

福山第 3 焼結機建設と DS 技術の適用

Construction of Fukuyama No.3 Sinter Plant and Application of Data Science Technology

竹内 直幸	TAKEUCHI Naoyuki	JFE スチール	西日本製鉄所 (福山地区)	製鉄部	焼結工場長 (課長)
松下 昌史	MATSUSHITA Masafumi	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 (副課長)・博士 (理学)
祇園 弘貴	GION Hiroki	JFE スチール	西日本製鉄所 (福山地区)	制御部	制御技術室
宮沢 徹	MIYAZAWA Toru	JFE スチール	西日本製鉄所 (福山地区)	製鉄部	焼結工場 副工場長 (副課長)
橋本 健	HASHIMOTO Ken	JFE スチール	西日本製鉄所 (京浜地区)	製鉄部	製鉄技術室長 (部長)
深川 謙一	FUKAGAWA Kenichi	JFE スチール	カーボンリサイクル開発部	主任部員 (部長)	

要旨

西日本製鉄所 (福山地区) では、2019 年 12 月末に最新鋭の焼結機と排ガス処理設備、自社開発の DS (Data Science) 技術を導入した福山第 3 焼結機を稼働させた。現在まで、優れた環境成績と安定操業を継続しており、高炉操業の焼結鉄比率は、従来の 60% から 80% にまで向上し、溶鉄製造コストを大きく低減できた。

Abstract:

In December 2019, No. 3 Sinter Plant started operation by using state-of-the-art sinter machine, exhausted gas treatment system and DS (Data Science) technology at JFE Steel West Japan Works (Fukuyama District). Until now, continued excellent environmental results were obtained and stable operation have been conducted. The sinter ratio in the blast furnace operation has been increased to 80% from 60%, leading to the large reduction in the production cost of hot metal.

1. はじめに

これまで福山地区の製鉄プロセスは、高炉 3 基に対して焼結機 2 基の生産体制であり、高炉主原料の約 20% を外部購入のペレットに依存していた。このような条件下、近年の鉄鉱石価格、石炭価格の高騰を背景として、溶鉄コスト低減の観点から、ペレットより安価で品質の安定した焼結鉄へのニーズが高まった。そこで、西日本製鉄所 (福山地区) では、焼結鉄比率の向上を目的とし、2017 年 4 月から 2019 年 12 月にかけて、福山第 3 焼結機を建設した¹⁾。

1999 年のダイオキシン (DXN) 類対策特別措置法の制定により、新設焼結機に課せられる環境基準は厳格化されており、国内での焼結機建設では、特に、環境対策設備の仕様選定が最も重要である。第 3 焼結機には、Primetals Technologies 社製の最新鋭の焼結機と排ガス処理設備、自社開発の DS (Data Science) 技術を導入し、焼結鉄製造時の環境負荷低減と安定操業を指向した。写真 1 に 2019 年 12 月末の稼働状況を示す。第 3 焼結機は、これらの設備・技術を用い、現在まで優れた環境成績と安定操業を継続している。また、高炉操業の焼結鉄比率は、従来の 60% から 80% にまで向上し、溶鉄製造コストを大きく低減できた。本



(a) Appearance of No.3 SP building



(b) Ignition of sintering bed surface

写真 1 2019 年 12 月の稼働状況

Photo 1 Appearance of No.3 SP starting operation in December 2019

2021 年 7 月 14 日受付

論文では、JFE スチールにおける 43 年ぶりの新設である福山第3 焼結機建設および安定操業に大きく貢献する DS 技術の適用について報告する。

2. 建設概要

2.1 生産能力の設定

図 1 に福山地区の製鉄プロセスにおける原料処理フローを示す。福山地区の焼結機は、従来、第 4 焼結機 (1971 年稼働, 焼成面積 454 m²) と第 5 焼結機 (1973 年稼働, 焼成面積 605 m²) の比較的大型な焼結機 2 基体制であった。一方、高炉は、第 3 高炉 (2011 年火入れ, 内容積 4 300 m³)、第 4 高炉 (2006 年火入れ, 内容積 5 000 m³)、第 5 高炉 (2005 年火入れ, 内容積 5 500 m³) の大型高炉 3 基体制で操業している。そのため、焼結鉄の需要と供給のバランスは、高炉の使用量に対し焼結の生産能力が常に不足している状況であり、焼結鉄比率は、例年、60% 程度にとどまっていた。過去 10 年間の実績では、年毎の出鉄量により異なるが、150~300 万 t/年の外部購入ペレットを使用しており、溶鉄コスト悪化の大きな要因となっていた。そこで、溶鉄コスト低減のため高炉の焼結鉄比率を向上させ、併せて経済状況により変動する出鉄量に柔軟に対応できるよう、第 3 焼結機の塊焼結鉄の生産能力 300~400 万 t/年と想定し、焼成面積を 387 m² とした。

