

JFE スチールの鉄鋼スラグ製品と新規有効利用技術

Ironmaking and Steelmaking Slag Products and its New Effective Utilization Technology

松本 剛 MATSUMOTO Takeshi JFE スチール スラグ事業推進部長 (理事)
 當房 博幸 TOBO Hiroyuki JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員 (部長)・博士 (工学)
 渡辺 圭児 WATANABE Keiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長・博士 (工学)

要旨

JFE スチールの鉄鋼スラグ製品を紹介する。また、環境修復や天然材料代替に有効な新規有効利用技術の近年の開発状況について述べる。

Abstract:

Lineup of ironmaking and steelmaking slag products of JFE Steel is introduced. And the development processes of the new technology which is effective for environment restoration and natural material substitution in recent years are also presented.

1. はじめに

鉄鋼製品を製造する際に必然的に発生する副産物である鉄鋼スラグを、鉄鋼会社では有用な材料“鉄鋼スラグ製品”に加工して販売している。日本国内製造される鉄鋼スラグ製品の年間販売量は、約4千万tの膨大な量になる¹⁾。工業的に製造された材料としての国内での生産量は、砕石、粗鋼、セメントの次に多く、ほぼガソリンと同じ量である²⁾。

JFE スチールでは、鉄鋼スラグの特性を活かした“鉄鋼スラグ製品”を製造、販売している。ここでは“鉄鋼スラグ製品”ごとの特性と用途について紹介する。

また、新たな特性を見出して活用する技術や大きく品質を改善する技術の開発にも JFE スチールでは日々取り組んでいる。それらの最近の成果について報告する。

2. 鉄鋼スラグ製品の製造と管理

2.1 鉄鋼スラグ製品の製造工程

鉄鋼スラグには、高炉で鉄鉱石を還元して鉄を作る製鉄工程で発生する高炉スラグ、転炉または電気炉で鉄を精錬して鋼を作る製鋼工程で発生する製鋼スラグがある。図1に鉄鋼スラグ製品の製造工程を示す³⁾。高炉および転炉では、基本的には溶銑、溶鋼の成分、温度を優先して操業しているが、スラグ製品の用途によっては必要なスラグ成分の調整を行っている。次に冷却・凝固工程では、ゆっくり冷やし結晶質の塊状に凝固する徐冷と、水で吹き飛ばして急速に冷却しガラス質の細粒にする水砕がある。破碎・粒度調整工程では、用途に応じて要求される粒度分布範囲内になるよう調整する。路盤材製品では、破碎・粒度調整後にエー

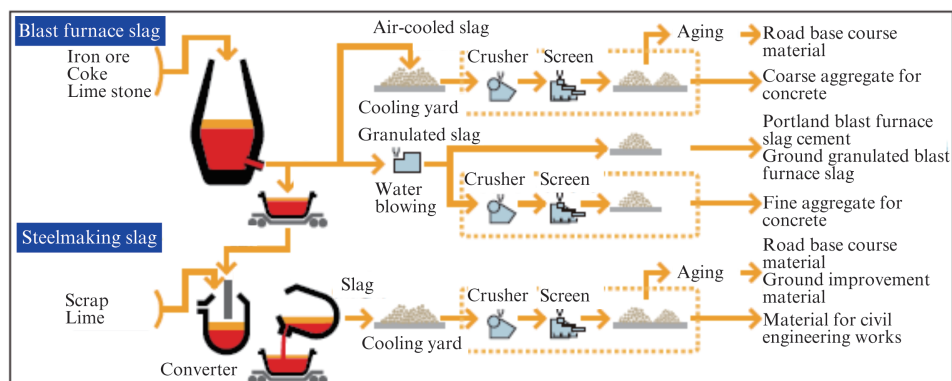


図1 鉄鋼スラグ製品の製造フロー

Fig. 1 Ironmaking and steelmaking slag processes

ジングする。最後に、製品品質を検査後、出荷する。

2.2 鉄鋼スラグ製品の管理

セメント、コンクリート用骨材、路盤材等、鉄鋼スラグ製品の主要な用途については、JIS規格が制定されている。その規格に従い品質を管理している。

さらに、鉄鋼スラグ製品の品質管理、販売管理については、鉄鋼スラグ協会が定めた「鉄鋼スラグの管理に関するガイドライン」¹⁾に従い、管理している。環境安全品質（重金属の溶出量、含有量）が規格を満足することを確認し、出荷している。さらに、ガイドラインに基づきマニュアルを制定し、受注前調査、納品先への説明、施工中調査、施工後調査等を実施している。

