

ステンレス鋼連铸におけるタンディッシュ内容鋼の自動温度制御*

川崎製鉄技報
17 (1985) 4, 365-371

Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting



馬淵 昌樹
Masaki Mabuchi
鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鋼研究室



古井 裕
Yutaka Yoshii
ハイテク研究所 新素
材研究センター 主任
研究員(課長補)



野崎 努
Tsutomu Nozaki
鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鋼研究室
室長・理博



恒生 泰生
Yasuhiro Habu
技術研究本部 企画開
発室 主査(部長補)・
工博



桜井 美弦
Mitsuru Sakurai
千葉製鉄所 設備技術
部電気計装技術室



森脇 三郎
Saburo Moriwaki
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(掛長)

1 緒 言

連続鑄造の鑄込初期にはタンディッシュ耐火物により熱が奪われて、溶鋼温度は低下する。取鍋交換時および鑄込末期においても大気放熱や取鍋からの入熱が途絶えることにより、温度が低下する傾向にある。このような溶鋼温度低下により、非金属介在物の浮上分離が困難になること、モールドパウダーの溶融不足を招き、パウダーが鑄片表皮下に捕促されやすくなるなど鑄片品質に悪影響を与える¹⁾²⁾。また、低熱によるレズル詰りなど連铸操業上の問題を引き起こすことが知られている。

鋼材の品質向上に関して、従来より介在物低減方法が検討されて、有効な対策が実施されてきた結果³⁾⁴⁾、上記非定常部鑄片の品質は向上してきている。しかし、品質要求の厳しい高級鋼においては未だ連铸非定常部鑄片の手入れ工数比率は高く、製品への充当規

要旨

タンディッシュ内容鋼の鑄込み全期間にわたる温度制御を目的とし、溝形低周波誘導炉を適用した加熱により、鑄込み非定常部での溶鋼温度低下の防止および目標温度鑄込みの安定化を図った。鑄込全期間での加熱制御の自動化を図った結果、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の温度制御が実現できた。加熱を行ったステンレス鋼の非定常部に相当する鑄片およびコイルの品質は、定常部相当コイルと同品質レベルが得られた。タンディッシュ内容鋼の攪拌およびフローパターンの考察から、大型介在物はタンディッシュ内で凝集体とし、湯面への上昇流によって浮上除去されると考えられた。

Synopsis:

The heating system of molten steel in the tundish by utilizing a channel type inductor has been developed to stabilize the temperature of molten steel in the tundish throughout continuous casting. The fluctuation of steel temperature can be controlled within $\pm 3^{\circ}\text{C}$ throughout casting. The number of subsurface inclusions in a stainless steel slab cast under an unsteady state decreases to 1/4 to 1/12 compared with that by the conventional method. Surface and internal qualities of cold-rolled sheets cast under the unsteady state have also been improved to the level of those cast under a steady state. Stirring of molten steel by induction heating can be considered to improve the removal of large inclusions in the tundish.

制も厳しく、一段と有力な品質向上対策が要求されている。

鑄込みの全期間にわたる一定の溶鋼温度管理を目的として、千葉製鉄所第1製鋼工場において、溝形低周波誘導炉を用いたタンディッシュ内容鋼の加熱方法を開発した⁵⁾¹³⁾。本報告では、加熱方法を自動化し、ステンレス鋼の連続鑄造に適用した結果について述べ、溶鋼清浄化のメカニズムについて考察する。

2 設 備

2.1 設備の構成

溝形低周波誘導炉(以後インダクタと称する)をタンディッシュに接続した状態を Fig. 1, Photo 1 に示す。インダクタ部は溶鋼を充填し、かつ昇温するための溝部と、鉄心および誘導コイルからなる電気部分の2つの主要部分から構成される。

