

## 高炉異常炉況予知システムの開発

技術報告

山本 亮二\*・中島龍一\*・岸本 純幸\*<sup>2</sup>

中村 博巳\*・酒井 敦\*

Development of Prediction System for Unusual State  
in Blast FurnaceRyoji YAMAMOTO, Ryuichi NAKAJIMA, Sumiyuki KISHIMOTO,  
Hiromi NAKAMURA and Atsushi SAKAI

## Synopsis :

For the efficient and stable blast furnace operation, the FLAG (Fine Lookout of Abnormal Gradient) system which can predict the unusual conditions at its earlier stage and direct the proper countermeasure, has been developed in NKK Fukuyama works.

This system is included in the operation control computer system at No.2 blast furnace and has the following features.

(1) Prediction indices ; these can detect the distinctive patterns of the sensor information which correspond to the process of the unusual states.

(2) Usage of voice annunciator for the direction of the action ; It makes possible to deal with the abrupt change of the furnace condition.

(3) Determination system for the threshold value of judgement ; It can maintain the prediction accuracy and can make it simple to introduce this system to the other blast furnace.

This system has been contributing to stabilize the blast furnace operation.

## 1. 緒 言

製鉄所の最上流に位置する高炉にとって、下工程への溶銑の安定な供給は最大の課題である。近年、製銑部門を取り巻く環境の変化、特に経済情勢、エネルギー情勢の変化は著しいものがあり、高炉においても、原燃料スペックの見直し、炉体長寿命化また所内エネルギーバランスの変化に即応する操業変更といった多様なニーズがますます増加する傾向にある。

これらのニーズに答えるため、高炉の安定操業技術は各種モデル実験によるプロセス研究、実操業での各種センサーによる炉内状況の把握、解明により高いレベルで達成されつつある。しかし、炉内ガス流れの変化、原料性状の変化などによる突発的な炉況変動の発生は避けられず、早期の対処アクションによつて長期炉況不調を回避することが重要である。

福山製鉄所では、各種センサー情報の計算機処理により、異常発生の前予知、ならびに早期の対処措置の指

示を行う FLAG (Fine Lookout of Abnormal Gradient) システムを開発し、高炉の安定操業に大いに貢献している。

以下に、本システムの概要とその適用状況について報告する。

## 2. 異常炉況予知システムの位置付け

プロセス変化の定量的かつ迅速な把握を目的として、各高炉には多種多様なセンサーが設置され膨大なプロセスデータが収集されている。これらのセンサー情報を効率よく利用するためコンピューターによる操業システム構築の試みはさかんに行われている。

高炉操業定量化の試みは、炉内状況を理論的に推定する方法と経験に基づく操業評価のシステムに大別できる。このうち、REICHARDT の段階別熱精算<sup>1)</sup>に代表される前者は、高炉が安定状態に保たれる場合にのみ有効でありスリップなど炉況変動発生時には適用できないものである。一方操業結果である炉況・炉熱を定量化し、操

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 8 月 5 日受付 (Received Aug. 5, 1985)

\* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

\*<sup>2</sup> 日本鋼管(株)福山製鉄所 (現: 日本鋼管(株)京浜製鉄所) (Fukuyama Works, Now Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)

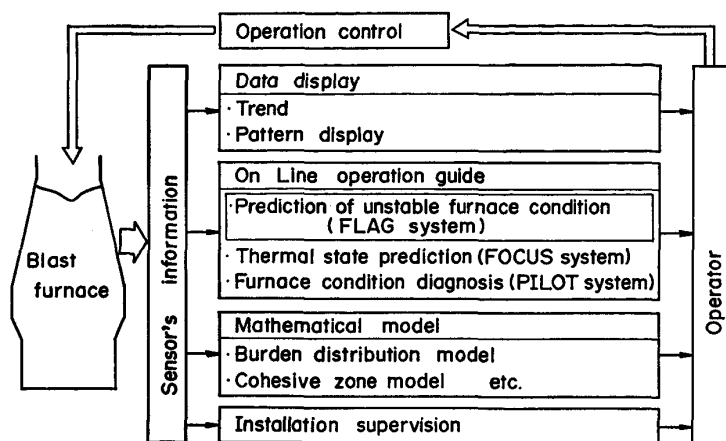


Fig. 1. Configuration of blast furnace operation control system at Fukuyama No. 2 BF.

