

技術報告

UDC 621.746.047

鋼用ビレット水平連続鑄造機の開発

宮下 芳雄*・宮本 明*²・伊藤 雅治*³
田口喜代美*⁴・小谷野敬之*⁴・本田 旭*³

Development of Horizontal Continuous Caster for Steel Billet

Yoshio MIYASHITA, Akira MIYAMOTO, Masaharu ITO
Kiyomi TAGUCHI, Takayuki KOYANO, and Akira HONDA

Synopsis :

Nippon Kokan (NKK) installed the test plant in Fukuyama Works to commercialize the horizontal continuous casting process of steel for billet, developed in cooperation with Davy-Loewy Co. (DL), and started the operation test from Nov. in 1978.

The various improvements of the Davy-Basic-Process and the additional developments of process technology have been done. That is :

- 1) Use of special refractory made from Si_3N_4 with dispersed BN for break ring.
- 2) Use of Cr-Zr-Cu alloy for mold material and control of cooling water pressure of mold.
- 3) Adoption of intermittent withdrawal mode with high speed frequency cycle and proper push-back force.

These enabled the continuous-continuous and high speed casting operations by the multi-strands. The billets with 115 mm square and 120 to 210 mm rounds, cast by this process were successfully rolled to D-bar, angle, rod bar and seamless pipe.

This improved horizontal continuous casting process named "HORICAST" is now used on a commercial base.

1. 緒 言

水平連続鑄造 (以下 HCC と呼ぶ) プロセスは、すでに非鉄金属¹⁾、鑄鉄分野では広く実用化されているが、鋼についてはいまだ実用化の段階に達していない²⁾。

鋼用の HCC プロセスは、通常の豎型連続鑄造プロセスと比較し、一般に次のような特徴を有するものと考えられてきた。

- (1) 機高が低く、建屋、土木工事を含む建設費が安く、また、既設建屋内に容易に設置できる。
- (2) すべての本体設備が平面上に直線的に配置されているため、操業および補修が容易にできる。

このような利点のため、古くから多くの研究がなされてきたが、そのいずれもが、タンディッシュ (以下 TD と呼ぶ) と鑄型の接合部の耐火物材料の開発、溶鋼シ-

ル法、または鑄型内の鑄片凝固シェルと鑄型内表面との焼付き防止対策などの点で問題点を解決できず、工業化されるにいたらなかつた。

日本鋼管は、HCC プロセスについて検討してきた結果、英国の Davy-Loewy 社によつて提案されているプロセス^{3)~5)}が将来的に可能性があると判断し、1977 年、このプロセスを実用規模に開発することに、同社と合意に達した。その結果、日本鋼管は、Davy-Loewy 社の協力を得て、工業化規模の、75~150 mm φ および 120~210 mm φ ビレット用水平連鑄設備を、福山製鉄所第一製鋼工場内に設置し、1978 年 11 月より実用化試験に着手した。2 年間にわたる設備、操業および品質に関する多くの研究を通じ、工業化のための技術開発をほぼ完了することができた。このプロセスを HORICAST と呼んでいる。

昭和 55 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 10 月 30 日受付 (Received Oct. 30, 1980)

* 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 工博 (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*² 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株) (Nippon Kokan K. K.)

*⁴ 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K.)

2. HCC プロセスについての技術動向

HCC プロセスが最も早く実用化されたのは、アルミニウム¹⁾、銅⁶⁾の分野であり、すでに 1960 年代前半には、HDC-Casting (Horizontal Direct Chill Casting) と呼ばれる各種プロセスが開発されている⁷⁾⁻⁹⁾。

現在開発されつつある鋼の HCC プロセスで、実用化段階に近いと考えられるプロセスとして、Davy Loewy³⁾⁻⁵⁾¹⁰⁾¹¹⁾、Technicon Instrument¹²⁾¹³⁾、General Motors¹⁴⁾¹⁵⁾、S. P. O. Tulachermat¹⁶⁾⁻¹⁹⁾、住友金属²⁰⁾²¹⁾などがある。これらプロセス間のおもな違いは、TD と 鑄型を接合する耐火物の種類と形状、鑄型内潤滑方式および鑄片の引抜方式に認められる。また、断面寸法としては最大 200 mm ϕ (ϕ) 程度までの鑄片を対象とするものが多く、鑄造鋼種も炭素鋼から低合金鋼、高合金鋼へと拡大されつつある²⁾。

