

## 特集

## 各種副産物のリサイクル技術

## 石炭火力における副産物の有効利用技術—石炭灰の有効利用—

## Utilization of Coal Fired Power Plant By-products—Utilization of Coal Ash—

岸本勝美\*・渡部正道\*\*

Katsumi Kishimoto Masamichi Watanabe

## 1. はじめに

石油危機以降、わが国の電源構成は、エネルギーセキュリティの観点から、石炭、LNGへと脱石油化が進んでおり、石油火力の依存度は設備容量で、昭和50年度の55.6%から、平成7年度には24.6%と低下した<sup>1)</sup>。一方、石炭火力は、それぞれ5.1%から10.0%へ増加し、平成12年度に約14%、平成22年度に約15%を担うものと想定されている<sup>2)</sup>。電源構成の変化に伴い、平成12年度の電力9社と電源開発(株)の石炭火力から発生する石炭灰は、約530万トンに増加するものと推定している。

一方、環境問題等から陸上、海上に灰処理施設を設けることが難しくなっていること、また平成3年10月施行の「再生資源の利用の促進に関する法律」(リサイクル法)により、電気事業からの石炭灰は指定副産物に指定され、一層の有効利用の拡大に努めることが求められている。

以上の状況を踏まえ、石炭火力から発生する石炭灰の有効利用への取り組みの現状及び今後の課題を紹介する。

## 2. 石炭灰の現状

従来は、国内炭が主であったが、石油危機以降の石炭火力の増加及び石炭政策の結果、海外炭が増加しており、昭和50年度の国内炭833万トン、海外炭30万トンの消費が、平成7年度にはそれぞれ610万トン、3,525万トンと推移している。また、平成7年度の国別の内訳を見ると、豪州59%、インドネシア13%、中国10%、米国6%と多くの国から輸入している<sup>3)</sup>。

石炭灰は、現在主力の微粉炭焚きボイラでは図-1<sup>4)</sup>に

示すように、発生箇所別にクリンカアッシュ、シンダアッシュ、フライアッシュに分類され、その発生量はそれぞれ10~15%、3~7%、80~90%である。さらに、シンダアッシュ、フライアッシュは原粉と、原粉を分級・粒度調整したJISフライアッシュと粗粉とに分類される。クリンカアッシュは、微粉炭がボイラで燃焼溶融し、炉底のホッパに落下堆積したものをクラッシュして25mm以下の粒状にしたものである。

石炭灰の性状は、産炭地、ボイラの燃焼条件等により異なるが、一般的には表1<sup>4)</sup>に示す通り、主成分のシリカ、アルミナが全体の70~80%を占めている。

一方、石炭灰が環境に与える影響は、重金属等の溶出試験の結果により判断できるが、石炭灰中の重金属等の含有濃度は一般に土壤中の濃度と同程度であり、

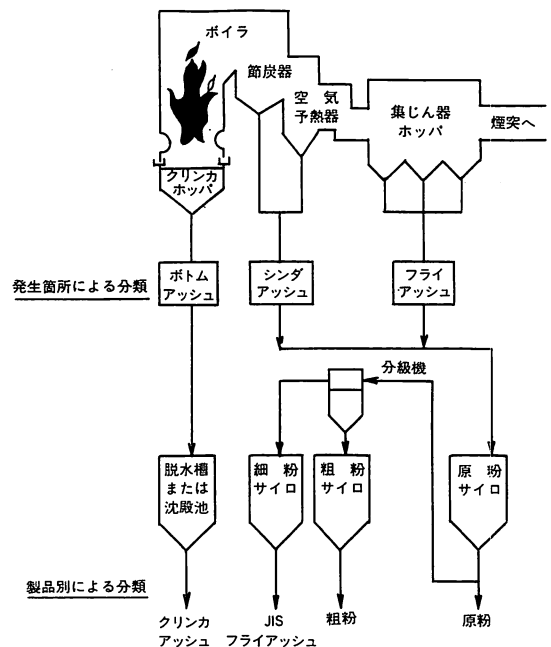


図-1 石炭灰の発生箇所および製品別分類

\* 電気事業連合会 立地環境部副部長

〒100 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館

\*\* 電源開発(株)建設部設計室副部長水力グループリーダー

〒104 東京都中央区銀座6-15-1

表1 石炭灰(微粉炭ボイラ)の性状

		フライアッシュ	シンダアッシュ	クリンカアッシュ
物理的性状	色	灰白色, 未燃分増により黒色増す		
	形状	球状でガラス質		砂状, 多孔質
	比重	1.9~2.3		
	粒度	0.1mm以下 90%		0.1~1mm 50% 1mm以上 50%
化学的性状	主成分	国内炭		海外炭
	SiO <sub>2</sub>	50~55%		40~75%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25~30%		15~35%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4~7%		2~20%
	CaO	4~7%		1~10%
	MgO	1~2%		1~3%
	Na <sub>2</sub> O	1~2%		1~2%
	K <sub>2</sub> O	0~1%		1~4%

