
遠心分離タンディッシュによる溶鋼中介在物の分離

Inclusion Separation from Molten Steel in Tundish with Rotating Electromagnetic Field

三木 祐二(Yuji Miki) 小倉 滋(Shigeru Ogura) 藤井 徹也(Tetsuya Fujii)

要旨：

タンディッシュ内容鋼を電磁力により水平方向に回転させ、遠心力により溶鋼中の非金属介在物の凝集および浮上分離を促進する遠心分離タンディッシュ(CF タンディッシュ)を開発した、千葉製鉄所第1連铸機での工程実験により、CF タンディッシュの脱酸速度定数は $0.17 \sim 0.25 \text{min}^{-1}$ と非常に大きいことがわかった。この効果は、溶鋼の回転流により生ずる遠心力乱流エネルギーにより、介在物の分離が促進されるためと考えられる。さらに、溶鋼の帯留時間分布が改善され、取鍋交換部の鍋スラグの除去が促進されることも確認された。本プロセスは、A1含有ステンレス鋼の工程生産に適用され、高品質ステンレス鋼板の製造に寄与している。

Synopsis：

For promoting inclusion separation from the molten steel in the tundish, the authors have developed a new process which utilizes electromagnetic force to rotate molten steel in a centrifugal flow tundish (CF tundish), where a centrifugal force caused by the rotational flow promotes separation of inclusions. Industrial plant tests carried out at Chiba Works showed that the CF tundish has an excellent deoxidation performance estimated at $0.17 \sim 0.25 \text{min}^{-1}$ as deoxidation rate constant. Centripetal force and large turbulence energy caused by rotational flow accelerate inclusion separation. Furthermore, residence time distribution of molten steel in a tundish has been improved and it promotes slag removal during ladle exchange. This process is successful in commercial production of stainless steel slabs of high quality.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Inclusion Separation from Molten Steel in Tundish with Rotating Electromagnetic Field

三木 祐司
Yuji Miki

技術研究所 鉄鋼プロセス研究部製鋼研究室 主任研究員(掛長)

小倉 滋
Shigeru Ogura

千葉製鉄所 製鋼部製鋼技術室 主査(課長)

藤井 徹也
Tetsuya Fujii

技術研究所 研究企画部長・工博

要旨

タンディッシュ内溶鋼を電磁力により水平方向に回転させ、遠心力により溶鋼中の非金属介在物の凝集および浮上分離を促進する遠心分離タンディッシュ(CFタンディッシュ)を開発した。千葉製鉄所第1連铸機での工程実験により、CFタンディッシュの脱酸速度定数は $0.17\sim 0.25\text{ min}^{-1}$ と非常に大きいことがわかった。この効果は、溶鋼の回転流により生ずる遠心力と乱流エネルギーにより、介在物の分離が促進されるためと考えられる。さらに、溶鋼の滞留時間分布が改善され、取鍋交換部の鍋スラグの除去が促進されることも確認された。本プロセスは、Al含有ステンレス鋼の工程生産に適用され、高品質ステンレス鋼板の製造に寄与している。

Synopsis:

For promoting inclusion separation from the molten steel in the tundish, the authors have developed a new process which utilizes electromagnetic force to rotate molten steel in a centrifugal flow tundish (CF tundish), where a centrifugal force caused by the rotational flow promotes separation of inclusions. Industrial plant tests carried out at Chiba Works showed that the CF tundish has an excellent deoxidation performance estimated at $0.17\sim 0.25\text{ min}^{-1}$ as deoxidation rate constant. Centripetal force and large turbulence energy caused by rotational flow accelerate inclusion separation. Furthermore, residence time distribution of molten steel in a tundish has been improved and it promotes slag removal during ladle exchange. This process is successful in commercial production of stainless steel slabs of high quality.

