

焼結層内幅方向ヒートパターン制御 システムの開発

© 1990 ISIJ
 ///////////////
技術報告
 ///////////////

中島 龍一*・黒沢 信一*・福与 寛*
 和田 隆*・木村 亮介*・山岡洋次郎*²

Development of Heat-pattern Control System along the Width Direction of Sintering Bed

Ryuichi NAKAJIMA, Shinichi KUROSAWA, Hiroshi FUKUYO,
 Takashi WADA, Ryosuke KIMURA and Yojiro YAMAOKA

Synopsis :

Sintering condition fluctuates considerably in sintering bed, particularly at large scale sintering machines. The fluctuation deteriorates the quality, yield and productivity of sinter. The fluctuation, therefore, must be controlled to improve both the quality and the sinter operation.

The heat-pattern control system along the width direction of sintering bed has been developed and applied to Ohgishima Sintering Plant at Keihin Works. This system unifies automatically the sintering speed along the width direction by measuring waste gas temperature under pallets at No. 18, 20 and 22 wind box to evaluate the fluctuation and by controlling the five charging gates devided along the width direction of sintering machine.

The coefficient of variation of the waste gas temperature at No. 20 wind box decreased to 0.06 from 0.19 by applying the control system. The sinter quality, the return fine amounts and the productivity of sinter were also improved by decreasing the fluctuation.

Key words : sinter ; sintering condition ; sintering speed ; process control system ; width direction of sintering machine ; waste gas temperature under pallets ; devided charging gates.

1. 緒 言

従来の焼結鉍製造技術は、主として焼結層内の焼成状態を空間および時間的に一定とみなし、焼結鉍の品質、歩留りあるいは生産性の向上を図ってきた。しかしながら、実際の焼結層内の焼成状態は、その位置および時系列的に一定でなく、変動している。特に大型焼結機では、その変動が著しいことが報告^{1)~4)}されている。一方、焼結層内の焼成状態は、焼結鉍の品質、歩留りに密接に関係している⁵⁾。すなわち焼結層内の焼成状態のばらつきが焼結鉍の品質、歩留りあるいは生産性の向上を阻害していることは明らかである。従って今後更なる品質、歩留りあるいは生産性の向上を図るためには、焼結層内の焼成状態を空間および時間的に均一化させることが必須の条件であり、かつ最も効果的と考えられる。

扇島焼結工場では、このような状況を考慮し焼結層内

の焼成状態の均一化を目的として焼結層内ヒートパターン制御システムを開発した。本報では、この中で最も効果のあった焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムについて、そのシステム構成および実機適用結果を報告する。

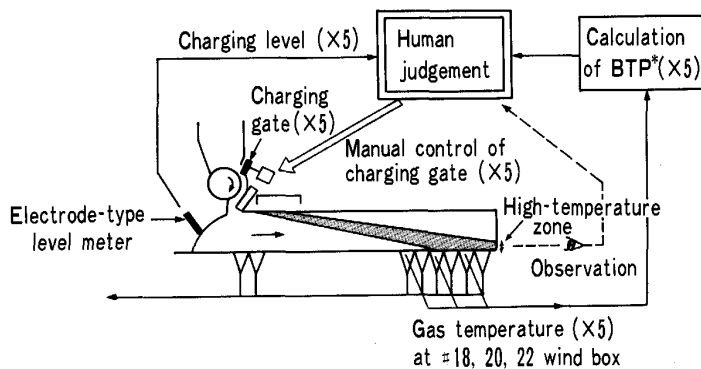
2. 従来の幅方向ヒートパターンの制御方法および問題点

従来、扇島焼結工場では焼結層内の幅方向ヒートパターンは、Fig. 1 に示すように、オペレーターが Burn Through Point⁶⁾ (以下 BTP と称す) の幅方向分布あるいは排鉍部の残火層厚分布⁷⁾を経験により判断し、幅方向に5分割された装入分割ゲートの開度を手動で調整し、BTP あるいは残火層厚分布が一定になるように制御していた。すなわち幅方向の装入密度分布により焼結層の通気性分布を変化させ、火落ち速度分布を制御する

平成元年4月本会講演大会にて発表 平成元年11月10日受付 (Received Nov. 10, 1989)

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

*² NKK 鉄鋼技術部 工博 (Iron and Steelmaking Technology Development Department, NKK Corporation)



*Burn Through Point

Fig. 1. Conventional control system along the width direction of sintering bed in Ohgishima Sintering Plant.

