

# 製鋼スラグからの鉄・りん回収による再資源化技術

## Recycling Technique of Iron and Phosphorus in Steelmaking Slag

中瀬 憲治 NAKASE Kenji JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主任研究員(係長)  
内田 祐一 UCHIDA Yu-ichi 元JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主任研究員(副部長)・博士(工学)  
三木 祐司 MIKI Yuji JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士(工学)

### 要旨

製鋼スラグに含まれる鉄・りんの再資源化を目的として、攪拌を付与した条件での製鋼スラグ中 ( $\text{Fe}_t\text{O}$ ), ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) の炭素還元及ばす温度 (1 473~1 873 K) とスラグ組成 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.0\sim 4.0$ ) の影響をラボ実験にて調査し、以下の知見を得た。(1)炭材とスラグを混合して加熱処理を行うことで、( $\text{Fe}_t\text{O}$ )と( $\text{P}_2\text{O}_5$ )が還元可能であり、( $\text{Fe}_t\text{O}$ )と( $\text{P}_2\text{O}_5$ )の還元率は高温かつ低塩基度であるほど上昇した。(2) ( $\text{Fe}_t\text{O}$ )の活量が約0.01以下まで還元された条件において、( $\text{P}_2\text{O}_5$ )の除去率が50%を超える結果が得られた。実験後のスラグ組成と温度から計算されるスラグ-メタル間の平衡りん分配比が増加するほどりん除去率は低下した。(3) 実験前後のPマスバランスにおいて、不明りんが観察された。この不明りんの割合は、気化脱りん反応から求まる平衡  $\text{P}_2$  ガス分圧が高いほど大きかった。

### Abstract:

In order to recycle iron and phosphorus in steelmaking slag, effects of temperature (1 473-1 873 K) and slag composition ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.0\sim 4.0$ ) on reduction of ( $\text{Fe}_t\text{O}$ ) and ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) in steelmaking slag by carbon with mechanical stirring were studied in laboratory-scale experiments. The results were summarized as follows. 1) The reduction ratios of ( $\text{Fe}_t\text{O}$ ) and ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) in steelmaking slag obtained in this research were 0-98% and 3-98%, respectively. These values were highly dependent on both slag basicity and the reduction temperature. 2) Higher reduction ratio of ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) exceeding 50% were obtained under the condition that the activity of ( $\text{Fe}_t\text{O}$ ) in the slag was less than 0.01. The ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) reduction ratio decreases as the equilibrium phosphorus partition ratio between slag and metal calculated by slag composition and temperature increased. 3) From the phosphorus mass balance before and after experiments, 1-29 mass% of unidentified phosphorus was confirmed. The ratio of unidentified phosphorus increased as the equilibrium  $\text{P}_2$  gas partial pressure calculated with an equation for the gaseous dephosphorization reaction increased.

## 1. はじめに

鉄鋼精錬プロセスにおいて発生する高炉スラグはおよそ 300 kg/t-steel 程度であり、セメント原料などに有効利用されている。製鋼スラグはおよそ 120 kg/t-steel 程度発生し、土工用の埋め戻し材などに利用されている。製鋼スラグを路盤材に利用するなど用途を拡大するためには、未滓化石灰による膨張崩壊性を低減する必要がある。一方、製鋼スラグ中の Fe, CaO 源の循環利用を目的として製鉄プロセスへのリサイクル等の効果的な処理、利用の研究開発<sup>1-3)</sup>が実施されてきた。しかし、製鉄プロセスへリサイクルする際、製鋼スラグ中に含有されるりんが、還元雰囲気の高炉で溶鉄に移行するため、鉄鋼製品の品質への悪影響が懸念され、十分実施されていないのが現状である。

製鋼スラグからのりんの除去に関する研究についてはいくつかの報告がある。塩見ら<sup>4)</sup>はスラグ塩基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$

