

# ボイラ用鋼管の最近の製造技術—Cr-Mo 電縫鋼管と 継目無鋼管製ライフルチューブ\*

川崎製鉄技報  
16 (1984) 3, 187-197

田村 寿恒\*<sup>2</sup> 南 正進\*<sup>3</sup> 魚住 一裕\*<sup>4</sup> 平野 豊\*<sup>5</sup> 渡辺 修三\*<sup>6</sup> 林 保之\*<sup>7</sup>

## Recent Manufacturing Techniques of Tube for Boiler— Cr-Mo Electric-Resistance-Welded Tube & Rifled Seamless Tube

Toshihisa Tamura, Masanobu Minami, Kazuhiro Uozumi, Yutaka Hirano, Shuzo Watanabe, Yasuyuki Hayashi

### 要旨

ボイラ用鋼管の最近の製造技術として、Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 (1Cr-1/2Mo 鋼) と継目無鋼管製ライフルチューブの製造技術と品質を紹介した。

当社の Cr-Mo 電縫鋼管の特徴は不活性ガスシールド溶接、溶接入熱量自動制御、中周波溶接等の製造技術の確立により安定した高品質の鋼管が得られることである。

ライフルチューブは、引抜技術の確立と素管からライフル加工までの品質管理システムの確立により、リブ形状の優れた信頼性の高い鋼管の製造が可能となった。

当社千葉製鉄所西発電所 3 号ボイラは、この Cr-Mo 電縫鋼管および継目無鋼管製ライフルチューブを全面的に採用しており昭和 59 年 4 月より運転を開始し順調に稼働している。

### Synopsis:

Recent development in our technology of manufacturing boiler tubes is described. Electric-resistance-welded tubes of 1Cr-1/2Mo steel (STBA 22 in the Japanese Industrial Standard) are produced with stability. The production of the Cr-Mo ERW tube of high quality is based on the inert gas shielded welding, an automatic heat controlling system and medium-frequency welding. Another technique developed is concerned with rifling seamless tubes. Establishment of a cold drawing technique and product-quality controlling system permits production of high quality tubes with excellent rib configuration. Such Cr-Mo ERW and rifled seamless tubes were employed to construct No. 3 West Power Station at Chiba Works of Kawasaki Steel Corporation, which has stationarily supplied electricity since April 1984.

## 1 緒 言

当社における鋼管製造は、昭和 27 年の電気抵抗溶接鋼管（電縫鋼管）に始まる。その後スパイラル鋼管、継目無鋼管、鍛接鋼管、UOE 鋼管等の各種製造設備の拡充を図り、現在では年間 250 万 t の鋼管を製造する能力を有するに至った。また、その製造可能鋼種も電縫鋼管、継目無鋼管ともに炭素鋼からステンレス鋼と多岐にわたっている。

ボイラ用鋼管の製造は昭和 30 年代に始まり、その後の継目無鋼管ミルの稼働に伴い一段と高級品化され、現在では発電用、産業用の各種ボイラに大量に使用されている。

当社のボイラ用鋼管の主たる特徴として、

- (1) 鋼管用素材に溶鉄脱硫および RH 脱ガスを施した連铸材を用いていることにより、従来のインゴット材に比較し、同一溶鋼内での偏析が少なく、より均一な機械的性質を有する清浄な鋼管が得られる。
- (2) 製管工程は高度に自動化かつシステム化されているため、製管条件にバラツキが少なく、安定した品質の鋼管が製造できる（例えば、電縫鋼管における溶接入熱量自動制御<sup>2)</sup>、継目無

鋼管における圧延制御モデルの採用による全圧延ラインの自動制御システム)。

- (3) 製管から精整、検査、出荷に至る全製造工程をコンピュータで管理し、品質保証、品質管理に万全を期している。

がある。  
特に素材の連铸化に関しては昭和 48 年より研究に着手し、その後、三菱重工業(株)技術本部長崎研究所の協力によりボイラチューブとしての各種確性試験を行い、連铸材の優位性が確認された。その後、連铸製ボイラチューブは発電用ボイラ、ソーダ回収ボイラ、各種熱交換器用と広範囲に使用されている。

本報では、最近、発電用ボイラに開発した Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22E-G (1Cr-1/2Mo) とライフルチューブについて、まず実際の適用例として当社千葉製鉄所の発電用ボイラの概要を紹介し、ついでその製造体制と品質状況について述べる。

## 2 千葉製鉄所西発電所 3 号ボイラの概要

当社千葉製鉄所内西発電所に設置された出力 125 MW 発電プラント用第 3 号ボイラ（西発 3 号ボイラ）は、世界初の大型ガスヒーターの設置により、ガス焼きボイラとしては世界一の 92% ボイラ

