

© 1985 ISIJ

大型水平連続鋳造機の開発と鋳造鋼種の拡大 技術報告

田中 駿一*・川和 高穂*²・田口喜代美*³本田 旭*⁴・角南英八郎*⁵・小森 重喜*³

Development of Horizontal Continuous Caster and Its Application to Large Cross Sectional Billets and Various Steel Grades

Shun-ichi TANAKA, Takaho KAWAWA, Kiyomi TAGUCHI,
Akira HONDA, Eihachiro SUNAMI and Shigeki KOMORI

Synopsis:

NKK-Davy type No. 4 horizontal continuous caster (HCC) has been installed in Keihin Works in April, 1983. The caster is producing billets such as carbon steels, low alloy steels, stainless steels and high alloy grades billets with 80 up to 330 mm round and 115 mm square.

New technological developments have been made as follows:

- (1) The automatic withdrawal modes for large section billet with high oscillation cycle.
- (2) The mold conicity design and the break ring made of modified SIALON suitable for the stainless steels and high alloy grades.
- (3) The hot-shot-blasting machine to eliminate cold shut cracks on the billet surface.

The application of HCC billets to seamless tubes and pipes, and wire rods for fine wire drawing and for cold-heading and hot forging has brought excellent results.

1. 緒 言

すでに報告したように^{1)~10)}, 日本鋼管は Davy-Loewy 社と協力して福山製鉄所に水平連続鋳造機を設置して, 1978 年から実験を開始した. 炭素鋼と低合金鋼に関しては, 75~150 mm φ および 120~210 mm φ ビレットの水平連続鋳造の工業化を完了した. その設備と操業技術を HORIZAST プロセスと命名し, 日本および外国の製鉄プラントで線棒圧延用のビレット生産設備として稼働している. 1983 年から, 京浜製鉄所に 330 mm φ までの鋳造が可能な大型の HORIZAST を設置し (Photo. 1), 鋳片サイズの大断面化によつて管用素材の製造を可能にするとともに, 高合金鋼, ステンレス鋼の鋳造技術を確立することを目指した.

水平連続鋳造は通常連続鋳造法と異なつて, 鋳型とタンディッシュは直接接続しており, 鋳片引き抜きは間歇引き抜き法を採用し引き抜きと押し戻し(引き押し)を短時間ごとに繰り返している. 間歇引き抜きのサイクルは, 良好な表面品質のビレットを得るには, 高サイクル

が望ましい. 大断面鋳片の大きな引抜重量増加に対しても, 高サイクル引き抜きを可能とする鋳造設備と引抜制御技術を完成した.

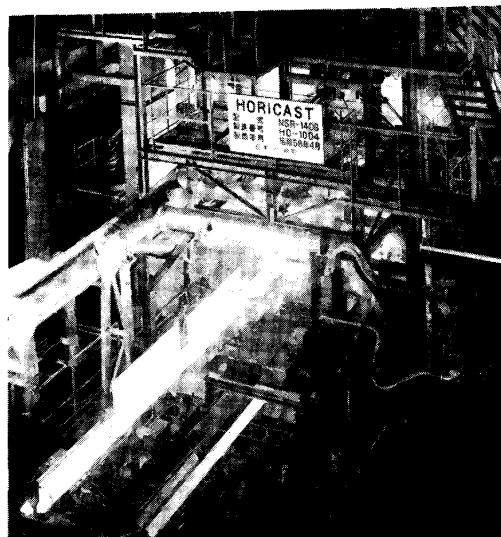


Photo. 1. An outlook of HORIZAST.

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 7 月 30 日受付 (Received July 30, 1984)

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

*² 日本鋼管(株)中央研究所 工博 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)

*⁴ 日本鋼管(株)第二重工本部 (Plant Planning and Design Dept., Nippon Kokan K. K.)

*⁵ 日本鋼管(株)中央研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwataridacho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

合金鋼，特にステンレス鋼や Ni 基合金の鑄造においては，線膨張率と高温変形抵抗が大きくなるが，適切な鑄型テーパの設計を行うことにより，鑄型内の引抜負荷を軽くすることが可能となった。

タンディッシュと鑄型を接合する部分に，ブレーキングと呼ばれるセラミックス製のリングを使用しているが，ステンレス鋼，Ni 基合金に対して，耐溶損性の良好な材質を開発して，安定した鑄造が可能となった。

ビレット表面品質の改善のため，鑄造機ライン内で鑄片に熱間ショットブラストを行い，表面欠陥は，ほぼ完全に除去できるようになった。

本報告では，上記の開発と HORICAST で製造したビレットおよび，製品の品質について報告する。

2. 大断面 HORICAST の設備と操業

2.1 設備概要

京浜製鉄所に設置した水平連鑄機の概要を Fig. 1 に，仕様を Table 1 に示す。

溶鋼は 50t 電気炉 (VAD, VOD) および 5t VIF から供給される。HORICAST の設備構成は，基本的

Table 1. Specifications of HORICAST.