3. 鉄鋼スラグ製品

3.1 セメント用原料

高炉スラグはセメント向けに最も多く利用されており、国内、輸出合わせて全国で年間 17.8 百万 t 販売されている¹⁾。高炉セメントは、**写真 1** の高炉水砕スラグを微粉砕した高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントと混合して製造される。JFE スチールでは、国内外のセメントメーカーに高炉水砕スラグを販売している。JFE スチールで製造した高炉水砕スラグの一部は、千葉リバーメント、水島リバーメントで微粉砕し高炉スラグ微粉末を製造している。

高炉セメントに混合できる水砕スラグの品質は、セメントメーカーごとに厳格に規定されている。化学成分は塩基度で規定されており、各社の規格に応じて高炉スラグの塩基度調整や塩基度による選別を実施している²⁾。

3.2 道路用路盤材

道路用鉄鋼スラグ路盤材として、上層路盤用に「水硬性粒度調整スラグ HMS-25」, 「粒度調整鉄鋼スラグ MS-25」を、下層路盤用に「クラッシュラン鉄鋼スラグ CS-40, CS-30」を製造、販売している。これらの製品は「JIS A 5015 道路用



写真 1 高炉水砕スラグと高炉スラグ微粉末

Photo 1 Water granulated blast furnace slag and ground granulated blast furnace slag



写真 2 鉄鋼スラグ路盤材と道路施工状況

Photo 2 Iron and steel slag for road construction and example of construction



写真 3 蒸気エージング設備（加圧式と常圧式）

Photo 3 Steam aging plants (pressure type and ordinary pressure type)

鉄鋼スラグ”の規格を満足する。

写真 2 に鉄鋼スラグ路盤材とその施工状況を示す。

鉄鋼スラグ路盤材は天然砕石を代替して使用できる。含水比に対する鋭敏性が低く、作業中雨が降り出した場合にも、締め固め作業の続行が可能である。締め固め性状が良好で、施工直後の交通開放が可能である。施工後長期間にわたって水硬性が発現するため、耐久性にも優れ、メンテナンスコストが低減できる。コンクリート・アスファルト等の再生路盤材の補足材として使用できる。特に HMS-25 は水と接すると徐々に硬化する水硬性を持ち、等値換算係数 0.55 で設計でき、少ない材料で路盤を施工できる³⁾。

高炉スラグは、黄水が溶出しないよう 3 ヶ月以上エージングする。その後、呈色試験を実施し、黄水が生成しないことを確認後、出荷する。

塩基度が高い製鋼スラグでは、転炉に投入した石灰が未溶解で残留したり、冷却時に析出してフリー CaO として存在している。このフリー CaO が水と接触すると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ になって膨張する。そのため、**写真 3** のエージング設備で蒸気エージングして、予め $\text{Ca}(\text{OH})_2$ まで水和させ、膨張を抑制してから路盤材製品にする。

3.3 高炉スラグ細骨材

高炉水砕スラグは、**写真 4** のコンクリート用細骨材、いわゆる砂にも利用される。細骨材は高炉水砕スラグの用途では 2 番目に多く、国内で年間 1.8 百万 t 販売されている¹⁾。



写真4 高炉スラグ細骨材

Photo 4 Blast furnace slag fine aggregate

セメント用とは異なり、細骨材用の水砕スラグには、密度が高く硬質なものが求められる。さらに、利用される地域によって必要とされる粒度分布が異なる。

西日本製鉄所福山地区では、高密度の水砕スラグを選別し中目砂相当の高炉スラグ細骨材を製造している。東日本製鉄所千葉地区では、細骨材専用の水砕スラグ製造設備を設置し、粗目砂相当の粗粒高密度高炉スラグ細骨材を製造している⁴⁾。どちらも水砕スラグの角を取る磨鉢処理後、固結防止剤を添加し、貯蔵時の固結を防止している。近年、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、耐硫酸性、凍結融解抵抗性、耐塩害性に優れる知見が得られている⁵⁻⁷⁾。

