

連携記事

SDGs・資源循環を見据えた 新しい製鋼プロセスの開発

Development of New Steelmaking Process Based on SDGs and Circular Economy

日本製鉄（株） 加藤勝彦
九州製鉄所 チタン・ステンレス部 室長 Katsuhiko Kato

日本製鉄（株） 原田俊哉
技術開発本部 製鋼研究部 部長代理 Toshiya Harada

江戸時代末期に国内で大砲を造るという命題が課せられ、
釜山反射炉は構築された。当時の日本としては画期的な「高
温溶解炉」である。いつの時代も社会の新しいニーズがプロ
セス革新を促すものである。

その後、日本では生産性、歩留、品質向上といった目標を
掲げて、高炉―転炉法をベースに転炉大型化、溶銑予備処理
法、二次精錬多機能化など、様々な製鋼プロセスの開発がな
されてきた。今後は、脱炭素という社会的要請を受けて製鉄
プロセスにかつてないほどの変革が世界中で起きようとして
いる。一方、SDGsや資源循環型社会といった世界共通の理
念に照らして現行の製鋼プロセスを見直してみると、新たな
プロセス変革の可能性を見出すことができる。本稿ではそう
した考え方から生まれた「還元を伴う溶解炉」を中心とする
新しいプロセスの開発事例を2件紹介する。

1 資源循環・環境調和型 ステンレス製鋼プロセス

1.1 緒言

資源循環・環境調和型ステンレス製鋼プロセスとは、安価
で高品位な鉄源である高炉溶銑を活用したクロム（以下、成分
をCr等の元素記号で示す）系ステンレス鋼（以下、SUSと略
す）製造プロセスに、従来とは全く異なる酸化精錬と還元精錬
を分離した高温還元溶解電気炉（以下、YESと称す：Yawata
Environment-friendly Smelter）を融合し、Cr含有発生物の再
生利用最大化、Cr含有物の系外排出量最小化を実現した、画
期的な資源循環・環境調和型SUS製鋼プロセスである。

日本製鉄グループは、持続可能な発展に貢献していくこと
は、国連の持続可能な開発目標SDGsの達成にも寄与する重
要課題と位置付け、様々な取組みを行っている。今回の開発

技術も、レアメタルであるクロムをはじめとする省資源化、
地球環境負荷低減に大きく寄与するものであり、本稿前半で
は、本技術の概要について述べる。

1.2 開発の概要

SUSは、Cr系とCr-Ni系の二種類に分けられる。当社九州
製鉄所では、このうちCr系SUSを中心に生産しており、自動
車、家電、厨房用品、容器、タンク、建築土木といった多種多
様な用途向けに、要求特性を満足する様々なSUS鋼材の生産
を行っている。

SUSの主要構成元素であるCrは、鉱石確認可採埋蔵量か
ら計算した可採年数が15年¹⁾とレアメタルの中で短く、貴重
な資源である。一方で、世界のSUS粗鋼生産量は、2000年以
降の中国を中心とする経済発展により4600万tまで増加して
おり²⁾、Cr資源の節約を図ることは今後益々重要な課題にな
ると思われる。また、SUSスラグには環境省土壤環境基準か
らCr低減技術とFレスが必要とされている。

Cr系SUS製鋼プロセスでは、一般的に、転炉と比較して容
積（フリーボード）の小さい電気炉では高攪拌力が得られな
いことが知られており、電気炉に還元を分離しても、十分な
Cr還元効果が得られない³⁾と考えられ、高い攪拌力を持つ転
炉で「酸化＋還元」を行うことが主流となっていた。当社で
も、従来法では、転炉で酸化還元精錬を行っていたため、熱
裕度制約からのCr含有発生物リサイクル率低位、Cr歩留低
下、Cr酸化物を含む環境負荷の高いスラグ発生の課題があっ
た。本発明では、酸化精錬を転炉、還元精錬をYESに完全分
離して実施することで、反応効率の最大化を達成した。転炉
で生成したCr酸化物含有スラグを、Cr含有鋼屑、FeCr合金
原料とともにYESで溶解しCrを回収（還元精錬）する。その
後、YESのCr含有溶銑と高炉溶銑を転炉に装入し粗脱C（酸

