

論 文

UDC 669.162.26 : 669.162.267.4 : 62-52 : 681.323

高 炉 溶 銑 温 度 の 自 動 制 御

羽田野道春* · 的場 祥行*² · 大塚 宏一*²芳木 通泰*³ · 宮木 俊光*³

Automatic Control of Hot Metal Temperature of Blast Furnace

Michiharu HATANO, Yoshiyuki MATOBA, Koichi OTSUKA

Michiyasu YOSHIKI, and Toshimitsu MIYAGI

Synopsis:

For the automatic control of hot metal temperature, an advanced computer control system was developed on the basis of the new mathematical model of blast furnace described in the other paper.

The characteristic features of the system are as follows:

(1) The parameters of the model are adjusted in advance by the adaptive feedback of actual operational data.

(2) Through the forward simulation of the process by the model, the hot metal temperature is predicted.

(3) The oil injection rate required for the control is derived from the difference between the predicted hot metal temperature and the aimed one. By examining the control characteristics of the system through the simulation, it is confirmed that the system is effective for the stable blast furnace operation.

With this system, the automatic control has been carried out at Kokura No. 2 BF since 1977 and the fluctuations of the hot metal temperature and the silicon content have been decreased. As the result of the control of the thermal condition, the hot metal temperature could be lowered by 15°C, which contributed to the decrease of fuel ratio by 4 kg/t-pig.

1. 緒 言

高炉の炉熱に関する計算機制御の研究は、STAIB ら¹⁾²⁾、桂ら³⁾をはじめとして 10 数年にわたり多方面で行われ^{4)~6)}、それぞれ制御テストを実施した結果、溶銑中の Si 値の安定化がはかられたと報告されている。しかしながら従来の研究は、STAIB らの例¹⁾²⁾にみられるごとく、炉下部における静的なモデルで計算される、熱相当量を指標としたフィードバック制御がほとんどであり、また自動制御システムとして、長期にわたり継続実施されている例はあまり報告されていない。

住友金属では、数式モデルを用いた、プロセスのフォワードシミュレーションにもとづく制御方法について研究を行ってきたが、1975 年計算機による操業ガイドシス

テム⁷⁾⁸⁾を完成した後、さらに新しい機能の追加、計測条件の改善をはかり、1977 年 11 月以来計算機出力により、直接重油吹込み量を操作する溶銑温度の自動制御を実用化するに至つた^{9)~11)}。

前報¹²⁾では制御に用いる高炉数式モデルの構造及び精度について述べたが、本報では、小倉 2 高炉で開発した溶銑温度の自動制御システムの概要と実際の自動制御実施状況及び結果について述べる。

2. 溶銑温度制御の意義

従来 STAIB ら¹⁾²⁾、加瀬ら⁶⁾をはじめとするほとんどの例にみられるごとく、炉熱レベルを代表する実測値として、溶銑中 Si 値が用いられてきたが、Si 値は装入物の成分、及びこれらの炉内滞留時間によつても変化する

昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 2 月 18 日受付 (Received Feb. 18, 1980)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 波崎研究センター 工博 (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*² 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd. 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*³ 住友金属工業(株)小倉製鉄所 (Kokura Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

ので、必ずしも適切な代表値とはいえない。したがって小倉 2 高炉では、炉熱の制御は、通常重油吹込み量を操作して、溶銑温度を制御することにより行われている。

さて溶銑温度の制御は、高炉操業上極めて大きな意義をもち、およそ以下のごとく要約される。

(1) 溶銑温度が低すぎる場合

スラグの流動性が低下し、スラグ排出が円滑に行えないことから、炉床部において湯面レベルが上昇し、通気性が悪化するとともに鉍石溶解帯レベルの低下を伴い、極端な場合は吹抜け・荷下がり異常をきたし、安定な操業の維持が困難となることもある。軽度な場合でも炉内でのガス流れが不安定となり、操業度を落とす必要が生じることも多い。また炉外においても、出銑樋上で溶銑、スラグが固化し、円滑な出銑作業が困難になることもある。

