

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

モールド内溶鋼流動を改善させる 次世代型浸漬ノズル

Next Generation Submerged Entry Nozzle for
Optimizing Molten Steel Flow in Mold

西 尾 奏 恵
Kanae NISHIO

新 妻 宏 泰
Hiroyasu NIITSUMA

品川技報

製品紹介 PRODUCTS

モールド内溶鋼流動を改善させる次世代型浸漬ノズル

Next Generation Submerged Entry Nozzle for Optimizing Molten Steel Flow in Mold

西 尾 奏 恵^{*1} 新 妻 宏 泰^{*2}
Kanae NISHIO Hiroyasu NIITSUMA

要 旨

モールド内の溶鋼流動は安定 casting と鋼品質に大きく影響を与えるため、浸漬ノズルの役割は非常に重要である。特に、浸漬ノズルからの吐出流はモールド内溶鋼流動に大きな影響を与える。我々は吐出流速を抑える新しい吐出孔デザイン（DiA）を開発した。本報告では開発した‘DiA型吐出孔ノズル’について紹介する。

Abstract

The role of the submerged entry nozzle is very important because of the great influence of molten metal flow in the mold on stable continuous casting operation as well as on the qualities of cast products. Especially, the molten steel stream discharged from the outlet of the submerged entry nozzle greatly influences molten metal flow in mold. New outlet design, DiA type outlet, was developed to lower the velocity of the molten steel stream running out of the outlet. The details of the submerged entry nozzle with DiA type outlet are introduced in this report.

1. 緒言

鉄鋼製品製造において、最適成分に調整された溶鋼は水冷モールド内に注ぎ込まれ凝固する。このプロセスは casting と呼ばれ、モールドへの casting は浸漬ノズルを介して行われる。鋼の高級化や鋼品質管理の厳格化に伴い、モールド内溶鋼流動の適正化は浸漬ノズルを設計するうえで最重要課題となっている。例えば浸漬ノズルからの吐出流速が上昇すると、それに伴いメニスカス流速、短辺近傍の下降流速が上昇し、介在物欠陥やパウダー巻

1. Introduction

In the steelmaking process, molten steel with properly adjusted alloying elements is cast in a water cooled mold via submerged entry nozzle (hereinafter referred to as SEN) in continuous caster for solidification. In order to secure sophisticated qualities as well as strict quality control of cast products, optimization of the molten steel stream discharged from its outlet is the most important issue in designing the SEN.

^{*1} 技術研究所 第1研究部 第2研究室 Basic Study Sec., Research Dept. No.1, Research Center

^{*2} 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

き込みなどの鋼品質欠陥の発生リスクが上昇する (Fig.1)。そのためこれらを抑制する対策が実施されてきた¹⁻³⁾。

一般的には、メニスカス流速を低下させるには吐出孔の角度を下向きにするなどの方法で短辺に衝突した上昇流を抑える。短辺近傍の下降流速を低下させるには逆に吐出孔の角度を上向きにすることが多かった。しかし、これらの方法ではメニスカス流速が低下すると短辺近傍の下降流速が上昇し、短辺近傍の下降流速が低下するとメニスカス流速が上昇する。メニスカス流速と短辺近傍の下降流速を同時に抑制することは困難を極めていた。メニスカス流速、短辺近傍の下降流速を同時に抑制する理想的なノズルからの吐出は以下のようなものと考えられる。

- ①吐出孔全体から均等に溶鋼が吐出し、吐出流速が緩やかにする。
- ②緩やかに吐出した溶鋼が水平に広がる。

吐出流速を緩やかにするため吐出孔をラッパ形状にする等の対策が取られてきたが十分ではなかった。上述の理想的な流れを求め浸漬ノズルの吐出孔形状の検討を進めた結果、吐出孔を緩やか

For example, when velocity of the molten steel stream discharged from the outlet increases, as schematically illustrated in Fig. 1, the meniscus metal flow and/or downward metal flow accelerate markedly. This increases the risk of the deterioration of steel quality caused by the entrapment of nonmetallic inclusions, mold powder or gas bubbles. Many countermeasures for suppressing or preventing such deterioration of steel qualities have been used¹⁻³⁾.

