選炭選鉱における選別機の最近の進歩*

北 修 一**

Recent Developments of Mechanical Concentration Machines
in Coal and Mineral Processing

Shuichi KITA

ま え が き

選炭選鉱の最近の技術進歩には著しいものがある。選別の理論の発展は、低品位鉱や選別困難な鉱石・石炭の開発への再挑戦を可能としている。一方プラント操業費の一層の低減と、設備コストのミニマム化が要求されている。従って単位機械の大型化、計算機制御、新センサー適用、耐磨耗材・加工、対環境設備のコスト低減および操業法のトータルシステム化施策等が急速に進展して

いる。

これら技術の進歩と理論研究の発展を切り離なして選別機のみを論ずることは片手落ちの感があるけれども、工業化され、また工業化の域に達しつつある選別機械の最近のものに限って解説することとする。

1. シ グ 選 別

1.1 網下気室式ジグ

高桑教授によって1954年網下気室式ジグの原理が発表

表1 網下気室式ジグの各国の仕様例

名 称	TACUB®	BATAC®	KOMAG	OM	GI	BOKO	篩下気室
メーカ (国 名)	住友重機械 (日 本)	KHD (西ドイツ)			Fives-Cail Babcock (フランス)	STAMI- CARBON (オランダ)	
仕 様 例	TN-13	5062	OZ-8	OM-24-3	GI		LTX-16
網 室 巾 m	7.4	5.0	3.0	4.0	4.5		2.8
〃 長 m	6.5	6.2	8.0	1.0	6.3		5.7
網 面 積 m ²	40.2	30	24.0	6u×4=24	27		16.0
処理能力 t/h	—	—	<50×0.5mm>	240~650	細 粉 (ボタ50%)	—	<100×0mm>
(標 準)	600	500	500	(450)	350	—	150~200
空 気 弁	ロータリ弁 可変スロットル	板 弁 電子式空圧 開閉	ロータリ弁 可変スロットル	ロータリ弁 可変スロットル		板 弁 マイクロ スイッチ空圧 開閉	ロータリ弁 可変スロットル
備 考	網巾 3.1m 2槽×6室 有効網面積 21m ² が日本 での実績	塊炭用 6m 巾 稼動実績 680 t/h	網面積36m ² (4産物式) を制作中 外に2×2.4 のユニット 缶体式もある。	塊炭用の 650 t/h が 稼動 MACHINO- EXPORT カタログより	西独ザール で稼動	特許公報より	唐山地区で 稼動

* 昭和58年6月9日日本会第70回例会において発表

** 住友重機械工業㈱技術本部
昭和58年4月21日受理

され、住友重機械工業㈱により TACUB® ジグが工業化されて以来20余年を経た。この間各国にて同原理に基づくジグ選炭機が工業化された(表1)。

図1 BATAc (左) と TACUB (右) の気室構成

1. 槽体 2. 空気室 3. エアバルブ駆動
4. ロータリーエアバルブ 5. 床網
6. 人工床 7. フロート 8. ボタ抜弁

図2 ソ連 OM 型ジグ (18型)

1. 給炭 2. ボタ 3. 2号炭 4. 精炭
5. 入気 6. 排気 7. バックウォーター

図3 ポーランド OZ 型ジグ (8型)

TACUB と BATAc の各室における気室の構成は略同形をとる(図1)。BATAc の気室は TACUB よりも深い位置にある²⁾。ソ連の OM 型とポーランドの OZ 型は気室仕切り板が彎曲形であり、室内の気室配置が TACUB とは異なる^{2,3)}(図2, 3)。

TACUB 原理のジグは一基で大容量型が実現でき、缶体の重量が小さく設計できることが、バウム型と比し利点とされている。また網室巾の大きい大容量機になると従来のバウム型では網室巾方向に波高差があり、良い選別が達せられないので 2.5~3.0m が限界とされている。尤も日本の永田製作所は網室幅 4~5m の大型バウムジグの開発を行っている⁴⁾。

1.2 2重パルセーションジグ

圧縮空気の入排気量比×タイミング比の組合せで、水のパルセーションを自由に変更できる。生ずる波形をより積極的に広くコントロールする目的で、低高2つの圧縮空気源からの圧を作用させる方法が発表された。