(2) 溶銑温度が高すぎる場合

炉内においてガス温度上昇・鉍石溶解帯レベルの上昇などにより通気性悪化の傾向がみられ、また温度レベルが高いと、必然的に燃料比の上昇につながる。

一方溶銑温度が不安定となれば、溶銑温度と相関の強い溶銑中 Si, C などの各成分も不安定となり、製鋼工程へ大きな外乱をもたらすことになる。したがって、溶銑温度の安定化は高炉操業上基本的なものであり、さらに安定化と同時に、可能な限り溶銑温度のレベルを下げて操業することにより、銑鉄コストの低下をはかることも極めて重要である。

3. 数式モデルを用いた溶銑温度制御方式

前報¹²⁾では、高炉の反応領域を 5 段に分割し、各段を集中定数系と仮定して各段の固体・ガス温度、反応速度をオンラインでシミュレーション可能とする数式モデルを提示した。さらに本モデルを用いて、炉頂ガス分析値等の実測値によりモデルパラメータを適応修正することにより、溶銑温度を精度よくシミュレーションできることを示した。以下本モデルを用いて作成した溶銑温度の制御方式について述べる。

高炉プロセスでは操作量に対する状態量の応答遅れが大きいので¹²⁾、単に測定された溶銑温度と目標値との偏差にもとづく単純なフィードバック制御では、適正な制御を行うのは非常にむづかしい。したがって、下記のごとき条件を考慮に入れて制御系を構成することが、制御上望ましいのは明らかである。

(1) 炉内の装入物性状等における外乱により反応速度が変化した場合、まず炉頂ガス分析値が変化し、しかる後溶銑温度が変化する。したがって溶銑温度のみに着

目するより、炉頂ガス分析値をもとに当然予想される溶銑温度変化を事前に予測し、補償する操作を行うのがよい。

(2) 重油吹込み量などの操作量変更に対する溶銑温度の応答は遅れ(時定数)が大きいので¹²⁾、この点を考慮して安定な制御を行う操作量を決定する必要がある。

(3) 大気湿分による変化や操業方針変更等による送風量、ore/coke などの変更がある場合、上記(1)と同様に当然予想される溶銑温度変化に対し事前に補償するのが望ましい。

一方、プロセス制御の方法として、線形系については積分型最適レギュレータ法がある。高炉プロセスは線形系ではないので、本方法を直ちに適用することはできないが、上記(1)~(3)の項目を考慮に入れ、レギュレータの概念にもとづいて下記のごとき制御方式を作成した。すなわち

(i) 刻々(例えば 10 分毎に)操業データ(送風量、送風温度、送風湿分、吹込み重油量、装入物成分、ore/coke)をモデルに入力し、炉内状態のシミュレーションにより刻々の溶銑温度を計算する。一方炉頂ガス分析値、溶銑温度の実測値とシミュレーションによる計算値の比較によりモデルパラメータ(反応速度、溶銑温度計算式中の定数)を更新する。

(ii) 更新されたパラメータをもとに、各時点の操作量が一定に保持されると仮定した場合に予想される l 時間後の溶銑温度をモデルによるフォワードシミュレーションにより計算する。

(iii) 得られた l 時間後の溶銑温度計算値 $\hat{T}_{pig}^{(l)}$ と目標値 T_{pig}^* との差にもとづき、制御に必要な操作量の値 U^n を前時刻における値 U^{n-1} をもとに(1)式により算出する。

$$U^n = U^{n-1} + (\Delta t \cdot K_I) (T_{pig}^* - \hat{T}_{pig}^{(l)}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで Δt は制御周期、 K_I は積分ゲインを表わす。(1)式右辺第 2 項は、 l 時間後に、溶銑温度が目標値より偏差を生じることが予測された場合、この偏差を零とするために、前もって現時刻で調整されるべき操作変更量を表わしている。ゲイン K_I は単位時間、単位温度偏差量に対する操作変更量を表わすので、 $(\Delta t \cdot K_I)$ は制御周期毎に予測温度偏差量 $(T_{pig}^* - \hat{T}_{pig}^{(l)})$ を操作変更量に換算する係数に相当する。

