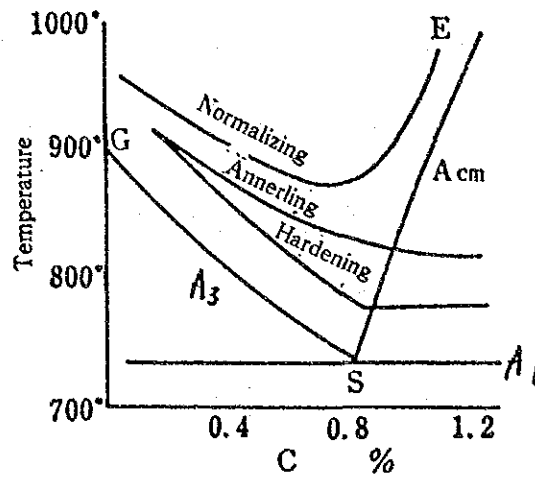


Figure 11--2 Heat Treatment Temperature of Carbon Steel

焼鈍・・・stressの除去、軟化、冷間加工性の改善等のために、鋼材を適当な温度に加熱し、一定時間保持した後徐冷する。

焼きならし・・・組織を均一にし、内部応力を除去する目的で、鋼材をA3、Acm変態点より40~60℃上まで加熱し、炭化物を溶解した後冷却する。

焼入れ・・・鋼材を赤熱し、一定時間保持した後に急冷して硬化する。温度は炭素含有量によって異なる。

焼きもどし・・・焼き入れた鋼の組織を安定化し、stressを除くため、A1 変態点以下の温度に加熱し、軟化する。

浸炭・・・鋼材の表面層を硬化するため、浸炭剤中で加熱し表面層の炭素量を増加させる。

鋼材の加熱、熱処理に用いられる加熱炉、熱処理炉の例を以下に述べる。

(1) 焼なまし炉

A) 箱形バッチ炉

構造が簡単で汎用性に富み、多種少量生産に適している。過剰炉床員荷で作業したり、扉の開閉時に空気が侵入するなどの理由により、一般に熱効率が低く、加熱時間にムラが生じる欠点がある。

B) 台車式バッチ炉

炉床が台車引出式になっており、大形品の加熱に適する。台車と炉体との間にはサンドシールがあり、空気侵入を防いでいる。Figure 11.3 に台車式加熱炉を示す。

C) プッシュ式炉

プッシュ式炉は、処理材料をトレイに直接積載したり、バスケット等を使用してトレイに積載し、装入側より油圧シリンダー等で押し込んで材料を搬送する炉で、ローラレール式、スキッドレール式、ローラトレイ式などがある。炉を休止するときは、炉内に処理材料が残らないよう空トレイを送る必要がある。

この方式は、処理材とともにトレイを加熱冷却するので、トレイの持ち出し熱量はそのまま熱損失となる。

プッシュ動力としては、人力、電動力、空気圧、油圧などが用いられているが、最近では重荷重に耐え作動が確実に複雑な自動操作ができる油圧式が多く使用されている。

D) コンベヤ式炉

コンベヤ式炉はプッシュ式炉に比べて、サイクル時間が短かく、炉床負荷〔kg/m<sup>2</sup>〕が小さい場合に用いられる。ベルトの形式としてリンクベルト、チェーンベルト、メッシュベルトがある。

コンベアの復路を炉外に通す場合が多いが、これによる熱損失を減少するために、炉内リターン方式を採用する場合が増えてきている。Figure 11.4 に外部リターン式を示す。

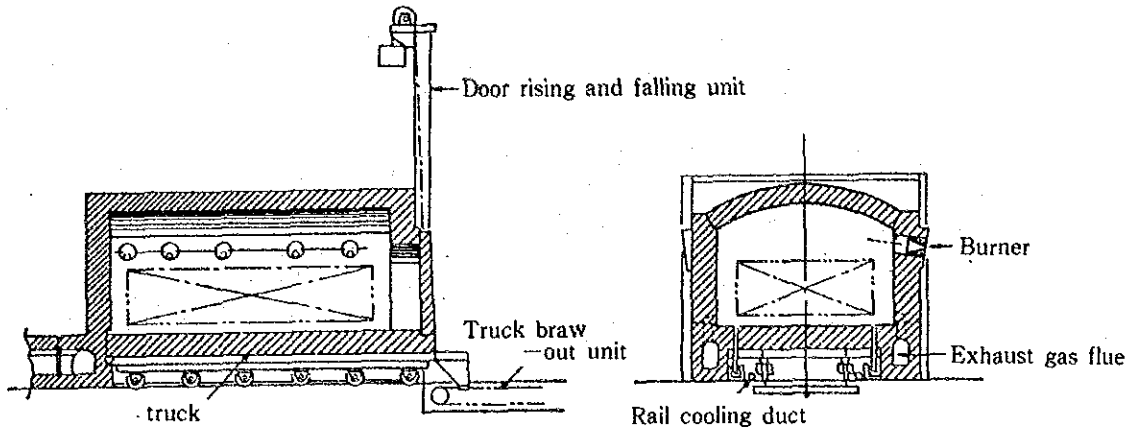


Figure 11-3 Shuttle Type Heating Furnace

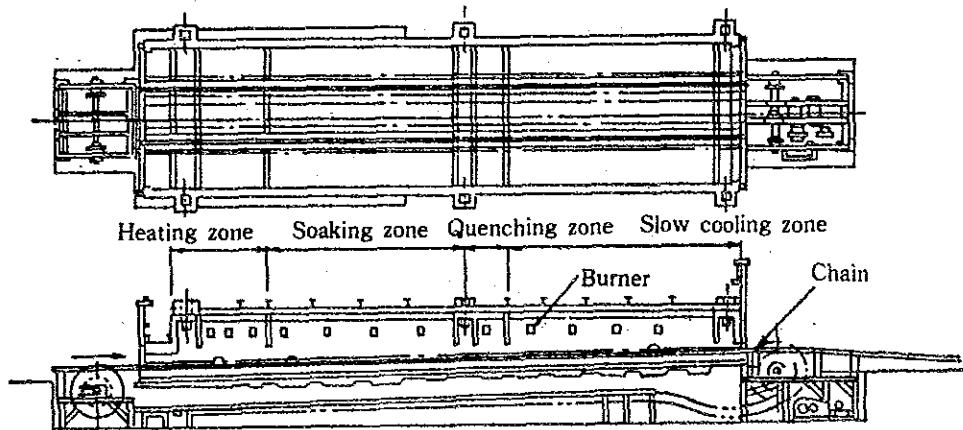


Figure 11-4 Ductile Cast Iron Annealing Furnace

(2) 浸炭炉

低炭素鋼、低炭素合金鋼の表面に炭素を浸透せしめ、焼入れにより表面を硬化する処理を浸炭という。

ふん囲気として吸熱性ガス (20% CO - 40% H<sub>2</sub>) を単独、または炭化水素ガスとあわせてもちいる。

A) ビット形炉

浸炭炉として最も簡単な形式で、炉底あるいは炉頂部にかくはんファンを設けてあり、処理材料は耐熱合金製治具、またはバスケットと共に、炉頂からクレーンやホイストで装入、取出しを手動操作で行なう。

この炉は構造上、独立した焼入れ槽を別に設備し、浸炭後、一度大気中に取り出して、焼入れ槽まで移動させ、焼入れする。

大物部品、特に長尺の軸類に適し、処理材料は吊下げて処理することができるので、歪の防止という点で有利である。

炉の構造の1例をFigure 11.5 に示す。

#### B) 横形炉

この炉は、従来バッチ式の箱形といわれている炉が浸炭部として用いられ、改良された炉である。

炉は、装入室、その下にある焼入れ油槽、浸炭炉から成っている。装入室には装入室トビラ、装入室と加熱室の間には加熱室トビラがある。焼入れ油槽が一体構造となっており、空気に触れることなく焼入れができる。

また、この炉は処理材の炉への装入—抽出方向にによって、イン—アウト方式とストレートスルー方式に分類することができる。

Figure 11.6 , Figure 11.7 にそれぞれの炉の構造を示す。

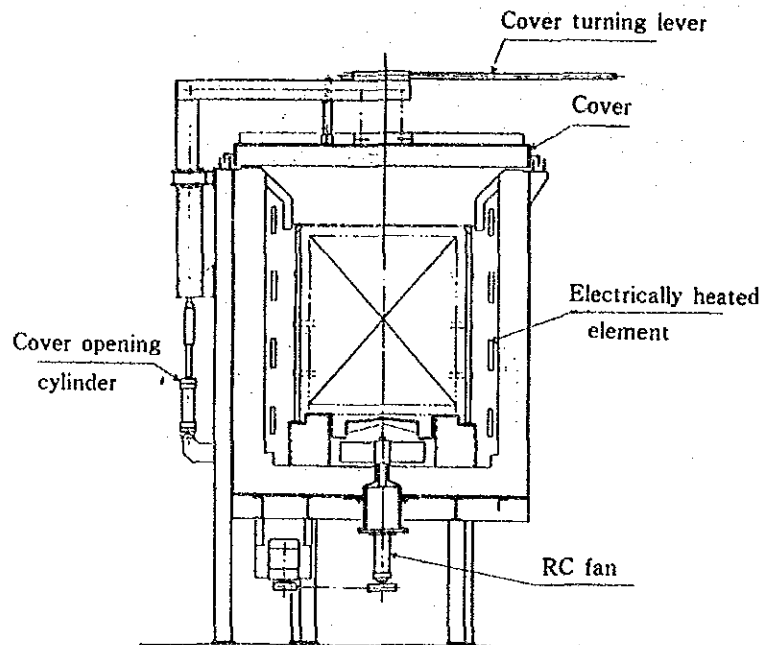


Figure 11-5 Pit-Shaped Furnace



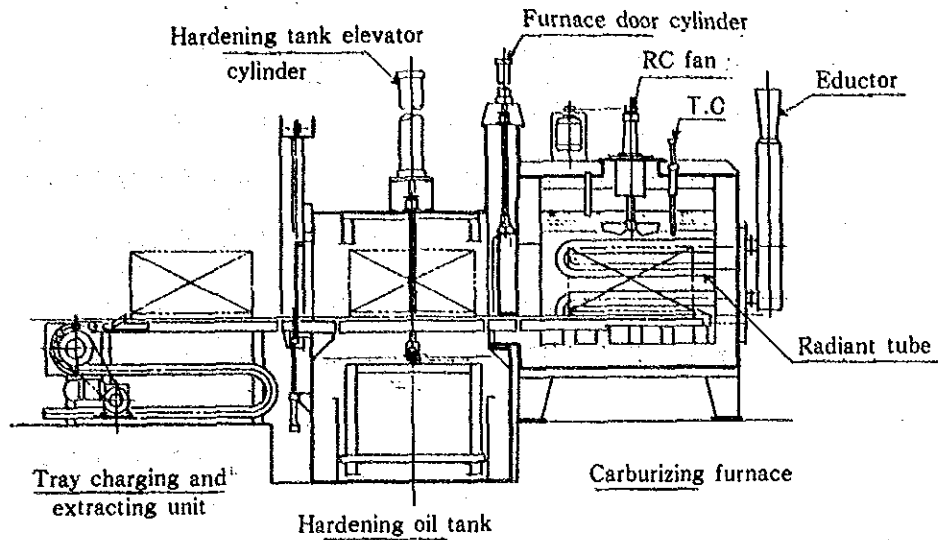


Figure 11-6 In-Out-Type Horizontal Furnace

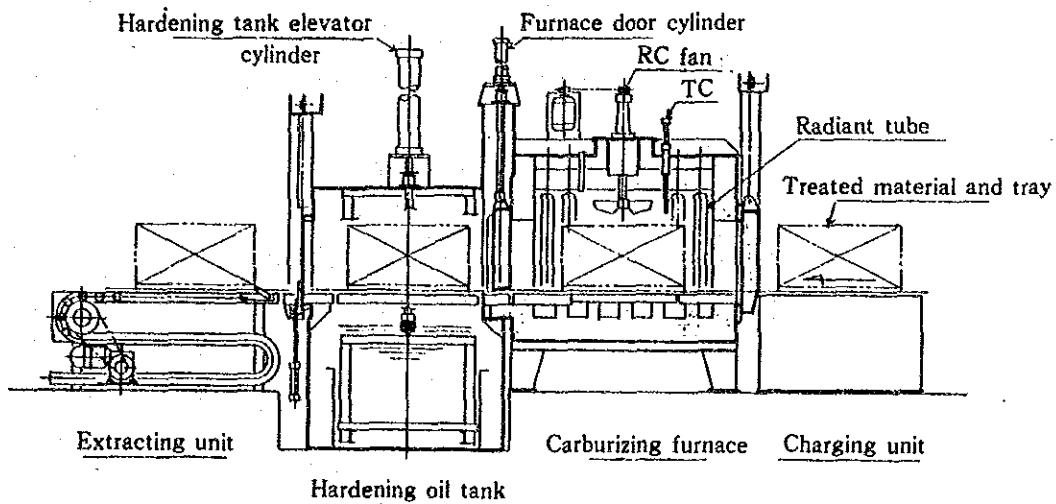


Figure 11-7 Straight Through Type Horizontal Furnace

C) トレイプッシャ形炉

連続式浸炭炉として、最も広く使用されている。特に大量生産と高度な室の均一性を要求される自動車用歯車類の浸炭には、欠くことのできない炉となっている。

装入、抽出端には控室 (Veslibule) を設け、炉内ふん囲気が外気の影響をうけないようになっている。

炉は材料進行方向に、加熱、浸炭、拡散、降温保持の4帯に分けられている。

材料はトレイに載せ、押込み機で装入され、スキッドレール上を移動し、各帯を

を経て外気に接することなく出口部に設置されている焼入槽に浸漬して焼入れ処理を行うか、焼入れを行はず別室で徐冷して炉外に取り出される。

ふん囲気ガスは各帯ごとに供給され、それぞれの目的に必要な炭素濃度を保つように操作される。均一な熱処理品質を得るためにはふん囲気の強力な循環が必要で、各帯にファンが設置されている。焼入れの終わった材料は自動的に外部へ取り出され、洗浄装置、焼もどし炉を通り熱処理を終了する。

