
精錬工程における粉体吹込みと制御

Powder Injection for Smelting Process and Its Control

岩村 忠昭(Tadaaki Iwamura) 大岩 美貴(Yoshitaka Ohiwa) 秋本 圭一(Keiichi Akimoto) 山根 明(Akira Yamane) 牧 勇之輔(Yunosuke Maki)

要旨：

精錬プロセスで熔融金属内に反応剤を必要量吹込むことを目的として導入されている。約50の粉体吹込み設備に関し、まず方式を分類整理しそれらの得失を論じた。ついで当社で開発された高炉微粉炭吹込み、底吹き転炉用粉体吹込みおよびポストミックス方式の溶銑予備処理設備に関し、その特長を述べた。さらに、もっとも複雑な設備構成を持つ溶銑予備処理を例にとり、吹込みの安定性に関して詳細に解析を行い、新しい制御方式を提示した。閉そくのない安定した吹込みのための粉体速度が剤の種類に関わらず、固気比の関数として整理されることが見いだされた。

Synopsis：

The number of powder injection systems introduced into our smelting processes reached roughly 50, and the main aim of these introductions is to inject necessary amounts of flux materials into molten metals. The above-mentioned systems are classified into four groups according to their injection control methods, and first, their characteristics are clarified. Next, we introduce three injections system, i.e., powder coal injection to the blast furnace, flux injection to the bottom blown LD converter and post-mix flux injection of hot metal pre-treatment equipment, and discuss their respective features. Lastly, the performance of hot metal pre-treatment equipment having the most sophisticated mechanism is analyzed theoretically in order to get a stable injection control. It was found that clogless and stable injection can be obtained by a unique powder speed which is determined by the S/G ratio and that this speed has no relation with the kinds of powder materials.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Powder Injection for Smelting Processes and Its Control



岩村 忠昭
Tadaaki Iwamura
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(課長)



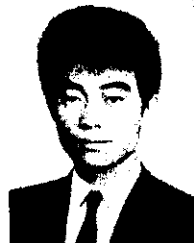
大岩 美貴
Yoshitaka Ohiwa
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)



秋本 圭一
Keiichi Akimoto
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)



山根 明
Akira Yamane
水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室



牧 勇之輔
Yunosuke Maki
千葉製鉄所 設備技術
部電気計装技術室

1 緒 言

粉粒体を空気輸送する技術は、今世紀の初めあたりから港湾における穀物類の荷揚げ作業を対象に実用化され、その管路輸送と返路不要¹⁾という2大特徴が動力の消費量の大きい欠点を補って応用分野を拡大している。特に飛散しやすい粉体を狭い設備面積の中で大量に輸送する場合には最適の輸送技術であり、鉄鋼業においても混鉄車脱硫設備を皮切りとして、底吹き転炉や高炉微粉炭吹込みなど近年適用例が急増している。

鉄鋼業の場合、粉体を輸送する目的だけでなく、多くは熔融金属内に反応剤を必要量吹込むという冶金反応装置であり、安定した粉体流量と搬送ガス流量の制御が必要となる。また昼夜の連続使用に耐え得るよう設備的に安定したものであることも必須である。

本報告では、まず当社に導入されている粉体吹込み設備の分類と整理を行い、各方式の得失を比較する。次に当社に導入する過程で開発された特長ある設備については、その粉体流量制御方法を中心に紹介する。さらにその中でもっとも複雑な設備構成となっているポストミックス方式の溶銑予備処理設備を例にとり、粉体輸送の安

要旨

精錬プロセスで熔融金属内に反応剤を必要量吹込むことを目的として導入されている、約50の粉体吹込み設備に関し、まず方式を分類整理しそれらの得失を論じた。ついで当社で開発された高炉微粉炭吹込み、底吹き転炉用粉体吹込みおよびポストミックス方式の溶銑予備処理設備に関し、その特長を述べた。さらに、もっとも複雑な設備構成を持つ溶銑予備処理を例にとり、吹込みの安定性に関して詳細に解析を行い、新しい制御方式を提示した。閉そくのない安定した吹込みのための粉体速度が剤の種類に関わらず、固気比の関数として整理されることが見いだされた。

Synopsis:

The number of powder injection systems introduced into our smelting processes reached roughly 50, and the main aim of these introductions is to inject necessary amounts of flux materials into molten metals. The above-mentioned systems are classified into four groups according to their injection control methods, and first, their characteristics are clarified.

Next, we introduce three injections system, i.e., powder coal injection to the blast furnace, flux injection to the bottom blown LD converter and post-mix flux injection of hot metal pre-treatment equipment, and discuss their respective features. Lastly, the performance of hot metal pre-treatment equipment having the most sophisticated mechanism is analyzed theoretically in order to get a stable injection control. It was found that clogless and stable injection can be obtained by a unique powder speed which is determined by the S/G ratio and that this speed has no relation with the kinds of powder materials.

定性について理論的な検討を行い新しい制御方式を提示する。

2 当社の粉体吹込み設備

当社では1975年に建設した混鉄車脱硫設備を始め、底吹き転炉のフラックス吹込み設備や溶銑予備処理における粉体吹込み設備にいたるまで、数多くの粉体吹込み設備を建設し、精錬設備としてその目的を果してきた。現在でも千葉および水島製鉄所には、およそ50ほどの粉体吹込み設備が稼動中である。以下に、これらの粉体吹込み設備の建設をとおして得られた技術について、設備構成、特徴、制御方式などを分類・整理した。

2.1 粉体の切り出し方式

粉体を吹込みタンクから切り出す方式を大別すると、上抜き方式と下抜き方式に分けられる。Fig. 1の(a)および(b)にそれぞれの方式の概要を示す。

* 昭和61年2月18日原稿受付

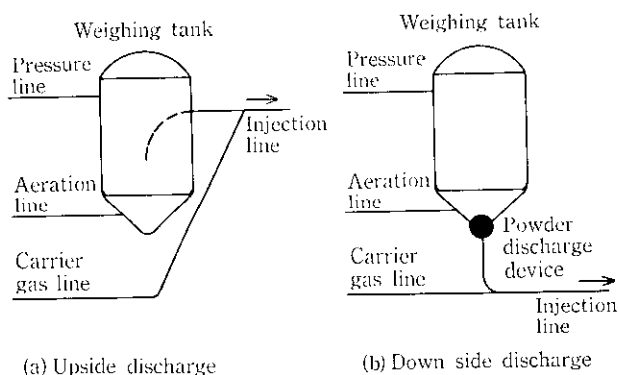


Fig. 1 Powder discharge methods

上抜き方式は、タンク内の粉体をガスで加圧して流動状態とし、タンクと搬送ガスラインの差圧を利用してタンク上方に切り出す方式である。

これに対して下抜き方式は、タンク下部に切り出し配管を有し、差圧と粉体の自重を利用して搬送ガスラインへ切り出す方式であり、粉体の切り出し促進用に機械的装置、たとえばロータリーフィーダなどが付加されることもある。

タンクを加圧するための配管を加圧ライン、タンク内粉体を流動化するための配管をエアレーションライン、粉体の搬送ガスを供給するための配管を搬送ガスライン、粉体を搬送するための配管を吹込みラインと呼ぶことにする。両方式にはともに粉体を流動状態にする「エアレータ」と呼ばれる装置が、タンク下部に付けられることが多く、その構造は各メーカーによって特色がある。