業管理に利用する後者の方法は、実際の高炉操業に大いに効果をあげている<sup>2)~7)</sup>。最近、これらの操業システムにおいて、各操業因子と管理基準の比較により異常を発見し警報するシステムも各社で開発されつつある。本、異常炉況予知システムは、この炉況定量化の試みの一つとして特に突発的な炉況変動の早期検出、タイムリーなアクション指示を目標に、異常予知確率の高いセンサー種とその処理方法を異常発生メカニズムと対応させて事前に選択し、計算機によりオンラインで連続的に監視するシステムとして開発されたものである。

福山製鉄所では、2高炉(3次)において、Fig. 1に示すような操業管理システムを開発した<sup>8)</sup>。このシステムは、安定操業を継続する上で必要なプロセスの情報を操業者の判断が行われやすい形式で提供する情報収集システムと、その判断による操業者の調節操作を能率よく行わすためのシステムを包括したものであり、異常炉況予知システム、炉熱予知システム<sup>9)</sup>、炉況診断システム<sup>4)</sup>、から構成されるオンライン操業ガイドの導入を特徴とするものである。これらは、それぞれプロセスデータを逐次取り込み、高炉の変動を早期に検出し適正なアクションの指示を目的として、操業中常に稼働している。

異常炉況予知 (FLAG) システムは、このように操業管理システムのサブシステムとして従来の操業経験にもとづきオンライン・プロセスデータを処理し、吹抜け<sup>†</sup>、大スリップなどの発生を事前に予知し、早期のアクションを指示することにより異常を回避することを目的としたものである。

† 当所では、スリップ、炉頂温度の上昇を伴う、0.02kg/cm<sup>2</sup>以上の炉頂圧力変動の現象を吹抜けと判定している。

### 3. 異常炉況とセンサー情報の挙動

#### 3.1 異常炉況発生メカニズム

装入物の降下は自重によつて起こり、層内を流れるガスの圧力損失、装入物相互および炉壁との摩擦力が降下を妨げる。吹抜けは、ガスの圧力損失が装入物重量を越えた時に発生し、装入物の異常降下を伴い、高温のガスが原料を吹き上げる現象である。

よく知られている充填層の圧力損失を示す式は、次の CARMAN 型の式である<sup>10)</sup>。

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot \Delta L} = C \cdot f' \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g_c \cdot \phi \cdot ds} \cdot \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \dots \dots \dots (1)$$

$\Delta P / \Delta L$  : 単位長当たりの圧力損失 (kg/m<sup>2</sup>/m)

C : 定数

f' : 修正摩擦係数

U : ガス流速 (m/s)

g<sub>c</sub> : 重力換算係数 (m/s)

φ : 球状係数 (-)

ds : 粒子径 (m)

ε : 空隙率 (-)

ρ : ガス密度 (kg/m<sup>3</sup>)

この式より、粒子径および空隙率の低下は、層内圧力損失を増加させることがわかる。

実炉における吹抜け発生原因から、長期の炉況不調に至るメカニズムを Fig. 2 に示す。炉壁付着物の成長、炉体の老朽化による冷却箱の部分的突出など、炉体プロフィールが悪化した状況では、装入物の降下に伴い炉壁近傍でコークス、鉱石の混合層が形成されやすくなる<sup>11)</sup>。混合層の形成は、鉱石のコークス層への浸透によつて起こり<sup>12)</sup>、円周方向の通気抵抗バランスの不安定状態が生じる。焼結鉱、コークスの粒径など、原料性状の変動が通気抵抗不安定の原因となることはもちろんである。こ

