

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

鑄片品質改善に対する 連続鑄造用耐火物の取り組み

Approach to Improvement of Steel Quality
through Suitable Application of Refractories for
Continuous Casting

松 長 隆 行
Takayuki MATSUNAGA

森 脇 宏 治
Koji MORIWAKI

飯 田 正 和
Masakazu IIDA

品川技報

鑄片品質改善に対する連続鑄造用耐火物の取り組み

Approach to Improvement of Steel Quality through Suitable Application of Refractories for Continuous Casting

松 長 隆 行^{*1}
Takayuki MATSUNAGA

森 脇 宏 治^{*2}
Koji MORIWAKI

飯 田 正 和^{*3}
Masakazu IIDA

要 旨

浸漬ノズルやガス吹き上ノズルなどの連続鑄造用耐火物は、鑄片品質に大きく影響を与える。本報では、モールド内溶鋼流動を改善する浸漬ノズルの適正な構造、介在物浮上に影響するガス吹き上ノズルの特性、ロングノズルのシール性向上などについて、鑄片品質改善へ向けた連続鑄造用耐火物の機能性向上効果や実機結果などの事例を報告する。これらの耐火物の適用により、鑄片品質の向上や耐火物寿命の向上を図ることが可能である。

Abstract

Refractories for continuous casting such as the submerged entry nozzle and gas-blowing upper nozzle considerably influence steel quality. In this article, a suitable submerged entry nozzle structure that allows desirable molten steel flow in the mold, and suitable properties of the gas-blowing upper nozzle in terms of inclusion floating, improving seal-ability of gasket of ladle shroud are described. By improving these refractories for continuous casting, it is possible to improve steel quality as well as refractory durability.

1. 緒言

現在製造されている鋼板・棒鋼・H型鋼などの鋼材のほとんどは生産性向上と省エネルギー効果から連続鑄造機で製造され、その適用率は1983年には90%を超え、現在ではほぼ100%に近づいている¹⁾。

Fig.1に連続鑄造設備と使用される耐火物について示す。連続鑄造用耐火物は、浸漬ノズル、ロングノズルなどの注入用耐火物、ガス吹き上ノズルなどのガス吹き用耐火物、およびプレート、ストッパーなどの流量制御用耐火物に大きく分類す

1. Introduction

Most of steel products, such as plate, bar, H-steel, and so on, are manufactured by continuous casting (hereinafter referred to as CC) method. In Japan, the CC rate for all steel production has increased according to its excellent productivity and exceeded 90% in 1983. Recently, almost 100% of the steel products are made by the CC process¹⁾.

Fig.1 summarizes CC facilities and refractory applications. Roughly speaking, refractories

^{*1} 技術研究所 第3研究部 第1研究室 主任研究員 Manager, Flow Control Refractories R&D Sec., Research Dept. No.3, Research Center

^{*2} 技術研究所 第3研究部 第1研究室 室長 General Manager, Flow Control Refractories R&D Sec., Research Dept. No.3, Research Center

^{*3} 技術研究所 第1研究部長兼第3研究部長 General Manager, Research Dept. No.1 & No.3, Research Center

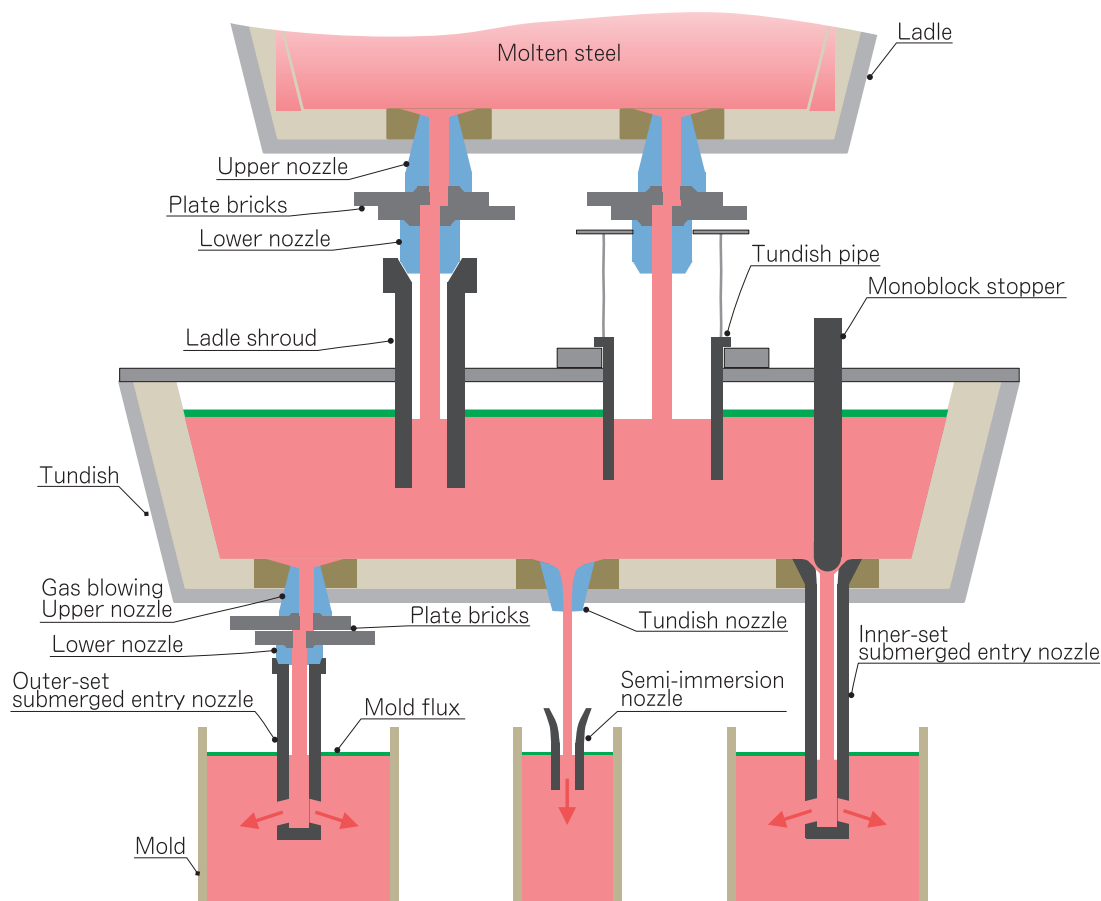


Fig.1 Schematic illustration of facilities and refractories for continuous casting.

ることができる。連続 casting は casting 品質を最終的に決定するプロセスで、そこに使用される浸漬ノズルなどの注入用耐火物やガス吹き用耐火物は溶鋼の空気汚染（再酸化）の防止、非金属介在物の除去、 casting 型（モールド）内の溶鋼流動制御などの機能を持ち、その機能性が casting 品質や歩留まりに強く影響する。

近年の鋼の高級化や casting 品質管理の厳格化に伴い、連続 casting 用耐火物に対するユーザーの要求はますます厳しくなっている。本報では当社が注入用耐火物やガス吹き用耐火物に適用している技術を casting 品質向上機能の観点から総括的に報告する。

2. 連続 casting プロセスにおける casting 品質の悪化とその原因

casting 品質の悪化は大きく分けて異物の混入、割

applied for the CC process are classified into the following three categories according to function. Molten steel-pouring refractories such as submerged entry nozzles (hereinafter referred to as SEN) and ladle shrouds (hereinafter referred to as LS), gas injecting refractories such as gas injection insert nozzles, and liquid flow rate controllers such as stoppers and slide valve (hereinafter referred to as SV) plates. CC is the process that determines steel slab quality. Steel-pouring refractories and gas injecting refractories play important roles such as eliminating steel pollution from air (re-oxidation and/or nitrogen pick up), rejecting non-metallic inclusions, and optimizing fluid flow in the casting mold, which strongly influences the quality and yield of steel slab.

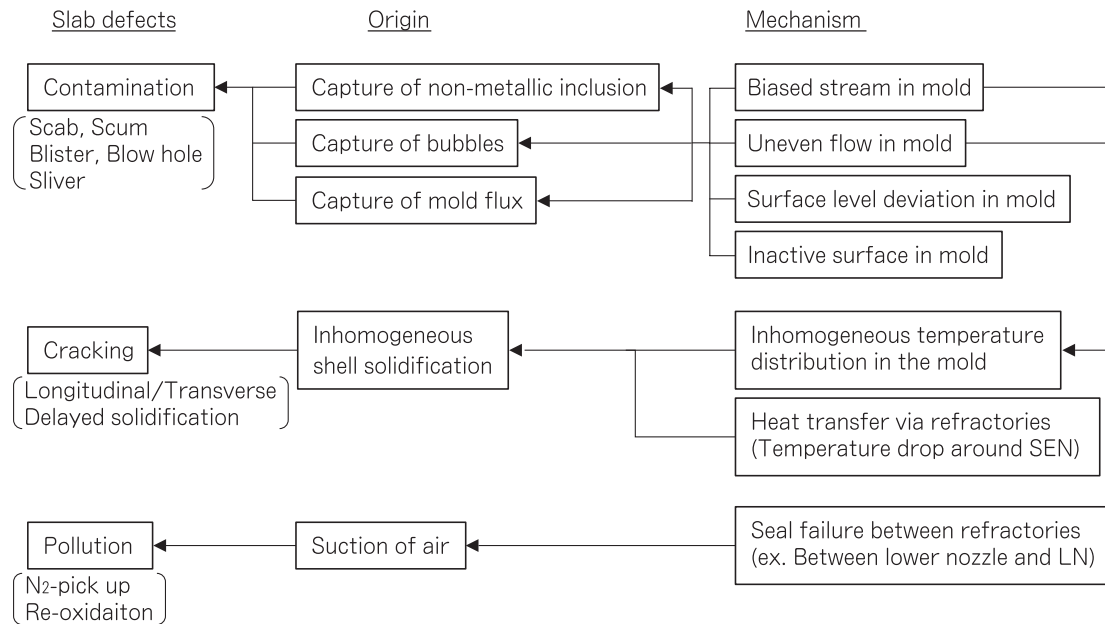


Fig.2 Kinds of slab defects and their causes.

