

## 3.2 鉄鋼業における省エネガイドライン

### 3.2.1 まえがき

鉄鋼製品を作る工場には、大きく分けて次の5種類がある。鉄鋼製造工程フローを図3.2.1-1に示す。

- (1) 高炉や COREX 法で鉄鉱石から銑鉄を作り、それを転炉で鋼に製錬し、鋼板・条鋼などの鋼材を作る鉄鋼一貫製鉄所。
- (2) 直接還元製鉄法で DRI (Direct-reduced iron) を作り、電気炉で鋼に製錬し鋼材を作る直接還元製鉄所。
- (3) 高炉や直接還元炉を持たず、銑鉄（型銑）、鉄スクラップ等を電気炉で溶かして鋼を作り、鋼材を生産する電炉工場。
- (4) 銑鉄や鉄スクラップ等をキュポラ・誘導炉（高周波、低周波）・電気炉等で溶解して鑄鉄または鑄鋼を作り、鑄型に鑄造し鑄物を生産する鑄物工場。
- (5) 電気炉等を持たず、上記(1)、(2)、(3)の工場からその中間製品であるスラブ、ブルーム、ピレット等の鋼材を購入し、鋼板・条鋼・鋼管等を作る単圧工場。

一貫製鉄所は鉄鉱石を還元し銑鉄を作る高炉をはじめ、焼結工場・コークスエ場等多くのプロセスから構成されており、全体としてエネルギー利用効率は高いが、設備等の資本負担が大きいので、大消費地の近くか、原料となる鉄鉱石および石炭の輸送コストが安い場所に建設されることが多く、年間生産能力数百万t規模の工場が一般的である。直接還元製鉄所は、製造コストの点から天然ガスの安価な地域に建設されている。

これに対し、電炉工場の特徴は、高級品種の生産には難があるものの設備などの資本負担が比較的小さいこと、製品製造および操業の切り換えが比較的容易で、多品種少量生産に適していることから、その製品の消費地の近くに需要に相当する生産能力をもった工場が建設されるケースが多い。

「イ」国には高炉・転炉方式による鉄鋼一貫製鉄所は無く、還元鉄法による一貫製鉄所と電炉工場および鑄物工場の3種類の工場がある。本章では電炉工場のエネルギー多消費設備の電気炉と鋼片加熱炉を主体に記述し、またエネルギー使用量の多い設備について説明する。

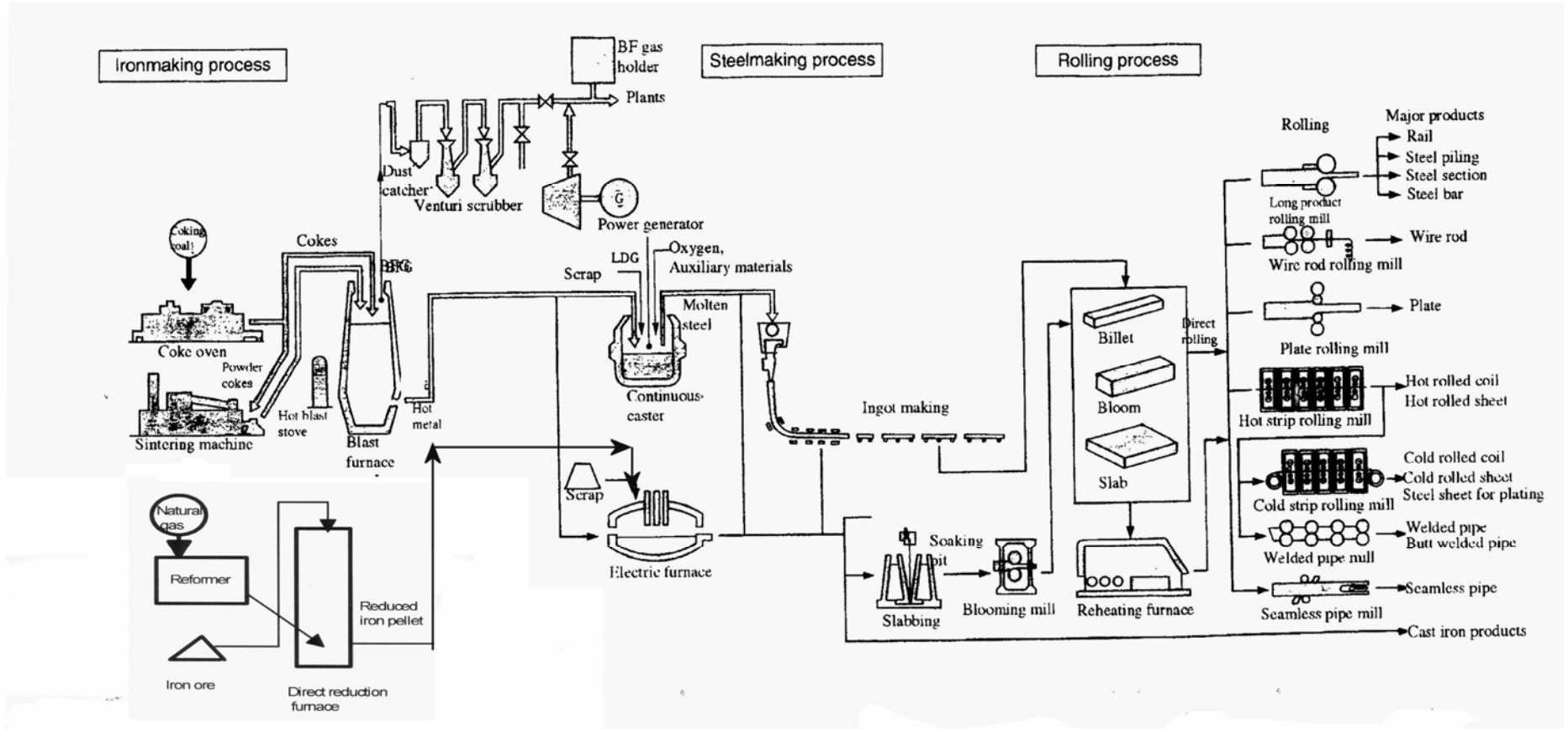


図 3.2.1-1 鉄鋼製造プロセスフロー

### 3.2.2 電炉工場のプロセス概要と省エネテーマ

電炉工場は主としてスクラップを原料として使用し、一貫製鉄所の様に鉄鉱石を還元するプロセスがないため粗鋼 1t 当たりエネルギー原単位が低く、スクラップ価格に大きく影響されるが一般に生産コストも低い。電炉ではスクラップ中に含まれる Cu、Cr、Ni などの不純物を取除くことはできないので、純度の高い高品質鋼を生産するには不向きであるが、鉄鋼製品のリサイクル率の向上に寄与し製品コストが安いので、今後もそのシェアを拡大していくものと予想される。ここでは、電炉工場の特徴ある設備として電気炉および圧延加熱炉をとりあげ説明する。

