論文 湿式選別法を用いた石炭燃焼灰からの中空球形粒子の回収*

平 島 剛¹ 大 迫 雄 司² 野 中 壯 泰³
H. T. B. M. PETRUS² 笹 木 圭 子⁴ 安 藤 隆⁵

Recovery of Hollow and Spherical Particles from Coal Fly Ash by Wet Separation Process

by Tsuyoshi HIRAJIMA^{a*}, Yuji OOSAKO^b, Moriyasu NONAKA^a,
H. T. B. M. PETRUS^b, Keiko SASAKI^a and Takashi ANDO^c

a. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University,
Fukuoka 819-0395, Japan (*Corresponding author E-mail: hirajima@mine.kyushu-u.ac.jp)

b. Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu
University

c. Industrial Energy Department, Idemitsu Kosan Co., Ltd., Chiba 299-0267, Japan

Fly ash is a by-product in coal power plants and a rich source of hollow and spherical particles. Hollow and spherical particles having density less than 1 g/cm³ are known as cenospheres. Their concentration in coal fly ash is around 1%. Particles are widely used as fillers and insulators with high performances in rubber, plastics, oil industry, space industry, glass steels, etc. due to their shape, specific surface, excellent physical and chemical properties; as a consequence, their value is relatively high. However, hollow and spherical particles are filled up with N₂ and/or CO₂ gas bubbles so their densities can vary from 0.6g/cm³ to near or greater than 2.0 g/cm³. Fly ash can consist of more than 80% hollow and spherical particles having particle diameter less than several hundred μm and density less than 2.0 g/cm³, but there is no efficient and economic way to selectively recover them.

The authors study on the recovery of cenospheres and hollow and spherical particles having density more than 1 g/cm³ from coal fly ash using a two-inch hydrocyclone and laboratory/pilot scale Mozley multi-gravity separator(MGS). A two-inch hydrocyclone having 6.4 mm of spigot diameter was used to effectively concentrate cenospheres in overflow product. A very small amount of cenospheres having density less than 1 g/cm³ were recovered as a float of overflow product. Underflow product and overflow product without cenospheres were supplied to MGS and the influence of MGS parameter such as drum rotation speed and wash water rate was studied. As a result, 54% of hollow and spherical particles having 2.08 g/cm³ of density and 61.6 μm of median diameter in underflow product was recovered as MGS lighter product and 17% of hollow and spherical particles having 2.19 g/cm³ of density and 8.4 μm of median diameter in overflow product was recovered as MGS lighter product. These results show that hollow and spherical particles having median diameter less than one hundred μm with middle density can be recovered.

KEY WORDS: Separation, Coal Ash, Fly Ash, Hollow and Spherical Particles, Multi-Gravity Separator, Hydrocyclone

1. は じ め に

石炭火力発電所では、発電に伴う副産物である石炭灰が発生する。これは石炭中に含まれる鉱物に応じて生ずるものである。平

成 18 年度の石炭灰発生量実績は電気事業と一般産業合わせて約 1097 万 t であり、前年度と比較して 1.7% 減少しているものの、1000 万 t を超える石炭灰が発生した¹⁾。多量の灰の埋め立て処分用地の確保は難しい状況にあること、また環境保全の観点から、石炭灰を資源として利用することが期待されている。平成 18 年度の石炭灰の有効利用率は 97% と極めて高い水準にある一方、分野別の石炭灰有効利用状況を見ると、セメント分野での利用が全体の 68% を占めており、1996 年度以降の急激な石炭灰有効利用率の向上がセメント分野、特に原料である粘土代替によるものであることが分かる。しかしながら、国内におけるセメント生産量は近年低下傾向にあり²⁾、今後とも大幅な増加は期待し難い状況から、新たな有効利用手段の確保が喫緊の課題となっている³⁾。この石炭灰のうち約 80% は集塵機等で捕集されるフライアッシュ

