

### 1.3.1 電気炉

#### (1) 電気炉製鋼工程

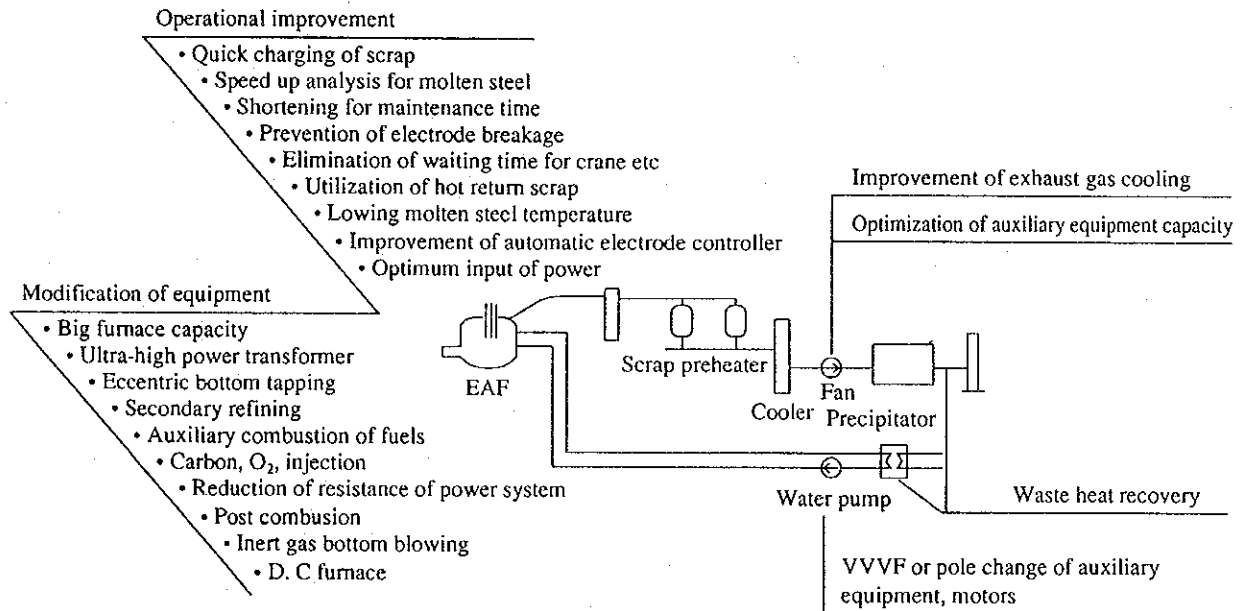
製鋼工程では電気炉でスクラップを加熱・溶解・還元した後（必要あれば引きつづき二次精錬装置で脱ガス処理などを行う）、溶湯は連続鋳造設備（CC）または造塊工場に送られ、鋼片または鋼塊（インゴット）が製造される。

製鋼工程でのエネルギー使用量は電炉工場全体の約 75%を占め、この製鋼工程の中では電気炉使用のエネルギーが最も多く大部分を占めている。

電気炉内では炉内スクラップが、スクラップと電極の間で発生するアーク熱とスクラップ内で発生する電気抵抗熱により加熱・溶解されるが、通常三相交流電力がその主要エネルギー源である。

Figure 1.27 に電気炉工程のフロー図および省エネルギー対策を示す。

Figure 1.27 Flow and Energy Conservation Measures for Arc Furnaces



#### (2) 操業改善・設備改善による省エネルギー

製鋼工程において、めざましい省エネルギー成果をあげたのは、連続鋳造比率の向上、並びに重油・カーボンなどの補助燃料吹込みおよび酸素吹込み等による電気炉の生産性向上によるところが大きい。電気炉には集塵機や冷却

であるので説明は省略し、主として電気炉本体のエネルギー原単位改善方法について説明を加える。

電気炉は大量の電力を消費する。その電力は発電所で正味熱効率 35.1%で燃料から電力に転換されたと仮定すると電力 1kWh は 10,258kJ (2,450kcal) と等価と考えられる。電気炉の溶鋼製造コスト低減のために、以下に記載するような電力原単位低減対策がとられている。その効果を  $1\text{kWh}=10,258\text{kJ}$  (2,450kcal) で評価すると、コスト低減対策は同時に省エネルギー対策でもあったことがわかる。

通常電気炉には冷却水による熱損失、炉体放散熱損失など固定損失がある。電気炉の投入エネルギーをふやし、Tap-to-tap 時間を短縮出来れば、いいかえれば投入エネルギー量を増加し生産性 (単位時間当たりの出鋼量) を増加できると固定損失の比率が下がり、エネルギー原単位を低下できるので、生産性向上は電気炉の省エネルギーの有効な手段と言える。Table 1.2 に電気炉の熱収支表 (例) を示す。

なお、電気炉エネルギー収支の理論的解析に関しては、 $1\text{kWh} \simeq 860\text{kcal} = 3,600\text{kJ}$  を使用する。

Table 1.2 Heat Balance of an Arc Furnace (Example)

Mcal/t tapping

Heat input			Heat output		
	10 <sup>3</sup> kcal/t	%		10 <sup>3</sup> kcal/t	%
Heat by electric power	302	50.2	Sensible heat of molten steel	342	56.8
Combustion heat (Fuel)	41	6.8	Sensible heat of slag	52	8.6
Oxidation heat of electrode	20	3.3	Heat loss by exhaust gas	71	11.8
Oxidation heat of charged raw materials	197	32.7	Heat loss by cooling water	62	10.3
Heat of slag formation	12	2.0	Heat loss of transformer and secondary conductor	22	3.7
Heat recovered by preheater	15	2.5			
Others	15	2.5	Others	53	8.8
Heat input total	602	100	Heat output total	602	100

Heat input			Heat output		
	10 <sup>3</sup> kcal/t	%		10 <sup>3</sup> kcal/t	%
Heat by electric power	373	59.1	Sensible heat of molten steel	340	53.9
Combustion heat (Fuel)	25	4.0	Sensible heat of slag	47	7.4
Oxidation heat of electrode	26	4.1	Heat loss by exhaust gas	111	17.6
Oxidation heat of charged raw materials	192	30.4	Heat loss by cooling water	30	4.8
Heat of slag formation	11	1.8	Heat loss of transformer and secondary conductor	28	4.4
Heat recovered by preheater	-				
Others	4	0.6	Others	75	11.9
Heat input total	631	100	Heat output total	631	100

電気炉の生産性を向上させるため以下の方策がとられている。

- ・トランス容量の増加
- ・助燃バーナの活用、酸素吹込み、粉体吹込み並びにスクラップ予熱などによる電力原単位の低減
- ・非通電時間の短縮
- ・熱効率の向上
- ・2次精錬設備の導入

次にこれらの各項目について説明を加える。

1) トランス容量の増加

近年、電気炉のトランス容量は大型化の一途をたどり、RP (Regular Power)

→ HP (High Power) → UHP (Ultra High Power) 化がすすめられた。Table 1.3 に炉容とトランス容量の関係を示す。

この様にトランスを大型化し大電力を投入できるようになったのは、① UHP 用電極の製造技術の向上、② 炉壁・天井の水冷化技術と耐火物技術の向上による耐熱性の向上、③ スラッグフォーミング技術等操業技術の向上および④ 残湯操業による溶解初期におけるアークの安定化、の四技術が寄与している。

Table 1.3 Relationship between Furnace Capacity, Required Size and Electrical Equipment

Nominal capacity of furnace [10 <sup>3</sup> kg]	Outside diameter of furnace core [m]	Metal bath depth [mm]	Diameter of electrode [mm]	Capacity of transformer [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	430/140
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	

Notes: RP: regular power, HP: high power, UHP: ultra-high power

Source: Cast Product Handbook, 4th Edition, edited by Japan Cast Product Association

## (2) 電力原単位の低減

### ① 助燃バーナー

助燃バーナーを設け灯油・重油・天然ガス等を用い、同時に必要量の酸素を供給してスクラップの昇熱・溶解を促進する。通常コールドスポッ

トに向けてバーナーが設けられる。

Figure 1.28 に助燃バーナーの設置例、Figure 1.29 に重油バーナーによる電力原単位低減効果を示す。助燃バーナーの効果は 5～9kWh/Loil である。

Figure 1.28 Example of Installation of Combustion Supporting Burner

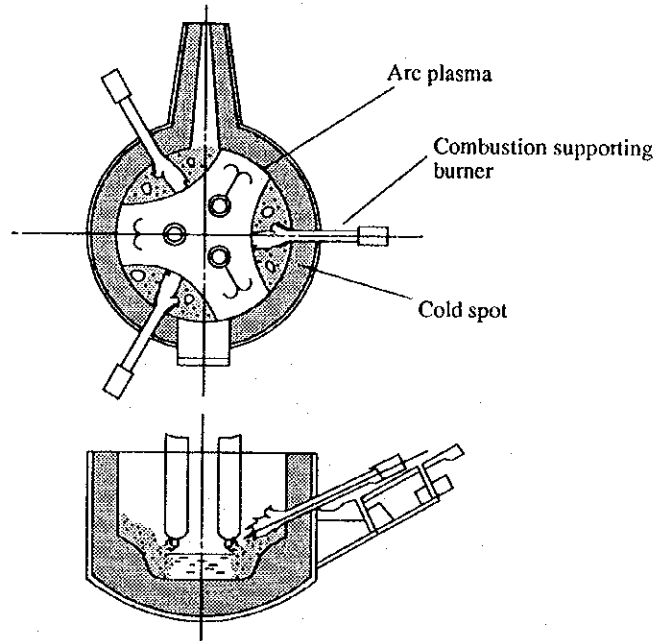
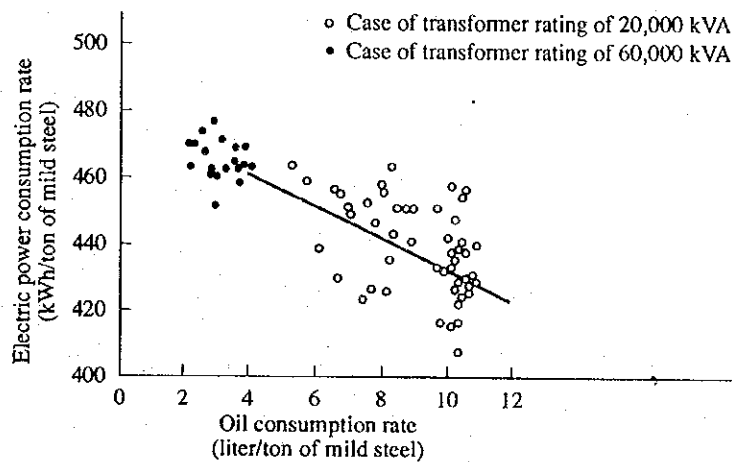


Figure 1.29 Effect of Combustion Burner



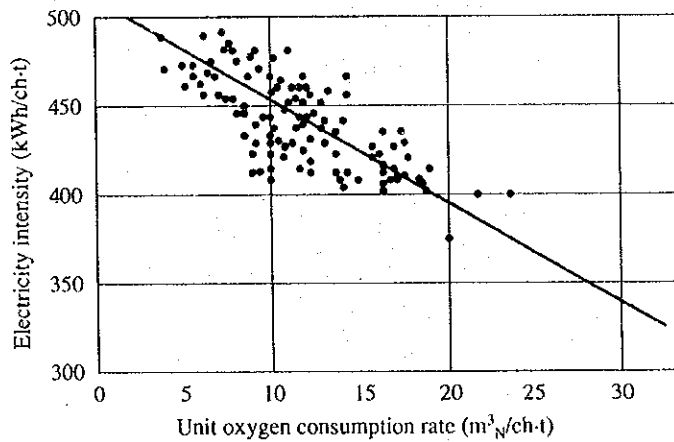
## ② 酸素吹込み操業

酸素吹込み操業は、スクラップや溶鋼に直接酸素を吹きつけ、スクラップカッティングおよび Fe 酸化反応を促進させ、加熱・溶解速度を向上さ

せる効果がある一方、出鋼歩留りが悪くなる欠点があった。この欠点を解決するために開発されたのがカーボン・インジェクションで、現在は① 助燃バーナ、② 酸素吹込み、③ カーボン・インジェクションを効果的に組み合わせて電力原単位を低減させている。酸素  $1\text{m}^3/\text{t}$  当たり電力  $5.5\text{kWh}$  の低減効果があるが、 $20\text{m}^3/\text{t}$  以上ではその効果は半減し、更に増加させると酸化ロスが増え逆効果になる。

Figure 1.30 に酸素吹込みの効果を示す。

Figure 1.30 Effect of Oxygen Injection



### ③ カーボンおよびアルミ灰などのインジェクション

電力によるスクラップ溶解と並行して炉内に酸素とコークス粉を吹き込むと、Fe、C の酸化発熱によりスクラップ溶解を促進させ、メルトダウン後はスラグ中の FeO と C が反応してできた CO ガスがスラグの泡立ち (Forming) 現象を起こさせ、サブマージドアーク化によりアークの輻射熱が炉壁に伝わるのを防ぎ、電力投入効率を向上させる。