Fig. 1 は重油吹込み量を操作量とする場合の本制御方式の概念図を示したものである。高炉を線形系で近似すれば、上記方法は制御論的には積分補償器をもつ状態フィードバック制御系で表わされ、フィードバックゲインは、制御偏差評価のための先行時間 l と積分ゲイン K_I

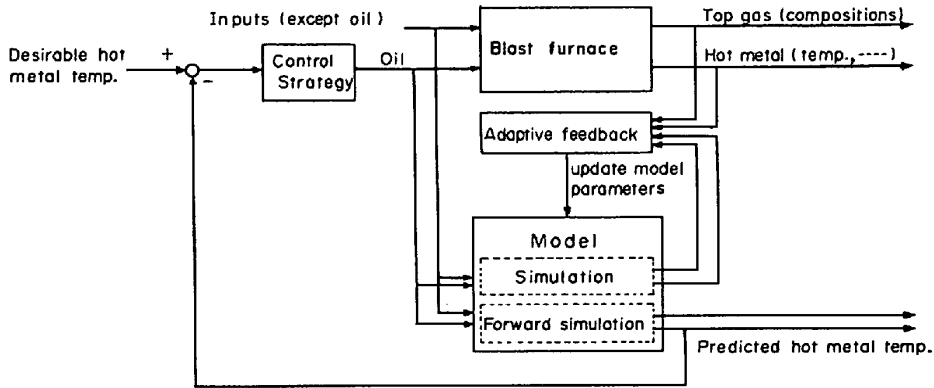


Fig. 1. Schematic diagram of control system.

の関数として決定される。(付録参照)

4. オンライン制御の可能性の検討

前記制御式より算出される重油操作量による溶銑温度の制御特性を、モデルを用いてシミュレーションした結果を以下に示す。

4.1 目標温度変更に対する制御特性

種々の先行時間 l に対して、目標を $+20^{\circ}\text{C}$ ステップ変更した場合の制御性は、Fig. 2 に $l=6, l=12$ の場合の例を示すごとく、 l を短かくすると応答は速くなるが、重油変更量が大きくなり不安定な傾向となる。したがって高炉の特性から考えて、 l の値としては、重油変更量の少ない約 12(h) が適当であることがわかった。

4.2 外乱に対する制御特性

外乱としてカーボンソリューション反応速度が 1 kmol/min (絶対値の 5%) ステップ変化した場合の、シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。無制御時は外乱により温度が 20°C 以上低下するのに対し、本方法では良好に制御されることがわかる。

次にカーボンソリューション反応速度に一定振幅の周

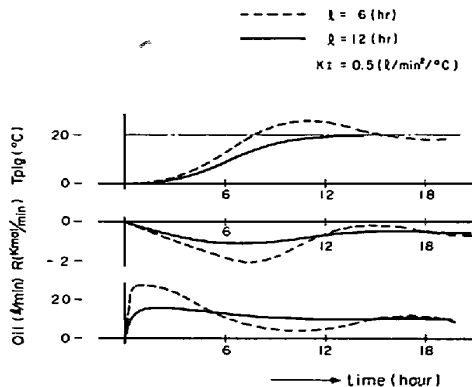


Fig. 2. Control characteristics of the closed loop system for step change by 20°C in the aimed temperature.

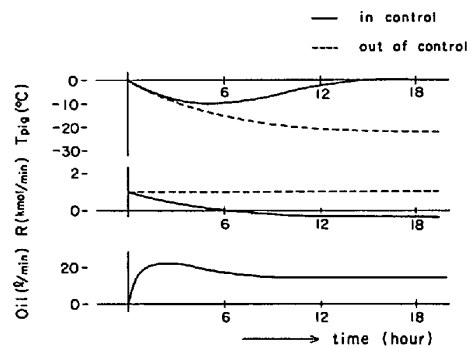


Fig. 3. Control characteristics of the closed loop system for step change by 1 kmol/min in carbon solution rate (R).

