

技術報告

# 日本製鉄(株)のプロセス制御におけるデジタルツイン

## Digital Twin of Steel-making Process Control in Nippon Steel Corporation

伊藤 雅浩\*  
Masahiro ITO

山本 浩貴  
Hiroki YAMAMOTO

伊勢居 良仁  
Yoshito ISEI

### 抄 録

日本製鉄(株)におけるプロセス制御技術の変遷と直近の開発事例を俯瞰し、デジタルツインとは今日突然出現した概念ではなく、先人技術の延長線上として位置づけられることを再確認すると共に、その普遍的な視点、本質的な位置づけは、人間側のダイナミクスと対話を含めた操業技術・設備技術・プロセス制御技術のデジタル共有にあり、そこに当社のプロセス制御におけるデジタルツインは構築されていると捉えることができることを抄述する。

### Abstract

**Overlooking of the changes in process control technology and the recent developments in Nippon Steel Corporation, we reconfirm that the digital twin is not a concept that has suddenly emerged today, but it is positioned as an extension of the technologies developed by our predecessors, and its universal perspective, or its essential position is digital sharing of operation technology, facility technology, and process control technology including human dynamics and man-machine communication. The digital twin in our process control is built on the universal perspective and the essential position.**

## 1. 緒 言

デジタルツイン (digital twin) という概念は、産業界において、統計的な考え方に基づく時間基準保全 (TBM: Time Based Maintenance) に代わる、実設備個々の稼働データの監視・分析に基づく状態基準保全 (CBM: Condition Based Maintenance) のシステム化にあたり、実設備の挙動をコンピュータ上で“双子”として扱うアルゴリズムとモデルの集合体として提案された<sup>1)</sup>。現時点、必ずしも学術的な定義が明確になされている段階ではないが、近年、様々な分野で提唱され、IoT・計算機・仮想化技術の進展と普及に伴い、一般には、現実世界の情報をリアルタイムかつ網羅的に収集し、現実の事象、すなわち物事の動きを表すデータとその振る舞いを数式化したモデルを組み合わせ、様々な現象や物流を仮想 (デジタル) 世界で再構成することにより現実世界を高解像度で再現する手法として認識されている。

この仮想世界は、デジタル空間またはサイバー空間とも呼ばれ、製造業のプロセス制御においては、サイバー空間

で、リアルタイムデータ (プロセスデータ I/O)、物理モデル、機械学習等の分析・知識化アルゴリズム、制御系、可視化 I/F、計算機、データベースなどの技術要素が構成されたシステムとして定義されることで、サイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical System) と同義と言える。

鉄鋼プロセスとそのプロセス制御におけるデジタルツインの在るべき姿も、現時点、明確に定義されている段階ではないが、本稿において、日本製鉄(株)におけるプロセス制御技術の変遷と直近の開発事例を俯瞰し、デジタルツインとは今日突然出現した概念ではなく、先人技術の延長線上として位置づけられることを再確認すると共に、その普遍的な視点、本質的な位置づけについて抄述する。

## 2. 日本製鉄のプロセス制御技術の変遷とデジタルツインの嚆矢

### 2.1 日本製鉄のシステム・計測制御技術の進歩と概要

日本製鉄のプロセス制御技術は、その基盤をなす当社のシステム・計測制御技術の進歩に立脚する。その進歩の概要を表1に整理する。

\* 設備・保全技術センター システム制御技術部 システム制御技術室 制御開発課 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

表1 日本製鉄におけるシステム・計測制御技術の進歩の概要  
Overview of progress in system and measurement control technology in Nippon Steel

Item	Before 1990s	After 1990s
1) System configuration (H/W, S/W)	Manufacturer-specific/Dedicated/Single-function system	Open/General-purpose/Multifunctional system
2) Measurement/Control target	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individual measurement (Time series chart)</li> <li>Single process</li> <li>SISO control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individual/Distribution measurement (Image information)</li> <li>Serialization of pre- and post-processes</li> <li>MIMO control</li> </ul>
3) Operator's point of view	<ul style="list-style-type: none"> <li>Single process (Single facility)</li> <li>Individual monitoring (Batch monitoring, Time series chart monitoring)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multiple processes (Multiple facilities)</li> <li>Individual/Distribution/Feature value monitoring (Integrated visualization monitoring, Image information monitoring)</li> </ul>
4) Man-Machine interface	Control room (Single function dedicated screen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control room (Integrated large screen)</li> <li>Tablet terminal, Wearable device (2020s and beyond)</li> </ul>
5) Data transmission	Wired	Wired + Wireless (2020s and beyond)
6) Data storage and analysis	Individual (Local)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Company-wide sharing</li> <li>Private cloud (2020s and beyond)</li> </ul>

1980年代後半以降の産業用計算機(H/W, S/W)の拡張性、統合性、互換性、オープン化を踏まえ、1990年代、制御用計算機ソフトウェアの自社開発支援環境(NSCASE, NS SEMI SYSTEM<sup>®\*1</sup>)を確立し、汎用PCでの24時間稼働や秒オーダーの応答性実現とベンダ毎のハードウェアやオペレーティングシステム(OS)差を吸収したオープン系システムの現場活用が進んだ。

2000年代以降、新しい技術の開発・応用期として、

- 1) 従来紙で行われていた細かな指示を全て電子化し必要ときに提示すると共にノウハウ情報として蓄積する“操業ナビゲーション”
- 2) 測定値や声を自動認識して記録するデバイス技術
- 3) 2次元バーコードや画像を用いた個体認識技術
- 4) 大量の数値データを大画面で3次元立体表現する表示技術
- 5) 大規模データから傾向や因果関係を解析しリアルタイムフィードバックを行うデータ駆動型の制御技術
- 6) 超高解像度デジタル画像をリアルタイムで処理する計測技術

が開発されるに伴い、計測技術は点から面／立体へと多次元化し高精度化され、大量の計測データを“見える化”する可視化技術を実現した。制御技術では、個別機能制御から品質造り込み制御へ、更には総合自動運転、最適化制御へと発展すると共に、実時間処理階層(レベル1)に接続した汎用PCでのmsオーダーの高速なプロセス制御を可能とする実時間観測・運転制御システムが開発された<sup>2)</sup>。

2020年代以降、統合化された大画面を活用した計器室での操業オペレーションに加えて、設備点検・保全作業の更なる効率化に向けたタブレット端末などのウェアラブルデバイスの活用やセンサデータの無線伝送化を進め、データストレージ・解析環境の社内クラウド化を実現している<sup>3-5)</sup>。

