

高炉スラグに関する最近の動向

— 利用拡大に向けた取組み —

竹内 一真*1・檀 康弘*2

高炉スラグの利用には 100 年以上の歴史があるが、近年では、天然資源の保護や環境負荷低減（CO₂削減）を目的として、高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの研究開発などが活発に行われている。本稿では、高炉スラグの製造や供給およびその用途について解説し、最近の動向について述べる。

キーワード：高炉スラグ、高炉スラグ微粉末、環境負荷低減、CO₂削減

1. はじめに

高炉スラグを含む鉄鋼スラグ製品は、官営八幡製鉄所の開所当初より高炉セメントへの利用をはじめとして各方面

で利用されている。それら製品の多くは、日本工業規格（以下、JIS）として規格化されており、そのなかにはグリーン調達の特典調達品目として市場に提供されているものもある。これら製品は、日本各地で供給されており、道路・

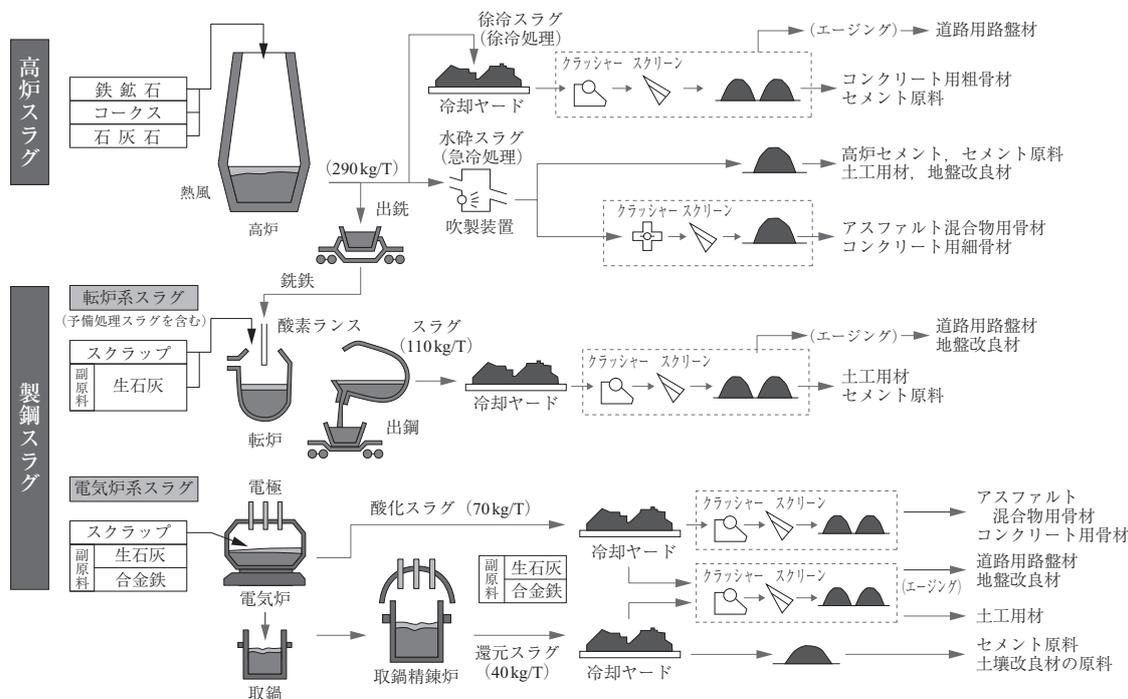


図 - 1 高炉スラグおよび製鋼スラグの製造フローとその用途¹⁾



*1 Kazuma TAKEUCHI

鉄鋼スラグ協会
(日鉄住金高炉セメント(株))



*2 Yasuhiro DAN

鉄鋼スラグ協会
(日鉄住金高炉セメント(株))

