

(論文)

# スクラップ利用拡大を目的とした脱りん炉反応効率の改善

對馬 卓<sup>\*1</sup>・大内慶太<sup>\*1</sup>・中須賀貴光<sup>\*1</sup>(博士(工学))・大谷真也<sup>\*2</sup>・岩崎眞澄<sup>\*3</sup>・足立毅郎<sup>\*3</sup>

## Optimizing Reaction Efficiency of Dephosphorization Furnace to Expand Scrap Utilization

Takashi TSUSHIMA・Keita OUCHI・Dr. Takamitsu NAKASUGA・Shinya OTANI・Masumi IWASAKI・Takerou ADACHI

### 要旨

加古川製鉄所のCO<sub>2</sub>発生量削減を目的として、脱りん炉でのスクラップ利用拡大に着目し、その前段階として、脱りん反応効率向上に取り組んだ。化学工学的な観点より、(1) 溶銑/スラグ反応界面へのりん移動の促進、(2) スラグ巻き込み促進による反応界面積増加が有効と考え、脱りん炉における底吹ガス吹込手法(底吹パターン)の改善を試みた。まず、事前検討として水モデル実験により、内側羽口からのガス吹込流量が外側より大きい状態を、外側と均等に変更することがコンセプト実現に有効であることを確認した。ついで脱りん炉での実証試験により、狙いどおり、反応効率が向上することを確認した。本結果に基づき、脱りん炉の底吹パターン改善を進め、2025年3月に実装を完了した。

### Abstract

To reduce CO<sub>2</sub> emissions at Kakogawa Works, efforts have been made with a focus on expanding scrap utilization in the dephosphorization furnace and, as a preliminary step, on improving dephosphorization reaction efficiency. The following issues were addressed from a chemical engineering perspective: (1) promotion of phosphorus transfer to the hot-metal/slag reaction interface, and (2) improvement of the bottom-blowing gas injection method (bottom-blowing pattern) in the dephosphorization furnace, based on the notion that increasing the reaction interfacial area through enhanced slag entrapment would be effective. First, as a preliminary study, water model experiments confirmed that an effective means of realizing this concept is to switch from gas blow-in where the inner-tuyeres flow rate exceeds that of the outer tuyeres, to a uniform flow rate from the outer tuyeres. Next, a demonstration test in the dephosphorization furnace confirmed that the reaction efficiency improved as intended. On the basis of these results, the bottom-blowing pattern of the dephosphorization furnace was improved, and full-scale implementation was completed in March 2025.

### 検索用キーワード

加古川製鉄所, CO<sub>2</sub>削減, スクラップ利用拡大, 脱りん炉, 底吹パターン

ま え が き = 当社は製鉄プロセスのCO<sub>2</sub>削減ロードマップにおいて、2030年度に2013年度比で30~40%削減、さらに2050年度カーボンニュートラル(CN)の実現を掲げている。具体的な施策としては、高炉でのHBI(Hot briquetted iron, 熱間成形還元鉄)やバイオマスの活用とならび、既存製鉄プロセスにおけるスクラップ利用拡大が重要な位置づけを占める。スクラップ利用拡大のためには、製鋼工程である脱りん炉および転炉での投入量を高める必要があるが、脱りん炉での単純なスクラップ増量は処理後の溶銑(ようせん)炭素濃度を低下させ、転炉での熱量不足を招く。溶銑炭素濃度の低下を抑制するためには、脱りん炉における反応効率を向上させて、

脱りん処理に必要な酸素量を低減する必要がある。

本稿では脱りん炉における反応効率向上を目的に、水モデル実験を用いて炉底羽口からのガス吹き込み手法(以下、底吹パターンという。)を改良し、実炉適用に至るまでの検討内容とその成果について報告する。

### 1. 脱りん炉反応効率改善の必要性

図1に加古川製鉄所における製鋼プロセス概要を示す。同所では、2010年代にプロセスの機能分担を強化し<sup>1)</sup>、転炉における脱炭処理に先立ち、転炉型脱りん炉による事前脱りん処理を行っている。図2に示すように、脱りん炉では炉内に装入した溶銑およびスクラップ

