

連続铸造取鍋—タンディッシュ間Ar最適シール技術の開発

笠井 宣文*・山副 広明*・井口 學*²

Development of Optimum Argon Shrouding System between Ladle and Tundish

Norifumi KASAI, Hiroaki YAMAZOE and Manabu IGUCHI

Synopsis : Experimental investigation has been carried out using three kinds of pouring tubes to establish an optimal Ar gas seal technology for the continuous casting tundish. The following findings are obtained.

- (1) The Ar gas seal effect in the pouring tube is dependent on the Ar gas flow rate and the distance between the Ar gas blow position and molten steel surface.
- (2) The performance of the seal of the pouring tube during ladle exchange is evaluated by the pressure of nitrogen, P_{N_2} .
- (3) When newly developed pouring tube of type-C is used in place of the conventional tube of Type-A, the number of inclusions in the slab, of which diameters are equal to or more than $120 \mu\text{m}$, is reduced by about 50% at the steady parts and by about 40% at the ladle exchange parts.
- (4) The deposit thickness on the tube wall of Type-C decreases to 1/3 of the thickness for Type-A. Accordingly, the pouring tube of Type-C can be reused.

Key words : continuous casting; argon gas; pouring tube; ladle exchange.

1. 緒言

鋼の連続铸造（以下CCと略す）における取鍋とタンディッシュ間をつなぐ機能性耐火物としては、ロングノズル¹⁾または注入管²⁾のいずれかを採用している場合が多い。最も使用されているロングノズルはシール性に優れている³⁾反面、タンディッシュ内で短絡流が生じやすく大型介在物が鑄型内に持ち込まれやすい⁴⁾ことと、取鍋交換時に取鍋スラグがタンディッシュ内へ侵入しやすい⁵⁾という短所を有している。これらの短所を改善するために、タンディッシュ内の溶鋼流動を制御する目的で、堰を設置するなど多くの努力が払われてきている⁶⁻⁸⁾。

一方、注入管はロングノズルに比べてタンディッシュ内において溶鋼の短絡流が発生しにくいことから、大型介在物の浮上に対して有利である⁴⁾。しかしながら、断気をするために大量のArガスが必要であり、特に開口部が広いことから取鍋交換時に断気が不十分となり溶鋼を汚染しやすい。

上述したように、清浄性を確保するという点で、ロングノズルと注入管を比較すると、いずれの方式においても一長一短を有しているが耐火物コストや寿命、または取り扱いの容易さを考慮すると、注入管を使用する利点は大きい。

本報においては、上述した注入管が持つ短所を改善して最適Arガスシール技術を確立することを目的に、構造が異なる3種類の注入管について実機実験を行い、Arガスシールの程度を評価した結果と注入管タイプの違いによるスラブの清浄性評価試験結果について述べる。

2. 実験内容

2.1 注入管の構造および鑄造条件

Fig. 1に注入管の構造を模式的に示すが、注入管上部からArガスシールを行うタイプ(Type-A)、注入管内にパイプを通して管内の湯面にArガスを直接吹き込むタイプ(Type-B)、注入管の耐火物にスリットを付与し、管壁から湯面にArガスを吹き込むタイプ(Type-C)の3種類を実験に供した。Type-Cについては、Arガス吹き込み口を管壁の任意の位置に付与することが可能であることから、Arガス吹き込み口を溶鋼に浸漬させるタイプ(Dip type)と浸漬させずに溶鋼湯面直上にArガス吹き込み口を付与したタイプ(Non dip type)について実験を行った。

注入管内雰囲気ガスのサンプリングはいずれの注入管タイプとも、中間リングに加工した穴から行った。これはArガスの吹き込み位置が注入管によって異なるため、定位置におけるガス組成結果をもって評価することを目的と

平成17年5月12日受付 平成17年7月11日受理 (Received on May 12, 2005; Accepted on July 11, 2005)

* 住友金属工業(株)鋼板・建材カンパニー (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd., 3 Hikari Kashima Ibarakki 314-0014)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

