

製鉄所におけるスラグ関連技術の開発状況

Overview of the Development for Slag Usage Technologies at the Steelworks

上 村 竜 介 ¹ Ryusuke UEMURA	光 石 尚 道 ¹ Naomichi MITSUIISHI	赤 羽 健 一 ² Kenichi AKAHANE	安 間 優 ² Suguru AMMA
丸 山 雅 志 ² Masashi MARUYAMA	山 本 充 ³ Takashi YAMAMOTO	横 尾 正 義 ³ Masayoshi YOKOO	真 沢 正 人 ³ Masato SANAZAWA
田 崎 智 晶 ⁴ Tomoaki TASAKI	岩 崎 正 樹 ⁴ Masaki IWASAKI	吹 上 和 徳 ⁴ Kazunori FUKIAGE	松 本 周 ⁴ Hiroshi MATSUMOTO
鳥 井 孝 一 ⁵ Koichi TORII	水 田 智 幸 ⁶ Tomoyuki MIZUTA	藤 井 郁 男 ⁷ Ikuo FUJII	柏 原 司 ⁸ Tsukasa KASHIWABARA
原 良 治 ⁸ Ryohji HARA	森 口 誠 ⁸ Makoto MORIGUCHI	中 村 貴 敏 ⁸ Takatoshi NAKAMURA	高 田 史 朗 ⁸ Shirou TAKADA
堀 井 和 弘 [*] Kazuhiro HORII			

抄 録

新日鐵住金(株)は全国に8箇所の一貫製鉄所を擁し、各製鉄所毎の鉄鋼製品製造品種により製造プロセスに差異がある。また、スラグの冷却・製品製造設備も各所特有のプロセスを有することから、製造する鉄鋼スラグ製品、特に製鋼スラグ製品については含有成分、組織、鉱物相等の製品の特徴に差異がある。さらに製鉄所設置の各地域毎の関連市場における需給動向やニーズに差異がある。したがって、鉄鋼スラグの有効利用拡大を進めるにあたっては、全製鉄所共有課題への対応として、新機能・新シーズ適用による新規利用用途開発やコンプライアンス対応技術等の開発を進めると同時に、製鉄所毎の種々の特性に応じた商品化関連技術を開発推進してきた。これまでの製鉄所を中心とした現場第一線におけるスラグ関連技術の開発状況について報告する。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has eight integrated iron and steel works with blast-furnace in the whole country of Japan, and each manufacturing process is different based on the several kinds of specific steel productions. Slag treatment processes about cooling, clashing and sizing are also originated in each works inevitably. So slag products produced from each steelworks are very different in the chemical components, the solidification and/or the mineral-phase. Even in the relation between supply and demand, and requirement (needs) from the customer are also different from the regional market around each steelworks. As a company-wide challenge, NSSMC has developed incessantly the original slag products depending on each characteristic slag, which have not only the innovated function or new seeds, but also the adaptability to the severe social compliance. In this report, we have summarized our developing status of the process and products for slag usage at the forefront of every steelworks.

* スラグ・セメント事業推進部 企画調整室長 東京都千代田区丸の内 2-6-1 〒100-8071

¹⁻⁸ 著者名 右肩の数字は執筆原稿の章番号を示す。

1. 室蘭製鉄所におけるスラグ開発の事例

—製鋼スラグ骨材を用いた重量コンクリートの研究—

1.1 緒言

東日本大震災からまもなく1年を迎え（事業提案時）、今後は震災からの復旧、復興に向けた具体的な計画の立案と各種工事の実行段階に移行していく。これらの進捗に伴い、工事で主要な建設資材となるコンクリートの需要は急激に高まり、その原料である骨材も大量に必要なと予想される。しかし、一般的にコンクリート用骨材は、生産から消費までを比較的狭い地域内で行われる“地産地消”型の流通形態をとっている。そのため、骨材の製造設備も震災地域内にあつて被災する、あるいは設備の事業者が遠隔地へと避難するなど、高まる需要に対して柔軟に応えることが難しい状況にある。そこで、種々の産業における副産物の活用（リサイクル）が考えられるが、コンクリート骨材としての品質を満足し、さらに大量かつ安定的な供給を可能とする資材の確保は容易ではない。

また、発生した津波が従来からの想定を越える規模であったことから、復旧・復興工事においては、津波や波浪に対する安定性を従来よりも高めた構造物の構築が求められると考えられる。これに対し、従来よりも大規模な構造物や、重量コンクリートを用いて同じサイズでより重量の大きい構造物を構築するなどの方策が考えられるが、これらを従来の技術や資材で実現することは、大幅な工事費の増加に繋がる。

以上の2つの課題に対し本事業では、製鋼スラグをコンクリート用骨材として活用する配合の開発と、これを用いたコンクリート構造物の製造を行う。具体的には、製鉄過程で副産物として製造される製鋼スラグは、高炉スラグとは異なりこれまでコンクリート骨材としては殆ど活用されてこなかったが、一定の品質を有し、かつ安定的に大量に供給可能な特徴を有するため、天然骨材の代替材としての活用が期待される。また、製鋼スラグが天然骨材よりも大きな比重を持つことから、津波や波浪に対して安定性の高い重量コンクリート構造物に適したコンクリートを、安価に且つ、大量に製造可能となることも期待される。このような効果を最大限に発揮するコンクリートの配合を開発するとともに、被災地域内の生コンクリートプラント等を用いてコンクリート構造物を製造し、限られた予算での効率的な復興事業の推進に向けた技術の実証を行う。

1.2 本論

製鋼スラグをコンクリート用の骨材として活用するためには、製造した生コンクリートの施工性や硬化特性等の諸性能が、天然骨材を用いた従来のコンクリートと同等の性

能を有することが重要となる。また、比重が大きいという製鋼スラグの特性を活かした重量コンクリートの開発においても、コンクリート比重以外の諸性能において従来品と同等の性能を有することが要求される。

そこで本事業では、製鋼スラグ自身の物性、製鋼スラグを骨材として用いたコンクリートの適切な配合条件、および諸性能・特性を詳細に把握するため実証研究の内容を以下の項目に大別して実施、各項目の試験結果より製鋼スラグのコンクリート用骨材としての適合性について評価を行った。

- 1) 製鋼スラグ骨材の物性試験
- 2) 製鋼スラグ骨材代替コンクリート配合の開発
- 3) 製鋼スラグ骨材を用いた重量コンクリート配合の実プラントによるコンクリート製造・施工試験
- 4) まとめ、総括

以下に、これらの詳細を示す。

1.2.1 製鋼スラグ骨材の物性試験

製鋼スラグ骨材の物性や特性を把握するために、各種の物性試験を行った（表 1.1）。一般的に行われる粒度分布や粉化率の試験に加え、蒸気エージング条件と膨張量の関係や、細骨材製造時における篩い形状とその粒度分布との関係についても改めて評価を行い、コンクリート用骨材としての品質を確保するための条件の整理を行った。ここでは、それらの結果の一部を示す。

1.2.1.1 骨材の水浸膨張試験

製鋼スラグは、含有する free-CaO や free-MgO が水と接触すると水和反応を起し、この反応に伴って体積が膨張する特徴を有する。この水和反応は、数百℃までの範囲では温度が上がるほど反応が速く進むため、室蘭製鉄所を含む多くの製鉄所では、蒸気を用いたエージングによって安

表 1.1 測定方法
Method of measurement

Measurement items	Method of measurement
Particle size	JIS A 1102-1103
Unit capacity mass	JIS A 1104
Density and water absorption	JIS A 1109 and JIS A 1110
Powdering rate	Steel slag hydrated solidified body technique manual
Chemical composition	
Rate of expansion	JIS A 5015
Resistance to abrasion of coarse aggregate	JIS A 1121



写真 1.1 測定方法
Method of measurement



写真 1.2 試験装置
Test equipment

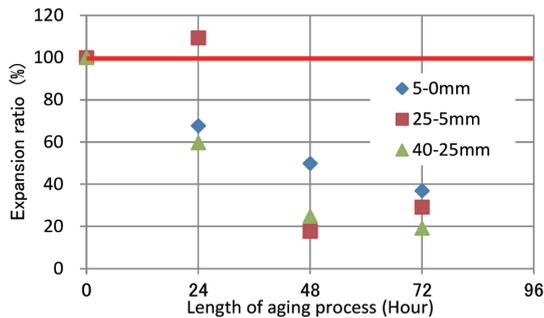


図 1.1 膨張率
Rate of expansion

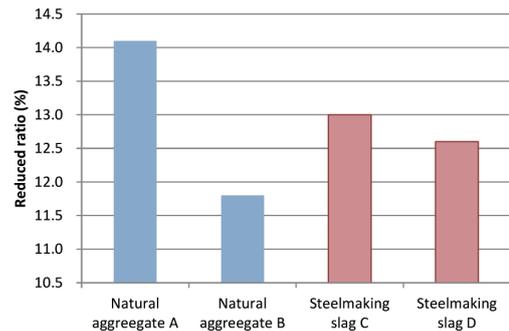


図 1.2 骨材のすり減り抵抗性
Resistance to abrasion of coarse aggregate

定化处理を行った後に、路盤材などの製品として出荷している。

ここでは、このエージング処理時間とエージング終了後の膨張性との関係を調べるため、水浸膨張試験 (JIS A 5015) を実施した。試験方法は、24、48、72 時間のエージング処理を行った製鋼スラグを充填したモールドを 80℃ 温水へ水浸し (写真 1.1)、製鋼スラグの膨張を促進させた後に、膨張量を容器上面に設置したダイヤルゲージで測定するものである。水浸条件は 80℃ で 6 時間保持とし、これを 10 日間繰り返した。

試験の結果、蒸気エージング時間が長いほど、水浸膨張試験での製鋼スラグの膨張量が減少し、72 時間のエージングにより水和反応の促進は概ね収束していることを確認した (図 1.1)。しかし、72 時間のエージングを行った場合にも、製鋼スラグの膨張性を完全に抑え込むまでには至っておらず、骨材の膨張が品質に影響を及ぼす可能性のあるコンクリート用には、骨材の品質管理やコンクリートの用途を適切に選択する必要があると考えられる。

1.2.1.2 骨材のすり減り抵抗性試験

骨材の運搬やコンクリートの混練中に破砕するような脆い骨材の場合、出荷時の粒度分布が大きく変動してしまい、所定の品質のコンクリートが得られなくなる。そのため、コンクリート用の骨材は、容易には破砕やすり減りを起こさない硬度が必要となる。ここでは、ロサンゼルス試験機によるすり減り試験方法 (JIS A 1121) によって、製鋼スラ

グ粗骨材のすり減り抵抗性を求めた。比較対象として、実際にコンクリートに使用されている天然骨材を用いた。

試験方法は、直径 46.8mm の鋼球と骨材を試験装置 (写真 1.2) に投入して所定の回数回転させた後、1.7mm の篩を通過する重量率 (すり減り減量) を求めるものである。試験結果から、製鋼スラグ骨材は天然骨材と同等のすり減り抵抗性を有することを確認した (図 1.2)。

1.2.2 製鋼スラグ骨材代替コンクリート配合の開発

天然骨材の供給状況は、地域性や時期による変動がある。そのため、粗骨材のみあるいは細骨材のみを製鋼スラグ骨材に置き換えた場合や、粗骨材と細骨材の両方を置き換えた場合など、必要に応じた骨材の組み合わせが可能であることが重要である。試験ではこのように骨材を組み合わせたケースを設定し、コンクリートに求められる品質 (フレッシュ性状、硬化特性) を満足する配合を検討した。

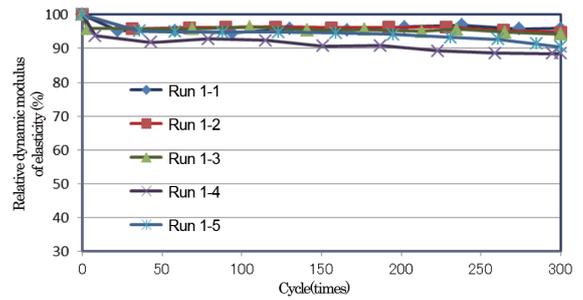
硬化特性は、圧縮および曲げ強度を確認するとともに、製鋼スラグ骨材代替コンクリートの耐久性に着眼した凍結融解抵抗性、乾燥収縮量、中性化速度、塩分浸透性に関する直接的な測定の外、2.5nm ~ 10μm 程度の細孔径分布の測定により微視的構造の変化についての観察も試みた (表 1.2)。また、得られたコンクリートによる環境影響を評価する溶出試験を実施した。試験結果の一部を以下に示す。