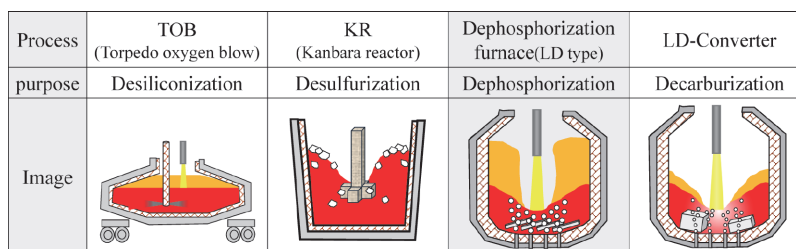


図1 加古川製鉄所における製鋼プロセスフロー  
Fig.1 Schematic flow of steelmaking process in Kakogawa Works

<sup>\*1</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 製鋼開発部 <sup>\*2</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 製鋼部 <sup>\*3</sup> 技術開発本部 材料研究所

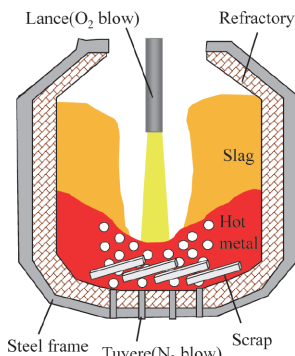


図2 脱りん炉の概要  
Fig. 2 Schematic of dephosphorization furnace

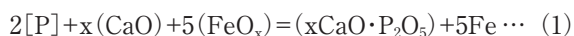
に上方から酸素を吹き付けながら、炉底に配置した10個の羽口から窒素ガスを吹き込むことで、溶銑/スラグを攪拌（かくはん）し、脱りん反応を進行させる。

脱りん炉でのスクラップ投入量を増やすと、相対的に溶銑比率が低下するため、投入原料全体の炭素量が減少する。この状態で、同じ酸素供給量での脱りん処理を行うと、処理後の溶銑炭素濃度が現状以上に低下し、後工程である転炉での脱炭反応に伴う発熱量が不足する。その結果、転炉における昇熱剤（フェロシリコンなど）の使用量増加によるコストの上昇を招く。

したがって、製鉄所でのCO<sub>2</sub>削減に向けて、脱りん炉でのスクラップ利用拡大と転炉での昇熱コスト抑制を両立するためには、脱りん炉の反応効率を高めて酸素量を低減し、処理後の溶銑炭素濃度を現状と同等レベルに維持することが不可欠である。

## 2. 脱りん炉反応効率改善のコンセプト

脱りん炉および転炉など、酸化精錬における脱りん反応は反応サイトであるメタル/スラグ界面でメタル中のりん[P]がスラグ中の酸化鉄(FeO<sub>x</sub>)で酸化されるとともに、同じくスラグ中の(CaO)により固定化される反応であり、便宜上、式(1)の形で表される。<sup>2), 3)</sup>



(ここで[P]はメタル成分、()はスラグ成分を示し、x=3もしくは4である。)

化学工学的な観点から脱りん炉における反応メカニズムを考えた場合、脱りん反応効率向上のためには、図3に示すとおり、A：反応サイトである溶銑/スラグ界面への溶銑りん移動を促進させる、B：溶銑へのスラグ巻き込み促進などにより、溶銑/スラグの界面積を増加させる、という二つのコンセプトが有効と考えられる。本稿ではコンセプトA、Bを実現する手段として、底吹パターンの改善が効果的であると判断し、まず、水モデル実験による検証を試みた。水の比重は1.0 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>であり、溶銑の比重7.0 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>と比較すると大きく異なるが、「液体の動きやすさ」を示す動粘度(=粘度(Pa)／比重(kg/m<sup>3</sup>))はおおむね同じ値である。さらに水は取り扱いが容易で、危険性が少ないこと、透明であるため流動を可視化しやすい利点などもあり、溶銑の模擬流体としてよく利用される<sup>4), 5)</sup>。

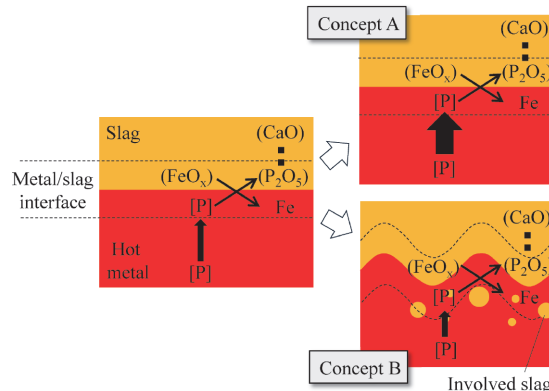


図3 脱りん反応メカニズムと効率改善コンセプト  
Fig. 3 Mechanism of dephosphorization reaction and concept of efficiency improvement