In general, in order to reduce the meniscus metal flow velocity, a downward angle is adopted for the outlet so as to decelerate the upward stream that bounces off of the mold narrow face. Contrarily, an upward outlet angle is adopted for lowering the velocity of the downward stream after bouncing off the mold narrow face. However, such outlet angle designs result in contradictory alternatives, a softened meniscus metal flow associated with deeply penetrating downward stream or moderate downward stream accompanied with relatively

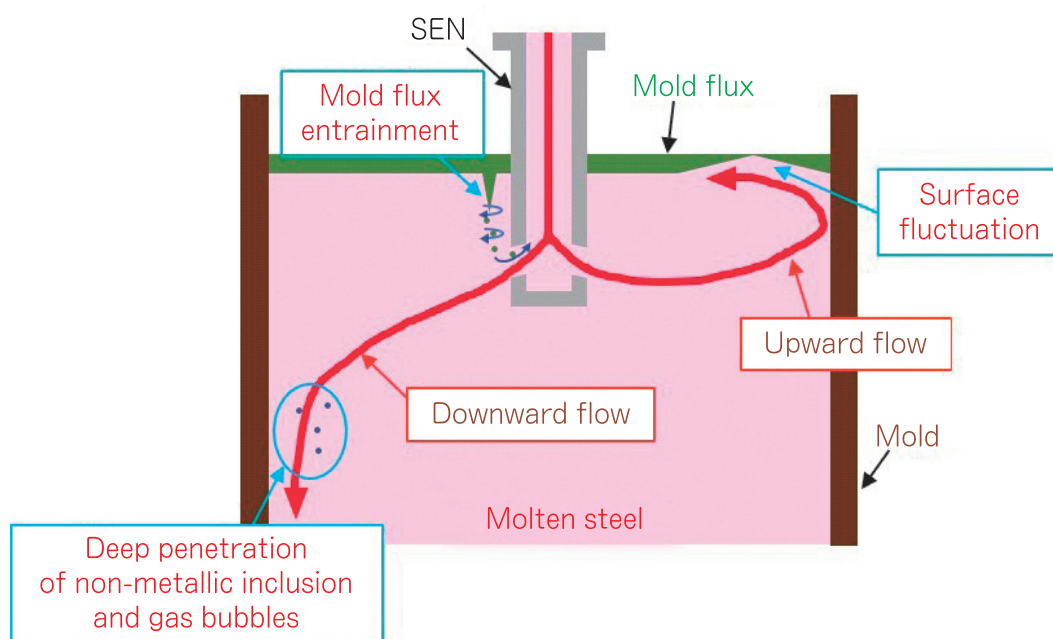


Fig. 1 Schematic diagram of molten steel flow in mold.

にかつ水平に吐出させメニスカス流速と短辺近傍の下降流速の低下を両立し、鋼品質が向上する新しい浸漬ノズル 'DiA (Different Angle Port) ノズル' を開発した。以下、開発したDiAノズルについて説明する。

2. DiA型吐出孔ノズルの思想

DiAノズルは名前の通り吐出孔の上側角度と下側角度が異なる。特に上側は大きな下向き、下側の角度が水平～上向きであることがこのDiAノズルの特徴である。吐出孔部の断面イメージ図をFig.2に示す。

DiAノズルでは吐出孔の上側は大きな下向きの角度をとる。これによって、内管から吐出孔へ向かう流れが壁面から剥離することを抑制し、吐出孔上部の吸い込み流の発生を抑えることが出来る。最適な角度はスリーブットやノズル内管形状により変化するが、従来形状よりも深く、より下向きに吐出させる。対して吐出孔下側は水平～やや上向きとし、内管底面にはプール部を有す。従来の一般的なノズル形状の場合、プール部に衝突した管内流は反転して吐出孔に流入するが、吐出孔下側の角度が深い下向きであると、ここでも流

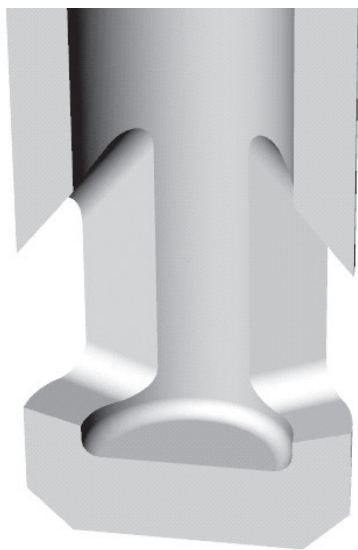


Fig. 2 Schematic diagram of DiA type SEN.

violent meniscus disturbance. That is to say, simultaneous suppression of the meniscus metal flow and downward stream running along the mold narrow face is extremely difficult.

