

---

第 2 中径電縫ハイテストラインパイプの製造について

Manufacturing of New 26-inch ERW High-Test Line Pipe

寺田 利坦(Toshihiro Terada) 平野 豊(Yutaka Hirano) 大谷 輝夫(Teruo Otani)  
吉本 勇三(Yuzo Yoshimoto) 横山 栄一(Eiichi Yokoyama)

---

要旨：

第 2 中径電縫鋼管工場は最大外径 26in(660.4mm),最大肉厚 0.63in(16.0mm)の製品が製造できる世界最大のミルである。この新ミル稼動以来、種々実験した結果、(1) Al-Si キルド連铸材で、靱性にすぐれかつ溶接欠陥発生が少ない素材製造が可能になった。(2) 靱性のすぐれた高張力大径薄肉 ERW 鋼管や溶接部の品質バラツキの少ない高張力厚肉電縫鋼管の製造が可能になった。(3) このミルで製造したラインパイプの補助的強度特性（バウシンガー効果、内圧降伏破壊強度、低温引張温度など）が定期的に把握できた。

---

Synopsis：

A new cage forming type ERW mill installed at Chita Works, Kawasaki Steel Corporation, is one of the largest of its kind in the world, capable of producing high quality steel pipe up to 26" (660.4mm) in outside diameter and 0.63" (16.0mm) in wall thickness. Factors contributing to the improvement in quality of the new mill pipe have been examined and the following results obtained. (1) The application of vertical-bend type caster with improved shielding is effective in decreasing the weld defects. (2) Controlled rolling of hot strip mill and pipe-making technique by cage forming have made it possible to produce high quality steel pipe with large outside diameter and thin wall thickness. (3) Welding heat input control, full automatic seam annealing control and full body ultrasonic testing have contributed to the production of ERW pipe with higher quality and reliability. (4) Supplementary mechanical properties such as yield strength drop due to Bauschinger effect, yield and burst strength by internal pressure, and tensile strength at lower temperatures have been quantitatively determined.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

## 第2 中径電縫ハイテストラインパイプの製造について

Manufacturing of New 26-inch ERW High-Test Line Pipe

寺 田 利 坦\*  
Toshihiro Terada

平 野 豊\*\*  
Yutaka Hirano

大 谷 輝 夫\*\*\*  
Teruo Otani

吉 本 勇 三\*\*\*\*  
Yuzo Yoshimoto

横 山 栄 一\*\*\*\*\*  
Eiichi Yokoyama

### Synopsis:

A new cage forming type ERW mill installed at Chita Works, Kawasaki Steel Corporation, is one of the largest of its kind in the world, capable of producing high quality steel pipe up to 26" (660.4 mm) in outside diameter and 0.63" (16.0 mm) in wall thickness.

Factors contributing to the improvement in quality of the new mill pipe have been examined and the following results obtained.

- (1) The application of vertical-bending type caster with improved shielding is effective in decreasing the weld defects.
- (2) Controlled rolling of hot strip mill and pipe-making technique by cage forming have made it possible to produce high quality steel pipe with large outside diameter and thin wall thickness.
- (3) Welding heat input control, full automatic seam annealing control and full body ultrasonic testing have contributed to the production of ERW pipe with higher quality and reliability.
- (4) Supplementary mechanical properties such as yield strength drop due to Bauschinger effect, yield and burst strength by internal pressure, and tensile strength at lower temperatures have been quantitatively determined.

### 1. 緒 言

ラインパイプの最大の需要分野は、いうまでもなく、石油・天然ガス輸送である。この石油・天然ガス輸送ラインには、使用用途別に、ギャザリング用 (O.D.4~24in)、トランクラインまたはトランスミッションライン用 (O.D.16~56in)、ディストリビューティングライン用 (O.D.2~16in) がある<sup>1)</sup>。これらのラインパイプは従来から、電縫鋼

管、サブマージアーク溶接鋼管、継目無鋼管が使用されてきたが、最近、溶接部の品質保証体制が一層進められるにつれて電縫鋼管の使用比率が高まってきている。

当社では、この状況に応じるため、昭和39年に他社に先がけて中径電縫鋼管 (O.D.6⅝~20in) の製造を開始してきたが、さらに最近のラインパイプの大型化、高張力化に迎え、昭和53年10月より第2中径電縫鋼管設備を稼動させた。この新設備は最大外径26in (660.4mm)、最大肉厚0.63in

\* 知多製造所管理部技術管理室主査(掛長待遇)

\*\*\* 知多製造所第1造管部溶接管技術室

\*\*\*\*\* 技術研究所知多研究室主任研究員

(昭和55年10月11日原稿受付)

\*\* 知多製造所管理部技術管理室主査(課長待遇)

\*\*\*\* 知多製造所第1造管部大中径管課掛長

(16.0mm)の製品が製造できる世界最大のミルである。

今回、このミルで製造したラインパイプに対して、どのようにして品質を向上させかつ保証してきたか、その概要を素材における品質向上、造管時の品質管理、品質保証体制および品質実績例などの面から紹介し、さらに強度特性を詳細に検討した結果について報告する。

## 2. API 規格、需要家の補足規格

### 2.1 高張力大径電縫鋼管について

Table 1 に API 5LX のグレードごとの主要化学成分、Table 2 に強度規定を示す。X56 以上は微量添加で析出硬化および細粒化により強度を上昇させる Nb, V, Ti などの析出硬化元素を用いた成分系となっている<sup>2)</sup>。

またグレード X52 以上、外径 20in (508.0mm) 以上の範囲で、かつ需要家の指定がある場合には、Table 3 に示すような靱性の補足規定がある。

### 2.2 大径電縫鋼管の寸法精度について

Table 4 に API 5LX の寸法許容差、外観および形状検査に関する主な規定を示す。

寸法許容差は、外径 20in 以上と未満に別けて規定している。これは従来 20in 以上は電縫鋼管としてよりはむしろ、サブマージアーク溶接鋼管製造が主体となっていたためである。第 2 中径電縫鋼管工場で製造したパイプは、後述するように全て 20in 未満の規定を満足している。

## 3. 第 2 中径電縫ラインパイプの製造

### 3.1 素材ホットコイル

高張力ラインパイプに要求される品質のうち特に重要な点は、母材部の諸特性が良好なことで、溶接部の諸特性が母材部に劣らず良好なことである。これらは非金属介在物の減少、S の低減、連铸技術、制御圧延技術の向上により一段と進歩した。なお当社は高張力ラインパイプの品質バラツキをできるかぎり小さくするため、素材は全量連铸材を使用している。

#### (1) 非金属介在物減少対策

製鋼、脱ガス過程での介在物浮上除去、連铸過程での介在物生成を防止する「無酸化鋳込」は、当然のことながら採用されているが、特に第 2 中径電縫鋼管用素材は広幅スラブ（外径 26in 材は 2100mm 程度となる）が要求されるため、介在物

Table 1 API requirements for heat analysis (Twenty-second Edition) (wt %)

| Grade                                 | C <sup>1)</sup><br>max. | Mn <sup>1)</sup><br>max. | P<br>max. | S<br>max. | Nb<br>min.          | V<br>min.          | Ti                 | Check<br>frequency        |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| X42                                   | 0.28                    | 1.25                     | 0.04      | 0.05      | —                   | —                  | —                  | If required,<br>each heat |
| X46, X52                              | 0.30                    | 1.35                     | 0.04      | 0.05      | —                   | —                  | —                  |                           |
| X56 <sup>2)</sup> , X60 <sup>2)</sup> | 0.26                    | 1.35                     | 0.04      | 0.05      | 0.005 <sup>3)</sup> | 0.02 <sup>3)</sup> | 0.03 <sup>3)</sup> |                           |
| X65 <sup>4)</sup>                     | 0.26                    | 1.40                     | 0.04      | 0.05      | 0.005 <sup>5)</sup> | 0.02 <sup>5)</sup> | —                  |                           |
| X70 <sup>2)</sup>                     | 0.23 <sup>6)</sup>      | 1.60 <sup>6)</sup>       | 0.04      | 0.05      | —                   | —                  | —                  |                           |

- 1) For grades X65 and below, for each reduction of 0.01 per cent below the specified maximum carbon content, an increase of 0.05 per cent manganese above the specified maximum is permissible, up to a maximum of 1.45 per cent.
- 2) Other chemical analyses may be furnished by agreement between purchaser and manufacturer.
- 3) Either Nb, V, Ti or a combination thereof, shall be used at the discretion of the manufacturer.
- 4) For grades X65 shown in size 16in and larger with wall thickness 0.500in and less, the chemical composition shall be as shown on as agreed upon between the purchaser and manufacturer. For other sizes and wall thickness the chemical composition shall be as agreed upon between the purchaser and manufacturer.
- 5) Either Nb or V or a combination of both shall be used at the discretion of the manufacturer.
- 6) For each reduction of 0.01 per cent below the specified maximum is permissible.

