

独立成分分析を利用した転炉脱リン吹錬制御技術の開発

New Refining Control for LD Converter Using Independent Component Analysis

富山 伸司 TOMIYAMA Shinji JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (課長)
内田 祐一 UCHIDA Yuichi 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)
前田 孝彦 MAEDA Takahiko JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 製鋼部製鋼技術室 主任部員 (副課長)

要旨

製鉄所における転炉設備では、高炉で生成した溶銑の不純物除去、成分と温度の調整が行なわれる。本開発では、転炉を使った溶銑中リン成分の除去処理 (転炉脱リン処理) に対して新制御系を構築し、その能力を検証した。新制御系は、過去処理の排ガス情報に基づいて推定したスラグ中 Fe_2O_3 濃度推定量を利用して、2 段階のステップで操作量を決定する。最初のステップでは、処理後のリン濃度が低くなるようなスラグ中 Fe_2O_3 濃度推移の目標パターンを生成する。この際には、過去処理ごとの計測誤差や未知変動要因の影響を低減するため、独立成分分析を用いてスラグ中 Fe_2O_3 濃度推移の特徴抽出を行なっている。2 つ目のステップではスラグ中 Fe_2O_3 濃度推移が目標パターンに近くなるように、操作量の決定を過去実績データに基づいて決定する。本制御系は実転炉設備に適用され、制御性能に関する検証試験が行なわれた。その結果、新制御系が処理後溶銑中リンの低位安定化に有効であることが確認された。

Abstract:

An LD converter is a widespread refining facility, which removes impurities from molten pig iron and adjusts the contents and temperature of hot metal to the requirements. JFE Steel developed new control algorithm for dephosphorization using an LD converter and evaluated the performance. The new control determines the control inputs based on Fe_2O_3 transition in the slag estimated using the information of the exhaust gas, and the algorithm is composed of two main steps. The first step creates target Fe_2O_3 transition in slag to lower the phosphorous content of the hot metal, applying independent component analysis to Fe_2O_3 transition to extract the feature of the pattern. The second step determines the control inputs to form the Fe_2O_3 pattern similar to the target based on the operation of the past heats. The new control was applied to an actual process and the result shows that the algorithm is effective to achieve low final phosphorous content of the hot metal.

1. はじめに

吹錬プロセスの主要設備である転炉は、高炉で生成された溶銑から不純物を取り除き、炭素や合金成分濃度および温度の調整を行なうものである。吹錬処理中は、炉内に吹き込まれた酸素により進行する激しい酸化反応のため、炉内溶銑の状態を連続して計測することが難しい。さらに計測により得られた値についても高温物を対象にしているため誤差が大きく、また計測誤差以外の様々な未知外乱や変動要因に影響されるため同じ条件でもプロセスの振る舞いが異なることも少なくない。これらの特性のため、高精度な転炉反応モデル、およびそれを用いた高精度な制御系を得ることは容易ではなかった¹⁾。

本開発では、過去の操業実績データを統計的に利用して

操作量を決定する転炉脱リン制御系を構築し、実機試験によりその能力検証を行なった。新制御系に用いた統計的処理により計測誤差や未知変動等の影響が小さくなり、良好な試験結果を得ることができた。本開発で得られた新吹錬制御系により、製品品質向上、お客様満足度向上、地球環境保全への貢献が期待される。

2. 転炉による脱リン処理

本開発で対象とするのは転炉による脱リン処理である。脱リン処理は転炉での脱炭処理前に溶銑中リン濃度を下げ予備的な処理であり、処理後の溶銑中リンが安定的に低くなるのが操業上望ましい。脱リン処理を事前に実施することにより、引き続き別の転炉を使って行なう脱炭処理において炉内に残存するリンを含んだスラグによる溶鋼の汚染や溶鋼の過酸化などを防ぐことができ、溶鋼の清浄度および

