

第3章 活用が期待される石炭灰有効利用技術

微粉炭焼きボイラーから発生するフライアッシュの特徴は、粒子の密度が低く、球形であること、ポゾラン活性を有すること、さらに、ドライで、無機成分が殆どであること等である。クリンカアッシュも粒子の特性以外は、ほぼ同様である。これらの特徴を活用した有効利用技術が土木を始め、各分野において開発され、実績も増加している。

以下に、石炭灰の特性とその活用技術について概略を述べる。また、有効に現場適用するためには、石炭灰の特性を踏まえた施工時の注意点等の理解も必要であり、それについても概略を述べる。

3.1 石炭灰の物理・工学的特性とその活用

3.1.1 物理的特性

石炭灰の色は、大部分が灰白色であるが、灰中の未燃分（炭素分）が増えると黒味を帯びてくる。また、鉄分が多いとわずかに赤みも帯びる。

クリンカアッシュは、微粉炭が火炉（ボイラー）内で熔融し、水封された炉底のクリンカホッパ内に落下固形化したものをクラッシャーで粉碎し 25mm 以下の砂礫状としたもので、粒子は多孔質のものが多い。粒度分布はかなり広く 0.1～1mm が 50%、1mm 以上が 50%程度である。

フライアッシュは、電気集じん器で捕集される微粉石炭灰であるが、節炭器、空気余熱器で捕集されるシダアッシュも僅かであるが混入している。粒度分布は 0.1mm 以下が 90%以上を占める。平均粒径は 25 μm 程度で土質的には粘土より粗く、シルト相当である。フライアッシュを気流分級して JIS フライアッシュ（種）が製造されるが、ほぼ 0.05mm 以下になる JIS 用のフライアッシュを細粉、残った 0.1～0.05mm 程度のフライアッシュを粗粉と称している。

フライアッシュおよびクリンカアッシュの

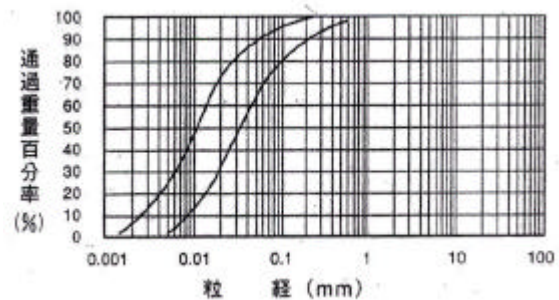


図 - 3.1.1 フライアッシュの粒度分布¹⁾

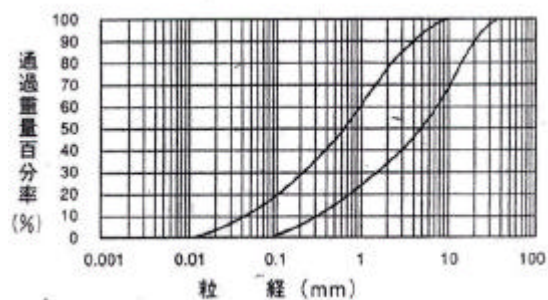


図 - 3.1.2 クリンカアッシュの粒度分布¹⁾

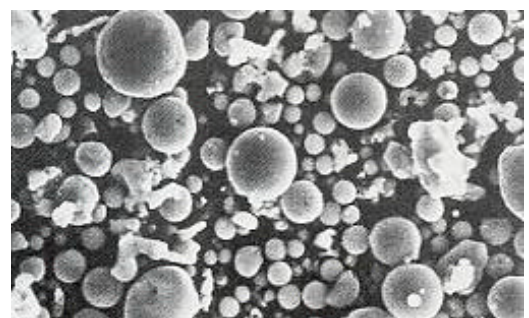


写真 - 3.1.1 フライアッシュの電子顕微鏡写真¹⁾

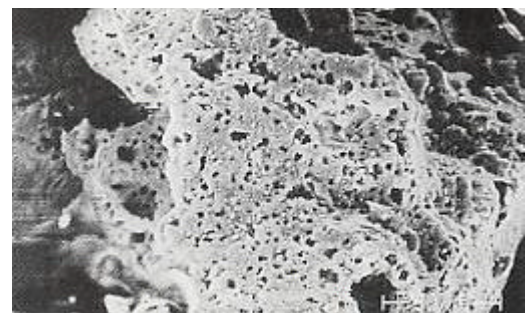


写真 - 3.1.2 クリンカアッシュの電子顕微鏡写真¹⁾

粒度分布の例（粒度の細かいものと粗いものの代表例）を図 - 3.1.1、図 - 3.1.2 に示す。また、写真 - 3.1.1、写真 - 3.1.2 に海外炭フライアッシュおよびクリンカアッシュの電子顕微鏡写真を示す。

表 - 3.1.1 には、JIS 規格のフライアッシュ 種相当のフライアッシュの性状例を示す。

石炭灰の粉末度は、飛散やコンクリート用混和材などに利用する場合の重要な因子となっ

ている。フライアッシュの比表面積（ブレン方法）は原粉で 3,000~3,500cm²/g が平均的な値である。比表面積が大きいと粒径が小さく、流動化性や反応性が良いということになり、JIS では 種は 2,500cm²/g 以上、 種は 5,000cm²/g 以上と規定している。

強熱減量は、主に未燃炭素の比率の指標を示す値であるが、強熱減量が少ないほどセメントやコンクリート用としては良質である。JIS 規格ではフライアッシュ 種として 5% 以下に規定している。

石炭灰の密度は、フライアッシュおよびクリンカアッシュともに 1.9~2.3g/cm³ の範囲である。山砂等は 2.6 程度であるため、石炭灰はかなり軽量であるといえる。なお、かさ比重は（密かさ比重）1.0 程度であり、ほぼ水と同じである。

3.1.2 化学的特性

石炭灰は結晶質鉱物と非晶質（ガラス質）鉱物から成る。結晶質鉱物は、クォーツ（SiO₂）、ムライト（2SiO₂・3Al₂O₃）、マグネタイト（Fe₃O₄）等である。表 - 3.1.2 に鉱物組成を示す。ガラス化率が高いほどポゾラン反応が進行しやすいといわれている。