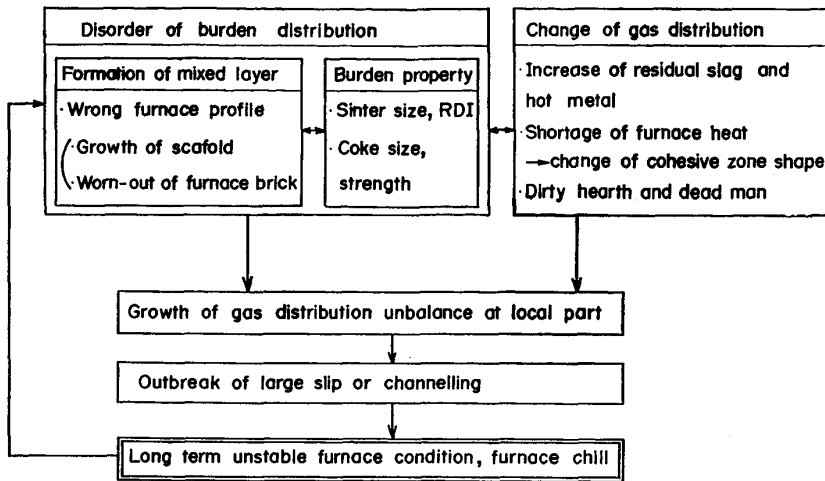


Fig. 2. Schematic flow of channelling mechanism in commercial blast furnaces.

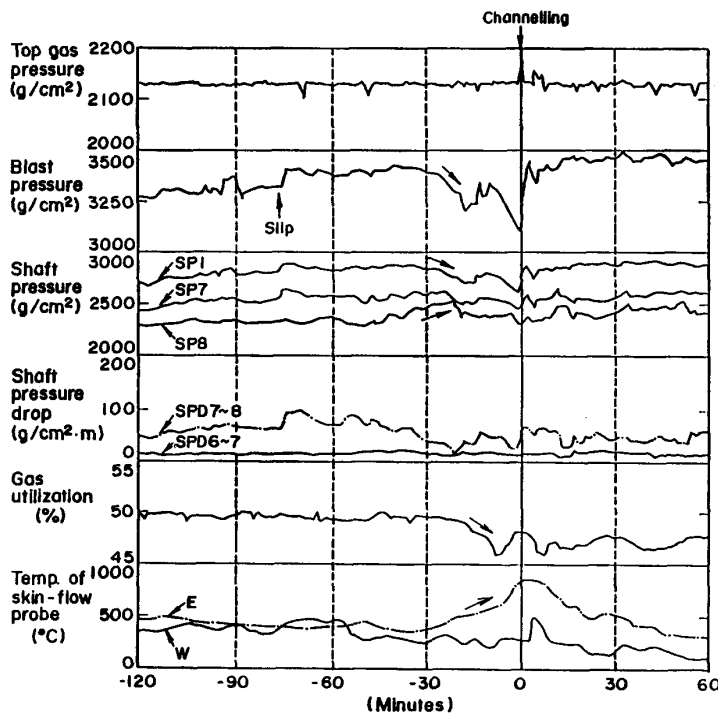


Fig. 3. Change of sensor information before channelling at Fukuyama No. 5 BF.