\*1 昭和 59 年 8 月 20 日原稿受付  
\*2 知多製造所管理部部長  
\*3 知多製造所管理部主査 (掛長)  
\*4 知多製造所管理部

\*5 知多製造所企画部主査 (部長)  
\*6 知多製造所第 1 造管部主査 (課長)  
\*7 知多製造所第 2 造管部掛長

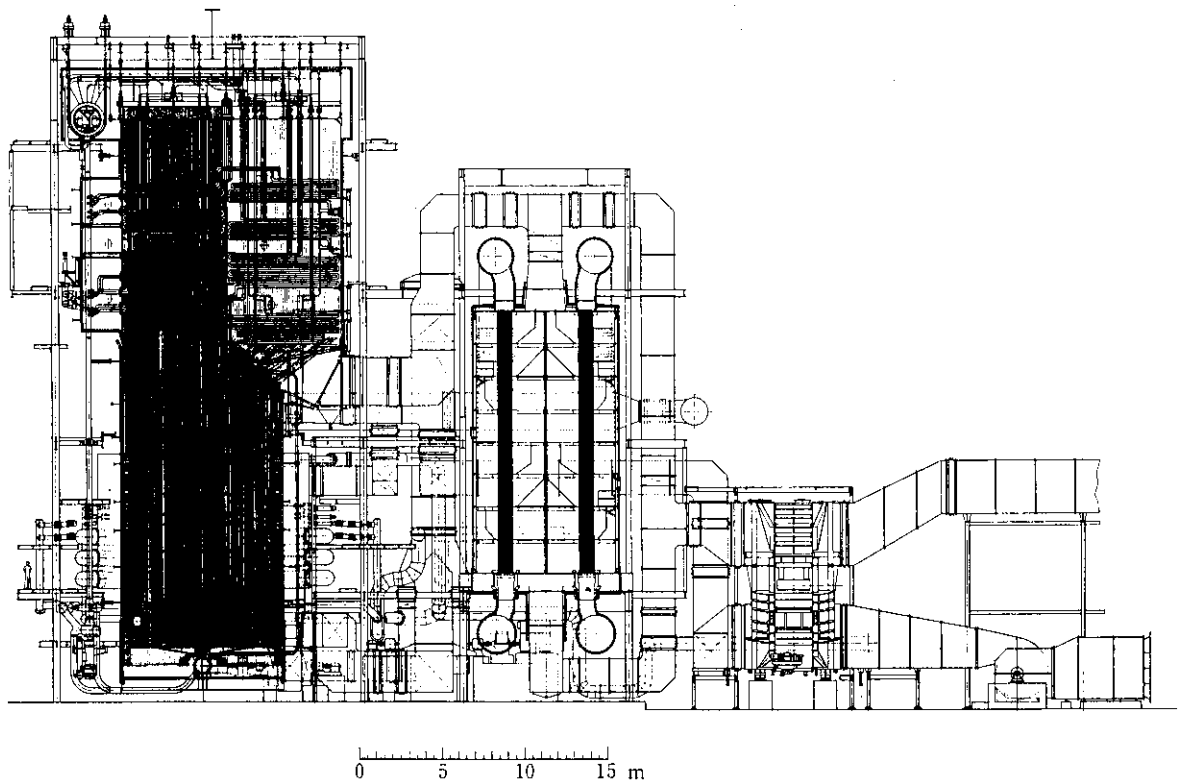


Fig. 1 West power station No.3 unit of Chiba Works

Table 1 Specification of west power station No. 3 unit at Chiba Works

Type	Mitsubishi controlled circulation radiant reheat pressurized boiler
Fuel	Multi-fuel gas, firing with tangential low NO <sub>x</sub> -boiler (Blast furnace gas, coke-oven gas, basic oxygen converter gas & LPG)
Steam pressure	176/33.8 kgf/cm <sup>2</sup>
Steam temperature	541/541°C
Evaporation	430 t/h

効率を達成し、総合発電効率も 42% を得ることができると高効率、省エネルギー型の最新鋭ボイラである。ボイラプラントの概要を Fig. 1 に、計画仕様を Table 1 に示す。設計にあたっては従来わが国では 375MW 級ボイラに主として採用される高压条件 (169 kg/cm<sup>2</sup>, 538°C) を採用し、かつ、抽気量を多くするサイクルの採用により効率アップを図った。また、ボイラ排ガスと高炉ガスを熱交換して高炉ガス温度を上昇させ、排ガス顕熱を徹底的に回収し、ボイラ効率を上げている。

省エネルギー面では、圧力通風方式を採用するとともに、火炉蒸発管にライフルチューブを採用し、効率的に熱交換させることにより循環水量を減らし、ポンプ動力を削減している。

当プラントの耐圧部には当社の鋼管がほぼ全量使用されているが、中でも Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 や、継目無鋼管製ライフルチューブは、当社の製造技術を結集して製造したものであり、厳しい通産省の審査においても認可された高品質の鋼管である。

### 3 Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 E-G

Cr 系低合金電縫鋼管は、電縫溶接部に高融点の Cr 系酸化物から成るペネトレータ欠陥が発生しやすく、その製造を困難なものとしていた。

ペネトレータ欠陥を防止するためには、Cr 系酸化物の生成を抑制すること、および生成した酸化物を電縫溶接部から排除することが必要である。そのための留意項目として、つぎのものが挙げられる。

- (1) 溶接部の酸化防止
- (2) 適正溶接入熱量の保持
- (3) 溶融ビードの安定化

これらの項目達成のために、次の最新技術を用いて Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 E-G を製造している。

- (1) 不活性ガスシールド溶接技術
- (2) 溶接入熱量自動制御技術
- (3) 中周波溶接技術

ここでは、この最新技術の概要とそれを採用して製造したチューブの品質概要を述べる。

#### 3.1 製造技術

##### 3.1.1 不活性ガスシールド溶接技術

通常、電縫鋼管の溶接作業は大気中で行われ、かつホットコイルの成形過程でロール冷却を行っているため、若干ではあるが、水が存在している状態で溶接している。したがって、溶接部を無酸化雰囲気中に保持するためには溶接部分を大気より完全に遮断すること、および無水状態での成形が必要となり、当社独自の不活性ガスシールド溶接技術を開発した。

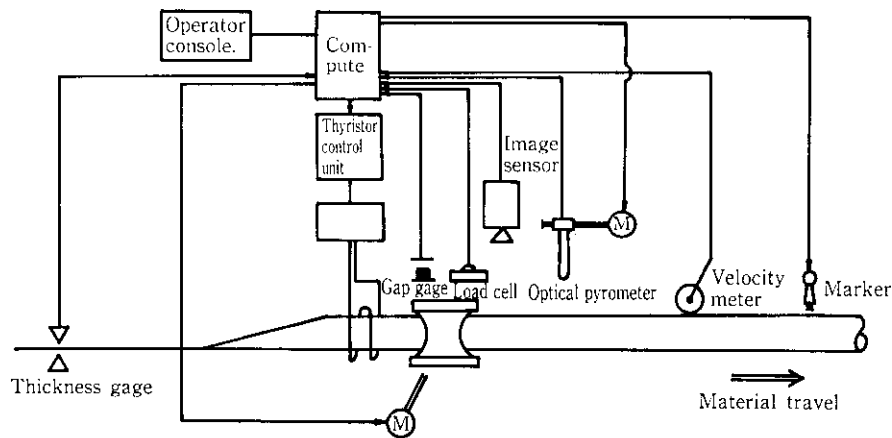


Fig. 2 Automatic heat control system

Table 2 Specifications of equipments for automatic heat control system

Instruments and controllers	Specifications
DDC (Direct digital controller)	MEDAC 16/11 (Micro computer) Main memory: 64 kW Peripheral: console typewriter : logging typewriter
Velocity meter	Pulse generator and counter Range: 0~328 ft/min (0~100 m/min) Accuracy: 0.492 ft/min (0.15 m/min)
Thickness gage	Mechanical flying micrometer Range: 0.00~0.591 in (0.00~15.00 mm) Accuracy: 0.0004 in (0.01 mm)
Optical pyrometer	Glass fiber type two color pyrometer Range: 1 832~3 632 °F (1 000~2 000 °C) Accuracy: 50 °F (10 °C)
Load cell at squeeze roll	A pair of load cells Range: 0~55 115 lb/unit (25 t/unit) Accuracy: 200 lb (0.1 t)
Gap gage	Gap sensor of eddy current type Range: 0~6 mm Accuracy: 0.05 mm
Image sensor	MOS type Range: 0~50 mm Accuracy: 0.05 mm
Reference of thyristor control unit	Analogue output of DDC Range: 0~10 V Accuracy: 0.1% F.S.

