特集2・無機系廃棄物の有効利用

フライアッシュの有効利用

金 津 努*

1. はじめに

フライアッシュは、微粉炭火力発電所から排出される産業廃棄物である。しかし、従来より、セメントコンクリート分野において、フライアッシュの特徴を活用した有効利用が図られている。本稿では、セメントコンクリート分野を中心に、土木・建築分野におけるフライアッシュの有効利用について解説する。以下で述べるフライアッシュは、火力発電所起源のフライアッシュのみを対象としている。

我が国における電源設備容量は、平成10年度末現在、約22,100万kWで、平成20年度末には27,800万kWと、約25%程度増加することが予想されている¹⁾。水力と原子力がそれぞれ20%、火力が60%で、設備構成割合としては大きな変動はない。設備容量の25%の増加の内、石炭火力が約9%を占めており、石炭火力設備から見ると、2400万kWから4400万kWへとほぼ倍増する予定である。また、発電電力量から見ると、石炭火力は全体の20%強を予定されており（図-1参照）、電源比率よりも大きい。

図-1 発電電力量構成の推移¹⁾（一般電気事業用）

*財電力中央研究所我孫子研究所構造部
Tsutomu KANAZU

これは、石炭埋蔵量が豊富であり、価格、供給安定性に優れていることから判断と考えられる。一方では、地球環境への影響面から見ると、炭酸ガス排出源であり、使用に当たっては十分な配慮が求められる資源でもある。

主たる起源が火力発電所の稼働にある石炭灰は、今後とも排出量は伸びていくことが予想される。このため、資源の有効活用および環境保全の観点から、積極的に石炭灰の有効利用を図っていくことが求められている。

2. 石炭灰

2.1 フライアッシュとは

微粉炭火力発電所におけるフライアッシュの発生過程を、図-2に示した²⁾。燃焼させた石炭の約13%が石炭灰となって排出される。この内、ボイラー下部のホッパー内に落下するものがクリンカアッシュと呼ばれ、石炭灰の5~15%、ボイラーから煙道を通して電気集塵機で捕捉されるものがフライアッシュと呼ばれ、石炭灰の85~95%を占める。また、空気余熱器・節炭器を通過する際に落下採取されるものをシンダーアッシュと呼ぶが、量的には数%と少なく、一般には、原粉サイロにおいてフライアッシュと一緒に貯蔵される。したがって、石炭灰のほとんどはフライアッシュということになる。

フライアッシュ、シンダーアッシュ、クリンカアッシュとも、化学成分はほとんど同じであるが、物理形状が異なり、それぞれ0.1mm以下、0.1~1.0mmおよび1.0~10mmである。特にフライアッシュは粒形が球形でガラス質のことが多い。

2.2 排出量

フライアッシュの排出量の推移を見る。平成10年度時点では、電気事業関係からの排出量が500万t、一般産業からの排出量が190万tで、合計690万t

図-2 石炭灰の排出過程²⁾

である。図-1から、発電電力量の伸び率は、平成15年度で約50%、平成20年度で約70%であるため、一般産業からの排出量をそのままとしても、平成15年度940万t、平成20年度に1040万tとなることが予想される。ここ10年程度で現状の約2倍となることが予想される。

2.3 フライアッシュの品質

フライアッシュは、その物理的、化学的特徴を活かして有効利用される。最近のフライアッシュの品質について、一般的に以下のことがよく知られている。

- ①燃料炭の80%以上は海外炭を使用しているが、海外炭は一般に融点が高いので、良好な粒形のフライアッシュが国内炭の場合と比較して減少した。
- ②窒素酸化物の排出抑制の面から、ボイラー燃焼温度が1300℃程度と昔より低くなったため、粒形の良くないフライアッシュが増加した。
- ③電力の負荷調整のために火力発電所ボイラーの燃焼調整が行われる場合があり、これがフライアッ

シュの品質変動を引き起こす。

- ④産炭地の異なる石炭を混焼するので、副産されるフライアッシュの品質が変動する。

- ⑤石炭微粉碎用のミルや燃焼ボイラーの性能の改善により、新しい発電所のフライアッシュに関しては、強熱減量は小さく、ブレン値は大きくなる傾向にある。

現在排出されているフライアッシュの物理特性および化学組成を表1に取りまとめた。非常に細かな灰色で球形の粒で、 SiO_2 、 Al_2O_3 の含有率が多いことが特徴である。

3. JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ⁴⁾

セメントコンクリート分野での利用を促進することを目的として、1958年にフライアッシュの日本工業規格（以下、JIS）が制定された。現在の火力発電用燃料炭の80%強（前述）が海外炭であること、ボイラーを含めて排出設備の性能が改善されたため、フライアッシュの品質が改善されてきていること、有効利

用を図るためには、利用しやすい規格であること等、フライアッシュを取り巻く環境が変化してきたことから、1999年2月にJISが改正された。表2にJIS A 6201-1999「コンクリート用フライアッシュ」の規格内容を示す。

JIS A 6201-1999の大きな特徴は、フライアッシュの品質に関して4つの等級が設定されたことである。これは、品質的に十分に使用できるフライアッシュであっても、従来の規格ではJIS外となって利用できなかった部分がかかなり大きかったことから、これらを取り込めるように配慮したものである。この結

表1 フライアッシュの物理特性と化学組成³⁾

物理特性				
密度 (g/cm ³)	粒径(mm)	粉末度 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	
1.9 ~ 2.3	0.2 未満	1500 ~ 7000	8.0 以下	
化学組成 (%)				
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
40 ~ 75	15 ~ 35	2 ~ 20	1 ~ 3	1 ~ 10

表2 JIS A 6201-1999「コンクリート用フライアッシュ」

品 質		フライアッシュ			
		I 種	II 種	III 種	IV 種
二酸化けい素 (%)		45.0 以上			
湿 分 (%)		1.0 以下			
強熱減量 (%) ⁽¹⁾		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密 度 (g/cm ³)		1.95 以上			
粉末度 ⁽²⁾	45 μm ふるい残分 (%) (網ふるい方法) ⁽³⁾	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (cm ² /g) (ブレン方法)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
フロー値比 (%)		105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材齢28日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢91日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

注 (1) 未燃炭素測定による場合は、その試験値に(炭素)と付記する。

(2) 粉末度は、網ふるい方法またはブレン方法による。

(3) 粉末度を網ふるい方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

果、JIS 範囲のフライアッシュの品質が広く分布することになり、ユーザーにとって用途に対応した品質のフライアッシュを選択しやすくするという観点から、等級化の措置が採られた。現在排出されるフライアッシュのおおよそ90%程度は、JIS A 6201-1999の規格範囲となっている。

以下に、I からIV種の品質の特徴を記述する。

(1) フライアッシュ I 種

高度気流分級技術の開発により製造可能となったもので、従来のJIS品よりも高品質・高性能のフライアッシュと位置づけられる。強熱減量が従来規格より2%小さく、ブレン値が2倍近く大きいので、混入した時にコンクリートの流動性を大きく改善することができる⁵⁾。

(2) フライアッシュ II 種

品質的には、ブレン値の下限値を100 cm²/g 増加させた以外は、従来のJIS A 6201-1996規格に相当する。排出される原粉は、ほとんどがII種に相当するものと考えられる。

(3) フライアッシュ III 種

強熱減量を8.0%以下、フロー値比を85%以上とした以外は、II種と同じである。強熱減量の主たる要因である未燃炭素による混和剤吸着が、セメントコンクリートのフレッシュ性状に影響を与えるが、強度発現には影響しない。フライアッシュの有効利用量の増大を意図して設定された等級である。

(4) フライアッシュ IV 種

粒度的に粗いフライアッシュを位置づけたもので、通常のフライアッシュ製造施設から排出される

分級粗粉を対象としている。このため、コンクリートに混入した場合のフレッシュ性状に配慮が必要のほか、強度発現も大きくは期待できない。通常のコンクリートよりはグラウト材料、砂の微粒分補充などへの利用が期待されるものである。

4. フライアッシュの有効利用

4.1 有効利用の現状

現在、排出された石炭灰の処理方法は、有効利用と埋め立てに分けられる。埋め立て分についても、有効利用との判断も下せる部分もあるが、別扱いの整理がなされている。

表3に、日本フライアッシュ協会で取った統計に基づいて、平成10年度の石炭灰の用途別利用状況を示した³⁾。わずかに農業分野での利用はあるが、ほとんどが土木・建築分野での利用である。排出量の半分近くがセメント原料として利用されており、次いで、埋め立て処分が約30%、残りの利用は、どの用途も数%の割合である。将来的には、埋め立て地の飽和、埋め立て処分そのものの環境面からの規制、近年のセメント製造量の鈍化等を考慮して、他の用途への利用拡大が大きな課題となっている。

