
千葉製鉄所第5高炉計算機システム

The Computer System for No.5 Blast Furnace at Chiba Works

岩村 忠昭(Tadaaki Iwamura) 福武 剛(Tsuyoshi Fukutake) 西山 哲司(Tetsuji Nishiyama)

要旨：

千葉製鉄所第5高炉の計算機システムは1971年6月に設置されて、このシステムの設置の目的は大きくわけて二つあり、一つは高炉プロセス全体の操業管理をおこなうことであり、今一つは高炉プロセスにおける情報処理をおこなうことである。具体的な Job として以下のことがあげられる。1)データ収集とファイルの作成 2)オペレーションガイダンスによる高炉操業の管理 3)測定値および操業指数によるプロセスの監視 4)熱風炉燃焼制御と送風切替時刻のスーパーバイブリーコントロール 5)炉頂ガス分析計の精度管理 6)操業解析の補助とグラフィックディスプレイ 7)日報、その他の情報処理 これらの Job を通して計算機システムは高炉操業と一体化されたものになっており、高炉プラントにおける必要不可欠な存在となってきている。

Synopsis：

In June 1971, with an aim of overall control of blast furnace operation and advanced data processing, IBM 1800 computer system was newly installed for the operation of No.5 blast furnace at Chiba Works. Main jobs of this system are as follows. 1) Data acquisition and filing. 2) Furnace condition control by operation guidance. 3) Monitoring by each measured value and calculated operation index. 4) Supervisory control of the combustion and the sequence interval of hot stove. 5) Control of topgas analyzer. 6) Technical analysis aid and graphic display of operation data. 7) Daily report making and information processing. As a result of many developments through this system, the computer has been well incorporated in the blast furnace operation, securing an indispensable position in the field.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

千葉製鉄所第5高炉計算機システム

The Computer System for No. 5 Blast Furnace at Chiba Works

岩村 忠昭*

Tadaaki Iwamura

福武 剛**

Tsuyoshi Fukutake

西山 哲司***

Tetsuji Nishiyama

Synopsis:

In June 1971, with an aim of overall control of blast furnace operation and advanced data processing, IBM 1800 computer system was newly installed for the operation of No. 5 blast furnace at Chiba Works.

Main jobs of this system are as follows.

- 1) Data acquisition and filing.
- 2) Furnace condition control by operation guidance.
- 3) Monitoring by each measured value and calculated operation index.
- 4) Supervisory control of the combustion and the sequence interval of hot stove.
- 5) Control of top gas analyzer.
- 6) Technical analysis aid and graphic display of operation data.
- 7) Daily report making and information processing.

As result of many developments through this system, the computer has been well incorporated in the blast furnace operation, securing an indispensable position in the field.

1. 緒 言

高炉プロセスはその古い歴史にもかかわらず、プロセス自身の定量的な解明は進んでいない。炉内に気・液・固相の物質が共存し、それらの反応がきわめて複雑であり、かつ、それらを単一の反応に分離してその入出力を押さえることが難しいこと、さらにはプロセスの状態を端的に表わす状態量がきわめて少ないことなどがその理由としてあげられよう。

高炉プロセスへ計算機が初めて適用されたのは秤量補正制御であり、これは不確かなものを一つ一つつぶしていくといった観点からなされたものである。その後、新しい計測量の開発に対する努力がなされる¹⁾と同時に、物質および熱収支に基本をおく炉熱モデルが提案され、実操業への適用も試みられている²⁾が、まだ炉況好調時の適用に限定されており、長期間の実用に耐えうるものは今後の開発にまたざるを得ない。

したがって、高炉のプロセス用計算機を考えるとき、現時点ではプロセスデータの収集とその解

* 千葉製鉄所動力部計測課

*** 千葉製鉄所動力部動力技術室

** 技術研究所製鉄研究室主任研究員

析のための機能を充実させることが必要不可欠であり、そのためにある程度の冗長度が計算機に要求される。

また高炉が大型化するに伴ない、必要な計測点や処理すべき情報は増加の一途をたどり、能率的な情報処理とデータソースの一元化が必要となってきた。さらに従来は付属プロセスとして省みられることの少なかった熱風炉についても、高温送風の要請、さらにはそれに伴う設備保守の問題など、より高度な操業と技術データの蓄積が望まれてきた。

本稿はこれらの要請に基づいて建設された千葉製鉄所第5高炉計算機システムの概要を紹介し、現在までに開発された高炉炉況制御、およびすでに実用化の段階にはいり90%程度の採用率を得ている熱風炉制御、さらには炉頂ガス分析機器の管理方法について詳述する。

2. 計算機システムの概要

本システムの構成を情報の流れに注目してFig. 1に示す。システムの設計思想およびその概要と特長を以下にまとめる。

2.1 設計思想と建設経過

本システムの設計にあたり、とくに留意した点は以下のとおりである。

(1) 操業データは極力計算機に入力し、オペレータから見たデータソースの一元化をはかる。また、それらはできる限り自動入力とし、手動入力に頼らざるを得ないものは必要最小限にとどめ、データ自身の信頼性を向上させる。

(2) 計算機に読込まれたデータは容量の許す限りデータファイルとして貯え、後処理のソフトウェアで用いるだけでなく、オペレータの要求により任意に出力できるようにする。

(3) プロセスの操作量は可能な限り計算機を通して管理できるようにし、高炉操業のワンマンコントロールを最終目標とする。ただし、制御モデルに不確定な要素が多いため、プロセスとの接続と切離しが簡単に行なえるSPC方式を原則とする。

(4) 制御モデルの基礎データとなる計測値については、計算機処理によりその信頼性の向上をめざすとともに、制御モデルにおいても若干の計器のドリフト程度は追従して行くようなくふうをする。

このシステムの建設は1971年6月の改修を機会に行なわれ、火入れと同時にシステムはスタートした。しばらくはソフトウェアの修正と追加が相次ぎ、同年12月にいたって第一次計画が完成した。その後、操業形態の変更に伴うシステムの変更と追加に努め、熱風炉についてはクローズループでの計算機制御が実用化されるに到った。高炉炉況制御については各種の指数により操業の定量化がなされており、さらに総合的な制御に目標をおいて開発を進めている。

2.2 計算機の構成と特長

2.2.1 ハードウェアの構成

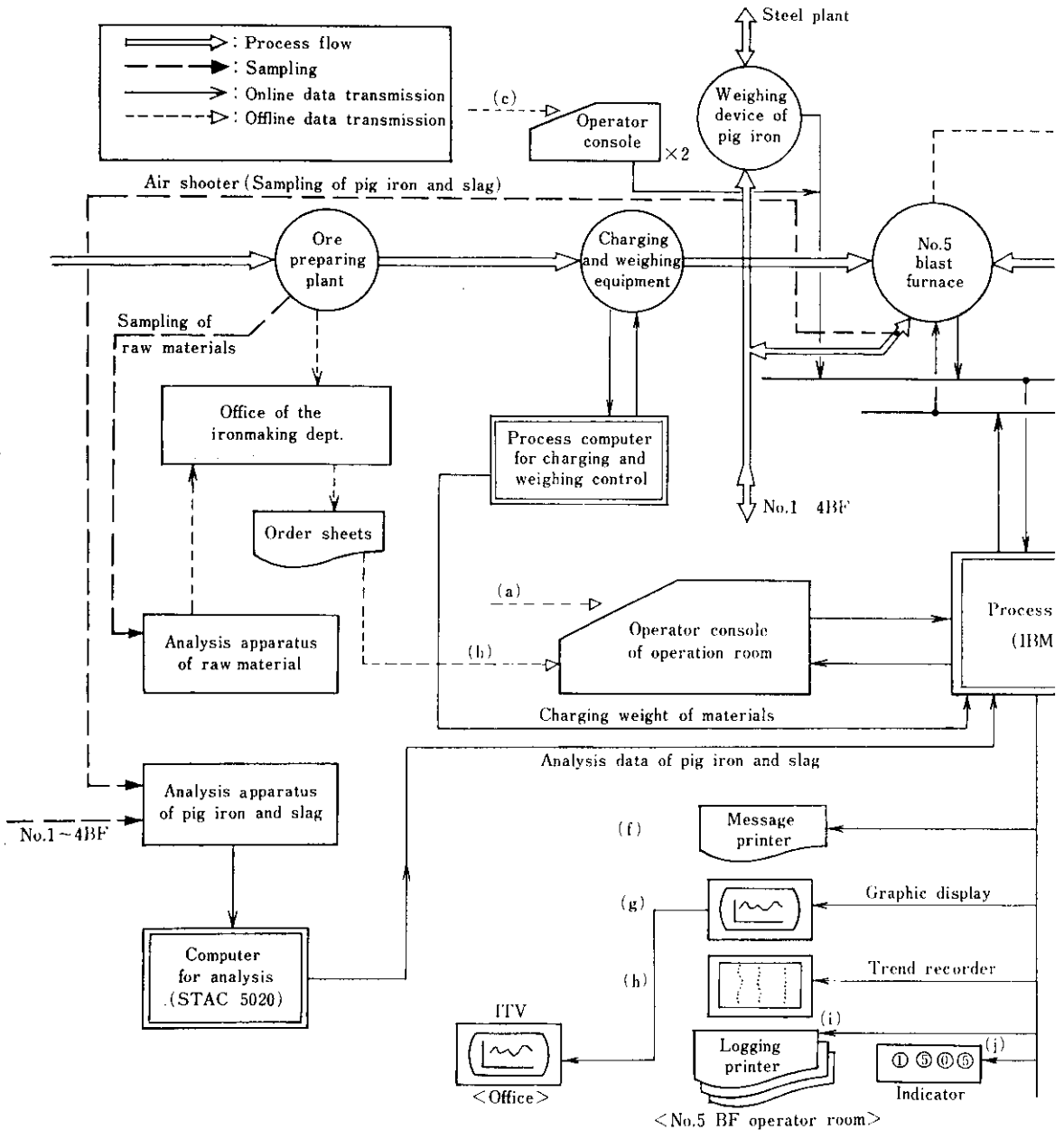
Table 1にハードウェアの仕様を示す。特長としては

- (1) 計算機側の入出力点数を極力少くし、マトリックス回路の採用により実装点数を大幅に増加させていること
 - (2) アクセスタイムを犠牲にして容量の大きいディスクを外部記憶として使用していること
 - (3) メモリーチューブ方式のCRTを採用し、グラフィックな表示も可能にしていること
 - (4) CRTは2機種ともプロセス入出力信号を用いてコントロールしていること
- などがあげられる。

また、計算機からプロセスを操作するのは、Fig. 2に示すようにすべてスーパーバイサリーな制御方法を取っており、ローカルな制御は一般計装設備あるいはワイヤードロジックにまかしている。設備的な理由により送風量と富化酸素量は直接計算機より操作することはできないが、その他の操作量はすべて計算機で集中管理している。

