

東日本製鉄所（千葉地区）におけるステンレス鋼製造能力向上の取り組み

Increase of Stainless Steel Production Capacity in East Japan Works (Chiba)

高島 大洋 TAKASHIMA Taiyo JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区)製鋼部 製鋼技術室【現 商品技術部 ステンレス室(係長)】
藤堂 渉 TODO Wataru JFE スチール 棒線事業部 仙台製造所 製鋼部 製鋼技術室 主任部員(副課長)
寺島 知道 TERABATAKE Tomomichi JFE スチール 東日本製鉄所 企画部長(理事)

要旨

東日本製鉄所（千葉地区）第4製鋼工場では主にフェライト系ステンレス鋼を製造している。2次精錬設備として Vacuum Oxygen Decarburization (VOD) を採用しており、高真空中で処理することでクロムの燃焼を抑制しながら効率的に脱炭できる¹⁾。しかし、近年自動車の排気系に使用されるフェライト系極低炭ステンレス鋼が増産傾向にあり、極低炭鋼種は真空処理中により多くの送酸が必要であるため脱炭に要する時間が長いことから、VOD 処理時間が製鋼全体のプロセスを律速する状況になっている。これに対し、フェライト系極低炭ステンレス鋼の VOD 処理における希釈送酸、脱炭ガイダンス導入、および合金添加タイミングの変更により脱炭処理時間の短縮を図り、ステンレス鋼の製造能力向上を達成したので報告する。

Abstract:

JFE Steel East Japan Works (Chiba) produces Cr-based stainless steel. Vacuum Oxygen Decarburization (VOD) which has been adopted for secondary refining performs additional decarburization while inhibiting oxidation of Cr under a high vacuum. Since production of ultra-low carbon Cr-based stainless steel which is used as a car exhaust system has been increased recently, VOD needs to process large amount of oxygen blowing with longer processing time. To improve bottleneck conditions of VOD, we tried dilution oxygen blowing, introduction of decarburization guidance, and change timing of alloy addition. As a result, more efficient production has been achieved at VOD process and productivity of stainless steel has been improved.

1. はじめに

東日本製鉄所（千葉地区）第4製鋼工場（以下、千葉第4製鋼工場）では主にフェライト系ステンレス鋼を製造しており、2次精錬設備として上吹き酸素を利用した VOD を採用している。フェライト系極低炭ステンレス鋼の場合、高真空中における上吹き送酸により $[C]=0.15\%$ 程度の粗溶鋼を 100 ppm 以下まで脱炭するが、脱炭が進むに従い脱炭酸素効率が低下し、Cr の酸化反応が促進されるという精錬反応が生じる。Cr 酸化が多いと脱炭速度が低下し処理時間の延長を招くのみならず、脱酸プロセスで脱酸用 Al や Si の添加量が増加してしまう。この精錬反応のため、フェライト系極低炭ステンレス鋼は VOD の脱炭処理に要する時間が長く、製鋼全体の処理速度を律速する状況となっている。ステンレス鋼の生産能力向上のためには、脱炭処理時間の短縮が不可欠であることから、今回 VOD 処理における脱炭処理時

間の短縮を図りステンレス鋼の製造能力向上を達成したので報告する。

2. ステンレス鋼製造プロセスの現状

2.1 ステンレス鋼製造フロー

千葉第4製鋼工場におけるステンレス鋼の製造フローを図1に示す²⁾。高炉、溶銑予備処理を経て脱燐された溶銑を溶融還元炉に装入し、クロム鉱石および転炉の Oxygen Converter Gas Recovery System (OG 設備) で回収された Cr 含有ダストの溶融還元により含クロム粗溶鋼とする³⁾。次に脱炭炉に装入し、上底吹き酸素により $[C]=0.15\%$ 程度まで粗脱炭を行う。その後 VOD により真空環境下で脱炭することでクロムの燃焼を抑制しながら $[C]=100$ ppm 程度まで脱炭し、最終成分調整を行う。そして第3製鋼工場の第4連続铸造機でスラブを铸造する。これが一連の製造フローである。

