

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7687439号
(P7687439)

(45)発行日 令和7年6月3日(2025.6.3)

(24)登録日 令和7年5月26日(2025.5.26)

(51)国際特許分類 F I
C 2 1 B 5/00 (2006.01) C 2 1 B 5/00 3 1 6
C 2 1 B 5/00 3 1 9

請求項の数 6 (全15頁)

(21)出願番号	特願2023-565429(P2023-565429)	(73)特許権者	000001258
(86)(22)出願日	令和5年8月7日(2023.8.7)		J F E スチール株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2023/028830		東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号
(87)国際公開番号	WO2024/048214	(74)代理人	100147485
(87)国際公開日	令和6年3月7日(2024.3.7)		弁理士 杉村 憲司
審査請求日	令和5年10月24日(2023.10.24)	(74)代理人	230118913
(31)優先権主張番号	特願2022-138752(P2022-138752)		弁理士 杉村 光嗣
(32)優先日	令和4年8月31日(2022.8.31)	(74)代理人	100165696
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		弁理士 川原 敬祐
		(74)代理人	100180655
			弁理士 鈴木 俊樹
		(72)発明者	橋本 佳也
			東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号
			J F E スチール株式会社内
		(72)発明者	益田 稜介

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 プロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

高炉の内部の状態を計算可能な物理モデルを用いて将来の溶銑温度の予測値を求める応答予測ステップと、

前記応答予測ステップで求められた前記溶銑温度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差に対応する項と還元材比又は送風湿分を低減するための項とを有する評価関数が最小化又は最大化するように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を求める操作量決定ステップと、を含み、

前記操作量決定ステップは、求める前記微粉炭比及び前記送風湿分の操作量を未知変数として、前記未知変数に関する一次式の制約条件下で、前記未知変数に関する二次関数である前記評価関数を用いて、前記未知変数を決定する、プロセスの制御方法。

10

【請求項 2】

前記応答予測ステップは、前記物理モデルを用いて現在の操作変数が保持された場合の将来の溶銑温度の予測値と現在の操作変数を変化させた場合の溶銑温度の予測値とに基づいて将来の前記溶銑温度の予測値を求める、請求項 1 に記載のプロセスの制御方法。

【請求項 3】

造銑速度の予測値が目標値と合致するように送風流量を操作し、通気度の予測値が上限以下となるようにコークス比を操作するステップをさらに含む、請求項 1 に記載のプロセスの制御方法。

【請求項 4】

20

請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載のプロセスの制御方法によって操作された操作変数を用いて操業条件を変更する、高炉の操業方法。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の高炉の操業方法によって操業される前記高炉を用いて溶銑を製造する、溶銑の製造方法。

【請求項 6】

高炉の内部の状態を計算可能な物理モデルを記憶する記憶部と、
溶銑温度の目標値である目標溶銑温度を取得して、前記溶銑温度が前記目標溶銑温度となるように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を算出する溶銑温度制御部と、を備え、
前記溶銑温度制御部は、

前記物理モデルを用いて将来の溶銑温度の予測値を求め、

前記溶銑温度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差に対応する項と還元材比又は送風湿分を低減するための項とを有する評価関数が最小化又は最大化するように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を求め、

前記操作量を求めることは、求める前記微粉炭比及び前記送風湿分の操作量を未知変数として、前記未知変数に関する一次式の制約条件下で、前記未知変数に関する二次関数である前記評価関数を用いて、前記未知変数を決定する、プロセスの制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、プロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

製鉄業における高炉プロセスにおいて溶銑温度 (Hot Metal Temperature: HMT) は重要な管理指標であり、主に微粉炭比及び送風湿分を調整することで制御されている。近年の高炉操業は、原燃料コストの合理化を追及すべく、低コークス比及び高微粉炭比の条件下で行われており、炉況が不安定化しやすい。そのため、溶銑温度のばらつきを抑える必要がある。

【0003】

また高炉プロセスは、固体が充填された状態で操業を行うためプロセス全体の熱容量が大きく、アクションに対する応答の時定数が長いという特徴がある。さらに、炉上部で装入された原料が炉下部に降下するまでに、例えば数時間を要することがある。そのため溶銑温度の制御のためには、将来の炉熱予測に基づく適切な操作が必要である。

【0004】

高炉の長い時定数に由来する応答の遅れを考慮するため、予測に基づいて高炉を制御する方法として、例えば特許文献 1 のような物理モデルを用いるものがある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】特開平 11 - 335710 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ここで、近年の CO₂ 低減の社会的要請により高炉プロセスでは還元材比 (コークス比と微粉炭比の合計) の低減が求められている。還元材比を低減するために、炉内に吹き込む送風湿分を低減したり、炉体ヒートロス低減したりすることで、余剰な熱源を消費しないようにすることが有効である。しかしながら、高炉プロセスでは、溶銑温度を制御するとともに、銑鉄の生産速度 (以下「造銑速度」と称される) を目標値近傍に保つことが求められる。そのため、還元材比の低減よりも溶銑温度のばらつき低減を優先した微粉炭

10

20

30

40

50

比及び送風湿分の操作が実施されがちである。また、特許文献 1 は、溶銑温度のみを制御する技術を開示し、還元材比を低減することを考慮した制御方法を提案するものでない。

【0007】

以上の問題を解決すべくなされた本開示の目的は、高炉において還元材比を低減しつつ、溶銑温度のばらつき抑制を実現するプロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0008】

(1) 本開示の一実施形態に係るプロセスの制御方法は、

高炉の内部の状態を計算可能な物理モデルを用いて将来の溶銑温度の予測値を求める応答予測ステップと、

10

前記応答予測ステップで求められた前記溶銑温度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差に対応する項と還元材比又は送風湿分を低減するための項とを有する評価関数が最小化又は最大化するように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を求める操作量決定ステップと、を含む。

