JFE 技報 No. 58
（2026 年 8 月）p. 11–16

サイバーフィジカルシステムによる高炉溶銑温度自動制御

Automatic Temperature Control of Blast Furnace Using Cyber-Physical System

益田　稜介　MASUDA Ryosuke　JFE スチール　スチール研究所　サイバーフィジカルシステム研究開発部　主任研究員
橋本　佳也　HASHIMOTO Yoshinari　JFE スチール　スチール研究所　サイバーフィジカルシステム研究開発部　グループリーダー・博士（情報学）

要旨

近年の高炉操業では CO_2 排出量の削減を目的として還元材量の低減が指向されており，熱源不足により安定操業との両立が困難になりつつある。高効率で安定した高炉操業の実現をめざして，JFE スチールでは高炉内の状態をリアルタイムに把握し最適な操作につなげる，高炉操業のサイバーフィジカルシステム化を推進している。本稿では，還元材量低減のために，最大 12 時間先の高炉内の状態を予測するモデルを用いて算出された最適な溶銑温度制御アクションを自動実行するシステムを紹介する。本技術を実高炉で運用した結果，手動操業と比較して溶銑温度のばらつきが低減した。本技術は JFE スチールの全高炉に実装され，CO_2 排出量の低減に寄与している。

Abstract:

In recent years, blast furnace operation has increasingly aimed to reduce the amount of reducing agent required per ton of hot metal in order to decrease CO_2 emissions. However, such operation tends to cause insufficient heat source, making stable furnace operation difficult. To achieve highly efficient and stable operation, JFE Steel has been promoting the development of a cyber-physical system (CPS) that links real-time understanding of in-furnace states to optimal actions. This paper introduces an automatic temperature control system of blast furnace that automatically executes optimal control actions based on predictions of in-furnace states up to 12 hours ahead obtained using two-dimensional transient model. Operational results from an actual blast furnace demonstrated that the proposed system significantly reduced fluctuations in hot metal temperature compared with manual operation. The system has now been implemented in all blast furnaces of JFE Steel and contributes to reducing CO_2 emissions.

1.　はじめに

高炉プロセスでは，炉頂からコークスや鉄鉱石などの原料を装入し，炉下部の羽口から熱風と微粉炭を吹き込んで鉄鉱石を溶融および還元し，出銑口から溶銑を得る。高炉で溶銑を 1 t 製造するのに使用される還元材（コークスと微粉炭）の量を還元材比という。近年の高炉操業では，CO_2 排出量および溶銑コストの削減のために低還元材比をめざしており，熱源が不足する傾向にある。加えて，高品質な原料が枯渇しつつあるため，低品位の原料の使用割合が増加し，原料の品質の変動が大きくなることが予想される。このように高炉プロセスの安定操業が困難になると見込まれる一方で労働人口の減少が進み，将来的に現場を支える優秀なオペレーターの確保が困難になることが予想される。したがって，プロセス自動化による高効率かつ安定した操業の重要性がより一層高まっている。

JFE スチールでは，高炉操業の完全自動化を実現するために，データサイエンス技術を駆使した高炉のサイバーフィジカルシステム（Cyber-Physical System: CPS）の開発を続けている[1, 2]。既報にて，物理モデル[3] とオペレーター行動モデル[4] を組み合わせることによる溶銑温度（Hot metal temperature: HMT）制御ガイダンスシステムを紹介した[2]。本稿では，上記技術をさらに高度化し，溶銑温度制御の自動化を実現した内容[5, 6] について述べる。

2026 年 3 月 31 日受付

2.　溶銑温度制御自動化へのアプローチ

本章では，既報の溶銑温度制御ガイダンスシステムの運用面における課題，および解決策を説明する。

溶銑温度制御ガイダンスシステムは，高炉のオペレーターに表示端末を介して目標とする微粉炭比（Pulverized Coal Ratio: PCR）の推奨値を提示する。PCR は，溶銑 1 t あたりの微粉炭量であり，溶銑温度制御における操作変数である。PCR を増加させると，溶銑 1 t あたりの熱源が上昇するため溶銑温度が上昇する。高炉のオペレーターは，表示端末を確認した後，分散制御システム（Distributed Control

Copyright © 2026 JFE Steel Corporation. All Rights Reserved.

