

石炭灰リサイクル技術特集

当社は、お客さまのもとへ高品質なエネルギーサービスを、将来にわたって安定的・継続的にお届けするため、多様な発電方式を組み合わせるベストミックスの取り組みを進めてきており、碧南火力発電所（総出力410万kW）を当社唯一の石炭火力発電所として電力安定供給の一翼に位置付けています。一方、石炭は燃焼した際にその残渣として石炭灰が発生します。碧南火力発電所の運転に伴い発生する石炭灰は年間90万トン程度と当社の産業廃棄物の約7割を占めています。

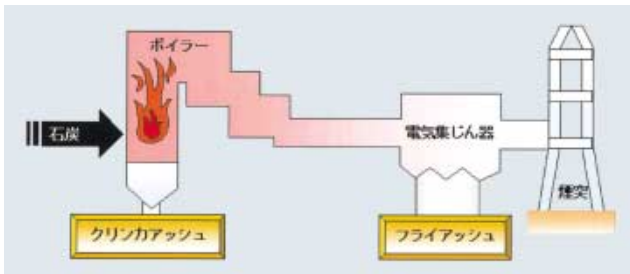
そのため、当社では石炭灰をセメント原料や土地造成材として利用する有効活用を進めていますが、さらに高付加価値での有効利用を図るための研究開発を進めています。



第1図 碧南火力発電所

石炭灰の種類

石炭灰は、電気集じん器で集められたフライアッシュとボイラ底部で回収されるクリンカアッシュに大別されます。

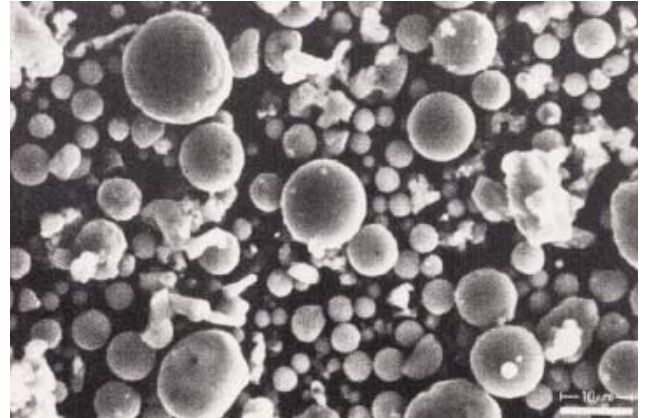


第2図 石炭灰の発生工程

1 フライアッシュ

フライアッシュは平均粒径20～30μmの微細な球形でシリカとアルミナを主成分としたガラス質の材料です。1950年代前半にセメント・コンクリート分野への

利用技術が確立されて以来、主要なコンクリート用混和物としてモルタル及びコンクリートに使用されています。また、高品質な無機材料として工業用原料などへの有効利用も期待されています。



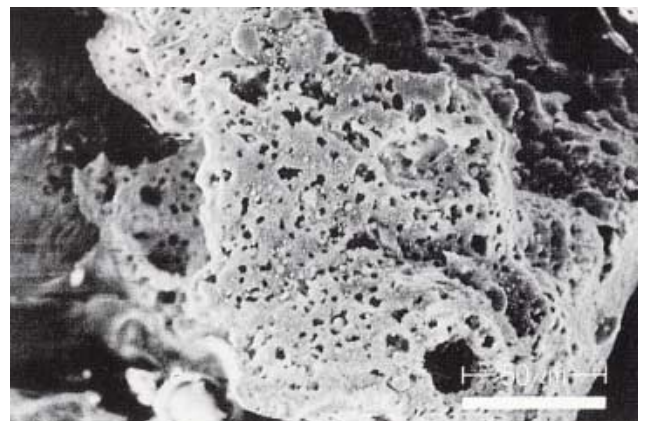
第3図 フライアッシュ電子顕微鏡写真

第1表 フライアッシュ品質（JISA6201）

項目		種	種
二酸化ケイ素	%	45.0以上	
湿分	%	1.0以下	
強熱減量	%	3.0以下	5.0以下
密度	g/cm ³	1.95以上	
粉末度	45μmふるい残分 %	10以下	40以下
	比表面積 cm ² /g	5,000以上	2,500以上
フロー値比	%	105以上	95以上
活性度指数 %	材齢28日	90以上	80以上
	材齢91日	100以上	90以上

