

資 料

フライアッシュ洗浄技術の開発と洗浄フライアッシュの品質評価

江木 俊雄*・中島 剛*・高橋 青磁*・神門 誠**・藤本 栄之助**

1. 目 的

島根県浜田市三隅町で稼働している中国電力(株)の石炭火力発電所は、出力 100 万 kW の電力を発生・供給している。2013 年度に発生した石炭灰は約 25.3 万トンとなり、14.3 万トンがセメント原料や土木資材に有効利用され、残りの 11.0 万トンが埋立による自社土地造成に使用されている¹⁾。

石炭灰の内、電気式集塵装置で回収された排気ガス中のばいじんは、フライアッシュ（以後、FA と表記）と称され、セメント製造時の粘土代替え原料として利用されている。また、コンクリートに FA を配合すると、セメント中の水酸化カルシウムと FA とが緩慢に反応し、不溶性のけい酸カルシウム水和物を形成して、コンクリートの強度を向上させる²⁾ことから、コンクリート用の混和材としても利用されている。しかしながら 火力発電所で発生した FA には未燃焼カーボンが含まれており、この未燃焼カーボンはフレッシュコンクリートの練り混ぜの際に使用される減水剤や AE 剤の機能を低下させる、あるいはコンクリートの色が斑になる等の問題を有している。

これらの問題が解決されれば、混和材として生コンクリートや二次製品用のコンクリートでの利用が促進されると考えられ、FA に含まれる未燃焼カーボンを除去するための洗浄技術の開発に 2013 年度より着手した。その結果、未燃焼カーボン量が 3% 程度の FA を洗浄することにより、未燃焼カーボン量が 1.6% 前後のスラリー状の FA が得られた³⁾。しかしながら松藤らは、未燃焼カーボン量が 7.7% の FA を洗浄し、未燃焼カーボン量を 1% 強にまで低減させており⁴⁾、さらに達見は松藤らの洗浄装置の前段に前処理装置を追加することにより、洗浄後の FA の未燃焼カーボン量を 1% 以下にしている⁵⁾。また、松尾らは洗浄前後の FA を配合したフレッシュコンクリートを作製し、洗浄後の未燃焼カーボン量が 1.6% 程度の FA はフレッシュコンクリートの流動性や空気量の調整機能を持つ減水剤や AE 剤の機能を阻害し難くなることを明らかにした⁶⁾。未燃焼カーボン量をさらに低減すると、減水剤や AE 剤の添加量を減らすことができ、また、フレッシュコンクリートのフロー値や空気量の変動を小さくできると考えられる。

さらに、脱水処理後に得られる洗浄後の FA の含水率は

25% 前後と高く、クリーム状の形態であった³⁾。そのため、この状態でセメントに配合しようとする、練り混ぜ水の投入量を大幅に低減する、あるいは FA の配合量を少なくする必要がある、特に後者ではポゾラン活性が期待できなくなる。松尾ら⁷⁾は、洗浄後の FA を乾燥した後にセメントに配合し各種評価試験を行ったが、混和材として利用するためには含水率の低減は不可欠である。

本資料では、FA の未燃焼カーボン量を 1% 以下とする洗浄技術の開発を主目的とし、FA の運搬やコンクリート用の混和材としての活用を容易にするために、洗浄後の FA の含水率を低減する手法についても検討した。以下に、FA の洗浄技術および未洗浄と洗浄した FA の品質について報告する。

2. 方 法

2.1 FA 洗浄システムの概要

図 1 に 2014 年度に試作した FA 洗浄システムの概略図を示す。本システムは、2013 年度に試作した FA と未燃焼カーボンを分離させるための浮遊分離装置³⁾、浮遊分離装置から回収した FA が浮遊する液（以後、FA 浮遊液と表記）の含水率を低減するためのフィルタープレス装置（(株)牧野鉄工所、M14）に前処理部として灯油と FA を攪拌する攪