方法である。

しかしながら、この制御方法には幅方向ヒートパターンの検出、および装入密度を間接的に表している装入レベルの制御に関し、幾つかの問題点があった。幅方向ヒートパターンの検出に関する問題点としては、①BTPまたは排鉦部の残火層厚の幅方向分布は後述する理由で検出精度が劣ると考えられること、②オペレーターによる常時監視が不可能であるため検出に遅れがあることなどがある。①の理由に関して、Fig. 2に、幅方向に5分割されている装入分割ゲートの開度を独立して1hごとに任意に変化させた時の、装入レベル（スローピングシュートから落下した原料がつくる装入山の表面とレベル計との間の距離）と18, 20, 22番風箱位置（扇島焼結工場の風箱総数は23個）におけるパレット直下の幅方向排ガス温度分布および排鉦部の幅方向残火層厚分布の時間平均値の時間推移を示す。一般に例えば装入レベルを大きくした場合、装入密度は小さくなり焼結層の通気性が向上する。その結果、パレット直下の排ガス温度の上昇位置は給鉦部側に近づき、排鉦部の残火層厚は低下する。しかし、Fig. 2に示すように実機では、装入レベルを幅方向で任意に変化させた場合、上述した関係は、排鉦部側に近づくに従って減少しており、排鉦部にいたっては幅方向残火層厚分布と装入レベル分布との関係はほとんど認められなかった。この原因は焼結層の収縮により変化した割れに起因する漏風や排鉦部端からの漏風が排鉦部に近づくに従って増大したためと考えられる。この結果、排鉦部に近いパレット直下の排ガス温度に重きを置いて算出するBTPや排鉦部の残火層厚は、幅方向ヒートパターンを検出するための指標としては精度が劣ると考えられた。

また装入レベルの制御に関する問題点としては、①装入レベルの検出に電極棒を使用しているために装入レベルの検出精度が劣ること、②装入分割ゲート開度の調整を手動で行っているため制御に遅れがあること、などが

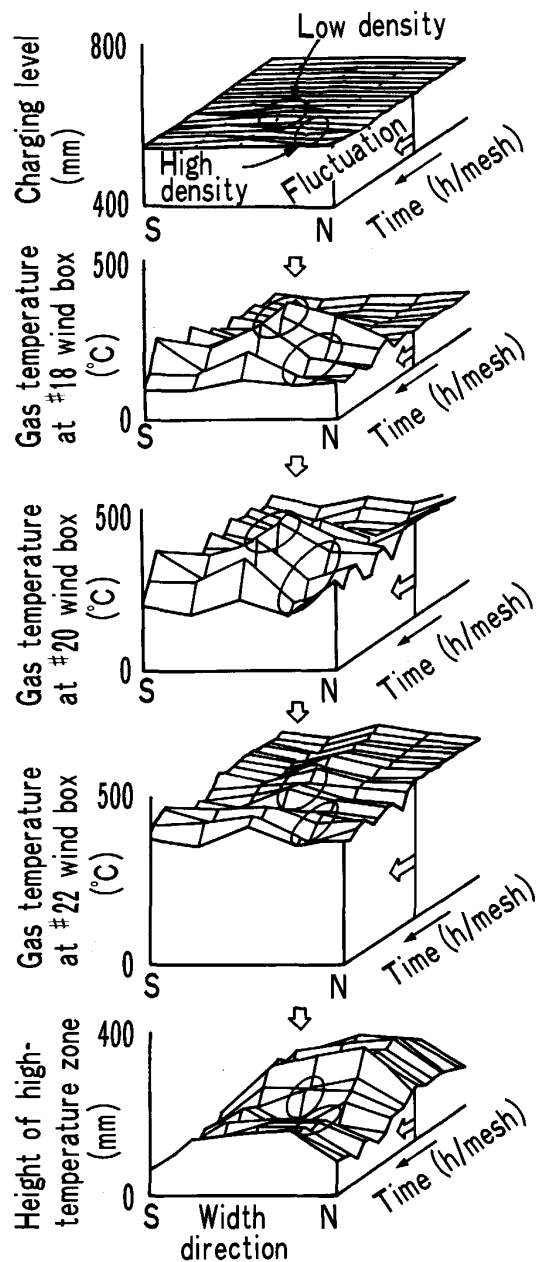


Fig. 2. Influence of charging level on the temperature distribution under pallets and the height distribution of high-temperature zone at strand end.