化精錬)を行う。粗脱C後の溶鋼は未還元のまま二次精錬工程にて真空処理を実施し、連続 casting 設備で鋼片を製造する。この結果、Cr含有発生物の全量リサイクル化、Cr酸化物含有スラグのFeCr合金中Siでの還元によるスラグ発生量の大幅な削減と残留Crの低減、転炉で還元を行わないため製品N濃度低減による加工性改善を実現した。

また、転炉工程のOG法 (Oxygen Converter Gas recovery System) で回収されたCr含有ダストに対しては、リサイクル時の熱消費を低減可能とする事前処理技術を開発した。OGダストは、その粒度が非常に細かく一般的なブリケット成形を行っても空気中の酸素と反応して鉄の酸化が進み貯留槽内等での発熱・発火による防災リスクを伴うことから、従来よりダスト状態で長時間かけて酸化乾燥を行う方法が一般的だった。しかしながら長時間の酸化乾燥ではダスト中の鉄分の多くが酸化してしまい、転炉等へリサイクルする場合には鉄酸化物の還元エネルギーが必要となり、熱裕度の低いSUS溶製転炉でのリサイクルは困難であった。そこで、高圧押出成形法により表面に緻密な酸化被膜を形成させることで、酸素の内部への侵入を防いで鉄分酸化の抑止と発熱・発火リスクの解消を図ることに成功した。

YESによる資源循環システムに、ダスト高圧押出成形技術を併用することで、Cr含有発生物として鋼屑・スラグに加えダスト・スケール等の全量リサイクル化を達成した。従来法

と本発明のCr系SUS製鋼プロセス全体概要を図1に示す。

1.3 開発の特徴

YESによる資源循環システムでは、電気炉での (1) 溶湯成分、温度、(2) スラグ組成、(3) 攪拌条件を最適化し、酸化精錬 (転炉) と還元精錬 (YES) を分離することにより、従来では到達できなかった還元レベルを達成し、効率的なCr系SUS製造プロセスを実工業規模で実現した。

(1) 溶湯成分温度

転炉では、脱C処理により溶湯中 [C] 濃度が4.5mass%から0.5mass%へ低下し [Cr] 酸化が進行した後に還元を実施していた。一方YESでは、FeCr合金とCr含有屑、Cr酸化物含有スラグを [C] = 4mass%で溶解製造するため、低酸素分圧還元雰囲気での溶解還元処理が可能となる⁴⁾。更に、[C] 濃度が高い程 [Si] 活量が増すので、YES還元は転炉還元と比較して [Si] 活量が5倍高い⁵⁾。これらの効果からCr酸化物の還元条件はYESが圧倒的に優位となる (図2)。

(2) スラグ組成

平衡論的にはスラグ塩基度が高いほどCr酸化物の還元には有利だが、塩基度を高め過ぎるとスラグが熔融し難く還元時間に時間を要する。従来は溶融材として蛍石 (CaF₂) を使用していたが、本発明では環境負荷の観点から蛍石不使用で効率的なCr還元が可能となるスラグ組成の適正範囲を見出した。

