

連铸における高纯净鋼の製造について

Method for Continuously Casting Highly Clean Steel Slabs

垣 生 泰 弘*
Yasuihiro Habu

吉 井 裕**
Yutaka Yoshii

江 見 俊 彦***
Toshihiko Emi

内 藤 雅 夫****
Masao Naito

久々湊 英 雄*****
Hideo Kuguminato

今 井 卓 雄*****
Takuo Imai

森 脇 三 郎*****
Saburo Moriwaki

児 玉 正 範*****
Masanori Kodama

Synopsis:

Methods have been investigated of eliminating large non-metallic inclusions from continuously cast steels for pipelines and DI cans.

First, critical sizes and compositions are discussed, together with origins of large non-metallic inclusions that cause defective products.

Second, for an effective reduction of harmful, large inclusions, special methods are introduced covering Ar gas bubbling in ladle during tapping, use of dams in tundish for strong stirring effect, and addition of Ca-alloys into molten steel in tundish, with mention made of the good surfacing properties of inclusions in the straight and bending type C.C. machine.

Last, the paper outlines C.C. process for making the above steels for pipelines and DI cans, giving some performance results of the products.

1. 緒 言

連铸技術の進歩にともない、連铸適用鋼種が大幅に拡大され、現在では連铸工程で製造できない鋼種は、ほとんどない状況にあるといえよう。しかしながら、過去の連铸適用鋼種の拡大過程で、高品質が要求される高級鋼種の連铸に際しては、大型介在物起因の欠陥がしばしば問題となった¹⁻³⁾。

本報では、高級鋼種のうちでもとくに高い清浄

度が要求される、UO や ERW バイブ用鋼、清涼飲料缶向けの DI 缶用鋼を連铸工程で製造する場合の大型介在物低減方法とその効果についてまとめた⁴⁻⁶⁾。

2. 大型介在物起因の欠陥例と介在物起源

連铸技術の発達はまだ不十分な頃は、連铸工程は造塊工程に比して溶鋼と空気や耐火物との接触機会が多いので、大型介在物、とくに 500 μ を越え

* 技術研究所製鋼研究室主任研究員・工博
*** 技術研究所製鋼研究室室長・理博
***** 千葉製鉄所管理部冷延管理課
***** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(掛長待遇)

[昭和55年4月22日原稿受付]

** 技術研究所製鋼研究室主任研究員
**** 千葉製鉄所管理部厚板管理課主査(課長待遇)
***** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(課長待遇)
***** 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(課長待遇)

る超大型介在物起因の欠陥が鑄片あるいは製品で多発した⁷⁻¹⁰⁾。これらの介在物を低減する効果の大きい溶鋼処理法や鑄造法、具体的には、取鍋内溶鋼の清浄化処理すなわち Ar ガスバブリングや RH 脱ガス処理¹¹⁾、取鍋-タンディッシュ間の無酸化注入¹²⁻¹⁵⁾、タンディッシュ形状^{16,17)}、タンディッシュノズルの材質と形状^{7,9,18,19)}、タンディッシュノズル内への Ar ガス吹込み²⁰⁾、などの採用・適正化により、各種欠陥のうち、たとえば、厚板でのサイドベンド割れ、超音波探傷欠陥、薄板でのスリーパー疵、二枚板、超音波探傷欠陥などは大幅に減少した。

しかしながら、UO や ERW パイプ用鋼は、造管後、溶接部近傍に対して高感度の斜角超音波探傷を行うため、Photo. 1, 2 に示すような、直径が約 300 μ 以上の介在物が欠陥として検出されることがある^{1,3)} (Fig. 1(a) 参照)。

さらに、DI 缶用鋼のように、厳しいしごき加工を受ける鋼種においては最大の問題である Photo. 3 のようなフランジ割れを誘発する介在物の臨界径は、Fig. 1(b) のように 50~100 μ 程度とさらに小さいことが認められている^{2,3)}。

