

© 1990 ISIJ

技術報告

## 熱風制御弁による高炉内円周バランス制御

中島 龍一\*・岸本 純幸\*・堀田 裕久\*  
石井 邦彦\*・木村 亮介\*・山本 修一\*

## Circumferential Balance Control in Blast Furnace by Hot Blast Control Valves

Ryuichi NAKAJIMA, Sumiyuki KISHIMOTO, Hirohisa HOTTA,  
Kunihiko ISHII, Ryosuke KIMURA and Syuichi YAMAMOTO

## Synopsis :

NKK jointly with Asahi Glass Co., Ltd. have developed a Hot Blast Control Valve (HBCV) which can control the flow rate at each tuyere. 19 HBCVs out of 38 tuyeres were installed in Keihin No. 2 BF in 1986. Through various test operations, innovative technologies for blast furnace operation have been developed. This paper reports the circumferential balance control of stock line levels.

(1) At the proper block with closed HBCVs, the coke consumption amount at the tuyere decreases, however the burden descending rate at the throat becomes faster. Applying these phenomena, it is possible to control the circumferential balance of SL levels.

(2) The simple stand-alone method, where the HBCVs at the block with higher SL level are closed based on the average SL levels during the past definite period of time, had sometimes put into disorder, and it was impossible to continue a stable control of SL levels.

(3) For further stable control, Successive Alleviative Integration (SAINT) method has been developed, taking account of their interferences of each HBCV opening, dead time and integral action of changes in valve opening.

(4) The test operation in Keihin No. 2 BF showed that it is extremely effective for the improvement of furnace conditions and decrease of Si content in hot metal to control the circumferential balance of SL levels on the SAINT method.

**Key words :** blast furnace ; hot blast control valve ; circumferential balance control ; stock line level ; SAINT method ; burden descending rate.

## 1. 緒 言

高炉の長期安定かつ弾力的な操業のためには、装入物の降下速度、炉内のガス流れ、融着帯レベル等の半径方向分布の制御だけでなく、円周方向分布の制御も極めて重要である。そこで、日本鋼管(株)(NKK)では、1983年より旭硝子(株)と共同で、高炉内円周バランスの制御手段として、羽口ごとの支管風量を制御できる熱風制御弁(Hot Blast Control Valve, HBCV)を開発した<sup>1)2)</sup>。そして、1986年6月、京浜2高炉(4052 m<sup>3</sup>, 1979年火入れ)において、19基(全羽口38本)設置・実用化した。その後、各種テストを精力的に繰り返し実施した結果、熱風制御弁を使用した新高炉操業技術として、ストックラインレベルの円周バランス制御技術<sup>3)</sup>、脈動送風技

術<sup>4)</sup>、新出銃制御法<sup>5)</sup>等の新技術を編み出し、1988年9月、そのコントロールシステムを完成した。

本報告では、熱風制御弁使用時の高炉内現象の変化(レースウェイ挙動、ストックラインレベル)について述べるとともに、ストックラインレベルの円周バランス制御技術について、単純追従型<sup>3)</sup>および有限整定応答系の制御システム(以下、これを逐次緩和積分型(Successive Alleviative INTEgration method, SAINT法)と呼称する)の実炉テスト結果<sup>6)</sup>を検討し、高炉操業への円周バランス制御(SAINT法)の有用性について述べる。

## 2. 熱風制御弁

弁体構造として、構造および軸シール施工が簡単なバ

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成元年12月21日受付 (Received Dec. 21, 1989)

\* NKK 京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

タフライ型を採用した。弁体は、高温（ $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ ）、高圧（ $\sim 5\text{ kgf/cm}^2$ ）、高速（ $\sim 250\text{ m/s}$ ）の熱風に耐えるよう、焼結炭化珪素（旭硝子社製）を用いた。炭化珪素製の弁体と金属製の継ぎ手の連結機構については、それらの接触力を、両者の膨張差によらず、ほぼ一定に保ちうる新規考案の焼ばめ（セラミック製弁体を加熱膨張させて、金属製の継ぎ手にはめこむ）方式を採用した。また、バルブ全閉時でも、風量の大幅な低下による羽口先への溶融物の逆流がおこらないように、支管内径  $200\text{ mm}$  に対して、本バルブの外径を  $180\text{ mm}$  に設定した。

本バルブを高炉熱風支管部に設置した模式図を Fig. 1 に示す。通過風量は、熱風本管とバルブ直上支管部間の圧力差から求めており、本バルブの開閉度を変えることにより、通過風量を制御することが可能である。バルブ全閉時の風量は、全開時の約 35% まで低下する。

次に、京浜 2 高炉における 19 基の熱風制御弁の円周配置図を Fig. 2 に示す。全羽口 38 本の内、19 基の本バルブは、円周方向ほぼ均一（1 本おき）に配置されている。これらはすべて、制御室からオペレーターによりまたは遠隔で風量が一定になるように弁開度を自動制御

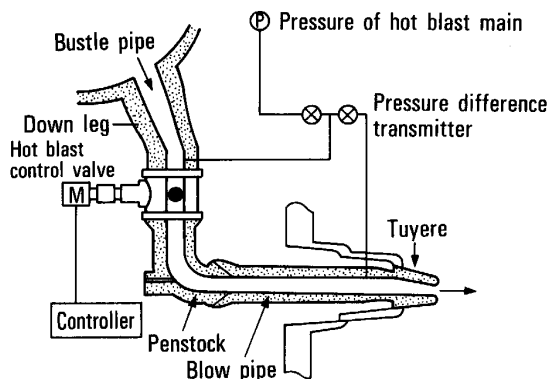


Fig. 1. Schematic drawing of installation of Hot Blast Control Valve (HBCV).

