■ 粉 粒 体 の 供 給

i) 高圧または真空部位への供給装置*

多 田 正 巳**

1. はじめに

この課題については、約10年前に本誌上で特集もあり、また、青木らの委員会によりまとめられた成書¹⁾がある。空気輸送および水力輸送の技術に、この課題の興味深い応用例が多く、これらは、空気輸送における上滝・西岡の共著²⁾と、水力輸送における寺田の著書³⁾に解説があり、もはや多くを付け加える必要はない。

戦後何回となくおとずれた原油需給の不円滑な市況に対処し、石炭の水力採掘、坑内における近距離移送、抗口への塊状石炭の垂直運搬のための各種のハイドロホイストの開発が進められ、世界でも著名な施設ができた。その研究成果や世界における開発状況が機械学会誌上⁴⁻⁷⁾に報告されているが、これらは全部前記の寺田の著書にまとめて収められている。

昭和41年にはアポロ計画が成功して人間が月の表面に到達した。宇宙開発や海洋開発では、人間や物品が、真空部位や高圧部位へ、出入りする必要を生じるが、これはもっとも信頼性のあるロックホップ方式によっている。また、アポロ計画では、空気と水を欠く絶対真空中において、状態が未知のふんじんに対する、土質力学上の問題を生じて話題となった。

地球上における粉粒体工学では常に空気（水蒸気を含む）と水との三相としての粉粒体を考えねばならない。粉粒体と共存する水分の量は、流動性その他の性質に与える影響が大きく、これに粒子径・粒径の分布・粒子の構造と形状・化学的特性などを考慮すると、本稿の課題の対象となる物件は、その範囲がまことに広く、また、その性質の変化の様相は連続で無段階である。

本稿では、この複雑な対象物の中から、数種の代表的

なものを選び、また、ポンプ・送風機の類を供給装置の仲間に加え、「供給装置」といわれるものの性格を把握することに努めた。次に、著者が経験し、あるいは見聞した、重工業方面における応用例の一部を挙げて、そのキーポイントとなる事項を述べた。著者の知らない場面がなお無数にあり、また、医薬品や工業薬品製造における各種の事例が多数あると考えられるが、これらについて興味あるものをご教示願いたいと考えている。

本稿の課題は、これに関連する因子が多いので、理論解析にも、実験的研究にも、てごわい相手である。摩擦や漏洩や閉塞などの各種の障害を克服して、経済性と信頼性を追求する限界条件の技術に属し、他の技術分野に比して浮動性が多いため、プラント内の弱点となることが多い。

2. 圧力差が小さい場合

圧力差がある場合のホップからの流出に関し、順圧のときの桑井の実験と、逆圧のときの青木の実験、また、傾斜管中でのエアレートせられた粉体の流れで、圧力差のある場合の Trees, J. の実験が、前掲の成書¹⁾に紹介されている。横山⁸⁾はフロートロンと言う電磁振動式の供給機兼制御機で、見掛比重が0.2~0.3位の軽い粒子のとき、逆圧が水柱500mm位で排出能力の限界に達したことを述べている。

一般に、貯槽からの排出装置は、そのままかなりの逆圧、および順圧に耐えるが、圧力の方向により、それぞれ、架橋現象やフラッシングが起りやすく、不安定となる。ガスの漏洩は、貯槽内の粉粒体のマテリアルシールに依存するが、これは層の高さや、粒子群の通気性や、漏洩による被害などの周辺条件によりきまることであり、予測が困難である。

* 昭和48年5月28日受理

** Masami Tada 石川島播磨重工業(株) 技術研究所

図1 流動層反応塔出口

図2 セメント原料サスペンション・プリヒータの一部

(a)

(b)

図3 ルルギ・サンドクラッキング法

供給装置とは言えないが、図1は流動床反応塔の出口に使われる典型的な形であり、外部に設けられたサイクロンから流下する粗粉が、元の槽に戻るかという問題がある。また、図2はセメント原料のサスペンションプリヒータの一部を示す。サイクロンの分離作用で、ガスと粉粒体は向流に接触するのであるが、上段で分離された粉体が下段へのガス入口ダクトに無事にはいるか、という問題がある。重量バランスされたフラップ弁を設け、起動時や運転時のガスの吹き抜けを防止するとともに、粉粒体をここに滞留させてその重量とマテリアルシール

