

論 文

UDC 622.341.1-188:669.162.263.43

高炉の通風時における装入物堆積挙動とガス流分布*

成田 貴一**・稲葉 晋一**・清水 正賢***

小林 勲***・沖本 憲市***・山口 荒太***

Charging Behavior and Gas Distribution Considering Blast Furnace Aerodynamics

Kiichi NARITA, Shin-ichi INABA, Masakata SHIMIZU

Isao KOBAYASHI, Ken-ichi OKIMOTO, and Arata YAMAGUCHI

Synopsis:

The transitional behavior of the burden and gas distribution in the blast furnace has been studied aerodynamically by a blast furnace model.

When ore is charged, the coke column is formed in the central region, named the central coke column. The formation process of its column is modeled as the following three steps from the experimental observation.

1) With the progressive covering of the stack surface from the periphery to the center by ore, the furnace gas is concentrated in the central region.

2) The coke layer is expanded in the area where the gas velocity exceeds the minimum fluidization velocity of coke layer.

3) Some of the expanded coke is pushed into the central part by the charged ore.

The central coke column is easily formed at pellets charging rather than at sinter charging. The concentrated gas velocity in the central part is related to the ore thickness and the area of ore layer and the permeability ratio of ore to coke, and is expressed by the following equations

$$\frac{U_C}{U_{av}} = 1 \left\{ \frac{A_C}{A_T} + \left(\frac{A_W}{A_T} \right) \left(\frac{U_C}{U_W} \right) \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{U_C}{U_W} = C_0 \left\{ \left(\frac{H}{R} \right) \cdot \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{0.778} \cdot \left(\frac{A_C}{A_T} \right)^{-0.483} \right\}^n \dots \dots \dots (2)$$

where, A is the sectional area and U is the gas velocity, and suffix c and w express the central part without ore and the peripheral part with ore covered, respectively, and suffix T is the throat and av is the average. H is the ore thickness, R is the throat radius, K_1 and K_2 are the permeability indices of coke and ore, respectively, and C_0 and n are constants.

The area of central coke column is estimated to be about 0.114 dimensionless radius from Eqs. (1) and (2).

The pressure drop in the stack of blast furnace is decreased by formation of central coke column, while the distribution of gas through the coke layers in the softening-melting zone hardly changes.

1. 緒 言

従来、高炉炉口部における装入物分布の調査研究の多くは静的条件下において行われ、ペレット多量使用時には中心部の ore/coke が増大して中心ガス流を抑制すると考えられてきた。しかし、最近の高炉解体調査¹⁾²⁾ではペレットを多量使用した高炉においても中心部のガス

流速が大きく維持され、中心部にペレットが認められなかった。また、尼崎 No.1 高炉の調査結果²⁾では中心部の中塊コークスが 2 チャージにわたって上方に盛り上がり、明らかに中心部で流動化したことを示唆していた。このような中心部コークスの流動化現象は西尾ら³⁾によつてそのメカニズムが現象論的に説明されてはいるが、その基本的要因に対する定量的解析は十分行われていな

* 昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 6 月 15 日受付 (Received June 15, 1979)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinocho Fukiai-ku Kobe 651)

い。

ここでは、モデル実験により中心部コークス層の形成を実操業に即した装入条件のもとで調査するとともに、鉱石装入時に引き起こされる炉口部のガス偏流量を定量化することを試みた。また、中心部コークス層の形成が炉内のガス流分布に及ぼす影響についても検討した。

2. 装入物分布とガス流速分布

2.1 実験方法

装入物分布実験装置の概略を Fig. 1 に示す。本装置は加古川 No.1 高炉の 1/20 半裁模型 (炉口径 430 mm) である。堆積層は炉底部のテーブルフィーダーで自動降下させ、装入線を一定に保つことができる。炉体前面壁には炉内圧力分布測定用の圧力タップ孔と炉口部のガス流速分布測定孔 (指定装入線まで降下した堆積層の表面上約 80 mm の位置に 4ヶ所) が設けられている。

装入は床敷コークス上に所定の装入方法で 3~4 チャージを装入し、装入ごとに堆積層の表面形状と層厚を測定した。送風は下部羽口より行い、堆積層上面の風速は傾斜面の影響を避けるために炉頂部を同心円状の仕切板で 4 分割して熱線風速計で測定した。実験条件を以下に示す。

- 1) 装入物：2~4 mm ペレット，3~5 mm 焼結鉱，5~10 mm コークス
- 2) コークスペース：1.52 kg (平均堆積層厚約 40 mm)
- 3) ore/coke：4.0 4) 装入方法：ベル装入
- 5) 平均炉口ガス流速：0~1.2 m/s の範囲で 5 段階
- 6) 装入時の堆積層深さ：ore/coke 分布が実物大模型実験結果⁴⁾と近似する位置で SL：130 mm

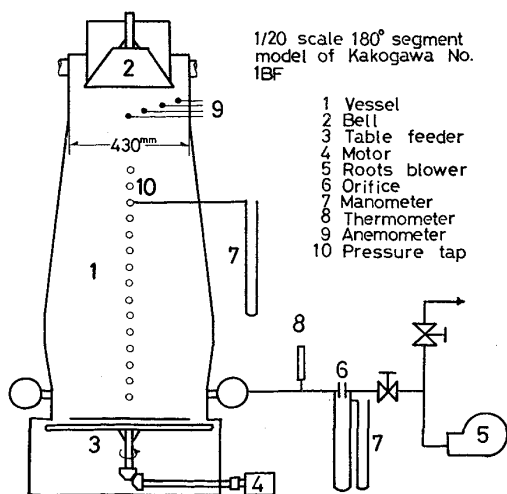


Fig. 1. Experimental apparatus.

