

遠心分離タンディッシュによる溶鋼中介在物の分離

三木 祐司*・北岡 英就*・別所 永康*・桜谷 敏和*・小倉 滋*²・久我 正昭*²

Inclusion Separation from Molten Steel in Tundish with Rotating Electromagnetic Field
Yuji MIKI, Hidenari KITAOKA, Nagayasu BESSHO, Toshikazu SAKURAYA, Shigeru OGURA and Masaaki KUGA

Synopsis : A new process was devised for promoting inclusion separation from the molten steel in the tundish. The process utilizes electromagnetic force to rotate molten steel in a cylindrical tundish. The centrifugal force caused by the rotational flow promotes separation of inclusions. This tundish is referred to as the Centrifugal Flow Tundish (the CF tundish).

Industrial plant tests carried out at Chiba works showed that the CF tundish has an excellent deoxidation performance estimated at $0.17\text{--}0.25\text{ min}^{-1}$ as deoxidation rate constant.

The mechanism of inclusion separation in the CF tundish is also discussed. Centripetal force and large turbulence energy caused by rotational flow accelerate inclusion separation. Furthermore, residence time distribution of molten steel in a tundish is improved and it promotes slag removal during ladle exchange.

This process is successfully used in commercial production of stainless steel slabs with high quality.

Key words : molten steel ; continuous casting ; non-metallic inclusion ; deoxidation ; electromagnetic field ; tundish ; separation.

1. 緒言

製鋼プロセスにおいて、高生産性と高品質を両立するために、より効率的な溶鋼清浄化技術が望まれている。溶鋼清浄化のためには、タンディッシュで介在物やスラグの分離を積極的に行ない、また、大気による酸化や耐火物からの溶鋼の汚染を極力低減することが重要である。介在物やスラグを溶鋼から浮上分離するためには、(1)タンディッシュの大型化による介在物の浮上時間の確保¹⁾、(2)タンディッシュ内容鋼流動の改善のための堰形状の改善²⁾、(3)タンディッシュ内容鋼加熱による介在物分離の促進³⁾、(4)タンディッシュでの溶鋼へのArガス吹き込み⁴⁾、(5)取鍋交換時の溶鋼清浄化対策として、二鍋同時注入を可能とするタンディッシュ等⁵⁾が、提案、実施されてきた。また、溶鋼汚染対策⁶⁾としては空気酸化防止のためのタンディッシュの密閉等が盛んに行なわれてきている。

しかしながら、近年の需要家の品質要求の高まりやコスト低減の必要性から、更に効率的な介在物分離技術の発展が望まれている。特に、高級鋼の製造プロセスの中で、二次精錬コストの上昇を伴うことなく、溶鋼中の介在物を低減することが重要な課題となってきた。また、連続製造工程においては、取鍋交換部などの非正常部の鑄品の品質向上が、残された重要な課題となっている。

このような背景から、電磁力により溶鋼に水平回転流を

与え、求心力によって介在物を集中分離する遠心分離タンディッシュの開発に着手した。回転磁界攪拌による介在物の分離効果については、著者らにより、回分系のモデル実験⁷⁾および500kg容量のタンディッシュを用いたパイロットプラント実験⁸⁾においてその効果が確認されているが、今回、実際の連铸機における適用法を検討し、その効果を明らかにするため、千葉第1連铸機において、スラブ連铸機生産ラインでの実験を行ない、本プロセスの介在物分離能力および溶鋼清浄化の機構を検討した。

2. 遠心分離タンディッシュの原理と介在物分離機構

Fig. 1 に本プロセスの概念を示す。円筒形のタンディッシュの外周より移動磁界を作用させて、溶鋼に水平回転流を与える。介在物は溶鋼より比重が小さいために、遠心分離の原理により、介在物に求心力が働き、回転軸芯部に分離される。そこで、下端部より溶鋼を排出することで、清浄化された溶鋼を鑄型へ供給できる。