*2008 年 7 月 2 日受付 9 月 30 日受理 2007 年 5 月 27 日資源素材学会・九州支部会及び 2007 年 8 月 2 日第 16 回日本エネルギー学会にて一部発表
1. 普通会員 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 教授
2. 九州大学大学院 工学府地球資源システム工学専攻
3. 普通会員 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 助教
4. 普通会員 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 准教授
5. 出光興産株式会社 販売部 石炭事業室 石炭・環境研究所
[著者連絡先] FAX: 092-802-3337 (九大・平島)
E-mail: hirajima@mine.kyushu-u.ac.jp

キーワード: 選別, 石炭灰, フライアッシュ, 中空球形粒子, マルティグ
ラビティセパレーター, ハイドロサイクロン

Table 1 Chemical composition of coal fly ash.

LOI	Ash											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	V ₂ O ₅	SO ₃
15.6	46.79	37.19	1.84	5.25	4.21	1.25	0.59	0.89	1.03	0.03	0.04	0.24

Fig.1 Particle size distribution of coal fly ash.

シュで、この中にはシリカとアルミナを主成分とする球状で内部が空洞の粒子が存在している^{4,5)}。中空球形粒子あるいはフライアッシュバルーンと呼ばれるこの粒子は、内部に空気もしくはCO₂、N₂といったガスを有しており、その程度に応じて一般に密度が0.6~2.0 g/cm³と変化する。特に水に浮揚する粒子はセノスフェアとして知られており、絶縁、潤滑、遮音、耐火、耐食、放射防止、無毒、吸水しないなどの優れた性能をもった充填材料としての利用が期待されている。

しかしながら、現時点で中空球形粒子の効率的な回収方法は存在せず、その模索が続いている⁶⁻⁸⁾。諸外国においては、フライアッシュを池等に散布することで、比重1以下のセノスフェアのみを回収している。この回収方法は、狭い国土を持ち、環境規制が厳しい我が国では実現が困難である上、全灰の約1%未満という低い回収率しか達成出来ない。そこで本研究では、セノスフェアと比重1以上の中空球形粒子を効率的に回収するため、既存の分級機である2インチハイドロサイクロンと、微粒子用比重選別機である英国 Richard Mozley Limited 製 Multi-Gravity Separator (MGS) を用いた選別プロセスを構築し、その結果について検討を行った。

2. 試料及び実験方法

本研究では、試料として一般用産業ボイラーで発生したフライアッシュを用いた。蛍光X線分析装置による試料の灰組成をTable 1に示す。本試料はシリカ、アルミナを主成分とし、微量の鉄とカルシウム等を含むフライアッシュである。一般用産業ボイラーからのフライアッシュの為、未燃分が約15.6%と非常に多く、多量の炭素分を含有している。レーザー回折式粒度分布計による本試料の粒度分布をFig. 1に示す。メジアン径は24.7 μm、5%積算ふるい下粒子径は2.3 μm、95%積算ふるい下粒子径は152.5 μmである。

本研究では、まず水と擬重液を用いて浮沈試験を行った。浮沈試験は500cc分液ロートを用いて行ない、比重の重い方から沈殿物として回収した。擬重液にはポリタングステン酸ナトリウム溶液⁹⁾を用い、比重は標準比重計（浮き計り）により測定した。回収した産物はメンブレンフィルター（空隙1 μm）を用いて、十分な蒸留水で水洗しつつ、吸引濾過した。フィルター上に残った産物は、秤量ビンにとり乾燥機中で乾燥（105℃）させた後、秤量

Fig.2 Separation flowchart of coal fly ash for high and low specific gravity (S.G.) products from coal fly ash.

