

鉄鋼スラグ有効利用の変遷

山中量一・遠山俊一・吉川勇一

鉄鋼事業本部・スラグ建材部

Utilization History of Blast Furnace Slag and Steel-making Slag

Ryoichi Yamanaka · Shun-ichi Tohyama · Yuichi Yoshikawa

At Kobe Steel, 3 million tons of blast furnace slag and steel-making slag are generated per year. The properties of the slag have been investigated and ways of using have been developed since the 1970s. As a result, the effective use of slag properties has been commercialized in applications such as base course materials, aggregate and admixture for use in concrete earthwork material, etc. At present, all of the slag is efficiently recycled in various fields as a useful resource. Such slag materials are also drawing attention from the viewpoint of saving resources and energy.

まえがき = 鉄鋼スラグは、高炉スラグと製鋼スラグを合わせて全国で年間約 3 600 万トン発生しており、その利用については明治末期から研究が進められてきた。とくに、1976 年日本鉄鋼連盟に「スラグ資源化委員会」が設置された後、現在の「鉄鋼スラグ協会」に至る資源化活動により、JIS や施工指針が制定されてきた。

当社でも、鉄鋼スラグの資源化に積極的に取組むべく、1973 年に全社的な「鉱滓利用委員会」を設けて資源化技術の開発に着手し、1976 年には鉄鋼事業部に利材部（現：スラグ・建材部）を発足させて、事業として本格的な取組みを始めた。これまでに、路盤材、コンクリート用細骨材、高炉水砕スラグ微粉末、土木用材料などを商品化してきた。

本稿では、これまでの鉄鋼スラグの商品化技術の歩みとその概要について紹介する。

1. 高炉スラグ

一年間に当社では 260 万トン、全国では 2 300 万トン発生する高炉スラグは、高炉から銑鉄とともに取出された後、比重差により分離され、冷却固化の方法により、徐冷スラグと水砕スラグに分けられる（第 1 図）。

徐冷スラグは、ドライピットまたはヤードに流し出された後、ゆっくりと冷却され、写真 1 a) に示すように岩石状の結晶質体になる。

いっぽう、水砕スラグは熔融状態から、水によって一

気に冷却され、写真 1 b) に示すように砂状の非晶質体となる。当社加古川製鉄所では、すべての高炉に水砕設備を設置しており、水砕化率は 90% を越えている。水



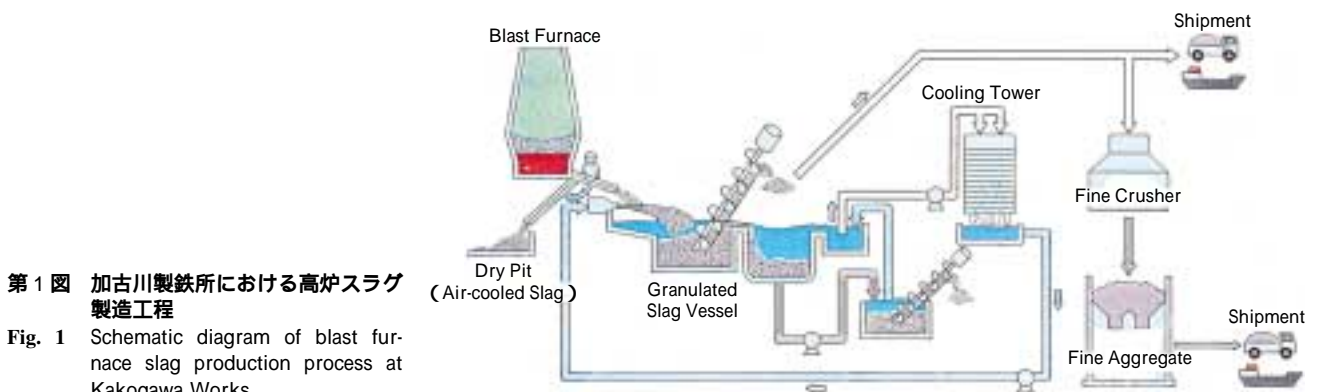
a) Air-cooled Slag



b) Granulated Slag

写真 1 高炉スラグ

Photo.1 Photographs of blast furnace slag



第 1 図 加古川製鉄所における高炉スラグ製造工程

Fig. 1 Schematic diagram of blast furnace slag production process at Kakogawa Works