1.2.2.1 配合試験

コンクリートは、骨材や水、混和剤などの種類や配合率

表 1.2 測定方法
Method of measurement

Measurement items	Method of measurement
Slump	JIS A 1101:2005
Air volume	JIS A 1128:2005
Concrete temperature	Bar thermometer
Characteristics	Visual
Compressive strength	JIS A 1108:2006
Bending strength	JIS A 1106:2006
Freezing and thawing	JIS A 1148:2001
Length change	JIS A 1129-3:2001
Carbonation	JIS A 1153:2003
Salt penetration depth	JSCE-G 572:2007
Damage by expansion of steelslag	Steel slag hydrated solidified body technique manual
Dissolution	Criterion on bottom earth and sand (Ministry of the Environment notification #14) etc.
Pore structure	Mercury penetration method

図 1.3 凍結融解試験結果
Result of freezing and thawing test写真 1.3 試験状況
Expansion test of concrete

によって練り上がり時の性状や硬化特性が敏感に変化する。そのため、製鋼スラグ骨材の使用条件に応じた品質を満足する配合条件を見出すため、配合条件を変えた多くの試験を実施し、その中から製鋼スラグ骨材を使用したコンクリートの特徴を把握し、使用条件に応じた適切な配合を選定した。その結果、細骨材率、単位水量等の配合条件を適宜修正することにより、天然細粗骨材を使用したコンクリートと同等のフレッシュ性状が得られることを確認した。

1.2.2.2 凍結融解試験

一般的な凍結融解抵抗性の指標となる事項は、凍結融解サイクル数が 300 回で相対動弾性係数が 60% を保持することであるが、天然細粗骨材を使用したコンクリートも含め、各製鋼スラグ骨材の使用条件配合において、凍結融解抵抗性に対する耐久性は要求性能を満足していることを確認した (図 1.3)。

1.2.2.3 膨張安定性試験

鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルに従い、コンクリートの膨張安定性評価試験を行った。この試験は、コンクリート供試体を、連続 10 日間 $80 \pm 3^\circ\text{C}$ の温水中に浸水させた後、コンクリート表面にひび割れなどの異常の有無を確認するものである (写真 1.3)。試験の結果から、これらの異常は観察されず、使用した製鋼スラグによるコンクリートへの問題は生じなかった。よって、先に述べたように、72 時間の蒸気エージングでも製鋼スラグ骨材の膨張性は完全には抑えることはできないものの、コンクリート骨材としては問題のない状態まで安定化処理ができていたことを確認した。

その他の圧縮強度、塩分浸漬、細孔構造などの各種硬化特性の試験結果では、製鋼スラグ骨材の使用による影響は

見られなかったこと、一方、乾燥収縮量については天然骨材を用いた従来の普通コンクリートよりも小さく良好な傾向、中性化については若干劣位であることを確認した。

また、製鋼スラグによる周辺環境への影響の有無を確認するために、溶出試験を実施した。鉄鋼スラグ水和固化体を含め、鉄鋼スラグを用いた建設資材に対して同様の目的で行われる試験法を採用することとし、水底土砂に係る判定基準 (環境省告示第 14 号)、環境 JIS 関連 (JIS K 0058-1, および -2) により評価を行った。いずれの分析項目についても基準値内であり、製鋼スラグ骨材を用いることによる環境への影響は無いことを確認した。

1.2.3 重量コンクリート配合の開発

製鋼スラグ骨材を用いたコンクリート配合の開発をさらに発展させ、コンクリートの比重を大きくすることを目的とする重量コンクリート配合の開発に取り組んだ。ここでの重量コンクリートの目標比重は 2.5 ~ 2.7 (単位容積質量 2.5 ~ 2.7 t/m³) である。

重量コンクリートの開発には、コンクリートの材料で最も比重が小さい水の配合量を可能な限り減らし、逆に最も比重の大きい製鋼スラグ骨材の配合量を増やすことが必要である。その結果、コンクリートの材料分離抵抗性や経時安定性の低下が懸念されるため、これらを同時に解決し得るコンクリート用化学混和剤の選定、開発から着手し、続いてコンクリート配合の検討、硬化特性の測定を実施した。

本試験の結果、製鋼スラグを骨材として用い、良好なコンクリート性状を確保するためには、天然骨材を用いる場合とは異なる混和剤が必要であることが判明した。また、単位水量の低減を要する重量コンクリート配合ではその傾

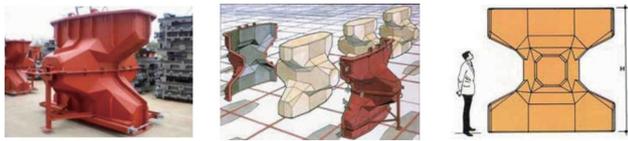


図 1.4 消波ブロック
Wave-dissipating concrete block

向は顕著であった。本研究では新たな混和剤を開発し、目標のフレッシュ性状、および単位容積質量 (2.5 ~ 2.7t/m³) を満足する配合条件を確立すると共に、各種の硬化特性も重量コンクリートとして適用可能であることを確認した。

1.2.4 実プラントによるコンクリート製造・施工試験

室内実験で確立した配合から2種類を選定し、南相馬市にあるレディーミクストコンクリート (生コンクリート) 工場にて実規模の製造・施工試験による最終評価を行った。

南相馬市内の加藤建材工業(株)の敷地内において、消波ブロック、および梁状有筋構造物のコンクリート打設の施工試験を実施した。消波ブロックの仕様は、東北ポール(株)製のアクロポッド®の6.3m³タイプ (図 1.4)、梁状有筋構造物は、高さ50cm、幅50cm、長さ3mのD13@200とし、それぞれについて、天然骨材を用いた“普通コンクリート”、粗骨材のみを製鋼スラグに置き換えた“粗骨材代替コンクリート”、粗骨材と細骨材の両方を置き換えた“重量コンクリート”の3種類のコンクリートを打設した。

室蘭製鉄所で製造した製鋼スラグを、2012年10月23日に生コンクリートプラントのある加藤建材工業 (南相馬市) へ搬入し、10月27日にコンクリートの製造と打設試験を行った (写真 1.4)。試験の結果、使用骨材種類による施工性の相違は見られず、いずれの骨材を用いたコンクリートにおいても施工性は良好であった。また、コンクリートの打設から5日後の11月1日に脱枠作業を行い、いずれのコンクリートも表面にクラック等の欠陥は見られなかった (写真 1.5)。

1.2.5 製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートの有用性

一般的な普通コンクリートの単位容積質量が2.3t/m³ (≒比重2.3) であるのに対し、実証試験で得られたコンクリートは、粗骨材代替コンクリートは2.5t/m³、重量コンクリートに至っては2.7t/m³程度に達した。この特徴を最も効果的に活用できる用途として、港湾構造物の消波ブロック等が挙げられる。

1.2.5.1 波に対する安定性

ある大きさの波に対して必要となるブロックの最小質量は、“港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局監修)”のハドソン式により求められる²⁾。これによると、海水による浮力の効果などによって、コンクリートの単位



写真 1.4 コンクリート打設状況
Concrete placing situation



写真 1.5 脱枠状況
Form removal situation

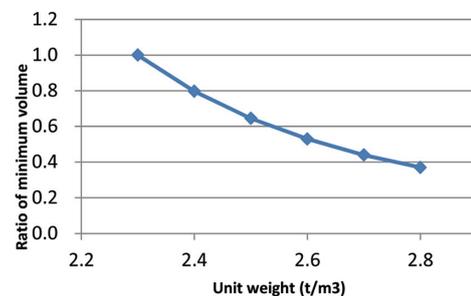


図 1.5 ブロックの単位容積質量と最小容積の比
Unit weight and ratio of minimum volume

容積質量が1.13倍 (= 2.7/2.5) に大きくなると、ブロックに求められる最小質量はほぼ半分 (0.53倍) の重さ (大きさ) に軽減され、非常に大きな効果を発揮する (図 1.5)。また、同じ大きさのブロックの場合、ある大きさの波に対する質量安全率を約2倍へ高めることができる。ここでの質量安全率は、ある大きさの波に対して必要なブロックの重量に対する実際のブロックの重量を意味する。

一般的な人工リーフなどの港湾・海洋構造物は、ブロックが設置される海域の水深などにより最低限必要となる構造物の規模が規定されるため、コンクリートの単位容積質量 (≒比重) によって極端に数量を削減できるケースは少ないと推察されるものの、質量安全率が大幅に高まるケースは多いと言える。

1.2.5.2 コンクリートの価格

重量コンクリートに用いられる天然骨材の例としてかんらん岩が挙げられる。このような骨材は価格が高く、それを用いた重量コンクリートは普通コンクリートと比べ、フレッシュコンクリートとして約1.5倍程度に達する。一方、製鋼スラグ骨材は、製鉄所からの輸送距離や輸送方法にも依るが一般的な天然骨材と同程度の価格で入手可能なため、製鋼スラグを重量コンクリートの骨材として用いることにより、大幅な原料コストの低減が可能である。

1.2.5.3 比重の大きな天然骨材の希少性

上述のかんらん岩などは、製鉄所における焼結原料の改質材としても活用されているなど、様々な工業分野で活用される資材であるものの埋蔵量は限られている。よって、このような希少な天然資材に代わり、製鉄副産物である製鋼スラグをコンクリート骨材として活用することは、コンクリートのみでなく幅広い分野への波及効果の可能性を持っていると考えられる。

以上の点から、本事業で開発した製鋼スラグ骨材代替コンクリートは、重量コンクリート用の骨材として極めて有効な建設資材となり得ると言える。

1.3 結 言

本事業における各種試験や検討を通じ、製鋼スラグ骨材代替コンクリートは、普通コンクリートや重量コンクリートとして使用できると判断できるが、その実適用に向けては、以下の課題を今後も検討していく必要がある。

①普通コンクリートとの特性比較（継続）

②品質管理

製鋼スラグ骨材の粒度分布のばらつき抑制の方法

③営業展開

国土交通省を始めとする自治体や施工業者への認知活動、公認化に向けた活動

震災発生から2年（事業の報告書作成時）が経過し、非常に多くの復旧や復興工事が計画、実行される一方、その中心的な資材であるコンクリート骨材の不足が顕在化している。この傾向は、今後益々厳しくなるとの試算結果や、骨材メーカーからの意見も挙がっている。さらに、被災地のみならず、日本全国で進められる今後の防災対策においても、沿岸地域を守るために波に対する安定性を高める構造物を効率的に構築することが益々重要となってくる。このような状況や需要に対し、本事業によって得られた成果を早期に、且つ、最大限に発揮するため、コンクリート材料の分野で中心的な役割を果たす東北大学の久田教授の指導の下、全国に拠点を持つ新日鐵住金(株)と(株)フローリックが、今後も協力して課題解決と営業活動を進め、東日本大震災の被災地域の復旧、復興と全国の防災対策の発展に少しでも貢献できるよう努めて行く。

謝 辞

本実証研究事業では、提案から完了までの間に、東北大学 久田真教授、加藤建材工業(株)、(株)テツゲン、五洋建設(株)、(株)エコニクス、そして北海道経済産業局をはじめとする様々な機関の多くの方々にご協力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

2. 鹿島製鉄所のスラグ活用技術事例紹介

2.1 緒 言

鹿島製鉄所は、坂東太郎として名だたる利根川の恵みを受ける茨城県南東部に位置し、鹿島灘に面する鹿島臨海工業地帯にある高炉一貫製鉄所である。2013年度の粗鋼生産量は約700万トンで、副産品である鉄鋼スラグの発生量は約280万トン、体積比からするとほぼ鉄鋼製品と同等の体積を持つスラグを如何にスラグ製品として、付加価値を付けて販売するか、日々研さんを積んでいる。

茨城県は、北海道、愛知県に次ぐ道路面積を有する道路県³⁾であり、かつ、千葉、東京といった大都市から約100kmという立地を活かして、道路用路盤材を中心に陸域土木工事にスラグ製品を開発し、販売している。

スラグ製品の環境性能への配慮は、安心して使用できるリサイクル製品開発に欠かせない、非常に重要な取り組み

であり、安定販売の原点である。また、有効な資源として活用されるスラグではあるが、スラグの発生原単位削減は再使用する負荷を考えると少ない方がより環境保全に寄与する。

本報告では、鹿島製鉄所の鉄鋼スラグ製品が環境保全に寄与するための技術開発事例および製鉄・製鋼部門の全面的な協力の元、スラグ原単位の削減に取り組んだ事例を紹介する。