また、今回実験を行った VOD プロセスの外観図と処理内

2021年3月11日受付

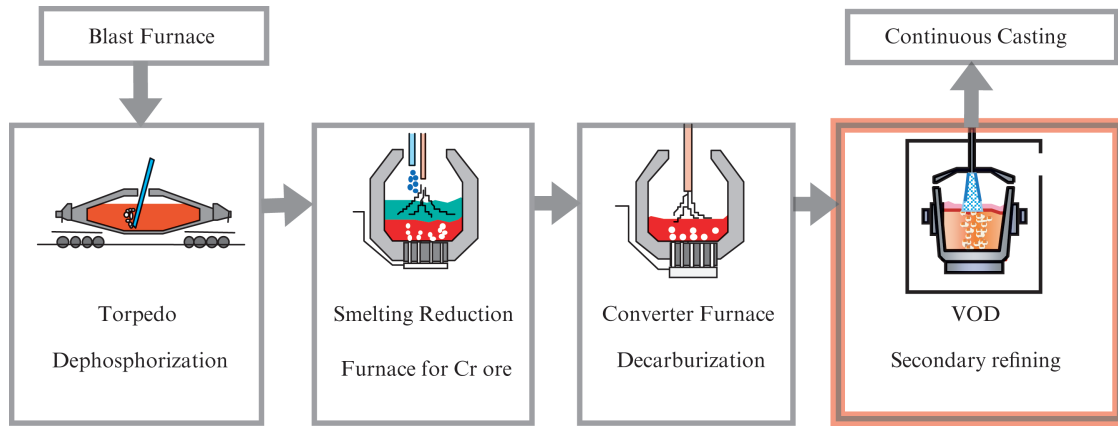


図1 千葉地区第4製鋼工場のステンレス鋼製造プロセスフロー
Fig. 1 Process flow of stainless steelmaking processes

容を図2に示す。VOD処理は大きく以下の工程に分かれる。

- (1) 真空送酸脱炭処理…真空下での上吹きランスからの送酸による脱炭処理
- (2) 真空リムド処理…ランスからの送酸を止め、溶存 [O] による脱炭処理
- (3) 真空キルド処理…合金を添加しつつ、Al や Si などの脱酸用合金を添加することによる脱酸処理
- (4) 大気処理…大気圧下での成分、温度の最終調整
この中で今回は真空送酸脱炭処理の処理時間短縮に関して報告する。

2.2 極低炭鋼種の生産能力

千葉地区で主に製造しているフェライト系極低炭ステンレス鋼の、主要プロセスの生産能力を図3に示す。ここでいう生産能力とは、転炉の場合は1チャージ分の溶鋼重量を吹錬時間と吹錬間時間の和で割った値、VODの場合は1チャージ分の溶鋼重量を真空処理に要する時間で割った値、連続 casting の場合は1チャージ分の溶鋼重量をタンディッシュに注入開始してから終了するまでの時間で割った値である。

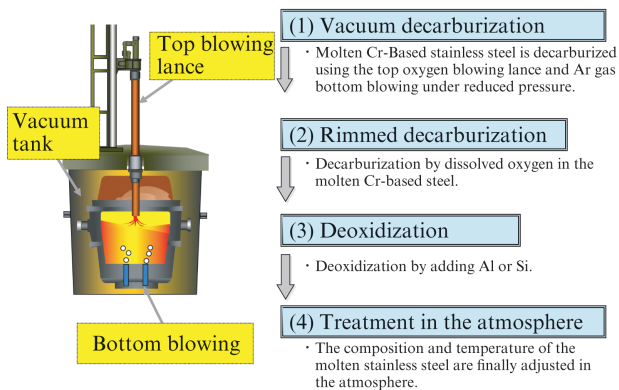


図2 VOD設備外観図と処理内容
Fig. 2 Outline of VOD equipment

生産能力を比較するとVODが劣位であり、製造プロセス全体の律速工程となっている。これは、フェライト系極低炭ステンレス鋼はVODでの真空送酸脱炭処理に時間を要するためであり、生産性向上のためには脱炭処理時間の短縮が最大の課題と言える。

