サイクロン浮選に関する研究*

論文・報告

正 会 員 今 泉 常 正**

正 会 員 井 上 外 志 雄***

正 会 員 野 中 道 郎****

Study of Cyclone Flotation

Tsunemasa IMAIZUMI, Toshio INOUE, and Michio NONAKA

The cyclone flotation method as a variety of pressure flotation, can be distinguished in various respects from the conventional flotation methods by mechanical flotation machines. In the course of preliminary experiments and examinations it was found that the air-lift cyclone flotation system comprising an aerator and a separating cyclone connected by an air-lift pipe has following advantages:

- 1) increased rate of aeration and sufficient dispersion of air bubbles by using the isolated aerator,
- 2) rapid and entire separation as well as sharp cutting of froth in the isolated separating cyclone,
- 3) increased gas precipitation effect,
- 4) simple structure with no mechanically moving parts,
- 5) low power requirement,
- 6) ease of constructing complex flotation circuit by common air compressor system.

The authors have made further experiments to develop the aerator of cyclone type in which centrifugal shearing force is utilized effectively.

Test results indicate that flotation rates can be radically increased with moderate centrifugal force in the separating cyclone.

1. 緒 言

現在、鉱業において使用されている浮選機の大部分は、機械攪拌式のものであるが、その性能は空気混和率を向上させることにより、より高い浮選速度、より大きな処理能力をもたせるとい方向へと次第に発展している。しかし一方、これらの機械攪拌式浮選機に対し、“機械的攪拌装置をもたない浮選機”の発達も見逃すわけにはいかない。元来このタイプの浮選機の歴史はかなり古く、種々の機種が考案されており、いわゆるSW型浮選機などは、かつてわが国においても広く用いられていたものであるが、近年においてはその命脈も失なわれたかの感があつた。

ところが最近、ソ連においてエジェクタ浮選機およびエアリフト浮選機が開発され、米国ではCyclo-Cellが漸次実用化される一方、ドイツにおいてもサイクロン浮選機の研究が見られるなど、この種の新型式の浮選機に関する報告や特許の発表が注目されるようになった。

エジェクタ浮選機は1958年ソ連において、主として石

炭を対象として開発されたものであるが、その現場試験に関する一連の報告¹⁾によると、従来の機械攪拌式浮選機に比して2~3倍の処理能力をもつといわれている。1960年には銅鉱石を対象としたこのエジェクタ浮選機と機械攪拌式浮選機（メハノープル型）のパイロット比較試験の結果²⁾が発表され、エジェクタ浮選機1区の銅実収率はメハノープル7番型浮選機の最初の2区の実収率よりかなり高いこと、精鉱の銅品位は1.5~1.6倍であること、気体析出の効果により微粒側における選択性がすぐれていること等が見出された。

またエアリフト浮選機も1958年に開発された³⁾。この浮選機はヘッドタンクから流下するパルプを加圧状態で空気混和し、エアリフト管を上昇させたのち、特殊な構造のセルに送入し、ここで弱い遠心力のもとでフロスの分離を行なうのである。エアレータとしては簡単な構造の多孔円筒を利用しており、フィードパイプの長さは20m、エアリフトパイプの長さは27mと報告されている。エアリフト管中をパルプが上昇する間に、減圧のため気体が析出する現象がこのエアリフト浮選機の一つの特色であるといわれる^{4),5)}。

米国では1961年パルプの旋回流によつて空気を混和し、SW式浮選機と似たセルの中で浮選を行なうCyclo-Cellが開発され、Heyl-and-Patterson社により市販さ

* 昭和42年2月27日受理

昭和40年度鉱業会春季大会、昭和41年度春季大会にて一部発表

** 工博 東京大学工学部教授 資源開発工学科

*** 工博 東京大学工学部助教授 資源開発工学科

**** 東京大学工学部助手 資源開発工学科

れた。その報告の一例⁹⁾によると、単位処理量あたりの所要動力は従来の機械攪拌式浮選機の約60%といわれる。また1964年、Bucklen-Smith⁷⁾によりソ連のエアリフト浮選機と同様なエアリフト式の浮選機についても試験研究が行なわれた。石炭を対象としたその浮選結果によると、従来の機械攪拌式浮選機に比して、歩留りが高いこと、微粒側で分離の効率が向上すること、フロスの濃度が高いこと等の特長が認められたという。

ドイツでは1963年 Heide⁸⁾ がサイクロン浮選に関する実験的研究の報告を発表した。これはフロスの分離装置として特殊構造のサイクロンを利用したもので、空気はこのサイクロンの流入口に設けられたエジェクタから導入されるようになってい。このほかドイツ特許にも類似のサイクロン式浮選機の考案が2,3見受けられる^{9),10)}。そのほか機械的攪拌装置をもたない浮選機に関する特許¹¹⁾や一般的な研究が数多く発表されている¹²⁻¹⁷⁾。