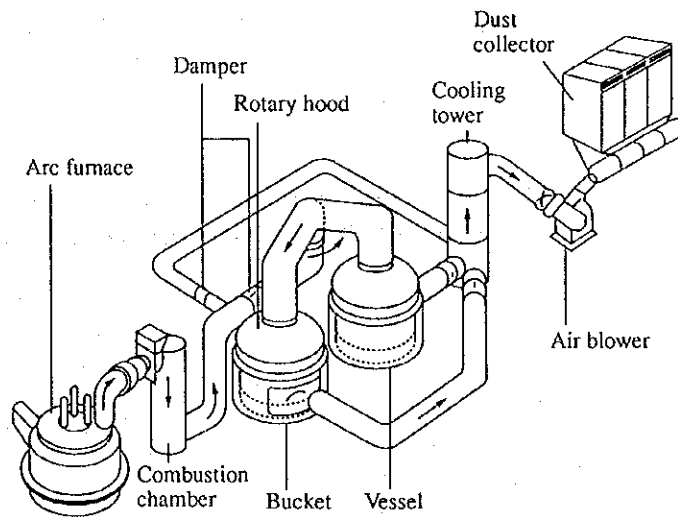
このサブマージドアーク化により高力率操業と大電力投入が可能になり、電力原単位の向上・炉壁寿命の延長・出鋼歩留りの向上が達成された。

近年助燃材の一部としてアルミ灰が使用されている。アルミ灰は、金属アルミを 30～40%含んでおり、このアルミ灰の酸化反応熱により電力原単位が出来その低減効果は  $4\sim 6\text{kWh}/\text{kg}$  アルミである。更にアルミ灰の添加は鋼中の C と酸素の急激な反応を防止し突沸を防止する効果がある。

④ スクラップの予熱

電気炉の主たる熱損失源である排ガス顕熱を利用し、スクラップを予熱する装置で、その概念図を Figure 1.31 に示す。通常スクラップを装入した装入バケットを、排ガス系に複数設置した予熱槽に入れ乾燥・予熱する方法がとられている。予熱槽はバケットを容易に取込み取出せるよう、作業性を重視した設計を行っている。予熱温度はバケットの熱変形防止の観点から導入排ガス温度は最高 600℃としている。

Figure 1.31 Conceptual Drawing of Scrap Preheating Equipment



これらの電力原単位低減効果例をまとめて Table 1.4 に示す。

Table 1.4 Effect of Alternative Energy on Electricity Conservation

Oxygen	0 to 20 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /t	5.5 kWh/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
	> 20 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /t	2.7 kWh/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Oil	0 to 5 L/t	9.0 kWh/L
Natural gas		8.5 kWh/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Coke		3.0 ~ 8.3 kWh/kg
Aluminium dross		5.0 kWh/kg-Aluminum
Scrap preheater		20 to 40 kWh/t

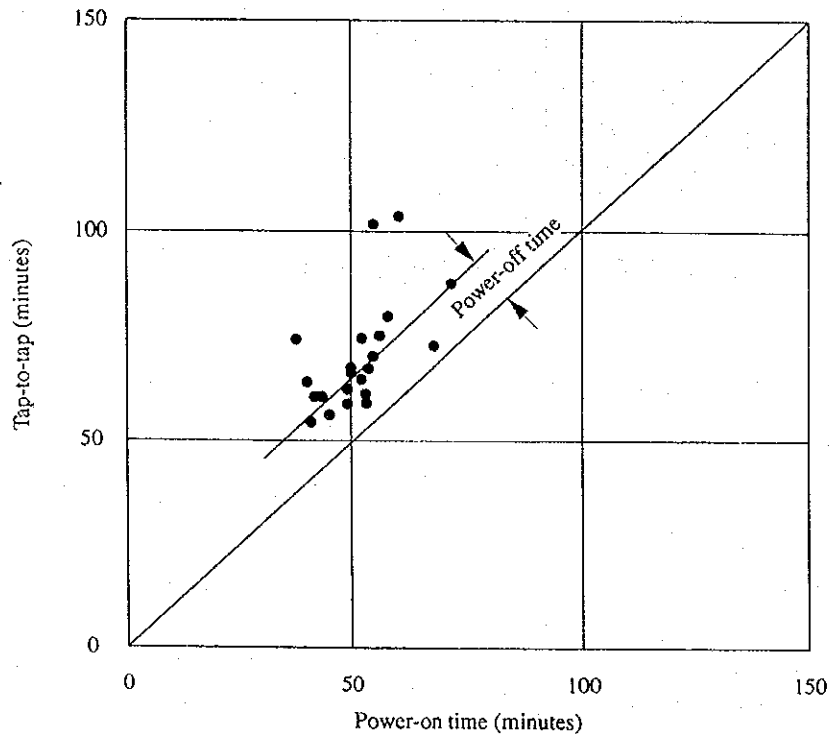
3) 非通電時間の短縮

Tap-to-tap 時間を短縮するには、次の様な非通電時間の短縮対策を並行して進める必要がある。Tap-to-tap 時間と非通電時間の実績調査を行った 1

例を Figure 1.32 に示す。

- ① 炉フタの昇降・旋回、電極昇降の高速化などによるスクラップチャージ時間の短縮
- ② 電極接続時間の短縮
- ③ 炉壁の水冷化による炉の耐熱性向上および炉補修期間の短縮
- ④ EBT (Eccentric bottom tapping) 炉化、台車受鋼方式による出鋼時間の短縮

Figure 1.32 Relationship between Tap-to-tap Time and Power-Off Time in Arc Furnace Operation



#### 4) 熱効率の向上

EBT 炉の採用、電力投入の電算機制御、スラグフォーミング技術、ガス底吹き、炉内 2 次燃焼法などが熱効率向上に寄与する。DC 炉は直流アー



クと電磁力による溶鋼攪拌によって熱効率が上昇する (電力原単位が交流アーク炉より低い)といわれている。

#### 5) 2次精錬設備の導入

LF (Ladle furnace) 等、取鍋内で精錬する設備を付加することにより、温度・成分的な中率を向上させるとともに、CC 操業の安定化や鋼片・鋼塊の品質向上に効果が上がっている。

特に電気炉と取鍋精錬の機能を分離することにより、電炉からの出鋼温度の低下・Tap-to-tap 時間の短縮・CC 連々鑄比率の向上等の効果があがっている。しかし、LF を必要としない鋼種に LF を使用してもかえってデメリットになるので注意を要する。

#### 6) 出鋼温度の低下、電気炉稼働基数の削減

下流工程 (主として CC) の高速化をはかり、炉および取鍋を大型化すると取鍋および取鍋内溶鋼からの放散熱が相対的に低減する。この放散熱量に相当する出鋼温度が低下出来るので電炉の電力原単位を低減できる。出鋼温度 10℃低減により電力原単位は 3kWh/t 低下する。

電気炉出鋼完了より CC 鑄込み完了までの時間を 150 分から 100 分に短縮できると、電力原単位が 50kWh/t 下がるといわれているように、CC の高速化の効果は生産性増と電力原単位低減に効果がある。

生産量を維持したまま電気炉の稼働基数を 1 基減らすことが出来れば非常に大きな省エネルギーが達成でき経済効果も大きい。したがって複数基の電気炉を有する場合は常に稼働炉基数の減少を念頭におくべきである。稼働基数減少のためには稼働対象炉の必要な Tap-to-tap 時間を求め、これを実現すべく諸改善を行う必要がある。稼働炉数の減少は大幅なコスト削減 (エネルギー削減) になるので、稼働基数の減少は省エネルギーの手段としてよく行われている方法である。

#### 7) 電力投入の計算機制御 (投入電力量の最適化)

電圧・電流の自動制御は省エネルギー上効果があることはいうまでもないが、電極消費原単位の向上などコスト低減にも効果があるので、ほとんどの炉に採用されている。

### 8) 冷却水による熱損失熱の低減

冷却水による熱損失は電気炉の入熱の 10%強を占めており、この損失を低減させることが電気炉の大きな省エネルギー課題になっている。

炉体の水冷化は、炉の大型化と UHP 化の推進に大きく寄与し、水冷による熱損失以上に電気炉の省エネルギーに役立っている。しかし水冷化面積を増加しすぎたため冷却水による熱損失が増大し、電力原単位が悪化し Tap-to-tap 時間が短縮できない例もあり、今後は水冷化面積の見直しが省エネルギーテーマの一つになると思われる。

### 9) Tap-to-tap 時間と電力原単位の関係

電気炉の Tap-to-tap 時間と電力原単位の関係は Table 1.5 に示すとおりである。

Table 1.5 Relationship between Tap-to-Tap Time and Electricity Intensity

Tap-to-tap time	Electricity intensity
180 minutes	550 to 600 kWh/t
120 minutes	480 to 520 kWh/t
90 minutes	430 to 470 kWh/t
70 minutes	380 to 420 kWh/t
60 minutes	360 to 400 kWh/t

## (3) 排熱回収および設備の近代化

### a. 改良型電気炉

電気炉を 2 基設置し、加熱・溶解用炉とスクラップ予熱炉の機能を交互に持たせるツウインシエル炉や、スクラップを連続加熱するシャフト炉など、スクラップを全量予熱した後加熱・溶解し、電力原単位 20%減を目標にした新プロセスが数機種提案され、すでに操業を開始したプラントがある。まだ結果が公表されていないが 250kWh/t 以下の電気炉が出現する日が近いと思われる。

b. 排熱回収

電気炉冷却水および電気炉排ガスより温水熱回収が出来る。しかし日本の電炉工場では排熱回収した温水の利用法、回収コストの点からまだ実施例はない。

1.3.2 圧延加熱炉

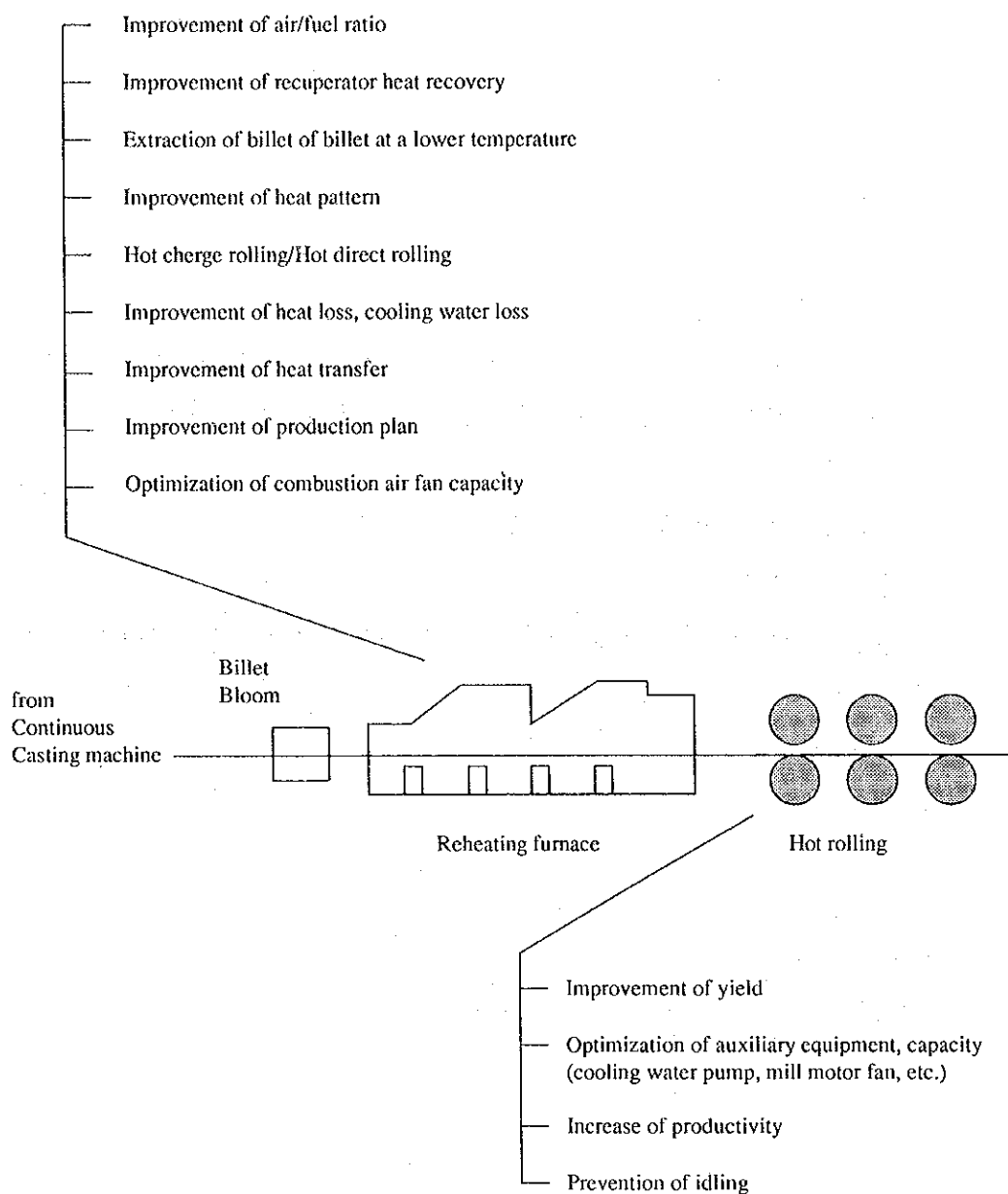
(1) 圧延工程

圧延工程は鋼片 (ピレット、ブルーム、スラブ) を加熱炉で所定の温度まで加熱したのち、圧延機で圧延し、目的の形状およびサイズに加工するプロセスである。

通常電炉工場の圧延の主要製品は、形鋼・棒鋼・線材などの 1 次圧延製品が大部分である。

Figure 1.33 に 1 次圧延工程のフロー図および省エネルギー対策を示す。

Figure 1.33 Flow and Energy Conservation Measures for Rolling Process



以下 1 次圧延工程でエネルギーを最も多く消費している加熱炉の省エネルギー対策に関し説明する。

(2) 操業改善・設備改善による省エネルギー

1 次圧延工程で使用するエネルギーは、燃料が 60%、残りを電力や蒸気が占めているが、めざましい省エネルギー成果をあげたのは加熱炉の燃料原単位の低減である。石油ショック以前は加熱炉の燃料原単位は 450Mcal/t を越える

