摩 鈹 回 路 サ イ ク ロ ン の 解 析*

深 見 進**
白 井 凱 也***

Analysis of the Cyclone Operating Data in the Primary Grinding Circuit.

Susumu FUKAMI, Yoshiya USUI

At Hitachi Mill, two stage grinding circuit has been adopted since 1963, and a hydrocyclone is used for classifying the rod mill discharge.

The influences of some variables on the cyclone performance at high pulp densities in the feed pulp (50~65% solids) were investigated based on the operating data.

The results obtained are summarized as follows.

(1) The separating size and the sharpness of separation were largely influenced by the feed pulp density.

(2) There was a half logarithmic relationship between the separating size and the solid recovery in the underflow.

(3) The sharpness of separation increased linearly with the solid recovery in the underflow.

(4) The sharpness of separation decreased with increased separating size and a half logarithmic relationship was obtained between them.

(5) It was pointed out that the fractional recovery curves should be drawn separately for the gangue minerals with low specific gravity and the sulphide minerals with high specific gravity, and so some more valuable informations could be obtained.

1. 緒 言

近年、1次摩鈹回路の分級機としてサイクロンが広く使用されるようになってきた。サイクロンは機械分級機にくらべて据付面積が少いこと、処理能力が大きいことなどの長所をもっており、その使用数は増加の一途をたどっている。

当日立選鈹工場においては昭和38年にロッドミルを設置し、この排鈹をサイクロンで分級し、そのアンダフロ産物をボールミルで処理する2段摩鈹方式を採用し、引続いて昭和41年より当所独創技術であるサイクロンによる比重選別を摩鈹回路に導入した「サイクロンバルク方式」操業を開発し現在にいたっている。

サイクロンの分級機あるいは選別機としての機能については数多くの報文が発表されているが、筆者らはここ4~5年(昭和38年~42年)の間に実際の現場操業を通

じて得られたデータをもとにして種々の要因と特性値の間の関係を調べ、操業実態の解析を通じてサイクロン内部での分級作用よりも比重分離作用を強調することにより摩鈹・浮選回路の負担軽減などの可能性を把握した経緯についてのべる。

2. 1次摩鈹分級回路

当選鈹工場の1次摩鈹回路は、第1図に示すごときボールミル並列操業であったのを、昭和38年に第2図に示すとおりのロッドミル直列操業に全面的に切換えることにより工程の合理化を行なった。その系統は図に示すようにミル原鈹をロッドミルで摩鈹後、サイクロン分級を行ない、アンダフロはボールミル、分級機閉回路で2次摩鈹する。分級機溢流はサイクロンオーバフロと混合してサイクロン分級を行ない、オーバフロは浮選原鈹とし、アンダフロはロッドミルへ繰返すことにした。

今回主にとりあげたサイクロンは前者のロッドミル排鈹分級用のものである。このサイクロンの仕様は第1表に示すとおりである。

この1次摩鈹回路におけるサイクロン分級は最初低濃

* 昭和42年11月14日 浮選研究会第39回例会特別講演

** 特別講演者、日本鈹業株式会社日立鈹業所鈹山部選鈹課副課長
(現在上北鈹業所)

*** 同 上 技 師

第 1 図 日立選鉱工場摩鉱分級回路（昭和38年10月以前）

第 1 表 360 mmφ サイクロン仕様

サイクロン径 (mm)	360
円筒部長さ (mm)	230
円錐部角度 (°)	20
流入口寸法 (mm)	46×80
ヴォルテックスファインダ径 (mm)	100~160(※)
同 長 さ (mm)	150
アベックスノズル径 (mm)	40~55(※)
流 入 圧 (kg/cm ²)	0.30±0.05
給鉱濃度 (%)	50~65(※)
台 数	2
圧入ポンプ	6/4 ワーマンポンプ
同上モータ馬力 (IP)	30

