

(解説)



## 変化し続けるものづくりを支えるプロセス制御

前田知幸\*<sup>1</sup> (博士(工学))・江口 徹\*<sup>1</sup> (博士(工学))・逢坂武次\*<sup>1</sup>・檜崎博司\*<sup>1</sup> (博士(工学))・加茂和史\*<sup>1</sup>

### Process Control Supporting Ever-changing Manufacturing

Dr. Tomoyuki MAEDA・Dr. Toru EGUCHI・Taketsugu OSAKA・Dr. Hiroshi NARAZAKI・Kazufumi KAMO

#### 要旨

お客様の新たなニーズや製品およびそれらの変化に的確に対応するため、当社グループの生産設備・プロセスやプラント製品などの安定稼働、効率化を支えてきたプロセス制御技術の高度化に関して報告を行う。具体的には、歴史的な背景にふれながらプロセス制御技術の概要およびいくつかの最新事例を紹介しつつ、当社グループのマテリアリティ「グリーン社会への貢献」との関係性や将来のカーボンニュートラル社会への貢献についても展望する。

#### Abstract

This article reports on the advancement of process control technology that has been supporting the stable operation and efficiency improvement of production facilities, processes, and plant products within the Kobelco Group to accurately respond to the new needs of customers and changes in products and processes. Specifically, it provides an overview of process control technology, touching upon its historical background and introduces several recent cases. It also discusses the relationship between this technology and Kobelco Group's materiality, "Contributions to a Green Society," and offers insights into the contributions to a future carbon-neutral society.

#### 検索用キーワード

プロセス制御, 高炉, 圧延, 冷却, 製鉄, 廃棄物処理

ま え が き = 多種多様な事業・製品を有する当社グループでは、お客様が求められる新たなニーズや製品にタイムリーに対応しつつ高生産性かつ高歩留まりで製造するため、保有する各種生産設備・プロセスを効率的かつ安定的に稼働・運転させている。お客様ニーズに的確に対応するため、還元、燃焼、加熱、吸熱、塑性変形など様々な工程やそれらを組み合わせた多種多様なプロセスを適正に操業する必要があり、プロセス制御技術が活用されてきた。とくに鉄鋼業界ではほかの産業に先駆けて積極的に導入した計算機を活用し制御機能の高度化を進めてきた。当社においても同様に最適制御、ロバスト制御などを開発・実用化し、近年ではビッグデータ解析、AI活用も積極的に行い数々の実績を築きあげてきた。今後も「グリーン社会への貢献」や「将来の人口減における生産技術」に対応すべく、低CO<sub>2</sub>排出高炉操業技術や高効率ごみ発電プロセスなど、生産設備やプロセスが進化していく中でプロセス制御技術の高度化はますます重要になると考えられる。本稿ではこれら技術の概要と当社グループで長年取り組んできたプロセス制御技術の近年の具体的事例について紹介、解説を行う。

### 1. プロセス制御の概要

プロセス制御技術は製鉄プロセスや大型プラントなど

連続稼働設備のプロセス挙動の変化を迅速に察知して操作することで設備を効率的かつ安定稼働させる技術であり、ものづくり基盤を支える技術の一つである。ものづくりに求められるニーズが、「大量生産」から、「量から質へ」、「多品種少量化」、「難製造製品の増加」と時代とともに変化する中、当社グループでは、プロセス制御技術を高度化することで製造条件変更や新規プロセス商品化を実現し、お客様や社内工場ニーズの変化に対応してきた。

80年代頃大量生産の時代、鉄鋼他社同様に当社グループでは国内でも先駆的に計算機や自動制御(PID)をライン導入し、その適用先を拡大することでプロセス・設備の安定稼働、高歩留まり生産を実現しお客様への大量製品提供を可能とした。とくに、制御対象の物理(化学)現象をモデル化し計算機シミュレータを活用した最適制御技術により、各種板厚制御や温度制御などの圧延制御技術が実操業へ適用された<sup>1)</sup>。

