

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開2024-34492
(P2024-34492A)

(43)公開日

令和6年3月13日(2024. 3. 13)

(51)Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
C 2 1 B 5/00 (2006. 01)	C 2 1 B 5/00 3 2 3	4 K 0 1 2
	C 2 1 B 5/00 3 1 6	
	C 2 1 B 5/00 3 2 0	

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 15 頁)

(21)出願番号 特願2022-138750(P2022-138750)
(22)出願日 令和4年8月31日(2022. 8. 31)

(71)出願人 000001258
J F E スチール株式会社
東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号

(74)代理人 100147485
弁理士 杉村 憲司

(74)代理人 230118913
弁護士 杉村 光嗣

(74)代理人 100165696
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

最終頁に続く

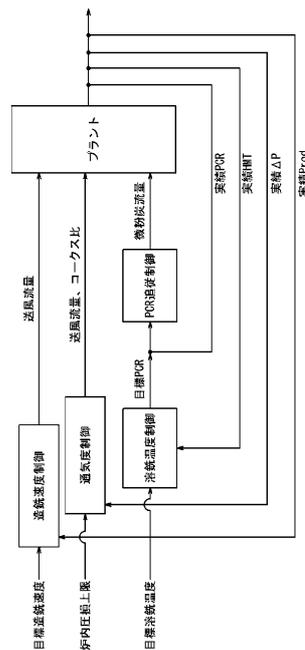
(54)【発明の名称】 プロセスの制御方法、高炉の操業方法、溶銑の製造方法及びプロセスの制御装置

(57)【要約】

【課題】高炉の状態を高精度に予測して制御することが可能な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提供される。

【解決手段】プロセスの制御方法は、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、溶銑温度の目標値（目標溶銑温度）、造銑速度の目標値（目標造銑速度）及び通気度の管理値（炉内圧損上限）と、取得された観測値又は計算値とに基づいて、溶銑温度、造銑速度及び通気度を同時に制御する。

【選択図】図 2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

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、

前記溶銑温度の目標値、前記造銑速度の目標値及び前記通気度の管理値と、前記取得された前記観測値又は前記計算値とに基づいて、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する、プロセスの制御方法。

【請求項 2】

前記高炉の内部の状態を計算可能な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前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度の予測値を求める自由応答予測ステップと、

前記自由応答予測ステップで求められた前記溶銑温度及び前記造銑速度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差を解消するための操作変数の操作量を求める第 1 の操作ステップと、

前記自由応答予測ステップで求められた前記通気度の予測値と前記通気度の上限値とに基づいて、操作変数である送風流量及びコークス比の操作量を求める第 2 の操作ステップと、を含み、

前記第 1 の操作ステップ及び前記第 2 の操作ステップは、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御するように実行される、請求項 1 に記載のプロセスの制御方法。

【請求項 3】

前記第 1 の操作ステップにおける前記操作変数は、送風流量、送風酸素流量、微粉炭比、送風湿分、送風温度、コークス比及び炉頂圧のうちの 1 つ以上である、請求項 2 に記載のプロセスの制御方法。

【請求項 4】

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、前記溶銑温度の目標値、前記造銑速度の目標値及び前記通気度の管理値と、前記取得された前記観測値又は前記計算値とに基づいて、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する制御部を備える、プロセスの制御装置。

【請求項 7】

前記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を備え、

前記制御部は、

前記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、微粉炭比の操作量を算出する溶銑温度制御部と、

前記造銑速度の目標値である目標造銑速度を取得して、前記造銑速度が前記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と、

前記通気度の上限を取得して、前記通気度が前記上限を超えないように、前記送風流量及びコークス比の操作量を算出する通気度制御部と、を含み、

前記溶銑温度制御部、前記造銑速度制御部及び前記通気度制御部は、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前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度の予測値を求め、

前記溶銑温度制御部及び前記造銑速度制御部は、前記溶銑温度及び前記造銑速度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差を解消するための前記微粉炭比及び前記送風流量の操作量を求め、