2.2 環境配慮事例

2.2.1 事例1（ふっ素溶出抑制技術）

道路用鉄鋼スラグは、1979年に規格が制定されたJIS A 5015に準拠して製造が開始され、その後、数々の性能改良がなされ、その結果をJISにも反映させてきた。2013年の

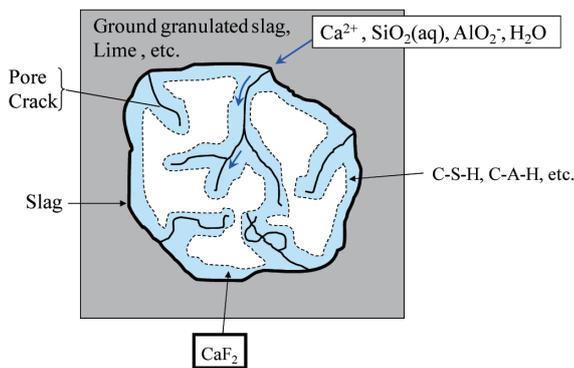


図 2.1 ふっ素溶出抑制メカニズム
Fluorine elution restraint mechanism

JIS 改訂では、より安心な製品とするため、環境安全品質基準が織込まれた。鹿島製鉄所では、規格が織込まれる前から環境安全品質基準に準拠するための技術を開発しており、その一例としてふっ素溶出抑制技術を紹介する。

溶銑の精錬では、不純物除去促進の為、螢石 (CaF_2) を使用することがあった。しかし、螢石を使用したスラグからはふっ素 (F) が溶出し、環境上問題となる懸念があった。その対応として、①螢石をある程度使用してもふっ素の溶出を抑制することで環境性能を確保したスラグ製品を製造する方法、②螢石を使用しない精錬方法の開発を推進してきた。

①ふっ素溶出抑制技術

ふっ素を含有する製鋼スラグに高炉水砕スラグなどシリカを溶出する物質とカルシウムを含む生石灰などを配合、混錬することで、ふっ素の固定能の高い水和物を意図的に作り、ふっ素を固定することで溶出を抑制する (図 2.1) ⁴⁾。この技術ではスラグから溶出するカルシウムイオンがシリカと反応して、特定の水和物を形成し、ふっ素を固定することに加えて、生石灰などから溶出する過剰なカルシウムイオンによってふっ素をふっ化カルシウム (CaF_2) として固定する技術である。なお、並行して螢石を使用しない精錬方法を確立した為、本技術を活用した路盤材は販売していない。

2.2.2 事例 2 (土壤改良：土壤からの重金属溶出の抑制技術)

鉄鋼スラグのアルカリ特性を活かした土壤からの重金属抑制技術について紹介する ⁵⁾。

土壌中には天然にマンガン、亜鉛、ひ素、カドミウム、ニッケル等の重金属を含有していることが多々ある。土壌が中性であればこれらの重金属は、溶出せず無害であるが、土の pH が酸性に偏るとこれらの重金属が溶出し、環境汚染や農作物の生育阻害を引き起こす懸念がある。例えば、奄美大島の土壌は、 $\text{pH} = 5.1$ と酸性で、重金属が溶出するリスクを持っている。

表 2.1 土壌中 pH の重金属溶出への影響
Influence of pH on heavy metal elution amount

pH in soil	5.1	7.8	8.9	10.4	11.8	13.1
Elution amount of zinc (mg/l)	300	42	0.06	0.6	6.5	243
Elution amount of manganese (mg/l)	245	252	2.4	0.08	0.1	0.05

この土壌に 30mm 以下に整粒した鉄鋼スラグを混合することで安定的に長期間土壌を中和させることができる。表 2.1 は実験の一例であるが、スラグの施用により土壌の pH を中性にすることでマンガン、亜鉛の溶出が減少していることが分かる。土地の用途、成分に応じて、スラグの混合量を調整することで目的の pH とすることができる。さらにカルシウムが徐々に溶解するため、長期間 pH を保持し続けることも可能である。スラグバラスのような用途ではアルカリ性が問題となり、使用を制限する場合があるが、逆に上手に活用することにより環境改善に役立つ事もできる事例である。これ以外にスラグにはりん酸、珪酸、鉄、Mg、Ca などの植物にとって有用な成分が含まれており、農業用肥料としての効果も期待できる。

2.3 スラグの所内循環使用の促進

鹿島製鉄所では製鉄プロセスから副生するスラグ自体の量を削減する取組を行っている。削減方法としては、①使用する副原料を減らす、②発生したスラグを再使用する、という方法が考えられるが、ここでは製鋼工程で発生するスラグを高炉や製鋼工程で再利用する事例を紹介する。

製鋼工程では、原料品位の悪化や高級鋼へのニーズに対応して、不純物除去を脱硫黄と脱燐、脱炭素の 2 工程若しくは脱硫黄と脱燐、脱炭素の 3 工程で行う 2 種類の製鋼方法を採用している。

このうち脱硫黄工程で発生するスラグは鉄分と石灰分を多く含有する。これらの成分は製鉄の有効成分であるが、硫黄が多いことで高炉・製鋼工程では使用できない。そこで焼結工程に再使用し、燃焼により硫黄分を SO_x として原料から分離し、排ガス処理設備で石膏として回収する事で鉄分、石灰分だけでなく、硫黄分までも資源として回収するプロセスを考えた。このプロセスにより脱硫黄工程で発生するスラグをほぼ 100% 所内で再利用できている。

また、3 工程で行う製鋼方法で脱燐工程後の脱炭素工程で発生するスラグは燐の含有量が低い上、鉄分と石灰分も豊富に含有する。そこで適度な粒度に破碎、整粒すると焼結工程や製鋼工程に再利用することが可能となる。脱燐工程後の脱炭素工程で発生するスラグもほぼ 100% 所内で再使用している。

これらの活動の結果、毎年約 23 万トンの製鋼スラグを製鉄プロセス内で再使用し、天然資源の使用削減に貢献している (表 2.2)。

表 2.2 再利用量推移
Reusing amount

Fy	Reusing amount (kt/Fy)
2009	206
2010	245
2011	259
2012	232
2013	231

2.4 結 言

事例の通り、鉄鋼スラグ製品の環境性能向上のための技術開発を紹介した。スラグ製品の環境性能向上や発生原単位の削減は、環境保全に寄与する。鉄鋼製品が環境負荷の少ない製品の代表であり続ける為にも、副産品の主体であるスラグをより環境調和型の製品とするために技術開発を続けて行く。

3. 君津製鉄所のスラグ開発

3.1 緒 言

君津製鉄所は、東京湾に面した房総半島の中ほどに位置する高炉一貫製鉄所として、年間約 400 万トンの鉄鋼スラグの製造、販売を続けている。国内の一般的なスラグ用途と同様⁶⁾に、高炉スラグは主にセメント原料、コンクリート骨材および道路用に、製鋼スラグは道路用、地盤改良用、人工石材等に多く利用されており、君津製鉄所に適した製造法の開発や顧客ニーズに応じた利用開発を行ってきている。本稿では、君津製鉄所のスラグ開発についての取組状況として、高炉スラグ細骨材、軟弱土改良技術適用事例を紹介する。

3.2 高炉スラグ細骨材

3.2.1 コンクリート細骨材の必要機能

コンクリート細骨材は、生コンクリートとしての流動性を確保する事が最重要であり、そのために、所要の粒度分布と単位容積質量が大きい事が求められる。しかし、近年、海砂、山砂といった天然砂では適正な粒度分布を単独種で得られる材料は少なく、粒度の異なる材料を混合して調整している⁷⁾。君津製鉄所近隣では細目の山砂が主体であり、粗目の骨材が求められている。

3.2.2 高炉スラグ細骨材製造技術

高炉から出銑後、溶銑と比重分離された高炉スラグを、炉前で水砕化する炉前水砕スラグ（以下炉前水砕とする）と一旦鍋車に受け、別の場所まで輸送し水砕化する炉外水砕スラグ（以下炉外水砕とする）がある。

炉前水砕、炉外水砕ともに、水砕後は針状粒が混在（図 3.1）しており、コンクリート細骨材として使用するには、この針状粒が単位容積質量を低減させ、また、生コンクリートの流動性を阻害する。そこで、磨砕加工といった軽破碎処理を行い、針状粒を破碎（図 3.2）して出荷している。尚、粒度調整上、必要に応じ微粒部分を分級するものもある。

磨砕加工後の炉外水砕は粗目で重質であるが、炉前水砕はやや細目で軽質であった。一方、生産量は炉前水砕の方

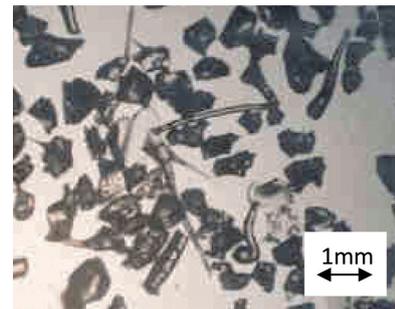


図 3.1 磨砕加工前水砕スラグ
Granulated blast furnace slag before the crushing processing

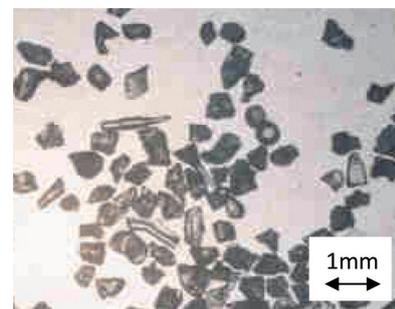


図 3.2 磨砕加工後水砕スラグ
Granulated blast furnace slag after the crushing processing

が多く、炉外水砕と炉前水砕の混合利用による細骨材製造法の確立が必要であった。そこで、磨砕加工後の炉前水砕と炉外水砕の混合比を変えて、混合材の粒度分布、単位容積質量を調査した。結果、要求仕様を安定的に満足可能な混合条件を見出すことができ、磨砕加工無しの炉前水砕をセメント向けに、磨砕加工した炉前水砕単独品を細目細骨材に、磨砕加工した炉前水砕と炉外水砕の混合品を粗目細骨材として、需要に応じた最適な製造体制を確立する事ができた（図 3.3）。

3.2.3 JIS 認証取得

また、君津製鉄所の高炉スラグ骨材（表 3.1）は、JIS 認証を取得（認証番号 TC 03 07 338）しており、製造から出

荷までの一貫した高い品質管理と継続した改善活動により、顧客が安心して使用できる高品質の製品を販売している。

3.3 軟弱土改良技術適用事例

3.3.1 陸域用途事例

宅地造成や道路整備工事等において、地盤が軟弱なため地盤強度向上のための改良が必要とされる事がある。製鋼スラグは適度に石灰を有し、土との混合による水和固化も期待できる。従って、現地盤の粒度、水分特性に応じて製鋼スラグの粒度、配合を検討する事により軟弱土改良材としての優れた効果を発揮できる⁶⁾。図 3.4、3.5 は、現地軟弱土 0.5m 厚みを製鋼スラグと重機での現地混合により改良した後、約 1.5m の盛土施工で仕上げた施工例である。

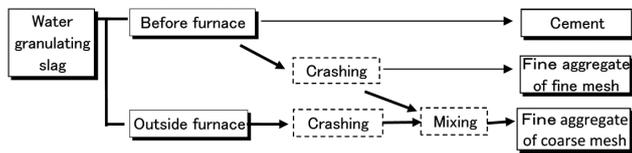


図 3.3 細骨材製造フロー
Production flow of blast furnace slag fine aggregate

表 3.1 君津製鉄所の JIS 骨材
JIS blast furnace slag aggregate of the Kimitsu Works

Product line	Product name
Blast furnace slag coarse aggregate	BFG20-5 N
Blast furnace slag fine aggregate	BFG20-5 L
Blast furnace slag fine aggregate	BFS5-0.3

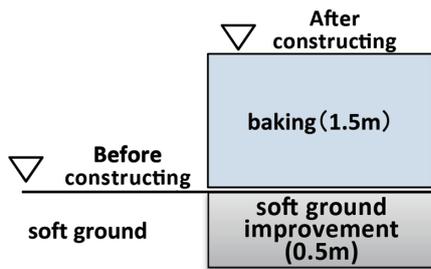


図 3.4 陸域軟弱土改良断面
Cross section of the soft ground improvement

3.3.2 海域用途事例

一方、航路確保等の目的で定期的に発生する浚渫土は湾内の深掘れ部の埋戻しとしていたが、製鋼スラグの固化作用を利用し、浚渫土を粒度、成分調整した製鋼スラグと混合し強度改善した改良土（カルシア改質土）で、沿岸部などで藻場とするには日光が不足気味な海域を浅場化し、同時に水和固化体製人工石材（ビバリー® ロック）を設置することで藻場造成が可能となる（図 3.6）^{8,9)}。