Ladle capacity	5 t & 50 t
Tundish capacity	3.5 ton
Number of strands	2 str/machine
Billet size Section	115 ~ 250 mm square, 80 ~ 330 mm round
Length	~ 12,500 mm
Steel grades	Carbon steel, stainless steel, High alloy
Casting velocity	max. 4.0 m/min
Equipment length	
Overall length	70,000 mm
Mould~pinch roll	12,880 mm
Strand distance	1,400 mm
Pass line	F.L. + 1,100 mm
Withdrawal device	Hydraulic drive (Servo-control)
Dummy bar pinchroll	2 stands (Hydraulic drive)
Cutter	Gas torch cutter (Powder cutting installed)

には福山製鉄所のそれと同様であるが，大型化とともに，次のような改良を加えた。

1) サイズを大断面にしたため，メタラジカルレンダスを 40 m 確保した。

2) 鑄造サイズの交換時間を短縮するため，モールドおよび，二次冷却ゾーンを一個のユニットに組み込み，15~20 min/ストランドで，サイズ交換が可能となった。それと同時に丸ビレット，角ビレットの全サイズに対応できる駆動ロール，テーブルロールを開発した。

3) 引抜慣性力の増加に対し，駆動ロール数を 4 ロール/ストランドにし，ブレーキ装置も追加した。

4) ビレット表面品質をさらに改善するため，熱間ショットブラスト装置 (HSB) を追加した。

5) 電磁攪拌装置を増強して，内質の改善を目標とした (Table 2)。

2.2 大断面鑄片の引抜制御

大型 HORICAST では，引抜装置の大型化と鑄片の大断面化によつて，鑄片引き抜き時の引抜抵抗と鑄片重量は，Fig. 2 に示すように，小型 HORICAST に比べ増加した。すなわち，引き押しの運動に対する慣性力は

Table 2. Specifications of electromagnetic stirrer.

No.	1	2	3
Type	Rotarymotor	Rotarymotor	Linearmotor
Number of pole	2	2	2
Number of phase	3	3	3
Capacity	30 kVA	660 kVA	250 kVA
Frequency	1 to 50 Hz	50 Hz	50 Hz
Magnetic flux density (gauss)	600	990	180

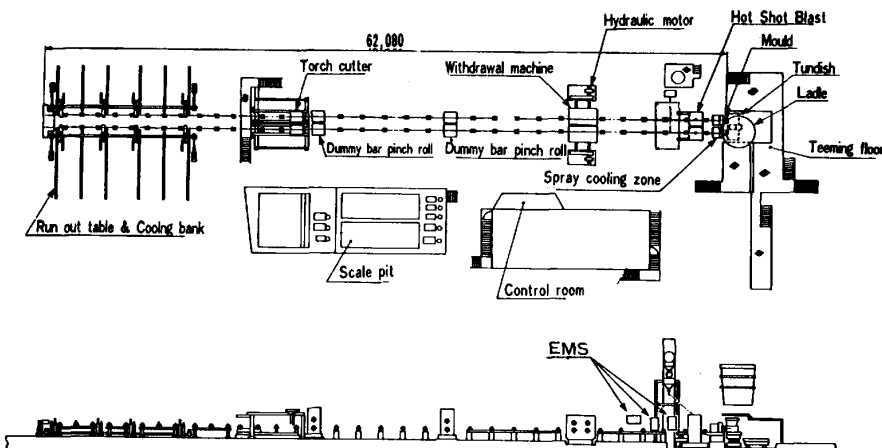


Fig. 1. Outline of HORICAST.

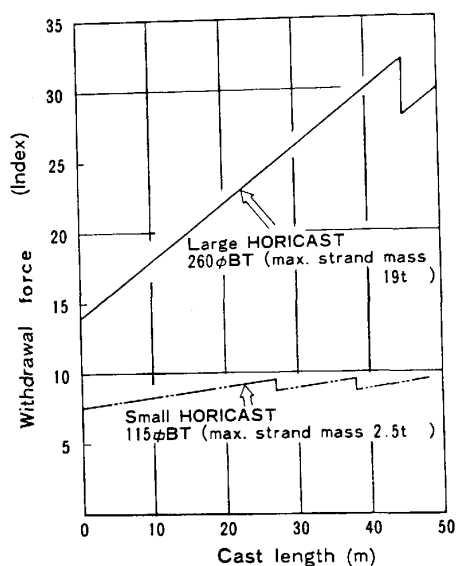


Fig. 2. Change of withdrawal force during casting.