その後、90年代後半に「量から質へ」の転換が始まった際、当社ではプロセス制御に最新技術を順次導入して対応を行った。具体的には、適応制御やロバスト制御を開発・実用化し<sup>2)</sup>様々な材料特性の作り込みを可能とした。さらには新たな学習機能開発やセットアップ計算モデル高精度化により、材料作り分け時のロット切り替え

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

ロスを最小化した。これらにより、お客様ニーズ多様化による難製造製品の製造を可能とし、多品種少量/変量生産へのシフトを支えた。加えて、時系列データなどの複雑かつ大量の操業データをハンドリングしクラスタリングする技術の高度化に取り組み、転炉副原料投入システムやごみ焼却炉温度予測制御<sup>3)</sup>により鉄鋼品質向上や新規商品メニュー化を実現した。

その後、「多品種少量化」によるニーズの多様化や「難製造製品の増加」に対応する製造技術高度化要求が進み、さらなる安定生産、制御性能の高精度化を目指す中、当社グループはベテランオペレータの暗黙知の活用、自動化と技能の共存を指向した。センシング技術の信頼性向上、高精度化やストレージ装置大容量化を背景とした転炉副原料投入システムの高度化でのJIT (just-in-time) モデリング技術開発にて培ったデータハンドリング技術を活用し、過去の大量操業データから高類似度データを抽出することでベテランの経験情報を模擬する仮想経験情報を表現することに成功し、仮想経験情報を操業オペレータへ提示して判断を支援する当社独自の操業支援技術を開発した。自動制御ループの中に人の判断を含めた制御系とすることで自動化と技能を共存させ、ベテラン暗黙知を活用したものづくりを実現した。従来の自動化アプローチでは困難な課題であった製鋼工程温度予測や熱延工程の圧延セットアップ計算などへの適用<sup>4)</sup>により様々な製品製造を可能とし、ニーズの多様化を支えている。また、このコンセプトを拡張し、より高難易度な高炉操業への適用を進めることで、通気性可視化と炉熱変化予測の技術を確立し、他社に先駆けて実機適用を果たした。

現在、業界に先駆けて機械学習を「オンライン・プロセス制御」に取り込み、実操業で活用できる機械学習技術を構築中であり、引き続きプロセス技術の高度化を進めていく。今後、お客様が求める新たな製品・プラント特性や、当社における鉄鋼原料の質的变化、HBI (hot briquetted iron) 投入など原料系の変化などに技術開発でこたえ続けていく。その中で、プロセス制御は大型設備・プロセスを繊細に操作し材料やエネルギーのロスを最小化することで、きたるべき未来のカーボンニュートラル世界の実現に貢献しつづけていくものと考えている。

## 2. 高炉 “AI操炉<sup>®</sup>” の開発<sup>5)</sup>

高炉は鉄鉱石とコークスを炉頂から交互に層状に装入し、炉下部の羽口から熱風と微粉炭を吹込んで鉄鉱石を昇温還元し、溶銑 (ようせん) を製造する固気向流型の巨大な反応容器である。高炉の安定操業には、向流移動層である充填層の通気性を安定させることと、炉熱 (溶銑温度) を一定レベルに保つことが重要である。炉熱制御で重要な役割を担っているのは操炉を行うオペレータであり、操炉オペレータは膨大な計測データを管理指標と照合し、経験というスパイスを付加して数時間後の炉内状況 (炉況) を予測し、溶銑温度が管理値範囲内に収まるよう操業条件変更を実施する (図1)。とくに大型

高炉での低コークス比操業は、熱慣性起因の時定数の大きさが災いとなり操炉アクションが遅延すると大きな炉況不調を招き易いことから、操炉オペレータにはより高度な判断能力が要求されている。

