

エネルギーの生産，輸送，貯蔵に使用される鋼材

Steels for Production, Transportation and Storage of Energy

弟子丸 慎一	DESHIMARU Shinichi	JFE スチール	西日本製鉄所 鋼材商品技術部 厚板・鑄鍛室長
高橋 和秀	TAKAHASHI Kazuhide	JFE スチール	スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員・工博
遠藤 茂	ENDO Shigeru	JFE スチール	スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員・工博
蓮沼 純一	HASUNUMA Junichi	JFE スチール	知多製造所 商品技術部長
坂田 敬	SAKATA Kei	JFE スチール	スチール研究所 鋼管・鑄物研究部長・工博
長浜 裕	NAGAHAMA Yutaka	JFE スチール	鋼管セクター部長

要旨

JFE スチールはエネルギーの生産，輸送，貯蔵に使用される鋼材を幅広く製造している。厚板としては，圧力容器用鋼張力鋼，高靱性海洋構造物用鋼と高性能鋼材を生産するための連続鑄造-鍛造技術を紹介する。鋼管では，UOE 鋼管，電縫鋼管およびシームレス鋼管の全品種を製造している。これらの商品の中からラインパイプを中心に油井管，防食管などの高性能鋼管の紹介をする。

Abstract:

JFE Steel produces a wide variety of steel materials used for the development, transportation and storage of energy. In this paper, there are introduced, as steel plate products, high strength steel plates for pressure vessels and high toughness steel plates for marine structures, and introduced further is, new continuous casting-forging technology for manufacturing high-performance steel materials. In JFE Steel, all types of pipes, such as UOE pipes, electric-welded steel pipes and seamless steel pipes, are manufactured. Here is especially given explanation of high-performance steel pipes on linepipes, oil country tubular goods and so forth.

1. はじめに

石油，天然ガスなどのエネルギーの生産，輸送，貯蔵には鋼材が多用されている。天然ガスを地中から取り出す油井管，海上における掘削用リグに使用される海洋構造物用鋼材，ガス田から消費地まで輸送するためのラインパイプ，石油タンカーおよび LNG 船用鋼材，また，ガスを蓄えておく圧力容器用鋼材などである。エネルギー産業における鋼材の重要性はますます増している。

パイプラインに使用される材料を例に取れば，その性能に対する要求は年々高度化している。Fig. 1 に示すように 1965 年以前には API X52 クラスの鋼材が主に使用されていたが，2002 年には X100 が実用化された。この 35 年間で強度が倍になっている。圧力容器用鋼材においても高強度化が進んでいる。また強度ばかりではなく，地震による地盤の変動に起因する座屈にも強い鋼管（HIPER）を開発

した。

一方，エネルギー需要の増加に対応するために，これまでは開発されなかったような深い井戸や，腐食環境の厳しい井戸が開発されるようになってきた。CO₂ の多い井戸では CO₂ 腐食が，また，H₂S の多い井戸では水素誘起割れ（HIC）や硫化物応力腐食割れ（SSC）が問題となる。こ

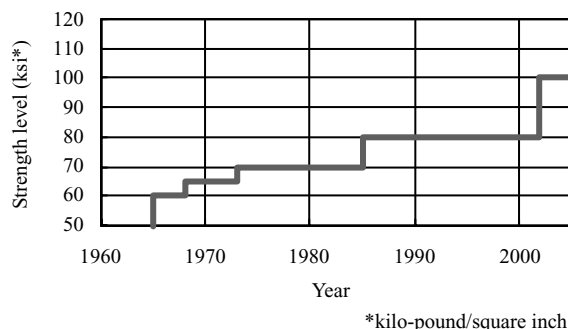


Fig. 1 History of high strength linepipe

これらの環境に対応する鋼材として13% Cr 油井管、ウェルダブル12% Cr ラインパイプや耐サワーラインパイプなど優れた特性を有する耐食材料が開発されている。

また、サハリンやアラスカ、北海などの寒冷地の井戸に使用する低温靱性に優れた構造用材料やラインパイプ材が開発されている。

エネルギー産業分野で使用される鋼材は要求特性が多岐にわたる。これに加えて、高圧のガスを扱うため、信頼性、安全性を確保する必要があり、高度の品質が要求される。これらの要求に応えるために、厚板、UOE 鋼管では主にTMCP 鋼が使用され、当社では最新鋭の設備である Super-OLAC を適用して、高強度で溶接性、靱性に優れた鋼板を製造している。本章では当社の代表的な商品を紹介する。

2. 厚板

2.1 圧力容器用高性能 610 N/mm² 級高張力鋼

エネルギー貯蔵設備や化学プラント、発電プラントなどのエネルギー分野では種々の厚板が使用されている。近年、これらの設備の大型化、操業条件や使用条件の過酷化と同時に、さらに建設コストの低減に繋がる施工の高能率化などにもとまない、鋼材に対しては高強度化や、溶接部靱性などの溶接部を含めた信頼性の向上、溶接施工性の向上などますます厳しい性能が要求されている。当社ではこのようなニーズに応えるため、最新の材質設計と製造技術を駆使して Table 1 に示す高性能 610 N/mm² 級高張力鋼板シリーズ¹⁾を開発した。その化学組成を Table 2 に示す。JFE-HITEN610U2 は溶接施工性と溶接部靱性に優れており、これに加えて 610E は大入熱溶接部特性に優れ、また 610U2L はさらに低温靱性に優れている。これらの開発鋼は、JIS G3115 圧力容器用鋼板 SPV490 に適合しており、従来鋼に対して C 量および P_{CM} 値を低くすることにより、

予熱温度の低下 (Fig. 2) と溶接部硬さの低減を可能としている。

Fig. 3 に JFE-HITEN610U2 の最高硬さ試験結果を示す。いずれの溶接条件においても、ピッカース硬さが 300 ポイント以下の低い HAZ 硬さが得られており、従来鋼と比較して大幅な溶接部硬化性の低減を実現している。

大型石油貯蔵タンクなどで高効率の大入熱エレクトロガスアーク溶接が適用される側板用として、大入熱溶接時

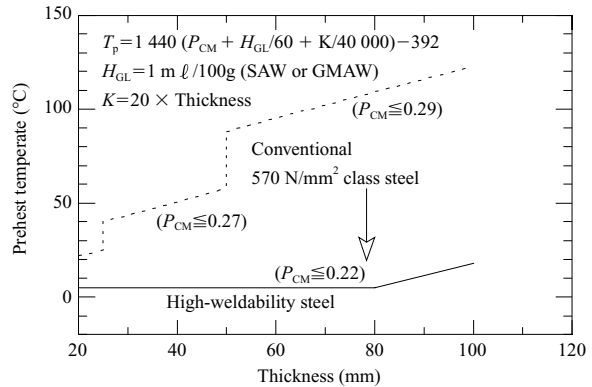


Fig. 2 Example of the decrease in required pre-heat temperature for low P_{CM} HSLA steel plates²⁾

