次世代型石炭高効率発電のための アドバンストコールクリーニング技術の動向*

伊藤 真由美¹

Recent Developments in Advanced Coal Cleaning

by Mayumi ITO^a

a. Laboratory of Mineral Processing and Resources Recycling, Graduate School of Engineering,
Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan
(Corresponding author E-mail: itomayu@eng.hokudai.ac.jp)

The rise in demand for coal due to growth in Asia is inducing coal price increases and it will be necessary to develop cleaning method for difficult-to-treat coal. High-efficiency power generation techniques are required to reduce greenhouse gas emissions and it is necessary to reduce ash content of coal significantly before combustion. Advanced coal cleaning techniques can generate low ash coals and this paper reviews recent applications of low ash coal, recent developments in commercial scale and lab scale flotation, and research results of enhanced gravity separators and comminution.

KEY WORDS: Coal, Coal Cleaning, Flotation, Enhanced Gravity Separators

1. はじめに

石油価格の急騰により、主要なエネルギー資源である石炭に世界的な関心が集まっている。しかし石炭利用は環境問題も抱えており、環境に調和したクリーンな利用が望まれる。

アジアでは急激な経済発展に伴い石炭の需要が急激に増大、価格も上昇しており、今後は選炭が難しい石炭も開発・利用せざるをえなくなる。また、利用に際しては地球温暖化対策のため、CO₂排出を抑制しながら利用する「発電の高効率化」が求められており、一部の技術では燃焼前の選炭工程での低灰化を必要とする。このような背景から、従来法よりも高度な選炭技術の導入の必要性が高まっており、近年は実用化を意識し、少ない投入エネルギー・試薬による効率的な処理法の開発を目的とした研究が増えてきている。例えばディーゼル代替となるスラリー状燃料(CWM or CWS)の製造前処理として、従来とは異なる発想の効率的な処理法が提案されている。本総説ではアドバンストコールクリーニング(高度選炭)技術に焦点を当て、2000年以降の論文を中心に最近の研究開発動向を紹介する。

2. コールクリーニング

コールクリーニング(選炭・脱灰)とは、灰分(鉱物質含有量)の低い精炭を得るための処理を指す。採掘された原炭(ROM炭)

Fig.1 Particle sizes for coal cleaning methods.

を粉砕・整粒し、石炭質と鉱物質の物理的性質の差を利用して選別することで、石炭の灰分値が低減する。Fig. 1に主な選炭法とそれに適したフィード粒径を示す¹⁾。鉱物質が比較的大きい場合は数十～数mm程度に破碎し、重液バスやジグ、サイクロンなどで処理することで目標灰分値を満たす精炭を得ることが出来る。

3. アドバンストコールクリーニング

ジグやサイクロンによる粗粒子の選炭では目標が達成できない場合がある。これは1)超低灰分化、2)高硫黄炭の高度脱硫、3)鉱物質の単体分離が困難な石炭(選炭困難炭)の処理、4)微粉の処理を目的とする場合で、より高度な選別装置で処理するためアドバンストコールクリーニングと呼ばれる。物理的選別を行うためには石炭質と鉱物質を粉砕工程で単体分離させる必要がある。単体分離性は粒度の減少に伴い増大するため、アドバンストコールクリーニングでは微粒子の処理を対象とすることが多い。遠心

*2008年6月16日受付 9月2日受理

1. 普通会員 博士(工学)北海道大学 大学院工学研究科 環境循環システム専攻 資源再生工学研究室 助教
[著者連絡先] FAX: 011-706-6315

E-mail: itomayu@eng.hokudai.ac.jp

キーワード: 石炭, 選炭, コールクリーニング, アドバンストコールクリーニング, 浮選, EGS

Fig.2 High efficiency power generation using hyper coal.

力を利用する比重選別装置 (EGS: Enhanced gravity separators) を用いる方法や濡れ性の差を利用する浮選・選択凝集・造粒などの手法がある。

酸性雨の原因である硫黄分の除去 (脱硫) の研究は、1980 年～1990 年代にアメリカ炭や中国炭を対象に盛んに行なわれ、筆者もこの課題に取り組んだ。上述のアドバンストコールクリーニング技術が研究・開発されたほか、物理選別が適用できない有機硫黄に対し、化学的コールクリーニング法²⁾や微生物脱硫法³⁾などが研究された。近年は、この時期に開発された脱硫技術を改良し、選炭困難炭など各種の石炭に適用して、より安価に処理できるようになりつつある。

