

技術報告

V-AOD (Vacuum Argon Oxygen Decarburization) の 精錬制御精度向上に向けた取り組み

Development to Improve the Accuracy of Refining Control of V-AOD (Vacuum Argon Oxygen Decarburization)

菊地 辰*
Shin KIKUCHI

田中 智昭
Tomoaki TANAKA

木下 陽介
Yohsuke KINOSHITA

戸渡 弘
Hiroshi TOWATARI

松並 忠則
Tadanori MATSUNAMI

兼川 賢
Satoshi KANEKAWA

抄 録

日鉄ステンレス(株)光製鋼工場ではV-AOD (Vacuum Argon Oxygen Decarburization) の制御システムの強化による精錬制御精度の向上に取り組んでいる。その一環として、高速通信回線を用いた電気・計装・計算機の相互通信システムを導入した。これにより炉内の熱・物質収支を計算し、迅速に実機の精錬制御に反映させることで、精錬制御精度が向上した。このシステムと排ガス分析装置を組み合わせ、脱C状態を逐次把握することにより、低C鋼の脱炭終了判定システムを構築した。その結果、精錬後のC値のばらつきを抑制し、精錬効率が向上した。更に、様々な操業条件を考慮したN反応モデル式を構築し、それに実測した操業データを反映させることで、高N鋼のN制御精度が向上した。これらの対策により、高性能、高機能ステンレス鋼をより高品質に製造可能になった。

Abstract

Steel making plant of Hikari Area, Nippon Steel Stainless Steel Corporation has been tackling to improve the accuracy of refining control by strengthening the V-AOD (Vacuum Argon Oxygen Decarburization) control system. As part of this effort, the intercommunication system between electricity-instrumentation-computer using high-speed network ware introduced. As a result, it is possible to improve the accuracy of refining control by calculating the heat and mass balance in the furnace and quickly reflecting it in the refining control of the actual furnace. The system for determining the end of decarburization of low carbon steel ware constructed by observing the decarburization state successively by combining this system and an exhaust gas analyzer. As a result, variations in carbon concentration after refining was suppressed, and refining efficiency was improved. Furthermore, the nitrogen control accuracy of high nitrogen steel was improved by constructing a nitrogen reaction model formula considering various operating conditions and reflecting the measured operating data. These measures have made it possible to manufacture high-performance stainless steel with higher quality.

1. 緒 言

日鉄ステンレス(株)山口製造所光エリア製鋼工場(以下、光製鋼工場と称す)では、Ni系ステンレス鋼を中心としたスラブ、ブルーム、ビレットの製造を行っている。Crをはじめとしたレアメタル等の希少資源を多量に使用するステンレス鋼の製造においては、省資源かつ省エネルギー型の環境調和型製造技術の確立が求められる。また、介在物厳

格用途の高清浄度鋼や高耐食性スーパーオーステナイトステンレス鋼¹⁾等の高性能鋼、高機能鋼を低コストかつ安定的に供給していくことで、社会の発展に寄与する必要がある。ステンレス鋼の品質と省資源・省エネルギー化を両立させるためには精錬工程の操業改善、技術開発が不可欠である。

本報では光製鋼工場の精錬工程におけるここ数年の技術開発事例について報告する。

* 日鉄ステンレス(株) 製造本部 山口製造所 光エリア 製鋼工場 製鋼技術室 山口県光市大字島田3434 〒743-8550

2. 光製鋼工場の概要

2.1 光製鋼工場の製造プロセス

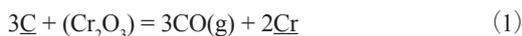
光製鋼工場の製造フローを図1に示す。予め所定の成分に配合されたスクラップ、合金、副原料を電気炉にて溶解する。次に精錬工程であるV-AOD (Vacuum Argon Oxygen Decarburization) において脱炭・還元および成分調整、温度調整を行う。LF (Ladle Furnace) において溶鋼成分・温度を目標範囲内に微調整した後に、CC (Continuous Caster) で連続鋳造を行う。連続鋳造機は垂直型のスラブCCとブルームCC、水平型のピレットCCを有しており、薄板、厚板、棒鋼、線材等、多品種に対応している。

