

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

薄スラブ用モールドパウダーの現状

Mold Powder Trends on Thin Slab Mold Casting

伊 藤 純 哉
Junya ITO

高 橋 尚 志
Shoji TAKAHASHI

岩 本 行 正
Yukimasa IWAMOTO

品川技報

レビュー REVIEW

薄スラブ用モールドパウダーの現状

Mold Powder Trends on Thin Slab Mold Casting

伊 藤 純 哉^{*1} 高 橋 尚 志^{*2} 岩 本 行 正^{*3}
Junya ITO Shoji TAKAHASHI Yukimasa IWAMOTO

要 旨

鋼のニアネットシェイプ casting 技術が向上し、世界中で多くの薄スラブ連続 casting 機が稼働している。それに伴い、薄スラブ casting 用のモールドパウダーの開発が、操業と鋼品質の改善のために進められている。本報告では、薄スラブ用モールドパウダーの特徴について新技術の紹介と共に概要を述べる。

Abstract

The technologies of near net shape casting of steel products have been improving, and there are many thin slab casters operating around the world. Mold powder development for thin slab casting is also progressing for improvement of operation and steel quality. In this report, a summary of the characteristics of the mold powder is described along with the introduction of new technologies.

1. 緒言

鋼の連続 casting において、生産コスト低減や工程の省略を目的とし、より最終製品に近い形状の铸片を連続的に生産するニアネットシェイプ連続 casting が開発されて幅広く使用されている。例えば、薄鋼板用のモールド厚みが50-100mm程度の薄スラブ、H型断面形状のビームブランク、小断面のビレット、ラウンド形状のブルームやビレットなどを示す。これらのニアネットシェイプ casting はモールド形状や casting 速度などが通常と異なることから独自の技術開発が求められ、大きな進歩が認められている。

1980年代に、生産性の向上を目的とした薄スラブ連続 casting が開発され、商業用では1989年に Nucor Steel Crawfordsville において SMS 社製の

1. Introduction

In the continuous casting of steel, near net shape casting has been developed and widely used for the purpose of reducing production cost and omitting processes, and continuously producing cast steel having a shape closer to the final product. For example, thin slab casting with mold thickness 50 to 100 mm for producing steel sheet coil, beam blank casting with an H-shaped cross section mold, a billet which is a small shape cross section for bars, and round shaped cross section bloom and billet are all in the family of near net shape casting. Because these near net shape castings have different operational conditions than conventional slabs and blooms, unique technology development

*1 技術研究所 第3研究部 第2研究室 主任研究員 Staff Manager, Mold Powder R&D Sec., Research Dept. No.3, Research Center

*2 技術研究所 第3研究部 第2研究室 Mold Powder R&D Sec., Research Dept. No.3, Research Center

*3 技術研究所 第3研究部長 General Manager, Research Dept. No.3, Research Center

連铸機の操業が開始された^{1,2)}。その後、1990年代に30機程度まで急速に広まり、2015年には約63機の薄スラブ連続铸造設備が稼働している。一方で、日本では鋼板の高品質要求などが背景にあり、現在においても導入されていない。

薄スラブ連铸機の進歩過程において、圧下帯 (Liquid Core Reduction) の導入³⁾、電磁ブレーキによる铸型内溶鋼流動の改善、浸漬ノズル形状⁴⁾の工夫など様々な分野での技術開発が行われてきた。また、铸造鋼種も低炭 (炭素濃度0.01%~0.08%) や中炭 (炭素濃度0.15%~0.25%) などの一般鋼種のみならず包晶鋼 (炭素濃度0.08~0.15%) や極低炭素鋼 (炭素濃度<0.01%) などまで拡大している。

薄スラブ铸造用モールドパウダーの技術開発も例外ではない。薄スラブ铸造は铸造速度が $3\sim 6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 程度と高速、モールド厚みが薄いなどの特徴がある铸造条件のため、良好な溶融性状で潤滑性に優れたモールドパウダーが必要であり、独自の技術進歩を示している。

本報告では薄スラブ用モールドパウダーの特徴および使用状況を示し、さらに当社の開発したモールドパウダーによる鋼の品質改善技術の一例を紹介する。

2 薄スラブ铸造の特徴と課題

2.1 特徴

薄スラブ铸造と一般的なスラブ铸造におけるモールド内条件の比較まとめをTable 1に示す。

2.2 铸片表面およびコイル品質の主な課題

高速で引き抜かれた铸片が、2次冷却帯で水冷された後、直結した150m程度の再加熱炉に挿入され、圧延されて順次コイルに成形される。直送圧延のためスケールオフ量が少なく铸片表面の疵が最終製品までの残りやすいことから、铸片表面の割れ、铸片表層下の非金属介在物、モールドパウダースラグ付着等の抑制が重要である。一般的に低炭鋼や極低炭鋼では介在物によるスリバー欠陥が、中炭鋼では铸片割れ欠陥の抑制が品質の主な課題となっている。

is required, and significant progress has been made.

In the 1980s, thin slab continuous casting was developed to improve productivity, and the commercial operation process made by SMS started up at Nucor Steel Crawfordsville in 1989^{1,2)}. In the 1990s, the system was expanded rapidly to about 30 casters. In 2015, approximately 63 thin slab continuous casting machines were in operation. On the other hand, they have not been introduced in Japan yet. This is due to high quality demands for steel sheet, plant space issues, and other reasons.

In the progress of thin slab continuous casting, technologies have been developed in various fields including introduction of Liquid Core Reduction³⁾, improvement of molten steel flow in the mold by electro-magnetic braking, and innovation of submersed entry nozzle (SEN) designs⁴⁾. Casting steel grades are expanding not only to common grades such as low carbon (carbon content 0.01 % to 0.08 %) and medium carbon (carbon content 0.15 % to 0.25 %), but also to peritectic grades (carbon content 0.08 % to 0.15 %) and ultra low carbon grades (carbon content < 0.01 %).

Technological development of mold powder for thin slab casting is no exception. Because the thin-slab casting is characterized by a high casting speed of about $3\text{ to }6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ and thin mold thickness, mold powder is required to have good melting properties and to provide excellent lubrication, which represents unique technological advances.