2 クリンカアッシュ

クリンカアッシュの主成分はシリカとアルミナであり、砂と類似した外見をしています。また、粒子表面に1～20μmの無数の細孔がある比表面積の高い材料で、優れた水分保有特性と締固まり難い材質から下層路盤材や植栽土壌などに有効利用が図られています。



第4図 クリンカアッシュ電子顕微鏡写真

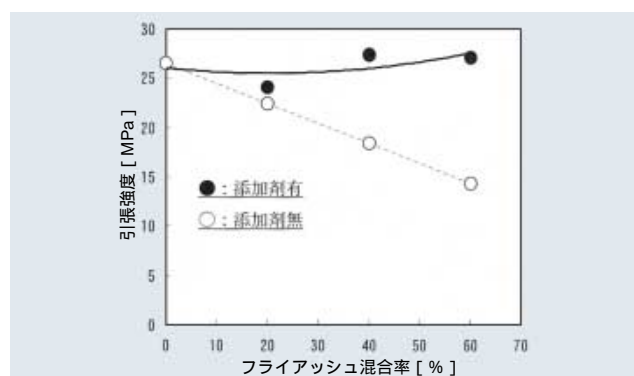
有効利用分野

1. 石炭灰混合プラスチック原料の開発

プラスチックの充填材としてフライアッシュを有効利用する試みはこれまで幾度となく挑戦されてきましたが、プラスチック原料にフライアッシュを混合すると強度が著しく低下するため、実用に耐えるプラスチックの開発に至りませんでした。今回、フライアッシュの表面を改質し、プラスチック原料との親和性を高める不飽和カルボン酸系添加剤を適用することでフライアッシュを60%含有する新たなプラスチック、商品名「PLASH」を三菱重工業株式会社と共同で開発しました。2004年4月から、三星ケミカル株式会社にて製造販売を開始しています。

1 PLASHの開発

第5図に示すように、添加剤無しではプラスチックへのフライアッシュ混合率が増加するに従い、引張強度が著しく低下します。しかし、不飽和カルボン酸系添加剤を適度に添加することにより、フライアッシュ混合率60%でも引張強度はベースとなるプラスチック原料の値を維持しており、実用的なプラスチックとすることができました。



第5図 フライアッシュ混合率と引張強度の関係

2 PLASHの物性と特徴

開発したPLASHは、金型に加熱圧入して成形することで多様なプラスチック用品となる射出成形用プラスチック原料であり、第2表の物性を有しています。引張強度は、ベースとなるポリプロピレンとほぼ同等、曲げ強度は約1.5倍となります。また、PLASHに副資材としてガラス繊維を混合した「PLASH-GF」も開発しました(2006年6月 販売開始)。これは、ガラス繊維強化ポリプロピレンに比べても曲げ強度が高く、高強度プラスチックとして幅広く活用できるものです。さらに、第6図のように、PLASH表面に良好なメッキ皮膜が形成でき、一般に必要とされるメッキ密着強度である1kgf/cm以上となることを確認しています。

第2表 PLASH物性データ

項目	A社 ポリプロピレン (PP)	PLASH	B社 ガラス強化 PP	PLASH- GF
比重 (g/cm ³)	0.900	1.403	-	1.322
MFR (g/10min)	29.1	17.6	8.0	27.3
引張強度 (MPa)	22.5	22.1	49.0	51.6
曲げ強度 (MPa)	31.4	46.9	68.3	92.4
熱たわみ温度()	114	131	146	160
衝撃試験 (kJ/m ²)	7.1	3.0	11.5	6.7
収縮率 (%)	1.2	1.0	-	1.1

* MFR (Melt Flow Rate) : 樹脂粘度指標で、高いMFRは低い樹脂粘度を示す。



第6図 PLASH成形試作例 排気口(メッキ加工品)