本プロセスでは、(1)求心力による介在物の移動と分離に加えて、(2)回転攪拌による介在物間の合体、凝集による粗大化⁹⁾、(3)回転流によって生じる二次流れによって重力方向の流動が変化し、滞留時間分布関数が改善する⁹⁾ことにより、溶鋼の清浄化を大きく促進する。

平成7年11月1日受付 平成8年3月4日受理 (Received on Nov. 1, 1995; Accepted on Mar. 4, 1996)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

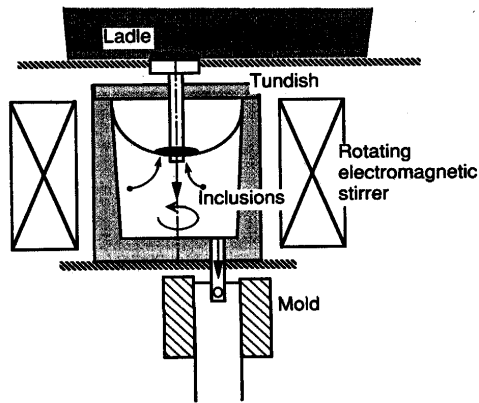


Fig. 1. Concept of the Centrifugal Flow Tundish.

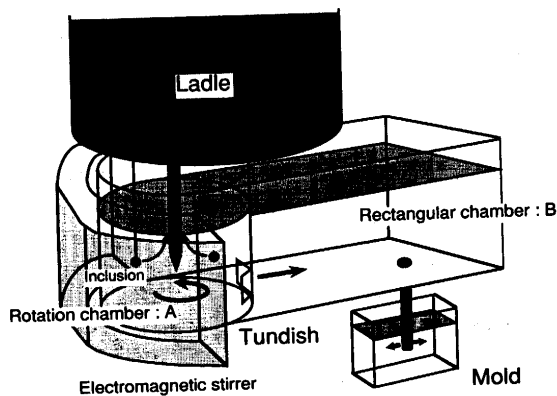


Fig. 2. Equipment of the Centrifugal Flow Tundish in Continuous Casting.

3. 遠心分離タンディッシュの実機実験

3.1 実験設備および実験条件

本プロセスの効果を確認すべく、千葉第1連铸機において実験を行なった。連铸を行なう際に、取鍋交換時にタンディッシュ内の溶鋼量が低減するため、溶鋼のバッファをもつ必要があること、また、回転磁界発生装置を小型化するため、Fig. 2に示すように、タンディッシュを、溶鋼を回転させる円筒槽 (Fig. 2中のA) と回転させない分配槽 (Fig. 2中のB) の2槽とし、下端部でこの2槽を連結する構造とした。

実験条件をTable 1にまとめる。Al含有フェライト系ステンレス鋼を用いて、100tonの取鍋3ヒートの連铸により铸造を行なった。溶鋼成分の例をTable 2に示す。

タンディッシュ内溶鋼高さは、定常部においては670mmで一定とし、取鍋交換時には、前鍋終了後に湯面高さは300~500mmまで低下し、次鍋開孔後に、取鍋から3.5~6.5 ton/minの注湯速度で注湯し、定常部レベルに戻す操作を実施した。

3.2 定常部での脱酸挙動

Fig. 3にタンディッシュ分配槽 (Fig. 2中のB) 内の溶鋼

Table 1. Experimental conditions.

Capacity of tundish (ton)	10
Ladle capacity (ton)	100
Feeding rate (ton/min)	1.5
Rotational speed (rpm)	40-50

Table 2. Chemical compositions of molten steel.

C	Si	Mn	Al	Cr
0.05	0.4	0.6	0.02, 0.07	16.3
(wt.%)				

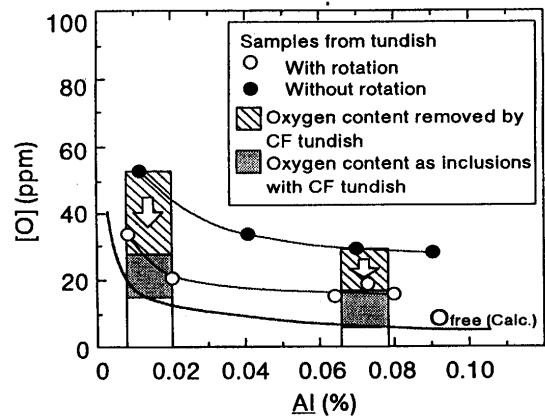


Fig. 3. Comparison of oxygen content between with rotation and without rotation.

