

第2章 石炭灰有効利用拡大の効果

2.1 石炭灰有効利用の現状

2.1.1 発生量と有効利用量

石炭灰は、主に電気事業の石炭火力発電所から発生するほか、一般産業（化学、パルプ産業）からも発生しており、平成12年度には全産業合計で842万t（内訳は、電気事業632万t、一般産業210万tである）が発生している。そのうち、約700万tが有効活用されている¹⁾。

平成12年度までの石炭灰発生・利用の状況を図-2.1.1に示す。埋立処分地の確保が難しくなる中で、各方面におけるこれまでの石炭灰有効活用の取組みを反映して、埋立処分量は減少傾向にあるものの、現在でも、年間約150万tが埋立処分されている。

今後も電気事業者による大型石炭火力発電所や卸供給事業者（IPP）の石炭火力発電所の新・増設が続き、石炭灰の排出量の増加が見込まれている。しかし、石炭灰埋立量は灰処分場の確保が困難となってきていることから、既存の灰処分場の延命化や埋立て以外の有効利用方法の拡大を図る必要がある。

2.1.2 石炭灰の有効利用分野

石炭灰の有効利用については、1955年頃から石炭灰の資源としての有効性が着目されはじめ、当初これをコンクリート用混和材とすることから研究が進められ、その結果、信頼性が特に要求されるダムに活用され始めた。その後、1970年代に至り、石油火力が石炭火力に取って代って以来、石炭灰の発生量が減り、一時その利用技術開発が停滞したが、2回の石油危機以降再び石炭への燃料転換および新規石炭火力発電所建設の機運が高まり、海外炭の導入と相俟って石炭灰の発生量が年々増加する情勢に変わってきた。現在では、ダム、橋梁、水力・火力・原子力発電所など大型構造物に大量に使用されているに至っており、また建材、道路材料、肥料、地盤改良材など身近なものにも活用されている。

石炭灰の利用分野を表-2.1.1に、図-2.1.2に有効利用分野の比率（平成12年度）を示すが、石炭灰は、セメント・コンクリート分野、土木分野、建築分野、農林・水産分野など多岐に亘って資材や原料として利用されている。主な利用分野は、セメント・コンクリート分野であり、7割を占めている。

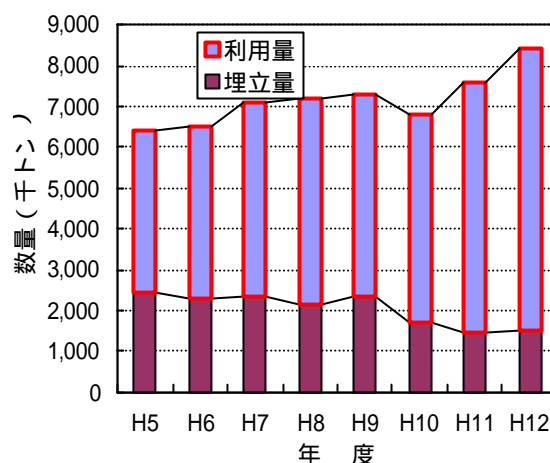


図-2.1.1 石炭灰の有効利用状況（全産業）¹⁾

表 - 2.1.1 石炭灰の有効利用分野¹⁾

| 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 |

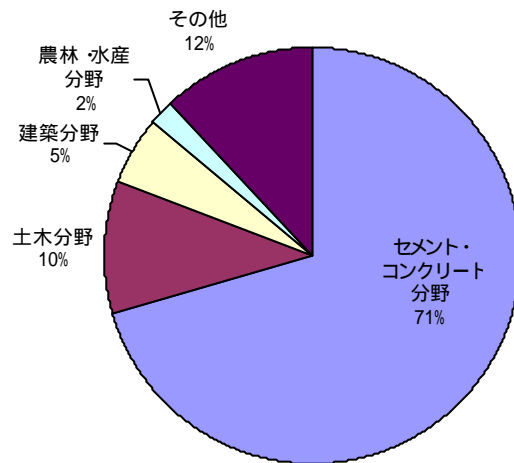


図 - 2.1.2 石炭灰の有効利用状況
(平成12年度実績、全産業)¹⁾

2.2 利用対象分野の現状と見通し

利用分野別に平成12年度までの有効利用量を表-2.2.1に示す。さらに、以下で、分野ごとに有効利用の見通しを推察する。

表 - 2.2.1 分野別有効利用量¹⁾ (千t)

| | H5 | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | H12 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| セメント・コンクリート分野 | 2,831 | 2,684 | 3,117 | 3,295 | 3,230 | 3,620 | 4,129 | 4,892 |
| 土木分野 | 583 | 427 | 479 | 547 | 503 | 359 | 683 | 703 |
| 建築分野 | 254 | 320 | 289 | 384 | 356 | 289 | 283 | 364 |
| 農林・水産分野 | 99 | 165 | 139 | 95 | 93 | 89 | 131 | 144 |
| その他 | 188 | 619 | 758 | 737 | 776 | 733 | 909 | 828 |
| 計 | 3,955 | 4,215 | 4,782 | 5,058 | 4,958 | 5,090 | 6,135 | 6,931 |

2.2.1 セメント・コンクリート分野における利用

現在、石炭灰が最も多く利用されている分野は、セメント・コンクリート分野である。年間 490 万 t（平成 12 年度）も利用されており、電気事業から発生する石炭灰の 50%、電気事業以外の一般産業から発生する石炭灰の 75%がこの分野において利用されている。

(1)ポルトランドセメント原料

セメント製造原料として使用される粘土の、資源としての枯渇化および原料としての価格高騰に対応するために、粘土と構成成分が比較的近い石炭灰が代替材料として利用されている。

セメント原料として平成 12 年度実績で約 4,400 千 t 程度の石炭灰が利用されている。普通ポルトランドセメントへの石炭灰の利用可能量は、セメント製造量に対して 9.5%程度といわれており、既に可能量の約 60%に達している。

ただし、近年は、図 - 2.2.1 に示すように、建設需要の低迷からセメント製造量が減少してきていることから、今後、セメント製造における石炭灰の利用可能量の増加は見込めない。このことから、セメント製造分野への石炭灰の供給は飽和状態に近づいているとの見方もある。

(2)フライアッシュセメント原料

フライアッシュセメントは、普通ポルトランドセメントに、5%~30%のフライアッシュ（JIS 規格品）を混合して製造された混合セメントであり、アルカリ骨材反応の抑制や、マスコンクリートの発熱抑制に

効果を持つが、品種別セメント生産高によると平成 13 年の全セメント量実績（セメント年鑑より）75,566 千 t のうち、わずか 392 千 t（0.5%）であり、同様の効果を持つ高炉セメント 17,710 千 t（23%）と比較しても需要ははるかに少なく、図 - 2.2.2 に示すようにフライアッシュセメント用のフライアッシュ利用量も低迷している。

高炉セメントは混合材として高炉スラグ微粉末を用いた混合セメントである。混合比率が 30~60%（B種）と高いことや、製鉄所毎のスラグの品質に差が少ないことにより低コストでの製造が可能であり、表 - 2.2.2 に示すように、高炉セメントはフライアッシュセメントより低価格で供給されている。このことがフライアッシュセメントの需要が伸びな