2. 園芸用培養土・緑化用土壌改良材の開発

クリンカアッシュが多孔質で、透水性等に優れているという特長を活かし、家庭園芸用培養土および公園等に利用される緑化用土壌改良材の開発を、自然応用科学株式会社と共同で実施しました。

1 園芸用培養土の開発

クリンカアッシュを主成分としてバーク堆肥や肥料等の最適配合割合を検討し、植生試験を実施しました。その結果、良好な結果が得られたことから、研究成果を活かした園芸用培養土、商品名「花めぐり培養土」の販売を2002年4月から開始しました。その後シリーズ化を図り、花専用培養土や野菜ハーブ用の培養土を販売しています。

また、2005年9月には芝生の床土・目土として最適な商品名「芝の土」の販売を開始しました。

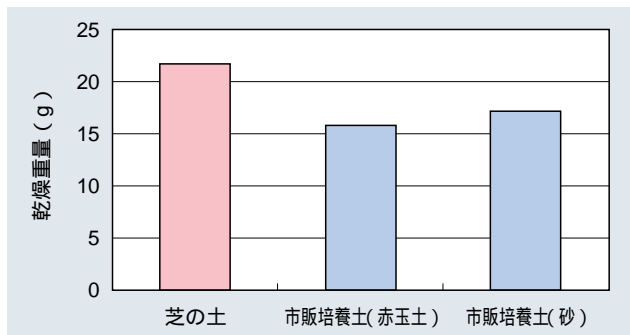
(第7図)

市販されている芝生用培養土には主に砂系と赤玉土系があります。砂系は、かさ比重が約1.5と大き



第7図 芝の土

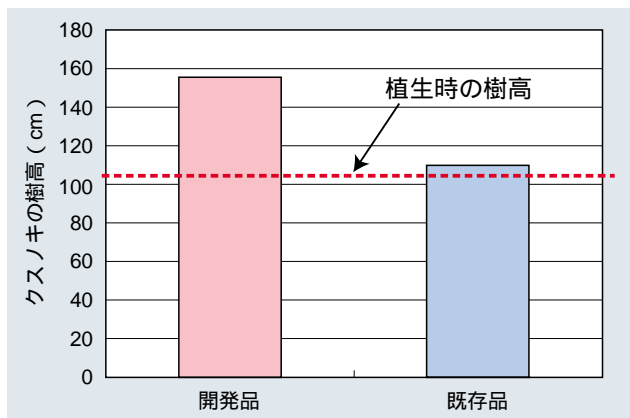
いため持ち運びが困難であり、赤玉土系は芝生の上を人が歩くことにより、粒状の赤玉土が砕け、粘土状となり踏み固まるため、透水性が悪くなり芝が病気等により枯れるという欠点がありました。クリンカアッシュはかさ比重が約1で砂よりも軽く、また踏み圧に対する抵抗性が強いといった特長もあるため、その特長を活かした芝生用培養土の開発に取り組みました。その結果、第8図に示すように、開発培養土は栽培試験において他の市販培養土よりも芝生の乾燥重量が重いという良好な結果が得られました。さらに、開発培養土は植物の生長において最も重要な根が良く育つことが確認されました。これらのことから、開発培養土は芝生が良く育つとともに、従来の市販されている芝生用培養土の問題点を解決できる最適な培養土と言えます。



第8図 高麗芝の鉢上げ時の乾燥重量

2 緑化用土壌改良材の開発

緑化用土壌改良材は、現地土の透水性等の物性を改良する目的で、現地土に対して20%程度混合し使用されています。クリンカアッシュは透水性等の土壌改良効果があることから、この特長を活かした緑化用土壌改良材の開発に取り組みました。開発品の土壌改良効果を確認するため、比較として既存品(愛知県が緑化工事で指定している配合)を使用し、当社知多第二火力発電所構内にてクスノキ等の植生試験を実施しました。その結果、第9図のように開発品は既存品よりも樹高が高く良好な育成ができました。開発した緑化用土壌改良材は一般の緑化工事に活用されています。



第9図 クスノキの樹高(10ヶ月後)

