

© 1984 ISIJ

# 広畑製鉄所における高炉操業管理システムの 開発とその適用

技術報告

福田 隆博\*・内藤 文雄\*<sup>2</sup>・姫田 昌孝\*・末瀧 哲郎\*  
西尾 通卓\*・西川 潔\*・神部 三男\*

## Development and Application of Blast Furnace Operation Control System in Hirohata Works

Takahiro FUKUDA, Fumio NAITO, Masataka HIMEDA, Tetsuro SUETAKI  
Michitaka NISHIO, Kiyoshi NISHIKAWA, and Mitsu KanBE

### Synopsis:

For the efficient blast furnace operation, a computer system having following functions was developed and has been used in Hirohata works.

(1) Control function of gas flow distribution: The accuracy of gas flow detection can be improved by this function, and the efficient gas utilization has been achieved.

(2) Control function of heat balance: This function consists of estimation model and operational guide for heat balance operation, and it helps stabilization of hot metal quality.

(3) Prevention function of abnormal condition: The abnormal condition can be forecasted and prevented by this function, and the stable condition in blast furnace has been obtained.

(4) Function of operation analysis: This function supports other functions by rapidly analysing operational data.

These functions have been refined according to the change of circumstances successively, and contributing to efficient blast furnace operation.

## 1. 結 言

高炉プロセスは複雑なプロセスであり、いまだ反応の定式化が十分にはなされていない。従つて、高炉操業の効率化を図るためには、炉内の状況をできるだけ精度よく把握し、その情報にもとづく操業管理が必要である。コンピュータシステムを利用して、これを実施する試みが国内外の各高炉で続けられている<sup>1)~7)</sup>。これらのシステムには、従来の操業経験にもとづき炉況を評価するシステム<sup>8)~10)</sup>と炉内熱レベルや融着帯形状などを理論モデルで推定するシステム<sup>11)~21)</sup>とがある。

広畑製鉄所では、1977年にこれら両種のシステムを組み合わせて高炉操業をパターンとして把え、それを追跡管理するための機能を備えた高炉操業管理システムを開発し、4高炉に適用した。システムの稼働後、製鉄技術の進歩に合わせて、機能の改善、追加を逐次加え、現在まで機能性のよいシステムとして高炉操業の効率化に

寄与している。以下にシステムの概要と適用状況について報告する。

## 2. 高炉操業管理システムの考え方

### 2.1 高炉操業管理の考え方

製鉄所における高炉の役割は低コストで安定した品質の溶銑を下工程に供給することであるが、そのためには次の3つの課題が重要である。すなわち、高炉プロセスは固体、気体、液体3相の混在した極めて複雑なプロセスであり、その操業を管理する上で、炉内の状態を把握することが最も重要な課題である。そして、炉内の状態把握にもとづいてより効率的な操業条件を選択することが第2の課題である。また、高炉操業において吹き抜けや冷え込み等の異常を起させば高炉工程のみならず、下工程にも影響を及ぼし、その損失は莫大なものとなる。従つて、高炉の操業異常を防止することが高炉操業管理上の第3の課題である。

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 2 月 28 日受付 (Received Feb. 28, 1983)

\* 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp., 1-1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)広畑製鉄所(現:新日本製鉄(株)釜石製鉄所) (Hirohata Works, Now Kamaishi Works, Nippon Steel Corp.)

一方、高炉を管理するには①操業、②作業、③設備、④原料の4要素があるが、これらに関する主要管理項目は次のものと考えられる。

- ①操業管理項目：装入物分布、ガス流分布、荷下がり分布、炉内通気性、炉内熱レベル、
- ②作業管理項目：貯銑滓、樋材
- ③設備管理項目：炉体浸食、炉内浸水、付帯設備状況
- ④原料管理項目：原燃料性状（強度、粒度、成分、還元性、高温特性）

上記の管理項目について、前述の3つの重要課題を達成するために広畑製鉄所では以下に述べる高炉操業管理システムを構築し適用している。

2.2 システム構成の考え方

(1) ガス流分布管理システム

高炉の操業状態を把握する上で最も重要な管理項目は炉内のガス流の分布であり、その把握精度と管理レベルの向上により、高炉操業の安定化を図りつつ、炉内のガス還元効率と熱交換効率の向上を図るためのシステムを構築した。