した。

次に、フライアッシュを10 wt%のスラリーに調製し、英国 Richard Mozley Limited 製2インチハイドロサイクロンを用いて分級試験を行なった。分級試験では、ハイドロサイクロンにExtension tubeを装着してVortex finderを14 mmに固定し、Spigot径のみを変化させた。オーバーフローとアンダーフローを所定時間サンプリングし、回収した産物は乾燥機で乾燥（105℃）させた後、秤量した。

さらに、ハイドロサイクロンの分級試験結果をもとに、Fig. 2の選別フローに基づきハイドロサイクロンとMGSを組み合わせた湿式選別実験を行った。まず、試料約100 kgをFeedタンクに入れ水道水で10 wt%濃度に調節し、攪拌懸濁した。次に、2インチハイドロサイクロン（試験条件Vortex finder径14 mm, Spigot径6.4 mm, Extension tube有り）¹⁰⁾を用いてアンダーフロー産物とオーバーフロー産物を回収した。オーバーフロー産物には静置後浮揚物が見られたのでこれを回収し、オーバーフロー・フロート産物とした。ハイドロサイクロン試験で得られたアンダーフロー産物、オーバーフロー産物（浮揚物除去後の産物）はそれぞれ、スラリー濃度約30 wt%に調節し、MGSに供給した。MGS実験では、C900型MGS（Richard Mozley Limited 製）を用いてドラム回転速度と洗浄水量を変化させて高比重産物、低比重産物を回収した。なお、フィード速度を1.5 l/min、ドラムの傾斜角度を4度、ドラムの振幅を15 mmに固定して実験を行った。ハイドロサイクロンとMGSの各産物は乾燥（105℃）させた後、気相置換式密度測定、粒度分布測定を行った。灰化して未燃分の影響を取り除いた産物に対して再び密度測定を行った。灰化はJISM8812に準拠して行い、無水ベースの重量百分率で計算を行った。

3. 実験結果及び考察

浮沈試験による比重区分毎の歩留まりをFig. 3, SEM画像をFig. 4に示す。なお、ここでは水に浮いた産物の比重を0.95、比重2.0で沈んだ産物の比重を2.05とした。SEM-EDXによりFig. 4(a)~(d)の元素分析を行ったところ、非球形粒子((a), (c), (d))の分析では、主として炭素を含んでおり、未燃カーボンであること、

Fig. 3 Yield of coal fly ash of different specific gravities.

(a) S.G. -1

(b) S.G. -1.3+1.2

(c) S.G. -1.6+1.5

(d) S.G. -1.6+1.5

Fig. 4 SEM-EDX of coal fly ash.

球形粒子は Si, Al を含むことがわかった。また, Fig. 4 (a) より, 比重 -1 の産物中には, セノスフェアと呼ばれる中空球形粒子が多数存在していることが分かる。しかし, 産物の歩留まりは全灰の 1.48% となり, 従来の回収法で得られる中空球形粒子は, ごくわずかである。Fig. 4 (b) より, 比重 -1.3+1.2 の産物には, 比重 -1 とはならないものの, 球形粒子が多数確認出来る。これらの粒子を選別によって回収することが出来れば, 比重 -1.3 の産物が全て回収され, 全灰の 5.28% を中空球形粒子として利用可能である。また, 浮沈試験において, 比重 -1.3 の産物の懸濁液には未燃カーボンが少なく, 白濁していたが, 比重 +1.3 では黒色の粗粒子が目視出来るようになった。Fig. 4 (c) より, 比重 -1.6+1.5 の産物には粒子径 200 μm 以上の未燃焼炭素粒子が存在していることが分かる。しかしながら, Fig. 4 (d) より, 比重 -1.6+1.5 の産物中にも, 10 μm 程度の球形粒子が存在している。これら比重 +1.3 以上の中空球形粒子も回収出来れば, 中空球形粒子の回収率を大きく改善出来るだろう。

ハイドロサイクロンによる分級試験結果を Fig. 5 に示す。Spigot 径の減少に伴い, アンダーフロー産物の歩留まりは減少し, オーバーフロー産物の歩留まりは増加した。このうち Spigot 径が 6.4 mm と 2.2 mm の時のアンダーフロー産物とオーバーフロー産物の SEM 画像を Fig. 6 に示す。Spigot 径の増大に伴い, オーバーフロー産物中の粗粒子量が低下し, アンダーフロー産物中に粗粒子は濃縮する傾向が認められた。以上の結果を踏まえ, 低密度で大粒の中空球形粒子を回収する為, 次の MGS 実験のフィード試料は, ハイドロサイクロンの Spigot 径を 6.4 mm とした場合のアンダーフローおよびオーバーフロー産物を用いることにした。

