

## 製鋼スラグの完全利用プロセスの開発

## Development of the Complete Utilization Process of Steelmaking Slag

原田 俊哉\*  
Toshiya HARADA坂元 基紘  
Motohiro SAKAMOTO平田 浩  
Hiroshi HIRATA新井 貴士  
Takashi ARAI藤 健彦  
Takehiko TOH

## 抄 録

還元と脱りん処理を通してFeおよびPを回収し、セメント、骨材等のスラグ製品、りん酸肥料、および製鋼用溶銑を製造する製鋼スラグの完全利用プロセスの開発を行った。還元プロセスとしては密閉型直流電気炉を採用し、パイロット試験を通じてプロセス特性を明らかにした。特に熔融スラグを還元炉へ直接装入することで、その可能性と効果を明らかにした。さらにりん濃度の高い溶銑を用いて脱りん試験を行い、低りん溶銑と高りん酸スラグ製品を同時に製造するためには、スラグの高塩基化と低(T.Fe)化が重要な要素であることを示した。

## Abstract

The complete utilization process of steelmaking slag has been developed, in which Fe and P were recovered and slag products such as cement or aggregates, phosphate fertilizer, and the hot metal for steelmaking were produced through reduction and dephosphorization. Closed type DC arc furnace was adopted as a reduction process and its characteristics were investigated through the pilot plant tests. Especially the possibility and the effectiveness of molten slag direct charging into the reduction furnace were confirmed through the actual trial. Moreover by conducting the dephosphorization test of the hot metal with high phosphorus content, it was shown that high basicity and low (T.Fe) of the slag are the key factors for producing both low phosphorus hot metal and high phosphate slag product.

## 1. 緒 言

現在、転炉から排出される製鋼スラグは道路・土木工事を中心にはほぼ全量利用されており、地盤改良材やけい酸質肥料、藻場造成製品等、新たな用途の開発も進められている。一方、製鋼スラグには鉄歩留で2%に相当する未利用鉄源や、人類の生命維持および様々な工業製品に不可欠でかつ日本では100%輸入に依存しているりんも多く含まれている。これらの有価元素を回収し、同時に製鋼スラグを還元改質することによって高水浸膨張率や高pH水溶出の問題のない高炉スラグと同等のスラグへと転換する“製鋼スラグの完全利用プロセス”の概念が以前から提唱されている<sup>1)</sup>。

著者らは本プロセスの実用化の可能性を追求するための研究開発を行ってきた。目指すプロセスの概念図を図1に示す。製鋼スラグは炭材およびスラグ改質材とともに還元

プロセスに供給され、還元されたスラグは高炉スラグと同様の用途に利用される。一方、還元によって鉄、りんが富

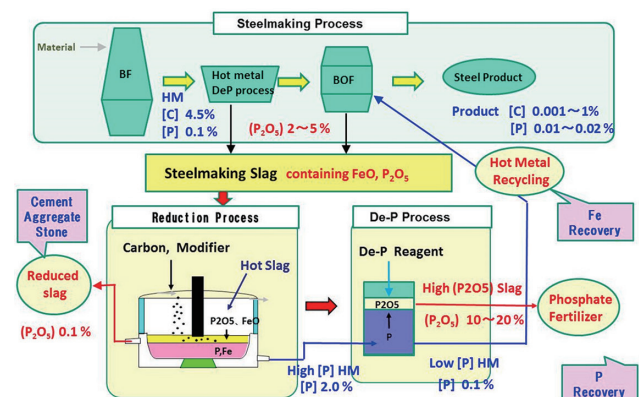


図1 製鋼スラグの完全利用プロセスの概要  
Process concept for complete utilization of the steelmaking slag

\* プロセス研究所 製鋼研究部 上席主幹 茨城県神栖市砂山16-1 〒314-0255

化された溶鉄は、脱りん（りん酸濃縮）プロセスで普通溶銑の[P]<sup>\*1</sup>レベルまで脱りんされた後、製鋼プロセスにリサイクルされる。また脱りんで得られたスラグは高りん酸肥料として利用される。開発に当たっては、必要エネルギー削減の観点から、製鋼スラグの熱間溶融状態での還元炉への直接装入に特に力点を置いた。本稿は還元プロセスおよび脱りんプロセスについて、それぞれのこれまでの開発成果について報告する。