炉が多かったが、最近では 200Mcal/t 以下の炉が出現している。

Table 1.6 に加熱炉の熱収支例を示す

Table 1.6 Heat Balance of a Reheating Furnace

Charged slab temperature : cold      Example 1  
 Charged billet temperature: hot      Example 2

(Example 1)

Heat Input	Mcal/t	(%)	Heat Output	Mcal/t	(%)
Combustion heat of fuel	318.7	(97.6)	Heat content of extracted slab	194.8	(59.7)
Sensible heat of fuel	0	(0)	Sensible heat of scale	2.1	(0.6)
Heat content of charged slab	0	(0)	Sensible heat of exhaust gas	33.3	(10.2)
Scale formation heat	8.0	(2.4)	Heat of cooling water	43.8	(13.4)
			Heat loss	52.7	(16.1)
Heat recovered by recuperator	(62.7)	((19.2))	Heat recovered by recuperator	(62.7)	((19.2))
Total	326.7	100	Total	326.7	100

$$\text{Overall heat efficiency} = \{194.8 / (318.7 + 8.0)\} \times 100 = 59.6 \%$$

(Example 2)

Heat Input	Mcal/t	(%)	Heat Output	Mcal/t	(%)
Combustion heat of fuel	168.8	(65.6)	Heat content of extracted billet	174.9	(67.9)
Sensible heat of fuel	0.3	(0.1)	Sensible heat of scale	3.1	(1.2)
Heat content of charged billet	73.9	(28.7)	Sensible heat of exhaust gas	30.7	(11.9)
Scale formation heat	13.2	(5.1)	Heat of cooling water	41.9	(16.3)
Sensible heat of atomizer	1.3	(0.5)	Heat loss	6.9	(2.7)
Heat recovered by recuperator	(16.7)	((6.5))	Heat recovered by recuperator	(16.7)	((6.5))
Total	326.7	100	Total	257.5	100

$$\text{Overall heat efficiency} = \{174.9 / (168.8 + 0.3 + 73.9 + 13.2 + 1.3)\} \times 100 = 67.9 \%$$

加熱炉を大別するとバッチ式と連続式がある。バッチ式は主に特殊な形状のものを再加熱する炉で、大量生産用には連続式が主流である。連続加熱炉にはプッシャー式、ウォーキングビーム式、ウォーキングハース式などがある。プッシャー式は建設費が安く 150t/h 以下の小型炉に採用されているが、大型炉にはウォーキングビーム式が使われている。ウォーキングハース式は、丸鋼片など特殊なものの加熱や熱処理に使用されている。

炉の熱効率を低下させる要因としては、排ガス熱損失等の炉の通常作業時に

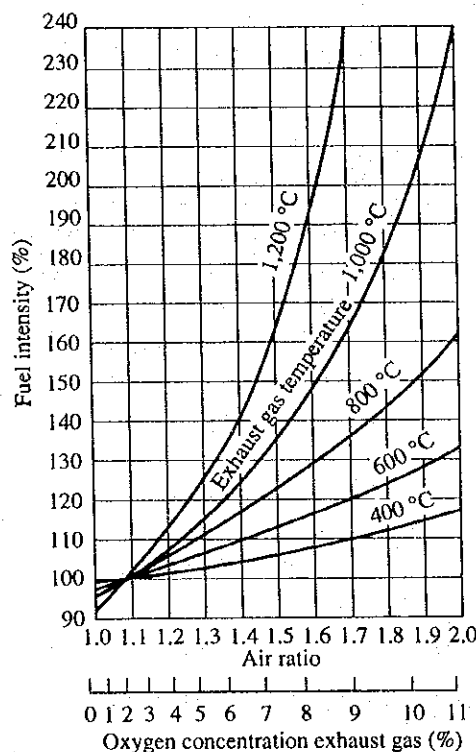
発生する熱損失のほか、材料待ち・圧延機トラブルなどの外部要因に基づく保熱や昇熱のため消費される熱損失がある。保熱や昇熱には予想以上に多量の熱量を必要とするので注意が必要である。他に圧延速度（加熱炉の負荷率）等が熱損失に与える影響も無視できない。

以下に省エネルギー対策について説明する。

### 1) 燃焼空気比の改善

燃焼空気比を適正に保つとともに、炉内圧力制御装置を調整し炉外からの侵入空気量を削減する。Figure 1.34 に空気比と燃料原単位の関係を示す。例えば排ガス温度 500℃で空気比 1.5 を空気比 1.2 に下げると燃料を 9%低減できる。

Figure 1.34 Relationship between Air/Fuel Ratio and Fuel Intensity



### 2) 排熱回収の強化

空気予熱器（レキュペレータ）は伝熱面が汚れると、著しく性能が劣化し燃料原単位が悪くなる。したがって、定期的に簡易熱精算を行ない新設当初の温度効率を維持するようにつとめる必要がある。

性能が回復しなければ原因に応じ空気予熱器を補修・増強またはリプレースする。

### 3) 低温抽出

加熱炉から鋼片をより低温で抽出すると、燃料原単位が下がるが電力原単位は上昇する方向なので、両者の影響を充分分析、最適温度で抽出する様にし、省エネルギーを図る必要がある。またこの場合スキッドマークにも注意を払う必要がある。もし低温度でも抽出が可能であれば抽出温度低下 10℃当たり 3～ 5Mcal/t 程度の燃料原単位低減が期待できる。

### 4) ホットチャージ率の向上

冷鋼片だけを加熱する加熱炉の設計燃料原単位は 300Mcal/t～400Mcal/t 程度であるのに対し、異形棒鋼だけを生産している電炉工場では 200Mcal/t 以下の燃料原単位で操業している圧延加熱炉が数多くある。これは連続铸造設備 (CC) で生産された高温鋼片をそのまま圧延加熱炉にチャージ (Hot charge rolling=HCR という) したり、あるいは圧延機でそのまま圧延 (Hot direct rolling =HDR という) しているからである。

ホットチャージを実施するに当たって、CC と加熱炉鋼片装入機が近接していることが望ましいことはいうまでもないが、CC と圧延能力の間に差があるので 100%ホットチャージすることは困難である。したがって通常バッファ機能として高温連铸ピ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、ピレットの出入のための移動可能なカバーを有している。

ホットチャージによる省エネルギー量は装入温度 100℃当たり約 20Mcal/t である。

### 5) 放射・伝熱などによる熱損失の防止

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ーで炉壁が構成されており、断熱効果が優れているとともに蓄熱量も小さく、炉壁からの熱損失が改善されている。

既設炉でレンガで炉壁が構成されている場合であっても、炉の内側壁に厚さ 50mm のセラミックファイバーを新たに張りつけることにより、放

熱量・蓄熱量ともに 30～40%程度低下させることが出来る。

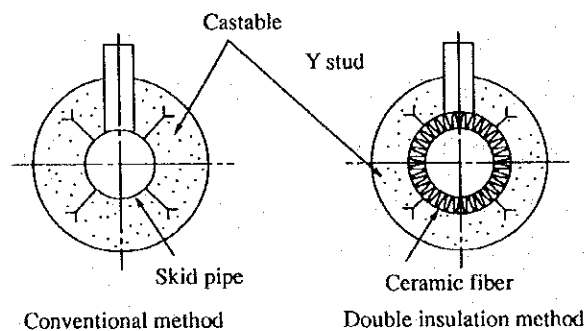
#### 6) 開口部からの熱損失の防止

開口部があると炉内の熱は放射熱として炉外に逃げまた燃焼ガスもれも熱損失になるので、出来るだけ開口部を小さくするように改善する。

#### 7) 冷却水からの熱損失の防止

連続加熱炉では水冷スキッドパイプの冷却損失熱が燃料原単位の 10～15%を占めていた。この冷却損失熱を減少させるためスキッドの二重断熱方法が開発され、新設炉はもちろん、既設炉でも採用され、熱損失は半減している。その改善例を Figure 1.35 に示す。

Figure 1.35 Double Insulation Method for Skid Pipe



#### 8) 炉内伝熱の効率化

炉内の鋼材は主として (約 95%以上) 燃焼ガスの熱放射 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  のガス放射と炎中に含まれる高温の炭素微粉子群による固体放射) により加熱されるので、いわゆる「ガス有効厚さ」 (Optical thickness of gas) を厚くする必要があり、能力に応じた規定の大きさの炉内容積が必要である。

したがって必要炉内容積が確保されているかどうか検討し、もし不足していれば炉内に伝熱促進用の仕切壁を設けたり、炉の形状を若干変更するなどの工夫が必要である。この他高温ガスが炉上部側だけ流れて炉下部側のガス温度が下がっていて輻射伝熱量を落としている場合もあるので、垂直方向の炉内温度均一化の対策も検討する必要がある。



### 9) 外部要因による熱損失の防止

加熱炉の空燃比などの管理が適正に行われている場合、あるきめられた範囲の加熱速度 (t/h) で連続操業することができれば、燃料原単位はかなり良いレベルに維持できる。

しかし、実際の操業では前後の工程との関係から、高い加熱速度や低い加熱速度で操業せざるを得なかったり、長時間保熱しつづけざるを得ないケースが発生する。このため年間平均の燃料原単位が著しく悪くなることがある。

このような事態が発生した場合はその要因を取り除くアクションが必要になり、生産計画そのものの変更改善が必要な場合も発生する。

例えば、前後の工程と生産速度の調整を行ったり、前後の工程のトラブル対策を講ずることにより、加熱炉を計画的に操業できるように改善し、併せ加熱炉の保熱・昇熱基準を定め管理する様になると熱量原単位はかなり向上する。また圧延ラインが複数 (したがって加熱炉も複数ライン) あっていろいろな製品を作っている場合、連続鑄造設備の生産能力と圧延ラインの生産能力がマッチしない事が多く、ある圧延ラインがしばしば停止せざるを得ない事態が発生するが、このような事態が定常的に発生し生産計画作業手順の調整等では対応できない様な場合少なくとも加熱炉の断熱材をセラミックファイバーに取替える等の手段により放熱損失および蓄熱損失を減らす等の対策が不可欠である。

## (3) 排熱回収による省エネルギー

### a. 蓄熱式バーナー

空気予熱器が古くりプレースが必要であれば蓄熱式バーナーの設置を検討する。蓄熱式バーナーについては 1.3.3 の鍛造加熱炉の項を参照されたい。

### b. スキッド冷却水顕熱回収

加熱炉排ガスボイラが設置されていればその給水予熱用として熱回収できる。

c. 加熱炉排ガスボイラ

ホットチャージなどによる燃料原単位低減による排ガス量の減少などを考慮した上で設置を検討する。

蓄熱式バーナーを設置すると排ガス温度が 200~300℃になるので、排熱ボイラを設置するメリットが小さくなり投資効果がうすれる。

(4) 歩留り向上、トラブルの減少

歩留り向上は圧延工程のみならず、その上工程の省エネルギーにもつながる。スケーロス、クロップロス、ミスロールの低減をはかることにより歩留りを向上させて行く事が大切である。圧延ラインにトラブルが発生すると、加熱炉の燃料原単位は悪くなり、ミスロール率は増大し歩留りが悪化するので、設備トラブルを減少させることが大切である。トラブルの減少は即省エネルギーに効果がある。