4. 高効率発電のためのアドバンストコールクリーニング

石炭は埋蔵量が豊富で発熱量当りの価格が他のエネルギー資源に比べて安価であるが、環境面では問題を抱えている。硫黄は高価な脱硫設備を設置できない発電所では酸性雨の原因となり、大量の石炭を使用した後に残る灰はその処分が問題となっている。そして、最大の問題が地球温暖化に寄与する二酸化炭素の排出である。発電に占める石炭火力の比率⁴⁾はアメリカ 50%、中国 78%、ドイツ 50%、日本 27% (2004 年) であり、石炭は主要なエネルギー源である。発電で得られる単位エネルギー当りの CO₂ 排出量⁵⁾は石炭を 1 とすると、石油が 0.76、天然ガスが 0.62 であり (2004 年)、石炭火力における発電効率の向上は CO₂ 排出抑制に大きく寄与し、我が国の石炭利用技術開発の長期戦略の 1 つに位置づけられている。石炭火力発電では、石炭が鉱物粒子を含んでいるため燃焼ガスで直接タービンを回して発電することができず、燃焼で発生する熱で水を加熱し、その蒸気でタービンを回す。高い蒸気温度で運転できれば発電効率が向上し CO₂ を削減できるため、ボイラの技術開発も盛んにおこなわれている。ところで石炭の燃焼ガスで直接タービンを回すことができれば、高い温度と圧力の流体でのタービン駆動が可能になるため蒸気タービンよりも高い発電効率を得られる。石炭を用いる場合も、ガス化発電、超低灰・低アルカリ炭のガスタービン直接燃焼発電などの方式により発電効率の向上が期待できる⁶⁾。ガスタービン直接燃焼では、生成する灰の粒径や組成がタービンプレードへの粒子付着やスケール生成に影響し、アルカリ金属はブレード腐食物質であるため、超低灰分で灰粒径が小さく、液体燃料の要求品質である Na+K<0.5ppm を満たす必要がある。Fig.2 に NEDO が開発した超低灰・低アルカリ炭 (ハイパーコール) の製造フローを示す^{7,8)}。まず、ROM 炭をアドバンストコールクリーニング処理

Fig.3 Ash contents of coals, production methods, and applications.

で灰分 5% にし、次いで高温高压下で溶剤中に溶解させる。石炭は巨大分子が凝集した状態にあり、溶剤により非共有結合が緩和されると液状になるため、鉱物質は重力により沈降する。その後、上澄液をイオン交換処理してアルカリ金属を除去し、溶剤を揮発分離すると灰分 0.02%、アルカリ金属濃度 0.5ppm 以下の固体状のハイパーコールが得られる。これをガスタービンで直接燃焼する。この技術は石炭液化で培った成果を応用しているが、石炭液化は液体燃料として活用可能であるものの溶剤による水素添加が必要で高コストであるのに対し、本法では水素不要で溶剤を循環利用可能である。Fig.2 から分かるように溶剤抽出での石炭溶解量は 70% 程度であり、抽出残渣炭を既往の火力発電で使う場合の目標灰分は約 15% であるため、処理前にアドバンストコールクリーニングにより灰分を 5% 程度まで低減する必要がある。同様にガスタービン直接燃焼の目的でオーストラリア (CSIRO) やイギリス (Nottingham Fuel and Energy Centre) でもウルトラクリーンコール (灰分 0.1-0.2%) 製造の技術開発が行なわれている^{9,10)}が、こちらはアルカリや酸で浸出して鉱物質除去を行う方法を採用しており、灰分やアルカリ金属濃度がハイパーコールよりも若干高い。

微粒の精炭 (10-20 μm) を水に固体濃度 70% 程度で添加剤とともに分散させ、スラリー状の燃料として利用する (CWM or CWS) 技術も開発されている例えば⁶⁾。この場合も灰分をおよそ 1-6% に低減する必要があり、スーパークリーンコールなどと呼ばれる。この燃料はディーゼル代替や高効率微粉炭火力発電などで利用可能とされている。

Fig. 3 に石炭灰分と利用用途・製造方法を示す。ガスタービン直接燃焼に用いるためには徹底的に不純物を除去する必要がある。最終的に溶剤や酸を用いて化学処理され灰分 0.2% 以下になる。ディーゼル代替や高効率微粉炭火力発電に供することのできるスラリー状燃料は物理選別法で製造可能で、灰分 6% 以下程度の低灰炭が望まれており、灰分 1% くらいが物理選別による限界である¹¹⁾。

