

討10 タンディッシュ内溶鋼の温度制御と清浄化および成分調整技術

川崎製鉄㈱千葉製鉄所 ○大杉 仁 山中啓充 大西正之 越川隆雄
技術研究本部 馬淵昌樹 理博 野崎 努

1. 緒言

連続 casting におけるタンディッシュの機能として、溶鋼の清浄化促進や溶鋼温度調整は特に重要である。千葉1連铸においてはタンディッシュに溝型誘導炉を設置し、非定常 casting 時の熱補償を行うことにより、ステンレス鋼の铸片歩止、製品合格率の向上に寄与している。本報では、タンディッシュ内溶鋼加熱装置の操業状況と数値解析等による流動解析結果を述べるとともに、タンディッシュにおける成分調整技術の一例について報告する。

2. タンディッシュにおける温度制御と清浄化技術

2.1 タンディッシュ内溶鋼加熱の目的

铸造初期、連々铸の鍋交換時、铸造末期等の非定常 casting 期には、タンディッシュ内溶鋼温度が低下し溶鋼内の介在物の分離浮上を困難にさせる。したがって、タンディッシュ内溶鋼温度を制御して、過熱度を一定に保持することはスラブ品質の向上にとって重要な技術である。

2.2 加熱設備と加熱原理

本加熱装置は、低周波誘導炉による溝型インダクタを用いており、インダクタと電源部および制御部から構成される。インダクタは溶鋼を導入するための溝部と、誘起電流を発生させるための鉄芯とコイルがあり、Fig.1に示すように、タンディッシュの側壁にフランジ合わせで接続している。コイルと上部鉄芯は、铸床で分離脱着できる構造となっている。電源は、出力設定が可変であるインバータ方式を採用しており、本設備専用開発されたコントローラにてピンチ効果抑制制御、自動温度制御等を可能としている。インダクタの電気回路を模式的にFig.2に示す。鉄芯にまかれた1次コイルに交流電源を印加することにより、2次側に相当する溝部内溶鋼中に誘導電流を発生させてジュール熱により、溶鋼を加熱する。

2.3 自動温度制御¹⁾

自動温度制御のフローを模式的にFig.3に示す。定常 casting 期には、消耗型非連続测温とスルーブットから、目標温度に適中させるように出力自動制御を行っている。非定常 casting 期には、ピンチ現象を回避し効果的な熱補償を行うため、溶鋼深さに応じた投入電力のプログラム制御を採用している。プログラム制御と自動制御との切替えは、予め設定した値かあるいはタイマーなどの信号により自動的に行われる。

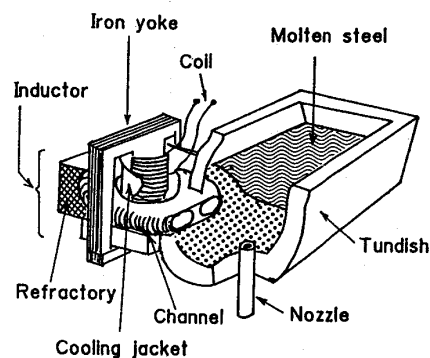


Fig. 1 Principle and construction of induction heater.

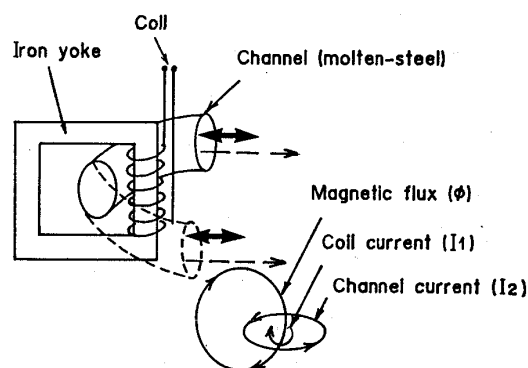


Fig. 2 Electrical construction of induction heater.

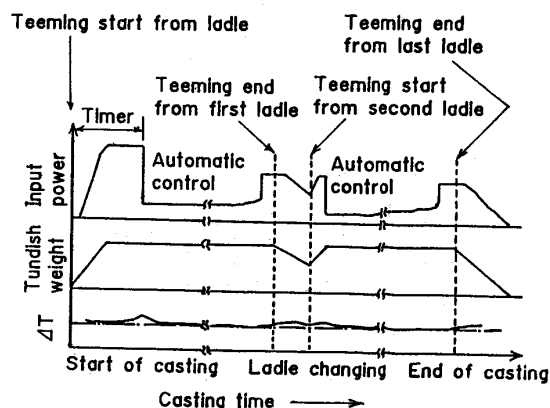


Fig. 3 Temperature control of molten steel in tundish.