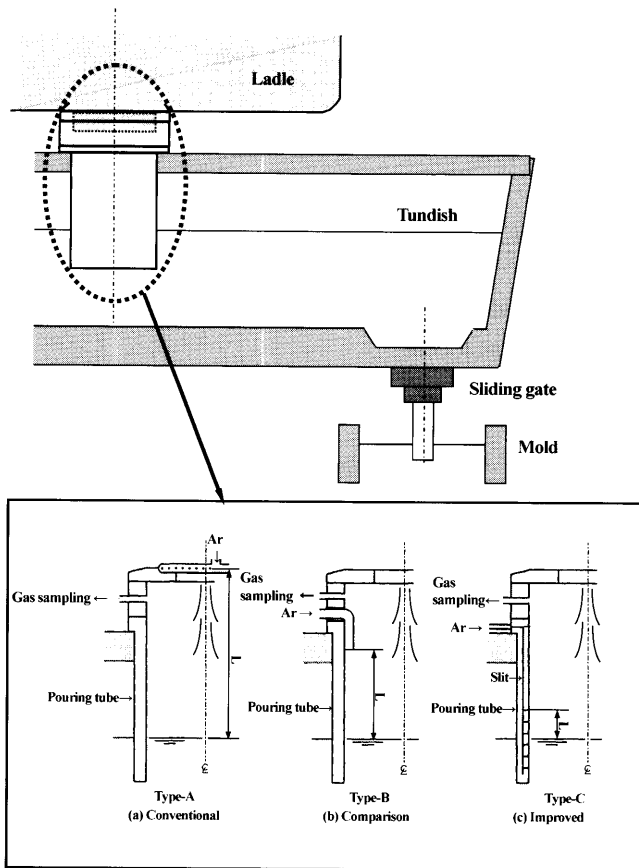


Fig. 1. Schematic drawing of shrouding system.

Table 1. Casting conditions.

Steel grade	Medium Carbon steel ([C]=0.09~0.16%)	
Tundish capacity	32 Ton	
Through put in tundish	5.6~6.3 Ton/min	
Ar gas flow rate in pouring tube	Conventional (Type-A)	2000 NI/min
	Comparison (Type-B)	2000 NI/min
	Improved (Type-C)	650~1200 NI/min

している。

本実験は鹿島製鉄所第1号連鑄機で行った。実験条件をTable 1に示す。Type-AとType-Bの注入管ではArガス流量が2000 NI/minに対して、Type-Cの注入管は650~1200 NI/minに低減した条件で実験を行っている。これは、Type-Cの注入管のArガス吹き込み口が溶鋼に浸漬しており、従来のArガス流量では湯面にスラグが浮遊していた場合、巻き込む可能性⁹⁾があることと、Arガス使用量の削減を意図している。

2.2 サンプル採取内容および調査方法

Fig. 2に鑄造中のサンプル採取状況を模式的に示す。定常条件で鑄造されている中間部ならびに、取鍋交換時にタンディッシュ内と鑄型内において溶鋼サンプルを採取し、[N]については化学分析、Total-[O]については機器分析によって、それぞれの値を求めた。また、溶鋼サンプル採取

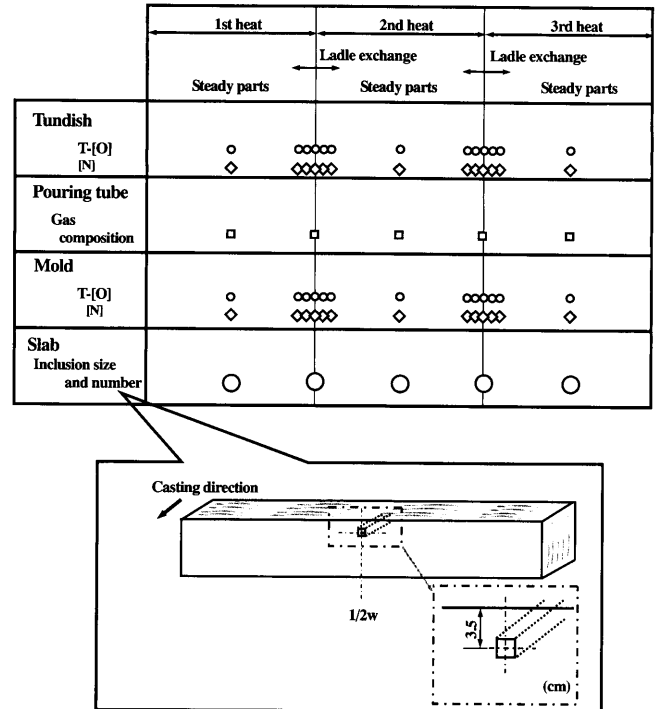


Fig. 2. Sampling timing of molten steel and gas, and slab sample position.