このような背景のもと、高炉でのCO<sub>2</sub>削減と究極の安定操業 (冷え込みゼロ、吹き抜けゼロ) を目的に、AI・数学モデル・計測端情報を融合した炉熱と通気性に関する“炉況予測”、さらに高度な“炉況制御”を行う“AI操炉<sup>®</sup>”を開発中である。以下では、主要技術の一つであるAIを活用した“炉熱 (溶銑温度) 予測技術”について紹介する。

溶銑温度の推定モデルは、炉下部の熱原単位変化量 $\Delta Q$ の総計より溶銑温度の変化量 $\Delta T_{pig}$ を求める炉熱過渡応答モデルである。モデルの入力情報は、操業条件変更アクションと炉内影響因子の熱原単位変化量、炉内残銑量、溶銑温度の過去実績データである。熱原単位変化量が溶銑温度変化へ反映される際に過渡応答の考え方を適用し、過渡応答曲線のモデルパラメータ $\theta$ をAIで逐次最適化した。

将来5時間の溶銑温度 (HMT) を予測した結果例を図2に示す。①時刻ゼロの時点で、モデルは将来5時間にかけて溶銑温度の急激な低下を予測している。②操炉オペレータが同タイミング以降で複数回の送風温度

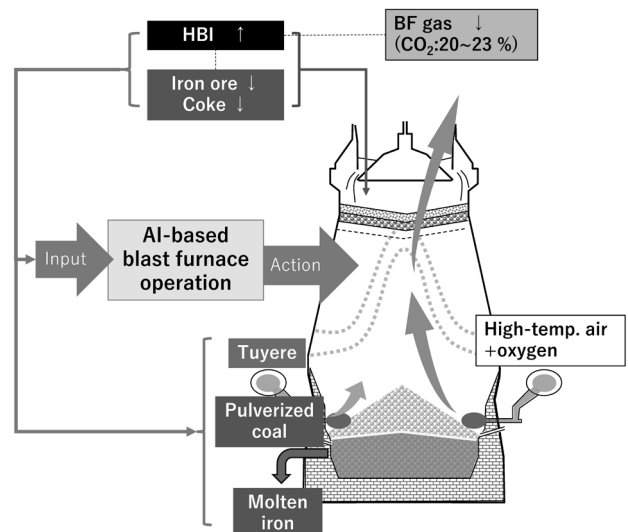


図1 AI操炉の概要

Fig.1 Outline of AI based blast furnace operation

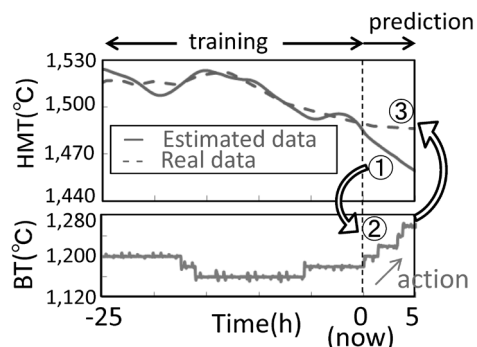


図2 溶銑温度予測の結果例

Fig.2 Result of HMT (hot metal temperature) prediction

(BT)の上昇アクションを実施することで、③溶銑温度の実測値は管理値範囲内に維持できており、予測モデルの妥当性を実証した。さらに、従来は浸漬型熱電対でバッチ計測した溶銑温度を教師データに用いていたが、出銑孔カメラで連続撮影した輝度画像から溶銑温度を連続算出できる技術を開発し、教師データに用いることで予測精度を飛躍的に改善した。

加古川製鉄所第3高炉でのHBI多量使用テストでは実際に本予測システムを活用し、低CO<sub>2</sub>高炉操業の実機で技術の実用性を実証した。世界中の高炉でCO<sub>2</sub>削減(HBI多量使用)を可能にする“AI操炉<sup>®</sup>”を目指して、現在も改良機能を開発中である。