また、省資源化に対応するため、製鋼工場内で発生したダストや、他工場が発生したスラッジやスケールはRHF-SAF (Rotary Hearth Furnace-Submerged Arc Furnace) プロセスにより、有価金属 (Ni, Cr, Fe) を回収し、原料としてリサイクルしている。

2.2 V-AOD におけるステンレス鋼精錬

ステンレス鋼の精錬においては、合金等から不可避免的に混入してくるCを取り除くため、精錬工程でO₂ガスを吹込むことにより脱炭を行う。しかし、ステンレス鋼のようなCr含有鋼においては、脱炭と並行して有価金属であるCrが酸化し、Cr酸化物としてスラグに移行してしまうため、脱炭後にFeSi合金やAl等の還元材を用いて、スラグ中のCr酸化物の還元を行う。従って、Crや還元材の省資源化、副産物であるスラグの発生量低減のためには、脱炭中のCr酸化の抑制が重要である。

CとCrの酸化反応の平衡関係は下記の式(1)、式(2)で表される²⁾。



$$\Delta G^\circ (J/mol) = 776510 - 486.82T \quad (2)$$

また、SUS304の組成における式(1)、式(2)を図2に示す。Cr酸化の抑制、すなわち脱炭反応の優先的進行のためには、①精錬温度の高温化、②CO分圧低減が効果的である。ただし、精錬温度は耐火物溶損防止の観点から上限が決まるため、実操業ではCO分圧の制御が重要になる。CO分圧の制御はAOD (Argon Oxygen Decarburization) のようにO₂ガスと同時にArガス(あるいはN₂ガス)を希釈ガスとして用いることでCO分圧を低下させる方法と、VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) のように真空装置を用いて雰囲気圧力そのものを低下させる方法がある。光製鋼工場では両者の長所を生かし、AODをベースとして、精錬の途中から真空装置を用いて炉内を減圧するV-AODの精錬技術を確立した³⁾。この技術により、Crの酸化を低減し、O₂ガスの使用量を削減した高効率な脱炭処理を実施している。