付帯設備として、インバータを用いた電源、冷却水供給ユニットおよび自動制御用コントローラを持つ。

鑄込みの不安定期を除く全期間の加熱電力を連続測温センサを用

* 昭和60年5月29日原稿受付

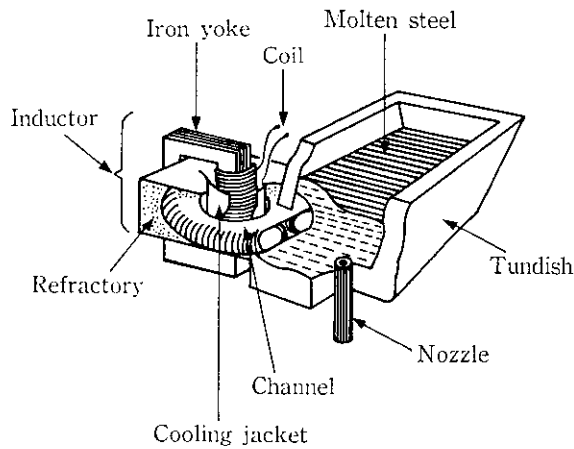


Fig. 1 Principle and construction of induction heater

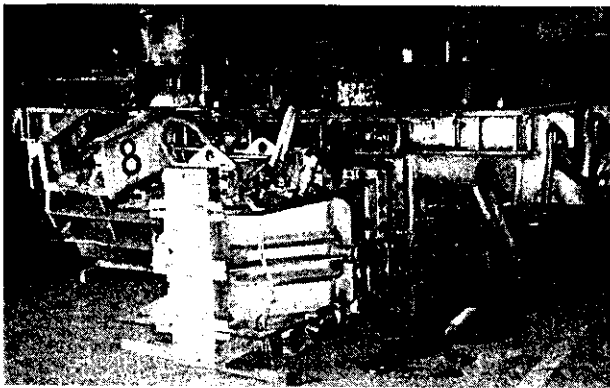


Photo 1 Back side view of heating system

いて自動調節し、目標温度を維持する自動温度制御を行っている。
溶鋼溝部を形成する耐火物は、1500°C以上の温度に耐え、成形が容易なマグネシア系、あるいはアルミナスピネル系のドライラミング材を使用している。成形時には金型を用いてラミングし、最初に用いるヒートで、この金型を加熱溶解し、焼結層を造り、溝部を形成した。

電源の模式図を Fig. 2 に示す。従来、実験段階ではトランスタップ方式とサイリスタコンバータを併用していた。三相平衡回路、力率改善用コンデンサを持ち、タップチェンジャにより手動で加熱電力を調節していた。本装置を実用に供するためには無人運転を原則とするので、今回、電源を出力設定が可変であるインバータ方式に改良した。周波数は 50 Hz で共振用コンデンサを持つ。

コントローラは誘導加熱装置用として開発され、CRT (キーボード付) により、各種設定データ、実績などの変更、監視が容易である。後述するピンチ効果抑制制御、自動温度制御およびプログラム制御の可能な方式を採用した。

2.2 加熱原理

インダクタは変圧器の一種であり、電気回路を模式的に Fig. 3 に示す。インダクタは 1 次コイルを貫通し閉回路を成す鉄心と、1 次コイルの外側で閉回路を成す 2 次側溶鋼通路から成る¹⁴⁾。通路内に溶鋼が充満した状態で 1 次コイルに交流電圧 E_1 をかけると、通路内溶鋼に誘導電流 I_2 が発生する。この時、溶鋼内に発生するジュール熱 W は (1) 式で与えられる。

$$W = K_1 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi \quad (1)$$

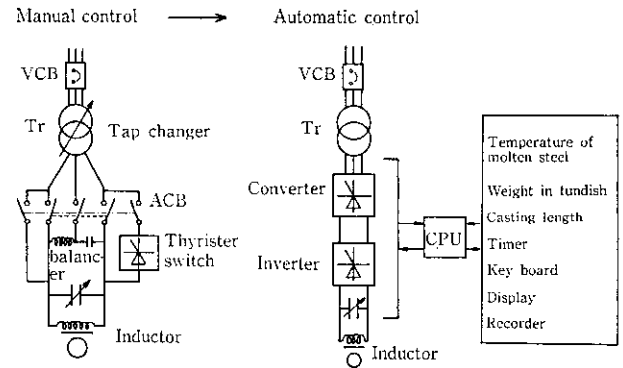


Fig. 2 Electric circuit and control system of inductor

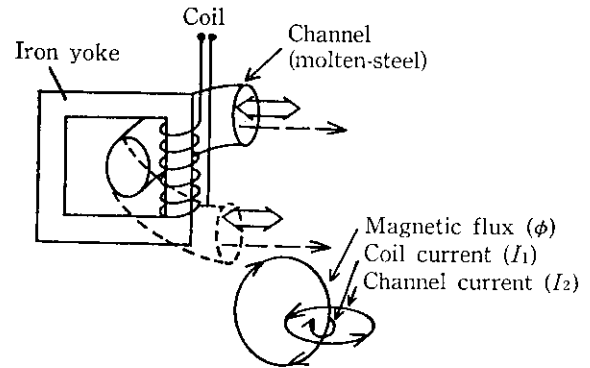


Fig. 3 Electrical construction of induction heater

$$= K_2 \cdot R \cdot I_2^2$$

$$= K_2 R \cdot (K_3 \cdot N \cdot I_1)^2$$

ここで、 K_1 : 定数

K_2 : 定数

K_3 : 定数

E_2 : 2 次側電圧

R : 全電気抵抗

N : 1 次コイル巻数

I_1 : 1 次コイルの電流

I_2 : 溝内溶鋼に流れる電流

$\cos \phi$: 力率

加熱された溶鋼はタンディッシュ内溶鋼中に噴射されて、温度を高める。印加電力の調節により温度制御が可能となる。

2.3 ピンチ効果抑制回路

溶融金属に電流が流れると Fig. 4 のように向心力が働き、自ら収縮しようとする。この力が大きくなり限界を越えると収縮により回路が切れる。回路が切れると向心力がなくなり再び接続する。この繰り返しがピンチ効果¹⁵⁾ (ピンチ現象) であり、向心力をピンチ力と称する。

