
中径ハイテストラインパイプの製造について

Progress on the Medium Diameter ERW High-Test Line Pipe

松尾 登(Noboru Matsuo) 上杉 斉(Hitoshi Uesugi) 柴田 富士雄(Fujio Shibata)

要旨：

中径電縫管の品質向上を反映して、石油・天然ガスパイプラインにおいては、X60（降伏強さ 42.2kg/mm²）などの高張力電縫ラインパイプが使用されるすう勢にある。高張力電縫ラインパイプの品質向上に寄与している要因は、(1)脱硫，脱ガス技術の発達により，清浄度の高い電縫管に適した鋼材が使用できること，(2)熱延時の制御圧延技術の発達により，強度，溶接性，靱性にすぐれた帯鋼が得られること，(3)造管技術，品質管理技術の発達，(4)電縫部超音波深傷検査の信頼性向上による品質保証体制の整備，などが挙げられる。当社は，将来の需要にそなえ，X65 の試作を行い，低温衝撃特生のすぐれた X65 級までの高張力鋼管の製造に目途をつけた。

Synopsis：

A noticeable trend in recent years reflecting the improving quality of medium ERW pipe is a use of high-test ERW line pipe covering X60 (with yield strength 42.2kg/mm²) in the oil and natural gas pipeline application. Factors contributing to the quality improvement of high-test ERW line pipe are: 1) Development of desulfurizing and degassing techniques in steel-making leading to the production of clean steels suitable for ERW pipe 2) Improvement on controlled rolling leading to the production of strip steels higher in strength, weldability and toughness 3) Development of pipe making technique and quality control, and improved reliability of ultrasonic flaw test leading to an advanced quality assurance system In preparation for a rising demand in the future, the company, through test manufacturing of X65, has established a workable system for the manufacture of high-test pipe covering up to X65 having superior impact property at low temperatures.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

中径ハイテストラインパイプの製造について

Progress on the Medium Diameter ERW High-Test Line Pipe

松 尾 登*

Noboru Matsuo

上 杉 齊**

Hitoshi Uesugi

柴 田 富士雄***

Fujio Shibata

Synopsis:

A noticeable trend in recent years reflecting the improving quality of medium ERW pipe is a use of high-test ERW line pipe covering X60 (with yield strength 42.2 kg/mm²) in the oil and natural gas pipeline application.

Factors contributing to the quality improvement of high-test ERW line pipe are:

- 1) Development of desulfurizing and degassing techniques in steel-making leading to the production of clean steels suitable for ERW pipe
- 2) Improvement on controlled rolling leading to the production of strip steels higher in strength, weldability and toughness
- 3) Development of pipe making technique and quality control, and improved reliability of ultrasonic flaw test leading to an advanced quality assurance system

In preparation for a rising demand in the future, the company, through test manufacturing of X65, has established a workable system for the manufacture of high-test pipe covering up to X65 having superior impact property at low temperatures.

1. はじめに

石油、天然ガスなどの流体燃料を、中、長距離輸送する手段として、経済性、安全性、安定性などで優位性が立証されているパイプラインに頼る比率は高くなる方向にある。また石油、天然ガスの産出量の増大に呼応して、パイプラインの新規建設、増強はますます盛んになるよう勢にある。

当社は、ラインパイプ（石油、天然ガス輸送パ

イプライン用鋼管）の旺盛な需要に応じるため、今春より千葉製鉄所において、最大外径 64in (1625.6mm) の高張力大径ラインパイプを製造できる世界最大の新鋭UO造管設備を稼働させ、高張力ラインパイプの製造可能範囲、量などの面において飛躍したが、外径 6 $\frac{1}{2}$ ~20in (168.3~508.0 mm) の、いわゆる中径ラインパイプは、主として10年の製造実績をもつ当社知多工場中径電縫管設備によって製造している。

パイプラインにおいては、輸送コストの低減と

* 知多工場管理部副部長兼管理課長

*** 知多工場管理部管理課課長

** 知多工場造管部第一鋼管課課長

いう経済性の追求から、高張力鋼管を用いて肉厚を薄くする方向にあるが、近年の電縫管の品質向上を反映して、3年前にはほとんど実績のなかった電縫管X60も、最近ではめずらしくなくなっている。パイプラインの長距離化、高緯度地帯など自然条件の厳しい地域に敷設される比率の増加、高圧操業による輸送効率の確保を保证するための信頼性向上の要求などから、電縫ラインパイプに対しても、切欠き靱性、現地での管溶接性などにすぐれていることが要求される場合が増加している。こうした品質の高級化に対して、当社の電縫ラインパイプがどのようにして品質を向上させ、かつ保証することによって需要家に応えてきたか、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、品質実績例などの面から紹介し、さらに将来の受注に備えて試作したX65の機械的性質の一端を報告する。

2. API 規格、需要家の補足規格

石油類パイプライン向ラインパイプの商取引には、アメリカ石油協会 (American Petroleum Institute) のAPI規格 5LX ハイテストラインパイプがもっともよく使用されている。ここではAPI 5LXの主な規定のうち、外径 20in (508.0

mm) 以下の中径電縫ラインパイプに適用される内容を紹介し、用途、敷設地域、使用条件によって補足的につけ加えられる需要家規格の特記事項にもふれることにより、電縫ラインパイプに要求される品質がどのようなものであるかを検討する。

2.1 化学成分

API 5LX ではグレードごとに主要化学成分を表1のように規定している。X52以下のグレードではC-Mn鋼、X56以上では溶接性を考慮して微量添加で析出硬化および結晶粒微細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を基本にしている。

Nb, Vなどの析出硬化元素を添加した成分系の材料は、後述の制御圧延による結晶粒微細化により強度上昇も図れるので、X60, X65でも低炭素化が可能になり、靱性を大幅に向上させることが可能になっている。また電縫管では後述するようにアプセット部のフッククラック、介在物などが溶接欠陥となるので、P, SおよびOなどの不純物元素をできるだけ低くして鋼の清浄度を高くする必要がある。

2.2 引張特性

パイプラインはラインパイプの円周方向の降伏

表1 API 5LX 化学成分 (1973年版)¹⁾

グレード	化 学 成 分 (レドール分析 %)							試験頻度 報 告
	C ²⁾	Mn ²⁾	P	S	Nb	V	Ti	
X42	0.28以下	1.25以下	0.04以下	0.05以下	—	—	—	1 溶鋼に1回 : 購入者の要求あるときは報告
X46 X52	0.30以下	1.35以下	0.04以下	0.05以下	—	—	—	
X56 ³⁾ X60 ³⁾	0.26以下	1.35以下	0.04以下	0.05以下	0.005 ⁴⁾ 以上	0.02 ⁴⁾ 以上	0.03 ⁴⁾ 以上	
X65 ³⁾	0.26以下	1.40以下	0.04以下	0.05以下	0.005 ³⁾ 以上	0.02 ³⁾ 以上	—	
X70 ³⁾	0.23以下	1.60以下	0.04以下	0.05以下	—	—	—	

1) 溶接鋼管で冷間拡管を行わぬものに対する規格値を示す。

2) C上限を0.01%減少させるごとに、Mn上限を0.05%ずつ増加させてよい。ただし、X65以下ではMn上限は1.45%、X70についてはMnの上限は規定なし。

3) X56以上では製造者と購入者間の合意があれば、ほかの成分系でも良い。

4) Nb, V, Tiを単独に、あるいはいずれかを組合せても良い。

5) Nb, Vのいずれか、あるいは両者の組合せても良い。

表 2 API 5 L X 引張特性 (1973年版)

グレード	母材部引張試験 ³⁾					溶接部 ⁴⁾ 引張試験	試験頻度
	降伏強さ		引張強さ		伸び (GL=2in)	引張強さ	
	(psi)	(kg/mm ²)	(psi)	(kg/mm ²)	(%)	(psi)	
X42	42 000以上	29.5以上	60 000以上	42.2以上	$d = 625 000 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}}$ 以上 e ; 伸び (GL=2in) A ; 断面積 U ; 規定引張強さ	60 000以上	外径 14~20in : 管 100 本または その端数ごとに 1 回 外径 6 $\frac{5}{8}$ ~12 $\frac{3}{4}$ in : 管 200 本または その端数ごとに 1 回
X46	46 000以上	32.3以上	63 000以上	44.3以上		63 000以上	
X52	52 000以上	36.6以上	66 000以上 ¹⁾ 72 000以上 ²⁾	46.4以上 ¹⁾ 50.6以上 ²⁾		66 000以上 ¹⁾ 72 000以上 ²⁾	
X56	56 000以上	39.2以上	71 000以上 ¹⁾ 75 000以上 ²⁾	49.9以上 ¹⁾ 52.7以上 ²⁾		71 000以上 ¹⁾ 75 000以上 ²⁾	
X60	60 000以上	42.2以上	75 000以上 ¹⁾²⁾	52.7以上 ¹⁾²⁾		75 000以上 ¹⁾²⁾	
X65	65 000以上	45.7以上	77 000以上 ¹⁾ 80 000以上 ²⁾	54.1以上 ¹⁾ 56.2以上 ²⁾		77 000以上 80 000以上	
X70	70 000以上	49.2以上	82 000以上	57.6以上			