(2) 炉熱制御システム

高炉プロセスの成品である溶銑の品質（溶銑温度、溶銑成分）の管理は重要であり、その最適化、安定化が高炉操業条件選択の重点目標となる。そこで、溶銑品質を予測し、制御するためのシステムを構築した。

(3) 操業異常防止システム

高炉の操業異常を防止するため、異常にいたる原因ごとに管理項目を設け、その監視と異常予防アクション指示を的確に行うシステムを構築した。

(4) 操業解析機能

高炉の操業状況を操業データのグラフィックパターンとして表示し、また、統計解析手法を用いて、操業データ間の因果関係の解明と将来の予測を行うことにより、高炉の操業パターンの変化を追従するための機能を開発した。この機能が上記3つのサブシステムの中にとり入

れられている。Fig. 1 にこれらのシステム構成図を示す。

3. システムの概要と高炉操業への適用

3.1 ガス流分布管理システム

3.1.1 システムの機能概要

ガス流分布管理システムの主機能は次のものである。

- (1) 装入物分布監視機能
  - ① 鉱石とコークスの層厚分布、降下速度分布の計算
  - ② 半径方向の装入物表面形状のグラフィック表示
- (2) 円周方向ガス流分布監視機能
  - ① ガス分布の円周バランス指数の計算
  - ② 円周方向のガス流分布のグラフィック表示
- (3) 半径方向ガス流分布監視機能
  - ① 半径方向のガス流分布指数の計算
  - ② 半径方向のガス温度、成分のグラフィック表示
- (4) 炉高方向ガス流分布監視機能
  - ① 融着帯形状、及び、根レベルの推定計算
  - ② 炉高方向の炉壁温度、圧力のグラフィック表示
- (5) 通気性、荷下がり監視機能
  - ① 炉内通気抵抗指数の計算
  - ② 装入物の降下速度、及び、降下速度変動の計算
  - ③ 棚、スリップの判定

3.1.2 システムの特徴と適用例

(1) 円周バランス管理の充実

高炉では半径方向分布と共に円周方向でのバランスが重要である。そこで、炉内に設置された温度計、圧力計等のデータをもとにガス流分布の円周バランス管理のための評価指標を作成した。

円周バランス指数 1

$$= \sum_{i=1}^N \{ \text{Max.}(W_i) / \text{Min.}(W_i) \} / N \dots \dots \dots (1)$$

円周バランス指数 2

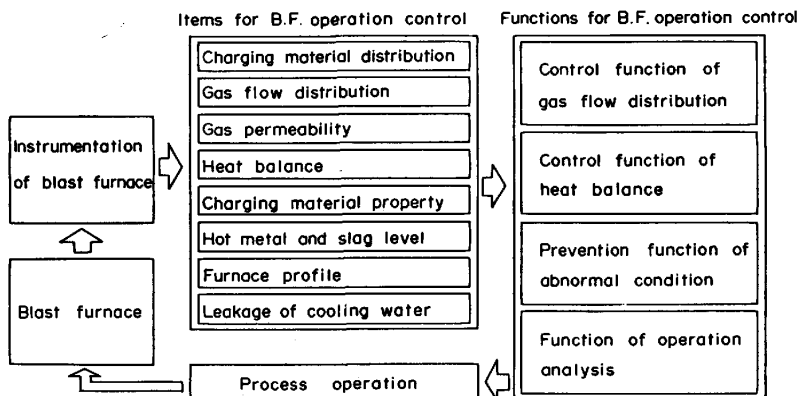


Fig. 1. Configuration of blast furnace operation control system in Hirohata Works.

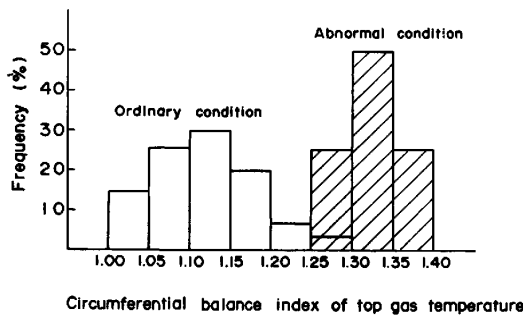


Fig. 2. An example of relation between circumferential balance index and operation condition.

