

技術論文

Technical Paper

高精度溶解制御による VSR 鋼塊の高品質化

齋藤克倫*, 浅野 怜*, 松谷博司*

Enhancement of VSR Ingot Quality by Precise Melt Control

Katsunori Saito, Rei Asano, and Hiroshi Matsuya

Synopsis

Vacuum Electro-Slag Remelting (VSR), which is one of Electro-Slag Remelting (ESR) process with vacuum chamber, was developed by Daido Steel for manufacturing ultra clean steels. VSR is much effective than conventional ESR to achieve lower atmospheric oxidization of slag, lower hydrogen pickup into molten metal, and higher deoxidation for low silicon bearing steels. Daido installed the new VSR with new function, melt rate controller by feed back of load cell processing and so on in May 2007.

The results are as follows;

- a) Resistance swing control enhanced the accuracy of the electrode positioning.
- b) Increase in cooling water flow shallowed pool depth and reduced harmful large carbides.
- c) Load cell feedback control stabilized the melt rate and pool shape.

By this way, it has become possible to obtain high-quality ingots, which possess shallow pool depth and stable pool configuration, compared with conventional VSR.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株)渋谷工場(以下、当社という)は、Electro-Slag Remelting (ESR) に真空排気機能を付加した Vacuum electro-Slag Remelting (VSR) を 1988 年に開発し実用化を果たしている。VSR とは、当社によって高纯净度鋼の製造を目的に開発された設備である。真空排気により溶鋼と大気の遮断が可能となり、通常の ESR と比べ、溶鋼酸化が少なく、加えてスラグ中の SiO₂ 活量も ESR と比べて低位であるため、低 Si 鋼での低酸素化が可能である。また、大気の影響を受けないため、水素性欠陥のリスクも少なく、含 CaO 系スラグを使用する大型鋼塊の製造にも適している。

当社では、高纯净度鋼の需要拡大に伴い、2007 年 5 月にロードセルフィードバックによる溶解速度制御などの機能を付加した新 VSR を増設した。本報では、VSR の特徴、および新 VSR の紹介、新 VSR で製造した鋼塊の品質について報告する。

2. VSR について

2. 1 VSR の設備諸元

Fig.1 に設備概略図を示す。VSR は真空下または不活性ガス雰囲気下 (13 ~ 100 kPa) で消耗電極を溶解するため、VAR (Vacuum Arc Remelting) と同様に密閉容器の中で溶解を行う構造となっている。真空排気には油回転式ポンプとルーツポンプを使用し、最高で 1 Pa の真空度を得ることが可能である。また、密閉容器内で溶解を行うため、粉塵が飛散することも無く、ESR と比較して作業環境面でも良好である。

2. 2 VSR の操業方法

VSR の溶解スタート方法は、ESR と同様であり未溶解スラグを用いるコールドスタート法である。電極から採取した金属板および着火材 (チップングダライ) をツールと呼ばれる銅製のプレート (モールドの底部品となる) の上にセットした後、溶解に使用する消耗電

2009 年 4 月 23 日受付

* 大同特殊鋼(株)渋谷工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

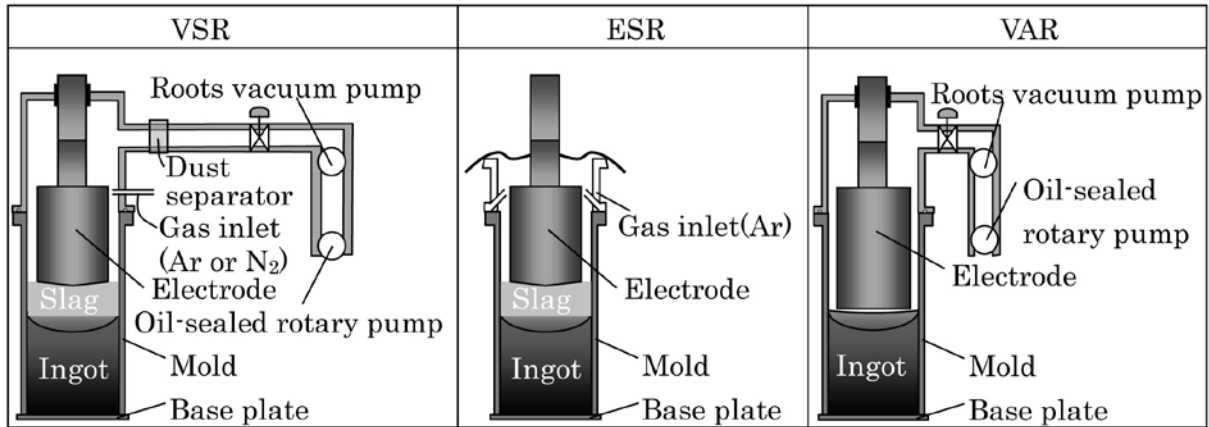
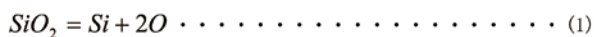


Fig.1. Schematic Diagram of VSR Equipment.