2.2 装入挙動の観察結果

Photo. 1, a) にペレットと焼結鉱の堆積状況に及ぼす炉口ガス流速の影響を示す。写真から明らかなように、無風時の堆積状況は従来から知られているように、C↓S↓ではコークスと焼結鉱の傾斜角がほぼ等しく、各層の厚さは半径方向でほとんど変化しない。C↓P↓では傾斜角の低いペレットの影響が強く現れ、中心部の鉱石層厚が著しく大きくなっている。炉口ガス流速の増加につれて各装入物の堆積傾斜角がしだいに減少する。

炉口ガス流速が 0.8 m/s 以下では、堆積状況は傾斜角の変化のみであるが、これ以上の炉口ガス流速では中心部にコークスと鉱石の混合層が形成されはじめる。さらにガス流速が増加すると、C↓S↓及びC↓P↓のいずれにおいても鉱石装入時に中心部のコークスが流動化して盛り上がり、さらに鉱石によつて押し流されて中心部にコークス単味層が形成される。この中心部コークス層の形成により、鉱石は中心部に到達できず、中間部から周辺部の鉱石層厚が急激に増大する。

炉口ガス流速が 1.2 m/s になると、中心部コークス層はさらに拡大し、その一部は流動化して装入された鉱石層の上部にまで吹き上げられ、その表面形状は平坦になる。

炉口ガス流速にともなう半径方向の ore/coke 変化を

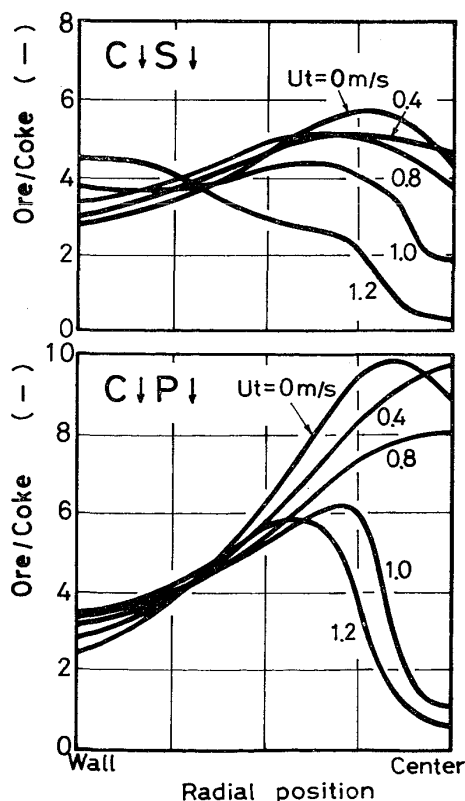


Fig. 2. Effect of top gas velocity on ore/coke distribution.

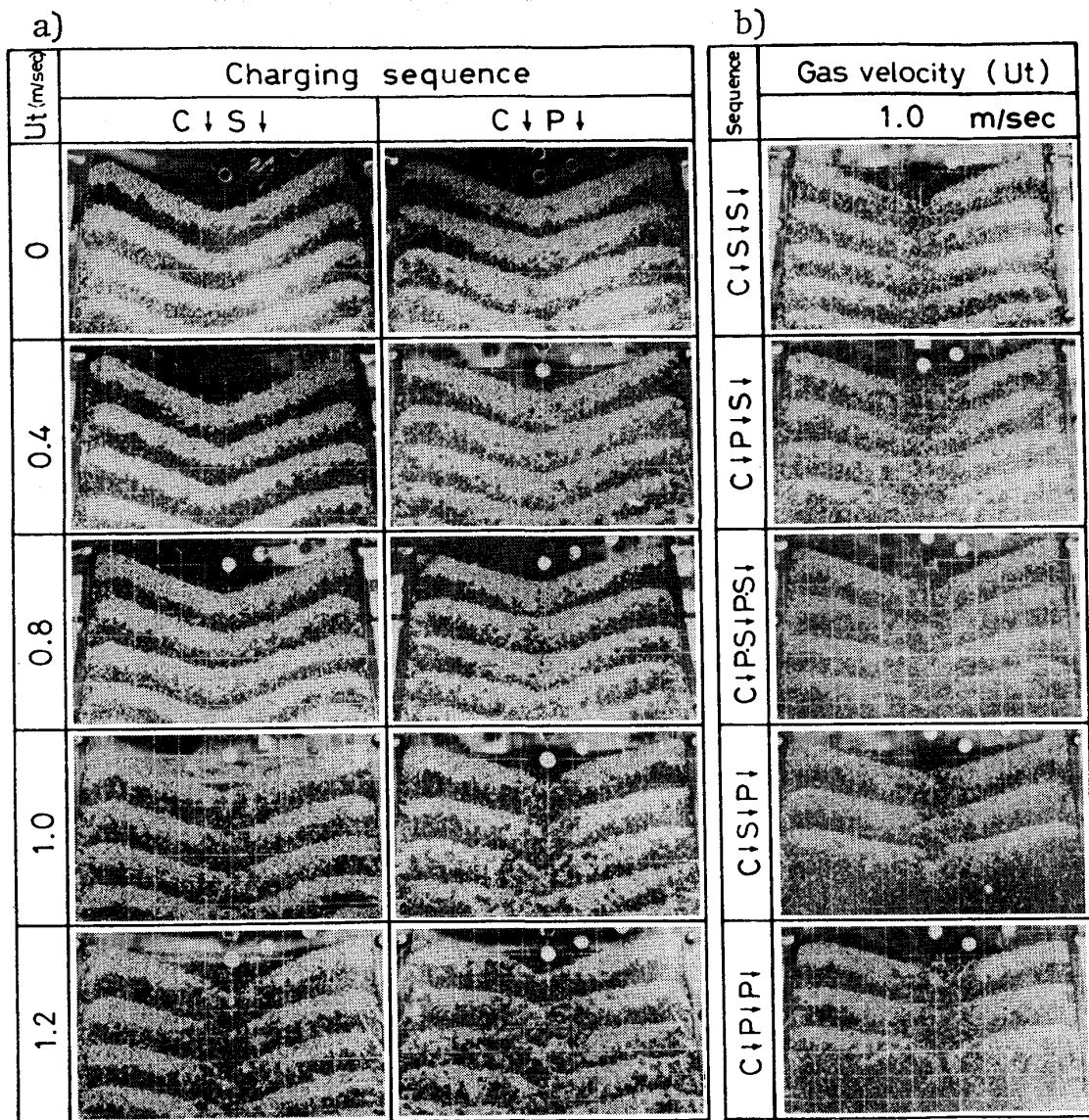


Photo. 1. Appearance of burden distribution.