うして生じたアンバランスな通気抵抗分布状態下では、装入物が局所的に流動化を開始する可能性が高いと推定される。

その他、炉熱の低下による溶融帯形状の変化、炉床部における残留溶銑、スラッグの増加などは、炉下部でのガス流分布そのものを変化させ、その結果炉上部においても、径方向、円周方向でのガス流れのアンバランスが発生し、吹抜けの原因ともなると考えられる。

シャフト中、下部で局所的な流動化が発生した場合、装入物の細粒は上方へ吹き飛ばされ、上部で堆積しそのレベルでの通気抵抗バランスは更に悪化し連続した流動化現象、大規模な吹抜けへと発達するものと考えられる。

以上のような各現象、原因は互いに独立なものではなく交絡し、影響を強め合うものであり、その結果長期にわたる炉況不調や炉冷の原因にもなると想定される。

### 3.2 センサー情報の挙動

福山5高炉では、1981年以降の低出銑比操業期において吹抜け現象が散発するようになった。従来、炉況異常発生を予知、回避するための指標としては、操業経験から送風圧力の上限管理を行っていた。しかし、操業状況の変化に適応した管理値の設定が困難なこと、送風圧力計単独では炉内の局所的な通気異常の発生に対して追従性が悪いなどの問題により吹抜け発生の完全な防止は不可能であった。

5高炉では、火入れ8年目の1982年2月、延命を目

的として大幅に各種センサーを増設し、すべてのデータを計算機で管理するシステムを完成させた。計算機に取り込まれた膨大なセンサー情報のうち、特に吹抜け発生前の変化に注目した結果、数種のセンサーにより異常予知が可能であることを見出した。その特徴的な例を Fig. 3 に示す。この例のように送風圧力は、吹抜け発生前急速に低下し、発生後は再び上昇傾向となる。ガス利用率は、送風圧力と同様な動きをするが発生前に変化が捕えられる確率は、送風圧力に比べ小さいものであった。

シャフト圧力に関しては、下部の 1 段は送風圧力と同様な挙動をするが、上部の 7, 8 段間圧損勾配の変動が吹抜け発生のかかなり前より激しくなっている。このことは、前述した下方での局所的な流動化の発生と上部での粉堆積現象をセンサーがよく検知しているものと考えられる。また、固定ゾンドは吹抜け発生を検出に敏感であり、吹抜け方位の検知にも有効なものである。

#### 4. 異常炉況予知のシステム化

##### 4.1 センサー情報の指数化

5 高炉において異常炉況発生を事前に予知する可能性のあるセンサー情報を 1s 間隔で取り込み、更に解析を

進めた。その結果、異常発生前これらセンサー情報の変化パターンは、次の 4 種に分類できることがわかった。

A. 異常発生前レベルが変化し、その変化方向に特定の方向性があるもの (送風圧力, ガス利用率)

B. レベル変動が大きくなるが、変化に方向性のないもの (シャフト圧損勾配)

C. 円周方向でレベルの相違が顕著となるもの (上部シャフト圧力, 固定ゾンド温度)

D. 垂直方向でのレベル相違が顕著となるもの (シャフト圧力)

時系列的に取り込まれるセンサー情報から、これらの変化パターンを明確に把握するため、各センサーの生データをおのおの指数化計算処理し、その指数値を管理することにより異常の発生を予知する方法を開発した。使用するセンサー種と、それらより計算する各指数を Table 1 に示す。

GUF, BPF は、変化パターン A (方向性のあるレベル変動) を検知する指数である。BPF の指数化例を Fig. 4 に示すが、それぞれ前後する 2 つの時間帯でデータ平均値の比較を行い変化の方向と量を把握するものである。例のように、吹抜け前に特徴的な送風圧力の低下が明瞭に表現され、かつ熱風炉切換え時のような短期

Table 1. Index and sensors in FLAG system.

