

発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用

6. 産業廃棄物の地盤工学的有効利用（その2）

堀内 澄夫 (ほりうち すみお)
清水建設(株)技術研究所

檜垣 貫司 (ひがき かんじ)
大成建設(株)技術研究所

神田 亨 (かんだ とおる)
(株)フジタ技術研究所

山口 隆史 (やまぐち たかし)
住友建設(株)技術研究所

6.4 石炭灰の有効利用

6.4.1 地盤材料としての利用実績

石炭灰の土木分野への利用は、コンクリートへの添加材をはじめとして古くから検討されてきている。地盤材料としての利用も道路材を中心として多くの検討実績がある。石炭灰のうちアルカリ性でカルシウム含有率が高い種類は、水との混合によってセメント水和物に似た生成物が形成される。1度も水と接触していないフライアッシュは少量の水を添加して転圧すると、この反応によって数百 kPa の圧縮強度を発現する¹¹⁾。この性質を自己硬化性と呼んでいる。

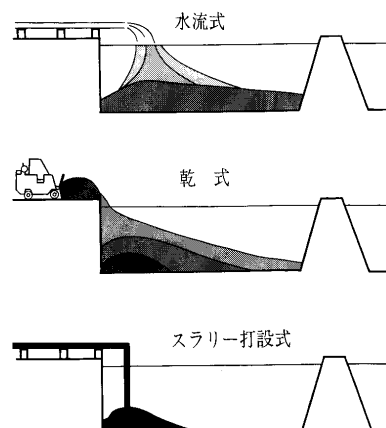
我が国における地盤材料としての利用についても多くの実績がある。例えば、①盛土の構築、②土地造成、③盛土用骨材化、④農用材¹²⁾、⑤シールド裏込め注入材^{13),14)}、⑥橋脚建設用築島材¹⁵⁾、⑦路床材や路盤材、⑧軽量盛土材（発泡スチロール混合セメントスラリー、気泡混合セメントスラリー¹⁶⁾）。このうち、①②⑦のような用途は、現行の法体系が整備される前の事例であり、最近の適用例は乏しい。

石炭灰の発生～処理、利用に関しては、土木学会がまとめた報告書¹⁷⁾や専門書¹⁸⁾などがあり、地盤関係の情報も掲載されている。ここでは特に地盤としての利用について情報をまとめた。

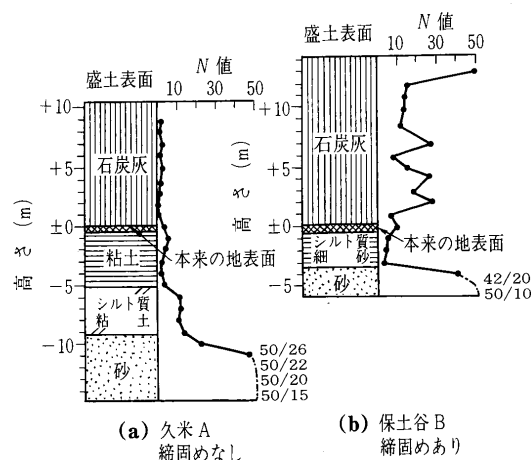
6.4.2 未改良石炭灰の地盤利用

発生する石炭灰の多くは埋立てられ、地盤として活用されている。埋立ては、山間地や湿地などへの陸上埋立てと、湖沼や海面などの水面埋立てとに分類される。また埋立方式の違いによって、加水した石炭灰を陸上や水面にまきだす乾式法、石炭灰を低濃度スラリー化してポンプで処分地まで移送し沈降・堆積させる水流式、および石炭灰を高濃度スラリー化して水底から打設するスラリー打設式¹⁹⁾がある(図—6.4)。このうちスラリー打設式は、我が国の独自技術であり、水中であっても陸上転圧と同等の高い密度で石炭灰を埋立てられる方法である。

陸上埋立てに関しては、泥炭地上での盛土の構築や工業団地用地盤の構築盛土や造成への適用事例があり、石炭灰を適切な含水比で加湿して転圧すれば、盛土などとして十分な強度が発現する。この強度発現は埋立地盤の密度によって変化するため、転圧せずに盛り立てた低い密度の石炭灰地盤では強度発現がほとんど期待できなく



