
ラインパイプ用高張力広幅熱延鋼帯の製造技術

Manufacturing Techniques of Hot Wide Strip for High Strength Line Pipe

江口 康二郎(Kojiro Eguchi) 岡本 昇(Noboru Okamoto) 大西 史博(Fumihiko Onishi) 深井 真(Makoto Fukai) 滝沢 昇一(Shoichi Takizawa)

要旨：

近年、石油や天然ガス運送用のラインパイプは輸送効率の向上をねらって高張力化、大径化が進められており、このような要求に対して電縫鋼管を用いるケースが増えてきている。そこで、この要求を満たすラインパイプ用電縫鋼管を製造するために、その素材である広幅熱延鋼帯に対して、製鋼段階ではロングノズル法、垂直曲げ型連铸機を活用した非金属介在物低減対策を、圧延段階では制御圧延技術を利用した材質改善および板形状、寸法精度向上による成形性安定対策を実施した。その結果、清浄度および成形性に優れ、かつ高強度、高靱性を有するラインパイプ用広幅熱延鋼帯の製造技術を確立した。

Synopsis：

Recently, higher strength and larger outside diameter have been required of crude oil or natural gas transmission line pipes in order to attain better transportation efficiency. Against this background, demands for ERW pipes are increasing. Many improvements, as shown below, have been made in the manufacture of hot wide strip for ERW line pipes. (1) Steelmaking techniques using immersed long nozzle and vertical-bending type caster for reducing non-metallic inclusion and sulfur content. (2) Controlled rolling techniques for better mechanical properties and toughness of the hot strip. (3) Hot rolling techniques for improving strip flatness and dimensional accuracy for better production of pipes. As a result of these improvements, steady production has been established of hot wide strip for ERW high strength line pipes up to 26 in. outside diameter.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

ラインパイプ用高張力広幅熱延鋼帯の製造技術

Manufacturing Techniques of Hot Wide Strip for High Strength Line Pipe

江 口 康二郎*
Kojiro Eguchi

岡 本 昇**
Noboru Okamoto

大 西 史 博***
Fumihito Onishi

深 井 真****
Makoto Fukai

滝 沢 昇 一*****
Shoichi Takizawa

Synopsis:

Recently, higher strength and larger outside diameter have been required of crude oil or natural gas transmission line pipes in order to attain better transportation efficiency. Against this background, demands for ERW pipes are increasing. Many improvements, as shown below, have been made in the manufacture of hot wide strip for ERW line pipes.

- (1) Steelmaking techniques using immersed long nozzle and vertical-bending type caster for reducing non-metallic inclusions and sulfur content.
- (2) Controlled rolling techniques for better mechanical properties and toughness of the hot strip.
- (3) Hot rolling techniques for improving strip flatness and dimensional accuracy for better production of pipes.

As a result of these improvements, steady production has been established of hot wide strip for ERW high strength line pipes up to 26 in. outside diameter.

1. 緒 言

近年、石油や天然ガス輸送用のラインパイプは、輸送効率の向上をねらって高張力化、大径化が進められる傾向にある。従来、このような要求に対してはUOEパイプやスパイラルパイプを向けていたが、最近パイプ敷設費の削減を図るために製造技術の進歩によりその品質・信頼性が向上してきている電縫鋼管を用いるケースが増えている。

当社では、この需要にこたえるため知多製造所に世界最大の26in. 中径電縫鋼管ミル¹⁾を建設し、

昭和53年10月に操業開始して以来、Table 1に示すように既に多くの大径高張力ラインパイプを製造しているが、それらの素材である高張力広幅熱延鋼帯は、優れた内部性状と機械的性質および良好な成形性を兼ね備えていることが必要である。

以下に、電縫鋼管用素材としての高張力広幅熱延鋼帯の製造に際し、要求される品質を確保するために講じた各種対策とその技術的背景を説明するとともに、得られた品質実績について述べる。

2. 熱延鋼帯に要求される特性

* 水島製鉄所管理部薄板管理課課長

*** 水島製鉄所管理部薄板管理課

***** 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主査(掛長待遇)

(昭和55年10月1日原稿受付)

** 水島製鉄所管理部薄板管理課掛長

**** 水島製鉄所管理部厚板管理課掛長

Table 1 Recent actual export record of E.R.W. high-strength linepipe (O.D. ≥ 22 in ϕ)

Use	Grade	Pipe size (in)	Quantity (t)	Shipment
Natural gas pipeline	API 5LX X52	22 $\phi \times 0.281$	19 800	Jul. 1979
Oil	X60	24 $\phi \times 0.312$	2 300	Sep.
Oil	X60	24 $\phi \times 0.250$	1 300	Sep.
Oil	X52	24 $\phi \times 0.250$	2 900	Sep.
Natural gas	X60	24 $\phi \times 0.562$	600	Nov.
Oil	X52	24 $\phi \times 0.250$	3 600	Dec.
Oil	X60	26 $\phi \times 0.250$	800	Dec.

