コロナ放電界における高品位炭の回収に関する研究*

正 会 員 向 井 滋**

正 会 員 若 松 貴 英***

志 田 芳 久****

Study on the Electrostatic Concentration of Low Ash Coal in Corona Field

Shigeru MUKAI, Takahide WAKAMATSU and Yoshihisa SHIDA

In order to recover the coal concentrates of low ash content, the electrostatic separation of coal in corona field was investigated by the Huff separator.

From the experiments of the coal separation by the Huff separator in corona field, it is recognized that the coal particles which are extremely low in ash content are attracted to the surface of grounded roller, while the coal of high ash content is repelled from the roller. It is more successful in corona field to recover the coal concentrates of low ash content than in the field without corona discharge.

From the measurements of conductivity of coal and electric charge of coal particles acquired in a electric field, the relation between conductivity and ash content was clarified. Furthermore, the mechanism of coal separation in a corona field was considered.

1. 緒 言

著者らは高品位石炭の分離回収に対して積極的に開拓されるべき方法として静電分離法をとりあげ、従来から静電選鉱の試験あるいは実操業に使用されている Huff 式選鉱機を用いて石炭に対する分離回収の研究を試みってきた。その結果、石炭組織の選別に静電分離法を適用することは極めて有望視されることが推察された。

Huff 式の選鉱機による選別には、電極の放電状態に基づく区別として、コロナ放電を行なう場合とコロナ放電を行わない場合の2種がある。従来より石炭を取扱った静電分離の研究あるいは外国における実用の例は、ほとんどコロナ放電を行わない場合についてなされている。しかし最近では石炭以外の鉱物の分離にコロナ放電界を利用する試みもみられる。

著者らは先に Huff 式選鉱機によるコロナ放電を行わない場合の石炭粒子の挙動ならびに選別性について検討した結果を報告した。

本研究ではコロナ放電界における石炭粒子の挙動ならびに分離性について、コロナ放電を行わない場合と比較しながら検討し、かつその分離機構を考察しながら、高品位石炭の回収に対するコロナ放電界の利用性を吟味した。

2. コロナ放電界における選別の原理

針金または細長い針金のように尖ったすなわち曲率の大なる部分を持つ電極と平板電極とを対立させ、電圧を印加した場合電圧を次第に上昇させていくと、尖った部分の付近がかすかな光を発して、電極間に微少な電流が流れ局部破壊を起こす。さらに、電圧を上昇すればこの局部破壊の状態が次第に進展し火花放電に到達する。この局部破壊の状態をコロナ放電と呼んでいる。

コロナ放電界においては不平等電界中の特に電界強度の大なる部分の気体が主として電子の衝突電離作用によりイオン化し、順次多数の電子および陽イオンを発生する。発生した陽イオンと電子はそれぞれ陰極および陽極に向って進むが、電子よりはるかに重い陽イオンは電子に比し移動度が小さく電子がすでに陽極に射突してしまっても陽イオンは電場に残留する。この残留陽イオンで形成された空間電荷が遮蔽作用を及ぼし、電離は一時止り陽イオンが陰極に射突して空間電荷がなくなると、再び衝突電離作用から同じ過程が繰り返される。したがって陽極では電子の断続的な射突、陰極では断続的な電子の放射とともに陽イオンの射突が行なわれていることになる。

いま針状の電極を陰極にし、これと対立する陽極の接地平板上に鉱粒が散布されると、鉱粒は放電界中で分極ならびに電子の放射を受けることになる。電界強度 E 内におかれた帯電量 Q の粒子に作用する電気力 F は

* 昭和37年7月10日受理

** 工博 京都大学教授 鉱山学教室

*** 京都大学助手 鉱山学教室

**** 八幡製鉄株式会社

A: 選別産物受器, B: ブラッシュ
F: 給鉱板, N: 針状電極, P: ボール電極, R: 接地回転ローラ
(数字の単位は cm)

第1図 コロナ放電を行なう選別機主要部

N: 針状電極, P: 平板電極
R: 接地回転ローラ
(数字の単位は cm)