Table 2 Tensile requirements

(Twenty-second Edition, API)

| Grade | Yield strength<br>(psi) min. | Tensile strength<br>(psi) min.               | Elongation<br>(GL=2")%<br>min. | Weld-tensile<br>strength <sup>4)</sup><br>(psi) min. | Test frequency                                                                                |
|-------|------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| X42   | 42 000                       | 60 000                                       | See foot<br>note <sup>3)</sup> | 60 000                                               | For pipe 4-1/2in O.D. and<br>smaller ;<br>one per each lot of 450<br>lengths or less          |
| X46   | 46 000                       | 63 000                                       |                                | 63 000                                               |                                                                                               |
| X52   | 52 000                       | 66 000 <sup>1)</sup><br>72 000 <sup>2)</sup> |                                | 66 000 <sup>1)</sup><br>72 000 <sup>2)</sup>         |                                                                                               |
| X56   | 56 000                       | 71 000 <sup>1)</sup><br>75 000 <sup>2)</sup> |                                | 71 000 <sup>1)</sup><br>75 000 <sup>2)</sup>         | For pipe 65/8in O.D.<br>through 12-3/4in O.D.<br>; One per each lot of<br>200 lengths or less |
| X60   | 60 000                       | 75 000                                       |                                | 75 000                                               |                                                                                               |
| X65   | 65 000                       | 77 000 <sup>1)</sup><br>80 000 <sup>2)</sup> |                                | 77 000 <sup>1)</sup><br>80 000 <sup>2)</sup>         | For pipe 14in O.D. and<br>larger ;<br>one per each lot of<br>100 lengths or less              |
| X70   | 70 000                       | 82 000                                       |                                | 82 000                                               |                                                                                               |

1) For pipe less than 20in O.D. with any wall thickness, and for pipe 20in O.D. and larger with wall thickness greater than 0.375 in

2) For pipe 20in O.D. and larger with wall thickness 0.375in and less.

3) The minimum elongation in 2 inches shall be determined by the following formula :

$$e = 625\,000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad \text{where ; } e = \text{minimum elongation in 2 inches in per cent rounded to nearest 1.2 per cent.}$$

A = cross sectional area of the tensile test specimen in square in the based on specified outside diameter or nominal specimen width and specified wall thickness, rounded to the nearest 0.01 sq. in or 0.75 sq. in whichever is smaller.

U = specified tensile strength, psi

4) For pipe 8 5/8in O.D. and larger with any wall thickness.

Table 3 Charpy impact testing<sup>1)</sup> and chop weight tear testing<sup>1)</sup>

(Twenty-second Edition, API)

| Test item                                | Method                     | Test temperature | Test frequency                                 | Requirement                                                                                                          |
|------------------------------------------|----------------------------|------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Charpy V-notch test<br>(two-thirds size) | According to<br>ASTM A 370 | 32°F or 50°F     | Three transverse<br>specimens per<br>each heat | Average shear value<br>; min. 35%<br>All heat average shear<br>value ; min. 50%                                      |
| DWTT                                     | According to<br>API RP 5L3 | 32°F or 50°F     | Two transverse<br>specimens per<br>each heat   | At least 80 per cent of<br>the heats shall exhibit<br>a fracture appearance<br>shear area of 40 per cent<br>or more. |

1) For welded pipe 20 in O.D. and larger, grade X52 and higher, if required

浮上効果の特に大きな垂直型連鋳機を使用している。この垂直型連鋳機（水島第6CC）は湾曲型連鋳機（水島第2CC）に比べて、電縫溶接品質上特に問題となる100 $\mu$ m以上の大型介在物の量が大幅に減少しており、かつスラブ幅方向のバラツキも少なくほぼ均一である<sup>3)</sup>。また厚み方向はスラブ表

面より 1/4 厚み付近に介在物が散在するが、湾曲型連鋳機のような顕著な介在物集積帯は発生しない<sup>3)</sup>。

## (2) [S] の低減対策と偏析対策

脱硫技術の進歩により極低S鋼の量産が可能になったが、その一例としてグレードX60のS量に対する溶接部シャルピー衝撃値をFig. 1に示す。

Table 4 Tolerances on dimensions and weights, workmanship (Twenty-second Edition, API)

| Item                     |                                                           | Requirements                                                       |                                                                |                                 |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Tolerances on dimensions | Outside diameter                                          | Pipe Body                                                          | Less than 20 in                                                | $\pm 0.75\%$                    |
|                          |                                                           |                                                                    | Larger than 20 in                                              | $\pm 1.00\%$                    |
|                          | Pipe Ends for a distance of 4 in from the end of the pipe | 10-3/4 in and smaller<br>12-3/4 in to 20 in<br>20 in and larger    | +1/16 in, -1/64 in<br>+3/32 in, -1/32 in<br>+3/32 in, -1/32 in |                                 |
|                          | Out of roundness                                          | Pipe Ends                                                          | Larger than 20 in                                              | $\pm 1\%$                       |
|                          | Wall thickness                                            |                                                                    | 18 in O.D. and smaller<br>20 in O.D. and larger                | +15.0%, -12.5%<br>+19.5%, -8.0% |
| Tolerances on weights    |                                                           | Single lengths                                                     | Regular weight series<br>Special light weight series           | +10.0%, -3.5%<br>+10.0%, -5.0%  |
|                          |                                                           | Carload lots<br>A carload is consider to be a minimum of 40 000 lb | -1.75%                                                         |                                 |
| Workmanship              | Dents                                                     | Depth : Max. 1.4 in<br>Length : Max. 1.2×O.D.                      |                                                                |                                 |
|                          | Offset of plate edges                                     | Max. 0.060 in                                                      |                                                                |                                 |
|                          | Height of inside weld bead                                | Max. 0.060 in                                                      |                                                                |                                 |
|                          | Trim of inside weld bead                                  | Wall thickness 0.151 in to 0.301 in<br>0.301 in and larger         | Depth of trim max. 0.015 in<br>max. 0.05 t                     |                                 |
|                          | Defects                                                   | Laminations at bevel face : max. 1.4 in (transverse dimension)     |                                                                |                                 |

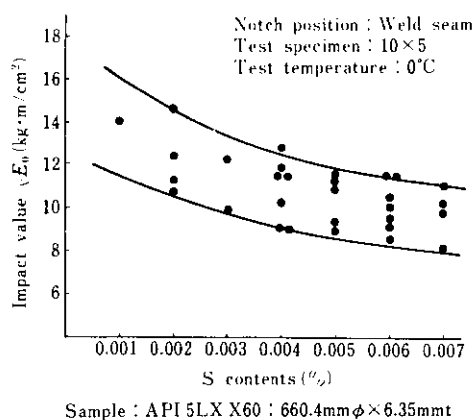


Fig. 1 Effect of S-contents on impact values of weld position

極低 S 化することにより，溶接部衝撃特性が次第に改善されることがわかる。また Fig. 2 に垂直連

鑄材で，スラブ断面の S プリントを厚み方向に 5 等分し，その内部に存在する S スポット数を測定した結果を示す<sup>4)</sup>。垂直連鑄材は S 偏析が極めて少ない。

### (3) 制御圧延による靱性向上対策

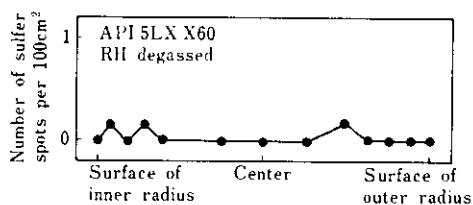


Fig. 2 Through-thickness distribution of sulfur spots in the sulfur print of slab section continuously cast with inert gas sealing between ladle and tundish

熱延時に高張力で靱性の良好な鋼板をつくるためには、低C-Mn鋼にNb, Vなどの元素を微量添加した成分系の材料をできるだけ低温加熱しオーステナイト細粒状態で、かつ粗圧延の圧下率を大きくとり仕上圧延前でホールディングすることなく、 $A_3$ 変態点付近で仕上げる<sup>5)</sup>、いわゆる制御圧延を行うことが望ましい。すなわち細粒化効果により靱性を向上させるのであるが、この時、C量が少々多かったり、仕上前シートバーでのホールディングタイムが長かったりすると、オーステナイト粒が粗大化し圧延後粗大なベイナイトの発生により靱性が劣化することがあるので、特に注意すべきである。

### 3・2 第2 中径電縫ラインパイプの製造

当社の第2 中径電縫鋼管工場におけるラインパイプ製造主要設備仕様をTable 5に、また製造可能範囲をFig. 3に示すが、 $t/D$  (肉厚/外径)は最小0.96%まで可能である。

Fig. 4に高張力ラインパイプの製造工程の代表例を示すが、その中で特に品質的に重要であり、かつ当工場で特徴的である溶接管理方法、溶接部品質管理設備およびパイプ成形方式について以下に紹介する。

#### 3・2・1 溶接条件管理

##### (1) 成形安定対策

溶接部の品質を安定させるためには、先ず溶接時の材料端部に局部変形や歪がなく安定していることが必要である。本ミルはFig. 5に示すようなフルケージフォーミング<sup>6)</sup>およびダウンヒルを採用しているため、成形時に急激な変形が発生せず