以上のような浮選法は加圧浮選法 (pressure flotation) と総称しうるもので¹⁸⁾、これらは機械的構造を工夫することによりつぎのような特色を発揮させることが可能である。

- 1) 気体析出 (gas precipitation) の効果を積極的に利用しうる。
- 2) 空気混和率を一段と高めうる。
- 3) 空気混和室をフロス分離室から切り離すことによつて、気泡を充分に分散させ、しかも分離ゾーンを静かに保つという両立困難な条件を同時に満足させることができる。
- 4) 浮選速度を大幅に増大させることができる。
- 5) 所要動力を減少しうる。
- 6) 機械的可動部分がないため構造を簡単にしうる。

著者らは以上の特色を充分に生かすことを主眼とし、特に 4) の特色を最大限に発揮させるため、“空気混和したパルプから鉱化気泡を分離する装置としてサイクロンを応用する”という基本的構想のもとに実験的研究を行なつた。

このような浮選方式を“サイクロン浮選”と呼ぶことにする。サイクロン浮選においては、フロスはサイクロンのオーバフローとして、テーリングはアンダフローとして得られるわけである。フロス分離用サイクロンの駆動方式としては、考える種々の方式のうちエアリフト方式がとくに妙味のあるものであると認められたので、この組合せによるエアリフトサイクロン方式を中心として実験を行なつた。

ここに今日まで得られた結果の概要を報告し、諸賢の

ご叱正を仰ぐ次第である。

2. 予 備 実 験

著者らはサイクロン浮選の方式として、(1) ポンプまたはエアレータにより加圧下で空気混和を行なつたパルプを直接サイクロンに流入させ、フロスを分離回収する方法 (エジェクタサイクロン方式) と、(2) エアレータで空気混和したパルプをエアリフト管で持揚げたのち、サイクロンに流入させてフロスを分離する方法 (エアリフトサイクロン方式) とを選び、種々の角度から予備実験を行なつた。以下にその概略を述べる。

ドデシルアンモニウムアセテートによりあらかじめコンディショニングを行なつた石英のパルプを、まず水流ポンプに似たガラス管の装置 [スロートノズル式エアレータ (第1図)] に圧入して空気混和を行ない、これを直ちにサイクロンに導き、サイクロン内の遠心効果が石英のフロス回収率におよぼす影響を調べた。これらの結果から、遠心効果が過大であると特に粗い石英粒子のフロスへの回収にかなりの悪影響が現われることが明らかとなつた。一方浮選速度からみると、サイクロンにおける平均浮選速度定数 k_1 ^{*)} は最大約 60min^{-1} となり、一般の機械攪拌式浮選機の場合 (最大 $k_1=1\sim 2\text{min}^{-1}$ 程度) に比して、画期的に高い値を得ることができた。しかしスロートノズル式エアレータでは充分に高い空気混和率が得られず、また発生気泡のサイズもあまり細かくならないという欠点が認められた。

つぎに遠心ポンプをエアレータに応用する方法を試みた。すなわちポンプのサクシオン側に一定量の空気を供給し、ポンプのインペラの回転によつて空気を粉碎して、微細気泡を発生させ、サイクロンでフロスの回収を行なつた。三菱鉱業高島鉱業所 (長崎県) 端島炭鉱産の水選原炭を乾式粉碎した試料を用いて浮選試験を行なつ

1: パルプ流入管 2: 空気吹込ノズル 3: ミキシングゾーン
第1図 スロートノズル式エアレータ(a)および
ディフューザ(b)

* k_1 : 浮選時間を t , その時の実収率を R (小数) とすると、第一近似として $1-R=\exp(-k_1 t)$ の関係が成立する。サイクロン内の平均滞留時間を $\bar{t}$ とすると、この関係より、平均浮選速度定数 k_1 は、 $k_1=-\ln(1-R)/\bar{t}$ で与えられる。

た結果、フィード灰分18.5%、精炭灰分10.8%、歩留り43.8%というデータを得た。しかし、この方式では最大約7%の空気混和率*しか得られなかった。

実験に使用したスライムポンプでは、インペラの構造等とくにこの目的に合せて改造しない限り、空気混和率をこれ以上向上させることは不可能と認められたけれども、発生気泡のサイズが非常に細かく、また気体析出の効果を期待できるために、たとえば工業廃水中の固形物の浮選除去、故紙の脱墨(deinking)等、浮遊させるべき固体の含有率が低い場合にはこの方式は実質上真空浮選と類似の浮選法として有効と考えられる。