【0009】

(2) 本開示の一実施形態として、(1)において、

前記応答予測ステップは、前記物理モデルを用いて現在の操作変数が保持された場合の将来の溶銑温度の予測値と現在の操作変数を変化させた場合の溶銑温度の予測値とに基づいて将来の前記溶銑温度の予測値を求める。

20

【0010】

(3) 本開示の一実施形態として、(1)又は(2)において、

前記操作量決定ステップは、求める前記微粉炭比及び前記送風湿分の操作量を未知変数として、前記未知変数に関する一次式の制約条件下で、前記未知変数に関する二次関数である前記評価関数を用いて、前記未知変数を決定する。

【0011】

(4) 本開示の一実施形態として、(1)から(3)のいずれかにおいて、

造銑速度の予測値が目標値と合致するように送風流量を操作し、通気度の予測値が上限以下となるようにコークス比を操作するステップをさらに含む。

【0012】

30

(5) 本開示の一実施形態に係る高炉の操業方法は、

(1)から(4)のいずれかのプロセスの制御方法によって操作された操作変数を用いて操業条件を変更する。

【0013】

(6) 本開示の一実施形態に係る溶銑の製造方法は、

(5)の高炉の操業方法によって操業される前記高炉を用いて溶銑を製造する。

【0014】

(7) 本開示の一実施形態に係るプロセスの制御装置は、

高炉の内部の状態を計算可能な物理モデルを記憶する記憶部と、

溶銑温度の目標値である目標溶銑温度を取得して、前記溶銑温度が前記目標溶銑温度となるように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を算出する溶銑温度制御部と、を備え、

40

前記溶銑温度制御部は、

前記物理モデルを用いて将来の溶銑温度の予測値を求め、

前記溶銑温度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差に対応する項と還元材比又は送風湿分を低減するための項とを有する評価関数が最小化又は最大化するように、微粉炭比及び送風湿分の操作量を求める。

【発明の効果】

【0015】

本開示によれば、高炉において還元材比を低減しつつ、溶銑温度のばらつき抑制を実現するプロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置を提

50

供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】図1は、高炉プロセスにおける操作変数と制御変数を示す図である。

【図2】図2は、本開示の一実施形態に係るプロセスの制御方法を示す図である。

【図3】図3は、本開示で用いられる物理モデルの入出力情報を示す図である。

【図4】図4は、微粉炭比と送風湿分の同時操作による制御シミュレーションの結果を示す図である。

【図5】図5は、微粉炭比のみの操作（比較例）による制御シミュレーションの結果を示す図である。

【図6】図6は、還元材比（RAR）の低減効果を説明するための図である。

【図7】図7は、本開示の一実施形態に係るプロセスの制御装置の構成例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、図面を参照して本開示の一実施形態に係るプロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置が説明される。

【0018】

図1は高炉プロセス（高炉の操業での工程）における基本的な操作変数と制御変数を示す。制御変数は、操業において制御すべき変数であるが、直接的な操作ができない又は直接的な操作が困難な変数であって、相関のある操作変数を介して変更される。高炉の操業において、溶銑温度を目標値とするために、主に微粉炭比又は送風湿分が操作される。高炉の通気性（通気度）を良好に保つために、主にコークス比又は送風流量が操作される。また、造銑速度を目標値とするために、主に送風流量が操作される。ここで、通気度として、本実施形態では、吹き抜けに直接的に影響がある炉内圧損が用いられる。炉内圧損は、送風圧力と炉頂圧（炉頂の圧力）との差である。炉内圧損以外に、通気抵抗、対面シャフト差圧など様々な通気性の指標が存在する。そのため、通気度として、炉内圧損に代えて別の通気性の指標が用いられてよいし、複数の通気性の指標の組み合わせが用いられてよい。本実施形態に係るプロセスの制御方法では、溶銑温度を制御するための操作変数である微粉炭比及び送風湿分に着目し、溶銑温度を制御しつつ還元材比を低減するように、微粉炭比及び送風湿分の最適な操作量を決定する。

【0019】

図2は、本実施形態に係るプロセスの制御方法の処理を示す図である。本実施形態に係るプロセスの制御方法では、例えば参考文献1（特許第7107444号公報）に記載されるカスケード制御が使用される。カスケード制御では、目標とする微粉炭比（PCR）を算出する制御（図2の溶銑温度制御）と、目標PCRに必要な微粉炭流量を算出する制御（図2のPCR追従制御）と、が連続して行われる。溶銑温度制御は、溶銑温度（HMT）の目標値である目標溶銑温度を取得して、後述の物理モデルを用いて目標PCRを算出することができる。また、溶銑温度制御は、目標PCRを算出するだけでなく（微粉炭比の操作量を求めるだけでなく）、送風湿分の操作量も算出する。

【0020】

本実施形態に係るプロセスの制御方法は、造銑速度制御及び通気度制御も含む。造銑速度制御は、造銑速度（Production rate: Prod）の目標値である目標造銑速度を取得して、後述の物理モデルを用いて、送風流量（BV）の操作量を算出する。通気度制御は、炉内圧損（P）の上限である炉内圧損上限を取得して、後述の物理モデルを用いて、送風流量及びコークス比の操作量を算出する。ここで、高炉を含むプラントでの実績値（観測値又は計算値であり得る）は各制御で用いられる物理モデルの更新などのために、フィードバックされてよい。図2の例では、微粉炭比（PCR）、溶銑温度（HMT）、炉内圧損（P）及び造銑速度（Prod）の実績値が、それぞれ実績PCR、実績HMT、実績P及び実績Prodとして示されている。また、高炉プロセスにおける制御変数と相関のある操作変数との対応付けは図1及び図2に示すものに限定され