1) 外径 18in 以下で、全板厚および外径 20in 以上で板厚 0.375in 越えの管に適用。

2) 外径 20in 以上で、板厚 0.375 未満の管に適用。

3) 溶接鋼管の外径 8 $\frac{1}{2}$ in 以上では管軸に対し直角方向に 6 $\frac{5}{8}$ in 以下では管軸に平行に試験片をとる。

4) 溶接鋼管で外径 8 $\frac{1}{2}$ in 以上で実施。

強さを基準に設計、使用される。API 5 L X の強度規定を表 2 に示す。ラインパイプの薄肉化を図るため高張力化が進んでいるが、電縫管の場合、実用化されているのは X60 クラスまでであり、X65 以上は試作段階である。ラインパイプの降伏強さの評価は、短管をへん平化後得た API 板状引張試験片を ASTM A370 の規定に従って引張り、ゲージ長さ 2in (50.8mm) の伸びが 0.5% に達したときの引張応力をもって行すが、これはラインパイプが内圧により円周方向に 0.5% の円周伸びを生じるときの降伏応力に対応するものと考えられている。

素材コイルでの降伏応力にくらべ、鋼管から採った板状引張試験片より得た降伏強さは、図 1 に

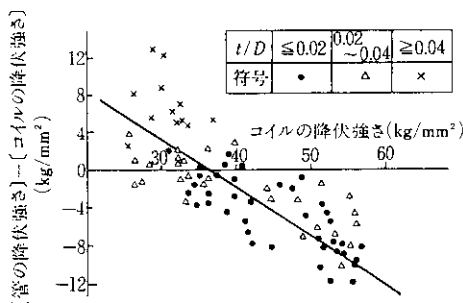


図 1 製管後の降伏強度の変動

示すように鋼管の t/D (t ; 呼称肉厚, D ; 呼称外径) が 2% 以下で、コイルの降伏強度が高くなるにつれて低くなる傾向にある。この理由は、造管過程ならびに鋼管から板状引張試験片を加工する過程での歪履歴により生ずるバウシinger 効果の影響によるものと考えられる¹⁾²⁾。この現象の定量的把握、および影響をできるだけなくする造管条件の設定などが重要な課題である。引張強さ、伸びはパイプに異常応力がかかった場合の安全性を保証する特性値と考えられている。

2.3 切欠き靱性

鋼材が切欠き欠陥を起点として降伏強さ以下の応力で急激に破壊する現象は、破断面が脆性破面を呈することから脆性破壊といわれ、使用温度が低温になるとくに問題になる。パイプラインは経済性のうえからも、破壊に対する安定性を確保することは重要な命題であり、脆性破壊に対する抵抗性のすぐれている、すなわち切欠き靱性のすぐれたラインパイプが要求される。脆性破壊に対する抵抗性能は、脆性破壊発生に対する抵抗性と、脆性破壊伝ば阻止特性の 2 つに分けられる。原油などの液体輸送の場合は、発生に対する抵抗性を考えれば十分で、ラインパイプの電縫部の靱

表 3 API 5LX 衝撃規定(補足)(1973年版)

試験種類 (方法)	試験温度	試験頻度	判定基準 (延性破面率)			
2 mm V ノッチ シャルピ試験 (ASTM A 370—65) による	0°C または 10°C	1 溶鋼で 1 回 (試験片 3 個)	全溶鋼の平均 50% 以上 ただし 1 回の平均 35% 以上			
DWTT (API RP 5L3) による	0°C または 10°C	1 溶鋼で 1 回 (試験片 2 個)	全溶鋼の 80% 以上で 40% 以上 試験条件は下表による			
			肉厚 温度	X 52, 56, 60	X 65	X 70
			0°C	≤ 0.360in	≤ 0.344in	協 定
			10°C	≤ 0.450in	≤ 0.375in	

(注) 外径 20in 以上で、グレード X52 以上の溶接管母材部について購入注文書で指定ある場合に適用

性が使用条件のもとで良好であることが要求されるが、天然ガスなどの気体輸送の場合には、破壊が伝ばして数 100m にも達した例があることから、発生に対する抵抗性に加えて、母材部の阻止特性、すなわち、使用温度において、シャルピ試験で得られる吸収エネルギーが高く、延性にすぐれていることが必要である^{3, 4)}。切欠き靱性を確認する完全な試験方法は、かならずしも確立されていないが、データも豊富で、試験室で容易に実施できる 2 mm V ノッチシャルピ衝撃試験および実物の破壊進行条件に近いとされている DWTT⁵⁾(Drop Weight Tear Test)(落重試験)が一般的である。

API 5LX の切欠き靱性に関する規定を表 3 に示す。これは補足規定で、適用対象はグレード X52 以上、外径 20in 以上の範囲で、かつ需要家の指定ある場合に適用されるが、高緯度地方で使用される場合、輸送対象が天然ガス、液化天然ガスの場合には、需要家の要求により環境温度、使用温度での 2 mm V ノッチシャルピ衝撃試験による靱性保証の要求が課せられる場合が増えている。

2.4 電縫部の品質検査

電気抵抗溶接は、3.2.1 に示すように突合せ面の熔融溶接であり、品質について特に問題は少ないと考えられるが、パイプライン完工時に行われるフィールド耐圧試験において、時おり電縫部の破裂事故が生じるため、需要家の間では電縫ラインパイプに対する不信感が根強く残っている。現

在 API 5LX では、電縫部全長について、超音波探傷または電磁気探傷のいずれかでの検査を規定している。最近の超音波探傷検査の精度、信頼性は、機器、探傷法の改良、技術の向上、内外面ビード切削技術の向上により、ビードエコーの影響を除けるようになったことなどにより、電縫部の品質保証には最適な方法になっている。そのほかに、電縫部の溶接強度、延性、健全性を検査するために、抜取りでへん平試験、ウェルドダクティリティ試験を、全数について規定降伏応力の 75~90% の応力で水圧試験を実施することが規定されている。

2.5 寸法許容差、外観、形状検査

パイプラインの建設は、現地での管同志の継ぎ溶接によって進められるので、溶接能率を確保し、溶接部品質に問題が生じないようにとくに管端部の外径許容差、真円度ならびにベベル角度、ルートフェースについて表 4 に示すようにかなり厳しい規定がなされている。外観、形状については、加圧下のパイプラインの安全性確保の見地から、切欠きとなるようなシャープな表面欠陥、管継ぎ部品質保証のため 6.35mm 以上のラミネーションなどの割れ、溶接部の食い違いなどは重大欠陥と考えられ、不合格または補修の対象となるが、補修の手段、手順、補修後の検査方法についても規定されている。なお外観、形状に関する主な規定も表 4 にあわせて示す。

表 4 API 5LX 寸法許容差、外観、形状判定基準 (1973年版)

項 目	対 象		適 用 範 囲	規定値・判定基準
寸法許容差	外 径	胴 体 部	外径20in 以上	±1.00%
			外径18in 以下	±0.75%
		管端 101.6mm	外径10¾in 以下	+ ¹ / ₁₆ in, - ¹ / ₆₄ in
			外径12¾~20in	+ ³ / ₃₂ in, - ¹ / ₃₂ in
	真 円 度	管端 101.6mm	外径20in 以上	± 1 %
	肉 厚		外径20in 以上	+19.5%, - 8.0%
外径18in 以下			+15.0%, -12.5%	
重量許容差	単 管 カーロードロット	レギュラーウェイト	+10.0%, - 3.5%	
			-1.75%	
外観、形状	へ こ み		深 さ 長 さ	¼in 以下 ½OD 以下
	溶接部食い違い			0.06in 以下
	ビード高さ	内 面	0.06in 以下	
		内面ビード切削代 肉厚0.301in 以上 肉厚0.151-0.300in		0.05fin 以下 (t:肉厚) 0.015in 以下
	ベベル面ラミネーション		横 方 向	¼in 以下

