

## 技術トピックス



## 最近の粉砕技術における話題

八 嶋 三 郎\*

## The Latest Technical Topics in Grinding Operation

Saburo YASHIMA

## 1. はじめに

粉体を生成する方法には、固相から作る方法、液相から作る方法、気相から作る方法があるが、粉砕という単位操作は第1番目に述べた固相から作る方法である。すなわち粉砕は固体に対し力を加えてこれを破壊し、粉体とする方法であり、鉱業、化学工業、窯業など、各種の工業分野において広く用いられている機械的単位操作の1つである。

この粉砕という操作は、その砕成物の大きさによつて、粗砕、中砕、粉砕、微粉砕とおおまかに分けられているが、そのほかに十数 $\mu$ のオーダーの砕成物を得ることを目的とするものを微粉砕、ミクロンオーダーのものに粉砕するものを超微粉砕とさらに分類する場合もある<sup>1)</sup>。

いうまでもなく粉砕の目的は固体の表面積を大きくすること、大きい岩石を破壊して有用成分を分離・回収すること、粉体の混合効果を良くすることなどにあるが、微粉砕ないし超微粉砕は、セメント、粘土、化粧品などの工業分野においては特に重要な単位操作と考えられている。そこで本稿では最近特に注目されている微粉砕ないし超微粉砕について最も重要な問題点を抽出し、これに関連して著者らが現在取り組んでいる超微粉砕と粉砕効率改善についての新しい知見を織り混ぜて述べ、その後、代表的な微粉砕機について例をあげてその特徴等を述べることにする。

## 2. 粉 砕 限 界

微粉砕機ないし超微粉砕機により粉砕原料を粉砕する場合、粉砕時間を長くとり、時間をかけて粉砕しても決して際限なく細かい粉体を生成できるわけではない。もちろん、理想的には粒子に加えるエネルギーを限りなく増大していけば粒子も限りなく小さくなつていくはずであるが、粉砕のように機械的な力によつて粒子に加えられるエネルギーにはおのずと限度があり、現実には、ある程度粒子は細かくなると、それ以上粉砕は進行しな

くなつてくる。この限界を粉砕限界と称するが、このときの固体の凝集エネルギーは固体の破壊に伴い表面エネルギーへと転換する。粉砕が進行して砕成物の表面積が増大するに伴い表面エネルギーは増大し、その値が凝集エネルギーと比較しうるようになると、それ以上粉砕は進行しなくなり粉砕限界に達するものと考えられる。粉砕原料に加えられたエネルギーは砕成物の内部に貯えられ、これが固体の構造不整や結晶転位等を起こさせ、その結果としてメカノケミカルな効果があらわれるようになつてくる<sup>2)</sup>。

一般に、粉砕限界粒径は  $1\sim 0.1\mu$  付近にあるとされており、これ以上細かい粒子を生成させることは困難である<sup>3)</sup>。しかし最近、著者とそのグループが実施した研究では、ボールミルによる長時間粉砕と摩砕との2つの方法によつて、それぞれごく微量ではあるが  $0.01\sim 0.05\mu$  の粉体を生成させることが可能であるという結果をえている<sup>4)5)</sup>。

## 3. 粉 砕 助 剤

先に述べたように微粉砕を継続してゆくと粉砕速度が低下し、ついには粉砕は進行しなくなる。このとき、 $0.1\%$  以下の微量のある種の物質を加えると粉砕効率や製品性状の改善ならびに微粉生成量の増大をはかることができる場合がある。たとえば、石灰石の粉砕には RDA (アリアルアルキルスルホン酸) とか、セメントクリンカーには TDA (トリエタノールアミン塩とリグニンスルホン酸のカルシウム塩の混合物)、鉄鉱石の粉砕にイソアミルアルコール、グラファイトの粉砕にはアンモニウム塩、顔料の粉砕には極性・非極性の物質などが工業的に有名である。このように粉砕速度を増加させる目的で用いられる物質を粉砕助剤という。その作用機構についての考え方はいろいろあり、これを要約すると(a) 助剤分子の固体への吸着により、その分だけ表面エネルギーが減少し、粉砕される際のき裂の進行を促進させるという説や (b) 助剤分子が固体粒子のき裂の中に入り