3. 設備概要²²⁾⁻²⁴⁾

HORICAST 設備の全体配置を Fig. 1 に、そのおもな仕様を Table 1 に、鑄造中の写真を Photo. 1 に示す。本設備は当初、1 ストランドでスタートしたが、1979 年 10 月に 2 ストランドに増強された。設備本体は

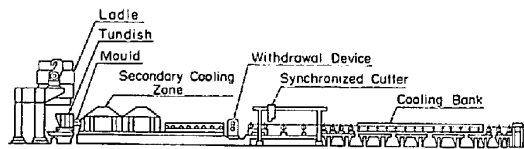


Fig. 1. Elevation of HORICAST.

Table 1. Specification of HORICAST.

Ladle capacity	40 t
Tundish capacity	2.5 t
Number of strand	2
Billet sizes	Section ; 75-150 mm ϕ 120-210 mm ϕ Length ; 5 500-10 500 mm
Steel grades	Plain carbon steel and low alloy steel.
Casting speed	Max. 4.0 m/min (at 115 mm ϕ)
Equipment length	
-Overall	35 000 mm
-Mold to pinch roll	8 000, 12 000 mm
-Secondary cooling zone	6 000 mm
Passline height	Floor line + 1 300 mm
Mold	Tubular mold by water cooling.
Pinch roll	Hydraulic drive servo-control.
Cutter	Gas torch cutter.
Strand spacing	1 000 mm

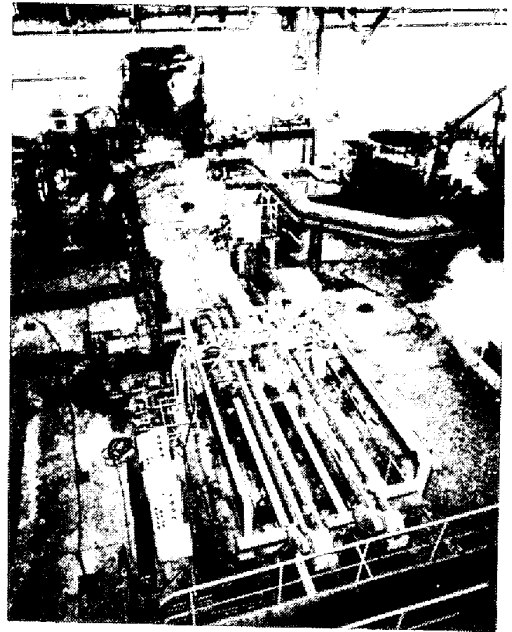


Photo. 1. An outline of HORICAST.

すべて水平に配置されており、パスラインは地上より 1.3m の高さにある。溶鋼は 170 t 転炉より出鋼されたのち、さらに 40 t 取鍋へ分湯して供給されている。

主要設備の概要を以下に記す。

3.1 タンディッシュ

TD は走行、横行可能な TD カー上に搭載されており、鑄型との接合が迅速かつ容易に行える構造になっている。また、TD 底部には、非常時および残湯処理のために空圧作動のダンプノズル (dump nozzle) を設置している。

3.2 鑄型および TD-鑄型間接合方式

フランジ付きチューブラー鑄型は一体物²⁵⁾であり、バルクヘッド (bulk head) と称する鑄型架台に取り付けられた水冷ジャケットに内挿され、シールされている。サイズ変更時にも、水冷ジャケットごと一括交換すれば、

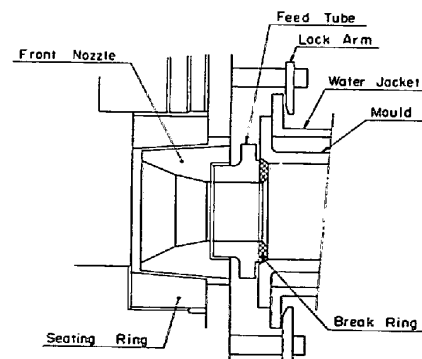


Fig. 2. Schematic view of joint assembly between tundish and mold.