挙げられる。

3. 焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムの開発

3.1 焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムで新たに設置した機器および主な設備改造概要

混合原料の焼結機への切出装置付近の設備構造を、Fig. 3 に示す。主ゲートは幅方向 5 m が同一開度となるような構造になっており、油圧で開度を調整し、混合原料の平均的な切出量を制御している。装入分割ゲートは幅方向 1 m ごとに 5 分割されており、主ゲートに取り付けられている。装入分割ゲートの開度はポジション付き電動モーターで制御され、幅方向の切出量を調整している。開度の制御範囲は 0~50° で全閉から全開までの動作時間は約 100 s である。なお、パレット端部への混合原料の供給を促進するため、主ゲートの両端からおのおの 30 cm の部分を両端が多く切り出されるよう傾斜をつけて切断している。

装入レベルの検出に関しては、従来の電極棒に替えて、超音波レベル計を幅方向に 5 台新たに設置した。超音波レベル計はスローピングシュートから落下した混合原料がつくる装入山の表面との距離を、45° の角度、0.2 s ごとに発振し、測定している。超音波レベル計の精度は、±4 mm で、従来の電極棒の±10 mm に比べ大幅に向上した。なお、5 台の超音波レベル計は同時に発振しているが、その反射波のうち最短の値を採用することにより、他の超音波レベル計からの干渉を防止している。また、測定場所の雰囲気起因する測定精度の悪化が懸念されたが、蒸気やダストの影響は無視できることをあらかじめ確認して設置した。

装入レベルの制御については、従来は、ロールフィーダーの回転速度で平均的な装入レベルを自動制御し、幅

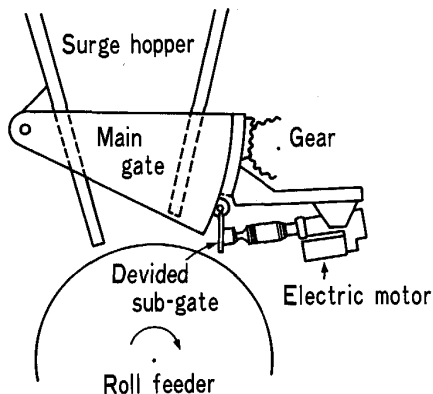


Fig. 3. Schematic illustration of equipments at the charging part of mixed raw material.

方向の装入レベルの調整は個々の装入分割ゲートの開度を手動設定することによって行っていた。しかし、本システムでは、新たに設置した DDC (Direct Digital Controller) により、装入レベルを幅方向に独立した各装入分割ゲートの開度で自動制御し、ロールフィーダーの回転速度はパレットスピードで制御している。主ゲートの開度は従来と同様に手動設定としたが、DDC でも設定できるようになっている。また、オートクリーナー作動時に装入分割ゲートの開度を自動的にロックするシーケンス、および主ゲートの開度を所定時間ごとに所定開度まで開けて主および装入分割ゲートを清掃するシーケンスを DDC に組み込んでいる。なお、幅方向の各装入レベルの目標値を求める処理については、既存のプロコン[®]で行っている。