System: DCS）で，式（1）で定義される実績 PCR が目標 PCR の推奨値に合致するように微粉炭流量を手動で調整する。

$$\text{実績 PCR (kg/t)} = \frac{\text{微粉炭流量 (kg/min)}}{\text{造銑速度 (t/min)}} \quad \cdots\cdots \quad (1)$$

すなわち，溶銑温度制御ガイダンスシステムは目標 PCR の推奨値を提示するのみで，微粉炭流量の調整はオペレーターが手動で行う必要があった。したがって，オペレーターの業務負荷は依然として高いままであった。

さらに，従来操業では，式（1）の分母に相当する造銑速度の変動に対して微粉炭流量の調整が十分に追従できず，PCR の制御精度が低下することも課題であった。送風流量，酸素量，送風圧力などの変化により高炉内部での原料の降下速度が変動し，その結果，造銑速度は頻繁に変化する。このような状況下で目標 PCR の推奨値が提示されている場合であっても，微粉炭流量の調整はオペレーターの判断に委ねられており，操作量や操作タイミングにばらつきが生じていた。**図 1** は，溶銑温度，PCR，微粉炭流量，および造銑速度のトレンドである。溶銑温度と PCR において，実線は実績値，破線は目標値を表す。図 1 の例では，15 時間付近で造銑速度が低下しており，オペレーターはこの変化に応じて微粉炭流量を減少させた。しかし，微粉炭流量の操作が不十分であったため，20 時間付近の実績 PCR は目標 PCR を上回った。その結果，25 時間以降の溶銑温度の実績も目標範囲を大きく上回った。このように，PCR の制御精度の低下は，溶銑温度のばらつき発生につながる。

上記の課題を解決するため，本技術では**図 2** に示すように，従来から用いられてきた溶銑温度制御による目標 PCR 算出を外側（上位）ループとし，これに目標 PCR と実績 PCR との偏差を解消する PCR 追従制御を内側（下位）ループとして付加することで，カスケード制御系を構築した。さらに，算出された目標 PCR および微粉炭流量の最適値を自動的もしくはオペレーターの了承下で準自動的に操作するシステムを考案した[5]。本手法により，従来のオペレーターの属人的な操作を排除できる。

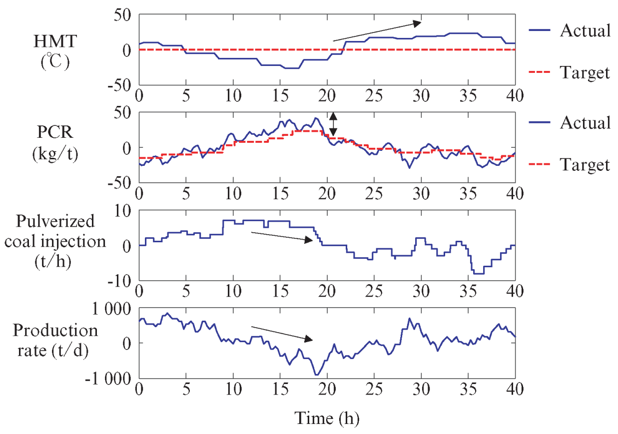

図 1　手動操業における溶銑温度，PCR，微粉炭流量，および造銑速度のトレンド

Fig. 1　Trends of HMT, PCR, pulverized coal injection, and production rate of manual operation

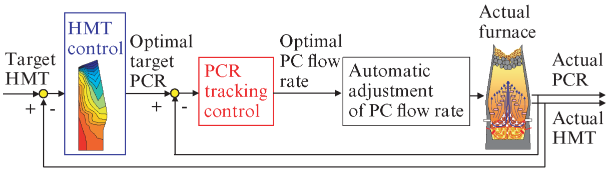

図 2　溶銑温度自動制御システムの概要

Fig. 2　Outline of automatic hot metal temperature control system

3.　溶銑温度自動制御システムの構築

本章では，本技術で考案した制御系のフローを述べた後，前章で述べた「溶銑温度制御」および「PCR 追従制御」の詳細について説明する。最後に，最適な操作量をオペレーターへ提示する手法について説明する。