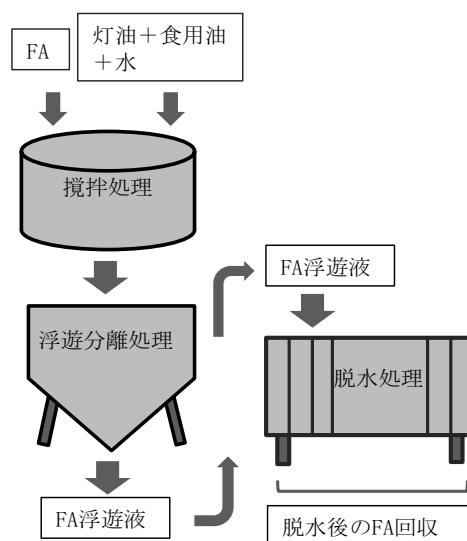


図1 FA 洗浄システムの概略図

* 無機材料・資源科，** 株式会社 藤井基礎設計事務所

拌装置（日本アイリッヒ㈱, RV-02）を付加した構成となっている。

2.2 FA の洗浄

2.2.1 攪拌処理を付加した洗浄システムによる洗浄

洗浄試験には中国電力㈱三隅発電所産の未燃焼カーボン量が異なる 2 種類の FA（規格：JIS II 種あるいは III 種適合品）を使用した。これを 5kg 量り取り、125 あるいは 250mL の灯油、気泡剤として灯油の量に対して 5vol% の食用油と FA が 20wt% 以上となる量の水とを攪拌装置の混合パンに投入した。投入後、アジテーターを先端速度が 21m/sec 程度で回転させ、次に混合パンをアジテーターとは反対方向に 64rpm で 4 分間回転させて、投入した FA、灯油、気泡剤、水とを攪拌した。同様の処理を 4 回行い、FA が 20kg 含まれる混合物を準備した。すなわち、20kg の FA に灯油 500 または 1000mL が含まれている。これを浮遊分離装置の上部開口部から 100L の水を貯めた浮遊分離槽に投入した。投入した FA が浮遊分離槽の下部に堆積するのを防止するために、槽の下部からポンプを用いて沈降した FA を吸引し、槽の上部から槽内に再投入した。同時に、投入した FA から未燃焼カーボンを除去するために、FA 浮遊液を槽内の液面下部から上記とは異なるポンプで吸引し、気泡発生装置を経由して浮遊分離槽の下部から槽内に戻した。ポンプは、FA 混合物を投入し 30min 運転後に停止し、その後 10min 静置した後に浮遊分離槽の最下部の排出口から FA 浮遊液を排出・回収した。ただし、FA 浮遊液の上澄みに含まれる分離された未燃焼カーボンが回収液に混ざること防ぐために、最後に回収する約 15L の FA 浮遊液は除外した。回収した FA 浮遊液から水分を除くために、フィルタープレス装置（㈱牧野鉄工所製、M14）を用いて送水圧を利用した脱水と圧縮空気圧（0.6～0.9MPa 程度）を利用した脱水を連続で行い、回収物を低含水化した。

2.2.2 浮遊分離装置のみによる洗浄

攪拌処理無しの洗浄試験には、2.2.1 の洗浄試験で使用した中国電力㈱三隅発電所産の未燃焼カーボン量が異なる 2 種類の FA（規格：JIS II 種あるいは III 種適合品）を用

表 1 攪拌処理を付加した洗浄前後の FA の
強熱減量値および添加灯油量

洗浄前の FA の強熱減量 (wt%)	5.96	3.10
洗浄に用いた灯油量 (mL)	500	1000
洗浄後の FA の強熱減量 (wt%)	0.38	0.65

表 2 浮遊分離のみによる洗浄前後の FA の
強熱減量値および添加灯油量

洗浄前の FA の強熱減量 (wt%)	5.96	3.10
洗浄に用いた灯油量 (mL)	1000	2000
洗浄後の FA の強熱減量 (wt%)	2.08	1.24

いた。洗浄に使用した灯油の量は、20kg の FA に対して 1000 あるいは 2000mL とし、気泡剤として灯油の量に対して 5vol% の食用油を添加し、100L の水を貯めた浮遊分離装置により洗浄した。浮遊分離装置による洗浄および FA 浮遊液の脱水は 2.2.1 と同条件で実施した。