図 3.2.2-1 に電炉工場における原料および製品の流れを示す。

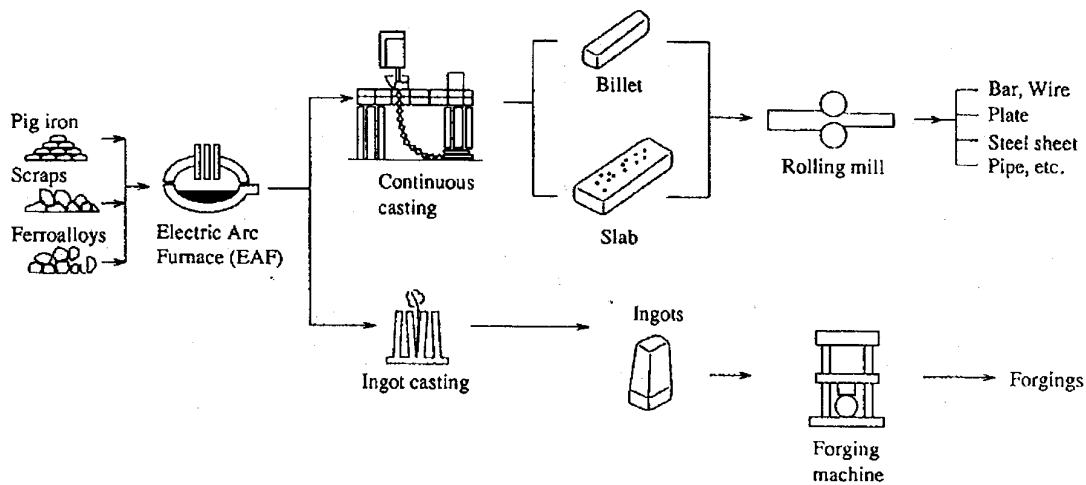


図 3.2.2-1 電気炉製鋼法の原料と製品フロー

## (1) 省エネ対策テーマ

電炉工場における省エネ対策テーマを表 3.2.2-1 に示す。テーマの詳細を p3-79 以降に示す。

表 3.2.2-1 電炉工場における省エネ対策テーマ

No.	区分	省エネ対策	省エネ効果	コスト要因	備考
1	電気炉	トランス容量の増加	大電力投入による溶解時間の短縮	新設時	
2	電気炉	助燃バーナの設置（灯油、重油、天然ガス、コークスおよび酸素）によるスクラップ熔解促進	重油量：5 liter/t ⇒ 電力原単位改善：45 kWh/ton	助燃バーナ設置費	
3	電気炉	酸素吹き込みによる溶解時間短縮	酸素量：10 m <sup>3</sup> N/t ⇒ 55 kWh/ton	酸素発生装置費	
4	電気炉	カーボン吹き込みによる溶解時間短縮	コークス量：10 kg/t ⇒ 50 kWh/ton	カーボン吹き込み装置費用	
5	電気炉	スクラップ予熱装置設置	電力原単位改善：20～40 kWh/ton	スクラップ予熱装置建設費	
6	電気炉	非通電時間短縮（スクラップ装入時間短縮、電極接続時間短縮、出鋼時間短縮、炉体修理時間短縮）	非通電時間短縮による生産量増加	炉蓋旋回装置改善費用、	
7	電気炉	2次精錬設備導入：レードルファーネス（LF）の導入による品質向上、生産量増加	電気炉を溶解専用、LFを精錬専用とし、生産性向上	LF設置費用	
8	電気炉	出鋼温度低下	出鋼温度 10℃低下により、電力原単位 3 kWh/ton 改善	コスト増無し	
9	電気炉	電力投入の計算機制御により投入電力量の最適化を図る	投入電力の最適化	制御装置費用	
10	電気炉	炉体冷却水による損失熱の低減	耐火物寿命延長	炉体水冷ブロック費用	
11	電気炉	Tap-to-Tap 時間の短縮	Tap-to-Tap 時間 30min 短縮 ⇒ 電力原単位改善 50 kWh/ton		
12	加熱炉	燃焼空気比の改善	排ガス温度 500℃で、空気比 1.5 を 1.2 に下げると燃料は 9%低減する。	排ガス酸素濃度計設置費用	
13	加熱炉	排熱回収による燃焼空気予熱	空気比 1.2、予熱空気温度 400℃、排ガス温度 800℃の時、燃料節約率は 30%	空気予熱器設置費用	

No.	区分	省エネ対策	省エネ効果	コスト要因	備考
14	加熱炉	低温抽出	抽出温度低下 10℃で、燃料原単位改善 3 Mcal/ton	コスト増無し	
15	加熱炉	ホットチャージ率の向上	装入温度上昇 100℃で、燃料原単位改善 20 Mcal/ton	保温ボックス、カバー設置費用	
16	加熱炉	セラミックファイバー貼り付けによる炉壁からの熱損失低減	炉壁放散熱量低減 30%	セラミックファイバー設置費用	
17	加熱炉	装入口、点検口など開口部からの熱損失防止	開口部閉止により、燃料原単位改善 5%	コスト増無し	
18	加熱炉	水冷スキッドパイプの断熱強化	スキッドパイプの二重断熱方法により、燃料原単位改善 5%	断熱工事施工費用	
19	加熱炉	蓄熱式バーナー（リジェネティブバーナー）の導入	リジェネティブバーナー採用により、燃料原単位改善は 30～50%	リジェネティブバーナー設置費用、炉体改造費用	
20	加熱炉	歩留まり向上（スケールロス、クロップロス、ミスロールの低減）	歩留まり向上により、加熱炉燃料原単位および圧延機電力原単位が改善する	コスト増無し	

