
高炉操業を支える最新のプロセス制御と自動化技術

The Latest Technologies for Process Control and Automation in Blast Furnace

牧 勇之輔(Yunosuke Maki) 稲山 晶弘(Akihiro Inayama) 井野 勝己(Katsumi Ino)

要旨：

川崎製鉄では、電気計装はサブプロセスごとに一体化・シングルウインドウ化、プロセスコンピュータは分散化する方向で、高炉改修のたびにその制御システムの更新を行ってきた。炉況を診断する GO-STOP システムはアクションガイダンスが可能な知識ベースシステムへと発展し、ベルレストップの採用により装入物分布制御の制御性・自由度が向上した。熱風炉ではファジィ制御の導入によりガス量設定の自動化と燃焼効率向上を達成した。さらに、千葉製鉄所 6 高炉では鑄床機器の遠隔操作化を実現し、作業環境の改善や作業効率向上に寄与している。

Synopsis：

Kawasaki Steel has modernized blast furnace control systems featuring an integrated instrumentation and electrical system for each sub-process, a human-machine interface through a single window, and a distributed process computer system. A furnace diagnosis system, which has been known as "GO-STOP system", has been developed to a knowledge-based system that enables to provide appropriate action guidance. For the burden distribution control, controllability and flexibility have been improved by the use of a bell-less-top charging device. For hot stove control, the automatic setting of a combustion gas flow rate and improved efficiency have been achieved by a fuzzy control system. Furthermore, the remote operation of cast house equipment has been realized and contributed to improve the working environment and the efficient operation at Chiba Works No. 6 blast furnace.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

The Latest Technologies for Process Control and Automation in Blast Furnace



牧 勇之輔

Yunosuke Maki
経営企画部設備計画室
主査(課長)



稲山 品弘

Akihiro Inayama
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長補)



井野 勝巳

Katsumi Iino
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)

要旨

川崎製鉄では、電気計装はサブプロセスごとに一体化・シングルウィンドウ化、プロセスコンピュータは分散化する方向で、高炉改修のたびにその制御システムの更新を行ってきた。炉況を診断するGO-STOP システムはアクションガイダンスが可能な知識ベースシステムへと発展し、ベルレストップの採用により装入物分布制御の制御性・自由度が向上した。熱風炉ではファジィ制御の導入によりガス量設定の自動化と燃焼効率向上を達成した。さらに、千葉製鉄所 6 高炉では鋳床機器の遠隔操作化を実現し、作業環境の改善や作業効率向上に寄与している。

Synopsis:

Kawasaki Steel has modernized blast furnace control systems featuring an integrated instrumentation and electrical system for each sub-process, a human-machine interface through a single window, and a distributed process computer system. A furnace diagnosis system, which has been known as "GO-STOP system", has been developed to a knowledge-based system that enables to provide appropriate action guidance. For the burden distribution control, controllability and flexibility have been improved by the use of a bell-less-top charging device. For hot stove control, the automatic setting of a combustion gas flow rate and improved efficiency have been achieved by a fuzzy control system. Furthermore, the remote operation of cast house equipment has been realized and contributed to improve the working environment and the efficient operation at Chiba Works No. 6 blast furnace.

1 緒 言

川崎製鉄では、1998 年の千葉製鉄所 6 高炉、1990 年の水島製鉄所 3 高炉など高炉改修を契機に制御システムを一新し、近代化を図ってきた^{1,2)}。

制御機能については、炉況診断・制御の分野では、かつての GO-STOP システムを発展させた知識ベースシステムの導入や、的確な操業アクションのガイダンスができるシステムへと開発を進めてきた。装入物分布制御ではベルレストップの採用により制御性・自由度を向上させ、安価原料使用を拡大してきた。熱風炉ではファジィ制御の導入によりガス量設定の自動化と燃焼効率向上が達成されている。さらに、千葉製鉄所 6 高炉ではマッドガンをはじめとした鋳床機器の遠隔操作化が実現され、作業環境改善などに寄与している。

