

製鋼工場における 最新のプロセス制御とシステム化技術*

川崎製鉄技報
31 (1999) 4, 222-228

The Latest Technologies for Process Control and System Configuration in Steelmaking Plant and Continuous Casting Machine



茨木 通雄
Michio Ibaraki
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室長



山根 明
Akira Yamane
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)

要旨

川崎製鉄水島・千葉両製鉄所で新製鋼、連続铸造工場が建設され、最新鋭の制御技術が数多く導入された。特に進歩の著しい電子制御機器の応用分野である制御システムにおいては、EIC 統合システムやマルチベンダシステムが構築された。ソフトウェア開発分野でも汎用化構造設計によるシステム製作が行われた。一方、プロセス制御の分野では、パワーエレクトロニクス技術の進歩を活かして電磁気力を応用したタンディッシュ介在物浮上装置の開発や、制御理論を応用したモールドレベル制御の高精度化などが行われた。本報では製鋼プロセスへの上記最新制御技術の適用について紹介した。

Synopsis:

At new steelmaking plants and continuous casters of Kawasaki Steel, the latest technologies for computer control system and process control were applied. An integrated EIC (electricity, instrumentation, process computer) unified control system at Mizushima Works and a multi-vender EI control system at Chiba Works were adopted. The process computer's software of the new steelmaking plant at Chiba Works was developed by means of standardized structure design for the purpose of high efficiency and high reliability on software development. In addition, mold meniscus level regulation, with state-of-the-art control theory, was introduced as remarkable applications. Electrical-magnetic coil was applied for making clean metal. This paper introduces the application of the above-mentioned latest control technologies to steelmaking processes.

1 緒 言

1993 年から 94 年にかけて水島、千葉両製鉄所において、新しく製鋼、連続铸造工場が稼働した。水島製鉄所では 93 年に第 4 連続铸造工場が完成し、千葉製鉄所では製鋼、熱間圧延の大規模なリフレッシュ計画のもとに、第 4 製鋼、第 4 連続铸造工場が稼働した。時間的には同一であるが、水島第 4 連続铸造工場が薄板普通鋼の大量生産を目的にしているのに対し、千葉第 4 製鋼工場は特殊鋼を主体として多品種少量生産の効率化をめざした。当社における新規製鋼工場の建設は千葉製鉄所第 3 製鋼工場建設以来 20 年ぶり、新連続铸造工場の建設は千葉製鉄所第 3 連続铸造工場建設以来 12 年ぶりの建設工事であった。

この間、操業技術は大幅に向上し、この一翼を担う電気、計装、制御用計算機（プロコン）設備も、その時々のハードウェア・ソフトウェア・制御理論の最新技術を取り入れ、改造を重ねてきた。しかしながら、既存設備の改造では限界があり、近年著しく進歩をと

げた制御装置のメリットを十分に生かし切れていたとはいえない状態にあった。そのような状況下で新工場を建設するに際し、新製鋼、連続铸造工場の合理的な製造プロセスを構築するために最新の制御技術を駆使するとともに、新たに開発を行い、新技術も積極的に導入した。

本報では、電気、計装、プロコンの制御系設計思想を中心に、新たに導入された最新制御技術の一部として

- (1) EIC 統合システムを具現化するための技術
 - (2) 連铸タンディッシュへの電磁気応用技術
 - (3) 製鋼プロコンのソフトウェア構造汎用化技術
 - (4) 連铸モールドレベル制御への制御理論の応用技術
- について報告する。

2 制御システム構築技術

急速なハードウェアの進歩により製鉄所内の制御システム構成に可能性が広がった。ハードウェアの高機能化・高速化・安価化を最大限に活用して、

- (1) ネットワークの高速化による配線ミニマム化

*平成11年6月2日原稿受付

- (2) インターフェースの簡便化による複数 CPU による複合制御機能の向上
- (3) 制御コントローラ的能力向上による電気 (E) 計装 (I) プロコン (C) の機能分担の最適化 (プロコン制御機能の下位取込みによる制御の自己完結化とプロコン機能の高度化)
- (4) 電気計装プロコンの操作性統一 (EIC 統合)
- (5) 制御コントローラ的能力向上によるソフト生産性向上、保全性向上

など、数多くの検討を行った。この中で、ソフトウェア生産性向上を目的として、千葉製鉄所第4製鋼工場プロコンでのアプローチ例と、システムの機能分担の最適化、新規に実現されたシステム上の機能について、連続鋳造制御システムの例を紹介する。