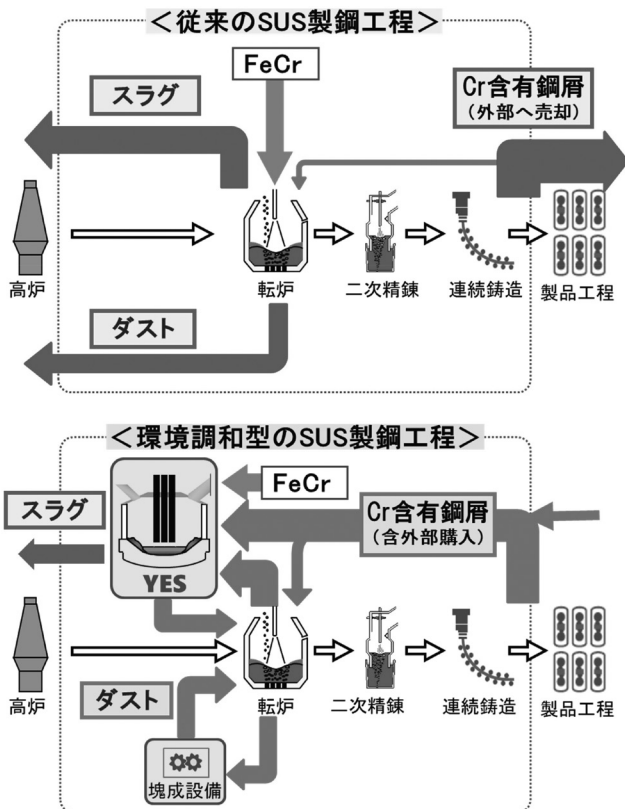


図1 開発前後のSUS製鋼プロセス全体概要

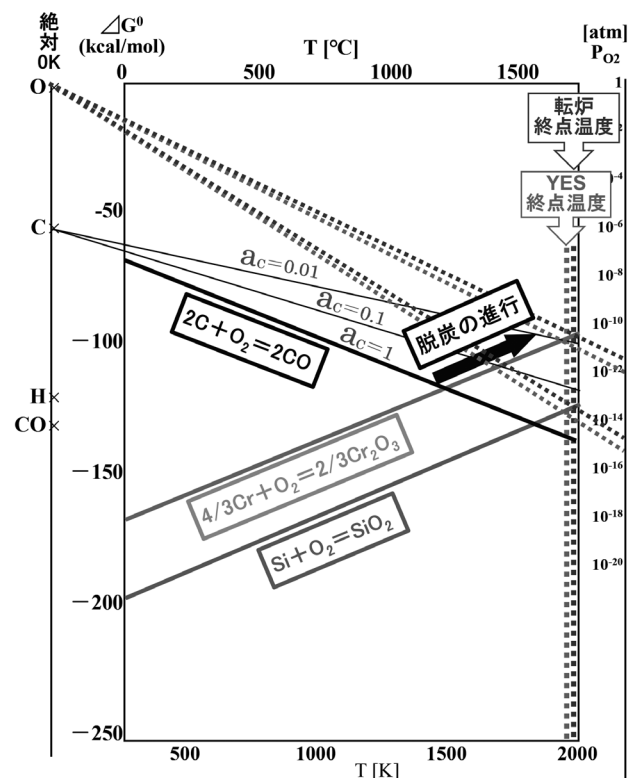


図2 酸化物の標準生成自由エネルギー変化と温度の関係^{4,5)}

(3) 攪拌条件

電気炉は一般的に鋼屑の溶解により粗溶湯を製造する設備であり、攪拌は行われないか、少量の底吹窒素ガス吹込み、もしくは炉底に設けられた電磁攪拌装置による攪拌が行われている。YESでは、Cr酸化物含有スラグやFeCr等の低熱伝導率原料が主体であり、伝熱溶解促進を図るために、炉内浴内を均一に攪拌可能な底吹位置、攪拌ガス種、流量の攪拌条件最適化を図った。その結果、浴深の浅い電気炉において、多量の低熱伝導率原料を、高速・高効率に溶解攪拌する技術を確立した。

1.4 開発の成果

- 本開発の結果、以下の成果を達成した。
- ・Cr含有発生物の全量リサイクルが可能となり、Crの系外排出量を10.8%から0.6%に大幅に低減できた(図3)。
- ・希少なレアメタルであるCrを中心に、貴重な地球資源の省資源化が図れた。
- ・Cr含有スラグの発生量減、スラグ中Crの残留率低減、Fレス処理により環境負荷の低減が図れた。
- ・転炉での未還元処理による鋼中N濃度低減の結果、製品の加工性が改善し、高加工なより自由度の高い製品市場ニーズに寄与できた。

