

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol. 32(2000) No.4

省エネルギーに貢献する蓄熱式熱交換システムを応用した高効率加熱技術

Advanced Heating Technologies Applying Regenerative Heat Exchange System for Energy Saving

安達 一成 (Kazunari Andachi) 中川 二彦 (Tsuguhiko Nakagawa) 小橋 正満 (Masamitsu Obashi)

要旨：

地球温暖化防止ならびに鉄鋼製品の品質改善を目的に、川崎製鉄では、蓄熱式バーナおよび蓄熱体の利用技術開発と実用化を展開した。蓄熱式ラジアントチューブバーナを開発し実用化した。さらに、直火型蓄熱式バーナ加熱システムの実用化開発を進め大規模連続式加熱炉へ業界で初めて適用するとともに、熱間圧延鋼板、厚鋼板、シームレスパイプ用の各種連続式加熱炉へ導入した。また、高温窒素噴流を用いた無酸化加熱装置、転炉操業に同期化した高効率取鍋加熱システム、回転型蓄熱器を利用した高効率加熱システムを開発し、それぞれ製鋼タンディシュ、製鋼取鍋、冷間圧延連続焼鈍炉にて実用化した。これらにより 733 924 GJ/y の省エネルギー（CO₂ 排出量換算 94 513 t/y の削減）ならびに製品品質の向上を達成した。

Synopsis：

For the prevention of global warming and the improvement of quality of steel products, Kawasaki Steel has developed a regenerative burner and heating technologies by the use of regenerative heat exchanger technologies. A regenerative radiant tube burner was developed first. A direct-fired regenerative burner heating system was developed and applied to a reheating furnace for a wide flange beam mill, which was the first application for a large scale industrial furnace in the steel industry in Japan, and it has spread to reheating furnaces for hot strip mills, plate mills and seamless pipe mills. A non-oxidized heating system using high temperature nitrogen jet, a ladle heating system synchronized with the steel making converter operation, and a rotary regenerator adopted heating system were also developed. These systems were applied to tundishes of continuous casting machines, to steel making converters and to continuous annealing lines respectively. Total energy saving of 733 924 GJ is achieved, that is equivalent to 94 513 of generated CO₂ reduction a year, and improvement of steel product quality was achieved as well.

本文は次のページから閲覧できます。

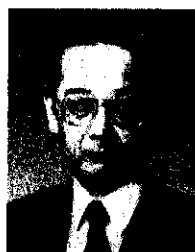
省エネルギーに貢献する 蓄熱式熱交換システムを応用した高効率加熱技術*

川崎製鉄技報
32 (2000) 4, 292-299

Advanced Heating Technologies Applying Regenerative Heat Exchange System for Energy Saving



安達 一成
Kazunari Andachi
水島製鉄所 設備技術
部 熱・流体技術室長



中川 二彦
Tsuguhiko Nakagawa
水島製鉄所 企画部
企画室 主査(課長)・
工博



小橋 正満
Masamitsu Obashi
(財)新エネルギー財団
導入促進本部 計画部
長

要旨

地球温暖化防止ならびに鉄鋼製品の品質改善を目的に、川崎製鉄では、蓄熱式バーナおよび蓄熱体の利用技術開発と実用化を展開した。蓄熱式ラジアントチューブバーナを開発し実用化した。さらに、直火型蓄熱式バーナ加熱システムの実用化開発を進め大規模連続式加熱炉へ業界で初めて適用するとともに、熱間圧延鋼板、厚鋼板、シームレスパイプ用の各種連続式加熱炉へ導入した。また、高温窒素噴流を用いた無酸化加熱装置、転炉操業に同期化した高効率取鍋加熱システム、回転型蓄熱器を利用した高効率加熱システムを開発し、それぞれ製鋼タンディシュ、製鋼取鍋、冷間圧延連続焼鈍炉にて実用化した。これらにより 733 924 GJ/y の省エネルギー (CO₂ 排出量換算 94 513 t/y の削減) ならびに製品品質の向上を達成した。

Synopsis:

For the prevention of global warming and the improvement of quality of steel products, Kawasaki Steel has developed a regenerative burner and heating technologies by the use of regenerative heat exchanger technologies. A regenerative radiant tube burner was developed first. A direct-fired regenerative burner heating system was developed and applied to a reheating furnace for a wide flange beam mill, which was the first application for a large scale industrial furnace in the steel industry in Japan, and it has spread to reheating furnaces for hot strip mills, plate mills and seamless pipe mills. A non-oxidized heating system using high temperature nitrogen jet, a ladle heating system synchronized with the steel making converter operation, and a rotary regenerator adopted heating system were also developed. These systems were applied to tundishes of continuous casting machines, to steel making converters and to continuous annealing lines respectively. Total energy saving of 733 924 GJ is achieved, that is equivalent to 94 513 of generated CO₂ reduction a year, and improvement of steel product quality was achieved as well.

1 緒 言

近年になって提唱された地球規模での環境保護、特に大気中の CO₂ 濃度上昇による地球温暖化の抑止は、我が国最終エネルギー消費の約 11% を占め石炭を主燃料とする鉄鋼業において、最重要課題の一つとなっている。

川崎製鉄では、従来からさまざまな省エネルギー施策を推進し地球環境負荷の低減に努めてきており、さらに上記ニーズに対応できる新しい加熱システムとして、蓄熱式熱交換システムを応用した種々の高効率加熱技術を開発し実用化している。蓄熱式ラジアントチューブバーナを独自に開発し冷間圧延連続焼鈍炉に適用した。さらに、直火型蓄熱式バーナの実用化開発を進め、大規模加熱炉へ鉄鋼業で初めて適用するとともに水島製鉄所の熱間圧延連続加熱炉、

厚鋼板連続加熱炉、知多製造所回転炉床式連続加熱炉への導入を推進した。また、鉄鋼の連続製造用タンディシュを無酸化で加熱できる高温窒素噴流加熱装置、転炉の操業と同期化して取鍋を効率よく加熱できる取鍋加熱システム、回転型蓄熱器を利用した高効率加熱技術といった独自の新しい加熱技術を開発し、それぞれ製鋼タンディシュ、製鋼取鍋、冷間圧延連続焼鈍炉にて実用化した。