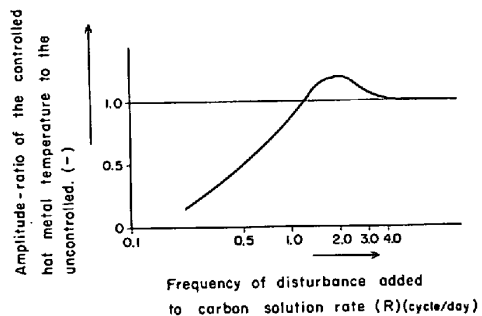


Fig. 4. Frequency characteristics of the closed loop control system.

期的外乱を加えた場合における周波数応答特性を検討し、Fig. 4 の結果を得た。小倉 2 高炉では、通常比較的低周波 (1.0 サイクル/日以下) の外乱が多いので、これらに対しては制御の効果があることがわかった。

4.3 実操業データによる制御性の検討

小倉 2 高炉の 2 ヶ月間にわたる実操業データについて、本制御方式で制御した場合の結果をシミュレーションにより求め、実操業結果と対比した。Fig. 5 にその一例を示すごとく、モデルによれば手動操作より早目に、適切な重油変更量の指示が出され、溶銑温度の制御性向

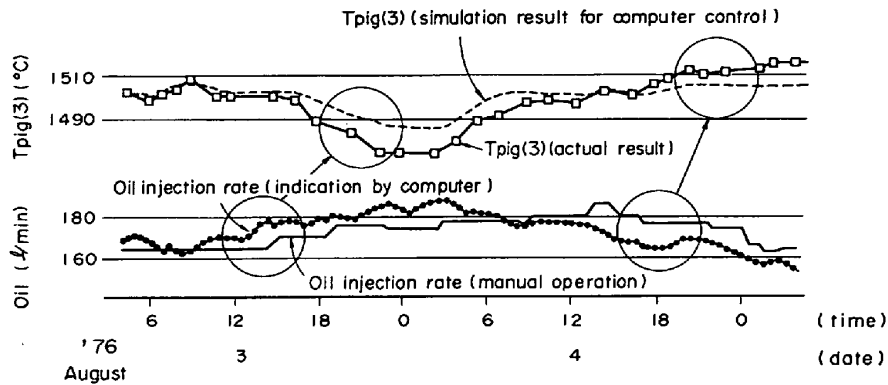


Fig. 5. Comparison between manual control and computer control.

上が期待されることが確認された。

5. 溶銑温度自動制御システム

本節では前述の制御方法にもとづいて、小倉2高炉で開発した溶銑温度の自動制御システムと、その運用にあたって実施した計測法の改善について述べる。

5.1 小倉2高炉計算機システム

小倉2高炉における計算機システムは、送風、装入物、炉頂ガス、出銑関係の各種操業データ及び炉体各部温度などのデータを収集し、操業管理のための各種表示と日報・月報を作成する機能及び各種異常監視機能とともに原料秤量制御・熱風炉燃焼制御及び本報告の新たに開発した溶銑温度自動制御の機能を有している。

5.2 自動制御システム

高炉炉内における装入物・ガスの挙動については、今なお未知の部分が多く、また異常状態に陥った場合の損失が大きいことから、単に自動制御の実施にとどまらず可能な限り刻々の炉内状態を推測し得る情報を提示することも重要である。この点を考慮して、CRT、警報装置を活用して下記機能をもつ自動制御システムを開発した。Fig. 6は本システム概念図を示す。

(1) 重油クローズドループ制御

10 min 毎に最新の操業データから、高炉数式モデルを用いて、炉内状態をシミュレートし、制御に必要な重油操作量を算出するとともに、重油量調節計の設定値を自動変更する。