実際、君津製鉄所付近の海域にて施工し、浚渫土の強度向上、窪地等よどみ部の水環境の改善、そして、浅場、藻場への魚介類、海藻類の生育を確認した。

このような軟弱土の改良では、陸域にしる、海域にしる、広域な施工現場が対象となるため、事前に軟弱土と製鋼スラグの混合試験を行い、強度発現可能な基本的な配合を決定していても、軟弱土側の性状等により所定の強度が出にくい場合がある。このような場合でも、事前試験結果を参考に、現地での配合変更試験と強度調査により、適宜配合調整を行い必要強度の確保を実現している。

3.4 結 言

君津製鉄所では、今後とも環境に配慮し、広く社会のニーズに応え、安心、安全なスラグ製品の製造、利用に努めていきたい。

なお、3.2.2は太平洋セメント(株)との共同研究成果の一部であり、3.3.2は、千葉県国土整備部、千葉県農林水産部、国土交通省関東地整千葉港湾事務所、千葉県



図 3.5 陸域軟弱土改良施工状況
Construction situation of the soft ground improvement

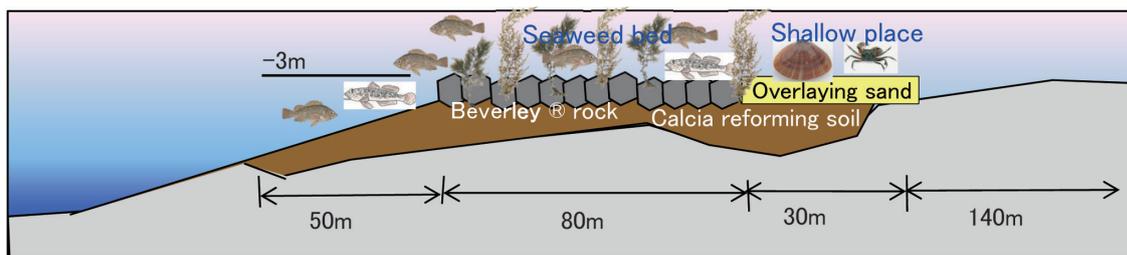


図 3.6 カルシア改質土を利用した浅場・藻場造成
Construction of the seaweed bed and shallow place with the Calcina reforming soil

漁業協同組合連合会, JFE スチール(株), 新日鐵住金(株)が参画する“水環境改善に関する勉強会”, および千葉県

君津市の支援を受けて実現した事案であり, この場を借りて謝意を表す。

4. 名古屋製鉄所ORPスラグ肥料化の開発

4.1 緒言

従来, 農業向けの肥料原料としては, 高炉スラグを原料とするケイカル, 転炉スラグを原料とするミネカルが主流であった。一方, 名古屋製鉄所では 1989 年に転炉型溶銑予備処理炉 (LD-ORP) を稼動し, 溶銑予備処理比率が急激に増加しており, 溶銑予備処理スラグ (ORP スラグ) の肥料適用について技術検討が進んでいた。当時の製鋼工場の技術メンバーは, 溶銑予備処理スラグを珪酸肥料として商品化できないか技術探索を実施し, 名古屋製鉄所のオリジナル商品として“農力アップ”という肥料が誕生した。

4.2 肥料開発のポイント

一般的に, 肥料に求められる成分は 3 大元素 (窒素, 燐酸, カリウム) が有名である。しかし, 農学分野においては, 各成分の施肥効果の研究が進んでおり, 可溶性珪酸, 水溶性珪酸, 可溶性苦土 (マグネシウム) アルカリ性 (酸化カルシウム) 鉄分, マンガンなどの様々な効用が解明されている (表 4.1)。

当時の名古屋製鉄所の肥料商品は, 高炉スラグを加工して製造する“ケイカル”, 転炉スラグを加工して製造する“ミネカル”の 2 種類であった。一方, 溶銑予備処理 (ORP) スラグは溶銑段階での製鋼製錬であるため高炉スラグと転炉スラグの両方の性格を持ち, 珪酸, 石灰分, りん酸, 鉄分,

マンガン, マグネシウムがバランス良く含まれている事からオールインワン肥料として単位面積当りの散布量低減による負荷低減を期待して研究を行った。

4.2.1 珪酸イオンの供給

農業の主力である稲作においては, イネ科は珪酸植物という種類に属し, 根, 茎, 種子に多くの珪酸を含有するため, 水稻の根にいかにか効率よく珪酸イオンを供給するかが重要なポイントとなる。

一般的に, 常温の水溶液中での酸化物のイオン化は酸性条件下で進行しやすい。そのため肥料測定法 (公定法) の場合に塩酸で pH = 0.7 の条件下で測定する“可溶性珪酸”がある。一方, 民間での肥効評価法として pH = 6~7 前後のイオン交換水で測定する“水溶性珪酸”がある。

塩酸で測定する理由は, 肥料内に含有する珪酸の総量を把握するため, イオン交換水での測定を行う理由は, 水田に近い条件で溶出する珪酸を把握するためである。

スラグ系珪酸肥料製品は高炉スラグを原料としたケイカルと転炉スラグを原料としたミネカルがあり pH = 0.7 では高炉スラグの珪酸溶出値が高い。一方, 水稻の実際の生育条件である pH = 6~7 では ORP スラグを原料とした試作品の方が高い結果となり (図 4.1), 圃場試験の結果でも収量改善が見られた (図 4.2)。

4.2.2 秋落ちの抑制

その他に, 水稻の出穂期ごろから生育が衰え, 収量が減少する現象に秋落ちという現象があり, 土中に発生した硫化水素がイネの根を痛めてしまう事が原因と言われている。背景として, 日本の土壌がもともと酸性土壌であるの

表 4.1 各種肥料成分の特長と製品別含有量
Feature of elements and the contents of various manure ingredients

Elements	Feature	Kei-Karu (BF)	Mine-karu (BOF)	Test (ORP)
SiO ₂	Resistance for the lodging of the paddy-rice, Restraint of the pest	31	10-13	23
CaO	Neutralization of the acid soil	40	35-40	43
Fe ₂ O ₃	Neutralization of the acid soil	-	20-25	10
MgO	Ingredient of the chlorophyll	5	3	1.6
P ₂ O ₅	Breathing action before the photosynthetic and glycolysis	-	1	2.5
MnO	For various oxidation-reduction enzymes, Generation of the chlorophyll	-	2-4	7

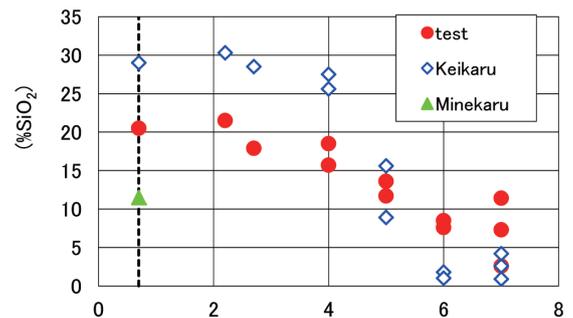


図 4.1 珪酸溶出試験結果
Silicic acid elution test result

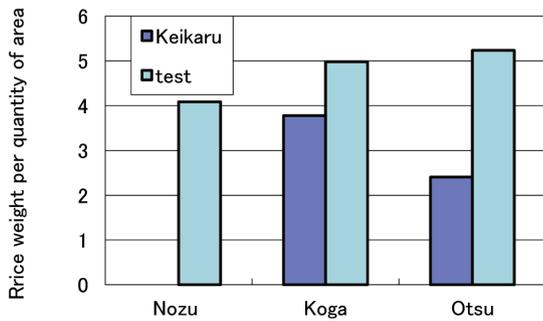


図 4.2 圃場実験実績比較（滋賀県）
Result of rice field test (Shiga Pref.)

に加え、近年のPM2.5など日本海側の雨水のpH低下が理由という説も出ている。対策として、自然の条件下で安定な硫化物を作る鉄、マンガンを補給する肥料の使用が効果的と言われている。表 4.1 から解るように、従来のケイカルと比べて、鉄、マンガン含有量が高く効能に優れた商品となった。

4.3 工場見学会の実施

名古屋製鉄所では、全国農業協同組合連合会、各農業協同組合のご協力の下、全国の営農家の工場見学会を年間通じて実施しており毎年100～200名の見学者が製鉄所に訪問頂き、高炉、製鋼、肥料工場などの見学を行い、意見交換会を通じ肥料に関するご要望についてご意見を頂き、製造・販売に反映させている（写真 4.1）。

その結果、平成24年度の国際米食味コンクールで、農力アップを御使用の農家が金賞を受賞されるなど着実に、成果が上がりつつある（写真 4.2）。

近年、見学会で話題となっているのが、りん鉱石の価格高騰である。国際的な食料問題の背景にあるのは中国など東アジアの肥料需要の増大である。一方、今回の商品を含めた製鋼スラグは、高炉溶銹に含まれるりんを除去・濃縮したものである。近年の鉄鉱石中のりん含有量の増加も手伝って、今後益々製鋼スラグのりん酸濃度は上昇すると考えられており資源の少ない日本にとって貴重なりん供給源になると考えられる。

4.4 農力アップの出荷状況

当所溶銹予備処理スラグを原料とする珪酸肥料は、1998年のサンプル開発後、産業振興(株)において造粒技術等肥料製品開発を経て、2000年から同社より“農力アップ”の商品名で出荷開始に至った。その後販売数量は順調に拡大を続け、現在は年間2万トンを超える出荷数量となっている。



写真 4.1 製鉄所見学風景
Steelworks plant tour



写真 4.2 農力アップ金賞受賞チラシ
Golden award of Rice Concur

4.5 結 言

名古屋製鉄所溶銹予備処理スラグを用いた肥料は、 $\text{pH} = 6 \sim 7$ の中性で、珪酸イオンが良く溶出する組成のため、少量散布でも施肥効果が高い事、高炉スラグと転炉スラグの両方の成分（特に鉄、マンガン）についてバランスよく配合している事から、単一少量施肥でも効果が高い事が明らかになった。また、工場見学会などを通じた品質改善による営農家の収益改善、および海外見学対応による社会貢献などを行っている。

謝 辞

開発当初から現在まで約17年の間、数々の助言を頂きました。東京農業大学後藤教授をはじめとする大学関係各位、各営農家の皆様、全国農業協同組合連合会、各農業協同組合、産業振興(株)肥料事業センター、産業振興(株)名古屋事業所に感謝申し上げます。

5. 和歌山製鉄所における開発状況

5.1 高炉スラグ

5.1.1 コンクリート用骨材比率

和歌山製鉄所の高炉スラグ製品は、コンクリート用骨材の占める比率が約 25%と高く、2012 年度で約 330 千 ton の出荷量となっている（図 5.1）。その内訳を表 5.1 に示す。高炉スラグ細骨材として年間約 120 千 ton を炉外水砕設備（2005 年稼働）で製造し、販売している。またスラグ処理場で徐冷し破碎分級した高炉スラグ粗骨材 2005 を年間約 160 千 ton 製造、販売している。

一方、高炉スラグ粗骨材 2005 製造時に発生する 5mm アンダー分については湿式分級設備¹⁰⁾（2010 年稼働）にて 2.5～5mm と 2.5mm アンダーに分級し、コンクリート二次製品用骨材等に年間約 50 千 ton 製造、販売している。

なお湿式分級設備によるコンクリート二次製品用骨材の商品化については、その内容が評価され平成 24 年度資源循環技術・システム表彰で奨励賞を受賞している¹⁰⁾。

またコンクリート二次製品については国土交通省の NETIS（新技術情報提供システム）に“高炉徐冷スラグ骨材を 100% 使用したコンクリート二次製品”（登録 No: KK-11041-A）として登録も行っている¹¹⁾。

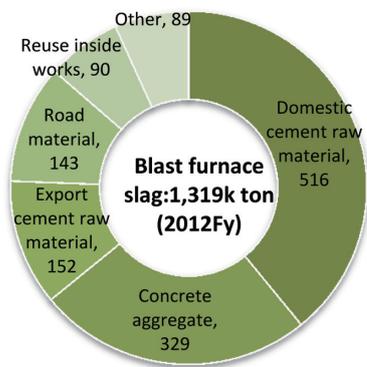


図 5.1 高炉スラグの製品構成
Product mix of blast furnace slag

表 5.1 高炉スラグコンクリート骨材の内訳
Product mix of concrete aggregate in blast furnace slag

Item	Production (kilo ton/2012Fy)	Remarks
Fine aggregate for concrete	118	Offline water granulation equipment
Coarse aggregate for concrete (5-20mm)	160	Air cooling in yard
Concrete product aggregate (2.5-5mm)	26	Wet classification equipment
Concrete product aggregate (under 2.5mm)	25	Wet classification equipment
Total	329	