2.2.2 ソフトウェアの構成

本システムは制御用計算機としては初めてソフトウェアをすべて当社で作成したため、できるか



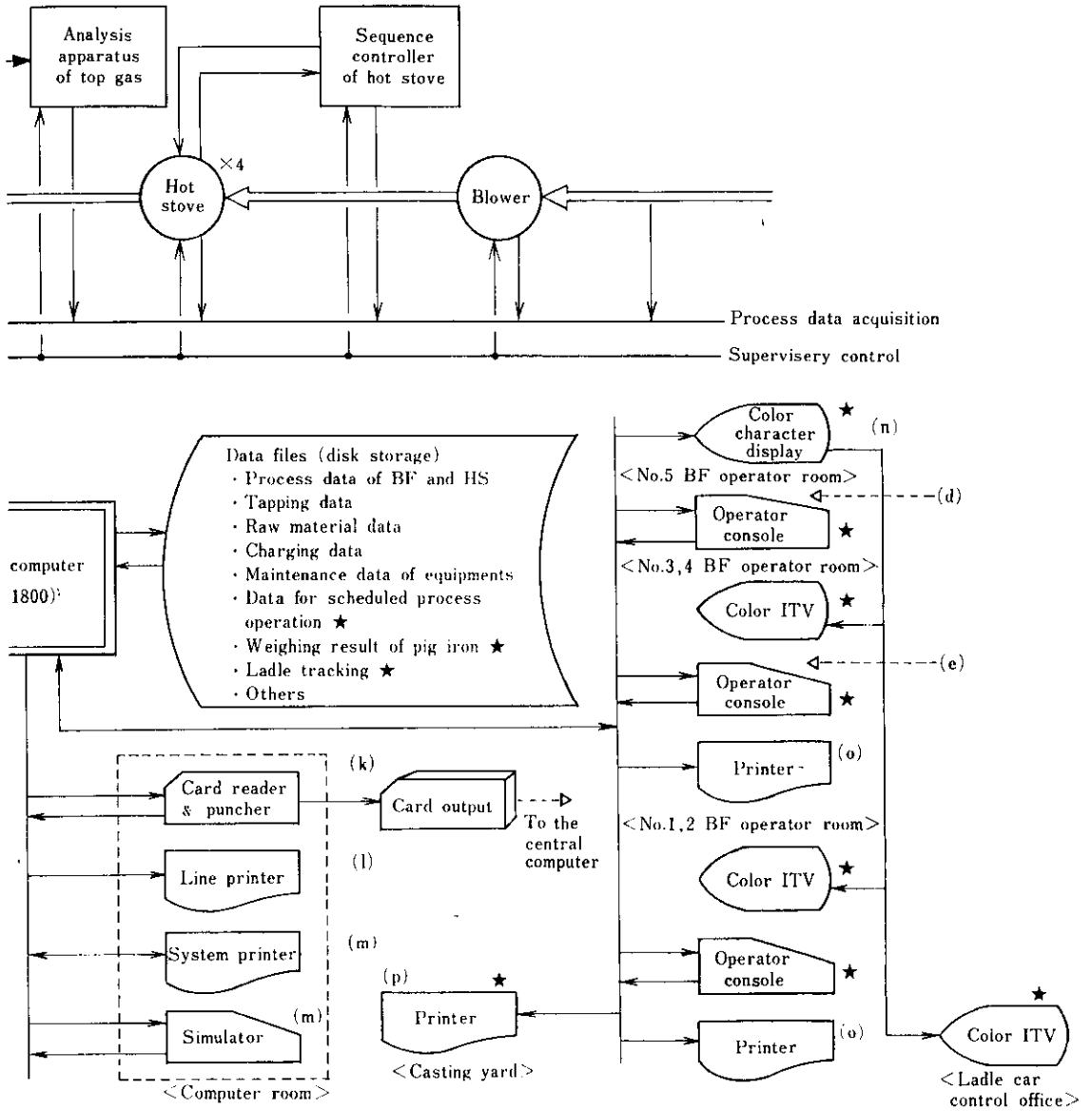
Manual input data

- (a) Set point value of BF (blast furnace) and HS (hot stove) (in case of manual mode)
- Miscellaneous data
- (b) Set point value of raw material weighing
- Data of raw material analysis
- (c) Ladle No.
- (d) Modification data for weighing control of pig iron
- (e) Ladle No. and tap No.

Output for operator

- (f) Operational guidance and alarm message
- Print out of filing data or other demand jobs
- (g) Display of operation data table
- Demand display of filing data
- (h) Operation record
- (i) Logging of BF operation, HS operation, tapping data and charging data
- Event logging
- (j) Hot metal temperature

Fig. 1 Block diagram of the computer system



- (k) Daily process data
- (l) Miscellaneous daily reports
Output of back ground jobs
- (m) System maintenance use
- (n) Ladle information
- (o) Report of pig iron weighing
Analysis data of pig iron and slag
- (p) Quality classification of cast iron

(★ : Near future plan)

Table 1 Hardware specifications of the computer system

Center processing units	Model	IBM 1800	
	Memory capacity	32kw	
	Cycle time	4 μ sec	
	Auxiliary memory capacity	512kw \times 2	
	Auxiliary memory type	Floating head magnetic disk	
	Auxiliary memory access time	70msec	
	Operation speed	Add	9 μ s
	Multiply	30.5 μ s	
	Divide	85.5 μ s	
Peripheral equipments	System printer	IBM 1816	\times 1
	Card reader & puncher	IBM 1442	\times 1
	Line printer	IBM 1132	\times 1
	Logging printer	IBM 1053	\times 7
	Off line card puncher	IBM 29A	\times 1
	CRT	SONY-TEKTRONIX 4501	\times 1
		(Memorytube type)	
		Iwatsu DSP 302	\times 1
		(IC Memory, colour)	
	ITV	Toshiba (Monochrome)	\times 3
	(connected with the above CRT)	Iwatsu (colour)	\times 4
	I/O relay unit	Tateishi	\times 1
	Operator console	No. 5BF operation use	\times 1
	Pig iron weighing use	\times 5	
Others	Trend recorder	\times 1	
	Simulator	\times 1	
	Indicator panel	\times 3	
Process I/O		Computer's points	Interface's points
	Analog input	192 points	—
	Digital input	128 bits	544 bits
	Analog output	6 points	—
	Digital output	128 bits	660 bits
	Pulse output	48 bits	—
	Process interrupt	64 bits	102 bits

ぎり専門知識を必要としない言語を選ばねばならなかった。そこで手続き言語としてプロセス入出力処理をサブルーチン化した FORTRAN を、さらに問題向き言語として Fill in the Blank 方式でコーディングを行なう PROSPRO の採用に踏みきり³⁾、ソフトウェア作成に要する時間を大幅に削減することができた。ただし、ともに同種類の言語としては初期に開発されたものであり、その機能が狭く、また冗長性の点でも問題があっ

た。PROSPRO については本システムにありようにかなりの修正と削減を行ない、また FORTRAN については、ASSEMBLER によるサブルーチン処理によりその機能の大幅な拡張を行なった。現システムにおいては、その全機能を FORTRAN のプログラムで処理することができる。なおコア常駐のプログラムは容量上の理由からすべて ASSEMBLER に統一している。

Fig. 3 にソフトウェアの構成を示す。

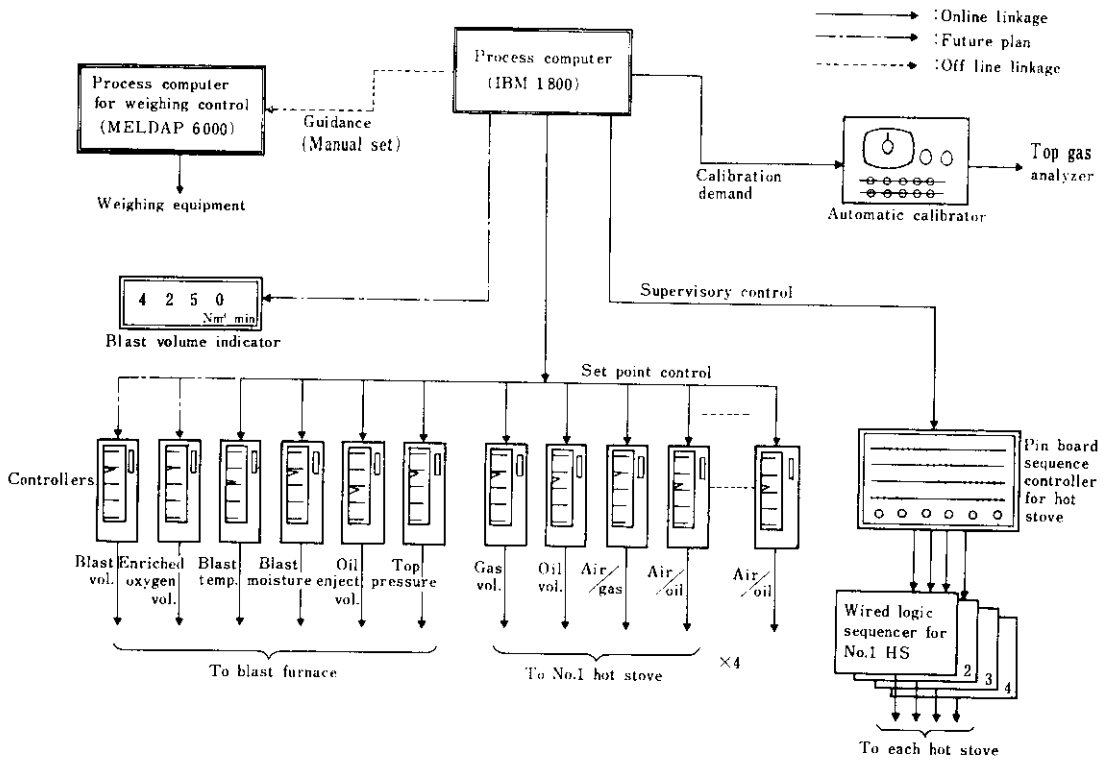


Fig. 2 Supervisory control system at No. 5 BF

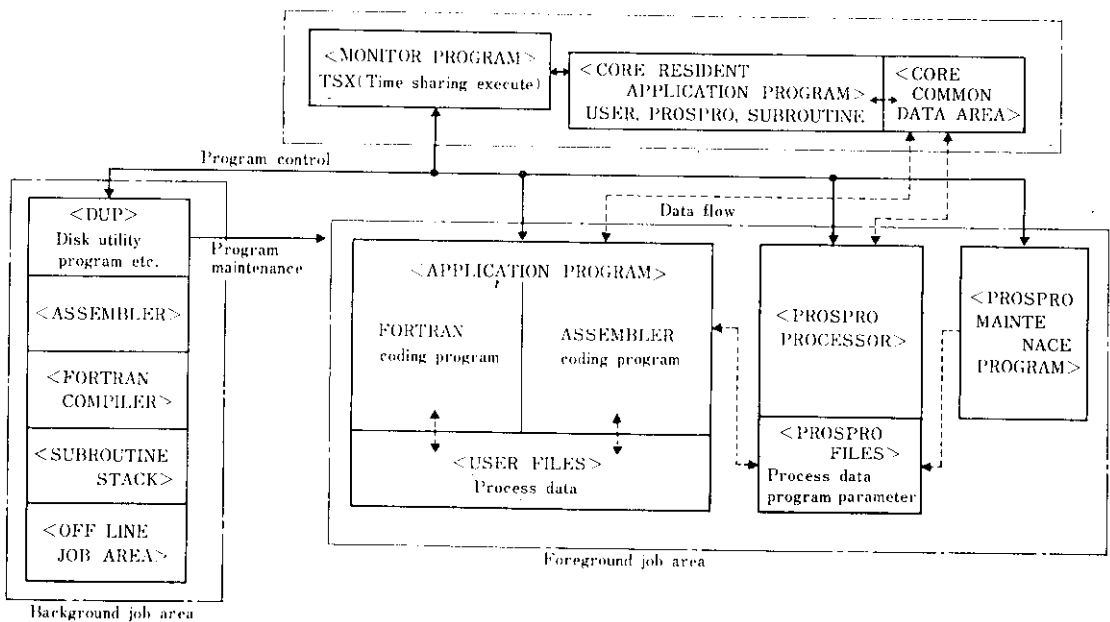


Fig. 3 Software configuration

2.3 システムの構成と機能

本システムは大きくわけて情報処理の機能と操業管理の機能からなりたっており、さらに両機能の信頼性を高めるために計測機器の管理やソフトウェアの保守を行なう上での機能を充実させている。以下に各機能の概略と具体的な Job を示す。

2.3.1 情報処理の機能

プロセスおよび関連部門から発生するデータの収集とファイルの作成を行ない、適時オペレータにタイプライタや CRT などを通して必要事項を出力させる。具体的な Job 項目としておもなものは以下のとおりである。

