

討7 連続製造における高潔度鋼の製造方法

川崎製鉄(株) 千葉製鉄所 駒村宏一 久々湊英雄 小嶋英明 越川隆雄
 水島製鉄所 上杉浩之 児玉正範
 技術研究所○吉井 裕 工博 垣生泰弘 理博 江見俊彦

1. 緒言

UOやERW用のパイプ素材をはじめ清涼飲料やビール向けのDI缶用ぶりき素材など特に高い清浄性を要求される鋼の鋳片を連続製造により製造するに関しては、問題となる介在物の大きさ、量、分布、組成、起源などを十分に調べたうえで要求される清浄度を満足しうる製造条件を見い出す必要がある。本報ではこれらの鋼種について転炉溶製から連铸々込にわたって清浄度の改善に有効な対策を確立するため種々の調査と試験を行なった。以下に対策の概略と効果について得られた知見を示す。

2. 実験方法

千葉製鉄所の湾曲型連铸機(№1CCM)と垂直逐次曲げ型連铸機(№2CCM, 垂直部2.4m)および水島製鉄所の垂直曲げ型連铸機(№6CCM, 垂直部2.1m)などのスラブ連铸機により、一般厚板をはじめUO、ERWパイプ、DI缶用ぶりき素材鋳片を種々の条件で製造し鋳片および製品でX線透過法、スライム抽出法、電顕、光顕、磁粉探傷、超音波探傷などにより介在物の大きさ、量、形態、分布を求めた。

3. 結果と考察

3.1 製品欠陥中の介在物と起源; 最終検査で発見される製品欠陥中の介在物を表1に示す。大きさは球に体積換算して $50\mu\text{m}^{\phi}$ 以上である。欠陥になる最小径は製品により異なり、DI缶用ぶりきが最も小さく、パイプ、冷延鋼板の順に大きくなっている。組成は鋼種間の差が小さくCaO-Al₂O₃系、Al₂O₃クラスター主体で、パイプではMnO-SiO₂-Al₂O₃が、冷延鋼板ではCaO-SiO₂-Al₂O₃-N₂Oがまれに見られる。Al₂O₃クラスターは伸延する介在物中に析出して存在するが、単独でも見られる。表2にLa, Ce, Baなどのトレーサー元素を用いて調査した介在物の起源と寄与率を示す。CaO-Al₂O₃系はタンディッシュフラックス¹⁾、Al₂O₃クラスターは取鍋とタンディッシュ間での大気による再酸化、MnO-SiO₂-Al₂O₃は脱酸、および大気による再酸化、と耐火物が主起源であり、含N₂O系はモールドパウダーが主起源であることが推察できた。それぞれの寄与率は鋼種と製造方法の差異によってやや異なるが、DI缶用素材の例¹⁰⁾を表2の下段に示した。寄与率はタンディッシュフラックス、取鍋～タンディッシュ間での大気再酸化、転炉スラグなどが大きく改善すべき点が明らかになった。図1に対策実施以前のDI缶用素材鋳片をスライム抽出して得られた介在物の粒径分布を示す。

表1. 高潔度鋼の製品品質上問題となる介在物

| 鋼種 | 製品欠陥 | 欠陥になる最小径 | 組成 |
|----------|--------|-------------------------|--|
| DI缶用ぶりき | フランジ割れ | $50\mu\text{m}^{\phi}$ | CaO-Al ₂ O ₃ |
| ERWパイプ | UT欠陥 | $150\mu\text{m}^{\phi}$ | CaO-Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ クラスター |
| UOパイプ | UT欠陥 | $200\mu\text{m}^{\phi}$ | MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ クラスター CaO-Al ₂ O ₃ |
| 深絞り用冷延鋼板 | プレス欠陥 | $250\mu\text{m}^{\phi}$ | Al ₂ O ₃ クラスター CaO-Al ₂ O ₃ CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -N ₂ O |

表2 製品欠陥部の大型介在物の起源

| 組成 | 起源 | |
|--|---|---------------------------------------|
| Al ₂ O ₃ クラスター | 脱酸生成物 | 合金剤添加 |
| | 大気再酸化 | 取鍋～タンディッシュ間 |
| | 再酸化 | 転炉スラグ 耐火物 タンディッシュフラックス |
| CaO-Al ₂ O ₃ | 各種スラグ | 転炉スラグ タンディッシュフラックス モールドフラックス |
| | | 合金剤添加 |
| | | 取鍋～タンディッシュ間 |
| MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ | 脱酸生成物 | 耐火物、ノズル |
| | 再酸化 | タンディッシュフラックス |
| | 耐火物 | モールドフラックス |
| CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -N ₂ O | 各種フラックス | タンディッシュフラックス |
| | | モールドフラックス |
| 寄与率 | タンディッシュフラックス 47% 大気再酸化 20% 転炉スラグ 5% | 脱酸生成物 28% 再酸化物 モールドフラックス 耐火物 |