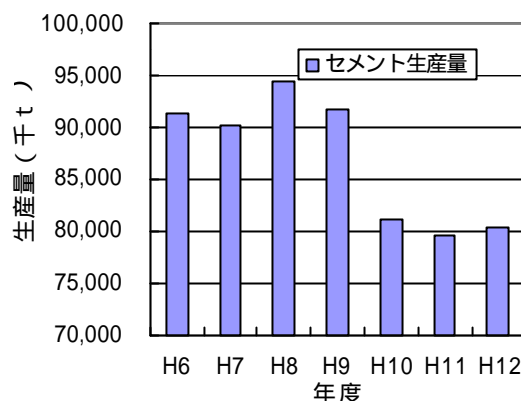


図 - 2.2.1 セメント生産量の推移²⁾

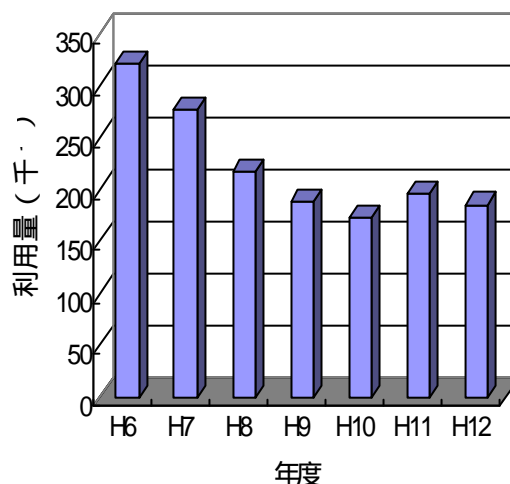


図 - 2.2.2 フライアッシュセメント用フライアッシュ利用量の推移²⁾

表 - 2.2.2 セメント価格²⁾

| | (円/t) | |
|-----------------|-------|-------|
| | H12 | H13 |
| 高炉セメント(B種) | 8,150 | 8,375 |
| フライアッシュセメント(B種) | 8,550 | 8,775 |

い一つの大きな要因であると考えられる。

(3) コンクリート用混和材

フライアッシュは、コンクリートのワーカビリティの改善やアルカリ骨材反応抑制、水密性・耐久性の向上、水和熱の抑制などの効果を目的として、混和材としてダム本体等のマスコンクリートや、海水・汚水と接すること等により耐久性を要する構造物に利用されてきたが、近年では吹き付けコンクリートや、高流動コンクリート等へ適用され、利用用途が拡大している。

図 - 2.2.3 にコンクリート用混和材としてのフライアッシュ利用量の推移を示すが、利用量は暫増傾向にあるものの、年間 140 千 t 程度であり、コンクリート全体の需要の中での比率は極めて小さい。要因として、品質の変動に対する対応、オーダーへの即応体制等の課題がある。一般的に生コン工場ではフライアッシュ用のサイロが無いいため、発注者からの要求の都度フライアッシュを混和したコンクリートの製造を行う場合が多い。このことから一般の市場に出にくい環境にあるといえる。

また、フライアッシュ混合コンクリートの短所として強度発現が遅く、養生に期間を要することも市場流通を阻害する要因と考えられる。

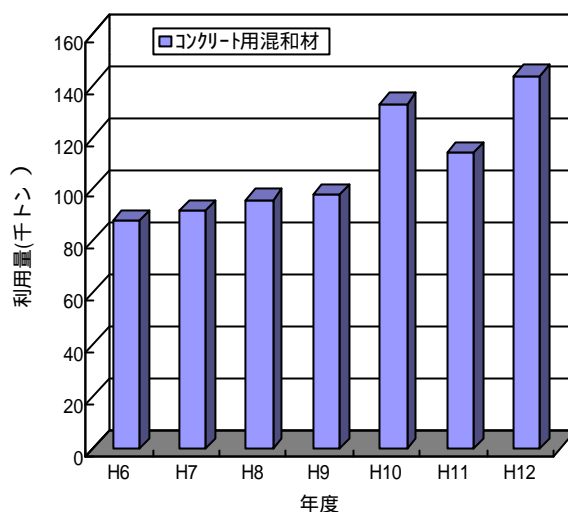


図 - 2.2.3 石炭灰有効利用量の推移 (コンクリート用混和材用) 1)

2.2.2 土木分野の利用

土木分野全体において石炭灰は年間約 700 千 t (平成 12 年度) 利用されており、石炭灰発生量の 8 % 程度を占めている。

図 - 2.2.4 に土木分野における石炭灰の有効利用量の内訳と推移を示す。利用用途としては主に路盤材料、地盤改良材、炭坑復元材、アスファルトフィラーである。さらに、近年、海砂代替材等の多岐にわたる利用が以下のように進められており、土木分野への利用量は増加傾向にあるといえる。

フライアッシュについては、フライアッシュの吸水性や化学反応性を利用して、土砂やセメント等と混合し、軽量盛土材や擁壁裏込め材、固

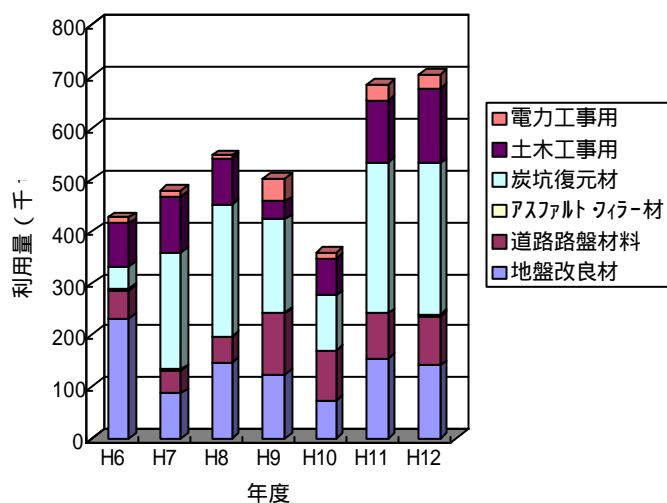


図 - 2.2.4 石炭灰有効利用量(土木分野)の推移 1)

化盤の造成、海中盛土による築堤等に代表される土砂代替材として用いられている。また、不良土や浚渫土との混合により土質の改良や、建設汚泥の再生利用にも利用されている。

クリンカアッシュについては、道路路盤材に利用される他、その透水性、保水性を活かしてゴルフ場やグラウンドの排水材として、寒冷地においては凍上抑制層材としての利用実績もある。

また、フライアッシュにセメントと適量の水を加えて造粒し、固化体を製造する技術が開発されている。この材料は下層路盤材として使用できるほか、海砂の代替材としてサンドコンパクションやサンドドレンの中詰め砂材として利用されており、今後、販路拡大が期待されている。