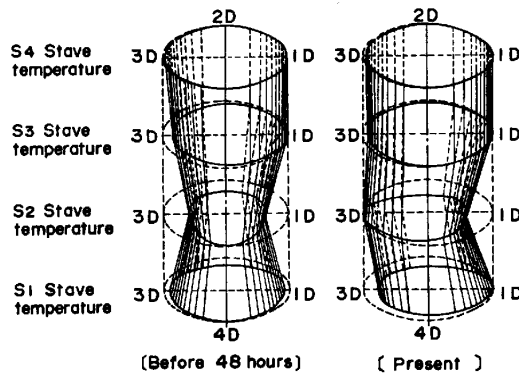


Fig. 3. An example of stereographic displays of gas flow pattern.

$$= \sqrt{\left\{ \frac{\sum_{i=1}^M (W_i \cdot X_i)}{\sum_{i=1}^M W_i} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M (W_i \cdot Y_i)}{\sum_{i=1}^M W_i} \right\}^2} \dots (2)$$

ここで、 $N$ は円周バランスを管理するための管理項目数、 $M$ は測定点の数、 $W_i$ は測定値、 $(X_i, Y_i)$ は炉芯を原点、炉の半径を1として表現した測定位置を示し、円周バランス指数1がばらつきの大きさを、また、円周バランス指数2が偏心の大きさを示す。Fig. 2には炉頂に設置された円周方向の温度計データから求めた円周バランス指数1による炉況評価の状況を示す。

(2) ガス流分布の視覚的表現

高炉の炉内状況をオペレーターに把握しやすくするため、炉内検出端の情報を加工して、炉内のガス流分布をグラフィックパターンとして視覚的に表現した。グラフィックパターンの種類としては円周方向、半径方向、炉高方向の分布表示、各操業データの時系列表示、及び、操業データ間の相関関係表示がある。Fig. 3にグラフィックパターンの表示例を示す。この図では48h前と現状のステープ温度による円周方向のガス流分布状態の変化を示しているが、高さ方向4レベルと過去10日間のデータを自由を選択して現状の状態と比較表示できるようになっている。

(3) 融着帯の推定

高炉操業にとって融着帯の果たす役割は大きく、高炉操業管理のために種々の融着帯推定モデルが開発されている<sup>11)~16)</sup>。広畑では炉頂部、及び、シャフト部に設置された2つのゾンデによるガス成分と温度情報を用いた反応伝熱モデルを導入し、高炉操業管理システムに組み込んでいる。このモデルは次の3つの基礎方程式によって構成されている。

$$C_g U_g \frac{dT}{dx} - \alpha(T-t) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$C_s U_s \frac{dt}{dx} + \alpha(t-T) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d\eta}{dx} = - \frac{A}{\rho \cdot U_g} (1-\eta) \cdot \exp\left\{ - \frac{E_o}{R(t+273)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- $T$  : ガス温度 (°C)     $t$  : 固体温度 (°C)
- $C_g$  : ガス比熱 (kcal/Nm<sup>3</sup>°C)
- $U_g$  : ガス空塔速度 (Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·min)
- $C_s$  : 固体比熱 (kcal/kg° C)
- $U_s$  : 固体質量速度 (kg/m<sup>2</sup>·min)
- $\alpha$  : 伝熱係数 (kcal/m<sup>3</sup>·min·°C)
- $\rho$  : ガス密度 (kg/Nm<sup>3</sup>)     $\eta$  : CO ガス利用率
- $\chi$  : 深さ (m)     $A$  : 比例定数
- $R$  : ガス定数 (cal/mol·°K)
- $E_o$  : 活性化エネルギー (cal/mol)

融着帯の上端におけるガス温度、成分を  $T=1000^\circ\text{C}$ 、 $\eta=0$  と仮定し、(3)、(4)、(5)式を3つの境界条件(炉頂ゾンデのガス温度と成分、及び、シャフトゾンデのガス温度)のもとで解くことにより、融着帯の上端位置が求められる。また、融着帯の根部位置をステープ温度の相関関係解析から推定しており<sup>16)</sup>、上記モデルの精度向上に役立っている。Fig. 4にその状況を示す。こ

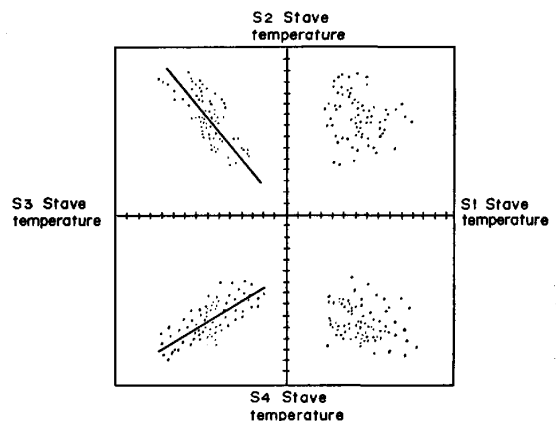


Fig. 4. An example of analysis results of gas flow pattern.

