破碎、粉碎の最近の進歩*

正 会 員 山 本 勇 次**

Recent Developments in Crushing and Grinding

Yuji YAMAMOTO

This paper gives the description of the recent trends in crushing and grinding field. As the remarkable topics, getting bigger of machinery, increasing application of automatic control and striking advances in autogenous grinding are described using some examples.

As for autogenous grinding, the excellent grinding mechanisms and the good effects on several succeeding extractive processes of the improved Aerofall mill, and some discussions on wet pebble milling are explained.

Furthermore, some essays on grinding by tumbling mill at supercritical speed or non-cataracting state, improvements in mill liners and fine grinding mills, and the main points of the theories and studies in comminution presented by F. C. Bond, R. T. Charles, and others are briefly introduced.

1. 結 言

破碎、粉碎の分野における最近のトピックスとしてはまず、機械の大型化、自働管理の普及、自生粉碎の目覚ましい進展であろう。ついで、回転ミルの超臨界速度における摩鉦、Non-Cataracting ボールミルの操業など興味ある粉碎実技と、それらに関する討論の発表であろう。また、粉碎機のライナ、粉碎媒体に関する各種の工夫、振動ミル、ジェットミルなど微粉碎機の急速な進歩が報ぜられる一方、粉碎理論、研究に関する貴重な論文が多数提出され、この面においても堅実な進歩を示していることは注目に値しよう。以下その概要を紹介する。

2. 機械の大型化^{1),2),3),4)}

発破法の進歩に伴って、採掘粗鉦は次第に大塊となってきたが、これを受け入れる粗碎機を初めとして、中碎機、摩鉦機も処理能力、運転経費などの面から、ますます大型化している。

ジョークラッシャではフランスの採石場で使われている標準型ブレーキ・ダブルトグルクラッシャが、その有効開口 99'×63'', セッティング 12'', 処理能力 600~800t/h といわれ、10t の大塊が給鉦されており、世界最大のものである。ジャイレートリクラッシャでは、Christmas 鉦山に 60'' の大型のものがあ、コーンクラッシャには、径 10' のものがある。また、ロッドミルでは、Tucson の Duvall Sulphur & Potash Co. の銅選鉦場にある 12.5'×16' のマーシイミルが最大であろう。

ボールミルは、とくに大型化の傾向が強く、セメント工業では、12'×36', 2,500HP のものがあり、鉦山関係では Climax のモリブデン工場の 13'×12' の溢流型ミル、Duvall 選鉦場の 12.5'×16' のミルなどが最大であろう。自生粉碎ミルでは、スエーデンの Vassbo 工場に 22'×7' のミルがある。また、微粉碎機として、42'' のマイクロナイザが作られ、36'' のものより 50% も容量が増している。

ミルの大型化にしたがい、運転機構にも変化が起り、従来の周辺駆動に代つて、トラニオン部における中心駆動が行われているものがある。さらに、ミルの設計上、「Slump」と呼ばれる不明の要因により、その能力が減少し、また、溢流型ミルでは、ミル径とボール径の比が 80:1 以上になると問題が起るなど、大型化にも自ら限界があるようである。

3. 自 働 管 理^{1),2),3),4)}

選鉦場の設計上の傾向としては、自働制御による管理方式の採用が顕著であるが、なかでも、破碎機、摩鉦機については、機械の設計容量を完全に維持し、過粉碎を防ぐために、自働調整方式の採用がますます普及している。自働管理による経費の節約が、すべての工場で明らかにされている。

ブレーキクラッシャ、ジャイレートクラッシャのセッティングの調整には、水圧調整装置が用いられ、Joy-Hazemag の衝撃破碎機では、運転中に衝撃板と回転軸の速度を調整できるようにして、産物粒度を制御している。摩鉦関係では、鉦液のミル内濃度の維持に、水量調整法、示差熱法などが採用され、Hardinge Co. により電気耳によるミル制御系に記録装置がつけられた。また

