

タンディシュ内溶鋼の汚染要因の定量化

田中 宏幸*・西原 良治*²・北川 逸朗*²・辻野 良二*

Quantitative Analysis of Contamination of Liquid Steel in Tundish

Hiroyuki TANAKA, Ryoji NISHIHARA, Iturou KITAGAWA and Ryoji TSUJINO

Synopsis : Recently, the high grade quality has been demanded for strips and surface-treatment steel plates. Especially, the cleanliness of molten steel in tundishs plays a crucial part in order to improve the quality of steel plate as well as to prevent immersion nozzle clogging. The tundish has functions of floatation and removal of inclusions, though, some contaminations to the molten steel also occur in tundishs. Therefore, it is necessary to make clear the cause of each contamination and their level for producing super clean steels.

In this study, the contamination factors to molten steel in the tundish and their influences were analyzed by continual metal sampling during operation and of investigation of size, number and composition of inclusions.

The results are as follows.

① Air-oxidation to molten steel is the biggest factor of contamination in the tundish.

② As the influence of air-oxidation decreases, slag contamination increases during continuous operations.

Key words : contamination by air ; continuous casting ; cleanliness ; liquid steel ; tundish ; inclusion.

1. 緒言

薄板、表面処理鋼板に要求される品質レベルは近年ますます厳格化しており、非金属介在物のさらなる低減が求められている。特に、タンディシュ(以下TDと称す)での溶鋼清浄化は浸漬ノズル閉塞防止の点も含め製品々質の向上のため特に重要である。TDは多ストランドへの溶鋼の分注の他に、取鍋内の介在物を浮上分離させる清浄化機能も有している^{1)~4)}が、TD内で汚染も生じている^{5)~9)}ことがわかっている。すなわち、これまでの知見として、TD内における溶鋼の汚染の原因は、

①取鍋内スラグや取鍋スライディングノズル詰物(以下取鍋詰物と称す)がTD内に巻き込まれることによる汚染

②TD内溶鋼の空気酸化

③TD耐火物の溶損

等であることがわかっている。このため、近年になってTD内溶鋼の汚染防止または汚染の影響の低減を目的としたTD内溶鋼の清浄化技術として、TD容量の拡大によるモールド内へのスラグの巻き込みの低減^{10)~12)}や、TD内への微細気泡吹き込みによる介在物の浮上分離促進^{13)~16)}、取鍋スラグのTD内への流入防止¹⁷⁾、取鍋スラグ改質、TD内へのAr吹き込みによる P_{O_2} 低下、その他の対策が講じられてきている^{18)~20)}。

一般に、実操業においては種々の汚染原因が混在して互

いに影響を及ぼしている場合が多く、高 cleanliness 溶鋼を安定して製造するには、TDの清浄化機能を最大限に発揮させるとともに汚染要因とその寄与率を明確にして適切な対策を講じることが必要である。ところが、これまでは単一の要因にのみ着目した解析は行なわれているが、複合汚染の場合の原因の特定とその寄与の定量化が行なわれた例は少ない。

そこで、本研究では実機設備を用いてスラグ汚染の影響を低減させた試験を行ない、TD内溶鋼中の介在物個数を詳細に調査することにより、TD内溶鋼中に巻き込まれた介在物の浮上分離効果の把握、さらにはTD溶鋼の汚染に関する空気酸化、スラグ巻き込み、TD耐火物の溶損の影響の分離ならびに、その寄与率の定量化を行なった。

2. 調査方法

試験はFig. 1に示す八幡製鉄所、第3製鋼工場の1号連铸機(2ストランド60tTD)でアルミキルド鋼($[\% Al] \approx 0.05$)を3チャージ铸造し、同一タイミングでTD内ロングノズル位置(以下TD流入部と称す)ならびに浸漬ノズル位置(以下TD流出部と称す)で、TD内溶鋼表面から400mm深さの位置よりFig. 2の急冷サンプラーにより溶鋼サンプルを採取した。その後に、サンプルの底部から10mm位置を切断、研磨した後に光学顕微鏡を用いて介在物個数を測定した(以下検鏡と称す)。溶鋼の採取は、採取時の外乱の影響の抑制、あるいは

平成5年2月22日受付 平成5年7月2日受理 (Received on Feb. 22, 1993; Accepted on July 2, 1993)

* 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 (Yawata R&D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1 Tobihata-cho Tobata-ku Kitakyushu 804)