本報告では、これらの省エネルギーひいては CO₂ 排出量削減に大きく貢献してきた当社の高効率加熱技術について紹介する。

2 蓄熱式熱交換システムの原理

蓄熱式熱交換器 (リジェネレータ) は、従来から高炉用熱風炉、コークス炉、平炉など高温用の炉に用いられてきた。その原理は、Fig. 1 に示すように、固体層である蓄熱体に高温ガスと低温ガスを交互に流すことにより、固体を熱媒体として熱交換を行うものである。その熱効率は、換熱式熱交換器 (レキュペレータ) の約 45%

* 平成12年9月19日原稿受付

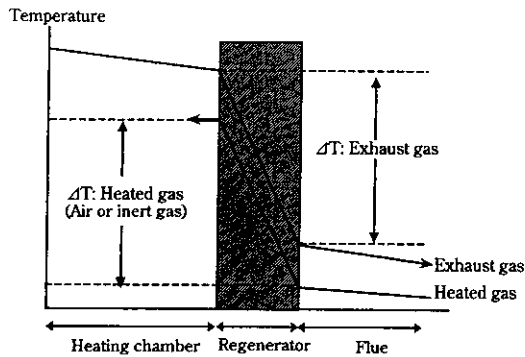


Fig. 1 Concept of regenerative heat exchanger

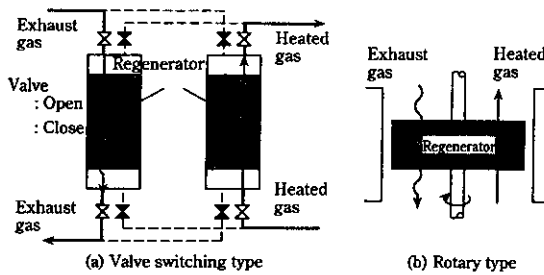


Fig. 2 Type of regenerative heat exchanger

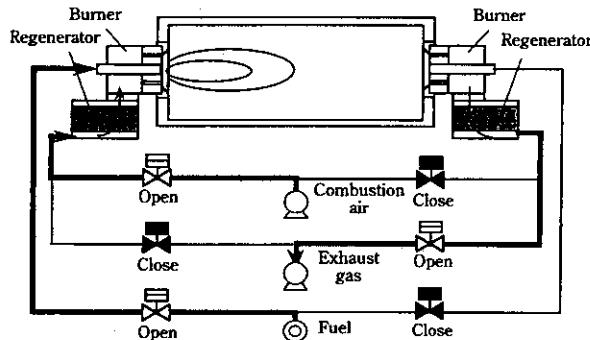


Fig. 3 Schema of regenerative burner heating system

に比べ 80% 以上と高い。ガスの切り換え方式としては、Fig. 2¹⁾に示すように、バルブを周期的に切り換える方式と蓄熱体自体を回転させる方式とがある。

一方、英国において 1986 年に考案された蓄熱式バーナ²⁾は、蓄熱式熱交換器とバーナが一体となったもので、その加熱システムは Fig. 3 に示すように対の蓄熱式バーナで構成される。すなわち、炉内からの燃焼排気ガスは、非燃焼側の蓄熱器に導かれ蓄熱体に熱を与え、一方、燃焼空気は、熱を蓄えた燃焼側の蓄熱器を通過し、高温に加熱されて燃焼に使われる。この燃焼と排気を 30~90 s という短いサイクルで切り換えることにより、コンパクトな設備で高い熱効率のシステムが成立している。なお、蓄熱式バーナには、被加熱物を間接的に加熱する方式の蓄熱式ラジアントチューブ (RT) バーナと直接加熱方式の直火型蓄熱式バーナがある。

3 蓄熱式 RT バーナシステム

蓄熱式バーナは、高い熱効率は知られていたものの、燃焼空気の高温化にともなう高 NO_x 濃度や装置の信頼性が低いなどの問題があった。川崎製鉄では、これら問題を解決するため、蓄熱式 RT

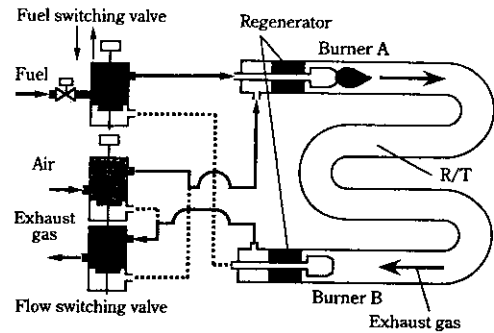


Fig. 4 Schema of regenerative RT burner

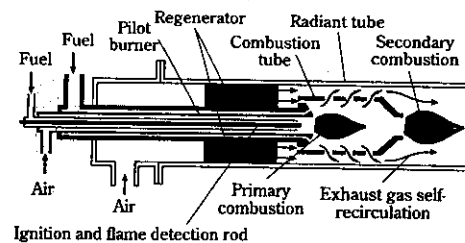


Fig. 5 Structure of developed regenerative RT burner

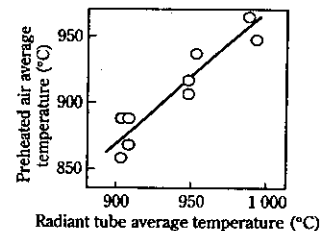


Fig. 6 Preheated air temperature of developed burner

バーナの開発³⁾を進めた。

3.1 蓄熱式 RT バーナシステムの概要

開発した蓄熱式 RT バーナシステムの概要を Fig. 4 に示す。組になったバーナと蓄熱体が、一本の RT の両端に設置され、この二組のバーナでは、燃焼と排気が 40~60 s ごとに交互に切り替えて行われる。

3.2 開発したバーナの基本的な構造

バーナ本体の構造は、Fig. 5 に示すように、従来から川崎製鉄の高温焼鈍炉で数多くの実績がある、排ガス自己再循環型の 2 段燃焼方式⁴⁾を採用した。そして、燃焼用空気の高温化に対応して、新たに燃焼筒を最適化することにより、大幅な低 NO_x 化を達成した。また、パイロットバーナは、中置きとし、燃料ガスの冷却効果を利用して、フレイムロッドによる火災検知の長寿命化と信頼性を向上した。

3.3 蓄熱式 RT バーナシステムの性能

3.3.1 熱効率

開発した蓄熱式 RT バーナにおいて、RT の平均温度と平均予熱空気温度の関係を Fig. 6 に示す。RT 平均温度 960°C の場合に、燃焼用空気を 930°C まで予熱することができ、その結果、本バーナでは燃焼排ガス顕熱の 80% 以上を空気顕熱として回収できる。