2-1 内部性状

電縫鋼管溶接部の品質を確保し良好な超音波探傷試験成績を得るために、非金属介在物や不純物元素の少ない清浄度の優れた素材が要求される。

2-2 機械的性質

API 規格では高張力パイプに対して、化学成分、機械的性質を規定している²⁾。したがって、これらを満たす範囲で成分、圧延条件を設計しなければならない。一方、鋼管の Y.S. はパウシンガー効果³⁾で熱延鋼帯の Y.S. より低くなる現象があり、その降下量 ($\Delta Y.S.$) は Fig. 1 に示すように t/D (肉厚/管外径) によって異なる。そのため、素材である熱延鋼帯はこの $\Delta Y.S.$ を考慮した強度レベルで材質設計を行う必要がある。

また、靱性については特に規定はされておらず需要家との協定仕様によるが、最近では寒冷地等の悪条件のもとで使用されるものも多く、優れた低温靱性を要求されることが増えてきている。なお、この場合、造管時の冷間加工により靱性は劣化する傾向があるため、熱延鋼帯に対する要求仕様は鋼管の仕様より厳しくなるのが一般的である。

2-3 造管時の成形性安定

造管時の成形性は電縫鋼管溶接部の品質に大きく影響する。成形性が不安定になると、

- (1) ビード切削不良による UT 不良の増加
- (2) シームねじれによるシームアニーラ追従不良
- (3) 電縫鋼管溶接部メタルフローの左右不均一などのトラブルが生じ、溶接部の強度、靱性が著

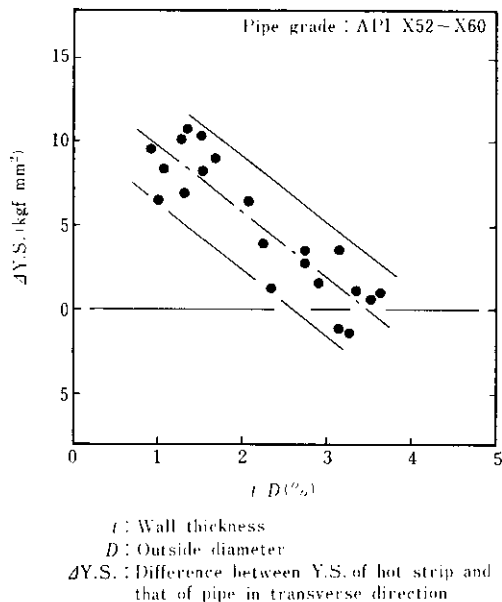


Fig. 1 Relation between t/D and $\Delta Y.S.$ of high strength linepipe

しく損われる。この傾向は、大径、薄肉厚になるほど敏感に現われる。そのため、熱延鋼帯の段階では、成形性に影響すると考えられる板形状、寸法精度、巻形状などについて十分管理する必要がある。

3. 製鋼技術

高張力ラインパイプ用電縫鋼管の溶接部品質を確保するためには、非金属介在物を減少させ、かつ不純物元素を低減させることが必要である。これらは、製鋼固有技術として個々に開発されてき

たものであるが、この技術をラインパイプ用素材に適用することにより内部性状向上を図っている。以下に、この技術の主な点を説明する。

3.1 無酸化注入技術

連铸工程における2次酸化のうち最大のものは、取鍋～タンディッシュ間の空気酸化によるものである。この空気酸化を防止する技術としては、Fig. 2 に示すロングノズル注入法を開発している。ロングノズル法の効果を Fig. 3 に示す。これは、低炭アルミキルド鋼の取鍋処理終了時からタンディッシュまでの全酸素の減少量を、ロングノズル法と従来のArガスシール法と比較したものである。これより、ロングノズル法のほうが全酸素の減少量が大きく、空気酸化防止効果が大きいことがわかる。

3.2 垂直曲げ型連铸機

垂直曲げ型連铸機（水島第6連铸機）は、湾曲型連铸機に比べて大型介在物の減少に有利である。Fig. 4 に、50キロ級鋼の铸片幅方向で100 μ m以上の大型介在物量を調査した結果を示す⁴⁾。垂直曲げ型連铸機では、大型介在物量は $\frac{1}{10}$ ～ $\frac{1}{5}$ に減少しており、また铸片幅方向での差はあまりなく、ほぼ均一な分布をしている。一方、铸片厚み方向ではFig. 5 に示す⁴⁾ように、湾曲型連铸機に見られるような介在物集積帯⁵⁾は発生しておらず、垂直曲げ型連铸機の利点がよくわかる。