## 2.2 日本製鉄のプロセス制御におけるデジタルツインの嚆矢

日本製鉄のシステム・計測制御技術の進歩の過程において、PLC(Programmable Logic Controller)と一般産業用途向け汎用シーケンサの能力は、2000年代には演算速度、データ容量の面で遜色無くなり、実質的な差はソフトウェア生産性と保守性となった。当社がIEC 61131-3言語をベースに開発した電気PLCソフトウェア設計製作技術(E-CASE)がこの問題を解決すると共に、モデル部品を充実化し、汎用パーソナルコンピュータ(PC)内に構築するバーチャル試運転機能を開発し、汎用シーケンサを用いた電気制御装置が鉄鋼プラントに次々と適用された。加えて計装制御機能が備わった電気の汎用シーケンサに計装用CASE(Computer Aided Software Engineering)を適用することで、計装コントローラ領域への汎用制御装置の適用も拡大した<sup>2)</sup>。

鉄鋼プラントの電気・計装制御装置に汎用シーケンサと汎用PCで構成した、この“バーチャル試運転システム”<sup>6,7)</sup>に、鉄鋼プロセス制御におけるデジタルツインの嚆矢をみることができる。

バーチャル試運転システム以前は、電気PLC制御ソフトの事前デバッグ用シミュレータを低級言語(ラダー)で構築しており、その生産性／流用性は低く、また動作確認も容易でなかった。バーチャル試運転システムは、定型化可能な機器(電磁弁、モータ、各種センサ)等をモデル部品として登録し、これらを日本製鉄独自の電気ソフト自製化技術を用いて構成／再利用する“プラントシミュレータ”と“仮想プラント画面”で構成した仮想環境で構築される。デバッグソフトの生産性及び品質向上を目的として開発された技術であるが、開発当時の概要図に、実操業(現実世界)とバーチャル試運転システム(仮想世界)を対応並置した概念が示されている(図1)。

加えて、制御機器仕様のオープン化に伴い、汎用PCの

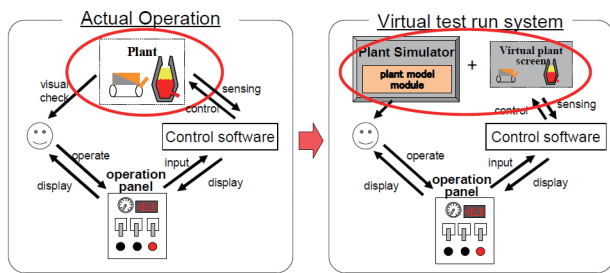


図1 バーチャル試運転システムの概要<sup>6), \*2</sup>  
Outline diagram of virtual test run system<sup>6), \*2</sup>

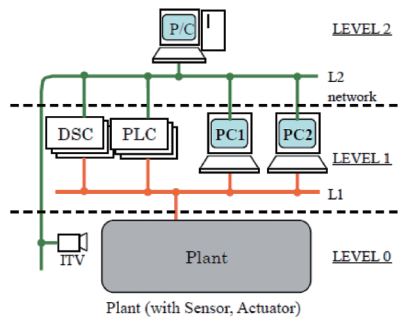


図2 実時間観測・運転制御システムの構成<sup>8, 9)</sup>  
Configuration of real-time observation and operation controlled system<sup>8, 9)</sup>

実時間処理階層(レベル1)活用にあたり、汎用PCの高い数値計算能力及び柔軟なソフトウェア開発環境と産業用PLCの高信頼性と定時刻性を高度に組み合わせる手法を確立し、高度なモデル計算に基づくプロセス観測や観測結果を用いた高度演算による運転制御機能をmsオーダーの実時間で実現する“実時間観測・運転制御システム”が開発された(図2)。

実時間観測・運転制御システムは、サンプリングタイムがmsオーダーの高速なプロセス制御が必須となる圧延工程などにおいて、新制御機能開発、実装上の自由度や機動性の圧倒的な改善を可能とすると共に、未知のプロセス現象の解明と解明された現象への速やかな反映、非熟練者への操業支援や保全情報提供を具現化するシステムであり<sup>8, 9)</sup>、現実世界の鉄鋼プロセス挙動の、仮想世界における再構築の更なる高解像度化を可能とし、制御技術者/システムエンジニアのみならず、操業オペレータ、設備整備者との、より正確な現象共有が可能となった。

## 2.3 鉄鋼プロセス制御の技術的難しさ

前節まで、日本製鉄のプロセス制御技術の変遷を俯瞰し、その中でデジタルツインの嚆矢と位置づけるべき、当社が開発したシステム化技術を示した。

高炉をはじめとする鉄鋼プロセスは、本質的に非線形な分布定数系であり、また内在する物理現象そのものとその制御系及び生産システムの構成はmsオーダーから1~2週間超にわたるマルチタイムスケールを有する時間階層構造

を有しており、ここに制御工学上、生産システム上の技術的難しさがある。

次章にて、日本製鉄が鉄鋼プロセスで開発した2000年代以降の計測・制御・システム技術を、デジタルツインの観点で例示し、鉄鋼プロセスにおけるデジタルツインの在るべき姿に向けた視点や位置づけを再確認する。

## 3. 日本製鉄開発の計測・制御・システム技術事例

### 3.1 高炉

製鉄プロセスは、原料である鉄鉱石と石炭等から溶銑を造り出すプロセスであり、安定生産が最重要視される。高生産性の確保と共に、近年は、劣質化原料への対応や温室効果ガスの排出抑制が求められる。高炉操業は高出銑比、低還元材比操業のもと高微粉炭比、低コークス比を指向し、高炉内での通気性確保と反応効率向上の両立は一段と重要な課題となっており、最新のデバイス技術、画像処理/画像解析技術、計算機技術、画像情報化技術を早期導入する形で、高炉の安定操業を支援する計測・制御・システム技術を開発してきた。

現在、原料の装入状況や羽口からの吹き込み状況等の制御入力、それと対になる炉体の温度等の計測状況と出銑流の温度、スラグ混入率等の制御結果の出力を高精度にリアルタイムに把握できる状況となりつつある。一方、近年の計算機の能力向上により、高炉内部の反応状況を再現できるシミュレータが実現しつつある。実機高炉において、リアルタイムで制御入力と制御出力の結果を満たすように高炉内部の状況を仮想世界に再現できれば、高炉内部の変化が明らかになり、操業の安定化や効率化に効果的である。本方法は物理の原理に基づくため、過去の操業実績にとらわれず、経験のない異常事態においても対応が可能となることが期待される。