2.3 VOD処理改善の考え方

ステンレス鋼の脱炭はCr酸化との競合反応である。平衡到達 [C] 濃度は (1) 式で与えられる。(1) 式から、①溶鋼温度高温化、②高真空化 (CO分圧の低下) により平衡 [C] 値が低下する。すなわち1次反応領域での脱炭反応速度を表す (2) 式における平衡到達 [C] 濃度 ([C]e) が低下することで脱炭反応速度が増加すると考えられる。

$$[C] + [O] = CO$$

$$2[Cr] + 3[O] = (Cr_2O_3)$$

$$\log K (= a_{Cr}^2 \times P_{CO}^3 / a_C^3) = -40560/T + 25.43 \dots (1)$$

$$-d[C]/dt = k([C] - [C]e) \dots \dots \dots (2)$$

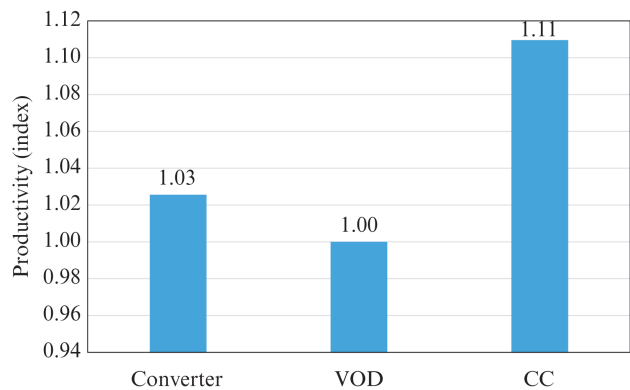


図3 転炉, VOD, 連続 casting 機の生産能力比較
Fig. 3 Comparison of converter, VOD, and 4CC production efficiency

表 1 VOD 脱炭処理時間短縮のための狙い
Table 1 Item of reduction VOD processing time

Target	Issue	Solution	Report
Low CO partial pressure	Depends on equipment performance	Ar dilution of top blowing	3.1
Low Cr concentration during decarburization	Depends on standard component	—	
Restrain excess decarburization	Judgment of decarburization end depends on operator's experimental	Installation of decarburization guidance	3.2
High temperature condition during decarburization	Temperature drop by alloy addition	Delay of timing of alloy addition	3.3
	Increase of alloy addition in Converter Furnace processing	Alloy preaddition before Converter Furnace processing	

ここで a_x は x 成分の活量, T は溶鋼温度 (K), P_{CO} は CO ガスの分圧, $[C]_e$ は平衡 $[C]$ 濃度である。

また, フェライト系極低炭ステンレス鋼には $[C]$ 上限値が定められており, 真空送酸脱炭末期の溶鋼サンプリングによる分析結果を見て脱炭終了としている。そのため, サンプリング時点の $[C]$ 濃度が許容上限を大きく下回る場合, 過剰な真空送酸脱炭により, 結果として処理時間延長を招いたことになる。従来, 脱炭終点判定はオペレータが排ガス濃度を参考として経験則で決めており, オペレータの習熟度によって脱炭終了サンプリング時の $[C]$ 値のばらつきが大きい。

なお, 脱炭が Cr 酸化との競合反応という点からは, 溶鋼中 $[Cr]$ 濃度を低位化すれば脱炭が促進されることになるが, 規格により $[Cr]$ 範囲が決められているため, $[Cr]$ 低位化は難しい。

以上をまとめると, 表 1 のような狙いと対策が考えられる。この中で, 本報告では真空上吹き希釈送酸, 脱炭ガイダンス導入, 脱炭処理中の合金添加タイミング変更について報告する。

3. 実験内容

3.1 真空上吹き希釈送酸

3.1.1 希釈送酸概要⁴⁾

はじめに, 真空送酸脱炭処理に関して詳細に説明する。真空送酸脱炭処理は処理中の $[C]$ 領域により大きく 2 つの期間に分類される。ひとつは送酸 1 期と言い, 高 $[C]$ 領域において脱炭速度は O_2 供給律速となるため, 脱炭速度が O_2 吹き込み速度に依存する期間である。もう一つは送酸 2 期と言い, 低 $[C]$ 領域において脱炭速度が $[C]$ の移動律速となり, 脱炭速度が溶鋼 $[C]$ 値と平衡 $[C]$ 値の濃度差で決まる期間である。

