

RCB-II型リジェネバーナを取付けたオールリジェネ加熱炉の総合評価

中外炉工業株式会社 プラント事業部 ○佐藤健次、木本康之、池田 勇

Abstract

In general, the regenerative burner is installed at pre-heating zone on re-heating furnace. Fuel consumption decrease and production capacity increase by regenerative burner installation. If it is possible to install such as good performance regenerative burner to all zone, furnace performance increase.

In this report, method of burner choice and material heating up characteristic is described. Finally, total performance of all regenerative burner side firing re-heating furnace is estimated.

1. はじめに

伝熱特性、熱効率、均一加熱、低NO_x性能などリジェネバーナの優れた性能は周知の通りである。鉄鋼用加熱炉の全ゾーンに採用し、リジェネの利点を生かしたプロフィールと適切なバーナ形式及びバーナ容量を選定する事によって大幅なダウンサイジングができる。これによって急速均一加熱と燃料原単位向上が両立する高性能工業炉が可能になる。

リジェネバーナの鉄鋼加熱炉への代表的な使用例として予熱帯への適用がある。リジェネバーナで発生する燃焼排ガスの大半を自己吸引し廃熱回収して排出できるため、既設煙道を改造することなく加熱炉の能力をアップする事ができる。最も熱量を多く必要とする予熱帯に採用することは熱効率、投資効果の面で最も有利であるのが最大の理由である。

本稿では NEDOの平成11年度高性能工業炉導入FT事業の一環として弊社が(株)中山製鋼所殿に納入した熱延スラブ加熱炉の事例を紹介する。

既設炉は下部サイド焚き、上部軸流焚きWB炉であったが全面改修してオールリジェネバーナ焚き加熱炉に改修した。炉長を84%にダウンサイジングし大幅な省エネルギーならびに高速均一加熱を達成した。

本加熱炉は、「オールサイド焚きリジェネバーナを採用した超コンパクトな加熱炉」であることが最大の特徴で、高い炉床負荷であるにも関わらず低燃料原単位、均一加熱が実現できた。Fig.1に本加熱炉の概略形状を示す。

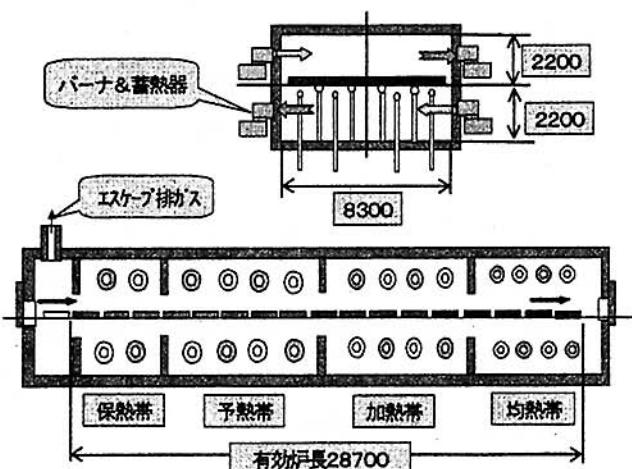


Fig.1 Furnace Size & Burner Layout

- 加熱能力 : 180 ton/h (冷片装入)
- 炉床負荷 : 880 kg/m²·h
- 加熱時間 : 90分
- 炉有効長 : 28700 mm
- 炉内幅 : 8300 mm
- 炉内高さ : HL + 2200 mm
- 炉内深さ : HL - 2200 mm
- バーナ数 : RCB-II型 28ペア

2. 加熱炉およびバーナの仕様

2-1. 加熱炉仕様

- ・燃 料 : LNG 専焼、COG 専焼、LNG+COG 混焼
- ・制御ゾーン: 6 ゾーン (保熱帯は予熱帯に包含)
- ・排ガス循環 (E G R) 量: 最大 25 %

2-2. バーナ仕様

本加熱炉で使用したリジェネバーナは、2段燃焼型リジェネバーナである。これにより低炉温時の燃焼安定性を確保すると同時に、高炉温時の低NO_x性も満足している。低炉温時の助燃空気もしくは補助燃料の投入が不要なのでバーナ周りの配管もシンプルになる。Fig.2に本バーナの概略形状を示す。