5. アドバンストコールクリーニングの研究動向

このように、石炭を高度利用するためにはアドバンストコールクリーニングが必要不可欠であり、1980 年代から各国で研究されている。初期の研究は、物理選別の限界に挑戦しどこまで低灰分化できるかを検討するものが多く、灰分の低いスーパークリーンコールを作るために数 μm まで粉碎し、浮選や造粒で処理する方法の開発が盛んに行なわれ、筆者の所属する研究室でも多数の検討が行われた例えば¹²⁾。コールクリーニングに関する総説・著作も多数あり例えば¹³⁾、石炭浮選を中心とした著作¹⁾も出版されている。筆者はコールクリーニング・アドバンストコールクリーニングの研究論文を毎年収集し、日本エネルギー学会誌に掲載さ

Fig. 4 Installed capacity of coal preparation methods.

Fig. 5 Performance of column and conventional flotation cells.

れるエネルギー関連の論文のレビュー「昨年度における重要なエネルギー関係事項（コーククリーニング）」を担当・執筆している。本報では、収集した論文のうちのアドバンスコーククリーニング関連、2000年以降の研究を中心に研究動向を紹介する。

石炭生成時の混入などに起因する鉱物粒子の大きさは、1-10 μm 程度のものと 100 μm 以上のものが存在し¹⁴⁾、アドバンスコーククリーニングではこれらの鉱物が単体分離している粒径、約 500 μm 以下（低灰化を目指す場合は 10 μm 以下）の微粉を選別する。

5・1 浮選・選択凝集

濡れ性の差を利用する浮選や選択凝集・造粒法は微粒子選別に適しており、鉱物質に比べ石炭質の多くは疎水性が大であることから多くの研究がなされてきた。

5・1・1 浮選の操業 Fig. 4 に主な国の商用施設での選炭法別の処理割合を示す¹⁵⁾。石炭浮選の研究は古くから行われていたが、粗粒子の処理に比べ粉砕・分級・試薬・脱水コストがかかるため実用化していなかった。しかし装置改良が進み、1990年代後半から急激に導入が増大し、2000年にはアメリカで 20.3%、中国で 14.0%、世界平均 13.6% に達した (Fig. 4)。現在も導入が進んでいる。導入の目的は 3 章で述べた鉱物質の単体分離が困難な石炭（選炭困難炭）の処理、従来廃棄していた微粉炭の回収が主である。浮選機は機械攪拌型とカラム型があるが石炭浮選では Fig. 5 に示すようにカラム型の方が選別精度が高く、リリースアナリシス法による処理結果（紛れ込みを極力抑える条件で浮選し、対象とする石炭を極めて高い選別効率で浮選分離した場合に得られる灰分値を知るための試験法）に非常に近い。カラム型は機械攪拌型よりも微細気泡を発生させることができ、選別ゾーンでの選別性も高いため微粒子を対象に高効率分離が達成できる。Table 1 はアメリカの主な石炭商用カラム浮選機の一覧で

Table 1 Commercial column installations for coal in the U.S.

Company/Location	Brand	Number of Units	Diameter, ft	Height, ft	Particle Size
Alpha Natural Resources—White Tail	Eriez/CPT	5	14	28	100 mesh $\times$ 0
Alpha Natural Resources—Middle Fork	Microcel	5	10	25	100 mesh $\times$ 0
Alpha Natural Resources—Holston	Microcel	1	14	30	100 mesh $\times$ 0
Alpha Natural Resources—Roxanna	Microcel	2	13	28	65 mesh $\times$ 0
Alpha Natural Resources—Toms Creek	Microcel	2	14	28	100 mesh $\times$ 0
Alpha Natural Resources—Brooks Run	Microcel	2	15	35	100 mesh $\times$ 0
Carbonitronics Fuel—Pawney	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
Carbonitronics Fuel—Gibraltar	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
Carbonitronics Fuel—Linville	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
Cline Resources—Coal Clean	Eriez/CPT	3	15	28	100 mesh $\times$ 0
CONSOL Energy—Keystone	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
CQ, Inc.—Ginger Hill	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
CQ, Inc.—Pleasant Ridge	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
International Coal Group—Marrowbone	Microcel	1	8	26	150 mesh $\times$ 0
Horizon Natural Resources—Lady Dunn	Microcel	3	14	30	100 mesh $\times$ 0
Massey Energy—Power Mountain	Eriez/CPT	2	13	24	100 $\times$ 325 mesh
Massey Energy—Liberty	Eriez/CPT	3	13	24	100 $\times$ 325 mesh
Massey Energy—Bandmill	Eimco	2	13	24	100 $\times$ 325 mesh
Massey Energy—Marfork	Jameson	4	16	12	100 mesh $\times$ 0
Ohio Valley—Century	Eriez/CPT	2	14	24	100 $\times$ 325 mesh
Peabody—Sugar Camp	Jameson	1	16	12	100 mesh $\times$ 0
Powell Mountain—Mayflower	Ken-Flote	4	8	22	100 mesh $\times$ 0
Sigmon Mining—Sigmon	Eriez/CPT	2	14	28	100 mesh $\times$ 0
TECO Mining—Clintwood Elkhorn	Eriez/CPT	2	10	24	100 $\times$ 325 mesh