This paper presents the characteristics and concepts of mold powder for thin slab and introduces examples of steel quality improvement technology with mold powders.

2. Characteristics and Issues in the Thin Slab Casting

2.1 Characteristics

A comparative summary of casting conditions

Table 1 Comparison of casting conditions

	Thin Slab	Conventional Slab
Mold thickness / mm	50 - 100	200 - 300
Mold width / mm	600 - 3000	800 - 3200
Mold length / mm	950 - 1200	800 - 1000
Mold shape	Funnel / Parallel	Parallel
Operational casting speed / $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	3.0 - 6.0	0.6 - 3.0
Operational throughput / $\text{ton} \cdot \text{min}^{-1}$	1.5 - 4.5	2.0 - 9.6
Mold Perimeter length / m	1.3 - 6.2	2.0 - 7.0
Mold Heat area / m^2	0.03 - 0.3	0.16 - 0.96

2. 3 鑄造安定性の主な課題

薄スラブ鑄造では鑄造速度が速いことから、モールドと凝固シェル間の摩擦力が大きく、モールドパウダーの潤滑性が低い場合は凝固シェルがモールドに拘束されやすくなり、ブレイクアウトなどの操業トラブルが発生しやすい。

モールドと凝固シェル間の摩擦力を評価するためには、その間隙に存在するパウダーフィルムを構成する液体層と固体層それぞれの液体摩擦と固体摩擦を考慮する必要がある。例えば液体摩擦力 $F_l(\text{N})$ の関係は(1)式で与えられ、モールドパウダー粘度 $\eta(\text{Pa} \cdot \text{s})$ とモールドオシレーション速度 $V_m(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ と鑄造速度 $V_c(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ の相対速度 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ およびフィルム液体層厚み $d_l(\text{m})$ で計算できる⁵⁾。

$$F_l = \eta \cdot (V_m - V_c) / d_l \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方で、固体摩擦力 $F_s(\text{N})$ は(2)式で与えられ、モールド/パウダー固体層間の摩擦係数 η_s と溶鋼静圧 $H(\text{Pa})$ で計算され、モールドオシレーション速度や鑄造速度は関与しないとされている。

$$F_s = \eta_s \cdot H \quad \dots\dots\dots (2)$$

これらの関係から、鑄型振動速度およびモールドパウダー粘度が一定の場合、液体摩擦力は鑄造速度とモールドオシレーション速度差によって大きくなり、モールド上昇時に液体摩擦力が最大となる。したがって、鑄造速度が一般的なスラブよ

in thin slab casting and conventional slab casting is shown in Table 1.

2. 2 Main issues in the quality of cast strand and coil surface

The steel strand is withdrawn with high casting speed and it is water-cooled in the secondary cooling zone of the caster, then directly inserted into a connected reheating furnace. The strand is then rolled directly into a coil from the reheat furnace. The scale-off amount in this process is small and any defects on the strand surface tend to remain in the final product due to direct rolling. It is important to prevent quality defects such as cracking of the surface, non-metallic inclusions under the surface, and adhesion of mold powder slag. It is well known that sliver defects with inclusions in low and ultra-low carbon steel grades, and crack defects in medium carbon and peritectic grades are common problems.

2. 3 Main issues on the casting operational stability

Since the casting speed in thin slab casting is much higher than that of conventional slab, the friction force between the mold wall and the solidified shell becomes higher. When the lubrication property of the mold powder is insufficient, risk of the solidified shell sticking to the mold wall is increased, and it may cause

りもおおよそ2から3倍程度速く、比較的モールド振動数が大きい条件では摩擦が大きくなり铸片拘束が発生しやすく、液体摩擦力を低く維持するためにはスラグフィルムの液体層の低粘度化や低凝固温度化による厚みの確保などによる高い潤滑性が必要であることが分かる。

モールドと浸漬ノズルの間隙をFig.1に示す。一般的なスラブの場合は間隙が30mm以上確保されているが、平行モールドでは15～20mm程度に設定されている場合が多い。一方でファンネルモールドでは一般的なスラブ程度の間隙が確保されている。薄スラブ铸造では浸漬ノズルの断面形状が扁平であるため、ノズル裏までモールドパウダーを均一に散布するのが難しい上に、浸漬ノズルとモールドの間隙が狭いため、浸漬ノズルからの熱とモールドからの冷却を同時に受けるためスラグベアが生成しやすい傾向がある。スラグベアが大きく成長するとモールドと凝固シェル間へのスラグ流入を阻害するため、凝固シェルの潤滑

operational problems including a breakout.

In order to evaluate the frictional force between the mold wall and the solidified shell through mold powder slag film, it is necessary to consider the friction of both the liquid layer and solid layer in the slag film. For example, the relationship of the liquid frictional force F_l (N) is given by Eq. (1), and it can be calculated using the mold powder slag viscosity η (Pa·s), the relative speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and the film liquid layer thickness d_l (m)⁵⁾. The relative speed is difference between the mold oscillation speed V_m ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the casting speed V_c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

$$F_l = \eta \cdot (V_m - V_c) / d_l \cdots \cdots \cdots (1)$$

In addition, the solid friction force F_s (N) is given by Eq. (2). It is calculated using the friction coefficient η_s between the mold wall and the solid layer of the mold powder slag film, and the static pressure of molten steel H (Pa). It is not related to the mold oscillation or casting speed.

$$F_s = \eta_s \cdot H \cdots \cdots \cdots (2)$$

From these relationships, when the mold oscillation speed and the mold powder viscosity are constant, the liquid frictional force is increased by the relative speed, and the liquid friction force is maximized during mold moving to upward position. Therefore, the casting speed in thin slab casting is about 2 to 3 times faster than that of a conventional slab caster, and the friction force becomes high under the condition where the mold oscillation frequency is relatively high.

In order to maintain the low liquid frictional force, lowering the mold powder slag viscosity in the slag film and/or making a thicker liquid layer thickness with a low solidification temperature are an effective method.