本報告では、千葉製鉄所 6 高炉 2 次改修での事例を中心に川崎製鉄で近年取り組んできた高炉制御技術について述べる。

2 高炉の制御システム

2.1 最新の高炉制御システム構成

Fig. 1 に 1998 年 5 月に改修を終えて稼動した千葉製鉄所 6 高炉の制御システム構成を示し、以下にその特徴を記す。

2.1.1 設備ごとのコントローラ選択

高炉は、原料設備、炉頂装入設備、熱風炉設備、ガス清浄設備、鋳床設備などの数多くのサブプロセスから成り立っている。それらのサブプロセスの制御システムから見た特徴は、以下の 3 種類に大別できる。

- (1) 比較的高速で大容量のシーケンス中心の制御：炉頂原料装入設備
- (2) プロセス計装が中心の制御：熱風炉、ガス清浄、送風設備など
- (3) 小規模な機器単位の FA 的制御：鋳床設備、集塵設備

このため、千葉製鉄所 6 高炉では、それぞれにいわゆる電気系 PLC、計装系 DCS、汎用シーケンサの 3 種のコントローラを割り当て、サブプロセスの特徴に応じた最適な制御システムを構成した。各サブプロセスは、鋳床横に設置された統合計器室から、コンバク

* 平成11年6月4日原稿受付

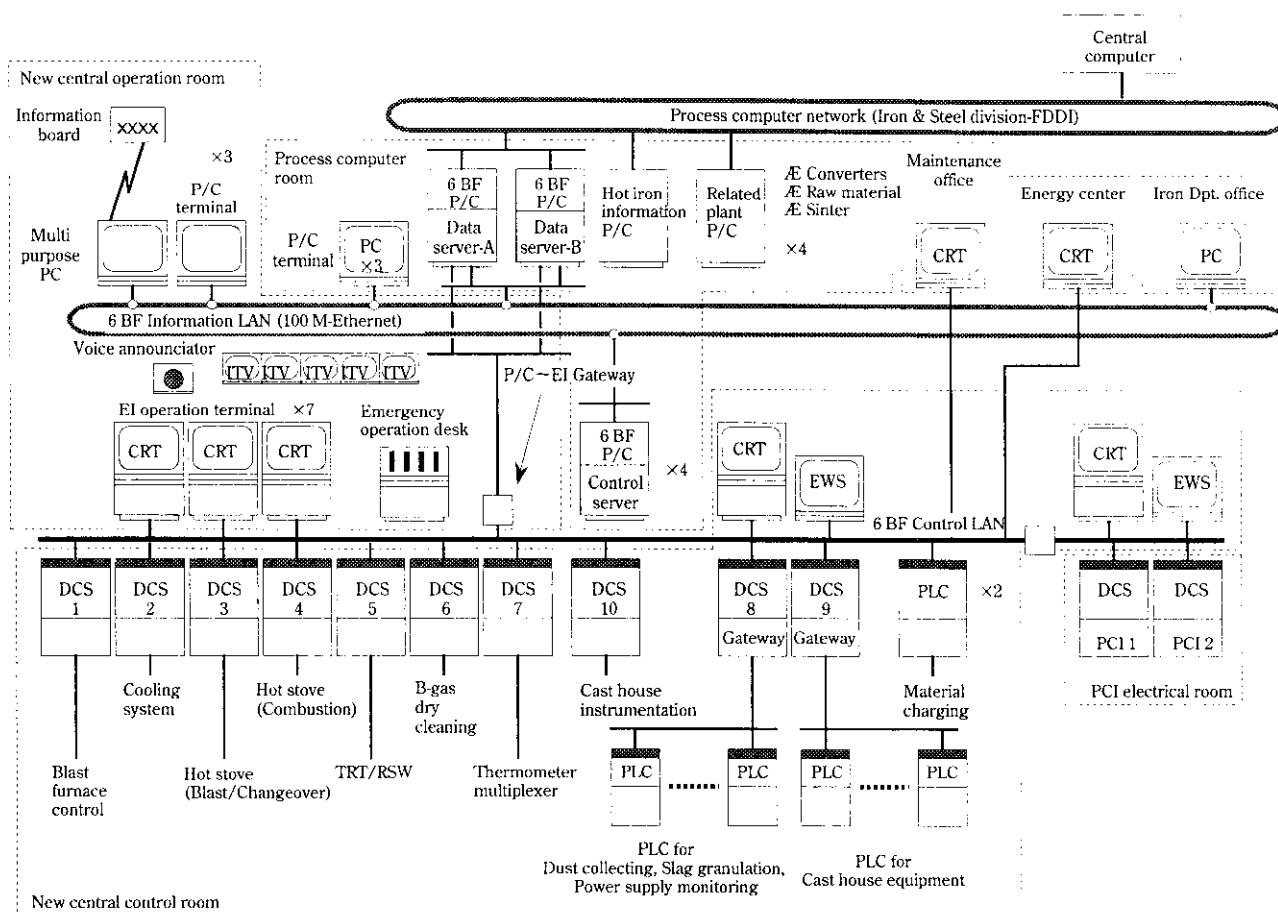


Fig. 1 Control system configuration of Chiba Works No. 6 BF

トな CRT オペレーションにより、監視および操作されている。

また、それぞれのコントローラでは、リモート I/O を活用して入出力制御盤を分散配置することにより、従来の高炉システムでは必須であった長距離制御ケーブルの敷設を不要とし、リフレッシュ工事の工程短縮、工事費の低減に寄与している。

2.1.2 プロセスコンピュータと EI の機能分担

従来、ともすれば機能分担が複雑であったプロセスコンピュータ（プロコン）と電気計装（EI）システムに関し、千葉製鉄所 6 高炉では以下の思想で機能を分割した。

プロセス制御機能はプロコンから EI にすべて移管し、プロコンは、高炉の膨大な操業データベースの構築を中心とする情報処理機能に特化させる。これにより、操業データから導かれるオペレータへの操業ガイダンス機能を充実させる。

