

土木学会平成 15 年度全国大会
研究討論会 研 - 1 6 資料

石炭灰有効利用技術について - 循環型社会を目指して -

座 長 話題提供者	高橋 邦夫	(財)港湾空港建設技術サービスセンター
	三木 博史	(独)土木研究所
	井筒 庸雄	電源開発(株)
	高橋 守男	東京電力(株)
	丸内 進	九州電力(株)
	石井 光裕	四国電力(株)
	斉藤 直	(株)エネルギー・エコ・マテリア

日 時	平成 1 5 年 9 月 2 4 日 16:30 ~ 18:15
場 所	徳島大学 共 - B 3 0 1

エネルギー土木委員会

概要

石炭火力発電所等から発生する石炭灰については、これまでセメント原料や埋立材としての利用が中心であった。しかし、今後セメント需要の減少や新たな埋立地の確保が困難な状況が想定されているにもかかわらず、石炭灰の発生は今後も増加する見通しとなっており、また循環型社会形成推進の社会的ニーズの高まりの中で、これら用途以外の有効利用を拡大していくことが必須の課題である。そこで、本討論会では、石炭灰の法的位置付けや有効利用拡大による効果、活用が期待される有効利用技術を紹介するとともに、有効利用に当たって必要となる仕組みや望まれる有効利用システムについて、今後の方向性と課題を明らかにする。

1. 再生資源としての石炭灰の発生状況と法的扱い

1.1 石炭灰の発生量の現状と見通し

石炭灰は、微粉炭燃焼方式においては大別してクリンカアッシュとフライアッシュの2種類があり、発生割合は5～15%：85～95%である。

全国における石炭灰の発生量は、平成12年度で約842万tとなっており、そのうち電気事業によるものが約632万tで全体の約75%を占めている(図1.1.1参照)。今後新たな石炭火力発電所の運転開始に伴い、発電出力は平成26年度に平成12年度の約1.4倍の約3,900万kWとなる見込みであり、石炭灰は単純に出力比例とすると約885万t程度まで増加することになる。

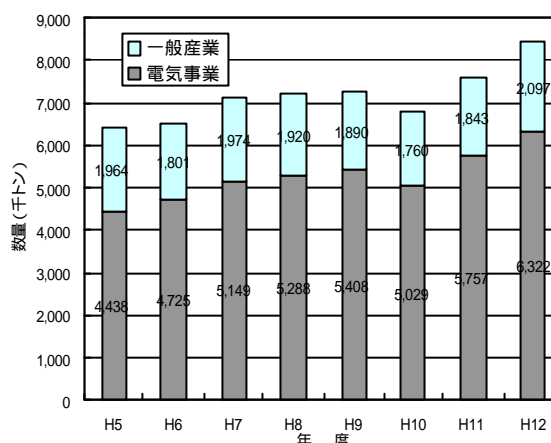


図1.1.1 石炭灰発生量の推移

これに対し、現在供用中の石炭灰専用処分場の全体容量は、全国で約8,600万tであり、このうち平成14年度までに全体容量の約40%にあたる約3,200万tが埋立られている。今後、平成5～12年度の平均的なペース(発電出力当たり)で埋立られると仮定すると、平成27年頃に満杯となることになる。

1.2 石炭灰のリサイクル資材としての法的位置付け

1.2.1 循環型社会形成推進のための法体系の枠組み

循環型社会の形成推進のための法体系は、図1.2.1のとおりであり、循環型社会形成推進基本法は、廃棄物対策とリサイクル対策を総合的かつ計画的に推進する目的で、平成13年1月に完全施行されている。石炭火力発電所から発生する石炭灰について、同基本法の考え方で整理すると、「製品(電気)を生産する過程で発生する廃棄物等(石炭灰)については、発電効率の向上、灰分の少ない石炭の利用等により、発生を抑制するが、排出された廃棄物等(石炭灰)のうち有用なもの(大半)を循環資源として、環境保全上の支障が生じないような循環的な利用(再利用・再生利用 有効利用)を図り、最後に無用となったものを適正処分(管理型処分場への処分)する」ということになる。

(1) 廃棄物処理法

石炭灰は無用となった場合産業廃棄物であり、本法に基づき、図 1.2.2 のフローにより処理する必要がある。

このうち、「中間処理業者による再資源化」は、産業廃棄物中間処理業の許可を得た業者が行うものである。また、「再生利用指定・認定制度による再資源化・再利用」による制度は、現状では石炭灰に対して適用された事例はあまりない。しかし、当制度は再生利用の一層の推進と支援を目的に規制緩和が図られたものであり、今後その対象品目拡大と認定基準を満たす者の積極的な認定が望まれている。また、中央環境審議会による廃棄物・リサイクル制度の見直しに関する意見具申（平成 14 年 11 月）では、合理的な制度の確立による効率的な廃棄物処理・リサイクルの推進が方向性として示されており、石炭灰についても早期に排出事業者側が品目追加や制度の適用可能性等について検討し、その指定が受けられるように取り組むことが必要と考えられる。

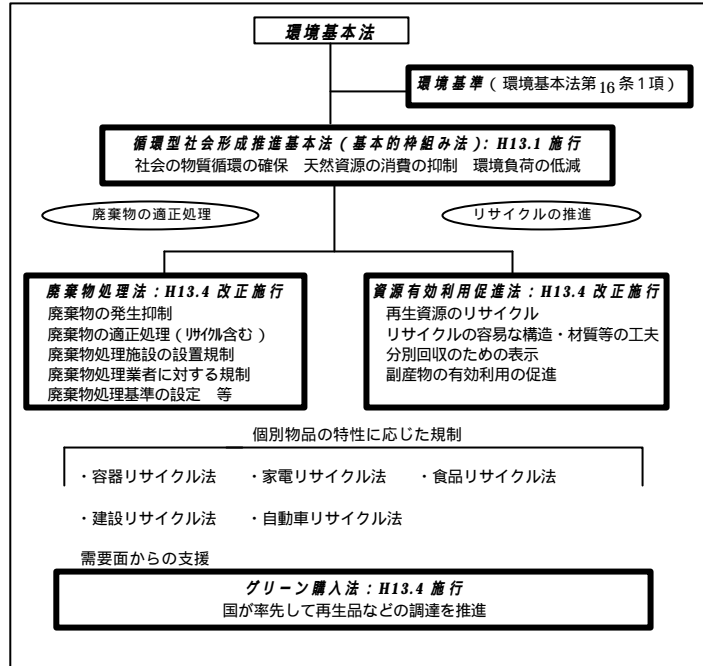


図 1.2.1 循環型社会形成推進のための法体系

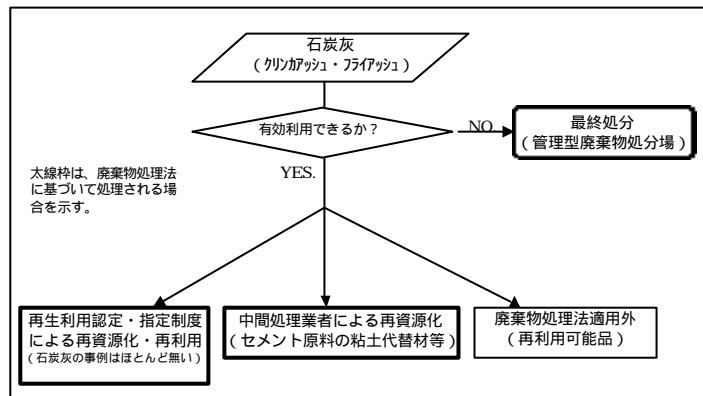


図 1.2.2 廃棄物処理法での石炭灰の処理フロー

(2) 資源有効利用促進法

本法は、製品回収・リサイクルの実施などリサイクル対策の強化、製品の省資源化・長寿命化等による廃棄物の発生抑制対策、回収した製品の部品等の再使用対策、副産物の発生抑制及びリサイクルの推進の 4 項目を事業者に義務付け、循環型経済システムの構築を目指している。