### 1.3.3 鍛造加熱炉

(1) 鍛造工程

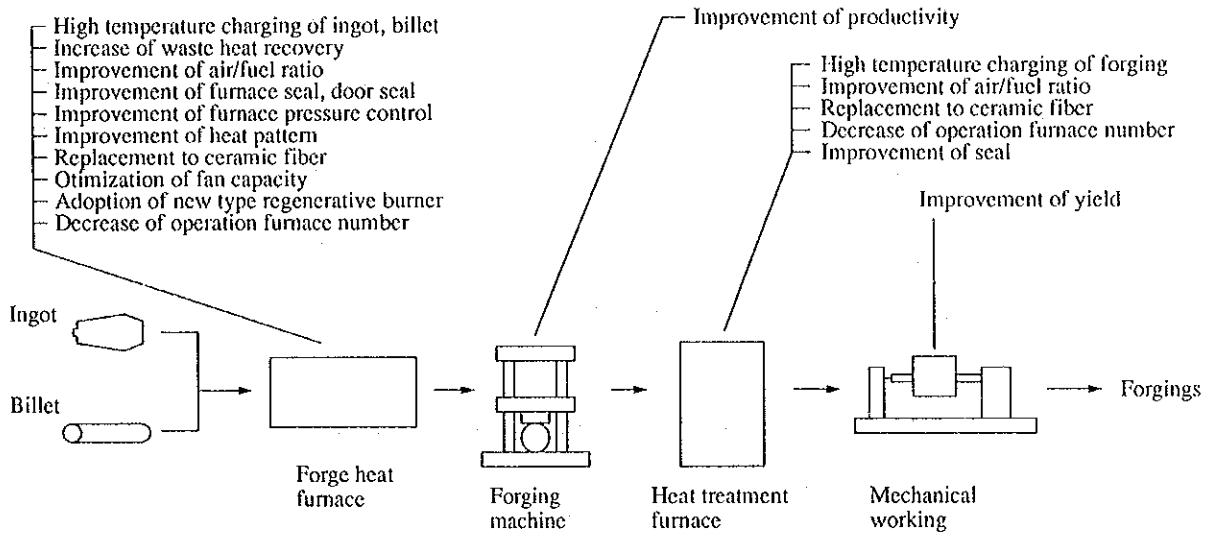
鍛造工程は、鋼塊または鋼片（ブルーム、ビレット）を鍛造加熱炉で所定の温度まで加熱したのち、鍛造機械（プレス、ハンマ、フォーミングロール）で鍛練し、目的の形状およびサイズに加工するプロセスである。通常鍛造機械で鍛練した後熱処理を行ない、内部応力を除去するとともに要求される材料特性を与えた後、機械加工し検査出荷される。

圧延工程が、圧延機で鍛練され、製品は 2 次元的に加工されるのに対し、鍛造工程は素材を 3 次元的に、より最終製品に近い形まで加工できるという特徴を持っているので自動車部品工場などの機械メーカーの一部門として設けられることが多い。

鍛造工程は、3 次元的加工が行われるため製造される製品は多種にわたるうえ、製品の大小、加工度や熱処理の有無などのちがいによりエネルギー原単位が大巾に変動するが、鍛造工程全体としては 2,000Mcal/t~5,000Mcal/t の間にある。

Figure 1.36 に鍛造工程のフロー図および省エネルギー対策を示す。

Figure 1.36 Flow and Energy Conservation Measures for Forging Process



鍛造工程で使用するエネルギーは燃料がその大部分を占めているが、中でも鍛造加熱炉において大量に消費される。

鍛造工程の加熱および熱処理は先にのべた圧延工程と類似しているが、鍛造工程のそれはバッチ型炉が大部分を占めているので、バッチ型炉を主体に省エネルギー対策を説明する。なお、鍛造工程でも回転炉床炉、ウォーキングビーム形炉、プッシャー形炉などの連続加熱炉があるが、この場合は圧延の連続加熱炉に準じた省エネルギー対策が考えられる。

## (2) 鍛造用バッチ式加熱炉

鍛造用バッチ式加熱炉の熱効率通常 10～20%で非常に低いものが多い。これは次の理由による。

- 1) 炉内温度が高かつ排ガス温度が高い
- 2) 炉の耐火材の重量が被加熱物に比べてはるかに大きく、その蓄熱のための熱損失が大きい
- 3) ドアやその他のシール部からの空気侵入がある
- 4) 鍛造炉の燃料投入量は、加熱中、均熱中および保持または待機中によって大きく変化するが、すべての期間において排ガス  $O_2$  濃度を低く

維持管理することが難しく調整されていないことが多い。

- 5) 炉の稼働率が低い。例えば台車式加熱炉は台車周囲耐火材の補修、台車フレームの補修や、炉の耐火材の補修などのメンテナンスに時間がかかり稼働率が低下することが多い。

(3) 操業改善、設備改善による省エネルギー

Table 1.7 にバッチ炉の熱収支例を示す。

Table 1.7 Heat Balance Example of Forge Heating Furnace

Unit of heating value [MJ]								
Item	Before modification				After modification			
	Heat input	%	Heat output	%	Heat input	%	Heat output	%
Fuel combustion heat	167,708	86.5			65,406	70.1		
Heat recovered from preheated air	26,175	13.5			27,908	29.9		
Work absorption heat			16,196	8.4			16,196	17.4
Pier absorption heat			3,571	1.8			3,571	3.8
Heat loss from furnace wall			12,797	6.6			7,673	8.2
Furnace material structural heat loss			37,745	19.5			15,836	17.0
Water cooling heat loss			10,155	5.2			6,861	7.4
Exhaust gas heat loss			101,594	52.4			37,984	40.7
Miscellaneous losses			11,825	6.1			5,193	5.5
Total	193,883	100.0	193,883	100.0	93,314	100.0	93,314	100.0
Comparison of fuel economy				100.0				39.0

a. 排ガス損失熱の低減

鍛造加熱炉の各種熱損失の中で最も大きな割合を占める排ガス損失熱を低減するには、排ガス量の低減（排ガス中の酸素濃度管理などによる）並びに排ガス温度の低減（レキュペレータによる熱回収量の増加など）を図る必要がある。このためには適正な燃焼空気比管理を行う他、炉内圧力を適正に維持して、空気の侵入や排ガスの吹出を防ぐ他、扉当たり面・台車周囲よりの空気の侵入を防ぎ排ガス中の酸素濃度を常に低く保つ必要がある。

b. 蓄熱損失の低減

鍛造加熱炉の熱損失の中で、次にウエイトを占めるのが蓄熱損失である。近年セラミックファイバー（またはアルミナファイバー）に取替える事例がふえている。バッチ式鍛造加熱炉は、炉外壁からの放散熱量よりも炉壁内部の耐火煉瓦による蓄熱損失量が大きいので、炉壁煉瓦軽量化により蓄熱量の低減をはかる必要がある。炉壁煉瓦をセラミックファイバーに変更の場合蓄熱量の減少に加え、耐火物のメンテナンスが簡単になり補修期間が短縮するサブメリットもある。

蓄熱損失の低減には、この他炉の稼働率を上げることも有効であり、常に必要最小限の鍛造加熱炉の稼働ですむ様生産計画をたてる必要がある。

c. 熱回収の強化

定期的に簡易熱精算を行ない新設当初の温度効率を維持するように保全管理する。性能が回復しなければ、空気予熱器を補修・増強またはリプレースする。また状況に応じ他のより効率の良い設備例えば後述するリジェネレーティブバーナーを設置することを検討する。

d. 熱塊装入率の向上

造塊工程または連铸工程からの熱鋼片（または熱鋼塊）を加熱炉にホットチャージできれば、その熱鋼片の温度まで加熱するに要する燃料相当量分だけ燃料が節約でき、加熱炉の燃料原単位を低下できる。

(4) 排熱回収・設備増強による省エネルギー

a. リジェネレーティブバーナシステム

蓄熱体を内蔵する「対」となる A・B 2 台のバーナで、数十秒間隔で燃焼と熱回収を交互にくりかえすことにより、コンパクトな構造であるにもかかわらず、85%以上の温度効率（予熱空気温度が 1,000℃を越える）が得られる。これは A バーナが燃焼中、B バーナは排気口になり A バーナの排ガスと B バーナの蓄熱体とが熱交換する一方、燃焼中の A バーナでは蓄熱体と燃料用空気が熱交換して、高温の空気が A バーナに供給されているからである。

このシステムでは、蓄熱体はアルミナ系の耐火物が使われていて、高温部はバーナおよび蓄熱体だけで、排ガス系および空気管系が低温であるため、小さくコンパクトにまとまっていること、熱回収／燃焼の切替え弁が低温側に設けられているため、損耗が少ないのが特徴で、燃料を 30～50%節約できる。この他空気予熱温度が高いのもかかわらず NOX は 150ppm 以下と低い優れた特徴を持っている。そのフロー図を Figure 1.37 に、予熱空気温度上昇効果を Figure 1.38 に示す。

Figure 1.37 Conceptual Flow of Regenerative Burner

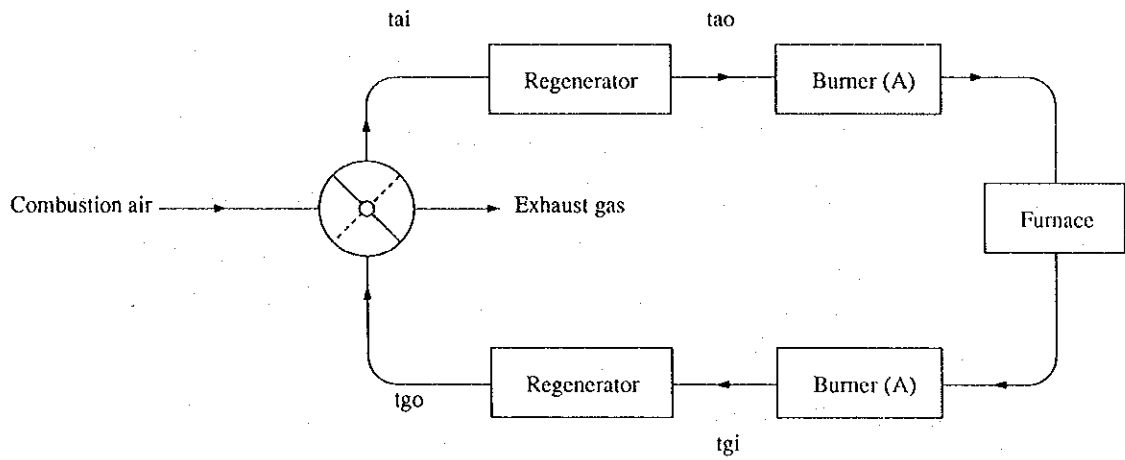
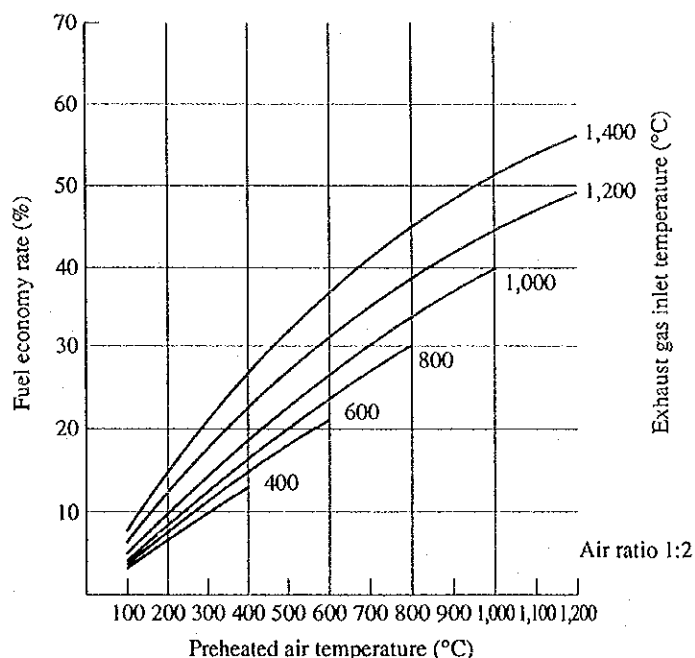


Figure 1.38 Effect of Air Preheater



b. 材料予熱炉

炉を双炉とし、一方の鍛造加熱炉の排ガスを他方の炉に導き、他方の炉を材料予熱炉として使用する。しかし通常予熱炉を新設するよりも a 項で記述の Regenerative バーナを採用する方が経済的である。

1.3.4 鋳物工場の溶解炉

鋳物工場においては溶解・鋳造工程が最もエネルギーを消費する部門で工場全体消費エネルギーのおよそ 50% を使用している。

(1) 鍛造工程

溶解・鋳造工程は、溶解炉で原料地金を溶解し、目的の材質が得られるよう成分調整や不純物除去などの精錬を行い、必要な鋳込み温度まで昇温した後、鋳型に流し込み凝固させる工程である。