* 昭和35年11月10日 日本鉦業会第22回選鉦研究会において講演

** 三井金属鉦業株式会社中央研究所採鉦選鉦研究室長代理

ミルをそのマンホールに近づき易い位置に止める装置が用いられた結果、ミルの休転時間が短縮されるようになった。

4. 自 生 粉 碎

鉱石自身によつて作られるペブルによつて粉碎を行なう自生粉碎は最近特に注目され、急速に発展しているが、H. Hardinge, B. S. Crocker, その他による最近の論文は、この分野における傾向を論じている。現在4つの型のミルがある。粉碎産物が搬送気流によつて除去される乾式粉碎機として、エロフォールミルが代表であり、搬送気流を持たないで、同程度の粒度以下に粉碎出来るものとして、周辺排鉱型のハーディンジ・カスケードミルがあり、湿式ミルとして、格子排鉱型のハーディンジ・カスケードミル、日本で考案された、塔型摩砕粉碎機などがあげられる。

4.1 エロフォールミル

鉱石の粉碎に当つて、粉碎によつて生じた微細粒はなるべくすみやかにその回路から除去されることが望ましいが、従来のミルの構造は、必ずしもその点満足なものでなく、過粉碎の傾向が見られるのに対して、最新のエロフォールミルは、粉碎産物をいくつかの粒群に分けるミル内分級効果と、優れた粉碎機構と相まつて、脈石のスライム化を防ぎ、重鉱物を過粉碎せずに選択破碎、選択粉碎を行ない、後述のように、選別工程、浸出工程における採収率を高め、試薬消費量を節減するなど、顕著な効果をあげている。現在優位を保っている、ユークラッシャ、ロッドミル、ボールミルの地位を脅かすといわれ、今後の発展が期待されるものである。

エロフォールミルの粉碎機構と操業実績などについては、1960年の国際選鉱会議にカナダの D. Weston, その他により提出された論文²⁾があるが、その概要を紹介しよう。

このミルは、大径(1.5~8.8m)、短胴(0.6~2.4m)で、周速度は2.4~6.0m/secであり、普通900mm~25mmの1次破碎産物が給鉱され、1段で破碎、粉碎を行ない、4mesh~200mesh 95%まで粉碎することが出来、しかも、給鉱中の水分18%まで処理可能といわれる能率の高いミルである。空気は、分級系統の上部にセットされたファンによつて流れ、その90%がミル系統内に循環され、10%はベンチュリスクラバを通して系外に排出される。ここで超微粉を除いて清浄な空気として放出し、循環空気の微粉による飽和を防いでいる。そしてこの循環空気は、ミルとファンの運転によつて生じた熱をこの系中に保存し、水分の高い給鉱処理を可能にしている。

空気分級系統は4つの分れた段階で閉回路で行なわれ

るが、第1の分級は最も重要な段階で、ミル自身の中で行なわれ、粉碎された鉱石は、空気流によつて数秒以内にミル外に投げ出されるが、湿式ミルより、粗い粒度で単体分離を行ない得る主な理由の一つである。第2の分級は、水平分級部に行く途中の傾斜した部分で行なわれ、第3の分級は、遠心力による水平分級部で、第4の分級は、サイクロン捕集機で行なわれる。この分級系統の効率は高くスリットが200meshに作られている時は、80~90%であり、還流荷は新給鉱の1~25%である。

粉碎媒体としては、ボールを入れても、入れなくても操業出来るが、また、従来の破碎設備、コンベヤ類、ポンプ、多段粉碎設備、それらの付属設備などがなくて済み、管理も極めて容易になっている。

このミルは、摩砕エネルギーの点で、ロッドミル、ボールミルと趣を異にしている。すなわち、後2者では、動力は摩砕仕事に消費されずに、偏向荷重のために消費されるに対し、このミルでは、鉱石のない時も動力が消費されるといわれ、ミルの持つ動エネルギーの一部が、粉碎に利用されることを示している。また、最新のエロフォールミルの特徴として、Keying Action Members, (K.A.M.) と称する機構があつて、これにより、衝撃破碎、剝離摩砕の効率を下げる凝集を防いでいる。試験の結果によれば、K.A.M.の有無による差は顕著である。

