

鉄鋼スラグ

# 1. 鉄鋼スラグの発生状況

## 1.1 鉄鋼スラグの生成

### (1) 鉄鋼スラグの生成工程

鉄鋼スラグは、鉄の製造過程で副生され、その製造工程から図 1.1 に示す種類がある。高炉スラグは、高炉で銑鉄を作る際に生成されるスラグであり、製鋼スラグは鋼を作る際に生成されるスラグである。製鋼スラグは、さらに製鋼炉により転炉スラグ、電気炉スラグに分類される。

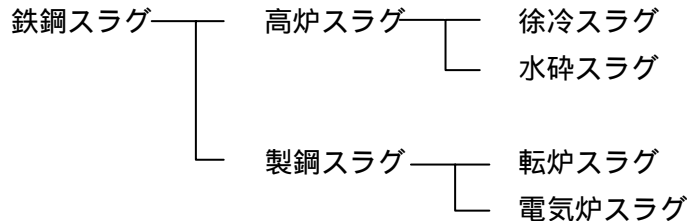


図 1.1 鉄鋼スラグの種類

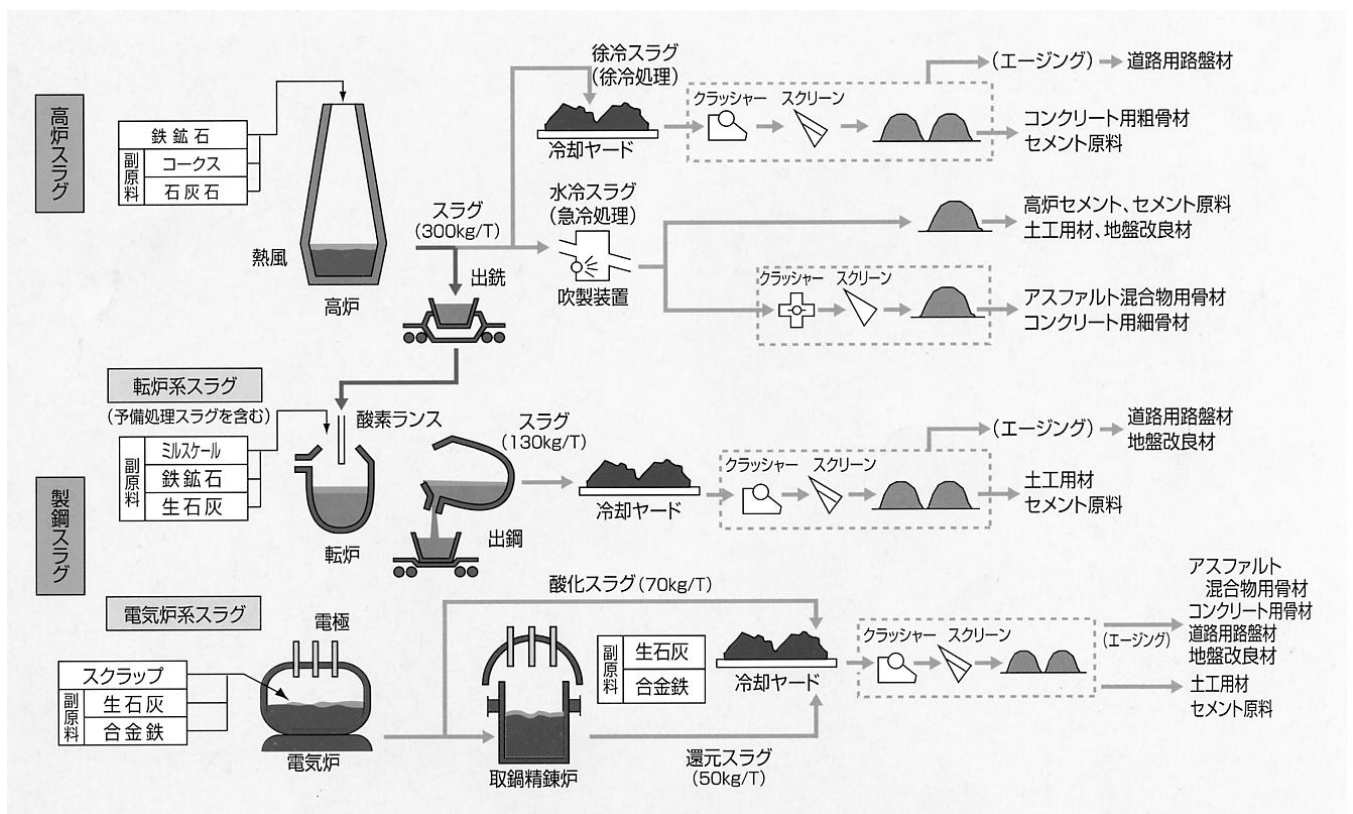


図 1.2 鉄鋼スラグの生成フロー<sup>1)</sup>

### 1) 高炉スラグの生成

高炉は主原料の鉄鋼石をコークス、石灰石等の副原料とともに高温で溶融し、コークスの炭素により還元し、銑鉄を製造する。この際に、鉄鋼石の鉄以外の成分は、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に高炉スラグとなり分離回収される。この高炉スラグは天然の岩石に類似した成分を有し、銑鉄 1t 当り約 300kg 生成する。高炉から取り出されたばかりのスラグは約 1,500 の溶融状態であるが、冷却の方法によって、以下の 2 種類の高炉スラグとなる。

#### 徐冷スラグ (徐冷処理)

溶融スラグを、冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水によって冷却すると、結晶質の岩石状のスラグとなる。これを徐冷スラグと呼び、所定の粒度に加工して、道路用・コンクリート用細骨材などに利用されている。