3.1　溶銑温度自動制御システムのフロー

図 3 に，溶銑温度自動制御システムのフローを示す。まず，溶銑温度制御ループにより目標 PCR の最適値を算出する。続いて，PCR 追従制御により，実績 PCR が目標 PCR に追従するように微粉炭流量の最適値を求める。さらに，オペレーターの負担軽減と過剰アクション防止を目的として，最後にアクションを実施した時刻から一定時間 τ_1 が経過した場合にのみ，DCS 画面に最適なアクションを提示する仕組みとした。また，本システムには「自動モード」および「準自動モード」の 2 種類を設けた。「自動モード」では，オペレーターが所定の時間 τ_2 内に拒否しない限り，提示されたアクションが自動実行される。「準自動モード」では，アクションの実施にオペレーターの了承を必要とする。なお，溶銑温度制御ループで用いる 2 次元非定常モデル[7,8]の計算時間に鑑みて，制御周期は 15 分とした。

3.2　「溶銑温度制御」ループのアルゴリズム

溶銑温度制御における 2 次元非定常モデルは，式（2）および式（3）に表される離散化された非線形状態空間モデルの形で表現される。非線形状態空間モデルの時間ステップは，溶銑温度の測定間隔のおよそ半分である 15 分と設定した。

$$\boldsymbol{x}(t+1) = f(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t)) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C(\boldsymbol{x}(t)) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

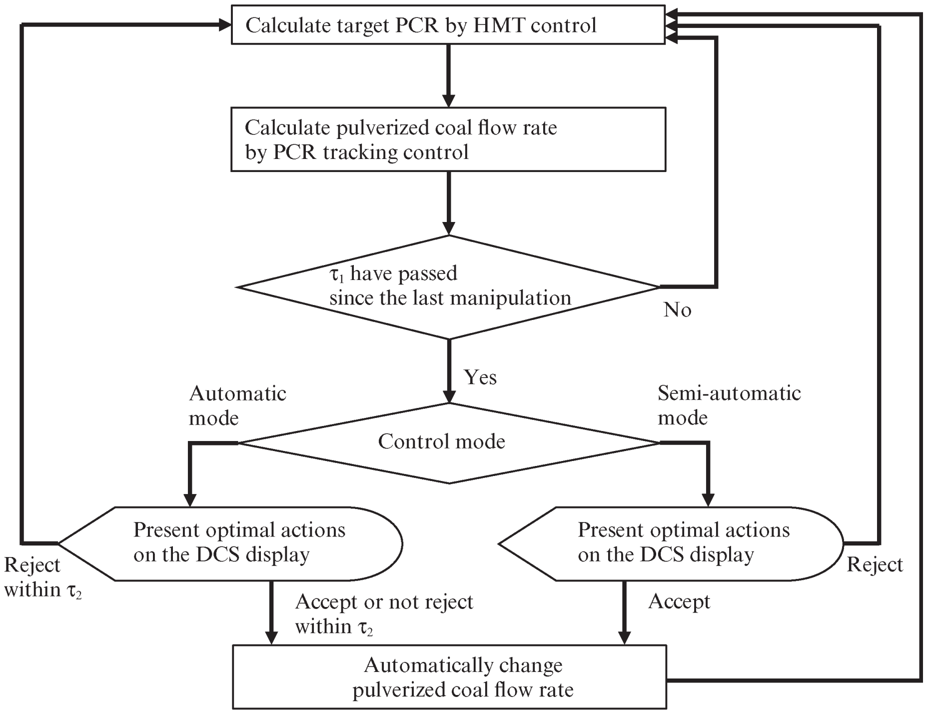

図 3　溶銑温度自動制御システムのフローチャート

Fig. 3　Flowchart of automatic hot metal temperature control system

ここで，$\boldsymbol{x}(t)$ は 2 次元非定常モデル内で計算される状態変数（コークスや鉄の温度，鉱石の酸化度，原料の降下速度など）である。また，$\boldsymbol{u}(t)$ は 2 次元非定常モデルの入力変数である，送風流量（blast volume: BV），富化酸素流量（enriched oxygen: EO），微粉炭流量（pulverized coal injection: PCI），送風湿分（blast moisture: BM），送風温度（blast temperature: BT），およびコークス比（coke ratio: CR）であり，$\boldsymbol{u}(t)=(\mathrm{BV}(t), \mathrm{EO}(t), \mathrm{PCI}(t), \mathrm{BM}(t), \mathrm{BT}(t), \mathrm{CR}(t))^T$ で表される。$\boldsymbol{y}(t)=(y_1(t), y_2(t))^T$ はそれぞれ溶銑温度と造銑速度であり，$\boldsymbol{x}(t)$ から関数 C により算出される。$y_2(t)$ は，3.3 節で説明する PCR 追従制御ループで用いる。