The clearance between the mold wall and the submersed entry nozzle slag line (SEN) is shown in Fig.1. The clearance is normally

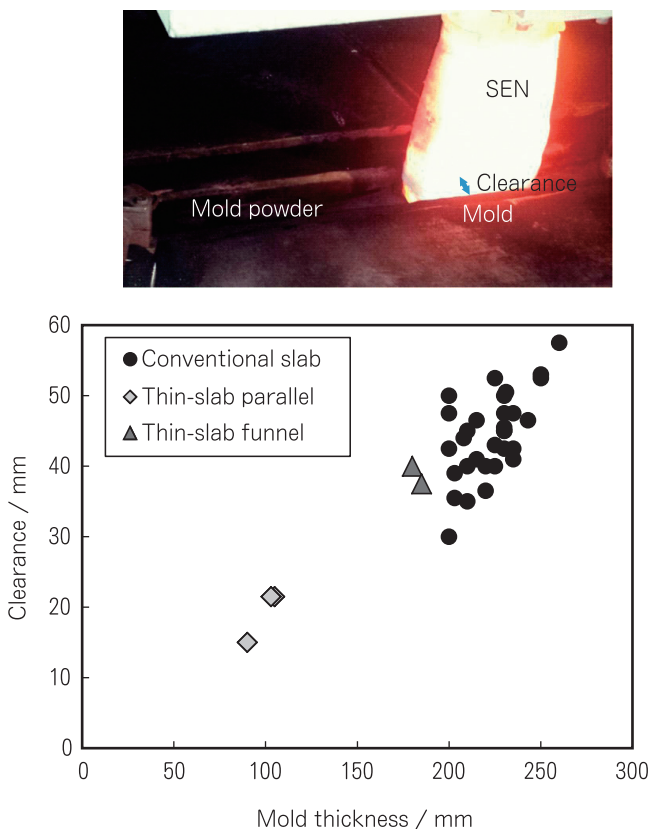


Fig. 1 Clearance between mold wall and submerged entry nozzle slag line surface.

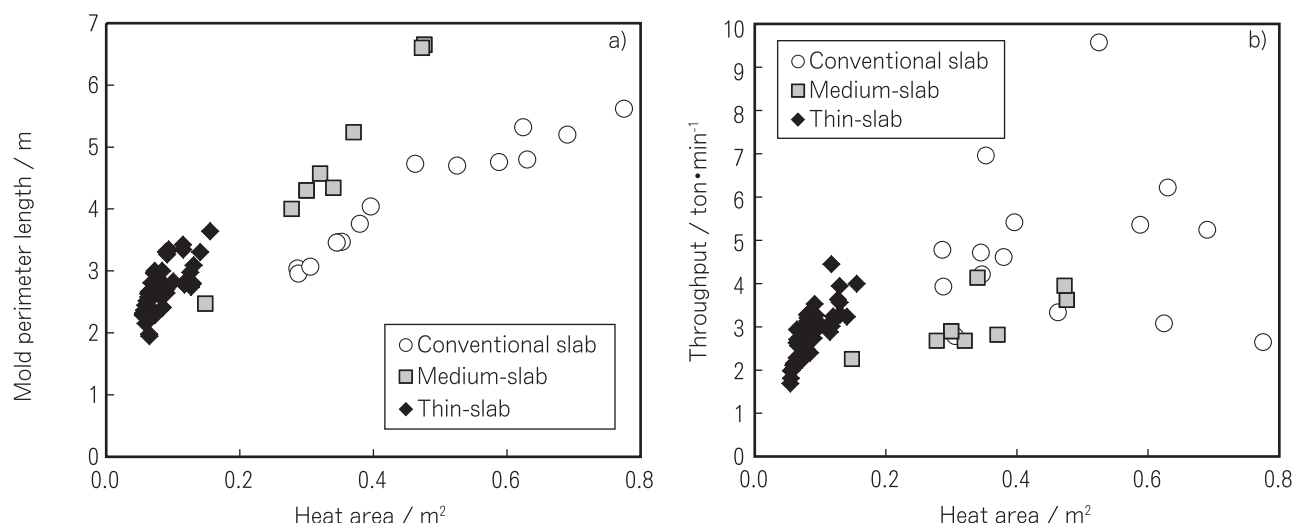


Fig. 2 Relation between mold heat area and a) mold perimeter length and b) throughput.

性が低下し、拘束性ブレイクアウトや铸片割れの操業トラブルや鋼品質不良を誘発しやすいため、カーボン原料の添加量や種類の選定など設計にはより注意が払われる。

通常のスラブ、中厚スラブ⁶⁾(厚み100～150mm)、薄スラブ連铸のモールドパウダーの受熱面積(溶鋼表面積)に対するモールド周囲長およびスループットの関係を図2に示す。薄スラブ铸造はモールド周囲長に比べて受熱面積が小さい。そのため、パウダースラッグの流入速度(消費速度)に対して溶融が遅くなり適正な溶融層厚みの確保が難しくなる場合がある。特にファンネルタイプモールドは短辺近傍のモールド厚みが50～65mmと薄く、短辺から浸漬ノズル方向へ向かう溶鋼流動により、溶融スラッグも浸漬ノズル側に流されるため、短辺近傍の溶融層の確保が難しく潤滑異常が発生する場合がある。一方、高速铸造であるが溶鋼スループットは铸片断面積が小さいことから一般的なスラブと同程度である。

3. 薄スラブ用モールドパウダーの特徴

一般的な薄スラブ用モールドパウダーの特徴と使用状況を以下に示す。

3.1 特性

主な薄スラブおよび一般スラブ用モールドパウ

30 mm or more for mold powder melting in conventional slab casting. However, in many cases only about 15 to 20 mm of clearance is available in the parallel type mold in thin slab casting. In the funnel type mold, the clearance is comparable to conventional slab in the funnel area.

It is difficult to maintain mold powder thickness uniformly at the back area of the SEN, because the cross-section shape of SEN is a rectangle in many cases. As the clearance gets narrow, the mold powder melting behavior tends to be worse. It results in slag roping because the area is given heating from the SEN and high cooling from the mold wall. When the slag rope grows too large, the flow of molten mold powder slag between the mold and the solidified shell is inhibited, and the lubrication property is decreased. Poor lubrication causes operational problems including sticker type breakouts, cracking on the strand surface, and other steel quality defects. More attention is paid to the mold powder design. This includes the amount and type of carbon added and the selection of raw materials that have good melting properties.