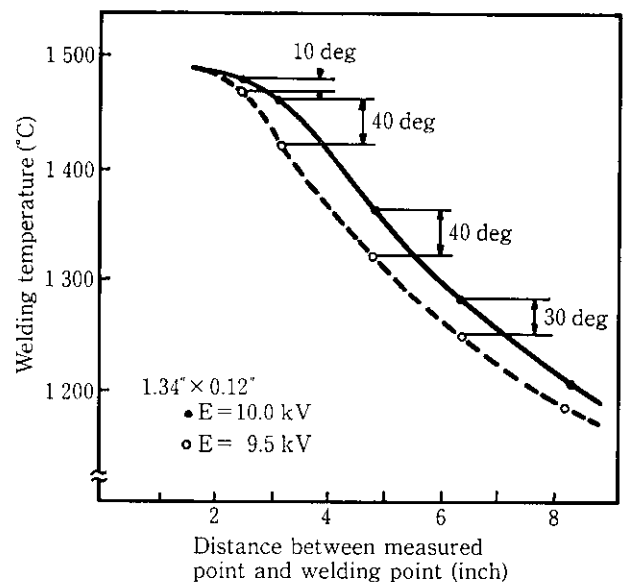


Fig. 3 Example of the transition of welding temperature

ここでは、ロール冷却方法に工夫を加えることにより、成形の段階からまったく無水状態での造管が可能である。

3.1.2 溶接入熱量自動制御技術

電縫鋼管の溶接入熱量は、帯鋼板厚の変動、造管速度の変化等に応じて適切に調整する必要がある。特に、STBA 22 においては、許容入熱量の範囲が狭く、その必要性は特に高い。そのため、当社では独自に開発した溶接入熱量自動制御装置を使用している。

本制御装置の概要を Fig. 2 および Table 2 に示す。制御は、フ

ィード・フォワード制御とフィード・バック制御から成る。フィード・フォワード入熱制御は、帯鋼板厚と造管速度の変動量に応じた入熱量を補正することを目的とし、(1) 式を基本としている。

$$\Delta E_{ff} = E_s \left( A \cdot \frac{t - t_s}{t_s} + B \cdot \frac{V - V_s}{V_s} \right) \dots\dots\dots (1)$$

- $\Delta E_{ff}$ : フィード・フォワード制御入熱量
- $E_s$ : 初期の入熱量
- $t$ : 帯鋼板厚
- $V$ : 造管速度
- $t_s$ : 基準帯鋼板厚
- $V_s$ : 基準造管速度
- $A$ : 定数
- $B$ : 定数

また、造管中のインピーダ効率の変化、帯鋼形状の変動等に対処し、より精度の高い制御を行うために、溶接温度および圧接力を因子とするフィード・バック制御も同時に行っている。

$$\Delta E_{fb} = C(\theta - \theta_s) + D \frac{P - P_s}{P_s} + \Delta E_{ff} \dots\dots\dots (2)$$

