

1.1. 石炭灰・鉄鋼スラグのリサイクル

(1) 石炭灰

1) 発生状況

石炭灰は、図11-1に示すように、石炭火力発電所等の石炭ボイラーで発生する。集塵機で捕集されるフライアッシュ（飛灰、fly ash）とボイラー底部から抜き出されるクリンカーアッシュ（炉底灰、bottom ash）があるが、80～90%はフライアッシュである。クリンカーアッシュのほうは、粒径が粗粒砂程度に大きく建設工事に利用しやすいが、フライアッシュは微粒で使いにくいうえに発生量が多いことから、その有効利用策が課題で、いまだ解決していない。

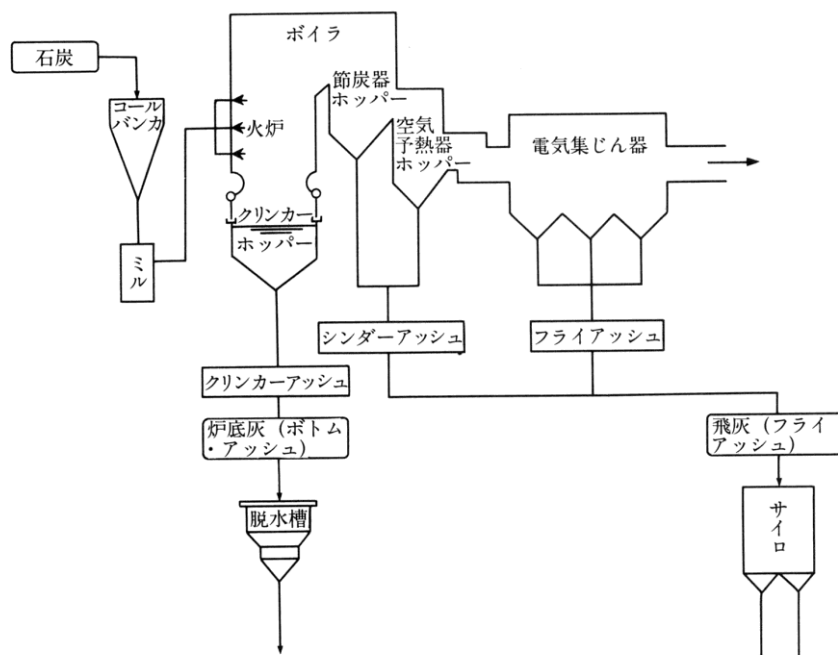


図11-1 石炭ボイラーから排出される石炭灰の区分¹⁾

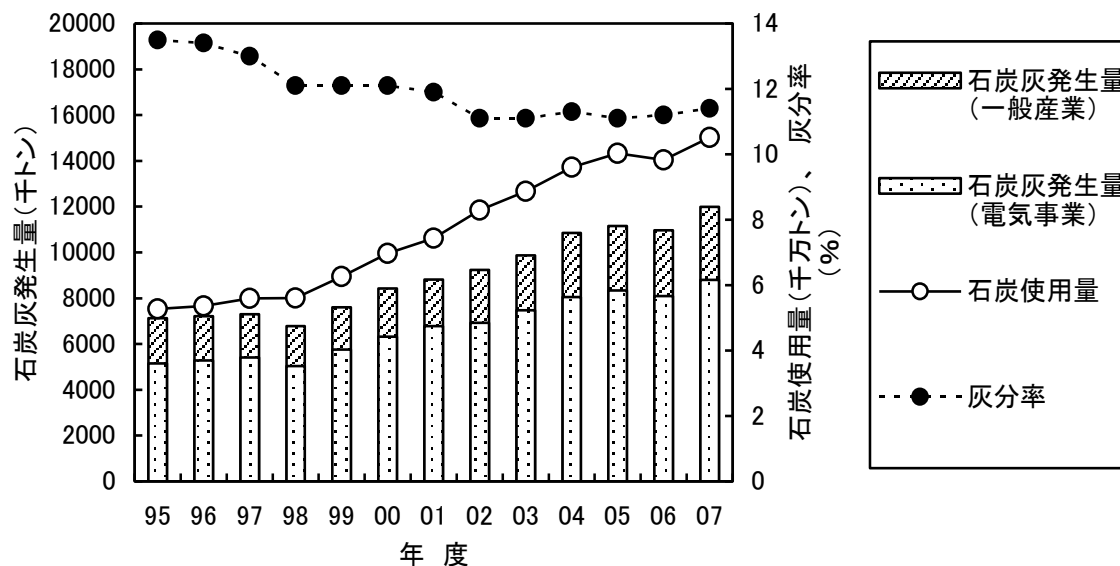


図11-2 石炭灰発生量、石炭使用量および灰分率の推移（石炭エネルギーセンター資料より）

石炭灰の年間発生量とその際の石炭使用量およびそれらの比率すなわち灰分率の推移を図11-2に示す。

石炭灰の発生量は図に示す期間10年以上増加傾向が続き、2007年度には約1200万トンに達している。その増加の原因は、灰分率（石炭使用量に対する石炭灰発生量の比率）は減少しているにもかかわらず、その効果以上に石炭の使用量が増加しているためである。石炭灰発生量のうち75%程度は、電気事業すなわち石炭火力発電所からのものである。1970年代に、石炭火力発電の石油への転換が進んだものの、オイルショック以降、再び石炭消費量は増加に転じ、石炭灰発生量が増加するようになった。

