

# 環境調和型高性能 鋼片加熱炉の性能評価

上 出 雅 男\*  
中 野 正 昭\*\*  
今 田 守 彦\*\*\*  
徳 留 典 之\*\*\*\*

## 概 要

地球温暖化防止を目的とした高性能工業炉の開発プロジェクトで研究開発された高温空気燃焼法は多くの工業炉に対して適応され、当初の目的どおりの成果をあげた。我々は本技術開発の集大成として全ゾーンにリジェネレータを設置した鋼片用加熱炉を建設し、実操業状態での実測、数値解析を通じてその性能を評価した。

## 1. 緒 言

ブラジルサミットでの Agenda21 (1992年) に基づく地球温暖化ガス排出量削減アクションプランは COP3~8 を通じて具現化されつつある。我が国には大小合わせて約 4 万基の工業炉が稼働しており、そのエネルギー使用量は国内の総エネルギー使用量の約 20%<sup>1)</sup> を使用しているといわれており、工業炉の省エネルギー、高性能化はエネルギー使用量削減、地球温暖化防止に大きく寄与できると考えられる。これらの背景のもとに「高性能工業炉等の開発プロジェクト」(新エネルギー産業技術総合開発機構、(株)日本工業炉協会1993~1999年)は、30%の省エネルギー、20%ダウンサイジングと同時に NOx 排出量を半減するという目標を掲げて開発研究を行った。この相矛盾する目標を達成するためのコアテクノロジーが高温空

気燃焼法<sup>2)</sup>であり、同プロジェクトを通じて多くの研究<sup>3)</sup>がなされた。同燃焼方法は、燃料及び燃料自己着火温度以上の高温予熱空気を高速で炉内に投入する燃焼方法であり、その特長は、

- ・火炎領域拡大による温度分布均一化
- ・高温領域減少による NOx 低減
- ・伝熱特性の向上
- ・高温予熱空気による燃料自己着火が可能

があげられる。本技術は、これに続くフィールドテストプロジェクト(1998~2001年)において種々の工業炉に対し適用され、目標どおりの成果<sup>3,4)</sup>をあげた。本稿では同技術を採用して納入した鋼片用加熱炉での試運転データ、数値解析から省エネルギー型高性能加熱炉を評価したので報告する。

## 2. 評価対象加熱炉<sup>3)</sup>

本評価対象炉は上記フィールドテストプロジェクトで弊社が JFE-日本鋼管(株)福山製鉄所殿に納入した鋼片用加熱炉である。本炉は全帯にリジェネレータを採用した加熱炉であり、基本設計は JFE-日本鋼管(株)が行った。標準仕様を表 1 に、図 1 に炉長手方向の断面図を示す。