- (a) 高炉と熱風炉のプロセスデータの収集
 - (b) 装入用計算機、成品分析計算機とのリンケージ
 - (c) データファイルの作成
 - (d) 各種設定盤管理
 - (e) 日報の作成
 - (f) 全高炉成品分析速報と総括表の作成
 - (g) ファイルデータの要求印字やグラフィック表示
 - (h) トレンド記録計への操業管理図作成
 - (i) 鋳物銑の規格判定と伝票作成
 - (j) 溶銑の自動看貫と管理および速報
 - (k) 溶銑鍋のトラッキングと寿命管理
 - (l) 中央計算機への 1 日総括データのカード出力
- なお(j), (k)については現在建設中である。

2.3.2 操業管理の機能

計算機に入力された情報に基づき高炉と熱風炉の操業状況の定量化を行ない、さらに適当な論理に基づいて操作量の制御を行なう。また、操業上必要な日常計算をオペレータとの対話形式で行なえるようにしている。以下の項目がおもなものである。

- (a) プロセス操作量の集中管理
- (b) 炉熱指数、通気抵抗指数、スリップ指数、棚指数などの各種指数の演算と監視
- (c) 高炉炉況の判定とオペレーションガイダンス
- (d) 熱風炉計算機制御
- (e) 炉内浸水、炉体温度、ドーム温度、排ガス温度

などの異常監視と制御

- (f) 作業標準に基づく操作量の定値制御とプログラム制御
- (g) 鉍石原料の分析値管理と諸元計算
- (h) 銑滓バランス計算
- (i) 理論燃焼温度、羽口シャフト風速などの試算

2.3.3 その他の機能

上記両機能をサポートするものであり、二重化された計算機器の管理やソフトウェアの保守のための機能がおもなものである。

- (a) 炉頂ガス分析計精度管理と校正処理
- (b) 溶銑温度測温
- (c) 二重化計器の差の監視
- (d) 汎用シミュレータ、システムプリンターによるシステムメンテナンス
- (e) 計算機スタート時のプロセス状態の追従と自動復帰
- (f) バックグラウンド処理

これらの Job の中からおもなものを選び以下の章にその内容を説明する。

3. 情報処理システム

先にも述べたとおりプロセス解析の道具としての使い方が本計算機にかなりの比重をしめており、データ収集とそのファイルの作成、さらにはオペレータへの解析しやすい形での出力に力を入れている。また、当所の高炉では唯一の情報処理能力をもった計算機であり、そのため高炉地区全体に関する情報処理の仕事も行なっている。

3.1 データの収集とファイルの作成

高炉と熱風炉のプロセスデータは可能な限り人手を介さずに収集しており、重要な計測値に関しては信頼性を高めるために発信器の二重化を行ない、適当な論理に基づいてプロセス量の決定を行なっている。装入関係のデータは装入制御用の専用計算機（三菱 MELDAP-6 000）より、ホップごとの秤量値のかたちで伝送されてくる。さらに銑鉄とスラグの分析値は製鋼分析室設置の分析処理用計算機（島津 STAC-5 020）より全高炉分が

伝送されてくる。

また原料鉱石の分析値などのように発生頻度が少く、また自動収集の難しいものはメータ室設定盤よりオペレータが入力する。

収集されたデータは、以後の処理のためにデータファイルとして計算機内に貯えられる。操業関係のデータは操業解析に便利のように時系列的なファイルを作っており、最小5min単位もしくはTap単位のものから最大1ヶ月単位のものまで用意している。さらに鉱石分析値ファイルや設定変更、減風、休風などのEvent記録、さらには羽口やブローパイプなどの設備保守の履歴や計測器の精度管理の記録にいたるまでファイルとして貯えている。

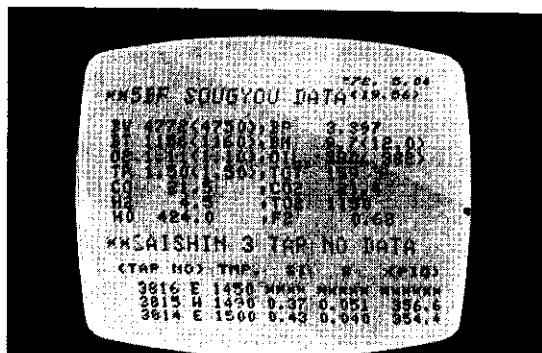
3.2 グラフィックディスプレイ

ファイルされたデータはオペレータの要求によ

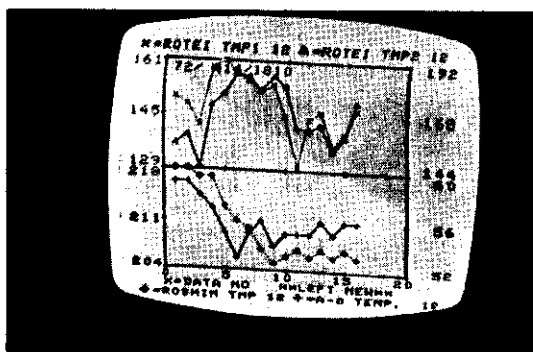
り任意にリストの形で出力することができるが、より判りやすい形の出力方法としてグラフィックディスプレイによる表示を用意している。

ディスプレイには通常 **Photo. 1 (a)** に示するような操業総括表を定期的に更新して表示しているが、オペレータの要求によりファイル番号とデータ番号を指定することで任意のプロセスあるいは計算値を最大4つまで同じ画面に推移図として表示することができる。さらに任意の2つの変数の散布図も表示することもできる。**Photo. 1 (b)**、(c)、(d)がその表示例である。なお、要求頻度の多いものについてはメニュー方式によりワンタッチでの選択を可能にしている。

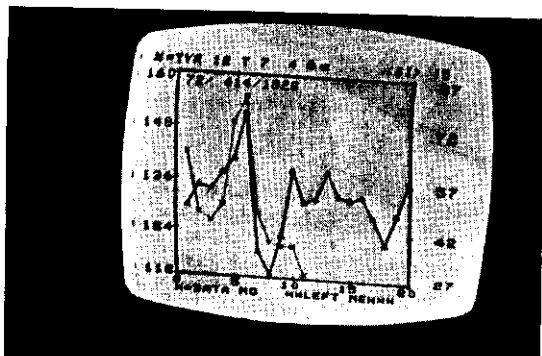
これらは操業の生のデータを用いての解析を可能にしており、操業推移の監視や制御モデルの開発とチェック、さらには新人オペレータの教育などに有用である。



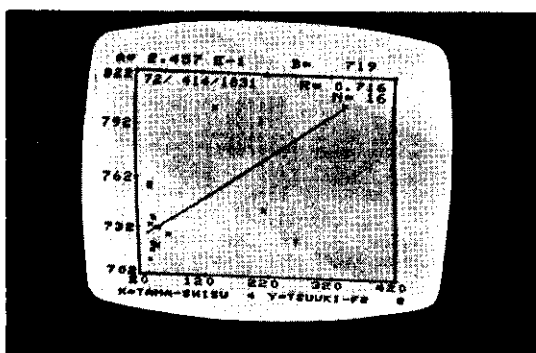
(a) Operation data table



(b) Temperature trend of BF bottom (One week average)



(c) Temperature trend of the tuyer wall and [Si] (One day average)



(d) Scatter diagram between the hanging index and the flow resistance index (One day average)

Photo. 1 Graphic display examples

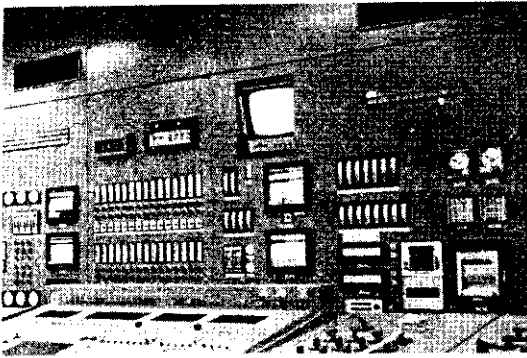


Photo. 2 View of the operation room

Photo. 2 にメータ室に設置している様子を示す。

3.3 高炉地区の情報処理

鉄鉄とスラグの分析値は本計算機が高炉地区の窓口となっており、各高炉へ速報のかたちでプリントアウトし、さらに総括表を作成している。銕物銕を吹くときはその分析値により規格判定を行なっている。

また、溶銕看貫の自動化と溶銕鍋の管理をこの計算機で行なうための拡張を現在進めており、1974年7月にスタートする予定である。

3.4 その他の情報処理

日報処理、トレンド記録による長期的な操業管理図の作成、中央計算機とのオフラインリンクなどがあげられる。日報は時系列的な通常のものほかに、班ごとあるいは1日ごとに設定変更などの操業上の事件を Event Logging としてまとめており、オペレータ間の申送りに使えるようにしている。

さらに銕物銕については分析値に基づいての規格判定を行ない、製品にはりつけるための伝票を銕銕場に印字している。

4. 高炉操業管理システム

計算機を用いた高炉の制御は、従来主として高炉の熱的狀態の制御を対象に行なわれ、このための種々のモデルと操業結果が報告されている。当

社でもこの炉熱制御を行なうための解析を種々行なっており、短期間であるが、炉熱制御モデルによる高炉のオンライン炉熱制御の実験も行なった。これらの解析と実験から装入物降下が順調で炉況の良いときには、炉熱制御モデルによる炉熱の推定と制御が可能であるが、スリップの発生などが多く炉況が悪い場合、送風量を変更した場合などには、炉熱の推定精度が悪くなり、制御も不可能となることが明らかになった。

このことから、炉熱の制御を目標とする場合も、従来のように炉の熱精算を中心とした送風温度、送風湿分などを操作因子とする制御のみでは不十分であり、高炉の操業を炉況の良い状態に維持するような操業方法（炉況制御モデル）を開発する必要があると考えた。しかし炉況制御モデルを開発するための研究はまだ不十分であり、本計算機システムでは、炉況制御モデルを開発するためのデータを提供し、高炉操業の状態をできるだけ定量的に示すために計算機により種々の指数を算出している。また、上述の理由により、計算機によって直接炉熱を制御するモデルは作成せず、操業者に炉の熱状態を示すためのオペレータガイダンスとしての炉熱推定モデルを作成した。

本章では、これらの指数、炉熱推定モデルおよび炉頂ガス中 H_2 %の変動による炉内侵水の検知方法について示す。

4.1 各種指数の計算

送風に関する諸変数と炉頂ガス分析値に基づいて、物質収支と熱収支を5 minごとに計算して各種指数を求めている。指数のおもなものは、炉頂ガス利用率、Wüstiteと共存するガスの利用率（シャフト効率）、直接還元率、間接還元率、銕銕生成速度、炉熱指数、羽口前理論火炎温度、通気抵抗指数である。以下にシャフト効率、通気抵抗指数、炉熱指数の計算方法を示す。

シャフト効率は、水性ガス反応が平衡に達しているものと仮定して CO のシャフト効率（ η_{CO} ）と H_2 のシャフト効率（ η_{H_2} ）を別々に(1)、(2)式により算出した。

$$\eta_{CO} = \{\sqrt{B^2 + 4AC} - B\} / 2A \quad \dots\dots(1)$$

$$\lambda_{H_2}^* = \lambda_{CO}^* / \{(1-K) \lambda_{CO}^* + K\} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $A = V_{CO} (1-K)$

$$C = 2 KO_W$$

$$B = V_{H_2} + KV_{CO} - 2(1-K) O_W$$

K : 水性ガス平衡定数

V_{CO} : 間接還元帯にはいるCOの量(Nm³/t 鉄鉄)

V_{H_2} : 間接還元帯にはいるH₂の量(Nm³/t 鉄鉄)

O_W : Wüstite と結合する酸素量 (Nm³O₂/t 鉄鉄)

通気抵抗指数 F_2 は、(3)式により算出した。この通気抵抗指数は炉内の温度、圧力と炉容の補正を行なっているの、従来炉内の通気性の判断に用いられていた $\Delta P / V_B \{(\text{送風圧力} - \text{炉頂圧力}) / \text{送風量}\}$ よりさらに一般化されている。

$$F_2 = \frac{P_B^2 - P_T^2}{L \cdot (V_{Bosh}/S_{nv})^{1.7} P_0} \cdot \frac{T_0}{T_{uv}} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 P_B, P_T, P_0 : 送風圧力、炉頂圧力、基準圧力 (kg/m² abs.)