まず，現在の時間ステップを $t=t_0$ と置き，現在の入力変数の値が一定に保たれると仮定して，$\boldsymbol{u}(t_0+k)=\boldsymbol{u}(t_0)(k=0, 1, ..., N)$ と固定する。この条件下で式（2）および式（3）を用いて，将来の溶銑温度および造銑速度を予測する。このようにして求めた溶銑温度と造銑速度の応答を自由応答と称する。10 時間先まで予測するため，$N=40$ と設定した。

次に，他の入力変数を保持したまま現時刻 $t=t_0$ において PCR を 10 kg/t 増加させる操作を $\Delta\boldsymbol{u}_1=(0, 0, \Delta\mathrm{PCI}, 0, 0, 0)^T$ と置き，$\boldsymbol{u}(t_0+k)=\boldsymbol{u}(t_0)+\Delta\boldsymbol{u}_1$ と固定して，式（2）および式（3）により $\boldsymbol{y}_{\mathrm{PC}}(t_0+k)$ を求める。微粉炭流量の増加量 ΔPCI は，PCR の増分と現在の造銑速度の積により求める。さらに式（4）のように自由応答と PCR を 10 kg/t 増加させた際の溶銑温度の応答との差分を取ることにより，時刻 t_0 における PCR 1 kg/t の変化に対する溶銑温度のステップ応答 $S_{\mathrm{PCR}}(k|t_0)$ を抽出する。

$$S_{\mathrm{PCR}}(k|t_0)=(y_{\mathrm{PC},1}(t_0+k)-y_{\mathrm{f},1}(t_0+k))/10 \quad \cdots\cdots \quad (4)$$

そして，PCR の最適操作量（ΔPCR）は，k_1 時間ステップ後の溶銑温度が目標範囲に収まるように式（5）に基づいて決定する。先行研究[9] において，PCR の操作の影響は 8 時間程度後に十分に発現することがステップ応答解析により示されている。この知見に基づき，本システムでは $k_1=32$ と設定した。

$$\Delta\mathrm{PCR}=-\alpha(\max(y_{\mathrm{f},1}(t_0+k_1)-T_{\mathrm{U}}, 0) + \min(y_{\mathrm{f},1}(t_0+k_1)-T_{\mathrm{L}}, 0))/S_{\mathrm{PCR}}(k_1|t_0) \quad \cdots \quad (5)$$

ここで T_{U} および T_{L} は，それぞれ溶銑温度の目標上限値および下限値である。また，α は緩和係数である。このような制御則とすることで，$y_{\mathrm{f},1}(t_0+k_1)$ が目標範囲内に収まっている間は操作幅がゼロとなり，操作量変更に伴うオペレーターの作業負荷を低減できる。最後に，式（6）に示すように，現在の目標 PCR（$\mathrm{PCR}^0_{\mathrm{ref}}$）に上記で算出された ΔPCR を加算することで，新たな目標 PCR（$\mathrm{PCR}_{\mathrm{ref}}$）を決定する。

$$\mathrm{PCR}_{\mathrm{ref}}=\mathrm{PCR}^0_{\mathrm{ref}}+\Delta\mathrm{PCR} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

3.3　「PCR 追従制御」ループのアルゴリズム

前節で算出された最適な目標 PCR を実現するためには，式（1）で定義される実績 PCR が目標値に合致するように微

粉炭流量を調整する必要がある。

図 4 に，PCR 追従制御ループのブロック図を示す。実績 PCR は，実績の微粉炭流量と造銑速度の比として算出される。造銑速度は，高炉内に吹き込まれる熱風中に含まれる酸素比率 X_{O_2} としたとき，式（7）で表される総酸素流量 V_{O_2} と比例関係にある。

$$V_{O_2}=\mathrm{BV}\cdot X_{O_2}+\mathrm{EO} \quad \cdots\cdots (7)$$

しかし，BV や EO の操作の影響が造銑速度に現れるまでにおよそ 1 時間の遅れが存在する。そのため本制御では，直近 3 時間における総酸素流量の変化量に基づいて制御則を切り替える。PCR 追従制御に使用する造銑速度 $Prod_0$ は，総酸素流量の変化量 ΔV_{O_2} の絶対値に応じて式（8）により決定する。

$$Prod_0=\begin{cases} Prod_{\mathrm{FB}} & |\Delta V_{O_2}|<50\ \mathrm{Nm^3/min} \\ Prod_{\mathrm{FF}} & |\Delta V_{O_2}|\geq 50\ \mathrm{Nm^3/min} \end{cases} \quad \cdots\cdots (8)$$