115 mm φ の 2.5 t に対し、260 mm φ では、8 倍の 19 t に増加し、引抜抵抗は 3 倍に増加した。一方鋳片引き抜きはビレット表面品質改善のため、120 cpm 以上の高サイクルの間歇引き抜きを行うことが必要である。大型 HORICAST では鋳片重量と引抜抵抗の増加影響を受けず、間歇引き抜きの精度と高サイクルを維持するため次の技術を開発した。

- 1) 引抜装置にブレーキユニットを追加し、引きから押しに移る時の鋳片慣性力に対抗させ、小型 HORICAST と同等の減速特性を維持した。
- 2) 引抜装置および制御装置の精度と応答速度を向上させた。
- 3) 鋳造長とともに増大し、変化する慣性力に追従する引抜制御を行わせた。

この結果、260 mm φ、290 mm φ の大断面鋳片も 120~150 cpm の高サイクル間歇引き抜きで 1 m/min の鋳造速度で安定して鋳造している。

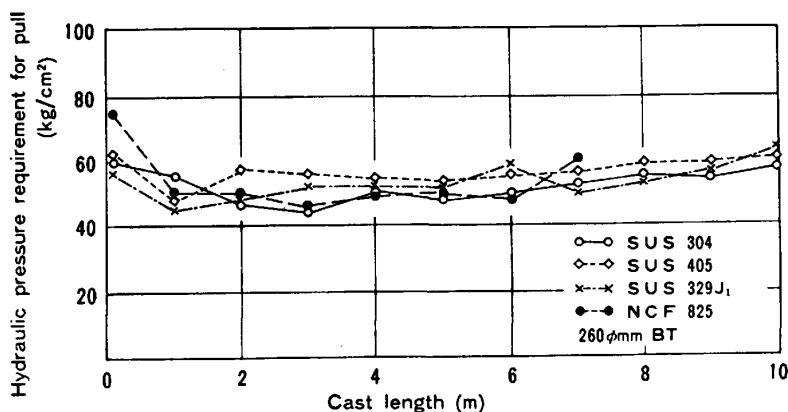


Fig. 4. Change of required hydraulic pressure for pulling.

2.3 ステンレス鋼、高合金鋼の鋳造

HORICAST では、鋳型内にパウダー等の潤滑剤を使用しないため、熱間強度が高い鋼種では鋳型内引抜抵抗が高くなり、引き抜きが安定しないことがある。また、丸ビレットの鋳造において鋳型内で、鋳片と鋳型の接触不良が起こると、鋳片の外形に歪みが発生しやすくなりビレットの真円度不良あるいは、表面縦割れ等の欠陥が多くなる。これに対して、鋳型のテーパを、これらの鋼種の熱膨脹特性に合わせて設計することにより、Fig. 3 に示すように SUS 304 の 260 mm φ 鋳片において、引き抜き力が低くなり、しかも、表面性状、形状ともに安定した鋳造が可能となった。また、各種ステンレス鋼と高合金鋼においても、Fig. 4 に示すように、それぞれの鋼種に適した鋳型テーパを設計することによって、鋳型内面に潤滑機能のある特殊なめつきの必要はなく、炭素鋼と同等の鋳造速度で鋳造が可能となっている。

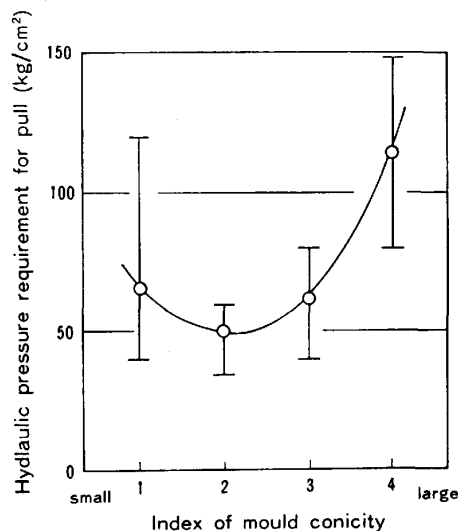


Fig. 3. Relationship between mold concavity and required hydraulic pressure for pulling (260 mm φ, SUS 304).

