

水島製鉄所第5連铸機における高速铸造

High Speed Casting on Curved Type Slab Caster

飯田 義治*
Yoshiharu Iida

江本 寛治**
Kanji Emoto

中井 一吉***
Kazuyoshi Nakai

前田 瑞夫****
Mizuo Maeda

武 英雄*****
Hideo Take

小島 信司*****
Shinji Kojima

Synopsis:

In No. 5 slab caster at Mizushima Works of Kawasaki Steel Corp., a stable operation has been achieved by the combination of high casting speed from 1.2 to 1.8 m/min and development of superior machine characteristics; two-points unbending with divided rolls of small diameter.

Radial streaks in slabs of most steel grades have not been observed due to high specific spray water, suitable control of chemical composition in steel such as phosphorus and sulphur and precise maintenance of roll alignment. Accumulation of non-metallic inclusions in slabs at continuously casting with high speed is at the same level as casting with low speed because of improvement in steelmaking; refining in ladle and sealing with immersed long nozzle between ladle and tundish as well as casting with well-designed submerged nozzle. Hence, slabs for extra deep drawing cold sheet and ERW pipe up to X75 are produced on routine base without any difficulties.

Surface defects on slabs are so few that most casts are directly charged into reheating furnace in rolling mill shop without any conditioning.

Breakout, one of the biggest accidents at high speed casting, has been conquered by the choice of appropriate mold powder with proper melting characteristics and adopting mold taper suitable to casting speed.

In recent several months, high productivity of 180 000~200 000 t/month has been attained by utilizing high efficient casting techniques i.e. slab width changing during casting and sequence casting in different chemical compositions, and high speed casting techniques.

1. 緒 言

水島製鉄所第5連铸機は、高速铸造時における内部割れ防止を目的として、メニスカス下12~26mに小径2分割ロールを配し、2点矯正方式を採用したDemag式の湾曲型スラブ連铸機である。熱圧向け小断面スラブが铸造対象の主体であるため

生産性を向上させるには、1.2~1.8m/minの高速铸造操業が必要である。

連铸比率の向上を目的として、熱圧向けスラブの多品種、多サイズに起因する铸造能率の低下を铸造中铸型幅変更、異鋼種連々铸などの技術開発¹⁾で克服するとともに、高速铸造に必要な設備改造、操業技術の開発を行い、18~20万t/monthの生産能力を有するに至った。

* 水島製鉄所製鋼部部长
... 水島製鉄所製鋼部第2製鋼課课长
..... 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室
〔昭和55年5月29日原稿受付〕

** 水島製鉄所製鋼部第2製鋼課課长
.... 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室主任(掛長待遇)
..... 水島製鉄所企画部設計室主任(掛長待遇)

本報は、第5連铸工場における高速铸造操業技術の開発経緯および現状について述べるとともに、これらの過程で得られた知見を報告するものである。

2. 高速铸造に関する問題点と設備改造

昭和48年に稼動を開始した第5連铸工場においては、当時としては高速といえる0.9~1.4m/minの铸造速度での操業を実施してきた。しかし、それ以上の铸造速度においては、ブレイクアウトに代表される操業事故の多発、内部割れ、表面性状の悪化が認められ、また、タンディッシュ三層式スライディングゲートの耐火物に起因する制約も顕在化してきた。これらの問題点を以下に要約する。

(1) 铸造速度の上昇とともに、ブレイクアウト発生率が上昇した。ブレイクアウトは、コーナ一部に割れに起因するものと、モールドパウダーの供給不足に起因する拘束性のものとに大別され、铸型内凝固形態の改善の必要性が示唆された。

(2) 高速铸造時の铸片品質に関する問題点としては、 $C \geq 0.15\%$ 鋼における内部割れ、0.10~0.14% C 鋼における表面欠陥発生率の上昇が顕著であり、铸造方案の再検討が必要と考えられた。

(3) 建設時に導入されたタンディッシュ三層式スライディングゲートは、浸漬ノズル交換が可能であるとの利点を有してはいたが、漏鋼事故防止のため、流量制御ゲートの交換枚数に制限があり、Alキルド鋼で発生頻度の大きいノズル閉塞に対しては不利であり、高速铸造および連々指数向上の阻害要因の一つであった。