石炭灰については、の中で「特に再生資源としての有効利用を促進しなければならない指定副産物」と位置付けられており、電力会社では自社工事への利用拡大、設備の整備、用途拡大・品質向上のための技術開発等に関する自主的な取組みが図られている。

(3) 国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律（グリーン購入法）

本法は、需要面から循環型社会の形成に資するものとして制定され、国及び特定の法人は、毎年度国の定める「基本方針」に即して各機関毎の「環境物品等の調達の推進を図るための調達方針」を作成、公表し、具体的目標を定めて再生品等の環境物品等の調達を推

進し、年度終了後、調達実績を公表することとされている。

対象となる物品は、建設資材等に着目した 14 分野の 151 品目が平成 13 年度末時点で選定されているが、開発状況・科学的知見等に応じて、毎年度見直しが実施される。

石炭灰関連商品については、平成 14 年度末現在で、フライアッシュセメントが特定調達品目に指定されているが、その他では、平成 15 年 5 月公表の特定調達品目候補群として、表 1.2.1 の品目が掲載されている。これによると、公共工事における使用実績が十分でないという課題が大きいと、石炭灰有効利用技術が調達品目として採用されていくよう、関係者の努力が望まれる。

表 1.2.1 特定調達品目候補群（資材）一覧表（石炭灰関係抜粋）

統合品目名	提案品目名	検討結果(注)
F S コンクリート	F S コンクリート	()
石炭灰焼成軽量骨材	高強度（フライッシュ）人工骨材	()
	焼成フライッシュ骨材	()
石炭灰を用いた吹付けコンクリート	石炭灰原粉を用いた吹付けコンクリート	()
	石炭灰を使用した吹付けコンクリート用混和材	()
石炭灰気泡混合軽量土	石炭灰を使用した気泡混合軽量土	()
石炭灰を用いた地盤改良材	火力発電所発生廃棄物を用いた地盤改良材	()
石炭灰溶融スラグ混入アスファルト混合物	石炭灰を使用した舗装用カー骨材	()
	石炭灰溶融スラグ舗装（フライッシュ舗装）	()
石炭灰を用いた地盤改良材	建設発生土への石炭灰（フライッシュ）利用方法	()

注）検討結果の意味は以下のとおり

- ()：他の課題を解決した後に、コスト面について普及とともに比較対象品と同程度になる見込を確認する必要あり。
- ：公共工事における使用実績が十分でない等、実際と同等の条件下で検証及び評価が十分にされていない。
- ：JIS、JAS 等の公的基準を満足または準拠していないなど、品質確保について不確実性が残る。
- F S コンクリートは、スラグとの組合せ、スラグの膨張性等に関する課題が挙げられている。

1.2.2 安全性評価に関する法基準等

表 1.2.2 土壌環境基準値一覧表（重金属類等抜粋）

石炭灰は微量であるが、重金属類等（六価クロム、砒素等）を含有するものである。このため、路盤材や土木用地盤改良材等への有効利用にあたっては、環境保全上の支障が生じないように、特に地下水へのこれら物質の溶出に十分留意しなければならない。

基準項目	環境基準値	
	同右以外の土壌 (1 倍値)	地下水から離れて、かつ地下水が汚染されていない土壌 (3 倍値)
カドミウム	0.01mg/l 以下	0.03mg/l 以下
鉛	0.01mg/l 以下	0.03mg/l 以下
六価クロム	0.05mg/l 以下	0.15mg/l 以下
砒(ひ)素	0.01mg/l 以下	0.03mg/l 以下
総水銀	0.0005mg/l 以下	0.0015mg/l 以下
セレン	0.01mg/l 以下	0.03mg/l 以下
ふっ素	0.8mg/l 以下	2.4mg/l 以下
ほう素	1mg/l 以下	3mg/l 以下

石炭灰の溶出に関する安全性評価については、明確な基準がないのが現状であるが、土壌と接して利用する形態では、特に「土壌の汚染に係る環境基準」に準拠して評価する事例が多いが、利用形態に応じ、十分吟味し、適切な基準値を設定する必要がある。

なお、土壌環境基準の再利用物への適用については、「土壌の汚染に係る環境基準についての一部改正について（平成 13 年 3 月）」により、再利用物の利用実態に即したりサイクルガイドライン等が関係省庁により早急に策定される必要があるとされている。

2. 石炭灰有効利用拡大の効果

2.1 石炭灰有効利用の現状と課題

平成 12 年度までの石炭灰の利用状況は図 2.1.1 のとおりである。処理場の確保が難しくなる中で、各方面における石炭灰有効活用の取り組みを反映して、埋立処理量は減少傾向にあるものの、現在でも年間約 150 万 t が埋立られている。

有効利用分野は、セメント・コンクリート、土木、建築、農林・水産の各分野などであるが、現状はセメント・コンクリート分野の割合が約 70%と高く、この分野に大きく依存している(表 2.1.1、図 2.1.1~2 参照)。

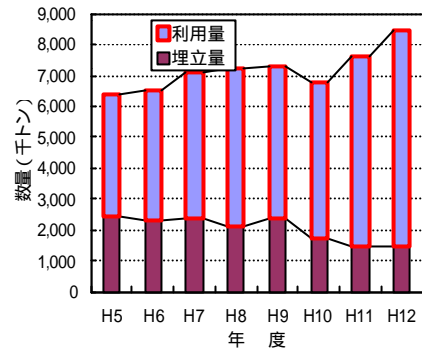


図 2.1.1 石炭灰の有効利用状況

表 2.1.1 石炭灰の各有効利用分野

利用分野	利用項目
セメント・コンクリート分野	セメント原材料、セメント混合材、コンクリート用混和材等
土木分野	地盤改良材、道路路盤材、アスファルト・フィラー材、土木用コンクリート製品、炭坑復元材等
建築分野	建材ボード、人工軽量骨材、建築用コンクリート製品等
農林 水産分野	肥料、土壌改良剤、融雪剤等
その他	下水汚水処理剤、製鉄用等