- $\Delta E_{fb}$ : フィード・バック制御入熱量

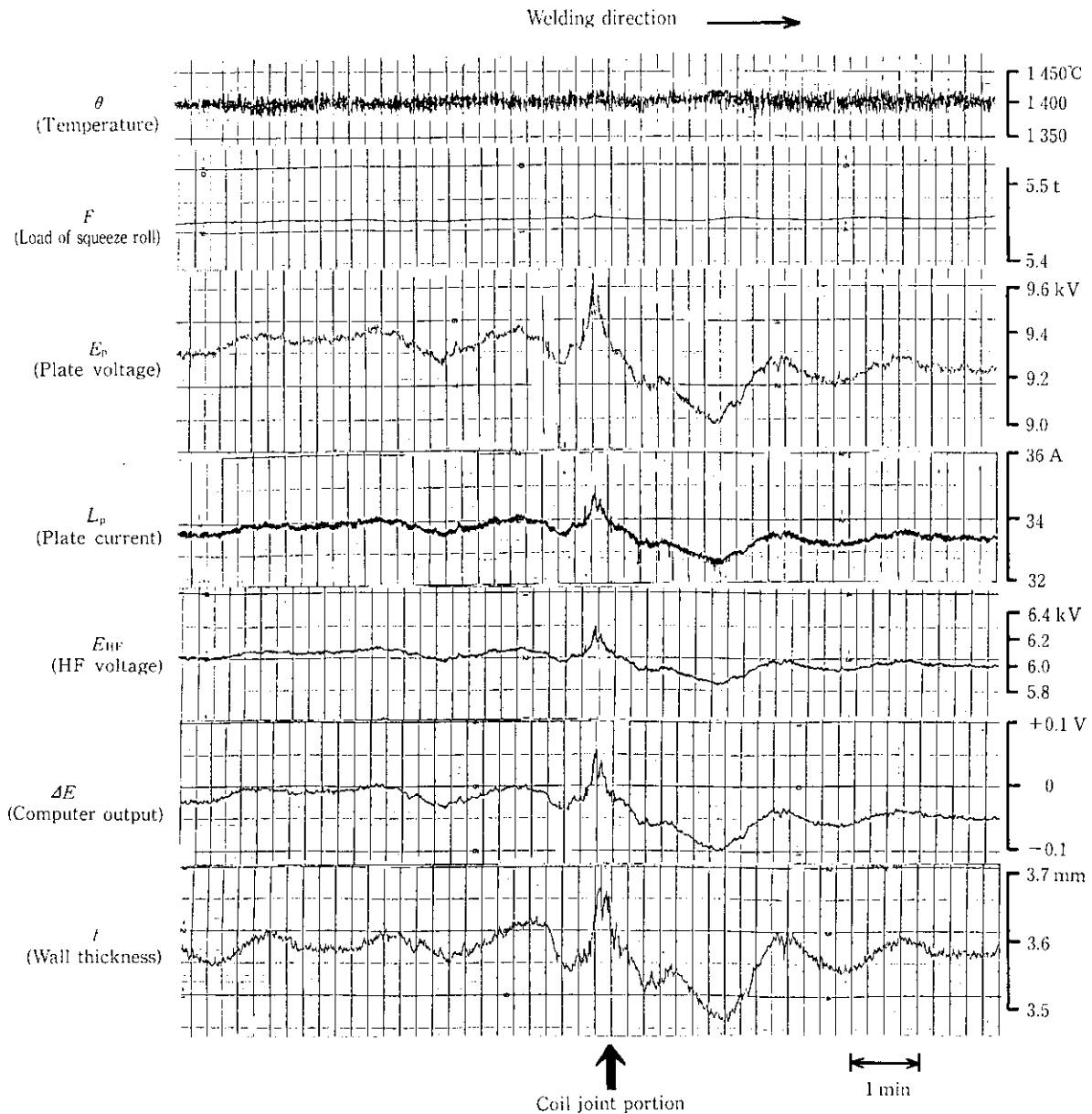


Fig. 4 Welding conditions by means of automatic heat input control techniques

$\Delta E_{FB}$ : フィード・バック制御入熱量 (前回分)

- $\theta$ : 溶接温度
- $P$ : 圧接力
- $\theta_s$ : 基準溶接温度
- $P_s$ : 基準圧接力
- $C$ : 係数
- $D$ : 係数

フィード・バック入熱制御においては、基準溶接温度の制御温度として 1400°C を用いる。これは、溶接入熱量の変化がもっとも敏感に表われる温度域で、この温度域で入熱を制御することにより制御精度の向上を図ろうとするものである。Fig. 3 に、溶接入熱量を 2 水準に変化させた場合の溶接温度の推移例を示すが、両者の温度差は、溶接直後では小さく、1350°C~1450°C 付近で最大となることわかる。

以上の技術を用いて造管した時の制御状況を Fig. 4 に示す。溶接温度は ±20°C 以内で安定している。

### 3.1.3 中周波溶接技術

電縫鋼管では、溶接効率向上のために、通常、高周波 (180~450

kHz) が用いられる。高周波溶接では、加熱時の表皮効果の影響が著しく、溶接部のコーナー部分に溶接電流が集中し、その部分が選択的に加熱されるため、溶融ビード形状が不安定になる傾向がある。これはベネトレタの排除に対して不利となり、溶融ビード形状を安定化するために溶接周波数の低減が必要となる。

通常、電流浸透深さは、(3) 式で与えられる。

$$d = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\rho}{\mu \cdot f} \dots\dots\dots (3)$$

- $d$ : 電流浸透深さ
- $\rho$ : 固有抵抗率
- $\mu$ : 比透磁率
- $f$ : 周波数

誘導電流を一次近似すると、その分布は、(4) 式のように与えられる。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{x}{d}\right) \dots\dots\dots (4)$$

- $I$ : 電流密度
- $x$ : パイプ円周方向位置

$L$ : 電流浸透深さ

$I_0$ : 表面の電流密度

パイプ円周方向の温度分布の算出には、(5) 式の熱伝導方程式で算出される。

$$r c \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial T}{\partial x} + 0.24 I \cdot \rho \quad \dots \dots \dots (5)$$