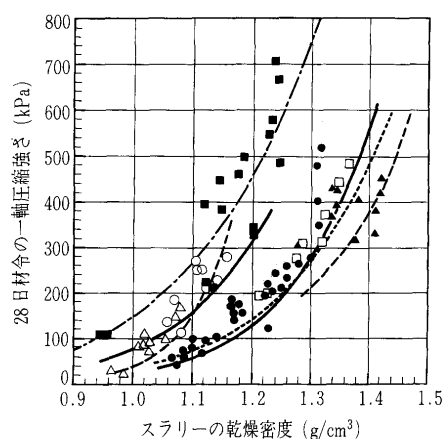
図—6.4 石炭灰の埋立方法



図—6.5 石炭灰埋立地盤の N 値²⁰⁾

なり、斜面崩壊などの事故を起こすような事態も生ずる²⁰⁾。図—6.5は盛土の調査結果であり、十分に締め固めた場合には N 値10～50の強度が得られているのに対し、締め固めが不十分であると強度がほとんど期待できない。以上のように、石炭灰地盤に安定した強度を求めるためには、重機による転圧などによって埋立密度を高くする必要がある。また、盛土の下部には粒径の大きい石炭灰であるボトムアッシュによって排水層を設ける必要性も指摘されている。

我が国における石炭灰の埋立ては、水域に移行しつつある。水中埋立てでは陸上のような転圧が不可能であり、埋立地盤の密度も一般的に低く、その結果として強度も低い。スラリー水域埋立地盤の液状化特性に関しては、水流埋立てしたフライアッシュは砂よりも液状化しやす



図—6.6 スラリー化したフライアッシュの乾燥密度と28日材齢の圧縮強度²³⁾

く²¹⁾、衝撃的な外力に弱い継続的な振動には比較的高く、液状化強度はフライアッシュの密度増加によって強くできる²²⁾などと報告されている。

埋立方式の違いによる埋立地盤の物性への影響についての検討結果によれば、水流式による埋立地盤はルーズで強度も低い、スラリー打設式では陸上埋立地盤程度に改善される¹⁹⁾。用途に応じた埋立方法を選択すべきであろう。図—6.6は打設埋立てに適用されるスラリー化したフライアッシュの乾燥密度と28日材齢における圧縮強度の関係である²³⁾。強度は密度の影響を大きく受けている。図中の記号はフライアッシュの種類であり、同一の乾燥密度であっても発現強度は種類によって大きく異なっている。これは強度発現がフライアッシュに含まれる化学成分と水との化学反応によっているためである。図—6.6のような密度と種類の影響は、締め固め材などスラリー以外の材料にも当てはまる。石炭灰を地盤材料として利用する場合には密度とフライアッシュ中の成分への十分な配慮が必要となる。

石炭灰を地盤材料として使用する際に、重金属類の溶出を抑えねばならない場合がある。溶出する金属は石炭灰表面に多く存在するようであり、石炭灰を使用する際に前もって洗浄処理すれば溶出率を低下できると考えられる²⁴⁾。また溶出成分の濃度は溶液のpHに大きく影響されるので、周囲の水質環境に留意する必要がある。周囲環境への対応策としては、①水の不使用、②ライニングの使用、③CaOやNa₂CO₃のような化学的処理、④石炭灰同志の混合などが提案されており、ライニング材としては、粘土系が推奨されている²⁴⁾。

水域埋立ての際の溶出に関しては比較試験結果が次のように報告されている¹⁹⁾。スラリー打設式では石炭灰中に含有されている溶出成分の90%以上を埋立地盤内に封じ込めることができるが、水流式、乾式では溶出成分の大部分が水中に溶出する。

6.4.3 硬化材添加石炭灰の利用

フライアッシュはポゾラン反応性が高い。埋立地盤の強度増加を目的として、セメントや石灰のような硬化材を添加しているのはこのためである。硬化材を併用した材料に関しては多くの研究があり、実際の適用事例も多

い。以下に利用形態を分類し紹介する。

- ① フライアッシュにセメントを添加してスラリー化し、空隙部の充填や裏込め、埋立てに適用する（事例1）。
- ② 石炭灰に少量のセメントを添加し、繊維補強材を併用しながら盛り立てる²⁵⁾。
- ③ 軽量地盤材料の一つである気泡セメントペーストの水和熱抑制と強度調整を目的として、大量のフライアッシュをセメントに添加して用いる¹⁶⁾。
- ④ 石炭灰にセメントやベントナイトなどを混合してスラリー化し、これに水ガラス溶液を添加して瞬結性を持たせてシールドの裏込めなどに用いる^{13),14)}。
- ⑤ 流動床石炭灰に炭酸アルミネート系塩材料を添加し、高い強度の地盤材料を得る²⁶⁾。

これ以外に、セメントを添加したフライアッシュスラリーを地中に敷設した袋中に圧入して周囲の軟弱地盤を圧密脱水するアッシュコラム工法²⁷⁾や、石灰や石膏を添加して造粒するポゾテック²⁸⁾などもある。