(white : ore, black : coke, P : pellet, S : sinter, C : coke)

a) Effect of top gas velocity

b) Effect of charging sequence

Fig. 2 に示す。図から明らかなように、 $C \downarrow P \downarrow$ と $C \downarrow S \downarrow$ とともにガス流速が増大するにつれて中心部の ore/coke が低下し、周辺部で増大している。この ore/coke の低下は $C \downarrow P \downarrow$ の方が低送風量で起こりはじめている。

Photo. 1, b) に炉口ガス流速を 1.0 m/s とし、鉄石を 2 分割装入 ($C \downarrow O_1 \downarrow O_2 \downarrow$) した場合の中心部コークス層の形成状況を示す。Photo. 1, a) との比較から、鉄石を 2 分割装入した場合には中心部コークス層はより形成しやすくなることがわかる。この中心部のコークス層領域の大きさを比較すると $C \downarrow P \downarrow S \downarrow$ の場合が最も大きく、以下 $C \downarrow S \downarrow S \downarrow$, $C \downarrow P \downarrow P \downarrow$, $C \downarrow (P \cdot S) \downarrow (P \cdot S) \downarrow$, $C \downarrow S \downarrow P \downarrow$ の順

となっている。

Fig. 3 に Photo. 1 から求めた ore/coke 分布と炉頂ガス流速分布を示す。まず、焼結鉄を一括装入から 2 分割装入に変更した場合には周辺部の ore/coke が著しく上昇する。これは 2 分割装入によつて中心部の流動化コークス領域が拡大したことも一因であるが、基本的には鉄石の傾斜角が装入量によつて変化する⁴⁾ ことに起因している。すなわち、2 分割装入によつて鉄石の傾斜角が増大し、周辺部の鉄石層厚の増大によつて周辺部のガス通気性が抑制される結果、中心ガス流速が増大して鉄石によるコークスの押し込みとコークス層の流動化が広範囲にわたつて生じたことによるものと考えられる。

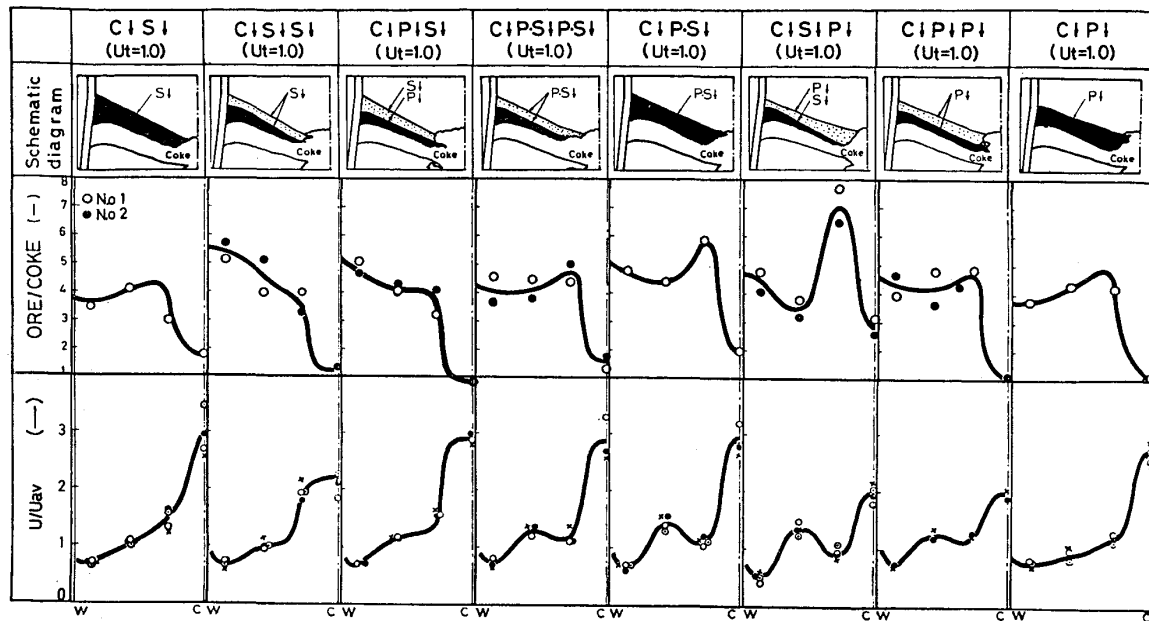


Fig. 3. Radial distribution of ore/coke and gas in various charging sequences.

鉱石の2分割装入において、写真ではペレットと焼結鉱を区別できないが、ペレットを $O_1\downarrow$ で使用した場合 ($C\downarrow P\downarrow S\downarrow$) には $C\downarrow S\downarrow S\downarrow$ に比して中心部コークス層は拡大するが周辺部の ore/coke はやや低下する。さらにペレットを $O_2\downarrow$ で使用した場合 ($C\downarrow S\downarrow P\downarrow$) には Fig. 3 でも明らかなように、ペレットの堆積傾斜角が小さいために中間部中心寄りの ore/coke が著しく増大している。

炉頂部のガス流速分布は ore/coke 分布とよく対応した分布形状を示している。ガス流速分布における $C\downarrow S\downarrow$ と $C\downarrow P\downarrow$ の差は周辺部と中間部中心部に認められる。特にペレット装入では中間部中心寄りのガス流速が小さい。 $C\downarrow P\downarrow S\downarrow$ と $C\downarrow S\downarrow S\downarrow$ では中心部の広い領域でガス流速が上昇して中心部に最も大きなコークス層を形成する。一方、 $C\downarrow P\downarrow P\downarrow$ では、中心部コークス層の形成が大きいにもかかわらず中心ガス流速が小さい。これは Photo. 1, b) にみられるように空隙が極めて高い中心部コークス層へ降下の過程でペレットが入りこみ、中心ガス流が抑制されるものと推測される。

3. 鉱石装入時における中心部ガス流速の変化

3.1 実験方法

鉱石の堆積過程を Fig. 4 のように経時的に固定したモデルで考え、ガスの流れを定常化して実験する。(1)式⁵⁾で表される通気抵抗指数 K_2 の粒子を所定の傾斜角 θ で充填して、その上に通気抵抗指数 K_1 ($K_1 \geq K_2$) の粒

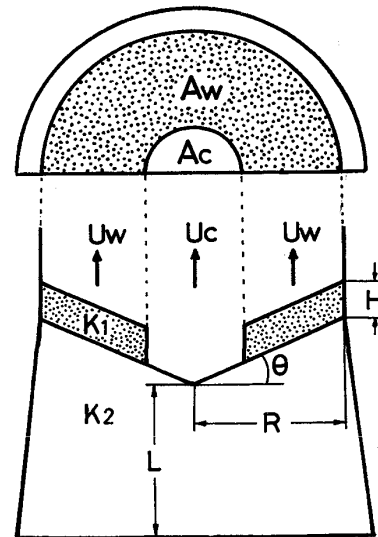


Fig. 4. Schematic model for estimation of gas velocity in central part U_c .

