



## 粉体工学と鉄鋼プロセス

井伊谷 鋼 一\*

### Powder Technology and Steel Industry

Koichi IINOYA

#### 1. は し が き

粉体工学は近々 20 年余りの間に体系化されてきたが、まだその定義も確定しているとは言えない。粉体とは気体や液体すなわち流体、および固体構造物をのぞいたほとんどの物質を含むと考えてよい。粉という概念は固体の小片の集合であるが、我々が粉体工学とよぶときには、粒体や塊状物も含むし、液滴はもちろん気泡をもその範ちゆうに入れることがある。むしろ粒子状物質 Particulate あるいは粉粒塊体と言つた方が適当であるが、字句が長くなるので粉体と略称していると考えていただければ幸いである。粉じんあるいはエアロゾルも、また液中の粒子すなわちスラリーやスラッジも仲間としているので、その分野は全工学に広がるし、医、薬、農、理学とも関連が深いことは流体工学にも劣らない程である。

したがって鉄鋼プロセスとの関連となれば、熔融状態と製品加工プロセスを除けば、その製錬工程では粉体工学が随所に関係をもつことになる。特にその初期の原料処理と高炉まではまさに粉体工学的プロセスであるし、後処理の排気排水や廃棄物である鉄滓の取り扱いも粉または塊状物であるから粉体としての問題になると言えよう。しかし筆者は鉄鋼プロセスについては全くの素人で、その詳細を論じる資格はないので、ごく外観的な皮相な見解となることをお許しいただきたい。

#### 2. 粉粒体プロセスの計装<sup>1)2)</sup>

オンラインの粉体状態量の計測とその制御操作は流体プロセスにくらべて非常にうまくできていると言つてよいであろう。流体プロセスを考えればすぐわかるように、その主な状態量は温度  $T$ 、圧力  $P$ 、レベル  $L$ 、流量  $F$  および成分であるが、このうちでどれをとつても粉粒体プロセスではその測定がむずかしいことは御存知のとおりである。また制御操作は流体では一般にバルブでほとんどまかなわれているが、粉粒塊体では弁ですませるにしても、かみ込みや閉塞をおこしやすく特別の注意が設計上にも取り扱い上にも必要になるので簡単ではない。しか

も一般には各種供給機（フィーダー）が操作端の役目をすることが多いが、その動特性はもちろん静特性すら十分にはわかっていないものが多いように思う。これらの点について鉄鋼屋さんほどの程度検討済みなのか知らないが、以下に若干私見をのべてみたい。

##### 2-1 温度の計測

粉粒塊体の温度とはいかなる定義であろうか。一応バルクの平均温度としても、共存する流体の温度ではないことが多いであろう。一個の粒子でも表面と内部では温度が異なることもあるので、この平均温度はサンプリングして熱絶縁の下で平均化するまでの放吸熱量の時間的経過をプロットして初期（サンプリング時点）の平均温度を推定するような自動化した方法も考えられる。一方バルク内部あるいは塊粒内部の温度分布を測ることはほとんど現状では不可能であろう。神通力のある計測方法の出現をまたねばならない。

##### 2-2 圧力の計測

これも介在する流体の圧力とは一致しないことが多いであろう。特に堆積状態にあるときは重力や遠心力あるいは付着力、時には電磁気力によつてその粒子接点にかなりの圧力が加わるし、流体におけるパスカルの原理は成立しないから、3次元の方向によつて圧力は変わるわけである。この接点力は別にしても平均化した応力を測ることはストレンゲージの発達した現在でも簡単ではない。各種の粉粒体圧力計が開発されているが、なかなか満足のゆくものはないようである。できるだけ小さい面積に対する3次元の各成分を同時にはかれるようなくふうが望ましいが、我が国の器用な技術が開花する見込みもあるやにきいている。これらはあくまで現場用であつて、試験室での実験用センサーではないことが必要である。

##### 2-3 レベルの計測

前項の圧力計測がレベル計測につかえることもあるが、それはやさしい粉粒体の場合であつて、棚吊り（ブリッジ）やラットホール（抜け孔）ができる場合にはお手上げである。粉粒塊体のレベルは対象物の特性と測定の最終目的によつていかなる手法をえらぶべきかをきめなけ

