

熱風炉燃焼パターン最適化技術

Hot Stove Combustion Pattern Optimization

藤 井 章* 藤 井 知 子 宮 崎 裕 之
 Akira FUJII Noriko FUJII Hiroshi MIYAZAKI
 伊 藤 雅 浩 本 田 基 樹
 Masahiro ITO Motoki HONDA

抄 録

熱風炉は製鉄所において大きなエネルギーを消費する設備であるため、省エネルギー操業が求められる。ここで述べる熱風炉制御技術は、熱風炉制御シミュレータと最適化アルゴリズムで構成し、燃焼ガス温度や流量等の燃焼制御に関わる制御目標値の変化パターンを最適化することにより熱風炉のエネルギー消費の最小化、即ち熱効率の最大化を図るものである。最適化アルゴリズムが生成する候補パターンを採用した時の熱風炉プロセスの状態変化を、熱風炉制御シミュレータを用いて高精度に予測評価させている。実機での検証テストで得られた熱効率が向上した結果と合わせて報告した。

Abstract

Hot stove is the process which needs a large amount of heat energy, so it is desired to carry out the energy saving operations, which minimize the energy consumption and maximize the heat efficiency. We have developed a new method of optimizing the combustion pattern by which the heat efficiency can be maximized. In this method, the hot stove control simulator and the genetic algorithm (GA) are used. The simulator consists of physical and control models, so it can predict the dynamical change of the process states accurately when the candidate patterns are given by GA. The method has been proved to improve the heat efficiency through the actual control tests.

1. 緒 言

熱風炉は高炉に高温の熱風を大量に連続供給するプロセスであり、製鉄所において大きなエネルギーを消費する設備であるため、熱効率を最大化する省エネルギー操業が求められる。ここで述べる熱風炉制御技術では、熱風炉プロセス全体の動特性を正確にモデル化した熱風炉制御シミュレータを用いることで、現時刻から先のプロセス状態を高精度に予測しながら熱効率が向上する操業条件を決定することができる。

本稿では、熱風炉制御シミュレータと最適化アルゴリズムを組み合わせることで、設備制約条件を守りながら熱効率が最大となる燃焼パターン（燃焼中における燃焼制御操作量の目標値パターン）を効率的に決定する手法について報告する。

2. 熱風炉プロセス

熱風炉は、図1に示すように燃焼室、蓄熱室、ミックスチャンバーおよびそれらを連結する配管で構成される。この熱風炉の操業では、各固定時間を持つ燃焼期と送風期が周期的に繰り返される。

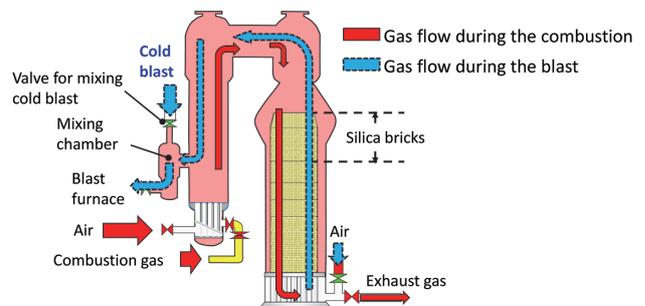


図1 熱風炉設備の概要
Image of hot stove

* 設備・保全技術センター システム制御技術部 システム制御技術室 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

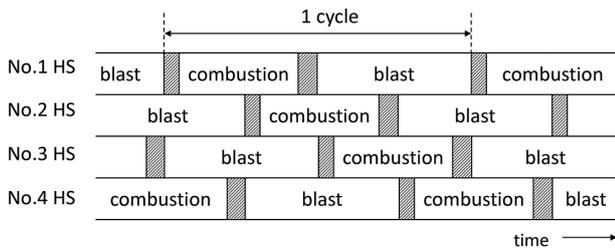


図2 熱風炉の操作サイクル例
Example of a hot stove operation cycle

燃焼期においては、燃焼ガスと空気を各々流量調整しながら燃焼室へ供給し、これらが燃焼して生じる高温の気体が蓄熱室へ送られるが、この時にドーム温度が所与の目標値と一致するように、燃焼ガスと空気の流量比がフィードバック制御されている。高温気体は積層状に配置されたチェッカーレンガと熱交換することにより蓄熱され、熱交換後の気体は蓄熱室下部より室外へ排ガスとして放出される。

