

高純度鋼 (I F 鋼) の製造技術の進歩

Advances in High-Purity Steel (I F Steel) Manufacturing Technology

木村 秀明^{*(1)}
Hideaki KIMURA

抄 録

近年の自動車用鋼板に対する防錆特性のニーズが高まる中、溶融亜鉛めっき鋼板などの表面処理鋼板の重要性が急増してきた。その素材として、I F 鋼が開発され、その製造量が大幅に増加している。一方、この I F 鋼は、従来の鋼種とは異なった特性をもち、特に、スリバーやブローホールなどの製鋼起因の欠陥が最終製品で発生しやすい。この課題に対し、新日本製鐵では、多岐にわたる調査解析と対策を施し、その大量生産体制を確立してきた。本報では、これらの I F 鋼の高品質化・安定製造体制の確立に向けた製鋼分野での改善、開発の経緯について紹介した。

Abstract

To meet intensified needs for rust-resistant properties of steel sheet for automobiles, surface-treated sheets, such as hot-dip galvanized sheet, have gained in importance. The production amount of I F steel developed to meet such needs has been rapidly increasing. As I F steel has characteristics which differ from those of conventional steels, the imperfections encountered in the steelmaking process, such as slivers and blowholes, are likely to be carried through to appear as defects on final I F steel products. To eliminate such defect, Nippon Steel Corporation has established the I F steel mass production system by conducting extensive investigation and analysis and taking a variety of countermeasures. The improvements made in the steelmaking field for the establishment of a high-quality I F steel production system and future prospects are described.

1. はじめに

自動車用鋼板は生産量の増加に加えて、防錆特性の要求が強まるなかで冷間圧延鋼板から溶融亜鉛めっき鋼板等の表面処理鋼板へと大きく移行してきた。加工性、時効性に優れた I F (Interstitial Free) 鋼は合金化処理を施す連続焼鈍処理めっき鋼板用素材として最適であり、溶鋼真空脱ガス処理等の溶製技術の進歩による大量生産が可能となってきたことと相まって主流になりつつある。なかでも防錆要求の高まりによって検査基準の厳しい外観基準厳格材 (外板) の比率、量がともに増加している。この I F 鋼は従来の鋼種とは異なった特性を持つ反面、従来の製造技術の延長線上では製造し難く、特に大量生産技術の開発と安定した品質確保対策という両面から取り組みを進めてきたが、新日本製鐵では各製鉄所一丸となった取り組みによりその体制を確立して現在に至っている。

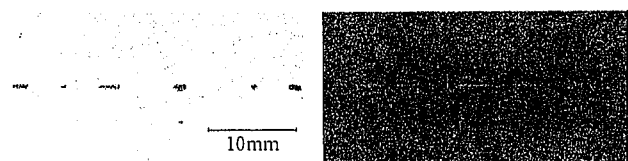
本稿では、品質向上と量産体制について I F 鋼の製造技術の現状と今後について紹介することとした。

2. I F 鋼とは

I F 鋼とは鉄に対して浸入型固溶元素である C, N の含有量をできるだけ少なくしたうえで、さらにこれらと化合物を形成する Ti,

Nb などを当量以上添加してマトリクスからの固溶 C, N を完全に除去した高純度鋼である。この鋼は低降伏点、非時効性、大きな全伸び、高い塑性歪比といった他にはみられない優れた鋼材特性を示し、連続焼鈍ラインや溶融亜鉛めっきラインにおける製造に適している。このように I F 鋼は機械特性が優れているが、製造開始当初は写真 1 に示すようなブローホール、スリバーといった表面疵が発生し、低炭素アルミニウムキルド (Al-k) 鋼に比べると歩留りの悪い点が問題となり、これらの原因を究明するとともに対応策を開発し、品質の向上を図ってきた。

I F 鋼で問題となる疵のうち、ブローホールは鋼板表面の膨れ状疵であり、内部に Ar ガスが内在している。その発生メカニズムは、欠陥の発生部位と鑄片を比較調査した結果から以下のように推定さ



(a) ブローホール (b) スリバー

写真 1 IF 鋼の成品で検出された欠陥の例

^{*(1)} 名古屋製鐵所 設備部 次長

れる。 casting中に浸漬ノズル閉塞防止のために吹き込まれ、モールド内の溶鋼に巻き込まれた Ar がモールド内で溶鋼下降流速と気泡上昇速度がバランスする部位（鑄片の短辺近傍）の集積帯に捕捉され、圧延時に気泡圧力が増大して疵になる。