に合わせて、注入管内の雰囲気ガスを真空ポンプによって採取してガスクロマトグラフィーを用いてガス組成を求めた。

スラブサンプルは、溶鋼サンプルと同一箇所になる部位から採取した。スラブサンプルの1/2幅位置における介在物集積部からサンプルを採取し、電解スライム抽出法¹⁰⁾によって清浄性を評価した。

3. 結果および考察

3.1 定常時における注入管内雰囲気ガス組成の測定

定常時における注入管内のArガスによるシールの程度を評価することを目的に、雰囲気ガス分析結果より各タイプの注入管内におけるN₂分圧（以下P_{N₂}と略す）を求めた。P_{N₂}とArガス流量（以下、Q_{Ar}と略す）との関係をFig. 3に整理した。いずれのタイプにおいてもQ_{Ar}が大きくなるのにしたがってP_{N₂}も小さくなるが、Type-CではQ_{Ar}が小さいにも関わらずP_{N₂}は小さく、良好なシールが確保されていることが分かる。また、注入管のArガス吹き込み口の位置に着目して同一Ar流量で比較すると、吹き込み口からガスのサンプリン位置までの距離が小さい注入管タイプほどP_{N₂}は大きい。Arガス濃度が高い吹き込み口に近いにも関わらずP_{N₂}が大きいのは、注入管内におけるArガスと空気の混合の程度によるものと考えられる。すなわち、いずれの場合も注入管内の空気は一部注入流に巻き込まれて注入管内に吹き込まれたArガスとともにタンディッシュ

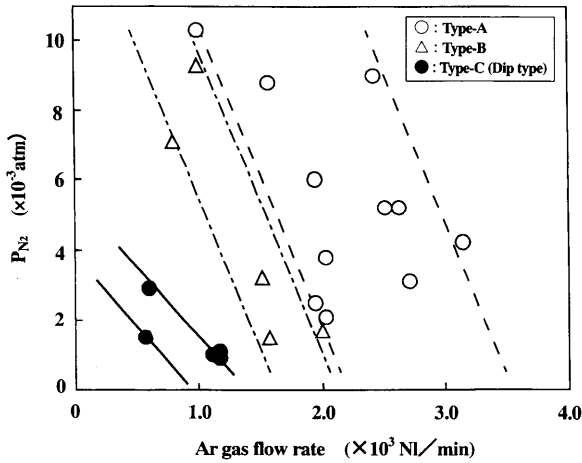


Fig. 3. Relation between Ar gas flow rate and P_{N_2} in pouring tube.

内に持ち込まれるが、その大部分は注入管上端に設置している中間リングと取鍋の隙間から管外に排出されており、Type-Aの場合は注入管の上部から注入流の周囲でArガスを吹き込んでいるために、吹き込まれたArガスが注入流によって大きな下向き速度を得て注入管内の空気とArガスがよく攪拌、混合されて空気が排出されにくくなる。一方、Type-Cでは注入管内溶鋼湯面近傍から吹き込まれることで、注入流によるArガスと空気の攪拌、混合が起こりにくく、より効果的に注入管から排除される。また、Type-BではType-AとType-Cの中間の状態にあると考えられる。上述したことを言い換えると、注入管内においてシールに寄与する範囲は、Arガス吹き込み口から注入管内の溶鋼湯面までの距離（以下 L と略す）によって規定されるとも言える。

このシールに寄与する範囲を、Arシール有効体積（以下 V_{Ar} と略す）として、(1)式で表わす。

$$V_{Ar} = SL \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 S は注入管断面積である。 L の範囲にある体積に対してArガスシールが有効であり、 Q_{Ar} が同一だとすると、(2)式からArガスシールの評価パラメータとしてArガス滞留時間（以下、 T_{Ar} と略す）を導出することができる。

$$T_{Ar} = V_{Ar} / Q_{Ar} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 T_{Ar} : Arガス滞留時間、 V_{Ar} : Arシール有効体積、 Q_{Ar} : Arガス吹き込み流量である。