2.3 FA の分析

洗浄前後の FA について強熱減量、含水率、レーザー回折法による粒度分布測定、比表面積測定を行った。強熱減量測定は、110℃で 2h 以上乾燥させた試料を 1g 程度量り取り、1000℃で 2h 熱処理した後に、熱処理前後の重量変化から算出した。脱水処理後の FA の含水率測定は、脱水処理後の FA を 150g 程度量り取り、110℃で 12h 以上乾燥した後に重量を計測し、乾燥前後の重量変化から湿重量基準で算出した。粒度分布の測定は、粒度分析装置（日機装㈱製、Microtrac MT3300EX II）を用い、洗浄前後の FA、および洗浄前の FA を 600℃で 12h 加熱し、未燃焼カーボンを除去した FA について行った。比表面積の測定は、洗浄前後の FA および未洗浄の FA について、セメントの物理試験方法（JIS R 5201 7.1 比表面積測定）に従いブレン空気透過法により行った。

3. 結 果

3.1 洗浄前後の FA の強熱減量

表 1 に 2.2.1 の攪拌処理を付加した手法で洗浄を行った FA の洗浄前後の強熱減量値および洗浄に使用した灯油の量を示す。また表 2 に 2.2.2 の浮遊分離のみによる手法で洗浄を行った FA の洗浄前後の強熱減量値と洗浄に使用した灯油の量を示す。

表 1, 2 から、2.2.1 の攪拌装置を用いて FA と灯油等とを攪拌する工程を有する洗浄を行った FA の強熱減量は、2.2.2 の攪拌を伴わない洗浄を行った FA よりも低い値を示し、かつ灯油の使用量が少ないことが分かる。即ち、2.2.1 の洗浄方法は、2.2.2 の洗浄方法と比較して、少量の灯油と食用油により FA 中に含まれる未燃焼カーボンをより多く取り除くことができる。これはアジテーターの強制攪拌による方が大量の水が介在する浮遊分離処理よりも FA と灯油との接触が生じ易く、さらに FA 同士の衝突の際に生じるせん断力により FA に付着した未燃焼カーボンが分離される効果によると推察される。

3.2 脱水処理後の FA の含水率

浮遊分離処理により未燃焼カーボンを除去した FA 浮遊液は、フィルタープレス装置を用いて脱水処理し、固形分と水に分離した。この時、送水圧だけを利用した脱水処理により回収した FA の含水率は 26% 前後であった³⁾。そこで含水率を低下させるために、送水圧による脱水処理後にフィルター間の FA を 0.6～0.9MPa 程度の圧縮空気で加圧して、FA 粒子間の水分を排出する処理を行った。その

表3 洗浄前後の強熱減量と比表面積

	洗浄前	洗浄後
強熱減量 (wt%)	5.96	0.65
比表面積 (cm ² /g)	3610	3490

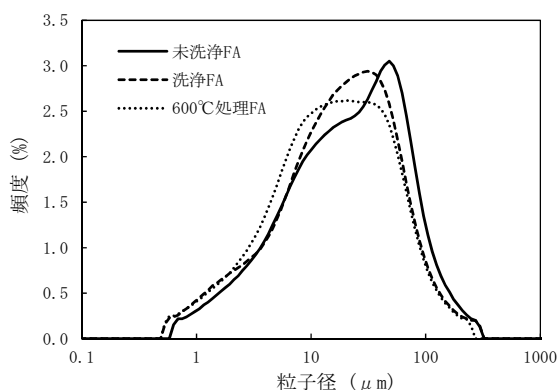


図2 洗浄前後及び600℃で12h処理したFAの粒度分布

結果、FAはパンケーキ状の固形物となり、含水率は15%前後に低下した。

3.3 洗浄前後のFAの比表面積

表3に強熱減量が5.96wt%の未洗浄のFAと強熱減量が0.65wt%の洗浄後のFAの比表面積を示す。洗浄したFAの比表面積は洗浄前よりも小さくなっており、比表面積の減少は洗浄による微粒分の減少によると推察される。