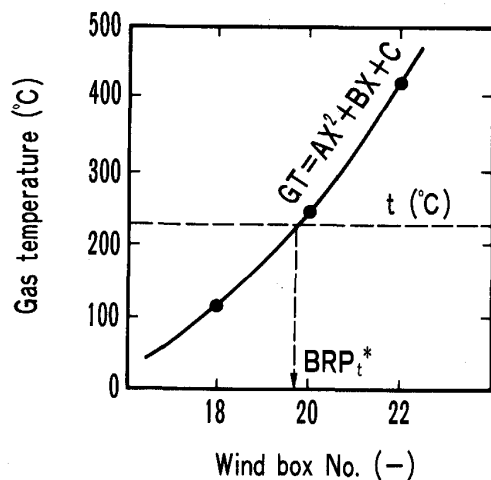
3.2 幅方向ヒートパターンを検出するための新指標の採用

本システムでは、幅方向ヒートパターンを検出するための新たな指標として、パレット直下の排ガス温度が上昇する機長方向での位置を表す BRP (Burn Rising Point)_i を採用した。BRP_i の具体的な求め方を (1)、(2) 式に、またその概念を Fig. 4 に示す。

$$GT_{i,k} = A_i \cdot X_k^2 + B_i \cdot X_k + C_i \quad (k=1 \sim 3) \dots\dots (1)$$

$$t_i = A_i \cdot BRP_i^2 + B_i \cdot BRP_i + C_i \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式は幅方向での各位置 *i* における機長方向のパレット直下の排ガス温度の上昇を 2 次曲線で表現するための式で、機長方向での各位置 *k* について 3 個の連立方程式が成り立ち、これらの式から係数 *A_i*, *B_i*, *C_i* を求める。なお風箱番号 *X* は *k*=1 で 18 番, 2 で 20 番, 3



* BRP: Burn Rising Point
t: Evaluating temperature for determining BRP

Fig. 4. Calculation method of Burn Rising Point (BRP) at *t*°C by using waste gas temperature under pallets.

で 22 番を表す。(2)式は(1)式で求めた係数 A_i , B_i , C_i および BRP を決定するための設定温度 t を用いて、幅方向での各位置 i における BRP_i を求める式である。

3.3 焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムでの制御方法

本システムの制御演算フローを Fig. 5 に、制御演算式を(3)~(6)式に示す。本システムの主な制御演算の特徴は、幅方向の平均値からの偏差を用いて処理していることである。これは BRP_i の機長方向での変化が、幅方向での BRP_i の変動に影響を与えないようにするためである。またこの処理方法を採用したことにより、 BRP_i の幅方向均一制御だけでなく、 BRP_i の平均値からの偏差を幅方向で任意に制御することもできる。

$$\Delta BRP_i = BRP_i - \sum_{i=1}^5 BRP_i / 5 \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^5 G_{ij} \cdot (\Delta BRP_i - \Delta BRP'_i) \dots\dots\dots (4)$$

$$U_{i,t} = U_{i,t-1} + \Delta U_i \dots\dots\dots (5)$$

(3)式は幅方向での各位置 i において BRP_i の平均値からの偏差を求める式で、また(4)式は幅方向での各位置 i における BRP_i の平均値からの偏差を、制御ゲイン G_{ij} を用いて、幅方向での各位置 i における装入レベルの平均値からの偏差の目標値に変換する式である。なお

制御ゲイン G_{ij} は、幅方向での各位置における装入レベルの平均値からの偏差と BRP_i の平均値からの偏差との関係を表すゲインで、幅方向での装入レベルの交互作用も考慮している。また本制御は系の無駄時間が 20~30 min と長いため、(3), (4), (5)式の制御ではサンプリング周期を無駄時間より同等以上に長くしなければならず、外乱による影響を受けやすい。このため本制御ではサンプリング周期を短くするために有限整定系⁹⁾として制御演算を行うこととした。すなわち(4)式は、実際には制御パラメーター D , E を用い(6)式の形で演算を行っている。

$$\Delta U_{i,t} = \sum_{m=0}^n \{ D_{(t-m)} \cdot \sum_{j=1}^5 G_{ij} \cdot (\Delta BRP_{i,(t-m)} - \Delta BRP'_{i,(t-m)}) - E_{(t-m-1)} \cdot \Delta U_{i,(t-m-1)} \} \dots\dots\dots (6)$$

(5)式は幅方向での各位置 i における装入レベルの目標値 $U_{i,t}$ を算出する式で、この計算結果をプロコンは DDC に出力する。なお BRP_i の平均値からの偏差を幅方向で任意に制御するための目標値 $\Delta BRP'_i$ は、 BRP_i の幅方向均一制御の時にはすべて 0 となる。