1 緒 言

製鋼プロセスにおいて、高生産性と高品質を両立させるために、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、タンディッシュで非金属介在物やスラグの分離を積極的に行い、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)タンディッシュ内溶鋼流動の改善のための堰形状の改善²⁾、(3)タンディッシュ内溶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⁾等が提案・実行されてきた。また、取鍋交換部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の採用⁵⁾や、溶鋼汚染対策⁶⁾として、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、さら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、連続铸造工程においては、取鍋交換部などの非定常部の铸片の品質向上が、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、回転系のモデル実験⁷⁾および500 kg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^{8,9)}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連铸機を用いて、スラブ生産ライン実験を行い、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調査した。

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鋳型へ供給できる。

本プロセスでは、(1)求心力による介在物の分離に加えて、(2)回転攪拌によって介在物間の合体、凝集が促進され介在物が粗大化される⁷⁾、(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、溶鋼の滞留時間分布が改善される¹⁰⁾ことによって、溶鋼の清浄化を大きく促進する。

* 平成8年1月5日原稿受付

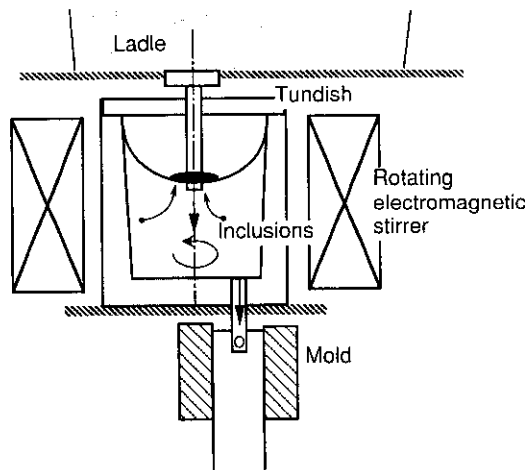


Fig. 1 Concept of the centrifugal flow tundish

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、千葉製鉄所第1連铸機において実験を行った。連々铸を行う際に、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、回転磁界発生装置の小型化の必要性から、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、100tの取鍋3ヒートの連々铸を行った。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、取鍋交換部では、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 t/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) 内の溶鋼サンプルの全酸素値 ($[O_t]$) 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溶鋼中AlとOの濃度平衡から求めた溶存酸素

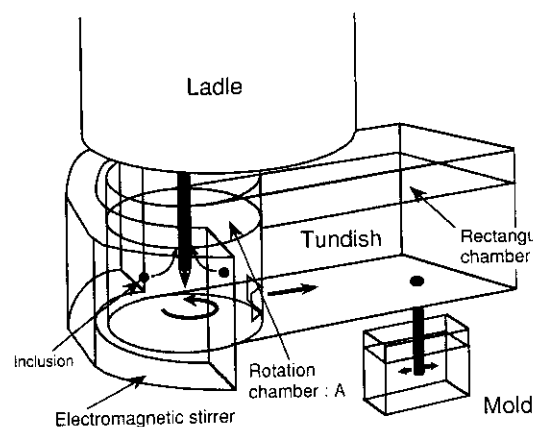


Fig. 2 Equipment of the centrifugal flow tundish in continuous casting

Table 1 Experimental conditions (No.1 CC at Chiba Works)

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

Table 2 Compositions of molten steel

	(wt%)				
Steel	C	Si	Mn	Al	Cr
Low Al	0.05	0.4	0.6	0.02	16.3
High Al	0.05	0.4	0.6	0.07	16.3

値を示す。 $[O_t]$ と溶存酸素値の差が不純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、分配槽の溶鋼の不純物酸素値が、約半減している。

Fig. 4に、タンディッシュ溶鋼サンプルのエレクトロンビーム (EB) 法による不純物の面積率を示す。溶鋼回転を行わない場合には、タンディッシュ内の不純物は取鍋内と比べてほとんど低減していない

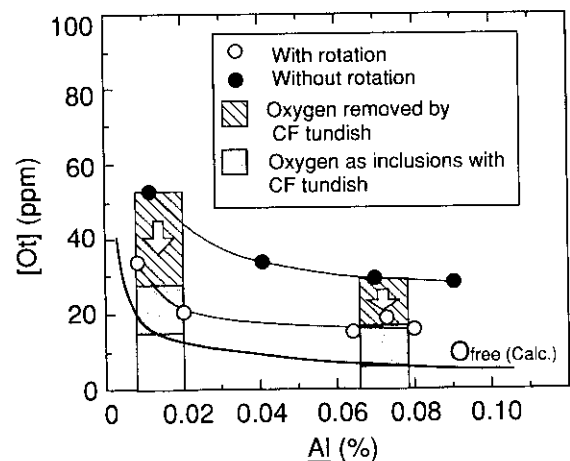


Fig. 3 Comparison of oxygen content of samples from tundish between with rotation and without rotation