10

20

30

40

50

ない。例えば造鉄速度制御では送風流量に代えて送風酸素流量を操作することが可能である。

【 0 0 2 1 】

本実施形態では、図 2 に示すような多変数制御系の構築において、溶鉄温度 (H M T)、炉内圧損 (P)、造鉄速度 (P r o d) を制御するための個別のコントローラ (溶鉄温度制御、通気度制御、造鉄速度制御) が構築されている。溶鉄温度は、送風湿分の操作及び微粉炭比 (P C R) と微粉炭流量を操作するカスケード制御によって制御される。通気度は、送風流量及びコークス比の操作により制御される。造鉄速度は、送風流量の操作により制御される。ここで、例えば造鉄速度制御において送風流量を操作した場合に、送風流量の変化は溶鉄温度に影響する。この影響は、溶鉄温度制御における物理モデルによって反映されて、微粉炭比又は送風湿分の操作量として算出され、算出された微粉炭比又は送風湿分の操作量が反映されることで溶鉄温度が目標値近傍に保たれる。本実施形態では、上記のように個別のコントローラが構築されているが、それぞれの操作変数同士の干渉を考慮した制御を実現可能である。つまり、例えば溶鉄温度制御と造鉄速度制御は干渉するが、他方の操作変数の操作に基づく変動を、自己の操作変数の操作によって吸収する外乱除去特性を有する制御系として構築されており、干渉の影響を低減できる。また、通気度制御についても同様である。

10

【 0 0 2 2 】

本実施形態に係るプロセスの制御方法では、反応速度論に基づいた高炉の物理モデルを用いて将来の溶鉄温度及び造鉄速度を予測し、予測された値が目標値近傍となるように、微粉炭比及び送風湿分の変化量を決定する。この操作量の決定の際に還元材比を考慮した評価関数を最小化する二次計画法を用いることで、還元材比低減と溶鉄温度のばらつき抑制を両立することができる。本実施形態に係るプロセスの制御方法における処理の流れの概略は、以下のステップ 1 ~ 3 の通りである。

20

【 0 0 2 3 】

まず、ステップ 1 として、物理モデルを用いて将来の溶鉄温度が予測される。ステップ 1 は応答予測ステップである。応答予測ステップは、物理モデルを用いて現在の操作変数が保持された場合の将来の溶鉄温度の予測値と、現在の操作変数を変化させた場合の溶鉄温度の予測値とに基づいて、将来の溶鉄温度の予測値を求める。現在の操作変数が保持された場合の将来の溶鉄温度の予測値は、後述する自由応答である。現在の操作変数を変化させた場合の溶鉄温度の予測値は、本実施形態においては後述するステップ応答であるが、これに限定されない。

30

【 0 0 2 4 】

次に、ステップ 2 として、ステップ 1 での溶鉄温度の予測値が目標値と合致するように、かつ、還元材比を最小化するように二次計画法を用いて操作変数の操作を実行する。ステップ 2 は、操作量決定ステップであって、予測値と目標値との偏差を求めて、偏差を解消するための操作量が求められ、操作変数が調整される。本実施形態において、操作変数は微粉炭比及び送風湿分である。

【 0 0 2 5 】

また、ステップ 3 として、高炉の実操業を模擬するため、造鉄速度の予測値が目標値と合致するように送風流量を操作し、通気度の予測値が上限以下となるように少なくともコークス比を操作してよい。本実施形態において、通気度は炉内圧損であって、炉内圧損の予測値が設定されている上限を超えると通気状態が異常であると判定される。通気状態が異常と判定される場合に、コークス比を上昇させる操作が実行されてよい。通気状態が異常でないとは判定される場合、つまり炉内圧損の予測値が上限以下の場合に、コークス比を低減させる操作が実行されてよい。ステップ 3 による送風流量及びコークス比の操作は、溶鉄温度制御にとって外乱となる。後述するように、この外乱の影響を微粉炭比及び送風湿分の操作により打ち消すことが可能であることが、シミュレーションによって検証された。

40

【 0 0 2 6 】

50

本開示において用いられる物理モデルは、参考文献 2（羽田野道春ら、「高炉非定常モデルによる火入れ操業の検討」、鉄と鋼、vol. 68、p. 2369）に記載の方法のモデルと同様である。すなわち、鉱石の還元、鉱石とコークスとの間の熱交換及び鉱石の融解等の物理現象を考慮した偏微分方程式群から構成された、非定常状態における高炉の内部（炉内）の状態を計算可能な物理モデルが用いられる。この物理モデルを、以下において非定常モデルと称することがある。

【0027】

図 3 に示すように、非定常モデルに与えられる入力変数の中で時間変化する主なものは、送風流量、送風酸素流量、微粉炭流量、送風湿分、送風温度、コークス比及び炉頂圧である。これらの入力変数は高炉の操作変数又は操業因子である。送風流量、送風酸素流量、微粉炭流量は、それぞれ、高炉に送られる空気、酸素、微粉炭の流量である。送風湿分は、高炉に送られる空気の湿度である。送風温度は、高炉に送られる空気の温度である。コークス比は、炉頂部におけるコークス比であって、1 トンの溶銑生成量に対して使用されるコークス重量である。

10

【0028】

また、非定常モデルの主な出力変数は、ガス利用率、ソリューションロスカーボン量（ソルロスカーボン量）、還元材比、造銑速度、溶銑温度及び炉内圧損である。非定常モデルを用いて時々刻々変化する溶銑温度、造銑速度及び炉内圧損を計算可能である。計算の時間間隔は特に限定されないが、本実施形態において 30 分である。後述する非定常モデルの式の「 $t + 1$ 」と「 t 」との時間差が、本実施形態では 30 分である。