自動的に芯出しが可能であり、同時に給排水配管もセットされる構造になっている。Fig. 2 に TD と鑄型の接合状況を示したが、フロントノズル (front nozzle)、フィードチューブ (feed tube) およびブレイクリング (break ring) と呼ばれる耐火物を組み合わせ、機械的に締付けることにより溶鋼をシールしている。鑄型長さは 300~450 mm であり、冷却水量は 1 100~2 400 l/min の範囲で、操業条件により選択できるようになっている。

3.3 二次冷却帯

二次冷却帯は約 6 m あり、鑄片コーナー部を除く全周にフルコンあるいはフラットノズルで散水している。ゾーンは 6 分割され、それぞれ独立に制御可能である。比水量は、0.2~1.0 l/kg of steel の範囲で設定している。

3.4 引き抜き装置

HCC プロセスでは、鑄型を強制振動させるのは構造的、重量的に難しいため、HORICAST では Fig. 3 に示すように引き抜き-圧縮を短時間ごとに繰り返す鑄片間欠引き抜き方法を採用し、安定した引き抜きを確保している。間欠引き抜きを行う一対の駆動ピンチローラは油圧サーボ方式を採用し、その精度を維持するためにミニコンを用い閉ループ全自動制御を実施している。

3.5 カッター

カッターは間欠引き抜きされるピレットに同調して移動するため、軽量で小型のガストーチ・カッターを採用した。

4. 開発状況および操業実績

当初 Davy-Loewy 社のプロセスをもとに試験を開始したが、設備、操業、品質面でいくつかの問題点が生じ

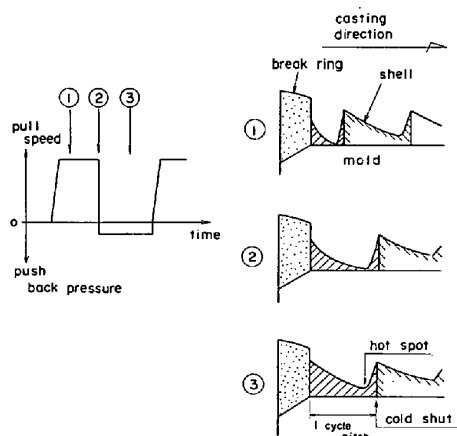


Fig. 3. Schema of initially solidified shell profile at various stages of one withdrawal cycle.

ため、多くの開発改善を行った。

4.1 鑄造プロセスの開発改善経緯

4.1.1 TD への溶鋼注入方式

当初より三孔ロータリーノズルを用いた自動注入方式を採用し、TD 内の所定溶鋼レベルへの早期到達とレベルの安定維持をはかった。また、取鍋~TD 間の再酸化防止法としてロングノズルを使用した。

4.1.2 TD 関係²²⁾²⁴⁾

TD は容量 2.5 t と小型なため、十分な予熱断熱対策を採っている。なお、TD 内容鋼過熱度は引き抜き異常や鑄片軸心性状に影響を与えるため、鑄造中常に、10°C 以上 40°C 以下に維持するよう管理している²⁶⁾。また、HCC プロセスでは、TD は介在物を浮上分離させ、かつ鑄型へ適切な流動状態の溶鋼を供給する重要な役割を担っているため、あらかじめ水モデル実験を実施し²⁶⁾²⁷⁾、その平均滞留時間が 180 s 以上で、かつ鑄型への溶鋼流がなるべく定常的になるように、その断面構造を決定した²³⁾。