したがって、パイプや DI 缶向けのように高度の清浄性が要求される鋼種を連铸工程で安定して製

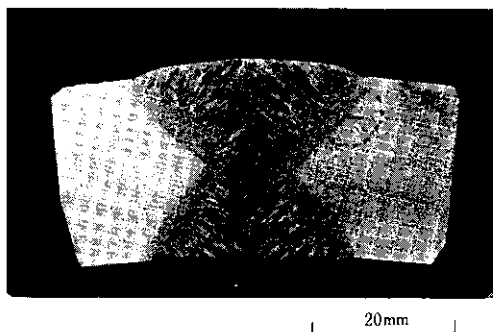


Photo. 1 An ultrasonic defect caused by large non-metallic inclusion in UO pipe

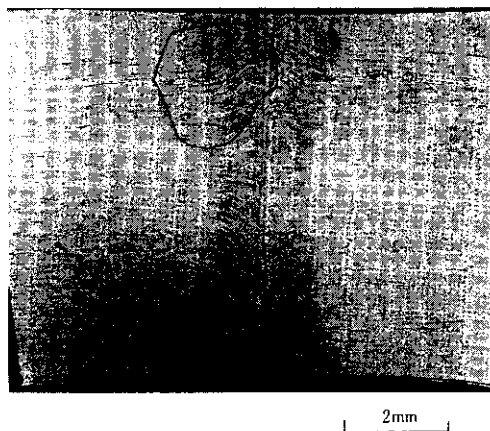


Photo. 2 An ultrasonic defect caused by large non metallic inclusion in ERW pipe

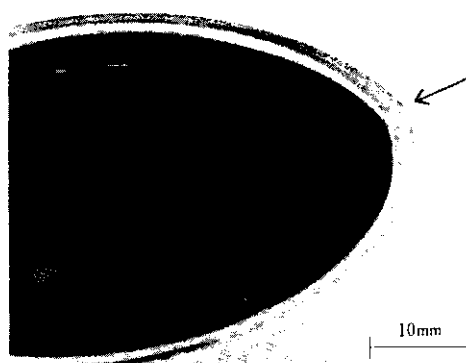


Photo. 3 An example of a flange crack of DI can

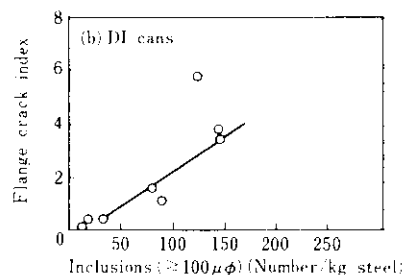
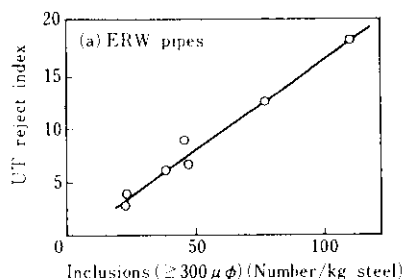


Fig. 1 Effect of large inclusions in slabs on the defects of products

造するためには、前述のような介在物対策に加えてさらに一段と効果的な介在物低減対策を併用する必要がある^{6,21-23)}。

パイプの超音波探傷欠陥部および DI 缶フランジ割れ部に存在する大型介在物の代表的な EPMA 分析結果を Photo. 4, 5 に示す。パイプ欠陥の場合は、CaO-Al₂O₃ 系と Al₂O₃ クラスター系、DI

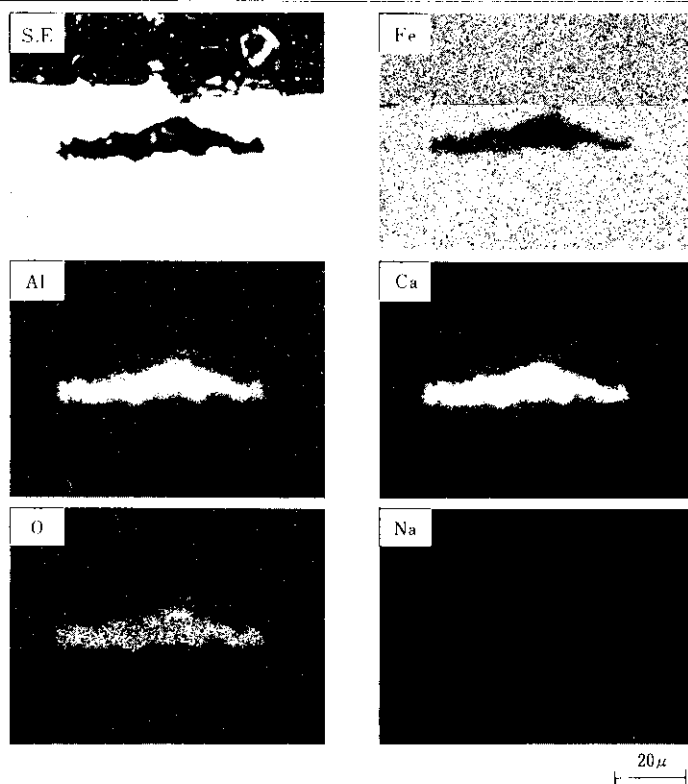


Photo.4 A typical large inclusion often found by the ultrasonic testing of UO pipes and in the flange crack of DI cans

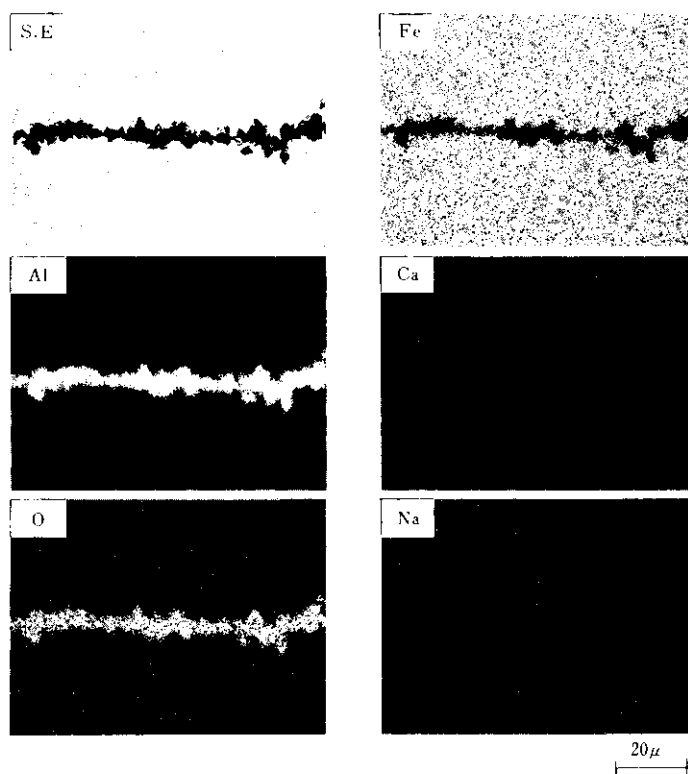


Photo.5 Another typical large inclusion found by the ultrasonic testing of UO pipes