昭和 56 年 10 月 26 日受付 (Received Oct. 26, 1981) (依頼解説)

\* 愛知工業大学 (Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa Yagusa-cho Toyota 470-03)

ればならない。万能の方法はもちろんないので、相手によつては装置の設計から変更しないとレベルが測れないこともおきるわけである。

すなわち、超音波、 $\gamma$ 線、電気容量、サウンジング、あるいはロードセル等の各種方法の中から最も適当な形式を選定するノウハウと、貯槽なり容器の形状の検討を必要とする分野である。鉄鋼としては石炭、コークスあるいは鉄鉱石等の貯槽あるいは野積みの計測に利用されている。

2.4 流量の計測

従来はホッパースケールかベルトスケールであるが、大形となり誤差も少なくない。天秤々量形式はそれ自体では 1/100% の精度も可能であるが、真の流量をはかつ

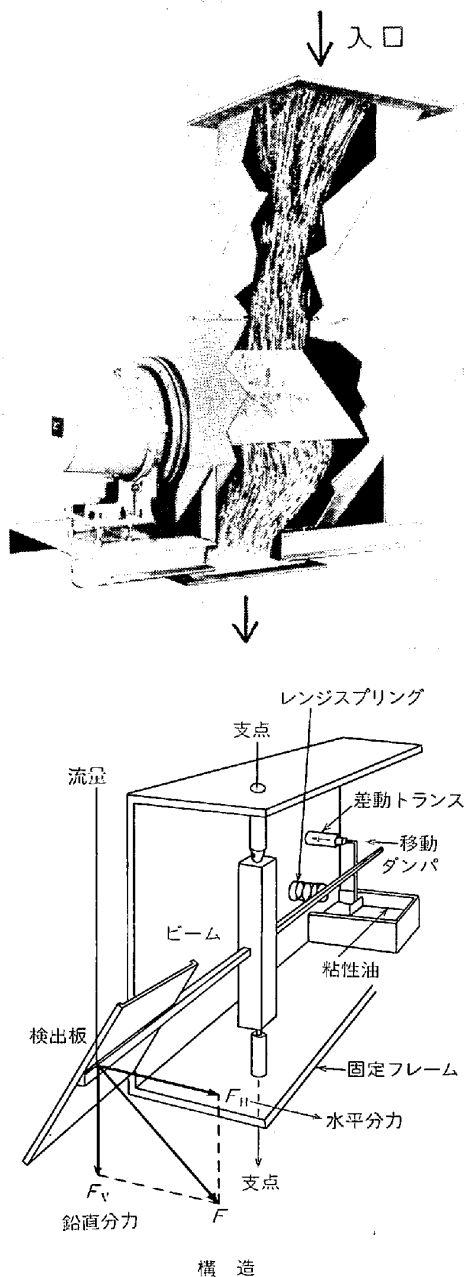


図 1 インパクトライン粉体瞬間流量計(三協電業)

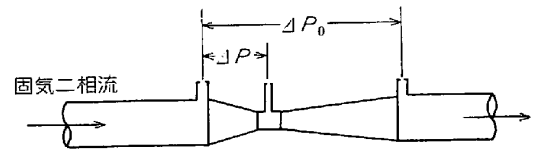


図 2 ベンチュリー形式固気二相流量計

ているかどうかが問題である。粉粒体だけの一相流でも行きづまっているが、固気あるいは固液二相流において、それぞれの固体流量のみを求めることは至難のわざである。これはフラッシングする、あるいは気泡を含む液体流の場合でも同様で、その各相の流量をはかることもいまだ不可能であろう。しかしこれを解決しないことには空気輸送による石炭の高炉吹き込み等の流量制御は完成しないとも言える。原料量も生産量もプロセス流量によつてきまってくるので、流量は直接利益につながる大事な情報であるが、粉粒塊体では時間おくれなく把握することがむずかしい現状である。単相流の瞬間流量計として開発した図 1 のインパクト形式(三協電業)は基礎実験以来約 20 年をへてやつと世界各国へ進出するようになったが、衝撃力という間接情報から流量を求めるので、最終的には検定を必要とする。この場合大流量になると流体でも似たようなことになるが、いかなる方法で検定するかが大きな問題である。しかしこれは完全密閉式で小形、高精度という長所をもっている。

