

磁気分離法による溶銑脱リンスラグからのリン回収法で生成する残渣スラグのリサイクル効果

松八重 (横山) 一代*・久保 裕也*²・長坂 徹也*

Recycling Effect of Residual Slag after Magnetic Separation for Phosphorus Recovery from Hot Metal Dephosphorization Slag

Kazuyo MATSUBAE-YOKOYAMA, Hironari KUBO and Tetsuya NAGASAKA

Synopsis : The authors have found in their previous work that phosphorus exhibits remarkable segregations in the industrial hot metal pretreatment slag and it exists as $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ solid solution together with $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-MnO-MgO}$ matrix. Since their magnetic property of each phase is significantly different, it is possible to separate each phase with the aid of superconducting strong magnetic field. By applying strong magnetic field of 0.5 to 2.5 T to the crushed slag, more than 60% of phosphorus concentrated phase in the slag has been recovered. If the most of phosphorus can be removed from the slag, the residual slag is basically $\text{FeO-CaO-SiO}_2\text{-MnO-MgO}$ with less P_2O_5 and thus it may be recycled to iron and steelmaking processes such as the sintering, hot-metal desiliconization, and hot-metal dephosphorization processes. In the present work, the recycling effect of the residual slag to the dephosphorization process is simulated based on the mass balance calculation. The significant reduction of total slag generation and CaO input has been demonstrated by the mathematical model considering phosphorus recovery and recycling of residual slag as a dephosphorization agent. It has also been indicated by the Waste Input-Output model that the phosphorus recovery from dephosphorization slag and the recycling of residual slag to hot metal dephosphorization process have great environmental and economical benefits.

Key words : multi-phase flux; hot metal pretreatment; dephosphorization; slag recycling; waste input-output analysis

1. 緒言

リンは自然界、人間経済活動圏の両者において重要な役割を担っている元素である。リンの工業的な主要用途は、食料生産を下支えする肥料成分や、最終製品を形作るポリリン酸等の素材成分などである。一方、肥料原料としてのリンは、食糧増産やバイオエタノール用穀物生産に直結する戦略物質のひとつとして極めて重要視されている。リン資源を海外に全面依存している我が国においては、既にリンの確保が極めてタイトになりつつあり、リンの安定確保は世界共通の緊急課題である¹⁻⁴⁾。

このようなリンを巡る資源事情とは裏腹に、リンは鋼材にとって典型的な有害不純物であることから、鉄鋼業では溶銑からの脱リンが行われている。前報^{3,5)}において著者らは、リンの国内マテリアルフローを明らかにし、2002年ベースで高炉溶銑から製鋼スラグ中に分配除去されるリンの量は、リン資源として輸入されるリン鉱石中のリンの総量とほぼ同等の約97kt-Pに上ることを示した。また、典型的なマルチフェーズスラグである溶銑脱リンスラグにおいて、リンは多くの場合に鉄をほとんど含まない $3\text{CaO}\cdot$

$\text{P}_2\text{O}_5\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 固溶体 (リン濃縮相) として $\text{CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}$ 系マトリックス相中に分散していたことから⁶⁾、超電導磁石を用いた高磁場勾配を利用したリン濃縮相の分離回収を試みた。その結果、リン濃縮相を60%以上の収率で回収することができた⁷⁾。

既存の製鋼プロセスでは、高炉鑄床、トープード、転炉、電気炉、取鍋などから約1400万トンのスラグが発生し⁸⁾、それらの相当量は土木資材等に再利用されている。しかしながら、鉄鉱石やコークス等の原料中に含まれている微量のリンあるいはマンガンは、基本的に酸化精錬工程である製鋼プロセスを経て、製鋼スラグに高度に濃縮されるものの、元素としてのリンあるいはマンガンの利用価値はゼロに等しい。路盤材や土木資材は、決して高付加価値の利用形態とは言えず、鉄鋼業にとって製鋼スラグの新たな利用法の開発は、スラグ発生量の削減と並ぶ重要な課題である。

