

スラブの高速鑄造技術における当社機能材の取り組み

SHINAGAWA's Approach in the Field of Functional Refractories and Mold Powder to Meeting High-speed Operation Requirements in the Continuous Casting of Steel Slabs

飯 田 栄 司 ^{*1}	小 形 昌 徳 ^{*2}
Eishi IIDA	Masanori OGATA
尾 本 智 昭 ^{*3}	岩 本 行 正 ^{*4}
Tomoaki OMOTO	Yukimasa IWAMOTO

Abstract

High-speed casting (2.0-3.0m/min) of steel slabs causes increased fluctuation of the molten steel surface and decreased thickness of the solidifying shell in the mold. Hence submerged entry nozzle (SEN) and mold powder have been improved to meet the casting condition. In order to prevent breakout, powder consumption, melting speed, viscosity at low temperature and the peeling properties of the slag film are taken into consideration when designing mold powder. In addition, new mold powder series, which satisfies both mild cooling at meniscus and sufficient heat removal in the mold, have been developed for the high-speed casting of middle carbon steel grades. As for SEN, annular-step SEN and mogul SEN are suitable for the high-speed casting because they supply symmetric outlet flows and suppresses penetration of inclusions deep in the mold.

1. 緒言

鋼の連続鑄造において、鑄造速度の高速化は生産性向上における最大のテーマの一つである。日本では1980年代以降、各所でスラブ連鑄機の高速鑄造化が積極的に進められ、鑄造速度2.0m/min以上の操業が行われるようになった¹⁾。現在ではスラブの高速鑄造は最大3.0m/minが達成されている²⁻⁴⁾。

スラブの高速鑄造ではストランド当りの溶鋼通過量（スループット）が5 ton/min以上に達するため、モールド内の湯面変動が増大し、凝固シェ

1. Introduction

High-speed casting is one of the most important topics in improving productivity of continuous casting of steel. In Japan, steelmakers have actively pursued the speeding-up of casting from the 1980's, and the casting speed of more than 2.0 m/min has come to be conducted¹⁾. At present, the maximum casting speed of 3.0 m/min has been achieved for steel slabs²⁻⁴⁾.

Because high-speed slab casting requires more than 5 ton/min steel throughput per

*1 技術研究所 第1研究グループ マネージャー Manager, Shaped Refractories R&D Group, Research Center

*2 技術研究所 第1研究グループ チームリーダー 理学博士 Dr.Sci., Team Manager, Shaped Refractories R&D Group, Research Center

*3 遼寧品川和豊冶金材料有限公司 総経理 President, Liaoning Shinagawa Hefeng Metallurgical Material Co., Ltd.

*4 技術研究所 第1研究グループ チームリーダー Team Manager, Shaped Refractories R&D Group, Research Center

ルの厚みが減少する²⁾。そこで、安定した高速鋳造を実現するために、モールド冷却・二次冷却の強化、湯面レベル制御精度の向上、ブレイクアウト予知技術、電磁力によるモールド内溶鋼流動制御^{5),6)}といった設備技術が導入された。また、設備技術に加えて、高速鋳造に対応するように機能性耐火物の改良や新しいモールドパウダーの開発⁷⁻¹⁰⁾が行われた。例えば、高速鋳造ではパウダー潤滑不良による拘束性ブレイクアウトが発生しやすいため、適切なモールドパウダーの選定が不可欠である。

現在、IF鋼などの高級鋼板も高速鋳造のスラブ連鋳機で生産されている。そのためには、精錬～連鋳工程における溶鋼清浄化と再酸化防止に加えて、適切な浸漬ノズル形状とモールドパウダーを選択し、気泡や介在物による鋳片欠陥を防止することが必要である。

本報では高速鋳造技術の課題の中で、ブレイクアウト防止対策、鋳片品質の向上、多連鋳化を取り上げ、浸漬ノズルとモールドパウダーを中心に当社の高速鋳造技術への取り組みを紹介する。

2. 高速鋳造における課題

高速鋳造における最大の課題は、鋳造速度の増大とともに薄くなる凝固シェルをブレイクアウトせずに安定して引き抜くことである。そのためには、モールド内で十分な抜熱を行ってシェル厚みを確保することと、モールドパウダーによる潤滑性を十分に確保することが不可欠である。また、高速鋳造では非定常バルジングによる湯面変動が発生しやすい¹¹⁾。これは2次冷却帯のロール間で引き起こされる現象であり、凝固シェル厚みが薄く、かつ不均一な場合に発生しやすい。したがってモールド内だけでなく、2次冷却帯においても抜熱の制御が重要となる。

また、モールド内の溶鋼流動の点でも、高速鋳造では鋳片品質に直結したさまざまな問題が発生する (Fig. 1)。こうした問題について、実スケールでの水モデル実験の結果に基づいて紹介する。

Fig. 2 に広幅モールド (240×2000mm) について、鋳造速度1.8m/minと2.4m/min相当の水モデ

strand, it causes increased fluctuation of the molten steel surface and decreased thickness of solidifying shell in the mold²⁾. Therefore some new equipment technologies have been introduced, such as enhanced cooling of the mold and a secondary cooling system, improved mold level control system, breakout prediction system, and electromagnetic flow control system in the mold^{5),6)}. In addition to the equipment technologies, submerged entry nozzle (SEN) and mold powder⁷⁻¹⁰⁾ have been improved to meet the high-speed casting. For example, the high-speed casting is susceptible to the sticker breakout caused by poor lubrication, hence it is essential to use a suitable mold powder.

Recently, high-quality steel grades, such as IF steel, have come to be produced in high-speed casting. In addition to cleanliness and secondary-oxidation prevention of the steel during its refining and casting processes, prevention of steel defects caused by gas bubbles and inclusions is required by selecting the proper type of SEN and mold powder.

Among the many issues of the high-speed casting, we focus on measures to reduce breakout and improve steel quality and long-sequence casting in this report. Our approaches to these issues in designing SEN and mold powder are described in this report.

2. Problems of the High-speed Casting

The most important issue of high-speed casting is to cast the solidifying shell, which becomes thinner as the casting velocity increases, without causing breakout. This requires ensuring adequate shell thickness by sufficient heat removal in the mold and to retain sufficient lubrication by suitable mold powder. In addition, a thin and non-uniform solidified shell is susceptible to the unsteady bulging in the secondary cooling region during the high-

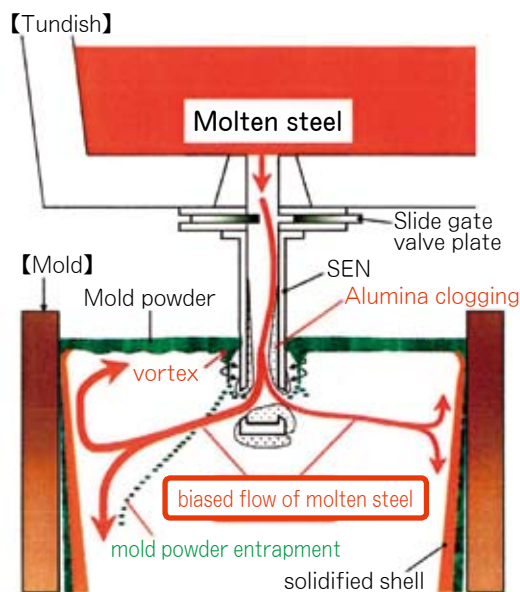


Fig. 1 Problems of molten steel flow in the mold during high speed casting.