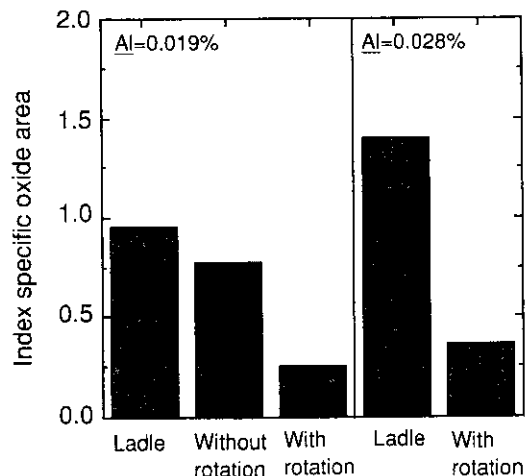


Fig. 4 Comparison of specific oxide area measured by EB method

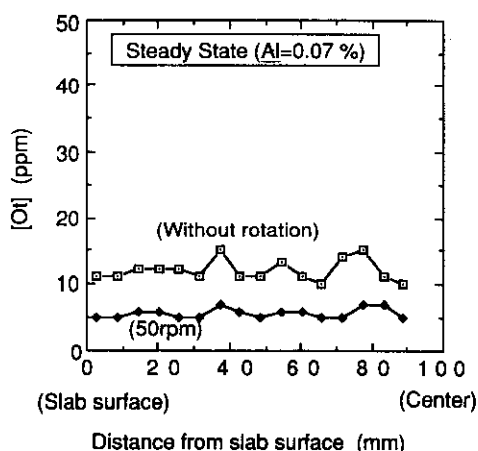


Fig. 5 Comparison of total oxygen contents of cast slabs between with rotation and without rotation

いが、回転時には、取鍋内の介在物の約26%まで低減されており、遠心分離タンディッシュの介在物分離効果が大きいことが確認された。

3.3 取鍋交換部での脱酸挙動

遠心分離タンディッシュ導入による取鍋交換部の介在物低減の効果を銹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 $[O]$ 分布を示す。50 rpmの溶鋼回転によって、 $[O]$ 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、 $[O]$ 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30 mmまでの $[O]$ を比較した。回転数の増加とともに $[O]$ は低減し、50 rpm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並のレベルに達し、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、

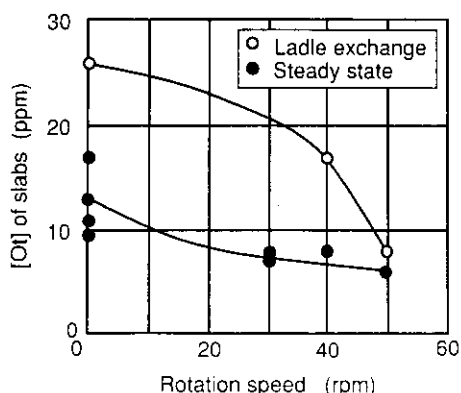


Fig. 6 Total oxygen content of slabs by CF tundish and conventional tundish during ladle exchange and steady state

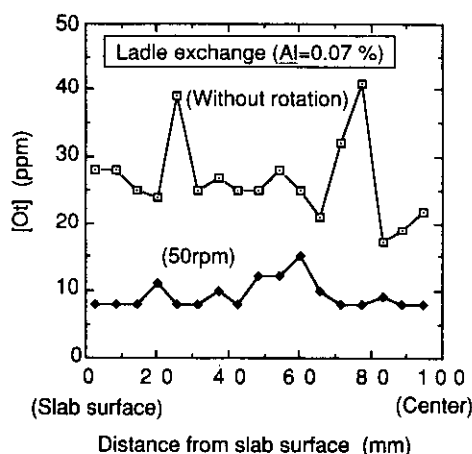


Fig. 7に示すように、取鍋スラグにトレーサーとして、転炉出鋼時に取鍋スラグ量の約5%相当のBaOを投入し、円筒槽および分配槽のスラグ量とBaO濃度から、円筒槽から分配槽へ流出したスラグ割合を算出した。Fig. 8に結果をまとめる。定常部では湯面レベルは670 mmであるが、取鍋交換部の残鋼の湯面レベルが500 mm以上でスラグ分離が大幅に改善され、また、500 mm以上の湯面レベルでは、溶鋼の回転数が高いときに、スラグ分離能力が向上した。