上記問題点の解決を目的として、設備改造を行った。Table 1に第5連铸機的主要仕様を、改造を加えたものについては、その前後の値を併記して示す。

改造の主要項目を以下に要約する。

(1) タンディッシュスライディングノズルの改造²⁾

タンディッシュスライディングノズルを浸漬ノズル交換が可能な二層式絞り方式のものに改造した。この改造によって、連々铸の制限が大幅に緩和され、たとえば、低炭素Alキルド鋼では、従来方式の3~4連から5~8連を安定して铸造できる

ようになり、また、ノズル閉塞に起因する高速铸造阻害要因が緩和された。

(2) 2次冷却帯の延長および改造

後述の理由から、従来の16mの2次冷却帯を機長と同じ32mに延長すると同時に、2次冷却水の増量を図った。この改造によって、比水量は1.8m/minの铸造速度において2.3l/kgまでが可能となった。

(3) タンディッシュ容量の増大

取鍋交換時におけるタンディッシュ内容鋼重量の十分な確保、タンディッシュ内における介在物浮上分離効果の向上を目的として、タンディッシュ容量を28tから42tに改造した。

(4) ロール材質の変更

ロール表面を耐摩耗鋼で肉盛被覆し、ロール摩耗に起因するミスアラインメントの低減を図った。

これらの設備改造によって、1.8~2.0m/minの高速铸造が可能な設備となった。現在の第5連铸機のプロファイルをFig. 1に示す。

3. 高速铸造スラブの品質

3-1 内部割れ

3-1-1 2次冷却帯の影響

第5連铸機における機内凝固実験により、内部割れはメニスカス下8m近傍から発生しはじめていることを立証する一方、1ロールピッチ間における弾塑性梁による計算³⁾を行い、Fig. 2に示すようにメニスカス下8~12m近傍にバルジングによる内部ひずみの極大点が存在することを確認した。これらの結果から、内部割れの防止には比水量を増大し、凝固シェル強度の向上を図ることが効果的であると考え、2次冷却帯上部ゾーンから徐々に水量密度を増大し、内部割れ発生位置の変化を調査した。その結果をFig. 3に示すが、水量密度を増大した部分では、内部割れの発生は認められず、それ以降で発生することが確認できた。

Fig. 4には、種々の铸造条件におけるバルジングによる内部ひずみ、許容限界である0.5mmのミスアラインメント発生時の内部ひずみを弾塑性計算³⁾によりもとめ、その値に(1)式でもとめた矯正による内部ひずみ $\epsilon_{V.R.}$ を単純に加算した値を全内

Table 1 Main specification of No.5 slab caster

Furnace	275t L.D
Machine type	Curved (2pt. unbending)
Casting radius	12.00 & 19.22m
Number of strands	2
Slab size	220 × (850 ~ 1 550)mm 190 × (1 400 ~ 1 900)mm
Capacity of tundish	28 → 42t
Mold length	700mm
Slab supporting length	32.3m
Containment roll type	Simple plus divided
Secondary cooling length	16.3 → 32.3m
Specific water flow rate	1.65 → 2.30 l/kg (V=1.8m/min)
Steel grade	40kg/mm ² plate, strip ERW pipe up to X 75 Low C Al killed strip