(2) 制御状況の CRT* グラフ表示。

重油操作量算出に至る素データ、中間計算結果（反応速度、炉内温度など）を印字・表示するとともに、主要計算結果である推定溶銑温度、指示重油量とそれぞれの実績値及び実績荷下がり速度、Si 値の過去 18 h の推移と未来 9 h における溶銑温度予測値を Fig. 7 のごと

* Cathode Ray Tube

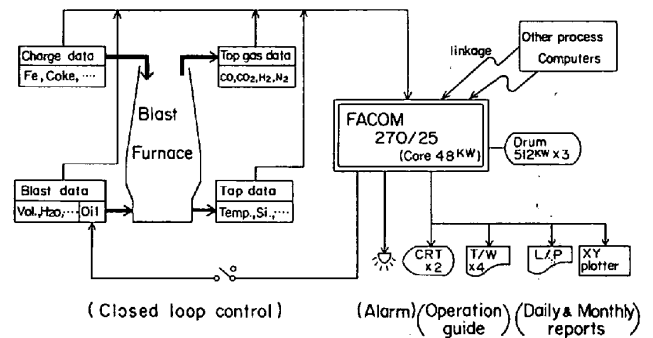


Fig. 6. Computer system of Kokura No. 2 BF.

く、時系列グラフで CRT 表示し、炉熱動向と制御状況が常時認識できる。

(3) 異常監視

モデル計算値に大きく影響する入力データ及び炉の異常を検知するため、荷下がり速度、圧損、装入物データ、炉頂ガス成分・温度、ガス利用率、ストックラインレベル、重油流量、送風量などの項目について異常状態を自動的に判定し、該当時には自動操作を停止し、異常内容を CRT に表示するとともに、警報により操炉者の注意を喚起する。

従来、操炉者は炉の異常について常時監視の体勢にしている必要があつたが、上記自動判定機能により通常発生する異常が、早期に検出されるので操炉者の負担が軽減されるとともに、自動、手動の切換え基準が明確化された。一方 CRT などの各種表示により計算機による自動制御の状況把握が容易になつたため、自動制御の信頼性が向上し、長期にわたる適用が可能となつた。

5.3 計測条件の改善

自動制御化推進にあつては、いくつかの計測条件の改善も必要であつたが、ここでは主な溶銑温度測定とガス分析上行つた改善について述べる。

(1) 溶銑温度測定タイミングの基準化

溶銑温度は通常出銑樋上で測定されるため、樋による

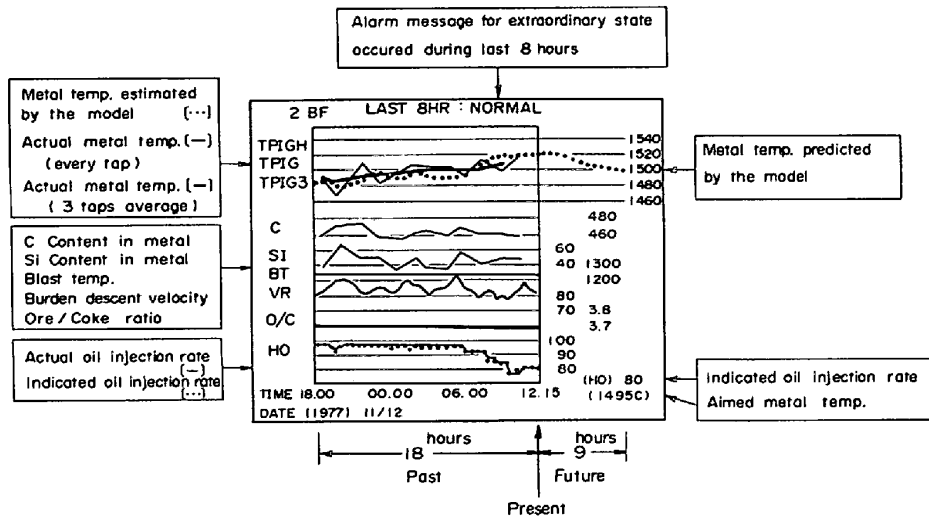


Fig. 7. Example of CRT display for control of hot metal temperature (Kokura No. 2 BF).

