
高張力ラインパイプについて

High Strength Steel Pipe for Pipeline

若林 浩一(Koichi Wakabayashi) 広瀬 圭介(Keisuke Hirose) 小西 博典(Hirosuke Konishi)

要旨：

石油や天然ガスの長距離輸送に使われるラインパイプは、大径化、高張力化するとともに安定したすぐれた品質特性が要求される。本報告では、高張力ラインパイプの規格と需要家の要求特性およびラインパイプ用鋼板の製造について概説するとともに、UOE方式により製造した寒冷地向ラインパイプX60の品質特性を紹介している。

Synopsis：

Along with its increasing trend for larger diameter and higher tensile strength, linepipe for a long-range transporting of oil and natural gas is required to possess stable and excellent product quality. This report outlines specifications of high strength linepipe, characteristics of customer demands and the manufacture of steel plates for linepipe, together with the properties of X60 linepipe for low ambient regions manufactured with UOE process at Chiba Works.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

高張力ラインパイプについて

High Strength Steel Pipe for Pipeline

若 林 浩 一*
Koichi Wakabayashi

広 瀬 圭 介**
Keisuke Hirose

小 西 博 典**
Hirosuke Konishi

Synopsis:

Along with its increasing trend for larger diameter and higher tensile strength, linepipe for a long-range transporting of oil and natural gas is required to possess stable and excellent product quality.

This report outlines specifications of high strength linepipe, characteristics of customer demands and the manufacture of steel plates for linepipe, together with the properties of X60 linepipe for low ambient regions manufactured with UOE process at Chiba Works.

1. 緒 言

世界的なエネルギーのひっ迫は、今や極北の地をはじめとして世界各地に新しい天然ガスおよび石油の地下資源の開発に拍車をかけつつある。この結果、採掘地がしだいに消費地から遠くなるにつれて、遠距離を大量にかつ最も安価に輸送する手段としてのパイプラインは、大径化厚肉化、高張力化している。さらに安全性を高めるべく、良好な溶接性、すぐれた内部清浄度が必要となり、とくに寒冷地で使用される鋼管は、厳しい低温靱性を要求されるに至っている。

本報告では、高張力ラインパイプの規格と要求特性、すでに千葉製鉄所において製造されたラインパイプの品質について概説する。

2. 高張力ラインパイプの仕様

現在、高張力ラインパイプの規格は、アメリカ石油協会 (API) の API 5LX High Test Line Pipe が最も広く使用されており、これを基本として、設計、施工会社、需要家の仕様が付加されるのが一般的な傾向であり、これらの付加仕様は **Table 1** に示す API 5LX の規格より厳しいのが普通である。さらに、パイプラインの敷設環境はプロジェクトごとに異なるため、ラインパイプの仕様は非常な多種にわたっているのが現状である。ここでは API 5LX を中心に、高張力ラインパイプに要求される特性について述べるとともに、2、3の特別仕様についてもふれることにする。

* 千葉製鉄所管理部検査課課長

** 千葉製鉄所管理部厚板管理課掛長

2.1 化学成分

化学成分に関する API 5LX の規格は、現状の技術水準では何ら問題はないが、特徴として、X56 以上のグレードでは、Nb, V, Ti の単独ま

たは複合添加を規定していることである。これは、溶接性に対して考慮がはられた結果として、溶接性にとくに影響する C 含有量を一定値以下に押えるためと考えられる。しかし、現実には X60 以上の高グレードにおいても、C は 0.15% 以

Table 1 API Spec. 5LX (Extract)

(a) Chemical requirements for ladle analysis (%)

Grade	C	Mn	P	S	Nb	V	Ti
X42~X52	≤0.28	≤1.25	≤0.04	≤0.05			
X56, X60	≤0.26	≤1.35	≤0.04	≤0.05	≥0.005	≥0.02	≥0.03
X65	≤0.26	≤1.40	≤0.04	≤0.05	≥0.005	≥0.02	
X70	≤0.23	≤1.60	≤0.04	≤0.05			

Note (1): Either Nb, V, Ti, or a combination thereof, shall be used at the discretion of the manufacturer

(2): For grades X65 and below, for each reduction of 0.01 per cent below the specified maximum carbon content, an increase of 0.05 percent manganese above the specified maximum is permissible, up to a maximum of 1.45 percent

(b) Tensile requirements

Grade	Y.S., psi (kg/mm ²)	T.S., psi (kg/mm ²)	Y.R., %	El., % (GL=2in)
X42	≥42 000(29.5)	≥60 000(42.2)	≤85	$e = 625\,000 \times \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}}$ e : Minimum elongation (%) A : Cross sectional area of the tensile test specimen (in²) U : Specified tensile strength (psi)
X46	≥46 000(32.3)	≥63 000(44.3)		
X52	≥52 000(36.6)	≥66 000(46.4) ≥72 000(50.6)*		
X56	≥56 000(39.2)	≥71 000(49.9) ≥75 000(52.7)*		
X60	≥60 000(42.2)	≥75 000(52.7) ≥78 000(54.8)*		
X65	≥65 000(45.7)	≥77 000(54.1) ≥80 000(56.2)*	t ≤ 0.375in, ≤85 t > 0.375in, ≤90	
X70	≥70 000(49.3)	≥82 000(57.7)	≤90	