沢田等は、試験装置によって実験し、給炭組成に適した波型を2重空気源により実現できることを実証した⁵⁾。

一方西独ルール炭田の選炭工場で、微粉サイズ領域までを効率よく選別できる2重パルセーションのジグを開発した⁶⁾(図4)。バウム型フェルスパージグ2槽2産物式で低サイクルパルセーションに、それよりもやや高い

図4 高サイクル空気添加式

図5 空気ダイアグラム

圧の高サイクル空気を作用せしめる⁷⁾(図5)。3 mm×0の微細粉を選別し 2×0.125 mm のサイズの灰分 5.5±0.7%, ボタ灰分80.8±3.5%の実績を得ている。

2. 浮 遊 選 別

2.1 浮選機の大型化

大量処理では浮選機を大型化することにより、プラントの床面積当り tph が大きく、プロセスコントロールが単純化されることは当然であるが大型化は窮極のところ tph 当り所要動力を低減する点に狙いがある。大型槽内のパルプの循環が必要にして充分なることが要求される。

2.1.1 空気自吸式

動力低減のため純自吸式機械攪はん型は一般にインペラーは槽の浅い部分に位置するか、浅槽型をとっている。

WEMCO 1+1 は縦長のタービン翼を使用する。タービン翼の上部は空気を巻きこんだパルプを孔明き分散板を経て放射状に噴出させる。翼の下部には竜巻き作用が生じ、槽下に循環してくるパルプをドラフトチューブ内から引揚げる。槽容積 2.8 m³ 以上の大型シリーズには容積 28.3 m³ までがあり、更に大型のものも実用化試験に供されている。この中120型(容積 8.5 m³)は欧米で鉍石・石炭用に5,100台以上が稼動している⁸⁾。

HSR セボネット浮選機 (High Set Rotor Sevonnett) は北大高桑健名誉教授の発明で、鶴永田製作所が工業化し、実効容積 14.5 m³ までの大型機シリーズを完成している。機械の特徴は円板の上下面に12枚の羽根をつけたタービン翼を、パルプの水面下僅か下で回転する(図6)。翼の浸水深さを極端に浅くして低動力を狙いとする。パルプは槽傾斜面から槽底に下り、タービン翼径と略等しい径の流通筒の下から竜巻状となって急上昇する。吸込みを助長するガイドプレートが槽底に設置される⁹⁾。槽容積 7.2 m³ の4セル1バンクが石炭用に稼動している。

図6 HSR セボネット浮選機
鶴永田製作所提供

図7 アゲテア浮選機パルプレベルコントロール

Booth 浮選機もロータは浅浸型で大型の 14.2 m³ が開発されている。

2.1.2 空気吹込式

Agitair 浮選機のその後の改良は槽形を折線形に下方に傾斜面を作り、従来の角形に拡がった槽底のスタビライザーは小型円形となっている。選炭用大型機に槽容積 28.3 m³, 鉍石用には 42.5 m³ の超大型がある¹⁰⁾。

DENVER, D-R 型の鉍石用 36.1 m³ の大型機があるが、構造上の大きい設計変更はない。

大型槽は給鉱の質の変動を吸収できる利点をもつが、特にパルプレベルの調整が肝要である。大型槽のパルプレベル調整は、排鉱箱で行うしかない。西独ルール炭田の大型アゲテア浮選機 (16 m³ と 10 m³) の排鉱箱に設置されたレベルコントロール(図7)と WEMCO 1+1 のコントロール(図8)は同様原理である¹¹⁾。前者はパイプ浸漬形空気圧センサーであり、WEMCO は排鉱箱の下部の空気室差圧発信器でレベル検出を行う。何れも箱の下部より、排鉱を引出すのが特徴である。

2.2 静的浮選機

粗粒や極微粒子の浮選の動力学や新表面活性剤の適用は種々の浮選機を創造しているようである。静的浮選機

図8 WEMCO 1+1 浮選機用レベル制御系統図

とは気泡と鉱粒が完全向流するコラム型とパルプレベル面近くで鉱化フロスを造るフロスセパレーター型の2つに大別できる。何れも単一セル内でのバル循環流がないと解釈してよいであろう。

