

高炉プラント運転訓練シミュレータ

Operator's Training Simulator for Blast Furnace Plant

出羽 竹彦^{*(1)} 佐藤 孝^{*(2)} 五味 秀式^{*(3)} 園 康次郎^{*(4)}
 Takehiko IZUHA Takashi SATO Hidenori GOMI Yasujiro SONO
 肥田 孝^{*(5)} 鷲津 加寿明^{*(6)}
 Takashi HIDA Kazuaki WASHIZU

抄 録

オペレータの運転技能の維持, 向上を目的とした高炉プラント運転訓練シミュレータを開発した。シミュレータは, プロセスモデルを搭載したワークステーション, プラントの運転監視を行うヒューマンマシンインターフェース及びプラントの制御を行うコントロールステーションから構成される。実プラントを制御しているアプリケーションソフトウェア及び実機と同じヒューマンマシンインターフェースの活用により, オペレータが実際の高炉プラントを操作監視しているような違和感のない環境を実現した。

Abstract

We have developed an operator's training simulator for the blast furnace plant to improve operator's operation skill. The simulator consists of a workstation with a process model, human machine interface, and plant control system. We have achieved such an environment as the operator can operate through human machine interface as if the operator is operating an actual plant and system is controlling the same software that controls the actual plant.

1. 緒 言

近年, 分散型制御システム(Distributed Control System : DCS)の導入により, プラントの運転監視の集中化や高度な自動化が実現可能となっている。しかし, オペレータの手動操作の機会や異常時の処置体験が減少しており, オペレータの運転技能の習得が困難な状況にある。本報では, 高炉プラントにオペレータの運転技能の維持, 向上を目的とした運転訓練シミュレータを開発・導入したので報告する。

2. 背景及び目的

近年, プラント運転監視用のDCSの進歩にはめざましいものがあり, 多くのプラントにDCSの導入が進められている。図1は, DCSのシステム構成を示す。オペレータがプラントの運転監視を行うヒューマンマシンインターフェース(Human Machine Interface : HMI)とプラントの制御及びデータ収集を行うコントロールステーションが制御バスで有機的に結合されている。DCSの導入により, プラントの運転監視をHMIで集中して行えることや高度な自動化をコントロールステーションで実現できる。これにより, オペレータが少数化され, オペレータが手動操作を行う機会が減少していることに加えて, 制御システムがブラックボックス化され, プラントが

どのように自動運転されているか, オペレータが理解することが困難になっている。また, DCSや設備機器の信頼性の向上により, プラントの安定な稼働が実現され, トラブル発生時におけるオペレータの対応操作の機会も減少している。

そのため, プラントの実際の運転経験のみでは, オペレータの多様な状況に対応できる運転技能の維持が困難な状況にあり, オペレータの熟練度の低下が危惧されている。制御機能の高度化や自動化がいかに進展したとしてもプラント運転の最後の砦はオペレータである。様々な局面に迅速に対応できるオペレータの育成は重要課

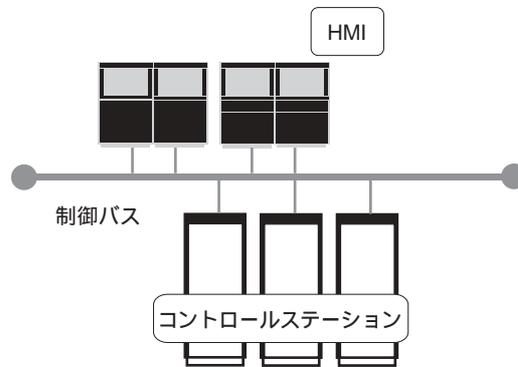


図1 DCSシステム構成

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2482
 *⁽²⁾ (株)日鉄エレックス 鉄鋼エンジニアリング部 係長
 *⁽³⁾ 名古屋製鐵所 設備部 マネジャー

