

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

鑄片品質改善効果のある ブルーム・ビレット用浸漬ノズル

SENs for Quality Improvement of Steel in
Bloom or Billet Caster

新 妻 宏 泰
Hiroyasu NIITSUMA

井 上 慎 祐
Shinsuke INOUE

大 川 幸 男
Yukio OHKAWA

松 長 隆 行
Takayuki MATSUNAGA

品川技報

鑄片品質改善効果のあるブルーム・ビレット用浸漬ノズル

SENs for Quality Improvement of Steel in Bloom or Billet Caster

新 妻 宏 泰 ^{*1}	大 川 幸 男 ^{*2}
Hiroyasu NIITSUMA	Yukio OHKAWA
井 上 慎 祐 ^{*3}	松 長 隆 行 ^{*4}
Shinsuke INOUE	Takayuki MATSUNAGA

要 旨

浸漬ノズルの構造は、モールド内の溶鋼流動パターンを制御し、鑄片品質に大きな影響を与える。ブルームやビレット連続鑄造機を対象とし、モールド内の溶鋼流動パターンを最適化できる構造を水モデル試験、CFD計算によって検討した。

ノズルの側面に“屈折型吐出孔”を有する浸漬ノズルは、モールド内に安定した旋回流が発生することが判明し、このノズルを丸ビレット連続鑄造機にて実機テストの結果、鑄片品質の向上が認められた。

内管にモーグル構造を有し、ノズル下端内径を拡大した“逆テーパー + モーグル”ノズルでは、吐出流の偏流が解消され、沈みこみ深さも軽減された。

Abstract

The structure of SEN controls the molten steel flow pattern in the mold and influence on steel quality.

Using a water model test and CFD calculation, we developed a SEN structure that can optimize the molten steel flow pattern in the mold for bloom or billet continuous casters.

It became clear that a stable swirling flow in the mold was created using “Bend port” SEN which had unique ports on the side of the nozzle. In addition, improvement of steel quality was confirmed by the results of an actual test in a round billet caster.

A Mogul SEN with a reverse-taper port which had mogul projections in the bore and an increased nozzle diameter, solved the biased outlet flow problem and decreased the depth of the outlet flow.

1. 緒言

ビレットやブルームといった小断面の連続鑄造機では、さまざまな構造の浸漬ノズルが用いられている。モールド内の溶鋼流動パターンは、浸漬ノズル構造によって大きく異なり、鑄片品質にさ

1. Introduction

Various kinds of Submerged Entry Nozzles (SEN) structures are used at bloom and billet casters. The molten steel flow pattern in the mold varies according to SEN structure, and

*1 技術研究所 第3研究部 主任研究員 Managing Research Engineer, Research Dept. No. 3, Research Center

*2 技術研究所 第3研究部 Research Dept. No. 3, Research Center

*3 東日本工場 技術室長 Manager, Technical Section, East Japan Works

*4 大石橋市品川栄源連鑄耐火材料有限公司 技術部長 General Manager of Technical Dept., Shinagawa Rongyuan Refractories Co., Ltd.

まざまな影響を与えている。例えば、下端に吐出孔を有する単孔ノズルはビレット連続铸造機向けに広く用いられている。この構造の場合、吐出流は強い下向きの流れであり、介在物や気泡がモールド深部まで運ばれやすい。結果として、介在物や気泡はモールド深部において凝固シェルに捕捉されて欠陥の原因となる可能性がある。さらに、メニスカスへの熱供給が不十分となり、ディッケルの生成やモールドパウダーの溶融不良を引き起こすこともある。一方、ブルーム連続铸造機向けには側面に複数の吐出孔を設けた横孔ノズルが広く使用されている。この構造の場合、吐出流はモールド壁面に衝突し、上向きと下向きの2つの流れを形成する。この流動パターンによって、介在物や気泡のモールド深部への到達は抑制され、メニスカスへの熱供給は向上する。しかし、浸漬ノズルとモールド壁面の距離が短い場合、吐出流が強く衝突して、凝固シェルの成長が不均一になることがある。このことは、鑄片縦割れなどの表面欠陥の原因となりうる。

電磁攪拌 (EMS) によって、鑄片品質が向上する¹⁾ことは良く知られているが、一方で、モールド内の流動パターンを最適化できる浸漬ノズル構造^{2)~4)}についても広く検討がなされている。本報では、モールド内の流動パターンを適正に制御できる単孔ノズルと横孔ノズルを開発したので、その試験結果と実機使用結果について報告する。