20

【0029】

非定常モデルを以下の式（1）及び式（2）により表すことができる。

【0030】

【数 1】

$$x(t+1) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

$$y(t) = C(x(t)) \quad (2)$$

【0031】

ここで $x(t)$ は非定常モデル内で計算される状態変数である。状態変数は、例えばコークスの温度、鉄の温度、鉱石の酸化度、原料の降下速度などである。 $y(t)$ は制御変数である溶銑温度、造銑速度及び通気度（炉内圧損）である。 $u(t)$ は上記の入力変数であって、高炉の操業を行うオペレータが操作可能な変数である。つまり、入力変数は、送風流量 $BV(t)$ 、送風酸素流量 $BVO(t)$ 、微粉炭流量 $PCI(t)$ 、送風湿分 $BM(t)$ 、送風温度 $BT(t)$ 、コークス比 $CR(t)$ 、炉頂圧 $TGP(t)$ である。 $u(t) = (BV(t), BVO(t), PCI(t), BM(t), BT(t), CR(t), TGP(t))^T$ で表すことができる。

30

【0032】

まず現在の入力変数の値が一定に保たれたことを仮定して将来の制御変数の予測計算をおこなう。現在の時間ステップである t_0 を 0 とし、以下の式（3）及び式（4）を用いて将来の制御変数が予測される。このようにして求められた制御変数の応答 $y_f(t)$ は自由応答と称される。

40

【0033】

【数 2】

$$x(t+1) = f(x(t), u(0)) \quad (3)$$

$$y_f(t) = C(x(t)) \quad (4)$$

50

【 0 0 3 4 】

以下では、現在及び将来の微粉炭比（PCR）及び送風湿分（BM）の操作量を決定する方法について述べる。将来として2時間後を予測する例が説明される。未知変数である $(PCR_0, BM_0, PCR_1, BM_1)$ を導入して、二次計画法によって微粉炭比（PCR）及び送風湿分（BM）の操作量が決定される。添え字の0は現在を示す。また、添え字の1は2時間後を示す。

【 0 0 3 5 】

本物理モデルを用いる予測制御の前提として、将来の溶銑温度は、自由応答である応答 $y_f(t)$ とステップ応答との重ね合わせで近似できるとしてよい。10時間先までの2時間ごとの溶銑温度の予測値である $y_{pre}(t)$ は以下の式（5）の通りである。

10

【 0 0 3 6 】

【数3】

$$\begin{pmatrix} y_{pre}(4) \\ y_{pre}(8) \\ y_{pre}(12) \\ y_{pre}(16) \\ y_{pre}(20) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{PCR}(4) & S_{BM}(4) & 0 & 0 \\ S_{PCR}(8) & S_{BM}(8) & S_{PCR}(4) & S_{BM}(4) \\ S_{PCR}(12) & S_{BM}(12) & S_{PCR}(8) & S_{BM}(8) \\ S_{PCR}(16) & S_{BM}(16) & S_{PCR}(12) & S_{BM}(12) \\ S_{PCR}(20) & S_{BM}(20) & S_{PCR}(16) & S_{BM}(16) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta PCR_0 \\ \Delta BM_0 \\ \Delta PCR_1 \\ \Delta BM_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_f(4) \\ y_f(8) \\ y_f(12) \\ y_f(16) \\ y_f(20) \end{pmatrix} \quad (5)$$

【 0 0 3 7 】

ここで $S_{PCR}(t)$ は微粉炭比（PCR）を単位量（1 [kg/t]）だけ操作した場合の溶銑温度の変化量である。また、 $S_{BM}(t)$ は送風湿分（BM）を単位量（1 [g/Nm³]）だけ操作した場合の送風湿分の変化量である。 S_{PCR} 及び S_{BM} は、例えば別の物理モデル又は実操業におけるステップ応答試験などにより求めることが可能である。本開示における計算では、参考文献3（Y. Hashimoto, Online prediction of hot metal temperature using transient model and moving horizon estimation. ISIJ Int. 2019, vol. 59, p. 1534）に記載のシミュレーション結果が用いられた。

20

【 0 0 3 8 】

以下において、ステップ応答行列 S を用いて式（5）を下記式（6）のように表すと、溶銑温度の予測値と目標値 $y_{pre}(t)$ との偏差は式（7）の通りとなる。

30

【 0 0 3 9 】

【数4】

$$y_{pre} = S\theta + y_f \quad (6)$$

$$y_{pre} - y_{ref} = S\theta + (y_f - y_{ref}) = S\theta + \delta y \quad (7)$$

【 0 0 4 0 】

ここで自由応答である $y_f(t)$ の目標値 $y_{pre}(t)$ からの偏差を y としている。溶銑温度の予測値と目標値 $y_{pre}(t)$ との偏差の自乗は下記式（8）の通りである。

40

【 0 0 4 1 】

【数5】

$$|y_{pre} - y_{ref}|^2 = (\theta^T S^T + \delta y^T)(S\theta + \delta y) = \theta^T S^T S \theta + 2\delta y^T S \theta + const \quad (8)$$

【 0 0 4 2 】

溶銑温度のばらつきの低減と還元材比の最小化とを両立するため、二次計画法に用いられる評価関数 J は式（9）の通り、式（8）の第1項及び第2項に加えて、送風湿分を低減する項（第3項）を含む。また、評価関数 J は、過度な操作を抑制するための第4項を

50

含む。

【 0 0 4 3 】

【数 6】

$$J = \theta^T S^T S \theta + 2\delta y^T S \theta + a^T \theta + \theta^T R \theta \quad (9)$$