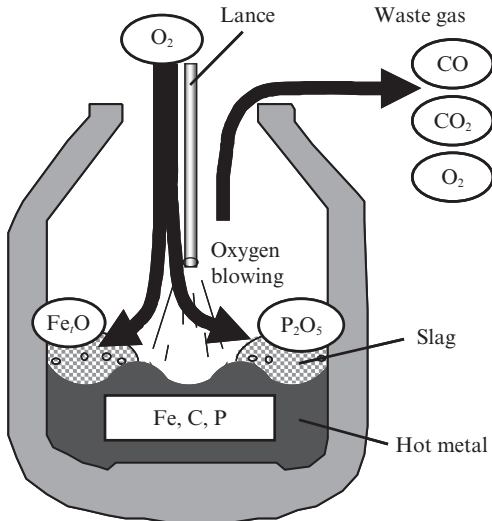


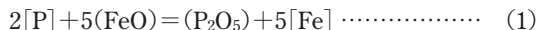
図1 転炉設備と脱リン処理

Fig. 1 LD converter and dephosphorization

び製品の品質が向上する。また脱リン処理によって、吹錬で生成するトータルスラグ量を低減することができるというメリットもある²⁾。

図1に示す転炉設備の概要図を用いて、転炉脱リン処理について以下に説明する。転炉脱リン処理では転炉上部からランスを通して炉内に酸素を吹き込み、溶銑中リンを酸化してスラグ中に取り込ませてリンを取り除く。吹錬制御の操作量には、ランスから吹き込む送酸速度のパターン、ランス高さのパターン、石灰などの副原料投入パターンなどがあり、これらの操作量パターンは、溶銑の成分や温度情報などに基づいて吹錬前に決定される。

(1)式はスラグ中 FeO による脱リン反応を表す式である。ここでは $t=1$ ，すなわち FeO が寄与する場合について示す。



(1)式において、[] は溶銑中の各成分、() はスラグ中の各成分を意味する。この式で示されるようにスラグ中 FeO 濃度は脱リン反応に直接関係しており反応進行に大きな影響を及ぼすため、この値を制御で活用することにより脱リン性能向上が期待できる。スラグ中 FeO 濃度を操業中に直接計測することは難しいが、その推移はプロセスに入出する各成分の質量収支から計算可能である。具体的には、処理前溶銑情報(重量, 成分), スクラップ投入情報, 副原料投入情報, および排ガス情報(流量, 成分)などの計測情報を使って、成分ごとのマスバランスが合うように溶銑中およびスラグ中の各成分量を推定することができる。上記推定計算によるスラグ中 FeO 濃度の精度をスラグサンプルの分析によって検証したところ、誤差が±5%以下であることが確認されている。

3. 新制御系の構成

本開発で対象とした操作量は送酸速度とランス高さであり、新制御系はこれらのパターンを吹錬処理開始前に生成する。この2種類の操作量は炉内反応に最も影響が大きく、スラグ中 FeO 濃度調整のため重要なものである。スラグ中 FeO 濃度は、脱リン処理終了後の溶銑リン濃度に大きな影響を与える。このため、処理後リン濃度が低くなるようなスラグ中 FeO 濃度パターンが得られれば、そのパターンを目標として操作量を決定することにより、処理後リン濃度を安定して低い値にコントロールできる可能性が高い。これらを考慮して新制御系は下記2段階のステップで構成することにした。

STEP1: 過去処理の実績データに基づいて、次回処理の目標スラグ中 FeO 濃度パターンを生成

STEP2: 過去処理のスラグ中 FeO 濃度, 操作量パターンと次回処理の目標スラグ中 FeO パターンに基づいて、次回処理の操作量パターンを決定

どちらのステップにおいても過去実績データを統計的に利用した処理が行なわれるが、これは計測誤差や未知変動要因による制御精度悪化を抑制することを目的としたものである。各ステップの具体的な処理内容について以下に説明する。

4. 目標スラグ中 FeO 濃度パターン生成方法

STEP1 で利用するスラグ中 FeO 濃度パターンは、計測誤差や未知変動要因によって変化する。それら要因の影響を低減させるため、スラグ中 FeO 濃度パターンの特徴的な成分を抽出し、その計算結果に基づいて目標パターンを生成することを考えた。特徴成分抽出には独立成分分析 (Independent component analysis, 以下 ICA) の手法を用いる³⁾。この手法では、複数の時系列信号を統計的に独立な時系列成分の線形結合として表すための計算が行なわれる。具体的には、 i 番目の時系列信号 x_i は (2) 式の形式で表される。

$$x_i = w_{i,1}S_1 + w_{i,2}S_2 + w_{i,3}S_3 + \dots + w_{i,m}S_m \dots\dots\dots (2)$$