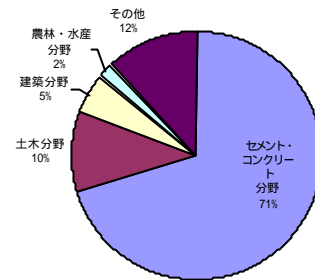


図 2.1.2 各分野の有効利用割合

セメント・コンクリート分野のうち、現在その大半はセメント原料の一つである粘土の代替として使用されており、その利用率も年々高くなりつつある。しかし、図 2.1.3 に示すように石炭灰発生量の急激な増加に対して、セメント生産量自体は減少傾向にある。また、石炭灰は粘土と比較してシリカ分が少なくアルミナ分が多いことから、粘土の 40~50%分が代替の限度であるとされており、セメント原料としての利用だけではすでに厳しい状況に近づいている。

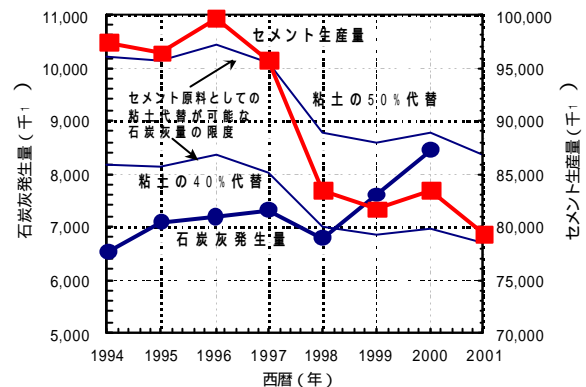


図 2.1.3 国内の石炭灰発生量とセメント生産量

従って、粘土代替を中心としたセメント原料への有効利用は、従来の大量・安定的な分野から、今後は安定的ではあるが量的制約を考慮せざるを得ない方向に変化していくと考えられる。

セメント・コンクリート分野以外の有効利用分野については、表 2.1.3 に示すように、まだ利用拡大の余地が十分残されており、これらの分野での利用拡大が課題である。

表 2.1.3 石炭灰の有効利用別状況

利用分野	用途	製造量(需要)	石炭灰混入単用量	石炭灰利用限度量	現状の石炭灰利用量	現状の利用率
セメント・コンクリート分野	セメント原料	8,000千 (全セメント)	5%	7,600千	4,400千	58%
	FAセメント用混合材	100千t (FAセメント、シエアを15%と想定)	15%	1,800千t	186千t	10%
	コンクリート用混和材	11600千m3 (生シ、シエア10%と想定)	50kg/m3	580千t	140千t	2%
土木分野	盛土材	71,000千m3 (全購入土)	-	-	400千t	1%
	地盤改良材	500千t (セメント系固化材)	25%	1,250千t	140千t	11%
	SCP代替材	12,000千	90%	10,800千t	20千t	0.2%
	道路路盤材	190,000千t	90%	171,000千t	100千t	0.1%
建築資材分野	建材ボード	4,500千	10%	450千t	300千t	67%
農業分野	肥料	100千t (全肥料)	-	-	40千t	0.3%

2.2 循環型社会形成への寄与

2.2.1 循環型社会形成の数値目標達成への寄与

政府が平成 15 年度に策定した循環型社会形成推進基本計画では、次のとおり 10 年後の数値目標を定めている。

資源生産性 = GDP / 天然資源等投入量 約 39 万円/t (H12 年度から概ね 4 割向上)

循環利用率 = 循環利用量 / (循環利用量+天然資源等投入量) 約 14% (H12 年度から概ね 4 割向上)

最終処分量 = 廃棄物最終処分量 約 28 百万 t (H12 年度から概ね半減)

石炭灰について、天然資源消費量を削減するような有効利用の促進により、概略以下のとおり貢献できるものと考えられる。

平成 12 年度における資源生産性は、1,912 百万 t の天然資源等投入で約 28 万円/t である。石炭灰の埋立処分量は同年度約 150 万 t であるが、全量有効利用し天然資源等投入量が節減されたとすると、1,912 1,910.5 百万 t、資源生産性は 280.2 千円となり、200 円/t、0.1%の生産性向上に寄与する結果となる。同様に、循環利用量は 218 219.5 百万 t で 0.1%の上昇、最終処分量は約 56 54.5 百万 t で 2.7%の低下に寄与することになる。

2.2.2 他産業廃棄物のリサイクルへの貢献・推進

鉄鋼業から排出する高炉スラグおよび製鋼スラグ、銅精錬業から排出する銅スラグ、建設業から排出する建設汚泥や発生土について、それぞれ石炭灰と混合して有用な固化体や改良土等の資材にリサイクルすることが可能である。

また、汚泥・スラッジ、石炭灰以外の各種焼却灰等の廃棄物・副産物については、セメント原料としてのセメント産業による処理への期待も大きい。よって、石炭灰のセメント原料としての処理量を減らし、この分野以外の有効利用技術を普及・拡大させることは、結果としてこれら廃棄物・副産物のセメント産業における各種汚泥・焼却灰等の処理余力を創出することとなり、これら廃棄物の最終処分量低減、循環利用率の向上に繋がり、全体として循環型社会形成推進に資するものである。

2.3 省エネルギー・CO₂ 排出削減効果

エネルギー消費量、CO₂ 排出量の状況としては、セメントの割合が大きく、CO₂ 排出量としては約 31%となっている(図 2.3.1 参照)。石炭灰をセメント原料の粘土代替として利用することにより、粘土採掘の省略で 8000t-c / 年規模(原単位 0.0019kg-c/kg と仮定、t-c、kg-c は炭素としての重量を示す)の CO₂ 排出量削減に寄与している。

さらに、フライアッシュセメント等の混合セメントは、セメントクリンカ焼成におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量が削減できることから、現在のフライアッシュセメントの販売シェアは 5%程度であるが、シェア拡大が望まれる。なお、経団連環境自主行動計画の中で、セメント協会は混合セメントの比率拡大を掲げている。

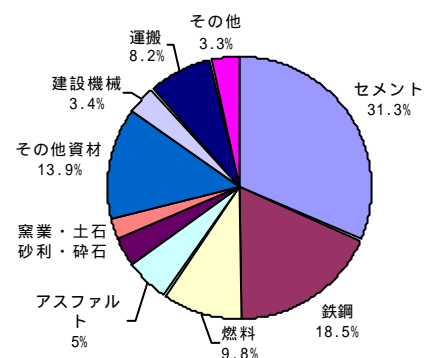


図 2.3.1 CO₂ 排出量の資材・燃料別内訳

2.4 天然資源消費抑制効果

コンクリート、アスファルト、道路等に用いられる骨材は、過去においてはほとんどが天然骨材であった。これをリサイクル材にシフトすることで海や河川、山の自然環境負荷の軽減、除去が可能となる。なお、天然骨材は、平成2年度以降減少傾向、リサイクル材は増加傾向であるが、これは建設リサイクル法、グリーン購入法等の法整備による効果によるもので、今後益々リサイクル材の利用が増加するとみられる。

