

# 転炉ゼロスラグ吹錬による環境調和型新製鋼プロセス

## Development of Environmentally-friendly Steelmaking Process by Zero-slag Operation in BOF

川畑 涼	福山製鉄所 製鋼部	品質開発グループ	Ryo Kawabata
小平 悟史	福山製鉄所 製鋼部	品質開発グループ 統括スタッフ	Satoshi Kohira
渡辺 敦	福山製鉄所 製鋼部	第3製鋼工場 工場長	Atsushi Watanabe
川嶋一斗士	福山製鉄所 製鋼部	品質開発グループ グループマネージャー	Hitoshi Kawashima
井澤 智生	京浜製鉄所 製鋼部	製鋼技術グループ 統括スタッフ	Tomoo Isawa
松野 英寿	総合材料技術研究所	製鋼研究部 精錬チ・ム 主任研究員	Hidetoshi Matsuno
菊地 良輝	総合材料技術研究所	製鋼研究部 主幹	Yoshiteru Kikuchi

製鋼プロセスで使用する原材料の節減，スラグ発生量の極少化および生産性の向上など，省資源・省エネルギーを目的に，溶銑脱燐挙動を調査し，溶銑脱燐前のシリコン低減が脱燐石灰効率の向上に極めて有効であることを解明した。これを受け，溶銑脱珪ステーションを建設するとともに，溶銑段階で燐成分を製品規格以下まで低減し，転炉で発生するスラグを“ゼロ”化する環境調和型「ゼロスラグ製鋼法（Zero Slag Process, ZSP）」を確立した。

*For ultimate saving of both resource and energy consumption such as minimization of steelmaking slag, influence of silicon content to hot metal dephosphorization had been investigated and the investigation made it clear that reducing silicon content significantly increased CaO efficiency. Based on the results, NKK installed hot metal desiliconization station to control phosphorus content in hot metal under the final product specification. This process is called “Zero Slag Process” as it enables to ignore slag generation in BOF.*

### 1. はじめに

近年の産業界全体にわたる省資源・省エネルギー志向は，鋼板の高級化に代表されるような，鋼材の高品質・高純度化に一層の拍車をかけることとなった。特に鋼中不純物である燐成分の低減要求により，製鋼プロセスとりわけ，精錬工程での負荷は増大し，原材料・エネルギー消費量は著しく増加することとなった。また，その過程で生成する製鋼スラグ量の増大を招いた。

この鋼中燐成分の低減に対しては，従来より転炉精錬前に溶銑の脱燐を行う溶銑予備処理法が一般的に適用されてきた。しかし，従来の溶銑予備処理法では脱燐に限界があり，より効率的で新たな「環境調和型新製鋼プロセス」の確立が必要となった。

そこで溶銑脱燐時の反応機構を調査し，脱燐前の溶銑シリコンを低減することにより脱燐で使用される生石灰の反応効率が飛躍的に向上し，プロセストータルのスラグ発生量を極限まで削減することが可能であることを解明した。

これを受け，福山製鉄所では1998年3月に第一脱珪ステーション，2000年12月に第二脱珪ステーションを建設し，溶銑脱燐前の溶銑シリコンを効率的かつ徹底的に低減した。また，1998年に京浜製鉄所においても同様のプロセスを導入した。これにより溶銑段階で鋼中不純物である燐成分を効

率的に製品規格以下まで低減し，転炉で脱燐のために発生するスラグを“ゼロ”化する環境調和型「ゼロスラグ製鋼法（Zero Slag Process, ZSP）」が確立し，製鋼精錬工程での大幅な省資源・省エネルギーが実現できた。本稿では以下にその概要を報告する。Fig.1に福山製鉄所のZSP物流フローを示す。

### 2. 極低シリコン溶銑の大量製造技術

従来，溶銑シリコンの除去は高炉出銑中にミルスケールなどの酸化鉄を用いて行っていた。この高炉銑床脱珪法では，攪拌力が弱いため，反応効率が悪く，シリコンの除去には限界があるとともに，溶銑温度の低下を招いていた。