の図では S1 と S2 ステープ温度間の相関が悪く、融着帯の根位置が S1 と S2 の間にあることを示している。

3.2 炉熱制御システム

3.2.1 システムの機能概要

炉熱制御システムの主機能は次のものである。

(1) 炉熱(銑中 Si, 溶銑温度)の予測機能

- ① 炉熱に影響の大きい要因群の選択
- ② 選択された要因群による炉熱の予測

(2) 炉熱調整アクションの設定機能

- ① 予測値と目標値によるアクション量の算出
- ② 炉熱の傾向と残熱量によるアクション量の補正
- ③ 炉熱調整手段の選択

3.2.2 システムの特徴と適用例

(1) 炉熱の予測

高炉の炉熱予測を行うためのモデルは熱収支、物質収支を基本とする理論モデル<sup>17)~20)</sup>と炉熱に影響する要因の係数を回帰分析等で求める統計モデル<sup>21)</sup>があるが、炉熱の変動要因は非常に多く、その影響度が一定でないため、従来の固定された要因による予測モデルでは予測精度に問題があつた。そこで、多要因の中から炉熱に大きく影響する要因を周期的に選択し、タイムラグを考慮して炉熱を予測するモデルを開発した。予測式には次の自己回帰移動平均法<sup>22)</sup>を使用している。

$$y(s) = \sum_{m=1}^M a(m) \cdot y(s-m) + \sum_{m=1}^M b(m) \cdot x(s-m) + \varepsilon(s) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

- $y(s)$  : 時刻  $s$  における特性因子の予測値
- $x(s-m)$  : 時刻  $(s-m)$  における 影響因子の実測値
- $y(s-m)$  : 時刻  $(s-m)$  における 特性因子の実測値
- $a(m), b(m)$  : 各因子の係数
- $s$  : 時刻を示す変数
- $m$  : タイムラグを示す変数 ( $M$  は最大遅れ時間)
- $\varepsilon(s)$  : 時刻  $s$  における 予測値と実測値の差

予測式作成の手順は、まず事前に選定された 15 要因の中から時定数を考慮して銑中 Si, または溶銑温度と相関の強い 7 つの影響因子を選択する。次にこの 7 要因を用いて予測式 (6) を作成する。(6)式中の係数  $a(m), b(m)$  は日常操業で考えられる炉況変化が起こる期間として過去 100 h におけるデータを用い、予測誤差  $\varepsilon(s)$  の自乗和が最小になるように決定する。Fig. 5 にこの予測モデルで求めた銑中 Si の予測値と実測値の推移を示す。予測値と実測値の間の相関係数は通常 0.7 程度である。

(2) 炉熱調整アクションへの適用

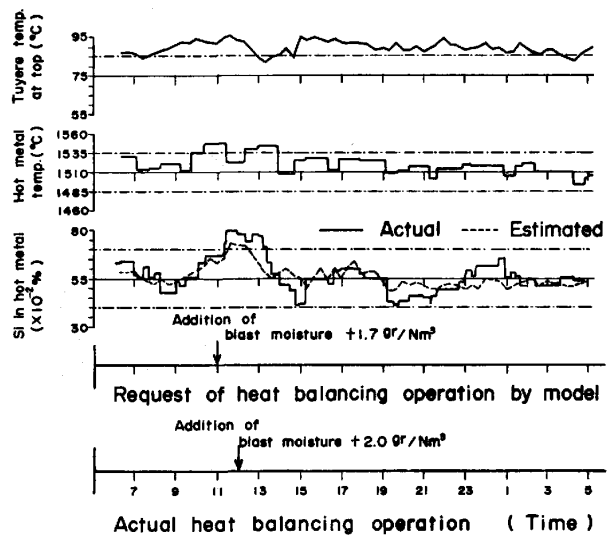


Fig. 5. Comparison of Si% in hot metal between actual operation and estimated by A.R.M.A model.