Figure 11.8 に炉の構造を、Figure 11.9 に連続浸炭設備の一例を示す。

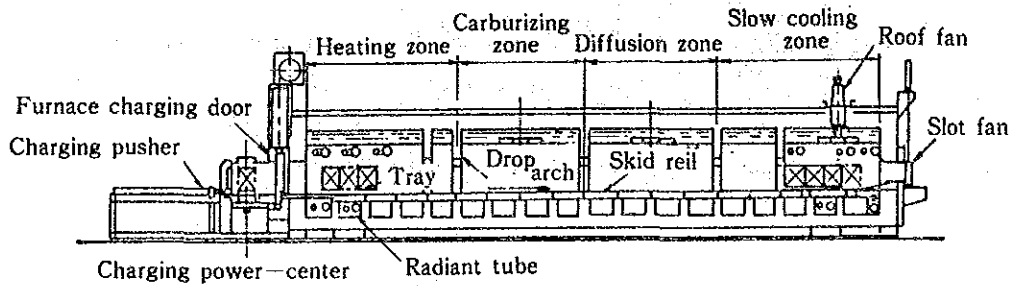


Figure 11-8 Tray Pusher-Type Furnace

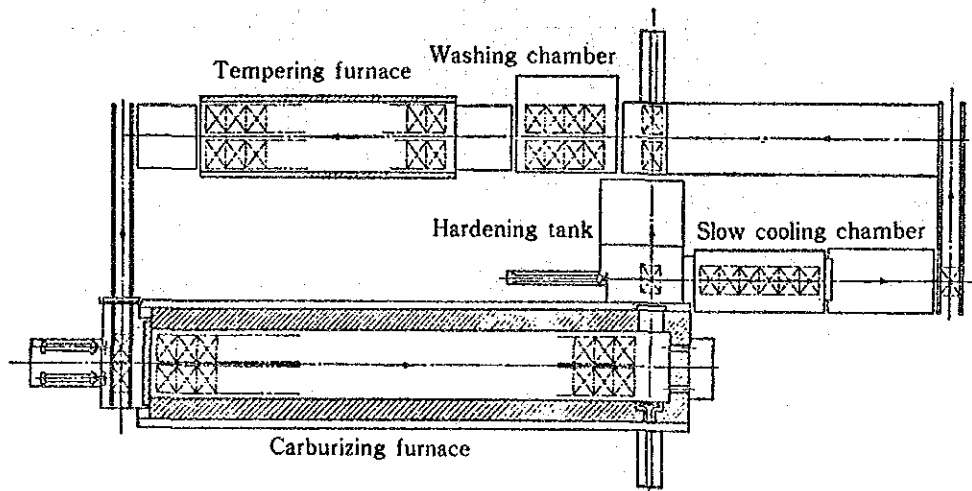


Figure 11-9 Continuous Carburizing Equipment

### (3) 鋼片加熱炉

鉄鋼業において、鋼材を熱間で圧延加工するこめに、1,000~1,300℃の目的温度まで再加熱する設備である。

加熱炉にはバッチ式と連続式があるが、バッチ式は主に特殊な形式のものを再加熱する補助的な設備であり、大量生産用には連続式が主流である。

連続式加熱炉にはプッシャ式、ウォーキング・ビーム形、ウォーキング・ハース形、ロータリ・ハース形等がある。

最も古く、かつ初歩的な形式の炉としては Figure 11.10 のプッシャ形1帯式加熱

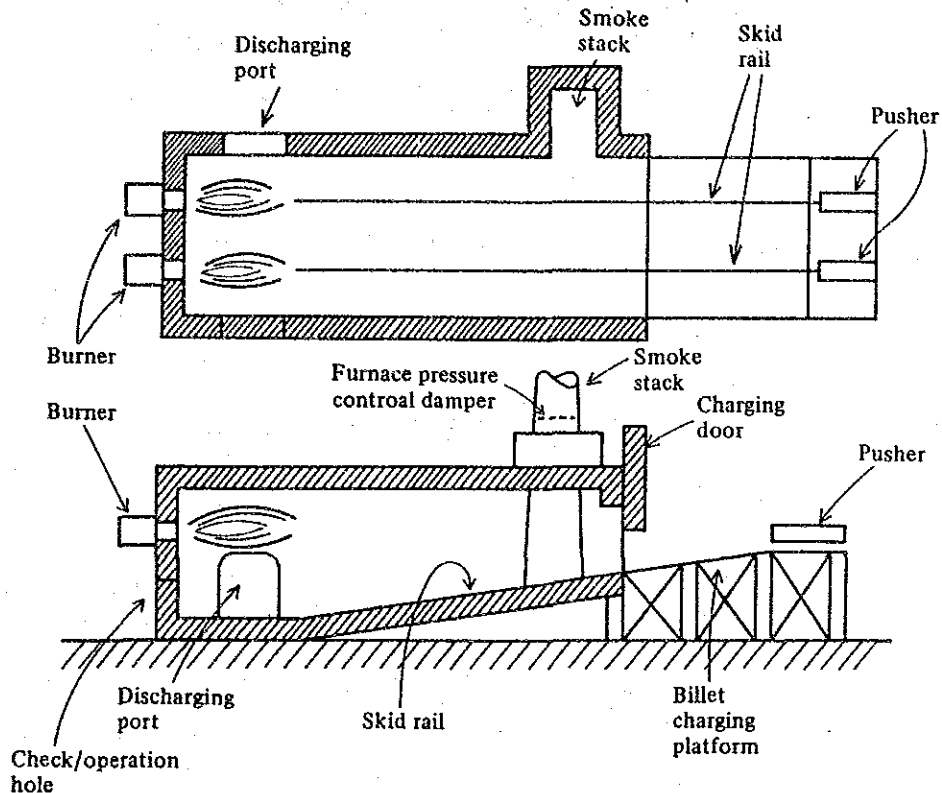


Figure 11-10 Pusher-Type Single Zone Reheating Furnace

炉があり、これは50t/h 程度までの加熱能力がある。鋼片は炉全長にわたって上面だけから加熱されているので、上下面の温度差が大きく、炉温が1ゾーンコントロールであるため、操業にフレキシビリティがない。炉長の長いものや、大容量の炉には適さない。

加熱容量60~120t/hの能力のある炉としては、Fig. 11.11のような、プッシャ形3帯式加熱炉がある。この炉は加熱帯と均熱帯が明確に区分され、加熱帯では鋼片を上下両面から圧延温度まで加熱し、均熱帯ではスキッドマークを減少し、鋼片の温度を均一にすることを目的として炉である。3ゾーンのそれぞれの炉温を制御することができ、ある程度加熱速度を変えることができる。すなわち、操業にフレキシビリティを有している。

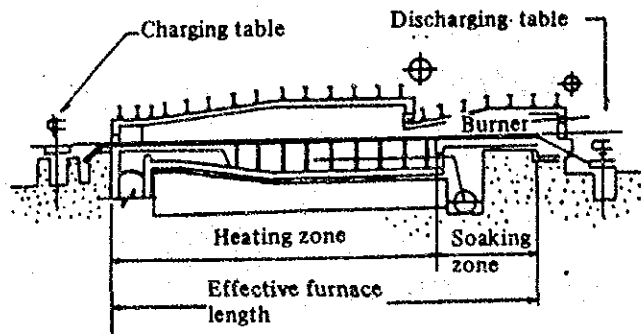


Figure 11-11 Pusher-Type 3-Zone Reheating Furnace

更に、加熱容量の大きな炉として 200~250t/hのプッシャ形5帯式加熱炉がある (Fig.11.12 参照)。これは3帯式加熱炉を発展させたものであり、予熱帯、加熱帯、均熱帯が明確に区分されている。

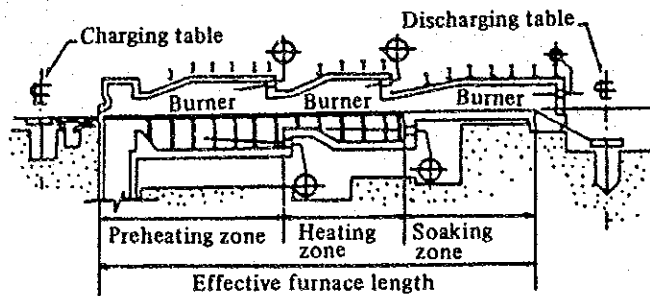


Figure 11-12 Pusher-Type 5-Zone Reheating Furnace

プッシャ形の欠点としては、スキッドマークの発生や、鋼片の裏面の搬送きずの発生等がある。更に、大容量の加熱能力を有する炉では、これらの欠点を解消するためのものとしてワーキング・ビーム形加熱炉がある (Fig.11.13 参照)。

この形式の炉の加熱能力は 200~400t/hと大きく、最近は大容量の加熱炉においては主流となっている。

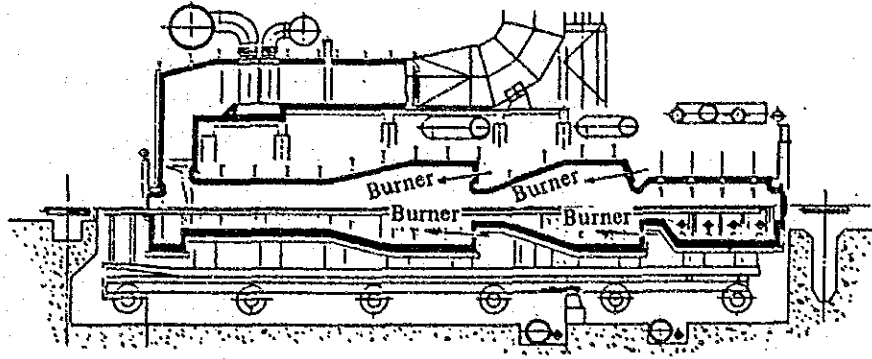


Figure 11-13 Walking Beam-Type Reheating Furnace

### 11.1.2 エネルギー使用の状況

これらの工程では加工機械、一部溶解炉、溶接、溶断に電力が用いられ他、大部分は燃焼による熱エネルギーとして加熱炉、熱処理炉で消費される。

熱処理炉におけるエネルギー消費は処理の種類、炉の規模によって大きな差があるが、一般的には熱効率が低い。Tabl 11.2 に日本の例を参考とし示した。このうち、Roller herth 炉、Walking beam 炉、Bell型炉は大企業の炉が多いため他の炉より熱効率がよい。個々には後述するような対策の積み重ねにより熱効率の改善が進められており、例えば球状化焼鈍の場合で $15 \times 10^4$  kcal/t以下と以前の5分の1以下に低下している例もある。

鋼片加熱炉については大企業の炉が殆どであるため原単位の低下が進み、 $30 \times 10^4$  kcal/t 以下になっている。特に前工程の高温をそのまま利用する Hot charge、あるいは加熱工程の省略まで行われるようにになり、単純な原単位比較はできない。

Table 11-2 Fuel Consumption and Thermal Efficiency by Type of Heat Treatment Furnace

Type	No. furnace	Item	Fuel consumption (10 <sup>3</sup> kcal/t)		Thermal efficiency (%)		Heat treatment temperature (inside of furnace) (°C)		Capacity Continuous(t/h) Batch(t/charge)		
			£	R	£	R	£	R	£	R	
Continuous Type											
		Tray pusher type	42	129	39~319	11.2	4.6~37.4	875	560~ 970	1.19	0.125~9.5
		Roller hearth type	25	42.5	20~ 79	33.4	19.7~50.7	863	700~1,000	5.59	0.4 ~18.0
		Conveyor type	29	93.8	10~262	11.1	4.2~48.0	724	400~1,000	0.78	0.17~ 2.9
		Bogie type	22	124.4	31~226	12.7	7.4~25.0	937	580~1,000	0.84	0.3 ~ 2.0
		Walking beam type	11	49.1	18~100	30.1	3.5~55.8	890	570~1,280	14.1	0.6 ~58.4
Batch type											
		Bogie type	109	177.4	21~920	8.5	1.8~32.9	900	500~1,200	42.8	0.3 ~350
		Box type	52	119.2	34~609	12.3	2.5~34.4	886	600~1,100	1.73	0.05~ 40
		Pit pot type	14	173.8	48~710	8.4	2.1~29.2	849	500~1,100	10.5	0.03~ 80
		Bell type	7	37.7	23~ 63	29.9	18.1~40.9	723	580~ 900	87.9	2.4 ~360

Note: £: Average  
R: Range

11.2 エネルギー使用の合理化

金属工業における熱エネルギー使用の合理化は、ほとんどが燃焼炉に関係するものである。加熱炉や熱処理炉に対する省エネルギーのための特性要因図はFig. 11.14 のとおりである。この主要項目を図示したものがFig. 11.15 である。

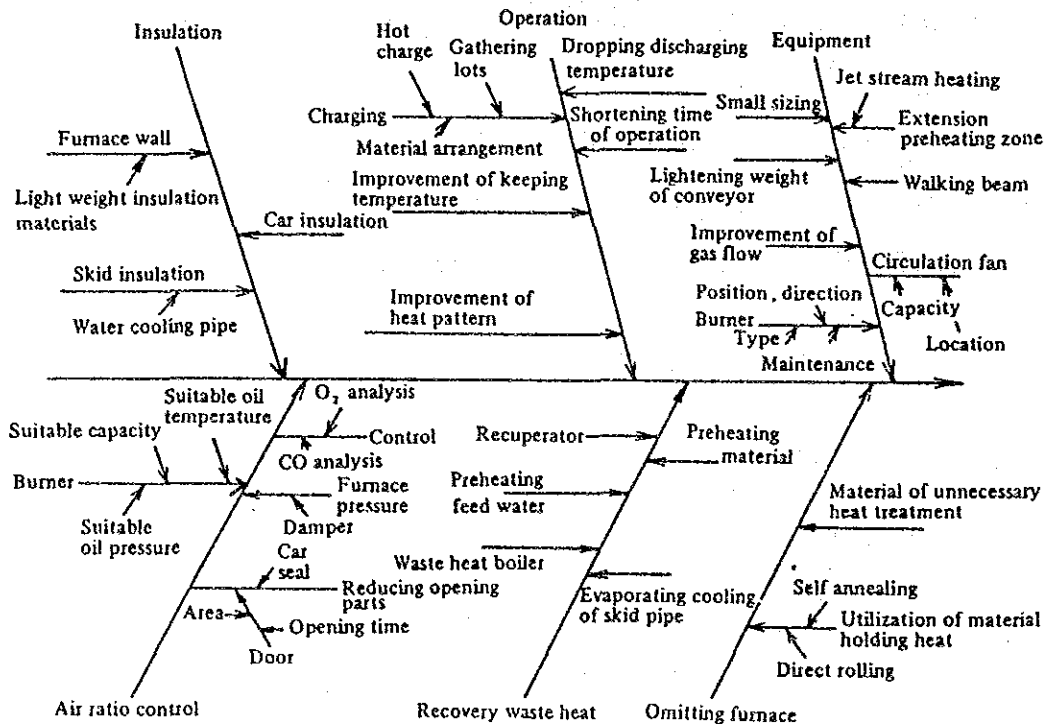


Figure 11-14 Characteristic Diagram of Energy Conservation for Reheating Furnace and Heat Treatment Furnace

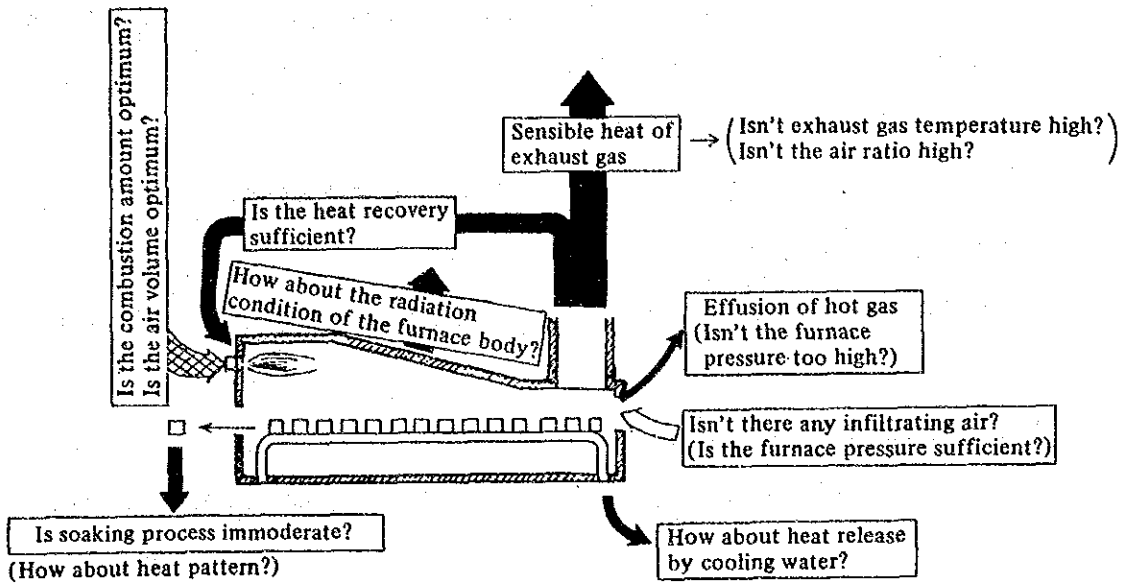


Figure 11-15 Reduction Point for Fuel Consumption Rate

### 11.2.1 燃料の燃焼の合理化

#### 11.2.1.1 空気比

燃料の持つ化学エネルギーを、熱エネルギーに変換する過程としての燃焼を行う場合、燃料を未燃分を残さずに燃焼しつくすと同時に、燃焼に要する空気の量を計算上必要とされる理論的な空気量に可能な限り近づけるよう低減させることによって、熱効率を可能な限り向上させることが必要であり、その重要な課題として空気比の低減がある。

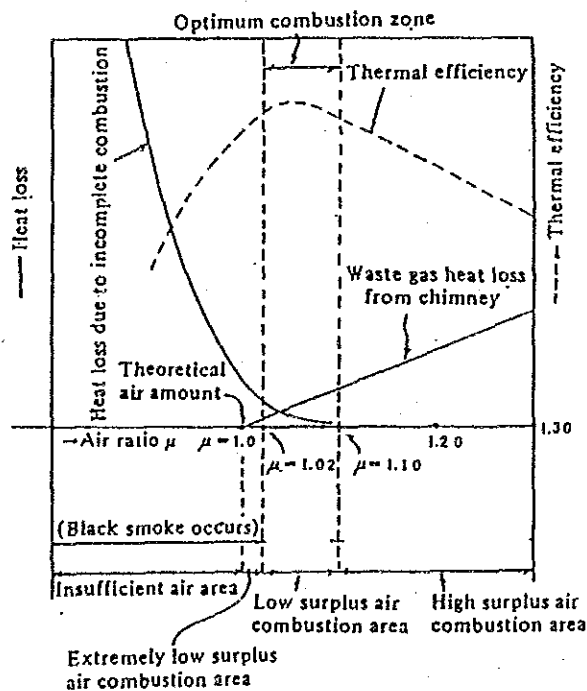


Figure 11-16 Relation between Air Ratio and Thermal Efficiency

Fig.11.16 のように、燃料が不完全燃焼をしている場合は、燃料の未燃分が残ることによる熱損失があり、一方、完全燃焼に必要な量以上に燃焼用空気を送入すると、過剰な空気に熱を与えることによる損失が生ずる。