Table 5 Main equipment and their specifications of cage forming type ERW mill

|                      |                                                                                                                                |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Forming              | Full-cage roll forming type<br>Break down : 4std. DC 150kW×1,<br>45kW×3                                                        |
| Welder               | Fin pass : 3std. DC 185kW×3                                                                                                    |
| Seam annealer        | Thermatool VT-600 400kHz                                                                                                       |
| Sizing               | 400kW×4 1 000Hz                                                                                                                |
|                      | Sizer : 4std. DC 185kW×3                                                                                                       |
| Finishing equipment  | Pipe end cut-off machine ×2,<br>Pipe middle cut-off machine ×1,<br>Facer ×2<br>Anti-rust coating machine ×1,                   |
| Inspection equipment | Skelp-edge UST, Flattening<br>tester<br>Hydrostatic tester, Seam UST,<br>Full body UST<br>Weighing machine, Marking<br>machine |

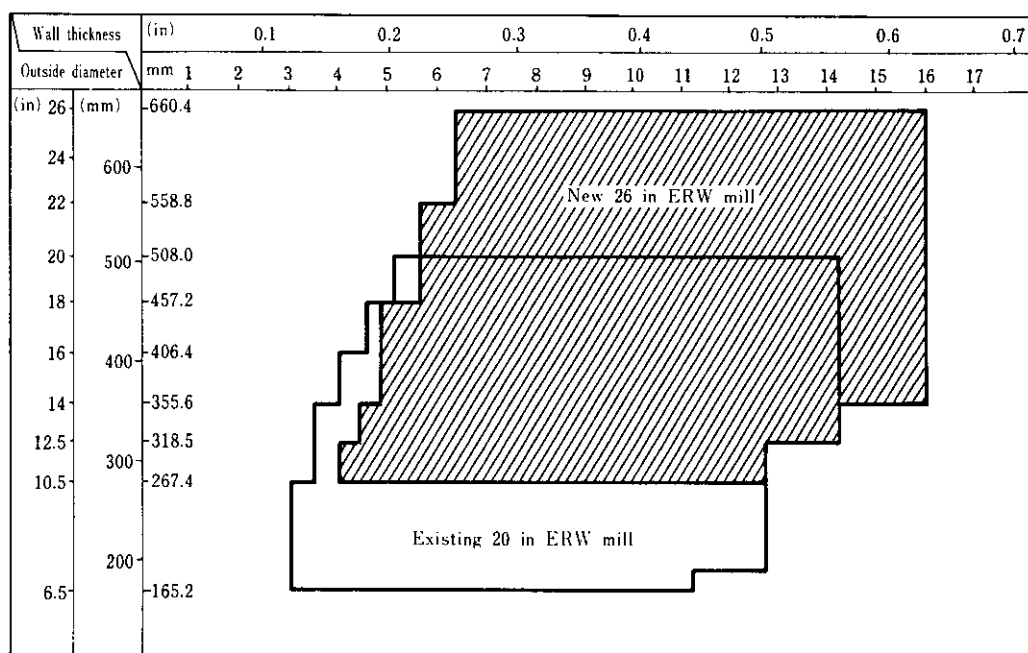


Fig. 3 Available size range

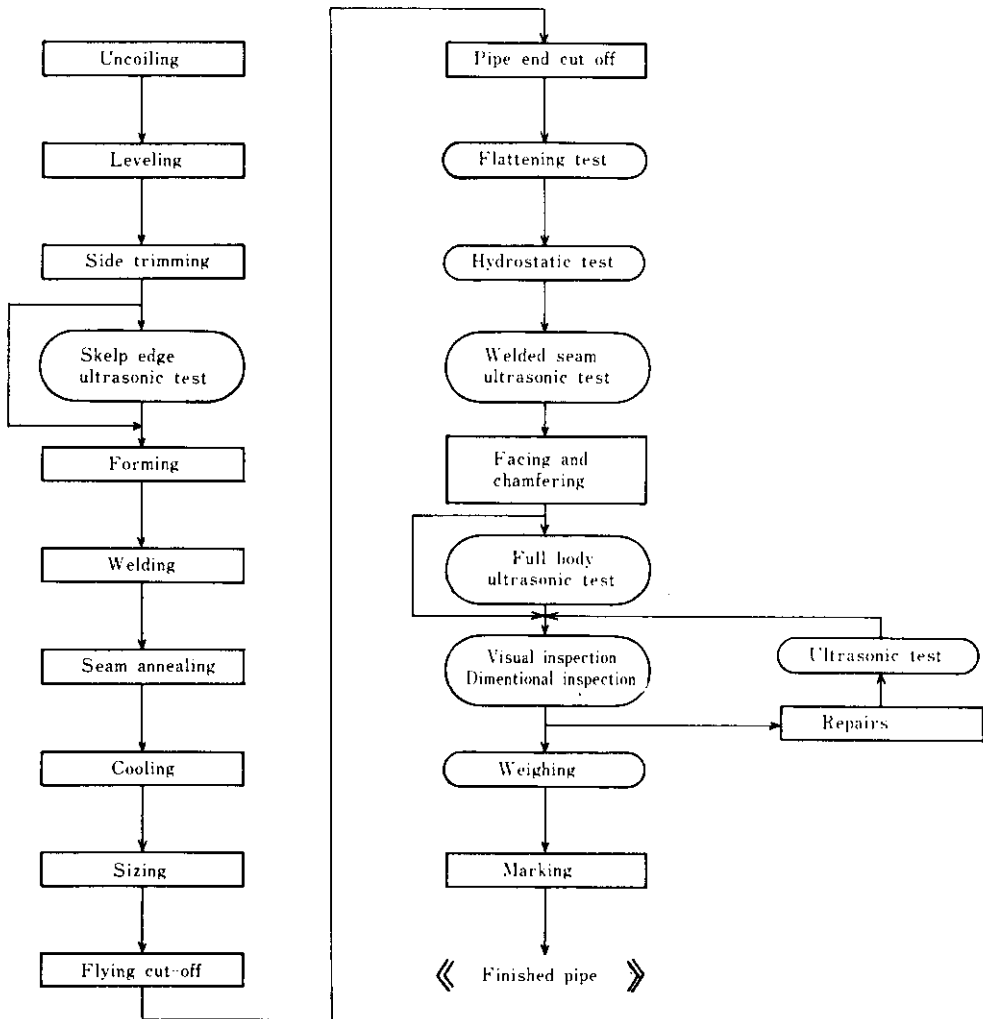


Fig. 4 Manufacturing and inspection processes of the line pipe

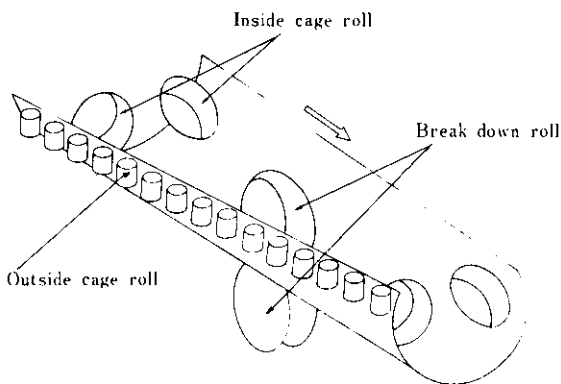


Fig. 5 Full cage roll forming

緩やかで均一な塑性変形状態が得られ、局部集中変形や材料端部の歪を極めて小さくすることができる。したがって大径薄肉鋼管の成形に有利であり、また厚肉鋼管に対してもケージスタンドの剛性を十分高めてあるため、16.0mmの肉厚まで安定成形が可能である。

## (2) 溶接入熱制御

溶接部の品質を左右する成形機端部の挙動と溶接性については、従来オペレーターが目視で行っていたため、個人差、熟練度の影響を受けやすかった。特に高張力鋼管については適正条件の許容範囲がせまくなるため安定条件を得ることは極めて困難であった。そこで当工場では、Fig. 6 に示

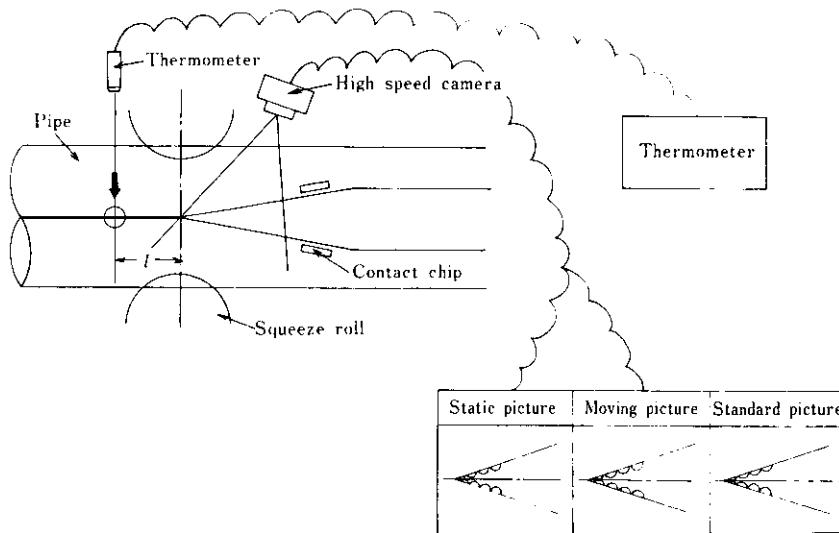


Fig. 6 Schematic diagram of heat input control for welding

すように溶接部を高速カメラで撮影し、正常な溶接状況と対比してたえず最適溶接条件が得られるよう管理している。正常な溶接状況を Photo. 1 の(a)に示す。また同時に溶接直後に温度計を設置し、その測温情報から溶接入熱を精度よく管理する方法を採用したので、溶接部の品質は著しく安定した。その状況を Fig. 7 に示す。