昭和 57 年 2 月 26 日受付 (Received Feb. 26, 1982) (依頼技術トピックス)

\* 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

込んだ結果のクサビ作用による説、あるいは(c)微粉体の付着を防止し、粉砕機内の粒子群の分散をよくする結果、粉砕が進行しやすくなるなどの説がある<sup>6)7)</sup>が、現在のところ万人の納得できる説明はない。

#### 4. 微粉砕機のエネルギー効率

微粉砕機のエネルギー効率、すなわち微粉砕機のモーター入力エネルギーのうちどれだけ理想粉砕仕事に費やされたかという値は、もしも理想粉砕仕事を固体の表面エネルギーと粉砕によつて生成した表面積の積としてあらわすと、ANSELM らが試算した表1に示す結果のように理想粉砕仕事はわずか0.6%という低い値になる。MITTAG のデータによれば、この値はわずか0.3%にすぎない。ANSELM らは表面エネルギーとして物理的測定によつて得られた値を用いて表1の理想粉砕仕事を求めているが、この表面エネルギーの値は表2に示すように実際に多くの研究者らによつて機械的な方法によつて測定されている。この場合の固体の表面エネルギーは物理的測定法による表面エネルギーとは著しく異なり、 $10^2 \sim 10^3 \text{ erg/cm}^2$  のオーダーで上回るのが普通である。したがつて、もしも表1に示した計算において、機械的な方法による表面エネルギーを用いれば理想粉砕仕事は0.6%より大となつてくる。このように固体の表面エネルギーの物理的測定値と、粉砕などの機械的な方法による

測定値との差が大きいことは広く認められていることであるが、それは機械的方法による測定では粉砕操作において不可避な発熱量の測定は困難であり、また、後述するように粉砕機の入力エネルギーの一部は砕料の局部的破壊によつて生じた内部表面積生成のために費やされるが、この内部表面積の測定を行うことも困難であるためと考えられている。なお、最近著者らが行つた実験では粉砕法によつて求められる固体の表面エネルギーは固体に作用する力の作用速度によつて変化し、その値は作用速度が大なるほど小さくなるが、特に固体の固有周期と同程度の荷重時間で破砕させる場合に最も小さくなり、物理的測定より得られる固体の表面エネルギーに近づくことを実験的に確かめている<sup>9)</sup>。このことは固体の固有周期と同程度の非常に短い時間で固体を破砕させる場合に最も粉砕効率が良好となることを意味するものであり、同時に、衝撃粉砕機の粉砕効率が良好であることに對して、明解な説明を与えたものとして注目される。ただ、この場合の粉砕効率は固体の破砕に要したエネルギーを基準にしたものであり、粉砕機の動力をも含めた粉砕効率ではない。

ともあれ、微粉砕機のエネルギー効率はきわめて低いものであることは間違いないところであり、通常1%以下と考えられている。このように低いエネルギー効率のもとで微粉砕機は運転されているわけであるが、最近、この微粉砕機の入力エネルギーの一部が前述したように砕成物粒子内に貯えられ、その粒子の結晶構造の不整や転位等を起こさせ、その結果としてメカノケミカルな効果を誘発させるという考え方が広まつてきている<sup>9)</sup>。著者らはこの点に關し、微粉砕機の入力エネルギーの一部がメカノケミカルな効果として消費されるという考え方のほかに、実際の破断面とはなりえない砕成物内部の表面の生成に費やされているのではないかと考えている。すなわち、最近、岩石力学の分野で研究が行われているように、粉砕原料に外力が加えられると原料粒子内に存在する数多くの構造的欠陥部分に局部的な破壊が生じ、その際、粒子内部に貯えられたひずみエネルギーは放出されて、いわゆるアコースティックエミッションとして観測される。このようにして生じた粒子内部の多数の局部的破壊のうち最も多い部分から破断面が生じて破壊が進行するのが本来の姿であり、したがつて微粉砕機の入力エネルギーの一部は粉砕されて生ずる個々の粒子の内部に、直接新生表面とはならない局部的破壊によつて生じた数多くの、いわば内部表面ともいふべき表面積の生成に消費されているものと考察している<sup>10)</sup>。このことから、前述した機械的方法による固体の表面エネルギーの測定値と物理的な測定法から求められるそれとの差は内部表面を考慮することによつて  $10^2 \sim 10^3 \text{ erg/cm}^2$  のオーダーよりも小さくなつてくるものと考えられる。