ある。Microcel, Jameson, CoalPro (Eriez/CPT) が主に使われており、一般に 150 μm 以下の粒径に適用されている。

Microcel カラム浮選機はフィード部のモーションレスミキサーで微細気泡と粒子を効率的に付着させることが出来るため、1980～1990 年代にスーパークリーンコーク製造の研究に用いられた。モーションレスミキサーを設置したカラム浮選機では、少ない捕収剤添加量で低灰炭が得られることが実証されている¹⁶⁾。従来の Jameson 浮選機は Microcel のように選別効率が高くないが、コンパクトな設備で安い運転コストという利点がある。その後改良が進み 2001 年には米国東部の選炭工場に直径 5m (0.8t/h) の Jamson 浮選機が導入され¹⁷⁾、90% 網下通過径 45 μm 、灰分 30% のフィードから灰分 6% の低灰炭が得られたことが報告された。また、通常のカラム浮選機では -150 μm 程度の微粒子を処理するが、Cowburn ら¹⁸⁾ は、Jameson 浮選機での石炭粒子の回収率が粒子径の増大と共に低下する要因についてまとめ、粗粒子 (+0.5mm) の浮遊性を向上させるためには、攪拌強度を低減するためにジェット速度を小さくするのが有効であることを報告した。オーストラリアのプラントにその成果が導入されており、この方法で粗粒を含む幅広い粒度分布を持つフィードを処理できる。その他、浮選機を導入した結果、著しい脱灰効果が得られたという報告や、炭種の特性に依じた最適処理条件の検討などが多く報告されている。

石炭浮選において粒子、捕収剤、気泡間の相互作用は極めて複雑である。捕収剤として油を用いるが、油添加は石炭表面を疎水化するとともに、粒子の非選択的な凝集ももたらす。この現象は炭質によってその生じ方が異なる。Polata ら¹⁹⁾ は、粒子、捕収剤、気泡間の相互作用を化学的、物理的（機械的）作用に分類し、既往の文献を調べて整理し、現場の技術者に役立つように、総説としてまとめている。

5・1・2 浮選・選択凝集に関する研究 超微粒子の処理では、粒子の比表面積が大きく多量に試薬を要する、粗粒に比べ気泡付着が困難、紛れ込みが多いなど問題があるため、これらの克服を目指した研究が近年多く行われている。

Honaker ら²⁰⁾ は、フロスゾーンで気泡が合一する際に疎水性粒子よりも弱疎水性粒子が脱離する確率が高くなり選別性が向上する現象を利用して、フロス層に強疎水性粒子を添加する方法を提案した。これを利用し、無煙炭の浮選に疎水性の強い瀝青炭粒子を添加することで、回収率を低下させずに灰分を 5% 低減できた。Atesok ら²¹⁾ は、-38 μm の微粉炭にキャリアーとして 0.1-0.3mm

Fig.6-1 Probable error as a function of particle size.

Fig.6-2 Specific gravity of separation as a function of particle size.