従って、理論空気量よりも少しだけ過剰な空気を送入する状態を維持しつつ、完全燃焼させることが合理的な燃焼である。

この空気の過剰の程度は、燃焼計算上必要とされる理論空気量に対する実際の燃焼空気量の比、すなわち空気比で表される。

Fig.11.17 は、空気比による燃料原単位の変化を示すが、排ガス温度が1,000℃の場合、空気比を1.8 から1.2 に下げると、燃焼原単位は180 から100 に下がり、もとの原単位と比較して、約45%の省エネルギーとなる。

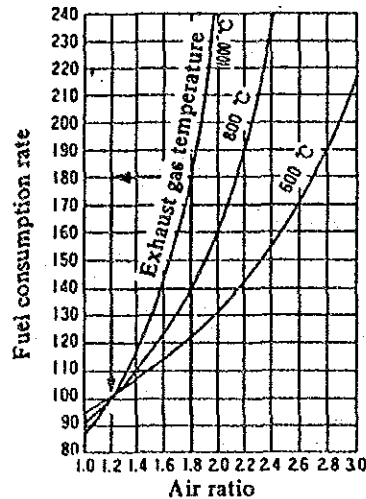


Figure 11-17 Energy Saving Effect under Air Ratio Control

このように空気比は、熱エネルギー使用の合理化の重要な指標であるので、燃料の燃焼を行う設備及び使用する燃料の種類に応じて、空気比についての標準を定め、管理して行く必要がある。

また、参考として日本での工業炉の標準空気比をTable.12.3に示す。



Table 11-3 Standard Air Ratio of Industrial Furnaces

Classification	Standard air ratio
Melting furnace for metal casting	1.3
Continuous reheating furnace for bloom	1.25
Metal reheating furnace other than continuous reheating furnace for bloom	1.3
Continuous heat treatment furnace	1.3
Gas producer and gas heating furnace	1.4
Petroleum heating furnace	1.4
Thermal cracking furnace and reformer	1.3
Cement kiln	1.3
Alumina kiln and lime kiln	1.4
Continuous glass melting furnace	1.3

## (Remark)

- The values of the standard air ratio listed in this Table are determined regarding the air ratio measured at the outlet of the furnace, when the burning is carried out at a load in the neighborhood of a rating after inspection and repair.
- The values of the standard air ratio listed in this Table will not apply to the air ratio of the under-mentioned industrial furnaces as a standard:
  - Those using a solid fuel.
  - Those having a rated capacity of not more than 200,000 kcal/hour.
  - Those requiring a special atmosphere for oxidation or reduction.
  - Those requiring a frequent operation of furnace cover or frequent ignition and fire extinguishment.
  - Those requiring a diluted air for maintaining a heat pattern or equalization of intrafurnace temperature.
  - Those requiring an opening because of the structure of burning equipment and through which a large amount of external air flows in.
  - Those operated annually with the maximum operating time limited to 1,000 hours.

## 11.2.1.2 バーナ

燃焼炉では燃焼熱エネルギーが最大の入熱であり、熱の生成、利用の過程における効率が炉全体の効率に大きく影響する。従って、バーナの選定に当たっては炉の形式燃料の種類、使用条件、炉の目的など、あらゆる角度から検討し、最も合理的なものを選定しなければならない。バーナ形式は燃料によってFig11.18のように分類される。

## (1) 内部混合式ガスバーナ

内部混合式ガスバーナは、ガスの燃焼に必要な空気の全量が予混合された混合気を噴出燃焼させるもので、燃焼用二次空気を必要とせず、無輝炎による急速燃焼が可能なバーナである。ガスと空気の混合比率を設定すれば、所望の炉内雰囲気を作り出すことができる。

急速な燃焼が行われるから、燃焼室を小形とすることができ、高温が得られるのと、

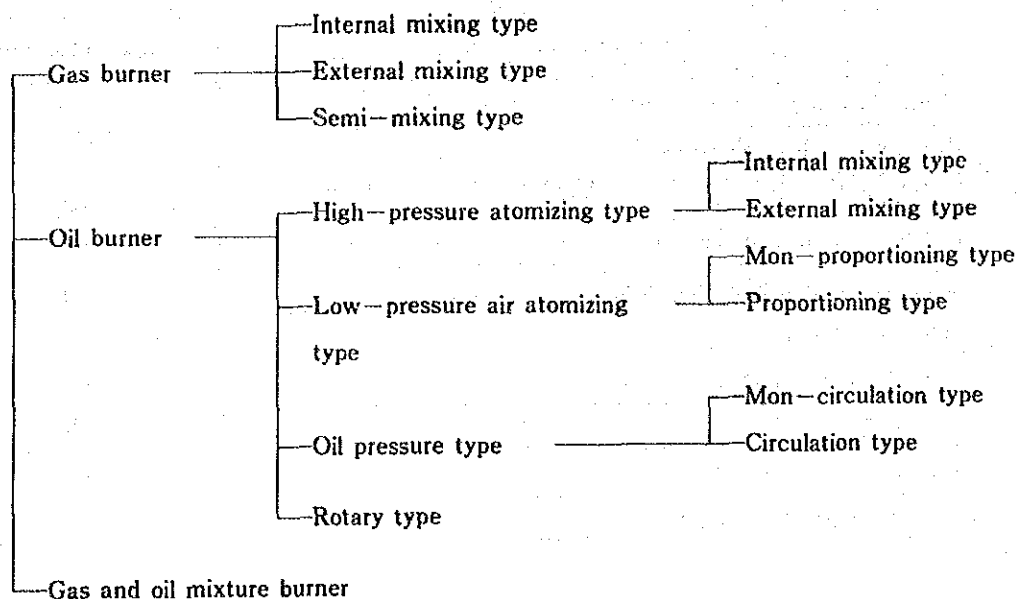


Figure 11-18 Classification of Burners

混合比率を正確に調整することができる。

内部混合式ガスバーナで、注意をしなければならない点は逆火である。

ガスと空気の混合気は、その混合割合がある範囲内にある場合にだけ、燃焼や爆発が起りうる。これを可燃範囲といて、ガスの種類によってこの範囲は異なる。

可燃範囲は、ガスの圧力と温度によって僅かに変化するが、空気との混合割合によって炎の伝ば速度が変化する。

バーナの逆火は、先端での混合気の噴出速度が炎の伝ば速度より小さくなった場合に起り、逆火した炎は、バーナ内部から配管中をさかのぼり、混合部まで後退することになる。

このため、混合気の噴出速度は燃焼量を最低に減じた際にも炎の伝ば速度より十分大きい速度であることが必要である。従って、高い圧力を持つ混合気の場合には燃焼調節範囲を広くとることができる。

混合気の噴出速度が極めて大きい場合には、炎の吹き飛び現象を伴う恐れがあるので多数の小穴から噴出させ、個々の噴出孔付近に生ずる渦によって減速を図ったり、耐火物表面に衝突させて減速し、燃焼を安定させる方法が普通とられている。

Fig. 11.19 に内部混合式ガスバーナの構造を示す。

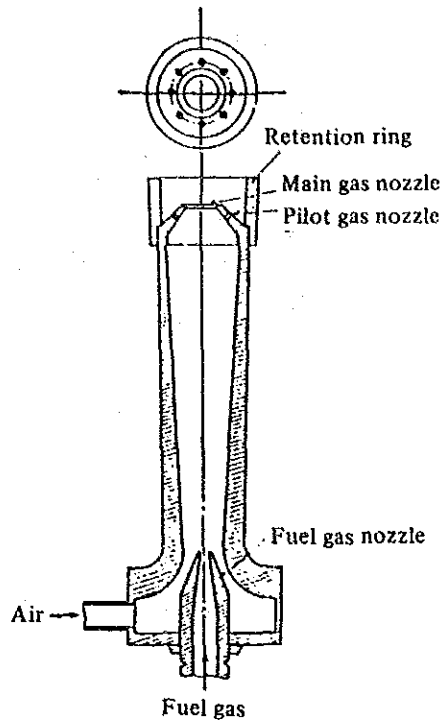


Figure 11-19 Structure of Internal Mixing Type Gas Burner

(2) 外部混合式ガスバーナ

外部混合式ガスバーナは、ガスと燃焼用空気とをバーナ外部で拡散混合させて燃焼させるもので、ノズル混合式とも呼ばれる。この形式では、バーナの内部で可燃性混合気が作られないから、逆火の危険なしに広範な燃焼量の調節ができ、高温に予熱した空気を燃焼用として使用したり、ガスを予熱して使用することができるので、工業炉用のガスバーナとして、大容量のものから小容量のものまで広く用いられている。

噴出部の構造やガス・空気の噴出速度を適当に選定することによって、いろいろの輝度、長さ及び温度特性を備えた炎が得られることも本形式のバーナの大きな特徴の一つである。典型的な外部混合式バーナはFig.11.20, Fig.11.21に示すとおりである。

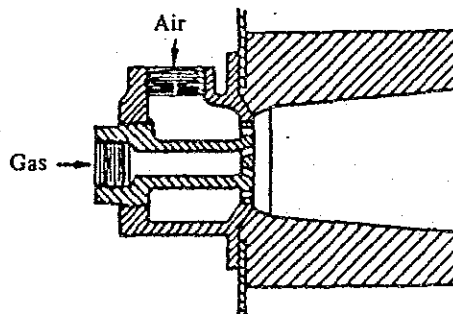


Figure 11-20 Compact External Mixing Type Gas Burner

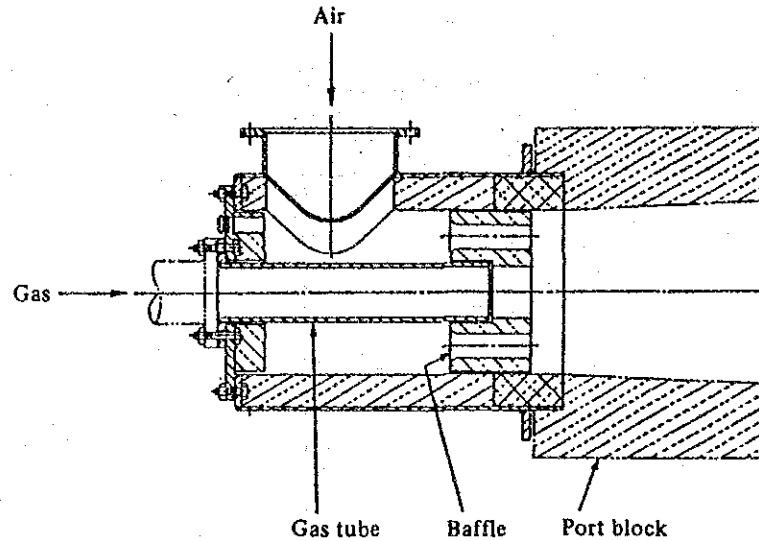


Figure-11-21 Structure of External Mixing Type Gas Burner

Fig.11.20 は比較的小容量のバーナとして用いられるもので、ガスは中心にあるノズルから供給され、空気はその周囲から入ってバーナタイル内に均一な噴流を作り、効果的な拡散混合が行われる。空気とガスが低速で噴出する場合には、比較的溫度の低いソフトな長い炎が得られるので、局所的な過熱を防止しなければならないラジアントチューブ用バーナなどには適している。

Fig.11.21 は均熱炉、再熱炉などに使用されているバーナで、出口部に耐火物製バッフルを備えたものや、耐火物のベンチュリを用いて出口を適当に絞ったものなどがあり、普通高温の予熱空気が使用されるので、ケーシング内面には、適当な厚さの断熱ライニングがされている。

### (3) 半混合式ガスバーナ

半混合式ガスバーナは、燃焼用空気の一部とガスを予め混合してバーナに供給し噴出部で必要量の二次空気を補足して燃焼を行わせる形式のバーナで、大気圧バーナとも呼ばれる。空気の子混合には普通ベンチュリ管が使用され、空気はガスの持つ動圧エネルギーによって大気中から吸引混合される。

予混合される空気量は、全燃焼空気量の30~70%程度で、この一次空気量の調節によって炎の長さや輝度を変えることができる。

簡単な設備の小形バーナ用としては、50~250 mmH<sub>2</sub>O の程度の低いガス圧力で使用されるが、燃焼量の大きい工業用バーナでは、ガスの種類、予混合される空気量の割

合、更には要求される燃焼量の調節範囲などから、適当な混合空気圧力を得るため、より高いガス圧力が必要とされる。

燃焼用空気の一部混合であっても、予混合であるので、ほとんどの場合、可燃焼範囲内の混合気となることから、逆火に対する考慮が払われなければならない。

Fig.11.22 半混合式ガスバーナの構造を示す。

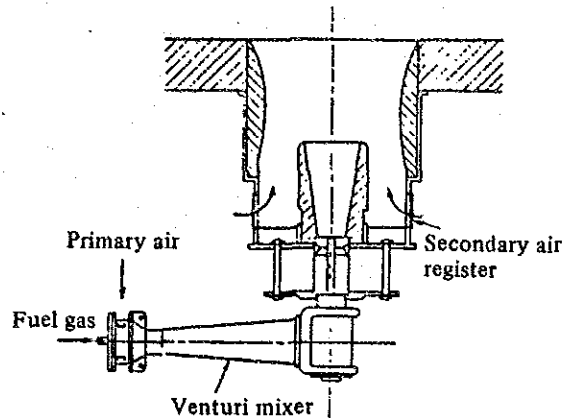


Figure 11-22 Structure of Semi-Mixing Type Gas Burner

#### (4) 高圧気流式油バーナ

油バーナの形式の中で、高圧気流式は通常  $2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$  程度の圧縮空気又はスチームを噴霧媒体として用い、油をせん断霧化するものである。

高圧気流式油バーナはFig.11.23 のように、バーナ本体の他に燃焼用空気を供給・制御するためのエアレジスタが必要である。高圧気流式油バーナは、油と霧化媒体との混合位置によって、内部混合形と外部混合形との2種類に大別される。

Fig.11.24 に示したバーナは内部混合形の一例で、油と霧化媒体が噴出孔の手前で混合するものである。

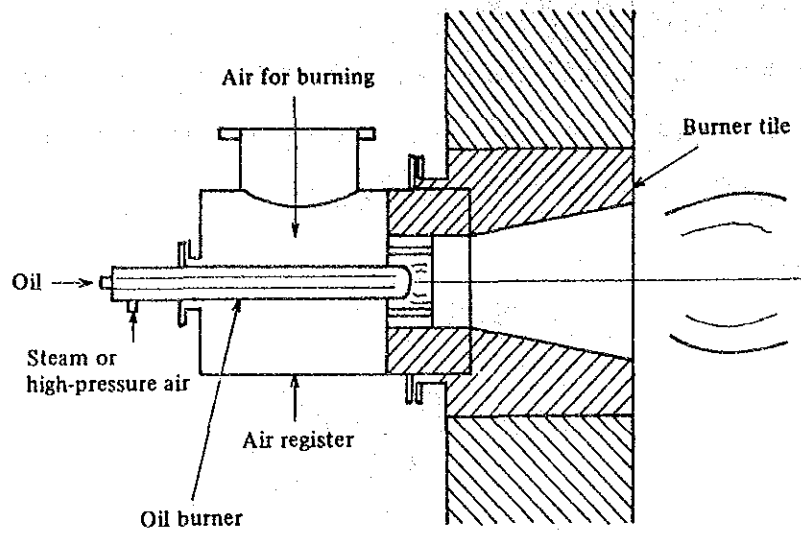


Figure 11-23 Installation Chart for High-Pressure Atomizing Type Oil Burner

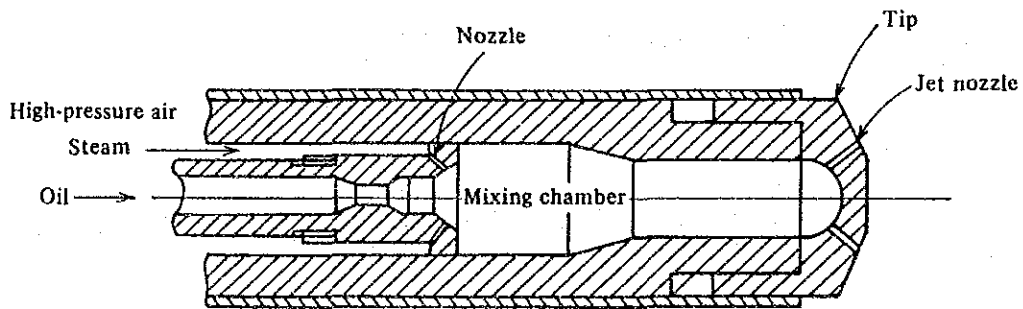


Figure 11-24 Structure of High-Pressure Atomizing Type Oil Burner (Internal Mixing Type)