2.2 設備構成

図 2 に第 3 焼結機の設備概要を示す。本建設は、前述の DXN 類対策特別措置法の制定以降国内初となる、現行法の環境基準に対応したフルプラント建設である。そのため、煙突排ガス中の DXN は、従来の最大値 1.0 ng-TEQ/Nm³ ではなく、0.1 ng-TEQ/Nm³ 以下の操業が課せられる。これまで、国内のゴミ焼却施設の DXN 対策では^{2,3)}、デノボ反応

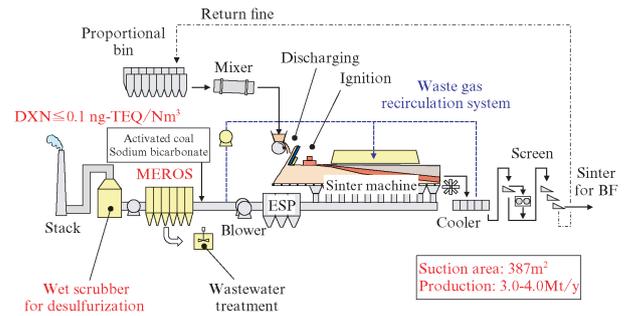


図 2 第 3 焼結機の設備概要
Fig. 2 Outline of No.3 SP equipment

抑制のための排ガス急速冷却 (ボイラー等の設置) や、排ガス中ダストに付着して排出される DXN 特性に着目した徹底した除塵が行われてきた。しかし、焼結操業の排ガス温度は、ゴミ焼却工程のように 800~900℃ と高温ではなく、100~120℃ 程度と低温で、最も高い焼結機排鉄部でも 300~400℃ 程度であるため、ゴミ焼却設備のような排ガス急速冷却技術は適さない。そこで、第 3 焼結機では、徹底した除塵による DXN 低減を指向し、Primetals Technologies 社製のバグフィルター式排ガス設備 MEROS (Maximized Emission Reduction Of Sintering) を採用した^{4,5)}。MEROS による排ガス処理では、バグフィルターによる除塵のみならず、脱 DXN 材 (活性炭) と脱硫材 (重曹) も併せて吹き込むことで、除塵、脱 DXN、脱硫を同時に行う。さらに第 3 焼結機では、より徹底した脱硫のため、水酸化マグネシウム方式の脱硫設備も導入し、MEROS との 2 段階脱硫を行っている。また、同じく Primetals Technologies 社製の排ガス循環設備も導入し⁴⁾、焼結排ガス中の顕熱と CO ガスの有効活用、排ガス量抑制による排ガス処理コスト低減を積極的に行うなど、焼結鉄製造時の環境負荷低減に特化した設備構成とした。

2.3 建設スケジュール

図 3 に第 3 焼結機の建設スケジュールを示す。本機は、1982 年まで稼働していた旧第 3 焼結機跡地に建設した。現地工事では、まず、残存していた旧第 3 焼結機設備 (配合槽, ドラムミキサー, 焼結建屋, スクリーン建屋, 電気集塵機, 主排風機など) の撤去から着手し、2017 年 11 月より基礎工事を開始した。続いて、2018 年 6 月からは、焼結建屋, 煙突, 配合槽, 各種コンベア, スクリーン, 焼結機, 排ガス処理設備などの主要設備を順次, 並行して設置し、2019 年 11 月末には、主要な機械・制御工事を完工した。

2019 年 11 月からは、各設備の単独試運転を行い、続いて 2019 年 12 月の原料ヤードのベルトコンベアから焼結スクリーンまでの一連の連動試運転を経て、2019 年 12 月 28 日に初排鉄 (焼結鉄の製造開始) に至った。また、稼働直後に各種環境測定 (風量, SOX, NOX, 煤塵, DXN など) を