その溶出結果は有害物質が検出限界以下または埋立処分に係わる判定基準値を下回っている。

平成8年度の電力9社及び電源開発㈱の石炭灰発生量は約430万トンであり、このうち約270万トンが有効利用されている。平成12年度には石炭灰発生量は約530万トンに増加し、このうち約400万トンを有効利用の目標として掲げているが、その後も発生量の増加が想定されるため、有効利用方策の確立に努めているところである。

### 3. 石炭灰有効利用技術の現状

石炭灰は、その物理的・化学的特徴を生かし、主にセメント・コンクリート分野、土木・建築分野、農林・水産分野に利用されている。平成8年度の電力9社及び電源開発㈱からの石炭灰発生量約430万トンのうち、セメント・コンクリート分野に約180万トン(約65%)、土木・建築分野に約50万トン(約20%)、農林・水産分野他に約40万トン(約15%)の合計で約270万トンが有効利用されている。

開発済、開発中の石炭灰有効利用技術は表2に示す通りであるが、その主な利用技術を以下に紹介する。

#### 3.1 セメント・コンクリート分野での有効利用

この分野では、セメント原料に82%、セメント混合材に12%、コンクリート混和材に6%が有効利用されている。石炭灰はシリカ、アルミナを主成分とするため、セメント原料の粘土代替品として利用されており、この分野での利用は今後も確実に増えていくものと期待されている。

フライアッシュをコンクリートに用いた場合、以下の効果が期待できる。

#### 1) 長期強度の増進

セメント中のカルシウム分が水和して生じる水酸化カルシウムとフライアッシュ中のシリカによりポゾラン反応が長期間継続する。

#### 2) ワーカビリティの向上

フライアッシュの形状が球形のため、コンクリートの流動性が改善される。従って、フライアッシュを使用しないコンクリートに比べ単位水量を低減できる。

#### 3) 水和熱の減少

コンクリートの硬化熱は、セメント使用量に比例するため、フライアッシュで置き換えた分、減少する。ダムコンクリートなどのマスコンクリートでは、硬化熱により有害なクラックが発生しないようフライアッシュを混和材として使用することが多い。

#### 4) アルカリ骨材反応の抑制

フライアッシュは骨材中の反応性シリカ鉱物が、セメント中のアルカリ成分と反応し膨張する現象を抑制する効果がある。

以上のような特徴を持つフライアッシュの利用を促進するため、1958年にJISが制定された。その後1974年に改定され、1996年には使用される石炭の主流が国内炭から海外炭に移行したことから、再改定された。1996年の改訂では、粉末度の規定として45 $\mu$ mふるい残分を導入し、流動性改善効果やポゾラン活性を適正に評価するため、従来の単位水量比と圧縮強度比に代えて、フロー値比と活性度指数が導入された。