【 0 0 4 4 】

ここで、 a 及び R は係数である。微粉炭比 (PCR) と送風湿分 (BM) のそれぞれの変更に対する溶銑温度の応答性を比べると、送風湿分の方が即応性を有することが知られている。ただし、送風湿分を増減できるように増加方向及び低減方向に操作可能領域を確保するためには送風湿分の平均値を上昇させる必要がある。送風湿分の平均値を上昇させると、送風湿分の水蒸気分解反応による吸熱が生じ、吸熱で低下した熱を補償するために還元材を多く投入しなければならないという問題が生じる。そこで、送風湿分の操作量を制限するため、第3項が導入されており、係数ベクトル a の要素の大きさにより、ベクトルに含まれる PCR と BM の重みづけを変更し、両者の操作配分を調整することができる。

10

【 0 0 4 5 】

また、以下の式 (10) ~ 式 (13) の制約条件の下で、式 (9) を用いて θ が決定される。

【 0 0 4 6 】

【数 7】

$$PCR_{min} < PCR_{now} + \Delta PCR_i < PCR_{max} \quad (10)$$

$$-\Delta PCR_{max} < \Delta PCR_i < \Delta PCR_{max} \quad (11)$$

$$BM_{min} < BM_{now} + \Delta BM_i < BM_{max} \quad (12)$$

$$-\Delta BM_{max} < \Delta BM_i < \Delta BM_{max} \quad (13)$$

30

【 0 0 4 7 】

ここで、式 (10) ~ 式 (13) における添え字の i は 0 又は 1 である。また、添え字の now は現時点の微粉炭比 (PCR) 又は送風湿分 (BM) の値を意味する。 PCR_{max} 、 PCR_{min} はそれぞれ微粉炭比 (PCR) の目標範囲の上限、下限である。 ΔPCR_{max} は微粉炭比 (PCR) の許容される変化量の大きさの上限である。 BM_{max} 、 BM_{min} はそれぞれ送風湿分 (BM) の目標範囲の上限、下限である。 ΔBM_{max} は送風湿分 (BM) の許容される変化量の大きさの上限である。式 (10) ~ 式 (13) で示される未知変数 θ に関する一次式の制約条件下で、未知変数 θ に関する二次関数である評価関数 J を最小化するように、二次計画法を用いて未知変数 θ が決定される。式 (9) を用いて未知変数 θ を求める制御が図 2 の溶銑温度制御に対応する。

40

【 0 0 4 8 】

ここで、本実施形態において、還元材比を低減するために送風湿分を低減するように評価関数 J を設計したが、例えば微粉炭比の増加にペナルティを与えるなど、還元材比を直接的に低減する評価関数 J を用いても同様の効果が得られる。また、本実施形態では評価関数 J が最小化する場合の未知変数 θ を求めたが、溶銑温度の予測値と目標値との偏差及び還元材比 (又は送風湿分) の最小化と、評価関数 J の最大化とが対応するように、評価関数 J が設計されてよい。つまり、評価関数 J が最小化又は最大化するように、微粉炭比及び送風湿分の操作量が求められてよい。さらに、評価関数 J において、準最適値が最適値と評価されてよい。つまり、必ずしも評価関数 J が最大値又は最小値をとらなくても、評価関数 J の値が最大値の近傍又は最小値の近傍であれば (準最適化が行われれば)、制

50

御目的が達成されると扱ってよい。したがって、評価関数 J が最小化又は最大化することは、評価関数 J の値が最大値又は最小値となる場合だけでなく、評価関数 J の値が最大値の近傍又は最小値の近傍となる場合を含むとしてよい。

【0049】

実操業に近い操業条件で、本開示による還元材比の低減効果をシミュレーションにより検証するため、溶銑温度以外の制御変数（造銑速度及び炉内圧損）についても、以下の手法により、操作変数（送風流量及びコークス比）が操作される。

【0050】

造銑速度について、目標値と予測値との偏差を解消するように、以下の式（14）によって、送風流量（ BV ）[Nm^3/min]の操作量である BV が求められる。

10

【0051】

【数8】

$$\Delta BV = \frac{-b(Prod(t+T) - Prod_{ref})}{S_{BV}} \quad (14)$$

【0052】

ここで $Prod(t+T)$ は造銑速度の T ステップ先の予測値である。一例として T は4であってよく、このとき2時間（30分×4）先の予測値を意味する。 $Prod_{ref}$ は目標造銑速度（造銑速度の目標値）である。また、 S_{BV} は送風流量（ BV ）を単位量（ $1 [Nm^3/min]$ ）だけ操作した場合の造銑速度の変化量である。 S_{BV} は別の物理モデル又は実操業におけるステップ応答試験などにより求めることが可能である。また、 b は係数であって正の数である。式（14）に従って BV を求める制御が図2の造銑速度制御に対応する。

20

【0053】

また、炉内圧損（ P ）について、上限（閾値）との比較によって、コークス比（ CR ）及び送風流量（ BV ）の操作量が決定される。炉内圧損（ P ）が上限を超えた場合に、コークス比を上昇させると同時に送風流量を低下させるように操作量が決定される。このことは、高炉の操業において、原料の荷下がり安定化させる操作に対応する。また、炉内圧損が上限以下の場合に、徐々にコークス比を低減させていくように操作量が決定される。原則として炉内圧損が上限を超えないように制御が行われるが、炉内圧損が上限以下の場合に、徐々にコークス比を低減させることによって操業のコストを低減させることが可能になる。このような制御が行われる場合に、炉内圧損の値は上限の近傍で推移する。炉内圧損の上限との比較によって、コークス比（ CR ）及び送風流量（ BV ）の操作量を決定する制御が図2の通気度制御に対応する。