これら2種類の粉体切り出し方式にはつぎのような特徴がある。

- (1) 同量の粉体を切り出すために必要なエネルギーは、上抜き方式の方が大きい。
- (2) 粉体と搬送ガスの合流部とタンク間の圧損 (ΔP と称す) が零の場合でも、下抜き方式は粉体が自重により切出されることがあり、小流量の粉体切り出し制御には注意が必要である。
- (3) 一般には固気比 S/G (粉体と搬送用ガスの質量流量比 $=m$) を高くとれるのは下抜き方式であり、脈流が少なく切り出せるのは上抜き方式である。

2.2 粉体流量制御方法

粉体吹込み装置においては、精錬反応上の目的に応じて、粉体流量 (kg/min)、固気比、搬送ガス流量 (Nm³/min) など、制御すべき対象が異なる。ここでは粉体流量の制御方式について述べる。

粉体流量を制御する方法は、つぎの4通りに分類できる。

- (1) 搬送ガス流量制御方式
- (2) 差圧制御方式
- (3) 制御弁方式
- (4) ロータリーフィーダ制御方式

Fig. 2 の (a) および (b) にそれぞれ、上抜き方式および下抜き方式の搬送ガス流量制御方式の例を示す。この方式の特徴は、タンク加圧とエアレーションを共通ラインで行っている点にある。タンク圧力が一定のもとでは、粉体流量が搬送ガス流量により制御されることを利用したものであり、タンク圧力制御は通常独立した制御ループを持つ。搬送ガス流量制御により、結局は搬送ガス合流点とタンクの差圧を制御していることになり、原理的にはつぎの差圧制御方式と等しい。

つぎに差圧制御方式の例を Fig. 2 (c) に示す。この方式の特徴は、タンクを加圧するラインと粉体を流動化するエアレーションラ

インが、分離独立をしている点にある。これは、タンクと搬送ガスライン間の差圧を変化させることにより、粉体流量が制御できることを利用したものであり、通常搬送ガス流量は独立した制御ループを持つ。

さらに、制御弁方式の例を Fig. 2 (d) に示す。これはVノッチボールバルブの開度により、粉体の切出し量を変化させるところに特徴がある。またタンク下部にはエアレーションラインが必要であり、タンク圧力と搬送ガスライン間の差圧は一定に制御される。

最後に、ロータリーフィーダ制御方式の例を Fig. 2 (e) に示す。これは粉体の流量をロータリーフィーダ回転数により直接制御するもので、ロータリーフィーダの材質や構造などはメーカー独特のもの

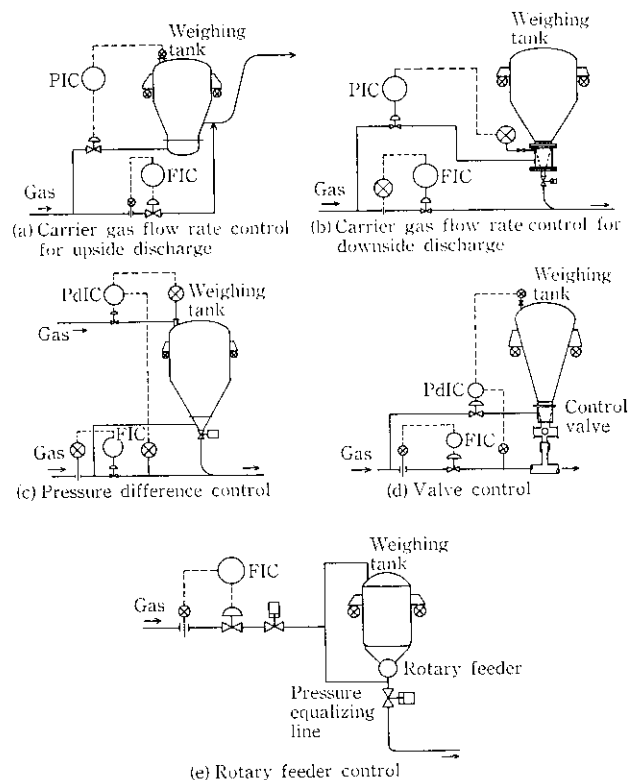


Fig. 2 Several methods of powder injection rate control

Table 1 Four control methods of powder injection rate

Control method	Carrier gas flow rate	Pressure difference	Valve	Rotary feeder
Item				
Construction	Fig. 2 (a) and (b)	Fig. 2 (c)	Fig. 2 (d)	Fig. 2 (e)
Control response time	medium	long	short	short
Control range	narrow	medium	wide	wide
Equipments	simple	medium	complex	complex
Cost of equipments	cheap	cheap	expensive	expensive
Maintainability	good	good	medium	medium
Weak point of system			Control valve (cost, life time)	Rotary feeder (cost)

が多い。図の均圧ラインにより、ロータリーフィーダ前後の圧力が等しくされており、しかもそこからのガスが粉体の搬送に利用されるという特徴を持つ。

以上4通りの粉体流量制御方式の得失をまとめて Table 1 に示す。また、ここまでにまとめた粉体切り出し方式および粉体流量制御方式にしたがって、当社の現状の粉体吹込み設備を整理して Table 2 に示す。これら以外にもいくつかの実験設備があるが、ここでは掲載していない。千葉と水島の両製鉄所を合せて、約 50 設備が稼動中であり、上抜き方式 31%，下抜き方式 69% である。制

御方式では、搬送ガス流量制御方式 31%，差圧制御方式 20%，制御弁方式 22% およびロータリーフィーダ制御方式 27% であり、搬送ガス流量制御および差圧制御方式が過半数を占めている。

3 特長ある粉体吹込み設備と粉体流量制御

当社で導入されている粉体吹込み設備の多くは冶金反応設備であり、プロセスの目的を効率良く達成するために既存技術では満足できないものが多い。そのため設備の導入時に装置メーカーと共同で特

Table 2 List of major powder injection equipments in Kawasaki Steel

Equipment	Location*	Kind of powder	Injection rate (kg/min)	Carrier gas	Pressure (kg/cm ²)	S/G	Powder discharge method	Control method of powder injection rate
Pulverized coal injection equipment	C. No. 5 BF	Pulverized coal	360	Air	8	2-15	Upside	Carrier gas flow rate
De-Si equipment at the cast house	M. No. 4 BF	De-Si agent	100	Air	1	20-30	Downside	Rotary feeder
Hot metal pre-treatment equipment	C. No. 1 BOF	De-Si and de-P agent	350	N ₂	2	10-30	Upside	Carrier gas flow rate
Hot metal de-S equipment	C. No. 1 BOF	De-S agent	250	N ₂	3	130	Downside	Pressure difference
	C. No. 2 BOF	De-Si agent	100-150	N ₂	6	40-60		
Hot metal pre-treatment equipment	C. No. 3 BOF	De-Si and de-P agent	300-400	N ₂	7	80-160	Downside	Pressure difference
Hot metal de-S equipment	C. No. 3 BOF	De-S agent	100-150	N ₂	6	70	Downside	Pressure difference
Hot metal pre-treatment equipment	M. PTC	De-Si and de-P agent	400-500	Air	8	30-70	Downside	Rotary feeder
Hot metal de-S equipment	M. No. 1 BOF	De-S agent	80	N ₂	5	10-20	Downside	Pressure difference
	M. No. 2 BOF	De-S agent	80	N ₂	5	10-20		
The first powder transporting equipment	C. No. 3 BOF	Flux	80	Air	3	10-15	Upside	Carrier gas flow rate
			600	Air	3	30-35	Upside	Carrier gas flow rate
The second powder transporting equipment	C. No. 3 BOF	Flux	80	Air	3	20	Upside	Carrier gas flow rate
			400	Air	3	20		
			80	Air	3	10		
Powder injection equipment	C. No. 3 BOF	Flux	600	O ₂	6	1-2	Downside	Valve
			600	O ₂	6	1-2		
			600	O ₂	6	1-2		
	C. No. 1 BOF	Flux	400	O ₂	7	2-3	Downside	Valve
Powder transporting equipment	M. No. 2 BOF	Flux	400	Air	5	20	Upside	Carrier gas flow rate
Powder injection equipment	M. No. 2 BOF	Flux	600	O ₂ , N ₂	7	2-3	Upside	Carrier gas flow rate
			600	O ₂ , N ₂	7	2-3	Downside	Valve
Flame gunning equipment	C. No. 1 BOF	Mending agent	300	N ₂	4	20-30	Upside	Carrier gas flow rate
Powder transporting equipment for ladle furnace	M. No. 2 BOF	Flux	150	N ₂	6	20	Upside	Carrier gas flow rate
Powder injection equipment for ladle furnace	M. No. 2 BOF	Flux	100-150	Ar	7	20	Upside	Carrier gas flow rate