### 水砕スラグ（急冷処理）

溶融スラグに加圧水を噴射するなどして、急激に冷却すると、ガラス質（非結晶）の粒状スラグとなる。これを水砕スラグと呼び、セメント用、土工用などに利用されるほか、加工することでコンクリート用細骨材としても利用されている。

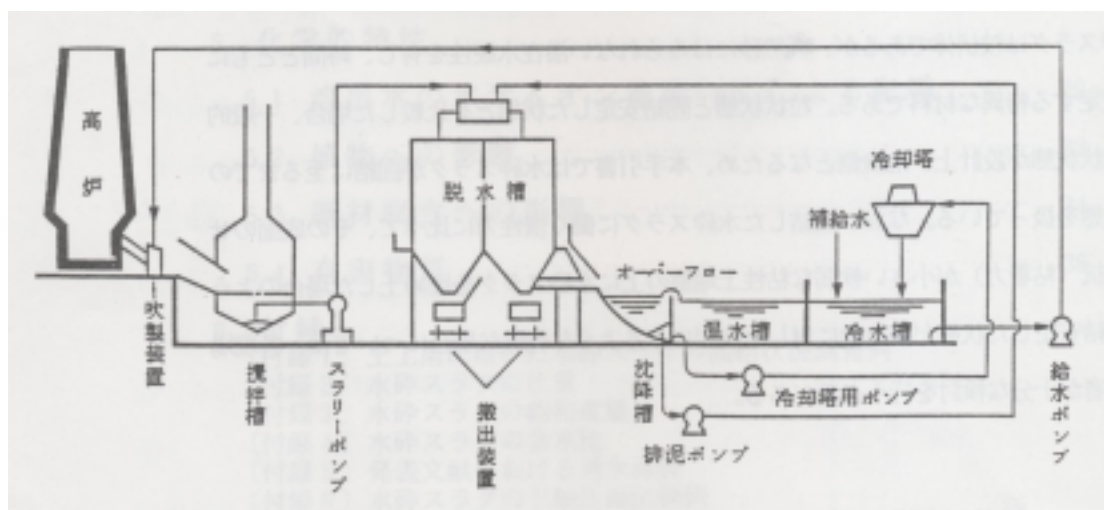


図 1.3 高炉水砕スラグの製造フロー<sup>2)</sup>

## 2) 製鋼スラグの生成

高炉で製造された溶銑やスクラップから、靱性、加工性のある鋼にするのが製鋼工程であり、製鋼炉には転炉、電気炉がある。この製鋼工程で生成するのが製鋼スラグであり、粗鋼 1t 当り約 120kg 生成する。製鋼スラグは高炉徐冷スラグとほぼ同じ方法で加工され、各種用途に用いられる。製造フローを図 1.4 に示す。

### 転炉スラグ

転炉工程では、生石灰を投入し酸素を吹き込み、銑鉄から炭素（C）を除去すると共に、生成したスラグにより燐（P）等の不純物を吸収する。

なお、溶銑を高炉から転炉へ運搬中に硫黄（S）や燐等を除去する予備処理が行われ、この際に発生する溶銑予備処理スラグも転炉スラグに含まれる。

### 電気炉スラグ

電気炉では、スクラップを主原料として鋼を製造する際に電気炉酸化スラグと電気炉還元スラグが発生する。電気炉酸化スラグは、スクラップを溶解し、これに酸素を吹き込み、生石灰等を投入して酸化性のフラックスを生成させてスクラップ中の不純物を除去する酸化精錬時に発生する。電気炉還元スラグ