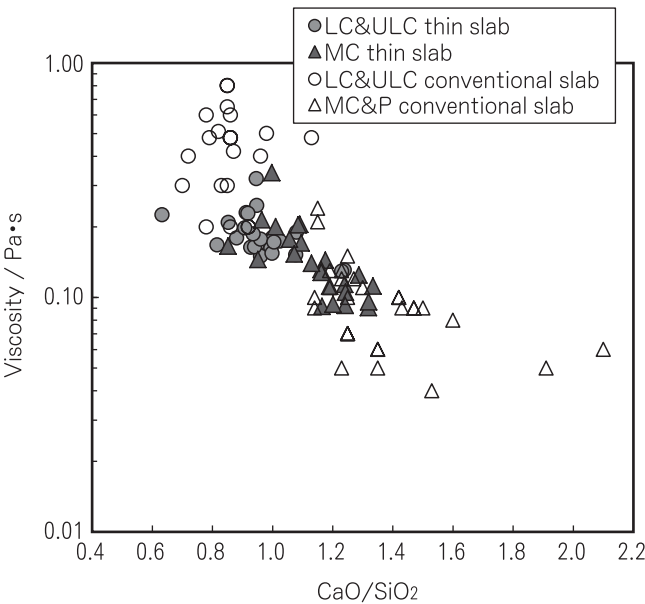


Fig. 3 Properties of mold powders for thin slab casting.

ダーの塩基度と1300℃におけるスラグ粘度の関係をFig.3に示す。さらに代表的な薄スラブ用モールドパウダーの品質をTable 2に示す。薄スラブ用モールドパウダーは一般的なスラブ用パウダーと比較して、低塩基度でも高フラックス組成によってスラグ粘度が0.3Pa・s未満に設計されている。また、中炭素鋼は亜包晶域を除きカーボン濃度0.16～0.25%で製造される鋼種が多いため、低炭パウダーを兼用する場合もある。鋳片割れ抑制のための高塩基化も進んでいるが一般スラブと比較すると低塩基度に設定されている場合が多い。こ

Figure 2 shows the relationship of the mold perimeter length and steel throughput to the heat area (molten steel surface area) in conventional slab, medium thickness slab (thickness: 100 to 150 mm)⁶⁾, and thin slab continuous casting. The thin slab casting has a smaller heat area regardless of the perimeter length. For this reason, it is difficult to increase the melting speed of the mold powder to match the consumption speed for maintaining the slag layer thickness. In particular it is difficult in the funnel type mold where the mold thickness of the narrow face side is 50 to 65 mm. The molten mold powder slag is also dragged to the SEN side by the molten steel flow, making it more difficult to maintain the molten slag layer thickness near the end of mold wall. Lubrication problems tend to occur in this area. Even with of the high casting speed, the molten steel throughput is about the same as that of a conventional slab because of the small mold cross section.

3. Characteristics of Mold Powder for Thin Slab Casting

Characteristics and actual usage data of typical thin slab mold powder are shown below.

3. 1 Characteristics

Figure 3 shows matrix of the basicity and the viscosity (1300 °C) of mold powder both for

Table 2 Typical property of mold powder for thin slab casting

	Mold powder A	Mold powder B
CaO/SiO ₂	0.95	1.15
Chemical composition / mass%		
F	8	9
Al ₂ O ₃ +MgO	7	5
Na ₂ O+Li ₂ O+K ₂ O	10	11
T.C	6	7
Viscosity at 1300 °C / Pa·s	0.15	0.13
Crystallization temperature / °C	1060	1120
Application	Low carbon steel	Medium carbon steel

これらの実績は、一般的なスラブ鋳造における高粘度化や緩冷却を目的とした高塩基度化などの品質改善手法は薄スラブ鋳造にそのまま適用することが困難であることを示唆している。

3. 2 実機鋳造状況

モールドパウダーの実機使用状況を以下に示す。

3. 2. 1 モールドパウダー消費量

モールドパウダーの消費量は潤滑性の指標となる。消費量が適正值以上確保されていれば、モールドパウダースラグがモールドと凝固シェル間に適正量流れ込み、良好に潤滑していると判断される。一般的に薄スラブ鋳造のパウダー消費量は鋳片通過単位面積当たりのモールドパウダー使用量で示され、(3)式で計算される。ここで、 $W(\text{kg})$ はパウダー使用量、 $L_t(\text{m})$ はモールド厚み、 $L_w(\text{m})$ はモールド幅、 $L_c(\text{m})$ は鋳造長さをそれぞれ示す。4か所の薄スラブ鋳造の実機のパウダー消費量をFig.4 a)に示す。ここで、ファンネルモールドは形状が複雑であるため、簡易的に平行モールドと仮定してパウダー消費量を計算した。薄スラブ鋳造におけるパウダー消費量は $0.06 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。一方、一般的なスラブ鋳造のパウダー消費量はおおよそ $0.20 \sim 0.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲内であり、薄スラブ鋳造のパウダー消費量は少なかった。しかしながら、この消費量はパウ

thin slab and conventional slab casters. In addition, the properties and chemical composition of typical thin slab mold powders are shown in Table 2. The thin slab mold powder is designed to have a slag viscosity of less than $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ due to having a high flux composition even at a low basicity as compared with the conventional slab mold powder. In addition, there are some cases where the low carbon mold powder has also been used for medium carbon steel, because many medium carbon steels are produced at a carbon content of 0.16 to 0.25 % to avoid the hypo peritectic range. High basicity for prevention of cracking has also been promoted, however, the basicity is often lower than that of medium carbon grades of conventional slabs. These trends suggest that it is difficult to directly apply quality improvement techniques such as high viscosity for prevention of mold powder entrapment and high basicity for softer heat removal used in conventional slab casting to thin slab casting.

3. 2 Application data in actual casting

Mold powder data from actual casting are shown in followings.

