

CPS プラットフォーム J-DNexus[®]による インテリジェント製鉄所の実現

J-DNexusTM: A CPS Platform for Realizing Intelligent Steelworks

庄村 啓	SHOMURA Kei	JFE スチール DX 戦略本部 DX 企画部 主任部員
愛甲 貴広	AIKO Takahiro	JFE スチール 棒線事業部 仙台製造所 設備部 制御室長
小林 健一	KOBAYASHI Kenichi	JFE スチール DX 戦略本部 デジタル化推進部 グループリーダー
加藤 哲孝	KATO Tetsutaka	JFE システムズ デジタル製造事業本部 第 1 開発部長

要旨

JFE スチールはインテリジェント製鉄所の実現に向けて製造プロセス全体の CPS 化を加速するため、IT/OT データ統合と CPS 開発・実行を担うプラットフォーム「J-DNexus[®]」を構築した。本プラットフォームは、OT データのリアルタイム処理や IT/OT の工程横断データの統合を可能とするデータ基盤、クラウド上の標準化された開発環境、弾力的な計算資源、および生成 AI 等による開発支援機能を備え、CPS モデルの開発から実装、運用までを一元的に支援する。導入の結果、工程横断データ整備負荷の削減、クラウド活用によるモデル開発および実装の迅速化により、CPS 構築期間を従来比で 30% 短縮した。

Abstract:

JFE Steel has developed the CPS platform “J-DNexusTM” to advance the realization of intelligent steelworks by systematically integrating IT/OT data management with CPS model development and execution. The platform provides a unified data infrastructure capable of real-time OT data processing and cross-process IT/OT data integration, and incorporates cloud-based standardized development environments, elastic computing resources, and development-support mechanisms utilizing generative AI. These functions enable structured and reproducible workflows across the entire CPS lifecycle, encompassing model development, deployment, and operational maintenance. The introduction of J-DNexusTM has yielded measurable improvements, including the streamlining of cross-process data preparation activities, the acceleration of model development and deployment through cloud-based environments, and an overall decrease of approximately 30% in CPS system development lead time.

1. はじめに

JFE スチールでは積極的なデータドリブンによる競争優位を獲得すべく、製造プロセス全体を対象とした Cyber Physical System (CPS) 化を推進し、データに基づく高度な予測・判断・制御を可能とするインテリジェント製鉄所の実現をめざしている。インテリジェント製鉄所の実現により、生産効率および品質の向上、GHG 排出量削減、技能伝承、人材育成、安全な職場環境の提供など多岐にわたる成果が得られる。CPS は、現実の製造プロセス (Physical) に設置したセンサーからのデータや操業データを収集し、それらをもとに仮想空間 (Cyber) 上でプロセス内部状態の把握および将来予測を行い、その結果を現実の製造プロセスにフィードバックする仕組みである¹⁾。仮想空間上で開発し駆動するモデル (CPS モデル) は物理・数値モデル、化学・熱力学モデル、統計モデル、機械学習モデルなどを組み合

わせたものである。

JFE スチールは、これまでも各製造プロセスにおける CPS 化を進めてきたが^{2,4)}、よりスピード感をもってすべての製造プロセスを CPS 化するため、IT/OT データ統合と CPS 開発・実行を一元的に扱うプラットフォーム「J-DNexus[®]」を構築した。J-DNexus では、OT データのリアルタイム処理と工程間を横断した IT/OT データ統合に加え、パブリッククラウド基盤による弾力的な計算資源の確保や、生成 AI および MLOps 基盤などの活用による開発効率と再現性の向上を実現している。

本稿では、まず従来の CPS 開発の課題について述べる。次に J-DNexus の全体構成を説明し、J-DNexus を構成する 2 つの構成要素 (データ統合基盤および CPS 開発・実行基盤) についてそれぞれ詳述する。最後に、J-DNexus の導入効果と活用事例、および全社一貫 CPS 化に向けた今後の展望を示す。

2. 従来の CPS 開発の課題

2.1 鉄鋼プロセスのデータ取得・処理における課題

JFE スチールは国内に 6 拠点の製鉄所・製造所を有し、主要製造ラインは 100 以上に及ぶ。これらのラインでは、操業条件、設備状態、品質値などのセンサーデータ、生産実績や製造諸元等の IT データを合わせ、1 ライン当たり数千〜数万項目規模のデータが生成される。従って全社規模では数百万項目規模に達する膨大な時系列データ・製品データを扱う必要があり、これらを欠損なく取得し、継続的に処理し続ける必要がある。