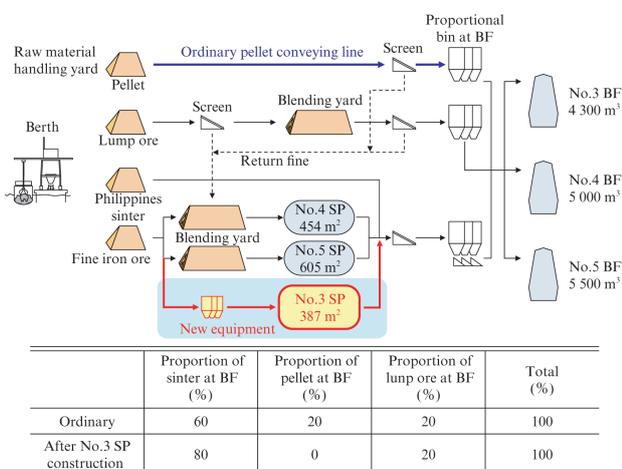


図 1 福山地区の製鉄プロセスにおける原料処理フロー
Fig. 1 Raw material handling flow of iron making process at Fukuyama works

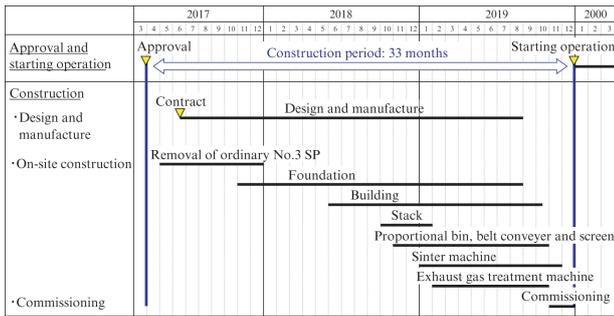


図3 第3 焼結機建設のスケジュール

Fig. 3 Schedule of Fukuyama No.3 SP construction

行い、続いて、2020年1月2日からは、オペレーターの3交替勤務を開始し、無事、24h連続操業に移行できた。

3. DS 技術の導入

3.1 センシング強化

第3 焼結機には、最新鋭の焼結機として多様な計測機器を導入し、センシングの強化を図っている。焼結プロセスで起こる諸現象を高い精度で認識する技術は、CPS (Cyber Physical System) の概念を具現化していくための必要不可欠な要素であり、今後の活用が期待されている。本章では、DS 技術の1つとして導入された設備異常予兆診断システム J-dscom[®] (JFE detecting anomaly signs and color mapping system) に関して説明する⁶⁾。設備や操業の異常は、生産性や品質に大きな影響を与えるため、トラブル抑止は重要な課題である。第3 焼結機では、DCS (Distributed Control System) を経由し収集する各種プロセス量や操作量に加え、設備診断を主目的とする CMS (Condition Monitoring System) を導入することにより多数の重要設備の振動や温度データを計測できるようにした。これら多くのデータを一元管理し、CBM (Condition Based Maintenance) に基づく設備異常診断を実現するため、J-dscom を導入した。ここで、第3 焼結機 J-dscom で扱うデータを表1に示す。

表1 J-dscom[®]で収集するデータ

Table 1 Summary of data set acquired in J-dscomTM

Source	Type	Number
DCS	Process variable	1 177
	Setting value	56
	Manipulated variable	55
	Others	76
PLC	Logic signal	541
CMS	Accelerometer	267
	Thermometer	66
	Level gauge	30

3.2 設備異常予兆診断システム J-dscom[®]

第3 焼結機に導入した J-dscom の特徴は、DCS/PLC (Programmable Logic Controllers) 系と CMS 系の両者からデータを収集する点である。図4にシステム構成の概略を示す。操業データや制御データは、DCS および PLC に接続するゲートウェイサーバー (GW: Gate Way) から、毎秒約 2 000 点のレートで収集する。一方、設備診断のために設置した約 400 点の振動、温度、油面レベルセンサーなどのデータは、CMS を経由して 15 分周期で収集される。収集経路およびサンプリング周期の異なる 2 種類のデータを同期して扱うためには、各システムのクロック時間の補正が必須となる。そこで、NTP (Network Time Protocol) を用いた時刻の同期化を GW, J-dscom, CMS の3者間で常時行うことで、システム全体の同期を保つこととした。これにより、CMS で収集する設備診断データについて、操業状態や設備設定値に応じてフィルタリングすることが可能となり、結果として、診断の S/N 比 (Signal-to-Noise ratio) が向上している。J-dscom のハードウェア構成は、3 台の計算機環境と 1 台のファイルストレージとした。また、モデル構築などの計算コストの高い処理をオンライン環境から分離したことで、安定したシステムの応答を確保している。履歴データの保存先としてのファイルストレージについても、将来的な容量の拡張や分散管理などの仕様変更を考慮し、独立した環境として構築した。