子を面積 A_w に層厚 H で堆積させる。

$$\Delta P/L = K \cdot \mu^\beta \cdot \rho^{1-\beta} \cdot U^{2-\beta} \quad (1)$$

ここで

$$K = \frac{c_1}{g_c} \left(\frac{1}{\phi_s \cdot D_p} \right)^{1+\beta} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^{1+\beta}}{\varepsilon^3} \quad (1)'$$

通風時に層が崩れないように上側堆積層先端を仕切板で固定し、下部より空気を送りながら Fig. 1 に示した堆積層表面上4ヶ所でガス流速分布を熱線風速計で測定する。各堆積層の K_1 , K_2 は層固有の特性値として (1)'式から推算すべきであるが各因子の定量が困難なため、充填層で測定した圧力損失値を(1)式に代入して求めた。なお、 β は充填層実験から 0.23 とし、 K_1 と K_2

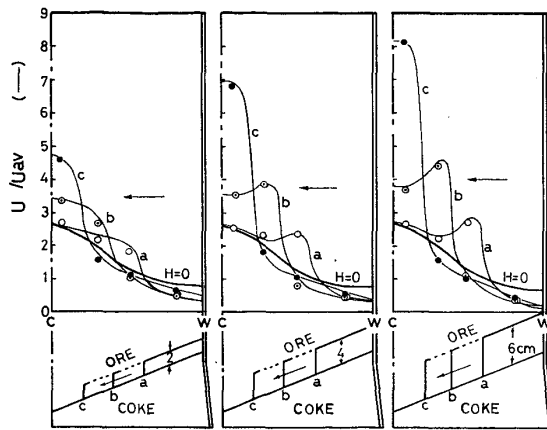


Fig. 5. Changes of gas velocity distribution at ore charging.

は粒子径によつて変化させた。また、 U_c と U_w はそれぞれ A_c と A_w 領域にある風速計の測定値を面積平均して求めた。

3.2 実験結果

Fig.5 は装入された鉱石が一定の層厚を保つて中心方向へ流れ込む時のガス流速分布の過渡的变化を、実測値をもとに模式的に示したものである。装入開始直後の炉頂ガス流速分布は周辺部に堆積した鉱石の通気抑制効果によつて炉内ガスが鉱石層の中心側先端部に集中するため、中間部にピークを持つ分布形状を示すが、中心部での変化は比較的小さい。堆積領域が中心部へ拡大するにともなつて、このピーク位置は中心側へ移行し、ピークが中心に達した時点で中心ガス流速が最大となり、炉口ガス流速が 0.8m/s 以上の場合にはコークス層を流動化させる。

このような過程で生じた中心部のガス流速を次のように考えて定量化した。層内の径方向各位置のガス流は軸方向の平均通気抵抗に対応して分配され、堆積層表面より L だけ下方に等圧面が存在すると仮定する。Fig.4 で $\theta = 0^\circ$ とした場合の U_c , U_w は(2), (3)式⁵⁾で表される。

$$U_c^{2-\beta} = \Delta P / (K_2 \cdot L \cdot \mu^\beta \cdot \rho^{1-\beta}) \dots\dots\dots (2)$$

$$U_w^{2-\beta} = \Delta P / \{ (K_1 \cdot H + K_2 \cdot L) \cdot \mu^\beta \cdot \rho^{1-\beta} \} \dots\dots\dots (3)$$

また、物質収支より(4)式が成り立つ。

$$\frac{U_c}{U_{av}} = 1 / \left\{ \frac{A_c}{A_T} + \left(\frac{A_w}{A_T} \right) \left(\frac{U_c}{U_w} \right) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

(4)式中の U_c/U_w は(2), (3)式で $L=R^0$ とおけば K_1/K_2 と H/R の関数として(5)式のように表される。

$$U_c/U_w = f(K_1/K_2, H/R) \dots\dots\dots (5)$$

この関係を実験によつて検討した。 $\theta = 0^\circ$ の場合の実験結果を Fig. 6 に示す。 U_c/U_w はこれら2つの因子に対してほぼ直線で表示されるが、鉱石の堆積領域 A_w

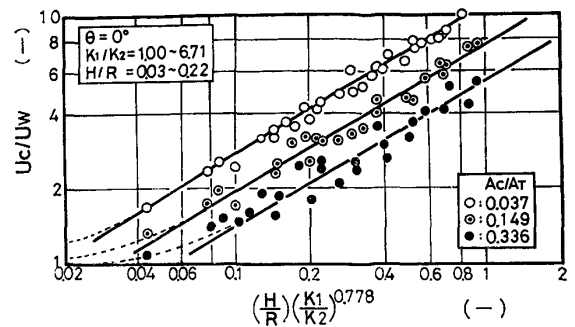


Fig. 6. Effect of permeability ratio $(H/R) \cdot (K_1/K_2)^{0.778}$ on gas velocity ratio of central and peripheral part U_c/U_w .

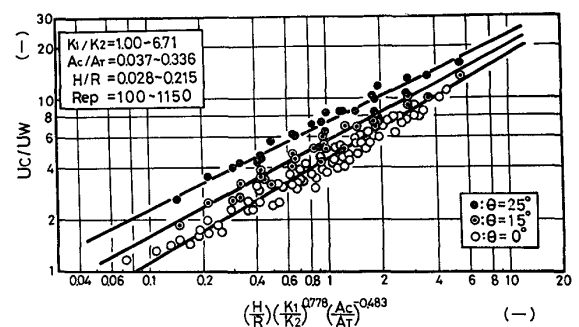


Fig. 7. Effect of biased gas coefficient $(H/R) (K_1/K_2)^{0.778} (A_c/A_T)^{-0.483}$ on gas velocity ratio of central and peripheral part U_c/U_w .

($=A_T - A_c$) の変化に対応して直線は上下に平行移動している。そこで、 A_c/A_T を考慮してデータ解析を行うと Fig. 7 (○印プロット) が得られ、 U_c/U_w は(6)式で表すことができる。この右辺をガス偏流係数と呼ぶ。また、

$$\frac{U_c}{U_w} \propto \left(\frac{H}{R} \right) \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{0.778} \left(\frac{A_c}{A_T} \right)^{-0.483} \dots\dots\dots (6)$$

Fig.7 より(6)式の関係は $\theta = 15^\circ$, 25° の場合の結果をも比較的精度よく表すことができ、 U_c/U_w は(7)式のように解析される。

$$\frac{U_c}{U_w} = C_0 \cdot \left\{ \left(\frac{H}{R} \right) \cdot \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{0.778} \cdot \left(\frac{A_c}{A_T} \right)^{-0.483} \right\}^n \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 C_0 と n は傾斜角に依存した定数で Fig. 8 のように与えられる。