表1 ボールミルでの消費仕事量

消費仕事の種類	仕事量 (kWh)	全体に対する割合 (%)
軸受・歯車などによる純粋に機械的な損失	57	12.3
砕生物の持逃げ熱量	222	47.6
ミル胴からの輻射熱量	30	6.4
空気持逃げ熱量	144	31.0
その他の雑損失 (粉砕媒体の摩擦 5 kWh, 粉砕媒体の加熱 2 kWh, その他音, 振動, 水分蒸発)	10	2.1
理想粉砕仕事	3	0.6
合計	466	100

表2 各種粉砕原量の表面エネルギー

砕料	物理的測定値 [erg/cm <sup>2</sup> ]	機械的測定値 [erg/cm <sup>2</sup> ]
ケイ砂 500~2000 900(KUZNETSOV の半理論値*)		56 000 GROSS ら <sup>a)</sup>
		174 000 PIRET ら <sup>a)</sup>
		107 000 SCHELLINGER <sup>c)</sup>
		3 700 ZELENY-PIRET <sup>b)</sup>
		$1.62 \pm 3.10 (\times 10^4)$ JIMBOD <sup>d)</sup>
石灰石 90(KUZNETSOV の半理論値*)		13 000 GROSS <sup>a)</sup>
		92 000 PIRET ら <sup>a)</sup>
		32 400 SCHELLINGER <sup>c)</sup>
石炭	—	約 10 000 HIORON ら <sup>e)</sup>

注)\* 半理論値は機械的方法で表面エネルギーの比較値を求め、それから表面エネルギー既知の物質を基準として推定値を導いたもの。a) は重錘落下法、b) は振りハンマー法、c) はボールミル法、d) は振動ボールミル法、e) は開裂法と曲げ破断法で、それぞれ求めたもの。

5. 各種微粉碎機<sup>11)</sup>

以上、微粉碎に関して最も重要な問題点を抽出して述べた。つぎに現在、おもに使用されている各種微粉碎機について例をあげてその特徴等を述べることにする。

5.1 衝撃粉碎機

衝撃力を利用して瞬間的な応力により粉碎原料を砕くもので、粗砕から超微粉碎に至るまで広くこの原理が利用されている。後述するボールミルはボールと粒子との衝突による打撃を破砕機構に利用したものであり、この場合の衝突速度は数 m/s 程度であるが、衝撃粉碎機では少なくとも 20~100 m/s という速度となる。

図1には反発式粉碎機的一种であるインペラブレカを示した。この粉碎機は従来の粗砕機に比べ、粉碎比が著しく大きく、最近漸次その利用がひろがりつつあり、大きい岩石から一挙に細かい粒子に砕きうるものである。原料はローターに取り付けられた打撃板により打撃加速され、衝突板に衝突してはね返る。さらに他の加速された砕料とはね返った砕料とが空間内で衝突し粉碎が進行するのである。この種の粉碎機にはローター周速が 100 m/s 近くでミル内を強制通風にし、内部分級を可能にした超微粉碎機も開発されている。スーパーミクロンミル、マイクロクロマトなどはこれに属する。そのほかに、摩耗に対しては弱い、操作が簡単のために軟らかいものに対しては汎用性があり、比較的小規模な粉碎に広く用いられているアトマイザーや自由粉碎機などがある。

衝撃粉碎機の原理や設計指針などに関する基礎研究は機械が利用されている割には少なかったが、最近 RUMPF<sup>12)</sup> により興味ある研究が発表されている。