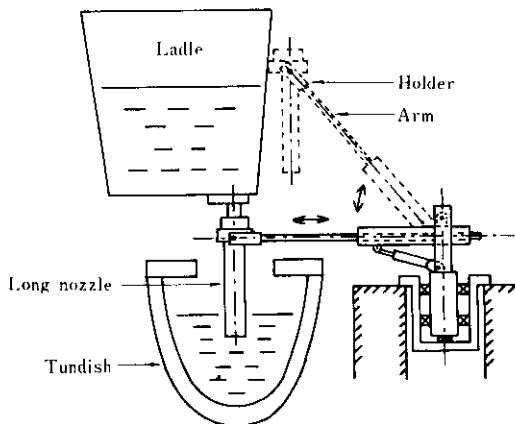


Fig. 2 Schematic diagram of long nozzle sealing method

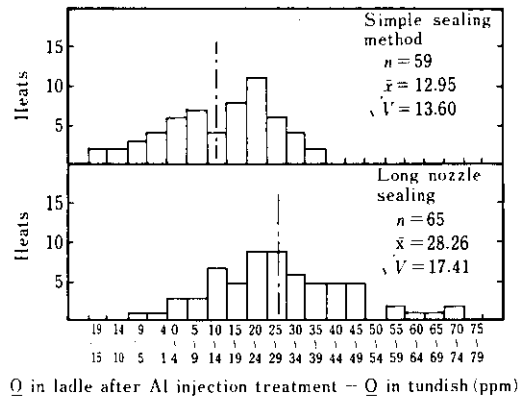


Fig. 3 Distribution of oxygen content in melt sealed with long nozzle and without long nozzle

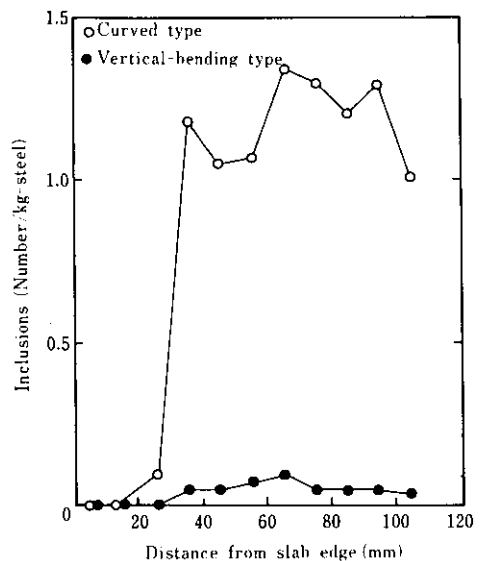


Fig. 4 Large inclusions ($\geq 100\mu$ m) distribution in transverse direction of continuously cast 50kgf/mm² grade slab

3.3 不純物元素低減

不純物元素の低減技術は大きく進歩しており、特に脱硫技術の発展はめざましいものがある。現在では、Sが10ppmレベルの極低硫鋼の製造も可能になっている。

4. 熱間圧延技術

4.1 機械的性質の向上

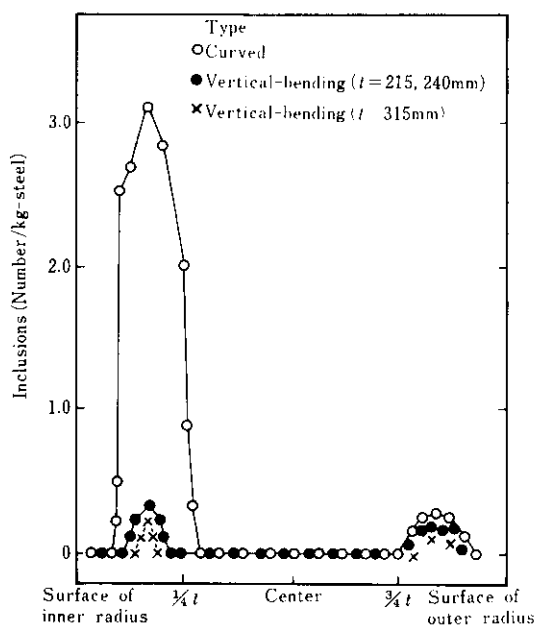


Fig. 5 Large inclusions ($\geq 100\mu\text{m}$) distribution in through-thickness direction of continuously cast 50kgf/mm^2 grade slab

Nb-V 系で高強度、低温靱性を兼ね備えた熱延鋼帯を製造するには、微細なフェライト・パーライト組織を得る必要がある。そのために、当社で開発した材質予測式⁶⁾を含む制御圧延技術^{7,8)}を用いて加熱から巻取りまでの諸条件を厳しく管理している。これは、熱延鋼帯長手方向の材質および組織の均一性を確保する上でも有効である。

機械的性質に影響を及ぼす主要因について、その効果を製造過程を通じて得た実績データと対応させながら以下に説明する。

(1) スラブ加熱温度

スラブ加熱温度は、Nb (C, N) の固溶度およびスラブ加熱時のオーステナイト粒度に大きく影響する。加熱温度は、Nb (C, N) が完全固溶する範囲でできるだけ低温にしたほうが加熱時のオーステナイト粒を微細化でき、靱性は向上する。低C材の場合は、高C材に比べてNb (C, N) 固溶に要する温度が低くてすむので有利である。加熱温度が引張特性、衝撃特性に及ぼす影響を Fig. 6, 7 に示す。加熱温度が低くなるにつれて引張強さは低下するか降伏強度はあまり変化しない。これは、Nb (C, N) の固溶度の違いにより、低温加熱の場合は強度に寄与しないオーステナイト域での