2. 旋回流ノズル

2.1 水モデル試験 1

モールド内に旋回流を発生させることができるノズル構造は幾つか報告例^{2)~4)}がある。これらの例では鑄片品質が向上したことも報告されており、モールド内に旋回流を発生させることは有効な手段であると考えられるため、新たに旋回流ノズルの開発を目指した。

試験1ではモールド内における旋回流の発生の有無を評価した。Fig. 1に試験1に用いたノズルの吐出孔形状を示す。吐出孔が湾曲している“湾曲型吐出孔”は、モールド内に旋回流を最も効果的に生成することができると考えられるが、製造が

it has various influences on steel quality. For example, a downward single outlet port SEN is widely used for billets. In this case, the molten steel is strongly discharged downward from the port causing inclusions and gas bubbles to easily penetrate deep into the mold. As a result, inclusions and gas bubbles can be caught in the solidified shell and cause defects in the steel. In addition, insufficient heat supply to the meniscus may induce solidified deckle and retard melting of the mold flux.

On the other hand, SENs that have multiple ports are widely applied in bloom casters. In this case, the outlet flow discharged from the SEN impinges against the mold wall and separates into two flows. This flow pattern prevents deep penetration of the inclusions and gas bubbles and improves heat supply to the meniscus. However, because of the close distance between nozzle and mold wall, the solidified shell thickness may become uneven due to the effect of strong impingement of the outlet flow against the mold wall. The uneven solidified shell growth may cause cracking or surface defects on the steel.

Therefore, in addition to the application of an electromagnetic stirring (EMS) system, improving the SEN design has been widely considered^{2)~5)} in order to optimize the flow pattern in the mold. We have developed unique structures that are effective in controlling the flow pattern in the mold for both single port SENs and multiple lateral port SENs in water model simulation tests. In this report, we report on the laboratory test results and actual results.

2. Swirling Flow SEN

2.1 Water model test 1

In order to improve the steel quality by controlling the flow pattern in the mold, some unique SEN designs have already been

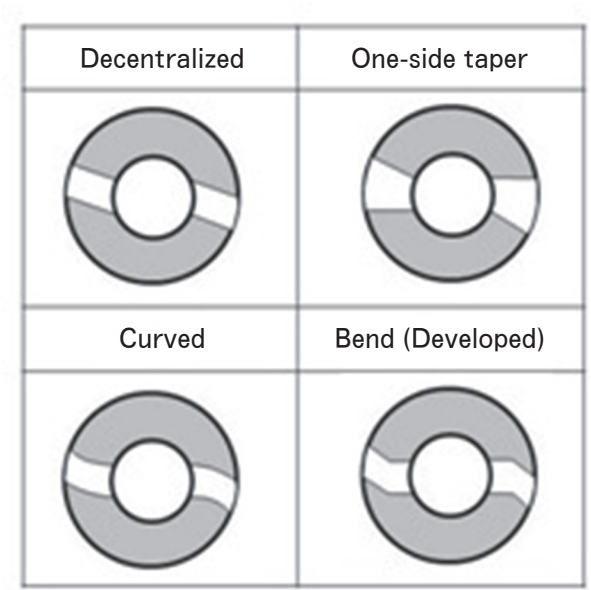


Fig. 1 Port designs tested in water model test 1.

Table 1 Test conditions of water model test 1 and 2

	Test 1	Test 2
Mold size	φ 190 (Round billet)	φ 190 (Round billet)
Casting velocity	1.2 m/min	1.2 m/min, 1.7 m/min
Immersion depth	155 mm	155 mm
Flow control	Stopper	Stopper
Bottom bore	0	0, φ 18, φ 25

困難である。そのため、製造可能な“屈折型吐出孔”を検討した。さらに旋回流が発生すると報告されている“偏芯型吐出孔”と“片テーパ吐出孔”を加えて水モデル試験を行った。Table 1に試験条件を示す。モールド内の流動パターンの可視化のために、水より比重の軽いビーズを投入し、その動きを観察した。

試験1の結果，“偏芯型吐出孔”と“片テーパ吐出孔”ノズルでは、ビーズは上下方向のみに動き、旋回する動きは発生しなかった。一方，“湾曲型吐出孔”と“屈折型吐出孔”ノズルでは安定して旋回する動きが発生した。“屈折型吐出孔”ノズルを使用した場合の、モールド内の状況をFig. 2に示す。以上のことから、“屈折型吐出孔”ノズルは容易に旋回流を生成できることが確認された。