2 相流に対しては固液流量計としての電磁式でも各相別々に測れるわけではないし、固気用にはいまだ完成した製品はない。20 年以上も折にふれて検討をつづけている図 2 のベンチュリー形式は、最も確実な方法ではあるが、混合比の範囲に限られるであろうし、やはり検定を必要とする。粉体物性の変化によつて、その流量係数が変化するために検定を要するのであるが、流体流量計のオリフィスにしても流量係数は状態量によつて変化するし、精度よく製作しても  $\pm 5\%$  程度の誤差は知らぬ間に生じていることが多いことを思うと、粉粒体流量計測にだけ厳格な条件を要求しても無理なことである。2 相流流量計も実用へもう一步という所までできているので、気長く辛抱よく開発への努力をつづけていただきたいと願っている。この面でも真のオンライン計測が世界にさきがけて完成することを祈つてやまない。

写真 1 は 2 槽ホッパー形式で秤量により連続流として流量を計測できるものである。したがつて原理的には粉体ごとに検定を必要としない。

2.5 粉粒体プロセス操作端<sup>3)</sup>

先にのべたように粉粒体用のかみ込みや摩耗に対して注意を払つたバルブも種々開発されているが、粉体フィダーが操作端として使用されることも多い。この場合の流量特性が粉体物性と運転条件によつていかにかわるかはむずかしい問題で解析的にも実験的にもまだ十分明確になつていない。我々が行つたわずかな研究結果だけで

もいろいろと面白いことがわかって来た。特に動特性としてテーブルフィーダーが図3のように微分要素をもっていることは制御ループを組む場合に活用すべき事柄であらう。

その他我々が基礎実験から開発した写真2のマイクロ

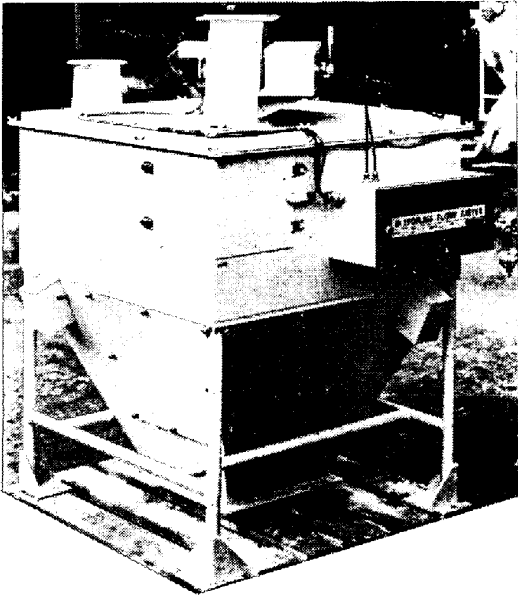


写真1 ストップレス粉体秤量流量計 (三協電業)

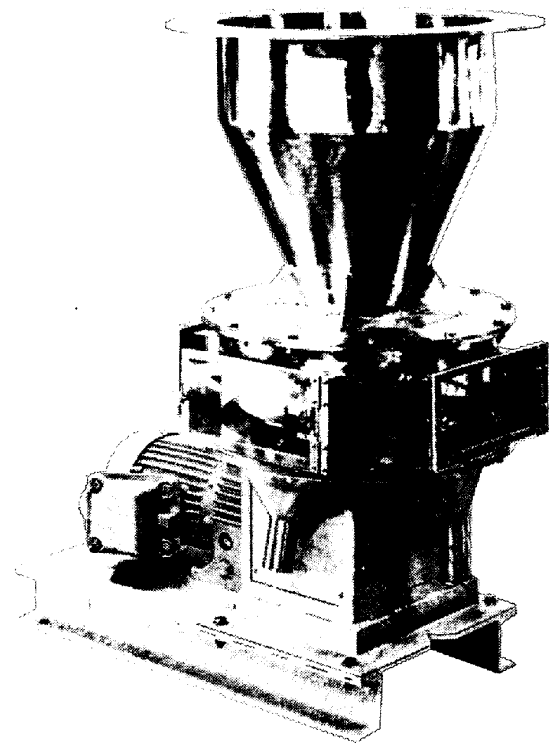


写真2 マイクロフィーダー (微量粉体定量供給機) (三協電業)