(※) 操業において、この範囲内で変更を行なった。

度給鉱により、高分級効率・低分級点をねらってスタートしたが、その後摩鉱工程全体の処理能力上昇化の過程において2次ボールミル回路が過負荷状態を呈した。そこでこの対策として、分級作用の他に比重選別を強調する高濃度分級に移行させることにより、サイクロン自体の分級効率は低下したが、ミル回路全体としての適正化を計ることができた。ここではこれらの変せんを通じて得られたデータをもとにして解析を進めた。

3. サイクロンの分級性能の評価について

サイクロンの分級結果は普通トロンブ配分率曲線にえがいて、これより分級点および分級効率（分級精度）を求め、この特性値によって評価される。さらに上記の2つの特性値と独立ではないが、オーバフロの粒度構成をあとに続く浮選の立場から代用特性値としてとる場合もある。

サイクロンの分級性能に影響を及ぼす変量要因は多くあるが、これらは2種類に分類できる。その1つはサイクロンの構造によって決るもので、サイクロンの直径、給鉱口径、円筒部長さ、ヴォルテックスファインダ径、同長さ、アベックスノズル径および円錐部角度などである。もう1つの要因は給鉱パルプ濃度（パルプ比重）、固体粒子の粒度分布、固体真比重および流入圧など給鉱条件によって決るものである。

これらの2種類の要因と結果の間の関係については多くの報文が出されており、とくに前者についてはよく研究されている。ここでは実際の操業データをもとにして

第 2 図 日立選鉱工場摩鉱分級回路（昭和38年10月～昭和41年10月）

て、とくに後者の要因に属する高パルプ濃度領域における給鋳濃度とアンダフロの鋳量配分比が分級点、分級効率およびオーバフロ粒度に及ぼす影響を調べ、あわせてこれらの特性値間の関係もみてみた。

4. 分級点に及ぼす諸要因の影響

分級点（分級粒度 d_{50} ）はオーバフロとアンダフロへの配分率がそれぞれ0.5である粒子の径である。

4.1 給鋳濃度と分級点

給鋳パルプ濃度は50%～65%の間で種々変化させて操作を行ない、その都度データを採取した。アンダフロの排出はすべての操作を通じてスプレ型排出である。

なお、給鋳パルプ濃度以外の要因も同時に変化させているので、データにはそれらの影響が交絡して入っているものと考えられるがえて層別せずにそのまま解析した。

第3図は給鋳濃度と分級点の関係を示したものである

第3図 給鋳パルプ濃度と分級点の関係

る。これより給鋳濃度が高くなると分級点は大となることがはっきり確められた。この結果より粗粒分級を行なおうとすれば給鋳濃度を高めれば大いに効果があり、微粒分級に対しては低濃度とすればよいことがわかる。

一方摩鋳回路における分級の1つの目的はオーバフロに浮選適正粒度のものを得ることである。第4図は給鋳パルプ濃度とオーバフロの80%通過粒度の関係を図示したものである。縦軸を対数目盛にとると両者は直線関係になる。給鋳濃度が高くなれば分級点が大となりその結

第4図 給鋳パルプ濃度とオーバフロ粒度の関係

果オーバフロ粒度も粗粒になることを示している。

4.2 アンダフロ鋳量配分比と分級点

サイクロンアンダフロの鋳量配分比 (g_u) がサイクロンの分級性能に大きな影響を及ぼすことが指摘されているので、¹⁾両者の関係を調べてみた。その結果を第5図に示す。横軸のアンダフロ鋳量配分比を対数にとりプロットするとこの範囲内では良好な直線関係が得られた。これよりアンダフロの鋳量配分比を増すと分級点小さくなることがわかる。