* 2 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

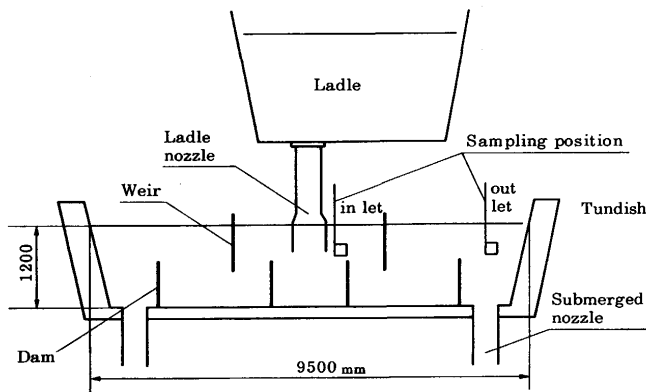


Fig. 1. Schematic drawing of the Yawata Works No.1 slab caster tundish.

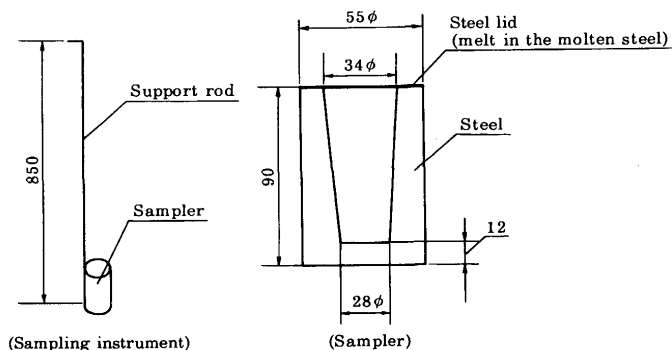


Fig. 2. Sampling instrument.

は casting 中の清浄性の過渡的な変化を把握するために casting 開始時あるいは連々鋳の取鍋交換時等の非定常部では 1 min 間隔で、また、定常部では 7 から 8 min 間隔で溶鋼を採取した。また、検鏡は 10 μm 以上の介在物を形状(クラスター、塊状、球状)、粒径別に行ない、さらに EPMA で組織を調査した。

試験 casting 条件としては、TD 内の溶鋼の一方のストランド側への偏流を防止するために鋳片幅、厚み、casting 速度は両ストランドとも同一とし、それぞれ 980 mm, 250 mm, 1.24 m/min とした。また、各チャージとも TD 内への Ar ガス吹き込みにより、雰囲気酸素分圧(P_{O_2})を 5 % 程度に低下させるとともに、取鍋スラグの改質を行ないスラグ中の(FeO_t)を 3

チャージとも 5 % まで低下させた。

試験時の操作は、1 チャージ目の casting 開始前には取鍋スライディングノズルの開孔を TD 外の排湯ポット上で実施して取鍋詰物を TD 外へ廃棄する操作(以下捨て湯と称する)を行ない、さらに casting 末期の取鍋溶鋼流とともに取鍋スラグが TD 内へ流入することを防止するために casting 末期に取鍋内に 20 t の溶鋼を残した(取鍋内残湯処置)。その後 2 チャージ目以降は通常の連々鋳操作で行なっているように、取鍋スライディングノズルの開孔を TD 上で行ない、さらに、取鍋内残湯処置は行なわず、取鍋内の溶鋼は全て TD 内に注入する操作を行なった。試験水準を Table 1 に示す。

3. 実験結果

3・1 TD 内溶鋼中介在物組成

TD 内介在物の組成を EPMA で調査した結果、クラスター状、塊状の介在物は純粋の Al_2O_3 であり、また、球状介在物の TD 流入部と流出部での平均組成を Fig. 3 に示すが、球状介在物は大半が $CaO-Al_2O_3$ 系であった。このことから、球状介在物は TD 内に巻き込まれた取鍋スラグと考えられる。そこで、以下クラスター状、塊状介在物をアルミナ系介在物、球状介在物をスラグ系介在物と称す。

さらに、Fig. 3 よりスラグ系介在物中の FeO_t や MnO , SiO_2 など、 $[Al]$ に比べて酸素との親和力が小さい成分の酸化物について、TD 内流入部、流出部とも濃度が 2 % 程度でほぼ一定で、TD 内での介在物組成の変化は小さいことがわかる。また、流出部において MgO 濃度が高くなっており、TD 耐火物の溶損が生じていることを示しているが、その増加量は 4 % 程度と小さい。

3・2 TD 内介在物個数推移

Fig. 4 に検鏡により測定した 10 μm 以上のアルミナ系介在物とスラグ系介在物の 1 チャージから 3 チャージまでの個数の推移を示す。TD 流入部のアルミナ系介在物、スラグ系介在物はチャージ数の増加につれてともに増加している。

また、TD 注入部と流出部の介在物個数の変化についてみると、アルミナ系介在物は TD 内で増加しており、その原因として取鍋スラグ、取鍋詰物等の溶鋼中 $[Al]$ による還元、

Table 1. Plant trial condition.