2.4 タンディッシュ内溶鋼加熱時の溶鋼流動解析²⁾

タンディッシュ内での介在物の浮上を考察するため、攪拌力とフローパターンについて解析した。

攪拌力の強度を評価する方法として、実機において、取鍋溶鋼落下点にトレーサ元素(Cu)を添加し、鋳型内の浸漬ノズル吐出口間近で30~60秒ごとにサンプリングし、Cuの濃度変化から滞留時間分布を求め攪拌力の強さの指標となるペクレ数(Pe)を計算した。³⁾ Pe数が小さいほど攪拌力は強い。Fig.4に投入電力とPe数の関係を示す。Pe数は、投入電力が大きくなるにしたがって小さくなり攪拌力が増すことが推定される。

$$\left[\begin{array}{l} Pe = u\ell / De \quad u: \text{代表速度} \quad \ell: \text{代表長さ} \\ De: \text{系内流体の乱流拡散係数} \end{array} \right]$$

次にインダクタ開孔部から噴出する熱流のフローパターンを水モデル実験と数値解析シミュレーションによって推定した。水モデルは1/3縮尺とし、フルード数相似とした。観察されたフローパターンをFig.5に示す。加熱を行った場合に相当するFig.5(b)から、溝内部より噴出した熱流は温度差による浮力により湯面に向かって上昇し、一部は浴内に戻る。この上昇流は介在物の浮上速度を助長し分離を促進すると考えられる。

数値解析にてシミュレーションした結果を以下に述べる。計算方法は、溶鋼流を三次元粘性流体として扱い、①Navier-Stokes方程式 ②連続の式 ③熱輸送方程式 ④乱流k-εモデルを基礎式として汎用熱流体解析ソフトウェアを用いて解析した。①式にBousinesque近似を適用し、熱対流を考慮した。Fig.6,7に示したように注入管、堰および加熱装置としてホットプレートモデル化した。Fig.7は、ホットプレートに1000kWの加熱を行って100秒後のフロ

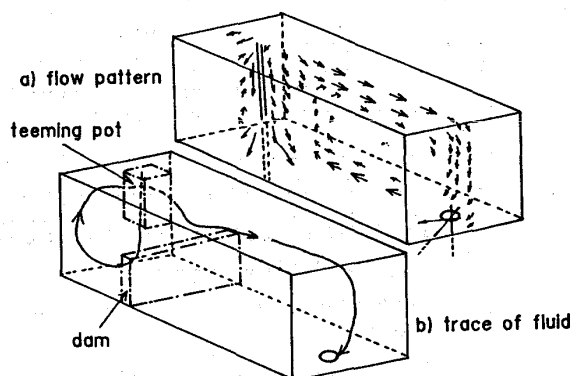


Fig. 6 Flow pattern in tundish without heating.

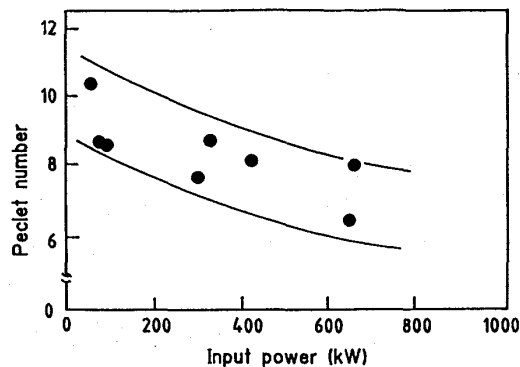


Fig. 4 Effect of input power on peclet number.

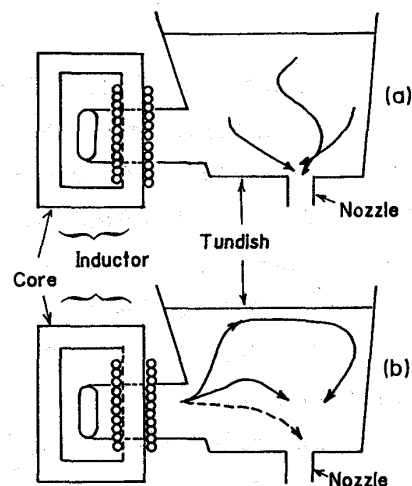


Fig. 5 Water flow model (a) without heating (b) with heating.

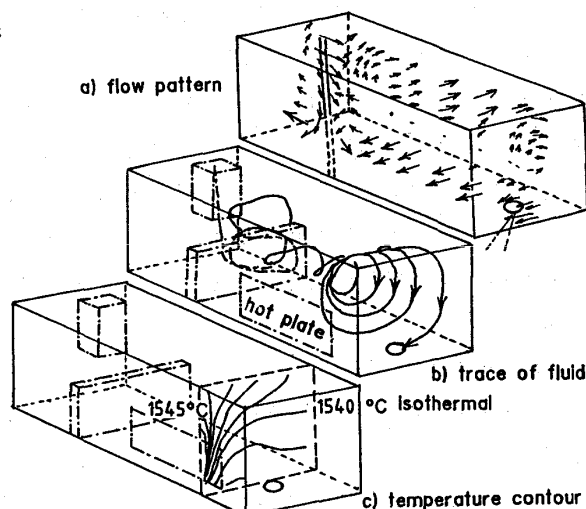


Fig. 7 Flow pattern in tundish with heating.