V : Casting speed

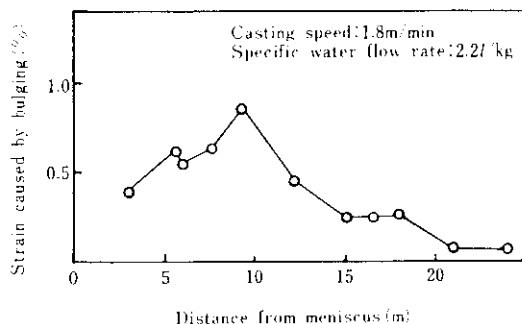


Fig. 2 Calculated example of inner strain caused by bulging at No.5 slab caster

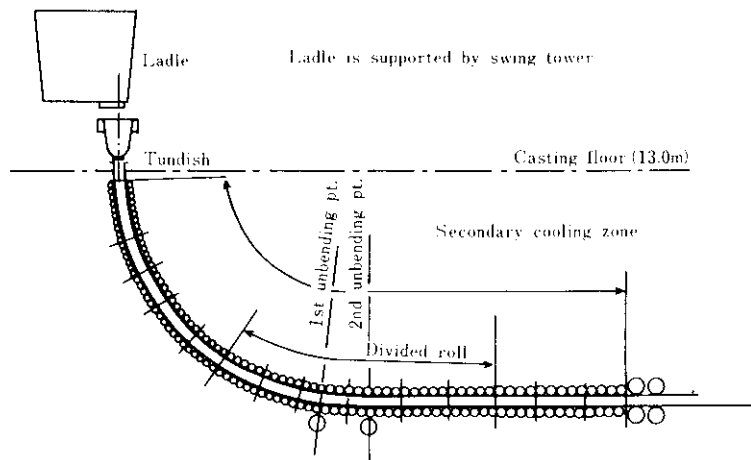
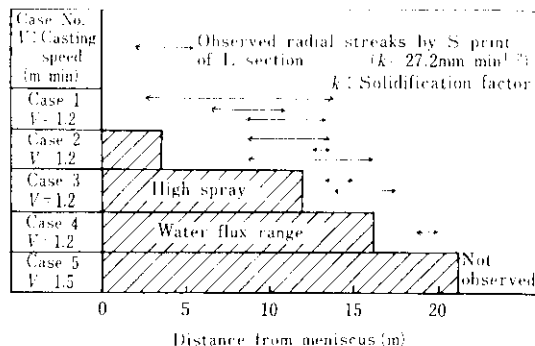


Fig. 1 Profile of No.5 slab caster

Steel grade : 40kg/mm² plate, C : 0.15 ~ 0.18%

S : 0.010 ~ 0.020%

Fig. 3 Influence of spray water flux on radial streak in high speed cast slab

部ひずみとし、パラメータとして凝固時間の平方根 ($t^{1/2}$) をとり、40kg/mm² 厚板材における内部割れ発生の有無との関連を調査した結果を示した。

$$\varepsilon_{V.B.} = (D/2 - S) \cdot (1/R_1 - 1/R_2) \quad \cdots (1)$$

D : スラブ厚 (mm)

S : 凝固シェル厚 (mm)

 R_1, R_2 : 湾曲半径 (mm)

$t^{1/2}$ の増大にともなう、内部割れ発生に対する許容ひずみが低下する傾向が明らかである。この現象は、凝固の進行にともなう樹枝状品間偏析程度の悪化による割れ感受性の増加⁴⁾、ロール間における繰返しひずみの蓄積^{4,5)} などによって説明されるが、この場合でも内部割れ防止の有効手段はロールピッチ間の全内部ひずみの低減である。

Fig. 4 に比水量 2.3 l/kg、铸造速度 1.8 m/min で、ロールピッチ 450 mm、湾曲半径 12 m の連铸機に

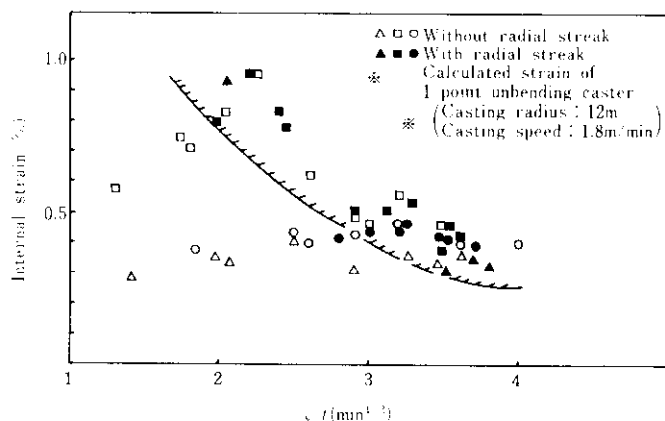


Fig. 4 Relation between square root of solidified time and allowable internal strain for radial streaks

における1点矯正時の想定ひずみを示すが許容ひずみを超えている。

このようにして、2次冷却帯上部ゾーンから冷却能を増大し、凝固シェル強度を高め、以後低下しないように凝固完了まで高水量密度を維持する高比水量鋳造方案の採用と、分割ロールによる小ロールピッチ、2点矯正方式に代表される第5連铸機の機械特性とによって高速鋳造時の内部割れが防止できることが確認された。

これらの結果をふまえて、2次冷却帯の増強および延長を図った。設備改造前後の2次冷却水量密度を比較してFig. 5に示すが、改造後は1.8m/minの鋳造速度において2.3l/kgの高比水量操作が可能となった。