なお, この条件で回収されるハイドロサイクロンのアンダーフロー産物の歩留まりは 65.43%, オーバーフロー産物の歩留まりは 34.43% であり, オーバーフロー産物を静置し, 浮いたオーバーフロー・フロート産物の歩留まりは 0.14% であった。各産物の粒度分布を Fig. 7, SEM 画像を Fig. 8 に示す。アンダーフロー産物のメジアン径は 79.3 μm , オーバーフロー産物のメジアン径は 8.4 μm , オーバーフロー・フロート産物のメジアン径は 90.8 μm であった。Fig. 8 (a) より, アンダーフロー産物は粗粒の球形粒子と未燃カーボンに富むことが観察できる。Fig. 8 (b) より, オーバーフロー産物中には, 微細な未燃カーボン及び数 μm の球形粒子が多数見られる。Fig. 8 (c) より, オーバーフロー・フロート産物中には大粒の中空球形粒子が多数観察できる。大粒の中空球形粒子は, 比重が -1 であるという特性を持つ為, ハイドロサイクロンによる分級によって水に浮き, オーバーフロー・フロート産物として回収されたと考えられる。ハイドロサイクロンのアンダーフ

Fig. 5 Effect of spigot diameter on the yield of 2-inch hydrocyclone (Vortex finder diameter: 14 mm; with extension tube).

Fig.6 SEM images of products obtained from two-inch hydrocyclone treatment (Vortex finder diameter: 14 mm; with extension tube).

Fig.7 Particle size distributions of products obtained from two-inch hydrocyclone treatment.

Fig.8 SEM images of products obtained from 2-inch hydrocyclone treatment (Spigot diameter: 6.4 mm; vortex finder diameter: 14 mm; with extension tube).

ロー産物、オーバーフロー産物、オーバーフロー・フロート産物に対して密度測定を行ったところ、アンダーフロー産物の灰化前の密度は 2.24 g/cm^3 、灰化後の密度は 2.42 g/cm^3 、オーバーフロー産物の灰化前の密度は 2.30 g/cm^3 、灰化後の密度は 2.42 g/cm^3 、オーバーフロー・フロート産物の灰化前の密度は 1.27 g/cm^3 、灰化後の密度は 1.85 g/cm^3 であった。オーバーフロー・フロート産物は水に浮く産物である為、密度が 1 g/cm^3 以下になるものと予想していたが、実際にはそれ以上であった。本実験ではヘリウムを用いて乾式密度測定を行っており、微細孔を通して粒子内部の気体がヘリウムと置換された結果、密度が大きく測定されたものと考えられる。オーバーフロー・フロート産物中のセノスフェアは、アンダーフロー産物、オーバーフロー産物中のセノスフェアと比較して低密度である。一方、灰化後に生じる未燃焼カーボン中の灰分は微量であるものの約 2.6 g/cm^3 であると考えられる。従って、オーバーフロー・フロート産物の灰化後の密度は他産物よりもこの灰分の影響を強く受け、灰化前後の密度変化は他産物よりも大きくなったと考えられる。しかし、他回収産物と比較するとオーバーフロー・フロート産物は極めて密度が低く、発泡度の高い大粒の中空球形粒子が回収されていることが明らかである。灰化前のアンダーフロー産物とオーバーフロー産物の密度を比較すると、アンダーフロー産物の密度が若干低い、灰化して未燃カーボンの影響を取り除いて比較すると、その差は無くなることが分かる。アンダーフロー産物の灰分が 80.88% であるのに対して、

Fig.9 Effect of wash water rate on the yield of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Drum rotation speed: 318 rpm).

Fig.12 Effect of drum rotation speed on the yield of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Wash water rate: 0.86 l/min).

Fig.10 Effect of wash water rate on the density of MGS products before and after ashing of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment: 318 rpm).

Fig.13 Effect of drum rotation speed on the density of MGS products before and after ashing of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Wash water rate: 0.86 l/min).