一方、スリバーは鋼板表面に線状に発生する疵で、鋼の表面に露出した介在物が原因となっていると考えられる。その発生機構は、溶鋼流動が弱い浸漬ノズル近傍の鑄片表層部に捕捉されたアルミナやパウダー系の介在物と介在物を伴った気泡が圧延時に表面に露出したものと推定される。

このように IF 鋼の表面疵は材料が柔らかく疵になりやすいこと、コイル表面処理により顕在化すること、出荷時に厳格な検査が実施されること等、圧延以降の工程に関わる要素も多いうえ、品質要求の厳格化に伴って超微小欠陥までも対象とするようになっており、入念な品質造込みが行われている。又、製鋼工程においては IF 鋼は低炭素 Al-k 鋼とは異なった現象がみられる。このため、従来の Al-k 鋼の製造技術の延長での対応では不十分であり、図 1 に示すブローホール例のように欠陥の発生率は低炭素 Al-k 鋼に比べて高くなる。これは極低炭素鋼であること、固溶元素を固定するために Ti や Nb を添加するという IF 鋼の特徴そのものに起因していると考えられる。

具体的にはその一として、IF 鋼は低炭素 Al-k 鋼に比べて浸漬ノズルの閉塞が起こりやすいことが挙げられる。特に casting時に連々鑄が進むと急速にノズル閉塞が進むことがあり、ノズルからの溶鋼吐出流が不均一となり強い下降流が生じて、大きな気泡が未凝固溶鋼の深部にまで達し、ブローホールの発生を促進する。さらに、湯面の変動が大きくなりパウダーが巻き込まれやすくなりスリバーも増加する。この原因は IF 鋼が極低炭素鋼で鋼中酸素濃度が高いことや鋼中 Ti とノズル耐火物とが反応してノズルが変質することから、ノズル壁にアルミナが付着しやすくなるためと考えられる。

第二はモールドパウダーが変質しやすいことである。IF 鋼では鋼中 Ti とパウダー中 SiO₂ とが反応してパウダー中の TiO₂ が増加し、パウダーの粘性が低下して巻き込まれて、パウダー系のスリバーが発生しやすくなる。

第三は IF 鋼は気泡や介在物が鑄片内に捕捉されやすいことである。これは IF 鋼は極低炭素で凝固温度が高く、かつ液相線と固相線温度の差が小さいので固液共存層が非常に薄く、凝固の進行が速いために浮上中の気泡及び介在物が鑄片の凝固シェルに捕捉されやすいためと推定される。又、写真 2 に示すように鑄片表層部分ではオシレーション等により初期凝固シェルが鑄片内部へ倒れ込んで傾いている部分（爪）で気泡が捕捉されやすいが、IF 鋼は低炭素 Al-k 鋼に比べてこの爪が深く、特に介在物や気泡が捕捉されやすくな

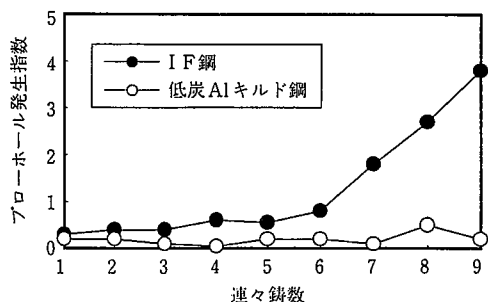


図 1 鋼種によるブローホール発生状況の違い

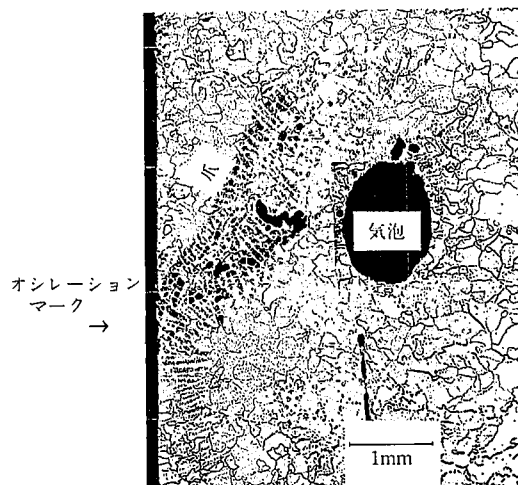


写真 2 オシレーションマーク部で捕捉された気泡の例

る。これらのことから集積帯や表層部での気泡数が多くなり、ブローホールやスリバーも発生しやすくなると考えられる。

このように IF 鋼の品質特性と操業条件との関係を解明することが、対策技術の開発に当って重要であり、その結果、従来からのパウダーやアルミナ系介在物対策に加え、気泡捕捉についての対策も必要であることが判明し、対策を講じた。