ル実験の様子を示す。高速鋳造に使用される浸漬ノズルは、各所の鋳造条件、特に電磁力制御の方式によって形状が異なるため、Fig. 2の実験では平均的な形状のノズルを使用した。実機でのモールドパウダーの挙動を調べるため、水よりも比重の軽い着色した流動パラフィンを浮かべた。ガス吹きはポーラス質の上ノズルから行い、スライドプレートで流量制御を行った。

高速鋳造におけるモールド内の溶鋼流動には以下の課題がある。

まず、モールド短辺側の湯面の盛り上がりとその湯面変動である。Fig. 2に示すように、鋳造速度を上げると浸漬ノズルからの吐出流が強くなり、モールド短辺に衝突して生じる反転上昇流が強くなる。この上昇流によって短辺側のメニスカスが盛り上がり、パウダー溶融層に相当するパラフィン層はノズル側に寄せ集まり、モールド短辺側で薄くなる。湯面の盛り上がり状態は一定ではなく、吐出流の勢いの変動に応じて変動する。実際の鋳造において、パウダー溶融層が薄くなるとパウダーの流入不良によって鋳片割れや焼き付きによるブレイクアウトが発生しやすくなる。また、湯面変動時に溶鋼が溶融層の上にある原パウダーと接触してカーボンピックアップが生じやす

speed casting¹¹⁾。Hence control of heat removal is highly important not only in the mold but also in the secondary cooling region.

Also as for flow pattern in the mold, high-speed casting has many problems directly related to slab quality (Fig.1). These problems can be confirmed by water model experiment.

Fig.2 shows the results of the water model experiment corresponding to the casting speed 1.8 m/min and 2.4 m/min on the wide mold (240×2000mm). Although the dimensions of the SEN for the high-speed casting differ depending on operating conditions, an averaged shape was used in the experiment. In order to simulate the molten mold-powder layer in the actual mold, colored liquid-paraffin with a lower density than water was placed on the water. Gas (air) was injected from porous upper nozzle, and the water flow rate was controlled by slide-gate throttling.

The main problems of flow pattern in the mold during high-speed casting are as follows.

The first problem is the surge of the meniscus near the mold narrow face and its fluctuation. With an increase in the casting speed, jet flow from the SEN becomes strong, resulting in enhanced upward flow along the narrow face caused by impinging against it. The meniscus level near the narrow face is uplifted by the upward flow, and the paraffin drifts toward the mold center. As a result, the paraffin layer (corresponding to the molten mold-powder layer) becomes thick around the SEN and thin near the narrow face. And the meniscus level is unstable and fluctuates actively. In practical operation, the thin molten powder layer is prone to cause surface cracking and sticker breakout due to poor inflow of the powder. Also, carbon pickup often occurs when the molten steel gets in touch with un-melted powder by the meniscus fluctuation. The meniscus fluctuation

Throughput*	4.0 steel ton/min	6.0 steel ton/min
Casting speed*	1.4 m/min	2.2 m/min
Flow pattern in the mold		
Height difference in meniscus		

*Throughput and casting speed are converted to values corresponding to actual steel casting

Fig. 2 Effect of throughput on flow pattern in mold in water model.

くなる。湯面変動が大きいと、溶融層が原パウダーを巻き込んで焼結塊が生じやすくなる。焼結塊がモールド壁面でスラグベアになると、パウダーの流入を阻害する。

第二の課題は、高速鋳造ではモールド短辺からノズル側に向かう表面流速が速い点である。よく知られているように、表面流速がある臨界値を越えると、パラフィンの下面が流れによって削り込まれ、水中に捕捉される¹²⁾。また、左右のメニスカス流が衝突することでノズルの近傍に渦流が発生し、パラフィンが渦流によって水中に巻き込まれる¹³⁾ (Fig. 3)。このような削り込みや巻き込みによるパウダーの捕捉現象は実機でも発生していると考えられ、パウダー性介在物欠陥の原因とされている¹⁴⁾。

第三は、Fig. 2 の気泡の分布から分かるように、ノズルからの吐出流がモールド短辺に衝突した後、その一部がモールド深部に侵入し、溶鋼中の気泡と介在物を深部に持ち込む点である。このう

also causes the forming of a sintered block by mixing the molten layer with the un-melted powder. This accelerates disturbing inflow of the mold powder by slag-bear formation at the mold wall.

The second problem is increased velocity of surface flow from the narrow face to the SEN. As is well known, when the surface flow velocity exceeds a critical value, the bottom of the paraffin is scraped off and trapped into water¹²⁾. In addition, collision of the fast meniscus flows from both sides forms a vortex near the SEN, which also entraps the paraffin¹³⁾ (Fig.3). The entrapment phenomena by the surface flow or the vortex are believed to be common to the actual casting and causes powder-derived inclusion defects of the slab surface¹⁴⁾.

Third is penetration of gas bubbles and inclusions deep into the mold. As shown by the



Fig. 3 Entrapment of liquid paraffin (mold powder) by vortex in water model.

ち、気泡性欠陥については垂直曲げ型連铸機の採用によって防止されるが、非金属介在物についてはモールド内での浮上が困難である。そのため高速铸造を実施している連铸機では、精錬～铸造工程における溶鋼の清浄化と再酸化防止のためにさまざまな対策が実施されている。

上記の3つの課題に対し、電磁力によるモールド内流動制御はその有効な対策であり、ほとんどの高速連铸機で採用されている。しかし、浸漬ノズル形状の最適化と適切なモールドパウダーの採用なしには、高級鋼の安定した铸造は困難となる。

3. 高速铸造用モールドパウダーと浸漬ノズルの設計

3.1 ブレイクアウト対策

高速铸造時のブレイクアウトを防止するには、モールドパウダーによる潤滑性の確保と、高拔熱化による凝固シェル厚みの確保が必要である。そのため、当社の高速铸造用モールドパウダーは次の4点を考慮した材料設計を行っている⁷⁻¹⁰⁾。

まず、Fig.4に示すように、铸造速度が速くなるとパウダー消費量は減少する傾向にある。当社では粘度と結晶化温度が過度に高くなることを避けてパウダー消費量の増大を図り、十分な潤滑性を確保している (Fig.4)。

次に、高速铸造ではモールド短辺近傍で湯面が

bubble distribution in Fig.2, the jet flow from the SEN impinges the mold narrow face and bifurcates into up-going and down-going flows. The down-going flow brings some gas bubbles and inclusions deep into the mold. As for the gas bubbles, most of them can be encouraged to float up by introducing a vertical-bending caster. While, the non-metallic inclusions don't float up easily. Hence, various measures for improving steel cleanliness and preventing secondary oxidation during the refining and casting processes are taken in steelworks with the high-speed casters.

Electromagnetic control of molten steel flow in the mold is the most effective measure to suppress the these problems, and it has been widely introduced to high-speed casters. Even under the electromagnetic control operation, however, it is difficult to cast high-quality steel grades steadily without use of optimized SEN design and proper mold powder.

3. Design Concept of Mold Powder and SEN for the High-speed Casting

3.1 Breakout prevention

In order to prevent the breakout at the high-speed casting, it is necessary to retain sufficient lubrication by mold powder and to ensure an adequate shell thickness by sufficient heat removal in the mold. Therefore, we take the following viewpoints into account in designing mold powder for the high-speed casting⁷⁻¹⁰⁾.