重量パーセント比)が1.1~1.2の合成スラグを黒鉛るつば内で溶融させてスラグの還元実験を行い、1 773~1 873 Kで脱りん率68~94%が達成でき、スラグ中の  $\text{Fe}_t\text{O}$  の還元が  $\text{P}_2\text{O}_5$  の還元を先行することを見出している。また、スラグ中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  の炭素による還元反応速度が化学反応で律速されるとしている。竹内ら<sup>5)</sup>は Fe-Si 合金共存下における炭素による転炉スラグの還元実験を行い、りんが  $\text{P}_2$  ガスとなって一部は溶鉄に溶け込み、少なくとも60%が気化除去されて単体のりんとして回収できることを報告している。永田<sup>6)</sup>は塩基度が2.7の予備処理スラグと黒鉛粉末を混合し、黒鉛るつば内で溶融させて還元実験を行い、1 896~1 938 Kで70%の気化脱りん率が得られたことを報告しており、スラグの攪拌により反応界面積を増大させることで更なる脱りんの促進の可能性について言及している。

さらに近年では、森田ら<sup>7)</sup>や伊藤ら<sup>8)</sup>によって急速加熱を用いたスラグからの脱りんに関する研究も行われている。また、久保ら<sup>9)</sup>は溶鉄脱りんスラグの構成相が、鉄をほとんど含まないりん濃縮相と、りんをほとんど含まない相に大

2016年3月4日受付

表 1 実験に用いたスラグの化学組成

Table 1 Chemical composition of slag used in the experimental work

	CaO mass%	SiO <sub>2</sub> mass%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mass%	MgO mass%	MnO mass%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mass%	T. Fe mass%	M. Fe mass%	FeO mass%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mass%	CaO/ SiO <sub>2</sub>
Dephosphorization slag	21.1	17.8	4.1	4.9	3.9	2.4	36.9	17.3	19.8	6.1	1.2
Converter slag I	40.0	13.5	5.4	5.8	2.8	2.2	20.6	2.2	12.0	12.9	3.0
Converter slag II	47.0	11.7	4.0	6.0	3.0	2.8	16.3	1.0	10.4	10.3	4.0

別できることに着目し、強磁場勾配を利用して、スラグから両者を磁気分離する実験を実施し、りん資源の回収の可能性を検討している。

このように、製鋼スラグからのりの除去については多くの知見が得られているが、その多くは比較的塩基度が低いスラグを高温の熔融状態で還元しており、スラグへの攪拌を与えない静置還元実験である。工業的応用を考える上では製鋼スラグを完全溶融させるプロセスは多量のエネルギーを要する上、設備コスト、耐火物コストが増大する。また、高い処理速度を得るためには攪拌付与が有効だと考えられる。

そこで、本研究では、攪拌を付与した条件下で、溶銑予備処理スラグおよび転炉スラグの (Fe<sub>t</sub>O), (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 還元挙動と温度の関係を調査した。

## 2. 実験

### 2.1 実験方法

製鋼スラグの還元実験に用いた装置の概略図を **図 1** に示す。高周波誘導加熱炉にカーボンのつぼ (外径 130 mm, 内径 100 mm) と MgO のつぼ (外径 85 mm, 内径 77 mm) を装入し、MgO のつぼ内にスラグ試料を 100 g と還元用炭材を装入して、炉上から Ar ガスを 5 L-norm./min 流しつつ、