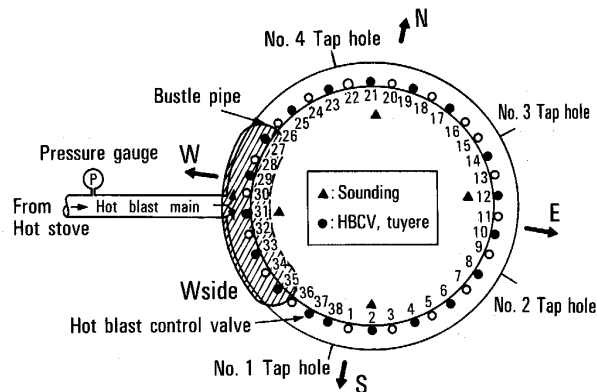


Fig. 2. Hot blast blowing system with 19 HBCVs in Keihin No. 2BF.

することができる。また、風圧上限、モーター過負荷等の異常に際しては、自動的に本バルブを全開またはそのバルブ開度で固定するよう、調整されている。

### 3. 熱風制御弁による高炉内現象の変化

#### 3.1 レースウェイ挙動

熱風制御弁の開閉度の変更に伴う羽口通過風量の変化が、羽口先レースウェイの挙動にどのような影響を及ぼすかについて、京浜 2 高炉の No. 29 羽口に設置したレースウェイゾンデ<sup>7)</sup>により、調査した。

##### (1) 圧力

送風圧力  $4.1\text{ kg/cm}^2$ 、送風量  $7100\text{ Nm}^3/\text{min}$  時の羽口先の圧力の変化を Fig. 3 に示す。本バルブの開閉度を 100% から 0% に絞ることにより、バルブ前後で約  $0.2\text{ kg/cm}^2$  の圧損を生じるため、ブローパイプ内の圧力は低下する。しかし、羽口通過風量も大きく低下（約  $210\text{ Nm}^3/\text{min}/\text{羽口}$  から約  $80\text{ Nm}^3/\text{min}/\text{羽口}$  まで低下）するため、羽口先端通過時の圧損は、逆に減少する。両者がほぼ相殺されるため、レースウェイ内の圧力は、本バルブの開閉度にかかわらず、 $3.5\sim 3.6\text{ kg/cm}^2$  でほぼ一定である。

##### (2) 温度

レースウェイブローブ先端に取りつけた二色温度計により、測定したレースウェイ内の温度分布を Fig. 4 に示す。弁開度を 100% から 0% に絞ることにより、羽口

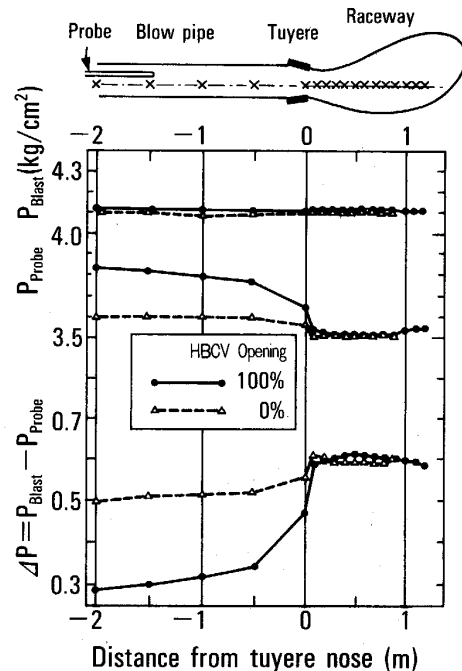
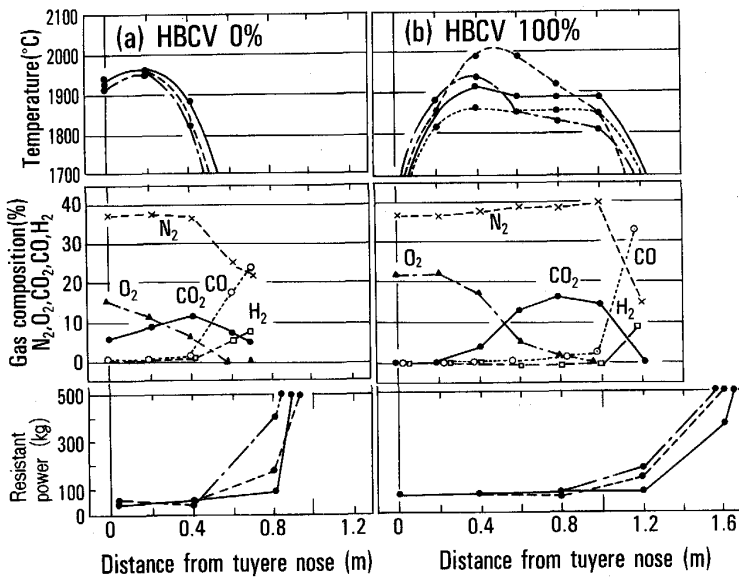


Fig. 3. Changes in pressure drop in raceway through distance from tuyere nose with valve opening of HBCV (100, 0%).