3. 新日本製鐵における IF 鋼製造技術

新日本製鐵における IF 鋼の生産高は図 2 に示すように、自動車用表面処理鋼板の需要拡大に伴い急速に増大し、現在では年間 3 000 000t 近いレベルに達している。この量産化と品質厳格化に応えるため、全社ワーキング・グループを組織し、これらの問題解決に取り組んできた。その一例として、名古屋製鐵所における IF 鋼の大量生産・高品質対策の取組み概要を図 3 に示す。取組みに当たっては前述した IF 鋼の特性を考慮し、品質欠陥の発生メカニズムを解明し、造込み技術の改善と操業管理指標による品質保証機能強化という両面から対策を進め、需要家に満足いただける製造体制を確立し現在に至っている。

表 1 に新日本製鐵の IF 鋼製造方法を示す。まず、精錬炉及び連続 casting タンディッシュにおいては、スリバーの直接原因となったり、ノズル閉塞をひき起して間接的にブローホールやスリバー原因となるアルミナ系介在物の減少を狙った溶鋼浄化対策が徹底的に行われる。溶鋼の酸化源となるスラグ、耐火物、空気の影響をなくすために従来より進めてきた転炉スラグカット、取鍋スラグの改質、非酸化性耐火物の使用、RH での [O] コントロール、タンディッシュの完全シール、取鍋ノズルの浸漬開孔、非酸化性タンディッシュ保温材の使用等に加えて、各所では溶銲予備処理プロセスによる転