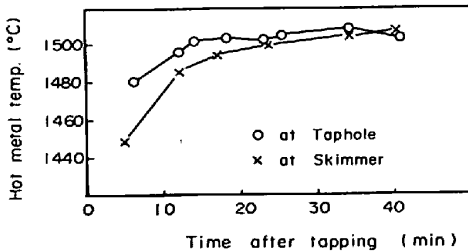


Fig. 8. Comparison between hot metal temperature at taphole and at skimmer.

冷却の影響を受け、代表性のある測定値を得にくいという測定上の問題がある。そこで小倉 2 高炉において、出鉄口直後と通常の測定位置であるスキナー直後（出鉄口より約 15 m の位置）で溶銑温度を浸漬型熱電対により測定したところ Fig. 8 に示す結果を得た。スキナー直後の測定値は、出鉄初期では種による冷却のため 30°C 前後低く、出鉄中期以降において出鉄口直後での値に一致してきている。溶銑温度測定位置は本来出鉄口直後が望ましいが炉前作業上制約を受ける。したがって従来通りスキナー直後で測定することとし、測定タイミングについて一定溶銑量出鉄後という基準を定めた。

(2) 炉頂ガス分析上の問題と対策

炉頂ガスについては、通常清浄化したガスが採取されるが、小倉 2 高炉では、できるだけ炉頂に近いところから採取する目的により、ダストキャッチャー直後で半清浄化されたガスを採取している。そのためサンプルシステムにドレン及びダストの詰りが多く、パーズ用の窒素ガスがサンプルに混入することがあったが、サンプル採取配管システムの保温を強化するとともに、ドレン・ダストの除去装置を設置することにより、サンプリングシステムの安定化をはかった。さらにガス分析計本体について、検定に

用いる標準ガスの高精度化などを行い、ガス分析精度の向上をはかった。

6. 小倉 2 高炉での自動制御実施とその結果

小倉 2 高炉は、内容積 1850 m³、炉床径 9.6m で、日産 3800 t (公称) の銑鉄を生産する高炉で、1974 年火入れされた。送風温度は最高温度 (1250°C) で一定とし、溶銑温度は重油吹込み量によつて制御されている。

自動制御の実施に際しては、高炉はいつたん不調に陥ると回復に長時間を要するため、十分な注意が必要であり、また長年経験をもつ操業者の信頼を得ることも重要である。そこで下記の 3 段階をふまえて実用化を推進した。

- (1) 溶銑温度予測によるオペレーションガイド (1975 年 9 月～1977 年 1 月)
- (2) 自動制御テスト期間 (1977 年 2 月～1977 年 10 月)
- (3) 自動制御の実用化 (1977 年 11 月～)

6.1 自動制御のテスト結果

Fig. 9 は従来の手動制御期間の一例で、Fig. 10, 11

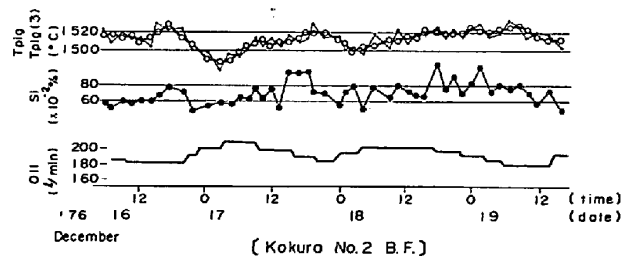


Fig. 9. An example of the variation with time of hot metal temperature (• T_{pig}, ○ T_{pig}(3)), Si content and oil rate during manual control period.