硬化材の添加による金属溶出の抑制に関しては、例えば、セメント、石灰、石膏によって6価クロムの溶出率が減少するとの報告がある^{29),30)}。

6.4.4 固化助剤としての石炭灰の利用

石炭灰を固化材の助剤として活用する検討も進められている。対象は軟弱地盤の改良や他種の廃棄物処理である。例えば、フライアッシュに炭酸アルミネート系塩材料とセメントを配合した固化材はへどろ処理に適している³¹⁾。流動床燃焼によって発生するフライアッシュは一般廃棄物の焼却飛灰の処理に適している³²⁾。フライアッシュ、貝殻焼却灰、脱硫石膏から製造した材料が、軟弱地盤の改良材として活用できることを確認している。こうした積極的な石炭灰の活用は、最近になって特に頻繁に報告されるようになってきている³³⁾。

6.4.5 適用事例(1) 人工島の構築¹⁵⁾

フライアッシュに4~5%のセメントを添加したスラリーを製造し、鋼管パイルで締め切った中に水底から打設しながら1基5万m³の人工島が2基建設されている。この埋立方法を採用した理由は以下の2点である。

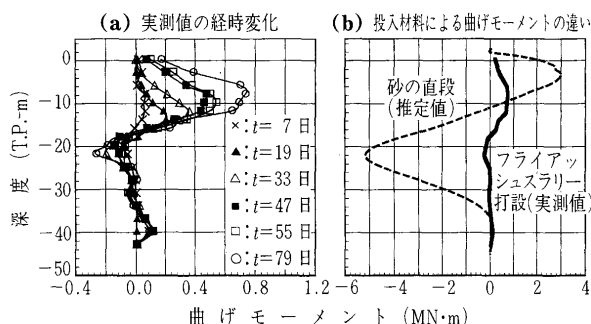
- ① スラリーは約1週間ピッチで1.5m程度ずつ打設する。スラリーは埋立て後数時間で硬化し自立するため、側圧は累積されない。事前の試算によれば、砂に比較して締め切り矢板に作用する側圧を1/4以下に軽減でき、矢板の剛性を大幅に軽減できる。
- ② セメント量を調節すれば、土工事に適した地盤強度が確保できる。

フライアッシュは現場から100km離れた火力発電所から搬入した。フライアッシュは発生する全15種を使用した。埋立地盤の均質性を確保するため、フライアッシュの種類に応じてセメント量と水分を調整した。

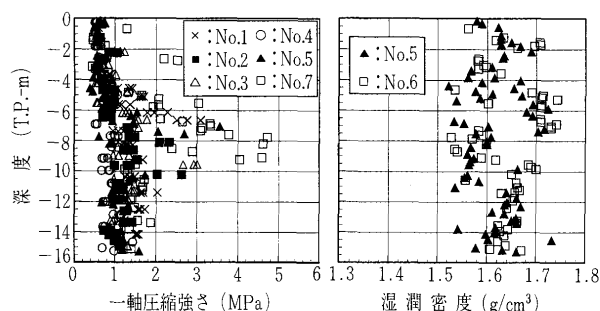
表—6.7は施工に供したフライアッシュスラリーの物性である。水分管理や混練機械に特別の注意を払ったため、施工スペックはほぼ満足できている。なお単一のフライアッシュで施工すればスラリーの品質はもっとばら

表—6.7 フライアッシュスラリーの品質

項 目	設計仕様	打設スラリーの物性	
		平均値	標準偏差
スランプ値 (cm)	8~13	10.3	0.69
浸潤密度 (g/cm^3)	1.60	1.60	0.073
28日材齢の q_u (MPa)	0.62	0.94	0.22
90日材齢の q_u (MPa)	0.84	—	—
ブリージング率 (%)	≤ 3	2.1	1.26



図—6.7 矢板に発生する曲げモーメント分布



図—6.8 フライアッシュスラリー埋立地盤の物性

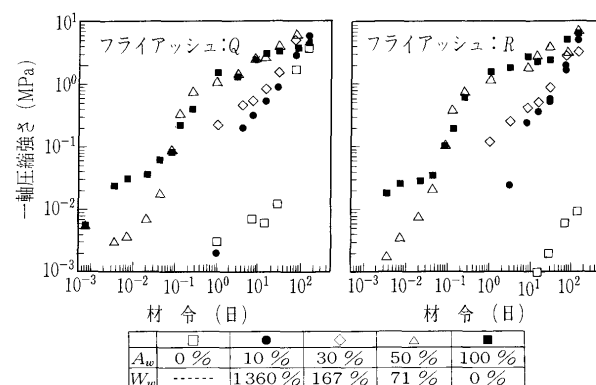
つきが少ない。スランプ値は高さ15 cmの小型スランプコーンを用いたときの値であり、水中打設には11 cm前後が適している。