現在、建設工事で利用される土砂量は年間約 15,000 万 m³（うち購入土は平成 12 年度実績で約 7,100 万 m³）である³⁾。また、碎石、砂利、砂等の全体需要はコンクリート用を除いても年間約 2 億 t である⁴⁾。このように、土木分野における土砂や碎石の需要は非常に規模が大きいため、石炭灰の土砂代替、骨材代替の分野への利用の拡大については 100 万 t 規模の参入でもインパクトは小さく、大きな参入余地が残されているといえる。ただし、セメント・コンクリート分野での利用に比べると新しい用途でもあり、利用者の認知を得ながら、徐々に供給体制を整備する必要がある。建設業界では、全土砂利用量に占める購入土比率が大きい（46%）ことや、海砂の枯渇による採取の制限、建設汚泥の再資源化率の低迷等の課題を抱えるが、石炭灰の土木工事への利用はこれらの諸問題の解決へも貢献出来るものと考えられる。

土木用コンクリート製品へのフライアッシュの利用については（実績については、図 - 2.2.6 に二次製品への実績として建築資材分と合せて示す）消波ブロックや護岸根固めブロック、魚礁などであるが、従来、それらの各種ブロックの製造材料は、フライアッシュを混和材としたコンクリートが多く利用されている。近年、セメントに石炭灰と鉄鋼スラグを混合し、海水で練り混ぜ、振動台締め固めや型枠外壁振動締め固めによるブロック製造技術が実用化されている。

護岸用コンクリートブロックの需要は、図 - 2.2.5 に示すように、近年において減少傾向であり、平成 12 年実績で年間 3,000 千 t 程度が生産されている。このことから石炭灰の有効利用量に関しては約 500 ~ 600 千 t（総量の 20% 程度）が限度かと思われるが、今後、魚礁やマウンド漁場造成技術の方面への適用が進むことで、利用量が拡大すると考えられる。

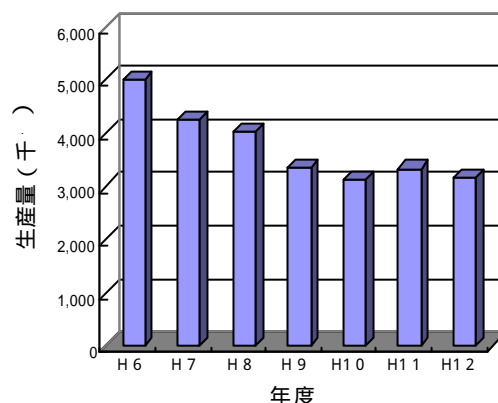


図 - 2.2.5 護岸用コンクリートブロック生産量の推移⁵⁾

2.2.3 建築資材分野の利用

建築資材分野での石炭灰の利用は、建材ボード（外壁ボード）、人工軽量骨材、コンクリート製品（二次製品）が主なもので、年間 30 ~ 35 万 t 程度の利用量である。図 - 2.2.6 に建築資材への石炭灰有効利用の内訳を示す。ほとんどが建材ボードの原料として利用され

てきている状況である。

建材ボードの原料は、セメントとパルプ材および石炭灰でほぼ構成されており、石炭灰は平成12年度実績で約300千tが利用されており、過去から需要量も安定している。

建材ボード以外の人工軽量骨材、コンクリート製品については、技術的な課題が多いことや、需要の減少が影響し、近年は需要が低迷している状況である。

2.2.4 農林・水産分野の利用

農業・水産分野において石炭灰は肥料、土壌改良材、融雪剤等に年間約14万t（平成12年度）利用されている。

肥料用には年間4万t程度が安定的に有効利用されている。肥料の年間生産量は普通肥料、特殊肥料合計で約15,000千tレベルであり⁶⁾、需要の変動も少ないが、肥料の種類が用途によって多種多様であることから、石炭灰を利用した肥料の高いシェアの獲得は難しいと思われる。

今後、石炭灰の保水性などを活用した屋上緑化基材や、土壌改良材として一層の利用が進むことが期待されている。

2.2.5 その他分野の利用

石炭灰は、従来は埋立材料やセメント原料として単に原料として利用されてきたが、今後は、石炭灰の化学的構成や保水性、吸着性、軽量性などの特徴を活かした製品の開発が石炭灰の利用促進につながると考えられる。

その一部の開発事例としては、人工ゼオライトや水質浄化材などが挙げられる。

特に人工ゼオライトは実用化されており、将来の農園材や水質浄化、土壌浄化技術に寄与するのではないかと期待されている。この人工ゼオライトを用いた製品開発が今後の課題であり、この製品開発が進めば石炭灰の有効利用が更に拡大する可能性がある。

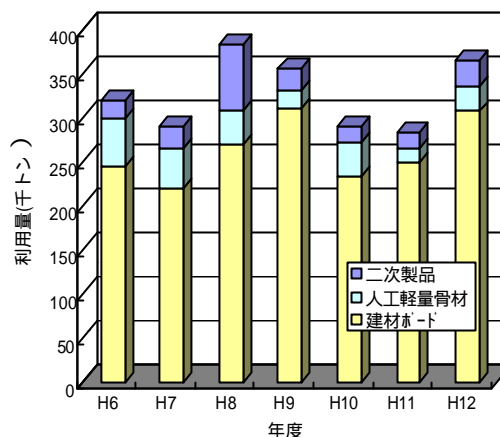


図 - 2.2.6 石炭灰有効利用量の推移（建築資材用）¹⁾

2.3 有効利用の現状の課題

前述のように石炭灰の利用は大きくセメント分野に依存しているが、ここでは、その状況およびその高い依存性の持つ課題について述べる。

2.3.1 セメント依存の現状

図 - 2.3.1 に平成 6 年度から 12 年度までの全国のセメント分野での石炭灰の利用量の推移を示す¹⁾。利用項目の内訳は、セメント原料材(主に粘土代替利用)が殆どで、セメント混合材(フライアッシュセメント用、普通ポルトランドセメントの少量混合材(5%以下))、コンクリート用混和材(レディーミクストコンクリート用混和材料)と続いている。平成 6 年度にセメント分野の中で 82% 占めていたセメント原料材用が平成 12 年度には 89% 以上にも増加している。産業別では、総量の 2 / 3 を電気事業が占め、残りを一般産業が占めている。

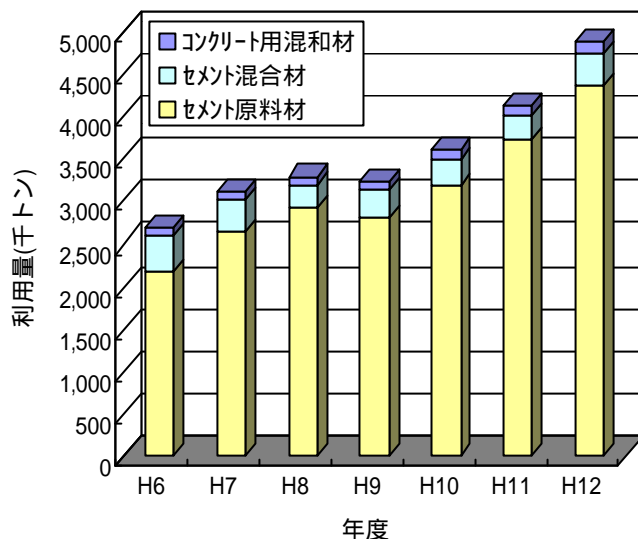


図 - 2.3.1 全国のセメント分野利用量

一方、セメント産業におけるセメント生産量の推移⁷⁾を図 - 2.3.2 に示す。同図から、セメント生産量はピーク時の 1996 年度(平成 8 年度)に 99,267 千トンに達し、同時に内需のピークは 82,417 千トンに達したがその後減少している。最近の見通しによれば、2002 年度の内需見通しを 64,000 千トン強としている⁸⁾が、これは、70 年代の水準といえる。このような平成 8 年度以降のセメント生産量の急激な減少にも係わらず、