3.1.2 鋼中成分の影響

Fig. 6に内部割れに及ぼすC, Sおよび鋳造速度の影響を示す。これは、通常操業における鋳片Sプリントを用いて調査した結果である。低炭素Alキルド鋼では、1.6~1.8m/minの高速鋳造時においては内部割れは皆無であり、 $C \geq 0.15\%$ の範囲においても、 $S \leq 0.010\%$ とすることによって1.4~1.7m/minの高速鋳造が可能である。

3.1.3 ロールアラインメント管理

ロールミスアラインメントの内部割れに与える影響はよく知られている。第5連铸機においては、ロール表面の耐摩耗鋼による肉盛、ロール母材の改質⁶⁾によって、Fig. 7に示すようにロール摩耗

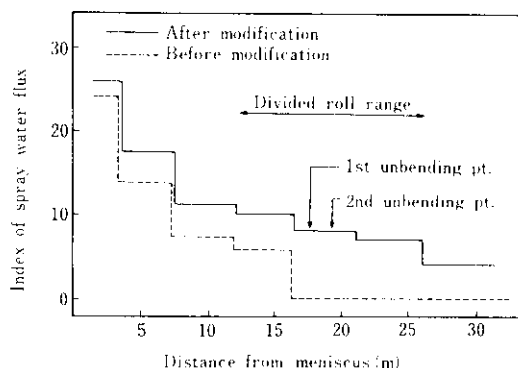


Fig. 5 Comparison of spray water flux by modification of secondary cooling

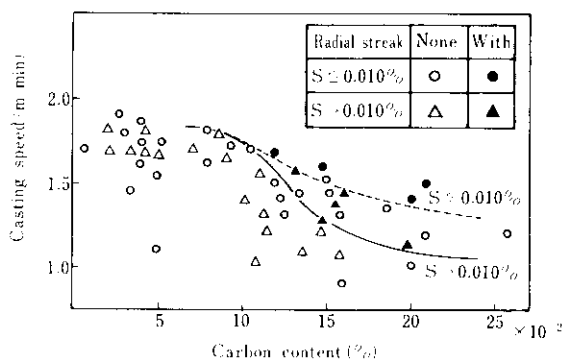


Fig. 6 Influence of C, S and casting speed on radial streaks

の減少を図るとともに、ロールギャップ、ロールアラインメント測定装置による日常管理を実施している。

3.2 中心偏析

Fig. 8に中心偏析に及ぼす鋳造速度の影響を示

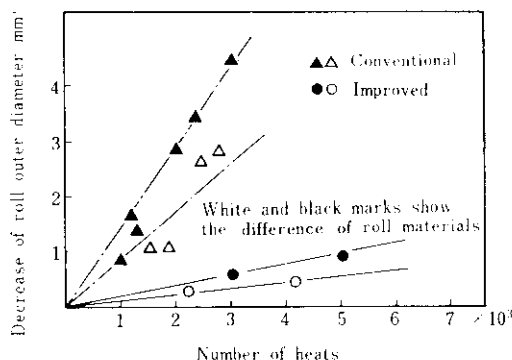
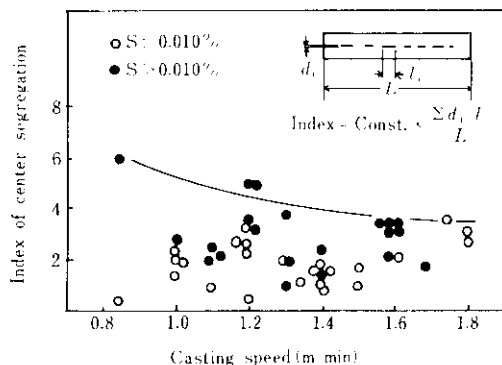


Fig. 7 Effect of roll materials and roll plating on roll wear and roll life



Steel grade: 40kg mm² plate and strip
Fig. 8 Influence of casting speed on index of center segregation in slab

す。中心偏析評点は、鋳片C断面Sプリントから、Fig. 8中に示した式によってもとめたものである。

鋳造速度が上昇しても中心偏析評点の悪化は認められない。これは、高比水量鋳造方案によるバルジングの減少、凝固先端がミスアラインメントの少ない分割ロール内に位置することにより、凝固末期の溶鋼流動が抑制されるためと考えられる。