L : 羽口～ストックライン距離 (m)

V_{Bosh} : ボッシュガス量 (Nm³/min)

S_{nv} : 炉内平均断面積 (m²)

T_{nv}, T_0 : 炉内平均温度、基準温度 (°K)

炉熱指数 H_0 は、炉下部の部分熱精算⁴⁾ にもとづいて(4)式により計算した。

$$H_0 = (Q_T - Q_{H_2} - Q_{SI}) / P_1 - Q_{CaO} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 Q_T : 羽口前で生成する熱量

($\times 10^3 \text{kcal}/1000 \text{Nm}^3$ 送風)

Q_{H_2} : 水素還元により炉下部で消費される熱量 ($\times 10^3 \text{kcal}/1000 \text{Nm}^3$ 送風)

Q_{SI} : ソリュージョンロス反応熱 ($\times 10^3 \text{kcal}/1000 \text{Nm}^3$ 送風)

Q_{CaO} : 石灰石の分解熱 ($\times 10^3 \text{kcal}/t$ 鉄鉄)

P_1 : 鉄鉄生成量 (t/1000Nm³ 送風)

なお炉下部での水素による還元量は、炉内で生成するH₂量 V_{H_2} とH₂のシャフト効率 $\lambda_{H_2}^*$ の積により求めた。

炉熱指数 H_R は、(4)式中の P_1 (酸素精算に

より求めたもの) を、炭素精算により求めた鉄鉄生成量 P_{Fe} に置きかえて求めた[†]。 H_0 と H_R は、ほぼ同様に变化する。

装入物の降下状況は、炉況の判定の重要な指標の一つである。しかし、従来この判定は、装入物面の降下状況の記録により定性的に行なわれていたにすぎず、この情報の定量化はなされていなかった。装入物の降下状況を定量化するために、装入物面の深さを30secごとに読み込み、その値から次のような指数を算出している。

(a) 棚指数 : 30sec間の平均降下速度が別に定める下限降下速度より遅い場合指数を1増す。

(b) スリップ指数 : 30sec間の平均降下速度が別に定める上限降下速度より速い場合、その速さに応じて指数を増す。

(c) 降下指数 : 装入物の装入速度と消費速度の比。

Fig. 4 に1日間の棚指数と溶鉄温度の標準偏差の関係を示す。棚指数が増せば、溶鉄温度の標準偏差が大きくなっていて、棚指数を炉況の判定に使えることがわかる。

4.2 炉熱推定モデル

炉熱指数 H_0 は、炉熱の変化と対応して変化するが、スラグ比、熱損失などの変動により一定の鉄中 [Si] %、溶鉄温度に相当する H_0 の値は、時間の経過とともに変化する。炉熱の制御は [Si] %、溶鉄温度を一定に保つことを目的としているので、 H_0 により炉熱を推定する場合には、 H_0 を適当に補正する必要がある。この補正は以下に示すような方法により、目標とする [Si] に相当する H_0 の基準値 H_{0s} を求め、 H_0 と H_{0s} の偏差により炉熱を推定することにより行なっている。 H_0 の基準値 H_{0s} は [Si] の制御を目標とする場合(5)式により計算する。

$$H_{0s} = \bar{H}_0 + A_0 (\bar{S}_i - S_i^*) \quad \dots\dots(5)$$

[†] $P_1 = (O_{DR} + O_{H_2}) / \varphi$

$P_{Fe} = C_{TR} / (\phi_C - C_{SI})$

により求めた。ここで、 O_{DR}, O_{H_2} は送風1000Nm³あたりの直接還元酸素量、間接還元酸素量、 φ は鉄鉄tあたり被還元酸素量、 C_{TR} は送風1000Nm³あたり羽口前でガス化するコークス中ガス化するC量、 ϕ_C は装入時のコークス中ガス化するC量、 C_{SI} は鉄鉄tあたりのソリュージョンロスC量である。

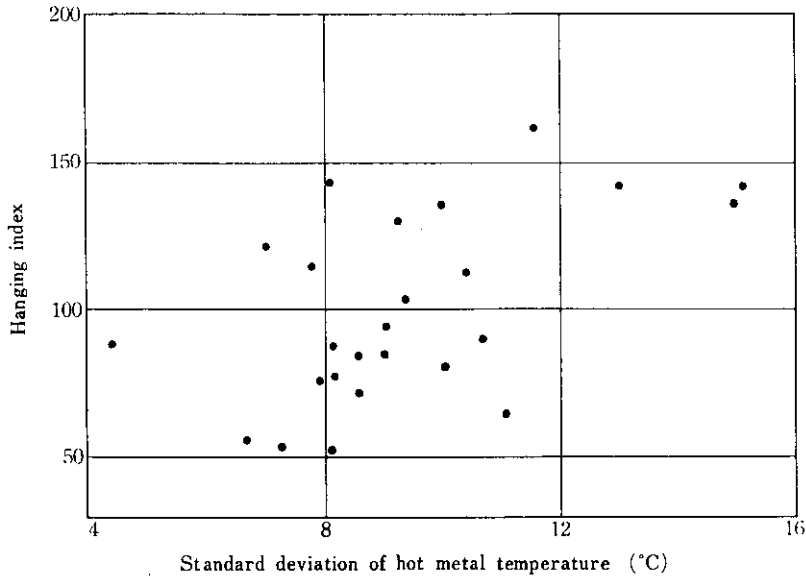


Fig. 4 Relation between the hanging index and the standard deviation of hot metal temperature based on daily data

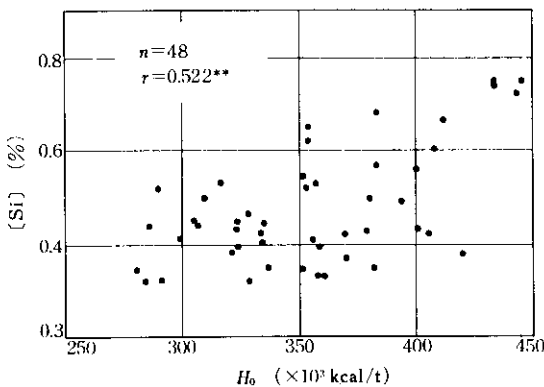


Fig. 5 Relation between [Si] in pig iron and heat index H_0

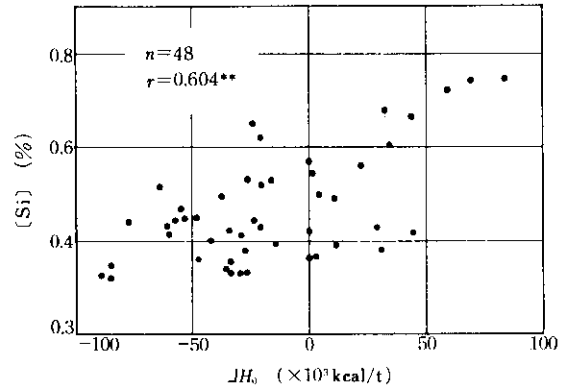


Fig. 6 Relation between [Si] in pig iron and index ΔH_0

ただし、 \bar{H}_0 : 各出鉄に対応する H_0 の平均値の指数平滑値

\bar{S}_i : 各出鉄ごとの [Si] の指数平滑値

S_i^* : 目標 [Si] 値

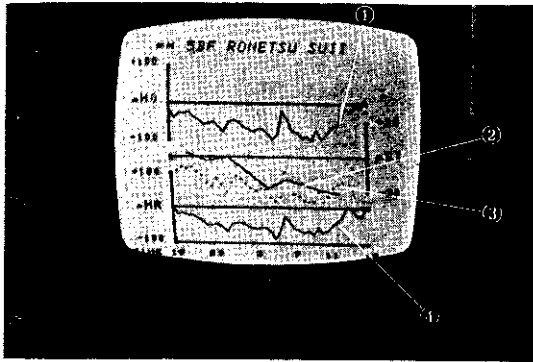
A_0 : H_0 と [Si] の関係を定める等価係数

A_0 の値は操業条件によりいくぶん変化するが従来の解析からこの変化幅は小さいことがわかっているので一定値としている。

Fig. 5 に H_0 と [Si] の関係を、Fig. 6 に ΔH_0 ($=H_0 - H_{0s}$) と [Si] の関係を示す。 H_0 、 ΔH_0 の値は対応する出鉄から 1.5hr 前の平均値である。

これらの図を比較して上述の修正方法が妥当であり ΔH_0 が炉熱の推定値として使えることがわかる。

炉熱推定結果は、30min ごとに印字するとともに操業者の要求 (押しボタン) によりメータ室の CRT に推移図として示す。推移図の例を Photo. 3 に示す。この表示には ΔH_0 、 ΔH_R のほかに、 ΔH_0 、 ΔH_R と経験的な要因 (通気抵抗指数、銑鉄生成速度、[Si]、溶鉄温度) から総合的に判断した結果 (指数 RKT) と [Si] の推移図を示している。



① ΔH_0 ② ΔSi ③ RKT ④ ΔH_R

Photo. 3 Graphic display of the trend of hearth heat

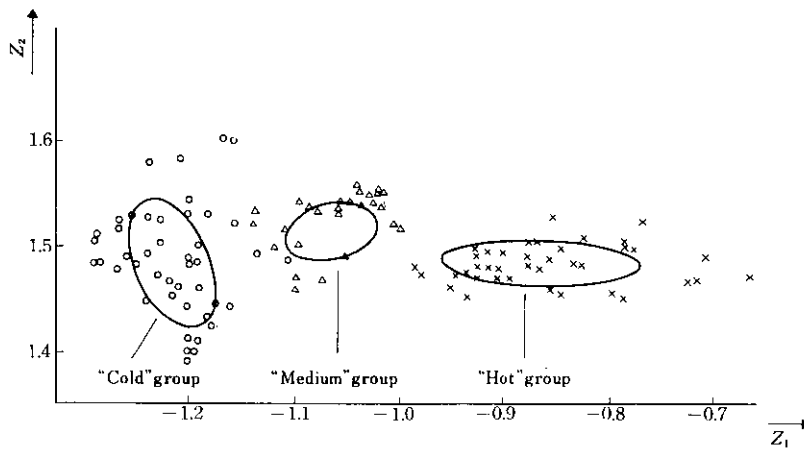
RKT は、判別関数⁵⁾を用いた炉熱の解析結果 (Fig. 7 参照) から炉熱が各要因の一次結合式により示される[†]ことがわかっている[†]ので、上述の各要因の一次結合式で求めた。

この推移図により、操業者は炉熱の推移と予測を知ることができるとともに、炉熱の推定結果と [Si] の推移を比較して推定結果の信頼性を確認できる。

4.3 炉内浸水の検知

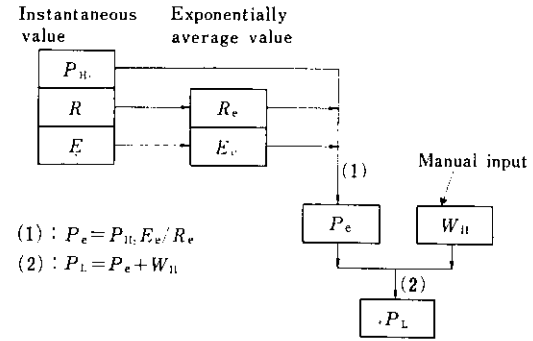
炉内浸水の検知は操業上重要な項目であり、従来炉頂ガス中 $H_2\%$ の上昇あるいは H_2 ガス利用率の低下により浸水の検知を行っていた。最近重油吹込量の増加により吹込量の変動幅も大きくなり、そのため炉頂ガス中 $H_2\%$ も大きく変化するようになった。第5高炉の場合、炉内にはいった