(* C: Chiba Works, M: Mizushima Works)

長ある装置を開発している。以下に3つの事例を粉体流量制御を中心に紹介する。

3.1 高炉微粉炭吹込み装置と羽口毎分配制御²⁾

千葉製鉄所第2高炉で予備テスト³⁾を行い、同第5高炉で設備化した川鉄-デンカ方式の微粉炭吹込み装置の特長は以下のとおりである。

- (1) 1つの吹込みタンクから複数本(7~8本)の吹込み管路を取り出しており、コンパクトで建設、操業および保全コストが安価である。
- (2) 粉体流量制御は搬送ガス流量制御方式であり、吹込み管ごとのガス流量を調整することで羽口ごとに任意の制御を可能としている。直接粉体と接触する部位に機械装置を必要としない。
- (3) 上記の方式により各羽口への任意の吹込み量制御を行うのと同時に全吹込み流量の制御も精度良く行うことができる。

Fig. 3に装置の原理図を示す。同図の*i*番目の吹込配管における圧力バランス式は以下のようになる。

$$P_T = \Delta P_{g1}^i + \Delta P_{g2}^i + \Delta P_{g3}^i + \Delta P_{g4}^i + P_{Bi} \quad (1)$$

ここで、

P_T : 吹込タンク圧力 (kg/cm²G)

P_{Bi} : *i* 番目羽口の背圧 (kg/cm²G)

ΔP_{g1}^i : *i* 番目配管における位置①と②間の搬送粉体によるガスの圧力損失 (kg/cm²)

ΔP_{g2}^i : 同上の配管によるガスの圧力損失 (kg/cm²)

ΔP_{g3}^i : *i* 番目配管における位置②と③間の搬送粉体によるガスの圧力損失 (kg/cm²)

ΔP_{g4}^i : 同上の配管およびノズルによるガスの圧力損失 (kg/cm²)

搬送ガス流量 F_{Ni} (Nm³/h) を変えることにより、($\Delta P_{g1}^i + \Delta P_{g2}^i$) を増減させ、結果として粉体を持ち上げる駆動力 ($\Delta P_{g1}^i + \Delta P_{g2}^i$) を調節し、粉体流量 W_i (kg/h) を制御する。($P_T - P_{Bi}$) が一定の場合は F_{Ni} と W_i の関係を一義的に求めておくことができるが、現実にはそれが変化しているため、(1) 式を以下のように簡略化した数式表現に直し、それを解いて必要な羽口ごとの搬送ガス流量 F_{Ni} を求める。

$$P_T = \lambda_a \times \frac{\gamma_a u_{ai}^2}{2g} \times \frac{L}{D} + \lambda_m \times \frac{\gamma_m u_{si}^2}{2g} \times \frac{L}{D} + P_{Bi} \quad (2)$$

u_{ai} : 配管 *i* のガス流速 (m/s)

u_{si} : 配管 *i* の粉体流速 (m/s)

λ_a : 搬送ガスの管摩擦係数でレイノルズ数の関数

λ_m : 粉体の管摩擦係数

γ_a : 搬送ガスの比重 (kg/m³)

γ_m : 粉体のかさ比重 (kg/m³)

L : 配管長さ (m)

D : 配管径 (m)

g : 重力加速度 (m/s²)

(2) 式の第一項は搬送ガスによる圧損項 ($\Delta P_{g1}^i + \Delta P_{g2}^i$) であり、第二項は粉体によるもの ($\Delta P_{g3}^i + \Delta P_{g4}^i$) で、それぞれに Fanning の式を適用し、位置エネルギーを省略している。さらに第二項に固気比 m 、流速比 φ を導入すると、

$$m = \frac{\gamma_m u_{si}}{\gamma_a u_{ai}} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{u_{si}}{u_{ai}} \quad (4)$$

などの関係から (2) 式は次式のようになる。

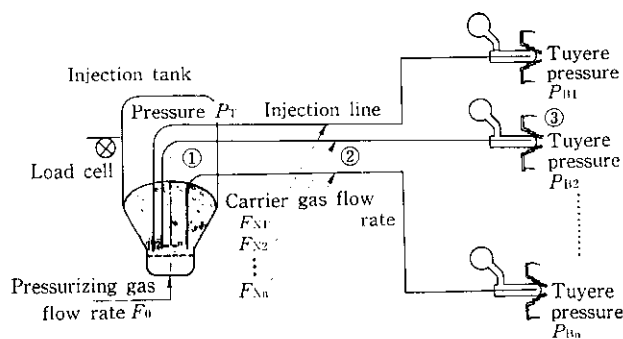


Fig. 3 Conceptual diagram of PCI process

$$P_T = \lambda_a \times \frac{\gamma_a u_{ai}^2}{2g} \times \frac{L}{D} (1 + km) + P_{Bi} \quad (5)$$

$$k = \frac{\lambda_m \varphi}{\lambda_a} \quad (6)$$

(6) 式で示される k は詳細には位置エネルギーの項が入りもっと複雑であるが、経験的に装置や粉体によって定まる定数と扱うことができる。さらに u_{ai} , γ_a , D , λ_a を配管に沿って一定であると仮定して、

$$u_{ai} = F_{Ni} \left/ \frac{\pi}{4} D^2 \right. \left(1 + \frac{P_i + P_{Bi}}{2} \right) \quad (7)$$

$$\gamma_a = \gamma_{gN} \left/ \left(1 + \frac{P_i + P_{Bi}}{2} \right) \right. \quad (8)$$

などを用いて (5) 式を整理すると、次式のようになる。

$$P_i = \frac{C_1}{2 + P_T + P_{Bi}} F_{Ni}^2 + \frac{C_2 W_i}{2 + P_T + P_{Bi}} + F_{Ni} + P_{Bi} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{16 \lambda_a L \gamma_{gN}}{\pi g D^5}, \quad C_2 = \frac{16 \lambda_a L k}{\pi^2 g D^5}$$

γ_{gN} : 搬送ガスの標準状態での比重 (kg/Nm³)

W_i : 必要粉体流量 (kg/s)

(9) 式は必要搬送ガス量 F_{Ni} についての2次式であり、装置に固有な定数 C_1 , C_2 , 羽口ごとの背圧 P_{Bi} , 吹込みタンク圧力 P_T を与えることにより陽に解くことができる。

実際の制御系では (9) 式を制御装置内で演算し、さらに吹込みタンクに設置したロードセルから得る全羽口粉体流量と目標値との差で補正する。Fig. 4が制御装置の構成であり、Fig. 5が各羽口への分配精度の実測値である。本装置計画時の分配精度目標値である最大吹込み量の $\pm 3\%$ 以内をクリアしている。