石炭灰の化学成分組成は炭種の違いにより多少の差異はあるが、二酸化けい素（SiO₂）、酸化アルミニウム（Al₂O₃）が全体の 70%~80% を占めている。その他の成分は Fe₂O₃、CaO、MgO、SO₃、Na₂O、K₂O 等の酸化物となっている。化学成分組成が粘土と似たような組成になっていることから、石炭灰はセメント原料の粘土代替として多くが利用され

表 - 3.1.1 フライアッシュ（JIS 種相当）の性状例²⁾

発電所名	化 学 成 分			物 理 的 性 質		
	湿 分 (%)	強 熱 減 量 (%)	二酸化けい 素 (%)	密 度 (g/cm ³)	粉 末 度	
					45μmふる い残分 (%)	比表面積 (cm ² /g)
A	0.16	1.92	61.7	2.29	4.5	3,828
B	0.00	2.96	61.8	2.25	5.2	3,644
C	0.32	4.00	52.0	2.25	11.1	4,694
D	0.10	1.50	59.4	2.30	8.3	3,370
E	-	2.40	57.7	2.23	17.2	3,465
F	0.20	3.70	66.7	2.24	15.3	3,875
G	0.05	1.03	59.2	2.20	3.9	3,240
H	0.05	0.31	55.9	2.26	4.2	4,590
I	0.00	0.60	50.8	2.29	16.7	3,306
J	0.00	2.60	53.4	2.20	29.3	3,036
K	0.10	0.90	62.7	2.25	3.3	4,074
L	0.00	1.50	64.0	2.23	3.8	4,142
M	0.10	2.20	59.7	2.26	4.2	4,263
N	0.10	2.60	60.2	2.26	18.1	4,483
O	0.10	1.90	57.0	2.26	13.0	3,200

表 - 3.1.2 石炭灰の鉱物組成¹⁾

項 目	-クォーツ	ムライト	鉄	ガラス	
国内炭灰	範囲 (%)	6~14	3~22	0~6	54~86
	平均 (%)	9	11	5	68
海外炭灰	範囲 (%)	4~34	4~43	0~18	29~79
	平均 (%)	11	21	5	53
内外合計	範囲 (%)	4~34	3~44	0~18	29~86
	平均 (%)	11	20	4	55

表 - 3.1.3 石炭灰の化学成分含有量³⁾

炭種	国内炭	海外炭	普通セメント	高炉スラグ	山 土
SiO ₂	50~55	40~75	22.2	33.4	59.6
Al ₂ O ₃	25~30	15~35	5.1	14.5	22.0
Fe ₂ O ₃	4~7	2~20	3.2	0.4*	-
CaO	4~7	1~10	65.4	41.0	0.4
MgO	1~2	1~3	1.2	6.0	0.8
K ₂ O	0~1	1~4	-	-	-
Na ₂ O	1~2	1~2	-	-	-

* : FeO

ている。表 - 3.1.2 に石炭灰の化学組成を示す。

石炭中の灰分は、根源植物中の無機質と石炭生成時に混入した粘土や岩石からなっているため、産炭地によっては、全水銀、カドミウム、鉛、ヒ素等の微量物質が含まれている場合がある。(1.2.4 溶出問題に関する法基準等参照)

石炭灰は水に浸すとpHは高く11~12程度の値を示す。CaO成分が多くなるとpHも高くなる傾向がある。海上灰処分場の場合には海水の緩衝効果があり、また経時的に空気中の炭酸ガスを吸収することにより、pHの上昇が抑制される。

3.1.3 工学的特性

フライアッシュは、写真 - 3.1.1 で明らかなように形状が球形に近いので、コンクリートに混和した場合にはワーカビリティが向上するといわれている。フライアッシュをセメントの一部と置換して使用することで、同一スランプを得るための単位水量を低減することができるが、この理由は粒子形状が著しく丸いため、いわゆるボールベアリング作用によってセメントペーストの流動性が向上するためと考えられている。

また、セメントにフライアッシュを混合した場合、フライアッシュ中の二酸化けい素によってポゾラン反応が長期間継続するため、長期強度の増進が図られる。

これらの特性から、フライアッシュを混合したコンクリートは単位水量の減少のため、硬化後の乾燥収縮率が小さくなり、ひび割れ現象が起きにくく緻密で水密性が高く化学抵抗性、耐熱性に優れたコンクリートを得ることが可能である。

また、セメント量の減少等により水和熱の抑制やアルカリ骨材反応の抑制にも効果があることが古くから知られている。

フライアッシュは、コンクリート用として JIS A 6201(1999) で表 - 3.1.3 に示すように種々種類の4種類に規定されている。これは、フライアッシュの上記の特性を基に等級分けしたものである。コンクリートの要求性能に応じて、幅広い性状の各種フライアッシュの中から適当なものを選択・使用できる。

コンクリート以外への用途についても、JIS規格のフライアッシュを使用すれば、おおよそのフライアッシュの性状が把握できるため、4種類の中からの選択・使用が有効である。

クリンカアッシュの粒子の表面には1~20 μm の無数の細孔があいているため大きな表面積をもっている(比表面積はまさ土0.94 m^2/g の4~5倍程度)。粒度は粗粒砂(FM =

表 - 3.1.4 フライアッシュの JIS 規格 (JIS A 6201)

項目	種類	フライアッシュ種	フライアッシュ種	フライアッシュ種	フライアッシュ種
二酸化珪素(SiO_2)	%	45.0以上			
水分	%	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(ブレン方法) cm^2/g	5,000以上	2,500以上	2,500以上	1,500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) 強熱減量に代えて、未燃炭素含有率の測定をJIS M 8819又はJIS R 1603に規定する方法で行い、その結果に対し強熱減量の規定値を適用してもよい。