Fig.11 Effect of wash water rate on the median diameter of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Drum rotation speed: 318 rpm).

オーバーフロー産物の灰分は88.43%であったことから、アンダーフロー産物に濃縮した大粒の未燃カーボンによって灰化前の産物密度は低くなったと考えられる。いずれにしてもハイドロサイクロンによる分級では、主として比重では無く粒子径に応じた分級が行われており、オーバーフロー産物もしくはアンダーフロー産物に低比重の中球形粒子を濃縮することは困難であることが分かった。そこで、ハイドロサイクロンのアンダーフロー産物とオーバーフロー産物をフィード試料として、MGSによる比重選別を行った。

MGSは汎用の振動テーブルの水平面を丸めて回転ドラム内に押し込んだものと表現できるもので、テーブル表面をドラムに置き換えることによって重力の数倍の遠心力を粒子に作用させることができる。このことにより、MGSでは汎用のテーブルよりも細かい粒子までの選別が可能である。

ハイドロサイクロンのアンダーフロー産物をフィード試料とし、ドラム回転速度を318 rpmとした場合のMGSの洗浄水量が

MGS回収産物の歩留まりに与える影響をFig. 9, 灰化前後の密度に与える影響をFig. 10, メジアン径に与える影響をFig. 11に示す。洗浄水量の増加に伴い、高比重産物の歩留まりは減少し、灰化前の密度は若干増大し、メジアン径は減少した。また、低比重産物の歩留まりと灰化前の密度は増大し、メジアン径は減少した。これらは、以下のように考えられる。MGS装置内において、フィードスラリーはドラム表面の中間あたりにフィードされる。ドラム表面はポリウレタンライニングされており、滑らかである。ライニングはコーン状で開口部に向かって狭くなっているため、フィードスラリーは自然にドラム後端に向かって流れる。重質物及び高比重物は遠心力によりドラム表面に突き刺さる格好になり、スクレーパーにより開口部の排出口に向かって掃き集められる。開口部付近に加えられる洗浄水は、掃き集められた高比重物をほぐすことで、層中に紛れ込んだ低比重物を押し流す。この水の薄流は、液表面付近で最大流速、ドラム表面で最小流速となる¹¹⁾ことから、低比重物で粒径が大きな粒子が低比重産物側へと押し流され回収され、洗浄水量の増加すなわち流速の増加に伴い、より高比重の粒子や小さな粒子も低比重産物側へ回収される。

また、Fig.10の高比重産物と低比重産物の密度差は0.2 g/cm³となり、比重による選別が行われていることが分かる。しかしながら、得られた産物を灰化して密度測定を行った結果(Fig. 10)はほぼ同一の値を示しており、低比重産物中には多くの未燃カーボンが含まれていること、この条件では適切な選別が行われていないことが分かった。そこで、ドラム回転速度を変化させて実験を行った。

ハイドロサイクロンのアンダーフロー産物をフィード試料とし、洗浄水量0.86 l/minとした場合の、MGSのドラム回転速度がMGS回収産物の歩留まりに与える影響をFig. 12, 灰化前後の密度に与える影響をFig. 13, メジアン径に与える影響をFig. 14に

Fig. 14 Effect of drum rotation speed on the median diameter of MGS products (Feed sample: Underflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Wash water rate: 0.86 l/min).

Fig. 15 Effect of wash water rate on the yield of MGS products (Feed sample: Overflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Drum rotation speed: 318 rpm).

Fig. 16 Effect of wash water rate on the density of MGS products before and after ashing of MGS products (Feed sample: Overflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; Drum rotation speed: 318 rpm).

Fig. 17 Effect of wash water rate on the median diameter of MGS products (Feed sample: Overflow product obtained from 2-inch hydrocyclone treatment; drum rotation speed: 318 rpm).