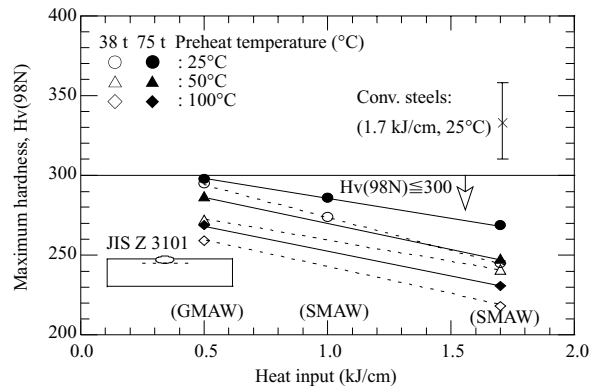


Fig. 3 Maximum hardness of JFE-HITEN610U2

Table 1 JFE Steel's 610 N/mm² class high performance steel plates for pressure vessel

Grade	Available thickness (mm)	Feature	JIS	WES certification			Applications
				WES3001	WES3009	WES3003	
JFE-HITEN610U2	6 ≤ t ≤ 75	Excellent weldability, superior toughness, etc.	JIS G3115 SPV490	HW490 QB	HW490Q CF	-	Penstock, tank, pressure vessel, etc.
JFE-HITEN610E	6 ≤ t ≤ 75	Excellent weldability, superior properties of weldments for high-heat input welding, superior toughness, etc.				-	Oil storage tank, etc.
JFE-HITEN610U2L	6 ≤ t ≤ 75	Excellent weldability, superior toughness at lower temperature, etc.				LT490-75 -50G Q	Tank for low temperature use, etc.

Table 2 Chemical compositions of JFE Steel's 610 N/mm² class high performance steel plates for pressure vessel

Grade	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq}	P _{CM}
JFE-HITEN610U2	0.09 max.	0.15-0.55	1.00-1.60	0.020 max.	0.010 max.	Cu, Ni, Cr, Mo : 0.30 max., V : 0.06 max., Nb : 0.03 max.	0.44 max.	0.20 max.
JFE-HITEN610U2L	0.09 max.	0.15-0.55	1.00-1.60	0.015 max.	0.005 max.			
cf. JIS G 3115 SPV490	0.18 max.	0.15-0.75	1.60 max.	0.030 max.	0.030 max.	Alloying elements other than those listed may be added.	0.45 max.	0.28 max.

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Table 3 Chemical composition of steel plate developed

(mass%)										
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	C _{eq} ^{*1}	P _{CM} ^{*2}	Note
0.07	0.10	1.55	0.005	0.001	0.29	1.09	0.015	0.42	0.18	Ti treated

^{*1}C_{eq}=C+Mn/6+(V+Mo+Cr)/5+(Cu+Ni)/15
^{*2}P_{CM}=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B

の継手強度と溶接部の靱性を向上させた大入熱溶接用 610 N/mm² 級高張力鋼板 JFE-HITEN610E はすでに数多くの採用実績がある。

-50 までの低温靱性を兼ね備えた低温用高張力 610 N/mm² 級高張力鋼板 JFE-HITEN610U2 も開発しており、低温タンクへの採用実績を有している。

これらの新規開発鋼はいずれもマイクロアロイングの活用と、高度な厚板製造技術の融合により達成されたものであり、多様なニーズに対応できる。

これらの開発鋼は、Table 1 に示すとおり(財)日本溶接協会(WES)のWES 3001-1996「溶接用高張力鋼板」、WES 3009-1998「溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性」および、WES 3003-1995「低温用圧延鋼板判定基準」に規定される当該規格の鋼種認定を取得している。また、近年著しい経済発展を遂げ、大型のエネルギープラント建設が活発化している中国やアジア向けにも各種タンクやペンストック用などにすでに数多くの採用実績があり、JFE-HITEN610U2 および 610U2L などは中国/全国ボイラ圧力容器標準化技術委員会の材料評定の一般承認を取得している。

2.2. 高靱性海洋構造物用鋼

近年、石油エネルギー資源開発の活発化により海洋構造物の設置域も氷海域、深海域へと広がりつつあり、使用される鋼板自体も高強度化、厚肉化している。また氷海域では破壊靱性 CTOD の要求される温度が従来の -10 から -40 に低温化している。

当社の海洋構造物は、Super-OLAC による高速冷却を活用し、YP420 MPa 級鋼としては、最大 101.6 mm までの厚肉材³⁾が製造可能である。

最近では、-40 での継手 CTOD 値 0.38 mm を保証できる板厚 75 mm の鋼板を開発した⁴⁾。Table 3 に鋼板の化学組成を示す。従来の低 C、低 N、低 Si、低 P、Ti 処理といった HAZ 靱性対策に加え、特に低温での靱性を確保すべく Ni を 1.1% 添加した。Fig. 4 に入熱 5.0 kJ/mm の SAW 継手部の CTOD を示すが、極めて安定した特性が得られている。

さらに高強度の YP460 MPa 級鋼、YP500 MPa 級鋼が使用されているが、これについても各物件に対応した製品化を順次進めている。

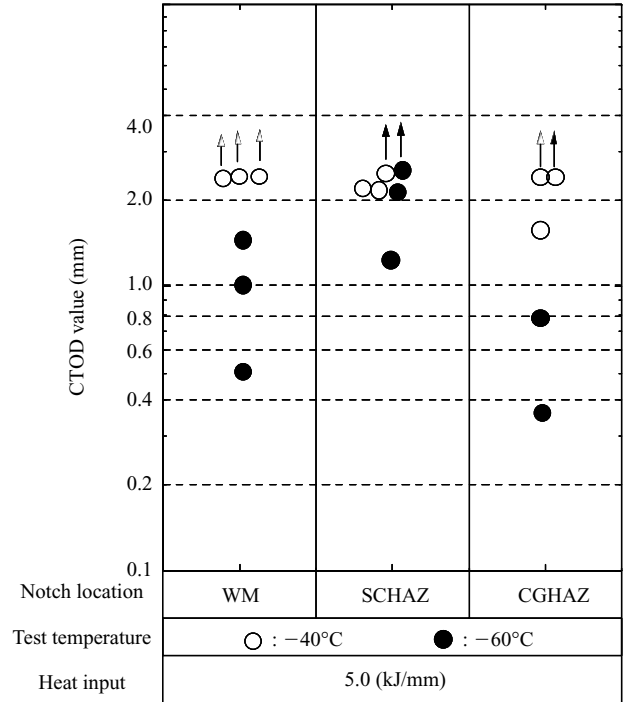


Fig. 4 CTOD values for SAW welded joints of steel plate developed

2.3 連続鋳造製スラブの鍛造 - 圧延プロセス

連続鋳造スラブ製高品質極厚鋼板の製造方法として、厚板圧延前の連続鋳造スラブに鍛造工程を付与するプロセス技術を開発した^{5,6)}。本鍛造 - 圧延プロセスの効果は、センターポロシティの閉鎖 - 圧着による板厚中心部の鋼板内質および機械的的特性の向上と中心偏析の軽減による板厚方向の均質性向上である。当社では、310 mm 厚の連続鋳造製スラブを用い、製品厚：240 mm (元スラブ厚 / 製品厚 = 圧下比：1.29) までの内質が健全な極厚鋼板の製造が可能であり、種々用途への製造実績は既に約 6 万トン以上を有する。また本プロセスは、ASTM STANDARD 2002 A20/A20M や ASME 2002 Addenda SA-20/SA-20M での压力容器用鋼板に関する一般条件規定において、圧下比緩和(3 以上 2 以上へ)の一必須プロセスとして認知され、今後は連続鋳造スラブ製極厚鋼板の適用拡大を図る上で、大いにその活用が期待されるものである。