石炭は、太古の植物が堆積し、長年月の間、生化学的作用や地熱・地圧の作用を受けることにより次第に変化して形成された。その石炭化の度合、**石炭化度の高いものから順に、無煙炭、瀝青炭、亜瀝青炭、褐炭、亜炭、泥炭**に分類される。我が国では一般に、無煙炭から褐炭までを石炭と呼んでいる。

また、用途により**原料炭、一般炭および無煙炭**に分類される。

原料炭は、大部分が製鉄用のコークスの製造に使用される。**コークス**は、石炭を加熱・乾留して製造される。良質のコークスを製造するためには、石炭の粘結性、コークス化性および流動性と呼ばれる性質が重要とされる。都市ガスの製造原料、石炭化学工業の原料としても使用される。コークス用原料炭の灰分は、全量がコークス中に残留するので、灰分は低いほうがよく、通常は10%以下とされている。

一般炭は、主に火力発電所などのボイラー用燃料として使用され、原料炭と違い、広い範囲の性質を有している。5~30%程度の灰分が含有していて、燃焼した後、多くの石炭灰が発生する。図1 1-2に示す石炭使用量は、主にこの一般炭の使用量である。その平均灰分率は11~14%であった。

無煙炭は、燃焼時の煙が少ないため、練炭や豆炭などの成形炭の原料となる。

原料炭と一般炭の供給量の推移を**図1 1-3**に示す²⁾。いずれも増加しているが、原料炭に比べ一般炭の増加が著しい。また現在、いずれもほとんどが海外から輸入されている。なお、無煙炭の量は、全体の数%程度で少なく、一般炭に含めて示している。