3. 土木分野への適用

1 フライアッシュのコンクリートブロックへの利用

(1) フライアッシュのセメント代替材としての利用

フライアッシュの有効利用量の拡大を図る上では、需要の多いインターロッキングブロック、積みブロックなどのコンクリートブロック製品への適用が期待されています。フライアッシュはセメントとの混合により硬化する性質があるため、セメント代替材としての利用が可能です。

フライアッシュをコンクリートにセメント代替材として混入すると、粘性が増大したり、強度の発生過程において、強度は長期的には高くなるものの初期には低くなる傾向があります。粘性の増大は成型性の悪化につながり、初期強度の低下は養生期間の長期化につながり製品のコストアップが懸念されます。そこで、主要な製品ごとに求められる規格を満たす範囲で、代替可能なフライアッシュ量について検討しました。

コンクリートブロックの製造方式には、硬練りコンクリートを圧力と強力な振動により成型し、その直後に脱型する即時脱型方式と、型枠にコンクリートを流し込み、振動機を用いて充填し成型する流し込み方式があります。

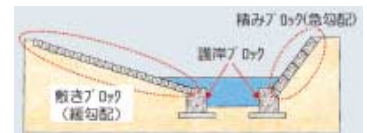
対象とした即時脱型方式のインターロッキングブロック、積み・敷きブロックでは、フライアッシュの代替可能量はそれぞれセメント量の40%、30%であることを明らかにしました。



第11図 積み・敷きブロック



第10図 インターロッキングブロック



第12図 ブロックによる護岸整備

流し込み方式の積みブロック、護岸ブロックでは、フライアッシュの代替可能量はどちらもセメント量の30%であることを明らかにしました。



第13図 積みブロック(流し込み方式)

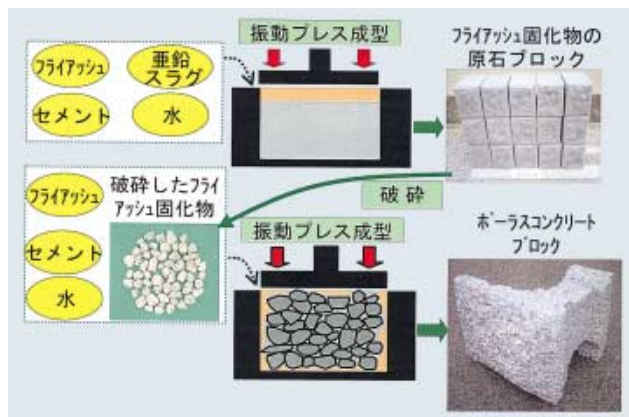


第14図 護岸ブロック

(2) フライアッシュ固化物のコンクリートブロックへの利用
 フライアッシュをセメントや水などととも固めた「フライアッシュ固化物」の特性を利用し、フライアッシュ固化物を砂利の代わりにコンクリートブロックへ適用する方法について検討しました。

ポーラスコンクリートブロックは、コンクリートでありながら内部に空隙を持たせることで、植物の根や水、空気を通すことができ、生物の生育が可能な環境にやさしいブロックですが、空隙量が多いと強度が低下するため、多くの空隙を有しながら実用可能な製品を製造するには高い製造技術が必要です。

フライアッシュ、セメントなどをミキサーで練り混ぜ、振動プレス成型機でフライアッシュ固化物の原石ブロックを製造し、次にこれを破碎し、フライアッシュ、セメントなどと練り混ぜ再び振動プレス成型機で成型して製造します。フライアッシュ、セメントの量と、成型時の振動数の最適化を図った結果、実用性があり、かつ従来の砂利を用いたブロックに比べ、空隙量が約5割多くでき、また保水性に優れたフライアッシュが原料であることから保水量を約2倍に向上したブロックを製造できました。