1.5 結言

Cr系SUS製造プロセスにおいては、Cr含有鋼屑のリサイクルが困難、スラグ発生量大、Cr系外ロスなど、省資源化・環境負荷に課題があった。

本技術開発により、Cr酸化物を多量・高速・高効率に還元する技術を開発し、Cr含有発生物の全量リサイクル・還元用FeSiの大幅削減による省資源化、スラグ発生量低減とスラグ残留Cr酸化物の最小化・Fレス化による環境負荷低減を可

能とし、エコプロダクツ®の安定供給を通じて、持続可能な社会の発展に貢献する事ができた。

2 製鋼スラグからの有価物回収利用プロセス

2.1 緒言

製鋼工程とは、高炉から供給される溶銑を精錬して、高品質な鋼を安価に効率よく製造する工程である。一方、SDGsや資源循環といった普遍的価値観に立脚すれば、製鋼工程とは、原料となる高炉溶銑や鉄スクラップおよび副原料を無駄なく活用し、副産物も含めて含有する有価物をすべて高付加価値製品に転換する工程でなければならない。

その観点から改めて現在の製鋼工程を見ると、転炉スラグには鉄分が酸化状態ながら20%程度含まれており、回収されずに歩留ロスの主要因となっている。またリン酸も2~3%含まれているが、回収利用されていない。リンは重要な肥料元素であるばかりでなく、リチウムイオン電池や半導体、表面処理剤等の工業製品や、医薬品、食品添加物など様々な用途に使用され需要も増加しているが、日本ではほぼ全量、輸入に依存している。従ってスラグ中のリンは貴重な国内最大のリン資源であり、回収ニーズは極めて大きい。しかし製鋼スラグは毎年約800万トン発生し、一部は工程内リサイクルされているが、大部分は系外に排出され、その多くは安価で競合品の多い下層路盤材や土工材料に利用されている。

そこで、省資源、有価物回収・利用、劣質原料利用拡大、CO₂排出量削減、といった観点から改めて製鋼工程を見直し、転炉スラグの有効活用を中心とする新たな精錬システムの構築を試みた。パイロット試験設備を設けて試験操作を行い、その実効性を確認したので以下に紹介する。