3. 電縫ラインパイプの製造

API 向高張力ラインパイプに要求される品質のうちとくに重要な点は、(1)電縫部の健全性、強度などの品質特性がAPI規格に対して保証されていること、(2)環境温度が低い場合、液化天然ガスなどのように使用温度が低い場合などでは、それぞれの温度においてすぐれた切欠き靱性を備えていること、の2点に集約される。(1)については、電縫管に適した良質素材が使用できるようになったこと、造管技術、品質管理技術の進歩により品質の安定した電縫部が得られるようになったことに加えて、電縫部超音波探傷検査の精度向上による品質保証体制の充実により、電縫ラインパイプの品質は著しく向上しており、使用者側の信頼を十分獲得している。(2)については、適正な成分系の鋼材を熱延時制御圧延することにより低温切欠き靱性のすぐれた熱延帯鋼（コイル）が製造されるようになり、さらに、造管後、電縫部を焼

きならし処理（シームノルマ）することにより、母材部とほぼ同水準の切欠き靱性が得られるようになっている。

ここでは素材の品質向上、高級化が高張力電縫ラインパイプの品質向上に寄与した点、電縫管の製造についての説明、品質管理状況のうち重要点について紹介する。

3.1 電縫管用ホットコイル

(1) 素材の発達による電縫部の品質向上

電縫部は写真2に示すようにアプセット部ではメタルフローが立上がり、ビード切削後この部分のメタルフローがパイプの表面に露出する。アプセット部にある介在物が露出すると、電縫時の熱応力により割れ（釣針状に見えるのでフッククラックと呼ばれる）となり、電縫部の延性を低下させるので、この部分でへん平試験を行うとへん平不良となる。一般に介在物の多い素材を使用するとへん平試験成績は良くない。電縫ラインパイプの電縫部は通常超音波探傷検査を受けるので、フ

ッククラック、アブセット部に内在する介在物などは、後掲の写真5に示すように欠陥として検出され不合格となる。

超音波探傷で検出される欠陥の大部分が、アブセット部およびその近傍にあるA系の硫化物、けい酸塩などの大型介在物か、アルミナクラスタであり、このような介在物の少ない鋼材が電縫ラインパイプの素材として望ましいものである。最近では、脱硫技術の進歩により、低S鋼の量産が可能になったこと、製鋼、脱ガス、造塊過程での介在物浮上除去、生成防止技術などの進歩により、清浄度の高い鋼材が得られるようになったことなど製鋼技術の発達により、電縫高張力ラインパイプに適した素材が使用できるようになっている。低S化の電縫部の品質に対する効果例を図2に示す。

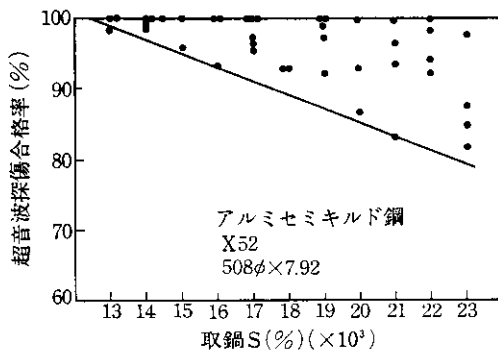


図2 取鍋S(%)と電縫部超音波探傷合格率

今後、高張力ラインパイプに連铸材の使用される比率は高くなると思われる。ラインパイプ素材は同一寸法ロットが比較的大きいので連铸向きであり、鋼塊材にくらべ品質が均一であることから、近い将来X60も連铸材で製造されることが考えられる。

(2) 切欠き靱性の向上

比較的C量の低いC-Mn鋼に、Nb, Vなどの析出硬化型元素を微量添加した程度の成分系の材料を熱延時A₃変態点付近で仕上げ、かつ最終に近い圧下量と圧延温度を厳密にコントロールし、圧延後の冷却速度をコントロールする制御圧延技術⁶⁾の飛躍的な発達により、微細なフェライト結晶粒度が得られることから、強度、溶接性が良好

で、切欠き靱性にすぐれた高張力ラインパイプ用素材が得られるようになっている。

3.2 中径ラインパイプの製造、品質管理

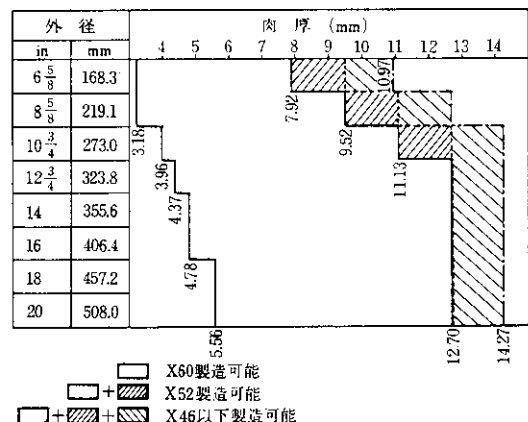
当社の中径ラインパイプ製造主要設備諸元を表5に、造管過程のうちの高周波抵抗溶接状況を写真1に示す。本造管機での製造可能範囲を表6に、製造工程、各工程での品質管理項目、管理手順、手段などを表7に示す。

電縫ラインパイプの造管は、成形、電気抵抗溶接、シームアニール、定形の4工程に分けられるが、品質はこの各工程で適正な設定条件に従って製造されてはじめて確保されるので、造管過程における主要管理項目の品質におよぼ影響を述べ、品質水準確認のための試験、検査を含む品質管理状況、超音波探傷を中心とする品質保証体制について以下に紹介する。

表5 主要設備諸元

フォーミング (成形)	ブレイクダウン: 4スタンド フィンパス: 3スタンド
溶接機	高周波抵抗溶接 280kW, 450kHz
シームアニール	高周波誘導加熱 350kV x 2 960Hz
サイジング (定形)	4スタンド
整精設備	切断機 x 4, 矯正機 x 1, 面取機 x 4, 塗油機 x 1
検査設備	へん平試験機, 水圧試験機, 超音波 探傷機, 自動秤量機
生産量	20 000 t/月

表6 中径電縫ハイトストラインパイプ製造可能範囲



(注) X65についてはそのつど検討

表 7 中径電縫ラインパイプ製造工程および品質管理状況

	製造工程	説明	管理項目	管理方法、手段	管理手順
1	コイル装入準備		造管命令書	コイル表示内容と命令書との対応	コイル表示のグレード、寸法、コイル番号が造管命令書と一致するか
2	アンコイルリング	コイルの捲き戻し	コイル寸法	マイクロメータ、ノギス	コイル厚、幅のチェック
3	レベリング		平坦度	目視	必要があれば調整
4	コイル端切断	コイル外巻端部切断	二枚板の有無チェック	目視	二枚板あればなくなるまで切断
5	サイドトリミング	両縁部切断し一定幅にする	幅 切断面および形状	実測 目視	トリマーセットは幅変えごとに行い、不良の場合はクリアランス、ギャップの再調整、刃欠けなどの場合取替え
6	フォーミング（成形）	成形ロール内で連続的に幅方向に曲げてオープンパイプとする	ブレイクダウン、フィンパス出側の周長	鋼製巻尺による実測	各段階での周長が設定どおりであることを確認
7	溶接	高周波電流の抵抗熱による溶融溶接とスライズロールによる溶融スラグの排出	入熱量 アブセット部メタルフロー立上り角度 外周長	メーター、溶融部の色調 目視 マイクロエッチテスト 鋼製巻尺およびキャリパで実測	初期設定時、電流、溶接速度ビード切削装置の調整を行い、切出しサンプルのメタルフロー立上り角度をチェックして溶接条件を定める
8	内外面ビードの切削		ビード高さ	目視	
9	シーム部熱処理	シーム部を高周波誘導加熱により焼ならしまたは焼なまし処理する	加熱温度 電縫部への確実な実施	自動制御	グレード、肉厚で加熱温度設定 温度はチャートに記録
10	クーリング	電縫部空冷			
11	サイジング（定形）	若干の絞り加工により外周長、真円度の精度向上	外径（外周長） 真円度 外表面	鋼製巻尺およびキャリパで実測 目視	測定結果不良の場合調整
12	フライングカットオフ	所定長に切断	管長 内面ビードチェック	自動測長機 目視、触覚	作業前設定
13	曲りとり	ローラー式曲りとり機で真直度向上	真直度	目視、必要ある場合実測	管寸法変えごとにロール間隔設定、設定変え後の最初の1本につき実測
14	管端切断	管理部よりへん平試験用リング切断			
15	へん平試験	電縫部を3時または12時の位置に置き平板でへん平化する	へん平試験結果	へん平試験機 規定へん平高さ	溶接割れあるいはフッククラックが発生した高さを規格値と比較、高さは記録、試験片を偏平化後、破面チェック
16	水圧試験	水圧試験で強度、もれの有無チェック	水圧力 水圧時間 ハンマリング もれの有無	目視 圧力計	規定試験圧、時間
17	管切断		管長	目視	ストッププレートの設定
18	ベベル加工、ルートフェース仕上げ	管端仕上げ加工	管端直角度 ベベル角度 ルートフェース	ゲージ	
19	電縫部超音波探傷	電縫部全長を超音波探傷によって検査	感度設定、電縫部の所定位置へのセット内面ビード不良部分へのマーキング	標準試験片	感度設定は各シフト初めに実施、不良部分にマーキング
20	寸法検査	外径、肉厚、長さ、端面の検査	外径、真円度 肉厚 管長 真直度、管端直角度、ベベル角度、ルートフェース 秤量	キャリパ、鋼製巻尺、リミットゲージ、リングゲージ、マイクロゲージ、リミットゲージ 実測、目視、実測 秤量機	API 5LX、の許容限界、範囲により判定
21	外観、形状検査		表面状況	目視	判定基準は API 5LX
22	機械試験 チェック分析		材料試験	試験機	API 5LX、需要家規格
23	塗油 マーキング	所定のマーキングを行う	マーキング内容と位置	目視	
24	出荷				

