

Construction and Operation of New Reheating Furnace in Plate Factory



千貫 昌一
Masakazu Sengan
千葉製鉄所 管理部厚板鋼管管理室 主査(部長補)



竹川 英夫
Hideo Takekawa
千葉製鉄所 熱間圧延部熱延技術室 主査(課長)



竹嶋 力男
Rikio Takeshima
千葉製鉄所 設備技術部機械技術室 主査(掛長)



尾坂 力
Chikara Osaka
千葉製鉄所 設備技術部電気計装技術室



山崎 孝博
Takahiro Yamazaki
千葉製鉄所 設備技術部電気計装技術室



海老原 正則
Masanori Ebihara
千葉製鉄所 エネルギー部エネルギー技術室

1 結 言

千葉製鉄所厚板工場は昭和36年稼動以来20余年を経過し、この間能力増強のほか、種々の設備改造を行ってきた。しかし、近年の需要家ニーズの高度化、多様化や品質、コスト、納期等の競争力向上に対し、従来の設備、システムで対応するのが困難になってきた。

そこで厚板製品の競争力強化を目的として昭和57年から厚板工場のリフレッシュ計画の検討を開始した。新加熱炉の建設はスラブヤードの更新とともにこの計画の一環として行われたもので、昭和60年2月に着工し61年1月に完成した。

本設備は省エネルギー、高級鋼への対応および生産性の向上を狙いとして、従来3基あった加熱炉を新加熱炉1基に集約するとともに種々の新機能や自動化技術を採用した最新鋭のものである。

現在稼動以来1年を経過したが、設備、システムとも順調に稼動しており、当初の狙いどおりの成果をあげている。

要旨

千葉製鉄所厚板工場では昭和61年1月から新加熱炉が稼動を開始した。本設備の特徴は(1)天井耐火物のオールセラミックファイバー化およびスキッドボイラーを導入し省エネルギーを図っていること、(2)端部シャドー装置およびボトムバーナを開発し、スラブの均一加熱性を向上させ高級鋼の製造を可能としていること、および(3)スラブ自動搬送システム、加熱炉計算機制御システムを開発し、操業の自動化を図っていることである。新加熱炉の稼動により、従来の加熱炉に比べ燃料原単位は30%低減され、スキッドマークは半減しており、省エネルギー、品質の向上に寄与している。

Synopsis:

At the plate mill factory in Chiba Works, a new continuous reheating furnace started its operation in January 1986. The new reheating furnace has three features: (1) High energy efficiency with full-ceramic-fiber insulation of the ceiling and skid boiler, (2) Uniform heating of the slab for a high quality plate product with the radiation shadowing apparatus and bottom burner, and (3) automatic operation by introduction of an automatic slab transfer system and furnace computer control system. The new reheating furnace reduces the fuel consumption rate by 30% and the skid mark by 50%.

本稿では新加熱炉について設備の特徴と操業実績を報告する。

2 新加熱炉の基本思想と機能

新加熱炉は厚板工場のリフレッシュ計画の一つとして建設したもので、将来の需要および品種構成を考慮して、多品種少量生産、とくに特殊鋼、高級鋼等の付加価値の高い品種に対応するとともに、徹底したコストダウンを狙いとし、以下の基本思想のもとに建設した。

- (1) 連铸工場との同期化を基本としたホットチャージローリング(HCR)の拡大(量および温度)により、加熱炉の省エネルギーを図る。
- (2) スラブ疵防止と均一加熱に重点をおいた設備とし、高付加価値品の品質向上と品質保証体制を確立する。
- (3) 設備の集約化と自動化を行い、労働生産性の向上を図る。
- (4) 設備の信頼性と保全性を向上し、修繕費を削減する。