前記通気度制御部は、前記通気度の予測値と通気度の上限値とに基づいて、操作変数で

10

20

30

40

50

ある送風流量及びコークス比の操作量を求め、

前記溶銑温度制御部、前記造銑速度制御部及び前記通気度制御部は、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する、請求項6に記載の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、主に還元材比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。造銑速度を制御するために、例えば送風流量が操作される。送風流量の操作についても、上記で述べた高炉の長い時定数に由来する応答の遅れを考慮する必要がある。予測に基づいた高炉の制御方法として、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】

【特許文献1】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、送風流量を増加させると炉内の圧力損失(炉内圧損)が大きくなり、圧力損失が原料の自重を上回ると吹き抜け等が生じるおそれがある。吹き抜け等が生じると、溶銑温度及び造銑速度に大きな影響を与える。そのため、炉内圧損等の通気状態に異常が見られる場合には、送風流量を低下させることによって原料の荷下りを安定化させる操作が必要になる。

【0007】

したがって、高炉におけるプロセスの制御では、溶銑温度、造銑速度及び通気状態を示す通気度を同時に制御する必要がある。特許文献1の技術は、溶銑温度のみを制御するものであり、造銑速度及び通気度を同時に制御することについて提案するものでない。従来、吹き抜け等の回避は、熟練オペレータの経験に基づく操業技術(手動操業)への依存が大きかった。

【0008】

以上の問題を解決すべくなされた本開示の目的は、高炉の状態を高精度に予測して制御することが可能な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】

【0009】

10

20

30

40

50

(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、
前記溶銑温度の目標値、前記造銑速度の目標値及び前記通気度の管理値と、前記取得された前記観測値又は前記計算値とに基づいて、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する。

【0010】

(2) 本開示の一実施形態として、(1)において、
前記高炉の内部の状態を計算可能な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前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度の予測値を求める自由応答予測ステップと、

前記自由応答予測ステップで求められた前記溶銑温度及び前記造銑速度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差を解消するための操作変数の操作量を求める第1の操作ステップと、

前記自由応答予測ステップで求められた前記通気度の予測値と前記通気度の上限値とに基づいて、操作変数である送風流量及びコークス比の操作量を求める第2の操作ステップと、を含み、

前記第1の操作ステップ及び前記第2の操作ステップは、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御するように実行される。

【0011】

(3) 本開示の一実施形態として、(2)において、
前記第1の操作ステップにおける前記操作変数は、送風流量、送風酸素流量、微粉炭比、送風湿分、送風温度、コークス比及び炉頂圧のうちの1つ以上である。

【0012】

(4) 本開示の一実施形態に係る高炉の操業方法は、
(1)から(3)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】

(5) 本開示の一実施形態に係る溶銑の製造方法は、
(4)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】

(6) 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、前記溶銑温度の目標値、前記造銑速度の目標値及び前記通気度の管理値と、前記取得された前記観測値又は前記計算値とに基づいて、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する制御部を備える。

【0015】

(7) 本開示の一実施形態として、(6)において、
前記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を備え、
前記制御部は、

前記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、微粉炭比の操作量を算出する溶銑温度制御部と、

前記造銑速度の目標値である目標造銑速度を取得して、前記造銑速度が前記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と、

前記通気度の上限を取得して、前記通気度が前記上限を超えないように、前記送風流量及びコークス比の操作量を算出する通気度制御部と、を含み、

前記溶銑温度制御部、前記造銑速度制御部及び前記通気度制御部は、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前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度の予測値を求め、

前記溶銑温度制御部及び前記造銑速度制御部は、前記溶銑温度及び前記造銑速度の予測値と目標値との偏差を求めて、前記偏差を解消するための前記微粉炭比及び前記送風流量

10

20

30

40

50

の操作量を求め、

前記通気度制御部は、前記通気度の予測値と通気度の上限値とに基づいて、操作変数である送風流量及びコークス比の操作量を求め、

前記溶銑温度制御部、前記造銑速度制御部及び前記通気度制御部は、前記溶銑温度、前記造銑速度及び前記通気度を同時に制御する。

【発明の効果】

【0016】

本開示によれば、高炉の状態を高精度に予測して制御することが可能な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ができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0017】