の疎水性石炭を添加し、微粉炭をキャリア粒子に付着・凝集させた状態で起泡剤のみで浮選すると、灰分を 16.3% から 8.3% に低減できることを報告した。Shen ら²²⁾ は、平均粒径 4-5 μm の石炭スラリーにイソオクタンを加え、いったん加圧下においた後、減圧し、攪拌することで微細気泡-石炭凝集体を形成させ、これを浮上させて精炭を回収する方法を検討し、2 段処理で灰分を 33% から 6.3% に低減できることを報告した。Honaker ら²³⁾ は、捕収剤などの薬剤を添加しなくても 3-5 μm の微粒石炭の脱灰ができる可能性を見出した。捕収剤無添加で pH のみを変化させた溶液中で石炭微粒子を凝集沈降させ、鉱物微粒子が分散している上澄と分離し、脱灰率を求めた。7 炭種の選択凝集試験を行ったところ、ほとんどの石炭は、pH8.5-9.5 で脱灰効果が認められた。ゼータ電位測定、接触角測定結果より、pH8.5-9.5 の範囲で鉱物質が分散し、石炭質が凝集するため、灰分及び硫黄分除去率が高くなること、接触角の大きな疎水性石炭では疎水性相互作用力による凝集力が大きく寄与することを明らかにした。また、DLVO 理論を拡大して疎水性相互作用力を付加した式を用いて粒子間に働く全相互作用ポテンシャルを求め、疎水性凝集による脱灰が起こることを示した。-10 μm の Elikhorn No.3 炭では、可燃成分回収率 86.3% で、灰分が 12% から 1.14% に低下、黄鉄鉱硫黄分が 0.25% から 0.03% に低下した。微粒子浮選では微細気泡を用いるため、気泡の上昇速度が遅いことが問題となる。Ping ら²⁴⁾ は微細気泡と遠心力を用いる円形遠心浮選機を開発し、微細気泡による微粒石炭の浮選においても短時間で高い選別性が得られることを報告した。湯川ら²⁵⁾ は、低品位炭を熱水乾燥法で処理して表面を疎水性に改質してから浮選し、その精炭をアルカリ熱水溶液法で処理することで、灰分 1% 以下の低灰炭が得られることを報告した。褐炭などの低品位炭は発熱量が低く、高含水率で自然発火しやすいなどの理由により山元での利用を除きほとんどが未利用である。膨大な賦存量のある低品位炭の改質と低灰分化を行ない、スラリー燃料化して輸送し高効率発電で利用するための研究が活発化している。

5・1・3 スラリー燃料製造のための逆浮選 従来の選炭では、粉碎産物を粗粒、細粒、微粒に分級後、それぞれに適した選炭法で処理し、脱水を経て出荷している。しかし粗粒では単体分離性が悪い選別成績に限界があり、微粒は脱水・乾燥にコストを要する。微粉炭を水に懸濁した状態（スラリー状態）で発電に利用する方式を採用すれば、山元で微粉碎して全量を浮選することで低灰分にでき、また選炭後にスラリー化を行なうため脱水が不要となる。スラリー化に際しては、石炭の水中の安定分

散のために石炭粒子の親水化が必要であり、選炭産物が親水性であれば、安定化試薬の削減につながる。表面酸化した石炭や低品位炭は疎水性が低いことから Laskowski ら¹¹⁾ は、鉱物質を浮かせ、石炭を尾鉱として回収する逆浮選が有効であることを指摘し、逆浮選のための捕収剤であるアミン系 DTAC、DTAB の効果²⁶⁾ を検討した。さらにアミン系の捕収剤は鉱物表面に付着して疎水化するが気液界面に移動しやすくロスが生じるため、エアロゾルとして送気ガスと共に浮選機に導入する方法 (The zero conditioning time method)²⁷⁾ により試薬量を大幅に削減できることを報告している。

5・2 遠心力を利用する比重選別装置 (EGS)

石炭と鉱物質の疎水性の差が小さい場合は比重差を利用する選別の方が良い成績が得られる。超微粒子の浮選や造粒に比べて選別精度がおちるため低灰炭の製造には向かないが、既存の火力発電向けの微粒子処理に適用できる。遠心力を利用する装置は、流動層型 (Knelson concentrator)、薄層選別型 (Falcon concentrator, Multi-Gravity separator)、ジグ型 (Kelsey jig, Altair jig, Packed column jig) などがあり、1980 年代から開発され始め、当初は脱硫のために比重の重い黄鉄鉱 (比重 5) の除去に焦点を当てて研究されていたが、その後 25-150 μm 粒群で著しい脱灰効果もあることが見出され、一部の装置では分離比重 1.5 を達成できることも分かっていた²⁸⁻³⁰⁾。各装置の原理については筆者らの総説に記述がある³¹⁾。