† 解析例の場合、炉熱により全データを3群に分けているので、通常これらの判別には2つの判別関数 (z_1, z_2) を必要とするが、この場合 z_1 の個有値が z_2 よりいちじるしく大きいことから炉熱は z_1 のみで判別できることがわかり、したがって炉熱を判定するのに各要因の一次結合式のみで十分なことがわかる。



Discriminant function	Eigen value (%)	Eigen vector						Average value of each group		
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	"Hot"	"Medium"	"Cold"
Z_1	97.8	-0.0004	0.0151	-0.259	0.352	1.000	-0.00163	-0.87	-1.07	-1.21
Z_2	2.2	-0.0005	0.0372	1.000	0.704	0.0884	-0.00114	1.485	1.513	1.48
Variables x_j		Heat index	Indirect reduction ratio	Melting intensity	Flow resistance index	[Si]	Hot metal temperature	$Z_i = \sum_j a_j^i x_j$		
Min. value		88	51.6	0.46	0.77	0.38	1450			
Max. value		314	57.4	0.57	0.80	1.10	1515			

Fig. 7 Classification of blast furnace hearth heat level using discriminant function



P_{H_2} : % H₂ in bosh gas
 R : Ratio of top gas volume to bosh gas volume
 E : Ratio of H₂ volume in top gas to that in bosh gas
 R_e, E_e : Exponentially averaged value of R and E
 P_e : Estimated value of % H₂ in top gas
 W_{II} : Sensivity limit
 P_L : Warning limit of % H₂ in top gas

Fig. 8 Calculation method of warning limit of % H₂ in top gas for the detection of water leakage

水がすべて H₂ に分解されるとして浸水量と炉頂ガス成分の変化の関係を推算すると浸水量 1t/h について炉頂ガス中の H₂% は 0.15~0.17% 増加する。このように小さい H₂% の変化を検知するためには、適当な方法により正常時の H₂% を推算し、この値と実際の分析値を比較して炉内浸水の検知を行なう必要がある。

Fig. 8 に本システムで用いた炉頂ガス中の H₂% の限界値の算出方法を模式的に示す。5 min 間ごとの物質精算により、ボッシュガス中の H₂%、 P_{H_2} 、炉頂ガス量とボッシュガス量の比 R、炉頂ガス中 H₂ 量とボッシュガス中 H₂ 量の比 E を計算し、R と E の指数平滑値 R_e, E_e を求めておく。炉頂ガス中の計算 H₂% P_e は、 P_{H_2} と R_e, E_e から計算でき、これに検出感度を定める W_{II} (手動で変えることができる) を加えて限界値 P_L としている。

炉内浸水が起ったときは、炉頂ガス中 H₂% は急に上昇するが、限界値 P_L は、 P_{H_2} は変化せず、 R_e, E_e はじょじょに変わるため、じょじょに上昇し、 W_{II} で指定した限界値より浸水量が多ければその検知ができる。

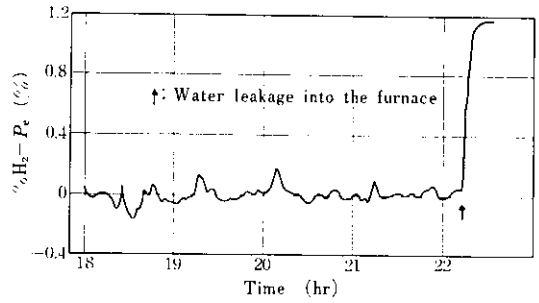


Fig. 9 Variation of the difference between H₂ content in top gas (%H₂) and estimated value (P_e)

Fig. 9 に羽口溶損時の % H₂ - P_e の推移を示す。ここで示した例は浸水時の % H₂ の変動が大きいが、正常時の変化では、% H₂ - P_e はほぼ 0.2% 以下なので、 $W_{II} = 0.3$ とおけば正常時に浸水警報を出すことなくほぼ 2t/h の浸水の検知が可能なのことがわかる。

5. 熱風炉制御システム

第5高炉付属熱風炉は熱風炉補修のため、第二次操業開始時3基操業を行っていた。この3基操業の制御では、熱バランスを中心にして各炉の均一な熱付き状態を維持するような制御モデルを作成するとともに、ドーム温度管理、排ガス温度管理、および投入燃料の重油量とBガス量の比率管理を行なうモデルを作成した。特に重油量/Bガス量の混合割合を管理したことにより、ドーム温度を上昇させたことも含めて送風温度を約 40°C 高めることができた。この3基モデルによる操業実験を行ない、効率上昇、送風温度の安定等の良好な結果が得られた。

しかし昭和47年3月より、4基操業によるスタッガード・パラレル操業を再開したため、制御方式の変更が必要となった。スタッガード・パラレル制御⁹⁾モデルを開発するため、種々の検討を行なったが以下の3点により熱バランスを基本としたモデルは適用できないことがわかった。

(1) スタッガード・パラレル時には、計測上の理由により、各炉の炉内通過風量および熱風出口温度が不正確なため、各炉の熱バランスが取れない

(残熱量のバラツキが大きい)。

(2) 熱風出口温度をドーム温度で、炉内通過風量を送風量および混合冷風流量で置換して熱バランスを取ったが、結果は同じであった。

(3) 上記の点を回避する手段として、熱風炉全体について熱バランスの計算を行なって実際に燃料を投入してみたが、投入熱量にかたよりが生じ実用にはいたらなかった。

そこで冷風バタ弁開度をもとに各炉の熱レベルを推定し、これに基づいて切替時間と燃料量を制御する熱レベル管理および定時刻切替管理を基本とするモデルを作成した。この新しいモデルによる実操業試験を行なったところ良好な結果を得た。

本章ではこれらのモデルおよび3基操業時より実用化されているドーム温度制御と排ガス温度制御とについて説明するとともに、オペレータガイダンスまたは全計算機制御（燃料自動投入、送風燃焼自動切替）による制御結果についてその効果を示す。

5.1 熱風炉制御概要

現在第5高炉付属熱風炉は4基操業で、2基送風2基燃焼、2時間送風2時間燃焼のスタaggerド・パラレル操業を行なっている。燃焼開始時Bガス専焼後、重油の混焼を行ない、燃焼終了前に重油停止、配管およびバーナの蒸気バージを行なう。送風期には、2つの送風炉の炉内通過風量または混合冷風量を調節して送風温度を制御しており、Fig. 10にその構成を示す。各炉の切替は、ピンボードシーケンサ上で定時間パルスによりピンが歩進し、送風モードを表わす。ピンの配列がなくなった時に送風終了指令を出す。ピンの配列は固定しているの、ピンボードシーケンサにより切替時間を管理させた場合には定時間切替となる。

冷風バタ弁開度、混合冷風弁開度の時間推移を熱風炉に熱が正常の場合、熱不足の場合および熱過剰の場合について模式的に Fig. 11に示す。熱が不足している状態では、先に送風にはいった炉(旧炉)の熱レベルが低下してしまうため、あと

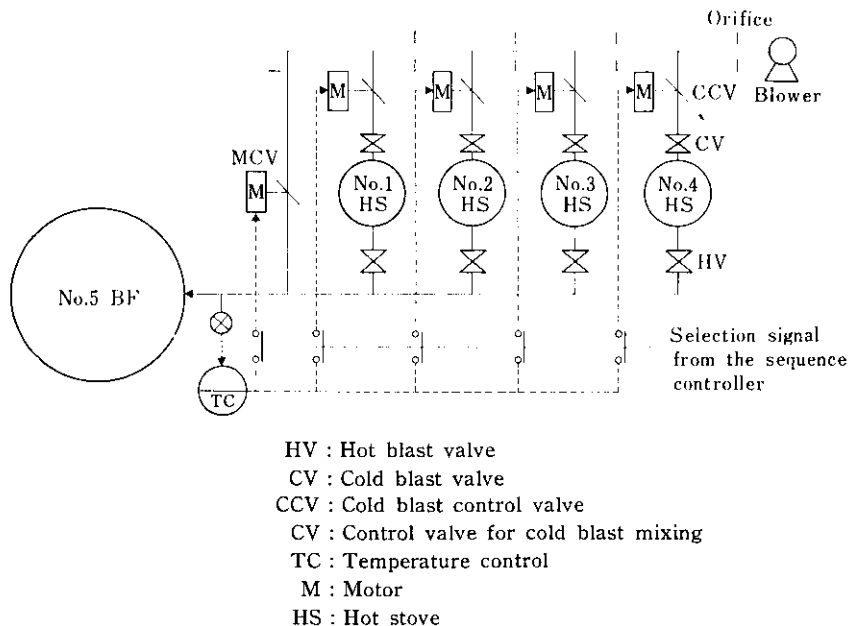


Fig. 10 Schematic diagram of the control system for hot blast temperature

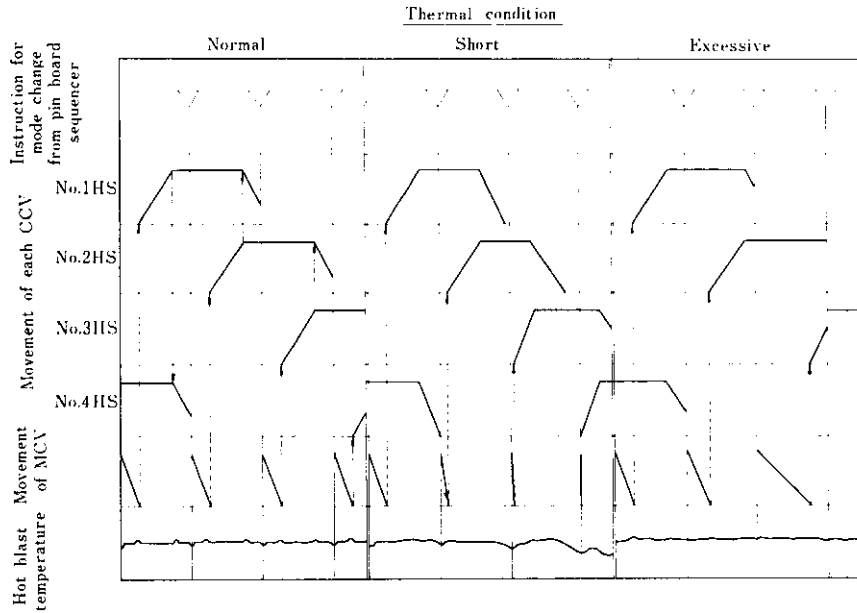


Fig. 11 Three typical patterns of valve movement

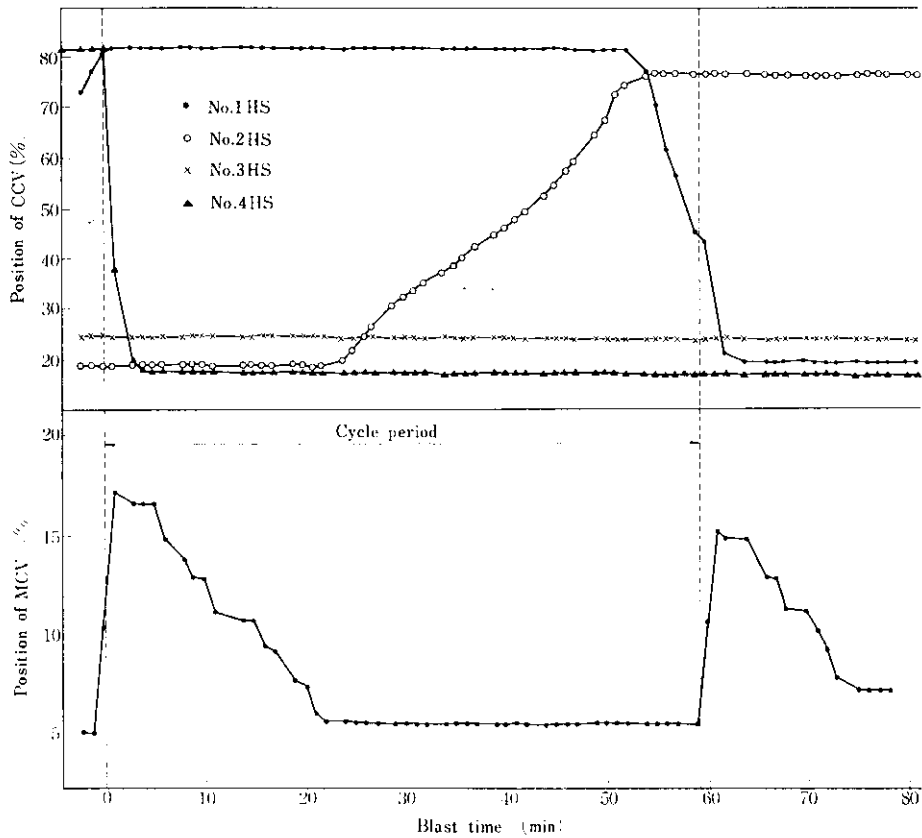


Fig. 12 Example of valve movement (Thermally normal condition)