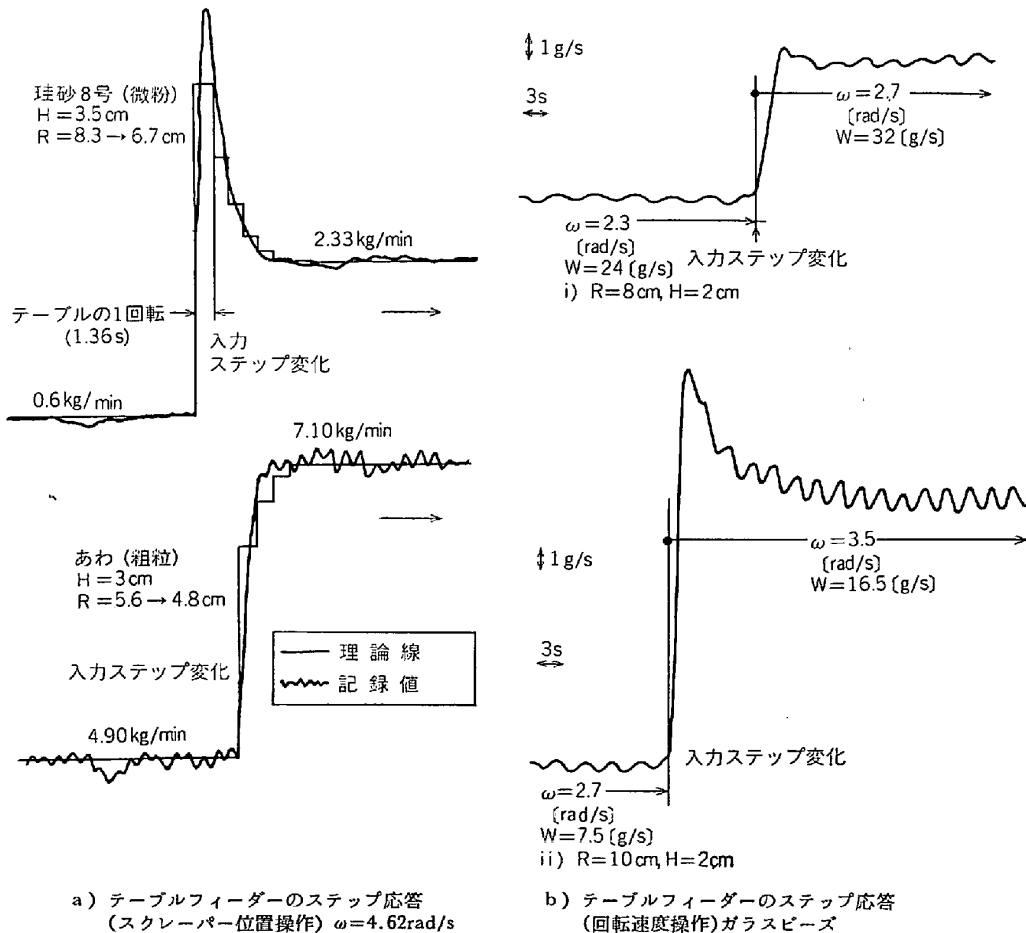


図3 テーブルフィーダーのステップ応答例

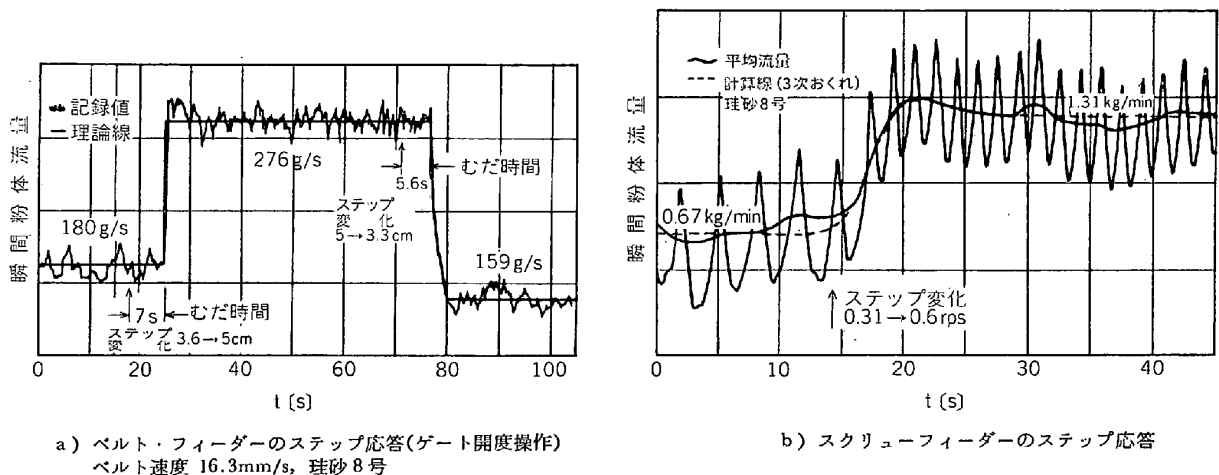


図4 ベルトおよびスクリーフィーダーのステップ応答例

フィーダー（三協電業）は無制御状態でも高精度（ $\pm 2\%$ 以下）の連続定量供給が可能で、しかも $1\text{ g/min}$ 以下の微小流量も可能であるし、数百気圧で水素や酸素中への粉体供給すら経験している。鉄鋼では転炉への応用を聞いている。

図4はベルトおよびスクリーフィーダーのステップ応答（動特性の一種）の実測例である。

### 3. ばいじん、粉じんの計測

粉じんあるいは煤じんは従来より大気汚染防止法施行規則によつて、その排出濃度等が規制されている一方、労働環境の浄化のため労働省により粉じん障害防止規則が昨年より施行され、その対策が推進されつつある。したがつて粉じん濃度および粒度分布あるいは粒度別濃度分布の測定は一部義務づけられていると共に、集塵あるいは除塵（労働省用語）装置の設計、運転および検討のために重要な課題である。現在ある程度のJISはあるものの、便利な形式が採用されていなかったり、本当に必要な粒度分布等は無視されてはなはだ頼りないといえる。

気体中におけるある程度凝集した粉じんの粒度分布、すなわち粒度別濃度分布の測定は、いまだ種々の問題点はあるもののカスケードインパクトによる方法の自動化等が有力である。光透過、光散乱、および光回折は原理的にはわかつていても実用上また若干問題があつて信頼性に欠けるような気がする。しかし光は簡単に電気に変わるので自動計測やデータ処理には便利である。ぜひ鉄鋼においてもこれらの実用的な検討を行つていただいて、定期計測あるいはモニター用として粒度分布までを測れるような態勢がとられることを願うものである。

今や衛生上にも技術的にも完全にサブミクロンの領域に粒子状物質は入つてきているので、その計測技術を早くマスターすることが不可欠の要素となることは間違いないと思う。

### 4. 粉体物性の測定(Characterization)

粉粒体の物性として粒度はある程度片付いているので、現在は粒子形状(Shape, Morphology)と粉体力学(Mechanics)が広く研究者の注目する課題となつている。前者はまだその定義等にいろいろの案が出されて、その優劣を議論しているところで、実用といかにむすびつけるかは、今後少なくとも数年を要するであろう。