## 3. 実験方法

### 3.1 水モデル容器の概要

図4および表1に本実験で使用した水モデル容器(透明アクリル製)の概要と吹込孔配置を示す。容器底部に脱りん炉の底吹羽口を模擬した計10個のガス吹込孔(φ3 mm)を中心からφ104 mm、φ220 mmの同心円上にそれぞれ4個および6個ずつ設置した。φ104 mm同心円上に設置した吹込孔(No.2, 5, 6, 9)を「内側吹込孔」、φ220 mm同心円上に設置した吹込孔(No.1, 3, 4, 7, 8, 10)を「外側吹込孔」と定義する。吹込孔ごとに流量計を設置しており、流量の個別制御が可能である。なお、均一混合時間測定(3.2節)、溶銑/スラグ混合模擬実験(3.3節)を実施したが、どちらも同じ水モデル容器を用い、水浴深さは180 mm(水：約50 l)、吹込ガスは空気とした。

### 3.2 均一混合時間測定

溶銑流動におよぼす底吹パターンの影響を評価するため、水モデル実験において均一混合時間を評価した。均一混合時間とは、液体中に特定成分を添加した場合に、攪拌混合によって全体の濃度が一定となる時間を示し、化学工学分野では、混合状況を表す指標としてよく使用される<sup>6)</sup>。均一混合時間が短いほど、図3(コンセプトA)で示したとおり、脱りん反応サイトである溶銑/スラグ界面への溶銑りん移動が促進されると考えられる。

図5に均一混合時間測定の概要を示す。吹込孔から水浴に空気を吹き込んで攪拌した状態において、吹込孔4の横に配置したシリンジから水浴表面に飽和KCl水溶液5 ml(40%KCl)を添加し、吹込孔2上部に深さ100 mmの位置に浸漬した導電計を用いて水浴導電度の経時変化を連続測定した。測定時間は飽和KCl溶液の投入後から5 minとし、均一混合時間は実験終了時点の導電度を100%としたとき、導電度が95%~105%の範囲内で収束する時間と定義した<sup>7)</sup>。

表2に均一混合時間測定で使用した底吹パターンを示す。吹込孔10個のうち、内側吹込孔からのガス流量が多い「傾斜パターン」(パターンA)、全吹込孔から同流量を流す「均等パターン」(パターンB)の2種を用い、ガス流量を10~200 NI/minの範囲で変化させて均一混

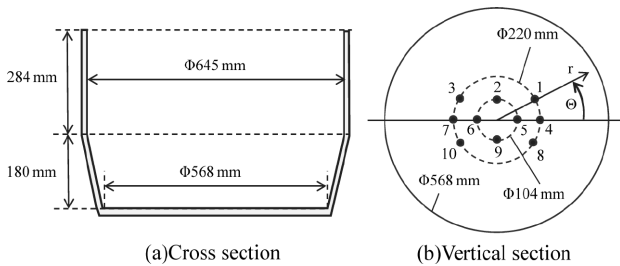


図4 水モデル容器の概要  
Fig.4 Schematic of water model cell

表1 水モデル容器におけるガス吹き込み孔の配置  
Table 1 Gas blow hole arrangement of water model cell

Number	r(mm)	Θ(deg)	Number	r(mm)	Θ(deg)
1	220	30	6	104	0
2	104	90	7	220	0
3	220	120	8	220	330
4	220	0	9	104	270
5	104	0	10	220	210

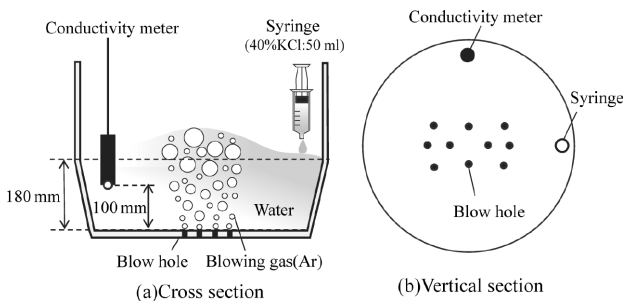


図5 均一混合時間測定の概要  
Fig.5 Overview of mixing time measurement

表2 均一混合時間測定におけるガス流量比率 (1孔あたり)  
Table 2 Gas blow rate ratio in mixing time measurement (per hole)

