

© 1989 ISIJ

技術報告

君津厚板工場における低熱慣性新連続 加熱炉の特徴及び概要

白井 美文*・久富木行治*・檜崎 誠治*
小嶋 宏*²・福岡 弘美*³

Characteristics and Outline of the New Continuous Furnace with Low Thermal Inertia in the Kimitsu Plate Mill

Yoshifumi USUI, Yukiharu KUBUKI, Seiji NARASAKI,
Hiroshi KOJIMA and Hiromi HUKUOKA

Synopsis :

We newly developed and established the high efficiency continuous reheating furnace with low thermal inertia in the Kimitsu plate mill, in order to adopt to the needs for perfect HCR (Hot Charged Rolling), TMCP (Thermo Mechanical Control Process), and energy conservation.

Through the adoption of ceramic fiber as lining material for the furnace body, skids, partition walls and heat cover plates over the hearth opening, this furnace realizes low thermal inertia and reinforcement of thermal insulation, and also makes heating schedule free.

In addition, by adopting high turn down burners, cyclic combustion control and a high precision temperature calculation model, this furnace is superior in relation to slab temperature with the high precision uniformity.

Key words : heating ; plate ; continuous furnace ; ceramic fiber lining ; combustion control ; cyclic combustion ; partition wall ; heat cover plate ; schedule free heating.

1. 緒 言

近年厚板における加熱炉の操業条件は、非常に多様化、厳格化しつつある。すなわち、第一に、省エネ対応としてのHCR進展に伴う熱片・冷片の混在操業、第二に、鋼材の要求特性の厳格化、TMCP化(Thermo Mechanical Control Process)による鋼材加熱条件の多様化及び加熱温度精度の厳格化、第三に、生産量の減少・変動に伴う加熱炉の間欠操業化である。

このような状況の変化に対し、従来炉では操業上対応が非常に困難となりつつあるために、新日本製鉄(株)においては、八幡¹⁾、名古屋²⁾の厚板工場に新鋭加熱炉を設置するとともに、昭和58年より次世代を目指した画期的な新機能加熱炉の開発に着手し、昭和61年7月、高効率低熱慣性の新連続加熱炉を君津厚板工場に設置した。

本報では、君津厚板工場の新連続加熱炉の特徴及び概

要を紹介するとともに、今回の最も大きな開発技術である、セラミックファイバー(C/F)ライニングによる低熱慣性化技術と高精度燃焼制御技術について報告する。

2. 新加熱炉の特徴及び概要

本加熱炉は、以下に述べる特徴を有する³⁾。

(1)低加熱原単位を極限まで追求した加熱炉である。

天井、側壁のライニングにC/Fを使用して、炉体の断熱強化を図るとともに、低熱容量化により間欠操業時・炉温変更時の炉体蓄熱によるエネルギーロスの減少を図っている。水冷損失減少策としては、スキッドサポートのC/Fライニングによる断熱強化、燃焼ゾーン仕切壁の完全非水冷化を実施している。ウォーキングビームの炉床開口部には、非水冷型の遮熱板を設置し放射損失の低減を図っている。また、排ガス熱損失低減には、煙道のC/Fライニングによる断熱強化とともに高効率レキュペレーターの採用により排ガス熱の回収効率の大幅

昭和63年4月6日受付 (Received Apr. 6, 1988)

* 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

*² 新日本製鉄(株)庄延プラントエンジニアリング第1部 (Rolling Plant Engineering Division I, Nippon Steel Corp.)

*³ 黒崎窯業(株)技術本部 (Technical Department, Kurosaki Refractories Co., Ltd.)

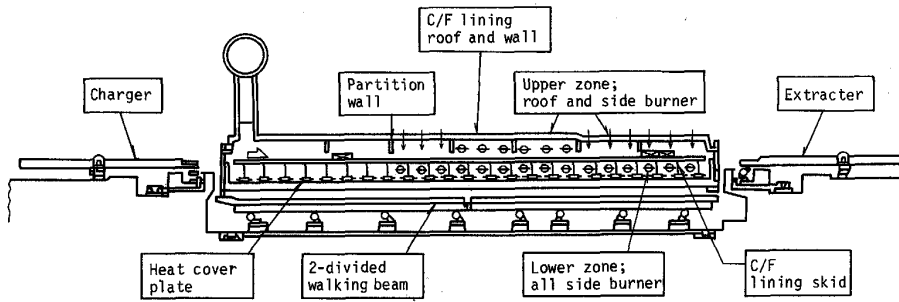


Fig. 1. Schematic cross section of new furnace.

Table 1. Main specifications.