なお本装置は微粉炭だけでなく、鉄鉱石粉や炭酸カルシウムなどの種々の粉体を単味または混合粉のかたちで羽口から吹込めるようになっており、溶鉄中の [Si], [S] の調整も可能としている。

3.2 底吹き転炉における粉体吹込み制御

K-BOP, Q-BOP などの底吹き転炉^{4,5)}では、底吹き精錬ガスを搬送媒体として微粉焼石灰などのフラックスを溶鋼内へ吹き込む FI (Flux injection) 機能を有している。この底吹きフラックスは、脱燐反応の促進、冷却効果による羽口保護など、底吹き精錬に対して非常に重要な役割を果たしている。したがって、その吹込み制御装置に要求される機能は、以下に示すように他の粉体吹込み設備とは異なったものになる。

- (1) 低固気比でかつ大量吹込が可能であること
- (2) 粉体流量変化の速応性が要求されること
- (3) 吹込中の粉体流量の安定性が要求されること

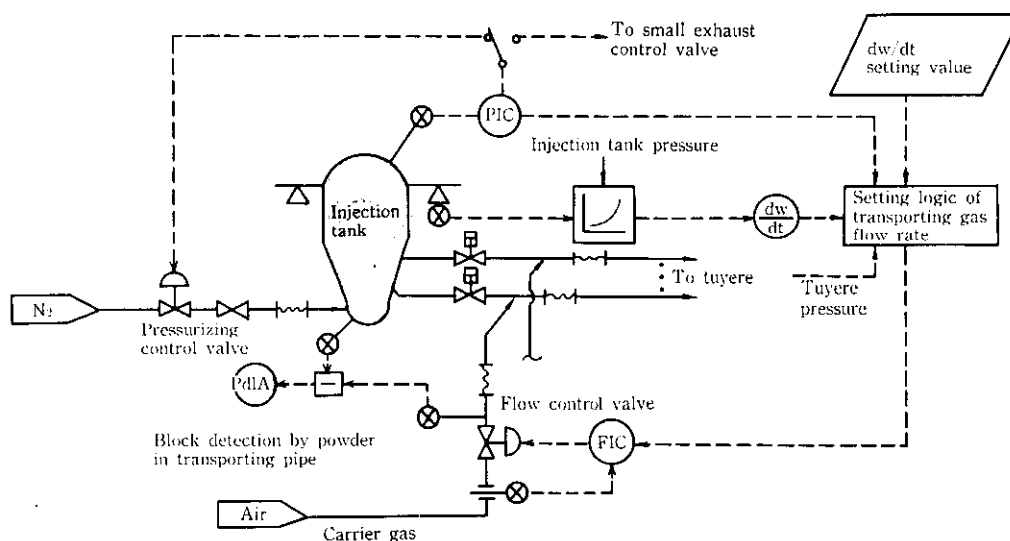


Fig. 4 Flow chart of powder injection control for PCI process

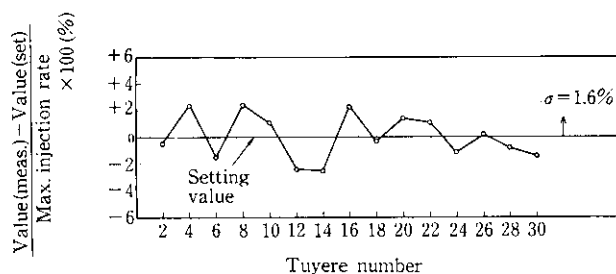


Fig. 5 Distribution of injection rate at each tuyere

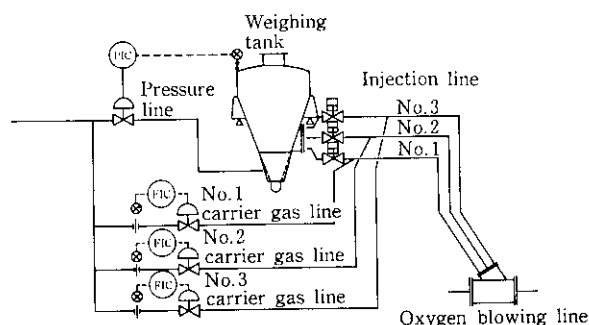


Fig. 6 New flux injection equipment

当社は、1977年1月の千葉製鉄所へのQ-BOP⁴⁾導入以来、1980年4月の水島製鉄所への第1基目のK-BOP導入⁵⁾まで、この苛酷な粉体流量制御を実現する装置として、Fig. 2(d)に模式的に示したVノッチボール弁を操作端とする方式を採用していた。この方式の特徴は、タンクと搬送配管合流点の差圧を定値制御しておき、制御弁の開度を変化させることによって切り出し量を制御するところにある。この方式を採用することによって(1)~(3)の機能は満足されるが、制御弁のコストが非常に高いこと、およびボールに対するシール部の摩耗が激しく、数百回の使用で交換の必要が生じるため保守性が良くないこと、などの欠点があった。そこで水島製鉄所の第2基目、第3基目のK-BOPでは、当社で独自に開発した新方式のFI設備を導入した⁶⁾。

新方式の構成をFig. 6に示す。この方式は、3.1の高炉微粉炭吹込みの応用であり、搬送ガス流量制御と異径搬送配管の選択により、粉体流量を制御する形になっている。必要なバルブはボール弁、玉型弁などのごく一般的なものでよく、かつ粉体の通過する吹込みラインには摩耗が想定される機械的な抵抗部が存在しないため、低コストで保守性も良い。

また粉体切り出し量の特長曲線は、タンク圧力一定の条件で、Fig. 7に示す形となる。異径吹込み配管の選択あるいは切り替えにより、迅速な粉体流量の変更を達成でき、搬送ガス流量の変更により粉体流量の微調整が可能であることが分る。Fig. 8は実操業データである。この図から、吹込み開始時の立ち上りの速さ、その後の安定性、吹込み配管を切り替えた時の速応性とも、十分満足できるレベルにあることがわかる。