(7)式は Fig. 4 に示した鉱石堆積時の中心部平均ガス流速 U_c と周辺部平均ガス流速 U_w の比が送風量とは無関係に粒子の堆積状況と通気抵抗によつて独立に規定されることを示しており、(7)式を(4)式に代入することによつて、中心部の相対ガス流速 U_c/U_{av} を求めることができる。ただし、Fig.7 から推察されるが(7)式は $(H/R) \cdot (K_1/K_2)^{0.778} \cdot (A_c/A_T)^{-0.483}$ の値が約 0.1 以上の流動化をとまなわない領域で精度よく適用される。

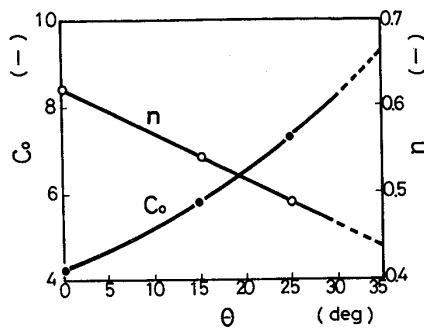
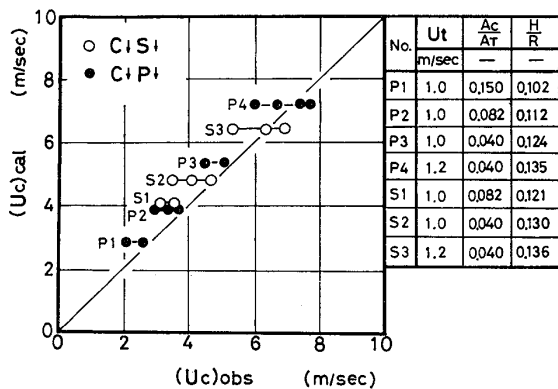
Fig. 8. Effect of θ on C_0 and n .

Fig. 9. Comparison between observed and calculated gas velocity in central part.

4. 考 察

4.1 中心部ガス流速の実験結果と計算値の比較

(7)式を実際の現象に適用する場合には装入時の平均層厚 H が問題となる。ここでは装入時に 0.2 s 間隔で撮影した一連の写真から H と A_c の経時的関係を求めて適用した。(7)式によって求めた計算値と実験で測定した中心部のガス流速との比較を Fig. 9 に示す。実測値のばらつきは大きい、ほぼ(7)式の妥当性が認められる。ここで、計算値がやや高い値を示す理由は装入時における鉱石層の空隙率が静止時に比して大きいことにあると推察される。

4.2 高炉中心部のコークス層流動化領域の試算

(4), (7)式から U_c/U_{av} と A_w/A_T (または r/R)との関係を求め、さらに U_c がコークス層の流動化開始速度 U_{mf} 以上となる範囲を求めることによつて、ペレット装入時のコークス層流動化領域の大きさを検討した。

ペレットとコークスの通気抵抗指数は Table 1 に示す粒度分布を福武ら⁷⁾の式に適用して求める。その計算結果を Table 1 の最右列に示す。 K_1 はペレットの通気抵抗指数 K_p をそのまま使用し、下部堆積層の通気抵抗指数 K_2 は鉱石とコークスの平均値を用いた。また、 θ はコークスの傾斜面に添って鉱石が流れこむと考えて

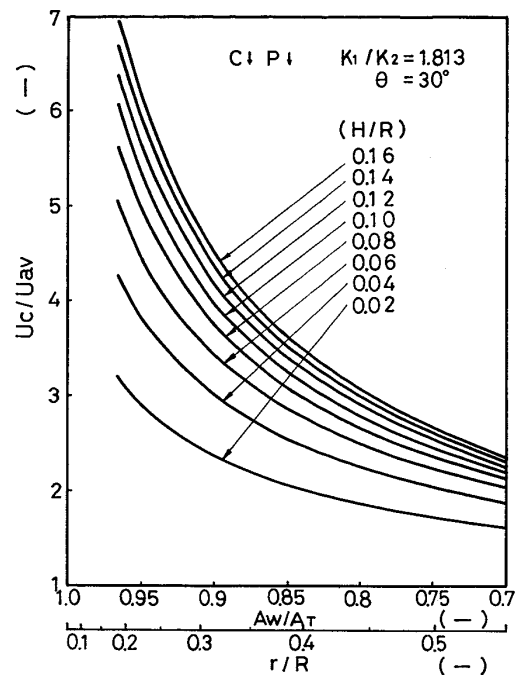
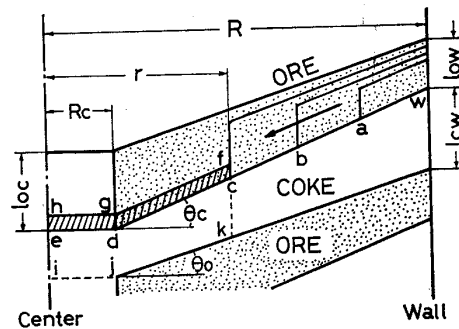
Fig. 10. Variation of U_c/U_{av} at pellets charging.

Fig. 11. Schematic drawing on formation of central coke column.

$\theta = 30^\circ$ とした。 H は実際には経時的に変化するので $H/R=0.02\sim0.16$ でパラメータとして与えた。

Fig. 10 にペレット装入時の中心部相対ガス流速 U_c/U_{av} とペレット堆積領域 A_w/A_T の関係を示す。図から中心部のガス流速はペレットの堆積領域が拡大するにつれて大きくなることわかる。一方、Table 1 に示したコークス層の流動化開始速度 U_{mf} は C. Y. WEN ら⁸⁾の式から $U_{mf}=2.6\text{ m/s}$ (炉頂圧力 2.0 kg/cm^2 , ガス温度 120°C)と求められる。従つて、この値を Fig. 10 に適用して、炉口平均ガス流速 $U_{av}=1.0\text{ m/s}$ の場合のコークス流動化領域を求めると、中心部に流れこむ鉱石の平均層厚を $H/R=0.06\sim0.10$ とすれば、コークスは $r/R=0.43\sim0.48$ の中心部領域で流動化することが予想される。

4.3 高炉における中心部のコークス単味層領域の推定

高炉中心部のコークス単味層領域の大きさを推定する

Table 1. Particle size and permeability index of coke and pellets

Material	Particle size								Permeability index (M.K.S.)	
Coke	Sieve(mm)	-15	15~25	25~50	50~75	75~100	+100	mean size (mm)	K_C	478
	Content(%)	1.9	4.0	47.1	36.6	10.3	0.0	42.6		
Pellets	Sieve(mm)	-5	5~8	8~10	10~12.5	12.5~15	+15	mean size (mm)	K_P	4618
	Content(%)	0.2	4.2	19.4	50.3	24.1	1.7	10.9		