また従来設備の有効利用と遊休品の活用による建設費の削減も重要な基本方針の一つとした。

以上の基本方針にもとづく設備のレイアウトをFig. 1に示すが、その特長は以下のとおりである。

- (1) 加熱炉能力はミル能力をベースに連铸能力と铸込みスケジュールを考慮して常温スラブを170t/h、600°Cスラブを240t/hと

* 昭和62年1月21日原稿受付

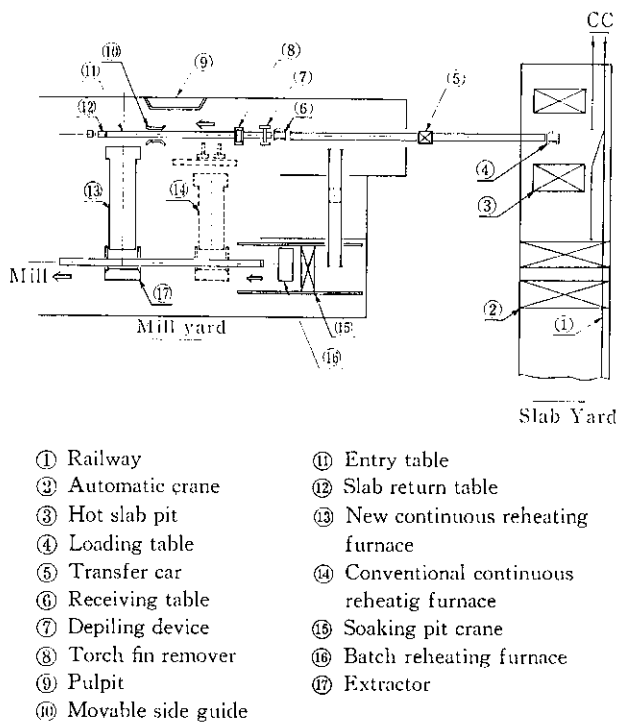


Fig. 1 Layout of the plate mill line, Chiba Works

し、前後設備の能力は加熱炉と一致させる。

- (2) スラブヤードに到着したスラブは直接、加熱炉の直近まで数枚のロットで払い出しのできる設備として、HCRの温度低下を防止する。
- (3) 加熱炉に装入するスラブは、自動的にオンラインでチェックし品質保証が行えるシステムとする。
- (4) スラブヤードから加熱炉出側までの搬送設備は、スラブ疵発生のない設備とする。
- (5) 全体システムは、オンラインコンピュータ (O/C) とプロセスコンピュータ (P/C) で構成し、生産管理、品質管理、操業管理およびプロセス制御を行う。またP/Cの下位には自動運転と炉計装用DDCを配し、スラブヤードから加熱炉までの一連の作業を全自動で行う。

3 加熱炉設備概要

主要設備の仕様をTable 1, 加熱炉の全体図をFig. 2に示す。

本炉は1基操業で、これに付帯する設備としてスラブ受入、装入および抽出設備が設置されている。

本炉は省エネルギー型炉で、かつ厳しい品質要求に対応するため、均一加熱性、広範囲な加熱温度制御、炉内発生疵ゼロ等の高機能、高効率を有している。

以下にその主な特長を示す。

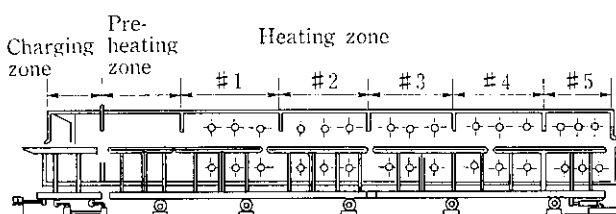


Fig. 2 Cross sectional view of the furnace

Table 1 Specifications of the new equipment

Equipment	Specification
Continuous reheating furnace	
• Slab size	80~320 t × 1 920 W × 1 900~3 860* L (mm)
• Temperature	
Entry	~800°C
Reheating	900~1 300°C
• Type	Two separate walking beam type with 10 zones
• Capacity	170 t/h for cold charge, 240 t/h for hot charge
• Furnace size	8 300 mm W × 45 000 mm L
• Fuel	Mixed gas (COG + BFG) 2 300 kcal/Nm³
• Recuperator	Air & Fuel
• Walking beam drive mechanism	
Lift	Eccentric wheel type
Traverse	Ball screw type
• Other features	Charging beam (Slab charger to furnace) Two-wall door (Charging & extracting side) Skid boiler
Transfer car	
• Type	Moter car with roller table
• Car speed	120 m/min
• Table speed	60 m/min
Depiling device	
• Type	slab tong type (Hydraulic drive)
• Capacity	40 t/chance
Torch fin remover	
• Type	Knife type with pinch roller
• Max. cutting speed	60 m/min
Extractor	
• Type	Moter driving and floor installed fork lift
• Max. capacity	18 t/row × 2-row

* 1-row maximum length: 7 000 mm

3.1 省エネルギー

燃料原単位ミニマムを狙いとして以下のことを実施した。

(1) 断熱強化

Fig. 3に耐火物の構成を示すが、その特長はセラミックファイバーの積極的な採用と断熱レンガを多用したことである。

(a) 天井のオールセラミックファイバー化

大型炉における我国で最初の試みで、天井梁の強度(たわみ)、熱膨脹、シール性、ガスの浸透性等を考慮して、ファイバブロック工法を採用した。またその表面には、より一層の断熱性とブロック間のシール性強化を狙いに、50 mm厚のファイバーベアリングを施工した。なお本工法は工期短縮と施工性の向上を狙いに、プレハブ化を実施した。

(b) スキッドパイプの一重断熱

従来の一重断熱に対して、単純な構造で施工性が良く、かつ信頼性の高い一重断熱を基本に検討を進めてきた結果、結晶質ファイバーを主原料とするファイバーキャストブルを開発した。これにより従来断熱法の約40%を上回る断熱効果が得られただけでなく、施工性および信頼性の大幅な向上が図られた。