*⁽⁴⁾ 名古屋製鐵所 製鉄工場 係長
 *⁽⁵⁾ 名古屋製鐵所 製鉄工場 主任
 *⁽⁶⁾ 名古屋製鐵所 設備部 主任

題であり、オペレータの運転技能の習熟、向上のためには、実際のプラントを模擬するプラント運転訓練シミュレータによる訓練が高い効果を得ることが知られている。

石油精製、石油化学、ボイラープラント等では、導入事例が数件あるプラント運転訓練シミュレータを、鉄鋼プロセスの中でも特に設備トラブルやオペレータの誤操作が重大事故につながる可能性の高い高炉プラントに、オペレータの運転技能の維持、向上を目的としてシミュレータを開発し、新日本製鐵名古屋製鐵所第3高炉の2000年4月の火入れにあわせて導入した。

3. 開発の進め方

3.1 基本方針

シミュレータが有効に活用されるためには、オペレータにとってDCS実機により高炉プラントを実際に操作監視しているような違和感のない臨場感あふれるシミュレータを開発することが不可欠である。そのためには、実プラントに導入した同様なDCSと高い精度で実プラントを再現することができる詳細なプロセスモデルにより、オペレータの実機のDCSと同様な操作に応じて、プロセスモデルが実プラントと同じ挙動を示すことが必要である。しかし、実プラントに導入した同じ台数、機器仕様を持つシステム構成の機器の購入費用と詳細なプロセスモデルを構築するための開発工数が必要であり、導入コストが高価なものとなる。そのため、DCS実機の資産を最大限に活用できる市販のシミュレータシステムを採用し、オペレータの運転訓練に最低限必要なプラントの臨場感を提供できるシミュレータを安価にかつ短工期で開発することを基本方針とした。

3.2 開発フロー

開発の進め方を図2に示す。最初からすべての設備を対象にしてモデルを開発するのではなく、開発工数や工期を考慮して、まず、設備を構成する一部分から開発に着手した。一部分の開発が完了した時点で、ビジュアルに動作させ、オペレータにとって違和感がないかを確認しながら、段階的に対象設備全体をモデル化した。

シミュレータの作成フローを図3に示す。企画構想段階から最終的なシミュレータの調整を完了するまで、約1年間の短工期で実現している。各フェーズでの開発内容は以下の通りである。

(1) 企画構想フェーズ

- ・運転訓練の目的と対象プラントの範囲の明確化
- ・モデルの要求精度についての方針決定

(2) 機能設計フェーズ

- ・対象プラントの範囲の決定
- ・モデル化により予想される挙動と実際のプロセスの挙動との相違の判定

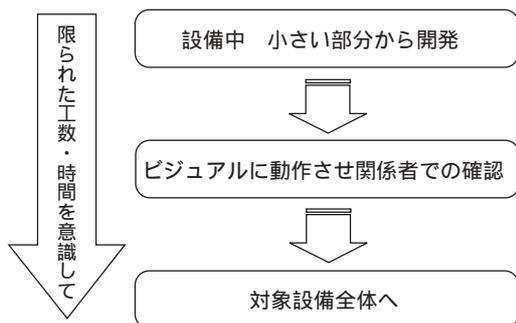


図2 開発の流れ

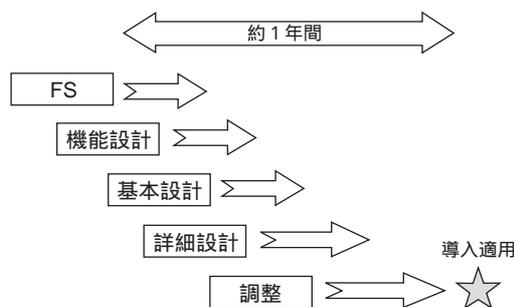


図3 シミュレータ作成フロー

- ・異常発生メカニズムと発生時の挙動の整理
 - ・概略の運転訓練シナリオの作成
 - ・プロセスデータの収集
- (3) 基本設計フェーズ
- ・基本モデルの作成
 - ・オペレータの操作方案の決定
- (4) 詳細設計フェーズ
- ・詳細モデルの作成
 - ・モデル挙動の良否の判定
- (5) 調整フェーズ
- ・シミュレータとしての最終調整