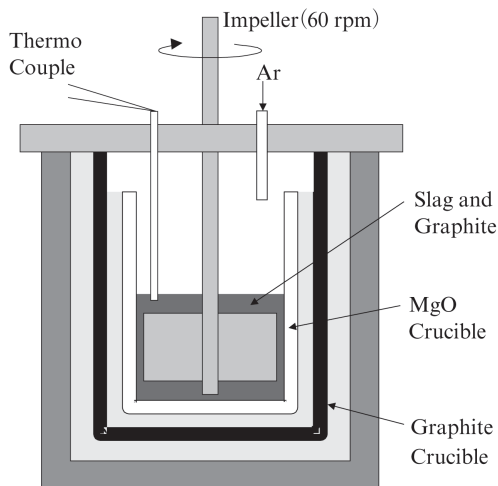


図 1 スラグ還元実験装置の模式図

Fig. 1 Experimental setup for slag reduction experiments

インペラによる機械攪拌 (60 rpm) を行いながら所定の温度まで平均 15 K/min で昇温した。試料温度は炉上より熱電対を挿入してスラグ上面の温度を測定した。実験に用いたスラグ試料の化学組成を **表 1** に示す。塩基度調整剤は珪砂 (SiO<sub>2</sub> 純度 > 95 mass %) を用いた。還元用炭材は C 純度 99 mass % 以上の黒鉛を用い、配合量 (C ratio) はスラグ中の (Fe<sub>t</sub>O), (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) の還元に必要な化学量論値に対して 1.5 倍あるいは 2.5 倍とした。スラグ試料および還元用炭材は粒度 0.425 mm 以下に調整したものを予め混合して装入した。所定温度到達後、30 分保持した後に機械攪拌を停止して空冷した。降温後、るつぼ内から試料を取り出し、スラグとメタルを磁選分離し、それぞれの重量測定、化学組成分析を行った。なお、スラグとメタルの分析には代表性を持たせるために、回収したサンプルを 0.25 mm 以下に粉碎し、縮分操作を行った後に分析に供した。

### 2.2 実験結果

#### 2.2.1 スラグ中 (Fe<sub>t</sub>O) の還元

実験後に回収したサンプルの外観例を **図 2** に示す。実験後の試料は磁選により、粒状鉄、磁着スラグ、非磁着スラグに分けることができる。CaO/SiO<sub>2</sub>=1.2 の予備脱りんスラグでは 1473 K, CaO/SiO<sub>2</sub>=3.0 の転炉スラグ I では 1873 K で大きな粒状鉄が得られた。実験中の炉上からの目視観察では、加熱当初のスラグは半溶融～溶融状態で攪拌されるが、鉄酸化物の還元反応の進行に伴いスラグの融点の上昇

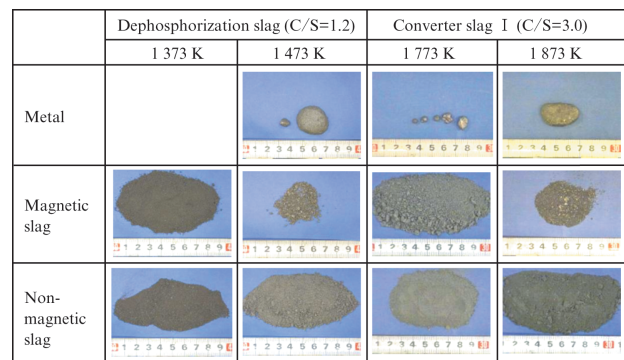


図 2 実験後回収サンプル外観 (メタル, スラグ)

Fig. 2 Appearances of metal and slag after reduction experiments

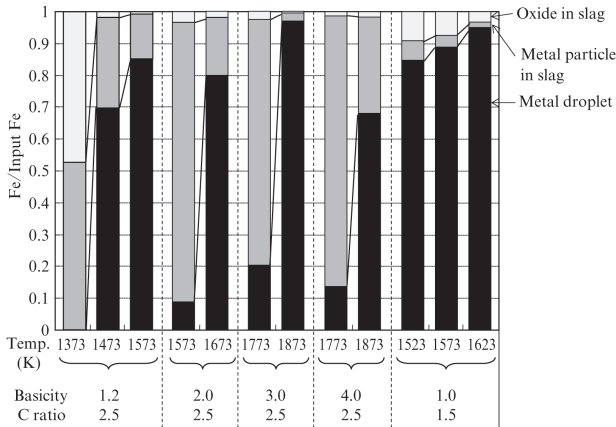


図3 還元実験後に各相へ分配されたFe重量バランス  
Fig. 3 Mass balance of iron after slag reduction experiments

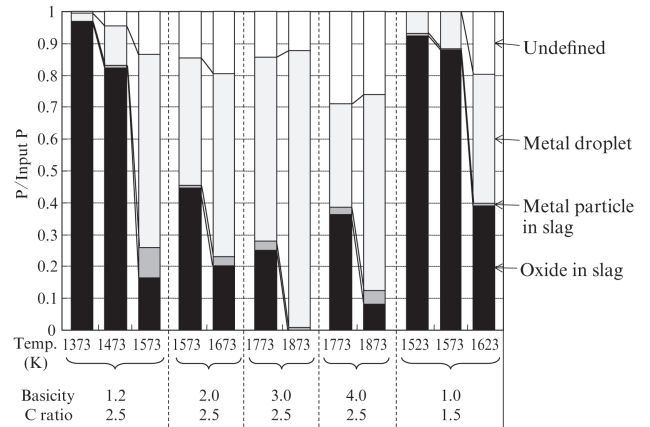


図4 還元実験後に各相へ分配されたP重量バランス  
Fig. 4 Mass balance of phosphorus after slag reduction experiments