これは Fahlström¹⁾ が指摘しているごとく、アンダフロ鋳量配分比が $0.4 < g_u < 1.0$ の範囲では、

$$d_{50} = -K \log g_u \quad (K: \text{定数})$$

の関係が成立するとの見解とほぼ一致する。

第5図 アンダ・フロ鋳量配合比と分級点の関係

アンダフロの鉱量配分比はヴォルテックスファインダ径 (D_o) とアベックスノズル径 (D_u) を変化させることによって調節できるので、分級点と出口径比 D_u/D_o の関係をプロットすると第6図のようになる。これをみ

第6図 出口径比と分級点の関係

ると口径比が大きになると分級点は小さくなる傾向はうかがえるが、2、3点例外も出ておりさきのアンダフロ鉱量配分比の場合のようにはっきりした関係は出てこない。

これらのことよりアベックスノズルの径とヴォルテックスファインダの径の比よりもアンダフロ鉱量配分比の方が分級点に対してははっきりした関係をもっており、日常の操業管理においては口径比よりも鉱量配分比に注意する必要があることを示唆している。当選鉱工場においても口径比よりも鉱量配分比にポイントをおいて操業を行なっている。

5. 分級効率に及ぼす諸要因の影響

分級効率(分級精度)は次式で表わしたものを使用した。¹⁾

$$\eta = 1 - (\phi_u^- + \phi_o^+)$$

ここに

η : 分級効率(分級精度)

ϕ_u^- : アンダフロへの分級点以下の粒子の迷い込み

ϕ_o^+ : オーバフロへの分級点以上の粒子の迷い込み

5.1 給鉱濃度と分級効率

給鉱濃度と分級効率の関係をプロットしたのが第7図である。操業において変更した濃度範囲内(50~65%)

第7図 給鉱濃度と分級効率の関係

では濃度と分級効率の間には直線関係が認められ、給鉱濃度を高くすると分級効率は低下する。この影響度合は大きく、濃度を50%から65%まで15%上昇させると分級効率は約30%も低下することがわかる。

5.2 アンダフロ鉱量配分比と分級効率

4.2においてアンダフロ鉱量配分比が分級点に大きな影響を及ぼすことを指摘したが、分級効率についても同じように調べてみた。その結果を第8図に示す。

操業において変更した範囲 $0.4 < g_u < 0.7$ においては両者の間には直線関係が認められ、アンダフロ鉱量配分比を増すと分級率は顕著に上昇する。さきの分級点の場合と総合するとアンダフロ鉱量配分比を増すと分級点は小さくなり分級効率は向上する。両者に対するアンダフロ鉱量配分比の影響は顕著である。

このように分級効率はアンダフロ鉱量配分比によって大きく左右される。このことはサイクロン同志あるいはサイクロンと機械分級機相互の分級効率を比較して優劣を論ずる場合には注意する必要があることを示している。

Fahlström¹⁾ はアンダフロ鉱量配分比が0%および100%のときは分級効率は0であり、その間は連続的に変化してアンダフロ鉱量配分比が80~90%の場合に分級効率が最大になるような曲線を与えているが、当所の場合アンダフロ鉱量配分比が40~70%の狭い範囲内においては近似的に直線関係になったものと判断される。

第8図 アンダ・フロ鉱量配分比と分級効率の関係

6. 出口径比とアンダフロ鉱量配分比

前述のようにアンダフロ鉱量配分比によって分級点と分級効率は大きく左右されることがわかった。そこでこのアンダフロ鉱量配分比に及ぼす諸要因の効果を調べておく必要が生じてくる。

そこでまず考えられることは、アベックスノズル径とヴォルテックスファインダ径の比 (D_u/D_o) の影響であ

第9図 出口径比とアンダ・フロ鉱量配分比の関係

る。この関係を図示したのが第9図である。これを見ると操業にて変更した範囲内では口径比が大きくなるとアンダフロ鉱量配分比は大きくなる傾向は出ている。しかし2, 3点の例外が出ていて他の要因の影響が交絡しているようである。