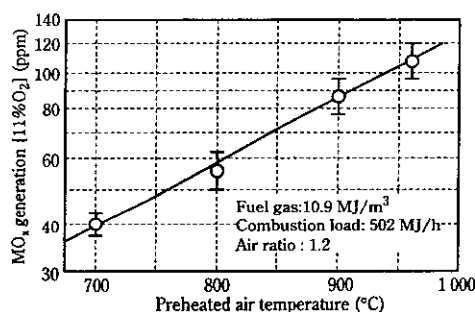
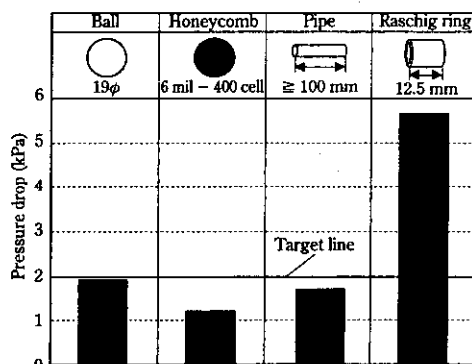
Fig. 7 NO_x generation of developed burner

Fig. 8 Comparison of pressure drop of regenerator

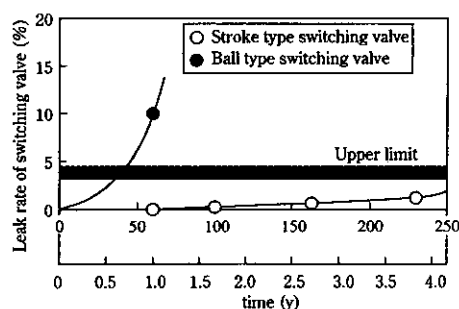


Fig. 9 Life of switching valve

3.3.2 NO_x 生成特性

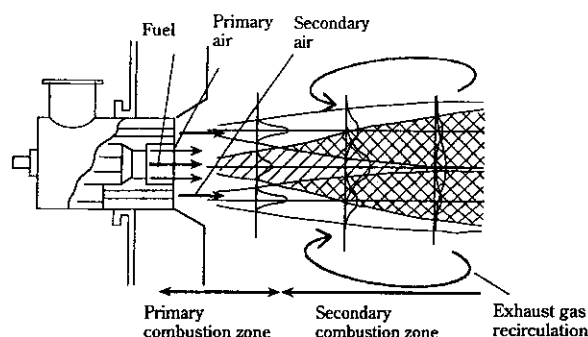
燃焼筒形状と分散火炎孔を変更して、1次と2次燃焼の比率と、排ガスの自己再循環量を最適化した。その結果、Fig. 7に示すように、バーナ容量 502 MJ/h、予熱空気温度 900°C において、排ガス O₂ 11% 換算の NO_x 値は 120 ppm 以下を達成した。

3.3.3 蓄熱体の構造

蓄熱体の選定に当たっては、(1) 低圧力損失化、(2) 破損しにくい構造、(3) 交換・補修の容易性を考慮して種々の形状と材質について、実機と同じ温度条件下で比較テストを行った。蓄熱体の圧力損失を比較した結果、Fig. 8に示すように、次の順であることが分かった。

ハニカム < パイプ < ボール < ラシヒリング

しかし、ハニカムはテスト中に約 50 h 使用しただけで破損し、その補修は困難であることが判明したため、蓄熱体にはボールまたはパイプを選定した。今回開発したバーナでは、交換・補修の容易性も考慮して、耐熱鋼ケースの中に高純度アルミナのボールまたはパイプを詰める構造を採用し、損傷しても簡単に交換できるようにした。また、実機と同じ条件で耐久テストを行った結果、蓄熱体の

Fig. 10 Concept of NO_x reduction of applied burner

寿命は 3 年以上あることを検証した。

3.3.4 切替弁の構造と寿命

RT バーナでは、設置スペースが狭く、バーナ数も多いことから、切替弁をコンパクトな形状とし数を少なくする必要があるため、ストロークタイプ六方弁を採用した。採用したストロークタイプの切替弁とボールタイプの切替弁をまったく同一条件で連続使用し、燃焼空気が排ガス中へリークする率で評価すると、Fig. 9に示すように、ストロークタイプは 4 年以上の寿命があることを確認した。

3.4 実機への適用結果

開発したバーナシステムを水島製鉄所 No. 2 冷間圧延連続焼鈍炉の均熱帯トンネル部に 3 組設置し、1993 年 12 月から連続使用した結果、切替弁でのリークや蓄熱体の損傷はなく、燃焼システムトータルとしての信頼性を検証できた。

4 直火型蓄熱式バーナシステム

4.1 実機適用技術の確立

4.1.1 開発の背景

直火型蓄熱式バーナも、燃焼空気の高温化にともなう高 NO_x 濃度などが障害となり実機への適用が遅れていた。川崎製鉄では、中外炉工業(株)と共同で、1993 年に製鉄所の副生ガス(M ガス)を用いた燃焼実験を行い、直火型蓄熱式バーナの実機適用技術の確立^{5,6)}を図った。

4.1.2 直火型蓄熱式バーナの特長

(1) 低 NO_x バーナの基本構造と NO_x 生成特性

低 NO_x の方策として、バーナ構造の工夫のみで実現でき、特別な制御の必要ない空気側 2 段燃焼法と高速ガス吹き出しによる拡散希薄燃焼法を採用した。2 段燃焼法では、Fig. 10に示すように、燃料過剰な 1 段燃焼域と排ガス自己再循環により低酸素濃度状態の 2 段燃焼域からなり、低 NO_x が達成される。さらに、燃焼空気の高温化により火炎が安定するため、空気および燃料ガスを高速で吹き出し拡散希薄燃焼させることが可能になり、NO_x の発生が抑制される。

M ガス燃焼時の NO_x 濃度と炉温の関係を Fig. 11 に示す。連続加熱炉の一般的な最高温度である 1300°C において、NO_x 濃度は、法規制値 (160 ppm, 11% O₂ 換算) を十分に満足する 130 ppm 以下を達成した。その後、さらに低 NO_x 化が図られ、後述の熱間圧延 3 号連続式加熱炉などでは NO_x 値が 50 ppm 以下のバーナが適用されている。