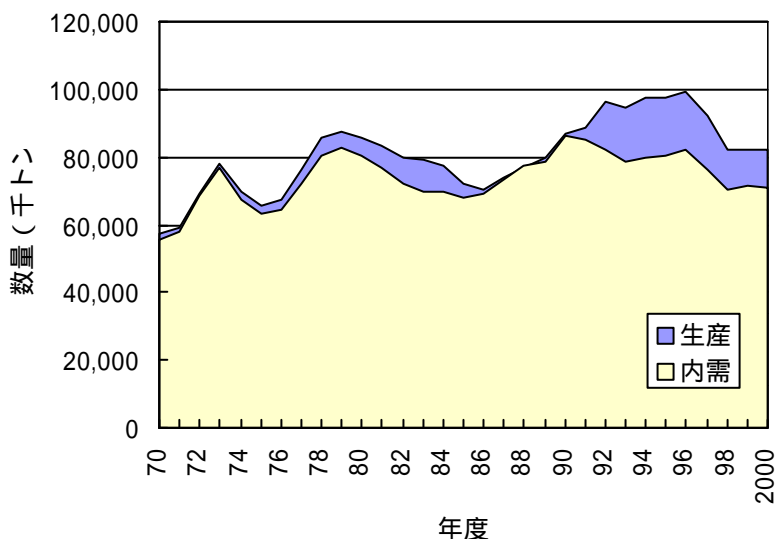


図 - 2.3.2 セメント生産量と内需量

図 - 2.3.1 に示すように、セメント分野の石炭灰利用量は順調に増加していった。セメント原料材以外の用途での利用量は殆ど変化がないことから、セメント原料材での利用が促進されたといえる。

2.3.2 セメント依存への課題

前項に示したように石炭灰は大きくセメント産業に依存しているわけであるが、ここでは、その体制への注意喚起を促す指摘⁹⁾を紹介する。

石炭灰は現在、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 - 2.3.3 に示すように石炭灰発生量の急激な増加に対して、セメントの生産量自体は減少傾向にあり、将来的にもセメント生産量の飛躍的な増大は期待できない。

またセメント1トンを製造するために約200kgの粘土を使用するが、石炭灰は粘土と比較してシリカ分(SiO_2)が少なく、アルミナ分(Al_2O_3)が多いことから、粘土の40~50%が代替の限度であると

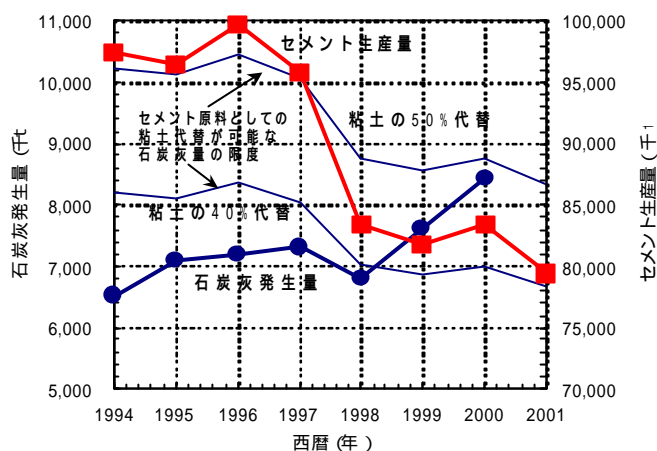


図 - 2.3.3 国内の石炭灰発生量とセメント生産量⁹⁾

されている。図 - 2.3.3 中にこのようにして算定したセメント原料としての粘土代替が可能な石炭灰量を併記している。同図から、セメント原料としての利用だけでは石炭灰の全量使用はすでに厳しい状況に近づいていることが明らかである。

図-2.3.3 に示すように、セメント生産高の減少と石炭火力発電所の新・増設に伴う石炭灰発生量の増大に伴い、その発生量をセメント1tあたりに占める石炭灰利用期待量(電気事業分)として試算すると、平成8年度に約20kg/t(粘土代替率約10%)であったものが、平成13年度には約50kg/t(約23%)と5年間で2倍以上の値となっており、急激な高まりを見せている。

セメント分野において、石炭灰を混和材として有効に活用できるフライアッシュセメントやフライアッシュコンクリートについては、ダムコンクリートのように低発熱を求める場合などフライアッシュの特性を必要とするなど、コンクリートを大量に使用するプロジェクトや地域限定的な利用が主体であり、広く一般市場で流通しているとはいえない。このため、主たるセメント分野への活用方法は、セメントの粘土代替材としての活用となっている現状にある。セメントの粘土代替材としての有効利用(再生利用)は、廃掃法上は中間処理の形態による廃棄物処理である。排出事業者としては、処理委託費を支出する必要があるものであるが、このような状況から排出事業者である電気事業の処理費支出も増大せざるを得ないのが現状である。

一方、近年一般廃棄物焼却灰を主たる粘土代替材とするエコセメント、セメントの塩化物含有量緩和のJIS改正にみられるように、セメント原料代替は各種廃棄物・焼却灰等の利用においても有望な処理委託先として注目されている。これら各種廃棄物・焼却灰等は、成分的な問題等により1t当たり1~2万円の処理費が必要とされているが、セメント原料以外の有効な活用先がなく、埋立処分も進まない現状においてこれらの廃棄物のセメン

ト原料への利用は、循環型社会形成推進の重要な一翼を担うことが期待されてきている。

このように、石炭灰以外の廃棄物の処理問題および公共事業の縮減に伴うセメント生産量の縮小という社会情勢を鑑みた場合、粘土代替を中心としたセメント原料への石炭灰の有効利用は、排出事業にとっては従来の大量・安定的な有効利用分野という位置付けから、今後は安定的ではあるが経済性の悪化 = 量的制約を考慮せざるを得ない有効利用分野という位置付けに変化していく方向であると考えられる。

表 - 2.3.1 に、年間の石炭灰の用途別利用状況を示す。石炭灰の利用はセメント原料と建材という一部の分野に留まっており、セメント・コンクリートの分野でもフライアッシュセメントや混和材の用途に、また、土木分野および農業分野の殆どの用途に、まだ利用拡大の余地が十分残されていることが分かる。これらの分野での利用拡大が課題である。

表 - 2.3.1 石炭灰の用途別利用の状況

| 利用分野 | 用途 | 製造量 (需要) | 石炭灰混入単位量 | 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t (全セメント) | 9.5% セメント粘土 代替及び少量混合 | 7,600千t | 4,400千t | 58% |
| | FAセメント用 混合材 | 12,000千t (FAセメント, シェア を15%と想定) | 15% | 1,800千t | 186千t | 10% |
| | コンクリート用 混和材 | 116,000千m ³ (生コン, シェア10%と想定) | 50kg/m ³ | 5,800千t | 140千t | 2% |
| 土木分野 | 盛土材 | 71,000千m ³ (全購入土) | - | - | 400千t | 1% |
| | 地盤改良材 | 5,000千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t | 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t | 10% | 450千t | 300千t | 67% |
| 農業分野 | 肥料 | 15,000千t (全肥料) | - | - | 40千t | 0.3% |