- ・型 式 : RCB-II L
- ・予熱帯上下部燃焼容量 : 4300kW 12ペア
- ・加熱帯上下部燃焼容量 : 1700kW 8ペア
- ・均熱帯下部燃焼容量 : 1500kW 4ペア
- ・均熱帯上部燃焼容量 : 1050kW 4ペア
- ・炉 温 : 1300°C

注) 上記 kW は燃料投入容量で蓄熱器、空気ノズルは排ガス循環量を加味し 25 % 増しの大きさになっている。

弊社は3種類のリジェネバーナを用途に応じて使い分けている。本加熱炉において3種類のバーナの中からあえてNO_xミニマムではないRCB-II L型バーナを採用したことには重要な意味がある。そこでバーナ決定までのプロセスをもう少し詳しく説明する。

3. バーナ選定プロセス

3-1. 炉内温度分布均一性

バーナ選定に際し最も重視した項目は炉内温度分布の均一性である。中でも炉幅方向の炉内温度分布は材料温度の均一性に直結するため特に重要である。

本加熱炉は炉幅8.3mと比較的狭いにもかかわらず、高い炉床負荷を実現するために予熱帯で大容量バーナを採用している。ここで火炎噴流速度の減衰が緩や

かなバーナを採用すると火炎噴流が反対側まで到達して、最悪は蓄熱器内部でも燃焼が継続することにもなるので、バーナタイプの選択には細心の注意を払う必要がある。バーナの選択肢は3種類で、それぞれの特徴は以下の通りである。

(1) RCB-II L型バーナ

燃焼空気の全量を燃料ノズルから離れた位置にある2次空気ノズルから供給するバーナで、最も火炎噴流速度の減衰が緩やかなバーナである。

(2) RCB-II L型バーナ

燃焼空気をバーナ内部で1次空気と2次空気に分割している2段燃焼型バーナで、火炎噴流速度の減衰は II L型バーナより早い。

(3) RCB-II S型バーナ

II L型と同様の2段燃焼型バーナであるが、1次空気割合が II L型より高く、2次空気ノズル数も II L型の2倍になっているので、最も火炎噴流速度の減衰が早く火炎温度も高い。

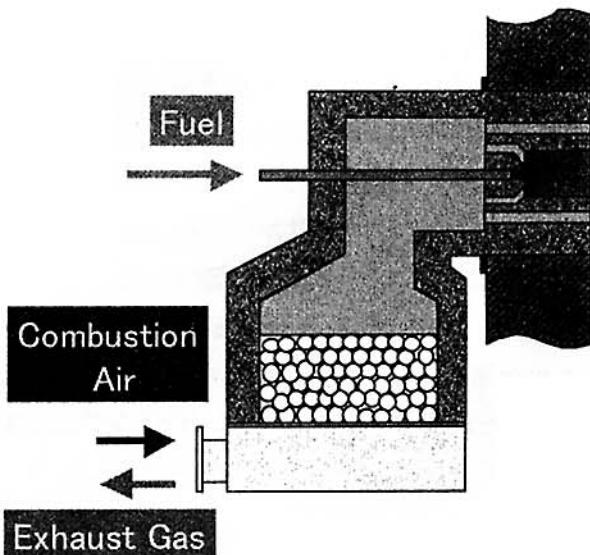


Fig.2 Type RCB-II L Burner

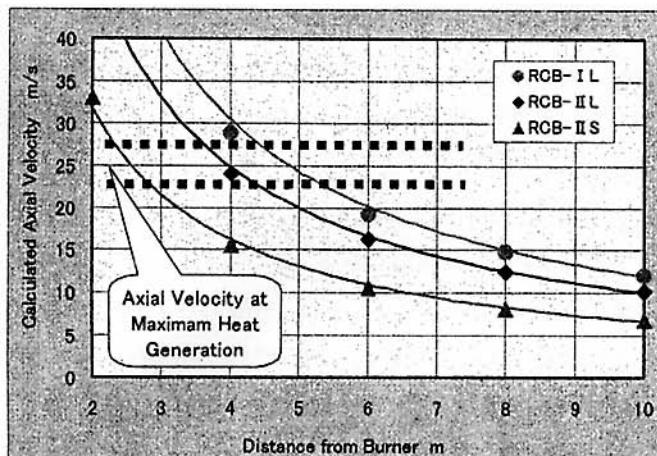


Fig.3 Characteristics of Axial Velocity
(4300kW with EGR Burner)