そこで効率良く脱珪反応を行い，極低シリコン溶銑を大量に製造することを目的とし，脱珪ステーションの建設を行った。脱珪ステーションでは，上吹きランスから供給する気体酸素と上置き添加の酸化鉄を併用し，この比率を調整することで処理後の溶銑温度を制御している。また，脱珪反応の効率を高めるため，攪拌用浸漬ランスから生石灰を溶銑中にインジェクションしている。これにより，当社で採用しているオープンレードル型溶銑輸送容器の形状とあいまって，より効率的な攪拌が行われ，従来の銑床脱珪に比べ脱珪酸素効率は飛躍的に向上した。この結果，次工程の脱燐処理へシリコン濃度が0.10%以下の極低シリコン溶銑を安定的に供給

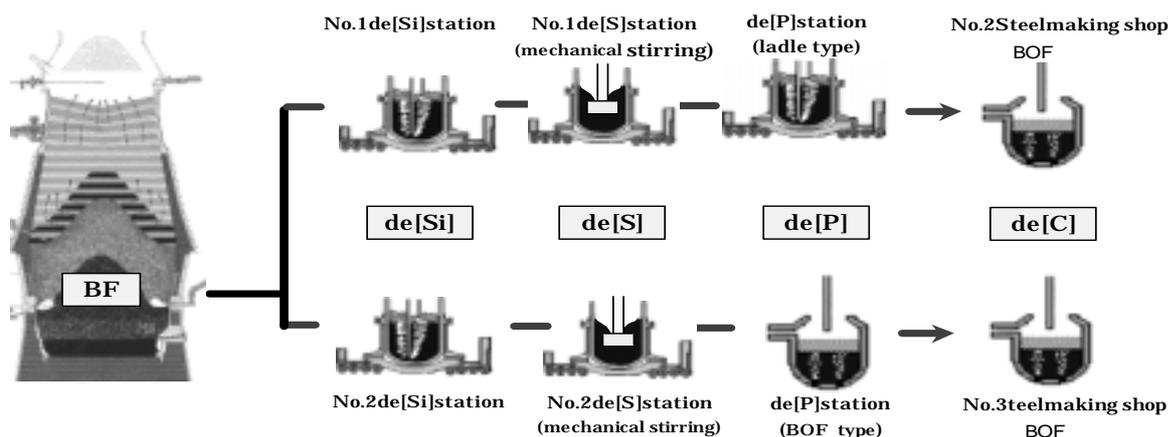


Fig.1 ZSP process flow at Fukuyama Works

でき、脱磷処理の高効率化が可能となった。Fig.2 に脱珪ステーションの設備概要を示す。また、Fig.3 に従来の鑄床脱珪と脱珪ステーションでの脱珪酸素効率（ $\eta_{O_2}$ ）の比較を示す。

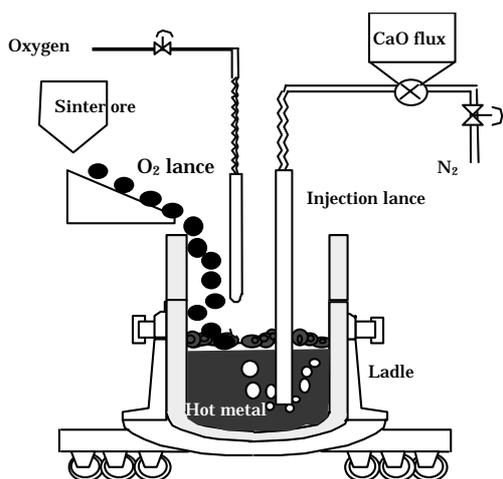


Fig.2 Schematic view of de[Si]station

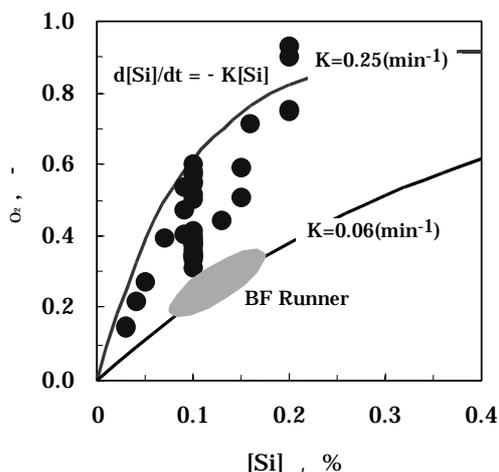


Fig.3 Oxygen efficiency at de[Si]