Hole number	Gas blow rate ratio(%)	
	Bottom blowing pattern	
	A	B
1,3,8,10	9	10
2,5,6,9	13	10
4,7	6	10

合時間 (n=3 平均) を測定した。

加古川製鉄所の脱りん炉では、耐火物保護のために定期的に補修を実施しているが、投入した補修材が内側に流れることで、外側羽口の直上に留まる補修材が少なく、損傷が大きくなる傾向がある。このため、従来は外側羽口の保護のため、外側羽口の吹込ガス流量が内側より低い傾斜パターンを採用せざるを得なかった。しかし、現在では耐火物補修技術の改善により、外側羽口の流量を内側羽口同等まで上げることが可能である。

### 3.3 溶銑/スラグ混合模擬実験

本稿では図3 (コンセプトB) に示す溶銑中へのスラグ巻き込み挙動におよぼす底吹パターンの影響を評価するため、水モデルによる溶銑/スラグの混合模擬実験を実施した。図6に実験概要を示す。水浴表面に水より比重の小さいスラグ模擬材を静置し、吹込孔から空気を吹き込んで攪拌することで、水浴中に巻き込まれた模擬

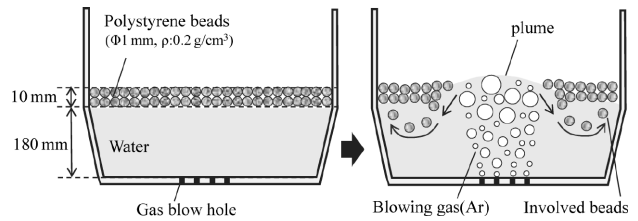


図6 メタル/スラグ混合模擬試験の概要  
Fig.6 Overview of metal/slag mixing simulation

表3 メタル/スラグ混合模擬試験におけるガス流量比率 (1孔あたり)  
Table 3 Gas flow rate ratio in metal/slag mixing simulation (per hole)

Hole number	Gas blow rate ratio[%]		
	Bottom blowing pattern		
	A	B	C
1,3,8,10	9	11	10
2,5,6,9	13	11	10
4,7	6	6	10

材量を測定した。

一般的な水モデル実験では、製鋼スラグ (真比重  $3.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  程度) の模擬材として、比重  $0.6 \sim 0.8 \text{ kg/m}^3$  のシリコンオイルやn-ペンタンが広く用いられている<sup>8), 9)</sup>。しかし、脱りん炉や転炉のような酸化精錬では、スラグ中の  $\text{FeO}_x$  と溶銑中炭素の反応により  $\text{CO}$  ガスが発生し、スラグがフォーミングすることで見掛け比重が低下することが想定される<sup>10)</sup>。本稿ではスラグ巻き込み挙動は溶銑とスラグの比重差に強く依存すると考え、フォーミングによるスラグの見掛け比重低下を考慮する必要があると考えた。そこで、フォーミング状態のスラグを再現するために、見掛け比重がより小さいポリスチレンビーズ ( $\phi: 1.0 \text{ mm}$ ,  $\rho: 0.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) を採用し、溶銑模擬材である水との比重差を大きくした。

混合模擬実験では、均一混合時間測定で用いた傾斜パターン、均等パターンに加え、両者の中間パターンを加えた3種の底吹パターンを用いてガス流量:  $85 \text{ Nl/min}$  の条件における水浴への粒子巻き込み量を評価した。表3に示すとおり、傾斜パターン、中間パターン、均等パターンをそれぞれ  $\alpha, \beta, \gamma$  パターンと定義する。

なお、粒子巻き込み量は National Institute of Health (NIH: (米) 国立衛生研究所) が作成したフリーソフトである ImageJ を用い、以下の手法により定量化した。