5.2 ボールミル

広義には粉碎媒体として鋼球、磁性ボール、ロッド、ペブル、玉石などを用いた広範囲な粉碎機を指すが、狭義には円筒状の容器内にボールをそう入し、回転運動に

よつてボールを持ち上げ、落下させ、ボールの衝撃あるいは部分的には摩砕作用によつて粉碎を進める粉碎機を指す。このボールミルは湿式にも乾式にも、また、回分式にも連続式にも用いられ、実操業においては設備費は若干高いが、運転費ならびに維持、管理費が安いのが最大の特長である。回分式は普通、ミル径  $D$  とミル長さ  $L$  との比 ( $L/D$ ) が 1 よりあまり大きくならないようにするが、連続式では ( $L/D$ ) はかなり大きい値をとり、単室の場合もあるが、図2に示したコンパートメントミルのようにミル中を軸方向に区切つた多室ミルの構造をとることが多い。この場合、粉碎を効果的に行わせるため、入口側の室に大きいボールを入れ、出口側にいくにしたがつて小さいボールをそう入するようである。また、ミル内において径の異なるボールを合理的に分布させるために、図3に示したようなミル内の形状が円錐状になつたコニカルボールミルなど、ライナーの形状がくふうされたボールミルもある。なお、連続式の場合の原料粒子は回転軸中心から供給され、出口の目皿板あるいは流板を通つて排出されるようになっていいる。そのほかに、最近、粉碎されるべき物質と同一の物質を粉碎媒体として用いる自生粉碎が注目されている。この粉碎法の特徴は大量の鉱石を経済的に処理し得ることであり、すでに金鉱石、鉄鉱石、銅、鉛の硫化鉱石、石灰石、砂岩、アスベストなど多くの鉱石や岩石の粉碎に適用されている。図4には自生粉碎機として有名なエアロ

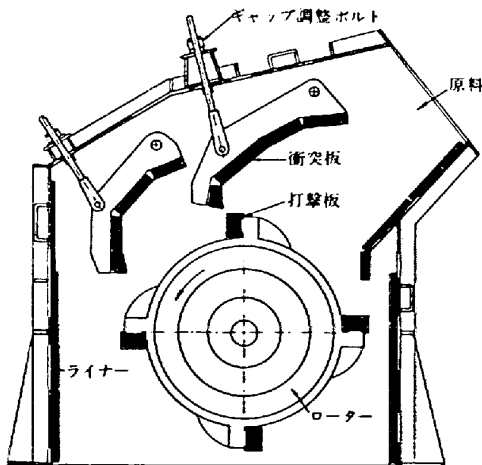
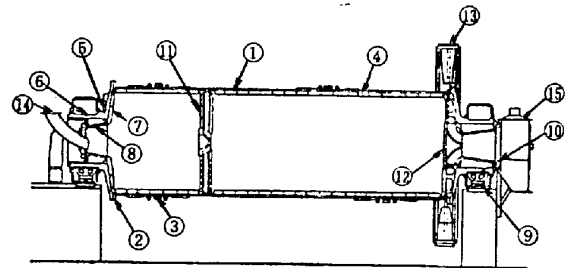


図1 インペラブレカ



①胴体、②胴体フランジ、③マンホール、④胴体裏板⑤側蓋、⑥中空軸⑦側蓋裏板、⑧中空軸裏板、⑨軸受、⑩軸受金、⑪中仕切、⑫出口仕切、大歯車⑬入口とい⑭出口ケーシング