3.4 鉄鋼スラグ水和固化体

JFE スチールでは、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を主原料とした鉄鋼スラグ水和固化体⁸⁾を開発し、製造している。製鋼スラグ水和固化体の配合例を図2に示す。製鋼スラグ水和固化体は、製鋼スラグを砂や砂利の代替に、高炉スラグ微粉末を結合材とし、通常のコンクリートと同様に、練り混ぜ、打設、養生して製造する。製鋼スラグから溶け出すCaイオンのアルカリ刺激が、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出し、水和反応により固化する⁹⁾。

練り混ぜ後は、生コンクリートと同様に扱うことができ、

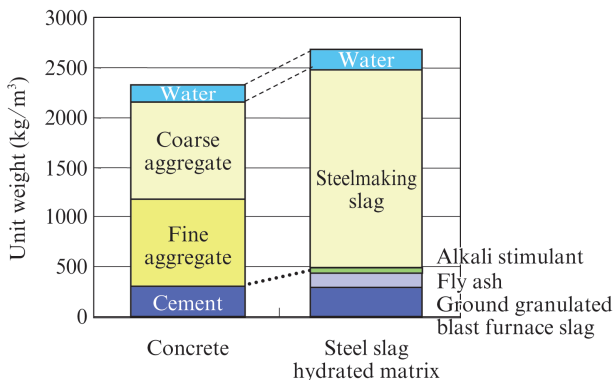


図2 鉄鋼スラグ水和固化体の配合例

Fig. 2 Mixture of steel slag hydrated matrix

型枠でコンクリートブロック同様に成形したものや、固まった後に破碎して岩石状にする写真5のフロンティアロック[®]を製造している。製鋼スラグは、発生する工場、工程ごとに成分や粒度分布が異なる。固化体の強度を確保するため、用いるスラグに応じて製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末他の配合を調整して製造している。水和固化体のアルカリ成分の溶出性は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートよりも小さい。そのため、海域で使用した場合、コンクリートよりも生物付着性が優れるという特徴があり、港湾工事用の石材やブロックとして利用されている^{10,11)}。

3.5 地盤改良用製鋼スラグ（サンドコンパクションパイプ用）

天然砂に比べ単位体積重量が大きく、せん断抵抗角が大きいという土質工学的特性を活かし、製鋼スラグは地盤改良工事のサンドコンパクション用材料として利用できる。40°以上のせん断抵抗角を確保できることから、天然砂と比較し、地盤改良幅を縮小でき、工事費が低減できる。

製鋼スラグのアルカリ溶出の影響する範囲は、杭から1mまでで、周辺地盤には影響しないことを確認している¹²⁾。

3.6 マリンストーン[®]

海域の環境改善材料として、マリンストーン[®]を製造、販売している。マリンストーンは製鋼スラグを粒度調整した製



写真5 人工石フロンティアロック[®]

Photo 5 Frontier rockTM



写真6 サンドコンパクションパイプ施工状況

Photo 6 Sand compaction pile method



写真7 マリンストーン®
Photo 7 Various Marine stone™ products

品で、写真7の3種類の粒度の製品、マリンストーン10、マリンストーン30、マリンストーン85を揃えている。浅場や藻場の基盤材に適した材料で、岩国飛行場藻場・干潟工事 242 000 m³、山口県東部海域藻場造成事業 24 500 m³に採用され、海藻や貝などの生物付着基盤となっている^{13,14)}。

3.7 カルシア改質材

カルシア改質材¹⁵⁾は、転炉系製鋼スラグを原料とし、成分管理と粒度調整した材料である。図3のように、軟弱な浚渫土と混合することで、吸水効果と水和反応により浚渫土の強度を増進したカルシア改質土になる。このカルシア改質土は、粘性が高いため、水中投入時の濁りの発生が著しく抑制される。また、リンや硫化物の吸着する性質も有する。カルシア改質土に改質することで、水分の多い軟弱な浚渫土を浅場干潟造成、浚渫窪地の埋戻し、埋立てなどに活用できるようになる¹⁶⁻¹⁸⁾。