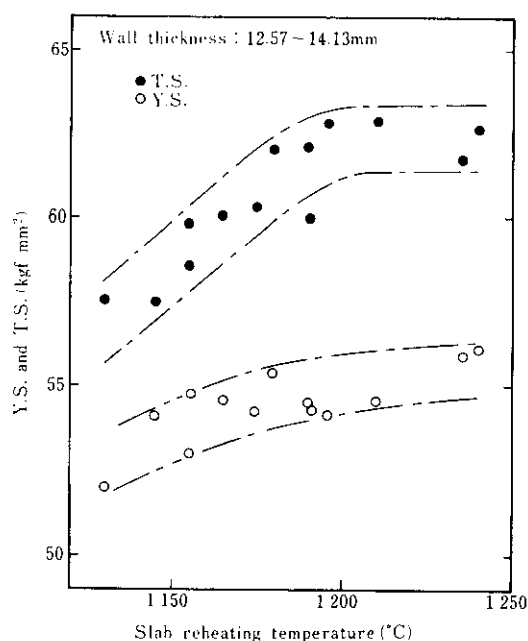


Fig. 6 Effect of slab reheating temperature on Y.S. and T.S. of control-rolled high strength hot strip

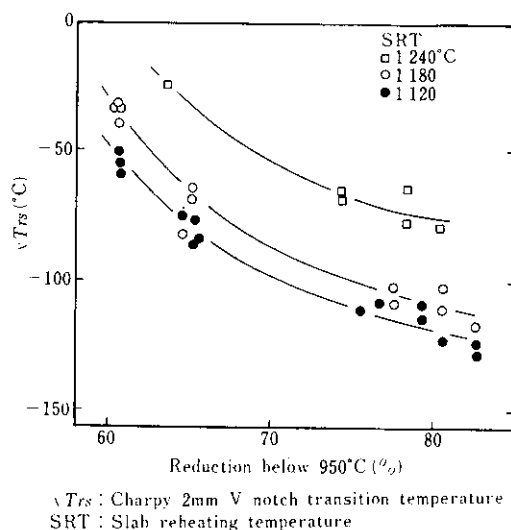


Fig. 7 Effect of reduction below 950°C and SRT on $\sqrt{Trs}$ of control-rolled high strength hot strip

Nb (C, N) の析出量が多くなるためと考えられるが、降伏強度は細粒化効果により確保できている。また、遷移温度は低温加熱のほうが良好なことがわかる。これは、結晶粒微細化効果および析出硬化による靱性劣化が減少するためと考えられる。

(2) 圧下率

フェライト粒微細化を図るためには、再結晶オーステナイト域の粗圧延段階で大きな圧下を加えることと、仕上圧延を未再結晶オーステナイト域(950°C以下)で行い、かつその圧下率を大きくして粒内に多数の変形帯を導入しフェライト変態核形成サイトを多くすることが重要であり、特に後者の効果が大きい^{8,9)}。Fig. 7, 8 に未再結晶オーステナイト域の圧下率が衝撃特性、引張特性に及ぼす影響を示す。これより、圧下率を上げると結晶粒微細化が促進され遷移温度は大きく改善されることがわかる。また、圧下率の増加とともに Y.S., T.S. は上昇するが、Y.S. の上昇率のほうが大きいために降伏比 (Y.S./T.S.) は高くなる傾向を示すので、降伏比に上限規制が設けられている場合に

は圧下率の選定に注意を要する。Photo. 1 に圧下率と結晶組織の関係を示す。これにより、圧下率が大きくなるにつれて結晶粒が細くなるようすがわかる。

(3) 仕上圧延温度

Fig. 9 に仕上圧延温度と引張特性の関係を示す。

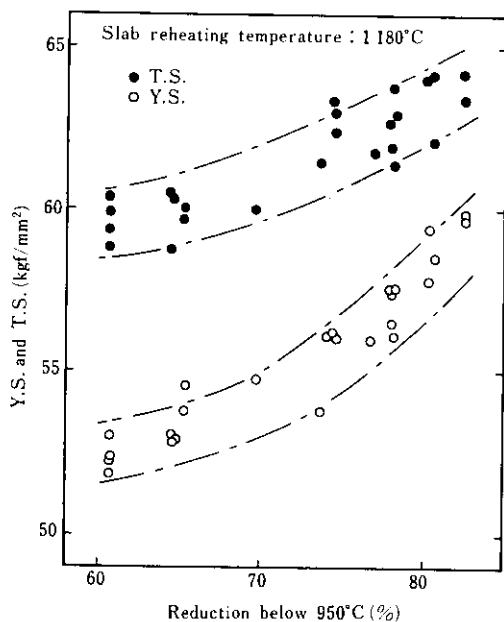


Fig. 8 Effect of reduction below 950°C on Y.S. and T.S. of control-rolled high strength hot strip