First, as shown in Fig.4, powder consumption tends to decrease with an increase in casting speed. In order to ensure sufficient lubrication, we retain sufficient powder consumption by avoiding excessively-high viscosity and excessively-high crystallization temperature (Fig.4).

Next, high-speed casting causes the surge of molten steel surface near the narrow face, which makes it difficult to ensure sufficient molten-

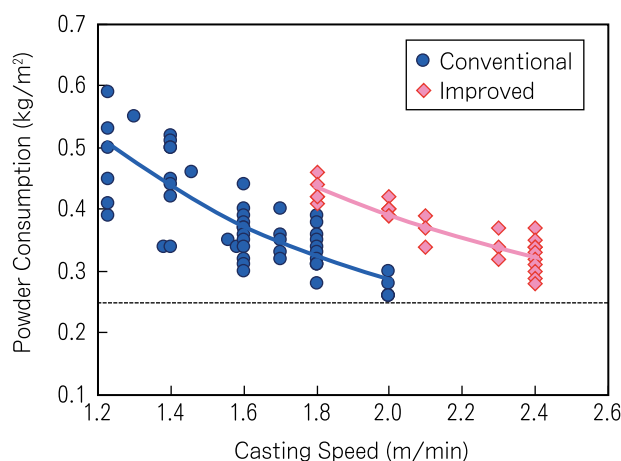


Fig. 4 Effect of casting speed on mold powder consumption.

盛り上がり、パウダーの溶融層の厚みが確保されにくくなる。そこでパウダーの滓化速度を速め、短辺近傍でも十分なスラグ層厚みを確保することが重要である。ただし、滓化速度が速いと浸漬ノズル側では溶融層が過度に厚くなるため、焼結塊やスラグベアが発生しやすくなる。Fig.5 に高周波誘導炉での溶融実験の様子を示す³⁾。同じパウダー組成でも顆粒品より粉末品の方が滓化性が良く、焼結塊が生じにくい。そのため当社の高速鋳造用モールドパウダーは粉末形状を採用している。さらに原料の組合せを最適化することで、焼結塊が生じにくい優れた溶融性状を付与する技術を開発した。その結果、鋳造速度2.5~3.0m/minの高速鋳造でも、当社の高速鋳造用パウダーの使用によって安定した操業が実現されている⁹⁾。

第3に、鋳造速度が速くなると凝固シェルの厚みが薄くなる。後述のように、不均一凝固を防止するためにはモールド内の緩冷却が有効である。しかし、モールド直下で十分な凝固シェル厚みがなければブレイクアウトが発生するため、モールド内で十分な抜熱が必要である。モールド下部ではモールドと凝固シェルの間にエアギャップが発生して抜熱されにくいので、エアギャップ生成を防止すれば抜熱量を確保できる。当社の高速鋳造用モールドパウダーでは、モールド下端に相当する低温域でのスラグの流動性に着目した材料

powder thickness. In order to attain sufficient thickness, we designed the mold powders with high melting speeds. However, mold powders with high melting speeds cause a thick molten layer near the SEN, which is apt to form a sintered block and slag bear. Fig.5 shows a melting experiment of the mold powder with different grain shapes (granule type and fines type) by high-frequency induction furnace³⁾. Even with the same composition, the fines type is superior in melting behavior and is resistant to forming a sintered block. Hence, we adopted the fines type for the high-speed-casting mold powder. In addition, we have developed a new technique to give superior melting behavior while suppressing the sintered block formation by optimizing raw material combination. As a result, our mold powder has achieved stable continuous casting at the casting speed over 2.5m/min⁹⁾.

Third, the thickness of the solidified shell becomes thin with an increase in the casting speed. As discussed later, mild cooling is effective to prevent non-uniform solidification. However, sufficient heat removal is required in the mold to prevent the breakout resulting from insufficient shell thickness. As is well known, heat removal at the lower mold depends largely on air-gap formed between the shell and the mold. Hence sufficient heat removal becomes possible by suppressing the air-gap formation. Our material design of the mold powder for high-speed casting focuses on the slag flow property at low temperature, corresponding to the mold bottom temperature. For example, temperature dependency of viscosity can be suppressed by actively using Li_2O and optimizing mold powder basicity (Fig.6). Thus we have succeeded to develop the mold powder that has sufficient flowing property at the low temperature to fill the air gap.

Fourth, shell thinning during the high-speed

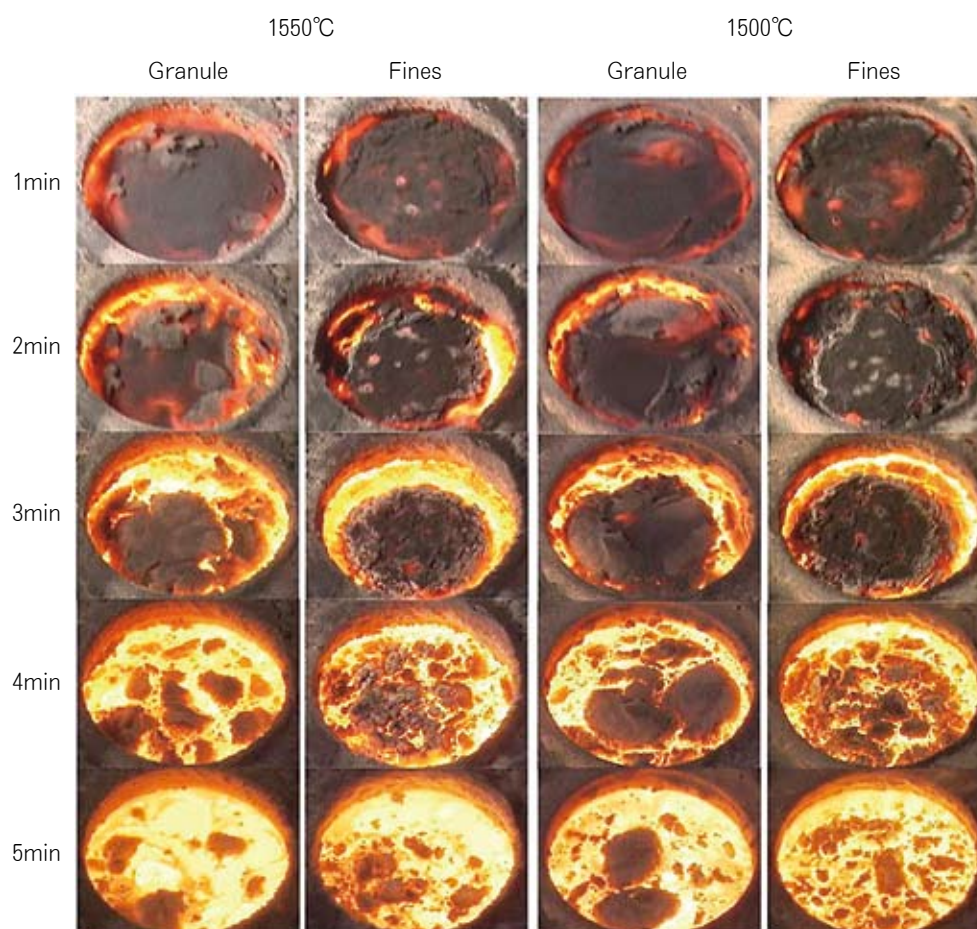


Fig. 5 Effect of powder shapes on melting behavior.