Heat size	320t/heat
Cast size	3heats/cast
Casting condition	1st. heat: Casting except the first 10tons and the last 20tons of molten steel. 2nd. and 3rd. heat: Casting full heat size (320tons)
Tundish sealing	Ar blowing during casting ($P_{O_2} \approx 0.05atm$)
Tundish flux	MgO
Tundish coating	MgO
Slag composition	$FeO_t \approx 5\%$

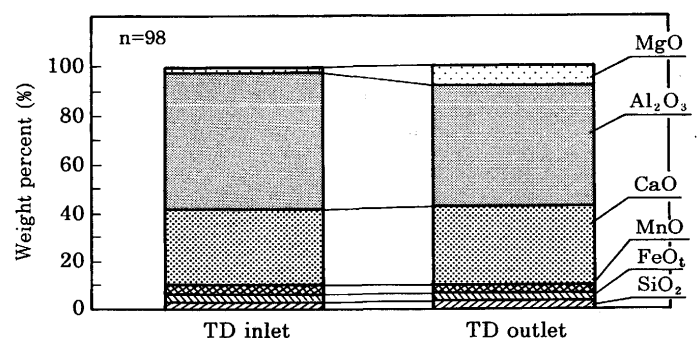


Fig. 3. Typical composition of slag type inclusions in tundish.

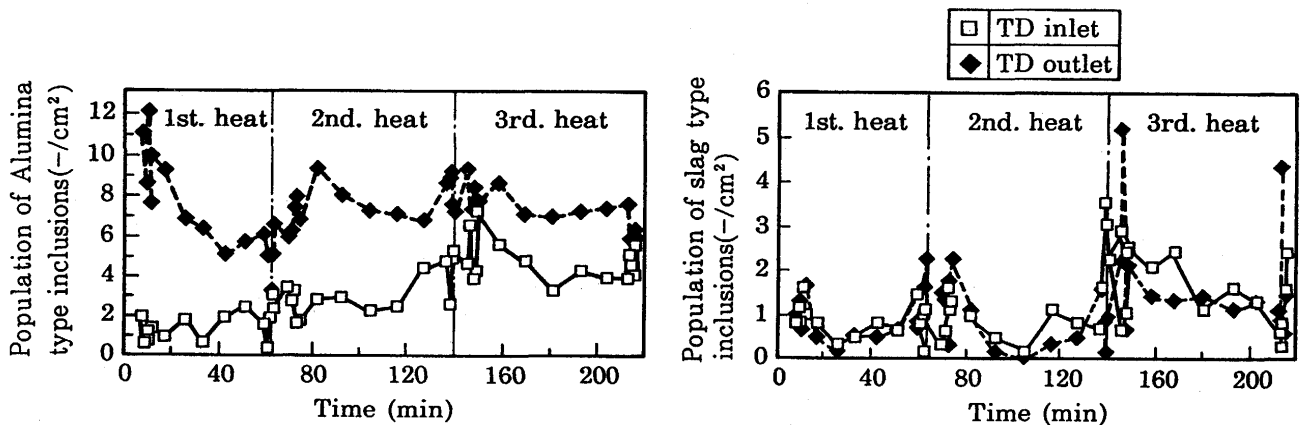


Fig. 4. Change in inclusion density(>10μm)in tundish.

あるいは溶鋼の空気酸化が考えられる。一方、スラグ系は流入部と流出部はほぼ同様の推移を示しており、さらに、流入部より流出部の個数がわずかに少なくなっている。このことは、TD内に流入したスラグ系介在物の一部は浮上除去されていることを示している。

4. 考察

4・1 要因解析に用いた仮定ならびにその妥当性

解析では次の仮定をおいて考察を行なった。

①溶鋼中に巻き込まれたスラグや取鍋詰物はTD内の強撹拌領域において組成が変化し平衡状態に達し、TD内の浮上領域を浮遊する間の溶鋼の[Al]との反応によるアルミナの生成はない。

②TD耐火物の溶損によるスラグ系介在物の生成はない。

③従って上記の原因によるスラグ系介在物の個数変化は無視でき、TD流入部から流出部の間のスラグ系介在物の個数の減少は全て浮上分離により生じる。

これらの仮定の妥当性については、

①Fig. 3より、TD内のスラグ系介在物の成分変化はMgOを除いて非常に小さいこと、また、Fig. 4のアルミナ系介在物個数推移よりTD内に取鍋詰物あるいは取鍋スラグが流入