4.1.3 TD~鑄型間の接合耐火物の開発および接合方式の改善²⁶⁾²⁸⁾

TD~鑄型間を接合している耐火物のうち、鑄型側に使用している Si_3N_4 製ブレイクリングは、この部分で全周にわたり均一な凝固開始点をつくり、溶融域と凝固域とをはつきり区分することで、初期凝固の安定性ひいては鑄片表面性状をも支配しているきわめて重要な部分である。しかし、ブレイクリングは鑄造中に溶鋼、凝固シェルおよび鑄型銅板に接しているため、Fig. 4 に示すように、その内部に大きな温度勾配を生じ、その結果、大きな熱応力が発生することが予測された。そのため、ブレイクリングには、1) きわめて高い加工精度、2) 耐溶損性に加えて、3) 耐スポーリング性 (高熱間強度および低熱膨張率) が要求され、当初より、反応焼結型 Si_3N_4 を使用した。しかし、このブレイクリングには鑄造開始直後の昇熱時に内部割れが発生しやすく、これは Fig.

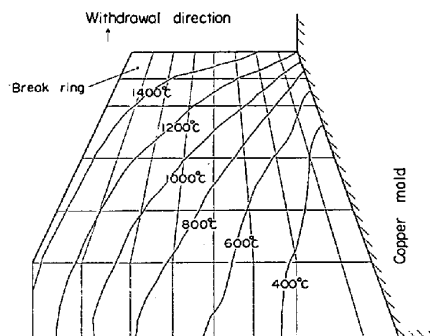


Fig. 4. Temperature distribution in cross-section of break ring at 50 s from casting start (Computation).

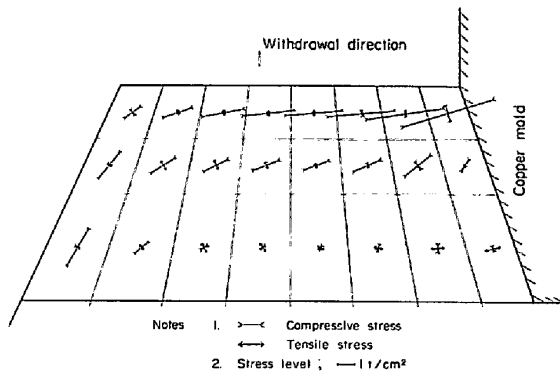


Fig. 5. Internal main stress distribution in cross-section of break ring at 10s from casting start computed with elastic stress analysis of finite element method.

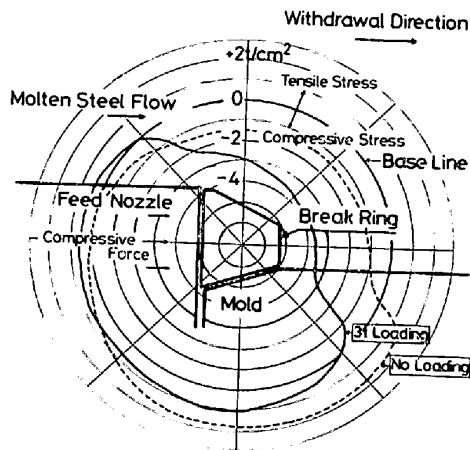


Fig. 6. Change of steady-state hoop stress distribution on break ring surface with giving compressive force (Computation with elastic analysis of finite element method).

5に示す計算結果から内部に大きな応力が生ずることがその原因であると推定された。またこのブレイクリングには、鋳型と溶鋼との接触点を中心に異常剝離を起す傾向が認められた。これは Fig. 6 に示す計算結果から、ブレイクリング外周部に引張応力が働いたため断面縦割れをひきおこし、これと前述の内部割れとの相乗作用によるものと推定された。そこで、これら割れを防止するため、Fig. 6 に示したように、ブレイクリングを鋳型に強圧するのが有効であるを見だし、特殊な外部締付け方式を開発した。同時に、内部割れの伝播を防止するため、材質面でも BN を 5~15 wt% 添加し耐スポーリング性能を改善した新材料を開発し、ブレイクリングの耐久性を飛躍的に向上させることができた²⁶⁾。その結果、115 mm φ ビレットで 600m (60 t/ストランド) の長時間連々鋳が品質、操業性を損うことなく可能となり、コ