ために、このコークス層の形成過程を実験観察にもとづいて Fig. 11 のようにモデル化した。

鉱石が装入される直前のコークス層表面プロファイルを wde とする。ここで、中心部のコークス層表面の傾斜角は実験結果及び堆積傾斜角とガス流速の相互関係を考慮して水平とみなす。周辺部に装入された鉱石は $a \rightarrow b \rightarrow c$ と中心に向かって流れこむが、中心から r の距離に達した時点で中心部のガス流速がコークス層の流動化開始速度を越え、半径 r 内のコークス層が膨張する。この膨張したコークス層 $cdgf$ が鉱石によつて中心部へ押し流されて半径 R_c の中心部コークス層を形成する。

Fig. 11 において半径 r 内の膨張前のコークス層 ($cd-eijk$ 領域) の体積を V_C とすると (8) 式が成り立つ。

$$V_C = \pi r^2 \cdot \{l_{cw} - (R-r) \cdot \Delta\theta\} - \frac{\pi}{3} (r^3 - R_c^3) \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

ここで、

$$l_{cw} = \left\{ V_{CT} + \frac{\pi}{3} (R^3 - R_c^3) \cdot \Delta\theta \right\} / \pi R^2 \quad (9)$$

$$\Delta\theta = \tan \theta_C - \tan \theta_0$$

流動化領域にあるコークス層の膨張率を α とするとコークス層の体積増加量 ΔV_C は (10) 式で与えられる。

$$\Delta V_C = \alpha \cdot V_C \quad (10)$$

また、膨張前後の空隙率をそれぞれ ϵ_0 , ϵ_1 とすると (11) 式が成り立つ。

$$\epsilon_1 = (\epsilon_0 + \alpha) / (1 + \alpha) \quad (11)$$

一方、Fig. 11 から中心部のコークス単味層の体積 V_C' は (12) 式となる。

$$V_C' = \pi R_c^2 \cdot \{l_{ow} + (R - R_c) \cdot \Delta\theta\} \quad (12)$$

ここで、

$$l_{ow} = \left\{ V_{OT} - \frac{\pi}{3} (R^3 - 3R \cdot R_c^2 + 2R_c^3) \cdot \Delta\theta \right\} / \pi (R^2 - R_c^2) \quad (13)$$

膨張したコークス ΔV_1 が空隙率 $\epsilon_{\max}$ で中心部に集められたと考えると (14) 式が成立する。

$$(1 - \epsilon_{\max}) \cdot V_C' = (1 - \epsilon_1) \cdot \Delta V_C = \alpha \cdot (1 - \epsilon_1) \cdot V_C \quad (14)$$

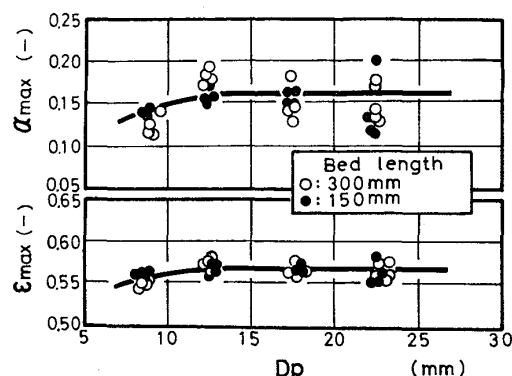


Fig. 12. Effect of particle diameter on maximum expansion rate and void fraction of coke bed.

ここで γ を (15) 式のように定義すると V_C' は (16) 式となる。

$$\gamma = \alpha \cdot \frac{1 - \epsilon_1}{1 - \epsilon_{\max}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \cdot \frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon_{\max}} \quad (15)$$

$$V_C' = \gamma \cdot V_C \quad (16)$$

(8), (9), (12), (13), (15), と (16) 式を用いて R_c を求めるに際して γ 中の ϵ_0 , $\epsilon_{\max}$, α の値を知る必要がある。 ϵ_0 は静止充填層の空隙率でコークスの場合には約 0.5 であることが知られている。 $\epsilon_{\max}$ は充填層でコークスを一旦流動化状態にした後に送風を止め、最大膨張率を測定することにより (11) 式から求めた。Fig. 12 にコークス層の最大膨張率 $\alpha_{\max}$ と最大空隙率 $\epsilon_{\max}$ をコークス粒径 D_p に対して示す。最大空隙率はコークス粒径が約 10 mm 以上の範囲で充填層高に関係なくほぼ一定値を取り $\epsilon_{\max} = 0.57$ である。また、膨張率 α は Photo. 1 より求めた R_c , $\Delta\theta$, l_{ow} , l_{cw} と (7) 式より求めた r を (8), (12), (15), (16) 式に適用して次のように算出される。

$$\alpha = 0.113 \sim 0.134$$

ここで、 α の値を約 0.123 とすると γ は 0.126 となる。

これらの結果を Table 2 に示す条件の高炉に適用して高炉中心部のコークス単味層領域の大きさを推定した

Table 2. Conditions for estimation of region of central coke column

Throat diameter	(m)	5.05
Pressure of top gas	(atg)	2.0
Temperature of top gas	(°C)	120
Density of top gas	(kg/m ³)	2.60
Expanded region of coke r/R	(—)	0.45
Charging volume of ore	(m ³ /ch)	60.5
Charging volume of coke	(m ³ /ch)	62.0
Surface angle of ore layer	(°)	23.5
Surface angle of coke layer	(°)	29.0

結果, $R_c=0.58\text{m}$ と算出された。

4.4 炉内ガス流れに及ぼす中心部コークス層の影響

高炉炉口部で中心部コークス層が形成された場合には塊状域の交互層状構造を変化させるとともに、頂層⁹⁾の存在しない融着層を形成して炉内ガス流分布をも変化させることが考えられる。そこで、融着層を考慮したガス流通実験を行い、中心部コークス層の炉内ガス流分布に及ぼす影響を検討した。

4.4.1 モデル実験

Fig. 1 の模型高炉内に Fig. 13 に示すような中心部コークス層 (半径 R_c) を考慮した発泡スチロール製の融着層を設定し、塊状域には 1~5 mm のペレットと 5~10 mm のコークスを層状充填した。融着帯の断面形状は逆 V 型とし、頂層高さを Type A と Type B の 2 種類に変化させた。羽口より 3.6Nm³/min の空気を送りながら炉体前面壁より 3 mmφ の圧力検出プローブを挿入して炉内の圧力分布を測定し、融着域におけるガス流量分布を推定した。