第15図 ポーラスコンクリートブロックの製造フロー

また、フライアッシュ固化物は加工が容易であること、灰色であるため、フライアッシュ固化物を用いたコンクリートの破断面は、表面状



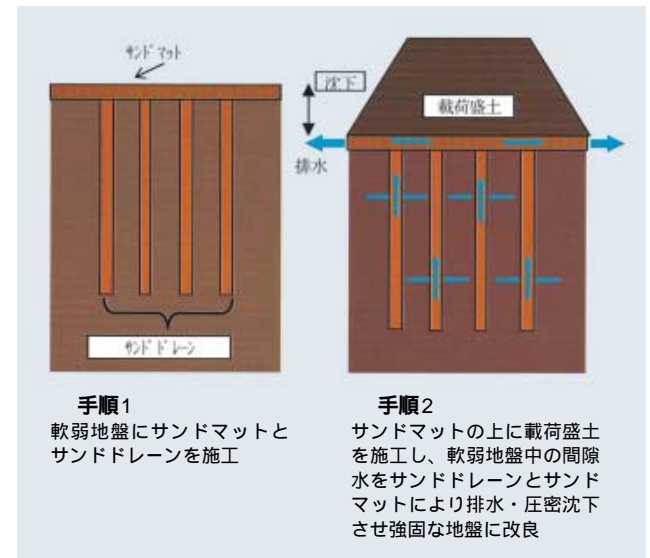
第16図 意匠用積みブロック

態が自然の岩に近い凹凸状態になるとともに、全体の色調が灰色に統一され、自然の岩に近い質感があります。この特徴を生かした実用可能な意匠用積みブロックの製造にも成功しました。

今後、他のコンクリート二次製品についてもフライアッシュの利用方法を検討し、フライアッシュの有効利用の促進を図っていきたいと考えております。

2 地盤改良工事へのクリンカアッシュの利用

軟弱地盤改良工事の1つであるサンドドレーン工法(第17図)では、透水性に優れた砂が大量に使用されます。クリンカアッシュは粒径が1~10mm程度で透水性に優れ、砂よりも軽量であることから砂代替材としての利用が可能です。



第17図 サンドドレーン工法の施工方法

現地実証試験により、施工性および地盤改良効果は従来の砂と同等で、周辺環境への影響もなく良好な成果が得られました。この成果を活用し、これまでに名古屋港内における地盤改良工事において、約6万tのクリンカアッシュが利用されています(第18図)。



第18図 クリンカアッシュを用いた施工状況

サンドドレーン工法をはじめとした地盤改良工事は、港湾エリア周辺で多く行われます。しかし近年、砂はその採取地が遠隔化し、輸送コストの増加要因となっています。そこで砂の代替材としてクリンカアッシュを利用すれば、同じ港湾に隣接する石炭火力発電所から供給されることから、輸送コストの低減も可能です。

今後も、建設コストの低減に寄与するリサイクル技術として展開する計画です。

3 道路工事へのクリンカアッシュおよびフライアッシュの利用

道路工事における路床材(道路の最下層を構成する部分に用いる材料)には砕石等が使用されますが、その代替材としてクリンカアッシュの利用が可能です。

材料試験により強度や締固め性能を確認し、路床材としての利用は可能であるとの成果が得られました。この成果を活用し、碧南火力発電所構内道路工事においてクリンカアッシュを使用しました(第19図)。



第19図 道路工事への利用状況

また、アスファルトには細粒材として石粉が使用されますが、その代替材としてフライアッシュの利用研究も現在実施しています。

道路工事は碧南火力発電所周辺でも恒常的に実施されるため、今後は自治体および道路会社にクリンカアッシュやフライアッシュの利用を呼びかけていく計画です。

4 トンネル吹付け工事におけるフライアッシュの利用

トンネル吹付け工事では、吹き付け材料に砂とセメントを用います。フライアッシュはセメントと同様な粉体であり流動性に優れ、セメントとの混合により硬化作用を発揮することからセメント代替材としての利用が可能です。

配合試験および現地試験(第20図)の結果、吹付けコンクリートはセメントの一部をフライアッシュに代替可能で、配合によっては吹付け性能が向上し発生粉塵量が低下する等の良好な成果が得られました。この成果を活用し、コストダウンをはじめ労働環境改善に寄与する技術として、現在、公共事業におけるトンネル壁面の吹付け工事に採用されています。