を利用することも行なわれるが、駆動力は重力のみに依存するので、閉塞に対する弱点を構成しやすい。国井ら⁹⁾の著書には、これに対する若干の理論解析がある。

図3は、この国井の著書から引用したもので、ルルギ社のサンドクラッキングという、炭化水素の分解プロセスで、(a)図は、熱媒体であるシリカや、アルミナなどの粒体の流れる経路を示し、粒体はこの三角形を時計方向に循環する。(b)図は、その各点の圧力を示し、横軸が圧力、縦軸は(a)図と対応する各点の位置を示す。(a)図の中央部にあるのは流動床レクタで、原料油と

図4 Trickle Valve

蒸気が下からはいって上方へ流れて成品となる。粒子の動きは、これに向流をなして最下部の燃焼室に流下する。ここから粒子は燃焼ガスにより、うすい混合物とされて上方へガス輸送され、途中でその熱を受ける。最上部のものは分離器であって、ここで燃焼ガスは排出され、粒子は分離して、元の流動床へ流下する。粒子の流れのうち、分離器と反応槽の間、および反応槽から燃焼室までの二つの経路は、(b)図の圧力図で示されるように、軽い圧力差のある部位に向って、前者は逆流、後者は順流である。粒子の直径は0.4~2.0mmであり、この間のガスの漏洩はマテリアルシールの上に依存して、許容限度内に保たれている。

石油の熱分解・合成などで、触媒や、熱の運び屋としてのアルミナ・シリカなどの粒子を用い、その移動層・流動床などを使用して、粒子群の自由自在なハンドリングを行ない、プラントの目的を達成する方式の、まことに多彩な多くのプロセスが開発されており、粉粒体の魔術師のような感じのするものもある。ルルギ社の上記の例以外のプロセスでは、粒子の径が5~10mmと少し大きいものが多く、このときはマテリアルシールが不満足であり、蒸気などのシール用ガスを封入して、有害な漏洩を止める場合が多い。

著者らは、ある実験プラントのための予備テストとして、図1と同じ構成のものを、透明プラスチックで造り、サイクロンから降下する粒子の流れなどを観察したことがある。このような傾斜管中で、ガスと粒子は、はげしく脈動するが、ある場合には、粒子群は管底にそって流下し、ガスはその上方を、向流に上昇することもあることを見受けた。

図4に示すような Trickle valve を先端に付けた Down comer を流動層の中まで差入れ、スタート時の吹き抜けを防止し、かつ、粒子の“Stick-flow”を確保することもあることを、前記の国井らの著書中に述べている。

3. 高圧部位への供給装置の種類

表1の左辺の欄に、高圧部位への供給装置の代表的な形式と、泥しょうポンプ、および、送風機類の諸形式を示した。

表1の上の欄には、送るべき粉粒体の流動特性のうち、きわめて代表的なものをえらんでならべた。

また、これらを組合せたときの適用性をマルバツ方式で示してある。

粉粒体の流動特性は、本表のように一律にはゆかず、ことに粘土鉱物などの微粒子が、成型加工を受ける区域の前後はもっとも複雑な変化を示す。また、粒子の径などの表現もこれでは不十分で、その性質を言いつくしていない。

左辺に示す機械、ないしは機械要素も、その機能はデザインによっても異なり、名称だけで、その能力を断定はできない。

表1は、このような点で不十分であり、例外的なことも多いのであるが、ここでは、これを見て注目すべき点を下に列挙する。

1) 供給装置の定義 泥しょうポンプと、送風機類は、供給装置ではないし、語感も異なる。この語感を解析すると、供給装置には容器に入れる、容器から定量的に出す、また、距離的に見て近い所の他のシステムへ移動させる意がある。工学的には同じ作業内容でも、単に距離が遠くなるだけで、この操作は輸送と言われることになる。ところが、ポンプと送風機とは、使われ方によっては、いつでも供給装置となり得る機能と素質を持っている。例えば、ボイラ用の給水ポンプや、後に述べるジンプロ湿式燃焼プロセスの泥しょうポンプのような場合は供給機と呼ばれてもよい。そこでポンプと送風機は差別をつけて、一線を画した上で、本来の供給装置といわれる種族と並列に置いた。