30

【0054】

図4は、上記のプロセス制御によるシミュレーション結果を示す図である。つまり図4のシミュレーションでは溶銑温度（ HMT ）、造銑速度（ $Prod$ ）及び通気度の一例である炉内圧損（ P ）の非定常モデルを用いた予測値に基づいて、送風湿分（ BM ）、微粉炭比（ PCR ）、送風流量（ BV ）及びコークス比（ CR ）を操作した。目標溶銑温度は1500であった。目標造銑速度は7 [t/min]であった。また、炉内圧損の上限値は100 [kPa]であった。

40

【0055】

図4に示す通り、溶銑温度（ HMT ）は目標値近傍に操作されており、式（9）に示した評価関数 J に基づき、溶銑温度のばらつきを抑制しつつ、送風湿分（ BM ）は下限値近傍に保持されていることがわかる。送風湿分が下限値近傍であることは、還元材を投入しなければならぬ水蒸気分解反応による吸熱が生じにくいいため、還元材比の低減につながる。また、造銑速度（ $Prod$ ）は目標値近傍に制御されており、炉内圧損（ P ）についても上限以下に保たれている。

【0056】

50

比較検証のため、微粉炭比（PCR）のみを操作し、送風湿分（BM）を操作しない比較例についてシミュレーションが実施された。図5は、比較例の制御によるシミュレーション結果を示す図である。図5のシミュレーションでは、溶銑温度（HMT）、造銑速度（Prod）及び通気度の一例である炉内圧損（P）の非定常モデルを用いた予測値に基づいて、微粉炭比（PCR）、送風流量（BV）及びコークス比（CR）を操作した。シミュレーションの条件は、送風湿分（BM）を除いて、図4の場合と同じである。送風湿分は $15.5 [g/Nm^3]$ の一定値とした。

【0057】

図6は、還元材比（RAR）の低減効果を説明するための図であって、図4（本実施形態に係るプロセスの制御方法）と図5（比較例）のシミュレーション結果の還元材比の時間変化を比較したものである。図6に示すように、本実施形態に係るプロセスの制御方法での還元材比の平均値は、比較例の還元材比の平均値より低減されている。微粉炭比及び送風湿分の同時操作によって、還元材比を低減可能であることが示された。還元材比が低減されることによって、溶銑1tを製造するために必要な羽口から吹き込む酸素量（酸素原単位） $[Nm^3/t]$ が低減する。そのため、より少ない送風流量で目標の造銑速度に到達させることができる。結果として、圧力損失に余裕が生まれるため、コークス比も低減できている（図3と図4のCR参照）。

【0058】

図7は、一実施形態に係るプロセスの制御装置10の構成例を示す図である。図7に示すように、本実施形態に係るプロセスの制御装置10は、通信部11と、記憶部12と、制御部13と、を備える。制御部13は、溶銑温度制御部14と、造銑速度制御部15と、通気度制御部16と、PCR追従制御部17と、を備える。プロセスの制御装置10は、上記のプロセスの制御方法を実行する。ここで、プロセスの制御装置10は、送風湿分、送風流量、コークス比又は微粉炭比を操作する場合に、例えば操作量などの情報を液晶ディスプレイなどの表示部に表示させてよい。

【0059】

通信部11は、上位システムと通信するための通信モジュールを含んで構成される。上位システムは、高炉を含むプラントでのプロセスを管理するプロセスコンピュータを含む。通信部11は、例えば4G（4th Generation）、5G（5th Generation）などの移動体通信規格に対応する通信モジュールを含んでよい。通信部11は、例えば有線又は無線のLAN規格に対応する通信モジュールを含んでよい。制御部13は、通信部11を介して、上位システムから目標溶銑温度、目標造銑速度及び炉内圧損上限などの情報を取得できる。また、制御部13は、通信部11を介して、操作を実行した操作変数、すなわち算出した操作量を反映した操作変数の情報を上位システムに出力することができる。

【0060】

記憶部12は、上記の物理モデルを記憶する。また、記憶部12は、高炉プロセスの制御に関するプログラム及びデータを記憶する。記憶部12は、半導体記憶デバイス、光記憶デバイス及び磁気記憶デバイスなどの任意の記憶デバイスを含んでよい。半導体記憶デバイスは例えば半導体メモリを含んでよい。記憶部12は、複数の種類の記憶デバイスを含んでよい。

【0061】

制御部13は、プロセスの制御装置10を構成する各機能部及びプロセスの制御装置10の全体を制御及び管理する。制御部13は制御に用いられるデータの取得も実行してよい。つまり、制御部13は、高炉の溶銑温度、造銑速度及び通気度を観測値又は計算値によって取得してよい。制御部13は、種々の機能を制御及び管理するために、例えばCPU（Central Processing Unit）のような少なくとも1つのプロセッサを含んで構成される。制御部13は、1つのプロセッサで構成されてよいし、複数のプロセッサで構成されてよい。制御部13を構成するプロセッサは、記憶部12からプログラムを読みだして実行することによって、溶銑温度制御部14、造銑速度制御部15、

10

20

30

40

50

通気度制御部 1 6 及び P C R 追従制御部 1 7 として機能してよい。

【 0 0 6 2 】

溶銑温度制御部 1 4 は、溶銑温度の目標値である目標溶銑温度を取得して、溶銑温度が目標溶銑温度となるように、送風湿分及び微粉炭比の操作量を算出する。溶銑温度制御部 1 4 は、図 2 の「溶銑温度制御」を実行する機能部である。

【 0 0 6 3 】

造銑速度制御部 1 5 は、造銑速度の目標値である目標造銑速度を取得して、造銑速度が目標造銑速度となるように、送風流量の操作量を算出する。造銑速度制御部 1 5 は、図 2 の「造銑速度制御」を実行する機能部である。