Item	Specifications
Start of operation	July 1, 1986
Manufacturer	NSC, Plant & Machinery Division
Type	Walking beam 10-zone type
Capacity	230 t/h
Dimensions	Effective length : 47 200 mm Effective width : 11 500 mm
Slab size	Thickness : 80~400 mm Width : 800~2 500 mm Length : 2 200~10 900 mm
Fuel	COG
Characteristics	All ceramic fiber lining

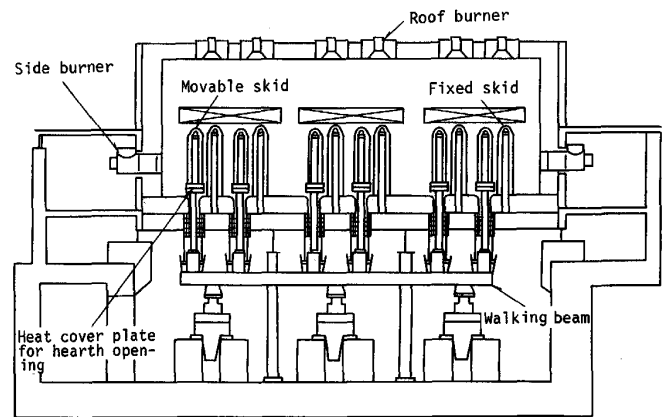


Fig. 2. Schematic cross section in the transverse direction.

向上を図っている。

(2) HCR の完全適用への対応に優れた加熱炉である。

C/F ライニングの採用による低熱慣性化により、設定炉温変更時間の大幅短縮を図っている。

また、ロングストロークのチャージャー、エキストラクターの採用とウォーキングビームの炉長方向分割によるスラブの装入・抽出位置の制御、炉内スラブの前後独立搬送制御とともに、燃焼ゾーンの炉長方向多分割化により、スラブ加熱条件ごとに最適なスラブ加熱パターン制御ができ、スケジュールフリー加熱が可能となった。

スラブ装入は一列から三列まで可変列装入が可能であり、広範囲なスラブ長さに対応可能な構造となっている。

(3) TMCP 化への対応性に優れた加熱炉である。

燃焼制御ゾーンの細分化と仕切壁設置により、各ゾーンごとに非干渉独立炉温制御、燃料流量制御が可能である。また、ルーフバーナーとサイドバーナーを使用したノーズ部のない完全箱型炉型を採用したことにより、多様な加熱条件に対し炉長方向に最適なヒートパターン制御が可能である。

さらに、高ターンダウン (T/D) バーナーの採用とサイクリック燃焼制御により広範囲な燃焼負荷に対し、炉幅方向に均一な炉温分布の確保が可能であり、スラブの均一加熱性に優れた加熱炉である。

(4) 徹底した省力化、自動化を考慮した加熱炉である。スラブの装入から抽出、ミルへの搬送まで、スラブのトラッキングおよび搬送制御、燃焼制御はすべてホストコンピューター (H/C) からの作業情報に従い、プロセスコンピューター (P/C) が実行するようになっており、徹底した自動化、省力化が図られたシステムとなっている。

本加熱炉の主仕様を Table 1 に示す。Fig. 1 及び Fig. 2 は新加熱炉の炉長方向断面図および炉幅方向断面図を示す。

3. セラミックファイバー利用技術

3.1 セラミックファイバーの基本特性

以前より、C/F の低熱伝導率から、ベニアリング等による炉体断熱強化が図られてきたが、本炉は C/F の低熱容量性にも注目し、その特性を最大限に発揮させるために、炉壁構造として、オール C/F により炉の極限までの低熱慣性化を図っている。

C/F の耐熱性の指標としては、熱間収縮率が用いられる。Fig. 3 に結晶質及びガラス質 C/F の加熱温度、時間と収縮挙動の関係を示す。C/F は、一般に初期収縮が生じる。#1400 C/F はガラス質であり、高温雰囲気

