

超高強度ラインパイプX120の開発

Development of Ultra High-strength Linepipe X120

朝日 均 ^{*(1)} Hitoshi ASAHI	原 卓 也 ^{*(2)} Takuya HARA	津 留 英 司 ^{*(1)} Eiji TSURU	森 本 裕 ^{*(3)} Hiroshi MORIMOTO
大 北 茂 ^{*(4)} Shigeru OHKITA	杉 山 昌 章 ^{*(5)} Masaaki SUGIYAMA	丸 山 直 紀 ^{*(6)} Naoki MARUYAMA	品 田 功 一 ^{*(7)} Koichi SHINADA
小 山 邦 夫 ^{*(7)} Kunio KOYAMA	寺 田 好 男 ^{*(8)} Yoshio TERADA	赤 崎 宏 雄 ^{*(9)} Hiroo AKASAKI	鮎 川 直 史 ^{*(10)} Naoshi AYUKAWA
村 田 正 彦 ^{*(11)} Masahiko MURATA	土 井 直 己 ^{*(12)} Naoki DOI	宮 崎 秀 樹 ^{*(12)} Hideki MIYAZAKI	吉 田 達 哉 ^{*(12)} Tatsuya YOSHIDA

抄 録

天然ガスの重要性は飛躍的に高まってきており、長距離輸送の低コスト化が必要である。長距離パイプラインの輸送コストを下げるためには、高圧操業、小径・薄肉ラインパイプの適用が有力な方法であり、このためには高強度ラインパイプが必要である。新日本製鐵(株)は世界最大の石油ガス会社ExxonMobil社と共同で、従来グレードX65、X80をはるかに凌ぐ超高強度大径ラインパイプX120を開発した。X120にはX65、X80と較べて飛躍した高い製造技術が要求され、材質設計、製鋼、鑄造、鋼板製造、鋼管製造 UOE鋼管成形、シーム溶接技術等 全ての分野で互いに有機的につながった研究開発を実施した。少量商業生産まで含めた鋼管の開発、ラインパイプとしての実使用性能の評価を完了し、さらに敷設現場で行う円周溶接の実用化等パイプラインとしての総合的な開発を実施し、商業化可能であることを明らかにした。

Abstract

Natural gas is increasingly and greatly important and cost reduction of long distance transportation is essential. High operating pressure and/or small diameter/ thin wall linepipes are a means to reduce transmission costs of long distance pipelines. For these challenges, high strength linepipes are required. Nippon Steel has developed an ultra high-strength grade of large diameter linepipe, X120 that far exceeds the conventional grades of X65 and X80 in cooperation with ExxonMobil, the world-biggest major oil&gas company. X120 requires much higher manufacturing technology compared with X65 and X80 and research and development was systematically performed in the fields of material design, steel making, casting, plate production and pipe production (UOE forming and seam welding). The both parties completed the pipe development including small scale commercial production and the evaluation of pipe performance as a linepipe and conducted comprehensive development for pipeline installation such as girth welding technology in a field. Now the commercializing of X120 is confirmed to be possible.

1. 緒 言

天然ガスの重要性は飛躍的に高まってきており、近い将来には石油を追い抜いて最大の一次エネルギーの地位を占めると予測されている。しかし、主要な産出地はしばしば大消費地から遠く離れているため、長距離輸送の低コスト化が必要である。液化天然ガス(LNG)輸送の重要性も高まっているが、天然ガス輸送の相当な部分はパイ

プラインが担い続けなければならない。1000kmを超えるような長距離パイプラインの輸送コストを下げるためには、高圧操業、小径・薄肉ラインパイプの適用が有力な方法であり、このためには高強度ラインパイプが必要である¹⁾。

現在までに実用化されている高強度ラインパイプはAPI(American Petroleum Institute)規格 5L X80が最高であるが、大幅な高強度化によってパイプラインコストを低減するために、ExxonMobil社と新日

^{*(1)} 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2233

^{*(2)} 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員 工博

^{*(3)} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員 工博

^{*(4)} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博

^{*(5)} 先端技術研究所 解析科学研究部 主幹研究員 工博

^{*(6)} 先端技術研究所 解析科学研究部 主任研究員 Ph.D.