図2 コンパートメントミル

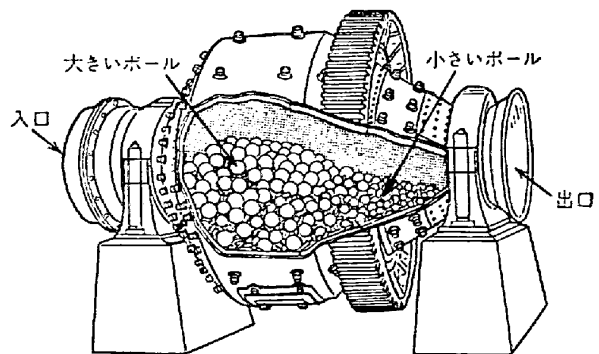


図3 コニカルボールミル

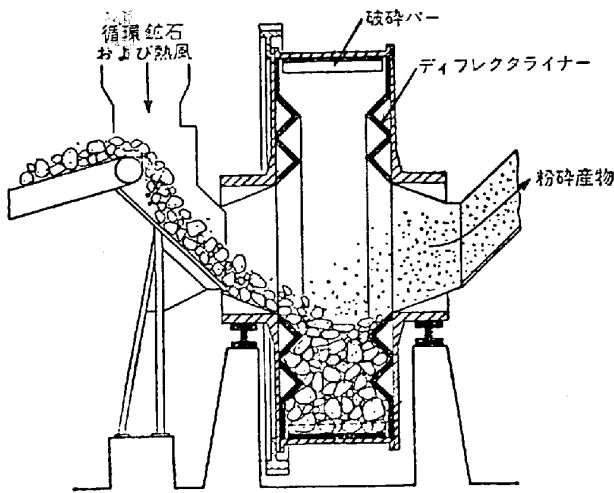


図4 エアロボールミル

ボールミルを示した。

さて、ボールミルの操作上重要なものの1つは、適切なボールを適当量そう入することである。一般にボールそう入量はミル内容積に対する見かけの容量で表示することが多いが、この値は回分式では通常30~40%、連続式では30%より小さいことが多い。また、ボールの直径は普通25~150mmで、新しくボールミルの使用を開始するときには、特に、大小のボールを混ぜてそう入する必要があるが、連続運転に入れば、時を定めて1または2種類の大きさのボールを一定量ずつ補給してゆき、ミル内のボールの摩耗による大きさの分布の変動がないように注意することが肝要である。砕料の大きさと粉砕媒体の大きさとの関係ならびに粉砕媒体のサイズ分布についてはBOND<sup>13)</sup>が提案した式がある。

つぎに、回転速度は臨界回転速度  $N_c$  とよばれる遠心力と重力とがつり合つてミル内容物がミルと一緒に回転する値の大体60~80%で運転するのが普通である。臨界回転速度は理論的に  $N_c = 42.3/\sqrt{D}$  から求められ、一般に、最適回転速度  $N$  は  $N = 32/\sqrt{D}$  として与えられる。しかし粘性のある湿式微粉砕の場合の回転速度は  $N_c$  の65~70%とし、粘性の低い湿式微粉砕あるいは砕料の大きさが10mmぐらいまでの粗粒子の乾式微粉砕の場合の回転速度は  $N_c$  の70~75%、パツフルのないミルの場合には、<sup>14)</sup> これらの値に5%加算した値を用いてミル回転速度を決めるのが良いとされている。ただし、自生粉砕の場合の回転速度は通常の臨界回転速度の75~95% (湿式粉砕においては75~85%、乾式粉砕では85~95%) で運転することが多い。もつとも、ミルのライニングの形によつてすべりの程度が違うので、 $N_c$  を求める理論式は必ずしも臨界値を示すとは限らない。実際に、自生粉砕の場合に  $N_c$  を越えた回転速度で運転して好結果を得たという報告もある<sup>14)</sup>。

砕料のミル内そう入量については、粉砕媒体の空間をちょうど埋めるくらいが最も良いというROSE<sup>15)</sup>の報告

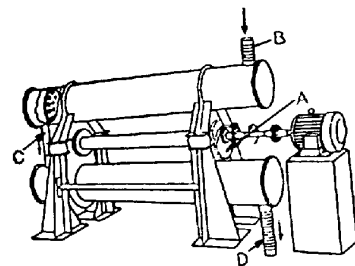
がある。

### 5.3 振動ボールミル

振動ボールミルは円筒あるいはトラフ状の容器中にボールを入れ、これをスプリングで支え、偏心重量体を取り付けた軸を1200~1500rpmで回転させてボールと砕料との間に複雑な強制振動による接触を与え、強裂な力で粉砕させるものである。この種の粉砕機は著しく粉砕速度が大きいことや粉砕効果が良いという特長を有するため、微粉砕機あるいは超微粉砕機として最近、特に注目をあびている粉砕機の1つである。この粉砕機の構造は基本的には前述したボールミルと同じであるが、ミル本体が回転しないため、真空、冷却、加熱下での粉砕も可能であり、そのほかに触媒活性の増大などの摩擦化学的な応用に使用されることもある。ただ、安定した振動を得るために振動源の中心とミルの重心とを一致させる必要があり、そのために構造がかなり制約され、一般にはあまり大型の粉砕機はないようである。図5には最も典型的な円振動型のフンボルトの連続式ミルを示した。