光製鋼工場のV-AODの操業パターンを図3に示す。まず大気圧下で上底吹酸により脱炭を行う。[C]が一定値ま

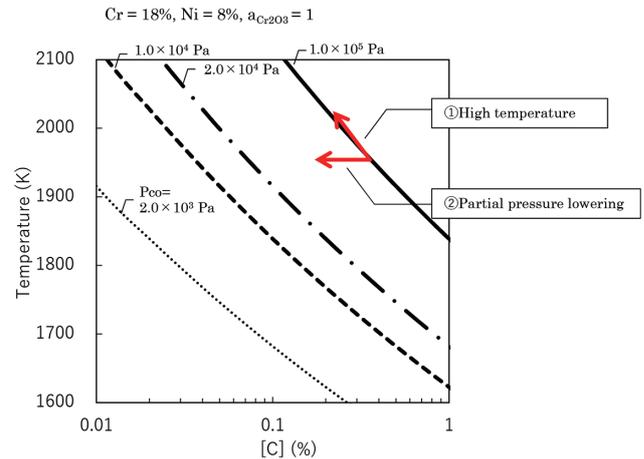


図2 CとCrの酸化反応の平衡関係
Equilibrium relationship of oxidation reactions of C and Cr

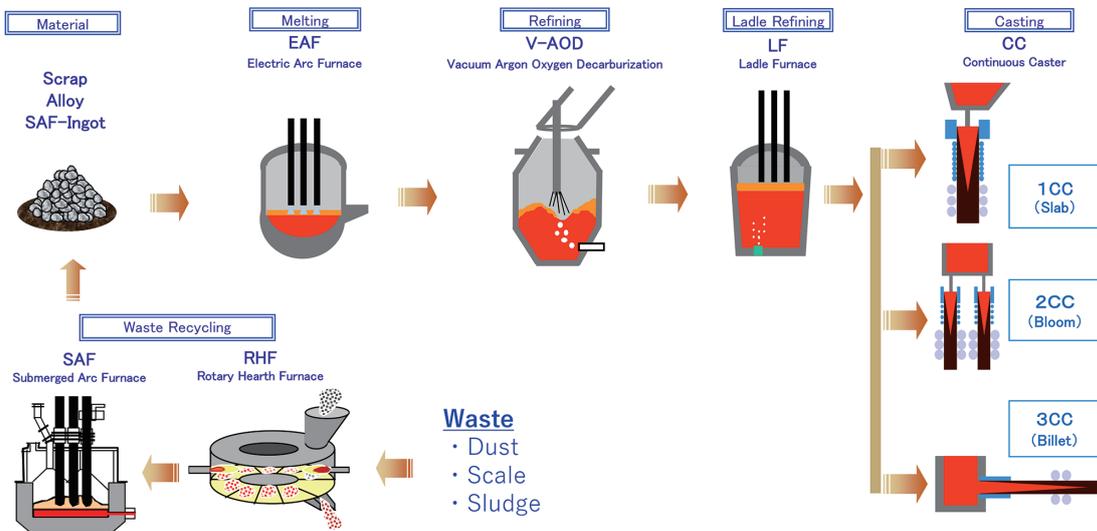


図1 光製鋼工場の製造フロー
Stainless steel manufacturing process at Hikari Area

で下がったところで真空精錬に切り替える。真空精錬中は推定[C]に応じて、 O_2 ガスの希釈比率および炉内圧力を制御しながら脱炭を行う。脱炭完了後は炉内に還元材を投入し、スラグ中 Cr 酸化物の還元と溶鋼の脱酸、脱硫を行う。還元後に溶鋼の成分確認を行い、取鍋に出鋼する。

3. 精錬制御精度向上に向けた設備対策

3.1 制御システムの機能向上

光製鋼工場では V-AOD の更なる高効率化を目的として、精錬制御精度向上対策を実施してきた。その一環として、炉内センシングおよび精錬制御システムの強化を行った。精錬制御システムの概要を図 4 に示す。本システムは、①電気・計装・計算機間的高速高頻度相互通信 (EIC 統合) による精密な精錬制御、②高性能計算機を用いた熱・物質収支の逐次計算によるチャージ毎の操業条件の最適化、③精錬作業の標準化と操業ガイド機能によるオペレーターの負荷軽減とばらつきの低減、を特徴としている。以後このシステム機能をまとめて ASTRA (Advanced System for Top Runner of AOD) と称する。ASTRA の導入によって、3 秒毎に炉内の熱・物質収支を計算できるようになり、またその結果を迅速に実機の精錬制御に反映させることで、精錬制御精度が向上し、余分な合金やエネルギーの使用量を削減した。また、オペレーターの経験に依存していた部分が見える化、標準化したことで、精錬技能の差を補完し、品質の安定化と生産性の向上を達成した。