### 3. 高効率大量溶銑脱磷技術

#### 3.1 極低シリコン溶銑を用いた高効率脱磷技術

極低シリコン溶銑を用いることにより、脱磷初期の段階で生成するシリカ ( $SiO_2$ ) と反応するダイカルシウムシリケート ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) の生成に必要な生石灰 ( $CaO$ ) を低減し、直接トリカルシウムフォスフェイト ( $3CaO \cdot P_2O_5$ ) を生成し得ることを確認した。シリコン濃度の違いによる脱磷処理中におけるスラグ組成変化（小型炉実験結果）を、Fig.4 の  $CaO-SiO_2-P_2O_5$  三元系の状態図上に示す。脱磷処理前の溶銑シリコンが高い場合には、初期にシリカが生成するため、このルートを経由し脱磷が進行する。一方、極低シリコン溶銑を用いた場合には効率的なルートを経由する割合が増加し、溶銑シリコンが高い場合に比較し、よりスラグ中へ磷が濃縮され、その結果、生石灰量の低減が図られることが解明された。Fig.5 に脱珪ステーション建設前後での溶銑脱磷処理における生石灰使用量の変化を示す。溶銑シリコンが 0.10% 以下の極低シリコン域では、ダイカルシウムシリケートの生成に消費される生石灰以上に脱磷石灰効率 ( $\eta_{CaO}$ ) の向上が図られ、大幅な生石灰削減が達成されている。また、処理後磷濃度の低位安定化も図られた。

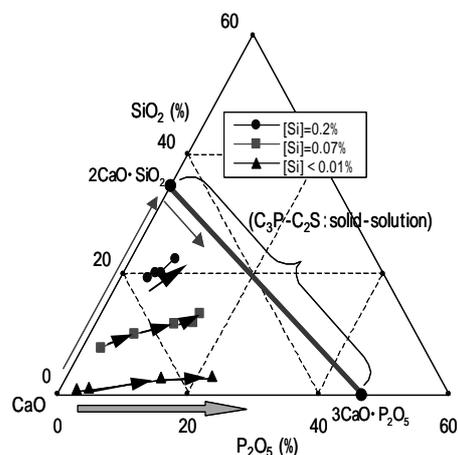


Fig.4 Phase diagram  $CaO-SiO_2-P_2O_5$

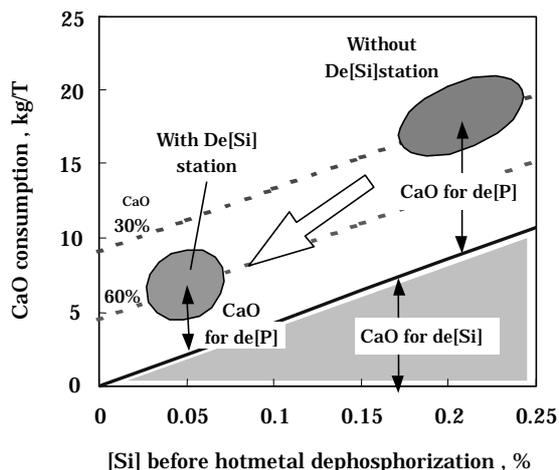


Fig.5 CaO consumption at de[P]process

### 3.2 脱燐溶銑の大量製造

極低シリコン溶銑を用いることにより、脱燐初期の脱珪時間が不要となるとともに、脱燐石灰効率が増えスラグ発生量が大幅に低減された。また、スラグ量の低減により脱燐処理時のスラグフォーミング現象などの処理阻害要因が排除され、溶銑輸送容器を用いフリーボードに限界のあった溶銑鍋型脱燐（鍋 NRP）の能力は飛躍的に拡大された。従来、鍋 NRP の能力は 280 千 T / 月程度であり、福山製鉄所第二製鋼工場向けの溶銑を全量脱燐することは不可能であったが、脱珪ステーションの導入により、その能力は 420 千 T / 月まで向上し、脱燐溶銑を同工場へ 100% 供給することが可能となった。