ピンチ効果の激しい時には、電気的不安定のために、安定した加熱ができなくなる。さらには耐火物に損傷を与える¹⁶⁾ こともある。溝形誘導炉において、ピンチ効果が起きる原因はピンチ力による電磁的圧力が溝内溶鋼静圧を上回ることにある。

まず、溶鋼に働く電磁的圧力 P_d は溝中心において (2) 式で与えられる。

$$P_d = C_1 \cdot \mu \cdot I_2^2 / A \quad (2)$$

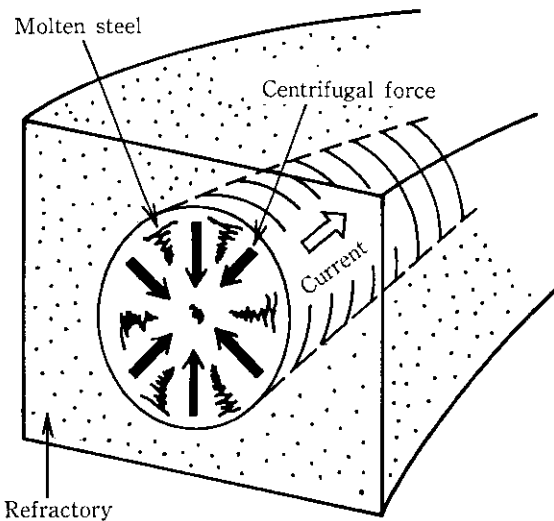


Fig. 4 Centrifugal force in the channel of tundish-heater

ここで、 μ : 溶鋼の透磁率 ($\cong 4\pi \times 10^{-7}$)

A : 溝の断面積 (m^2)

C_1 は形状に関する定数で、円柱のとき $1/8\pi$ である。

また、溝内の溶鋼静圧 P_{st} は (3) 式で与えられる。

$$P_{st} = P_0 + \rho_{Fe} \cdot g \cdot h - P_{vap} \quad (3)$$

ここで、 P_0 : 大気圧 ($1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$)

ρ_{Fe} : 溶鋼密度 (kg/m^3)

g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)

h : メニスカスからの溶鋼深さ (m)

P_{vap} : 溶鋼中揮発成分の蒸気圧あるいは気泡の圧力

実機において、電氣的圧力 P_d は最大でも $1.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ であり、大気圧に及ばない。溝が溶鋼で満たされている限り、安定した加熱ができることになる。しかしながら、鋳込初期には、溝内に残留した気泡、水蒸気あるいは耐火物からしみ出るガスなどのため、溶鋼が浅く静圧が小さい時にピンチ効果が起き易い。

ピンチ効果検出のための測定回路を主回路に設けた。ピンチ効果発生時には R 相、T 相と主回路の電流波形に乱れが現われる。これは主回路に三相を単相として使うための整合用平衡回路があり、ピンチ効果によるインピーダンス変化が電源に波及したものである。

そこで、インピーダンス変化を検知し、あるレベル以上の急変に対して、出力を下げることににより、ピンチ効果を抑制する。また、インピーダンスの変化が安定してきたら、出力を必要量まで回復させる回路を装備している。

2.4 印加電力の自動制御

自動制御のフローを模式的に Fig. 5 に示す。

鋳込初期、取鍋交換期および鋳込末期を除く定常鋳込期には、温度センサーにより、連続して測温を行い、飽和時間がより短い消耗型測温により補正する。この補正值と目標温度が等しくなるように出力制御する。制御式は (4) 式で与えられる。

$$E = E_0 \cdot \left(1 + \sum^n K \frac{\theta_s - \theta_s'}{\theta_s} \right) \quad (4)$$