4. シミュレータの機能

4.1 シミュレータ構成

シミュレータ構成のいくつかの形態⁹⁾を図4に示す。スタンドアロン型は、コンピュータのみで構築するものである。HMI及びコントロールステーションのアプリケーションソフトウェアを再現するために、コンピュータが持っているソフトウェア作成機能を使用して、新規にDCS実機と同じ機能を持つように作成する必要がある。

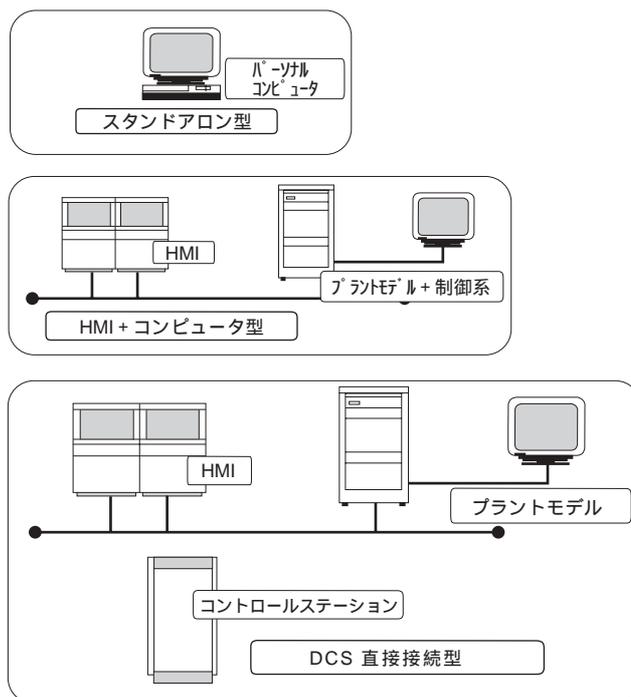


図4 シミュレータ構成

また、HMIのオペレータ用キーボードやタッチスクリーン機能が使えず、オペレータに実機と同様な操作環境を提供することができない。

HMI+コンピュータ型では、HMIの問題は解決され、オペレータに実機と同じ操作環境を提供できる。しかし、コントロールステーションのアプリケーションソフトウェアについては、スタンドアロン型と同様に新規に作成する必要がある。採用しているDCS直接接続型は、実機と同じHMIとコントロールステーションから構成される。そのため、実機DCSのアプリケーションソフトウェアをそのまま活用することができる。

4.2 シミュレータ構築イメージ

シミュレータの構築イメージ¹⁾を図5に示す。実プラントは、HMI、コントロールステーションから構成されるDCSとプロセスから構成されており、それらの構成要素は、シミュレータでは次のように実現している。HMIは、実機と同じ機種を採用し、HMIソフトウェアは実機で使用しているソフトウェアをそのまま移植している。コントロールステーションは、実機と同じコントロールステーションを使用するのではなく、汎用のEWSで実機のアプリケーションソフトウェアをエミュレートし、そのまま活用することにより低コスト化を図っている。

また、プロセスは、ポンプ、バルブや配管などがユニット化され、プロセスフロー図を作成することでモデル構築が容易に可能であるグラフィカルユーザインターフェース(Graphical User Interface : GUI)機能に優れている市販のダイナミックシミュレータを採用し、EWS上で、モデル開発を実行している。なお、シミュレータは、実プラントから独立しており、オペレータがオフラインでいつでも自由に運転訓練をできるようにしている。

4.3 ハードウェア構成

具体的なハードウェア構成²⁾を図6に示す。HMI、コントロールシミュレータ(CS-EWS)、プロセスシミュレータ(MDL-EWS)及びゲートウェイ(AP-EWS)から構成されている。HMIは、オペレータに実機と違和感のない操作性、例えば、キーボード配列やタッチスクリーン機能などを提供するために、実機DCSのHMIと同じ機種を使用している。