第2図 粒度別試験における電極条件

$$F = QE + 2\pi\rho^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \epsilon_0 \text{grad } E^2 \quad (1)$$

で与えられる²⁾。ここに ρ , ϵ は粒子の半径および比誘電率, ϵ_0 は真空の誘電率である。

粒子が接地平板上に接するとき, (1) 式の第1項中の Q は接地平板上より得る電荷, および針状のコロナ放電により電子の放射より得る電荷の総合されたもの, 第2項は電界中におかれた粒子の分極にもとづく電気力であり, 一般には吸引力として考えられるものである。もし鉱粒が絶縁体であるとするれば, 接地平板電極から得る電荷はなく, (1) 式第1項の Q は電子の放射により与えられた電荷のみとなり, QE は平板電極に吸引力として働き, 第2項の分極の吸引力と総合され, 粒子は強く電極に吸引される結果となる。また粒子が導体であれば, コロナ放電による電荷は接地電極からの反対電荷とたちまち中和し, Q は常に接地電極からの電荷を与え, QE は一般に反発力となつてあらわれる。

(1) 式の分極にもとづく第2項は, 本来は吸引力として作用するものであるが, 表面電導性の粒子が接地電極

に接した場合は電荷は中和され, 同符号の電荷のみが残留し, 反発力として作用する。

一般に選別の対象となる鉱物は組成によつて種々の電気的性質を示すため, コロナ放電界中では接地平板上に対し, 吸引, 反発あるいはその中間状態といった種々なる挙動を示すものと考えられる。

3. 試料の調整および分離装置

実験の試料として, 住友石炭鉱業赤平鉱業所産の石炭を使用した。研究の目的にしたがい塊状のものを選び約 2mm 程度に粗砕し, さらにメノウ乳鉢で粉碎しふるい分けして, $-10 \sim +14\text{mesh}$, $-14 \sim +20\text{mesh}$, $-20 \sim +28\text{mesh}$, $-28 \sim +35\text{mesh}$ の4種類を準備した。

実験に用いた静電分離装置は Huff 式で, 島津製の ES-1 型オーケンセパレーターである。これは給鉱板および接地回転ローラの裏面にヒーターが内蔵され, 室温より 100°C まで加熱乾燥することが可能である。コロナ放電界を与えるために, 従来のボール電極とさらに並行して針状電極を組合わせたものを高圧電極とした。主要部は第1図に示すようである。また粒度別試験の際には, 高圧電極のボールを平板に置きかえ, 針状電極と平板電極とを組み合わせた第2図に示すような電極条件で実験を行なつた。これらのボールあるいは平板は回転ローラとの間に静電界を形成し, 帯電した粒子の反発跳躍を助長する役割を果すために設けたものであるが, この効果は顕著である。

4. コロナ放電界における石炭粒子の分離試験ならびに考察

4.1 灰分含有量と飛距離

第1図に示した針状電極とボール電極とを併用した場合のコロナ放電界における分離試験の結果を第3図に示す。試料は $20 \sim 28\text{mesh}$ の粒度のものを使用し, 印加電圧は 20kV , 15kV の場合について, 重量分布百分率ならびに灰分含有量を示している。分布位置(飛距離)の基準点は回転ローラ縁端直下とし, 回転ローラに対して粒子が反発される方向を正, 吸引されブラシで搔落される方向を負としている。

第3図の結果は針状電極を含む高圧電極の極性が負の場合で, かつ常温常湿で試験したものである。重量分布曲線から石炭粒子はローラに吸引されるもの, 自由落下するもの, さらに反発跳躍を行なうものと種々の異なつた挙動を示し, 灰分含有量の結果と対照すると飛距離負の部分すなわちローラに吸引する石炭粒子は極めて低灰

高圧電極の極性は負, 石炭の粒度 $20 \sim 28\text{mesh}$, (I) 印加電圧 20kV の場合の重量分布, (I') 印加電圧 20kV の場合の灰分分布, (II) 印加電圧 15kV の場合の重量分布, (II') 印加電圧 15kV の場合の灰分分布