2.1 連続鋳造工場における EIC 統合システム

水島製鉄所第4連続鋳造設備の制御系設計にあたって、製品の品質はもとより、品質保証、DHCR (直送温間圧延)、高能率操業の実現、品質判定の自動化、ヒューマンマシンインターフェース (HMI) を中心とした操作性の追求、また、溶鋼に近接する高熱、危険作業の排除を目的とした広範な自動化など、多くの要求、期待が寄せられた。そこで、それらの課題を満足すべく、各種制御システムを性能、拡張性、信頼性の観点から比較検討した結果、Fig. 1 に示すような共通高速データウェイをバックボーン LAN にした EIC 統合制御システムを採用した。水島製鉄所では、工場間スケジュール調整機能が O/C (online computer) と呼ばれるビジネスコンピュータ (B/C) の所掌となっており、プロセス計算機 (P/C) 以下の階層は担当工場の制御に重点が置かれている。これら電気、計装、計算機の各装置を同一ネットワーク上に結合し、また、FEP (front end processor) を通して機電一体設備、Ethernet を介して FA 計算機群とも接続した。

システムの特徴は、

- (1) P/C が必要な情報を迅速正確に収集し処理しやすいシステム
- (2) 統合操業データベースの構築

(3) HMI の統合

- (4) 制御装置間インターフェース点数の激減の4点であり、その詳細を Table 1 にまとめる。

特に HMI に関しては、CRT タッチオペレーションを基軸とし、E、I、C 機種間の差異にとらわれず、操作性に優れ、プラントを最適にオペレーションできるシステムを実現した。

操業画面の一例を Fig. 2 に示す。この画面は連続鋳造操業の基本画面であり EIC それぞれの情報が融合表示されている。計装関係は、品質に最も密接に関係する冷却水の制御情報を左半面に棒グラフの形で表示し、中央は電気のパinchロール制御、トラッキング情報が、中央左上に P/C からの製造命令情報がある。この画面を基本とし、操業の各局面に必要な画面は、その都度、表示される仕組みになっている。オペレーターは E、I、C を意識することなく、一つの画面で操作、監視が可能である。レスポンスは 1~2s と速い。

2.2 連続鋳造工場におけるマルチベンダシステム

千葉製鉄所第4連続鋳造工場の主要設計課題は

- (1) 高能率操業と小ロット鋳造への対応
- (2) 高品質
- (3) 非定常レス鋳造

である。また、千葉製鉄所製鋼工場は、水島製作所に比べ上工程が単純であり、転がー連鋳間工程調整を行う、いわゆる O/C に対応する計算機を配していない^{2,3)}。

そこで、上記課題から制御システムの設計方針を次のように定め、マルチベンダシステムの構築にいたった。

- (1) 製鋼、連続鋳造工場では、P/C にて工場間スケジュールを実行調整しながら操業を行うので、B/C から送信される命令の管理と操業実績の把握に基く品質管理との綿密な関連づけを行う。
- (2) 操作性の面では、端末を統合し台数を削減する。
- (3) 電気、計装制御系は連続高速制御性が必要で、規模も似通っ