(2) 高効率レキュペレータの採用

HCR拡大により、排ガス損失熱が増大するため、空気レキュ

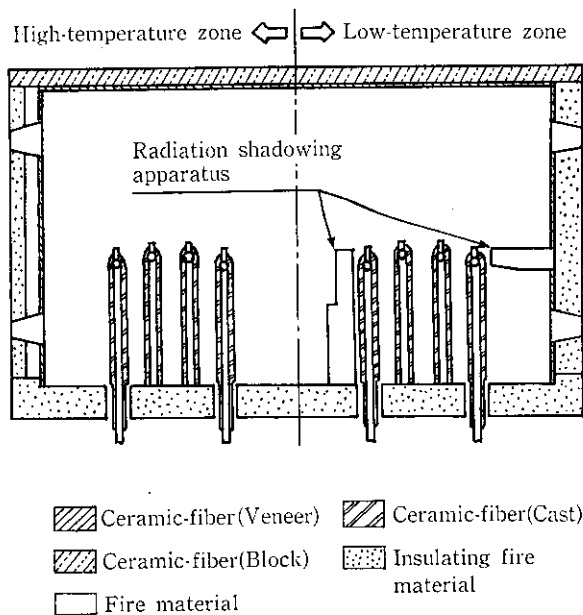


Fig. 3 Refractories for the new reheating furnace

ペレータとガスレキュペレータの併用により、最大限の排熱回収効率を狙った。

(3) スキッドボイラー設置

スキッドパイプと各帯の仕切壁の冷却水損失熱を蒸気として回収する蒸発冷却システムを採用した(蒸気発生量、常用=4.7 t/h)。その他、装入および抽出扉の2重化、炉尻可動式ダンパ等の装置を設置した。

3.2 スラブ均一加熱

3.2.1 炉温分布の均一化

炉形は軸流式加熱炉のバーナ取付部付近での炉温低下を防止し、炉長方向の炉温分布を均一とするために完全箱形とした¹⁾。また鋼種、生産形態に応じた最適加熱を可能とするために炉長方向の燃焼帯を10帯に細分化した。

バーナには、炉幅方向の炉温の均一性および、低負荷時の火災の安定性に優れたモータィブエアー付KSバーナを採用した²⁾。

3.2.2 スキッドマークの低減

厚板用スラブは長さが短いのでスキッドビーム間隔を狭くする必要がある。その結果、ビーム間ではスラブ下面への入熱量が小さく

スキッドマークは大きくなる。そこでスキッドビーム間の低温部を積極的に加熱するボトムバーナを開発した。Fig. 4にボトムバーナの概略図を示す。

また下部からの入熱を均一化するためにスキッドビームの配置と形状、スキッドボタンの形状と高さについて検討を行いスキッドマークの低減を図った。

3.2.3 スラブ端部過加熱の防止

スラブ長手方向の両端部は、端面からも加熱されるので中央部分に比べて温度が高くなる。従来は、均一加熱の要求が厳しく、かつスラブ加熱温度の上限が規制される鋼種では、スラブの過加熱防止のため普通鋼よりも低い炉温で、在炉時間を延長して加熱していた。

本炉では、スラブ端部への入熱を低減して加熱能力の低下を防ぐために、端部シャドー装置を開発し、スラブ長手方向の均一加熱を図った。Fig. 4に端部シャドー装置を示す。

3.3 スラブ裏面疵防止

スラブ裏面疵はウォーキングビーム型炉により大幅に向上するがエントリーテーブル上のスラブを炉に装入する時に発生するすり疵も非常に多く、とくに特殊鋼等では大きな問題となっている。

その点を考慮し、エントリーテーブル上のスラブを直接炉内に取り込む装置として、ウォーキングビームと独立したロングストロークを有する高速ウォーキングビーム型装入機CHB(チャージングビーム)を開発した。Fig. 5にCHBの構造を示す。

この装置により、スラブ裏面疵は皆無となるとともに、装入扉の完全密閉や装入機設置スペースの縮小、HCRの温度低下防止等が図れた。

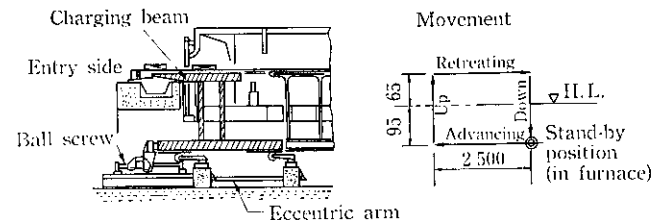


Fig. 5 Charging beam

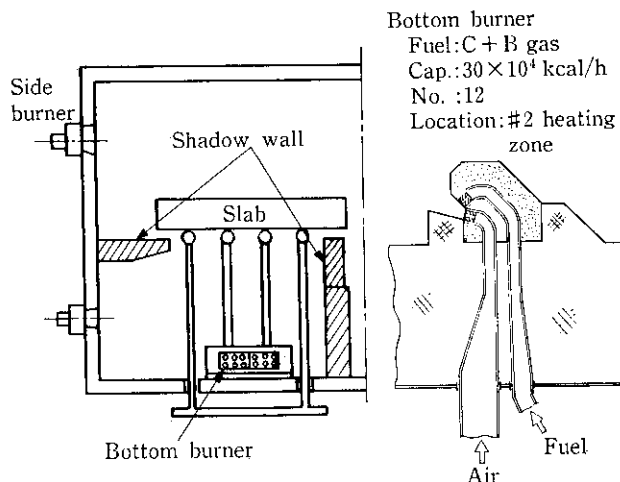


Fig. 4 Radiation shadowing apparatus and bottom burner

4 自動化技術

4.1 全体システム構成

スラブヤードから加熱炉までのスラブ搬送の自動化および、加熱炉計算機制御を行うためにP/CおよびDDCを導入した。Fig. 6に制御システムの構成を示す。

厚板工場計算機システムは、加熱、ミル、開発P/Cの3台より構成し、それらを、光データウェイで接続することにより、開発P/Cによる加熱P/CのバックアップとDRIO(Direct I/O)より取り込むラインセンサー信号の共有化が可能な構成となっている。