ここで、 E : 出力指令値

E_0 : 基準出力値

θ_s' : 溶鋼温度補正值

θ_s : 目標溶鋼温度

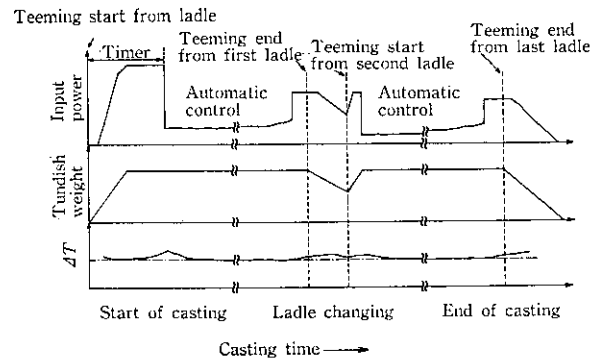


Fig. 5 Temperature control of molten steel in tundish

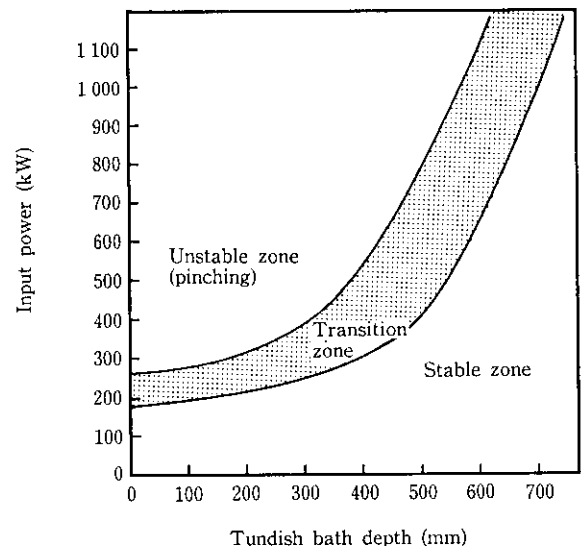


Fig. 6 Influence of input power and the bath depth in the tundish on pinch effect

K : 係数

n : サンプル回数

E_0 , K は温度に依存した関数として設定した。

次に鋳込初期、取鍋交換期あるいは鋳込末期などタンディッシュ内溶鋼量の変動の大きな時期は、タンディッシュ内溶鋼レベルの低下により、ピンチ効果が起きる恐れあるいは温度センサーの溶鋼との非接触の懸念から、溶鋼深さに応じたプログラム制御を採用した。

鋳込初期においては鋼浴深さと印加電力の間には Fig. 6 のような関係があるので、鋼浴深さに応じて投入電力を大きくし、かつ、最大電力投入時期を早くすることが効率的な加熱を行う条件である。

プログラム制御と自動制御との切替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っている。

3 ステンレス鋼への適用

3.1 実験方法

千葉製鉄所、第1連铸機 (CONCAST-住重、全湾曲型スラブ連铸機) の 8 t 容量のタンディッシュを用いて実験を行った。また、

一部のヒートでは鋳込中期に、溶鋼過熱度を任意に変化させ鋳込温度のスラブ鋳片品質に及ぼす影響を確認する実験を行った。

ステンレス鋼の連続鋳造に際しては、SUS304, SUS430 系に適用し、200 回以上の加熱実験を行った。鋳造条件は、誘導加熱を行う以外は通常の条件と等しくした。

鋳片性状の調査は、まず、非定常部に相当する位置から、鋳込み長さで 6 m 採取し、表面近傍 (0~20 mm 深さ) の大型介在物およびピンホールを染色探傷法により調べた。鋳片内部の介在物は、スライム抽出法、X線透過法および酸素分析を行って、厚み方向集積帯近傍の分布を定量化した。

次に製品コイルは、冷延仕上工程で表面に現れるヘゲや筋状欠陥およびフレ状欠陥の発生頻度を目視調査した。ここで、ヘゲおよび筋状欠陥は、鋳片表層に存在する大型介在物に起因するものが多く、また、フレ状欠陥は、鋳片内部の大型介在物に起因して発生していた。

また、タンディッシュ内での介在物の浮上を考察するため、以下の実験を行った。

攪拌力の測定は実機において、取鍋溶鋼落下点にトレーサ元素 (Cu) を添加し、モールド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 の濃度応答から滞留時間分布と攪拌力の指標となるペクレ数 (Pe) を求めた。

インダクタの開孔部から噴出する熱流のフローパターンは水モデル実験による染色液の軌跡から推察した。モデルは 1/3 縮尺とし、フルード数相似とした。

3.2 実験結果

3.2.1 加熱効果

加熱を行わない通常ヒートにおいて、連続温度センサーを用いてタンディッシュ内溶鋼温度を連続的に測定した結果の代表例を Fig. 7 に示す。

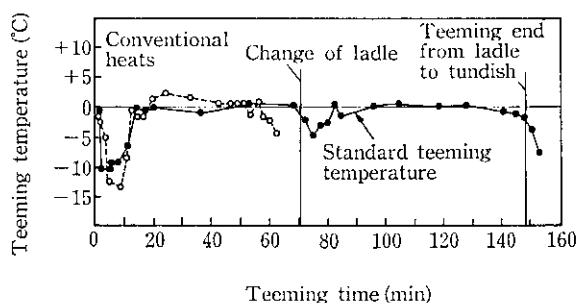


Fig. 7 Temperature change of molten steel of conventional heats in tundish

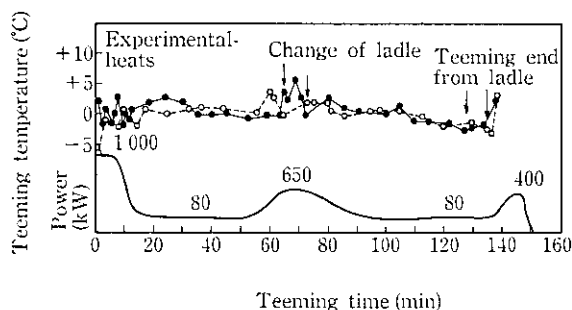


Fig. 8 Temperature change of molten steel of experimental heat tundish

鋳込初期は鋳込中期の平均温度に対して、最大 10~20°C 低下し、末期は 5~10°C 低下、取鍋交換時には、次ヒートにもよるが 5~8°C の低下が認められた。また、取鍋からタンディッシュへの給湯開始 1 分後の測温値は、鋳込中期の平均温度と良い一致を示すことから、温度降下量の表示に際しては、給湯後 1 分の測温値を基準にして、 ΔT_1 で示す。