(2) 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。

図 3.2.2-2 に電気炉工程のフロー図および省エネ対策を示す。

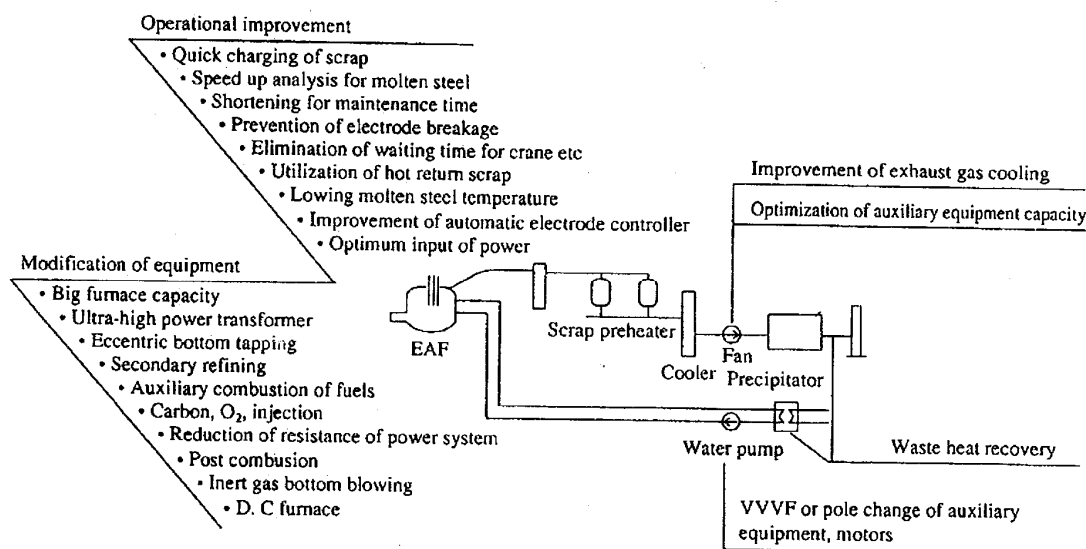


図 3.2.2-2 アーク炉工程フローと省エネ対策

2) 操業改善・設備改善による省エネ

製鋼工程において、めざましい省エネ成果をあげたのは、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き込みおよび酸素吹き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ポンプなどが付帯設備されているが、付帯設備の省エネ技術は他の設備と共通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以下説明を加える。

電気炉は大量の電力を消費する。PLN の電力は発電所で正味熱効率 32.84%で燃料から電力に転換されたと仮定すると電力 1kWh は 10,965 kJ (2,619kcal) と等価と考えられる（1 次エネルギー換算）。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 1kWh = 10,965 kJ (2,619kcal) で評価すると、コスト低

減対策は同時に省エネ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増やし Tap-to-tap 時間を短縮、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。生産性の向上は電気炉の省エネの有力な手段と言える。表 3.2.2-2 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、 $1\text{kWh} \doteq 860\text{kcal} = 3,600\text{kJ}$  (2次エネルギー換算) を使用する。

表 3.2.2-2 電気アーク炉の熱勘定例

			Meal/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 preheated	15	2.5	Other	53	8.8
Other	15	2.5			
<b>Heat input total</b>	<b>602</b>	<b>100</b>	<b>Heat output total</b>	<b>602</b>	<b>100</b>

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 preheated	-		Other	75	11.9
Other	4	0.6			
<b>Heat input total</b>	<b>631</b>	<b>100</b>	<b>Heat output total</b>	<b>631</b>	<b>100</b>

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、酸素吹き込み、粉体吹き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

以下これらの各項目について説明を加える。

## a) 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。表 3.2.2-3 に炉能力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、①UHP 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。

表 3.2.2-3 電気炉能力と電気機器の関係

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

## b) 電力原単位の低減

## a. 助燃バーナ

助燃バーナを設け灯油・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が設けられる。図 3.2.2-3 に助燃バーナの設置例、図 3.2.2-4 に重油バーナによる電力原単位低減効果を示す。助燃バーナの効果は 5 ~ 9 kWh/L-oil である。



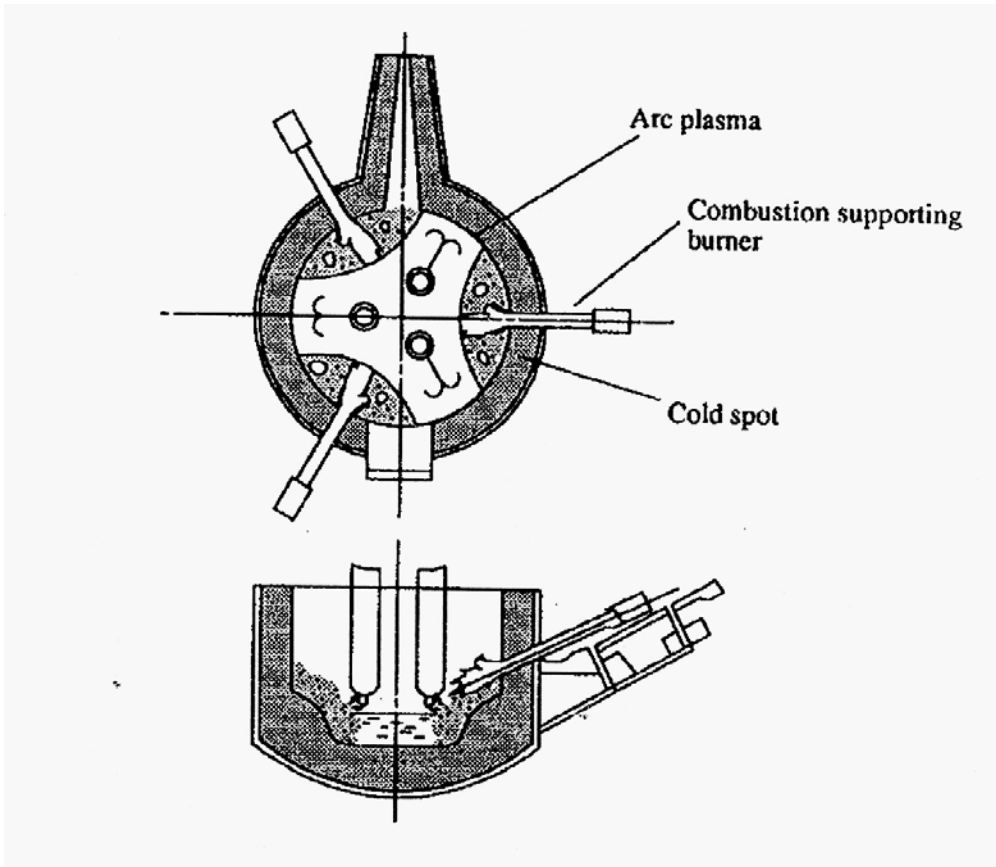


図 3.2.2-3 補助バーナの設置例

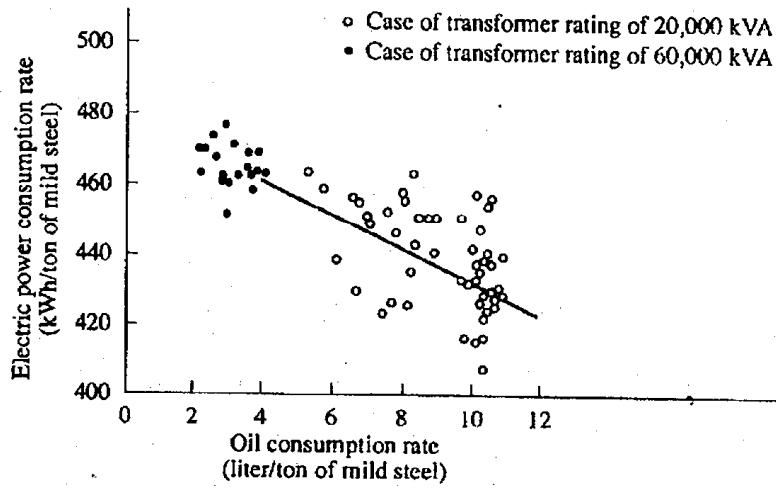


図 3.2.2-4 助燃バーナの効果

## b. 酸素吹き込み操業

酸素吹き込み操業は、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酸素吹き込み、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 1m<sup>3</sup>N/ton 当たり電力 5.5kWh の低減効果があるが、20m<sup>3</sup>N/ton 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。