さらに、製鉄プロセスは上工程から下工程までの多工程で構成されており、例えば薄板鋼板の製造プロセスでは延伸、切断、分割、巻取りといった形状変化や位置、向きの変化を伴う。このため、製品 1 本を通じた長手方向データの連続性を保ちつつ工程間で正確に関連付けるには、高度で一貫性のあるデータモデルが不可欠である。しかし、従来は各工程・設備ごとにデータ構造やデータの命名規則が異なり、本来実施したい解析や CPS モデルの開発を行う前段階での、工程横断のデータ統合に多大な処理工数を要していた。

また、CPS を運用するためには、OT 側で取得される高頻度データをリアルタイムに近い速度で処理し、その結果をモデルに反映する必要がある。しかし、従来の基盤では高頻度かつ大容量のデータを安定的に収集して処理するための機能・性能が十分ではなく、リアルタイム性の確保が難しい場合があった。

2.2 CPS モデル開発・実装の課題

これまでは、多くの開発者が CPS モデルを各自の業務 PC 環境もしくはオンプレミスの計算サーバで開発しており、環境差異による再現性の低下およびモデル開発の属人化が課題となっていた。また、GPU の利用に代表されるような計算負荷の高いモデルを扱うためには、PC および計算サーバの性能向上が必要であったが、ハードウェアの調達、更新には時間と手間を要し、開発効率を低下させるひとつの要因となっていた。

また新たなラインに CPS モデルを実装する際には、モデルを動作させる計算機を都度調達し現地で推論環境を構築する必要があった。そのため導入リードタイムの増大を招いていた。さらに、CPS モデルを各製鉄所・製造所のラインへ導入する際には、モデルのチューニングのため開発者が都度現地に出張して作業する必要があった。

3. J-DNexus[®]の全体構成

J-DNexus は、従来の CPS 開発で課題となっていたデータ

取得・処理基盤の分散、環境構築の属人化、モデル実装および運用の非効率性を解消するために、IT/OT データ統合基盤と CPS モデル開発・実行基盤を一体的に整備したプラットフォームである。本章では、J-DNexus の設計方針および全体アーキテクチャについて述べる。

3.1 設計コンセプト

J-DNexus の設計にあたっては、以下の 2 点を中核的なコンセプトとして掲げた。

(1) IT/OT データの一元的統合とリアルタイム処理

OT データとは、生産設備、センサー、PLC (Programmable Logic Controller)、DCS (Distributed Control System) などの制御システムからリアルタイムに取得される設備状態、稼働ログ、品質パラメータ、プロセス変数などのプラントの運転・制御に直結する情報であり、IT データとは、ERP (Enterprise Resource Planning)、MES (Manufacturing Execution System) といった情報システムから生成される生産計画、在庫情報、作業実績、品質記録など業務遂行や意思決定を支える情報資源である。両者は時間粒度や要求される信頼性が異なる一方、CPS 化を推進する上で統合的に活用することが極めて重要となる。鉄鋼プロセスにおける膨大な OT データと IT データを統合し、工程横断のトレーサビリティを標準化するとともに、高頻度データをリアルタイムに処理できる基盤を整備する。

(2) CPS モデル開発・実行環境の標準化と柔軟な拡張性

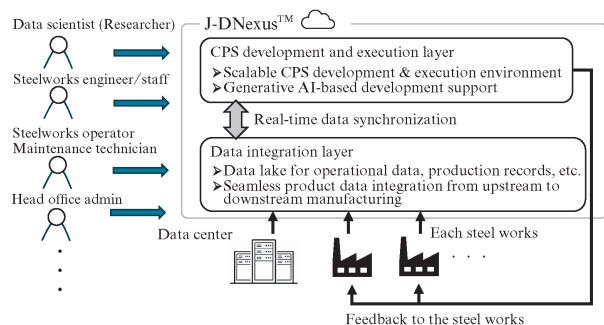
従来は開発者ごとの PC 環境で個別に行われていた開発をクラウド上の標準環境に集約し、再現性を確保するとともに、計算資源を弾力的に確保できる体制を整える。開発したモデルの実装においても、クラウド上で環境を複製し、遠隔で調整することで速やかな展開を実現する。

3.2 全体アーキテクチャ

J-DNexus は、データ統合基盤と CPS 開発・実行基盤の 2 つのレイヤーで構成される (図 1)。

データ統合基盤では、IT/OT データを一元的に収集し、設備・製品のコンテキスト付与 (文脈化) を行う。鋼板の延伸、切断、分割、巻取りなどを伴う複雑な長手方向データの紐づけを標準的なデータモデルで表現し、モデル開発に必要なデータを統一形式で提供する。