4.4.2 圧力分布に及ぼす中心部コークス層の影響

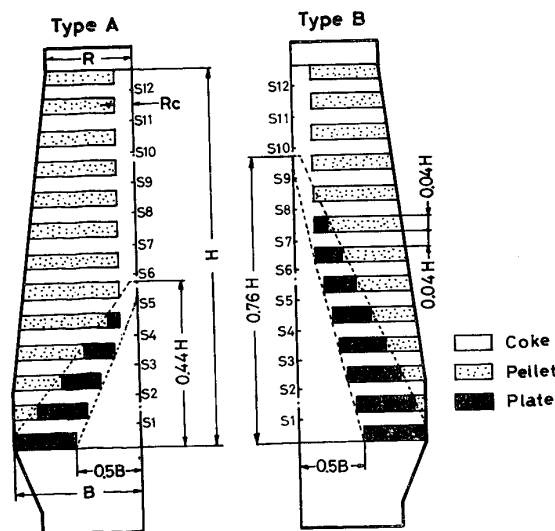


Fig. 13. Schematic drawing of softening-melting zones with different height in model.

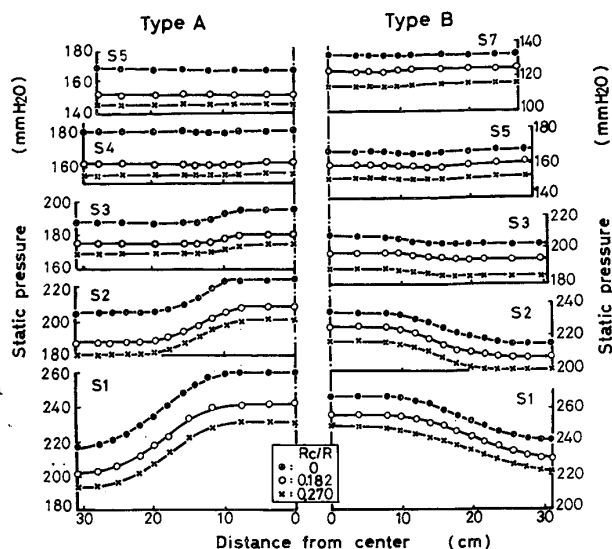


Fig. 14. Radial distribution of static pressure in coke slits.

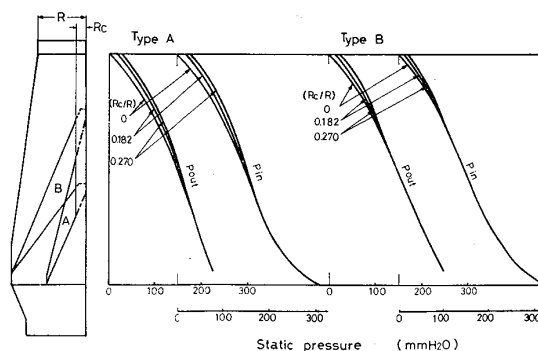


Fig. 15. Effect of central coke column on pressure distribution in vertical direction.

Fig. 14 に径方向圧力分布に及ぼす中心部コークス層の影響を示す。各コークススリット内の圧力分布は Type A, B とともに炉内側で高く、炉壁側で低い。中心部コークス領域が拡大するにつれて、各曲線は下方に平行移動しており、上部塊状域で生じた圧力損失の変化が下部の全領域に等しく反映されることがわかる。

Fig. 15 に高さ方向の圧力分布を示す。

この図は R_c/R の異なる 3 本の圧力曲線がシャフト中段以下ではほぼ平行していることに着目して各曲線の下端部を重ねて表示し直したものである。ここで、 P_{in} は炉中心軸上の圧力変化を、 P_{out} は炉周部の圧力変化を示す。図から明らかなように、中心部コークス層の形成に伴う圧力損失の低下は Type A, B とともに塊状帯でのみ生じている。一方、融着層の存在する領域では圧力損失は一定で、中心部コークス層の影響は現れていない。

中心部コークス層によつて塊状帯の圧力損失が低下することは中心部のガス流量が増大したことによるもので

ある。しかし、融着帯部の高さ方向および径方向の圧力勾配がほとんど一定のままであることから、ガスは塊状帯において著しく偏流していることが推察される。

4.4.3 圧力分布に及ぼす融着帯形状の影響

Fig. 16 に高さ方向の圧力分布に及ぼす融着帯形状の影響を示す。図中の各圧力曲線より、融着帯形状の影響は下部融着帯存在領域にのみ現われ、塊状帯には及んでいないことがわかる。これは融着帯形状によつてコークススリットからのガス分配量が異なるものの、融着帯を通過したガス流は塊状帯の通気抵抗分布に従つて急速に再配分されることを示している。融着帯頂層位置の高い Type B では Type A に比して下部の圧力損失が増加している。これは融着層の存在がガス流れに対して抵抗体として作用した結果であり、頂層位置の上昇が必ずしも圧損低下をもたらす¹⁰⁾ものではないことを示している。

4.4.4 ガス流分布に及ぼす中心部コークス層と融着帯形状の影響

Fig. 17 と 18 に炉内圧力分布から求めた融着帯領域におけるガス流量分布を示す。ここで、ガス流量は Fig. 14 に示す各コークススリット内の炉軸側と炉壁側の圧力差を(1)式に代入し、 $\beta = 0.23$ として求めた。図中には各コークススリットを通過するガス量と、このガス量を積算した周辺部ガス量を示している。

Fig. 17 はガス流分布に及ぼす中心部コークス層の影響であるが、Type A, B ともにコークススリットを通過するガスの分配量には中心部コークス層の影響はほとんど認められない。

Fig. 18 は融着帯形状の影響を示すが、コークススリットを通過するガス量分布は融着帯形状によつて大きく異なり、Type A は Type B に比して下部のコークススリットを通過するガス量が増加している。

これらの結果から、融着帯領域のガス流分布は融着帯形状によつてのみ決定され、その分配機構は頂層レベル

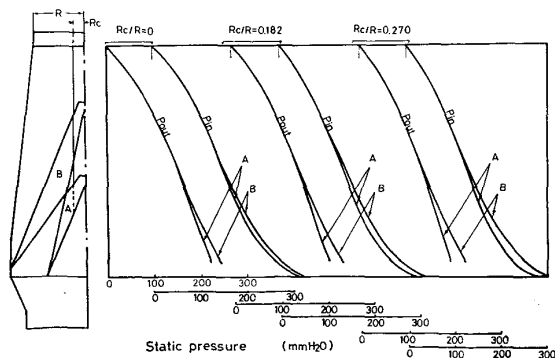


Fig. 16. Effect of softening-melting zone profile on pressure distribution in vertical direction.