図 3.2.2-5 に酸素吹き込みの効果を示す。

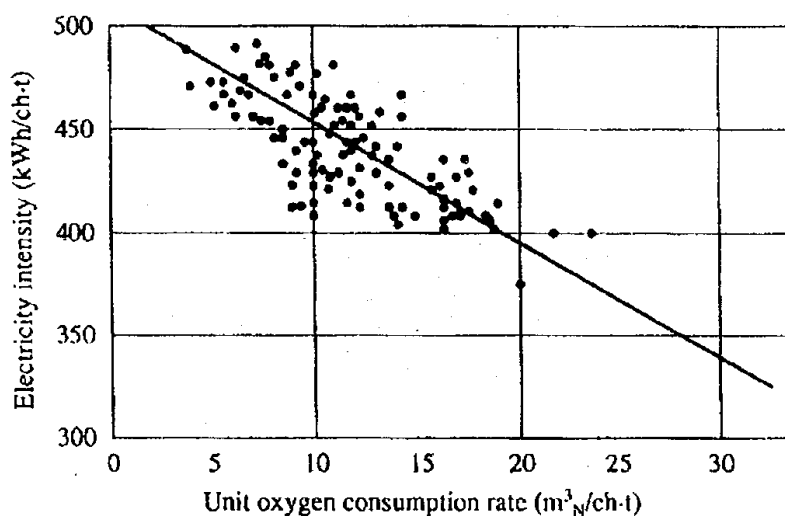


図 3.2.2-5 酸素吹き込みの効果

## c. 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効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るその低減効果は 4~6kWh/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。

d. 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、その概念図を図 3.2.2-6 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。

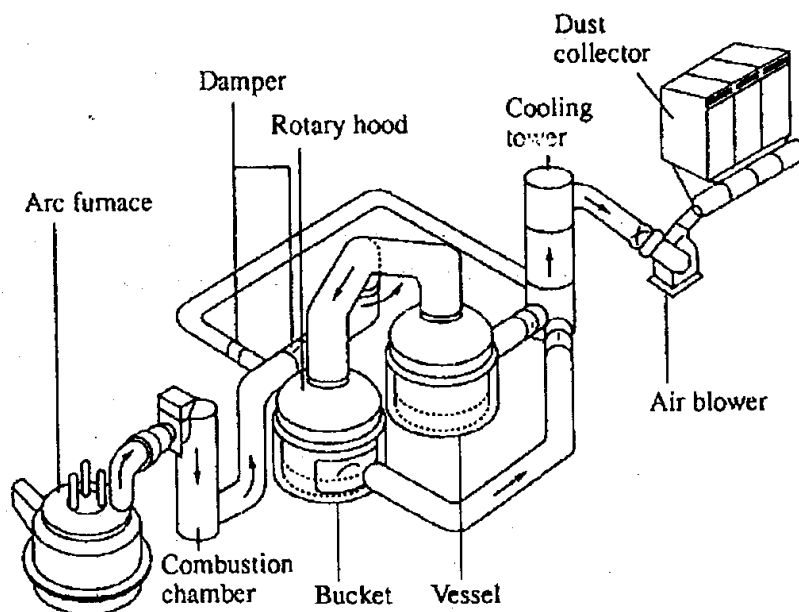


図 3.2.2-6 Conceptual Drawing of Scrap Preheating Equipment

これらの電力原単位低減効果例を表 3.2.2-4 に示す。

表 3.2.2-4 電力省エネに関する代替エネルギーの効果

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

c) 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 例を図 3.2.2-7 に示す。

a. 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

- b. 電極接続時間の短縮
- c. 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
- d. EBT (Eccentric bottom tapping) 炉化、台車受鋼方式による出鋼時間の短縮

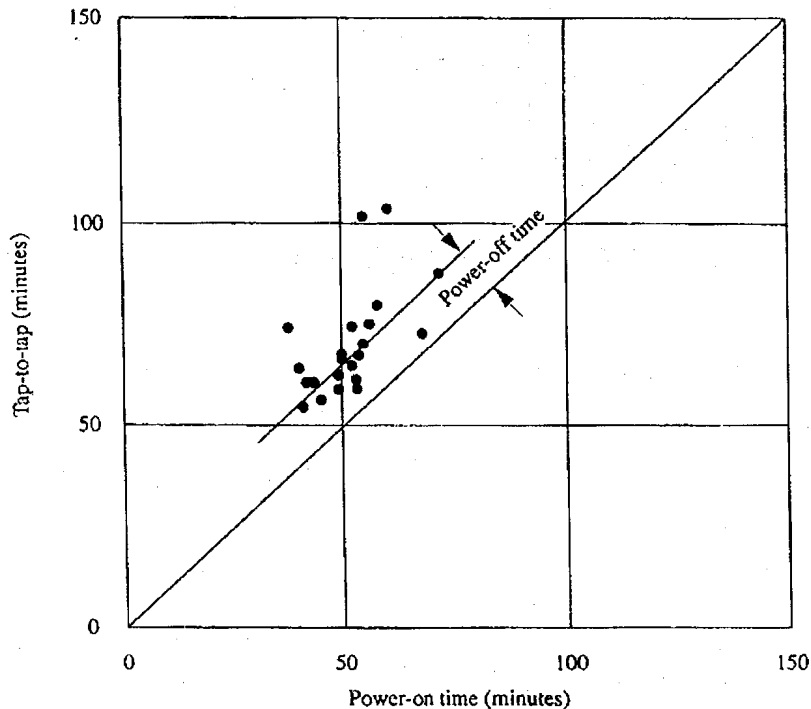


図 3.2.2-7 アーク炉操業における Tap-to-tap 時間と電力停止時間の関係

d) 熱効率の向上

EBT 炉の採用、電力投入の電算機制御、スラグフオーミング技術、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。

e) 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・成分の的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。

f) 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)の高速化を図り、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°C 低減により電力原単位は 3kWh/t 低下することができる。