缶欠陥の場合は、 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系の介在物が主体である。

これら介在物の起源として、まず $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系介在物は、Fig. 2 に示すように、取鍋内溶鋼中の大型介在物にすでかなりの CaO が含まれていること^{1,11,24)}、また、タンディッシュ内湯面を含 CaO 系フラックスで被覆していても、浸漬式注入管を使用すれば、フラックスに含有せしめたトレーサーが介在物中に認められなくなる、すなわちフラックスの巻込みをほぼ防止し得ること³⁾ から溶鋼中に混入した転炉スラグと脱酸生成物の合体物が、溶鋼中の Al_{sol} で還元され、変成したものと判断される¹⁾。他方、 Al_2O_3 クラスター系介在物は、脱酸生成物、溶鋼再酸化生成物、が主体と考えられる³⁾。

以下、これら介在物の効果的な低減法を述べる。

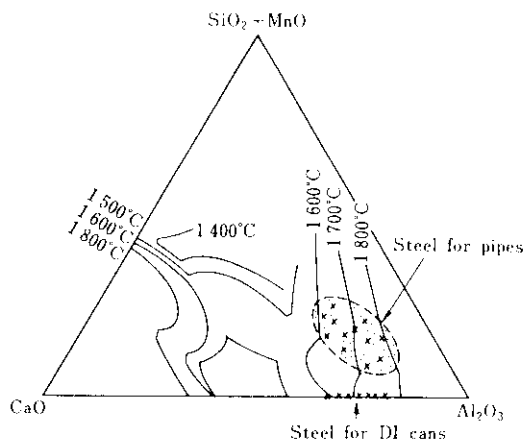


Fig. 2 Compositions of large inclusions ($\geq 100\mu\phi$) in molten steel in ladle for pipes and DI cans

3. 大型介在物の低減方法とその効果

3-1 取鍋における溶鋼清浄化法

取鍋内溶鋼中の介在物低減には通常、Ar ガスバブリング処理や RH 真空攪拌処理（以下 RH 処理）などが適用されるが、一般に Ar ガスバブリング処理よりも、RH 処理の方がより清浄な溶鋼が得られるので、介在物品位に対する要求が厳しい鋼種に対しては RH 処理が適用される。

RH 処理において介在物低減を効果的に行うには、

- (1) 環流量増大による浴内攪拌強化
- (2) スラグの不活性化処理
- (3) 塩基性耐火物鍋の使用

などを実施し、介在物はかなりの低水準になっている¹⁰⁾。しかしながら、より高い清浄度が要求される鋼種に対しては、Fig. 3 に示すような RH 処理に先立つ、出鋼中の取鍋内 Ar ガスバブリング処理^{6,*)}を考案し一段と介在物低減を図った。この処理には次の二つの目的がある。

- (1) 出鋼中に添加する Al をただちに鋼浴内に分散させ、酸化損失を少なくし、Al 歩留りの向上、すなわち、生成する Al_2O_3 量を少なくする。
- (2) 鋼浴内の攪拌を強化し、脱酸生成物の浮上分離を促進させる。

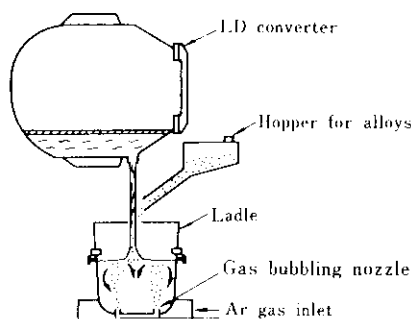


Fig. 3 Ar gas bubbling of molten steel during tapping

このような出鋼中の Ar バブリングと RH 処理を組合せた場合、 100μ 以上の大型介在物量は、Fig. 4 のように、通常の RH 処理に比較してかなり少なくなり、かつ、安定する。

なお、取鍋内溶鋼中の大型介在物の大半は Fig. 3 に示すように $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系であり、 CaO は転炉スラグに起因するので、出鋼時の転炉からのスラグ流出を極力少なくすることが肝要である。

3-2 タンディッシュにおける溶鋼清浄化法

3-2-1 介在物の浮上分離に効果的な堰の設置

タンディッシュでは鋼浴が浅くかつ溶鋼の滞留

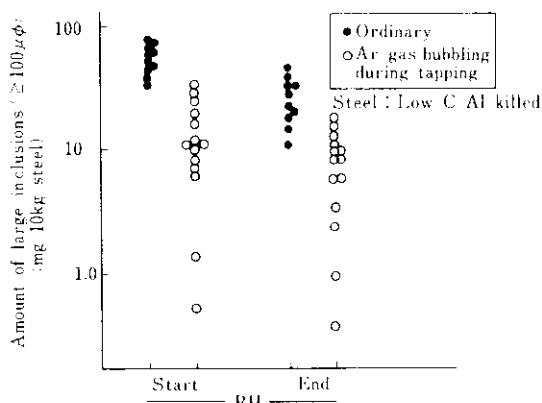


Fig. 4 Effect of Ar gas bubbling treatment of molten steel in ladle during tapping on the amount of large inclusions ($\geq 100\mu\phi$) in molten steel before and after RH treatment

時間が比較的長いので、介在物浮上分離が容易とされている。しかし一方では、溶鋼の再酸化、浴面フラックスの巻込みなど汚染の機会も多い。そこで、介在物の浮上分離機能を積極的に高めることが清浄鋼を製造するポイントとなる。一例として Fig. 5 に先に開発した二重堰型タンディッシュ構造と介在物低減効果を示す。すなわち、タンディッシュ内の流れが二つの堰の間で上向きに揃えられ、その後浴面に沿った整流となるので、介在物の浮上が容易で低減効果大きい。