一方後者の粉体層の力学的特性は固体力学のモル円の解析等を利用して、実験的にも理論的にもかなり進展をみている。引張試験機や剪断試験機が各種試作販売されているし、各研究者間での協同試験結果の比較検討等も行われている。そして理論解析も我が国独自の方法によつて、東大産業機械工学科、京大化学工学科、名工大土木工学科、群馬大情報工学科等において成果をあげている。これらをもし集大成することができるならば我が国の粉体力学は理論的にも実用的にも世界をリードすることができるであろう。しかし独創性をもつ研究者間の緊密な協力と全体へのまとめということとは至難のわざであることもたしかである。

この粉体力学は貯槽やヤードあるいはコークス炉、焼結プロセスおよび高炉内での粉粒塊体の挙動を解明する最も重要な手段であつて、石炭、コークス、鉄鉱石、石灰その他原料の取り扱い上も不可欠な知識である。それがちよつと粉体工学でここ数年来まとまつて進展しているので、実用への適用をはじめめるのに好都合である。しかしいまだ動き出したばかりの分野であるから、玉石混肴のきらいもあり、研究開発者はそれぞれ当然ながら自分の方法が最善であると信じているわけで、採用される方々も十分勉強して検討しないと失敗をまねかねないから慎重に前進をしていただきたい。

いずれにしてもこの粉体の流動と関連した静力学から動力学への遷移状態はむずかしい神秘的なものを含んでいるようであるが、経験だけにたよる時代はそろそろ脱

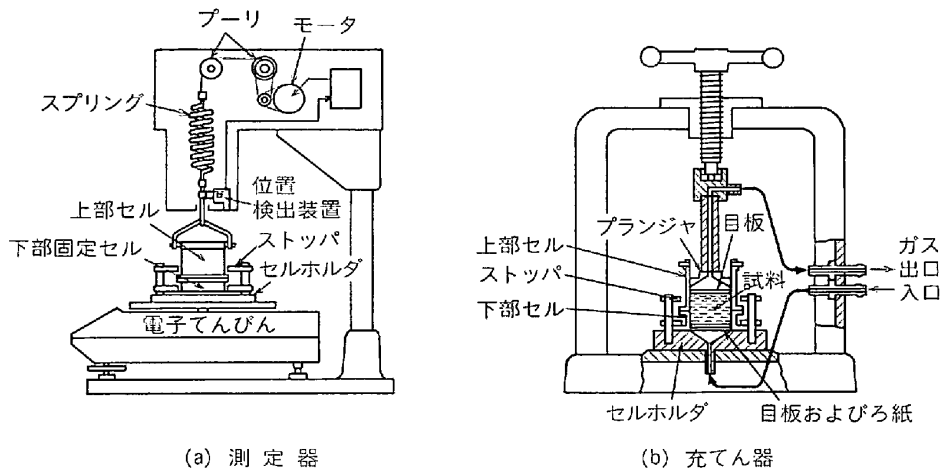


図 5 粉体層引張試験機 (島津)