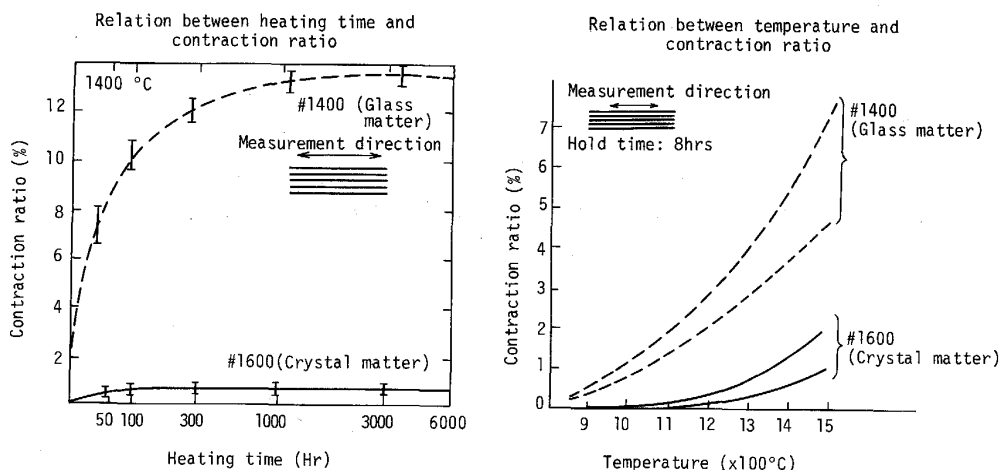


Fig. 3. Contractive characteristic of C/F.

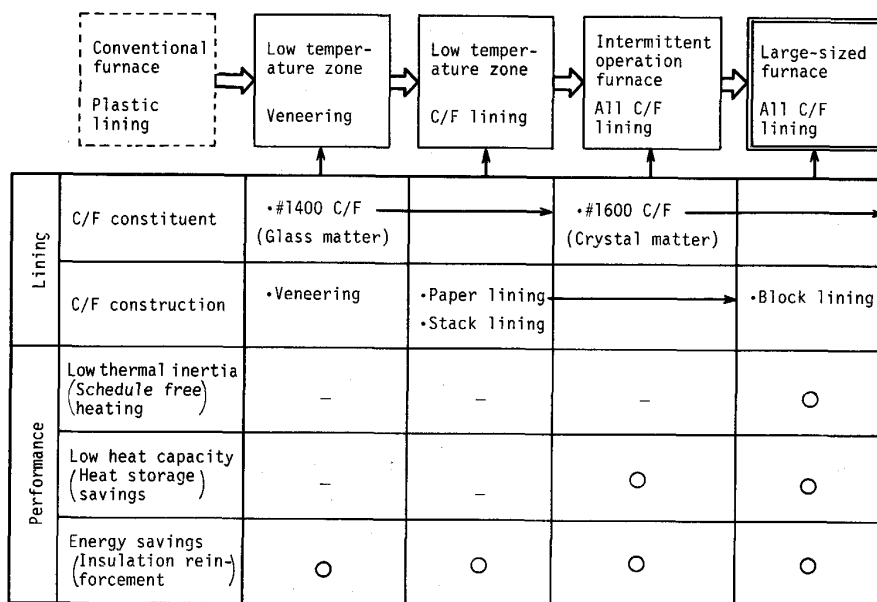


Fig. 4. Development of C/F lining technology.

気下では結晶化及び部分的溶融に伴う大幅な高温収縮が起こるが、今回採用した#1600結晶質C/Fは、高温雰囲気下でも繊維の構造的変化がほとんど起こらず、1500°C程度まで収縮が小さく耐用温度は高い。しかしながら、結晶質C/Fにおいても収縮挙動はC/Fの繊維の方向によって異なり、C/Fブランケット長手方向より厚み方向の収縮率が大きい特性を持つ。このことがC/Fの実機化にあたっての一つの課題である。

3.2 C/Fライニング技術

3.2.1 C/Fライニング技術の進歩

加熱炉のC/Fライニング技術は以下に述べるような進展をたどってきた。

まず、加熱炉の低温域において、ベニアリング及びC/F化が実施され断熱強化による省エネルギーが図ら

れた。次いで、高温用C/F(結晶質C/F)の出現により、小型の間欠操業加熱炉の休止ロス減少のためにC/F化による炉の低熱容量化が図られた。そして今回、ライニング技術の進歩とあいまって大型加熱炉のオールC/F化が実現された。Fig. 4はC/Fライニング技術の進展状況を示す。

3.2.2 C/Fライニング損傷機構と実機化技術

(1) 損傷機構

C/Fライニングにおいて、背面を金物で支持する構造での損傷機構をFig. 5に示す。損傷は、①C/Fの収縮が生じ、②C/Fブロック間の目地が開き、③熱風の侵入(裏風廻り)が起こり、④C/Fブロックの取付け金物の温度上昇による強度低下により、⑤取付け金物破損によるブロックの脱落、という経過をたどると考え

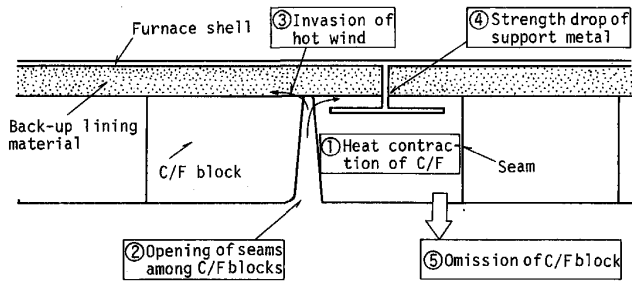


Fig. 5. Damage mechanism of ceramic fiber lining.