Fig.3 に、周囲温度や噴流温度を仮定して計算により求めた3種類の4300kWバーナの火炎噴流速度減衰特性を示す。但しこの4300kWバーナは25%排ガス循環対応型のため、バーナサイズは5375kW相当である。

また弊社研究所における1000kWバーナでの実験結果より、バーナタイプによらず火炎噴流速度が約25m/sの位置で最高火炎温度が記録された。これらの結果から、4300kWのバーナタイプ別最高火炎温度発生位置を逆算することができる。

- RCB-I L : 5.0 m
- RCB-II L : 4.0 m
- RCB-II S : 2.6 m

Fig.4 は1000kWのRCB-II L型バーナの火炎温度分布測定結果である。燃料はLNG、平均炉温1310°C、空気比1.10である。1000kWのRCB-II L型バーナではバーナから1.5m付近でピーク火炎温度を示した。また1.5mの位置での計算による火炎噴流速度は約25m/sであった。

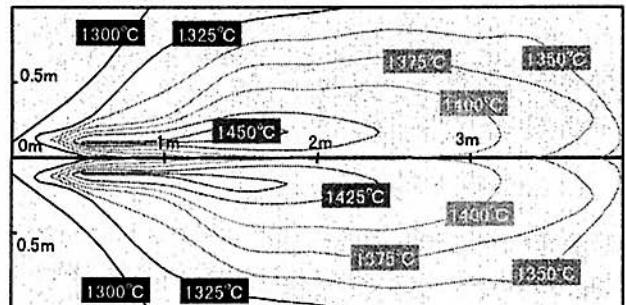


Fig.4 Flame Temperature Distribution (RCB-II L)

加熱炉設計において重要なことは、加熱材料の大きさや形状に応じた最適加熱のための炉幅方向ピーク火炎温度発生位置を見極めることである。本加熱炉の場合は、加熱材料の特性から予熱帯において炉幅方向の中央付近でピーク火炎温度を発生させることが、炉内温度分布均一性に必須であり、ひいては材料の均一加熱に通じる。その結果、予熱帯で使用する4300kWバーナにおいて、炉幅8.3mのほぼ中央の4.0mでピーク火炎温度を発生させることを狙ってRCB-II L型バーナを採用することに決定した。

3-2. 低NOx性

材料の均一加熱の観点からは最適バーナが選定できたが、もう一つの観点である低NOx性も重要である。特に本加熱炉は工場全体のNOx総量規制の関係から大変厳しい低NOx性が要求されていた。

- NOx年間総排出量 = 45 ton 以下
- NOx瞬間濃度 = 200 ppm (O2=0%) 以下

年間総排出量から逆算すると、平均NOx濃度は45 ppm(O2=11%)以下にする必要がある。RCB-II L型バーナのNOx特性から判断すると45ppmは燃料をLNGにすれば達成できる値であるが、本加熱炉では状況に応じてCOGを使用することもあり、その場合は達成が微妙であった。仮に最も低NOxタイプであるRCB-I L

型バーナを選択すれば、燃料がCOGでもNO_x値の問題はクリアされる。しかし炉内温度分布が「極端な中高」になること予想されるためRCB-II L型の選択を崩すことは出来ない。

最終的には、将来的なNO_x規制強化やCOG性状変動に伴う Fuel NO_x 増加にも対応できるようRCB-II L型バーナにおいて、排ガス循環を採用することにした。Fig.5 に1000kWテストバーナにおいて燃焼空気量の20%の排ガス循環を実施した場合の低NO_x効果を示す。排ガス循環を実施することで約15%のNO_x低減となることが確認された。

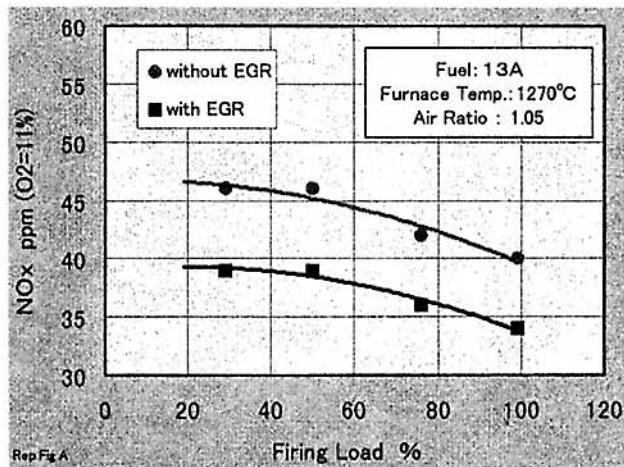


Fig.5 NO_x Emission with EGR (RCB-II L)