続いて、図5に第3 焼結機における J-dscom のソフトウェア構成を示す。J-dscom を焼結プロセスへ適用するにあたり、特にデータ加工 (前処理) 工程の充実に留意した。焼結プロセスの過酷な測定環境でのセンサーデータは、ある時点では正常値を示したとしても、粉塵付着や腐食、水蒸気などの外乱によって誤差が生じ、正しい計測値を得られない場合が予想できる。そのような状況でも、ソフトウェ

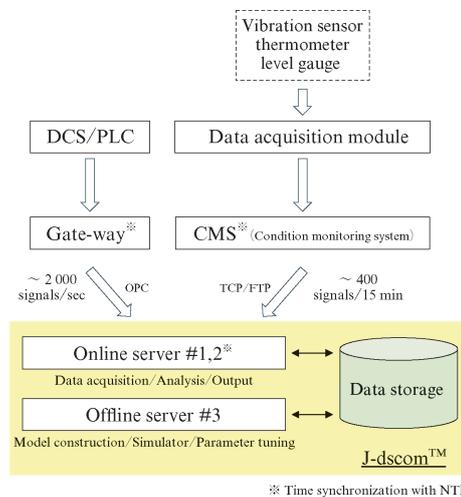


図4 第3 焼結機における J-dscom[®]のシステム構成

Fig. 4 System configuration of J-dscomTM at Fukuyama No.3 SP

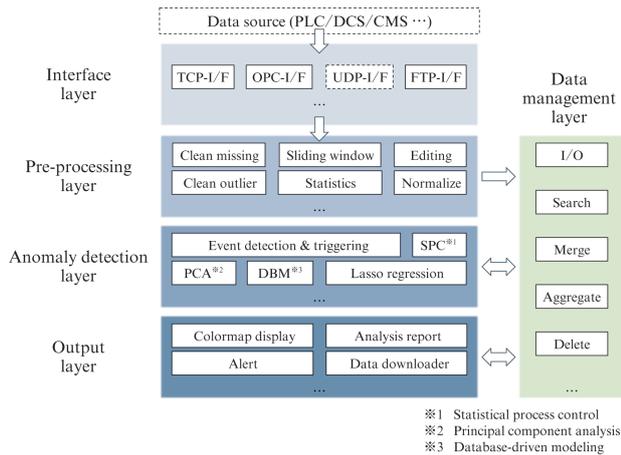


図5 第3 焼結機における J-dscom[®] のソフトウェア構成

Fig. 5 Software architecture of J-dscomTM at Fukuyama No.3 SP

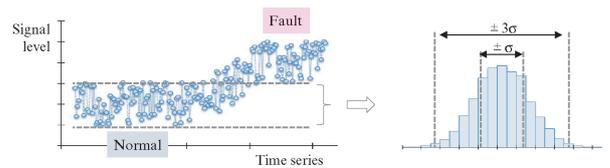
エア側で測定誤差を補正できるよう、データの欠損処理や移動窓を用いた平滑化などの加工処理を、システムの設定変更で行えるようにした。また、データ同士の演算を組合せ、新たなデータとして追加できるようにし、物理的背景に合致した特徴量の加工も自由に行える構成とした。また、診断結果の出力形態として、効率的な多点監視が可能なカラーマップ形式のトレンド管理、画面とアラート音およびメールによる警告通知、異常レポート自動作成、データダウンロードなどのさまざまな機能を第3 焼結機の J-dscom に実装した。