## 2. プロセスの選択

スラグの還元プロセスとしては、転炉型<sup>2)</sup>、電気炉型<sup>3,4)</sup>、シャフト炉型<sup>5)</sup>等、様々な形態が提案されている。その中で、我々は密閉型直流電気炉を選択した。本プロセスは主として合金鉄製造用に南アフリカのMINTEKで開発されたもの<sup>6,7)</sup>で、溶解型の汎用電気炉と異なり空気の侵入がなく、また汎用還元電気炉のサブマージドアーク炉のように固体原料の充填層を形成することもない。密閉炉の特徴としては、炉内酸素ポテンシャル低減による高還元率、低排ガス量による高热効率、さらには炉内ガス低流速による粉体原料の上方投入、といった点が挙げられる。また直流電気炉の特徴は、スラグ内流動促進、低い電極原単位、操業の簡易性、などが挙げられる。さらに本開発においては、CO<sub>2</sub>排出量の削減、および溶融スラグの直接装入の可能性の2つの観点から、密閉型直流電気炉を採用し、パイロット試験を実施した。

一方、還元後に得られる高りん溶銑の脱りんプロセスについては、還元炉から排出される溶銑を受け、処理後に転炉に装入することを考慮して、搬送容器としても利用可能な取鍋方式を前提にパイロット試験を実施した。

\*1 [P]：メタル中Pの重量%を表す。

## 3. 試験方法

### 3.1 還元プロセス

還元炉の開発のために、3つのパイロット試験を行った。各試験の条件を表1に示す。TEST 1は、スウェーデンのSWEREA-MEFOSにある密閉型直流電気炉を用いて行った<sup>8)</sup>。装置の模式図を図2に示す。実際の製鋼スラグ粉と無煙炭を中空電極を通して炉内の鉄浴に投入し、スラグの還元特性を調査した。TEST 2は室蘭製鉄所の実機120t直流電気炉を用いて試験を行った<sup>9)</sup>。装置の模式図を図3に示す。ここでは溶銑装入後に酸素脱Siと成分調整を行うことにより、炉内で擬似製鋼スラグを溶製し、コークス粉をスラグドアからパイプで供給することによってスラグを還元した。通常の溶解電気炉であるため、開放型で、スラグドアから常時、空気が炉内に吸引された状態で還元処理を行った。TEST 3は、実際の転炉スラグを溶融状態のまま

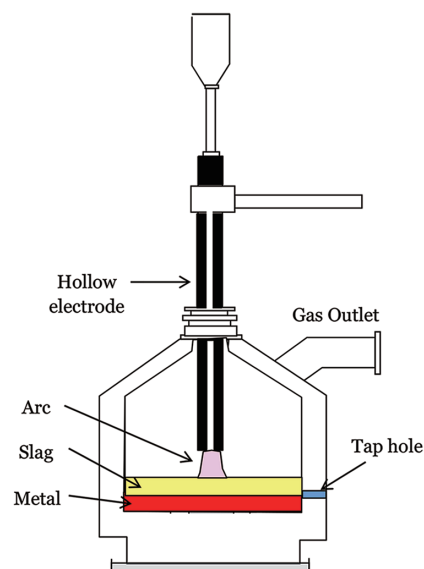


図2 TEST 1における試験炉の概略図  
Schematic diagram of the test furnace in TEST 1

表1 試験条件  
Experimental conditions of each TEST

	TEST 1	TEST 2	TEST 3
Purposes	Cold slag charge Reducing efficiency	Molten slag reduction Influence of P <sub>O<sub>2</sub></sub>	Molten slag charge Process optimization
Furnace type	Closed-type Reducing DC arc	Open-type Melting DC arc	Closed-type Reducing DC arc
Power	1-2 MW	30 MW	2-4 MW
Heat size	Hot heel 3 t	Melt size 120 t	Hot heel 10 t
Material slag	Cold converter slag	Pseudo-converter slag	Molten converter slag
Charge method	Hollow electrode	Prepared in the furnace	Tilting-type Slag container
Reductant	Anthracite	Coke	Coke
Feed method	Hollow electrode	Injection tube	Top feed tube
Tapping	1 tap hole	Slag door/EBT	2 tap holes
Location	MEFOS/Sweden	Muroran Works	Yawata Works

