

蓄熱式燃焼技術のウォーキングビーム式加熱炉への適用

Application of Regenerative Type Combustion Technology
to Waking Beam Type Reheating Furnace

肥 田 敦⁽¹⁾ 野 崎 洋⁽²⁾ 森 田 豊 彦⁽²⁾
Atsushi HIDA Hiroshi NOZAKI Toyohiko
MORITA

抄 録

蓄熱式燃焼技術は、画期的な省エネ技術として近年国内で注目を集めている。新日本製鐵機械・プラント事業部では1992年よりこの燃焼技術の連続式加熱炉への適用研究に本格的に取り組み始め、その成果として1995年5月、蓄熱式燃焼システムを全面的に採用した日本で初めての大型(100t/h)ウォーキングビーム式加熱炉をトビー工業(株)棒鋼工場に建設した。ここではこの加熱炉の技術の特徴を紹介するとともに、その実操業データに基づいて、連続式加熱炉への蓄熱式燃焼技術適用の効果を報告した。

Abstract

The Regenerative type combustion technology attracts public attention in the country in recent years as an epochal energy saving technology. Nippon Steel's Plant & Machinery Division has been fully studying on the application of this combustion technology to a continuous type reheating furnace since 1992. The waking beam type reheating furnace constructed at the bar and rod mill of Topy Industries, Ltd. in May, 1995 is the fruit of our efforts, which adopts a regenerative combustion system in full measure and has the biggest capacity of 100t/h in Japan. In this paper, the feature of technologies with regard to the reheating furnace are introduced, together with the effects of the application of the regenerative type combustion technology to the continuous type reheating furnace on the basis of the actual operational data.

1. 緒 言

近年、地球温暖化議論に代表される環境問題意識の高まりと厳しい経済環境は、日本鉄鋼業に対し“環境破壊の抑制”と“製品コストの更なる低減”という二つの課題を提起している。加熱炉を始めとする熱設備においてこの両者を同時に満足する解答は“大幅な省エネルギーの実現”にあることは明らかであり、国内鉄鋼各社はいずれも“効率の良いかつ安価な設備”を求める姿勢を鮮明にしている。これに対応して工業炉メーカーは“省エネルギー”“環境対策”に特徴を持った商品開発に主眼をおくようになってきており、成熟商品といわれる加熱炉の分野においてもそのシーズ技術の一つとして“蓄熱式燃焼技術”が大きな注目を集めている。

新日本製鐵では1992年より“蓄熱式燃焼システムの連続式加熱炉への適用研究”に本格的に着手し、その成果として日本で初めて蓄熱式燃焼システムを全面的に採用した大型(100t/h)ウォーキングビーム式加熱炉をトビー工業(株)棒鋼工場に建設、1995年5月より順調に稼働を続けている。

本報告では上記加熱炉の技術的特徴とその実操業データに基づいた連続式加熱炉への蓄熱式燃焼システム適用効果について述べる。

2. 蓄熱式燃焼システムの原理と効果

蓄熱式燃焼システムの構成と作動原理を図1に示す。蓄熱式燃焼技術とは各々に蓄熱体を持った一対以上のバーナを交互に切り替えて燃焼させる技術である。その作動原理は一基のバーナが燃焼中は他の一基のバーナから燃焼排ガスを排出し、これにつながる蓄熱体にその顕熱を蓄え(モードA)、一定時間(通常20~90秒)経過後、燃焼と排気の組合わせを切り替えることで蓄熱体に蓄えた顕熱を燃焼空気の前熱として回収する(モードB)というものである。

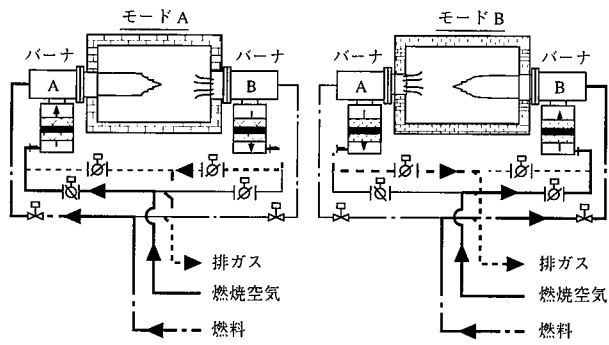
蓄熱媒体の材質としてアルミナ(ボール、ナゲットあるいはハニカム)を用いることにより、金属式熱交換器の限界となっていたチューブの耐熱性という問題から解放され、また、高温の排ガスと燃焼空気が同一流路を交互に通過して蓄熱媒体と直接熱交換すること及び蓄熱媒体の表面積(伝熱面積)も十分に大きくとれることから熱交換効率が高く、燃焼空気温度は炉内雰囲気温度近くまで予熱できるとされる。