2. 2 “屈折型吐出孔”ノズルの評価

“屈折型吐出孔”ノズルを用いて水モデル試

験^{2)~4)} which could generate a swirling flow in the mold. Because these proposed designs improved the steel quality, generating a swirling flow in the mold can be considered to be an effective method. Therefore, we also investigated a novel swirling flow SEN design. We carried out a yes or no evaluation of the swirling flow outbreak in the mold in examination 1. Fig. 1 shows schematic drawings of the ports that were examined. Although a curved port is the most advantageous design to generate a swirling flow in the mold, it is difficult to manufacture. Alternatively, we designed bend ports that are favorable for production. In addition, both, decentralized ports and one-side taper ports were examined because the designs were described in some articles. Table 1 shows the test conditions. The flow pattern in the mold was investigated by the motion of plastic beads that have a lighter specific gravity than water.

As a results of test 1, in the case of the decentralized port nozzle and the one-side taper nozzle, a swirling movement did not occur in the mold although the particles moved in an up and down direction. On the other hand, both the curved port nozzle and the bend port nozzle generated a stable swirling movement in the mold. In other words, we confirmed that the bend port nozzle could easily generate a swirling flow in the mold easily.

2. 2 Evaluation of “Bend port” SEN

We performed water model test 2 using a “Bend port” SEN. In this SEN, two of “Bend port” and a bottom port were opened. Three different bottom bore diameters were prepared (0, φ18 and φ25). Table 1 and Fig. 2 show the test conditions. We also carried out CFD calculations in order to evaluate the flow pattern in the mold. PHOENICS was used as the CFD program for this study. In addition, the k-ε model was used as a turbulence model. As the



Fig. 2 Swirling flow generated by “Bend port” SEN.

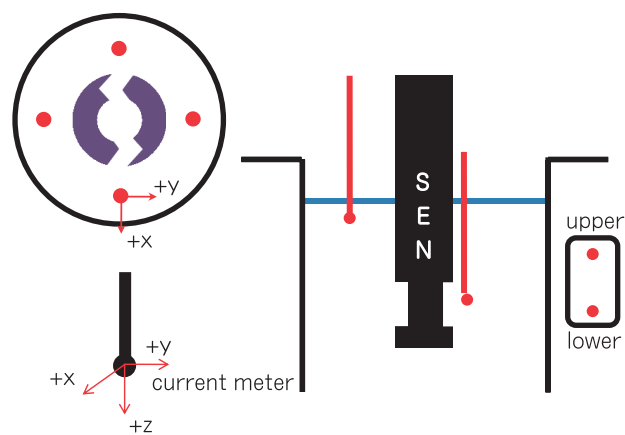


Fig. 3 Flow velocity measurement locations and axial direction of current meter.

Table 2 Outlet flow velocities (Bottom bore : $\phi 18$)

Flow velocity : cm/sec		Velocities to each axial direction			Composed velocities
		X	Y	Z	
Vc	Upper	14.3	-20.9	-2.5	26.2
	Lower	57.9	-8.9	8.1	59.7
Vc	Upper	23.2	-28.0	-9.0	39.3
	Lower	62.5	-5.7	7.8	65.7

験2を実施した。このノズルでは“屈折型吐出孔”2孔に加えて底孔を設けた。底孔径は、なし、 $\phi 18$ 、 $\phi 25$ の3水準とした。試験条件をTable 1, Fig. 3にそれぞれ示す。同ノズルにおいてはCFD計算による流動パターンの評価も実施した。計算プログラムにはPHOENICSを用い、乱流モデルとしてk- ε モデルを採用した。

Table 2に吐出流速の測定結果を示す。吐出孔上部と下部の流速を比較すると、下部がより高速であった。上部の流速はノズルに対して水平断面における接線方向であるY軸方向の成分が大きいことが明らかになった。底孔径が大きくなる程、“屈折型吐出孔”からの吐出流速は減少した。Fig. 4にCFD計算による吐出孔流速の分布を示す。水モデル試験2の結果と同様に、吐出孔下部の流速は上部よりも速かった。また、吐出孔の左端と右端の流速を比較すると、“屈折型吐出孔”の屈折方向の外側に位置する吐出孔右側の方が左側よりも速い結果であった。

メニスカス位置では試験1と同様に安定した旋

bottom port diameter became larger, the outlet speed from the “Bend port” decreased. Table 2 shows the measured results for the outlet flow velocities. When comparing the top and bottom measuring points, the flow velocity at the bottom can be recognized to be faster than the top. It became clear that the flow direction from the top of the outlet port was strong in the Y-direction, which is in a tangential direction to the SEN. Fig. 3 shows the velocity distribution at the outlet port by CFD calculation. The outlet flow velocity at the bottom area is faster than the top area, which is the same result as water model test 2. The flow velocity distribution in a horizontal direction of the outlet port, suggests that the velocity on the right-side, on the outside of the bend, is faster than the left-side.