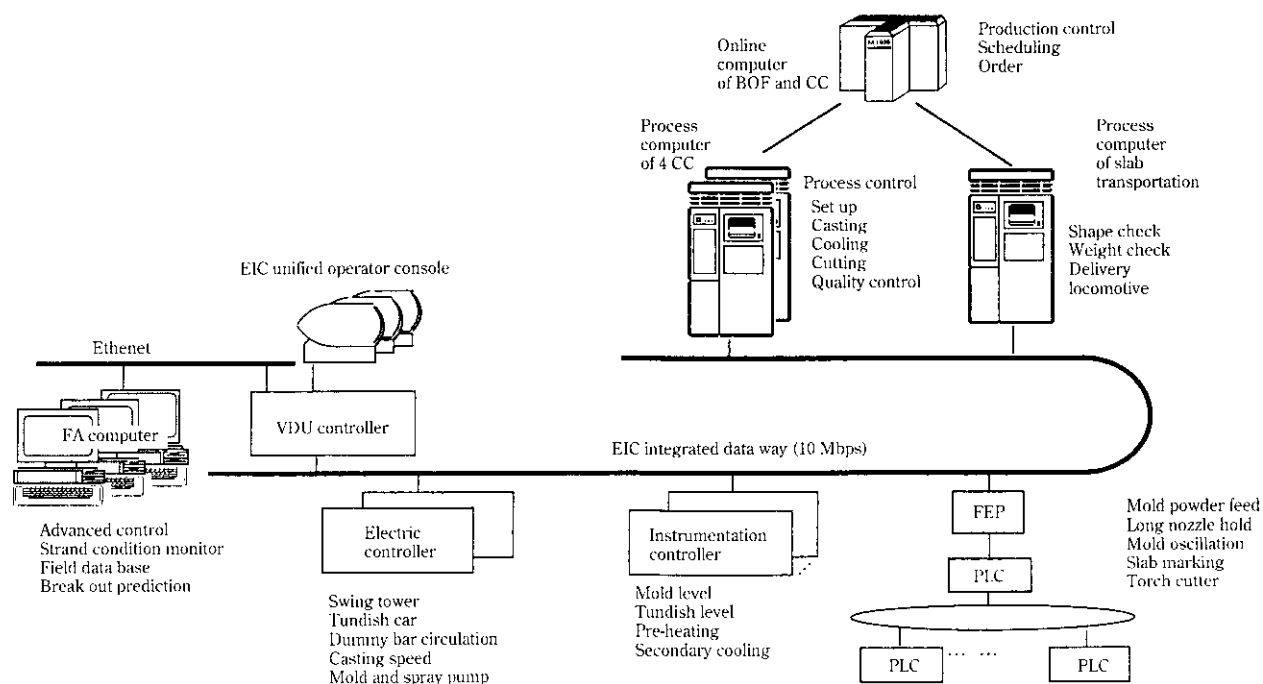


Fig. 1 System configuration of Mizushima Works 4CC

Table 1 Features of EIC unified system and control functions

Features	Means of accomplishment	Accomplished control functions
Higher functionality and higher performance of process computer	Unified data way makes it easier consolidation and expansion of dense high-speed data with 10 Mbps	Process control with advanced data interface Full automatic casting, Double slab cutter, Direct hot charge rolling, Production order modification, Accurate quality control and judgment Advanced engineering support Real time process data analysis through PC network
Continuous caster data base	Realtime plant data base accessible from every controller All necessary data and information, such as field signals and production order, are provided	Accurate tracking such as casting length and slab transfer Flexible production order control Efficient and reliable back up system for emergency such as system down
Optimum plant operation	Operation through single window unified human machine interface Sophisticated human-machine interface	Reduction in VDT number Five units for cast, cut and transportation Virtual maintenance with network condition monitoring system
Cost reduction	Simple system configuration to the whole of a large plant	Reduction in interface hardware and software Reduction in process time Improved engineering efficiency, organizational streamlining, unification of concepts, total system balance

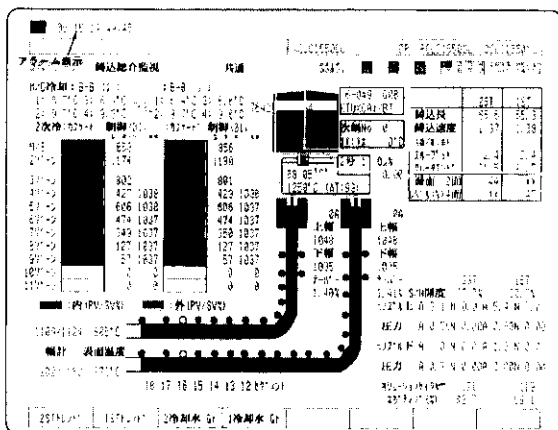


Fig. 2 Example of integrated EIC display

ているので、EI を統合して、情報処理の高速化、簡略化、端末操作の一元化をはかった。

- (4) 情報端末は、P/C 端末を基幹 LAN を介して B/C とも接続し従来の特用端末を廃し、P/C 端末上からも B/C 画面表示、操作を可能として端末の融合をはかった。

また、千葉製鉄所では、第 4 連続鋳造工場とともに、転炉、VOD 新鋭設備一式からなる第 4 製鋼工場をあわせて建設したり。両工場の P/C に同型機種を採用し、B/C、および P/C 階層で、システム設計を統一することで、開発効率、信頼性、保全性の面で大きな効果をあげた。

全体制御システム構成を Fig. 3 に示す。特徴は、

- (1) 製鉄製鋼地区のほぼ全 P/C を接続する大規模な FDDI 基幹 LAN
- (2) ブロードキャスト通信により優れた開発性と高い信頼性を両立した二重構成の P/C ハードウェア
- (3) PLC および DCS 間でのバス情報共有化、端末共有化
- (4) 基幹 LAN への Ethernet 接続でオープン化した専用制御用 FA 計算機群
- (5) 末端制御シーケンサのネットワーク統合化
- (6) EI 階層での制御パラメータ保持と、EI、C 間 G/W 機能を持つ

つ専用計算機 APS (application station)