港湾・空港などのインフラを支える建設資材として、また海や土壌などの環境修復・改善につながる環境資材として、大きな役割を果たしている。

近年では、環境負荷低減という視点から、高炉スラグ微粉末を多く含有したセメントやコンクリート用スラグ骨材などの研究が盛んに進められており、さらに需要の幅を広げている。ここでは、主に高炉スラグの製造と利用の実態、最近の研究動向などについて概説する。

2. 高炉スラグとは

2.1 高炉スラグの分類と製造方法

図 - 1 は、高炉スラグおよび製鋼スラグの製造フロー

とその用途を示す¹⁾が、ここに示される高炉スラグと製鋼スラグを併せて鉄鋼スラグと呼んでいる。

鉄鋼スラグは、鉄鉱石から鋼を作り出す還元・精錬段階で生まれるシリカ (SiO₂) などの鉄以外の成分が、石灰 (CaO) と熔融・結合した副産物であり、その製造方法により高炉スラグと製鋼スラグに分類される。

高炉スラグは、高炉で鉄鉱石を熔融・還元する際に鉄鉱石に含まれるシリカなどの鉄以外の成分や還元材として使われるコークスの灰分が、副原料の石灰石と結合した副産物である。

他方、製鋼スラグは、高炉で生まれた銑鉄を、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やリン、硫黄などを取り除き、粘り強い鋼に製鋼する工程で発生する副産物である。

高炉スラグは、高炉から取り出された際には、約 1500℃の熔融状態であり、その冷却方法で徐冷スラグと水砕スラグに分類される。

徐冷スラグは、熔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り徐冷処理をすることで、結晶質の岩石状になったものである。

一方、水砕スラグは、熔融スラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却することにより、ガラス質で粒状の水砕スラグとなる。

2.2 高炉スラグの生産状況

図 - 2 に、1975 年以降の高炉スラグの生産量と徐冷および水砕スラグの生産量と高炉比率を示す。なお、高炉比率とは、国内で販売される全セメントの販売量のうち、高炉セメントの販売量を百分率で表した数値である。

図より、高炉スラグの生産量は、1975 年頃から微減傾向にあるものの 25 000 千 t 前後で推移している。一方、水砕スラグは、高炉比率の増加に伴い増加しており、高炉比率が 20% 程度で落ち着くと水砕スラグの生産量も横ばいとなっている。

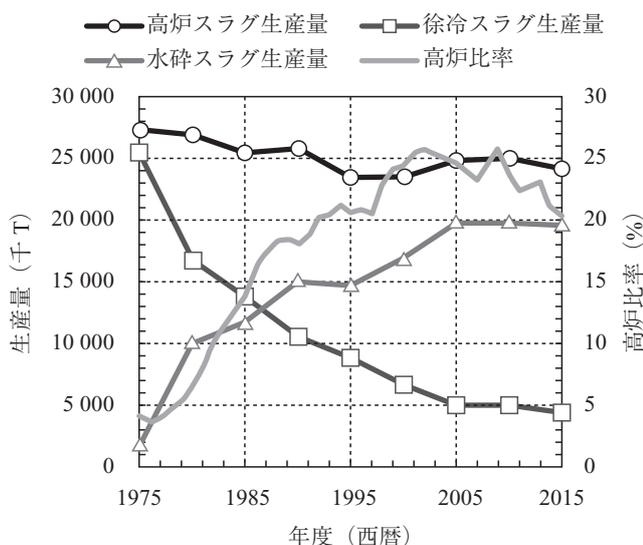


図 - 2 高炉スラグの生産量と高炉比率の関係

2.3 高炉スラグの用途

図 - 3 に徐冷スラグの図 - 4 に水砕スラグの用途を示す。徐冷スラグは道路用 (路盤材) での使用が多いが、次いでコンクリート用、セメント用、土木用などとなっており、比較的用途は多彩である。

他方、水砕スラグは、その用途のほとんどがセメント用である。

なお、それぞれの用途に関して、セメント用はセメント原料および混合材 (混合材に関しては水砕のみ)、コンクリート用は骨材 (徐冷:粗骨材, 水砕:細骨材)、道路用は路盤材, 土木用は裏込め材, 地盤改良材はサンドコンパクションなどが主な用途となる。