### 3. 廃棄物プラント自動化機能の開発<sup>6)</sup>

当社グループ製品メニューに廃棄物焼却プロセスがある。これまでに当社グループでは安定稼働、排ガス環境負荷物質(CO, NO<sub>x</sub>)濃度低減や自動運転を支えるプロセス制御技術を多数開発しており、その一つに排ガスCO, NO<sub>x</sub>抑制自動化技術がある。

排ガス中の環境負荷物質濃度は常に変化する廃棄物性状の影響を受け操業中に急激に変化するため、その抑制と操作自動化が望まれていた。そこで、当社グループでは多岐にわたる変動要因を最新の機械学習を活用して表現し、プロセス情報からCO, NO<sub>x</sub>発生状況を高精度に予測する技術を開発した。本稿では、この技術で得られる予測結果を基に燃焼空気量を最適に制御する排ガスCO, NO<sub>x</sub>抑制自動化技術(図3)について報告する。

以下に、開発技術のフローを示す。

- (1) 機械学習(決定木)による排ガ斯特性のモデリング  
決定木を用いて過去の運転データを学習させ、CO, NO<sub>x</sub>が急変するタイミングを予測するロジックを構築する。これにより運転員が手動介入可否を判断可能とする。
- (2) オンデマンドな空気量制御の実行  
前述の予測ロジックによってCO, NO<sub>x</sub>の上昇を予測し、必要な排ガス抑制操作(溶融炉の一次/二次空気量の調整)を事前に行う。なお、操作介入は必要なタイミングのみとし、運転状態に与える影響を最小限に留め、運転の安定化を図る。

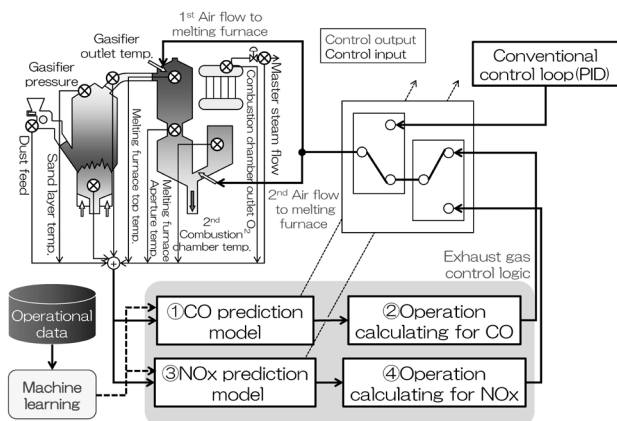


図3 開発制御システムの概要  
Fig.3 Outline of developed CO/NO<sub>x</sub> emission control system

表1 施設概要

Table 1 Outline of target plant

Disposal method	Fluidized-bed gasification and melting furnace
Disposal capacity	143 t/day (71.5 t/day * 2 Furnaces)
Exhaust gas cooling system	Waste heat boiler + Water spray
Steam conditions	350 °C * 4 MPa
Exhaust gas treatment method	Non-catalytic denitration + Bag filter + Catalytic reaction tower
Wastewater treatment equipment	Flocculation precipitation/Sand filtration + Membrane treatment equipment
Power generation	1,970 kW

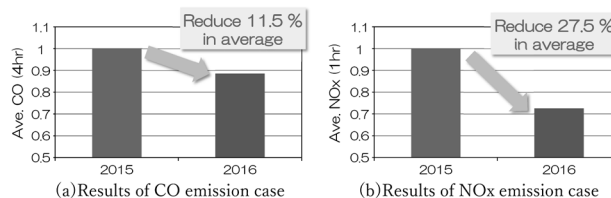


図4 開発システムによるCO, NO<sub>x</sub>抑制効果の評価結果

Fig.4 Results of CO/NO<sub>x</sub> emission control by developed control system

なおCO, NO<sub>x</sub>予測ロジックでは既知の反応、燃焼メカニズムを用いてガス化炉砂層温度や炉内圧力、燃焼炉出口酸素濃度などのプロセス情報から特微量を計算する中間処理を内包することで高精度な予測を実現している。