(2) 粉末度は、網ふるい方法又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。

3.5～4.0)程度で、含水量は普通の砂に比べて高い。浸水膨張率(浸水状態で水分の吸収により粒径の膨張する比率)0.012～0.036%で鉄鋼スラグ協会規格3.0%より極めて小さい。透水係数は砂と同程度であり、まさ土に比べると大きく、しかもまさ土では締固めた場合に透水係数が10分の1以下になるのに対して、クリンカアッシュの場合には殆ど変化しない。クリンカアッシュの透水試験例を表-3.1.5に示す。また、一般土壌に比べて易効水(土壌中の水分のうち植物に効率よく利用できる水分)の水分保有率が高く、耕地の土壌として適している。

クリンカアッシュの締固め特性としては、砂とは対照的に最適含水比が高く、最大乾燥密度が低くて空隙率の高くなる傾向がある。このため、転圧に対する抵抗性が強くなり固い土壌になりにくい。

これらの特徴を生かして下層路盤材、ゴルフ場やグラウンドの排水材、植栽土壌など有効利用分野の拡大が図られている。

表-3.1.5 クリンカアッシュの透水試験例

乾燥密度 (g/cm ³)	透水試験 (cm/s)
1.23	3.2×10^{-2}
1.20	3.4×10^{-2}
1.14	3.2×10^{-2}

3.2 有効利用技術の概要

石炭灰有効利用は、セメント分野の他、強度の確保、微量成分の溶出抑制等の目的で、セメント、高炉スラグ、石灰等の添加物を用いたり、スラリー状、砂礫状、固化体とする利用技術や蒸気養生、焼成等のプロセスでの利用方法について研究開発、実用化が進められている。用途別に分類された各々の技術の特徴は表-3.2.1、3.2.2に示すとおりである。また、有効技術の利用効果、利用方法を表-3.2.3、3.2.4に示す。なお、各々の技術の詳細データについては巻末の付録を参照されたい。以下に、土木分野とその他の分野における有効利用技術について概要を述べる。

3.2.1 土木分野における有効利用技術

土木分野における石炭灰の有効利用はこれまではフライアッシュの特性である水和熱の低減、水密性の増大、アルカリ骨材反応の抑制などを生かしてダム、橋脚、発電所などの大型構造物のコンクリートに利用されてきた。最近では、コンクリートへの利用の他に盛土材、裏込材、充填材などの土工材料や地盤改良材、道路路盤材として公共工事等に利用されている。図-3.2.1に道路およびその周辺での石炭灰有効利用技術の適用イメージを示す。また、図-3.2.2に海洋・その他での適用イメージを示す。

(1) 土工

盛土材、埋戻材は石炭灰にセメント、水を混合して製造しており、軽量で粉塵発生がなく通常の土質材料と同様に施工でき、土砂採取に伴う環境破壊を抑制できる。

裏込材、充填材は石炭灰にセメント、水を加えてスラリー状にしたものであり、軽量で流動性に優れているため、荷重の軽減、施工性の向上が図られるとともに砂の代替材として石炭灰を利用しているので天然資源の消費抑制となる。

(2)コンクリート工

コンクリートの混和材としては従来から利用されており、水密性・耐久性の向上、長期強度の増進、ブリーディング抑制などの効果がある。

コンクリート用骨材は石炭灰に水、ベントナイトを加え、造粒・焼成することによる人工骨材であり、軽量・球状で流動化性に優れているため単位水量の低減ができ、乾燥収縮が小さくなる。

吹付材は細骨材またはノよびセメントの一部を石炭灰で置換することにより、リバウンド量の低減、長期強度の増進が図られる。高流動コンクリートは従来のコンクリートに石炭灰と高性能減水剤を添加することにより、低発熱で温度ひび割れが発生しにくく、締固め作業の不要なコンクリートが製造できる。

(3)地盤改良工

深層及び浅層混合処理工法の固化材としてセメントに石炭灰を混合したものを使用し、低強度から高強度までの幅広い地盤改良ができる。特に、低強度の地盤改良では大幅なコスト削減が可能となる。

表層処理工法では固化材として石炭灰にセメント、水等を混合したものを使用して、軟弱土の物性を改善し、混合直後に重機が走行できるなど、従来の固化材にない改良効果が期待できる。

SCP工法で用いる砂の代替材として石炭灰にセメント、ベントナイト、水を混合して造粒したものが使用されている。海砂と同等の締固め効果及び施工性が期待でき、天然資源の消費抑制が図られる。