2.5 コスト抑制効果

石炭灰のセメント原料の粘土代替としての利用は、粘土の採掘・粉砕費等の節減も可能としている。石炭灰は廃棄物として納入されるため、粘土資源節減と廃棄物としての受入れにより、セメント製造コストは全量で年間数十億円規模の低減があるものとみられ、セメント価格の安定ひいては公共工事のコスト抑制にも寄与していると考えられる。

また、電力各社は、セメント原料以外への有効利用を拡大する方向で技術開発を進めており、コストダウン工事例も着々と増加している（表2.5.1）。工事例では、石炭灰の活用により、平均で約13%のコストダウンとなっている（図2.5.1）。

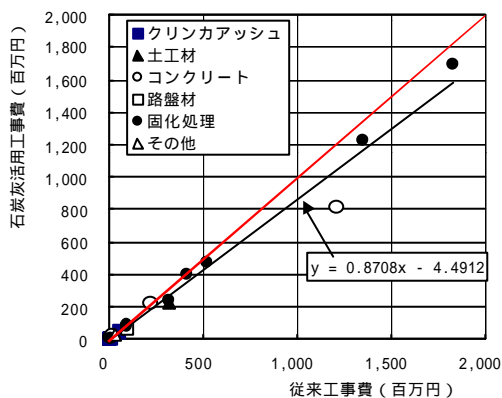


図 2.5.1 石炭灰活用によるコストダウン

表 2.5.1 石炭灰活用によるコストダウン工事例

製品	製品・用途	内容	コストダウン規模	コストダウン要因
製品	海砂代替材Hiセーズ (中国電力)	SCP工法、SD工法	-10%	廃棄物利用 (フライアッシュ)
	NAクリート (中国電力)	消波ブロック等	-5 ~ -30%	廃棄物 (フライアッシュ、製鋼スラグ、銅スラグ等) 利用, 軽量~重量コンクリート
	F Sコンクリート (沿岸センター)	消波ブロック等	-10 ~ -15%	廃棄物 (フライアッシュ、高炉スラグ、製鋼スラグ、銅スラグ等) 利用
建設工事	海中盛土 (北海道電力)	土砂+セメント+フライアッシュ+海水 固練りスラリー	-30%	浚渫土砂とフライアッシュの利用
	固化盤 (北海道電力)	フライアッシュ+セメント 固練りスラリー	-0.3億円	フライアッシュの利用
	建設汚泥改良 (北海道電力)	フライアッシュ+建設汚泥 土砂材	-1.0億円	建設汚泥の廃棄物としての処理の省略
	深層混合処理F-CDM (北海道電力)	フライアッシュ+セメント 地盤改良材	-0.6億円	フライアッシュをセメントの一部代替として利用
	深層混合処理 (中国電力)	フライアッシュ原粉+セメント+特殊減水剤	-10 ~ 30%	フライアッシュ原粉のセメント置換, 特殊減水剤による高濃度スラリー
	路床改良 (国交省・中国電力)	加湿固化材による路床改良システム	-5 ~ 10%	
	石炭灰スラリー埋戻し (中部電力)	フライアッシュ+セメント+水 スラリー状の管 路埋戻し材	-5.0億円	埋設管厚低減等
	高品質吹付けコンクリート (四国電力)	トンネル吹付けコンクリート 添和材 (フライアッシュ種)	-5 ~ -10%	リバウンド量・粉塵量の低減
	E Pショット工法 (石炭灰原粉を活用した吹付けコンクリート) (中国電力)	トンネル吹付けコンクリート 添和材 (フライアッシュ原粉)	-5 ~ 15%	セメント置換, リバウンド・粉塵発生量低下
	エアモルタル (中国電力)	軽量盛土	-10 ~ 20%	細骨材の全量置換, セメントの一部置換, 気泡剤低減
	フライアッシュモルタル (FAM-NF) (電源開発)	フライアッシュ+セメント+海水+硬化促進剤 管理型漏水工事	-10%	細骨材代替としてフライアッシュ使用
	F G C-DM深層混合処理 (電源開発)	フライアッシュ+セメント+水 地盤改良材 (スラリー)	-25%	均一低強度地盤改良による土留め矢板、基礎杭設置時の補助工法省略等

3. 活用が期待される石炭灰有効利用技術

3.1 石炭灰の物理・工学的特性

石炭灰の性質の概要を表3.1.1に示す。フライアッシュは、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の特徴を有する。クリンカアッシュも、粒子の特性以外は、ほぼ同様である。

(1) フライアッシュ

フライアッシュは、粒子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。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できるが、これは粒子形状が丸いため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によって、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、耐熱性に優れた品質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。

なお、フライアッシュは、コンクリート用として JIS A 6201 で表 3.1.2 に示すように ~ 種の等級分けの規定があり、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・使用ができる。

(2) クリンカアッシュ

クリンカアッシュの粒子表面には 1 ~ 20 μm の無数の細孔があいており、大きな表面積をもっている（まさ土 0.94m²/g の 4 ~ 5 倍程度）。粒度は粗粒砂（FM = 3.5 ~ 4.0）程度で、普通の砂に比べて、含水量は高く、密度は小さい。浸水膨張率は 0.012 ~ 0.036% で、鐵鋼スラグ協会規格 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い。まさ土で締固めた場合に透水係数が 1/10 以下になるのに対して、クリンカアッシュの場合にはほとんど変化しない。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）の保有率が高く、耕地の土壌に適している。

締固め特性は、砂と対照的に最適含水比が高く、最大乾燥密度が低く空隙率が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。これらの特徴を活かして下層路盤材、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 3.1.1 石炭灰の性質


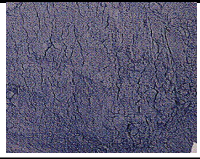
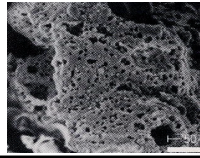
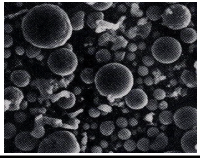
燃焼方式	微粉炭燃焼方式	
種類	クリンカアッシュ	フライアッシュ
色・外観		
粒子形状		
工学的性質	赤熱状態でボイラ底部の水槽に落下した石炭灰を破砕機で粉砕、粒度調整したもので、赤熱状態から急冷水洗したものである。化学的に安定している。	主成分がシリカ・アルミナであり、セメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こすなど長期的に密実な構造が形成される。
物理的性質	<ul style="list-style-type: none"> ・粒子は細礫と粗砂を中心とした締固め性能の高い砂と同じ粒度分布。 ・透水係数も砂と同程度で高い排水性を有する他、表面に多数の細孔があり、水平保有率が一般土壌に比べ高い等の特徴あり。 ・軽量で、高いせん断強度(30°) ・密度：一般に 2.3(± 0.3) g/cm³程度 ・pH：一般に 9(± 1.5) 程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・微細粒子で球形をしているため、フライアッシュを混合したコンクリートは流動性が増大。 ・粒径は 0.1mm 以下が 90% 以上を占めるが、基本的性質は砂状の性質をもち、締固め性能が高い。 ・密度：一般に 2.3(± 0.3) g/cm³程度 ・pH：一般には 11(ややアルカリ性) 程度
化学成分	<成分割合> SiO ₂ : 65%程度 Al ₂ O ₃ : 15%程度 Fe ₂ O ₃ : 10%程度 CaO : 5%程度 その他 : 5%程度	<成分割合> SiO ₂ : 60%程度 Al ₂ O ₃ : 20%程度 Fe ₂ O ₃ : 5%程度 CaO : 10%程度 その他 : 5%程度