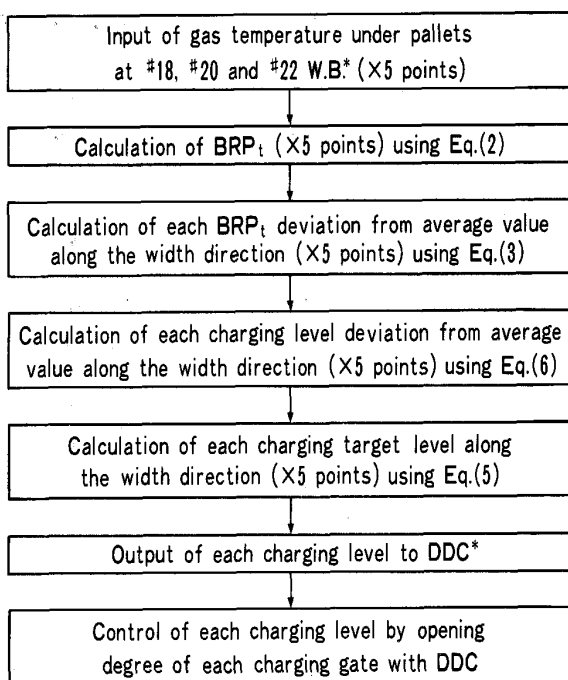
4. 焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムの実機適用結果

4.1 超音波レベル計による装入レベルの制御性

Fig. 6 に装入レベルを手動で制御した場合と超音波レベル計を用い自動で制御した場合の装入レベルの時系列での相対変動を比較して示す。超音波レベル計による装入レベルの自動制御により、各装入レベルの時間平均に対する相対平均偏差は、幅方向平均で 0.0064 から 0.0045 へ約 2/3 に低下している。

4.2 各種制御係数の決定

制御ゲイン G_{ij} を求めるために、1 h ごとに幅方向での各位置における装入レベルの設定値に M 系列¹⁰⁾ 信号を重畳し、実機で装入レベルを変化させ、幅方向での各位置における装入レベルの平均値からの偏差と BRP_i の平均値からの偏差の関係を求めた。測定結果を幅方向の対応する位置のみの関係として Fig. 7 に示す。なお BRP_i の設定温度 t は検出精度を考慮して、機長方向の温度測定位置の中間点である 20 番風箱位置でのパレット直下の排ガス温度とほぼ等しい 250°C とした。Fig. 7 より装入レベルの平均値からの偏差と BRP_{250} の平均値からの偏差は、高い負の相関をもっており、2 章で述べた装入レベルとパレット直下の排ガス温度の上昇位置との関係に良く合っている。すなわち BRP_{250} は装入レベルの変化に対し十分な検出精度をもっていると考えられる。以上の結果より、制御ゲイン G_{ij} は Fig. 7



* W. B. : Wind Box DDC : Direct Digital Controller

Fig. 5. Calculation flow of the heat-pattern control system along the width direction of sintering bed.

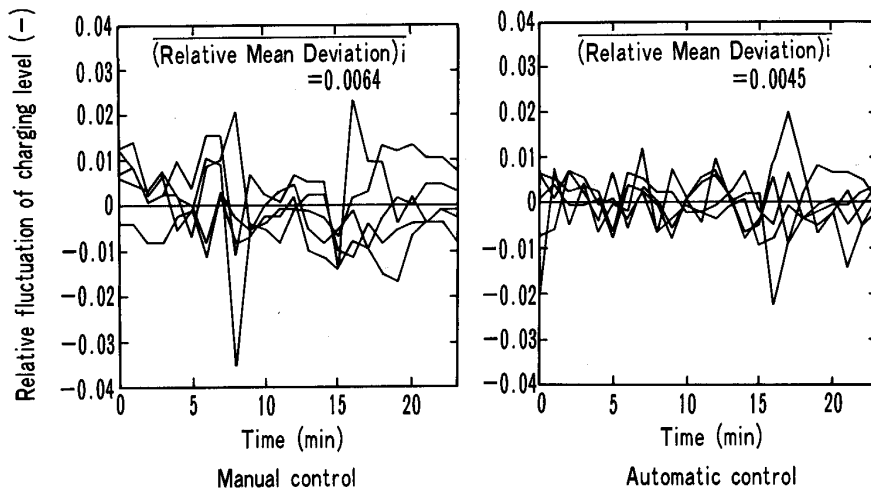


Fig. 6. Comparison of relative fluctuation of charging level at each position along the width direction between manual control and automatic control with ultrasonic level meters.