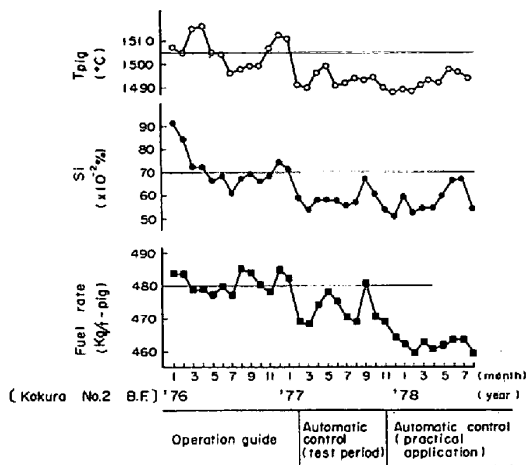


Fig. 14. Thermal level and fuel rate.

は、1505°C から 1490°C へ、また Si 値は 0.70% から 0.55% へそれぞれ低レベル化が達成され、燃料比も低下した。

実績の燃料比は、1976 年に比べ 2 年間で約 20 kg/t-pig 低減に成功しているが、この間種々の操業改善も行なわれており、データ上自動制御の効果のみを区別するのは困難であるが、補正燃料比により溶銑温度を 15°C 低下させたことによる燃料比約 4 kg/t-pig の低減は、自動制御による直接的な経済効果として推定することができる。

以上のごとく小倉 2 高炉では、休風前後の除外期間を除きほぼ全面的に自動制御により操業され、炉熱低位安定化に効率を上げている。

7. 結 言

溶銑温度を制御量とする高炉の自動制御システムの研究・開発を行い、小倉 2 高炉で以下の成果を得た。

- (1) 数式モデルによるプロセスのフォワードシミュレーションを通じ予測した溶銑温度をもとに、制御に必要な操作量を算出する制御方式を開発した。
- (2) 本制御方式は、制御論的には積分型レギュレータの概念にもとづくことを示した。
- (3) 本制御方式における重油操作のクローズドループ制御特性をシミュレーションにより明らかにし、その有効性を確認した。
- (4) オンライン制御を行うにあたり、制御状況の把握を容易とする CRT グラフ表示機能、各種入力データ・炉況異常の自動警報機能をもつ独自の自動制御システムを開発した。
- (5) 上記システムにより、溶銑温度自動制御の長期継続実施の実績を上げ、休風前後を除く操業の約 90%

を自動化するに至った。

(6) 自動制御の実用化を通じて、溶銑温度、Si 値の安定化がはかられ、平均溶銑温度を 15°C さげた操業が可能となり、約 4 kg/t-pig の燃料比低減に寄与した。

最後に、本研究に対して御支援、御指導いただいた、当社副社長池島俊雄博士、研究所前所長小田尚輝博士、同副所長白岩俊男博士、住友軽金属顧問岡本豊彦博士に深謝の意を表するとともに、有益な助言をいただいた研究所主任研究員美坂佳助博士および小倉、鹿島製鉄所の技術者の方々の熱心な御討議に対しまして厚く感謝いたします。

付 録

本文中 (3 節) で述べた予測制御方式が、積分形状態フィードバック系となることは次のように説明される。

高炉プロセスが次の線形系で近似されるとする。

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dd \dots\dots\dots (1)$$

$$y = Cx \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x は状態 (炉内温度、反応速度)、 u は操作量 (重油量など)、 d は外乱、 y は状態の結果として観測される出力 (溶銑温度)、 y_r は出力の目標値、 $A \sim D$ は係数行列を表わす。時刻 t における値を初期値として、 t 時間後の状態量 x_{t+1} は次のように求められる。

$$x_{t+1} = e^{At}x_t + \int_t^{t+1} e^{A(t+1-\tau)}(Bu_\tau + Dd_\tau)d\tau$$

ここで本制御方式では u_τ 、 d_τ は t 時刻の値がつづくとするので、次式が得られる。

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= e^{At}x_t + \left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)(Bu_t + Dd_t) \\ &= e^{At}x_t + \left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)(\dot{x}_t - Ax_t) \\ &= e^{At}x_t - \left(\int_0^t Ae^{A\tau}d\tau\right)x_t + \left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)\dot{x}_t \\ &= x_t + \left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)\dot{x}_t \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