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 下がるといわれており、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順におくべきである。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の手段としてよく行われている方法である。

g) 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、日本ではほとんどの炉に採用されている。

h) 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は電気炉の大きな省エネ課題である。

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テーマの一つになると思われる。

i) 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表 3.2.2-5 に示すとおりである。

表 3.2.2-5 Tap-to-Tap 時間と電力原単位の関係

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。

(3) 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。

図 3.2.2-8 に 1 次圧延工程のフロー図および省エネ策を示す。

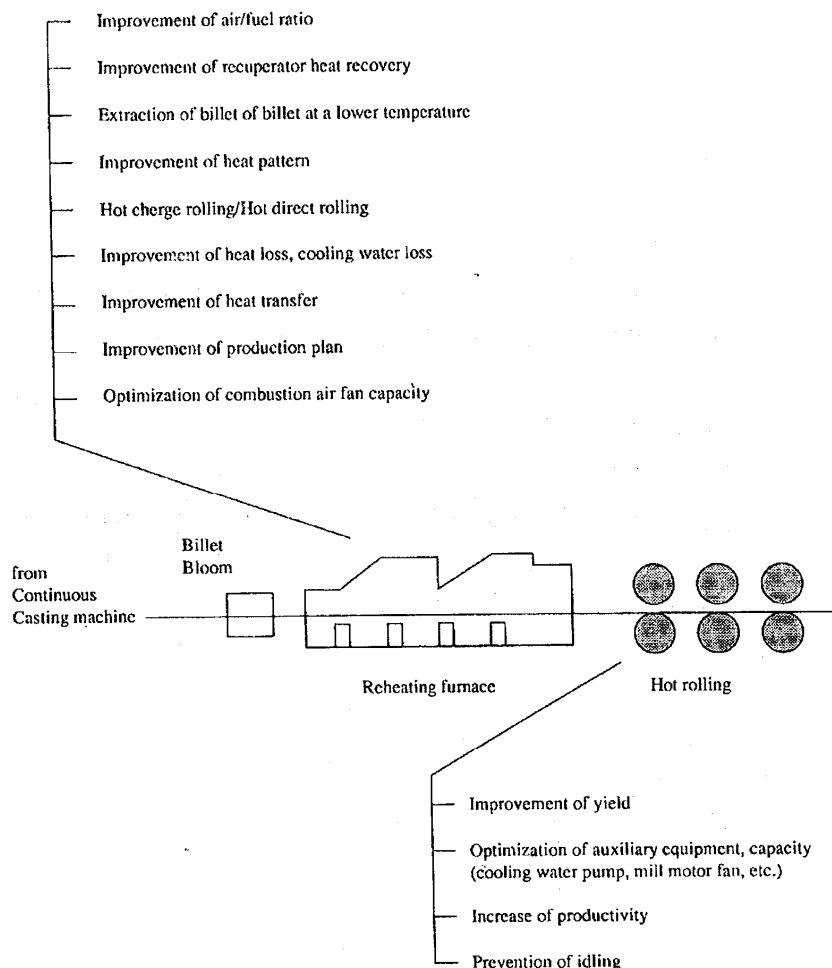


図 3.2.2-8 圧延工程フローと省エネ策

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策について説明する。

## 2) 操業改善・設備改善による省エネ

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。表 3.2.2-6 に加熱炉の熱収支計算例を示す。連続式加熱炉の熱収支の計算方法および様式を p3-93 5) に示す。

表 3.2.2-6 加熱炉の熱収支計算例

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	82.4)	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

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 slab	174.9	(67.9)
Sensible heat of fuel	0.3	(0.1)	Sensible heat of scale	3.1	(1.2)
Heat content of charged slab	73.9	(28.7)	Sensible heat of exhaust gas	30.7	(11.2)
Scale formation heat	13.2	(5.1)	Heat of cooling water	41.9	(16.3)
Sensible heat of atomizcr	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

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操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。

以下に省エネ策について説明する。

a) 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。図 3.2.2-9 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°C 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。

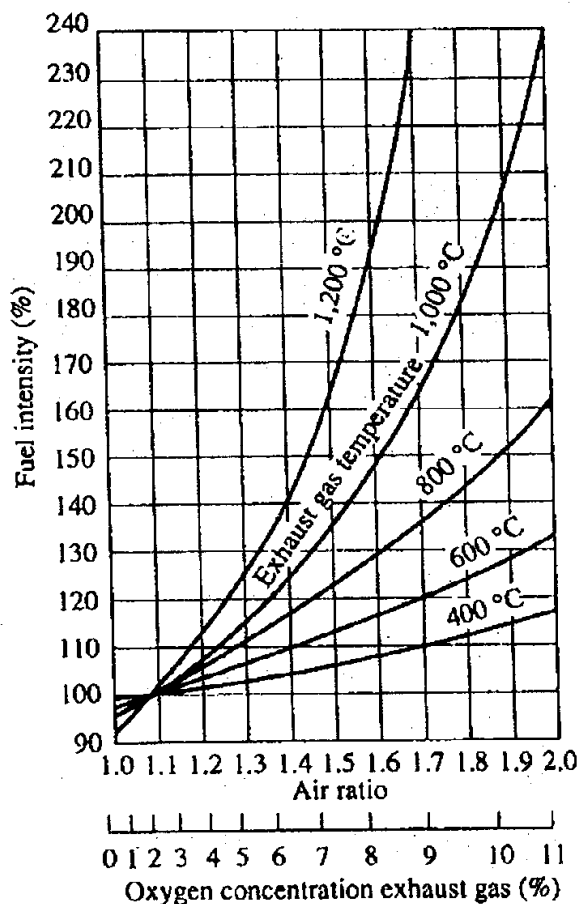


図 3.2.2-9 空気比と燃料原単位の関係

b) 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。



## c) 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るので、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。

## d) 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 300 Mcal/ton ~ 400 Mcal/ton 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 200 Mcal/ton 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 roning=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と加熱炉鋼片装大磯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量は装入温度 100℃当たり約 20Mcal/t である。

## e) 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の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。

## f) 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。

## g) 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。その改善例を図 3.2.2-10 に示す。

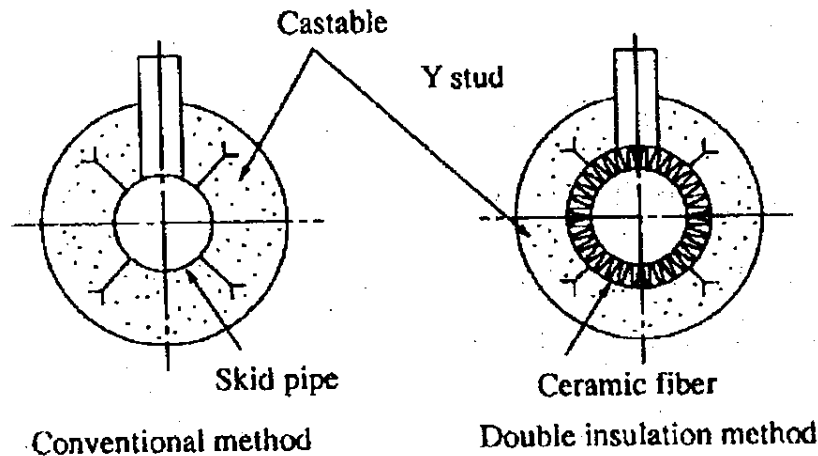


図 3.2.2-10 スキッドパイプの二重断熱方式

#### h) 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）を厚くとる必要があり、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。

#### i) 外部要因による熱損失の防止

加熱炉の空気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、長時間保熱し続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もある。

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）あっているような製品を作っている場合、連続鋳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