4. 最適制御方法

4-1. 排ガス循環量制御

低NO_x化のために排ガス循環を採用することを決定したが、省エネルギーの観点からすれば排ガス循環量は少ないほど良い。そこで本加熱炉では、煙突でのNO_x測定値により排ガス循環率を可変とする制御を採用した。煙突でのNO_x測定値が45ppm(O₂=11%)を超えると排ガス循環がスタートし、最大で燃焼空気流量の25%までの排ガス循環が可能である。排ガス循環時は、燃焼空気プロワ吸引側の流量調節弁と排ガス循環ライ

ンの流量調節弁の開度を協調的に制御している。

4-2. 炉内O₂濃度制御

リジェネバーナは必ず周期的に燃焼と吸引を繰り返さなければならない。加えてバーナの間引き制御と時間比例燃焼制御を実施している。そのため、燃料と燃焼空気の流量制御を実施しているにも関わらず、炉内O₂濃度が変動することがある。この変動を最小限に止めるため、通常の流量制御に加え 炉内O₂=1.5%になるようにO₂制御を実施している。

5. 総合性能評価(1)－燃焼性能評価－

5-1. 炉内温度分布評価

予熱、加熱、均熱の各帯天井の炉幅方向に5本のR熱電対を装着し、通常操業時の炉内温度分布を計測した結果を Fig.6 に示す。

加熱開始直後の予熱帶では、炉幅方向中央付近の炉温がバーナ近傍炉温より約19°Cほど低い。これは、炉幅方向中央付近が最高火炎温度発生位置であるにもかかわらず材料受熱量が大きいため、僅かではあるが若干「中低傾向」となった。しかし、高炉床負荷の予熱帶温度分布としては特筆すべき均一性である。

加熱帶では、バーナ形式の選定もさることながら容量の設定が最適で、熱供給と材料の受熱がバランスしたため温度差が6°Cと最も小さくなり、予想以上の結果を得た。加熱帶では「中低」の傾向は解消された。

均熱帶では設置しているバーナ容量が小さいことに加え、加熱帶まで加熱がほぼ完了していることで、バーナ負荷を約1/4に絞って操業した。その結果、炉幅方向中央付近の炉温がバーナ近傍炉温より約11°Cほど低下した。しかしこの温度差は、従来炉の温度差と比較すると比類ない程小さい値であると評価している。

この均一な炉内温度分布が材料の温度分布にどのように影響したかは次章で解説する。

5-3. 蓄熱器性能評価

高温空気燃焼の要が蓄熱器である。通常操業状態における予熱帶上部バーナの蓄熱器高温側ならびに低温側の温度変化を Fig.7 に示す。

ここで蓄熱器高温側温度はバーナタイル部温度を採用した。蓄熱体直上実測温度 + 40°C (実験より求めた補正值) をバーナタイル部温度とした。この時の予熱帶上部平均炉温 1232°C に対し、高温側空気平均温度が 1172°C であることから温度効率は 95% 以上となる。

また低温側は蓄熱体直下の温度を採用した。低温側平均温度は 198°C を示した。LNG70% + COG30% の燃料による排ガスの酸露点を考慮して、低温側平均温を 200°C と設定している。