7. 分級点と分級効率の関係

粒度のほぼ一定したロッドミル排鉱をサイクロンで分級した場合、分級点と分級効率の関係を調べると第10図のとおりである。横軸の分級点を対数にとると分級効率

第10図 分級点と分級効率の関係

と分級点はこの操業の範囲内においては直線関係になる。すなわち微粒分級の場合は分級効率は高いが、粗粒分級の場合は分級効率は低い。

この結果は分級点と分級効率は無関係でないことを示しており、Fahlström¹⁾の指摘していることに一致する。またこのことより2つのサイクロンを正しく比較評価する場合は注意を要する。

8. トロンプ配分率曲線の活用

サイクロンの分級結果はトロンプ配分率曲線にえがいて評価される場合が多い。一般に基礎研究で行なわれるごとく比重が一定の均質な固体粒子をサイクロンにかけると、比重の差による分離作用は消えて分級作用のみがあらわれ、一方粒度が一定で比重分布を有する固体粒子をサイクロンにかければ、粒度の差による分級作用は消えて比重分離作用のみが働く。

ところで実際の摩鋳回路における鉱石パルプの場合を考えてみると、粒度はもちろん異なるがその上に比重の異なる多種鉱物の混合体から成っていることに注意しなければならぬ。その結果分級作用と比重分離作用の両

方が重ってあらわれる。

当選鉱工場のロッドミル排鉱についてみると、低比重の脈石鉱物（比重2.8）と高比重の有価鉱物（比重4.2～5.0）からなっている。これをサイクロンにかけた場合の配分率曲線を、さらに有価鉱物と脈石鉱物に分解してえがいてみると第11図のようになる。有価鉱物の配分率

第11図 硫化鉱物と脈石鉱物にわけて描いた配分率曲線

曲線はより立ってくるが、脈石鉱物のそれは完全になており分割的現象を呈する。そして有価鉱物の分級点は全体よりも小になり、脈石鉱物の分級点は著しく大となる。このことは比重分離に近い現象が発生していることを物語っている。

Dahlstrom²⁾ は比重の異なる2種の固体粒子を含む鉱石パルプを分級する場合、分級点に対してある値の安全率を乗じて補正すべきことを指摘している。

なお脈石鉱物と有価鉱物に分解して配分率曲線をえがく場合、分析品位より計算して出しているの、有価鉱物と脈石鉱物の片刃粒子の存在は考慮していない。この片刃粒子の存在による補正については今後の検討にまきたい。

9. サイクロンバルク方式の採用について

以上述べた解釈を実際の摩鉱分級回路に活用することの意義はつぎのとおりである。

すなわち摩鉱回路におけるサイクロンの役割を、従来の分級機としてのみの働きよりむしろ積極的に比重選別機としての働きを強調することにより、この回路ですでに単体分離した過半量の硫化鉱物をバルク精鉱として早期に回収し、これを次工程のバルク浮選で処理することなく直接優先浮選工程に送る新しい選鉱方法を見出した。

換言すれば「重液サイクロンによる選別法」の原理を応用して、処理鉱石中の含有硫化鉱物を擬似重液材として挙動させる操業条件を設定するための基礎実験を行な

第2表 サイクロン仕様

	第 1 段 サイクロン	第 2 段 サイクロン
サイクロン径 (mmφ)	380	300
台 数	1	1
円筒部長さ (mm)	215	200
円錐部角度 (°)	20	20
流入口寸法 (mm)	46×120	38×100
ヴォルテックスファインダ径 (mmφ)	160	70
アベックスノズル径 (mmφ)	70	40

い、その可能性を把握して操業化に移行した。

第2表は比重選別用サイクロン（直列2段配置の場合）の主要寸法であり、第12図および第13図はそれぞれについて、先にのべたごとくトロンプ配分率曲線を給鉱中の各構成鉱物別にえがいた曲線を示したものである。両図より比重の重い硫化鉱物と比重の軽い脈石鉱物との間に明瞭な相違が認められ、前者は適正な分級作用を受けそしてサイクロンアンダフロ産物として容易に回収されており、一方後者は分級よりも分割現象を呈しオーバフロ産物として排除されている状況を示している。

