
薄鋼板向け連続鋳造スラブの高清浄化技

Kawasaki Steel's Steelmaking Technologies for Mass Production of High Cleanliness Steel Sheet

三木 祐司 (Yuji Miki) 竹内 秀次 (Shuji Takeuchi)

要旨：

近年の世界的な薄鋼板市場における高品質化の要求にともない、川崎製鉄では、千葉、水島両製鉄所において欠陥の極めて少ないスラブの製造技術開発を行ってきた。本報告では、これらの開発技術の中で、主に、次の項目について紹介する。(1) 溶銑予備処理の改善, (2) スラグ組成, 二次精錬プロセスの最適化, (3) タンディッシュによる溶鋼再酸化防止, (4) 鋳型内溶鋼流動制御。これらの新技術によって、ここ 10 年でコイルの欠陥発生は 1/10 まで低減してきている。

Synopsis：

The demand for high quality steel sheets has been increasing in the world market. Kawasaki Steel has developed, at its Chiba and Mizushima Works, new steelmaking technologies to produce high quality slabs without defects. In this report, the following technologies to improve the cleanliness, quality and productivity of the slabs are introduced. (1) Improvement of hot metal pretreatment, (2) Control of slag composition and optimization of ladle refining, (3) Suppression of reoxidation of steel in a tundish, (4) Flow control of molten steel in a mold. With these technologies, surface defects have been reduced down to one tenth in the last ten years.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Kawasaki Steel's Steelmaking Technologies for Mass Production of High Cleanliness Steel Sheet



三木 祐司
Yuji Miki
技術研究所 製鋼研究
部門 主任研究員(課
長補)



竹内 秀次
Shuji Takeuchi
技術研究所 製鋼研究
部門長

要旨

近年の世界的な薄鋼板市場における高品質化の要求にともない、川崎製鉄では、千葉、水島両製鉄所において欠陥の極めて少ないスラブの製造技術開発を行ってきた。本報告では、これらの開発技術の中で、主に、次の項目について紹介する。(1) 溶銑予備処理の改善、(2) スラグ組成、二次精錬プロセスの最適化、(3) タンディッシュによる溶鋼再酸化防止、(4) 鋳型内溶鋼流動制御。これらの新技術によって、ここ 10 年でコイルの欠陥発生は 1/10 まで低減してきている。

Synopsis:

The demand for high quality steel sheets has been increasing in the world market. Kawasaki Steel has developed, at its Chiba and Mizushima Works, new steelmaking technologies to produce high quality slabs without defects. In this report, the following technologies to improve the cleanliness, quality and productivity of the slabs are introduced. (1) Improvement of hot metal pretreatment, (2) Control of slag composition and optimization of ladle refining, (3) Suppression of reoxidation of steel in a tundish, (4) Flow control of molten steel in a mold. With these technologies, surface defects have been reduced down to one tenth in the last ten years.

1 緒言

近年の世界的な薄鋼板用スラブの高品質要求の高まりから、川崎製鉄では千葉、水島製鉄所における溶鋼の高清浄化技術の開発を続けてきた。高生産性で、高品質のスラブを製造するためには、製鋼工程の予備処理から鑄造にわたる種々の技術が必要である。

本報告では、(1) 溶銑予備処理、(2) スラグ組成、二次精錬プロセスの最適化、(3) タンディッシュによる溶鋼再酸化防止、(4) 鋳型内溶鋼流動制御などの新しい技術開発を紹介し、薄板材における品質向上のための取り組みについてまとめた。

2 溶銑予備処理

千葉および水島の 2 つの一貫製鉄所では約 98% という高い溶銑率で操業しており、長寿命の大型高炉による安価で豊富な溶銑のメリットを享受している。このような高い溶銑率から得られる熱余裕度を活かして、脱 P 効率の高い酸化鉄インジェクションによる溶銑予備処理を溶銑のほぼ全量に対して実施し、トータル精錬コストを低減している。

