

高温空気燃焼を用いた 鋼片加熱炉の炉形最適化 に関する研究

上 出 雅 男*
田 中 一 久**
今 田 守 彦***
村 上 弘 二****

概 要

地球温暖化防止技術の一つとして高温空気燃焼技術が多くの工業分野に用いられるようになってきた。本技術は、従来トレードオフの関係だと考えられてきた予熱空気温度の上昇に伴う NO_x 排出量の飛躍的増大が、低酸素濃度下であれば燃焼を持続しつつ、低 NO_x 化可能な領域を発見したことから始まる。

本研究では、本技術を具現化したリジエネレイティブバーナを鋼片用加熱炉に適応し、その最適炉形を CFD 解析により求めた。その結果、燃焼量 240 kW/m² (有効炉床面積当たり)、炉幅 12 m の加熱炉で最適炉高、バーナピッチは 2~2.5 m であることが分かった。また、従来目視確認できなかったバーナ切替時の非定常流れを解明、可視化した。

その結果、燃焼バーナ切替後約 5 秒程度で定常的な燃焼状態となることが分かった。さらに実炉スケールでの従来炉との比較を行った結果、25%のエネルギー削減の可能性があることが分かった。

1. はじめに

Agenda 21 (1992年ブラジルサミット) に基づく地球温暖化ガス削減のためのアクションプランは COP 3~6 を通じ具現化されつつある。(株)日本工業炉協会は通産省、NEDO を通じて高性能

工業炉の開発を受託し、1993年から7年間にわたり研究開発を行ってきた。

このプロジェクトでは20%の炉のダウンサイジング、30%の省エネルギー、NO_x 半減を同時に達成することを目的として行われた。

本稿では、同プロジェクトの成果である高温空気燃焼技術を具現化したリジエネレイティブバーナの NO_x 排出特性、炉内流動の非定常流れ解析、同バーナを装着した高性能加熱炉の炉形最適化について、CFD (Computational Fluid Dynam-

* 中外炉工業(株)開発本部開発部係長 M. Uede

** 同 K. Tanaka

*** 同 部長 M. Imada

**** 同 技師長 K. Murakami

ics) による解析を中心に従来炉と比較しながら報告する。

2. リジェネレイティブバーナのNO_x排出特性¹⁾

本プロジェクトの開始当初、11%換算NO_x排出量を1,000°Cの予熱空気での燃焼において60 ppm以下に抑えることが目標とされた。従来の燃焼においては、予熱空気温度が高くなると、NO_xの排出量は指数関数的に増大すると言われてきたが、近年の研究によりNO_x生成の要因には酸化剤中の酸素濃度が大きく寄与することが分かってきた。

リジェネレイティブバーナは炉内排ガス顕熱の回収効率の向上と共に、予熱空気温度の向上をももたらす。また、燃料と酸化剤（燃焼空気）の分散導入及び高速度化による炉内排ガスの巻き込みは、低酸素濃度下で燃料との混合、燃焼を可能とし、低NO_x化を可能とした。

図1に本プロジェクトで用いたバーナの概略図を、図2にそれぞれのバーナの予熱空気温度に対する11%酸素換算したNO_x排出量を示す。

Type A'は二段燃焼形リジェネレイティブバーナで、燃焼用空気を一次と二次とに分割供給しており、従来の二段燃焼方式とほぼ同等のNO_x排出量を示す。燃料と酸化剤を分散投入したほかのケースでは予熱空気温度が800°Cで25 ppm、1,000°Cで60 ppmとなっている。このことは上記に述べた従来トレードオフの関係であると考えられていた高温予熱空気を用いた場合でも低NO_x化が可能であることを示す。

3. 炉形最適化¹⁾

鋼片等の加熱炉の炉形最適化は限定された範囲では実験可能ではあるが、実炉スケールでは困難であることは言うまでもない。本研究ではCFDを用いてその最適化を行った。

3.1 数値解析手法²⁾

本研究における数値解析には汎用解析コードSTAR-CDを用いた。本コードは空間離散化手法にFVM(有限体積法)を使用しており、乱流モデルには高Re型κ-ε model、燃焼モデルにはPDF model、輻射モデル(ガス輻射を含む)には