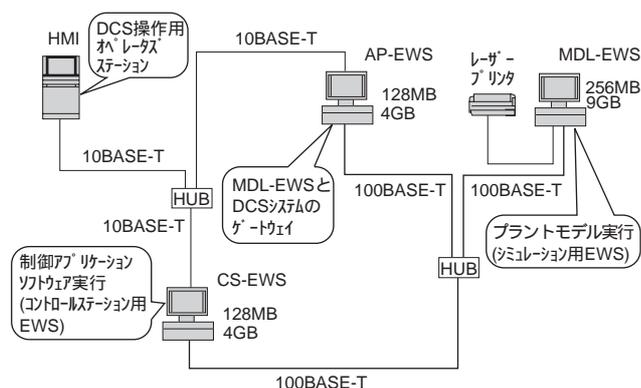


図6 ハードウェア構成

従って、プラント監視操作画面等のHMIソフトウェアは、実機DCSのソフトウェアをそのまま移植することが可能である。CS-EWSは、DCSコントロール機能を模擬するもので、実機DCSのアプリケーションソフトウェアをエミュレートし、そのまま活用している。これにより、実機DCSのコントロール機能とシミュレータで模擬するコントロール機能を同一のものとしている。MDL-EWSはプロセスの挙動を模擬するシミュレータで、プロセスモデル演算や訓練管理などを実行している。AP-EWSは、HMI、CS-EWS、MDL-EWS間のデータのやりとりを実行している。また、HMIとCS-EWSは、実機DCSのアプリケーションソフトウェアをそのまま移植し利用することにより、ソフトウェア開発費用の低コスト化を実現している。

4.4 ソフトウェア環境

シミュレータには、大別すると以下の3つのサブシステムがMDL-EWSに搭載されている。

(1)ダイナミックシミュレータ

ダイナミックシミュレータは、HMI、CS-EWSとデータ授受を行いプラントモデルのシミュレーションを実行する。シミュレータには、オペレータに違和感のないプロセスの挙動を提供できる詳細な物理モデルの採用、ユーザによるモデル開発や変更が容易に可能なことや大規模なモデルを高速に実行可能なことが必要である。採用

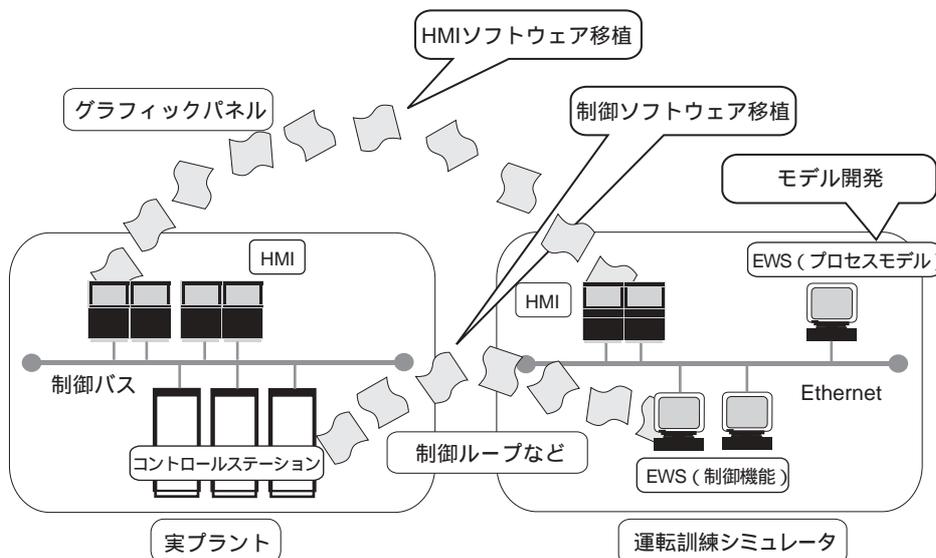


図5 シミュレータの構築イメージ

したシミュレータは、モジュール型のシミュレータで、プラント内の個々の装置(バルブ、ポンプ、配管など)を標準ユニットと呼ぶモジュールで表現し、個々の標準モジュールの組み合わせで全体のモデルを構築する。たとえば、バルブのモジュールは、動的な特性を詳細に表すために流量特性や動作速度などを含んだものであり、物質収支、熱収支、圧力バランスの代数・微分方程式で構成された詳細な物理モデルである。