3.3 非金属介在物

鋳造速度の上昇とともにクラスタ内での介在物の浮上が困難となるため、鋳片内介在物の増加が懸念される。Fig. 9は、鋳造速度とX線透過法によりもとめた直径250 μ 以上の鋳片内介在物個数との関係を示したものであるが、鋳造速度の上昇とともに介在物個数の増加傾向が認められる。しかし、浸漬ノズルの吐出孔形状などを介在物侵入深さが小さくなるように改善することによって、Fig. 9中に併せて示したように、その増加傾向を緩和させることが可能である。

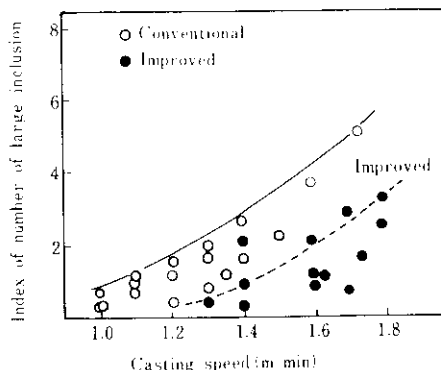


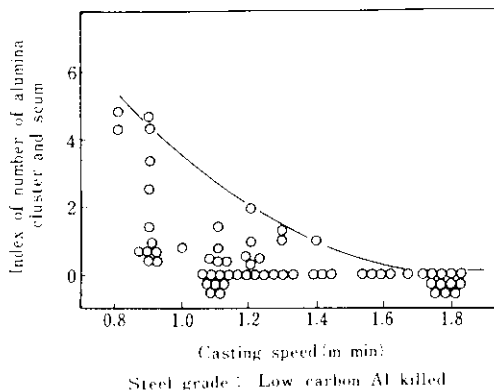
Fig. 9 Relation between casting speed and number of large ($\geq 250\mu$) non metallic inclusions in slab

これらの鋳造条件の改善とともに、吹錬からタンディッシュにいたる取鍋精錬、取鍋ロングノズルによる溶鋼流シール、堰による介在物浮上促進などの諸改善を加えることによって、インプット介在物を減少させ、X75までの電鍍鋼管用素材、自動車用外板用冷延鋼板に代表される深絞り用AIキルド鋼を問題なく鋳造している。

3.4 表面性状

3.4.1 のろかみおよびクラスター

Fig. 10に鋳造速度とのろかみ、アルミナクラスターの発生個数との関係を示すが、のろかみおよびクラスターの個数は、鋳造速度の上昇とともに低減する傾向を示している。これは、鋳造速度の上昇により溶鋼吐出流による洗浄効果が増大し、樹枝状品間への介在物捕捉量が低減するためと考えられる。



Steel grade: Low carbon Al killed
Fig. 10 Effect of casting speed on alumina cluster and scum

3.4.2 表面たて割れおよびコーナーたて割れ

Fig. 11 に表面およびコーナーたて割れに及ぼす铸造速度の影響を示す。モールドパウダーの溶融特性の改善⁷⁾によって铸造速度上昇による悪化は認められない。

4. 高速铸造操業の実績

4.1 高速铸造操業の安定

4.1.1 ブレークアウトの減少

高速铸造操業における最大のトラブルはブレークアウトであろう。第5連铸機におけるブレークアウトは、前述のとおりコーナー部シェルの再溶解あるいは割れに起因するものと拘束性のものとに大別される。

木下らの熱弾塑性計算⁸⁾によれば、铸型内凝固シェルは Fig. 12 に示すような挙動を示し、その応力分布は、コーナー部から長、短辺 10~20mm 付近に大きな引張応力が作用する。したがって、凝固シェルの成長が不均一あるいは遅滞した場合、コーナー近傍での凝固シェルが溶鋼の静圧に耐えきれず破断し、ブレークアウトに至るものと考えてよく、このような機構は、ブレークアウトシェル、铸型内 S 添加による S プリントなどの観察結果によっても支持される。第5連铸機の铸型長さは 700mm であり、この種のブレークアウトの防止にはきわめて不利である。コーナー近傍でのブレ