2) ジェットとスクリュウ 表1で見ると、この二つは満点の成績をとっている。効率は共によくないのであるが、適用範囲は非常に広い。

3) 空気機械 送風機の中で、回転式(Rotodynamic type)のものと、微粒子(バラバラ)との組合せのところだけに、○印がある。これは粉粒体の空気輸送の可能なことを示すが、実際には輸送の場合は、送風機へ粒子の混入を避けて使われている。

4) 泥しょうポンプ 粒子の小さいものが、間隙水を100%以上を含んで、ビンガム塑性体のうちのスラリー域にはいるものに対し、泥しょうポンプの大群がある。種類は水ポンプのそれより多く、用途もスラリー域内はかなり広い。

表1 供給装置の種類とその適性

供給装置の諸形式		粉粒体の姿とその流動性		水分				多い		なし	
				ニュートニアン		ビンガム		粉粒体			
				スラリ		泥土・坏土		微粒子		塊	
				塊	微粒子	極微粒子	泥土・坏土	微粒子	塊		
ロックホッパー式				○	○	○	×	○	○		
ロータリーバルブ				○	○	○	×	○	○		
MOVING POCKET TYPE				○	○	○	×	○	○		
スクリーフィーダ				○	○	○	○	○	○		
ジェットポンプ		空気ジェット		○	○	○	×	○	○		
		水ジェット		○	○	○	○	○	○		

泥しょうポンプ	容積式	ピストン式		直接式	弁あり	×	○	○	×	×	×
		プランジャ式		圧力置換式		○	○	○	×	×	×
		SQUEEZE TYPE			弁なし	○	○	○	×	×	×
		ROTARY-VANE				×	○	○	×	×	×
		ギヤー式・ねじ式				×	×	○	×	×	×
		モイノ（あるいはモノ）				×	○	○	○×	×	×
	回転式	遠心式		弁なし	○	○	○×	×	×	×	
		軸流式			○	○	○×	×	×	×	
		混流形			○	○	○×	×	×	×	
		ブレードレスなど			○	○	○×	×	×	×	
	送風機	容積式の諸形式			×	×	×	×	×	×	
回転式の諸形式		弁なし	×	×	×	×	○	×			

5) 回転式泥しょうポンプ この形式のポンプが、ビンガム塑性体を動かし得る限界は、スラリの速度により増大する粘性の大きさにより定まるが、これを計算して可能性の極限を予測することはむずかしい。このとき、トルクの増大にかまわず、無理にまわして見ても、粘性が大きくなると速度のエネルギーは圧力のエネルギーに転化せずに、全部が熱となって失われ、吐出口に圧力を発生し得なくなる。

6) 容積式泥しょうポンプ この型は大きな粒子の存在に弱く、この目的に造られた特殊な構造のものが、若干の効果を挙げているが、なお、弁機構に弱点が残る。

図5に示すように、せん断ひずみ速度に対する、せん断力の曲線が、ニュートニアン粘性体のように、その原点を通るものは、いかほど粘度が高くても（吸入はできなくても）押し出すことができる。ビンガム塑性体のように、第5図の τ_0 で示される降伏値が存在すると、保形能力が発生するので、流送不可能となる限界が生じる。

7) 粉粒体 乾燥、または湿った粉粒体で、ばらばらなものは、容積式でも、回転式でも、ポンプでは送れない。いわゆる粉粒体といわれるこの集合体は、図6に

図5 ビンガム塑性体の降伏値

図6 粉粒体のせん断特性

示される特性を持ち、静止状態でもせん断強度を持ち、原則的にはせん断応力はすべり速度によっては変化せず、その代り、図6の(a)に示すように垂直応力に比

図7 各種炉頂装入装置の概略比較

例して、いかほどでも増大するせん断強度を示す。圧縮を受けるといかほどでも強くなる保形能を示し、ポンプ内の通路を通らなくなる。また、通気性がある、吸入が全くできない。直管や曲管の中の粉粒体を、どんなにピストンで押してみても、Janssenのサイロ効果の理論や、また、有名なPhillipsの実験のように、直径の数倍の長さの所では、駆動力を失ってしまう*。