### 3・2・2 品質保証体制設備

#### (1) スパーク検出器

溶接時に発生するスパーク現象は局部的なコー

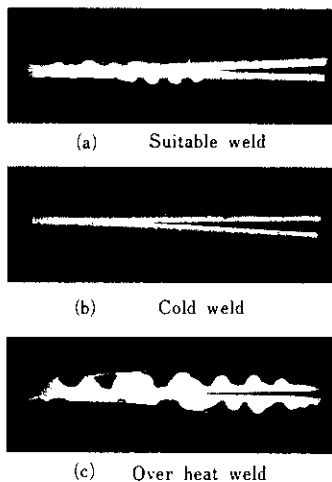


Photo. 1 Dependence of Vee-shape appearances on welding heat input

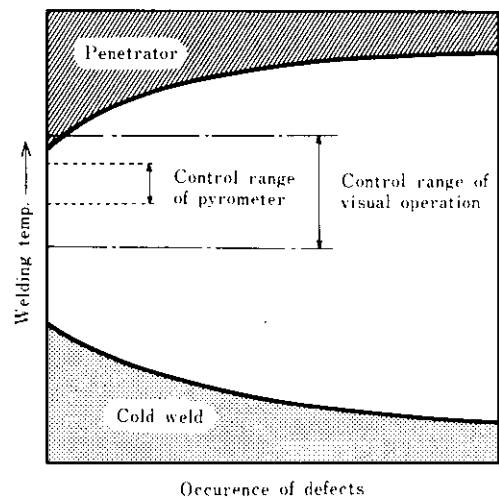


Fig. 7 Control range of welding temp.

ルドウェルドとなるため、溶接品質上非常に問題となる。そこでスパーク発生時にその現象をキャッチしその情報をオペレーターに知らせると同時に、スパーク発生箇所をパイプにマーキングする装置を開発し設置している。このスパーク検出装置はスパーク発生時の異常プレート電流をとらえるものである。装置の概要を Fig. 8 に示すが、この設備導入により溶接部の品質保証体制が一段と進歩した。

#### (2) 全自動シームアニーラー<sup>6)</sup>

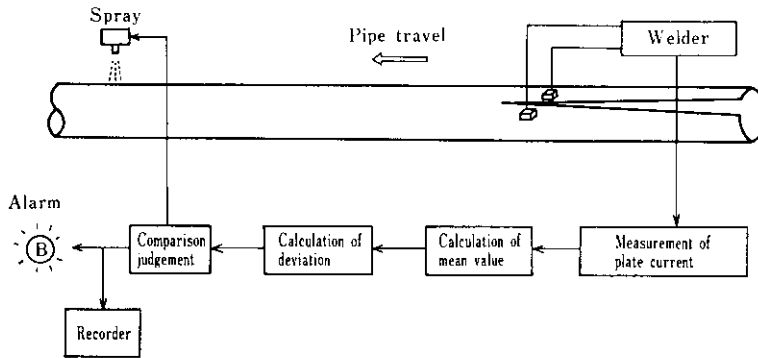


Fig. 8 Spark detector

溶接部の靱性向上、硬度の均等化などを図るため誘導加熱方式によりシーム部の熱処理を行っているが、製品のハイグレード化に伴い、そのコントロールはますます厳しくなるすう勢にある。本設備はこれに対応すべく、自動温度コントロールおよびシーム自動追従などの自動制御システムを内蔵している。

### (3) NDI 設備

当工場では品質保証体制に万全を期すため、コイルエッジ超音波探傷装置、溶接部超音波探傷装置（6 探触子）の他に、全面超音波探傷装置<sup>6)</sup>を設置している。この装置は 4 個のヘッドに内蔵された複数の探触子を、縦走してくるパイプの円周方向に高速で回転させ、パイプの長手方向および円周方向の内外面、内質部に存在するすべての欠陥を検出することができる。

## 4. 品質実績

最近、第 2 中径電縫鋼管工場で製造した高張力薄肉鋼管 API 5LX X60 (660.4mmφ×6.35mm<sub>t</sub>;  $t/D = 0.96\%$ ) の品質実績例を Fig. 9~13 および Photo. 2, 3 に示す。また同様に、高張力厚肉鋼管 API 5LX X65 (406.4mmφ×14.27mm<sub>t</sub>) の例を Fig. 14~18 および Photo. 4, 5 に示す。

素材は、いずれも低 C-Mn-Nb-V 系の Al-Si キルド連铸材で、ホットストリップミルの圧延時、

制御圧延により強度および靱性をアップした帯鋼を使用している。

Fig. 9, 14 のレードル分析値から、いずれの成分もよくコントロールされており、かつアップセット部のフッククラック、介在物などの溶接欠陥対策と靱性向上とをねらって、P, S などの不純物元素をできるだけ低くした清浄度の高い鋼である。

Fig. 10, 15 の引張特性、シャルピー衝撃特性および Fig. 12, 16 の DWTT 遷移温度から、いずれも強度および靱性のすぐれたパイプであることがわかる。また Fig. 13, 17 の硬度分布および Photo. 2~5 の顕微鏡組織写真より、溶接部の品質も良好なことがわかる。

Fig. 11 の寸法測定結果から、外径 26in の大径鋼管でも 20in 未満の API スペックを十分満足しており、寸法精度のすぐれたパイプである。

また、水圧による常温での内圧破壊試験結果の一例を Table 6 および Photo. 6 に示す。破断位置は母材部であり、母材破壊応力は母材引張強さの API スペックを十分満足している。

## 5. 第 2 中径電縫鋼管の強度特性について

通常、ラインパイプ規格での機械的性質は、シャルピー衝撃試験および平板に展開した板状試験片での常温引張試験などによって規定される場合が多く、その品質実績は上述したとおりである。

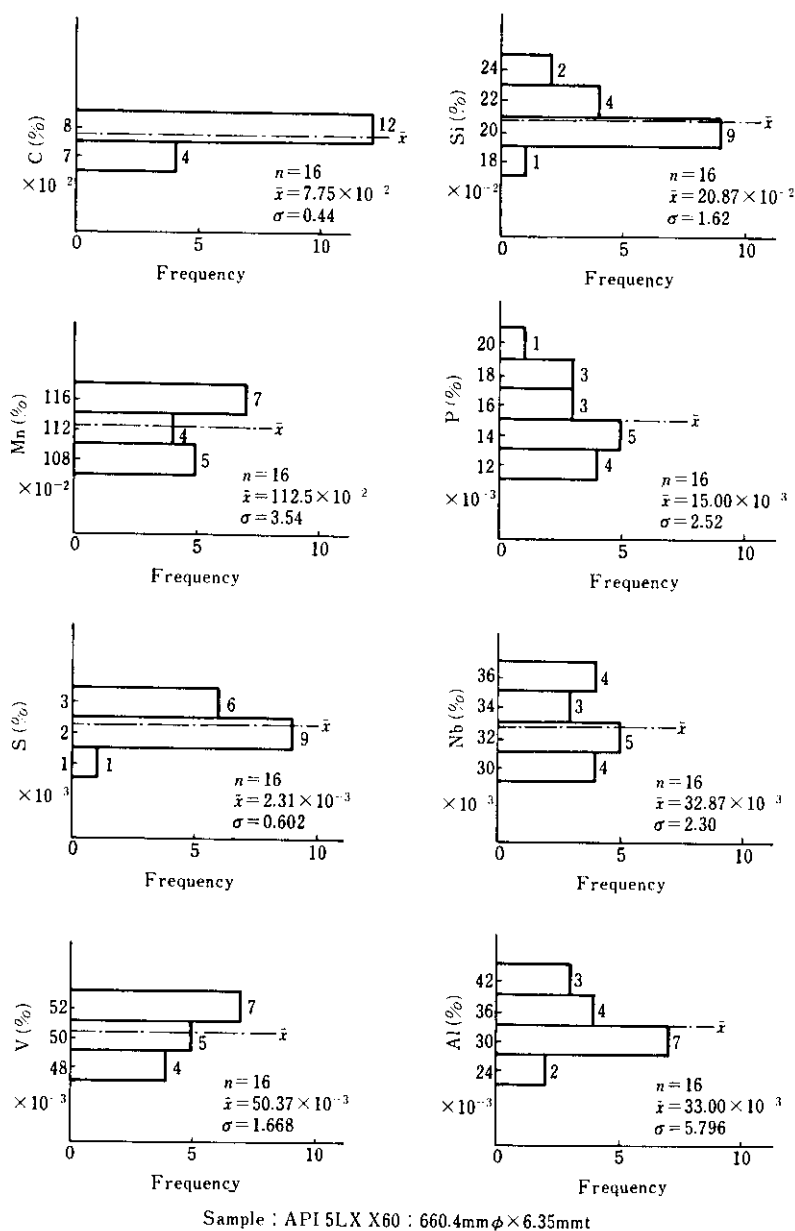


Fig. 9 Chemical composition (Ladle analyses)