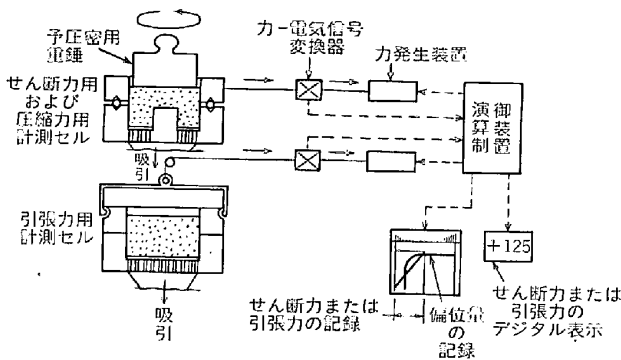


図 6 リングセル形式粉体層引張り及び剪断試験機

却すべき時が来たといえよう。図 5 および図 6 はそれぞれ粉体層の引張りおよび剪断試験機の一例である。

5. 粉砕プロセス等

固体原料 (鉱石等) および固体燃料 (石炭等) は粉砕分級することによって粒度をそろえると共に、処理に最適の粒度にもつてゆくことができる。化学反応を促進するためには比表面積の大きい方が、すなわち微粉程好ましいが、微粉は凝集付着を起しやすく、気体の透過性もわるくなるので、実用上は細粉にして造粒焼結することが行われる。この辺りは粉体の圧密充填あるいは粒子配列構造の研究が関連してきて興味あるところである。焼結体の粒径と強度及び充填層通気性の関係等はエネルギー価格の変化によってその最適値が変わることはないのであろうか。また高炉の操業は正に粉体工学屋にとっても検討してみたい巨大な反応を伴う高温充填層で、そのオーバーオールを経済性を解析するのに粉体工学も一役かっていることであろう。

この前処理である粉砕は最も不経済な単位操作であつて、真に必要なエネルギーの百倍も千倍もの動力を食っているらしい馬鹿げた方法である。大昔からの臼に始まるこの操作は熱機関のカルノーサイクル等にくらべても

問題にならない劣等生であるが、助剤添加、微粉分級、あるいは雰囲気調整等によつて少しでも能率向上を目指している。しかしそんな劣等生でも、全体のプロセスの性能を向上させるためには必要な欠かせない操作であるだけに、その使い方、すなわち不必要な粒度分布まで粉砕しないですませるプロセス面からの配慮も考えるべきであろう。従つて数 $\mu$ 以下の微粉は機械的粉砕では割に合わないの、化学反応によつて製造するようになっていく分野が多いようであるが、鉄鋼プロセスにおいても省エネとの関連において粉砕分級操作を再検討する必要はないのだろうかと思ふ。

最後にムーンライト計画の一環として研究中のヒートパイプ利用の移動層式熱交換器を図 7 に示しておく。

6. 集じん装置

鉄鋼の集じん装置も過去におけるスクラッパー (洗浄方式) から、乾式のバグフィルター (ろ過方式) あるいは電気集塵 (コロナ放電方式) に変わつてきたが、省エ

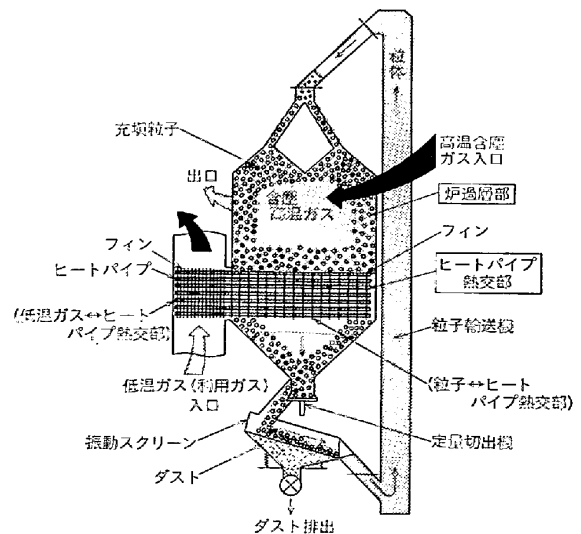


図 7 ヒートパイプ利用移動層式熱交換器 (神鋼)

エネルギーと排出規準の強化から、今後は高温高压用高性能乾式集塵が要求されることは必至である。その一つの対策として移動層集塵が注目され、我が国では日セメ・神鋼形式と川重・川鉄形式とが開発テストされたが、いまだ鉄鋼用に実用化されたとは言えないようである。移動層の開発実用試験は欧米に比して日本の鉄鋼業界の方が早かつたのであるが、ここ一年の米国での動きは活発で、国家的プロジェクトで進められる可能性もある。

電気集塵の性能向上への開発研究も米国の電力中研 (EPRI) および環境保護庁 (EPA) を中心に盛んで、いまだ決定版は出ていないが、石炭火力用の発展と共に、鉄鋼の焼結や高炉用にその技術が波及して来る可能性は大きい。

しかし集塵性能が一番すぐれているのはバグフィルターであるから、これの高温高压高温高湿下での使用を可能にする開発研究が待たれるところである。我が国のメーカーは中小企業が多く研究開発力には限度があり、国家的助成も余り期待できないので、前者同様主として米国の開発成果を導入することになるであろう。特にセラミックろ布や静電気併用のろ過方式の開発等は興味ある分野である。