昨今の充実したパッケージソフト類を活用して、従来はプロコンが担当していたアドバンス制御機能も EI に取込み、今後も大きな変化がないと予測される高炉の基本制御機能をすべて EI で網羅させた。

2.1.3 オペレータ HMI (human-machine interface) の EI 一元化

前述のサブプロセスを監視・操作する際の、オペレータに対する HMI 端末については、操作性を重視して 3 種類のコントローラの間で一元化した。すなわち、電気系 PLC、計装系 DCS、汎用シーケンサを同一の制御用 LAN にすべて接続し、EI 統合 HMI 端末に向かえば、どのサブプロセスの監視・操作も可能な構成とした。

2.2 プロコンのライトサイジングと分散化

Fig. 2 に、千葉製鉄所 6 高炉の情報処理、制御機能分担の変化を 1 次（1977 年稼動）と現在とを比較して示す。

従来のプロコンは、EI システムでは実現できない高度の制御機能と、短期（日オーダーまで）のデータベース管理機能、および中長期（月、年オーダー）のデータベースを管理するビジネスコンピュータ（ビジコン）へ EI システムから吸い上げたデータを伝送する機能を備えていた。

2 次改修にともなうシステムリフレッシュにあたり、高炉システムに要求されるニーズを再整理し、情報処理と制御に大別した。さらに、情報処理機能に関しては、昨今の EWS、パソコンの高機能化にともなうライトサイジングの考え方を導入し、身軽で、柔軟性に富んだシステム構成をとった。

千葉製鉄所 6 高炉の新プロコンの特徴は以下の通りである。

2.2.1 操業ガイダンス機能の強化

EI システムの高機能化をフル活用し、高炉の基本的制御機能はすべて下位システムに移管することにより、操業ガイダンス中心の情報処理機能を増強した。

一例として、高炉の炉内解析モデルや炉底のレンガ侵食解析モデルなど、従来ビジコンでオフライン、パッチ的に技師が使用していた貴重なソフト資産（プログラム）を、プロコンレベルで現場のオペレータが最新のデータを用いて容易に実行できるようにした。