れ、溶鋼清浄度の低下に分類でき、その発生要因はそれぞれのタイプにより異なる。鑄片欠陥を低減するには、そのタイプから発生原因を推定し、それぞれの原因に合った適切な対策を行う必要がある。Fig.2に鑄片欠陥の種類とその発生要因の関係図を示す。

鑄片に混入する異物は、非金属介在物と気泡である。非金属介在物の起源は脱酸生成物であるアルミナを主体とする酸化物とモールドフラックスで、気泡は非金属介在物の捕捉と浮上除去を目的に吹き込まれるガスである。異物混入の原因としては、主にモールド内の不適正な溶鋼流動があげられる。Fig.3に水モデル実験によるモールド内溶鋼流動シミュレーション結果の一例を示す。(A)は片側のみ強い流れ（片流れ）が発生している状態、(B)は使用前ノズルと使用時に閉塞したノズルの流れを比較した写真である。モールド内で片流れが発生すると（Fig.3(A)）、片側で湯面変動、介在物の潜り込みなどが助長され異物混入の原因となる。また、非金属介在物が内孔に付着、成長してノズル閉塞が発生、吐出流が下向きに変化すると（Fig.3(B)）介在物が沈み込み、鑄片に捕捉され異物混入となりやすくなる。これらの介在物の

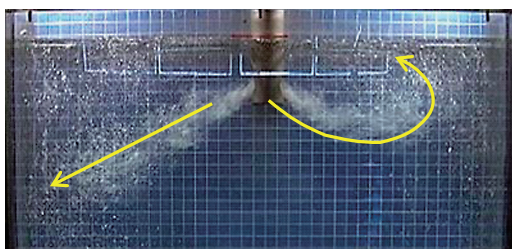
Recently, increase in high grade steel production and strict quality control requires further improvements of refractory functionalities. This article describes our CC refractory technologies comprehensively in terms of the functionality.

2. Steel Slab Defects Occurred in CC Process and Their Causes

Cast steel slabs occasionally show some kinds of defects. Slab defects are categorized as contamination, cracking, and deterioration in cleanliness, which are caused by various factors. Therefore, accurate evaluation of their causes according to the careful investigation of defects and applications of suitable countermeasures is necessary in order to reduce slab steel defects. Fig.2 is a summary of typical slab defects and their causes.

Contamination consists of non-metallic inclusions and gas bubbles. The non-metallic inclusions come from de-oxidation products, which are composed of alumina and aluminous oxides, and mold flux. Ar gas, which is injected

(A) Biased flow in casting mold



(B) Fluid flow in the mold with or without clogging.

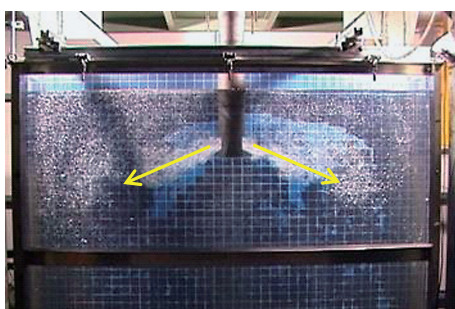
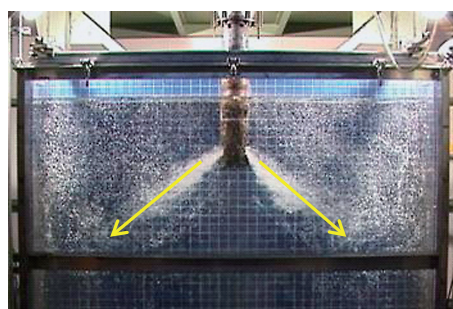
SEN before use
Without cloggingSEN after use
With clogging

Fig.3 Examples of fluid flow in the mold simulated by water-model experiment.

捕捉と浮上除去には上ノズルからのArガス吹込みが有効であるが、吹込み方法が不適切な場合、Arガスそのものが異物となる。

铸片割れは、溶鋼が不均一に凝固して生じる場合が多い。Fig.3(A)に示した片流れは、モールド内における溶鋼温度のバラツキを大きくし不均一凝固を誘発、铸片割れを引き起こす可能性が高くなる。

溶鋼清浄度の低下は再酸化（N₂ピックアップ）によるものが主で、その原因としてロングノズル－取鍋下ノズル間のシール性の悪化による吸気の影響があげられる。

本報ではこれらの铸片品質に大きな影響を与える浸漬ノズル、ガス吹き上ノズルおよびロングノズル－取鍋下ノズル間パッキンにおける取り組みについて報告する。

3. 連続铸造用耐火物の機能性向上

3.1 浸漬ノズルの内管形状

铸造時の溶鋼流量制御を目的にスライドプレートによる絞り注入が行われる場合、モールド内の溶鋼に偏った流れが生じやすく、铸片品質の低下

for the sake of trapping and flotation separation of non-metallic inclusions, is the origin of bubble contamination. Inappropriate fluid flow in the casting mold induces contamination. Fig.3 exemplifies fluid flow in the casting mold simulated by water-model experiments. (A) shows a liquid flow biased toward left outlet port. Such biased flow promotes liquid surface level fluctuation and inclusion trapping on a specific side, resulting in contamination. (B) of Fig.3 compares flow behaviors of the liquid drained from an unused SEN and a used SEN, which had been clogged during commercial application. The nozzle clogging occurred as a result of adhesion and growth of non-metallic inclusions. The downward stream caused by clogging tends to entrain non-metallic inclusions, resulting in contamination. While Ar gas purging from the insert nozzle is an effective measure for trapping and flotation separation of non-metallic inclusions, inadequate gas purging promotes bubble contamination.

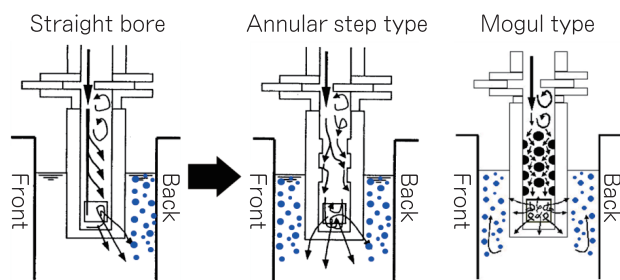


Fig.4 Influence of bore shape on fluid flow in SEN.

を招くことがある。当社は、内管に管状突起部を有する「段差型浸漬ノズル」、多数の球面状突起を有する「モーグル型浸漬ノズル」などユニークな内管形状の浸漬ノズルを開発し、偏流抑制に効果を上げている。Fig.4にこれら偏流抑制型浸漬ノズル内の流れの模式図を示す。内管突起部に偏流が衝突し内管流・吐出流が均一化されると考えられる。浸漬ノズル内での偏流抑制によりモールド内の偏流も抑制され、湯面変動の低減、気泡の浮上分布の均一化、吐出孔流速分布の均一化や負圧による吸い込み流の抑制（Fig.5）などが水モデル実験で確認されている。これらには実機での使用実績が多くあり、以下に実铸造で確認された効果について述べる。

Fig.6にモールド内の偏流改善効果が認められた結果を示す²⁾。使用した浸漬ノズルはモーグル型浸漬ノズルで比較は内管ストレート形状のノズルで行った。評価はモールドに埋め込まれた熱電対を利用して長辺両端に位置する部位の温度推移で行った。Fig.6より内管ストレート品は幅方向の温度差が約14℃であるのに対して、モーグル型浸漬ノズルはその温度差が約4℃まで軽減されることがわかる。これは偏流が抑制されモールド内流動が均一になったためと考えられる。段差型浸漬ノズルでも同様の効果が得られている³⁾。

Fig.7に介在物の潜り込みによる铸片の疵が低減された結果を示す⁴⁾。この製鉄所の連铸機は湾曲式構造で、モールド内で浮上できなかった介在物が湾曲上部の凝固シェルに捕捉されてブリストア疵やスリバー疵が発生していると推定し、偏流による気泡や介在物の潜り込みを低減するため

Most of cracking can be attributed to inhomogeneous solidification of molten steel. The biased flow, as shown in Fig.3(A), increases temperature deviation in the casting mold, which induces inhomogeneous solidification.