2.2.1 コラム型浮選機

英国の Leeds 大学の研究による Norton-Leeds Column Cell (図9) は、槽底への吹込空気⑥は槽底の①④⑤内で分散し給鉱を横切ってコラムを上昇する。その上に230 mm 間隔で細隙板⑧が4枚ある。上昇する鉱化気泡が細隙バリアをくぐりぬける時に淘汰作用をうけ精選される¹²⁾。

図9 Single Norton-Leeds column cell

図10 Schematic diagram of a flotation column

カナダで開発された Flotation Column (図10) は円筒セルの最底部の空気分散板を通った気泡群は、セル上部の給鉱パルプと完全向流する。フロス層のやや下に洗滌水が一樣に与えられる。フロス層中のスライムは水と共に下降する。第1号機は銅-モリブデンのバルク精鉱からのモリブデン精鉱を採取するもので、1981年から稼動している。現在普通硫化鉱浮選に採用されている最大のものはセル径 1,830 φ で 2,000 t/d を処理している¹³⁾。

米国 Deister Concentrator 社の Flotaire Flotation Column (図11) は円筒形セルの最下部からアスピレーターを介し微細空気水を押しこむ。2枚の孔明き板により槽全面に一樣に空気泡・水が分散し上昇する。槽上部のフロス層下にある給鉱パルプ分散箱にもアスピレーターの気泡水が入る。テールは上昇気泡水と完全向流をし、底部中央から排出される¹⁴⁾。

図11 FLOTAIRE CELL

図12 粗粒りん鉱石浮選

図13 SWIRL CELL

Soviet froth separator. (1) Feed tank; (2) Sloping baffles; (3) Divider; (4) Preliminary aeration channel; (5) Nozzles; (6) Aerators; (7) Overflow lip; (8) Froth paddle; (9) Pyramid-shaped tank; (10) Valve.

図14 フロスセパレーター

アスピレーター水圧は $2.4 \sim 3.1 \text{ kg/cm}^2$ で水量は $5.1 \sim 6.1 \text{ m}^3/\text{min}$ を要する。槽の高さは約 5 m 、槽径は $2 \sim 4 \text{ m}$ である。大型槽は槽容積 31 m^3 で水ポンプ動力は 60

図15 Slime Aerator of the Pneumatic (froth) Flotation Unit

図16 Separating Vessel of the "Pneumatic" Froth Flotation

IP である。更に大きい 48 m^3 槽もある。

この槽は粗粒浮選が可能である。燐鉱石の粗粒浮選の機械攪拌式と比較した例を図12に示す¹⁵⁾。

Flotaire 浮選機はまた極微粒子の浮選にも適しカオリンの精選、石炭などにも好成績を納めるという。

2.2.2 フロスセパレーター式

水槽表面近くに給鉱し、フロス層を形成させ直ちにフロスを取り出す方式がある。1965 年日本で発明された SWIRL CELL は石炭用に稼動していた¹⁶⁾。(図13) ベルリン大学で実験が行われフリージェット式¹⁷⁾、その他この種のものは幾つかある。

図17 Ash Contents of the Products as a Function of the Air/slurry Ratio

ソ連のフロッセパレーター¹⁷⁾(図14)は1961年に開発され1972年までに種々の鉱石800万tを処理している。下部がコーン形のセルの上部中央からの給鉱は、分配器をへてトラフにおち、水ジェット5で激しく攪はんされ表面に出る。フロス層下部に、ゴム製のポーラスパイプ6(40~60ヶ/cm²)があり空気が吹込まれる。空気圧は2.0kg/cm²、空気量は最大2m³/minである。フロスは刃長1.6mの両サイド面から8によりかき出される。フロス層厚は100mmから1,000mmにも及ぶ。

給鉱サイズは75μmから2~3mmで粗粒を浮かす特徴がある。-75μmを除かないと成績はおちる。

Slime Aeratorは西独ルール炭鉱で工業化された¹⁹⁾。スライムエアレーター(図15)は条件賦与された石炭パルプに微細空気を吹込み石炭粒/気泡の凝集体を作る。パルプ通路には4~6mm間隔の低圧ポリエチレン製管が10数本あり、0.1mm径の気泡がポラス管から吹出る。ポーラス孔径は15μ(開孔率40%)である。パルプ通過速度は2m/s~12m/sで、粒子・気泡の接着時間は数μs以下であるから12m/sでも充分である。70m³/hの空気吹込み量である。浮選槽(図16)の上部には空気とスラリを配分するリング状のパイプがあり、夫々10ヶに分割される。エアレーターを通過したスラリは、浮選槽のコーン部の中央より稍下に注入され、圧力が解放される。テーリングはコーン下部より排出する。