2.4 石炭灰有効利用拡大による効果

2.4.1 循環型社会形成への寄与

(1)循環型社会形成の数値目標達成への寄与

我が国は、21世紀の経済社会のあり方として「循環型社会」を提起し、平成12年6月には循環型社会形成基本法が制定された。また、この循環基本法と一体的に改正廃棄物処理法、資源有効利用促進法（リサイクル法の改正）、建設リサイクル法、グリーン購入法などが成立し、循環型社会の形成に向けた取り組みを推進する基盤が整備されつつある。さらに、政府は、循環型社会の形成に関する施策の総合的かつ計画的推進を図るための基本計画（循環型社会形成推進基本計画）¹⁰⁾を平成15年度に決定した。

この計画の特徴は、これから10年間の枠組みを示すもので、あるべき姿、マテリアル・フローについての10年後（平成22年度）の数値目標、国の取り組みと事業者等の役割を明示していることである。

マテリアル・フローについての数値目標は、以下の3つである。

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| 資源生産性 = GDP / 天然資源等投入量 | 約 39 万円/t |
| | (平成12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% (平成12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 |
| | (平成12年度から概ね半減) |

「資源生産性」は、産業や人々の生活がいかにものを有効に利用しているかを総合的に表す指標で、天然資源等はその有限性や採取に伴う環境負荷が生じること、また、それらが最終的には廃棄物等になることから、少ない投入量で効率的にGDP（国民総生産）を生み出す（表現を変えると、僅かなエネルギーでより高い製品性能を実現する）よう、増加が望まれている。

石炭灰は大量に発生する副産物であり、天然資源消費量を削減するような利用法の促進、再利用率の向上（最終処分量の削減）により、この目標実現へいくらか貢献出来ると考えられる。概略値は以下のとおりである。

平成12年度における資源生産性は、1,912百万tの天然資源等投入により、約28万円/tとなっている。平成12年度において埋立て処分されている石炭灰は約150万tであるが、これを全量有効利用することで天然資源等投入量が節減されたとすると、1,912百万t 1,910.5百万tとなり、結果として資源生産性は280.2千円となる。これにより200円/tすなわち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、218百万t 219.5百万tと見積もられ、循環利用率0.1%の上昇に寄与することとなる。また、最終処分量は約56百万t 54.5百万tと見積もられ2.7%の低下に寄与することになる。

(2)他産業廃棄物のリサイクルへの貢献

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それぞれについて、石炭灰の利用によるリサイクル例

を表 - 2.4.1 に示す。

NA クリートは石炭灰と共に、鉄鋼業界から産する高比重スラグを積極的に使用した重量コンクリートである¹¹⁾。石炭灰とスラグを骨材として利用し、セメント量を従来のコンクリートに比べて半減させたコンクリートで、消波ブロックに採用されている。このコンクリート製品には従来のコンクリートと比較して、海水中でも硬化作用が続くために摩耗量が著しく少ない上、アルカリ性が低いためにヨコエビ等海生生物が付着し易いという特徴がある。

セメントコンクリートの分野では、不安定な鉱物相を有し、膨張性のある製鋼スラグの使用を禁じていたが、FS コンクリートでは、フライアッシュとの併用で製鋼スラグのコンクリートへの利用が可能になった¹²⁾。フライアッシュを製鋼スラグの30%程使用することで製鋼スラグの膨張を抑制する効果があったためである。護岸、根固め等の海洋コンクリートブロックや無筋コンクリートに採用されている。

表 - 2.4.1 他産業廃棄物の利用促進の事例

| | 材料 | | | 用途 | 併用効果 |
|-----------|---|----------------|-----------|---------|---|
| | 石炭灰 | 他産業副産物 | | | |
| | | 副産物 | 業界 | | |
| NAクリート | フライアッシュ | 製鋼スラグ 銅スラグ | 鉄鋼 銅精錬 | 消波ブロック等 | 副産物スラグによる コンクリートの比重調整 (2.3~2.8) ・低アルカリ、鉄分供給 で海生生物の付着 が良好 |
| | コンクリート配合 /m3 FA:約500kg 製鋼スラグ等 約1500kg | | | | |
| FSコンクリート | フライアッシュ | 高炉スラグ 製鋼スラグ | 鉄鋼 鉄鋼 | 消波ブロック等 | ・フライアッシュによる 製鋼スラグの膨張破壊 抑制 |
| | コンクリート配合 /m3 FA:約200kg 高炉スラグ 約1100kg 製鋼スラグ 約600kg | | | | |
| FSG固化体 | フライアッシュ | 高炉スラグ | 鉄鋼 | ブロック | ・フライアッシュとスラグの 反応性により、セメント を省略 |
| | FA:高炉スラグ微粉末 脱硫酸石膏 = 10:2:1 | | | | |
| 建設汚泥リサイクル | フライアッシュ | 建設汚泥 | 建設 | 盛土材、埋土 | フライアッシュの吸水性 によるハンドリング改善 |
| 発生土リサイクル | クリンカアッシュ | 不良土 | 建設 | 盛土材、埋土 | ・クリンカアッシュの吸水 性と粒度改善による ハンドリング改善 |

FSG 固化体は、石炭灰および石膏に鉄鋼業からの高炉スラグ微粉末を加水して練り混ぜることで圧縮強度が40~60N/mm²のコンクリート並の強度を発現する固化体である¹³⁾。材料は全て産業副産物ということになる。瀬戸内海沿岸での海砂採取規制により、天然骨材に代わる材料が求められる中で、コンクリート用骨材としての適用も考えられている。

シールド工事や杭工事から発生する建設汚泥は平成12年度時点で発生量が年間800万t程度で、最終処分量は480万tである。依然、再資源化率が低い状態である。

石炭灰(フライアッシュ)を利用することで、この建設汚泥を改良し、盛土等の土砂材

料として再利用する技術が実用化され、実績も増えている。石炭灰は絶乾状態の粉体であり、粒度分布はシルトを主体とするが、ノンプラスチックで微細な砂の特性を持つ。建設汚泥や浚渫土のような高含水比泥土に混合すると含水比を低下させ、物性を砂質土状に改良する効果がある。

建設汚泥・泥土を改良する方法として、石炭灰に少量のセメントを添加して改良材とする方法もある。セメントの添加により石炭灰の品質変動の改良効果への影響を抑制することができ、改良土の性状を安定化することが可能となった¹⁴⁾。発生土をクリンカアッシュにより改良して盛土材とする技術については国土交通省東北地方整備局のガイドラインが作られている¹⁵⁾。発生土・建設汚泥の発生量は膨大であり（発生土は2.8億m³）、発生土の改良に石炭灰が使われるようになると、石炭灰の有効利用は相当容易になるものと考えられる。