本実験では, 送酸 1 期は供給律速のため, O_2 希釈送酸の効果は得られないと考えた。そこで送酸 2 期で従来 O_2 のみ吹いていた期間に O_2+Ar 混合吹きを行うことにより, CO 分圧の低下, すなわち平衡 $[C]$ 低下による脱炭速度向上を

図った。

実施条件を表 2 に示す。真空送酸 2 期で Ar を $10 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 増加させるのみでは溶鋼からのスプラッシュが増大し, VOD の中蓋 (取鍋上部に設置する耐火物を張った蓋) への地金付着量が増大し生産トラブルを招く恐れがあると考えた。そこで送酸速度を $18 \Rightarrow 15 \text{ Nm}^3/\text{min}$ に低下させ, ランス高さを $1450 \Rightarrow 1650 \text{ mm}$ と高くした。この条件は, 浴面動圧が工程と同等となる計算による。この O_2 に Ar を混合させ送酸速度を下げる対応を希釈送酸という。

上記の条件で, $[C]$ 上限 150 ppm のフェライト系極低炭ステンレス鋼を対象に, 希釈送酸を行った。

3.1.2 実験結果

本実験における脱炭速度の変化を図 4 に示す。希釈送酸条件では脱炭速度が 14% 向上する傾向が見られた。また希釈送酸を継続しても VOD 設備の中蓋寿命が低下しなかったことから, 溶鋼スプラッシュ量は増加しなかったと考えられる。本実験により真空処理時間が 3.5% 短縮された。

3.2 過剰脱炭抑止のためのガイダンス作成

3.2.1 脱炭ガイダンス概要⁵⁾

次に過剰脱炭防止のための真空送酸脱炭終点 $[C]$ 最適化を行った。フェライト系極低炭素ステンレス鋼では $[C]$ 上

表 2 希釈送酸の吹錬条件パターン
Table 2 Pattern of dilution oxygen blowing

		Oxygen blowing 1	Oxygen blowing 2
Convention	O_2 blowing velocity (Nm^3/min)	25	18
	Lance height (mm)	1 500	1 450
Experiment	O_2 blowing velocity (Nm^3/min)	25	15
	Ar blowing velocity (Nm^3/min)	0	10
	Lance height (mm)	1 500	1 650

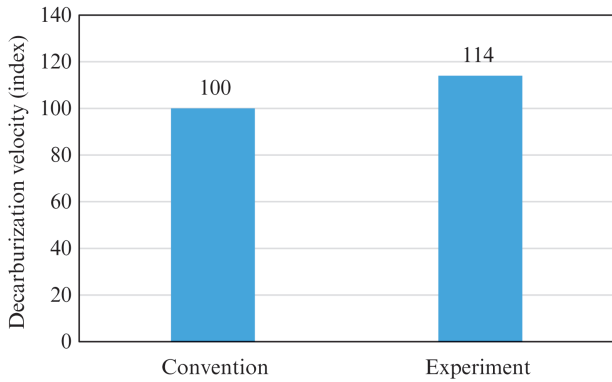
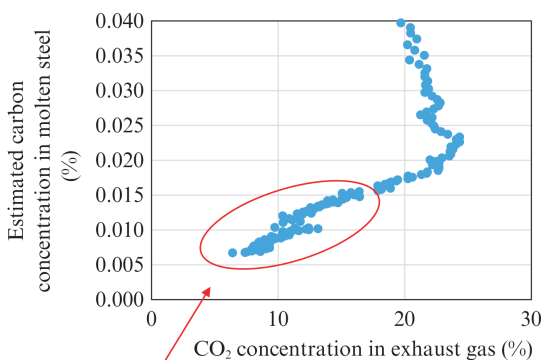


図4 希釈送酸による脱炭速度指数の変動

Fig. 4 Effect of decarburization velocity index by dilution oxygen blowing

限150 ppm規格が多く、真空送酸脱炭末期にサンプリングし、約10分間の分析待ちの最中に送酸終了しリムド処理へ移行する。分析の結果[C]値が低位の場合、キルド処理へ移行する。[C]値が高位の場合は再度真空送酸を行い、キルド処理へ移行する。脱炭末期では排ガス中のCO₂濃度が線形的に減少することから、従来、終点サンプリングのタイミングを排ガス中のCO₂濃度から判定していた(図5)。しかし同一のCO₂濃度と比較しても、[C]分析結果は溶鋼温度や真空度などの影響によりばらつきが大きい。そのため[C]分析結果が推定より高位に推移した場合再脱炭処理が必要となり処理時間延長の要因となることから、ばらつきが高位に推移した場合でも再脱炭する必要がないように、過剰な脱炭を行っていた。