また、上述の解析モデルを容易に実行するためにも、月オーダーの中期操業データまで、プロコンが管理することとした。

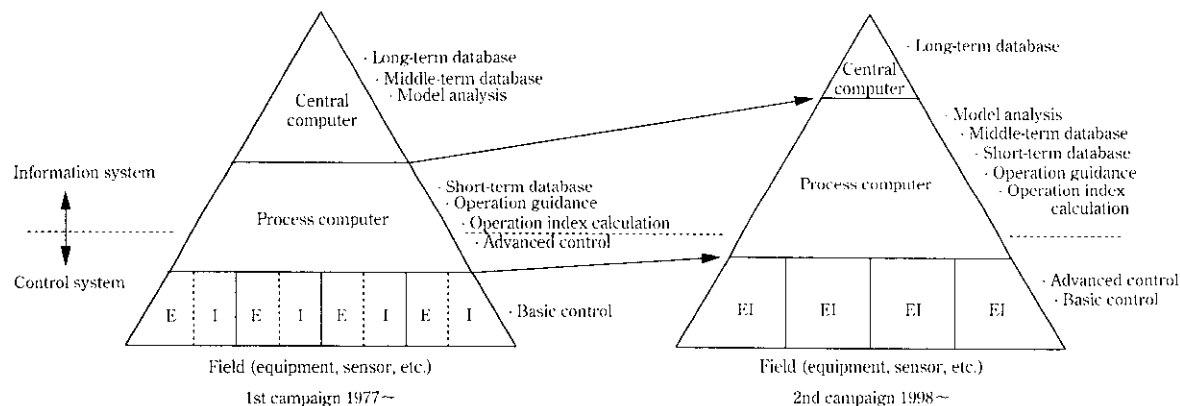


Fig. 2 Transition of functional workshare of Chiba Works No. 6 BF control system

2.2.2 新陳代謝の容易なシステム

制御システムの寿命よりも、高炉本体の寿命がますます長くなっていくことを想定して、プロコンをデータベース管理機能、操業ガイダンス機能、伝送機能、端末機能を受け持つ複数のコンピュータ群からなる分散型システムで構築し、操業ニーズ変化やコンピュータの劣化進行などに柔軟に対応できる形態とした。

3 高炉炉況制御

3.1 高炉炉況制御のニーズ

高炉は、炉内原料が還元溶融反応を経て銑鉄として取り出される過程を有する、巨大な物理化学反応容器である。炉内は高温高圧でかつ多変数の分布定数系であるため、プロセス特性を表す物理量をすべて測定し、それに基づいた制御理論によるモデルを組み立てることは困難である。したがって、高炉の操業は、操業者の経験と測定された多種多量のプロセス情報に基づいて行われている。高炉操業における炉況診断、制御システムにおいては、操業者の判断を適正化するため、多くの情報の定性的、定量的評価を支援する情報提供機能が必要である。

3.2 従来の炉況制御システム

前述のようなニーズから、千葉製鉄所 6 高炉では 1977 年の稼動以来、炉況診断システムとして、「高炉 Go/Stop システム」が導入され、操業者へ定量的な炉況判断指標を提示し、安定稼働に貢献してきた。その構成は、各種センサーの情報をその絶対値（レベル）と変化とを組み合わせた指数とし、各々に重み付けを加えた総合評価指数に基づき、炉況の良好 (Go)、維持 (Stop)、悪化 (Back) を判定し送風流量の指示を行うものである。

3.3 最新の炉況制御システム

従来型システムは情報の集約、管理に基づく判定重視型であったのに対し、近年では、判定から具体的なアクション（制御）へ結び付けるより高度なシステム、言い換えれば、安定操業下での（冷え込みなどの）重大トラブル回避などの目的から、低コスト操業下における高度安定稼働のためのシステム構築目的へと変化してきている。