する2チャージ目以降においてTD流入部のアルミナ系介在物個数が増加していること、

②また、Fig. 3よりMgO濃度の変化量は4%と小さく、これを無視しても浮上率の算出には大きくは影響を及ぼさないと考えられることから、

③TD内に流入した取鍋詰物あるいはスラグ中のFeO, MnO, SiO₂などの酸化物と溶鋼との反応はTD流入部の強撹拌域においてほぼ終了し、TD内を浮遊する間の反応は少ないと考えられるため、前述した仮定はほぼ妥当なものといえる。

次に、TD内に供給した溶鋼中の介在物が浮上除去される一方、溶鋼汚染により介在物が生成される状況を模式的にFig. 5に示す。Fig. 5より、TD内において溶鋼汚染が生じない場合、TD流出部の実測の溶鋼の清浄性は(1)式で示される後述するTD流出部理論溶鋼清浄性と同一となる。さらに、実測の流出部溶鋼の清浄性は(2)式に示すようにTD流出部理論溶鋼清浄性にTD内での溶鋼汚染量が加算されたものとなる。

TD流出部理論溶鋼清浄性

$$= \sum \left[\frac{1}{4} \pi (D_i)^2 / S (1 - \alpha_i) \right] \dots \dots \dots (1)$$

TD流出部実測溶鋼清浄性

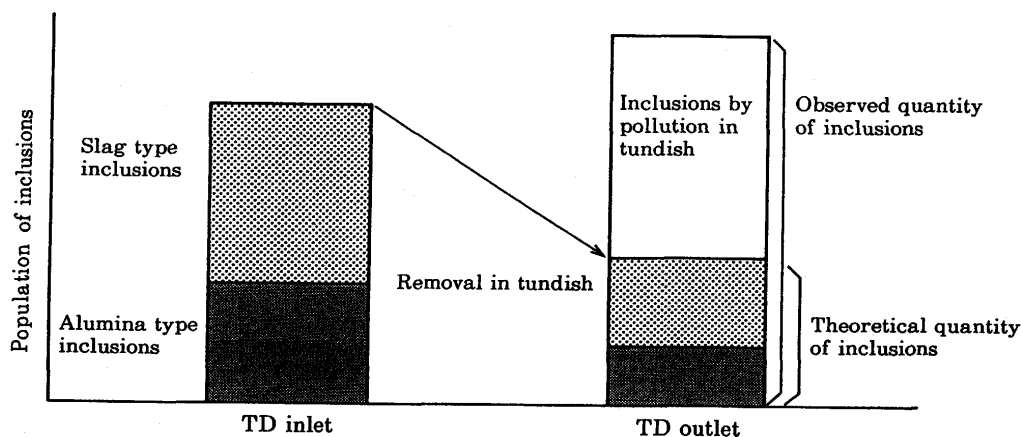


Fig. 5. Change in cleanliness of steel in tundish.

$$= \Sigma \left[\frac{1}{4} \pi (D_i)^2 / S (1 - \alpha_i) \right] + N_F \dots \dots \dots (2)$$

本検討ではTD内の機能として湯落ち部の強撹拌領域(完全混合領域)とTD内を溶鋼が移動している領域(浮上領域)に分類して考えた。さらに、検討ではTD内の完全混合領域内では介在物量は均一と考え、介在物浮上率は浮上領域における浮上率を求めた。

4・2 TD内溶鋼汚染要因の評価方法

4・2・1 介在物粒径毎のTD内浮上率

TD内の介在物粒径毎の浮上率は検鏡により求めた介在物個数結果より算出した。すなわち、アルミナ系介在物は空気酸化等によりTD内で増加することが予想されるため、スラグ系介在物にのみ着目して、TD流入部と流出部の介在物個数の個数変化より介在物径毎の浮上率を求めた。ここで、介在物個数を比較するための溶鋼の滞留時間はFig. 4 にみられるスラグ径介在物の流入部に対する流出部の応答の遅れより2.3minとした。本TDの上堰からTD端片間の容量は30 tあるため、今回の注湯量(2.3t/min/st)では応答時間は6.5 min程度確保できるはずであるが、TD内に完全混合域が存在すること、またTD内に多数堰を設置しているとはいえTD内には溶鋼流動の主流が存在するためにプラグフローとしては扱えないことのためと考えられる。また浮上率の算出においては、介在物粒径はばらついているため、介在物粒径を10~25 μ m, 25~50 μ m, 50~100 μ m, 100~200 μ m, 200 μ m以上の5段階に分類して、この領域の介在物個数の変化より、浮上率を求めた。