$r$ : 密度

$c$ : 比熱

$T$ : 温度

$K$ : 熱伝導率

$\rho$ : 固有抵抗率

$t$ : 時間

温度分布計算結果の一例を Fig. 5 に示す。また、加熱幅について、実験結果と計算結果の比較は Fig. 6 に示すごとく、良好な一致を示している。

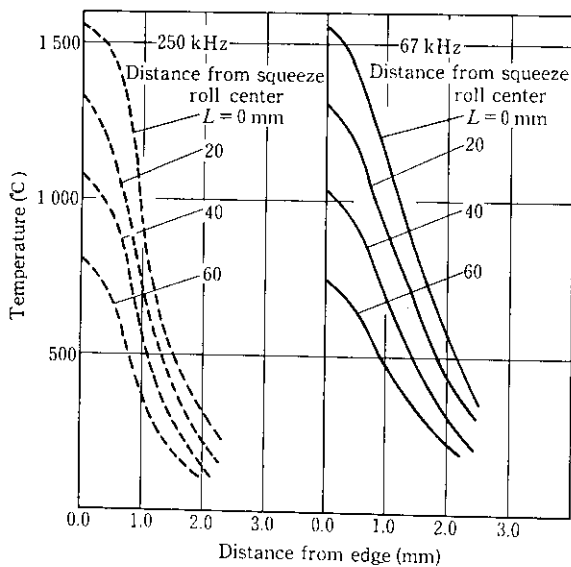


Fig. 5 Temperature distribution

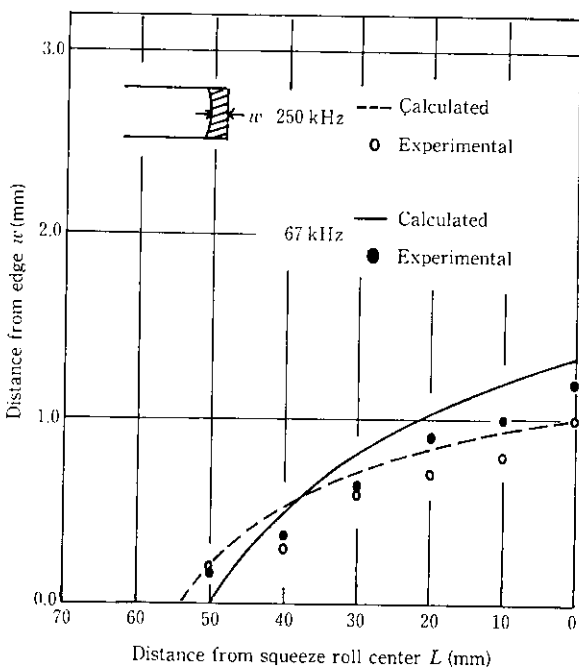


Fig. 6 Change in area of heated zone

そこで、当社においては、中周波溶接技術を開発し、STBA 22 の製造に対応した。

Photo 1 に、適正条件における溶接 V シェーブ部の溶融ビード形状の比較を示す。高周波溶接においては、凹凸が著しいが、中周波溶接においては、安定している。

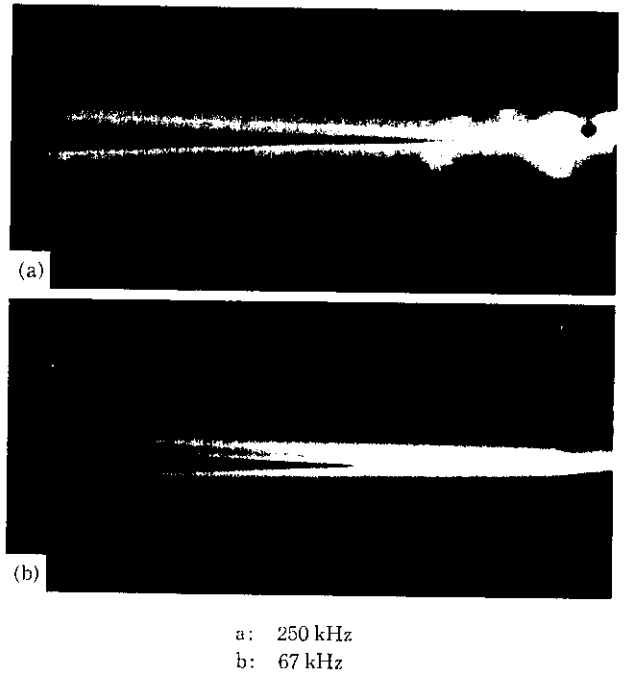


Photo 1 Comparison of heating phenomena between 250 kHz and 67 kHz heatings; a view of upper surface of pipe at welding zone

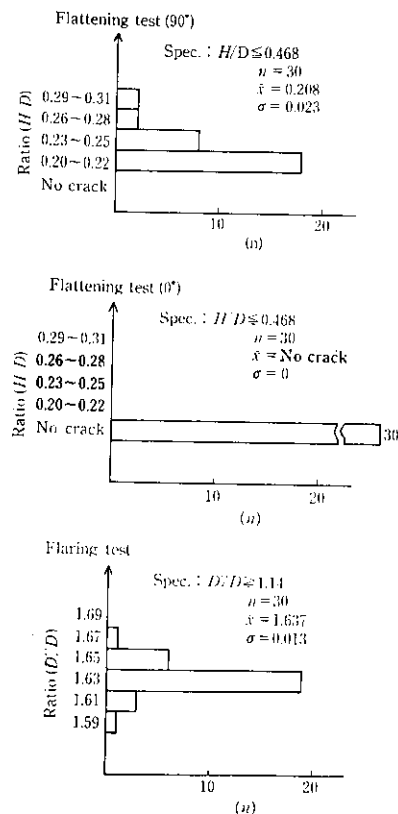


Fig. 7 Flattening and flaring test (STBA 22E-G 48.6  $\phi$   $\times$  4.2t)

Photo 2 に、溶接 V シェープ部の加熱パターンの比較を示す。高周波溶接では、誘導電流がコーナー部に集中するため、板厚中央部と外表面近傍の熱影響幅に差があるのに対して、中周波溶接では熱影響幅も広く、均一加熱に近づいている。

3.2 製造体制

前述の溶接入熱量自動制御技術、中周波溶接技術、不活性ガスシールド溶接技術を組み合わせることにより、Cr 系低合金鋼管の造管が可能となった。

Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 の製造にあたっては、これらの技術を機能的に適用するとともに、造管から最終工程終了まで厳重な品質管理を実施した。

3.3 品質状況

厳重な品質管理下で製造された Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 の品質として、溶接部品質の評価となる実用試験結果は、Fig. 7, Photo 3 に示すように、規格を大幅に満足する水準であった。また、クリープ試験結果は、Fig. 8 に示すように、継目無鋼管に優るとも劣らない水準である。

4 継目無鋼管製ライフルチューブについて

チューブの伝熱特性向上を図るため、チューブ内面にスパイラル状の突起（リップ）をつけたライフルチューブが最近、注目を浴びており、ボイラの大容量化、高温高压化に伴い、その需要は急速に増加している (Photo 4)。

その状況において当社西発 3 号ボイラにも伝熱特性向上のため、このライフルチューブが採用された。

高品質のライフルチューブを短期間で開発・製造できたのは、長年にわたって蓄積された冷間加工技術によるところが大きい。

ここでは、西発 3 号ボイラに使用したライフルチューブの品質、

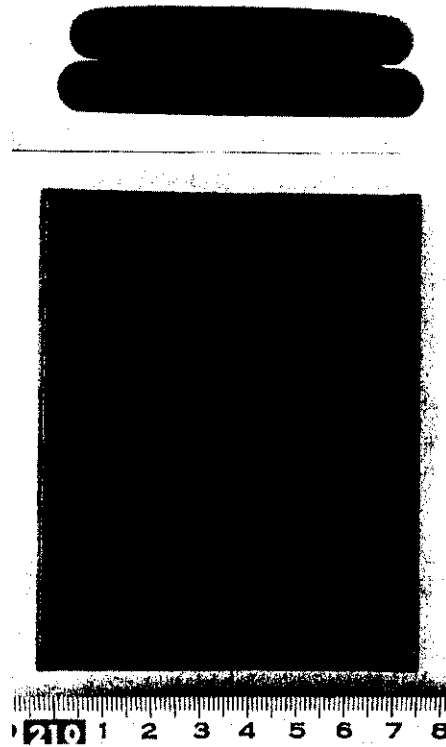


Photo 3 Results of crush test (upper) and reverse flattening test (lower); STBA 22E-G 48.6 φ × 4.2 t