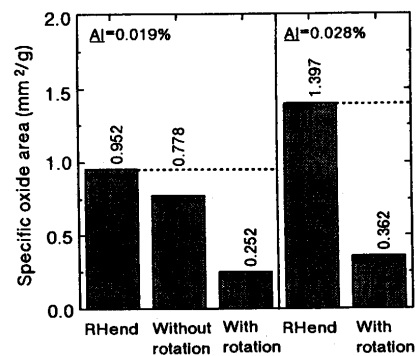


Fig. 4. Comparison of specific oxide area by the EB method.

サンプルの全酸素値 (全酸素値を以下 [Ot] と称す) を回転有無で比較した。図中の O_{free} は、Crの相互作用を考慮したAlとOの平衡から求めた溶存酸素値を示す。[Ot]と溶存酸素値の差分が介在物による酸素値とみなされる。回転流を与えることによって、分配槽内の溶鋼の介在物酸素値が、約半減している。

Fig. 4に、タンディッシュ溶鋼サンプルのEB法による介在物の面積率を示す。溶鋼回転を行なわない場合には、タンディッシュ内の介在物は取鍋内と比べて殆ど低減していないが、回転時には、取鍋内の介在物の約26%まで低減さ

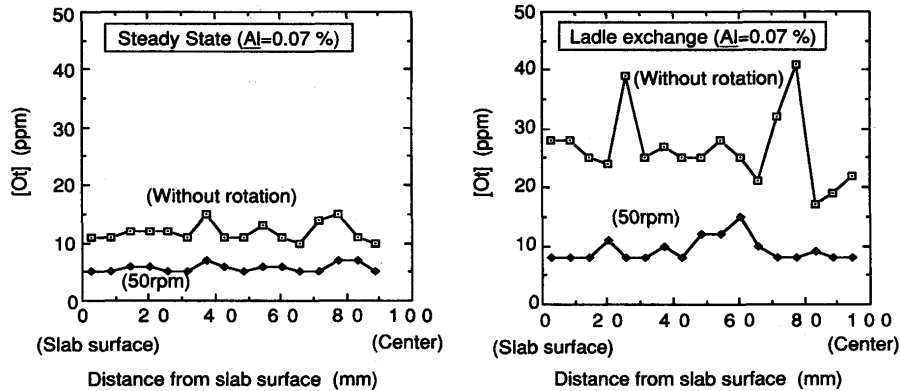


Fig. 5. Comparison of total oxygen contents of cast slabs between with rotation and without rotation.

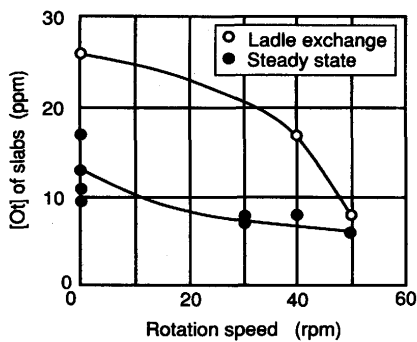


Fig. 6. Total oxygen content of slabs by using of CF tundish and conventional tundish.