【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、送風流量、コークス比及び微粉炭比と造銑速度との関係を示す図である。

【図4】図4は、送風流量、コークス比及び微粉炭比と炉内圧損との関係を示す図である。

【図5】図5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6】図6は、目標造銑速度が6.4[t/min]の場合のシミュレーション結果を示す図である。

20

【図7】図7は、目標造銑速度が6.6[t/min]の場合のシミュレーション結果を示す図である。

【図8】図8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】

【0018】

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。

【0019】

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、関連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、主に微粉炭比又はコークス比が操作される。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。

30

【0020】

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。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）

40

50

の目標値である目標造鉄速度を取得して、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 ）、溶鉄温度（ HMT ）、炉内圧損（ P ）及び造鉄速度（ $Prod$ ）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ない。例えば溶鉄温度制御では微粉炭比（ PCR ）に代えて送風湿分を操作することが可能である。また、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。

10

【0021】

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（ HMT ）、炉内圧損（ P ）、造鉄速度（ $Prod$ ）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、微粉炭比（ PCR ）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、例えば溶鉄温度制御において微粉炭流量を操作した場合に、微粉炭流量の変化は造鉄速度に影響する。この影響は、造鉄速度制御における物理モデルによって反映されて、送風流量の操作量として算出され、算出された送風流量の操作量が反映されることで造鉄速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、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、通気度については、炉内圧損の上限を考慮した制御系として構築されている。溶鉄温度制御、造鉄速度制御は、それぞれ、通気度制御における操作変数の操作に基づく変動も、外乱除去特性によって、自己の操作変数の操作によって吸収することができる。

20

【0022】

図3は、送風流量（ BV ）、コークス比（ CR ）及び微粉炭比（ PCR ）と造鉄速度（ $Prod$ ）との関係を示す図である。また、図4は、送風流量、コークス比及び微粉炭比と炉内圧損（ P ）との関係を示す図である。実線及び破線は、還元材比（コークス比と微粉炭比の合計値）が一定の条件下で、コークス比と微粉炭比とを置換したケースを示している。還元材比が一定であれば、図3の通り、送風流量（ BV ）と造鉄速度（ $Prod$ ）はほぼ比例の関係にある。図3の例の制御シミュレーションでは、物理モデルによる造鉄速度の予測値と目標値との偏差に応じて送風流量の操作量が求められた。また、図4の通り、コークス比（ CR ）が低減すれば、同じ送風流量（ BV^* ）であっても炉内圧損（ P ）が上昇する。高炉の操業では、炉内圧損（ P ）が上限（閾値）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ことで原料の荷下がり安定化させて、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ことが好ましい。原則として炉内圧損が上限を超えないように制御を行い、炉内圧損が上限以下の場合には、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。このように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。

30

40

【0023】

本実施形態に係るプロセスの制御方法は、概略として、まず高炉の溶鉄温度、造鉄速度及び通気度を観測値又は計算値によって取得する。そして、溶鉄温度の目標値、造鉄速度の目標値及び通気度の管理値と、取得された観測値又は計算値とに基づいて、溶鉄温度、造鉄速度及び通気度が同時に制御される。より具体的に説明すると、この制御方法の処理は以下のステップ1～3を含む。

【0024】

50

まず、ステップ1として、物理モデルを用いて将来の溶銑温度及び造銑速度が予測される。ステップ1は、自由応答予測ステップであって、現在の操作変数が保持された場合の将来の溶銑温度、造銑速度及び通気度の予測値を求める。