このような現状に対して、例えば著者らが前報^{5,7)}で示したような方法によって脱リンスラグからリンを回収できるならば、回収物をリンの新資源として有効に活用でき、逼迫するリン需給問題に対して鉄鋼業が大きく貢献できる

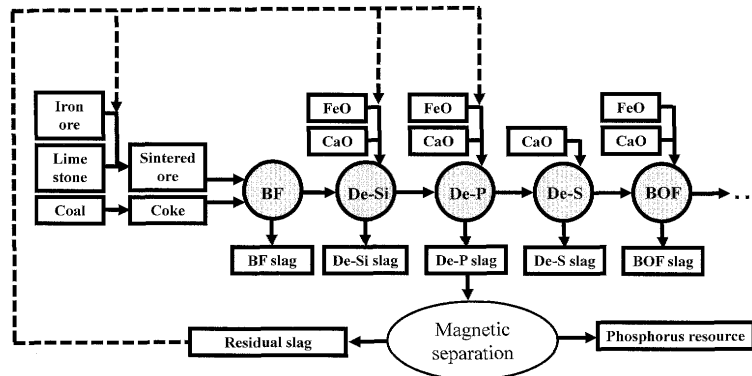
平成20年11月28日受付 平成20年12月17日受理 (Received on Nov. 28, 2008; Accepted on Dec. 17, 2008)

* 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aoba-yama 6-6-11-1006, Aoba-ku, Sendai 980-8579)

*² 東北大学大学院環境科学研究科 (現: アサヒプリテック) (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, now Asahi Pretec Corp.)

Table 1. Composition of dephosphorization slag used in the present work. The slag consists of phosphorus enriched phase (P-phase) and matrix phase (M-phase).

	composition (%)						phase ratio (%)
	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	
average	18.1	6.6	45.9	20.3	2.5	5.5	
P phase	0.6	11.8	60.5	26.7	0.2	0.3	56.2
M phase	40.5	0.2	27.2	12.0	5.7	12.5	43.8

Fig. 1. Schematic process flow diagram of the conventional BF-BOF steelmaking process and possible recycling path of residual slag after the magnetic separation of dephosphorization slag for phosphorus recovery.^{5,7)}

可能性を生むことになる。一方、リン回収後の残渣スラグは、リン濃度がかなり低下して基本的にFeO-CaO-SiO₂(-MnO-MgO)系となる。従って、この残渣スラグを上工程にリサイクルすれば、土木資材等より付加価値の高い精錬用フラックス等の形で再利用できるのみならず、スラグ発生量を大幅に低減できる可能性がある。

本論文では、溶銑脱リンスラグに磁気分離法を適用した場合を想定し、残渣スラグの上工程へのリサイクル効果について定量的に検討した。まず、残渣スラグリサイクルが副原料投入量およびスラグ発生量に及ぼす影響を物質収支計算に基づいて検討し、次いでリン回収と残渣スラグリサイクルの経済波及効果と環境負荷低減効果について、廃棄物産業連関モデル^{9,10)}を用いたシナリオ分析を行った。

2. 検討対象プロセス

著者らが前報^{5,7)}で提案した磁気分離プロセスでは、回収されるリン濃縮物と残渣の組成は、スラグの平均組成、冷却方法、磁気分離方法に依存し、一義的に定まる値ではない。これらの関係を広汎に明らかにすることは今後の課題であるが、本論文では磁気分離後の残渣スラグのリサイクル効果を定量的に知るために、前報で示した実績値に基づいて検討することにした。前報⁷⁾で用いたスラグの平均組成と、スラグを構成するリン濃縮相(P相)およびマトリックス相(M相)の各組成および両相の存在比をTable 1に示す。磁気分離法は、ここに示されるリン濃縮相とマ

トリックス相を、それぞれ非磁着物、磁着物として分離しようというものである。Table 1よりわかるように、両相の分離が十分であれば、磁着物、すなわちリン回収残渣は、リンをほとんど含まないFeO-CaO-SiO₂-MnO-MgO系であり、Fig. 1に示すように、焼結、溶銑脱珪、溶銑脱リンなどの製精錬上工程へリサイクル可能と考えられる。なお、著者ら^{11,12)}によれば、溶銑脱リンスラグ中には、現場での操業条件によってはマトリックス相中にMnOに富んだMnO-FeO-CaO-MgO系固溶体が析出することが指摘されているが、本研究ではスラグはTable 1に示すように基本的に2種類の結晶相で構成されていると仮定した。