\* 中外炉工業(株)開発本部開発企画課課長補佐  
M. Uede

\*\* 同 プラント事業部技術部加熱炉課課長  
M. Nakano

\*\*\* 同 開発本部開発部部长 M. Imada

\*\*\*\* 同 プラント事業部技術部プロダクトマネージャー N. Tokudome

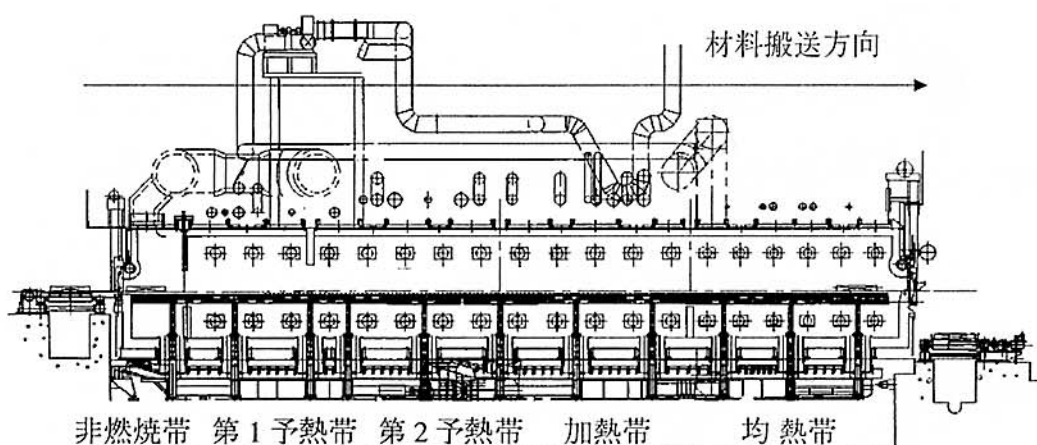


図1 評価加熱炉断面図

表1 標準仕様

|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| 炉内寸法      | 36(l)×10.1(w)×4.8(h)m               |
| 処理能力      | 定格 200 t/h, 最大 230 t/h              |
| 処理材       | 普通鋼, ビレット                           |
| 処理材寸法(標準) | 8.8(l)×1.5(w)×0.22(t)m 21,800 kg    |
| 加熱温度      | 20→1,250℃                           |
| 材料搬送方式    | WB方式                                |
| 燃料        | ミックスガス                              |
| 燃料低位発熱量   | 11.7 MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> |
| バーナ燃焼容量   | 1.16～3.49 MW                        |
| バーナ本数     | 76本 38ペア                            |
| 制御帯       | 4ゾーン10帯制御式                          |

第1, 第2予熱帯間には仕切壁が設けられており, 材料を熱片のまま装入したときには, 第1予熱帯のバーナを消火し, 燃料消費量を低減することができる。

本加熱炉に設置したバーナはJFE-日本鋼管㈱及び日本ファーステス工業㈱によって開発されたハニカム蓄熱式リジェネレイティブバーナであり, 図2にその概略図を示す。予熱空気導入孔はバーナ軸芯上にあり, 燃料導入孔はその周囲に水平より角度を持たせて配置されている。

このバーナには燃焼モードが2モードあり, 炉温が800℃以下(昇温)のとき, 燃料は空気導入孔より炉内へ導入され, かつ, メイン火炎はパイロットバーナにより保持されている。炉内温度が

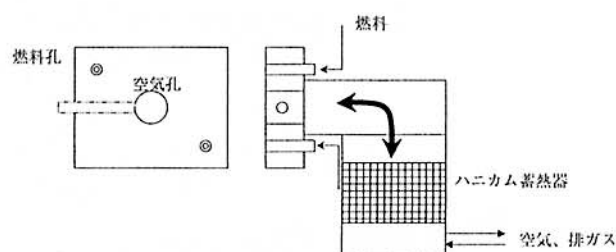


図2 リジェネバーナ

800℃を超えたとき, 燃料は燃料導入孔から炉内に導入される。この際パイロットバーナは消火するが火炎は保持可能である。

### 3. CFD

本稿で行った燃焼解析には, 有限体積法を採用したSTAR-CDを用いた。乱流場の計算はk-ε法<sup>5)</sup>によって計算され, 燃焼場の計算はPDF (probability density function) 法<sup>6)</sup>によって計算されている。壁及びガスからの放射はDTRM (discrete transfer radiation method)<sup>7)</sup>法を採用した。

### 4. 結果, 考察

#### 4.1 炉内温度分布

加熱炉に要求される最も重要なファクターは炉内温度分布の均一性である。特に, 温度勾配が炉内で幅方向についた場合には, 被加熱材の温度分布に直結する。図3に測定結果と計算結果の幅方向炉(天井)温度分布を示す。