次章から ASTRA を用いた精錬制御精度向上の具体的な取り組み事例について、2 例紹介する。

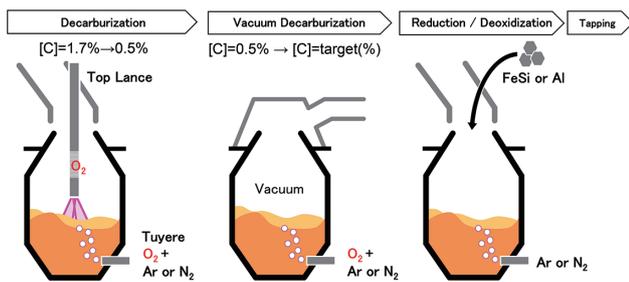


図 3 V-AOD の精錬パターン
Refining pattern of V-AOD operation

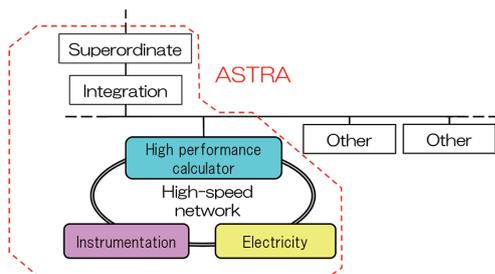


図 4 ASTRA のシステム構成図
System configuration of ASTRA

4. 低C鋼の脱炭制御精度向上対策

4.1 V-AOD における脱炭制御の課題

V-AOD の真空精錬中は炉口に真空蓋を被せるため、サンプリングにより成分値を把握できない。そのため、従来は脱炭不足による[C]上限外れを懸念し、過剰に O_2 ガスを吹き込み低[C]化した後、分析値に応じて加炭材を添加して[C]の調整を行っていた。これにより、 O_2 ガスや Cr 酸化による還元材の使用量が増加し、精錬効率の低下を招いていた。また精錬時間が延長し、生産性を悪化させる要因となっていた。この課題を解決するため、排ガス分析装置を用いた脱炭制御精度向上対策について取り組んだ。

4.2 排ガス分析装置の概要

排ガス分析装置の概要を図 5 に示す。真空精錬中の排ガスを常時少量サンプリングし、赤外線吸収式分析計で CO_2 および CO ガス濃度の分析を行う。ここで、炉内圧力に依存せず一定流量のガスを分析できるように、低圧力時に大気の流れを防ぐための背圧制御を実施している。また、配管容積に起因する排ガス分析計までのガス到達遅れ時間を短縮する対策として、サンプリングポンプの下流側で子ポンプを台数制御し、吸引ガス量の調整を行っている。排ガス分析の結果にピトー管で計測した排ガス流量を用いて質量バランスを補正することで、排ガスとして炉外に排出される C 量や脱炭速度を把握できる。

4.3 低 C 鋼の脱炭終了判定技術

低 C 鋼 ($[C] \leq 0.034\%$) における脱炭末期の脱炭反応は溶鋼中[C]の移動律速と考えられており⁴⁾、その脱炭速度は溶鋼中[C]に依存した式 (3) で表される。