したがって t 時間後の出力値 y_{t+1} は (4) 式より次のように求められる。

$$\begin{aligned} y_{t+1} &= Cx_{t+1} \\ &= y_t + C\left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)\dot{x}_t \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

本制御方式では $(y_r - y_{t+1})$ にある定数 K_1 をかけて \dot{u}_t が決定されるので (5) 式より操作量に関して次の関係を得る。

$$\begin{aligned} \dot{u}_t &= K_1(y_r - y_{t+1}) \\ &= K_1\left(y_r - y_t - C\left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)\dot{x}_t\right) \\ &= K_1(y_r - y_t) - K_1C\left(\int_0^t e^{A\tau}d\tau\right)\dot{x}_t \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

これにより Fig. 15 に示すごとき積分形状態フィードバックのブロックダイアグラムを得る。ここでフィードバックゲイン F は次のごとくなり

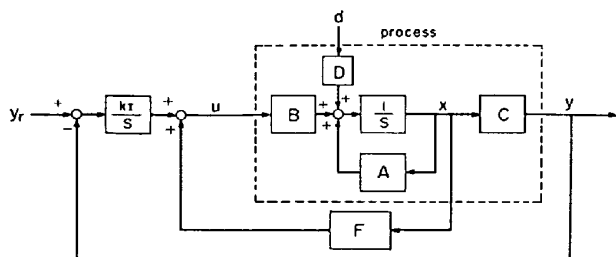


Fig. 15. State feedback system with integral compensator.

$$F = -K_I C \left(\int_0^l e^{A\tau} d\tau \right) \dots\dots\dots (7)$$

先行時間 l と積分ゲイン K_I の関数として表される。

文 献

1) C. STAIB and J. MICHARD: J. Metals, Jan. (1965), Part I, p. 33 (1965), Part II, p. 165
 2) N. JUSSEAU, J. C. COCHERY, C. STAIB, R. VASSE, and Ph. BECE: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making 1970 (Luxembourg), B-3
 3) K. KATSURA and T. YAMAMOTO: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making,

1965 (Amsterdam), B-9
 4) R. VIDAL, J. LÜCKERS, and G. MORE: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making, 1970 (Luxembourg), B-6
 5) R. NIDAL, J. LÜCKERS, A. POOS, G. MORE, and R. Delacharlerie: Inter. Meeting on Iron and Steel Making 1976 (Brassel), Preprint, 3. 2. 6
 6) 加瀬正司, 林 洋一, 田村健二, 林秀次郎, 久々宮明, 西納幾平, 山田武弘, 花房章次: 製鉄研究, 288 (1976), p. 70
 7) T. OKAMOTO, S. YABE, M. HATANO, Y. MATOBA, S. TOKURA, T. SHIMODA, M. KOJIMA, and H. TSUCHIYA: Inter. Meeting on Iron and Steel Making 1976 (Brassel), Preprint 3. 2. 6
 8) 岡本豊彦, 矢部茂慶, 羽田野道春, 的場祥行, 戸倉誠太郎, 下田輝久, 小島正光, 槌屋治紀: 鉄と鋼, 62 (1976), S68
 9) 羽田野道春, 的場祥行, 大塚宏一, 望月 顕, 横井 毅, 村上陽一: 鉄と鋼, 63 (1977), S44
 10) 的場祥行, 大塚宏一, 望月 顕, 横井 毅: 鉄と鋼, 63 (1977), S430
 11) 的場祥行, 大塚宏一, 沖 宏治, 望月 顕, 横井毅, 上野保長: 鉄と鋼, 64 (1978), S505
 12) 羽田野道春, 美坂佳助, 的場祥行, 大塚宏一: 鉄と鋼, 67 (1981) 3, p. 518