(2)式は Q_{Ar} が大きい、または V_{Ar} が小さいほど T_{Ar} は小さくなり、シールの程度が良いということを表している。

Fig. 3に示した P_{N_2} と Q_{Ar} の関係を T_{Ar} で整理すると、Fig. 4のとおりとなり、定常部におけるArガスシールの程度は T_{Ar} によって評価することができる。Type-Cの場合、 V_{Ar} が小さいことで低Ar流量でも良好なシールを確保することが可能となっている。

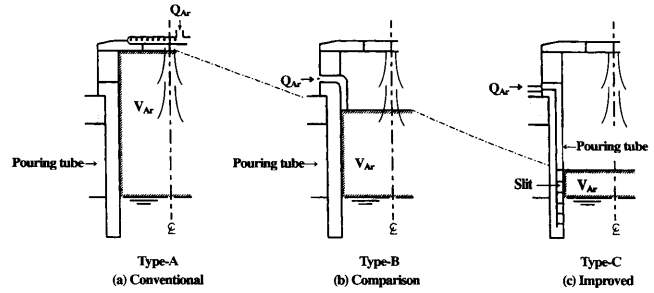


Fig. 4. Relation between T_{Ar} and P_{N_2} .

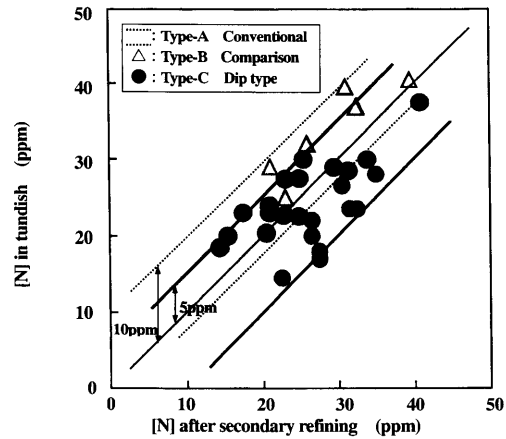


Fig. 5. [N] pick-up in tundish.

3.2 定常時における大気による溶鋼汚染の評価

前述したように、注入管の構造の違いによってArガスによるシールの程度は大きく異なるが、溶鋼の大気による汚染の違いについて比較検討を行った。

注入管内におけるArガスによるシールの程度を溶鋼中への[N]のピックアップから評価すると、Fig. 5のとおりとなる。Type-A, Bでは定常部において[N]ピックアップは最大10ppm程度認められたのに対して、Type-Cでは最大5ppm程度であり定常条件下において鋳造される際の取鍋とタンディッシュ間における溶鋼の二次酸化は大幅に改善

されることが分かる。上述した結果はFig. 3, 4に示したように、Type-Cの注入管は Q_{Ar} が小さいにも関わらず管内の P_{N_2} が最も小さく、有効なArガスシール状態が確保されていることと、溶鋼に浸漬させた部位からArガスを吹き込むため、溶鋼湯面において生じる注入流による巻き込みの発生によって生じる[N]のピックアップが抑制されているものと推察される。

3.3 取鍋交換時における雰囲気ガス測定

取鍋交換時における注入管内の雰囲気ガス組成分析結果から、Arガスシールの程度を評価することを目的に検討を行った。取鍋交換時において注入管内では、上端面が開放されることで大気の巻き込みが起こる。また、注入流が停止することで湯面は下降する。

今回の実験に用いたType-BとType-Cの注入管については、取鍋交換時においても一定のArガス流量を吹き込んでおり、管内の雰囲気はArと空気が混在している状態となっている。

一方、雰囲気ガスのサンプル採取口はいずれの注入管タイプにおいても同一位置であり、Arガスの吹き込み位置は注入管タイプによって異なるため、Arガス吹き込み位置からガスサンプル採取口間の距離（以下、 l と略す）と Q_{Ar} の違いが雰囲気ガスのサンプル採取口における P_{N_2} に与える影響を把握することで、注入管内の溶鋼湯面における N_2 分圧（以下、 p_{N_2} と略す）を推定した。