(a) : 0% (b) : 100%

Fig. 4. Changes in temperature, gas composition and resistant power in raceway through distance from tuyere nose with valve opening of HBCV.

先速度が約 1/3 になるため、微粉炭の燃焼がより手前側から起こり、羽口先端では、すでに温度が上昇している。そして、レースウェイも浅くなり、1800°C 以上の高温領域が大きく減少している。

(3) ガス組成

レースウェイ内のガス組成分布を Fig. 4 に示す。そのガス組成を用いて、下間ら<sup>8)</sup>と同様の方法により、レースウェイ内 200 mm ごとの熱収支から推定したレースウェイ内ガス温度分布を Fig. 5 に示す。

本バルブの弁開度を 100% から 0% に絞ることにより、O<sub>2</sub> の消失位置、CO<sub>2</sub> のピーク位置および CO の上昇開始位置等すべてが、羽口先端側にシフトしている。それに伴い、推定ガス温度は、羽口先端側から上昇開始し、高温領域（たとえば、2800°C 以上）は、逆に減少している。レースウェイ内推定最高ガス温度は、3 200~3 300°C でほぼ一定である。

(4) レースウェイ深度

外径約 50 mmφ の水冷プローブを炉内に挿入する時、レースウェイ内では、その反力は、100 kg 以下であるが、レースウェイ壁に近づくと急激に上昇する。今回、その反力が 500 kg に達した時、レースウェイ壁と想定し、その深さをレースウェイ深度と定義した。Fig. 4 に示すように、弁開度を 100% から 0% に絞ることにより、レースウェイ深度は、1.6 m から 0.9 m まで浅くなっている。

つまり、本バルブの弁開度を 100% から 0% に絞ると、通過風量は約 1/3 になり、レースウェイ深度は約 1/2 に減少する。しかし、レースウェイ内の温度・圧力等には、大きな変化はなく、レースウェイ挙動に致命的な変化は生じないので、高炉操業には支障は生じないと考えられ

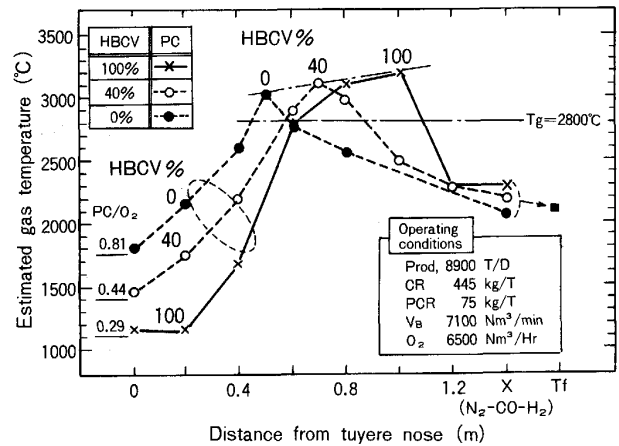


Fig. 5. Changes in estimated gas temperature in raceway through distance from tuyere nose with valve opening of HBCV (100, 40, 0%).

る。

3.2 ストックラインレベル

装入物の降下挙動に及ぼす円周方向の風量分布の影響を調査するため、West (W) 側の 5 基の熱風制御弁を絞った時のストックラインレベルの変化を測定した。

W 側の 5 基の本バルブを 0% まで絞った時の羽口ごとの風量分布を Fig. 6 に示す。その 5 本の羽口通過風量は、全開時の約 210 Nm<sup>3</sup>/min から、全閉時には約 80 Nm<sup>3</sup>/min まで減少している。しかし、本バルブは、1 本おきに設置されているため、W 側のブロック風量 (No. 26~35 羽口の平均風量) は、他の 3 方向の約 70% 弱である。

次に、この W 側の 5 基の本バルブを毎日 8 h ずつ、30, 20, 10% と絞った時のストックラインレベルの経

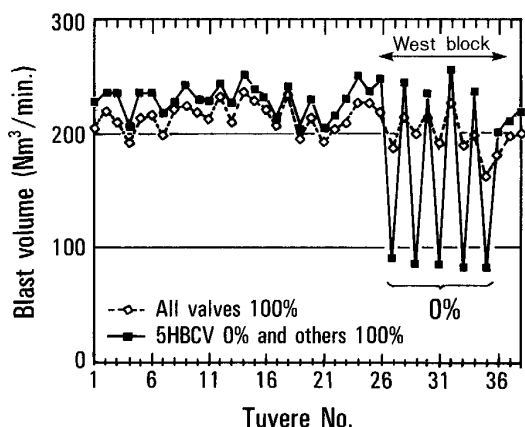


Fig. 6. Circumferential distribution of blast volume through tuyere at West block control by HBCVs (0%).