3.5 解析および考察

3.5.1 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、(1)式で示される。

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

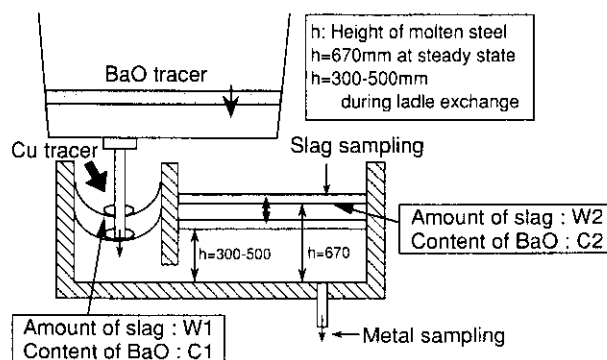
k : 脱酸速度定数

$[O]_{\infty}$: 到達酸素値

$[O]_{\infty}$ は、酸素値が攪拌時間に依らず一定となるとき酸素値で、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、完全混合槽を仮定すると、定常状態では¹⁰⁾

$$[O]_{out} - [O]_{\infty} = \frac{[O]_{in} - [O]_{\infty}}{1 + k \bar{\tau}} \quad (2)$$



$$\text{Ratio of slag flowed out from rotation chamber to rectangular chamber} = \frac{W2 \cdot C2}{W1 \cdot C1}$$

Fig. 7 Method of Cu and BaO tracer experiments

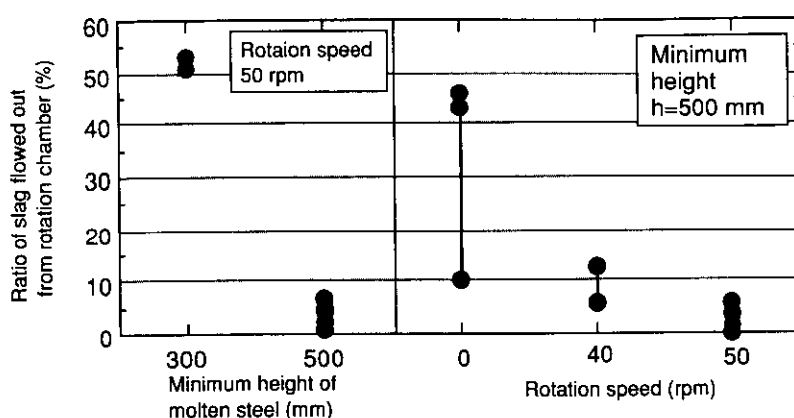


Fig. 8 Measurement of ratio of slag flowed out from rotation chamber during ladle exchange

$\bar{\tau}$: 平均滞留時間

$[O_{out}]$: 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素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、脱酸素速度式は(3)式で与えられる。

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

k, k_1, k_2 : タンディッシュ全体、円筒槽、あるいは分配槽の脱酸素速度定数

$\bar{\tau}, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$: 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

流通系容器では、到達酸素値 $[O]_{\infty}$ は実測されないで、 $[O]_{\infty}$ を溶存酸素値 O_{free} に一致すると仮定し、脱酸素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素速度定数 k は 0.25 min^{-1} 、高 Al 材では、 0.17 min^{-1} 程度と見積もられる。分配槽の脱酸素速度定数 k_2 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素速度定数 0.02 min^{-1} と同等と仮定すると、円筒槽における脱酸素速度定数 k_1 は $0.51 \sim 0.74 \text{ min}^{-1}$ 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素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 $\dot{\epsilon}$ は、(4)式で表される¹¹⁾。

$$\dot{\epsilon} = 2 \pi N T / W \quad (4)$$

N : 回転数

T : トルク

W : 溶鋼重量

いま、溶鋼回転数が 50 rpm 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、 $24 \text{ kg} \cdot \text{m}$ となり、この時の $\dot{\epsilon}$ は(4)式から 2.5 kW/t と見積もられる。