このような作動原理から蓄熱式燃焼技術の特徴は大きく以下の2点にまとめられる。

(1)高温燃焼空気温度の実現：従来の金属式熱交換器では650℃レベ

⁽¹⁾ 機械・プラント事業部 製鉄プラント第二部 部長代理

⁽²⁾ 機械・プラント事業部 製鉄プラント第二部 掛長



	モードA	モードB
バーナA	燃焼	蓄燃
バーナB	蓄燃	燃焼

図1 蓄熱式燃焼システムの作動原理

ルが限界であったのに対して1000℃を超える燃焼空気が得られる。
 (2)均一加熱性能の向上：切替燃焼による炉内燃焼ガスの攪はん効果により通常バーナでは30～50℃であった炉内温度偏差が10～15℃に低減できる。

従ってこの技術を連続式加熱炉に適用すれば通常バーナを採用した場合と比較して次のような効果がもたらされるものと想定される。

ケース1：加熱炉の炉長が同一であれば

- (i) 10～15%の加熱能力の向上
- (ii) 冷片操業で約5%，熱片操業で約15%の加熱効率の向上(図2参照)

ケース2：加熱能力，加熱効率が同一レベルであれば

- (i) 15～20%の炉長の短縮・設備のコンパクト化(図3参照)
- ・均一加熱性能が向上することから被熱材が必要とする均熱時間が短縮できる。

・従来炉ではレキュベレーターの耐熱ネックにより炉尻での燃焼排ガス温度制約があったが，蓄熱式燃焼技術を採用すればレキュベレーターが不要となり，この温度制約もなく炉長短縮が可能となる。

蓄熱式燃焼技術が“効率の良いかつ安価な設備”を実現するシーズ技術として注目され，工業炉メーカーが競ってその実機化に取り組

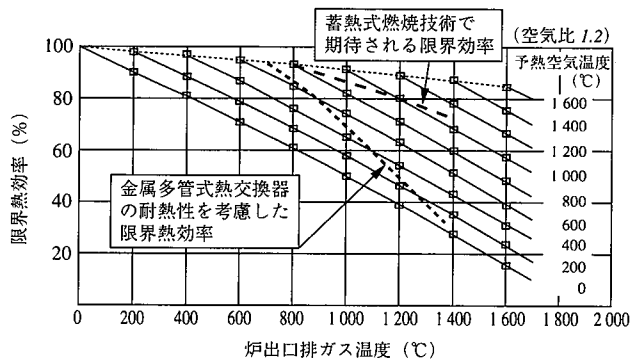


図2 加熱炉排ガス温度と限界熱効率

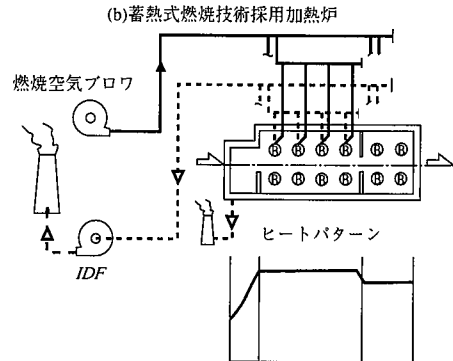
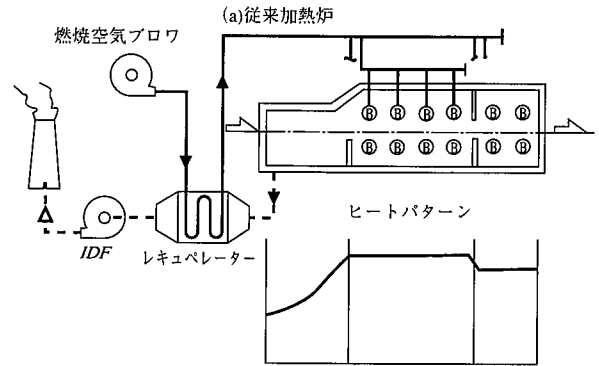