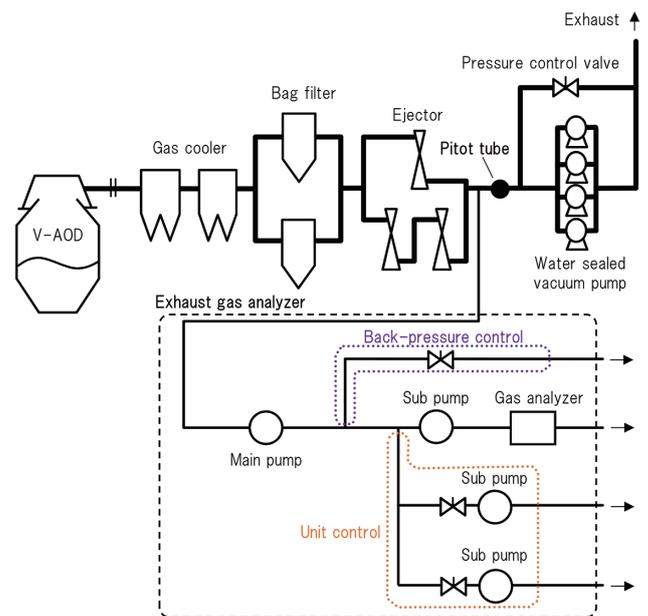


図 5 排ガス分析装置の概要
Overview of exhaust gas analyzer

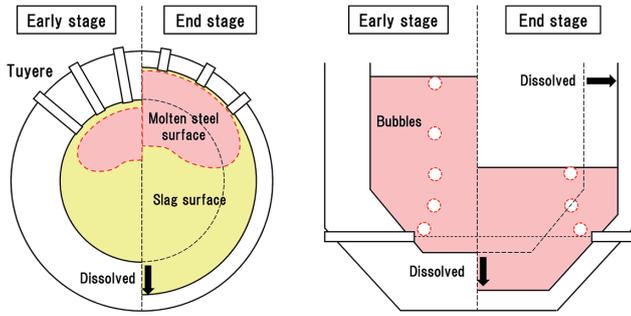


図6 炉体溶損と有効反応界面積の関係

Relationship between furnace refractory dissolved loss and effective interfacial area

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_c[C] \quad (3)$$

ここで、 t : 時間 (s), k_c : 脱炭速度定数 (s^{-1}) である。

脱炭速度は排ガス分析により実測可能であるため、この関係式を用いて脱炭末期の溶鋼中[C]を推定できる。

また、V-AODのステンレス鋼の脱炭においては、鋼種毎の目標成分やチャージ毎の操業条件差を反映する必要があると考え、パラメーターとその係数を考慮した。パラメーターとしては炉内圧力、Cの活量係数を考慮した。また、図6に示すように炉体耐火物溶損により炉内の反応界面積や攪拌動力エネルギー密度が変化するため、耐火物張り替え後からの炉使用回数をパラメーターとして考慮した。各パラメーターに掛かる係数については希釈ガス種に応じて決定した。[C]推定式を式(4)に示す。

$$[C] = a \times \frac{d[C]}{dt} + b \times P + c \times N_h + d \times f_c + e \quad (4)$$

ここで、 P : 炉内圧力 (Pa), N_h : 耐火物張り替え後からの炉使用回数, f_c : Cの活量係数, a, b, c, d, e : ガス種毎に決まる定数である。

この推定式をASTRAに組み込むことで、チャージ毎の操業条件や鋼種特性を考慮した[C]推定と脱炭終了判定システムを構築した。

4.4 排ガス分析による脱炭改善効果

排ガス分析により推定した[C]推定値と実測[C]を比較した結果を図7に示す。推定[C]の推定誤差は $1\sigma=0.0024\%$ であり、光製鋼工場でのステンレス鋼精錬に適用可能な推定精度である $3\sigma \leq 0.010\%$ の目標精度を達成した。

目標とする $\pm 0.010\%$ 内の精度での脱炭末期の[C]推移を連続的に把握できるようになったため、推定[C]を利用した脱炭終了判定を行った。[C]推定精度とAOD出鋼後の[C]ピックアップを考慮して、推定 $[C] \leq ([C]_{\text{目標上限}} - 0.010\%)$ を脱炭終了判定条件として吹酸を終了した。対策の結果、対策前と比較して低C鋼の精錬時間が6.7%短縮し、生産性が向上した(図8)。また、[C]のばらつきが低減することで、過剰な脱炭を抑制し、 O_2 ガス使用量や還元材使用量を削減した(図9)。

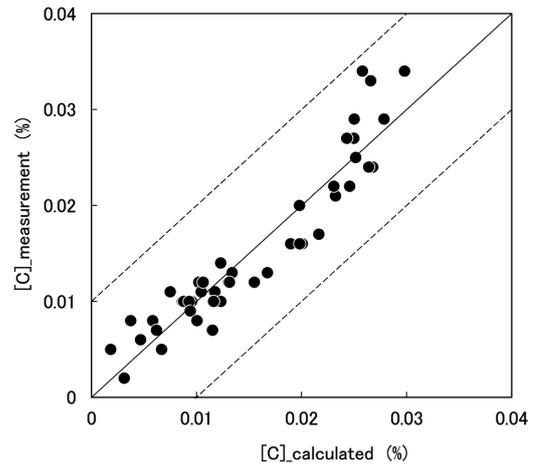


図7 推定[C]と実績[C]の比較

Comparison calculated [C] and measurement [C]