3.3 異常診断の手法

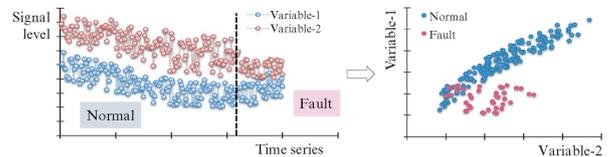
第3 焼結機の J-dscom は、監視対象とするデータの規模に応じ、複数の異常検知手法を実装している。例えば、各種モーターの振動値や、コンベアの軸受け温度など、比較的単純なデータの異常検知は、図6 (a) に示すとおり、統計的プロセス管理 (SPC: Statistical Process Control)⁷⁾ を用いている。この場合、正常なデータ分布から得られる統計量 (平均、標準偏差) を用いることで、閾値を統計的に決定できる。

次に、複数のデータが連動して変動するような設備を対象とする場合、図6 (b) のようなデータ駆動型モデル (DBM: Data Base Models) を用いた変数間相関監視が適用できる。DBM 診断では、過去の正常実績をあらかじめデータベースに登録しており、判定対象の計測値を取得したときに、判定対象のデータとデータベースに格納している正常データとの差分を求める。この差分を正常状態からの逸脱度として監視し、閾値を超えると異常と判定する。線形、非線形を問わず、変数間に一定の相関がある設備であれば、監視対象となる。

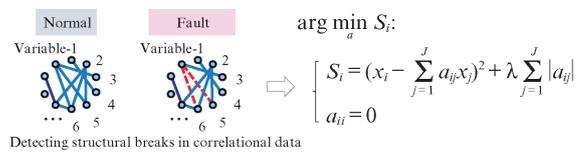
また、図6 (c) に示すとおり、複数の設備やプロセス全体から得られるデータセットをまとめて監視する方法とし



(a) Monitoring of individual variables using SPC



(b) Monitoring of multivariate correlation using DBM



(c) Monitoring of large-scale data using Lasso regression

図6 対象のデータ規模に応じた異常検知手法の適用

Fig. 6 Several application of anomaly detection methods according to the scale of data to be analyzed

て、Lasso 回帰⁸⁾ に基づく異常検知手法を導入している。Lasso 回帰によれば、微小な影響係数がゼロとなるため、不要な説明変数を大幅に削減できる。あらかじめ用意した正常時のデータに対し、変数別の予測モデルを構築し、監視判定の際には、新たに得られた実績値との予測誤差を算出する。判定対象のデータが正常な関係性を保持している場合予測誤差は小さく、相関の崩れが生じていれば予測誤差が大きくなり、異常と検知できる。異常の度合いは、回帰モデルの予測誤差に基づく指標を変数別に算出することにより管理している。

4. 稼働状況

4.1 操業状況

図7 に稼働からの生産量と稼働率を示す。2020 年1月の連続操業開始以降、新型コロナウイルスの影響による一時的な出鉄減や福山第4 高炉バンキングに伴う生産調整があったものの、第3 焼結機は順調な操業を継続している。図8 には、煙突での排ガス中 O₂、SOX、煤塵濃度を示す。2021 年7月以降の通常生産ベースでは、排ガス中の O₂ 濃度は、おおむね 14% 未満で操業できており、焼結機の漏風状態も良好であると考えられる。煙突における SOX 濃度は、常時 1~数 ppm 程度であり、MEROS と水酸化マグネシウムの 2 段階脱硫の高い効果を確認した。また、煤塵濃度についても、常時 1~2 mg/Nm³ 程度と低く、MEROS のバグ