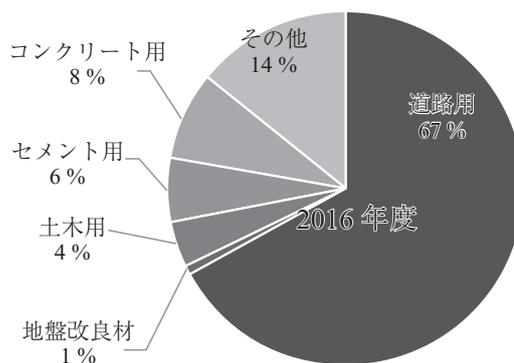


図 - 3 徐冷スラグの用途 (全使用量: 4 297 千 t)

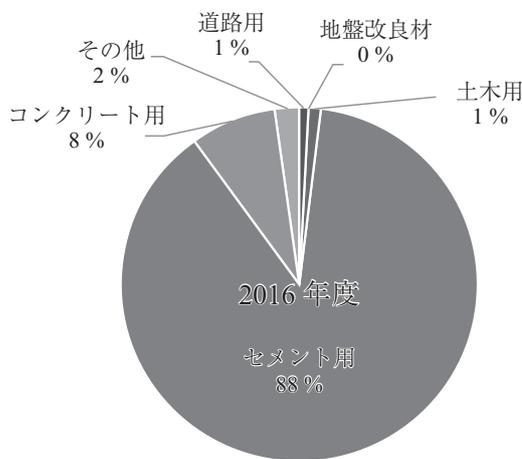


図 - 4 水砕スラグの用途 (全使用量: 19 600 千 t)

3. 高炉スラグの特徴

高炉スラグは、表 - 1 に示すように、その製造の過程から石灰 (CaO) とシリカ (SiO₂) を主成分としており、そのほかの成分としてアルミナ (Al₂O₃)、酸化マグネシウム (MgO) と少量の硫黄 (S) などを含んでいる。これらの成分は、天然岩石や鉱物など自然界に存在するものであり、化学組成は普通ポルトランドセメントや一般の砕石または砂と類似している。

表 - 1 高炉スラグの化学組成 (単位: %)

成分	種類	高炉スラグ	安山岩	普通セメント
CaO		41.7	5.8	64.2
SiO ₂		33.8	59.6	22.0
T-Fe		0.4	3.1	3.0
MgO		7.4	2.8	1.5
Al ₂ O ₃		13.4	17.3	5.5
S		0.8	-	2.0
P ₂ O ₅		< 0.1	-	-
MnO		0.3	0.2	-

高炉スラグの化学成分は、徐冷スラグと水砕スラグとも同じであるが、冷却プロセスの違いから、外観・物理的性質および鉱物的性質はまったく異なるという性質を有する。

徐冷スラグは、結晶質の塊状で、天然岩石と同じような性質をもち、碎石工場で破碎・粒度調整をしたものが、主に道路用路盤材、コンクリート用粗骨材などに使用されている。

他方、水砕スラグは、ガラス質（非結晶）の粒状であり、セメント（アルカリ刺激）と水が共存すると、スラグそのものがセメントと同じように水和反応を示し硬化・強度発現する性質（潜在水硬性）を有している。この特性を活かして、高炉セメントの混合材やコンクリート用混和材（高炉スラグ微粉末）として使用されている。

高炉スラグ微粉末（高炉セメントも含む）を使用した場合は、ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末を置換して使用されることから、セメントを製造する際のCO₂発生量を大きく削減することができる。

一例として、LCA（ライフサイクルアセスメント）データベースの値²⁾を表-2に示す。表より、普通ポルトランドセメントのCO₂排出量はセメント1kgあたり772gであるのに対し、高炉セメントB種は1kgあたり437gであり、およそ43%のCO₂の削減効果があることが分かる。