空気/スラリ比は夫々電気制御弁で変更できる。極微粒石炭の精選に適している。0.1mm以下で-9μm40%を処理した1例を示す(図17)。

2.2.3 特殊な試験段階の浮選

微粒子の浮選分離には色々な提案がある。加圧浮選、電解気泡浮選またはフロスレス浮選などは水処理や化学工業で実用化されている。

CGA法は微細なガス泡群²⁰⁾(Colloidal Gas Aphrons)

を予め作ってからコラムに吹込む方法で石炭の脱灰・脱硫化鉄に注目された。格段に良い成果は得られなかったようである。化学工業の分離装置KARR Columnが住友重機械工業で試験されている²¹⁾。またソ連のフロスレス²²⁾浮選試験等がある。

3. 比重選別

重液選鉱法は重液サイクロンが選別困難な細粒に広く使用されている。石炭の重液サイクロン法で×0mmのフィードが実用化され、また近比重の鉱物同志の分離への挑戦、粗いボタ粒子を事前除去するスカルパーの挿入など、多くの話題はあるが、各比重選別法の代表的機種に限って記載する。

図18 DWP (Wilmot Eng. Co, カタログより)

3.1 TRIFLO セパレータ

重液の渦巻による空心の表面に粒子を供給する DWP 法 (図18) は1965年米国の Mascot 選鉱場で始めて実用化された²³⁾。8×0.5 mm の亜鉛鉱を 52 t/h 処理し、その後鉱石・石炭に広く稼動され、日本では赤平炭鉱で細粒用に使用されている²⁴⁾。

TRIFLO セパレータ (図19) は DWP シリンダーベッセルを直列にした2段方式である²⁵⁾。重液のみの圧入口は2ヶ所となる。 H_1 と H_2 は重液背圧を調整する。原鉱は粒度組成×比重組成の変動がさけられない。変動の大波は一般の重液比重調整によるが、小時間内での変動は、一定給鉱量を以ってしても分離ロスを生ずる。2段方式はラッファースカベンジャーの働きをもつ。

イタリーの Masua 鉱山に於て従来の DWP と、この TRIFLO を並列に試験した結果の例を鉛について試験した (図20)。2段方式で品位の高いシンの増加が達せられた²⁶⁾。

3.2 Twin Shaking Table

揺動テーブルは鉱石・石炭の特定粒度範囲の処理に捨

図19 The two-stage TRI-FLO separator

図20 鉛回収率と品位

図21 Twin arrangement of shaking tables

て難しいもので100年間の歴史をもつ。しかし処理量当り設置面積が大きい欠点がある。テーブルを吊下げ式とし2重又は3重に重ねて、1つのモーターで駆動する方式がある。Twin の双子式は、平面的にも設置面積を節約し、給鉱の配分を容易にした。西独 KHD 社によって開発されたものである²⁷⁾ (図21, 22, 23)。

双子テーブル駆動装置はトッグルジョイント機構で、反力が相殺し合う (図24)。偏心軸回転はピボットレバーを介しスプリング荷重をうけるガイドロッドの運動となり、ガイドロッドエンドはテーブルデッキに固定される。

図22 Layout of twin shaking tables

図23 General view of a shaking table tower

図24 Drive for twin shaking tables

図25 CWC

図26 DSM-WOC

ガイドロッドのヒンデはスベリ軸受で球面をもたせてあり微少偏位を吸収しうる。ここには強制注油が行われている。駆動軸受は垂直方向に位置をずらすことによりストロークアングルを変え、水平ストローク長と合成加速

比を調整する。連結機構は振動数と加速ダイアグラムに対し、電子計算機によって決定された。

テーブルサイズは 1.8×4.8 m, 板面リップルは木を用い全面をポリウレタン膜処理をしている。分級サイクロンによるアンダフローの 3mm 以下を供給し、1 台当たり 4.3 t/h を処理する。数百 t/h の粗粒処理プラントが建設中である。