表 3.1.2 フライアッシュ JIS 規格 (JIS A 6201)

項目	種類	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 以下の残分(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。

3.2 石炭灰の有効利用技術の概要

有効利用技術は、セメント分野の他、強度確保、重金属等微量成分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スラリー状、砂礫状、固化体としての利用技術や蒸気養生、焼成等のプロセスでの利用方法の研究開発、実用化が進められている。

3.2.1 土木分野における有効利用技術

土木分野における有効利用は、これまでフライアッシュの水和熱低減、水密性増大、アルカリ骨材反応抑制などの特性を活かして、ダム、橋脚、発電所など大型構造物のコンクリートに利用されてきた。最近では、この他に盛土材、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（表 3.2.1 参照）。

(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、軽量で粉塵の発生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

コンクリート混和材（前節参照）以外では、コンクリート用人工骨材があり、石炭灰に水、ベントナイトを加え、造粒・焼成することにより生成され、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（および）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、締固め不要のコンクリートを製造できる。

(3) 地盤改良工

深層混合処理工法等の固化材としてセメントに石炭灰を混合して使用し、低強度から高強度までの幅広い地盤改良ができる。特に低強度域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、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も、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おり、海砂と同等の締固め効果及び施工性が期待できる。

(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。

路盤材としては、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、締固めることで高強度の良質な路盤ができる。

3.2.2 その他分野における有効利用技術

建築分野、農林水産分野では、主として建築資材としての建材ボード、環境改善材としての人工ゼオライト、水質浄化剤、土壌改良材等の技術がある。

表 3.2.1 石炭灰の有効利用技術

分野	工種	用途	工法名等	形態		利用効果・特徴等														
				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	土工	全般	頑丈土破砕材		○		○							○						
			コアソイルQ		○		○							○						
			ゼットサンド	○	○		○								○					
			建設汚泥再生工法	○	○	○									○	○	○			
		クリカアッシュ	○	○		○	○							○						
		盛土材	軽量盛土材	○	○		○	○	○						○			○		
			水中盛土材	○		○					○				○	○				
		埋炭材中詰材裏込材充填材	Eドライ		○		○	○							○					
			Fソイル		○		○	○	○		○				○	○				
			Fスラリー		○		○	○	○		○	○			○	○				
			FCスラリー	○	○	○	○	○	○		○	○			○	○				
			エアモルタル	○	○	○	○	○	○		○	○			○	○			○	
			FC硬化体	○	○	○	○	○	○		○	○			○	○				
			FAモルタル	○	○	○	○	○	○		○	○			○	○				
			FAシールド		○	○				○	○									
			FAEIL/加NF	○	○	○	○	○	○		○	○			○	○				○
	CLSM			○	○		○	○		○	○			○	○					
	FQSグラウト		○	○	○										○	○				
	グラウト材		○												○					
	コンクリート工	混合セメント	ファイブセメント		○					○	○									
			ファイブ		○					○	○									
		コンクリート用混和材	原粉利用	○	○	○									○	○				
			細骨材補充混和材		○					○	○					○				○
			I/エイト	○			○													
			高強度人工骨材ライト	○						○	○									○
		コンクリート用骨材	Jライト	○																
			細骨材代替材	○																
			ファイブ		○	○					○					○				○
		吹付コンクリート	吹付用混和材	○							○					○	○			
			EP-shot工法																	
	高流動コンクリート	FECコンクリート	○	○	○	○				○	○	○			○				○	
		高流動コンクリート		○	○					○										
	固化体	各種ブロック等硬化体	NAクリート	○							○				○	○	○			
			F-Sコンクリート		○															
			フォーム	○							○					○	○	○		
			アッシュ	○			○									○	○	○		
			FSG固化体	○			○									○	○	○	○	
	地盤改良工	深層混合処理	FGC-DM	○	○	○									○	○	○			
			GeoSeed	○	○	○										○	○			
		Qフラッシュ	○							○					○	○				
		F-CDM		○	○						○	○								
	SCP工法	Hiピーズ		○	○	○													○	
		石炭灰固化物		○																
	表層処理工法	石炭灰スリ-固化板	○	○	○					○	○				○	○			○	
		固化盤	○																	
	道路工	アスファルトファイバー材	エコアッシュ	○	○										○					
			(ファイブ)	○											○					
		アスファルト用骨材	加-骨材		○															色調
			クリカアッシュ	○			○									○				
		凍上抑制層材	ボ-リチック		○	○	○									○				
			アッシュパ-ン		○	○		○								○				
			土木用固化砕石	○				○								○				
	路盤材	路盤材	○			○	○								○					
		GeoSeed		○	○										○	○				
	路床改良	(クリンカ)	○												○					
			○												○					
その他	地中連続壁	石炭灰利用TRD	○		○					○	○			○	○					
	管中混合処理	GeoSeed	○	○	○									○	○			安定性		
建築	鉛直遮水工	自硬性安定液	○						○	○	○			○	○					
	建材	建材ボード		○														断熱性、遮音性、寸法安定性等		
その他	窯業製品	瓦、レンガ		○														強度、耐寒性向上、表面平滑		
		ブロック		○														耐久性向上、表面平滑		
	環境改善材	人工セ-メント		○														脱臭、吸湿、重金属吸着		
	ポリイソシアナート製品用ファイバー	ファイブラス		○										○						
	法面緑化吹付	厚層基盤材	○											○				生育性		
	育苗	培土	○												○					
	植栽土壌改良材	ボ-ラスソ-ド	○	○		○	○							○						
	堆肥副産材	水分調整材	○												○			○		
	水質浄化・改善材	Hiピーズ	○																	
	研磨材	Fプラスト	○															○		

4. 石炭灰の品質保証及び供給体制の現状と課題

石炭灰の有効利用技術は、前述したように、幅広い分野で確立されてきており、用途に応じた品質や量などユーザーのニーズに応じた流通拡大に向けた取り組みが各電力会社で行われている。しかし、石炭灰の発生は、石炭火力発電所が地域偏在しており、供給量の地域間アンバランスに伴う供給安定性の制約と輸送コストの多寡による出荷エリアの制約が完全に解消されていないのが現状である（図4.1.1参照）。

また、品質保証体制も、共通規格としては物理・工学的条件としてのJIS規格があるが、重金属等の溶出に関する環境安全性については、一部の電力会社で保証体制を確立しているのみである。