平島ら³²⁾ は釧路コールマインの選炭廃水を処理しているシクナー水に可燃成分が含まれていることに着目し、サイクロン分級により微粒子をカットした後に、Multi-Gravity separator で処理することで、可燃成分を 57% 回収でき、灰分を 43% から 18% に低減できたことを報告した。Honaker³³⁾ らは、-150 μm の石炭を Knelson concentrator へ導入する際に、浮選で用いる起泡剤を添加し、スタティックミキサーを用いて微粒気泡を発生させて処理する方法を考案した。気泡は疎水性である石炭粒子に付着し、みかけの比重が小さくなるため、親水性で比重の大きな粒子との分離性が向上し、石炭回収率が 10-20% 増大した。Falcon concentrator では通常、水で処理するが、重液をもちいることで歩留まりを 20% 上昇できたことを Honaker ら³⁴⁾ は報告している。Mohanty ら³⁵⁾ は、44-600 μm 粒群を Altair ジグで処理し、分離比重 1.55、テラ指数 (Probable error) 0.09 を達成できたことを報告している。Peng ら³⁶⁾ は、150-1000 μm 粒群を Packed column ジグで処理し、灰分 35-50% が 5-6% に低減できたことを報告している。さらに彼らは様々な選別装置で報告されているテラ指数 (Probable error, Ep) や分離比重と粒径の関係を図にまとめ (Fig. 6) 比較した。石

炭は産地によって単体分離性・分離のし易さが異なるため比較が難しいが、細粒群の場合も低い分離比重で精度良く分離できるようになってきたことがこの図から分かる。

5・3 その他の研究

粉砕に消費されるエネルギーはアメリカの発電量の1.5%を占め、鉱物処理プロセスの60-70%を占めていると推定されており、粉砕の高効率化は重要である。Ozbayogluら³⁷⁾は、マイクロウェーブ粉砕前処理による石炭の粉砕性向上効果について、粒径や照射パワー・時間を変化させた試験を行い、その有効性を報告した。褐炭にマイクロウェーブを照射すると水分含有量の低下とともに黄鉄鉱の磁性を増大させることができるため、マイクロウェーブ処理後に粉砕し、磁選や静電選別で処理する方法も提案されている^{38, 39)}。Cuiら⁴⁰⁾は、高圧ウォータージェットミルの適用を検討し、粗粒子をフィードに戻す機構やメンテナンスの容易な装置に改良することで、石炭粉砕に利用可能であることを報告した。選炭における粉砕では整粒に加え、粒子の単体分離が重要である。Itoら⁴¹⁾は、石炭質/鉱物境界を選択的に破壊する電気パルス法の選炭への適用と、そのメカニズムの解明に取り組んでおり、石炭および人工試料の粉砕特性について報告した。オーストラリアでは、従来スパイラル選別機で処理していた石炭を、複数の平行傾斜板を持つ流動層選別機(Reflux Classifier: RC)で処理する方式に切り替える傾向にある⁴²⁾。この装置では、水中沈降速度の速い粒子は傾斜板上に沈積して下方に滑り落ち、沈降速度の遅い粒子は水流と共にオーバーフローし分離される。Galvinらは、400t/h～600t/hの処理量を持つ実機のRCで0.25-2mmの石炭を処理し、既存の選別装置より選炭性が良いこと、パイロットスケール試験と同等の選別性が得られたことを報告している。Honaker⁴³⁾らは、スパイラル分級機で44 μ mの微粒子も処理可能であることを示し、そのための運転条件を検討した。

インドの燃料炭の9割は灰分約40%のFグレードに分類されるので⁴⁴⁾、インド政府は2002年以降ピットから1000km以上遠隔又は都市域の発電所で使用する石炭について規制(灰分<34%)しており、8割近くの発電所が該当するため、インド炭のコールクリーニングに関する論文も多い。Dwari⁴⁴⁾は、乾式のソーティング・比重・磁気・静電選別法について装置や原理をレビューし、インド炭の選炭結果についてまとめた。

インドのコースス用炭の選炭工場では、約2割を浮選で処理している。Dey⁴⁵⁾は、粒群別のコレクターレス浮選において、産地や粒度によって最適な起泡剤の種類が異なることを報告した。また微粉(-0.5mm)を分級し、粗粒をコレクターレス浮選、微粒を多段浮選し、それぞれ得た産物をブレンドしてコースス用や発電用として全量利用する方法を提案した⁴⁶⁾。Banerjee⁴⁷⁾は、インドのコースス用炭の浮選において、+0.5mm粗粒群の浮遊性を改善するために、初めに微粉を浮かし、その後捕収剤を追添して粗粒を浮かせる方法を提案した。インドのTata製鉄グループは、アルコール・ポリグリコール・エーテル系捕収剤の起泡性・安定性・気泡径を測定し、動的気泡指数と臨界合濃度には負の相関があること⁴⁸⁾、インド炭の浮選結果からアルコール系のMIBCは選択性が高く微粉が浮き、ポリグリコール系のDow frothはフロスの含水率が高く鉱物質の紛れ込みが起こるものの粗粒も回収できることを報告し、混合して用いるのが効果的であることを報告している⁴⁹⁾。