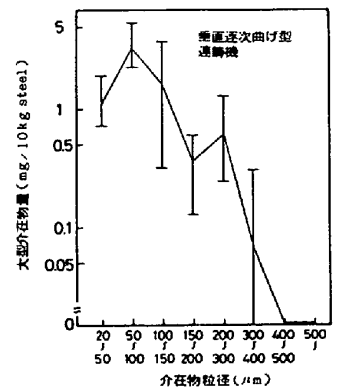


図1 DI缶用素材鋳片内の介在物の粒径分布

有害な $50 \mu m^{\phi}$ 以上の介在物が鋼 10 kg 中に平均約数個と多く、欠陥になる介在物径が比較的大きい UOパイプにおいても有害な $250 \mu m$ 以上のものが平均約 0.5 個含まれており改善を要する。

3.2 大型介在物低減対策； 連铸機種の影響をはじめ主として垂直逐次曲げ型連铸機による調査試験と主要対策に関して述べる。

3.2.1 連铸機種の影響； 各連铸機により 50 キロ厚板材を铸造した。図 2 に X 線透過法による $100 \mu m^{\phi}$ 以上の大型介在物量を比較して示した。垂直曲げ型連铸機では集積がほとんど認められない²⁾。垂直逐次曲げ型連铸機では湾曲側内面に集積があり、垂直曲げ型連铸機に比較してピーク値で 4~5 倍、铸片内面側 1/2 厚平均で約 2 倍大きい。湾曲型連铸機では集積がより顕著であり垂直曲げ型連铸機に比較してピーク値で 20~30 倍、平均値で約 10 倍大きい。図 3 に垂直逐次曲げ型と湾曲型（水島 No. 5 CCM）での X 線透過法による铸片内の $250 \mu m^{\phi}$ 以上の大型介在物量を示した。前者では $1.4 m/min$ までは介在物の増加が小さい⁶⁾。これらの結果から $100 \mu m$ 以上の大型介在物の低減には铸型および直下の垂直部が長い連铸機ほど明らかに有利である。

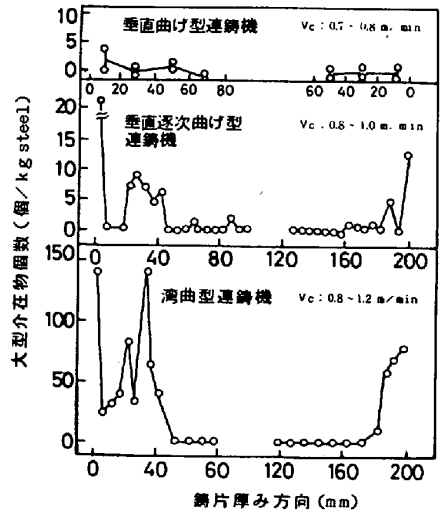


図2 各連铸機による铸片内の $100 \mu m$ 以上の大型介在物の分布

3.2.2 取鍋〜タンディッシュ間の大気酸化防止とスラグの叩き込み防止； 取鍋からタンディッシュ間への注入流の大気シール方法を従来の Ar ガスパイプ方式からサンドシール方式⁵⁾に改め、さらに注入管を設けてスラグの叩き込みを防止することにより大型介在物は約 1/2 近く減少した。とくに $200 \mu m^{\phi}$ 以上の大型介在物の個数が大幅に減少し、UO や ERW パイプの無欠陥率が向上した。