3. 2. 1 Mold powder consumption

The mold powder consumption is used for

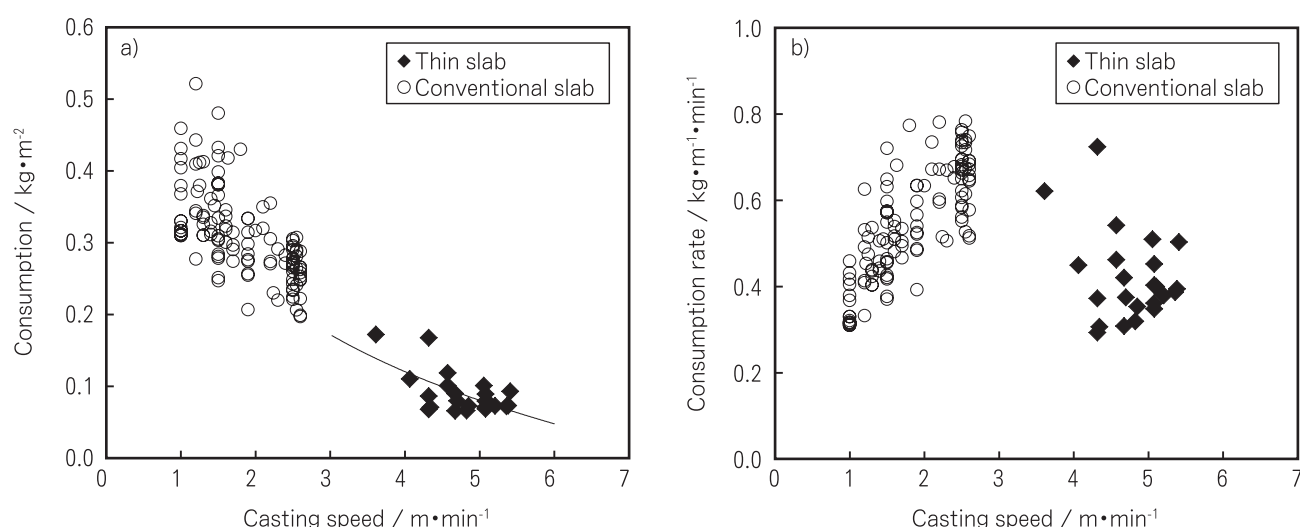


Fig. 4 a) Mold Powder Consumption, b) Mold Powder Consumption Rate.

ダースラグが铸片と同じ速度で流入したと仮定した計算であるが、別の見方として、(4)式で計算されるモールド周囲長あたりの消費速度 Q_r ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)がある。铸造速度与 Q_r の関係をFig.4 b)に示すと、薄スラブ铸造のパウダーのスラグ流入速度は一般的なスラブ铸造と同等であり、極端に少ないとは必ずしも言えない。

$$Q = W / (2(L_t + L_w) \cdot L_c) \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$Q_r = W \cdot V_c / (2(L_t + L_w) \cdot L_c) \cdots \cdots \cdots (4)$$

3. 2. 2 モールド内抜熱

薄スラブ铸造においてモールド抜熱量は凝固シェル厚みの指標として重要であることから、铸片表面積あたりの抜熱量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)が用いられる場合が多い。4 か所の薄スラブ連铸機で計測されたモールド抜熱量と铸造速度の関係をFig.5に示す。Fig.5 a)は低炭および極低炭素鋼铸造時のデータ、b)は中炭素鋼でのデータをそれぞれ示す。モールド抜熱量 HR ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)はモールド冷却水の入口および出口の温度差を用いて(5)式で計算される。ここで、 F_w は冷却水量($\ell \cdot \text{min}^{-1}$)、 D_{tw} (K)は冷却水の入出温度差、 L_m (m)はモールド長辺または短辺長さ、 V_c ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)は铸造速度をそれぞれ示す。

$$HR = F_w \cdot D_{tw} \cdot 0.004186 / (L_m \cdot V_c) \cdots \cdots \cdots (5)$$

evaluating the lubrication property. If the consumption rate is found to be greater than or equal to what has been found to be sufficient, then it is found that enough mold powder slag flows between the mold wall and the solidified steel shell, and it can provide enough lubrication. Generally, mold powder consumption in thin slab casting is expressed by the amount of mold powder used per steel strand unit area passing through the casting, and it is calculated by the Eq. (3). Here, W (kg) indicates mold powder usage amount, L_t (m) indicates the mold thickness, L_w (m) indicates the mold width, and L_c (m) indicates the cast duration length for mold powder usage. Mold powder consumption obtained from four thin slab casters is shown in Fig. 4 a). Here, since the funnel mold has a complicated shape, the mold powder consumption was calculated by assuming that the funnel mold was a parallel mold in a simple manner. Mold powder consumption in thin slab casters ranges from 0.06 to 0.15 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$. On the other hand, the powder consumption of conventional slab casting ranged approximately from 0.20 to 0.60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, thus the mold powder consumption of thin slab castings tends to be low. However, this consumption assumes that the mold powder