本論文では、脱リンスラグの磁気分離残渣スラグの脱リンプロセスへのリサイクルが、脱リン剤投入量およびスラグ排出量に対してどのような波及効果を及ぼすかについて分析することとした。検討するプロセスをFig. 2に示す。まず、1チャージ目の溶銑に通常操業と同様にFeOおよびCaOを投入し、脱リンスラグが生成する場合を考える。払い出し後の脱リンスラグを、廃棄せずに磁気分離に供し、リン濃縮相を回収する。残渣スラグには、脱リン能を確保するためにFeO、CaOを必要量添加し、次チャージの脱リン剤として全量リサイクルする。2チャージ目の脱リン終了後、スラグを廃棄する。このように溶銑2チャージ分を1つのプロセスと考えるので、既存の脱リンプロセス2回分を比較対象とする。これら2つプロセス(a)、(b)におけるFeO、CaO、スラグ排出量を定量的に検討した。

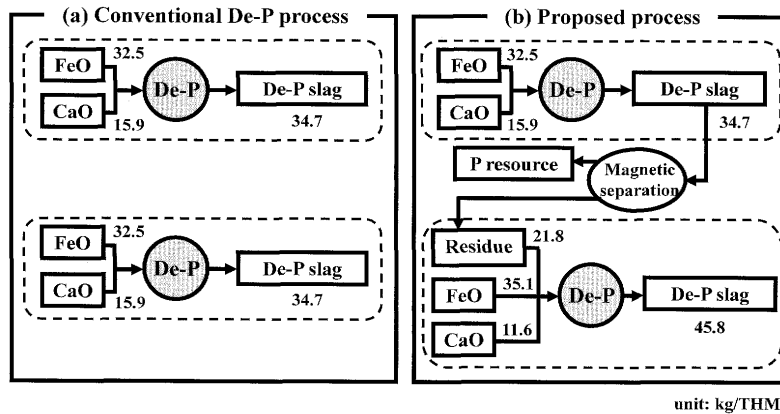
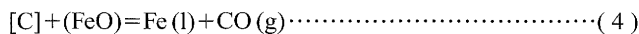
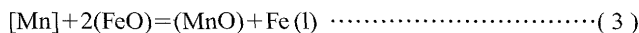
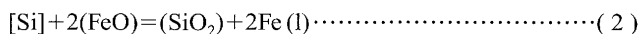
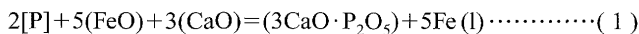


Fig. 2. Schematic process flow diagram of (a) conventional hot metal dephosphorization process and (b) proposed process of residual slag recycling.

3. 計算方法

3.1 通常の脱リン処理における物質収支

本研究では、脱リン前後の溶銑成分変化を高炉メーカー各社の実績を参考にして Table 2 のように設定し、1 チャージ目の溶銑脱リンの結果、前報で磁気分離実験に使用した Table 1 の組成のスラグが発生する場合を仮定した。前提条件として、スラグ-メタル間で以下の4成分の酸化反応のみが化学量論的に進行し、飛散ロスや蒸発等が起こらないと仮定すると、Table 2 の溶銑成分変化と物質収支より、1 チャージ目のスラグ生成量が計算できる。



ここで、[], () はそれぞれ溶銑中およびスラグ中の成分を表し、簡略化のためにスラグ中の酸化鉄は全て化学量論組成の FeO として扱った。なお、MgO は Table 1 に示す平均濃度まで炉壁耐火物からスラグ中に溶解するものとした。また、第一近似として、熱バランスは考慮しないことにした。以後の計算では、スラグ発生量、副原料投入原単位を全て溶銑 1t 当たり (THM: Ton Hot Metal) で表記することにする。

スラグの脱リン能を確認するために、本研究では小川ら¹³⁾によって提案されている溶銑予備処理プロセスにおけるリン分配に関する実験式を適用した。小川らの式を(5)式に示す。

$$\begin{aligned} \log(\text{mass\%P})/[\text{mass\%P}] &= 2.5 \log(\text{mass\%T.Fe}) + 0.0175\{(\text{mass\%CaO}) \\ &+ 0.25(\text{mass\%MgO})\} + 7710.2/T - 8.55 \\ &+ (105.1/T + 0.0723)[\text{mass\%C}] \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

Table 2. Calculation condition of hot metal composition before and after the dephosphorization process.