Steel pollution such as re-oxidation and/or nitrogen pick up is caused by air suction via interface between LS and lower nozzle. This is attributable to deterioration of seal-ability.

In this article, therefore, recent innovative improvements in the SEN, gas blowing insert nozzle, and gasket between LS and lower nozzle of steel ladle are described.

3. Improvements in CC Refractory Functionalities

3.1 Bore shape of SEN

In the case of casting through a half-opened SV, a narrow flow channel tends to be formed on the bore surface of SEN, resulting in uneven steel supply that sometimes induces steel quality deterioration. In order to achieve a uniform steel supply, applications of annular-step SEN and/or mogul SEN were found to be effective. Fig.4 schematically shows the liquid flow on the surface of the SEN bore. The stream branches at the corner of the step or moguls, and is distributed evenly on the bore surface. This was observed by water-model experiment. It clarified the suppression of the biased flow in the SEN and mold, resulting in reduction of liquid surface level deviation. Moreover, stable bubble floatation and uniform flow rate distribution at the outlet port were recognized. Fig.5 demonstrates the flow rate distributions evaluated by water-model experiment. Obviously, a uniform flow rate distribution that eliminates a stream toward the inside is achieved for the mogul SEN. The effectiveness of these unique shape SENs was validated by many commercial applications.

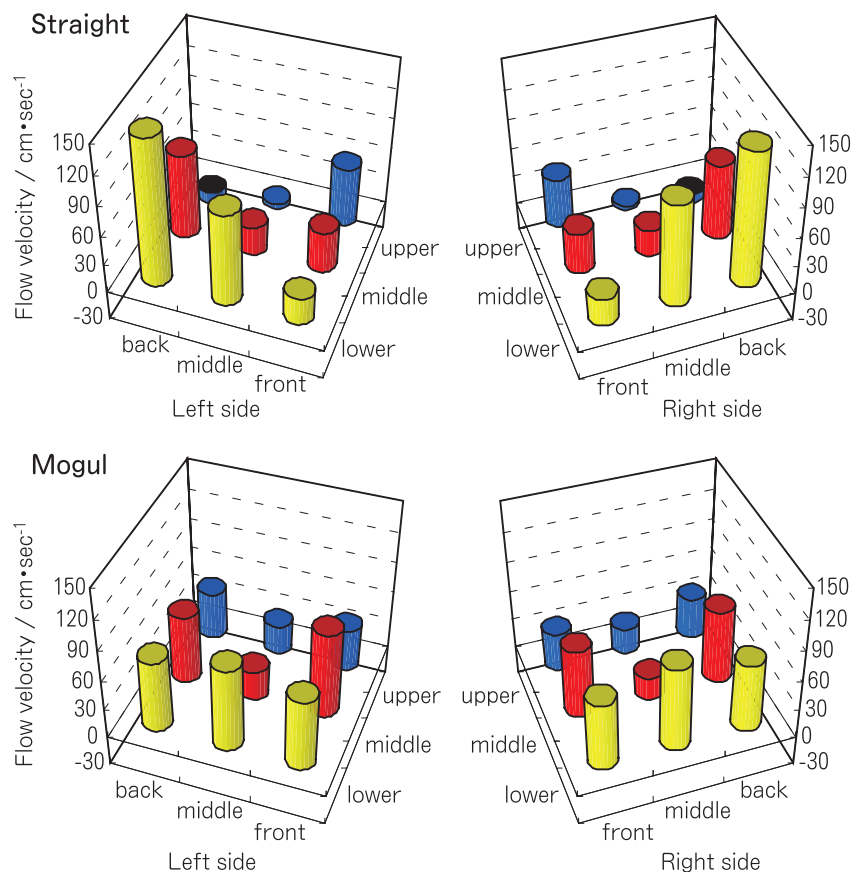


Fig.5 Distribution of average flow velocity at outlet port in water model experiment.

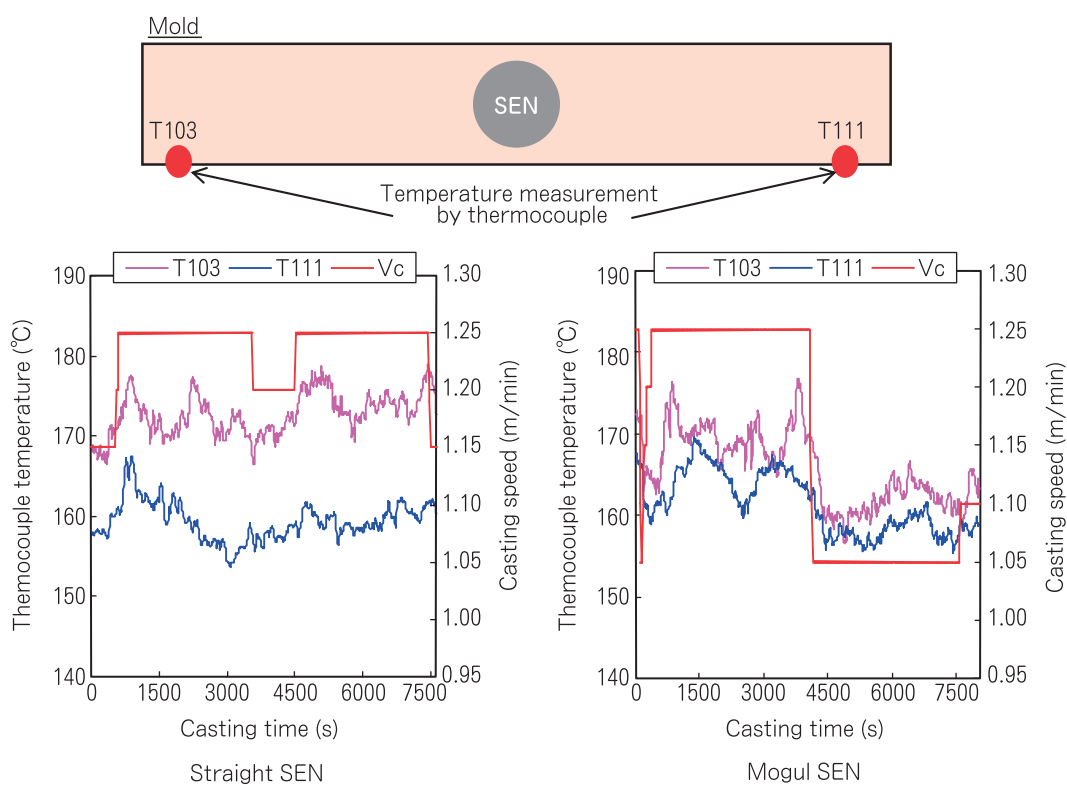


Fig.6 Trends of mold temperature measured by thermocouples located at the opposite ends of the mold wide face during casting.

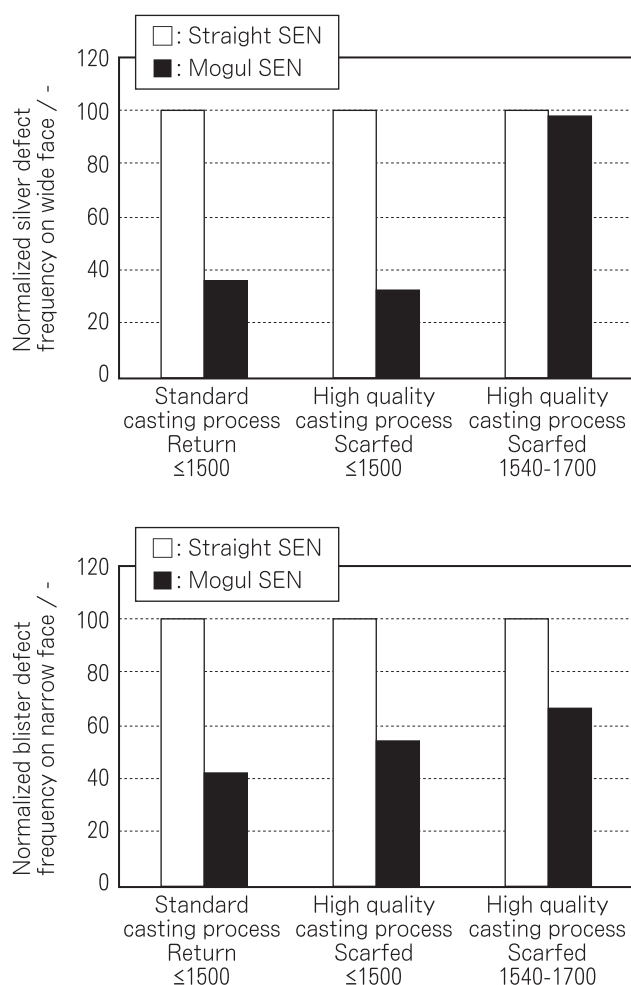


Fig.7 Influence of Mogul SEN application on defect frequency.