さらに前記スロートノズル式エアレータで加圧空気混和を行なった後、ある高さのエアリフト管を用いてパルプを持ち揚げた上で、サイクロンに送入する方法(エアリフト-サイクロン方式)を試みた。しかしこのスロートノズル式エアレータでは発生気泡のサイズが粗大であったため、エアリフト管内を上昇する間に気泡の合体が起り易く、かつ空気混和率も所期の値に到達し得なかった。管内における気泡の合体はサイクロンへの流れを不円滑にし、その分離性能を著しく害することが認められた。

以上の予備実験から得られた知見はつぎのように要約することができる。

- 1) パルプから鉱化気泡を分離する装置として、サイクロンは充分実用性をもっている。
- 2) サイクロンによる浮選の速度(したがってまた処理能力)は従来の機械攪拌式浮選機に比してはるかに大である。しかし粗粒子の浮遊率が低下するおそれがあるので、サイクロンの遠心効果はあまり大きくしてはならない。
- 3) 第1図(a)のようなスロートノズル式エアレータでは充分な空気混和率と気泡粉碎効果が得られ難い。
- 4) エアリフトサイクロン方式の場合、エアリフト管内で気泡の合体が起らないよう、気泡が充分に細かく分散していることが必要である。
- 5) 空気混和率の増大は浮選速度の向上のために望ましいことであるが、とくにエアリフトサイクロン方式の場合には、全体の装置を能率よく運転するために空気混和率が高いことが必須条件であるといえる。いずれの方式にせよ、サイクロン浮選においては空気混和率50%(すなわち分離サイクロンの入口でのパルプと空気の体積比が1:1)を一応の目安とすべきであろう。

* 空気混和率: サイクロン流入口における固気液混相流の全流量に対する空気流量の体積割合。ただし空気は等温膨張するとしてサイクロン流入口での体積に換算。

3. エアリフトサイクロン浮選に関する実験

エアリフトを浮選に利用するという考えは、前述の通り、すでにソ連の研究者によつて提案され、ある程度の成果が収められているわけであるが、この方法は加圧の手段としてスライムポンプ等を必要とせず、直列あるいは並列に浮選回路を組んだ場合においても共通のコンプレッサ設備で操業できるという点に妙味があるように思われる。著者らの予備実験の結果によれば、前掲第1図(a)のようなスロートノズル式エアレータではエアリフト方式の浮選が困難であることがわかったので、新たにパルプの旋回流による剪断力を利用したサイクロン式のエアレータを開発した。以下、このサイクロン式エアレータの性能試験、ならびにこれを利用したエアリフトサイクロン浮選の試験結果について報告する。

3.1 サイクロン式エアレータ

第2図にサイクロン式エアレータの構造を示す。パルプは流入管(1)より接線方向に円筒部(3)に流入する。一方空気は吹込ノズル(2)より圧入する。パルプ流はオリフィス(4)の出口で強力な渦流スプレーを生じる。オリフィスにおける剪断作用により、空気流はミキシングゾーン(5)において微細な気泡に分散する。残留遠心効果などのために一度分散した気泡が再び合体するのを防ぐ目的で十字板(6)が挿入されているが、これは条件によつては不要である。分散気泡とパルプの混相流は流出部(7)をへてエアリフト管を上昇する。

サイクロン式エアレータの空気混和性能を検討するため、まず一定濃度の起泡剤水溶液をフィードして試験を行なった。このとき著者らは、エアレータの性能を表わす1つの指標として、パルプ流と空気流が2層分離しない限界の空気混和率すなわち最大空気混和率 φ_m を用いた。第3図はオリフィス径 D をパラメータとして、流量 Q と最大空気混和率 φ_m との関係を測定した結果を示したものである。流量の増大とともに最大空気混和率 φ_m は向上する傾向があり、オリフィス径 D を適当に選ぶことによつて、 $\varphi_m > 50[\%]$ を達成できることがわかる。別の実験より、空気吹込ノズルの位置および孔径は φ_m に対してほとんど影響をもたないこともわかった。

第2図 サイクロン式エアレータ

第3図 オリフィス径 (D) をパラメータとする流量 (Q) と最大空気混和率 (ϕ_m) の関係

つぎにサイクロン式エアレータのエアリフト方式への適応性を検討するため、エアレータに背圧を加えた場合の ϕ_m の変化を測定した。第4図はエアレータ流入圧を一定 (0.40 kg/cm^2) とした場合の背圧 P_b と ϕ_m の関係を測定した結果を示したものである。ヘッドタンクのレベルと同一レベルまでエアリフトでパルプを持ち上げる場合、 $\phi = 50[\%]$ を目標とすると、エアレータにかかる背圧は 0.23 kg/cm^2 となる。第4図から $P_b = 0.23 [\text{kg/cm}^2]$ で $\phi_m = 54[\%]$ を得ることから、サイクロン式エアレータは少なくとも空気混和率の点ではエアリフト-サイクロン方式の加圧空気混和装置として充分活用できることが明らかとなった。