しかしながらこれらの値のみでは実際の使用環境条件下での適用性を論ずるには不十分である。このため実物破壊試験<sup>7-9)</sup>、低温破壊靱性<sup>10,11)</sup>、疲労特性<sup>11,12)</sup>、バウシinger効果特性<sup>13-15)</sup>、などについて各種の研究報告がなされてきている。そこでこのような観点から新規に稼動した第2 中径電縫鋼管の補助的強度特性を明らかにする意味で、Table 7 に示す強度、化学成分を有する供試管に

ついて、バウシinger効果特性、内圧降伏破壊強度、低温引張強度などを比較測定したので紹介する。

Fig. 19 に各種管サイズ、グレードの第2 中径電縫鋼管造管前後の降伏強度変化  $\Delta Y.S.$  (=パイプ Y.S.-コイル Y.S.) と造管前コイル強度の関係を示す。素材コイル Y.S. が高くなるほどバウシinger効果の影響を大きく受けて造管後の降伏強度低

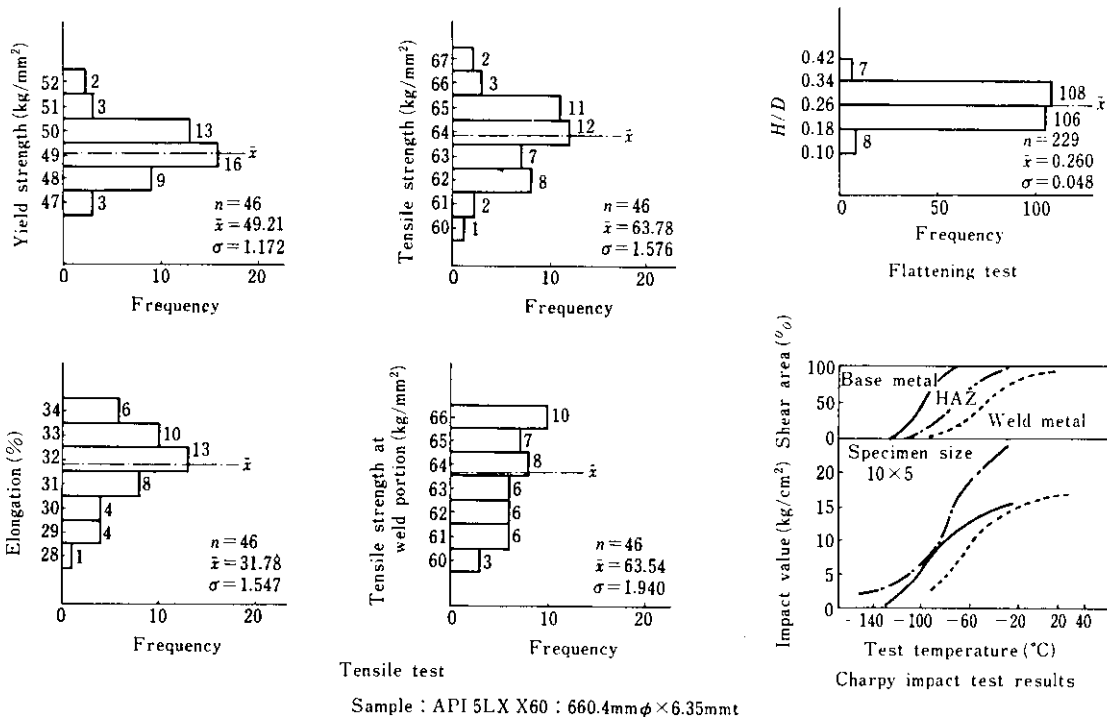


Fig. 10 Mechanical properties

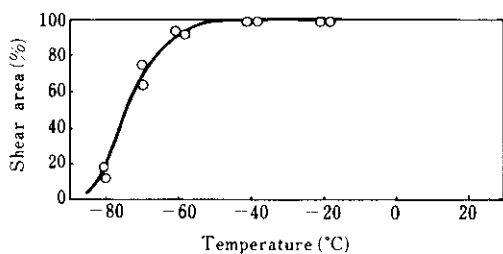


Fig. 12 DWTT transition curves in transverse direction

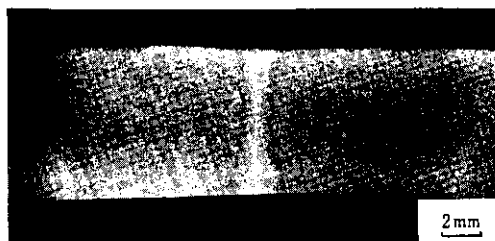
Sample : API 5LX X60 660.4mm $\phi$ ×6.35mmt

Photo. 2 Optical macrograph at welded portion

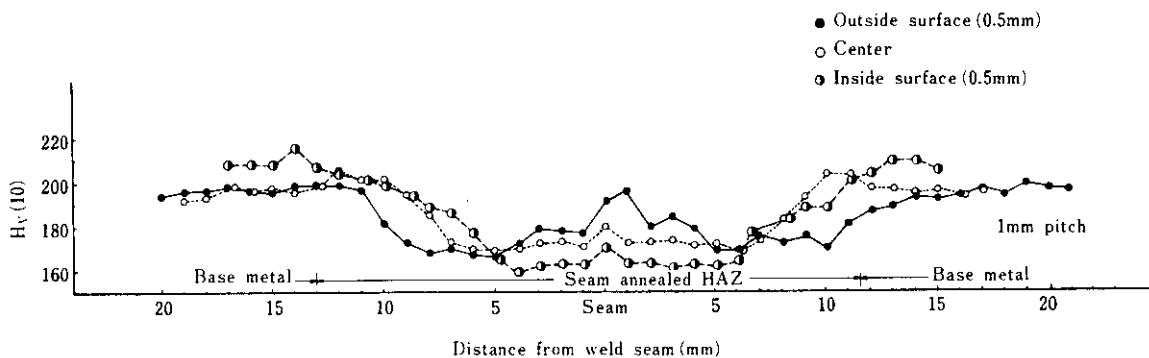
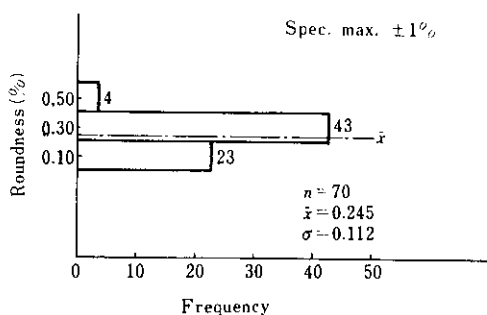
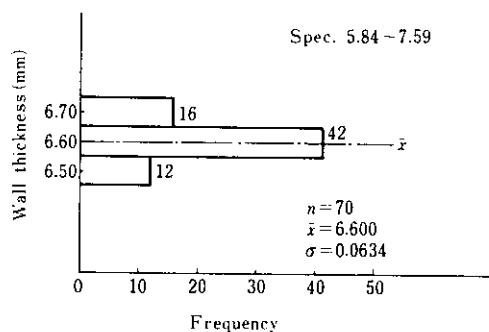
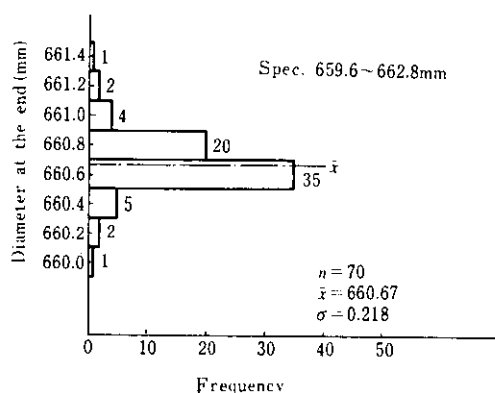


Fig. 13 Hardness distribution in transverse direction



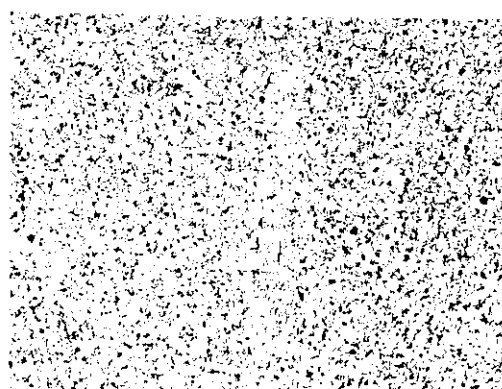
Sample : API 5LX X60 : 660.4mmφ×6.35mmt

Fig. 11 Variation of outside diameter, wall thickness and outside roundness

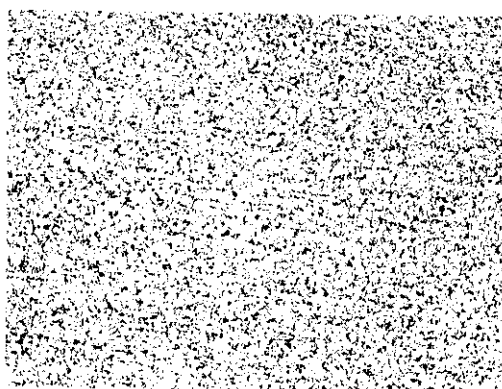
下量 ΔY.S. が増大する。

Fig. 20 に X60~65 高強度第2 中径電縫鋼管における ΔY.S. と  $t/D$  (板厚/外径) の関係を示す。バウシinger 効果は素材コイル強度のみならず管サイズによっても影響を受け、 $t/D$  が小さくなるほど造管後の Y.S. 低下量が大きくなる。