Fig. 1 に溶銑予備処理工程の概略を示す。溶銑は高炉鑄床で酸化

鉄ブラスティングにより予備脱 Si され、脱 Si スラグを除滓した後トビードでの酸化鉄インジェクションによる脱 P 処理をほぼ全量に対して実施し、さらにソーダ灰 (Na_2CO_3) または CaO 系フラックスのインジェクションによる脱 S 処理を経て、溶銑 P 濃度を約 0.15% から 0.02~0.05% 程度まで低下した後、転炉で脱 C を行っている。Fig. 2 に溶銑予備処理比率の推移を示す。予備処理比率を増大したことにより転炉の P 汚染が低減し、転炉精錬の安定化により一層のフラックスコストの低減が可能となった。また転炉スラグ中の P 含有量が低減したことにより、転炉スラグをほぼ全量焼結工程にリサイクルして鉄、CaO 源として有効利用し、銑鋼トータルでの発生スラグ量を大幅に削減できた。

3 スラグ組成

最近の転炉での CaO 原単位の推移を Fig. 3 に示す。溶銑予備処理によって転炉での脱 P 負荷が低減したことにより、転炉での CaO 使用量の削減を追求した結果、約 16 kg/t まで低減できた。熱力学計算ソフト Chem-sage を用いた検討により、過剰に使用していた未溶解の CaO を削減して脱 PCaO 効率の向上を進めるとともに、 Al_2O_3 、MgO も含めたスラグ組成の適正化を行った。さらに転炉への装入 Si、P 濃度が低減してスラグ組成が変化した結果、取鍋への流出スラグ量およびスラグ中 P 濃度が低減し、スラグ中の P の溶鋼中への再移行(復 P)を防止しつつ Al 灰による取鍋スラグ