現状の石炭灰の供給・受入先は、表4.1.1のとおり、90%超が中長期的に固定した場所あるいは電力工事・ダム等のように工事の計画時点

より需要想定可能で、供給体制準備を組み易い供給先が主体となっており、土壤に接する観点での環境安全性に関する品質条件が必要なものは数%以下にとどまっていると推定できる。しかし、今後、従来以上の有効利用拡大を図っていくためには、一般的な建設工事等（新規ユーザー）において、従来のJIS規格品にとどまらず、広く、石炭灰有効利用が普及・拡大していく必要があり、そのためには品質保証体制もJIS品質保証のみならず、環境安全性に関する品質保証も必要となっていくとともに、供給先への対応も特定ユーザーではなく、不特定ユーザーにも対応できるようにしていく必要がある。

4.1 品質保証体制

JIS規格に対する品質保証と環境安全性の品質保証も含めた品質保証体制については、電力会社の一部で整備が始まっているが、その現状と将来的なイメージは、図4.1.2のとおりである。

図のように、現在までに確立している実線で示した品質保証フローに加え、今後は破線で示す品質保証フローが整備され、かつ供給体制と整合することにより、品質保証も含めた供給体制が確立される。

なお、品質保証体制の構築とは別に、具体的な品質・安全性評価に関して、現状、以下のような課題がある。

(1)物理・工学的品質

3で示した各種技術は、石炭灰の物理・工学的条件のバラツキがJISの規格範囲を超えた原粉で利用できるものが多い。しかし、用途に応じて、バラツキの範囲・上下限值等

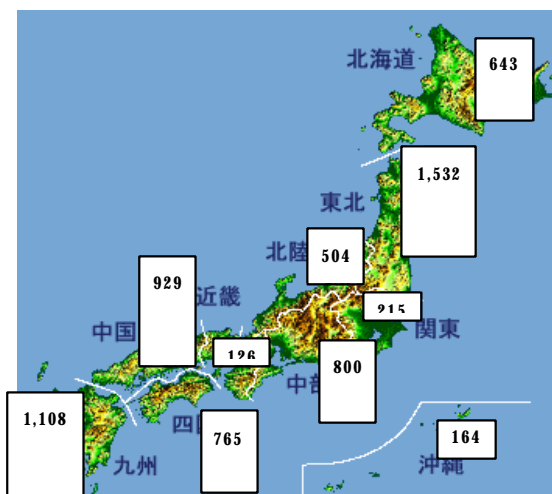


図 4.1.1 石炭灰発生量の分布(単位: 千 t/年)

表 4.1.1 石炭灰の供給・受入先別分類

	特定供給・受入先				不特定供給・受入先
	最終処分場	セメント会社	各種工場等	電力工事等	一般工用等
数量(万t)	150	375	39	72	42
構成比(%)	2.2	5.5	6	1.1	6
	94				6

(平成13年度実績: 日本フライアッシュ協会調べより推定)

注: ・セメント会社: セメント原料、セメント混合材(ワイヤメント)
 ・各種工場等: コンクリート混和材、コンクリート二次製品、建材ボード、肥料等
 ・電力工事等: 電力自社利用、炭坑充填、土地造成等
 ・一般工用等: 地盤改良、路盤材料、土壌改良材等

を規定する必要がある場合は、その規定について検討する必要もあるが、JIS品のように粉末度の均一性確保、上下限値の設定に対応するために分級を行ったり、ブレンディングすることによってコスト増に繋がるものである。このため、利用用途・利用技術・完成品の要求品質に応じて石炭灰の品質の設定項目・許容範囲を適切に定めることも重要である。

(2) 環境安全性評価の試験法

重金属等の溶出試験は、溶出操作で抽出した検液に含まれる重金属濃度を測定するものである。地盤改良分野などにおける改良土に対しての溶出試験では、一般的に土壌汚染の判定に用いられる環告第46号の溶出試験方法（振とう試験）を援用しているが、溶出操作等、各種分野・形態に適合可能な試験方法が明示されていないのが現状である。

振とう試験は供試体を粉砕して行う試験法であるため、環境に与える影響を適切に評価できない可能性があり、「土壌の汚染に係る環境基準の項目追加等について（答申）平成12年12月中央環境審議会」においても、試料の作成において土塊、団粒を粗砕することは、中小礫を無理に細かく砕くことを意味しておらず、土塊や団粒の粗砕以上の処理を行う必要がないこと等、当該基準の合理的かつ適正な運用について改めて周知すると指摘されている。また、EUでは欧州統一規格（EN規格）として、粉砕して行う溶出試験の他に有姿のまま行う溶出試験方法が策定されようとしており、これら動向等も勘案し、利用分野・利用形態に即した試料・検液の作成方法、試験方法の確立が必要である。

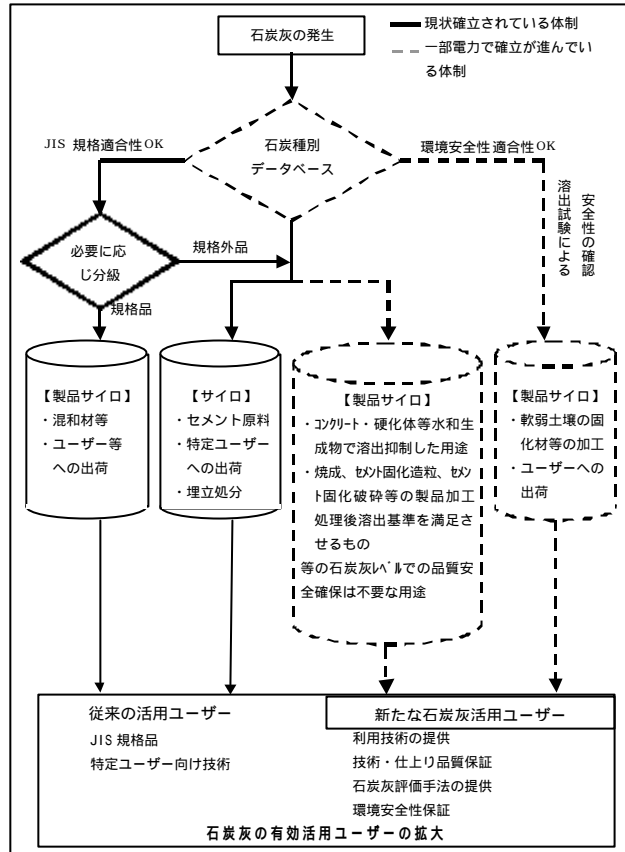


図 4.1.2 有効利用拡大に向けた品質保証体制

4.2 供給体制

石炭灰は、量・品質とも発電所の運転状態に依存するところが大きく、また石炭の性状によっても大きく変化する。従って、通常石炭灰の種類毎(原粉、細粉、粗粉またはJIS規格灰、非規格灰など)に仕分けし、発電所構内の複数基のサイロへ貯蔵しており、ユーザーの需要動向に応じて運用を行っている。