本実験では、真空送酸脱炭終点[C]値的中精度向上を図り過剰な脱炭を防止することにより処理時間の短縮が可能であると考え、脱炭反応と相関がある因子を選び重回帰分析を行うことで脱炭終点時の[C]値を推定する脱炭ガイ



Conventional processing
Estimate carbon concentration in molten steel from CO₂ concentration in exhaust gas at the end of oxygen blowing.

図5 終点サンプリング時の排ガスCO₂濃度と推定[C]値の関係

Fig. 5 Relationship between estimated carbon concentration in molten steel and CO₂ concentration in exhaust gas

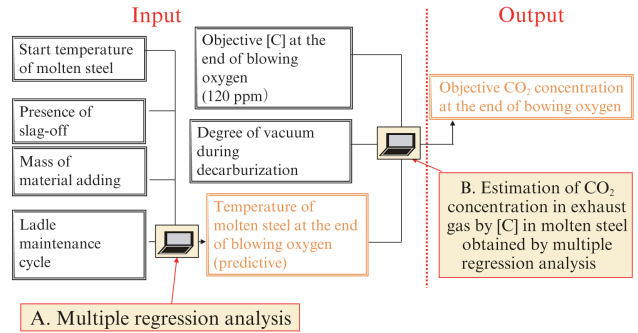


図6 脱炭ガイダンスの考え方

Fig. 6 Outline of decarburization guidance

ダンスを作成した。脱炭ガイダンスの考え方を図6に示す。最終的にオペレータが判断する要素は排ガス中のCO₂濃度とし、サンプリングを行う最適なタイミングをガイダンスで示すこととした。排ガスCO₂濃度に影響を与える因子は、①サンプリング時の[C]目標値(ここでは[C]=120 ppmを狙った)、②脱炭処理中の真空度、③サンプリング時の溶鋼温度であるが、このうち溶鋼温度はサンプリング時に初めて値が判明する因子であり、この値も重回帰により予測する必要がある。溶鋼温度に影響を及ぼす因子として、④処理前の溶鋼温度、⑤VOD処理前の除滓(転炉からの持ち込みスラグを取り除く作業)の有無、⑥送酸中の合金添加量、⑦取鋼が空であった時間、が挙げられる。

以上よりガイダンスの運用方法を下記のとおりとした。

- (i) VOD処理中に上記①~⑦の因子をPCに入力し、サンプリングすべきタイミングのCO₂濃度を算出する。
- (ii) 真空送酸脱炭末期に(i)で算出されたタイミングでサンプリングを実施。分析結果が判明する約10分間に送酸およびリムド処理を終了させる。
- (iii) 分析結果が判明し、[C]=120 ppm以下になっていることを確認し次第、即キルド処理へ移行する。

上記方法により、フェライト系極低炭ステンレス鋼を対象に実験を行った。

3.2.2 ガイダンス導入結果

図7に、本ガイダンス導入前後の脱炭終点サンプリング時の排ガスCO₂濃度(%)と、真空送酸脱炭終点[C]値の実績を示す。ガイダンス適用により、排ガスCO₂濃度が高位の状態でもサンプリングできるようになり、その結果真空送酸脱炭終点[C]値が高位となった。また、ガイダンス適用前はCO₂濃度が7~15%の領域で[C]値のばらつきが大きかった(70~140 ppm)が、ガイダンス適用後は低減している(60~110 ppm)。これはガイダンスを適用することでサンプリング[C]値のばらつきを抑えられ、その結果[C]値を高位にコントロールできたことを示している。ガイダンス導入前後の平均铸造[C]値を図8に示す。ガイダンス導入後、[C]成分不適合は発生しなかった。本ガイダンス導入により真空処理時間を6.9%短縮できた。