- (7) 操業情報を収集保存しているデータサーバシステムなどである。制御機能の概要を Table 2 に示す。

制御系と情報系が明確に分離され、HMI の点からも、PLC、DCS、下位シーケンサを含む「制御系」統合と、B/C、P/C の「情報系」統合が達成された。基幹 LAN 上の任意の計算機から EI 情報とサーバシステムの時系列操業データにも随時アクセスが可能となり、情報のオープン化も合わせて実現した。

2.3 製鋼工場におけるプロコンソフトウェア構造設計

(1) 高機能化、複雑化するソフトウェアの信頼性向上、(2) 建設/改造/保全コスト削減を目的とする従来の「汎用処理ソフト + 可変定義データ」タイプのソフトウェアでは「処理の冗長度増大」が動作上の欠点となっていた。しかしながら、近年の計算機ハードウェア技術の進歩による処理能力の向上を最大限に活用することにより、上記の冗長度増大を許容するシステムを実現する環境が整ってきた。このようなシステム環境の改善を背景に、1990 年に稼働した第 3 製鋼新プロコンシステムでは端末からの操作入出力処理の汎用化に取り組み、成果を上げた。

千葉製鉄所第 4 製鋼工場建設の機会を捉え、ソフトウェアおよびデータベースに本格的な汎用化設計思想を取り入れたプロコンシステムを開発した。

2.3.1 処理汎用化へのアプローチ

プロコンシステムの検討にあたり、計算機に通知される外部事象、計算機から外部への事象通知は、すべて高速 LAN により一本化された通信によることを前提条件とした。

具体的な設計は、以下のステップに沿って進めた。

- ・STEP 1: 既設システムの解析を基に、製鋼プロコンとして必要とされる処理内容の分類を行い、共通項の抽出により汎用化範囲を特定した。
- ・STEP 2: すべての入力を共通的に処理するための外部インターフェースの統一とこれに対応した共通処理構造およびテーブルロジック構造の設計を同時推進した。
- ・STEP 3: 実機上での試作品製作、テストラン、評価（特にパフォーマンス面の検証）を基に、本番仕様のマイナー変更を実施した。

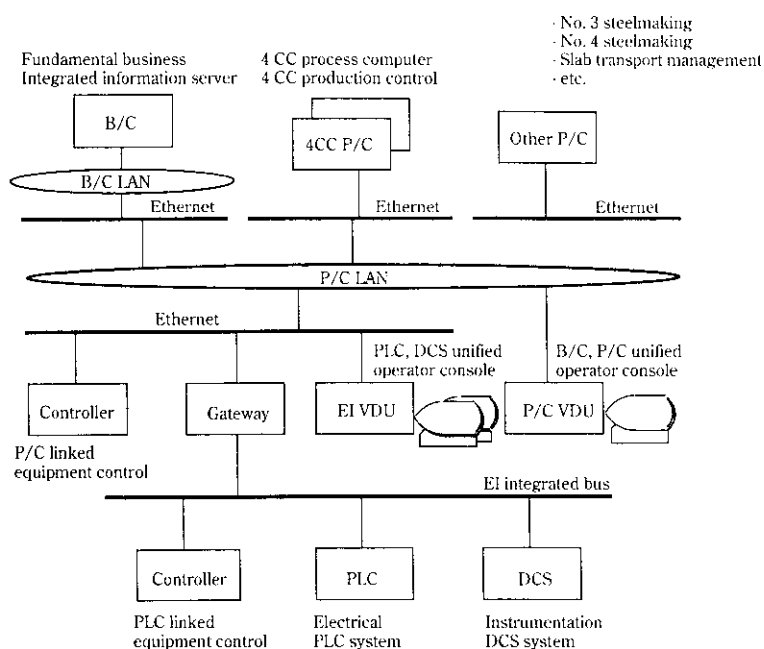


Fig. 3 System configuration of Chiba Works 4CC

Table 2 Main function of Chiba Works 4CC P/C automatic control system

Heading	Function
Preset control	Setting block of pattern and parameter data to PLC, DCS at previous charge casting start timing · Cooling pattern selection · Mold oscillation pattern selection · EMS pattern selection · Bubbling gas selection · Mold width change parameter selection
Event scheduling	Setting individual slab control data to PLC, DCS at particular production timing · Mold width change control · Casting speed control · Slab cut length setting · Slab delivery control
Manufacture standard table maintenance	Pattern table of manufacture standard maintenance Control parameter maintenance