するため、処理後半は固体～半熔融状態の固液共存状態で攪拌される様子がうかがえた。また、還元された鉄は、回収時につば底部で粒状鉄として凝集しているものと、スラグ中に微粒鉄として存在するものがあった。粒状鉄は、還元により生成した鉄への浸炭に伴い融点が低下し、実験中は熔融鉄として攪拌されていたと思われる。一方、スラグ中の微粒鉄は固体～半熔融状態のスラグとともに攪拌されていたものと推察される。

各スラグの還元実験前後の鉄の重量バランスを図3に示す。図中の縦軸は、スラグ原料中の鉄重量を1として、各相に分配された鉄の重量割合を示している。鉄は、粒状鉄として回収されたもの、スラグ中に微粒鉄として残留したもの、スラグ中に酸化物として残存するものに分類した。1573～1773 Kの温度においては高塩基度の転炉スラグでは、大きな粒状鉄は回収できていないが、スラグ中に微粒鉄が残存しており、還元反応そのものは進行していることが分かる。また、還元用の炭材割合が大きいほど還元率が高いことが分かる。

これらの測定結果から、スラグの塩基度を低下させることでスラグの融点が低下して流動性が確保しやすくなり、粒状鉄が回収できるものと思われる。また、還元により生成した金属鉄を凝集させるには、金属鉄を熔融させることが効果的であると思われ、還元鉄への浸炭を促進させることも重要であると考えられる。

### 2.2.2 スラグ中 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) の還元

各スラグの還元実験における、りんの重量バランスを図4に示す。図中の縦軸は、スラグ原料中のりん重量を1として、各相に分配されたりんの重量割合を示している。りんは、粒状金属中に溶け込んだもの、スラグ中に残存する微細鉄中に溶け込んだもの、スラグ中に酸化物として残存するものおよび不明分として分類した。(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の還元と同様に、処理温度の上昇に伴いスラグ中から除去されるりんの割合は増加し、高塩基度スラグであるほど、りんの還元除去に必

要な温度が高くなるのが分かる。

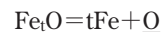
なお、不明分は酸化除去されたりんに相当する可能性があるが、今回の測定では排ガス中ダストの補足および排ガス組成分析を行っておらず、未確認である。

## 3. 考察

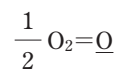
### 3.1 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 還元と (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 還元の関係

(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) および (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) の還元はいずれも処理温度の上昇に伴い進行することが分かった。ここでは、還元反応に及ぼす酸素ポテンシャルについて考察を行う。

反応系の酸素ポテンシャルが Fe-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平衡で決まると仮定し、各実験における還元後のスラグ中の (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 濃度より酸素ポテンシャルを求めた。Fe/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の平衡は文献値<sup>10)</sup>より以下の (1) 式、(2) 式を用いた。



$$\log K_1 = -\frac{6150}{T} + 2.604 \dots \dots \dots (1)$$



$$\log K_2 = -117110 - 3.39T \dots \dots \dots (2)$$

ここで、K<sub>1</sub>は式(i)の平衡定数、Tは絶対温度(K)であり、Feの活量は1とした。また、(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の活量係数γ<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>はBan-ya<sup>11)</sup>により提唱されている正則溶体モデルを用いて、CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-MnO系にて算出した。

実験温度と Fe-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平衡から算出した酸素ポテンシャル P<sub>O<sub>2</sub></sub> の関係を図5に示す。また、図5中の破線は、スラグ中 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の活量 a<sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> がそれぞれ 0.1, 0.03, 0.01 の場合の温度と酸素ポテンシャルの関係を表している。さらに、一点鎖線は C-CO 平衡における温度と酸素ポテンシャルの関係を表

CaO/SiO <sub>2</sub>	C ratio	Phosphorus removal ratio	
		<50 mass%	≥50 mass%
1.2	2.5	○	●
2.0		△	▲
3.0		◇	◆
4.0		□	■
1.0		1.5	◎