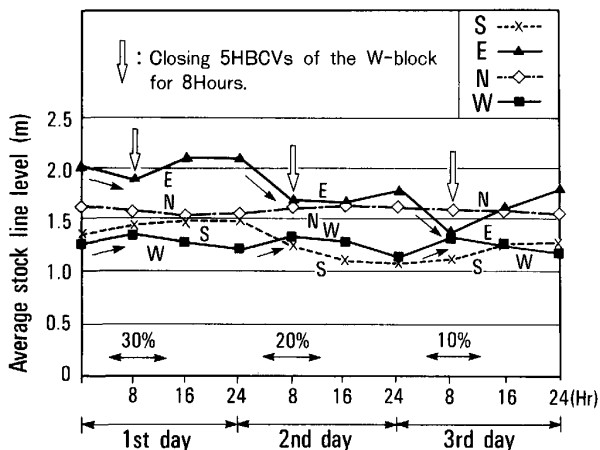


Fig. 7. Changes in stock line levels by closing 5HBCVs of the West block for 8 h (30, 20, 10%).

時変化を Fig. 7 に示す。3回のテストすべてに共通して、W 側の本バルブを絞ることにより、W 側の荷下りが早くなり、ストックラインレベルが深くなる傾向を示している。逆に、E 側はその反対で、荷下りが遅くなり、ストックラインレベルが埋まり傾向を示している。これは、羽口先でのコークス消費量という観点では、全く逆であり、説明できない。清水らの模型実験結果<sup>9)</sup>から推定すると、炉芯が異型化してクロスフローの固体流れが生じたのではないかと推察される。

このように、羽口レベルでの円周方向のブロック風量バランスと炉頂ストックラインレベルの変化の関係を利用すれば、本バルブにより、炉頂4方向のストックラインレベルを均一に制御することが可能であると考えられる。

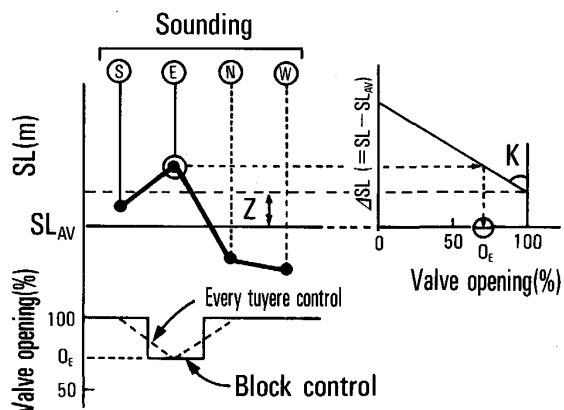


Fig. 8. Flow sheet of circumferential balance control of SL levels on simple stand-alone method by HBCVs.

#### 4. 熱風制御弁による高炉内円周バランス制御

炉頂4方向のサウジング位置に対応して、38本の羽口を4ブロック (SENW) に分割した。そして、各ストックラインレベルの位置により、それに対応したブロックの熱風制御弁を絞り、高炉内の円周バランスを制御するテストを実施した。

##### 4.1 単純追従型円周バランス制御

単純追従型円周バランス制御のフローを Fig. 8 に示す。

$SL(i) \leq SL_{ave} - Z$ では、

$$V(i) = 100 - K \cdot \{SL_{ave} - Z\} - SL(i) \dots \dots \dots (1)$$

$SL(i) > SL_{ave} - Z$ では、

$$V(i) = 100 \dots \dots \dots (2)$$

$SL(i)$ :  $i$ 方向のストックライン (m)

$SL_{ave}$ : 4方向の平均ストックライン (m)

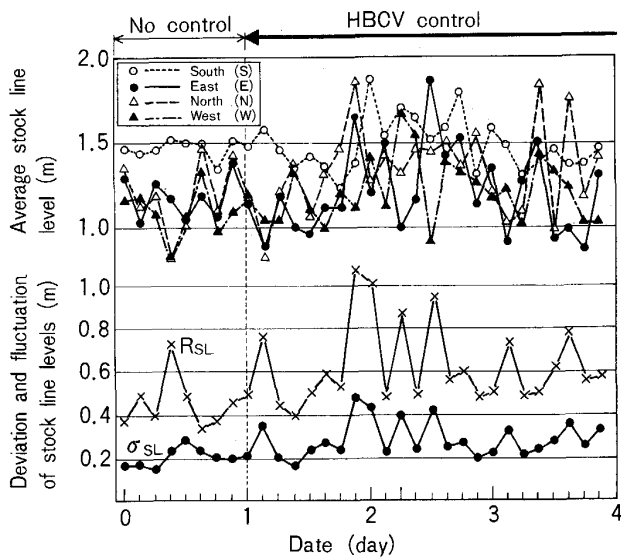
$V(i)$ :  $i$ ブロックのバルブ弁開度 (%)

$Z$ : 不制御帯 (m)

$K$ : 比例定数 (-)