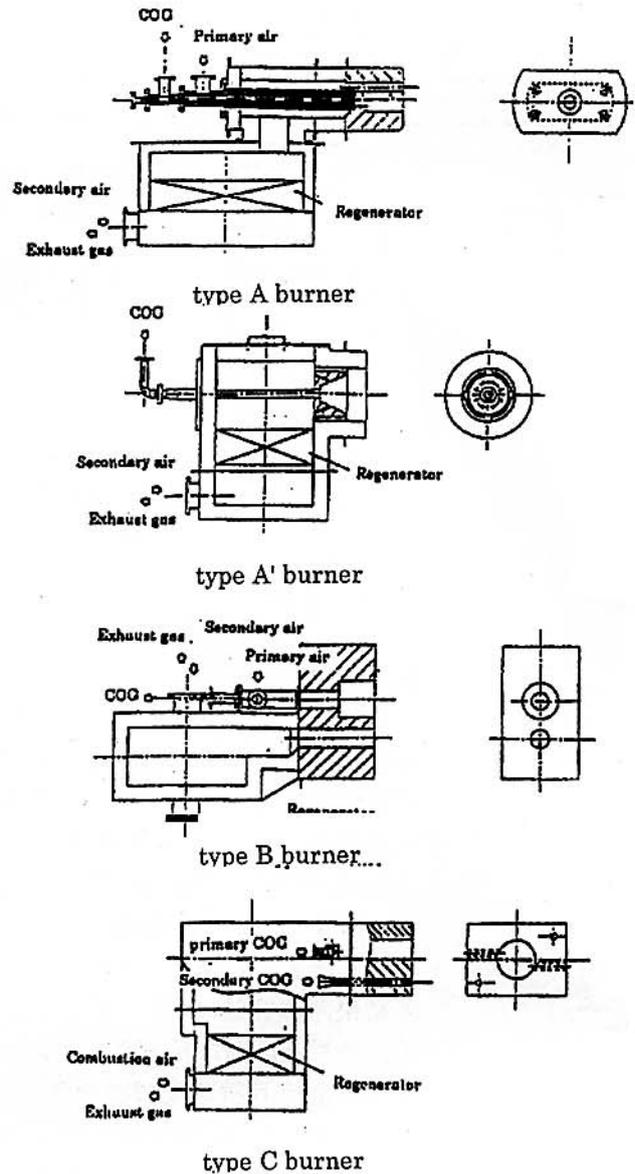


図1 バーナ概略図

DTRM modelなどの各モデルを適応した。以下に詳細を示す。

(1) κ-ε model³⁾

κ及びεの輸送方程式を(1)式及び(2)式に示す。本モデルでは壁面境界層流れにおいて、壁関数を用いている。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ = \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (1)$$

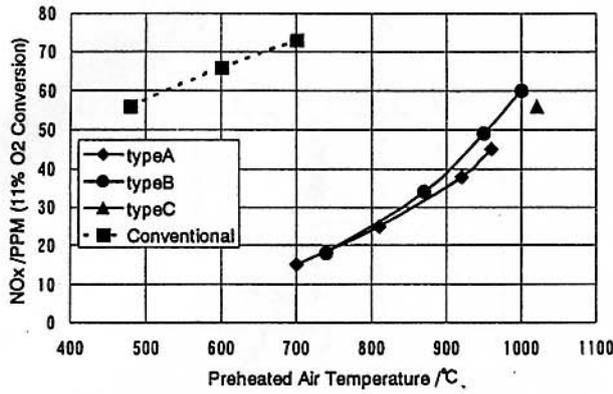


図2 予熱空気温度とNOxとの関係 (11%O₂換算・燃料COG)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t (P + C_{\varepsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \times \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$P \equiv 2 s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$P_B \equiv \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (5)$$

(2) PDF model⁴⁾

本モデルでは燃焼速度は無限大と仮定されており、スカラー量 ϕ (例えば密度, 化学種濃度) は燃料と, 酸化剤の混合分率 f 及びその2乗平均変動 g_r により(6)式を用いて表される。