### 5.4 ジェット粉砕機

この粉砕機は流体エネルギーを利用して粒子を粉砕するもので、流体エネルギーミル、またはジェットミルといわれている。すなわち、ノズルから高圧(7気圧程度)空気または蒸気を噴出して音速近くのジェット気流をつくり、この中に砕料粒子を吹きこませ、これを加速させ、粒子同士または粒子をミル壁に衝突させて粉砕を行わせる粉砕機である。この種の粉砕機はミル内での発熱現象が伴わないことから、特殊な材料、たとえば薬品、樹脂、鉄鉱石、顔料などの粉砕に広く用いられており、また、平均粒度が $\mu$ という細かい粉体を得ることも可能であるという特徴を有する。さらにジェット粉砕機は大型になるほど粒子同士の衝突回数が増大し、同時に、粒子の加速に十分な距離を与えるために粉砕効率が著しく良くなるという長所を有する。しかし、動力消費が大きく、設備費ならびに運転経費が高いのが欠点であり、また、粉体が気流中に吸い込まれることによる衝撃が粉砕の主要因であるため、粒子の逃げの現象が起こり、比較的はつきりした粉砕限界粒径があるのが特徴である。



A: 振動重量体, B: 供給口, C: 上下のミルの連絡筒, D: 排出口

図5 連続式振動ボールミル

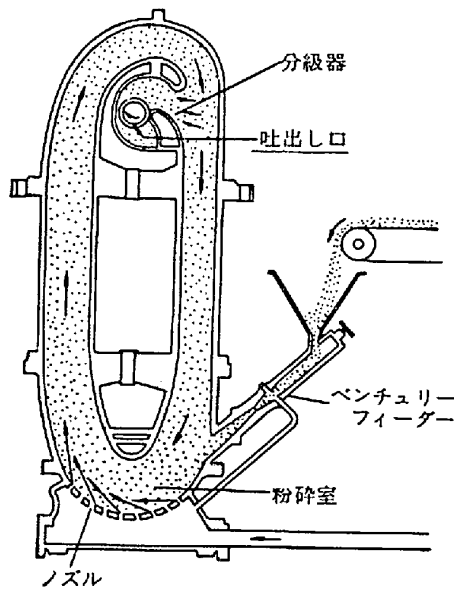


図 6 ジェットマイザー

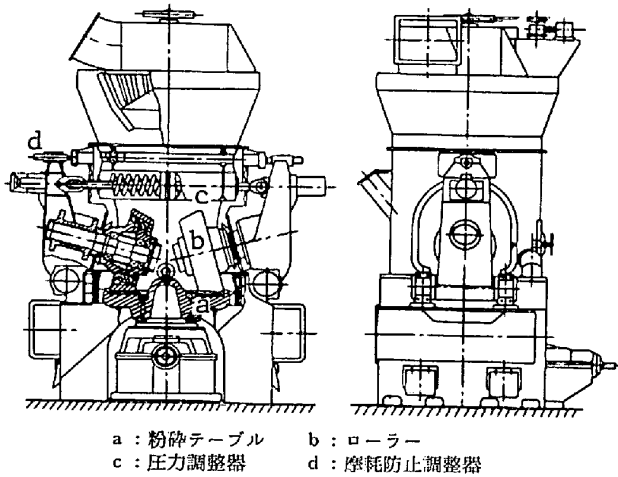


図 7 ロッシェミル

図 6 にはジェット粉砕機の代表的なものとしてジェットマイザーを示したが、そのほかにマイクロナイザー、マジックミルも有名である。

### 5.5 ローラミル

この種の粉砕機はローラーあるいはボールが回転運動に伴う遠心力や垂直荷重によつてミル壁の被粉砕物を圧縮、せん断破壊しながら転がる機構を有し、一般には気流を下方より吸い込み、風篩作用を行わせ、さらにミル上部で分級機による分級を行わせる分級機内蔵のものをいう。ローラミルの代表的なものとして、図 7 には最近、特に注目されているロッシェミルを示した。この粉砕機は動力費がきわめて少なく、保守管理が容易であるほか、製品粒度のコントロールと大量処理が可能であるなど、すぐれた特長を有し、おもにセメント原料、石炭、コークス、石灰石およびドロマイト、リン鉱石、れんが原料などの粉砕に広く用いられている。同種の粉砕

機としては遠心リングローラーミル、ポウルミル、ボールペアリングミルなど、多様な形式を含んだものがあり、中硬質の碎料の粉砕に用いられている。