図3 炉長短縮の概念

んでいる理由である。

3. 蓄熱式燃焼システム実機化への取組み

蓄熱式燃焼システムの歴史は1982年イギリスで英国ガス公社とHot Work社(バーナメーカー)の共同開発によりスタートし，その後欧米を中心にコイル焼鈍炉，アルミニウム溶解炉といったパッチ炉において200基以上の実績を持つに至っている¹⁾。ただし，連続式加熱炉への適用実績は数基にとどまっており^{2, 3)}，この3～4年日本国内で注目を集めるようになったというものの我々にとっては未知の技術であった。

特に日本国内でこれを連続式加熱炉に採用することを考えた場合には，“1000℃を超える燃焼空気による短時間サイクルでの燃焼，消火(排ガス)の繰返し”という従来の燃焼に対する概念を完全に変えてしまう燃焼方式であるがゆえに

- (1) 国内の厳しいNO_x規制値をクリアできるのか
 - (2) 短時間サイクルの切替燃焼で安定した操業が可能なのか
 - (3) 広巾大型炉に適用できるのか
 - (4) 従来炉並の安全性，メンテナンス性を確保できるのか
- といった懸念が払しょくされず，前項で記述した効果は認めつつも“実機化技術にはまだ達していない”というのが国内ユーザーの一般的な評価であった。

つまり蓄熱式燃焼システムの実機適用にあたっては，上述の燃焼特性を前提として，国内鉄鋼メーカーの要求する厳しい条件下で安定した操業を実現し，かつその効果を最大限に発揮する加熱炉ハードと燃焼制御ソフトを構築することが我々に与えられた課題であった。

ここでは国内ユーザーの要求をもとに開発項目を設定し，大型実験炉による燃焼テストと熱流動解析を並行して活用することでその

対応技術の確立に取り組んだ。図4に具体的な取組み内容と開発技術をまとめる。トピー工業加熱炉はこれらの開発技術を適用した国内1号機として位置づけられる。

4. トピー工業(株)加熱炉の概要

加熱炉の断面図を図5に、主仕様を表1に示す。また、抽出側から見た設備の全景と蓄熱式バーナの設置状況を写真1、2に示す。

4.1 技術の特徴

本炉は図4に記載した開発技術をすべて織り込んだ設備設計としている。ここではそのうち主要な項目について記述する。

4.1.1 省エネ効果を追求した加熱炉ハード

蓄熱式バーナを採用した加熱炉(以下リジェネバーナ加熱炉)では蓄熱媒体の熱バランスの関係から燃焼排ガスの約80%はバーナから、残り20%は加熱炉炉尻から排出される。しかし、これまでに建設されたリジェネバーナ加熱炉は一般的に非燃焼ゾーンを持たず、この20%の排ガスは高温のまま炉外に排出するという設計思想をとっている。

今回、熱流動解析を利用して燃焼排ガス総量の20%だけが流れるという条件での非燃焼ゾーンのガス流動及び温度分布を定量的に把握(図6参照)し、これと加熱炉伝熱解析プログラムを組み合わせた評価を行った結果、リジェネバーナ加熱炉においても短い非燃焼