3.2 エアリフトサイクロン方式による浮選実験

サイクロン式エアレータを用い、第5図に示す実験系を組み立て、これによって以下に述べる浮選試験を行なった。ヘッドタンク(1)であらかじめコンディショニングを行なったパルプをサイクロン式エアレータ(2)にフ

第4図 背圧 (P_b) と最大空気混和率 (ϕ_m) の関係

ィードする。一方空気はコンプレッサ(6)からエアレシーバ(5)を通して、フローメータ(4)で流量を測定してエアレータ(2)に圧入する。それぞれの流入圧は圧力計(9,8)によって測定する。空気混和を行なった後、混相流はエアリフト管(7)を上昇し、分離サイクロン(3)でフロスの分離が行なわれる。エアレータ出口圧および分離サイクロン流入圧はそれぞれ圧力計(10)およびマノメータ(11)により測定する。

まず適正条件を明らかにするために合成試料(足尾鉱山産の黄銅鉱および石英粗面岩を主成分とする)による一連の浮選試験を行なった。この試験により遠心効果による粗粒側の実収率低下は認められない程度に抑えうることが再確認され、またパルプ濃度は30%固体前後にまで高めても支障を生じないことが明らかになった。

つぎにラサ工業大峰鉱山(岩手県)産の黄銅鉱とキューバ鉱を含む銅鉱石、同和鉱業秋田鉱業所花岡鉱山(秋田県)産の一次スライム、および古河鉱業足尾鉱山(栃木県)産の銅鉱石を試料として浮選試験を実施した。

第1表に小型ボールミルにより湿式粉碎した大峰産銅鉱石試料の粒度分布および品位を、第2表にその浮選条件を示す。

第6図はこの試験における粒度 $D_p[\mu]$ と各粒度ごとの実収率 $R[\%]$ の関係を銅成分と脈石成分について示したもので、便宜上銅鉱物はすべて黄銅鉱であるとして銅の分析値から両者を求めてある。この場合、粗粒側での

1: ヘッドタンク
2: サイクロン式エアレータ
3: 分離サイクロン
4: エアフローメータ
5: エアレシーバ
6: エアコンプレッサ
7: エアリフトパイプ
8: 空気吹込圧力計
9: パルプ流入圧力計
10: エアレータ出口圧力計
11: 分離サイクロン流入圧マノメータ

第5図 エアリフトサイクロン浮選実験装置

第1表 大峰産銅鉛石試料の粒度分布および品位

粒 度 $[\mu]$	+149	149/105	105/74	74/53	53/37	-37	計
重 量 量 (%)	8.2	16.5	14.4	17.4	15.5	28.0	100.0
重 積 量 (%)	8.2	24.7	39.1	56.5	72.0	100.0	-
銅 品 位 (%)	1.31	1.51	1.78	2.05	1.76	1.80	1.75

第2表 大峰産銅鉛石の浮選条件

パルプ濃度 [%固体]	34
浮選剤添加量 [g/t]	NaEX 50 タカサフロス#2 17
パルプ pH	7.7
パルプ温度 $^{\circ}\text{C}$	20
空気混和率 (%)	53
分離サイクロン流入圧 $[\text{cmH}_2\text{O}]$	16
エアレータ吹込空気圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$	1.25
エアレータ流入パルプ圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$	0.98
揚 程 [m]	8.0

実収率の低下は必ずしもサイクロン浮選に特有の傾向ではなく、片刃粒子の存在などによるものと認められる。なお分離サイクロンの遠心効果は $Z_1^*=1I$ となっている。また細粒側ではスライムがフロスと一緒にオーバーフローしたため、分離が悪くなったのが認められる。なお図中の破線は全粒子に対する銅成分および脈石成分の実収率の値である。

第7図は粒度 $D_p[\mu]$ と分離サイクロンにおける平均浮選速度定数 $\bar{k}_1[\text{min}^{-1}]$ との関係は銅成分および脈石成分について示したものである。破線は同様全粒子に対する値である。この実験では銅成分の $\bar{k}_1$ は最大約 100 min^{-1} に達している。空気吹込を併用した機械攪拌式浮選試験機で試薬条件をこれと同一に行なつた実験結果では、銅成分の全粒度に対する $\bar{k}_1$ は 0.5 min^{-1} であつた。したがってエアリフト-サイクロン式浮選機の浮選速度がいかに大きいかがわかる。また選択性について