以下に、日本製鉄が開発した、高炉へ装入する原料の炉内分布の制御精度を向上させるための計測技術、高炉の羽口内部や出銑流の状態を計測するための画像解析技術、高炉操業データの可視化技術、高炉操業自動化技術の開発事例を示す。

#### 3.1.1 高炉安定操業を支援する計測技術<sup>10)</sup>

##### 1) RFIDを用いた高炉装入原料トラッキング技術

装入物分布の制御は、高炉半径方向の原料の堆積状況を制御することであり、その手段として、層状装入されるコークスと鉄石の層厚制御に加え、炉内半径方向の粒度分布制御や鉄石層内に小塊コークスを混合する混合装入が行われる。

炉内半径方向の粒度分布や混合装入の高精度化のためには、原料のコンベア切り出しからホッパー等の装入経路での原料の偏析状況の把握が必要であり、原料粒子を模擬したRFID(Radio Frequency IDentification)タグをトレーサと

して利用する装入原料トラッキング技術が開発された<sup>11-13)</sup>。

RFIDは、電波を用いた非接触の認証技術が開発され、広く一般に使用されている。タグとリーダとの間の無線通信技術であり、IDコードを付与したタグを様々な物や人に取り付け、リーダによりID検出することでこれらの位置や動きをリアルタイムで把握することが可能となる。実世界の物や人の動きを、デジタルの仮想世界と結びつけて認識できる点が、社会的にも様々な波及効果を与えている技術である。図3にRFIDを用いた高炉装入原料トラッキング技術の概要を示す。

原料を模擬したアクティブ方式のRFIDタグを装入原料に混合し、装入経路の途中及び炉内装入直前でそのIDコードを読み出すことで、搬送経路での偏析挙動を把握し、コンベア上への原料排出順を制御するための情報を得ることができる。使用されるRFIDタグは原料と共に搬送されて衝撃を受けるため、故障しないように耐久性を考慮したケースに収納される。このケースの大きさ、重さを調整することで実際の原料を模擬する。密度偏析が生じやすい鉍石層内への小塊コークス混合を対象として実高炉での性能評価試験が行われ、高炉内に装入される直前に検出アンテナを配置して検出することで、遅れなく正確に通過タイミングを検出できること、原料サンプリングとの相関が良好であること、炉頂バンカ排出シミュレーションとの比較の結果も良好であることが確認されている<sup>13)</sup>。

## 2) 画像解析を用いた羽口内部／出鉄流の状態測定技術

高炉の安定操業を支援するために、従来から、高炉に取り付けられた数多くの熱電対や圧力計などの外周部の計測情報、羽口内部のレースウェイ生成や微粉炭反応の状況、高炉下部の出鉄口から流出する溶鉄の温度や重量の情報は、高炉内部の高温反応場や湯溜り部分の状況を知る情報として注意深く監視されてきた。

近年は、これらの情報を、より正確に、かつ迅速に、連続的に把握するための画像処理／画像解析技術を活用した計測技術の開発が進められた。

羽口内部や出鉄流の状態把握にあたり、一つの高炉に40

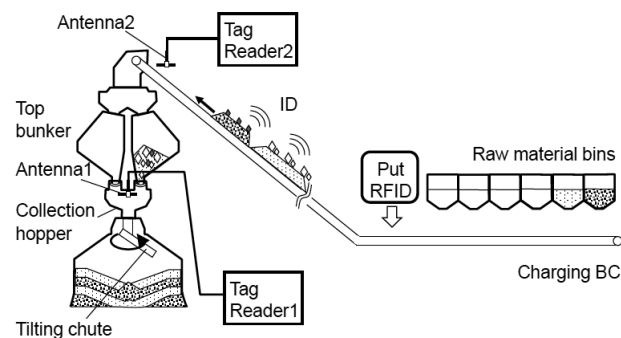


図3 RFIDを用いたバルレス高炉の装入原料トラッキング技術の概要<sup>11)</sup>、\*2

Outline of burden material tracking using RFID for direct charge type<sup>11)</sup>、\*2

本程度ある羽口内部や、出鉄の都度切り替えられ4つ程度ある出鉄口を撮像するカメラ画像を、操業オペレータが目視して操業に活用するには限界がある。

そこで、羽口における計測・炉内監視技術として、カラーCCDカメラの画像から二色温度演算を行い羽口レースウェイ内部の温度分布を測定する技術<sup>14)</sup>、出鉄口から流出する出鉄流の状態監視技術として、画像処理による輝度ヒストグラム解析に基づき溶鉄とスラグの領域を分離し、溶鉄流の温度、スラグ混合度、流速をリアルタイムで計測する技術<sup>15,16)</sup>が開発された。

図4にカラーCCDカメラを用いた高炉羽口レースウェイ温度分布測定結果例を示す。図4は、東日本製鉄所君津第4高炉にて、酸素富化、蒸気吹き込み時及び二重管ランスによる外管空気吹き込み時のレースウェイの温度を測定比較した事例で、蒸気は100kg/h、183kg/hの2水準とし、酸素は10Nm<sup>3</sup>/min添加している。図4上段は元画像で、図4下段がカラーCCDカメラから二色温度演算で推定した温度である。画像の右側斜め下から中央部にかけての暗い部分は微粉炭の映像である。元画像の明度からも判断できるが、温度分布図から蒸気吹き込み時に較べて酸素添加時にレースウェイの温度が高いことが定量的かつ画像情報として確認できる<sup>14)</sup>。

図5に出鉄流の熱画像と輝度ヒストグラムの解析例を示す。出鉄口からの出鉄流を横方向からモノクロカメラで撮像し、像流れが生じない短い露光時間を設定することで図5a)の熱画像が得られる。出鉄流上のやや暗い領域が溶鉄であり、それに比べて明るい領域がスラグである。両者の高温液体は放射率が異なるため輝度差が生じている。

図5b)は出鉄流の熱画像の輝度ヒストグラムの例で、溶鉄部分は明瞭なピークを有する一方、半透明なスラグは熱放射特性が厚みで変化することからブロードな輝度分布になる。スラグ分布の裾野が溶鉄ピークまでと仮定して、図