It is thought that the ideal molten steel stream discharged from the outlet which can suppress both meniscus metal flow and downward stream simultaneously should meet both of the following descriptions;

- (1) evenly discharged metal flow from the whole outlet with moderate stream velocity
- (2) horizontally spreading metal permeation with moderate stream velocity

Various trials to materialize moderate molten steel flow, such as a trumpet shaped outlet, have been made with insufficient performance. By carrying out investigations on the SEN outlet design in order to create the above mentioned ideal metal flow, a newly designed SEN characterized by DiA (Different Angle Port) type outlet, was developed. This newly developed SEN can create horizontally spreading metal permeation and moderate stream velocity with optimized consistency between mild meniscus flow and moderate downward stream. Details of the newly developed DiA type SEN, simply referred to as DiA nozzle, are introduced in this report.

2. Concept for DiA type SEN

As indicated by its name, the DiA type SEN is characterized by different tilting angles of the upper and lower wall faces outlet. More specifically, as illustrated in Fig. 2, large downward tilting angle and horizontal or slightly upward tilting angle was adopted for the upper and lower side profile line of the outlet, respectively.

Because of a large downward angle of the upper profile design, the molten metal flow running from the inner bore to outlet bore is

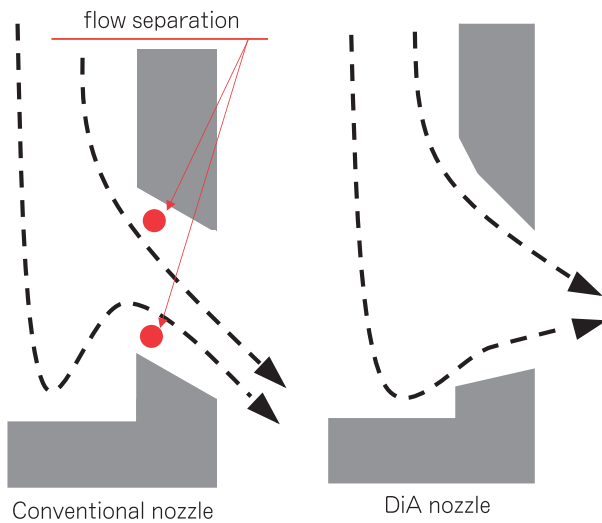


Fig. 3 Comparison of flow pattern at vicinity of outlet.

れの剥離が発生しやすい。一方、DiAノズルは吐出孔下側の角度が浅いため、壁面に沿ってスムーズに吐出することができる。Fig.3にこの吐出孔付近の流線イメージ図を示す。

DiAノズルでは、Fig.3のように吐出孔上側からは深い下向きの流れ、下側からはより水平に近い流れが吐出するため、吐出孔外で上下の流れが衝突する。衝突によって吐出流の勢いは緩和され、より水平に近い流れが形成されることが期待される。これは前述した理想的な流れである吐出した溶鋼が穏やかかつ水平に吐出し短辺に衝突する状況を実現している。

3. CFD計算及び水モデル実験結果

新形状DiAノズルの効果をCFD計算と水モデル実験で確認した。

CFD計算結果の流速コンター図をFig.4に示す。Fig.4から従来ノズルはモールド短辺近傍まで吐出流が比較的速いが、DiAノズルでは流速の速い領域が吐出後減少し、短辺への衝突が緩やかになっているのが分かる。その結果、DiAノズルは従来ノズルと比較し短辺近傍の下降流速は明らかに低減し、メニスカス流速も低減していることが確認された。