Fig.11.25 に示したバーナは、外部混合形の一例で油と霧化媒体が噴出孔の外部で混合するものである。

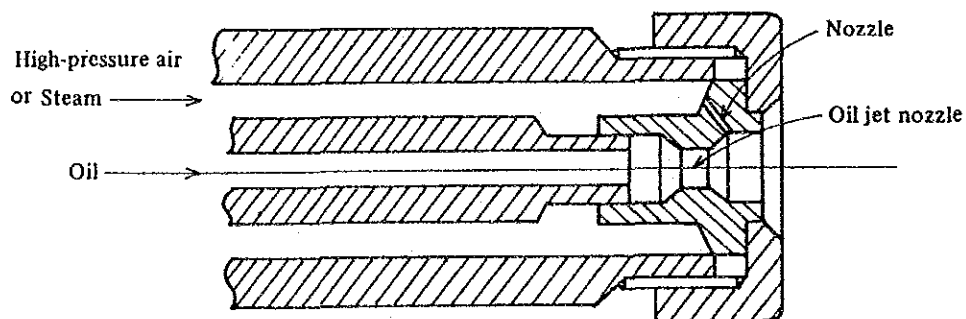


Figure 11-25 Structure of High-Pressure Atomizing Type Oil Burner (External Mixing Type)

(5) 低圧空気式油バーナ

低圧空気式油バーナは、油の霧化媒体として 600~1000mmH<sub>2</sub>O の低圧空気を用いる。霧化原理は高圧気流式と同様で、空気の噴出エネルギーを利用して油を微粒化する方式のバーナである。この形式のバーナは、油の霧化に必要な空気量のみをバーナ本体に供給する非連動形と、燃焼に必要な全空気量をバーナ本体に供給する連動形に大別される。

非連動形低圧空気式油バーナは、燃焼に必要な理論空気量の約20~30%の空気を霧化用としてバーナに供給するものが多い。従って、完全燃焼をするためには、残り70~80%の空気量を自然通風、又は押し込み通風のいずれかによって別途に供給する必要がある。

連動形低圧空気式油バーナは、一般にプロポーショニングバーナと呼ばれるもので、噴霧用空気を含む燃焼用空気の全量をバーナーに供給し、油量調節と空気量調節を連動させている。

燃焼に必要な全空気量がバーナから供給されるので、炉圧の影響を受けることが少なく、また、空気比を比較的正確に保持することができる。

Figure11.26 に非連動形低空気式油バーナ、Figure11.27 に連動形低空気式油バーナの構造例を示す。

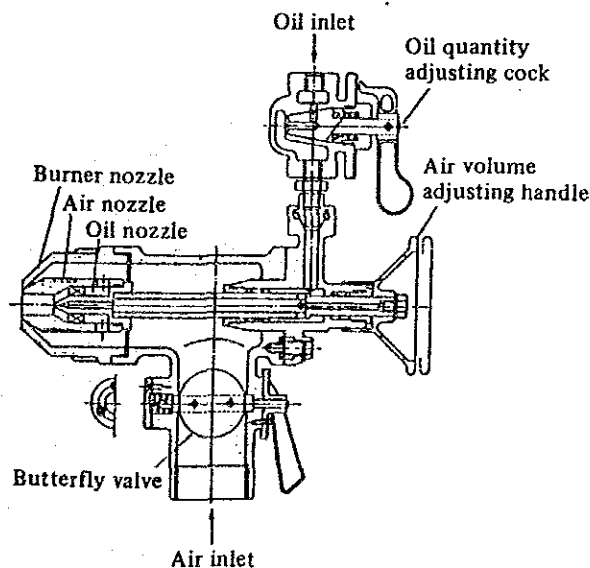


Figure 11-26 Structure of Low-Pressure Air Type Oil Burner (Non-Proportioning Type)

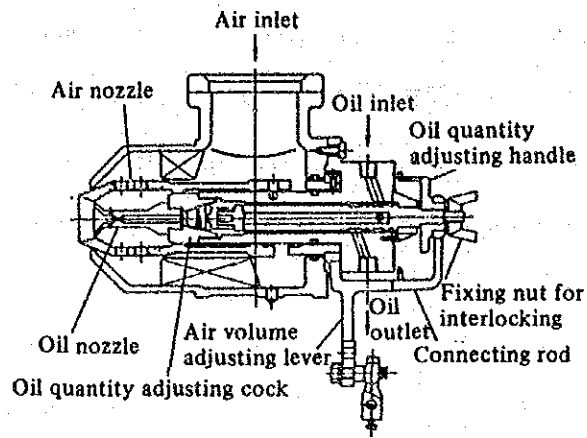


Figure 11-27 Structure of Low-Pressure Air Type Oil Burner (Proportioning Type)

(6) 油圧式油バーナ

油圧式油バーナは、油圧エネルギーのみで油を霧化する方法のバーナである。

油は比較的高圧で供給し、霧化用の空気やスチームは不要である。

霧化のための油圧は、通常  $5 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  とされているが、近時、バーナの大形化に伴って最高圧力  $100 \text{ kg/cm}^2$  あるいはそれ以上のものもある。

油圧式バーナには、バーナ本体に送り込んだ油を戻すことのできない形式と戻すことのできる形式がある。前者は設備が単純で、運転操作も容易であるが、調節範囲が狭いため、一定流量で燃焼させるのに適しており、その制御方式はon-off制御が用いられている。

後者は、この欠点を補うもので、広い調節範囲をもっている。

Figure 11.28 に非戻り油形バーナ、Figure 11.29 に戻り油形バーナの構造を示す。

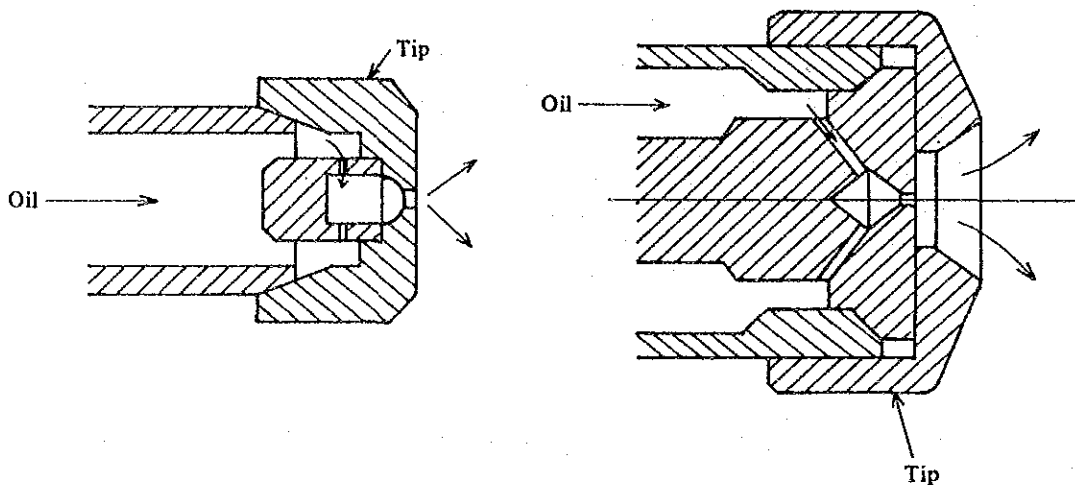


Figure 11-28 Structure of Non-Return Oil Type Oil-Pressure Burner



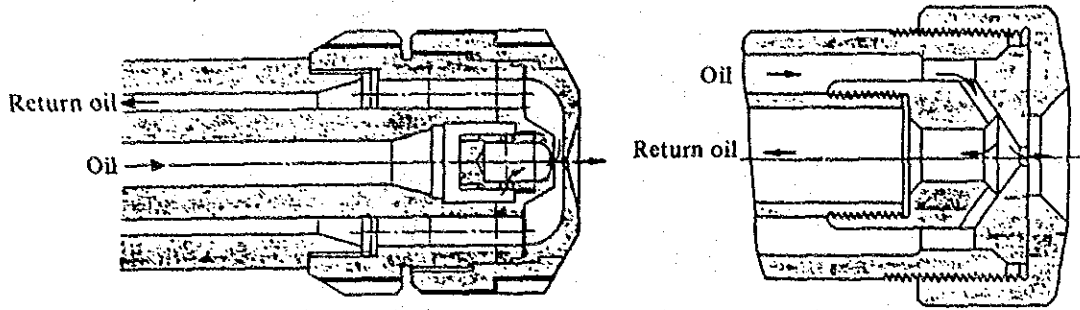


Figure 11-29 Structure of Return Oil Type Oil-Pressure Burner

(7) 回転式油バーナ

回転式油バーナは、回転板による油の微粒化を利用して霧化するもので、Fig.11.30にその構造を示す。

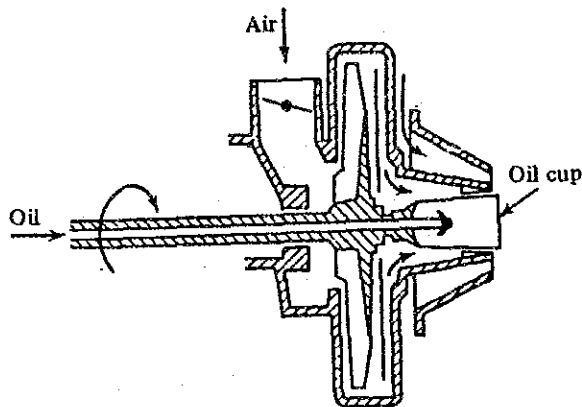


Figure 11-30 Structure of Rotary Type Oil Burner

このバーナの霧化機構は、回転するカップ（霧化筒）の内面テーパに沿って流出した油が、その先端で遠心力によって振り出され、霧化筒の先端で、その切線方向に薄い膜状になった状態となり、それを霧化筒の外側から吹き出す一次空気によって霧化するもので、低圧空気噴霧バーナの発展したものといえる。

(8) 油・ガス混合バーナ

単一のバーナで、油及びガスをそれぞれ専焼もしくは両者を同時に混焼可能としたバーナであって、通常、油バーナガンはバーナの中心に配置され、いろいろの形式の外部混合ガスバーナと組み合わせて使用される。

Fig.11.31 は多くの均熱炉や再熱炉で使用されている混焼バーナの形式である。

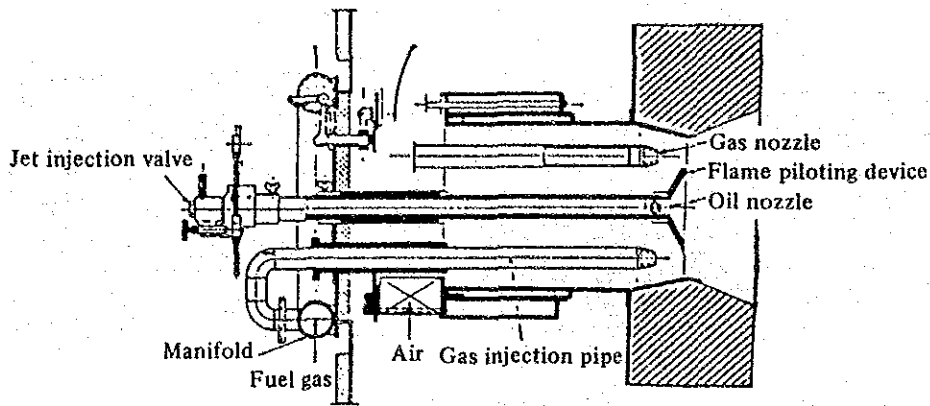


Figure 11-31 Structure of Oil and Gas Mixture Burner

燃焼設備についてのチェックポイントと処理方法を Table 11.4 に参考までに示す。

Table 11- Points of Check and Maintenance Services for Burning Equipment

Check spot	Points of check	Procedures (Maintenance)
Fuel piping (oil and gas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check leaking spots and tightened parts.</li> <li>• Check if there are any foreign matter or accumulated materials in piping.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retighten defective spots.</li> <li>• Blow the air into piping.</li> </ul>
Attached equipment with piping	• Disassemble and check the oil pump	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check worn-out parts, specially bearing, and if defective, replace them.</li> <li>• If the whole pump is defective replace it with a spare pump.</li> <li>• Check V-belt and coupling, and replace them, if necessary.</li> </ul>
	• Disassemble and check oil strainer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check the interior of strainer.</li> <li>• Clean the clogged strainer.</li> <li>• If broken, replace the strainer or repair by partial welding and padding.</li> </ul>
	• Disassemble and check oil heater	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check and clean the heater.</li> <li>• If defective, replace it.</li> </ul>
	• Check valves such as pressure adjusting, stop and relief.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• If any function is found, disassemble and check, and replace the whole set of valves.</li> <li>• For the relief valve and safety valve, check and adjust their working pressure.</li> </ul>
Interior of furnace	• Check burner tiles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check if there is any carbon attaching to the burner tile scrape it off while it is hot as for as circumstances allow.</li> <li>• Check if there are any cracks.</li> </ul>
	• Check refractories.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check if there are cracks or a large break.</li> <li>• Check the joints of refractories.</li> <li>• Check the alignment of refractories.</li> </ul>
	• Check the castable or furnace body.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In addition to the castable, check the furnace body.</li> <li>• Check the peep hole and the explosion door.</li> </ul>
Instruments	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check the flow meter.</li> <li>• Check the thermometer.</li> <li>• Check the manometer.</li> <li>• Check, the fuel safety device.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Check the accuracy of indication. (check the zero point)</li> <li>• Check a leakage and breakage of the connections.</li> <li>• Test the flame suppression action. It is necessary to disassemble and clean the flame detector (e.g. ultra-violet detector).</li> </ul>

### 11.2.1.3 爆発防止

燃焼装置の取扱に当たってまず注意すべきは爆発の防止である。爆発により人身事故、設備破壊、長期の操業防止を招けば省エネルギーを始めとする操業改善努力の効果をすべて失わせてしまうことになる。燃焼ガスの爆発事故は作業開始時、停止時に起こり易いので以下の注意が必要である。

- ・ 着火前に送風機で十分炉内残留ガスをバージすること
- ・ 着火に失敗した場合は躊躇なく作業を中止し、改めて炉内バージを行うこと
- ・ 火炎検出装置が正常に作動しているか常に注意する
- ・ 消化後の炉内ガスバージも十分に行うこと
- ・ 燃料がガスの場合は、作業終了後ガス供給管を水封により遮断しておくこと

### 11.1.2.4 油燃焼の管理

油の完全燃焼を図るためには完全に油を霧化する必要がある。霧化が悪いと火炎が不安定になったり、不完全燃焼を起こして黒煙を発生したり、炉壁に炭素を付着させたりする。

霧化不良の原因には燃料中のフラッジ等夾雑物による噴霧の断続、油圧の変動、霧化用空気またはスチームの量、圧力の不適、油の予熱不足などがある。

霧化が正常に行われるためには、バーナ入り口での油粘度が Table 11.5 に示す範囲にある必要がある。

Table 11-5 Required Viscosity of Oil at Burner Inlet

Type of burner	Required viscosity of oil at burner inlet	
	RW. No. 1	Kinematic viscosity
High-pressure atomizing type	230 sec. max.	59 cst max.
Low-pressure air type	230 sec. max.	59 cst max.
Oil pressure type	150 sec. max.	32 cst max.
Rotary type	150 sec. max.	32 cst max.