前記した電力の自動制御およびピンチ効果抑制制御を併用し、鋳込全期間の溶鋼温度制御した例を Fig. 8 に示す。鋳込初期のタンディッシュ内溶鋼温度は、加熱ヒートでは 0~5°C の低下と、加熱のないヒートの 10~20°C の低下と比べて、著しく改善できた。同時に温度降下の回復時間も早く、13 分から 6 分に短縮できた。鋳込末期および取鍋交換時においても、温度低下はみられず、鋳込全期間にわたり、 $\pm 3^\circ\text{C}$ の温度制御が可能となった。

3.2.2 非定常部鋳片の表皮下介在物の低減

SUS304 の非定常部鋳片について表皮下の大型介在物およびピンホールの測定結果を Fig. 9 に示す。これらの欠陥の個数は、加熱を実施することにより著しく減少しており、加熱を行わない場合と比較して、1/4~1/2 に減少し、定常部鋳片と同程度まで改善できている。

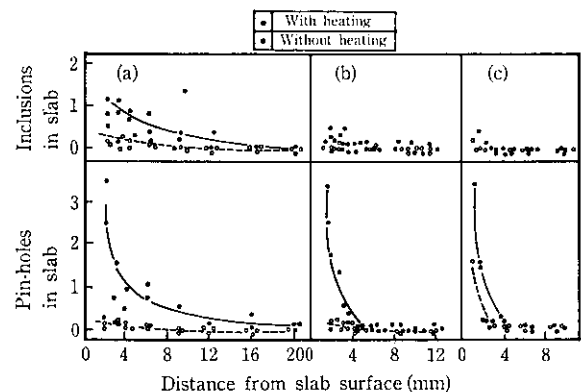


Fig. 9 Distribution of inclusion and pin hole in (a) the first (b) the ladle changing (c) the last slab

3.2.3 製品コイルの表面品質改善

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. 10 に示す。加熱を行ったヒートからのコイルでは、ヘゲ状およびフレ状、いずれの欠陥も減少している。大型介在物起因が明らかとなっているフレ状欠陥の方が、大型介在物以外の要因、例えば、加熱圧延条件の不適などに影響され易い筋状欠

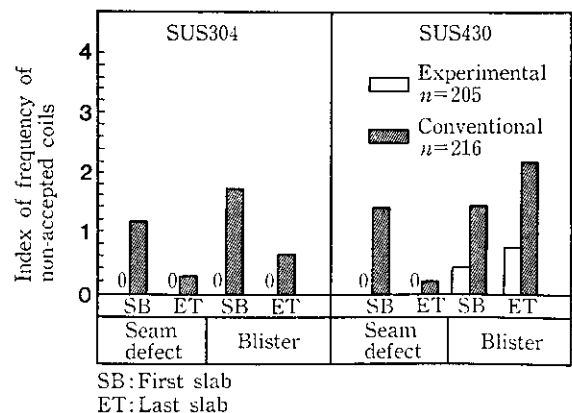


Fig. 10 Surface defects on the stainless steel cold rolled coils

陥よりも低減効果大きい。しかし、筋状欠陥も本装置の適用により欠陥の程度が軽微になることが観察されている。

3.2.4 定常部鑄片の内部介在物低減

溶鋼過熱度の鑄片性状に及ぼす影響を調査するために、同一ヒート内で投入電力を変化させて溶鋼過熱度を 20, 28 および 38°C と変化させた。各温度における鑄片内部介在物量を S スポットおよび酸素分析値で代表して Fig. 11 に示す。大型介在物および非金属介在物総量を意味する酸素分析値のいずれも、過熱度が大きくなるに従って減少する。

過熱度以外の条件をそろえて、温度の影響を単独で抽出する確信試験によって、各鋼種に応じた最適の鑄造温度が選択できる。本装置の適用により連铸操業の安定化が図れる利点がある。