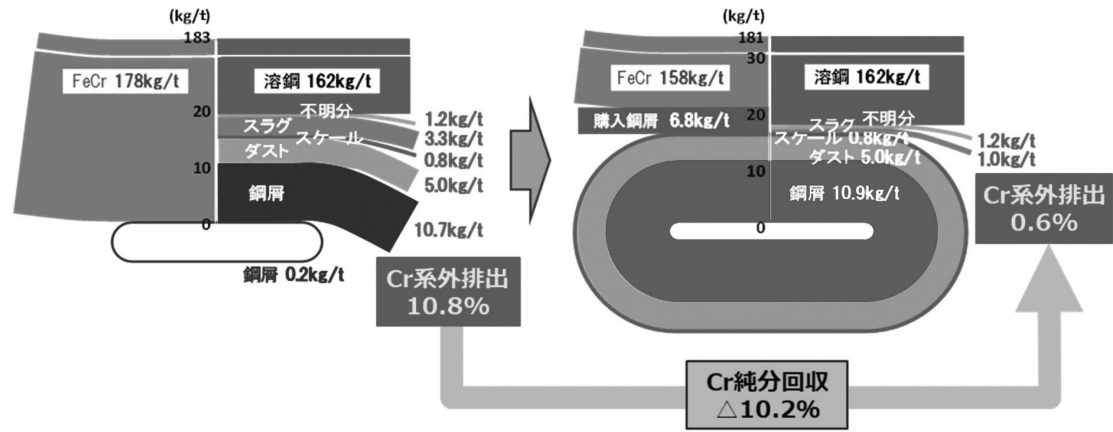


図3 開発前後のCrマスフロー変化

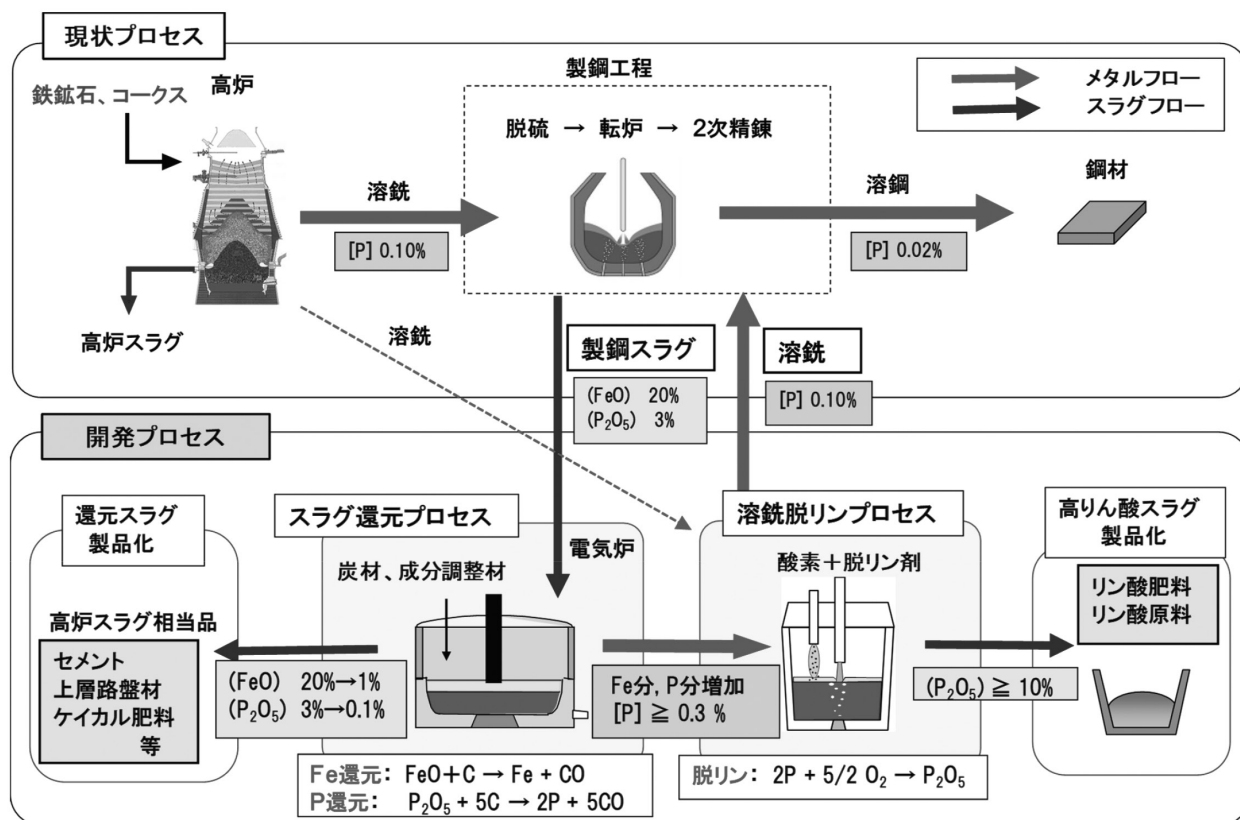


図4 IBXプロセスフロー

2.2 開発プロセス

図4に開発したIBXプロセスのフローを示す。名称の由来は、Iron Bath for X、すなわち鉄源や酸化物の溶融還元、溶鉄脱リンなど様々な可能性を秘めた「鉄浴炉」を中心とするプロセスを意味する。転炉スラグから有価物を回収し有効活用するプロセスの概念⁶⁾は以前から提唱されていたが、本開発ではプロセスを具合的に構築してパイロット設備を建設した。転炉スラグはFe分20%、(P₂O₅) 3%であり、鉄分60%の鉄鉱石やリン酸30%のリン鉱石と比較するとかなりの劣質原料であると言わざるをえない。そのためにこれまでスラグからの鉄やリンの回収利用は実施されてこなかった。しかし転炉から排出されるスラグは1300℃の融体であり、そのまま還元できれば脈石分の溶解昇熱が不要となるため、良質の鉄・リン原料となり得る。よって本プロセスでは溶融状態の転炉スラグを還元プロセスに直接装入して安定操作することをひとつの目的とした。スラグ還元により鉄とリンは90%以上還元されて鉄浴中に移行し、残った還元スラグは高炉スラグと同等の組成に調整することによって、セメントや骨材、石材への適用が考えられる。