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-SKF¹³⁾、FI (フラックスインジェクション)¹²⁾ および回転磁界取鋼精錬¹¹²⁾ における攪拌動力密度と脱酸素速度定数の関係を

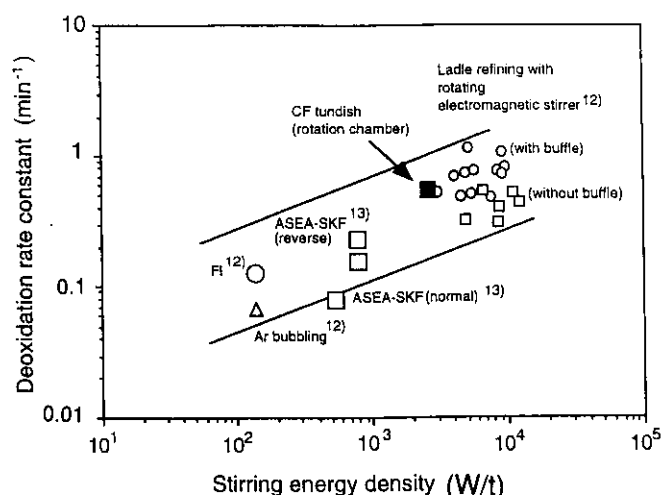


Fig. 9 Comparison of deoxidation rate constants in various processes

Table 3 Deoxidation rate constants

Al content (%)		Total oxygen content (ppm)			Deoxidation rate constants (min^{-1})		
		in ladle	in tundish	free O in tundish	k (whole tundish)	k_1 (rotation chamber)	k_2 (rectangular chamber)
0.02	without rotation	68	53	15	0.02	0.02	0.02
	with rotation	68	28		0.25	0.74	0.02
0.07	without rotation	31	28	6	0.02	0.02	0.02
	with rotation	68	16		0.17	0.51	0.02

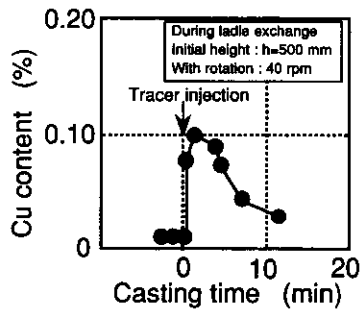


Fig. 10 Change of Cu content of outflow samples from tundish

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、中介物の分離プロセスとしては、大きな脱酸速度が得られている。

3.5.2 遠心分離タンディッシュの溶鋼混合特性

タンディッシュ内に流入した取鍋スラグの溶鋼からの浮上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、定常部は670 mm一定とし、取鍋交換部での最低溶鋼高さを350~500 mm、次鍋開孔後の取鍋からの注入速度を3.5~6.5 t/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高い。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。

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

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 : ガンマ関数

いま、適当な n を与えて(5)式から算出される滞留時間分布関数

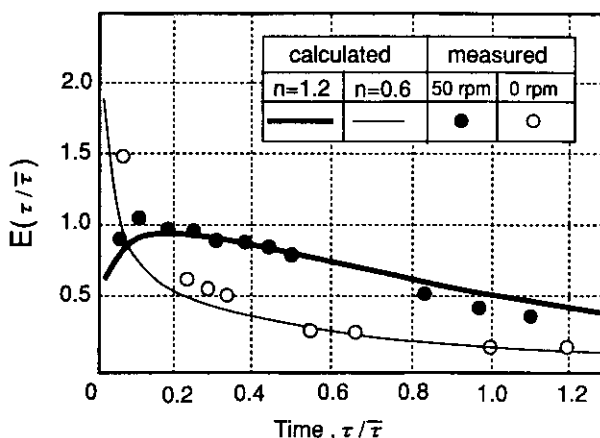


Fig. 11 Comparison between calculated and measured $E(\tau/\bar{\tau})$ during ladle exchange