このように、石炭灰が発生する一般炭の使用量が増加しており、石炭灰発生量は今後も増加すると予想される。それゆえ、建設工事などでの利用拡大が期待されている。

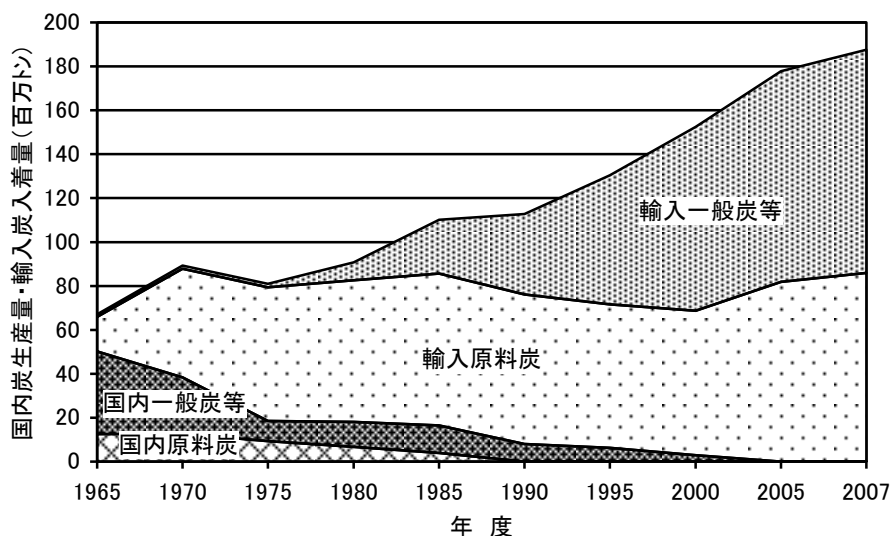


図1 1-3 石炭供給量の推移²⁾

2) リサイクルの現状

2007年度、石炭灰の利用状況は表1 1-1に示すとおりで、ほとんどが有効利用されていることになっている。しかし、有償譲渡できているケースは少ないとみられる。

全体の63%がセメント原材料として利用されたが、それは粘土の代替えであり、逆有償と考えられる。セメント混合材およびコンクリート混和材としての販売が期待されるが、それぞれ26万トおよび7.7万トにとどまっている。大量に販売できる用途として人工軽量骨材の製造技術も開発されたが、現状では製造されていない。

3) 材料特性と建設工事で期待される利用用途

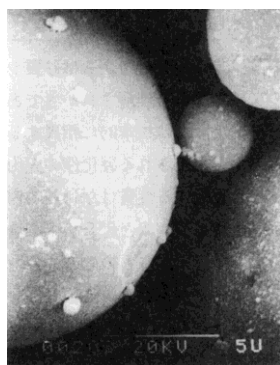
石炭灰の材料特性を表1 1-2に示す²⁾。石炭灰の80%以上を占める**フライアッシュ**は微粒で球状、ガラス質でポズラン活性といった特徴を持つ(写真1 1-1参照)。

表 11-1 石炭灰の有効利用状況 (2007 年度分、石炭エネルギーセンター資料より) 単位：千トン

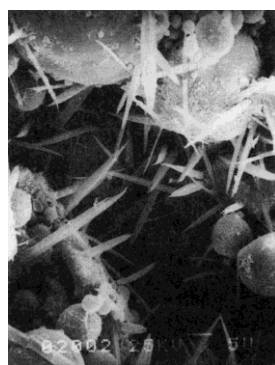
分野	項目 内容	電気事業		一般産業		合計	
		利用量	構成比	利用量	構成比	利用量	構成比
セメント分野	セメント原材料	4,995	58.91	2,349	74.67	7,344	63.17
	セメント混合材	110	1.30	150	4.77	260	2.24
	コンクリート混和材	71	0.91	0	0.00	77	0.66
	計	5,182	61.12	2,499	79.43	7,681	66.07
土木分野	地盤改良材	273	3.22	84	2.67	357	3.07
	土木工事用	563	6.64	32	1.02	595	5.12
	電力工事用	17	0.20	0	0.00	17	0.15
	道路路盤材	142	1.67	221	7.02	363	3.12
	アスファルト・フィラー材	9	0.11	0	0.00	9	0.08
	炭坑充填材	294	3.47	0	0.00	294	2.53
	計	1,298	15.31	337	10.71	1,635	14.06
建築分野	建材ボード	222	2.62	153	4.86	375	3.23
	人工軽量骨材	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	コンクリート2次製品	38	0.45	2	0.06	40	0.34
	計	260	3.07	155	4.93	415	3.57
農林・水産分野	肥料 (含:融雪剤)	40	0.47	17	0.54	57	0.49
	魚礁	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	土壌改良剤	17	0.20	80	2.54	97	0.83
	計	57	0.67	97	3.08	154	1.32
その他	下水汚水処理剤	1	0.01	1	0.03	2	0.02
	製鉄用	6	0.07	5	0.16	11	0.09
	その他	1,675	19.75	52	1.65	1,727	14.86
	計	1,682	19.84	58	1.84	1,740	14.97
有効利用合計		8,479	100.00	3,146	100.00	11,625	100.00