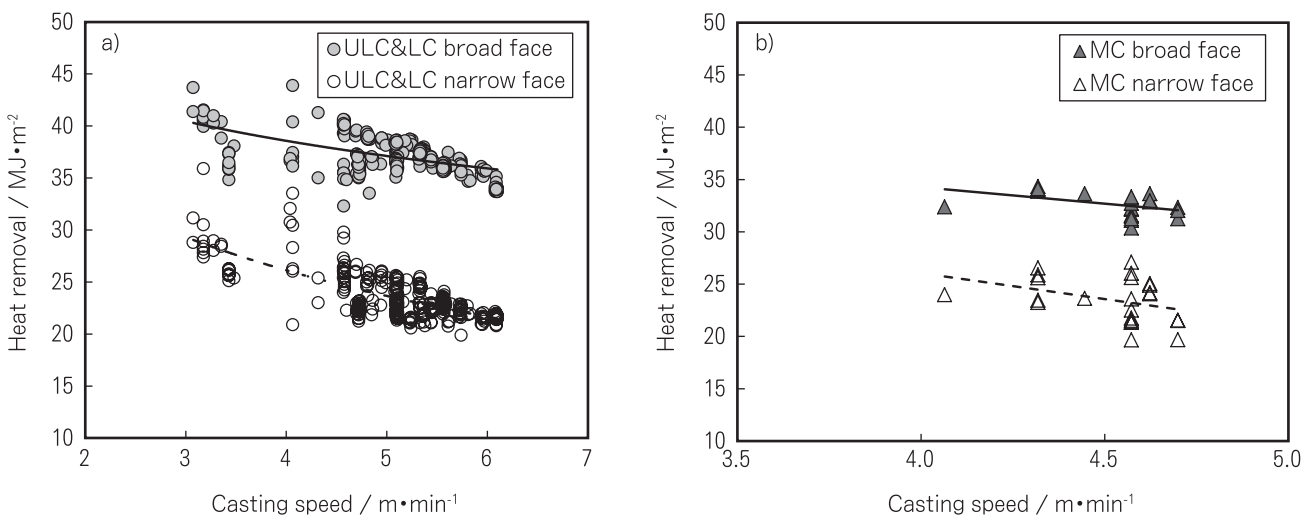


Fig. 5 Heat removal data, a) ULC and LC grades, b) MC grades.

極低炭/低炭鋼の casting ではモールド長辺はおよそ $35 \sim 45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、短辺はおよそ $20 \sim 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の拔熱量である。一方で中炭鋼は铸片割れを抑制するために緩冷却パウダーが用いられるため拔熱が低くなっており、長辺で $30 \sim 35 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、短辺で $20 \sim 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。また、铸造速度が増加するとモールド内の滞留時間が短くなるためモールド拔熱量が低下する傾向が認められた。一般的なスラブ casting の拔熱量は長辺において $40 \sim 70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲であり、それと比較すると薄スラブ casting では低い傾向を示した。

3. 2. 3 モールドパウダー溶融層厚み

モールドと凝固シェル間への安定的なスラグ供給による凝固シェルの潤滑、溶鋼の再酸化防止、介在物吸収のためには溶鋼表面に一定厚みのモールドパウダー溶融層の存在が必要である。同一モールドパウダー使用時のモールド各部位でのモールドパウダーの溶融層厚みと铸造速度の関係を Fig.6 に示す。ここで、図中の 1/4 Width はモールド幅方向の 1/4 位置を、Near SEN は浸漬ノズルから 50mm 位置を、Near Narrow Face は短辺モールドから 50mm 位置を示す。適用されているモールドパウダーは溶融温度やカーボンなどの原料種が適宜調整され、適正な溶融層厚み $8 \sim 30 \text{ mm}$ の範囲を示している。溶融層厚みはモールド内の溶鋼流動に大きく影響を受けて形成され、浸漬ノズル近傍が厚く、短辺近傍が薄い傾向が認められた。

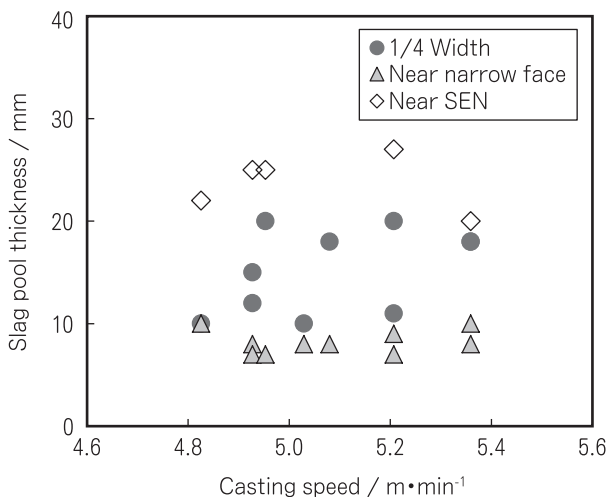


Fig. 6 Mold slag pool thickness.

slag is flowing with same speed as the strand. There is another view that the consumption rate Q_r ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) means the usage amount per mold perimeter length. Q_r is calculated by Eq. (4). The relation between Q_r and casting speed is shown in Fig. 4 b). The Q_r indicates slag inflow speed, and it is comparable to conventional slab casting mold powder results.

$$Q = W / (2(L_t + L_w) \cdot L_c) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_r = W \cdot V_c / (2(L_t + L_w) \cdot L_c) \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. 2. 2 Heat removal in the mold

In thin slab casting, the heat removal in the mold is important as an index of the thickness of the solidified steel shell, thus, the heat removal per unit casting strand surface area ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) is often used. Figure 5 shows the relationship between the heat removal and casting speed measured by four thin slab continuous casters. In Fig. 5 a) shows the data from low and ultra low carbon steel grade casting, and b) shows the data from medium carbon steel grades. The heat removal HR ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) is calculated by the Eq. (5) using the temperature difference of mold cooling water inlet and outlet. Here, F_w ($\ell \cdot \text{min}^{-1}$) indicates the mold cooling water flow rate, D_{tw} (K) indicates the inlet/outlet temperature difference of cooling water, L_m (m) indicates the mold width length for broad face or thickness length for narrow face, and V_c ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) indicates the casting speed respectively.

$$\text{HR} = F_w \cdot D_{tw} \cdot 0.004186 / (L_m \cdot V_c) \quad \dots\dots\dots (5)$$

In the casting of low and ultra low carbon steel grades, the HR in broad face mold is about 35 to 45 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, and the narrow face mold is about 20 to 30 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. On the other hand, HR of medium carbon steel grade is lower than that of low and ultra low carbon grades data because of the use of softer heat removal mold powders to prevent strand surface cracking, and it is shown to be 30 to 35 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ on the broad

4. 改良技術例

4. 1 低炭, 極低炭素鋼用パウダー

低炭鋼や極低炭素鋼の主な課題は表面および内部の介在物欠陥である。薄スラブ casting では鑄片が圧延機に直結しているため、パウダースラグ付着によりスケール生成量増加や付着物自体がコイル品質を悪化させる。そのため、品質改善のためにパウダースラグフィルムの鑄片からの剥離性に着目した。従来品は高フラックスかつ $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0.9$ 程度であり、表面張力が 1400°C で $390\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ であった。改良品は高 CaO/SiO_2 化、低フラックス組成とし、表面張力を $433\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ とした。スラグの高表面張力化によってパウダースラグフィルムの除去が促進され、コイルの表面状態が改善した。Fig.7にコイル表面写真を示す。従来品は浅い線状の傷が認められたが、高表面張力化