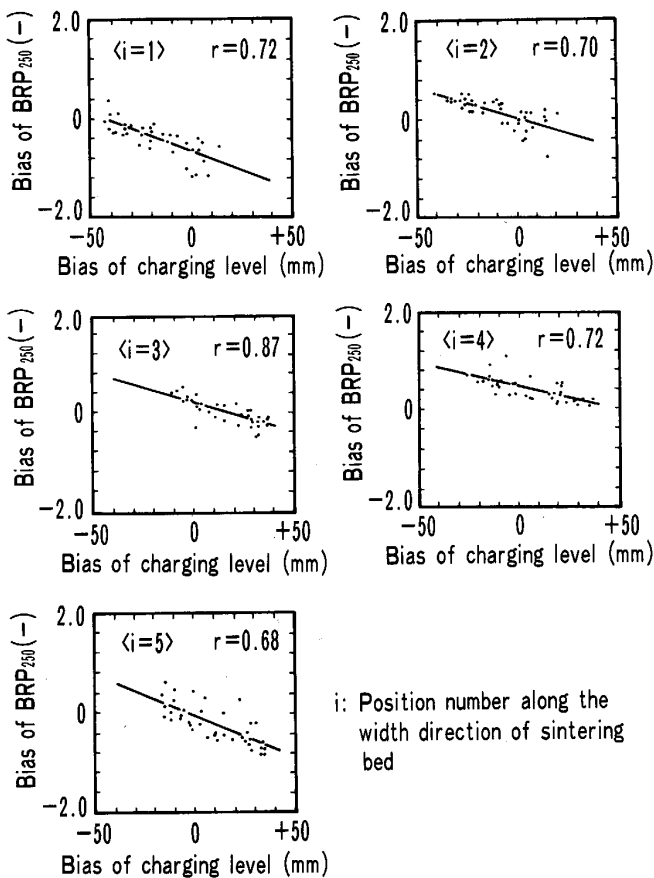


Fig. 7. Relation between bias of charging level and BRP_{250} from the average value.

Table 1. Transformation constants (G_{ij}) obtained from Fig. 7 for the heat-pattern control system along the width direction.

Item	G_{11}	G_{22}	G_{33}	G_{44}	G_{55}
G_{ij} (mm/°C)	-0.07	-0.08	-0.08	-0.10	-0.06

Table 2. Control parameters used in the heat-pattern control system along the width direction.

Items		Value
Delay time	(min)	20~23
Sampling period	(min)	8
System order	(-)	3

から得られた Table 1 に示す値を採用した。

その他本システムで採用した各種制御パラメーターのうち、遅れ時間、演算制御出力周期および整定回数を Table 2 に示す。遅れ時間は、装入レベル検出位置からヒートパターン検出位置までの距離 (90 m) と扇島焼結工場の通常操業におけるパレットスピード (3.9~4.5 m/min) の関係から算出した。演算制御出力周期は、①同一条件下での BRP_{250} を算出するのに必要なプロセス時間、すなわち、パレットが 18 番から 22 番の風箱位置まで移動する時間以上であること、②制御出力周期の整数倍の値が遅れ時間の変動範囲と重ならないこと、などの条件を考慮し、かつ実機においてシステムのチューニングを行い設定した。整定回数については、遅れ時間と制御出力の関係から 3 回の出力で整定させるようにした。

4.3 実機での制御結果

本システムを実機に適用した時の幅方向の BRP_{250} の変動の時間推移を Fig. 8 に従来の制御と比較し示す。本システムを適用することにより幅方向の BRP_{250} の変動係数 σ_i/\bar{x}_i の時間平均値 $\overline{\sigma_i/\bar{x}_i}$ は 0.041 から 0.010 に減少した。この結果幅方向の各位置における BRP_{250} の時系列での変動係数の幅方向平均値 $\overline{(\sigma/\bar{x})_i}$ も Table 3 に示すように従来の制御と比べ約 2/3 に減少した。以