(4)道路工

フィラー材についてはアスファルト舗装要綱でJIS灰の使用が認められており、ボールベアリング効果によりアスファルト量を低減できる。

路盤材として石炭灰にセメント、石膏、水を加えて造粒したものを使用し、締固めることにより高強度の良質な路盤ができる。

(5)その他

連続地中壁工法、管中混合処理工法などにおいて石炭灰を利用することにより施工性の改善が図られる。

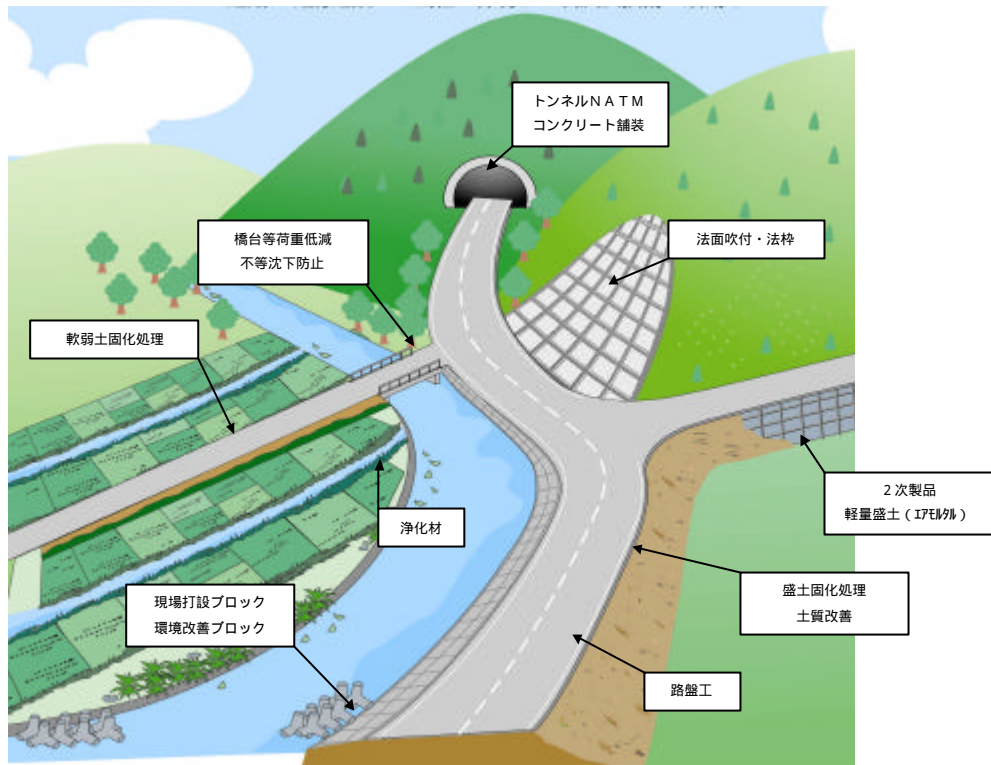


図 - 3.2.1 石炭灰有効利用技術の適用イメージ（道路・河川）

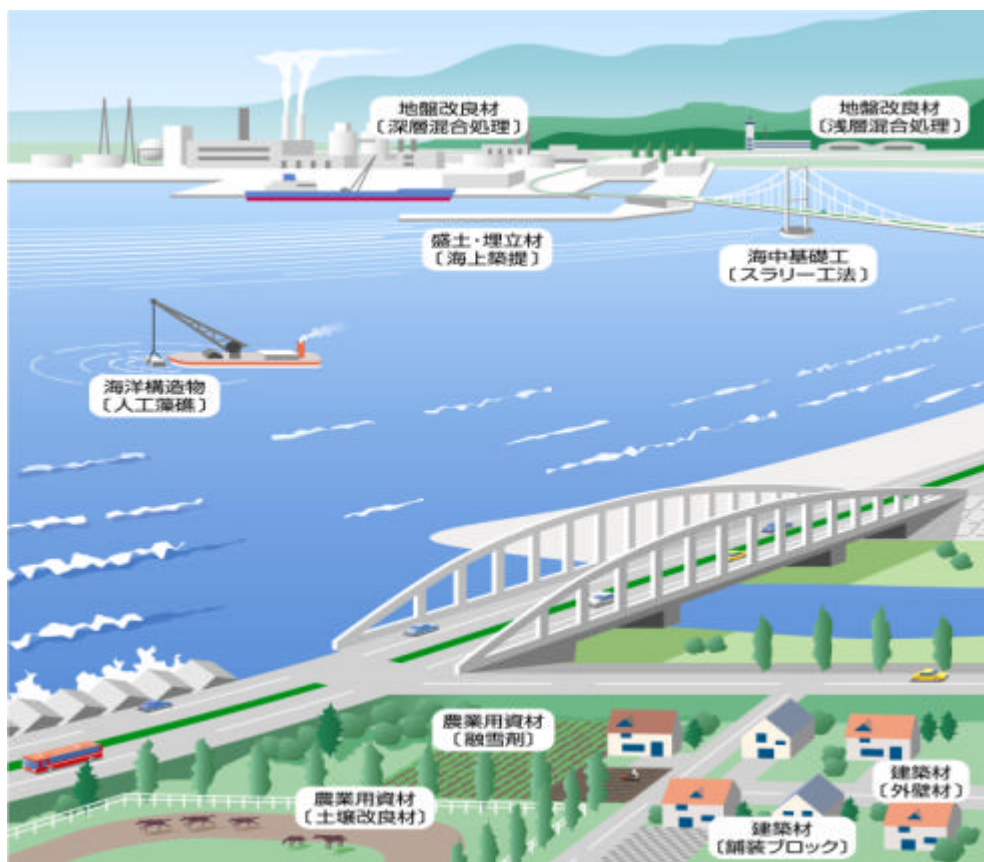


図 - 3.2.2 石炭灰有効利用技術の適用イメージ（海洋・その他）

表 - 3.2.1 有効利用技術の用途別分類と特徴（その1）

工種	用途	工法名等	石炭灰の供給形態		利用効果・特徴等										巻末詳細データ No			
			原粉等	加工品	長期強度増進	軽量性	土圧軽減	流動性向上	耐久性向上	充填性	土質性状改善	天然資源消費抑制	セメント等代替	環境調和		施工性改善	その他	
土木	全般	頑丈土破碎材		○		○						○					A01	
		コアソイルQ	○			○	○					○					A02	
		ゼットサンド	○	○		○						○					A03	
		建設汚泥再生工法	○	○	○						○	○	○				A04	
		クリンカッシュ	○	○		○	○					○					A05	
	盛土材	軽量盛土材	○	○		○	○	○				○		○			A06	
		水中盛土材	○		○					○		○	○				A07～08	
	埋炭材 中詰材 裏込材 充填材	Fドライ		○		○	○					○					A09	
		Fソイル		○	○	○	○			○		○	○				A10	
		Fスラリー		○	○	○	○	○	○	○		○	○				A11	
		FCスラリー	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○				A12	
		エアモルタル	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○		A13～17	
		FC硬化体	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○				A18	
		FAモルタル	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○				A19～20	
		FAシールド		○	○				○	○	○						A21	
		FAEモルタルNF	○	○	○	○	○	○	○			○	○		○		A22	
		CLSM		○	○		○	○	○	○		○	○		○		A23	
	FQSグラウト	○	○	○				○		○	○					A24		
	グラウト材	○										○				A25		
	コンクリート工	混合セメント	フライアッシュセメント		○	○				○	○							B01
			ファイアッシュ		○	○				○	○			○				B02
		コンクリート用混和材	原粉利用	○	○	○				○	○		○	○				B03～04
			細骨材補充混和材		○	○				○	○		○			○		B05
		コンクリート用骨材	E/Fイライト	○			○						○					B06
			高強度人工骨材タライト	○			○			○	○		○			○		B07
Jライト			○			○						○					B08	
細骨材代替材			○			○						○					B09	
吹付コンクリート		ファイアッシュ		○	○					○		○			○		B10	
		吹付用混和材	○		○					○			○				B11	
		EP-shot工法															B12	
高流動コンクリート		FECコンクリート	○	○	○	○			○	○	○				○		B13	
		高流動コンクリート		○	○				○								B14	
固化体		各種ブロック等硬化体	NAクリート	○		○				○		○	○	○			C01	
	FSコンクリート			○	○				○		○					C02		
	フォーム		○		○				○		○	○	○			C03		
	アッシュクリート		○		○	○			○		○	○	○			C04		
	FSG固化体		○			○					○	○	○			C05		
	緑化コンクリート		○		○	○			○		○	○	○	○		C06		