第3図 コロナ放電界における分離試験の一例
(常温・常湿)

高压電極の極性は負，石炭の粒度 20~28mesh，電極間隔 4cm，印加電圧 2kV，(I) 重量分布曲線，(II) 灰分分布曲線

第4図 コロナ放電を行なわない場合の分離試験の一例（常温・常湿）

分で，約3%の灰分含有量を示すことが認められる。なお飛距離が正の方向に増加するにつれ集積した石炭粒子の灰分含有量も増加している。

第4図はコロナ放電を行なわない場合，すなわち高压電極がボールのみの場合の結果である。この結果からわかるようにコロナ放電を行なわない場合においても灰分含有量の少ない高品位炭はローラに吸引され，灰分含有量の大きな石炭はローラより反発される傾向が認められる。しかしコロナ放電を行なわない場合，重量分布曲線がコロナ放電を行なう場合と著しく異なっている。すなわち，コロナ放電を行なわない場合は自由落下する石炭がかなり多く，したがってローラに吸引される石炭が少なくなっている。

コロナ放電を行なつた場合の第3図の結果では，印加電圧 20kV の場合は，15kV の場合に比し吸引される部分の重量百分率が増加し，飛距離の増加に伴う灰分%の増加は顕著になつていく。これは 15kV の場合に飛距離 4cm 前後の位置に自然落下していた石炭粒子が印加電圧の上昇により粒子の負に荷電する量がとなりローラに吸引される結果のためと考えられる。

4.2 石炭粒子の荷電

コロナ放電を行なつた場合およびコロナ放電を行なわない場合の分離試験の結果，第3図および第4図のように相違しているが，この相違はまず石炭粒子のそれぞれの電界内における荷電状態の差に起因するものと考えられる。

分離試験により選別された石炭粒子の荷電を次のような方法で測定した。すなわち，第5図に示すように A，B 2 コ組み合わせた金属製容器を絶縁して対立させ，コンデンサとなす。A を選別された粒子を受ける受器とする。A の受器に石炭粒子を受け，受器と一端を接地した弾動検流計を接続すれば電荷は弾動検流計を通じてアースへ流れる。弾動検流計の振れはアースへ流れた全荷電量に相当する。弾動検流計の振れと電荷量との関係は容

第 1 表

粒 度 (mesh)	電 荷 量 (coul/g)	
	コロナ放電界	非コロナ放電界
28 ~ 35	-9.16×10^{-9}	-7.02×10^{-9}
20 ~ 28	-8.59×10^{-9}	-4.33×10^{-9}
14 ~ 20	-8.60×10^{-9}	-6.14×10^{-10}
10 ~ 14	-7.81×10^{-9}	-1.91×10^{-10}

量既知なコンデンサに一定電圧の電池で充電し，次に弾動検流計を通じて放電し，最大の振れを読みとることにによりあらかじめ求めた。

コロナ放電を行なつた場合の石炭粒子について，選別分布位置と荷電との関係を示した一例は第6図のようである。第6図からわかるように高压電極が陰極の場合，回転ローラに吸引された粒子は負の電荷を有しており，ローラより反発跳躍した粒子は正の電荷を有している。かつよく反発するもの，あるいはよくローラに吸引するものは荷電が大であることが認められる。ただしブラシで搔落される粒子はそのために放電して，有している電荷量はかなり減少している。

つぎにコロナ放電界およびコロナ放電を行なわない場合の帯電状態を比較するために，ローラに吸引された石炭粒子について印加電圧 15kV，時間 30sec で，それぞれ粒子の大きさを変えて比較検討を行なつた。その結果は第1表に示すようである。第1表の結果は高压電極が負の場合の結果である。第1表に示されているように，粒子の大きさが 28~35mesh 程度の粒子では荷電状態はコロナ放電界あるいはコロナ放電を行なわない場合のいずれにおいても差はあまり認められないが，粒子の大きさが大になればコロナ放電を行なわない場合と行なう場合とでは著しい差があらわれている。すなわちコロナ放電を行なう場合は，この粒度範囲においては粒子の大きさの増大による電荷量の減少は認められないが，コロナ放電を行なわない場合は粒子の大きさが大になるにしたがい電荷量は著しく減少する。