本モデルは非断熱壁, 輻射を取り扱い可能とするためエンタルピーの輸送方程式を併用することによって可能としている。

混合分率の変動は β 関数によって記述されている。 f 及び g_r の輸送方程式を(11)式, (12)式に示す。

$$\phi = \int_0^1 \hat{\phi}(f) P(f) df \quad (6)$$

where

$$P(f) = \frac{f^{a-1} (1-f)^{b-1}}{\int_0^1 f^{a-1} (1-f)^{b-1} df} \quad (7)$$

$$a \equiv \frac{f}{g_r} [f(1-f) - g_r] \quad (8)$$

$$b \equiv \frac{(1-f)}{f} a \quad (9)$$

$$g_r = \bar{f}^2 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j f - \left(\rho D_r + \frac{\mu_t}{\sigma_{f,t}} \right) \frac{\partial f}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho g_r) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j g_r - \left(\rho D_g + \frac{\mu_t}{\sigma_g} \right) \frac{\partial g_r}{\partial x_j} \right] = \frac{2\mu_t}{\sigma_g} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 - C_D \rho \frac{\varepsilon}{k} g_r \quad (12)$$

(3) Thermal Radiation model⁵⁾

ある壁面からの輻射フラックス J_i は(13)式で表される。

$$J_i = \varepsilon_r E_{B,i} + \rho_r I_i \quad (13)$$

$$\varepsilon_r + \rho_r = 1 \quad (14)$$

$$E_{B,i} \equiv \sigma T^4 \quad (15)$$

$$I_i = \sum_j F_{ij} J_j \quad (16)$$

流体を通過する輻射ビーム強度 I は(17)式に従い熱交換を行う。そのエネルギーはエンタルピーの輸送方程式のソース項として考慮される。

$$\frac{dI}{ds} = -(k_a + k_s) I + \frac{k_a E_g}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} p(\underline{\Omega}, \underline{\Omega}') I(\underline{\Omega}') d\underline{\Omega}' \quad (17)$$

記号

- F_{ij} ; 形態係数
- E_g ; ガス温度 T_g における黒体放射エネルギー
- J_i ; 全輻射フラックス
- σ ; ステファン・ボルツマン定数
- I_i ; 全入輻射フラックス
- k_a ; 気体の吸収係数
- k_s ; 気体の散乱係数
- s ; Ω 方向の距離
- s_{ij} ; 応力のテンソル成分
- ε_r ; 表面放射率
- ρ_r ; 表面反射率
- μ ; 分子粘性
- μ_t ; 乱流粘性
- $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}$ and $C_{\varepsilon 4}$; 実験定数

3.2 非定常燃焼解析

上記に説明したようにリジェネバーナは蓄熱帯

に排ガス顕熱を与え、燃焼用空気の子熱に使うため30秒ないし1分周期で燃焼，吸引を繰り返す。そのため炉内の流れは従来バーナに比べ複雑となる。

炉形最適化を行う際に，非定常解析を行うことはマシンパワーから考えてかなりの時間を要することが予測される。このため炉形最適化に定常解析での結果を用いる必要がある。そこで非定常状態の燃焼を定常解析の結果で推察可能かどうかを判定するため，まず始めに非定常解析を行った。図3に解析領域を示す。

同解析においてはサイドだき加熱炉の上部帯2ペア（4本）のバーナ領域をその対象とした。この場の炉幅は12.8 m，炉高・バーナピッチ共に2 m，燃焼量242 kW/m²（有効炉床面積当たりの燃焼量），スラブ想定温度500°Cとし，炉壁からの抜熱も考慮した。

図4に非定常解析結果のバーナ取付高さでの水平面温度分布を示す。同図から分かるように，炉内の温度分布は燃焼バーナ切替後約5秒で定常状態に達することが分かる。図示しないが，流速分布，化学種分布についても同様な傾向が認められた。ただし，壁面温度については前述のスカラ量に対し若干遅れが生じるが，バーナ切替後数秒で