れており、遠心分離タンディッシュの大きな介在物分離効果が確認された。

3.3 取鍋交換部での脱酸挙動

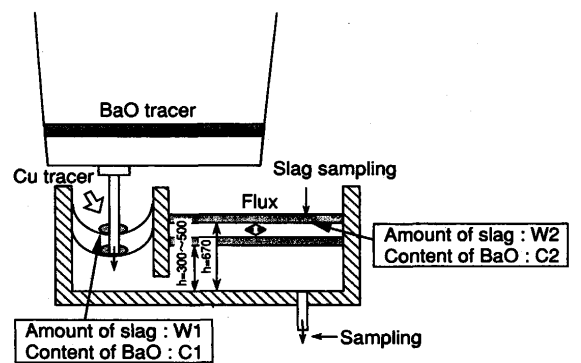
取鍋交換部の低酸素化の効果を鋳片の酸素値で評価した。Fig. 5 に、取鍋注入の安定時（取鍋の溶鋼量の約1/2を注入した時点、以降定常部と称す）および取鍋交換部（前鍋終了時から次鍋開孔後まで）におけるスラブ厚み方向の [Ot] 分布を示す。5.24rad/s (50rpm) の溶鋼回転によって [Ot] は回転していないときの約1/2に低減している。また、取鍋交換部についても、[Ot] は1/2以下に低減され、回転しないときの定常部レベルまで改善される。

Fig. 6 に、定常部および取鍋交換部におけるスラブ表層下30mmまでの [Ot] を比較した。回転数の増加とともに [Ot] は低減し、5.24rad/s (50rpm) では取鍋交換部の酸素値は、回転していないときの定常部を上回るレベルに達し、取鍋交換部でも大きな低酸素化の効果が得られている。

このような取鍋交換部での大きな脱酸能力の機構を明らかにするため、取鍋交換部におけるスラグ分離効果を検討した。

3.4 取鍋スラグの浮上分離挙動

遠心分離タンディッシュの流入スラグの分離能を評価するため、Fig. 7 に示すように、取鍋スラグにトレーサーとして、転炉出鋼時に取鍋スラグ量の約5%相当のBaOを投入し、円筒槽および分配槽のスラグ量とBaO濃度から、円筒



$$\text{Slag flowed out from rotation chamber to rectangular vessel} : \frac{W2 C2}{W1 C1}$$

Fig. 7. Method of Cu and BaO tracer experiments.

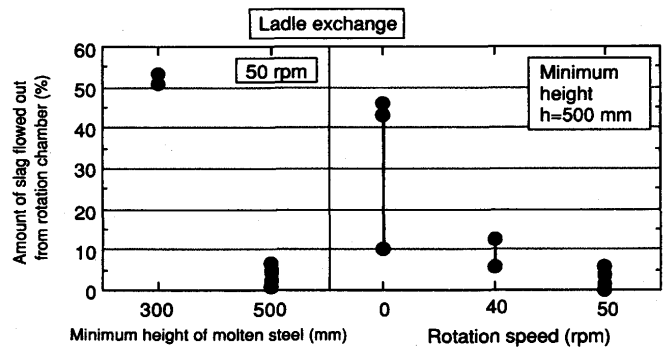


Fig. 8. Measurement of amount of slag flowed out from rotation chamber.

槽から分配槽へ流出したスラグ割合を算出した。Fig. 8 に結果をまとめる。定常部では湯面レベルは670mmであるが、取鍋交換時の残鋼の湯面レベルが500mm以上でスラグ分離が大幅に改善され、また、500mm以上の湯面レベルでは、溶鋼の回転数が大きいときに、スラグ分離能力が向上した。

4. 解析および考察

4.1 遠心分離タンディッシュの脱酸能力

脱酸が一次反応で起こるとき、溶鋼中の酸素値 [O] は、

Table 3. Calculated deoxidation rate constant.