また、高炉プロセスのモデリングの難しさと操業者の人間判断への依存度が高いという観点から、高炉各社では、ファジー理論、エ

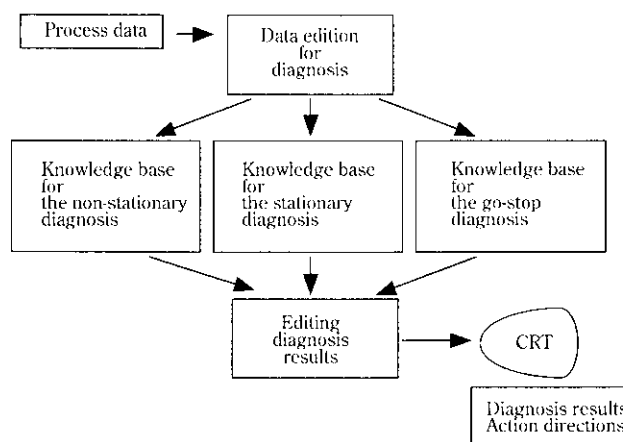


Fig. 3 Configuration of the knowledge base in the blast furnace expert system

キスパートシステムなどの知的制御手法を使ったアプローチが試みられてきた。

水島製鉄所 3 高炉で実用化したエキスパートシステムを適用した炉況管理システム³⁾を説明する。高炉で生じる大きな時定数を持つて変化する（炉熱や出鉄バランスなど）現象を計測した情報と、突発的に変化する（送風圧力の急変動など）現象を計測した情報とを、それぞれ独立した知識ベースとして構築した。知識ベースはプロダクションルール形式で記述されており、エキスパートの思考過程を反映させるように、状況把握、現象認定、アクション決定といった 3 段階の推論ができるルール群構成としている。これにより、指示アクションがどのような推論を経て決定されたかのトレースを容易に行えるようにし、指示出力の根拠を明確化している。

Fig. 3、Table 1 に知識ベースの構成を示す。水島製鉄所 3 高炉では、炉熱制御に関して定常状態の自動制御までが可能になった。千葉製鉄所 6 高炉でも同様なシステムを移植し、オペレータで容易にパラメータ変更可能な階層化テーブルを用意する改善を加え、advanced Go-Stop system として炉況管理に活用されている。

4 装入物分布制御

原料装入に対するニーズは (1) 高出鉄比安定操業、(2) 低コークス比操業、(3) コストダウンのための安価原料の多量使用などであ

Table 1 Scale of the knowledge base

	Number of production rules	Number of knowledge frames	Execution timing
Knowledge base for the stationary diagnosis	508	50	Every 5 min, 15 min, and 1 day
Knowledge base for the non-stationary diagnosis	50	5	Executed by events
Knowledge base for the go-stop diagnosis	37	1	Every 15 min

り、これらの操業ニーズを達成するために高精度な装入物分布制御が必要である。千葉製鉄所 6 高炉 2 次改修⁹⁾、水島製鉄所 3 高炉改修¹⁰⁾では、Fig. 4 に示す 3 パラレルバンカー型の新炉頂装入装置を開発、実機化しているが、これに合わせて装入物分布制御を以下の 2 つの機能を中心に構成した。

第 1 は装入物分布シミュレータを用いた分布パターン設計であり、装入パターンを入力することにより装入物分布形状を計算し、その結果を画面出力する。

第 2 は、上述の分布パターン設計を精度良く実現する制御機能で

ある。本機能には、将来的な操業形態の変化、使用原料の変化に追従できる柔軟性、自由度が求められ、千葉製鉄所 6 高炉 2 次改修では、制御機能設計時に以下のような点を考慮した。

- (1) 装入スケジュールの任意設定
- (2) 高精度な流調ゲート開度一定制御および装入速度一定制御
- (3) 分配シュート旋回速度の任意設定

原料装入運転においては、上記の制御機能により、装入スケジュール変更（予約の概念で HMI からの設定）以外全自動運転を実現し、安定操業に寄与している。

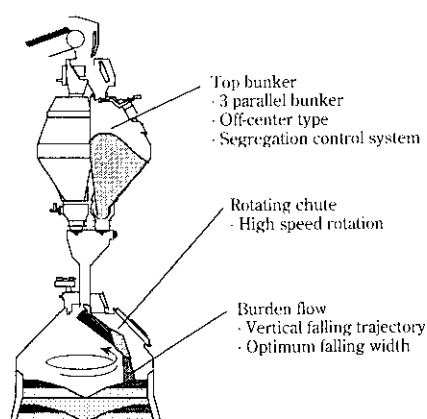


Fig. 4 New top charging system for Chiba Works No. 6 BF (2nd campaign)

5 熱風炉制御

5.1 プロセスと制御フロー

Fig. 5 に千葉製鉄所 6 高炉の熱風炉における燃焼期の燃料ガス流れと制御システムを示す。燃料ガスとして、高炉ガス（BFG）とコークスガガス（COG）を混合したガスを使用し、炉ごとの熱レベル偏差を調整するために、2 次的に COG を添加できるようにしている。

熱風炉の理想的な操業は、設備保護の観点から蓄熱室レンガの温度分布を管理しながら、より少ないガス量で所定の温度まで空気を昇温し、エネルギーコストを最小にするところにあつて、そのキーポイントは燃焼期の燃料ガス量をいかに最適値に設定するかにある。