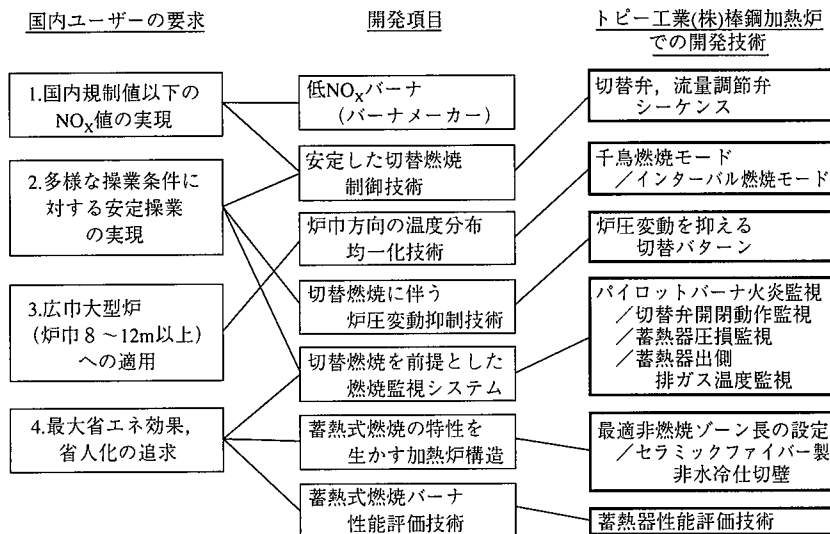


図4 連続式加熱炉への蓄熱式燃焼技術適用のための技術開発

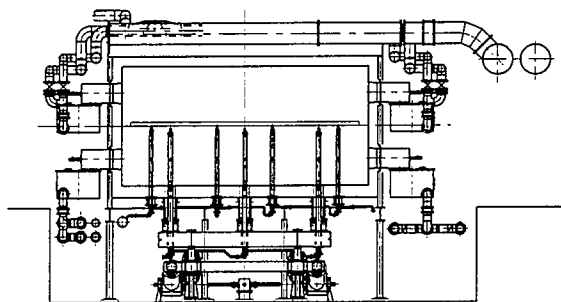
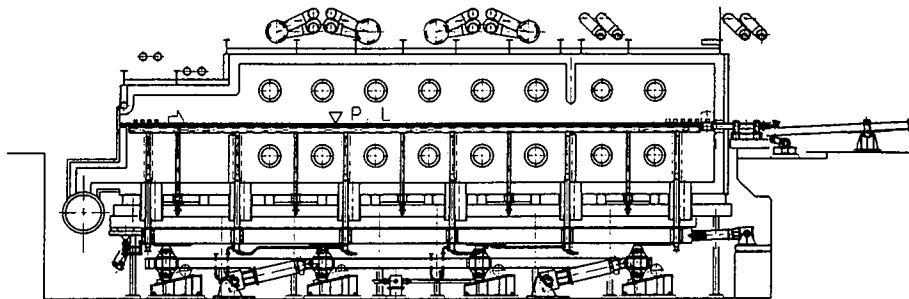


図5 加熱炉断面

表 1 加熱炉主仕様

項目	仕様
操業開始	1995年 5月
炉型式	4 带式ウォーキングビームタイプ
加熱能力	100 t/h
主要寸法	有効炉長：19.0m 炉内巾：8.3m
ピレット寸法	□130mm×7 700mm
燃料	軽油

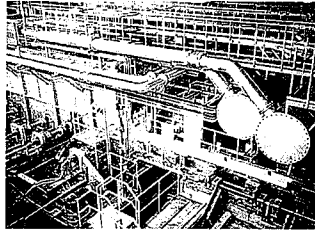


写真 1 設備全景

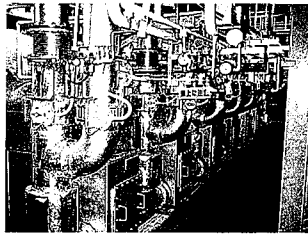


写真 2 蓄熱式バーナ設置状況

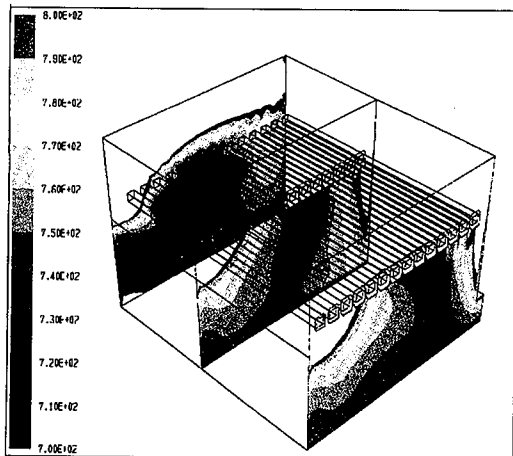


図 6 非燃焼ゾーン温度分布解析

ゾーンを設けることで大きな省エネ効果があることを確認した(図7参照)。更に本炉の操業条件を基に省エネ効果と設備費を考慮した最適の非燃焼ゾーン長を決定し、排ガス顕熱を極力有効に利用する設備構成としたことがハード面でのポイントである。