総酸素流量の変化が小さい場合には，造銑速度の将来的な変動は限定的であり，実績造銑速度に基づく制御で十分な制御性能が得られる。したがって，ΔV_{O_2} が閾値未満の場合は，実績造銑速度 $Prod_{\mathrm{FB}}$ に基づく実績 PCR を用いたフィードバック制御を採用する。一方で，総酸素流量の変化が大きい場合には，造銑速度が将来的に変化すると予測されるため，将来の造銑速度を考慮した制御が必要となる。したがって，ΔV_{O_2} が閾値以上の場合は，2 次元非定常モデルにより算出した予測造銑速度 $Prod_{\mathrm{FF}}$ に基づく予測 PCR を用いたフィードフォワード制御を実施する。

フィードバック制御では，炉頂より投入される焼結鉱中の鉄の含有量より求めた溶銑換算量を用いて，造銑速度の推移に対する線形回帰に基づき，現在の造銑速度を推定する。i 番目のチャージの装入開始時刻 T_i における造銑速度は式（9）で表される。

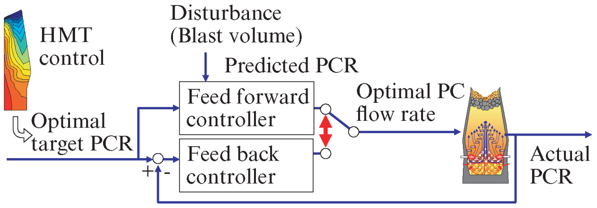

図 4　PCR 追従制御のブロック線図
（赤い矢印はスイッチを意味し，総酸素流量の変化量により切り替わる）

Fig. 4　Block diagram of PCR tracking control
(The bidirectional red arrow shows the switching of the control law based on the change in the total oxygen flow rate)

$$Prod(T_i)=\frac{W_{\mathrm{HM},i}}{T_i-T_{i-1}} \quad \cdots\cdots (9)$$

ここで i 番目のチャージの溶銑換算量を $W_{\mathrm{HM},i}$ とする。さらに，最新のチャージ番号を N として，直近 m チャージを $p=N, N-1, \ldots N-m+1$ と表現する。各チャージ p における装入開始時刻 T_p に対応する造銑速度 $Prod(T_p)$ を対象として，これら各点に対する近似曲線を式（10）の 1 次関数で表す。ノイズの影響を低減するため，本稿では $m=8$ とした。

$$Prod(T_p)\approx\beta_0+\beta_1 T_p\ (p=N, N-1, \ldots N-m+1) \quad \cdots (10)$$

最小二乗法により回帰係数 β_0，β_1 を求め，現時刻 T_0 における実績造銑速度を $Prod_{\mathrm{FB}}=\beta_0+\beta_1 T_0$ と推定する。

フィードフォワード制御では，直近における総酸素流量の大きな操作の影響がひととおり反映された後の，将来の造銑速度を予測する。そこで本制御では，3.2 節で定義した 2 次元非定常モデルによる造銑速度の自由応答のうち，k_2 時間ステップ後における値を用いて，$Prod_{\mathrm{FF}}=y_{\mathrm{f},2}$（$t_0+k_2$）とする。予測時点以前の BV や EO の操作の影響は，約 2 時間以内に造銑速度へ反映されて，その後は応答が収束して大きな変化が生じにくくなる。このため，約 2 時間後には造銑速度はほぼ一定とみなせることから，$k_2=8$ とした。

次に PCR の制御偏差を式（11）により算出する。

$$\delta\mathrm{PCR}=\frac{\mathrm{PCI}(t_0)}{Prod_0}-\mathrm{PCR}_{\mathrm{ref}}^{0} \quad \cdots\cdots (11)$$