設計を行っている。例えば、パウダーの塩基度を調整し、 Li_2O を積極的に活用すると、粘度の温度依存性を低下させることができる (Fig. 6)。こうして、低温域でも優れたスラグ流動性をもち、エアギャップの充填を可能としたパウダーを開発している。

第4に、高速鋳造では凝固シェルが薄いので、2次冷却帯で非定常バルジングが発生して周期的な湯面変動を引き起こしやすい。2次冷却帯での強冷却には設備面での対策が重要であるが、凝固シェルに付着したスラグフィルムが2次冷却帯でも剥離せずに残留していると、冷却能が低下する可能性がある。当社では、スラグフィルムの剥離性により2次冷却効率を調整できるようモールドパウダーの品質設計を行っている。

3. 2 均一凝固対策

高速鋳造が特に困難なのは割れ感受性の高い中

casting often causes unsteady bulging at the secondary cooling region. Although cooling efficiency in the secondary cooling region depends mainly on cooling equipment, slag film adhering to the shell without peeling-off also affects cooling efficiency. Therefore, we take the peeling property of the slag film into account in designing the mold powder.

3. 2 Uniform solidification

Due to high sensitivity to cracking during casting, middle carbon (MC) steel grades are difficult to cast at high-speeds. In the case of conventional mold powder, frequency of the surface cracking tends to increase with an increase in casting speed, which limits casting speed. In order to prevent cracking, it is important to suppress non-uniform solidification

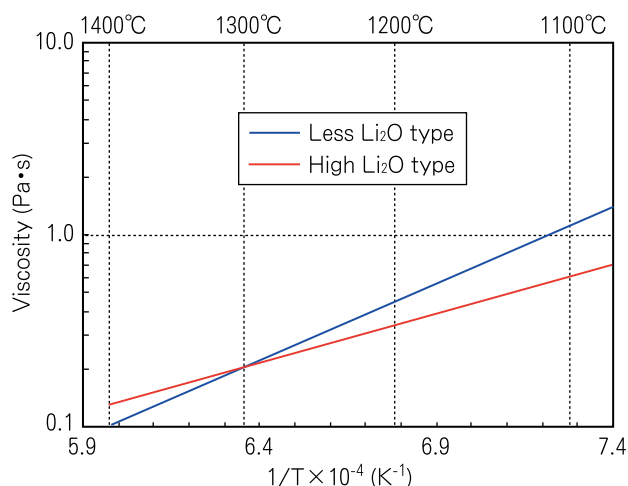


Fig. 6 Temperature dependence of viscosity of molten mold powder.

炭素鋼である。 casting速度が速いほど鋳片表面割れの発生率が増加する傾向があり、従来のモールドパウダーでは casting速度を制約していた。鋳片表面割れの抑制には、パウダーの結晶化温度を高めてモールド内を緩冷却化し、不均一凝固を抑制することが重要である。しかし、前述のように、結晶化温度を過度に高くすると、潤滑性の確保と凝固シェル厚の確保において弊害をもたらす。そこで、緩冷却と凝固シェル厚みの確保という相反する要素を両立させるために、当社ではパウダーの結晶化温度だけでなく、結晶化速度に注目した品質設計を行った。新規に開発したモールドパウダー“REVIX”シリーズは、鋳片割れの起点となるメニスカスでは速やかに結晶化して緩冷却効果を与える一方、モールド下部では凝固シェル厚を確保できる十分な抜熱を付与する特徴をもつ。その結果、高速 castingと表面割れ抑制の両立を達成した (Fig. 7)¹⁰⁾。

一方、均一な初期凝固を得るためには浸漬ノズルの構造も重要である。通常、高速 castingでは、モールド内湯面の制御性の点からストッパーではなくスライドプレートによる流量制御が採用される。プレート制御においては、絞りの影響でプレート直下に偏流が発生し、モールド内の溶鋼流動も偏流状態となりやすい。当社では、偏流を防止するために内管に環状の段差構造をもつ浸漬ノズルを

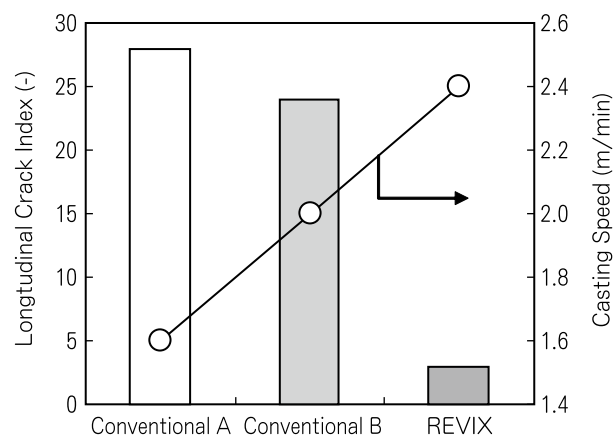


Fig. 7 Effect of mold powder on longitudinal cracking of slab (middle carbon steel grade).

of molten steel caused by mild cooling of the mold. This can be attained by increasing the crystallization temperature of the mold powder. As mentioned, however, excessively-high crystallization temperature is disadvantageous for ensuring the lubrication and the shell thickness. Then, in order to satisfy both mild cooling and the sufficient shell thickness characteristics, we focused not only on the crystallization temperature but also on crystallization speed of the mold powder. The newly-developed mold powder series, “REVIX” is characterized by a unique crystallization property; it suppresses heat removal near the meniscus by rapid crystallization but promotes heat removal under the meniscus to ensure sufficient shell thickness. As a result, “REVIX” has succeeded to achieve both high speed casting and suppression of the surface cracking for MC grades (Fig.7)¹⁰⁾.

On the other hand, SEN design is also important for uniform solidification in the mold. In general, flow rate of high-speed casting is controlled not by stopper but by sliding-gate due to its superior controllability. In the case of the sliding-gate throttling control, biased flow occurs beneath the throttled area, resulting in

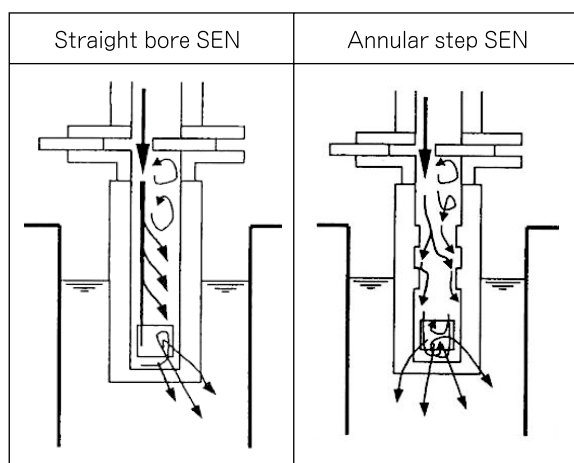


Fig. 8 Effect of annular-step inside bore geometry on biased flow caused by slide-gate throttling.