表 11-2 石炭灰の一般的材料特性

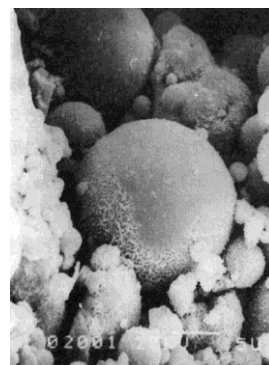
化学的 特性	化学組成	SiO ₂ : 40~75%、Al ₂ O ₃ : 15~35%
	反応性	ポゾラン活性があり、CaO分が多い場合、自硬する。
物理的 特性	形状	球形粒子、不定形粒子、多孔質不定形粒子が混合している。
	形態	結晶質を含むガラス状である。
	密度	真比重: 1.9~2.3g/cm ³ 、かさ密度: 0.8~1.0 (土砂より軽い)
	粒径	フライアッシュ: 数μm~数10μm、ボトムアッシュ: 数mm
	粘着性	粘着性がなく、砂質土に近い。
	熱伝導性	普通の土砂より断熱性が高い。



石炭灰の表面形状



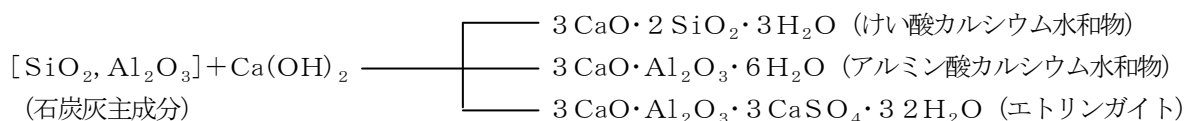
ポゾラン反応水和物の発生
(エトリンガイト結晶)



ポゾラン反応水和物の発生
(非晶質)

写真 11-1 石炭灰の表面およびポゾラン反応水和物の発生状況

ポゾラン活性を持つフライアッシュは、セメントや石灰の反応副産物である水酸化カルシウムと再反応し、次に示すような不溶性化合物を生成して硬化する。



石炭灰のこれらの特徴を活かしてセメント原材料以外で建設工事に利用するための検討が種々行われてきた。最も実績があるのはセメント混合材あるいはコンクリート混和材としての利用である。2000年度に518千トンが利用されたが、品質面での制約から、利用量は近年伸びていない。

フライアッシュセメントは、JIS A 6201 に適合するフライアッシュを混和材とする混合セメントである。また、高流動コンクリートには粉体が混和材として使用され、その粉体としての利用が期待される。

その他、石炭灰を用いた人工軽量骨材については、九州電力で製造され、年間8万トン程度利用された実績があるが、現在は製造されていない。

土砂代替の地盤材料として用いれば、大量に使用することができる。ただし、石炭灰(フライアッシュ)は粒径が数 μm 以下の粉体で、そのままでは輸送が困難で、屋外貯蔵もできない。また、工事現場で粉塵発生の問題が起りやすい。それゆえ、あらかじめセメントなどを用いて造粒しておく必要がある。

(2) 鉄鋼スラグ

1) 種類と生成過程

図11-4に示すとおり、鉄を製造する過程で**高炉スラグ**、さらに鋼を製造する過程で**転炉(系)スラグ**および**電気炉(系)スラグ**と呼ばれる鉄鋼スラグが生成する。