1: 銅成分
NaEX 50g/t
2: 脈石成分
タカサフロス#2 17g/t

第6図 大峰産銅鉛石のエアリフトサイクロン浮選の結果—粒度(D_p)と実収率(R)の関係

1: 銅成分
2: 脈石成分

第7図 大峰産銅鉛石のエアリフトサイクロン浮選の結果—粒度(D_p)と平均浮選速度定数($\bar{k}_1$)の関係

は、銅成分と脈石成分についての平均浮選速度定数の比 $\bar{k}_1^{(1)}$ をみると、最大 34、全粒子については 15 となっている。

つぎに花岡産一次スライム試料の粒度分布および品位を第3表に、その浮選条件を第4表に示す。

第3表 花岡産一次スライムの粒度分布および品位

粒 度 $[\mu]$	+37	-37	計
重 量 量 (%)	15.9	84.1	100.0
品 位 (%)	1.50	1.88	1.82
Cu	21.07	33.15	31.24
PyS			

第4表 花岡産一次スライムの浮選条件

パルプ濃度 [%固体]	9
浮選剤添加量 [g/t]	KAX 200 タカサフロス#2 210
パルプ pH	5.7
パルプ温度 $^{\circ}\text{C}$	20
空気混和率 (%)	52
分離サイクロン流入圧 $[\text{cmH}_2\text{O}]$	14
エアレータ吹込空気圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$	1.04
エアレータ流入パルプ圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$	0.82
揚 程 [m]	8.0

このスライムの本方式による浮選結果を第5表に示す。第5表中、下段は起泡剤のみを添加したブランクテストの結果である。

この浮選試験においては、実収率も精鉱品位も低く、浮選としてはきわめて不満足な結果しか得られなかつた。これは黒鉛1次スライムの浮選分離が困難なことによるのはもちろんであるが、元来、この種の浮選速度のおそい鉱石に対し、このような1段のサイクロン浮選では、1区セルで連続式浮選を行なつた場合と同様、動力学見地からみても充分な分離成績をのぞむことは無理

* Z_1 : 分離サイクロン流入口で計算した初遠心効果

第5表 花岡産一次スライムのエアリフトサイクロン浮選の結果

浮選剤添加量 [g/t]	粒 度 [μ]	重量[%]		品 位		[%]		実収率[%]	
				Cu		Py-S			
		フロス	テール	フロス	テール	フロス	テール	Cu	Py-S
KAX : 200 タカサフロス#2 : 210	フィード	100.0		1.82		31.24			
	+37	4.3	11.6	4.20	0.50	53.78	8.95	75.7	69.0
	-37	35.4	48.7	3.40	0.78	56.07	16.50	76.0	71.2
	計	39.7	60.3	3.49	0.73	55.82	15.04	76.0	70.9
タカサフロス#2 : 210	フィード	100.0		1.85		30.58			
	+37	3.5	13.1	2.95	1.30	45.98	13.65	37.7	47.4
	-37	29.2	54.2	2.40	1.62	50.19	23.11	44.4	53.9
	計	32.7	67.3	2.46	1.56	49.74	21.27	43.4	53.2

であろう²⁰⁾²¹⁾。とくにサイクロン浮選では、前に指摘したとおり、スライムを伴ったパルプの一部がフロスに混入しやすく、これが精鉱品位低下の原因となる。

しかし一般に行なわれているようなくり返し多段浮選方式を前提とするならば、直列浮選回路を構成することの比較的容易なエアリフトサイクロン浮選の場合、この欠点はさして憂慮すべきこととは思われない。またとくに必要な場合は、精選だけ従来の浮選機によって行なうという方法も考えられる。

くり返し浮選方式による今後の試験研究への布石として、足尾銅山産の銅鉛石試料について簡単な多段浮選試験（粗選、1段精選、1段清掃）を行なった。その結果をバランスシートの形で第8図に示す。なおこの場合の浮選条件は第6表のとおりである。

第8図 足尾銅山産銅鉛石のエアリフトサイクロン浮選の結果—多段浮選のバランスシート

第6表 足尾産銅鉛石のエアリフトサイクロン浮選によるくり返し試験の浮選条件

パルプ濃度 [%固体]	7.9
浮選剤添加量 [g/t]	NaEX 50
	タカサフロス#2 200
パルプ pH	7.7
パルプ温度 [°C]	20
空気混和率 [%]	53
分離サイクロン流入圧 [cmH ₂ O]	16
エアレータ吹込空気圧 [kg/cm ²]	1.08
エアレータ流入パルプ圧 [kg/cm ²]	0.82
揚 程 [m]	8.0