から送風にはいった炉（新炉）の炉内通過風量を増加させねばならない。したがって旧炉の冷風バタ弁は正常な場合に比べて早く閉じ、極端な場合には新炉が必要熱量を補いきれず、送風温度が低下してしまう。逆に熱が過剰な状態では、旧炉の冷風バタ弁が切替時まで全開の状態、また新炉冷風バタ弁は全閉に近い状態で操作を行なうので1基送風となり、熱を残したまま切替った炉は熱効率が低下する。Fig. 12, Fig. 13に熱付きが正常な場合および過剰の場合の冷風バタ弁開度、混合冷風弁開度推移を実操業からプロットしたものを示す。

以上の検討より、冷風バタ弁開度と混合冷風弁

開度の推移を用いて、その熱風炉の熱付き状態が予測できる。また送風終了時の旧炉冷風バタ弁開度からその炉の残熱が推定できる。

本モデルでは、これらの推定値に基づいて残熱が零になるように切替時間を制御する熱レベル零管理と、熱レベル零管理による設定切替時刻のずれを燃料投入量で調節して、設定切替時刻近辺で切替を行なうように制御する定時刻切替制御の2つからなっている。これらの制御と合わせて熱風炉の設備上のトラブルをさけ、効率を高めるためにドーム温度管理、排ガス温度管理、設定送風条件変更時計算などを行なっている。

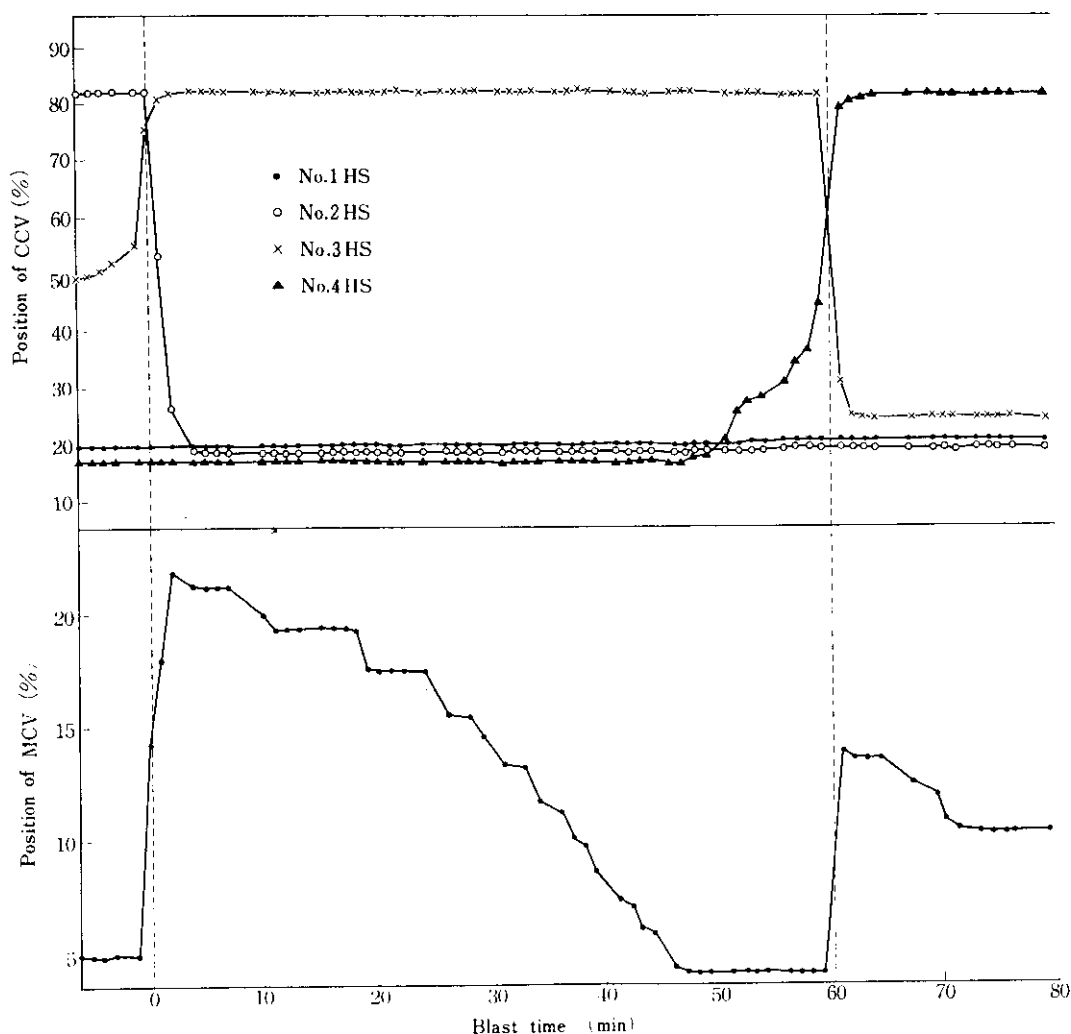


Fig. 13 Example of valve movement (Thermally excessive condition)

5.2 制御方法および結果

5.2.1 熱レベル零管理

上述したように、熱バランス計算（残熱量の積算値）により把握することは困難であるが、旧炉冷風バタ弁の切替時開度を制御することにより、送風温度、送風量に合った熱レベルで切替を行なうことは容易である。本システムでは後者の方法を採用しており、さらに切替時の旧炉冷風バタ弁開度（ $\alpha\%$ ）を、その時点での熱レベルが零となるように送風温度の関数として与えている。

熱付き状態により切替時刻が変動するようすを模式的に Fig. 14 示す。また熱レベル管理の補助制御として、操業者がピンの位置により熱付き状態を判定するとともに、切替時刻を予想できるように、熱付き状態をピンの位置で示している。すなわち新炉の送風開始時に、旧炉の熱レベルおよび前サイクルの履歴により旧炉の送風終了時刻を予想し、送風終了時刻にピンが切替位置まで歩進しているよう制御する。さらに熱不足の場合、冷風バタ弁が設定切替開度になった時点で、ピンの早送りを行ない、逆の場合には冷風バタ弁が切替開度になるまで停滞させている。

5.2.2 定時刻切替制御

千葉製鉄所第1～5高炉において、熱風炉切替

が重なった場合には、Bガス使用量が少なくなるためにBガスホルダー上昇速度が限界になり、Bガスを大気放散しなければならない。そこで各高炉において切替時刻を定めており、この切替時刻を15min程度の精度で管理しなければならない。

熱レベル零管理でのべたように、旧炉冷風バタ弁開度 $\alpha\%$ で切替を行なうために、切替時刻が定時刻からずれてしまう。このずれを燃料投入量で定時刻にもどすため、定時刻切替制御を行なう。

定時刻切替制御の燃料計算は、4サイクル後までの計算を行ない、以前の履歴を考慮した以下の3項目からなっている。

- (1) 実投入燃料と計算燃料の差の修正
- (2) 切替時刻誤差の燃料増減計算による修正
- (3) 他の炉の影響補正

しかしこれらの計算投入による効果は、燃料変更した炉が送風末期になるまで（3サイクル後）現われないので、もっと早い操作が必要となる。そこで早期に送風終了時刻を予想する因子として、混合冷風バタ弁が下限になるまでの時間と、新炉冷風バタ弁がある開度になるまでの時間を採用している。

5.2.3 ドーム温度管理

ドーム温度はギッターレンガ保護のため、上限値を越えないように操作する必要がある。しかしドーム温度が低すぎると熱付きが悪くなり、送風

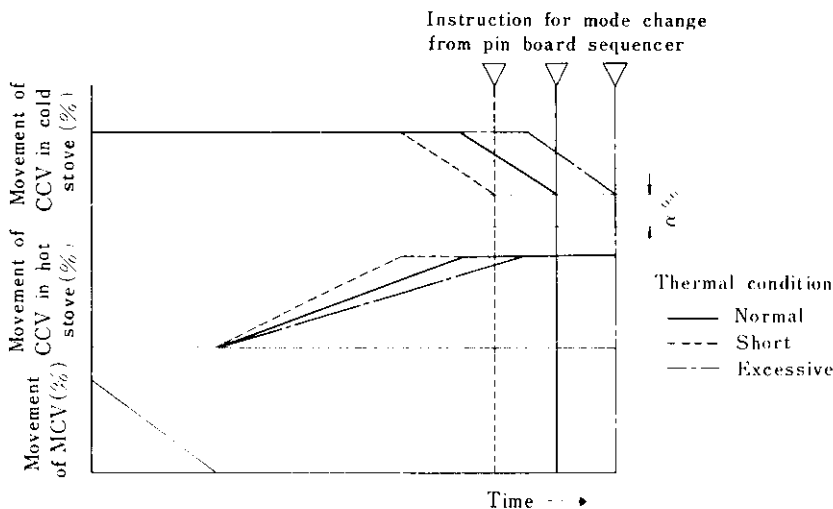


Fig. 14 Valve movements at end point of blast

温度を維持できなくなるので、なるべく温度を高くし、しかも上限値を越えないように制御するのが最も良い。

本システムでは、燃焼開始には重油空燃比を不完全燃焼しない限度に設定し、設定ドーム温度を越えた時点から、この空燃比を増減させることにより、この温度を維持している。Fig. 15 に制御結果を示す。1 min ごとの制御であるが、この程度の周期で十分設定温度を維持している。

5.2.4 排ガス温度管理

排ガス温度の上昇は熱効率の低下を招くのみでなく、ギッターレンガ金物受けの破損をまねく原因ともなり、排ガス温度が上限値になった時には、ただちに燃焼を停止しなければならない。

本システムでは排ガス温度が排ガス量の積算値と直線的な関係があることを利用して、排ガス温度が所定の燃焼時間内に、上限値を越えないよう燃料投入量を調節する(排ガス温度管理)。排ガス温度管理の制御方式を模式的に示す Fig. 16 において、排ガス温度が上注意点を越えたとき、それまでの温度上昇速度から直線①を単相関により求め、上限値を越える時刻を計算し、予定燃焼終了

時刻に上限値を越えるようであれば、現行排ガス量に t_0/t_e を掛けて求めた排ガス量に減少させるよう制御する(直線②)。

実操業における制御結果を Fig. 17 に示す。上注意点での燃料変更により、所定燃焼時間内で排ガス温度は良く制御されている。また上限値を越える予想時刻と実際に上限値になった時刻との差