図—6.7は締切り矢板に発生した曲げモーメントの分布である。埋立施工日程 t の進行に従って曲げモーメントが増加しているが最大でも0.7 MN·mであり、砂を直投した場合の最大値である5 MN·mと比較して1/7に低減できている。

図—6.8は埋立て終了後1か月時点でボーリング調査したときの結果である。No. 1~7はボーリング孔の位置を示している。強度は深度とともに増加している。これは水底から打設するために下方の材齢が上方より大きいのが原因である。またTP-8 m前後の強度が高くなっているのは、セメントの水和熱などによってこの部分の温度が高めであった影響と説明されている。湿潤密度について表—6.7と図—6.8の湿潤密度を比較すると、両者にほとんど差がなく、水中打設に伴うスラリーの乱れはほとんどなかったと推定できる。

6.4.6 適用事例(2) 裏込め注入材¹⁴⁾

トンネルやシールドへの裏込め充填材として、瞬結性を有する特殊モルタルが用いられている。フライアッシュスラリーに瞬結性を付与すれば裏込め材として活用できる可能性がある。



図—6.9 瞬結性フライアッシュスラリー

図—6.9は、2種のフライアッシュQとRを408 kg/m³、セメント233 kg/m³を主成分とするスラリーの強度発現を示している。図中の A_w は外割りの水ガラス溶液の添加率であり、セメントとの質量比である。 W_w は水ガラス溶液中の水の質量比である。セメントの凝結遅延剤を併用しているため、水ガラスを添加しない場合には強度はほとんど発現せず、材齢28日以前の強度は10⁻² MPa以下に抑えられている。これに水ガラス溶液を添加すると強度発現が促され、 A_w が50%を越えると1 min以下でも強度を発現するようになっている。

以上の結果をもとに、フライアッシュ410 kg/m³、セメント230 kg/m³を主体とするスラリーを使用した裏込め材が実際に使用され、トラブルなく施工を終了している。

6.4.7 課題

石炭灰は廃棄物の中でも比較的有效利用も進んでいる材料である。水域での利用にはスラリー化フライアッシュを適用する方向に移行しており、港湾工事や空港建設にも拡大されてゆくものと期待されている³⁴⁾。しかし現状では管理型廃棄物として法的に位置付けられている側面に留意する必要がある。すなわち、まれにはあるが石炭灰から基準をオーバーする有害物質が溶出する場合がある。また、全般的にpHが高い。こうした環境面の因子のほかに、石炭灰自体の品質のばらつきもある。いずれも、焼却灰を中心とした他の廃棄物にも共通した課題であり、適切な管理手法を用いて対処すべき事項である。

6.5 一般廃棄物焼却灰の処理と有効利用

6.5.1 灰の分類と性質

都市ごみの性状は地方や季節によって変動するものであり、それを焼却した灰の物性も石炭灰などに比べて相当ばらつきが大きい。また焼却灰の性質は焼却炉の方式や採取される場所によっても大きく異なる。図—6.10に大まかな分類を示す。

焼却炉の詳細な構造についてはここでは説明しないが、流動床炉は比較的新しい焼却方式であり全炉の7%程度を占めている。高カロリーごみに対応できクリンカーが発生しにくいなどの特長がありシェアを伸ばしている。流動床炉の場合、灰はほとんど飛灰(フライアッシュ)となり、バグフィルター等で捕捉される。一方ストロカ

講 座

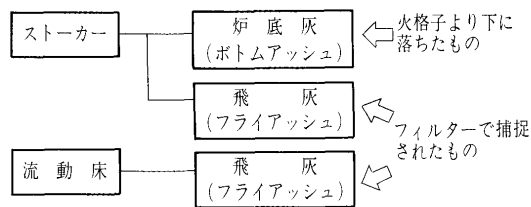


図-6.10 焼却灰の分類

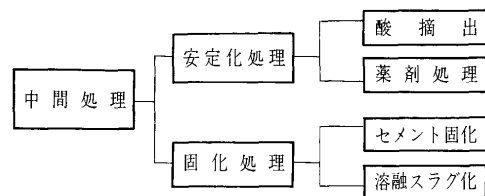


図-6.11 中間処理の分類

一炉の灰は、火格子より下に落ちたもの（ボトムアッシュ）と電気集塵機やバグフィルターで捕捉された飛灰に分けられる。飛灰は処分に当たっては中間処理が必要であるがこれについては6.5.2で述べる³⁵⁾。一方ボトムアッシュについては有害性は低いとされ無処理のまま埋立処分されている。一般に飛灰の有害性が高いとされているのは、水銀等の低融点の有害物が気化し灰に吸着されるためである。しかしながら、可燃物のほぼ100%が飛灰となる流動床炉の飛灰はストーカー炉の飛灰に比べこうした有害物質の濃度は相当低くなる。したがって灰の資源化を目指す立場からは、一律に有害な飛灰として取扱うのには問題もあると思われる。