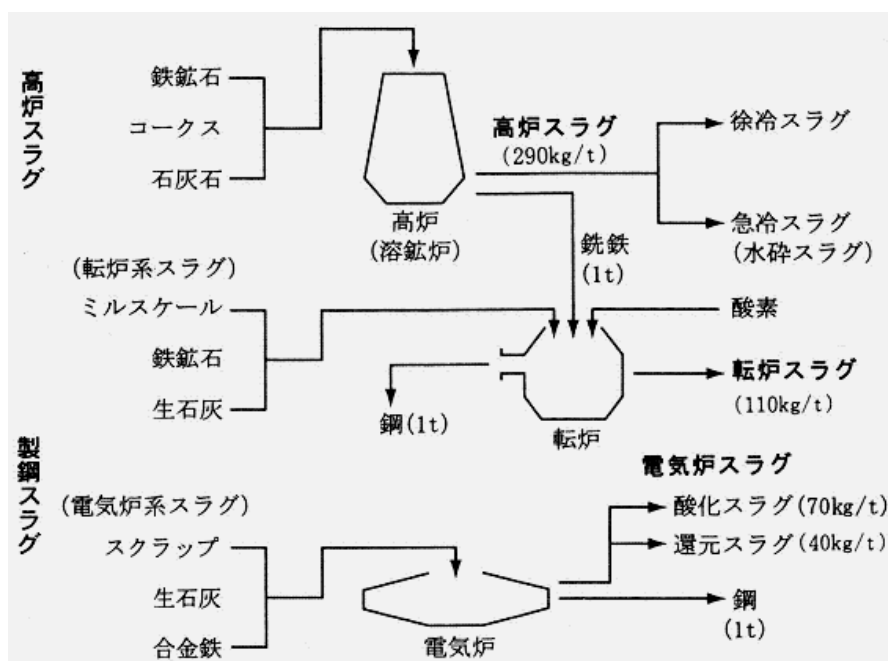


図11-4 鉄鋼スラグの種類と生成フロー (鉄鋼スラグ協会資料より)

① 製鉄(製鉄)と高炉スラグ

鉄は、自然界において一般的に酸化鉄の形で存在し、**鉄鉱石**として取り出される。製鉄用に多く使用されている鉄鉱石は、赤鉄鉱(Fe_2O_3)と磁鉄鉱(Fe_3O_4)である。製鉄原料には、鉄鉱石のほか、熱源および還元剤となる原料炭(C)と、鉄以外の成分を分離しやすいように溶剤の役割をする石灰石(CaCO_3)などがある。

原料炭は、あらかじめ高温乾留によって**コークス**にして使用され、熱源および還元剤であると同時に炉内通気

保持体としての役割をする。そのため、原材料の重みに耐えられるコークスになる粘結性が要求される。石灰石は、鉄鉱石に含まれるシリカ (SiO₂) やアルミナ (Al₂O₃) などの鉄以外の成分と溶融して融点を下げ、鉄とそれ以外の成分が分離しやすくするために加えられる。鉄鉱石をコークス、石灰石とともに高炉と呼ばれる溶鉱炉に入れ、熱風を送ってコークスを燃焼させ、生じた一酸化炭素 (CO) で酸化鉄 (Fe₂O₃、Fe₃O₄など) を還元して鉄を得る。この鉄を**銑鉄**、銑鉄をつくることを**製銑**という。

高炉スラグは、高炉で鉄鉱石を加熱、還元、溶解して比重差で鉄 (銑鉄) を分離した際に生成する。密度が銑鉄より低く、溶融状態では銑鉄の上部に浮かび上がってくるため容易に分離・回収できる。銑鉄1トン当たり約290kg生成する。高炉から取り出されたときのスラグは1500℃程度の高温で溶融状態である。それを冷却すると固体状のスラグすなわち高炉スラグになるが、冷却方法によって異なった性状になる。溶融状態のスラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により徐冷処理すると、結晶質の大きな塊となる。これを**徐冷スラグ**と呼ぶ。それを破碎して骨材、路盤材などに利用される。溶融状態のスラグを、加圧水を噴射するなどして急激に冷却処理すると、ガラス質でかつ砂のような粒状になる。これを**急冷スラグ**または**水砕スラグ**と呼ぶ。

② 製鋼と製鋼スラグ

高炉で製造された銑鉄は炭素の含有量が多く、構造材などとして使うには硬くて脆いので、**転炉**で石灰などの副原料を加えて酸素を吹き込み、銑鉄に含まれる炭素のほかリン、硫黄などの不要成分を酸化除去して粘り強い鉄にする。この鉄が**鋼 (こう、はがね、スチール)**と呼ばれるものである。また、鉄のリサイクル、鉄スクラップ (くず鉄) を主原料にして鋼を製造 (回収) する場合には、その溶解のための熱源として電気、すなわち**電気炉**が使われる。溶解は、酸化および還元の2段階の雰囲気で行われる。鋼をつくることを**製鋼**、また、こうした製鋼のように粗金属の純度を高め精製する工程を一般に**精錬**という。