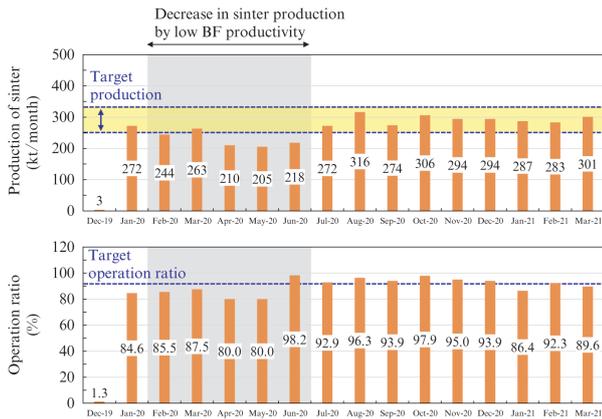


図7 稼働からの生産量と稼働率

Fig. 7 Production and operation ratio after starting operation

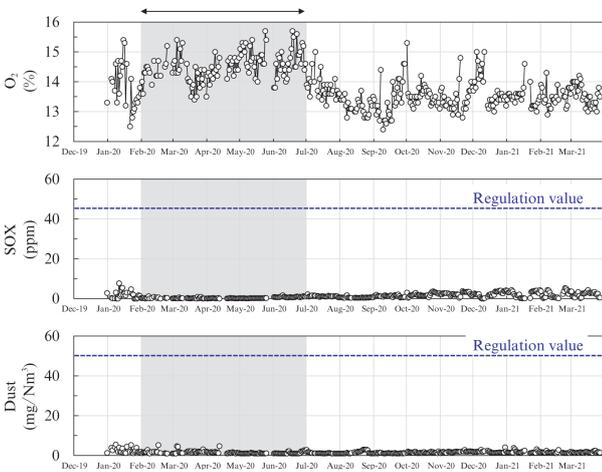


図8 煙突での排ガス中 O₂, SOX, 煤塵濃度

Fig. 8 Concentration of O₂, SOX and dust in exhaust gas at stack

フィルターとしての除塵効果が十分に発揮されている。

4.2 排ガス中 DXN 測定

図9に MEROS への活性炭吹込み量と煙突での排ガス中の DXN 濃度の関係を示す。第3 焼結機建設における最大の課題であった排ガス中の DXN 濃度については、計画通り現行法の基準値 0.1 ng-TEQ/Nm^3 以下の操業であることが確認できた。また、図9に見られるとおり、MEROS へ活性炭を吹き込まない条件であっても 0.1 ng-TEQ/Nm^3 以下の操業は十分に可能であるが、活性炭吹込み量を増加させることで煙突での DXN 濃度がより低下する傾向も確認できた。

4.3 DS 技術の適用状況

第3 焼結機は2020年6月にセンサーの整備が完了し、システム調整後の10月から J-dscom による設備監視を開始した。設備監視の一例として、ベルトコンベアに設置した CMS によるモーターベアリングの振動異常の検知例を図10に示す。本事例では、加速度センサーで計測する振動値が

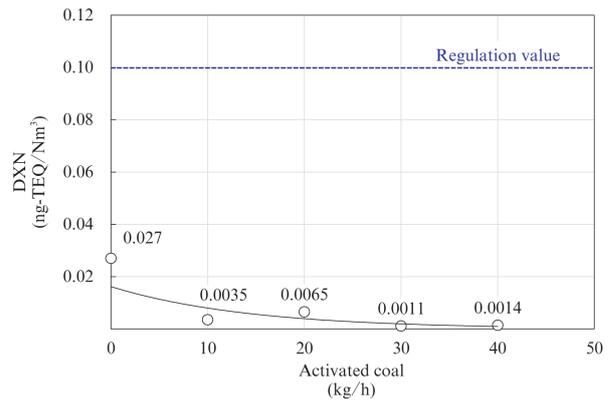


図9 MEROS への活性炭吹込み量と煙突で測定した排ガス中の DXN 濃度の関係

Fig. 9 Relationship between injection amount of activated coal to MEROS and concentration of DXN in exhaust gas at stack

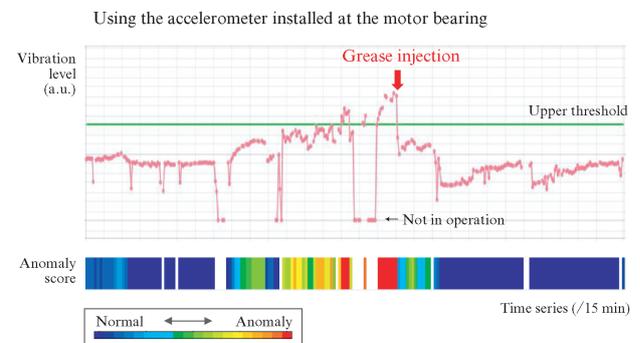


図10 モーターベアリングの振動異常の検知例

Fig. 10 Example of anomaly detection using vibration analysis of motor bearing

断続的に上昇している傾向を観測できた。現地調査の結果、ベアリング部のグリース不足が見受けられたため、グリースの追加注入により、振動値を正常レベルへ復帰させた。このように、PLC で収集した対象設備の運転状態信号を用いることで、設備稼働中の異常な振動値だけを抽出、評価できている。一連の対応の結果、設備トラブルによる減産を未然に防ぐことができた。