アメリカでは2007年から、石炭火力発電所からの水銀の排ガス規制が始ったため、燃焼前(事前)脱水銀処理に関する研究も多い。Guffeyら⁵⁰⁾は、予備過熱による脱水銀の効果について研究し、250℃で4分ほど処理すると脱水銀(60-70%)できるが、

さらに除去するためには水銀と炭素の結合を切断する別処理が必要になることを報告している。Dronenら⁵¹⁾は、酸洗浄および微生物処理による石炭からの水銀除去について検討した。強酸と弱酸の2段階処理で90%の水銀が除去可能であり、*Acidithiobacillus ferrooxidans* および *Acidithiobacillus thiooxidans* による微生物処理も効果的であることを報告した。微生物処理の場合、黄鉄鉱と共存するヒ素、セレン、カドミウム、クロムなどが除去され、酸洗浄の場合には有機物と結合している水銀も除去されている可能性がある。Allerら⁵²⁾は微生物処理で微量元素のカドミウム、ヒ素、ホウ素が除去されることを報告している。

石炭は産地や炭層によって鉱物質の種類や含有量・粒径などが変動し、同一の処理を行っても選炭成績が異なるため、現場では浮沈試験法で選炭のしやすさ、選炭成績の予測・評価を行なっている。Okiら⁵³⁾は、石炭の浮沈試験データから鉱物質の単体分離性を把握するための指数算出方法を開発した。最も軽比重の粒子の灰分(限界灰分)と、最も高比重の粒子の片率の最小値から、鉱物質単体分離度の最大値(MLmax)を算出し、単体分離度の評価指標とするもので、石炭の粒径や鉱物組成などの石炭性状はこのMLmaxの値に反映されるため、鉱物質の単体分離度の指標として有用である。オーストラリアでは四塩化炭素などの有害な有機溶剤を用いる標準浮沈試験法(AS4156.1)の取り消しを検討しており、代替法が必要となっている。Galvin⁵⁴⁾はこの代替法をレビューし、各手法の利点・欠点をまとめた。無機比重液・擬重液を用いる方法や、水ひやジグの原理を利用するもの、密度測定法、トレーサー法、CTによる断層撮影法などを紹介している。

6. おわりに

コールクリーニングの研究分野では、高度脱硫や超低灰炭製造を目的とした物理選別の限界に挑戦するような大型のプロジェクト研究が1980年から1990年代に世界中で盛んに行なわれ、各種の新技术が開発されたが、当時は良質な石炭が低価格で供給されていたため、これらの技術は実用化には至らない次世代技術として位置づけられていた。しかし近年、低質な石炭の地場利用であっても環境に配慮することが求められ、先進国ではCO₂排出を抑制しながら利用する次世代型石炭高効率発電への移行が急速に進んでおり、アドバストコールクリーニング技術の導入が脚光をあびている。研究論文をみても、2000年代に入ってから実用化を重視した、少ない投入エネルギー・試薬による効率的な処理法の研究開発が多く報告され、実プラントへの浮選機の導入などが急ピッチで進んでいる。今後もこれらの技術はますます磨きがかけられ普及していくであろう。

逆浮選や選択粉砕、微粒子処理手法の粗粒子への適用拡大などの技術は、従来の選炭プロセスを大きく変える必要があるが、粉砕を含めた処理フローの大幅な見直しが可能であるため、大きな効果が期待できる。

山元以外での利用が難しい褐炭は、脱灰・脱水改質・スラリー化などの処理で遠方でも使えるようになる。経済的な選炭処理・燃焼利用の目途がつけば大幅な利用の拡大が見込まれる次世代技術であり、実用化に向けた研究開発の意義は大きい。

References

- 1) J. S. Laskowski: *Coal Flotation and Fine Coal Utilization* (Elsevier, Amsterdam, 2001), p.2.
- 2) T. Oki: Proc. MMIJ Fall Meeting (1995), Vol. H, p.1.
- 3) T. Nagaoka: *Journal of MMIJ*, **113** (1997), 219.
- 4) IEA Electricity Information 2006 Edition.
- 5) METI: *Energy Hakusyo* (Gyosei, Tokyo, 2004), p.53.
- 6) Japan Coal Energy Center: *Clean Coal Technologies in Japan* (Japan Coal Energy Center, Tokyo, 2006).