モーグル型浸漬ノズルをテストした。Fig.7は6ヶ月の間に製造されたスラブを、自動表面検査システム（SIAS）を用いて検査した結果である。モーグル型浸漬ノズルの投入よりスリバー疵は約半減、ブリストア疵は約1/3～半数減少し、鋳片品質が改善する結果が得られた。

Fig.8にモーグル型浸漬ノズルと内管ストレートノズルの使用後切断面写真を示す。内管ストレートノズルはパウダー巻き込みによる吐出孔溶損が発生しているが、モーグル型浸漬ノズルは吐出孔部の拡大が認められない。吐出孔へのパウダー巻き込みは、負圧による吸い込み流により発生し、吐出孔を溶損する。溶損した耐火物はモールド内に拡散され、鋳片欠陥の要因となる。Fig.9

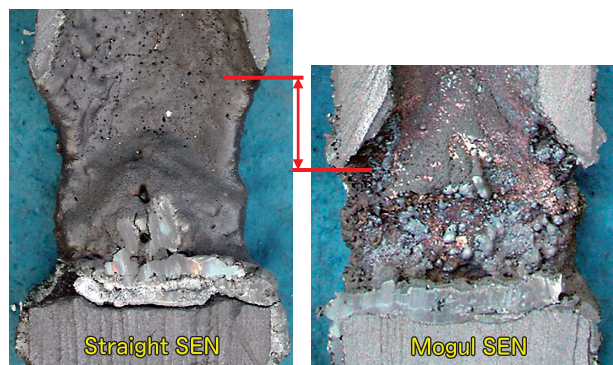


Fig.8 Cut section of Straight bore SEN and Mogul SEN after use.

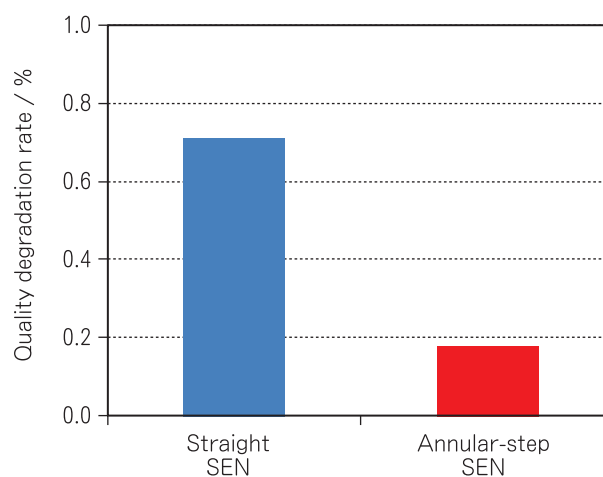


Fig.9 Influence of Annular-step SEN application on outlet port corrosion and quality degradation rate.

Fig.6 shows the influence of the mogul SEN on the suppression of biased flow²⁾. The degree of bias was evaluated by the temperature difference between thermocouples embedded in opposite ends of the wide faces of the casting mold. In comparison with a casting operation using a straight bore SEN, which showed 14°C difference in temperatures, a considerably smaller temperature difference (4°C) was evaluated for casting using a mogul SEN. This is considered attributable to symmetrical fluid flow in the casting mold caused by uniform steel supply from two outlet ports. The same effects are also observed for annular-step SEN³⁾.

にそれに伴う格落ち率（スリバー疵欠陥）が段差型浸漬ノズルの適用により低減した結果を示す。段差型やモーグル型浸漬ノズルの適用により、負圧による吸い込み流が解消され吐出孔溶損が低減し、それに伴い鑄片欠陥も低減した。

このように浸漬ノズルの内管に段差や突起の機能を付与することでモールド内溶鋼流動を適正化し、鑄片品質の改善が図ることが可能である。現在、段差型浸漬ノズルは後述する難付着材との併用でより効果を生み多くのスラブ、ブルーム連鑄機で適用されている。

3. 2 浸漬ノズルの吐出孔形状

浸漬ノズルの吐出孔形状はモールド内流動に影響を与える。吐出孔はその角度や孔数によって溶鋼流動の向きが決まる。吐出孔角度が下向きに大きい場合、モールド内の溶鋼流動は強い下向きの流れとなる。強い下向きの流動パターンは湯面を安定化させる特徴を持つ。そのため、定常的に湯面変動が大きい場合や、スループットを上げて生産性をアップさせたいなどの場合には有効な手段である。しかし、介在物や気泡がモールド深部に運ばれやすくなるため、鑄片欠陥の原因となる。一方、吐出孔角度が浅い場合は、介在物の潜り込み低減や湯面への熱供給が向上し鑄片の表面品質向上に繋がる可能性を持つが、湯面変動が大きくなる傾向となるため生産性向上には妨げとなる。

Fig.10に吐出孔を巾方向に外周側へ向かって広げた「ラッパ型吐出孔」の模式図を示す。このラッパ型吐出孔は吐出流を扇状に広げて吐出することで、スループットを下げずに吐出流速を減速させる効果を生み出す。また、角度を変更せず短辺側の上昇/下降流速を低減でき（Fig.11）、前述の介在物の潜り込みや湯面変動の抑制に効果的であると考えられる。Fig.12にはラッパ型吐出孔使用時の鑄片品質改善例を示す。ラッパ型吐出孔の流速緩和効果により、鑄片コーナー部の凝固遅れの低減が確認されている。

電磁攪拌（EMS）によって、モールド内に旋回する流れを付与することで鑄片品質が向上することはよく知られているが、EMSを保有しない連続鑄造機もある。それらの連鑄機に対して、吐出流

Fig.7 shows the effects of the mogul SEN on the frequency of sliver and blister defects⁴⁾. The steel mill uses a bow type caster which has less ability of floatation separation of inclusions since there is no vertical part. Thus, it is assumable that un-separated inclusions tend to be trapped just below the upper solidified shell and cause blisters and sliver defects. According to that assumption, the mogul SEN was used in order to reduce biased flow that is accompanied by entrainment of inclusions and bubbles. Fig.7 shows the results of a six month trial evaluated by a surface inspection system. Application of mogul SEN reduced sliver defects by half and blister defects by one-third to half.

Fig.8 shows the influences of the application of the annular-step SEN on outlet port corrosion. The inward flow toward the SEN outlet port induces mold flux contamination and promotes corrosion of the outlet port. Naturally, it is assumable that refractory substances, which are derived as a result of corrosion, cause slab defects. Fig.9 compares grade reduction rate according to sliver defects between straight bore SEN and annular-step SEN. By application of the annular-step SEN, the inward flow was eliminated, resulting in reductions of outlet port corrosion and slab defect frequency.

As discussed above, optimization of fluid flow in the casting mold, which improves slab quality, is achievable by utilization of a functional SEN such as the annular-step or mogul type. According to the effectiveness, they have been widely adopted to many slab casters and bloom casters in association with anti-clogging material applications. The anti-clogging materials will be described later.

3. 2 Outlet port shape of SEN

Predictably, shape, angle and number of SEN outlet ports considerably influence on molten steel flow in a casting mold. An intensive downward

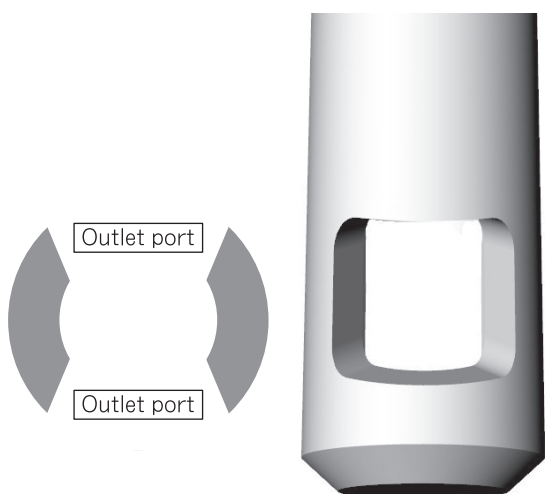


Fig. 10 Schematic diagram of spreading outlet ports.

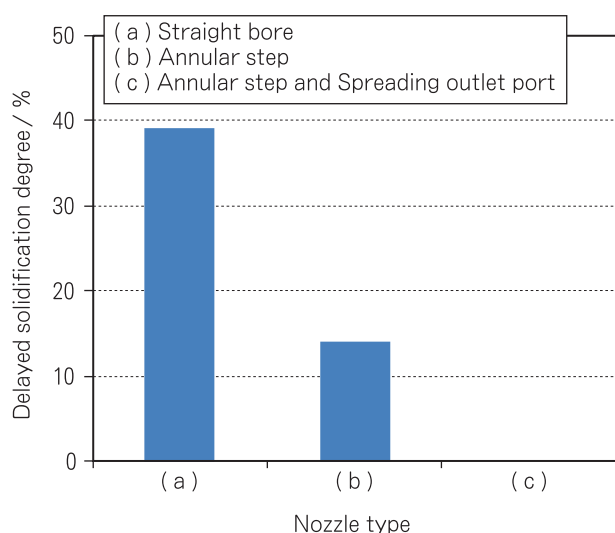


Fig. 12 Effect of nozzle type on inhomogeneous solidification of shell around the corner.