CPS 開発・実行基盤はクラウド上に構築された標準環境で、開発者は社内ネットワーク上に接続された各自の業務 PC から開発環境にアクセスし、CPS モデルの開発から学習、評価、実装、運用までを一貫して実施できる。計算資源を需要に応じて増減することにより、コストの低廉化と高負荷計算の迅速な実行の両立が可能な仕組みとなっている。

図 1 J-DNexus[®]の概要Fig. 1 Schematic diagram of J-DNexusTM

3.3 データフローと CPS モデルライフサイクル

J-DNexus におけるデータフローは、以下のように設計されている。

(1) データ取得

製鉄所の各設備から高頻度 OT データおよび IT データを継続的に取得し、データ統合基盤へ格納する。

(2) データ統合

データ統合基盤上で、工程横断の長手方向データを含むデータモデルへの統合と文脈化を行う。

(3) モデル開発

標準化されたクラウド上の開発環境で、機械学習モデル、物理モデル、統計モデル等を組み合わせた CPS モデルを開発する。

(4) モデル実装（デプロイ）

学習済みモデルをクラウド上の推論環境に実装し、リアルタイムまたはバッチ処理で動作する。モデルの出力結果は社内環境から閲覧でき、製造オペレータはアプリケーション画面に表示されたガイダンスをもとに最適な操作を行う。

(5) モニタリング・改善

推論結果はモデル開発・実行基盤、もしくは必要に応じてデータ統合基盤へ書き戻され、継続的に監視できる。この結果をもとに必要に応じて遠隔からモデルの再調整を行う。

このように、J-DNexus は従来分断されていたデータ処理、開発、運用のプロセスを統合し、全社的な CPS 展開を支える基盤として機能する。

4. データ統合基盤

本章では、J-DNexus の中核をなすデータ統合基盤の役割と実装内容について述べる。データ統合基盤は、鉄鋼プロセスにおける膨大かつ高頻度の OT データと、各工程で管理される IT データを統合し、工程横断の製品単位のトレーサビリティを標準化されたデータモデルとして表現する機能を

有する。これにより、従来は設備ごと、拠点ごとに分断されていた情報を一元的かつリアルタイムに扱うことができるようになり、CPS モデル開発・実行に必要なデータ基盤として機能する。

4.1 OT データのリアルタイム処理

データ統合基盤では、製鉄所各設備の制御システムやセンサーから取得される高頻度 OT データを継続的に取り込み、時系列データとして蓄積する。前述のとおり、全社規模では数百万項目規模に達する膨大なデータは、分単位もしくは秒単位で発生する。従来はオンプレミスに配置された社内クラウド基盤上の行指向型データベースを利用しており、時系列データの取扱いに最適ではなかったため性能、機能上の制約によりリアルタイム性が確保できない場面があった。J-DNexus のデータ統合基盤は、パブリッククラウドを利用したことで柔軟に処理負荷の変化に対応でき、かつ列指向型データベースや時系列データに特化したデータの保持方式を採用することにより、高頻度データを欠損なく取り扱うことができる。これにより、CPS モデルで重要な生産状態の変動把握および異常兆候の早期検知と、それに基づいたリアルタイム制御へのフィードバックが可能となる。

4.2 工程横断データの統合

鉄鋼プロセスの特性は、鋼板が上工程から下工程に進むにつれて、延伸、切断、分割、巻取りなどにより形状、長さ、位置、向きが変化することである。このため、製品 1 本ごとの品質および操業履歴を工程横断で関連付けるには、長手方向データの連続性を保持する高度なデータモデルが必要となる。

データ統合基盤では、多工程の生産実績データおよび OT データの関連性をグラフ構造で表現するデータモデルによりデータ統合を行う。これにより、下工程で検出された品質不良が、上工程のどの設備条件・操業条件に起因するかを迅速にトレースできる。また、薄板鋼板製造工程における Top/Bottom 反転や切断による生産工程の分岐も統一ルールで管理され、利用者は工程差異を意識することなくデータを活用できる。

5. CPS 開発・実行基盤

本章では、J-DNexus におけるもう一つの主要構成要素である CPS 開発・実行基盤について述べる。本基盤は、従来の CPS 開発において課題となっていた開発業務の属人化および計算資源の不足の解消、CPS 実装における水平展開の迅速化を実現することを目的として設計されている。クラウド基盤を用いることで、開発環境の標準化と弾力的な計算資源の確保を実現し、さらに生成 AI や MLOps 技術を活用することで、CPS モデルの開発・実装・運用を効率的に進