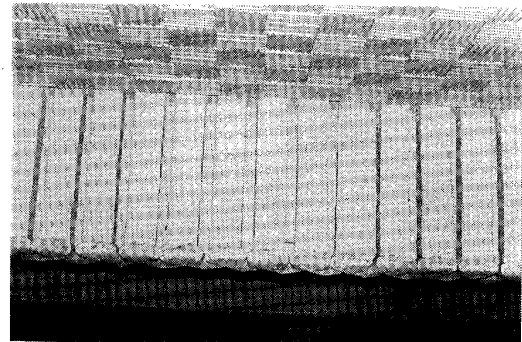


Photo. 1. Dry type partition wall.

		Paper lining	Stack lining	Block lining
Construction				
Characteristics	Checked arrangement	×	×	○
	Contraction crack	×	×	○
	Support position	×	△	○

Fig. 6. Comparison and estimate of C/F lining methods.

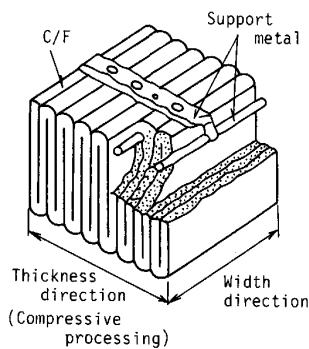


Fig. 7. Structure of Z-blok.

製 Z-BLOK) による施工法を採用した。

この Z-BLOK は、収縮の大きな厚み方向には、ブロック成形時に 33% の圧縮を加えており、C/F ブロック単体としても収縮による目地開きの少ない構造となっている。ブロック間の目地開きを防ぐためには、ブロックを市松模様の配置として、圧縮しない幅方向の高温収縮を厚み方向の圧縮成型復元力で補っている。Fig. 7 に Z-BLOK の構成図を示す。

実機への C/F ブロックの適用は、天井、側壁、各ゾーンごとの温度並びに使用条件を考慮して、加熱炉部位別に、結晶質 C/F、ガラス質 C/F 及び結晶質/ガラス質合成 C/F ブロックを使い分け、低コスト化を図っている。

3.3 非水冷低圧損仕切壁

本炉では、加熱ゾーンを分割するための炉幅方向仕切壁として、C/F とセラミックスチューブ (C/T) の複合構造による非水冷低圧損仕切壁を開発し採用している。

従来の仕切壁は、水冷型であり冷却水損失が大きく、炉内圧損も大きいために炉圧制御上、仕切壁の数及び寸法が制約されていた。

本炉の仕切壁は、Photo. 1 に示すように、C/F を C/T で串刺しにしたユニットを天井より 2 列に千鳥で垂設している。このため、輻射熱は隣のゾーンに対し完全に遮蔽可能であり、また排ガスはユニット間の隙間を通過できるので圧損を非常に小さく抑えることができる。

3.4 炉床開口部遮熱板

ウォーキングビーム炉の炉床開口部からの放射熱低減は、省エネに大きな効果があり、以前よりさまざまな遮熱板が考案され設置されてきたが、従来の技術は、遮熱板の骨材として金属を使用しており、高温酸化、クリープ等の問題より長期寿命に耐えうるものがなく本格的な

られる。

(2) 実機化技術

損傷機構のうち、高温下での耐熱性 (収縮性) が最も重要であり、実機化にあたっては C/F の材質、目地開きを防止する施工方法の検討を第一に留意した。

材質的には、高温での耐熱収縮性に最も優れた結晶質 C/F の使用をベースとして考えた。

ライニング方式としては、ペーパーライニング、スタックライニング、ブロックライニングについて目地開き、C/F の収縮き裂、支持金物寿命等を比較評価し (Fig. 6 参照)、結晶質 C/F を使用したブロック (新日鉄化学

Table 2. Heat balance.

Input	COG combustion heat	COG sensible heat	Air recovery heat	Slab sensible heat	Scale productive heat	Total
heat	138.4 (51.7%)	0.3 (0.1%)	24.6 (9.2%)	97.8 (36.5%)	6.7 (2.5%)	267.8 (100.0%)
Output	Slab sensible heat	Combustion gas sensible heat	Water-cooled heat loss	Another heat loss	—	Total
heat	184.3 (68.8%)	48.2 (18.0%)	22.3 (8.3%)	13.0 (4.9%)	—	267.8 (100.0%)

Unit : 10³ kcal/t



Photo. 2. Heat cover plate for heath opening.