粉粒体は、空気または水中に懸濁せしめて、その流動性を借りる以外には、ポンプ類を用いて送ることは、まったく不可能である。

4. 産業界における応用例

4・1 ロックホッパ式の例

これは二重扉方式で、二つの仕切りを交互に開閉することにより、異なるふんい気の直通を避けたもので、暗室の出入口、圧力系のボイラ室への出入口、また、宇宙船や水中設備における出入口に使われる方法と同じものである。

粉粒体の供給に使われるときは、粉粒体を動かす駆動力は重力による落下あるいは沈降である。

1) 高炉炉頂装入装置 近年は高炉炉内圧は2~2.5 kg/cm²・gの高い圧力で使われ、原料装入口のバルブの

大きさ、使用頻度、耐用年数、鉍石その他による摩耗や漏洩を考えると、かなりきびしい要求となる。

昔は高炉排ガスは、炉頂で燃焼して空中へ放散していたが、1800年代の中頃から、呼び名をベルと称する円錐形バルブ2個を用い、ロックホッパ方式により、排ガスの無駄な放散を防ぎ、排ガスのエネルギーを有効に利用するようになった。この装置の他の一つの任務は、鉍石類を炉内の反応層の表面に、円周方向には平均に、半径方向にはそのもっとも好ましい形に散布することになり、この為にとどこかのベルホッパを廻すことになり、これがガスシールの問題を複雑にする。図7はその各種の方式を示す略図で、この各形式中いずれもが現在使われている。高圧操業は1960年頃から、その効果が認められ、実用化に進んだ。これは高炉のスケールアップの要求に答えて開発されたもので、炉内を上昇するガス速度を上げることなく、酸素の密度を上げる一つの方法である。高圧操業ではベルホッパ回転部のシール部からのガスの漏れが増すので弁を3個、すなわち、ロックホッパは2室とする方がよい。各種の方法があるがIHI型では、回転部分を上部のロックホッパ内に収め、最上部のベルをフラップ弁に換えたものである。図7には示していないが最近では装入物の散布装置を炉内に持ち込み、その結果、大きくてやっかいなベルを全廃して、全部のバルブをフラップ弁や仕切弁に換え、かつ、ロックホッパを一つとしたものが、開発されつつある。

2) 真空脱ガス casting 真空の程度は絶対圧で水銀柱0.1mm程度の高いもので、操業中は0.2mm位から少し変動するが、驚くべき高真空が、重工業規模で、条件の悪い環境で連続的に操業されている。真空は数段の蒸気式エゼクタによるものが多い。あらかじめ精密に計量された合金鉄を入れて、成分が調整されるが、出鋼口からレードルを経て、鑄型に至る間の、どこで真空脱ガス操作をやるか、また、攪拌の方法などにより、数種の方法があり、合金鉄は出鋼直後に大気圧で装入するよりも、真空脱ガス中に、ロックホッパ方式を用いて装入す

- * 1) フィリップスの実験： 水面計ガラスの短いものの先を紙で蓋をし、砂を入れて、棒でつついても、壁面摩擦が力に比例してきいてくるので、どうしても押し出せない。
- 2) 鋼管杭： この杭は先端に蓋を設けず、開放のまま強大な衝撃を与えられて打込まれる。しかし、現実には土は直径の数分の1の所までしかはいるらない。
- 3) 実験： 円筒型のゴム風船、あるいは自動車のチューブのようなものに砂を入れて、真空ポンプで空気を抜く。砂は周囲より大気圧を受け、硬直して、ある程度の曲げ、ねじり、せん断力に耐えるようになる。すなわち、機械的強度を得て、保形能力を持つ。また、この強度はすぐ計算できる。気密を破って空気を入ると、直ちにバラバラになる。
- 4) 直角方向への力の伝達： 鋭い90°ベンドの所を、粉粒体を押し出そうとすると、壁面摩擦を無視したとしても、駆動力の大部分が失われる。土質力学の受働土圧の公式を適用すると、90°方向への駆動力は、 $K_p = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 倍になる（ ϕ は内部摩擦係数）。すなわち、一回の90°ベンドで駆動力は、数分の1、ないし数十分の1に減衰する。