示す。ドラム回転速度の増加に伴い、低比重産物の歩留まりと灰化前の密度は減少し、メジアン径は増大した。また、高比重産物の歩留まりは増加し、灰化前の密度は減少し、メジアン径は増大した。これは、ドラム回転速度の増加に伴い、高比重産物ばかりではなく、より低比重物で粒径の大きい粒子、すなわち一部の中空球形粒子が遠心力によりドラム内部表面に押し付けられ、スクレーパーにより開口部の高比重産物排出口に向かって掃き集められ回収されるため、高比重産物の歩留まりとメジアン径は増大し、密度は低下するものと考えられる。灰化後の高比重産物と低比重産物の密度 (Fig. 13) の差は、ドラム回転速度の増大に伴い小さくなり、318 rpm ではほぼ同一の値を示した。これらの結果より、低比重産物の密度が低く、歩留まりが多いドラム回転速度 260 rpm が適切な選別条件と考えられる。ドラム回転速度の変化による密度の変化は、洗浄水量による密度の変化と比較して大きいこと、また低密度の産物が得られることから、回収産物はドラム回転速度の影響を受けやすいことが分かる。従って、フライアッシュの選別では、まずドラム回転速度を変化させて全体の選別挙動を調査し、洗浄水量を変化させて微調整を行うのが有効であると考えられる。

ハイドロサイクロンのオーバーフロー産物は粒子径がアンダーフロー産物よりも小さく軽量である為、本装置の最大ドラム回転速度 318 rpm よりも低くすると、高比重産物はほとんど回収出来なかった。そのため MGS のドラム回転速度を 318 rpm とし洗浄水量を変化させて実験を行った。

ハイドロサイクロンのオーバーフロー産物をフィード試料とし、ドラム回転速度を 318 rpm とした場合の、MGS の洗浄水量が MGS 回収産物の歩留まりに与える影響を Fig. 15、灰化前後の密度に与える影響を Fig. 16、メジアン径に与える影響を Fig. 17

に示す。洗浄水量の増加に伴い、高比重産物の歩留まりは減少し、灰化前の密度は増大し、メジアン径は増大した。また、低比重産物の歩留まりと灰化前の密度は増大し、メジアン径は減少した。ハイドロサイクロンのオーバーフロー産物は、アンダーフロー産物と比較して粒子径が小さく、比重による選別が困難であると予想されたが、高比重産物と低比重産物を選別可能であることが分かった。これは、アンダーフロー産物をフィード試料とした場合と同様の現象、すなわち、洗浄水量の増加に伴い、より高比重の粒子や小さな粒子も低比重産物側へ回収されたものと考えられる。ただし、洗浄水量が増加すると、高比重産物と低比重産物の粒子径の差が無くなった。これは、洗浄水量の増大に伴い、小さな粒子も流速の増加により低比重産物側へ流されるが、密度の高い大きな粒子は遠心力によりドラム表面に押し付けられ、薄流によっても低比重産物側に流されなかった為と考えられる。以上より、中空球形粒子を回収する際には、出来るだけ洗浄水量を低くすることが有効である。ただし、洗浄水量が低すぎる場合には、長時間運転によりドラム表面に厚い粒子の沈積層ができ、運転が不安定になる場合が認められたことから、本実験条件では洗浄水量は 0.86 l/min 程度が最適と考えられる。

以上より、ハイドロサイクロンと MGS を組み合わせた湿式選別システムを用いることで、粒子径の異なるフライアッシュの中空球形粒子を選択的に回収可能であることを明らかにした。

4. ま と め

本研究では試料として一般用産業ボイラーで発生したフライアッシュを使い、2 インチハイドロサイクロンと MGS を組み合

わせた湿式選別システムを用いてフライアッシュ中の中空球形粒子の回収について検討を行なった。

浮沈試験の結果、比重 -1 の産物中には、セノスフェアと呼ばれる中空球形粒子が認められたが、その量は極めて少ないことがわかった。また、比重 -1.3 の産物の懸濁液には未燃カーボンが少なく、球形粒子が白濁していたが、比重 +1.3 では黒色の粗粒子が目視出来るようになり、比重 -1.6+1.5 の産物には粒子径 200 μm 以上の未燃焼炭素粒子が多数存在していることがわかった。