3.8 土工用水砕スラグ

水砕スラグは、護岸背後の裏込め材・埋立材や軟弱地盤の覆土材、路床、盛土用などの土工用途に幅広く利用されている。土工用水砕スラグとその施工例を写真8に示す。土工用水砕スラグの特徴は、天然砂より軽量でありながらせん断抵抗角は35°以上、修正CBRが20~30%と天然砂以上の強度がある。また、水砕スラグ水硬性を有し、経時的に固結して、地震時の液状化に対する抵抗性が大きくなる³⁾。

3.9 土工用製鋼スラグ

土工用製鋼スラグは、土地造成材、載荷盛土、中仕切堤

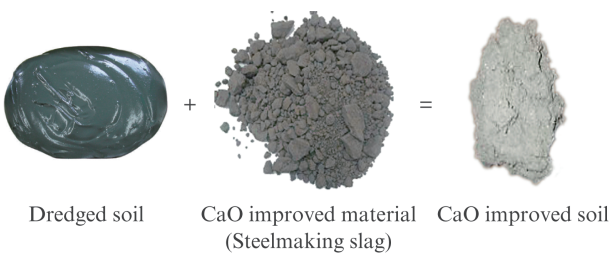


図3 カルシア改質材
Fig. 3 CaO improved soil



写真8 土工用水砕スラグと岸壁での施工例
Photo 8 Water granulated slag for civil engineering works and example of construction for quay



写真9 土工用製鋼スラグと農道での施工例
Photo 9 Steel slag crushed stone for civil engineering works and example of construction for farm road

用材、工事用道路材などとして幅広く使用されている。土工用製鋼スラグとその施工例を写真9に示す。

天然碎石の路盤材料と比べ単位容積質量が大きく、せん断抵抗角は40°以上ある。品質は、建材試験センター規格「JSTM H 8001 土工用製鋼スラグ碎石」に規定されている。本規格に従い、粒度を調整し、環境安全品質を管理して、土工用製鋼スラグ製品を製造している。

4. 新規有効利用技術の開発

4.1 海域底質環境改善材

2010年9月に福山市から福山内港奥部で発生している悪臭に関する相談を受け、広島大学と共同で、同海域のヘドロ状底泥から硫化水素臭が発生する問題の解決を目指し、「マリンストーン®」を活用した硫化物抑制のフィールド実証試験を行った。その結果、硫化水素発生の抑制や底生生物の生息などの底質改善効果を確認した¹⁹⁻²¹⁾。

広島県の「福山港 港湾海域環境創造工事（内港地区）」における底質改善材としてマリンストーンが採用された。福山港内港（広島県福山市）の約66 000平方メートルに約38 000トンの「マリンストーン」が敷設された。マリンストーンの施工状況を写真10に示す。

この閉鎖性海域のマリンストーンによる環境改善効果が評価され、広島大学とともに、2015年には「第12回エコプロダクツ大賞」の「農林水産大臣賞（大賞）」を、2016年に



写真10 福山内港へのマリンストーン®施工状況
Photo 10 Construction of Marine stone™ in Fukuyama inner harbor

は「第26回日経地球環境技術賞」の「優秀賞」を受賞した。

4.2 フェロフォーム®舗装

製鉄所内の道路では、コイル搬送車や大型ダンプが走行するため、一般道よりも過酷な荷重条件下にあり、アスファルト・コンクリート舗装では、表面の劣化の進行が早い。耐久性向上には、コンクリート舗装への置き換えが有効である。このコンクリート舗装を鉄鋼スラグ水和固化体に代替したフェロフォーム®舗装を製鉄所内の道路に適用している。普通コンクリート舗装同様、ポンプ打設もでき、簡易フィニッシャーによる施工も可能であった²²⁾。

さらに、(株)大林組の海水練りコンクリート技術をフェロフォーム®に適用し、東日本製鉄所千葉地区内で写真11の海水練りフェロフォーム®を用いた舗装を施工した²³⁾。(株)大林組の『高耐久海水練りコンクリート』技術は、2015年に「第17回国土技術開発賞」の「最優秀賞(国土交通大臣賞)」を受賞した。