る方が歩留りがよい。

図8はDH式(Dortmund Hörder)脱ガス装置における攪拌の状態を示す図で、上部の真空槽を上下することにより、サイホン作用で吸い上げられた溶鋼が入りしきりて攪拌され、合金鉄は真空槽の方へ、それが最下点にある時に装入せられる。仕切弁やフラップ弁を用いる簡単なロックホッパー式を用いるが、真空の吸引管もこのとき一時閉鎖してガスの流れをとめる。

図7と図8は文献¹⁰⁾より引用した。

3) 鉄鉱石直接還元法の H-Iron 法 還元用ガスは、米国では、天然ガスを原料とする変成ガス(H_2 90%以上)が主流である。温度 $600^\circ C$ の所にカルサイニングの領域があるので、その上または下の温度域を使う。温度制御が大切であるが、たいていは流動床法であり、炉内温度は比較的均一に保ちやすい。

図9は、国井らの著書⁹⁾より引用した、H-Iron 法の断面の略図である。このプロセスは、温度は低圧域を用い、その代り圧力は高い。 $540^\circ C \times 35 \text{ kg/cm}^2$ 、三段流動床、鉱石の粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$ で、鉱石の装入は三段構えの、なかばバッチ、なかば連続式の方法が紹介されており、図に見られるとおり、供給、排出にそれぞれのロックホッパーがある。入口のそれは鉱石予熱槽、出口のものは排熱回収の操作に使われると想像せられる。鉱石のいれかえ操作は下の手順となる。

- (1) 入口のロックホッパーを CO_2 ガスでエアーページし、次に、これを H_2 ガスに置き換え、かつ、 46 kg/cm^2 に昇圧しておく。
- (2) 下段の 98% 還元鉄を下段のロックホッパーに取り出す。
- (3) 中段の 87% 還元鉄を下段に移す。
- (4) 上段の 47% 還元鉄を中段に移す。
- (5) 新しい予熱鉱石を上段の流動床に流下せしめる。

各流動床の間に、このための仕切弁をそなえた連絡管があり、操業を中止せずにこの操作ができる。

その他に、FIOR 法: $10 \text{ atm} \times (700 \sim 900^\circ C) \times 2$ 段流動床、また、Nu 法: $3.5 \text{ atm} \times 700^\circ C \times 2$ 段流動床、などの数種のプロセスが世界各国で開発中であり、鉱石の輸送と装入は、還元ガス、あるいはイナートガスによる流体輸送と、ロックホッパーによっているらしいが、細部は不明である。原料鉱石の粒子を高圧高温部位へ供給し、また還元鉄の粒子を常圧常温部位へ取り出す方法に、重大な成否のキーポイントの一つがあるプロセスである。

4・2 ロータリーバルブと Moving pocket type

ロータリーバルブは、ビル入口の回転扉と同じ思想である。粉粒体を動かす駆動力は、この場合も重力による落下あるいは沈降に依存する。

Moving pocket type は、草間の報告⁹⁾と、寺田の著書³⁾に、英国石炭庁が塊炭の水力輸送に開発しようとし

図8 DH脱ガス鑄造装置の取鍋部

図9 H-Iron 法

た形式のものが紹介されている。このような塊状のものや都市ごみなどに、鋭いシャープを与えるやりかたは、無理が起りやすい。ここには別の形式を紹介する。

カミヤ式連続蒸解法 クラフトパルプの蒸解は、薬液温度が $170^\circ C$ 位、したがって、圧力が 10 kg/cm^2 位で行なわれ、普通はバッチ式蒸解缶内で、リグニンとパルプの分離が行なわれる。大型プラントになると連続化の利点が出てくる。スウェーデンのカミヤ社の連続プロセスのうち、二段目の圧入部の略図を、図10に示す。

図10 カミヤ連続蒸解装置における供給装置

一段目の圧入部はここでは省略するが、これは一般形のロータリーバルブで行われ、図10の①スクリーニングベッセルは、既に $0.5 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の圧力となっており、チップはスクリーにより、下方に落される。この圧力から蒸解缶の圧力 $10 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ に向って送り込む装置は、③のMoving pocket（あるいは回転ポケット）で、これは大型の四方コックである。⑤は低圧系、⑥は高圧系の循環ポンプで、この二つの系統は、このコックの所で十字交叉をなす。③の回転ポケットは3~4rpmでまわっており、④のストレーナによりせき止められてこのポケットに溜る木材チップを、低圧系から高圧系へ、ゆるやかに移し換える。チップは、循環する高圧系の薬液により水力輸送されて、蒸解缶にはいる。高圧系の薬液は、当然相当に漏れ出して低圧系へ流入するが、⑦の自動制御弁を通して取り出され、図のように、この大型コック③への進入路内で、水面は一定に保たれる。②はストレーナである。