最終的な微粉炭流量の最適操作量 ΔPCI は，式（12）に示すように，PCR 追従制御による微粉炭流量の操作量と溶銑温度制御による操作量の合計により算出する。

$$\Delta\mathrm{PCI}=-(\gamma_1\cdot\delta\mathrm{PCR}+\gamma_2\cdot\Delta\mathrm{PCR})Prod_0 \quad \cdots\cdots (12)$$

ここで γ_1，γ_2 は緩和係数である。

最後に，式（13）に従い，現在の微粉炭流量の設定値（$\mathrm{PCI}_{\mathrm{SV}}^{0}$）に ΔPCI を加算することで，最適な微粉炭流量の設定値（$\mathrm{PCI}_{\mathrm{SV}}$）を決定する。

$$\mathrm{PCI}_{\mathrm{SV}}=\mathrm{PCI}_{\mathrm{SV}}^{0}+\Delta\mathrm{PCI} \quad \cdots\cdots (13)$$

3.4　DCS 画面への最適アクションの提示

溶銑温度自動制御システムは，制御室の DCS 画面に，**図 5** に示す最適な制御アクションをポップアップウィンドウとして提示する。図 5 の例では，溶銑温度制御ループに基づき ΔPCR＝＋4 kg/t，PCR 追従制御ループに基づき ΔPCI

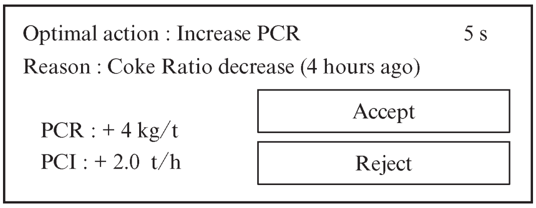

図 5　最適な操業アクションのポップアップ画面例

Fig. 5　Example of optimal control action display

表 1　溶銑温度自動制御システム運用の中断条件

Table 1　Interruption conditions for using the developed control system

Item	Condition
Control error of HMT	Higher than 35℃ or lower than −25℃
Blast volume	More than 2 hours of low BV due to poor gas permeability

＝+2.0 t/h と算出された。また，本例では制御モードとして「自動モード」が選択されており，オペレーターが 5 秒以内に提示されたアクションを拒否しない限り，目標 PCR および微粉炭流量は自動的に操作される。さらに本システムでは，オペレーターへの説明性向上のために，最適アクションの算出根拠も併せて提示する。図 5 の例では，4 時間前にコークス比が低下した影響により，将来的な溶銑温度低下が予測されたため，溶銑温度を上昇させるアクションが提示された。

4.　実プラントでの検証結果

本章では，前章で説明した溶銑温度自動制御システムを実プラントに実装し，溶銑温度の制御精度を検証する。

具体的には，本システムにより目標 PCR および微粉炭流量を操作した場合と，オペレーターによる手動操作の場合の溶銑温度の制御偏差を比較することで，本システムの有効性を評価した。なお，**表 1** に示す中断条件に抵触しない限り，オペレーターは溶銑温度自動制御システムが提示する最適アクションをすべて了承する形式で運用した。

図 6 に，溶銑温度制御精度の検証のために本システムを実プラントで試験運用した期間のトレンドを示す。図 6 は，それぞれ 60 時間にわたる（a）溶銑温度，（b）コークス比，（c）PCR，（d）微粉炭流量，（e）送風流量，および（f）造銑速度の推移を示す。図 6（a）は目標値からの偏差を，図 6（b）から（f）は期間平均値からの差分を示す。図 6（a）および（c）において，実線は実績値，破線は目標値を示す。図 6（c）および（d）に示すように微粉炭流量を適切に調整することで，実績 PCR は目標 PCR に良好に追従した。また，図 6（b）に示すコークス比は，オペレーターによる手動操作により徐々に低下した。これに対し，本システムが図 6（c）のとおり目標 PCR を上昇させることで，コークス比低下による溶銑温度への影響を相殺し，図 6（a）に示すように溶銑温度は目標値近傍に制御された。これらの結果は，本システムがコークス比低減に寄与しつつ，溶銑温度を安定に制御できることを示している。