スト面をも含め本プロセスの工業化に大きく貢献した。

4.1.4 鋳型変形の防止²⁵⁾

本プロセスでは、その構造上の特徴から、鋳型内初期凝固シェルと鋳型との接触が長範囲にわたり良好に維持されるため、凝固速度が大きい反面、鋳型の熱負荷も厳しくなる²³⁾²⁶⁾。試験開始当初、燐脱酸銅鋳型を使用していたが、鋳造中の変形が大きく引き抜き障害が多発し、さらに鋳造後の残留変形も大きいため、鋳型矯正が必要となり作業性が著しく悪かつた。そこで、有限要素法による弾塑性熱応力解析により鋳型変形におよぼす諸要因の影響を評価した。その結果にもとづき、鋳型冷却水圧を適正化し、かつ熱間強度の高い合金銅 (Cr-Zr 系) 鋳型を使用した結果、鋳型変形は最大でも ± 0.1 mm 以内におさまり安定した操業が可能となつた。

鋳型内面には Ni と Cr の二層薄肉めつきをほどこしており、その上にさらに鋳造前に特殊な固体潤滑剤を塗布している。

4.1.5 鋳片引き抜き方法の改善²⁶⁾²⁷⁾

本プロセスは 3・4 項に記したように鋳片間欠引き抜き方式を採用しているため、ブレイクリング近傍の初期凝固シェルは、Fig. 3 に模式的に示したように形成される結果、新旧シェルの凝固方向の差異により、その境界面に厚みが最も厚いコールドシャット (cold shut) と呼ばれる凝固パターン部が常時観察されるとともに、その近傍に厚みが最小のホットスポット (hot spot) が発生する。引き抜き条件が不適正な場合、前記コールドシャットまたはホットスポット部にそれぞれコールドシャットクラック (cold shut crack) またはホットティア (hot ear) と称する表面横割れが発生することがある。Photo. 2 にコールドシャットおよびコールドシャットクラックの代表例を示した。コールドシャットクラックの主因はブレイクリング、鋳型と接する初期凝固シェルがコーナー三重点で過冷却されるために生じる溶着不良と考えられた。この解析のため水モデル実験、差分法による二次元伝熱計算および鋳片凝固シェルの応力計算を実施した。その結果、コールドシャットクラックの生成には引き抜き 1 サイクルの時間が最も大きく影響し、ついで溶鋼攪拌強度が影響し、溶鋼過熱度および鋳型、ブレイクリングなどの周辺冷却条件はあまり影響しないことが明らかになつた²⁶⁾。以上の結果にもとづき、実機で引き抜きサイクル数を広範囲に変化させ、Photo. 2 中の断面マイクロ組織写真より測定したコールドシャットおよびコールドシャットクラックの深さとの関係を調べた結果を Fig. 7 にまとめた。引き抜きサイクル数の増加によりコールドシャットクラックを完全に防止することが可