鋳鉄の溶解温度は材質により異なるが、通常 1,400~1,500°C で、いわゆる高級鋳物ほど高温で出湯される。鋳込み温度は材質および製品により大幅に異なる。出湯温度のまま鋳込まれるものから凝固温度に近い 1,200~1,250°C で

鋳込まれるもの迄多様である。溶解炉としてはキューボラ炉、誘導炉およびアーク炉電気炉が用いられている。

この他キューボラの特徴を（低コスト、連続出湯）を最大限に生かすために、キューボラとるつぼ型低周波炉等へ組み合わせるいわゆる二重溶解方式が採用されることも多い。

鋳鋼の溶解は一般にアーク炉または誘導炉を用いて行なわれる。鋳鋼は機械的強度を要する機械部品に使用されるので、リン (P)、硫黄 (S)、水素 (H)、酸素 (O) などの有害成分の除去、カーボン (C)、シリコン (Si)、マンガン (Mn)、など各種成分のこまかい再調整が必要である上、溶解温度および粘性が高いため健全な鋳鋼鋳物製品を得るため約 1,600℃の高温で出湯される。

## (2) 溶解炉の選定と省エネルギー

### a. キューボラ

溶解炉はいろいろな形式がありそれぞれ優れた特徴を持っている。しかし製品の品質・種類・生産量および操業形態（例えば 8 時間操業か 3 直操業か）等を考慮して、その鋳物工場にとって一番最適な炉を選定することが省エネルギーの第一歩である。その選択を誤ると定常的なエネルギー損失が発生し製造コストが予想以上に上がることがある。

また、溶解炉はその能力を常にフルに活用することが省エネルギー上重要なポイントである。固定的熱損失例えば放熱損失、冷却水による熱損失等は炉容量が大きいほど大きくなり、また溶解炉の数が増えるほど増大するので、溶解炉の数と能力は出来るだけ小さい方が望ましい。

## (3) 操業改善・設備改善による省エネルギー

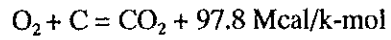
### a. キューボラ炉

#### ① キューボラ炉

キューボラ炉は円筒状の鋼板に耐火レンガを内張りした溶解炉で、連続溶解に適する炉である。炉底から羽口の上にある高さまでコークスをつめ（これをベッドコークスという）この上部にコークスと銑鉄、スクラッ



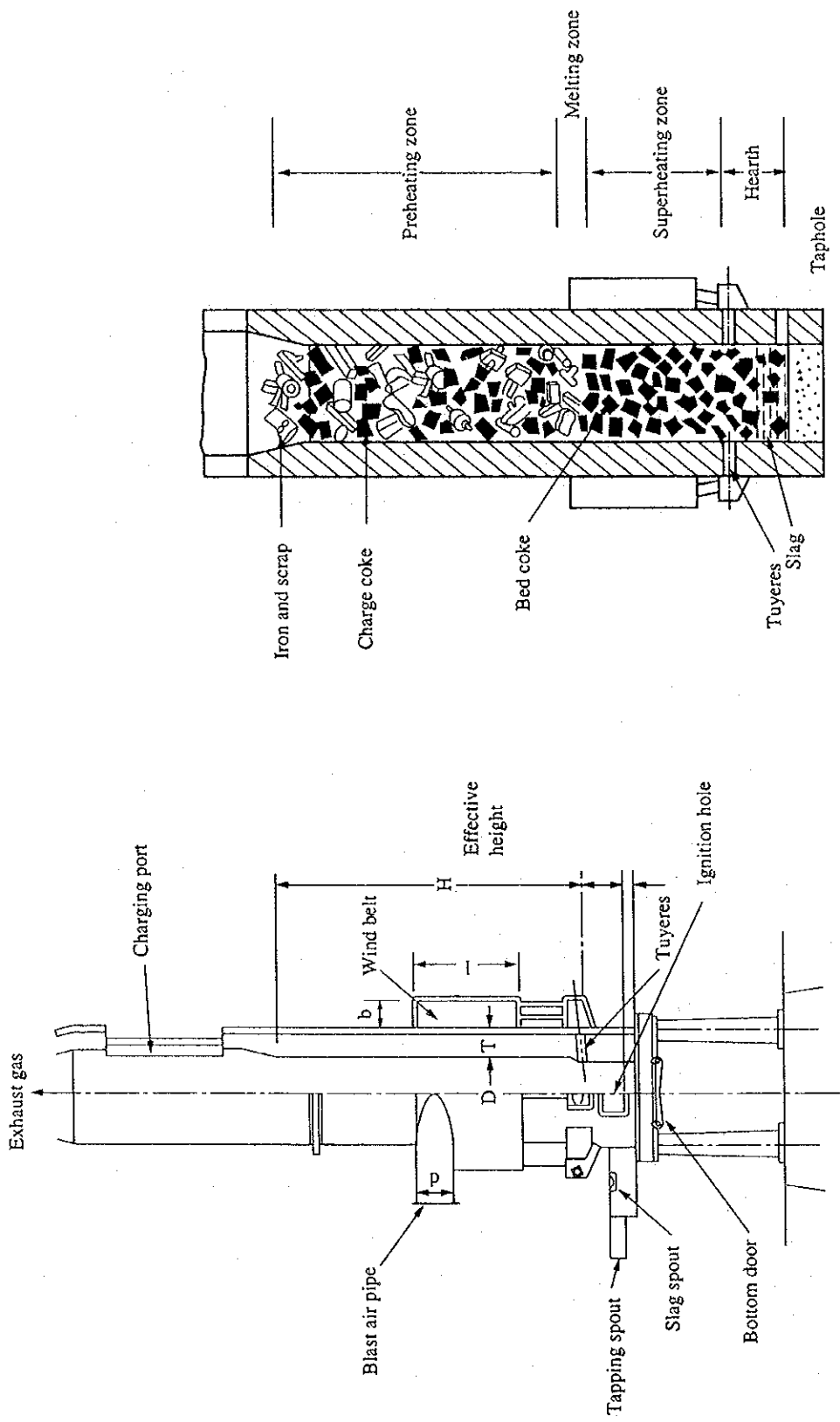
ブ、返り材などの地金が一定比率で装入口からチャージされる。羽口から送られた空気中の酸素は、コークス中の炭素と反応して二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）ガスとなる。装入された地金はこのコークス燃焼熱によって溶解される。



燃焼して消耗したコークスは上部からチャージされるコークスにより補充され、ベッドコークス高さは適正なレベルに維持される。キュポラの断面図を Figure 1.39 に示す。

上部から装入される追込みコークス（charge coke）と地金との重量比をコークス比と呼び、このコークス比を出来るだけ低くすることがキュポラ炉の重要な省エネルギー活動である。

Figure 1.39 Conceptual Drawing of Cupola



## ② コークス比の低減対策

キュボラのコークス比は溶解速度（生産性）や出湯温度すなわち鑄鉄の品質と密接に関係する。したがって、通常キュボラの製造コストが最小となるようなコークス比が設定されている。

日本の鑄物工場のキュボラ炉は 1,500℃出湯時コークス比 100～110kg/t、熱効率 35～45%で操業している。実施されている省エネルギー対策は次のとおりであるが、キュボラの燃焼用空気に関する項目が多い。

### ・熱風送風（hot blast）

送風を予熱することにより、キュボラへの入熱が増加し、かつコークスの燃焼が良くなり、キュボラの熱効率が向上する。すなわち冷風送風と比べ次の効果がある。

- コークス比が低減する。
- 出湯温度が上昇し、材質の向上と不良率の減少に効果がある
- 溶解速度が増大する
- Si および Mn ロスが減少する。
- スクラップの比率を増加できる（出湯温度が上昇するとカーボンピッキングアップが増えるので銑鉄を減らせる）

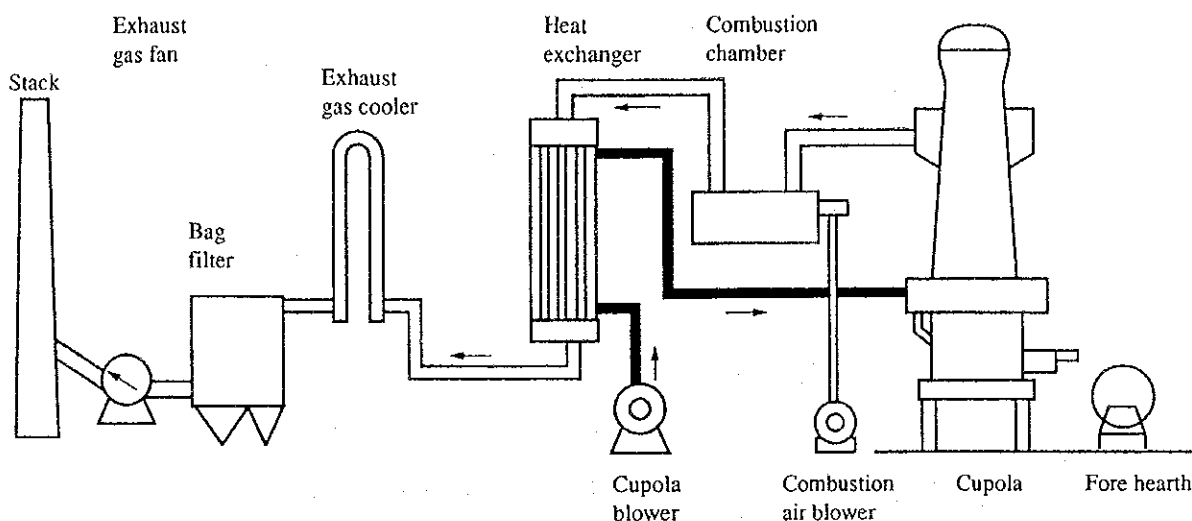
の効果がある。

これらの効果はそれぞれ関連を持っている。例えば、冷風送風時すでに出湯温度が目標温度を維持出来ている場合、熱風送風を行えばコークス比の低減が可能である。

送風予熱には通常キュボラの排ガス顕熱および排ガスに含まれる CO 潜熱が利用されるが、別の燃料を使用する場合もある。（別の燃料を使用しても総合効率は向上する。）

熱交換器は二重管式の輻射型や多管式、U 字管式の対流型などいろいろな種類があり熱風温度は 300～600℃である。熱風送風システム図（例）を Figure 1.40 に示す。

Figure 1.40 Hot Blast Cupola Process Flow Diagram



・酸素富化送風

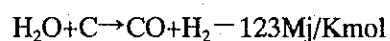
送風中に酸素を富化し、コークスの燃焼反応を促進するとともに、排ガス熱損失を低減できるのでキュポラの熱効率が向上する。酸素富化送風を単独（補助燃料吹込みを伴わない）で実施した場合酸素 3%富化に対し、コークス比が 2.5% (25kg/t) 低減する。

送風熱風中に酸素を 1.5%富化することによりコークス使用量を 9.6%削減、溶解能力 16.3%向上、出湯温度 15℃が上昇するとの報告もある。

この他送風開始から初出湯までの間酸素を富化し、初湯までの時間を短縮するとともに、溶鑄温度の上昇を促進し初湯から出来るだけ品質の安定した溶湯を得るようにしている foundry もある。

・送風除湿

送風中に含まれている水分はキュポラ内に入ると赤熱されているコークスと水性ガス反応を起こし、コークスを浪費するとともに吸熱反応による熱損失が発生する。



このため送風除湿装置を設置し水分含有量を 5~7g/Nm<sup>3</sup> のレベルまで下げることにより年間を通じて安定した操業を確保している。

送風除湿の方法としては吸着法（シリカゲル等による吸着等）、吸収法（塩化カルシウムによる吸収等）及ぶ冷凍方があるが、冷凍方が一般に使

用されている。

・分割送風 (二段送風)

通常の送風羽口の他にもう一ヶ所羽口を設け、熱効率を上昇させるとともに溶解速度を上げコークス比を下げる狙いを持った送風方法である。送風羽口の増設場所はその設置目的によって、予熱帯部または過熱帯部が選ばれている。二段送風を行なうと熱効率が 2%は増加するといわれている。炉内の未反応 CO が燃焼され CO<sub>2</sub> ガス濃度が高くなり熱効率的には有利になるが反面送風中酸素により Si や Mn が酸化され損失が増加する方向になるので操業面で十分な管理が必要である。