還元処理によって得られた溶鉄は、スラグ還元を繰り返すことによってリン濃度が上昇する。そのまま転炉にリサイクルすると脱リン負荷が大きくなるため、普通溶鉄の[P]レベ

ル0.10%程度まで取鍋で脱リン処理を行う。このとき必要なスラグ量は少量のため、脱リンスラグの(P₂O₅)を高めることができる。よって脱リンスラグをリン酸肥料やリン酸原料など国産リン資源として利用することが可能となる。もちろん還元によって回収された鉄分は溶鉄として転炉にリサイクルされる。工程内で発生するダストも還元工程で処理できるので、本プロセスを用いれば、高炉から得た溶鉄中の鉄源をほぼ100%、溶鋼に転換することができる。また副産物もリン製品や省エネに資する高炉セメント等、付加価値の高い製品への転換が期待される。

2.3 還元プロセス

還元プロセスとしては、炭材ベースのシャフト炉、回転炉、鉄浴炉、電気ベースの原料充填型抵抗加熱炉やオープンアーク型電気炉など多くの選択肢があるが、CO₂排出量削減や溶融スラグの直接装入機能の可能性を考慮して、オープンアーク型密閉式直流電気炉を選択した。本タイプの電気炉は南アフリカで開発⁷⁾され、主として海外合金鉄メーカーで採用されているが、鉄鋼業においては未経験のプロセスである。

図5に建設したパイロット試験設備の模式図を、図6には出鉄中の試験設備の写真を示す。また本プロセスは既存の溶解電気炉や還元電気炉と比べて以下に示す多くの長所を有する^{8,9)}。