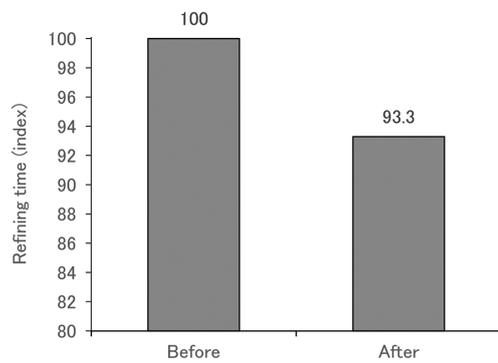


図8 精錬時間の短縮効果

Effect of shortening refining time

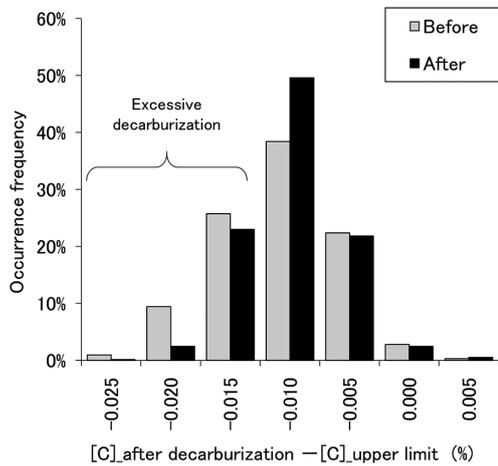


図9 脱炭終了判定による過剰脱炭抑制の効果

Effect of suppression of excessive decarburization by decarburization completion judgment system

5. 高N鋼のN制御精度向上対策

5.1 V-AODにおける高N鋼のN制御の課題

ステンレス鋼は多量のCrを含むためN溶解度が高く、高価なNiに代わる γ 相安定化元素として、また強度、耐食性を向上させるために、積極的に添加されることがある。例えば、表1に示されるようなスーパーオーステナイトス

表 1 代表的な高 N 鋼種の成分規格
Standard composition of typical high nitrogen stainless steel grade

Grade	Standard component (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS312L (NSSC® 270)	≤0.020	≤0.80	≤1.00	≤0.030	≤0.015	17.50–19.50	19.00–21.00	6.00–7.00	0.50–1.00	0.16–0.25
SUS821L1 (NSSC 2120®)	≤0.030	≤0.75	2.00–4.00	≤0.040	≤0.020	1.50–2.50	20.50–21.50	≤0.60	0.50–1.50	0.15–0.20
SUS316LN	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.50–14.50	16.50–18.50	2.00–3.00	–	0.12–0.22

ステンレス鋼や二相ステンレス鋼等の高機能鋼には、N を 0.1 % 以上含有する鋼種が多くある。従って、ステンレス鋼精錬において高 N 鋼の N 制御は非常に重要な技術である。

V-AOD では底吹きガスにより N 添加を行う。この際、N₂ ガスの溶鋼への歩留まりは精錬温度や炉内圧力等の操業条件の影響で変化する。これらの操業条件は ASTRA 機能により把握できるため、ASTRA を活用した高 N 鋼の N 制御モデルの構築に取り組んだ。

5.2 N 推移推定式と N 制御技術

精錬中の [N] 推移を把握するためには、溶鋼中の飽和 [N] 濃度と N₂ ガスによる吸 N, Ar ガスによる脱 N の反応速度式を解けばよい。飽和 [N] は Sieverts 則に従い、溶融金属中の [N] と N₂ 分圧の平衡関係として式 (5)、式 (6) で表される²⁾。

$$[\%N]_{eq} = \frac{K\sqrt{P_{N_2}}}{f_N} \quad (5)$$

$$\log K = -\frac{518}{T} - 1.063 \quad (6)$$

ここで、 $[\%N]_{eq}$: 平衡窒素濃度 (mass%), K : 平衡定数, P_{N_2} : N₂ 分圧 (Pa), f_N : N の活量係数, T : 溶鋼温度 (K) である。これらの値は ASTRA により 3 秒毎に推定できる。