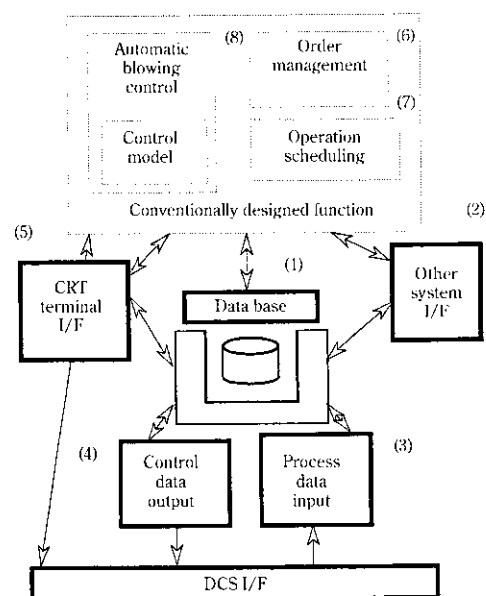


Fig. 4 Schematic view of standardized software configuration

・STEP 4: 実操業シミュレーションにより本番仕様の最終確認と微調整を実施した。

上記のアプローチにより、汎用処理化の対象とした機能を Fig. 4 に示す。具体的な機能を以下に示す。

- (1) データベースアクセス処理
- (2) 計算機通信インターフェース処理
- (3) 実績情報入力処理(処理構造例として Fig. 5 に示す)
- (4) 制御情報出力処理
- (5) 汎用端末情報入出力処理

2.3.2 処理汎用化の実績効果

同一機能の対既設製鋼プロコン比でアプリケーションソフトボリュームは 31% に減少した。また、通常発生する小規模な改造はソフトロジックの変更なく、テーブルデータの入替えにより高信頼かつ迅速に処置できる環境が整った。このことにより、当初目的とした、高機能化、複雑化するソフトウェアの信頼性向上を達成できた⁶⁾。

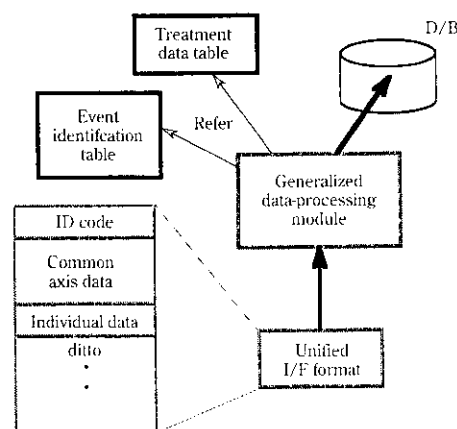


Fig. 5 Basic configuration of generalized logic for No. 3 function

3 モールドレベル制御への制御理論の適用

連続鋳造機のさまざまな制御系のなかで、モールド湯面レベル制御系は鋳片の品質を安定させるうえで最も重要な制御系の1つである。高温の溶鋼注入量をスライディングノズルの開閉で調整し、湯面を一定に制御するが、さまざまな外乱要素があり、古典的なPID制御系のみでは必要とされる制御性能を達成できなかった。そこで、当社の千葉、水島両製鉄所はいうまでもなく、鉄鋼各社においてもTable 3に示すような種々のアドバンスト制御方式が試行されてきた。同じスラブ連続鋳造機でも、各社各製鉄所各様の対応を行っており、外乱の種類が多岐にわたっていることがうかがえる。

水島製鉄所第4連続鋳造工場には、最大2.5 m/minの高速鋳造、DHCR操業用の高速鋳片の製造などの機能が具備されており、レベル制御系に未経験の障害をもたらす可能性があった。そこで、制御システムの設計に当たっては、さまざまな方式の制御理論の適用がしやすい構成とした。Fig. 6に、レベル制御系のシステム機能分担を示す。基本となるPID制御系をEIC統合システムの中に作り込み、インターロック、安全処置はすべてこの中で完結する形を取った。ロバスト制御、オブザーバ制御、適応制御など、アドバンスト制御機能は、別置きのFA計算機で実行するが、演算結果はEICコントローラを介して出力する。各ロジックの切り替えやFA計算

機異常時のバックアップ処理は、すべてEIC制御装置側が主導権を取るようにした。さらに、開発の便宜を考え、EICコントローラでPID制御しながら、同時にFA計算機で新ロジックを走らせ、モニターで両方の出力を比較できるようにした。ロジック変更、パラメータ調整など制御理論応用のあらゆる調整局面で、実操業での出力の妥当性を目で確認できるようにした。