製造工程フローおよび鍛造要領をおのおの Fig. 5, 6 に示す。実際のスラブ厚方向鍛造プレス作業を Photo 1 に示す。

Fig. 6 に示すように、スラブ幅方向の圧下後にスラブ厚

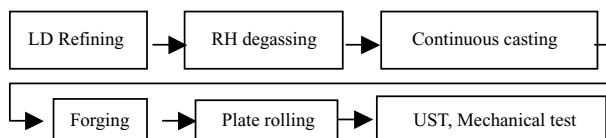


Fig. 5 Manufacturing process

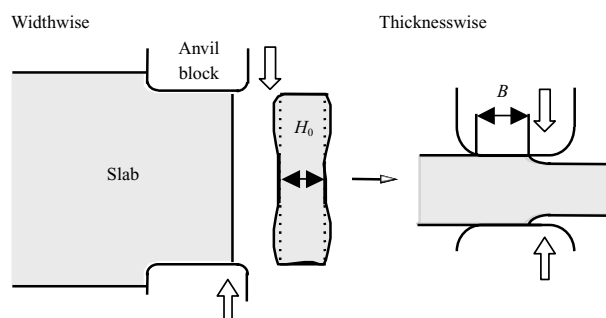


Fig. 6 Schematic diagram of CC slab forging



Photo 1 Forging reduction in thickness of CC slab

方向圧下を行う二方向鍛造圧下法や適切な B/H_0 (B : 鍛造金敷の掛幅, H_0 : 元スラブ厚) の設定による厚み方向鍛造圧下を行うことにより, 効果的にスラブ厚中心における幅, 厚方向の圧縮側塑性歪量を付与し, 内質の向上が達成される。

中心偏析の軽減, さらに鍛造時加熱保持時間の増大による拡散効果によって, 板厚中心位置での低温靱性あるいは焼戻し脆化感受性や HIC 特性などを著しく改善することが可能となる。

Table 4 に示す取鍋化学組成の高温圧力容器用 2.25Cr-1Mo 鋼 (JIS G4109 SCM4-2, 110 mm 厚) において, 鍛造時加熱温度: 1270 °C での保持時間 (保持時間: 0 における特性値は鍛造工程を適用しない通常圧延プロセスによる) を変更し, 以降, 同様に厚板圧延, 調質熱処理, 試験片 PWHT を施した後に調査した靱性レベルの比較結果を Fig. 7 に示す。

鍛造加熱保持時間の増大とともに, $1/2 t$ 位置での顕著な靱性向上が確認できる。

Table 4 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel

							(mass%)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
0.14	0.09	0.55	0.007	0.001	2.43	1.05	

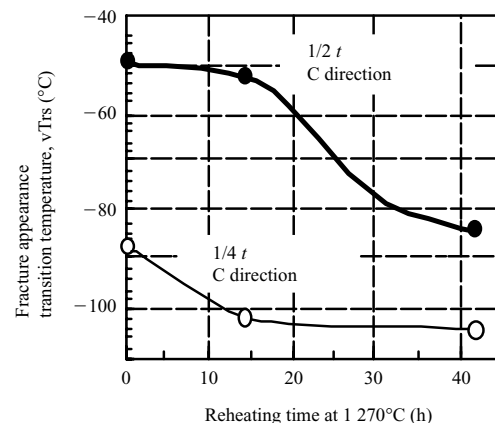


Fig. 7 Influence of reheating time at forging on vTrs

3. 鋼管

3.1 高強度 UOE ラインパイプ

3.1.1 高強度 API X80, X100 ラインパイプ

操業圧力を上げるとともに使用鋼材量の低減を可能にすることから, 長距離パイプラインに用いられるラインパイプへの高強度化の要求は継続的なトレンドである。2002 年当社は世界で初めて CSA グレード 690 (API X100 相当) という世界最高強度のラインパイプの商用生産を行った。また, 当社では 1991 年にカナダ向け X80 ラインパイプの製造を開始し, 以来約 5 万トンの X80 ラインパイプを実製造している。本章では, X100 など高強度ラインパイプの製造技術と特徴について述べる。

3.1.2 高強度・高靱性ラインパイプの製造技術

高強度ラインパイプを用いるためには, 安全性の観点から優れた低温靱性, 施工能率の観点からは優れた現地溶接性が重要である。これらの要求を満足するための手段として, 高強度ラインパイプの製造には制御圧延と加速冷却が適用されている。加速冷却は, 1980 年に世界で初めて西日本製鉄所福山地区厚板工場で実用化された技術で, 制御圧延後オンラインで鋼板を冷却するものである。加速冷却の適用により, より低成分な鋼を用いた高強度高靱性鋼板の製造が可能となる。さらに, 高冷却速度と優れた温度制御性, 鋼板上下面の対称冷却と面内均一冷却を特徴とする新しい加速冷却装置「Super-OLAC」を開発し, 1998 年に設置, 稼動した (Fig. 8)⁷⁾。

3.1.3 X100 ラインパイプの機械的性質と今後の展開

Table 5 に, 12.7 mm ならびに 15.1 mm の管厚さで外径 36" の X100 ラインパイプの機械的性質の例を示す。パイ

Table 5 Mechanical properties of API X100 linepipes

Grade	Tensile properties (Transverse direction)			Charpy impact properties			DWTT			
	Wall thickness (mm)	Outside diameter (")	Specimen type	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Energy at 0°C (J)	50%FATT (°C)	SA at 0°C (%)	85%SATT (°C)
API X100	12.7	36	API (flattened)	735	886	23	262	-60	100	-28
			Round bar	850	890	19				
	15.1	36	API (flattened)	734	923	21	223	-55	100	-40
			Round bar	818	901	16				

YS : Yield strength, TS : Tensile strength, El : Elongation, FATT : Fracture appearance transition temperature, DWTT : Drop weight tear test, SATT : Shear area transition temperature

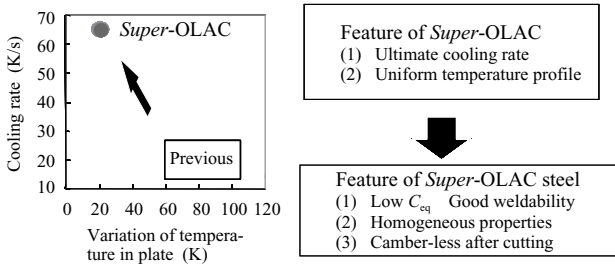


Fig. 8 Main features of Super-OLAC system

ブ円周方向の引張、シャルピー、DWTT（落重試験）結果をまとめて示す。表に示すとおり、X100の強度は規格を十分に満足するものであり、シャルピー試験における吸収エネルギーは200 J以上と高い値が得られている。DWTT試験の85%延性破面遷移温度はいずれも-20以下で、寒冷地のパイプラインを考慮しても十分な性能が得られている。