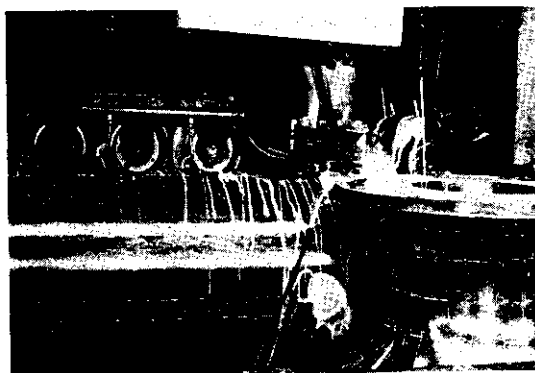


写真1 電気抵抗溶接機
(X65 508.0mmφ×9.52mm 溶接中)

3・2・1 造管技術、品質管理と電縫部の品質

(1) 成形

電縫管の成形は、両縁部を剪断し一定幅にしたスケルプ(鋼帯)を成形スタンド内で連続的に図3に示すように幅方向に曲げながら、若干の絞りを与えてオープンパイプにして溶接場所へ送り出す過程をいう。成形では溶接場所で安定した良好な突合わせが行えるよう溶接面の開先形状、周長を調整する。一般に t/D の小さな薄肉管の成形時には、溶接面になるスケルプ縁部の形状を安定させるために絞り量を大きくするが、前述した高張力ラインパイプで問題になるバウシング効果は、造管時の絞り量依存性があるので、 t/D が2%以下の場合にはスケルプ幅をさらに若干広くしている。

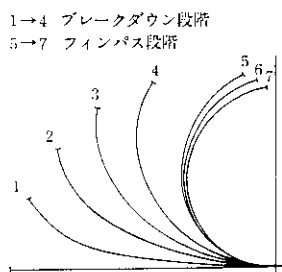


図3 フォーミングフラワの一例

(2) 電気抵抗溶接

高周波抵抗溶接法は、図4、写真1に示すように、オープンパイプ両縁部に置いた給電接触子間に450 kHzの高周波電流を流すと、高周波電流

の特性である近接効果(電流通路ができるだけ接近するように流れる特性)と、表皮効果(電流が導体の表面の薄い層に集中して深部を流れない特性)により接合部に電流が集中するため、接合部表面層は抵抗熱により急速に加熱され、接合点では溶融点に達する。溶融部分は、接合点の直後でスクイズロールにより加圧されるので、その大部分はスラグとして溶接面から絞り出されて内外面ビードとなるが、両縁溶融部は一体となり溶接が完了する。APIラインパイプの電縫部は、超音波探傷により検査されるので、溶接直後内外面のビードを切削除去している。

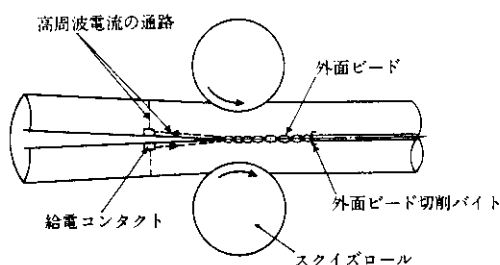


図4 高周波電気抵抗溶接のメカニズム

電縫部の品質を左右する条件としては、入熱量 $E_p \times I_p$ (E_p : 高周波発振器1次側プレート電圧, I_p : 同電流), アプセット量(スクイズロール前後の外周長の差)があげられるが、本造管機では入熱量、アプセット部メタルフロー立上り角度、外周長、ビード高さを管理項目としている。各管理項目について適正な条件が設定されているか否かは、造管を開始した直後に電縫部の小片を切出し、研磨・腐蝕を行って確認している。溶接のままの電縫部顕微鏡組織例を写真2に示すが、まず、突き合わせ面が直線状になっているか否かで突き合わせ条件の適否を確認する。次に入熱量が適当であるかをつづみ型の熱影響幅よりチェックし、溶接条件の適否の確認を行う。さらに、主として電縫部の健全性、延性を左右するアプセット量が適正であるか否かを、アプセット部メタルフロー立上がり角度が、標準内にあるかどうかでチェックしている。メタルフロー立上り角度が、立上り過ぎている場合はアプセット量過大であり、フッククラックが多くなり、メタルフローの露出

面積が広くなるため延性が低下し、へん平試験成績が悪くなる。小さ過ぎる場合は、アブセット不足で溶接面に溶接時生成された二次酸化物が排出されきれずに残るため強度不足となる。したがってメタルフロー角度の管理はとくに重要である。

(3) シームアニール

API 規格では、電縫ラインパイプの電縫部を 538°C (1000°F) 以上の温度で熱処理するか、あるいは急冷マルテンサイトが残らぬよう製造することが規定されている。当電縫管ラインでは造管機直後に、シームアニールと呼ばれる電縫部を焼きならし、または焼きなまし処理する高周波誘導加熱装置を備えている。焼きなましあるいは焼きならし処理することにより、電縫部の組織の改善、軟化がはかれるので、電縫部の延性、切欠き靱性は向上する。シームアニールでの管理項目は加熱温度を調整すること、電縫部に確実に熱処

理が実施されていることを確認することである。

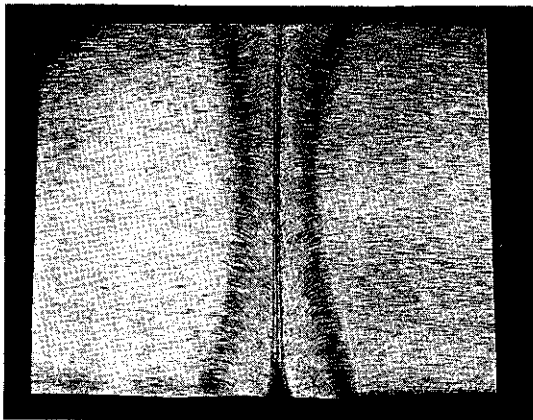
(4) 電縫部の組織、品質

電縫部接合面は、急熱により溶融点まで加熱され、溶接後は急速に冷却されるので、その顕微鏡組織は写真 2 に示すように接合面を中心にしたボンド部（白く見える部分）と、それに隣接したつづみ型の熱影響部をもつ高周波抵抗溶接特有の組織を呈している。写真 2 に溶接の ままの シーム部、熱影響部の顕微鏡組織を示すが、いずれも結晶粒度が粗く、急熱急冷組織である。シーム部はパーライトが少なく、溶融時に脱炭していることがわかる。

高張力ラインパイプで、シームアニールにより焼きならし処理を受けた場合の顕微鏡組織を写真 3 に示す。拡大組織では焼きならし処理によりつづみ型の熱影響部と母材部との境界面が不明瞭となり、こん跡を残す程度になっている。その組織を見ると、シーム部、熱影響部では、C の拡散、再結晶により微細な結晶粒度をもつフェライト-パーライト組織に改善されていることがわかる。