(2) 蓄熱体の選定

排熱回収を担う蓄熱体として高純度アルミナボールを採用し

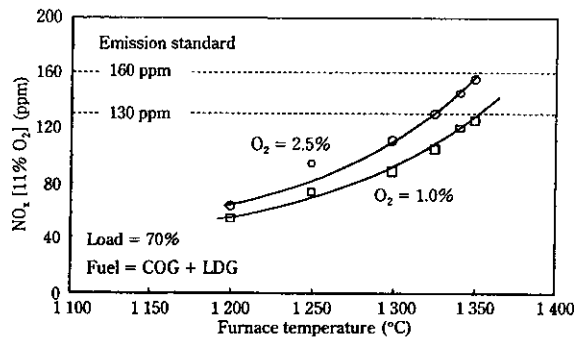
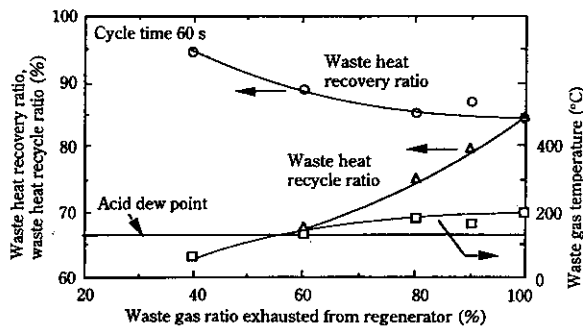
Fig. 11 Characteristics of NO_x generation

Fig. 12 Characteristics of waste heat recovery

た。アルミナボールは、ハニカムなどの構造体と比べ低コストであるうえ、熱膨張、熱衝撃に強く長寿命である。さらに、交換時には蓄熱器に投入するだけでよいなど、メンテナンス性に優れている。

(3) 排熱回収特性

蓄熱式バーナの最適運転方法を検討するため、排熱回収特性を実験にて検討した。Fig. 12 に示すように、蓄熱体において80%以上の高い排熱回収率(=蓄熱体通過空気増加熱量/蓄熱体吸引排ガス熱量)が得られる。また、排ガス吸引率(=蓄熱体通過排ガス量/蓄熱式バーナ燃焼排ガス量)が小さくなると、排熱回収率は上昇するが、蓄熱体を通して排気される排ガス量が減るため、排熱を再利用する割合を示す排熱利用率(=排熱回収率×排ガス吸引率)は低下する。さらには、排ガス温度が酸露点以下となり、排ガス中のいおう酸化物の結露による配管腐食の恐れがある。以上で述べたことより、切替弁、吸引ファンの耐熱の許容範囲内で、吸引率を大きくすることが有利である。

(4) 炉温分布

炉温分布は、鋼材の均一加熱性能に影響する重要な因子である。本蓄熱式バーナは、広い燃焼負荷範囲において均一な炉温分布であり、従来バーナと異なり、低負荷時にも均一加熱性に優れることを検証した。

4.1.3 直火型蓄熱式バーナの制御システム

蓄熱式バーナを実炉へ適用する際の操作性を考慮し、従来バーナと同様の燃焼制御に加えて新たに制御システムを開発した。

(1) 安全な切替燃焼システム

蓄熱式バーナは燃焼と消火を繰り返すため、パイロットバーナの自動点消火、火災監視および切替弁の開閉状態監視などの方策により、安定で安全な切替燃焼を実現した。

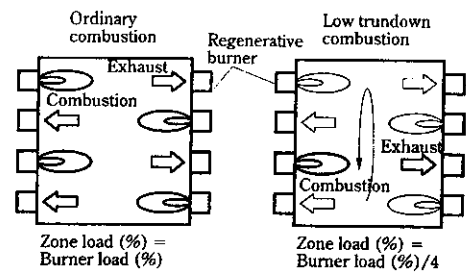


Fig. 13 Concept of high turndown ratio combustion system

(2) ハイターンダウン比燃焼システム

複数の蓄熱式バーナから成る制御ゾーン内で、対向する対バーナごとの間引き制御を可能とし、バーナ単体のターンダウン比(燃焼可能量の最小と最大の比)よりも大きくできるハイターンダウン比燃焼システムを実現した。Fig. 13 に示すように、全対が燃焼した状態では、ゾーン負荷はバーナ負荷と等しい。一方、燃焼/蓄熱と休止をサイクルに選択し、4対のうち1対を燃焼状態とすることにより、ゾーン負荷をバーナ負荷の1/4にできる。この方法とバーナのターンダウン比1/5を組み合わせることで、ゾーンのターンダウン比が1/20まで可能となり、広範囲の燃焼負荷制御および低負荷での炉温均一性を確保できる。

(3) 排ガス吸引率制御

蓄熱体を通ずる排ガス流量を制御し、蓄熱器出側排ガス温度を酸露点以上としかつ高熱回収を達成できる制御を開発した。

(4) バーナ切替パターン制御

複数本の蓄熱式バーナを同時に切替燃焼させた場合、加熱炉内の温度や圧力が安定しないため、切替パターン制御を構築した。

4.1.4 実機への適用結果

上述の知見をもとに、直火型蓄熱式バーナは、大規模な連続加熱炉としては国内で初めて、1994年9月、水島製鉄所大形鋼工場連続加熱炉へ適用された⁷⁾。以来、操業を行い、燃料原単位の約15%低減を達成し、省エネルギーに寄与している。

4.2 連続式加熱炉への直火型蓄熱式バーナの導入

川崎製鉄では、直火型蓄熱式バーナを前記の大形加熱炉へ適用するとともに、水島製鉄所の熱間圧延用連続式加熱炉、厚鋼板用連続式加熱炉、知多製造所の回転炉床式連続加熱炉へ導入し、その適用拡大を図っている。

4.2.1 熱間圧延用連続式加熱炉

(1) 導入の目的

当社水島製鉄所の熱間圧延3号連続式加熱炉に蓄熱式バーナを導入し、加熱能力向上による生産上方弾力性強化、排熱回収率向上による燃料原単位削減、CO₂、NO_x削減による環境負荷軽減を図った。