開発した制御システムを表1に示す施設(流動床式ガス化溶融炉)へ導入し、性能検証を行った。評価期間は2016年9月の一箇月とし、前年同時期の運転データを比較対象とした。なお、NO<sub>x</sub>抑制量は、触媒反応塔入口での分析装置の計測値で評価を行った。

図4に評価期間におけるCOの4時間平均濃度およびNO<sub>x</sub>の1時間平均濃度を前年同時期比として示す。図4から評価期間中のCO, NO<sub>x</sub>濃度は前年同時期に比べそれぞれ11.5%, 27.5%の低減効果が確認された。また評価期間における運転員の手動介入頻度はCOに対しては0回、NO<sub>x</sub>に対しては前年同時期に対して約半減となり、もう一つの目的である手動介入低減効果が得られた。なおNO<sub>x</sub>に関しては開発システムの空気量制御のほかに無触媒脱硝制御があり、将来的にこれらの組み合わせにより手動介入頻度0の達成を見込む。

本開発技術によって当社グループの廃棄物焼却プラントの安定稼働を継続し、社会に対する環境負荷低減に貢献していく。

### 4. 熱延巻取り温度制御(CTC)における深層学習温度予測モデルの開発<sup>7)</sup>

本技術は、熱間圧延工程における巻取温度(coiling temperature, CT)の制御に、深層学習による鋼板温度予測モデルを導入することで、熱伝導方程式によるモデルを用いた従来技術と比較して、鋼板温度の制御精度を大幅に向上させたものである。

巻取温度は鋼板の材質特性に大きく影響し、さらなる品質改善には温度の高精度化が不可欠である。また、加工性の良い高強度ハイテン材の開発には、新たな成分設

計や冷却条件への柔軟な対応も要求されている。それに対して、従来の熱伝導方程式によるモデルが新材料の冷却条件に対応できない場合、モデル式の改良から着手するため多大に時間を要し、さらに、プロセスコンピュータでオンライン制御を行うには計算能力が制約となり、モデル簡略化が必要となるため多少精度が犠牲となる問題があった。また、モデルの調整パラメータ決定も操業スタッフの属人的なノウハウになっており、品質の安定化という観点で課題が残っていた。

比較的シンプルな構造のネットワーク構造を用いる深層学習であれば、温度予測時の計算量は少ないため、オンライン制御にも適している。しかしながら、一般的に深層学習などの機械学習手法は、訓練データの無い外挿領域に弱く、これまでは基準となる物理モデルと組み合わせることで誤差のみを学習して補正する使われ方がほとんどであった。これに対して本技術では、図5に示すようにネットワーク構造に冷却設備におけるプロセスを表現しつつ、相変態の状態を中間特徴量として取り込むとい

う工夫を加えている。また、冷却過程の鋼板温度を表現する仮想温度計という概念を考案することで、画像分野において有効とされるデータ拡張手法を応用し、物理モデルと操業実績の限られたデータから多数の訓練データを生成することで、汎化性能の高い予測モデルの構築を実現した。

本技術によって、図6のように巻取途中で目標温度を変更した場合にも高い制御精度を確保でき、柔軟な冷却条件への対応力が向上した。また、精度改善や新たな材料への対応も、モデル式の改良を必要とせず、操業実績データを学習することで属人性の排除された持続的なモデル改善を積み重ねるようになり、製造の難しい高性能な鋼板の品質安定化や開発期間の短縮にも寄与している。