第 1 表 鉄鋼スラグの化学組成

Table 1 Chemical compositions of blast furnace slag, steel-making slag and other materials

	mass %				
	Blast Furnace Slag	Steelmaking Slag	Mountain Earth	Andesite	Ordinary Portland Cement
SiO ₂	33.6	11.7	59.6	59.6	22.0
CaO	42.0	48.2	0.4	5.8	64.2
Al ₂ O ₃	14.9	2.3	22.0	17.3	5.5
T-Fe	0.2	18.1	-	2.2	2.1
MgO	7.3	6.5	0.8	2.8	1.5
S	0.9	0.1	0.01	-	0.8
MnO	0.2	3.7	0.1	0.2	-
TiO ₂	1.2	1.6	-	0.8	-

碎スラグは、アルカリ性溶液による刺激を受けると急激に水和反応を起こす潜在水硬性を有することや、軽量でかみ合わせがよいことなど、天然材料にない性質を有していることから 徐冷スラグにくらべて利用分野が広い。

第 1 表には高炉スラグの化学組成を示すが、CaO, SiO₂, Al₂O₃ を主成分としており、セメントに似た化学組成をもっている。

2. 製鋼スラグ

一年間に当社では 60 万トン、全国で 930 万トン発生している製鋼スラグは、転炉で酸化精錬の際に生じた酸化物と精錬材からなり、外観は写真 2 に示すような岩石状である。

製鋼スラグの化学組成は第 1 表に示すように、CaO, SiO₂, FeO が主成分であるが、高炉スラグより CaO が多く、その水溶液は強いアルカリ性を示す。また、遊離石灰も少量含まれるため、その吸水反応により水酸化カルシウムが生じ膨張する性質を有している。



写真 2 製鋼スラグ

Photo.2 Photograph of steel-making slag

3. 商品化の歩み

当社における高炉スラグと製鋼スラグの用途別利用量の推移を、それぞれ第 2 図、第 3 図に示す。製鉄所の拡大時期でもあった 1976 年は、自家造成や埋立てが主であったが、その後、路盤材料やセメント用材料、土木用材料を中心に資源としての利用を拡大してきた。

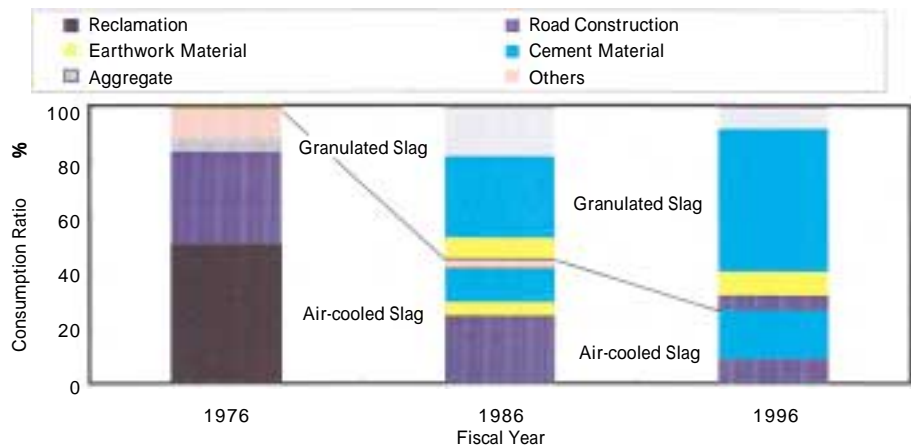
高炉スラグは、水砕スラグの生産量を増加させることにより、多様な用途先の確保が可能となった。製鋼スラグも、膨張対策として蒸気によるエージング技術を確立し、以後、路盤材などへの利用に弾みをつけることができた。