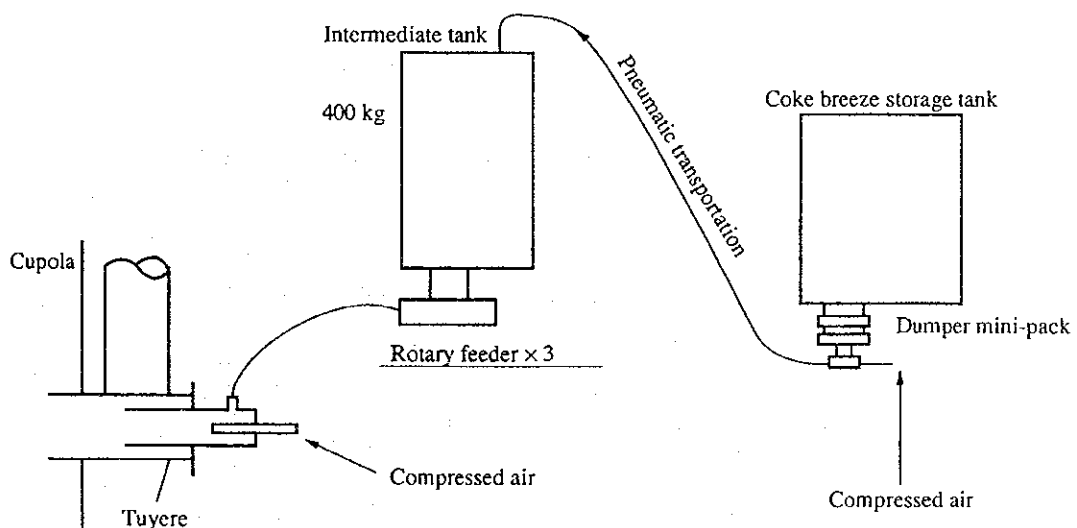
・粉コークス吹込み

送風羽口から粉コークスを吹込む方法で、コークス比が低減できる他に次の効果がある。

- 日本の実績によれば操業が安定し、溶湯のカーボンが安定する
- 溶解速度が上昇する

粉コークス 1%を吹込むことにより、コークス比が 1.5%低下し、溶解能力 4%が向上する。粉コークスの吹込みフローを Figure 1.41 に示す。

Figure 1.41 Coke Breeze Injection System Flow Diagram



・コークス中の水分管理の強化

コークス中の水分が1%増加するとコークス比が約10kg/t hot metal 変化する  
るので炉の大きな変動要因となる。コークスの貯場は屋内に設けること  
が望ましい。

・出湯口の長寿命化

キュボラを週1回切替えると、ベッドコークス損失が2~3kg/t hot metal  
発生する。したがって、キュボラの切替えは極力長期をすることが望ま  
しい。日本の場合炉の切替えは操業条件にもよるが短いもので数週間に1  
回程度、長いものでは月単位で切替えるものまであり長寿命達成のため  
出湯口の構造を変更したり、炉体および炉底の耐火物を高品質のものに  
取替えている。

・二重溶解

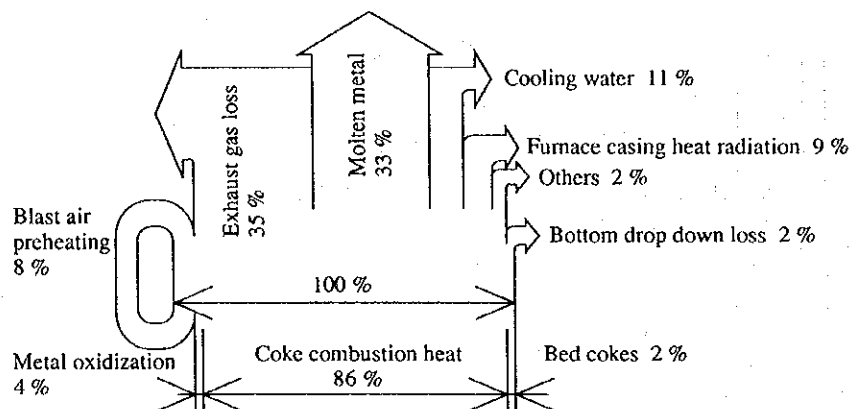
キュボラで徹底した経済溶解を行ない、低周波誘導炉または高周波誘導  
炉で昇温および成分調整を行なう溶解方法である。白鑄鉄製造やダクタイ  
ル鑄鉄の製造等高温出湯が必要な場合に用いられている。

・操業管理の強化

キュボラのSiロス、排ガス中のCO、CO<sub>2</sub>、排ガス温度、送风量等の情報  
を活用し、キュボラの炉況を総合的に判断しながらコークス比を出来る  
だけ低いレベルで維持するよう操業努力が行なわれている。

Figure 1.42 にキュボラのヒートバランス例を示す。

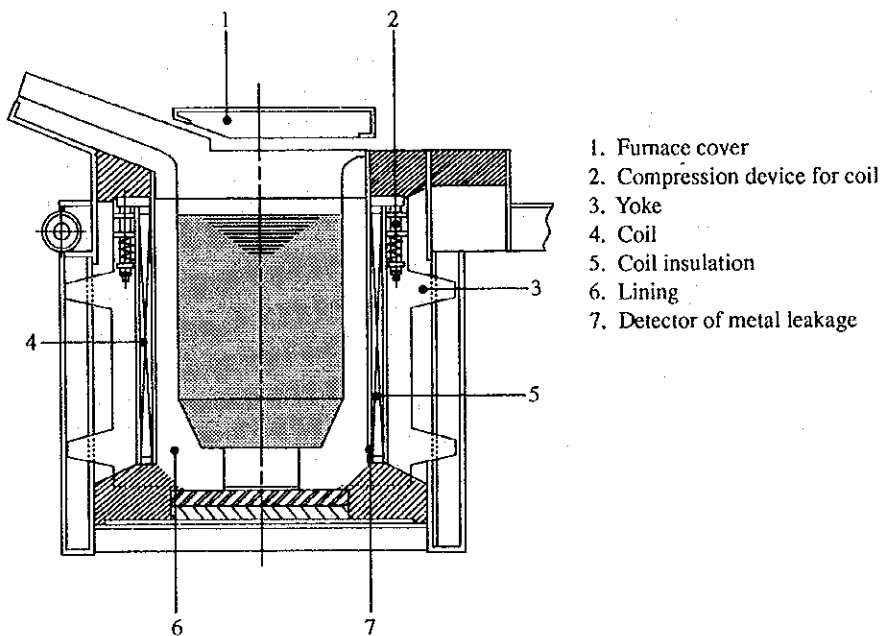
Figure 1.42 Heat Balance of Cupola (Example)



b. 誘導炉

誘導炉はキュボラに比べると設備費が高いが効率がよく、溶解中に不純物が混入する要因が少ないため高品質の製品を得ることができ、または溶解材料の成分調整が容易なこと、省力になること、操業上特別な技術熟練者を必要としないこと、公害発生が少なく作業環境も改善されるなどの利点があるので次第に増加する傾向にある。鋳鉄用の誘導炉にはるつぼ型高周波誘導炉 (以下高周波誘導炉という)、同低周波誘導炉および溝形誘導炉がある。Figure 1.43 に誘導炉の構造例を示す。

Figure 1.43 Induction Furnace Sectional Drawing



① 高周波誘導炉

比較的小型で溶解能力 (t/h) が大きくバッチ操業に適しており、特に生産する材質の種類が多い場合、選ばれる炉である。

高周波誘導炉と低周波誘導炉の比較表を Table 1.8 に、エネルギー損失分布図を Figure 1.44 に、同じく電力原単位を Table 1.9 に示す。

誘導炉の熱効率は、炉の構造でほぼ決まってしまう。すなわちメーカーが設計製作した時にその熱効率は決まってしまうので、省エネルギーの点から次の注意を払う必要がある。

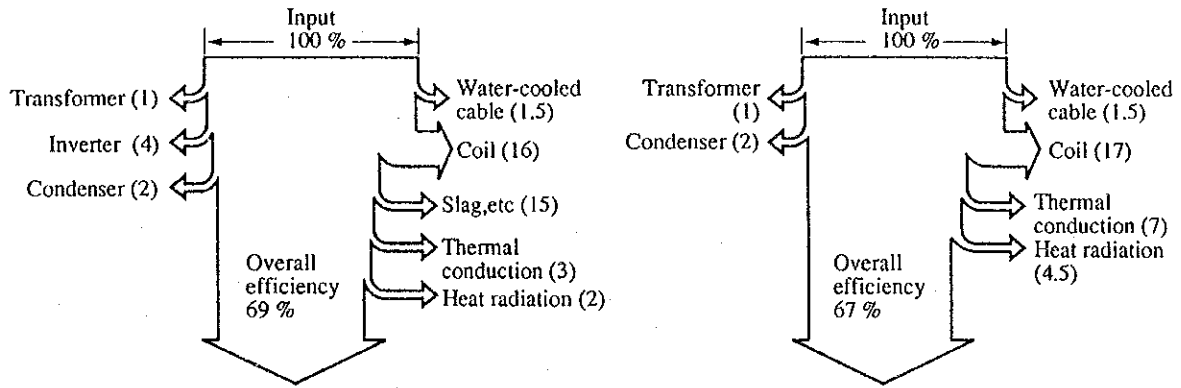
- 操業形態および製造する製品に適した炉形式・能力・基数およびメーカーを選ぶ
- 溶湯を過昇温させない (高周波誘導炉はスクラップ溶け落ち後の溶湯昇温時間が短く 2~4 分間で 100℃程度昇温出来る)
- 誘導炉の保熱時間を出来るだけ短くする

**Table 1.8 Comparison between a High-frequency Induction Furnace and a Low-frequency Induction Furnace**

	High-frequency induction furnace	Low-frequency induction furnace	Confer: Channel induction furnace
Operation pattern	Suitable for batch operation	Suitable for continuous operation	Suitable for continuous operation
Furnace capacity	Suitable for small-size furnaces (50 kg to 6 t)	Suitable for medium/large capacity furnaces (~ 50 t)	Suitable for medium/large-capacity furnaces
Use	Melting (Raising of temperature is also available)	Temperature-holding/raising, melting and duplex melting with a cupola	Temperature holding/raising
Kinds of melting materials	No problem even with more kinds of material	Inferior to a high-frequency furnace	-
Starting from the cold furnace	Starting is available even with small scraps.	A starting block is required.	Operation cannot be started without molten metal.
Melting	Residual molten metal is not required.	Residual molten metal is required (1/3 or more).	-
Thermal efficiency	67 to 73 %	65 to 71 %	75 to 85 %
Halt	A furnace can be made empty	A furnace can be made empty	A furnace cannot be made empty.
Equipment cost	Expensive	Rather inexpensive	Inexpensive
Power capacity (kW)	1,200 kW is available for 500 Hz 1 t	350 kW per ton	-
Frequency (Hz)	150 to 10,000 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
Countermeasure for the higher harmonics	Necessary	Not necessary	Not necessary
Mixing power	Medium	Strong	Weak
Melting speed (t/h)	Fast	Slow	-



**Figure 1.44 Heat Balance of Induction Furnace**



(a) Heat loss distribution for a high-frequency furnace  
The values in parenthesis indicate heat loss [%]

(b) Heat loss distribution for a low-frequency furnace  
The values in parenthesis indicate heat loss [%]

Table 1.9 Electricity Consumption of Induction Furnace (Example)

Low frequency induction furnace											
Furnace			Cast iron melting			Cast steel melting					
Capacity [t]	Trans-former [kVA]	Power input [kW]	1,450 °C melting [t/h]	1,550 °C melting [t/h]	100 °C temperature rise [t/h]	100 °C temperature rise [kWh/t]	Power input [kW]	1,600 °C melting [t/h]	Power input [kWh/t]		
1	400	350	0.57	590	0.53	630	7.8	45	300	0.34	860
1.5	600	500	0.85	570	0.79	610	11.9	42	450	0.56	775
2	700	600	1.05	550	0.98	590	14.8	40.5	550	0.72	735
3	1000	800	1.46	530	1.36	570	20.3	39.3	700	0.96	710
4	1200	1000	1.86	520	1.73	560	25.9	38.7	850	1.16	710
5	1450	1200	2.28	510	2.11	550	31.6	38	1000	1.4	690
6	1650	1400	2.66	510	2.46	550	37	37.6	1200	1.7	685
8	2150	1800	3.49	500	3.23	540	48.6	37	1550	2.27	665
10	2500	2100	4.08	500	3.77	540	56.9	36.9	1800	2.66	660
12	2800	2400	4.7	495	4.39	535	65	36.9			
15	3300	2800	5.5	490	5.13	530	72	36.9			
16	3800	3200	6.3	490	5.8	530	87.6	36.5			
18	4800	4000	8.0	485	7.4	520	110	36.1			
20	5800	4800	9.7	480	9.3	505	133	36			
25	7200	5000	12.3	475	11.3	510	169	35.5			
30	9000	7500	15.4	470	14.3	510	212	35.5			
40	12000	10000	20.7	470	19.1	510	283	35.5			

Note 1: The capacity in the table is for 1/2 remaining molten metal operation and does not include the necessary time for holding (ex. removing slag, measuring temperature, adjustment of composition and pouring-out).