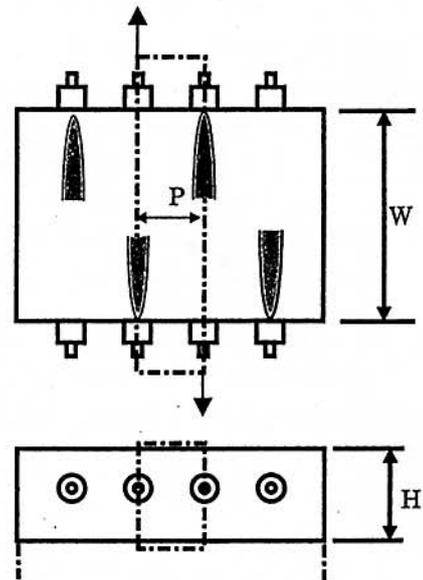


図3 数値解析領域

定常状態に到達することが分かる。実験においてもプラグ流と交番燃焼流の炉温加法性が成り立つことを確認しており，本炉形最適化の数値解析に対し，定常解析結果を代数平均したものを用いても差し支えない。

3.3 炉形最適化

図5，6に炉幅及びバーナピッチ（炉長方向）

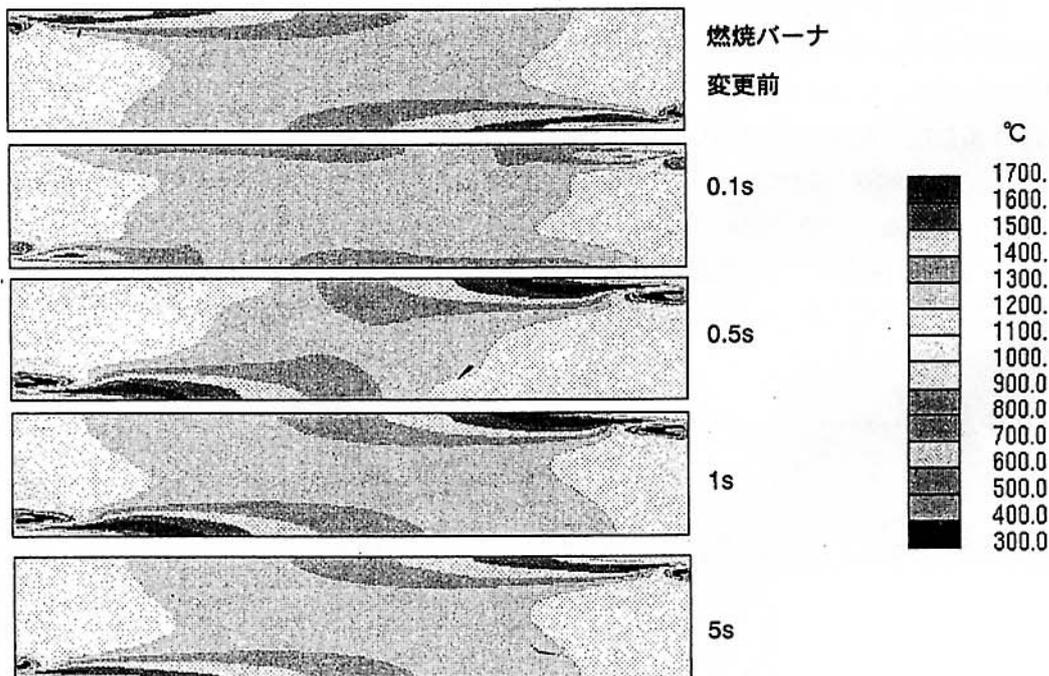


図4 水平面温度分布

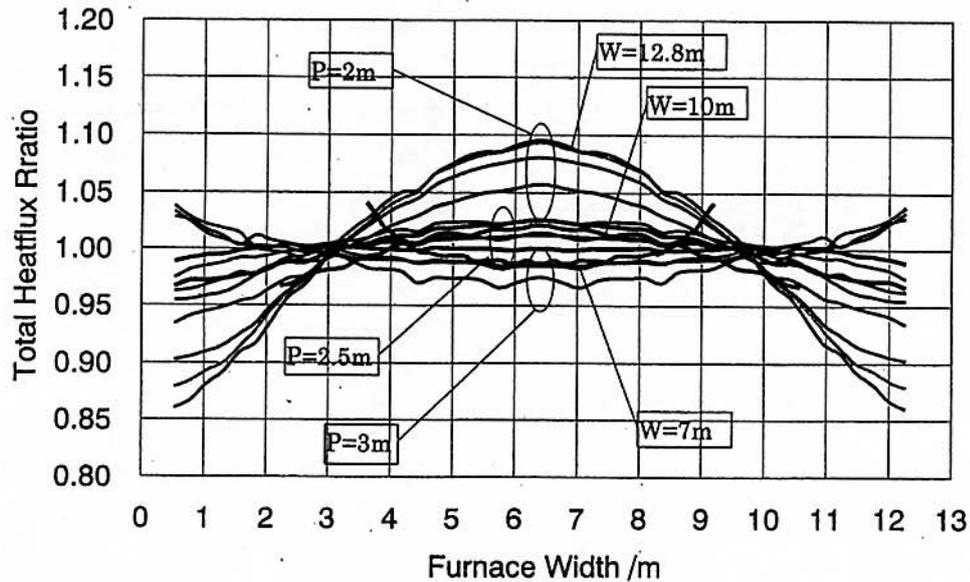


図5 炉幅に対する熱流束比率分布

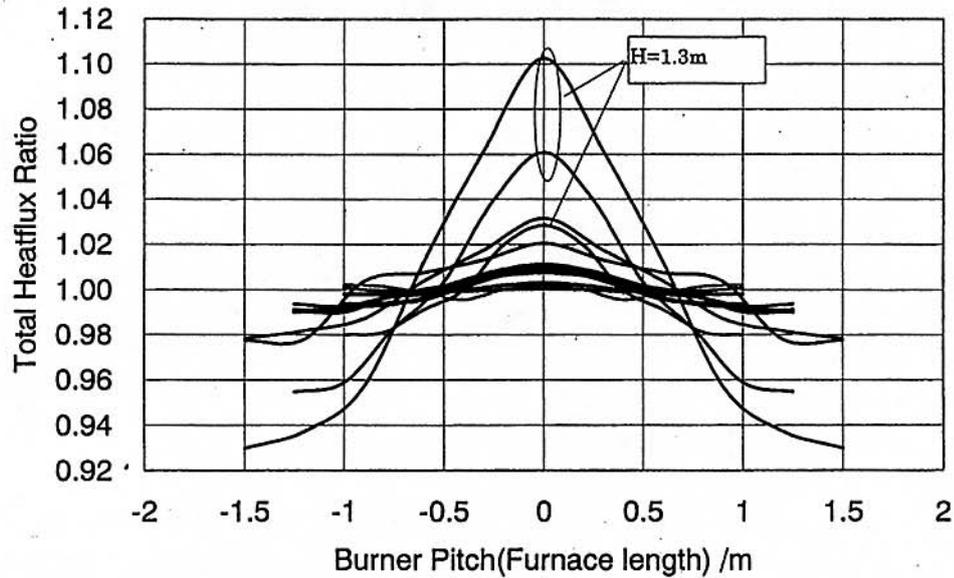


図6 バーナピッチ (炉長) に対する熱流束比率分布

に対する受熱面での平均値に対する熱流束比率を示す。解析境界条件は上記非定常解析と同じである。

炉幅に対する熱流束比率はバーナピッチが増加すると、その分布形状は上に凸な形状から下に凸に変化する。炉幅方向の熱流束分布形状は被加熱材料温度分布に直接関与する。また本解析では受熱面側壁からの入熱を考慮していない。以上のことから、炉幅方向の熱流束分布形状は若干中高形状がよいと考えられる。炉幅7mでの炉中央熱流束は炉幅12mのものに比べ約9%減少してい

る。炉幅が狭い場合、未燃ガス及び高温排ガスが炉内に発生熱量を十分与える前に排気中のバーナに吸引されたためであると考えられる。

炉長方向の熱流束比率分布は図6に示すように、バーナ直下にピークを持つ分布となる。炉高2m以上のものはフラットな傾向を示し1.3mの場合、そのピークが顕著となる。炉長方向の熱流束分布形状は操業が順調な場合は問題とならないであろうが、圧延工程等でのトラブル発生の際、被加熱材が炉内同一場所に滞留すると局所加熱の要因になり得るため炉両方向熱流束分布はできる