3.1 路盤材用途

破碎して粒度を調整した徐冷スラグは、路盤用粒度調整高炉スラグとして、JIS¹やアスファルト舗装要綱にも規定され、早い時期から大量に使用されてきた。

第 2 図 当社における高炉スラグの用途別利用割合の推移

Fig. 2 History of consumption ratio of blast furnace slag at Kobe Steel



第 3 図 当社における転炉スラグの用途別利用割合の推移

Fig. 3 History of consumption ratio of steel-making slag at Kobe Steel

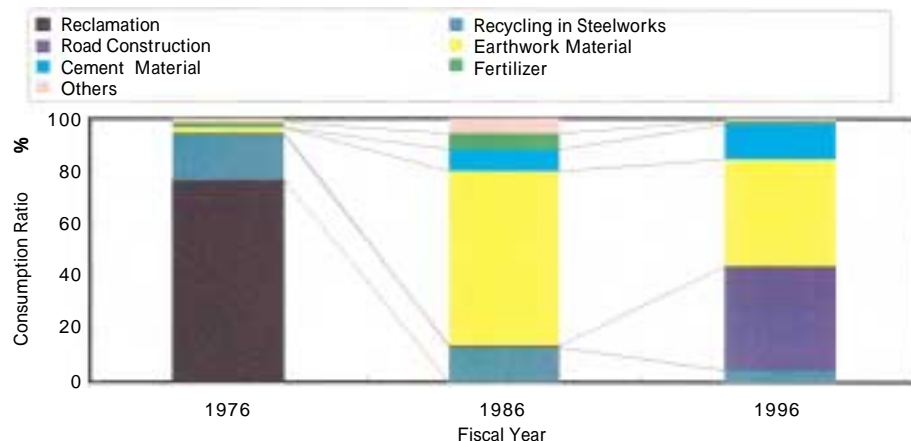




写真3 円形走行試験装置
Photo.3 Photograph of loop model test equipment

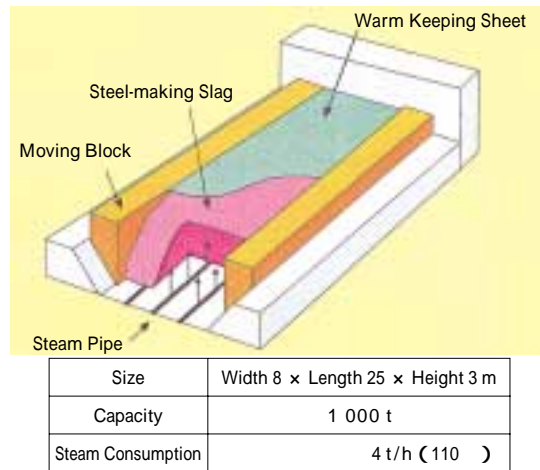
高炉スラグに含まれる硫黄は、黄濁水や硫化水素臭を発生することがあるため、約1~3カ月間屋外に野積みする「エージング」を実施し、水、大気中の酸素や炭酸ガスによって硫黄を安定化した後、路盤材として使用している。

当社では、徐冷スラグのセメント用途の増加や水砕化率向上により、徐冷スラグのみでは路盤材の需要に応じることが厳しくなってきた。そこで、製鋼スラグと高炉スラグ（徐冷、水砕）を複合した路盤材（水硬性粒度調整鉄鋼スラグ：HMS-25）の開発を進めた。

円形走行試験装置（写真3）による試験をおこなった結果、HMS-25は粒度調整碎石とくらべて優れた耐久性を有していることが判明した。実道路による試験でも供用性に優れていることから、1992年に公共工事に使用できる公認を取得して、販売をおこなっている。

膨張性を有する製鋼スラグを、路盤材にもちいる際に必要な6カ月以上の屋外エージング期間を短縮するために「促進エージング方法」を開発した。当初は、スラグを温水に浸漬する方法を実施していたが²⁾、現在では、蒸気による促進エージング処理をおこなっている³⁾⁴⁾。