また、副産物である高炉スラグを使用することから天然資源（石灰石や石炭など）の使用量を大きく削減できることも大きな特徴である。

ここで、高炉スラグの用途としてもっとも利用されている高炉セメントについて、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較した高炉セメントB種を使用したコンクリートの特徴を以下に示す。

1) フレッシュコンクリートの性状

ワーカビリティに優れ、条件によっては同一のスラ

表 - 2 セメント種類とCO₂排出量試算例²⁾

種類	項目	CO ₂ 排出源		計
		石灰石 脱炭酸	化石 エネルギー	
普通ポルトランドセメント		480 g/kg	292 g/kg	772 g/kg
高炉セメント B 種		268 g/kg	169 g/kg	437 g/kg
	削減率	44 %	42 %	43 %

ンプを得る単位水量を低減することができる。

2) 強度特性

材齢7日程度までの圧縮強度の発現は遅くなるが、材齢28日以降の強度の伸びが大きく、普通ポルトランドセメントを上回る。

3) 中性化

促進中性化試験による中性化速度はやや大きくなるが、最近の実構造物の調査結果で、セメント種類の差が小さいことが報告^{3,4,5)}されている。

4) 収縮特性

乾燥収縮における、セメント種類の影響は小さい⁶⁾。

5) 耐塩害性

耐海水性および塩分侵入の抑制効果が大きく、海洋環境下や融雪剤散布環境下において、鉄筋を保護する性能に優れている。

6) アルカリシリカ反応抑制効果

スラグ置換率が40%以上の場合、アルカリシリカ反応抑制効果がある。

7) 耐凍害性

凍結融解作用に対して適切な空気量を確保したコンクリートの場合、セメント種類による耐凍害性の差はない。

8) 温度依存性

温度依存性が大きく、低温時は緩やかに反応し、高温時は反応が促進される。

9) 養生

高炉セメントを用いたコンクリートは、水和反応が遅いため、湿潤養生の期間を延長するなど入念に養生を行う必要がある。

4. 高炉スラグの利用拡大に向けた取組み

高炉スラグは、前述したように徐冷スラグと水砕スラグの2種類がある。

徐冷スラグは、図-3に示したように道路用の路盤材としての使用が主であり、1960年代から研究が開始され、1979年にはJISが制定されている。他方、コンクリート用骨材としての利用は、1970年代より技術開発が行われ、高炉スラグ粗骨材が1977年に細骨材が1981年にJISとして制定されている。

現在は、JIS A 5011-1:コンクリート用スラグ骨材-第1部の高炉スラグ骨材として粗骨材と細骨材が統一された規格となっており、粗骨材は徐冷スラグ、細骨材は水砕スラグと規定されている。

高炉スラグ骨材は、アルカリシリカ反応において、化学法で無害の評価であり、さらに細骨材の一部に置換することで乾燥収縮の低減効果がある。最近では、耐酸性などの化学薬品に対する抵抗性が高いことも確認されている。今後は、良質な天然骨材の枯渇化がさらに進むなか、有用な代替骨材として、利用の拡大が期待される。

水砕スラグは、主に高炉セメントの混合材あるいは高炉スラグ微粉末として使用されており、JIS R 5211に「高炉セメント」、JIS A 6206に「コンクリート用高炉スラグ微粉末」の規格がある。

2013年のコンクリート用高炉スラグ微粉末の規格改正時には、高炉スラグ微粉末3000の規格が追加されている。この高炉スラグ微粉末3000は、汎用の高炉セメントB種より低発熱性を有する高炉セメントのニーズに応えるために、後述する低発熱型高炉セメント用の混合材として製造が始まったものである⁷⁾。

低発熱型高炉セメントB種は、従来から多くの施工実績のあるダム用高炉セメントに改良を加えたものであり、高炉セメントB種のJISに適合する製品となっている。特徴としては、汎用の高炉セメントB種と比較すると、コンクリートの水和発熱を低下させるため、粉末度を小さくし、高炉スラグの分量を高炉セメントB種の規格の上限近くまで増加させ、さらにせつこうを添加することによりSO₃量を増加させている^{7, 8)}。現在では、マスコンの温度ひび割れ抑制対策としての採用実績も増えており、橋脚や橋台、上下水道施設などの施工に使用されている。