ここで S_j は独立時系列成分を示しており、これらは各時系列信号 x_i に対して同じ時系列となっている。一方、各成分 S_j に掛けられる係数 $w_{i,j}$ は時系列信号 x_i ごとに異なる値をとる。限られた数の独立成分 S_j で時系列信号を表現するため、ICA の適用により計測誤差などの影響が低減されることが期待できる。独立成分と係数を生成するための数値計算に関しては、すでに高速な計算アルゴリズムが提案されており、それを利用すれば ICA の数値計算処理を含んだ制御系を容易に実装することが可能である。新制御系は、ICA の

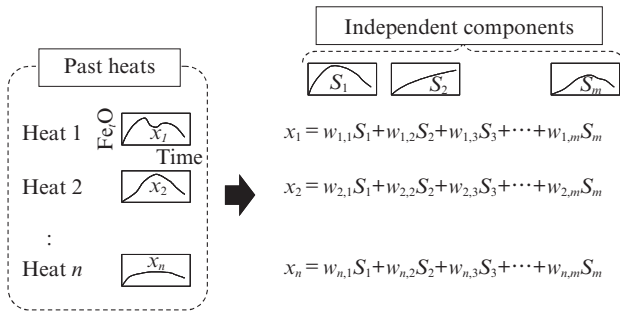


図2 FeO 推移パターンへの独立成分分析適用

Fig. 2 Independent component analysis (ICA) of FeO transition

高速計算アルゴリズムを過去処理のslag中 FeO 濃度時系列に適用することにより、特徴成分および係数の導出を行なう (図2)。

なお、目標slag中 FeO 濃度パターンは吹錬前の溶銑状態や処理条件によっても変化し、この特性をプロセスモデルとして表現することは難しい。この影響を反映させるため、目標パターンを生成する計算アルゴリズムに過去実績データを用いた統計的処理を組み込むことにした。以上の考え方に基づいた目標slag中 FeO 濃度パターン生成アルゴリズムの概略図を図3に示し、処理ステップについて下にまとめる。

- STEP1-1: 過去処理のslag中 FeO 濃度時系列に独立成分分析を適用、独立成分 S_j とその係数 $w_{i,j}$ を計算
- STEP1-2: 過去処理の中から、処理後溶銑中リン濃度が設定値以下の処理を全て選択
- STEP1-3: 選択された過去処理 i について、溶銑状態および処理条件の値に関して次回処理との差 d_i を計算
- STEP1-4: 差 d_i に基づいて、過去処理 i の重み p_i を計算
- STEP1-5: 過去処理の独立成分係数 $w_{i,j}$ について p_i を用い