(2) 導入設備の概要

本連続式加熱炉においては、Fig. 14 に示すように、加熱能力向上や燃料原単位削減が効果的に達成される第1加熱帯上下部に、蓄熱式バーナを導入した⁸⁾。バーナ容量は、上部帯25.2 GJ/h、下部帯24.1 GJ/hとし、ペア数は上部帯2ペア、下部帯3ペアとした。蓄熱体は、寿命などを考慮してセラミックボール(直径13 mm)を使用し、切替弁は、メンテナンスなどを考慮し、シンプルな構造のL型弁を採用した。また、燃焼切替

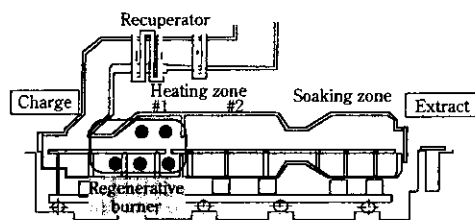


Fig. 14 Setting position of regenerative burner

Table 1 Comparison of available heat

	(GJ/h)	
	Conventional burner	Regenerative burner
Combustion heat of fuel	120	120
Sensible heat of fuel	5	5
Sensible heat of air	25	52
Total heat	150	177

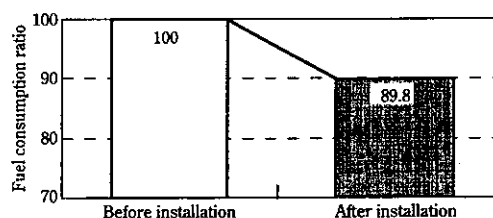


Fig. 15 Comparison of fuel consumption

時間は 40~60 s である。

(3) 導入の効果

加熱能力向上の効果を Table 1 に示す。蓄熱体による高温空気が加熱により、第 1 加熱帯に投入される熱量が 18% 程度向上した。また、蓄熱式バーナを導入することで、蓄熱体を通ずる排ガスの熱回収率は 80% 以上に達し、Fig. 15 に示すように、燃料原単位が 10.2% 削減された。これによる CO₂ 削減量は、年間約 23 597 t に達すると考えられる。さらに、高温噴流を利用した排ガス自己循環型の 2 段燃焼方式の採用により、排ガス NO_x 濃度も従来の 120 ppm から 77 ppm へと大幅に低減された。

本設備は、1999 年 4 月に稼働してから順調に運転され、上記のように環境負荷低減ならびにスラブのスキッドマーク低減などによる品質向上に大きく寄与している。

4.2.2 回転炉床式連続加熱炉

(1) 導入の目的

小径シームレスパイプ工場は、知多製造所の主力工場で、エネルギー消費量が最も大きい。なかでもエネルギー使用量の大きい回転炉床式連続加熱炉に、蓄熱式バーナを導入するとともに重油から天然ガスへ燃料転換することで、省エネルギー、燃焼ガスの清浄化および鋼材の加熱精度向上による製品の品質向上などを狙った。

(2) 導入設備の概要および特徴

本連続加熱炉のバーナ全数を、セラミックボール蓄熱体を用いた蓄熱式バーナに改造し、Fig. 16 に示すように、27 対 54 本を設置した。本改造では、生産性を落とすことなく燃焼容量を 232 GJ/h から 204 GJ/h へとダウンサイジングした。また、従来は材料予熱、レキュペレータ、廃熱ボイラの 3 段階で行っていた排熱回収を、蓄熱式バーナに 1 本化して設備構成を簡略

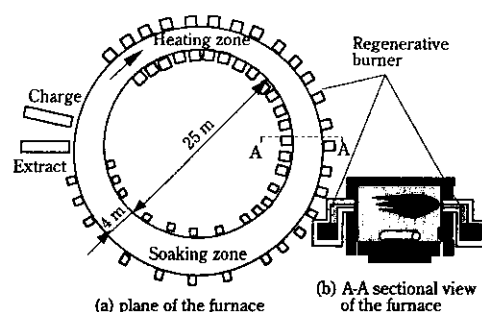


Fig. 16 Rotary furnace with regenerative burner

Table 2 Result of installation

	Before installation		After installation		(%)
Thermal efficiency	48		64		
Waste heat recovery	45		70		

化しかつ排熱回収率の向上を図った。なお、回転炉床式連続加熱炉の蓄熱式バーナへの全面改造は業界初である。

本炉は円形状のトンネル炉であり、Fig. 16 に示すように炉幅が 4 m と狭い。一般に蓄熱式バーナは NO_x 抑止を狙って緩慢燃焼させるため、通常バーナよりも火炎が長くなる傾向にある。本改造では、狭い燃焼空間への大容量バーナの適用が技術開発ポイントであり、改造に先だって実験および数値解析での事前検討を行った。その結果、バーナのノズル配置や燃料の吐出流速により炉内での混合状態を制御し、複数バーナの燃焼と吸引を組み合わせた系としての燃焼完結と低 NO_x を両立する技術を開発できた。この技術により、最大でゾーン長 10.1 m かつ炉幅 4 m の狭い空間へ、大容量蓄熱式バーナ (11.5 GJ/h, 4 対 8 本) の適用が実現されている。

(3) 導入の効果

本改造により、Table 2 に示すように、排熱回収率が 45% から 70% に向上し、約 20% の省エネルギーにつながった。この結果、知多製造所として年間約 14 656 t の CO₂ 排出量削減、燃料転換により約 40% の SO_x 排出量削減を達成し、環境改善に大きく貢献した。また、鋼材の目標加熱温度的中率や均熱度の向上により、合金鋼の品質安定化に寄与した。

本設備は 1999 年 3 月に稼働し¹⁰⁾、上記の性能が発揮されている。

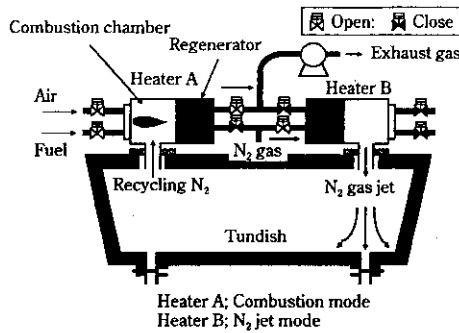
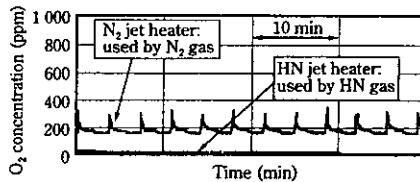
5 高温窒素噴流を用いた無酸化加熱装置