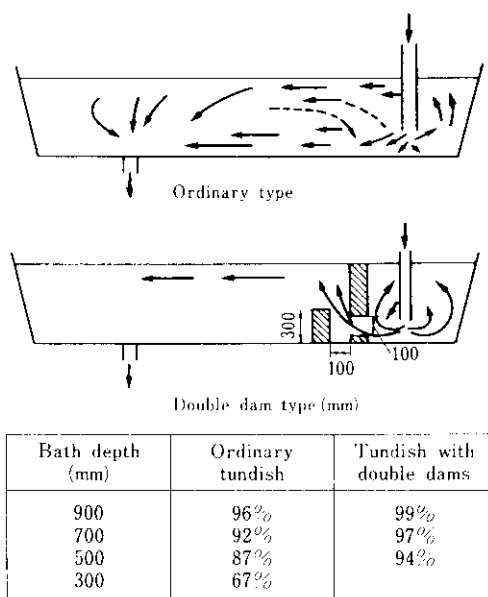


Fig. 5 Water flow pattern in model tundishes and percentage of inclusions removed in tundishes of different design

しかしながら、このように、主として流れのパターンを変えるタイプの堰の場合、サイズが大きく浮上速度が大きい介在物に対する低減効果は大きい、サイズが小さく浮上速度の小さい介在物の浮上分離効果はさほど期待できない。しかるに、高級鋼の大部分は、Al キルド鋼で、この場合、溶鋼中介在物は、直径 10μ 以下の小さい Al_2O_3 粒子が主体であり、しかも、かかる小粒子介在物が、たとえばタンディッシュノズル内壁に付着堆積し⁷⁾、ある程度の大きさに成長した後、離脱してそのまま鑄片内に捕捉されることもあるので、小さい介在物といえども極力低減しておくことが重要である。

このような観点から開発したのが“攪拌強化型堰”であり、以下にその開発経緯の概略を示す^{5,25)}。まず、水モデル実験で攪拌強度の大きい堰形状を検討した。その際、タンディッシュの基本構造としては、介在物の衝突・凝集・成長・浮上分離という過程を考え、上流側に、強攪拌域を設け、下流側に緩流域を設けるものとし、強攪拌域の攪拌強度を高めることに力点を置いた。装置は千葉第2連铸設備の4分の1模型とし、フルード数によりタンディッシュ内の流体力学的条件を相似させた。

実験は Fig. 6 のように、区分された各領域の入側から 23% KCl 溶液のトレーサ 5cc を 3 秒以内にパルス的に注入し、各領域の出側において白金センサーを用いた電気伝導度法によりトレーサ

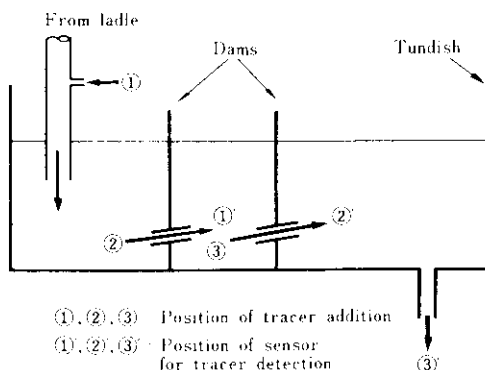


Fig. 6 Arrangement of the tracer adding device and the sensor for tracer detection in water model experiment

の濃度変化を連続測定した。得られた応答曲線をもとに、拡散モデルにより攪拌強度を示すパラメータ、ペクレ数 (Pe) を求めた。

トレーサーの物質収支式は (1) 式で示される。

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} + \frac{E_z}{uL} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- C : トレーサー濃度
- θ : $t/\bar{t}$ ($\bar{t}$ は平均滞留時間)
- E_z : 混合拡散係数
- u : 流速
- Z : 流れの方向の距離
- L : 代表長さ

ところで E_z と Pe との間には (2) 式の関係がある。

$$E_z = uL/Pe \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式を (1) 式に代入すれば (3) 式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

さて、(3) 式を次のような境界条件下で解くと (4) 式を得る。

$$\begin{aligned} Z=0, Z=L, \partial C/\partial Z &= 0 \\ Z=L \quad \int_0^L C \cdot u \cdot dt &= Q \end{aligned} \quad (Q: \text{トレーサー全量})$$

$$C_p = C/C_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta/Pe}} \cdot \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta/Pe}\right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式を用い、実測の応答曲線と対比させて Pe 数を求めた。

実験に供した、代表的な堰の構造とタンディッシュ内全体の Pe 数を Fig. 7 に示す。攪拌強度が最も大きいのは C 型の堰で、この場合は、第 1 堰に設けた二つの円形断面通路を出た流れが互いに衝突するよう構成されており、強攪拌域である第 1 堰と第 2 堰との間の Pe 数でいえば 1.01 ときわめて小さい。ちなみに、この領域のエネルギー供給速度を実機で推定すると、約 38 watt/t steel となり、これは中西の脱酸モデル²⁶⁾によれば、粒子の衝突が十分起こり得る大きさである。

次に、前述の代表的な堰の介在物低減効果を千葉第 2 連铸機で試験した。堰以外の条件、すなわち、鋼種 (API 5LX-X65)、スラブ寸法 (200 × 1700mm)、铸込速度 (1.0m/min) タンディッシュ内溶鋼過熱度 ΔT (25°C)、タンディッシュノズル (AG 質 2 孔型下向 5°)、などは同一に揃えた。

铸造後、スラブ内の 100 μ 以上の大型介在物を X 線透過法で調査した結果を Fig. 8 に示す。水モデル実験で Pe 数が最も小さかった Fig. 7 C の