Fig. 6は検討に用いたモデルの概略を示している。本モデルの対象となる注入管はType-BとType-CのDip typeとNon dip typeの3種類である。

Arガス吹き込み位置は m_1 から m_3 であり、ガスサンプル採取口までの距離はそれぞれ l_1 から l_3 に対応する。

l とガスサンプル採取口における P_{N_2} の関係をFig. 7に示すが、 l が大きく Q_{Ar} が小さいほど大気の侵入による影響が大きくなることが分かる。この結果から、上端面が開放された注入管内の N_2 分圧を推定するために、Fig. 6に示した状態において、 l と Q_{Ar} を含む指標として(3)式から T'_{Air} を求めた。

$$T'_{Air} = (Sl)/Q_{Ar} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 T'_{Air} は取鍋交換時における注入管内大気滞留時間であり、 T'_{Air} が大きいほど大気の侵入による影響が大きくなることを意味する。(2)式に示した T_{Ar} との違いは T_{Ar} が大気の侵入がない状態において V_{Ar} を求める距離の指標として L を用いたのに対して、 T'_{Air} は l を用いていることにある。

すなわち、 T_{Ar} は注入管内を閉空間にしてArガスによってシールされていることから、管内の P_{N_2} は一定であるのに対して、 T'_{Air} は大気が侵入することで影響を受ける範囲を Sl として、注入管内の N_2 分圧は l の区間において勾配を持つと仮定している点にある。

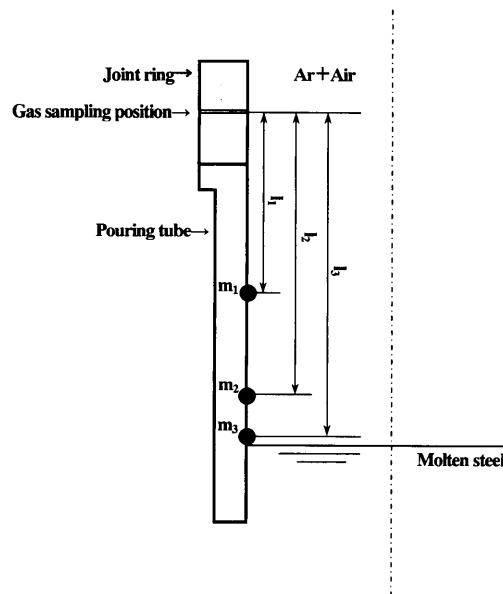


Fig. 6. Schematic drawing of Ar gas sealing analysis model.

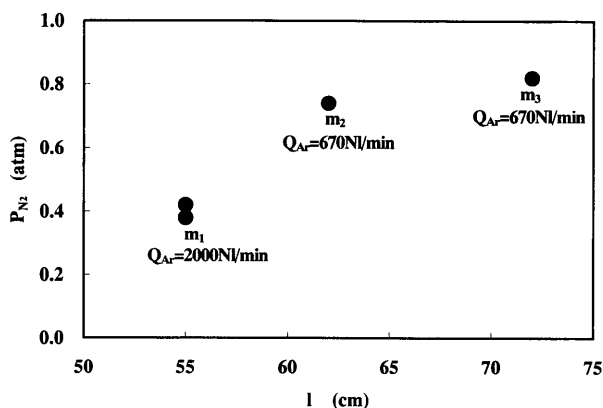


Fig. 7. Relation between l and P_{N_2} .

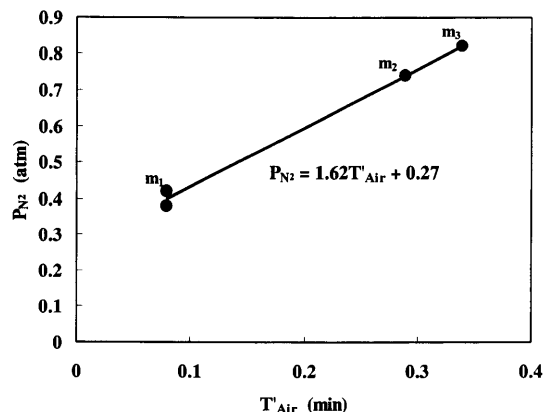


Fig. 8. Relation between T'_{Air} and P_{N_2} .