エロフォールミル粉碎の主要因として、D. Westonは圧縮を伴つた衝撃破碎、回転鉱粒による剝離摩砕、粒度の異なる鉱粒の循環制御、鉱粒の移動、凝集に対する制御4段分級機構、の5項をあげている。以下試験、操業例を示す。

(1) Inertia Body を使つた破碎の効果 比重の異なる2つの Inertia Body について強靱な珪化した斑岩についての試験結果は第1表の通りである。使用したミ

第 1 表

Inertia Body	容 量 kg/h	産 物 率 % -200mesh
な し	150	55
銅 (比重: 7.6)	270	75
タングステンカーバイド (比重: 13.5)	400	80

第 2 表

産 物 粒 度 mesh	エロフォールミル系 積 算 重 量 %	ロッドミル系 積 算 重 量 %
+ 14	7.0	1.0
+ 28	38.9	22.6
+ 48	62.2	51.4
+ 100	79.4	73.5
- 100	100.0	100.0

第 3 表

	エロフォールミル系 Fe%	ロッドミル系 Fe%
給 精	24.30	24.40
尾 鉱	60.60	60.65
採 収	7.20	8.80
鉄 率	79.9	74.8

ルは、5'×2'の小型のもので、給鉱は -10'' で、ミル容積の32%を占め、Inertia Body は2.5%を占めた。

(2) 単体分離性と比重選鉱試験 Jones and Laughlin Steel Corporation の工場のエロフォールミル(径17')と、破碎機-ロッドミル系で得られた産物についての粒度分布を第2表に、試験結果を第3表に示す。

(3) 浮選への効果 南アフリカの Mangula 工場には2台の22'×7'のエロフォールミルがあるが、18''以下の銅鉱石を1日3,600t処理し-200mesh, 65%に摩鉱し、粗選して得られた粗精鉱を-325mesh, 80~90%に再摩鉱し、最終精鉱の品位50~52%Cuを得ている。湿式ボールミルの基礎試験では-200mesh, 85%で採収率92%であつたのに対し、エロフォールミルでは、-200mesh, 65%で採収率93.5%を示した。

(4) 浸出への効果 南アフリカの Dornfontein の金-ウランウム鉱についての比較試験の結果は第4表の通りで、給鉱は全く同じものであつた。

第 4 表

粉 碎 系 統	摩 鉱 % -200mesh	硫酸消費量 kg/t	U 採 収 率 %
ロッドミル-ペブルミ ル系	79.2	9.0	79.0
エロフォールミル系	60.4	5.8	88.5

(5) 分級効率 Mangula 工場では、エロフォールミルへの還流荷が20%で、この中には-200mesh, 6%しか含まず、分級効率は94%である。

以上エロフォールミルの利点をまとめると、1段で破碎粉碎が行なわれる、鋼材消費量が節減される、工賃が軽減される、鉄分の汚染が少なくなる、産物の粒度構成が改善され、爾後の選鉱成績が向上する、粉碎経費が少なくなる、投資は若干高くなるが全体として安い、などとなる。

4.2 湿式ペブルミル

B. S. Crocker はその報文⁹⁾で6 mesh から-325 mesh, 92%の微粉碎過程における湿式自生粉碎について論じているが、従来自生粉碎は硬い珪酸鉱以外には適用されないといわれているが、非常に軟かい鉱石を含む12種の鉱石について試験を行なつた結果、充分適用することが出来、鉱石の硬さの影響は主要な問題とならないといっている。又ペブルサイズについて Lake Shore 鉱山での操業の結果、適正な管理状態で摩鉱が行なわれる時には、粉碎所要動力はボール粉碎と全く同じであること、ペブルは最適粒度で使用される鋼球と同一重量で用いなければならないこと、ペブルミルとしては、低レベルの格子排鉱型が好ましく、溢流型は適当でないこと、などをあげている。最新のプラントの例として、Bancroft 地方における工場では、9'×11'の格子排鉱型ペブルミルが1次のロッドミル(6'×8')ならびに分級機と閉回