### 11.2.1.5 炉内圧と煙突の通風力

通風とは、燃焼用の空気を供給し、燃焼ガスを排出することをいい、その強さは圧力差 {単位は水柱 (mm)} で示される。通風力は、燃焼炉の通風能力と操炉の良否を判定するうえで非常に重要である。

通風は煙突及び送風機により行われ、次の2方法に大別される。

(1) 自然通風 (煙突)

(2) 強制通風 (送風機)

A) 押し込み通風

燃焼用空気を送風機で炉内に吹き込み、燃焼ガスを煙突の通風力で排出する。炉内圧力が大気圧より高くなる場合があり、炉体に隙間があるとガスが噴出する。

B) 誘引通風

煙道の送風機やエジェクタで燃焼ガスを排出する。炉内圧力が大気圧より低くなる場合があり、炉体に隙間があると外気が侵入する。

C) 平衡通風

押し込み通風と誘引通風を組み合わせた方式で、炉内圧力の調節が自由にできる。通風力が過大のときは、①過剰空気が多く、排ガスによる熱損失が増大し、②炉内温度が降下し、温度分布が不均一となる。

通風力が不足のときは、①不完全燃焼によりススが発生し、②ガス燃料の場合はAfter burnの危険がある。

Fig 11-32 に煙突内の平均ガス温度と通風力の関係を示す。

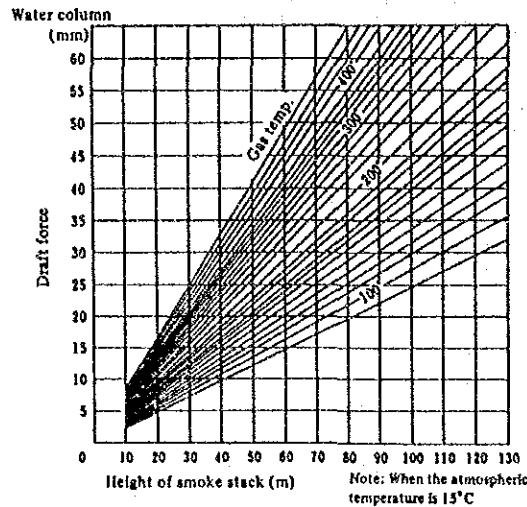


Figure 11-32 Average Gas Temperature and Draft Force Inside Smoke Stack

燃焼に必要な通風力は、バーナの形式と燃焼量によって決まる。通風力はバーナを空気が通過するときのレジスタ抵抗、及び煙道を燃焼ガスが通過するときの煙道抵抗の合計より大きくなければならない。

煙道断面が一定で真直ぐのとき煙道通風抵抗は、長さ1 m当たりの圧力降下で示すと

0.2 ~ 0.3 mm水柱であるが、途中に曲りや断面変化があったり、また煙突までの間に過熱器、エコノマイザ、空気予熱器等があるとき、それぞれ通風抵抗を生ずるので、必要通風力は大きくなる。

煙道中の通風抵抗の1例をTable 11.6に示す。

Table 11-6 Example of Draft Resistance (Water Column mm) in Flue

Heat transfer area	Flue tube boiler	4 ~ 7
	Smoke tube boiler	7 ~ 10
	Horizontal multitubular boiler	3 ~ 6
	Water tube boiler	2 ~ 5
Superheater		2 ~ 3
Economizer		3 ~ 5
Air preheater		3 ~ 5
Dust collector		2 ~ 3
Damper		1 ~ 3
Horizontal flue per 1 m		0.2 ~ 0.3
Flue 90° bend		3

煙道中に空気予熱器などを新設した場合には、通風抵抗が増加するだけでなく、排ガス温度が低下するので、通風力も低下する。

燃料ガス中に硫黄分がある場合は、燃焼によって硫黄酸化物が生成される。この硫黄酸化物は、空気予熱器、エコノマイザ、鋼板製煙突を腐食させるので、排ガス温度は露点以下にしてはならない。通常は200℃以上の排ガス温度にするのがよい。

通風力が不足する主な原因は、次のとおりである。

- a. 煙突高さ及び煙突断面積の不足
- b. スス及びばいじんによる煙道の詰まり
- c. バーナの2次空気入口部の閉塞
- d. 炉体、煙道のレンガ壁等からの空気の侵入
- e. ダンバの開度不足
- f. 送風機の容量又は圧力不足

煙突の通風力は、煙突内のガス密度と大気密度との差により生ずるものであり、その強さは煙突内のガス温度及び煙突の高さによって決まる。

煙突の通風力を求める簡単な計算式を次に示す。

$$h = 355 \times H \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$h$  : 煙突の生ずる理論通風力 (mm水柱)

$H$  : 煙突高さ (m)

$T_1$  : 大気温度 (°C) + 273

$T_2$  : 煙突内ガス平均温度 (°C) + 273

煙突内の一般的なガス流速は、4～5m/s であり、煙突の径が小さいとガス流速が速くなり抵抗が増えるので、十分な流通面積を持った煙突径とする必要がある。

炉内圧設定値は、炉床上の圧力で0.2～0.4mm H<sub>2</sub>O にするのがよい。

ダンパー等炉内圧調節機による圧力設定はFig.11.33 に示すように炉内ガスの浮力と炉内圧測定口の位置との影響を考慮して次のように設定する。

$$P = (0.2 \sim 0.4) + L \text{ (mm H}_2\text{O)}$$

ここで

$P$  : 炉内圧設定値 (mm H<sub>2</sub>O)

$L$  : 炉床からの測定口の高さ (m)

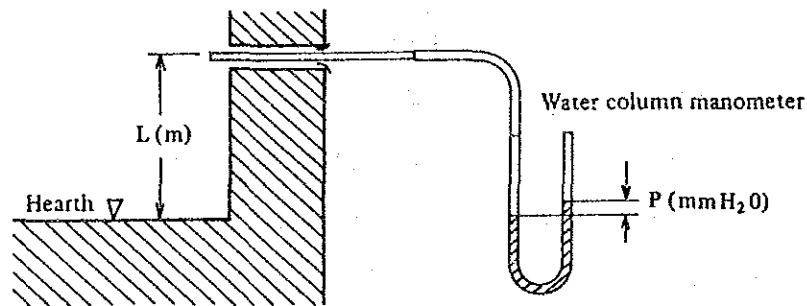


Figure 11-33 Furnace Pressure Measurement Port and Pressure Setting

#### 11.2.1.6 加熱及び冷却並びに伝熱の合理化

加熱炉内において熱は材料に次のように伝えられる。

##### (1) 伝導による伝熱

低温の材料が高温の炉床上に置かれたとき、伝導により熱が伝わる。

2個の固体が接触すると、接触面は瞬間的に両接触面の中間のある温度になる。

実際に伝導によって材料に熱が伝えられる量は比較的少ない。

## (2) 対流による伝熱

Fig.11.34 に示すように、固体の表面に平行にガス状流体が流れている場合には、固体の表面には分子間の吸引力によって流体の層がついていて、熱はこの静止層（境界層）を通り伝導によって伝えられる。600℃以下の炉温では対流による伝熱が最も重要なものとなる。

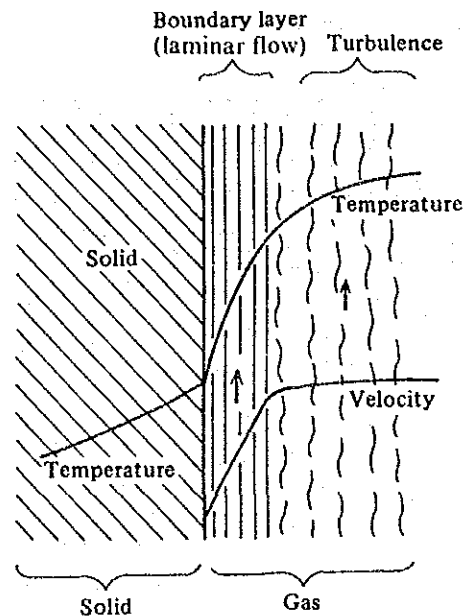


Figure 11-34 Heat Transfer to Surface by Convection

実験によれば、平面に沿うガスの流れに対する単位面積、単位時間当たりの伝熱量はガスの質量と速度及び温度差の関数である。伝熱量を高める目的でガス速度を上げ、熱伝達係数を30 kcal/m<sup>2</sup> h℃又はこれ以上にしている例がある。

低温の加熱炉では、炉内ガスの速度をあげるのが伝達係数をあげる唯一の方法である。

実際の炉内では、ガスの温度も速度も場所によって異なり、ガスの流れが天井に沿って流れ、加熱材料に接触しないこともある。また加熱材料が小さくて、まとめてトレーの上に乗せて加熱する炉も多いが、この場合には、各材料は平らな面をもっているわけでない。この面にガス流が衝突するときの伝熱は、前述のものとは違ったものとなる。

## (3) 固体間の放射による伝熱

固体からは熱を放射していて、高温になればその放射量が増大する。

高温の固体から低温の固体へ放射によって伝えられる熱量は、高温の固体から低温の固体に放射される熱量と、低温の固体から高温の固体に放射される熱量の差である。

固体からの放射熱量は、その固体面の絶対温度の4乗に比例すると共に、固体の放射率にも比例する。

この放射率は吸収率と等しく、完全放射率を黒体放射率ともいう。

Fig.11.35 に、各種金属表面の温度による放射率を示す。

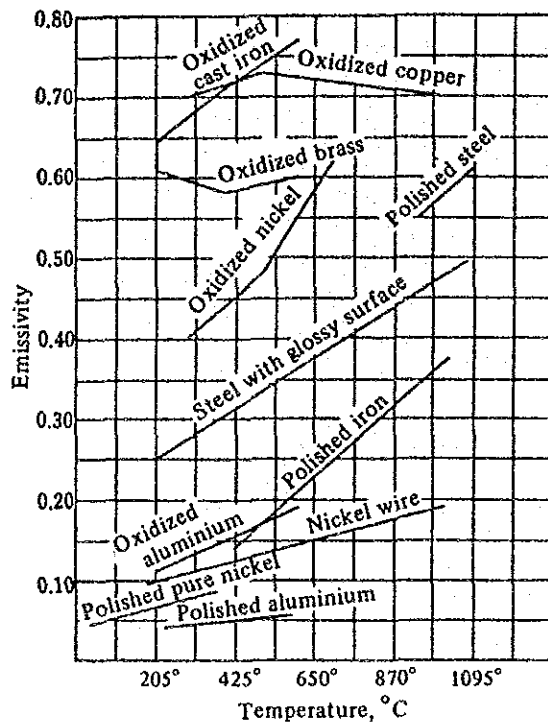


Figure 11-35 Emissivity of Metal

(4) 透明なガスから固体への放射による伝熱

燃焼ガスから固体への放射のうち、透明なガスからの放射といわゆる輝炎からの放射とは区別しなければならない。

透明なガスの中の $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $SO_2$ だけがかなりの熱放射を行う。他のガスすなわち $O_2$ 、 $N_2$ 、 $H_2$ 等は無視できる程度の熱放射しかない。

そしてガスの中でも $CO_2$ 、 $H_2O$ からの熱放射が一般的に重要であり、その強さはそれぞれのガス分圧及びガス層の厚みとの相乗積、及びその温度によって支配される。

(5) 輝炎からの放射による伝熱

液体燃料を燃焼させた場合、気体燃料を空気不足で燃焼させた場合、あるいは微粉



炭などを燃焼させた場合に見られる黄橙色を呈した炎のことを輝炎という。

輝炎の放射は、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等のガス放射と、炎中に含まれる高温の炭素微粒子群による固体放射とが、合成されたものと考えられる。

この輝炎による放射は、一般に不輝炎のガス放射よりもはるかに高い。

#### (6) ホットチャージによる前工程の予熱利用

連铸工場と圧延工場加熱炉装入機が近接してホットチャージに非常に有利なレイアウトになっている場合にはホットチャージを採用して燃料原単位の低減を図る方法がある。

ホットチャージはカットされた高温の連铸ビレットが直接加熱炉に装入されることが望ましいが、連铸機と圧延ラインとの生産能力の差により全量処理することは非常に難しい。従って、通常はバッファ機能として高温連铸ビレットを一時的に貯蔵する保温ボックスが設けられている。保温ボックスは、断熱材でライニングした鋼板構造の箱で、ビレットの出入のための移動可能なカバーを有している。

保温ボックスの収容量及びボックス数等は連铸機能力、ビレット貯蔵計画量等により決定される。

ホットチャージによる省エネルギー量は、装入温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 当たり $20 \times 10\text{ kcal/t}$  (C重油換算で $2.2\text{ l/t}$ )である。

#### (7) 材料装入方法の改善による炉内伝熱の効率化

材料の装入方法を改善することによって炉内伝熱を良くすることができる。

装入材料を山積み状で装入した場合は、炉内の放射伝熱と対流伝熱が山積みとなった材料の上部にのみ作用し、熱伝導による伝熱も各材料の接触度合いが少ないので、下積みの材料が加熱されにくい。

以上のように燃焼炉における炉内の伝熱は、基本的には燃焼ガスの熱放射の能力によるが、この能力を大きくするためには、被熱物の大きさに比べて、炉内容量をかなり大きくして、いわゆる「有効ガス厚み」を厚くする必要がある。しかし、炉内容量を大きくすると、炉壁蓄熱や放熱による熱損失や設備建設費用も高くなることから、熱放射能力そのものを高めて、燃焼ガスから被加熱物への伝熱効率を向上する工夫が必要となる。

固体熱放射能力が、気体熱放射能力よりはるかに高いことに注目して、通気性固体を加熱炉内に装着することによって、気体熱放射を固体熱放射に変換し、結果的に熱

放射能力を高めて、省エネルギーを実施している例もある。

#### 11.2.1.7 放射・伝熱等による熱の損失の防止

##### (1) 炉体表面からの熱損失の防止

炉体表面からの放射熱損失、炉体の蓄熱損失を改善する対策としては、炉壁、天井等の熱伝導率を低下させると共に、熱容量を低減する必要がある。

炉壁はその強度や耐火性などについて一定の性能が求められ、それに応じて炉壁の材料の種類、組み合わせ方、厚さ等の構成の仕方が異なる。

天井は側壁に比べ、炉の強度等の理由から相対的に厚みが少なくなっているのが一般的である。また、側壁には覗き窓、扉、バーナ取り付け部等がありその構造上から、特に厚みが厚い場合や薄い場合がある。

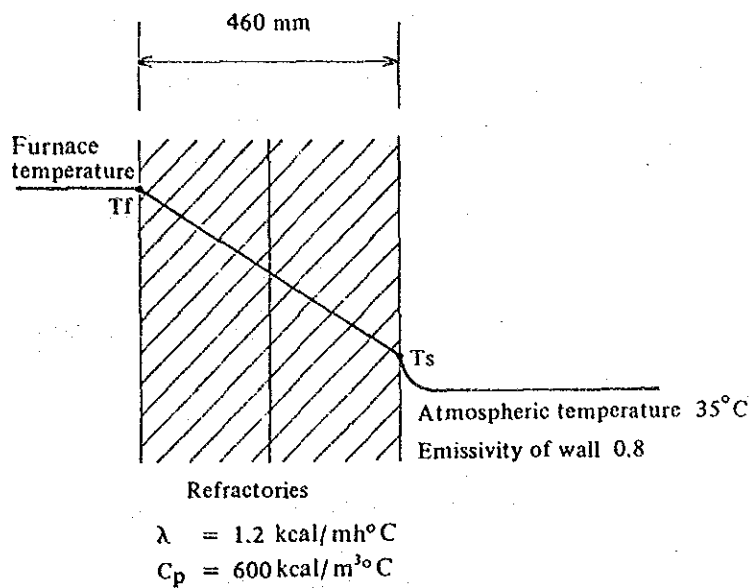
最近設備される炉は、比熱が小さい軽量なセラミックファイバで炉壁が構成されており、断熱効果が優れていると共に、蓄熱量が小さく、炉壁からの熱損失が改善されている。

レンガで炉壁が構成されている既設炉の場合は、後述するようにセラミックファイバ内張りにより対処せざるを得ないが、これは炉容積を減少してもよい場合に限られる。炉体表面からの放散熱損失の改善は断熱方法を強化することにより達成できる。