以下、鍋交換時の湯面変動を抑えてきた経緯を例に述べる。連々操業のチャージの継目ではどうしてもタンディッシュ内溶鋼のレベルが下がる。従来の連続鋳造機では、このタンディッシュ内溶鋼の変化をフィードフォワード補償することにより対応していた。ところが第4連続鋳造工場では立ち上げ当初Fig. 7に示すような湯面異常が発生した。種々解析を行なった結果、上ノズルから吹き込んでいるガスの挙動が主原因であることが分かった。すなわちスライディングノズル直後の急激な減圧で膨張するガスがノズルの流量係数を大きく変化させていた。この対策として、Fig. 8に示すようなSN開度実績値とレベル信号から流量外乱を推定する外乱オブザーバ制御を適用した。結果をFig. 9に示す。図で、鍋交換時だけでなく定常時もオブザーバ制御により目標レベルに偏差なく制御できていることが分かる。したがって、レベル変動抑制という観点からは、定常部でも外乱オブザーバを使用することが望ましい。しかし、オブザーバ制御ではPID制御に比べて予測制御の効果でスライディングノズルの制御動作が多くなり、開閉の動作回数が増えること

Table 3 Disturbance around mold level control

Disturbance	Cause of the disturbance	Countermeasure in control technic
Change of process gain (Perturbation of flow coefficient)	Immersion nozzle erosion Immersion nozzle clog Injecting argon gas	(1) Adaptive control ^{7,8)} Least mean square, Most likelihood method, Neural network (2) Expert system ⁹⁾ (3) Optimum control, Gain scheduling
Unexpected (sudden) Disturbance	Solidification and solution of steel attached to the inner surface of the nozzle	(4) Observer ¹⁰⁾
Disturbance with specific frequency band	Bulging (sinusoidal disturbance 10~20 s) Surface wave (2~3 s)	(5) H-Infinity control ¹¹⁾