Al=0.02%	Total oxygen content in ladle (ppm)	Total oxygen content in tundish (ppm)	k [whole tundish] (min ⁻¹)	k1 [Rotation chamber] (min ⁻¹)	k2 [Rectangular chamber] (min ⁻¹)
Without rotation	68	53	0.02	0.02	0.02
With rotation	68	28	0.25	0.74	0.02
(O _{free} =15 ppm)					
Al=0.07%	Total oxygen content in ladle (ppm)	Total oxygen content in tundish (ppm)	k [whole tundish] (min ⁻¹)	k1 [Rotation chamber] (min ⁻¹)	k2 [Rectangular chamber] (min ⁻¹)
Without rotation	31	28	0.02	0.02	0.02
With rotation	68	16	0.17	0.51	0.02
(O _{free} =6 ppm)					

(1)式で示される。

$$\frac{d[O]}{dt} = k([O] - [O]_{\infty}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、k：脱酸速度定数、[O]_∞：到達酸素値。
 [O]_∞は、酸素値が攪拌時間に依らず一定となるときの酸素値で、介在物の分離と溶鋼汚染による介在物生成がバランスするときの酸素値と考えられる。
 流通系容器では、完全混合槽列モデルを用いて、定常状態では、[O]は(2)式で表される^(付録)。

$$\frac{[O_{out}] - [O]_{\infty}}{[O_{in}] - [O]_{\infty}} = \frac{n^n}{\bar{\tau}^n \left(k + \frac{n}{\bar{\tau}}\right)^n} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\bar{\tau}$ ：平均滞留時間、n：完全混合槽列数、[O_{out}]：流出溶鋼の酸素値、[O_{in}]：流入溶鋼の酸素値。
 遠心分離タンディッシュでは、円筒槽と分配槽での脱酸速度定数を分離するために、完全混合槽列モデルの直列モデルを考えて¹³⁾、

$$\frac{[O_{out}] - [O]_{\infty}}{[O_{in}] - [O]_{\infty}} = \frac{a^a}{\bar{\tau}^a \left(k + \frac{a}{\bar{\tau}}\right)^a} = \frac{b^b}{\bar{\tau}_1^b \left(k_1 + \frac{b}{\bar{\tau}_1}\right)^b} \times \frac{c^c}{\bar{\tau}_2^c \left(k_2 + \frac{c}{\bar{\tau}_2}\right)^c} \dots (3)$$

ここで、k、k₁、k₂：タンディッシュ全体、円筒槽、あるいは分配槽の脱酸速度定数、 $\bar{\tau}$ 、 $\bar{\tau}_1$ 、 $\bar{\tau}_2$ ：タンディッシュ全体、円筒槽、あるいは分配槽の平均滞留時間、a、b、c：タンディッシュ全体、円筒槽、あるいは分配槽の完全混合槽列数。

また、後述の回転有りでのタンディッシュ全体での溶鋼混合特性の調査結果(Fig.12)から、円筒槽あるいは、分配槽の完全混合槽列数b、cをそれぞれ2および1と仮定する。さらに、流通系容器では到達酸素値[O]_∞は実測されないのので、[O]_∞を溶存酸素値O_{free}に一致すると仮定し、脱酸速度定数を評価した。

Table 3に結果をまとめた。低Al材では、タンディッシュ全体の脱酸速度定数kは0.25min⁻¹、高Al材では、0.17

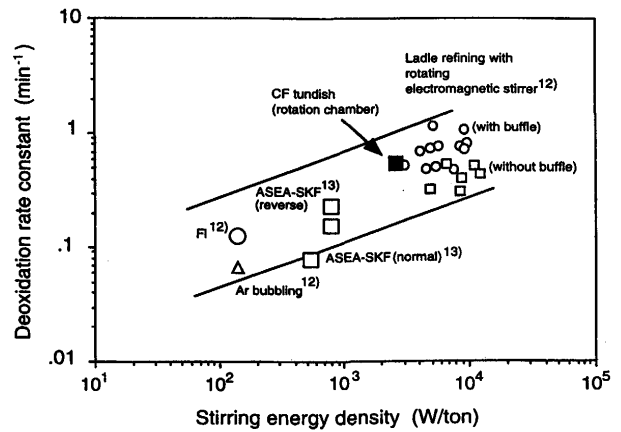


Fig. 9. Comparison of deoxidation rate constants in various processes.

min⁻¹程度と見積もられる。分配槽の脱酸速度定数k₂を溶鋼を回転していないときのタンディッシュ全体の脱酸速度定数0.02min⁻¹と同等と仮定すると、円筒槽における脱酸速度定数k₁は0.51-0.74min⁻¹と非常に大きなものとなる。