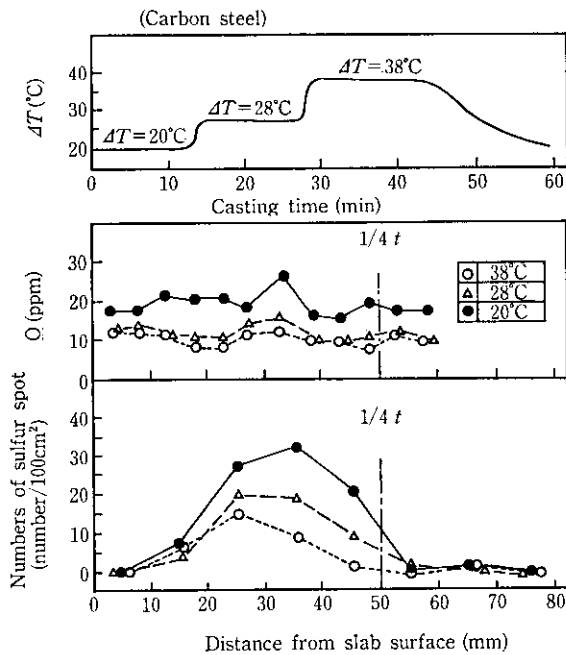


Fig. 11 Relation between the quality of slabs and casting temperature

4 考 察

4.1 タンディッシュ内溶鋼の熱収支

タンディッシュ容量にふさわしい加熱設備の決定には、投入電力の見積りが必要となる。通常工程ヒートにおけるタンディッシュ内溶鋼温度の推移から、タンディッシュ内溶鋼の熱収支を検討し鑄込初期の最大温度低下を防止するために必要な印加電力を計算する。

いま、タンディッシュ内溶鋼温度が均一であり、取鍋からタンディッシュへの給湯速度とタンディッシュからモールドへの注入速度が等しいと仮定すると、タンディッシュ内溶鋼の熱収支は (5) 式で示される¹⁷⁾。

$$C_p \cdot W \frac{dT}{dt} = C_p \cdot \dot{w} (T_L - T) - H_L \quad (5)$$

ここで、 C_p : 溶鋼比熱 (kW/kg·°C)

W : タンディッシュ内溶鋼重量 (kg)

$\dot{w}$: 溶鋼の流入および流出速度 (kg/s)

T : タンディッシュ内溶鋼温度

T_L : 取鍋内溶鋼温度

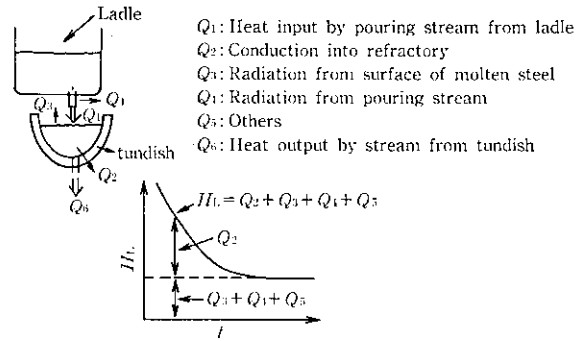


Fig. 12 Schematic diagram of heat balance from molten steel in tundish

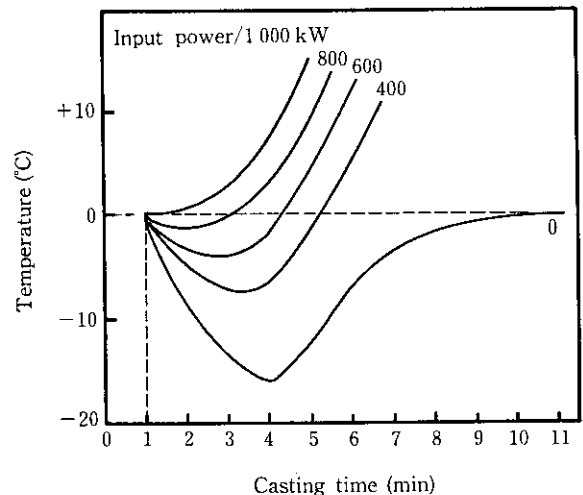


Fig. 13 Temperature change of molten steel in tundish calculated by heat balance

t : 時間

H_L : タンディッシュによる全熱損失量 (kW)

タンディッシュ内溶鋼のヒートバランスを模式的に Fig. 12 に示す。主な熱損失は耐火物への熱伝導損失 (Q_2)、鋼浴表面からの放熱 (Q_3)、取鍋とタンディッシュ間の注入流からの放熱 (Q_4) と考えられる。鑄込初期の数分間の大きな熱損失は時間依存項である耐火物への熱伝導損失が大きく影響する。その後の熱損失量は一定となる。

加熱を行う場合の熱収支は (5) 式に加熱エネルギー (P) を加えて (6) 式で示される。

$$C_p \cdot W \frac{dT_h}{dt} = C_p \cdot \dot{w} (T_L - T_h) - H_L + P \quad (6)$$

加熱を行った場合と行わない場合の熱収支の差は (5), (6) 式を比較して, (7) 式になる。

$$C_p \cdot W \frac{dT}{dt} = C_p \cdot \dot{w} \cdot \Delta T + P \quad (7)$$

ただし、 $\Delta T = T_h - T$

千葉 No. 1 CC の 8 t タンディッシュについて、(7) 式を積分し、鑄込初期の温度推移を計算した結果を Fig. 13 に示す。鑄込初期の温度低下を防止するために必要な電力は 1000 kW 以上であることがわかる。これが、1000 kW のインダクタを選定した理由である。