温度プロファイルは, ほぼフラットか若干凸型である。均熱帯においてはその温度差は±8℃と

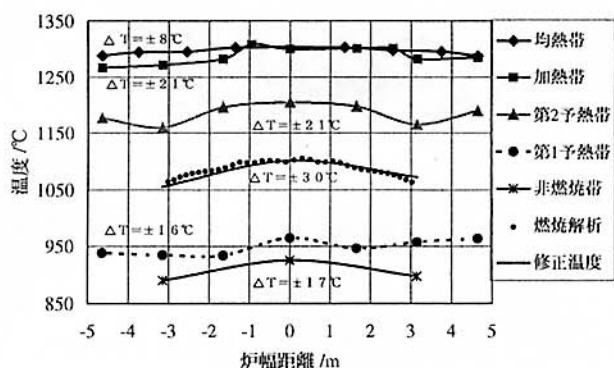


図3 炉幅方向炉温分布

なり、非常に平坦な分布となった。また、第1予熱帯においては若干凹型な分布傾向を示す。この傾向は従来炉にも見られる傾向である。

被加熱材温度は、炉装入直後は低く、炉内温度との偏差が大きいため被加熱材への熱流束が大きくなりその結果、炉温は凹型になりやすい。本炉においては、その程度は小さいといえる。続く第2予熱帯では温度分布は凸型で、偏差幅はここで最も大きくなり±23℃となるが、その形状は加熱に適した形状といえる。

図中に示す数値解析結果は分布傾向の中高傾向は同じといえるが、絶対値は第1、第2予熱帯の中間値を示した。数値解析上の想定スラブ表面温度は500℃であり、この表面温度は実測結果では両帯の中間に位置するためにスラブへの抜熱量の差異によるものと考えられる。そこで、この近傍の炉温を算術平均したものが修正炉温であり、両者はよく一致した。このことは数値解析が実際の加熱炉の炉温予測に適応できることを示すものと考えられる。

#### 4.2 熱伝導特性と推定総括熱伝達係数 ( $\phi_{CG}$ )

高温空気燃焼法の特長を明確にするため操業時の炉温、加熱材料実測値をもとに熱伝導解析を用いて総括熱伝達係数 ( $\phi_{CG}$ ) を求めた。同解析では加熱は式(1)に示すように放射のみとした。対流加熱の効果は加熱炉の場合、全伝熱量の約7%<sup>1)</sup>程度と推定されるが、今回求めた  $\phi_{CG}$  はこれを含めて算出した。

$$Q = A \times \sigma \times \phi_{CG} \times (T_f^4 - T_s^4) \quad \dots\dots\dots(1)$$

Q: 伝熱量

A: 伝熱面積

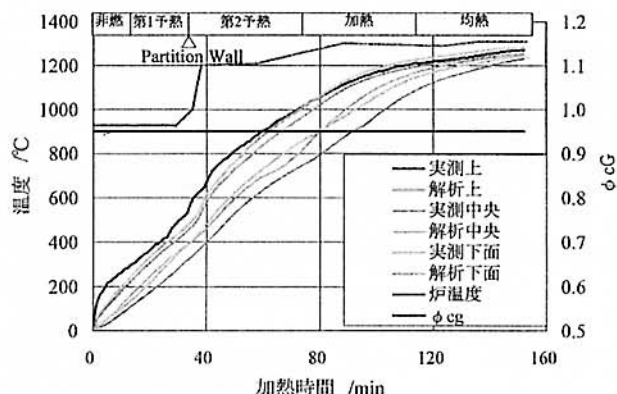


図4 炉温、スラブ（実測値、解析値）及び  $\phi_{CG}$  と加熱時間の関係

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン常数

$T_f$ : 天井温度

$T_s$ : スラブ表面温度

図4に测温スラブ導入後の時間と炉温、材料温度（厚み方向）及び熱伝導解析より求めた材料温度、推定  $\phi_{CG}$  を示す。炉温は測定スラブ通過時の直上天井炉温を示す。