開発した (Fig. 8)¹⁵⁾。この段差型浸漬ノズルは高速铸造するスラブ連铸機で広く採用されている。また、段差型ノズルの吐出孔形状を最適化することで均一な初期凝固を実現し、中炭素鋼でのスラブのコーナー縦割れを低減した事例がある¹⁶⁾。

極低炭素鋼は铸片品質、コイル品質が厳格なため、パウダー性の介在物欠陥を防止するために高粘度のモールドパウダーが志向されてきた。その一方で、極低炭素鋼は冶金学的特徴から凝固シェルが不均一に生成しやすいため¹⁷⁾、パウダーの品質設計においても緩冷却化を指向したほうが好ましい。しかし、高粘度領域では中炭素鋼用パウダーのように速やかな結晶化は困難であるので、同様の手法では緩冷却を実現できない。そこで最近、凝固したガラスフィルムが再結晶化することで緩冷却を達成する新しい高粘度パウダーを開発した。この高粘度パウダーは高速铸造される厳格材鋼種で使用され、铸片品質・コイル品質の向上が達成された⁹⁾。

3. 3 表面欠陥対策

品質規格の厳しい低炭素鋼、極低炭素鋼の場合、パウダースラグの削り込み、巻き込みによるパウダー性介在物の表面欠陥が一番の課題である¹⁴⁾。こうしたスラブ表面でのパウダー捕捉はパウダースラグの粘度と溶鋼のメニスカス流速に依存しており、その対策にはパウダースラグの高粘度化が

a biased flow condition in the mold. We have developed the annular-step SEN that has some annular steps on its inside bore to prevent the biased flow condition (Fig.8)¹⁵⁾. The annular-step SEN is widely used in high-speed casters. There is one case in which slab corner cracking of the MC grades was reduced by optimizing outlet port design of the annular step SEN¹⁶⁾.

Because ultra-low carbon (ULC) steel grades are required to have high surface quality of the slab and steel coils, high viscosity mold powder is used to prevent powder-derived surface defects. On the other hand, due to its metallurgical characteristics, ULC steel grades are susceptible to non-uniform shell growth¹⁷⁾, hence mild cooling is favorable in designing the mold powder. In the case of high-viscosity mold powder, rapid crystallization is difficult. Hence, unlike the MC grades, the ULC grades require an alternative approach to mild cooling. Recently, we have developed new high-viscosity mold powder that achieves the mild cooling by effective re-crystallization from solidified glassy film. The new high-viscosity powder is used for the high-speed casting of the high quality ULC grades, and improvement of the slab and coil quality was achieved.

3. 3 Surface quality

In the case of low carbon (LC) and ULC steel grades, the most important problem is the surface defects resulting from mold powder entrapment¹⁴⁾. The powder entrapment depends both on the viscosity of mold powder and on the surface flow velocity. Increasing of slag viscosity is an effective measure to prevent entrapment, but excessively-high viscosity mold powder lacks lubrication and may cause breakout. Hence increasing viscosity should be limited to a certain level.

As for the surface flow velocity, it is important to control it within a certain range in improv-

有効である。ただし、過度に粘度を高めると、潤滑性が低下してブレイクアウトの恐れがあり、適度に高い粘度がふさわしい。

スラブの表面品質の向上には、モールドパウダーだけでなく、モールド内の表面流速を一定の範囲に制御することが重要である¹⁴⁾。そのためには電磁力による流動制御が最も効果的な手法であり、高速連铸機では広く導入されている。なかでも電磁ブレーキはメニスカス流速を効果的に抑えるため、モールドパウダーの捕捉防止に有効である⁵⁾。ただし、過度の電磁ブレーキは湯面が不活性となりパウダーの滓化を遅延させ、十分な溶融層を確保できない問題がある。一方、モールド内での溶鋼の流れが速いと凝固シェルに対して洗浄効果をもつため、電磁攪拌によってモールド内の溶鋼を旋回させると表面品質が向上する¹⁹⁾。ただし、電磁攪拌によって湯面が過度に活性化した場合、メニスカスの形状が変わり、溶融層厚みが薄い部位が生じると、焼き付きや介在物性欠陥を引き起こす場合がある。このように、モールド内の電磁力制御は安定铸造と铸片品質向上のための強力な手段であるが、滓化性に優れたモールドパウダーを使用して溶融層を安定して確保することによって、その効果が最大限に発揮される。

電磁力によってモールド内溶鋼流動を制御する場合、浸漬ノズルの吐出孔形状の設計も非常に重要な因子であり、選択を誤ると逆効果になることがある^{18),19)}。したがって、電磁力を活用した操業においても、水モデル実験によって浸漬ノズルの吐出流の状態を調べることは、操業の最適化を目指すうえで有効なアプローチである。また、電磁力を活用した流動制御は浸漬ノズルから左右および前後に均等な吐出流が供給されることを前提としている。しかし、プレートによる流量制御の影響で吐出流が偏った状態にある場合、電磁力制御によって不均一流動が助長される可能性がある。当社では、偏流防止のために浸漬ノズルの内管に環状の段差や、多数の球状突起（モーグル型；Fig. 9）を配設する技術をもつ²⁰⁾。この技術は電磁力による溶鋼流動制御に対しても有効である。

ing the surface quality¹⁴⁾. Steel flow control by the electromagnetic force is the most effective measure for controlling surface flow velocity, and the equipment has been widely adopted for high-speed casters. In particular, the electromagnetic brake (EMBR) system effectively suppresses the surface flow velocity to prevent mold powder entrapment⁵⁾. However, when the EMBR is excessively applied, the meniscus becomes inactive and delays melting of the mold powder, occasionally resulting in insufficient thickness of the molten powder layer. On the other hand, the electromagnetic stirring (EMS) system gives the molten steel some flow velocity beyond a critical value, which has a washing effect on the solidifying shell surface and prevents inclusions and bubbles from being entrapped by the shell¹⁹⁾. However, when the EMS is excessively applied, the meniscus shows a difference in height, resulting in a difference in the molten slag layer thickness. As a result, there are cases where sticking or inclusion defects form on the slab surface. Thus, although electromagnetic flow control is a significant measure for attaining stable operation and the steel quality improvement, its effect can be maximized by using a mold powder with superior melting properties.

Even with the electromagnetic control operation, design of the SEN affects molten steel flow pattern in the mold. For example, there are cases in which steel quality was reduced even under electromagnetic control due to usage of an improper SEN design^{18),19)}. Therefore water model experiment for the SEN is still an effective approach in optimizing SEN design and operating condition.

Electromagnetic flow control design assumes that SEN supply a symmetric outlet flow. However, the sliding-gate flow rate control often causes asymmetric flow pattern in the mold. In



Fig. 9 Inside bore appearance of Mogul SEN.

3. 4 介在物の深部侵入対策

一般に、高速鋳造ではモールド内湯面変動を抑えるため浸漬ノズルの吐出孔の角度を下向きに深くする。また、吐出流速を抑えるため吐出孔の面積を大きくする。しかし実際に水モデル実験すると、こうした吐出孔構造の変更は期待ほどの効果が得られない場合が多い。これは吐出孔における流速分布が均一でないことが原因である。

浸漬ノズルの吐出孔の流速分布を水モデル実験で測定した一例をFig.10に示す²⁰⁾。吐出孔が下向きの30度で、80×80mm形状の場合である。吐出孔内の9ヶ所で流速を測定した結果、通常の内管ストレート型のノズルの場合、流速分布は著しく不均一であった (Fig.10a)。すなわち、局部的に流れが非常に速い部分があり、局部的には負圧域となって吸い込み流が発生している。このうち、非常に速い流れの部分がモールド短辺に強く衝突し、モールド深部へ下降する流れを生じる。鋼中の非金属介在物の一部はこの下降流によって鋳片内部に取り込まれ、内部品質の低下を招く。したがって、モールド短辺への衝突を弱めて内部品質の低下を防止するには、吐出孔内の流速分布を均一化させることが効果的である。

吐出孔の流速分布の不均一さは浸漬ノズルの内管構造を工夫することで改善される。Fig.10bに示すように、モーグル型ノズルでは吐出孔の流速分布がかなり均一になる。そのため、モールド短

such cases, electromagnetic control may make the flow pattern worse. In addition to the annular-step SEN, we have developed a mogul SEN which has many spherical convex projections in the bore (Fig.9)²⁰⁾. The annular-step SEN and the mogul SEN are characterized by supplying a symmetric outlet flow, hence they are suitable for electromagnetic control operation.