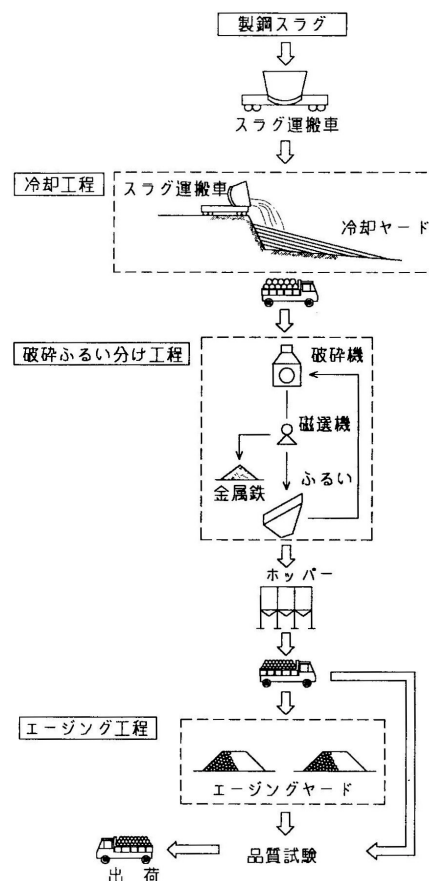


図 1.4 製鋼スラグの製造フロー<sup>3)</sup>

は、酸化精錬終了後に、さらにコークスや生石灰などを加えて還元性のフラックスを生成させて酸素や硫黄を除去する還元精錬時に発生する。

(2) 鉄鋼スラグの生成量

鉄鋼スラグの生成量と銑鉄及び粗鋼生産量推移を図 1.5 に示す。国内の銑鉄生産量は年間 8 千万 t、粗鋼生産量は 1 億 t 前後で推移している。

一方、鉄鋼スラグの生成量は、約 37 百万 t 程度で推移しており、2002 年度では、高炉スラグは 2,350 万 t 生成され、その内訳は水砕スラグが 1,830 万 t、徐冷スラグが 590 万 t である。現在の水砕化率（水砕スラグ生産量 / 高炉スラグ生産量）は 75.7mass% である。製鋼スラグでは転炉スラグが 890 万 t、電気炉スラグが 330 万 t 生成されている。

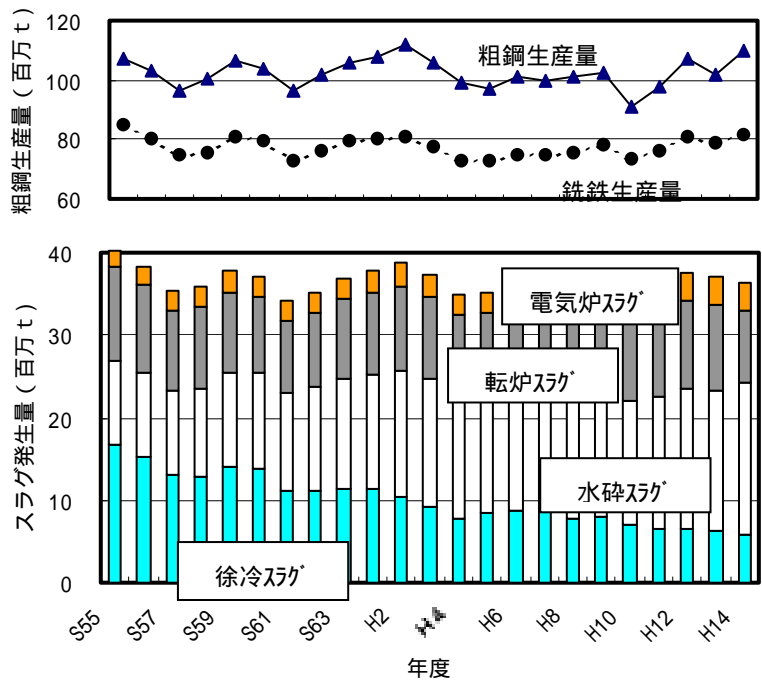


図 1.5 銑鉄及び粗鋼の生産量と鉄鋼スラグの生成量<sup>4)</sup>

1.2 鉄鋼スラグの特性

(1) 鉄鋼スラグの物理特性

鉄鋼スラグは、その製造工程から物理的性質が異なる。表 1.1 に各鉄鋼スラグの形状を示す。高炉スラグの内、水砕スラグはガラス質の粒状で水硬性を持ち、砂に類似している。また徐冷スラグは石状で、どちらの絶乾密度も 2.6g/cm<sup>3</sup> 程度とほぼ碎石や砂と同等である。