特に重要特性である寸法形状とそれの冷間加工技術の概要について述べる。

4.1 ライフル加工法

素管はドローベンチ中央部に設置されたダイスタンドに組み込ま

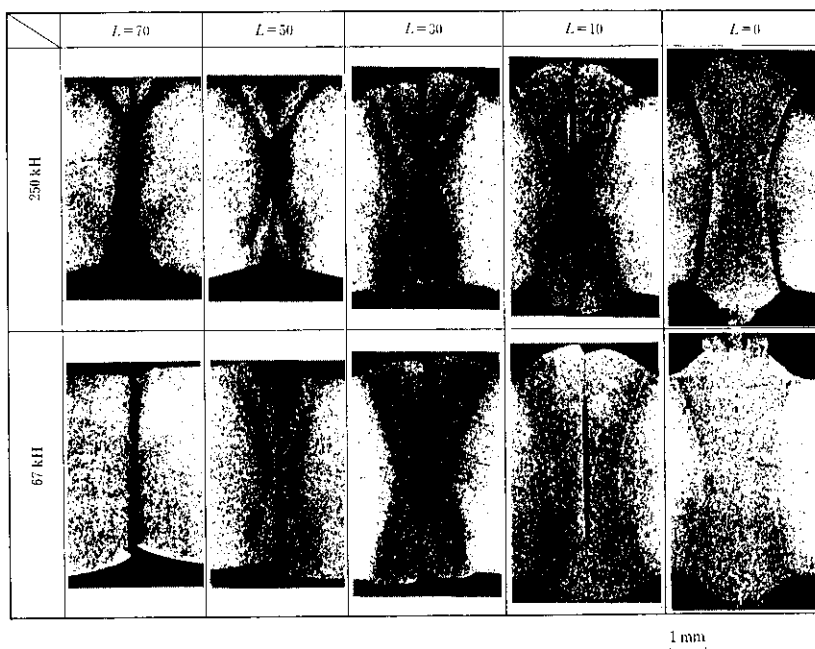
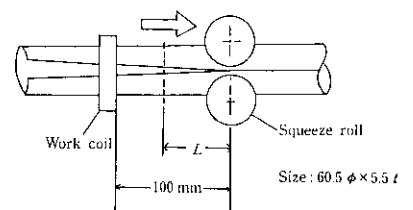


Photo 2 Comparison of heating patterns between high frequency heating and middle frequency heating



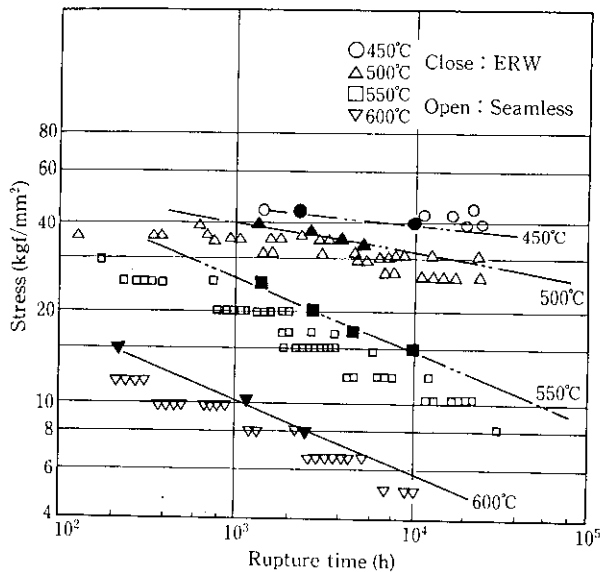


Fig. 8 Results of internal pressure creep rupture test

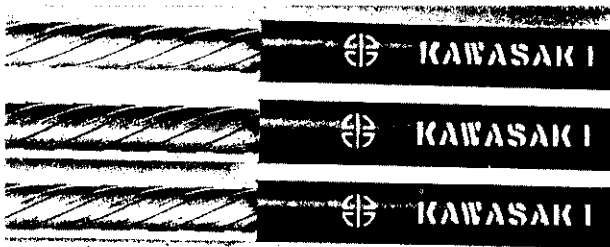


Photo 4 Inside view of rifled tube

れたダイスによって外径が絞られ、内面に配置された溝付プラグによって内面に螺旋状のリブを形成しながら仕上げられる。

特にプラグは自由に回転ができるようになっており、この部分の構成が重要な要素である。

また、ライフル加工において、リブ高さ、リブ形状等（特にリブコーナー部およびリード角）の品質特性を支配する大きな因子はプラグ形状である。

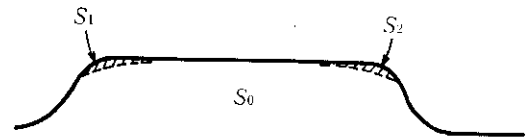
プラグ形状に関しては各社独自の検討が加えられているが、当社としても、各種の実験および検討を重ね、リブ高さが得やすくリブの充満度を高めかつ、プラグの焼付を完全に防止できる形状のプラグの開発に成功し、種々の形状を有するライフルチューブの製造に適用している。

#### 4.2 ライフル成形性

管の内面にライフル加工を行う際のリブの成形性は、肉厚/外径の比、リブ数、リブ高さ、リブ幅比など客先により指定される要因と、引抜き時の減径率、減肉率、減面率およびプラグ位置、プラグ形状、ダイス形状、引抜き速度などの製造要因とによって影響を受ける。

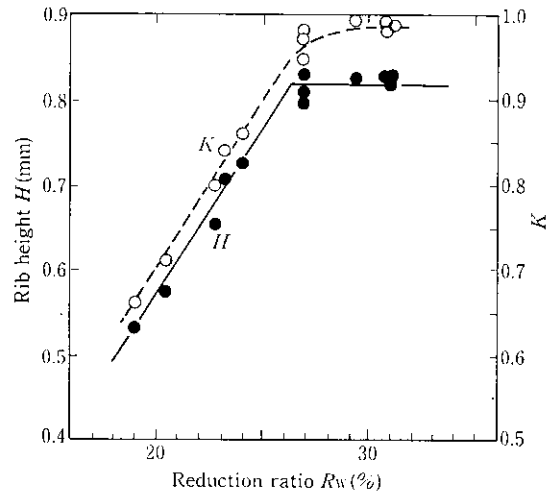
中でもリブ高さおよびリブ充満度は各因子の影響度を定量的に評価するための重要な品質特性と考えることができる。

ここで、リブ充満度 ( $K$ ) はリブ凹部のだれ (欠肉) を評価するために導入したパラメーターで Fig. 9 により定義される。



$$K = \frac{S_0 - (S_1 + S_2)}{S_0}$$

$S$ : cross section area of rib

Fig. 9 Definition of  $K$ Fig. 10 Relation between reduction ratio, rib height, and  $K$ 

#### (1) リブ高さ ( $H$ )

リブ底における減肉率 ( $R_w$ ) とリブ高さ ( $H$ ) の関係を Fig. 10 に示す。図中、減面率はライフル加工原管の厚みを変えることにより変化させた。リブ高さは低減面率領域では直線的に増加するが、それ以降はプラグ溝により抑え込まれ、横ばいとなっている。

#### (2) リブ充満度 ( $K$ )

ライフル加工前の軟化焼鈍条件によりライフル加工時の変形抵抗が大きく変化するため、リブ充満度を高めるには、できるだけ材料を軟化しておくことが重要である。

Fig. 10 に示すように、リブ高さと同様、リブ充満度を高めるためには大きな減肉率を与えることが重要であるが、不必要に減肉率を高めることは、ドローベンチの引抜き力の増大につながるばかりでなく、プラグ焼付きの原因となるため適正值が存在する。