表 - 3.2.2 有効利用技術の用途別分類と特徴（その2）

工種	用途	工法名等	石炭灰の供給形態		利用効果・特徴等										巻末詳細データ No			
			原粉等	加工品	長期強度増進	軽量性	土圧軽減	流動性向上	耐久性向上	充填性	土質性状改善	天然資源消費抑制	セメント等代替	環境調和		施工性改善	その他	
土木	地盤改良工	深層混合処理	FGC-DM	○	○	○						○	○				D01	
			GeoSeed	○	○	○						○	○					D02
			Qフラッシュ	○		○			○			○	○					D03
			F-CDM	○	○	○						○	○		○			D04
		SCP工法	Hiビーズ		○	○	○					○	○		○			D05
			石炭灰固化物		○							○	○					D06
		表層処理工法	石炭灰スリ-固化板	○	○		○		○		○	○	○		○			D07
			固化盤		○							○	○					D08
	道路工	アスファルト	エコアッシュ	○	○							○	○					E01
			ファイバー材 (ファイアッシュ)	○								○	○					E02
		アスファルト用骨材	カー骨材		○												色調	E03
			凍上抑制層材	クリンカッシュ	○			○					○					E04
		路盤材	ポゾテック		○	○	○						○					E05
			アッシュパッド		○	○		○					○					E06
			土木用固化砕石	○				○					○					E07
			路盤材	○		○	○						○					E08 ~ 09
		路床改良	GeoSeed		○	○						○	○					E10
			(クリンカ)	○								○	○					E11
		その他	地中連続壁	石炭灰利用TRD	○		○			○	○	○	○	○				
	管中混合処理		GeoSeed	○	○	○						○	○			安定性		F02
	鉛直遮水工		自硬性安定液		○				○	○	○	○	○					F03
建築	建材	建材ボード		○											断熱性, 遮音性, 寸法安定性等			
	窯業製品	瓦、レンガ		○											強度, 耐寒性向上, 表面平滑			
	コンクリート2次製品	ブロック		○											耐久性向上, 表面平滑			
その他	環境改善材	人工セメント		○											脱臭, 吸湿, 重金属吸着		F04	
	ポリフィン製品用ファイバー	ファイブラス		○							○						F05	
	法面緑化吹付	厚層基盤材	○								○				生育性		F06 ~ 07	
	育苗	培土	○								○						F08	
	植栽土壌改良材	ポラスラット	○	○		○	○				○						F09	
	堆肥副資材	水分調整材	○								○	○					F10	
	水質浄化・改善材	Hiビーズ		○													F11	
	研磨材	Fブラスト	○								○						F12	
グラウンド等材料	ランドプラス	○	○		○	○				○						F13		