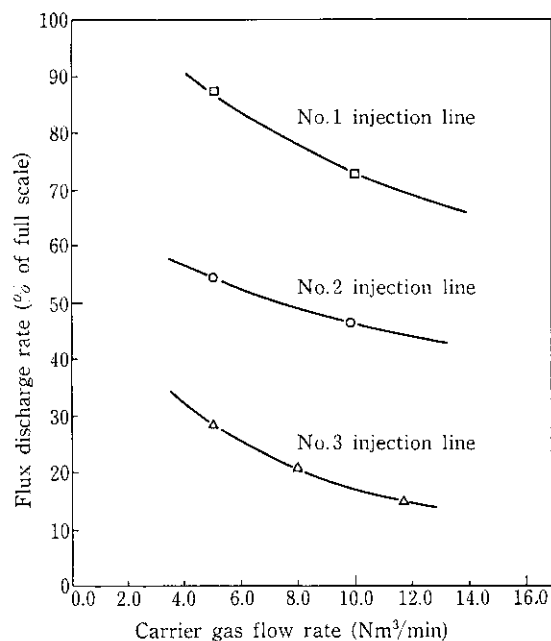


Fig. 7 Characteristic curve of new flux injection equipment

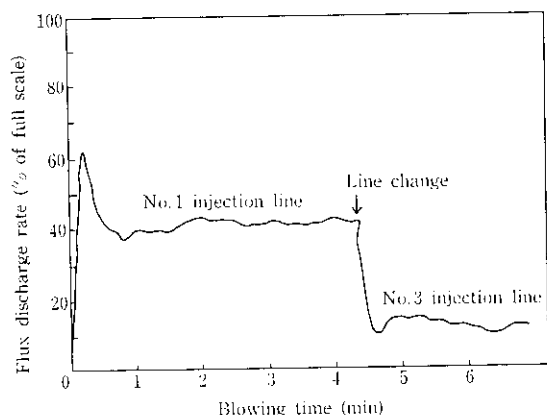


Fig. 8 Change of flux discharge rate in actual blowing operation

3.3 溶銑予備処理における粉体混合吹込み設備と制御

高級鋼の量産体制の確立と転炉での溶製コスト低減を目的として溶銑予備処理設備 (Pre-treatment Center, 以下 P.T.C. と略) を建設し⁷⁾, 昭和 60 年 3 月末より稼働を始めて現在 10 万 t/month の溶銑処理を行っている。P.T.C. の粉体吹込み設備は, 4 種類の独立した吹込みタンクに入れられた粉体を吹込みラインで合流し, 自在に粉体銘柄変更や配合比変更が可能な粉体混合吹込み設備である。Fig. 9 にその全体系統図を示すように, 粉体切出し方式は下抜きであり, ロータリーフィーダ方式で粉体流量を制御している。Fig. 10 に粉体混合吹込みパターンの主要なものを示している。この粉体吹込み設備は, いわゆるポストミックス方式を採用しており⁸⁾, その利点はつぎのとおりである。

- (1) 溶剤の選択, 配合が自由に可能なため, トビード別溶銑に対する溶剤の段取りが簡単にでき, 精錬中でも自在に処理内容を変更できる。
- (2) 精錬処理を止めることなく, 脱 Si および脱 P の連続処理が可能である。
- (3) 粉体混合設備 (ミキサ) と混合粉体貯蔵設備および粉体吹き戻し設備などが不要である。

しかし, このポストミックス方式粉体流量制御には, 非常にむずかしい問題を含んでいる。即ち, それぞれの吹込みタンク別の粉体流量制御系の相互干渉とか, ロータリーフィーダを使用している粉体吹込み系におこりやすい吹込み配管閉そくなどの問題である。これら安定条件と実操業データの解析結果は後述する。現状のポストミックス制御方法はつぎのとおりである。

- (1) 粉体流量はロータリーフィーダ回転数で決まるため, 粉体重量の微分値を用いたフィードバック制御は行わず, フィーダ回転数設定方式とした。
- (2) 搬送ガス流量は粉体流量レンジに応じた 3 段階プリセット方式を採用し, 独立したガス流量制御ループを構成した。
- (3) 吹込みタンクの圧力設定値も, 粉体流量レンジに応じた 3 段階プリセット方式を採用し, 粉体吹込みを開始するまでは搬送ガス流量ラインおよび流量調節弁によって圧力制御するようにした。吹込みを始めると, タンクの圧力制御ができなくなるが, 搬送ガスラインからのガスの一部がタンク加圧に使われ, 自動的に圧力がバランスする。

Fig. 11 に, このポストミックス方式粉体吹込みデータの一例を示す。これは Fig. 10 に示す(2)パターンの実例を示しており, 粉体

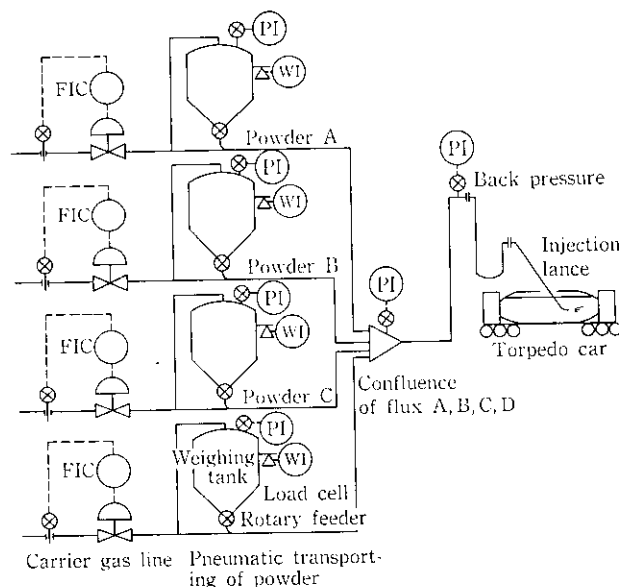


Fig. 9 Conceptual diagram of P.T.C. process

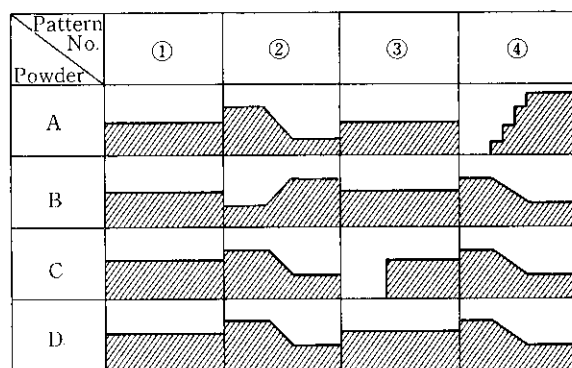


Fig. 10 Powder injection pattern

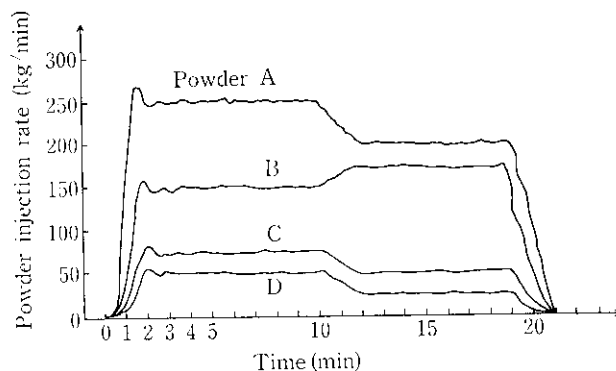


Fig. 11 Results of postmix-type powder injection

の 4 種混合吹込みおよび途中からの増減が, 設定通り制御できていることがわかる。

4 粉体吹込みの安定性の評価

水島製鉄所の溶銑予備処理設備は Fig. 9 に示したように 4 基の計量吹込みタンクからロータリーフィーダで切り出した 4 種の溶剤を搬送途中で混合するいわゆるポストミックス方式を採用している。こ

の方式は、各吹込み制御系の相互干渉、ロータリーフィーダを使用した吹込み系特有の閉そく現象に対する不安定性、といった問題を内在しており、粉体吹込み制御上、最難関のプロセスの1つである。本設備に求められる粉体搬送条件は、高固気比と安定性である。ところがここで使用しているような、粒径 100 μm 以下の粉体で固気比 10 以上の高濃度輸送に関する研究事例は少なく、安定搬送条件も経験的なものしか得られていない。そこで、この安定搬送条件を規定するため、実際の操業データと管壁との摩擦を考慮した粉体群に対する運動方程式を基に解析を行った。

4.1 仮定、および解析に使用したデータ

解析を行うにあたり、以下 6 つの仮定を採用した。

- (1) 粉体粒子は全て球形である。
- (2) 輸送配管中の圧力損失は搬送ガスによる圧力損失と粉体による圧力損失の和で表わされ両者の交互作用はない。
- (3) 粉体による圧力損失は、ガスと同様 Fanning の式の形で表わせる。
- (4) 粉体粒子の回転エネルギー、熱エネルギーの変化は無視できる。
- (5) タンク内の粉体の空げき率は、大気下の状態と同じである。
- (6) タンクの圧力は定常で、時間微分値は 0 である。

また解析に使用したデータは操業中に採集したもので、Fig. 9 に示す各系ごとのタンク重量微分値、タンク圧力、搬送ガス流量、および、各系共通の合流部圧力とランス背圧である。総計 104 個のデータを使用した。