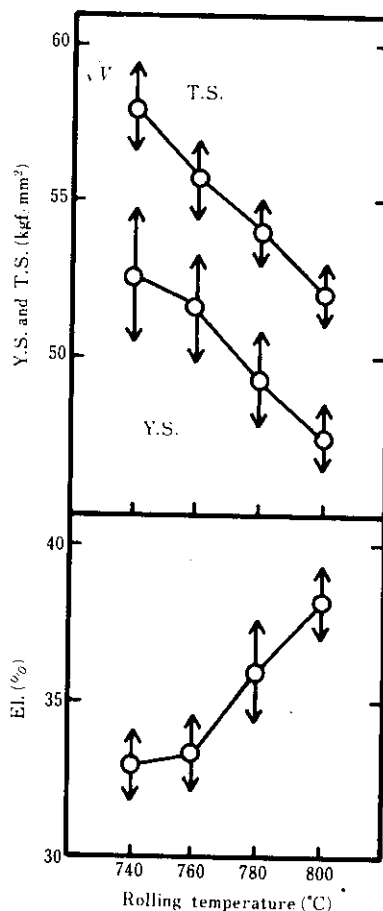
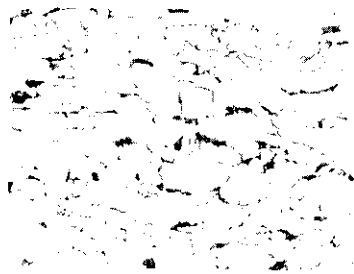
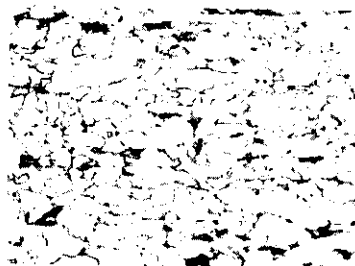


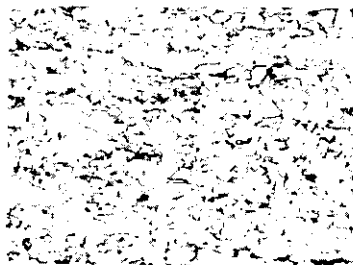
Fig. 9 Effect of rolling temperature on the mechanical properties



(a) Reduction ratio: 60.8%



(b) Reduction ratio: 70.0%



(c) Reduction ratio: 82.5%

Photo. 1 Effect of reduction ratio below 950°C on the microstructure

20 μm

仕上圧延温度が高くなると強度は低下するが、これは仕上圧延中に導入される変形帯の密度が減り結晶粒径が大きくなるためと考えられる。また、衝撃特性についても一般的に劣化する傾向があるので仕上圧延温度を上げるのは得策ではないが、実際には板の形状や通板性も考慮して適切な温度を選定している。なお、仕上圧延温度は、変態域圧延になると靱性が劣化する¹⁰⁾ため Ar_3 変態点を割らないように設定しなければならないが、圧下率が大きくなると歪誘起変態¹¹⁾により Ar_3 変態点が上昇する現象があるので注意を要する。

(4) 巻取温度

Fig. 10 に巻取温度と引張特性の関係を示す。巻取温度の低いほうが仕上圧延後の変態域での冷却速度が早くなるためフェライト粒が微細化し、かつフェライト中へ Nb (C, N) や V (C, N) が微細に析出し強度は上昇する。巻取温度が高すぎると

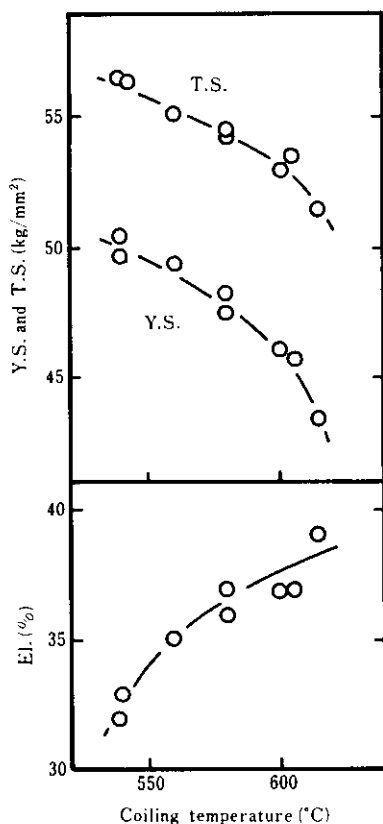


Fig. 10 Effect of coiling temperature on the mechanical properties

結晶粒粗大化、強度低下の弊害が、また低すぎると巻形状に支障をきたしやすく造管時の成形性に悪影響を及ぼすことになるため、当素材の製造に際しては適切な巻取温度に固定し、機械的性質は他の要因で調整した。

以上、機械的性質に影響を及ぼす要因とその効果について説明したが、実際に材質設計を行う場合には要求されている特性を考慮し、最適の材質が得られるように各条件を組み合わせる必要がある。

4・2 成形性安定対策

前記 2・3 項で述べた熱延鋼帯への具体的要求特性は、(1)横曲り (キャンバー)、(2)板厚精度、(3)厚みプロフィール、(4)平坦度である。これらの要求に対し、ホットストリップミルでは次のように対処している。

(1) 横曲り (キャンバー)