#### a) 蓄熱式バーナ(リジェネレティブバーナ)

空気予熱器が古くリプレースが必要であれば蓄熱式バーナの設置を検討する。

リジェネレティブバーナシステムは、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 NO<sub>x</sub> は 150ppm 以下と低い優れた特徴を持っている。そのフロー図を図 3.2.2-11 に予熱空気温度上昇効果を図 3.2.2-12 に示す。

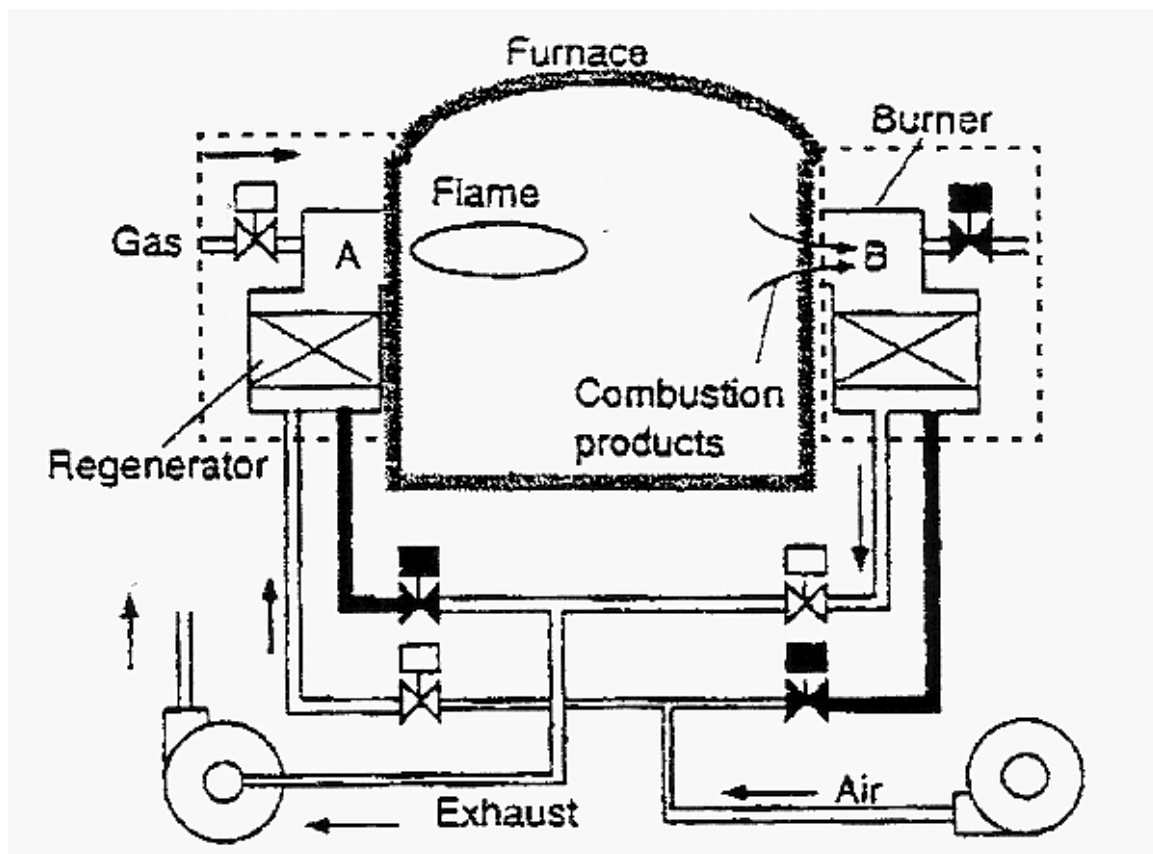


図 3.2.2-11 リジェネレティブバーナ設置の加熱炉概念図

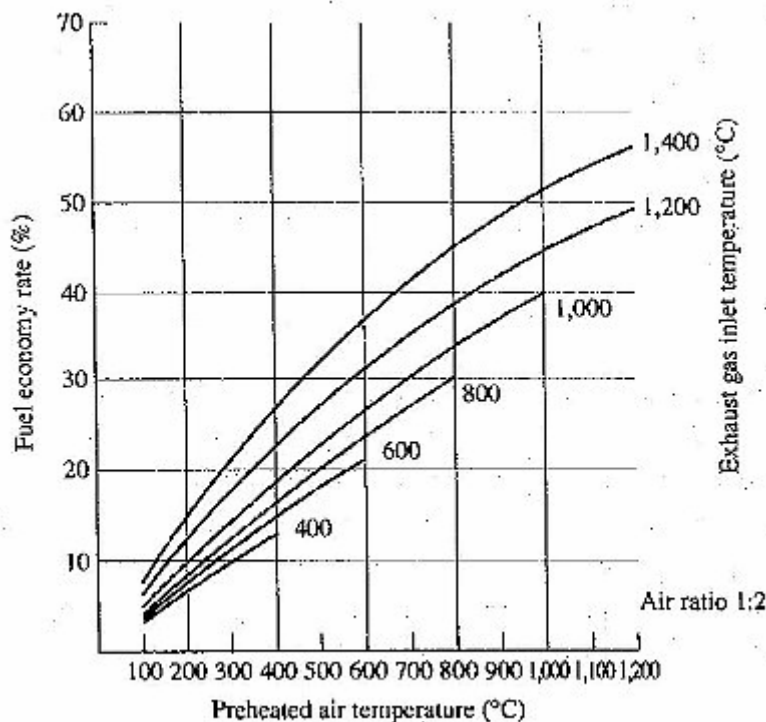


図 3.2.2-12 空気予熱器の効果

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。

蓄熱式バーナを設置すると排ガス温度が 200 ~ 300°C 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。