国土交通省は、産業間の連携による資源循環型システムの形成の観点から、建設分野での利用を可能な限り図っていくとしており、マニュアル¹⁶⁾、ガイドライン¹⁷⁾を整備している。

(3)セメント産業の余力創出による他産業廃棄物リサイクル推進

経済産業省は平成13年に「循環型社会の構築に向けたセメント産業の役割を検討する会」を設置して検討した結果、平成22年度にはセメント1t当り、廃棄物・副産物利用量を400kgにする努力目標を提言している。このうち粘土代替等の原料代替として利用する部分は最大200kg程度と想定されている。

今後のセメント生産量を6,000万tと想定した場合、原料代替としての廃棄物・副産物利用期待量は、1,200万tとなる。平成12年度における石炭灰のうち、セメント原料として処理されたものは、440万t（内、電気事業300万t）であり、利用期待量の36%（内、電気事業25%）を既に占めていることになる。

セメント原料として用いられる廃棄物・副産物は、石炭灰のほかに汚泥・スラッジ、石炭灰以外の燃え殻・ばいじん（各種焼却灰等）などがあり、これらの有効利用に関する技術開発も行われているところであるが、セメント産業による処理への期待も大きい。

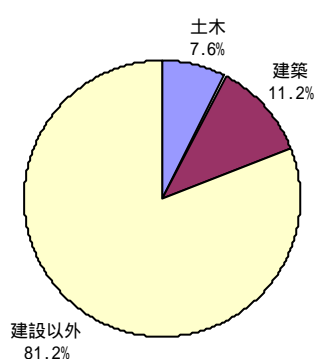
石炭灰は3章に示すように各種建設材料等としての有効利用方策が開発・実用化されており、これら技術の普及・拡大により、石炭灰の最終処分量の低減はもちろんだ、セメント原料としての処理量を減らし、セメント産業の廃棄物・副産物利用期待量における石炭灰の比率を低減することができる。このことは、結果としてセメント産業における各種汚泥・焼却灰等の処理余力を創出することとなり、これら廃棄物の最終処分量低減、循環利用量の向上に繋がることになり、全体として循環型社会形成推進に資する。

2.4.2 省エネルギー・CO₂排出削減効果

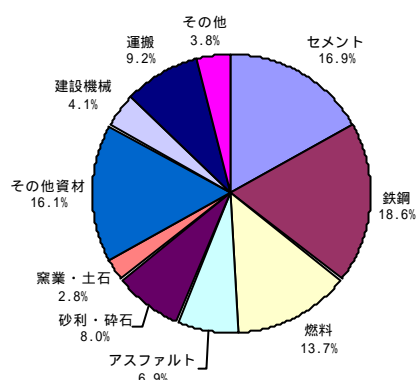
エネルギー消費量およびCO₂排出量の状況を産業別および資材・燃料別（土木事業）に示したものが図-2.4.1である。土木事業におけるエネルギー消費量は全産業分の8%程度であり、資材・燃料別では、セメント、鉄鋼、燃料の3分野でほぼ15%程度であり、多い状況である。また、土木事業におけるCO₂排出量は全産業分の10%程度である。資材・燃

料別では、セメントが最も多く 30% を超え、鉄鋼がそれに次いでいる。土木事業において、エネルギー消費量およびCO₂排出量を削減するためには、セメントと鉄鋼について使用量を削減するか、生産方法について適切な方策を進めることが効果的であるといえる。

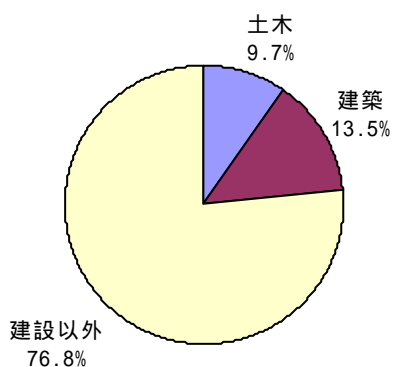
普通ポルトランドセメント中には、混合材として5%までフライアッシュ等が含まれているが、さらに混合材を多く含むフライアッシュセメント等の混合セメントの生産・供給量の拡大が省エネルギーと環境影響の見地から望まれる。これは、混合材の添加により、セメントクリンカ焼成におけるエネルギー消費量およびCO₂排出量が削減できるためである。フライアッシュセメントB種（混合率20%）の普通セメントに対する省エネ率・CO₂削減率は20%である。表-2.4.2に示すように、セメントクリンカー7,000万t/年



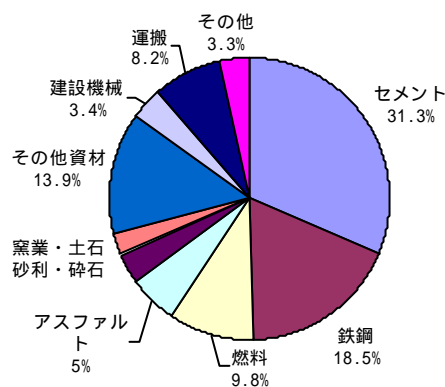
(1) 全産業に対する建設関連分野のエネルギー消費量の比率



(2) エネルギー消費量の資材・燃料別内訳



(3) 全産業に対する建設関連分野のCO₂排出量の比率



(4) CO₂排出量の資材・燃料別内訳

図-2.4.1 エネルギー消費量・CO₂排出量の状況¹⁸⁾

表 - 2.4.2 フライアッシュセメント利用による省エネルギー効果¹⁹⁾

| | フライアッシュ 混合率 (%) | C重油燃料換算節 減量(キロリットル) | 節減率 (%) |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|------------|
| フライアッシュセメント (販売シェア5%とする) | 20 | 55,000 | 0.8 |
| 普通セメント (販売シェア82%とする) | 5 | 226,000 | 3.3 |

に対して、フライアッシュセメントの販売シェア5%としてC重油燃料換算節減量は5.5万k l /年である。これによりCO₂排出量は4万t-c /年削減する。シェア拡大と共に効果は大きくなる。

セメント原料の粘土代替としての石炭灰の使用量は約400万t /年であるが、粘土採掘の省略により、8000t-c /年規模(原単位0.0019kg-c/kgと仮定²⁰⁾、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。

フライアッシュセメントは普通セメントの様に汎用的に使用されていないのは初期強度発現性が低いことが一因である。そこで、早強セメントとフライアッシュを混合(置換率25%程度)したフライアッシュセメントの提案がされ、普通セメント並の性能とCO₂排出量20%削減の可能性があるとしている²¹⁾。こうしたセメントが一般に普及すると相当な省エネルギー・CO₂の削減効果が可能である。

産業界としても環境問題への積極的に取り組んでおり、経団連環境自主行動計画をまとめている。その中でセメント協会は混合セメントの比率拡大を掲げ、電力業界も石炭灰のセメント原料、コンクリート用混和材としての利用拡大を掲げており、業種間の協力が今後益々期待されるところである。

2.4.3 天然資源消費の抑制効果

骨材は、コンクリート、アスファルト、道路、道床その他に用いられる。海、山、川から採取される砂利、また、山から岩石を採掘・破砕して得られる砕石は天然骨材である。現在、骨材の供給は殆どが天然骨材であるが、供給量は天然骨材とリサイクル材(アスファルト・コンクリートやコンクリート屑を破砕して得られる再生骨材)を合わせて年間7億tである。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。