さらに当社においてはX80までの曲がり管の開発を完了している⁸⁾。X100ラインパイプにおいては、曲がり管、円周溶接材料ならびに適正溶接プロセスの開発が今後の課題である。これら周辺技術の開発と、上述の延性破壊挙動の検討がX80さらにX100ラインパイプの適用拡大をもたらすと考えられる。

3.2 高変形性 UOE ラインパイプ「HIPER」

3.2.1 高変形性ラインパイプ開発ニーズ

地盤の変動などによる大ひずみの発生が予想されるパイプラインの場合、高強度高靱性以外に必要な特性として、大変形を考慮した変形吸収能があげられる。現在国内で広く用いられているラインパイプでも径厚比 D/t が40前後で一軸圧縮試験での限界座屈ひずみは1%以上の大きな変形能を示す。しかし、API X80などの高強度ラインパイプを適用し管厚の低減を図る場合、座屈強度が低下する傾向を示すことが一般的である。したがって、耐座屈特性を向上させることにより、高強度ラインパイプの適用が可能となる。このような背景にかんがみ、高い耐座屈性を有する高変形性ラインパイプを開発した。本報告では、開発したラインパイプの機械的性質、耐座屈性などについて紹介する。

3.2.2 高変形性ラインパイプ「HIPER」の特徴

一般に、一軸圧縮試験での限界座屈ひずみは管厚に比例し、管径に反比例する。パイプラインが高強度化した場合、管厚を低減すると管径管厚比が増加し、Fig. 9に示すように限界座屈ひずみを低下させる結果となる。

当社では高強度ラインパイプの座屈ひずみ改善に関しての検討を行い、高変形性ラインパイプ「HIPER」を開発した。HIPERは鋼材の加工硬化能を向上させることにより、高い耐座屈性を達成している。高変形能を得るため、鋼板の製造には加速冷却プロセス Super-OLACを適用している。HIPERの耐座屈性を通常材のそれと比較した結果をFig. 9に示す。HIPERの一軸圧縮時の限界座屈ひずみは通常のパイプの1.5倍以上となっている。

HIPERの機械的性質をTable 6に示す。表中には現地溶接を想定した溶接部の機械的性質も合わせて示す。HIPERはAPI規格のグレードX65ならびにX80に相当する強度を有している。通常のパイプは、-10前後の環境で使用され、シャルピー試験で50 J以上の吸収エネルギー、DWTTでほぼ100%延性破面が得られているが、HIPERも遜色ない特性を有している。また、現地円周溶接を模擬した溶接継手においても良好な特性が得られることも確認できている。

3.2.3 HIPERの製造実績と今後の展開

高変形能を有するHIPERはAPIのX80まで対応可能で、すでに、国内向けに耐震性ラインパイプとしてX65の製

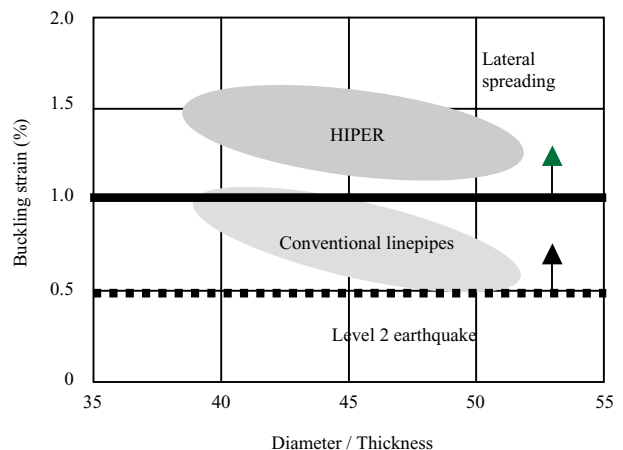


Fig. 9 Critical buckling strain of HIPER

Table 6 Dimensions and mechanical properties of API X65 and X80 HIPER linepipes

API Grade	Dimensions			YS (MPa)	TS (MPa)	Charpy	DWTT	Girth welded joint		
	OD (mm)	WT (mm)	D/t			Energy at -10°C (J)	85%SATT (°C)	TS (MPa)	Charpy energy at -10°C (J)	FATT (°C)
X65	711	16	44	468	615	222, 265, 255	-30	670	169, 149, 147	-56
X80	711	18	40	557	751	236, 246, 250	-30	785	124, 178, 142	-57

OD : Outside diameter, WT : Wall thickness, YS : Yield strength, TS : Tensile Strength, DWTT : Drop Weight tear test, SATT : Shear area transition temperature, FATT : Fracture appearance transition temperature.

造実績を数千トン有している。開発した HIPER の実ガスラインへの適用により、従来以上に安全性の高いパイプラインの建設が可能となる。特に、高強度ラインパイプを用いる場合にその効果は大きいと考えられ、国内ガスラインの高圧化の進行とともに、その適用の拡大が期待されている。さらに、高変形能を要求される凍土地帯や大変形が予想される海底パイプラインへの適用の拡大を図っている。

3.3 UOE 耐サワーラインパイプ

油田・ガス田の掘削技術や長距離輸送技術の進歩により、寒冷域や深海の石油ガス開発が進んでいる。これにもなって輸送流体の性状も多様化する傾向にある。このような背景から高強度耐サワーラインパイプは今後も安定的な需要が予想される。

3.3.1 高強度・高靱性耐サワーラインパイプの製造技術

サワーラインパイプに要求される特性は、強度、低温靱性、溶接性に加えて H₂S を含有する流体では耐サワー性（水素誘起割れや硫化物応力腐食割れに対する抵抗力）である。そのために、製鋼技術として極低 S・低 P 鋼溶製技術と、Ca 添加による硫化物形態制御技術、連続鋳造スラブの軸心部に存在するマクロ、セミマクロ偏析の低減や表面割れ防止技術を開発してきた^{9,10)}。さらに、鋼板の圧延には制御圧延と加速冷却「Super-OLAC」を適用している¹¹⁾。

3.3.2 高強度耐サワーラインパイプの製造実績と今後の展望

Fig. 10 にこれまでの耐サワーラインパイプの生産量の推移を示す。主なパイプグレードは X65 で、至近の製造実績は年間 10 万トンを超える大量なものとなっている。また、図中 Mild と分類した H₂S 濃度が低いあるいは pH が高いサワー環境に適したラインパイプの需要が高まりつつあり、当社においても 1997 年から開発し、すでに供給している。

このようなラインパイプは高強度耐サワーラインパイプと同様にパイプラインシステム費用低減の可能性があり、今後の需要の拡大が期待されている。

3.4 高強度高靱性電縫鋼管ラインパイプ

近年において電縫鋼管ラインパイプは、素材製造技術と鋼管製造技術の進歩により高級化、高品質化とともに製造

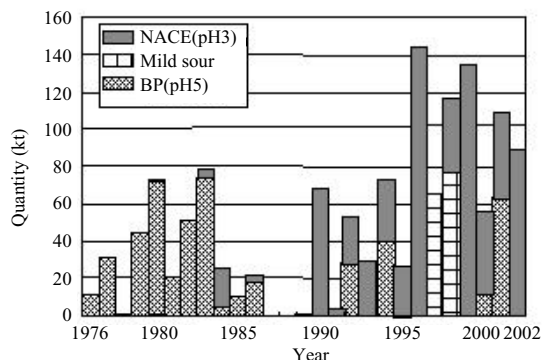


Fig. 10 Production amount of sour gas line pipes

コストの低減も図られた結果、コストパフォーマンスの優位性を背景に UOE 鋼管やシームレス鋼管の分野へ進出しつつある。特に天然ガスラインパイプの高強度化にともない、小径薄肉化が図られ、電縫鋼管でも対応可能なサイズが増加している。