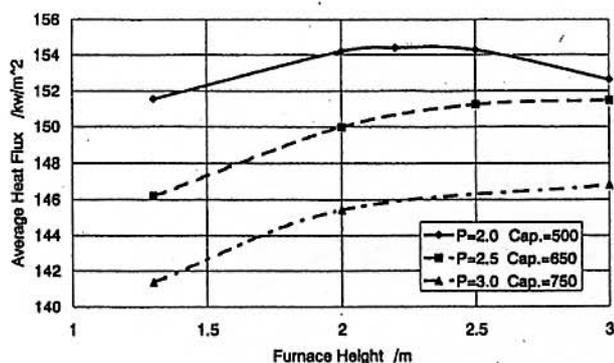


図7 炉高に対する平均熱流束の関係

限りフラットな形状がよい。

図7, 8に炉高及びバーナピッチと平均熱流束の関係を示す。バーナピッチ2mの場合、炉高2~2.5m近傍にピークを持つ。ほかの2.5及び3mの場合は単純増加の傾向を示す。これらは炉高3m以上にピークが存在することが予測される。炉高1.3mの熱流束はほかの場合に比べその値は低くなる。これは低炉高化によって炉内再循環領域が減少し、高温炉内ガスが排気中バーナに吸引されたためであると考えられる。解析結果においても流出口温度は低炉高化により上昇することを確認した。また、バーナピッチ増加から熱流束は減少することも判明した。これは同ピッチの増大から燃焼用量は比例的に増大するのに対し、その火炎（火炎容積）は対数関数的に増大するため高温火炎部と受熱面の角関係が変化したためであると推察される。

以上の結果から最適炉高、バーナピッチは共に2~2.5m程度がよいことが分かった。

4. 炉幅に対する燃焼容量¹⁾

図9に炉幅とバーナ燃焼量の関係を示す。図中の破線は実操業加熱炉のデータより求めた炉内燃え切り上限（すす等の発生なし）を示し、実線は本解析で用いた想定燃焼量 242 kW/m^2 を炉幅で整理したものを示す。Actual 2はField Test プロジェクト⁶⁾の実績を示している。同図から分かるように実操業データから求めた燃焼量が広炉幅で大きな値を示すが両者はほぼ同一と考えられる。この実・破線を超える領域の炉を設計した場合、操業上支障をきたす可能性がある。

Actual 3は実施例の一つで、両者を超える領域

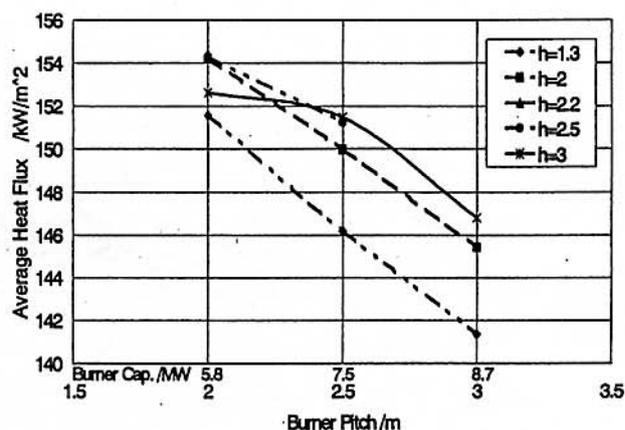


図8 バーナピッチ（炉長）に対する平均熱流束の関係

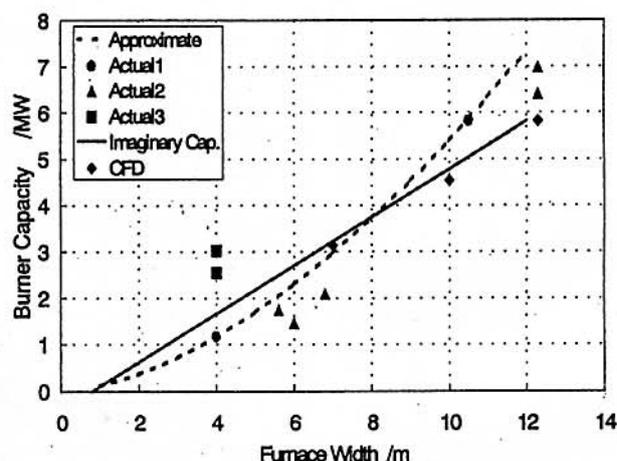


図9 炉幅に対する燃焼量の関係

に存在しており、操業試運転時にすすの発生が認められた。図10はActual 3でのCFDで求めたCO濃度と燃料吐出流速の関係を空気比、燃焼用量をパラメータとして示す。なお、本解析では燃焼バーナ配置を千鳥配置から対向配置に変更した。