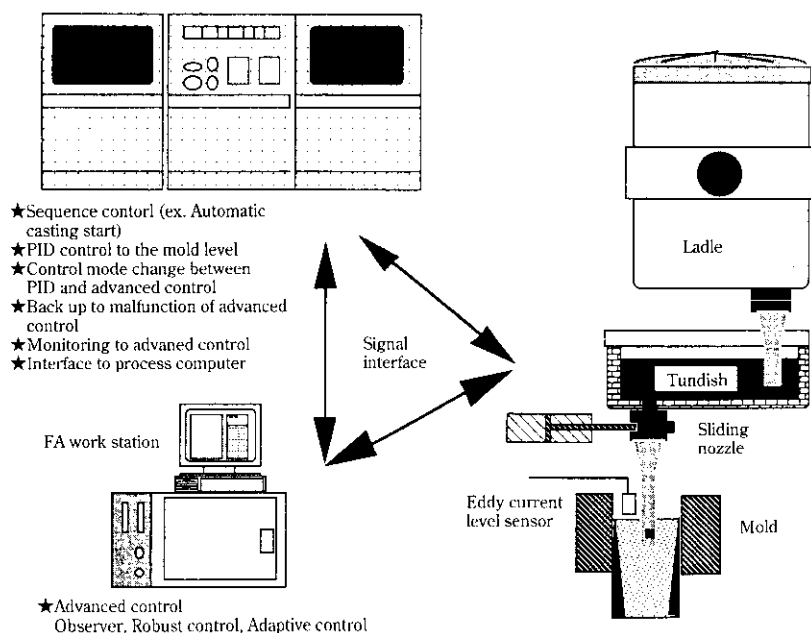


Fig. 6 Control function sharing between DCS and FA Work Station

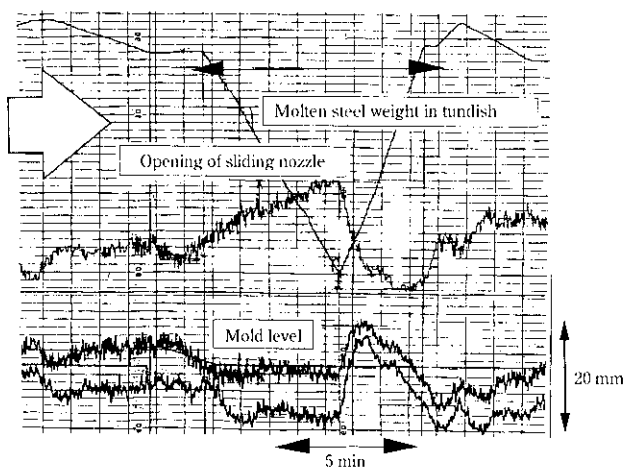


Fig. 7 Level control problem at change ladles

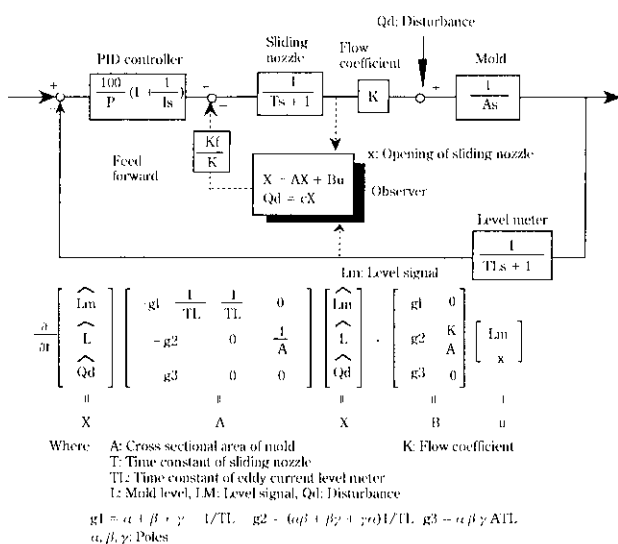


Fig. 8 Block diagram of advanced controller in case of observer

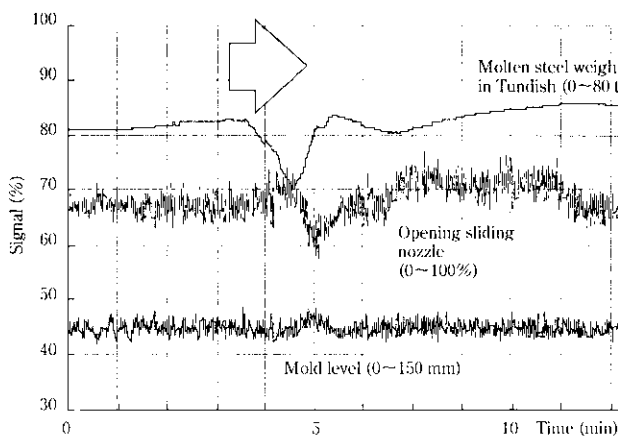


Fig. 9 Result by advanced controller/observer

による耐火物の磨耗の問題や、高速鋳造時油面の波立ちが発生した際にレベルが不安定になる可能性がある。そこで定常部に対してはロバスト制御の適応を試みた。

Fig. 10 にロバスト制御結果とオブザーバ制御、PID 制御との比

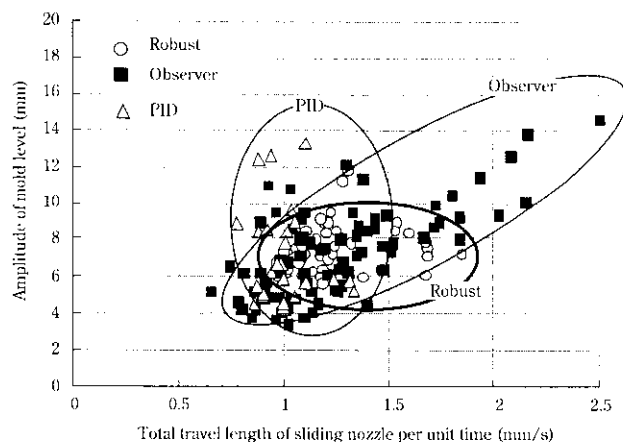


Fig. 10 Result by robust controller

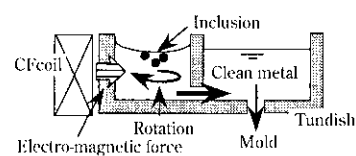


Fig. 11 Principle of making clean metal

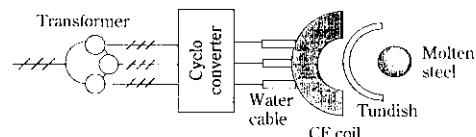


Fig. 12 Construction of electrical power

較を示す。このグラフで振幅は 100 s ごとの最大レベル偏差であり、SN 移動量は 1 s ごとのスライディングノズルの移動量の平均値である。ロバスト制御はスライディングノズルの平均速度が PID 制御とほぼ同程度で、かつレベル制御性能がよいことが分かる。

以上のように、簡便に新しい制御理論の試行を行うことができるため、レベル制御精度向上に寄与している。また、千葉製鉄所第 4 連続鋳造工場でも同様の制御システムを導入している。

4 連続鋳造タンディッシュへの電磁気力応用

従来から連続鋳造機ではスラブ品質向上を目的として電磁気力の応用が盛んに行われており、EMS、EMBr などモールドや機内での介在物対策に効果を上げてきた。

千葉製鉄所第 4 連続鋳造機において、さらなるスラブの品質向上（介在物低減）を狙い、タンディッシュ内溶鋼を電磁力により回転させ、鋼中介在物を浮上分離させる遠心分離タンディッシュ用電磁コイル（以下 CF コイル）を開発した。以下に CF コイルの仕様と能力について述べる。