同図より、第1、第2予熱帯間に設けられた仕切壁の効果によって急速な炉温の立ち上がりが確認できる。図中の  $\phi_{CG}$  は熱伝導解析結果が最も実測値と合致する場合の値で0.95であった。本結果は高温空気燃焼を用いた炉における  $\phi_{CG}$  と考えられ、他のリジェネレータ仕様加熱炉のそれともほぼ一致している。この推定総括熱伝達係数 ( $\phi_{CG}$ ) は従来タイプの炉より10～20%程度上昇している。

本結果は、4.1項の測定結果からも分かるように炉温偏差が小さく高温部分が少ないことが  $\phi_{CG}$  を上昇させた要因と推定される。リジェネレータは炉内排ガスと燃料、予熱空気の混合を促進させることを目的として空気孔、燃料孔の配置を最適化し、かつ燃料、予熱空気の導入流速を高速化している。図5に数値解析で求めた投入流体流速の減衰を式(2)に示す空気開口径を基準とした無次元距離を用いて示す。

$$Y = X/A \quad \dots\dots\dots(2)$$

Y: 無次元距離

X: バーナからの距離

A: ノズル孔径

投入流体流速を高速化しても共に無次元距離7

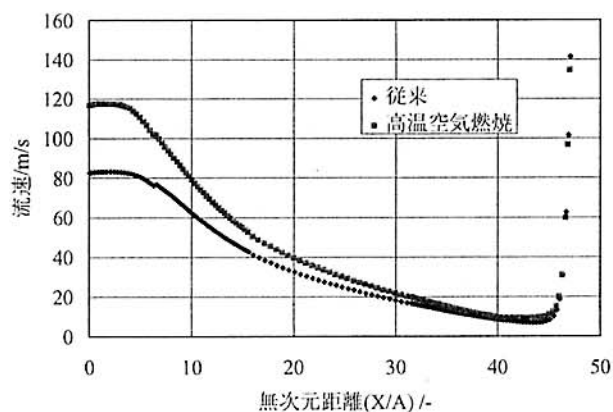


図5 流速と無次元距離の関係

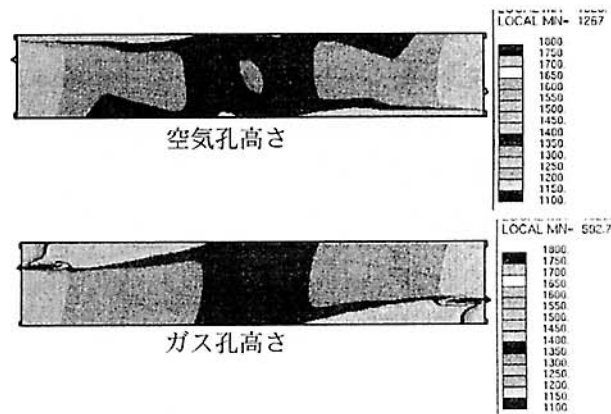


図7 水平断面温度分布

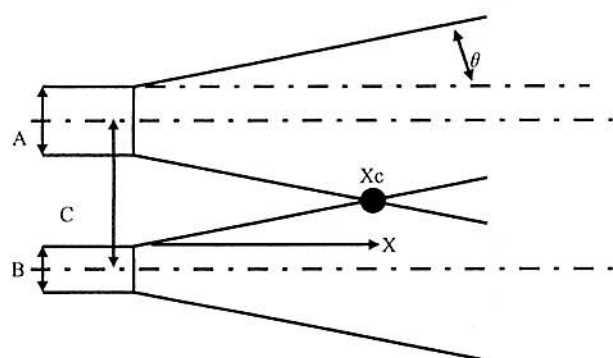


図6 二流体の仮想混合距離

倍程度の噴流ポテンシャルコア領域は変化しないが、無次元距離～20程度の発達領域において、高速な流体では速度の減衰が大きくなる。このことは周囲の流体との混合が促進されることを予測させる。