次に、鋳型とタンディッシュ間を接合するのに使用しているブレーキングの材質についても、耐溶損性と耐熱衝撃性の点から検討を加えた。従来ブレーキングの材質として、BN が知られているが、HORICAST では炭素鋼用として、 Si_3N_4 に少量の BN を含んだ複合材を使用し、価格と性能の点で BN より優れた結果を得て、工業生産に使用してきた。しかし、ステンレス鋼に対して、SIALON 組成 ($Si_{6-z}Al_2O_2N_{8-z}$) の各種の材質について検討した結果、SIALON 係数 $Z=1$ の材質に少量の BN を添加したセラミックスが、耐溶損性と耐熱衝撃特性のバランスの上から良好であることがわかった (Fig. 5)。

2.4 熱間ショットブラスト

本プロセスにおいては、従来報告したように、鋳片表面に垂直にコールド・シャットと呼ばれる組織的不連続線が周期的に発生し、さらにその一部に微小な空隙の列が並ぶことがある。この空隙の列をコールド・シャット・クラック (CSC) と呼称している。コールド・シャット・クラックの鋳片表面からの深さは、鋳片の引き抜

きサイクルと相関があり、炭素鋼を例にとると、Fig. 6 に示すように、引き抜きサイクル数の増加につれて、浅くなっていく。SUS 304 においても同様の傾向が観察されている。今回、このコールド・シャット・クラックをさらに完全に防止するために熱間ショット・ブラスト法を開発した。この方法はショット・ブラストによって鋳片表面に圧下加工を加え、それによつてコールド・シャット・クラックを圧着させようとしたものである。従つてこの効果はショット時のコールド・シャット・クラック内部の酸化程度と、鋳片表面の変形抵抗に依存している。すなわち原理的にはショット処理位置がモールドに近くなるほどコールド・シャット・クラックの酸化度は少なくなり、また鋳片表面温度も高くなつて変形抵抗が小さくなるために、効果が大きくなつていく。この考え方にもとづいて、モールド出側直後に設置した熱間ショット・ブラストの効果を実験した結果を Fig. 7 に示した。ビレット表面のコールド・シャット・クラックの深さ分布を顕微鏡観察した。引き抜きサイクルが 80 cpm の場合、本装置によつて約 0.6 mm 以下の浅いコールド・シャット・クラックは防止できたが、それ以上に深いものはショットの加工深さの限界から、圧着できないことがわかる。従つてショットの効果を得るためにはコールド・シャット・クラックの深さそのものを浅いレベルに維持しておくことが必要で、同じく Fig. 7 に示したように、たとえば 130 cpm という高サイクル引き抜きで鋳造し、コールド・シャット・クラックの深さを 0.6 mm 以下にした場合皆無にすることができた。ステンレス鋼では、例えば SUS 304 を炭素鋼と同一条件でショット処理した結果炭素鋼では消失する程度の深さのコールド・シャット・クラックでも残存していた。これはステンレス鋼は一般に炭素鋼よりも

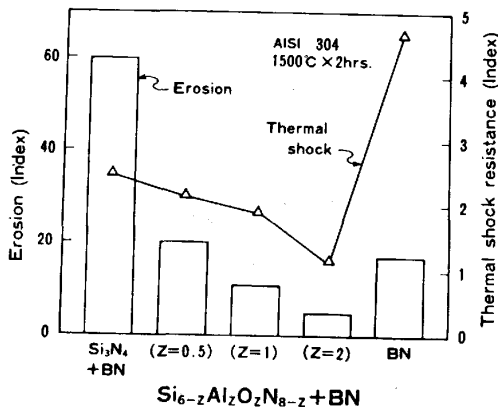


Fig. 5. Resistance to erosion and thermal shock of break ring material.

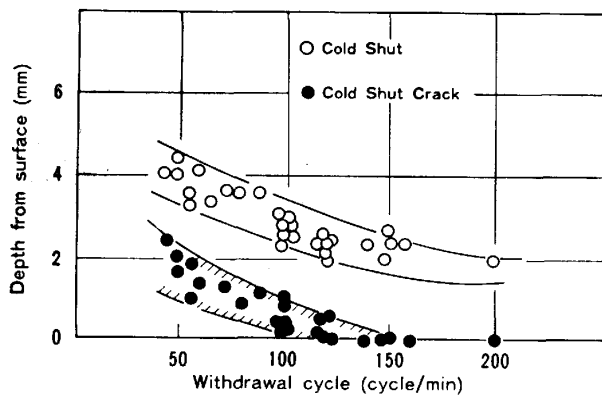


Fig. 6. Relationship between depth of cold shut, cold shut crack and withdrawal cycle for carbon steel.