送風期においては、燃焼期とは反対に蓄熱室下部から流量調整した空気が流入し、チェッカーレンガと熱交換して高温となった状態で上部から流出し、燃焼室およびミックスチャンバーを経由して送風本管から高炉本体へ熱風として吹き込まれる。

このような熱風炉プロセスが通常3～4基設置されており、図2に示すように各々時間をずらして燃焼期と送風期を繰り返すことによって高炉に対しては連続して熱風を吹き込むことを可能としている^{1,2)}。

3. 熱風炉制御シミュレータ

ここで用いるシミュレータは、熱風炉プロセスの伝熱や燃焼による動特性をモデル化した熱風炉プロセスモデルと、実機が装備しているプロセスコンピュータと計装の制御機能をモデル化した熱風炉制御モデルを組み合わせる構成している。

3.1 熱風炉プロセスモデル

このプロセスモデルは燃焼室と蓄熱室で構成される熱風炉本体、ミックスチャンバー、および送風本管の部分から構成し、実機の設定仕様に基づいてモデル化している(図3)。

燃焼室には燃料ガス(BFG, COG, LDG, 混合ガスなど)の燃焼モデルが組み込まれており、燃焼の結果生じる高温気体の温度と流量を算出する。例として、BFGとCOGを燃料ガスに用いた場合の燃焼ガス温度は下記の式で表される³⁾。

$$T_{th} = \frac{F_{MIX} \cdot H_{1,MIX}}{F_{COMB} \cdot C_{p,MIX}(T_{th})} + T_{MIX,pre} \quad (1)$$

$$F_{MIX} = F_{BFG} + F_{COG} \quad (2)$$

ただし、

T_{th} : 燃焼ガス温度, F_{MIX} : 燃料ガス流量,

F_{BFG} : BFG 流量, F_{COG} : COG 流量,

F_{COMB} : 燃焼ガス流量, $H_{1,MIX}$: 燃料ガス発熱量,

$C_{p,MIX}$: 燃焼ガス定圧比熱, $T_{MIX,pre}$: 燃料ガスの燃焼前温度

一方、蓄熱室は中心層のチェッカーレンガと炉壁構造体で構成される同心円筒形の層構造であると仮定し、大気への放熱に伴う蓄熱室半径方向の熱伝導を考慮する円筒2次元非定常分布定数系伝熱モデルとしている。燃焼ガスと蓄熱れんがの熱交換は対流熱伝達と輻射熱伝達としてモデル化し、蓄熱れんがや炉壁構造体等の固体間の熱交換は熱伝導による熱伝達を仮定してモデル化している。

例として蓄熱室モデルを図4に示す。蓄熱室半径方向を空間的に離散して*i*要素、蓄熱室高さ方向を空間的に離散して*j*要素とすると、ガス、蓄熱れんが、炉壁構造体のモデルは下記の式で表される¹⁻³⁾。

1) ガスモデル

$$\begin{aligned} & \rho_g(T_{g,j}) \cdot C_{pg}(T_{g,j}) \cdot S_{g,j} \cdot v_{g,j}(t) \cdot \frac{dT_{g,j}(t)}{dz} \\ & = K_{(g,1,j)} \cdot A_{(g,1,j)} \cdot \{T_{1,j}(t) - T_{g,j}(t)\} \\ & + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{(g,1,j)} \cdot \{(T_{1,j}(t) + 273.15)^4 - (T_{g,j}(t) + 273.15)^4\} \end{aligned} \quad (3)$$