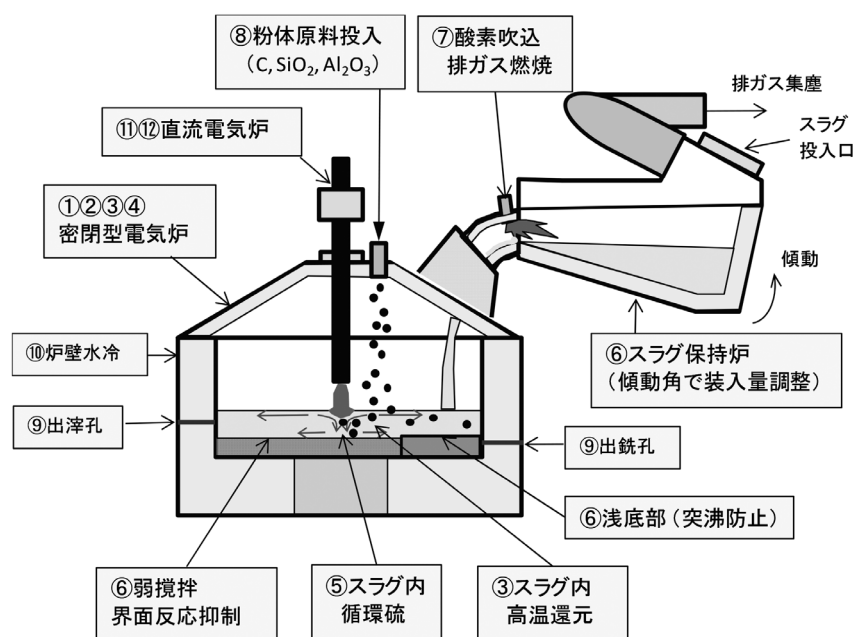


図5 パイロット試験電気炉模式図



図6 出銑中のパイロット試験設備

- (1) 原料自由度：密閉炉で侵入空氣がなく、飛散ロスが少ないため、還元剤の炭材粉や粉体原料をそのまま重力落下で炉内に供給することができ、原料コストの低減が図れる。また装入口を設けることで、熔融スラグや固形原料の投入も可能であり、原料の酸化度の自由度も高い。
- (2) 熱効率：密閉化で空氣侵入を防止することにより排ガス顕熱ロスが減少する。またスラグコーティングによって炉壁からの抜熱ロスを低減できる。
- (3) 還元効率：密閉化で炉内を還元雰囲気を保つことができる。またスラグ層内の炭材粉と熔融スラグがスラグ浴の高温領域で直接反応するため還元速度が速い。アーク炉の特性であるスラグの上熱も還元促進には効果的に作用する。
- (4) 炭材効率：侵入空氣の遮断によりスラグ表面を浮遊する

炭材の酸化ロスやスラグの酸化が抑制される。

- (5) 炉内流動：直流電場によって電極直下に下向きの流れが生じ、浮遊する炭材粉がスラグの高温部や鉄浴面に運搬されるため、スラグの還元反応や溶鉄の加炭が促進される。
- (6) 熔融スラグ装入時の安定性：傾動型スラグ保持炉を設けて、熔融スラグを保温しながら反応に応じてスラグを電気炉内に装入する。電気炉に浅底部を設けることによって、熔融スラグ落下部のスラグメタル混合が回避でき、スラグ装入時の突沸反応を防止できる。
- (7) 排ガス利用：スラグ保持炉に排ガスを導入し、酸素で燃焼することにより、熔融スラグの炉内凝固付着を阻止し、保熱を図ることができる。
- (8) スラグ処理：スラグの組成調整により、還元スラグを高炉スラグと同様の用途に適用できる。
- (9) 生産性：出銑孔・出滓孔の適用により連続操業が可能となり、高い生産性が得られる。
- (10) 耐火物：スラグの酸素ポテンシャルが低く、溶鋼よりは低温でかつ攪拌がないという好条件や、炉壁水冷の効果で、耐火物の耐用性は高い。
- (11) スラグ洗浄：直流電場によるスラグクリーニング効果で粒鉄混入量を低減できる。
- (12) 操業制御性：投入電力と原料・還元材投入量を調整することでスラグメタル温度を容易に制御できる。

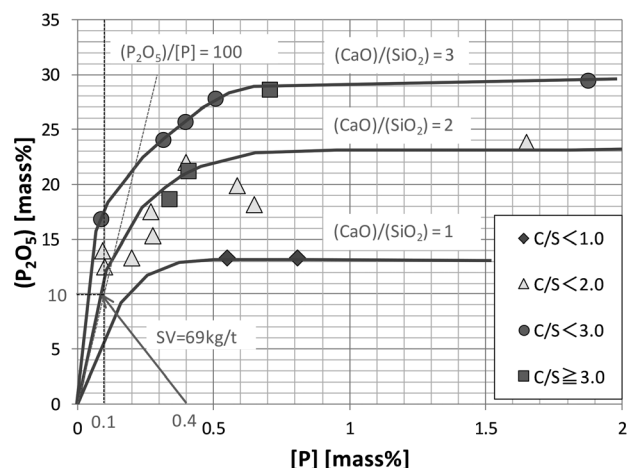


図7 脱リン平衡時のスラグ (P_2O_5) とメタル $[P]$ との関係

2.4 脱リンプロセス

スラグ還元を繰り返す度ごとに還元されたリンは電気炉内の鉄浴に蓄積されるため、溶鉄中の $[P]$ は増加する。その高リン溶鉄を普通溶鉄の $[P]$ 0.10 % レベルまで低減するために取鍋脱リン装置を用いた。