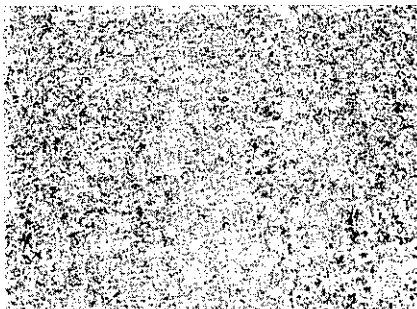
電縫部焼きならし前後の硬度分布を図 5 に示すが、焼きならし後は母材と同水準にまで軟化している。写真 3 では内面側で溶接時のつづみ型のこん跡が残っているが、硬度分布では肉厚中央部より内面側の硬度が低く、内面側組織は写真 4 に示すように、肉厚中央部よりむしろ細粒化されているので、焼きならし効果は十分であると判定される。

電縫部の切り欠き靱性は、前述したように切り



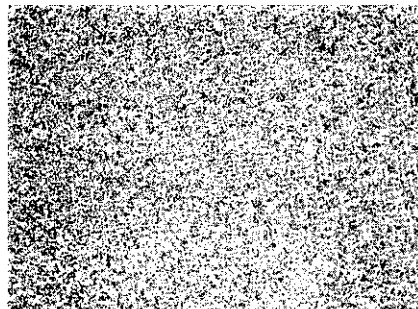
電縫部拡大組織

— 1 mm



シーム部

0.1mm



熱影響部

写真 2 電縫部顕微鏡組織（溶接のまま）（X52 508.0mmφ×12.7mm）

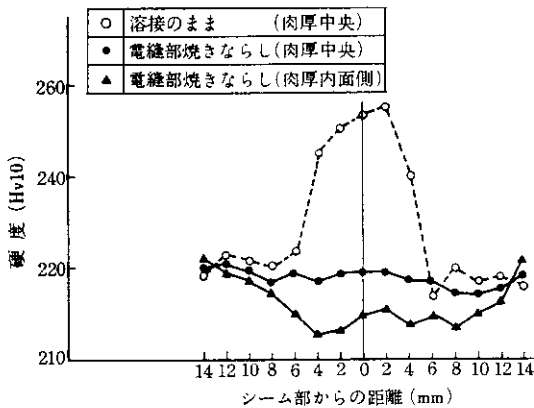


図5 電縫部硬度分布(X52 508.0mmφ×12.7mm)

欠き靱性のすぐれた素材が使用できるようになっていることから、著しく向上している。写真3に組織例を示した鋼管のシーム部、熱影響部、母材部から、図6に示す要領で2mm Vノッチシャルピ

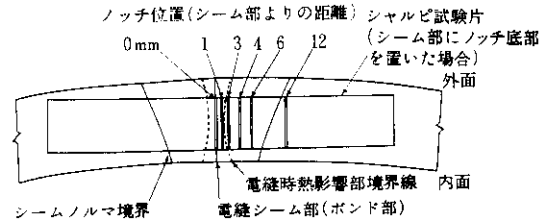
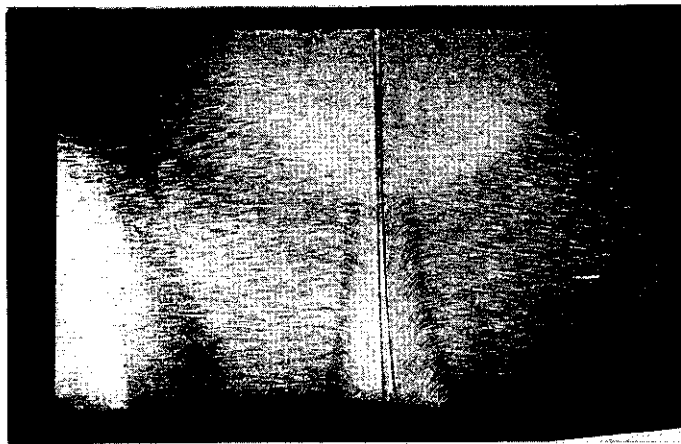
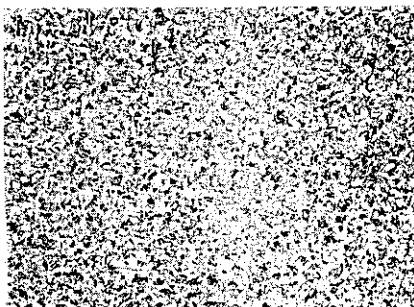


図6 シャルピ試験片のノッチ位置

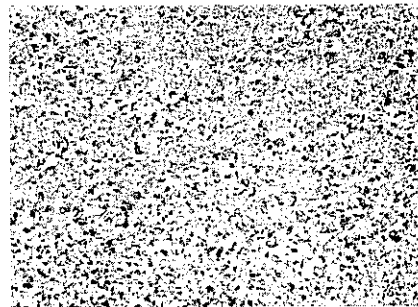
試験片を採取して衝撃試験を行った。その vT_{rs} (破面の延性破面率が50%に達する温度), vE_0 (0°C における平均吸収エネルギー)を図7に示す。シーム部およびシーム部から2mm未満のメタルフロー立上がり角度の大きい部分の vT_{rs} , vE_0 が母材部より劣っているが、それ以外の焼きならしを受けた部分は、母材部より切り欠き靱性にすぐれている。シーム部およびその近傍が母材部より切り欠き靱性が劣るのは、メタルフローの立上



電縫部拡大組織



シーム部



熱影響部

写真3 電縫部顕微鏡組織(電縫部焼きならし後)(X52 508.0mmφ×12.7mm)

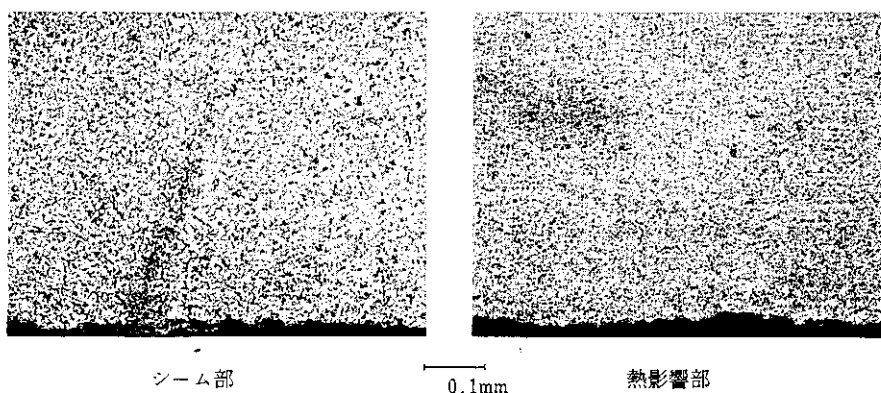


写真 4 電縫部内面部顕微鏡組織（電縫部焼きならし後）（X52 508.0mmφ×12.7mm）

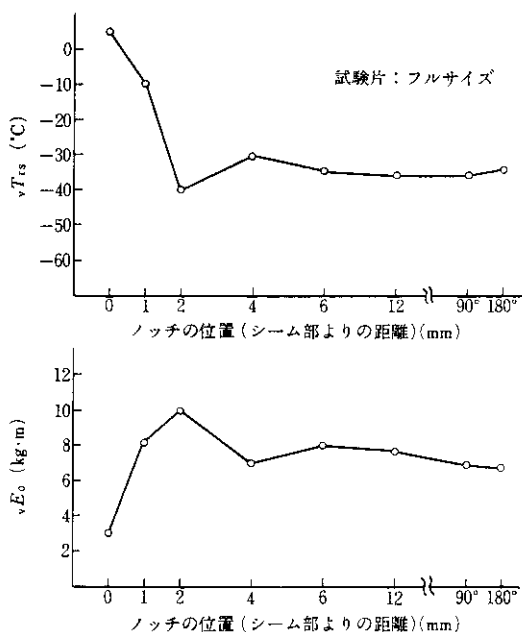


図 7 溶接部、母材部衝撃特性
（X52 508.0mmφ×12.7mm）

がりによると考えられている⁶⁾。

(5) 定形

シームアニーラにより熱処理を受けた電縫管は、長さ30mのクーリングセクションで冷却後、定形スタンドで絞り加工を加えられ、所定の外径、真円度に調整されて切断場所へ送られる。