ファジィ制御導入以前は、この最適値を算出する精度の良い制御

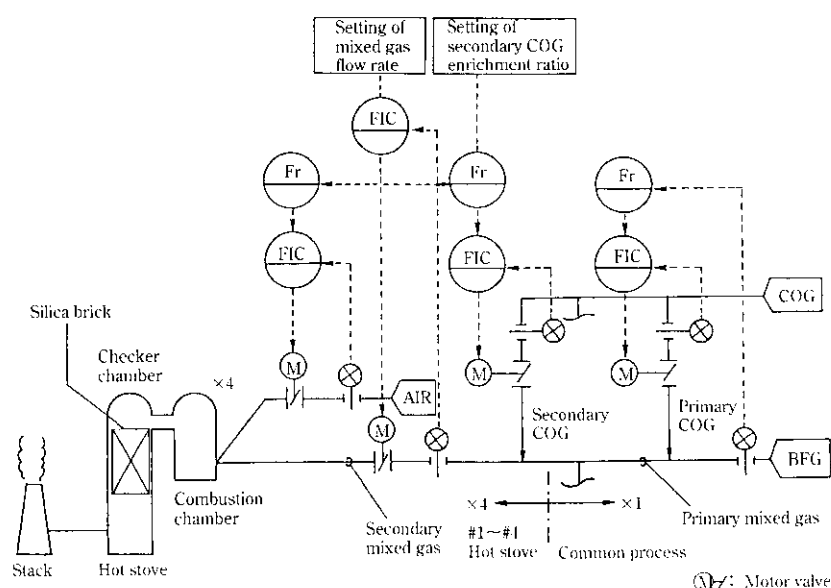


Fig. 5 Gas flow of hot stove combustion process and its control system

モデルがなく、燃焼ガス量の設定は送風から燃焼に切り替わるたびに手動で行われていた。

5.2 ファジィ制御構成と効果

川崎製鉄では、従来熟練オペレータの経験によって決定されていた燃焼期のガス量設定について、ファジィ理論を活用した制御システムを構築し、熱風炉の熱効率向上（約3%）に効果をあげてきた⁴⁾。

Fig. 6 に千葉製鉄所 6 高炉におけるファジィ制御システムの機能構成を示す。送風終了時の各炉の熱つき状態を温度計や調節弁開度をもとに判定し、次回の送風時に必要とされる熱量も勘案して、今回燃焼期におけるガス流量およびガス単位熱量を決定し、それに基づき自動制御を行うものである。

2 次改修前の千葉製鉄所 6 高炉、現在の千葉製鉄所 5 高炉および水島製鉄所では、ファジィ制御の中核部はプロコンの中に構築していたが、千葉製鉄所 6 高炉では、DCS のファジィ制御パッケージソフトを活用することにより、すべての機能を DCS のみで構築している。そのため、プロコンで実施した場合に比べて、現在の熱レ

ベル判定の厳密化や、操業条件が変化したときの対応の迅速化が図られ、熱風炉熱効率のさらなる向上に結びついている。

6 鋳床機械の遠隔操作と自動化

鋳床設備の遠隔化および自動化は作業環境改善と省力のニーズから長年の課題であった。千葉製鉄所 6 高炉 2 次改修では機械、制御系ともども全面リプレース⁷⁾を実施し、大規模な遠隔化および自動化を実現した。Fig. 7 に鋳床レイアウト、Table 2 に各機器のリプレース実施状況および特徴をまとめた。レイアウト面では傾注樋および開孔機を 2 つの出鉄口で共用化したこと、中央操作室を鋳床に新設したことを特徴としている。また、従来からある個々の設備についてもマッドガンの 1 モーション化などの改善を行った。

6.1 出鉄開孔・閉塞作業の遠隔操作と自動化

出鉄開孔・閉塞作業の効率化を目的として導入した孔前出鉄樋カバー移動機械、開孔機金棒取り替え専用機械は、設備単体での運転機能の他に、孔前出鉄樋カバー移動機械はマッドガンと、開孔機金