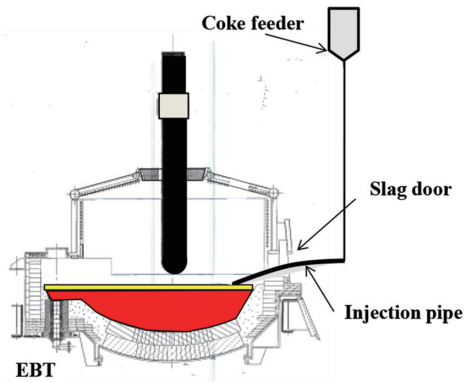


図3 TEST 2における試験炉の概略図  
Schematic diagram of the test furnace in TEST 2

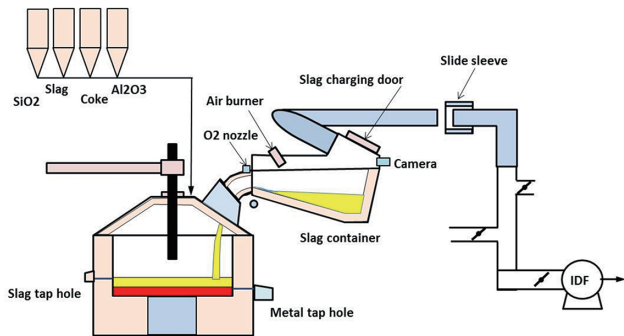


図4 TEST 3における試験炉の概略図  
Schematic diagram of the test furnace in TEST 3

還元炉に装入することを主目的として、八幡製鉄所にパイロット試験設備を新設し、5日間のキャンペーン試験を通算7回行った<sup>10,11)</sup>。

試験設備構成の概要を図4に示す。密閉型の直流電気炉上部に熔融スラグを一時貯留するスラグ保持炉を設けた。排ガスは保持炉先端部で酸素燃焼し、保持炉内のスラグの昇熱および熔融を行った。電気炉内圧力は煙道のスライドスリーブの開度によって $-30\text{Pa}$ に調整した。還元炉内には浴深 $200\text{mm}$ 、約 $10\text{t}$ の溶銑がホットヒールとして常時存在し、その上に $3\sim 4\text{t}$ の還元スラグを残留させた。試験は $350\text{t}$ 転炉から排出された熔融スラグから約 $8\text{t}$ を搬送鍋に移して試験棟に搬送した。そのうちの約 $4\text{t}$ を保持炉に装入し、傾動することによって断続的に還元炉にスラグを装入した。

還元剤としてのコークス粉、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 調整用改質剤としての珪砂およびれんが屑は炉蓋に設置した原料投入管を通して連続的に投入した。保持炉から装入したスラグの還元処理が完了した時点で出滓孔から還元スラグを排出し、1回の試験とした。出滓中の状況を図5に示す。この処理を繰り返し、メタルの増加によって、メタルレベルがスラグ孔レベルに近づいた時点で、スラグ孔より $200\text{mm}$ 低いレベルにある出銑孔からメタルを排出した。

還元後スラグの目標組成は塩基度 $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)=1.0\sim 1.2$ 、 $(\text{Al}_2\text{O}_3)=10\sim 12\%$ で、高炉スラグと同等とし、温度目標は

(a) Slag tap hole



(b) The whole facilities



図5 TEST 3における出滓状況  
Slag tapping operation at TEST 3

上熱を考慮してスラグ温度 $1823\text{K}$ 、メタル温度 $1723\text{K}$ とした。测温サンプリングはサブランス装置を用いて行った。

### 3.2 脱りんプロセス

スラグの還元プロセスにおいては、 $\text{Fe}_x\text{O}$ とともに $\text{P}_2\text{O}_5$ も還元され、溶銑中にPが濃縮される。脱りんプロセスでは、メタルを製鋼工程にリサイクルするために普通溶銑レベルの $0.1\%$ まで[P]を低減し、同時に $(\text{P}_2\text{O}_5)$ を、例えば $15\%$ 以上に高めて付加価値の高いりん酸肥料を作製することが求められる。そこで高りん領域での脱りん特性を調べるために、誘導溶解炉を用いて脱りん試験を行った。試験装置の概略図を図6に示す。 $800\text{kg}$ の型銑を溶解した後、[C]を $4\%$ 、[P]を $0.6\sim 3.0\%$ に調整し、上吹ランスから酸素を $30\sim 60\text{Nm}^3/\text{h}$ で吹込み、脱りん処理を行った。フラックスとして生石灰、ドロマイト、けい砂、冷却材として鉄鉍石を上方から添加した。また攪拌ガスとして炉底のポーラスプラグからArを $2\sim 10\text{Nm}^3/\text{h}$ 吹き込んだ。温度は $1473\sim 1923\text{K}$ の間で設定した。

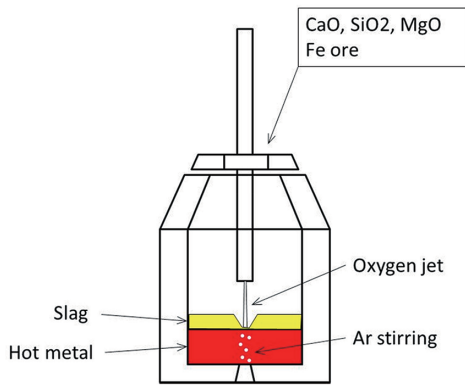


図6 脱りん試験炉の概略図

Schematic diagram of the test furnace for dephosphorization process

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 還元プロセス

#### 4.1.1 炉内温度分布

TEST 3において同じタイミングで測定したメタル浴(炉底+100mm)とスラグ浴(炉底+300mm)の温度の関係を図7に示す。スラグ温度はメタル温度に対して100~200K高い。スラグ相内で還元反応が進むことを考えた場合、この浴内の温度勾配はプロセスの短所と言うよりも、メタル温度を低位に抑え、スラグ相内の炭材による直接還元を促進する長所であると言える。