天然骨材は平成2年度以降、減少傾向であるがリサイクル材は増加傾向である。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増加するとみられる。

石炭灰については、路盤材としてクリンカアッシュやフライアッシュ固化体が使われている。また、コンクリート用骨材として焼成タイプの人工軽量骨材が実用化されている。路盤材と人工軽量骨材で年間約15万tの石炭灰が利用されているが、骨材供給量全体と比較するとごく僅かであり、今後の伸びが期待される。土木学会としても石炭灰の人工骨材への利用を検討し、高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案)²²⁾作成した。

瀬戸内海では海砂の採取が全面的に出来なくなることから、海砂代替としてのフライアッシュ造粒固化体が既に実用化され、実績を伸ばしつつある。主に、SCP工法およびSD工法に使用されている。また、四国地区では、従来コンクリート用細骨材の約半分を海砂に依存してきたため、細骨材の不足が予想されているため、フライアッシュを「細骨材補充混和材」として使用することを土木学会四国支部として検討し、施工指針（案）を作成している²³⁾。

2.4.4 コスト抑制効果

セメントの製造には原料として粘土がセメント1t当たり約200kg必要であるが、石炭灰が粘土代替として約50～100kg使われることがある。これにより、粘土資源の節約に合わせて、粘土の採掘・粉砕費等の節減が可能となっている。この用途に、年間400万t余もの石炭灰が使用されている。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。

電力各社は、石炭灰のセメント原料以外への有効利用を拡大する方向で実用化を前提とした技術開発を進めている。既に、採用された技術も多く、コストダウン工事例も着々と増加している。図-2.4.2は石炭灰活用によるコストダウンの状況を示している。平均で約13%のコストダウンとなっている。また、表-2.4.3には石炭灰の利用で製品および建設工事コストダウンとなった事例を紹介している。これらは、社会資本整備に石炭灰を活用することで地域貢献とリサイクル推進を両立させることが出来た例といえる。

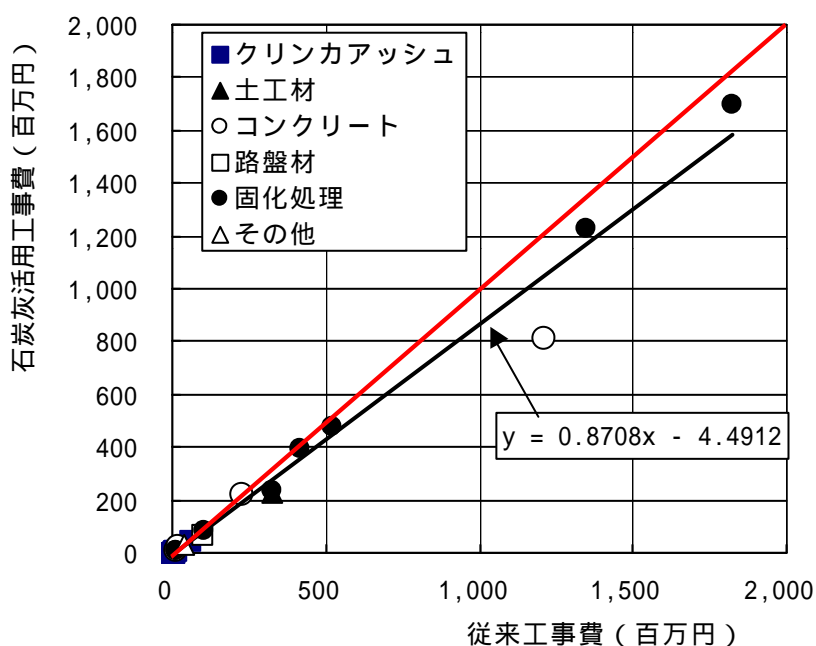


図 - 2.4.2 石炭灰活用による工事費のコストダウン

表 - 2.4.3 石炭灰利用によるコストダウン事例

| | 製品・用途 | 内容 | コストダウン規模 | コストダウン要因 | 供給・実施者 |
|------|--------------------------------|--|----------|--|---------------------|
| 製品 | 海砂代替材Hi ピーズ | S C P工法、S D工法 | -10% | 廃棄物利用(フライアッシュ) | 中国電力(株) |
| | NAクリート | 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 | 中国電力(株) |
| | F Sコンクリート | 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 | (株)沿岸環境開発資源利用センター |
| 建設工事 | 海中盛土 | 土砂+セメント+フライアッシュ+海水 固練りスラリー 苫小牧西港 H10~11 フライアッシュ 1.5千t | -30% | 浚渫土砂とフライアッシュの利用 | 北海道電力(株) |
| | 固化盤 | フライアッシュ+セメント 固練りスラリー 苫東コールセンター貯炭場 H11~12 フライアッシュ 4.5千t | -0.3億円 | フライアッシュの利用 | 北海道電力(株) |
| | 建設汚泥改良 | フライアッシュ+建設汚泥 土砂材 苫東4号 H11~12 フライアッシュ 2.1千t | -1.0億円 | 建設汚泥の廃棄物としての処理の省略 | 北海道電力(株) |
| | 深層混合処理F-CDM | フライアッシュ+セメント 地盤改良材 苫東4号・苫東コールセンター H11 フライアッシュ 6千t | -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 | 北海道電力(株) |
| | 深層混合処理 | フライアッシュ原粉+セメント+特殊減水剤 日本石油 下松コールセンター工事 他 | -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 | 中国電力(株) |
| | 路床改良 | 加湿固化材による路床改良システム 山陰道(国交省) 他 | -5~10% | 加湿固化材による省力化施工 | 中国電力(株) 国交省中国整備局 |
| | 石炭灰スラリー埋戻し | フライアッシュ+セメント+水 スラリー状の管路埋戻し材 碧南火力4・5号増設 H11フライアッシュ 4.0千t | -5.0億円 | 埋設管厚低減等 | 中部電力(株) |
| | 高品質吹付けコンクリート | トンネル吹付けコンクリート混和材(フライアッシュ 種) 笹ヶ峰トンネル(道路公社)等 | -5~-10% | リバウンド量・粉塵量の低減 | 四国電力(株) |
| | 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) | トンネル吹付けコンクリート混和材(フライアッシュ原粉) 平瀬トンネル(山口県) 他 | -5~15% | セメント置換, リバウンド・粉塵発生量低下 | 中国電力(株) |
| | エアモルタル | 軽量盛土 苫田ダム黒木第一改良工事(国交省) 他 | -10~20% | 細骨材の全量置換, セメントの一部置換, 気泡剤低減 | 中国電力(株) |
| | フライアッシュモルタル(FAM-NF) | フライアッシュ+セメント+海水+硬化促進剤 | -10% | 細骨材代替としてフライアッシュ使用 | 電源開発(株) |
| | F G C -DM深層混合処理 | フライアッシュ+セメント+水 地盤改良材(スラリー) 電源開発(株)ポンプ場土留め工事 | -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 | 電源開発(株) |