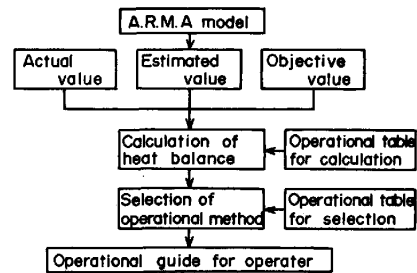


Fig. 6. Calculation flow for operational guide.

炉熱調整アクション量の算出は銑中 Si, または溶銑温度の予測値と実績値, 及び, 目標値から熱バランス計算によりあらかじめ作成しておいたアクションマップを利用して行われる。また, アクションマップによつて求められた炉熱調整アクション量は直近の炉熱の変動形態, 及び, 以前に採られた炉熱調整アクションによる残熱量を考慮して補正される。こうして算出された炉熱調整アクション量をもとにして, スペクトル解析結果により決定したアクション指示ロジックにより, 炉熱調整手段の選択をして炉熱調整アクションの指示が出される。Fig. 6 にモデルによる炉熱調整アクションの指示フローを示す。また, Fig. 5 の下段にこのモデルによつて出されたアクション指示とその実施状況例を示す。操業者はこのガイドを利用して炉熱の安定化を果たしている。

3.3 操業異常防止システム

3.3.1 システムの機能概要

操業異常防止システムの主機能は次のものである。

(1) 通気異常防止機能

- ① 通気異常発生の予測
- ② 異常警報による減風, 減圧の指示

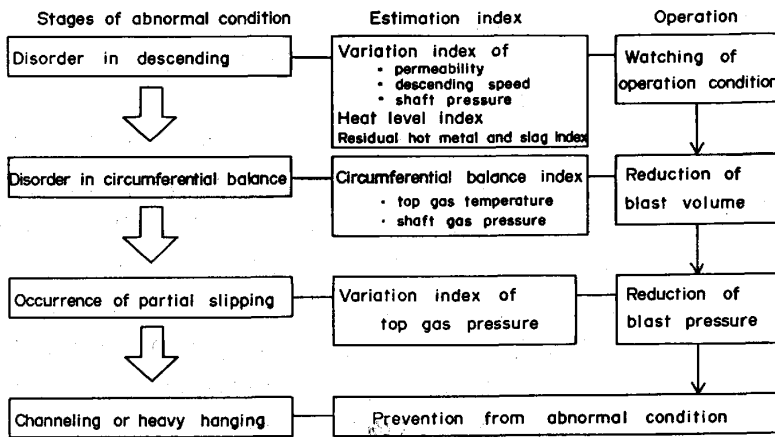


Fig. 7. Preventing flow of abnormal condition in permeability.

(2) 原燃料性状監視機能

- ① 鉱石, コークス性状(強度, 粒度等)の時系列表示
- ② 鉱石, コークス性状の上下限值管理 (異常表示)

(3) 炉内浸水監視機能

- ① 炉内浸水量の推定計算
- ② 炉内浸水有無の判定と警報による点検の指示

(4) 炉体監視機能

- ① 炉底, 炉壁浸食ラインの計算と表示
- ② 炉壁ガス流指数の計算と上限値管理 (異常表示)

(5) 炉内貯鉄滓量監視機能

- ① 炉内貯鉄滓量の計算と上限値管理 (異常表示)
- ② 出鉄, 出滓速度の計算

3.3.2 システムの特徴と通気異常防止への適用例

従来から通気異常の防止手段として, 炉内圧損の上限管理があつたが, 適正な許容圧損の理論的設定が困難なため, 設定された圧損の管理範囲内で吹き抜け, 連続棚等の通気異常の生じることを防ぎ得なかつた。そこで, より高炉の実態に応じた管理をめざすため, 過去の通気異常発生時の実績より, 通気異常にいたる標準的な過程と各過程を判定する評価指標を見出し, それにもとづく予防措置を講ずることにより通気異常を防止するシステムを構築した。通気異常は装入原料性状の異常, 炉内附着物の生長, 炉体冷却装置の故障, 炉内貯鉄滓量の増加等による高炉炉内反応が定常的でない時に生ずるが, その前兆として, 炉内通気性, または, 荷下がり状態の悪化が起こる。次に, これが進行するとガス流分布の円周バランスが乱れ, 円周の特定方向での局部的なスリップ, ドロップが発生する。そして, これを放置すると吹き抜け, 連続棚等の重大な通気異常に及ぶことがある。これら各過程の評価指標として次のものを設けた。