本バルブを絞るブロックについては、式(1)、(2)に示すように、それに相当する方向のストックライン (Fig. 8では、Eブロック)が、4方向の平均ストックラインより更に不制御帯 ( $Z$ )以上埋まっている場合のみとする。また、その絞る弁開度幅は、そのストックラインレベルの差と比例定数 ( $K$ )の積で表す。制御方法として、Fig. 8に示すように、ブロック内の弁開度はすべて一定にする方法 (ブロック制御)と羽口ごとに比例的に変化させる方法 (羽口ごと制御)がある。

そこで、京浜2高炉において、この単純追従型制御フローに基づく実炉テストを数多く実施した。炉況が安定している時には、かなり成功を納めた例<sup>3)</sup>もあるが、



$R_{SL}$ : Maximum difference among four stock line levels  
 $R_{SL} = SL_{max} - SL_{min}$

Fig. 9. Comparison of changes of stock line levels between circumferential balance control in stand-alone method by HBCVs and no control.

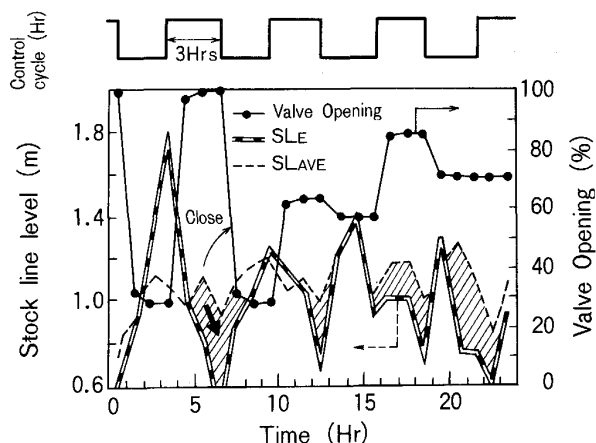


Fig. 10. Example of disorder of valve openings at circumferential balance control on simple stand-alone method by HBCVs (E block).

Fig. 9 に示すように、本制御により、逆に外乱を与える結果となり、ストックラインレベルがハンチングして発散する傾向が、しばしば認められた。

単純追従型円周バランス制御テスト時 ( $Z=0.1\text{ m}$ ,  $K=400$ , 制御周期 = 3 h, ブロック制御), E ブロックのバルブ弁開度とストックラインレベルおよび 4 方向の平均ストックラインレベルの変化を Fig. 10 に示す。過去 3 h の平均ストックラインレベルのみから本バルブの弁開度を設定しているため、制御周期ごとの弁開度の変更幅が大きく、E ブロックのストックラインレベルは、ハンチングをおこなっている。これらの現象を Fig. 11 に

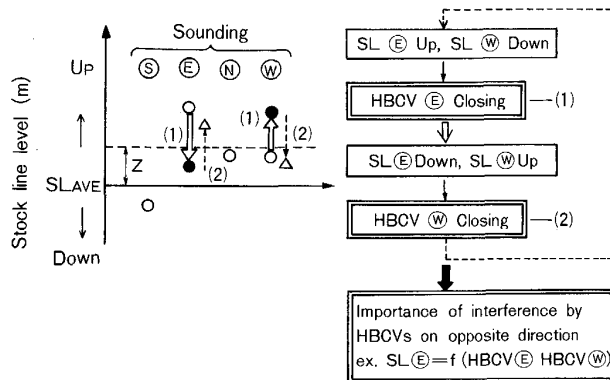


Fig. 11. Interference by valve opening of the proper direction on the stock line level of the opposite direction at circumferential balance control on simple stand-alone method.

模式的に示す。つまり、E ブロックのバルブ開度を絞ることにより、E 側のストックラインレベルが低下しすぎると同時に、反対の W 側のストックラインレベルが埋まりすぎる。その後、W ブロックのバルブ開度を絞ることにより、W 側のストックラインレベルが低下しすぎて、E 側のストックラインレベルが埋まりすぎる。これらの繰返しで、E-W 間で相互にハンチングをおこなっている。これより、E 側のストックラインレベルは、E ブロックのバルブ開度だけでなく、W ブロックのバルブ開度も影響を及ぼすことが推察された。