水砕スラグは、粒径が 5mm 以下で粒度構成は比較的単粒度である。また、徐冷スラグは人頭大で製造されるが、用途に応じた粒径に加工される。

また、転炉スラグは徐冷スラグと同様石状であるが、鉄分を含むことから絶乾密度は 3.0 g/cm<sup>3</sup> 以上あり、碎石よりも重い特徴を持つ。転炉スラグも徐冷スラグと同様に製造当初は人頭大であるが、各用途に応じた加工がなされる。なお、鉄鋼スラグの物理的性質は、次章で詳細に述べる。

表 1.1 鉄鋼スラグの形状<sup>1)</sup>

種類	高炉スラグ		転炉スラグ
	水砕スラグ	徐冷スラグ	
形状	粒状 (砂状)	石状	石状

## (2) 鉄鋼スラグの化学的性質

鉄鋼スラグの化学成分を表 1.2 に示す。鉄鋼スラグは、採掘した鉱石類が溶融され再結晶化している事から、その成分は普通の岩石、鉱石の成分に類似しており、石灰 (CaO)、シリカ (SiO<sub>2</sub>) が主成分である。

高炉スラグと製鋼スラグは、水に接するとスラグ中の石灰 (CaO) がわずかに溶出し、アルカリ性を呈する。また、微量のシリカ (SiO<sub>2</sub>) やアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の溶出により表面に緻密な水和生成物を形成し、これがスラグの粒子をつなぐ結合材となって時間とともに硬化する性質 (水硬性) を持つ。

鉄鋼スラグの中で製鋼スラグは、水と接触すると膨張する特性がある。これは、製鋼工程で鋼を生成する過程で不要となる Si (ケイ素)、P (リン)、S (硫黄) など除去するため、CaO や微量の MgO が添加され、この一部が溶解されずに製鋼スラグ中に残存するためである。

現在は、この製鋼スラグの膨張性を安定化するため、利用前に水と水和させ膨張させる方法 (エージング) が一般的にとられている。

表 1.2 鉄鋼スラグの化学組成例<sup>1)</sup>

成分 \ 種類	高炉スラグ	製鋼スラグ	山土	安山岩	普通ポルトランドセメント
SiO <sub>2</sub>	33.8	13.8	59.6	59.6	22.0
CaO	42.0	44.3	0.4	5.8	64.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.4	1.5	22.0	17.3	5.5
T-Fe	0.3	17.5	-	3.1	3.0
MgO	6.7	6.4	0.8	2.8	1.5
S	0.8	0.07	0.01	-	2.0
MnO	0.3	5.3	0.1	0.2	-
TiO <sub>2</sub>	1.0	1.5	-	0.8	-

## (3) 鉄鋼スラグの溶出特性

表 1.3 に室蘭製鉄所の鉄鋼スラグの重金属類の溶出試験結果を示す。鉄鋼スラグからの重金属類の溶出については、一部未測定項目はあるが、いずれも基準値以下であり、環境に対する汚染の恐れはない。

表 1.3 溶出試験結果例

項目	高炉水砕スラグ	製鋼スラグ	土壌環境基準 (環告46号)
カドミウム	<0.01	<0.01	0.01以下
六価クロム	<0.05	<0.05	0.05以下
総水銀	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
セレン	<0.01	<0.01	0.01以下
鉛	<0.01	<0.01	0.01以下
砒素	<0.01	<0.01	0.01以下
ふっ素	0.4	<0.8	0.8以下
ほう素		<1	1以下

### 1.3 鉄鋼スラグの利用状況

#### (1) 鉄鋼スラグの用途

H14年度全国の鉄鋼スラグの利用用途を図1.6に示す。H14年度では、鉄鋼スラグはほぼ全量リサイクルしており、埋立量は製鋼スラグが2.2%である。高炉スラグの利用量は、徐冷スラグと水砕スラグの合計を示している。

高炉スラグの内、水砕スラグは微粉碎することで潜在水硬性を持ち、セメントと同様な水和反応をして硬化・強度発現する。このため、高炉スラグの6割りがセメント用途（高炉セメント原料・ポルトランドセメント混合材・コンクリート混和材）に利用されている。また、高炉スラグは塩分等の有害物質を含まず、溶解シリカ量が少ないことからアルカリ骨材反応の原因にならないことから、コンクリート用の細骨材、粗骨材として用いられる。