路をなして用いられている。ロッドミル給鉱は-1/2''で最終産物粒度は-200mesh 55~60%で、ロッド消費量は120g/t、2台のミルで使用されるペブルは処理鉱量の約3%に当り、1日に33tの鉱石が消費されるが、これらは2次クラッシャの前でふるい分けによつて、2~3時間で作ることができる。鉱石が新たに碎かれると直ちにペブルを供給するので、ペブルピンは大きなものは必要なく、3~6カ月の持ち手を必要とする鋼球を使う工場とは趣を異にする。ペブルミルによる粉碎工場の起業費は鋼球使用の場合に比して、僅かに高くなるが、最初のボール負荷量とか、ボール貯蔵ビンとか、数カ月の持ち手などの費用を考慮すれば大差はなくなる。硫化鉱に対するペブル粉碎については、珪酸質鉱石の場合と異なり鉱石の比重についての考慮が必要である。粉碎媒体が重ければ重い程、処理能力は大となるので十分注意しなければならない。ペブルミルは鋼球を使うミルより融通性にとみ、ボールサイズを変える場合、非常に能率的である。

R. T. Hukki は超臨界速度で自生粉碎することの利益について、注意を喚起し、種々興味ある結果を報告している。ボールミルを高速運転する場合、ボールの消費量が大きくなるという反論に対して、自生粉碎におけるペブル消費量の大きいということはむしろ利点とみられることであり、高速回転による自生粉碎は今後研究されなければならない興味ある問題であろう。ウラン鉱の酸浸出に有害な鉄の混入を避けるために、カナダでは最近従来のロッドミルの後に自生粉碎ペブルミルを採用している。North Rankin ニッケル鉱山でも、新設250t/日の銅、ニッケル選鉱場に粉碎媒体として、ふるい分けした塊鉱を使用している。

5. ミルの超臨界速度における摩鉱

R. T. Hukki は、1957年の国際選鉱会議で、「ミルの超臨界速度における摩鉱特性について」の論文¹⁰⁾を発表し、注目をひいたが、1960年の同会議では更に、パイロットプラントによる詳細な実験結果を紹介した¹¹⁾。この超臨界速度における摩鉱は、粉碎媒体とライナの間に生ずる摩擦と鉱石と粉碎媒体の速度差を有効に活用して従来の普通速度による摩鉱には見られない全く新しい摩鉱効果を生み出し、その作用は、ミル回転速度の増加とともに、極めて急速に増大する特色を有している。H. E. Rose はこのようなミル内では、給鉱が振子のように振動し強い打撃を与えるといっている。この粉碎機構を採用する場合は、給鉱、排鉱、荷重と回転速度相互間に器用な調節が行なわれなければならないし、また、ライニングについても、型式、材質についての研究が必要であり、製作に当つては、精密さが要請されるようであ

る。操業において、最も懸念されることは、ボール摩耗量の問題で速度の増加とともに急増するので、許されるならば、ペブルによる自生粉碎法の採用が、経済的であり望ましいことである。実技としては、Outokumpu の 9'×12' のペブルミルによる操業がある¹²⁾。

6. Non-Catacting ボールミルの操業

J. F. Myers の提唱による N-C ボールミル¹³⁾は、低速で運転され、従つてミル内の水面は静かに保たれ、鉱液濃度に応じた分級点で分級が行なわれるが、その特徴としてはボール装入量の少ないこと、分級作用のよいこと、したがつて過粉碎が防止され、選鉱成績が向上することなどがあげられるが、その操業例としての Tennessee Copper Co. と Cleaveland Cliff Iron Co. の 1 次ミルにより N-C 操業の有利性が実証されている¹⁴⁾。また Creighton 選鉱場¹⁵⁾のロッドミル-ボールミルにおいて、ボールミル速度を臨界速度の 74% から 60% に下げると処理能力は、16~18% 落ちるが、同時に装入ボールサイズを 1½" から 1" に変えると、損失の 11% が回復され、ボール装入量をミル容積の 40% から 25% に下げると、4% が回復され、分級を適当にすれば、さらに、4~6% 回復され、減速のための処理量低下は防ぐことが出来ると報告されている。