表 - 3.2.3 各分野における石炭灰の利用効果、利用方法（その1）

工種	用途	工法名等	利用効果	利用方法	巻末詳細データ No	
土木	全般	頑丈土破碎材	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰を土工材料としてリサイクルするため、資源の有効利用を図ることができるとともに土砂の採掘に伴う環境破壊を抑制できる 粉塵の発生が少なく通常の土質材料と同様に施工することができる 砂質土と同等以上の強度を有し、路床や盛土に適用可能な強度を有している 土壌環境基準を満足している 	重力式混合装置を用い、石炭灰に水、セメントを混合して製造	A01	
		コアソイルQ		重力式混合装置を用い、石炭灰に水、セメント及び添加剤を混合して製造	A02	
		ゼットサンド		砂の代替材として盛土材、道路材、埋戻し材、裏入れ材等に使用	A03	
		建設汚泥再生工法		建設発生土にセメント、石炭灰、添加剤を混合して建設発生土の再生利用を行う	A04	
		クリンカアッシュ		石炭灰（外ガッシュ）を盛土材として使用	A05	
	盛土材	軽量盛土材	<ul style="list-style-type: none"> ポンプ圧送時の材料分離耐性に優れており、施工性が向上する 土壌環境基準を満足している 	軽量盛土工法に用いられる気泡混合軽量土の砂（原料土）の代替材として JIS 種フライアッシュ（エコアッシュ）を利用	A06	
		水中盛土材	水中不分離性及び強度が向上する	浚渫土砂 + 石炭灰 + セメント + 海水を混合して海上築堤の材料として使用	A07 ~ 08	
	埋戻材 中詰材 裏込材 充填材	Fドライ	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰は軽量であり、荷重が軽減できる 流動性が良く充填性施工性（長距離圧送）に優れている 	石炭灰にセメントを混合したもの	A09	
		Fソイル		石炭灰にセメントを混合し、加水して湿潤状態にしたもの	A10	
		Fスラリー		石炭灰にセメント、添加剤を混合し、加水してスラリー状態にしたもの	A11	
		FCスラリー		石炭灰に少量のセメントを混合し、加水してスラリー状態にしたもの	A12	
		エアモルタル		砂の代替材として石炭灰を使用したものでセメント量の低減が可能	A13 ~ 17	
		FC硬化体		流動性が良いため、施工性に優れている	石炭灰とセメント、水を混合したものを使用した裏込材	A18
		FAモルタル	流動性が良く充填性施工性（長距離圧送）に優れている	石炭灰とセメント、水を混合したものを使用した充填材および中込材	A19 ~ 20	
		FAシールド	高密度で流動性が良く充填性、施工性（長距離圧送）に優れている	シールドトンネルの裏込め材	A21	
		FAモルタルNF	<ul style="list-style-type: none"> 単位体積質量が小さく、地盤の沈下や土圧の低減が可能 透水係数が小さい 	石炭灰とセメント、硬化促進剤、水を混合したものを使用した遮水材	A22	
		CLSM	<ul style="list-style-type: none"> 再掘削可能な低強度の埋戻し材 自己充填性に優れている。 	砂、石炭灰、セメント、水を混合したもの	A23	
		FQSグラウト	水筋により瞬間性を確保できる	(Flyash Quick Setting)石炭灰、セメント、泥水、凝結剤（水ガラス）を混合した瞬間性のグラウト材料	A24	
		グラウト材	<ul style="list-style-type: none"> 充填性が良く、高い止水効果、耐久性がある。 流動性が良く、長距離圧送が可能である。 	フライアッシュ、セメントに骨材、安定材、水、急結材を混合したものを使用したシールド裏込め材	A25	
		コンクリート工	混合セメント	フライアッシュセメント	<ul style="list-style-type: none"> 単位水量の減少、・ワーニング抑制、 長期強度の増進、・水密性、耐久性の向上 	フライアッシュセメントの材料として使用
	コンクリート用 混和材		ファイナッシュ	長期強度の増進、・水密性、耐久性の向上	JIS 種フライアッシュをコンクリート用添剤として使用	B02
			原粉利用	ワーニングの改善	コンクリート用添剤として使用	B03 ~ 04
			細骨材補充混和材	<ul style="list-style-type: none"> 短、長期経年での圧縮強度の向上、乾燥収縮の低減が図れる。 	JIS 種フライアッシュをコンクリート用添剤として使用	B05
	コンクリート用骨材		IFライイト	<ul style="list-style-type: none"> 球状であるため流動性が増大し、所要の性能を得るための単位水量が低減でき乾燥収縮も小さくなる 軽量であり砕石を用いたコンクリートとほぼ同等程度の強度が得られる 	石炭灰と微粉炭、水を混合して焼成後、造粒した人工骨材	B06
			高強度人工骨材ファイブ		石炭灰、セメント、炭酸カルシウム、水を混合して造粒、分級した人工骨材	B07
Jライト			石炭灰、セメント、真岩微粉末、特殊骨材を混合して造粒した人工骨材		B08	
細骨材代替材			<ul style="list-style-type: none"> 良質の天然骨材の枯渇化対策となる 圧縮強度の向上、・乾燥収縮の低減 		コンクリート2次製品の細骨材代替材として石炭灰を使用	B09
吹付用混和材	ファイナッシュ		<ul style="list-style-type: none"> 吹付時のリバウンド量が低減され、材料ロスの少ない吹付ができる 石炭灰のポゾラン反応により長期強度の増進が図られる 	50 ~ 150kg/m ³ 程度細骨材と置換することで、高品質の吹付コンクリートが得られる	B10	
	吹付用混和材			吹付用コンクリート混和材として使用	B11	
	EP-shot工法			吹付用コンクリート混和材として使用	B12	
高流動 コンクリート	FECコンクリート		<ul style="list-style-type: none"> 締固め作業が不要 低発熱で温度ひび割れが発生しにくい 	(Flyash Enriched Concrete)セメント、石炭灰、高性能 AE 減水剤、必要に応じて増粘剤を添加した高流動コンクリート	B13	
	高流動コンクリート		優れた自己充填性を有している。（締固め作業が不要）	フライアッシュを混合した高流動コンクリート	B14	
固化体	各種ブロック 等硬化体		NAクリート	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰にセメント、塩水を混合して振動締固めを行うことによりコンクリートと同程度の強度の固化体を作ることができる 金属スラグ等を混合することで自在に比重調整ができる 	セメント、高炉スラグ粗骨材、高炉スラグ細骨材、製鋼スラグ細骨材、ファイナッシュを混合したもので、海洋の無筋コンクリート（消波ブロック、根留めブロック）への利用	C01
		FSコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> 産業副産物を100%有効活用したコンクリート 長期強度の増進、耐海水性に優れている 	セメント、高炉スラグ粗骨材、高炉スラグ細骨材、製鋼スラグ細骨材、ファイナッシュを混合したもので、海洋の無筋コンクリート（消波ブロック、根留めブロック）への利用	C02	
		フェロフォーム	<ul style="list-style-type: none"> 100%リサイクル材を使用できる セメントを用いないので、アルカリ成分の溶出が少なく 	製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末、高炉水砕スラグにファイナッシュ、刺戟剤を混和したもので海洋構造物への利用	C03	
		アッシュクリート	<ul style="list-style-type: none"> 骨材を使用せず、少量のセメントで高強度が得られる 海水中での強度増進は普通コンクリートより高く、耐久性・耐海水性に優れる 	石炭灰、セメント、水、混和剤を材料とした高強度の硬化体	C04	
		FSG固化体	<ul style="list-style-type: none"> 構成材料全てが産業副産物であり、また焼成や加熱工程も不要であることから、環境負荷の極めて低い材料である 	フライアッシュ(F)、高炉スラグ(S)、二水石膏(G)の混合材料であり、セメントを使わずに、一般のコンクリートに匹敵する強度（91=40 ~ 60N/mm ² 程度）を発現する	C05	
		緑化コンクリート	コンクリートの強度及び耐久性と土の植栽機能を併せ持つ		C06	

表 - 3.2.4 各分野における石炭灰の利用効果, 利用方法 (その2)