中間産物（精選テールおよび清掃フロス）のくり返しを行なっていないので、総合的な成績の判定は困難であ

るが、この実験結果からくり返し浮選の効果はある程度窺知しうることと思う。

4. 考 察

4.1 サイクロン内の速度分布による剪断力および遠心効果について

サイクロン内の流動は切線方向速度 v_t 、半径方向速度 v_r および軸方

向速度 v_z の3成分によつて特性づけられる。これらは $|v_t| \gg |v_z| \gg |v_r|$ の状態にあるのが普通である。サイクロン浮選の場合は分離サイクロン内における v_t の大きさが、剪断力または遠心力による鉱化気泡の破壊に関連して問題となることが予想される。

v_t の半径方向の分布については、Kelsall²²⁾、Lilg²³⁾、吉岡²⁴⁾等による数多くの研究があるが、Bradleyは最近の著書²⁵⁾の中でそれらを次に示す一般式（経験式）で表わしている。

$$v_t r^n = v_c r_c^n = \alpha v_i r_c^n = \text{const} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ここで } \alpha = \frac{v_c}{v_i} = 0.5 \sim 0.9$$

$$n = 0.4 \sim 0.9$$

v_t : 切線方向速度

r : 位置半径

v_c : サイクロンの外壁での切線速度

r_c : サイクロン円筒部半径

v_i : サイクロン流入速度

ただし空気芯の近傍では $v_t r^{-1} = \text{const}$ となり、

$r = \frac{1}{6} r_c$ の位置で v_t が最大になるといわれている。

(1) 式の成立領域における剪断力 τ は $\eta \cdot \frac{dv_t}{dr}$ で与えられるから、(1) 式を r で微分することにより次式を得る。

$$\tau = -\eta \cdot \alpha \cdot n \cdot v_i r_c^{n-1} r^{-(n+1)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで τ : 剪断力

η : パルプの粘性係数

つぎに気泡と接着粒子間の接着力は、気泡径に対して粒子が充分小さい場合には、次式で表わすことができる²⁶⁾²⁷⁾。

$$W = \gamma l_g \cdot l \cdot \sin \theta \dots \dots \dots (3)$$

ここで W : 気泡と粒子の接着力

l : 気泡と粒子の接着線の長さ

θ : 接触角

γl_g : 気液界面の表面張力

剪断力の悪影響については、気泡自体の破壊および接着粒子の剥離の2つが考えられるが、検討の結果両者と

も問題にならないことが明らかとなった。

遠心力の悪影響については、接着粒子の気泡からの剝離に関して問題となることが考えられる。いま気泡と粒子（長さ＝直径の円筒形粒子を仮定する）が円筒端面で接着しているものとすれば、求心力および遠心力による剝離力は次式で与えられる。

$$F = \frac{1}{4} \pi D_p^3 (\rho_s - \rho_l) \frac{v_t^2}{r} \dots\dots\dots (4)$$

ここで F : 剝離力 ρ_s : 固体密度
 D_p : 粒子直径 ρ_l : 液体密度

したがって遠心力により粒子が気泡から剝離される条件は、

$$\pi D_p \gamma_{lg} \sin \theta < \frac{1}{4} \pi D_p^3 (\rho_s - \rho_l) \frac{v_t^2}{r} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

(1)～(5) 式を第1表、第2表に示した銅鉱石のエアリフトサイクロン浮選の結果に当てはめてみよう。ここで $n=0.8$, $\alpha=0.7$, $\eta=1.0$ c.p., $\gamma_{lg}=70$ dyne/cm, $\theta=60^\circ$, $\rho_s=4.1$ g/cm³, $\rho_l=1.0$ g/cm³ と仮定し, $r=\frac{r_c}{6}$ において切線速度 v_t が最大になるとすれば, 計算により以下の値を得る。

(1) 式より, 最大切線速度 $v_t(\max)=425.9$ cm/sec

(2) 式より, 最大剪断力 $\tau(\max)=10.2$ dyne/cm²

(5) 式より, 最大の遠心力場で気泡から剝離する最小の粒子径は,

$$D_p(\min)=120\mu$$

以上の結果から (1) 式が成立するとすれば 120μ 以上の粒子はサイクロン内の遠心力によつて気泡から剝離されることになる。しかし実際の浮選結果 (第6図) によれば, $D_p=120\mu$ で実収率は88%を示し, $D_p=200\mu$ においても実収率は75%を保っている。

これは分離サイクロンの場合, サイクロンの中心に向つてフロス量が多くなっているため見掛けの粘性が高まり, 問題となる遠心力の上昇の度合が (1) 式から予想されるよりも少なくなっている結果ではないかと思われる。ちなみに Fontein 等²⁸⁾は v_t に対する粘性の影響について調べ, レイノルズ数 Re^* が小さい場合には v_t は流入速度 v_i に比してかなり小さく, しかも半径方向にほぼ一定の値を示すことを明らかにしている。