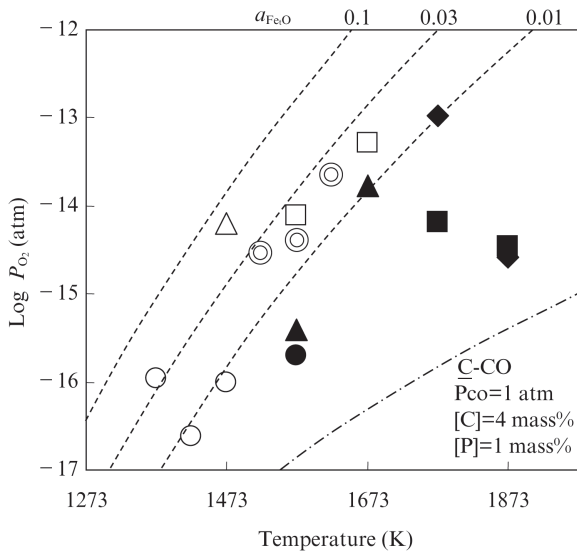


図5 実験時の酸素ポテンシャルの比較

Fig. 5 Comparison of oxygen potential in the experimental work

している。C-CO 平衡は文献値<sup>10)</sup>より(3)式を用い、(2)式と組み合わせることで酸素ポテンシャルを計算した。計算では、還元実験後のスラグとメタルの分析値をもとに、メタル中 [C]=4 mass%、[P]=1 mass%を仮定した。また、CO 分圧  $P_{CO}$  は 1 atm とし、相互作用助係数は文献値<sup>10)</sup>より、 $e_C^C=0.243$ 、 $e_C^P=0.051$  を用いた。

$$\begin{aligned} C + O &= CO \\ \Delta G_3^\circ &= -22\,200 - 38.34T \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta G_i^\circ$  は式 (i) の標準ギブズエネルギーである。本実験で得られた酸素ポテンシャルはおよそ  $10^{-13} \sim 10^{-17}$  atm 程度となり、これは Wei ら<sup>12)</sup> の測定した酸化鉄含有スラグ-溶鉄間のりん反応におけるスラグ/メタル界面の酸素ポテンシャル  $10^{-14} \sim 10^{-16}$  atm とおよそ一致を得た。

また図5のプロットは、各実験水準において、りんの除去率が 50 mass% 以上のものを塗り潰し (●, ▲, ◆, ■), 50 mass% を下回るものを白抜き (○, △, ◇, □) で表示している。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の活量が 0.01 を下回る条件で、りん除去率が 50 mass% 以上のプロットが多い傾向にあることから、製鋼スラグの還元は、まず (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の還元が優先して進行し、スラグ中の (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 濃度が低下してから (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) の還元が進行すると推察される。

次に、スラグからのりんの除去率について、温度、スラグ組成、酸素分圧の影響を表す指標として、平衡りん分配比  $L_P$  を用いて考察を行った。スラグ-メタル間のりん分配比  $L_P$  は以下の(4)式で表される。

$$L_P = \frac{(\%P)}{[\%P]} \dots\dots\dots (4)$$

ガス-スラグ間のフォスフェイトキャパシティー  $C_{PO_4^{3-}}$  は以下の(5)式で定義される。ここで、 $P_{P_2}$  は P<sub>2</sub> ガスの分圧 (atm) である。

$$C_{PO_4^{3-}} = (\%PO_4^{3-}) / (P_{P_2}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{5/4}) \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式と、(6) 式に示す P<sub>2</sub> ガスの溶鉄への溶解反応<sup>10)</sup>を組み合わせることで、(7) 式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} P_{P_2} &= P \\ \Delta G_6^\circ &= -157\,700 + 5.4T \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \frac{(\%P)}{[\%P]} &= \log L_P \\ &= \log C_{PO_4^{3-}} - \frac{8\,236}{T} + 0.204 + \log f_P + \frac{5}{4} P_{O_2} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 $C_{PO_4^{3-}}$  については、還元処理後のスラグ組成からスラグ/メタル界面のフォスフェイトキャパシティー  $C_P$  を Suito ら<sup>13)</sup> による(8)式にて算出し、(9)式による変換を行った値を用いた。

$$\begin{aligned} \log C_P &= 0.0938 \{ (\%CaO) + 0.50(\%MgO) + 0.30 \\ &\quad (\%Fe_2O_3) + 0.35(\%P_2O_5) + 0.46(\%MnO) \} \\ &\quad + \frac{32\,500}{T} - 17.74 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\log C_{PO_4^{3-}} = \log C_P + \frac{21\,680}{T} + 1.87 \dots\dots\dots (9)$$