	[mass%]				
	C	Si	Mn	P	S
before de-P	4.40	0.15	0.25	0.12	0.03
after de-P	4.20	trace	0.18	0.02	0.03

この式の導出に用いられたスラグ組成は、塩基度 0.9~2.5、CaO 濃度 15~50 mass%、FeO 濃度 10 mass% (高塩基度)~45 mass% (低塩基度) の範囲であり、本研究で対象とした Table 1 のスラグはこの式の適用範囲内にある。脱リン処理温度を $T=1573K$ として、Table 1 のスラグ組成を代入すると、溶銑中のリン濃度は 0.002 mass% と計算され、このスラグが Table 2 に示す処理後のリンレベル、0.02 mass% を十分達成できることが確認された。

3.2 残渣スラグの組成および生成量

残渣スラグリサイクルによる脱リン処理、すなわち Fig. 2 の (b) のプロセスにおける2回目の脱リンでは、脱リン剤として磁気分離残渣スラグに加え、FeO、CaO を投入する。当然のことながら、残渣スラグの組成および生成量は、磁気分離処理に供する脱リンスラグの性状と磁気分離の効率によって異なってくるが、リン資源の回収、および残渣スラグリサイクルといういずれの観点でも、磁気分離回収物中にリンが多く含まれることが望ましい。そこで、まず前報⁷⁾において Table 1 に示したスラグを用いて得られた、磁場強度 2.5 T、分離回数 5 回における磁気分離実験の実績 (Table 3) を基に、残渣スラグの組成と生成量を設定した。すなわち、この条件では、リン回収率として約 60%、回収されたリン濃縮相中へのマトリックス相の混入率は約 8% が達成されている。Table 1 および Fig. 3 に示すように、本スラグはリン濃縮相 56.2% とマトリックス相 43.8% から構成されていたので、この条件で生成する残渣スラグは、リン濃縮相の 40% (=100%-60%) とマトリックス相 92% (=100%-8%) の混合物として生成することになる。残渣スラグの組成は Table 3 に示すように定量されているので、

Table 3. Composition of the recovered and residual slags after the magnetic separation process of dephosphorization slag for phosphorus recovery.⁷⁾

	mass ratio against initial slag (%)	ratio against initial P phase (%)	ratio against initial M phase (%)	composition (mass%)					
				Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	MnO	MgO
Recovered slag	37.2	60	8	4.4	10.7	57.3	25.3	0.8	1.4
Residual slag	62.8	40	92	26.2	4.4	39.1	17.3	3.7	8.1

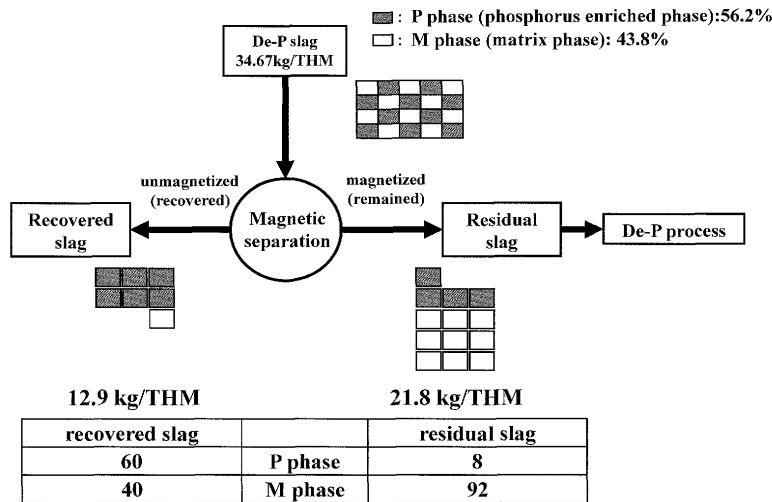


Fig. 3. Schematic process flow diagram of the magnetic separation of dephosphorization slag for phosphorus recovery,^{5,7)} showing the phase ratio of phosphorus enriched phase (P-phase) and matrix phase (M-phase) in the recovered slag and residual slag.