また、福山製鉄所第三製鋼工場においては炉代の前期を脱炭炉、後半を溶銑脱燐処理炉として運用する転炉型脱燐（LD - NRP）を 1995 年より採用してきたが、極低シリコン溶銑を用いることにより、転炉の操業ピッチに合わせた高速処理が可能となった。現在、その能力は最大 480 千 T / 月にまで向上し、脱燐銑 100% による操業を行っている。

これらの技術開発により、溶銑段階で燐成分を平均で 0.012% とし、製品規格以下まで安定的に低減することで、転炉での脱燐負荷のない操業を確立した。

Fig.6 に福山製鉄所における溶銑脱燐処理比率の推移を示す。

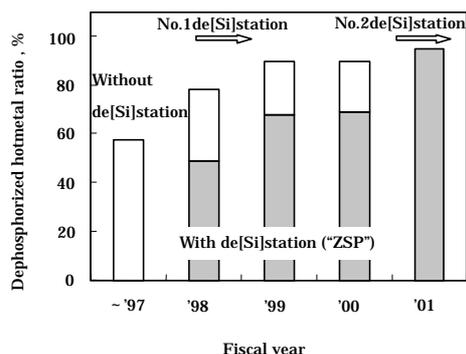


Fig.6 Production of hot metal dephosphorization

## 4. 転炉ゼロスラグ吹錬技術

### 4.1 ゼロスラグ下での転炉吹錬

脱燐溶銑を 100% 使用することにより、転炉では従来、重要な使命の一つであった「脱燐」を行う必要がなくなった。この結果、転炉では脱燐のために発生するスラグを「ゼロ化」することが可能となった。

しかし、転炉スラグの「ゼロ化」に伴いスラグのカバーリング効果が激減し、転炉でのダストロスが増大するという新たな問題の発生が懸念された。

このため、転炉ダスト発生量の抑制に主眼をおいた「転炉ゼロスラグ吹錬技術」の開発を行い高鉄歩留り、高速吹錬による高生産性を実現した。Fig.7 に転炉ダスト発生挙動のイメージ図を示す。

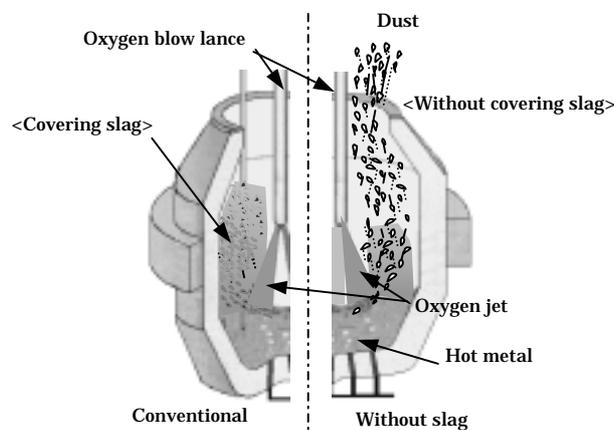


Fig.7 Schematic view of dust generation

### 4.2 転炉オンラインダスト濃度計の開発

転炉でのダスト発生は、転炉吹錬時にランスより吹き付けられる気体酸素の供給速度とランスノズルの形状などが複雑に絡み合っているため、ダスト発生挙動を定量的に予測することが難しい。また、直接的にダスト発生量・速度を評価する有効な手段はなかった。そこで転炉の湿式集じん設備にて捕集された集じん水を連続的に採取し、光学的に計測することにより転炉ダストの発生量を連続的に計測できるオンラインダスト濃度計を開発した。当社福山製鉄所、第三製鋼工場転炉設備における測定システムの概要を Fig.8 に示す。これにより、転炉吹錬中のダスト発生挙動がオンラインで把握可能となり、送酸パターンなどの操業条件の最適化を行うとともに、転炉ランスノズルの迅速な開発が可能となった。