* For pipe 20in OD and larger with wall thickness 0.375in and less

(c) Notch toughness requirements

	Charpy V-notch test	DWTT (Drop weight tear test)
Test temperature	32°F or 50°F	X52~X60 X65 X70 32°F 0.360in and less 0.344in and less 50°F 0.450in and less 0.375in and less (By agreement)
Acceptable value	The average shear value of three specimens ≥35% The average shear value for heat ≥50%	At least 80% of the heats shall exhibit a shear area of 40% or more

(d) Tolerances on dimensions

Item	Tolerance
Outside diameter	Pipe body ; Less than 20in $\pm 0.75\%$
	20in and larger $+0.75\%$, -0.25%
	Pipe ends ; $12\frac{3}{4}$ in and larger $+\frac{1}{32}$ in, $-\frac{1}{32}$ in (4in from the end)
Wall thickness	18in and smaller $+17.5\%$, -12.5%
	20in and larger $+19.5\%$, -8.0%
Out-of-roundness	$\pm 1\%$ for a distance of 4in from the end of the pipe
Straightness	≤ 0.2 percent
Pipe ends	Bevel angle $30^\circ + 5^\circ$, -0°
	Root face $\frac{1}{16}$ in $\pm \frac{1}{32}$ in
Height of outside weld bead	Wall thickness $\frac{1}{2}$ in and under $\frac{1}{32}$ in
	over $\frac{1}{2}$ in $\frac{3}{16}$ in

下にするのが一般の傾向であり、Cを0.10%以下に規定する需要家も現れている。一方、Cの含有量を低く規定する代りに、Mnなどの強化元素をAPI 5LXの上限を越えて許容する需要家が増加している。たとえば、Mn含有量をレードル分析で1.60%、チェック分析で1.80%程度まで許容する需要家仕様が多くなりつつある。今後成分仕様は、低炭素、高マンガン鋼タイプに移行していくものと思われる。また、一般に炭素当量の規定は、溶接性を示す一つの目安として付加される場合が多く、厚肉のものでも、従来より炭素当量を低く規制する仕様も現れつつある。

一方、とくに溶着金属に対して厳しい靱性が要

求されるために、品質設計の段階でCを極力低くせざるを得ない場合もある。さらに、P、Sを極力低い水準に押えるようにとの要求は圧倒的に多く千葉製鉄所でもすでに $P \leq 0.015\%$ 、 $S \leq 0.006\%$ の仕様でラインパイプが製造されている。厳しい靱性の要求に対しては、サルファイドの形状コントロールを目的として、希土類元素(R. E. M.)も使用されている。

R. E. M. 添加の場合のシャルピー値の一例をFig. 1に示す。

2.2 強度

ラインパイプの強度に対する要求は、高グレードへと移行しつつあり、現在ではX52の時代はすでに去り、X60はごく普通のグレードと考えられているばかりでなく、X70を採用したパイプラインもすでに一部では稼動している。今後、長大なパイプラインはそのほとんどがX65、X70を使用することは明らかである。さらに、暫定的ながらX80の規格化も終り、X90、X100の開発が進められているのが現状である。このような傾向は、パイプラインの設計基準が、鋼管の降伏応力に置かれているためである。つまり、同一圧力が負荷される場合、鋼管が高グレードであればあるほど管厚を薄くすることが可能である。また、同一管径で輸送能力を増すためには、使用圧力を上げる必要から、高グレードのものを使用するか、低グ

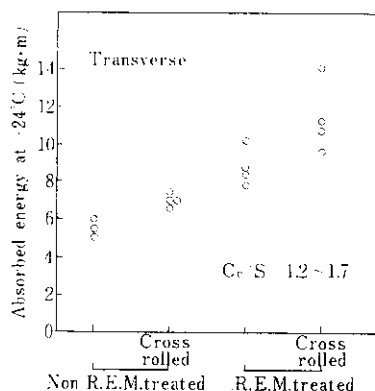


Fig. 1 Effect of R. E. M. (rare earth metal) treatment on Charpy value (API 5LX X60)

レードで管厚を厚くして使用するかであるが、高グレードのものが多く採用されている。これは、管厚を薄くすることによって、使用される鋼材量の減少とこれによる鋼管輸送費の節減、現地溶接費の節減などの利点が生ずるためと考えられる。