3.3 WOC

粉化し易い石炭の選別に適する水のみによる WOC (water only cyclone) は約20年前に、カナダの J. Visman により発明され、CWC (Compound water cyclone) と称せられた²⁸⁾(図25)。DSM の WOC を参考に図示する(図26)。

McNally Visman Triclone[®] は、同社が各種サイクロンに使用する cycloid 注入形を使用している(図27)²⁹⁾。図28のAはゆるい傾斜部で干渉沈降帯であり、軽い大きい炭粒の沈下を妨げている。Bは第2のコンカル部で、上層部よりも中心流れはより強く中間炭の軽い部分はボルトックスファインダーに引かかる。Cは成層帯である。

Liller の特許になる WOC (図29)³⁰⁾はスラurry供給エ

図27 McNALLY CYCLOIDAL INLET

図28 McNALLY VISMAN TRICONE

図29 The Liller patented high capacity centrifugal cyclone separator

ルボーは高速でも乱流なしに流入する。それはエルボーの絞り度と胴体開口面積の関係が重要であるという。流入速度が大であると胴体とファイダーの環状部に乱流が起るが、本圧入法によると乱流はない、従ってボルテックスファインダー下端からのショートサーキットがない。50×0 mm を処理し (18") 分離比重 1.2~1.7 である。内面は高純度アルミナセラミックスで精炭処理 200,000 t 以上の寿命がある。

3.4 乾式選炭

水を使用しない空気力選炭機 (エアジグ, エアテーブル) は選別精度は 50×1 mm に対し E_p は 0.30 前後と言われている。

米国西部炭の露天掘炭の表土岩石を除きかつ 2~3% の夾みも除去できる Dry table (図30) のパイロットプラ

図30 Dry table for western coal

ントが稼動中と言われるが詳細は不明である。

流動床乾式選炭機が 9 th ICPC で発表された³²⁾(図31)。エンドレスパドルが沈下したボタを一方から排出し、浮遊炭は反対側より流出する。流動床メジウムは 0.6×0.125 mm の石灰石で之に赤鉄鉱または磁鉄鉱を混合する。0.19 m×5.5 m 長さの試験機で 20×0.8 mm を処理し、20×6 mm, 6×0.8 mm フラクションの E_p は夫々 0.04 ($d_p=1.54$) 0.20 ($d_p=1.54$) であった。

パイロットプラントが建設中である。流動床 1 m 巾で 30 t/h が達成できる。

4. 凝集造粒

油造粒による微粉炭の脱灰脱水は普通の浮選より格段により成績を達成することができる。しかも 1~2 mm の粗粒を含むスラーリの処理も可能である。しかし重油の使用量が多く、球状化するには動力を多く要する。

Olifloc 法は油凝集法による比較的強く凝集した脱灰精炭をうる方法で、使用したミキサーは、ターボトロンと呼ばれる^{33,34)}(図32)。タービン翼は油圧モータで駆動され、スラーリと油をタンクの底から押しこむ。下部コーン部に位置する主翼は 300 mm 径で周速は 26.2 m/s.

図31 Coal Cleaning Using the Fluidized Bed Cascade

(turbotron Mixer)

図32 オリフロク法用

タンク容積は 1.1 m³, 給炭は 15 t/h である。滞留時間は 1～2 分である。タンク上部より出る凝集精炭は固定篩で脱水デスライムされる。浮選精炭用真空フィルターに混合供給し更に脱水を行うこともある。