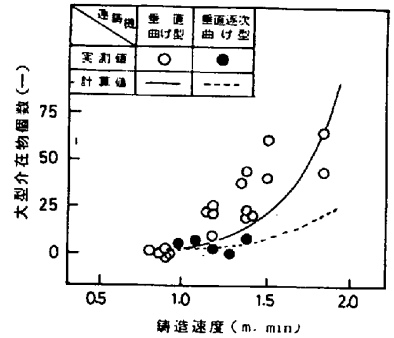


図3 铸造速度与 $250 \mu m$ 以上の大型介在物個数

3.2.3 渦流によるタンディッシュフラックスの吸込防止； タンディッシュノズル直上に L_2O_3 を均一配合したタンディッシュフラックスを配置し、タンディッシュ内の鋼浴深さを定常位置から徐々に降下させつつモールドパウダー中の L_2O_3 濃度を分析し、上述のフラックスの吸込量を測定した。図 4 に結果を示す。吸込量は鋼浴深さが減じるにしたがって直線的に増加する。吸込が生じなくなる鋼浴深さは約 $500 mm$ である。非定常域铸片の清浄度が向上しない原因の一つとして、上述のフラックスの叩き込みとともに渦流による吸込の影響が大きいことが本試験から明らかになった。そこで水モデル実験により渦防止効果のある 2 種類の堰を選びこれを DI 缶用素材の铸造に用いた。図 5 に結果の 1 例を示す。特殊堰 A を用いるとスライム抽出によるスラブ内の $100 \mu m^{\phi}$ 以上の大型介在物量は疑似ストッパーからの Ar ガス吹込の B、対策なしの C に比較して少なく、非定常域铸片の清浄化に優れている¹⁰⁾。

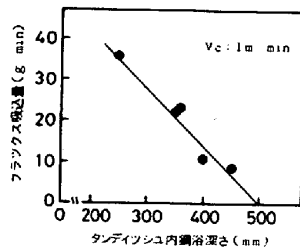


図4 タンディッシュ鋼浴深さとタンディッシュフラックス吸込量

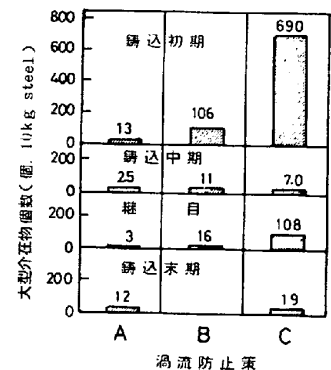


図5 渦流防止諸対策と铸片内の $100 \mu m$ 以上の大型介在物量

3.2.4 タンディッシュへの Ca 添加； UO や ERW パイプの UT 欠陥部の Al_2O_3 クラスタや $CaO-Al_2O_3$ 等の介在物をより低融点化して、凝集と浮上による減少を図るにはタンディッシュへの Ca 添加が有効である³⁾。最適 Ca 含有量は $30 \sim 50 ppm$ の範囲にあり、UO パイプの UT 欠陥個数は図

6のように改善された。図7は大気酸化の影響が大きい非定常域
 鋳片への影響を示す。X線透過法による鋳片内の大型介在物個
 数はCa添加により定常域鋳片と同程度に
 なり製品への充当が可能となった。

3.2.5 タンディッシュ堰形状； 先
 に開発した二重堰付タンディッシュ¹⁾は溶
 鋼の局部的な速い流れを遮断し滞留時間
 を延長することにより介在物を浮上分離
 させることを目的としており、200μ

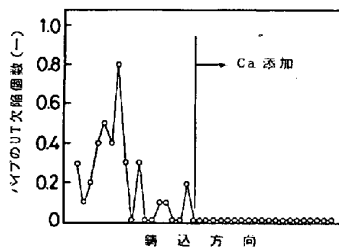


図6 UOパイプのUT欠陥に及ぼすCa添加の影響

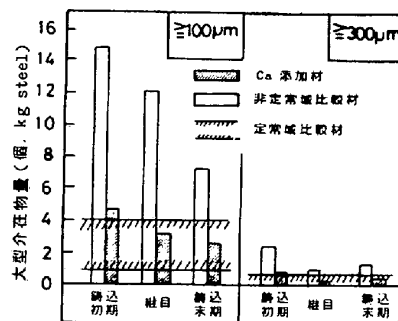


図7 タンディッシュへのCa添加による非定常域鋳片の清浄効果

m^φ程度の大型介在物の除去には効果があった。しかしAl₂O₃クラスターをはじめ小径介在物の除去にはなお不十分であった。そこで滞留時間をさらに延長すると同時に溶鋼を混合攪拌させることにより微細な介在物を凝集肥大させ、続く下流域の

表3 堰形状と攪拌強度

| 堰形状 | 堰なし | A堰 | B堰 | C堰 |
|-----|------|------|------|------|
| Pe数 | 6.67 | 4.76 | 4.00 | 2.86 |