Fig. 21 にリングエキスパンジョン試験による内圧降伏強度と板状引張試験による Y.S. (いずれもオンライン水圧試験前から採取) の比較を示す。



Welded seam



HAZ  
(2mm-portion from welded seam)

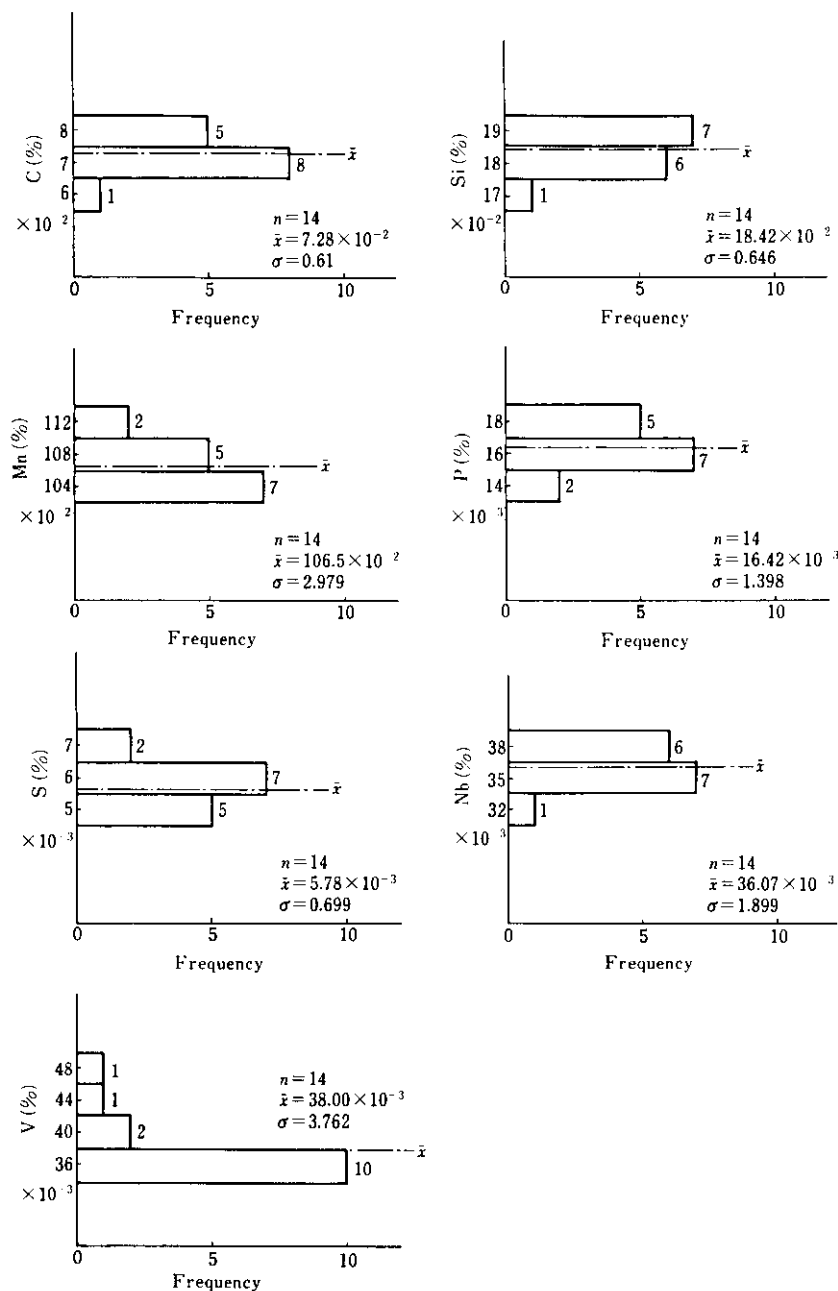


Base metal  
(180 degree from welded seam)

Sample : API 5LX X60 660.4mmφ×6.35mmt

Photo. 3 Optical micrographs at the center of wall thickness on various transversal portions

UOE 鋼管のように拡管工程を有する場合には、引張りひずみの影響を受けて、リングエキスパンジョン試験 Y.S. のほうが板状引張試験 Y.S. より



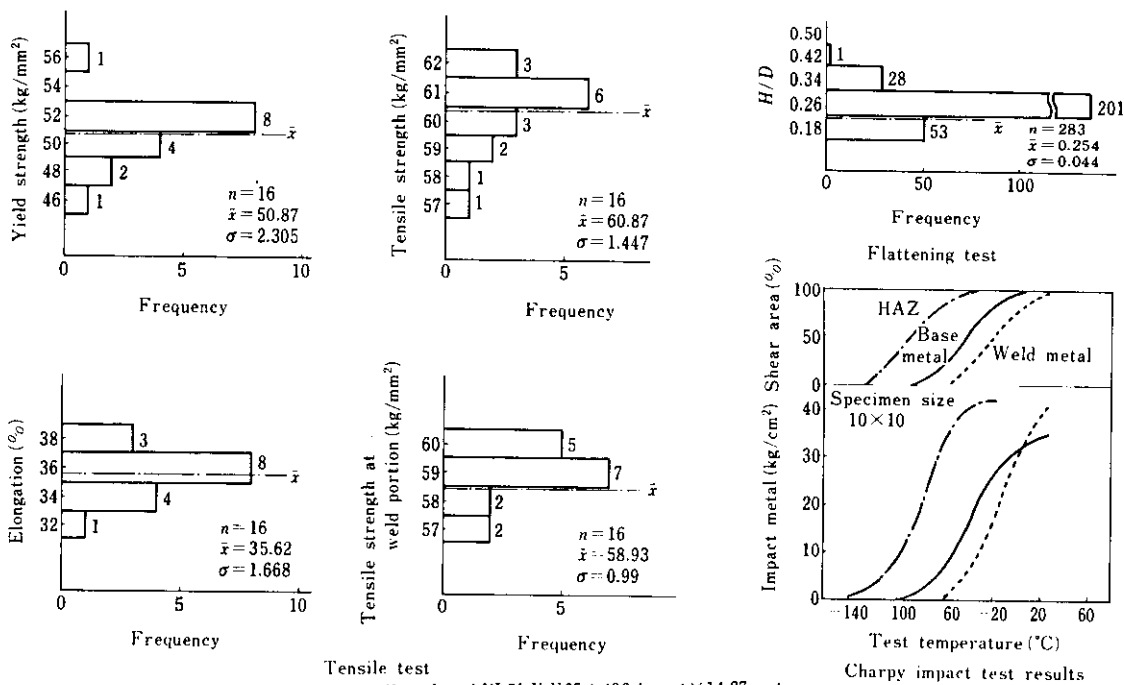
Sample : API 5LX X65 : 406.4mm $\phi$ ×14.27mmt

Fig. 14 Chemical composition (Ladle analyses)

も高くなるが<sup>16,17)</sup>，中径電縫鋼管においては両者はほぼ等しい値を示すことがわかる。

Fig. 22 にバースト水圧試験とリングエキスパンジョン試験による内圧降伏強度の比較を示す。バースト水圧試験では両端に鏡板をとりつけた「両

端閉じ」の状態の内圧が管軸方向にも作用しているのに対し，リングエキスパンジョン試験では管軸方向には応力を受けない「両端開き」の状態にあり，両者は降伏条件を異にしている。したがって図からわかるようにバースト水圧試験の Y.S. の



Tensile test

Sample : API 5LX X65 : 406.4mm $\phi$ ×14.27mmt

Fig. 15 Mechanical properties

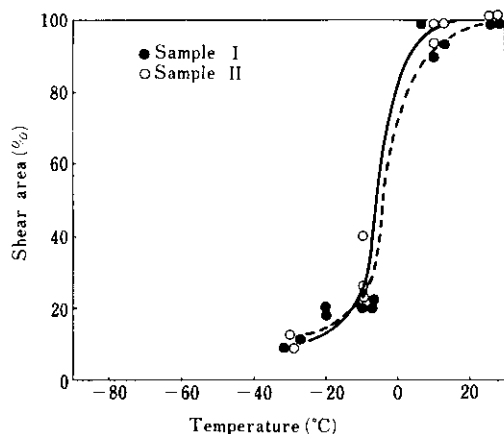
Sample : API 5LX X65 : 406.4mm $\phi$ ×14.27mmt