(6) 切断から端面加工工程まで

切断、曲りと、端面仕上げなどの各工程において、所定の寸法、形状に加工するが、電縫部の強度、延性を検査するへん平試験、ウェルドダクティリティ試験を曲りと工程のあとで行ってい

る。試験はAPI規格で定められている試験のほかに試験回数をふやし、溶接部品質水準を把握し、造管条件が安定しているか否かをチェックしている。試験結果に異常、不良が連続して認められた場合、ただちに、造管工程で再調整などの是正措置がとれるよう管理している。へん平試験のつぎに、全数についてAPI 5LXに従い水圧試験を行って、溶接部の健全性、強度を検査している。超音波探傷検査技術の発達した今日でも、水圧試験、へん平試験は電縫部の品質保証体制の一担をになっている。

3.2.2 電縫部超音波探傷検査

水圧試験後、電縫部全長について超音波探傷検査を実施している。電縫部の欠陥を検出する手段としては、超音波探傷法がもっとも精度がよく、信頼性が高いので、現在、電縫ラインパイプの品質保証体制の中心となっている。ここでは、電縫部超音波探傷法の原理、設備の特徴、検出欠陥などについて紹介する。

(1) 方法、設備

電縫管の探傷に一般に用いられている部分水浸斜角探傷法においては、超音波ビームがジグザグに進行するため検出範囲に死角が生じる。当工場ではこの感度変化を減少させ、検出精度を確保するために1/2スキップ距離の間隔を置いて3個の探触子を配置した同時励振3チャンネル方式を採用している。その原理を図8に示す。本方法による感度誤差は図9に示すように最大2dB程度であり、

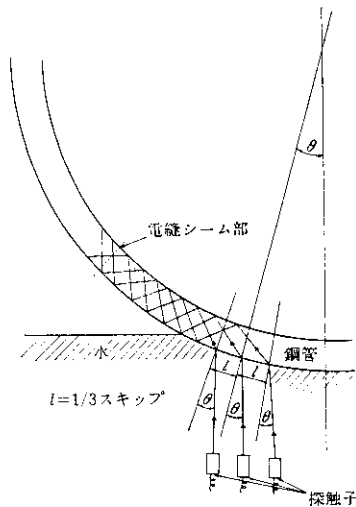


図 8 3 探触子法超音波探傷の原理

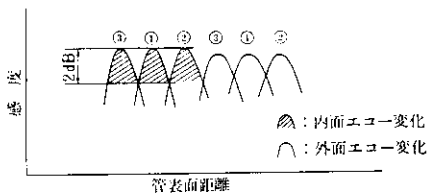


図 9 3 探触子法での管表面距離と感度変化

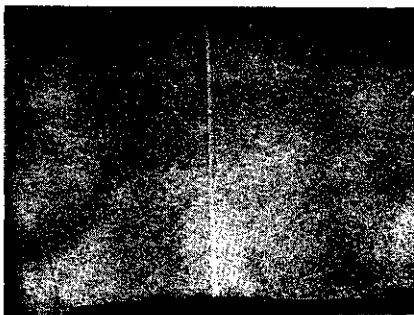
感度設定時一律に感度を 2dB 高くして補正している。正しく電縫部を探傷するため、管ごとに、シームを外径別に決められている位置にオペレータがセットしている。探傷時管内での電縫部のねじれおよびコンベア移送中の電縫部の位置の設定箇所からのずれも探傷精度を低下させる要因となるが、当工場の場合、電縫部の設定位置からのずれは 15mm 以内であり、電縫部の探傷幅を 40mm (設定はシーム線を中心にして片側 20mm) に設

定しているので電縫部を確実に探傷している。

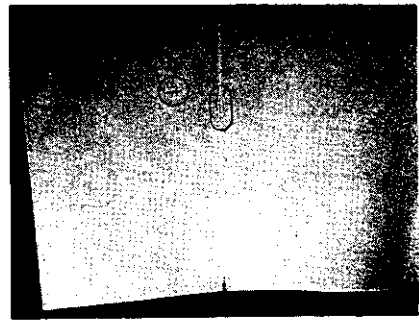
超音波探傷での管理項目は適正探傷感度の設定および保持、正確な探傷が行えるよう電縫部を所定の位置にセットすること、ビード切削面が滑らかになっていること、不良部へのマーキング、チャートへの記録が正しく行われるようにするなどである。内面ビードが高いか、形状が悪いと、溶接部の欠陥エコーと同様の反射エコーが得られ、この分離が不可能なため不合格と判定される。また内面ビード反射エコーは、連続的に発生するなどの特徴があるので、オフラインでビード部の研磨手入れののち再検査を行っている。

(2) 検出欠陥

超音波探傷検査の不合格部分の断面を検鏡して検出した欠陥例を写真 5 に示す。現在の探傷は溶接部の片側から超音波ビームを入射させる方法で、溶接面の両側でアブセット部に存在するフッククラックや非金属介在物、あるいは母材部の非金属介在物を欠陥として検出している。厳しい品質管理体制のもとで製造され、各段階で品質チェックを受けてきた電縫ラインパイプからは、超音波探傷で未溶接あるいはペネトレータ (溶接熱不足、アブセット不足あるいは素材成分系不適などの場合、溶接時の溶融スラグが絞り出し切れず、溶接面に残り溶接強度を低下させる) が検出されることは少なく、電縫部超音波探傷不合格原因のほとんどが小さなフッククラックや非金属介在物で占められている。今後、超音波探傷方法、装置はさらに発展、改良が行われ、より厳しくなる要求に応じて、一層精度をあげ、品質保証体制のかなめの役割を果たしていくものと考えられる。



介在物



介在物およびシームライン上のペネトレータ

写真 5 電縫部超音波探傷不合格部分断面

3・2・3 電縫ラインパイプ製造時の品質管理

表 7 に品質管理の概要を示し、3・2・1において製造各段階での主要管理項目について紹介したので、ここではロットの形成、付加的な品質管理項目について、X60を例に説明する。X60は降伏強さ42.2kg/mm²以上の高張力鋼管であり、電縫管での製造実績も比較的少なく、また需要家規格で付加仕様が規定される場合が多い。

ラインパイプ製造時の品質管理の基本項目は次のとおりである。

(1) 電縫管に適した介在物が少なく、清浄度の高い鋼で、鋼管に要求される機械的性質を満たすことができるよう、製造されたコイルを使用する。

(2) 鋼帯は、出鋼単位、圧延単位にまとめる。

(3) 造管開始時、適正造管条件を断面サンプル検鏡によりチェックし、造管中はへん平試験などでチェックする。

(4) 管端切断時、管番号を出鋼単位、コイル番号、コイル内採取順などの履歴が識別できるよう設定する。

(5) 造管後各管の片端より試験片を採取して電縫部の品質をチェックし、不合格が連続して発生する場合は必要に応じて造管条件の再調整を行う。

(6) 電縫部全長について、超音波探傷検査を行い、不合格部を含む鋼管を不合格とする。ビード切削不良管については、ビード部をグラインダ仕上げ後、また外面の小欠陥についてもグラインダ仕上げ後超音波探傷で再検を行う。

(7) 外観、形状、寸法については、API規格および需要家規格に従って検査する。

(8) 肉厚は12.7mm以下であるので、母材部、溶接部の溶接補修は一切行わない。不良部は切捨てるかあるいは管を不合格とする。

(9) 短い管を溶接して製品に入れることは行わない。

(10) API 5LXでは製品長は下限、平均長が規定されているが、需要家が船のハッチの制限から上限を押えてくる場合が多い。これに対しては原則として上限に近い。一定長さにそろえる。

需要家規格では、コイル製造工程中、あるいは最終検査で母材部の非破壊検査を規定している場合が多い。その主な内容は次のとおりである。

(1) 両端部のトリミング後、コイルエッジのラミネーションチェックを超音波探傷により行う。

(2) ラミネーション、大型介在物をチェックするために母材部の幅方向一定間隔ごとに全長にわたり超音波探傷を行う。この要求には現在応じられないが、電縫管が海底パイプライン、あるいはX65以上の高張力鋼管に進出するすう勢にあるので、いずれは必要になると考えられている。

(3) 最終検査において、管端部付近のラミネーションチェックに管端部全周の超音波探傷検査の実施、ベベル面、管端から一定範囲の内面ビード部について磁気探傷検査の実施、あるいは管全表面についての磁気探傷検査の実施などを要求される場合がある。