一方、製鋼スラグは、水硬性があり大きな支持力を確保できることから道路用の路盤材に使用されたり、砂の代価材として港湾工事におけるサンドコンパクションパイル材として地盤改良用途に使用される。さらに、鉄鋼スラグ自体はCaO、SiO<sub>2</sub>、MgO、FeO等の肥料成分も含んでいるため、珪酸石灰肥料（ケイカル肥料）等としても用いられている。

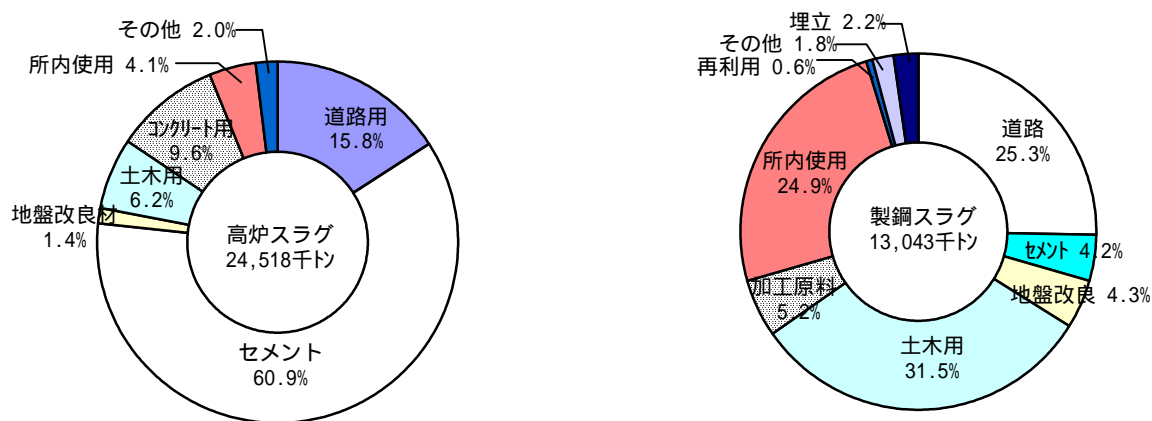


図1.6 鉄鋼スラグの利用用途（H14年度）<sup>4)</sup>

#### (2) 鉄鋼スラグの利用推移<sup>5)</sup>

鉄鋼スラグは、昭和40年代までは製鐵所の工事用資材として使用されており、資源化のニーズはあまり大きくなかった。

しかし、昭和45年前半に粗鋼生産量1億t体制がほぼ整ったのに伴い、大量に生成される鉄鋼スラグの資源化の必要性が顕在化し、昭和47年に(社)日本鉄鋼連盟が「高炉滓」JIS化推進委員会」を設立、その後昭和53年に鉄鋼スラグ協会が設立され、各種鉄鋼スラグ製品のJIS制定、各学協会の各種設計施工指針の制定、官公庁の工事仕様書への記載などが逐次行われるに至った。

図1.7に高炉スラグの利用量推移を示す。高炉スラグは、昭和40年以前には主に製鐵所工事の資材として、埋め立て、土地造成等に使用されていたが、その後は道路路盤材、セメント原料、コンクリート用骨材等に利用が拡大し、昭和54年以降の埋め立て量はゼロとなっている。

一般道路用の路盤材としては徐冷スラグが1960年代後半から利用され始め、昭和55年頃は生成量の50%に用いられていたが、現在は400万t前後で推移している。

現在、高炉スラグで最も使用されているセメント用途は、1970年代のオイルショック、1980年代

のアルカリ骨材反応への対応を背景に、使用量が年々増加している。コンクリート骨材としての用途は、1970年代後半から始まり、昭和51年、昭和56年にJIS規格が制定された。現在、天然骨材の枯渇による需要が拡大しつつあり、H14年度では200万tを超えている。また、土工用としては阪神淡路大震災の復旧工事で使用されるなど、港湾工事での利用が増加傾向にある。

図1.8に、転炉スラグの利用量推移を示す。転炉スラグは、1980年頃までは埋立て量が4~5百万tと生成量の4割りを占めており、高炉スラグに比べ資源化対策が遅れていたが、最近では港湾分野、道路分野での使用が増加し、埋め立て量は約2%まで減少している。