最近の強度に対する要求としては、**Table 1**の規定に加えて、降伏強さ、引張強さの上限を規定しているものがある。降伏強さの上限は、X60の場合、75 000psi 以下の要求はごく自然のこととして取り扱われるような情勢であり、時には 70 000 psi 以下の要求さえもみられるに至っている。また、降伏比の要求も X65 の肉厚 0.375in 超のもので、85% 以下に規制しているものがある。

引張試験は、一般にパイプより切り出した試験片を平坦にしたのちに行われるため、バウシンガー効果によりパイプの持つ真の値を知ることができない。このため、当社では **Photo. 1** に示す Ring expansion 試験機を設置し、真の降伏強さを知ることができるようにしている。

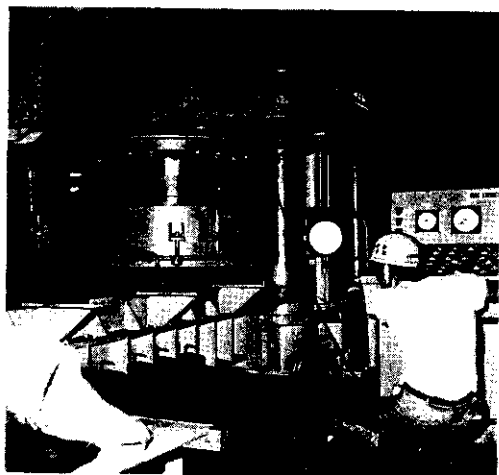


Photo. 1 Ring expansion tester

2・3 靱 性

パイプラインの破壊は、その修復に要する経費とともに、設備の停止による機会損失などを考えると、その経済的損失は莫大なものとなるほかに、都市部においては、人的、物的な面で被害をおよぼし、原野部においてさえ、自然環境の破壊

につながる大事故をひきおこすということを常に考えておかねばならない。パイプラインの破壊を防ぐには、強度はもちろんであるが、靱性に対する考慮も不可欠のものである。すなわち、降伏強さ以下の応力における不安定破壊を防ぐために、鋼材にはそれに適した靱性が常に要求される。API 5LX では、需要家から要求のあった場合には、2mmV シャルピー試験あるいは DWTT の試験を行うように定められているが、その規定は **Table 1** に示すとおりである。しかしながら、寒冷地において使用されるラインパイプに需要家で付加される仕様は、これよりはるかに厳しい。母材部を例にとれば、 -10°F で延性破面率 50% 程度要求されるものはめずらしくなく、 -10°F で 70% 程度のものまであり、延性破面率のほか、吸収エネルギーを規定しているのが大部分である。たとえば、 0°F で吸収エネルギー、50 ft·lb、 -10°F で 50 ft·lb といった要求があり、このほかに延性破面率がはじめて 100% になる温度での吸収エネルギーを規定しているものがある。DWTT でも試験温度、延性破面率の規定は、シャルピー試験におけると同等に厳しくなっており、本来、その延性破面が問題となるべきであるにもかかわらず、破断に要するエネルギーを問題にする需要家すら現れている。この点に対処するため、当社では **Photo. 2** に示す Pendulum type の落重試験機を設置している。**Fig. 2** に最近試作した X70 相当材の落重試験遷移曲線の一例を示す。



Photo. 2 DWTT machine

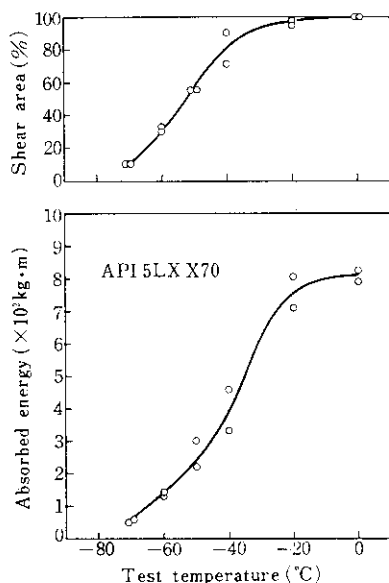


Fig. 2 Result of DWTT

2.4 寸法

ラインパイプにおいては、その寸法精度も材質特性に劣らず重要である。これは、パイプライン敷設現場での作業を容易にするための必然的な要求である。したがって API 5LX では、Table 1 に示したように、外径、真円度、肉厚、曲り、管端ベベル角度、ビード高さの寸法精度を規定しているが、実際の需要家の要求はさらに厳しく、外径、真円度、肉厚、直角度は、API 5LX 規格値の 1/2 にするようにとの要求が多くなっている。

2.5 溶接部

溶接鋼管では、溶接部がとくに重要視されており、パイプラインの破壊につながるような欠陥、

すなわち、アンダーカット、ブローホール、割れ、スラグ巻き込み、有害なデント、目違いなどが無いように種々の試験を規定している。これには溶接部型曲げ試験、超音波探傷試験、X線透過試験があり、さらに水圧試験を行うようになっている。