成分分析結果の例を表-6.8に示す^{36),37)}。あくまで1例であって、これらの値は文献によって相当差があることに留意する必要がある。Cr（クロム）についてはCr⁶⁺で表示している文献もあり、まちまちなのでCr量として表記されたもののみ示してある。

Ca（カルシウム）の量は脱硫のために石灰を添加するかどうかで大きく差がでる。飛灰に関してはCl（塩素）の量が多いが、塩ビや食塩等から混入したものと考えられる。ストーカーのボトムアッシュについては大量の不燃物も混入しており平均粒子径も5 mm程度となるが流動床等の飛灰に関しては比較的粒径もそろっている。ただし粉末度で2 000～10 000 cm²/g程度はばらつく。

6.5.2 飛灰の中間処理

飛灰は平成4年度の法改正³⁵⁾に伴い特別管理一般廃棄物に指定され、中間処理した後最終処分しなければならなくなった。厚生大臣が定める中間処理方法としては図-6.11のように分類される。

表-6.8 焼却灰の成分例

成分	灰	ストーカー 炉底灰①	ストーカー 炉底灰②	ストーカー 飛灰①	ストーカー 飛灰②	流 動 床 飛灰①	流 動 床 飛灰②
Ca	(%)	13.10	11.00	32.90	9.70	30.00	15.00
Al	(%)	7.25	6.50	2.22	6.00	8.12	7.60
Fe	(%)	9.63	4.40	0.54	0.92	2.59	3.20
Na	(%)	2.39	1.10	2.37	3.70	1.89	1.90
K	(%)	0.82	1.30	2.19	5.90	1.38	2.60
Cl	(%)	0.21	1.40	14.50	11.00	5.87	8.70
SO ₄	(%)	0.49	0.84	4.21	4.20	2.94	1.80
P	(%)	0.90	0.52	0.25	0.58	0.79	0.65
Mn	(mg/kg)	1 440	1 200	1 000	340	1 740	1 000
Cu	(mg/kg)	950	2 700	790	660	2 830	4 100
Pb	(mg/kg)	730	1 100	11 500	3 100	1 640	1 400
Zn	(mg/kg)	2 730	5 100	14 000	10 000	4 860	4 400
Cd	(mg/kg)	51.8	13.0	174	110	18.9	25
Hg	(mg/kg)	0.74	0.19	2.74	23	0.35	0.66
As	(mg/kg)	15.5	6.5	37.6	28	9.9	8.3
Cr	(mg/kg)	300	—	140	—	280	—

安定化処理は、有害物質の溶出を抑えるためのものであり処理後の強度を期待するものではない。このうち酸抽出は現在あまり行われておらず、重金属固定剤（例えばキレート剤）による薬剤処理が中心である。難溶性の重金属キレート化合物を生成するため、溶出防止の性能は優れているとされている。しかしながら薬剤が高価で処理コストがかかることや灰によってはpH調整が必要となることもある。

一方、固化処理は単に溶出を抑えるのみではなく、固化体の強度がある程度期待できる処理方法であり6.5.3～6.5.4の有効利用手法とも関連してくる。熔融固化は1 200～1 400℃で灰をスラグ化するもので、処理前の容積の1/2～1/3程度まで減容でき、固化体の強度も高く溶出防止に関しても最も優れているが極めて高コストである。セメント固化は処理も単純で固化体の強度も1～3 MPa程度のものが期待でき、材料費が安いこともあって全国的に多数採用されている。

6.5.3 地盤材料としての利用

前述のセメント固化や熔融固化は中間処理の方法を示したものであり、溶出試験にパスすれば最終処分場内に捨ててもよいということであって、有効利用の方法を示したものではない。現在のところ、こうやれば有効利用できるといった指針は国からは提示されておらず、自治体等の主導で有効利用手法が模索されているといったところであろう。灰には有害物が含まれているため、未処理のまま有効利用するケースはほとんどない。過去にはボトムアッシュを路盤材として使用したり、灰の水硬性を利用して土質改良材として用いた例もあったが、溶出の問題から現在では行われていないようである。灰を直接有効利用したことにはなら

ないが、灰を埋立てた処分場を跡地利用することは多い。このため灰の埋立地盤の動的特性まで含めた詳細な検討も行われている³⁸⁾。

比較的ポピュラーな有効利用の例としては、焼結によりれんがやブロックなどを製造する方法があり、いくつかの自治体で実施されている。しかしながら製造コストが高いことや、原料である灰の品質がばらつくために製品の品質が不安定であることが問題となる。また年間数百万t以上