同図から燃料吐出流速、空気比の増大はCO濃度を減少させることが分かる。CO濃度はすす発生に密接な関係があり、同成分濃度をすす発生有無の判定に使用した。この結果に基づき、当初の燃料吐出流速を約25 m/sから80 m/sに変更することですすの発生は回避された。

以上のように図9の想定線を超える領域での設計も可能ではあるがその際の炉、バーナ設計時に考慮が必要となることが分かる。また、同図から設計段階でのトラブル発生の事前予知が可能とな

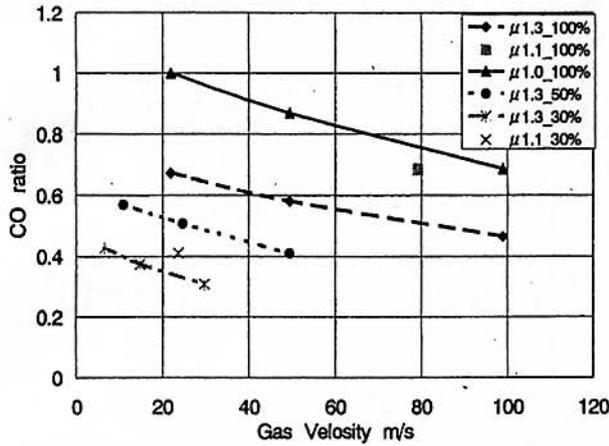


図10 燃料流速に対するCO発生比率の関係

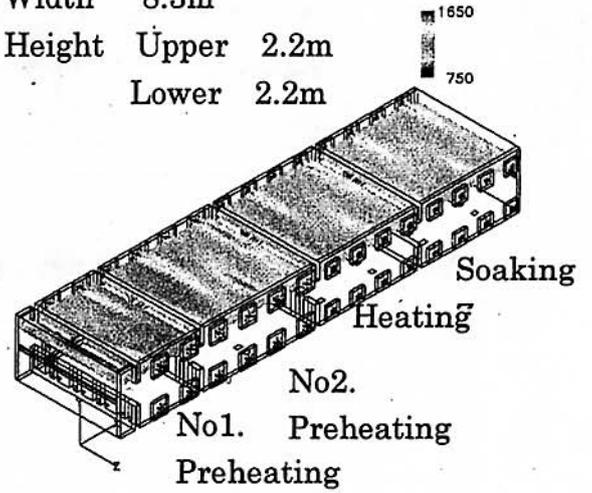
Treatment Cap. 180000kg/h

Length 31m

Width 8.3m

Height Upper 2.2m

Lower 2.2m



Treatment Cap. 260000kg/h

Length 31m

Width 12.8m

Height Upper 2.6m

Lower 2.3m

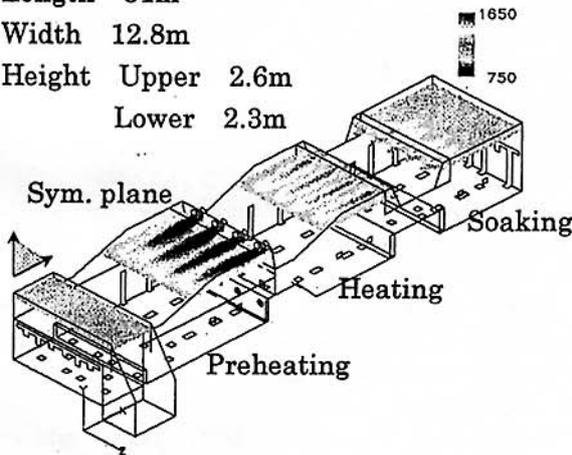


図12 高性能加熱炉のバーナ軸水平面温度分布

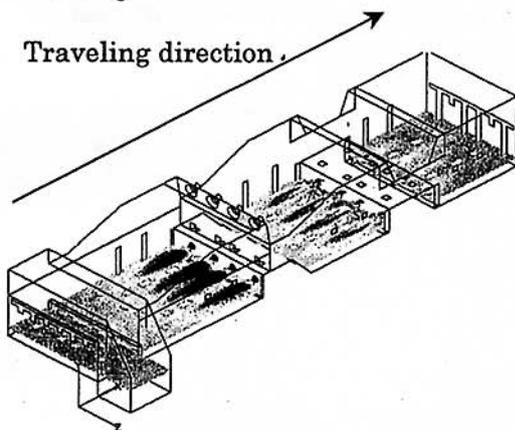


図11 従来加熱炉のバーナ軸水平面温度分布