そのほか、最近の動向として、大手のゼネコンを中心に高炉スラグを高含有したセメントあるいは高炉スラグを結合材として多量に使用したコンクリートの研究開発が行われており、実用事例も増えている。

一例をあげると、ゼネコン、大学、セメントメーカー、混和材メーカーの共同で開発した、セメント生産におけるエネルギー消費量とCO₂排出量を汎用的なセメントよりも6割以上削減できる、エネルギー・CO₂・ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステムがある⁸⁾。これは高炉セメントC種の範囲で結合材の量を調整したセメントを使用しており、この技術を用いることで、一般的なコンクリートに比べCO₂排出量が60%程度削減させることが可能となる。このほかにも、さらなる環境負荷低減効果を目的とした、高炉セメントC種以上の置換率で高炉スラグ微粉末を使用する研究なども盛んになってきている。

また、高炉スラグ微粉末は、比表面積を大きくすることで初期強度が増加する。そのため、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末6000に置換しても、早強ポルトランドセメントと同程度の初期強度を確保することが可能となる。この特性を活かした、高炉スラグ微粉末6000をプレストレストコンクリートに適用する技術も開発されており、実績も数多くある。高炉スラグ微粉末はとくに塩害への耐久性が高いため、沿岸構造物などへの実績が多いが、近年は融雪剤散布による塩害やアルカリシリカ反応による劣化が問題視されている橋梁上部工の桁や床版において、採用されることも多くなってきている。

そのほか、高炉スラグ微粉末を用いた派生技術として、超微粒子の無機系の高炉スラグ注入材、流動性保持時間の長い高流動無収縮グラウト材、材料分離抵抗性が高く、高い平滑度と高強度が得られるセルフレベリング材のほか、特殊土用セメント系固化材にも用いられている。

5. おわりに

ここまで、高炉スラグの製造、用途、特徴そして、これまでの取組みや動向について述べてきた。

高炉スラグは、鉄鉄の製造に欠かすことのできない副産物であり、100年以上前からさまざまな利用方法が検討され、現在では多方面で活用されている。

今後、環境負荷低減や天然資源の保護の面から、高炉スラグに関わる製品の利用がさらに進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ協会ホームページ
- 2) 一般社団法人セメント協会：セメントのLCIデータの概要、2017年2月7日
- 3) 依田彰彦：40年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果、セメント・コンクリート論文集、56、pp.449-454、一般社団法人セメント協会、2002年
- 4) 一般社団法人日本鉄道施設協会：土木工事標準仕様書（東日本旅客鉄道(株)編）、2010年
- 5) 石田哲也：コンクリート構造物長寿命化に資する品質保証/性能照査統合システムの開発、国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書、研究期間2008～2009年度
- 6) 一般社団法人セメント協会 コンクリート専門委員会：JCA Report 各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮に関する実験結果、セメント・コンクリート、No.774、pp.3-9、一般社団法人セメント協会、2011年8月
- 7) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用、2017年版
- 8) 藤原稔ほか：低発熱型高炉セメントB種の特性と施工例、コンクリート工学、vol.47、No.3、pp.10-15、公益社団法人日本コンクリート工学会、2009年3月
- 9) 和地正浩ほか：高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究（竹中技術研究報告）、No.67、pp.1-6、株式会社竹中工務店、2011年
- 10) 鉄鋼スラグ協会：環境資材 鉄鋼スラグ
- 11) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報、平成27年度実績
- 12) 檀康弘：特集/産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用-課題と展望- /3. コンクリート用混和材としての現状「高炉スラグ微粉末」、コンクリート工学、Vol.52、pp.387-392、公益社団法人日本コンクリート工学会、2014年5月号

【2017年8月28日受付】