当選鉱工場では昭和25年以来ストレート方式による優先浮選操業を行なってきたが、さきにのべた新構想にもとずき昭和41年より第14図に示す摩鉱回路操業を採用した。これを当所では「サイクロンバルク方式」総合優先浮選法と呼ぶことにした。

第12図 第1段サイクロン配分率曲線

第13図 第2段サイクロン配分率曲線

第14図 日立選鉱工場摩鉱分級回路—サイクロンバルク方式基本系統図—（昭和41年10月以降）

この方式を採用することにより、通常のパルク方式を適用することによって生ずる優先分離の困難性を取りのぞくことが可能となり、浮選機使用台数と浮選剤消費量を大巾に削減することができた。

10. 総括

日立選鉱工場の1次摩鉱分級回路に使用してきたサイクロンについて、実操業データを通して特性値と要因の関係を調べた。

得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

1) 給鉱パルプ濃度を高くすると分級点は大きくなり両者の間には密接な関係がある。また給鉱パルプ濃度の分級点に対する影響度合は非常に大きく、たとえば粗粒分級を行なおうとすれば給鉱パルプ濃度を高くすれば大いに効果があることが示された。

また給鉍パルプ濃度を高くするとオーバフロ粒度は粗粒になり両者の間には直線関係が示された。

2) アンダフロの鉱量配分比と分級点の間には、後者を対数にとれば直線関係が成立することが確められた。アンダフロ 鉱量配分比を大きくすると分級点は小となる。このアンダフロ 鉱量配分比は分級効率への影響を含めて重要な要因であることが示された。

3) アベックスノズル径とヴォルテックスファインダ径の口径比すなわち出口径比 (D_u/D_o) を大にすると分級点は小となる傾向は認められたが、さきのアンダフロ
 鉱量配分比の場合ほどは顕著ではなかった。

このことからサイクロンの日常操業管理を行なう場合には出口径比よりも飲量配分比に注目する必要があることが示された。

4) 給鉍パルプ濃度を高くすると分級効率は低下することが示された。この影響度合も大きい。

5) アンダフロ 鉱量配分比を大にすると分級効率は上昇することがわかった。実操業の範囲内では両者は直線関係を示した。

6) 出口径比 (D_u/D_o) を大きくするとアンダフロの
 鉱量配分比は大きくなる傾向が確かめられたが、例外点も
 存在しはっきりした関係は求められなかった。

7) 同一粒度分布をもったロッドミル排鉾を分級した場合、分級点と分級効率の間には前者を対数にとると直線関係が保たれ、分級点が大になると分級効率は低下することが示された。すなわち分級点と分級効率は無関係ではないことが示された。

8) 比重の異なる鉱物が混合されている鉱石パルプに対するサイクロンの分級結果をトロンプ配分率曲線にかく場合、脈石鉱物と有価鉱物にわけてえがくと操業実態の解析に有効な情報が得られることを指摘した。

9) 8)でのべた考え方をさらに発展させ、サイクロン内部での分級作用よりも比重分離作用すなわち重液サイクロンの選別作用を強調することにより、摩蝕・浮選回路の負担軽減などの可能性を述べた。

10) 最近日立選鉱工場において採用した「サイクロンバルク方式」操業での摩鉱回路を紹介して、選鉱技術面での新しい分野を開拓した事例を示した。

なお本報文でのべた「サイクロンバルク方式」操業については目下特許出願中であることを付記する。

参考文献

- (1) P.H. Son Fahlström Studies of the hydrocyclone as a classifier Proceedings of the 6 th I.M.P.C. Cannes (1963)
- (2) D.A. Dahlstrom Cyclone operating factors and capacities on coal and refuse slurries Trans. Amer. Inst. Min. Engrs. 184, 1949 p. 331