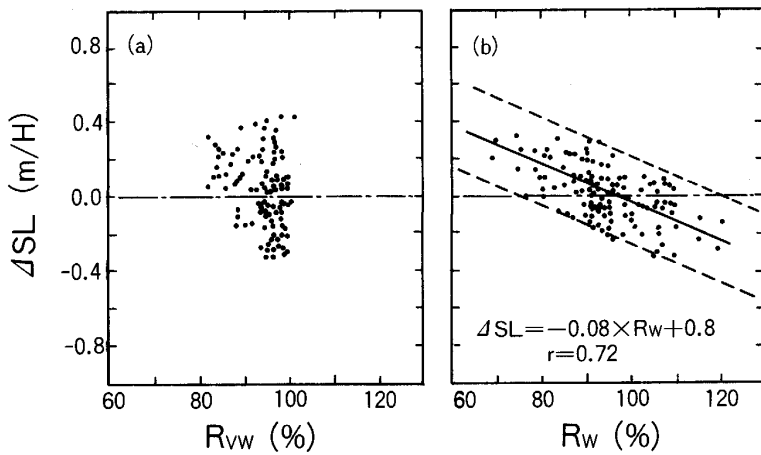
そこで、W ブロックの 1 h ごとのストックラインレベルの変化量 ( $\Delta SL$ ) について、風量比 ( $R_{VW}$ : 平均ブロック風量に対する W ブロック風量の割合) および修正風量比 ( $R_W$ : E ブロック風量に対する W ブロック風量の割合) との相関関係を Fig. 12 に示す。 $\Delta SL$  と  $R_{VW}$  の間には、あまり明瞭な相関はないが、 $\Delta SL$  と  $R_W$  の相関関係より、ストックラインレベルの変化量は、修正風量比 ( $R_W$ ) により、ほぼ説明できる。つまり、ストックラインレベルの円周バランス制御には、ブロックごとの風量 (バルブ開度) の相互干渉を考慮する必要がある。

#### 4.2 逐次緩和積分型円周バランス制御 (SAINT)

そこで、ある方向のバルブ開度が、4 方向それぞれのストックラインレベルの変化に与える影響を表現できるよう、制御ゲイン  $G$  を  $4 \times 4$  のマトリックスで記述し、Fig. 13 に示すような逐次緩和積分型 (SAINT 法) の制御フローを開発した。

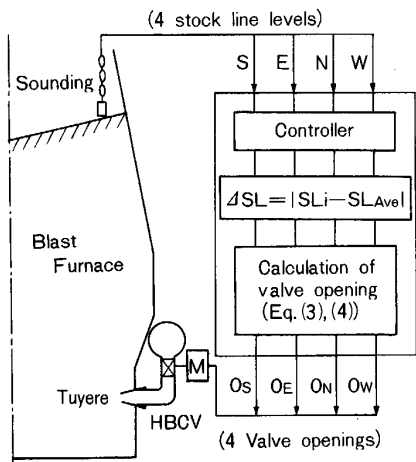
$$U(K) = U(K-1) + \Delta U(K) \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta U(K) = \sum_{i=1}^n \Delta U(K-i) a_i + \sum_{j=0}^m G \cdot \Delta L(K-j) b_j \dots \dots \dots (4)$$



$R_{vw}$ : Blast volume ratio  
 $R_{vw} = V_W / V_{ave} \times 100$   
 $R_W$ : Corrected blast volume ratio  
 $R_W = V_W / V_E \times 100$   
 $V_W$ : Blast volume of W block  
 $V_E$ : Blast volume of E block  
 $V_{ave}$ : Average blast volume of all blocks

Fig. 12. Relation between changes of stock line level and blast volume ratio (a), or corrected blast volume ratio (b) (W block).



$$U(K) = U(K-1) + \Delta U(K) \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta U(K) = \sum_{i=1}^n \Delta U(K-i) a_i + \sum_{j=0}^m G \cdot \Delta L(K-j) b_j \dots\dots\dots (4)$$

$U(K)$ : Valve openings (Operational output) (%)  
 $\Delta U(K)$ : Modification amount of valve openings (%)  
 $\Delta L(K)$ : Modification amount of stock line level (m)  
 $G$ : Control gain (-)  $a_i, b_j$ : Control parameter (-)

Fig. 13. Flow sheet of circumferential balance control of SL levels on Successive Alleviative Integration (SAINT) method by HBCVs.

$U(K)$ : 今回のバルブ開度 (%)  
 $\Delta U(K)$ : 今回のバルブ開度変化量 (%)  
 $\Delta L(K)$ : ストックライン変更必要量 (m)  
 $G$ : 制御ゲイン (-)  
 $a_i, b_j$ : 制御パラメーター (-)  
 $K$ : 制御時刻 (min)

単純追従型と逐次緩和積分型の制御機能の比較を Table 1 に示す。主な変更点は、

- 1) 各ブロックの弁開度の干渉を考慮し、制御ゲインとして、各方向からの影響を設定可能とした。(Table 1 の 3 項)
- 2) バルブ開度の変更については、一度に大幅な変更

Table 1. Comparison of control function between simple stand-alone method and SAINT method for circumferential balance control by HBCVs.

Items	Control method		Comments
	Stand-alone	SAINT	
1 Control cycle	○	○	3 h-5 min Proportional ( $G - \Delta U / \Delta L$ ) Set up gain for each direction Integral amount ( $a_i$ ) adjustable Set up by off-line calculation
2 Control gain	○	○	
3 Interference	×	○	
4 Integral action	×	○	
5 Dead time	×	○	

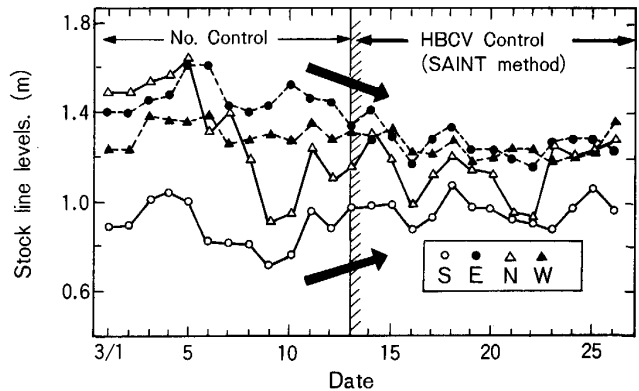


Fig. 14. Comparison of changes of stock line levels between circumferential balance control in SAINT method by HBCVs and no control.