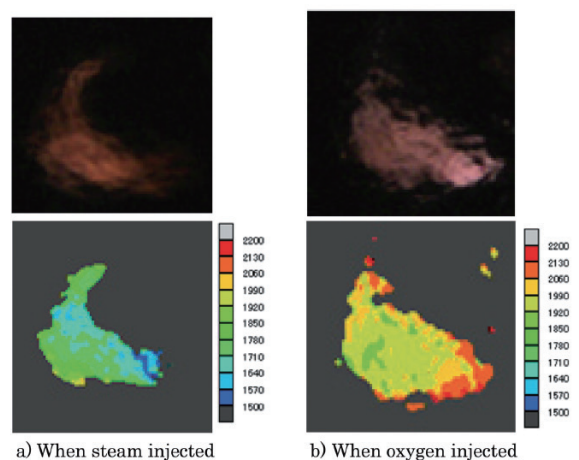
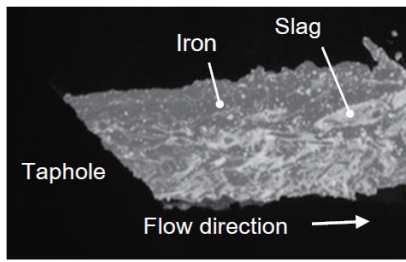
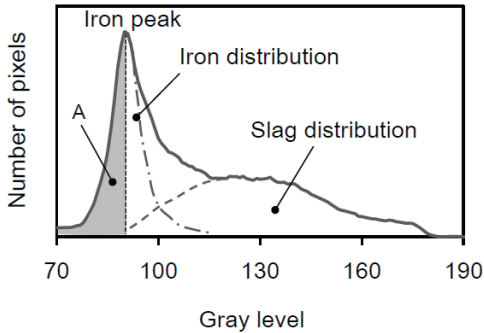


図4 カラーCCDカメラを用いた高炉羽口レースウェイ温度分布測定結果例<sup>14)</sup>、\*2

Example of measurement results and estimation results of temperature using CCD camera<sup>14)</sup>、\*2



a) Example of thermal image of molten iron and slag stream



b) Histogram of the thermal image

図5 出鉄流の熱画像と輝度ヒストグラムの解析例<sup>16)</sup>、\*2

Thermal image of tapped stream and analysis example of brightness histogram<sup>16)</sup>、\*2

中の領域 A の2倍を溶鉄分布の面積とし、スラグ分布の面積をヒストグラム全体から溶鉄面積を差し引いた値とすることで、画像情報からスラグ比率が算出できる。

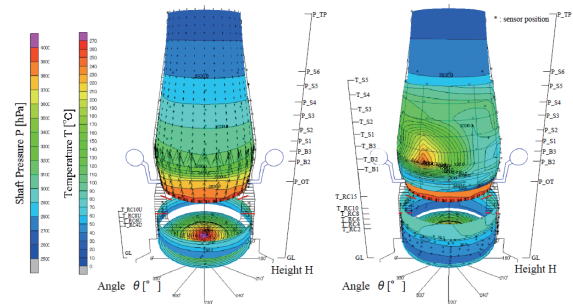
また、乱流のため変形するスラグ模様を追跡できる高速フレームレートで連続画像を得て、スラグ模様の移動距離から出鉄流の速度の計算が可能であり、更に出鉄流は変形する表面波を伴っていることから、複数画像の差分処理により波の部分を抽出した合成画像を得て、上下の波の内径と外径を測定し、流速と出鉄流径から流量を推定する際、内径と外径の間に見かけの出鉄流径を定めることが可能である<sup>16)</sup>。

### 3.1.2 高炉操業データの画像情報化(可視化)技術

高炉には、温度、圧力、ガス組成など各種検出端が多数設置され、長期間の連続計測が可能となっており、計測データから溶鉄温度の急激な低下、炉頂ガス成分の変動、スリップ、ドロップ、棚つりなどの装入物の降下異常、シャフト圧力変動、ガス抜け、吹き抜けなどのガス流れ異常など炉況異常に関する多くの解析や予測技術が研究されてきたが、多数の計測データの時系列チャートを空間的、時間的に総合的に判断して行う非定常挙動の把握や予測は操業オペレータの経験と技量に負うところが大きかった。

そこで、高炉操業データの空間的分布や時間的推移をオンラインで可視化して操業オペレータを支援する画像情報化システムを開発し、現場適用が進められた<sup>17)</sup>、<sup>18)</sup>。

本システムの視点は、高炉を、空間的分布特性を有する分布定数系のプロセスとしてあらためて捉えなおし、客観



a) Shaft pressure, hearth wall (inside) and hearth temperature b) Shaft pressure, stove, hearth wall (outside) and hearth temperature

図6 高炉操業データの3次元画像情報化例(九州製鉄所大分第2高炉)<sup>18)</sup>、\*2

3-Dimensional image of blast furnace process data (#2BF Oita Works, Nippon Steel)<sup>18)</sup>、\*2

的な画像情報によって、その非定常挙動を定量化し、共有化する点にある。

操業監視及び設備管理の目的で、炉体に多数配設される炉体温度計、炉内圧力計、炉頂ガス成分計等の多種の計測器のそれぞれの位置情報を正確に考慮し、各計測器の位置情報と計測値を用いて、計測器が設置されていない領域の計測値の空間的補間計算と等値線の逐次探索により、2次元平面または3次元空間上の炉体に計測データの空間的分布特性を画像情報化して可視化するシステムである。汎用PCの安価高性能化、OpenGL<sup>®</sup>\*1をはじめとする3次元グラフィック処理用のプログラミング・インターフェースや高性能な画像処理チップ(GPU: Graphics Processing Unit)の汎用化といった計算機技術の進展をいち早く鉄鋼プロセスの操業監視システムへ応用し、計測データの収集から仮想格子点の値の更新、等値線の探索、3次元画像の作成と画面更新に至るまでの一連の処理を、時間変化率や空間変化率ベクトルといった2次加工値のリアルタイム計算を含め、計装周期の1秒周期内で安定的に完了させることを実現した(図6)<sup>18)</sup>。

### 3.1.3 高炉操業自動化技術

高炉操業自動化技術は、最新の高度ICT技術を基盤に前項までに例示した計測(可視化)・制御・システム化技術を発展させて開発を進めた制御システムである。

高炉操業の安定化と高効率操業の実現のため、日本製鉄では操業オペレータの属人性や装入原料の性状変化に起因する操業ばらつき低減を目的とした高炉操業自動化技術(BlastBrain<sup>®</sup>\*1)の開発を進めている。高炉操業自動化技術の機能の一つである、予測制御機能では、炉況安定時の生産速度・炉熱調整の自動化を目指して、モデル予測制御により、送風条件(送風量、酸素富化量、微粉炭吹込量等)及び炉頂装入条件(コークス比等)の最適化を実現する。以下に、モデル予測制御に基づく、高炉の自動制御技術の概略について述べる。