Fig. 16 DWTT transition curves in transverse direction

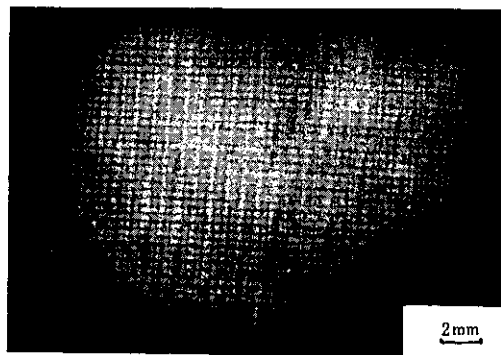
Sample : API 5LX X65 406.4mm $\phi$ ×14.27mmt

Photo. 4 Optical macrograph at welded portion

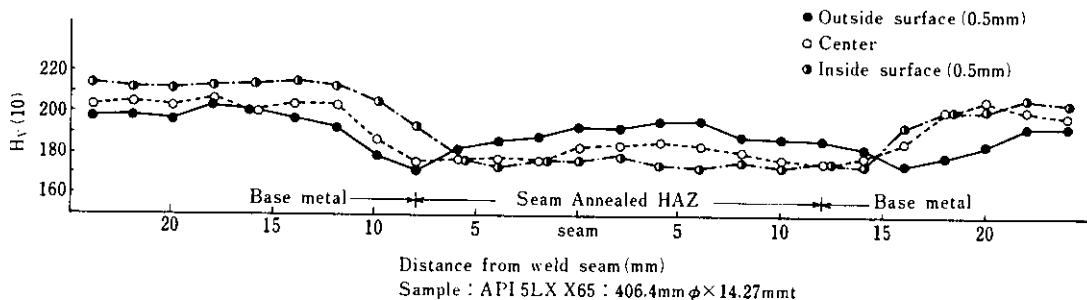
Sample : API 5LX X65 : 406.4mm $\phi$ ×14.27mmt

Fig. 17 Hardness distribution in transverse direction

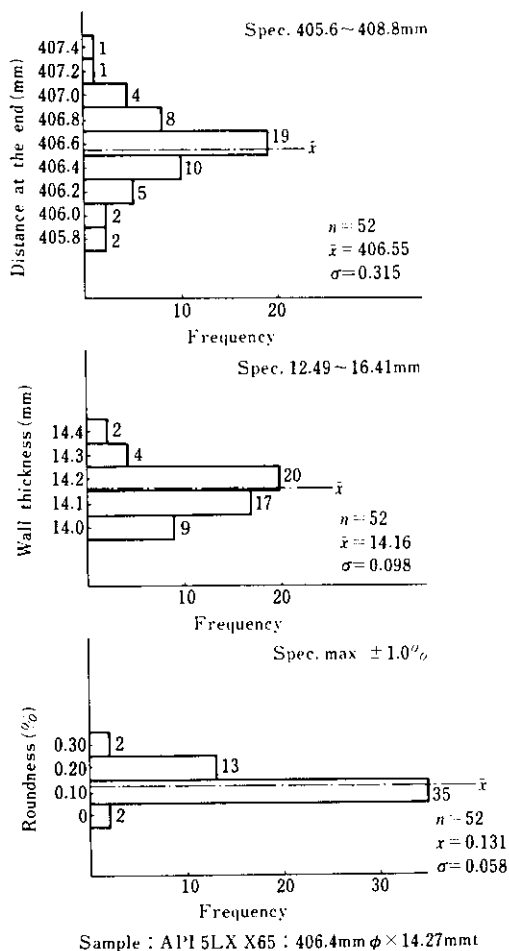
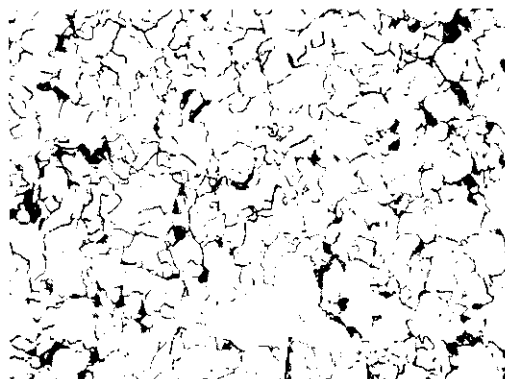


Fig. 18 Variation of outside diameter and wall thickness and outside roundness

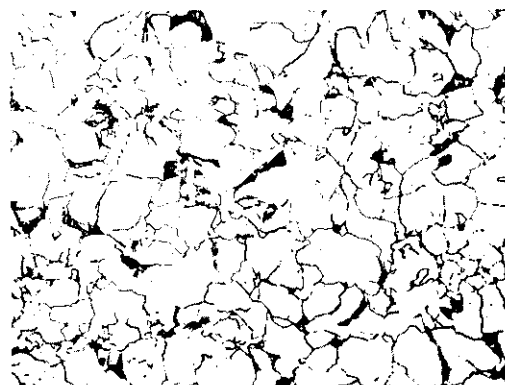
ほうがリングエキスパンション試験 Y.S. にくらべて約 15% ほど大きな値を示し、Von Mises の降伏条件式から得られる理論値<sup>14)</sup> とほぼ一致している。

Fig. 23 にバースト破壊強さと板状引張強さの関係を示す。バースト破壊強さのほうがやや大きい値を示し、長谷部<sup>10)</sup> らによって得られている実験式  $Y = 1.034X$  とほぼ一致している。

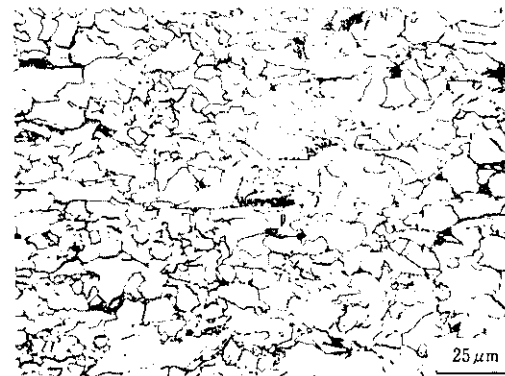
Fig. 24 に低温引張試験装置の概略を示す。溶接部および母材部より平行部長さ 60  $\times$  幅 10mm の特殊引張試験片を作製し、常温から  $-120^\circ\text{C}$  の範囲にいたる低温引張試験を行った。その結果の一例 (API 5LX X65, 609.6mm  $\phi$   $\times$  12.7mm) を Fig. 25 に示す。図からわかるように温度の低下と



Welded seam



HAZ  
(2mm portion from welded seam)



Base metal  
(180° degree from welded seam)  
Sample : API 5LX X65 406.4mm  $\phi$   $\times$  14.27mm

Photo. 5 Optical micrographs at the center of wall thickness on various transversal portions

ともに、Y.S. および T.S. とともに次第に増大し、強度  $\sigma$  と温度  $T$  (K) の間には、

Table 6 Burst test results

| Grade | Size          | Burst test results                        |                                         |                | Strap tensile properties   |                            |         |
|-------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------|
|       |               | Pressure at rupture (kg/mm <sup>2</sup> ) | Stress at rupture (kg/mm <sup>2</sup> ) | Burst position | Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S. (kg/mm <sup>2</sup> ) | El. (%) |
| X 60  | 26"×0.250"×6m | 124                                       | 64.5                                    | Base metal     | 49.8                       | 64.1                       | 31.0    |
| X 65  | 16"×0.562"×6m | 431                                       | 61.4                                    | Base metal     | 51.3                       | 60.4                       | 35.1    |

$$\text{Stress at rupture} = P \cdot D / 200t$$

$P$  = Pressure at rupture

$D$  = Outside diameter

$t$  = Wall thickness

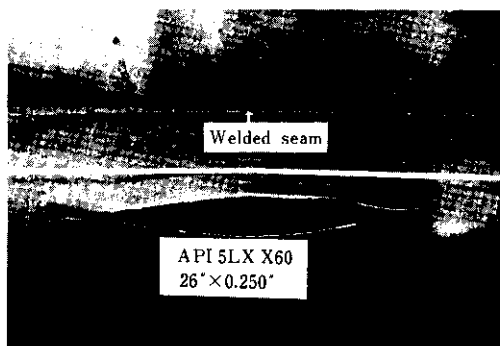


Photo. 6 Appearance of the pipe after burst test

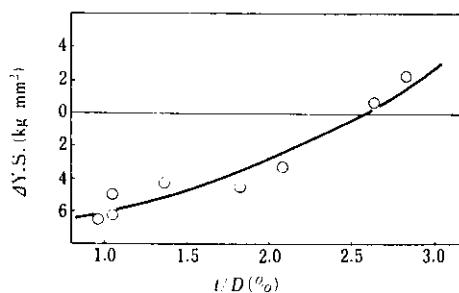
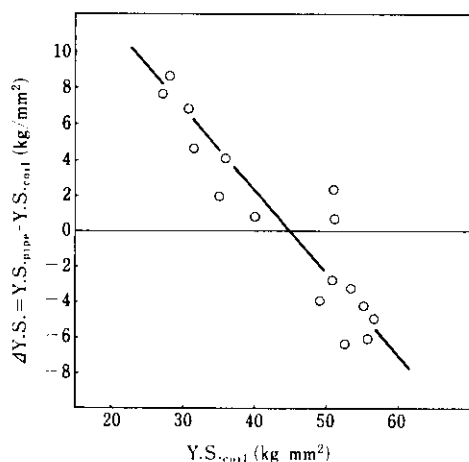
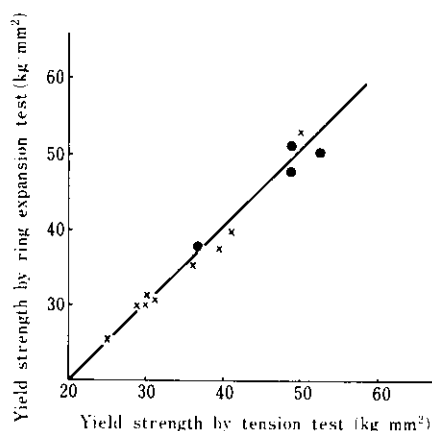
Fig. 20 Relation between Y.S. and  $t/D$  for X60~65 grade pipesFig. 19 Relation between  $\Delta Y.S.$  and Y.S. of coil materials in transverse direction