極をモールドにセットする。前述したように VSR の溶解は真空下で行うため、溶解前に大気圧 (100 kPa) から 1 Pa 以下になるまで排気し、その後 Ar を設定圧力まで導入する。使用するスラグは、ESR と同様に使用前に十分に乾燥させ、スラグ中の水素を減少させる。乾燥したスラグは、溶解前に装入する初装スラグと溶解開始後に初装スラグが滓化した後に入れる追装スラグの二回に別けて装入する。溶解は、ESR と同様の操作を行い、溶解末期にはホットトップと呼ばれる電流値を徐々に低くしていく溶解を行い、引け巣や二次パイプの防止を図る。

2. 3 VSRの脱酸挙動

ESR, VSR では、スラグにより脱酸を行うことで、電極の酸化物系介在物を除去し、高纯净度鋼の製造が可能である。一般的なステンレス鋼や高速度工具鋼の ESR における脱酸は Si 脱酸であり、式(4)に示すように溶鋼中 [O] は溶鋼中 [Si] とスラグ中の SiO₂ 活量に依存する¹⁾。



$$\log K = \frac{-30110}{T} + 11.4 \dots\dots\dots (2)$$

$$K = \frac{a_{Si} \cdot a_O^2}{a_{SiO_2}} = \frac{f_{Si} [\%Si] \cdot f_O^2 [\%O]^2}{a_{SiO_2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$[\%O] = \sqrt{\frac{\exp(-30110/T + 11.4) \cdot a_{SiO_2}}{f_{Si} \cdot f_O^2 \cdot [\%Si]}} \dots\dots\dots (4)$$

- (K : 平衡定数
- T : 温度 (K)
- [%i] : i 成分の濃度 (mass%)
- a_i : i 成分の活量
- f_i : i 成分の活量係数

VSR も同様の脱酸平衡が成り立つ。

また、一般的に、Holzgruber らが Fig.2 に示すように、雰囲気酸素分圧が高くなると溶鋼中 [O] は高くなる²⁾。これは、酸素分圧の上昇により、溶鋼中 [Si] が酸化し、スラグ中の SiO₂ 活量が上昇するためである。従って、鋼中 [O] を低減するには、雰囲気酸素分圧を低減することが有効であり、ESR では Ar をモールド内に通気し溶解中の酸素分圧の低減を図っている。しかし、ESR は開放容器で溶解されるため、大気浸入が少なからず発生し、Fig.3 に示すように酸素分圧は 2.0 kPa となる。これに対し、VSR は、密閉容器の中であつ真空下で溶解が行われるため、酸素分圧は 1.3 Pa と ESR の酸素分圧よりも低くなる。

Fig.4 に溶解後の SUS316L 鋼塊の [Si] を示す。ESR で

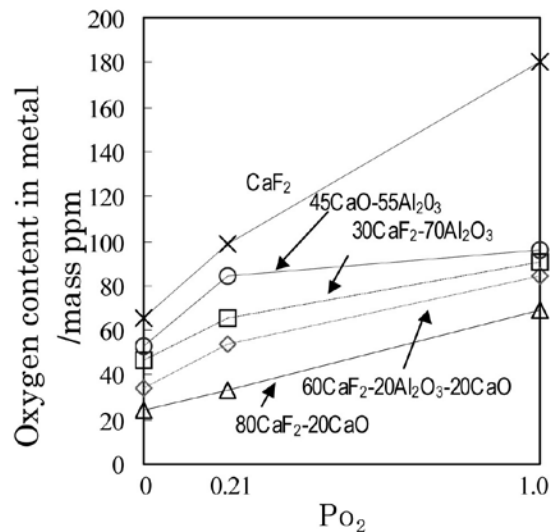


Fig.2. Relation between oxygen content in molten metal and oxygen partial pressure²⁾.