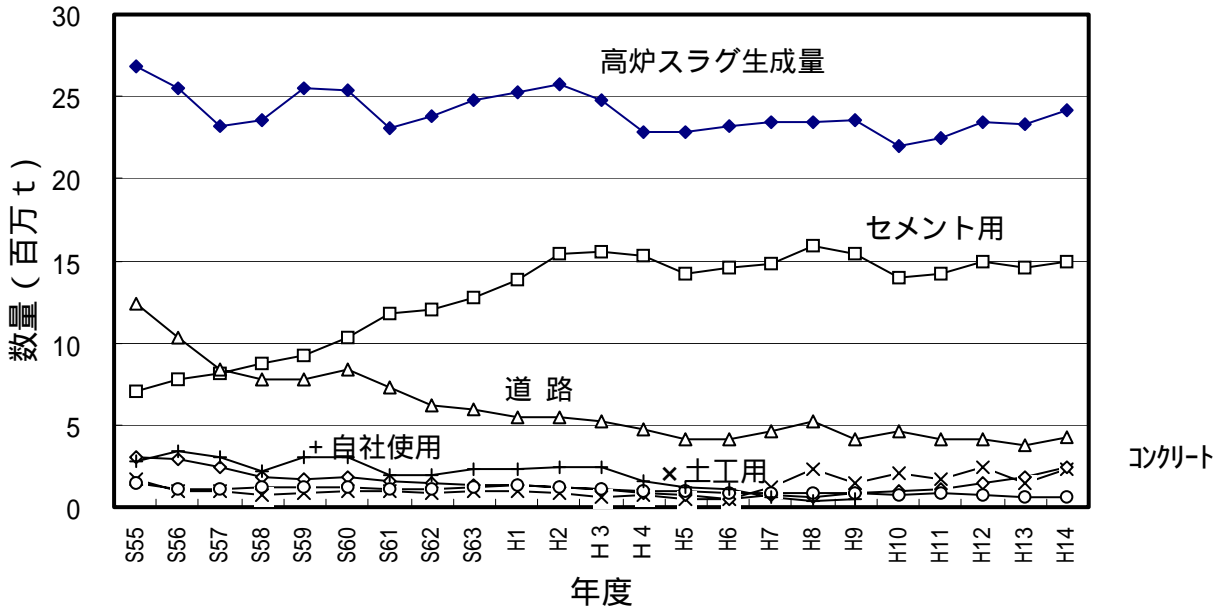


図1.7 高炉スラグの生成量と利用量推移<sup>4)</sup>

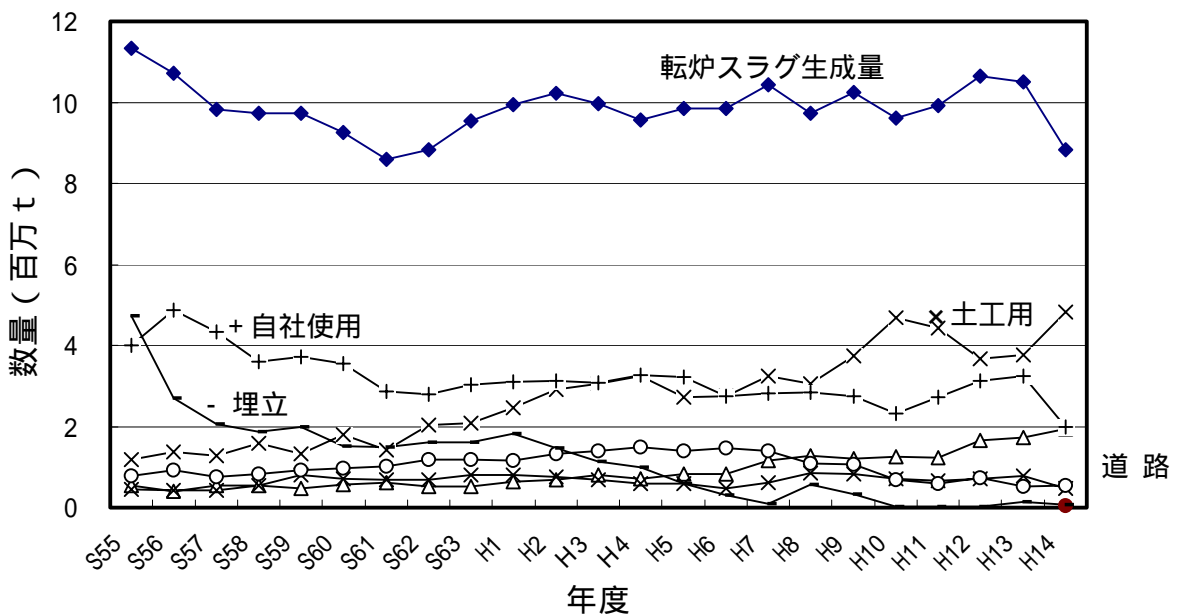


図1.8 転炉スラグの生成量と利用量推移<sup>4)</sup>

鉄鋼スラグの主要用途は、セメント向けである。セメントの内需推移を図1.9に示す。全国のセメント内需量は、80百万t強を境に年々減少傾向にあり、現在は60百万tレベルで推移している。