巻取温度制御以外にも従来の理論や知見に基づくプロセス制御技術だけでは対応の難しかった非定常部での制御に、深層学習やAIモデルを幅広く活用していく。

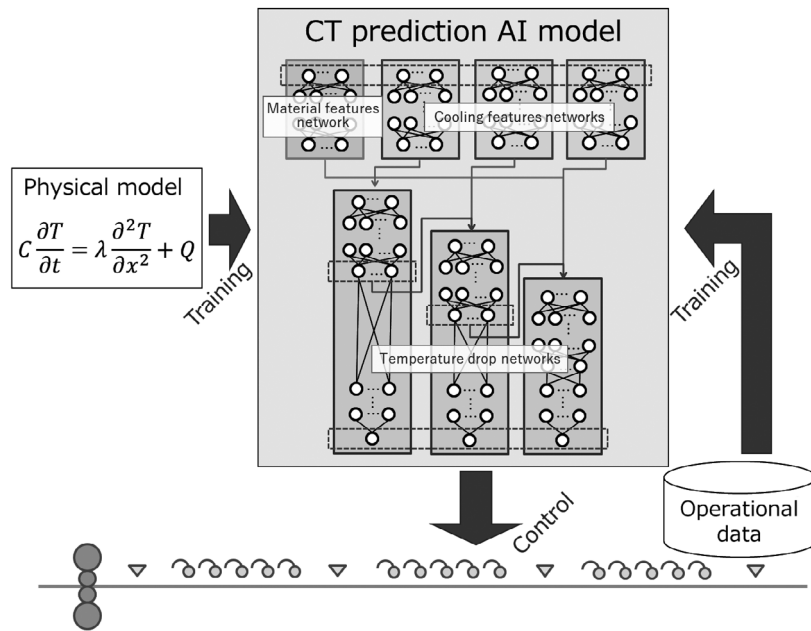


図5 AIを活用した巻取温度制御  
Fig.5 AI-based coiling temperature control

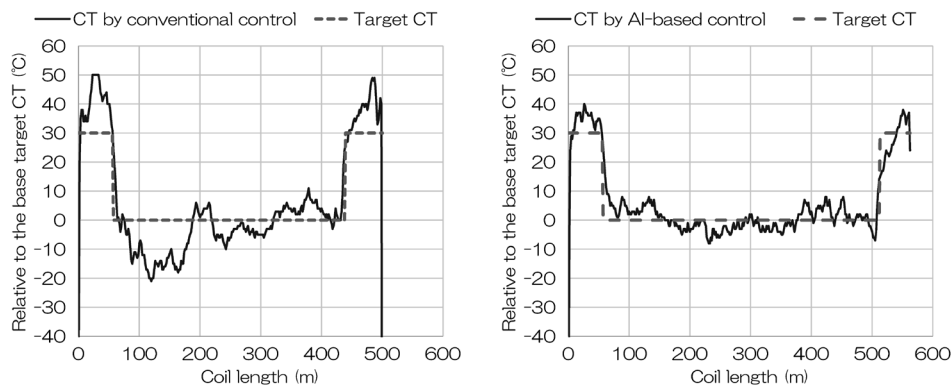


図6 従来制御とAIを活用した制御の比較  
Fig.6 Coiling temperature by using conventional and AI-based control

**むすび**＝本稿では、当社グループの一品一様なモノづくりを支えるプロセス制御技術の概略と具体的な開発事例および将来動向について紹介を行った。紹介した技術はいずれもプロセスの効率化と安定稼働に資する技術であり、お客様への高品質商品の提供を実現しグリーン社会への貢献を果たしている。今後も、変化し続けるお客様ニーズへこたえ続けるとともに来るべきカーボンニュートラル社会におけるものづくり実現にむけて、センシング技術やデータ分析技術など最新の技術を取り込みながら当社グループのプロセス制御技術は進化し続けていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 北村章ほか. システム制御情報学会論文誌, 1989, Vol.2, No.5, P.147-154
- 2) 西野都ほか. システム制御情報学会論文誌, 1996, Vol.9, No.11, P.64
- 3) 友近信行ほか.R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.1, P.64-68
- 4) 経済産業省2012年度版ものづくり白書, 第1部, 第2章, 第3節, (2012), 154
- 5) 加茂和史ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, P.7-11
- 6) 江口徹ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2017. Vol.14, No.1, p19-25
- 7) 逢坂武次ほか. 材料とプロセス. 2022, Vol.35, P.387-390