表2 石炭灰利用技術開発の概要

※セメント・コンクリート分野	
*セメント混和材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 普通ポルトランドセメント (FA混入率5%以下)</li> <li>— フライアッシュセメント ( " 10~30%)</li> <li>— ハイポリウムFAコンクリート ( " 30%以上)</li> <li>— 活性化フライアッシュ</li> </ul>
*コンクリート混和材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— RCD工法 (大型ダムコンクリート)</li> <li>— 高流動コンクリート (FEC-Fly ash enrich concrete)</li> </ul>
*セメント原料	— 粘土材代替
※土木・建築分野	
*道路材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— アスファルトフィラー材</li> <li>— アスファルト流動防止材 (ファイヤービーズ)</li> <li>— 路盤・路床材 (クリンカーアッシュ)               <ul style="list-style-type: none"> <li>(フライアッシュ+砂+セメント：羽田空港沖合展開)</li> <li>(ポゾテック)</li> <li>(アッシュロバン (微粉炭灰固化体))</li> <li>(ナルトン (流動床灰固化物))</li> </ul> </li> </ul>
*土工材	
・盛土、埋立材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— ポゾテック</li> <li>— 不拡散高密度埋立 (高濃度スラリー)</li> <li>— 炭鉱充填材 (スラリー)</li> </ul>
・護岸材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 裏込材 (スラリー, 碧南火力灰処分場)</li> <li>— 事前混合工法</li> <li>— FAC軽量土工材</li> </ul>
・地盤改良材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 軟弱地盤表層改良 (スラリー, 荻田沖土砂処分場)</li> <li>— FGC (Fly ash-Gypsum-Cement) 深層混合処理工法</li> <li>— SCP (Sand compaction pile工法) 材</li> </ul>
・海中基礎工	<ul style="list-style-type: none"> <li>— PC工法 (瀬戸大橋の橋脚基礎)</li> <li>— CAP工法 (白鳥大橋の橋脚人工島)</li> <li>— スラリー工法 (名港東大橋の橋脚基礎)</li> </ul>
・土質改良材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 建設発生土への利用</li> <li>— 海底浚渫土の改良</li> </ul>
*建設材	
・軽量構造用人工骨材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 軽量粗骨材 (エフエイライト)</li> <li>— 軽量砂 (ファイヤービーズ)</li> <li>— 中量粗骨材 (比重1.8~2.1)</li> <li>— 超軽量骨材 (比重1.25以下)</li> </ul>
・建築材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 建材 (内外壁材, 遮音材, 断熱材, フロワー材)</li> <li>— 窯業製品 (屋根瓦)</li> <li>— セメント製品 (ポール, ブロック)</li> </ul>
※農林・水産分野	
*農業用資材	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 肥料 (けい酸カリ肥料, 特殊肥料 (微粉炭燃焼灰))</li> <li>— 土壌改良材</li> <li>— 融雪材</li> </ul>
*海洋構造物	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 漁礁 (FGC, HFA漁礁・こんぶ礁・藻礁)</li> <li>— 湧昇流用マウンド材</li> </ul>
※その他分野	— 乾式用脱硫材, 人工ゼオライト, 防錆塗料, 有価物回収技術

出典：(株)石炭灰利用総合センター

この分野での他の利用技術の主なものを以下に示す。

#### (1) 高機能分級フライアッシュ

高機能分級フライアッシュとは、フライアッシュから特殊分級機により、不定型の粗粒子を取り除き、良質の球形微粒子を抽出したもので、ブレン比表面積  $5,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の微粉フライアッシュのことであり、以下の効果が期待できる。

- ・球形粒子のボールベアリング効果により流動性が確保でき、単位水量を減少させることができる。従って、一般のフライアッシュを用いた場合のコンクリートの品質に比べさらに高品質のコンクリートができる。
- ・長期強度発現性が向上する。
- ・緻密なコンクリート硬化体となるため、水密性が向上する。

#### (2) 高流動コンクリート用粉体

高流動コンクリートの要点は流動性と分離抵抗性のバランスを取ることである。一般に流動性は高性能減水剤により確保し、分離抵抗性は分離抵抗剤の混入または粉体量の増加により確保する。分離抵抗性を得るための粉体としてフライアッシュは優れた材料である。

#### (3) 活性化フライアッシュ

セメントの一部にフライアッシュを使用した場合、初期強度が不足する問題がある。活性化フライアッシュは燃焼前の石炭に石灰石を添加し、高カルシウム灰とすることで、初期強度発現性を付与するものである。カルシウム成分が10%程度が最も強度発現性が良好である。

### 3.2 土木・建築分野での有効利用

大量使用が見込まれ、比較的石炭灰の品質の変動に左右されることの少ない土木・建築分野での有効利用が、今後の利用拡大につながるものと期待されている。

この分野での有効利用は、道路材、土工材及び建設材に分けられる。

#### (1) 道路材としての利用

道路材として既に実用化された技術の主なものを以下に示す。

##### 1) 路盤材 (アッシュロバン)

アスファルト舗装要綱では、フライアッシュ・クリンアッシュを路盤・路床材として、またフライアッシュをアスファルトフィラーとして使用することが認められている。

中部電力<sup>(株)</sup>はフライアッシュに5%程度のセメントを添加し、いったん粒状に固めたうえで破碎した

ものに、フライアッシュ、セメント、石膏を混ぜた結合材を加えた路盤材「アッシュロバン」を開発し、舗装道路の下層路盤に使用することで、平成9年に建設省外郭団体の<sup>(株)</sup>土木研究センターの技術審査証明を取得した。

#### 2) 混合土木材料の技術 (ポゾテック)

<sup>(株)</sup>石炭利用総合センターは三井グループと共同で、新しい混合土木材料の技術 (ポゾテック) を導入し実用化した。火力発電所から発生する石炭灰と排煙脱硫スラッジに少量の石灰を添加して混合させると化学反応により固化する現象を利用したものである。ポゾテックの特徴は①強度が大きい②低い透水性③環境的に安定等であり、この特徴を生かして、道路路盤材、遮水性ライニング材、軟弱地盤改良材等に利用できる。平成7年に<sup>(株)</sup>土木研究センターの技術審査証明を取得した。