この断熱方法には炉内壁にセラミックファイバ等を取り付ける方法と、炉外壁にセラミックファイバやロックウールやグラスウール等を取り付ける方法がある。

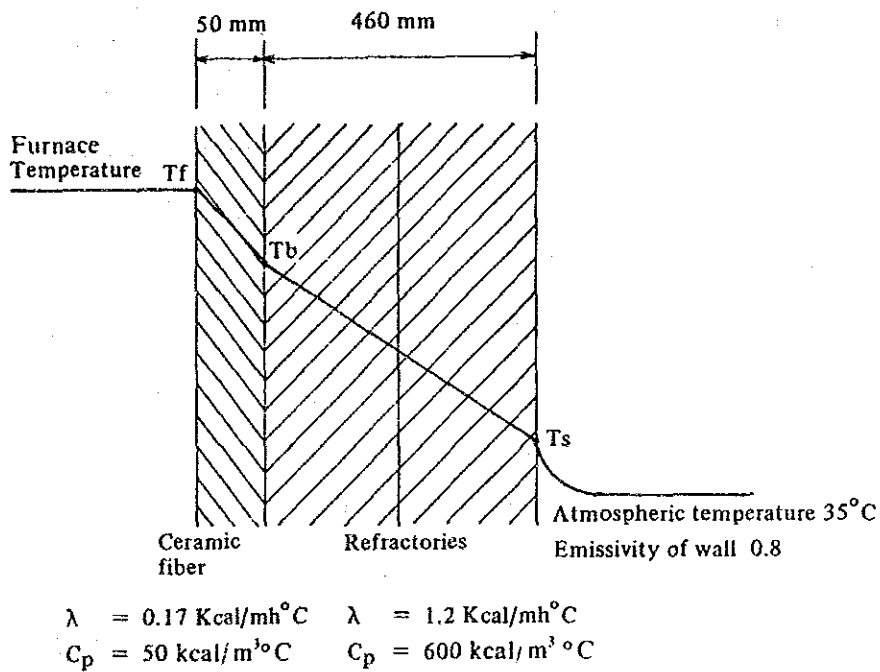
Fig.11.36 は加熱炉の標準的な炉壁温度で、この場合は、炉壁材は耐火レンガのみで厚さ460mm である。

Fig.11.37 は、Fig.11.36 に示す炉の内側壁に厚さ50mmのセラミックファイバを新しく張り付けることにより断熱を強化した例である。



Furnace temperature	$T_f$	1300	1200	1000	800	$^\circ\text{C}$
Surface temperature	$T_s$	199	190	170	149	$^\circ\text{C}$
Quantity of radiant heat	$Q$	2,873	2,636	2,165	1,699	$\text{kcal/m}^2\text{h}$
Quantity of accumulated heat	$H$	206,837	191,765	161,463	130,914	$\text{kcal/m}^2$

Figure 11-36 Typical Wall Temperature of Reheating Furnace



Furnace temperature	$T_f$	1300	1200	1000	800	$^\circ\text{C}$
Boundary temperature	$T_b$	800	741	621	307	$^\circ\text{C}$
Surface temperature	$T_s$	149	142	128	112	$^\circ\text{C}$
Quantity of radiant heat	$Q$	1,700	1,562	1,288	1,015	$\text{kcal/m}^2\text{h}$
Quantity of accumulated heat	$H$	133,562	124,215	105,384	86,341	$\text{kcal/m}^2$

Figure 11-37 Improvement Plan for Wall Composition of Reheating Furnace

改善による省エネルギー効果をみると、Table 11.7に示すように外壁面の表面温度が低下すると共に、放散熱量、蓄熱量いずれも30~40%低下している。耐火性、断熱性がともに優れているセラミックファイバにより、耐火レンガの温度が低下するので、耐火レンガの寿命も延長する方向であり、すべての面からみて、好ましい完全方法である。ただ、この炉内壁にセラミックファイバを張ることにより炉内容積が小さくなることと、炉床全面に施工するのが難しいことの2点が問題点であるが、これは大きな障害とはならない。

Table 11-7 Improvement Effects of Wall Composition of Reheating Furnace

	When furnace temp. is at 1,300°C		Improvement effects
	Before improvement	After improvement	
Surface temperature	199°C	149°C	25% drop of surfacial temperature
Quantity of radiant heat	2,873 kcal/m <sup>2</sup> h	1,700 kcal/m <sup>2</sup> h	41% decrease in quantity of radiant heat
Quantity accumulated heat	206,837 kcal/m <sup>2</sup>	133,562 kcal/m <sup>2</sup>	35% decrease in quantity of radiant heat

次に、炉壁の外側にロックウールを取り付けた場合の改造案を検討してみる。

炉壁外面が鋼板等で覆われていると、ロックウール等を取り付けることにより、この鋼板温度が上昇して、熱膨張による歪等が発生して炉殻が破損する恐れがある。

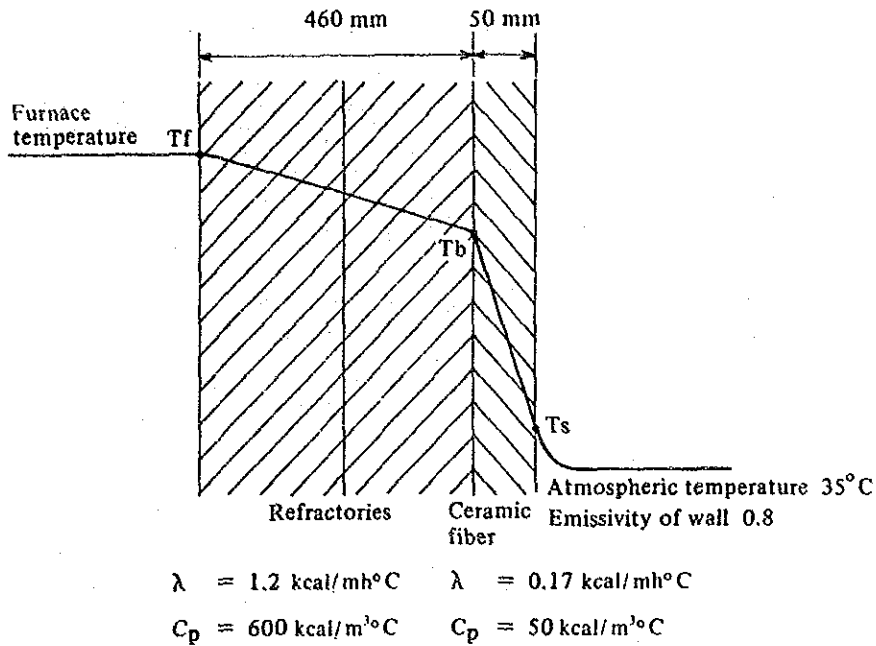
Fig.11.38 は炉壁外面が耐火材のままの場合、50mm厚さのセラミックファイバを取り付けたときの炉壁温度等を示したもので、耐火レンガの平均温度が著しく上昇し、蓄熱量が増大するという欠点が生じている。

この場合は、ロックウールを使用せずにセラミックファイバを取り付けているのは、境界温度が高くロックウールの安全な使用温度を超えているからである。

耐火レンガの温度が上昇すると強度が弱くなり、炉壁が破損するなど寿命が短くなる。

参考として日本で工業炉の標準炉外面温度として示されている値をTable 11.8に示す。

まだ主な耐火断熱材の主要特性をTable 11.9に、代表的保温材の使用温度範囲をFig.11.39 に示す。



Furnace temperature	Tf	1300	1200	1000	800	°C
Boundary temperature	Tb	649	601	506	411	°C
Surface temperature	Ts	149	142	128	112	°C
Quantity of radiant heat	Q	1,700	1,562	1,288	1,015	kcal/m <sup>2</sup> h
Quantity of accumulated heat	H	269,893	249,506	208,676	167,761	kcal/m <sup>2</sup>

Figure 11-38 Inferior Reconstruction Plan for Wall Composition of Reheating Furnace

Table 11-8 Standard Wall Temperature of Reheating Furnace in Japan

Intrafurnace temperature (Unit °C)	Standard external wall surface temperature of furnace	
	Ceiling	Side wall
1,300	140°C	120°C
1,100	125°C	110°C
900	110°C	95°C
700	90°C	80°C

(Remark)

1. The values of external wall surface temperatures of the furnace listed in this Table were determined concerning the average temperature of the furnace's external wall surface (excluding the peculiar parts) at an atmospheric temperature of 20°C during a regular operation.
2. The values of external wall surface temperatures of the furnace listed in the Table will not apply to the external wall surface temperatures of the under-mentioned industrial furnaces as a standard:
  - (1) Those having a rated capacity of not more than 200,000 kcal/hr.
  - (2) Those whose walls are forcibly cooled.
  - (3) Rotary kilns.

Table 11-9 Main Characteristics of Insulating Fire Materials

	Bulk specific gravity t/m <sup>3</sup>	Specific heat kcal/m <sup>3</sup> °C	Thermal conductivity kcal/mh °C	Safe working temp. °C
Refractory brick S K32	2.0~2.5	520~650	0.9~1.4	1,300
Plastic refractory S K32	1.9~2.3	380~500	0.6~1.4	1,300
Insulating fire brick B 5	0.7~0.8	160~200	0.2~0.4	1,100
Insulating fire brick B1	0.6~0.7	140~160	0.1~0.2	700
Insulating fire castable (1,300°C)	1.0~1.3	240~300	0.2~0.4	1,100
Ceramic fiber (lower than 1,300°C)	0.06~0.3	20~ 80	0.05~0.3	1,100

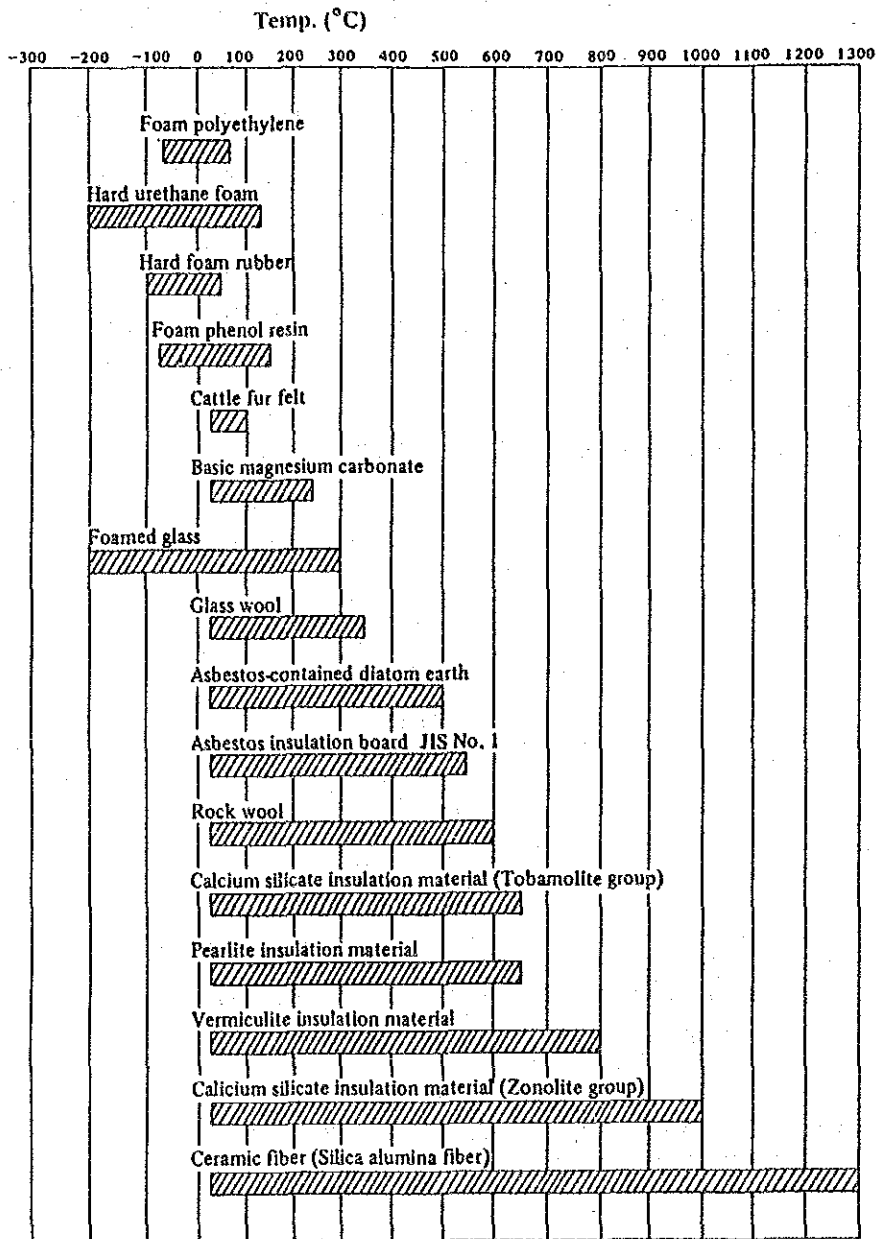


Figure 11-39 Working Temperature Range of Typical Insulating Materials Temperature

(2) 開口部からの熱損失の防止

開口部からの熱損失には2種類ある。そのうちの一つは、開口部からの直接放射による熱損失であり、もう一つは、開口部から燃焼ガスが漏れるために起こる熱損失である。

A) 開口部からの放射による熱損失

炉体の一部に開口部がある場合、炉内の熱は放射熱として炉外へ逃げていく。

このことによる熱損失量は、炉壁の厚みと開口部の形状によって異なる。開口部の壁厚部分が炉内から放射を受けて温度が上がり、この熱の一部が外部へ2次的に放射する熱損失量と炉内から直接外部へ放射する熱損失量の合計が、開口部からの熱損失量となる。

完全に外部にさらされている平板の放射熱量と、炉の開口部からの放射熱量の比は、J.D.Kellerによれば、Fig.11.40 に示すとおりである。

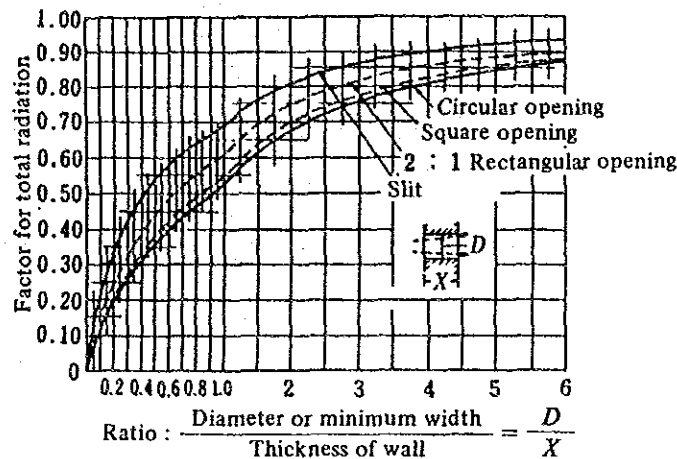


Figure 11-40 Factor for Determining the Equivalent of Heat Release from Openings to the Quantity of Radiant Heat from Perfect Black Body

これを、例題によって説明すると次のようになる。

炉体に高さ(D) 1 m、幅 1 mの扉のない矩形の鋼材抽出口があり、炉壁の厚さ(X)は0.46mとする。

開口部の形状は正方形開口であり、 $D/X = 1/0.46 = 2.17$ となる。従って、全放射に対する係数は0.71を得る。

炉内温度を1,340℃とすれば、開口部からの放射熱損失量は、次のとおりである。

$$4.88 \times \left( \frac{1,340+273}{100} \right)^4 \times 0.71 \times 1 \times 1 = 234,500 \text{ kcal/h}$$

以上の例題は扉のない、開口部が常に開いている、定常的な場合に適用できるものである。

扉のある開口にはこの条件は適用できない。それは、扉が閉じられている間は開口部の壁は炉の内側に近い部分から、扉に接する部分まで、一様に炉内温度に等しい温度になっているので、扉を開いた瞬間の放射熱量は、完全に外部にさらされている平板からの放射熱量と等しい。扉を開放した後は開口部の壁は急激に冷えて定常状態の温度分布に近づき、Fig.11.40 のような割合まで熱放射量が減少する。

#### B) 開口部から燃焼ガスが漏れるために起こる熱損失

加熱炉では、操業中炉内圧力は外気圧より若干高いから、炉内の燃焼ガスが開口部から吹き出すことにより熱損失が起こっても多少やむをえない。炉外の空気が侵入して炉を冷却し、また材料を酸化することのほうが害が大きいから、一般に加熱炉は炉内の圧力を高くして操業するのである。扉によって開口部との隙間から吹き出す燃焼ガスは少なく、この熱損失は炉内で発生した総熱量の1%程度である。

#### (3) 熱勘定

加熱炉の熱損失及び効率を十分に把握する目的でJIS G0702「連続鋼材加熱炉の熱勘定方式」がある。Table 11.10 に設備概要調査表、Table 11.11 に長期操業実績調査表、Table 11.12 に測定項目及び結果整理表、Table 11.13 に熱勘定表を参考として示す。

##### 11.2.1.8 排熱回収

排ガスからの熱回収の方法としては、(1)熱交換器による燃焼用空気又は燃料ガスの予熱、(2)排熱ボイラによるスチーム発生、(3)排ガスによる材料予熱、(4)他の熱源としてのカスケード利用等がある。

なお参考として日本での工業炉に関する標準排熱回収をTable 11.13 に示す。



Table 11-10 Survey Report on the Outline of Equipment

1	Name of Co. Factory		
2	Address		
3	Name of furnace manufacturer		
4	No. of furnace		
5	Rolling mill	Type	
6		Nominal capacity	t/yr
7		Name of main finished product	
8	Reheating furnace	Type	
9		Nominal capacity	t/h
10		Effective furnace length x furnace width	mm x mm
11		Size and quality of furnace refractories and insulation material	
12		Kind of fuel used	
13		Type, capacity and No. of burning units	
14		Type and capacity of draft equipment	
15		Type and heating surface area of preheater	m <sup>2</sup>
16	Quality, size and unit weight of main heated steel	mm, kg	

(Remark) As to Items 10, 11 and 15, attach simple charts representing the vertical and horizontal cross-sections of the furnace (including the size of main parts of the furnace and preheating unit, kind of refractories and main measurement spots).