第20図 トンネル吹付け工事への利用状況

5 地下空洞充填工事へのフライアッシュの利用

亜炭廃坑をはじめ地下空洞充填工事には、充填材料として砂等が使用されます。この砂等の代替材としてフライアッシュを使用することで、充填性能の向上と材料費のコストダウンが期待できます。

配合試験と配管圧送試験の結果、従来よりも圧送距離が長くなり施工性が向上することが確認されました。

現在、社内工事の四日市ガス導管工事において使用されています。(第21図)



第21図 フライアッシュを混合した充填材

東海地方には、戦時中採掘した亜炭廃坑が点在しており、しばしば崩壊による地上建物や道路への被害が発生しています。今後は、このような廃坑充填事業への積極的な展開も目指していきます。

4. 石炭灰のリサイクル材「シーキュラス」



1 「シーキュラス」の概要

石炭灰の主要な化学成分であるシリカ(SiO_2)、アルミナ(Al_2O_3)を利用し、その表面にゼオライトの結晶を合成したものが、一般に人工ゼオライトと呼ばれる「シーキュラス」です。シーキュラスの結晶は表面がスポンジのように無数の穴をもつ多孔質構造で(第22図)、悪臭ガスや重金属などの様々な物質を吸着する能力を有します。当社は碧南火力発電所構内に、製造能力3千トン/年の人工ゼオライト製造工場(第23図)を建設し、2004年10月から製造販売を開始しました。



第22図 顕微鏡写真



第23図 製造工場

2 「シーキュラス」の用途

(1) 農業・緑化用土壌の保肥力向上

シーキュラスはプラスにイオン化した物質の吸着能力が高いため、農業・緑化用土壌の保肥力・保水力向上に役立つ材料であり、雨水などによる肥料分の流亡を防止し、野菜や花き類の生育促進に効果があります。シーキュラスの農業向け資材として、同じく石炭灰の一種であるクリンカアッシュとシーキュラスを混合した「ランドプラスZ」という商品があります。ランドプラスZの適用事例として、徳島県内でのさつまいも「なると金時」の栽培成果を示します。

従来と同様の土づくりをした「慣行区」と、ランドプラスZを 1m^2 あたり0.3リットル施用したLPZ区で、なると金時の30座(株)あたりの収量を比較しました。



第24図 試験ほ場(収穫後)

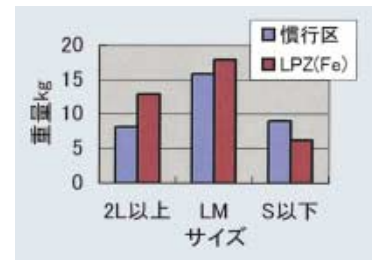
第26図に各サイズ(L、M、S)毎の重量を示します。

重量では全体で12%の増量となりましたが、大きいサイズの割合が増えたため、収穫高(金額)では2割近く



第25図 収穫後のさつまいも

の増収となり、ランドプラスZの資材代を差し引いても増収となりました。



第26図 サイズ別重量

(2) 悪臭ガスの吸着機能

シーキュラスは悪臭ガスを吸着する能力が高く、特にアンモニア、酢酸、トリメチルアミンに対しては、活性炭と同等あるいはそれ以上の吸着能力があります。その適用例として、第27図に示す日立の空気清浄機の脱臭フィルターに使用されています。この空気清浄機の脱臭能力は業界最高です。



第27図 日立 空気清浄機「クリア 脱臭大賞」
(日立アプライアンス株式会社殿のプレスリリース資料『空気清浄機「クリア 脱臭大賞」加湿機能付きを発売』による)

(3) 重金属吸着等による水質浄化

シーキュラスは水中に溶けた鉛等の重金属やアンモニアを吸着する能力が高く、工場排水等の水質浄化に効果を発揮します。2005年4月には、シーキュラスを用いた水質浄化方法が、国土交通省の新技術情報提供システム(NETIS)に登録されました。

終わりに

当社では、今回紹介したもの以外にも様々な石炭灰の有効利用に取り組んでいます。

石炭灰のさらなる有効利用を図るため、今後も石炭灰有効利用技術の開発に取り組んでいきます。