Fig. 7に示した結果を(3)式によって整理すると、Fig. 8のとおりとなり、(4)式を得る。

$$P_{N_2} = 1.62T'_{Air} + 0.27 \dots \dots \dots (4)$$

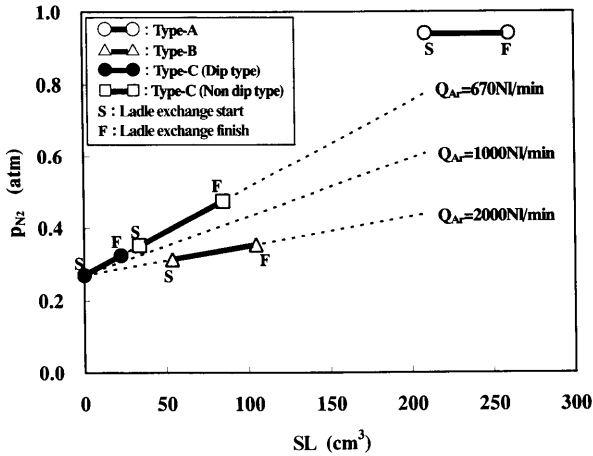


Fig. 9. Relation between SL and p_{N_2} .

ここで、 $T'_{Air}=0$ の時に p_{N_2} が0にならないのは、溶鋼の熱対流が生じることによるものと推察されるが、熱対流による影響はいずれの注入管においても同一であることから、ここでは特に考慮しない。

さらに、(4)式の l を L に置き換えると(5)式が導出され、注入管内の溶鋼湯面位置における各注入管タイプ別の p_{N_2} はFig. 9に示す推定値となる。

$$p_{N_2} = 1.62SL/Q_{Ar} + 0.27 \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 9において、取鍋交換時には溶鋼の注入流が0となり、タンディッシュ内の溶鋼湯面が下降することによって SL は図中に示した範囲で変動するためにType-BとCの注入管では、 SL が大きくなることに伴い溶鋼湯面位置における p_{N_2} は大きくなると推察される。また、Type-Aの注入管の場合、取鍋交換時はArガスシールが全く行われなことから p_{N_2} は高位一定となる。

以上の検討結果から、取鍋交換時における注入管内のArガスによるシールの程度を評価すると、Arガスの吹き込み口が注入管内の溶鋼湯面に近いほどArガスシールの程度は良く、 Q_{Ar} を小さくすることが可能となる。

3.4 取鍋交換時における大気による溶鋼汚染の評価

取鍋交換時における鋳型内溶鋼中T-[O]推移の一例をFig.10に示す。Type-Aと比較してType-C (Dip type)ではT-[O]のピックアップはほとんど認められない。

また、注入管タイプ別に定常時と取鍋交換時における鋳型内溶鋼のT-[O]と[N]の分析値から、取鍋交換時のピックアップ量を整理した結果をFig.11に示す。T-[O]、[N]のいずれも大気による溶鋼の汚染がない領域は1.0以下である。Type-Cの注入管ではType-A, Bの注入管と比較して取鍋交換時における溶鋼汚染が抑制されていることが分かる。

3.5 スラブにおける清浄性評価結果

前述したように、注入管内におけるArガスによるシールの程度はArガス吹き込み位置を変更することによって、大幅に好転することが分かったが、製品品質に直結するス

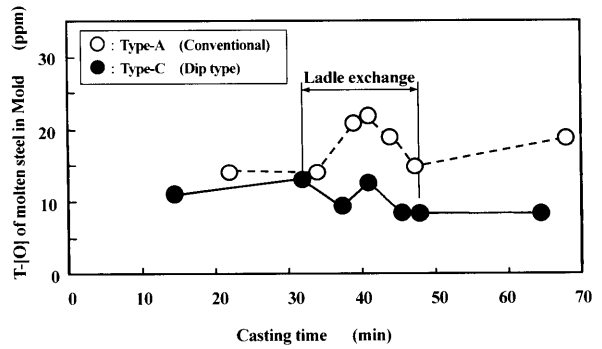


Fig. 10. Variation of total oxygen content in mold during ladle exchange.