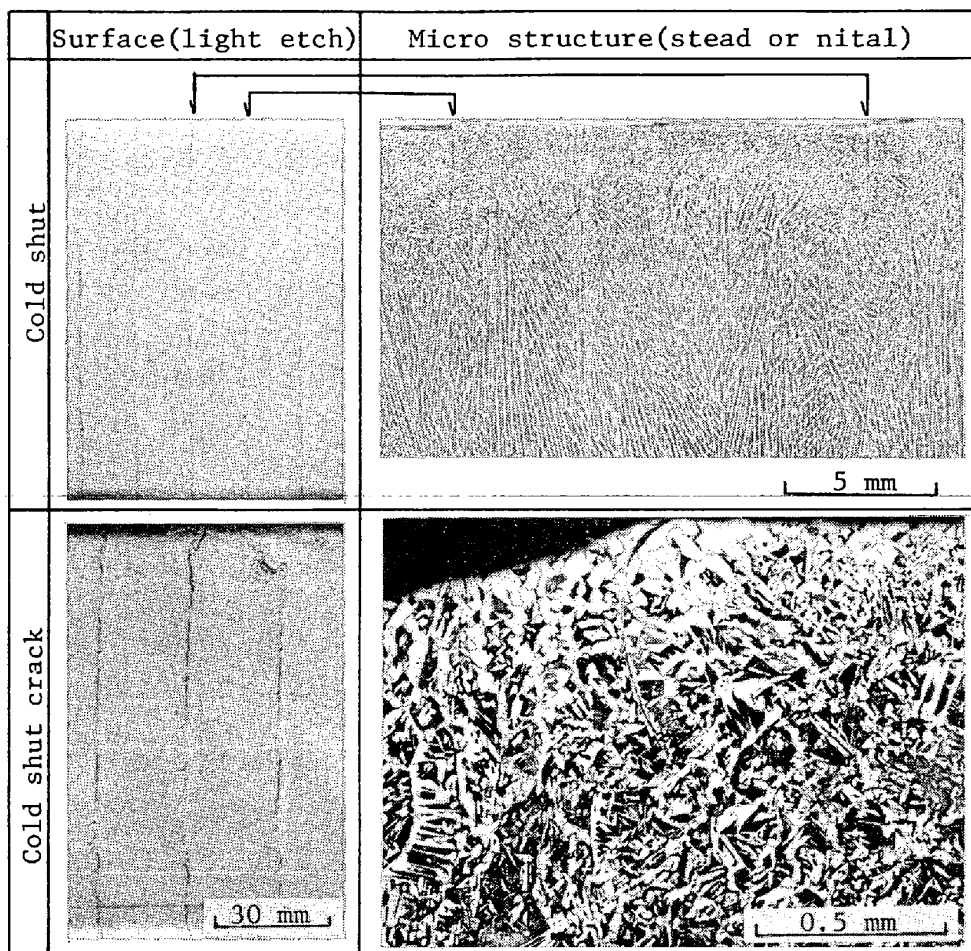


Photo. 2. Examples of cold shut and cold shut crack.

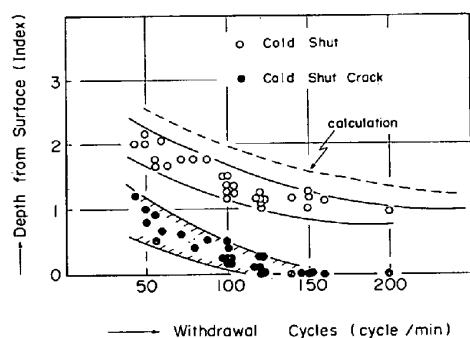


Fig. 7. Relationship between withdrawal cycle and cold shut and cold shut crack depth of 115 mm square billet.

能になった。一方、ホットティアは、引き抜き停止時の初期凝固シェルの熱収縮量に応じて必要となる鑄片の push back 量が不適正な場合に発生することが明らかになっており³⁾²⁷⁾、現在では push back 時の圧縮モードを適正範囲に管理することにより防止できている。

以上の対策により、操業、品質面の不安定性を完全に解消することが可能となった。

4.2 操業概要

4.2.1 操業実績

試験開始以来、すでに 390 heats (1980 年 9 月末まで) の鑄造を行い、115 mm φ 鑄片を主体に、2 連々鑄を定常ベースとして、3 連々鑄までの多連鑄操業も実施している。引き抜き速度は 115 mm φ, 120 mm φ で 2.0 ~ 3.5 m/min, 170 mm φ で 1.5 ~ 2.0 m/min, 210 mm φ で 0.8 ~ 1.4 m/min の範囲である。

4.2.2 鑄片サイズの拡大

115 mm φ 鑄片の他に、120 ~ 210 mm φ の継目無鋼管向け素材の鑄造試験を行つている。今後さらに、75 ~ 150 mm φ 鑄片の試験も予定している。

4.2.3 鑄造鋼種

SS 41 ~ 50 クラスの一般炭素鋼が主体であり、なお、焼入れ用 B 添加鋼を鑄造した経験もある。

5. 鑄片性状

5.1 表面性状

HORICAST で得られた鑄片の表面欠陥としては、す

でに 4.1.5 項で記述したようにコールドシャットクラックとホットティアであり、用途によつてはさらに厳しく鑄造条件を管理する必要がある。現在、操業上制御可能な具体的手段として、高引き抜きサイクル化と push back モードの適正管理により、現状用途には十分対応できている。