また、これらの灰については、単一の発電所からだけでは安定的に供給できない場合、発電所間連携、事業者（電力会社）間連携を行っている。

一方、今後供給を拡大していくべき新規ユーザーは、これまでの各種工場等、プロジェクト的なものといった特定可能な供給先と比較して、需要想定が難しく、供給要請から出荷までの期間も短く、全国的に分散している。これに対応するには、地域内における供給体制のみならず、地域による供給アンバランスの解消のための全国的な供給体制整備も必

要である。このため地域内、全国大での中継・貯蔵機能の拡充、発電所連携、事業者間連携の強化について、各電力、電力間等での取組みの充実が必要と考えられる。これらを踏まえ、石炭灰の有効利用が全国的に普及・拡大していくための供給体制整備は、図 4.2.1 のような供給体制イメージを構築することが必要と考えられる。図のように、現在までに確立している実線で示した特定のあるいは発電所直近ユーザーに対しての供給体制については、今後、破線で示した中継・貯蔵機能の拡充および発電所間、事業者間の連携強化が進めば、全国的な供給体制とすることができる。

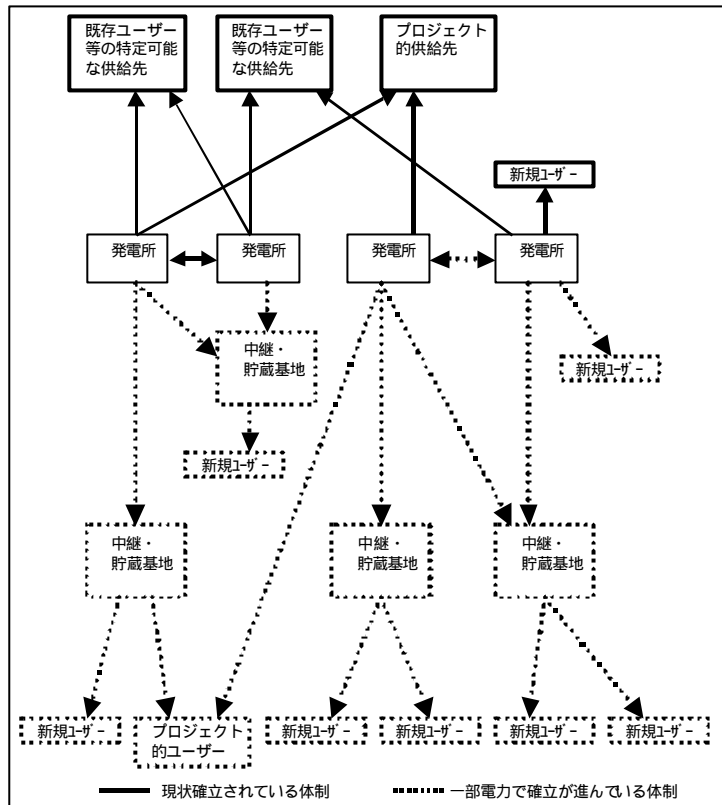


図 4.2.1 石炭灰の全国的な供給イメージ

4.3 最近の安定供給・品質保証体制についての取り組み

品質保証・安定供給体制について、中国電力、四国電力、北海道電力では、一体的な取り組み体制が確立している。

中国電力では、工事前の段階でのコンサルティングの他、工事中の施工指導および品質管理に関する技術指導などの十分な支援を行っている。環境安全性については、改良土への使用に対し、溶出のない石炭灰を炭種毎に選別して、安全性の確保できる石炭灰を出荷用サイロに貯蔵すると共に、自主的に改良土について公的機関で溶出試験を行い、その安全性を確認・報告している。この取り組みにより、環境安全性管理体制が評価され、現在はセメント安定処理に準じる取扱いとなっている。安定供給体制についても、中国地方管内の公共事業のニーズに応えるため、低コストの海上輸送をベースとした供給体制を整備しており、需要地近傍の港湾に 2,000t クラスの固定式大型サイロの他に、移動式サイロとして 500~1,400t クラスを数基、1,400t クラスを 1 基設置し、需要量に応じた機動的な供給体制を敷き、さらに石炭灰運搬専用船を有している。

四国電力では、品質保証において J I S 規格値に適合させることを基本的な考え方にしてきたが、工事に関わる場面では発注者、施工業者、エンドユーザーなどに技術コンサルティング・技術支援を行い、定常使用に向けた活動を展開している。環境安全性については、「土壌汚染に係る環境基準」を基本として、石炭灰単独レベルおよび石炭灰使用製品レベルでの試験で確認を行っている。特に地盤材料として使用する場合には、必要に応じて工事案件毎に事前に溶出試験により問題ないことを確認し、発注官庁や施工業者へ環境安全性を保証している。安定供給体制については、主として四国地域内におけるニーズにタ

イムリーに因應べく、発電所内の貯灰サイロだけでなく四国四県に固定式の中継サイロを配備している。輸送手段のメインは現在陸上輸送となっているが、一部で現在実施中の海上輸送方法の拡大など、より経済的・効率的な供給体制について検討中である。

北海道電力でも、工事前の段階でコンサルティングを行い、石炭灰加工品の品質確認や施工中の品質管理において技術支援を行なっている（建設工事の品質保証は発注者（施工会社））。環境安全性については、低強度の固化材として土壌と混合する場合、「土壌汚染に係る環境基準」を満足するために、公的機関で改良土の溶出試験を行い、安全性を確認・報告している。なお、品質保証体制については、石炭灰単体、石炭灰加工品、改良土の3段階のレベルがあるが、現状では過去データ等で重金属溶出の心配のない灰種を選定し、それでも重金属溶出の心配がある場合は、製品として出荷しないようにしている。また、改良土については、事前の確認をし、自主的に北海道電力でも実施しバックアップ体制をひいている。安定供給体制については、貯灰設備としてブレンディングサイロ 2,500t / 基 × 2 基、クリンカアッシュ貯灰設備用に 8,000t のストックヤード、移動式サイロ用に 50t / 基 × 5 基、30t / 基 × 3 基を設置し、需要量に応じた供給体制を敷いているが、今後はさらにサイロの増強も視野に入れている。

4.4 石炭灰の有効利用に関わる経済性について

石炭灰の有効利用による販売価格は、品代（必要な加工費含む）と中継・運搬費で構成される。コストの大半を占める運搬費は、条件により大きく異なるが、海上輸送による臨海域への輸送は、全国的に概ね2~4千円/t、陸上輸送では発電所から50km圏内で2千円/t以内、150km以上で5千円/t以上となっている。

ユーザーにとっては、ある価格レベルであれば有価で購入することができるが、発電所から需要地までの距離が遠いほど運搬費が高くなり、遠隔地では対応できなくなる。

一方、有効利用が進まない場合は、産業廃棄物としてセメント原料への中間処理費、埋立処分費といった排出者側の内部コストが発生するが、主要港湾にサイロ等の中継・貯蔵機能が整備されると、陸域においても全国的に概ね4千円/t程度で輸送可能とされている。つまり、全国的な供給体制が確立していけば、輸送コストの低減を図ることが可能となるばかりでなく、排出者側の内部コストも有効利用の拡大により低減可能となる。