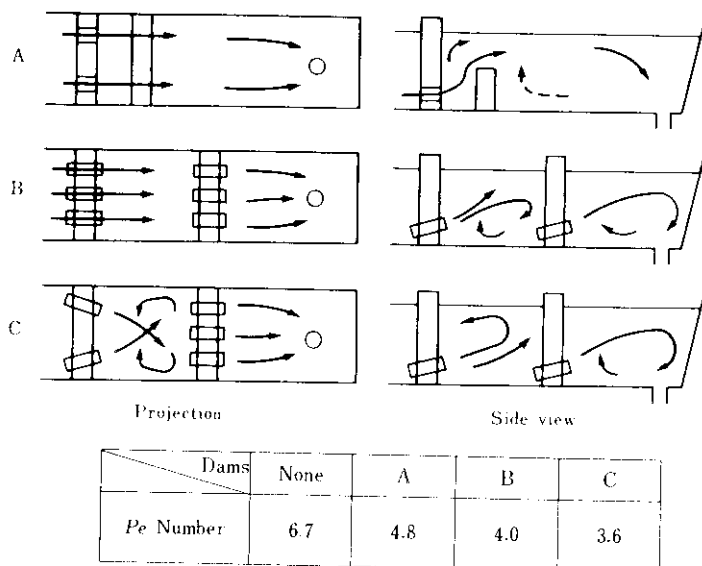


Fig. 7 Relation between design of dams in tundish and pecclet number (Pe) in water model experiment

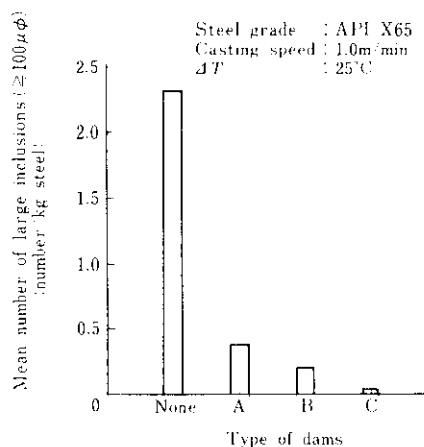


Fig. 8 Relation between mean number of large inclusions ($\geq 100\mu\phi$) in slabs and type of dams in tundish

“攪拌強化型堰”を使用したスラブ内の介在物量が最も少なく、Al キルド鋼の連铸において、タンディッシュにおける溶鋼の攪拌強化が铸片内の大型介在物低減に有効であることがわかった。

3・2・2 タンディッシュ内溶鋼へのCa合金添加

Al キルド溶鋼中の Al_2O_3 系介在物の浮上分離を図る効果的な方法の一つに Ca 合金添加がある。これは高融点の Al_2O_3 系介在物を低融点の $CaO \cdot Al_2O_3$ 系介在物に形態制御し、凝集把大を促進させ、浮上分離しやすくするのが狙いである。連铸の場合、介在物の浮上分離に有利なタンディッシュで Ca 合金を添加すれば、より大きな効果が期待できる⁴⁾。

ここでは、タンディッシュでの Ca 合金添加を铸込中期ばかりでなく、介在物が多発しやすい铸込初期、継目および末期において実施した効果を述べる²⁷⁾。

実験は、千葉第2連铸機において、API X65 級の UO パイプ向け Al キルド鋼を対象とし、Fig. 9 のように取鍋タンディッシュ間の Ar ガスシール内に約 30mm 直径の Ca 合金塊を 200~400ppm Ca 相当添加した。スラブ寸法、铸造速度、タンディッシュ溶鋼過熱度、などの铸造条件は一定に揃えた。铸造後スラブ内介在物に関し、光学顕微鏡と EPMA により形態と組成、X 線透過法により量と分布を調べた。

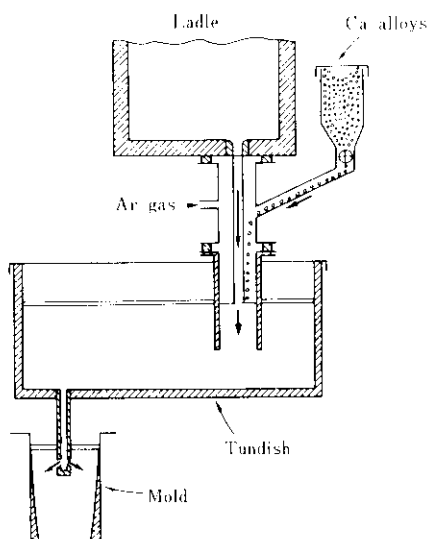


Fig. 9 Apparatus for adding Ca alloys into molten steel in tundish

まず、代表的なスラブ内介在物の形態と組成を Photo. 6 に示す。Ca 添加のない場合は、やや角ばった Al_2O_3 粒子であるのに対し、Ca 添加スラブではほとんどが球状の $CaO \cdot Al_2O_3$ 系に変化している。Ca 含有量の異なる数多くのスラブの調査結果をもとに Ca 含有量と介在物組成の関係を整理して Fig. 10 に示す。Ca 含有量の増大とともに介在物中の CaO 濃度も増大している。鋼中 Ca 量が約 20ppm 以上になれば、介在物中 CaO 濃度が約 40% 以上となり介在物融点が大きく下がるので介在物間の凝集把大、浮上分離が起こりやすくなると推察される。

次に、スラブ内の 100μ および 300μ 以上の大型介在物分布に対する Ca 添加効果を Fig. 11 に示す。Ca を 30ppm 含有したスラブでは著しく湾曲内側の介在物集積が軽減され、とくに 300μ 以上の大型介在物は認められない。Fig. 12 はスラブ内