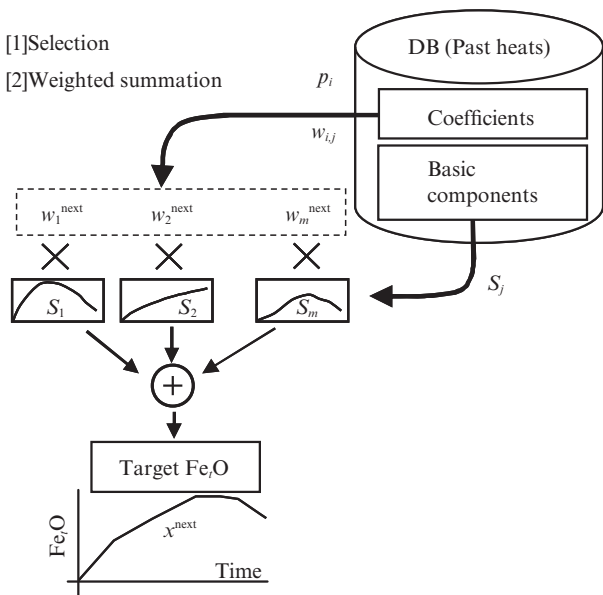


図3 目標 FeO 濃度パターンの生成方法

Fig. 3 Creation of target FeO

た重み付き和 w^{next} を計算し、これを用いて目標 FeO 濃度パターン x^{next} を生成

上記の STEP1-2 においては、処理後のリン濃度が低い処理を選択することによって、望ましい処理のslag中 FeO 濃度推移の情報を取り込むことを目的としている。また、STEP1-3 では、2つの処理の溶銑温度、成分濃度、処理条件などの値についてそれぞれ差を計算し、その重み付き二乗和平方根を計算した結果を2つの処理の差 d_i とする。STEP1-4 では p_i が非線形関数 f によって、 $p_i=f(d_i)$ と計算される。ここで f は単調減少関数であり、0以上1以下の数値を取る。このため重み p_i は差 d_i が小さい過去処理ほど大きく設定されることになる。最後に STEP1-5 においては独立成分 S_j の係数 w_j^{next} が(3)式に従って計算される。なお、ここでは STEP1-2 で k 個の過去処理が選択されたものとする。

$$w_j^{next} = \frac{p_1 w_{1,j} + p_2 w_{2,j} + \dots + p_k w_{k,j}}{p_1 + p_2 + \dots + p_k} \dots\dots\dots (3)$$

w_j^{next} は溶銑状態や処理条件が次回処理と近い過去処理の係数と近い値になる。このため、最終的に生成される目標slag中 FeO 濃度パターン x^{next} の計算式を(4)式に示す。 x^{next} は溶銑状態や操業条件が近く処理後溶銑中リン濃度が低い過去処理のslag中 FeO 濃度パターンに近づく。

$$x^{next} = w_1^{next} S_1 + w_2^{next} S_2 + \dots + w_m^{next} S_m \dots\dots\dots (4)$$

5. 操作量パターン決定方法

STEP2 では次回処理の FeO 濃度推移が目標パターンに近づくように、送酸速度及びバランス高さパターンを決定する。これは、脱リン処理が良好に進んだ過去処理に習って操作量を設定することによって、処理後溶銑中リン濃度が低位安定することを目的としたものである。図4に操作量パターン決定アルゴリズムの概略図を示す。提案アルゴリズムにおける処理は以下のステップに従い、操作量パターンを決定する。

- STEP2-1: STEP1-2 で選択された過去処理 i のslag中 FeO 濃度パターン x_i を収集
- STEP2-2: 過去処理slag中 FeO 濃度パターン x_i と次回処理目標slag中 FeO 濃度パターン x^{next} の差および操業条件の差に基づいて過去処理 i と次回処理の差 e_i を計算
- STEP2-3: 差 e_i に基づいて過去処理 i の重み q_i を計算 (STEP1-4 と同様の方法で計算)
- STEP2-4: 過去処理 i における操作量パターン u_i の q_i に関する重みつき線形和を計算して、次回処理の操作量 u^{next} を決定