Fig. 21 Relation between yield strengths by ring expansion test and tension test

Table 7 Chemical composition of hot-rolled sheet tested

| Pipe size             | Pipe grade | Chemical composition (wt %) |      |      |       |       |       |       |       |
|-----------------------|------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       |            | C                           | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | Nb    | V     |
| 24" $\phi$ × 15.88mmt | X 42       | 0.21                        | 0.16 | 0.81 | 0.017 | 0.011 | 0.020 | —     | —     |
| 20" $\phi$ × 14.27mmt | X 60       | 0.18                        | 0.20 | 1.29 | 0.020 | 0.009 | 0.003 | 0.041 | 0.026 |
| 24" $\phi$ × 6.35mmt  | X 60       | 0.17                        | 0.18 | 1.17 | 0.016 | 0.004 | 0.025 | 0.039 | 0.010 |
| 24" $\phi$ × 12.7 mmt | X 65       | 0.08                        | 0.21 | 1.33 | 0.016 | 0.002 | 0.027 | 0.038 | 0.031 |

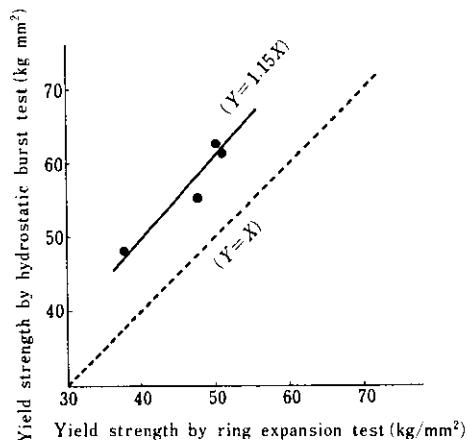


Fig. 22 Relation between yield strengths by hydrostatic burst test and ring expansion test

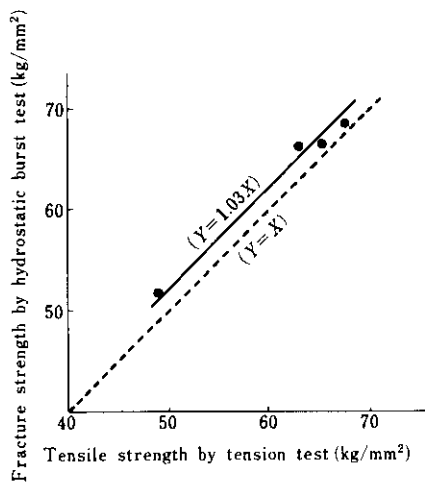


Fig. 23 Relation between fracture strength by hydrostatic burst test and tensile strength by tension test

$$\sigma = A \exp(B/T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

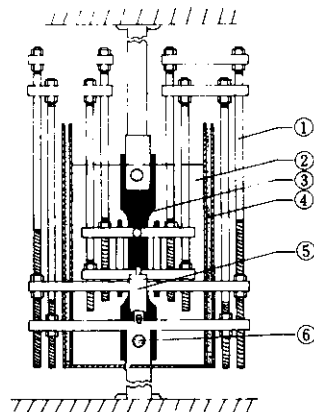
(ただし  $A, B$  は定数)

なる関係が認められる。また溶接部の強度は常温の場合と同様に低温域においても母材強度よりも高い値を示した。

いま常温 (20°C) での強度を  $\sigma_{20}$  としたとき、(1) 式を書き変えると、

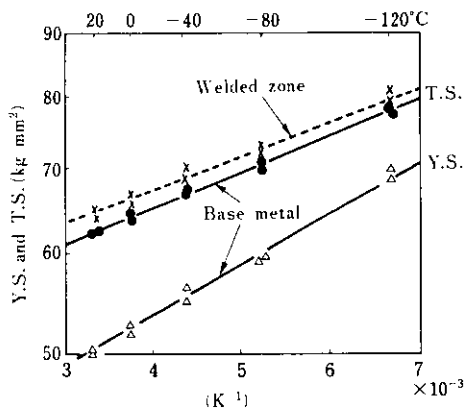
$$\sigma = \sigma_{20} \exp \{B(1/T - 1/293)\} \quad \dots\dots (2)$$

で表わされる。したがって定数  $B$  を最小自乗法により整理すると、 $\sigma_{Y.S.}$ 、 $\sigma_{T.S.}$  は次式の関数で与えられ、



① Specimen attaching jig  
② Liquid kept at low temperature state  
③ Specimen  
④ Heat protecting layer  
⑤ Strain meter  
⑥ Chuck

Fig. 24 Tension test device for low temperature range



Sample: API 5LX N65: 609.6mm  $\phi$   $\times$  12.7mm

Fig. 25 Temperature dependence of tensile and yield strength

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Y.S.} &= \sigma_{20(Y.S.)} \exp \{ (1067.9 - 251.6 \ln \sigma_{20(Y.S.)}) \\ &\quad \times (1/T - 1/293) \} \\ \sigma_{T.S.} &= \sigma_{20(T.S.)} \exp \{ 77.5 (1/T - 1/293) \} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

常温での Y.S. および T.S. がわかれば電綫鋼管強度の温度依存性が推定できることがわかった。

## 6. 結 言

第2中径電縫鋼管設備は最大外径26in(660.4mm), 最大肉厚0.63in(16.0mm)の製品が製造できる世界最大のミルである。昭和53年10月稼動以来, 素材品質, 造管, 溶接技術, 非破壊検査技術の向上に努めてきた。その結果,

- (1) 製鋼技術の進歩により, 靱性のすぐれた低C-Nb-V系のAl-Siキルド連铸材で, かつ溶接欠陥発生が少ない素材製造が可能になった。
- (2) 熱圧での制御圧延技術の進歩および造管の成形技術の向上により, 靱性のすぐれた高張力(X60

以上), 大径薄肉電縫鋼管(660.4mm $\phi$ ×6.35mm)の製造を可能とした。

- (3) 造管での溶接技術および非破壊検査技術の向上により, 溶接部の品質バラツキの少ない高張力X65, 厚肉電縫鋼管0.562t(14.27mm)の製造を可能とした。
- (4) 稼動以来の種々の実験の結果, 第2中径電縫鋼管設備で製造したパイプの補助的強度特性(パウシンガー効果特性, 内圧降伏破壊強度, 低温引張強度など)が定量的に把握できた。

#### 参 考 文 献

- 1) 田中: 西山記念講座, 50, 51 鋼管の用途の現状と将来
- 2) 松尾, 上杉, 柴田: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 152
- 3) 江口, 岡本, 大西, 深井, 滝沢: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 1, 53
- 4) 飯田, 大森, 江本, 前田, 大岡, 小島: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, 56
- 5) 西田, 加藤, 大橋, 森, 田中: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 67
- 6) 田村, 細川, 吉本, 大出, 近藤, 黒崎, 杉本: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 3, 150
- 7) 佐山: 川崎製鉄技報, 2 (1970) 3, 21
- 8) 長谷部, 古賀, 岡沢: 住友金属, 25 (1973) 1, 42
- 9) 長谷部, 古賀, 岡沢: 住友金属, 25 (1973) 2, 67
- 10) 三瀬, 長谷部, 川井, 井関: 住友金属, 21 (1969) 1, 1
- 11) 長谷部, 京極, 高橋, 矢村, 岡沢: 住友金属, 24 (1972) 2, 67
- 12) 三瀬, 長谷部, 古賀: 住友金属, 23 (1971) 2, 90
- 13) 中島, 水谷, 菊間, 松本: 製鉄研究, (1973) 277, 91
- 14) 長谷部, 京極, 古賀, 北川, 岡沢: 住友金属, 23 (1971) 3, 18
- 15) 横山, 大坪, 山県, 杉本: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 23
- 16) T. Taira, T. Otsuka and Y. Ishida: Mechanical Working and Steel Processing XI (Proceeding of 15th Mechanical Working and Steel Processing Conference) (1973), 33
- 17) 高田, 杉江: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 14