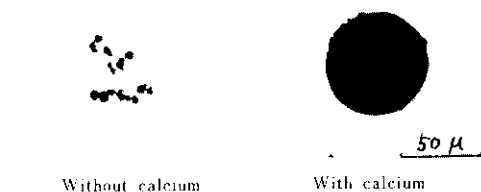


Photo. 6 Typical shapes of oxide inclusions in slabs with and without adding calcium

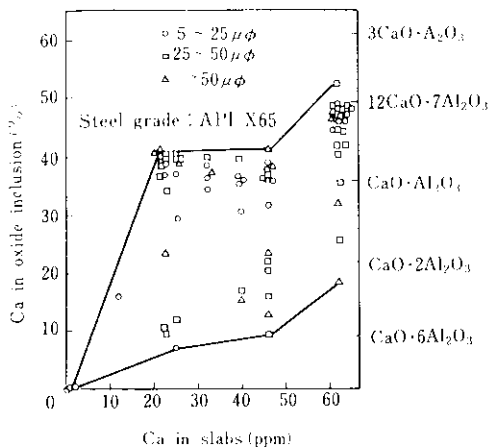


Fig. 10 Effect of calcium addition to molten steel in tundish on the composition of oxide inclusions in slabs

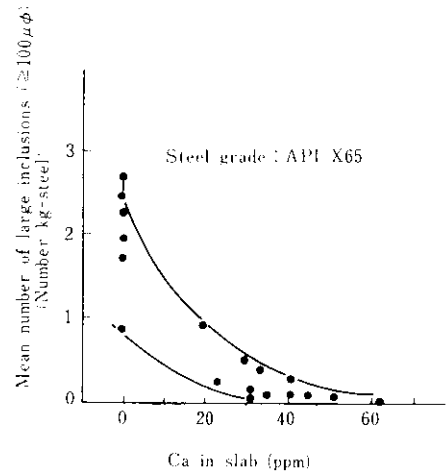


Fig. 12 Effect of calcium addition to molten steel in tundish on the amount of large inclusions ($>100\mu\phi$) in slabs

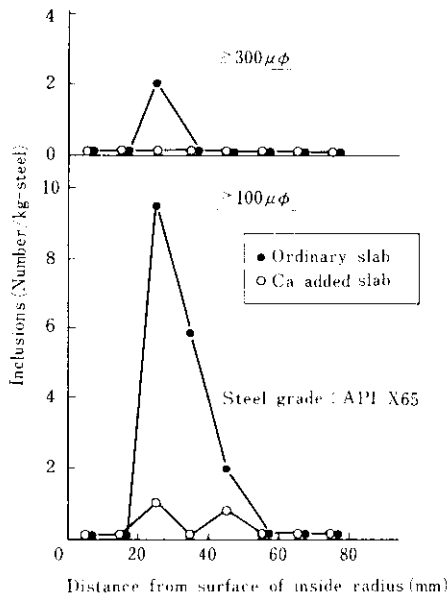


Fig. 11 Effect of calcium addition to molten steel in tundish on the amount of large inclusions in slabs

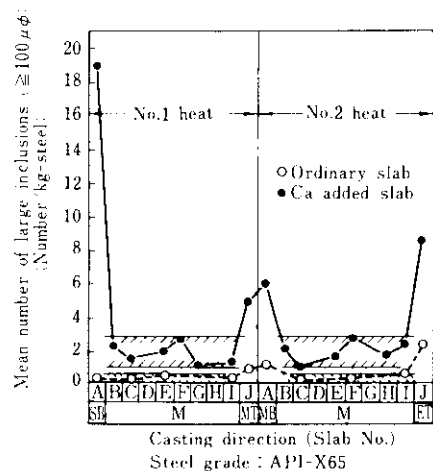


Fig. 13 Improved cleanliness in leading end (SB), junction (MT, MB) and tail end (ET) of sequentially cast slabs with adding calcium in tundish

の 100μ 以上の大型介在物量とCa含有量の関係を示す。Ca含有量が約20ppm以上において、介在物量の低減効果が明瞭であり、この点、前述の介在物形態変化と良く符号している。

次に、鑄込初期、継目および鑄込末期におけるスラブ内 100μ 以上の大型介在物量に対するタンディッシュ内Ca添加の効果をFig. 13にまとめた。

Caを適量添加することにより、大型介在物を鑄込定常期の水準にまで減少させ得ることがわかる。

3.3 連鋳機ストランド内での浮上分離促進 ——垂直曲げ型連鋳機の適用

取鍋やタンディッシュでの介在物浮上分離をいかに促進させても、鋳型内へのある程度の介在物混入は不可避である。したがって、より高い清浄度の鋳片を得るためには、鋳型内あるいは鋳型より下方の、いわゆる“ストランド”内での浮上分

離も併行して同時に促進させることが肝要となる。

ストランド内での介在物浮上促進法としては、垂直曲げ型連铸機の適用、タンディッシュノズル形状の最適化、タンディッシュノズル内への Ar ガス吹込み、介在物吸収能の高いモールドパウダーの使用、など各種の方法が考えられるが、ここではそのうちでも効果の大きい、垂直部を有する連铸機の適用効果について述べる^{7,28,29,31)}。

調査は、UO パイプ向 API X65 級鋼を対象とし、湾曲型千葉第 1 連铸機、垂直部長さ 2.3m の千葉第 2 連铸機および完全垂直曲げ型水島第 6 連铸機において、ほぼ同一の铸造条件下でスラブを铸造し、X 線透過法で 100μ 以上の大型介在物を測定した。