4.2 気体析出について

液体に対する気体の溶解度に関する圧効果については Henry の法則が成立することが知られている²⁹⁾。

$$* Re^* = \frac{\text{流入速度}(v_i) \times \text{サイクロン直径}(2r_c)}{\text{動粘性係数}(\eta/\rho_p)}$$

** 水に対する酸素の溶解度は窒素のそれに比して大きいため, 溶解 (または析出) する気体の組成は大気のものとは異なっている。

*** 標準状態における溶解空気量は理化学便覧³⁰⁾ による。

第9図は圧力水頭 H において種々の温度の水中に溶解した空気**が大気圧に開放されたとき, 水 1 l あたり析出する気体量 G_p を標準状態に換算して示したものである***。

第9図
圧力水頭 (H) と
気体析出量 (G_p) の
関係

Klassen 等³¹⁾はエアリフト管内をバルブが上昇する間に析出する気体量を測定し, 一般の物理的測定値とよく一致していることを確かめている。析出する気体量は外部から混和される空気量に比較して, このようにきわめてわずかではあるが, 疎水性鉱物の表面に選択的に析出する性質がある³¹⁾ことから, とくに気泡の付着が起りにくい微粒鉱物³²⁾の浮選の場合には, 相当の効果があると推測される。

4.3 エアリフトの効率について

エアリフトの効率は, 空気の等温膨張による仕事とバルブをもちあげる仕事の比として次式で表わすことができる。

$$\eta_a = \frac{\rho_p Q H_t}{10 P_0 V_0 \ln(P_s/P_0)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで η_a : エアリフト効率 [—]

P_0 : 大気圧 [kg/cm²]

V_0 : 大気圧下の空気流量 [l/min]

P_s : 空気吹込圧 [kg/cm²]

ρ_p : パルプの見掛け密度 [g/cm³]

Q : パルプ流量 [l/min]

H_t : 揚程 [m]

本エアリフトサイクロン浮選の実験系について, 起泡剤溶液と気泡の2相流の場合の効率を (8) 式により求めた結果, $\eta_a=0.33$ を得た。実際にはこのほかに,

- 1) エアレータ出口におけるパルプと空気の余剰運動エネルギー
- 2) エアリフト管内の流動による圧力損失
- 3) 固体粒子混入による影響
- 4) コンプレッサの効率

を考慮しなければならない。

4.4 エアリフトサイクロン 浮選機の処理能力について

エアリフトサイクロン浮選は浮選速度を高めうるため、単位ホールドアップ体積あたりの処理能力を著しく増大させることが可能である。大峰鉱石について行なったエアリフトサイクロン浮選の結果を、同性質の鉱石を処理する大峰鉱業所一次浮選系のワーマン浮選機の現場試験の結果と比較してみた*。第7表にこの両者の浮選速度および所要動力を対比して示す。

第7表 エアリフトサイクロン浮選機とワーマン浮選機の性能比較の一例

	エアリフトサイクロン浮選機	ワーマン浮選機
平均浮選速度定数 $\bar{k}_1(\text{min}^{-1})$	78.5	0.382
所要動力† (kWh/m^3)	0.12	0.89

† エアリフトサイクロン浮選機の空気混和率は53%，コンプレッサ効率は50%とする。実収率90%についての比較。

5. 結 言

サイクロン浮選法は加圧浮選の一つの方式として、従来の機械攪拌式浮選機による浮選とは違った多くの特色をもっている。とくにエアレータと分離サイクロンの間をエアリフト管で接続したエアリフトサイクロン浮選は、複雑な浮選回路でも共通のコンプレッサのみにより連続運転ができるという点で優れていると考えられる。著者らはこの方式による実験的研究を行ない、パルプの旋回流による剪断力を利用したサイクロン式エアレータを開発し、また分離サイクロン内の遠心効果を適当に選ぶことにより、従来の機械攪拌式浮選機に比してはるかに高い浮選速度を得ることに成功した。本研究はまだその緒についたばかりの段階であるが、今後はこれらの基礎的な実験結果にもとづき、装置のスケールアップと連続式多段浮選法の研究に進む計画である。

おわりに実験試料を提供して下さったラサ工業大峰鉱業所および古河鉱業足尾鉱業所に厚くお礼申し上げますとともに実験に種々ご協力をいただいた当研究室の杉本三喜男教官、中村良輔教官および村上志朗、小林茂則両君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Бедраны Н. Т., Жендринский А. П., Классен В. И.: Конструктивные особенности и результаты технологических испытаний новой флотационной машины ЭФМ-ДТИ., Уголь Украины, (1960), No. 10, p. 18~21.
- 2) В. И. Классен, Г. А. Пиккам-Ордынский, М. Д. Венкова, А. П. Жендринский, Н. В. Матвеевко, М. И. Городецкий, А. А. Егизаров, В. В. Печенкин, Н. В. Серегин, Г. А. Кепп, Н. Н. Яценко: Промышленное испытание эжекторной флотационной машины для флотации руд., Цветные Металлы, (1963), No. 4, p.