5.1 開発の背景

水島製鉄所の No. 4 連続鋳造設備は、耐火物コストの削減と生産性向上のため、2 基のタンディッシュを熱間で交互に使用する熱間再使用方式を採用している。しかし、この熱間再使用方法は、待機中に残鋼の再酸化が起り、鋳込み開始時の溶鋼汚染によるボトムスラブの品質低下を招いていた。そこで、待機中のタンディッシュを無酸化あるいは還元状態に保ちながら高温に保持できる加熱技術の開発が求められ、高温窒素噴流を用いた無酸化加熱装置 (N₂ ジェットヒーター) の開発¹¹⁾ を中外炉工場(株)と共同で進めた。

5.2 N₂ ジェットヒーターの原理と概要

開発した N₂ ジェットヒーターは、蓄熱体を内在させた加熱器 2 台を 1 組として使うことにより、N₂ ガスを 1500°C まで昇温し、

Fig. 17 Tundish equipped with N₂ jet heaterFig. 18 O₂ concentration in tundish

被加熱物に高温ガスを噴出させることにより加熱する装置である。本装置を用いたタンディッシュの無酸化加熱の原理を Fig. 17 に示す。各ヒーターは、「燃焼モード」と「N₂ ジェットモード」の2つの状態があり、これらを 30～100 s の周期で交互に繰り返す。「燃焼モード」では、燃焼排ガスとタンディッシュ加熱後に回収される N₂ ガスにより蓄熱体を高温に加熱する。「N₂ ジェットモード」では、高温の蓄熱体に N₂ ガスを通すことにより蓄熱体に蓄えた熱エネルギーを高温の N₂ ガス顕熱に転換し、タンディッシュ内へ噴出させる。その結果、高温 N₂ ガス噴流の対流熱伝達によってタンディッシュ内を無酸化雰囲気下で加熱できる。さらに、加熱前の N₂ ガスに少量の H₂ ガスを添加し、水素濃度が 1～3% 程度の HN ガスを用いることによって還元加熱も可能である¹²⁾。

5.3 N₂ ジェットヒーターの性能

5.3.1 タンディッシュ断気能力

N₂ ジェットヒーター使用中のタンディッシュ内の酸素濃度を Fig. 18 に示す。N₂ ジェットヒーターの加熱ガスとしては、N₂ ガス単体と N₂ ガスに少量の H₂ ガスを添加した HN ガスを用いた。N₂ ガス単体でタンディッシュ内の酸素濃度は、平均で 300 ppm 以下に保持できており、ほぼ無酸化に近い状態で加熱することができている。HN ガスを用いた場合には、タンディッシュ内の酸素濃度は完全にゼロにできる。また、鉄の還元雰囲気領域を表わす H₂/H₂O は 1.5 以上を保持できており、還元加熱ができることも確認されている。

5.3.2 タンディッシュ加熱能力

N₂ ジェットヒーターを使用してタンディッシュ内表面温度の低下を抑止できた効果を Fig. 19 に示す。これより 8 h 待機後のタンディッシュ内表面温度は、N₂ ジェットヒーターによる加熱によって従来の無予熱待機に比べ約 180°C 上昇させることができた。その結果、鋳込み前に必要であるタンディッシュ温度 900°C 以上の状態が、20 h 待機後も保持されている。

5.4 N₂ ジェットヒーターの導入効果

連続再使用するタンディッシュの待機方法別（無予熱待機、N₂ ジェットヒーター使用、HN ジェットヒーター使用）に、鋳込み開始

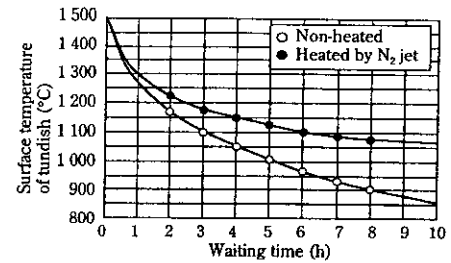
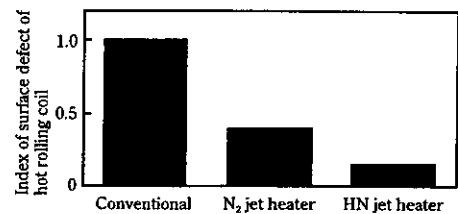
Fig. 19 Effect of N₂ jet heating on tundish temperature

Fig. 20 Comparison of surface defect of hot coil

時における最ボトムスラブを熱間圧延し表面酸洗した後のコイルの表面筋状欠陥混入率を Fig. 20 に示す。N₂ ジェットヒーターの導入により、従来の無予熱待機に比べ表面欠陥は半分以下まで低域でき、さらに HN ガスを用いて還元加熱を実施した場合、表面欠陥が 1/4 以下まで改善され¹³⁾、歩留まり向上による省エネルギーに大きく寄与している。

6 転炉操業に同期化した取鍋加熱システム

6.1 開発の背景

水島製鉄所の第 1 製鋼工場は多品種小ロットに対応しているため、鋼種制約などから決まる取鍋の使用規制により稼働鍋数が多い。このため、取鍋の待機時間が通常の製鋼工場に比べ長く、受鋼前の取鍋耐火物の温度が低くなるため、転炉から受鋼した溶鋼の取鍋内での温度低下量が大きくなっている。これに対しオフラインに直火バーナを用いた取鍋耐火物の加熱装置が装備されているが、加熱終了から受鋼までの時間が長く放熱が大きいため、期待するほどの効果は上がっていない。そこで、第 1 製鋼工場において、取鍋内での溶鋼温度低下の抑止による出鋼温度の低域を狙い、受鋼する直前に取鍋を急速加熱するシステムの開発に取り組んだ¹⁴⁾。