当社知多製造所の中径電縫鋼管ミルは、電縫鋼管としては世界最大外径の 26” まで製造可能な唯一のミルであり、Fig. 11 に示すように世界最大級の製造範囲を有している。

近年は電縫鋼管のラインパイプにも X65 クラスの高強度で、破面遷移温度が -46 以下の高靱性、および硫化水素環境を考慮した耐 HIC 性、耐 SSC 性などの複合特性が要求される。これらの要求を満足させるため低 C 化と熱間圧延条件の適正化を図っている^{11,12)}。また電縫溶接部の靱性を向上させるための、熱処理技術も確立しており、Fig. 12 に示すように、電縫溶接部に QT 処理を施すことにより、破面遷移温度が -46 以下の溶接部靱性が得られている。この QT 技術により溶接部品質が大幅に改善された。さらに電縫溶接部の欠陥を防止する造管技術を開発したことにより、高強度、高靱性でかつ高耐食性電縫鋼管ラインパイプの開発に成功した。

また品質検査体制において、全数・全長・全面検査を基本としその充実を図っており、特に電縫溶接部では Fig. 13 に示す独自開発のマルチプローブシステムを導入して肉厚全面の検査を可能とした。これらの検査体制により、電縫溶接部の信頼性が格段に向上し、使用対象が陸上のパイプラインのみならず、海底パイプラインにも拡大され、北海において使用された。当社の電縫鋼管ラインパイプの優れた品質を示すことができ、オイルメジャーからも高い

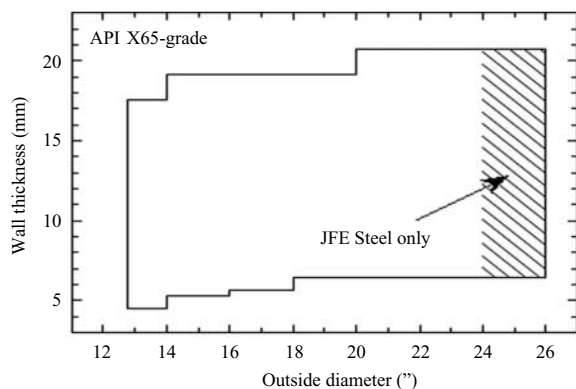


Fig. 11 Available manufacturing size range of X65-grade ERW line pipe of JFE Steel at 26 inch ERW mill

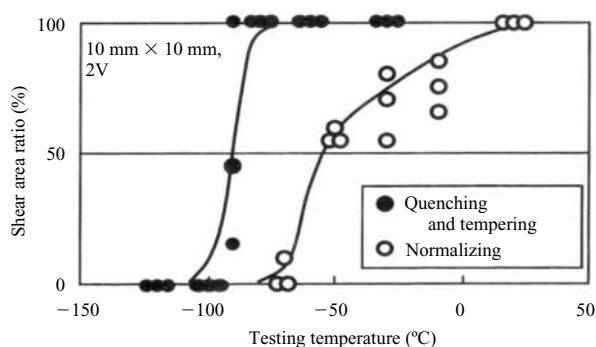


Fig. 12 Charpy impact property of weld seam of X65-grade ERW line pipe

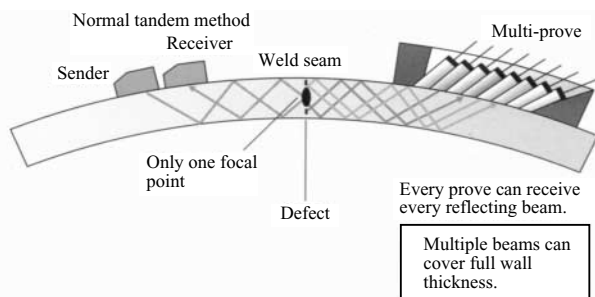


Fig. 13 Schematic image of JFE Steel's new multi-probe system compared with normal tandem method

評価を受けた。

最近ではさらに検討を加え、X65で外径24", 肉厚19.1mmの母材部および電縫溶接部ともに0でのCTOD \leq 0.2mmを保証した高強度厚肉高靱性電縫鋼管ラインパイプにも対応している。今後はX80グレード以上の高強度高靱性化¹³⁾にも対応可能とすべく開発を進めている。

3.5 厚肉電縫鋼管ラインパイプ

知多製造所の26"電縫鋼管ミルでは2003年に成形装置の増強工事を行い、輸出用オイル・ガス用鋼管の製造最大肉厚を、従来の0.812" (20.6mm) から1.000" (25.4mm) に引き上げ、2003年5月より商業生産を開始した。増強工

Table 7 Available range at 26 inch ERW pipe mill

Outside diameter	12.75" (323.9 mm) - 26" (660 mm) (1" wall pipe : 20" (508 mm)- 26" (660 mm))
Wall thickness	0.157" (4.0 mm)- 1.000" (25.4 mm)
Material grade	Up to API 5L X80 (1" wall pipe : API 5L X56)

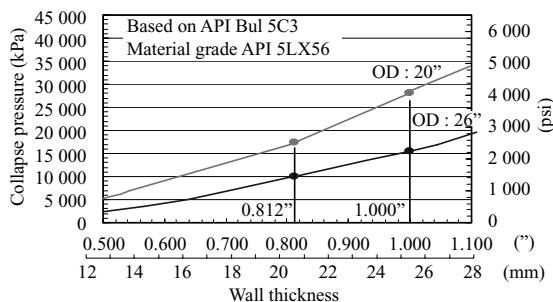


Fig. 14 Calculated maximum collapse pressure for heavy wall pipe

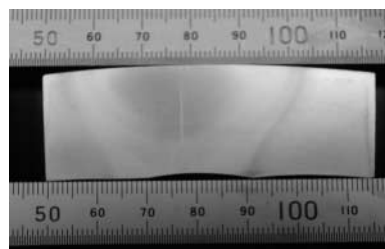


Photo 2 ERW weld seam of 1.000 inch thick pipe (Nital etched)

事後の当工場の製造可能範囲をTable 7に示す。肉厚1"の鋼管はこれまでUOE鋼管またはシームレス鋼管のみが供給可能であった。電縫鋼管で製造可能なのは2003年11月現在で当工場のみである。肉厚の増加により、耐圧潰特性が従来の約1.6倍の鋼管を供給することができる (Fig. 14)。

Photo 2に電縫溶接部の断面マクロ写真を示す。ボンド層および熱処理状況とも良好な溶接部を形成している。

品質保証の面では、独自開発のマルチプローブシステムを導入することにより、1"の極厚材でも全面探傷が可能となった。

3.6 13Crシームレス油井管

石油、天然ガス開発は年々深井戸化の方向に進み、かつ開発地域も陸上から海底に広がってきた。また、環境面においても高温でかつ、CO₂やH₂Sなどを含む過酷な条件の井戸開発が進んできた。このような腐食性の強い井戸開発では鋼管の内面をコーティングし、さらにインヒビターを使用するのが一般的であったが、環境問題からインヒビターの使用に制約が加わってきており、耐食性に優れた鋼管のニーズが高まってきている。湿潤CO₂環境における耐食性向上にはCr添加が有効である¹⁴⁾。Fig. 15にCO₂