炉計装DDCは、各加熱帯の炉温、雰囲気中酸素濃度などを制御している。マンマシンインターフェースには、CRTによる総合監視システムを導入し、運転に必要な全ての情報の表示と、運転操作を可能とした。また、制御ループを8台の分散型プロセスコントロールステーションに分割することにより故障時の危険分散を図っている。

自動運転DDCは、炉前スラブ搬送テーブルおよび炉内ウォーキ

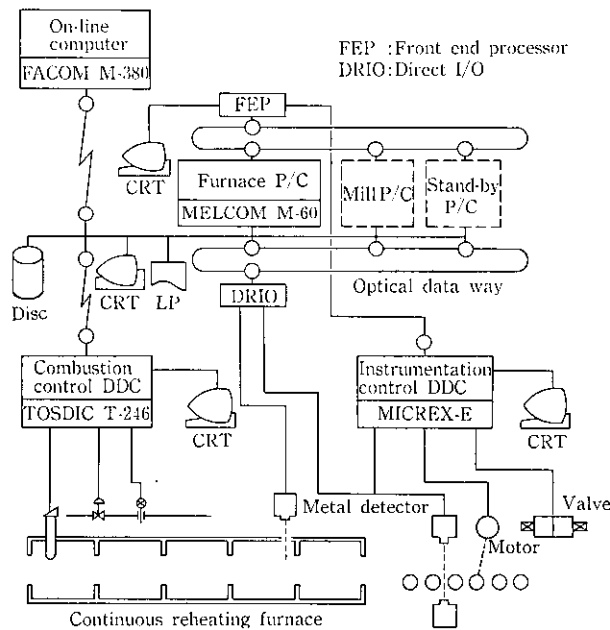


Fig. 6 Configuration of furnace control system

ングビームをP/Cの指令により制御することでスラブ自動搬送を可能としている。

4.2 炉計装システム

炉計装システムは、加熱炉に要求される機能を実現するためにTable 2に示す機能を備えている。

I-PD制御³⁾は、炉の負荷変動に対する炉温の追従性向上を目的として、PID制御に代わるものとして導入した。制御ブロック図をFig. 7に示す。本制御方式は、プロセスの特性を補償するPDループと、目標値変化に対する追従性を向上させるIループを用いることにより、外乱および設定値の変化に対する応答性の向上を図ったものである。

また、燃焼ガスの下部から上部帯への吹き上りを防止するために炉尻天井部に電動上下動式の仕切壁を設置し、上、下部帯の炉温差がなくなるような自動制御を導入した。

4.3 自動運転

本設備は、P/Cの指令による全自動運転とし、オペレータは、基本的に、ローディングテーブルでの自動スタート指示とスラブ照合の確認のみを行えばよい。

自動運転DDCは、上位からの指令で、自動化機器の運転、スラブの位置停止制御、スラブ寸法や重量の測定を行う。とくに炉内搬送設備は1列または2列装入が可能になっている。Fig. 8に示すように、スラブ長に応じた5つのパターンを持っており、各々のパターンに応じて両列のチャージングビームとウォーキングビームはTable 3に示すように制御する。さらに、鋼種の切り替わり時に抽出側ウォーキングビームのみ運転する入側待機運転、スラブ装入遅れ時にスラブ間隔を詰めるため装入側ウォーキングビームのみ運転する前詰運転も自動で行う。

また、自動運転の信頼性を高め保守性を確保するため、センサーの非接触化、故障監視機能の充実、モーターの全交流化を行っている。

(1) センサーの非接触化

近接スイッチ、光電管、バリカムなどを採用し、リミットス

Table 2 Characteristics of DDC combustion control

Requirements	Control target	New technology
Uniform heating	High accuracy temperature control	• I-PD control • Double cross limit control
Low temperature heating	Stability of temperature control	• Automatic ratio regulation • Dual type flow detector
Energy conservation	Heat efficiency improvement	• Combustion gas flow control by damper wall
	Heat loss reduction	• O₂, CO control • Furnace pressure control
	Electric power reduction	VVVF control of combustion blower