Fig. 14 に各連铸機で铸造したスラブ内厚み方向の 100μ 以上の大型介在物分布を示す。湾曲型機の場合、湾曲内側 $1/4$ 厚近くに介在物集積が顕著に認められるのに対し、垂直曲げ型機の場合には、湾曲内外両側 $1/5$ 厚近くに若干の介在物集積がみられるものの全介在物量は大幅に減少しており、垂直凝固における介在物浮上分離の有利性が明らかである。このような介在物集積に対する垂直凝固方式軽減効果は铸込速度が大きくなるほど、顕著となる³⁰⁾。

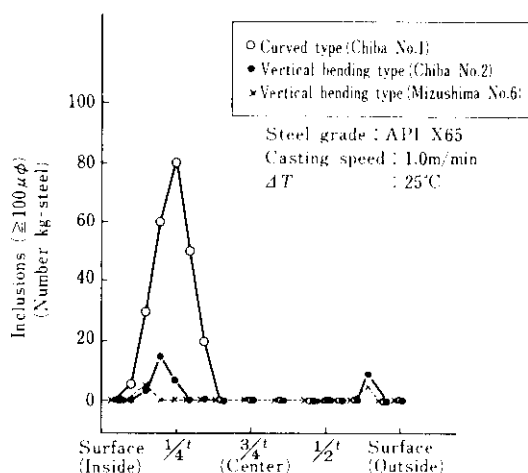


Fig. 14 Distribution of large inclusions ($\geq 100\mu\phi$) in slabs cast on three type continuous casting machines

4. 各種介在物低減法のパイプ用鋼、DI 缶用鋼への適用効果

すでに、述べたように、UO、ERW などのパイプ用鋼や DI 缶用鋼に対する介在物品位の要求は厳しいので、前章で示した介在物低減法を中心に各種介在物対策を検討適用した結果、現在では高い清浄度の铸片が安定して製造できるようになった。Fig. 15 に当社におけるパイプ用鋼および DI 缶用鋼の連铸工程の概要、Fig. 16 にそれら向鋼種の代表スラブ内の 100μ および 300μ 以上の大型介在物分布を示す。パイプ用鋼では 300μ 以上の介在物は見られず、 100μ 以上の介在物が少量存在するのみである。DI 缶用鋼は 100μ 以上の介在物も存在しない。

Table 1 には最近の UO パイプの造管後の高感度超音波探傷成績を示す。小さい介在物をも検出する高感度の超音波エコー指数は、铸込時期を問わず少ない。

Table 2 には最近の DI 缶用材の熱延コイル超音波探傷成績および冷延コイルの磁粉探傷欠陥³²⁾と

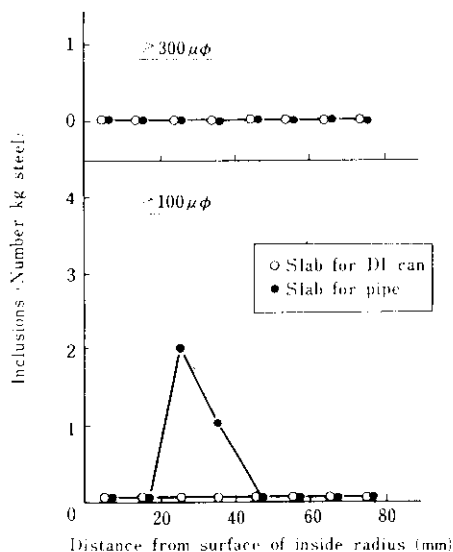


Fig. 16 Distribution of large inclusions in slabs for UO pipes (API X65) and DI cans cast on Chiba No.2 Vertical bending type continuous casting machine