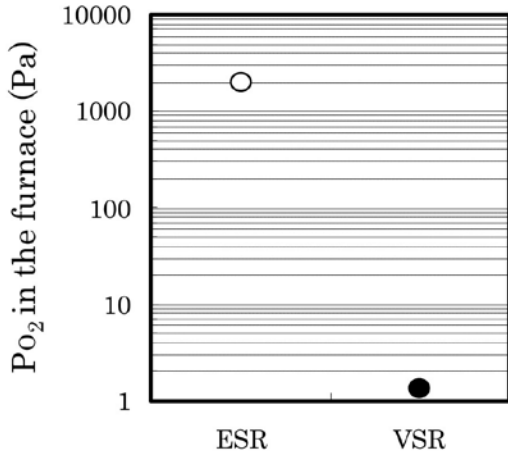


Fig.3. Comparison of Oxygen Partial Pressure for ESR and VSR.

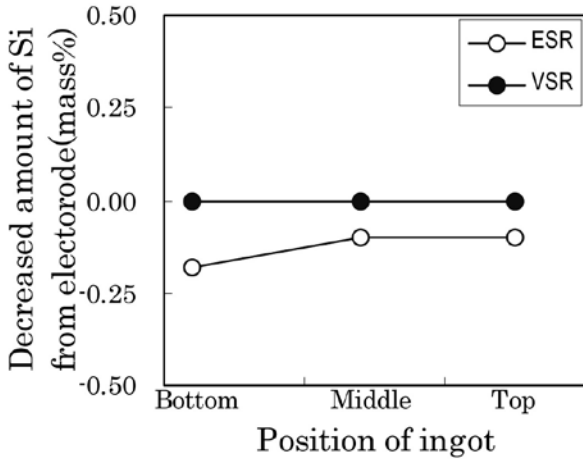


Fig.4. Changes in Si Concentration in SUS316L.

は溶解時、鋼塊 [Si] が減少するが、VSR では [Si] の変化はない。従って、スラグ中の SiO₂ の増加もなく、SiO 活量は変化しない。Fig.5 に CaF₂-Al₂O₃-SiO₂ 系における溶解後の SiO₂ 活量を示す³⁾。実際のスラグ分析の結果、ESR での SiO₂ 活量が 0.01 であるのに対し、VSR での SiO₂ 活量は 0.005 以下となる。

このように、VSR は低 SiO₂ 活量での脱酸が可能であるため、ESR では困難であった低 Si での低 [O] 鋼が製造可能である。Fig.6 に示すように、ESR で [O] が 0.002 mass% 以下の鋼塊を製造するには、[Si] は 0.200 mass% 以上必要であったが、VSR では [Si] が 0.100 mass% 以下で製造可能である。

VSR は ESR より脱酸能力が向上するため、溶鋼中 [Si] が同じであっても [O] の低減が可能である。ここで、Fig.7 に SUS304 の介在物測定結果を示す。測定方法

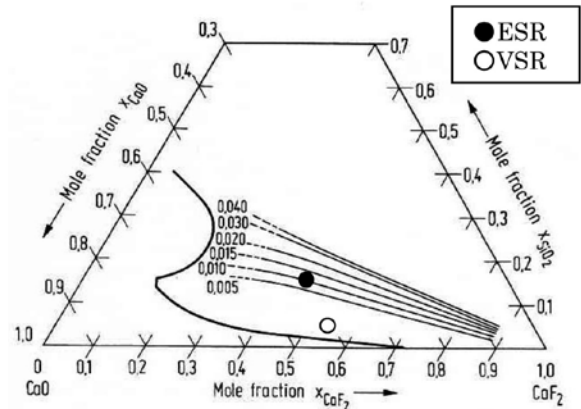


Fig.5. Differences in SiO₂ Activity in Slag between VSR and ESR³⁾.

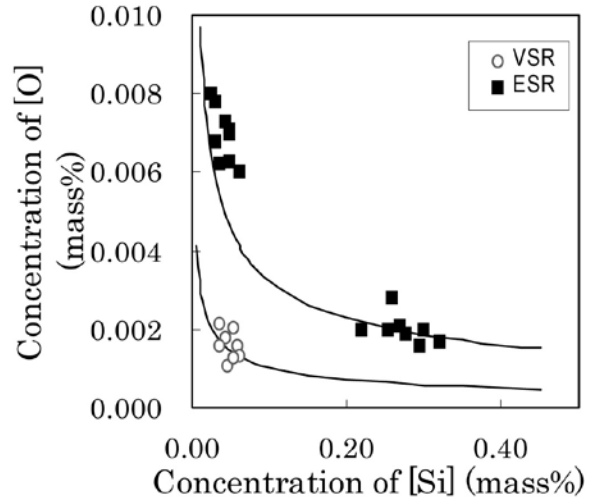


Fig.6. Differences in ingot Si concentration between VSR and ESR.