## 6. 各種碎料と粉砕機の適性

現在用いられている粉砕機と各種碎料の関係を示す松山<sup>16)</sup>の分類を表 3 に示した。この表は碎料の物理的性質、たとえば硬さ、摩耗性、粘結性、耐熱性や力学的性質などの点を考慮し、経済的かつ安全円滑な操作を行うる機種を選択するためのおおまかな目安を示したものである。また、粉砕をある程度効果的に行うために、従来の豊富な経験から得られた粉砕事例を集大成した調査表<sup>17)18)</sup>もある。

## 7. む す び

粉砕は現在、鉱物処理工学、粉体工学とその工業に関連する各種工業において広く用いられている単位操作の一つであるが、その設計と操作においてはいまだに未解明な問題を数多くかかえ、経験に頼ることが多いのが現状である。本稿では粉砕操作についての現状を理解するにはまだまだ不十分ではあるが、とにかく最近の粉砕の研究の中で特に注目をあびている微粉砕ないしは超微粉砕の問題を取り上げ、最も重要な問題点と各種微粉砕機とその特徴に重点をおいて述べてみた。

なお、本稿において各種微粉砕機の機種については文献にも記したように主として化学工学便覧より引用させていただいた。

## 文 献

- 1) 神保元二, 八嶋三郎, 小沼栄一: 化学工学便覧 (17. 粉砕) (化学工学協会編) (1978)
- 2) 井伊谷鋼一, 荒川正文, 神保元二, 三輪茂雄: 粉体の物性と工学 (1967), p. 17 [化学同人]
- 3) 藤田重文, 東畑平一郎: 化学工学 II, (1963), p. 54 [東京化学同人]
- 4) 諸橋昭一, 加藤 忍, 沢島 恭, 八嶋三郎: 粉体工学研究会誌, 10 (1973), p. 316
- 5) 佐野 茂: 一関工業高等専門学校, 化学工学科卒業論文, 未発表 (1979)
- 6) 田中達夫: 粉体プロセス入門 (1968), p. 129 [工学図書]
- 7) 前出 1), p. 1300
- 8) 八嶋三郎, 斉藤文良, 橋本 等: 化学工学英文誌投稿中
- 9) 神保元二: 工業化学雑誌, 71 (1968), p. 1309
- 10) 大塚尚寛: 東北大学学位論文 (工学) (1980) (未発表)
- 11) 前出 1), p. 1279
- 12) H. RUMPF: Chem. Ing. Tech., 31 (1959), p. 323
- 13) F. C. BOND: Brit. Chem. Eng., 6(1961), p. 378
- 14) R. T. HUKKI: Min. Eng., 10 (1958), p. 581
- 15) H. E. ROSE: Trans. Inst. Chem. Eng. (London), 35 (1957), p. 87
- 16) 松山卓蔵: 化学機械技術, 14 (1962), p. 69