熱延コイル状態でのテレスコ量と巻戻したときの熱延鋼帯の横曲り量は Fig. 11 に示すように良好に対応しており、横曲りに対してはコイル巻形状対策が重要である。良好な巻形状は高張力広幅材ほど得にくい傾向にあるが、巻取張力やピンチロール、ラッパーロール隙、押付圧力設定の適正化および Fig. 12 に示すピンチロール前のペンディングロール使用により、良好な巻形状を確保している。これは、Fig. 13(a) のような上下ピンチロールによる熱延鋼帯の 2 点支持に対し、Fig. 13(b) の上下ピンチロールとペンディングロールの 3 点支持により接触面積を大きくとれるので、熱延鋼帯のスラスト方向の力に対して拘束力が作用し、テレス

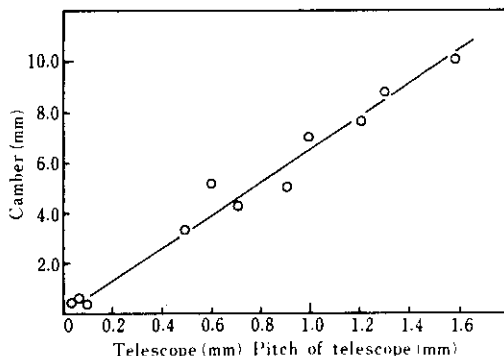


Fig. 11 Relation between telescope of hot coil and camber of strip

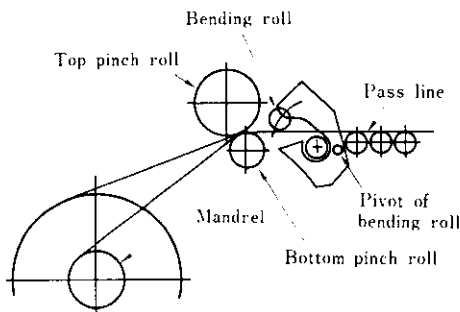


Fig. 12 Schematic diagram of down coiler with a bending roll

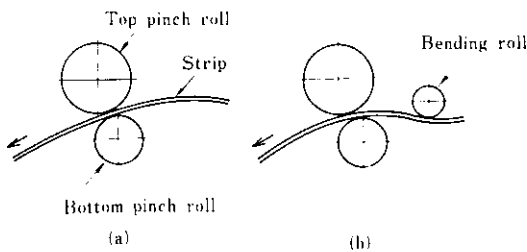


Fig. 13 Behavior of strip (a) without and (b) with a bending roll

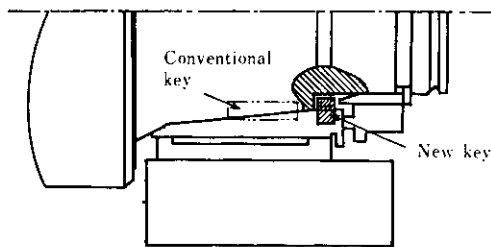


Fig. 14 Schema of key-less bearing

コ発生を抑制できるものである。

(2) 板厚精度

プロセスコンピュータのセットアップ精度およびA.G.C. (Automatic Gauge Control) 精度のレベルアップにより要求に対処しているが、さらにFig. 14に示す仕上圧延機バックアップロールにキーレスベアリング¹²⁾を適用して効果を上げている。

(3) 厚みプロフィール

熱延鋼帯の板幅方向の厚みプロフィールは、パイプ成形時にシーム部が蛇行しないように板幅中心に対称形の適正クラウンにする必要がある。これに対し、熱圧仕上圧延機後面にプロフィールメーターを設置し、オンラインで厚みプロフィールを検出することにより片圧下調整や圧下配分変更のフィードバックを行い、適正な厚みプロフィールを得るためのプロフィール制御を実施している。

(4) 平坦度

電縫鋼管用熱延鋼帯の形状は、特に耳伸びのないことが要求される。これに対し、仕上圧延機後面にFig. 15に示す水流式形状検出器¹³⁾を設置し、これからの形状信号をもとに最終スタンドロールベンディング圧力およびF1~7スタンドの圧下配分にフィードバックする形状制御¹⁴⁾を実施し、良好な平坦度を得ている。