smoothly guided along the inner wall face of the SEN, resulting in less flow separation from the inner wall and minimized suction of counter metal flow at the upper end of the outlet. Even though the upper side profile line angle is modified or optimized in accordance with throughput and/or inner bore shape, in comparison with a conventional SEN, the upper side profile is designed to create more intensive downward stream. On the other hand, the lower side profile line is horizontal or slightly upward aiming to create upward stream. In addition, the metal pool space is situated at the inner bore bottom. In a conventional SEN design possessing relatively large downward angle for lower profile with the bottom metal pool, metal flow toward the outlet after bounding on the metal pool tends to induce flow separation. Because of a horizontal or shallow upward profile line to lower side of outlet in DiA type SEN, metal flow bounding on the metal pool is smoothly discharged along the profile line. A conceptual diagram comparing the discharged metal flows near the outlet in conventional SEN and DiA type SEN is shown in Fig. 3.

As illustrated in Fig.3, since the intensive downward metal flow from above and moderate upward metal flow along lower side profile collide at the vicinity of the outlet and counteract the opposing metal flow vectors each other, it is highly expectable that an almost horizontal direction metal flow would be generated. That is, the above mentioned ideal situation where a horizontally permeating metal flow with moderate stream velocity would hit onto the mold narrow face would be materialized.

3. CFD Calculation and Water Model Experiment

CFD (Computational Fluid Dynamic) comparative calculation was conducted on conventional

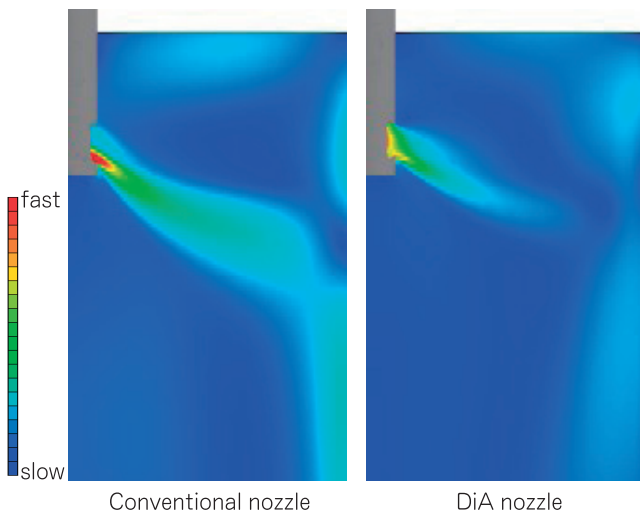


Fig. 4 Metal flow velocity contour map obtained by CFD calculation.

Fig.5に吐出孔出口付近の乱流エネルギー図を示す。DiAノズルでは吐出孔の外部の広い範囲で乱流エネルギーが発生している。これは前章で記したように吐出孔の上下角度に沿った流れが衝突したことにより乱流が発生したためである。

以上のCFD計算結果からDiAノズルは想定通りの流れを得られたことを確認したため、次に水モデル実験によるモールド内流動の比較を行った。Fig.6に従来ノズルとDiAノズルの水モデル実験中の静止画を示す。Fig.6よりDiAノズルは明らかに気泡の沈み込みが少ないことがわかる。実際

SEN and DiA type SEN followed by validation utilizing water model experiment.

The calculation results are comparatively shown with a metal flow velocity contour map in Fig. 4. It is clarified in Fig. 4 that, in comparison with conventional SEN, the stream velocity of the downward metal flow near the mold narrow face is lowered in DiA type SEN along with the reduced velocity of the meniscus metal flow from the mold narrow face to the mold center. Fig.5 shows a calculated contour map of the turbulent kinetic energy in the vicinity of the outlet of a conventional and DiA type SEN. It is observable that turbulent kinetic energy is generated broadly at the outer vicinity of the outlet of the DiA type SEN. Such calculation results of turbulent flow conform to the speculation mentioned in the previous section that downward metal flow from above and moderate upward metal flow from the bottom rebound collide at the outer vicinity of outlet and counteract the opposing metal flow vectors of each other.