また、吸 N 反応速度と脱 N 反応速度はそれぞれ 1 次反応⁵⁾、2 次反応⁶⁻⁸⁾ であると考えられており、操業上扱いやすいように、N 添加用 N₂ ガス量 V_{g,N_2} (Nm³)、および脱 N 用 Ar ガス量 $V_{g,Ar}$ (Nm³) の関数で表現すると式 (7) および式 (8) で表される。

$$\text{吸 N 反応式} \quad \ln \frac{[N]_{eq} - [N]_0}{[N]_{eq} - [N]} = k' \frac{A}{V_m} \frac{V_{g,N_2}}{Q} \quad (7)$$

$$\text{脱 N 反応式} \quad \frac{1}{[N]_0} - \frac{1}{[N]} = k'' \frac{A}{V_m} \frac{V_{g,Ar}}{Q} \quad (8)$$

ここで k' : 吸 N 反応速度定数 (m/s), k'' : 脱 N 反応速度定数 (m/s), A : 反応面積 (m²), V_m : 溶鋼量 (m³), Q : ガス流量 (Nm³/h), $[N]_0$: 計算開始時の溶鋼中空素濃度である。

上記式を実機に導入するにあたり、各パラメーター、定数の設定について検討を行った。まず反応速度定数については脱酸レベルの影響を受けることが知られており⁹⁻¹³⁾、脱酸状態をパラメーターとして実機のサンプリング結果から値を決定した。次に、反応界面積については前述のように、耐火物張り替え後からの炉使用回数の影響を受けるため、炉使用回数をパラメーターとして考慮した。

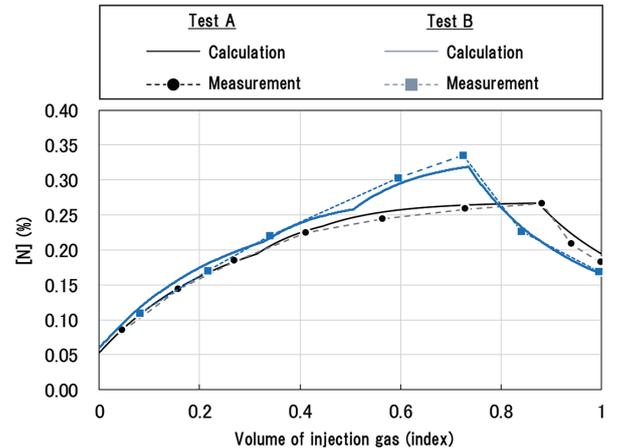


図 10 N 推移推定式の計算結果と実測値の比較
Comparison of calculation results and measured results

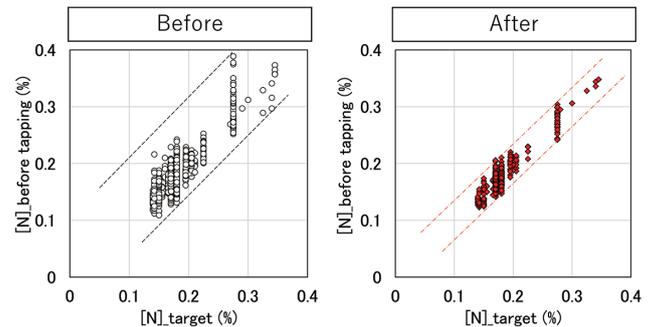


図 11 対策前後の V-AOD 出鋼前の [N] のばらつき比較
Comparison of variations of [N] before V-AOD tapping before and after measures