最後に機械式集塵の元祖ともいべきサイクロンは集塵性能が劣るため排出規準対策としてはあきらめた状態にあるが、予備集塵や熱交換用あるいは微粉サブミクロン分級用としては興味ある形式である。特に省エネ用のガスタービン前段集塵として高温高压には十分耐えるので、その設計と運用にはもつと開発研究意欲をもつていただいてもよいように思う。すなわちサイクロンのシステムとしての設計あるいは操作条件の検討にはまだ残された課題がかなりあるのである。

## 7. 輸送プロセス

鉄鋼も見方によればプロセス工業の一つで、プロセス工業では輸送 (transportation) が大きな要素となっており、その費用は無視できない。流体の輸送はポンプとパイプあるいはブローとダクトによつて比較的容易に行われるが、流体に粉体が含まれると粉じん気流やスラリーとなり、付着、摩耗、閉塞等の問題が生じてくる。また粉体を輸送するために流体を利用して取り扱いを容易にすることも御存知のとおりで、空気輸送とかスラリー輸送とよばれている。これらは理論的にも実験的にも解決しているとは言えず、常に新しい解析があらわれ、新しい考案が製品化されるが、消えてゆくものも少なからずあり、定着した技術分野とはなっていない。特に省エネ、対摩耗を目指した低速高濃度輸送は沈積閉塞と紙一重の運転条件だけにむずかしく、各種のくふうが目白押しという状況で、今後鉄鋼の各種原料および燃料

石炭等の輸送に利用されることが期待される。

次に粉粒塊体の単相輸送はベルトコンベヤおよびバケットコンベヤに代表される長尺物が主力であろうが、その維持管理は脇役だけに日の目をみることは少ないであろう。しかしここにも粉体物性との関連で、その能率向上に検討すべき課題は残つていると思われる。

## 8. 粉体工学における国際協力について

最後に一般的なことになるが、粉体工学は近年欧米においても注目されることとなり、国際学術雑誌として Powder Technology (Elsevier 社) が出版されている一方、アメリカにおいても Fine Particle Society がミニ学会ながら活動している。そして産学協同による基礎研究の推進を目的として International Fine Particle Research Institute (IFPRI) がデュポン社エンジニアリング部の提唱によつて発足している。これは世界の一流企業が共同して粉体工学の基礎研究を最も適当な大学研究室に委託して実施中の組織で、年一回の総会において関係者が討議の上研究課題及びその運営を決めている。現在鉄鋼関係ではベツレヘム、スチールが会員となつているが、エキソン、コダック、アルコア、アマックス、シェル等 20 社以上が参加し、将来の発展が期待されている。我が国の鉄鋼業界の加入も世界的協力の立場から強く要望されているところである。

## 9. むすび

粉体工学は横割りの工学分野で、鉄鋼プロセスとも関連の深いことはわかっているが、鉄鋼の各部門において粉体工学の面からその現象を解析検討してみると、意外な興味ある知見が得られるのではなからうかと想像する次第である。しかし最近やつと形をなしてきた粉体工学という体系を鉄鋼プロセスに利用してみて、すぐ役立つことは少ないかもしれないが、それは粉体工学がまだ未熟だからであつて、長い目でこのおくれた工学を刺激していただいて、将来の発展へと導いて下さることを基幹産業の鉄鋼屋さんにてお願いして筆をおく次第である。

鉄鋼プロセスに無知な者がその関連をのべることは最初から無理なことがわかっているが、執筆を引き受けたのは浅慮の至すところでお詫びするより仕方がない。

## 文 献

- 1) 井伊谷鋼一, 増田弘昭: 粉粒体プロセスの自動化 (昭和50年) [日刊工業新聞社]
- 2) 粉粒体計測ハンドブック (日本粉体工業協会編) (昭和56年) [日刊工業新聞社]
- 3) 井伊谷鋼一, 増田弘昭: 化学工学, 37 (1973) 8, p. 782