工種	工種	用途	工法名等	特 徴	摘 要	巻末詳細 データ No			
土木	地盤改良工	深層混合処理	FGC-DM	<ul style="list-style-type: none"> セメント系固化材では不可能な低強度から高強度までの幅広い地盤改良が可能 特に低強度の地盤改良では大幅なコスト削減が可能となる 石炭灰のポゾラン反応による長期強度の増進によりセメント添加量が低減できる 	スラリー系深層混合処理の固化材としてセメントに石炭灰と石膏を混合したものを使用	D01			
			GeoSeed		粉体系及びスラリー系深層混合処理の固化材としてセメントに石炭灰を混合したものを使用	D02			
			Q フラッシュ			D03			
			F-CDM			D04			
		SCP 工法	Hi ビーズ	<ul style="list-style-type: none"> 海砂と同様の締固め効果及び施工性が期待できる サンドドレーン材としても活用できる 海砂等の天然資源の枯渇環境問題に貢献できる 	石炭灰, セメント, ベントナイト, 水を混合したものを製造し通常 SCP 工法で用いられる砂の代替材として利用	D05			
			石炭灰固化物		石炭灰にセメントと水を加えて造粒・固化したもので, SCP 工法の地盤改良材, 擁壁裏込材として利用	D06			
		表層処理	石炭灰スラリー-固化板	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰を使用することにより軟弱土の物性が改善され, 混合直後に重機が走行できるなど, 従来の固化材にない改良効果が期待できる 	既成灰とセメント, ベントナイト, 水を混合したものをを使用した表層処理工法 (電原開発)	D07			
			固化盤		石炭灰とセメント, 水を混合してスラリー化した材料で固化盤を造成する	D08			
	道路工	アスファルトファイバー	エコアッシュ	<ul style="list-style-type: none"> ポルハアッシュ効果により, アスファルト量の低減が可能であり, 経済性が向上する ポルハアッシュ効果により, 作業性が向上する 	アスファルト材として通常用いる石灰石粉の代替として利用する	E01			
			(ファイバッシュ)	<ul style="list-style-type: none"> ポルハアッシュ効果により, アスファルト量の低減が可能であり, 経済性が向上する ポルハアッシュ効果により, 作業性が向上する 	アスファルト材として通常用いる石灰石粉の代替として利用する	E02			
		アスファルト骨材	カラー骨材	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰自体の発色による自然で落ち着いた茶系の色合いを持った骨材 	JIS 種ファイバッシュ(ファイバッシュ)を焼成し, 破砕・分級して製造する	E03			
		凍上抑制層材	クワカアッシュ	<ul style="list-style-type: none"> 化学的に安定している 土と比較して軽量である 含水比に左右されずに締固めができ, 密度管理が容易である 凍上抑制効果を有している 	クワカアッシュを粉砕機で粉砕, 粒度調整したもので, 道路の下層路盤材およびグラウンドの中間材として利用	E04			
					路盤材	ボソテック	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰に少量のセメント, 石膏を混合して締め固めることにより高強度の良質な路盤ができる 工事用の仮締結材としても活用できる 	石炭灰に見ると排煙脱硫石膏と少量の消石灰を添加して混合したもので, 路床, 路盤, 盛土材などの土砂代替材として利用	E05
						アッシュロハン		石炭灰にセメントと水を加えて粒状材とし, 破砕したもので, 道路の下層路盤材として利用	E06
						土木用固化砕石		石炭灰に添加剤 (生石灰, 排煙脱硫石膏) と水を混合したもので, 道路の上層, 下層路盤材として利用	E07
		路床改良	GeoSeed	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰の吸水作用により軟弱土の物性が改善され, 混合直後から所要のトラフィカビリティが得られる 混合後, 仮置き等で時間が経過しても強度の低下が生じない 重金属等の溶出の問題のない環境にやさしい材料である 	固化材としてセメントに石炭灰と石膏を混合したものをを使用した路床改良工法	E08 ~ 09			
					(クワカ)	クワカアッシュと不良土 (粘土や第4種遊離土) を混合したもので, 改良材として利用	E11		
		その他	地中連続壁	石炭灰利用 TRD	<ul style="list-style-type: none"> 表層から深層まで均質で止水効果の高い壁体が造成可能 ヘアリング効果による材料混合度, 施工性の改善 	(Trench cutting Re-mixing Deep wall method) 固化材として石炭灰, セメント, ベントナイト, 水を混合したものをを使用した連続地中壁工法	F01		
			管中混合処理	GeoSeed	<ul style="list-style-type: none"> 石炭灰の物性改善効果や締固め性能の向上等の性質を活かし, 浚渫土の安定した強度が得られる 	固化材としてセメントと石炭灰を混合したものをを使用した浚渫土処理工法	F02		
			鉛直遮水工	自硬性安定液	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度のベントナイト量, セメント量を低減することができる 掘削孔壁の安定性, 固化壁の耐久性に優れている 	ファイバッシュ, セメント, ベントナイト, 水, 添加剤を混合したもので, 遮水壁として利用	F03		
建築	建材	建材ボード	<ul style="list-style-type: none"> 断熱性, 遮音性, 寸法安定性等の向上に有効である 	原料として石炭灰を混合利用					
	窯業製品	瓦, レンガ	<ul style="list-style-type: none"> 強度や耐寒性が向上し, 表面が平滑になる 	原料として石炭灰を混合利用					
	コンクリート2次製品	ブロック	<ul style="list-style-type: none"> 耐久性が向上し, 表面がなめらかになる 	原料として石炭灰を混合利用					
その他	環境改善材	人工セメント	<ul style="list-style-type: none"> 粒子表面の細孔を利用し, 吸着能, 陽イオン交換能, 触媒性を有す 	石炭灰に苛性ソーダ等を混合し, 加熱, マイカ波を照射して製造	F04				
	ポリエチレン製品用ファイバー	ファイブラス	<ul style="list-style-type: none"> 焼却しても塩素ガスの発生がない 高耐久で繰返し使用が可能である 従来品以上の防水性を有す 	JIS 種ファイバッシュ(ファイバッシュ)とポリエチレンを溶解・混合したものを造粒し, 難燃化剤を添加し, フィルムを製造する	F05				
	法面緑化吹付	厚層基盤材 (クワカ)	<ul style="list-style-type: none"> 従来の厚層基盤吹付工法と同等以上の効果があり, コスト削減が図れる 	ファイバッシュを用いた接合材とバー材の一部をクワカアッシュ (CA) に置き換えた 緑化基盤材と組合せたもの	F06 ~ 07				
	育苗	培土	<ul style="list-style-type: none"> 透水性, 保水性に優れる 通気性が良く, 保肥性に優れる 	クワカアッシュを主成分として, 肥料, マシ酸燐酸化合物を配合したもので培養土として利用	F08				
	植栽土壌改良材	ポーラスサンド	<ul style="list-style-type: none"> 多孔質で適度な保水性と排水, 通気性を持つ 空隙を多く持つため, 肥料等の保持力が高まる 	砂の代替材として使用可能	F09				
	堆肥副資材	水分調整材	<ul style="list-style-type: none"> 糞尿の発酵に伴う悪臭成分の発生量を抑制できる 水分調整が可能である 	各種ファイバッシュを添加して家畜糞尿処理を行い, 堆肥として利用	F10				
	水質浄化・改善材	Hi ビーズ	<ul style="list-style-type: none"> 富栄養化物質の吸着作用があり, 水質・底質の浄化特性を持つ 	サンドマット, サンドドレーン材に通常用いられる砂の代替材として使用	F11				
	研磨材	F プラスト	<ul style="list-style-type: none"> ガラス質なので母材の金属類を傷めない, 錆, 塗装除去に高い性能を有している, 既存のプラスト機に利用できる 	クワカアッシュを粒1 ~ 2mmに粉砕, 粒度調整したもの	F12				
	グラウンド等材料	ランドグラス	<ul style="list-style-type: none"> 透水性, 保水性, 通気性を有している, 軟弱地盤を改良できる, バクテリアの繁殖を促し土壌を復活できる 	クワカアッシュを粒3 ~ 5mmに粉砕, 粒度調整したもので, グラウンド, ゴルフ場等の地盤材として利用	F13				