実際の選別において，この荷電は電界中における鉱粒

A, B: 金属製容器，
G: 弾動検流計

第5図
電荷測定方法

印加電圧 15kV，石炭の粒度 20~28mesh，(I) 高压電極の極性が正，(II) 高压電極の極性が負

第6図 コロナ放電界における選別分布位置と荷電との関係（常温・常湿）

の滞留時間ならびに電界強度に比例するものと考えられたが、つて判然とした分離はこの電荷量の適切な調節によつてなされるべきである。

4.3 石炭粒子の電導性

第3図あるいは第4図の結果からわかるように、石炭粒子

はローラに吸引されるもの、反発されるもの、自由落下するものと種々異なつた挙動を示している。これらの挙動は選別の原理から考えて、ローラに付着して搔落される低灰分の石炭はかなり絶縁性を有し、反発跳躍する高灰分の石炭はかなり電導性を有するものと考えられる。したがつて石炭の比抵抗の測定を試みた。

第7図のように研磨した石炭表面に水銀電極を設け、この2電極間の抵抗を R として第7図の右図のように結線し、標準抵抗にかかる電圧を真空管電位計で測定して次式から比抵抗 ρ を求めた。

$$\rho = \frac{\pi R}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b-a}} = \frac{\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b-a}} \cdot \frac{R_s}{V} (V_s - V) \quad (2)$$

(2)式中の記号は第7図に示した。

試料として輝炭および暗炭を用い、これを飽和蒸気圧一定の恒温を与える試薬とともにデシケータに入れ一昼夜放置した後に測定した。結果は第2表のようである。この測定に使用した輝炭は灰分4%以下の高品位炭で、回転ローラにはほとんど吸引される石炭である。第2表の結果からわかるように輝炭は暗炭に比して極めて比抵抗が大である。逆に暗炭はかなり電導性を有している。この結果から石炭中に含まれる灰分と電導性との間には相関性を有していることが明らかである。

印加電圧15kVで選別した際の飛距離12~16cm, 0~4cm,

a : 水銀電極の半径, b : 電極間隔, c : 石炭試料, R_x : 未知抵抗, R_s : 標準抵抗, V_s : 電池, V : 標準抵抗にかかる電位差

第7図 石炭の電気抵抗測定方法

—8—12cmの各部に集積した石炭を採取し、この各々をノレルコ蛍光X線分光分析にて検した結果は第8図(A, B, C)のようである。この第8図のA, B, Cを比較すれば鉄分の含有量がかなり相違しており、ローラに吸引される灰分含有量の小なる石炭は鉄分が少なく、反発される石炭すなわち灰分含有量の大なる石炭は鉄分が多く、したがつて電導性が大なるものと思われる。

以上の実験結果から灰分と電導性との間には密接な相関性があり、灰分含有量の少ない高品位炭がローラに付着し、灰分の大なる暗炭がローラから反発される現象は電導性の相違に基づくものであることが、明瞭に認められる。

4.4 粒度別試験

石炭の粒子の大きさが変化するとき重量分布百分率、分布位置における灰分含有量がどのように変化するかを検討した。試料の粒子の大きさは10~14mesh, 14~20mesh, 20~28mesh, 28~35meshのものについて、前記の針状電極と平板電極とを組合わせた高压電極(第2図参照)を使用して、印加電圧15kVで選別試験を行なった。結果は第9図に示すようである。この場合の高压電極の極性は負である。

第9図の結果からわかるように重量分布は粒子の大き

(A) 分布位置 —8—12cm に集積した石炭, (B) 0~4cm に集積した石炭, (C) 12~16cm に集積した石炭。ノレルコ分析条件, W-T 50kV-20mA, GM tube 1540V, Source e Receiving Collimator 0.005×4"long, Scale factor 32, Multiplier 1, Time const. 4 sec, Scanning Speed 1°/min, Chart Speed 1/2"/min.