3. ラインパイプ用素材の製造

高張力ラインパイプ用鋼板の製造法を大別すると、(1)焼ならし材、(2)アズロール材、(3)焼入、焼もどし(QT)材などが考えられる。焼ならし材では、強度を保持する必要上から炭素当量が高くなる傾向にあり、QT材では、熱処理炉の能力の点で生産量に制限を受けるため、両者とも数多くは行われていない。ここでは、現在当所で採用しているコントロールド・ローリングにより、厚板ミルで製造されるアズロール材について述べる。

コントロールド・ローリングは、従来から、衝撃値を要求される造船用 Al キルド鋼などで、焼ならしに代る方法として使われていたが、ラインパイプ用鋼板では、さらに厳しい条件を付加したコントロールド・ローリングが要求される。現在、当社で、コントロールド・ローリングを行っているラインパイプ用鋼板は、Si-Mn 系の Al キルド鋼をベースとして、高グレード用には Nb、V の析出硬化型元素を加えたものである。これらの元素の含有量や、単独添加か複合添加かは、その要求性能に応じて決定しているが、一般には X56 までは Nb の単独添加とし、X60 以上のグレードでは Nb および V を使用している。この成分系とコントロールド・ローリングの併用により、所

Table 2 Test results of Nb-V type and Nb-Mo type

	Tensile properties on base metal				Charpy V-notch on B.M.			DWTT	Tensile strength on weld joint		Charpy V-notch test on weld joint	
	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El. (%)	Y.R. (%)	0°C (kg-m)	-20°C (kg-m)	T _{rs} (°C)		T.S. (kg/mm ²)	Fracture portion	Notch portion	0°C (kg-m)
Nb-V	49.5	59.9	38	83	10.3	9.6	-89	100	64.0	B.M.	W.M.	6.2
											H.A.Z.	10.3
Nb-Mo	50.7	60.3	36	84	8.6	7.4	-100	100	65.0	B.M.	W.M.	5.7
											H.A.Z.	8.1

B.M. : Base metal
DWTT: Drop weight tear test

W.M. : Weld metal
H.A.Z: Heat affected zone

定の強度と靱性を持つラインパイプ用鋼板を製造しており、現在X70まで製造することができる。また、とくに高いレベルの靱性が要求されるものに対しては、R. E. M. を使用する場合があることは前に述べた。成分系としては、このほかにNb-Mo系のものがあり、これを低炭素、高マンガン系のものに採用して良好な結果を得ている。**Table 2**にNb-V系、Nb-Mo系の機械的性質の一例を示す。

ラインパイプに要求される機械的性質は、少なくとも、その素材である鋼板で確実に保証されなければならないのはもちろんであるが、これらの鋼板は、パイプの製造過程において複雑な加工履歴を受けるために、パイプの特性値と鋼板の特性値には相当の差が出るのが普通である。とくに、大きな差として現れるのは、バウシinger効果による降伏強さの変化と、衝撃試験における遷移温度の変化である。**Table 3**にその一例を示すが、これらの変化は一定ではなく、グレードやパイプの肉厚と直径との比(t/D)によっても異ってくる。このため、ラインパイプ用鋼板の製造に当っては、これらの変化を十分に見込んで、鋼板の品質設計を行っている。このため、鋼板に付加される仕様は、パイプの仕様より厳しいのが一般である。

鋼板と同様に、ラインパイプを製造するに当たって重要なものに溶接材料があり、これは、当社技術研究所を中心に種々の開発、改良が行われ、需要家の要望に十分応え得るものが当社の溶接棒工場で製造されているが、本稿では詳細は割愛した。

3.1 製鋼、分塊

前述のように、ラインパイプは、高い強度レベルと同時に良好な溶接性、靱性を要求されるとい

う相反する要素を持っており、これらを満足させるために、化学成分の許容範囲はきわめて狭くなり、鋼の製造にあたっては厳しい成分調整が行われている。Sレベルを低く保持するための溶銑脱硫はもとより、特別の精練方法によりPレベルを低く押えるなどの技術が採用され、加えて溶鋼の脱ガス処理、下注ぎ注入を行うことによって、清浄度のすぐれたラインパイプ用鋼板を製造している。実作業においては、吹止めCの厳重な規制をはじめとして、各段階における温度規制など、きわめて密度の高い作業が、厳しい管理基準のもとに行われている。**Fig. 3**に最近のX60の出鋼実績を示す。いずれの成分もよくコントロールされていることを示している。