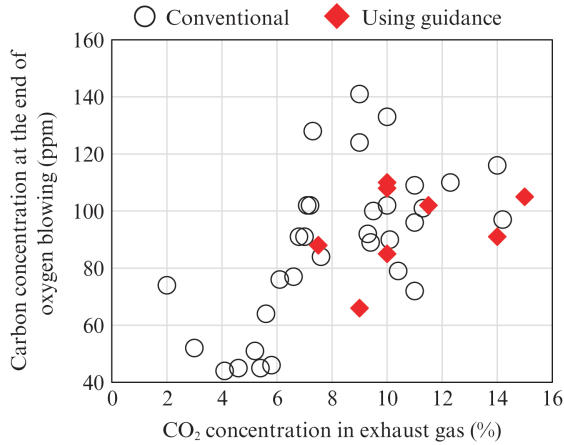


図7 サンプルング時の排ガス CO₂ 濃度と終点 [C] 値の実績
Fig. 7 Relationship between CO₂ concentration exhaust gas and carbon concentration at the end of blowing oxygen

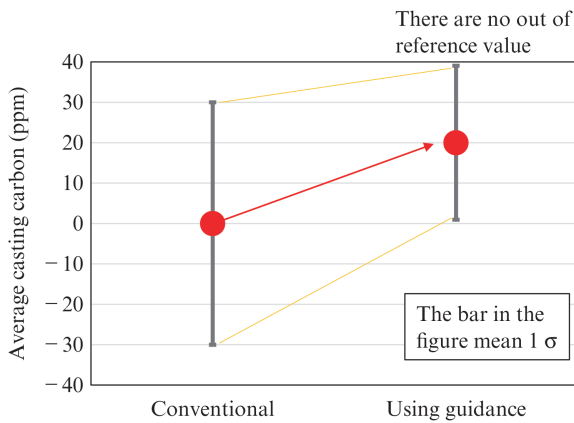


図8 脱炭ガイダンス適用前後の casting [C] 値推移
Fig. 8 Transition of casting [C] value after application of decarburization guidance

3.3 処理中の合金添加タイミング変更

3.3.1 合金添加タイミング変更実験概要⁵⁾

続いて、真空送酸脱炭中の合金添加タイミングを変更した。従来は、送酸中に添加する合金が含有する C 成分の影響を最低限にするために送酸初期に合金を添加していたが、送酸初期の温度降下の影響で脱炭素効率の低下を招いていた。これに対し、先述した脱炭ガイダンスの導入によってより精度の高い終点判定が可能となり真空送酸脱炭終点 [C] 値のばらつきを低位にできたことから、合金を送酸末期に添加しても [C] 上限値外れは発生しないと考えた。合金添加タイミングの変更による影響の概念図を図9に示す。従来の送酸初期の合金添加では、合金中に微量に含まれる C が及ぼす [C] ピックアップ影響が送酸末期には収束しており、[C] 値のばらつきを抑制できていたが、一方で溶鋼温度の低下による脱炭素効率の低下を招いていた。

これに対し、送酸末期の合金添加では、合金含有 C によ

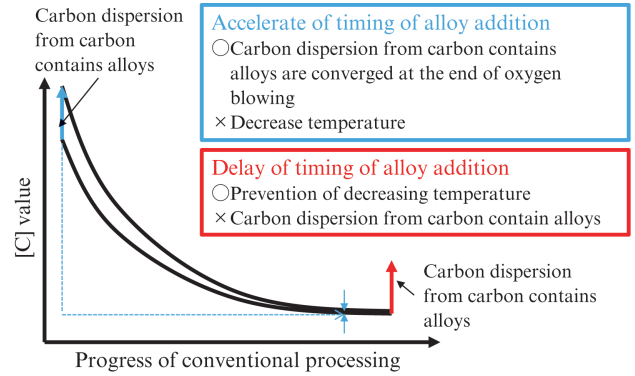


図9 合金添加タイミング変更による影響の概念図
Fig. 9 Effect of delay timing of alloy addition

表3 合金添加タイミング変更による処理時間変動推定
Table 3 Effect of delay timing of alloy addition

Item	Decarburization time	Procedure
1. Decarburization efficiency	-0.15	Calculate decarburization efficiency from temperature transition
2. Decarburization time of carbon from added alloy	+0.08	Calculate decarburization efficiency of beginning and late decarburization temperature
Total	-0.07	