#### <粒子巻き込み量の定量化手法> (図7)

- ①実験中 (n=2) に水モデル側面から撮影した動画 (1 ~ 2 min) から約 0.4 s 間隔で静止画像を切り出す (a)。
- ②各画像のグレースケール化後 (b)、バックグラウンドを差し引き、二値化処理を実施する (c)。
- ③気柱領域 (吹込ガスにより激しく攪拌される領域) から外れた位置に解析領域 ( $67.4 \text{ cm}^2 \times 2$  箇所) を設定し、ImageJ の Analyze Particles 機能 (粒子解析) を用いて解析領域に巻き込まれた粒子個数をカウントする。
- ④実験 (n=2) で撮影した動画から切り出した全ての静止画像の粒子個数を平均することで平均巻き込み粒子数を算出する。

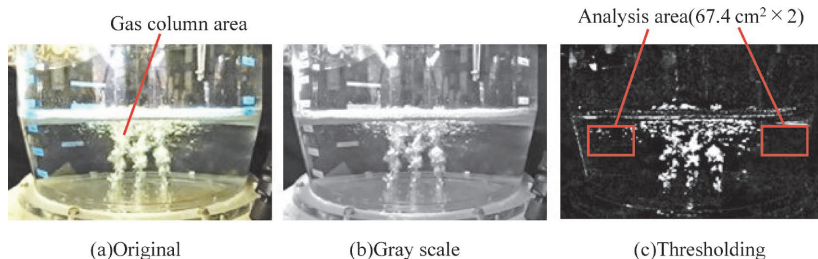


図7 画像解析による巻き込み粒子評価の概略  
Fig.7 Schematic of involved particle evaluation by image analysis

上記手法では、水浴内に巻き込まれたポリスチレンビーズと気泡を厳密に区別できず、評価値は双方を合算した値となるが、ビーズ+気泡の合算値でもスラグの「巻き込みやすさ」を定性的に評価できると考えた。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 均一混合時間測定

図8に傾斜パターンおよび均等パターンにおける均一混合時間と底吹ガス総流量の関係を示す。両パターンとも底吹ガス総流量が増加するに伴い、水浴がより強く攪拌されるため、均一混合時間は短くなるが、総流量が同じでも外側と内側の流量が等しい均等パターンの方が均一混合時間は短く、水浴の混合が効率的に進む。

傾斜パターンと比較して均等パターンの均一混合時間が短くなる原因として、図9に示すイメージのとおり、外側吹込孔からのガス流量増加に伴い、気柱領域が外側に広がることで、死水領域（流動が起こらない、あるいは極端に弱い領域）が縮小した可能性が考えられた。

本仮説の検証に必要な気柱領域サイズの定量化を目的として、ガス流量85 NL/minの条件における均一混合時間の測定中に水モデル容器側面から撮影した動画を用いて画像解析を実施した。なお、円筒型の水モデル実験では水浴の揺動・旋回が生じることが報告されており<sup>11), 12)</sup>、本測定でも全ての実験条件において水浴が約1 s周期で揺動・旋回した。このため、動画から0.1 s間隔で揺動・旋回の約2周期分となる20枚（2 s）の静止画像を切り出し、図10に示す方法で気柱領域の面積を定量化し、その平均値を気柱領域サイズとした。

図11に示した気柱領域サイズの比較より、前述の仮説どおり、均等パターンの気柱領域は傾斜パターンより大きいことが確認された。この原因としては、気柱領域が大きくなることで死水領域が縮小し、均一混合時間が短くなったものと考えられる。

##### 4.2 溶銚/スラグ混合模擬実験

図12に3種の底吹パターンにおける平均巻き込み粒子数を示す。平均巻き込み粒子数は、均等パターン>中間パターン>傾斜パターンの順に多く、外側吹込孔からのガス流量を増加させるほど、巻き込み粒子数が増加した。この理由としては、図13に示すイメージのとおり、外側吹込孔からのガス流量増加にしたがい、メタル/スラグ界面に相当する水/ビーズ界面におけるせん断的な流れが強くなることで、ビーズおよび気泡を水浴中に巻き込みやすくなったものと考えられる<sup>13), 14)</sup>。

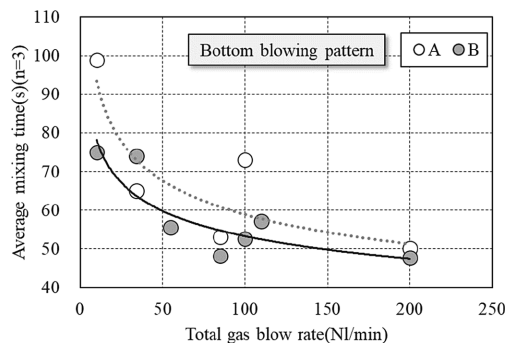


図8 均一混合時間と底吹ガス流量の関係  
Fig.8 Relationship between mixing time and bottom blowing gas rate