発生する大量の灰の処分に対応できる手法ではない。ここでは土木分野で大きな需要を期待できそうな熔融スラグ化とセメント固化に絞って話を進める。

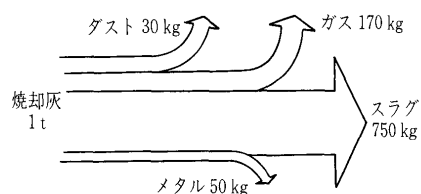
(1) 熔融スラグ化処理

灰の無害化という点に関しては熔融固化は最も優れた方法である。1 200～1 400℃で灰をガラス質のスラグに変えるものであり溶出の問題はほぼクリアされる^{39),40)}。

スラグとなる過程で灰は約1/2～1/3に減容されるため最終処分場の延命にもつながる。したがってコストが高いとされる熔融固化も、処分場の建設費用も含めて考えればそれほど割高とはいえないとする説もある。スラグには高炉スラグと同様、空冷と水淬があり路盤材などとして利用できる。熔融炉の方式には多くの種類があり、スラグの物性も炉の形式によって微妙に異なるようである。ちなみに筆者らがサンプルの提供を受けたA市のアーク熔融スラグでは比重は2.8程度であり、平均粒径を0.53 mmに調整して出荷している。地盤材料として締固めた場合の最大乾燥密度は1.7 g/cm³程度であった。溶出試験はすべての項目にわたり十分な余裕をもってクリアしている。しかし熔融固化にも問題は残されている。図—6.12に示す代表的な熔融の物質収支によれば、灰がすべてスラグ化するわけではなく、熔融の過程で飛灰や排ガスが発生することが分かる。この時発生する熔融飛灰は有害物質の含有率が極めて高く、特殊な薬剤を用いなければ処分できない。すなわち熔融固化は処分法としてそれ自体完結しておらず、処理の過程でさらに有害な物質を排出することがわかる。またスラグの品質が灰の物性のばらつきの影響を受けうまくガラス化しないこともあるようで、連続稼働しているプラントは少ないようである。現状では熔融処理されているのはボトムアッシュのみであり飛灰の熔融は技術的にも難しいようである。熔融処理はイニシャルコストも高いが、電力を大量に消費する。二酸化炭素の排出量削減が叫ばれる今日、ほとんどのごみ焼却場では余熱を利用した発電が行われ、一部は電力会社へ売電を行っている。このようにごみから苦労して回収したエネルギーを熔融固化で簡単に消費してしまうことにはいささか疑問を感じざるを得ない。製造されるスラグが単なる砂利の代替でしかなく付加価値が低いことも問題である。

(2) セメント固化処理

セメント固化は古くから実績のある方法であり、コストが安いのが特長である。単にセメントで固めただけでは付加価値は低い、細かな気泡を混入してエアミルクの形にすることで、最終処分場の覆土に利用したり⁴¹⁾、軽量盛土材として利用する方法⁴²⁾が提案されている。



図—6.12 熔融固化の物質収支の1例

表—6.9 セメント固化体の溶出特性

灰の種類	セメント量 (kg/m ³)	溶出量 (mg/l)				
		Pb	Cd	Hg	Cr ⁶⁺	AS
飛灰 A	150	0.1	0.01	0.001以下	0.01以下	0.01以下
飛灰 B	100	0.05以下	0.01以下	0.0005以下	0.09	0.02以下
飛灰 C	120	0.15	0.01以下	0.0005以下	0.13	0.02以下

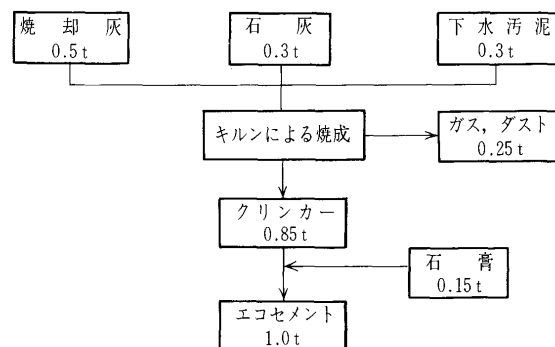
通常はセメントの添加量10～15%程度で溶出基準をクリアできるようである。嘉門ら⁴³⁾はEP灰（電気集塵機灰）と流動床石灰灰を混合固化処理したものが耐水性に優れ重金属の溶出も少なく土木材料として利用できることを示した。花嶋ら⁴⁴⁾はセメント固化体からの溶出を長期的に測定し重金属の溶出が長期にわたり極めて低いことを示している。また阿部ら⁴⁵⁾はエトリンナイト系の超速硬セメントが溶出抑制効果が極めて大きいことを示した。表—6.9に飛灰固化体の溶出試験結果の1例を示す。しかしながら長期的な品質に関しては疑問の声もある。