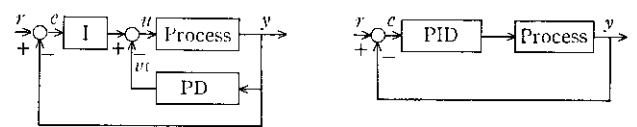


Fig. 7 Block diagrams of I-PD control and PID control

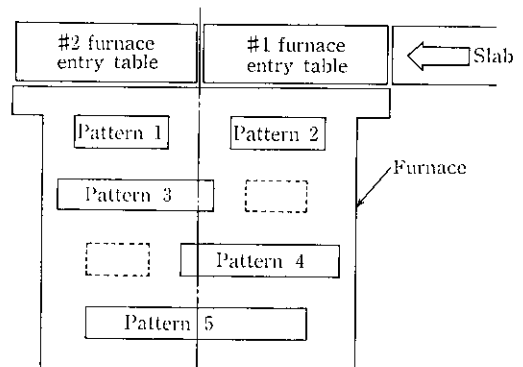


Fig. 8 Positioning patterns

Table 3 Positioning patterns

Pattern	Slab length L	Slab position	Control	
			Charging beam	Walking beam
1, 2	$1\,900 \leq L \leq 3\,860$	Center of CHB	Individual drive	Individual drive
3, 4	$3\,860 < L \leq 4\,070$	Constant distance from the wall	Individual drive	Electrical tied drive
5	$6\,000 \leq L \leq 7\,000$	Center of the furnace	Electrical tied drive	Electrical tied drive

イッチは設備の非常停止点のみに採用した。

(2) 故障監視機能

センサーの動作レベル低下や合理性チェックを行い、自動運転ダウンの事前発見を可能にしている。また、スキッドボイラ、炉内搬送設備および燃焼設備は、専用の監視盤により集中監視を行っている。

(3) モーターの全交流化

モーターは全て交流機とし、制御性能を要求される部分（ウォーキングビーム、チャージングビーム、前後テーブル）は、VVVFとし、その他は、巻線形二次抵抗制御やかご形直入れ方式とした。

5 加熱炉計算機制御

5.1 機能概要

加熱炉計算機制御の機能ブロックダイアグラムを Fig. 9 に示す。連続加熱炉、バッチ炉に装入されたスラブは「抽出順位決定処理」において加熱後の抽出順が決定される。「抽出予定時刻計算」ではスラブ一本ごとの圧延時間と加熱時間を計算し、抽出ピッチを決定する。装入から現時刻までのスラブ昇温実績は簡易昇温でモデル式と差分昇温モデル式を用いて計算する。

炉温設定計算では、上位 O/C より指定された制御目標値（目標加熱温度、均熱度他）、現状スラブ温度計算結果、在炉時間計算結果をもとにして、炉内全スラブの将来の昇温予測計算を行い、全スラブが抽出口において制御目標値を満足する加熱炉各帯炉温設定値を計算する。

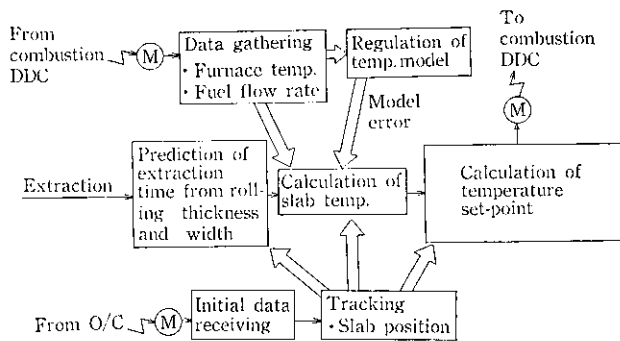


Fig. 9 Block diagram of furnace combustion control

5.2 制御方式

5.2.1 スラブ温度計算モデル

スラブ温度計算モデルは、一次元伝熱モデルを、スラブ厚さ方向の温度分布を二次曲線近似し簡易化したモデル（簡易モデル式）と、二次元伝熱モデルを差分近似したモデル（差分モデル式）⁴⁾の両者を用いている。前者は、スラブ昇温実績計算および炉温設定計算時の温度予測計算に用いる。また後者は、スラブ端部、スキッド接触部の温度計算に用いる。

5.2.2 ヒートパターンの決定⁵⁾

加熱炉のヒートパターンは次の点を考慮して決定している。

- (1) 省エネルギーを目的として、後段高負荷型のスラブ昇温を行う。
- (2) 在炉する全スラブの抽出されるまでのスラブ昇温を予測計算し、全スラブが抽出時に目標温度範囲に入るよう制御する。
- (3) 個々のスラブに対しては、あらかじめヒートパターンを与えずに、抽出目標温度のみを与えて、加熱中にダイナミックにヒートパターンを決定してゆく。

ヒートパターン決定の基本的な考え方を Fig. 10 に示す。あるスラブが炉内に装入されて抽出されるまでの炉温を設定する場合、加熱帯の出口付近にきたスラブが次の帯に移動するまでの間だけ、そ