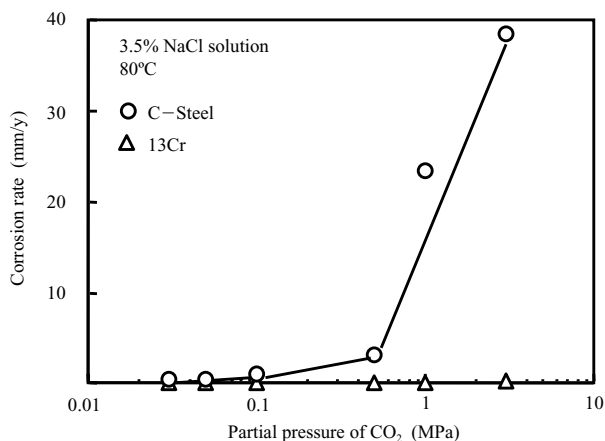


Fig. 15 CO₂ corrosion test result

Table 8 Chemical composition of 13Cr and HP13Cr

	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
13Cr	0.20	0.20	0.40	13	0.1	—
HP13Cr-1	0.025	0.25	0.45	13	4.0	1.0
HP13Cr-2	0.025	0.25	0.45	13	5.0	2.0

環境における炭素鋼と 13Cr 鋼管の腐食速度を示す。13Cr 鋼管は炭素鋼に比べて大幅に腐食速度が低下し、高濃度の CO₂ が存在する環境においてもインヒビターなしでも使用可能である。13Cr 鋼管は開発当初よりその優れた耐食性から、CO₂ を含む環境を中心にそのニーズは高かった。13Cr 鋼管製造に関して、当社はピレット製造技術、ピアサー穿孔圧延技術、マンドレルミル圧延技術、工具寿命延長技術等の高合金鋼圧延技術を開発し、それまで主として熱間押し法で製造されていた 13Cr 鋼管をマンネスマンプロセスにて高寸法精度でかつ高い生産性で製造することを可能にした^{15, 16)}。その結果、13Cr 鋼管の市場を年間 10 万トンを超える規模まで大きく拡大させるとともに、当社は 13Cr 油井管において世界でトップクラスのシェアを有するようになった。

一方、13Cr 鋼管は API 規格で L80-13Cr として規格化され、CO₂ を含む環境で使用されているが、150 を超える環境では耐 CO₂ 腐食性が劣化し、長期間の使用に耐えられなくなる。また、H₂S を含む環境では硫化物応力腐食割れ (SSC) が発生するという問題があった。そこで、耐 CO₂ 腐食性、耐 SSC 性を改善した新しい化学組成のマルテンサイト系ステンレス鋼管 HP13Cr を開発した^{17, 18)}。13Cr および HP13Cr の主な化学組成を Table 8 に示す。HP13Cr はより高温で苛酷な環境に対応するために、C 量を低下させて耐食性に有効な固溶 Cr 量を増加させるとともに、Ni, Mo を添加して、熱間加工性、耐食性の両立を図っている。Fig. 16 に高温、高 CO₂ 環境における 13Cr 鋼管、HP13Cr 鋼管の腐食速度と適用可能条件を示す。CO₂ が 1 MPa である環境において 13Cr 鋼管は 120 まで、HP13Cr 鋼管は 175 までの温度域で適用可能である。

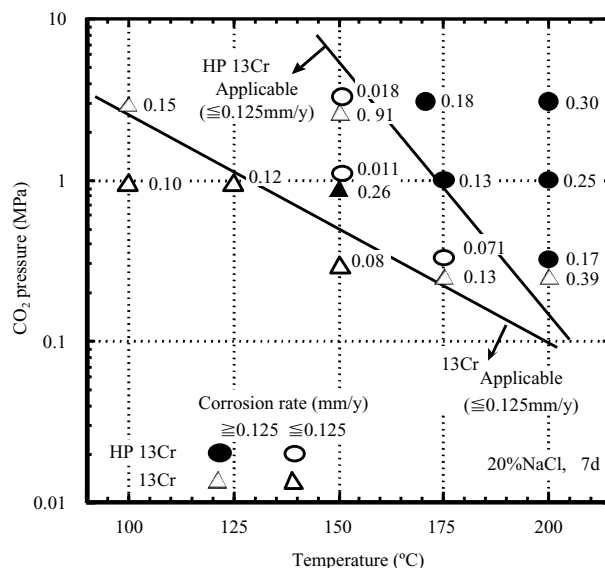


Fig. 16 CO₂ corrosion map for 13Cr and HP13Cr

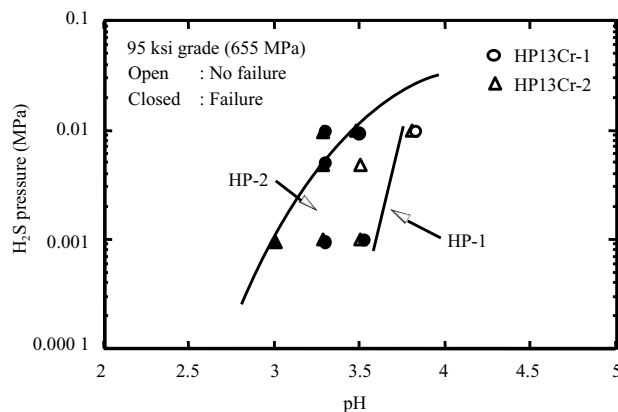


Fig. 17 SSC test result for HP13Cr pipe

また、HP13Cr 鋼管は耐孔食性に有効な Mo を含むことから、SSC の起点となる孔食発生を抑制することができ、13Cr 鋼管に比べてより厳しい H₂S 環境でも適用可能である。Fig. 17 に HP13Cr-1 2 の SSC 試験結果の一例を示す。HP13Cr-2 鋼管は Mo 増量によってより低い pH, より高い H₂S 環境で使用可能である。

13Cr 系油井管は CO₂, あるいは H₂S を含む厳しい環境においてもインヒビターなしで使用可能なことから、今後も天然ガス開発用を中心に、順調に需要が伸びていくと考えられる。

3.7 Weldable 12Cr シームレスラインパイプ

CO₂ や H₂S を含む腐食性の強い油田・ガス田において未処理の生産物を輸送するためのフローライン、ギャザリングラインと呼ばれるパイプラインでは、CO₂ 腐食や硫化物応力腐食割れ (SSC) の防止対策が必要である。パイプラインには一般に、インヒビターを注入するか、二相ステンレス鋼などの高価な耐食材料を用いるなどの対策が講

Table 9 Chemical composition of two types of weldable 12Cr seamless line pipe

Material	(mass%)					
	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N
KL-12CR	0.01	11	2.4	—	0.5	0.01
KL-HP12CR	0.01	12	5.5	2.0	—	0.01