本制御技術は、高炉の動特性を表現した多入力多出力系

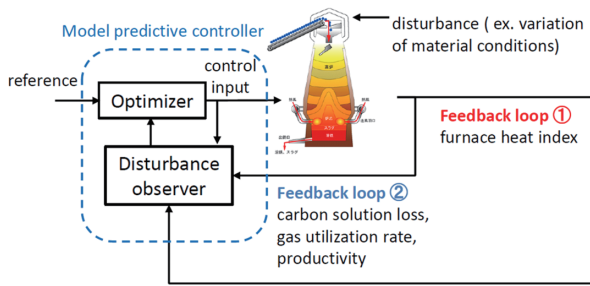


図7 高炉操業自動化技術における制御系の概要  
Outline of the control system in automated blast furnace operation

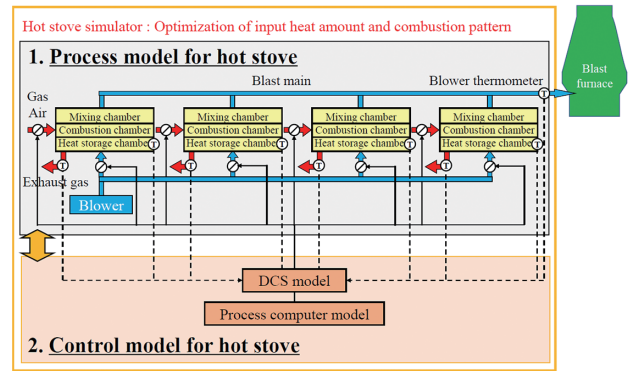
の状態空間モデルに基づき、制御対象である炉熱指標(羽口上熱バランス、溶銑温度等)に先行し変化する別操業指標(カーボンソリューションロス量、ガス利用率等の先行指標)も入力情報に考慮した外乱推定オブザーバを構成したうえで、6~8時間程度先までの炉況の将来予測軌道を最適化するモデル予測制御と組み合わせることで実現した(図7)。このロジックにより、装入原燃料の性状変化等に起因する外乱が生じた際に、先行指標の変化を通して速やかに外乱を検出できるため、制御対象である炉熱指標の変化を先読みした制御操作を実現可能とした。また、モデル予測制御は、等式または不等式制約を含む数理計画法で定式化できるため、高炉操業上で満たすべき様々な制約条件を考慮することが可能であり高炉の制御方式として適した手法である。当制御システムは、北日本製鉄所室蘭第2高炉をはじめとして当社の各所高炉に実機適用中である。

### 3.2 熱風炉・コークス炉

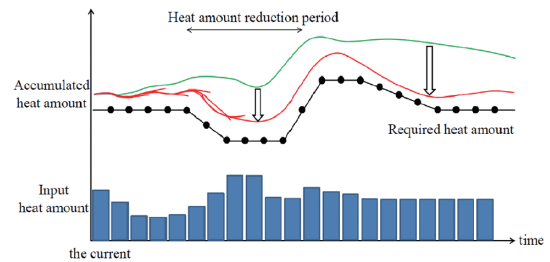
#### 3.2.1 熱風炉最適燃焼制御

熱風炉は、高炉に高温の熱風を大量に供給する設備で、製鉄所において多量のエネルギーを消費するプロセスの一つであるため、高炉への送風要件(送風温度、送風量など)や熱風炉で蓄熱する珪石レンガの温度下限管理値等の設備管理要件を満たしつつ省エネルギー操業が求められる。このとき、熱風炉は、蓄熱室での熱交換において蓄熱(燃焼期)と放熱(送風期)が周期的に繰り返される非定常プロセスとして捉えるべきであり、その時定数は約3日と長く、加えて3基または4基の熱風炉が並行する形で切替運転されるため、プロセス全体の動的挙動の把握が難しいプロセスである。操業オペレータは現在の熱風炉の状態が今後どのように推移するか予想できない故に、どうしても熱を多めに蓄積する傾向にあった。

そこで、熱風炉の動的挙動を定量的に数値計算する熱風炉プロセスシミュレータ(円筒2次元非定常分布定数伝熱モデル)を開発し、プロコンと計装(DCS: Distributed Control System)の実装制御機能を具備して熱風炉制御シミュレータを構築し、熱風炉制御シミュレータに最適化アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)を構成することで、燃



a) Outline of process model and control model for hot stove



b) Example of optimization of input heat amount and combustion pattern

図8 熱風炉最適燃焼制御の概要<sup>22)</sup>  
Outline of optimal combustion control for hot stove<sup>22)</sup>

焼ガス温度や燃焼ガス流量等の燃焼制御に関わる制御目標値のパターン設定を最適化し、熱風炉におけるエネルギー消費の最小化、即ち熱効率の最大化を図ると共に、最適化アルゴリズムが導出する制御目標値の最適変化パターン(目標軌道)を採用したときに熱風炉の状態が今後どのように推移するかを熱風炉制御シミュレータで高精度に逐次予測評価していく最適化モデル予測制御を実現した<sup>19-21)</sup>(図8<sup>22)</sup>。

#### 3.2.2 コークス炉最適燃焼制御

コークス炉は、高炉に装入する還元材かつ燃料であるコークスを生産する設備で、製鉄所において多量のエネルギーを消費するプロセスの一つである。燃料ガスを燃焼させる燃焼室と石炭を装入する炭化室を交互に複数配置して一つの炉団を構成し、燃焼室の燃料ガス燃焼熱で隣接する炭化室内の石炭を乾留してコークスを生産する。乾留完了(=火落ち)後の急激な温度低下を防ぐ目的で、ある一定間隔のグループでコークスが押し出される。設備構造と炭化室内の物理現象により、その時定数は長く、操業アクション基準の変更に伴うダイナミクスは数日を有するプロセスであるため、操業上、制御工学上の難しさがある。加えて、近年、高炉高出銑に伴うコークス需要の増加から調湿炭が使用され、また良質石炭の入手が困難となったことから、コークス乾留ばらつきによる生産量低下や燃料原単位の悪化が顕在化している。

コークス炉操業における従来の火落ち判定・炉温制御は、調湿炭の使用や石炭性状の悪化に伴い、その判定精度が低

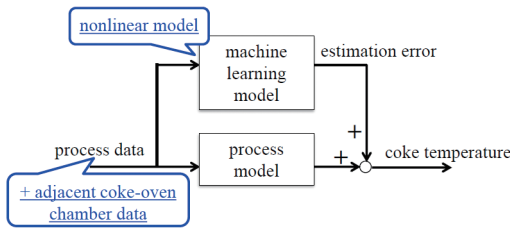


図9 コークス炉最適燃焼制御におけるグレイボックスモデルの概要<sup>23)</sup>  
Outline of gray box model for optimal combustion control for coke oven<sup>23)</sup>