#### 4.3 製造体制

ライフルチューブは通常の冷間仕上品に比較して極めて過酷な加工を受けるため、その製造、検査時 Table 3 に示すごとく特別な品質チェックを行う必要がある。

マンネスマン・マンドレルミルで熱間製管した素管を用い、NDI を含む厳しい検査により品質を確認され、所定のライフルチューブ用原管寸法まで必要回数の冷間引抜きを行う。次に再度前処理を行い冷間引抜きによりライフル加工を実施する。

ライフル加工後の成品については材料の強度を確保するため適切

な熱処理を行い、さらに、厳しい検査を実施する。特にオンラインにおける品質チェック強化策として次の3点を採用した。

- (1) ライフル加工時における引抜毎のプラグ外観のチェック。
- (2) コントレーサーによる成品形状チェック。
- (3) ファイバースコープによる内面チェック。

4.4 品質状況

西発3号ボイラ用ライフルチューブの品質は極めて満足すべきも

のであった。

以下にライフルチューブの品質状況の一例を述べる。

代表的な要素の寸法ヒストグラムを Fig. 11 に、実用試験後の外観例を Photo 5 に、また、リブ部断面のマクロ組織およびミクロ組織を Photo 6 および Photo 7 に示すが、いずれも満足すべき結果が得られている。

Table 3 Manufacturing process and quality control

Process	Equipment	Main quality control item
Hot rolling	Mandrel mill	1. Heating temperature 2. Roll setting 3. Dimension
Mother tube	Visual inspection Eddy current inspection Magnetic particle inspection	1. Reference standard 2. Surface condition 3. Dimension
Cold drawing	Drawn bench	1. Tool dimension 2. Drawing speed
Softening	Continuous heat treatment furnace	1. Heating temperature 2. Heating time 3. Atmospheric gas composition
Nondestructive examination	Visual inspection Ultrasonic tester	1. Reference standard 2. Surface condition 3. Dimension
Rifling	Drawn bench Cone-tracer	1. Tool dimension 2. Drawing speed 3. Visual check of drawn tube 4. Configuration check by cone-tracer
Heat treatment	Continuous heat treatment furnace	1. Heating temperature 2. Heating time 3. Atmospheric gas composition
Hydrostatic test	Hydrostatic testing machine	1. Test pressure 2. Keeping time
Nondestructive examination	Eddy current tester Ultrasonic tester	1. Reference standard 2. Surface condition
Final inspection	Visual inspection Fiber-scope	1. Dimensional checking (OD, WT, Length, ID) 2. Material identification test 3. Configuration & inside surface condition check by fiber-scope
Testing	Testing machine Microscope	1. Chemical composition 2. Tension test 3. Hardness test 4. Flattening test 5. Flaring test 6. Reverse flattening test 7. Rib configuration 8. Microstructure
Marking and coating		1. Marking items
Packing		