流れの緩慢な領域で浮上除去する効果を狙って図8に示す形の堰についてUOパイプ素材の
 製造試験を実施した。表3は水モデル実験により
 電解質溶液の混合分布曲線から求めた攪拌力の
 指標となるPe数を示す。攪拌力はC堰が最も大
 きくB、Aの順に小さくなる。図9に製造結果を
 示す⁴⁾。パイプのUT欠陥個数は攪拌の大きい
 C堰が最も少なくB、Aの順に増加する。水モ
 デル実験によれば滞留時間にはほとんど差がないので、C堰の効果は単
 純に攪拌力の差と考えられる。これらBおよびCの攪拌堰は上述のCa
 添加法と併用することによって非定常域鋳片を含む鋳片の清浄性が向上
 し、UOパイプの無欠陥率も向上した。

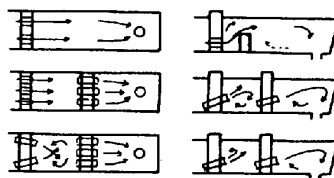


図8 各種堰形状

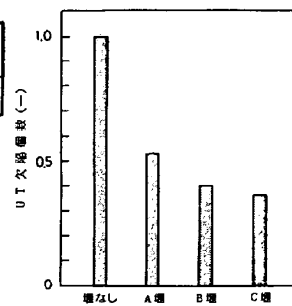


図9 堰形状とUOパイプの超音波探傷欠陥個数

3.2.6 転炉スラグの改質と流出防止；

取鍋内に流出した転炉ス

ラグは溶鋼中に分散し、その一部は連鋳モールド内にまで残留することが
 転炉スラグ中に投入したBaOトレーサーにより明らかとなった。こ
 の際流出量が多いほど大型介在物量、酸素量ともに増加する。一方スラグ中のT、Feが多くなると再
 酸化によりAl₂O₃が増加する。そこでスラグの流出量を減少させるとともに改質固化試験を行なった。

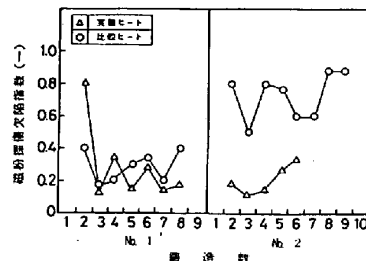


図10 DI缶用ぶりきの磁粉探傷欠陥個数に及ぼす出鋼時のスラグカットと改質の影響

図10に結果を示す。DI缶用ぶりきの磁粉探傷欠陥個数は第1ヒート、第2ヒートともに減少し、
 第2ヒートでは大きな効果が得られた。

3.2.7 タンディッシュノズルの吐出孔角度； ノズルの材質はSiO₂
 質をAl₂O₃質にかえることにより、ノズル溶損に起因するMnO-SiO₂-
 Al₂O₃系の介在物は減少した。形状的には吐出孔角度を種々変えて鋼種
 と鋳片寸法に適合する条件を水モデル実験をはじめ実機試験で検討した結果、
 上述の鋼種、寸法に関係なく水平、およびやや上向きの角度が介在物低減
 に好ましいことがわかった⁸⁾。しかし、図11に示す40キロ鋼を対象

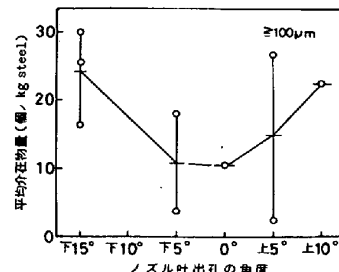


図11 濃濁ノズルの吐出孔角度と大型介在物量

とした多数の試験ヒートの集計結果によれば、上向きノズルは清浄化効果はあがるが、上向き5°の例に
 見られるように、ノズルの浸漬深さが大きくできない場合にはモールドパウダーの巻込を起し介在物
 量が増加することがある。これを考慮し実際は水平およびやや下向きが好ましい。

3.2.8 非定常域鑄片の清浄化法； 鑄込初期，継目，末期とも別個の対策が必要と考えるが，基本的には上述の4つの方法，すなわち(1)取鍋とタンディッシュ間の大気酸化防止，タンディッシュフラックスの叩き込み防止，(2)渦流防止用堰，(3)Ca添加，(4)強攪拌型の堰の使用，を要求される清浄度に応じて選択して採用していくことで定常域鑄片とほぼ同等のものが得られるようになる⁵⁾。