をせずにすむように、制御周期を短くかつ積分動作で設定可能とした。(同 4 項)

3) むだ時間の対応については、オフラインでむだ時間を任意設定し、最小二乗法による制御ゲインの決定を可能とした。(同 5 項)

1989 年 3 月、京浜 2 高炉で実施した逐次緩和積分型円周バランス制御テスト時の 4 方向のストックラインレベルの変化を Fig. 14 に示す。本制御により、各ストッ

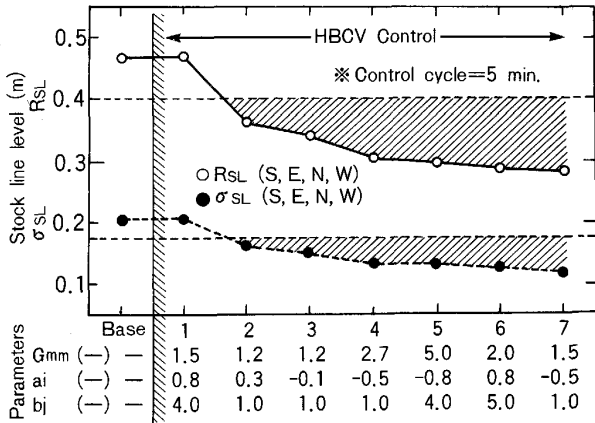


Fig. 15. Effect of control parameters (G, a, b) on deviation of stock line levels (S, E, N, W).

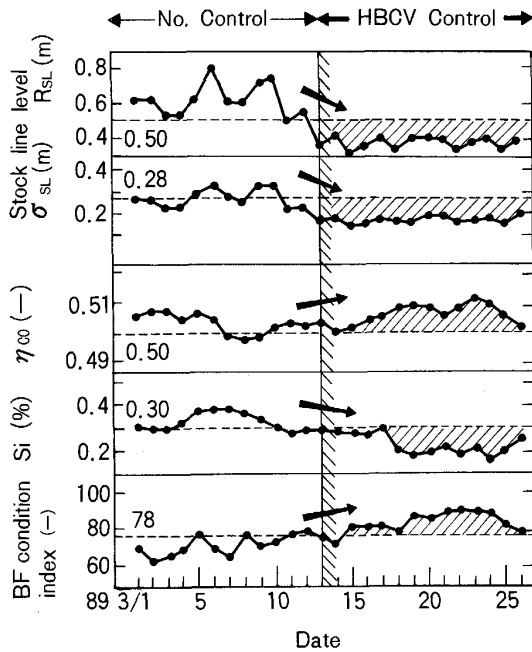


Fig. 16. Test operation results for circumferential balance control on SAINT method by HBCVs.

クライン間のばらつきが大きく低減していることは、明瞭である。ストックラインのばらつきに及ぼす各種制御ゲインやパラメーターの影響を Fig. 15 に示す。本期間中にテストした中では、Case 7 が最も良く、 $\sigma_{SL} = 0.12 \text{ m}$ 、 $R_{SL} (= SL_{max} - SL_{min} \text{ の差}) = 0.28 \text{ m}$ であった。しかし、制御ゲインには方向性があり、E-W 間と N-S 間にはオフセット (両方向間の平均ストックラインレベルの差) が残ることが多い。これは、炉内れんがの摩耗状態、送風本管や出鉄口の位置関係によるものと考えられる。

次に、SAINT 法による円周バランス制御テスト前後の高炉操業推移を Fig. 16 に示す。SAINT 法による制

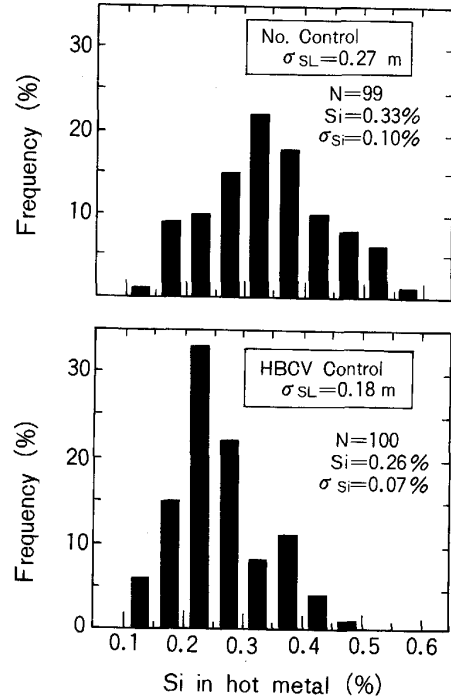


Fig. 17. Effect of circumferential balance control of SL levels by HBCVs on Si in hot metal.