図 7 ではコークス比および送風流量の変化が大きく，溶銑温度制御に対する外乱が大きな条件下で本システムを試験運用した 60 時間の結果を示す。本期間では炉内ガスの通気抵抗が大きく，これを緩和するためにオペレーターが送風流量を大きく操作した。その結果，図 7（f）に示す造銑速度の変動は図 6 と比較して大きい。このような条件下でも，本システムは微粉炭流量を適切に調整することで，図 7（c）に示すように実績 PCR を目標 PCR に追従させている。さらに，オペレーターは 8 時間および 18 時間付近においてコークス比を上昇させて通気性を確保し，33 時間以降ではコークス比を段階的に低下させている。これらの変化を相殺するように本システムが目標 PCR を操作することで，溶銑温度は目標値近傍に制御された。以上より，本システムは外乱に対してロバストな溶銑温度制御を実現していることが確認された。

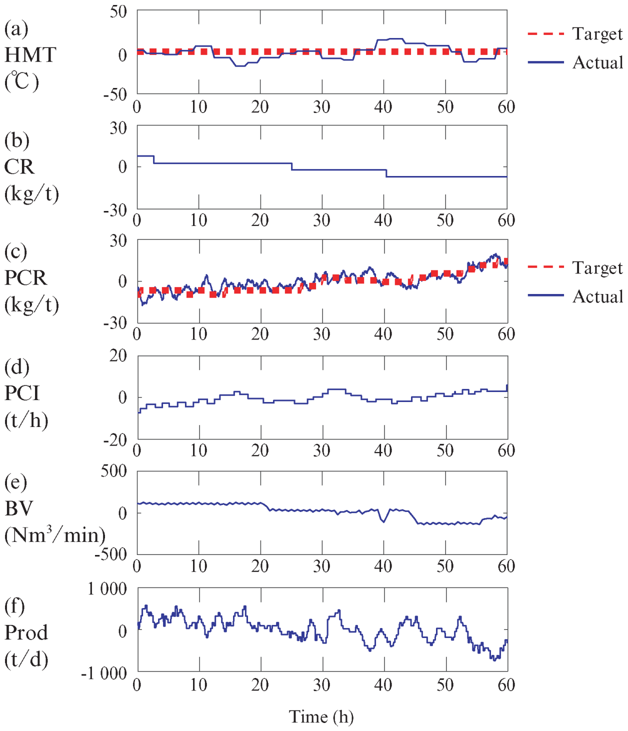

図 6　実操業における溶銑温度自動制御システムの運用結果

Fig. 6　Real operational results of the developed control system

図 8 に，手動操業と溶銑温度自動制御システムを適用した場合における溶銑温度および PCR の制御偏差の比較を示す。本システムにより目標 PCR および微粉炭流量を操作することで，PCR の制御偏差の根二乗平均値（RMSE: root mean square error）は 1.0 kg/t 低減した。また，溶銑温度

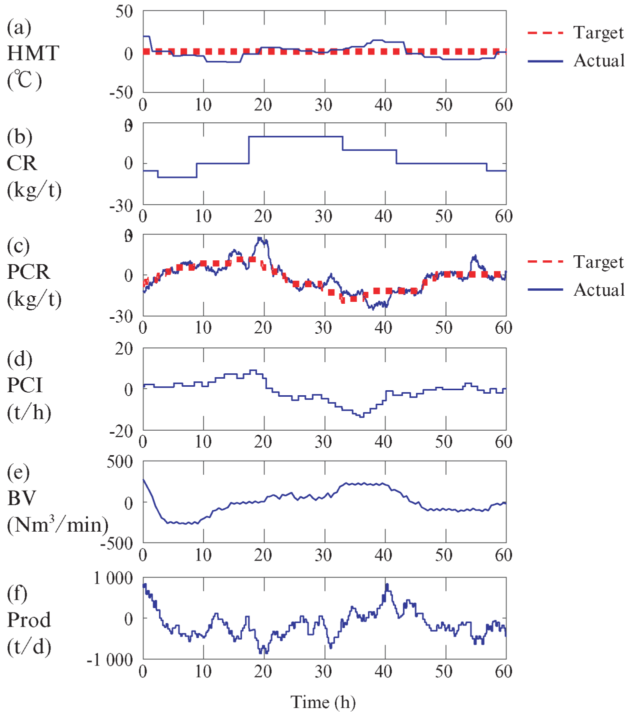

図 7　コークス比および送風流量の変化が大きい条件下での溶銑温度自動制御システムの運用結果

Fig. 7　Real operational results of the developed control system under the condition of large disturbances