第8図 ノレルコ蛍光X線分析による結果

高圧電極の極性が負、印加電圧 15kV
第9図-1 粒度別試験の重量分布曲線

第 2 表

相対湿度	100%	75%	15%
燐炭 (Qcm)	3.7×10^{11}	4.5×10^{11}	6.7×10^{11}
暗炭 (Qcm)	1.5×10^5	5.3×10^5	15.0×10^5

さが大になるほど、吸引される粒子は少なくなり、自然落下する粒子の割合が増加している。灰分の分布は図に示されているように粒子の大きさ別の灰分分布曲線が類似しており、実験に供した試料の石炭については10mesh程度である程度単体に分離しているものと思われる。しかし粒子の大きさ 10~14mesh の場合の最低灰分は約4%であるに比し、28~35mesh では約2.5%灰分でさらに低い値を示している。

以上コロナ放電を行なう場合は電子の放射により電荷が強制的に与えられるため、かなり粒子の大なる石炭まで回転ローラに吸引回収することができ、かつ安定した選別が可能と考えられる。コロナ放電を行なわない場合には石炭粒子の大きさが大になれば第1表に示すように単位重量当たりの荷電量が減少し、高品位炭の回転ローラに吸引回収は困難になるので、処理粒度がコロナ放電を行なう場合と比較してかなり制限される。

石炭の粒度 20~28mesh, (I) 印加電圧 20kV の場合の重量分布 (I') 印加電圧 20kV の場合の灰分分布, (II) 印加電圧 15kV の場合の重量分布, (II') 印加電圧 15kV の場合の灰分分布。

第10図 高圧電極の極性が正の場合の分離試験
(常温・常湿)

第9図-2 粒度別選別試験の灰分分布

4.5 電極の極性変換による効果

コロナ放電は針状電極が陽極であるか陰極であるかにより放電の様子が異なり、針状電極が陽極の場合、印加電圧を増大せしめると暗流の状態からブラッシュコロナとなりさらに火花放電となる。一方針状電極が陽極の場合は暗流からグローコロナとなり、さらにブラッシュコロナ、ストリーマーコロナを経て火花放電に至る。また極性の相違によりコロナ発生電圧も、それぞれ異なった値をとる。

先に示した第3図の結果は針状高圧電極側が負の場合である。極性の交換が選別におよぼす影響をするためにさらに針状電極側を陽極として実験を行なった。試料の大きさは 20~28mesh である。分離試験の結果は第10図に示す。印加電圧はそれぞれ 15kV, 20kV で実験を行なったが、放電の外見は印加電圧 15kV の場合、ブラッシュコロナとストリーマーコロナの入り混った状態で放電し、印加電圧 20kV の場合は全面的にストリーマーコロナであった。

第10図の結果を第3図の結果と比較すれば、高圧側が陽極の場合は高圧電極が陰極の場合に比して回転ローラに吸引される割合が印加電圧 15kV, 20kV のいずれの場合も少なく、特に印加電圧 15kV の場合にその差が著しい。また灰分分布曲線が印加電圧 15kV の場合と 20kV の場合とにおいてかなり類似している点も高圧電極が陰極の場合の分離選別と異なる点である。

コロナ放電を行なわない場合の結果は第11図のようである。この結果からわかるように高圧電極が陽極の場合はローラに吸引される石炭粒子が極めて少なくなる傾向が認められる (第4図と対比)。

以上の実験結果からコロナ放電を行なわない場合は極性変換の影響が顕著に認められるが、コロナ放電を行なった場合は分布位置について極性変換による大きな影響は認められないようである。しかしローラに吸引される石炭はかなり少なくなり、かつ高圧電極が負の場合に比し分離効果がやや悪くなる。