これに対して、H. E. Rose¹⁶⁾はボールサイズの減少は粉碎率の低下を来し、好ましくないし、分級プールを持たないミルとの比較はできない。むしろ興味のある点は、粉碎が粗粒部に集中されて、過粉碎を防いでいることにあるといっている。

7. 粉碎機のライナ、粉碎媒体^{11), 2)}

ジャイレートリクラッシュのコンケーブの材質は、マンガン鋼から、ニッケル鋼に変つている。また、衝撃破碎機の摩耗対策として、タングステンカーバイドの部品が使用されるようになり、Simplicity Eng. Co. 製のものは、シェルに若干の給鉱が固着し、シェルを包み、衝撃に耐えるように工夫されている。

ボールミルのライナとして、二重波型のものの使用が増加している。Otanmaki の工場では、ボールミルに珍らしいライニングを施している。すなわち、シェルを 3 部分に分ける鋼の肋骨材に代つて、楔状の木材を用いてその上をゴムライニングし、操業に際して、肋骨材が膨張し、全体を締めつけると同時に、その木部に、はまつた、ボールにより、シェルは保護され、寿命は永くなり重量とライナのコストは減少し、ミル容積は 15% も増加したといわれる。マイクロナイザのライナには、タングステンカーバイドが使われている。

また、自生粉碎における、粉碎媒体の自生ペブルが、

ロッド、ボールより経済的であることが、北米で実証されており、1 次摩砕用には、鋼球が用いられるが、細粉碎用には、ほとんど、ペブルを用い得ることが明らかにされている。

8. 微 粉 碎 機^{1), 17)}

最近の微粉碎機の発展は目覚ましいものがあり、振動ミル、ジェットミルなど、新しい型式のものが出現している。

振動ボールミルは長い研究の結果、実用化の段階に達し、今や 20 余の種々の工業で用いられており、Allis-Chalmers 社製振動ボールミル、Siebtechnik 社製ビブラトン、Podmore Boulton 社製パイプロエネルギーミルなどが市場に出ている。Allis-Chalmers 社の 15"×15"、15HP のものは、基礎を必要とせず、大容量を有し 1959 年末には、30"×30"、75HP のものが作られている。また A. W. Fahrenwald は最近垂直軸のまわり大きな振幅で旋回するミルについて報告している。

振動ミルは、ボールミルとして、小型で能率がよく、粉碎速度が非常に速く、微粉碎または、超微粉碎が可能である。硬い物質の粉碎に適し、高価な試料に対して、バッチ式で損失がなくてすむ。また、粉碎と同時に、化学反応が行なわれる場合に応用出来るのも特徴の一つである。

ジェットミルは、7~15atm の蒸気、または圧縮空気を数個のノズルより噴射させて、600m/sec の高速を得、この気体の衝撃力と粉体間の摩擦力で超微粉碎を行なうもので、圧縮空気を使うときは、発熱のないのが特徴である。立型の Jet-O-Mizer と、横型のマイクロナイザの 2 型式があり、アメリカ、ヨーロッパで盛んに製作、使用されている。

塔型摩砕粉碎機は、日本で考案、製作されており、砂鉄、ウラン鉱の粉碎に効果をあげている。粉碎と浸出とを同時に行なうことが出来る。

9. 粉 碎 理 論

粉碎理論については、Rittinger, Kick, Bond らの粉碎に関する法則など、エネルギーに関する理論がその大半を占めている。これは、粉碎に費されるエネルギーの量がきわめて大きいのかかわらず、その効率が、非常に低いことから容易にうなずけることである。また、破碎産物の粒度分布に関する理論も多くなっているが、これは平均粒径、粒径範囲など直接産物の性質の問題として重要であり、とくにエネルギーの消耗に伴つて、粒度分布がどのような関係で細かい方に移行して行くかは興味ある問題である。