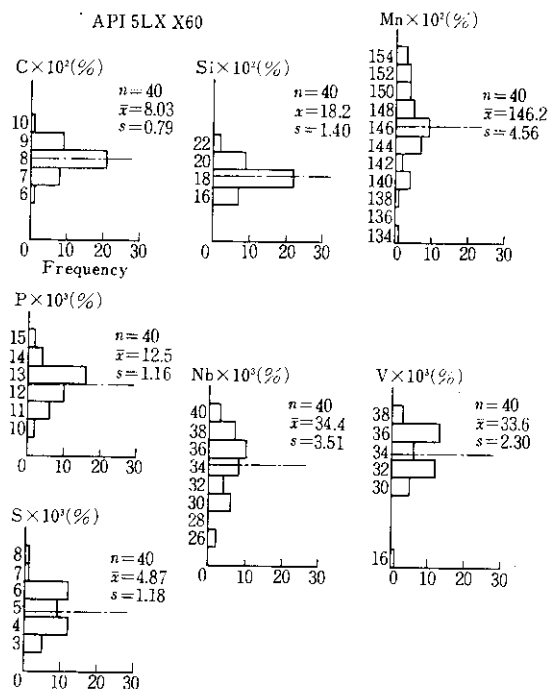


Fig. 3 Chemical compositions (Ladle analysis)

Table 3 Relation of mechanical properties between pipe and plate

	Tensile test (transverse)				Charpy V-notch test (transverse)	
	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El. (%)	Y.R. (%)	0°C (kg·m)	vT_{rs} (°C)
Plate	48.9	58.2	39	84	9.6	-63
Pipe	46.7	58.4	36	80	8.0	-41

適切なトラックタイムと均熱条件の管理のもとに分塊圧延された鋼塊は、スラブの段階で表面欠陥を除去され、とくに定められた検査基準に従ってその可否を決定されるが、パイプ成形後にノッチとなるような欠陥は、この段階でまず徹底して除かれる。

3.2 厚板圧延

ラインパイプ用鋼板に要求される厳しい強度と靱性を満足させるためには、スラブ加熱温度と圧延温度が十分に管理されなければならない。スラブの加熱温度は、鋼板に所定の強度を与えるために Nb, V などの析出硬化元素が十分に固溶する温度で、かつスラブの状態でのオーステナイト結晶粒度ができるだけ細粒化されるように設定する必要がある。このため、加熱温度は一般材に比べて低温側であり、かつ狭い範囲に規制されている。X60以上のグレードでは、要求特性によって異なるが、1150°Cから1200°Cの間で加熱温度を選び、それぞれの特性に合った温度を決定している。なお、加熱温度は機械的特性のほかに圧延能率、鋼板の形状に影響するところが大きく、これらの点も十分に加味して決定されるものである。

コントロールド・ローリングにおいては、圧延開始から終了まで厳密に温度管理を行う必要があり、これを満足するためにそれぞれの要求特性に

合致したパススケジュールを設定し、ある特定の温度範囲での圧下率を規制している。この温度範囲と圧下率の組み合わせにより、同一化学成分でも強度、靱性の異なった鋼板を得ることができる。一例として、Fig. 4 に仕上温度と機械的性質の関係を示した。この図では、仕上温度の低いもの

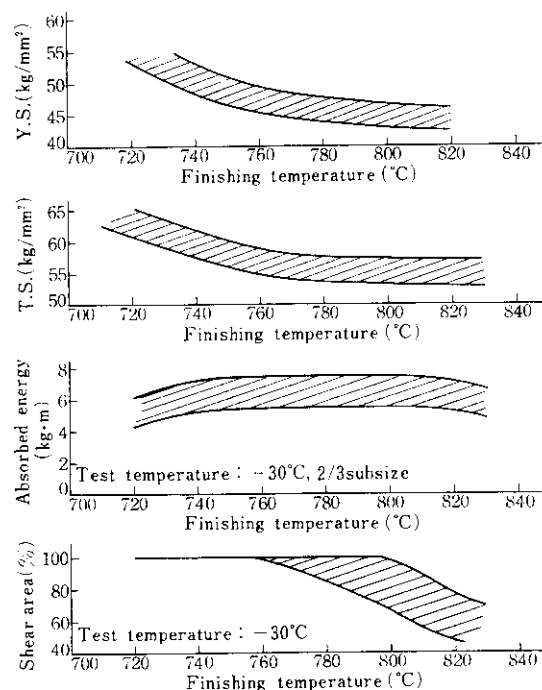
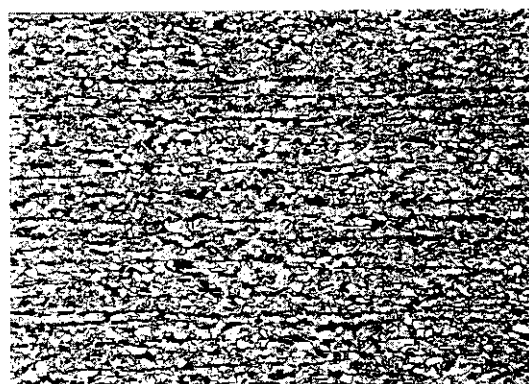
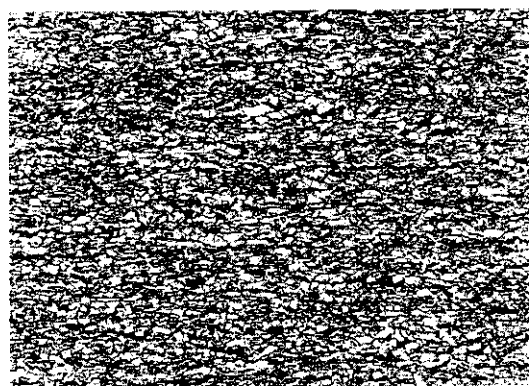