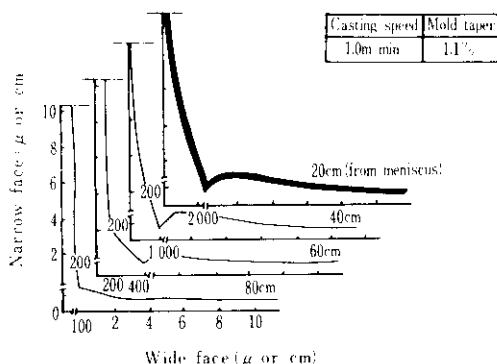


Fig. 12 Behavior of solidified shell in mold

ークアウトに対しては、凝固シェルの均一で順調な成長を促進させる铸造条件の選定が必要であり、铸型銅板测温⁹⁾などの手段を用いて铸型内における凝固シェルの挙動を調査し、以下に記す諸対策を実施した。

- (1) 鋼種および铸造速度に応じた铸造中短辺テーパ設定変更および長辺テーパの付加。
- (2) 浸漬ノズルの浸漬深さ、吐出孔形状、角度の適正化ならびにノズル閉塞防止による溶鋼吐出流偏流の緩和。
- (3) 適切な性状を有するモールドパウダーの開発および選定。

一方、拘束性ブレークアウトの発生機構は、モールドパウダーの一時的な流入の途切れあるいは不足によって铸型壁と凝固シェルとの直接接触、固着が生じ、铸型内での凝固シェルの破断が铸型出口まで繰り返して発生し、ブレークアウトに至るものと推察される¹⁰⁾。したがって、この種のブレークアウトの防止には、高速铸造時において均一な溶融特性を有し、铸造条件の急激な変化にも十分に対応し得るモールドパウダーの開発が必要である。このような見地から、焼結層の生成を抑えてスラグベアの成長を抑制するとともに、铸造速度の急変に溶融層厚が追従し得るように、軟化点の低下を図り溶融速度を向上させたモールドパウダーの開発を行った⁷⁾。

ブレークアウトに対するこれらの対策が完了したことによって、ブレークアウト発生率は、Fig. 13 に示すように、ストランド単位で 0.1% 近傍にまで減少した。

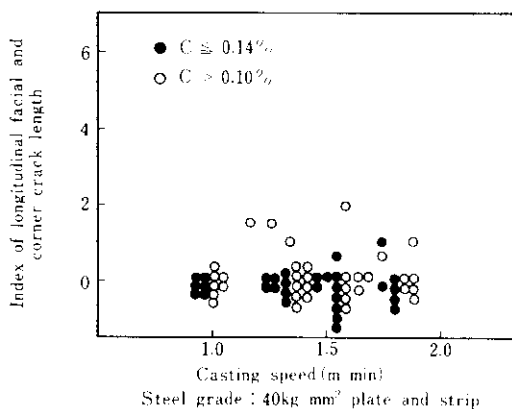


Fig. 11 Relation between casting speed and longitudinal facial and corner crack length
Steel grade: 40kg mm² plate and strip

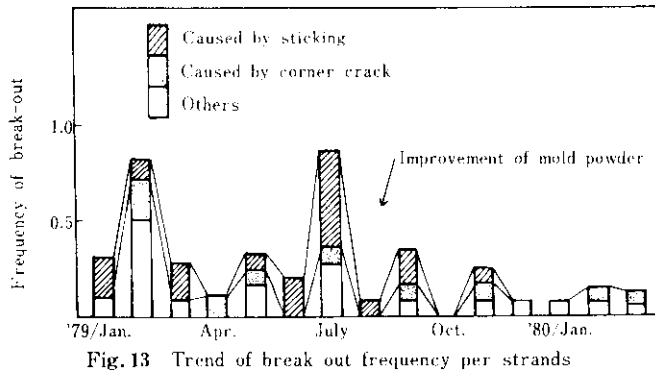


Fig. 13 Trend of break out frequency per strands

4-1-2 ノズル閉塞現象の緩和

低炭素 Al キルド鋼で顕著にあらわれるアルミナ付着によるノズル閉塞現象は、多連鑄造を阻害するばかりでなく、高速鑄造の可否を決定する大きな要因の一つでもある。ノズル閉塞現象は、溶鋼の清浄性、取鍋タンディッシュ間無酸化注入法、さらにはタンディッシュノズルガス吹き込み方式などに大きく左右される。したがって、この解決には連鑄鑄造技術の改善のみでは不十分であり、精錬、取鍋溶鋼処理を含めた技術の集積が必要である。