#### (2) 土工材としての利用

主なものは以下の通りである。

##### 1) 護岸裏込材及び軟弱地盤表層処理

フライアッシュに数%のセメントを添加し、含水比50%程度のスラリーを護岸裏込材として使用するもので、固化後の一軸圧縮強度は数 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ である。固化後の側方土圧の軽減、軽量性等、フライアッシュの有利な特性を生かす工法で、<sup>(株)</sup>石炭利用総合センターが、運輸省港湾技術研究所の指導により、平成7年度に中部電力<sup>(株)</sup>碧南火力発電所の灰捨てで現場施工試験を行い、所定の成果を得た。

また、同様のスラリーを利用した軟弱地盤改良の試験が九州荊田沖の人工島で行われた。

##### 2) 軟弱地盤改良、土質改良材

軟弱地盤の土質改良方法としては各種の方法がある。そのうち化学的安定工法としてのセメント及び石灰安定処理工法の材料として石炭灰が利用される。

ヘドロやスラッジなどの高含水比で有機物を含む場合は、セメントまたは石灰では安定化が期待できないことがあり、このような場合、フライアッシュ (アルミナ)、石灰、石膏によりセメントバチルスを生成させ安定化させる。また、単純に水分を多く含む軟弱土にフライアッシュを混合し、余剰水を吸収させることにより、剪断強度を増加させる。

##### 3) FGC深層混合処理工法

本工法は<sup>(株)</sup>石炭利用総合センター、<sup>(株)</sup>電源開発が、運輸省港湾技術研究所の指導により開発中であり、川崎港、横浜南本牧埋立地で試験施工を行った。通

常の深層混合処理工法は、安定材としてセメントを用いているが、均一改良のためには必要以上のセメントを添加しなければならない。本工法は安定材としてセメント(C)の一部をフライアッシュ(F)及び火力発電所からの副産物である排煙脱硫石膏(G)に置き換えた混合スラリーを深層混合処理工法に適用したものであり、目標強度に応じた低強度の改良地盤を造成できる。

#### 4) サンドコンパクションパイル材

フライアッシュとセメントの重量比を85%と15%程度にしたものに20%程度の水を加えて混練りし、造粒機により作成したものをサンドコンパクションパイルの砂の代替として用いる。

中部電力㈱の提唱に応じて、電力各社や関係企業が参集し、運輸省と(株)石炭利用総合センターの指導のもとに平成7年度より開発を進めており、平成8年度には試験施工を行い、平成9年度は陸域および海域での試験を予定している。

#### (3) 建設材としての利用

建設材としては、フライアッシュの軽いという特徴を生かした人工軽量骨材分野での使用が多い。

##### 1) 軽量粗骨材(エフェイライト)

フライアッシュに少量の微粉炭とベントナイトを混合し造粒、焼結した絶乾比重1.30~1.38の軽量骨材で、九州電力㈱、(株)神戸製鋼所により開発された。

##### 2) 軽量砂(ファイヤービーズ)

石炭灰に少量の結合材と水を添加し、造粒した後自然養生、破碎、乾燥、ふるい分けにより製品化される。東北電力㈱が開発したアスファルト流動化防止材である。

##### 3) 中量粗骨材

電源開発㈱、秩父小野田㈱の共同により試作された。平成10年度からは、両者を中心とした研究会により開発を継続する。絶乾比重が2.0前後で、安定性、すりへり減量、強度特性に優れている。

#### (4) 建築材としての利用

建築分野における利用対象として以下のものがあるが、コスト的な問題が残っている。

##### 1) 窯業製品(粘土瓦、れんが、タイル)などの粘土代替原料としての利用

##### 2) コンクリート二次製品(ブロック、ボード)のセメント混合材としての利用

### 3.3 農林・水産分野

#### (1) 農業用資材としての利用

1960年にフライアッシュが、1992年にはクリンカアッシュが「肥料公定規格」の特殊肥料として指定され、また石炭灰を主原料とした「けい酸カリ肥料」も1978年にカリ質普通肥料として認可された。日本にはカリの資源が乏しく、その全てを塩化カリ、硫酸カリの形で輸入しているが、これらは水溶性であり、効果発現のコントロールが難しい。炭酸カリ、苛性カリをフライアッシュと混合造粒焼成し、フライアッシュ中の珪酸とカリから運効性の珪酸カリ肥料を製造した。