4. 対策後の鑄片および製品の品質

以上述べてきた諸対策に加えて，(1)取鍋とタンディッシュ耐火物の改善，(2)出鋼時のArバブリングによる清浄化処理⁹⁾，(3)ノズル閉塞防止，(4)介在物吸収能のよいタンディッシュフラックスの開発，なども影響の大きい要因として注目してきた。これらの総合効果によりモールドへ注入する溶鋼の清浄性が向上し，連鑄機種による品質差を実用上問題にならぬ程度にすることができた。図12にDI用素材鑄片内のスライム抽出による50μm^φ以上の大型介在物を機種別に比較して示す。垂直逐次曲げ型連鑄機による鑄片の介在物量は垂直曲げ型連鑄機のそれと比較して約2倍多いが，対策前の水準と比較して約1/100に改善されている。介在物の粒径分布は，図13に示すように，鑄込中期，継目の鑄片には150μm以上の大型のものは認められない。鑄込初期の鑄片には，約1%とやや多い。DI缶のフランジ割れ欠陥に特に問題となる100μm^φ以上のものは，鑄込中期では鋼10kg中に，平均0.012%（約4個）と最も少なく，継目では平均約0.05%（約15個），鑄込初期では2.5%と順に多くなる。図14に多連時の影響を示す¹⁰⁾。対策後のDI缶用ぶりの磁粉探傷欠陥個数は，目標値の0.4個/m²以下を示し4連を重ねても増加せず，ヒートの継目でも特に高いピークはない。上述の対策後，DI缶のフランジ割れ欠陥は鑄込中期では，50ppm以下に低位安定し，そのうち数ロットについては10ppm以下にまで減少した。継目では清浄度の安定性が鑄込中期に比較してやや劣るが，製品化してもほとんど問題ない水準にある。一方ERW，UOパイプにおいては非定常域鑄片のUT欠陥は，定常域鑄片とほとんど同水準にまで高められている。

5. 結 言

UOやERW用のパイプ，およびDI缶用ぶりき，など高い清浄性が要求される素材を連鑄で製造するべく，水モデル実験をはじめ実機によるトレーサー実験などの基礎調査をふまえて種々の対策を実施した。その結果，清浄度に対する要求が最も厳しいDI缶についてもフランジ割れ欠陥がほとんど発生しない安定した製造法を確立することができた。

6. 参考文献 (1) 垣生他；鉄と鋼 62(1976)P1803 (6) 児玉他；鉄と鋼 64(1978)A123
 (2) 大森他；鉄と鋼 63(1977)S564 (7) 吉井他；鉄と鋼 66(1980)S138
 (3) 森脇他；鉄と鋼 63(1977)S607 (8) 浜上他；鉄と鋼 66(1980)S141
 (4) 森脇他；鉄と鋼 64(1978)S625 (9) 川鉄技報；Vol.12, No.3(1980)P54
 (5) 吉井他；鉄と鋼 64(1978)S626 (10) 川鉄千葉；第77回製鋼部会(1980)重-3

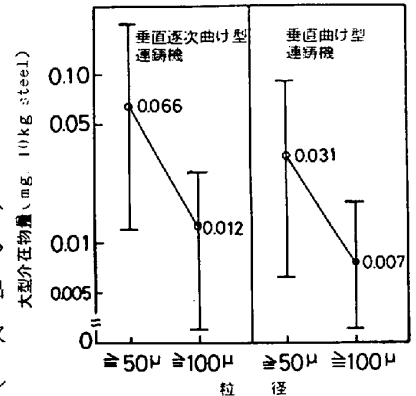


図12 DI缶ぶりき用素材鑄片内の大型介在物量

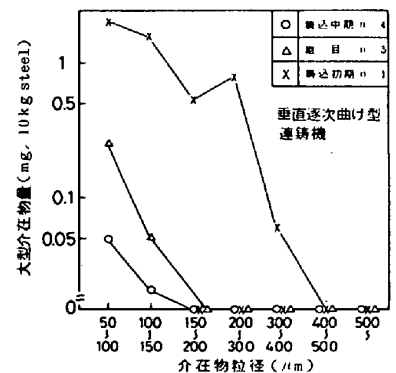


図13 DI缶ぶりき用素材鑄片内の介在物粒径分布

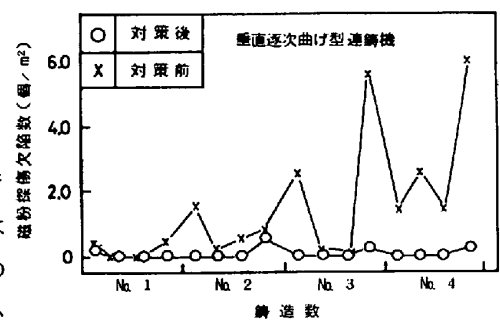


図14 多連鑄時のDI缶用ぶりきの磁粉探傷欠陥個数