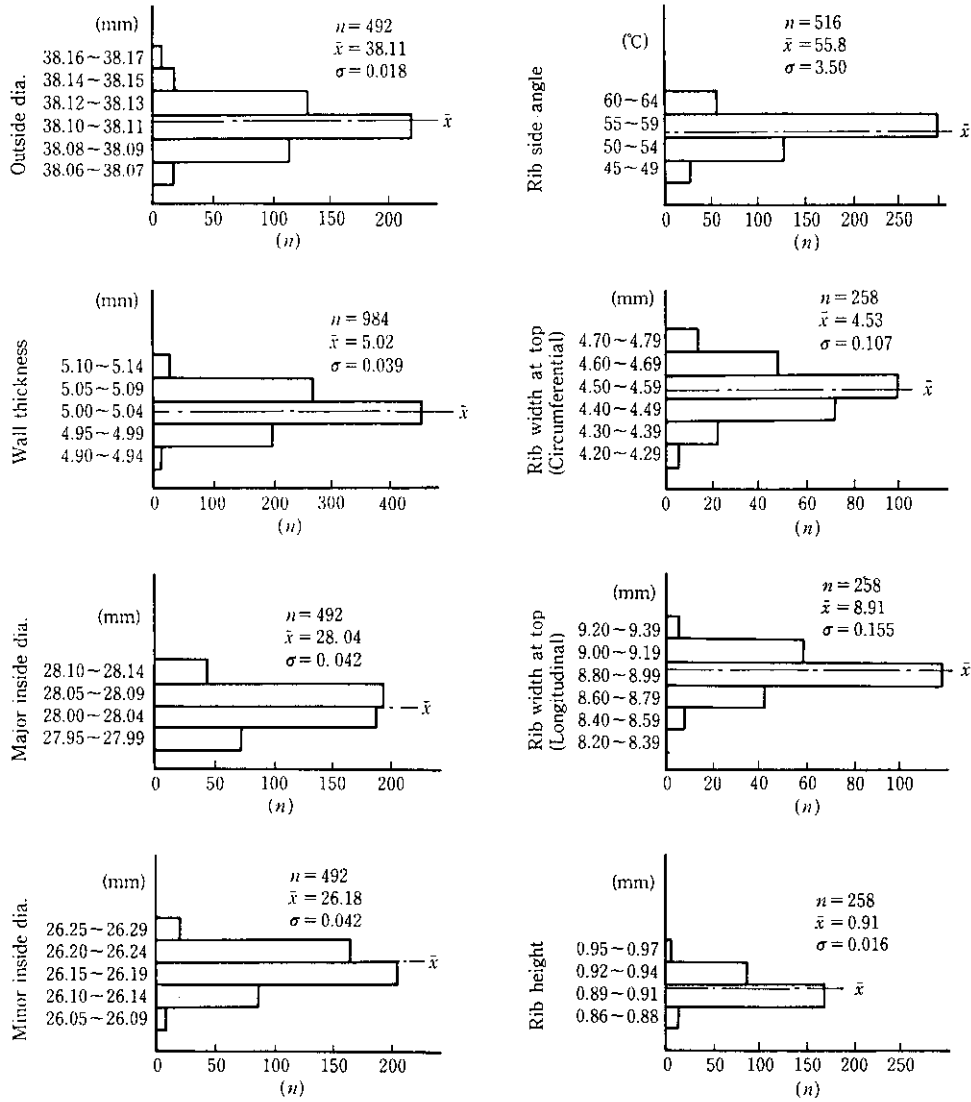


Fig. 11 Histogram of rifled tube dimension

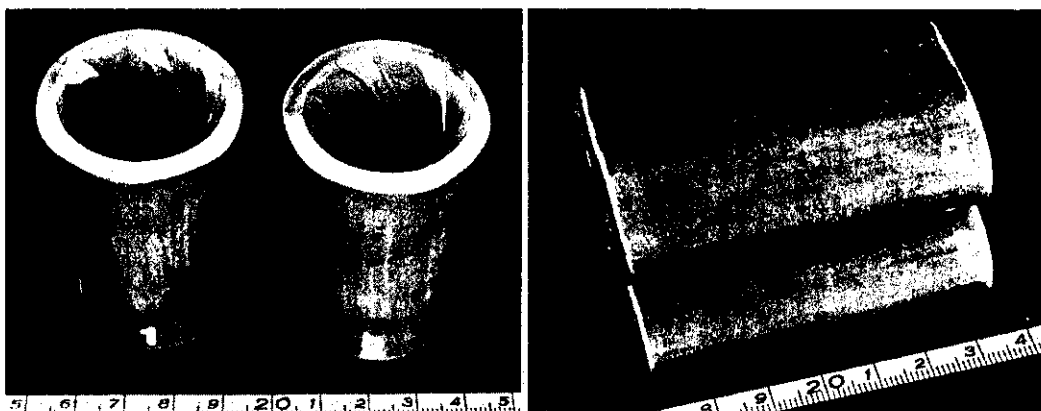


Photo 5 Views of specimens after flattening test (right) and flaring test (left)

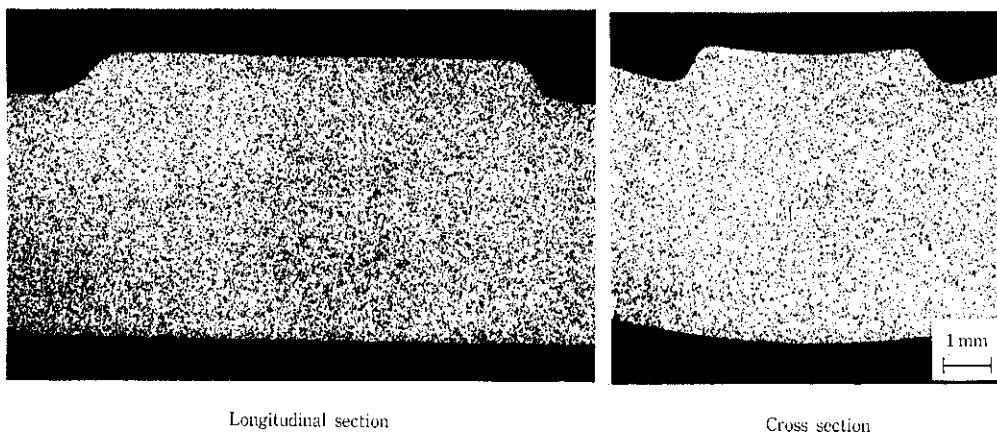


Photo 6 Macrostructure of configuration

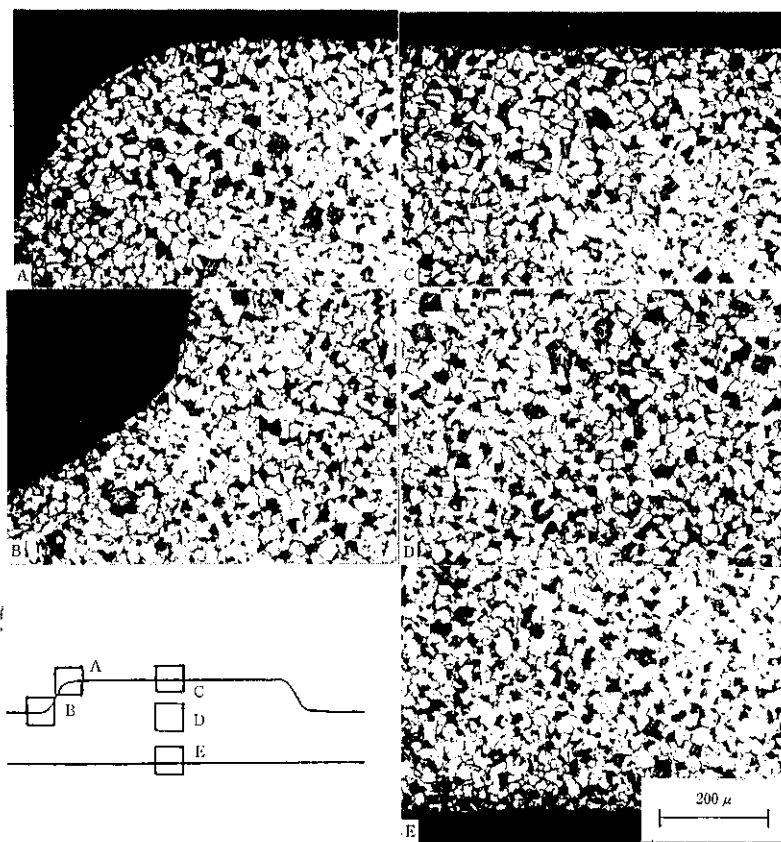


Photo 7 Microstructure of a cross section of the rifled tube containing 0.20% C

5 結 言

当社におけるボイラ用鋼管，特に，Cr-Mo 電縫鋼管 STBA 22 (1Cr-1/2 Mo 鋼)，ライフルチューブについての製造技術とその品質状況等の概要を紹介した。これらの技術は単にボイラ用鋼管のみならず他の製造技術に反映され，鋼管製造技術向上に多大の効果をおよぼしている。

これらの技術により製造された各チューブ類を使用した西発3号ボイラは，昭和59年4月に運転を開始し，以降順調に稼動している。

さいごに，西発3号ボイラに Cr-Mo 電縫鋼管，ライフルチューブを採用するにあたり，多大なるご助言とご協力を得ました，三菱重工業(株)神戸造船所火力部関係各課の皆様に対し，深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 中川康弘, 新庄 豊, 佐山泰弘, 中井一吉, 浜口 陽, 片山 進: 鉄と鋼, **65** (1979) 4, S 237
- 2) 渡辺修三, 平野 豊, 嘉納徳彦, 大出文昭, 横山栄一: 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 93
- 3) 佐山泰弘, 富樫房夫, 江島彬夫, 阿部英夫, 船生 豊, 接田和之, 間口龍郎, 田口芳夫: 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 1