ここで、実測した温度上昇率と (7) 式から得られる理論温度上

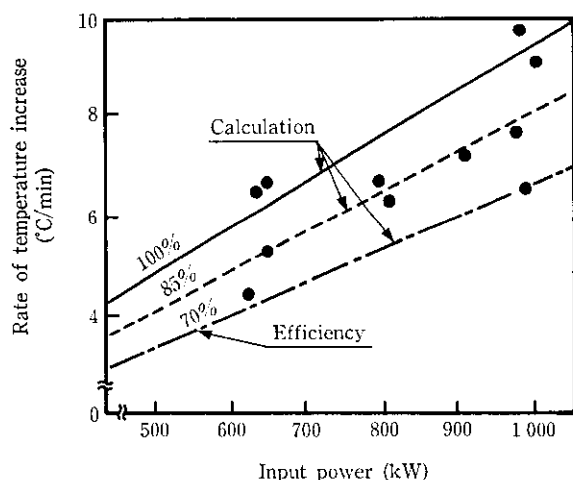


Fig. 14 Relationship between rate of temperature increase and input power

昇率を比較した Fig. 14 の結果から投入電力の熱効率を求めると、85% と見なせる。

4.2 溶鋼清浄化のメカニズム

タンディッシュ内溶鋼加熱による溶鋼清浄化のメカニズムは

- (1) タンディッシュ内およびモールド内における介在物の浮上促進
 - (2) モールドパウダーの溶融性改善
- などが考えられる。上記 (1) のタンディッシュ内での浮上に関しては、(a) 攪拌力の増大による介在物の凝集肥大化、(b) フローパターンの改善による浮上促進の2つが考えられる。

まず、Cu トレーサ添加による攪拌力の検討を行う。パルス的に系の入口に投入した不活性はトレーサの出口における濃度 C_{out} は (8) 式で与えられる¹⁰⁾。

$$C_{out} = C_0 \cdot E(\theta) \quad (8)$$

ここで、 C_0 : 初濃度

E : 滞留時間分布関数

θ : 無次元時間

濃度分布の分散は、滞留時間分布関数を用いて (9) 式で定義する。

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty (\theta - 1)^2 E(\theta) d\theta}{\int_0^\infty E(\theta) d\theta} \quad (9)$$

一方、拡散モデルによれば分散 σ^2 と攪拌の強さの指標となる P_0 数の間には (10) 式の関係がある¹⁰⁾。

$$\sigma^2 = \frac{2}{P_0^2} \{P_0 - 1 + \exp(-P_0)\} \quad (10)$$

ここで、

$$P_0 = ul/D_0,$$

u : 代表速度

l : 代表長さ

D_0 : 系内流体の乱流拡散係数

P_0 数が多いほど攪拌力が弱く、小さいほど攪拌力が強いといえる。

前述した Cu トレーサの濃度変化から、(9) 式を使って分散 σ^2 を求めた。この分散 σ^2 と (10) 式を比較し、 P_0 数を計算し、投入電力との関係を Fig. 15 に図示する。 P_0 数は投入電力が大きくなるに従って小さくなり、攪拌力が増すことが推定される。 P_0 数