でモールド内に旋回流を発生させることができる吐出孔形状を開発した⁵⁾。Fig.13にモールド内に旋回流を発生させることができる屈折型吐出孔の形状図と水モデル実験結果を示す。水モデル実験はモールド内流動を可視化させるために、水の比重より軽いビーズを投入して、その動きを観察した。Fig.13より屈折型吐出孔は安定して旋回する様子が確認できる。この浸漬ノズルを実機で使用した使用後ノズルの外観写真と铸件品質評価結果をFig.14に示す。使用後の吐出孔に溶損や閉塞は

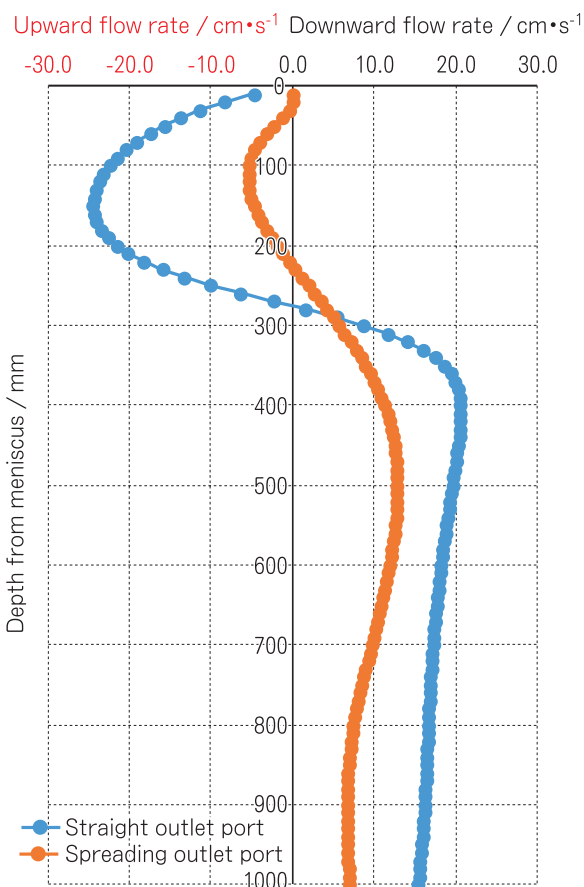


Fig. 11 Flow rate distribution along narrow face of mold evaluated by CFD calculation.

stream generated by downward-oriented outlet port stabilizes liquid surface movement. Thus, it is effective to operations in which liquid surface level fluctuation is permanently large and/or high throughput operation. However, excessively intensive downward stream delivers inclusions and/or bubbles deeply in the partially solidified slab and causes slab defects. On the other hand, SENs with lower angle outlet ports, i.e., closer to the horizontal direction, is an advantageous status in terms of reduction of entrainment of inclusions and/or bubbles as well as efficient heat supply to the liquid surface, which is a favorable status for improving slab surface quality. However, if the accompanying liquid surface level fluctuation is excessively large, productivity will deteriorate.

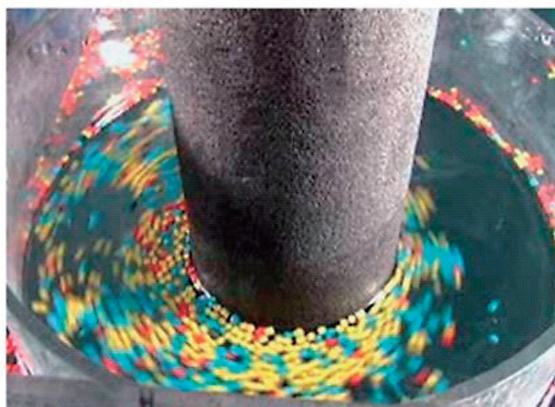
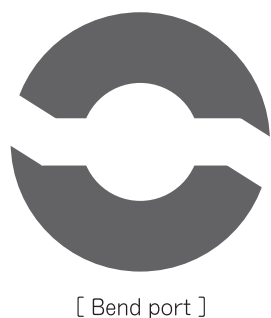


Fig.13 Swirling flow generated by “Bend port” SEN.

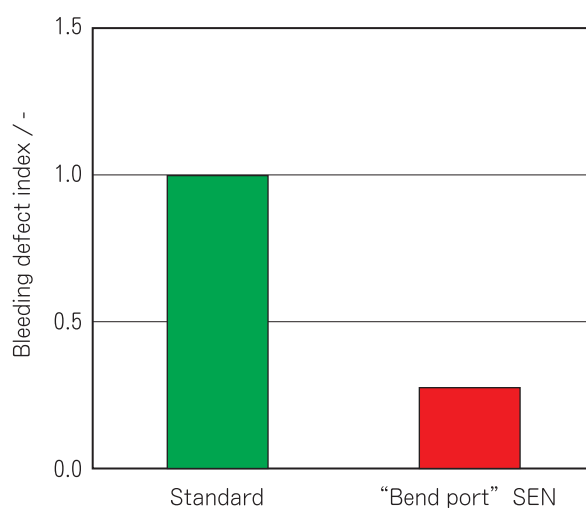


Fig.14 Appearance of “Bend port” SEN after use and comparison of the bleeding defect rate.

認められず、ノズルの旋回流発生効果は铸造終了まで有効であったと考えられる。本ノズルを使用した鋳片はブリード欠陥の発生頻度が改善されており、凝固シェルの均一生成によって鋳片の表面品質が向上されたためと推測される。

このように、吐出孔形状はモールド内流動に影響を与え、鋳片欠陥にも影響を与える重要な要素である。客先のニーズを把握し、操業条件に適切な溶鋼流動を得る浸漬ノズルの設計が必要である。

3. 3 浸漬ノズルの難付着材

Fig.3に示したように、浸漬ノズルが閉塞するとモールド内流動に影響を与えるため、浸漬ノズル

Fig.10 demonstrates the spreading outlet port of which the horizontal width of the port increases toward the outside. A spreading stream exiting from this outlet port enables flow speed deceleration without throughput reduction. In addition, it decreases upward and downward flow speeds at the narrow surface side without changing outlet port angle as indicated in Fig.11. It is considered to be effective for suppressing entrainment of inclusions as well as liquid surface level fluctuation. Fig.12 shows the effectiveness of the spreading outlet port stream on slab solidification. Flow speed

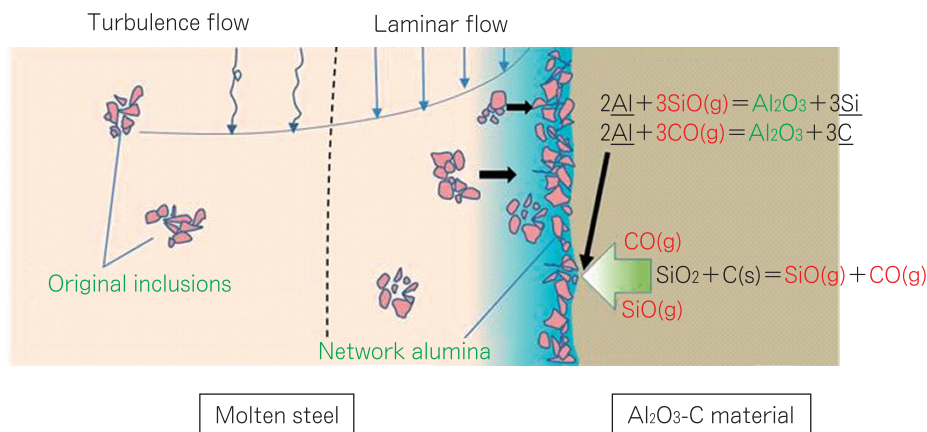


Fig.15 Schematic illustration of alumina adhesion.

への非金属介在物の付着は連々数以外に铸件品質にも大きく影響する。内管への介在物付着に対しては以下の機構が考えられる。

- 1) 溶鋼中のAlと浸漬ノズルとの反応による付着
浸漬ノズル材質内における反応で生成したCO(g)やSiO(g)が、ノズル管内の動圧により内管壁面へ移動し、壁面で溶鋼中のAlと反応、網目状のアルミナ系酸化物を生成することで付着が生じる (Fig.15)。
- 2) 内管稼働面へ介在物が衝突することによる付着
内管壁面はほとんど流速がゼロのため、層流域に侵入した介在物は浮力の影響で比較的ゆっくりとした動きとなり、互いに付着・凝集が起こる。この引き寄せられた介在物の付着は内管稼働面の表面状態に左右される。材質中カーボンの溶鋼への溶解、SiO₂の消失により凹凸化した表面では、機械的な捕捉が助長され易くなる。また、耐火物と溶鋼との濡れ性が介在物付着に影響を与える。溶鋼との濡れ性が悪いと、引き寄せられた介在物が内壁へ押される方向へ力が働き付着が進行し易くなる (Fig.16)。

上記1), 2) のメカニズムに基づき、非金属介在物の付着を改善する方法として浸漬ノズル内管部にカーボンフリー材料の配設が有効な手段であると考えた。カーボンフリー内管材を適用することで、耐火物中のSiO₂還元反応が抑制される、ま

deceleration effectively suppressed the delayed solidification around the slab corner, resulting in reduction of corner cracking frequency.