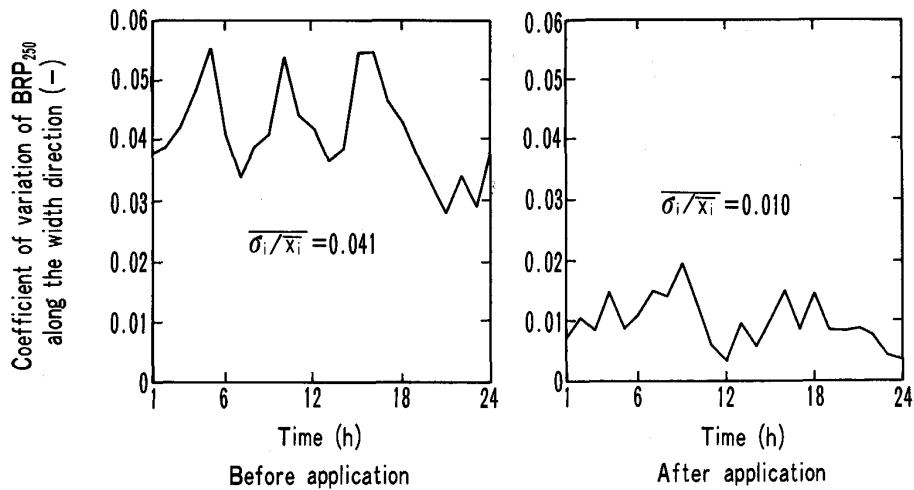


Fig. 8. Comparison of coefficient of variation of BRP_{250} at each time between before and after applying the heat-pattern control system along the width direction of sintering bed.

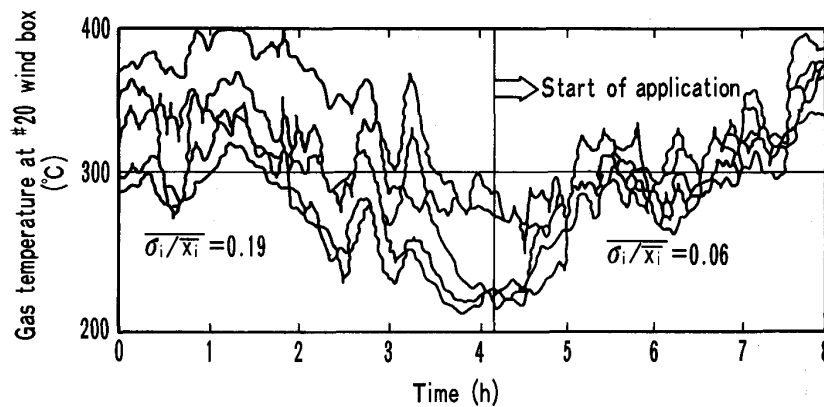


Fig. 9. Trends of waste gas temperature under pallets at #20 wind box between before and after applying the heat-pattern control system along the width direction of sintering bed.

Table 3. Effect of the heat-pattern control system along the width direction on the coefficients of variation of BRP_{250} on time.

	$(\sigma/\bar{x})_i$ (Coefficient of variation BRP_{250})					Average
	Position along the width direction of sintering bed (i)					
	1	2	3	4	5	
Before application	0.038	0.025	0.027	0.025	0.019	0.027
After application	0.018	0.022	0.019	0.020	0.012	0.018

Table 4. Effect of the heat-pattern control system along the width direction on operational results in Ohgishima Sintering Plant.