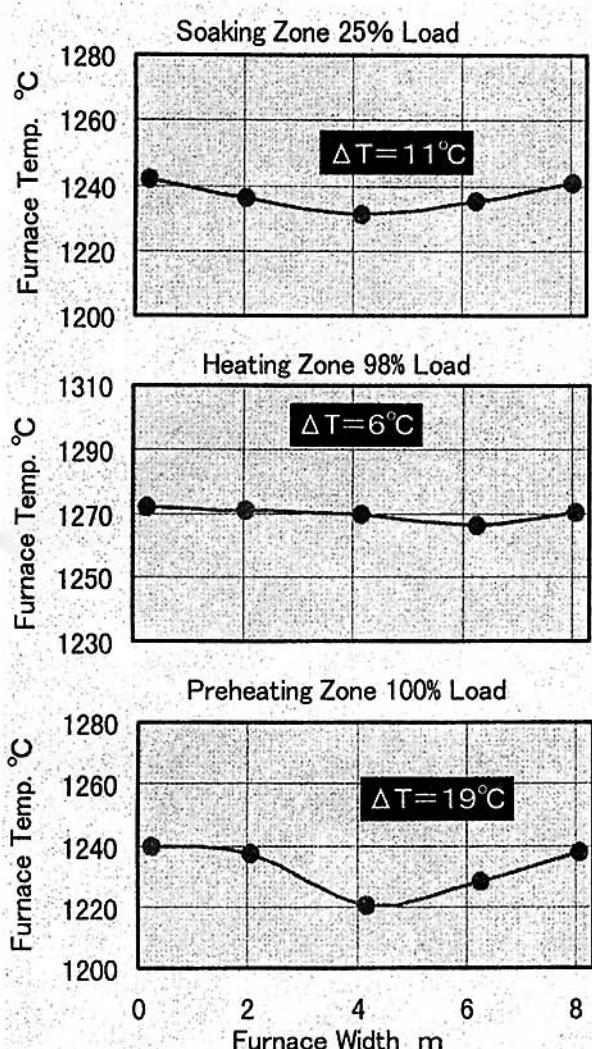


Fig.6 Furnace Temperature Distribution

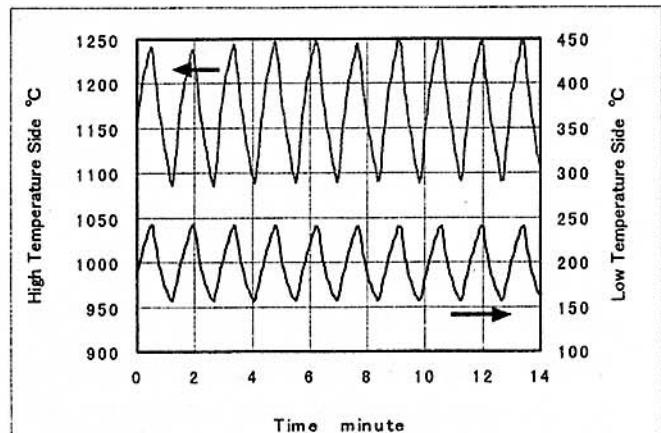


Fig.7 Characteristic of Regenerator

5-2. NOx排出特性評価

通常操業時における煙突での目標NOx値 45 ppm ($\text{O}_2=11\%$) に対して、約 20% の排ガス循環を実施することで 37 ppm ($\text{O}_2=11\%$) まで低下した。この時の燃料は COG30% + LNG70% であった。ここでも満足できる低NOx性が確認された。

6. 総合性能評価(2) - 加熱性能評価 -

6-1. 材料昇温特性評価

厚さ 168mm の材料の上面近傍(深さ 10mm)、下面近傍(深さ 10mm)、中心部の 3 層の温度上昇変化を測定するため、熱電対を取り付けた材料を通常操業中の材料の間にまぜて加熱炉に装入した。その時の材料温度上昇履歴を Fig.8 に示す。

材料上面から約 150mm 離れた雰囲気温度は、材料装入後 12 分 (装入位置から約 1m の位置) で 1000°C

に達していることから、材料投入直後から急速加熱が行われていることが証明された。また全加熱工程に亘り下面からの入熱量が多く、従来炉では考えられない程上下面の温度差が少ない。このことは画期的である。抽出時の上面と中心の温度差は約10°Cであり、高炉床負荷にかかわらず極めて高い熟熱性を示した。