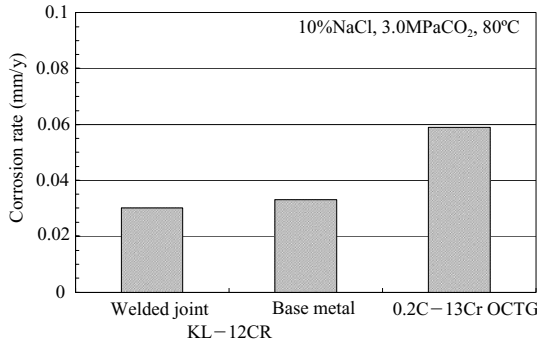


Fig. 18 CO₂ corrosion test results of KL-12CR welded joint

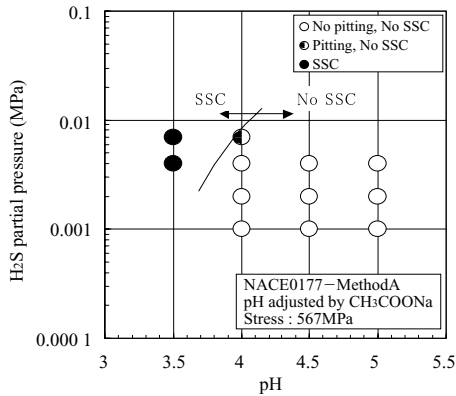


Fig. 19 SSC test results of KL-HP12CR welded joint

じられていた。しかしながら、インヒビターは操業コストが、また、二相ステンレス鋼は材料コストが高いことから、当社は、ライフサイクルコストを低減できる新材料として、Weldable12Cr シームレスラインパイプを開発した。

Weldable12Cr シームレスラインパイプは、マルテンサイト系ステンレス鋼を素材としている。マルテンサイト系ステンレス鋼は一般に溶接性が悪く、溶接には予熱を必要とするため、施工効率が重視されるパイプラインの敷設では使用が敬遠されていた。本製品は、C および N をともに 0.01 mass% まで低減し、溶接性を改善し、予熱なしで溶接可能とした。またこれとともに、耐食性向上に効果のある Ni, Mo などを適量添加することで、2 種類の Weldable12Cr シームレスラインパイプ、すなわち、CO₂ 環境用 KL-12CR、および、CO₂ + 微量 H₂S 環境用 KL-HP12CR を開発した¹⁹⁾。化学組成を Table 9 に示す。

Fig. 18 に KL-12CR の CO₂ 腐食試験結果を示す。KL-12CR の腐食速度は、油井管用 0.2C-13Cr 鋼管の半分程度であり、優れた耐 CO₂ 腐食性を示していることがわかる。

Fig. 19 は KL-HP12CRa 溶接継手の SSC 試験結果であり、

本材料が微量 H₂S 環境下で使用可能であることを示している。なお、強度は、KL-12CR および KL-HP12CR でそれぞれ X70 級および X80 級であり、靱性はともに -20 °C の使用が十分可能なレベルである。

Weldable12Cr シームレスラインパイプは 1996 年に世界で初めて出荷され、これまでに合計 20 000 t 以上の実績がある。

3.8 特殊ねじ継手 KSBEAR

油井管の使用環境において、油井管の接続にはメタルトゥメタルシールを有する特殊ねじ継手の使用が一般化しつつある。ところが近年、傾斜井・水平井の増加により、既存の特殊ねじでは対応困難な油井設計の事例が増加している。特に、圧縮、外圧、曲げ環境下での耐リーク性能の高いねじ継手が望まれてきている。このような市場の要求に応えるべく、高圧縮・曲げ・外圧リーク特性に優れた油井管用特殊ねじ継手「KSBEAR」を開発した。

3.8.1 油井管ねじ継手に求められる性能

(1) 油井における耐リーク性能

油井管を坑内へ降下する過程および降下後には、ねじ継手には管自重により引張りの力を受ける。また、坑壁からは外圧、管内からは生産流体による内圧が加わる。さらに、水平井では湾曲部において曲げが加わる。曲げの内側では圧縮、外側では引張りの力が働く。よって、上記の条件下での耐リーク性能が求められる。

(2) ねじ接続の作業性

ねじ継手には、複数回の締付けに対する耐ゴーリング（焼付き）性能が求められる。

さらに、降下作業の所要時間短縮のため、ねじの噛み違いの発生防止や作業効率性が求められている。

3.8.2 KSBEAR の特徴

KSBEAR の形状を Fig. 20 に示す。

(1) フックねじの採用

フックねじを採用することにより、引張り、外圧、曲げが作用した際にピンねじとカップリングねじが管径方向に離れようとする力を大幅に減少させるようにした。

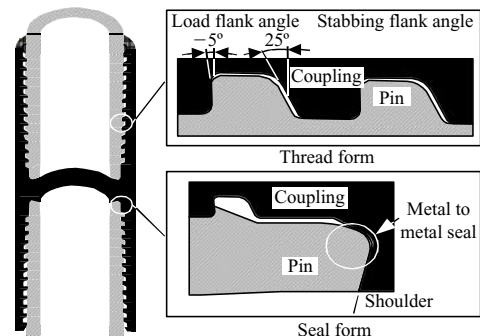


Fig.20 Design of KSBEAR

Table 10 Grade, size and interference of specimen

Grade	Size	Interference*			
		H/H	H/L	L/H	L/L
13CR-80	5-1/2"×23.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L
13CR-80	7"×29.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L
13CR-80	7"×35.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L

*Thread/Seal
H : High, L : Low

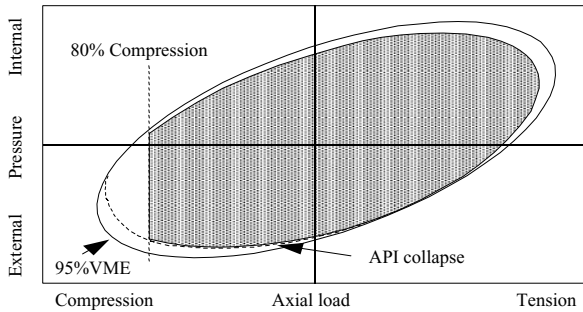


Fig. 21 Performance of KSBEAR

(2) スタッピングフランク間隔の最適化

スタッピングフランクの間隔を最適化し、高圧縮荷重を受けた際にスタッピングフランクを接触させることによって、シール部およびショルダー部への荷重を軽減し、ショルダー部およびシール部の塑性変形を大幅に抑制させる。その結果、圧縮後の引張り荷重下における耐リーク性能が大幅に向上した。

(3) ピンねじのロードフランクコーナ円弧の最適化

ゴーリング発生を防止するためにピンねじのロードフランク上方のコーナ円弧を大きくすることにより応力を分散させた。

(4) ピンとカップリングのロードフランク角度の最適化

カップリングに対するピンのロードフランク角度を変更した。最も強度の高いピンねじ下部に応力を集中させ、耐ゴーリング性能をさらに向上させた。

(5) 25° のスタッピング角度

パットレスモディファイねじでは10°であったスタッピング角度を25°とし、ねじ接続時の作業性を高めた。

3.8.3 KSBEAR ねじ性能評価試験

あるオイルメジャーから要求のあった試験方法と試験結果の例について述べる。

(1) 試験方法

試験材のグレード・サイズと試験体の組合わせを Table 10 に示す。

- (a) グリーンドープ（環境保護型潤滑剤）のねじ締付けへの適用
- (b) 19.7°/30 m の曲げ試験
- (c) 80% PBYS (pipe body yield strength) の圧縮試験
- (d) 100 回の熱サイクル試験