なお、この大型コックは、2組が平行に設置されており、位相を 45° 違えられているので、高圧の流送系統のチップの流動はかなり均一に保たれている。また、この大型コックにはテーバーが付けてあり、間隙を微調整することができる。コックが1回転すると、ポケットの4倍量のチップが送り込まれる。きまった分類法はないが、著者はこれをMoving Pocketと解する。

4.3 スクリュー・フィーダ

スクリューフィーダは、非常に広い動作範囲と、適用範囲を持っている。内容物の充填率が100%となり、出

図11 バンディア連続蒸解装置のチップ供給装置

口をしぼると、材料を圧着して押し出すことができ、このときは、強いマテリアルシールが期待できる。

この状態のときの流れについては、本誌上に、坂中¹⁴⁾や石丸¹⁵⁾が、Darnel Molの式を紹介しており、また、森の著書¹⁶⁾には、ビンガム材料の降伏値を考慮に入れた場合の理論解がある。この二つは摩擦面のとり方が違う。

1) 木材チップ用フィーダ 木材チップの連続蒸解に用いられる供給装置の、別の例を図11に示す。一見して、粘土やプラスチック加工におけるオーガー押出機、あるいは、セメント工業などで多用せられるキニヨンポンプと形状は同じであるが、回転数はキニヨンポンプの1,000rpmに対し、これは最高で60rpm位である。

気密のロータリーフィーダにより、既に第一段目の軽い圧力系にある木材チップは、このフィーダ内で、蒸気と薬液を受けて空気をバージして薬液を吸い込み、軟化・圧縮・圧着して、プラグパイプでしぼり作用を受けて、つぎの高圧系にはいる。圧力は、バルブの種類と使用者の意向により異なる。チップの連続性が破れたときの用意のため、この場合は、モータ電流により空気で動作するブローバック防止用非常弁をそなえている。

2) ブロー作業 蒸解作業を終了したあとの薬液とバルブの混合体を、常圧の部位へ取り出す作業は、連続蒸解でもバッチ式蒸解のときでも同じく必要な操作で、本稿の課題ともなるものである。ブロー弁の摩耗・騒音・蒸気の発生を伴い、昔はたいへんな操作であった。現今は、蒸解缶の底部へ低温の薬液をまわし、コールドブローを行う。缶底に攪拌機をそなえて閉塞を防止しつつ取出し、サイクロンによりパルプ分を分離沈降させ、発生蒸気は全部回収して加熱に利用する。圧力を落とすための主役はブロー弁であり、閉塞と摩耗による障害に備えて、必ず2組が、方向反対側に装備されており、また、摩耗部品の交換容易な構造としてある。

4.4 超高圧泥しょうポンプ

泥しょうポンプ一般については、田伏¹⁴⁾・乙竹¹⁵⁾・吉田¹⁶⁾らの解説があり、また、ジンプロ湿式燃焼式による污水处理プラント用の高圧泥しょうポンプについては、根橋¹⁷⁾が圧力置換形の例を説明している。圧力置換形は

ダイヤフラムやゴム袋の所に機械的弱点が残る、また、ポンプ弁が粒体をはさみ込む弱点はまったくそのまま残るので、未だ中途半ばなものである。

超高圧スラリーに対してはピストン式ブランチャ式が圧倒的強さを示し、選択の余地が全くない。主な用途は長距離スラリー輸送と、探鉱作業におけるさく井に使われる*。カナダ・米国・オーストラリアの鉱山関係の雑誌に、実技面での情報が多い。スラリー中の最大粒子径とその硬さ（圧壊強度と摩耗性を示す）とが、相関関係を持っており、この種のポンプの適用限度をきめ、また、複働ピストン式とブランチャ式の優劣を定める。摩耗性粒子に対し、ブランチャ式の優位を認める人が多い。これはシリンダライナの問題がなくなり、軸封部については、ブランチャ式の方が太くはなるが、軸が外に出るときに吸入行程となり、はいるときに吐出行程となるため、パッキンの作用がよくなり、かつ、Flushing waterで粒子の侵入を防ぐことが容易となるためである。