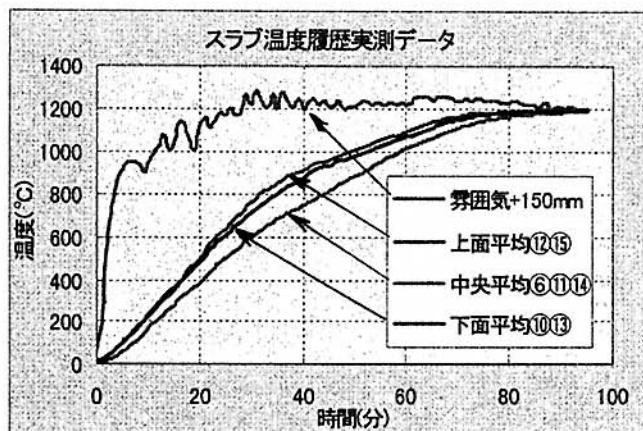


Fig.8 Characteristic of Slab Heating

6-2. スキッドマーク評価

材料の厚み方向(168mm)の温度分布均一性は、上述の計測により極めて良好であることが確認できたが、もう一つの材料温度分布指標である材料長さ方向の温度分布(スキッドマーク含む)に関しても良好であることが確認できた。

本加熱炉は、高速加熱(炉床負荷880kg/m²h、95分加熱)を実施しているにも関わらず、粗ミル出側でのスキッドマークは10~15°C程度で、圧延精度の向上に大きく貢献した。

6-2. 原単位評価

Fig.9 および Table.1 に本加熱炉の熱収支結果を示す。廃熱回収率が81%に達し、Available Heat は89.6%にも達し、原単位は1092.6MJ/ton (261Mcal/ton) であった。炉床負荷が 800kg/m²h 以上の炉における原単位としては、極めて優れた数値である。

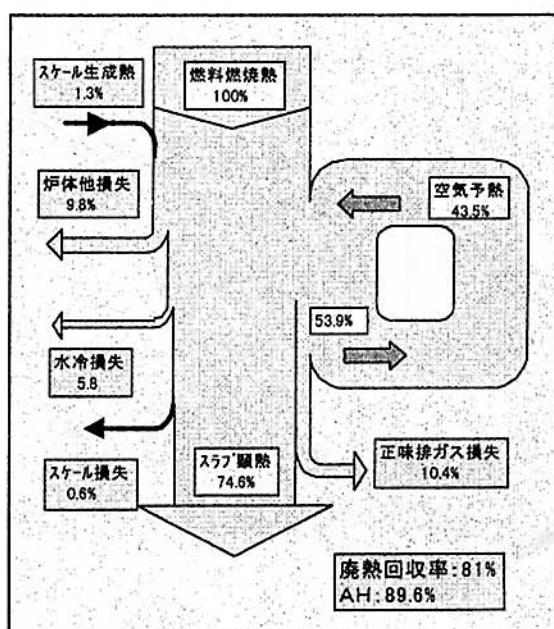


Fig.9 Heat Balance

① 加熱量	184.7t/h	
② 加熱温度	15°C → 1220°C	
③ スラブ平均長さ	7550mm	
④ 炉床負荷	880 kg/m ² h	
項目	MJ/t	%
入熱	①燃料燃焼熱 ②スケール生成熱 ③燃料ガスの回収熱 ④燃焼空気の回収熱 ⑤鋼片顯熱	1092.6 13.8 0.0 475.1 0.0
	入熱合計	1581.5
出熱	⑥鋼片顯熱 ⑦スケール顯熱 ⑧冷却損失 ⑨排ガス損失 ⑩その他損失	815.4 7.1 62.8 588.6 107.6
	出熱合計	1581.5

Table 1 Heat Balance

7. まとめ

炉幅8.3mのオールリジエネバーナサイド焚き鉄鋼加熱炉において、火炎噴流速度の減衰より予想した最高火炎温度発生位置の知見を元に、材料温度分布均一性向上のための最適バーナ選定を実施した。更に、通常操業中の炉温分布並びに材料温度分布を測定することでバーナ選定結果の正しさを証明した。

またNOx値に関しても、排ガス循環を適切に実施することで、COG含有燃料でも37ppm(O₂=11%)という低N Ox化を達成した。

加熱炉としての総合評価でも、上部帯軸流焚き既設炉と比較して、炉長、炉高両方のダウンサイ징、省エネルギー28%、均一加熱による圧延精度向上などを達成した。

今後は、本加熱炉から得られたような伝熱特性の実機データ数を増やして、加熱炉における最適バーナ選定の精度向上ならびに材料加熱特性予想の実現に努力したい。

最後に本報告をまとめるにあたり、多大なご協力をいたいたいた(株)中山製鋼所の方々に謝意を表して本稿の結びとする。