Fig. 4 Relation between finishing temperature and mechanical properties



Heavier ← → Lighter

Reduction ratio at low finishing temperature

Photo. 3 Change of microstructure (×100)

は、低温での圧下率が大きいことを意味している。この図から、低温での圧下率が大きいほど、強度は上昇する傾向にあるが、吸収エネルギーはある温度範囲で最も良好となることが判る。また破面遷移温度は、低温領域での圧下率の増加とともに低温側に移行するが、これも限界があり、より低い温度での圧下率の増加は、破面遷移温度を高温側に移行させることが実験的に知られている。Photo. 3 は、低温領域での圧下率の異なるものの組織写真である。

上述の温度規制のほかに、コントロールド・ローリングを行うためのパススケジュールを決定するにあたって重要な事柄は、鋼板の形状、圧延能力を十分に考慮することである。この点について

は、千葉、水島両製鉄所で厚板工場のレイアウトなどが異なるため、それぞれに適したパススケジュールが採用されている。

機械的性質のほかに、高張力ラインパイプ用鋼板に要求される内部欠陥の除去については、前述の製鋼段階で徹底した対策がとられているが、さらに鋼板の状態で、有害な内部欠陥の無いことを確認するため、すべての鋼板は Photo. 4 に示す自動超音波探傷機により検査される。とくにパイプの溶接部に当たる鋼板の端面は入念に検査される。

4. UOE 方式による当社ラインパイプの品質

当所では、UOE 方式によりラインパイプの製造を行っているが、この製造、検査に関しては、本誌別報¹⁾に詳しい。

製管工程において最も重要なことは、溶接部の品質、寸法形状である。これらの点については、稼動以前から種々の研究室的実験、さらに稼動後は実機における実験、検討により製造上の諸要因を解析し、改良を加えた結果、API 5LX の規定を満足するのはもちろんのこと、需要家の厳しい要求にも十分応え得るラインパイプが製造されている。

以上に従って製造されたラインパイプの品質特性の一例を Fig. 5~Fig. 15 に示す。このライン

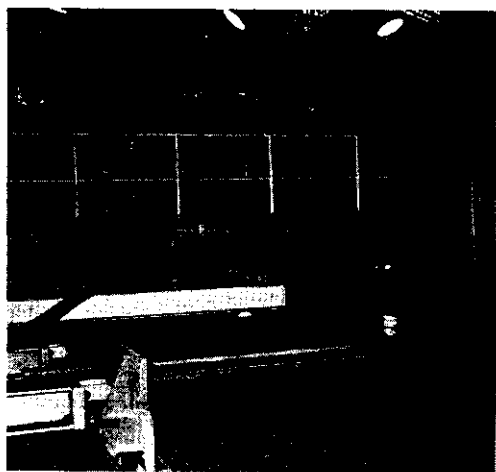


Photo. 4 Automatic UST machine

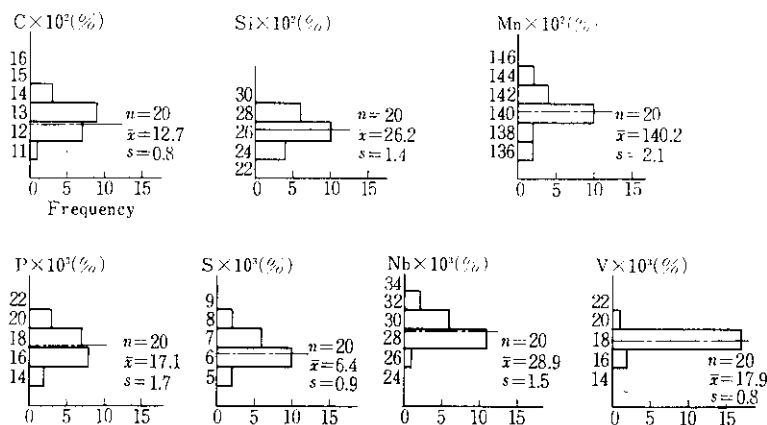


Fig. 5 Chemical compositions (API 5LX X60)