【0025】

次に、ステップ2として、ステップ1での溶銑温度及び造銑速度の予測値が目標値と合致するように、操作変数の操作を実行する。ステップ2は、第1の操作ステップであって、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流量である。ただし、上記のように、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に示すものに限定されない。操作変数は、例えば送風流量、送風酸素流量、微粉炭比、送風湿分、送風温度、コークス比及び炉頂圧のうちの1つ以上であってよい。

10

【0026】

また、ステップ3として、ステップ1での通気度の予測値と通気度の上限とに基づいて、通気度と相関を有する操作変数の操作量が求められる。通気度の上限は、通気度を管理する管理値の一例である。ステップ3は、第2の操作ステップに対応する。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して、送風流量の低下及びコークス比の上昇の操作を実行する。上限を超えない場合、つまり炉内圧損の予測値が上限以下の場合に、コークス比の低減の操作を実行する。ここで、ステップ2とステップ3とは、一方が他方の後に実行されるといった実行順が固定されるものでなく、溶銑温度、造銑速度及び通気度を同時に制御するように実行される。

20

【0027】

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）に記載の方法と同様、鉍石の還元、鉍石とコークスとの間の熱交換及び鉍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である。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できる。

【0028】

図5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。

30

【0029】

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。

40

【0030】

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。

【0031】

【数 1】

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

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

【0032】

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、鉍石の酸化度、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。溶銑温度、造銑速度及び通気度をそれぞれ $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 及び $y_3(t)$ として区別することができる。つまり、 $y(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t))^T$ と表すことができる。 $u(t)$ は上記の入力変数であって、高炉の操作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。

10

【0033】

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を t_0 として、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。

20

【0034】

【数 2】

$$x(t+1) = f(x(t), u(t_0)) \quad (3)$$

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

【0035】

次に溶銑温度の目標値と予測値との偏差を解消するように、以下の式 (5) によって、微粉炭比 (PCR) [kg/t] の操作量である PCR が求められる。ここで、PCR で表される操作量は前回操作量 (PCR) に対する増減値を算出するものである。他の操作量についても の意味は同様である。

30

【0036】

【数 3】

$$\Delta PCR = \frac{-a\{\max(y_{f,1}(t_0+T_1) - y_{U,1,0}) + \min(y_{f,1}(t_0+T_1) - y_{L,1,0})\}}{S_{PCR}} \quad (5)$$

【0037】

ここで $y_{f,1}(t)$ は溶銑温度の自由応答を示す。 $y_{U,1}$ 、 $y_{L,1}$ はそれぞれ目標溶銑温度（溶銑温度の目標範囲）の上限、下限である。 $\max(p, q)$ 、 $\min(p, q)$ は、それぞれ p と q のうち大きい値、小さい値を出力とする関数である。過度な操作を防止する観点から、予測値が溶銑温度の目標範囲内である限り、操作量はゼロに設定される。つまり、式 (5) において、溶銑温度の自由応答の予測値が目標溶銑温度の上限を超えない場合には、 \max 関数の出力はゼロになる。また、式 (5) において、溶銑温度の自由応答の予測値が目標溶銑温度の下限を下回らない場合には、 \min 関数の出力はゼロになる。 S_{PCR} は微粉炭比 (PCR) を単位量 (1 [kg/t]) だけ操作した場

合の T_1 時間後の溶銑温度の変化量である。 S_{PCR} は別の物理モデル又は実作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。 T_1 は予測する将来の時間を定める時間ステップである。一例として T_1 は 16 であってよく、このとき 8 時間 (30 分 \times 16) 先の溶銑温度が予測される。また、 a は係数であって正の数である。式 (5) に従って PCR を求める制御が図 2 の溶銑温度制御に対応する。図 2 に示すように、溶銑温度制御によって求められた PCR に基づいて目標 PCR が定められ、上記の参考文献 1 のような PCR 追従制御によって、目標 PCR に追従するように微粉炭流量 (PCI) が操作される。

【0038】

また、造銑速度についても目標値と予測値との偏差を解消するように、以下の式 (6) 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。