4.1.2 安定操業を実現する燃焼制御システム

短時間サイクルで燃焼、消火の切替を繰り返すリジェネバーナを加熱炉に適用するためには“安定した切り替え燃焼を継続する切替え弁と流量調節弁の動作シーケンスを構築すること”が燃焼制御システムを設計する上で必要不可欠な課題である。具体的には

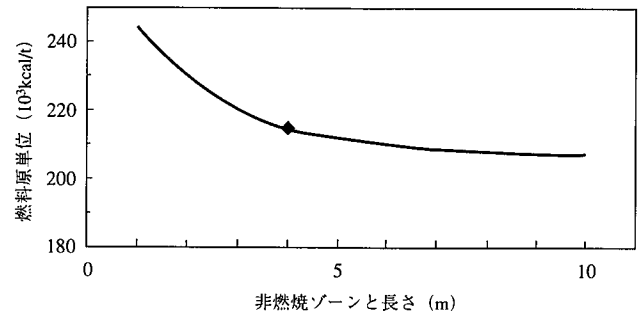


図 7 非燃焼ゾーン長と燃料原単位

(1)切り替えの瞬間に燃料流量が0になることに起因する燃料、空気、排ガスの流量制御の不安定な動きを防止すること、
(2)切替えの瞬間に空気、排ガスの過大な流量変動が発生することを防ぎ、炉圧の大きな変動を抑えるとともにパイロットバーナの安定した燃焼を継続すること、
が技術課題となる。ここでは一つの流量調節弁で最大12本のバーナを制御するという厳しい条件の下この課題に取り組み、燃焼テスト及び実炉立上げ後の燃焼調整を通して実操業に対応できる制御システムを作り上げた。システムの基本的な考え方は“バーナ切替えの際に流量調節弁の開度制御を適切なタイミングで行うこと”であり、図8に弁の動作シーケンスの概念を示す。

4.1.3 炉内温度分布均一化に対する最適制御

8.3mの炉巾でサイドバーナという設備構成において操業条件が変動した場合にも15℃レベルの炉巾方向温度偏差を確実に達成するために以下の二つの燃焼方式を採用している。

(1)千鳥燃焼モード

サイドバーナによる蓄熱燃焼に対しては千鳥燃焼と片側燃焼の二つの燃焼方式が考えられ(図9参照)、炉内燃焼排ガスの攪はん効果という観点からは千鳥燃焼方式が、対向するバーナへの燃焼排ガスの到達という観点からは片側燃焼方式が有効であると判断される。ただし、炉内温度分布均一化を考えた場合どちらの方式を採用すべきか理論的に整理することは困難であり、今回は大型実験炉での炉温測定を通して、本炉の設備仕様に対しては千鳥燃焼方式の採用が有効であると結論づけた。

千鳥燃焼方式においては隣接するバーナへ燃焼排ガスがショートカットする現象が発生することによる温度分布悪化の可能性を否定できないこともあり、炉巾、バーナピッチ等設備構成によりこの二つの燃焼方式を使い分ける必要が出てくるものとする。

(2)低負荷燃焼時のインターバル燃焼モード

バーナ燃焼負荷の低下は火炎の短炎化につながり、その結果炉巾中央部の温度低下を招き易い。蓄熱燃焼においてこれに対応する技術としてインターバル燃焼という考え方を採り入れた。これは切り替え燃焼の間にバーナが休止する時間を設定することで制御ゾーンの燃焼負荷が下がった場合にもバーナ単体の燃焼負荷を高く保つ燃焼方式であり(図10参照)、特にバーナ容量、負荷変動とも大きい加熱帯でその効果を発揮している。

4.1.4 蓄熱器性能評価技術

蓄熱器の性能は加熱炉の熱効率に直結するものであり、炉設備の性能保証の観点からこれを定量的に評価する手法をもつことは炉メーカーにとっては不可欠な条件であるといえる。