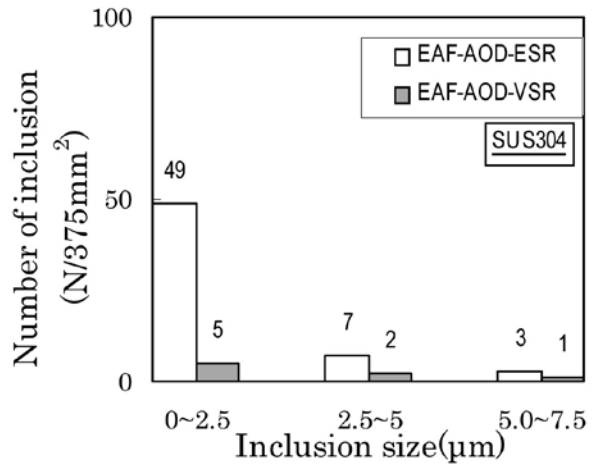


Fig.7. Differences in Inclusion Size Distribution for Each Process.

は光学顕微鏡により旧 JIS 法によって測定した。[O] の分析値は ESR インゴットは 0.0020, VSR インゴットは 0.0009 であり [Si] は同じであるため, VSR 溶解時には顕著に酸化物系介在物が低減される結果となった。従って, 鋼塊の清浄度も, 図に示すように VSR は ESR よりも改善される。

3. 新 VSR の紹介

当社では, VSR で製造している低 Si 鋼を始めとした高純度鋼の需要の拡大に伴い, 2007 年 5 月に新 VSR を増設した。この新 VSR は, 再溶解材の品質向上に非常に重要な因子とされる溶解中のプール形状を最適化するために以下の 2 つの機能 (抵抗スイングによる電極位置制御, ロードセルフィードバックによる溶解速度制御の機能) を付加した。これらの機能の追加によりさらに高品質な鋼塊の製造が可能となった。

3. 1 設備能力の比較

Table 1 に, 新 VSR の設備能力を示す。

3. 2 電極位置制御について

一般的に ESR のプール形状は, 電極のスラグへの浸漬位置と溶解速度に依存する⁴⁾といわれ, プール形状を一定かつ浅く保つことが, 高品質の鋼塊を得るための重要な操業因子であると考えられている。これは, VSR 溶解でも同様であり, プール形状が不均一になると偏析, 介在物など品質悪化の原因となる。

電極のスラグへの浸漬位置は, 抵抗 (V/I) と一定の関係があるため, 旧タイプの ESR は, この現象を利用して電極位置制御 (抵抗制御) を採用している。しかし, 溶解の進行に伴い生じるスラグ組成が変化したり, スラグがモールドと鋼塊との間に入り込むことで, スラ

グ量が減少することによって, 抵抗値が見かけ上変化するため, 溶解初期と同様の精度での電極位置制御が困難となる。そこで経験に基づき, 抵抗値の設定目標値を変更することで適正な電極浸漬, すなわちプール形状を保持させていたが, 電極個々の成分の差異や使用するスラグ組成の微小変動により溶解ごとにわずかなプール形状のばらつきが発生する問題点があった。これに対し, 新 VSR では, Fig.8 に示すような電極浸漬位置がスラグ表面に近づくと抵抗の振れ幅 (抵抗スイング) が大きくなる現象⁵⁾を利用した抵抗スイング制御を採用した。この抵抗スイング制御という高精度な電極位置制御方法を採用したことにより, 抵抗が変化した場合でも, Fig.9 に示すように, 浸漬位置をより適正な浅い位置で制御することが可能となった。

3. 3 溶解速度制御について

溶解速度が変動するとプール深さと溶鋼の部分凝固時間に影響を与える⁶⁾。部分凝固時間とは, 平衡液相線から平衡固相線まで通過する時間のことである。このため, 高速度工具鋼に代表される高炭素鋼では, 一般的にプール深さが深くなると部分凝固時間が長くなり, デンドライトが大きくなる。それに伴いマイクロ偏析が顕著となり, 粗大な炭化物が増加して, 鋼塊品質に悪影響を与える⁵⁾。この他にも溶解速度の変動は, 介在物が増加するなど鋼塊品質悪化の原因の一つに考えられている。