実例としては、オーストラリアのタスマニア島の鉄鉱石輸送ではブランチャ式が用いられ、粒子径最大 200 mesh (0.074 mm) でポンプ吐出圧力 105 kg/cm² である。もし、これが石炭輸送ならば、粒子径 100 mesh (0.149 mm) まで許される。石油探鉱におけるさく井に用いるドロマイトスラリーは、粒子径 200 mesh 以下でこまかいほど品質がよいとされ、このような条件では、どちらの形式でも使われている。しかし、Rizzone, M. L. ら¹⁸⁾は、さく井用ドロマイトポンプで現在最高の吐出圧力 4,000 psi (280 kg/cm²) のものについては、ピストン式では不満足で、ブランチャ式の方が勝ると述べている。さく井用のポンプの容量は、孔の径によりほぼ定まっており、最大 200 m³/hr 位のものである。

4・5 空気輸送・水力輸送における話題

1) エアロボール 永田ら¹⁹⁾は低圧流動形プロータンク式空気輸送装置で図 12 に示すエアロボールという商品の解説をしている。乾式のセメントプラント内の近距離輸送で、粒子径がこまかいときに用いられるもので、圧入動作は連続である。フラクソーやセラポンプは、連続的操作のできる機能をそなえてはいるが、従来は、バッチ式の機器として知られている。エアロボールは粒子径が 88 ミクロン程度とこまかいので、連続式が可能となったものである。

2) マルコナフロア 米国のマルコナ社が 1970 年頃、自社の南米マルコナの鉄鉱石の、米国オレゴン州お

図 12 エアロボールの原理図

よび日本向けの海上輸送で、船舶への積荷・荷上げをスラリー状態で行ない話題となった。鉱石がベレット用微粉鉱 (325 mesh, 0.05 mm 以下を 63% 以上含む) であることと、船上での再スラリー化に優れた装置を開発したことにより成功した。雑誌 Ocean Industry²⁰⁾ (筆者不明) の記事が、もっともよく荷上げ装置の有様を伝えている。スラリーは船上では水分量 8% 位、パイプ輸送中は 30~40% (重量) である。この鉱山は山元での選鉱作業が湿式であり、また受入側の製鉄所の最初の混合粉碎の操作がやはり湿式である方がよい。このスラリーはパイプ輸送にやさしく、脱水貯蔵には困難なタイプである。

空気輸送と水力輸送は、送るべき混合体を、周囲の条件が変動した場合にも、どのようにして安定、かつ、一定に保つかということに、物理的にも、また、経済的にも、その成否の鍵がある。要は、表 1 に示した多くの機器の組合せの技術である。スラリー濃度検出装置の精度がよくなり、時間おくれがなくなれば、自動制御の技術により、その適用範囲をなお広め得る可能性がある。

最近では、都市ごみの短距離および長距離輸送に、水力ないしは空気力を用いることが話題となっており、Feasibility Study が各国で行われている。ごみの輸送は技術がニードに追いつけない状態となっている。

5. む す び

圧力の異なる部位への、粉粒体の供給あるいは移送は、常に磨耗・閉塞などのトラブルに悩まされる操作であるが、プラント中の他の機器と同様に、これが止ると全プラントが直ちに止まる重要部に使われていることが多い。材料の進歩によりかなり性能は改善されてきたが、構造的にみて、技術者は、既成概念にとらわれるこ

* ドロマイトスラリーは重量濃度 10% 位のものを循環使用する。目的は (1) 孔の周辺の土壌の崩壊防止、(2) ドリルの切りくずの迅速排除、(3) ドリルチップの摩擦熱の迅速排除、(4) リング状の孔周辺のスペースにより、切くずを地表まで水力輸送することなどの多目的である。深度は石油探鉱の場合に 1,500 m 以上および、ドリル先端でなお充分なジェット圧力のあることが要求されるため、現在最高の吐出圧力を出すスラリーポンプは、この部門にある。

となく、繰り返し繰り返し、絶えず原点に立帰り、手段方法を見直してみるにより、その進展が期待される。いまだに Art 的性格の強い技術分野であり、この Art の部分を出来る限り少くしようというのが、粉粒体工学の実用的効果である。