Table 2. Effect of circumferential balance control (SAINT method) of SL levels by HBCVs on BF operation.

Items	Period		Difference
	No Control March 1~12	HBCV Control March 13~26	
Deviation of SL (m)	0.27	0.18	$\Delta 0.09$
Productivity (t/D/m <sup>3</sup> )	2.30	2.40	$\oplus 0.10$
Fuel rate (kg/t)	506.5	498.0	$\Delta 8.5$
CO utilization ratio (%)	49.7	50.4	$\oplus 0.7$
Shaft efficiency (%)	94.1	94.1	$\oplus 0.3$
Heat loss ( $\times 10^3$ kcal/t)	155.3	140.0	$\Delta 15.3$

御とともに、ストックラインのばらつきは減少して ( $\sigma_{SL}: 0.27 \rightarrow 0.18 \text{ m}$ ,  $R_{SL}: 0.60 \rightarrow 0.38 \text{ m}$ )、円周バランスが改善され、ガス利用率が向上している。同時に、高炉の炉況が安定し (炉況診断指数<sup>10</sup>): 70  $\rightarrow$  80 points)、鉄中 Si が大きく低減している。この間の鉄中 Si の分布を Fig. 17 に示す。これは、炉内特に融着帯の円周バランスも改善されて、鉄中 Si 値およびそのばらつきが低減したものと推察される。今回の SAINT 法によるストックラインレベルの円周バランス制御の効果を Table 2 にまとめて示す。

このように、熱風制御弁を使用した SAINT 法の円周バランス制御により、炉況安定・鉄中 Si の低下、ガス利用率やシャフト効率の改善による燃料比の低下、更には、出鉄比の向上等多くの効果が得られた。

残された課題として、制御ゲインの方向性(特に、E-W間とS-N間のオフセット)および制御ゲインの能力不足(本バルブが羽口1本ごとにしか設置されていないため)等がある。今後、京浜新1高炉(4907 m<sup>3</sup>, 1989年11月火入れ)において、全羽口に熱風制御弁が設置されているので、これらの諸問題を解決していく予定である。

## 5. 結 言

NKKでは、高炉内円周バランスの制御手段として、1983年より旭硝子(株)と共同で、羽口ごとの支管風量を制御できる熱風制御弁(Hot Blast Control Valve, HBCV)を開発した。そして、1986年6月、京浜2高炉にて、19基(全羽口38本)設置・実用化し、各種テストを精力的に繰り返した結果、以下のような知見を得た。

(1)熱風制御弁を全開から全閉にすることにより、羽口通過風量は大きく低下(約210→80 Nm<sup>3</sup>/min, 約35%)し、レースウェイ深度は、1.6→0.9 mに減少する。しかし、レースウェイ内の温度や圧力には、大きな変化はなく、レースウェイ挙動に致命的な変化は生じないので、高炉操業には支障は生じないと考えられる。

(2)熱風制御弁を閉にしたブロックの荷下りは、逆に早くなり、ストックラインレベルが下降するというテスト結果から、本バルブにより、4方向のストックラインレベルを一定に制御することが可能である。

(3)4方向の平均ストックラインレベルと当該方向のストックラインレベルの差のみから、そのブロックのバ

ルブ開度を絞る単純追従型円周バランス制御では、E-W間又はN-S間でハンチングをおこし、制御不能になるケースが生じた。

(4)そこで、相互干渉を考慮した制御ゲイン、弁開度変更を積分動作化およびむだ時間等の機能を付加した、有限整定時間応答系の制御システム(逐次緩和積分型、SAINT法)を開発した。

(5)京浜2高炉でのテストでは、SAINT法の円周バランス制御は、高炉炉況の安定、銑中Siの低減、燃料比の低下等に極めて有力であることを確認した。

今後、京浜新1高炉で、全羽口に熱風制御弁を設置し、更にきめ細かな円周バランス制御技術を構築していく予定である。

## 文 献

- 1) 佐藤武夫, 齊藤 汎, 泉 正郎, 竹部 隆, 土本義紘, 古瀬 裕, 竹佐和彦: 鉄と鋼, **70** (1984), S743
- 2) 山岡洋次郎, 竹部 隆: 日本鋼管技報, **115** (1986), p. 117
- 3) 中島龍一, 岸本純幸, 堀田裕久, 沢田輝俊, 石井邦彦, 山本修一: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 69
- 4) 加藤友則, 山岡洋次郎, 竹部 隆, 岸本純幸, 泉 正郎, 脇田 茂: 鉄と鋼, **73** (1987), S91
- 5) 加藤友則, 山口 篤, 泉 正郎, 古屋茂樹, 古川 武: 鉄と鋼, **73** (1987), S818
- 6) 中島龍一, 岸本純幸, 堀田裕久, 石井邦彦, 木村亮介, 山本修一: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1022
- 7) 中島龍一, 岸本純幸, 堀田裕久, 古屋茂樹: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1074
- 8) 下間照男: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 323
- 9) 清水正賢, 山口恭太, 稲葉晋一, 松井良行: 鉄と鋼, **71** (1985), S891
- 10) 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