最近粉碎をあるきまつた型の操作の繰返しと考えて、

マトリックス算法の応用による粉碎過程の解析についての理論が展開され、石炭の粉碎について実験を行ない、この計算の結果による粒度分布と測定結果とよく一致することを示している。また、粉碎動力の次元解析的¹⁸⁾、確率論的、相似則的取扱など、現象に測した工学的方法も採り入れた新しい理論が展開されている¹⁹⁾。

Rittinger, Kick, Bond らの法則は、Walker, Lewis らによれば、次の微分方程式で表わされる。

$$dE = -C \cdot dx/x^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで dE はエネルギーの微小変化、 C は定数、 dx は粒度の微小変化、 x は最初の粒度、 n は定数、(Rittinger の法則では $n=2$ 、Kick の法則では $n=1$ 、Bond の法則では $n=1.5$)、

R. T. Charles²⁰⁾ は粉碎におけるエネルギー産物粒度の関係について (1) 式と Schuhmann の粉碎産物の粒度分布に関する経験式、

$$y = 100(x/K)^\alpha \quad \dots\dots\dots (2)$$

(ここで y は粒度 x より小さいものの積算%、 α は分布率、 K は粒度係数である)と数多くの試験結果とから、粉碎の消費エネルギーは、次の経験式で示されることを見出した。

$$E = AK^{(1-\alpha)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(ここで A と n は定数、 E は物質の単位容積当りのエネルギー消費量)さらに、実験誤差内で、

$$\alpha - n + 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

の関係にあることを示し、(3) 式と (4) 式から

$$E = AK^{-n} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を導いた。

R. S. Schuhmann²¹⁾ は粉碎過程は各々独立した多くの粉碎事象から成っており、粉碎の規模は、この事象 Z により表現されることを考え、これら粉碎事象の特性は本質的に一定なものであり、粉碎進行中も不変であると仮定して、(1) 式から (5) 式を理論的に誘導し得ることを証明した。さらに、複雑な粉碎行程についても、同様な結果が得られることを説き、粉碎機構についての仮説を論じ、同様に (1) 式から (5) 式を誘導することができるとし、また、粉碎性の尺度、エネルギーと粒度の関係に検討を加えている。

Arbiter²²⁾ と U. N. Bhrany は、回転ミル中の粉碎においては、各鉱種は比較的一定の破面生成環境におかれていて、作用する力の強さは、粉碎媒体(ロッド、ボール、岩石)の質量、あるいはミルの速度、および寸法と諸要素によつて決定されるという考えを基にして研究を行ない、回転ミルにおける産物粒度、処理量および動力の関係について論じ、回転ミルにおける比較的細かい粒度との間に指数関係が成立するという実験結果に基づいて、既によく知られている指数関係型の重量-粒度関

係式およびエネルギー粒度関係式を導いた。これらの式から、粉碎効率および被粉碎性の定義が可能となり、これらの指数は鉱山によつて異なるが、所要動力量に及ぼす産物粒度変化の影響、または、その逆の影響を推定する上に必要である。被粉碎性 (1Ph 当り -200mesh 生成トン数) そのものから、処理量と産物粒度を一定とした場合の所要動力量を推定することができる。被粉碎は主として、鉱石の性質によつて変り、回転ミルの型式および寸法による変化は比較的少ないことがわかった。今後の主な問題は、いろいろの鉱物および鉱石の被粉碎性を求めて、表にまとめることと、被粉碎性と速度、寸法、ボールの大きさなどのミルの変数の間に、はつきりした関係がもし存在するならば、それらを決定することであると報告している。

F. C. Bond²³⁾ は、粉碎の 3 原則を示し、次のように説明している。第 1 の原則は、破砕、粉碎に消費されるエネルギーは粉碎産物と被粉碎物との Energy Register の差に等しい。この Energy Register は、被粉碎物が無限大の粒度から現在の粒度までに砕かれるに要したエネルギーを示している。第 2 の原則は、一つの被粉碎物が粒径 d に砕かれるに必要で且つ有効なエネルギー (kWh/t) は $1/\sqrt{d}$ に比例する。第 3 の原則は、すべての粉碎産物は瑕を有し、この瑕が被破砕力、産物粒子の数、粒径をきめるが、一定粒度の被粉碎物が、一定の粒度に砕かれるに必要なエネルギーを決定するものではない。