その生成量は3・1の手順で求められる1チャージ目のスラグ発生量より計算することができる。このように、残渣スラグの組成と生成量は、スラグの構成相が既知であれば、リン回収率とリン濃縮相の残留率をパラメーターとして記述できる。なお本論文では、残渣中へのリン濃縮相の残留率を、リン回収の対象となる初期脱リンスラグ中のリン濃縮相の存在量に対する残渣中に残ったリン濃縮相の割合(重量比)とし、 ϵ で表すことにする。

3.3 残渣スラグを用いた脱リン処理における物質収支

残渣スラグのみでは酸化剤であるFeOが不足して(1)~(4)式の反応を所定濃度まで進行させることができないため、FeOおよびCaOの追加投入が必要である。そこでFeOおよびCaOの追加投入量を変数とし、3・1で述べた方法と同様に、後述する拘束条件の下で、Table 2の溶銑成分変化、残渣スラグの初期組成、(1)~(4)式による物質収支および(5)式を連立させて解くことにより、FeOおよびCaOの追加投入量およびスラグ発生量を計算することができる。この時、生成するスラグが溶銑中の最終リン濃度0.02 mass%を達成するように、(5)式から計算される[mass%P]が0.02以下になるようにスラグ組成を求めた。また、スラグの最終組成範囲が小川ら¹³⁾の実験組成および現場脱リンスラグの組成範囲から大きく逸脱しないよう、

スラグの最終塩基度(mass%CaO)/(mass%SiO₂)を2.5に固定し、CaO濃度15~50 mass%、FeO濃度を15~32 mass%の範囲内に限定した。さらにスラグ中のP₂O₅が極端に高くなると、スラグから溶銑への復リンが懸念されるため、本研究ではスラグ中のP₂O₅濃度の上限値を7 mass%と設定した。なお、熱収支と反応速度は考慮していない。

4. 計算結果および考察

4.1 副原料投入量およびスラグ発生量の削減効果

1チャージ目の既存の脱リンプロセスにおけるスラグ原単位をTable 4にまとめた。FeOとCaO投入量は、それぞれ32.5 kg-FeO/THM、15.9 kg-CaO/THMと求められ、スラグ発生量は34.7 kg-slag/THMと見積もられた。既存の脱リンプロセスでは、2チャージ目の脱リンにおいても、1チャージ目と同じ副原料投入量、スラグ発生量となるので、残渣リサイクルの場合との比較では、FeOとCaO投入量およびスラグ発生量は、それぞれ65.0 kg-FeO/THM、31.8 kg-CaO/THM、69.3 kg-slag/THMが基準となる。なお、一連の酸化反応でスラグから還元されて溶銑中に移行するFe(I)は20.4 kg-Fe/THMであり、(1)~(4)式の酸化反応によって溶銑から除去されるリン、シリコン、マンガン、炭素の

Table 4. Calculated results on the recycling effect of residual slag to hot metal dephosphorization process on FeO and CaO inputs and slag generation.

		(a) conventional process	(b) proposed process	(b)-(a)
2 charges total	FeO input	65.0	67.7	+2.7
	CaO input	31.8	27.5	-4.3
	slag generation	69.4	45.8	-23.6
average per unit charge	FeO input	32.5	33.9	+1.4
	CaO input	15.9	13.8	-2.1
	slag generation	34.7	22.9	-11.8

unit: kg/THM

Table 5. Effect of entrainment ratio of P-phase in the residual slag on the amount of slag generation and flux inputs in the proposed process.