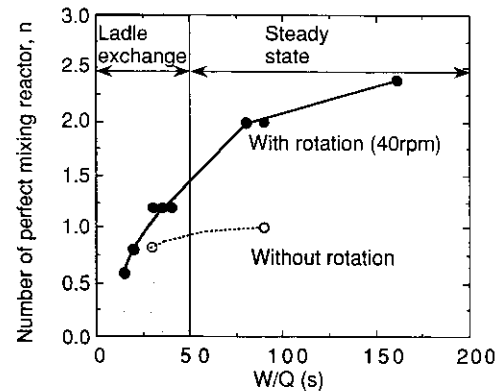


Fig. 12 Relation between W/Q and number of perfect mixing reactor

と、サンプル中のCu濃度を規格化して求めた実験値からの滞留時間分布関数を Fig. 11 に示す。 n は溶鋼を回転した場合は1.2の時の計算値に適合し、回転しない場合は0.6に近い。従って、溶鋼に回転を与えると短絡流が抑制され、完全混合槽列数が多くなっている。Fig. 12に回転流の有無での槽列数を、タンディッシュ円筒槽の残鋼量 W (t)と取鍋からの注入速度 Q (t/s)の比 W/Q (s)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 では整理され、 W/Q が増加すると槽列数は増加する。

Fig. 12から、槽列数は、溶鋼を回転した場合、定常部で2.0~2.4、溶鋼を回転しない場合に1.0程度となる。また、取鍋交換部でも、 W/Q が30 s以上で、回転時に1.2、回転なし時に0.6と槽列数が大幅に改善されており、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完全混合槽列数が増加し、滞留時間分布関数が改善される。

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いて、時間 t までに流出する溶鋼比率 $Y(t)$ は、(6)式のように示される。

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

(5)および(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、30 s間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

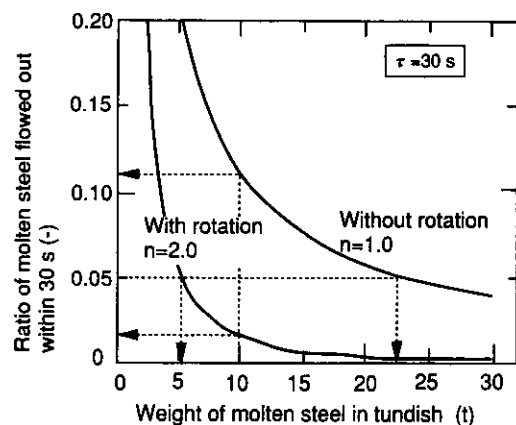


Fig. 13 Calculated results of ratio of molten steel flowed out within 30 s

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、30 s 以内に流出する溶鋼比率は低減するが、5 t 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、22 t 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、10 t 容量のタンディッシュでは、完全混合槽列数が 1.0 では 30 s 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。

4 千葉 4 連鋳機における工程化

4.1 設備概要

以上のような千葉製鉄所第 1 連鋳機実験での知見を基に、新たに建設された第 4 連鋳機のステンレス鋼に本プロセスを適用した。タンディッシュの主仕様を Table 4 に示す。スループット量の増加に対して、第 1 連鋳機の実験時と平均滞留時間を等しく、また、Fig. 8 の知見より、取鍋交換の湯面低下時のタンディッシュ内溶鋼高さを 500 mm 以上確保するようにして、タンディッシュ容量を 30 t にスケールアップした。

4.2 遠心分離タンディッシュの効果

Fig. 14 に、タンディッシュ内溶鋼中の介在物量をエレクトロニウム法で評価した。本プロセス適用により、鋼中の介在物量が約半減している。

Fig. 15 に、熱延コイル、冷延コイルの欠陥発生率指数を比較した。欠陥発生率指数が約 60% に低減され、遠心分離タンディッシュによる鋼板の品質向上効果が明らかとなった。

以上の知見から、現在、Al 含有ステンレス鋼の全量に、遠心分離タンディッシュを適用し、高生産性で高品質の鋼板の製造に寄与している。

Table 4 Operational conditions of No.4 CC

Capacity of rotation chamber	(t)	7
Capacity of rectangular chamber	(t)	23
Ladle capacity	(t)	160
Feeding rate	(t/min)	2
Rotational speed	(rpm)	40~50