【 0 0 6 4 】

通気度制御部 1 6 は、通気度（本実施形態において炉内圧損）の上限を取得して、通気度が上限を超えないように、少なくともコークス比の操作量を算出する。通気度制御部 1 6 は、本実施形態のように、さらに送風流量の操作量を算出してよい。通気度制御部 1 6 は、図 2 の「通気度制御」を実行する機能部である。

【 0 0 6 5 】

P C R 追従制御部 1 7 は、溶銑温度制御部 1 4 によって定められた目標値である微粉炭比（目標 P C R）を取得して、P C R 追従制御によって、目標 P C R に追従するように微粉炭流量（P C I）の操作量を算出する。P C R 追従制御部 1 7 は、図 2 の「P C R 追従制御」を実行する機能部である。

【 0 0 6 6 】

溶銑温度制御部 1 4、造銑速度制御部 1 5、通気度制御部 1 6 は、それぞれ溶銑温度（H M T）、造銑速度（P r o d）、炉内圧損（ P ）を制御するための個別のコントローラである。上記のステップ 1 ~ 3 を用いて説明すると、溶銑温度制御部 1 4 は、物理モデルを用いてステップ 1（応答予測ステップ）を実行して、溶銑温度の予測値を求める。溶銑温度制御部 1 4 は、ステップ 2（操作量決定ステップ）を実行して、微粉炭比及び送風湿分の操作量を求める。造銑速度制御部 1 5 は、ステップ 3 を実行して、造銑速度の目標値と予測値との偏差を解消するように送風流量の操作量を求める。また、通気度制御部 1 6 は、ステップ 3 を実行して、炉内圧損の予測値が上限を超えないように、送風流量及びコークス比の操作量を求める。ここで、上記のように、個別のコントローラとして構築される溶銑温度制御部 1 4、造銑速度制御部 1 5 及び通気度制御部 1 6 は、他の制御部による操作変数の操作に基づく変動を、自己の操作変数の操作によって吸収する外乱除去特性を有する制御系である。そのため、溶銑温度制御部 1 4、造銑速度制御部 1 5 及び通気度制御部 1 6 は、他の制御部からの操作変数の干渉の影響を低減できる。

【 0 0 6 7 】

高炉の操業方法の一部として、プロセスの制御装置 1 0 によって実行されるプロセスの制御方法が用いられてよい。例えば上記のプロセスの制御方法において操作された操作変数は、高炉の操業における操業条件の変更に用いられてよい。また、このような高炉の操業方法は、溶銑を製造する製造方法の一部として実行され得る。高炉において原料の鉄鉱石が溶解、還元されて銑鉄となり、溶銑として出銑されるが、高炉はこの操業方法に従って操業されてよい。

【 0 0 6 8 】

プロセスの制御装置 1 0 は、例えば高炉の操業を制御するプロセスコンピュータと別のコンピュータで実現されてよいし、プロセスコンピュータで実現されてよい。コンピュータは、例えばメモリ及びハードディスクドライブ（記憶装置）、C P U（処理装置）、ディスプレイなどの表示装置を備える。各種機能は、C P U、メモリ等のハードウェアとプログラムとを有機的に協働させることにより実現され得る。記憶部 1 2 は、例えば記憶装置で実現されてよい。制御部 1 3 は、例えば C P U で実現されてよい。

【 0 0 6 9 】

以上のように、本実施形態に係るプロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置 1 0 は、上記構成によって、高炉において還元材比を低減しつ

10

20

30

40

50

つ、溶銑温度のばらつき抑制を実現することができる。

【0070】

本開示に係る実施形態について、諸図面及び実施例に基づき説明してきたが、当業者であれば本開示に基づき種々の変形又は修正を行うことが容易であることに注意されたい。従って、これらの変形又は修正は本開示の範囲に含まれることに留意されたい。例えば、各構成部又は各ステップなどに含まれる機能などは論理的に矛盾しないように再配置可能であり、複数の構成部又はステップなどを1つに組み合わせたり、或いは分割したりすることが可能である。本開示に係る実施形態は装置が備えるプロセッサにより実行されるプログラム又はプログラムを記録した記憶媒体としても実現し得るものである。本開示の範囲にはこれらも包含されるものと理解されたい。

10

【0071】

図7に示されるプロセスの制御装置10の構成は一例である。プロセスの制御装置10は、図7に示す構成要素の全てを含まなくてよい。また、プロセスの制御装置10は、図7に示す以外の構成要素を備えてよい。例えば、プロセスの制御装置10は、さらに表示部を備える構成であってよい。

【符号の説明】

【0072】

- 10 プロセスの制御装置
- 11 通信部
- 12 記憶部
- 13 制御部
- 14 溶銑温度制御部
- 15 造銑速度制御部
- 16 通気度制御部
- 17 PCR追従制御部