	Corrected* productivity (t/h/m ²)	Return fine amounts (kg/t)	Coke breeze amounts (kg/t)	Steam recovery (kg/t)	TI (+10 mm) (%)	RDI (-3 mm) (%)	RI (%)
Before application	1.75	188	48.2	86.2	64.4	37.9	63.7
After application	1.83	177	45.4	73.5	64.2	39.1	68.0

* Corrected by the amounts of iron sand in blending ore, the chemical composition of sinter and TI(+10 mm %)

上の効果を 20 番風箱におけるパレット直下の排ガス温度で比較すると、Fig. 9 に示すように幅方向の排ガス温度の変動係数の時間平均値は 0.19 から 0.06 に減少させることができた。

また本システムを実機に適用したときの生産諸元、焼結鉱品質に与えた影響を Table 4 にまとめて示す。なお比較対象期間は停止日前後を除くおのおの 1 週間とした。補正生産率が $0.07 \text{ t/h}\cdot\text{m}^2$ 増加しているが、これは BRP_{250} の幅方向での変動が減少したために、機長方向に BRP_{250} を増加させることができたことと返鉱原単位が低減したことによるものと考えている。また歩留りの向上により粉コークス量の低減が図れ、回転強度を維持しつつ被還元性の向上が可能となった。

5. 結 言

焼結層内の焼成状態の均一化を目的として焼結層内ヒートパターン制御システムを開発し、扇島焼結工場に適用した。この中で最も効果のあった焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムにより、幅方向の焼成状態は均一化され、その結果歩留り、生産性および品質の向上を図ることができた。

しかしながら、現状の焼結層内幅方向ヒートパターン制御システムは、各種制御係数として固定値を使用しているため、原料条件や生産条件が大きく変動した場合には各種制御係数をその都度見直さなければならず、各種制御係数の自動更新が当面の課題と考えている。また、焼結層内の機長方向すなわち高さ方向の焼成状態の均一化を目的としたシステムについても、効果を挙げるべく精度向上を図る必要があると考えている。

記 号

A, B, C : 機長方向のパレット直下の排ガス温度を 2 次曲線で表現するための係数 ($^{\circ}\text{C}$)

BRP : パレット直下の排ガス温度が上昇する風箱番号 (—)

BRP' : BRP の平均値からの偏差を幅方向で任意に制御するための目標値 (—)

D, E : 有限整定系における制御パラメーター (—)

G : 幅方向での各位置における ΔBRP を ΔU に変換するための制御ゲイン ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)

GT : パレット直下の排ガス温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t : BRP を決定するための設定温度 ($^{\circ}\text{C}$)

U : 装入レベルの制御目標値 (mm)

X : 風箱番号 (—)

Δ : 幅方向の平均値からの偏差

$\overline{(\sigma/\bar{x})}_i$: 時系列での変動係数の幅方向平均値

$\overline{\delta_i/\bar{x}_i}$: 幅方向での変動係数の時間平均値

添え字

i, j : 焼結機の幅方向の位置 ($i, j=1\sim 5$)

k : 機長方向の風箱番号 (1: 18 番, 2: 20 番, 3: 22 番)

l : 時刻 (—)

m : 過去への時間シフト (—)

文 献

- 1) 奥田康介, 今田邦弘, 斎藤元治, 神子芳夫, 檜崎誠治, 川口勝徳, 寺田高志: 鉄と鋼, **71** (1985), S29
- 2) 稲角忠弘, 富井良和, 北山 順, 斉藤武雄, 古宅英雄, 高松信彦, 中川浩一郎, 松村勤二: 製鉄研究 (1985) 317, p. 59
- 3) 佐藤武夫, 山岡洋次郎, 沢田輝俊, 松永吉史, 竹元克寛, 斉藤森生, 木村亮介: 学振 54 委-No. 1688 (昭和 59 年 7 月)
- 4) 和島正巳, 相馬英明: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1948
- 5) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永真弓: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 657
- 6) 篠崎義信: 第 3 版鉄鋼便覧 II 製鉄・製鋼 (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 116 [丸善]
- 7) 佐々木豊, 渡辺 実, 高橋博保, 加藤 明, 安田素郎, 三木克之: 川崎製鉄技報, **19** (1987), p. 93
- 8) 日本鋼管(株) (私信) 1985 年 10 月
- 9) 上滝致孝: 電気学会大学講座 自動制御理論 (1975), p. 199 [電気学会]
- 10) 森下 巖, 小畑秀文: 信号処理 (1982), p. 208 [計測自動制御学会]