Index name	Sensor's information	Arrangement of sensors
GUF (Gas utilization fluctuation)	$\eta_{CO}$	
BPF (Blast pressure fluctuation)	Pb	
SPF (Shaft pressure fluctuation)	$P_2 - P_3$	
TTB (Throat temperature balance)	Tp	
SPB (Shaft pressure balance)	$P_2 \& P_3$	
MPG (Multiplication of pressure gradient)	$P_1 \& P_2 + P_3$	

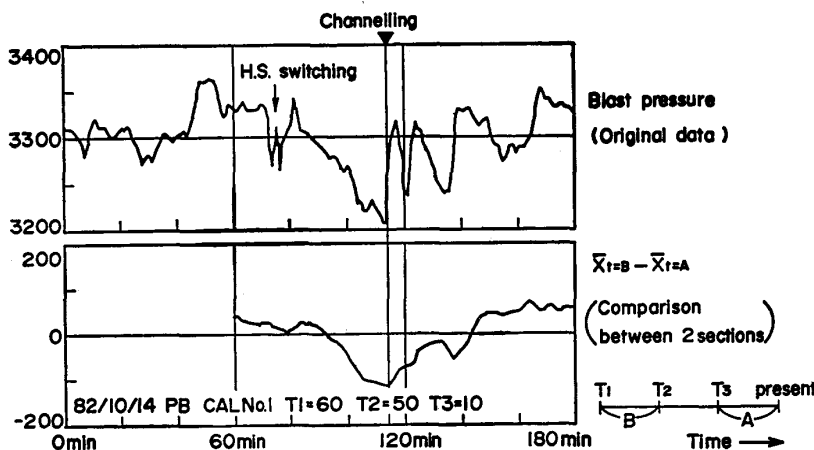


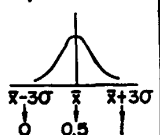
Fig. 4. Relation between variation of blast pressure and index value (BPF).

的な圧力低下は現れない。

その他、選択されたセンサー情報それぞれについて、外乱を除去し異常発生前に特徴的な変化パターンを明確に抽出可能な指数化処理方法を見出した。各パターンごとの指数化計算方法を一括して Table 2 に示す。

この中で、MPG はシャフト圧力の垂直バランス指数であり、各レベルでのシャフト圧力変動と方向をAパタ

Table 2. Methods of indexing treatment.

Category of index	Content of indexing treatment
A. Direction and degree of gradient (GUF, BPF)	$\text{Index I} = \frac{\sum_{T=N-11}^{N+12} X_i(T)/(t1-t2+1) - \sum_{T=N-13}^N X_i(T)/(t3+1)}{X_i(T) : \text{Value of sensor } i \text{ at time } T}$ <p>N : The present time t1~t3 : Constant (t1&gt;t2&gt;t3)</p>
B. Degree of fluctuation (SPF)	$\text{Index J} = \frac{\sum_{T=N-11}^N  \Delta P_i(T) - \Delta P_i(T-1) }{(t1+1)}$ <p><math>\Delta P_i</math> : Pressure drop of the direction i at upper shaft</p>
C. Circumferential balance (TTB, SPB)	<p>Index K = (r, <math>\theta</math>) (r, <math>\theta</math>) : Polar coordinates of composed vectors of sensor's information</p> <p>* <math>Tp^i = (tp^i - \bar{tp}^i) / 6\sigma tp^i + 0.5</math>  <math>tp^i</math> : The standardized value of the peripheral temperature of the direction i at upper shaft  <math>tp^i</math> : The actual value of the present time  <math>\bar{tp}^i</math> : mean value of <math>tp^i</math>  <math>\sigma tp^i</math> : standard deviation of <math>tp^i</math></p> 
D. Vertical balance (MPG)	<p>Index L = Index I1 x Index I2                      I1 : P1, I2 : P2 + P3</p>

ーン検知の I 指数計算方法で求め、上下レベル間でその指数の積を管理することにより垂直方向のアンバランス発生を検知するものである。

#### 4.2 システムの構成

吹抜けなど炉況の異常変動は、突発的なものでありそれに対する防止アクションも緊急を要する。異常炉況予知システムは、近未来における炉況異常の発生を予知した場合、その内容とアクションを音声で操業者に直接警告するシステムを採用した。