* 平成11年10月28日原稿受付

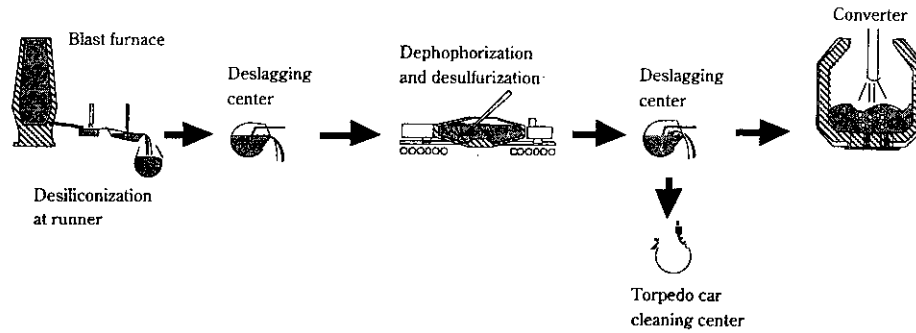


Fig. 1 Hot metal pretreatment process at Mizushima Works

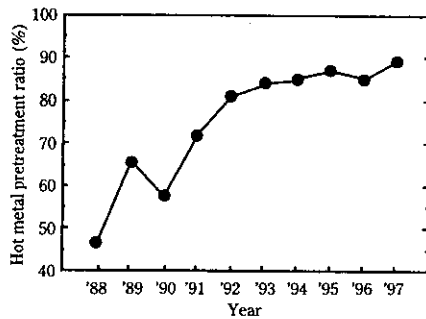


Fig. 2 Trend of hot metal pretreatment ratio

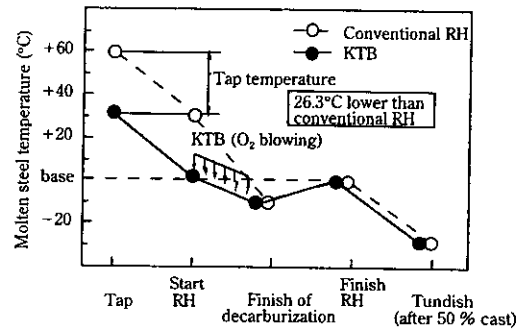


Fig. 4 Transition of molten steel temperature

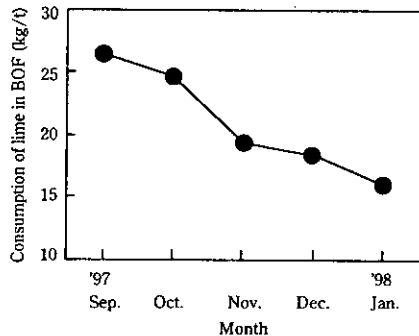


Fig. 3 Trend of line consumption in BOF

の還元処理を行うことが可能となった。これにより溶鋼清浄度を低下させる Al_2O_3 系介在物生成の酸素源である取鍋スラグ中の (T. Fe) は大幅に低減し、溶鋼清浄度が向上した。

4 二次精錬

さらに RH 脱ガス装置への酸素上吹き設備 (RH-KTB) の導入によって、脱 C および熱補償の機能が向上した結果、極低炭素鋼の精錬においても、大幅な出鋼 C 濃度の上昇および出鋼温度を低下できた²⁾。Fig. 4 に極低炭素鋼精錬における溶鋼温度推移を通常 RH と比較して示した。KTB により RH での温度降下を防止できた結果、転炉の出鋼温度は約 26°C 低下した。このように極低炭素鋼の溶製における転炉での脱 C および昇温の負荷が低減した結果、転炉精錬における過酸化を防止でき、転炉耐火物、合金鉄などが低減できた。Table 1 に千葉製鉄所での極低炭素鋼 ([C] ≤ 100 ppm) 吹錬における転炉出鋼温度、(T. Fe)、[C]、[O]、Al 原単位の例を示す。さらに KTB による脱 C 機能を活用して、極低炭素鋼の溶製におい

Table 1 Average values of refining conditions for ultra-low carbon steel at Chiba Works

Tapping temperature	1 626 °C
[C] at tapping	0.035%
[O] at tapping	467 ppm
(T. Fe) at tapping	11.3%
Aluminum consumption to produce unit steel	1.39 kg/t

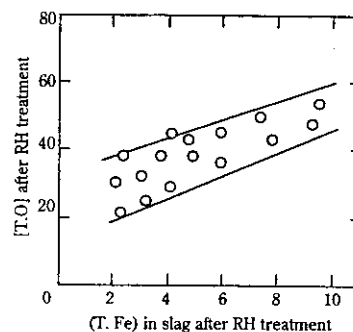


Fig. 5 Relation between (T. Fe) and [T. O] after RH degassing

ても RH 処理前に Al 灰による取鍋スラグの還元処理を適用することが可能となった。これにより Fig. 5 に示したように極低炭素鋼においてもスラグ中の (T. Fe) の低減により溶鋼清浄度が向上し³⁾、薄板表面欠陥を大幅に低減することができた⁴⁾。

自動車用などの冷間圧延鋼板の加工性の向上に対する要求から、極低炭素鋼の C 濃度を 20 ppm からさらに低下する試みとして、以下のような脱 C 速度定数の増大のための反応工学的な対策を検討した。

Table 2 Design parameters and rate constants for decarburization in RH degassers at Mizushima Works

	No. 2 RH Conventional vessel	No. 2 RH New vacuum vessel	No. 4 RH Conventional vessel
D (m)	0.6	1.0	0.6
Q (t/min)	120	240	90
A (m ²)	3.5	5.1	5.1
K_{calc} (min ⁻¹)	0.18 (Base)	0.30	0.19
K_{obs} (min ⁻¹)	0.18	0.31	0.18