The practical melting rate becomes 80 to 60 % of the rate indicated in this table.  
 2: Actual electricity consumption will be about 100 kWh/t higher than these data if the necessary time for holding is included.

High frequency furnace									
Furnace			Cast iron (1,500 °C)			Cast steel (1,500 °C)			
Capacity [kg]	Frequency [kHz]	Furnace input [kW]	Melting time [minimum]	Melting rate [t/h]	Power consumption [kWh/t]	Melting time [minimum]	Melting rate [t/h]	Power consumption [kWh/t]	Power consumption [kWh/t]
30	3	60	22	0.081	749	26	0.069	886	
50	2	80	27	0.113	721	31	0.097	833	
100	2	200	18	0.332	611	19	0.311	652	
200	1	200	38	0.318	638	41	0.292	696	
300	1	200	58	0.309	657	65	0.277	732	
300	1	450	23	0.792	576	24	0.753	606	
500	0.5	500	33	0.908	533	35	0.862	562	
500	0.5	500	27	1.109	524	26	1.060	548	
1000	0.5	1200	26	2.292	507	26	2.214	525	
1500	0.5	600	85	1.065	545	90	0.997	583	
1500	0.5	900	54	1.669	522	57	1.592	548	
1500	0.5	1500	31	2.877	505	32	2.781	522	
2000	0.5	900	72	1.660	525	76	1.574	554	
2000	0.5	1200	53	2.264	513	55	2.169	536	
2000	0.5	1800	35	3.472	502	36	3.358	519	
3000	0.5	1200	80	2.244	518	84	2.137	544	
3000	0.5	1500	83	2.848	510	66	2.731	532	
3000	0.5	2400	39	4.659	499	40	4.514	515	
5000	0.5	1800	88	3.399	513	92	3.274	532	

Note 1: The capacity in this table does not include the necessary time for holding.

2: Actual electricity consumption will be about 100 kWh/t higher than these data if the necessary time for holding is included.

## ② 低周波誘導炉

同じ溶解能力 (t/h) をもつ高周波炉と比較すると、低周波炉は3倍の容量の炉が必要 (電力容量は同一溶解能力であればほぼ同じ) である。したがって溶解炉としては高周波炉より放熱損失が大きいので、保持電力、溶解電力も大きくなる。このため小容量大電力の高周波炉が溶解炉の主流となりつつ、型低周波炉は年々少なくなっている。省エネルギー面では高周波炉の方が良いとされるが低周波炉の場合溶湯攪拌力が強く大型炉の製作が可能のため大型製品製作等工場の生産条件により現在でも広く使用されている。また一方、キューボラとの二重溶解や保持炉として低周波誘導炉が用いられている例もあり、ランニングコスト低減の観点から溝形炉の代替炉として選ばれることもある。

## ③ 溝形誘導炉

高効率で率も良く、炉の保持電力原単位は低周波誘導炉より良いが、常に溶湯を炉内に保持し通電しておかなければならないというマイナス面もある。通常は保持炉 (特に大容量保持炉) として使用されるが、溶湯材質の変更が難しく炉の補修期間が長いという弱点がある。

一方低周波誘導炉は通常作業時の保持電力原単位は高いが、数日間作業を中止する場合は空炉に出来るので作業形態によっては低周波誘導炉の方がランニングコストが安い場合がある。

なお、溝形炉の保持電力は10t炉 (有効容量7t炉) で125kwh/ht (1,500℃保持)、一方低周波誘導炉は10t炉 (有効容量7t炉) で165kwh/ht (1,500℃保持) 程度である。

## 2. 化学工業の省エネルギー

## 2. 化学工業の省エネルギー

### 2.1 化学工業におけるエネルギー使用の特徴

化学工業は、生産の主要な過程で原料の加工に質的变化、即ち化学反応が利用される工業である。更に、原料の前処理や生成物の分離、精製等を目的とする物理的・化学的処理工程が加わって、1つの生産設備が完成する工業で、装置産業の一種である。

化学プラント内のそれぞれの装置の操作は、一般に常温付近で行われるものは少なく、原料や中間物等の加熱・冷却を伴う工程が多いので、エネルギーの消費も少なくない。それぞれの操作の効率が最良となる最適温度・圧力・濃度等を選定し、かつ加熱冷却に際しての顕熱・潜熱をできる限り回収して有効に利用することが、エネルギーの使用の合理化につながる。

化学工業では原材料に気体や液体等の流体を用いることが多く、固体を用いるほかの業種に比べ、熱交換や熱伝導が容易である。このため、伝導操作を最適化することにより、熱効率的に優れたプロセスの構築が可能である。

エチレン製造プラントを例にとると、原料であるナフサを800～850℃の温度で分解して製造されるが、エチレトン当たり $6 \times 10^6$  kcal という多量の熱エネルギーが必要である。そこで、省エネルギーに努めているエチレンプラントの例をとると、分解炉の燃料には自製する分解ガスと分解重油を使用し、分解炉から出る高温ガスは、急冷工程で複数の排熱ボイラに熱を与えて、温度・圧力の異なる蒸気が回収されるようになっている。この回収蒸気はそれぞれの温度・圧力に応じて動力用、反応用、加熱用に区分して利用される。この結果、分解炉への入熱は分解反応に17%使われたあとに68%回収され、冷却損失と煙突からの排出量は15%にすぎない。

化学工業は製品により、また、使用される原料によって生産プロセスおよびエネルギーの使用はそれぞれ特有であるため、化学工業における省エネルギーを画一的に論ずることは難しい。

しかしながら、プロセスの中において、いわゆる単位操作を行う単位装置には、プロセスの相違にかかわらず類似のものが使用されている場合が多く、エネルギー使用の面においても共通する点が多い。ここでは、化学工業において使用されているいくつかの代表的な単位操作を選び出して論ずる。

## 2.2 熱エネルギー使用の合理化

### 2.2.1 燃焼装置

#### (1) 燃料

##### a. 気体燃料

工業的に使用される代表的なものは天然ガスであり、一般にメタンが主成分をなし (88~99%)、発熱量は  $8,000\sim 11,000\text{kcal/m}^3_{\text{N}}$  である。

##### b. 固体燃料

工業的に最も多く使用されるものはリグナイトと石炭であり、発熱量は前者が  $1,500\sim 4,500\text{kcal/kg}$ 、後者が  $4,500\sim 7,500\text{kcal/kg}$  であり、性状、成分は産地による差異が大きい。

##### c. 液体燃料

石油系が一般であり、ディーゼル油、またはガスオイル、燃料油が代表的な燃料である。燃料油は硫黄を含有しているので、燃焼ガス中に通常 0.1~0.25%の  $\text{SO}_2$  を含み、更に、その中の 1~5%は  $\text{SO}_3$  に転化しているので腐食の原因となる。

##### d. 発熱量

###### 1) 固体および液体燃料

燃料 1kg 中の炭素、水素、硫黄、酸素、水分、窒素の含有量をそれぞれ  $c$ 、 $h$ 、 $s$ 、 $o$ 、 $w$  (kg) で表すと、総発熱量は近似的に次式で求められる。

$$\text{総発熱量 } H_h = 8,100c + 34,500(h - o/8) + 2,500s \text{ kcal/kg}$$

燃焼ガス中の水蒸気の凝縮熱を差し引いたものが真発熱量であり、総発熱量との関係は次式で示される。

$$\text{真発熱量 } H_l = H_h - 600(9h + w) \text{ kcal/kg}$$

2) 気体燃料の発熱量

燃料  $1\text{m}^3_{\text{N}}$  中の可燃成分を、例えば  $\text{CH}_4$  を  $\text{ch}_4$ 、 $\text{H}_2$  を  $\text{h}_2$  ( $\text{m}^3_{\text{N}}$ ) 等で表すと、

総発熱量  $\text{Hh} = (3,055 \cdot \text{co} + 3,036 \cdot \text{h}_2 + 9,498 \cdot \text{ch}_4 + 14,982 \cdot \text{c}_2\text{h}_2 + 35,702 \cdot \text{c}_6\text{h}_6 + \dots)$  kcal/ $\text{m}^3_{\text{N}}$

真発熱量

$$\text{Hl} = \text{Hh} - 600 \frac{8}{22.4} (\text{h}_2 + 2\text{ch}_4 + \text{c}_2\text{h}_2 + 3\text{c}_6\text{h}_6 + \dots) \text{ kcal}/\text{m}^3_{\text{N}}$$

e. 空気比と燃焼ガス量

燃焼に使用された実際の空気量  $A_a$  と、理論空気量  $A_0$  の比 ( $A_a/A_0$ ) を空気比 ( $m$ ) といい、燃料中の窒素分を無視すると、

$$m = \frac{21(\text{N}_2)}{21(\text{N}_2) - \{79(\text{O}_2) - 0.5(\text{CO})\}}$$

で表される。ここで  $(\text{CO})$ 、 $(\text{O}_2)$ 、 $(\text{N}_2)$  は乾燃焼ガス中の  $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  の Vol% を表す。

固体、液体、気体燃料の各空気比に対する発熱量と燃焼ガス量の関係を Figure 2.1~Figure 2.3 に示す。

Figure 2.1 Relation between Low Calorific Value of Solid Fuel and Combustion Gas Amount, and Theoretical Air Amount

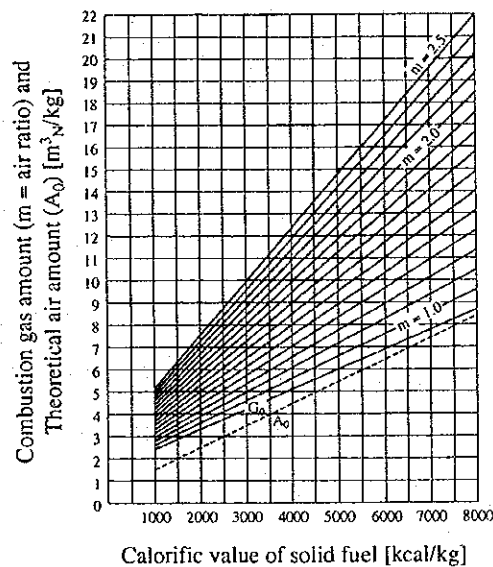


Figure 2.2 Relation between Low Calorific Value of Liquid Fuel and Combustion Gas Amount, and Theoretical Air Amount

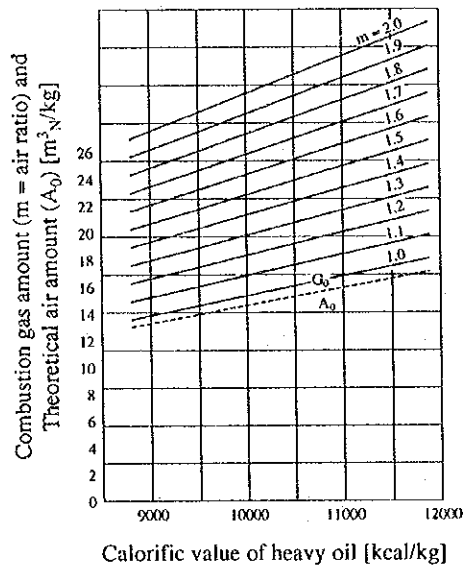
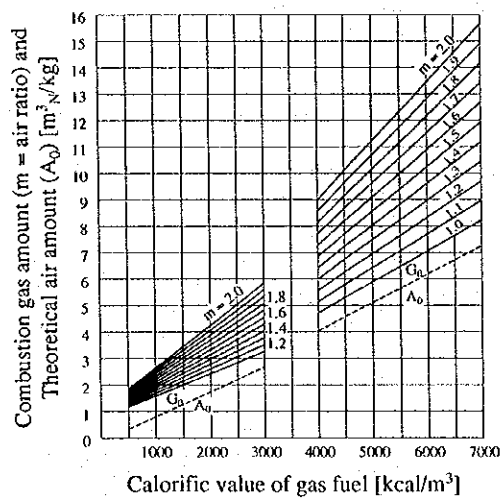


Figure 2.3 Relation between Low Calorific Value of Gas Fuel and Combustion Gas Amount, and Theoretical Air Amount



(2) 熱収支と熱効率

熱収支は燃焼装置に供給される熱量とその使用状況を調べ、入熱と出熱の関係を明らかにし、エネルギー使用の合理化の程度を判断する重要な指針とするために作られる。

熱収支計算は、

- a. 使用燃料の諸性状
- b. 燃料の使用量



- c. 空気温度
- d. 燃焼生成物の組成
- e. 煙道ガスの温度
- f. 被熱物の量および温度
- g. 未燃物の量および組成
- h. 被熱物の化学変化の有無

等をもとにして、以下の計算を行う。

1) 入熱

燃料の保有する熱量  $(Q \times F) + (F \times C_{pf} \times \Delta t)$

空気の顕熱  $V \times C_{pv} \times \Delta t$

被熱物の持ち込む熱量  $M \times C_{pm} \times \Delta t$

化学変化による入熱  $H \times M$

2) 出熱

被熱物の持ち出す熱量  $M \times C_{pm} \times \Delta t$

燃焼排ガスの持ち出す熱量  $(E \times C_{pe} \times \Delta t) + (S \times C_{ps} \times \Delta t) + 600S$   
(高発熱量基準のとき)