### 4.3 上吹き酸素の動圧制御技術

ゼロスラグ吹錬におけるダスト発生抑制を目的に、従来型のランスにおいて酸素ジェットの出孔径を拡大し、ジェットと溶鉄の衝突圧力を低減することを試みた。しかし、溶鋼中炭素濃度の低下する吹錬末期において、酸素ジェットによる溶鋼攪拌力の低下によるスラグ中 FeO 濃度の上昇とそれ

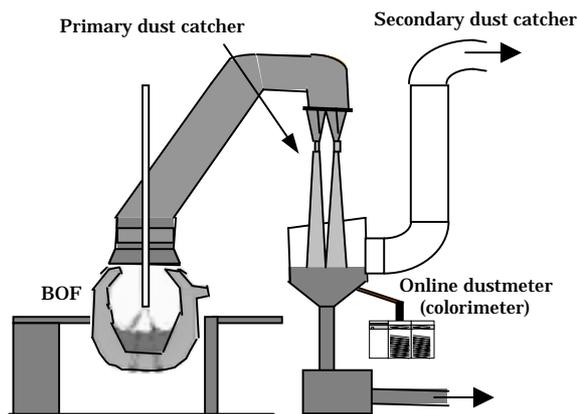


Fig.8 Schematic view of online-dustmeter

に伴う、鉄・マンガン成分の酸化ロス増大などの問題が発生した。

そこで数値解析による酸素の噴流状態のシミュレーションとオンラインダスト濃度計を用いた実機でのテストによりランスノズルの最適な形状を見出し、新ランスノズルの開発と操業への適用を行った。

これら技術開発により Fig.9 に示すようなダスト発生量の低減を実現した。

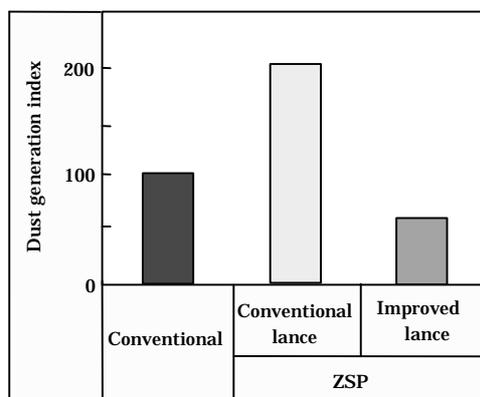


Fig.9 Quantity of dust generation

## 5. ZSP による操業改善効果

### 5.1 スラグ発生量の削減

以上の技術開発の結果、プロセストータルでの生石灰使用量が極少化され、Fig.10 に示すように製鋼スラグの大半を占めていた転炉スラグは、ZSP の適用後、10kg/t 以下に削減され、製鋼スラグ発生量も 60kg/t 程度と従来に比較して半減した。この転炉でのスラグ発生量の極少化に伴い、スラグへのマンガンロスが減少することで、マンガン鉱石の直接還元歩留りが向上し、マンガン合金鉄の大幅な削減も達成された。加えて、転炉からのスラグ流出が抑制され、鋼の品質を悪化させる非金属介在物である鋼中アルミナ量が激減し、鋼の品質向上に顕著な効果が得られた。Fig.11 に製鋼起因の冷延コイル格落ち率の比較を示す。