5.2 製鋼スラグ

5.2.1 所内原料用途としての再利用率

和歌山製鉄所では従来から製鋼工程の脱硫プロセスで排出される脱硫スラグを焼結原料として再利用する取り組みがおこなわれていたが、排ガス中の SO_x 排出量制約で、発生量見合まで有効利用できていなかった。2009 年の新第一高炉の稼働に合わせ、No. 5 焼結増強起業の一環で、2008 年度より脱硫脱硝装置を稼働させた結果、脱硫スラグを発生量見合で再利用することが可能となり、製鋼スラグの所内原料用途としての利用率が飛躍的に向上した。また、スラグ粒度管理により、焼結成品 RDI（還元粉化指数）、凝結材原単位の低下が確認され、多配合使用が可能となり、現在では約 50%に達している（図 5.2）。

5.2.2 転炉スラグを用いたコンクリート舗装¹²⁾

製鋼スラグを骨材に用いたコンクリート舗装を開発・検討中である。所内におけるコンクリート舗装は、コストや操業との兼ね合いから、初期コスト低減と短期開放が要求され、この問題を解決する為に、セメント協会舗装技術専門委員会が開発された“1 DAY PAVE”に転炉スラグ骨材が適用可能か室内試験を行い、和歌山製鉄所構内で試験施行を実施した。その結果、製造、出荷、運搬は問題無く、現場到着時のスランプフローは 41.5cm、空気量は 4.4%と目標値を満足した（表 5.2）。

また材齢 1 日の曲げ強度は 5.40N/mm²と目標値を満足し

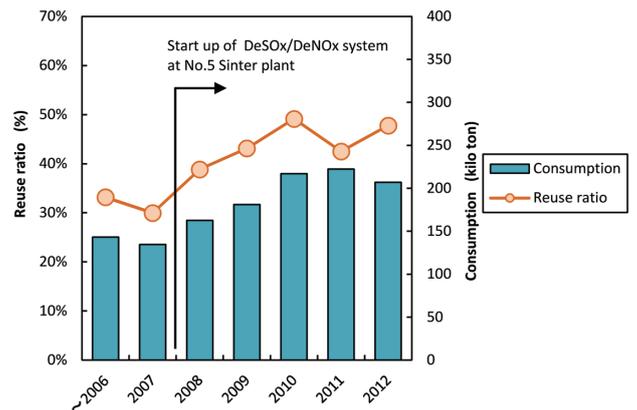


図 5.2 製鋼スラグの所内原料用途利用率と消費量
Reuse ratio and consumption of steel making slag

表 5.2 品質管理試験結果
Result of quality control test

Slump flow (cm)		Air content (%)	
Before delivery	At construction site	Before delivery	At construction site
40.5	41.5	3.5	4.4

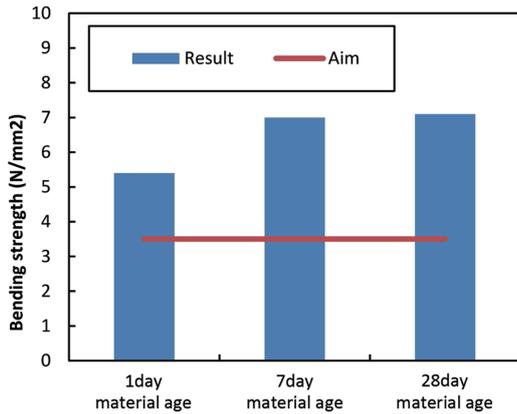


図 5.3 曲げ強度試験結果
Result of bending strength



写真 5.1 コンクリートの打ち込み
Placing of concrete

(図 5.3), 施工性も概ね良好で打設直後に生じるプラスチック収縮ひび割れや, 乾燥収縮ひび割れは認められなかった(写真 5.1, 5.2)。

一年後の目視調査においても収縮ひび割れは無く, 特に問題無かった。今後は経年変化の把握と適用範囲拡大を図っていく(写真 5.3)。



写真 5.2 硬化後の舗装表面
Pavement surface after hardening



写真 5.3 供用1年後の状況
Pavement surface a year later

6. 広畑製鉄所 アッシュストーン製造・利用技術開発

6.1 緒言

石炭は石油代替エネルギー資源として, その重要性が見直され, 石炭火力発電所の建設が各地で行われている。それらの石炭火力発電所の稼働により, 多量の石炭灰が発生している。石炭灰の主な用途はセメント原料としての利用であるが, その利用可能量にも限界があり新たな用途開発が望まれている。

兵庫県スラグ路盤研究会(神戸大学, 兵庫県, 神戸市, 鉄鋼スラグ協会)では, 石炭灰の利用を推進させるために石炭灰を造粒固化した路盤材用補足材(名称: アッシュストーン)の研究を行った。本稿ではアッシュストーンの開発の取組みおよびその利用状況についての概要を紹介する。

6.2 アッシュストーンの開発経緯

従来, 兵庫県では石炭灰を粉体状のまま既存の路盤材に混合し利用することが認められていたが, 粉体状であるために利用可能量が2~7%と非常に少なく, またその飛散

等の問題があった。この問題を解消するべく石炭灰を固化したアッシュストーンの開発が行われた。

6.3 アッシュストーンを用いた試験施工

アッシュストーンの実用化に向け, 兵庫県スラグ路盤研究会では県道でアッシュストーンを混合した水硬性粒度調整鉄鋼スラグ(以下 HMS-25 と略す)の実路試験を2件実施した。ともに1999年に施工を行い, 道路面のひび割れ, 平坦性, 維持管理指数などの舗装性能の調査を3年間実施し, 既存の路盤材と同等の性能を有することが確認され, 兵庫県での利用が認められることとなった。

以下に2件実施されたうちの兵庫県道小部明石線(兵庫県明石市, 延長:132m)での試験施工結果を紹介する。図 6.1 に試験施工断面, 表 6.1 に使用材料の品質試験結果および表 6.2, 図 6.2~6.5 に追跡調査結果を示す。なお, 本調査結果は2002年3月の兵庫県スラグ路盤研究会にて報告されたものである¹³⁾。

6.4 アッシュストーン製造について

広鋳技建(株)ではアッシュストーンが兵庫県で認可された後の2003年9月よりアッシュストーン製造設備の営業運転を開始させた。広鋳技建ではアッシュストーンの原料として新日鐵住金(株)広畑製鉄所(以下広畑と略す)で発生

する流動床燃焼灰を用いた。

一般的に流動床燃焼灰はCaOとSO₃を多く含有しており、水を加えると固化する特性を有している。この流動床燃焼灰を使用することにより、添加するセメント量を低減することが可能となった。また混合、混練、造粒については特殊な設備(ミキサー)を採用することにより、3工程を1設備で行うことが可能となった。その製造設備の概念図を図6.6に示す。

広鋳技建ではアッシュストーン製造設備の営業運転開始以降、広畑で1か月に発生する流動床燃焼灰のほぼ全量をアッシュストーンとして製品化している。

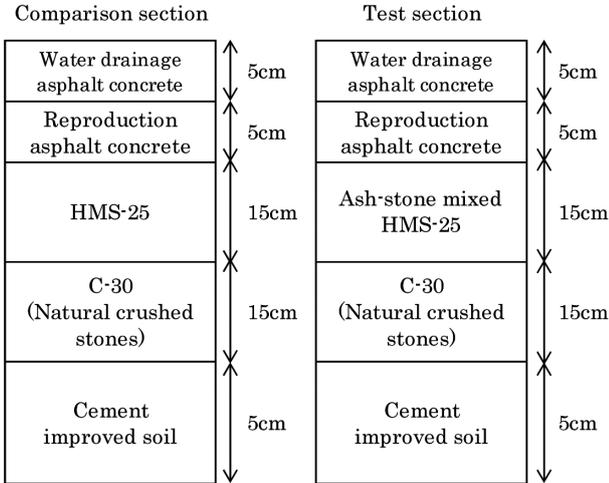


図 6.1 試験施工断面図
Test sectional view

表 6.1 品質試験結果
Quality test result

	HMS-25	Ash-stone mixed HMS-25	Standard
Unit capacity mass (N/m ³)	19.3	18.1	≥ 15.0
Correction CBR* (%)	175	170	≥ 80
Compressive strength (N/mm ²)	1.55	1.71	≥ 1.2

* CBR : California Bearing Ratio

表 6.2 追跡調査結果
Results of follow-up surveys

Section	Assorted traits	Directly		6 months		12 months		18 months		24 months		30 months		36 months	
		Up line	Down line	Up line	Down line	Up line	Down line	Up line	Down line	Up line	Down line	Up line	Down line	Up line	Down line
Comparison section	Crack rate (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Amount of average tracks (mm)	13.2	8.6	14.5	12.8	16.5	14.5	16.4	14.7	16.3	15.1	16.7	15.4	16.6	16.5
	Flat nature (mm)	2.0	1.8	1.8	2.8	2.9	3.0	3.2	4.9	4.9	3.8	3.2	4.9	3.2	4.9
	MCI*	7.7	8.2	7.6	7.7	7.4	7.5	7.4	7.5	7.3	7.4	7.3	7.4	7.3	7.3
Test section	Crack rate (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Amount of average tracks (mm)	12.4	11.0	14.4	13.6	16.1	16.2	16.1	16.2	16.5	16.7	16.2	16.8	16.2	16.9
	Flat nature (mm)	1.7	1.7	2.5	2.7	2.6	2.7	3.9	3.5	3.5	2.6	4.0	3.6	4.0	3.7
	MCI*	7.8	8.0	7.6	7.7	7.5	7.4	7.5	7.4	7.5	7.5	7.5	7.4	7.4	7.3

* MCI : Maintenance Control Index

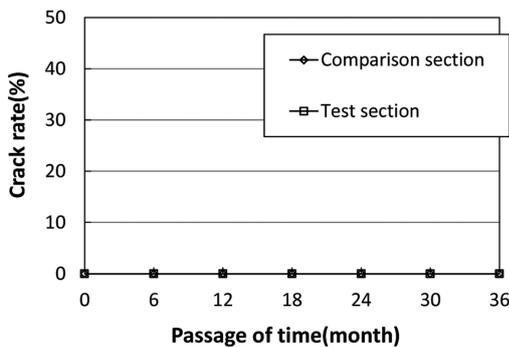


図 6.2 追跡調査結果 (ひび割れ率)
Results of follow-up surveys (crack rate)

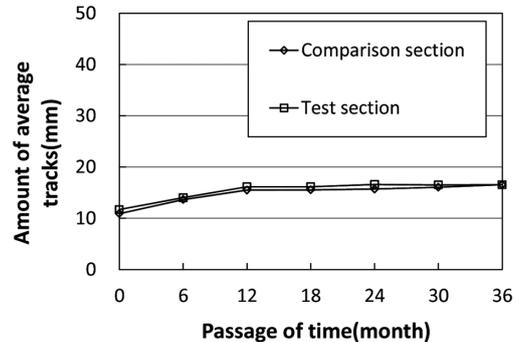


図 6.3 追跡調査結果 (平均わだち量)
Results of follow-up surveys (amount of average tracks)

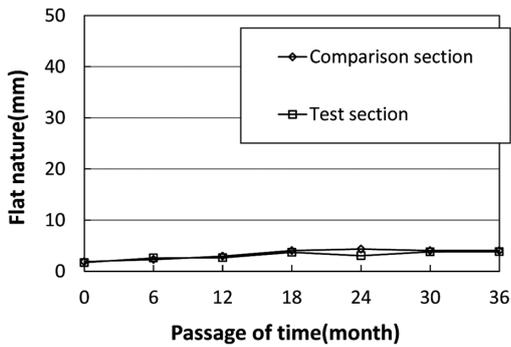


図 6.4 追跡調査結果 (平坦性)
Results of follow-up surveys (flat nature)

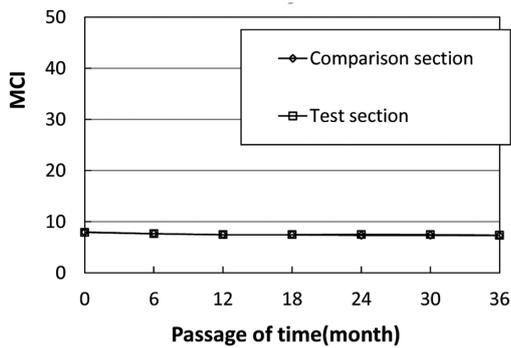


図 6.5 追跡調査結果 (MCI)
Results of follow-up surveys (MCI)