Conventional decarburization time means 1.0

る [C] 値のピックアップが高位となるものの、脱炭処理末期まで溶鋼温度を高位に維持できるため、脱炭酸素効率の低下を防止できると考えた。

3.3.2 実験結果

上記の検討では、①溶鋼温度アップによる脱炭酸素効率向上と②合金含有 C による脱炭時間増影響が考えられ、それぞれが脱炭時間にどの程度影響するか計算した。その結果を表3に示す。脱炭処理時間が7%短縮すると推定できたため、合金末期添加による処理時間の短縮は可能と判断した。合金添加タイミングを変更した結果、VOD 真空送酸中の脱炭酸素効率が20%向上し、真空処理時間を7.3%短縮できた。

4. 結果まとめ

VOD 真空送酸中の脱炭効率の向上および過剰脱炭の抑止という観点から3つの実験を実施し、以下に示す生産能力の向上を達成した。

VOD における生産能力が①希釈送酸実施により3.6%、②脱炭ガイダンス導入により8.0%、③合金添加タイミング変更により9.9%向上した。その結果、VOD の生産能力が

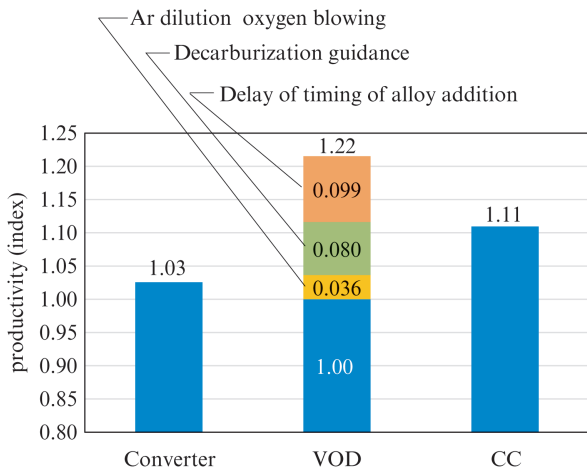


図 10 本取り組みによる VOD 生産能率向上効果まとめ
Fig. 10 Result of improvement of VOD processing

22%向上し、VOD プロセスの律速解消が可能となった（図 10）。

5. おわりに

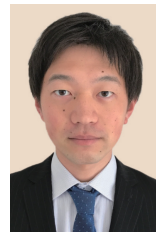
フェライト系極低炭ステンレス鋼の VOD 処理時間短縮に取り組んだ。得られた知見を以下にまとめる。

- ① 真空上吹き希釈送酸により、CO 分圧が低位な状態で脱炭処理を進めることができた。その結果地金やスラグの飛散によるトラブルを抑えつつ脱炭酸素効率を高位に維持することができ、生産能率が 3.6%向上した。

- ② 脱炭ガイダンスの運用により脱炭末期のサンプリングタイミングの適正化を図ることができ、その結果、[C] 値の成分不適合を発生させることなく過剰脱炭を防止することで、生産能率が 8.0%向上した。
 - ③ 合金添加タイミングの変更により送酸中の温度を高位に維持することで脱炭素効率の向上を図り、生産能率が 9.9%向上した。
- これらの実験により、VOD 処理の生産能率が 22%向上し、VOD 律速の解消を達成できた。

参考文献

- 1) 廣田哲仁, 野村寛, 奥山悟郎. VOD によるステンレス鋼の高清浄度. 川崎製鉄技報. 1998, vol. 32, no. 2, p. 78-81.
- 2) 川崎製鉄千葉製鉄所. 千葉第 4 製鋼工場の建設と操業. 日本鉄鋼協会 第 113 回製鋼部会. 1995, 自由-1.
- 3) 藤堂渉, 仮屋和広, 小笠原太. JFE スチール東日本製鉄所（千葉地区）におけるステンレス鋼製造技術の改善. JFE 技報. 2016, no. 38, p. 75-80.
- 4) 藤堂渉. VOD 処理時間短縮への取り組み. 日本鉄鋼協会 第 138 回特殊鋼部会資料. 2014, 共-9.
- 5) 高島大洋. クロム系ステンレス鋼の VOD 処理時間短縮. 日本鉄鋼協会 第 146 回特殊鋼部会資料. 2016, 自-2.



高島 大洋



藤堂 渉



寺嶋 知道