セメント固化体の溶出防止機能についてはおおむね肯定的な意見が多いが、セメント固化体をそのまま建材利用できるとする考え方は全体としては少数派と言える。

セメント固化は処理に際してエネルギー消費が少なく、得られた固化体は土木材料として大量の需要が期待できるというほかにない特長がある。最近Pb（鉛）の溶出基準がかなり厳しくなったためセメント固化に対しては必ずしも追い風というわけではないが、セメントメーカー各社より新基準に対応した固化材が登場している。

6.5.4 エコセメントとしての利用

エコセメントは焼却灰を原料に製造された特殊なセメントである⁴⁶⁾。ポルトランドセメントとの大きな違いは塩素を取り込んだアリナイト $\text{Ca}_{21}\text{Mg}[(\text{Si}_{0.75}\text{Al}_{0.25})\text{O}_4]_8\text{O}_4\text{Cl}_2$ と呼ばれる鉱物を主成分とすることにある。塩素分が多いためJIS規格外となり、鉄筋を含む構造物には使用できない。しかしながら、セメントという付加価値の高いものをごみの灰から作り出せることは魅力的である。また通常のセメントと同様にキルンで焼成するため低融点の重金属類は塩化物としてダストに回収されるので、溶出に関しては極めて安定しており通常のポルトランドセメントと同様の扱いが可能である。エコセメントは通産省の主導で開発が進んでおり、現在実証プラント



図—6.13 エコセメントの製造プロセス

講 座

が稼働中である。エコセメントの原料および製造プロセスを図—6.13に示す。

大部分が廃棄物から製造されていることが分かる。エネルギー消費も熔融固化よりは小さいとされており、有効利用の手法としてはかなり期待できるものと言えよう。

6.5.5 今後の課題

高効率のごみ発電が各地で実施されるようになりつつあり、ごみを燃料としてとらえ効率良くエネルギーを回収するという考え方が広まってきた。またごみから固形燃料 (RDF) をつくる試み⁴⁷⁾も行われている。このようにごみからエネルギーを回収するという考え方が認知される一方で、焼却灰の有効利用は一向に進んでいない。全国どこの自治体においても最終処分場の不足は深刻な問題となっており、新しい処分場の建設も思うにまかせないのが実情である。捨てる所がない以上有効利用していく以外に道はなく、いたずらに危険性をあおり立てるのではなく現状を少しでも改善していくための冷静な努力が望まれる。たとえ有害なものが含まれているにせよ、それが外部に漏れるのを抑えながら可能な限り有効利用していくこと、また一般廃棄物は一般家庭から排出されたものにはかならず、分別収集を徹底すれば有害物を取り除けることなどを一般向けに PR し、有効利用に関する社会的なコンセンサスを作り上げていくことが重要であろう。