プロセス計算機による異常予知のフローを Fig. 5 に示す。各センサーより得られる情報は、1 min ごとに計算機に取り込まれ前述のような指数化計算処理された後、それぞれの指数値にもとづいた異常発生確率の判定に使用される。吹抜け発生の可能性が高い場合、発生確率に応じ Attention と Alarm の2段階の判定が行われ、プリンターに予知内容を書き出すと共に、スピークモニターから緊急性に応じた減風の指示が出される。また各指数値の推移は、操業者の指示入力により CRT で観察することが可能である。

具体的な異常発生の予知は以下のようにして行っている。

計算処理された個々の指数値に対し、過去の操業解析により決定された境界値にもとづいて、異常の発生する確率判定を行う。この第1段階の判定で異常発生を検出した要素については、その FLAG 点数を1とする。

第2段階は、各要素ごとに判定した異常発生確率を集計して総合判定指数 S を計算する。この場合上述の境界

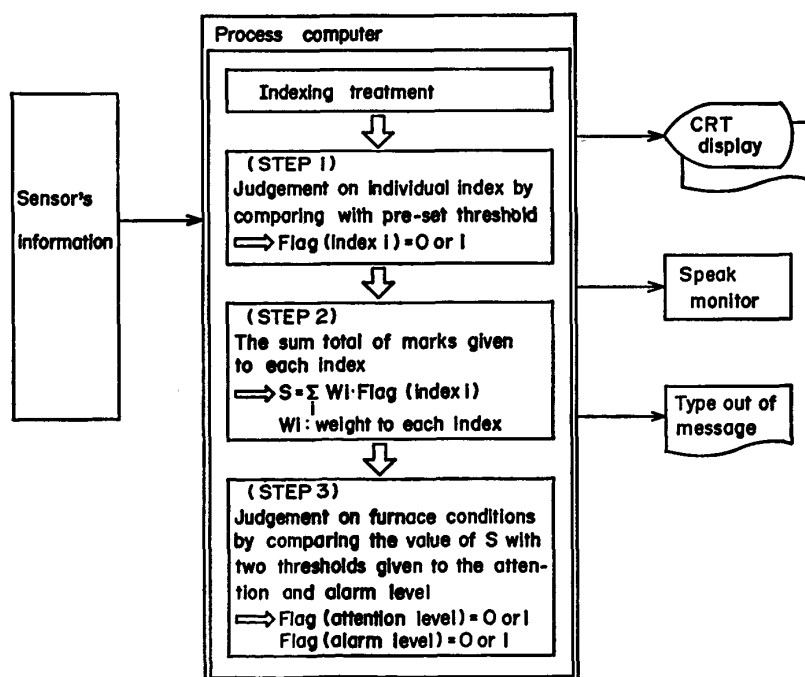


Fig. 5. Schematic flow of abnormal state prediction.

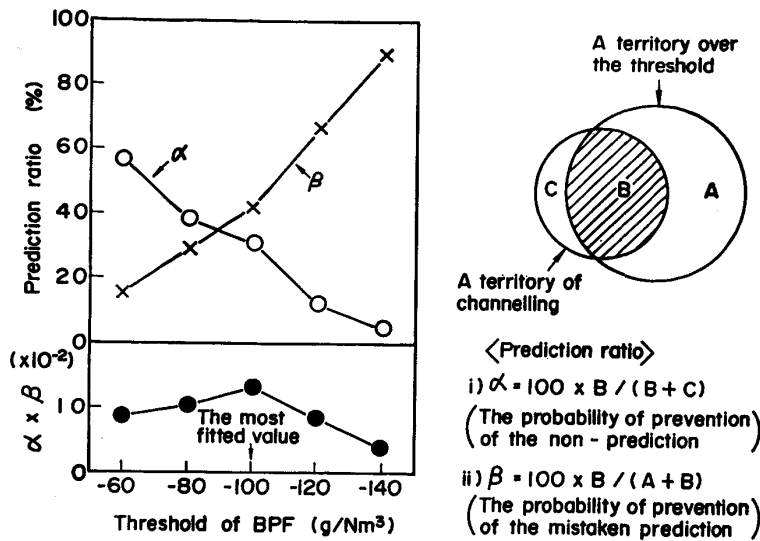


Fig. 6. An example of determination of threshold.