また、クリンカアッシュは多孔質であることから、良好な排水性・保水性を持つため、土壌改良材としてゴルフ場の芝生用に使用されている。

#### (2) 海洋構造物としての利用

フライアッシュの軽い性質を生かし、フライアッシュを大量に使用したコンクリートによる軽い漁礁が試作され、生物の付着や集魚効果が確認され、1993年に水産庁監修「沿岸漁場整備開発事業施設設計指針」で認められた。また、(株)マリノフォーラム21が主体となり、水産庁の補助事業として石炭灰を利用したブロックにより人工湧昇流漁場を創造する研究が行われており、平成9年8月から長崎県の試験海域において沈設が開始された。

### 4. 石炭灰有効利用の今後の課題

石炭灰の有効利用技術の開発は、紹介したように各方面において行われている。リサイクル法の施行以降は、運輸省では「港湾技術開発5ヶ年計画」に基づく、リサイクル材料の実用化により天然資材の10~30%の削減を目指している。また、建設省でもリサイクル材料の再生利用技術の開発のための「アクションプログラム21」の中で、建設発生土利用に際し石炭灰を添加材として使用することを検討中である。今後、この分野での有効利用が促進されることが期待される。

このようなリサイクルの気運の高まりがある一方、従来から利用されている分野での利用を拡大することも必要である。特に平成8年度の有効利用の約65%を占めるセメント・コンクリート分野での利用促進は、定常的に使用されるという点で重要である。現在、年間のセメント生産量は約9,000万トンであり、今後急激な需要拡大は見込まれないものの、セメント原料としての拡大の余地はあるものと期待している。

石炭灰の有効利用拡大のためには、利用分野を多様化することは勿論であるが、利用し易い環境を整備することも必要であり、そのための検討課題は以下の通

りである。

#### (1) 供給の安定化

火力発電所の地域的偏在等により、適正な価格で石炭灰を供給できる範囲が限られている。従って、利用者が使用し易い適正な価格を達成できる供給体制の在り方が課題として挙げられる。

#### (2) 品質の安定化

石炭産地の多様化、ボイラでの燃焼条件等により、石炭灰の品質が変動する場合がある。利用者にとっては、この品質の変動が有効利用意欲への一つの阻害要因となっている面もある。そのため、ブレンディングサイロ、貯蔵設備等による品質の安定化が課題として挙げられる。

#### (3) JIS改正

現在、電気事業連合会としては平成11年3月を目途にフライアッシュのJIS規格改正のための諸準備を進めている。本改正は、フライアッシュを品質別に3ランク程度に等級化し、使用目的に応じたユーザの選択自由度を増すことにより、石炭灰の有効利用拡大に資することを目的としている。

## 5. おわりに

火力発電所から発生する副産物としての石炭灰の有効利用技術の現状を紹介してきたが、その技術は多様多様であり、その全てを網羅できたわけではない。

副産物の再資源化は、資源の有効利用という観点から官民挙げて取り組んでいるところであり、電気事業者としても事業の副産物である石炭灰の有効利用については、今までの利用技術中心の開発だけではなく、供給体制等の品質管理を含むシステムを整備することにより、より一層の利用拡大を図っていきたい。

この機会に、石炭灰の有効利用の現状を紹介できたことは、喜びとするものである。

#### 参考文献

- 1) ㈱日本電気協会, 電力年報委員会編, ; 電気事業の現状 (1996)
- 2) 電気事業審議会, 需給部会中間報告 (1994. 6)
- 3) 資源産業新聞社刊; コール・ノート (1997)
- 4) 環境技術協会, 日本フライアッシュ協会編; 石炭灰ハンドブック (1995)

共催行事ごあんない

## 第36回原子力総合シンポジウム 開催について

と き 1998年2月9日(月) 10:00~16:30

と ころ 学士会館本館 (202会議室, 210会議室)

(東京都千代田区神田錦町3-28, ☎03-3292-5931)

**開催趣旨** 原子力関連学協会の共同主催により、21世紀を前にますます広領域化しつつある原子力研究関連の各専門分野の研究者—技術者間および学界—産業界間の知識と情報の交換・普及を図ると共に、単に専門家に対してのみならず、一般社会に対しても、原子力研究の現状、展望を含め、原子力界が直面している問題点を提示し、相互理解を深めることを目的として、本シンポジウムを開催する。

**予稿集** 1月中旬に作成し、実費頒布する(予価1,000円)

**参加費** 共催学協会会員 2,000円, 一般は3,000円を当日「受付」で。(学生は無料)

**運営** 「原子力総合シンポジウム」運営委員会事務局

〒105 東京都港区新橋1-1-13 (東新ビル6階)

(社)日本原子力学会内 TEL 03-3508-1261, FAX 03-3581-6128