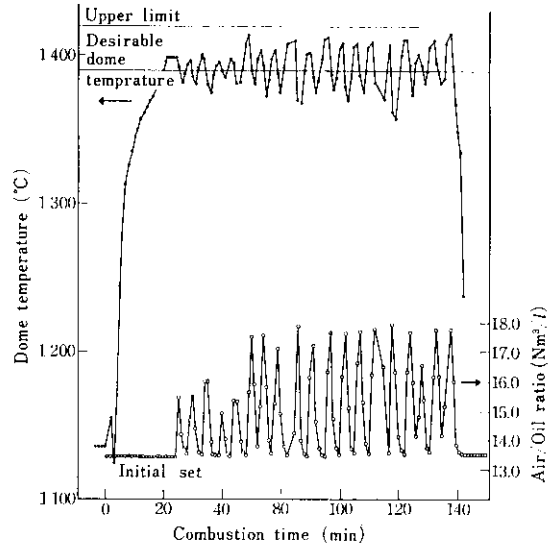


Fig. 15 Result of dome temperature control

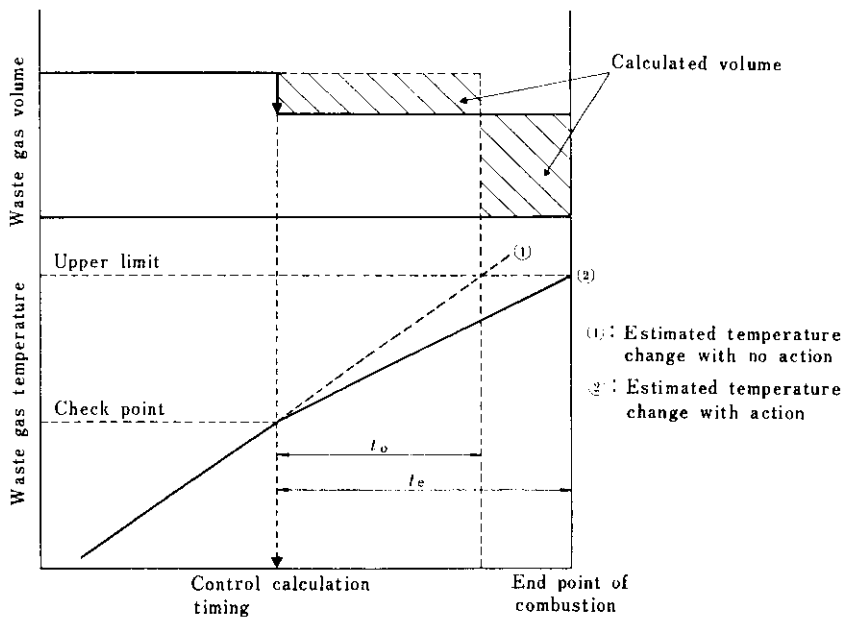


Fig. 16 Schematic diagram of waste gas temperature control by adjusting waste gas volume

は1 min以下の精度で良く合うことを、操業データから確認している。

5.3 クローズループシステム

熱レベル零管理、定時刻切替を主体とした熱風炉制御には、制御量を示して操業者の同意によって(押ボタン)操作を行なう設定盤モードと、切替、燃料投入および警報処理をすべて計算機で行なうクローズドモードの選択が可能である。

熱風炉計算機制御を行なった場合の送風温度記録チャートをFig. 18 (a)に示す。このチャートによると切替前で送風温度がわずかに降下している。一般に切替前まで送風温度を一定に保持しようとする、熱を残したまま送風を終了してしまい、効率は低下する。逆に送風温度を降下させた

場合、効率は上昇するが、送風温度が変動してしまう。それぞれに対し制御を行なわなかった場合の送風温度チャートを、Fig. 18 (b), (c)に示す。またクローズドモードを使用した時の効率を100とすると、(b), (c)の場合はそれぞれ98.2, 100.5であった。

本システムは1974年3月よりクローズモードでの全自動運転を行なっており、計算機制御の採用率は87% (3月~5月)である。減風、休風などの異常時および出鉄タイミングとの兼合いで計算機指示どおりの熱風炉切替をキャンセルさせる場合などが残り13%である。

Table 2 に全計算制御期間とオペレーションガイダンス期間の操業結果の比較を示す。効率での0.4%上昇およびoil/gasの比率制御に基づく

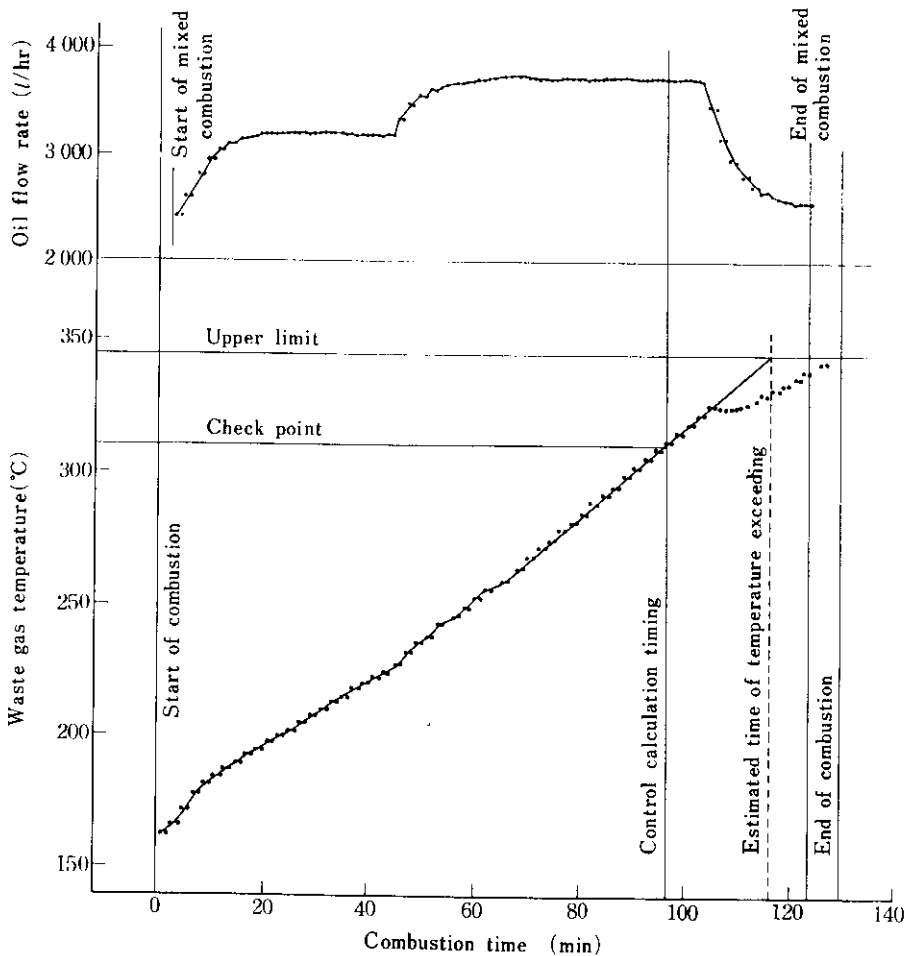
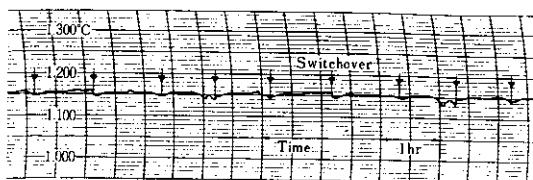
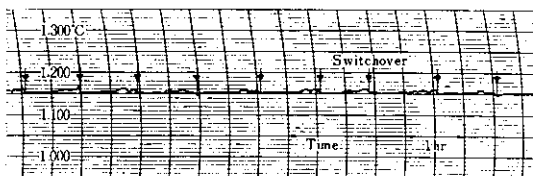


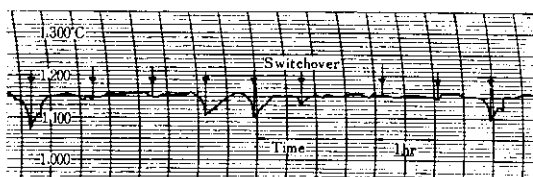
Fig. 17 Result of waste gas temperature control



(a) Control result with computer



(b) Without computer (thermally excessive condition)



(c) Without computer (thermally short condition)

Fig. 18 Results of hot blast temperature control

消費燃料量低下を含めて2900千円/月(2月ベースに換算して)の節減が達成されている[†]。

今後の改良点としては、排ガス温度上昇時の燃焼のみ停止にもって行くこと(シーケンス改造が必要)、環境問題からのNO_x、SO_x低減対策、燃焼パターンの調整による熱効率上昇を検討した

いと考えている。

[†] 熱風炉効率の計算は次式による。

$$\eta = \frac{V_B \times 60 \times 24 \times \{ (C_{PBA} + B_M \times 1.244 \times 10^{-3} \times C_{PBM}) \times T_B - (C_{PCA} + B_M \times 1.244 \times 10^{-3} \times C_{PCM}) \times T_C \}}{H_B + H_C + H_h} \times 100$$

- V_B: 送風量 (Nm³/min)
- T_B: 送風温度 (°C)
- T_C: 冷風温度 (°C)
- C_P: 各種比熱 (kcal/Nm³°C)
- B_M: 送風湿分 (g/Nm³)
- H_B: Bガス投入熱 (kcal/day)
- H_C: Cガス投入熱 (kcal/day)
- H_h: 重油投入熱 (kcal/day)

6. 炉頂ガス分析計管理システム

高炉の炉熱推定モデルや炉内浸水の監視は炉内における物質バランスと熱バランスに基本を置いているため、そのバランス演算の基礎となるプロセス量の計測、とくに炉頂ガス分析計には高い精度が要求される。このため本システムでは分析計の整備に重点を置き、発信器の二重化とソフトウェアによる精度管理を行なっている。

6.1 システムの構成

Fig. 19 にシステムの構成を示す。炉頂ガスのサンプリングはベンチュリースクラパーの出側(荒ガス)とEPの出口(清浄ガス)の両方が選択できるようにしているが、重油の多量吹込みにより荒ガス側のサンプリング系統のつまりが激し

Table 2 Hot stove computer control result

Period	Blast condition*		Fuel consumption*			Efficiency	Fuel cost
	Volume	Temperature	B-gas	C-gas	Oil		
(1974)	(Nm ³ /min)	(°C)	(kcal/day)	(kcal/day)	(kcal/day)	(%)	(×10 ⁸ yen/day)
2.1~2.28 Manual operation (with operation guidance)	4 106	1 155	1 187 (44.3%)	467 (17.4%)	1 026 (38.3%)	77.1	6 622
3.1~3.31 Full automatic computer control	3 829	1 164	1 172 (47.2%)	426 (17.2%)	886 (35.6%)	77.5	6 524 (February base)

* These data are selected only during normal blast furnace operation

く、現在は清浄ガスに切換えている。この場合、両方のガス分析値の間に時間的にも成分的にも差の無いことは十分な確認を行なっている。

分析計は連続測定のためにCOとCO₂は赤外線式を、H₂は熱伝導式を採用し、精度の向上をはかり機器較正時のデータ欠損を避けるため二重化を行なっている。

6.2 計算機による管理

計器を二重化することは、一つのサンプルに対して、2つの測定値を与えることになり、いかなる論理で真の値を推定するかは多くの議論を呼ぶところである。本システムでは両方の分析計に適切な較正指令を与えることにより一定の精度レベルを維持させ、その上で両方の平均を取ることにより真の値を求めている。このための論理を簡単に説明すると以下のとおりである。

6.2.1 較正必要機器の発見と較正指令

両方の分析計の測定値の差を管理限界内に押さ

えて置くため、次の判定規準のいずれかに合致した場合、計算機より分析計に較正指令を出す。

- (a) 2つの分析値(瞬時値)の差が限界を越える場合
- (b) 差の積分値が限界を越える場合
- (c) 瞬時値の差の変化が限界以上に急激である場合
- (d) 1つの分析計が較正を終了した時点で他方の分析値と比較し、その差が限界値以上である場合
- (e) 較正中に何らかのエラーが生じた場合