また、活量係数  $f_P$  の計算には、各実験におけるメタル中 [C] と [P] の分析値および熱力学データ<sup>10)</sup>より  $e_P^P=0.054$ 、 $e_C^C=0.126$  を用いた。また、 $P_{O_2}$  には、(1)、(2) 式の Fe-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平衡による酸素ポテンシャルの値を用いた。

(7) 式を用いて計算した  $\log L_P$  と、スラグから除去されたりんの割合の関係を図6に示す。 $L_P$  とりん除去率にはおよそ良い相関関係が認められ、 $L_P$  の低下に伴いりん除去率は向上する。このことから、本実験系においてはスラグ-メタル間反応が主反応であると推察され、スラグ中の酸化鉄の還元による酸素ポテンシャルの低下に伴い、平衡りん分配比が低下し、スラグからのりん除去が進行するものと考えら



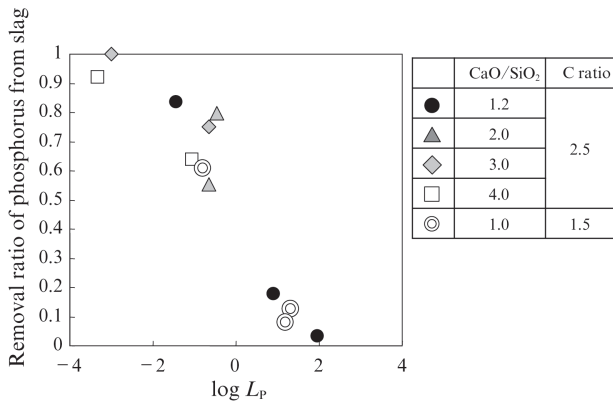


図6 logL<sub>P</sub> とりん除去率の関係

Fig. 6 Relationship between logL<sub>P</sub> and removal ratio of phosphorus from slag

れる。

### 3.2 気化脱りん

図5で示したりんバランスにおいて、不明りんが認められた。今回の実験では、排ガス組成の分析やダスト捕集などを行っていないため、直接的に気化脱りん量を測定することはできなかったが、熱力学的に気化脱りんの可能性について考察を行った。Turkdogan<sup>14)</sup>は(10)式で表されるP-PO<sub>2.5</sub>平衡定数を報告しており、(10)式と(2)、(6)式を組み合わせることで、以下の(11)式を得る。

$$P + \frac{5}{2} O_2 = (PO_{2.5})$$

$$\log K_{10} = \frac{21740}{T} - 16.5 \dots \dots \dots (10)$$

$$(PO_{2.5}) = \frac{1}{2} P_2 + \frac{5}{4} O_2$$

$$\Delta G_{11}^\circ = 866732 - 312.8T \dots \dots \dots (11)$$

ここで、(PO<sub>2.5</sub>)の活量は、各実験の還元処理後の(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)濃度と、Ban-ya<sup>11)</sup>により提唱されている正則溶体モデルを用いて活量係数γ<sub>PO<sub>2.5</sub></sub>をCaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-MnO系にて計算することで求めた。また、酸素分圧は還元処理後の(FeO)濃度から、(1)、(2)式を用いて求めた。このようにして求めた(PO<sub>2.5</sub>)の活量と酸素分圧を(11)式に代入することで各実験におけるP<sub>2</sub>分圧を計算することができる。

計算により求めたP<sub>2</sub>分圧と、図4中の不明りん割合の関係を図7に示す。計算で求められるP<sub>2</sub>分圧が高いほど、不明りんの割合が増加する傾向にあることから、不明りんが気化脱りに相当する可能性は考えられる。但し、同一の平衡P<sub>2</sub>分圧の条件であっても不明りん割合にバラツキが見ら