噴流の広がり角度を空気、燃料共に7度<sup>8)</sup>とした場合、図6に示す空気、ガスの仮想的な噴流が交差する位置をXcとすればXcは式(3)で表される。

$$Xc = (C - (A + B)/2) / 2 \tan \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

Xc：交差位置

B：ガスノズル孔径

C：ノズルピッチ

θ：半広がり角

この位置から燃焼が開始すると仮定すると、図2に示すバーナでの燃料と空気の無次元燃焼開始距離は10.6となっている。無次元距離10迄の減衰が大きいことは予熱空気及び燃料内に炉内ガスを巻き込んだ状態、すなわち低酸素/低燃料濃度で

の燃焼開始を予測させる。バーナ近傍で燃焼し得なかった未反応物質は炉全体に拡散しながら反応する結果、火炎領域が増大すると考えられる。

図7に燃焼解析結果の燃料、予熱空気導入孔高さでの温度分布（水平面）を示す。同図ではバーナ近傍で急激な温度上昇は見られず高温領域、温度偏差も小さい。これらの結果は、上記の燃焼状態を裏付けるものと考えられる。加えて、本炉の形状（炉高、炉幅、バーナピッチ）は我々の研究成果である高性能工業炉プロジェクト<sup>9)</sup>で得られた最適炉寸法を採用したことによる効果も炉温分布均一化の要因と考えられる。

#### 4. 3 NOx 排出特性及び火炎温度

炉温が1,200℃を超えるような炉においてはThermal-NOxが発生NOxの多くを占める。このThermal-NOxを低減するには高温空気燃焼法においても局所的にしる高温領域をなくすことであることは間違いない。

場を断熱と仮定すると燃料と酸化剤が量論比で燃焼すれば燃焼生成物は必ず理論断熱温度にまで上昇する。しかし、燃焼エネルギーは炉内介在物（例えばN<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>）を含めた温度上昇に使われ、局所的な燃焼場の温度を低温化させるので可能な限り、炉内ガスを混合させることが重要である。加えて上記に述べた炉内ガスによる希釈により低酸素条件下での燃焼が起こるため、局所高温領域の発生が減少しNOxの発生は減少する。

Thermal-NOx発生の実質上問題ないといわれる境界値は1,550℃<sup>10)</sup>以下といわれており、同温度以下にガス温度を下げるのが肝要である。炉