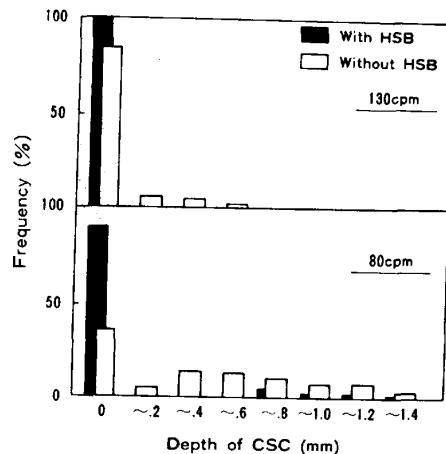


Fig. 7. Effect of hot-shot-blasting (HSB) on the depth of cold shut crack.

熱間変形抵抗が高いため、ショットによる加工深さが浅くなつたことに原因があると考えられる。また、炭素鋼の角铸片のコーナーからサンプルを切り出し試験圧延機で圧延試験を行つた。加熱は $1100^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ で 115mm ϕ から 46mm 厚まで圧延 (圧下比=2.2) した結果、熱間ショット・ブラストの無い場合には铸片のコーナー部に相当する位置に浅いコールド・シャット・クラックによる開口が認められているが、熱間ショット・ブラストのある場合には全く疵発生がない。以上述べたように、高サイクル铸片引き抜きと熱間ショットブラストの使用によつて、水平連铸法の特有の表面欠陥であるコールドシャットクラックは、炭素鋼では防止できるようになつた。

3. 铸片の内質と成品の品質

3.1 ステンレス鋼および高合金鋼の铸造組織

Table 3 に铸造したステンレス鋼と高合金鋼と铸造条件を示す。Photo. 2 に铸片のマクロ組織を示す。SUS 304, 316, 321, 405, NCF 825 では柱状組織が発達しているが、SUS 329J1 では铸片上面側は柱状組織が見られるが、下側は等軸晶となつている。また柱状組織の場合でも铸片内の最終凝固位置が幾何学的中心から $5\sim 10\text{mm}$ ほど上側にずれて上下面で非対称となつており、さらに柱状組織の成長方向も上側に偏倚しつつ中心

に向かつている。

SUS 304 について2次デンドライトアームスペーシングを铸片表層から中心に向かつて測定すると Fig. 8 に示すようになった。上側でアームスペーシングは多少大きくなつており、下側に比べて冷却速度がゆるやかであることがわかる。これは铸片内の未凝固溶鋼中で自然対流が生じ、上下面に温度差を生じたこと、およびサポートロール群が下側のみに配置されているため、下側の冷却が強くなつたために生じたと考えられる。

Table 3. Experimental condition of stainless steels and high alloy.

Steel grade	Main chemical composition (%)			Phase
	Ni	Cr	Others	
SUS 304	9.0	19.0	—	$\gamma (+\delta)$
316	14.0	16.5	Mo : 2.0	
321	11.0	18.5	Ti : 0.25	
SUS 405		13.0	—	α
SUS 329J1	5.0	23.0	Mo : 3.0	$\alpha+\gamma$
NCF 825	42.0	21.0	Mo : 3.0, Cu : 2.0, Ti : 1.0	γ
Billet size		260 mm in diameter		
Casting speed		1.2~1.5 m/min		
Superheat in tundish		30~40 °C		
Withdrawal cycle		120~150 cpm		