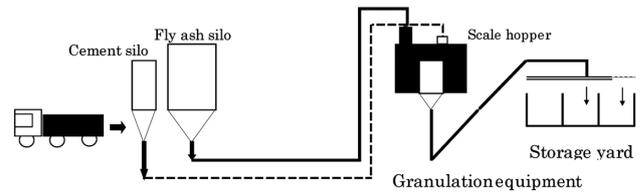


図 6.6 製造設備概念図
Equipment key map of production equipment

6.5 結 言

上記で紹介するように広鉾技建ではアッシュストーン製造設備の営業運転開始以降、広畑で発生する流動床燃焼灰の製品化、またそれを混合した路盤材は兵庫県内の公共工事を中心に販売を継続中である。今後も更なる品質改善および営業努力に努めるものとする。

謝 辞

本稿の執筆にあたり兵庫県スラグ路盤研究会の参加団体より、多大なるご支援いただきましたことをここに付記して、謝辞を表します。

7. 八幡製鉄所の鉄鋼スラグ利用の取組

7.1 緒 言

八幡製鉄所は、2014年4月1日より旧八幡製鉄所と旧小倉製鉄所が統合し、新生“八幡製鉄所”としてスタートを切った。本報告では、旧八幡製鉄所での鉄鋼スラグ製品の利用状況に関して報告する。

7.2 高炉スラグの利用

7.2.1 鉄鋼スラグの利用の始まり^{14,15)}

現在八幡製鉄所の戸畑地区では、戸畑第4高炉が稼働している。高炉から生産される高炉スラグは、水砕スラグをセメント原料、骨材、土工用途等で有効利用され、徐冷スラグは道路用路盤材として利用されている。

水砕スラグのセメントへの利用は1世紀の歴史があり、1901年旧八幡製鉄所の東田第一溶鉾炉の作業開始から、1910年にセメントに高炉スラグを試験・研究的に製造した事に始まる。その後1913年に日本初の高炉セメント工場を前田地区に設置し、現在の日鉄住金高炉セメント社（小倉地区）での高炉セメントの製造に至っている。このような歴史の中で、本報告では主に2000年以降の鉄鋼スラグの

利用状況とその取り組みをまとめる。

7.2.2 高炉スラグの有効利用

7.2.2.1 現地発生土と高炉スラグの利用¹⁶⁾

廃棄物処分場の遮水工法の一つとして、粘土層と遮水シートを組み合わせた構造がある。粘土層等の土質遮水材に求められる透水機能は、透水係数 $<10^{-7}$ cm/sのため、通常は現地発生土にベントナイトを混合し遮水性の向上を図っている。一方、廃棄物等の荷重による地盤の変形によるシートへの負荷を減少させるため、ある程度の強度を確保する必要性があり、現地発生土とベントナイトに、高炉スラグ微粉末を混合した遮水材の開発を行った。

このシステムは、2001年に北海道上川郡朝日町で、埋立面積5000m²、埋立容量12000m³の一般廃棄物処分場造成工事に採用された。

7.2.2.2 土工用水砕スラグ利用¹⁷⁾

2004年3月に部分開業した九州新幹線は、九州特有のしらす地盤を通過するトンネル構造が多く、その路盤に水砕

スラグを用いた透水性路盤が採用されている。透水性路盤の機能は、トンネル周辺の地下水位の低下としらす地盤における噴泥防止を目的としている。しらす地山におけるトンネルは、従来はコンクリートのインバート構造が多いが、しらすは水に対する抵抗性が弱く、水圧対抗型としても繰り返される列車の荷重が課題となっていた。

一方、水砕スラグは砂状の粒状体であり、透水性と共に路盤材としての支持力もある事から鉄道路盤材の採用に至っている。

九州新幹線は2011年3月に全線が開業し、現在九州と本州を結ぶ大動脈として機能している。

7.2.2.3 フライアッシュ溶融高炉スラグの開発^{18, 19)}

近年の海砂採取規制、天然骨材の枯渇等、高炉スラグのコンクリート骨材へのニーズが益々高まっている。八幡製鉄所では、高炉水砕スラグ細骨材の販売を行っているが、新たな取り組みとしてフライアッシュを高炉スラグに添加したフライアッシュ溶融高炉スラグの開発を行った。フライアッシュの多くはセメント原料等に利用されているが、一方では未燃カーボン等の課題もあり、有効利用は進んでいない。

そこで、高炉スラグ鍋中にフライアッシュを吹込み溶融させる事でコンクリート骨材を製造する方法を開発した。フライアッシュ溶融高炉スラグ細骨材は、高炉スラグ細骨材 JIS A 5011 の規格値を満足しており、モルタル試験での全量使用においては、フライアッシュ添加率が10%までのフライアッシュ溶融高炉スラグ細骨材は、海砂を使用したモルタルと比較しても遜色ない性能が見られた。今後フライアッシュ処理課題に向けた1つの施策として検討している。

7.3 製鋼スラグの利用

鉄鋼スラグの中でも、製鋼スラグの利用が本格化したのは、1979年に道路用鉄鋼スラグの JIS が制定されてからとなる。その後道路路盤材を主体に、コンクリート再生材を混合した新複合路盤材の開発や、また軟弱地盤の改良材の利用技術が開発されており、現在港湾用資材としても注目を集めている。本報告では、この中でも新複合路盤材の開発と製鋼スラグの港湾資材への取り組みを述べる。

7.3.1 新複合路盤材の開発²⁰⁾

鉄鋼スラグ路盤材は、高炉スラグを主体とした水硬性複合路盤材 (HMS25) が上層用路盤材として利用されているが、製鋼スラグは水硬性が小さく、一軸圧縮強度も小さいため上層用路盤材への利用ができなかった。一方、コンクリート構造物の解体時に発生するコンクリート再生材は、強度のばらつき等の課題から単独材では上層用路盤材として活用ができなかった。そこで、鉄鋼スラグとコンクリー

ト再生材を組み合わせた新複合路盤材を開発した。

組み合わせのメリットは、以下のとおりである。

- コンクリート再生材の未反応セメント分による再硬化特性の活用
- コンクリート再生材のアルカリ刺激によるスラグの潜在水硬性の早期発現
- 鉄鋼スラグ混合による物性値の安定化

その結果、コンクリート再生材 45%、製鋼スラグ 30%、高炉スラグ 25%の配合で、従来の HMS25 と同等な性質を持った新複合路盤材を開発し、現在も北九州市土木工事資材として利用されている。

7.3.2 鉄鋼スラグの海域利用

7.3.2.1 海域改善材

新日鐵住金(株)では海域改善材として、鉄分を含む製鋼スラグと人工腐植土を混合したビバリー® シリーズ²¹⁾等の漁場・藻場造成製品を開発している。これらの製品は、北海道増毛町での取組²²⁾が有名であるが、九州でも北部九州を中心に海域の磯焼け現象が多くみられる。その中で2010年に長崎県壱岐市石田地区の藻場回復事業に使用したビバリー® シリーズは、設置後3年が経過しているが、アラメ等の海藻類の繁茂が確認されている²³⁾。同市では別地区でもビバリー® シリーズの投入を行っており、今後も海域環境改善材として活用を図りたい。

7.3.2.2 浚渫土改良工法の検討

近年、航路浚渫工事で発生する浚渫土砂の処分場が枯渇しており、その有効利用が求められている。浚渫土改良は、2008年に日本鉄鋼連盟で製鋼スラグによる利用手引書²⁴⁾が発刊されている。八幡製鉄所でも浚渫工事で発生した浚渫土を埋立処分場で処理する際に、土地利用としての強度発現の必要性から、カルシア改良材による改良工事を試験実施した²⁵⁾。

カルシア改良混合は、浚渫土を陸揚げし、ピット内に投入した後、カルシア材を投入、バックホー混合で攪拌した。この適用に当たっては、カルシア改良土の目標強度をコーン指数 $qc=200\text{kN/m}^2$ 以上に設定し、現場管理強度の安全率2として $qc=400\text{kN/m}^2$ となるように、カルシア材の混合率を30%に設定した。また現場品質管理指標として、バックホー混合時間と現場品質の相関から現場での単位体積重量で混合度合いを評価している。これらの手法により、今後同様な工事が発生する場合は、鉄鋼スラグの有効利用とコスト削減の方法としてカルシア改良工法の採用を図りたい。

7.3.2.3 浚渫土固化体の検討²⁶⁾

九州各地でも浚渫土の有効利用が課題となっている。博多湾では、航路水深確保のため浚渫工事が進められている

が、採取される浚渫土の有効利用の一環として、浚渫土と製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末を混合した浚渫土固化体を製造した。浚渫土固化体の製造は、浚渫土と製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末を現場で事前混合し、土質改良機を用いて全体量 30m³ を混連した後に、型枠に投入し、養生後に 300～500kg/個の大きさに破碎し、28日強度を確認した後に漁礁、藻場石として現地海域に投入した。浚渫土固化体の必要強度は $\sigma_{28}=10\text{kN/mm}^2$ 以上を目安にしており、また現地での湿潤密度の計測により混合具合も評価した。これらの一連の作業により、浚渫土を現地で混合し、漁礁、藻場礁を製造する手法を確立している。

7.4 環境資材としての鉄鋼スラグの評価活動²⁰⁾

鉄鋼スラグはまた環境資材として有効利用の推進活動を進めているが、その評価に関して、環境と経済を考慮した評価手法の検討を、2001～2002年に地盤工学会九州支部の中で検討した。

この中で、経済と環境の評価手法として、直接コスト（建設用材料費、建設工事費）とエココスト、および環境コストによる試算を行っている。このエココストは“建設用材料の製造、運搬、構造物の建設、維持管理、解体、廃棄に伴って発生する環境負荷に対して、それらの環境負荷を排除するために要する等価な技術的・実務的コスト”と定義されている。また具体的な試算は、二酸化炭素の排出量を試算したライフサイクル炭酸ガス（LCCO₂）を指標としている。ライフサイクル炭酸ガス（LCCO₂）は、工事で使用する資材の採取、製造、運搬と建設工事の建設重機から排出される二酸化炭素の排出量の試算を行い、また鉄鋼スラグが有効資材として活用され埋立処分が避けられる廃棄回避を試算し合わせて評価された。さらに環境コストは、使用材料

の森林・生態系への影響、居住環境悪化、地価下落等を評価する便益移転法を基本に、建設材料に対する相対的な環境コストとして求めている。

報告書の中では、港湾工事において鉄鋼スラグと天然材料（捨石、海砂）を用いた試設計でコスト比較を行っている。試設計は、延長 100m、水深 -7.5m 岸壁（ケーソン式）の岸壁構造物をモデルとしたが、鉄鋼スラグのメリットとしては以下の点があげられている。

- 裏込め材に水砕スラグを使用する事で土圧が軽減
- ケーソン中詰め材に製鋼スラグを使用し、土圧に対する抵抗モーメントを大きくする
- SCP（サンドコンパクションパイル工法）材製鋼スラグは内部摩擦角、円形すべりの抵抗力も大きく、改良範囲を縮小できる

これらの試算の結果、建設工事全体では、直接コストは天然材を使用する場合に比べ9%の削減が図れている。また、エココストは建設単味では削減率が4%であるが、リサイクル材として鉄鋼スラグを有効活用する効果を加味すると建設工事全体では約3割の低減効果があるとされている。

さらに環境コストは、天然材に比べ鉄鋼スラグを使用する場合は環境への負荷が1/4程度に抑制できると試算されている。これらの結果から、鉄鋼スラグの有効利用により直接コストとともに、エココスト、環境コストの縮減効果が期待できると報告されている。

7.5 結 言

鉄鋼スラグの利用は、開始から既に1世紀が経過した。次世代にかけても社会環境の変化と要請に応じた鉄鋼スラグ製品の提供を図ると共に地域の発展に寄与したい。

8. 大分製鉄所の鉄鋼スラグ利用の取組

8.1 緒 言

温暖な瀬戸内海地方に位置した大分県は、水産資源が多い豊後水道、そして背後にそびえる九重山系から広がる里山等での、農業、林業、水産業と、その自然の豊かさを利用した第1次産業が特に盛んな県である。