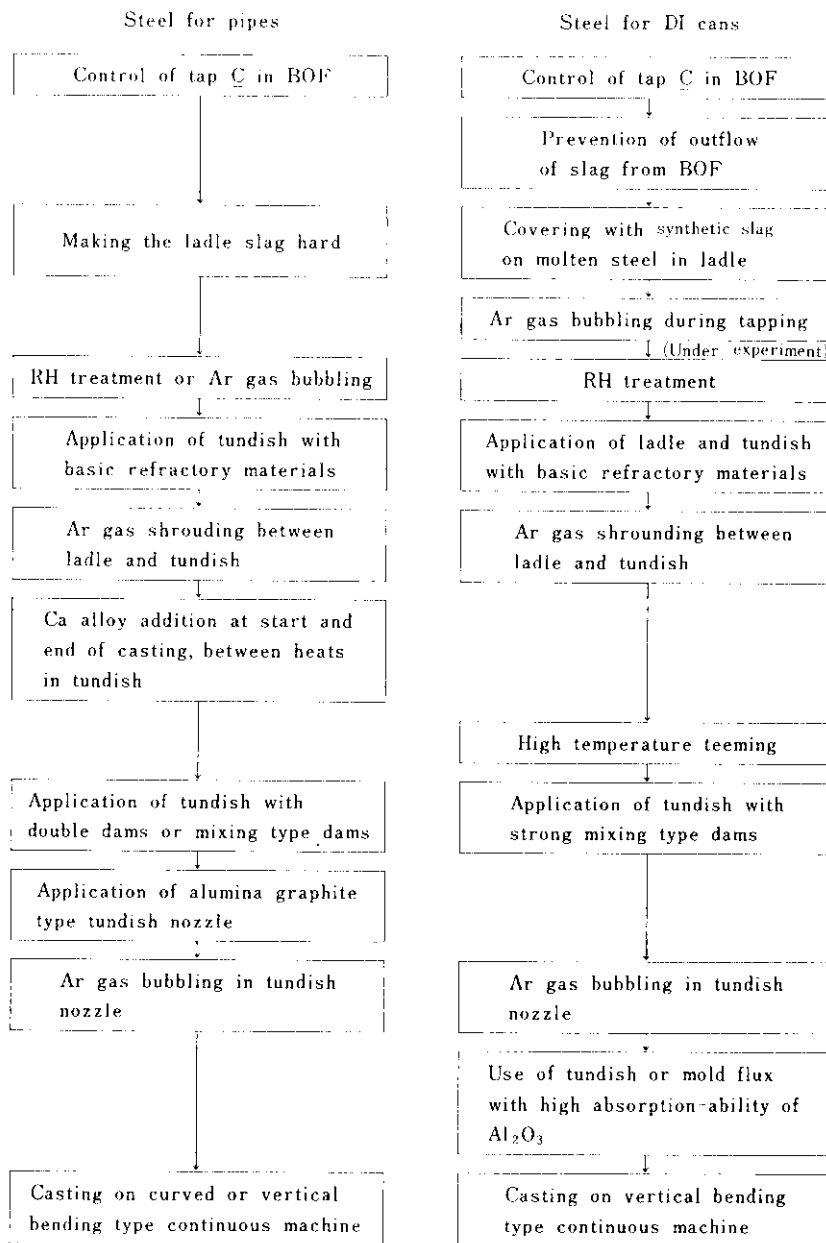


Fig. 15 Processes for producing slabs for linepipes and DI cans in continuous casting

製銑時のフランジ割れ発生率を示す。いずれも良好な成績で、とくにフランジ割れは、欠陥発生率が10ppmを下廻る高洁净のコイルが多く、割れ欠陥が全く発生しないコイルも実現できる高い技術水準を確立した。

5. 結 言

高級鋼種のうちでも、とくに高度の清浄性が要求される UO や ERW パイプ用鋼、清涼飲料缶向

Table 1 Results of highly sensitive ultrasonic test of the latest produced UO pipes from continuous continuous-cast slabs

Casting period	UT index
Start	0.24
Middle	0.10
Mixed part of two heats	0.12
End	0.23

Table 2 Results of Lamb Waves test of hot coils, and magnetic particle test and drawn ironed press test of cold strip coils for DI cans

Coil No.	LW pulses (m ⁻¹)	Number of MT defects (m ²)	Ratio of occurrence of flange crack (ppm)
A	0	0.1	4
B	0	0.1	4
C	0	0	4
D	0	0	24
E	0.006	0.1	12
F	0	0.2	0

けの DI 缶用鋼を連铸工程で製造する場合の大型
介在物低減方法とその効果についてまとめた。現
在では両鋼種とも、介在物起因の欠陥発生は少な

い、満足のゆく高 cleanliness 鋼片を安定して製造してい
る。

参 考 文 献

- 1) 鈴木ほか：鉄と鋼，61 (1975) 13, 2805~2818
- 2) 飯田ほか：川崎製鉄技報，8 (1976) 1, 1~14
- 3) 垣生ほか：鉄と鋼，62 (1976) 14, 1803~1812
- 4) 吉井ほか：鉄と鋼，63 (1977) 11, S 607
- 5) 森脇ほか：鉄と鋼，64 (1978) 11, S 625
- 6) 吉井ほか：鉄と鋼，66 (1980) 4, S 138
- 7) 熊井ほか：鉄と鋼，60 (1974) 7, 926~942
- 8) 植田ほか：鉄と鋼，60 (1974) 7, 943~952
- 9) 垣生ほか：鉄と鋼，60 (1974) 7, 962~972
- 10) Y. Habu et al: Trans. ISIJ, 15 (1975), 246~251
- 11) 垣生ほか：鉄と鋼，60 (1974) 10, A 99
- 12) 玉本ほか：住友金属，26 (1974) 2, 145
- 13) 市川ほか：鉄と鋼，58 (1971) 11, S 688
- 14) 新日本製鉄(株)(光)：日本鉄鋼協会共同研究会第 54 回特殊鋼部会資料 No.9 (1972)
- 15) 新日本製鉄(株)(八幡)：日本鉄鋼協会共同研究会第 54 回製鋼部会資料 鋼 54-6 (1973)
- 16) V. S. Rutes et al: Stal in Eng., (1970), 778
- 17) 日本鋼管(株)(福山)：日本鉄鋼協会共同研究会第 60 回製鋼部会資料 No.12 (1975)
- 18) 大河平ほか：鉄と鋼，60 (1974) 2, 192
- 19) 宮原ほか：鉄と鋼，65 (1979) 4, S 227
- 20) 植田ほか：鉄と鋼，61 (1975) 12, S 472
- 21) 新日本製鉄(株)(広畑)：日本鉄鋼協会共同研究会第 71 回製鋼部会資料 No.7 (1978)
- 22) 小舞ほか：鉄と鋼，65 (1979) 11, S 720
- 23) 山村ほか：鉄と鋼，66 (1980) 4, S 137
- 24) 小舞ほか：鉄と鋼，63 (1977) 11, S 608
- 25) 川崎製鉄(株)：特開昭 54 31013
- 26) 中西：Trans. ISIJ, 15 (1975), 522
- 27) 吉井ほか：鉄と鋼，64 (1978) 11, S 626
- 28) 守脇ほか：鉄と鋼，61 (1975) 11, S 474

-
- 29) 飯田ほか：鉄と鋼，**63** (1977) 11, S 565
 - 30) 児玉ほか：鉄と鋼，**64** (1978) 8, A 123～126
 - 31) 持田ほか：鉄と鋼，**66** (1980) 4, S 142
 - 32) 久々湊ほか：鉄と鋼，**66** (1980) 4, S 375