【0039】

【数 4】

$$\Delta BV = \frac{-b\{max(y_{f,2}(t_0+T_2)-y_{U,2,0})+min(y_{f,2}(t_0+T_2)-y_{L,2,0})\}}{S_{BV}} \quad (6)$$

【0040】

ここで $y_{f,2}(t)$ は造銑速度の自由応答を示す。 $y_{U,2}$ 、 $y_{L,2}$ はそれぞれ目標造銑速度 (造銑速度の目標範囲) の上限、下限である。過度な操作を防止する観点から、予測値が造銑速度の目標範囲内である限り、操作量はゼロに設定される。つまり、式 (6) において、造銑速度の自由応答の予測値が目標造銑速度の上限を超えない場合には、 max 関数の出力はゼロになる。また、式 (6) において、造銑速度の自由応答の予測値が目標造銑速度の下限を下回らない場合には、 min 関数の出力はゼロになる。 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 T_2 時間後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作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。 T_2 は予測する将来の時間を定める時間ステップである。一例として T_2 は 4 であってよく、このとき 2 時間 (30 分 \times 4) 先の造銑速度が予測される。また、 b は係数であって正の数である。式 (6) 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。

【0041】

さらに、通気度の一例である炉内圧損 (P) [kPa] の予測値に応じて、以下の式 (7) 及び式 (8) によって、コークス比 (CR) [kg/t] の操作量である CR 及び送風流量 (BV) [Nm^3/min] の追加の操作量である BV が求められる。ここで、コークス比は、溶銑 1 トン当たりのコークスの投入量 [kg] で示される。

【0042】

【数 5】

$$\Delta CR = +c \times max(y_{f,3}(t_0+T_3) - y_{U,3,0}) + d \times min(y_{f,3}(t_0+T_3) - y_{U,3,0}) \quad (7)$$

$$\Delta BV = -e \times max(y_{f,3}(t_0+T_3) - y_{U,3,0}) \quad (8)$$

【0043】

ここで $y_{f,3}(t)$ は炉内圧損の自由応答を示す。 $y_{U,3}$ は炉内圧損の上限である。上記のように操業コスト低減の観点から、炉内圧損が上限に近くなるように操作が行われる。一例として T_3 は 1 であってよく、このとき 30 分先の炉内圧損が予測される。また、 c 、 d 及び e は係数であってそれぞれ正の数である。式 (7) 及び式 (8) に従って CR 及び BV を求める制御が図 2 の通気度制御に対応する。

【0044】

図 6 は、上記のプロセス制御による、目標造銑速度が 6.4 [t/min] の場合のシ

10

20

30

50

ミュレーション結果を示す図である。すなわち、図6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。目標溶銑温度は1500であった。また、炉内圧損の上限値は100 [kPa]であった。溶銑温度及び造銑速度について、目標範囲の上限と下限とは同じである。

【0045】

例えば30～70 [hour]において、炉内圧損（P）の予測値に応じた操作量に従って、コークス比（CR）が低下している。コークス比の低下による熱の低下を補償するために、55～70 [hour]において、溶銑温度制御における目標PCRを上昇させている。また、PCR追従制御によって微粉炭流量（PCI）を操作することで、目標PCRに実績PCRが追従している。コークス比（CR）の低下及び微粉炭比（PCR）の上昇によって、30～70 [hour]において炉内圧損（P）が上昇している。ここで、72 [hour]のタイミングで炉内圧損（P）が上限（目標上限）を超えると、通気度制御によって送風流量（BV）の低下及びコークス比（CR）の上昇の操作が行われている。72～75 [hour]において炉内圧損（P）が上限を下回ったため、送風流量（BV）を上昇させる操作が行われ、その結果、造銑速度（Prod）が目標値に近づいている。このように、炉内圧損（P）が上限を超えない範囲で、コークス比（CR）の低下と送風流量（BV）の調整が行われて、溶銑温度（HMT）及び造銑速度（Prod）については目標溶銑温度及び目標造銑速度が達成された。