その地に位置する大分製鉄所は、我が国では最後に建設された新しい貫製鉄所であり、さらに地域と一体となった生産活動を営んで既に43数年が経過している。

最近、行政、民間で抱えるいくつかの農林水産の課題を、大分製鉄所で製造したスラグ製品を活用し、地域貢献を進めている。その代表例を以下に報告する。

8.2 農業への貢献

8.2.1 特殊肥料（含鉄肥料）の開発

鉄鋼スラグは、石灰分、シリカ、りん酸といった基本的な肥料成分の他、ミネラル分である鉄、ほう素、マンガンといった植物の成長に必須な微量成分を有していることは、述べるまでもない。大分製鉄所でも、製鋼スラグを主に肥料としての販売を実施していたが、近年の国の減反施策等の影響で、肥料としての販売量が落ち込み、農業資材として鉄鋼スラグ肥料の直接的な販売は、2002年に中断した。

特に、製鋼スラグを石灰肥料として活用するには、石灰分の溶出速度が遅く遅効性であり、石灰肥料の10数倍もの施肥が必要となる。たとえ10数年の効果が持続すると

しても、例えば一度に一反(10a)に数トンの施肥をするのは容易でない為、重機を持たない小規模農家、あるいはアプローチ道路が狭い山間部にある畑の農家の資材としては向かない事も、販売量が伸びなかった大きな理由でもあった。

しかし大分製鉄所では2007年から視点を変え、大型重機を持つ大型農家専用、輸送コストを抑えるため10tのトラック単位で商品を届ける輸送方法で販売することを前提とした製鋼スラグの肥料の開発に着手し、写真8.1に示す製鋼スラグで作った“含鉄肥料”という名称の特殊肥料の開発を行った。

著者らは、農業の支援に力を入れる大分県の豊肥振興局、同県の安全農業研究所および竹田市にある大型農家と試験を実施し、一区画に22トン/反という施肥を実施した(写真8.2)。従来から、製鋼スラグの肥料は根コブというアブラナ科の葉物野菜がかかる病気に対し予防効果があると言われていた²⁷⁾が、当製品も、その効果があること、さらには肥料効果として野菜の生育効果が高い事を立証した(図8.1、写真8.3、8.4参照)。

その後、2009年に“含鉄肥料”と命名し、特殊肥料として大分県に登録を行い、本格的な販売を開始した。特に農地の改良事業として貢献した事例を次に示す。

8.2.2 竹田市の菅生地区での事例

高原葉物野菜の大規模農家が多い竹田市の菅生地区においては、20年の間に500haの畑に根コブ病が蔓延してしまい、高価な薬材を活用しながら露地野菜を育てている。その対策として、2009年に、大分県の豊肥振興局、JAおおいた、おおいたみどり地域本部の葉菜部会が中心になり、戦略的産地振興支援事業という国の事業を活用し、部会30名の57圃場(23ha)で、2000トンもの本資材“含鉄肥料”を活用し、土壤改良の試験を実施²⁸⁾した。

根コブの発症が抑えられる事象に加え、葉物野菜の裏作



写真 8.1 特殊肥料“含鉄肥料”
Fertilizer “Gantetsu hiryo”



写真 8.2 散布状況
Situation of fertilization

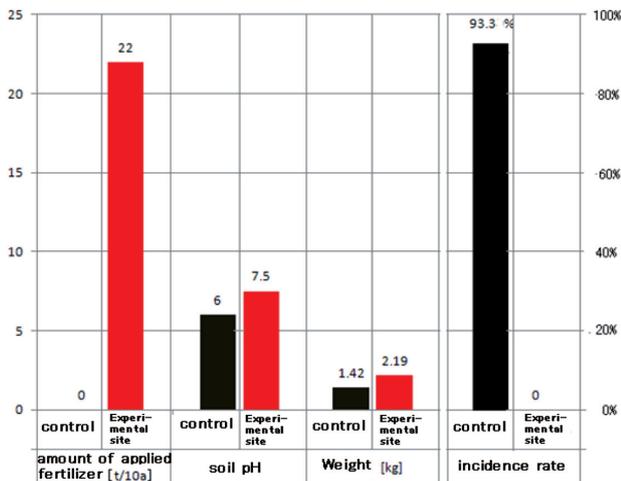
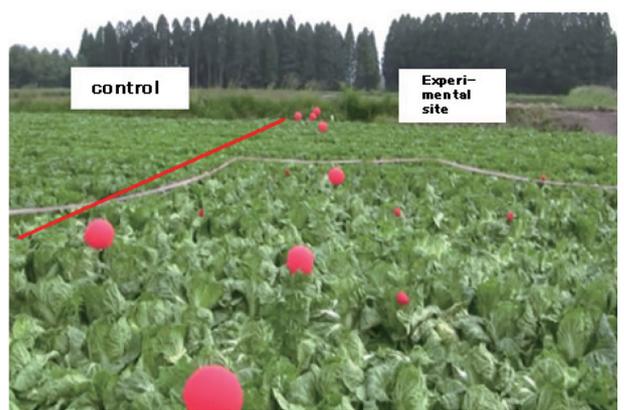


図 8.1 施肥の効果
Effect of the fertilizer on Chinese cabbage



The red balloon was fixed to the infected Chinese cabbage.

写真 8.3 試験結果の状況
Overview of control and experimental site

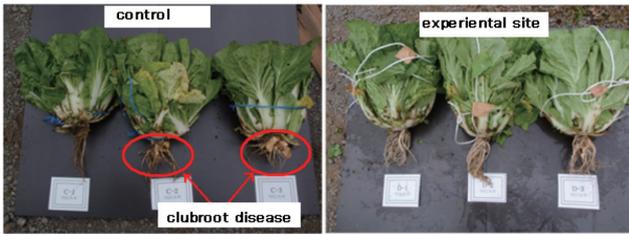


写真 8.4 白菜への施肥の影響
Effect of the fertilizer on Chinese cabbage

で作るスイートコーンの出来が良いとの事象があった。これは、スイートコーンはイネ科であり、シリカ成分が多い、本資材の成分が、生育を進めたものと考えられた。

8.2.3 八代市での活用事例

さらに2011年には、同じく葉物野菜の大規模農家が多い熊本県の八代市でも、JA やつしろの協力のもと事業化が進み、32.6haを、3000トンもの本資材“含鉄肥料”が活用され、土壤改良が行われた²⁹⁾。

ただし、この本資材“含鉄肥料”の施肥については、例えば黒ボクのようなアルカリ化し難い土壌であれば、施肥量が10トン/反以上必要となる農地も珍しくない。この場合、一度の施肥では地盤が固くなるといった課題もある。さらには、養分の偏りの問題あり、活用に関しては、大分製鉄所に問い合わせされたい。経験で得られた、紙面に書き得ないノウハウも活用し、相談に応え販売している。

8.2.4 他地域での試験活用

大分県の南部振興局、JA おおいた佐伯事業部と佐伯の弥生で、牛糞、鶏糞と“含鉄肥料”で発酵させた肥料を用いた水稻での生育促進試験を実施したり、JA おおいた中津事業部もキャベツやブロッコリーの根コブ病対策で実施したり、県内各地で、さらにネギやアスパラガス等の他の野菜でもいくつかの試験が始まっている。

8.2.5 不溶化機能の活用試験 (Cd 汚染圃場改善)

カドミニウム (以下 Cd と記載) の公害といえば、イタイイタイ病が有名である。現在でも、Cd のやや高い米が収穫される農地があり、農用地土壤汚染地域と国により指定され、不溶化や客土等の対策で改善が進んでいる。2011年には、日本の玄米の Cd の規格基準が、国際基準に見直され、1.0ppm が 0.4ppm 以下の基準に厳格化された。これに対応すべく対策が進んでいるようだが、高価な石灰資材の活用や客土というコストのかかる対策しかないのが現状である。

この対策へ“含鉄肥料”を不溶化資材として使用すべく、九州大学の和田信一郎教授の指導の下、(株)アステックと、ある地域の圃場で試験を実施した。試験方法は、6.4a の畑の4分の1の1.6aを、試験区とし、その横の1.6aを対象

区として実施し、水の流れが混在しないように波板鉄板で分断した。また土壌の pH が 7.5 程度になるように 10a あたり 6 トンの量の“含鉄肥料”の施肥を、2009 年の麦を収穫した後の 6 月に実施し、毎年、玄米と麦の作物を植え継続評価した。

結果、図 8.2 に示すように土壌の pH は比較区に比べ上昇し、図 8.3, 8.4 に示すように、施肥後の試験区で収穫される玄米と麦の Cd 含有濃度は比較区に対し低下し、継続することが確認できた。

このように、例えば、“含鉄肥料”で作物の収量増を狙

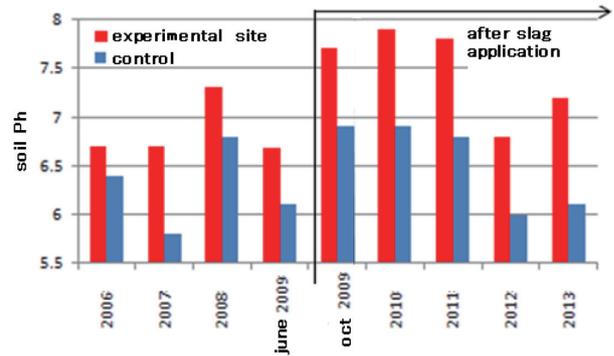


図 8.2 土壌 pH
Effect of the fertilizer on pH of soil

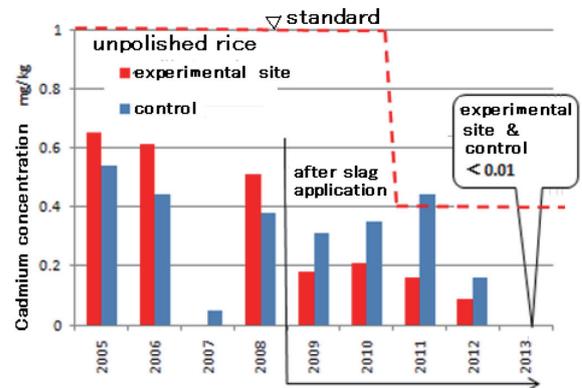


図 8.3 玄米の Cd 含有量への影響
Effect of the fertilizer on the cadmium concentration of unpolished rice

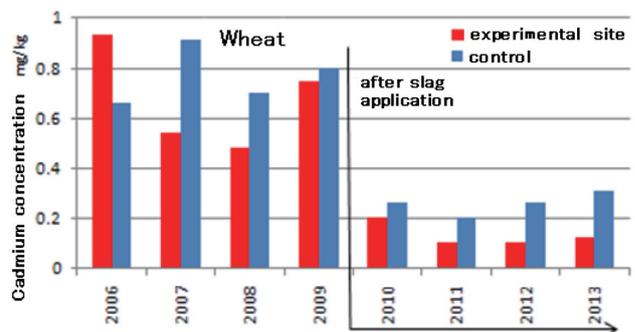


図 8.4 麦への Cd 含有量への影響
Effect of the fertilizer on the cadmium concentration of wheat

い施肥を行えば、同時に有害物のCdの吸収量を抑えられることになり、一石二鳥の効果が得られる。このようにCdで汚染された圃場の対策としても、あるいは汚染圃場ではないがCdが比較的高い地域の圃場の予防策としても、本資材“含鉄肥料”を活用した作物作りで、土壤の改善も図れると思われる。

8.3 畜産での活用事例

8.3.1 牧草の為の土壤改良

久住高原を始めとして、大分県は畜産産業が盛んである。この畜産産業においても、鉄鋼スラグ肥料での貢献を始めている。畜産を行う上での牧草の栽培は、海外から輸入される飼料の高騰もあり、良質の牧草を高収穫する事が重要である。従って、牧草を育てるため肥料や酸の強い土壤を中和するよう石灰のような土壤改良資材を活用して牧草を育てる必要がある。

しかし、九州の高原の大半は火山土特有の黒ボク土であり、酸性が強くアルミナなどを多く含む土壤である為にアルカリ化しづらく、植物がりん酸を吸収しづらい土壤である為に肥料の効果も少なく、石灰や肥料の散布量も多くなってしまい経営を圧迫している状況にある。

そこで、石灰資材の代替や肥料として、良質の牧草を高収穫する為に本資材の活用が始まっている。

ただし、広大な牧草地の改良であることから、地下水等への環境影響も懸念される。そこで大分県と九州大学が、多量施肥した場合の土壤を調査し、環境影響の研究を継続し、一部を佐伯らが2013年度日本土壤肥料学会九州支部秋季例会（九州農業試験研究機関協議会土壤肥料部会共催）で紹介³⁰⁾し、地下水への影響はほとんど見られないと紹介した上で、植物へのりん酸の吸収効果が得られそうであることが土壤調査から得られたとの結果も報告されている。