高压電極の極性が正、石炭の粒度 20~28mesh、電極間隔 4cm
印加電圧 2kV、(I) 重量分布、(II) 灰分分布

第11図 コロナ放電を行なわない場合
における極性変換の効果

5. 結 言

静電選鉱による高品位炭の回収を目的として、Huff式選鉱機を使用し、コロナ放電を行なう場合の石炭粒子の挙動ならびに分離性をコロナ放電を行なわない場合と比較検討した。実験の試料には赤平産の石炭を用いた。

本研究によつてつぎの事項が明らかにされた。

(1) コロナ放電を行なう場合の静電分離において低灰分高品位炭は接地回転ローラに吸引付着するが、高灰分炭はローラより反発されて高压極側に集積し、それぞれの分離は極めて良好である。

(2) コロナ放電を行なわない場合も分離特性はコロナ放電を行なつた場合とほぼ類似的傾向を示すが、コロナ放電を行なわない場合は放電を行なう場合に比してローラに吸引付着する石炭の量はかなり減少する。

(3) 分離回収せられた高品位炭の電界中で得られた荷電量を測定した結果、コロナ放電を行なう場合はコロ

ナ放電を行なわない場合に比して荷電量ははるかに大である。さらに粒度別に検討した結果、コロナ放電を行なわない場合は粒子の大きさが大になるしたが単位重量当たりの荷電量はかなり減少する。しかるにコロナ放電を行なう場合は粒子の大きさの増加による荷電量の減少は認められない。この事実から高品位炭が回転ローラに付着する現象が主として粒子の荷電量に支配されることを考察した。

(4) 石炭の比抵抗測定結果から、低灰分の高品位炭は常温にて約 $10^{14} \Omega \text{cm}$ 、一方灰分の大なる暗炭は約 $10^5 \Omega \text{cm}$ であり灰分と電導性との間の相関性を明らかにした。なお蛍光X線分光分析の結果、灰分含有量による電導性の相違は主として石炭中の鉄分の含有量と相関することを認めた。以上の実験結果から高品位炭がローラに付着し、灰分の大なる石炭が反発し分離する機構は両者の電導性の相違に基づくことを考察した。

(5) 単体分離の影響を考慮する必要のない場合にはコロナ放電界における選別の方が粒度の大なる粒子をも処理可能であり分離成績も安定する。

(6) コロナ放電を行なわない場合高压電極の極性変換は分離特性にかなりの影響を与える。コロナ放電を行なう場合は極性変換の効果はあまり認められない。しかし分離効果の点では高压電極の極性が負の方が良好である。

この研究は文部省科学試験研究費補助金の交付を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 向井滋・若松貴英・志田芳久：水曜会誌，第14巻，第8号（昭和37年3月）371頁。
- 2) 向井滋・大森滋：日本鉱業会誌，第74巻，837号，（昭和33年3月）。164頁。
- 3) 電気学会編：放電現象，昭和35年，74頁。

螢 石 の 選 鉱 法

最近螢石に対する関心が高まつて来て、その文献——とくに選鉱法について——の照会が多いのに気が付き、資源技術試験所選鉱研究室において主として外国文献の翻訳を集めてみた。

いくら需要が多いといつても他の金属鉱物の選鉱法と違つてごく限られているので限定版として発行した。もし品切れになつた節は、お許し願いたい。

内 容

1. 緒 言
2. 螢石の鉱物学的性質
3. 螢石鉱床
4. 螢石の選鉱
5. 螢石の選鉱に関する文献
 - (1) Nevada 州 Kaiser 鉱山の螢石の選鉱
 - (2) 高品位セラミック用螢石の選鉱
 - (3) Illinois州 Cave-in-rockes

選鉱工場の操業

- (4) 螢石の堆積尾鉱の再処理
- (5) 螢石選鉱法
- (6) 硫化物を含む螢石鉱の浮選
- (7) アシド・グレード用螢石の浮選
- (8) 螢石の浮選
- (9) 鉛—重晶石—螢石の浮選
- (10) 重液選鉱による螢石の分離
- (11) その他の文献

A5版 50 ページ タイプ印刷
フ ロー シ ー ト 多 数
頒 価 200 円 (送料 30 円)