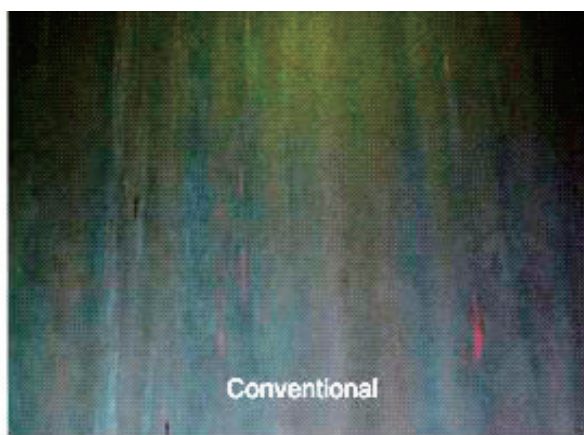


Fig. 7 Improvement on coil surface quality.

face mold and 20 to $30\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ on the narrow face. In addition, as the casting speed increased, the residence time in the mold becomes shorter, so that the heat removal amount in the mold decreases. The heat removal of conventional slab casting ranged from 40 to $70\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ on the broad face mold, so the heat removal in thin slab casting tended to be lower.

3. 2. 3 Molten mold powder slag layer thickness

In order to provide enough mold lubrication by stable slag inflow between the mold wall and the solidified shell, prevent reoxidation of the molten steel, and remove floating inclusions from the molten steel, the molten mold powder slag layer thickness needs to be sufficient. Fig. 6 shows the relationship between the molten mold powder slag pool thickness and the casting speed at each part of the mold when the same mold powder is used. Here, 1/4 Width indicates a quarter position across the width of the mold, Near SEN indicates a 50 mm position from the SEN, and Near Narrow Face indicates a 50 mm position from the narrow face mold. The mold powder showed an appropriate molten mold powder slag layer thickness in the range of 8 to 30 mm by optimizing the melting temperature and the type of raw materials such as carbon. The thickness of the molten mold powder slag layer was largely affected by the flow of molten steel in the mold, and the thickness tended to be thick near the SEN area and thin near end of the wall.

4. Examples of Quality Improvement Technology

4. 1 For low and ultra low carbon steel grades

The main quality issue in low and ultra low carbon steel are surface and inclusion defects. In thin slab casting, since the casting strand is directly connected to the rolling mill, an increase in both scale and mold powder slag

させた改良品はクリーンであった。

4. 2 中炭素鋼用パウダー

中炭素鋼は δ 相から γ 相への変態を伴うため、その密度差から凝固時に収縮が大きく、凝固シェルのたわむことによって不均一となりやすく、表面割れが発生しやすい^{7,8)}。薄スラブにおいても適正なモールド内抜熱量および潤滑を確保しつつ、パウダースラグフィルム中に生成する結晶層の厚みや結晶化を促進させて鑄片を緩冷却化させることが鑄片表面割れの抑制に効果的である。結晶強度測定結果をFig.8に示す。実験方法は、1300℃で溶融させたモールドパウダースラグを水冷させた断面形状がV字型の銅樋に流し込み、冷却後に注ぎ口から100mmの位置のスラグ破断面を観察した。CaO/SiO₂=1.2の高塩基度パウダーはCaO/SiO₂=1.1の従来パウダーと比較して表層に形成する結晶層が厚くなった。この結果は開発品が急冷却条件でも結晶が生成しやすく結晶化が速いことを示唆している。この高塩基度パウダーを実機に適用した結果、Fig.9に示す通り鑄片割れを抑制できた。

また、一般的に高塩基度パウダーは融点、結晶化温度が高くスラグベアが発生しやすい傾向があ

spots on the strand surface deteriorate the coil quality. Thus, ability of the mold powder slag film to peel off the cast strand was a focus for improving quality. The conventional product had a high flux composition, a CaO/SiO₂ = 0.9, and a surface tension of 390 mN·m⁻¹ at 1400 °C. The new developed product has surface tension 433 mN·m⁻¹ with high CaO/SiO₂ and low flux composition, and the powder slag film was more easily removed in the secondary cooling zone. As a result, the coil surface condition was improved. Figure 7 shows a photograph of the coil surface. The conventional product has a shallow linear scratch, but product surface with high surface tension type mold powder is clean.

4. 2 For medium carbon steel

Since medium carbon steel grades are accompanied by transformation from the δ phase to the γ phase, it has large shrinkage during the solidification due to differences in their densities^{7,8)}. This solidification phenomena also tends to form an uneven solidified shell that leads to cracking on the strand surface. Even in a thin slab, softer heat removal and maintaining lubrication by optimizing the crystallization in the mold powder slag film is an effective way for preventing surface cracking. The results of measuring crystal strength of mold powder slags are shown in Fig. 8. In the test method, a mold powder slag melted at 1300 °C is poured into a water-cooled copper gutter having a V shaped cross section, and after cooling, a slag cross section at a position 100 mm from the pouring port was observed. The developed high basicity powder with CaO/SiO₂ = 1.2 shows a thicker crystalline layer formed on the surface layer compared to the conventional powder with CaO/SiO₂ = 1.1. This result suggests that the developed one easily formed crystals even under fast cooling conditions, and it means the mold powder slag has high crystallization speed. As a result of applying this high basicity

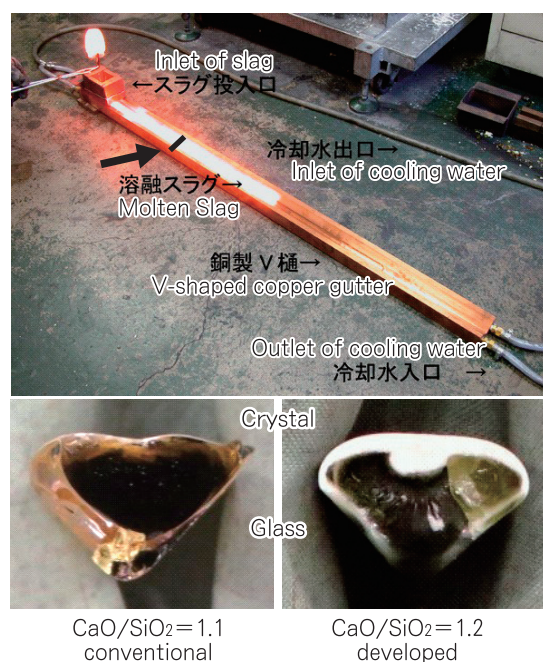


Fig. 8 Crystallization test.