こうした検査は、需要家指定の立会検査機関が担当する場合の方が多いようである。

このように、需要家からの品質保証に対する要求は厳しくなるすう勢にあるが、製造者側も、需要家の要求に対処していく必要がある。

4. 品質実績

輸出向原油パイプライン用に製造した電縫管X60の品質実績例を図10、図11、図12に示す。外径が10 $\frac{3}{4}$ in (273.0 mm)と比較的小径であったが、船積の関係で3回に分割して製造した成品のデータを集計したものである。素材は低C-Mn-Nb系でP、Sを低くしたSi-Alキルド鋼を使用した。引張特性、2mmVノッチシャルビ試験の vT_{rs} はいずれもバラツキが小さく、良好な結果を示している。へん平試験も t/D が2.9%と比較的に高かったが、良好な結果を示した。寸法測定実績のうち、管端外径、肉厚を図12に示すが、いずれも製造ロット間の差が小さいことを表わしている。

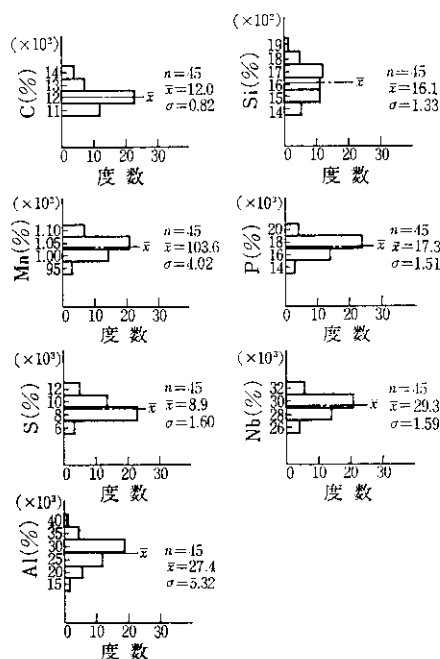


図 10 X60の化学成分(取鍋) (273.0mmφ×9.52mm)

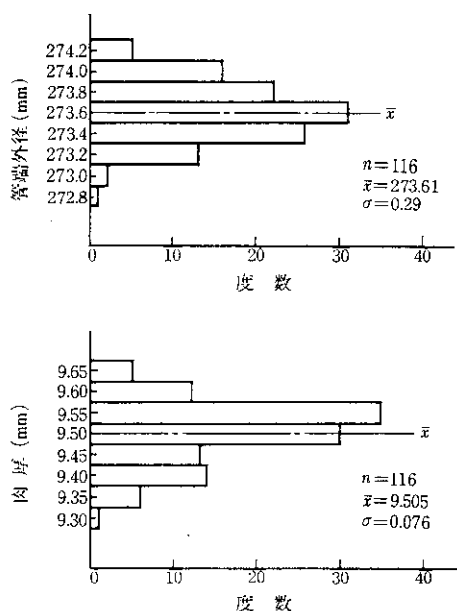


図 12 X60の寸法精度(管端外径, 肉厚) (273.0mmφ×9.52mm)

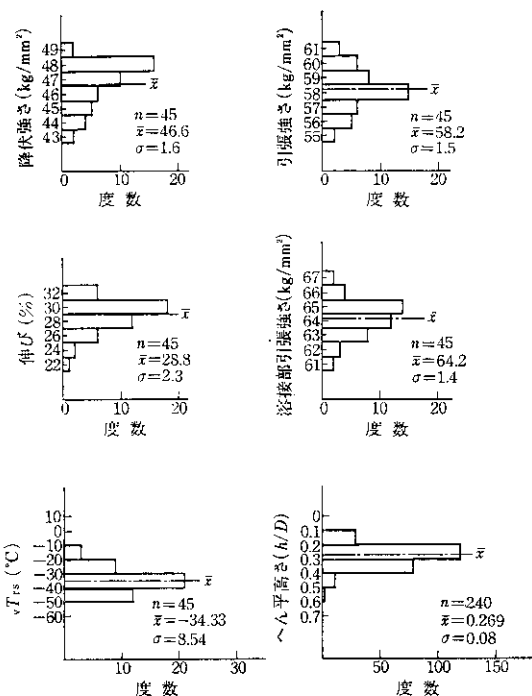


図 11 X60の機械的性質 (273.0mmφ×9.52mm)

5. 試作 X65 の実績

高緯度地域向を想定して、衝撃特性のすぐれた電縫ラインパイプX65を試作した。品質は、UOE鋼管に対する引き合い対象のうち、表8に示す要求を満足させることを目標とした。電縫部の品質を調査するため、バーストテストを含む各種試験を実施したが、ここでは試作ラインパイプの機械的性質に関して報告を行う。

5.1 ホットコイル

スパイラルX65向ホットコイルの製造実績にもとづき、表9に示す化学成分の材料を熱延時コントロールドロリングを実施することにより、微細なフェライト・パーライト組織をもつ強度、靱性にすぐれた素材が得られた。

5.2 機械的性質

(1) 引張特性

引張試験結果を表10に示す。またコイル内巻き、中央、外巻き部から製造した鋼管の引張特性の一例を図13に示すが、変動が小さく、熱延時のコントロールドロリングが安定したものであ

表 8 試作電縫ラインパイプ X65 の品質目標

	I	II
グレード寸法	X65 508.0mmφ×9.52mm	X65 406.4mmφ×11.13mm
用途	天然ガスパイプライン	欧州大陸沿岸海底原油ライン
化学成分	API 5LX とおり	$\begin{array}{l} \text{C} \quad \text{Si} \quad \text{Mn} \quad \text{P} \quad \text{S} \\ \leq 0.15 \quad \leq 0.35 \quad \leq 1.50 \quad \leq 0.025 \quad \leq 0.020 \\ \text{Nb} \quad \text{V} \quad \text{Nb+V} \quad \text{Alsot} \\ \leq 0.080 \quad \leq 0.080 \quad \leq 0.12 \quad 0.055 \\ \text{Ceq} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr}}{10} + \frac{\text{Ni}}{20} + \frac{\text{Cu}}{6} + \frac{\text{Mo}}{50} \\ + \frac{\text{Nb+V}}{10} \leq 0.40 \end{array}$
引張特性	—	降伏比 0.85以下
衝撃特性 2mmVノッチ シャルビ試験 試験片 3/8サイズ	シャルビ試験 0℃延性破面率 平均 50%以上 最小 35%以上	シャルビ vE_0 (kg・m) 平均 最小 母材 5.0 4.2 溶接 3.5 2.8 HAZ 3.5 2.8

表 9 試作電縫ラインパイプ X65 の化学成分 (取鍋) (%)

記号	寸法	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Mo	Alsot
A	508.0φ×9.52	0.09	0.11	1.28	0.008	0.005	0.035	0.044	—	0.032
B	406.4φ×11.13									
C	406.4φ×11.13	0.09	0.16	1.36	0.015	0.004	0.035	—	0.204	0.046

表 10 試作電縫ラインパイプ X65 の強度特性

記号	母材部幅方向引張り				溶接部引張り		水圧試験
	降伏強さ (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	降伏比 (%)	引張強さ (kg/mm ²)	破断点	降伏強さ* (kg/mm ²)
A	48.4	64.7	31.7	75	68.0	母材	55.2
B	48.3	63.9	32.2	71	69.2	母材	54.1
C	51.3	65.8	28.4	74	70.5	母材	56.5

* 6mの管の両端に鏡板を取りつけ管周長が0.5%伸びた際の水圧を求め、API

5LXに規定されている $\sigma_s = \frac{PD}{200t}$ により算出

σ_s : 降伏強さ t : 板厚 (mm) P : 水圧 (kg/mm²) D : 外径 (mm)

たことがうかがえる。

(2) 顕微鏡組織

写真6に記号B (Nb-V添加, 肉厚11.13mm)の顕微鏡組織例を示す。組織は微細なフェライト-パーライト組織になっている。ステッド氏薬エッチの拡大組織は、今回の試作X65の代表的なものである。