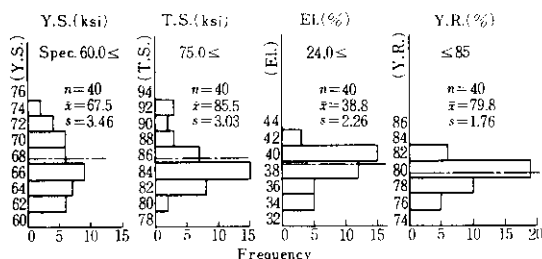


Fig. 6 Tensile test result

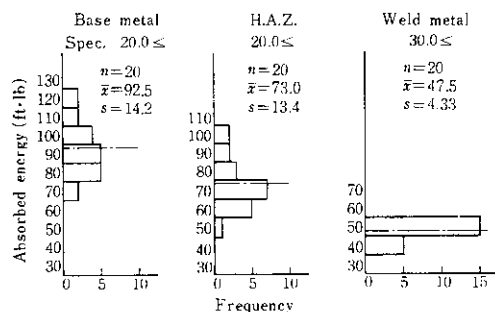
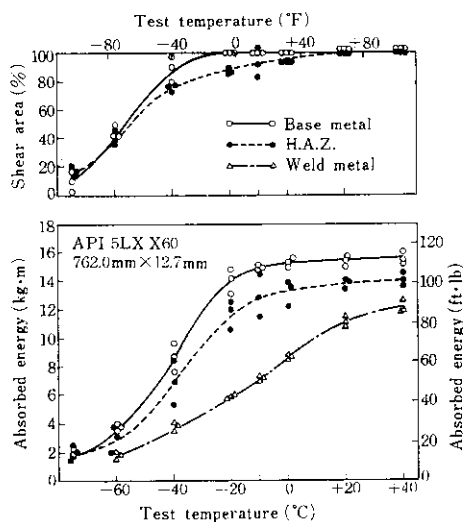
Fig. 7 Results of Charpy impact test (2mm V-notch full size) at -10°C 

Fig. 8 Charpy V-notch transition curves

パイプは、寒冷地用ラインパイプとして製作されたもので、グレードは X60 でパイプ寸法は 30in $\times$ 0.5in $\times$ DRL である。

レドール分析値を Fig. 5 に示す。いずれの成分もよくコントロールされている。引張試験結果を Fig. 6 に示す。いずれも API の規定値を満足している。降伏強さ、引張強さは、バラツキの少

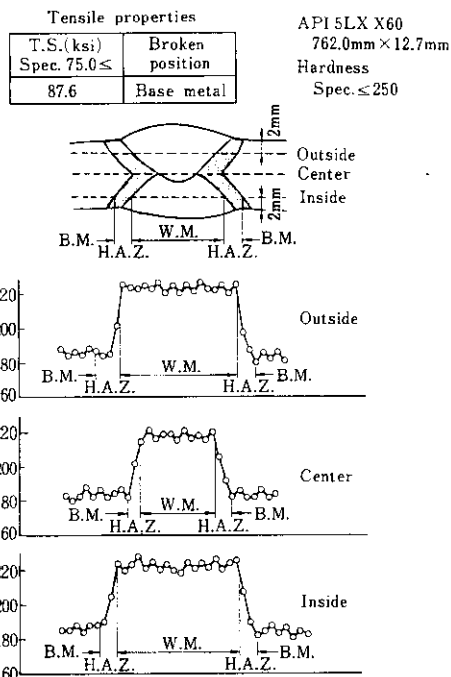
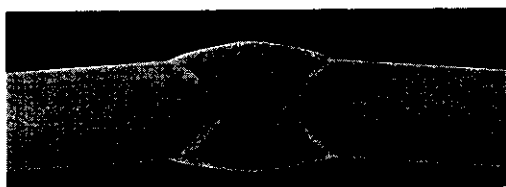


Fig. 9 Tensile properties and hardness distribution of weld

Photo. 5 Transverse section of weld (API 5LX X60 762.0mm $\times$ 12.7mm)

ない値であり、降伏比もよくコントロールされている。伸び値も十分で、良好な延性を持っていることが判る。

シャルピー試験結果を Fig. 7 に示す。母材、H.A.Z., 溶着金属ともに良好な値で、すぐれた低温靱性を有している。Fig. 8 に遷移温度曲線の一例を示す。

溶接継手の強度および硬度分布を Fig. 9 に示す。強度は十分であり、溶接による硬化も少ない。シャルピー試験の結果と合せて、すぐれた溶接継手性能を有している。溶接継手写真を Photo. 5 に示す。