In the meniscus, a stable swirling flow occurred which was similar to water model test 1. As shown in Fig. 4, as the casting velocity

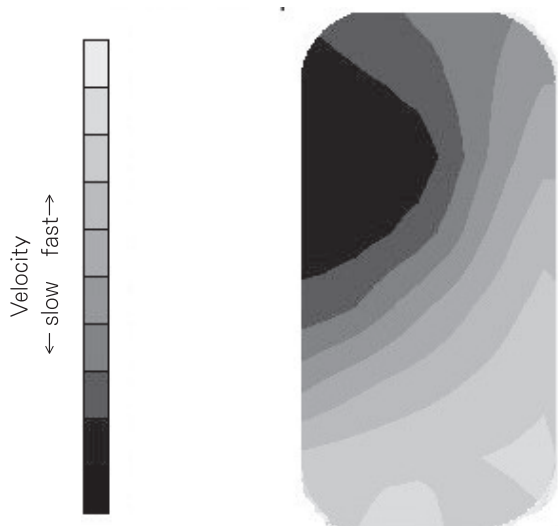


Fig. 4 Flow velocity distribution at outlet port (CFD calculation).

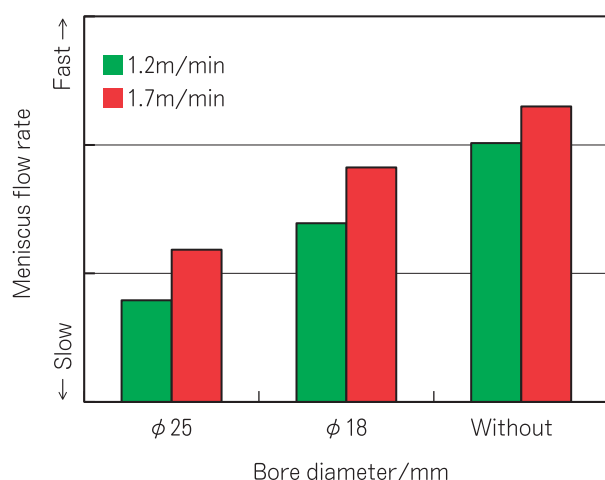


Fig. 5 Flow velocity at meniscus.

回流が認められた。Fig. 5に示すとおり、鑄造速度が増加すると、メニスカスの旋回流速も増加した。また、底孔径を変化させることによってメニスカス流速を調節できることもわかった。Fig. 6にCFD計算によるモールド内全体の流線図を示す。旋回流は浸漬ノズル下端よりも深い部分にも到達しており、モールド内全体が旋回していることが明らかになった。

2. 3 使用結果

“屈折型吐出孔”ノズルの使用後外観をFig. 7に示す。吐出孔に溶損や閉塞は認められず、“屈折型吐出孔”ノズルの旋回流発生効果は使用終了まで



Fig. 6 CFD-calculated streamline for “Bend port” SEN.

increased, the meniscus velocity also increased. In addition, it was clear that the meniscus velocity could be adjusted by changing the diameter of the bottom bore. Fig. 5 shows a streamline of the entire mold by CFD. The swirling flow pattern extends to a position that was deeper than the SEN tip. All of the fluid in the mold was rotated.

2. 3 Actual results

Fig. 6 shows the appearance of a used “Bend port” SEN. Because the structure of the outlet port did not change, it is thought that the bend structure functioned effectively during use. The appearance of the billet that was cast using this SEN without EMS is shown in Fig. 7. The surface of the billet was smoother than in the cases where common SENs were used. As shown in Fig. 8, the ratio of bleeding defects was improved. A swirling flow occurred in the mold when using the bend port SENs, and the



Fig. 7 Appearance of “Bend port” SEN after use.