#### 4.1.2 還元特性

図8に各試験終了後のスラグ(T.Fe)<sup>\*2</sup>とメタル[C]との関係を示す。TEST 1, 3で投入される製鋼スラグおよびTEST 2でつくられる擬似製鋼スラグの(T.Fe)は16~28%であった。同一TEST内で処理後の(T.Fe)にばらつきが見られるが、これは炭材投入量および処理時間のばらつきによるものである。この図から3つのことが言える。

まず各TESTの還元力についてである。TEST 1およびTEST 3に比べてTEST 2の(T.Fe)はその下限値が3%とやや高い。TEST 2は開放型で空気を吸引しているため、炉内の酸素ポテンシャルが高く、スラグ還元と同時にFeやCの酸化が起きているからと考えることができる。

2点目は還元力と溶銹[C]との関係である。転炉型のようにスラグメタルの混合攪拌によって還元反応を促進するプロセスにとって、溶銹[C]は還元反応の駆動力となるが、TEST 3では[C]が2%の低いレベルでも(T.Fe)が1%以下に低下している。すなわちこれは還元がスラグ相内で進行していることの証左であると言える。

3点目は、(T.Fe)の上限値と溶銹[C]との関係である。[C]が高いほど(T.Fe)の上限値は低下傾向にある。すなわち、還元反応の主体はあくまでスラグ相内であっても、[C]飽

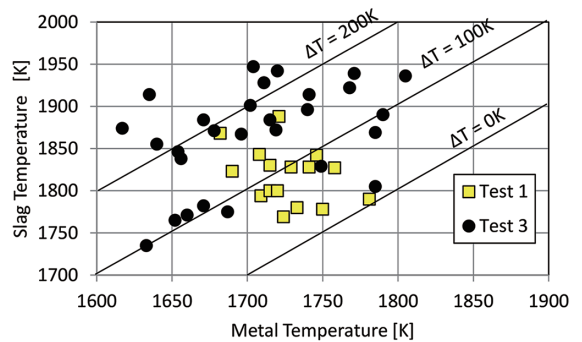


図7 スラグ温度とメタル温度との関係  
Relationship between slag and metal temperature

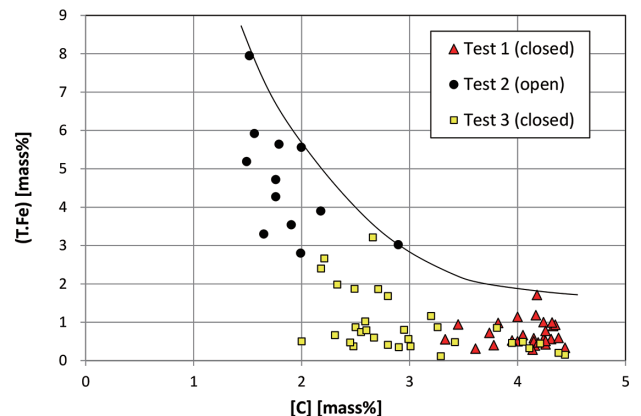


図8 開放炉と密閉炉における(T.Fe)と[C]との関係  
Relationship between (T.Fe) and [C] in open and closed type furnaces

和に近い領域ではスラグメタル界面での還元反応が活発化し、(T.Fe)は1%レベルまで低下する。他方、[C]が2%の低位の場合には、(T.Fe)が5~6%のスラグでも安定して存在しうることを示唆している。

#### 4.1.3 炉内流動解析

還元特性の理解を助けるために、FLUENTを用い、電気炉内の流動解析を行った。ここで炉形状はTEST 3のパイロット試験装置をベースとし、二分の一領域の三次元モデルを用いてシミュレーションを行った。図9に結果を示す。中央部にはスラグ相、メタル相ともに電磁力による下降流が発生し、スラグ表面にはアークジェットのガスドラッグ力による半径方向の流れが発生する。上方から投入された炭材粉の一部は中央の下降流に乗って高温部に誘導されてスラグの急速還元に参加し、一部はメタルに溶解する。他の炭材粉は表面の放射状の流れに乗ってスラグ相内を漂流し、低温領域でゆっくりとスラグを還元するものと推定される。一方、スラグメタル界面は平坦で、対向流が存在するが、流速は大きくはない。フローパターンから、スラグの還元反応は主としてスラグ相内の特に中央高温部で起きているものと推定される。