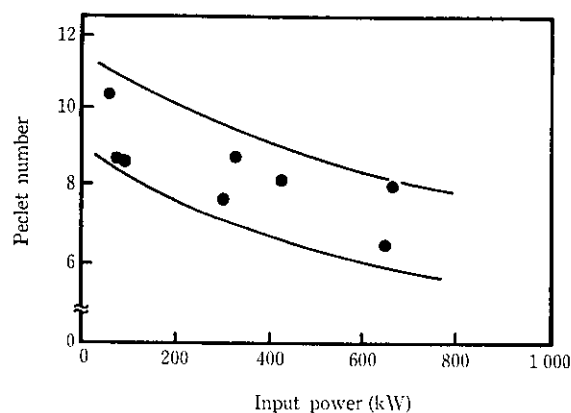


Fig. 15 Effect of input power on Peclet number

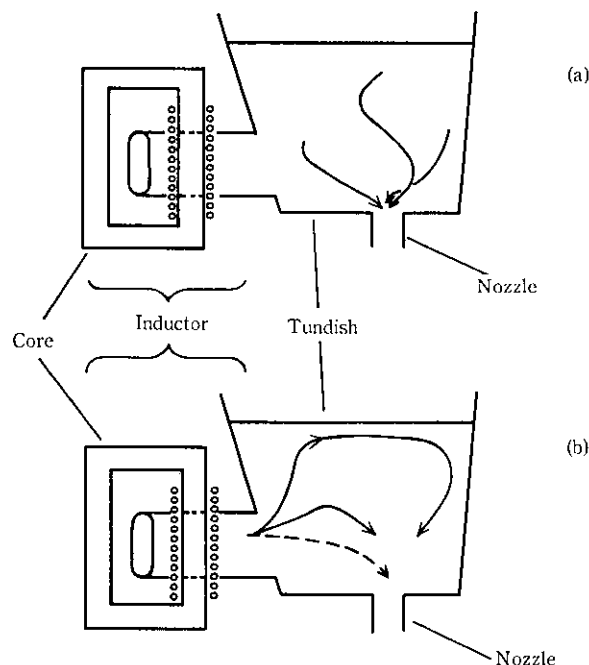


Fig. 16 Flow in water model (a) without heating (b) with heating

の減少は 1000 kW に対して 20~30% であるが、系全体に平均した値であり、局所的にはより大きな攪拌力が期待できる。したがって介在物の凝集肥大化によって、ストークス浮上が促進され、溶鋼の清浄化が図られる可能性が示唆された。

次に、水モデルによるフローパターンの観察結果を Fig. 16 に示す。加熱を行った場合に相当する Fig. 16 (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、一部は再び浴内に戻る。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。

5 結 言

連続铸造時の铸込初期や末期、および取鋼交換時などの非定常部铸品の品質を改善するため、溝形低周波誘導方式のタンディッシュ内溶鋼加熱装置を開発し铸造温度の制御を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 铸込み非定常部でのプログラム制御と、定常部では温度センサ

- ーと直結した出力制御を組み合わせることにより、出力電源制御の自動化を図り、 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の温度制御が可能となった。
- (2) 熱を行ったステンレス鋼非定常部に相当する鋳片およびコイルの品質は定常部相当コイルと同品質レベルが得られた。
- (3) 大型介在物が低減する理由をタンディッシュ内溶鋼の攪拌およびフローパターンから考察し、インダクター周辺の溶鋼攪拌により介在物は凝集肥大し、上向きの熱流によって湯面に運ばれ、分離される可能性を示唆した。

参 考 文 献

- 1) 大西正之, 岩永侑輔, 日和佐章一, 加藤安功, 大岡秀志: 鉄と鋼, **69** (1983) 4, S 211
- 2) 友野 宏, 尾崎孝三郎, 浦 知, 岩田勝吉, 鈴木俊明: 鉄と鋼, **69** (1983) 12, S 914
- 3) 柿原節雄, 馬田 一, 浜上和久, 久我正昭, 吉井 裕: 鉄と鋼, **70** (1984) 4, S 270
- 4) 吉井 裕, 垣生泰弘, 江見俊彦, 森脇三郎, 越川隆雄, 今井卓雄: 鉄と鋼, **64** (1978) 11, S 626
- 5) 吉田基樹, 石飛精助, 脇田淳一, 溝口庄三: 鉄と鋼, **66** (1980) 11, S 863
- 6) 小舞忠信, 野田郁郎, 野呂克彦, 伊賀一幸, 押田 淳, 堀利男: 鉄と鋼, **70** (1984) 1, P 86
- 7) 塗 嘉夫, 梅沢一誠, 大橋徹郎, 伊藤 良, 溝口良平, 横井真一: 鉄と鋼, **69** (1983) 12, S 989
- 8) 駒村宏一, 久々湊英雄, 小嶋英明, 越川隆雄, 上杉浩之, 児玉正範, 吉井 裕, 垣生泰弘, 江見俊彦: 鉄と鋼, **67** (1981) 9, A 133
- 9) 小原昭彦, 桜井美弦, 徳繁次郎, 越川隆雄, 針田彬, 垣生泰弘, 吉井 裕: 鉄と鋼, **69** (1983) 4, S 208
- 10) 吉井 裕, 野崎 努, 垣生泰弘, 内村良治, 木下勝雄, 山中啓充, 上田典弘, 針田 彬: 鉄と鋼, **69** (1983) 4, S 209
- 11) 吉井 裕, 野崎 努, 垣生泰弘, 上田典弘, 垣内博之, 内藤雅夫: 鉄と鋼, **69** (1983) 12, S 931
- 12) 佐藤哲雄, 上田典弘, 桜井美弦, 川島美典, 木下勝雄: 鉄と鋼, **70** (1984) 4, S 265
- 13) 馬淵昌樹, 吉井 裕, 野崎 努, 垣生泰弘, 柿原節雄, 上田典弘: 鉄と鋼, **70** (1984) 12, S 840
- 14) 鈴井正憲: 工業加熱, **15** (1978) 3, 68
- 15) 工業加熱, **2** (1965) 4, 159
- 16) R. E. Hammarlund: *Foundry Trade Journal*, **13** (1966), 21
- 17) 藤井徹也, 垣生泰弘, 大井 浩: 鉄と鋼, **57** (1971) 10, 1645
- 18) O. Levenspiel: "Chemical Reaction Engineering, second edition", (1972), 263, [John Wiley & Sons, Inc.]
- 19) 梶 巖, 森山 昭: 「冶金反応工学」, (1972), 113, [養賢堂]