パターンと温度分布を示す。熱対流が明らかであり、主流は堰を越える付近から旋回流となっている。旋回流によるよどみ部の減少、湯面近傍の温度上昇による流れの上向き化、滞留時間の延長による介在物浮上の促進効果が、数値解析結果からも推察できた。

2.5 タンディッシュ内溶鋼の加熱効果と品質向上効果

実機において得られた加熱結果について述べる。加熱を行わない通常ヒートにおけるタンディッシュ内溶鋼温度変化の代表例をFig. 8に、タンディッシュ内溶鋼加熱装置を用いて温度制御した場合の代表例をFig. 9に示す。

取鍋から給湯開始1分後のタンディッシュ内溶鋼測温値は、鑄込中期の平均温度と良い一致を示すことから、温度降下量の表示は、給湯後1分の測温値を基準として示す。加熱により鑄込初期の温度降下量は10～20℃から0～5℃へと著しく改善され、さらに温度降下の回復時間も13分から6分に短縮されている。鑄込末期および取鍋交換時にも温度降下は認められず、鑄込全期間にわたり±2.5℃の温度制御が可能となった。

SUS304の鑄込初期のスラブのノロかみ量を加熱有無で比較してFig. 10に示す。ノロかみ個数は、同一過熱度でも、加熱を実施することによって著しく減少しており、前述の流動解析で推察された攪拌効果と良く一致している。

非定常部に相当するステンレス鋼の表面欠陥による不良コイルの発生状況をFig. 11に示す。脱酸生成物、二次酸化物、モールドパウダ等介在物が主要原因となっている非定常部のフクレ状欠陥は加熱によって発生率が著しく減少する。また線状ヘゲ欠陥についても加熱によって程度が軽微になることが観察されている。

3. 成分調整技術

タンディッシュにおいては、溶鋼の温度制御とともに成分調整も重要な技術である。次に、当所で行われているタンディッシュ内成分調整技術の例について述べる。

3.1 加窒コントロール技術⁴⁾

硬度を要求される冷延鋼板等においては、窒素を添加する場合があります。加窒法としては、従来から次のような方法があった。

- (1) A法：取鍋とタンディッシュ間の注入雰囲気窒素を窒素として加窒する。
- (2) B法：出鋼時等に窒素含有合金を投入して加窒する。

しかし、A法は加窒量の制御が困難であり、鋼中Nのパラツキが大きく、またB法は経済性に問題があった。そこで、ロングノズルの頭部に小径のステンレスパイプを埋め込み、

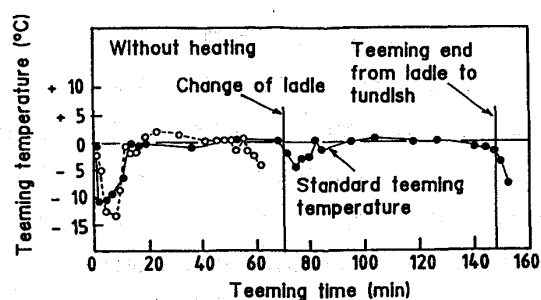


Fig. 8 Temperature change of molten steel in tundish without heating.

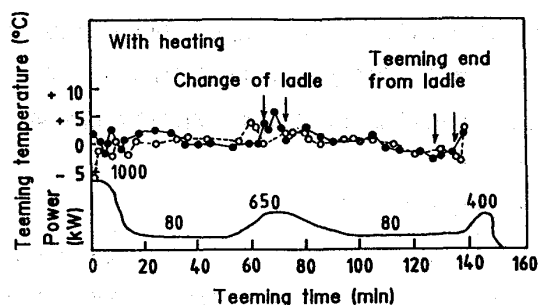


Fig. 9 Temperature change of molten steel in tundish with heating.

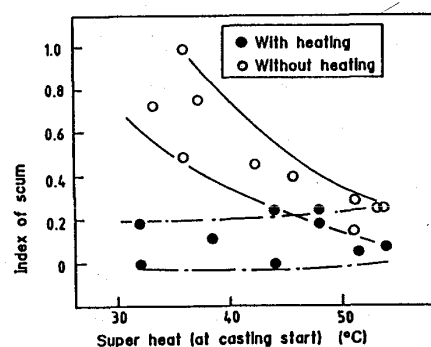


Fig. 10 Scum trap of first slab.