While it is well-known that a swirling flow induced by electro-magnetic stirring (hereinafter referred to as EMS) improves slab quality, there still are many EMS-uninstalled casters. Thus, a bending-shape outlet port, which is designed to generate swirling flow, was developed⁵⁾. Fig.13 is a schematic diagram of bend port and swirling flow generation validated by the water-model experiment of which light beads were floated for the sake of visualization. Obviously, stable swirling flow was recognized. Fig.14 shows the influence of bending port SEN application on the bleeding detect rate of a slab associated with the external view of a used bending port SEN. An obvious reduction in bleeding defect frequency is considered attributable to homogeneous formation of the solidified shell resulting from uniform heat supply through adequate swirling. No trace of outlet port corrosion or clogging indicates that the effectiveness had been maintained until casting sequence completion.

As described above, it is necessary to optimize SEN shape design taking customer's requirements and operation conditions into account.

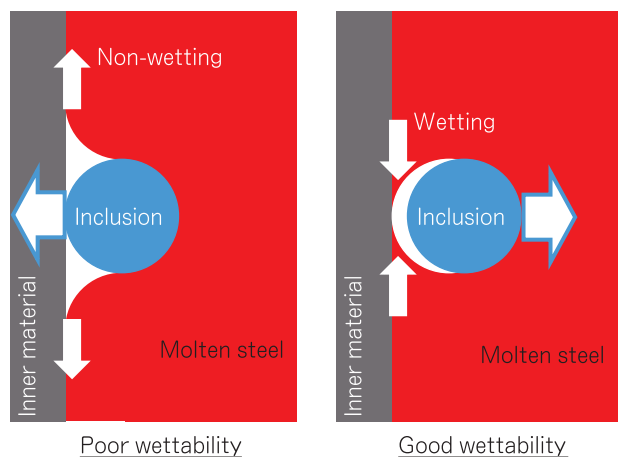


Fig. 16 Influence of wettability of a SEN refractory to molten steel on inclusion adhesion.

Table 1 Properties of anti-clogging materials

Type	Unreactive			Reactive		
Material code	AS	A	Sp	AS	Sp	CZ-C
Apparent porosity / %	22.5	23.0	21.5	20.0	18.5	14.0
Bulk density / g·cm ⁻³	2.40	2.90	2.70	2.10	2.75	3.05
Chemical composition / mass%						
Al ₂ O ₃	66	96	70	41	64	-
SiO ₂	27	-	-	56	4	1
CaO	-	-	-	-	3	22
MgO	-	-	26	-	24	-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	49
C	-	-	-	-	-	23

A : Al₂O₃, S : SiO₂, Sp : Spinel, CZ : CaOZrO₂

た、カーボンフリーであるためカーボンの溶鋼への溶解も抑制されることから、表面の平滑性が保たれ付着が抑制されと考えられる。溶鋼との濡れ性向上による付着抑制機構については、鋼中の成分の浸透や溶鋼からの受熱によって溶鋼と濡れやすい液相を伴う組織を形成することで付着抑制効果を生むと考えている。Table 1に当社内管材の代表品質表を示す。溶鋼反応型は、鋼中のMnとシリカ成分の反応により、より溶鋼と濡れやすい反応層を形成することを目的としたものである。スピネル質は、フラックス成分を添加し、受熱により溶鋼と濡れやすい稼働面を形成させるよう設計したカーボンフリー材である。CaO-ZrO₂-C材質（CZ-C材）は溶鋼反応側のカーボン含有材で、閉塞に対して有効であることが確認されている。

3. 3 Anti-clogging materials for SEN

As shown in Fig.3, SEN clogging considerably influences on flow in the casting mold. Thus, clogging should be eliminated from the viewpoints of casting sequence extension and improving slab quality. Clogging mechanisms are hypothesized as follows:

- (1) Reaction between Al in steel and substances included in SEN

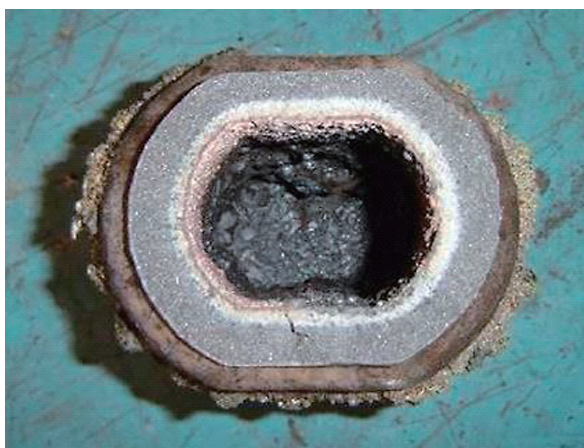
CO(g) and SiO(g), which are formed as a result of a reaction between SiO₂ and C in SEN material, transfer to the inner surface of the SEN bore and react with the Al in the steel to form aluminous oxide network on the SEN surface as shown in Fig.15.

- (2) Collisions and adhesion of non-metallic inclusions

In the vicinity of the SEN inner surface where fluid flow is negligible, inclusions float slowly and attract each other to form agglomerations that tend to collide with and adhere to the inner surface of SEN. The surface configuration considerably affects the adhesion easiness. The agglomerations which contact the wall attach easily to the rough surface, which is formed by SiO(g) evaporation and carbon dissolution. Furthermore, poor wettability of the SEN surface to molten steel promotes adhesion since a pushing force is imposed to the agglomerations as shown in Fig.16.

On the basis of the above hypothesis, it was understood that installation of carbon-free materials as liner on the bore surface is effective since SiO₂ reduction and carbon dissolution can be suppressed so as to improve surface smoothness, which is desirable in terms of inclusion adhesion. Additionally, improvement of wettability is considered to be effective. It is achievable by in-situ formation of a surface layer that includes adequately controlled molten

Annular step and carbon-free material



Straight bore without carbon-free material



Fig.17 Cross section of SEN used for 6 heats of low carbon steel casting.

ただし、CZ-C材は熱膨張率が比較的高いため、十分な予熱が必要であり操業条件の把握が必要である。

このような非金属介在物の付着と成長が著しくなるとノズル閉塞が発生する。閉塞の低減に対しては、材料だけでなく浸漬ノズルの内管構造との組み合わせでより高い効果が得られる場合がある。Fig.17に内管段差構造の浸漬ノズルとカーボンフリー内管材を併用した時の実機使用結果を示す。段差+カーボンフリー内管材の併用により内管閉塞が低減され、寿命の延長に加えて鑄片のダウングレード比率が減少するなど鑄片品質にも良い効果が得られている。

浸漬ノズルへの付着は、内管だけでなく吐出孔部に発生する場合もある。これは吐出孔からの吐出状況が影響している。吐出孔形状によっては吐出孔上部に吸い込み流が発生するなど流れの停滞現象が起こり、CFD計算や水モデル実験でその状態を確認することができる (Fig.18(a))。実機においてもこの部位に付着が発生しやすい傾向がある。この流れの停滞は適正な吐出孔形状により解消されと考えられ、流れ停滞位置の付着抑制効果が期待される (Fig.18(b))⁶⁾。

3. 4 タンディッシュ用ガス吹き上ノズルの改善

連続鑄造では、タンディッシュ用上ノズルからArなどの不活性ガスを溶鋼に吹き込む操業が行われる場合がある。ガスを吹き込む目的として

steel-wettable liquid phase. Table 1 provides the typical properties of anti-clogging material for the liner. The steel-reactive type is a material in which the contained SiO_2 reacts with the Mn in the steel to form a steel-wettable reaction layer. Spinel material adequately contains a flux component, which allows the steel-wettable surface layer. $\text{CaO-ZrO}_2\text{-C}$ (CZ-C) is a steel-reactive type carbon-including material. Effectiveness of this material on suppression of clogging has also been confirmed by commercial applications. Since it exhibits larger thermal expansion, sufficient pre-heating is necessary for CZ-C.

As described in subsection 3.1, application of an anti-clogging material liner associated with flow controllable bore structure effectively suppresses the clogging. Fig.17 shows the effect of combined application of a carbon-free liner and annular-step bore on clogging. Thanks to the suitable combination, prolongation of service life and reduction in steel quality degradation were obtained simultaneously.

Clogging occurs not only at the bore but also at the outlet port. Outlet port clogging is attributed to the liquid flow out behavior which includes a stagnant area. The stagnation is caused by compensation of the outward flow

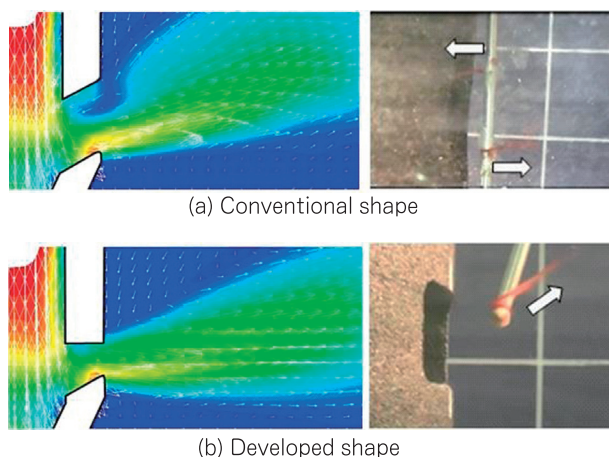


Fig.18 Fluid flow in the vicinity of outlet port demonstrated by CFD calculation and water model experiment.