Table 11-11 Survey Report on Actual Long-Term Operations

1	Date of operation					
2	Breakdown of operating time		Heating	Heat boosting	Heat retaining	Shutdown
		h/month				
		%				
3	Heated tonnage	t/month				
4	Tonnage per heating time	t/hour				
5	Average weight of typical heated steel (Max. and Min. range)	kg				
6	Fuel consumption	t/month, kg/month or Nm <sup>3</sup> /month				
7	Low calorific value of fuel	kcal/kg or kcal/Nm <sup>3</sup>				
8	Energy consumption rate per ton of heated steel	10 <sup>3</sup> kcal/t				
9	Status of operational shift					

(Remark) The definition of the breakdown of operating time is as follows:

Heating times: Time during which steel is extracted, i.e. the rolling mill runs.

Heat boosting time: Time required for increasing the furnace temperature upto an "extractable" temperature.

Table 11-13 Heat Balance Table

Heat input			Heat output		
Item	10 <sup>3</sup> kcal/t	%	Item	10 <sup>3</sup> kcal/t	%
(1) Combustion heat of fuel			(8) Quantity of heat contained by extracted steel		
(2) Sensible heat of fuel			(9) Sensible heat of scale		
(3) Sensible heat of air			(10) Sensible heat of exhaust gas		
(4) Heat brought in by atomizer			(11) Heat loss by incomplete burning		
(5) Quantity of heat contained by charged steel			(12) Quantity of heat brought out by cinder		
(6) Heat of scale formation			(13) Quantity of heat brought out by cooling water		
(7) Heat recovered by preheater	( )	( )			
			(14) Other heat loss		
			(15) Heat recovered by preheater	( )	( )
<b>Total</b> (1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)			<b>Total</b> (8)+(9)+(10)+(11)+(12)+(13)+(14)		

(Remark) 1. For recording the quantity of heat, use 10<sup>3</sup> kcal/t as a unit and round out figures after the decimal point into a single digit.

2. Round out figures after the decimal point into a single digit in the percentage.

Table 11-12 Table for Measurement Items and Results of Measurement

1	Date and time of measurement (Hours)				
2	Person in charge of measurement				
3	Weather	Atmospheric pressure	Atmospheric temp.	Room temp.	Relative humidity
		mmHg	°C	°C	%
4	Fuel	Soaking zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
5		Upper heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
6		Lower heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
7		Pressure	kgf/cm <sup>2</sup> or mmAq		
8		Temperature	°C		
9		Components	%		
10		Low calorific value	kcal/kg or kcal/m <sup>3</sup> N		
11	Atomizer	Kind			
12		Soaking zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
13		Upper heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
14		Lower heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
15		Pressure	kgf/cm <sup>2</sup> or mmAq		
16	Temperature	°C			
17	Secondary air	Soaking zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
18		Upper heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
19		Lower heating zone consumption	kg/t or m <sup>3</sup> N/t		
20		Pressure	mmAq		
21		Pre-preheating temp.	°C		
22	Post-preheating temp.	°C			
23	Cooling water	Consumption	t/t		
24		Inlet temp.	°C		
25		Outlet temp.	°C		
26		Pressure	kgf/cm <sup>2</sup>		
27	Combustion gas	Furnace tail temp.	°C		
28		Inlet Temp. of preheater	°C		
29		Outlet temp. of preheater	°C		
30		Components	% CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO, (CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> )		
31	Cinder	Combustible amount	%		
32		Cinder amount	kg/kg		
33	Heated steel	Size (Thickness x Width x Length)	mm x mm x mm		
34		Unit weight	kg		
35		Total charged tonnage	t		
36		Charging temp.	°C		
37		Discharging temp.	°C		
38		Burning loss	kg/t		
39		Average in-furnace holding time	h		
40	Furnace pressure		mmAq		
41	Surface temp. of each part of furnace body		°C		

(Remark) As to the measurement method for Item 41, describe in the furnace sketch.

Table 11-14 Standard Waste Heat Recovery Rate of Industrial Furnace in Japan

Exhaust gas temperature (°C)	Classification of capacity	Standard waste heat recovery rate (%)	Reference	
			Exhaust gas temperature (°C)	Preheated air temperature (°C)
500	A · B	20	200	130
600	A · B	20	290	155
700	A	30	300	260
	B	25	330	220
	C	20	370	180
800	A	30	370	300
	B	25	410	250
	C	20	450	205
900	A	35	400	385
	B	25	490	285
	C	20	530	230
1,000	A	40	420	490
	B	30	520	375
	C	25	570	315
over 1,000	A	40	—	—
	B	30	—	—
	C	25	—	—

(Note)

1. "Exhaust Gas Temperature" means the temperature of exhaust gas discharged from the furnace chamber at the outlet of furnace.
2. The classification of the capacity of industrial furnace is as follows:
  - A. Industrial furnace whose rated capacity is more than 20MM kcal/hr.
  - B. Industrial furnace whose rated capacity is from 5MM kcal to not more than 20MM kcal/hr.
  - C. Industrial furnace whose rated capacity is from 1MM kcal to not more than 5MM kcal/hr.

(Remark)

1. The values of standard waste heat recovery rate listed in this Table are determined concerning the ratio of a recovered quantity of heat to a quantity of sensible heat in an exhaust gas discharged from the furnace chamber when a combustion is carried out under a load in the neighborhood of a rating.
2. The values of standard waste heat recovery rate listed in this Table shall be a standard for the continuous operating furnaces built on and after January 1, 1980.
3. The values of standard waste heat recovery rate listed in this Table shall not be a standard for the waste heat recovery rate of the under-mentioned industrial furnaces:
  - (1) Those whose rated capacity is not more than 1MM kcal/hr.
  - (2) Those whose annual operating time does not exceed 1,000 hours.
4. The values of exhaust gas temperature and preheated air temperature listed as references are values obtained by calculating the temperature of exhaust gas when the waste heat of standard waste heat recovery rate has been recovered and the temperature of preheated air when the air has been preheated by the afore-mentioned recovered waste heat, on the following conditions:
  - (1) Temperature drop due to released heat loss, etc. from the furnace outlet to the heat exchanger for preheating air: 200°C
  - (2) Fuel: liquid fuel
  - (3) Atmospheric temperature: 20°C
  - (4) Air ratio: 1.2

(1) 熱交換器(Recuperator)を用いた燃焼排ガスによる燃焼用空気の予熱

熱交換器は伝熱面が金属でできている金属熱交換器と耐火物でできているセラミック熱交換器とがあるが、今日では金属熱交換器が主流である。その例をFig.11.41に示す。燃焼用の空気に熱風を使用すると燃料が節約できる。

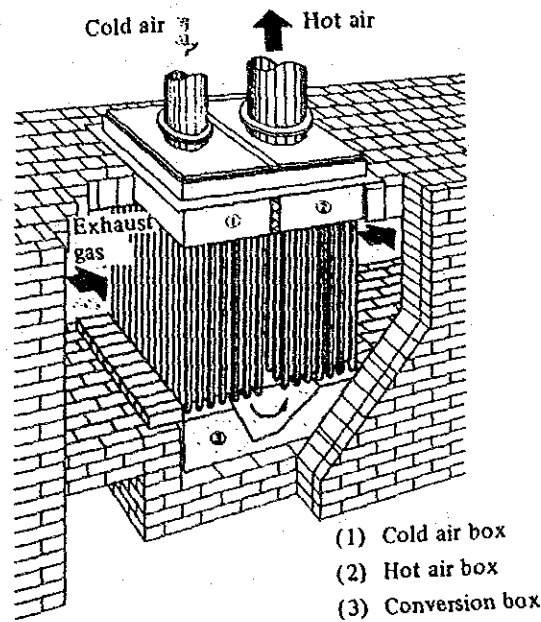


Figure 11-41 Example of Preheater of Air for Burning (Recuperator)

このときの燃料節約率は次式で表わされる。

$$S = \frac{P}{F + P - Q} \times 100 (\%)$$

ここで、S：燃料節約率 (%)

F：燃料発熱量 (kcal/kg fuel)

P：予熱空気が持ち込む熱量 (kcal/kg fuel)

Q：排ガスの持ち去る熱量 (kcal/kg fuel)

この式を用いて重油、天然ガスに対する排ガス温度、予熱空気温度別の節約率を計算した結果をFig.11.42、Fig.11.43に示す。

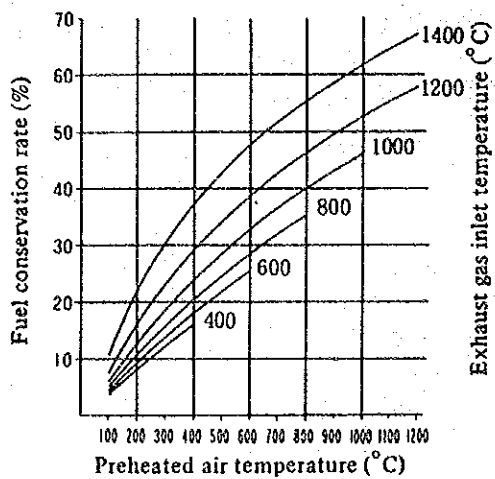


Figure 11-42 Fuel conservation rate  
when fuel oil is used

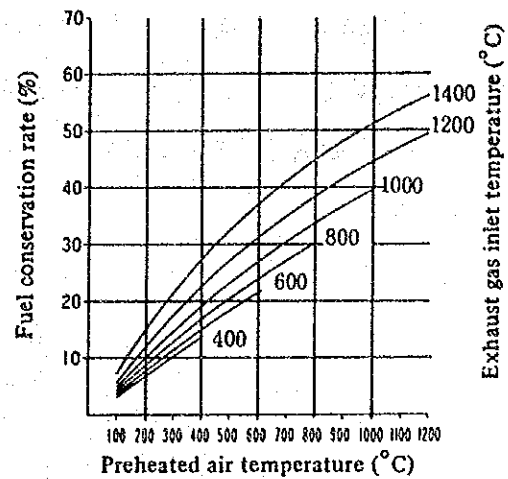


Figure 11-43 Fuel conservation rate  
when natural gas is used

排ガス温度が高いと同じ予熱温度でも燃料節約率が大きい。

レキュペレーターには、対流型と放射型がある。

対流型レキュペレータは対流伝熱を主体とした熱交換方式であり、排ガス温度が高くなると熱膨張等に対する配慮が難しくなるので、1,000 °C以下で使用するのに適している。

放射型レキュペレータは放射伝熱を主体とした熱交換方式である。熱伝達は絶対温度により左右され、排ガス速度にはほとんど影響されない。通常放射型レキュペレータの伝熱面は簡単な円筒形であり、800 °C以上で使用するのに適している。

レキュペレータは、排ガスと空気の流れ方によって、並流と向流に区別される。この違いにより対数平均温度差に違いが生じ、レキュペレータの伝熱面積の差となる。

レキュペレータの伝熱面積は次の式で表わされる。

$$F = \frac{Q}{\Delta t_m \times k}$$

ここで、F：伝熱面積 (m<sup>2</sup>)

Q：熱交換量 (kcal/h)

$\Delta t_m$ ：対数平均温度差 (°C)

k：熱貫流率 (kcal/ m<sup>2</sup> h °C)

この対数平均温度差は次式のとおりである。

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$$

並流の場合の  $\Delta t_{\max}$ 、 $\Delta t_{\min}$  は Fig. 11.44 から次のようになる。

$$\Delta t_{\max} = t_1 - t_1'$$

$$\Delta t_{\min} = t_2 - t_2'$$

また向流の場合  $\Delta t_{\max}$ 、 $\Delta t_{\min}$  は Fig. 11.45 から次のようになる。

a.  $(t_1 - t_2') > (t_2 - t_1')$  の場合

$$\Delta t_{\max} = t_1 - t_2'$$

$$\Delta t_{\min} = t_2 - t_1'$$

b.  $(t_1 - t_2') < (t_2 - t_1')$  の場合

$$\Delta t_{\max} = t_2 - t_1'$$

$$\Delta t_{\min} = t_1 - t_2'$$

例題を用いて、並流と向流の対数平均温度差を示すと次のとおりとなる。

まず入口、出口の温度を次のとおり仮定する。

$$t_1 = 800 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_2 = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_1' = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_2' = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

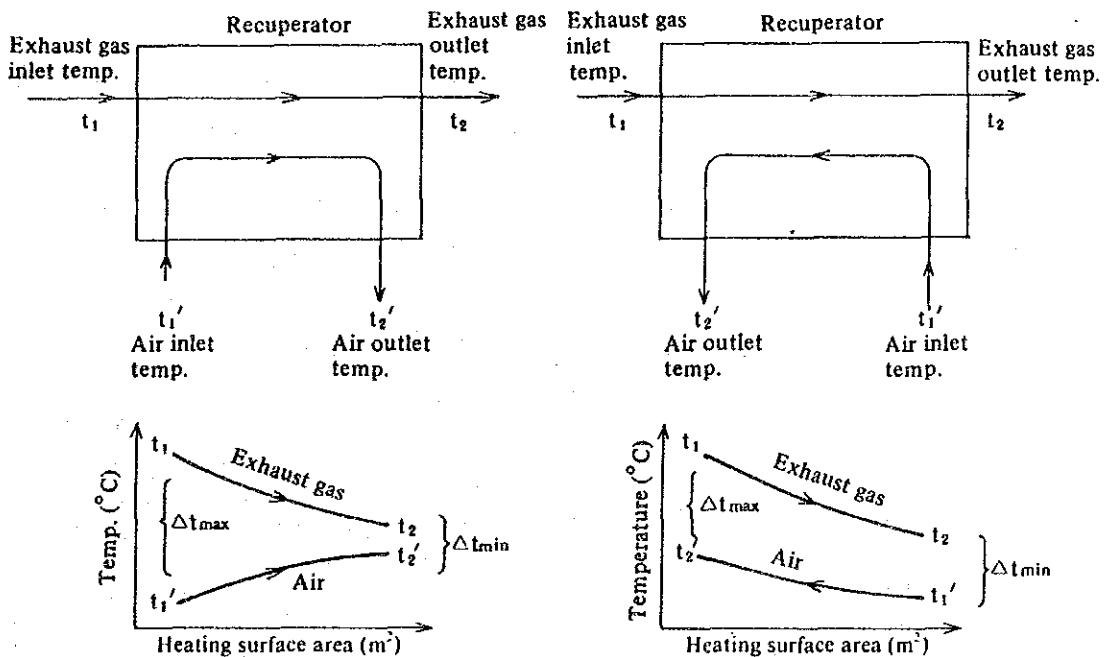


Figure 11-44 Temperature Difference in Case of Parallel Flow

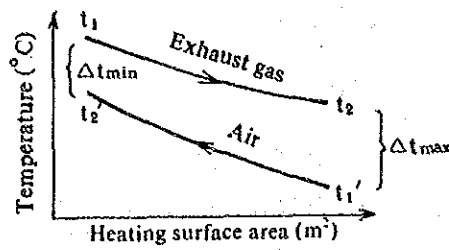


Figure 11-45 Temperature Difference in Case of Counter Flow

・並流の場合

$$\Delta t_{\max} = 800 - 20 = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\min} = 500 - 350 = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m (\text{並}) = \frac{780 - 150}{\ln \frac{780}{150}} = 382 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

・向流の場合

$$\Delta t_{\max} = 500 - 20 = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\min} = 800 - 350 = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m (\text{向}) = \frac{480 - 450}{\ln \frac{480}{450}} = 465 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

よって向流の場合の方が並流の場合より22% $\Delta t_m$ が大きくなる。 $k$ が並流、向流ともに同一の値とすれば、伝熱面積は向流の方がやく18%小さくなる。