ここでは蓄熱器を図11のようにモデル化し、その内部温度をシミュ

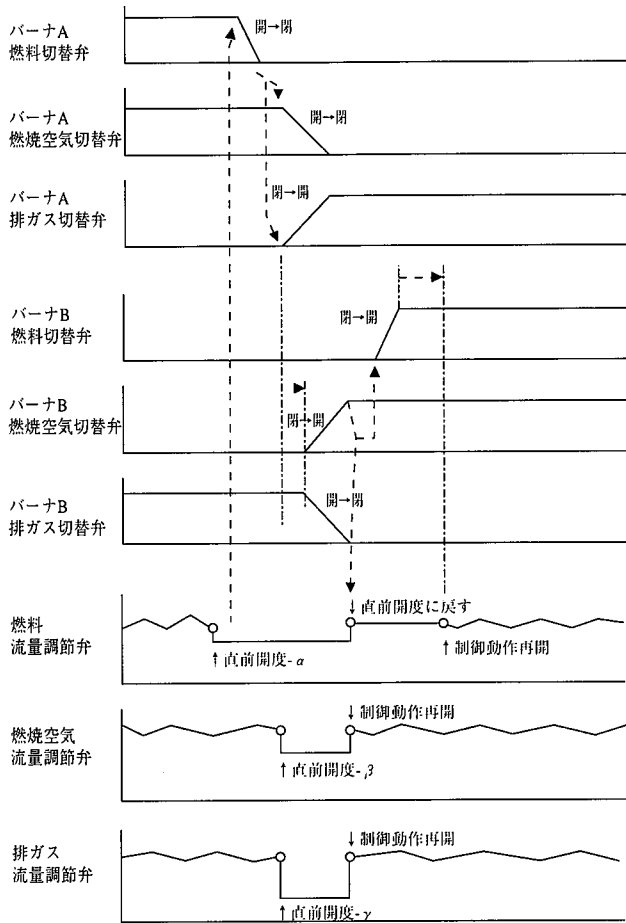


図 8 切替弁, 流量調節弁動作シーケンスの概念

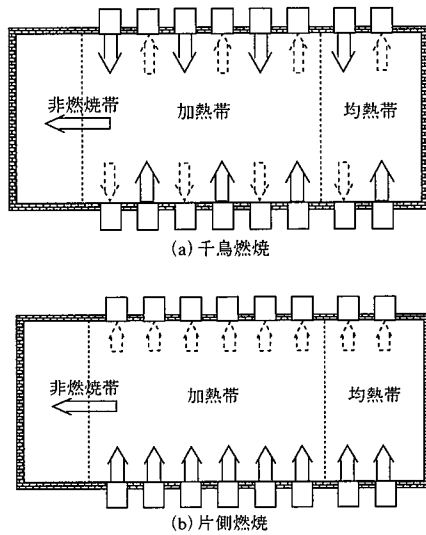


図 9 サイドバーナによる燃焼方式

レーションする非定常熱収支プログラムを以下の考え方で作成した⁴⁾。
 [流体から蓄熱体に伝達される熱量] = [蓄熱体層 dx に蓄熱される熱量]
 [d 時間に流体の失った熱量] = [流体から蓄熱体層 dx に伝達される熱量]
 + [蓄熱器耐火材に伝達される熱量]
 実際の設計では, バーナメーカーから提出された燃焼空気温度は参