5.2 内部性状

115 mm ϕ 鑄片で、表面段削により大型目視介在物を調査した結果、通常の鑄型連鑄プロセスで鑄造されたビレット材よりは優れ、ほぼブルーム材と変わらないことがわかった。

Photo. 3 に 115 mm ϕ および 170 mm ϕ 鑄片の代表的な断面マクロ組織を示したが、断面形状は良好であり内部割れもなく、軸心 V 状偏析、ポロンティともに軽微であり、通常の鑄型連鑄材と同レベルにあるものと考えられる²⁶⁾。しかし、用途によつては通常の鑄型連鑄材と同

様に、さらにその分散化を図る必要があると考え、電磁攪拌を試験的に実施し、好結果を得ている。

6. 成品試圧結果

HCC 鑄片の試験圧延結果を Table 2 にまとめて示した。115 mm ϕ 鑄片は、当初より鉄筋用異形棒鋼(D-Bar)を対象に無手入で圧延し、良好な成績をおさめている。種々の設備、操業技術改善により、鑄片表面性状は良好に維持されるようになり、さらに小型形鋼、丸棒、みがき棒鋼まで用途が拡大されるようになった。また、一般機械構造用およびボイラー熱交換器用などの継目無鋼管素材用の 120~210 mm ϕ の鑄造試圧試験も実施し良好な結果を得ている。

7. 結 言

鋼のビレットを対象にした水平連鑄プロセス「HO-

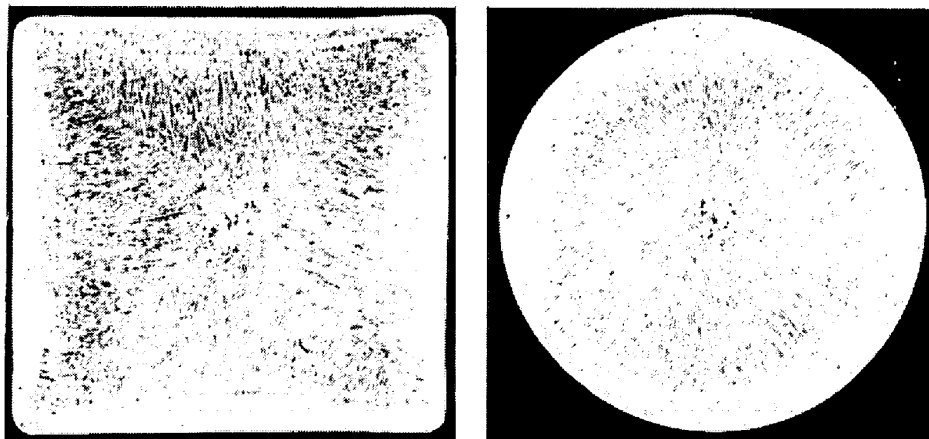


Photo. 3. Macro structure in cross section of as-cast billet.

Table 2. Results of test rollings.

Billet size	Surface conditioning	Rolling mill	Products	Test results
115 mm ϕ	Without	Rods mill	Deformed bar (SD 30)	Satisfied.
	Without	Section mill	Angle (SS 41) 40×40×3 40×40×3	Satisfied.
	Grinding	Bar mill	Round bar (SS 41) 25 mm ϕ	Satisfied. Size up and grade up are necessary.
	Grinding or Without	Wire or rod mill	Wire rod (SS 50) 8 mm ϕ	Satisfied. Grade up is necessary.
120 -210 mm ϕ	Without	Mandrel mill or plug mill	Seamless pipe (STB 42) (STPG 42) (API-J-UTN) I. D. ; 48.6-194.0 mm ϕ)	Satisfied.