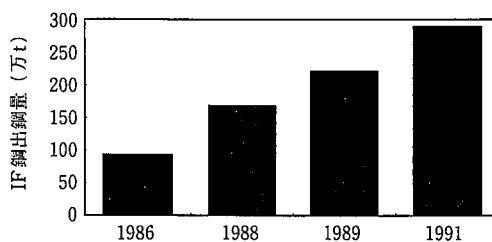


図 2 新日本製鐵における IF 鋼出鋼量の推移

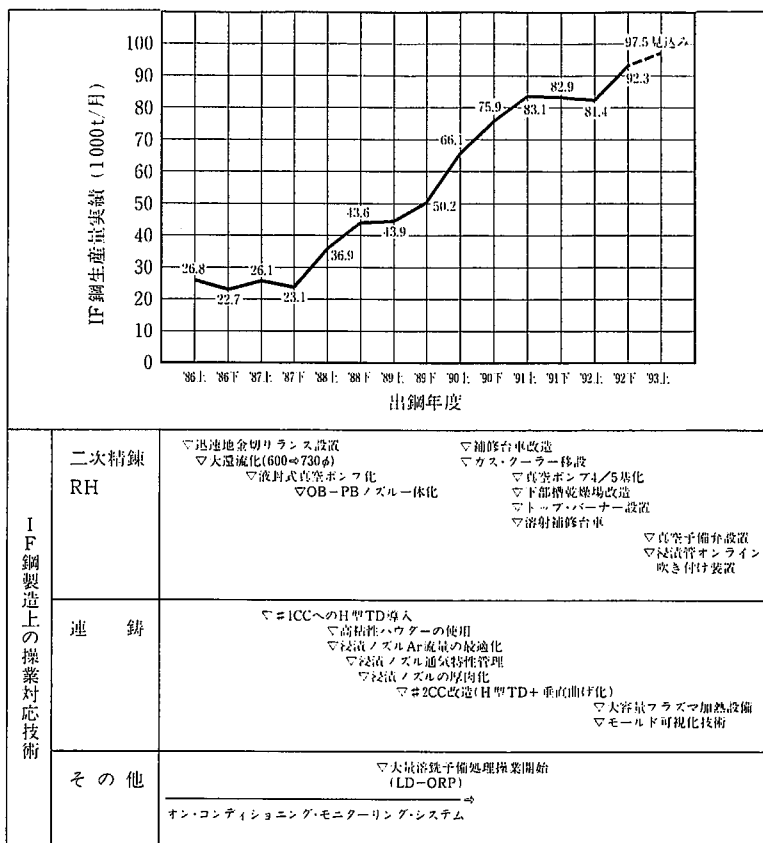


図 3 名古屋製鐵所におけるIF鋼製造量の推移と主な製造技術の変化

炉スラグ容積低減とスラグ性状の改善，さらに広畑製鐵所では取鍋プラズマ処理を適用して，より徹底したスラグ改質が行われている。

表 1 新日本製鐵におけるIF鋼製造プロセス

工程	機 能	考 え 方	対 策
予備処理	脱磷	転炉スラグ量の減少	溶銑脱磷処理
転 炉	吹錬	アルミナ生成量低減	吹止め[C]規制
	出鋼	スラグ流出量減少	スラグストッパー，ポール
二次精錬	取鍋	耐火物汚染源防止	非酸化性耐火物
	スラグ処理	スラグの酸化源減少	プラズマ装置
	RH	アルミナ生成量低減 介在物の浮上促進	脱酸前[O]管理 還流時間管理
連 鋳	取鍋ノズル	スラグ巻込み防止 スラグ流出防止	浸漬開孔 ストッパー，スラグ流出検知
	タンディッシュ	空気酸化防止 保温材汚染防止 温度一定操業 スラグ巻込み防止 介在物浮上促進	シールドタンディッシュ SiO ₂ レス保温材 プラズマ，誘導加熱 タンディッシュ形状 H型タンディッシュ
	浸漬ノズル	パウダー巻込み防止 介在物侵入防止 ノズル閉塞防止	Ar流量・圧力管理 ノズル形状 ZrO ₂ -CaO, SiO ₂ レス材質
	鋳型	パウダー巻込み防止 // 表層部捕捉防止 // 集積帯捕捉防止	高粘性パウダー 湯面制御 オシレーション制御 鋳型内電磁攪拌 垂直曲げ型連鋳機

又，介在物の浮上促進除去に関してはRH処理方法やタンディッシュ形状の最適化が図られてきた。名古屋製鐵所に採用された大型H型タンディッシュは溶鋼のロングパスと取鍋交換時2鍋同時注入が特徴であり，前者で介在物の浮上促進を，後者で取鍋交換部の清浄性悪化の防止を狙いとしている。これらの対策によりアルミナ系介在物によるスリバーは減少した。

次に，連々鋳時に最も重要な浸漬ノズル閉塞防止の観点から，上記対策に加えて，取鍋交換時の非定常状態を減少させるためにタンディッシュ誘導加熱やプラズマ加熱法が導入された(第4章に詳述)。さらに，アルミナの付着しにくい浸漬ノズル材質として，耐火物表面に，低融点層を形成させ，図4に示すような付着抑制効果のあるZrO₂-CaO-C系ノズルを開発し，実用した。又，耐火物の変質しにくいシリカレスのアルミナグラファイト系ノズルも開発し，実機適用を図っている¹⁾。このような総合的対策の推進により現在では連々鋳後半のブローホール発生を防止でき品質が安定した状態で，連々鋳を継続できるようになっている。

連続鋳造技術においてはモールド内のパウダー巻込み防止技術が重要である。材質面では，溶鋼と接しても粘性が維持でき巻き込みにくい高粘性パウダーが開発されてきた。又，操業面では前述のノズル閉塞防止，アルゴン吹込みガス量の適正化，モールド湯面レベル安定化，オンライン操業モニターによる操業制御が導入された。これらにより，パウダー系のスリバー発生は大きく減少した。さらに，スリバーを誘因する前述の爪に関係するオシレーションマークの低減のためにモールドオシレーションの最適化を行っており，名古屋製鐵所では油圧シリンダー式オシレーション装置を導入し，鋳造速度に応じて振幅，振動数を独立に制御している。

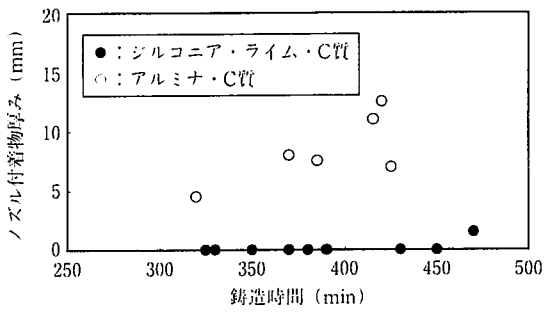


図4 ジルコニア・ライム・グラファイト質浸漬ノズルのノズル附着抑制効果

又、流れの弱いノズル近傍のメナスカス部に溶鋼流動を与えることは気泡や介在物の捕捉防止に効果があると考えられる。調査の結果、図5に示すようなスリバー発生率の減少効果が確認されており、鋳型内電磁攪拌装置の導入が進められている²⁾。