3. 4 Measures to reduce deep penetration of inclusions

In general, SEN for the high-speed casting are designed to have the outlet ports with deep downward angle to suppress the meniscus turbulence in high-speed casting. In addition, the outlet port is often designed with a large port area to weaken the jet of the outlet flow. However, when SEN are tested by water modeling, the results do not always show the expected effect, and the flow velocity distribution is not even at the outlet port.

Fig.10 shows an example of the flow velocity distribution at outlet ports measured by water model experiment²⁰⁾. The downward angle of the outlet port is 30 degrees, and the port size is 80×80mm. Among the 9 points measured in each port, the flow velocity distribution is very uneven in the case of conventional straight bore SEN (Fig.10a). The flow velocity is very high at lower part of the ports, and is negative (suction flow) at the upper part. The high-velocity jet from the lower part impinges with the narrow face to form a downward flow. The downward flow brings non-metallic inclusions in the molten steel deep into the mold, resulting in inner defects in the slabs. Hence, it is important to achieve even flow distribution at the ports to suppress the strong impingement to the narrow face and the resulting quality loss.

The uneven flow-velocity distribution at the port can be improved by modifying the SEN bore geometry. As shown in Fig.10b, the flow

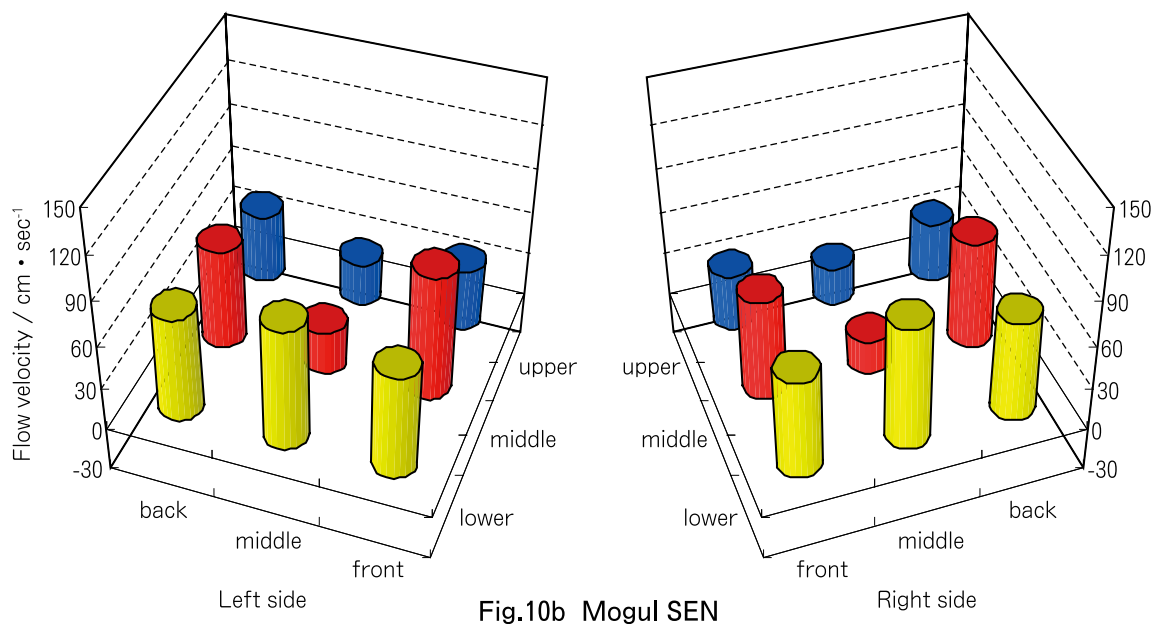
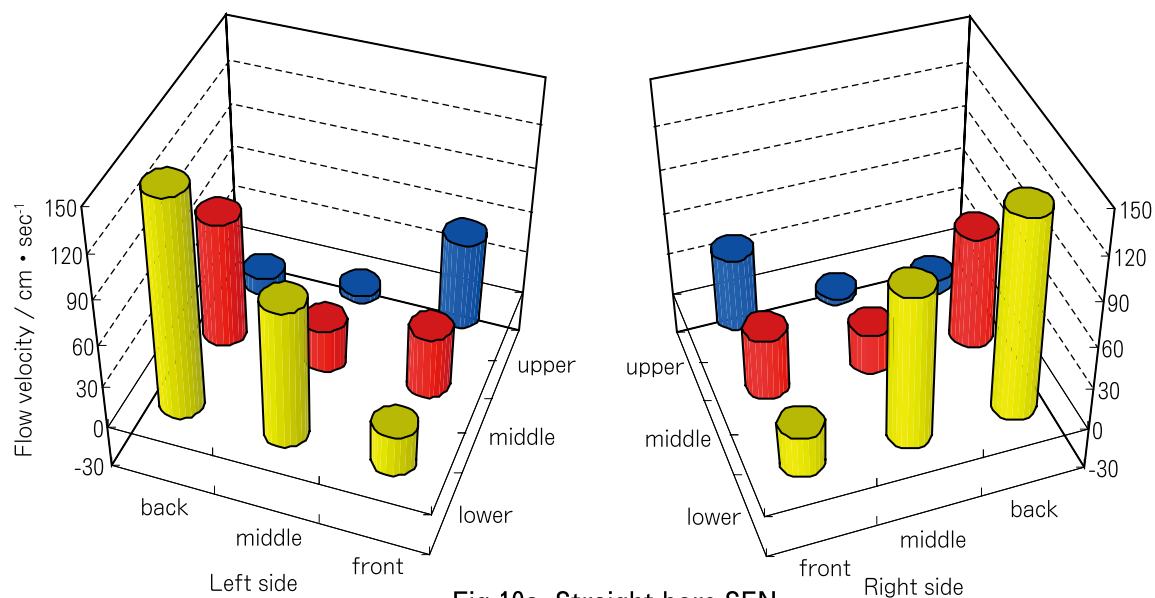


Fig. 10 Distribution of average flow velocity at outlet port in water model experiment.