められる仕組みを整備している。

5.1 クラウド基盤による弾力的計算資源の確保

J-DNexus を利用する開発者は、社内ネットワークに接続された業務 PC からクラウド基盤上に標準化された開発環境にアクセスして CPS モデルを開発する。標準化された環境にはデータ解析に必要なライブラリやツールがひととおりプリインストールされているため、開発者はクラウド上の開発環境を払い出された後すぐに開発を始められる。また、一部の計算資源は動的に割り当てられ、必要に応じてスケールイン・スケールアウトできる。これらにより、高負荷モデルの迅速な開発、リソース不足の解消、開発者間の環境差異の排除および開発サーバ調達リードタイムの削減が実現した。

また、CPS の実装フェーズでもクラウド化による恩恵を受けられる。具体的には、クラウド上の環境への遠隔アクセスが可能となったことに加え、クラウド上の環境を複製して水平展開できるようになったことから、新規ラインや別拠点への CPS 導入にあたり、環境構築やモデルのチューニングに要する時間を大幅に短縮できる。

5.2 開発効率ツールの利用

CPS モデルの開発には、モデルを構成する一要素である機械学習モデル一つを取っても、データ前処理、特徴量設計、モデル学習、評価指標設定、モデル実装、推論監視、再学習など、多数の工程が存在する。J-DNexus では、生成 AI による開発支援機能、コードリポジトリおよび MLOps の開発管理機能を活用することで、モデル開発・実行プロセスを効率化している。

5.2.1 生成 AI による開発支援

CPS 開発環境上で利用者が生成 AI（コード生成、ドキュメント生成、ログ要約など）を利用できるようにしており、データ解析およびモデル開発におけるコーディング作業の効率化、タスク自動化による人的ミスの減少、ドキュメント作成支援等が実現する。

5.2.2 CPS モデルの開発管理

CPS 開発環境上で開発したモデルのソースコードを一元的に管理するコードリポジトリを提供している。コードリポジトリとは、ソフトウェア開発におけるソースコードや設定ファイル、ドキュメント等の関連資産を体系的に保存・追跡・管理するための仕組みであり、バージョン管理機能を通じて変更履歴の記録や開発者間の協調作業を支援する基盤である。これにより従来の属人化した開発から脱し、複数人での並行したモデル機能開発が可能となる。

5.2.3 CPS モデルライフサイクル管理

CPS 開発・実行基盤上に構築された MLOps 基盤により、実験管理（学習条件、データ、モデル精度の記録）、モデルレジストリによるバージョン管理、自動デプロイによる迅速な展開、推論ログ・精度監視など開発から運用までのプロ

セスを統合的に管理できる。MLOps とは、機械学習モデルの開発、学習、デプロイメント、運用、監視といったライフサイクル全体を、統合的かつ自動化された形で管理するための概念および実践手法である。これにより、CPS モデルの開発や保守に伴う作業負荷を軽減する。

6. 基盤の導入効果と活用事例

本章では、J-DNexus の導入後に得られた効果と、代表的な活用事例について紹介する。

6.1 導入効果

従来の CPS 開発・実行における課題は、データ取得・処理基盤の分散、モデル開発環境の属人化、計算資源の制約、およびライン展開時の非効率性に集約されていた。J-DNexus によりこれらの課題がどの程度解消され、どのような効果をもたらしたかを以下に示す。

(1) CPS の構築期間短縮

工程横断データの整備負荷削減およびモデル開発・実装の効率化により、従来比で全体として CPS の構築期間を 30%短縮できた。

(2) 開発成果物の品質向上

生成 AI の利用およびコードリポジトリによる複数人での開発により、開発するモデルのソースコード、ドキュメント品質が向上した。

(3) データ解析業務、研究開発業務の効率化

CPS 開発基盤は CPS モデル開発に直接かわる開発者以外にも環境解放されている。今まで業務 PC を利用して研究開発やデータ解析を実施していた社員が、柔軟性のある計算資源、生成 AI による開発支援、MLOps 基盤による実験管理基盤などの利用により開発を効率化している。

6.2 活用事例

J-DNexus の活用事例として、多工程一貫品質データ解析システムである J-astquad^{®5)} および、上工程単一プロセス CPS の内容を紹介する。

6.2.1 多工程一貫品質データ解析システム

J-astquad[®]