値と同様に操業解析から決定された加重係数  $W_i$  を使用するが、 $W_i$  は、 $S$  値が 0~10 の範囲となるようあらかじめ規格化されている<sup>4)</sup>。

最終段階は、 $S$  値をもとに 2 レベルの境界値と比較して異常発生の確率を判定し、吹抜け発生の可能性が高い場合、警報と共にアクション指示が発せられる。この過程で使用する境界値も経験的に決定されるものである。

以上のような判定方法において、それぞれの境界値および加重係数の最適化が最も重要な問題である。本システムで使用する各境界値、係数は、センサー設置位置の相違などから、このシステムを適用する各高炉に固有の値をとるものであり、その決定には長期のデータ蓄積と解析が必要である。

Fig. 6 に、BPF (送風圧力変動) 指数の境界値決定の考え方を示す。本システムを実炉に適用するにあたっては、異常発生時のデータの他、各指数が仮に設定した境界値を越えた時のデータをも採取する。図中の円 (A+B) は、全収集データのうちで、BPF が境界値として指定した値を越える件数であり、円 (C+B) は、実際に炉況異常に至った範囲である。したがって、二つの円が交叉する B の範囲が BPF 指数の異常予知有効範囲である。指定する境界値を変化させて、予知漏れをしない確率  $\alpha$  と、予知の正確性  $\beta$  を計算しその積  $\alpha \times \beta$  が最大となる値を境界値として採用する。また適用した境界値における  $\alpha \times \beta$  の値により、各指数の加重係数  $W_i$  を決定する。更に、総合判定指数  $S$  に対する境界値も同様にして決定される。

以上の方法により、センサーから得られる異常予知情報を効果的にシステムへ反映することが可能である。本システムの開発においては、常時オンラインで異常予知

判定を行うプログラムとは別に、実操業データ採取と境界値解析用の 2 本のサブプログラムを作成し、最適な境界値を導入することによる予知確率の向上と新たな高炉へ適用する際の効率化を図っている。

4.3 実操業への適用結果

FLAG システムは、1982 年に開発着手され、まず 5 高炉において稼働した。当時、本システムによる吹抜け Alarm 警報が発せられた後に実際に吹抜けが発生した場合の予知確率は約 90% に達し、この方式による異常発生予知の妥当性が確認された。

1983 年 11 月に火入れした 2 高炉においては、立上がり操業時から本システムを活用し炉況安定化を図っている。Fig. 7 は、2 高炉立上がり直後の異常予知時の各指数推移 CRT 表示の例を示す。画面の右欄はそれぞれの指数に対して決定された境界値と加重係数を表している。各指数の上昇により Alarm レベルの警報が出され減風を行つた直後にスリップが発生し、その後  $S$  値が Good レベルに戻つて増風を行つている。

2 高炉稼働初期ベルレス分布試験操業期間において、本システムの予知確率チェックを行つた結果を Fig. 8 に示す。FLAG システムにより異常発生の Alarm 警報が発せられた後に、実際に吹抜け、スリップが発生した割合は 90% にのぼり、逆に吹抜け発生前に異常が予知されていた確率は 85% であつた。

このように、本システムによる異常炉況予知確率は、実炉でも相当に高いものでありタイムリーな減風指示および戻しの判断基準を提供することが可能である。更に、各センサー情報の指数値は、日常操業時の炉況の定量的把握にも有効であり安定操業の維持に貢献している。