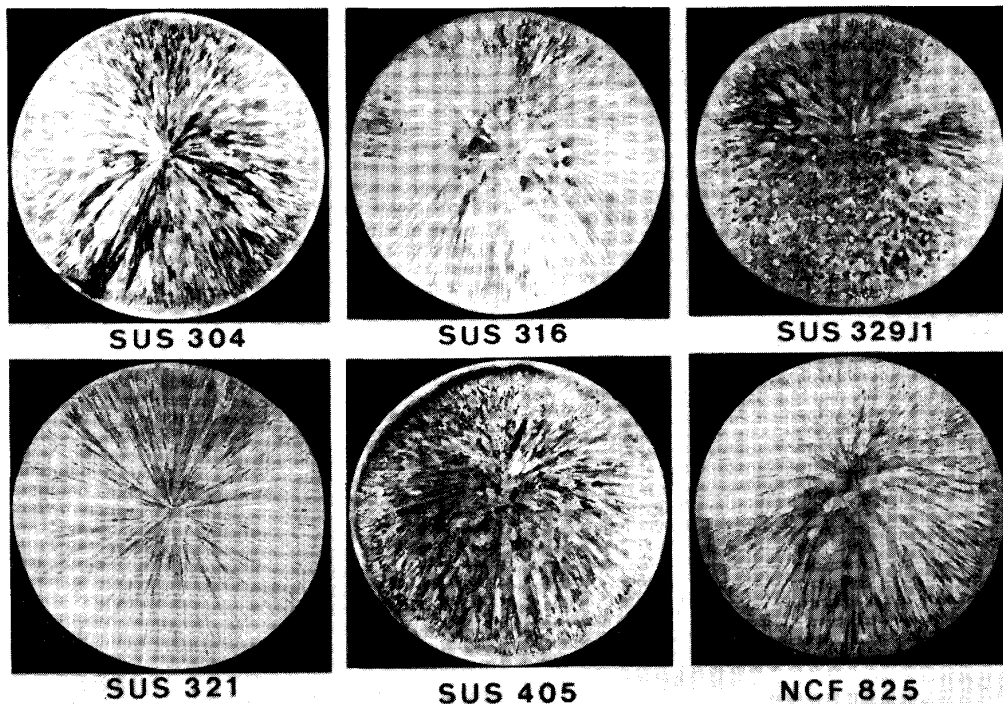


Photo. 2. Cast structure of stainless steels and high alloy. $\Delta T=30\sim 40^{\circ}$, without EMS

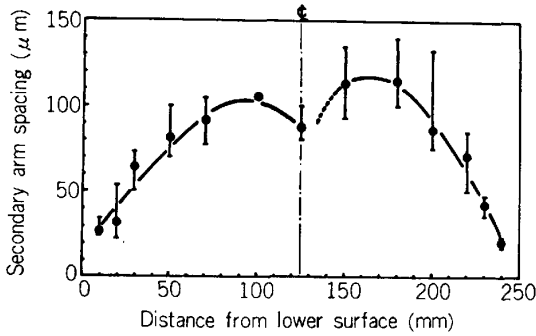


Fig. 8. Distribution of dendrite secondary dendrite arm spacing on the cross section of billet (SUS 304).

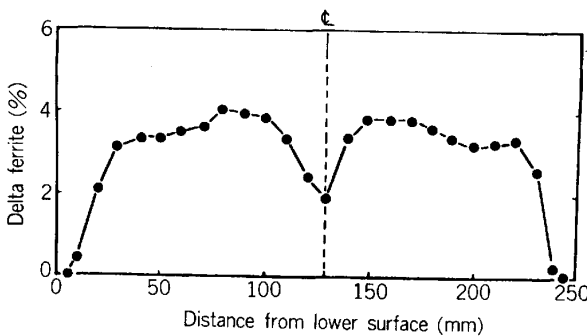


Fig. 9. Distribution of δ-ferrite on the cross section of billet (SUS 304).

Fig. 9 に SUS 304 鋳片の C 断面内の δ-フェライト量の分布を示す。冷却速度の大きい表面では中心部に比べて δ-フェライトの量が少ない。

3.2 熱間押し出しパイプへの適用

鋳片表層には、Photo. 2 に示すようになんかなり厚いチル晶と微細結晶が生成している。SUS 304 と SUS 329 J1 の鋳片を、ごく表層をピーリングした後、熱押しプロセスで継目無鋼管に試圧した。その結果、鋼塊から分塊圧延されたビレットで製造したパイプに比べて劣らない良好な表面性状のパイプを得た。

3.3 線材、熱間鍛造への適用

炭素鋼ビレットの鋳造技術については、すでに福山製鉄所で確立している⁸⁾。京浜製鉄所の HORICAST では、鋳造ビレットに対して、熱間鍛造性、線材に圧延した後には伸線性、冷鍛性について調査した。試験した鋼種は、炭素含有量が 0.04% から 0.65% までである (Table 4)。ビレットには熱間ショットプラストは適用した。

3.3.1 伸線性

0.26% C 鋼を除く鋼種は、115 mm φ ビレットをビレットの表面手入を行うことなく、直接に 5.5 mm φ と 9 mm φ の線材に圧延した。高炭素線材は、圧延直後にステルモ冷却ラインで急冷して伸線に適した組織とした。

Table 4. Chemical composition of tested steels (wt%)

Sample No.	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Steel grade JIS No.
1	0.04	0.01	0.24	0.017	0.012	0.001	SWRM 6 K
2	0.09	0.03	0.37	0.023	0.009	0.057	SWRCH 10 A
3	0.17	0.06	0.62	0.022	0.015	0.037	SWRCH 18 A
4	0.26	0.25	0.60	0.018	0.001	0.019	SF 45 A
5	0.32	0.22	0.60	0.021	0.011	0.016	SWRCH 35 K
6	0.65	0.21	0.51	0.028	0.016	0.020	SWRH 62 A