また溶剤の物性を Table 3 に示す。表中の代表粒径は粒径重量分布のメジアン径である。

Table 3 Physical properties of fluxes

Flux	A	B	C	D
Specific density (kg/m^3)	3 280	3 140	3 180	2 160
Bulk density (kg/m^3)	1 300	800	1 700	930
Particle diameter (μm)	70.0	38.0	100.0	38.0

4.2 粉体群の運動方程式に基づく解析

4.2.1 パラメータの定義

過去の解析事例をみると、固気二相流の主要パラメータである固気比 (S/G)、搬送ガス速度 (u_g) などの定義を、あいまいにしている場合が多いので、これらを以下のように定義する。

(1) 固気比 (S/G)

従来の解析では、タンクから粉体とともに排出されるガス量を考慮しない場合が多い。本報告では固気比を (10) 式で定義する。

$$S/G = \frac{\text{粉体流量}}{\text{搬送ガス流量} + \text{粉体に伴って排出されるガス量}} \\ = \frac{W_t}{F_N \gamma_{gN} + \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \times \frac{W_t \gamma_{gN} P}{\gamma_s}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\varepsilon = (\gamma_s - \gamma_m) / (\gamma_s - \gamma_{gN})$$

ただし

W_t : 粉体流量 (kg/min)

F_N : 搬送ガス流量 (標準状態) (Nm^3/min)

ε : 空げき率

γ_s : 粉体真比重 (kg/m^3)

P : 搬送配管圧力 (kgf/cm^2 , abs)

(2) 搬送ガス流速

搬送ガス流速は、粉体による管路の占有を考慮し (11) 式とした。

$$u_g = \frac{F_N}{60P} \times \frac{1}{\left(S - \frac{W_t}{60\gamma_s u_s}\right)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし

u_s : 粉体速度 (m/s)

S : 配管断面積 (m^2)

4.2.2 摩擦を考慮した粉体群運動方程式の導出

Fig. 12 に示すように、内径 D の輸送配管中を運動する直径 D 長さ dl の円柱状の粉体群に働く力は、搬送ガスによる形状抵抗抗力と管壁との摩擦力の差として表わすことができる¹⁾。形状抵抗抗力 F_s は搬送ガス流速 u_g と粉体流速 u_s の差に起因する力であり上記粉体群に対して (12) 式の形となる。また摩擦力 F_t は (13) 式の形となる。

$$F_s = (\text{粉体群中の粒子}) \times (\text{粒子 1 個あたりの形状抵抗抗力}) \\ = \left(\frac{W_t dl}{60 u_s} \times \frac{1}{\frac{4}{3} \pi \frac{d^2}{8} \gamma_s} \right) \times \left(C_D \pi \frac{d^2}{4} \gamma_g \frac{(u_g - u_s)^2}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$F_t = \lambda_m \times \frac{dl}{D} \times \frac{\gamma_m u_s^2}{2} \times \frac{\pi D^2}{4} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\gamma_m = \frac{W_t / 60 u_s + F_N \gamma_{gN} / 60 u_g}{\pi D^2 / 4} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし

C_D : 形状抵抗係数

d : 粒子径 (m)

(12)、(13) および (14) 式より (15) 式のように運動方程式をたて整理すると (16) 式を得る。

$$F_s - F_t = \frac{W_t}{60} \times \frac{dl}{u_s} \times \frac{du_s}{dt} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\gamma_g C_D}{\gamma_s d} (u_g - u_s)^2 - \lambda_m \frac{1}{D} \left(\frac{u_s^2}{2} + \frac{F_N \gamma_{gN}}{2 u_g W_t} u_s^3 \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

(16) 式で形状抵抗係数 C_D は、Reynolds 数に応じて変化する性質を有しており、球形粒子に対しては H. Schlichting の実験データがある²⁾。その他 C_D の与え方としては Reynolds 数の範囲と限定して計算する Stokes 近似法、Newton 近似法、Allen 近似法などがある。ここでは、(16) 式の初期値問題を解くにあたって C_D が ($u_g - u_s$) の値に応じて動的に変化する形となっている点を考慮し、H. Schlichting のデータを線形補間することによって C_D を求めた。したがって初期値問題の方も、計算ロジックの組み易さから、定式化された数値計算法の 1 つである Runge Kutta 法を用いて解くことにした。

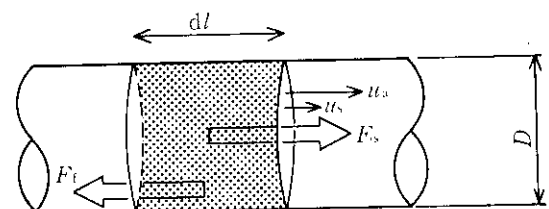


Fig. 12 Kinetics of dilute-phase flow

4.2.3 摩擦係数 λ_m の算出

本解析で対象としている微小粒径でかつ高固気比では粉体と管壁の摩擦係数 λ_m の測定例がないので、実操業データから以下の手順で求めた。

まず、固気二相流の圧力損失 ΔP は、4.1 節の仮定 (2)(3)(4) より (17) 式となる。

$$\Delta P(\text{kgf/m}^2) = \lambda_a \times \frac{\gamma_a u_a^2}{2g} \times \frac{L}{D} + \lambda_m \times \frac{\gamma_m u_s^2}{2g} \times \frac{L}{D} + \gamma_m H \quad (17)$$

ただし

H : 配管の上昇高さ (m)

ここで、(17) 式の右辺第 3 項は位置エネルギーの変化分である。(17) 式を変形すると (18) 式を得る。

$$\lambda_m = \left(\Delta P - \lambda_a \frac{\gamma_a u_a^2}{2g} \frac{L}{D} - \gamma_m H \right) \frac{2gD}{\gamma_m u_s^2 L} \quad (18)$$

この式の右辺には u_a 、 u_s といった速度項が存在するため結局 (15) 式の運動方程式と組み合わせ、繰返し計算法で解かなければならない。ここでは λ_m を収束パラメータとして、計算を行い各ケースごとの粉体摩擦係数を求めた。なお λ_a の値に関しては Nikuradse の実験値を参考に¹⁰⁾ 0.03 とした。

4 種の吹込剤に対して求めた粉体摩擦係数をまとめてプロットした Fig. 13 より摩擦係数 λ_m として (19) 式を得た。粉体と配管の摩擦は管壁に衝突する粉体粒子個数に比例し、この衝突粒子個数は、固気比 S/G に比例するとみなすことができる。(19) 式を用いて以下の解析を行う。

$$\lambda_m = 1.025 \times 10^{-4} + 5.643 \times 10^{-4} \times S/G \quad (19)$$

4.2.4 粉体搬送のシミュレーション

操業で得られた 104 のデータに関して、切り出し点から合流管までの粒子運動を (16) および (19) 式を用いてシミュレートした。演算結果として、粒子速度および搬送ガス速度の経時変化が得られる。

4.2.5 粒子の加速時間

Table 3 の 4 種の溶剤の中で粉体と搬送ガスの性質を同時に表わすパラメータの一つである浮遊速度が中位のもの A を例に、その操業データの中からランダムに 3 ケースを選び、切り出し点を起点とした各速度の経時変化を求め Fig. 14 にプロットした。この結果から、以下の特徴のあることがわかる。

- (1) 加速は 20 ms ~ 40 ms と瞬時にして終了する。
- (2) 摩擦に起因する粒子と搬送ガスの速度差は各ケースとも 0.5 m/s (ガス速度の 10~15%) 程度である。