5. 高張力広幅熱延鋼帯の品質実績

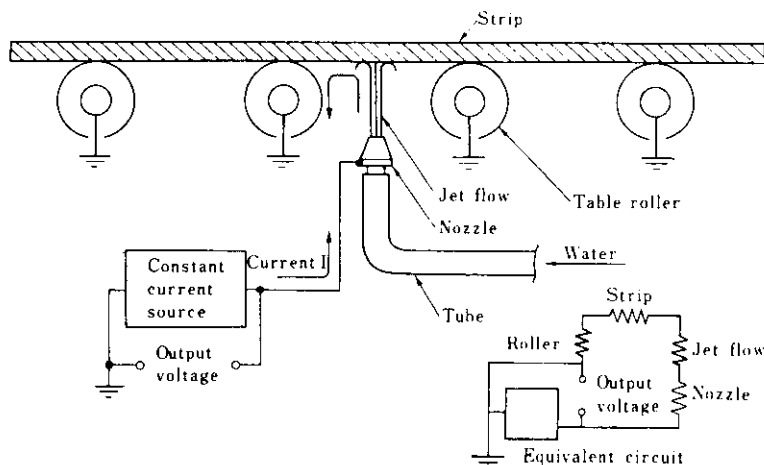


Fig. 15 Principle of flatness measurement and its equipment circuit

以上に述べたような各種対策をとって製造した 24in.φ (609.6mmφ) 電縫鋼管 API 5LX X60 用熱延鋼帯の品質実績を以下に示す。

5・1 寸法および化学成分

Table 2 に示すように、対象材は薄肉大径管で化学成分は Nb-V 系の Si-Al キルド鋼とし、靱性、溶接性を考慮して低 C としている。

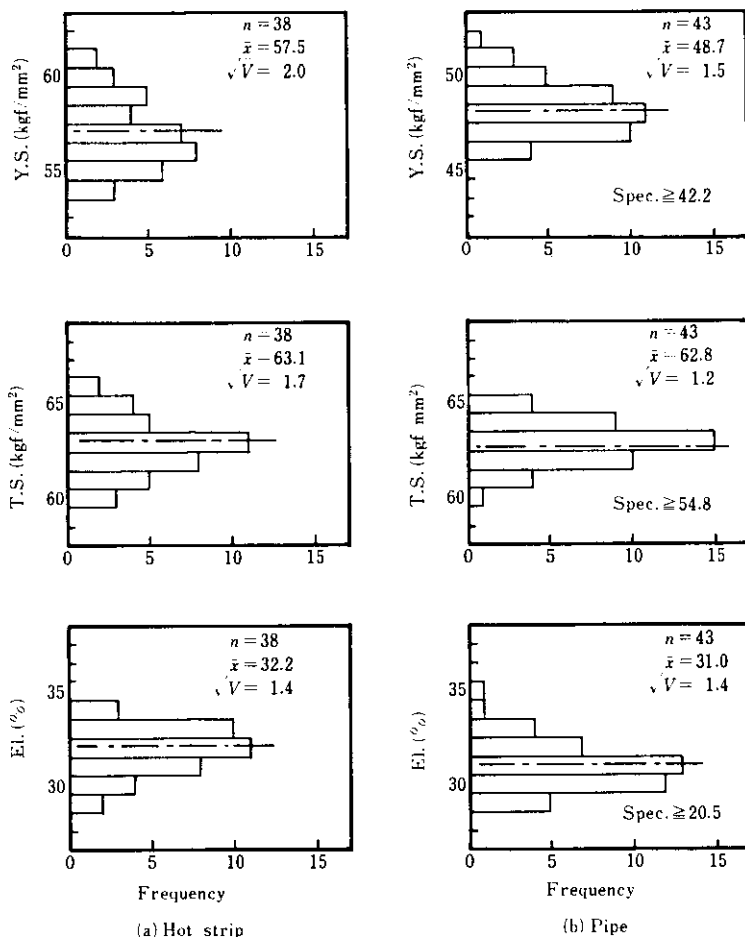
5・2 引張特性

Fig. 16 に熱延鋼帯および鋼管の引張特性を示す。なお、熱延鋼帯は造管によるバウシinger 効果を考慮して Y.S. で 55~60kgf/mm² レベルの強度目標としている。

5・3 衝撃特性

Table 2 Dimensions and chemical composition of API 5LX X60

Dimensions		Chemical compositions (wt %)							
Hot strip	Pipe	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
6.29mm × 1 950mm	24 in φ × 0.250 in	0.08	0.20	1.10	0.015	0.005	0.025	0.035	0.040



Sample : API 5LX X60, 24in φ × 0.250in

Fig. 16 Results of tensile test of hot strip and pipe in transverse direction

Fig. 17に2mmVノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。T方向遷移温度は約 -115°C が得られており優れた低温靱性を備えている。