Entrainment ratio of P phase in the residual slag, ϵ (%)	ratio against initial M phase (%)	residual slag						dephosphorization of 2nd charge by using residual slag							
		composition (mass%)						composition (mass%)					slag generation (kg/THM)	flux input (kg/THM)	
		FeO	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	CaO	SiO ₂	MnO	MgO		FeO	CaO
40	92	26.2	4.4	39.1	17.3	3.7	8.1	31.8	37.9	15.2	4.3	3.8	22.9	35.1	11.6
30		28.7	3.6	37.0	16.3	4.1	8.9	31.4	37.7	15.1	4.7	4.1	21.3	33.9	11.4
20		31.8	2.7	34.5	15.2	4.5	9.8	30.9	37.6	15.0	5.0	4.5	19.6	32.7	11.3
10		35.6	1.6	31.3	13.8	5.0	11.0	30.3	37.4	15.0	5.5	4.9	18.0	31.5	11.2

量は、トータルで5.2kg/THM (P: 1.0kg-P/THM, Si: 1.5kg-Si/THM, Mn: 0.7kg-Mn/THM, C: 2.0kg-C/THM)と計算された。すなわち、脱リン処理前後で、溶銹量は15.2kg/THM (=20.4-5.2)増加することになる。この増加量は溶銹1tに対して約1.5%と小さいので、本研究では溶銹量変化は無視できると仮定した。

残渣スラグの組成と生成率を Table 3 に示したが、磁気分離に供する1チャージ目のスラグ発生量が34.7kg-slag/THMと求められたので、磁気分離後の残渣スラグの生成量はスラグ発生量の62.8%として、21.8kg-residue/THMと見積もられた。

残渣スラグのリサイクル効果の計算結果を Table 4 中に示した。溶銹2チャージ分を評価対象にしているため、最終的なFeO投入量、CaO投入量、スラグ発生量は1チャージ当たりの平均値で表記した。Table 3 に示した前報⁷⁾での磁気分離実験において発生した残渣スラグをリサイクルした場合、酸化力を補償するために投入するFeO量がわずかに増加するものの、CaO投入量およびスラグ排出量は低下するという結果が得られた。その削減量は11.8kg-slag/THMであり、通常の脱リンプロセスに対する削減率は34%である。

残渣リサイクルによる副原料投入量およびスラグ発生量の削減効果は、前段の磁気分離効率に依存する。そこで、同様の手順に手、磁気分離によるリンの回収効率が向上した場合の残渣リサイクル効果を計算した。まず前報での磁気分離実験結果を踏まえ、残渣中に含まれるFeO-CaO-SiO₂(-MnO-MgO)系マトリックス相 (Table 1 のM相) は初期スラグ中に存在した量の92%一定とし、ここに残留するリン濃縮相の割合を、Table 3 および Fig. 3 に示した ϵ

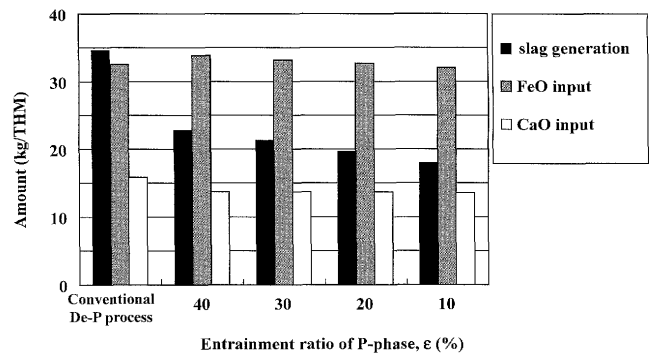


Fig. 4. Reduction of slag generation by the recycling of residual slag after the magnetic separation of dephosphorization slag for phosphorus recovery.^{5,7)}

=40%の場合から、10%毎に低下させて残渣スラグ組成を設定した。これらの残渣スラグ組成を Table 5 に示す。これらの残渣スラグをリサイクルした場合の副原料投入量およびスラグ発生量を同様の手順で計算した。結果を Fig. 4 に示す。CaO添加量は、残渣スラグ中に含まれるCaO量がほぼマトリックス相の組成で決まってしまうため、ほぼ一定値であるが、FeO投入量はリン濃縮相の残留率 ϵ が低下するに従って減少する。いずれの分離率においても残渣リサイクルを導入しない場合に比べてスラグ排出量は大幅に削減でき、リン濃縮相の残留率が10%では、スラグ発生量削減率が48%にも達する。