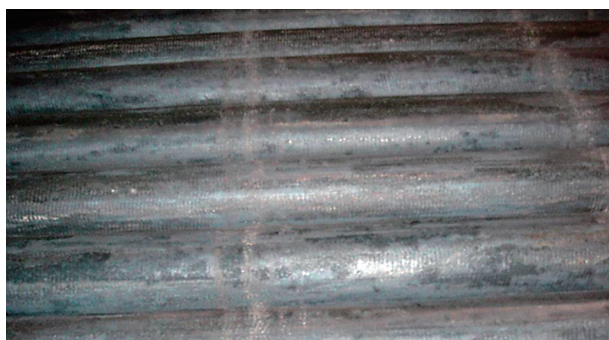


Fig. 8 Appearance of the billet cast by “Bend port” SEN.

有効であったと考えられた。Fig. 8に当ノズルを用い、EMSを使用せずに鑄造したビレットの外観を示す。従来のノズルを用いて鑄造したビレットと比較し、表面性状は非常に平滑であった。Fig. 9に示すようにブリーディング欠陥の発生頻度も改善しており、当ノズルを使用することによってビレットの表面品質が向上することが確認された。

3. 逆テーパー + 単孔モーグルノズル

単孔式SENでは、吐出流の沈み込みを抑制するためには、ノズル下端内径が拡大する逆テーパー構造が効果的であることは良く知られている。しかし、単なる逆テーパー構造では、偏流の影響が顕著に現れやすい。そこで偏流防止のモーグル突

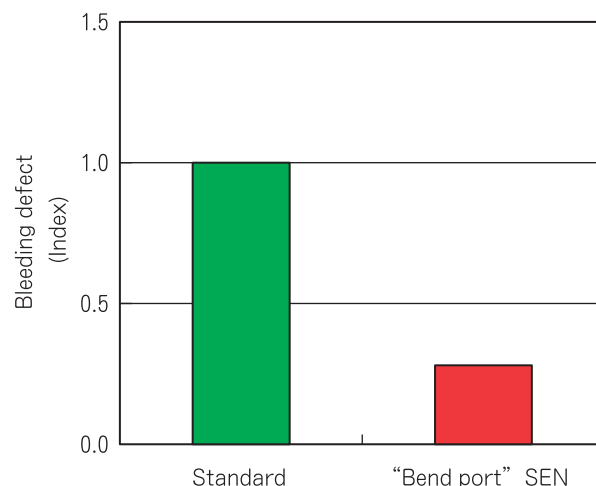


Fig. 9 Comparison of the bleeding defect ratio.

surface quality of the billet was confirmed to be improved.

3. Mogul SEN with Reverse-taper Port

A reverse-taper port single port SEN is known to be an effective structure for suppressing the penetration depth of the outlet flow. However, in the case of a reverse-taper port, the influence of biased flow is clear. Therefore, we introduced mogul projection structures to prevent biased flow in the reverse-taper port SEN. Fig. 10 shows some schematic drawings of the SEN design.

We measured the downward outlet flow penetration depth of the single port SEN. Table 3 shows the test conditions. We injected a small amount of air (2 L/min) from a nozzle installed in the upper part of the SEN and observed the arrival depth of air bubbles in the mold. As shown in Fig. 11, in the case of a “standard” straight nozzle, gas bubbles penetrated to a deeper position in the mold (500mm from the meniscus). In addition, the direction of the outlet flow was not perpendicular but biased because of slide gate throttling. Many inclusions and gas bubbles are thought to have been carried

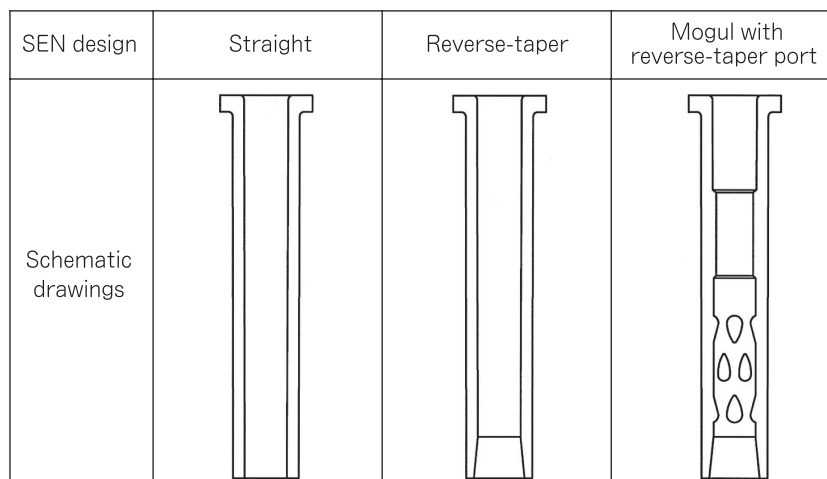


Fig. 10 Various shapes of single port SEN.