一方、浸漬ノズルからの吐出流を制御又は最適化する方法として溶鋼流動や凝固現象が重力に対して均等に起こるように配慮した上部に垂直部分を有する垂直一曲げ型連続鋳造機が導入された。これはノズル吐出孔径や角度の適正化技術をベースに置きつつも、気泡や介在物の重力場浮上という現象には基本的には垂直凝固場が最適であるというコンセプトによって実施されたものである。垂直曲げ化による効果の例を図6に示すが、鋳片内の気泡個数が大きく減少しており、ブローホールの発生が大幅に低減されている。

新日本製鐵におけるIF鋼の生産高、連々鋳数(ch/TD)、鋳造速度(t/min)と一貫製造歩留の実績推移を表2に示す。上述してきた諸対策により鋳造速度の向上や連々鋳数の増加によりIF鋼量産要請に応えるとともに、当初本質的に困難と予測された低炭素Al-k鋼並みの品質確保も種々の造込み技術の確立により達成し、品質要求レベルの厳しい自動車用外板向けIF鋼でも、その一貫製造歩留は当初レベルから10%を超える向上となっており、低炭素Al-k鋼の歩留に近いレベルに到達している。

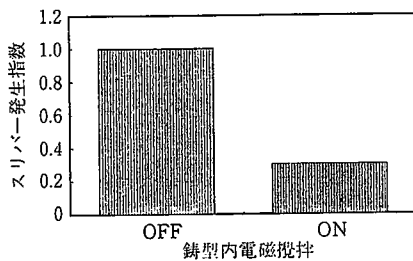


図5 鋳型内電磁攪拌によるスリバー発生低減効果

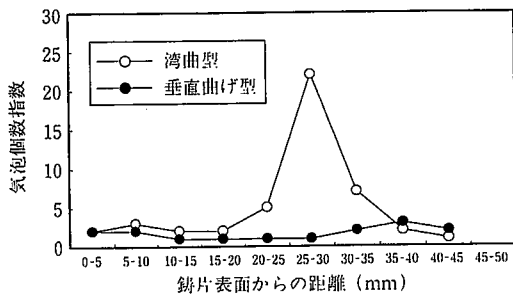


図6 垂直曲げ型連続鋳機による鋳片内気泡低減効果

表2 新日本製鐵におけるIF鋼製造実績の推移

製造年	1988	1989	1991
IF鋼製造量(万t)	169	222	290
ch/TD	4.81	5.01	5.48
最大t/min	4.1	5.0	5.6
一貫歩留(%)	72.9	79.4	83.7

4. IF鋼製造技術としての今後の動向

前述したようにIF鋼は高品質で厳格な自動車用外板素材として短期間に増産してきた上に、鋼が特異な凝固現象を伴っていることから、鋳造に当たっては従来の低炭素Al-k鋼に比べれば過剰ともいえる種々の直接的、間接的操業管理規制を課してきた。最近になって、その管理すべき項目なり、相互の関連要素など最適操業基準に関わる本質がようやく明らかにされつつある。又、品質保証体制についてはそれぞれの実績値がその管理基準を逸脱した際には他品種への振替処置という従来の方法にて対処しているのが実態であるが、最近の直行・直結化の動向を考えると、他の品種への影響も無視できない面がでてきている。

したがって、今後のさらなるIF鋼の低コスト量産化と品質厳格化への対応を勘案すると、従来の総括的操業管理と異常材のリジェクト的品質管理から一歩進めて、一層の造込み技術による品質保証と歩留の向上、物流改善による納期短縮を図っていくことが必須である。

この対策の一つとして、生産現場に実際に従事しているオペレーター自身が時々刻々の操業変化を的確に把握するとともに、その情報に基づきIF鋼の最適条件になるようにリアルタイムに操業を制御できるようにすることが考えられる。換言すれば、製造オンラインにおける操業モニタリング・システムがそのキー・テクノロジーであり、今後のIF鋼製造における重要な技術動向と思われる。