2.4.5 今後期待される新たな効果

今後期待される効果として、漁業資源保全、環境保護に向けた取り組みとして石炭灰コンクリートによる湧昇流事業と石炭灰ゼオライト化の二つの例を紹介する。

(1)湧昇流事業の実用化

石炭灰、水およびセメント等を混合して製造される石炭灰を大量に配合する石炭灰コンクリートのブロックを海底に沈設し、人工の海底山脈(図 - 2.4.3)を構築することにより、湧昇流を発生させ、好漁場を造成する土木技術が事業化されている。湧昇流の効果については、既に、長崎県生月島沖で、1.6m 角、1基6 tのブロック約 5000 個(石炭灰約 2 万 t)による水深 80mの海底での実証試験で確認されており、植物プランクトンが増加し、漁獲量も大幅に増加した²⁴⁾。

この技術は、湧昇流海域が好漁場で、海中の栄養塩類が水面近くに上昇し、海食物連鎖の源である植物プランクトンの増殖量が多いことに着目したものである。大規模な人工海底山脈を構築するために、資源の少ない我が国で膨大な量の自然石や普通コンクリートを使用すれば資源の枯渇や陸上の環境破壊が問題になってしまう。石炭灰コンクリートは、十分な強度・安全性を有し、経済性にも優れるため、石炭灰利用により、この構想の実現もあったといえる。

植物プランクトンの増殖はCO₂の固定にもつながり、海洋中のCO₂が大量に生物生産のために消費され、大気中のCO₂が海洋に溶解し温暖化の抑制効果が期待できる。食料生産と産業副産物リサイクル、環境創造を同時に実現する技術である。

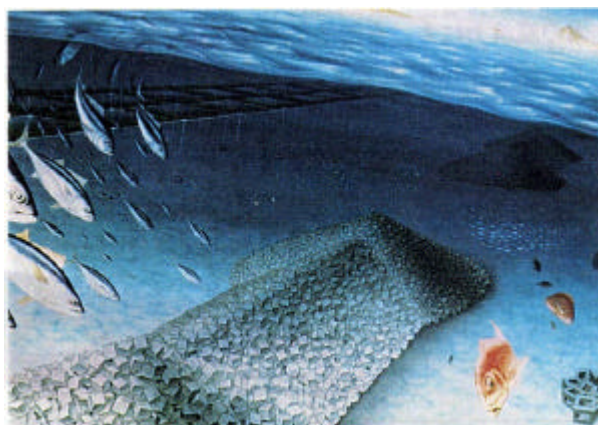


図 - 2.4.3 人工海底山脈²⁴⁾

(2)ゼオライト化による新たな展開

石炭灰を原料とする人工ゼオライトは、図 - 2.4.4 に示すような多孔質である表面性状によりガス吸着とイオン交換に優れた材料である。石炭灰を原料とする材料の中でも付加価値の高い材料として注目されている。人工ゼオライトを富栄養化により水質が悪化している閉鎖性水域の底泥上に敷設し、溶出するガスと栄養塩をこれに吸着させることにより、

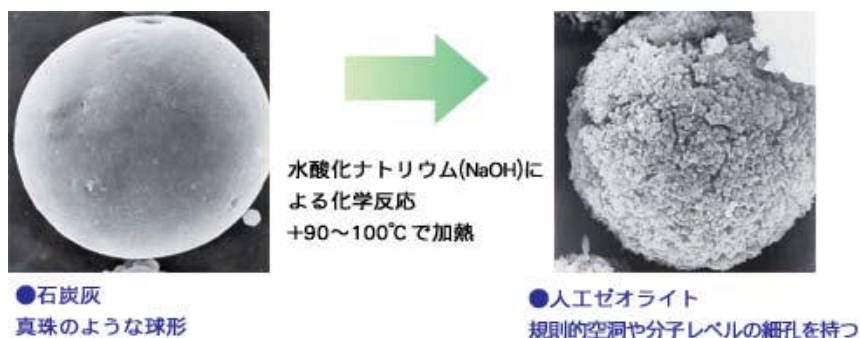


図 - 2.4.4 人工ゼオライト

水質を改善することができるとする研究例もある²⁵⁾。pHの上昇等の課題が残されているが、天然ゼオライトに比べて、CEC(陽イオン交換容量)が高いこと、リン除去能があるこ

とが特長であり、利用拡大が期待されている。

また、ゼオライトは、鉛等重金属の吸着能がある。石炭灰から合成した人工ゼオライトを用いて、クレー射撃場の土壌中に残った鉛の排水中への溶出を防ぐために、浄化効果を確認する実証試験が行われている。既に、鉛について90%以上の高い吸着性能が確認されている。

参考文献（第2章）

- 1) (財)石炭利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書（平成12年度）平成14年3月
- 2) セメント新聞編集部、セメント年鑑第54巻（平成14年度）
- 3) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策（平成14年度版）
- 4) 経済産業省製造産業局窯業室編：砕石統計年報（平成13年）
- 5) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：窯業・建材統計年報（平成13年）
- 6) 肥料協会新聞部編：肥料年鑑第49版（2002年）
- 7) (財)セメント協会編：セメント需給概要
- 8) セメント新聞，2002.10.28
- 9) 松藤泰典，小川智幸，山口謙太郎他：接続可能な火力発電を実現するための電力産石炭灰の環境負荷低減処理システム，九州大学大学院人間環境学研究院紀要，第2号，pp.57-68，2002.7
- 10) 環境省：循環型社会形成推進基本計画，2003.
- 11) 斉藤直他：石炭灰を多量に使った新素材コンクリートの開発，電力土木，No.285，pp.75-79，2000.
- 12) 堀井昭宏：フライアッシュを大量に使用した高耐久性「FSコンクリート」，電力土木 No.299，pp.113-115，2002.
- 13) 石井光裕他：セメントを使わない高強度石炭灰固化体の開発，電力土木，No.297，pp.11-18，2002.
- 14) 五十嵐他：フライアッシュの不良土改良材への適用性検討，電力土木，No.303，pp.101-105，2003.
- 15) 国土交通省東北地方整備局：道路盛土における石炭灰と建設発生土利用ガイドライン（案）（クリンカーアッシュ編），2001.
- 16) 国土交通省：公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案，1999.
- 17) 国土交通省：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン，2001.
- 18) 寺田他：建設事業における資源・エネルギー消費量及び環境負荷量の算定調査，土木技術資料，vol.37，No.9，pp.20-25，1995.
- 19) 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，p.46，2000.
- 20) 土木学会 地球環境委員会：土木建設業における環境負荷評価，「土木建設業における環境管理と環境負荷評価」講習会講演要旨集，p.9，1997.
- 21) 盛岡実他：早強セメントとフライアッシュから調整したフライアッシュセメントの物性とエコロジカル評価，コンクリート工学論文集，第13巻第2号，pp.33-39，2002.
- 22) 土木学会：高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー106，2002.
- 23) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリート施工指針（案），2003.
- 24) 鈴木達雄：産業副産物を利用した海洋での食糧増産，土木学会誌，vol.84，1999.
- 25) 井野場他：人工ゼオライトによる湖沼底質浄化法の開発，電力土木，No.280，pp.80-84，1999.