転炉スラグは、転炉で溶融銑鉄に酸素を吹き込んで不要成分を酸化除去して鋼を製造した際に分離、生成する塊状のスラグである。高炉徐冷スラグと同様、破碎して製品にされる。**電気炉スラグ**は、電気炉でスクラップ (くず鉄) を加熱、酸化および還元雰囲気中で溶解して鋼を精錬製造する過程で生成し、**酸化(期)スラグ**と**還元(期)スラグ**がある。酸化スラグは塊状で、還元スラグは粉状で生成することが多い。これら製鋼工程で生成するスラグを総称して**製鋼スラグ**と呼ぶ。

2) 鉄鋼スラグの生成量

2002～2009年度の各年度、高炉で生産される銑鉄の生産量、転炉および電気炉で生産される鋼の生産量ならびにそれらに伴って生成する各スラグの年間生成量は、**図11-5**に示すとおりで、いずれも大きな変化はない。

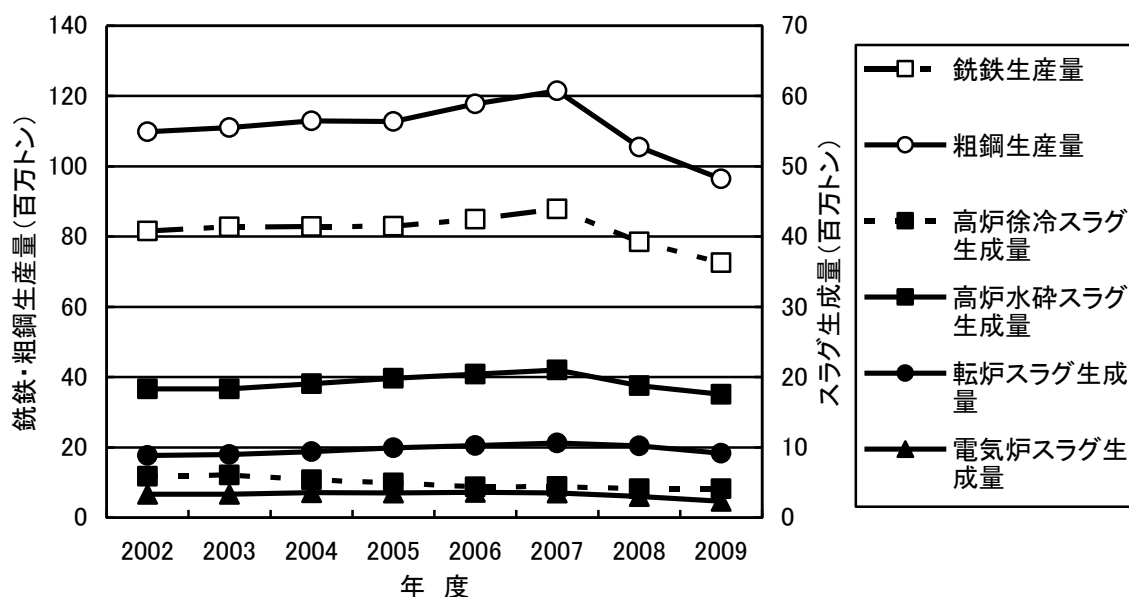


図11-5 銑鉄と鋼の生産量ならびに各スラグ生成量の推移 (鉄鋼スラグ協会資料より)

高炉スラグが徐冷と水砕それぞれ約400万トンと1800万トン、計2200万トン、転炉スラグが約900万トン、電気炉スラグが200万トン、鉄鋼スラグ全体で3300万トンである。

高炉スラグで徐冷よりも水砕が多いのは、徐冷スラグが路盤材など砕石代替材程度であるに対し、水砕スラグが高炉セメント用などのセメント混合材やコンクリート用細骨材など価値の高い用途に利用されるからである。

3) 建設工事で期待される鉄鋼スラグの利用用途

鉄鋼スラグは、製鉄・製鋼過程で石灰石を使用しているため、表11-2に示すとおりCaOを多く含み、利用用途は多い。高炉スラグは、セメント用、路盤材などとして、ほぼ100%が再利用されている。製鋼スラグも、それぞれ土工用、道路用を中心に再利用率が上昇している。