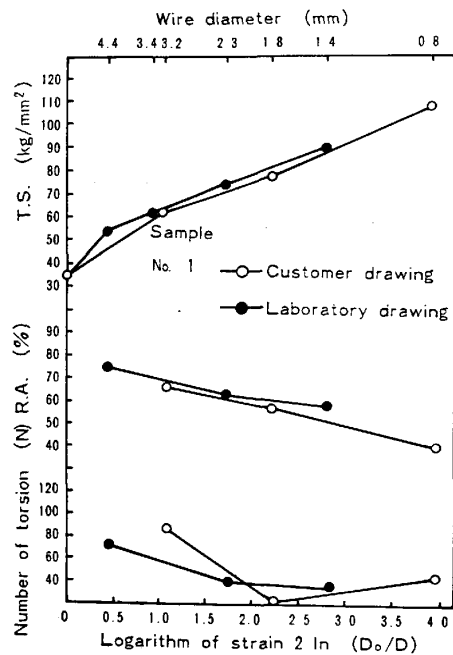


Fig. 10. Drawability of low carbon steel.

低炭素鋼線材は、5.5 mm φ から 0.8 mm φ まで 13 ダイスで (最終伸線速度 900 m/min) 中間に焼鈍工程を入れることなく伸線した。リムド鋼より伸線過程での延性が高く、圧延スケールは酸洗ではなく、メカニカルデスケーリング (繰り返し曲げ) で落としたにもかかわらず、1 t コイルで断線はなく、内部清浄性が良好で、ビレット表面疵がないことがわかった (Fig. 10)。

0.65% C 鋼も、5.5 mm φ の圧延線材を酸洗によつてデスケーリングした後、1.6 mm φ まで 9 ダイスで (速度 700 m/min) 中間熱処理なしに伸線できた。これは、内部清浄性、表面性状が良好なことのほか、中心偏析が少なく、圧延後の冷却時に線材の中心にマルテンサイト等が発生していないことを示している。

3.3.2 冷鍛性

0.04% C, 0.09% C 鋼は、5.5 mm φ の圧延線材から

3.23 mm φ まで伸線したものを、また、0.17% C 鋼では、5.5 mm φ の圧延線材から 3.5 mm φ まで伸線し、700°C × 4 h 炉冷の中間焼鈍を入れた後、3.23 mm φ まで再度伸線したものを、小ネジ（十字穴付皿頭タッピングネジ）に、冷間鍛造した線材の表面疵があると皿頭部に割れが入り、中心偏析、介在物があると冷鍛されたネジの先端に割れが入るが、今回のテストでは、頭部および先端には割れは、発生しなかつた。

0.35% C 鋼は、9 mm φ の圧延線材を 8.25 mm φ まで伸線した後に直接、丸頭ボルトに冷鍛した。この冷鍛試験においても、線材に表面疵があると丸頭部に割れが発生するが、その発生率は通常のブルーム CC 材と同等であり（発生率 15%、これは主に強度レベルからくる加工限界である）、無手入水平連铸ビレットの表面性状は良好であることがわかつた。

3.3.3 熱間鍛造性

HORICAST には電磁攪拌装置が設置されており铸造組織、マイクロ、ポロシティの微細、均一化がはかられているが⁶⁾、その結果、熱間鍛造を行つた場合、どの程度少ない圧下比で密着させることができ、中心部まで、健全な機械的性質が得られるか調査した。

铸造のままの 115 mm φ および 220 mm φ のビレットを 150 mm の長さに切断した後、1170°C に加熱し 2 t ボードハンマーで鍛造した。铸造方向に平行もしくは直角に、圧下比 1.5 から 10 まで鍛造し、軸心部から引張試験片を採取して、機械的性質を調査した。Fig. 11 に示すように、引張強さ、伸び、絞り値は圧下比が大きくなるにつれて、ばらつきが少なく、一定値になつていく。これから、圧下比は 5 以上をとれば、マイクロポロシティが密着し、中心部においても均一な材質を持つことがわかつた。連铸材の中心部の均質化に対する圧下比の影響に関して従来の報告^{12)~15)}をまとめると、Table 5 に示すようになるが、水平連铸のビレットも一般連铸材とほぼ同様の健全性を持つていると判断できる。