3.2.2 その他の分野における有効利用技術

その他の分野として建築分野および農林水産分野について、石炭灰有効利用技術の概要を以下に述べる。

(1) 建築分野

石炭灰の利用対象としては、ボード類（建築用内外壁材）、コンクリート二次製品（コンクリートブロック等）のコンクリート用混和材、人工軽量骨材および、粘土瓦、れんが、タイルなどの窯業製品の粘土代替原料等があり、製造コスト低減や品質向上にその効果を発揮している。

石炭灰を使うことで内外壁材については、断熱性、遮音性、寸法安定性等が向上するという特徴があり、瓦については、粒度改善や生地の焼結促進による曲げ強度の増加、吸水率低下に伴う耐寒性の向上、軽量化、表面の平滑化等の特徴を有する。

(2) 農林水産分野

石炭灰の利用対象としては、肥料、土壌改良材、人工培土、融雪材、人工漁礁等がある。

フライアッシュ、クリンカアッシュともに特殊肥料の指定を受けいているが、石炭灰を主原料としたけい酸加里肥料の工業化が成功し、加里質普通肥料として認可されている。この肥料は、フライアッシュ中のけい酸を有効に利用するために苛性加里等を加えて焼成した緩効性加里肥料で、肥効が長続きし、根を丈夫にする等の特徴がある。

クリンカアッシュは、透水性、保水性に優れるため、ゴルフ場等で土壌改良材として利用されている。

人工漁礁は、既に実用化段階であるが、海洋で大規模人工湧昇流を発生させるための人工海底山脈築造による新しい漁場開発への研究も進められ、実用化の段階にある。これには石炭灰を大量に配合した大型コンクリートブロックが用いられ、製造コスト低減に寄与している。

3.3 有効利用における施工時の注意点

(3) 飛散防止

フライアッシュはそれ自体湿分ゼロの乾燥状態であることから、密閉サイロからセメント混合・土砂混合等のプラント等に密閉配管で供給されるなど粉体が直接環境に触れる心配がない場合を除いては、粉塵発生に伴う環境影響について検討・必要な対策を実施する必要がある。浅層混合改良などの施工では、フライアッシュとセメントを混ぜて改良することが多いが、現場で混合する時は飛散対策が必要である。プレミックスしたものであれば現場での混合手間が省け、製品としても均一になるが、プレミックスしない場合は、原位置でスタビライザー等の施工機械で改良するよりも移動式プラント等で予め改良したほうが飛散は少ない。

飛散防止対策としては、従来からの飛散対策としては固化材に水を混合する方法と固化材を粒状にする方法がある。さらに、最近では通常の施工方法や施工体制で使用でき、飛散対策が図れる固化材の開発が行われている。方法の特徴を以下に述べる。

1) 固化材に水を混合する方法

基本的にはフライアッシュを加湿し乾灰から湿灰にするだけで、十分飛散対策になりうる。このような加湿材料は、フライアッシュの初期では凝結遅延効果があるが、長期的な強度発現性を有していることから十分に硬化性能を有しているものであり、GeoSeedのように製品化しているものもある。水をさらに加え、スラリーにすれば飛散対策上全く問題はない。

2) 固化材を粒状にする方法

セメントや生石灰による固化、焼成等がある。ただし、造粒するためには設備が必要で製造コストがかかり、貯蔵や運搬の際に粒状体が崩壊しないような配慮も必要である。

3) 飛散対策のための固化材

代表的なものには、テフロン樹脂を用いた防塵処理安定材がある。これは、テフロンの微細繊維が固化材の粉体粒子を蜘蛛の糸のように補足して飛散防止するものである。しかし、テフロン加工にコストがかかることおよびテフロン繊維を多くすることで固化材の散布に支障をきたすなど問題点がある。さらに、地盤改良用固化材として、少量の油脂を事前混合して固化材粒子表面に「ぬれ」を生じさせることで飛散対策を図っている例もある。

(1) 降雨時施工の配慮

石炭灰であっても基本的に、他材料と同様の施工として取扱うことができる。フライアッシュであればセメント系固化材、クリンカアッシュであれば砂と同様である。小雨程度の施工であれば粉体で扱う場合でも特に問題ない。また、クリンカアッシュは含水比が変化しても乾燥密度がほぼ一定となる材料である。ただし、降雨の状態によっては施工中の現場の含水の状態が変わることや施工機械の能率が悪くなることから、通常材料や工法と同様の雨水対策が必要である。施工後も土工やコンクリート工で工種に応じてシート養生をするなどの対策が必要である。さらには冬期施工では、防寒対策も必要である。

参考文献（第3章）

- 1) 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，2000．
- 2) (社)日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案)・同解説1999．
- 3) 資源エネルギー庁 石炭・新エネルギー部監修：コールノート，1999．