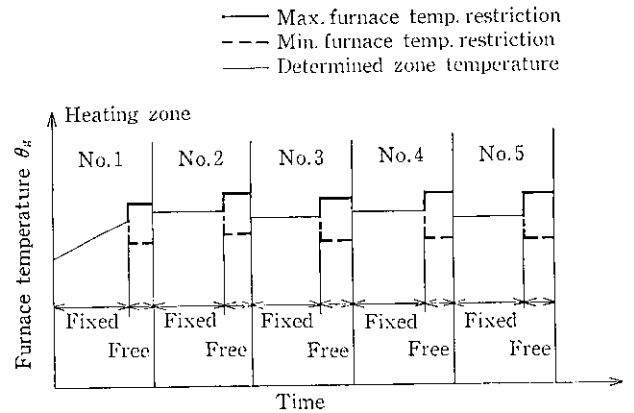


Fig. 10 Heating pattern calculation

のスラブは通過帯の炉温を自由に決定できると考える。対象スラブが各帯の出口付近に来るまでは、先行するスラブがその帯の炉温を支配しており（既決炉温と呼ぶ）、将来各帯出口付近に対象スラブが来た時に炉温を上昇させるか下降させるかを予測計算により決定する。上昇させる場合には、抽出側加熱帯から装入側加熱帯に向って順次炉温上昇させることにより、排ガス温度が低下でき、省エネルギー型の後段高負荷型ヒートパターンを実現している。

6 操業結果

新加熱炉は、昭和 61 年 1 月 25 日に立ち上り、3 月 5 日からは従来の加熱炉 3 基操業から、1 基操業に移行した。以下に新加熱炉の稼動状況を述べる。

6.1 熱バランス

新加熱炉の熱精算結果を Fig. 11 に示す。

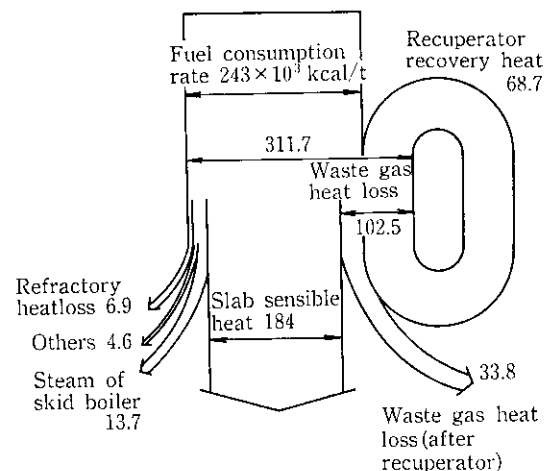


Fig. 11 Heat balance (at 170 t/h; slab charging-temp. 30(°C), Reheating temp. 1150(°C), Slab size 260 t × 1600 W × 2500 Lmm)

新加熱炉に導入した省エネルギー技術の効果により炉効率 η_F は

$$\eta_F = (\text{スラブ顕熱}) / (\text{燃料燃焼熱}) \\ = 75.7 (\%)$$

また、スキッドボイラーからの回収蒸気も考慮した熱利用率 η_T は、

$$\eta_T = [(\text{スラブ顕熱}) + (\text{蒸気顕熱})] / (\text{燃料燃焼熱}) \\ = 81.4 (\%)$$

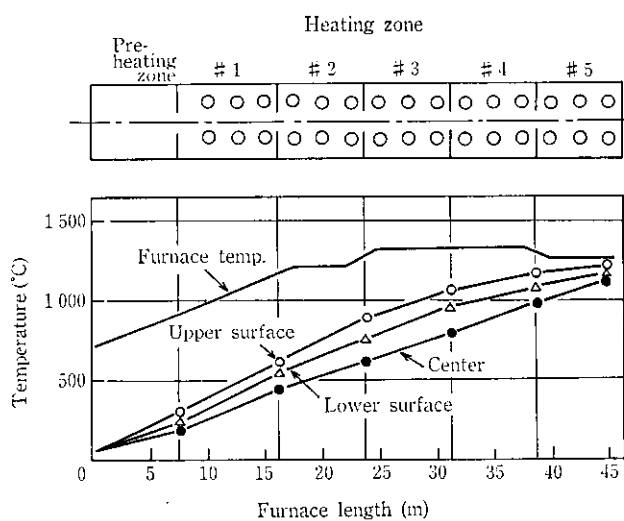


Fig. 12 Heating pattern

となり、高い効率を実現している。

Fig. 12に熱精算時のスラブのヒートパターンを示す。Fig. 12からわかるように、箱形炉形の特徴である炉長方向に均一な炉温分布が得られている。

6.2 スラブ温度分布

6.2.1 スキッドマーク

Fig. 13に、旧加熱炉、新加熱炉のデスケリング後のスラブ長手方向温度分布を示す。新加熱炉のスキッドマーク量は、旧加熱炉に比べ約50%に減少し良好な均一加熱性が得られている。

6.2.2 低温加熱時のスラブ温度分布

スラブ均一加熱性の要求が、最も厳しい低温加熱材の抽出時の温度偏差の実測値をFig. 14に示す(基準点: 固定ビーム上の厚み方向センター)。

(1) スラブ長手方向温度

スラブ長手方向の対応する位置(測温点No. 2と6, No. 3と5)に温度差はなく、炉幅方向(スラブ長手方向)炉温分布が均一で

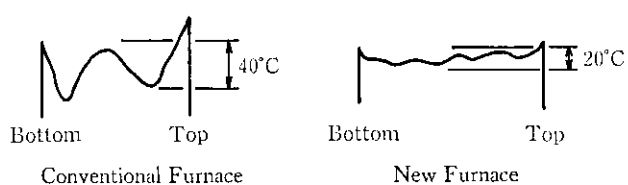


Fig. 13 Skid mark

Slab size: 260t × 1 860W × 3 370L mm
Slab reheating temp.: 950°C
Reheating time: 6h