外径および内径の測定結果を Fig. 10 に示す。また管厚の測定結果を Fig. 11 に示し、真円度を

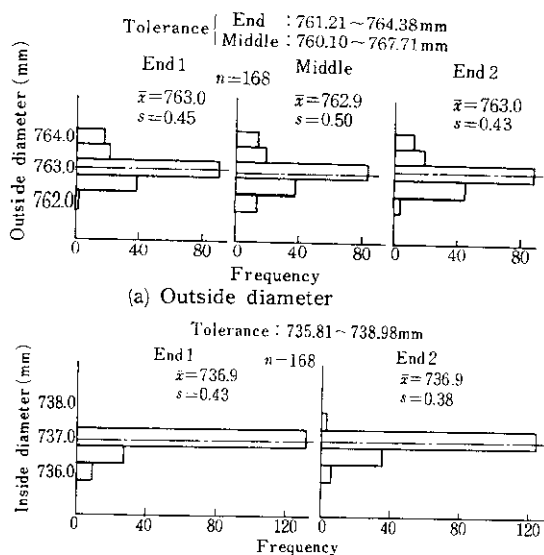


Fig. 10 Outside diameter and inside diameter
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

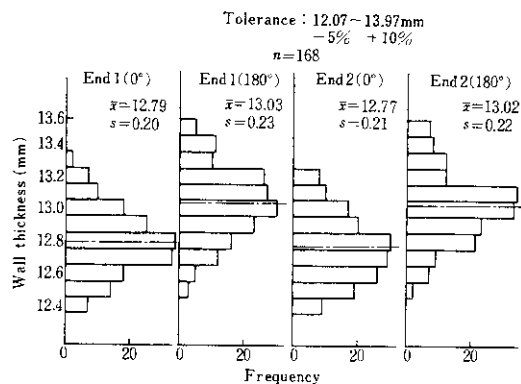


Fig. 11 Wall thickness
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

ODmax. - ODmin. ≤ 1.5% × OD
Tolerance : 11.4mm max.

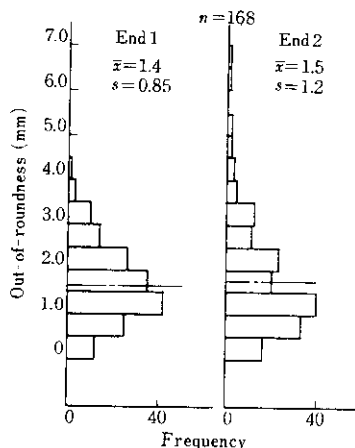


Fig. 12 Out-of-roundness
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

Fig. 12 に示す。いずれも API の規定値を満足するのはもちろんのこと、バラツキの少ない良好な値を示している。真直度を Fig. 13 に示す。

ベベル角度の測定値を Fig. 14 に示す。またルートフェイスの測定値を Fig. 15 に示す。いずれも API の規定値を満足している。

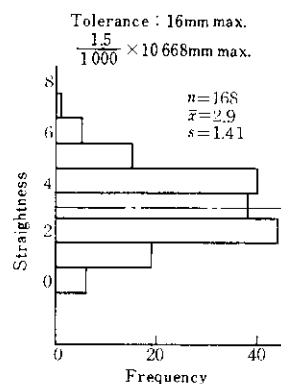


Fig. 13 Straightness
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

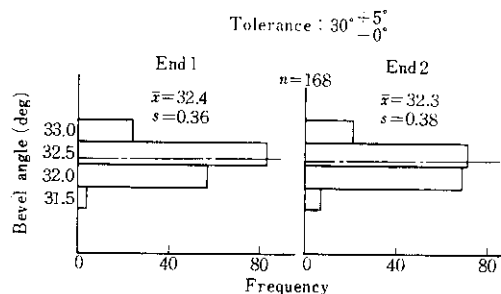


Fig. 14 Bevel angle
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

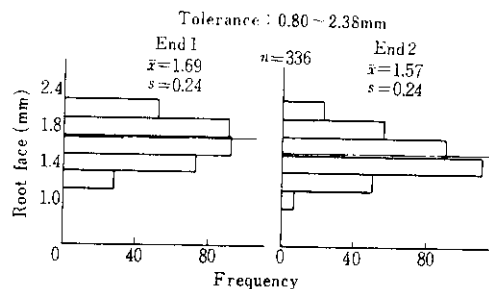


Fig. 15 Root face
(API 5LX X60 762.0mm × 12.7mm)

5. 結 言

高張力ラインパイプに要求される特性について述べるとともに、当社の UOE 方式によるラインパイプについて、その素材となる厚鋼板の製造状況、パイプの品質について概説した。UOE ミル稼動後いまだ日が浅いにもかかわらず、すぐれたラインパイプが製造されている。これは、十分に

検討された新鋭設備に負うところが大きいのは当然であるが、今まで培われてきた製鋼技術、厚板製造技術、溶接技術に負うところが実に大きい。今後、カナダ、アラスカ、北海などの寒冷地で、大量に使用されると思われる高級ラインパイプの製造に当っては、さらに厳しい品質と高度の技術が要求されるであろう。そうした要求に応えるべく、技術研究所、工場一体となってたえず努力が続けられている。

参 考 文 献

- 1) 歌橋, 山本: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 4, 140