(1) 通気性悪化, 荷下がり不順の評価指標

- ① 炉内通気抵抗指数, 降下速度, シャフト圧力の変

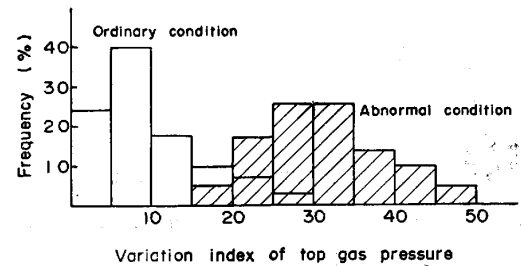


Fig. 8. Difference of top pressure variation index between abnormal condition and ordinary condition.

- ① 動量を 2 h 以内の各データの標準偏差で評価
- ② 炉熱レベルを鉄中 Si と溶鉄温度の値で評価
- ③ 貯鉄滓量を 2 h 以内の上昇量で評価

- (2) ガス流分布の円周バランス乱れの評価指標  
炉頂温度とシャフト圧力の円周バランス指数で評価
- (3) 局部スリップ, ドロップ発生の評価指標  
炉頂圧力変動指数 (20 min に上限を越える回数)で評価

過去の実績データより, これら評価指標の判定基準値を設け, 各過程ごとに Fig. 7 に示す異常防止措置を指示するようになっていた。Fig. 8 に通常操業時と通気異常発生時の炉頂圧力変動指数の分布状況を示す。

Fig. 9 は通気異常防止機能の適用状況を示している。図に示された炉況では貯鉄量の増加に伴って通気性指数, 送風圧力の上昇と差指レベル, 円周バランスの乱れが続き, 通気異常警報が出て, 即時に減圧と出鉄作業が実施されている。減圧中に小さなスリップが起きているが大きな通気異常にはいたっていない。通気性指数, 送風圧力の上昇状況からみて, 放置しておれば大きな通気異常に発展していた可能性がある。このように通気異常防止機能は有効に活用されており, 高炉の安定操業に寄与している。

4. ハードウェア構成とソフトウェアの開発, 保守

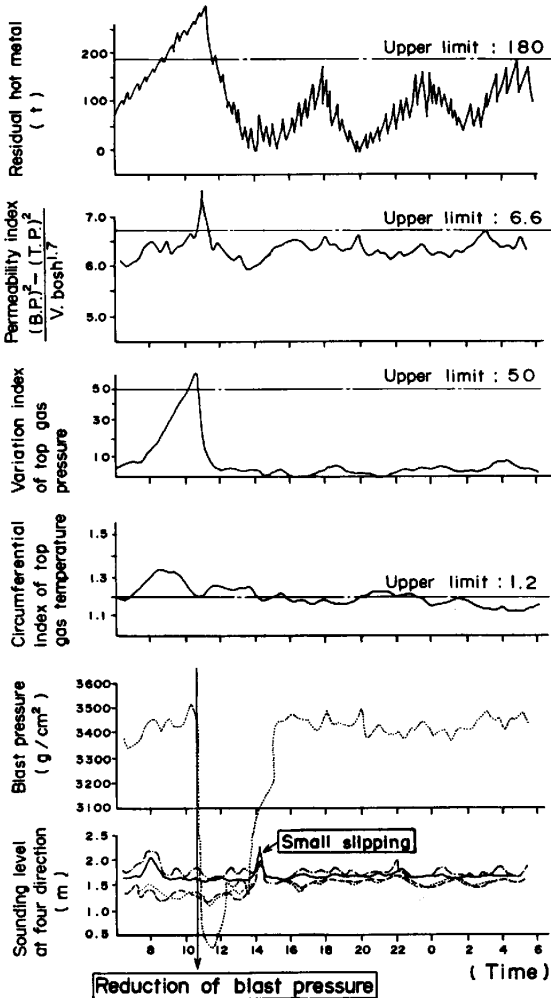


Fig. 9. An example of application results of prevention function from abnormal condition.