\*2 (T.Fe)：スラグ中トータル Fe 分の重量%を表す。

4.1.4 熔融スラグ装入の可能性

スラグフォーミングはスラグと金属界面での還元反応が主たる原因であることが知られている<sup>12)</sup>。界面で発生する気泡は微細気泡のため、上昇速度が遅く、スラグ内滞留時間が長くなるため、フォーミングが起きやすい。従って、スラグ内還元が主体の本プロセスはフォーミングの発生しにくいプロセスであると言えることができる。しかし熔融スラグ装入時はフォーミングのリスクが高まる。そこで熔融スラグ装入時のスラグと金属の挙動について FLUENT を用いてシミュレーションを行った。

その結果を図 10 に示す。スラグ厚 200mm でスラグ装入速度が 1t/min の場合、スラグと金属界面は乱されないが、10t/min になるとスラグと金属のエマルジョンを形成する。この状態では界面で多量の CO ガスが発生し、スラグフォーミングが誘発されることが想定される。そこでスラ

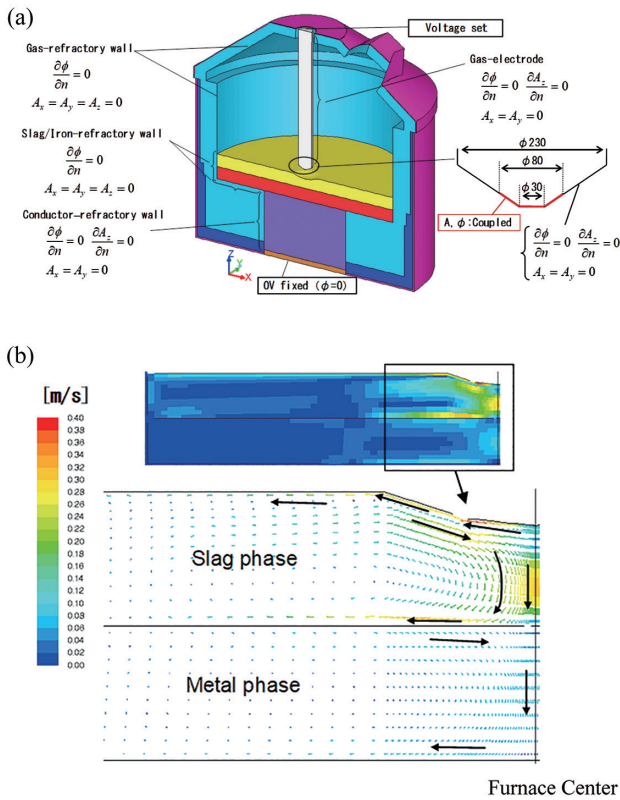


図 9 (a) 計算前提, (b) スラグ相とメタル相における流動パターン

(a) Calculation condition, (b) Flow pattern in the slag and metal phase

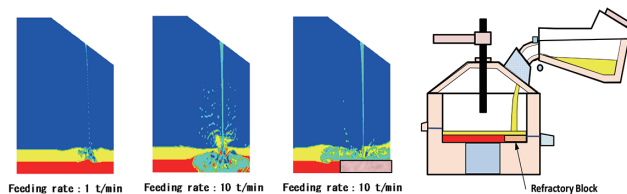


図 10 モデル計算による鉄浴へ装入されたスラグの挙動 Behavior of the charged slag into the iron bath obtained by model calculation

グの落下点に浅底部を設けたところ、スラグと金属のエマルジョンは消え、界面積の増加を抑えることができた。実際に還元炉でスラグ流の落下領域にれんがブロックを設置した結果、スラグ装入直後のフォーミングを完全に抑制することができた。もちろんスラグ装入後は、バルクスラグの (T.Fe) が急上昇しないよう、連続的に還元剤を添加することが、フォーミング抑制に必要であることは言うまでもない。その際は前段で述べたように、[C] の低い鉄浴を利用すれば、フォーミング発生に対する (T.Fe) の上限許容度を緩和することができる。

4.1.5 必要エネルギー

図 11 に実機規模の還元炉を想定した場合の必要エネルギー原単位の算出結果を示す。ここで炉体放熱ロスは、各試験で得られた炉体からの単位面積当たりの熱ロスを基に 4000kW と推定した。その他の顕熱および反応熱は表 2 に示す作業前提から計算によって求めた。スラグを冷間で投入した場合の必要エネルギーは 1063 kWh/t-slag であるのに

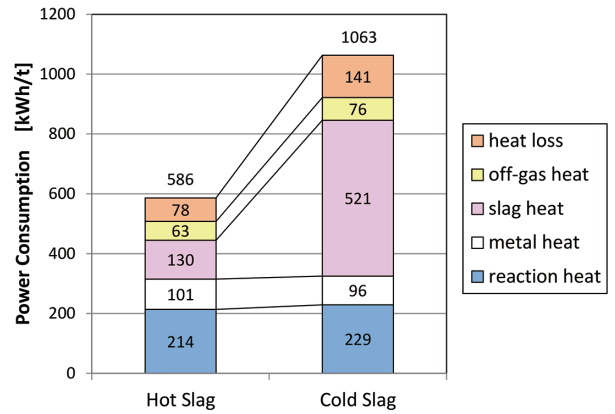


図 11 熱間スラグ装入と冷間スラグ装入の場合の必要エネルギー消費量の比較

Comparison of the required energy in each case of hot slag and cold slag charging