CT 適中率の向上、取鍋精錬法による確実な Al 添加技術の開発により溶鋼清浄性の向上を図ると同時に、取鍋ロングノズルによる取鍋タンディッシュ間無酸化注入の強化、迅速浸漬ノズル交換および適切なタンディッシュノズルガス吹き込みを活用し、Fig. 14 に示すように、低炭素 Al キルド鋼を安定して 5~8 ヒート鑄造し得るに至った。

これらの一連のノズル閉塞防止技術によって、製造コスト上、連鑄化が困難と考えられていたリムド鋼の連鑄化メリットが生じ、現在では、50~60千t/月のリムド相当鋼を鑄造するに至っている。

4-2 鑄造量の推移

4-2-1 高能率操業の効果¹⁾

連鑄機の鑄造能力を向上させる具体的な手段としては、単位時間あたりの生産性を高めるための高速鑄造技術の他に、鑄造時間率を向上させるための技術の確立も必要である。

第 5 連鑄工場においては、高速鑄造技術の開発

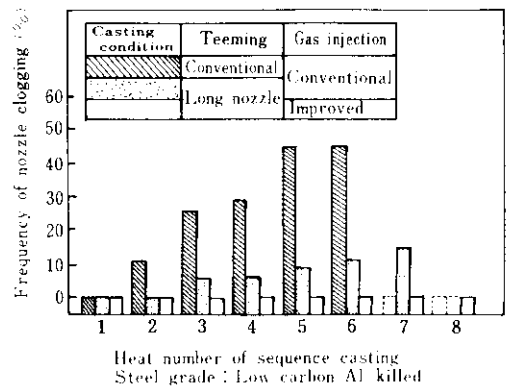


Fig. 14 Influence of progress in casting condition on frequency of nozzle clogging

に先がけて、鑄造中鑄型幅変更、異鋼種連々鑄などの技術開発を実施してきた。これらの技術の活用によって、ダミーバーあたりの連々指数、鑄造時間率はそれぞれ Fig. 15 および Fig. 16 に示すように高位に安定している。

4-2-2 高速鑄造操業の効果

2 次冷却帯の延長などの設備改造、高速鑄造操業の安定化により、1 ヒートあたりの平均鑄造速度は Fig. 17 に示すように推移している。低炭素 Al キルド鋼の定常鑄造時においては、1.4~1.9m/min の鑄造速度が常用されているが、平均 35mm/ヒート、ストランドの鑄造中幅変更時における鑄造速度の低下、異鋼種連々鑄、浸漬ノズル交換などの所要時間が含まれるため、1 ヒートあたりの平均鑄造速度は 1.2~1.3m/min である。

上記 2 項目の技術の複合効果により月間生産量は、Fig. 18 に示すように推移しており、180~200 千t/month の生産能力を有するに至っている。平均スラブサイズ 220×1150mm に対するこの月