新日本製鐵では以上のようなコンセプトを重要視し、特にそのポイントは鋳型内溶鋼流動制御であると考え、従来よりその開発と実用化を推進してきた。例えば、名古屋製鐵所では、約10年前から鋳型表面の熱電対(温度)情報と湯面レベル変位の情報を駆使して鋳型内溶鋼流動に関する重要なパラメーターをシミュレーションモデルにより算出し、その情報をCRT画面でオペレーターに常時表示する“オン・コンディショニング・モニタリング・システム”を導入して、操業に活用してきた。最近ではこのシステムを大幅に改善して、それまでの湯面変位量、鋳型内溶鋼偏流量、浸漬ノズル閉塞度数に加えて、ノズル吐出孔別の溶鋼吐出量、メナスカス部の溶鋼流速、モールド下端における短辺シェル厚み、溶鋼の機内浸透深さなどの鋳型内溶鋼流動に関する情報も表示できるようになっている。又、表示に当たっては情報をより正確に、より総合に表示するとともに、その内容も単なる数字の表示ではなく、その時点における操業状態が適正なのか、異常なのかを瞬時に判断できるように直截的なイメージ像としてオンラインにて表示する“モールド可視化技術”を開発して実用に供している。代表的な表示画面の一例を図7に示す。

こうした技術の導入により、従来より品質異常や操業異常となる兆候を早期に検知することが可能となり、この情報に基づいて前述してきたタンディッシュ加熱機能、鋳型内電磁制御機能、鋳造速度や浸漬ノズルアルゴン流量等の鋳込み制御機能を多段に駆使した品種別操業が可能になるものと思われる。

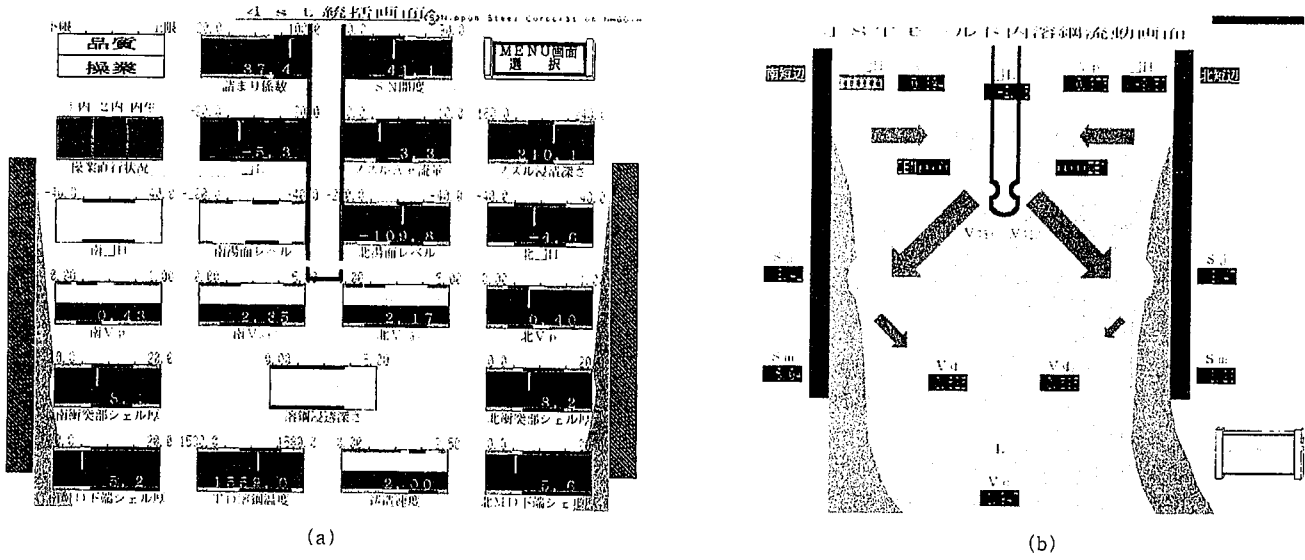


図 7 铸型内可視化統括画面と個別画面

IF鋼はその品質の厳しきゆえに製鋼プロセスにも多くの課題を提起してきた反面、その解決を通じて品質造込みを中心とした製鋼技術の発展を促してきた。今後も一層の高品質安定製造技術の確立に取り組みを進めていく所存である。

参考文献

- 1) 田中和明 ほか：材料とプロセス，4，220(1991)
- 2) 湯山英俊 ほか：材料とプロセス，1，1220(1988)