4・2・2 TD流出部の理論溶鋼清浄性

TD流出部理論溶鋼清浄性の算出はTD流入部の各粒径毎の介在物に残留率を掛けて算出した。その際、アルミナクラスターの浮上率については、クラスター中のアルミナの体積率($\alpha=0.3$)²¹⁾を用いて以下の(3)~(7)式の方法で、アルミナクラスターの粒径が、浮上速度が同一となる塊状介在物粒径に該当するとして換算して求めた。

すなわち介在物径が小さい(150 μ m $\geq D_1$)場合には、溶鋼中の塊状アルミナとアルミナクラスターの浮上速度は(3)(4)のストークスの式で表わせる²²⁾。

$$u_1 = - \frac{D_1^2 (\rho_{P1} - \rho_{Fe}) g}{18\mu} \dots \dots \dots (3)$$

$$u_2 = - \frac{D_2^2 (\rho_{P2} - \rho_{Fe}) g}{18\mu} \dots \dots \dots (4)$$

(3)(4)式よりアルミナクラスターの径が D_2 の時に $u_1 = u_2$ となる介在物径(D_1)は(5)(6)式より導かれる(7)で表われる。

$$D_1^2 (\rho_{P1} - \rho_{Fe}) = D_2^2 (\rho_{P2} - \rho_{Fe}) \dots \dots \dots (5)$$

$$\rho_{P2} = \rho_{P1} \times \alpha + \rho_{Fe} \times (1 - \alpha) \dots \dots \dots (6)$$

$$D_1 = D_2 \times ((\rho_{P2} - \rho_{Fe}) / (\rho_{P1} - \rho_{Fe}))^{1/2}$$

$$= 0.548 D_2 \dots \dots \dots (7)$$

4・2・3 TD内浮上領域における汚染量の算出

アルミキルド溶鋼が汚染されると優先的にアルミナが生成することから、TD内溶鋼の汚染量は生成したアルミナの量に反映される。そこで、TD内の浮上領域の溶鋼汚染量はTD流入部と流出部のアルミナ系介在物個数より(8)式で表わせる。なお、(8)式中TD流出部理論溶鋼アルミナ量は(7)式を(1)式に代入して求めた。

TD内溶鋼汚染量 = TD流出部の実測アルミナ量

$$- \text{TD流出部理論アルミナ量} \dots \dots \dots (8)$$

4・2・4 検鏡による介在物個数から介在物濃度への換算

溶鋼中に懸濁している介在物の個数の比較では溶鋼の汚染量の定量化には正確でない。また、浮遊介在物の中で製品欠陥に関係する介在物は数10 μ m以上の比較的大きな介在物²³⁾²⁴⁾であるため、非常に微細な介在物までの介在物の総量を示すT.[O]では実際の汚染現象との対応が得られにくい。そこで、本検討では検鏡による10 μ m以上の介在物個数の結果を溶鋼中の介在物濃度へ換算し、溶鋼清浄性の指標とした。

今、サンプル内に介在物が均一に分散している場合には調査断面中の介在物の面積率(A_{inc})は介在物体積率(V_{inc})と同一とおける²⁵⁾²⁶⁾。そこで、検鏡結果の介在物濃度への換算は(9)から(11)式に示すように、先ず検鏡結果よりサンプル中の介在物面積率を算出し、さらにこの面積率に介在物と溶鋼の密度を掛けることにより算出した。

$$V_{inc} = A_{inc} \dots \dots \dots (9)$$

$$A_{inc} = \Sigma \frac{1}{4} \pi (D_i)^2 / S \dots \dots \dots (10)$$

$$W_{inc} = V_{inc} \times \rho_{inc} / \rho_{Fe} \\ = A_{inc} \times \rho_{inc} / \rho_{Fe} \dots \dots \dots (11)$$

4・3 TD内溶鋼清浄性を支配する各種要因の検討

4・3・1 介在物粒径ごとのTD内介在物浮上率

Fig. 4のスラグ系介在物個数推移より介在物粒径ごとに求めたTD流入部と流出部の単位面積あたりの介在物の平均個数をFig. 6に、さらに、Fig. 6より求めた介在物粒径ごとの

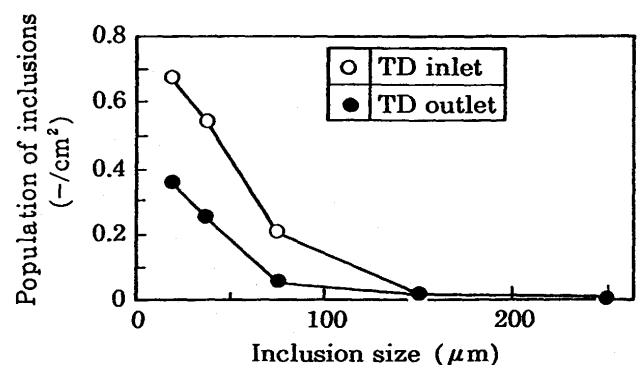


Fig. 6. Size distribution of slag type inclusions.