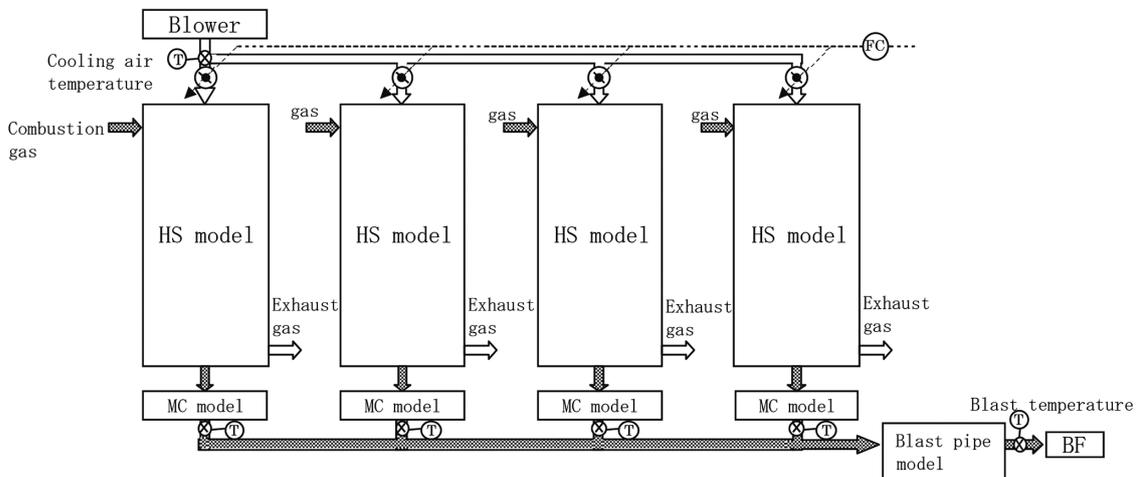


図3 熱風炉制御シミュレータモデル
Hot stove simulator model

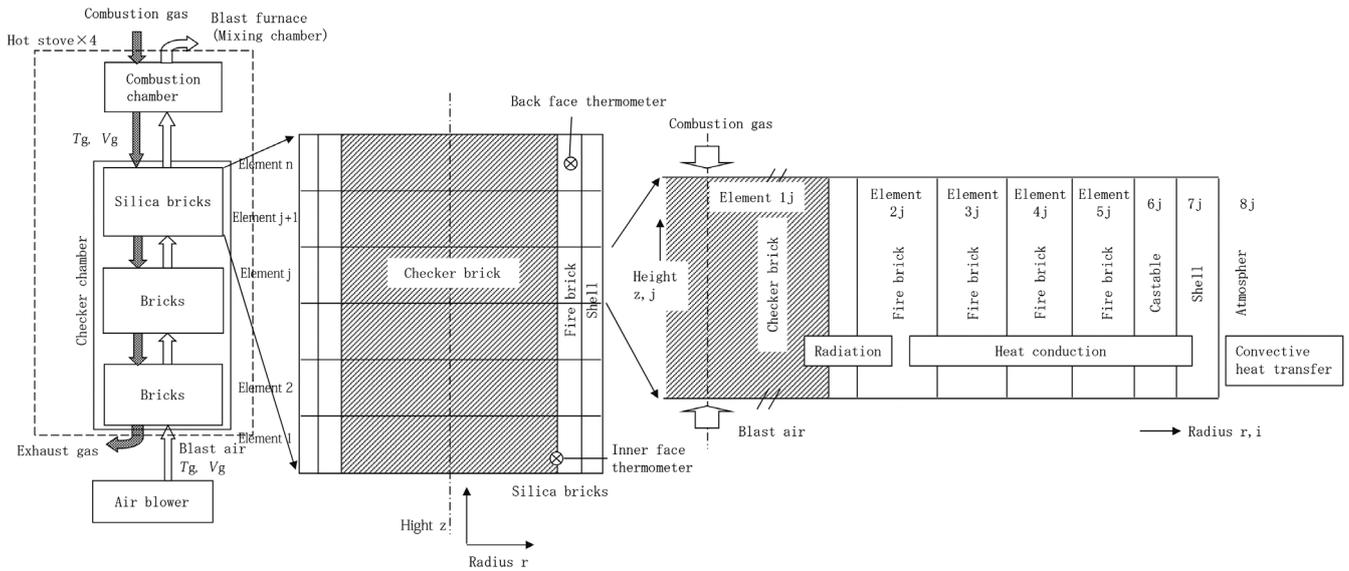


図4 熱風炉プロセスモデル
Hot stove process model

2) 固体モデル (i=1 のとき、蓄熱れんが³⁾)

$$\begin{aligned} & \rho_i(T_{1,j}) \cdot C_{pi}(T_{1,j}) \cdot S_{1,j} \cdot z_j(t) \cdot \frac{dT_{1,j}(t)}{dt} \\ & = K_{(g,1),j} \cdot A_{(g,1),j} \cdot \{T_{g,j}(t) - T_{1,j}(t)\} \\ & + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{(1,2),j} \cdot \{(T_{1,j}(t) + 273.15)^4 - (T_{2,j}(t) + 273.15)^4\} \end{aligned} \quad (4)$$