上記 STEP2-2 では(5)式に従って差 e_i を計算する。こ

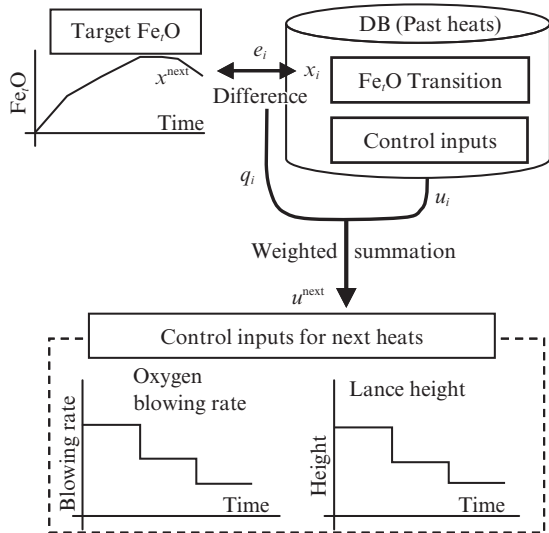


図4 操作量決定アルゴリズム

Fig. 4 Algorithm to determine control inputs

で $x^{next}(t)$ および $x_i(t)$ はそれぞれ、時系列 x^{next} および x_i の t 番目の値を示す。

$$e_i = \sqrt{\sum_t (x^{next}(t) - x_i(t))^2} \dots\dots\dots (5)$$

Fe₂O 濃度パターンが目標パターンと近く、操作条件に近い過去処理ほど差 e_i は小さくなる。STEP2-3 で差が小さい過去処理ほど重み q_i が大きく設定されるため、STEP2-4 では、差 e_i が小さい過去処理の操作量パターンと近い形状のパターンが最適操作量パターンとして生成されやすくなる。 u^{next} の計算式を (6) 式に示す。

$$u^{next} = \frac{q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_k u_k}{q_1 + q_2 + \dots + q_k} \dots\dots\dots (6)$$

なお、本制御系で用いる統計的処理は Just-In-Time モデリングで用いられる手法と同じアプローチを適用している。この手法は実績データを用いて局所モデルを逐次生成するものであり、各種の応用例がある⁴⁾。

6. 実験結果

上記で説明した新制御系を、実際の転炉設備に適用して試験を行なった。表1に、従来制御と新制御の処理後溶銑中リン濃度を示す。従来制御は、冶金学モデルに基づいて事前設定された複数の送酸速度とランス高さパターンの中から、操作条件に応じて1組のパターンを選択して操作量を決定する仕組みになっている。なお表1において、処理後溶銑中リン濃度の平均値と標準偏差は、従来制御の値をそれぞれ μ , σ として表されている。これらの結果から、新制御系は従来制御に比べて処理後溶銑中リン濃度を低位に抑えることに成功していることが分かる。

表1 処理後溶銑中リン濃度 (実機試験結果)

Table 1 Phosphorous concentration of hot metal

	Number of heats	Phosphorous concentration	
		Average	Standard deviation
Conventional	467	μ	σ
Proposed	31	0.863μ	0.857σ

新制御系には、独立成分分析および溶銑状態や操作条件を反映した統計的処理が組み込まれている。これらが有効に働くことによって転炉吹錬プロセスで問題となる計測誤差や未知変動などの影響が抑制され、良好な制御結果を得られたものと考えられる。

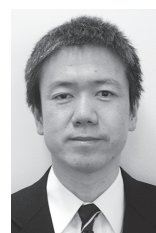
7. おわりに

本稿では、転炉脱リン処理の新吹錬制御技術について紹介し、実機を使った検証試験の結果によってその有効性を示した。新制御系は、時系列情報に対して独立成分分析などの統計的手法を導入することにより、計測誤差や未知変動要因などの影響を低減して性能向上を実現している。脱リン制御性能がレベルアップすることにより溶鋼はより清浄化され、より高品質の製品がご提供可能になった。また、本技術の適用によって吹錬処理時間短縮、副原料使用量およびスラグ発生量の低減を実現し、納期短縮などのお客様満足度の向上や地球環境保全への貢献を図っていく。

なお、本技術に関する詳細内容が、ジャーナル論文誌に掲載予定である⁵⁾。

参考文献

- 1) 高橋亮一. 鉄鋼業における制御. コロナ社, 2002.
- 2) 田辺治良, 中田正之. NKK 技報. 2002, no. 179, p. 14-21.
- 3) Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. 【詳解】独立成分分析 信号解析の新しい世界. 根元幾, 川勝真喜訳. 東京電気大学出版局, 2005.
- 4) 水野浩, 秋生賢吾, 前田孝彦. 転炉吹錬制御モデルへの Just-In-Time モデル適用. 材料とプロセス. 2007, vol. 20, no. 5, p. 955.
- 5) Tomiyama, S.; Uchida, Y.; Mizuno, H.; Akiu, K.; Maeda, T. A novel control algorithm for dephosphorization in an LD converter. Journal of Process Control. 2015, vol. 25, p. 35-40.



富山 伸司



内田 祐一



前田 孝彦