介在物の浮上率をFig. 7に示す。Fig. 6, 7より介在物粒径が大きくなるにつれて介在物の浮上率は向上し、150 μ m以上の介在物はTD内ではほぼ完全に浮上している。

4.3.2 TD内溶鋼汚染の寄与率

TD流出部における理論溶鋼清浄性と流出部溶鋼サンプルより求めた実測の溶鋼清浄性の比較を経時的にFig. 8に示す。これらの介在物濃度の差はTD内において生じた汚染量を示している。また、同一のTDを用いた実験であり、TD流入部の雰囲気条件は3チャージとも同様であること、および、供給される溶鋼の清浄性はチャージ内ではほぼ一定であることから、汚染量がチャージ内で大きくなっているところはTDに流入したスラグまたは、取鍋詰物による汚染量が多いことを意味している。図の理論溶鋼清浄性の推移より、取鍋スラグや取鍋詰物のTD内への流入を抑制させた1チャージ目の汚染量は2チャージ目以降と比較して小さく、また、チャージ内ではほぼ一定レベルで推移している。一方、取鍋詰物をTD内に流入させた2チャージ目はチャージ開始時から1/3の時間、汚染量が増加している。また、いったん汚染量が減少し、1チャージ目と同じレベルまで低下した後、チャージ末期に再び汚染量が増大している。これは、 casting開始時の取鍋詰物や casting末期の取鍋スラグがTD内に流入し、溶鋼流で攪拌されることにより、詰物中のSiO₂やスラグ中のFeO、MnOが溶鋼中の[Al]と反応する影響と考えられる。本 castingで使用した取鍋詰物は約20kgで

あるが、これが全て溶鋼と反応してAl₂O₃が生成し、さらに350tの溶鋼中に希釈されるとすると約60ppmとなる。一方、Fig. 8中の2チャージ目の ΔW_{inc} は最高でも5 ppm程度であり計算値に比べてはるかに小さい。その結果、TD内の流入した詰物は、流入量の中のわずかが溶鋼と反応して溶鋼を汚染し、大半は溶鋼表面に浮上していると考えられる。さらに、3チャージ目ではTD内へのスラグの蓄積のために2チャージ目の汚染レベルに加算する形で汚染が進行し、2チャージ目とほぼ同様の推移を示している。

Fig. 9にTD流出部でのスラグ系とアルミナ系の全介在物についての実測溶鋼清浄性と理論溶鋼清浄性との差の推移とTD流出部でのスラグ系介在物原因による理論溶鋼清浄性の推移を併せて示す。TD流出部におけるスラグ系とアルミナ系介在物の全介在物の実測溶鋼清浄性と理論溶鋼清浄性との差はTD流入部から流出部間の浮上域での汚染を示し、その要因としては(1)空気酸化(2)TD耐火物の溶損が考えられる。ここで、前述したように、耐火物の溶損による影響は小さいことから、汚染の主要因は空気酸化であるといえる。この空気酸化量は2チャージ目以降の定常部では一定に推移しているが、1チャージ目の casting開始時と各チャージ間の取鍋交換時は汚染量が増加しており、特に casting開始時の汚染はチャージの casting時間の2/3近くまで影響を及

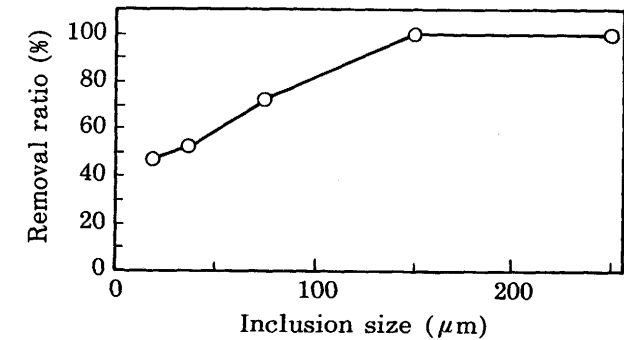


Fig. 7. Influence of inclusion size on floating-off ratio.