4.1 検出端の設置状況

炉内検出端の設置状況を Fig. 10 に示す。

(1) 炉頂部

炉頂部にはプロフィールメーター, 炉頂ゾンデ, 及び, 炉頂4方向に設置された装入物上方のガス温度計がある。プロフィールメーターは機械式で半径方向6点の測定が可能で, その情報は降下速度と装入面プロフィールの推定に使用されている。炉頂ゾンデは温度とガス成分のCO, CO<sub>2</sub>を測定しており, 半径方向10点の測定が可能で, その情報は半径方向のガス流分布推定に使用されている。また, 装入物上方のガス温度計は直径2方向に10点ずつ設置されており, ガスの連続測温が可能で円周方向, 及び, 半径方向のガス流分布推定に使用されている。

(2) シャフト部

シャフト部には上部, 中部の水平ゾンデと炉壁部の垂直ゾンデ, 及び, 固定電極式の層厚計がある。上部ゾンデは半径方向10点, 中部ゾンデは6点の温度とガス成分の測定が可能であり, 半径方向のガス流分布推定に使用されている。また, 垂直ゾンデは炉壁より450mmの位置に装入される消耗型のもので, 温度とガス成分を測定し, 炉高方向の還元状況推定に使用されている。層厚計は円周4方向に設置されており, その情報は円周方向の鉱石とコークスの層厚比の管理に使用されている。

(3) 羽口部

羽口部では羽口全点に支管風量計と埋め込み式の温度計が設置されており, 支管風量分布, 及び, レースウェイ状況の把握に使用されている。

その他にも炉体の各部位に温度計, 圧力計, 流量計等

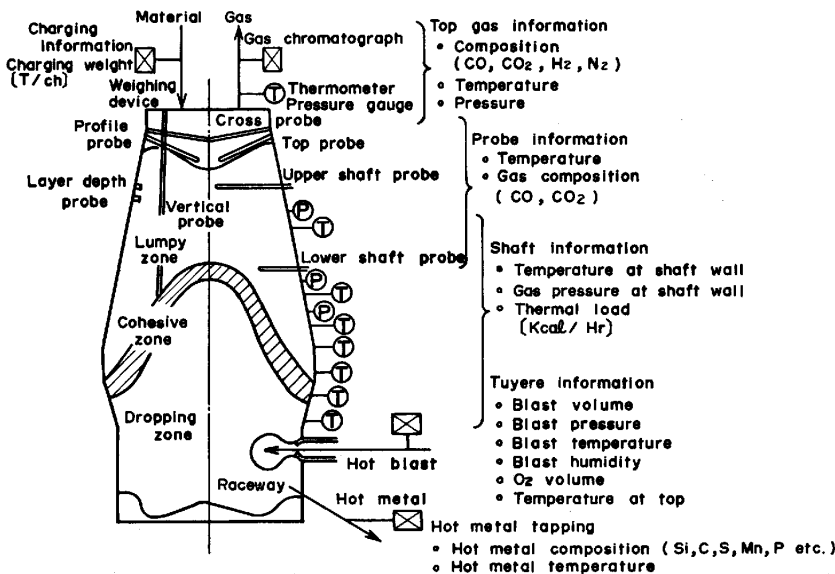


Fig. 10. Instrumentation in Hirohata No. 4 B.F.

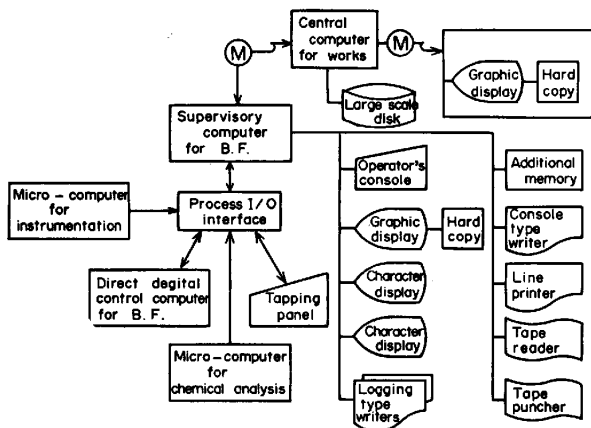


Fig. 11. Configuration of computer system.