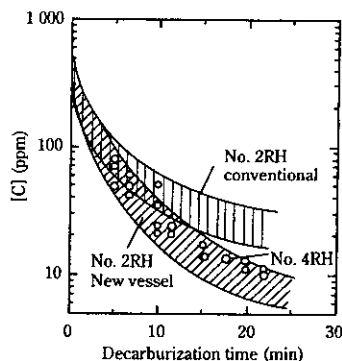


Fig. 6 Change of C content for conventional and new vacuum vessels in No. 2 RH and in No. 4 RH

脱ガス槽および環流管断面積を大幅に拡大する実験を、水島製鉄所 No. 2 RH において実施した。No. 2 RH および No. 4 RH での実験条件を Table 2 に示す。ここで、 d は浸漬管内径 (m)、 A は下部槽の断面積 (m²)、 K_{calc} は脱 C 速度定数の計算値、 K_{obs} は脱 C 速度定数の実測値を示す。No. 2 RH で通常下部槽 ($d = 0.6$ m, $A = 3.5$ m²) と新型下部槽 ($d = 1.0$ m, $A = 5.1$ m²) を用いた場合と、No. 4 RH ($d = 0.75$ m, $A = 4.9$ m²) の場合の C 濃度推移を Fig. 6 に示す。 d と A がともに大きい新型下部槽の脱 C 速度は通常の下部槽のそれに比べて大きく、処理時間 20 min での到達 C 濃度で 6~12 ppm が得られた。 d と A が No. 2 RH 通常下部槽と新型下部槽の間にある No. 4 RH は、Table 2 に示すように脱 C 速度定数が両者の中間にあり、到達 C 濃度も両者の中間にある。これらの結果より得られた装置設計の指針に基づき、両製鉄所において RH の増強を行い、 $[C] < 20$ ppm の極低炭素鋼を大量工程生産することが可能となった⁵⁾。

また特に脱 C の停滞する極低炭域での脱 C 反応を促進するため、H₂ インジェクション法を検討した⁶⁾。Fig. 7 に H₂ インジェクション法と通常 RH の到達 $[C]$ を比較した。20 min 程度で $[C] < 10$ ppm まで脱 C 可能であることが分かる。通常 RH では $[C] < 20$ ppm では溶鋼中からの CO 気泡の生成が停滞して脱 C 速度が著しく低下するが、H₂ インジェクション法では、環流管に吹き込まれた H₂ ガスの一部が溶鋼中に溶解して、真空槽内で溶鋼中から気泡が発生しやすくなるため、 $[C] < 20$ ppm においても脱 C 速度の低下が軽微となる。

5 タンディッシュホットリサイクルと溶鋼再酸化防止

水島製鉄所第 4 連続鋳造機では、タンディッシュホットリサイク

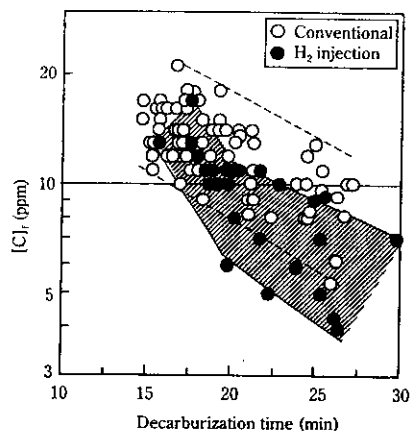
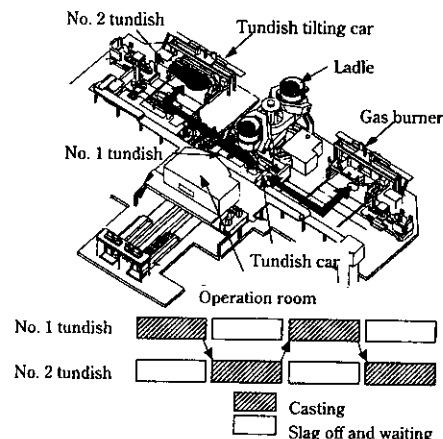
Fig. 7 Relation between final C content and decarburization treatment time in H₂ injection method and in conventional method