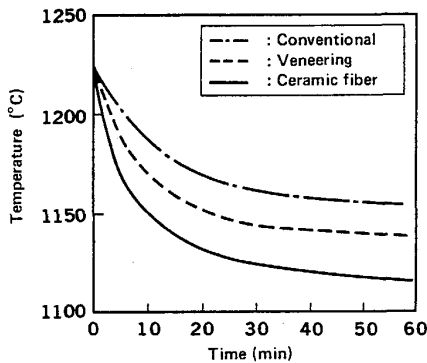


Fig. 8. Comparison of thermal inertia.

実機採用には至っていなかった。今回、骨材として金属に替えて C/T を使用し C/F との複合構造による長寿命遮熱板を開発し採用した。現在、稼動後約 2 年経過するが特に問題無く、効果を十分発揮している。Photo. 2 に遮熱板の施工実績を示す。

3.5 C/F ライニングによる実機効果

(1) 熱慣性効果

Fig. 8 に C/F 化による低熱慣性効果を示す。省エネを考慮し断熱強化を図った加熱炉においては、放散熱損失、冷却水損失等の炉の固定損失が小さいために炉温を下げる場合の炉温変更時間が長くなり問題となるが、従来耐火物に比較し、C/F 炉は低熱慣性のため大幅な時間短縮が可能となった。

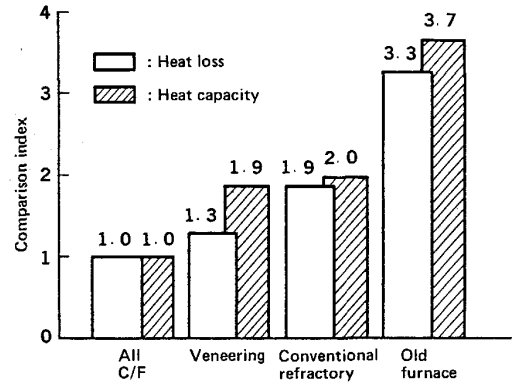


Fig. 9. Comparison of heat loss and heat capacity among lining refractories.

なお、炉温を上げる場合の炉温変更時間は、下げる場合よりも更に短時間で可能である。

(2) 熱損失、熱容量効果

Fig. 9 に従来炉(ベニアリング炉壁, 従来耐火物炉壁, 君津旧加熱炉)とオール C/F 新炉の熱損失, 熱容量比較を示す。オール C/F 化による低熱伝導率特性, 低熱容量特性の効果により、操業時の炉体放散熱, 間欠操業時の炉体蓄熱損失の大幅低減が実現できた。

(3) 新炉の熱精算結果

Table 2 に新炉の TMCP 材における HCR 時の熱精算結果を示す。各項目とも C/F 炉の設計値を満足しており、高効率加熱性能が実現できた。

4. 高精度燃焼制御技術

4.1 基本的考え方と制御技術概要

厚板製造における TMCP 化の進展に伴い、スラブの高精度加熱制御技術、すなわち、スラブの昇温履歴制御、スラブ内均一加熱技術は必須のものであり、加熱炉の燃焼制御の高精度化、厳格化が TMCP 化の進展を左右するといつても過言でない。

(1) スラブ昇温履歴制御

高精度なスラブ昇温履歴制御を可能とするために、本炉は完全箱型炉型とすることで、軸流バーナーを使用した従来炉のようなノーズ部での加熱制御不能域をなくし

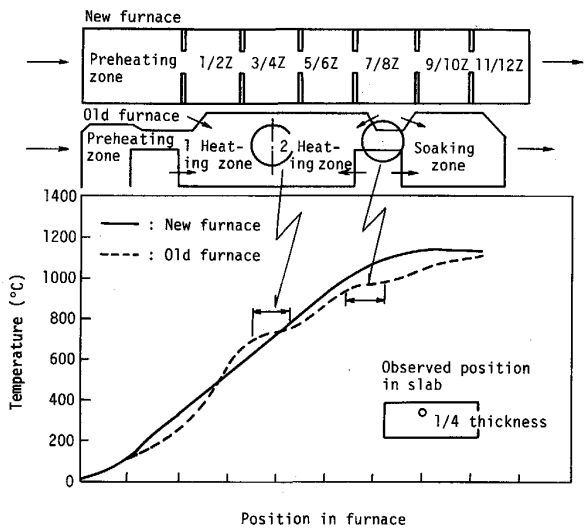


Fig. 10. Comparison of heating-up curve of slabs between old furnace and new furnace.