N 推移推定式を ASTRA に組み込み、N 制御の最適化を図った。

5.3 窒素制御モデルによる改善効果

N 推移推定式と実機のサンプル調査の比較を図 10 に示す。鋼種 A、鋼種 B 共に、実機の [N] 分析結果はいずれも計算結果に対して良く一致していることが確認できた。また、本計算モデル適用前後の V-AOD 出鋼前の [N] のばらつきの比較を図 11 に示す。導入した計算モデルにより N 制御精度が向上し、[N] のばらつきが低減し、品質の安定化に寄与した。加えて、N 調整のため V-AOD の精錬時間の延長や後工程の LF における長時間の N 調整頻度を低減し、高 N 鋼の生産性が大幅に向上した。

6. 結 言

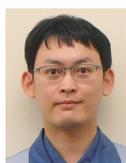
光製鋼工場における精錬制御精度向上に向けた取り組みを以下にまとめる。

- (1) システム機能の強化 (ASTRA) により、炉内の精錬状況を逐次かつ精度良く把握可能になった。
- (2) 排ガス分析と ASTRA の機能を活用した低 C 鋼の脱炭終了判定システムを構築し、過剰吹酸の抑制による精錬ガスの削減および還元材の削減を達成した。
- (3) 高 N 鋼の N 推移推定式を構築し、ASTRA に組み込むことで、高 N 鋼の精錬時間の短縮および N のばらつき低減を達成した。

一連の精錬制御精度向上に向けた取り組みを通して、省資源・省エネルギー化を達成した。また、二相ステンレス鋼やスーパーオーステナイトステンレス鋼のような低 C 高 N の高性能・高機能鋼を、より成分のばらつきを抑制して、高品質に製造可能になった。

参照文献

- 1) 末次和広 ほか：材料と環境. 57, 322 (2008)
- 2) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編：製鋼反応の推奨平衡値 (改訂増補). 東京, 1984, p.17
- 3) 池田聡：新日鉄技報. (389), 2 (2009)
- 4) 日本金属学会編：金属化学入門シリーズ第 2 巻 鉄鋼精錬. 東京, 2005, p.109
- 5) 川上正博 ほか：鉄と鋼. 73, 661 (1987)
- 6) 長隆郎 ほか：鉄と鋼. 64, 701 (1978)
- 7) 成田貴一 ほか：鉄と鋼. 57, 2207 (1971)
- 8) 鈴木鼎 ほか：鉄と鋼. 55, 877 (1969)
- 9) 萬谷志郎 ほか：鉄と鋼. 60, 1443 (1974)
- 10) 長隆郎 ほか：鉄と鋼. 67, 2665 (1981)
- 11) 清瀬明人 ほか：鉄と鋼. 78, 97 (1992)
- 12) 原島和海 ほか：鉄と鋼. 73, 1559 (1987)
- 13) 務川進 ほか：鉄と鋼. 88, 195 (2002)



菊地 辰 Shin KIKUCHI
日鉄ステンレス(株)
製造本部 山口製造所 光エリア
製鋼工場 製鋼技術室
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



戸渡 弘 Hiroshi TOWATARI
日鉄ステンレス(株)
製造本部 設備・保全技術部
設備・保全技術室 主幹



田中智昭 Tomoaki TANAKA
日鉄ステンレス(株)
製造本部 山口製造所 光エリア
製鋼工場 製鋼技術室 上席主幹



松並忠則 Tadanori MATSUNAMI
日鉄ステンレス(株)
製造本部 山口製造所 光エリア
生産管理部 部長



木下陽介 Yohsuke KINOSHITA
日鉄ステンレス(株)
製造本部 山口製造所 光エリア
設備部 エネルギー室 室長



兼川 賢 Satoshi KANEKAWA
日鉄ステンレス(株)
製造本部 山口製造所 周南エリア
製鋼工場 工場長