RICAST」による2年間の開発試験の結果、工業化のための技術をほぼ完成することができた。本プロセスは従来の豎型連铸プロセスを補完しながら発展させ得るものと考えられるが、これまでの試験を通じ次の用途に適していることがわかった。

- (1) 設備の簡易性の面から小規模のビレット
- (2) 品質の高清浄性の面から合金鋼を含む高級鋼ビレット
- (3) 铸片形状の良好な真円度の面から丸ビレット
- (4) ノズルづまりのない操業の安定面から従来の豎型連铸機では铸造不可能な小断面ビレット

なお、本プロセスが持つ機能から、多ストランド化およびその結果得られる大容量溶鋼のビレット铸造への適用についても十分可能性があるものと考えられ、今後も用途拡大への努力を続ける予定である。

文 献

- 1) E. F. EMLEY: International Metals Rev., 21 (1976) June, p. 75
- 2) R. THIELMANN and R. STEFFEN: Stahl u. Eisen, 100 (1980), s. 401
- 3) J. MARSH, P. C. O. GAMBLE, and R. J. DAIN: Metal Mat., 6 (1971) July, p. 229
- 4) J. MARSH: Steel Times, 199 (1971) June, p. 515
- 5) J. MARSH and D. TOOTHILL: International Conf. Proceeding organized jointly by Metallurgical Society and IRSID at Biarretz, 1976
- 6) H. A. KRALL: Metall, 33 (1971) 12, s. 1247
- 7) R. B. POWERS: Light Metal Age, 32 (1975) Dec., p. 5
- 8) H. S. SPAULDING: Light Metal Age, 32 (1975) Dec., p. 8
- 9) F. L. WUETIG: Light Metal Age, 32 (1975) Dec., p. 23
- 10) G. B. Pat.: No. 798/70 on 7th Oct., 1970
- 11) G. B. Pat.: No. 2586/71 on 19th Jan., 1971
- 12) U. S. Pat.: No. 343755 on 22th Mar., 1973
- 13) U. S. Pat.: No. 419027 on 26th Nov., 1973
- 14) U. S. Pat.: No. 897832 on 25th Nov., 1969
- 15) U. S. Pat.: No. 11407 on 16th Feb., 1970
- 16) V. T. SLADKOSHTEEV, A. I. MAKHOKHIN, and O. A. SHATAGIN: Stal (1977) 4, p. 311
- 17) A. G. ZUBAREV, V. P. SYMONOV, V. T. SLADKOSHTEEV, and O. A. SHATAGIN: Stal (1979), p. 1090
- 18) スラドコシュティーフ, マノキン: 特願. 52-9307 (1977. 2. 1)
- 19) スラドコシュティーフ, サタジン, ハレムスキ: 特願 51-156651 (1976. 12. 27)
- 20) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 石村 進, 三浦 実, 中井健: 鉄と鋼, 65 (1979), S243
- 21) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 石村 進, 三浦 実, 中井健: 鉄と鋼, 65 (1979), S244
- 22) 三好俊吉, 阪本英一, 伊藤雅治, 本田 旭, 安斉孝儀, 石川 勝: 鉄と鋼, 65 (1979), S756
- 23) 田口喜代美, 宮下芳雄, 小谷野敬之, 半明正之, 石川 勝: 鉄と鋼, 65 (1979), S757
- 24) M. ISHIKAWA, A. HONDA, and T. ANZAI: Trans. ISIJ, 20 (1980) 8, p. 570
- 25) 田口喜代美, 石川 勝, 水岡誠史, 上野 康, 本田 旭: 鉄と鋼, 66 (1980), S200
- 26) 宮下芳雄, 宮原 忍, 田口喜代美, 広瀬 猛, 石川 勝, 水岡誠史: 学振 19 委第3分科会凝固現象協議会提出資料 (1980. 5. 21)
- 27) 武田州平, 土田 裕, 宮原 忍, 田口喜代美, 石川 勝, 上野 康: 鉄と鋼, 66 (1980), S198
- 28) 田口喜代美, 石川 勝, 水岡誠史, 小谷野敬之, 宮本 明, 西 正明: 鉄と鋼, 66 (1980), S199