工程を横断したデータ連携が必要となる複数の製造プロセス（連続鋳造、熱延、冷延、鍍金等）を対象とし、各製造プロセスの制御 PLC から得られる数千項目規模の OT データと、製造諸元、品質・生産実績などの IT データをデータ統合基盤上で統合している。データ統合基盤上で実装された鋼板の延伸、切断、分割、巻取りといった形状変化を伴う長手方向データの紐づけ処理により生成されたデータを利用して、CPS 開発実行基盤上で品質予測のための機械学習モデルを開発・実装した（図 2）。モデルの開発

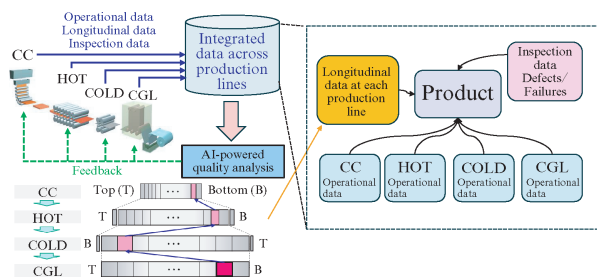


図2 J-DNexus[®]のデータ統合基盤上での工程横断データの統合と、それを活用したJ-astquad[®]の概要

Fig. 2 Integration of cross-process data on the J-DNexusTM data integration layer and an overview of its application in J-astquadTM

では前述した MLOps 基盤を活用し、効率的に開発、実装、管理している。

6.2.2 上工程単一プロセス CPS

上工程のある単一プロセスを対象とし、物理モデル、機械学習モデルが組み合わされた CPS を J-DNexus 上に実装している。PLC、DCS 等から得られる数千項目規模の OT データをデータ統合基盤経由で CPS 開発実行基盤上のモデルに連携し、1 分間隔で実行する一連の流れを遅延なく実行している。また、モデル開発に生成 AI およびコードリポジトリによる支援を活用している。

6.3 全社展開と CPS 構築の方針

J-DNexus を全社規模で展開し、社内主要 100 ラインのデータを統合、工程横断データの統合を完了している。工程横断データの統合にあたっては、統一したデータモデルを拡張することで効率的に展開できるようにしている。それと並行して上記に示すような各プロセスの CPS の構築を進めている。CPS の実装にあたっては、プロセスが異なる場合でも標準化された構成でシステムを構築することで、プラッ

トフォーム上での実装の効率化を図っている。

7. おわりに

本稿では、JFE スチールにおけるインテリジェント製鉄所の実現に向けて、IT/OT データ統合基盤と CPS 開発・実行基盤を一体的に整備したプラットフォーム「J-DNexus[®]」の構築内容について述べた。J-DNexus は、IT/OT データのリアルタイム統合、工程横断データモデルの構築、クラウド基盤による標準化された開発環境と弾力的な計算資源に加え、生成 AI による開発支援機能、コードリポジトリおよび MLOps の開発管理機能を導入することで、CPS モデル開発から実装・運用までのプロセス全体を統合的に扱う仕組みを実現した。

J-DNexus の導入によりデータ整備工数削減および開発効率の向上が実現し、CPS 構築期間を従来比 30% 短縮できることを確認した。さらに、標準化された基盤により主要ラインへの展開が加速し、運用負荷の軽減にも貢献している。

今後は、本プラットフォームを活用し、工程間の CPS 連携強化や各拠点における CPS モデルの体系的拡大を進め、全社一貫での CPS 高度化を図る。その活動の中で、インテリジェント製鉄所の実現に向けた J-DNexus の機能強化と適用範囲の拡大を継続していく予定である。

参考文献

- 1) 山口収. CPS を活用した製鉄プロセス革新. システム/制御/情報. 2024, vol. 68, no. 1, p. 27-31.
- 2) 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ドンス技術. JFE 技報. 2020, no. 45, p. 19-25.
- 3) 小笠原知義, 林弘治, 吉原孝次. モデル予測制御による製鉄所燃料・電力運用ガイドンスシステム. JFE 技報. 2020, no. 45, p. 26-31.
- 4) 加瀬寛人, 富山伸司, 佐藤新吾. 転炉内部状態リアルタイム推定モデル. JFE 技報. 2025, no. 56, p. 8-14.
- 5) 高木宏征, 舞嶽孝二, 平岩琢朗. 多工程一貫品質データ解析システム『J-astquad[®]』の開発. JFE 技報. 2026, no. 58, p. 43-48.