参 考 文 献

- 11) Gray, D.H. and Lin, Y.K.: Engineering Properties of Compacted Fly Ash, J. Soil Mechanics and Foundations Div., Proc. ASCE, pp. 361~380, 1972.
- 12) 鴻池組: 多孔質体の緑化用土壌材料としての評価, (株)鴻池組資料, 1994.
- 13) 檜垣寛司・牧本有功・菊地秀明・阿曾康夫・四家 隆: 泥水シールドの同時裏込材としての石炭灰の利用, 第1回環境地盤工学シンポジウム, pp. 195~200, 1994.
- 14) Horiuchi, S., Odawara, T. and Takiwaki, H.: Coal Fly Ash Slurries for Back-filling, Waste Materials in Construction, Elsevier Science Publishers, pp. 545~552, 1991.
- 15) Kawasaki, H., Horiuchi, S., Akatsuka, M. and Sano, S.: Fly-Ash Slurry Island: II. Construction in Hakucho Ohashi Project, J. Material Engineering, ASCE, 4(2), pp. 134~152, 1992.
- 16) 塩谷平八郎・堀内澄夫・古谷俊明・大石新一郎: ビル構築における特殊フライアッシュセメント軽量盛土の利用, 土と基礎, Vol. 40, No. 12, pp. 29~34, 1992.
- 17) 土木学会新エネルギー技術小委員会: 石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望, 1990.
- 18) 玉貫 滋ほか: 石炭灰処理システムと有効利用技術, フジテクノシステム, 1981.
- 19) Sugimoto, T., Ohguchi, I. and Horiuchi, S.: Effective Method for Underwater Disposal of Coal Fly Ash, Proc. 2nd Int. Symp. Environmental Geotechnology, Vol. 1, pp. 428~437, 1989.
- 20) 三木五三郎: 石炭灰による土地造成の問題点, 材料, Vol. 19, No. 205, pp. 900~904, 1970.
- 21) 三木五三郎・今井五郎・秋谷 元・斉藤敏樹・土居洋一: 石炭灰の液状化特性, 第20回土質工学研究発表会, pp. 613~614, 1985.
- 22) 安原一哉・平尾和年・堀内澄夫: 石炭灰の埋立て地盤への有効利用に関する基礎的研究, 第34回土質工学シンポジウム, pp. 341~348, 1989.
- 23) Horiuchi, S., Tamaoki, K. and Yasuhara, K.: Coal Ash Slurry for Effective Underwater Disposal, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 1, pp. 1~10, 1995.
- 24) Theis, T.L. and Marley, J.J.: Environmental Considerations for Flyash Disposal, Proc. ASCE, Journal of the Energy Div. EY1, 14286, pp. 47~61, 1979.
- 25) 秋谷 元・花見浩二・則武邦具・鳥生 晃・土居洋一: 石炭灰の新しい有効利用技術, 土木施工, Vol. 27, No. 6, pp. 81~86, 1986.
- 26) 嘉門雅史・勝見 武・今西秀公: 流動床ボイラー石炭灰の固化処理による有効利用, 廃棄物埋立地盤の跡地利用に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp. 89~94, 1991.
- 27) 住友建設: アッシュコラム工法.
- 28) 三井物産: ポゾテックパンフレット.
- 29) 村山嘉郎: 石炭灰硬化体の溶出試験結果, 東北電力研究期報, No. 52, pp. 12~22, 1983.
- 30) 村山嘉郎: 石炭灰一鉱さい硬化体の溶出試験, 東北電力研究期報, No. 53, pp. 29~33, 1984.
- 31) 嘉門雅史・友久誠司・壺内賢一: 各種廃棄物のセメント系固化材による有効利用, セメント技術年報, pp. 98~101, 1987.
- 32) 嘉門雅史・勝見 武・佐野陽一: 一般廃棄物焼却飛灰の固化処理, 第1回環境地盤工学シンポジウム, pp. 231~238, 1994.
- 33) 高橋守男・土居洋一・三上 博: 火力発電所副産物の地盤改良材への利用に関する研究, 第1回環境地盤工学シンポジウム, pp. 223~230, 1994.
- 34) 高橋邦夫: 港湾・空港資材への石炭灰の利用, 第1回石炭灰の有効利用セミナー土工材料としての大量利用技術開発一講演集, 石炭利用総合センター, pp. 17~30, 1995.
- 35) 特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物の処分又は再生の方法として厚生大臣が定める方法, 平成4年7月3日, 厚生省告示第194号.
- 36) 平岡正勝・酒井伸一: ごみ焼却灰の性状と処理技術の展望, 廃棄物学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 3~17, 1994.
- 37) 安藤 茂・小林陽一: 特別管理一般廃棄物であるばいじんの適性処理に関して, 廃棄物学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 18~31, 1994.
- 38) 岩谷文方・三宅達夫・和田真郷・丸山敦司: 尼崎沖フェニックスにおける焼却灰の力学特性, 土と基礎, Vol. 40, No. 6, pp. 5~10, 1992.
- 39) 柴田 清・劉 大偉・西垣正秀・野上晴男: 表面熔融炉によるばいじん・不燃物の混合熔融, 第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 339~342, 1994.
- 40) 木村哲雄・上林史郎・山口茂樹: 熔融法による飛灰処理技術と実際例, PPM, Vol. 25, No. 1, pp. 32~38, 1994.
- 41) 田代晃一・菊地慎二・森 國夫・河内山謙司: 焼却灰を用いた廃棄物最終処分場の覆土材の開発, 日本国土開発技術研究報, No. 13, pp. 107~111, 1994.
- 42) 神田 亨・中村正博: RDF 焼却灰のセメント固化に関する研究, 土木学会第48回年次学術講演会, 第V部門, pp. 183~184, 1993.
- 43) 嘉門雅史: 一般廃棄物焼却飛灰の固化処理と有効利用について, PPM, Vol. 25, No. 1, pp. 62~66, 1994.
- 44) 島岡隆行・花嶋正孝: セメント固化による安定化飛灰の埋立処分特性, 廃棄物学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 32~45, 1994.
- 45) 阿部雄二: セメント固化法による飛灰処理技術と実際例, PPM, Vol. 25, No. 1, pp. 18~31, 1994.
- 46) 土田良明・武広 実・上保知伸・宇智田俊一郎: 都市ゴミ灰を用いて調整した高アリナイト系セメントの水和反応, 第49回セメント技術大会講演集, pp. 96~101, 1995.
- 47) 羽田寿夫: 都市ごみ発電・高効率化の最近の動向, 産業公害, Vol. 29, No. 8, pp. 47~61, 1993.