5・4 結晶組織

Photo. 2に熱延鋼帯の組織の一例を示す。微細なフェライト・パーライト組織が得られているのがわかる。

5・5 巻形状

Photo. 3に熱延鋼帯の外観写真の一例を示す。

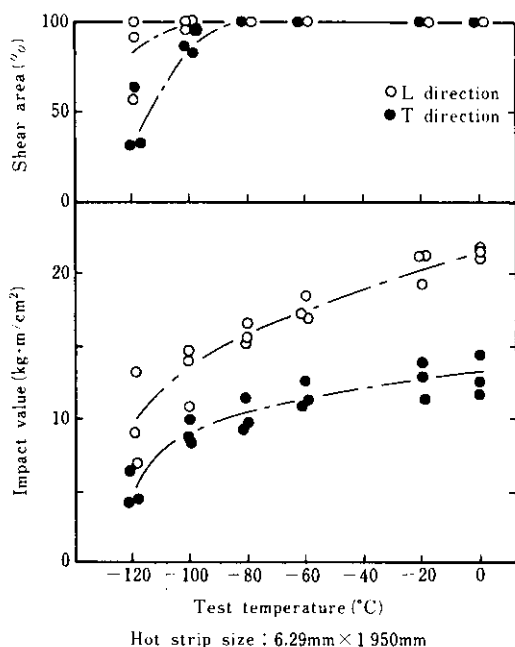


Fig. 17 Charpy 2mm V-notch impact properties of hot strip

巻形状、平坦度は良く、造管に際しても良好な成形性を確保でき、円滑に造管することができた。

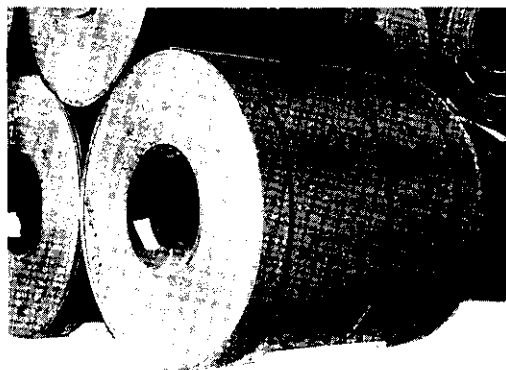
5・6 内部性状

Fig. 18に対策前後の電縫鋼管溶接部の超音波探傷試験チャート例を示す。いずれも超音波探傷試験は合格しているが、対策前のほうは微小な欠



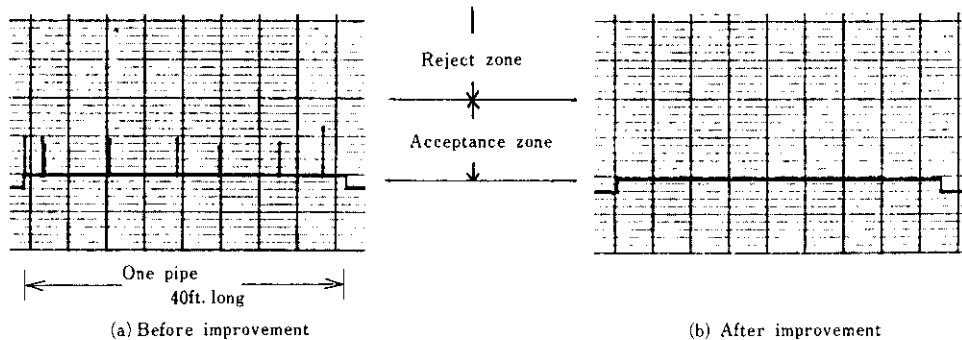
Hot strip size: 6.29mm × 1950mm

Photo. 2 An example of the microstructure of high strength hot strip



Pipe grade: API 5LX X60 Pipe size: 24in ϕ × 0.250in

Photo. 3 Appearance of high strength hot rolled coil



(a) Before improvement

(b) After improvement

Reference standard: 3.2mm ϕ D.H.

Fig. 18 Examples of ultra sonic test recording chart for the welded seam

陥がところどころに検出されているのに比べ、対策後のほうはそれらがなく優れた清浄度を確保できていることがわかる。

6. 結 言

2300mm幅ホットストリップミルで圧延した薄板から26in.電縫鋼管ミルにより高強度、高靱性を有するラインパイプ用大径電縫鋼管を製造する場合、その素材である広幅熱延鋼帯の品質特性としては、

- (1) 優れた内部性状を有すること
- (2) 高強度、高靱性を兼ね備えていること

- (3) 造管時の成形性が良好なことが要求される。

そこで、これらの要求を満たすために、製鋼段階ではロングノズル法、垂直曲げ型連鑄機を活用した非金属介在物低減対策を講じ、圧延段階では制御圧延技術を利用した機械的性質の改善および板形状、寸法精度向上による成形性安定対策を実施した。

その結果、清浄度および成形性に優れ、かつ高張力、高靱性を有するラインパイプ用広幅熱延鋼帯を安定して製造できるようになり、既に多くの製品を納入するに至っている。

参 考 文 献

- 1) 田村, 細川, 吉本, 大出, 近藤, 黒崎, 杉本: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 3, 450
- 2) 寺田, 平野, 大谷, 吉本, 横山: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 1, 63
- 3) たとえば横山, 大坪, 山県, 杉本: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 511
- 4) 飯田, 大森, 江本, 前田, 大図, 小島: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, 328
- 5) 平井, 松永, 大橋, 広本: 製鉄研究, 294 (1978), 12551
- 6) 伊藤, 坂元, 佐伯, 船越, 荻野, 斎藤, 東野, 青柳: 鉄と鋼, 65 (1979) 8, A 185
- 7) 田中, 榎並: 鉄と鋼, 58 (1972) 13, 1775
- 8) 田中: 塑性と加工, 18 (1977) 196, 381
- 9) 関根, 丸山, 川島: 鉄と鋼, 60 (1974) 11, S 557
- 10) 田中, 波戸村, 田畑: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 522
- 11) 関根, 丸山: 鉄と鋼, 58 (1972) 10, 1424
- 12) 三宅, 浜田, 広瀬, 直井, 侍留, 野口: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 339
- 13) 江端, 井上, 齊川: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, 370
- 14) 北尾, 齊川, 登田, 浜田, 広瀬, 大島: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 298