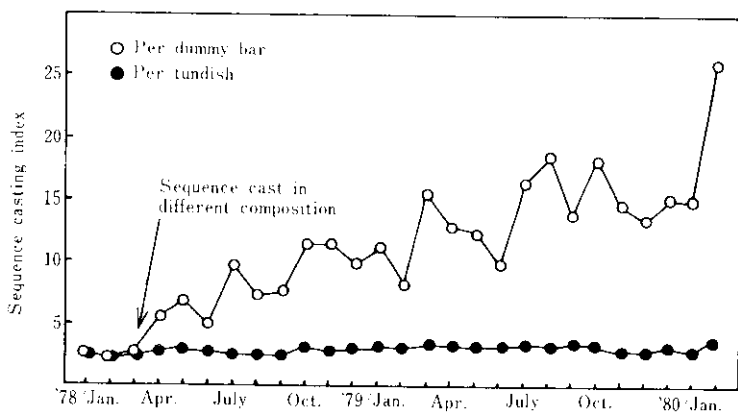


Fig. 15 Trend of sequence casting index on No.5 caster

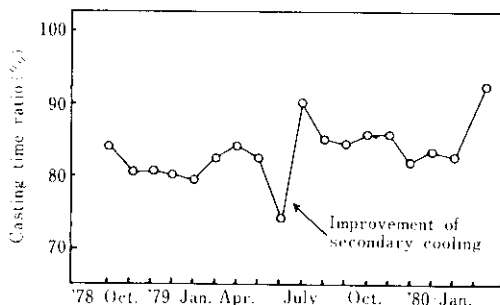


Fig. 16 Trend of casting time ratio on No.5 slab caster

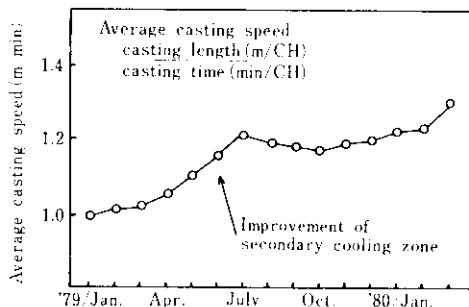


Fig. 17 Trend of average casting speed on No.5 slab caster

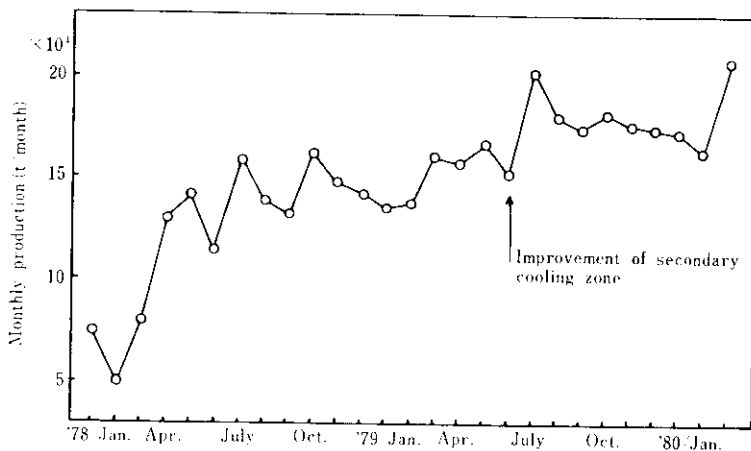


Fig. 18 Trend of monthly production on No.5 slab caster

間生産量は非常に高いレベルといえる。

4・2・3 熱片装入量の推移

Fig. 19 に熱片装入率の推移を示すが、铸造量の50%以上(圧延工場とのマッチングが可能な命令ホットチャージ量に対する実施率は90%以上)を安定して熱片無手入れ装入するに至っている。

5. 結 言

水島製鉄所第5連铸機においては、铸造時間率の向上を図る技術開発と並行して高速铸造設備の改造、技術開発を実施してきた。その結果、現在では、ほぼ大半の鋼種について1.4~1.8m/minの

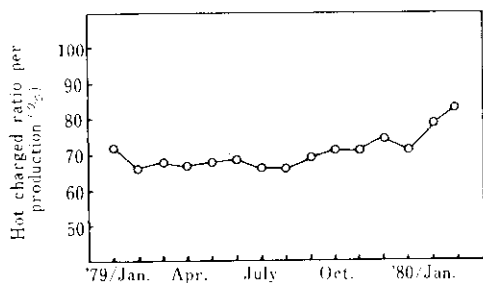


Fig. 19 Trend of hot charged slab ratio per production on No.5 slab caster

casting speed was used, and the internal and surface quality of the cast slab was improved. Furthermore, the improvement of the operation technology centered on the mold powder, such as the reduction of the operation trouble, contributed to the stabilization of the high-speed casting operation.

The improvement of the casting rate, the combined effect of the high-speed casting, has maintained the high productivity of 180~200 kt/month, and the hot charged slab ratio has been improved, contributing to the saving of energy.

参 考 文 献

- 1) 前田ら：川崎製鉄技報，12 (1980) 3, 1
- 2) 著者ら：鉄と鋼，65 (1979) 11, S 658
- 3) 小島ら：川崎製鉄技報，12 (1980) 3, 101
- 4) 児玉ら：鉄と鋼，64 (1978) 8, A 123
- 5) O. M. Pühringer : Stahlu. Eisen 96 (1976), 279
- 6) 白石ら：鉄と鋼，66 (1980) 4, S 248
- 7) 桜谷ら：川崎製鉄技報，12 (1980) 3, 37
- 8) 木下ら：川崎製鉄技報，12 (1980) 3, 86
- 9) 日名ら：鉄と鋼，65 (1979) 11, S 749
- 10) 糸山ら：鉄と鋼，65 (1979) 4, S 167