が多数設置されており、これらを含めると検出端の数は約 700 点になる。

#### 4.2 計算機システム構成

本システムのハードウェア構成を Fig. 11 に示す。コンピュータとしては製鉄所の中央コンピュータ、高炉のプロセスコンピュータ、デジタル制御用、分析データ処理用、及び、検出端データ処理用のマイクロコンピュータがあり、これらを階層構造に組み合わせて分散処理を行っている。ここで述べた高炉操業管理システムの主要部分の処理は高炉のプロセスコンピュータで実施しており、下位のマイクロコンピュータではデータの収集、加工と制御を行い、また、上位の中央コンピュータでは長期間データの保存、検索による対話型の操業データ解析を行っている。

#### 4.3 ソフトウェアの開発、保守

高炉操業管理システムのレベルアップにとつて、炉内検出端の開発、改善とそれにもとづくソフトウェアのリファインが重要である。また、システムの機能活用度を高めるためには高炉オペレーターのニーズを的確にシステムに反映できることが必要である。そこで、本システムの開発に当たってはエンドユーザーの積極的な参画をはかり、機能仕様の設計からアプリケーションプログラムの製作まで使用者が中心になつて推進した。その結果、使用者のシステム開発、活用能力が向上し、システム稼働後のソフトウェアの保守も使用者側で実施している。

### 5. 結 言

本報告の高炉操業管理システムは開発後広畑 4 高炉で順調に稼働しており、高炉の炉内状態把握とそれにもと

づく適切なオペレーションガイドにより、高炉の安定操業に寄与している。しかし、今後更に高炉操業の効率化を進めるためには、より詳細な原燃料情報の提供と炉内検出端の開発による炉内状態把握精度の向上が不可欠であり、また、炉内制御性の向上を果たすための設備技術、及び、操業技術の開発を含めた総合的な高炉操業管理システムの構築が必要である。

#### 文 献

- 1) 渋谷悌二: 鉄と鋼, 67 (1981), A109
- 2) 岩村忠昭, 河合隆成, 浅野有一郎: 鉄と鋼, 67 (1981), A121
- 3) 阪本喜保, 的場祥行, 稲永昭二, 大塚宏一, 山本俊行: 鉄と鋼, 67 (1981), A125
- 4) 塩沢武夫, 細川益祥, 酒井博明: 神戸製鋼技報, 30 (1980) 4, p. 15
- 5) 田村健二, 林 洋一, 山本崇夫, 松井正昭, 彼島秀雄: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2287
- 6) W. L. ZIEGART and D. O'CONNELL: Iron & Steelmaker, 9 (1982) 6, p. 21
- 7) F. E. SVEKRIC, B. SCHILLER, and B. J. MITCHELL: Iron & Steelmaker, 9 (1982) 9, p. 34
- 8) 岡部俠児, 福武 剛, 高橋博保, 河合隆成, 岩村忠昭, 崎村 博: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 7, p. 34
- 9) 羽田野道春, 梶原義雅, 山県千里, 狩谷順二, 山西逸生, 山本章生: 鉄と鋼, 68 (1982), S116
- 10) 斎藤 汎, 炭竈隆志, 泉 正郎, 片岡恒男, 堀内好浩, 木村亮介: 鉄と鋼, 68 (1982), S798
- 11) 安田一美: 鉄と鋼, 65 (1979), S71
- 12) 加瀬正司, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1928
- 13) 大野陽太郎, 山田 裕, 近藤国弘, 丹羽康夫, 炭竈隆志, 木村康一: 鉄と鋼, 67 (1981), S71
- 14) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 67 (1981), S752
- 15) 久保秀穂, 西山哲司, 田口整司: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 2, p. 134
- 16) S. WAKURI, K. KANAMORI, N. MORISHITA, N. FURUSHIRO, N. NAKANO, and S. WAKAYAMA: Proc. Ironmaking Conf., 40 (1981), p. 112
- 17) N. JUSSEAU, J. COCHERY, C. STAB, R. VASSE, and Ph. BEGE: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making, Luxembourg (1970), B-3
- 18) R. VIDAL, J. LÜCKERS, and G. MORE: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making, Luxembourg (1970), B-6
- 19) 加瀬正司, 林 洋一, 田村健二, 林秀次郎, 久々宮明, 西納幾平, 山田武弘, 花房章次: 製鉄研究, 288 (1976), p. 70
- 20) 羽田野道春, 美坂佳助, 的場祥行, 大塚宏一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 518
- 21) K. KATSURA and T. YAMAMOTO: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making Amsterdam (1965), B-9
- 22) 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御(1972), p. 50 [サイエンス社]