6.2 取鍋加熱システムの概要

第 1 製鋼工場に導入した取鍋加熱システムの概要を Fig. 21 に示す。受鋼準備が完了した取鍋は、クレーンにより受鋼台車に積載され、受鋼台車で加熱装置まで移動し加熱される。加熱は転炉の吹錬完了までの約 20 min 実施され、加熱終了から出鋼までの時間は 5 min 以内と加熱後の放熱ロスを最小限に抑えている。さらに、加熱中の取鍋耐火物への入熱量を随時計算して、加熱情報をプロセスコンピュータへ送信することにより転炉の出鋼温度の低域を図っている。また、加熱装置のバーナには、急速加熱かつ高熱回収が可能な蓄熱式バーナを採用した。この加熱システムの特徴は、従来のオフラインにて長時間加熱しクレーンにて受鋼台車上に搬送する方式から、受鋼台車上でのオンライン急速加熱方式に改良したこと、転炉吹錬に取鍋の加熱を同期化させ、取鍋の加熱量に応じて転炉からの溶鋼の出鋼温度を制御したことである。

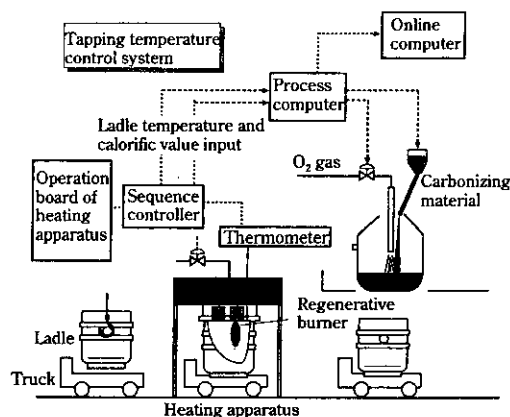


Fig. 21 Outline of the online ladle heating system

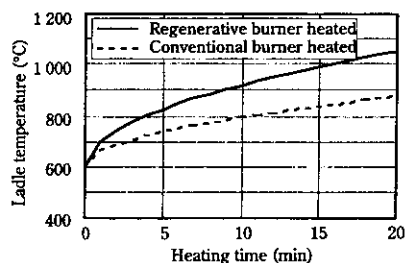


Fig. 22 Effect of regenerative burner heating on ladle temperature

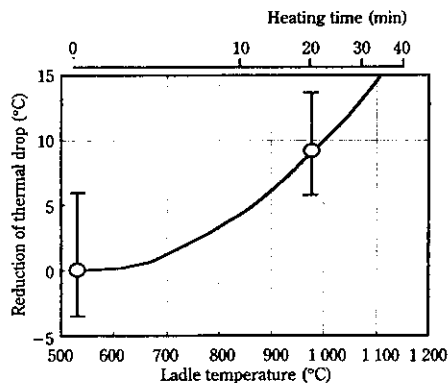


Fig. 23 Reduction of thermal drop of molten steel in ladle

6.3 取鍋加熱システムの性能

受鋼台車上的取鍋のオンライン加熱は、転炉の出鋼周期と出鋼後に行われる2次精錬の処理時間により、加熱時間の制約を受ける。そのため、限られた加熱時間内に取鍋耐火物に十分な熱量を供給する必要がある。

Fig. 22 に同一バーナ燃焼量で、蓄熱バーナと通常バーナを用いて取鍋を加熱した場合の耐火物表面温度の推移を示す。蓄熱バーナの採用により、20 min で 1000°C 以上まで加熱でき、通常のバーナ加熱に比べ約 150°C 取鍋温度を高くできる。また、この時の蓄熱バーナ単体での取鍋の加熱効率（取鍋耐火物入熱量／燃料ガス燃焼熱量）は約 80% であり、通常バーナに比べ約 1.6 倍に向上した。さらに、取鍋の加熱終了から受鋼までの放熱ロスを含めた加熱システム全体としては、オンライン加熱の効果により、オフライン加熱に対し加熱効率が 10 倍以上になる。

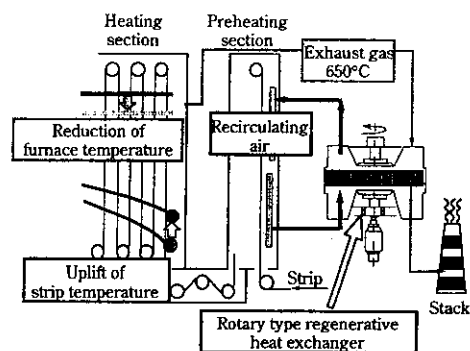


Fig. 24 Schema of installed regenerative heat exchanger

6.4 取鍋加熱システムの導入効果

2000 年 5 月に導入した本取鍋加熱システムによる転炉の溶鋼出鋼温度の低減効果を Fig. 23 に示す。オンライン上での短時間の取鍋加熱によって、取鍋温度が従来の約 550°C から約 1000°C に上昇し、取鍋内での溶鋼温度の降下を約 9°C 抑止できた。その結果、転炉での出鋼温度を約 9°C 下げることが可能になり、溶鋼の昇温材である炭材の使用量を大幅に削減できた。さらに、従来のオフラインでの取鍋加熱に対して、取鍋加熱に使用する燃料ガスを約 40% に削減でき、大きな省エネルギーにつながっている¹⁰⁾。

7 回転型蓄熱器を利用した高効率加熱システム

7.1 開発の背景

高温焼鈍、チャンスフリーを特徴とする水島製鉄所 No. 2 冷間圧延連続焼鈍炉 (2CAL) は、付加価値の高い鋼板を低コストで製造しているが、昨今のコスト競争の激化に対応して、さらなる生産性の向上と低コスト化が求められていた。そこで、2CAL 予熱帯に回転型蓄熱式 (ユングストローム式) 熱交換器を応用した加熱システムを適用することで、予熱帯の加熱能力を向上し、炉内金物寿命延長による修繕費削減、燃料原単位削減および炉内安定通板による生産能力向上を図った。

7.2 加熱システムの概要

連続焼鈍炉に回転型蓄熱式熱交換器を適用した加熱システム¹⁰⁾の概要を Fig. 24 に示す。回転型蓄熱式熱交換器にて、加熱帯から排出された高温排ガス (650°C) を予熱帯の循環空気中に熱交換する。昇温された循環空気は、予熱帯のチャンバーよりストリップに噴射され、ストリップは所定の温度まで加熱される。この加熱システムにより、従来のレキュベレータ方式に比べ、約 2 倍の熱回収が可能となり予熱帯出側板温を上昇させることができ、ストリップとロールとの温度差 (サーマルクラウン) 低減による炉内安定通板、加熱帯の燃焼負荷低減や平均炉温低減による炉内金物寿命延長が同時に達成できる。