求め、図11、12にそれぞれの結果を示す。両加熱炉共に下部帯にスラブ搬送機構をモデル化している。従来加熱炉ではバーナ近傍の温度が高く、炉長方向の炉温偏差も大きいことが分かる。これに対し高性能加熱炉は炉温が平準化されていることが分かる。図13、14に前記各炉の予熱帯における炉長方向の炉温及び熱流束分布を示す。従来炉では10m付近に最高温度点が存在する。また、省エネルギー対策で煙道部を大きく取っているため炉尻の温度が低い。高性能炉では炉温の立ち上がりが急峻であり、その結果、熱流束の立ち上がりも急峻でその値も高い。本炉予熱帯では排熱回収方式、生産量の違い等があるが、単位炉容積当たりの発熱量は約25%向上している。

る。

5. フルスケール加熱炉での比較¹⁾

従来の軸流形加熱炉とリジェネバーナを適応した高性能加熱炉の水平断面温度分布を数値解析で

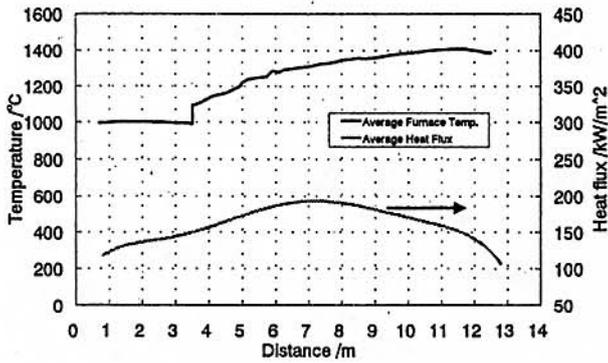


図13 従来加熱炉における炉長方向の炉温及び熱流束分布

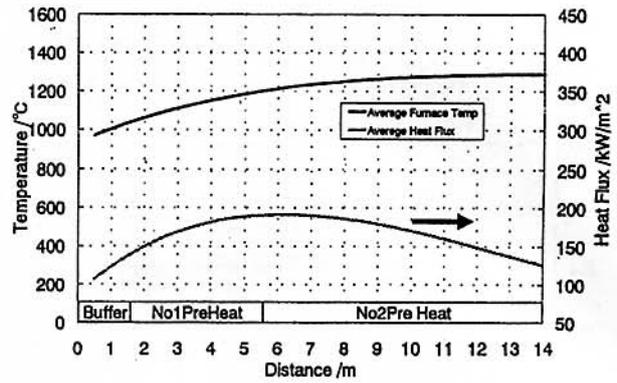


図14 高性能加熱炉における炉長方向の炉温及び熱流束分布

6. まとめ

- ①リジェネレータのバーナ切替時、約5秒で定常状態となり非定常性を含めた解析は定常解析の結果から予測できることが分かった。
- ②最適な炉高、バーナピッチは2~2.5 mに存在する。
- ③炉幅に対する燃焼量の関係を明らかにし、燃え切り上限を超えるような場合でもバーナ配置、燃焼方法を考慮することで、上限を超える燃焼量でも支障のない運転が可能であることが分かった。
- ④従来炉との比較により約25%程度のエネルギー削減可能性が認められた。

謝辞

本研究はNEDOからの再委託業務として(株)日本工業炉協会が行った「高性能工業炉等の開発」

研究成果の一部であることを付記し、謝意を表わす。