蒸気エージング設備は、コンクリート製のピット（幅8m、長さ25m、深さ3m）4基に、1基あたり約1000トンの製鋼スラグを投入し、ピット下部より蒸気を吹込む

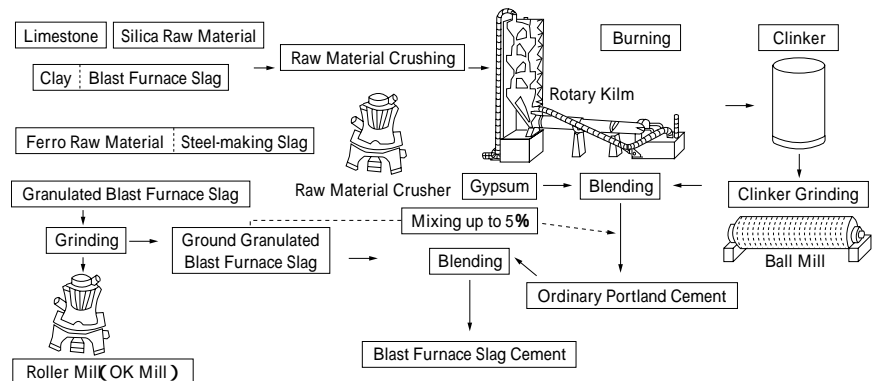


第4図 蒸気エージングピット断面図
Fig. 4 Cross section of steam aging facilities for steel-making slag

構造となっている（第4図）。また、処理中のスラグの膨張圧を緩和するための「移動壁構造」を開発し、これによりコンパクトでメンテナンス性に優れた設備となっている。また、材料表面を覆う保温シートの開閉に移動台車を使用するなど、作業効率の向上を図っている。

3.2 セメント・コンクリート用途

セメントの製造工程を第5図に示す。スラグはセメント原料に必要な成分を有するため、高炉スラグは粘土代替材、製鋼スラグは鉄質原料として使用される。スラ



第5図 セメントの製造工程
Fig. 5 Production process for ordinary portland cement and blast furnace slag cement



写真4 ケイメント
Photo.4 Photograph of Kment

グの使用は、セメントへの石灰分の補充となるため、石灰石の分解にともなうCO₂量、および分解に要するエネルギーを低減することができる。

高炉セメントは、普通セメントと高炉水砕スラグ微粉末を混合して製造したもので、国内でも80年以上の使用実績がある。高炉セメントの約半分はスラグ微粉末であり、クリンカーのみをもちいる普通セメントにくらべ、電力原単位で16%、石灰石および石炭の原単位はそれぞれ40%低減されるため⁵⁾、環境保全の点から有意義な商品である。こうした観点から、高炉セメントとスラグ微粉末は、1990年にエコマーク商品の認定を受けている。

また、スラグ微粉末は、JIS⁶⁾に規定された混和材料として、建築・土木材料としても使用されている。

当社では、1987年に加古川製鉄所既設のボールミルを改造し、スラグ微粉末(商品名:「ケイメント」、写真4)の製造を開始した。1993年には型型ローラミル(OKシリーズミル⁷⁾)に転換し、製造を継続している。

ケイメントは、最終製品であるセメントの強度や凝結などの品質を安定して維持する必要がある。これらの品質には、ミルの操業要因だけでなく、原料となる水砕スラグの性状も影響する⁸⁾。高炉では、こうした性状にも注目して、細やかな操業をおこなっている。

3.3 骨材用途

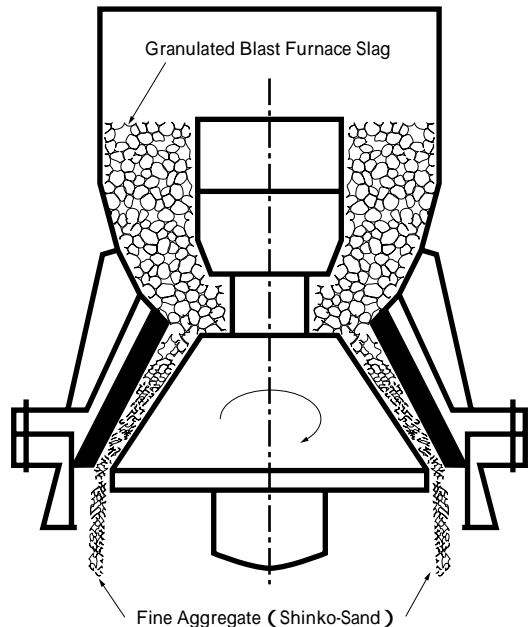
コンクリートにもちいる砂(細骨材)は、近年良質品の入手が困難になりつつあり、品質が安定した工場生産品であるスラグ細骨材に大きな期待がかけられている。

当社では、水砕スラグから製造した細骨材を1973年から「シンコーサンド」という商品名で販売しているが、冷却固化した直後の水砕スラグは、形状や粒径が不均一であるため、当社が開発した粒度調整機である「オートファインクラッシャ」をもちいて破碎・整粒し、製品化している。