溶解速度を安定するためには溶鋼への供給熱量の変化を考慮する必要がある。しかし 3.2 で述べたように溶解の進行に伴ってスラグ量が減少するため, スラグのジュール発熱量も変動する。そこで, 新 VSR では, 溶解ごとの抵抗のばらつき影響を受けないロードセルフィードバック方式 (電極重量をロードセルで測定し, 重量変化を制御装置へフィードバックする) を採用し

Table.1. New VSR, ESR and VAR equipment capabilities.

Max ingot diameter (mm)	1100
Power source	Single-phase alternating current
Max melting current (kA)	36
Range of vacuum pressure control (Pa)	$(1.33-10.13) \times 10^4$
Electrode drive	Screw drive
Electrode position control	Resistance + Swing
Power control	Melt rate feedback

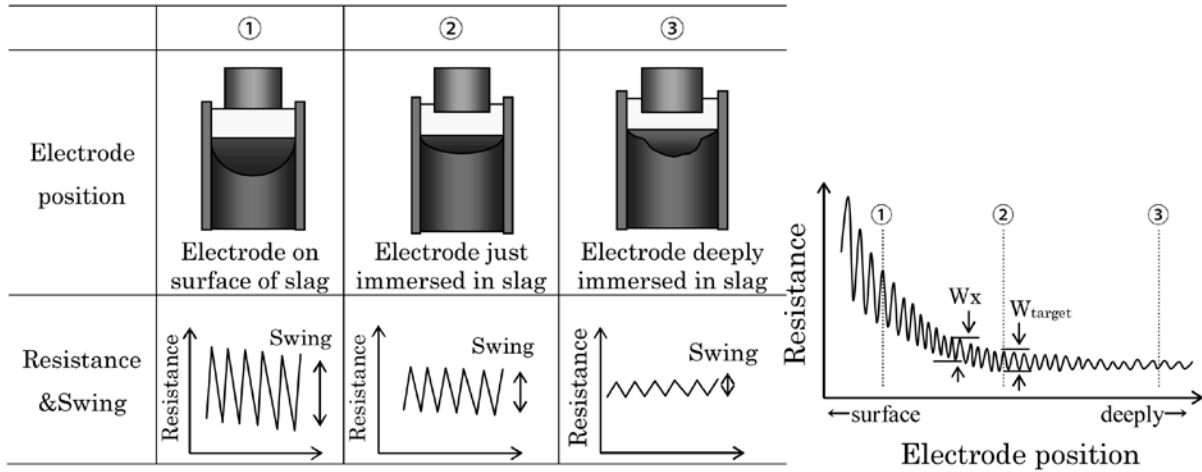
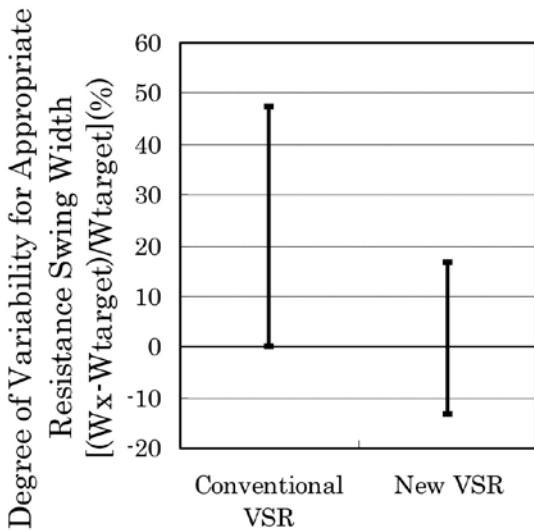


Fig.8. Relationship between Electrode Position, and Resistance Value and Resistance Swing.



$$\frac{W_x - W_{target}}{W_x} = \text{Degree of Variability}$$

W_x = Actual Resistance Swing Value

W_{target} = Setting Resistance Swing Value

Fig.9. Accuracy of Electrode Positioning Control.