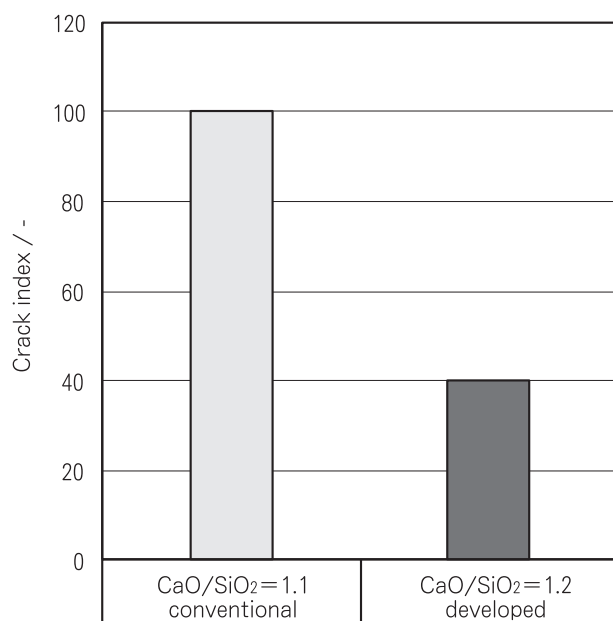


Fig. 9 Result of strand surface crack.

るが、本開発品は使用原料やカーボン添加量の適正化によって抑制できた。

5. まとめ

薄スラブ用モールドパウダーの現状の使用状況をまとめ以下の状況が得られた。さらに当社で開発した独自技術による課題解決例について紹介した。

- ・薄スラブ用モールドパウダーの特性は一般的なスラブ用と比較して潤滑性および抜熱量確保を重要視して設計されている。
- ・薄スラブ casting におけるモールドパウダーの消費量は $0.06 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、一般的なスラブ casting よりも少ない。ただし、モールド周囲長あたりの流入速度は同等である。
- ・薄スラブ casting 時の抜熱は低炭および極低炭素鋼では長辺 $35 \sim 45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、短辺はおよそ $20 \sim 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の抜熱量であった。一方、中炭素鋼では低炭素鋼や極低炭素鋼より低く長辺 $30 \sim 35 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、短辺はおよそ $20 \sim 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ の抜熱量であった。
- ・モールド厚みが薄く、受熱面積が小さいことから熔融層厚みの確保が困難であるが、熔融温度

technology to actual casting, reducing cracks has been achieved as shown in Fig. 9.

In general, high basicity powders tend to have a high melting point and a high crystallization temperature, and slag roping can occur. The developed high basicity mold powder can reduce slag roping by optimizing the raw materials used and the amount of carbon addition.

5. Summary

The mold powder trends for thin slab casting is summarized in this report and the following criteria were identified. In addition, examples of technologies for steel quality improvement are also introduced.

The mold powder for thin slab casting has been designed with emphasis on lubrication property and maintaining heat removal as compared with conventional slab products.

- ・ The thin slab mold powder consumption range is $0.06 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, which is less than typical slab mold powders. On the other hand, the slag inflow rate per unit mold perimeter length is comparable.
- ・ Heat removal of thin slab casting is 35 to $45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ on the broad face mold, and 20 to $30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ on the narrow face mold on low and ultra-low carbon steel grades. In the medium carbon steel grades, 30 to $35 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ on the broad face, and 20 to $30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ on the narrow face, lower than that of low and ultra-low carbon steel grades.
- ・ Although it is difficult to make a consistent thickness of molten slag layer in thin slab casting because of the small heat area, appropriate melting properties can be achieved by adjusting the melting temperature and the type of raw material such as carbon.
- ・ Improving the ability of the mold powder slag film to peel off during secondary cooling can be achieved by increasing the surface tension of the molten slag. This is shown to be effective in improving the coil quality.

- やカーボンなどの原料種を調整することにより適正な溶融性状の確保が可能であった。
- ・ コイル品質の改善にはパウダースラグの高表面張力化による剥離性の向上が効果を示した。
- ・ 鋳片段階での割れを抑制させるためには溶融性状や総括抜熱量を考慮した緩冷却化が有効であった。
- ・ In order to prevent cracking on the strand surface, softer cooling while maintaining excellent melting properties and lubrication is effective.

References

- 1) Y. Minami : Taikabutsu, **50** [6] 366-374 (1998).
- 2) M. Kolakowski : Proc. of 1st European Conf. on Continuous Casting, Associazione Italiana di Metallurgia, (1991) p.2.
- 3) A. Yamanaka, S. Kumakure, K. Okamura, T. Kanazawa, T. Murakami, M. Oka, I. Akeuchi, and T. Watanabe : Ironmaking and Steelmaking, **26** [6] 457-462 (1999).
- 4) J. P. Rogler, J. Richaud, G. Baehren : AISTech2015 proceedings, Association for Iron & Steel Technology, (2015) pp.2523-2533.
- 5) H. Mizukami, Y. Kitagawa, K. Kawakami : Tetsu-to- Hagané, **72** 1862-1869 (1986).
- 6) T. Omoto, Y. Iwamoto, J. Ito, T. Suzuki, J. Gilmore, B. He : Shinagawa Technical Report [51] 71-78 (2008).
- 7) Y. Sugitani and M. Nakamura : Tetsu-to-Hagané, **65** [1] 42-51 (1979).
- 8) T. Kanazawa, S. Hirai, M. Kawamoto, K. Nakai, K. Hanazaki and T. Murakami : Tetsu-to-Hagané, **83** [11] 701-706 (1997).