ただし、同一分析計の較正回数が日間あるいは週間の限界値を越えた場合は計算機管理を放棄して警報をだすようにしている。

6.2.2 不良分析計の削除

前の項でのべた較正指令に基づく較正動作にもかかわらず正常に復帰しない分析計は、その分析値を測定値として用いない。さらに熱風炉切換時にガス分析値の変動があるか否かによりサンプリ

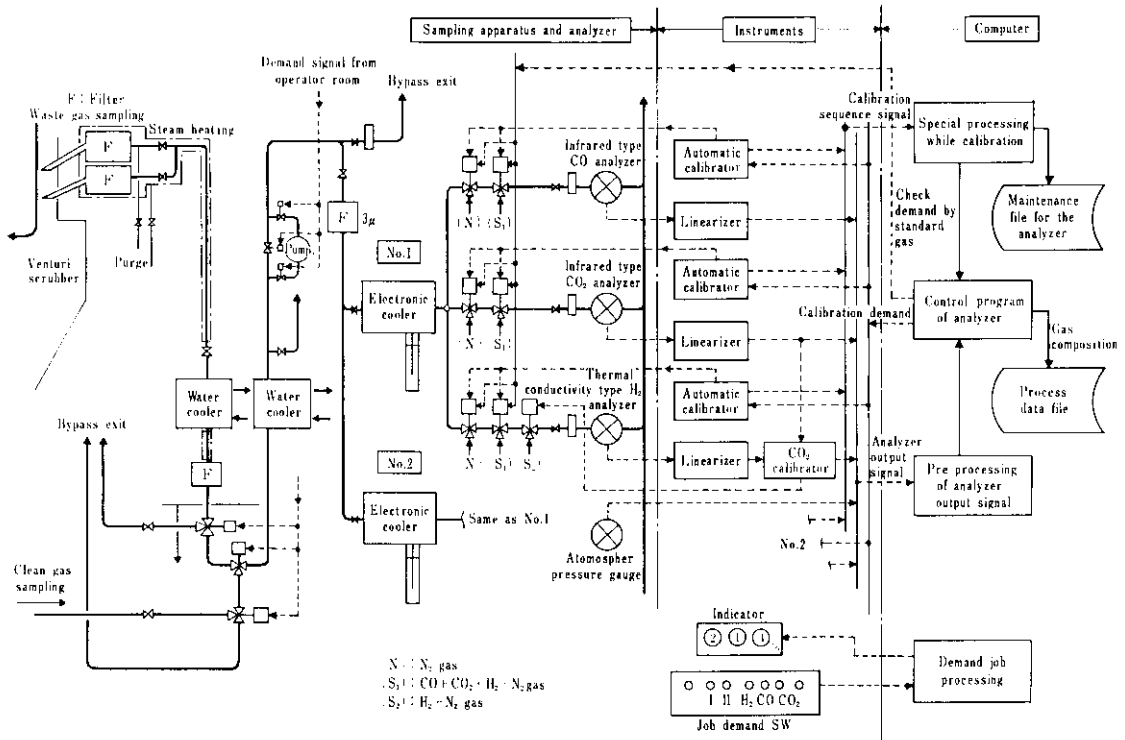


Fig. 19 Flow sheet of the top gas analyzer

ング系統のつまりと分析計自身の感度を判断し、不良のものは警報を出すと同時に測定値から除外する。

6・2・3 分析計真値の決定

次式により No. 1 系と No. 2 系の重みつき平

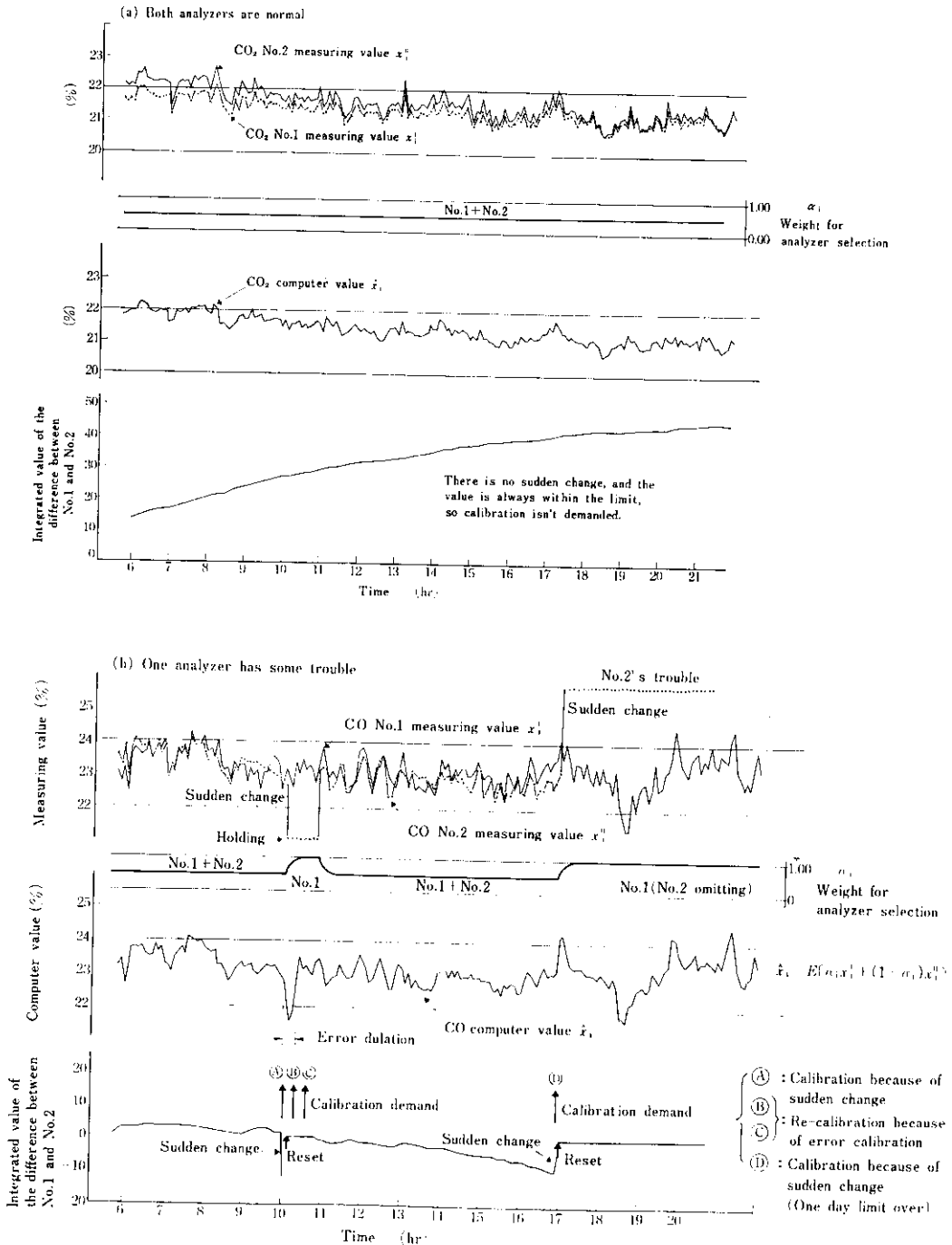


Fig. 20 Examples of the top gas analyzer control

均を行なっている。

$$\hat{x}_1 = \alpha_1 x_1^I + (1 - \alpha_1) x_1^{II} \quad \dots (6)$$

ただし x_1^I : No. 1 系分析値

x_1^{II} : No. 2 系分析値

α_1 : 重み ($0 \leq \alpha_1 \leq 1$)

No. 1 系, No. 2 系ともに正常と判断される場合は $\alpha_1 = 0.5$ としており, どちらかが不調と判断された場合, あるいは較正処理にはいった場合, α_1 を指数関数的に変化させて正常な分析計単独測定への切換を行なう。指数関数的な変化にしているのは較正処理など分析計自身の理由による分析値の急激な変化を避けるためである。

6.2.4 分析計保守記録の作成

分析計較正時の諸データをファイルとして貯え, 適時に保守記録として出力し分析計の長期的な保守の資料とする。

6.3 計算機管理の実例

Fig. 20 に計算機管理の実例を示す。(a)はNo. 1 系, No. 2 系ともに正常な場合で較正指令は差の累積値が限界値にいたるまで出ない。(b)は No. 2 系の分析計が不調で4回目の較正指令によりNo. 2 系の切離しが自動的に行なわれている例である。A~Bの時点では一時期 No.2 系の分析値の変化に影響を受け, 測定値に乱れを生じているが自動的に No. 2 系を切離すことにより 15min 程度の乱れに押さえられているのがわかる。

なお(b)の No. 1 系の不調の原因は No. 1 系サンプリング系統にドレインが流れ込んだためによるものと恒温槽温度制御の不調によるものであり, 翌日修理を行なっているが, 修理完了までは No. 1 系での単独運転によりデータの欠損は防がれている。

7. 計算機導入の効果

本計算機システム導入の効果を以下にまとめる。

(1) 操業の簡易化

高炉および熱風炉の管理が計算機にまかされる

結果, 操作量の細い調整が不用となり監視業務も簡易化された。また日常の面倒な計算からも解放され, これらの結果, オペレータは操業解析など, より高度な業務に専念することができる。

(2) 設備能力の上昇

熱風炉制御により送風可能温度を上昇させることができ, さらにきめの細い操業管理により高水準の操業の維持を可能にしている。具体的な数字としては 40°C の送風可能温度の上昇, 2900 千円/月の燃料費の削限があげられる。

(3) 省力化

高炉の場合, 緊急時の要員をある程度確保しておかなければならず, 具体的な人数での省力化は難しいが, 監視業務や情報処理での工数削減に大きく寄与している。計画中の溶銑看貫では 1×4 人の省力化がなされる。

(4) 情報処理上の整備

情報処理を可能な限り自動化することにより, データの信頼性の向上と処理の迅速化がなされた。また豊富なデータファイルを持つことにより, データソースの一元化がなされ, 操業解析を容易に行なうことができるようになった。

(5) 計測器の精度向上

分析計など計測器を計算機で管理することにより, その精度の向上と保守の簡易化がなされた。

8. 結 言

千葉製鉄所第5高炉計算機システムについて, その設計思想とシステムの概要, さらには高炉と熱風炉の計算機制御の現状などについて説明を行なった。炉況制御ではまだ不満足な点もあり, 引き続き努力が必要であるが, その他の面では所期の目的を十分に満足させている。

現在第5高炉においては高炉操業と計算機システムは一体化されたものになっており, 高炉プラントにおける必要不可欠な地位を築きつつある。

また先述の溶銑看貫の自動化に加えて, 休風立上り時などのスケジューリング操業を計算機で処理することを進めており, 計算機のより有効な利用を図る予定である。

なお, 計装システムの一要素としての計算機の

役割を見直すとき、一般計器と重複している面が少なく、システム構成の簡素化、データソースの一元化ならびに建設コストの低減といった観点からは不十分と言わざるを得ない。次のシステムを建設する時点では、これらの面に十分留意する

必要がある。

最後に本システムの建設を実際に担当し水島川鉄鉱業㈱に出向している田中周氏、ソフトウェア作成に尽力された計測課古川道夫氏をはじめ、関係部課の諸氏に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 松田ほか：鉄と鋼, 59 (1973) 5, 570
- 2) Y. Fukagawa, et al. : Development and Application of Computer Control System at Sakai No. 2 Blast Furnace, Proceeding ICSTIS, 11 (1971), Section 1
- 3) 岩村：高炉プラントに対する計算機の適用, 第3回IBMプラントMISシンポジウム報告集, (1971) P. J-1
- 4) C. Staib, J. Michard : J. Metals, (1965) 2, 165
- 5) たとえば北川ほか：多変量解析論 (情報科学講座), (1967) 179, [共立出版]
- 6) 一宮ほか：川崎製鉄技報, 2 (1970) 4, 422