3.4 洗浄前後および熱処理したFAの粒度分布

図2に洗浄前後のFA、および未洗浄のFAを600℃で12h熱処理したFAの粒度分布測定結果を示す。この図において、未洗浄のFAと600℃で12h熱処理したFAの粒度分布を比較すると、熱処理により粒子径が20μmより大きい粒子は減少し、それ以下の粒径の粒子は増加していた。次に熱処理したFAと洗浄したFAの粒度分布を比較すると、粒子径が2μm以下の粒子は共に同程度の含有量であるが、粒子径が2μm～10μmでは洗浄したFAの方が少なく、10～50μmでは多い。50μm以上の粒径では同量であることから、熱処理したFAの方が洗浄したFAよりも粒度は小さくなった。

未洗浄と洗浄したFAの粒度分布を比較すると、洗浄したFAは未洗浄のFAよりも3μm以下と7～40μmの粒子の割合が多く、40～300μmの粒子は少ない。このことから、洗浄によりFAの粒度は小さくなったと考えられる。しかし、表3では未洗浄のFAの比表面積は、洗浄後のFAよりも大きく、前記の結果とは矛盾している。そこで洗浄前後および熱処理したFAの粒度分布について、比表面積の変化も含めて今後さらに詳細に検討する予定である。

る。

3.5 まとめ

FA中の未燃焼カーボンを除去するためにFA洗浄システムを構築し、強熱減量が3%と6%程度のFAの洗浄を行った。以下に、本試験で得られた知見と課題を示す。

- 1) 浮遊分離装置内でFAと灯油、食用油、水との攪拌と分離を同時に行う単一工程から、攪拌装置を用いた前処理によりFAと灯油、食用油、水を攪拌する工程と浮遊分離装置で未燃焼カーボンとフライアッシュを分離する二つの工程に変更することにより、未燃焼カーボンの除去率は向上した。その結果、従来よりも少量の灯油と食用油で未燃焼カーボン量が3あるいは6wt%程度のFAを洗浄することにより、強熱減量が1.0wt%以下のFAにすることができた。
- 2) フィルタープレスの送水圧による脱水処理後、フィルター間に充填されたFAを0.6～0.9MPa程度の圧縮空気 で加圧することにより、FA粒子間の水分が排出され、FAの含水率は15%前後まで低減した。
- 3) 洗浄前後のFAの比表面積を比較すると、洗浄前のFAの方が大きい値を示し、他方、粒度は洗浄後のFAの方が小さく、矛盾した結果となった。今後それぞれのFAの粒度と比表面積の関係を詳細に検討する。

謝 辞

本報告は、平成26年度資源循環技術基礎研究実施事業による研究成果の一部である。実験で使用したFAは、中国電力㈱から提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 中国電力株式会社三隅発電所．環境レポート2014「2013年度環境管理目標と実績」．2014, p. 4.
- 2) 小林一輔．“材料”．最新コンクリート工学．第5版，森北出版株式会社．2013, p. 21.
- 3) 江木俊雄，中島剛，高橋青磁，神門誠，藤本栄之助．石炭灰洗浄装置の試作と洗浄効果．島根県産業技術センター研究報告．2015, no. 51, p. 22-31.
- 4) 松藤泰典，小山智幸．セメント系組成物の製造方法．特許第4028966号．2007-10-19.
- 5) 達見清隆．スラリー化した石炭灰前処理方法およびスラリー化した石炭灰前処理装置並びに石炭灰処理方法および石炭灰処理設備．特許第5326168号．2013-08-02.
- 6) 松尾暢．コンクリート混和剤に活用される石炭灰の洗浄技術による品質向上効果について．エネルギー総研レビュー．2015, vol. 4, no. 42, p. 6-7.
- 7) 松尾暢，江木俊雄，福本直，及川仁．“フライアッシュ洗浄技術によるコンクリートのワーカビリティ改善効果について”．平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会講演概要集．岡山，2015-9-16/18．公益社団法人土木学会，2015, (CD-ROM) V -558.