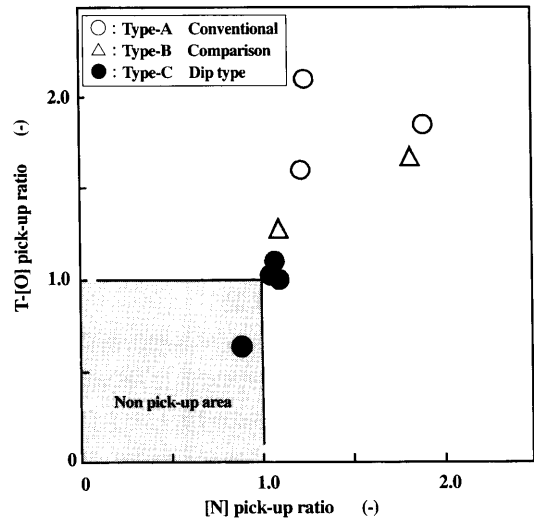


Fig. 11. [N] and total oxygen pick-up in mold during ladle exchange.

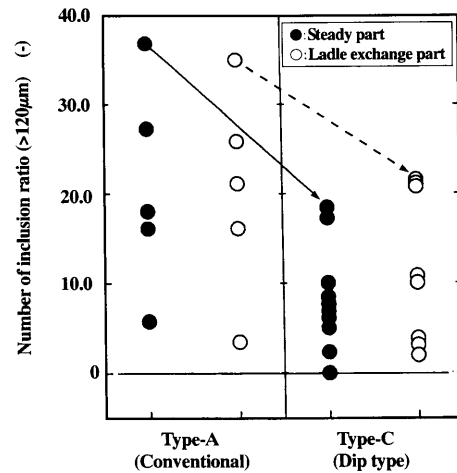


Fig. 12. Effect of improved pouring tube on inclusions in slab.

ラブ内の介在物に対する評価が最も重要と考えられる。

そこで、製品において特に有害となる120 μ m以上の大型介在物の個数を、定常部ならびに取鍋交換部に該当するスラブについて調査した。結果をFig.12に示すが、120 μ m以上の大型介在物の個数はType-Aと比較してType-Cでは

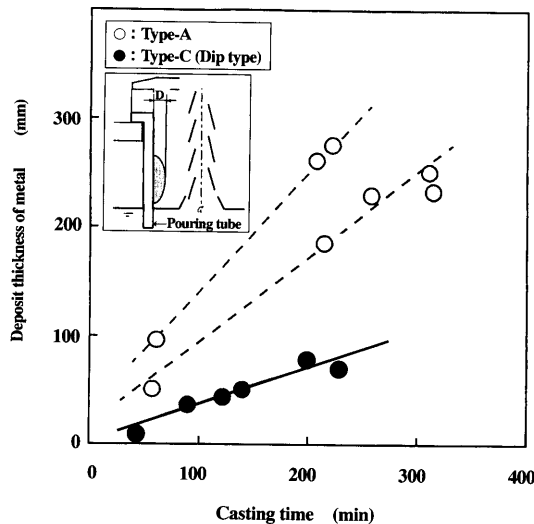


Fig. 13. Relation between casting time and deposit thickness of metal.

定常部において約50%，取鍋交換部においては約40%低減することを確認した。

3.6 注入管内壁の地金付着状況

注入管シール法の場合，注入流が湯面に衝突する際に発生する溶鋼のスプラッシュが管内壁面に付着する。この付着したスプラッシュは casting 時間の増加とともに大きくなるが，品質上の理由によって casting 速度を制限している場合や，铸片サイズが小さい場合など， casting 時間が長くなると多連铸化を阻害する要因となる。また， casting 後に地金の除去が困難となるため，耐火物としては問題がなくとも再使用が不可能となる場合が多く，耐火物コストに影響を与える要因のひとつとなっている。