第6図に粒調機の概要を示すが、「層圧縮破碎」という概念に基づいた設計であり、細粒の破碎であるにもかかわらず大量の生産を連続的におこなうことができ、良好な粒径分布を有する骨材がえられている⁹⁾。

3.4 土木用途

土地改良や湾岸工事などの土木用途は従来からの用途

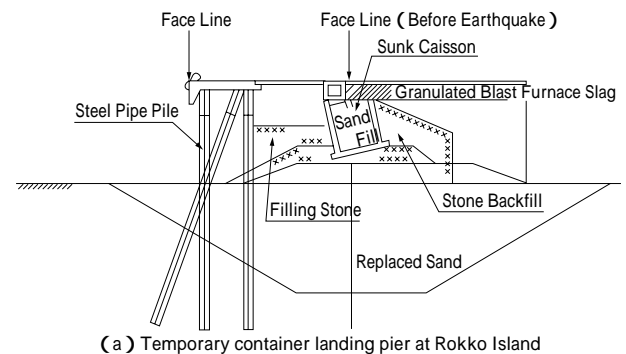


第6図 粒調機(AF型コーンクラッシャ)の概略
Fig. 6 Schematic diagram of AF Crusher

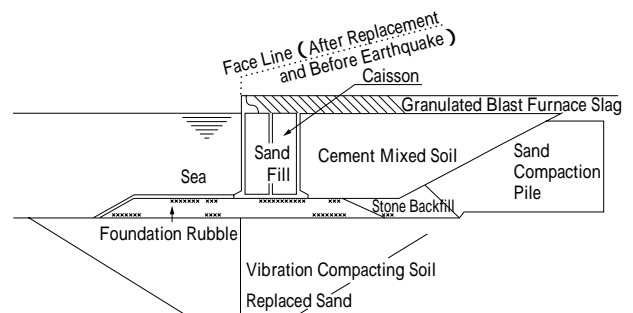
第2表 高炉水砕スラグの材料特性

Table 2 Material properties of granulated blast furnace slag

	Granulated Blast Furnace Slag	Natural Sand Material
Mass of Unit Volume t/m ³	1.3	1.8~2.0
Mass in Water t/m ³	0.7	0.8~1.0
Internal Friction Angle degree	35	30~35



(a) Temporary container landing pier at Rokko Island



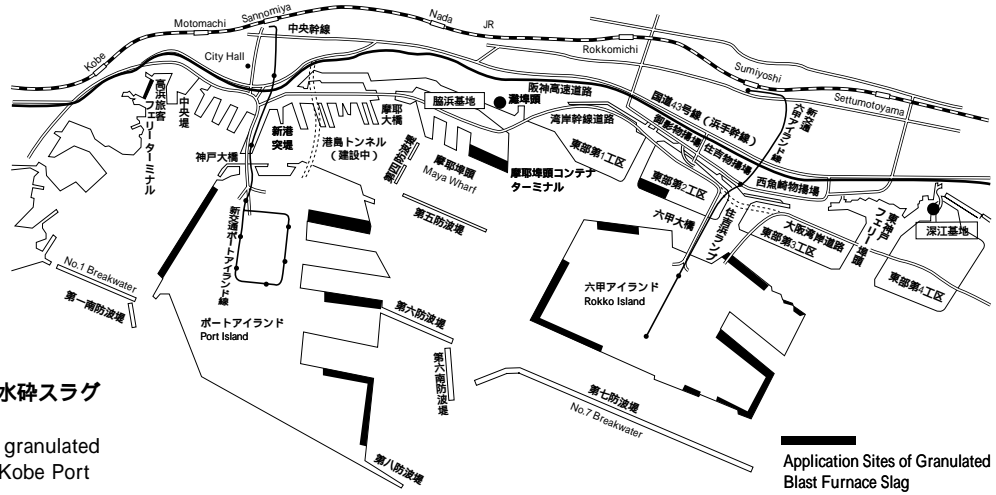
(b) Ferryboat landing pier at Rokko Island

第7図 神戸港復旧工事での水砕スラグ使用箇所断面

Fig. 7 Cross section of quay wall applied by granulated blast furnace slag at Kobe Port