次に、遠心分離タンディッシュにおける脱酸能力を他の二次精錬プロセスと比較評価した。

最初に、攪拌動力密度を見積もる。回転攪拌における攪拌動力密度 ϵ は、(4)式で表される¹¹⁾。

$$\epsilon = 2\pi NT/W \dots\dots\dots (4)$$

ここで、N：回転数、T：トルク、W：溶鋼重量。

いま、溶鋼回転数が5.24rad/s (50rpm) のときの電力から、電磁場解析により回転磁界による体積力を計算しトルクに換算すると、24kgmとなり、この時の ϵ は(10)式から2.5kW/tonと見積もられた。

Fig. 9に、遠心分離タンディッシュの円筒槽部、Arガスバブリング¹²⁾、ASEA-SKF¹²⁾、FI(フラックスインジェクション)¹³⁾および回転磁界取鋼精錬炉¹⁴⁾における攪拌動力密度と脱酸速度定数の関係を示した。攪拌動力密度の増加とともに脱酸速度定数が増加するが、本プロセスの攪拌動力密度および脱酸速度定数は、他の二次精錬プロセスと比較しても大きく、タンディッシュでの脱酸、介在物の分離プロセスとしては、非常に大きな脱酸速度が得られる。

4・2 遠心分離タンディッシュの溶鋼混合特性

取鍋スラグの分離能力を考察するために、タンディッシュ内の溶鋼の滞留時間分布を調査した。

円筒回転槽のロングノズル近傍に粒状のCuを投入し、タンディッシュからの流出流を連続的にサンプリングした(Fig. 7)。

流出流のCu濃度の推移の一例をFig.10に示す。タンディッシュの溶鋼高さは、定常部においては670mm一定とし、取鍋交換時での最低溶鋼高さを350~500mm、次鍋開孔後の取鍋からの注入速度を3.5~6.5ton/minの範囲で、取鍋交換時の作業条件を変化させて同様の実験を行ない、滞留時間分布を完全混合槽列モデル¹⁰⁾を用いて定量化した。完全混合槽列数が多い程プラグフローに近づき、完全混合槽列数が少ない程、短絡流の発生頻度が大きい。本モデルでは、容器内に時間 τ だけ滞留後、流出する溶鋼素片の割合 $E(\tau/\bar{\tau})$ は、完全混合槽列数 n を用いて、(5)式のように表される。

$$E(\tau/\bar{\tau}) = \frac{n^{n+1}(\tau/\bar{\tau})^{n-1} \exp(-n\tau/\bar{\tau})}{\Gamma(n)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 n ：完全混合槽列数、 $\bar{\tau}$ ：平均滞留時間、 τ ：溶鋼流出時間、 $E(\tau/\bar{\tau})$ ：時間 τ で流出する溶鋼素片の割合、 Γ ：

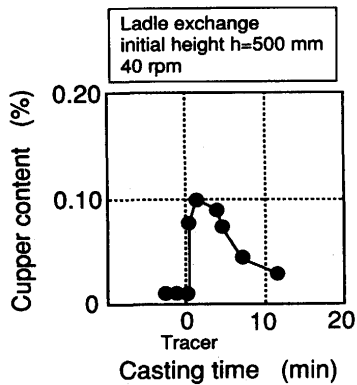


Fig. 10. Change of Cu content of samples from outflow.

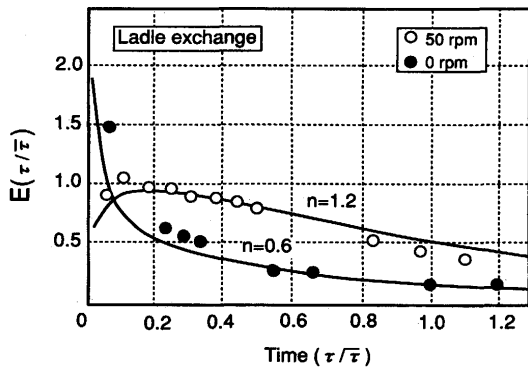


Fig. 11. Comparison between calculated and measured results of normalized Cu content during ladle exchange.