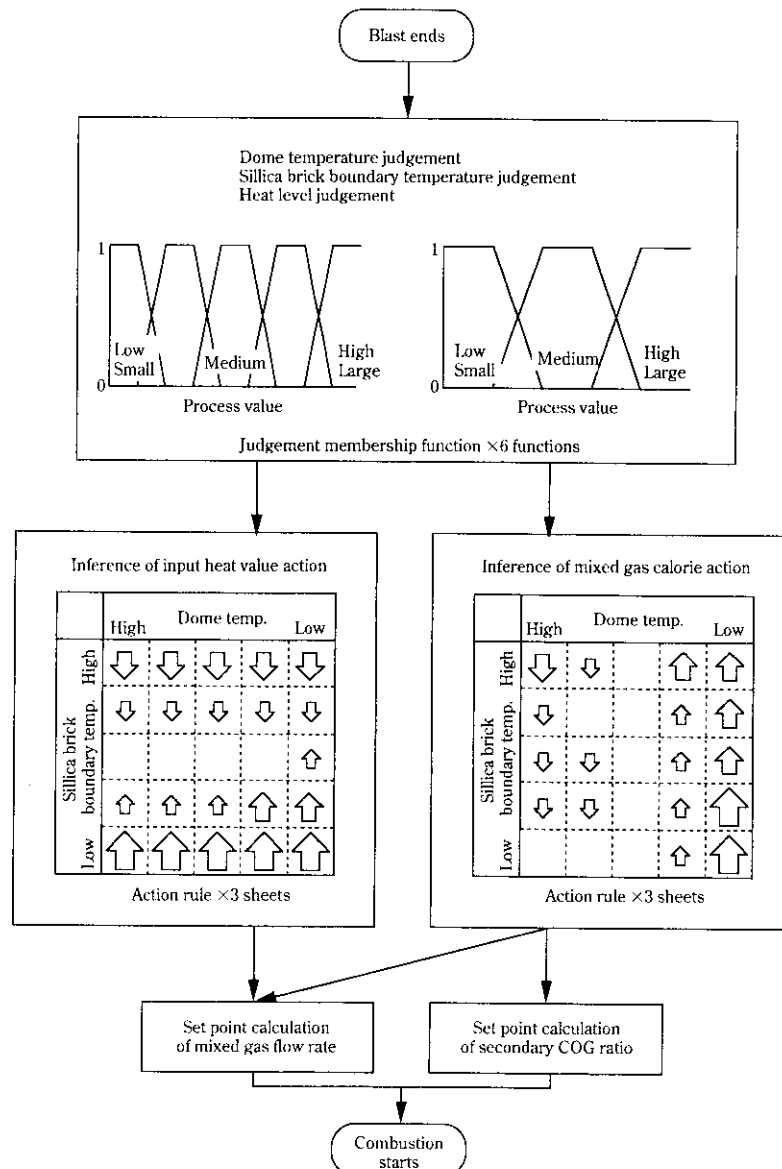


Fig. 6 General flow chart of fuzzy control system (Chiba Works No. 6 BF)

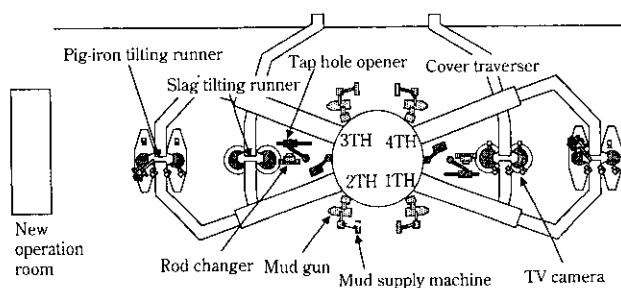


Fig. 7 Layout of cast house

Table 2 Feature of the renewal on cast house equipment

Name of equipment	Feature of renewal for the 2nd campaign
Mud gun	Fully replaced 1-motion control Increased hydraulic pressure
Top hole opener	Fully replaced Hydraulic system One system for two tap holes
Cover traverser	Newly introduced One system for two tap holes
Rod changer	Newly introduced
Desiliconization equipment	Fully replaced
Slag deformer charging equipment	Newly introduced
Tilting runner	One system for two tap holes
Torpedo weighing machine	Newly introduced; 4 sets

棒取り替え専用機械は開孔機とおのおの運動運転機能を設けた。また、これらの機器の操作については従来の無線操作に加え、鋳床に新設した中央操作室 CRT からのワンタッチオペレーションにより、出鉄開孔・閉塞作業の 1 人運転を可能とした。