(e) 圧縮と曲げの同時負荷、引張りと曲げの同時負荷

(f) リーク試験終了後の締付け試験の実施

(2) 試験結果

上記の各試験においてリークの発生は検出されなかった。また、試験終了後にねじ部およびシール部を観察した結果、ゴーリングは見られなかった。KSBEAR は、Fig. 21 に示す 80% PBYS での圧縮という厳しい条件においてもリークが発生せず、安定した性能がみられた。

3.9 極薄肉管

高圧ガスポンペ用鋼管には、その用途上、高強度化、薄肉化、平滑な表面肌が要求されている。今後、自動車用 CNG ポンペの需要拡大とともに、さらに要求は厳しくなるものと予想される。当社シームレス鋼管は、その特徴で

OD	WT (mm)					
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
7"	177.80-182.00					
7-5/8"	183.50-199.00	4.5				
8-5/8"	203.00-221.20		5.5			
9-5/8"	231.00-252.30			6.0		
10-3/4"	253.50-277.00				6.35	
11-3/4"	297.40-310.50					
12-3/4"	316.00-331.40					
13-3/8"	336.40-347.00					
14"	348.50-370.0				7.9	
14-3/4"	374.50-381.00					
16"	400.00-414.80					
16-3/4"	423.50-427.50					9.0

OD : Outside diameter, WT : Wall thickness

Fig. 22 Available manufacturing size

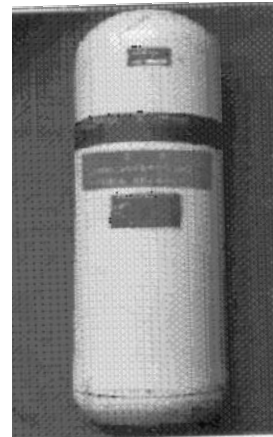


Photo 3 Vessel for high-pressure gas

ある薄肉管製造技術，表面性状平滑化技術を適用して，上記要求に応えている。製造可能範囲を Fig. 22 に示す。

高圧ガスポンペ (Photo 3) に用いられる鋼管は，肉厚外径比：2%程度であり，シームレス鋼管の中で最も薄肉品として位置付けられる。薄肉シームレス鋼管の製造には寸法精度の観点から非常に高度な製造技術が要求され，穿孔プロセスで生じる偏芯性偏肉を防止するための最適圧延スケジュールを採用している。

内面性状改善のためには，圧延中に発生するスケールを内面工具（プラグ）で押さえ込むことを防止する必要があり，被圧延材の温度低下を最小限にすることが可能な最適なデスクレーン方法や薄肉材用の潤滑剤を適用している。

3.10 防食管（ガス用非塩ビ樹脂外面被覆鋼管 PLS-F）

塩ビ系樹脂の廃材処理時の環境汚染といった地球環境問題に対する社会的責任が高まる中，当社の防食管においても塩ビ被覆鋼管を代替する商品の開発を推進している。その1つとしてガス配管用途である「外面塩ビ被覆鋼管」の代替商品として防火区画貫通用ポリエチレン被覆鋼管 PLS-F を開発した。

3.10.1 認定取得経緯

共同住宅・オフィスビルなどの「防火区画部」の配管施工については，耐熱性能において建築基準法および消防法の規制により，従来，自己消火性材料である塩ビの被覆鋼

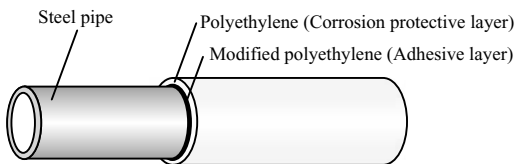


Fig. 23 Construction of coating for "PLS-F"



Photo 4 "PLS-F"

管のみが認可されていた。しかし 2001 年に評価基準が見直されたことを受け，可燃性材料であるポリエチレンの被覆鋼管において，樹脂に適切な耐熱性，耐候性を付与することで認定を取得することが可能となり，従来の埋設用途だけでなく露出配管を含め，使用可能範囲を拡大することができた。

Fig. 23 に商品の被覆構成を，Photo 4 に商品の写真を示す。

3.10.2 商品の特長

「PLS-F」商品の特長は次の3点である。

- (1) 非塩ビ樹脂（ポリエチレン）被覆
- (2) 配管場所：埋設部，立ち上り部（メーター），屋内（一般，防火区画貫通部，厨房周辺）
- (3) 配管接続方法：ネジ継手，メカニカル継手

3.10.3 防火区画貫通認定

日本消防設備安全センター性能認定

認定番号：評 14-654 号

国土交通省大臣認定

認定番号：壁) PS060WL-0059

床) PS060FL-0060

4. おわりに

地球温暖化問題に対応するために，水素利用技術に代表される新エネルギー対応の技術開発が進展している。新エネルギーを利用する場合も高性能で高品質の鋼材は必要である。特に，水素エネルギーの利用に当たっては安全性などの面からもこれまでとは異なった特性が要求されるものと考えられる。JFE スチールでは社会の発展に寄与するために技術開発を継続し時代の最先端を行く高性能の鋼材を供給していく所存である。

参考文献

- 1) 柚賀正雄ほか．溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集．2002，p.303-310.
- 2) 松井和幸ほか．NKK 技報．no.165，1999，p.11-16．
- 3) 谷川治ほか．川崎製鉄技報．vol.25，no.1，1993，p.13．
- 4) 久田光夫ほか．川崎製鉄技報．vol.30，no.3，1998，p.142．
- 5) 荒木清己ほか．川崎製鉄技報．vol.30，no.3．1998，p.181-185．
- 6) 荒木清己ほか．圧力技術．vol.41，no.4．2003，p.20-27．
- 7) Endo, S. et al. Proc. of Pipe Dreamers Conf. Yokohama, 2002-11, p.273-288.
- 8) Kondo, J. et al. : Proc. of the 4th ISOPE. Conf. Kobe, 1994.
- 9) 小林日登志ほか．CAMP-ISIJ．vol.2，no.4，1989，p.1158．
- 10) 田辺治良ほか．鉄と鋼．vol.66，1980，S-258．
- 11) 板谷元晶ほか．CAMP-ISIJ．vol.7，1994，p.747．
- 12) 川端文丸ほか．CAMP-ISIJ．vol.7，1994，p.746．
- 13) 上力ほか．CAMP-ISIJ．vol.15，2002，p.1221．
- 14) Kimura, Y. et al. CORROSION/94 paper. no.18, 1994. NACE
- 15) 森岡信彦ほか．川崎製鉄技報．vol.29，no.2，1997，p.57
- 16) 依藤章ほか．川崎製鉄技報．vol.29，no.2，1997，p.64
- 17) Tamaki, K. CORROSION/89 paper. no. 469, 1989. NACE
- 18) Kimura, Y. et al. CORROSION/97 paper. no. 22, 1997. NACE
- 19) 宮田由紀夫ほか．川崎製鉄技報．vol.29，no.2，1997，p.90



弟子丸 慎一



高橋 和秀



遠藤 茂



蓮沼 純一



坂田 敬



長浜 裕