8.3.2 肥料の改善

多くの畜産農家は、牧草や農作物の肥料に、畜産で発生した家畜の糞尿から良質の肥料を作り、効率的な経営をしている。その肥料製造の発酵時に、本資材“含鉄肥料”を活用している。例えば、本資材“含鉄肥料”が含有する石灰分は、肥料の発酵促進に効果があり、糞尿にない微量成分も合わせ持つ。次第に、多くの農家で独自の活用が広がり始めた。

8.3.3 牧草地維持の整備資材

九州の高原地帯では、2月になると野焼きが始まり春の風物詩となっている。この野焼きは、良質の牧草の収穫の為には重要な行為であることは言うまでも無い。しかしこの作業中に煙にまかれたりする危険を伴う為、延焼を止める防火帯を効率的に作り作業を進めている。その防火帯は、

毎年、草刈りを行い作られているが、面積も広い為、大変な労力を要する。この防火帯に、防草対策となる大分製鉄所で開発されたカタマ®SP³¹⁾の適用化が望まれており、国の地域活性化総合特区として“草原特区”と指定された阿蘇地域で、その試験が開始されている³²⁾。

8.4 林業への活用

8.4.1 路網整備資材での活用

日本の国土の67%を占める貴重な森林は、残念ながら利用率は低く、国産材の活用割合は28%に留まっている。海外の森林を枯渇させる一方、林業として営み育てた日本の山林は荒廃が進んでいる。林業が盛んな大分県も、この傾向は変わらず、本来の林業だけでは生計を立てることのできない状況下にあると言われる。

特に森の整備にはその整備を行うための路網が重要で、豪雨や重機の轍掘れで傷み、その補修に追われて、本来の森の整備が進まない状況にあった為、大分県では、路網整備を効率良く進める多くの取り組みを行っていた。

その中、2008年より開発を開始したカタマ®SPは、元は林道用の資材として開発したものであった。製鉄スラグの固まる性質を、さらに強い潜在水硬性を持つ水砕を配合して、安定的に強度が発現できる資材にし、大分県に紹介したところ、大分県は林業の路網整備材として認定し、研修を通して県下一円に活用を広めた。既に4年が経過し、多く活用されている³³⁾。

その大分県は、2012年10月10日に開催された行政関係者機関で企画される治山林道研究発表会の長崎での九州大会で、“鉄鋼スラグを活用した路盤材の施工事例”として、低コスト、高耐久性の路網が作れる整備資材であることを紹介し、最優秀林道研究会賞の受賞を受け、他県から注目を集めた。

併せて、地盤工学会主催の“第10回環境地盤工学シンポジウム”において九州大学農学部の和田信一郎教授らは、“鉄鋼スラグを用いた舗装材の変質特性と舗装周辺土壌への影響評価”を報告し、林業での活用に対する環境影響のリスクの少なさについて評価し紹介された³⁴⁾。

しかし林業の活用にはさらに課題もある。路網の中でも車輪の車輪の摩耗を受ける急勾配の部分では、高価なコンクリートが活用されるが、カタマ®SPは、コンクリートの代替とはなり得ない。そもそも強度が不足ししかも転圧が効かない勾配の大きな場所での施工は、仕上りの強度が不足する為である。そこで、筆者らは、カタマ®SPの資材より強度の高いG（グレート）カタマ®を開発し、その適用試験を民間や行政と進めている。

8.5 水産業への活用

新日鐵住金で近年、試験され開発されたビバリー®ユニット、ビバリー®ボックス、ビバリー®ロック³¹⁾は、環境省の



写真 8.5 試験状況
Situation of experiment



写真 8.7 ある地域でのイベント
Event in a certain area



写真 8.6 試験状況
Situation of experiment

環境技術実証試験（ETV）の評価を受けた事もあり、九州県内の水産業関係先にも広く知れ渡ってきており、漁業協同組合や行政からの問い合わせも多くなった。大分製鉄所でも、それらの製造体制を整え、姫島、佐伯での試験、国東市での投石事業（人工漁礁製造事業）に貢献してきている。

その中で、波浪の大きな外洋でビバリー®ボックスを活用する場合、固定が難しい。そこで(株)不動テトラと共同でビバメックスという商品を開発した（写真 8.5 参照）。これは、ペルメックス³⁵という不動テトラの開発商品（ブロックに5つの大きな開口部を有し揚圧力を透過させ非常に高い安定性を持つ商品）の中心孔に、ビバリー®ユニットを詰めた商品で、波浪の大きい外洋向けに開発したものである。

大分県の佐伯市にて、大分県農林水産研究指導センターとクロメ、トサカノリ、マクサなどの紅藻類の繁茂試験で活用し（写真 8.6）、現在では下入津漁業協同組合で使用されている。

8.6 結 言

南北に長い日本は地域毎に環境が違う為、農業、林業、水産業の分野は地域毎に生産物、生産方法や収穫方法が異なる。これに合わせ各地域に農林水産の試験場があり独自に最適な農林水産業が発展しているように、鉄鋼スラグの農林水産業への活用も、各地域性に合わせ研究を進める必要がある。2007年から開始した鉄鋼スラグの活用の取り組みは、近隣大学、行政、JA 関係先、そして大型農家と輪を広め、地域の信頼を得ながら進んでいる（写真 8.7）。

我が国における農林水産業は国力の基盤であり重要な国の課題である。そしてそれは大きな転換期にある。新たな鉄鋼スラグの活用が、製鉄所を持つ多くの地域で進み全国の一次産業に広く貢献できれば、幸いである。

謝 辞

以上の試験にあたり、根コブ対策のご指導をいただきました東京農業大学の後藤逸男先生、三重県職員の村上圭一氏、不溶化の技術指導してくださいました九州大学農学部和田信一郎先生、林業再生支援活動に関してご指導をいただいた内閣府地域活性化伝道師の米田雅子先生、また海洋における鉄鋼スラグの活用にご指導をいただいた京都大学名誉教授の田中克先生に、深く感謝申し上げます。

さらに、大分県の農林水産部、大分県豊肥振興局、大分県南部振興局、大分県農林水産研究指導センター、JA おおいた竹田事業部、JA やつしろの皆様、姫島や下入津の漁業協同組合の他、多くの方々のご指導、ご協力を頂き多くの知見を得ることができました。感謝申し上げます。

参照文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル. 2002.2
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説. 2007.7
- 3) 国土交通省道路局企画課：道路統計年報 2010
- 4) 公開特許公報 特開 2007-75714. 2007年3月29日
- 5) 公開特許公報 特開 2000-282034. 2000年10月10日
- 6) 新日鐵住金(株)：鉄鋼スラグ製品カタログ：NS スラッガーズ
- 7) 高野良広 ほか：新日鉄技報. (376), 45 (2002)
- 8) 堀井和弘 ほか：新日鉄技報. (394), 125 (2012)
- 9) 中川雅夫：第 205・206 回西山記念講座. 日本鉄鋼協会編, 2011, p. 27
- 10) (社)産業環境管理協会：平成 24 年度 資源環境技術・システム表彰 表彰概要. p. 8
<http://www.cjc.or.jp/modules/incontent/indexsyokaiJshigen24bn.html>
- 11) NETIS 新技術情報提供システム. 登録 No:KK-11041-A
http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KK-11041&TabType=2&nt=nt
- 12) 林口幸子 ほか：舗装. 49(4), (2014)
http://www.kensetutosho.com/Magazine/hosou/2014_04_hosou.html
- 13) 兵庫県スラグ路盤研究会：第 4 回兵庫県スラグ路盤研究会資料 -4. 2002
- 14) 鉄鋼スラグ協会：高炉セメント百年誌. 2010
- 15) 新日鉄高炉セメント(株)：新日鉄高炉セメント 100 年技術史. 2010
- 16) 則松勇 ほか：現地発生土と高炉スラグを用いた処分場土質遮水工の開発—土質遮水材料の現場製造について—. 土木学会第 55 回年次学術講演会. 2000
- 17) 須長誠 ほか：鉄道トンネル用透水性スラグ路盤の施工性に関する研究. 土木学会論文集 D. 64 (3), 411-420 (2008)
- 18) 湯木敏隆：高炉スラグへのフライアッシュ溶融技術. 石炭灰有効利用シンポジウム. 2007
- 19) 高橋勝也 ほか：フライアッシュを溶融添加した高炉スラグの物理的性質および細骨材としての適用性. コンクリート工学年次論文集. 29 (1), (2007)
- 20) (社)地盤工学会九州支部：環境と経済を考慮した建設発土と廃棄物の有効利用. 2001
- 21) 新日鐵住金(株)：鉄鋼スラグ製品カタログ：NS スラッガーズ
- 22) 木曾英滋 ほか：海域施肥時のコンブ等の生育に関する実海域実験—転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発 (1) —. 第 20 回海洋工学シンポジウム. 2008
- 23) 月刊ダイバー. 2013 年 10 月号
- 24) (社)日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引. 2008
- 25) 赤司有三 ほか：カルシア改質土の品質管理方法について. 土木学会第 67 回年次学術講演会. 2012
- 26) 田中裕一：浚渫土固化体の製造と海域投入. 土木学会第 67 回年次学術講演会. 2012
- 27) 後藤, 村上 ほか：根こぶ病 土壌病害から見直す土づくり. 農山漁村文化協会
- 28) 大分県 HP 農林水産部現地情報. 2010 年 3 月 23 日
http://www.pref.oita.jp/uploaded/life/101723_105248_misc.pdf
- 29) 環境新聞. 2012 年 11 月 28 日
- 30) 佐伯, 影井, 和田：2013 年度日本土壤肥料学会 九州支部秋季例会 (九農研土壤肥料部会共催)
- 31) 新日鐵住金(株)：鉄鋼スラグ製品カタログ：NS スラッガーズ
- 32) 日刊大分建設新聞. 2014 年 4 月 8 日
<http://www.yoneda-masako.com/140408oitakensetsusinbun.pdf>
- 33) 日刊大分建設新聞：特集 土木の森が未来をつくる. (2012.5)
- 34) 森下, 和田 ほか：地盤工学会 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集. 2013, p. 141-148
- 35) 不動テトラ HP
<http://www.fudotetra.co.jp/products/permex.html>



上村竜介 Ryusuke UEMURA
室蘭製鉄所 設備部 機械技術室 主幹



松本 周 Hiroshi MATSUMOTO
名古屋製鉄所 製鋼部 製鋼技術室 主幹



光石尚道 Naomichi MITSUISHI
(株)フローリック
東京支店 営業第一部長



鳥井孝一 Koichi TORII
和歌山製鉄所 環境・エネルギー部
リサイクル技術室長



赤羽健一 Kenichi AKAHANE
鹿島製鉄所 資源エネルギー部
リサイクル推進室長



水田智幸 Tomoyuki MIZUTA
日鉄住金スラグ製品(株)
広畑事業所 技術部 主査
(前 広鋳技建(株))



安間 優 Suguru AMMA
鹿島製鉄所 資源エネルギー部
リサイクル推進室 主査



藤井郁男 Ikuo FUJII
八幡製鉄所 生産技術部
スラグ・資源化企画推進室 主幹



丸山雅志 Masashi MARUYAMA
環境部 環境技術室 主幹



柏原 司 Tsukasa KASHIWABARA
大分製鉄所 生産技術部 資源技術室長



山本 充 Takashi YAMAMOTO
君津製鉄所 資源エネルギー部
スラグ技術室長



原 良治 Ryohji HARA
大分製鉄所 生産技術部 資源技術室



横尾正義 Masayoshi YOKOO
君津製鉄所 資源エネルギー部
スラグ営業室 主幹



森口 誠 Makoto MORIGUCHI
大分製鉄所 工程業務部 スラグ業務室
主幹



真沢正人 Masato SANAZAWA
君津製鉄所 資源エネルギー部
スラグ技術室 主幹



中村貴敏 Takatoshi NAKAMURA
日鉄住金スラグ製品(株)
大分事業所 営業部 営業第2室 主査
(前 (株)製鉄鋳業大分)



田崎智晶 Tomoaki TASAKI
名古屋製鉄所 エネルギー・資源化推進部
スラグ室 主幹



高田史朗 Shirou TAKADA
(株)アステック
常務執行役員
環境エンジニアリング事業部長



岩崎正樹 Masaki IWASAKI
執行役員 広畑製鉄所長



堀井和弘 Kazuhiro HORII
スラグ・セメント事業推進部 企画調整室長



吹上和徳 Kazunori FUKIAGE
名古屋製鉄所 製鋼部 製鋼技術室長