ガンマ関数。

いま、(5)式から算出される滞留時間分布関数を基に、サンプル中のCu濃度を規格化し、滞留時間分布関数と共にFig.11に示す。溶鋼を回転した場合には、短絡流が抑制され、完全混合槽列数が多くなっている。Fig.12に回転の有無での槽列数を W (タンディッシュ円筒槽の残鋼量)/ Q (取鍋からの注入速度)：(min)で整理して比較した。 W/Q は、定常部では平均滞留時間に相当し、また、取鍋交換部では、取鍋からの注入速度が一定のときには、タンディッシュの残鋼量に比例する。完全混合槽列数は W/Q でほぼ整理され、 W/Q が増加すると槽列数は増加する。

Fig.12から、槽列数は、定常部で溶鋼回転時に2.0~2.4、溶鋼を回転しないときに1.0程度となる。また、取鍋交換部でも、 W/Q が30sec以上で、回転時に1.2、回転なし時に0.6と槽列数が増加しており、定常部、取鍋交換部とも、回転磁界を印加することによって、滞留時間分布関数が改善さ

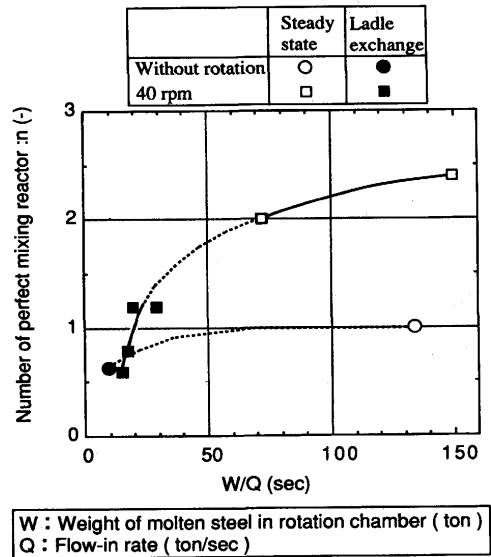


Fig. 12. Relationship between W/Q and number of perfect mixing reactor.

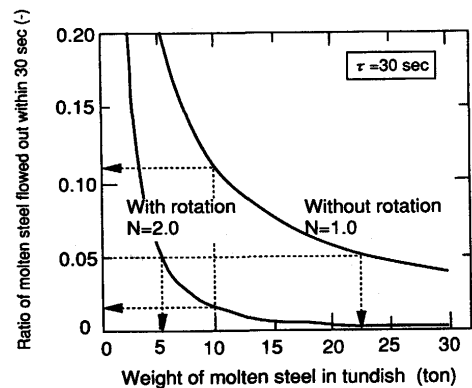


Fig. 13. Calculated results of ratio of molten steel flowed out within 30 sec.

れている。

このような溶鋼流動の改善効果を、短絡流の発生頻度の観点から評価する。完全混合槽列モデルにおける時間 τ で流出する溶鋼の比率 $E(\tau/\bar{\tau})$ は(5)式で求められ、また、時間 t までに流出する溶鋼比率を $Y(t)$ とすると、 $E(\tau/\bar{\tau})$ を用いて、(6)式のように示される。

$$Y(t) = \int_0^t E(\tau/\bar{\tau}) d\tau \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5)、(6)式より、任意の時間 t までに流出する溶鋼比率が計算される。いま、短絡流の発生頻度を比較するため、例えば、30secまでに流出する溶鋼比率を、タンディッシュの容量と完全混合槽列数を変化させて計算した。Fig.13に示すように、タンディッシュ容量と完全混合槽列数が大きくなると、30sec以内で流出する溶鋼比率は低減するが、5ton容量のような小型のタンディッシュであっても、完全混合槽列数を1.0から2.0まで改善することによって、22ton容量での完全混合槽列数1.0のタンディッシュと同等の短絡流の抑制効果がある。また、10ton容量のタンディッシュでは、完全混合槽列数が1.0では30secまでに流出する溶鋼比率は0.12、完全混合槽列数が2.0では0.05となり、滞留時間分布関数の改善により、短絡流の発生が大きく抑制される。