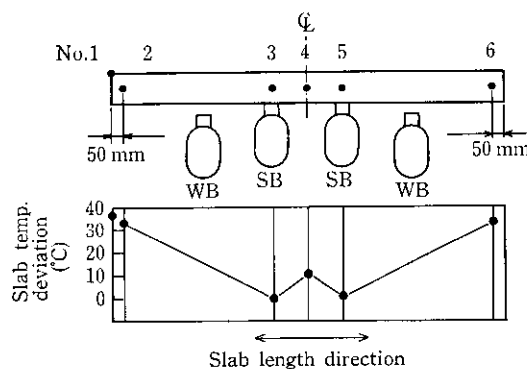


Fig. 14 Slab temperature deviation

あることがわかる。

(2) スラブ内温度偏差

スラブ内の温度偏差(スラブ内の最高、最低温度の差)は36°Cであり(当初の目標: 40°C), 端部シャドー装置, ボトムバーナ, 低シャドースキッドボタンなどの均一加熱技術の有効性が確認できた。その結果, 従来の加熱炉に比べ, 約9%の在炉時間の短縮が可能となった。

6.3 燃焼制御

6.3.1 I-PD制御, 炉尻仕切壁制御

Fig. 15にはPIDおよびI-PD制御を炉温制御に適用した場合の

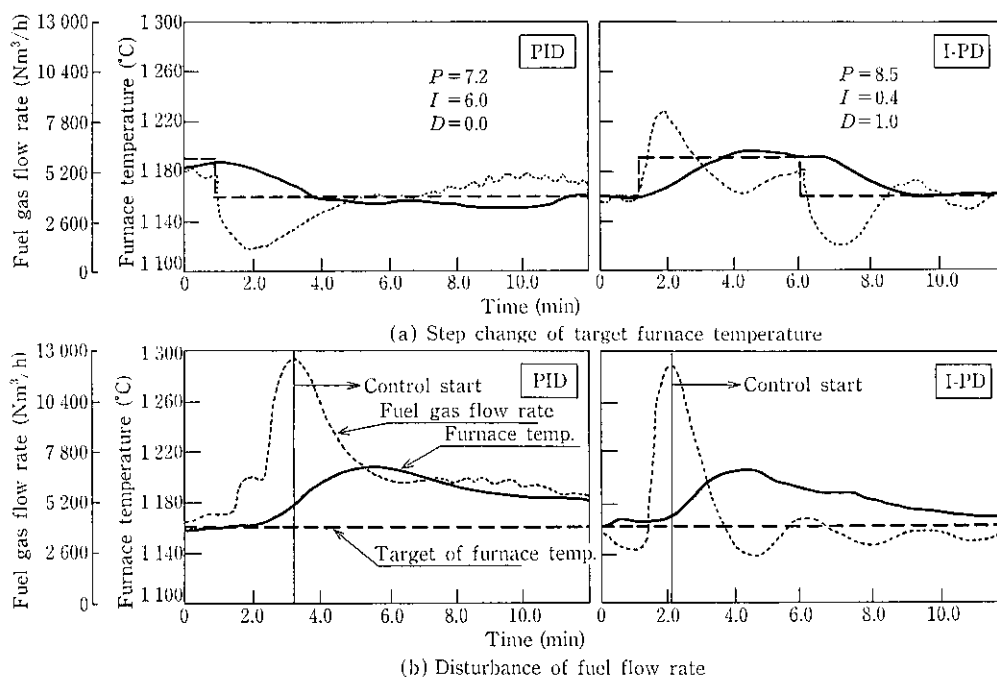


Fig. 15 Comparison of I-PD control with PID, when changed the target temperature and the fuel flow rate