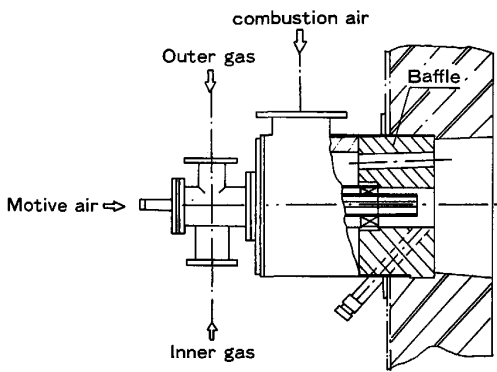


Fig. 11. Schematic cross section of MFR burner.

た。また、炉長方向に制御ゾーンを多分割することで炉長方向任意なヒートパターン制御を可能としている。Fig. 10 にノーズ部のある軸流バーナー旧炉と完全箱型炉型の新炉におけるスラブ昇温履歴の比較を示す。新炉においては、ノーズ部のダークポイントがなく、滑らかな昇温が実現されている。

(2)スラブ内均一加熱制御

スラブ内均一加熱を可能とするために、スラブ下面のシャドウを小さくする目的でメインスキッド間の距離ができるだけ大きくなるように、固定ビームと可動ビームを交互に並べた配列をとっている。

また、高 T/D バーナーの採用、サイリック燃焼制御の採用⁴⁾により、広範囲な燃焼負荷に対して炉幅方向に均一な炉温の確保を図っている。

4.2 炉幅方向均一炉温制御技術

4.2.1 高 T/D バーナー技術

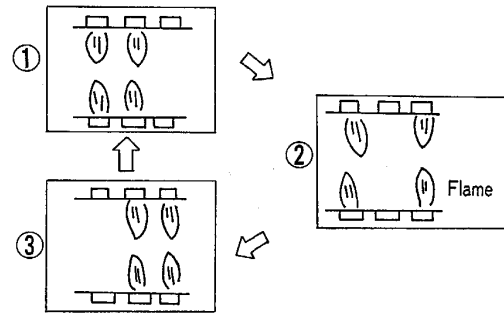


Fig. 12. Example of cyclic combustion.

今回サイドバーナーとして、供給系統が Fig. 11 に示すガス 2 流・エア 2 流式の MFR バーナー (Multi Flame Combustion Ring Burner) を開発、採用したことにより、燃焼負荷を、最大燃焼量に対し 20% 程度まで絞つても、炉幅方向炉温均一性が維持可能な高 T/D 性能を実現した。

このバーナーは、通常負荷範囲では内流ガスのみで燃焼するが、高負荷域では火炎長が長くなることによる炉幅方向中高炉温分布を改善するために、負荷に応じ、旋回のかかった外流ガスを流し、その流量を調整することで均一炉温とするべく火炎長の制御を行っている。低負荷域では、短火炎による中低炉温分布を改善するために、バーナー中心よりモーティブエアーを流し、火炎の直進性の向上を図っている。

4.2.2 サイクリック燃焼制御

(1)サイクリック燃焼制御の必要性

前記 MFR バーナーの採用により、ゾーンの燃焼負荷 20~30% 以上の領域では炉幅方向一様な炉温制御が可能であるが、厚板の TMCP 化には、さらに、スラブの極低温加熱や、長時間保持加熱が必要である。このような超低負荷域での炉幅方向均一炉温制御性を確保するために、今回サイクリック燃焼制御技術を開発した。

(2)サイクリック燃焼制御方法

サイクリック燃焼制御とは、Fig. 12 に示すように、ゾーンの燃焼負荷に応じ点火バーナーの本数を減少させ、点火バーナー一本当たりの燃焼負荷量を増加させることで炉幅方向の炉温の均一化を図り、さらに、消火バーナー部の炉長方向炉温の低下に対しては、点火バーナーの位置を周期的に移動させることにより解消する方法である。

各ゾーンの設定負荷 (設定温度) は、後述する方法により P/C で計算され、計装 DDC (Direct Digital Controller) に指示される。バーナーの燃焼特性から求めた炉幅方向炉温均一性を確保するために必要なバーナー

本当たりの最低燃焼量は、あらかじめ計装 DDC に設定されており、P/C からの燃焼負荷指示に従って自動的にサイクリック燃焼へ移行し、負荷に応じ消火バーナー

本数の調整を行う。すなわち、Fig. 13 に示すように、燃焼負荷が 70%~100% の範囲は全点火によるガス内外流比制御、30%~70% は全点火によるガス内流流量制御、20%~30% は 2 本消火サイクリック、10%~20% は 4 本消火サイクリック、0%~10% は全バーナー点消火による火炎長制御を行い、炉幅方向炉温均一性を実現している。