4.2 セメント原料

フライアッシュの化学成分が粘土に非常に近いことを利用して、セメント製造の主要原料である粘土の代替として利用されている。

セメント1 tを製造するのに必要な原料、燃料の原単位を表4に示した⁶⁾。セメント1 t当たり約200 kgの粘土が使用されており、でき上がるセメントの

表3 石炭灰の有効利用先分類

	項 目	割合 (%)
1	セメント原料	45.0
2	セメント混合材	4.4
3	コンクリート混和材	2.3
4	道路材	1.1
5	土工材	3.9
6	建設材	4.1
7	農業用資材	1.5
8	その他の利用	6.2
9	埋め立て	31.5
総処分量		447.8万トン

品質の確保の問題から、粘土代替としてのフライアッシュの使用は約40～50%，約100 kgが上限とされている。

セメントの製造実績は、平成7年、8年の約1億tをピークに減少してきており、平成11年度で約8200万tである。しかし、セメント1t当たり100kgの使用で単純に計算すれば、年間820万tのフライアッシュを処理できることになる。現状は、その1/4の200万t程度が粘土代替としての処理である。これは、セメント製造工場と発電所の立地点が離れていることに起因している。今後ともある程度安定した利用量が見込まれる。

4.3 混合材・混和材

混合材、混和材としての利用が、セメント、コンクリート分野の主たる利用方法である。セメントの一部をフライアッシュで置き換えて、これを用いて製造するコンクリートの性能を改善することを目的とするものである。このような材料を混和材と定義している。混合セメントのように、フライアッシュが予めセメントと混合されるような場合には、これを混合材と称して区別される。コンクリートの性能向上の観点からみれば、同様の使い方と言える。

フライアッシュによるコンクリートの性能向上効果の代表的なものは、フレッシュ性状の改善、水和発熱の低減、長期強度の増進、アルカリシリカ(ASR)反応抑制等の効果である。

4.3.1 フレッシュ性状の改善

フレッシュ性状とは、まだ固まらない状態のコンクリートの施工作業のしやすさを表す。フライアッシュは微細な球形粒子であるため、コンクリートの流動性を向上させる効果（ボールベアリング効果）がある。このため、同じ流動性を得るために必要な練りまぜ水量を低減でき、これがコンクリートの品

表4 セメント1tの製造に要する原料、燃料

区分	種 類	原単位(kg)
原料	石灰石	1088
	粘土	210
	けい石	70
	鉄原料	31
	石こう	35
燃料	石炭などの燃料	105

燃料は、石炭換算（6200kcal/kg）

質を向上させる。

4.3.2 水和発熱の低減

大量のコンクリートを打設する際、セメントの水和発熱による温度応力に起因するひび割れの発生抑制が、施工計画上の留意事項となる。セメントの発熱を抑制するため、通常、使用セメント量の20～30%がフライアッシュで置き換えられる。フライアッシュのポズラン反応（後述）が、セメントの水和に遅れて生じるため、発熱の遅延、発熱量の低減がもたらされる。このため、早期材齢では強度発現の遅延が生じることとなる。

4.3.3 長期強度の発現

ポズラン反応とは、フライアッシュの主成分であるガラス質シリカ（ SiO_2 ）やアルミノシリケート（ $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）が、常温で水の存在下においてセメントの水和によって生成される水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ と反応し、新たに水和物を生成する反応をいう⁷⁾。フライアッシュの化学組成、鉱物組成および反応の条件によって生成水和物の種類、組成は異なるが、その代表的なものはカルシウムシリケート水和物、カルシウムアルミネート水和物、エトリンガイト等である。ポズラン反応による水和物が空隙を充填するため毛細管空隙が減少し、コンクリートの組織は緻密化する。この結果、長期強度が増進し、耐久性能（水密性、耐化学抵抗性、耐塩化物イオン浸透性等）が向上する。