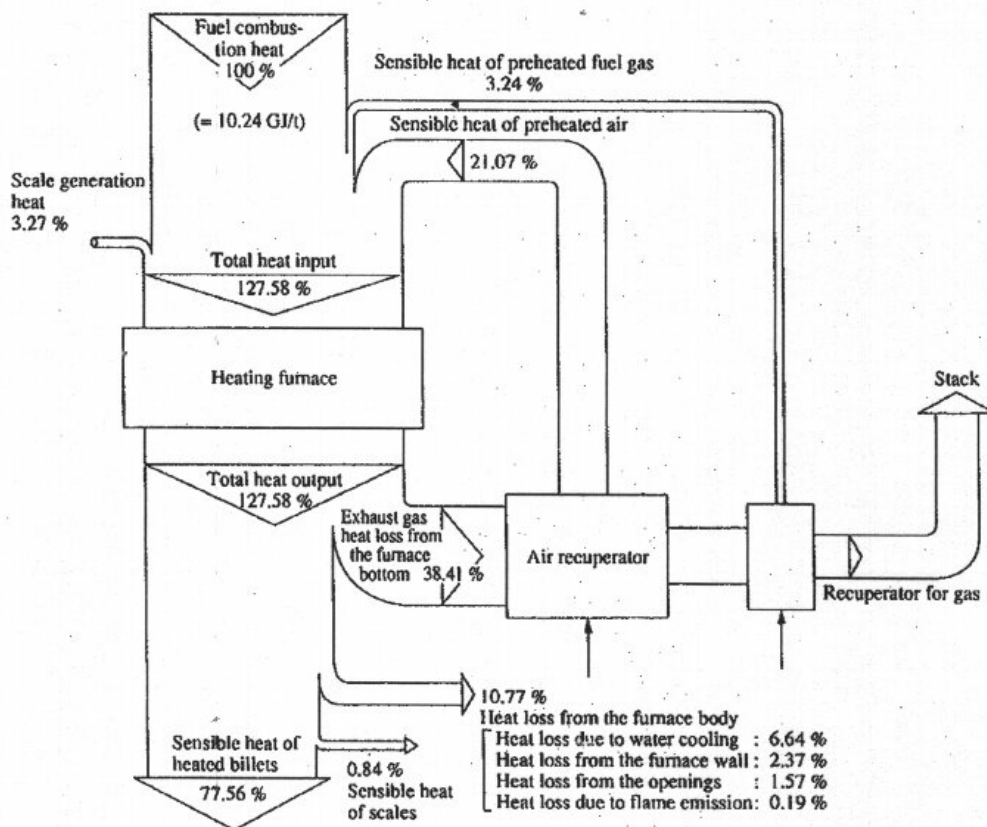
4) 歩留り向上、トラブルの減少

歩留り向上は圧延工程のみならず、工程の省エネにつながる。スケーロス、クランプロス、ミスロールの低減を図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に効果がある。

5) 連続式加熱炉の熱勘定

加熱炉の熱収支計算では、入熱と出熱の明細を求めることにより熱損失を量的に把握し、対策の重要点を明らかにする。熱収支計算の方法は日本では日本工業規格 (JIS) で定められている。

図 3.2.2-13 には最近の省エネ策を施した鋼材連続式加熱炉の熱収支の計算例を示す。



1. Heating capacity: 300 t/h
2. Billet (slab or bloom) to be heated: 250 T × 1,200 W × 12,000 L
3. Effective length of a furnace: 38 m
4. Load on the furnace floor: 700 kg/m<sup>2</sup>·h
5. Heating temperature: 30 °C → 1,200 °C
6. Fuel: Mix gas
7. Excess air ratio: 5 %
8. Preheated air temperature: 620 ° (before the burner)
9. Preheated gas temperature: 250 ° (before the burner)
10. Exhaust gas from the furnace bottom: 800 °C
11. Amount of reduction due to burning: 0.6 %
12. Fuel intensity: 10.24 GJ/t

Source: Handbook for Industrial Furnaces  
(Published by The Energy Conservation Center, Japan)

図 3.2.2-13 ウォーキングビーム式加熱炉の熱収支計算図

日本工業規格 (JIS) には排ガスの損失熱および鋼材の保有熱の他に、次の各熱量の算出式が記載されている。排ガスの損失熱の計算方法については、ボイラの省エネガイドラインに示す。

- 外壁からの放散熱
- 炉床からの放散熱
- 炉開口部放焰ガス損失熱
- 炉開孔部放射損失熱

- a) 炉体および煙道放散熱
  - a. 炉壁および煙道からの放散熱

熱収支実施時間(h)×外壁面積(m<sup>2</sup>)×〔放射による放散熱流束(kJ/m<sup>2</sup>h)+  
対流による放散熱流束[kJ/m<sup>2</sup>h] /鋼材質量(t) [kJ/t-鋼材]

放射による放散熱流束は、

$$q_c (\text{kJ/m}^2\text{h}) = \varepsilon \times 20.428 \times [(T_w/100)^4 - (T_a/100)^4]$$

自然対流による放散熱流束は、

- 壁が水平上向きの時： $q_c (\text{kJ/m}^2\text{h}) = 11.721 \times \Delta T^{1.25}$

- 壁が垂直横向きの時： $q_c (\text{kJ/m}^2\text{h}) = 9.209 \times \Delta T^{1.25}$

- 壁が水平下向きの時： $q_c (\text{kJ/m}^2\text{h}) = 6.279 \times \Delta T^{1.255}$

によって求める。

ここに、

$\varepsilon$  : 炉体表面の放射率

$T_w$  : 外壁温度(K)

$T_a$  : 室温(K)

$\Delta T$  :  $T_w - T_a$  (K)

#### b. 炉床からの放散熱

炉床からの放散熱は炉床構造によって異なるので、構造条件に適合した計算をしなければならぬ。例えば、ウォーキングピーム式加熱炉床からの対流による放散熱量は前述 a.項の壁が水平下向きの際の式によって求めることができる。

また、コンクリートにじか積みされた炉床では

熱収支実施時間(h)× 炉床面積(m<sup>2</sup>) × 炉床を通じて失われる熱量(kJ/m<sup>2</sup>h)/  
鋼材質量(t) [kJ/t-鋼材]

炉床を通じて失われる熱量は、

$$Q = 3.599 \times S \times C \times (T_h - T_a) / D (\text{kJ/m}^2\text{h}) \text{ によって求める。}$$

ここに、

$S$  : 炉床の形状によって定まる係数で、円形 -4.1、正方形 -4.5、長い長方形 -3.8

$C$  : 炉床材料の熱伝導率(W/mK)

$T_h$  : 炉床面温度(K)

$T_a$  : 室温(K)

$D$  : 内壁間炉幅(m)

b) 炉開口部放炎ガス損失熱

熱収支実施時間中の開口時間 (h) × 放炎ガス量 (m<sup>3</sup>N/h) × [放炎ガスの平均比熱 (kJ/m<sup>3</sup>NK) × 放炎ガスの温度 (K) - 基準温度の放炎ガスの平均比熱 (kJ/m<sup>3</sup>K) × 基準温度 (K)] / 鋼材質量 (t) [kJ/t-鋼材]

放炎ガス量は、

$$G = \alpha \times 4,467 \times (273/T_g)^{0.5} \times (\Delta p)^{0.5} \times A \text{ (m}^3\text{N/h) によって求める。}$$

ここに、

$\alpha$  :  流出口の形による係数で摩擦抵抗係数を f とすれば、 $\alpha = 1/(1+f)$

$\Delta p$  :  開口部における炉内圧 (Pa)

$T_g$  :  放炎ガス温度 (K)

$A$  :  開口面積 (m<sup>2</sup>)

c) 熱収支表の様式

JIS による熱終止計算の様式を参考として、表 3.2.2-7 ~ 表 3.2.2-10 に示す。

表 3.2.2-7 設備概要

1	Company and factory names		
2	Address		
3	Name of reheating furnace manufacturer		
4	Reheating furnace No.		
5	Rolling mill	Type	
6		Nominal capacity	t/year
7		Major products	
8	Reheating furnace	Type	
9		Nominal capacity	t/h
10		Effective length of furnace × furnace width	mm × mm
11		Dimensions and material of furnace body brick and heat-insulating materials	
12		Kind of fuel used	
13		Type, capacity and quantity of combustion equipment	
14		Type and capacity of ventilation equipment	
15		Type and heating surface area of air preheater	m <sup>2</sup>
16		Material, dimensions, mass and heating temperature of standard steel products to be used as a basis for nominal capacity	Mm, kg, K

Remark: With regard to the items 10, 11 and 15, a simplified diagram of the vertical and horizontal sections of the furnace (including the dimensions of major parts of the furnace and preheater, the kind of refractory materials and major measurement points) should be attached.