脱リンスラグからのリン濃縮相の回収は、リンの新たな資源確保という視点から重要である。これに加えて、残渣スラグリサイクルは、溶銹処理用フラックス副原料投入量およびスラグ発生量の削減効果をもたらすことが、定量的に示された。

4.2 スラグからのリン回収と残渣リサイクルによる波及効果

前報⁵⁾では、脱リンスラグから回収したリン濃縮物をリン鉱石代替物として肥料・化学工業に供給した場合の波及効果分析を行った。一方、本研究で明らかにしたように、リン回収後の残渣リサイクルは副原料投入量やスラグ発生量を削減し、鉄鋼業自身のアクティビティに対する影響も小さくないことが予想される。そこで本研究で得られた知見を基に、スラグからのリン回収と残渣リサイクルが実際に導入される場合を想定し、その時の経済波及効果と環境負荷低減効果について、廃棄物産業連関モデル^{9,10)}を用いてシナリオ分析を行った。計算には以下の仮定をおいた。

1. リン濃縮相の60%とマトリックス相の8%をリン資源として回収する。
2. 脱リンスラグから回収されるリン資源は、その組成および価格をリン鉱石と同等とする。
3. リン回収物の国内輸送は、リン鉱石輸入量の削減による輸送量低下分と相殺され、新たな輸送負荷は生じない。
4. リン酸製造工程はリン回収物が導入されても変化しない。
5. 磁気分離装置などの新規インフラ設備の建設および運転による負荷は無視できるとする。

以上のような仮定の下に、産業連関表でカバーされている約400部門に上る我が国のほぼ全ての産業部門にわたって波及効果を分析した。

モデル計算の結果、多くの部門で消費や廃棄物発生量の減少が認められた。これらのうち、特に大きな波及効果が認められた4部門、すなわち窯業原料鉱物部門（石灰およびリン鉱石）、無機化学製品、CO₂排出量、最終処分量

（処分場体積）の各部門における我が国全体での変化量をFig. 5に示す。窯業原料鉱物部門での生産活動は、本提案プロセスの適用によって顕著な減少を示した。例えば、磁気分離プロセスによる残渣中へのリン濃縮相の残留率が10%のとき、リン鉱石の輸入量削減による控除に伴い、窯業原料鉱物部門は-6%もの大幅な減少を示した。これは金額ベースで約91億円に相当する。また、CO₂排出量および埋め立て処分場体積についても削減効果がかなり大きく、 ϵ が40%の時、CO₂排出量は-0.013%（CO₂重量換算で-38 kt-CO₂）、最終処分量削減量は-1.56%（体積換算で-10,310 m³）となった。リン濃縮相の残留率が10%に向上すると、CO₂排出量は-0.018%（-54 kt-CO₂）、最終処分量-2.21%（-14,619 m³）と推定され、残渣へのリン濃縮相の残留率が低下するほど、すなわち脱リンスラグからのリン回収率が高くなるほど、その削減効果が大きいことが示された。このように、本法の活用は環境負荷を大幅に減少させることが示された。磁気分離効率が向上すればこれらの効果はさらに大きくなる。

5. 結論

著者が前報で示した磁気分離法による溶銹脱リンスラグからのリン回収後の残渣スラグを対象に、これを溶銹脱リンフラックス原料としてリサイクルした場合の副原料投入量およびスラグ発生量削減効果を物質収支に基づいて定量評価した。また、磁気分離法導入によるリン回収と残渣スラグリサイクルの経済波及効果と環境負荷低減効果について廃棄物産業連関表を用いたシナリオ分析を行った。本研究で得られた結論は以下通りである。

(1) 残渣スラグの脱リンプロセスへのリサイクルによってCaO投入量およびスラグ発生量を削減でき、残渣スラグへのリンの残留率が40%以下の低い場合には、さらにFeO投入量も削減できる。