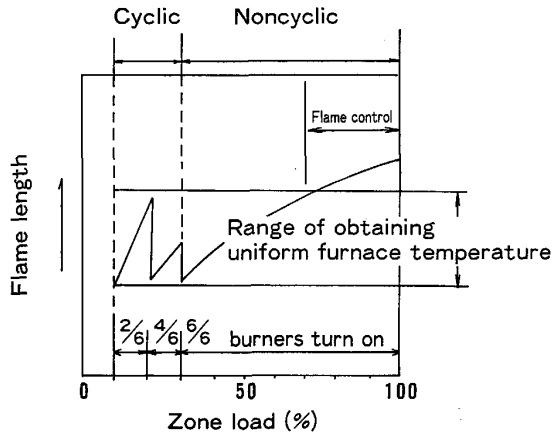


Fig. 13. Flame length control for zone load.

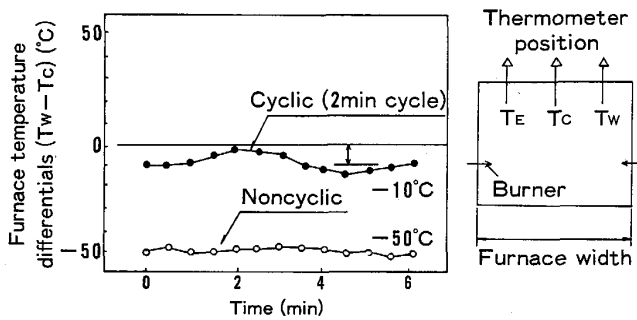


Fig. 14. Furnace temperature differentials in the transverse direction.

ゾーン内の炉温分布変動は、複数の温度計により常に把握され、炉温および火炎の安定時間を考慮した最適サイクル時間の設定により、全点火時と同様な炉温制御性を実現している。

Fig. 14 に実炉への適用状況を示すが、燃焼負荷 20% 以下において通常燃焼時に比較して炉幅方向炉温偏差は

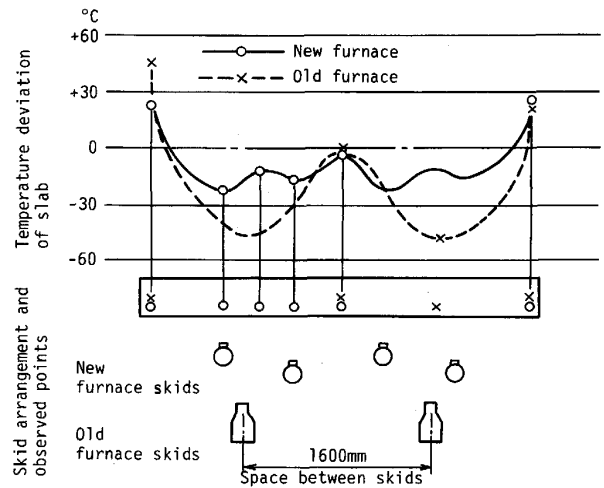


Fig. 15. Temperature deviation of extraction slabs.

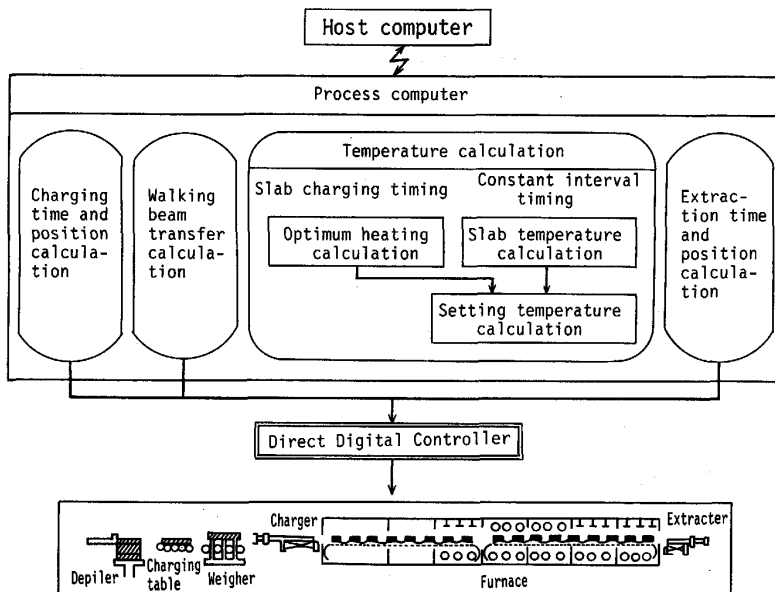


Fig. 16. Configuration of furnace control system.