3) 固体モデル (i=2,3,...7 のとき、炉壁構造体)

$$\begin{aligned} & \rho_i(T_{i,j}) \cdot C_{pi}(T_{i,j}) \cdot S_{i,j} \cdot z_j(t) \cdot \frac{dT_{i,j}(t)}{dt} \\ & = K_{(i-1,i),j} \cdot A_{(i-1,i),j} \cdot \{T_{i-1,j}(t) - T_{i,j}(t)\} \\ & - K_{(i,i+1),j} \cdot A_{(i,i+1),j} \cdot \{T_{i,j}(t) - T_{i+1,j}(t)\} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

ρ : 密度, C_p : 比熱, S : 断面積, v : 流速, T : 温度,
 K : 熱伝達率, A : 接触面積, ε : 放射率, z : 高さ,
 t : 時間, g : ガス, σ : ステファン・ボルツマン定数

3.2 熱風炉制御モデル

熱風炉制御モデルとして、燃焼開始から終了までのトータル投入熱量を制御するプロセスコンピュータ制御機能、およびドーム温度、燃焼ガス流量等の温度や流量をフィードバック制御する計装制御機能をモデル化して実装している。3.1のプロセスモデルに制御モデルを組み合わせることで、制御モデル部分に燃焼ガス流量等の様々な目標値を操業条件として与えることにより、その条件における送風温度や蓄熱室珪石れんが温度等のプロセス状態を定量的に予測、評価することを可能としている。

4. 熱風炉新燃焼制御方法

4.1 熱風炉燃焼の高効率化³⁻⁶⁾

開発した熱風炉制御シミュレータを用いて、熱効率が向上する操業方法を決定する。このとき、熱効率は下記の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{熱効率} &= \frac{\text{送風中に高炉に送風した送風熱量}}{\text{燃焼中に熱風炉に投入した投入熱量}} \\ &\cong \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{str}} + Q_{\text{ex}}} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、

Q_{out} : 送風熱量

Q_{str} : 燃焼中に熱風炉に蓄熱される熱量

Q_{ex} : 排ガスや炉体放散熱として炉外に失われる熱量

高炉に送る送風熱量は操業条件によって与えられるものであるから、(6)式より熱効率を向上させるためには送風熱量を満足する蓄熱量を確保した上で投入熱量を削減すれば良いことが分かる。

投入熱量のうち、蓄熱されずに余った熱量の多くは排ガス熱量として熱風炉から排出されるため、燃焼中の燃焼ガスと蓄熱れんがとの熱交換の効率を高くすることで排ガス熱量を削減し、投入熱量を削減することを考えた。燃焼ガスと蓄熱れんがとの熱交換効率は、燃焼ガスの流量と温度に依存するため、熱効率が向上するようにこれらの値を制御する必要がある。

従来の燃焼制御では、燃焼ガスの流量および温度は通常燃焼の開始から終了まで一定の目標値で制御されている。新燃焼制御方法では、燃料ガス発熱量、燃料ガス流量、ドーム温度等の燃焼制御操作量の目標値を燃焼時間中に可変とすることを前提とする。即ち図5に示すガス流量の例のように、燃焼開始から終了までの時間を複数に分割し、各時間帯で異なる目標値を設定することにより1個の燃焼パターンを構成する。

熱効率で定量化されるような制御性能を向上させる燃焼パターンを決定する問題は、これらの燃焼パターンを変化させながら熱風炉制御シミュレータでプロセス状態量の時間変化を予測計算し、制御性能が最良となる燃焼パターン

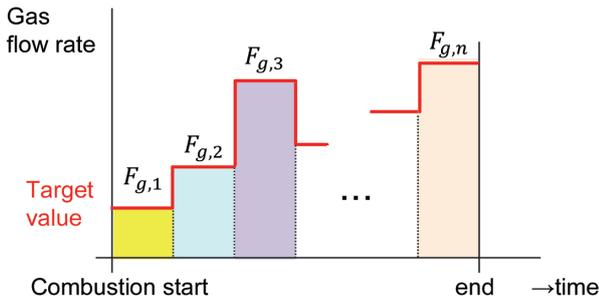


図5 燃焼パターン (ガス流量の例)
Combustion pattern (example of gas flow rate)

(以下、最適燃焼パターンと呼ぶ) を決定する最適化問題となる。このとき、プロセス状態を熱風炉制御シミュレータで予測することにより蓄熱れんが温度等の設備制約条件を満足することを保証できる。