脱リンプロセスの特徴は単に溶鉄中の $[P]$ を低減するだけでなく、同時にスラグの組成も最適化し、リン酸肥料やリン酸原料として製品化できなければならない。そこで脱リン試験を通して、メタル $[P]$ とスラグ (P_2O_5) の最終到達点、すなわち平衡関係を調査した。得られた関係を図7¹⁰⁾に示す。たとえば $[P]$ 0.40 % の溶鉄を0.10 % まで脱リンし、同時に (P_2O_5) 10 % のスラグを製造するためには、スラグ量 69kg/t、塩基度 (CaO) / (SiO_2) = 2程度の条件でよい。従来の取鍋脱リンは高塩基度スラグが前提であったためにホタル石 (CaF_2) を用いていたが、本プロセスでは環境規制からも肥料効果の面からもFは使用できない。しかし高リン領域から0.10 % 程度までの脱リンであれば、(CaO) / (SiO_2) = 2以下でも可能であるため、ホタル石は不要である。ただし、より高い (P_2O_5) の脱リンスラグを目標とする場合には、脱リンスラグを高塩基度化せざるを得ない。その場合には、燃料バーナーを用いて石灰粉を投射して高温化し、石灰粉にリンを吸収させた後凝固させる方法が有効である。また脱リン後のリン濃度を高位に留めれば、上質のリン鉱石と同じリン酸濃度30 % 程度のスラグを得ることも可能である。

2.5 開発の成果

IBXプロセスの開発試験によって、製鋼スラグの系外排出量をゼロにでき、還元処理を通して高炉スラグに転換するこ

とができることを確認した。また実際の転炉スラグを用いて、高温熔融状態のスラグを安定して直接熔融還元するプロセスを確立し、常温スラグに対して必要エネルギーをほぼ半減できる目途を得た。それによって転炉スラグ中の未利用鉄源を90 % 以上回収し、鉄歩留2 % の改善効果をもたらすと共に、リン分を溶鉄に回収した後、脱リン処理を施すことによって肥料効果の高いリン酸ケイ酸肥料やリン鉱石並みの高濃度リン酸原料を製造できることを確認した。

2.6 結言

本プロセスは発展の余地が大きい。鉄鉱石のリン含有量増加によって高炉溶鉄の $[P]$ が上昇しても、脱リン処理工程を経れば普通溶鉄となり、同時にリン酸スラグ製品を造ることが可能である。また冷鉄源を電気炉工程に導入することも可能であり、今後のSDGsや資源循環型社会の実現にとって効果的なプロセスになると考えられる。

参考文献

- 1) 平成23年版_環境・循環型社会・生物多様性白書, 環境省編, (2011), 15.
- 2) 日本ステンレス協会 世界のステンレス粗鋼生産量データに基づく.
- 3) C.W.McCoy and F.C.Langenberg : J. Metals, 16 (1964), 421.
- 4) 第3版鉄鋼便覧 第I巻 基礎, 日本鉄鋼協会編, (1981), 81.
- 5) 第3版鉄鋼便覧 第I巻 基礎, 日本鉄鋼協会編, (1981), 147.
- 6) S.Kubodera, T.Koyama, R.Ando and R.Kondo : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 19 (1979), 419.
- 7) N.Barcza : J. South African Inst. of Mining and Metallurgy, 86 (1986), 317.
- 8) T.Harada, H.Hirata, T.Arai, T.Toth and T.Yamada : ISIJ. Int., 58 (2018) 10, 1934.
- 9) T.Harada, H.Hirata, T.Arai, T.Toth and C.Shuto : ISIJ Int., 58 (2018) 10, 1943.
- 10) 原田俊哉, 坂元基紘, 平田浩, 新井貴士, 藤健彦 : 日本製鉄技報, 414 (2019), 60.

(2021年7月13日受付)