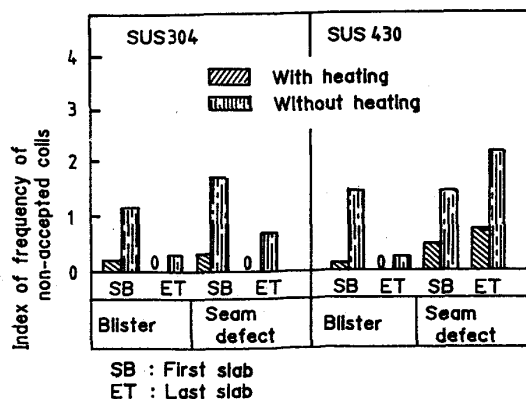


Fig. 11 Surface defects on the stainless steel cold rolled coils.

このパイプから流量を自動制御し、窒素ガスを吹き込み安価で加窒制御性に優れた自動加窒法を開発した。Fig.12に最終の鋼中Nのバラツキを示す。本法によってバラツキを大幅に低減させることができ、さらにロングノズル長さ(L)を長くすることで制御性が向上する。

3.2 タンディッシュ内溶鋼へのCa添加技術⁵⁾

Alキルド鋼中の Al_2O_3 系介在物の浮上分離を図る方法の一つとしてCa合金添加による介在物形態制御がある。API-X65級のUOパイプ向けAlキルド鋼製造時に鑄造全期にわたってCaを添加した時のスラブ内大型介在物量低減効果をFig.13に示す。非定常鑄造期にも大型介在物は低減しており、製品の格落ち率も著しく改善できた。

4. 今後の展望

上述のように、近年タンディッシュは、従来の単なる溶鋼量調整、介在物の除去機能に加え、温度および成分調整機能等が具備され、多機能精錬容器として位置づけされつつある。

このことは、大ロットの鋼種の鑄造を主体とし、耐火物コストの低減および一層の清浄化機能を追求する方向と安価な小ロット溶製技術におけるタンディッシュ内成分調整機能を持った精錬容器としての開発といった、二極化の方向に進むことを示唆している。

5. 結言

タンディッシュ内溶鋼加熱装置による温度制御技術と溶鋼流動の解析ならびに、その溶鋼清浄化への効果、さらにはタンディッシュでの成分調整の一例について述べるとともに、今後のタンディッシュ機能に関する展望について述べた。

引用文献

- 1) 馬淵ら：川鉄技報，17（1985）4
- 2) 馬淵ら：鉄と鋼，72（1986），S1074
- 3) 鞭 ら：「冶金反応工学」，（1972），113，〔養賢堂〕
- 4) 柿原ら：鉄と鋼，68（1982），S908
- 5) 吉井ら：鉄と鋼，64（1978），S626

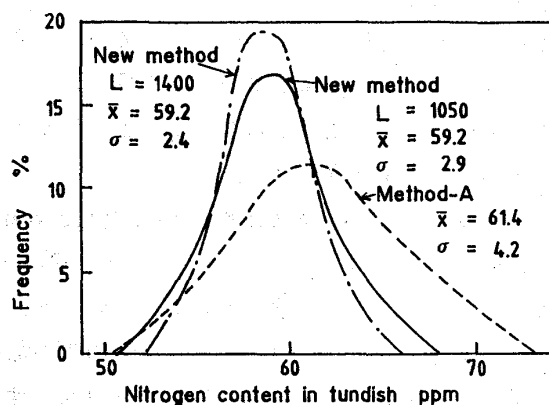


Fig. 12 Improvement of nitrogen distribution by new method.

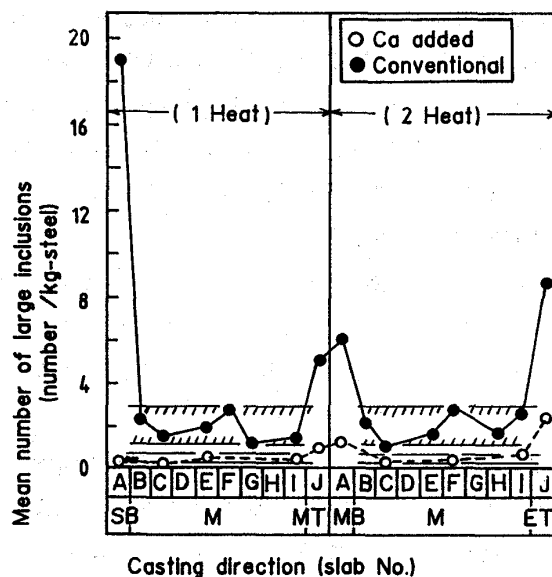


Fig. 13 Improved cleanliness in leading end (SB) junction (MB, MT) and tail end (ET) of sequentially cast slabs with adding calcium in tundish.