ハイドロサイクロンによる分級試験の結果、Spigot 径の増大に伴い、オーバーフロー産物中の粗粒子量は減少し、粗粒子はアンダーフロー産物中に濃縮する傾向が認められ、Spigot 径 6.4mm では、アンダーフロー産物の歩留まりは 65.43%、オーバーフロー産物の歩留まりは 34.43% であり、オーバーフロー産物を静置し、浮いたオーバーフロー・フロート産物の歩留まりは 0.14% であった。また、アンダーフロー産物のメジアン径は 79.3 μm 、オーバーフロー産物のメジアン径は 8.4 μm 、オーバーフロー・フロート産物のメジアン径は 90.8 μm であり、粒度分級は可能であった。オーバーフロー・フロートの気相置換式密度測定によって測定した灰化前密度は 1.27 g/cm^3 (灰化後密度 1.85 g/cm^3) と低かったが、オーバーフロー及びアンダーフロー産物の密度はほぼ等しくハイドロサイクロンでは、密度分級は困難であった。

上述の試料を用いて MGS により比重選別を行なった。ハイドロサイクロンのアンダーフロー産物をフィード試料とし、ドラム回転速度を 318 rpm として洗浄水を変化させ実験を行なった結果、洗浄水量の増加に伴い低比重産物の歩留まりと密度は増大、メジアン径は減少した。なお、この結果は遠心場における薄流選別現象をもとに説明可能であった。産物の密度差が認められることから比重選別が行なわれていることは確認できたが、低比重産物中には多くの未燃カーボンが含まれており、灰化後の密度には

差は認められず、適切な選別条件ではないことがわかった。そこで、ドラム回転速度を変化させて実験を行なった。その結果、ドラム回転速度 260rpm で灰化前密度 2.08 g/cm^3 (灰化後密度 2.28 g/cm^3)、メジアン径 61.6 μm の低比重産物を 54.37% 回収出来た。

ハイドロサイクロンのオーバーフロー産物をフィード試料とした場合には、ドラム回転速度を 318 rpm 以下では、高比重産物が分離されず選別が困難であった。そのため、318 rpm で、洗浄水を変化させ実験を行なった結果、洗浄水量 0.86 l/min で灰化前密度 2.19 g/cm^3 (灰化後密度 2.27 g/cm^3)、メジアン径 8.4 μm の低比重産物を 16.66% 回収出来た。

以上の結果より、ハイドロサイクロンと MGS を組み合わせることで 100 μm 以下の微粒の中空球形粒子の比重選別が可能であることを明らかにした。

謝辞 本研究は(財)石炭エネルギーセンターから委託を受けて九州大学と出光興産(株)が共同で行ったものである。SEM 分析には、九州大学中央分析センターの走査型電子顕微鏡 SS-550 及び ABT-32 を利用した。御協力頂いた関係各位に厚く感謝の意を表する。

References

- 1) JCOAL: Sekitanhai Zenkoku Jittai Chousa Houkokusho 2006. (HP: <http://www.jcoal.or.jp/coalash/ash01.html>)
- 2) JCA: Semento Jyukyuu Jisseki 2008. (HP: <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jh1.html>)
- 3) F. Goodarzi et al.: Fuel, **85** (2006), 273-280.
- 4) JETA and Japan Fly Ash Association : Coal Ash Hand book 2005, pp.1-35, II-83.
- 5) E. Raask et al.: Journal of the Institute of Fuel, **41** (1968), 339-444.
- 6) Orhan Ozdemir et al.: Proc. International Ash Utilization Symp. (2001), Paper No.44.
- 7) Tapiwa Gurupira et al.: Proc. International Ash Utilization Symp. (2001), Paper No.44.
- 8) V. Parameswaran et al.: Journal of materials science, **35** (2000), 21-29.
- 9) Toru Danhara et al: Chishitsu News, **455** (1992), pp.31-36.
- 10) Tsuyoshi Hirajima et al.: Journal of MMIJ, **121** (2005), 456-460.
- 11) B.A. Wills and T.J. Napier-Munn: *Wills' Mineral Processing Technology*, (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006), pp. 238-243.