【0046】

図7は、上記のプロセス制御による、目標造銑速度が6.6 [t/min]の場合のシミュレーション結果を示す図である。目標造銑速度を除く条件は、図6の場合と同じである。図6の例と同様に、炉内圧損（P）が上限を超えない範囲で、コークス比（CR）の低下と送風流量（BV）の調整が行われて、溶銑温度（HMT）及び造銑速度（Prod）については目標溶銑温度及び目標造銑速度が達成された。ただし、目標造銑速度を上昇させると、より多くの送風流量（BV）が必要となるため、炉内圧損（P）が上限に達しやすくなる。通気度を確保するため、すなわち炉内圧損（P）が上限を超えないようにするため、必要なコークス比（CR）が上昇する。図6の例においてコークス比（CR）は平均で約305 [kg/t]であったが、図7の例において平均で325 [kg/t]に上昇している。

【0047】

図8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8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。

【0048】

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。

【0049】

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。

【0050】

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する。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する。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、通気度制御部 16 及び PCR 追従制御部 17 として機能してよい。

10

【0051】

溶銑温度制御部 14 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、微粉炭比の操作量を算出する。溶銑温度制御部 14 は、図 2 の「溶銑温度制御」を実行する機能部である。

【0052】

造銑速度制御部 15 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 15 は、図 2 の「造銑速度制御」を実行する機能部である。

20

【0053】

通気度制御部 16 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、送風流量及びコークス比の操作量を算出する。通気度制御部 16 は、図 2 の「通気度制御」を実行する機能部である。

【0054】

PCR 追従制御部 17 は、溶銑温度制御部 14 によって定められた目標値である微粉炭比（目標 PCR）を取得して、PCR 追従制御によって、目標 PCR に追従するように微粉炭流量（PCI）の操作量を算出する。PCR 追従制御部 17 は、図 2 の「PCR 追従制御」を実行する機能部である。

30

【0055】

溶銑温度制御部 14、造銑速度制御部 15 及び通気度制御部 16 は、溶銑温度（HMT）、造銑速度（Prod）、炉内圧損（P）を制御するための個別のコントローラであって、操作変数同士の干渉を考慮した制御を実現可能である。

【0056】

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 14、造銑速度制御部 15 及び通気度制御部 16 は、それぞれ物理モデルを用いてステップ 1（自由応答予測ステップ）を実行して、溶銑温度、造銑速度及び通気度の予測値を求める。溶銑温度制御部 14 及び造銑速度制御部 15 は、それぞれステップ 2（第 1 の操作ステップ）を実行して、微粉炭比及び送風流量の操作量を求める。通気度制御部 16 は、ステップ 3（第 2 の操作ステップ）を実行して、通気度（本実施形態において炉内圧損）の予測値に基づいて炉内の通気状態を判定し、通気状態が異常と判定する場合に、送風流量の低下及びコークス比の上昇の操作を実行する。通気度制御部 16 は、通気状態が異常でないとは判定する場合に、コークス比の低減の操作を実行する。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 14、造銑速度制御部 15 及び通気度制御部 16 は、溶銑温度、造銑速度及び通気度を同時に制御することができる。

40

【0057】

高炉の操業方法の一部として、プロセスの制御装置 10 によって実行されるプロセスの

50

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 5 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）、CPU（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、CPU、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CPUで実現されてよい。

10

【 0 0 5 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、上記構成によって溶銑温度、造銑速度及び通気度に基づく操作変数の操作を同時に行って、高炉の状態を高精度に予測して制御できる。

【 0 0 6 0 】

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。

20

【 0 0 6 1 】

図 8 に示されるプロセスの制御装置 1 0 の構成は一例である。プロセスの制御装置 1 0 は、図 8 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 1 0 は、図 8 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 1 0 は、さらに表示部を備える構成であってよい。