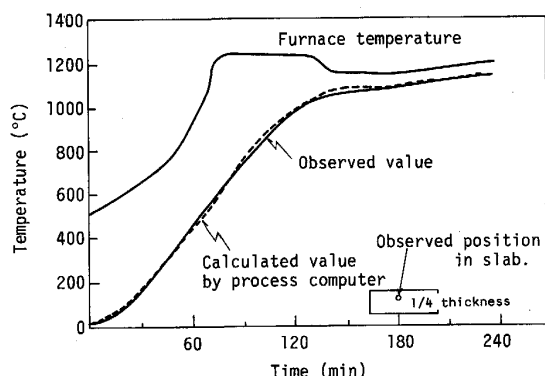


Fig. 17. Comparison with calculated value to observed slab temperature.

約 50°C から 10°C へと大きく改善された。

4.2.3 スラブ内均一加熱効果実績

Fig. 15 には新炉と旧炉のスラブ内温度分布を示す。新炉においては、前述の対策及びスキッド径、ボタンの極限までの縮小化を図ったことで同じ加熱条件において旧炉に比較して温度偏差が約 1/2 に大幅低減している。

4.3 制御システム及び制御モデル⁵⁾

4.3.1 システム構成

Fig. 16 に加熱炉の制御構造図を示す。P/C は H/C からのスラブ一本ごとのスラブ情報（サイズ、加熱条件等）に基づいて、炉内及び前後テーブル上のスラブトラッキングを行い、スラブ装入、抽出、炉内搬送制御を行う。また、スラブ温度計算を行い焼き上げ判定を行うとともに、スラブ抽出条件を満足するように各ゾーンの設定炉温計算を行い計装 DDC に対し指示する。

4.3.2 スラブ温度計算

スラブの炉内装入時の初期温度は、炉前テーブル上に設置された放射温度計により测温されたスラブ表面温度より、装入までの空冷温度降下量、板厚方向温度分布を考慮して決定される。

以後抽出までのスラブ温度履歴は、炉内に設置された多数の雰囲気温度計により测温された炉温分布に基づき 2 次元差分伝熱計算により逐次求められる。

炉内の各位置における総括熱吸収率 (ϕ_{cg})、下面のシャドー係数などは数多くのスラブ测温結果の解析より、炉内の位置ごとに決定されている。また、 ϕ_{cg} は炉温の関数の形で持つており、さまざまな操業条件においても非

常に高精度なスラブ温度推定計算がなされている。

Fig. 17 に計算と実績のスラブ温度の比較を示す。

4.3.3 炉温設定計算

鋼種による抽出温度や装入温度の違うスラブが混在する加熱炉の炉温制御においては、従来オフラインで計算した標準目標炉温による制御が行われてきた。この方法では高精度なスラブ昇温履歴制御は不可能である。そこで本加熱炉においては、装入時にスラブごとに、加熱条件、装入温度、炉内先行スラブの抽出ピッチより抽出時刻及び炉内移動速度を予測して、材質造り込みの必要条件を満たしながらミニマム燃料原単位を達成するスラブの最適昇温履歴を決定している。

各ゾーンの設定温度は、スラブごとに、その時点の実スラブ計算温度と目標最適昇温履歴より所要設定炉温を計算し、滑らかな炉温変化と過不足のない燃焼が実現できるように設定される。

5. 結 言

本炉は、昭和 61 年 7 月ホットラン後順調に稼働を続けており、約 2 年が経過したが、C/F の耐用度においても問題無く、C/F ライニングの長寿命化に対する信頼性の目処もたつた。

オール C/F 化による低熱容量化、低熱慣性化も当初の期待どおりの効果が発揮されており、高精度燃焼制御技術による安定した加熱での品質造り込み技術とともに、昭和 62 年に入つてからの低生産状況化においても、省エネ、品質向上の上で多大な効果を発揮している。

本炉により、次世代加熱炉の技術的方向が明確になったものと考えられるが、今後本炉の機能を最大限に発揮させ、新加熱技術の確立を目指していく所存である。

文 献

- 1) 西岡 潔, 大家直治, 酒井和夫, 三田村外喜男, 永井 勲, 石川 浩, 副島 豊: 鉄と鋼, 69 (1983), S1168
- 2) 関谷幸三, 保科安男, 高森 修, 矢沢修蔵, 川端 明, 三宮勝彦, 松川敏昭: 鉄と鋼, 70 (1984), S339
- 3) 木船 勲, 白井美文, 真沢正人, 桑野康洋: 鉄と鋼, 73 (1987), S320
- 4) 檜崎誠治, 村瀬悦裕, 真沢正人, 木田英夫: 鉄と鋼, 73 (1987), S391
- 5) 白井美文, 下井辰一郎, 上田豊彦: 鉄と鋼, 73 (1987), S321