全セメントに占める高炉セメントの割合は年々拡大傾向にあるが、その数量は頭打ち状態にある。

セメント原料等への副産物・廃棄物の受入状況の推移を図 1.10 に示す。鉄鋼スラグの利用は近年減少傾向にあり、石炭灰等他産業の廃棄物利用が進んでいる。このような中で、国内向けの高炉スラグの利用減を国外セメント向け輸出や、コンクリート骨材等の需要で補っており、今後も高炉セメント比率の増加、コンクリート骨材等のセメント以外の用途への適用拡大が急がれる。

一方で、道路・土工分野ではリサイクル法の制定に伴い建設物の分別解体と再資源化が義務付けられている。表 1.4 に建設廃棄物の発生量と再資源化率を示す。コンクリート塊、アスファルト塊等の建設副産物の発生量は近年頭打ちの傾向にあるが、再資源化率は大幅に上昇している。このため、これらの建設副産物の主な用途である路盤材やアスファルト混合物等の用途で鉄鋼スラグ製品と競合する状況が生まれている。

建設副産物の有効利用は、循環型社会の形成に欠かせない施策であり、鉄鋼スラグ製品も今後は複合路盤材のように互いの特徴を上手く組み合わせ共存できる用途の開発と、これらのリサイクル材料との差別化を図る事が重要になる。

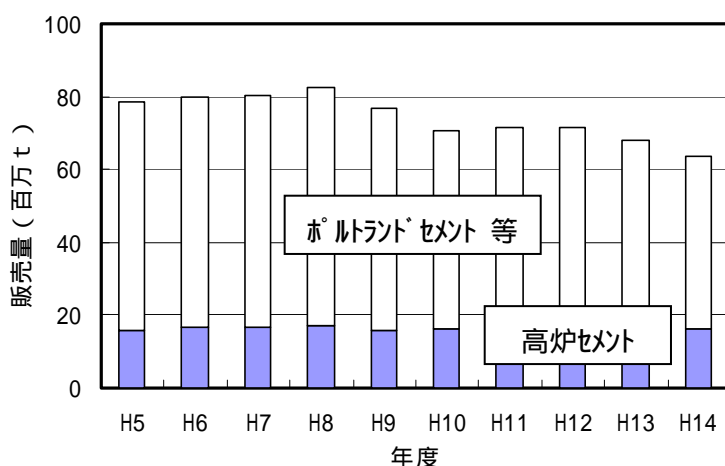


図 1.9 全国セメント販売量の推移<sup>4)、6)</sup>

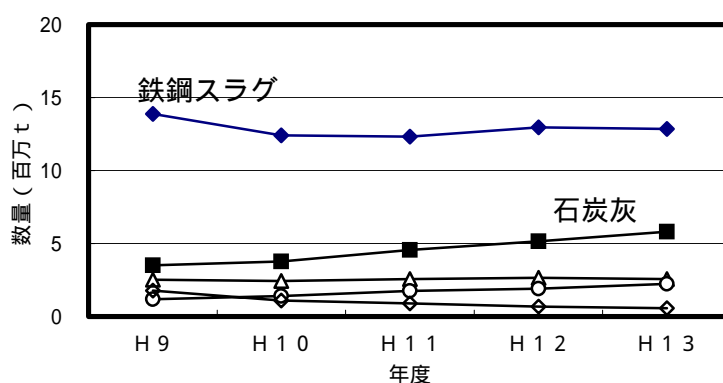


図 1.10 セメント原料の推移

表 1.4 建設廃棄物の発生量と再資源化の推移<sup>7)</sup>

	建設廃棄物発生量						再資源化		
	コンクリート塊	アスコン塊	木材	汚泥	混合	その他	計	量	率
H2	25,438	17,535	7,500	14,413	9,460	1,518	75,864	32,000	42%
H7	36,467	35,654	6,320	9,778	9,523	1,403	99,145	58,000	59%
H12	35,272	30,094	4,770	8,252	4,848	1,516	84,752	72,000	85%

道内では、室蘭製鐵所が銑鋼一貫製鐵所として高炉スラグ、転炉スラグを生成している。全国及び道内のセメント販売量の推移高炉スラグ生成量と利用用途の推移を図 1.11 に示す。