Fig. 8 Hot-cycle operation with two tundishes at No.4CC in Mizushima Works

ルを行っている。Fig. 8 にタンディッシュのホットリサイクルの概念を示す。タンディッシュ内の残鋼を排出し、2 機のタンディッシュを交互に用いることによって、タンディッシュをメンテナンスヤードで補修することなく操業できる。この場合、準備中のタンディッシュの加熱の際に、付着した地金が酸化することで FeO が生成し、鋳込み初期のスラブの清浄度を悪化させることが問題となった。このため、川崎製鉄では N₂ ガスジェットヒーター⁷⁾を開発した。

Fig. 9 に、N₂ ガスジェットヒーターの概念を示す。N₂ ガスはヒーター A またはヒーター B の熱交換によって 1500 °C まで加熱される。condition 1 では、ヒーター A の蓄熱体は LDG と COG の混合ガスによって加熱され、この間、純 N₂ はすでに加熱されているヒーター B の蓄熱体に送り込まれて加熱される。加熱された N₂ ガスはタンディッシュに送られる。condition 2 では、逆に、N₂ ガスはヒーター A で加熱され、ヒーター B の蓄熱体はガスバーナーで加熱される。このように、condition 1 と condition 2 が約 100 s ごとに交互に繰り返されることで、20 h の待機でも、再酸化なく、また、熱ロスもガスバーナーと同程度で、タンディッシュを約 900 °C で保熱できる。

Fig. 10 に、最ボトムおよび 2 枚目のスラブの熱延板の表面欠陥を比較した。N₂ ジェットヒーターによって、大幅な欠陥低減が達成されている。

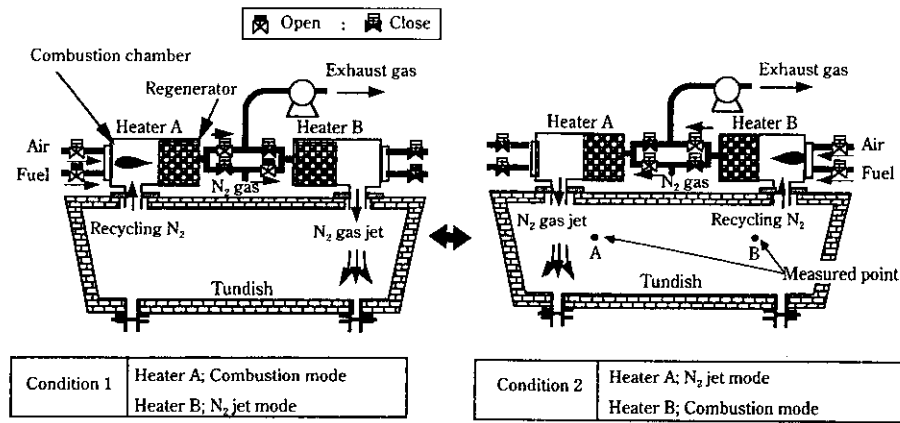
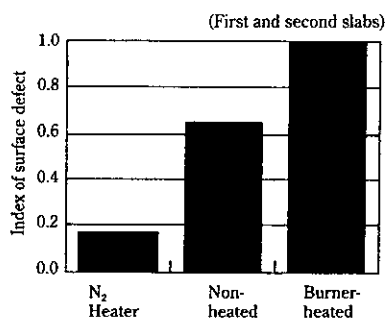
Fig. 9 Schematic diagram of N₂ Jet Heater