は、以下があげられる。

- 1) 上ノズル～浸漬ノズル内管への介在物付着の抑制（閉塞抑制）
- 2) モールド内での鋼中介在物の浮上促進
- 3) モールド内湯面の活性化による湯面への熱供給（湯面の凝固抑制）

溶鋼に気泡が懸濁すると気泡が介在物を捕捉しながらノズル表面を流れるため付着が低減する。さらに、気泡はモールド内で浮上しながら衝突した介在物を付着、介在物の浮上分離を促進する。このようなモールド内での連続的な気泡の浮上によりモールド内の溶鋼は攪拌され、表面凝固が抑制される。

一方、Arガスの気泡がモールド内で浮上せず鋳片にトラップされれば鋳片欠陥に繋がるため、上記3項目を考慮しながらも極力吹き込みガス量を低減する方が好ましい。Fig.19にガス吹き用上ノズルの構造例を示す。少ないガス量で最適部位からのガスの吐出を行うため、ポーラス質と非ポーラス質を同時成形した多層構造のノズルが開発されている。Fig.19に示しているように、上下方向にポーラス質や非ポーラス質を配設し、少ないガス流量でも上下・円周方向に均一なガス吹きを行うことが可能で、また閉塞しやすい場所から優先的にガス吹きさせるなどガス吐出範囲や吐出位置の調節が可能である。

by the inward flow, which occurs as a result of inappropriate port shape. This phenomenon was confirmed by calculations utilizing computational fluid dynamics (CFD) and/or water-model experiment. Stagnant area shown in Fig.18(a) corresponds to the area on which inclusions tends to adhere. Hence, elimination of stagnation by applying appropriate port shape as shown in Fig.18(b) is considered to be effective for suppressing outlet port clogging⁶⁾.

3. 4 Improvement of gas blowing insert nozzle

Many steel mills adopt inert gas (Ar) blowing from tundish insert nozzle. Blew gas bubbles are dragged down through SEN and float up in the casting mold. The purpose of gas blowing is as follows.

- (1) Suppression of non-metallic inclusion adhesion to bore surface of insert nozzle and SEN (suppression of clogging)
- (2) Promotion of floatation separation of inclusions in the mold
- (3) Heat supply to liquid surface in the mold by activation of liquid surface (surface solidification inhibition)

As the bubble-dispersed liquid steel flows down along the bore surface of the nozzle, bubbles capture the non-metallic inclusions, resulting in suppression of adhesion of non-metallic inclusions. In the casting mold, the dispersed bubbles float up capturing the collided non-metallic inclusions, thus, floatation separation of the inclusions is promoted. The continuous floatation of bubbles stirs the liquid steel in the mold so as to inhibit surface solidification.

In spite of the above favorable advantages of gas blowing, it causes slab defects if bubbles are trapped in the slab. Thus, blowing of a minimum amount of inert gas to satisfy the above three factors is recommended. Fig.19 shows an example of a gas blowing insert nozzle configuration.

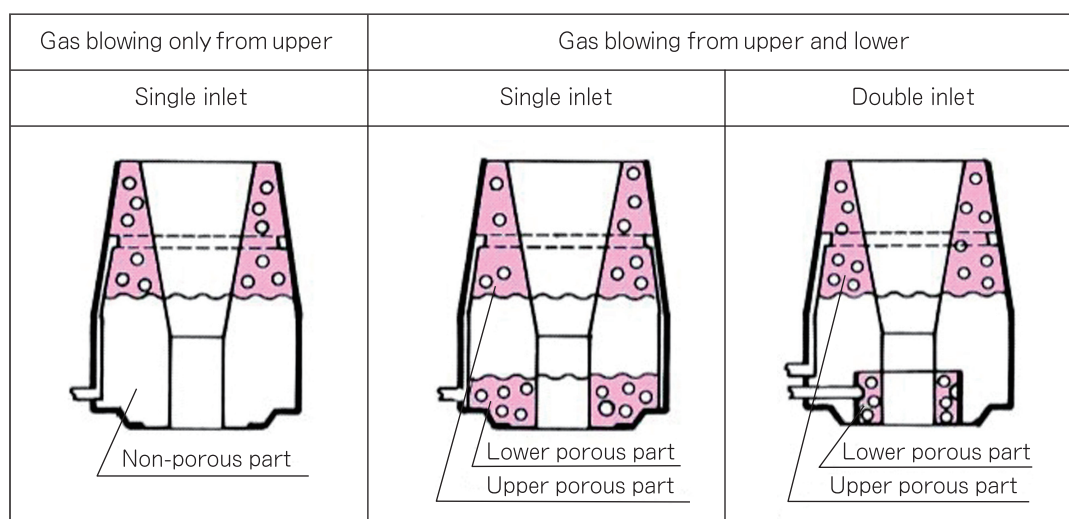


Fig.19 The structure of various insert nozzles for gas injection.

溶鋼に吹き込む気泡の大きさはポーラス材質の気孔径で制御する。Stokesの式に示されているように、気泡は気孔径が大きいほど浮上速度が速い。そのためモールド内では、大きい気泡はノズルに近い位置に浮上し小さい気泡は吐出流によって短辺近傍まで運ばれる。小さい気泡は、場合によってはモールド短辺衝突後にモールド深部まで運ばれると考えられる。Table 2にガス吹き上ノズルの機能と気孔径との関係性を示す。気泡の大小によりそれぞれの効果が異なるため、使用状況に応じて気孔径の異なるポーラス材を適用する。一般的には平均気孔径が $20\text{--}30\mu\text{m}$ の材質が適用されている。経験的に、大きい気孔径を有するポーラス材の方が良好な鋳片品質を得られる傾向があ

A suitable arrangement of a simultaneously fabricated porous part and dense part enables the uniform gas blowing with minimum gas volume. Furthermore, selective gas blowing technology, of which intensive gas flow area can be adjusted to the easy-clogging zone, allows effective clogging suppression.

The pore diameter of a porous medium determines bubble diameter. As described in Stokes' equation, floating speed becomes higher as bubble diameter increases. Hence, big bubbles float around the SEN and small bubbles are delivered to the narrow face of the mold. It is possible that fine bubbles that collides the narrow face flow down deep into the mold along with the molten steel stream and induce slab defects. Table 2 qualitatively summarizes bubble size and functionality of a gas blowing insert nozzle. As described above, careful selection of porous medium taking operation into account is important. Generally, materials with an average pore diameter of $20\text{--}30\mu\text{m}$ are applied. Empirically, application of large pore diameter insert nozzle tends to improve slab quality. This is considered attributable to immediate floatation

Table 2 Influence of bubble size on functions of insert nozzle

Functions	Bubble size	
	Large	Small
Anti-clogging effect according to inclusion trapping	Negative	Positive
Inclusion-floating effect	Positive	Negative
Fluid surface activation effect	Activates nozzle surroundings	Activates narrow face of the mold

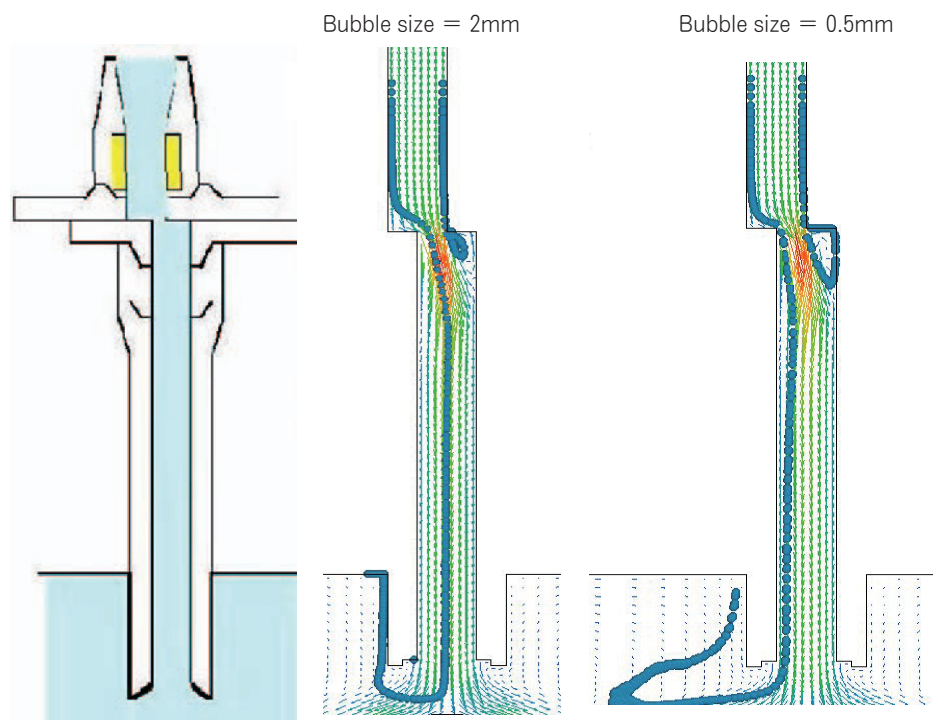


Fig.20 Difference in bubble passing routes according to bubble size.