介在物分離の原理を Fig. 11 に示す。タンディッシュ側面に配置された半円筒型電磁コイル（CF コイル）から移動磁場を発生させ、溶鋼を電磁力で旋回させることにより、溶鋼中の介在物を凝集、合体させ浮上分離させる。これによりモールドへは清浄鋼が注入される。

Fig. 12 に装置構成を示す。コイルの電源として、低周波電源変

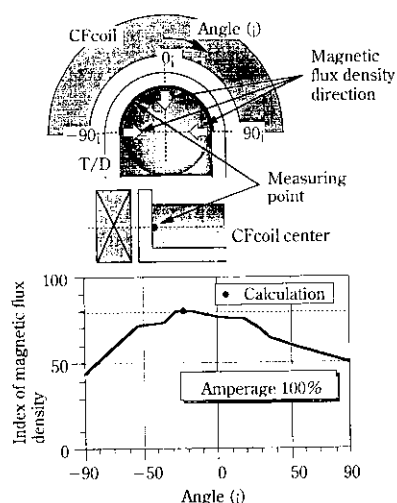


Fig. 13 Magnetic flux density of CFcoil

換装置のサイクロコンバータを採用している。また、三次元磁場解析により計算した値と、測定結果を Fig. 13 に示す。計算結果と実測値はよく一致していることが分かる。

Fig. 14 に CF コイルを印加したときの溶鋼回転数の測定結果を示す。本設備で得られる溶鋼回転数は、当初の設計のとおりであり、鋼中介在物除去を満足するものとなっている¹²⁾。

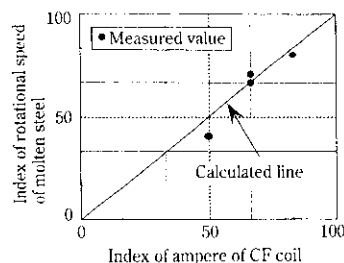


Fig. 14 Rotation of molten speed in tundish

6 結 言

水島・千葉両製鉄所の新製鋼・連続铸造工場建設に際して導入された最新制御技術を紹介した。進歩の著しいシステム制御技術においては、EIC 統合とマルチベンダ化が進み、従来では不可能であった高度な自動化と操作性の統一を実現している。複雑さを増すソフトウェアを効率よく開発していくための汎用化構造設計も新製鋼プロセスで導入され成果を上げた。また、制御理論をモールドレベル制御に適用し、スラブ品質改善が達成される一方、パワーエレクトロニクスを駆使して連続铸造のタンディッシュに電磁気力を応用して介在物低減を達成するなど、各分野で新技術が操業改善に寄与している。

参 考 文 献

- 1) 山根 明, 浦上雅彦: 日立評論, **75**(1993), 61-66
- 2) 船谷幹夫, 竹本茂男, 神尾善夫: 川崎製鉄技報, **27**(1995)2, 90-95
- 3) 船谷幹夫, 菅谷照英, 蛸島武誠: 川崎製鉄技報, **27**(1995)2, 67-73
- 4) 鍋島祐樹, 田岡啓造, 山田純夫, 浜田俊二, 櫻井美弦, 増田康男: 材料とプロセス, **8**(1995)4, 1139
- 5) 廣田哲仁, 鍋島祐樹, 鷲尾 勝, 山田純夫, 藤原義治, 増田康男: 材料とプロセス, **8**(1995)4, 1140
- 6) 桐谷厚志, 増田康男, 笠井康裕: 材料とプロセス, **8**(1995)2, 383
- 7) 黒川哲明, 加藤祐一, 近藤琢巳: 「連続铸造機モールドレベル制御への適応制御導入結果」, SICE, 「実システムにおける制御理論応用シンポジウム」, (1991), 39-42
- 8) A. Yamane, K. Akimoto, M. Maruya, and T. Iwamura: "A Method of System Identification and Adaptive Control on Regulation with Stochastic Disturbance and Observation Noise", The 29th IEEE Conf. on Decision and Control, (1990)
- 9) 笹部幸博, 久保多貞夫, 小山朝良, 三木裕貞: 材料とプロセス, **2**(1989), 388-391
- 10) 青木秀未, 加地孝行, 浅野一哉, 岩槻祐司, 山根 明: 「外乱オブザーバを用いた連铸モールド内溶鋼レベル制御」, 電気学会産業応用部門全国大会, (1993)
- 11) 黒川哲明, 加藤祐一, 近藤琢巳: 「連続铸造機モールドレベル制御への Hoo 制御理論適用」, 第 2 回ロバスト制御研究会資料, (1991), 109-114
- 12) 山田正弘, 櫻井美弦, 増田康男, 神山朋典, 小倉 滋, 美本祐司: 材料とプロセス, **9**(1996)1, 233