あ と が き

最近の文献および海外での見聞を基に、主な選別機を総覧した。詳しくは添付文献を参照されたい。文献の幾つかは、早大原田教授、京大若松教授より載っている。また東大名誉教授今泉先生から選鉱選炭の最近事情について御教示を頂いた。本文をまとめるに当り深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 北修一：新しい選炭機械の開発，石炭情報，No. 3 (1981) p. 12
- 2) MACHINO-EXPORT カタログ，前掲 1)
- 3) K. Wrobel & Z. Broma: Mining-Power industry, No. 4 (1981) p. 7-9
- 4) 田中実，久保泰雄：網室幅 5 m パウム型ジグの開発について，日本鉱業会誌，Vol. 97, No. 1124 (1981) p. 1126-1127
- 5) Y. Sawada 外：Theoretical Analysis on Air-Pulsated Jigs with New Pulsation Mechanism, 9th ICPC, D-1(1982)
- 6) E. Fellensiek: Feinstkornsotierung auf einer neuartigen in Doppelfrequenz geulsten Durchsetzmaschine, Glückauf-Forschungshafte, 42, Nr. 3 (1981) p. 130-136
- 7) A. Bahr 外：Recent Developments and Research in the Separating of Fine Coal < 2 mm with Ruhrkohle AG, 9th ICPC, C-6 (1982) p. 1-18
- 8) 小川七郎：大型浮選機について，日本鉱業会誌，Vol. 95, No. 1099 (1979) p. 41-43
- 9) 鎌田宏外：HSR SEVONETT 浮選機の性能に及ぼす各種要因の効果について，日本鉱業会，S. 58年度春季大会講演要旨集，p. 141-142
- 10) P. Young: Flotation Machines, Min Magazine, Jan (1982) p. 35-59
- 11) A. Supp & H. Auerbach: Grossraum-Flotation-sanlagen in der Praxis der Steinkohlensaufbereitung des Ruhrgebiets, Erzmetall, 33 Nr. 9 (1980) p. 441-445
- 12) P. Young: 前掲 10) の p. 51
- 13) L.A. Adorjan: Mineral Processing, Min Magazine Ann. Review (1982) p. 263
- 14) C.A. Hollingsworth: The Flotaire Flotation Cell, AIME Ann Meeting, Chicago (1981) 81-4, p. 1-9
- 15) Deister Concentrator Inc. カタログ
- 16) 桜田幸一：SWIRL CELL について，選炭，Vol. 15, No. 80 (1965) p. 94-98
- 17) A. Alizadeh & W. Simons: Free Jet Flotation of Coal, Coal Preparation and Use, A World Review, 1982 (New Delhi) p. 175-177 (9th ICPC Supplements)
- 18) P. Young: 前掲 10) の p. 47 および原田種臣：粗粒子段階での脉石分離の意義と技術展望，日本鉱業会誌，S. 56 秋季大会，分科会 (J) p. 27
- 19) A. Bahr 外：前掲 7) p. 19-25
- 20) R.H. Yoon & G.S. Halsay: Microgas Dispersion for Fine Coal Cleaning, U.S. DOE/PC/20234-T2 (1981) pp. 48
- 21) KARR COLUMN 住友重機械工業資料
- 22) O.S. Bogdanov 外：Influence of some Factors of Fine Particle Flotation, AIME, ISFPP (1980) Chapter 36, p. 710
- 23) J.H. Polhemus & B.J. Ammon: First Application of Dyna Whirlpool Process to Zine Ore, Tr. Inst Min SOC C 75-712 (1966) C 126
- 24) 川島勇：DWP 重演選別機と赤平における操業実績について，浮選，Vol. 27, No. 2 (1980) p. 15-24
- 25) 原田種臣：前掲 18) p. 24
- 26) G. Ferrara & H.J. Ruff: Dynamic Dense Medium Separation Process (1), Erzmetall, 35 Nr. 6 (1982) p. 294-299
- 27) ANON: Shaking tables staging a comeback, Coal Gold Base Miner South Afr. Vol. 29, No. 4 (1981) p. 60-
- 28) J. Visman: The Cleaning of Highly Friable Coals by Water Cyclones, 4th ICPC (1962) C-2, p. 1-8
- 29) McNally Pittsburg Mfg. Corp: Coal Preparation Manual, M 576 p. 60
- 30) D.I. Liller: Cyclone Separates Close Gravities, Coal Age, Jan (1982) p. 72-73
- 31) ANON: Dry Table for Western Coal, Power, Sept (1978) p. 96
- 32) M.W. Mikhall & S.G. Butcher: Novel Techniques Applied to Beneficiation of Western Coals. 9th ICPC, F-3, p. 11-14
- 33) 北修一：前掲 1) p. 20
- 34) B. Bogenschneider u.W. Erdmann: Die betriebliche Erprobung des Olifloc-Verfahrens bei der Ruhrkohle AG, Aufbereitungs-Technik, 22, Nr. 4 (1981) p. 188-198