このように、全国的な供給体制の整備は、ユーザーにとって低価格の石炭灰利用による工事コスト縮減に寄与するだけでなく、排出者である電気事業者にとっても販売費用の低減、廃棄物処理の内部コスト縮減に寄与していくものと考えられる。

5. 資源としての石炭灰に望まれる有効利用システムへの提言

5.1 新たな有効利用システムの確立に向けて

5.1.1 排出者側における取組み

石炭灰の有効利用拡大に当たっては、主たる排出者である電力会社に、より具体的で現実的なアプローチによる積極的な取り組みが求められており、以下に示す課題を克服していく必要がある。

(1) 技術開発に関する課題

今後の石炭灰有効利用技術の開発においては、公共工事等の社会資本整備におけるさら

なるコスト縮減に寄与できる技術や費用対効果を生み出すことのできる高付加価値技術などユーザー側に利用することのインセンティブを付与できる技術が求められている。これまでの技術開発において、電力が培ってきた石炭灰活用技術を活かし、ユーザーである官庁と相互理解を得られる実用化技術の開発が求められる。

(2)技術の市場定着に関する課題

公共の社会資本整備において本採用され、市場に定着していくためには、技術のフォロー体制、低コスト化、品質や安全性に関わる保証体制の整備が必要であり、採用技術に応じて開発者や電力会社にこれら体制の整備が求められる。

(3)安定供給、品質・安全性保証に関する課題

建設材料として、市場性確保のための安定供給体制が望まれている。これまで、石炭火力発電所の地域偏在が安定供給体制構築を阻害してきた一面があるが、今後は販売主体・管理体制・安定供給体制を市場性確保・定着を主眼に構築することが必要である。

品質や安全性の保証については、電力会社によってその体制や手法は異なるが、既に電力各社が責任を持った姿勢が整いはじめている。電力各社で取り組みの違いはあるが、必要な品質と安全性は電力各社により保証されつつあると言える。やがて、これらの技術が一般的になっても、電力会社は材料供給者としての安全性に対する保証を続けていく必要があり、現行の保証体制や取り組みを更に充実させていく必要がある。これらの体制の再構築・整備を将来的に全国で進展できるよう電力全体で検討を進め、その体制を全国で整えて行く必要がある。

5.1.2 利用者の取り組み

発生者である電力会社の取り組みを礎として、石炭灰の利用者である行政との相互理解において最も重要なことは、相互の立場を十分に理解して行うことである。

その際、利用者として留意すべき点は、対象とするリサイクルシステムや技術を次のような観点からきちんと評価しておくことである。すなわち、1)環境負荷低減効果、2)環境安全性、3)品質保証体制の観点から十分に信頼でき、4)経済性の観点からみてもトータルな社会的費用を小さくできるかどうかを見極めることである。

この点は、平成 13 年度から国土交通省が推進している公共工事におけるグリーン調達の推進と同じ考え方であり、公共工事における特定調達品目（平成 14 年度現在で、資材や建設機械など 28 品目）の選定の基本的な考え方は、次のとおりである。

環境負荷低減効果がデータ等により客観的に認められるもの

普及の促進が見込まれるもの（既に十分に普及し、通常品になっているものは除く）
品質確保（安全性、耐久性等）が確実なもの（公的基準を満足または準拠すること、公共工事での使用実績が十分あり、実際での検証・評価が十分なされていること）

コストが適正と判断されるもの（コストが通常品に比べ著しく高いものは除く、現在割高なものは、普及とともに比較対象品と同程度になることが見込めるもの）

以上のようなことから、これからの循環型社会においては、公共事業における他産業リサイクル材の活用が一層推進される方向にあるが、利用者としては、推奨できる有効利用システムや技術を選定するための透明性のある評価軸を明らかにし、選定した技術を積極的に活用していくことが求められている。

5.1.3 新たな有効利用システムに向けて

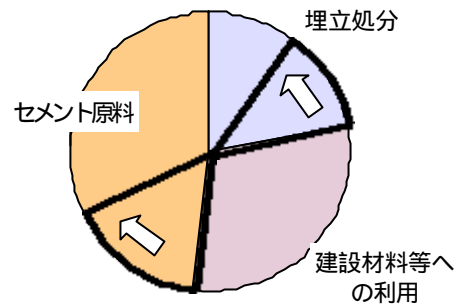
石炭灰の新たな有効利用システム構築に向けて、土木分野への建設材料としての活用にシフトするためには、有効利用のあるべき姿が必要となる。

セメント原料への活用は、将来的にはその利用量や価格などの問題を含んでいるが、セメント工場と発電所の位置的な優位性や、利用量の変動が少ないなど安定した有効利用先であることに変わりない。

土木分野への建設材料としての活用においては、近年の公共事業における必要性や在り方の見直しによる事業費の低減などの問題や、使用量の場所的・時期的な変動などの問題もあるが、今後の主力となり得る有効利用先である。

石炭灰の有効利用先のあるべき姿としては、これらの有効利用先がベストミックスされた姿が求められることとなり、今後も石炭灰量の増加が予想される中、現状における将来像としては図 5.1.1 に示すような姿が考えられる。図は、近年の石炭灰利用状況の動向を示すものであり、「現状：(セメント原料 約 50%) > (建設材料等への利用, 埋立処分 50%以下)」から、循環型社会形成に資する姿として「将来：(建設材料等への利用 50%超) ((セメント原料+土地造成への利用) 約 30%) (埋立処分 約 10%前後)」としていこうとする電力全体の目標を示すものである。

このようなビジョンの達成に向けて、電力業界が一体となって取り組み、公共の理解を得ていくことが重要であるものとする。



5.2 循環型社会における石炭灰有効利用システム

循環型社会において、電力業界から発生する石炭灰を「再生資源」として、大量活用することのできる土木・建築分野や農業水産分野等へ有効利用することは、まさに天然資源の消費抑制と環境負荷低減を目的とした社会の取り組みに合致するものである。

この石炭灰の有効利用を推進するためには、前述したような発生者側の取り組みと利用者側の取り組みが重要である。これら取り組みにより、発生者である電力業界の取り組みも一層促進される他、行政によるリサイクル社会形成の主旨を全うすることができ、リサイクルを理解・認識した上で利用者も石炭灰の利用を容易に行われるものと考えられ、社会全体で石炭灰のリサイクルが促進されることが期待できる。

基本は、発生者と利用者および行政が連携を持ち、以下に示す共通認識のもと石炭灰のリサイクル推進を図ることである。

石炭灰は「再生資源」であり、天然資源消費抑制および環境負荷低減に寄与できる有用資源であり、全国で入手が可能な材料である。

石炭灰の活用により、リサイクルの推進はもとより、公共事業のコスト縮減を図る努力を行っていく。

この取り組みを通じ、石炭灰の資源としての有用性を認識し、広く社会に向けて PR を推進する。

今後、廃棄物から資源へ、循環型社会のモデルケースとして、産官学が一体となった石炭灰リサイクル社会構築を図り、活用のための法整備に取り組むことが必要である。

以上