であるが、近年は天然材料にはない水砕スラグの利点を活用できるために、今後の用途拡大が期待される。

水砕スラグは、天然材料にくらべて単位体積重量が小さく、内部摩擦角が大きい(第2表)。また、天然材では通常一回で施工できる層厚が0.3m程度であるのに対



第 8 図 神戸港復旧工事での水砕スラグ
使用場所

Fig. 8 Application sites of granulated
blast furnace slag at Kobe Port

Application Sites of Granulated
Blast Furnace Slag

して、水砕スラグでは一層当たり 1m の施工が可能であるため、工期短縮など施工性が大幅に改善できる。
阪神・淡路大震災において損壊したコンテナターミナルを代替する六甲アイランド緊急コンテナ（仮設）棧橋の整備や、「防災港湾」造りのための耐震強化岸壁工事に、第 7 図に示すように、背後土圧の低減を図る目的で水砕スラグが使用された^{10)~12)}。そのほか、第 8 図¹¹⁾に示すように神戸港の全域にわたって水砕スラグが使用されている。

3.5 新しい用途

鉄鋼スラグを再溶融した後、ナトリウムやコバルトなどの化合物を添加して冷却固化すると、オパールなみの硬度を持つ人造石ができ、添加物質や溶融雰囲気調整によって青や緑、赤などの色付けが可能である(写真 5)。ネクタイピンやペンダントなどの装飾品に使用されるほか、床材やタイル、テニスコートやゴルフ場などにもちいられるカラー砂としての用途も期待される。

鉄鋼スラグはけい酸カルシウム肥料として利用されているが、写真 6 に示すように、水砕スラグを山砂などの土壌と混合して花卉栽培土としても利用することができる。植物成育の促進効果や、透水性の良い水砕スラグによる排水性の改善効果も認められている¹³⁾。

また、製鋼精錬剤として鉄鋼スラグを利用する取組みや溶融スラグを発泡させて新たな機能を付加する試みもなされている¹⁴⁾。



写真 5 カラースラグ
Photo.5 Photograph of colored slag stone



写真 6 水砕スラグ混合土による植物の栽培
Photo.6 Plant growing by using of mixed soil with granulated blast furnace slag

むすび=過去 20 年以上にわたり、鉄鋼スラグの有効利用に取組んできた結果、鉄鋼スラグの優れた特性を見いだすことによって、単なるリサイクル品から付加価値の高い工業製品という地位を築きつつある。欧州では、鉄鋼スラグが廃棄物の範囲から除外された例もあり、リサイクル気運が高まる中、鉄鋼スラグ製品の品質向上や利用技術の開発を積極的に推進し、地球の環境保全にも貢献していきたい。

参 考 文 献

1) JIS A 5015 : 道路用鉄鋼スラグ .
2) 松本順一ほか : R&D 神戸製鋼技報 , Vol.42 ,No.1 (1992) , p.101 .
3) 亀井和郎ほか : 材料とプロセス , Vol.8 ,No.1 (1995) , p.118 .

4) 亀井和郎ほか : 材料とプロセス , Vol.8 ,No.4(1995) , p.1103 .
5) 鐵鋼スラグ協会 : 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用について (平成 3 年版) , p.17 .
6) JIS A 6206 : コンクリート用高炉スラグ微粉末 .
7) 下島克彦ほか : R&D 神戸製鋼技報 , Vol.35 ,No.1(1985) ,p.49 .
8) 山中量一ほか : R&D 神戸製鋼技報 , Vol.46 ,No.3(1996) ,p.32 .
9) 森本秀彦ほか : R&D 神戸製鋼技報 , Vol.29 ,No.2(1979) ,p.46 .
10) 松永康夫ほか : 土木技術 , Vol.52 ,No.2 (1997) , p.83 .
11) 鐵鋼スラグ協会 : スラグニュース (1997 April)
12) 第 52 回土木学会年次学術講演会 (1997) 講演概要 , -B327 , p.654 .
13) 前庭伸雄ほか : グリーン研究報告集 , Vol.38 ,No.2 (1980) , p.49 .
14) 遠山俊一ほか : コンクリート工学年次論文報告集 , Vol.14 , No.1 (1992) , p.269 .