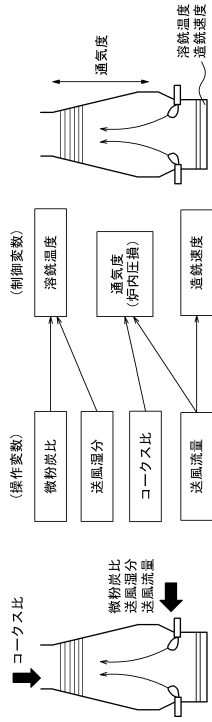
20

30

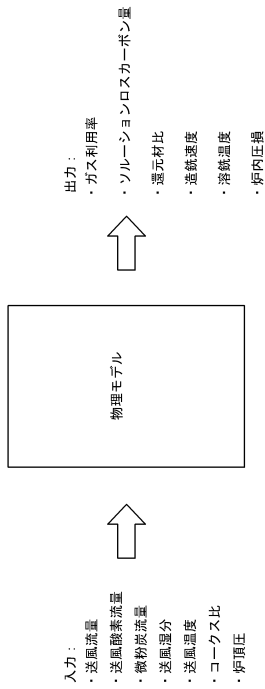
40

50

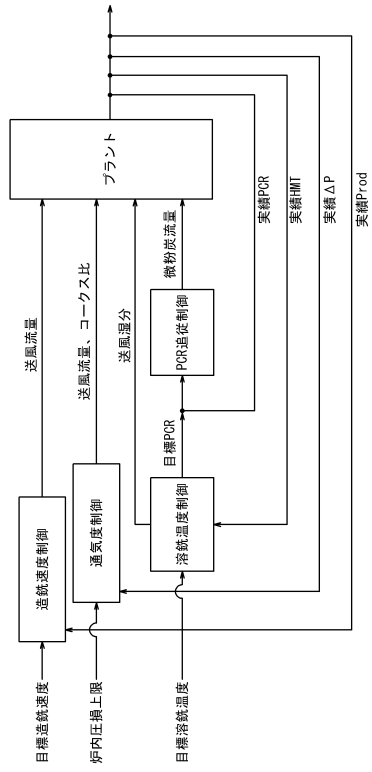
【 図 面 】
【 図 1 】



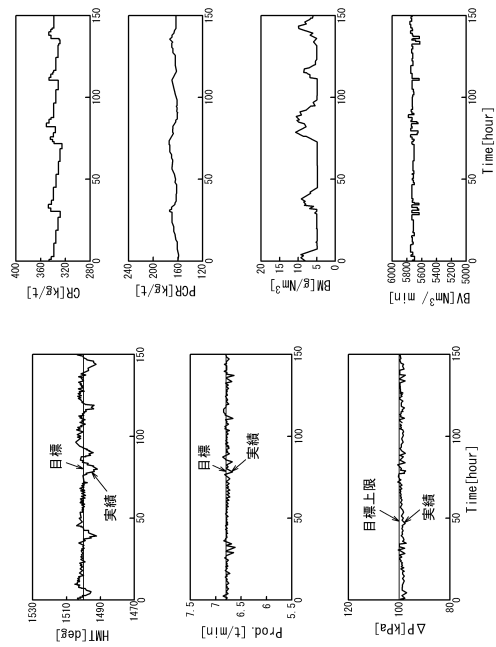
【 図 3 】



【 図 2 】



【 図 4 】



10

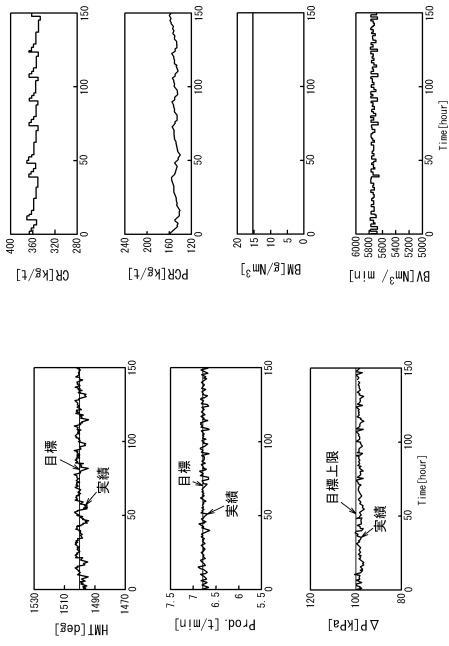
20

30

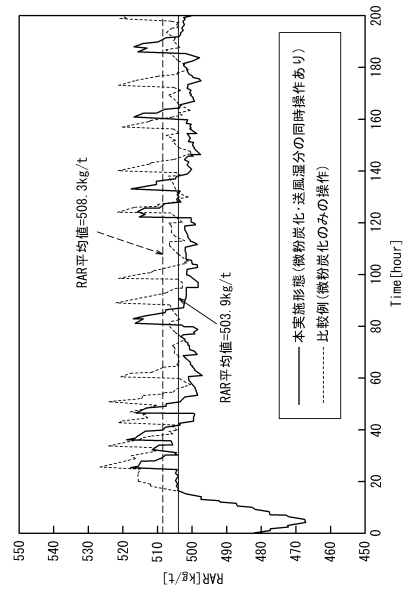
40

50

【図5】



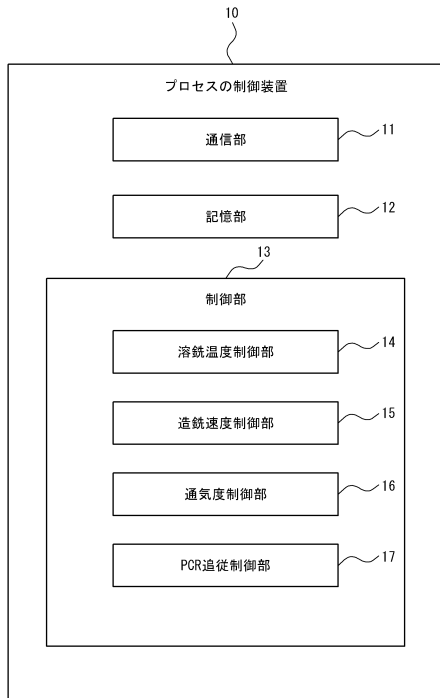
【図6】



10

20

【図7】



30

40

50

フロントページの続き

- 東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内
(72)発明者 大和 玄弥
東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内
(72)発明者 木津 健
東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内
審査官 祢屋 健太郎
(56)参考文献 特開2000-129319(JP,A)
国際公開第2015/105107(WO,A1)
特開2002-146414(JP,A)
特開平06-172825(JP,A)
特開2022-014169(JP,A)
特開2012-087375(JP,A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
C21B 5/00