標準ユニットは、ポンプ、バルブ、配管、熱交換器などのプロセスユニットと流量計、温度計、圧力計などの計装ユニットが装備されている。標準ユニットの一例として、熱交換器の標準ユニット¹⁾を図7に示す。

モデル開発は、プラントモデルを複数のプロセスモデルで分割し、個々のプロセスモデルごとに独立して行い、その後全体を統合してプラントモデルを構築している。また、プロセスモデルは、機器に相当する標準ユニットを配管ユニットで、計装ユニットは信号線で結ぶことにより、プロセスフロー図を記述するイメージで作成する。

(2) 訓練管理機能

プラントモデル内に作り込まれた異常状態、例えば、バルブ動作不良やポンプの故障などを模擬的に発生する。また、訓練中の任意の時点を保存し、その状態から訓練の再開が可能である。なお、異常状態は、熟練オペレータの経験により、オペレータの迅速な対応が不可欠なものを抽出し、決定している。

(3) シナリオ機能

運転訓練開始時のプラントの初期状態、異常状態の内容や発生タイミングなどをシナリオとして登録し、運転訓練を自動化並びに標準化している。

4.5 プロセスモデル

高炉プラントは、高炉炉体設備、ガス清浄設備、炉頂装入設備、熱風炉設備、鋳床設備等の複数の設備から構成される。これらの設備は、他設備とまったく無関係に独立しているものではなく、その設備の運転状況が他の設備へ影響を与える。本開発では、運転訓練の対象設備として、高炉プラントの中でも、制御機能が高度化、複雑化している熱風炉設備、ガス清浄設備としている。

また、モデル構築にあたっては、訓練を対象とする熱風炉設備、ガス清浄設備のみをモデル化すれば、最低限の訓練は可能である。しかし、オペレータにとって実際の設備を運転監視している場合と

同じような臨場感があり、オペレータに違和感を持たせないシミュレータを提供するためには、関連のある他設備の運転状況も考慮する必要がある。但し、関連するすべての設備をモデル化するとモデルの開発工数が膨大なものとなる。そのため、訓練の対象外の設備であるが、その稼動状況が訓練を対象とする設備に影響を与える設備については、設備を構成する要素の一部の機器やプロセスのみをモデル化するとともに、場合によっては、モデル化は行わずに影響具合を外乱要素として扱っている。

たとえば、ガス清浄設備は、高炉炉体の状況により大きく影響を受ける。高炉炉内で高炉ガスの吹抜けが発生した場合、その結果として高炉ガス流量が変化し、その影響が炉頂圧の変動となって、ガス清浄設備へ影響を及ぼす。また、炉体内に原料を装入する事前作業として、炉頂装入設備で、装入ホッパー内圧力を炉頂圧と同じにする必要があるが、そのための均圧用ガス体として高炉ガスを使用することが多い。

この場合、均圧を行っている間、高炉ガス流量が少なくなるため、ガス清浄設備に影響を与える。高炉炉体からの影響を考慮し、吹抜け等の異常状態の発生時にも活用できる臨場感のあるシミュレータとするためには、高炉炉体設備や炉頂装入設備のモデル化が必要である。これらの設備の詳細なモデルを作成するためには、上述のように、膨大な開発工数が必要となる。そのためここでは、高炉ガス流量の変動に着目し、高炉炉体設備はバルブとしてバルブ開度を変化させて高炉ガス流量を変動させるモデルを作成している。また、炉頂装入設備は、高炉ガス流量に対してステップ状に外乱を与えて、高炉ガス流量を変動させるモデルを作成している。

プロセスモデルの一例として、熱風炉の熱収支モデルの概要を述べる。熱風炉の設備構成¹⁾を図8に示す。名古屋製鐵所第3高炉では、内燃式熱風炉のため、1本の炉の中に燃焼室と蓄熱室があり、送風制御及び燃焼制御のために複数の弁が設置されている。図9は蓄熱室をモデル化¹⁾したものであり、室内のれんが物性値の違う部位でブロック化し、それぞれの部位について、ガス-れんが間の伝熱は1次元であり、れんが断面方向の温度は均一である等のモデルの簡素化を図っている。これにより、ダイナミックシミュレータの標準ユニットである“汎用簡易熱交換器ユニット”を用いることが可能となり、モデル開発の工数削減を実現している。