る。これは、大きい気泡の方がモールド内での浮上速度が速いことが影響していると考えられる。

上ノズル～浸漬ノズルまでの閉塞についても気泡径が影響する。気泡径が小さいと同じガス量でも気泡の数が増え、比表面積が大きくなり、介在物との衝突確率が上昇するため介在物を捕捉する能力が高い。また、Fig.20に示すとおり、気泡径が大きいガスは浸漬ノズルの中央を流れるが、小さいガスはノズル壁面近傍を流れる。よって、ノズルへの介在物の付着に対しては小さい気泡径の方が有効であると考えられる。

3. 5 ロングノズル用パッキン（ N_2 ピックアップ防止）

取鍋下ノズルとロングノズルとの接合面には、パッキン材が使用される。このパッキン材は、目地からの吸気による铸片品質低下や耐火物損傷の防止を目的に使用される。ロングノズルは多数回使用されるため、この目地に使用されるパッキン材はシール性と耐火物との離型性が重要である。Fig.21にロングノズルと取鍋下ノズル間で吸気浴損が発生した事例を示す。これはパッキンの離型

of purged bubbles.

Bubble diameter influences nozzle clogging as well. Inclusion capturing efficiency is improved as bubble diameter decreases since the increase in number of bubbles and overall specific surface area increase the probability of collision with the non-metallic inclusions. Additionally, according to the calculated result, as demonstrated in Fig.20, small bubbles flow down along the surface of SEN bore. Thus, blowing smaller diameter bubbles is desirable in terms of clogging suppression.

3. 5 Double layer gasket for LS suppressing N_2 pick up

To the interface between lower nozzle of steel ladle and LS, application of a gasket as a joint material is necessary in order to suppress slab quality deterioration according to air suction and refractory damage. Since the LS is used through several casting, easy removability of gasket is important. Fig.21 shows refractory

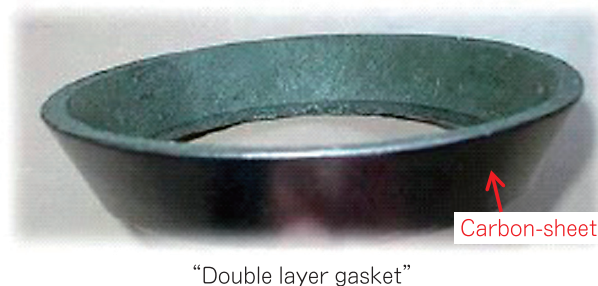


Fig.21 Example of corrosion caused by air suction.

Fig.22 Application of double layer gasket.

性が悪く、ロングノズルの嵌合部に旧パッキンが積層し、シール性が悪化して吸気溶損が発生した例である。

吸気が発生すると、溶損だけでなく同時に N_2 が溶鋼中にピックアップされ溶鋼清浄度が低下する。これを防止するために、当社は2層式のパッキン材を開発した。このパッキンは、下ノズルと接する側には熱間で荷重変形するパッキン材質を適用し、ロングノズルと接する側にはカーボンシートを貼付け離型性を高めている。Fig.22に当社2層式パッキンの外観と使用後写真を示す。Fig.23にこのパッキンを使用して N_2 ピックアップが改善された例を示す。2層式パッキンの適用により、 casting中の面間シール性と脱着時の離型性が

wear induced by air suction via interfacial joint. If the gasket sticks the joint face of the LS tightly, complete removal will be difficult, resulting in formation of the used gasket layer, which adversely affects the air seal.

Air suction causes not only refractory wear but also deterioration of steel cleanliness according to nitrogen pick up. For the sake of air suction suppression, application of double layer gasket is favorable. It is the gasket consists of deformable material, which improves the sealability, and carbon sheet, which improves removability. Fig.22 shows the external image of the gasket before and after use. Fig.23 exemplifies

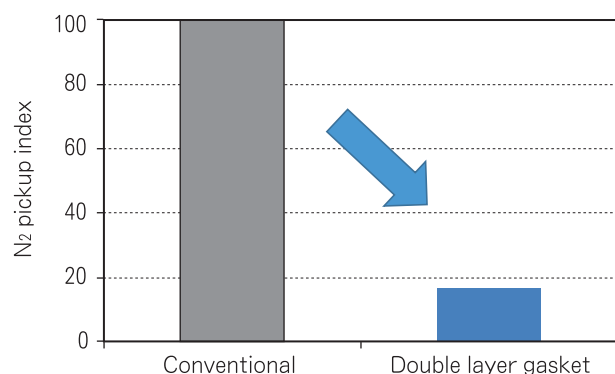


Fig.23 Effectiveness of double layer gasket.

向上し、ロングノズル嵌合部の寿命延長とN₂ピッキングの両方の改善が可能となった。

4. 結言

铸件品質の改善を行う点において、連続铸造用耐火物の役割は非常に重要である。この铸件品質改善に対して、浸漬ノズル構造の適正化、上ノズルからのガス気泡径の制御、目地のシール性の向上という機能的な面を中心に、当社の取り組みや改善例を紹介した。

Table 3に本報で紹介した各機能材に対しての当社の取り組みと期待される効果について示す。浸漬ノズルは、特に構造面に着目してモールド内流動の適正化に向けた取り組みを行った。内管段差型やモーグル型浸漬ノズルは各所で铸件品質向上の効果が確認され、高速铸造連铸機にも広く使

effectiveness of the gasket on nitrogen pick up suppression. Thanks to the double layer gasket application, improvements of LS joint face durability and steel cleanliness were obtained.

4. Conclusion

In terms of quality improvement of steel slabs produced through the continuous casting (CC) process, refractories for CC equipment play important roles. In this article, optimization of submerged entry nozzle (SEN) structure, controlling of bubble diameter blowing from insert nozzle, and improvement of seal-ability of the gasket installed between lower nozzle of steel ladle and ladle shroud were introduced from a functional point of view. Table 3 summarizes the recent developments of refractories for the CC process and expectable achievements.

Optimization of SEN shape enables the desirable fluid flow in the casting mold. Applications of SEN with unique bore shape such as annular step or mogul surface is increasing according to the effective improvement of slab quality, particularly for high speed caster. In addition, combination of suitable structure and anti-clogging liner material successfully decreases SEN clogging, resulting in increase in casting sequence as well as improvements of slab

Table 3 Efforts for improving CC refractories and expected achievements

Items	Efforts	Achievements
SEN	Bore shape ex. Annular type, Mogul type Outlet port shape ex. Spreading shape, Rectangular shape Anti-clogging materials ex. Non-carbon, Steel-Wetting	Suitable flow in the mold Homogenous heat supply -> Reduction of contamination -> Suppression of slab cracking Suppression of clogging -> Long service life -> Reduction of quality degradation rate
Gas-blowing upper nozzle	Optimized gas purging ex. Position of porous material, Bubble diameter	Promotion of inclusion floating Promotion of inclusion trapping Liquid surface activation in mold
Long nozzle	Optimized gasket structure Sealability, detachability	Reduction of Nitrogen pick-up Prolonging service life

用されるようになっている。また、適正な浸漬ノズルの構造と難付着性内管材との組み合わせで閉塞が減少、連々数や鑄片品質の向上に加えて安定操業にも寄与している。今後も、鑄片品質の改善に加えて安定操業に貢献する連続鑄造用耐火物の製品の開発に取り組みたい。

quality and operational stability.

We will continue to engage in CC refractory development in order to improve steel quality as well as operation efficiency.

References

- 1) Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation : Tetsuto tekkouga wakaruru hon, Nippon Jitsugyo Publishing, (2004) p.76.
- 2) T. Matsunaga, M. Ogata, M. Nakamura, E. Iida, K. Masuda and T. Iwatsuki : Abstracts and Proceedings ECCC (2008).
- 3) N. Hiroki, A. Takahashi, Y. Nanba, N. Tsukamoto, Y. Kurashina and K. Yanagawa : Shinagawa Technical Report, [36] 75-88 (1993).
- 4) P. Colucci, M. Halloucherie, F. Leclercq, D. Verrelle, C. Schiltz, E. Iida and M. Nakamura : Shinagawa Technical Report, [51] 9-18 (2008).
- 5) H. Niitsuma, Y. Ohkawa, S. Inoue and T. Matsunaga : Shinagawa Technical Report, [58] 17-24 (2015).
- 6) H. Niitsuma, K. Moriwaki and K. Nishio : Shinagawa Technical Report, [60] 90-99 (2017).