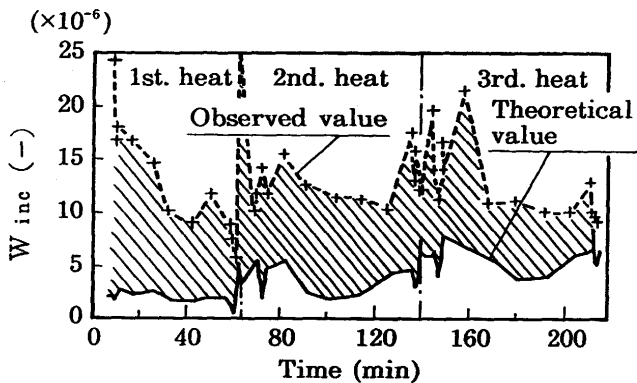


Fig. 8. Experimental analysis of steel cleanliness in tundish during the casting.

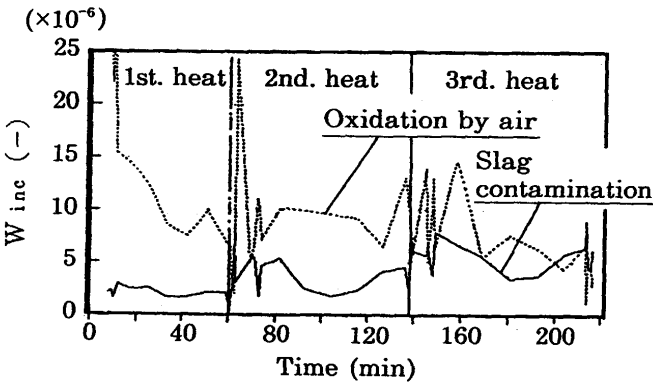


Fig. 9. Influence of oxidation by air and slag contamination on converted quantity of inclusion-s during the casting.

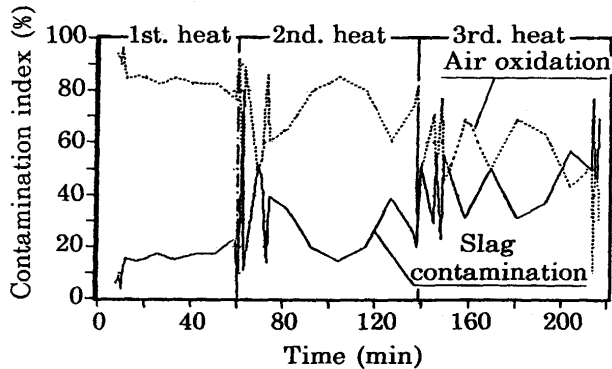


Fig. 10. Influence of oxidation by air and slag contamination on contamination index during the casting.

ばしている。さらに、Fig.10に空気酸化による汚染とスラグ系介在物によるスラグ流入による汚染の寄与率を示す。鑄造開始から2チャージ目までは空気酸化による汚染の影響が大きく、特にスラグ、取鍋詰物を低減した1～2チャージ間はTDからの流出溶鋼の汚染量の70%以上が空気酸化であるといえる。

また、TD内に流入したスラグによる汚染量はチャージ数とともに増加する傾向にあるのに対し、空気酸化量は低下傾向にある。これは、チャージ数とともにTD内への蓄積スラグ量が増加する反面、溶鋼表面をスラグがカバーするために空気酸化が低減しているためと考えられる。

以上から、溶鋼汚染を防止し連々鑄数を増加させるためには汚染の寄与率からみて、先ず空気酸化防止が最も重要である。そのためには[A1]で還元される酸化成分を含まず、TD内に巻き込まれにくい合成スラグによるTD溶鋼表面の遮蔽あるいはAr吹き込みによる酸素分圧低下が有効である。さらに、TD内へ流出する取鍋詰物や、スラグ量の低減が重要である。

5. 結論

連続採取したTD溶鋼サンプル内の介在物を検鏡により詳細に調査、解析を行なうことにより、TD内の介在物の浮上率や溶鋼汚染に関する各種の汚染の寄与を定量的に評価した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) TDの溶鋼汚染は空気酸化による影響が最も大きい。