また、これら製鋼スラグ削減と同時に脱珪スラグのカリ肥料化、脱磷スラグの炭酸固化による漁礁（マリブロック）への活用などスラグの利材も推進し、事業化している。

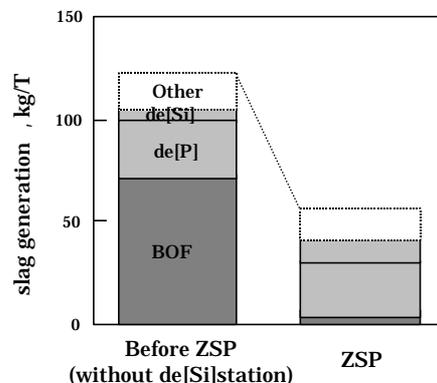


Fig.10 The effect of ZSP on slag generation

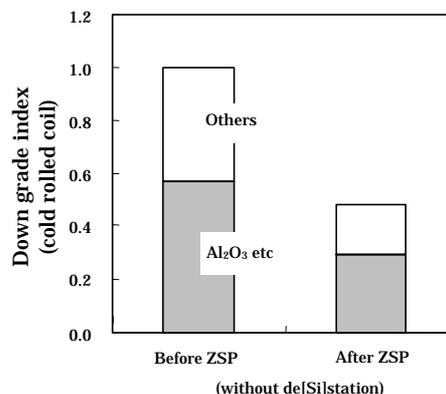


Fig.11 The effect of ZSP on down grade of cold rolled coil

### 5.2 転炉生産性の向上

従来、製鋼時間は吹錬時間が大半を占め、その時間は脱磷反応に要する時間に規定されていた。しかしながら、脱磷が転炉で不要となった ZSP では、脱炭を主目的とした吹錬となり、従来に比較し吹錬時間をヒート当たり約 4 分間、約 25%の短縮が可能となった。

また、吹錬準備時間では(1) スラグの排出作業、(2) 炉体耐火物の補修作業、(3) 吹錬中に飛散したスラグ・地金の転炉炉口近辺からの除去作業などを定期的に行っていたが、ZSP によりこれら吹錬準備作業の大幅な時間短縮が可能となった。

この結果、転炉設備の吹錬準備時間が約 10%低減し、製鋼時間の短縮を含め、転炉生産性の大幅な向上が達成された。Fig.12 に福山製鉄所第三製鋼工場における転炉生産量の変化を示す。

### 5.3 転炉耐火物寿命の向上

ZSP では、転炉スラグ中の FeO を大幅に低減することが可能となった。これにより、従来、転炉炉体寿命を律速して

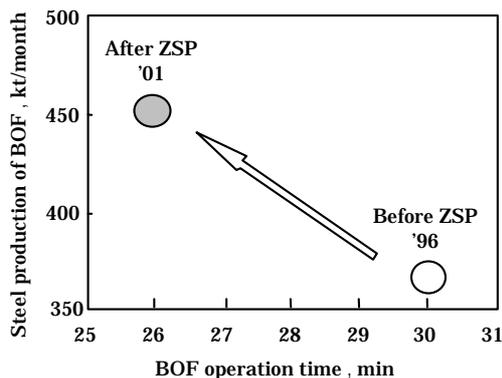


Fig.12 Change in steel productivity of BOF

いた転炉吹錬時および出鋼時にスラグと接触する部位の耐火物損耗が軽減されるとともに、前述した転炉稼働率の向上により転炉空炉時間が減少し、耐火物の加熱・冷却に伴うスポーリング性の損耗も減少した。Fig.13 に日当たり転炉出鋼ヒート数と耐火物損耗速度の関係を示す。