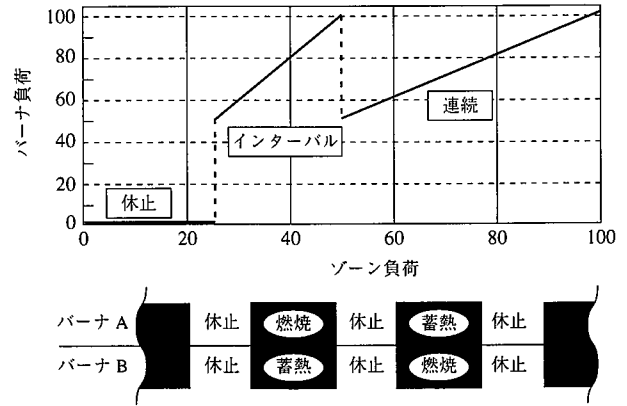


図 10 インターバル燃焼モード

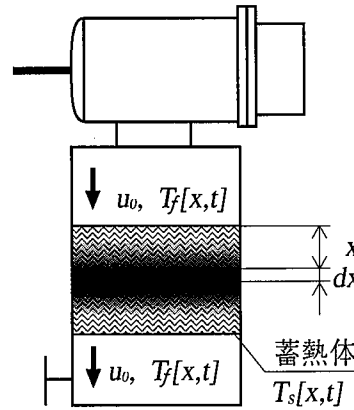


図 11 蓄熱器計算モデル

考値にとどめ, このプログラムを使って算出した空気温度を燃焼設備容量設定の基準データとした。

4.1.5 蓄熱式燃焼に特有な燃焼監視システム

燃焼の安全性確保については実機1号機ということもあり, 文献, 海外での実績調査及び燃焼テストを含め十分な検討を実施し, 通常バーナに対する燃焼監視に加え, 切替え燃焼という特性を考慮した以下の監視システムを採用している。

(1)パイロットバーナの火炎監視

点火, 消火を繰り返すことからパイロットバーナが確実に燃焼を続けていることを確認し, 昇温途中など炉温の低い条件では燃焼遮断につなげる。

(2)切替え弁の開閉動作監視

バーナ1本ごとに燃料, 燃焼空気及び排ガスの三つの切替え弁が設置される。これらすべての弁に開・閉のリミットスイッチを設け, 操業中切替え動作が確実に実行されていることを確認し, 異常が発生した場合にはそのバーナセットを消火する。

(3)蓄熱器の圧損監視

蓄熱器入側と出側の差圧を検出し, スケール, 耐火材等による蓄熱体の目詰まり発生を監視, 圧損が高いバーナについて警報を出す。

(4)蓄熱器出側排ガス温度監視

蓄熱器出側の排ガス温度は通常 250°C 以下となるように設計されている。この温度監視により, バーナの燃焼状態あるいは蓄熱器に発生した異常を知るとともに, 排ガスの高温化による蓄熱体支持金物と排ガス系計装機器の耐熱トラブルを防止する。

4.2 蓄熱式燃焼システム適用の効果

加熱炉が稼動した1995年5月から現在までの約1.5年間の操作データを基に連続式加熱炉への蓄熱式燃焼システム適用の効果をまとめる。

4.2.1 省エネ効果

図12は本炉に設置したリジェネバーナで得られる燃焼空気温度特性である。縦軸が燃焼空気温度、横軸が炉内雰囲気温度を示している。燃焼空気温度は炉内雰囲気温度より200~300℃低いレベルにあるというのが実測の結果であり、本炉の操作条件では850~950℃という高温空気が得られている。また、今回作成した蓄熱器性能評価プログラムによる計算結果も併記しているが、実測データとの比較によりその妥当性が証明され、今後の設計に活用できるものと判断する。また、これによれば燃焼空気温度は炉内雰囲気温度に対してほぼ直線的に変化するものと推定される。

加熱能力と燃料原単位の関係を図13に示す。設計条件(100t/h)における燃料原単位は $217 \times 10^3 \text{kcal/t}$ となり、従来バーナ炉に比べおよそ15%短い19mという炉長において76%という炉効率(鋼材に与えられた熱量/燃料による投入熱量)を達成している。これは、加熱炉建設にあたって設備費の低減を最優先課題とし、炉効率を従来バーナ炉の最高レベルと同等して設備のコンパクト化(炉長の短縮)を目指した結果である。

4.2.2 炉内温度分布と NO_x 特性

操業中の炉内温度分布測定例を図14に、炉内温度と NO_x 値の関係を図15に示す。炉中方向の温度偏差は加熱帯、均熱帯いずれも10℃以内であり、設計当初目標とした15℃という値を達成している。つまり均一な温度分布を実現するために今回採用した燃焼制御システムが有効に働き、切替え燃焼の特性を十分に生かした操業ができていたものと考えられる。