7~13.

- 3) Коряков-Савойский Б. А., Бубликов А. В.: Новый способ интенсификации флотационного процесса, Кокс и Химия, (1958), No. 9, p. 13~15.
- 4) В. И. Классен, Б. А. Коряков-Савойский: теоретические основы интенсификации флотации углей эрлифтно-центробежным способом, Кокс и Химия, (1959), No. 12, p. 7~9.
- 5) I. N. Plaksin, V. I. Klassen: Methods of improving the process of coal flotation, Fourth International Coal Preparation Congress 1962, Paper D5.
- 6) W. E. Bearce: The Cyclo-Cell, Colliery Guardian, March 28, (1963), p. 377~380.
- 7) O. B. Bucklen, J. W. Smith: A simplified device for the froth flotation of fine coal (progress report), AIME Transactions December (1964), p. 373~378.
- 8) B. Heide: Grundlagen der Zyklonflotation, Bergb. Wiss., 10 (1963), H7, p. 152~168.
- 9) DAS 1158461 (1962).
- 10) DAS 1175621 (1962).
- 11) DAS 1067743 (1960).
- 12) W. Kramer: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Flotationszellen, Bergakademie, 16, 4/5 (1964), p. 263~272.
- 13) H. Cardes, F. Isenhardt, G. Salzmann: Untersuchungen an Flotationszellen, Erzmetall, 17, 9 (1964), p. 487~491.
- 14) P. Iohn: Zur Entwicklung der rührerlosen Flotationszellen, Aufbereitungs-Technik, Nr. 10, (1964), p. 532~543.
- 15) Flotation Column due for mill scale tests, Engineering & Mining Journal, 166, 1, p. 76~83.
- 16) 林大輔・林英輔: 二、三のフリー・フロー式浮選機について(I), 浮選, 25, (1965), p. 59~63.
- 17) P. Iohn, Das Gegenstrom-Flotationsverfahren, Aufbereitungs-Technik, Nr. 6, (1965), p. 322~325.
- 18) 今泉常正: 浮選法について, 化学工学, Vol. 30, No. 3 (1966), p. 182~187.
- 19) 今泉常正・井上外志雄: 速度過程としての浮選の研究, 日本鉱業会誌, 77, 881 (1961), p. 987~994.
- 20) 今泉常正・井上外志雄: 単体鉱物粒子の浮選速度特性について, 日本鉱業会誌, 82, 933 (1966), p. 17~24.
- 21) T. Imaizumi, T. Inoue: Kinetic Consideration of Froth Flotation, Mineral Processing, Proceedings of the Sixth International Congress, Pergamon Press, 1965, p. 581~593.
- 22) D. F. Kelsall: A study of the motion of solid particles in a hydrolic cyclone, Trans. Instn. Chem. Engrs., 30 (1952), 81, p. 87.
- 23) E. O. Lilg: Hydrocyclone Fundamentals, Bull. Inst. Min. & Met., March (1962), p. 285~337.
- 24) 吉岡直哉・堀田豊: 化学工学, 19(1955), 12, p. 632~641.
- 25) D. Bradley: The Hydrocyclone, Pergamon Press (1965), p. 19~40.
- 26) A. M. Gaudin: Flotation, McGRAW-HILL BOOK CO., 1957, p. 147~181.
- 27) 桃崎順二郎: 浮選法における鉱粒と気泡の接着機構について(I~IV), 日本鉱業会誌, 69, 786, p. 551~554. 70, 796, p. 467~473. 74, 837, p. 170~176. 74, 840, p. 377~382.
- 28) F. J. Fontein, C. Dijkstra: The Hydrocyclone, Its Application and Its Explanation. Recent Developments in Mineral Dressing, A Symposium arranged by Institution of Mining and Metallurgy, 1952, London, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1953 p. 229~257.
- 29) W. J. MOORE 著: 藤代亮一訳, 新物理化学(上), 東京化学同人, p. 128.
- 30) 理化学便覧, 共立出版, 1953, p. 160.
- 31) V. I. Klassen, V. A. Mokrousov: An Introduction to the Theory of Flotation, Butterworths, London, 1963, p. 449~458.
- 32) K. L. Sutherland, I. W. Wark: Principles of Flotation, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Inc., 1955, Melbourne, p. 382~390.

* 試験条件が異なるため、これはごくおおよその比較である。