不完全燃焼による損失熱

$$(E \times \frac{(\text{CO})}{100} \times 3,050 \times F) + (8,100 \times (\text{ススの量}))$$

燃えがら中の未燃分による損失熱

$$F \times 8,100 \times \frac{an}{1-n}$$

放射、伝導等による損失熱  $\Sigma (hc + hr) (\Delta t) (A)$

hc については後出の「伝熱の基礎計算」を参照のこと。

$$hr = 4.88 \{ (T_o/100)^4 - (T_a/100)^4 \} \times \epsilon / \Delta t$$

または

$$\frac{\lambda (T_i - T_o)}{1} \cdot A$$

燃焼装置は、熱収支を明らかにすることにより、与えられた熱量が目的と

する加熱にどれくらい使用され、どれくらい損失になっているかを知ることができる。与えられた全熱量に対して、どれくらい有効に使用されているかを表すのが熱効率であって、全入熱量を基準とするのが全入熱量基準熱効率であり、燃料発熱量を基準とするのが燃料発熱量基準熱効率である。熱効率は、いかなる項目を有効熱量とするかによって違ってくるので、燃料装置ごとに有効熱量を定義しておく必要がある。

(記号)

F	: 燃料消費量	[kg/h]
Q	: 燃料発熱量	[kcal/kg]
H	: 反応熱	[kcal/kg]
M	: 被熱物量 (入)	[kg/h]
W	: 被熱物量 (出)	[kg/h]
E	: 乾き排ガス量	[m <sup>3</sup> /h]
S	: 排ガス中の水蒸気量	[kg/h]
A	: 放熱面積	[m <sup>2</sup> ]
V	: 空気量	[m <sup>3</sup> /h]
T <sub>i</sub> , T <sub>o</sub> , T <sub>a</sub>	: 炉内温度、炉外壁温度、外気温度	[K]
Δt	: 外気温度との温度差	[°C]
l	: 炉壁の厚さ	[m]
C <sub>p</sub>	: 定圧比熱で、添字 f, v, m, w, e, s はそれぞれ燃料、空気、被熱物 (入)、被熱物 (出)、乾き排ガス、排ガス中の蒸気についての値	
(CO)	: 排ガス中の CO 濃度の Vol%	
hr	: 輻射伝熱係数	[kcal/m <sup>2</sup> h·°C]
hc	: 対流伝熱係数	[kcal/m <sup>2</sup> h·°C]
λ	: 炉壁材の熱伝導率	[kcal/mh·°C]
a	: 燃料 1kg 中の灰量	[kg]
n	: 燃えがら 1kg 中の炭素量	[kg]
ε	: 壁面の放射率	

### (3) 燃焼装置における熱エネルギー使用の合理化

#### a. 空気比の低減

装置の熱収支において燃焼排ガスの持ち出す熱量は、(2)項 で述べたとおり排ガス量による影響が大きく、排ガス量は空気比に直接関係する。排ガスによる熱損失は、Figure 2.4 および Figure 2.5 に示すように、空気比の増加とともに直線的に増加するので、空気比は小さいほど熱損失が少なくなるはずであるが、実際は、1.01 よりも小さくなると不完全燃焼による損失が生ずるので、熱効率の最大値は空気比が 1.02~1.10 の間に存在する (Figure 2.5 参照)。

Figure 2.4 Relation between Air Ratio and Waste Gas Loss

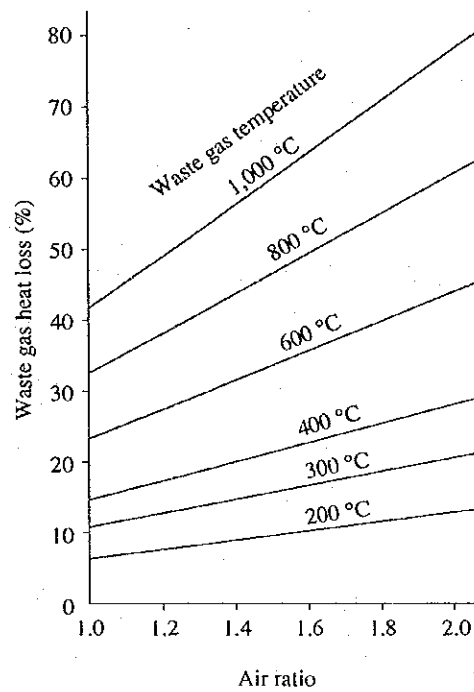
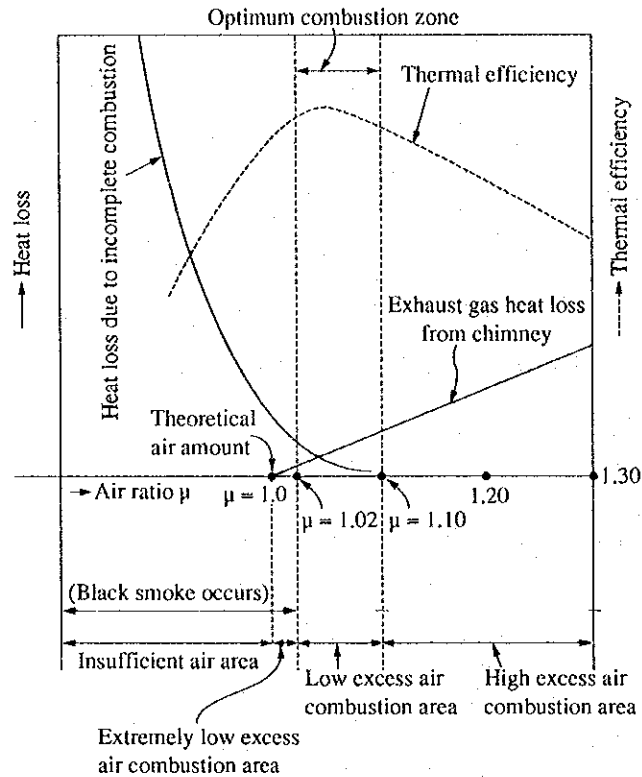


Figure 2.5 Relation between Air Ratio and Thermal Efficiency



しかし、一般の燃焼装置では通常負荷の変動があり、低空気比で燃焼していると燃料量変化の過程で不完全燃焼により黒煙が発生しやすい。そのため、実際の装置では余裕をとって1.2~1.3前後の空気比で運転されている (Table 2.1 参照)。最近では、空気と燃料の流量をそれぞれ直接計測して、負荷変動時においても、必ず所定の空気比が維持されるコンピュータによるクロスリミット方式の自動コントロールが行われ、常時空気比を1.02~1.10に保つことが可能となり大きな省エネルギー効果が上げられている。このような低レベルでの空気比では、負荷の小変動時に部分的に不完全燃焼となることがあり、COメータと組み合わせて制御することもある。

Table 2.1 Standard Air Ratio

Classification	Standard air ratio
Melting furnace for metal casting	1.30
Continuous billet reheating furnace	1.25
Continuous heat treating furnace	1.25
Petroleum heating furnace	1.25
Thermal decomposition furnace and reforming furnace	1.25
Cement kiln	1.3
Lime kiln	1.3
Continuous glass melting furnace	1.3

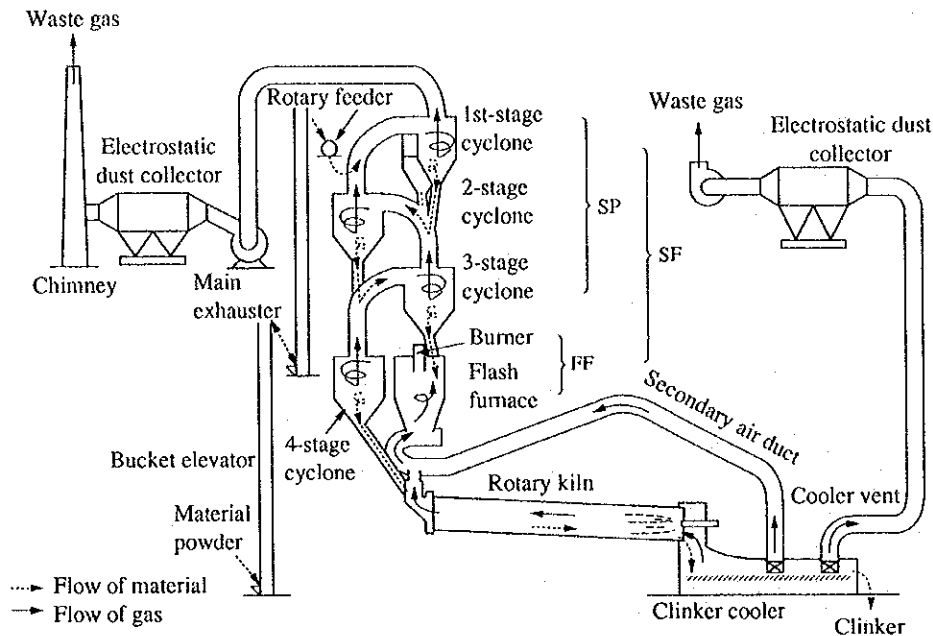
b. 排熱の回収

空気比が 1.2 の場合であっても、炉出口の排ガス温度が 1,000℃であると排ガス損失は 50%近くとなり、燃焼装置の省エネルギーは排ガス保有熱の回収にかかっている。

1) 原材料の予熱

通常、原材料は常温で装入される場合が多いので、材料装入場所に予熱室を設け排ガスを導入して、原材料を加熱する。セメント製造プラントのサスペンションプレヒータ方式はこの方法の好例である (Figure 2.6 参照)。

Figure 2.6 New Suspension Preheater System Cement Plant



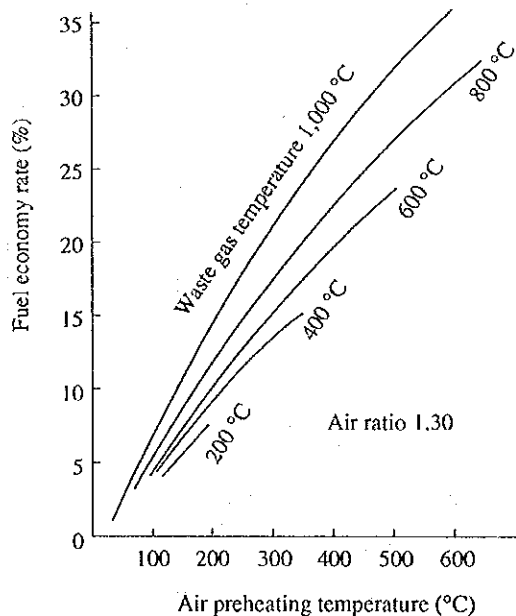
## 2) 燃焼用空気の前熱

熱交換器を用いて燃焼用空気の前熱を上げれば、熱収支計算式より明らかのように、燃料使用量は減少する。1 例として、空気比 1.3 の場合の空気前熱温度と燃料節約率を Figure 2.7 に示す。ここでは、燃料に含まれる硫黄による腐食に注意すべきである。硫黄は排ガスの中で  $\text{SO}_2$  の形となっており、この一部は  $\text{SO}_3$  に転換される。 $\text{SO}_3$  は更に燃焼ガス中の水蒸気と化合して硫酸蒸気となり、これが低温部で露点に達して液化し、熱交換器を腐食する。露点温度は燃料中の S 分濃度の影響を受けるが理論的解明が難しく、経験則的に求められており、重油燃焼の場合は一一般的に  $110\sim 160^\circ\text{C}$  といわれている (後出のボイラの項参照)。

## 3) その他の加熱源としての利用

排ガスの顕熱がほかの装置のための加熱源として、熱量、温度範囲等が適合しており、かつ場所が近接していれば、その利用を考えるべきである。また、工場内でスチームの需要があれば、排熱ボイラを設置して蒸気発生用に排ガス顕熱の利用を考えるのがよい。

Figure 2.7 Fuel Economy due to Air Preheating



c. 被熱物の顕熱利用

燃焼装置から出る被熱物は、そのままでは温度が高く、次工程で引き続いて処理される場合は別として、一般には常温まで冷却されたり、あるいは副反応の防止のため急冷されることが多い。

このような場合には、被熱物の顕熱を回収して有効に利用すべきである。セメント製造プラントにおけるクリンカ冷却空気の燃焼用 1 次空気としての利用や (Figure 2.6 参照)、エチレンプラントにおける分解炉出口ガスの急冷用排熱ボイラ、および Figure 2.8 に示す潤滑油製造プロセス (Gulfinning 法=水素化精製法における加熱炉送り原料油への熱回収) 等が好例である。

Figure 2.8 Lube Oil Manufacturing Process (Gulfinning Process)