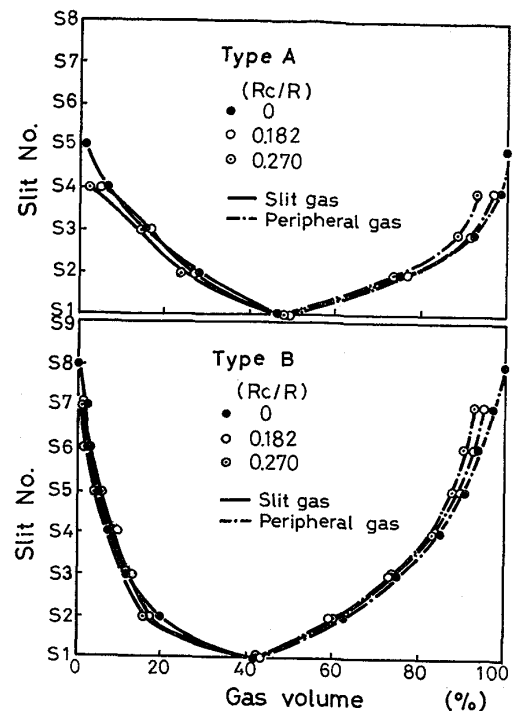


Fig. 17. Effect of central coke column on gas volume through coke slits in softening-melting zone and on uprising gas volume in peripheral zone.

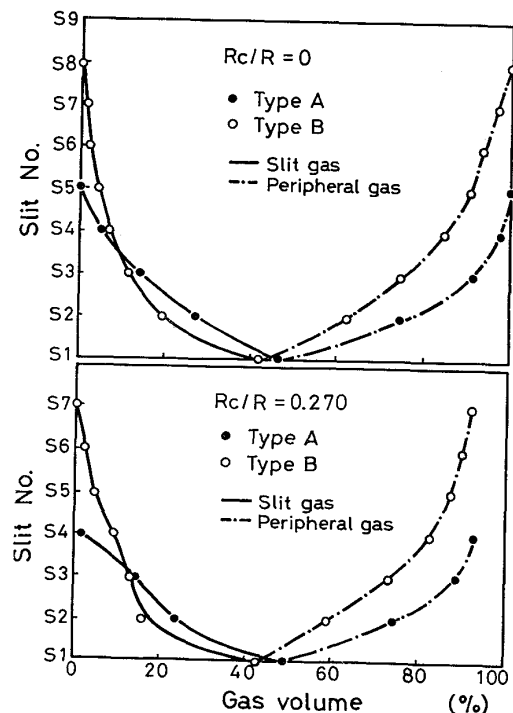


Fig. 18. Effect of softening-melting zone profile on gas volume through coke slits in its zone and on uprising gas volume in peripheral zone.

の径方向圧力分布が平坦化すべく分配されていると推察される。従つて、中心部コークス層は炉全体としての圧力損失を減少させるが、融着帯におけるガス分配にはそ

れほど大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

5. 結 言

通風時における装入物の堆積挙動を中心部コークス層の形成現象に着目して調査した。その結果、中心部コークス層の形成領域は装入鉱石の通気特性と装入方式によつて大きく異なることが判明した。また、鉱石の通気抵抗および堆積形状から鉱石装入時における中心部ガス流速の変化を定量化し、実高炉において中心部コークス層が形成する可能性について検討した。さらにモデル実験から、中心部コークス層の形成により、炉内圧力損失は塊状帯において低下することを明らかにした。

記 号

A_c, A_w : 炉口部の中心部, 周辺部の面積 (m^2)
 A_T : 炉口断面積 (m^2)
 C_0, C_1 : 係数 (—)
 g_c : 重力換算係数 ($kg \cdot m/kg \cdot s^2$)
 H : 鉱石層厚 (m)
 K_1, K_2 : (1) 式の通気抵抗指数
 L : 堆積層の高さ距離 (m)
 l_{cw}, l_{ow} : 周辺部のコークスと鉱石の層厚 (m)
 ΔP : 圧力損失 (kg/m^2)
 R : 炉口半径 (m)
 R_c : 中心部コークス層領域の半径 (m)
 r : 半径方向の距離 (m)
 U_o, U_{mf} : 空塔ガス流速, 流動化開始速度 (m/s)
 U_c, U_w : 炉口部の中心部, 周辺部のガス流速 (m/s)
 U_{av}, U_t : 炉口部の平均ガス流速 (m/s)
 V_C : 流動化領域にある膨張前のコークス体積 (m^3)
 ΔV_C : コークス層の膨張による体積増加量 (m^3)
 V_{CT}, V_{OT} : コークス, 鉱石の装入量 ($m^3/charge$)

α : コークス層の膨張率 (—)
 α_{max} : コークス層の最大膨張率 (—)
 β : レイノルズ数によつて決まる定数 (—)
 γ : 係数 (—)
 $\varepsilon_0, \varepsilon_1$: コークス層の膨張前, 膨張時の空隙率 (—)
 ε_{max} : コークス層の最大膨張時の空隙率 (—)
 μ : ガスの粘度 ($kg/m \cdot s$)
 ρ : ガスの密度 (kg/m^3)
 ϕ_s : 粒子形状係数 (—)
 θ : 堆積傾斜角 ($^\circ$)
 θ_c, θ_o : コークス層と鉱石層の傾斜角 ($^\circ$)

文 献

- 1) 伊沢哲夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斎藤正紀, 宮本健彦, 福島 勤, 古川 武: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 446
- 2) 吉村研三, 佐藤 忠, 富貴原璋, 嶋崎重信, 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 551
- 3) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 440
- 4) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲市, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, 65 (1979) 3, p. 358
- 5) 児玉惟孝, 堀尾竹弘, 肥田行博: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p. 295
- 6) K. POLTHIER: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966), p. 453
- 7) 福武 剛, 岡部狭児: 鉄と鋼, 57 (1971) 10, p. 1627
- 8) C. Y. WEN and Y. H. YU: AIChEJ, 12 (1966) 3, p. 610
- 9) 研野雄二: 学振 54 委資料 No. 1361 (1975)
- 10) 田代 清, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976) 4, S 66