下傾向にあり、操業オペレータが炭化室の乾留状態を推定し、投入熱量の調整操作を行う必要が生じている。このとき、押詰まりリスクとなる未乾留の防止を優先するが故に、過剰な熱量を投入して燃料原単位を悪化させたり、予定より押出時刻を遅らせて生産性を低下させてしまう傾向にある。

そこで、炭化室の乾留状態を直接的に表す押出時コークス温度を制御量とする燃焼制御に基づくオペレータガイダンスシステムが開発された。本燃焼制御は、コークス炉操業データから押出時コークス温度を高精度に予測するコークスプロセスモデルと本モデルを用いたリアルタイムシミュレーションにより最適な操作量を導くアルゴリズムで構成される。

コークスプロセスモデルは、1) 炭化室内伝熱現象の影響因子を考慮した線形プロセスモデルと2) 機械学習により熱物性値や炉温動作点変化に起因する非線形性や隣接窯からの熱影響等の外乱と考えられる誤差要素を推定して補正する非線形予測モデルで構成するグレイボックスモデルを採用した(図9)。グレイボックスモデルにより、マクロな傾向予測を物理モデルが担保するため、コークス乾留の動的挙動が把握しやすいプロセスモデルの長所を維持しつつ、所望の予測精度が可能となっている。

コークス炉最適燃焼制御により、炭化室内のコークス乾留状態の正確な把握が可能となると共に、手動介入が必要となる場合でも適切な投入熱量の設定が可能となり、コークス乾留ばらつきを抑制し、生産安定化及び燃料原単位の向上による生産コスト削減、CO<sub>2</sub>排出量削減を実現した<sup>23)</sup>。

### 3.3 熱間圧延

熱間圧延プロセスは、製鋼で製造されたスラブを要求された寸法に圧延するプロセスである。近年、温室効果ガス排出抑制の要求のもと、自動車の重量を軽量化することで燃費向上が可能となる薄手、高強度の鋼板の適用比率が増加している。このような薄手、高強度鋼板を熱間圧延する際に、圧延荷重の増加に伴い圧延ロールの変形が大きくなり、蛇行や曲がりによる通板トラブルが増加するため、通板安定性の向上が大きな課題となった。また、要求された

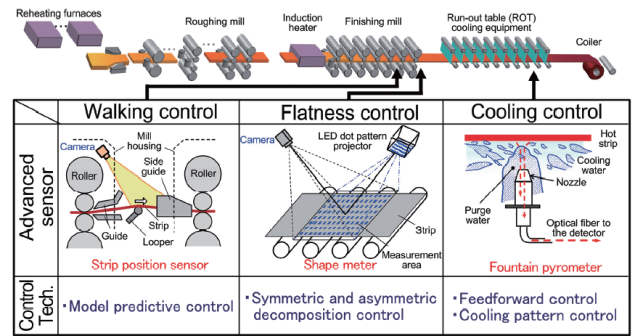


図10 計測技術(先進センサ)と制御技術の一体開発(熱間圧延ミルでの開発事例)<sup>2)</sup>  
Development of advanced sensors and control technologies<sup>2)</sup>

機械的特性を造り込むためには、設計された温度履歴に従い鋼板を冷却する必要があり、冷却時の温度制御精度の向上が課題となった。

このような課題に対応するために、熱間圧延プロセスでは、2000年以降、日本製鉄のプロセス制御技術として、計測と制御の一体開発、プロセスモデル高度化、アドバンスド制御応用、オンライン最適化、データモデリング技術の観点で開発が活発に進められた。計測と制御の一体開発の一例として、先進センサを活用した制御開発、冷却帯内温度計を用いた冷却履歴制御を示す(図10)。

#### 3.3.1 先進センサを活用した制御開発

通板安定性を向上させるためには、圧延される鋼材の挙動をリアルタイムで計測し、その測定結果により圧延機を制御することが有効である。薄板熱間圧延の仕上圧延機において、圧延スタンド間の鋼板尾端部の蛇行量をリアルタイムで測定するスタンド間蛇行計を開発し、測定されたこのスタンド間中央部の蛇行量から、制御対象である圧延機直下の蛇行量を予測、蛇行量が少なくなるように制御するモデル予測制御を開発した。これにより、鋼板最尾端で発生する急激な蛇行を抑制して、蛇行による通板トラブルを減少させた<sup>24-26)</sup>。

要求の機械特性を確保するためには、ランアウトテーブルで熱間圧延後の鋼板を冷却する際に、指定した温度履歴に従い鋼板温度を制御する冷却温度履歴制御と、幅方向及び圧延方向の冷却温度むらを抑制する均一冷却が必要である。

冷却温度履歴制御の高精度化を目的として、冷却帯内の水環境下でリアルタイムに鋼板温度を測定可能な水パージ方式のファウンテン・パイロメータが開発され、冷却帯内部の測温結果に基づき、冷却帯の水量を操作する制御により温度履歴精度を向上させた<sup>27-29)</sup>。

一方、冷却温度むらの抑制には、大きな要因の一つである冷却前の平坦形状を改善することが効果的である。そのため、薄手材において板波が静止したように観察される板波定在時にも精度悪化がなく、安定測定が可能なLEDドッ

トパターン投影方式平坦度計が開発された。平坦度測定値を圧延機のベンダとレベリングの操作に適用する自動平坦度制御により鋼板をフラットに制御し、形状不良起因の冷却温度むら抑制に効果を発揮している<sup>30,31)</sup>。

熱間圧延で開発実用化されたこれらの技術は“過酷な環境に適応した計測・制御による高強度鋼板の熱間圧延技術”として第68回(令和3年度)大河内記念生産賞を受賞した。

### 3.3.2 冷却履歴制御による機械特性の造り込み

冷却帯内温度計を用いた冷却履歴制御では、冷却帯全長にわたる冷却中の鋼板温度を正確に測定することに成功しており、得られた情報を用いることで、仮想空間上で鋼板内部の金属組織の生成状況を計算することが可能になると期待できる。このような取り組みは、より高性能な新しい鋼板を創造、製造する際に有効と考えられる。

従来型の放射温度計は、熱放射光を吸収・散乱させる水を排除して測定光路を確保するが、本温度計は、噴水状の水パージを行って、その水を、熱放射を透過させる安定した導光路として活用する。放射光のうち、水の分光透過率が高い波長を検出するよう構成し、鋼板冷却中は、飛散する大量の冷却水滴が熱放射を吸収・散乱させるが、噴水状水パージを、鋼板裏面から離れて光量が確保できる有効視野角度を満たすようにノズルから噴流させることで、吸収・散乱の影響を抑制して安定測定を可能とした。これにより、従来、ランアウトテーブルの途中の1,2か所の非水冷ゾーンに設置した温度計情報しか用いることができなかったが、冷却帯内に設置された複数の温度計情報が利用可能となった。