H. E. Rose¹⁸⁾ は、ボールミルの所要動力と比表面積を 17 の因子について、次元解析を行ない、多くの実験によつて、それに含まれるすべての函数関係を決定し、線図によつてそれを示している。17 の因子とは、 L =ミルの長さ、 D =ミルの直径、 d =ボール直径、 ρ =ボールの密度、 J =ボールの充填率、 N =回転数、 g =重力加速度、 f =摩擦係数、 e =ミル材料の摩擦係数、 b =粒径、 E =単位比表面積増加数、 σ =粉体の密度、 U =鉱液の濃度、 h =リフタの高さ、 n =リフタの数、 V =粉体の見掛容積で所要動力 P は次のように表わしている。

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{D^3 N^3 \rho} \right) = & \left(1 + \frac{0.46}{\rho} \right) \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \phi_1 \left(\frac{N_c}{N} \right) \\ & \cdot \phi_3(J) \cdot \phi_4 \left(\frac{d}{D} \right) \cdot \phi_5(n) \cdot \phi_6 \left(\frac{h}{D} \right) \cdot \phi_9 \left(\frac{b}{D} \right) \\ & \cdot \phi_{11}(V) \end{aligned}$$

以上粉碎理論について、最近の動向を述べたが、従来ややもすれば、エネルギー消費と基礎的粉碎機構の問題に偏っていた研究の方向が、マトリックス算法や、次元解析法の応用などによつて、その複雑なプロセス全体の姿をとらえようと試みられはじめたことは注目されよ

う。今後こうした方向の研究が蓄積され新しい体系化が進められることが期待されている。

10. そ の 他

まず、ロッドミルが、数段階の細粉碎に代つて使われるようになった²⁾。わが国でも最近、クラッシングロールに代つてロッドミルを閉回路で使用し、ボールミルと直列にして微粉碎をする操業例が見られ、好結果が報告²⁾されている。

また、採掘粗鉱が大塊となるに伴い、坑内輸送の合理化の見地から、坑内破碎が次第に普及してきた。

研究としては、高周波電磁感应(4~7メガサイクル/sec 25kW)を用いてタコナイトを破碎する方法が考案されている。これは磁鉄鉱を胚胎する珪岩中の場所による熱膨張の差を利用する粉砕法である。

ソ連では、各種のエレクトロ・ハイドロリッククラッシュが発表されたが、これは液体中に電氣的にスパークをとばして、その発生する数百気圧の圧力により岩石を破碎しようとする方法で、堅硬な塊鉱の小割り、あるいは光学用ガラスの破碎に利用されている^{2), 25), 26)}。