表 2 プロセスの必要エネルギー算出前提

Preconditions for estimating the required power of the process

Furnace capacity	30 MW	
Slag bath	Amount	30 t
	Temperature	1873 K
	(CaO)/(SiO <sub>2</sub> )	1.2
Metal bath	Amount	100 t
	Temperature	1723 K
Charging slag	Amount	30 t
	Temperature	1583 K
	(CaO)/(SiO <sub>2</sub> )	2.5
Reduced slag	Temperature	1873 K
	(CaO)/(SiO <sub>2</sub> )	1.2
	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8 %
Off-gas temperature	1573 K	
Total heat loss	4000 kW	

対し、1583Kの溶融スラッグを直接装入した場合には、586 kWh/t-slag となり、45%削減された。スラッグ顕熱の差異の他にも処理時間短縮による放熱ロスの減少が必要エネルギー低減に寄与している。

#### 4.2 脱りんプロセス

10分間サイクルの連続サンプリングによって得られた脱りん処理中のスラッグ ( $P_2O_5$ ) とメタル [P] の挙動を図12に示す。例えば、初期 [P] 1.5% から出発すると、[P] の低下とともに ( $P_2O_5$ ) は増加し、30% 近傍で飽和する。これは ( $P_2O_5$ ) の高い領域では  $P_2O_5$  の活量係数が増加するので、平衡  $P_2O_5$  濃度が抑制されるためと考えられる。各プロットと x 軸上の初期 [P] を結ぶ直線の傾きはスラッグ量を表し、各プロットと原点を結ぶ直線の傾きは ( $P_2O_5$ )/[P] すなわちりん分配を表す。スラッグ量を抑制し、吹止 [P] を適正化すれば ( $P_2O_5$ ) を高濃度にするのは容易だが、[P] を 0.1% まで低減する

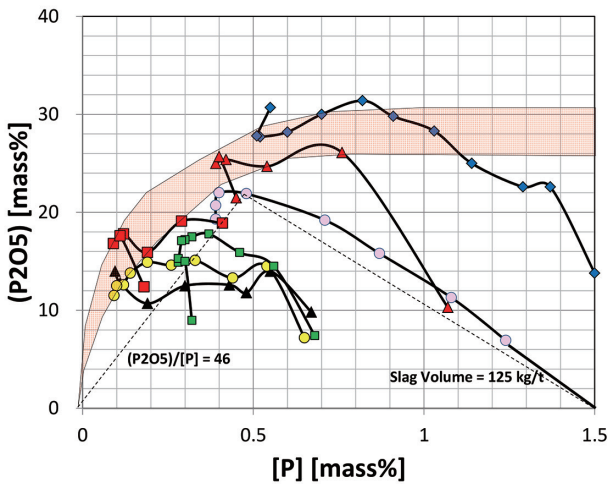


図12 脱りん処理中の ( $P_2O_5$ ) と [P] の挙動  
Behavior of ( $P_2O_5$ ) and [P] contents during dephosphorization treatment

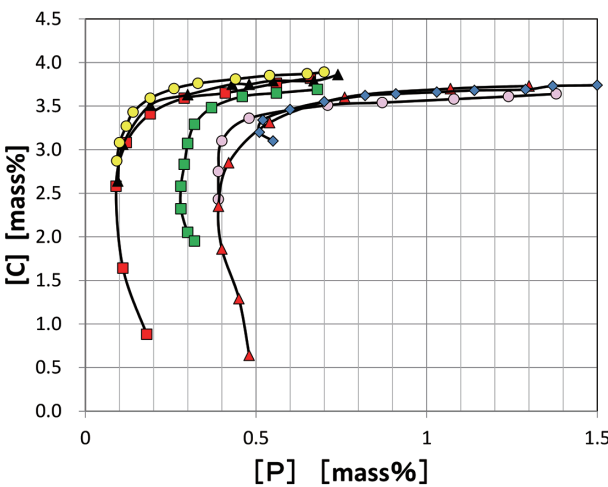


図13 脱りん処理中の [C] と [P] の挙動  
Behavior of [C] and [P] contents during dephosphorization treatment

場合には、りん分配を改善し、( $P_2O_5$ ) の上限曲線をできるだけ上方にシフトさせることが必要である。また同時に、[P] 0.1% で ( $P_2O_5$ ) が高位になるよう、スラッグ量を適正化することが必要である。