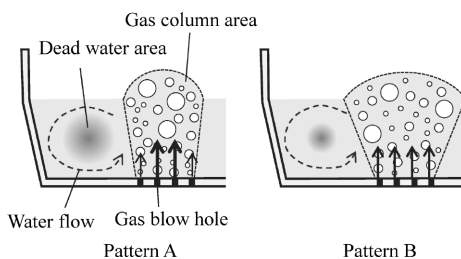


図9 気柱領域の広がりに伴う死水領域縮小のイメージ  
Fig.9 Image of shrinking dead water area caused by expansion of gas column

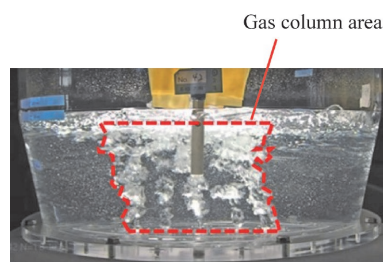


図10 画像解析による気柱領域測定概略  
Fig.10 Schematic of gas column area measurement by image analysis

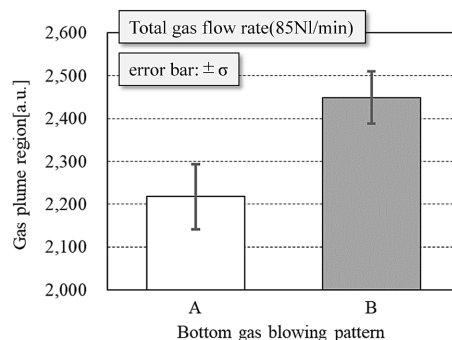


図11 気柱領域に及ぼす底吹きパターンの影響  
Fig.11 Effect of bottom blowing pattern on gas column area

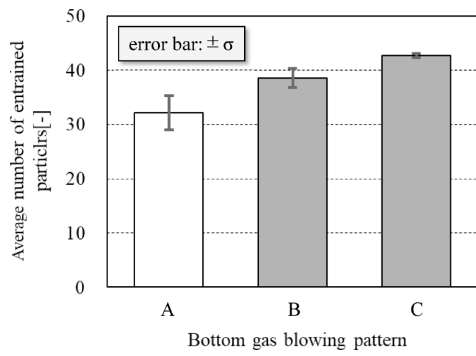


図12 メタル/スラグ混合模擬実験における平均巻き込み粒子数  
Fig.12 Average number of involved particles in metal/slag mixing simulation

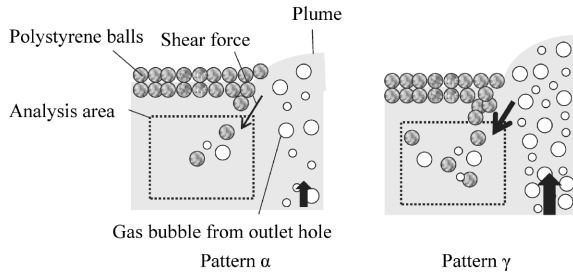


図13 プルームにおける粒子巻き込みイメージ  
Fig.13 Image of involved particles at plume

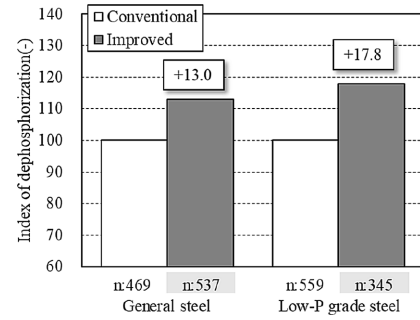


図14 実機試験における脱りん指数の改善（スクラップなし）  
Fig.14 Improvement of dephosphorization index in actual process experiment (without scrap)