4.2 全体制御構造⁷⁻⁹⁾

新制御方法の全体制御構造は、図6に示すように熱風炉制御シミュレータと最適化アルゴリズムから構成する。この熱風炉制御シミュレータを用いた燃焼パターン最適化は基本的に非線形最適化問題となることから、最適化アルゴリズムとしてはヒューリスティック手法の一つである遺伝的アルゴリズム (GA) を用いることとした。

具体的な実行方法として、まず GA で燃焼パターンの候補解 (個体) を生成し、各個体を用いて熱風炉を運転した時のプロセス状態を熱風炉制御シミュレータで予測する。次に、GA は得られた予測結果で評価関数の値を計算し、評価値が小さい個体を選択した上で、残った個体に遺伝子操作 (交叉や突然変異) を行うことで、次世代のパターン候補解を作成する。以上の計算を GA の世代数分繰り返して、評価値が最小となる解を最適燃焼パターンとして決定する。

4.3 遺伝的アルゴリズムの適用方法⁷⁻⁹⁾

前述の制御構造を用いて熱効率が向上する最適燃焼パターンを決定するため、GA の燃焼パターン候補解と評価関数を以下のように設定する。

(1) パターン候補解

図7に示す通り、燃焼制御操作量であるガス流量 (F_g)、ドーム温度 (T_d)、ガスカロリー (C_g) 等の各燃焼パターンの組み合わせを1個の個体 (パターン候補解) とする。

即ち、(7) 式に表すような数値の組み合わせとして個体を定義し、組み合わせ最適化問題として GA を適用する。

$$\text{個体} = [F_{g,1} \ F_{g,2} \ \dots \ F_{g,n} \ T_{d,1} \ T_{d,2} \ \dots \ T_{d,m} \ C_{a,1} \ C_{a,2} \ \dots \ C_{a,p}] \quad (7)$$

ただし、個体を構成する各数値には上下限值がある。

$$F_{g,\min} \leq F_{g,i} \leq F_{g,\max}, \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$T_{d,\min} \leq T_{d,j} \leq T_{d,\max}, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$C_{a,\min} \leq C_{a,k} \leq C_{a,\max}, \quad k = 1, \dots, p \quad (10)$$

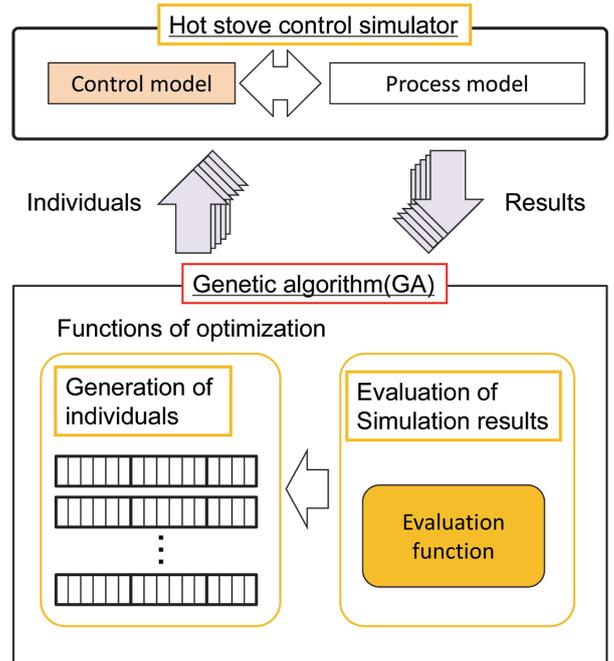


図6 全体制御構造
Structure of combustion pattern optimization

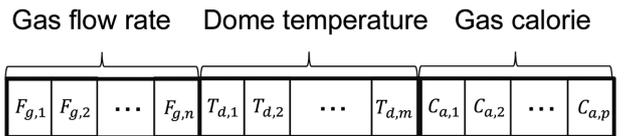


図7 個体の例
Example of the individual

これら上下限值は、ガス流量の場合にはガスを供給するブロワーの能力、ドーム温度の場合は設備保護や環境対策のための上限温度、ガスカロリーの 경우에는製鉄所内のエネルギー供給バランスやエネルギーコスト等の条件に基づいて決まる制約条件として与えられるものである。