4.3.4 アルカリシリカ反応抑制効果

セメント中のアルカリ分とシリカ質骨材が反応し、コンクリートに膨張性のひび割れをもたらし現象がASRである。フライアッシュを用いることで、ASRを抑制することができる。ASR抑制効果は、フライアッシュの品質に依存し、1種のより微粒なものの効果が卓越している。ASRの膨張に対するフライアッシュの抑制効果を試験した例を図-3に示す。

図-3 フライアッシュのASR膨張抑制効果の例

4.4 細骨材への補充材料

最近、フライアッシュのコンクリートへの大量利用方法として、細骨材への補充材の研究が進められている⁸⁾。これは、海砂を除塩して使用する場合に、水により流失した微粒分を補充する場合と、コンクリートの品質向上を目的とし、細骨材の一部をフライアッシュで置き換える場合がある。このような使用でも、ポゾラン活性を期待できるので、硬化後のコンクリートの品質（強度、耐久性）向上が期待できる。特に、フライアッシュⅣ種は、フライアッシュとしては粗粒であるが細骨材微粒分としては適当な粒径であり、有効な利用方法である。

ただし、フライアッシュの大量使用であるため、化学混和剤との関係で、所定のフレッシュ性状を得るためには、混和剤使用量の増加、コンクリートの品質管理に注意を払う必要がある。

4.5 造粒製品

フライアッシュを主要原料として造粒し、これを骨材として利用する方法の研究開発が行われている。10～20%のセメントと練り混ぜて造粒する方法^{9, 10)}および石灰石、ペントナイトとの混合原料を焼結させる方法¹¹⁾がある。これらは、フライアッシュの利用用途拡大と、将来的に見た場合の普通骨材（自然石起源）の枯渇化対応を目的とした技術開発である。前者は、普通骨材ほどには強度を期待できないものの、骨材としての用途を考慮すれば、十分に利用できる品質を有している。後者は、品質的に普通骨材に替わりうる特性を持つ人工骨材の開発を行ったものである。

4.6 路盤材

フライアッシュにその10%程度のセメントを混合

して締め固め、路盤材料とする利用方法、あるいは、4.5の造粒した人工骨材（前者）を路盤碎石の代替として利用する方法がある。通常、路盤の構造設計要件として、使用材料の品質が一軸圧縮強度やCBR値として規定されており、これらの規格を満足することが必要である¹²⁾。フライアッシュの路盤材料への適用実績は多くはないが、路盤材としての性能が満足されることが、電力大での実験的検討により確認されている。

5. まとめ

以上、セメントコンクリート分野を中心として、フライアッシュの利用の現状を概説した。フライアッシュの有効利用促進の要件は、

- (1) 品質が安定していること
- (2) 安定供給体制が整備されていること
- (3) 安価であること

といわれている。最近の火力発電所における石炭灰の排出設備の改善・整備により、(1)の要件は改善されつつある。従来より、石炭灰の有効利用のためにいろいろな技術開発が行われ、使える技術としては十分に出そろっている感がある。しかし、有効利用の促進という命題が解消しないのは、(2)(3)の要件が改善されていないことに原因があるものと思われる。供給体制・供給網の整備と価格とは連動するものと考えられ、利用技術の開発以上に強力で推進していくべき課題と考える。

参考文献

- 1) 日本電気協会：通産省資源エネルギー庁公益事業部監修「電気事業の現状 平成11年度版」、オーム社、2000年3月
- 2) 日本フライアッシュ協会：石炭灰（パンフレット）
- 3) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック 第3版、2000年12月
- 4) 金津努：フライアッシュのJIS改訂、コンクリート工学 37 (8)、1999年8月
- 5) (財)土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書、コンクリート用混和材ファイナッシュ、平成6年3月
- 6) セメント協会：セメントの常識 1998年
- 7) 長瀧重義監修：コンクリートの高性能化、技報堂、1997年11月
- 8) 渡辺健治他：粗骨材を粗粉フライアッシュで置換したコンクリートの基礎物性、セメントコンクリート論文集 No.54/2000、2000年2月
- 9) 齊藤直他：石炭灰を使った海砂代替材の開発と取り組み状況、電力土木No.287、2000年5月
- 10) 安藤兼治他：石炭灰質非焼結型人工骨材の製造方法の開発、電力土木No.289、2000年9月
- 11) 横川憲司他：石炭灰を原料とした高強度人工骨材の開発、電力土木No.288、2000年7月
- 12) 日本道路協会：アスファルト舗装要項、丸善