図11に示すように、冷却履歴制御は、鋼板の金属組織を積極的に造り込むための重要なポイントである急冷停止温度、中間空冷時間、巻取温度を高精度に制御する技術である。急冷停止温度制御では、圧延速度に応じて移動する急冷停止位置に追従するように、冷却帯内にある複数の温度計から適切な冷却帯内温度計を選択してフィードバック制御する方法が開発された。また、巻取温度制御では、熱

流束が不安定になる温度領域まで鋼板を冷却しすぎないように、冷却帯内温度計の測定値を使って温度履歴を多段階に軌道修正するフィードフォワード制御が開発された。

冷却帯内温度計を用いた冷却履歴制御の実用化により、鋼板の温度履歴が初めて正確に制御可能になったと共に、高強度鋼板の巻取温度適中率が改善し、通常材と同等の精度に向上した<sup>26-29,32,33)</sup>。

### 3.4 2020年代以降のプロセス制御

日本製鉄は、デジタルトランスフォーメーション(DX: Digital transformation)戦略として、“データとデジタル技術を駆使して事業競争力を強化”するため、業務プロセスと生産プロセス、それぞれに改革を行うこと、及びデータを価値に変える“つなげる力”と“あやつる力”のもと、デジタル技術が創出する“ロケーションフリー”、“データドリブン”、“エンパワーメント”という3つの価値・効果により意思決定の迅速化と課題解決力の向上の実現を図る。

これら3つの価値・効果は連携して本戦略を具体化するが、このうち“データドリブン”は、データを基軸とする新たな業務・生産プロセスの構築を指し、生産プロセスにおいては、デジタル技術を活用し、暗黙知を含む当社技術の形式知化・標準化拡大、自動化・予兆検知等を活用した労働生産性の向上、生産技術の高度化による生産安定化・品質の更なる向上、海外拠点の遠隔操業マネジメント基盤等を推進する<sup>34)</sup>。

生産プロセスとしてのプロセス制御も、本戦略の中に位置づけられ、最新の計算機技術(H/W, S/W)、シミュレーション技術、機械学習等の分析・知識化技術、制御技術、システム化技術を駆使したサイバーフィジカルシステム(CPS)をデジタルツインとして構築することにより、実設備の状態や動的挙動を、制御技術者/システムエンジニアのみならず、操業オペレータ、設備整備者との、デジタル空間であるからこそその高解像度共有が可能となっている。

また、設備点検・保全作業の更なる効率化を図る実設備設置センサ計測値の無線伝送・監視技術(NS-IoT)、データストレージ・解析環境の社内クラウド化(NS-DIG<sup>®</sup>\*1, NS-Lib, AIRON-EDGE<sup>®</sup>\*1)が実現され<sup>3,5)</sup>、社内の技術者がいつでもどこからでも実設備の状態を把握/監視/分析できる環境が構築されている。

## 4. 結 言

鉄鋼プロセス制御におけるデジタルツインの在るべき姿は、現時点、必ずしも明確に定義/認識されている段階ではないが、サイバーフィジカルシステム(CPS)として、単にデジタル空間で、リアルタイムデータ(プロセスデータI/O)、物理モデル、機械学習等の分析・知識化アルゴリズム、制御系、可視化I/F、計算機、データベースなどを連携しただけでは、(ツールの連携に留まる限り)製造現場に実効

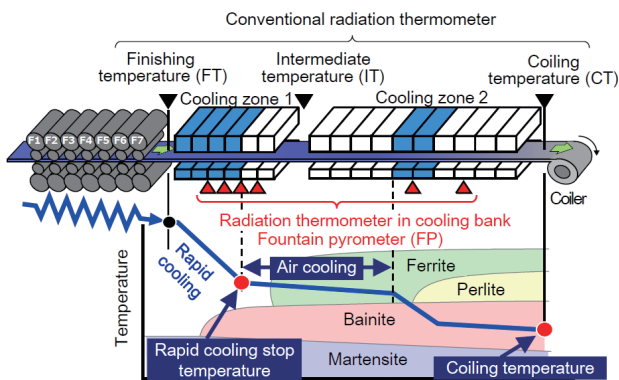


図11 冷却履歴制御の概要<sup>26)</sup>, \*2  
Outline of cooling history control<sup>26)</sup>, \*2



## Digital sharing enabled by Digital Twin of Steel-making Process Control

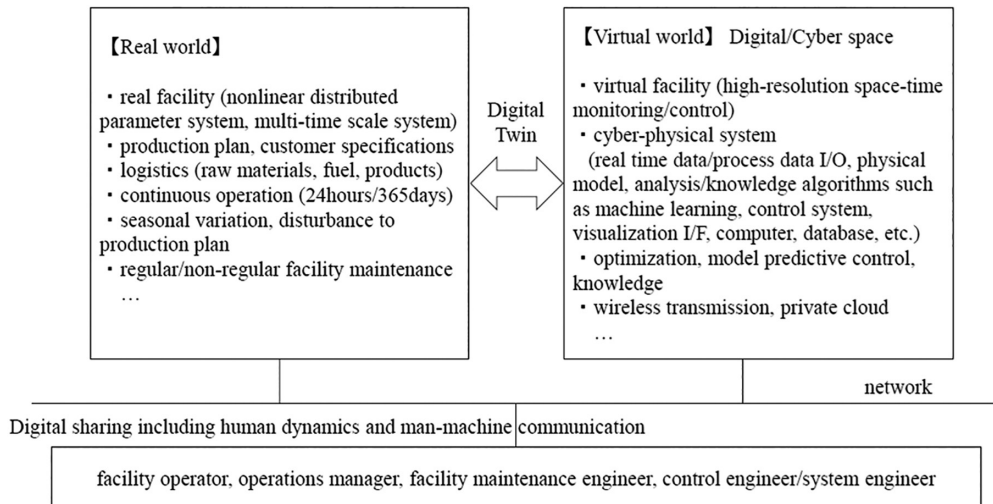


図 12 日本製鉄のプロセス制御におけるデジタルツイン  
Digital twin of steel-making process control in Nippon Steel