4.3 東北震災復興への人工石の利用

鉄鋼スラグ水和固化体フロンティアロック®は、港湾工事用人工石材として、東北震災復興工事に採用された。主に



写真11 海水練りフェロフォーム®舗装
Photo 11 Ferroform™ pavement by sea water



写真12 大船渡港湾口防波堤工事での施工状況
Photo 12 Construction of breakwater at Oofunato harbor entrance

1tサイズの石が、湾口の防波堤の被覆石として用いられた。大船渡港湾口防波堤工事(写真12)の被覆石に11000m³、釜石港湾口防波堤工事に14000m³が使用され、復興に貢献した。

4.4 緻密高炉スラグ粗骨材

高炉徐冷スラグは、コンクリート用粗骨材として利用されるが、その年間販売量は219千tと少ない¹⁾。高炉徐冷スラグは多孔質であるため、吸水率が高く、その値に変動が大きい。JFEスチールでは、高炉スラグの気孔を低減する写真13の高炉スラグ連続凝固プロセスPACSS®を開発した。鑄鋼製鑄型を用いて連続的に凝固すると厚みが約25mmの緻密な板状スラグが得られる²⁴⁾。これを破碎すると写真14の粗骨材が製造できる。通常の高炉徐冷スラグの吸水率は3~4%であるが、PACSSで製造した粗骨材の吸水率は、天然骨材と同様1%以下である。本粗骨材を配合したコンクリートは、乾燥収縮が石灰石と同等である²⁵⁾。



写真13 高炉スラグ連続凝固プロセス PACSS®
Photo 13 Continuous solidification process for blast furnace slag PACSS™



写真14 開発した低吸水性粗骨材の外観
Photo 14 Appearance of plate-like solidified slag and developed coarse aggregate

4.5 将来へ向けた取り組み

JFE スチールでは新たなスラグ製造プロセスの開発にも取り組んでいる。NEDO プロジェクトの環境調和型製鉄プロセス開発 COURSE50 では、高炉ガスから CO₂ ガスを分離するプロセスを検討している²⁶⁾。分離方法の一つの CO₂ 吸収法では、CO₂ ガスを吸収した液から CO₂ ガスを分離するエネルギーとして、製鉄所内の未利用エネルギーの利用を検討している。その一つの方法として、JFE スチールでは製鋼スラグ顕熱回収プロセスを開発した。熱伝導度の小さい製鋼スラグから、効率的に顕熱を回収するため、双ロール方式で熔融スラグを厚み 7 mm 程度の板状に凝固し、充填層で空気と熱交換するプロセスである²⁷⁻²⁹⁾。パイロット規模の設備を設置し実験した結果、30%以上の顕熱回収率が得られた。

NEDO プロジェクトでは、スラグに残留する鉄分を回収するため、スラグ鉄源回収技術の開発にも取り組んでいる。高温状態の製鋼スラグから混入しているメタル分を回収後、ロータリーキルン方式で酸化鉄を還元し、メタル鉄を回収するプロセスである。

その他、品質向上に重要な fMgO の分析技術の開発³⁰⁾ や生物を用いた環境影響評価³¹⁾ にも取り組んでいる。

5. おわりに

鉄鋼スラグ製品は、鉄鋼製品を製造する際に発生する副産物であるが、利用用途、ユーザーの要求品質に応じて加工、管理して製造している工業製品である。鉄鋼スラグ製品が社会を支える材料として、より役立つ様、今後も開発を進めて行く。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ統計年報 (平成 27 年度実績)。鉄鋼スラグ協会 HP。
- 2) 當房博幸。生産と技術。2014, vol. 66, no. 1, p. 51.
- 3) 鉄鋼スラグ協会。環境資材鉄鋼スラグ。2010.
- 4) 當房博幸, 渡辺圭児, 桑山道弘, 後藤滋明, 後藤弘樹, 田中敏宏。鉄と鋼。2014, vol. 100, p. 799.
- 5) Paweena Jariyathitipong, 細谷多慶, 藤井隆史, 綾野克紀。土木学会論文誌 E2 (材料・コンクリート構造)。2013, vol. 69, no. 4, p. 337.
- 6) 藤井隆史, 綾野克紀。土木学会論文誌 E2 (材料・コンクリート構造)。2014, vol. 70, no. 4, p. 417.
- 7) Paweena Jariyathitipong, 藤井隆史, 綾野克紀。セメント・コンクリ