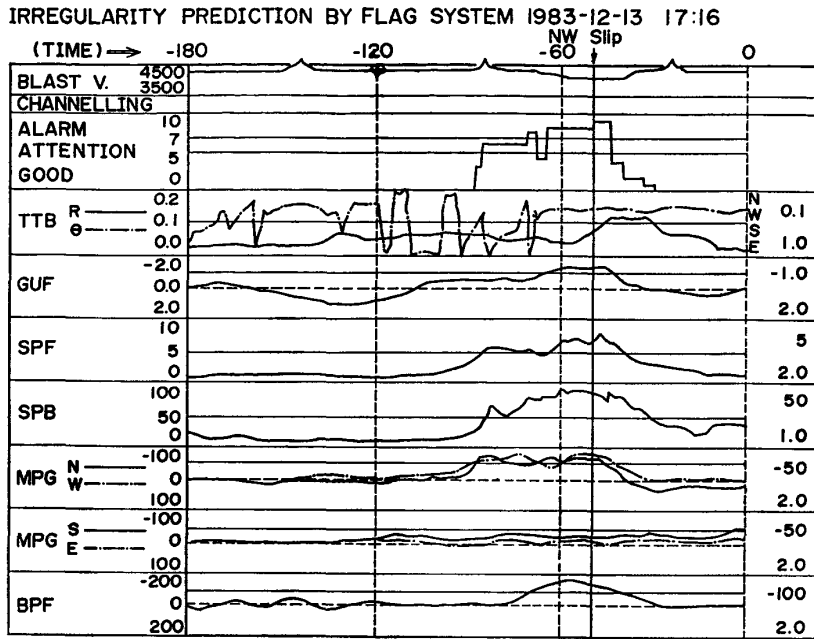


Fig. 7. An example of FLAG system CRT display.

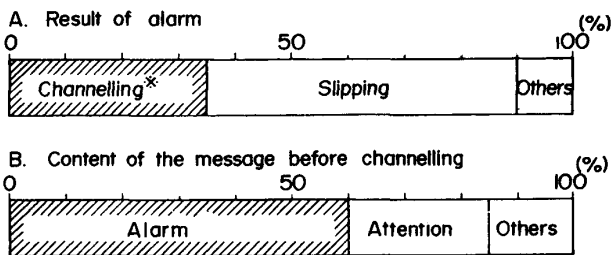


Fig. 8. Prediction results by FLAG system at Fukuyama No. 2 BF.

### 5. 結 言

本報告の FLAG システムは、異常を事前に予知し早期のアクションによつて、炉況不調を防止することを目的として開発されたものである。

本システムは、福山 5 高炉 (1 次) で開発され、逐次全炉へ適用し高炉の安定操業に大いに貢献している。

### 文 献

- 1) P. REICHARDT: Arch. Eisenhüttenwes., 1 (1927), p. 77
- 2) 渋谷悌二: 鉄と鋼, 67 (1981), A109
- 3) 福田隆博, 内藤文雄, 姫田昌孝, 末瀧哲郎, 西尾通卓, 西川 潔, 神部三男: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 5
- 4) 佐藤武夫, 炭竈隆志, 木村康一, 泉 正郎, 齊藤森生, 木村亮介: 日本鋼管技報, 107 (1985), p. 1
- 5) 塩沢武夫, 細川益祥, 酒井博明: 神戸製鋼技報, 30 (1980) 4, p. 15
- 6) 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
- 7) 羽田野道春, 美坂佳助, 的場祥行, 大塚宏一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 518
- 8) 大西英明, 石川高人, 橋本紘吉, 牧 章, 齊藤典生, 石井考治: 鉄と鋼, 70 (1984), S 65
- 9) 梶川修二, 山本亮二, 橋本紘吉, 岸本純幸, 酒井敦, 石井孝治: 鉄と鋼, 69 (1983), S 70
- 10) 児玉惟孝, 堀尾竹弘, 肥田行博: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 295
- 11) 一田守弘, H. BIAUSSEV: 鉄と鋼, 69 (1983), S 61, 62
- 12) 大野陽太郎, 近藤国弘: 鉄と鋼, 70 (1984), S 51