図13に処理中の [C] と [P] の挙動を示す。[P] が高い領域では脱りん反応が支配的であるが、遷移点を過ぎると急激に脱炭速度が上昇し、脱りん反応が停滞する。その遷移点は [P] にはよらない。すなわちメタル中りんの移動律速ではないことがうかがえる。図14に ( $P$ )/[P] と  $d[C]/d[P]$  の処理中の推移を示す。( $P$ )/[P] が最高点に達すると同時に  $d[C]/d[P]$  が急上昇しており、遷移点が脱りん平衡に達する点であることがわかる。[P] が 0.1% 以下に低下するまで脱炭速度の急上昇を回避するためには、[P] 0.1% 領域のりん分配を改善し、( $P_2O_5$ ) の上限曲線をできるだけ上方にシフトさせることが必要である。

図15、16に、各試験で ( $P$ )/[P] が最高点に達したときの ( $P_2O_5$ ) と [P] との関係を示した。図15は ( $CaO$ )/( $SiO_2$ ) で、図16は ( $T.Fe$ ) で層別した。これらの図から、りん分配を改善し、( $P_2O_5$ ) の上限レベルを上方にシフトさせるには、( $CaO$ )/

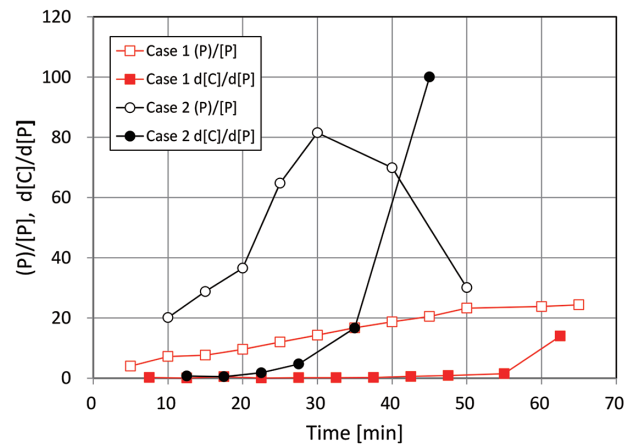


図14 脱りん処理中の ( $P$ )/[P] と  $d[C]/d[P]$  の挙動  
Behavior of ( $P$ )/[P] and  $d[C]/d[P]$  during dephosphorization treatment

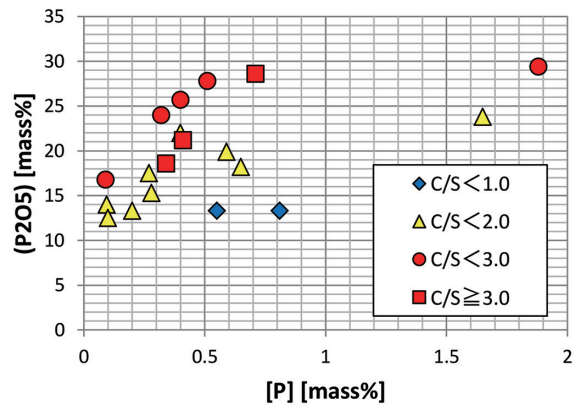


図15 各試験の最大 ( $P_2O_5$ ) に及ぼす ( $CaO$ )/( $SiO_2$ ) の影響  
Influence of ( $CaO$ )/( $SiO_2$ ) upon maximum ( $P_2O_5$ ) at each heat

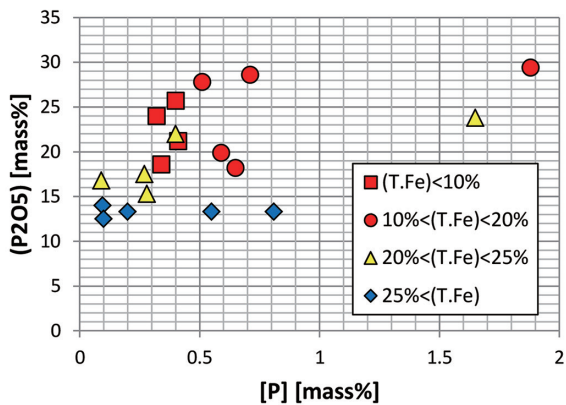


図 16 各試験の最大 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) に及ぼす (T.Fe) の影響  
Influence of (T.Fe) upon maximum (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) at each heat

(SiO<sub>2</sub>) を高め、(T.Fe) を低下させることが効果的であることがわかる<sup>12)</sup>。高 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) スラグでは、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を 3CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> や 5CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> としてスラグ内に固定化するための CaO が相当量必要であり、そのため塩基度を高めることが、低 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 領域よりもより重要になる。