- ト論文集。2014, vol. 67, no. 1, p. 427.
- 8) (財) 沿岸技術センター。鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル—製鋼スラグの有効利用技術— (改訂版)。2006.
- 9) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多穂。コンクリート工学。2003, vol. 41, no. 4, p. 47.
- 10) 松永久宏, 高木正人, 小菊史男。鉄と鋼。2003, vol. 89, p. 454.
- 11) 松永久宏, 谷敷多穂, 藤井隆史, 綾野克紀。土木学会論文誌 B2 (海岸工学)。2009, vol. 65, no. 1, p. 1196.
- 12) 恩田邦彦, 本田秀樹, 吉武英樹。JFE 技報。2013, no. 31, p. 50.
- 13) 杉本憲司, 高濱繁盛, 中野陽一, 山本民次, 土田 孝, 関根雅彦, 岡田光正。土木学会論文誌 B2 (海洋工学)。2014, vol. 70, no. 2, p. 1231.
- 14) 杉本憲司, 高濱繁盛, 中野陽一, 山本民次, 土田 孝, 関根雅彦, 岡田光正。土木学会論文誌 B3 (海洋開発)。2016, vol. 72, no. 2, p. 1023.
- 15) (財) 沿岸技術研究センター。港湾・空港・海岸等におけるカルシウム改質土利用技術マニュアル。2017.
- 16) 本田秀樹, 林 正宏, 谷敷多穂, 土田 孝, 亀山武士。土木学会論文誌 B3。2014, vol. 70, no. 2, I 747.
- 17) 本田秀樹, 横手武聡, 林 正宏, 吉武英樹, 御手洗義夫。土木学会論文誌 B3。2015, vol. 71, no. 2, I 814.
- 18) 本田秀樹, 土田 孝, 谷敷多穂, 林 正宏, 山田耕一。土木学会論文誌 B3。2016, vol. 72, no. 2, I 443.
- 19) 宮田康人, 林 明人, 桑山道弘, 山本民次, 卜部憲登。鉄と鋼。2014, vol. 100, p. 421.
- 20) 宮田康人, 林 明人, 桑山道弘, 山本民次, 谷敷多穂, 卜部憲登。鉄と鋼。2014, vol. 100, p. 1426.
- 21) 宮田康人, 松永久宏, 藪田和哉, 林 明夫, 山本民次。土木学会論文誌, B3 (海洋開発)。2012, vol. 68, no. 2, I 564.
- 22) 落合 建, 井上陽太郎, 谷本文由, 新村 亮, 片野啓三郎。JFE 技報。2017, no. 40, p. 51-56.
- 23) 新村 亮, 竹田宣典。機能材料。2016, vol. 36, no. 3, p. 59.
- 24) 當房博幸, 宮本陽子, 渡辺圭児, 桑山道弘, 小澤達也, 田中敏宏。鉄と鋼。2013, vol. 99, p. 532.
- 25) 中西克佳, 王 蓓, 田 恵太。コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学会。2016, vol. 38, no. 1, p. 75.
- 26) 三輪 隆, 奥田治志。日本エネルギー学会誌。2010, vol. 89, p. 28.
- 27) 當房博幸, 田 恵太, 桑山道弘, 萩尾勇樹, 藪田和哉, 戸澤宏一, 田中敏宏, 森田一樹, 松浦宏行, 月橋文孝。鉄と鋼。2013, vol. 99, p. 683.
- 28) 紫垣伸行, 當房博幸, 小澤純仁, 田 恵太, 萩原一真。鉄と鋼。vol. 103, p. 111.
- 29) 當房博幸, 紫垣伸行, 萩尾勇樹。JFE 技報。2013, no. 32, p. 38.
- 30) 花田一利, 猪瀬匡生, 藤本京子。JFE 技報。2016, no. 37, p. 50.
- 31) 八尾泰子, 井澤智生。JFE 技報。2016, no. 37, p. 55.



松本 剛



當房 博幸



渡辺 圭児