30

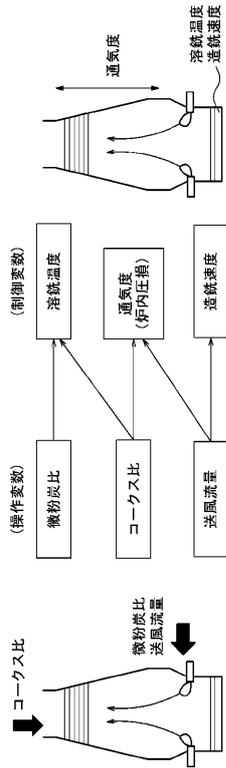
【 符号の説明 】

【 0 0 6 2 】

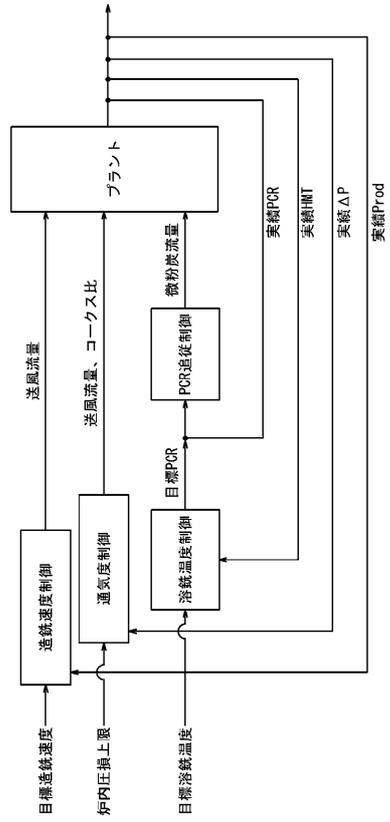
- 1 0 プロセスの制御装置
- 1 1 通信部
- 1 2 記憶部
- 1 3 制御部
- 1 4 溶銑温度制御部
- 1 5 造銑速度制御部
- 1 6 通気度制御部
- 1 7 P C R 追従制御部