表11-2 鉄鋼スラグの化学組成例（鉄鋼スラグ協会資料より）

成分	高炉スラグ	転炉系スラグ	電気炉系スラグ		安山岩	普通ポルトランドセメント
			酸化スラグ	還元スラグ		
CaO	41.7	45.8	22.8	55.1	5.8	64.2
SiO ₂	33.8	11.0	12.1	18.8	59.6	22.0
T-Fe	0.4	17.4	29.5	0.3	3.1	3.0
MgO	7.4	6.5	4.8	7.3	2.8	1.5
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	6.8	16.5	17.3	5.5
S	0.8	0.06	0.2	0.4	—	2.0
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	0.3	0.1	—	—
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0	0.2	—

図11-6に鉄鋼スラグ全体の利用用途の内訳を示す。埋立等は少なく、有効利用が進んでいることが分かる。ここに示す用途分類の中では、高炉セメント用などのセメント混合材を中心とするセメント原料・コンクリート混和材としての利用量が最も多い。ポルトランドセメントの製造では原料である石灰石からCO₂が発生するので、それを少しでも少なくするために高炉水砕スラグ微粉末を混合して製造する高炉セメントの使用割合が増加することを期待したい。しかし、その用途での需要に限界がある。また、次いで多い、地盤改良・港湾土木材、路盤材等についても今後、需要が低下すると予想される。・アスファルト合材用骨材としての利用など、他の利用価値の高い用途での利用量の増加が期待される。

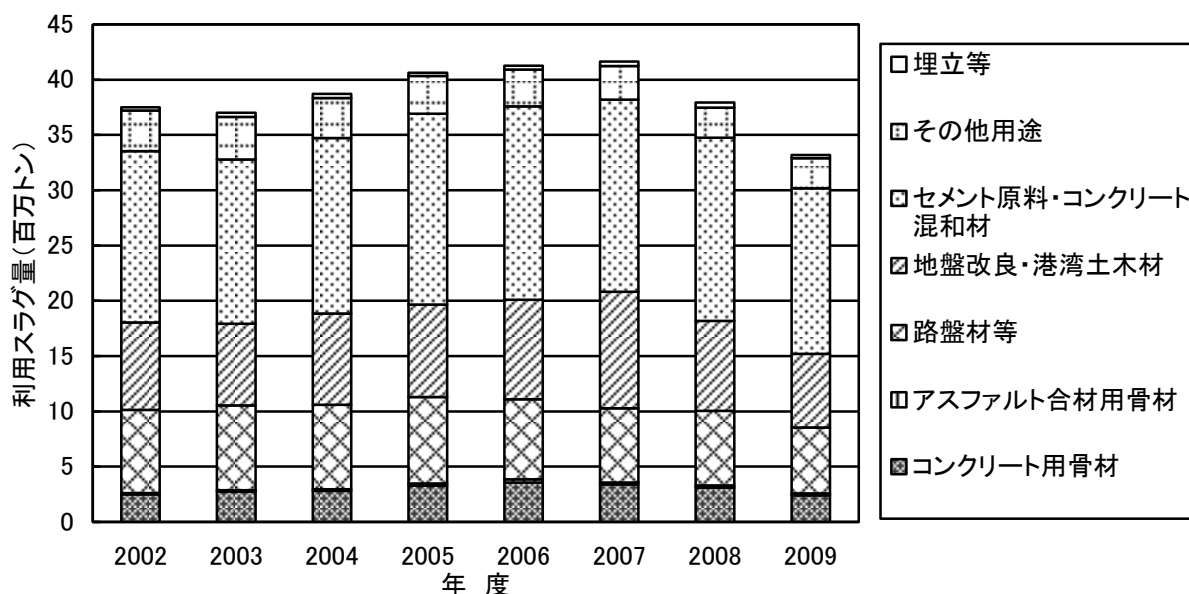


図11-6 鉄鋼スラグの利用用途内訳の推移（鉄鋼スラグ協会資料より）

参考文献

- 1) アッシュ情報調査センター：石炭灰有効利用ガイド，一般産業編，1989.
- 2) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編：エネルギー・経済統計要覧，省エネルギーセンター，p. 145, 2009.