高炉スラグは、H9 年度までほぼ全量を資源化してきた。しかし、全国的なセメント需要の減少と合わせ、北海道のセメント販売量も減少しており、近年のセメント原料への廃棄物受入量の増加と合わせ、現在高炉スラグのセメント向け利用量は減少傾向にある。H14 年度では、高炉スラグは約 60 万 t 生成され、国内セメント原料向けに 34 万 t を出荷するとともに、国外セメント向けの輸出等を拡大している。

一方、転炉スラグの生成量と用途推移を図 1.12 に示す。転炉スラグは、これまで所内の建設利用や土木用途、港湾用途に使用されている。H14 年度の転炉スラグの生成量は 25 万 t であるが、セメント需要の減少にも見られるように、公共事業の減少から需給バランスが変化しつつある。

このため、転炉スラグの持つ高密度、安定性を生かした技術開発、Fe、Si 等の栄養成分を有効に利用した新規用途開拓を進めるなどの取組を進めている。

鉄鋼スラグの利用に関しては、製鐵所が集中している西日本での取組が先行しており、道内においてもこれらの有効な事例を生かした取組が必要と考えている。

鉄鋼スラグは、天然素材にはないユニークな特性を数多く持っており、今後も鉄鋼スラグの特徴を生かしたその幅広い利用用途を PR するとともに、技術開発、用途開発を進めることで、リサイクル社会形成の一助とするとともに、地域環境、地球環境の保全に役立てたい。

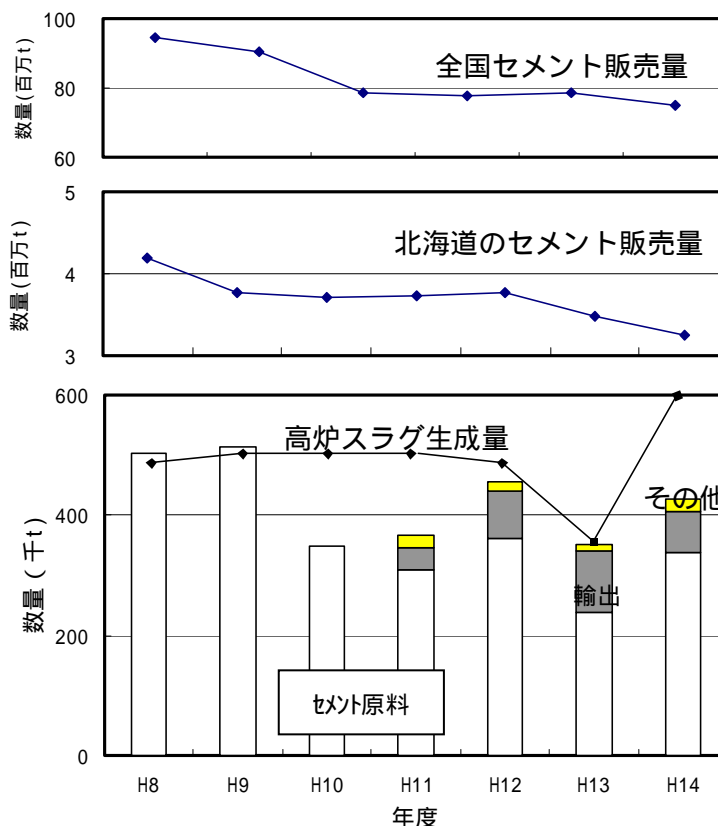


図 1.11 全国及び北海道のセメント販売量と室蘭製鐵所の高炉スラグの利用量推

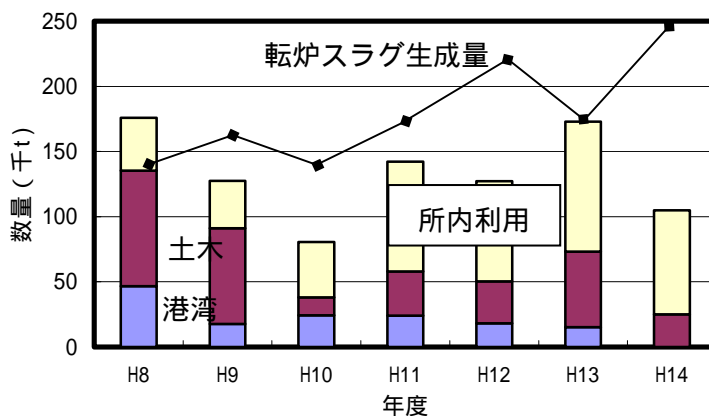


図 1.12 室蘭製鐵所 転炉スラグの利用量推移