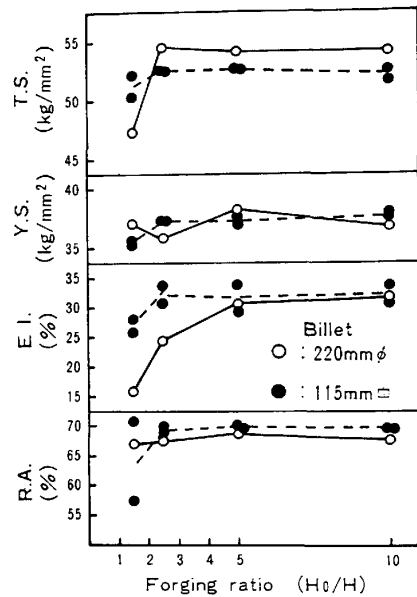


Fig. 11. Effect of forging ration on the tensile properties.

4. 結 論

京浜製鉄所において、大型 HORICAST を設置しステンレス鋼を主体とした铸造技術の開発を行つた結果、

- 1) 大断面铸片を安定して铸造する引抜制御技術を完成した。
- 2) ステンレス鋼、高合金鋼を铸造するための铸型テーパの設計、ブレーキング材質の開発を行つて、安定した铸造と良好な表面性状の铸片が得られた。
- 3) 高サイクル铸造、および熱間ショットブラストの適用によつて、水平連铸ビレット固有のコールド・ショット・クラックは防止できた。
- 4) 本プロセスで铸造したビレットから熱間押し出し法で製管したパイプの機械的性質、表面性状は良好で、造塊材に劣らないことがわかつた。現在さらに、高温強度クリープ試験を行つている。
- 5) 水平連铸製炭素鋼ビレットを線材に圧延して、伸

Table 5. Required minimum reduction for continuously cast slab or billet.

Slab or Billet	Size (mm)	Rolling or Forging	Steel grade	Necessary min. reduction	Ref.
Slab	190	Rolling	T.S.=40kg/mm ² , 50kg/mm ²	3~5	Sumitomo kinzoku 24 (1972), p. 79
	250	Rolling	40kg/mm ² , 50kg/mm ²	3	Nipponkokan giho 69 (1976), p. 1
	210	Rolling	40kg/mm ² , 50kg/mm ²	2.8	Tetsu-to-Hagane 70 (1984), p. 388
Billet	130 φ	Rolling	Spring steel Si-Mn	6~10	Tetsu-to-Hagane 48 (1962), p. 11
	300 φ	Forging	S 45 C	2.8 S	R and D 19 (1969), p. 24
HCC Billet	115φ 220φ	Forging	S 25 C	5	This work

線性，冷鍛性を調べた。また，ピレットを直接，熱間鍛造して，健全性を検討した。いずれも造塊材，一般連铸材に劣らないことがわかった。

文 献

- 1) 阪本英一，伊藤雅治，本田 旭，石川 勝：鉄と鋼，65 (1979)，S 756
- 2) 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)，S 757
- 3) 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)，S 198
- 4) 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)，S 199
- 5) 田口喜代美，石川 勝，水岡誠史，上野 康，本田 旭：鉄と鋼，66 (1980)，S 200
- 6) 水岡誠史，広瀬 猛，田口喜代美，武田州平，宮原 忍：鉄と鋼，67 (1981)，S 209
- 7) 山田武海，関口英男，武田州平，広瀬 猛，川邑 正男：鉄と鋼，67 (1981)，S 854
- 8) 鶴 雅広，水岡誠史，広瀬 猛，田口喜代美，武田州平，宮下芳雄：鉄と鋼，68 (1982)，S 282
- 9) 武田州平，宮下芳雄，広瀬 猛，水岡誠史，鶴雅広：鉄と鋼，68 (1982)，S 917
- 10) 宮下芳雄，宮本 明，伊藤雅治，田口喜代美，小谷野敬之，本田 旭：鉄と鋼，67 (1981)，p. 1387
- 11) 木下凱雄，竹田誠一，義村 博：鉄と鋼，65 (1979)，p. 176
- 12) 長谷部茂雄，井関祥浩，浜中禎雄，中村昌明：住友金属，24 (1972)，p. 79
- 13) 山口哲夫，川和高穂，石黒守幸，岩崎宣博，菅原功夫，下田達也：日本鋼管技報，69 (1976)，p. 1
- 14) 奥村直樹，長谷川俊永，織田昌彦，南雲道彦：鉄と鋼，70 (1984)，p. 388
- 15) 永井親久，野崎輝彦，三浦正淑，小原浩二：神戸製鋼技報，14 (1964)，p. 24