引用文献

- 1) 粉粒体供給装置委員会編：“粉粒体の貯槽と供給装置”，日刊工業新聞社，1963，11月初版
- 2) 上滝貞貞，西岡富士夫 共著：“粉粒体の空気輸送”，日刊工業新聞社，1961，2月初版
- 3) 寺田進著：“ハイドロリックコンベヤ”，日刊工業新聞社，1962，8月初版
- 4) 草間：機械学会誌，60，463，p. 835 (1957・8)
- 5) 寺田：同上，62，485，p. 1000 (1959・6)
- 6) 佐々木：同上，70，578，p. 391 (1967・3)
- 7) 渡辺：同上，71，485，p. 88 (1968・1)
- 8) 横山：化学工学，26，4，p. 542 (1962)
- 9) Kunii, D., Levenspiel, O.: “Fluidization Engineering”, John Wiley & Sons, Inc., USA (1969)
- 10) 日本鉄鋼協会編：鉄鋼製造法第1分冊「製鉄製鋼」丸善，昭和47年4月
- 11) 坂中：化学工学，25，5，p. 409 (1961)
- 12) 石丸，神保：同上，28，8，p. 721 (1964)
- 13) 森芳郎：“レオロジー”，共立出版，p. 113 (1966・2)
- 14) 田伏：化学工学，25，5，p. 347 (1961)
- 15) 乙竹：化学装置，昭和39年12月，p. 35 (1965)
- 16) 吉田：化学工場，13，8，p. 23 (1969)
- 17) 根橋：ケミカルエンジニアリング：1972年7月，p. 60
- 18) Rizzzone, M. L. et al.: *Trans. Soc. of Mining Engineers*, Vol. 247, p. 138, Jun. 1970
- 19) 永田，田中：産業機械，昭和47年4月，p. 32
- 20) *Ocean Industry*, Aug. 1970

ii) 各種粉体供給機の特性*

— 粉体プロセスの操作端として —

井伊谷 鋼一**・増田 弘 昭**

1. はじめに

粉体プロセス制御システムにおける粉体供給機の役割は、制御命令に従って粉粒体の供給流量を変化させることであり、いわゆる操作端として働くことである。ここで要求される特性は、動的な応答が速いこと、再現性のある定常特性を示すこと、さらに静特性すなわち排出流量とその操作変数との関係が線形であることが望ましい。粉体供給機がこれらの条件を満たすためには、第一にホッパーからフィーダーへの粉粒体の供給が円滑に行われねばならない。この基本的な条件を満足させることは、微細粒子の場合かなり難しい問題であって、ホッパーの設計上の問題として従来より詳しく検討されているが、最近ではホッパーとフィーダーを組み合わせた検討もある^{1,2,3)}。また、供給機自体も粉体の種類によっては適当でないことがあり、流体系の場合よりも粉体供給機の種類は多い^{3,4,5,6)}。これらの粉体供給機は、いずれも定重量の粉体を供給するというよりは、むしろ定容

積の粉体を供給するものであり、主プロセスに供給される粉体の質量を問題にするのであれば、厳密には何らかの方法で質量流量を求めることが必要になる。よく知られているベルトスケールやホッパースケール^{7,8)}はこの機構を備えたものであり、最近でも秤量法を併用することのような方法の検討も行なわれているが^{9,10)}、粉体流量計を用いて適宜マイナー・ループの制御システムを構成するのが典型的な方法であろう^{11,12)}。このように、操作端である粉体供給機自身がコントロールされているのが望ましいことであるが、粉体プロセス制御で考慮されねばならない点であるが、環境条件の変化が割合にゆっくりしている場合や、粉体供給機の特性が安定している場合には、経済性を考えて上記の制御系を省略することもできるであろう。いずれにしても、粉体プロセス制御の基礎事項として、粉体供給機の特性をつかんでおくことは必要である。ここでは数種の供給機について述べる。

2. テーブル・フィーダー

このフィーダーの概略は図1に示すように、テーブル上に堆積した粉粒体をスクレーパーによって切り取り、

* 昭和48年5月9日受理

** Koichi Inoya (正会員)・Hiroaki Masuda (正会員) 京都大学工学部 化学工学科