(2) リン濃縮相のリン濃度が高いほどFeO投入量、CaO投入量、スラグ発生量の削減が見込まれ、高品質リン資源の獲得、副原料投入量およびスラグ発生量の削減の両面から、脱リンスラグ中のリン濃縮相のリン濃度を高める条件を調査することが重要である。

(3) 本法は、特に石灰やリン鉱石などの資源投入量、CO₂発生量、埋め立て処分量の削減に有効である。

本研究の遂行にあたり、有益な御助言を賜った日本鉄鋼協会マルチフェーズフラックス研究会（主査：月橋文孝東大教授）の委員各位、並びに入江章太氏（現東北大学大学院環境科学研究科修士課程）に深く感謝申し上げます。本研究の一部は（独）科学技術新興機構、戦略的創造研究推進事業・社会技術研究（公募型プログラム「循環型社会」）および平成18~20年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究B、課題番号18360433）の御援助を受けた。付記し

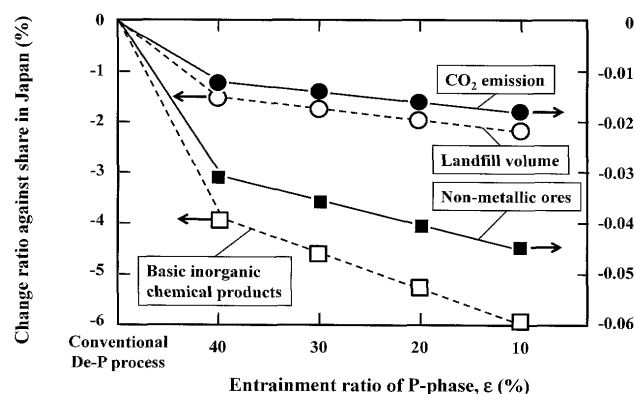


Fig. 5. Effect of phosphorus recovery from hot metal dephosphorization slag and recycling of residual slag to dephosphorization process on the economic activities in Japan calculated by the Waste Input-Output model^{5,9,10)} where ϵ denotes the entrainment ratio of P-phase in the residual slag. Units of CO₂ emission and landfill volume are ton-CO₂ and m³, respectively and those of non-metallic ores and basic inorganic chemical products are both million Japanese Yen.

て謝意を表します。

文 献

- 1) P.H.Abelson: *Science*, **283** (1999), 2015.
- 2) K.Christen: *Environ. Sci. Technol.*, **41** (2007), 2078.
- 3) H.Kubo, K.Yokoyama, K.Nakajima, S.Hashimoto and T.Nagasaka: *J. Env. Eng. Manag.*, **18** (2008), 47.
- 4) K.Matsubae-Yokoyama, H.Kubo, H.Ohtake and T.Nagasaka: *Sociotechnica*, **5** (2008), 106.
- 5) K.Yokoyama, H.Kubo, K.Mori, H.Okada and T.Nagasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 683.
- 6) T.Futatsuka, K.Shitogiden, T.Miki, T.Nagasaka and M.Hino: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 753.
- 7) H.Kubo, K.Matsubae-Yokoyama and T.Nagasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **95** (2009), 300.
- 8) Nippon Slag Association: Statistics on Production and Uses of Steel Slag in Japan, 2007.
- 9) S.Nakamura and Y.Kondo: *J. Indust. Eco.*, **6**, (2002), No. 1, 39.
- 10) K.Yokoyama, T.Nagasaka and S.Nakamura: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **10** (2005), 862.
- 11) K.Yokoyama, H.Kubo, K.Nakajima, Y.-S.Jeong and T.Nagasaka: Proc. 3rd Int. Conf. Process Develop. Iron Steelmaking (Scanmet III), June 2008, Luleå, Sweden, MEFOS, 551.
- 12) Y.-S.Jeong, K.Matsubae-Yokoyama, H.Kubo, J.-J.Pak and T.Nagasaka: *Resour. Conserv. Recycl.*, 投稿中
- 13) Y.Ogawa, M.Yano, S.Kitamura and H.Hirata: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 21.