辺への吐出流の衝突が抑制され、気泡や介在物の深部侵入が抑制される。例えば湾曲型連铸機では、気泡の深部侵入によって発生するブリストア欠陥を抑制するうえでモーグル型ノズルの効果が確認されている²¹⁾。

4. 多連铸化への機能材の考え方

連続铸造の生産性向上においては铸造速度の高速化とともに多連铸化が効果的である。高速铸造

velocity distribution at the port becomes fairly even by applying the mogul bore geometry. As a result, the penetration depth of Ar gas bubbles and inclusions becomes shallow by using the mogul SEN²⁰⁾. For example, in the case of a curved-type casting machine, it is well known that the deeply penetrating gas bubbles cause blister defects. The mogul SEN was applied to continuous casting of the IF steels in the

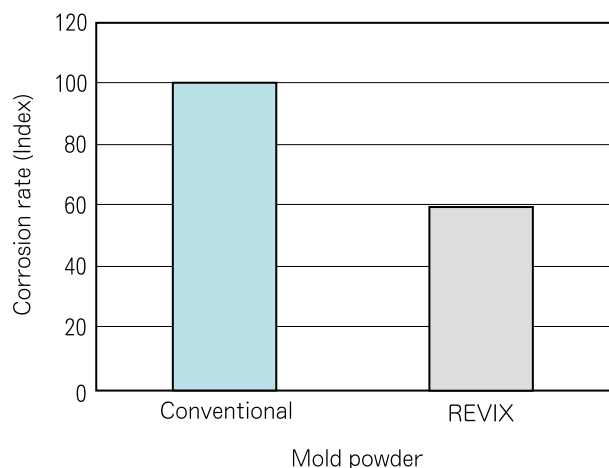


Fig. 11 Effect of mold powder on corrosion rate of $\text{ZrO}_2\text{-C}$ material.

で多連 casting を進める場合、浸漬ノズルの溶損速度増加への対応、ノズル閉塞の防止、一時的な低速 casting など casting 速度変化への柔軟な対応、といった課題がある。

4. 1 浸漬ノズルの溶損対策

高速 casting では、モールド内の表面流速と湯面変動の増加によって浸漬ノズルのスラグラインの溶損速度が増加する傾向にある。ノズルの $\text{ZrO}_2\text{-C}$ 材の溶損に対して、モールドパウダーの低 F 化や高粘度化は溶損速度の抑制に効果があることは良く知られている。しかし、中炭素鋼のような割れ感受性の高い鋼種等では、このような手法は適用が難しい。

近年、当社で開発した新しい中炭素鋼用モールドパウダー“REVIX”シリーズの場合、超高塩基度、高カーボン組成であるため、高 F 組成にもかかわらず $\text{ZrO}_2\text{-C}$ 材の溶損が抑制される特徴がある¹⁰⁾。Fig.11 に示すように $\text{ZrO}_2\text{-C}$ の溶損量は約 60% 低減し、ノズルの寿命延長と連々数の増加が達成された。

4. 2 浸漬ノズルの閉塞対策

浸漬ノズルの閉塞は多連 casting を阻害するだけでなく casting 品質にも影響する。ノズルが閉塞すると吐出流は下向きに流れるようになり、介在物や気泡の浮上が難しくなる¹⁵⁾。また、吐出孔の上部に負圧域が生じるため、ノズル近傍で渦流によって巻

curved type caster and succeeded in reducing the blister defects²¹⁾。

4. Design Concept for Long-sequence Casting

In addition to high-speed casting, increasing in sequence length of the continuous casting is effective in improving productivity. The high-speed and long-sequence casting requires measures to decrease the corrosion rate of the SEN slagline, and prevent clogging, and cope with changes in casting speed.

4. 1 Measures for decreasing slag line corrosion of SEN

In high-speed casting, the corrosion rate of the SEN slag line tends to increase due to the increased surface flow velocity and meniscus fluctuation in the mold. It is well known that mold powders become less corrosive to the $\text{ZrO}_2\text{-C}$ materials of the SEN by reducing their F content or by increasing viscosity. However, in the case of the MC steel grades with high sensitivity to cracking, these approaches are not suitable.

New mold powder series “REVIX” for MC grades is characterized by ultra-high basicity and high carbon content. REVIX is less corrosive to $\text{ZrO}_2\text{-C}$ materials compared with conventional mold powder, regardless of its high F content¹⁰⁾. As shown in Fig.11, the corrosion rate of the SEN slagline ($\text{ZrO}_2\text{-C}$) was reduced by about 60% by using REVIX mold powder, allowing a high-speed long-sequence casting.

4. 2 Clogging prevention

Alumina clogging of the SEN not only restricts the sequence length but also reduces steel quality. After clogging, the outlet flow from the SEN is discharged at a steeper angle than before, and the upper portion of the pressure condition of the outlet port becomes a strongly negative¹⁵⁾. As a result, floatation separation of

き込まれたパウダースラグがノズル内に吸い込まれた後、モールド深部へ吐出される。この現象はスループットが大きい高速鋳造ほど顕著であり、使用後ノズルの吐出孔の上部が溶損される結果となって現れる。

浸漬ノズルの閉塞防止のためには上ノズルからのArガス吹きが有効である。しかし通常、スループットの増加に比例してArガス流量を増やすと、モールド内ではガス湧出過剰の状態となる。すなわち、鋳造速度の増加とともに、溶鋼通過量当りのArガス量は少ない条件でノズルの閉塞を防ぐことが必要となる。そのためには、難付着内管材やガス吹き浸漬ノズルなどの浸漬ノズルの閉塞防止技術だけでなく、ガス吹き上ノズルの改良が重要である。当社ではガス吹き条件の最適化に適した多層構成ガス吹き上ノズル²²⁾を推奨している。段差型ノズルやモーグル型ノズルも、本来は偏流防止のために開発された構造であるが、多層構成ガス吹き上ノズルと組合せると、突起による気泡の攪拌により閉塞防止効果が得られた事例がある^{15), 20)}。また当社の経験では、高速鋳造における低炭素鋼・極低炭素鋼の表面品質は上ノズルのタイプによってかなり変化する。ただし、ガス吹きした気泡の挙動に関しては、水モデル実験や流体計算による取り扱いが難しいため不明な点が多い。当社ではユーザーと協力して、実際の鋳造結果を踏まえながら最適なガス吹き上ノズル構造を追求している。

4. 3 鋳造速度の変化への追従性

高速鋳造において、実際の多連鋳操業では、取鍋交換時など一時的に減速することも少なくない。浸漬ノズルなどの機能材は高速鋳造条件に適合するように形状設計されているので、モールド内の溶鋼流動条件が定常域と減速域とで大きく変化してしまう場合がある。特に減速域では、メニスカス温度の低下により操業トラブルや铸件品質の低下が生じやすい。そのため、浸漬ノズルやモールドパウダーを設計する上では、最大鋳造速度に対応するだけでなく、鋳造速度が低下した場合にも不具合を生じないような操業変動に対する柔軟性も重要である。

the inclusions and gas bubbles in the molten steel becomes difficult. In addition, the mold powder entrapped by the vortex near the SEN is sucked into the port by the negative pressure and then discharged deep into the mold by the outlet flow. These phenomena become prominent in high-speed casting with high throughput.

Ar gas injection from the tundish upper nozzle is an effective measure for preventing the SEN clogging. However, if the gas flow rate is increased in proportion to the throughput, the molten steel surface in the mold becomes excessively active during the high-speed casting. Thus, the gas volume per steel throughput becomes smaller with the increase in the casting speed, hence the casting condition become increasingly disadvantageous for the SEN clogging prevention. To prevent SEN clogging, gas-injection at the upper nozzle should be improved in addition to measures for the SEN itself such as anti-clogging material. For this purpose, we recommend a multi-layered porous-upper nozzle, which is suitable for optimizing gas injection²²⁾. For example, there are cases that the annular-step SEN and the mogul SEN prevent effectively the clogging when they were used in combination with the multi-layered upper nozzle^{15), 20)}. To our experience, steel quality of the LC and ULC steel grades differs considerably by type of the gas-injection upper nozzle used in the casting. However, behavior of the gas bubbles remain poorly understood due to difficulty in simulating it by water model or fluid calculation. We pursue the optimized upper nozzle design basing on the casting results in cooperation with customers.