熱風炉をモデル化したプログラムの実例の一部¹⁾を図10に示す。“汎用簡易熱交換器ユニット”や“バルブユニット”等の組み合わせのプロセスフロー図によりモデルを構築している。使用している標準

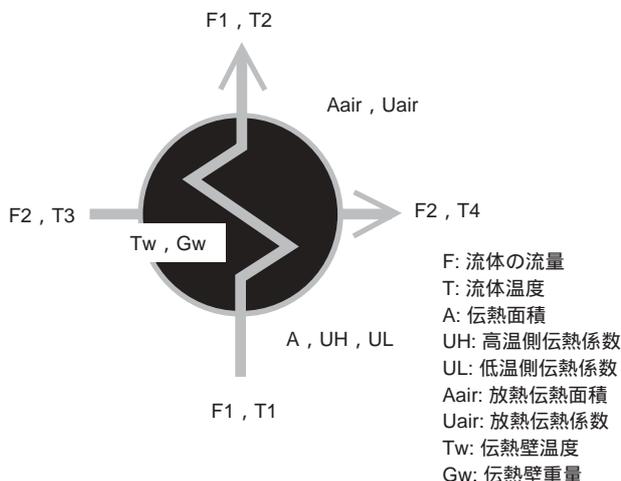


図7 標準ユニットの例(熱交換器)

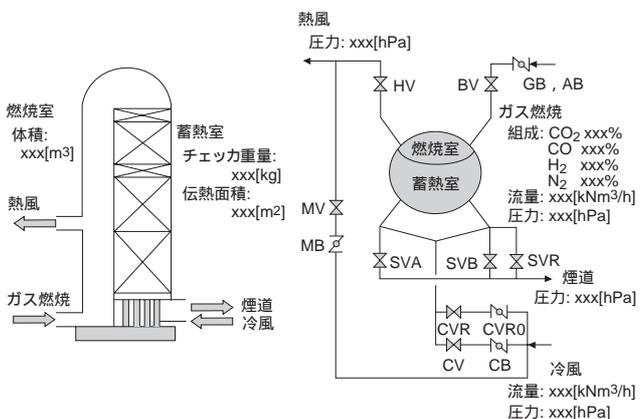


図8 熱風炉設備構成

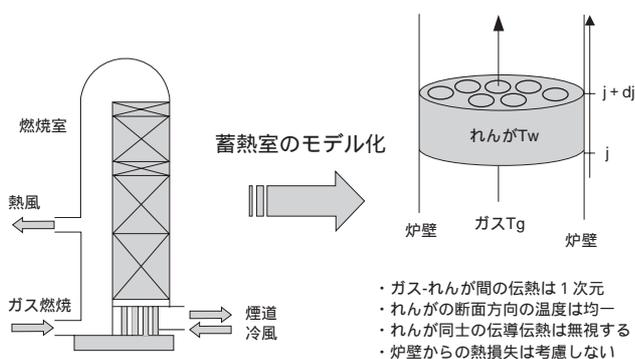


図9 蓄熱室モデル

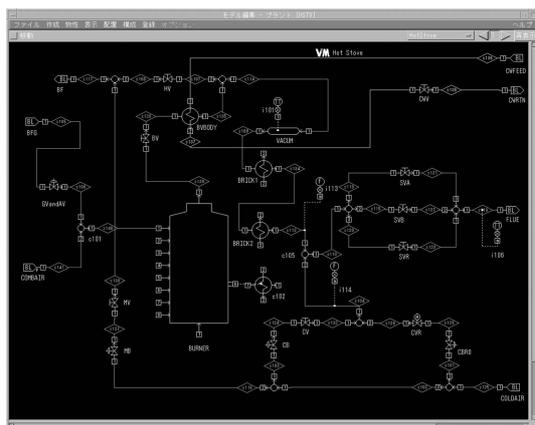


図10 プログラムの例(熱風炉)