表3 粉砕機の機種選定

機種選定 フアクター	主要物理 化学性	粉砕材料名		粉砕製品粒度と適当粉砕機種 (粉砕粒度はおよそ+5~+95%ふるい下を示す)											
				粗 碎		中 碎		微粉砕および超微粉砕							
				メッシュ→4		20		100 200 325 1,250 2,000							
I 粉砕材料モース硬度	硬度	標準物質	その他	粒径+100mm	10mm	1mm	100μ	10μ	1μ						
	軟質材料	1	滑石	粘土黒鉛フィルター ケーキ乾燥物	ハンマークラッシャー	ジョークラッシャー	ジャイレトリークラッシャー	エッジランナー	ロールクラッシャー	ハンマークラッシャー	ディスクブレンダー	バルベライザー	マイクロンミル	ジェットミル	
		2 3 4	石コウ 方解石 ホタル石	岩塩無煙炭, イオウ 軟質石灰石, セメント 石灰石, マグネサイト 軟質リン鉱石	ハンマークラッシャー	ジョークラッシャー	ジャイレトリークラッシャー	エッジランナー	ロールクラッシャー	ハンマークラッシャー	ディスクブレンダー	バルベライザー	マイクロンミル	ジェットミル	
	硬質材料	5	リン灰石	硬質石灰石, 石綿 クロム鉄鉱							マイクロンミル	湿式 (閉回路分)			
		6	長石	イルメナイト, 硫化鉄							スタンプミル	乾式 (閉回路)			
		7	水晶	砂岩, 花コウ岩							ボールミル				
		8	黄玉	緑柱石, ジルコンサンド							ボールミル				
		9	コランダム	アラウンド							ボールミル				
		10	金剛石								リングロールミル				
II 弱熱粘着性 材着性	(融点) 40°C ~ 60°C ~ 110°C	尿素樹脂 無水マレイン酸 ベニシリン BHC原末 ゴム老化防止剤 プラスチック類 DDT原末		バルベライザー	ナイフハンマーミル	ハンマーミル	ハンマーミル			砥製ポットミル	バルベライザー	マイクロンミル	マイクロンミル	バルベライザー	ジェットミル
III 分級 粉砕分離	ふるい分け 重力風篩 遠心風篩 粉砕分離	機械的ふるい分け法 粗塊, 粗粒の除去 微粉および超微粉分級 原料中の異物除去		トロンメル, 振動ふるい	風篩	旋動ふるい	スーパーマイクロンミル (粉砕分離)			エアセパレーター		マイクロンセパレーター			
IV 脆性材	脆性大塊 の破砕	氷, 松脂塊 塩化マグネシウム塊 フィルターケーキ乾燥物		アイスクラッシャー											
V または軟性 かつ 低融点 耐衝撃性 かつ 低融点 脆性材	耐衝撃性 かつ 低融点	ポリビニルアルコール 軟質塩化ビニル ポリエチレンシート ナイロン塊 硬質または軟質ゴム		ナイフバルベライザー	ナイフハンマーミル	カッティングミル	コーンバルベライザー	ハンマーミル				コーンバルベライザー	ハンマーミル	マイクロンミル (G型)	
VI 繊維材	解粉 砕粉	アルカリセルロース 甘草, わら メチルセルロース ナイロン繊維		コーンバルベライザー (解粉)							ナイフバルベライザー (中碎)	ナイフバルベライザー (中碎)			
VII 含水材	水分 15~50%	フィルターケーキ または遠心脱水処理物		ハンマーミル						バルベライザー		マイクロンミル			
VIII 含油材	粉砕 油状化	落花生 綿実 ごま									コーンバルベライザー	バルベライザー			
IX 吸湿材	吸湿 潮解性	塩化カルシウム 粗製ブドウ糖								ハンマーミル	バルベライザー	せん断ロールミル			
X 爆引 発火性 材	微粉域 に発火容易	ニトロセルロース イオウ Mg, Al, Ti		バルベライザー (湿式粉砕)							バルベライザー	マイクロンミル	カッティングミル	バルベライザー	

17) 井伊谷鋼一, 三輪茂雄: 最近粉粒体プロセス技術集成, 基礎技術編 (1974), p. 35 [産業技術センター]

18) 奥田 聡, 崔 堯 植: 粉体工学会誌, 17 (1980), p. 383