一方、(T.Fe) については、酸素ポテンシャルとりん分配の関係とは異なる相関が得られた。もちろんある程度の (T.Fe) はりん酸化には必須であるが、必要な (T.Fe) は 10% より低く、必要以上の (T.Fe) は逆に (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) を低下させる、と解釈すべきである。考えられる理由は 2 つある。1 点目は、(T.Fe) が上昇すると、マスバランスから相対的に (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) の濃度が低下する効果がある。もう 1 点は、(T.Fe) の低下によって融点が増し、スラグが固化するが、その際、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> は復りんせずに 3CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> や 5CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> の形で、CaO と結びついて凝固スラグ中に留まるためと考えられる。

以上の結果から、高塩基度、低 (T.Fe) が、高りん銑脱りんの目標達成のための重要な要素であることを確認することができた。

## 5. 結 言

“製鋼スラグの完全利用プロセス”の具現化を目的として、還元プロセスと脱りんプロセスのパイロット試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 空気を遮断した密閉型直流電気炉で製鋼スラグを C 還元することによって (T.Fe) を 1% 以下に低減できる。
- (2) 還元反応は主としてスラグ相内で起きるので低 [C] でも還元が可能であり、スラグ金属間の干渉が少ないのでフォーミングは抑制される。
- (3) 溶融スラグ装入時には落下点に浅底部を設けることでスラグ金属混合を回避でき、スラグフォーミングを抑制しつつ高速装入することができる。
- (4) 溶融スラグの直接還元により、冷間スラグ使用時よりも必要エネルギーを半減させることができる。

(5) 溶銑 [P] を 0.1% 以下に脱りんし、同時にりん酸肥料となりうる高い (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) のスラグを得るためには、(P)/[P] の向上とスラグ量の適正化が必要である。

(6) (P)/[P] を向上させるためには、(CaO)/(SiO<sub>2</sub>) の向上と (T.Fe) の低減が必要である。

製鋼スラグの完全利用プロセスの実現は、精錬工程の抜本的変革であり、熱間スラグ利用による省エネルギー、電気エネルギー利用による省 CO<sub>2</sub>、未利用鉄源・りん源の回収、スラグの高付加価値化、廃棄物の有効活用、粉じん環境対策といった将来課題を解決する多くの効果を期待することができる。今後もプロセスの経済合理性の追求や生産される肥料等の商品価値の向上に尽力していきたい。

## 謝 辞

本成果の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果、得られたものである。本開発試験の遂行および解析に当たり、一方ならぬご支援、ご尽力をいただいた SWEREA-MEFOS、南ア MINTEK、独 FEhS、(株)アステック入江、濱田重工(株)、日本鑄鍛鋼(株)、三菱製鋼室蘭特殊鋼(株)、日鉄テックスエンジ(株)、日鉄エンジニアリング(株)、日鉄プラント設計(株)の関係者各位に心より御礼申し上げる。

## 参照文献

- 1) Kubodera, S., Koyama, T., Ando, R., Kondo, R.: Trans. ISIJ. 19, 419 (1979)
- 2) Tschudin, M., Brotzmann, K., Günther, C.: Proc. Recycling and Waste Treatment in Mineral Processing: Technical and Economic Aspects. Vol.2, Luleå, Sweden, 2002-6, p.425
- 3) Ye, G., Burström, E., Kuhn, M., Piret, J.: Scan. J. of Met. 32, 7 (2003)
- 4) Fleischanderl, A. et al.: Stahl u. Eisen. 124, 123 (2004)
- 5) Yamamoto, T., Nakamoto, M.: Proc. 1st Int. Conf. of Energy and Material Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry, 2017, p.144
- 6) Barcza, N.: J. South African Inst. of Mining and Metallurgy. 317 (1986)
- 7) Jones, R., Reynolds, Q., Curr, T.: Proc. South African Pyrometallurgy 2011, 2011-3, p.15
- 8) 原田俊哉 ほか: CAMP-ISIJ. 168, 778 (2014), CD-ROM
- 9) 平田浩 ほか: CAMP-ISIJ. 168, 779 (2014), CD-ROM
- 10) Harada, T., Hirata, H., Arai, T., Toh, T., Yamada, T.: ISIJ. Int. 58 (10), 1934 (2018)
- 11) Harada, T., Hirata, H., Arai, T., Toh, T., Shuto, C.: ISIJ. Int. 58 (10), 1943 (2018)
- 12) 小川雄司 ほか: 鉄と鋼. 87, 14 (2001)



原田俊哉 Toshiya HARADA  
プロセス研究所 製鋼研究部 上席主幹  
茨城県神栖市砂山16-1 〒314-0255



新井貴士 Takashi ARAI  
設備・保全技術センター  
プラントエンジニアリング部



坂元基紘 Motohiro SAKAMOTO  
八幡技術研究部 主任研究員 博士(工学)



藤 健彦 Takehiko TOH  
日鉄テクノロジー(株)  
富津事業所 資源・プロセスソリューション部長  
環境科学博士



平田 浩 Hiroshi HIRATA  
プロセス研究所 製鋼研究部 主幹研究員