た。これにより、溶解速度の変動が解消され、プール深さを短時間で一定に保つことが可能となった。また、Fig.10 に示すように溶解ごとでの溶解速度のばらつきも低減しており、より均一な内質を有した鋼塊を製造することが可能となった。

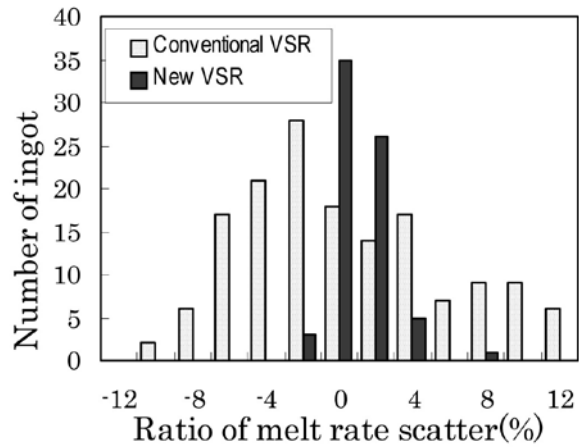


Fig.10. Comparison of Erratic Variations in Melt rate between Conventional VSR and New VSR.

3. 4 新VSRの鋼塊品質

新 VSR では、これまで記述したように、抵抗スイングによる電極位置制御とロードセルフフィードバックシステムによる溶解速度制御を採用した。また、冷却水の水量と流速を増加したことで冷却能力が大幅に向上している。これらの効果により、Fig.11 に示すように、従来の VSR と比較して、同溶解速度でもプール深さを浅く制御することができ、より高品質な鋼塊を製造することが可能となった。また、プール深さを浅くすることで、Fig.12 に示すように、鋼塊中の炭化物の析出量を抑えることに成功した。

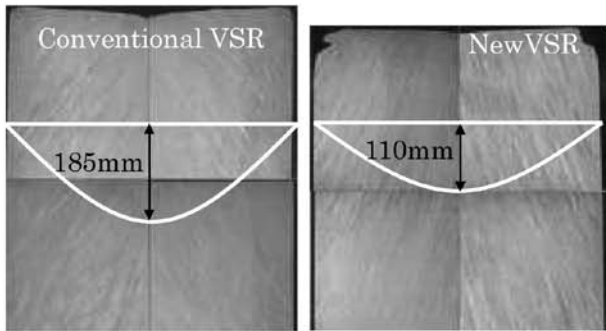


Fig.11. Comparison of Pool Depth between Conventional VSR and New VSR.

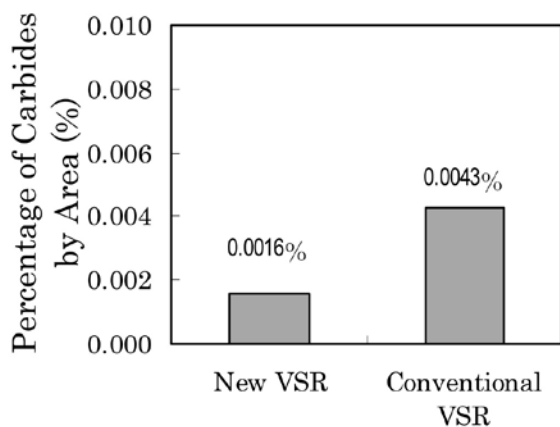


Fig.12. Differences in Carbides between Conventional VSR and New VSR.

4. 結 言

本報で紹介した新 VSR は、当社の独自技術である減圧下の ESR 技術に加え、抵抗スイングによる電極位置制御の精度向上、ロードセルフフィードバック制御による溶解速度の安定化、冷却水量の増加による冷却能向上を図った。これによって、従来の VSR に比べ、プール深さが浅く、かつプール形状が安定的に保たれた良質な鋼塊を得ることが可能となった。その結果、炭化物系の析出物量も低減し、更なる高品質な製品の製造が可能となった。

(文 献)

- 1) 的場幸雄, 郡司好喜, 桑名武:鉄と鋼,45 (1959) ,1328.
- 2) W.Holzgruber,E.Plockinger: Journal of The Iron and Steel Institute 211, (1973) ,533.
- 3) Verein Deutscher Eisenhüttenleute:Slag atlas, Committee

for Fundamental Metallurgy, (1981) ,122.

- 4) Y.Sato: Electroslag remelting methods phisico-chemical studies and technical problem, ISIJ, (1979) , 233.
- 5) 笹山新一: 第 143・144 回西山記念講座, 日本鉄鋼協会, (1992) , 223.
- 6) F.J.Zanner: Metal. Trans. B, 12 (1981) , 721.