輸送配管中では、ここで言う加速終了後も圧力損失に起因するゆるやかな加速が進行しているが、その大きさは切り出し点近傍の加速に比べて無視できる程小さい。そこで以下の閉そく判定に関する記述ではこの状態を定常状態とみなす。

4.2.6 粒子速度による閉そく条件の弁別

Fig. 15 は、4 種の吹込剤に関する操業データにもとづいて 4.2.4 および 4.2.5 と同様の方法で求めた、加速終了後の粒子速度と固気比の関係のプロットしたものである。実線は閉そくデータ (*), 正常データ (○) を区分する弁別線である。

このグラフから以下の結果が得られた。

- (1) 閉そく弁別点すなわち安定搬送限界は、粒子速度をパラメータにすることによって求めることができる。今回のケースでは 3.5~5.0 m/s のところにしきい値が存在する。
- (2) 弁別線は固気比に対して右下がりの傾向にある。すなわち固

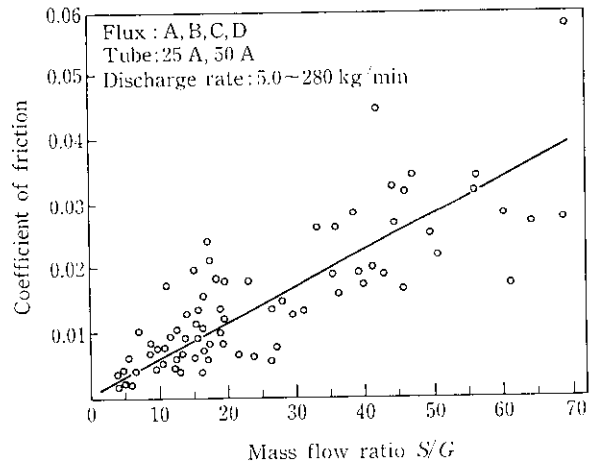


Fig. 13 Relation between coefficient of friction and mass flow ratio

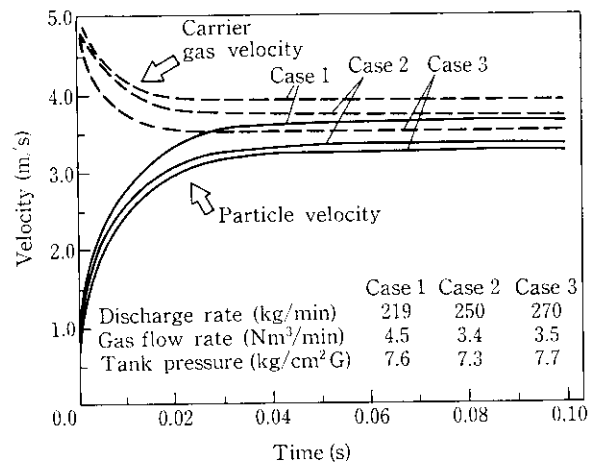


Fig. 14 Change of particle and gas velocity measured by powder flow meter at acceleration

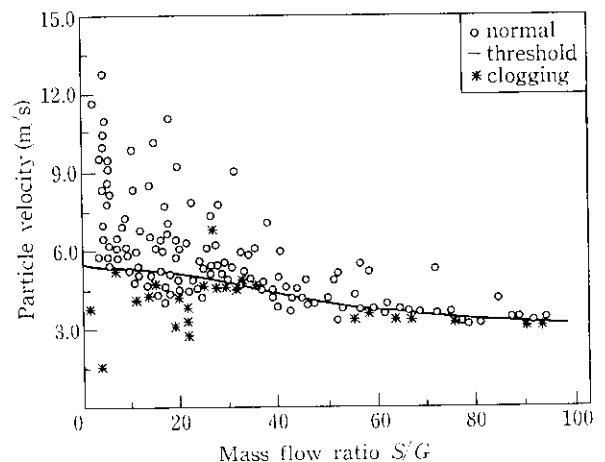


Fig. 15 Calculation result based on operational data

気比が高いほど低い粒子速度で搬送可能である。

- (3) Fig. 15 は 4 種の溶剤をまとめてプロットしているが、不連続性はみられず閉そく条件の溶剤による差はない。
- (4) 特に低固気比の領域で、過剰流速にて操業している例が多い。

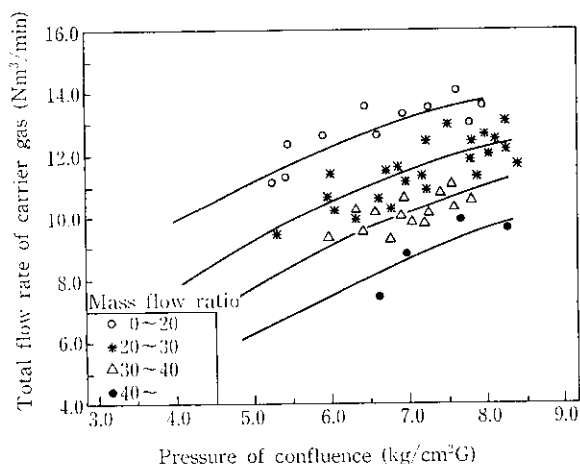


Fig. 16 Relation between pressure at confluence and total flow rate

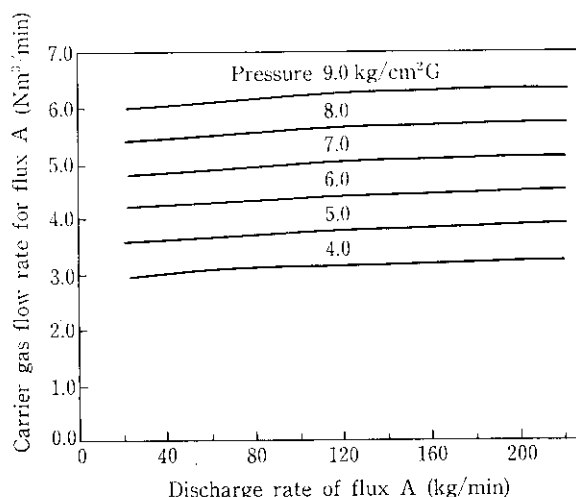


Fig. 17 Optimal flow rate for flux A in order to keep the particle velocity 5.2 m/s at several pressurized conditions

4.3 溶鉄予備処理設備における安定吹込み制御方法

解析結果をもとに、予備処理設備のようなポストミックス方式の粉体吹込み設備に適用すべき安定吹込み制御方法すなわち無閉そくかつ高固気比吹込を可能とする制御方法を定式化した。この設備では、粉体切り出し量がロータリーフィーダの回転数制御によって独立に設定されるため、最適化すべきパラメータは各搬送ガス流量設定値のみとなる。以下その手順を示す。

4.3.1 合流点圧力特性の確性

固気比、搬送ガス総流量などの種々の条件における合流部の圧力特性を実操業データより求める。Fig. 16 はその一例で、搬送ガス流量の総和と合流部の圧力の関係を固気比で層別しプロットしたものである。このグラフにより、合流後の搬送ガス流量と固気比から合流部圧力を求めることができる。

4.3.2 キャリアガス流量算出の定式化

粒子速度計算ロジックを多少変形することによって、合流部圧力および粉体流量を前提条件として、所要粒子速度を得るに必要な搬送ガス流量を各吹込み割別に計算することができる。Fig. 17 は、その結果の例で、Table 3 の溶剤Aに関し、粒子速度=5.2 m/s となるような搬送ガス流量を圧力別に示したものである。