7.3 回転型蓄熱式熱交換器の焼鈍炉適用技術

従来、回転型蓄熱式熱交換器は、高炉用熱風炉など低温排ガスには用いられていたが、連続焼鈍炉への適用にあたっては、以下の技術開発を行った。

- (1) 循環空気への燃焼排ガスリークによるストリップ表面品質悪化を防止するため、Fig. 25 に示すように、排ガスが含まれる

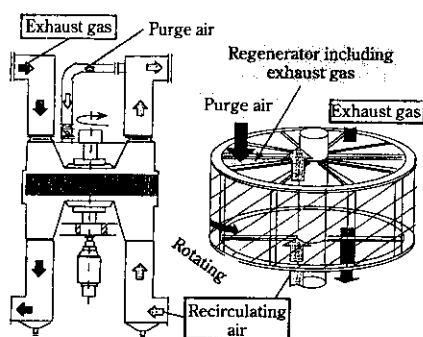


Fig. 25 Purging method of regenerator

蓄熱体を循環空気によりパージする機構を考案し、循環空気への排ガス混入をゼロにした。

- (2) 高温循環空気を用いた高温までのストリップ加熱による表面品質への影響評価を行うために、高温空気噴流によるストリップ加熱実験を実施し、ストリップの酸化・還元特性および化成処理性を評価し、予熱帯でのストリップ加熱温度を最適化した。
- (3) 高温排ガス (650°C) 投入時の回転型蓄熱体の信頼性を向上するために、蓄熱体には、高温耐熱、低圧力損失、装置のコンパクト化が可能となるエレメントを採用し、蓄熱器全体の高温耐熱に配慮して設計した。

これらにより、回転型蓄熱式熱交換器を初めて連続焼鈍炉に適用することに成功した。

7.4 加熱システムの導入効果

回転型蓄熱式熱交換器を2CAL予熱帯に適用した¹⁷⁾結果、予熱帯のストリップ昇温能力が約45°C向上し、加熱帯のサーマルクラウンが約15°C低減され、生産能力が約17%向上した。さらに、加熱帯の燃焼負荷が軽減されるとともに、伝熱量が最大となる最適ヒートパターンを実現することにより、加熱帯の平均炉温が約11°C低減された。これにより、ラジエントチューブなどの金物寿命は、約1.7倍に向上すると推定される。

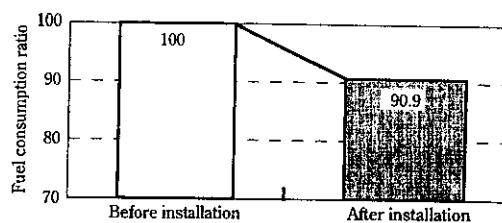


Fig. 26 Comparison of fuel consumption

また、適用した蓄熱式熱交換器により従来に比べ約2倍の熱回収を達成し、加熱帯燃焼負荷の最適化と相まって焼鈍炉の炉効率が約10%向上した。これにより、Fig. 26に示すように、燃料原単位が9.1%削減され、大きく省エネルギーに寄与している。

8 結 言

川崎製鉄では、大気中のCO₂濃度上昇による地球温暖化の抑止に貢献できる蓄熱式熱交換システムを応用したさまざまな加熱技術を開発して実用化した。これらの技術は、製鉄プロセスに適用して以来、期待通りの性能を発揮し、その結果733924 GJ/yの省エネルギー (CO₂排出量換算94513 t/yの削減) を達成するとともに製品品質の向上にも貢献している。

本報で述べた技術は、省エネルギーを通じて環境負荷低減に極めて有効な手段と考えられ、今後の応用拡大が期待される。

なお、N₂ジェットヒータは「日本機械学会賞(技術)」、日本機械工業連合会の「優秀省エネルギー機器」を、蓄熱式RTバーナ、直火型蓄熱式バーナおよびN₂ジェットヒータを総合して(財)岩谷直治記念財団の「岩谷直治記念賞」を授与された。

水島製鉄所の熱間圧延用、厚鋼板用の連続加熱炉、知多製造所の回転炉床式連続加熱炉への蓄熱式バーナの導入は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の「高性能工業炉導入フィールドテスト事業」に、水島製鉄所の製鋼取鍋加熱システムは「先導的エネルギー使用合理化設備導入モデル事業」にそれぞれ認可され補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 尾花英朗：「熱交換器設計ハンドブック」，(1974)，219，[工学図書株式会社]
- 2) M. Gettings: Gas Warmer Int., 35(1986)5, 292
- 3) 中川二彦，児玉吉寿，江口信之，花園宣明，安部義男，由利寿康：材料とプロセス，9(1996)，1048
- 4) 中川二彦，小橋正満，怒田邦広，内藤 廣，蔵本浩史，貝原利一：材料とプロセス，5(1992)，504
- 5) 尾前純也，福井雅康，清水 淳，藤本洋二：材料とプロセス，9(1996)，112
- 6) 日本鉄鋼協会生産技術部門第98回熱経済技術部会(1996)，熱98統4，川崎製鉄提出資料
- 7) 藤本洋二，得丸豊久，尾前純也，八尋和広，坂本庄一，永井精和：材料とプロセス，9(1996)，1046
- 8) 杉本一郎，古川誠博，苅部建太，安達一成：材料とプロセス，12(1999)，1110
- 9) 川崎製鉄(株)：特願2000-39214
- 10) 正司雅朗：「知多小径シームレス回転炉への蓄熱式バーナ導入」，平成11年度省エネルギー優秀事例全国大会，東海地区大会事例集，(1999)，185
- 11) T. Nakagawa, K. Hara, J. Hasunuma, H. Osanai, R. Yamaguchi, and S. Hashimoto: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 80(1997)，307
- 12) 原 一晃，中川二彦，油原 晋，小山内寿，安部俊史，若槻裕司：材料とプロセス，13(2000)，72
- 13) 安部俊史，原 一晃，中川二彦，門田圭司，藤村俊生，野村 寛：材料とプロセス，13(2000)，73
- 14) 川崎製鉄(株)：特願平11-242005
- 15) 原 一晃，安達一成，野村 寛，後藤信孝，高橋大輔：材料とプロセス，投稿中
- 16) 川崎製鉄(株)：特開平10-088245
- 17) 苅部建太，安達一成，中川二彦，岸田義宣，児玉吉寿，廣畑和宏：材料とプロセス，13(2000)，1072