起^{5), 6)}を設けた構造を開発した。構造の模式図を Fig. 10にそれぞれ示す。

Table 3に示す試験条件にて、単孔ノズルにおける下向き吐出流の沈み込み深さの調査を行った。上ノズルから少量のエアを吹き込み (2L/min), 気泡の沈み込み深さを評価した。Fig. 11に示すとおり、一般的なストレートの単孔ノズルでは、気泡はモールド深く (メニスカスから500mm位置) まで沈み込んでいた。加えて、沈み込み流は鉛直方向ではなく、スライドプレートの絞りによって偏流が発生していた。偏流によって、介在物や気泡が偏った方向により多く運ばれることが考えられた。

逆テーパ構造の効果を確認したところ、気泡の沈み込み深さは軽減されたが、偏流は依然発生していた。偏流の影響によって、局所的に沈み込み深さが深くなっており、十分には改善されていなかった。

モーグルノズルでは、内管の突起に溶鋼流が衝突し、流下する方向がさまざまに変化することによって偏流が解消し、流れを均質化することができる。Fig. 11に示すとおり、逆テーパ + 単孔モーグルノズルでは、気泡の沈み込みは抑制され、偏りのない均一な流れが認められた。Fig. 12に逆テーパ + 単孔モーグルノズルの実使用後切断面を示す。鑄造後も逆テーパ構造、モーグル構

Table 3 Test conditions

Mold size	240 x 240 mm
Casting velocity	0.9 m/min
Immersion depth	100 mm from the tip of SEN
Flow control	Sliding plate (3 layer)
Air injection	2 L/min

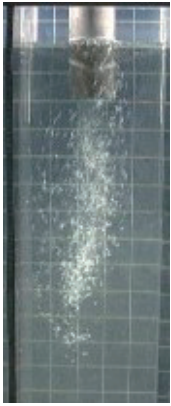
SEN design	Straight	Mogul with reverse-taper port
Water model simulation		
Penetration depth	Depth = 500mm	Depth = 250mm

Fig. 11 Water model test results of single bore SEN.



Fig. 12 Cut section of “Mogul with reverse-taper port” SEN.

造ともに良好に残存しており，鑄片品質の改善効果が期待される。

4. まとめ

ブルームやビレットといった小断面モールドを用いた連続鑄造プロセスにおいて，鑄片品質の向上を目的として，モールド内の溶鋼流動パターンを改善できるユニークな構造を開発した。“屈折型吐出孔”ノズルはモールド内に安定した旋回流を生成させることが可能である。また，逆テーパー + 単孔モーグルノズルは，単孔ノズルの吐出流の沈み込みと偏流を抑制することが可能である。

by the biased flow. In the case of the reverse-taper port structure, the penetration depth of the bubbles was suppressed. However, a biased flow still occurred. Because of the influence of the biased flow, the penetration depth of the bubbles was increased locally and was not improved enough. With the mogul nozzle, the molten steel flow collides with the projections on the inside of the tube, and the biased flow is changed into a homogenous flow by the moguls. As shown in Fig. 11, The mogul SEN with a reverse-taper port realized a shallow and even outlet flow. Fig. 12 shows the cut section of a mogul SEN with a reverse-taper port after use. Because the reverse-taper structure and mogul structure remained well in act after use, we expect it to improve steel quality.

4. Conclusions

We developed unique SEN structures that can control the molten steel flow pattern in the mold to improve steel quality for bloom or billet casters. The “Bend port” SEN can generate a stable swirling flow in the mold. The “Mogul SEN with reverse-taper port” can suppress the penetration depth of outlet flow and biased flow.

References

- 1) P. Dauby, S. Kunstreich, D. Yves : 14th IAS Steelmaking Conf. Proc., 31
- 2) H. Sun, J. Zhang : ISIJ International, 51 [10] 1657
- 3) H. Sun, Y. Li, J. Zhang, Q. He, L. Fan: AISTech 2013 Proc., 1509
- 4) C. Capurro, J. Copola, S. Ferro, C. Cicutti : AISTech 2013 Proc., 1027
- 5) S. Enschi, T. Horiuchi, M. Kajimura : UNITECR 2005 Proc.,
- 6) M. Nakamura, S. Inoue, T. Horiuchi : Shinagawa Technical Report, 49 59 (2009)