- 7) M. Ito et al.: Proc. MMIJ Fall Meeting (2002) , Vol. CD, p.65.
- 8) I. Saito and S. Shinozaki: Journal of MMIJ, **118** (2002) , 115.
- 9) http://www.det.csiro.au/science/lee_cc/ultra_clean_coal.htm
- 10) K. M. Steel et al.: Fuel, **82** (2003) , 1917.
- 11) J. S. Laskowski: Proc. of XXIII Int. Miner. Proc. Congr. (2006) , p.1101.
- 12) T. Hirajima et al.: Journal of MMIJ, **110** (1994) , 473.
- 13) D. G. Osborn: *Coal Preparation Technology* (Graham and Trotman Limited, London, 1988) .
- 14) J. S. Laskowski: *Froth flotation A century of innovation* (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, 2006) , p.613.
- 15) R. Kempnich: Proc. of XX VII Inter. Coal Prep. Exhib. and Conf. (2000) , p.5.
- 16) T. Hirajima et al.: Proc. of XI Int. Coal Prep. Congr. (1990) , p.361.
- 17) M. K. Mohanty: Miner. Eng., **14** (2001) , 1531.
- 18) J. Cowburn et al.: Miner. Eng., **19** (2006) , 609.
- 19) M. Polata et al.: Int. J. Miner. Process, **72** (2003) , 199.
- 20) R. Q. Honaker et al.: Miner. Eng., **19** (2006) , 687.
- 21) G. Atesok et al.: Miner. Eng., **14** (2001) , 661.
- 22) M. Shen et al.: Coal Prep., **21** (2000) , 277.
- 23) R. Q. Honaker et al.: Coal Prep., **25** (2005) , 81.
- 24) D. Ping et al.: Proc. XIV Int. Coal Prep. Conf (2002) , p.69.
- 25) K. Yukawa et al.: Journal of MMIJ, **118** (2002) , 695.
- 26) K. Ding et al.: Miner. Eng., **19** (2006) , 72.
- 27) K. Ding et al.: Miner. Eng., **19** (2006) , 79.
- 28) G. H. Luttrell et al.: Porc. XII Int. Coal Prep. Conf. (1995) , p.281.
- 29) R. Q. Honaker et al.: Porc. XIII Int. Coal Prep. Conf. (1998) , p.349.
- 30) R. Q. Honaker et al.: Coal Prep., **21** (2000) , 211.
- 31) M. Tsunekawa et al.: Journal of MMIJ, **121** (2005) , 467.
- 32) T. Hirajima et al.: Journal of MMIJ, **121** (2005) , 456.
- 33) R. Q. Honaker et al.: Coal Prep., **25** (2005) , 99.
- 34) R. Q. Honaker et al.: Miner. Eng., **13** (2000) , 415.
- 35) M. K. Mohanty et al.: Coal Prep., **20** (1999) , 85.
- 36) F. F. Peng et al.: Coal Prep., **22** (2002) , 199.
- 37) G. Ozbayoglu and T. Depci: Proc. XXIII Int. Miner. Proc. Congr. (2006) , p.1177.
- 38) T. Uslu et al.: Fuel Processing Technology, **85** (2004) , 21.
- 39) L. Turćániová et al.: Fuel, **83** (2004) , 2075.
- 40) L. Cui et al.: Int. J. Miner. Process., **81** (2006) , 113.
- 41) M. Ito. et al.: Proc. XXIII Int. Miner. Proc. Congr. (2006) , p.247.
- 42) K. P. Galvin et al.: Miner. Eng., **18** (2005) , 19.
- 43) R. Q. Honaker et al.: Miner. Eng., **20** (2007) , 1315.
- 44) R. K. Dwari et al.: Mineral Processing & extractive Metall. Rev., **28** (2007) , 177-234.
- 45) S. Dey et al.: Int. J. Coal Prep. and Util., **27** (2007) , 4.
- 46) S. Dey et al.: Fuel Processing Technology, **88** (2007) , 585.
- 47) P. K. Banerjee et al.: Int. J. Coal Prep. and Util., **27** (2007) , 39.
- 48) A. K. Gupta et al.: Int. J. Coal Prep. and Util., **27** (2007) , 107.
- 49) A. K. Gupta et al.: Int. J. Miner. Process, **82** (2007) , 126.
- 50) F. D. Guffey et al.: Fuel Processing Technology, **85** (2004) , 521.
- 51) L. C. Dronen et al.: Fuel, **83** (2004) , 181.
- 52) A. Aller et al.: Process Metall., **9A** (1999) , 99.
- 53) T. Oki et al.: Miner. Eng., **17** (2004) , 39.
- 54) K. P. Galvin: Coal Prep., **26** (2006) , 209.