伝熱面温度は、排ガス温度と空気温度の中間温度としても大きな間違いではないことから、前述の例の場合にはTable 11.15のように算出される。

Table 11-15 Temperature of Heat Transfer Area

	Parallel flow		Counter flow	
	Exhaust gas temperature	800°C	500°C	800°C
Air temperature	20°C	350°C	350°C	20°C
Temperature of heat transfer area	410°C	425°C	575°C	260°C



この例では、並流の場合には伝熱面温度は410～425℃と平均化しているが、向流の場合には260～575℃と大きな差がある。

レキュペレータの寿命に大きく影響する要素は、耐酸化性、耐腐食性、機械的強度、熱膨張の吸収方法等である。前述の例題において、耐酸化性から材質を選定すれば次のとおりとなる。

・並流の場合

高温部……………炭素鋼

低温部……………炭素鋼

・向流の場合

高温部……………ステンレス鋼

低温部……………炭素鋼

また、熱膨張の点からは、材質温度が平均化している並流の方が安定している。並流、向流のどちらの型式を選定するかは設置条件、価格等の検討を必要とする。

伝熱面材質の選定は、温度条件、排ガス成分、圧力条件等による。

A) 酸化による減肉

金属は高温で $O_2$ と反応して、表面に酸化物を生ずることにより減肉する。

一般に酸化の度合は、この表面の酸化皮膜の性質により皮膜が剥離しやすかったり、多孔性で $O_2$ の侵入が容易である場合には進みやすい。

またMoやWなどの酸化物のように揮発性であったり、融点の低いものでなども酸化速度が大きい。

Crは固着性のよい酸化物を形成し、Cr含有量が多いほど、耐酸化性は優れている。Al、Siも耐酸化性を良くするが、機械的性質は劣化させる。

Niは酸化物にも密性を持たせて、これが保護膜となって内部への酸化の進行を防止する。酸化は $CO_2$ ガスによっても起こり得るが、これは $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$ の反応によって生ずる $O_2$ によるものである。

また、酸化性雰囲気中に水分が存在すると一般に酸化が促進される。これは形成される酸化物保護被膜が水分の存在によって多孔性を帯びることによる。

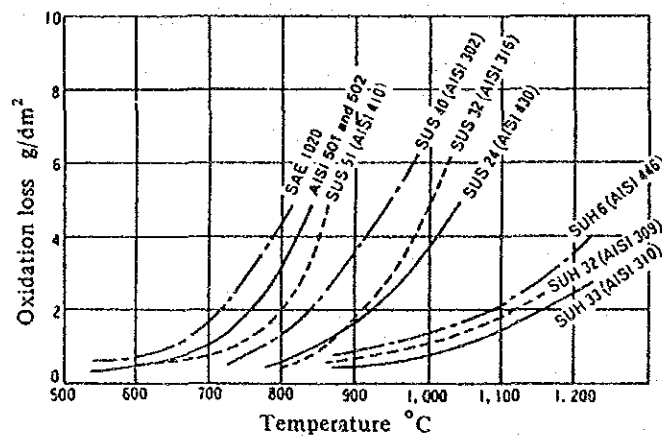
加熱冷却の熱サイクル、酸化性・還元性の雰囲気サイクル等が高温において加えられる場合には、一層苛酷な環境となる。

Table 11.16 に材質別の使用温度を、Fig.11.46 に温度と酸化減量の関係を示す。

Table 11-16 Working Temperature of Heating Pipe by Material

Material (Customary indication)	Max. working temp. (°C)	Ordinary working temp. (°C)
Carbon steel	565	400
½ Mo steel	565	450
1 Cr-½ Mo steel	565	450
1¼ Cr-½ Mo steel	590	550~575
2¼ Cr-1 Mo steel	635	600
5 Cr-½ Mo steel	620~650	600
9 Cr-1 Mo steel	650~700	600~650
13 Cr steel	650	600
25 Cr steel	1,000~1,100	1,000
18 Cr-8 Ni steel	870	800
18 Cr-12 Ni-Mo steel	870	800
18 Cr-12 Ni-Ti steel	870	800
18 Cr-12 Ni-Nb steel	870	800
25 Cr-12 Ni steel	1,000~1,100	1,000
25 Cr-20 Ni steel	1,100	1,000

(Note) The max. working temperature varies slightly according to literature.  
 The ordinary working temperature was determined considering oxidation limits, tolerable stress, graphitization, etc. and referring to US Steel's technical data.



Test conditions : 12 intermittent cycles of heating and cooling  
 By courtesy of : Welding Research Council Bulletin Series No.31  
 "Stainless Steel for Pressure Vessels"

Figure 11-46 Relationship between Temperature and Oxidation Loss

(2) レキュペレータ付きラジアントチューブ

浸炭炉では、マツクル式炉のような特殊の場合を除いて、すべてラジアントチューブ方式が採用されている。このラジアントチューブの排気側に熱交換器を取り付け、燃焼用空気を予熱する方式がある。

Fig.11.47 にラジアントチューブ用レキュペレータの構造を、Table 11.17 にレキュペレータの性能と燃料節約率の一例を示す。

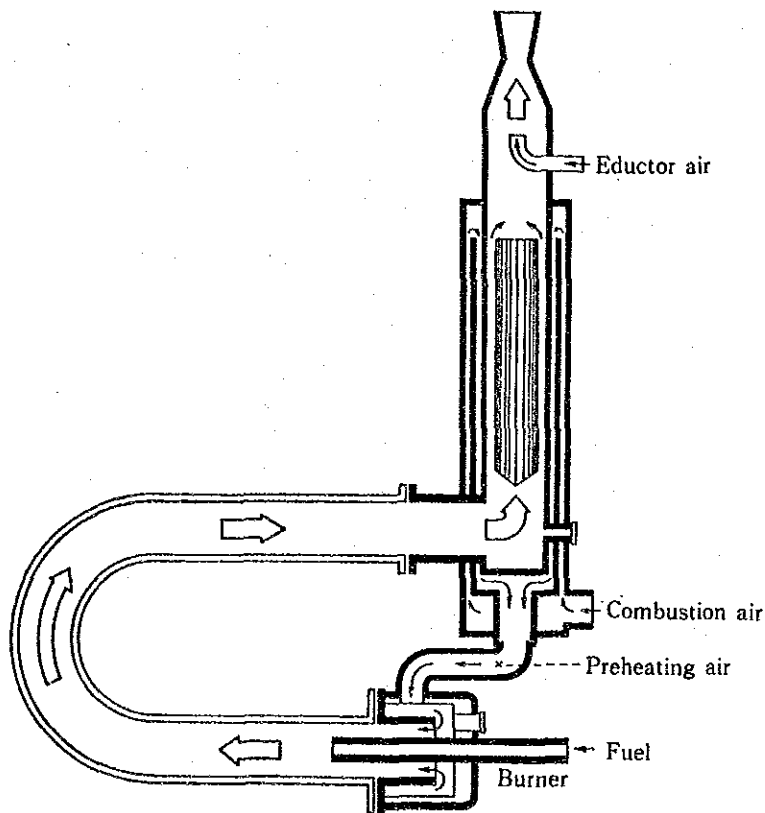


Figure 11-47 Structure of Recuperator for Radiant Tube

Table 11-17 Performance of the Recuperator for Radiant Tube

Fuel used		Kerosene	
Fuel consumption		4~ 6 l/h	
Flow rate	Exhaust gas side	50~80 Nm <sup>3</sup> /h	
	Air side	40~70 Nm <sup>3</sup> /h	
Pressure loss	Exhaust gas side	5mmH <sub>2</sub> O	
	Air side	28mmH <sub>2</sub> O	
Temperature	Exhaust gas side	Inlet 900°C	Outlet 550°C
	Air side	Inlet 30°C	Outlet 330°C
Heat transfer area		0.5m <sup>2</sup>	

Fuel saving rate by recuperator (actually measured value)  
In case of carburizing at 930°C, fuel: kerosene

Item	Fuel saving effect
Preheating of combustion air	15%
Adjustment of air ratio m = 1.36 → 1.16	9%
closing of burner	3%
Reduction of draft loss	8%
Fuel saving rate	35%

Before improvement: 58 l/h, after improvement: 38 l/h

### (3) 排ガスによる材料予熱

従来熱処理終了後の材料の保有熱は無駄に放散されていたが、熱回収式の炉では、熱交換室を設け、この熱で熱処理前の材料を最高500℃まで予熱する。

Fig.11.48 はこのような炉の例で、熱交換室と熱処理室との間には真空バージ室を設け、雰囲気ガスの損失を防ぐようにしている。

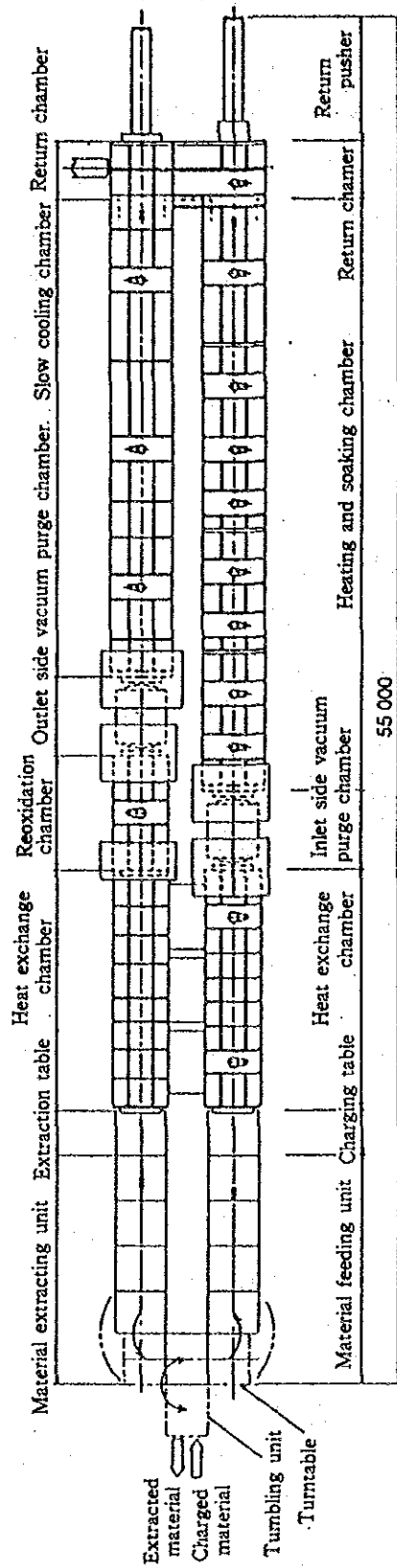


Figure 11 - 48 Continuous Roller Hearth Annealing Furnace with Heat Exchange Chamber

#### (4) 他の熱源としての利用

排ガスの顕熱が、自工程の他の装置との間で、熱量、温度範囲、運転時間等が合致すれば大幅な燃料の節約となる。

Fig.11.49 に焼戻し炉への浸炭炉排ガスの利用例を示す。ガス浸炭炉の燃焼排ガスを焼戻し炉に導き、従来、加熱に使用していた燃料を不要とした。なお、浸炭炉の排ガス流量温度はバーナの燃焼制御により一定しないので、焼戻し炉への供給ガス温度の変動を防ぐために蓄熱器を設置している。また、ダクト配管中の3方コックは、浸炭炉のバーナが低燃焼（又はoff）となって排ガス流量が不足する場合に、焼戻し炉→蓄熱器→焼戻し炉の循環ループをつくためにある。

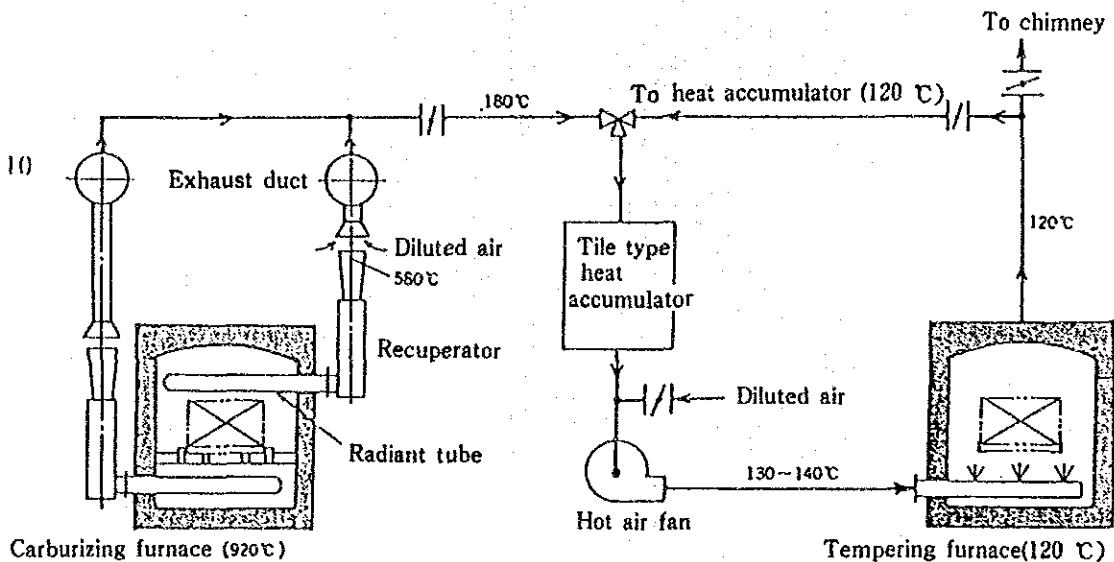


Figure 11-49 Use of the Exhaust Gas of Carburizing Furnace for Tempering Furnace

#### 11.2.1.9 雰囲気ガスの発生

自動車部品、機械部品の浸炭焼き入れ、無酸化焼き入れなどの熱処理には雰囲気ガスとして、プロパンなどの炭化水素ガスを変成したRXガス（CO 25 %、H<sub>2</sub> 33 %）が使用されている。

このガスは普通、別に設置したガス発生機で発生させるが、輸送配管途中での温度低下による組成変化や煤の発生防止のため、変成直後に急冷しなければならず、熱処理炉内で再加熱する必要があった。

その対策として、Fig.11.50 のような触媒を充填した反応筒を直接熱処理炉に取り付けることが行われている。発生した雰囲気ガスを一旦冷却する必要がないので、再加熱

に要するエネルギーを節減できるほか、発生機の放熱損失もなくなる。エネルギー消費量の比較をTable 11.18 に示す。

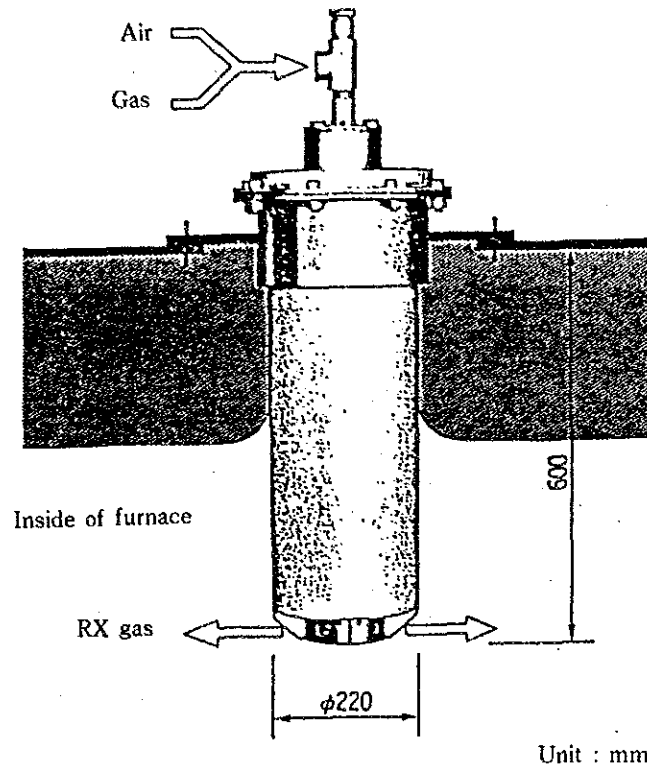


Figure 11-50 Rough Drawing of Reaction Tube

Table 11-18 Comparison of Energy Consumption

Unit: kcal/m<sup>3</sup>RX

	Conventional type	CRX	characteristic of CRX
Power for heater	390	110	Small-sized heater installed in furnace
Power for blower	25	25	
Heat for reheating RX gas	305	0	Heat for reheating not required
Vent pilot burner	65	0	Not required at regular operation
Control power	15	15	
Total	800	150	

また、無酸化焼き入れ用のRXガス(N<sub>2</sub>)の製造を別置きの発生装置によらず、熱処理炉の排ガスから炭酸ガスを除くことによって製造している例もある。