この結果、Fig.14 に示すように転炉炉体寿命は、従来の4000 チャージから 8500 チャージへ大幅に改善された。

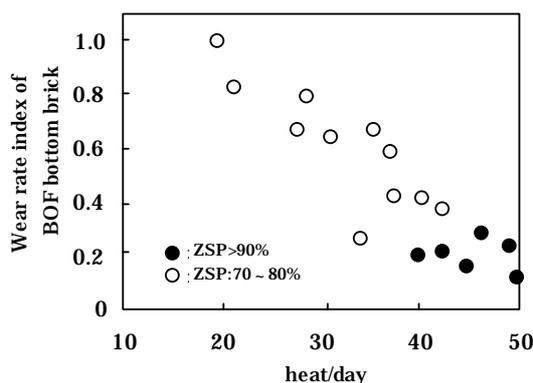


Fig.13 Wear rate of BOF bottom brick

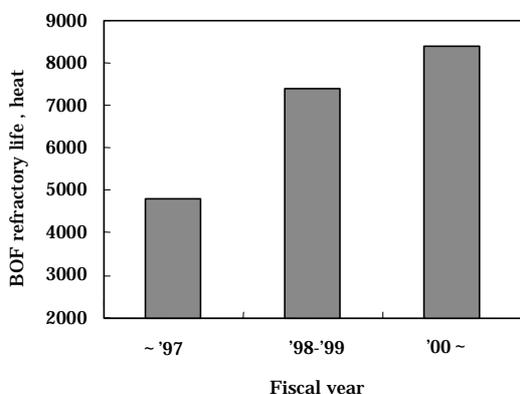


Fig.14 BOF refractory life

## 6. おわりに

溶銑脱珪・脱燐および「転炉ゼロスラグ吹錬」に関わる技術開発、設備導入により生石灰・合金鉄・耐火物など原材料の大幅な節減、製鋼スラグ発生量の極少化および高品質化による製品歩留りの向上・生産性の拡大による省エネルギーなど、多くの成果を得ることができた。

この「環境調和型新製鋼プロセス」の完成により、高品質・高純度鋼の大量製造と省資源・省エネルギーという相反する課題を同時に解決させることができた。

今後、以上述べてきた技術を更に発展させ、究極の製鋼プロセスの構築を行うとともに、JFE 発足後もこれまで培った技術をもとに、多様化する社会ニーズに即応しうる技術開発と実操業への速やかな適用を推進していく所存である。

### 参考文献

- 1) 山瀬治ほか。“福山製鉄所における溶銑予備処理とレススラグ吹錬技術”。日本鋼管技報。No.118, pp.1-7(1987).
- 2) 赤井真一ほか。CAMP-ISIJ。Vol.11, p.764(1998).
- 3) Sakurai et al. 82nd Steelmak. Conf. Proceedings Chicago. p.371(1999).
- 4) 田中秀栄ほか。CAMP-ISIJ。Vol.9, p.863(1996).
- 5) 若松信一ほか。CAMP-ISIJ。Vol.9, p.864(1996).
- 6) 田中秀栄ほか。CAMP-ISIJ。Vol.10, p.164(1997).
- 7) 田中秀栄ほか。CAMP-ISIJ。Vol.11, p.144(1998).
- 8) 田中秀栄ほか。“ゼロスラグ新製鋼プロセスの確立”。NKK 技報。No.169, pp.6-10(2000).
- 9) 川畑涼ほか。“レススラグ吹錬でのダスト発生挙動”。CAMP-ISIJ。Vol.10, p.777(1997).
- 10) Kawabata et al. 6th International Conference on molten slags, fluxes and salts. June, 2000.
- 11) 鷲見郁宏ほか。“転炉オンラインダスト測定装置”。NKK 技報。No.176, pp.55-58(2002).
- 12) Tanaka et al. 81nd Steelmak. Conf. Proceedings Toronto(1998).
- 13) 高橋達人ほか。“鉄鋼スラグ大型炭酸固化体「マリブロック」の海中試験”。NKK 技報。No.167, pp.67-68 (1999).
- 14) 渡辺圭児ほか。“鉄鋼スラグから製造した緩効性カリ肥料の特性”。CAMP-ISIJ, Vol.13, p.859(2000).
- 15) 八尾泰子ほか。“鉄鋼スラグを利用したケイ酸カリ肥料の肥効”。日本土壤肥料学会誌。72(1) pp.25-32(2001).

<問い合わせ先>

福山製鉄所 製鋼部 品質開発グループ

Tel. 084 (945) 3452 川畑 涼

E-mail address : Ryo\_Kawabata@ntsgw.fukuyama.nkk.co.jp

福山製鉄所 製鋼部 品質開発グループ

Tel. 084 (945) 3458 小平 悟史

E-mail address : Satoshi\_Kohira@ntsgw.fukuyama.nkk.co.jp