Fig. 10 Comparison of hot-coil surface quality

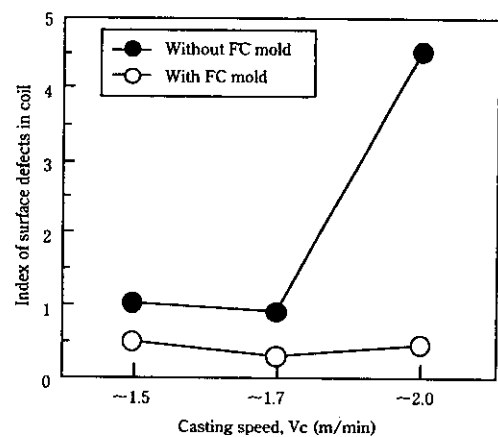


Fig. 12 The effect of the FC mold on surface quality of cold-rolled coils

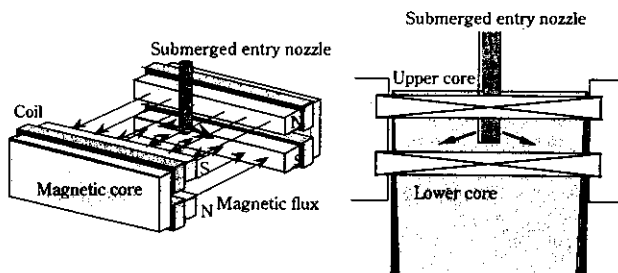


Fig. 11 Schematic view of the FC mold

6 鋳型内溶鋼流動制御

従来の EMBR (electromagnetic braking) の問題点を解決するために当社では新しいタイプの電磁ブレーキである FC モールド (flow-control mold)⁹⁾ を開発した。Fig. 11 に FC モールドの模式図を示す。FC モールドは従来の EMBR とは異なり、モールド全幅に 2 対の直流コイルを保有しており、幅方向に均一な磁場を発生させる。上部磁極は、メニスカス部の溶鋼流速や変動を減少させ、モールドパウダーの削り込みや渦巻き込みを防止する。また下部磁極は鋳片内部へ向かう下降流速を低減し、スラブ内部への介入物侵入を減少させる。

FC モールドの使用により、高速鋳造時でも従来よりも表面欠陥の発生率を低減でき (Fig. 12)、また、磁粉探傷 (MT) 欠陥も大幅に低減できている (Fig. 13)⁹⁾。

また、FC モールドによる表面欠陥低減の機構についても検討が

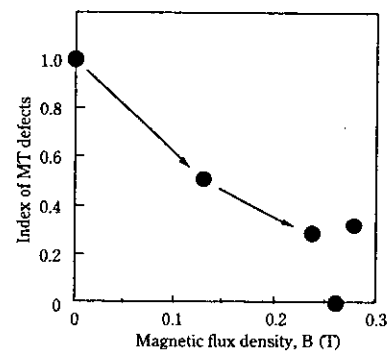


Fig. 13 Index of MT defects in the cold-rolled steel sheets with and without the application of the FC mold

なされてきた。モデル実験などにより、溶鋼速度変動が溶鋼へのパウダーの巻き込みに大きく影響することが明らかとなり、FC モールドによるパウダー欠陥の低減は、磁場による溶鋼の速度変動低減の寄与が大きいものと考えられる⁹⁾。

さらに、水島製鉄所 No. 4 連続鋳造機では、連続鋳造機と熱間圧延工場は熱片無人搬送台車で直結されており、トーチ切断、スラブマーキング、スラブ搬送、加熱炉への装入は完全に自動化されている。連続鋳造機-加熱炉間の搬送に要する時間は 2.5 min で、移動台車は輸送中のスラブの温度低下を少なくするとともに、高温高頻