参 考 文 献

- 1) A. A. Wallach: Mill Design (Annual Review-Minerals Beneficiation) & H. J. Kaiser. Min. Eng. Feb. 1960, pp. 122.
- 2) C. L. Sollenberger & O. F. Tangel: Crushing and Grinding. (Annual Review-Minerals Beneficiation). Min. Eng. Feb. 1960, pp. 123~124.
- 3) A. A. Wallach: Mill Design (Annual Review-Minerals Beneficiation). Min. Eng. Feb. 1961, pp. 174.
- 4) F. Windolph: Crushing and Grinding (Annual Review-Minerals Beneficiation). Min. Eng. Feb. 1961, pp. 175.
- 5) D. Weston: Theoretical Concept of the Aerofall Mill with Illustration of Plant Practice, I.M.P.C., 1960.
- 6) B. Fagerberg: Grinding Tests on Magnetic Ores with Aerofall Mill and With Dry and Wet Rot Mills, I.M.P.C., 1960.
- 7) L.A. Wasp: Tests with the Aerofall Mill on a Rand. Min. Mag. June. 1956, pp. 325~334.
- 8) B. S. Crocker: Recent Development in Pebble Milling. Min. Eng. Mar. 1959, pp. 527~530.
- 9) N. Weiss: Beneficiation in 1956. Min. Eng. Feb. 1957, pp. 223~231.
- 10) R. T. Hukki: Grinding at Supercritical Speeds in Rod and Ball Mills. I.M.D.C., 1957.
- 11) R.T. Hukki: Fundamental Study of Grinding Characteristics of Tumbling Mills. I.M.P.C., 1960.
- 12) H. Tanner & T. Heikkinen: Crushing and Grinding at Outokumpu. I.M.D.C., 1957.
- 13) J. F. Myers: Non-Catacting Ball Mill Study. E.M.J. Mar. 1957, pp. 98~105.
- 14) F. M. Lewis and J. G. Goodman: Grinding Practice at the Tennessee Copper Co's Isabella Mill, Min. Eng. Nov. 1957, pp. 1253~1255.
- 15) J.F. Myers: Operation of the Creighton Mill. C.I.M. Bulletin, May, 1952.
- 16) H. E. Rose.: An Analysis of the N-C Ball Mill. C.M.M. Aug. 1958, pp. 495~504.
- 17) 松山卓哉: 粉碎技術の進歩, 化学工業, 23巻, 11号 (1959), pp. 705~709.
- 18) H.E. Rose & R. M. E. Sullivan: A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube and Rod Mills. (London, 1958)
- 19) 森芳郎: 粉碎理論の進歩, 化学工学, 23巻, 11号 (1959), pp. 701~704.
- 20) R. T. Charles: Energy-Size Reduction Relationships in Comminution. Min. Eng. Jan. 1957. pp. 80~88.
- 21) R. S. Schuhmann: Energy-Input and Size Distribution in Comminution. Min. Eng. Feb. 1960, pp. 161~164.
- 22) N. Arbiter & U. N. Bhargy: Correlation of Product Size Capacity and Power in Tumbling Mills, 1959.
- 23) F. C. Bond: Three Principles of Comminution. M.C.J. Aug. 1960, pp. 53~56.
- 24) 今泉茂樹: ロッドミル-ボールミル粉砕方式の導入について, 鉱業協会, 現担会議講演集, 昭和36年4月, pp. 43~48.
- 25) B. H. Bergstrom: The Electrohydraulic Crusher. E.M.J. Feb. 1961, pp. 134~140.
- 26) V. S. Kravchenko, A. P. Obrastsov & V. V. Ustinov: Dustless Breaking of Rocks Electrically. M.C.J May, 1961, pp. 53~55.

自動居付き取り鉱車

粉じんを抑制するため坑内で水の使用量がふえてきているので、鉱車の居付き取りの問題がますます重要となつてきている。いままでいくつかの居付き取り装置が考案されているが、それらは高価であつたり、あるいは、鉱車をごしごし洗う (scouring action) ため、その寿命を短くする傾向があつた。

ここに紹介する新しい居付き取り装置は第1図 (チブラでさかさまにしたところ) に示すように、底開き鉱車の底にチェーンを張り、中古のコンベヤベルトを1枚または2枚つかつたものである。このベルトのマッ

トは目板で内壁にねじ止めされ、交換ができるようになっていいる。この装置では動力も労力も別に必要としないという長所がある。

数年間の試用結果によれば、湿つた粉鉱や付着した微粉はこのフレキシブルなベルトのマットから、うまくはがれ落ちる。またマットの下に入つた居付きも開いた底から落ちる。この装置をつける鉱車はサンドや廃石の運搬にも役立つことがわかつた。鉱車の底の損耗は、悪条件下で

第1図 自動居付き取り鉱車：チブラでさかさまにしたところ

約3年使用してもほとんどなかつたという。

G. Alberts. Bergfreiheit, Vol. 25, No. 8, 271; selfcleaning mine cars, Colliery Engineering, June (1961), 284. より

(鈴木真夫)