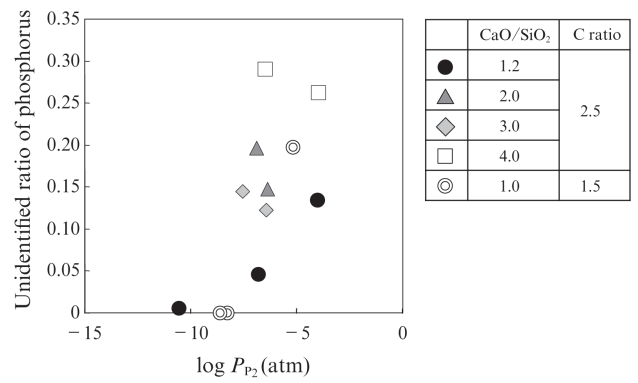


図7 logP<sub>P<sub>2</sub></sub> と不明りん率の関係

Fig. 7 Relationship between logP<sub>P<sub>2</sub></sub> and undefined ratio of phosphorus

れることから、平衡P<sub>2</sub>分圧のみで不明りん割合が説明できているとは言い難い。

### 4. おわりに

攪拌を付与した条件での製鋼スラグ中(FeO)、(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)の炭素還元及ばす温度(1473~1873K)とスラグ組成(CaO/SiO<sub>2</sub>=1.2~4.0)の影響をラボ実験にて調査し以下の結論を得た。

- (1) 炭材とスラグを混合して加熱処理を行うことで、(FeO)と(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)の還元が可能であった。(FeO)と(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)の還元率は高温かつ低塩基度であるほど上昇した。
- (2) 還元後スラグの(FeO)濃度から推算される酸素ポテンシャルは10<sup>-13</sup>~10<sup>-17</sup>atmであった。また、FeOの活量がおよそ0.01以下まで還元された条件において、(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)の除去率が50%を超える結果が得られた。
- (3) 実験後のスラグ組成と温度から計算されるスラグ-メタル間の平衡りん分配比が増加するほど、スラグからのりん除去率は低下した。
- (4) 実験前後のりん重量バランスから、不明りんの存在が確認され、実験中の気化脱りん反応の進行が示唆された。

これらの結果より、製鋼スラグを還元することで鉄とりんを回収し、再資源化する可能性が示唆された。鉄とりんを分離する工程の省略のためには、りんの気化除去が有効だと考えられ、詳細な条件の解明が求められる。

本研究は、平成21年度独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)「製鋼スラグ資源化技術のためのりん分離回収に関する事前研究」にて行った成果を含み、研究の遂行にあたって、適切なご助言を頂いた長坂徹也東北大学大学院環境科学研究科教授をはじめ、関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Yahata, H.; Kurose, Y.; Okuda, H.; Oshima, K.; Aoyagi, A. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, p. 1101.
- 2) Kimura, M.; Nakajima, S.; Mimura, T.; Hoshikawa, I.; Ono, R.; Semura, K. Kobe Steel Engineering Report. 2001, vol. 51, p. 50.
- 3) 日本鉄鋼協会. 製鋼スラグ極小化にむけての開発動向と課題. 製鋼スラグ極小化研究会最終報告書. 1999.
- 4) Shiomi, S.; Sano, N.; Matsushita, Y. Tetsu-to-Hagané. 1977, vol. 63, p. 1520.
- 5) Takeuchi, S.; Sano, N.; Matsushita, Y. Tetsu-to-Hagané. 1980, vol. 66, p. 2050.
- 6) 永田和宏. 製鋼スラグの発存量低減と資源化. 鉄鋼スラグの基礎と応用研究会最終報告書. 1997, p. 49.
- 7) Morita, K.; Guo, M.; Oka, N.; Sano, N. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2002, vol. 4, p. 93.
- 8) Toishi, S.; Itoh, K. CAMP-ISIJ. 2004, vol. 17, PS-1.
- 9) Kubo, H.; Matsubae, K.; Nagasaka, T. Tetsu-to-Hagané. 2009, vol. 95, p. 300.
- 10) The Japan Society for the Promotion of Science. "Steelmaking Data Sourcebook Revised Edition, The 19th Committee on Steelmaking". 1984.
- 11) Ban-ya, S. ISIJ International. 1993, vol. 33, p. 2.
- 12) Wei, P.; Ohya, M.; Hirasawa, M.; Sano, M.; Mori, K. Tetsu-to-Hagané. 1990, vol. 76, p. 1488.
- 13) Suito, H.; Inoue, R. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, p. 183.
- 14) Turkdogan, E.T. ISIJ International. 2000, vol. 40, p. 964.



中瀬 憲治



内田 祐一



三木 祐司