また NO_x 値についてもバーナメーカーによる低 NO_x バーナ商品化の努力と安定操業を可能とする燃焼制御システムの構築による低空

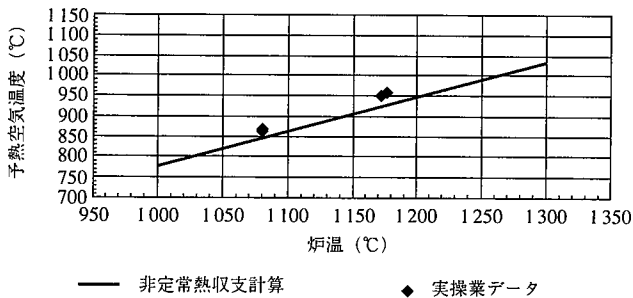


図12 燃焼空気温度特性

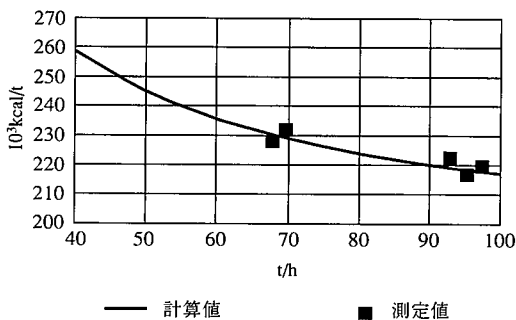
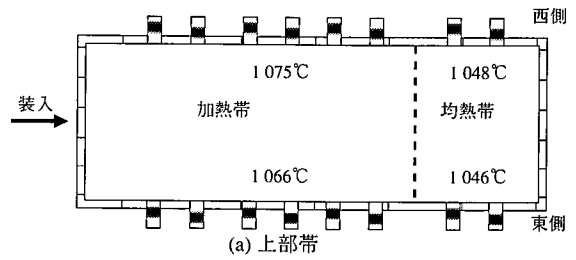
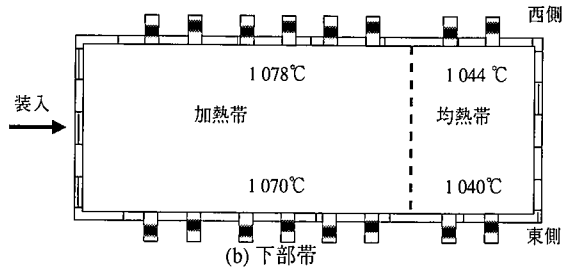


図13 燃料原単位

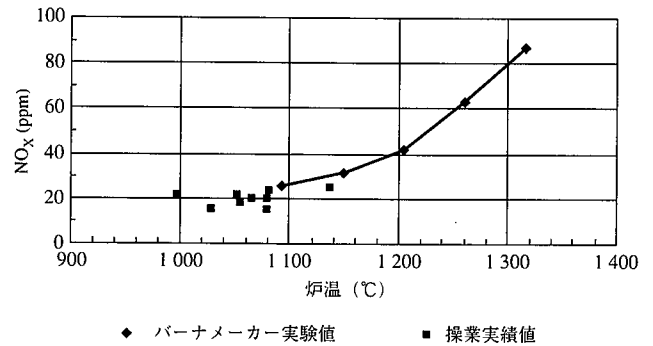


(a) 上部帯



(b) 下部帯

図14 炉内温度分布測定例

図15 NO_x 特性

比燃焼の実現の結果、日本国内での一般的な環境規制値である100 ppm (O_2 11%換算)以下を達成できることが実操業により確認され、今後日本国内での使用に十分対応できることが明確になった。

5. 結 言

蓄熱式燃焼システムはそれを適用することにより現状技術では頭打ちとなっている加熱炉の熱効率を大幅に改善できるシーズ技術であり、更に設備のコンパクト化が可能であるという特性と合わせ、まさに日本の鉄鋼メーカーが求める“効率のよい安価な設備”を実現する技術であるということが出来る。また、炉長を変えることなく容易に加熱能力を上げることが出来る技術として、既設炉の能力アップに対しても有効な手段として注目され始めており、今後もその適用実績は増加し続けるものと想定される。

新日本製鐵ではリジェネバーナ加熱炉1号機となるトピー工業(株)棒鋼加熱炉の操業をフォローし、技術のブラッシュアップを図ることで今後も国内、海外を問わずユーザーの要求を満足する特徴あるリジェネバーナ加熱炉を提供していきたいと考える。

参考文献

- 1) 仲町一郎 ほか: 東京ガス(株)技研報告, 第31号, 1987
- 2) Lupton, D.: Steel Times International, Nov. 1989
- 3) Maynard, M.: Industrial Heating, Dec. 1989
- 4) 尾花英朗: 熱交換器設計ハンドブック.