続いて、焼結機の点火炉ガス流量制御に適用したモデルの異常検知例を図11に示す。本事例では、点火炉内の耐火物が脱落したことにより炉内環境が悪化し、点火炉に供給する C ガスの流量にも変化が生じていた。J-dscom を用いたガス流量に関する異常診断には、C ガスの流量制御バルブの弁開度、1 次圧力 (工場に供給される大元の配管圧力)、2 次圧力 (個別のバーナー毎に分割して供給される支管圧力)、C ガス流量の間の物理的関係に基づくモデルを実装している。本事例では、正常時に得られる応答から大幅に乖離するデータが計測されており、異常スコアの上昇として検出できていることがわかる。

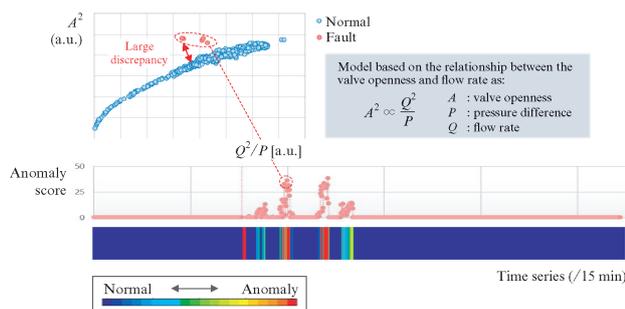


図 11 点火炉ガス流制御における異常検知の例

Fig. 11 Example of anomaly detection in the gas flow control of the ignition furnace

図 10 や図 11 に示したとおり、J-dscom を活用した DS 技術により、環境異常や長時間の設備トラブルなどを未然に防ぐことが可能となっている。今後とも、必要に応じて設備異常の予兆監視の対象を拡大し、より良い環境成績と安定操業を継続していく。

5. おわりに

西日本製鉄所（福山地区）では、2019 年 12 月末に最新鋭の焼結機と排ガス処理設備、自社開発の DS（Data Science）技術を導入した福山第 3 焼結機を稼働させた。現在まで、優れた環境成績と安定操業を継続しており、高炉操業の焼結鉱比率を従来の 60% から 80% にまで向上させたことにより、溶銑製造コストを大きく低減できた。

謝辞

JFE スチールにとって、今回の福山第 3 焼結機建設は、京浜 1 焼結以来、実に 43 年ぶりのフルプラント建設でありました。社内にフルプラント建設の経験者がいない中で、計画とおりに建設を進め稼働させることができたのは、Primetals Technologies 社を始めとするメーカー各社および

現地工事に携わった多くの方々のご協力のお陰であり、関係各位に深く感謝し御礼申し上げます。

参考文献

- 1) JFE スチール. 2020 年鉄鋼生産技術の歩み. ふえらむ. 2021, vol. 26, no. 5, p. 269.
- 2) 永田勝也. 都市ごみ焼却炉におけるダイオキシン対策の現状と動向. 廃棄物学会誌. 1992, vol. 3, no. 3, p. 217-237.
- 3) 安東龍生, 前田泰昭, 西村六郎. 中国都市ごみ焼却炉から発生する排ガスの乾式排ガス処理システムの性能試験について. 環境技術. 2009, vol. 38, no. 2, p. 126-130.
- 4) Fleischanderl, A.; Böberl, M.; Steinwandter, A. Steel Plants Are Greener Than You Might Think (環境対応が進む製鉄プラント). ふえらむ. 2019, vol. 24, no. 12, p. 802-810.
- 5) Fleischanderl, A.; Steinwandter, A.; Neuhold, R.; Plattner, T.; Mizuki, H. MEROS®—乾式排ガス処理設備の紹介. 産業技術. 2020, no. 833, p. 22-25.
- 6) 平田文英, 蜂谷由佳子, 鈴木宣嗣. データサイエンス活用の異常予兆監視技術. JFE 技報. 2020, no. 45, p. 14-18.
- 7) Oakland, J. Statistical Process Control. 6th ed., Routledge, 2007, 458p.
- 8) Tibshirani, R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1996, vol. 58, issue. 1, p. 267-288.



竹内 直幸



松下 昌史



祇園 弘貴



宮沢 徹



橋本 健



深川 謙一