(2) 評価関数

熱風炉の熱効率を評価する排ガス温度と、設備制約条件を持つ珪石れんが温度を用いて、以下の式で表わし、これを最小とする目標値パターンを最適燃焼パターンとする。

$$Q = w_1 \cdot P_1 + w_2 \cdot (\max [cr - P_2, 0]) \quad (11)$$

ただし、

$$P_1 \leq P_{1,\max} \quad (12)$$

P_1 : 排ガス温度

$P_{1,\max}$: 排ガス温度の設備上限値

P_2 : 珪石れんが温度

cr : 珪石れんが設備制約温度 (下限温度)

w_1, w_2 : 重み係数

5. 実機テスト結果例⁷⁻⁹⁾

上記の手法で最適パターンを決定した結果の一例を図8に示す。多くの候補解の中から、珪石れんが温度の制約条

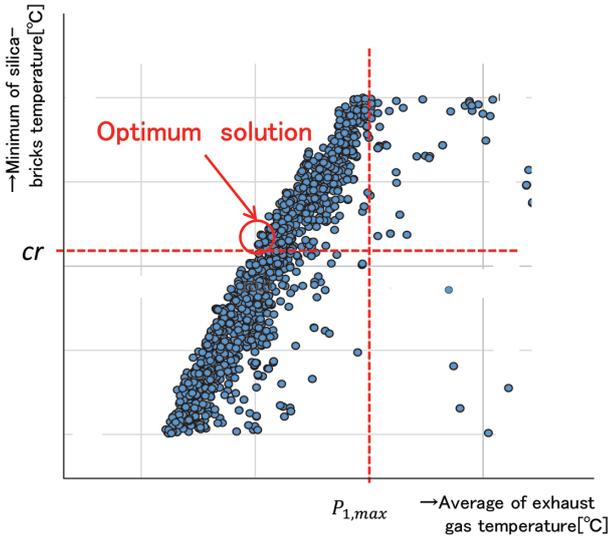


図8 候補解と最適解
Candidates and the optimum solution

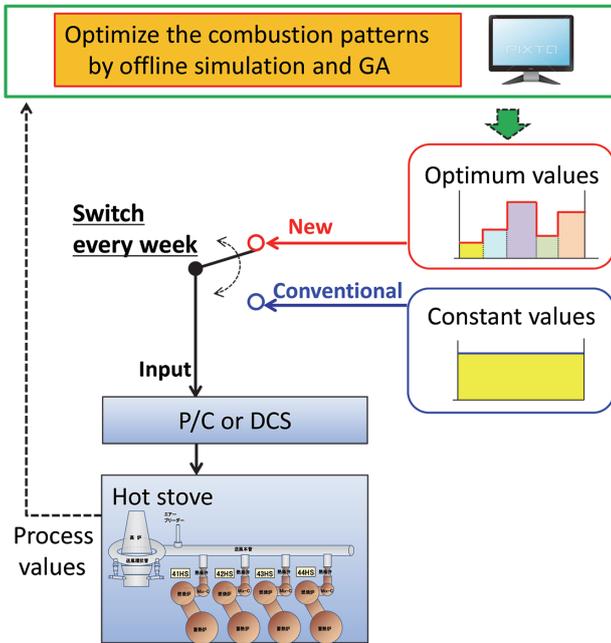


図9 実機テストシステム
System configuration for on-site test

件を満たした上で排ガス温度が最小となる最適解を決定している。この方法で最適燃焼パターンをオフラインで計算し、求めたパターンを用いて実機テストを行った(図9)。熱風炉制御シミュレーションの条件として最新の操業実績データから送風温度や送風流量ほかを入力した上で、前述の方法でGAを用いた燃焼パターン最適化の計算を実行する。その結果得られた最適燃焼パターンを熱風炉実機の燃焼制御へ反映させる。

結果の一例を図10に示す。制御性能の評価としては熱効率の最大化を指標としているが、(6)式より熱風炉から排出される排ガス熱量を削減することで熱効率が向上することから、具体的には排ガス熱量を小さくすることを考え