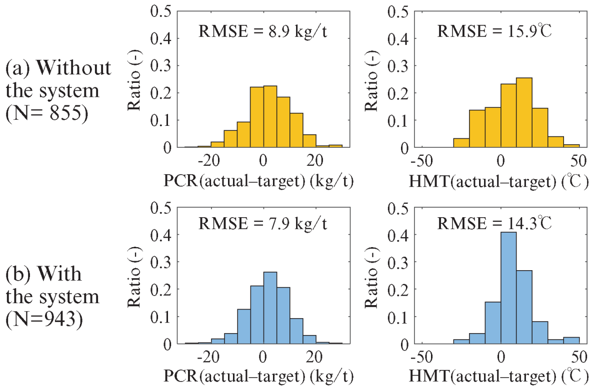

図 8　手動操業時とシステム使用時との制御精度比較

Fig. 8　Control accuracy of PCR and HMT by the developed control system

の制御偏差の RMSE は 1.6℃低減した。これらの結果から，溶銑温度自動制御システムの有効性および妥当性が定量的に示された。

5.　おわりに

JFE スチールでは，高炉の溶銑温度を高精度に制御する溶銑温度自動制御システムを開発した。本システムでは，溶銑温度制御のための最適な目標 PCR を算出するとともに，目標 PCR と実績 PCR を合致させるための最適な微粉炭流量を算出する制御アルゴリズムを構築した。さらに，算出された目標 PCR および微粉炭流量を自動的，もしくはオペレーターの了承下で準自動的に操作するシステムとして実プラントに実装した。

溶銑温度自動制御システムは，JFE スチールの全高炉に実装されており，コークス比および CO_2 排出量の低減に寄与している。今後も，高炉操業の完全自動化に向けた開発を進めていく所存である。

参考文献

1）伊藤友彦，橋本佳也，島本拓幸．データサイエンスによる高炉操業ガイダンス技術．JFE 技報．2020, no. 45, p. 19–25.
2）伊藤友彦，坪井俊樹，益田稜介，島本拓幸．データサイエンスによる高炉操業ガイダンス技術　その 2．JFE 技報．2022, no. 49, p. 36–41.
3）Hashimoto, Y.; Kitamura, Y.; Ohashi, T.; Sawa, Y.; Kano, M. Transient model-based operation guidance on blast furnace. Control Engineering Practice. 2019, vol. 82, p.130-141.
4）Hashimoto, Y.; Masuda, R.; Yasuhara S. An operator behavior model for thermal control of blast furnace. ISIJ International. 2022, vol. 62, no. 1, p. 157–164.
5）Masuda, R.; Hashimoto, Y.; Mulder, M.; van Paassen, M.M.（René）.; Kano, M. Automation on thermal control of blast furnace. Digital Chemical Engineering. 2023, vol. 7, p. 100085.
6）Hashimoto, Y.; Masuda, R.; Mulder, M.; van Paassen, M.M.（René）. Automatic control of hot metal temperature. Metals. 2022, vol. 12, p. 1624.
7）Hashimoto, Y.; Sawa, Y.; Kitamura, Y.; Nishino, T.; Kano, M. Development and validation of kinematical blast furnace model with long-term operation data. ISIJ International. 2018, vol. 58, no. 12, p. 2210–2218.
8）Hashimoto, Y.; Sawa, Y.; Kano, M. Practical operation guidance on thermal control of blast furnace. ISIJ International. 2019, vol. 59, no. 9, p. 1573–1581.
9）Hashimoto, Y.; Sawa, Y.; Kano, M. Online prediction of hot metal temperature using transient model and moving horizon estimation. ISIJ International. 2019, vol. 59, no. 9, p. 1534–1544.

本稿は，参考文献 5)（Creative Commons Attribution 4.0 International, CC BY 4.0）で公開されている内容を基に，構成および表現を大幅に再編・改変し，日本語論文として新たにまとめたものである。なお，図表はすべて原論文とは異なるものを新たに作成している。

Copyright © 2026 JFE Steel Corporation. All Rights Reserved.　禁無断転載