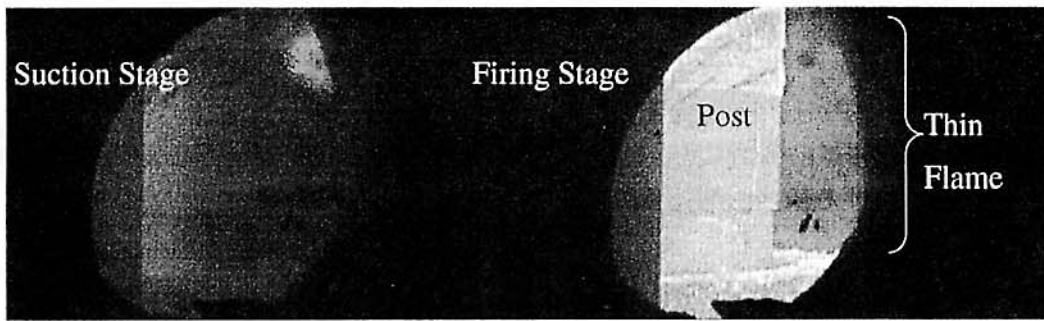


写真1 下部帯材料搬送装置周辺火炎観察結果

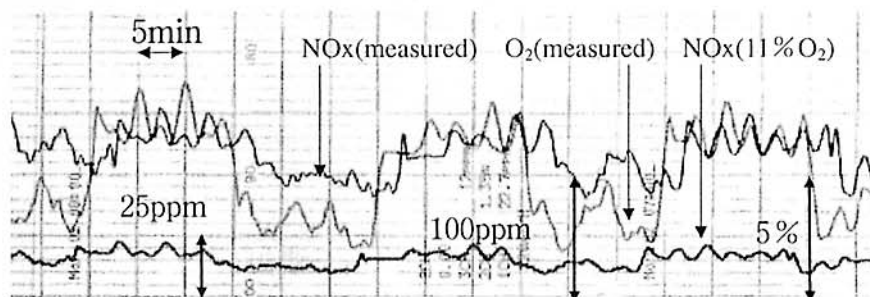


図8 炉内 NOx 測定結果

内雰囲気との混合を増長させる手法として上記で述べた投入流速の高速化が考えられる。図7に示す解析結果では、バーナ近傍温度も1,550℃より低くなっており本効果は期待できる。

また、炉内雰囲気測定結果において高濃度のCO（6,000 ppm 超）が炉内で検出されている。COは炉内反応での中間生成物であり通常操作では炉外にはほとんど排出されない物質である。このことは炉内で低酸素濃度での燃焼が発生し、低温で大きな火炎帯を形成していることを示すものと考えられる。

Mochida<sup>1,11)</sup>らによる炉内のイオン電流測定結果では、高温空気燃焼法での火炎は従来存在し得ない領域にまで到達し、反応していることを報告しており、火炎帯の拡大を示す事実といえる。

写真1に下部帯でのバーナ近傍ポストの火炎観察写真を示す。燃焼中のバーナ火炎はWBポストの周辺に広く存在し、ポスト表面を含め炉内を加熱していることが確認できる。同部の断熱材の最高使用温度は1,600℃であり、操業上問題が発生していないことから火炎がポスト表面を加熱するものの同温度を超えていないことが予測される。

図8に炉内 NOx 濃度の測定結果を示す。時間

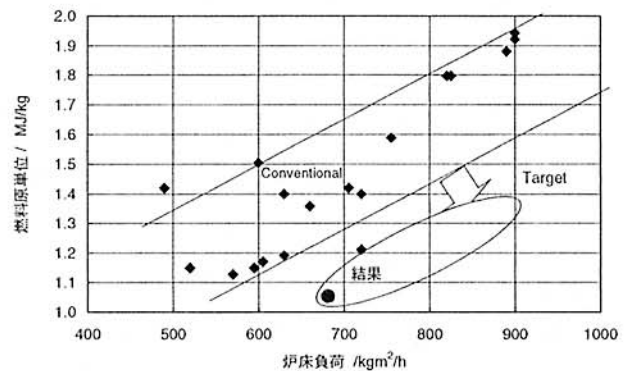


図9 燃料原単位と炉床負荷の関係

平均で約20 ppm（11%O<sub>2</sub>換算）となり、従来炉に比べ本炉のNO<sub>x</sub>排出値は約1/3<sup>12)</sup>となった。

#### 4.4 省エネルギーデータ<sup>3)</sup>

本加熱炉の省エネルギー量は予想値ではあるが、省エネルギー量294 TJ/年、CO<sub>2</sub>削減量28,300 t/年となっている。また、図9に示す炉床負荷と燃料原単位の関係<sup>1)</sup>においては本加熱炉は高炉床負荷でありながら低燃料原単位であることが分かり、当初の目標を達成していることが分かる。



## 5. 結 言

高温空気燃焼を実際の炉に適用し、操業データと解析から下記のことが明らかになった。

- ①高温空気燃焼法における総括熱伝達係数  $\phi_{CG}$  は0.95であった。
- ②炉幅方向の温度分布は平滑であった。
- ③燃料と予熱空気の流速を上げることで火炎拡大、排ガス混合、高温領域減少の効果を確認した。
- ④低酸素燃焼の結果、 $\text{NO}_x$  排出量は従来炉に比べ約1/3であった。

謝辞 本論文の作成、操業データ収集にあたり、JFE-日本鋼管㈱には多くのご協力、ご助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。