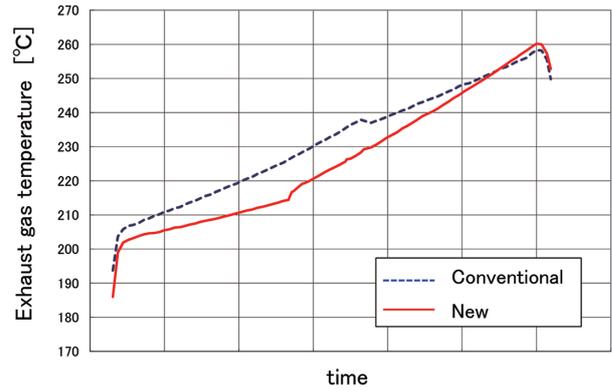


図10 実機テスト結果例(排ガス温度)
Result of on-site test (exhaust gas temperature)

た。排ガス熱量は以下の式で表される。

$$\text{排ガス熱量} = \text{排ガス比熱} \times \text{排ガス流量} \times \text{排ガス温度} \quad (13)$$

(13)式より、排ガス流量が同じであれば排ガス温度が低いほど排ガス熱量が小さくなることから、この評価項目として排ガス温度を用いた。図10に示す実機テスト結果例では、蓄熱室を通過する燃焼ガス流量と燃焼ガス温度が燃焼中に変化することで、燃焼中の排ガス温度が従来制御より5.6℃ほど低下し、熱効率が向上した結果が得られた。

6. 結 言

熱風炉の熱効率を向上させる燃焼パターンを最適化する新燃焼制御技術を開発した。本方法では、従来は燃焼の開始から終了まで一定の目標値で制御されていた燃焼制御操作量の目標値を可変とし、燃焼ガス流量と温度が燃焼中に変化することで燃焼ガスと蓄熱れんがとの熱交換の効率を高くすることに着目した。最適化アルゴリズムとしてはGAを採用し、GAで生成する候補解を熱風炉制御シミュレータで評価させる。このシミュレータは熱風炉全体の動特性をモデル化した物理モデルと、計装やプロセスコンピュータが持つ制御機能をモデル化して組み合わせたものであり、現時刻から先の熱風炉のプロセス状態を予測することで、珪石れんが温度や排ガス温度等の制約条件を満足することを保証できる。

本方法を用いて決定した燃焼パターンを用いて実機テストを行った結果、燃焼中の排ガス温度が従来制御より低下し、熱効率が向上した結果が得られた。現在は新日鐵住金(株)の熱風炉設備において実用化されている。

参考文献

- 1) 伊藤雅浩, 藤井章, 上之俊昭: 制技 134-1-5: 熱風炉プロセスモデルの開発. 日本鉄鋼協会 第134回制御技術部会, 東京, 2005-11, 私信
- 2) 伊藤雅浩, 上之俊昭: 熱風炉プロセスシミュレータの開発. 日本鉄鋼協会 第153回春季講演大会, 20(2), 303(2007)

- 3) 高橋知子, 藤井章, 本田基樹: 熱風炉燃焼制御技術の開発. 電気学会ものづくり研究会, MKZ-13-009, 2013
- 4) 高橋知子, 藤井章, 本田基樹: 制技 148-1-5: 熱風炉燃焼制御技術の開発. 日本鉄鋼協会 第 148 回制御技術部会, 東京, 2012-11, 私信
- 5) 高橋知子, 藤井章, 本田基樹: 熱風炉燃焼制御技術の開発. 日本鉄鋼協会 第 165 回春季講演大会, 26 (1), 131 (2013)
- 6) 日本特許公報: 特許第 4734014 号, 2011 年 4 月 28 日
- 7) 高橋知子, 藤井章: 制技 154- 制 -1: 熱風炉燃焼パターン最適化技術の開発. 日本鉄鋼協会 第 154 回制御技術部会, 東京, 2015-11, 私信
- 8) 高橋知子, 藤井章: 熱風炉燃焼パターン最適化技術の開発. 日本鉄鋼協会 第 171 回春季講演大会, 29 (1), 131 (2016)
- 9) 日本特許公報: 特許第 5803810 号, 2015 年 9 月 11 日



藤井 章 Akira FUJII
設備・保全技術センター
システム制御技術部 システム制御技術室
主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



藤井知子 Noriko FUJII
設備・保全技術センター
システム制御技術部 システム制御技術室
主査



宮崎裕之 Hiroshi MIYAZAKI
設備・保全技術センター
システム制御技術部 システム制御技術室
主幹



伊藤雅浩 Masahiro ITO
設備・保全技術センター
システム制御技術部 システム制御技術室
主幹



本田基樹 Motoki HONDA
大分製鉄所 製鉄部 製鉄技術室
主幹