40

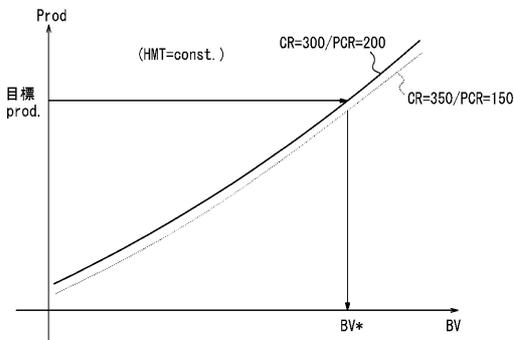
【 図 1 】



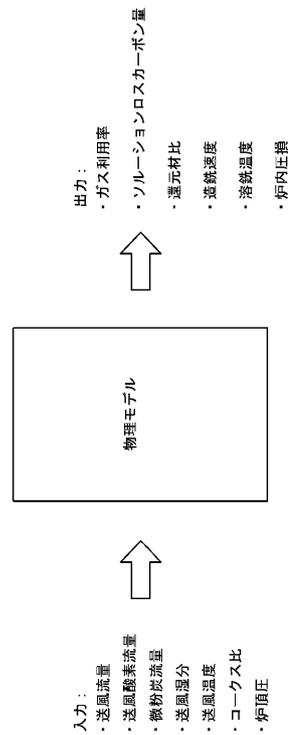
【 図 2 】



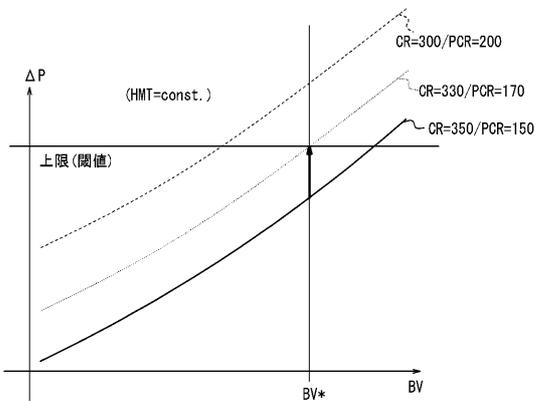
【 図 3 】



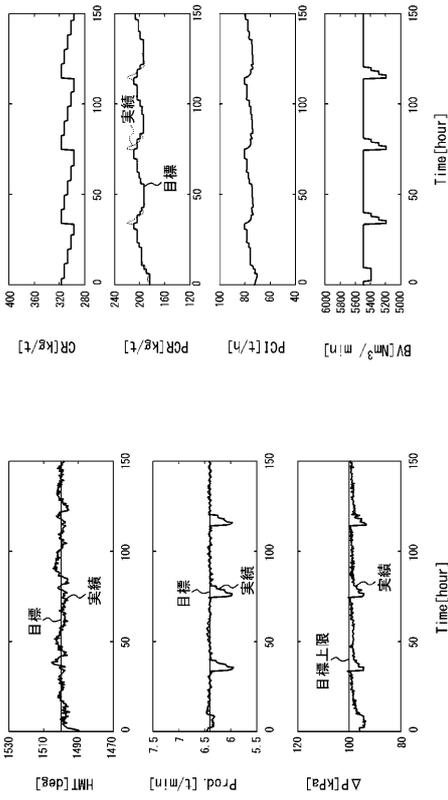
【 図 5 】



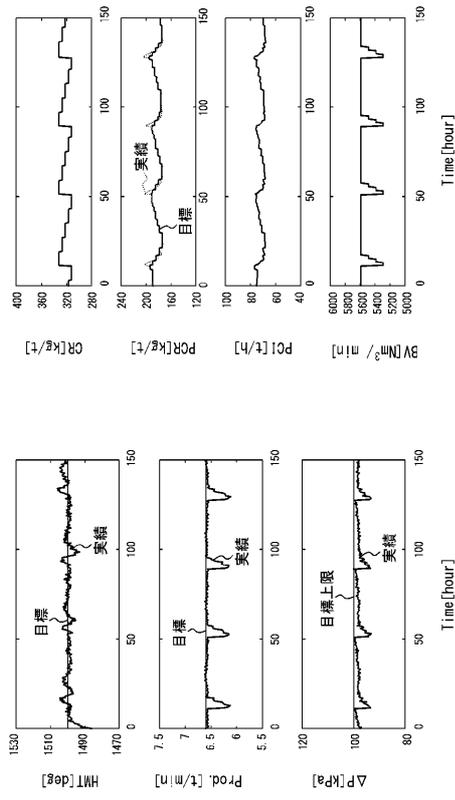
【 図 4 】



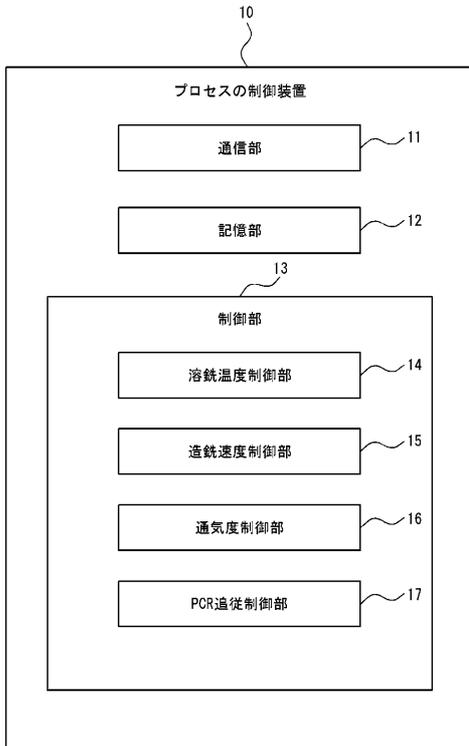
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 益田 稜介

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

Fターム(参考) 4K012 BD01 BD04 BE01