4. 3 Adaptive flexibility to casting speed changes

In actual high-speed long-sequence casting, casting speed is sometimes temporarily slowed down, for example, during ladle exchange.

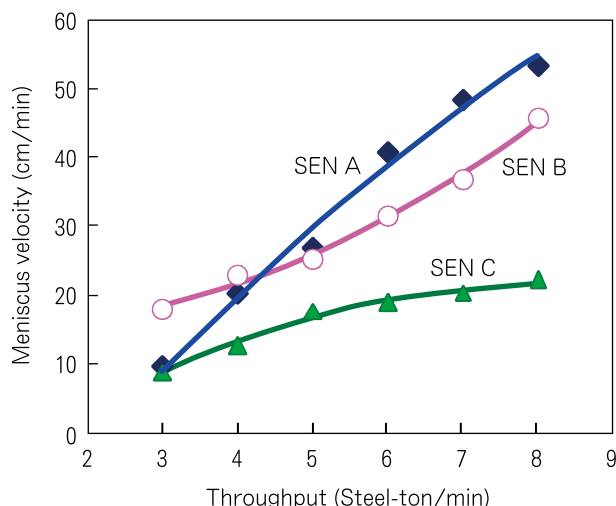


Fig. 12 Relationship between throughput and meniscus flow velocity in water model.

モールドパウダーの場合、滓化速度が温度の影響を受けやすいと、定常域と減速域とで溶融性状が変化する。粉末形状のパウダーは、顆粒形状に比べて滓化速度が温度の影響を受けにくく、溶融層が比較的安定に保たれ操業変動への追従性が優れている。Fig.5の高周波誘導炉によるパウダーの溶融試験から、粉末形状は溶鉄温度1550℃と1500℃とで同じような滓化速度を示すのに対し、顆粒形状では滓化速度が溶鉄温度によって変わることが分かる。

浸漬ノズルは、その吐出孔の設計によって铸造速度変化に対する表面流速の感度が異なる。形状の異なる浸漬ノズルについて、水モデル実験におけるスループットとメニスカス流速の関係の例をFig.12に示す。

当社の機能材では、こうした铸造速度変化への追従性も考慮した材料設計、構造設計に取り組んでいる。

5. 結言

スラブ連铸機で高級鋼板を高速铸造する点において、日本の製鋼技術は国際競争の中でも最先端に位置している。この高速铸造技術の中で、浸漬ノズルとモールドパウダーを中心に、当社の考え方と製品の特徴を紹介した。当社は、1986年の国際鉄鋼会議で当時最速であった铸造速度

Because SEN are designed to function best during high-speed operation, the flow pattern in the mold becomes worse during low-speed operation, and the drop in the meniscus temperature is apt to reduce steel quality. Therefore, adaptive flexibility to operation changes is also important in designing SEN and mold powder.

In the case of mold powder, if its melting speed is sensitive to temperature, the melting behavior changes with casting speed. Compared with the granule type, the fines type of mold powder is advantageous in adaptive flexibility, because the melting speed is not sensitive to temperature. In the melting experiment in Fig.5, the fines type mold powder shows similar melting behavior at molten iron temperatures of 1550 and 1500 degrees Celsius, but the granule type shows different melting behavior depending on the temperature.

As for the SEN, sensitivity of surface flow velocity to casting-speed change differs with port design. Fig.12 shows the relationship between throughput and surface flow velocity for some SEN shapes in water modeling.

We have taken this need for adoptive flexibility into account in developing SEN and mold powder.

5. Summary

In view of the high-speed casting of high quality steel grades, Japanese steelmaking technology is on the leading edge in global competition. Among many topics of the high-speed casting, our approach in functional refractories and mold powder is described. At the 5th International Iron and Steel Congress in 1986, SHINAGAWA gave a presentation on a mold powder for the casting speed of 2.0m/min⁷⁾, which was the highest speed at that time. After that, we have gone on to develop new mold powders on the front line of high-speed casting. In 1992, we

2.0m/min用のモールドパウダーを発表⁷⁾して以来、常に高速鋳造用パウダーの最前線で開発を重ねてきた。また、1992年に当社で開発した段差型浸漬ノズルは、各所で鋳片品質向上の効果が確認され、高速鋳造連鋳機で広く使用されるようになった。こうした経験を活かして最近開発した超高速用パウダーやモーグル型浸漬ノズルは、高速鋳造に限らず広い用途で、安定操業や鋳片品質向上の効果が確認されつつある。^{9), 10), 21), 23), 24)} 今後も、機能性耐火物とモールドパウダーの両方の視点からユーザーと協力し、高速鋳造技術に貢献する製品の開発に取り組みたい。

developed the annular-step SEN and it came to be widely used in high-speed casting due to its effectiveness on improving steel quality. Based on these experiences, we have developed new mold powders and mogul SENs, recently. These new products have come to be widely used in continuous casting as well as the high-speed casting.^{9), 10), 21), 23), 24)} We believe that our functional refractories and mold powders meet our customer's demands for high-speed casting and contribute to steel quality improvement.

References

- 1) The Iron and Steel Institute of Japan: History of Steel Continuous Casting Technology in Japan, ISIJ (1996), pp772
- 2) A. Shirayama et al.: Nippon Kokan Report, **120**, 1 (1988)
- 3) S. Nanbu et al.: CAMP-ISIJ, **15**, 167 (2002)
- 4) S. Lee et al.: 6th European Conference on Continuous Casting, (2008)
- 5) K. Kariya et al.: 1994 Steelmaking Conference Proceedings, 53 (1994)
- 6) J. Kubota et al.: Tetsu-to-Hagane, **86** 271 (2000)
- 7) H. Kyoden, O. Nomura: 5th International Iron and Steel Congress (1986)
- 8) K. Ichikawa et al.: Shinagawa Technical Report, **37**, 61 (1994)
- 9) T. Omoto: Shinagawa Technical Report, **49**, 65 (2006)
- 10) T. Omoto et al.: Shinagawa Technical Report, **49**, 73 (2006)
- 11) T. Kato et al.: CAMP-ISIJ, **17**, 853 (2004)
- 12) N. Kasai et al.: CAMP-ISIJ, **3**, 1114 (1990)
- 13) N. Kasai, M. Iguchi: Tetsu-to-Hagane, **92**, 544 (2006)
- 14) T. Teshima et al.: Tetsu-to-Hagane, **79**, 576 (1993)
- 15) O. Nomura et al.: Shinagawa Technical Report, **46**, 95 (2003)
- 16) D. Nakai et al.: 4th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 97 (2008)
- 17) T. Kajitani et al.: Tetsu-to-Hagane, **81**, 25 (1995)
- 18) K. Takatani: CAMP-ISIJ, **16**, 21 (2003)
- 19) M. Morishita et al.: CAMP-ISIJ, **14**, 6 (2001)
- 20) M. Nakamura et al.: Shinagawa Technical Report, **49**, 59 (2006)
- 21) P. Colucci et al.: Shinagawa Technical Report, **51**, 9 (2008)
- 22) H. Suzuki et al.: Shinagawa Technical Report, **46**, 67 (2003)
- 23) A. Nascimento et al.: 6th European Conference on Continuous Casting, (2008)