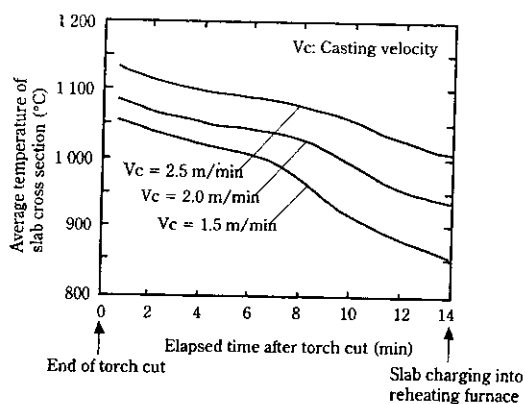


Fig. 14 Transition of slab temperature

度の使用条件に耐えうる設計としている。

Fig. 14 に、トーチ後の経過時間によるスラブ温度の推移を示した。本設備によって、加熱炉へ装入されるスラブの温度は 850 °C 以上を確保できている。また、中炭素鋼の DHCR 達成のため、内部割れ防止の観点より、コーナー部のミストブレイ供給停止やスラブの表面温度を曲げ矯正部で脆化温度域を避けるように制御している。その結果、中炭素鋼の表面割れを抑制しつつ、90% の DHCR 率を達成している。結果、DHCR 対象である No. 4 加熱炉の燃料原単位が約 200 MJ/t 低減された¹⁰⁾。

上記技術に加え、浸漬ノズルやパウダーの高粘度化等の改善¹¹⁾に

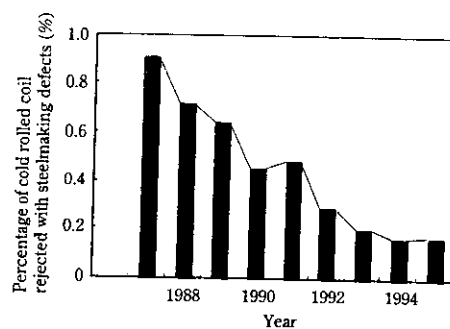


Fig. 15 Improvement of surface quality of cold-rolled coil with steelmaking defects

より、Fig. 15 に示すように冷間圧延コイルの製鋼要因欠陥発生率は過去 10 年間に 1/10 まで低減し、冷間圧延鋼板の表面および内部品質の大幅な改善がなされている。

7 結 論

川崎製鉄では、以上のような、(1) 溶銑予備処理、(2) スラグ組成、二次精錬プロセスの最適化、(3) タンディッシュによる溶鋼再酸化防止、(4) 鋳型内溶鋼流動制御などの新しい技術開発によって、高能率で高品質のスラブの製造が可能となり、結果、鋼板の表面品質、内部品質の大幅な向上が達成されている。

参 考 文 献

- 1) 水藤政人, 相沢完二, 有吉政弘, 永井亮次, 西川 廣, 大宮 茂: 川崎製鉄技報, 22(1990)3, 143
- 2) 亀山恭一, 西川 廣, 荒谷 誠, 朝穂隆一, 田村 望, 山口公治: 川崎製鉄技報, 23(1991)2, 136
- 3) M. Suda, M. Suitou, J. Hasunuma, S. Ohmiya, and F. Sudo: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 75(1992), 229
- 4) J. Hasunuma, Y. Kurose, S. Hiwasa, and F. Sudo: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 73(1992), 91
- 5) 加藤嘉英, 藤井徹也, 末次精一, 大宮 茂, 相沢完二: 鉄と鋼, 79(1993)11, 1248
- 6) 山口公治, 竹内秀次, 反町健一, 北野嘉久, 桜谷敏和: 材料とプロセス, 6(1993), 177
- 7) T. Nakagawa, K. Hara, J. Hasunuma, H. Osanai, R. Yamaguchi, and S. Hashimoto: Steelmaking Conf. Proc., ISS, 80 (1997), 307
- 8) 井戸川聡, 北野嘉久, 戸澤宏一: 川崎製鉄技報, 28(1996)1, 46
- 9) 戸澤宏一, 井戸川聡, 中戸 参, 反町健一: CAMP-ISIJ, 9(1996), 604
- 10) 内田秀史, 菊川裕幸, 小西敏弘, 石川好藏, 頭山 奨, 松川敏胤, 岡本浩志: 材料とプロセス, 6(1993)5, 1427
- 11) 飯屋和広, 北野嘉久, 濱上和久, 山内 章, 井戸川聡, 糸山賢司: 材料とプロセス, 7(1994), 281