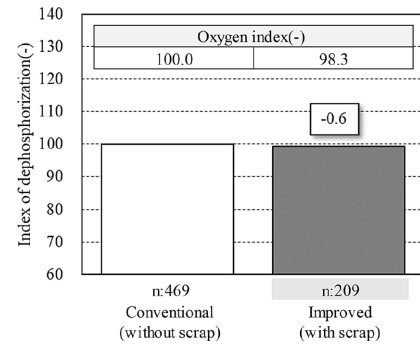


図15 一般鋼における脱りん指数の変化  
Fig.15 Dephosphorization index in commodity steel

## 5. 実機脱りん炉における底吹パターン改善

水モデル実験により、現状の脱りん炉を模擬した傾斜パターンを均等パターンに変更することで、溶銑/スラグ界面へのりん移動（コンセプトA）、および溶銑へのスラグ巻き込み（コンセプトB）が、いずれも促進され、脱りん反応効率向上に寄与する可能性が示唆された。本知見をふまえて、加古川製鉄所の実機脱りん炉において、外側および内側羽口の底吹ガス流量を均等に近づけるテストを実施した。

実機テストでの改善効果は、一般鋼（製品規格上限りん濃度 > 0.02%）、低りん鋼（製品規格上限りん濃度 ≤ 0.02%）の2種類に分けて評価した。図14に従来底吹パターン（傾斜パターン）での脱りん効率を100とした指標で実機テスト結果を示した。いずれの鋼種も傾斜パターンから均等パターンに近づけることにより、狙いどおり、脱りん効率が向上した。本結果に基づき、実機テストで使用した新底吹パターンの脱りん炉適用を進め、2025年3月に実装が完了した。

新底吹パターンの実装後、当初計画どおり、底吹パターン改善で生まれた脱りん能力の余裕を活用し、スクラップ使用時の処理後炭素濃度を一定に保ちながら、脱りん炉における酸素量を低減（上吹酸素およびミルスケールなどの固体酸素の合計）するテストを実施した。図15に一般鋼における脱りん指数を示す。スクラップ増量時の処理後炭素濃度維持のために酸素量を低減しても、新底吹パターンを採用することで、ほぼ従来どおりの脱りん効率を維持できることが確認された。なお、スクラップ投入の必要がないヒートに対しては、従来の酸素量を維持しながら処理後りん濃度を低減し、次工程で

ある転炉でのスラグ量を低減することで製鉄所の操業コストダウンに寄与している。

むすび=当社CO<sub>2</sub>削減ロードマップの実現に向け、具体的方策の一つとして掲げる「スクラップ利用拡大」を目的に、前段階として必要となる脱りん炉の反応効率向上に取り組んだ。水モデル実験をベースとして浴内流動におよぼす「底吹パターン」の影響を明確化し、その知見に基づき、実機脱りん炉の底吹パターンを従来の内側羽口の流量が高い傾斜パターンから外側/内側のガス流量が等しい均等パターンに近づけた結果、反応効率向上を実現した。今後は本成果を最大限活用して、脱りん炉でのスクラップ増配を進めるとともに、引き続き、お客様・社会からのグリーン鋼材ニーズに応えるため、製鉄プロセスにおけるCO<sub>2</sub>発生量をさらに削減するための技術開発に努めていく。

## 参考文献

- 1) 齋藤幸介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.32-36.
- 2) 森下 仁ほか. 川崎製鉄技報. 1983, Vol.15, No.2, p.93-99.
- 3) 佐々木貫太郎ほか. 鉄と鋼. 1977, Vol.63, No.12, p.1801-1808.
- 4) 深澤 慧ほか. 混相流. 2013, Vol.27, No.2, p.168-174.
- 5) 藤川俊秀ほか. 鉄と鋼. 2009, Vol.95, No.6, p.515-521.
- 6) 浅井滋生ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.3, p.426-434.
- 7) 中西恭二ほか. 鉄と鋼. 1980, Vol.66, No.9, p.1307-1316.
- 8) 井口大亮ほか. 鉄と鋼. 2006, Vol.92, No.8, p.475-480.
- 9) 丸山明日香ほか. 鉄と鋼. 2011, Vol.97, No.10, p.519-524.
- 10) 三浦植也ほか. 鉄と鋼. 2024, Vol.110, No.2, p.41-50.
- 11) 小笠原太ほか. JFE技報. 2016, No.38, p.26-30.
- 12) 小坂洋介ほか. 鉄と鋼. 2004, Vol.90, No.6, p.379-386.
- 13) A. Senguttuvan et al. AIST Transactions. 2014, Vol.11, No.1, p.230-241.
- 14) 井口 学. 鉄と鋼. 2017, Vol.103, No.3, p.119-133.