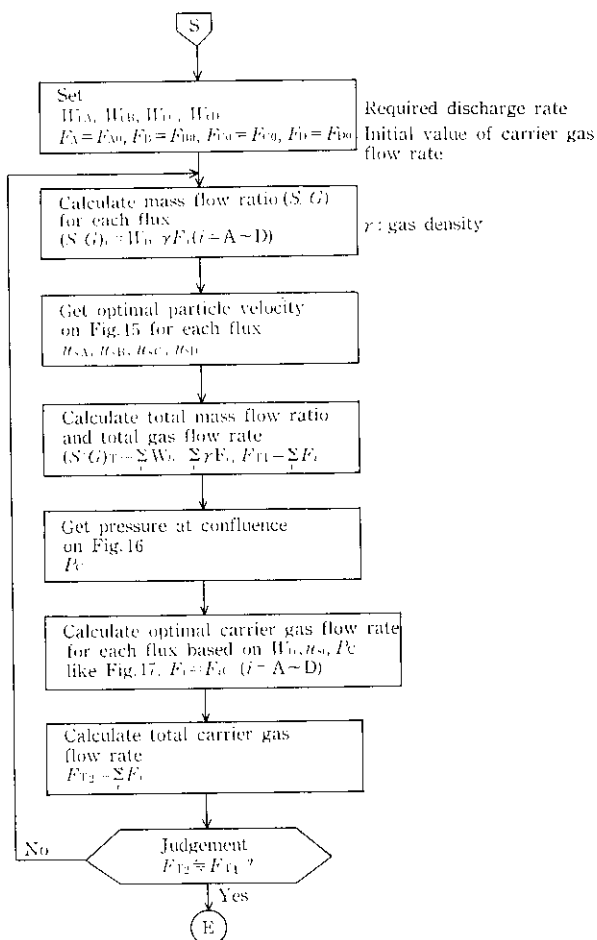


Fig. 18 Calculation flow of optimal operation

4.3.3 計算フロー

最適搬送ガス流量計算フローを Fig. 18 に示す。吹込み剤ごとの所要吹込み量を基に搬送ガス流量の総和を収束パラメータとして繰り返し計算を行うロジックとなっている。途中、溶剤ごとの所要粒子速度は、解析で求めた閉そく弁別線に対し多少余裕を持った値を設定すべきである。

この結果を広く他システムへ応用するためには、閉そく現象を左右するパラメータの無次元化が必須となる。Matsumoto ら¹¹⁾ は Froude 数をパラメータに固気二相流における Saltation 速度（粉体流量一定の条件のもと、搬送配管中での単位圧力損失が最小となる搬送ガス速度）および最低搬送速度を求めており、今後同様の解析が必要となる。

5 結 言

当社で工程的に使用している粉体吹込み装置について、粉体流量制御を中心にまとめ、当社と装置メーカーの共同で開発した高炉微粉炭吹込み装置、底吹き転炉粉体吹込み装置ならびに溶鉄予備処理粉体混合吹込み装置の三つを新しい応用例として紹介した。さらにもっとも複雑な吹込み装置の一つと思われるポストミックス方式の溶鉄予備処理設備を例に挙げ、粉体吹込みの安定性について解析を行った。

粉体の切出方式は上抜きと下抜きの二つに大別され、粉体流量の制御方式としては、搬送ガス流量制御方式、差圧制御方式、制御弁

方式ならびにロータリフィーダ方式の4つに分けられる。各方式は設備の目的によって使い分けられているが、下抜き方式で搬送ガス流量もしくは差圧制御方式のことが多い。高炉微粉炭吹込み装置や底吹き転炉粉体吹込み装置の例では直接粉体と接触する部分に機械的な稼動部分を持たず、前者では羽口ごとの粉体流量制御が、後者の例では粉体流量の大幅な変更が迅速にかつ安定して得られるのが特長である。

溶銑予備処理設備はポストミックス方式であるため、吹込む粉体の種類や混合方法を吹込み中に任意に変更できる特長を持つ。溶銑予備処理を例にとった理論的な解析では、固気比や搬送ガス流速に従来とは異なる定式化を行い、さらに粉体と管壁の摩擦を考慮した運動方程式をたてることにより、粉体輸送の安定性が粉体種類によらず固気比と搬送ガス流速の関係で整理されることを示した。また、その解析に基づく新しい粉体流量制御方法を提案した。

粉体吹込みは固気二相流の取り扱いが必要であり、理論的あるいは汎用的な取り扱いの極めて難しい分野の1つである。設備の設計においても経験則に基づくところが多く、また試行錯誤的な改善の

積み重ねにより安定した操業を得ている。本来、粉体吹込み装置はエネルギー消費量の多い輸送設備であり、さらに安定輸送に対する定量的な指標の欠如が、安全側の操業を指向させ無駄なエネルギー消費に拍車をかけることになる。当然ながら精練工程で用いられる設備においては、粉体の安定した吹込みだけでなく、吹込み速度ならびにガス流速もそれぞれ適切な範囲に制御されねばならず、別の評価の指標も必要である。消費エネルギーの装置による違いをも含めて別途報告したい。

本報では頁数の関係で省略したが固気二相流の流量計測の問題もまだ完全な解決を得るには至っていない。当社で計測器メーカーと開発した相關式流量計^{2,10)}も精度的には $\pm 5\%$ Full Scaleのレベルであり、工業用計測器としてはもう一步の改善が必要である。

粉体吹込みに関する分野は客観性を得るために為すべきことはまだ多い。専門家諸氏の御批判と御指導を頂ければ幸いである。

最後に、本報で紹介した粉体吹込装置に関し、デンカエンジニアリング株式会社およびイビデンエンジニアリング株式会社の関係諸氏に種々の御協力を頂いた。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 上滝貞貞: 「粉粒体の空気輸送」, (1974), [日刊工業新聞社]
- 2) 才野光男, 芹沢保文, 阪口泰彦, 中井歳一, 渡辺洋一, 牧 勇之輔: 川崎製鉄技報, **17** (1985) 4, 343-350
- 3) S. Sakurai, H. Takahashi and A. Suemori: "Injection of Coal as Auxiliary Blast Furnace Fuel", *Ironmaking and Steelmaking*, **10** (1983) 3, 137-142
- 4) 川名昌志, 岡崎有登, 永井 潤, 香月淳一, 田中貞治, 駒村宏一: 川崎製鉄技報, **10** (1978) 2・3, 184-193
- 5) 田中秀幸, 岩谷明之, 陶山謙一, 有吉政弘, 秋山信治, 武 英雄: 川崎製鉄技報, **16** (1984) 2, 84-92
- 6) A. Yamane, M. Ogawa, T. Iwamura, H. Okuda, H. Take and M. Kodama: "The Modernization of LD Converter at Mizushima Works-New Instrumentation System of K-BOP", 68th Steelmaking Conference, AIME, Detroit (USA), April (1985)
- 7) 水藤政人, 日和佐章一, 武 英雄, 児玉正範, 今井卓雄: 「溶銑予備処理設備の建設と操業」, 鉄と鋼, **72** (1986) 4, S213
- 8) 大岩美貴, 岩村忠昭, 日和佐章一, 武 英雄, 児玉正範, 今井卓雄: 「溶銑予備処理計測制御装置」, 鉄と鋼, **72** (1986) 4, S214
- 9) H. Schlichting: "Boundary Layer Theory", (1965), P 16, [McGraw Hill]
- 10) 化学工学協会編: 「化学工学便覧」, (1968), 869, [丸善]
- 11) S. Matsumoto: *Journal of Chemical Eng. of Japan*, **17** (1974) 6, 425-430
- 12) 岩村忠昭, 田宮徳士, 松下重忠, 毎床辰次: 鉄と鋼, **68** (1982) 4, '82-S5