Encouraged by affirmative CFD calculation results that DiA type SEN materializes speculative metal flow, a water model experiment was conducted with conventional and DiA type SEN in order to compare observed flowage in the mold. Fig. 6 shows snapshots taken of

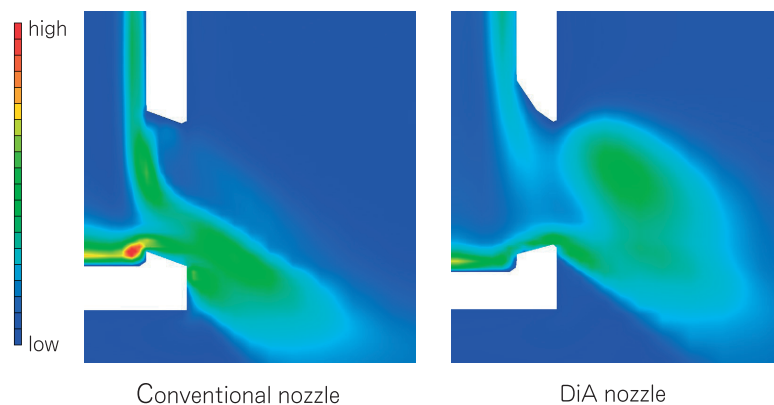


Fig. 5 Contour map of turbulent kinetic energy at outer vicinity of outlet.

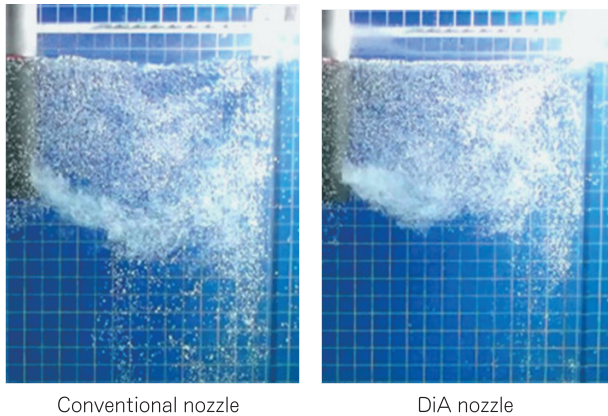


Fig. 6 Snapshots of water model experiment with conventional and DiA type SEN.

に測定したメニスカス流速，下降流速ともにDiAノズルは従来ノズルより低下しており，水モデル実験でもDiAノズルの効果を確認することができた。

4. 結言

モールド内溶鋼流動の適正化を図り鋼品質が向上する新しい吐出孔デザインの「DiAノズル」を開発した。DiAノズルはCFD計算，水モデル実験でその効果が確認され，現在各所にて実機使用されている。特に介在物の潜り込みにより起こる欠陥が大幅に低減した結果が得られている。DiAノズルはこのような介在物欠陥以外にも短辺衝突流が緩和されるなど様々な欠陥においても有効に働き今後の鋼の品質向上に期待できる。

the water model experiment with conventional and DiA type SEN. As is clearly observable in the photographs, the penetration depth of the gas bubbles accompanying the water stream discharged from the DiA type SEN was much shallower than those from conventional SEN. Velocity of the meniscus water flow as well as of downward water flow actually measured in the water model experiment with the DiA type SEN was smaller than those in water model experiment with conventional SEN. Thus, favorable influence of DiA type SEN predicted by CFD was validated by the water model experiment.

4. Conclusions

The DiA type SEN was developed by designing an appropriate submerged entry nozzle outlet profile by which molten metal flow in the continuous casting mold could be optimized. After affirming improvement of flowage in mold by CFD calculation and water model experiment, a newly developed DiA type SEN is adopted for several actual casting operations with considerable reduction in nonmetallic inclusion defects relating to deeply penetrating metal flow. In addition, further improvement of steel quality by reduction of various kinds of defect can be expected by application of the DiA type SEN that materializes moderate collision of discharged metal flow to the mold narrow face.

References

- 1) T. Teshima, J. Kubota, M. Suzuki, K. Ozawa, T. Masaoka and S. Miyahara : Tetsu-to-Hagane, **79** [5], 576, (1993).
- 2) E. Iida, M. Ogata, T. Omoto and Y. Iwamoto : Shinagawa technical report, [52], 1, (2009).
- 3) A. Watabe, K. Tachikawa, J. Kurisu and M. Ueki : Taikabutsu, **69** [2], 58 (2017).