ワンタッチオペレーション実現にあたっては、従来、設備本体が高温に曝されるため耐久性の面から最小限の設置であったセンサーを熱対策を実施し積極的に導入した。これにより各アクチュエーター位置、シリンダー圧力などの検出が可能となり、マッドガンや開孔機の自動位置制御などに役立てている。

6.2 受鉄滓作業の遠隔操作化

受鉄作業関連では、1 次より導入しているトビードカー溶鉄レベル測定用のマイクロ波レベル計に加え、受鉄中のトビードカー重量

をリアルタイムで測定可能な秤量器、溶鉄レベル監視用 ITV カメラを新規に導入した。これらの計測値、ITV 画像により、中央操作室 CRT から遠隔での傾注傾動操作を可能とした。また、受鉄付帯設備についても、脱 Si 剤投入設備を全面リブレース、フォーミング防止剤投入装置を新設することにより、中央操作室 CRT での遠隔監視操作を実現した。

受滓作業については、ITV カメラを新規に導入し、さらに溶滓を受ける鍋の牽引用電動台車制御装置を改造することにより、傾注傾動操作と鍋牽引用電動台車の自動運動運転を実現した。

6.3 実績収集機能の充実

1 次ではトビードカーごとの受鉄量、脱 Si 剤およびフォーミング防止剤投入量、出鉄閉塞時のマッド剤使用量、開孔時の出鉄孔深度などのデータをオペレーターがその都度帳票に記入し管理していたが、機器の運転操作とならんで負荷の大きい作業であった。2 次ではこれら実績の自動収集を達成している。

6.4 運転操作室の集約

2 次改修では上記の主要な設備のリブレースに加え、集塵機、鋳床脱 Si 設備、水砕設備などの付帯設備の制御系リブレースを実施した。これを通じて、1 次では鋳床に散在した操作盤にて行っていたオペレーションを中央操作室 CRT にて可能とすることにより、効率化を達成した。

7 結 言

千葉製鉄所 6 高炉 2 次改修での事例を中心に、近年川崎製鉄で取り組んできた高炉制御技術について述べた。

- (1) 高炉の EI 制御システムを、電気系 PLC、計装系 DCS、汎用シーケンサの最適な組み合わせで構成した。プロセス制御機能は EI に移行し、プロコンは情報処理に特化させ、ライトサイジングで分散化したシステムへと進化させてきた。
- (2) 炉況診断・制御の分野では知識ベースシステムの導入などを通して、具体的でタイムリーな操業アクションをガイダンスでできるシステムへと開発を進めてきた。
- (3) 装入物分布制御ではベルレストップ装入装置の導入とともに制御性・自由度を向上させた制御機能を実機化してきた。
- (4) 熱風炉ではファジィ制御の導入によりガス量設定の自動化と燃焼効率向上を達成した。
- (5) 千葉製鉄所 6 高炉ではマッドガン、開孔機をはじめとした鋳床機器の自動化、遠隔操作化を実現し、作業環境改善などに寄与している。

参 考 文 献

- 1) 稲山品弘, 櫻井美弦, 牧勇之輔, 鈴木拓哉, 富永太志, 鎌野秀行: *CAMP-ISIJ*, **12**(1999), 296
- 2) 岩村忠昭, 飯田 修: 計装, **35**(1992)1, 24-28
- 3) 飯田 修, 谷吉修一, 上谷年男, 沢田寿郎, 橋本正広, 斧田大介: 川崎製鉄技報, **23**(1991)3, 210-217
- 4) 鈴木拓哉, 稲山品弘, 牧勇之輔, 富永太志, 鎌野秀行, 宮田 淳: *CAMP-ISIJ*, **12**(1999), 295
- 5) 廣瀬茂行, 菅原英世, 谷吉修一: 川崎製鉄技報, **25**(1993)4, 253-257
- 6) 牧勇之輔, 高島暢宏, 小幡英志, 飯田 修, 中島一磨, 沢田寿郎: 川崎製鉄技報, **22**(1990)3, 196-202
- 7) 森川泰之, 鎌野秀行, 河合隆成, 丸島弘也, 松本敏行: *CAMP-ISIJ*, **11**(1998), 896