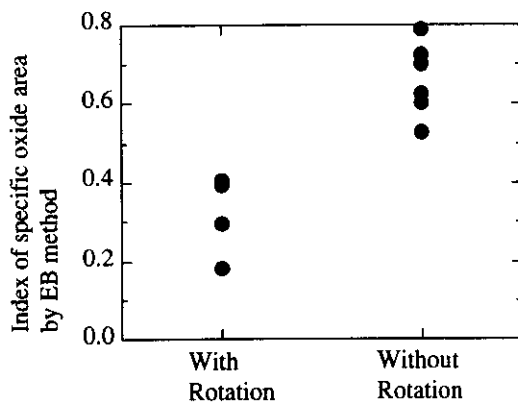


Fig. 14 Comparison of amount of inclusions in molten steel in tundish between with rotation and without rotation (Al killed stainless steel)

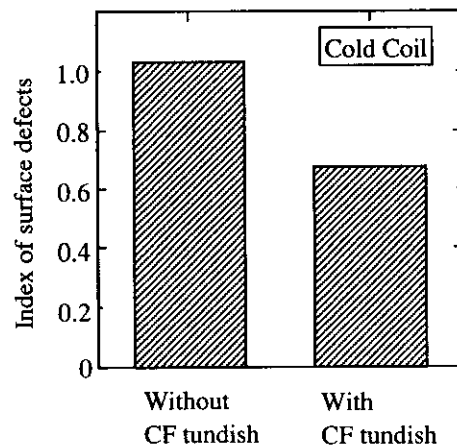
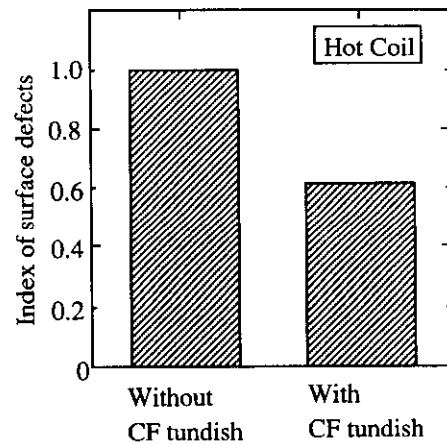


Fig. 15 Effect of the CF tundish on the surface quality in stainless steel coils

5 結 言

遠心分離タンディッシュを用いた新しい介在物分離技術を開発するため、千葉製鉄所第 1 連鋳機を用いて生産ラインにおける効果確認実験を行うとともに第 4 連鋳機による実工程生産への適用を図った。その結果、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 $0.17 \sim 0.25 \text{ min}^{-1}$ 、回転槽のみでは、 $0.51 \sim 0.74 \text{ min}^{-1}$ 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、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、溶鋼の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) 本プロセスを Al 含有ステンレス鋼の工程生産に適用した結果、介在物量は半減し、製品コイルの欠陥発生指数も約 60% に低減し、高品質のステンレス鋼板の製造が可能であることが実証された。

参 考 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)1, 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)4, 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)4, 1198
- 6) 田中宏幸, 西原良治, 北川逸朗, 辻野良二: 鉄と鋼, 79(1993)11, 38
- 7) 三木祐司, 北岡英就, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, 78(1992)3, 431
- 8) Y. Miki, H. Kitaoka, T. Fujii, S. Saito, and K. Komamura: International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, "Development of the Centrifugal Flow Tundish for Separation of Inclusions from Molten Steel in Continuous Casting", ISIJ, Nagoya (Japan), (1994), 217
- 9) 三木祐司, 北岡英就, 藤井徹也, 齊藤滋之, 駒村宏一, 桜井美弦: 材料とプロセス, 7(1994)4, 1200
- 10) 例えば, 化学工学協会編: 「化学工学便覧」, (1988), 988. [丸善]
- 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, "Development of Intensively Stirred Ladle Furnace with Rotating Electro-Magnetic Field", ISIJ, Nagoya (Japan), (1990), 576
- 13) K. Nakanishi and A. G. Szekely: Trans. ISIJ, 15(1975), 522