ユニットの個数は、熱風炉モデル全体で600個程度、熱風炉1基では100個程度である。

他のモデルも同様に、オペレータの運転訓練に最低限必要なプラントの臨場感を提供できるものとし、可能な限り、ダイナミックシミュレータの“配管ユニット”、“加熱炉ユニット”、“バルブユニット”等の標準ユニットを採用しながらモデル開発を実行している。

4.6 運転訓練機能

運転訓練機能として、新人オペレータの訓練としてのみでなく頻度が少ない運転操作についての熟練オペレータ運転技能の維持、向上を可能とする以下の4つの機能を持たせている。

(1) 手動操作機能

DCSオペレーションの習熟を含めて、HMIから手動での各種機器(バルブ、ポンプ等)の操作を行う。

(2) プロセス監視機能

流量、温度、圧力等のプロセス状態の監視を行う。

(3) 非定常運転訓練機能

休風及び送風時等の高炉立上げ・立下げ対応操作を行う。

(4) 異常時対応操作

以下に示すようないくつかの代表的な異常状態を模擬的に発生させ、その時の対応操作を行う。

(i) 炉替スケジュール変更(熱風炉)

弁類のトラブル(開閉不良)時の対応操作を行う。

(ii) 操業モード切替(熱風炉)

熱風炉の平行・シングルモード等の操業モードの切替操作を

行う。

(iii) 高炉ガス受入操作(ガス清浄)

低圧送風から高圧送風までのガス受入操作を行う。

(iv) 高炉異常時対応(ガス清浄)

炉頂圧変動、ガス発生量変動、吹抜け発生等の異常時の対応操作を行う。

(v) TRTトリップ時手動対応(ガス清浄)

TRTトリップ時の対応操作を行う。

5. 開発成果

名古屋製鐵所第3高炉改修工事中及び火入れ後のシミュレータ活用による効果として、以下の3点が挙げられる。

(1) 火入れ早期円滑立上げへの貢献

吹き止め前に開発を完了し、火入れまでの期間において、本第3高炉のオペレータ全員を対象とした習熟運転用のツールとして活用した。従来は、DCSオペレーションの習熟程度の訓練であったが、実操業にほぼ等しい運転訓練が可能となり、オペレータ全員が、新しくなった運転操作方法や方案などに違和感を持つことなく、実運転に移行することができた。これにより、火入れ後の高炉プラントの円滑な立上げに大きく貢献した。

(2) DCSソフトウェア試運転の効率化

DCSソフトウェアとシミュレータのプロセスモデルとの組合せテストにより、装置やプロセスの挙動に連動した精度の高いデバッグが可能となり、品質の高いソフトウェア製作を実現した。また、現地での試運転もソフトウェア品質の向上により、短期間で効率的に推進することができた。

(3) 高炉吹抜け時の減産量低減

プロセスや設備の異常時の対応訓練により、オペレータの迅速な対応が可能となった。これにより、たとえば高炉吹抜け発生時の早期炉内圧調整アクションが可能となり、高炉減風時間の短縮化が可能となった。

これらの効果に加えて、今後、プロセスモデルの精度アップによる運転方法や制御方案の改善・検討用として、また休風等でのDCSソフトウェア変更・追加時のデバッグのためのソフトウェア開発支援用としての活用が期待されている。

6. 結 言

実機DCSアプリケーションソフトウェアの有効活用、実機と同じHMIの利用等により、オペレータが高炉プラントを実際に操作監視しているような違和感のない臨場感あふれるプラント運転訓練シミュレータを安価かつ短工期で開発した。

本シミュレータは、名古屋製鐵所第3高炉に実機導入しているが、HMIとEWSで構成されるコンパクトなものであり、運転室の近くに設置している。これにより、オペレータがいつでも自由に利用できるものとなっている。オペレータの定期的な訓練、教育だけでなく、手軽にオペレータが個人学習にも使用しており、オペレータの運転技能維持・向上のため十分に活用されている。

参考文献

- 1) 出羽:電気学会金属産業研究会 MID-02-18 札幌 2002-9