的かつ有用な技術構成や生産システムの必要要件とはならないと考える。

24時間/365日の連続操業を前提とする製鉄所において、季節変動や予期せぬ生産計画外乱、設備の定期/非定期保守などの不連続過程を念頭に、生産計画と客先仕様を厳守すべく、時々刻々の様々な状況下において、設備操作者(操業オペレータ)は的確に設備を操作し、設備整備者は適切に設備を保全する必要がある。

そこでは、自動制御、最適化、可用性、リアルタイム性という視点に加えて、設備操作者や設備整備者(そして製鉄所を支える全社員)、すなわち人間とデジタルツインが対話的に相互に作用しながら製造現場を維持/改善していくことが大切である。

高炉、熱風炉・コークス炉、熱間圧延といった鉄鋼プロセスは、本質的に非線形な分布定数系であり、内在する物理現象のダイナミクスとその制御系構成はmsオーダーから1~2週間超にわたるマルチタイムスケールを有する。そして、これらの設備を運転操作する人間側のダイナミクスとして8時間毎の番交代があり、連続操業の中で実設備の状況が正しく共有されている必要がある。デジタルツインの具体化により、人間側のダイナミクスを超える長いダイナミクスを有するが故にこれまで難しいとされてきた鉄鋼プロセス制御において、実際の操業(未来)を予測した制御を実現すると共に、パラランに留まらず実操業の中で最適な制御出力やシーケンスの選択を可能とする人間の相談役としての役割を持たせることができる。

すなわち、鉄鋼プロセスにおけるデジタルツインの在るべき姿の一つとして、人間側のダイナミクスや対話を含めた形態のデジタル空間で、実設備の状況が、操業技術・設備技術・プロセス制御技術の相互で正しく効率的に共有/

蓄積(=知識化)されると共に、その共有/蓄積に基づく形で技術発展するシステムが必要要件と考える。

本稿にて、日本製鉄におけるプロセス制御技術の変遷と直近の開発事例を俯瞰し、デジタルツインとは今日突然出現した概念ではなく、先人技術の延長線上として位置づけられることを再確認した。そして、その普遍的な視点、本質的な位置づけは、人間側のダイナミクスと対話を含めた操業技術・設備技術・プロセス制御技術のデジタル共有にあり、そこに当社のプロセス制御におけるデジタルツインは構築されていると捉えることができる(図12)。デジタルツインという言葉は、時代と共に廃れていく可能性はあるが、別の言葉に置き換わったとしても、その本質的な位置づけは不変である。

## 参照文献

- 1) General Electric Company: GE REPORT JAPAN. 2015-10-06
- 2) 吉沢一郎 ほか: 新日鉄住金技報. (411), 2 (2018)
- 3) 日本製鉄: プレスリリース, 2019-4-25
- 4) 日本製鉄: プレスリリース, 2022-4-27
- 5) 日本製鉄: プレスリリース, 2022-5-30
- 6) 堤泰伸: 電気学会金属産業研究会, MID-07-21 (2007)
- 7) 住田伸夫 ほか: 新日鉄住金技報. (411), 16 (2018)
- 8) 山中祥史: 日本鉄鋼協会第147回制御技術部会大会, 制技147-1-2, 君津, 2012-6, 私信
- 9) 空尾謙嗣 ほか: 新日鉄住金技報. (411), 49 (2018)
- 10) 伊勢居良仁: 鉄と鋼. 106 (9), 591 (2020)
- 11) 伊勢居良仁 ほか: 鉄と鋼. 106 (1), 12 (2020)
- 12) 中野薫 ほか: 材料とプロセス. 23, 1002 (2010)
- 13) 夏井琢哉 ほか: 材料とプロセス. 23, 1003 (2010)
- 14) 松崎眞六 ほか: 鉄と鋼. 99 (5), 338 (2013)

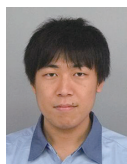
- 15) 大本展久 ほか：材料とプロセス. 26, 743 (2013)  
 16) 杉浦雅人 ほか：材料とプロセス. 29, 235 (2016)  
 17) 伊藤雅浩 ほか：新日鉄技報. (379), 33 (2003)  
 18) 伊藤雅浩 ほか：計測自動制御学会産業論文集. 8 (10), 82 (2009)  
 19) 伊藤雅浩 ほか：材料とプロセス. 20, 303 (2007)  
 20) 高橋知子 ほか：電気学会ものづくり技術研究会, MZK-13-009, 函館, 2013-10  
 21) 藤井章 ほか：新日鉄住金技報. (411), 90 (2018)  
 22) 吉沢一郎：ISIJ-Web 講演会, 鉄鋼技術最前線シリーズ (第3回), 2023-4-19  
 23) 榊原稔二：日本鉄鋼協会第166回制御技術部会大会, 制技166-制-1, 千葉, 2022-6, 私信  
 24) 鷺北芳郎 ほか：鉄と鋼. 95 (1), 43 (2009)  
 25) 鷺北芳郎 ほか：新日鉄住金技報. (401), 11 (2015)  
 26) 伊勢居良仁 ほか：ふえらむ. 28 (4), 227 (2023)  
 27) 本田達朗 ほか：鉄と鋼. 96 (10), 592 (2010)  
 28) 中川繁政 ほか：計測自動制御学会論文集. 46 (8), 463 (2010)  
 29) 本田達朗 ほか：新日鉄住金技報. (401), 17 (2015)  
 30) 太田武 ほか：材料とプロセス. 25, 352 (2012)  
 31) 伊勢居良仁 ほか：鉄と鋼. 105 (1), 20 (2019)  
 32) 中川繁政 ほか：計測自動制御学会論文集. 45 (4), 233 (2009)  
 33) 橘久好 ほか：材料とプロセス. 25, 1026 (2012)  
 34) 日本製鉄：プレスリリース, 2021-3-5

\*1 OpenGL は, Silicon Graphics Inc. の登録商標, NS SEMI SYSTEM, NS-DIG, AIRON-EDGE, BlastBrain は, 日本製鉄(株)の登録商標

\*2 図1は一般社団法人電気学会, 図3, 図4, 図5, 図11は一般社団法人日本鉄鋼協会, 図6は公益社団法人計測自動制御学会に著作権があり, 転載許可許諾のもと本稿に転載



伊藤雅浩 Masahiro ITO  
 設備・保全技術センター  
 システム制御技術部 システム制御技術室  
 制御開発課 主幹  
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



山本浩貴 Hiroki YAMAMOTO  
 プロセス研究所 計測・制御研究部  
 制御・電磁ソリューション研究室 研究第一課  
 主任研究員



伊勢居良仁 Yoshito ISEI  
 プロセス研究所 計測・制御研究部  
 プロセス加工計測研究室 研究第二課長