Type-A と Type-C (Dip type) の注入管について，地金付着状況を調査した結果を Fig.13 に示すが，Type-A と比較して Type-C の地金付着厚みは約 1/3 に減少している。また，Type-A, Type-C のいずれの注入管も地金は管内溶鋼湯面の直上から付着していた。管内溶鋼湯面の温度が低下することで地金の付着が始まり，注入流からのスプラッシュによって成長していくものと推察される。Type-C (Dip type) の注入管の場合，Ar ガスの吹き込み口は浸漬部と非浸漬部がほぼ 1:1 となっており，溶鋼中から Ar ガスを吹き込むことで，管内において最も流動が停滞し温度が下がる管壁近傍の溶鋼を攪拌する効果と，湯面上部において Ar ガスを吹き込むことによって，注入流からのスプラッシュが管壁に付着するのを抑制する効果によって，地金の付着が低減したものと考えられる。

また， casting 後の地金除去作業においては，付着した地金が熱収縮によって小さくなることで管壁面から容易に剥離することで，作業負荷が大幅に低減するとともに，Ar ガス吹き込み口のつまりや溶損などの問題もなく再使用は十分に可能であることを確認した。

4. 結言

取鍋とタンディッシュをつなぐ注入管内の Ar ガスシールの最適化を目的に，タイプの異なる注入管について実験を行い以下の知見を得た。

(1) 定常条件下における注入管内の Ar ガスによるシールの程度は T_{Ar} によって整理することが可能であり，Ar ガスの吹き込み位置と注入管内の溶鋼湯面間の距離が小さいほど T_{Ar} は小さくなる。このことから， T_{Ar} を小さくすることによって Q_{Ar} が小さい条件下においても十分なシール効果が得られる。

(2) 取鍋交換時における注入管内の P_{N_2} は (4) 式から求めることができ，異なるタイプの注入管を同一指標によって評価することが可能である。

(3) 注入管内耐火物にスリットを付与し浸漬部内壁面から吹き込む Type-C (Dip type) の注入管では，スラブにおける $120 \mu\text{m}$ 以上の大型介在物個数が定常部では約 50%，取鍋交換部では約 40% 低減した。

(4) CC における多連铸化を阻害し，注入管寿命に影響を与える管壁面への地金付着は Type-C の注入管の場合，従来方式である Type-A の約 1/3 に低減するとともに，再使用が十分に可能であることを確認した。

記号

P_{N_2}	: N_2 分圧
Q_{Ar}	: Ar ガス流量
L	: Ar ガス吹き込み口から溶鋼湯面までの距離
T_{Ar}	: Ar ガス滞留時間
V_{Ar}	: Ar ガスシール有効体積
l	: 注入管の Ar ガス吹き込み位置からガスサンプル採取口までの距離
P_{N_2}	: 注入管内の溶鋼湯面における推定 N_2 分圧
T'_{Ar}	: 取鍋交換時における注入管内大気滞留時間
$m_{Ar1} \sim m_{Ar3}$: Ar ガス吹き込み位置
$l_1 \sim l_3$: Ar ガス吹き込み位置からガスサンプル採取口までの距離

文献

- 1) M.Hanmyou, M.Ishikawa, Y.Ogura, C.Matsumura, S.Miyahara and Y.Ookubo: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), A215.
- 2) K.Nakanishi, T.Okamoto, S.Takebayashi, K.Kawai, E.Iida and M.Takai: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1057.
- 3) T.Saeki, O.Tsubakihara, A.Kusano, I.Umezawa and Y.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), A207.
- 4) K.Takatani, Y.Shirota, Y.Higuchi and Y.Tanizawa: *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, **1** (1993), 265.
- 5) H.Tanaka, R.Nishihara, I.Kitagawa and R.Tsuji: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1254.
- 6) T.Ushiro, K.Akiyama, T.Kumei, Y.Hiraga and T.Okimura: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 139.
- 7) K.Nakajima, M.Kawasaki, N.Kasai, J.Yoshiyama and A.Satou: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), A223.
- 8) K.Takase, K.Misawa, K.Amada, M.Amano, N.Kon-no, A.Uehara and H.Yamamura: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 138.
- 9) M.Iguchi, Y.Sumida, R.Okada and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **34** (1994), No. 2, 164.
- 10) 黒澤文夫: 最近の分析・解析技術の進歩，第19回白石記念講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1990)，87.