(2) チャージを重ねるにつれて空気酸化の影響は低下する反面、取鍋詰物や取鍋内スラグ等のスラグ系介在物による汚染は次第に増加する。

(3) 以上の結果から本研究で用いた解析手法によりTD内の溶鋼汚染要因の特定や寄与率を従来よりも定量的に行うことが可能である。

記 号

A_{inc} : 介在物の面積率	(—)
A_o : 検鏡面積	(m^2)
D_i : 介在物粒径	(μm)
D_1 : 塊状、球状介在物粒径	(μm)
D_2 : アルミナクラスター粒径	(μm)
g : 重力加速度	(m/s^2)
N_p : TD内溶鋼汚染量	(—)
n : 検鏡による介在物粒径毎の個数	(—)
S : 検鏡調査面積	(m^2)
u_1 : 塊状、球状介在物浮上速度	(m/s)

u_2 : アルミナクラスター浮上速度	(m/s)
V_{inc} : 介在物体積率	(—)
W_{inc} : 介在物濃度	(—)
α : アルミナクラスター中のアルミナの体積比率	(—)
α_i : 介在物粒径毎の浮上率	(—)
μ : 溶鋼粘度	($Pa \cdot s$)
ρ_{Fe} : 溶鋼密度 (=7000)	(kg/m^3)
ρ_F : 介在物密度 (=3600)	(kg/m^3)

文 献

- 1) 石川英毅, 渋谷伊左雄, 田中 純, 中村貞彦: 鉄と鋼, **66** (1980), S866
- 2) 小舞忠信, 宮村 紘, 大崎真弘, 草野昭彦, 山田 哲, 島津 勲, 佐藤憲夫, 山本知文: 鉄と鋼, **67** (1981), p.1152
- 3) 中田正之, 福田脩三, 村上勝彦, 矢野幸三: 鉄と鋼, **69** (1983), S212
- 4) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p.852
- 5) 恒生泰弘, 北岡英就, 吉井 裕, 江見俊彦, 飯田義治, 上田典弘: 鉄と鋼, **62** (1976), p.1803
- 6) 飯田義治, 児玉正範, 大西康博, 大杉賢三, 小沢三千晴, 野崎 努: 鉄と鋼, **64** (1978), S148
- 7) 宮原 忍, 菅原功夫, 田口喜代美, 内田繁孝, 政岡俊雄: 鉄と鋼, **65** (1979), S226
- 8) 村上勝彦, 笹島保敏, 矢野幸三, 盾 昌久, 石黒守幸, 小倉康嗣: 鉄と鋼, **66** (1980), S865
- 9) 仲 億, 勝山憲夫, 和気 誠, 小宮敏明, 三隅秀幸, 井口新一: 鉄と鋼, **68** (1982), S1006
- 10) 吉田基樹, 石飛精助, 脇田淳一, 溝口庄三: 鉄と鋼, **66** (1980), S863
- 11) 脇田淳一, 溝口庄三, 吉田基樹, 石飛精助: 鉄と鋼, **66** (1980), S864
- 12) 大西正之, 岩本侑輔, 日和佐章一, 加藤安功, 大岡秀志: 鉄と鋼, **69** (1983), S211
- 13) 友野 宏, 浦 知, 坂本弘樹, 岩田勝吉: 鉄と鋼, **69** (1983), S210
- 14) 山中啓充, 寺嶋 司, 中田謹司, 越川隆雄, 上田典弘, 吉井 裕: 鉄と鋼, **69** (1983), S213
- 15) 今村 茂, 今村 晃, 池崎英二, 草野昭彦, 欽取英宏, 宮村 紘: 鉄と鋼, **73** (1987), S281
- 16) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, **73** (1987), S860
- 17) 伊藤俊之, 越川隆雄, 高橋 暁, 今井卓雄: 鉄と鋼, **67** (1981), S847
- 18) 宮原 忍, 菅原功夫, 田口喜代美, 内田繁孝, 政岡俊雄: 鉄と鋼, **65** (1979), S228
- 19) 友野 宏, 尾崎孝三郎, 浦 知, 岩田勝吉, 鈴木俊明: 鉄と鋼, **69** (1983), S914
- 20) 森岡信彦, 鷺尾 勝, 浜上和久, 小倉 滋, 西川 廣, 朝穂隆一: 鉄と鋼, **73** (1987), S280
- 21) 山村英明, 松崎孝文, 三隅秀幸, 溝口庄三: 学振19委-介在物-No. 38 (平成3年7月)
- 22) 化学工学便覧第3版(化学工学協会編), (1975), p.354 [丸善]
- 23) 松藤和雄, 下村隆良, 小林英男, 黒河照夫, 宮原 忍: 日本鋼管技報, (1982)92, p.27
- 24) 御園生一長, 藤井昭明, 福元亮一, 中島 厚: 鉄と鋼, **68** (1982), p.147
- 25) S.A.Saltikov: Stereometric Metallography, Metallurgizdat, Moscow, (1958)
- 26) J.E.Hilliard: Quantitative Microscopy, ed. by R.T.Dehoff and F.N.Rhines, (1968), p.45 [McGraw-Hill Book Co., N.Y.]