表 3.2.2-8 操業データリスト

1	Operation date	Date				
			Heating	Heating raising	Heat holding	Shutdown
2	Description of operation time	h/month				
		%				
3	Heating ton	t/month				
4	Ton per heating hour	t/h				
5	Average mass of typical steel products (Maximum and minimum range)	kg				
6	Average temperature of hot charged steel	K				
7	Hot steel product ratio	%				
8	Fuel consumption	kL/month or m <sup>3</sup> /month				
9	Lower calorific value of fuel	kJ/kg or kJ/m <sup>3</sup>				
10	Heat intensity per ton of steel product	MJ/t				
11	Work shift status					

- Remark: 1. Definitions of operating time shall be described as follows:  
 Heating time: Time during which a steel product is being extracted; that is, the operating time of a rolling mill.  
 Heat raising: Time required for the furnace to be heated up to the temperature when extraction can be conducted.  
 Holding time: Time during which extracting is stopped due to a failure of equipment other than the furnace, etc.  
 Shutdown time: Time during which no operation is performed (including the time for periodical repairs)
2. Definitions of steel products treated as hot-charge steels should be described.

- Remarks 1. Definitions of operating time shall be described as follows:  
 Heating time: Time during which a steel product is being extracted; that is, the operating time of a rolling mill  
 Heat raising: Time required for the furnace to be heated up to the temperature when extraction can be conducted  
 Holding time: Time during which extracting is stopped one to a failure of equipment other than the furnace, etc.  
 Shutdown time: Time during which no operation is performed (including the time for periodical repairs)
2. Definitions of steel products treated as hot-charge steels should be described.



表 3.2.2-9 測定データリスト

1	Measurement date and time (hours)					
2	Person who made measurements					
3	Weather	Atmospheric pressure	Outside temperature	Ambient temperature	Relative humidity	
		MPa	K	K	%	
4	Fuel	King				
5		Soaking zone upper part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
6		Soaking zone lower part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
7		Heating zone upper part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
8		Heating zone lopper part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
9		Preheating zone upper part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
10		Preheating zone lower part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
11		Before the flowmeter	Pressure	Pa		
12		Before the combustion equipment	Temperature	Pa		
13		Inlet of the preheated	Temperature	K		
14		Outlet of the preheater	Temperature	K		
15		Before the flowmeter	Temperature	K		
16		Before combustion equipment	Temperature	K		
17		Mass or volumetric ratio of each component		kg/kg/ or m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		
18		Lower calorific value		kJ/kg or kJ/m <sup>3</sup>		
19		Atomizer	Kind			
20			Soaking zone upper part	Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t	
21	Soaking zone lower part		Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
22	Heating zone upper part		Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
23	Heating zone lower part		Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
24	Preheating zone upper part		Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
25	Preheating zone lower part		Consumption	kg/t or m <sup>3</sup> /t		
26	Before the flowmeter		Pressure	Pa		
27	Before the combustion equipment		Pressure	Pa		
28	Before the flowmeter		Temperature	K		
29	Before combustion equipment	Temperature	K			
30	Combustion air	Soaking zone upper part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
31		Soaking zone lower part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
32		Heating zone upper part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
33		Heating zone lower part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
34		Preheating zone upper part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
35		Preheating zone lower part	Consumption	m <sup>3</sup> /t		
36		Hot air blow-off amount		m <sup>3</sup> /t		
37		Before the flowmeter	Pressure	Pa		
38		Before the combustion equipment	Pressure	Pa		
39		Inlet of the preheater	Temperature	K		
40		Outlet of the preheater	Temperature	K		
41		Before the flowmeter	Temperature	K		
42		Before combustion equipment	Temperature	K		
43	Oxygen	Consumption	m <sup>3</sup> /t			
44		Temperature	K			
45		Pressure	Pa			
46		Oxygen purity	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
47	Cooling water	Consumption	t/t			
48		Temperature at the inlet	K			
49		Temperature at the outlet	K			
50	Combustion gas	Pressure	MPa			
51		Furnace bottom temperature	K			
52		Temperature at the preheater inlet	K			
53		Temperature at the preheater outlet	K			
54	Steel product	Volumetric ratio of each component	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
55		Average dimensions (Thickness × width × length)	mm × mm × mm			
56		Average mass	kg			
57		Mass meter for charged steel	t			
58		Mass meter for extracted steel	t			
59		Mass meter for steel products in a furnace at the start of measurement	t			
60		Mass meter for steel products in a furnace at the end of measurement	t			
61		Average charge temperature	K			
62	Average extraction temperature	K				
63	Amount of reduction due to burning	kg/t				
64	Average in-furnace time	h				
65	Furnace Internal pressure	Pa				
66	Surface temperature of each part of the furnace body	K				

Remarks: For the measurement method for item No.66, a simple sketch of the furnace body should be attached.

表 3.2.2-10 熱収支計算表

Heat input			Heat output		
Item	MJ/t	%	Item	MJ/t	%
(1) Fuel combustion heat			(8) Heat content of the extracted steel product		
(2) Sensible heat of fuel			(9) Sensible heat of scale		
(3) Sensible heat of combustion air			(10) Sensible heat of exhaust gas		
(4) Sensible heat of atomizer			(11) Heat loss due to incomplete combustion gas		
(5) heat content of a charged steel product			(12) Heat carried away by cooling water		
(6) Heat generated by scale formation					
(7) Heat recovered by the preheated	( )	( )	(13) Other heat output		
			• Heat loss due to radiation from the furnace body and the flue		
			• Heat loss due to gas flame emission from the furnace opening		
			• Heat loss due to emission from the furnace opening		
			• Heat loss from the piping for preheated fluid		
			• Heat loss due to hot air blow-off		
			• Other heat losses		
			(14) Heat recovered by the preheater	( )	( )
<b>Total</b>			<b>Total</b>		
(1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)			(8) + (9) + (10) + (11) + (12) + (13)		

- Remarks
1. For entry of heating values, MJ/t should be used as the unit, and the fractional portion of the number should be rounded off to the first decimal place.
  2. The percentage should be rounded off to the first decimal place.
  3. "Heat recovered by a preheater" means the circulating heat based on the temperature and the flow rate before the combustion equipment.
  4. Other heat losses should be analyzed in as much detail as possible.