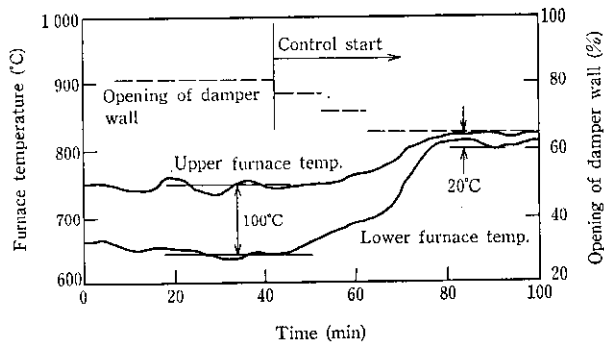


Fig. 16 Effect of damper wall control

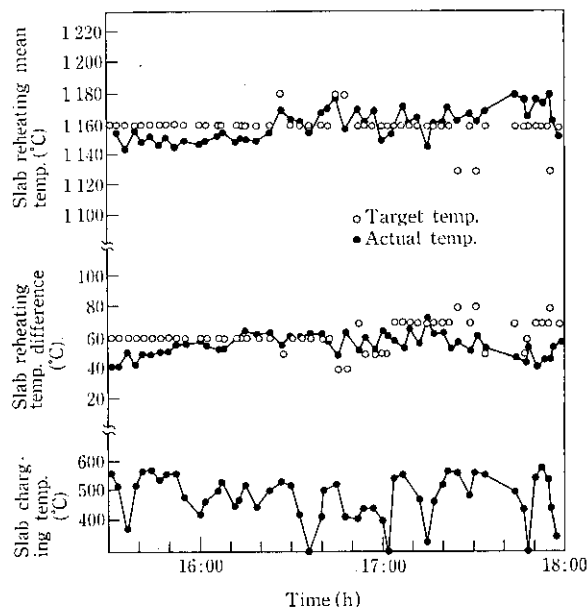


Fig. 17 Accuracy of furnace combustion control

比較を示す。温度設定変更の場合、炉温の応答性は両者間において大きな差はない。一方、炉温制御を一時的に中断することにより外乱を与えた場合の収束速度は、I-PD 制御が速いことが確かめられた。

また、Fig. 16 には炉尻仕切壁の開閉制御を行った時の予熱帯炉温の変化を示す。本制御により、上下部炉温差が減少しスラブ下面伝熱向上に効果があった。

6.3.2 加熱炉計算機制御

目標平均温度、目標均熱度が規制されているスラブに対する制御結果を Fig. 17 に示す。装入時温片温度、抽出ピッチ等の変動に対し、目標温度に対する実績温度偏差は、 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内であり、良好な制御精度が得られている。また目標平均温度の変動に対しても、その温度の最も高いスラブに合わせた制御が行われていることが確かめられた。

6.4 燃料原単位および品質改善効果

新加熱炉 1 基稼動となり、操業も安定し始めると同時に原単位も低減してきた。原単位の推移を Fig. 18 に示す。旧炉 3 基の燃料原単位は約 $334 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ であったが、新炉による炉効率のアップや HCR の拡大により約 $235 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ と 30% 原単位が向上した。また、同図に示すとおり HCR の装入温度は従来の約 400°C から 500°C へとアップし、前述した HCR 向上対策の効果が現われている。一方、品質面では、加熱炉要因の製品疵の発生率は旧加熱炉で

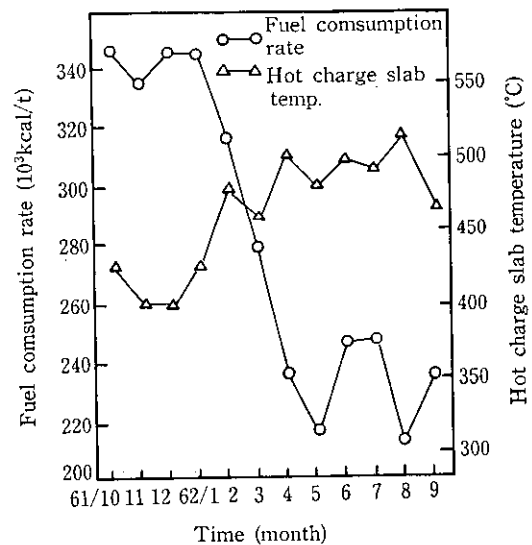


Fig. 18 Fuel consumption rate

3.4% であったものが新加熱炉では絶無となり、さらにスケールロス減少による歩留りも 0.1% 向上している。

また、加熱炉の集約と自動運転化によりバッチ炉を含めた操業要員が、従来の 7 人/班から 3 人/班に効率化されて労働生産性を向上させることができた。

7 結 論

千葉製鉄所厚板工場に新設した連続式新加熱炉は従来の 3 基の炉を 1 基に集約した高効率炉であり、61 年 1 月より操業を開始した。ここでは新設備の機能と操業結果について報告したが、得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 省エネルギーを狙って、セラミックファイバーの大幅な採用による断熱強化、高効率レキュペレーターによる廃熱回収およびスキッドボイラーによる冷却水損失熱の回収を行った。
- (2) スラブの均一加熱を実現するために、箱形炉形にサイドバーナーを配置するとともに、スラブ端部過加熱防止装置、ボトムバーナーの設置やスキッドマーク軽減策を実施した。
- (3) 操業の自動化による省力、省エネルギーを達成するために、オンラインコンピュータとプロセスコンピュータおよび DDC を導入し、搬送の自動化と燃焼の計算機制御を行った。
- (4) 操業結果は燃料原単位で 30% の向上とスキッドマークの半減および加熱炉要因の製品疵零の成果を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 下向央修, 植田憲治, 伊藤康道, 武藤振一郎, 竹嶋力男, 君嶋英彦: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 3, 154-161
- 2) 海老原正則, 武藤振一郎, 豊川 明, 藤田定雄, 伊藤康道, 植田憲治, 青木富士男, 橋 正治: 鉄と鋼, 71 (1985) 12, S1197
- 3) 北森俊行: システムと制御, 27 (1983) 5, 287-294
- 4) 日本鉄鋼協会特別報告書 No. 11: 「連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法」, (1971)
- 5) 植田憲治, 斉川夏樹, 海老原正則, 武藤振一郎: 鉄と鋼, 69 (1983) 12, S1162