5. 結言

新しい介在物分離技術を開発するため、遠心分離タンディッシュの生産ラインにおける効果確認実験を行ない、以下の知見を得た。

(1)遠心分離タンディッシュの脱酸能力は、脱酸速度定数で、タンディッシュ全体で $0.17\text{--}0.25\text{min}^{-1}$ 、回転槽のみでは、 $0.51\text{min}^{-1}\text{--}0.74\text{min}^{-1}$ に達する。本プロセスは他の二次精錬プロセスと比しても有利であり、タンディッシュでの脱酸、介在物の分離プロセスとしては、非常に大きな脱酸速度を得ることができる。

(2)遠心分離タンディッシュでは、攪拌による介在物の凝集、粗大化と求心力による介在物の分離に加えて、溶鋼

回転による滞留時間分布の改善効果があり、この結果、取鍋交換部で溶鋼汚染の起源となる流入取鍋スラグの分離を大幅に促進する。

(3)以上の実験結果から、本プロセスをAl含有ステンレス鋼に適用し、高品質のステンレス鋼板の製造が可能となった。

付録. 流通系における脱酸速度定数

脱酸を1次反応と仮定すると、滞留時間分布関数 $E(\tau)$ から、(A1)式で出口における酸素濃度 $[O_{out}]$ が求まる。

$$[O_{out}] = \int_0^{\infty} [O(\tau)] E(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (A1)$$

ここで、 $[O(\tau)]$ は回分系における時間 τ の酸素濃度で、

$$[O(\tau)] = [O_{in}] e^{-k\tau} \quad \dots\dots\dots (A2)$$

(A1)式に(A2)式と(5)式を代入して、(2)式を得る。

文 献

- 1) 大熊賢一, 齊藤 忠, 江波戸紘一, 松尾勝良, 大手 彰, 藤本英明: 材料とプロセス, 3 (1990), 198.
- 2) 垣生泰弘, 北岡英就, 吉井 裕, 江見俊彦, 飯田義治, 上田典弘: 鉄と鋼, 62 (1976)14, 1803.
- 3) 朱宮 徹, 白石愛明, 岩田勝吉, 友野 宏, 永幡 勉, 森 明義: 材料とプロセス, 2 (1989), 1216.
- 4) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, 73 (1987) 7, 860.
- 5) 木村秀明, 森 正晃, 後藤 修, 白井登喜也, 田中宏幸: 材料とプロセス, 4 (1991), 1198.
- 6) 田中宏幸, 西原良治, 北川逸朗, 辻野良二: 鉄と鋼, 79 (1993), 1254.
- 7) 三木祐司, 北岡英就, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, 78 (1992), 431.
- 8) Y.Miki, H.Kitaoka, T.Fujii, S.Saito and K. Komamura: Proceedings of Electromagnetic Processing of Metals ISIJ, Nagoya, (1994), 217.
- 9) Y.Miki, T.Fujii, H.Kitaoka and T.Sakuraya: 2nd Canada-Japan Symp. on Modern Steelmaking and Casting Techniques, CIM, Toronto, (1994), 155.
- 10) 例えば, 化学工学便覧, 化学工学協会編, 丸善, (1988), 988.
- 11) K.Higashitani, K.Yamauchi, Y.Matsuno and G.Hosokawa: J. of Chem. Eng. of Japan, 16 (1983)4, 299.
- 12) T.Sakuraya, N.Sumita, T.Fujii and Y.Fukui: Proceedings of 6th Int. Iron & Steel Congress, ISIJ, Nagoya, (1990), 576.
- 13) K.Nakanishi and Szekely: Trans. ISIJ, 15 (1975), 522.