(3) 電縫部の硬度分布

図14に電縫部を中心としたビッカース硬度分布例を示す。いずれも電縫部焼きならしが効いていて、電縫部を含む部分が母材部より硬度が低くなっている。

(4) 電縫部の衝撃特性

電縫部と母材部における2mmVノッチシャル

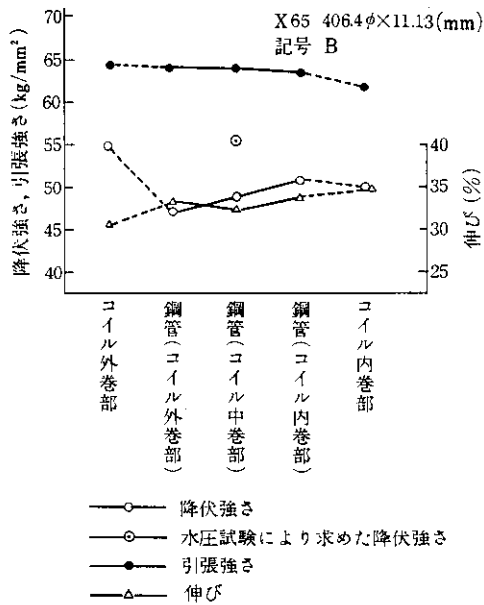


図 13 コイル内での引張特性の変化

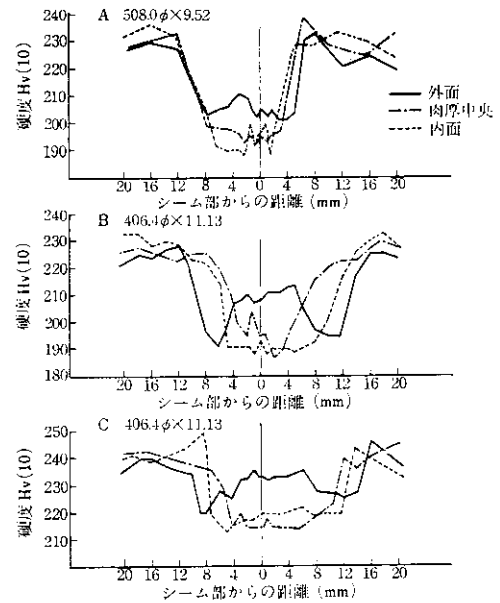
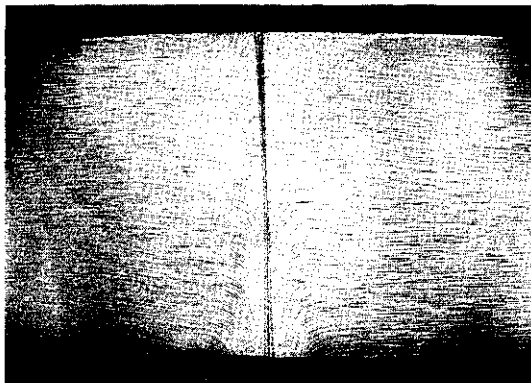


図 14 X65 電縫部硬度分布

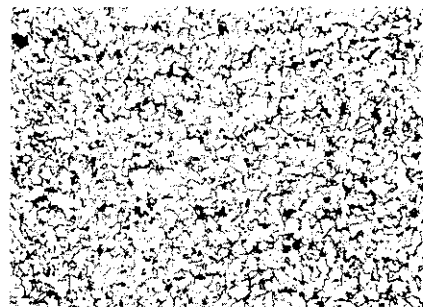
フェライト結晶粒度

熱影響部 (肉厚中央)	12.0
母材部	11.0



電縫部拡大組織

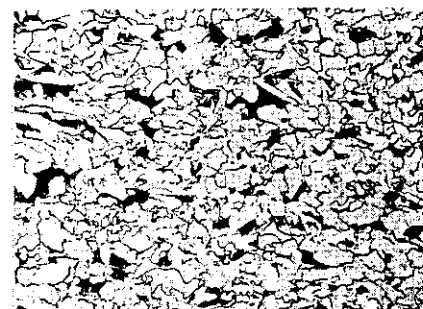
1 mm



熱影響部



シーム部



母材部

0.01mm

写真 6 試作 X65 顕微鏡組織 [X65 406.4mmφ×11.13mm (記号 B)]

ピ試験で得られた vT_{rs} , vE_0 を図 15 に示す。試験片はいずれも $\frac{2}{3}$ サイズであるが、衝撃特性としては、肉厚 9.52mm と薄いものがもっともすぐれている。シーム部、熱影響部、母材部での特性を比較すると、シーム部とメタルフロー立上りのあるシーム中心より 2mm 未満の範囲が、母材部より vT_{rs} で 20~40°C 高いが、 vE_0 はほぼ同水準であり、表 8 に示した目標に対して、記号 C のシーム部の vT_{rs} が満足できなかった以外は、すべて満足している。以上の結果から、天然ガスパイプライン向、寒冷地原油ライン向 X65 が電縫管で製造できることが確認できた。

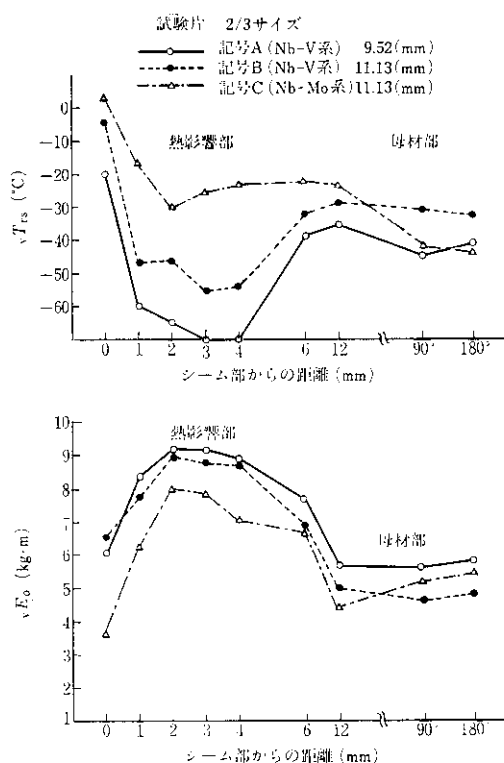


図 15 試作電縫ラインパイプ X65 のシーム部、熱影響部、母材部の 2 mm V ノッチシャルピ試験での vT_{rs} , vE_0

(6) バーストテスト

電縫部の強度が十分であるかどうかを確認のため、内圧破壊試験を実施した。破壊は母材部で発生していて、高 Mn 系の X65 向素材の成形、溶接



写真 7 バーストテストによる破壊状況
(X65 406.4mmφ×11.13mm)

条件が適正であり、溶接部が健全であることが証明された。バースト後の状況の一例を写真 7 に示す。

6. ま と め

電縫ラインパイプの品質の向上は、

- (1) 製鋼、造塊技術の発達により、電縫管向きの清浄度の高い鋼が利用できるようになったこと、
- (2) 熱延での制御圧延技術の発達により、強度、靱性、溶接性にすぐれた鋼帯が供給されるようになったこと、
- (3) 造管技術の進歩、品質管理技術の発達により、電縫管の品質のバラツキが小さくなったこと、
- (4) 超音波探傷検査の信頼性が増し、品質保証体制が一応確立したこと、

などに帰することができる。現在、X60 へ進出しているが、昨年冬のいわゆるオイルショックを契機として、世界各地での油田、ガス田の開発の活発化と、それに呼応したラインパイプの需要の増大予測からすると、電縫管が X60、X65 などの本格的な高張力鋼管の分野へ、ますます進出できる情勢にあると判断される。当社は昨年切欠き靱性にすぐれた電縫ラインパイプの試作を実施したが、ほぼ目標とした品質水準を達成でき、X65 の製造にも目途をつけることができた。

今後とも、需要家の要求にこたえられるよう、不断の努力を続ける所存である。

参考文献

- 1) 中島ほか：製鉄研究，(1973) 277, 95, 96
- 2) 長谷部ほか：住友金属，23 (1971) 3, 18~26
- 3) 石崎ほか：製鉄研究，(1973) 277, 1
- 4) 長谷部ほか：配管と装置，(1973) 12, 4
- 5) API-RP5L3: Conducting Drop Weight Tear Test on Line Pipe, (1969), 4
- 6) 長谷部ほか：住友金属，24 (1972) 2, 67~90

訂 正

川崎製鉄技報 Vol. 6 No. 3 の中に誤りがありましたので以下のように訂正いたします。

訂 正 個 所		誤	正
45ページ	脚注下より 8 行目	$P_1 = (O_{DP} + O_{IR}) / \varphi$	$P_1 = (O_{DP} + O_{IR}) / \varphi$
"	" 3 行目	… コークス中ガス化する C 量, …	… コークス中 C 量, …
93ページ	Fig.20 キャプション	……at $H'_o = 50$ t	……at $H'_o = 50$ t