^{*(7)} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

^{*(8)} 君津技術研究部 主幹研究員

^{*(9)} 鋼管営業部 部長

^{*(10)} 鋼管営業部 マネジャー

^{*(11)} 君津製鐵所 鋼管工場 グループリーダー

^{*(12)} 君津製鐵所 鋼管工場 マネジャー

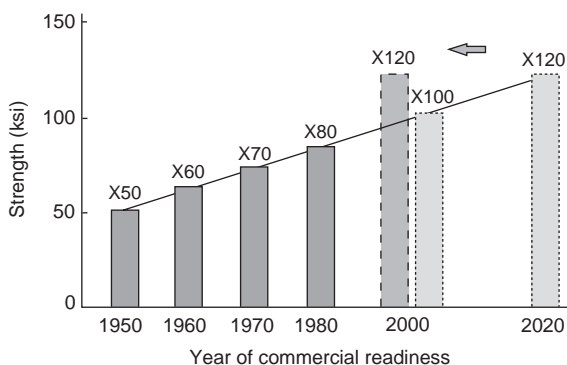


図1 ラインパイプ技術の発展 (1 ksi = 6.89MPa)
Evolution of linepipe technology

本製鐵は超高強度大径ラインパイプX120を共同で開発した。図1²⁾に示すように、共同開発を行うことで高強度化を加速することができ、世界の有力メーカーがX100の開発、実用化を進めている同時期にX120の開発に成功した。

2. 開発目標と開発課題

X120の開発目標を表1に示す。X120としての内圧に耐える必要があるため、周方向の最小降伏強度(SMYS)を120ksi(827MPa)以上とすることが必須条件である^{*1}。鋼管長手方向強度は直接内圧強度に関係しないので規定されていない。鋼管に要求される低温靱性として、き裂発生防止を目的にシーム部のVノッチシャルピー値(CVN値)を規定し、万が一発生したとき裂伝播停止のためにCVNのDBTT(延性脆性破面遷移温度)、バッテルタイプ落重試験(B-DWTT)の延性破面率、CVN値を規定した。これらについてはよく使用されるパイプラインの規格DNV OS-F101 2000のX80以下の要求値から外挿した値を仮目標とした。使用温度は寒冷地でも使用されることを考え、-20での要求特性とした。なお全厚試験以外は試験温度を-30とした。

X120はX65、X80と比べて飛躍した高い製造技術が要求され、材質設計、製鋼、鋳造、鋼板製造、鋼管製造(UOE鋼管成形、シーム溶接技術等)、全ての分野で、互いに有機的につながった研究開発が必要であった。

表1 X120の開発目標
Targets of X120 development

Property	Base pipe	Seam weld & HAZ
Tensile strength (TS) (circumferential)	YS 827MPa (120ksi) TS 931MPa (135ksi)	TS 931MPa (135ksi)
CVN energy@ -30	231J	84J
CTOD@ -20	0.14mm	0.08mm
DBTT of CVN	-50	
B-DWTT SA@ -20	75%	

*1 API規格ではX80については0.5%アンダーロード耐力が降伏強度として使用されるが、高強度になると0.6%、0.7%と大きな値を使用しないと正しい降伏強度が測定できなくなる。このような複雑さを避けるため、X120では0.2%オフセット耐力を使用した。

3. 鋼管開発と特性

3.1 鋼板の開発

X120が適用されるパイプラインプロジェクトでのラインパイプ必要量は数十万トンから百万トンと多く、また短期間に集中して生産する必要がある。従って、鋼板は熱処理工程を経ない熱間圧延のままでも且つ生産性が高い工程でなければならない。さらに、パイプラインの敷設速度は現地での円周溶接の速度で決まるため、ラインパイプは極めて高い溶接性が要求される。従って、低温割れ感受性が低く、溶接予熱が不要で、高靱性が得られる低炭素(C)鋼でなければならない。低Cで高強度を得るためには、変態強化を活用することが必要で、この観点から高強度、高靱性が得られるマイクロ組織について検討した。

実験室設備を使用して種々の化学成分系、製造方法で鋼板を試作して検討した結果、低Cのベイナイト組織で高強度、高靱性(当初目標の-30でのCVN値120J)を満足できることがわかった。特に、写真1に示すように下部ベイナイト組織では極めて高いCVN値が得られる。上部ベイナイトでは、図中矢印で示すような粗大なMA(Martensite Austenite constituent)が存在し、さらにパケットの下部構造が下部ベイナイトと比べて粗いためにCVN値が低い。ベイナイト組織を得る方法として、図2に示す途中水冷停止型直接焼入れ法(IDQ Interrupted Direct Quench)プロセスを適用し、特に微細な下部ベイナイト組織を安定して実現できるように圧延条件、冷却条件、IDQ停止温度を決定した。

化学成分としてはボロン(B)鋼と非B鋼の二本立てで検討を開始した。歴史的経緯からラインパイプ用鋼にはB鋼が受け入れられ難いとの懸念を持っていたが、ラインパイプで許容されると考えられる合金元素の範囲ではB鋼の特性が圧倒的に優れていることが判明したので最終的にB鋼を選択した。Nを完全に固定できるだけのTiを添加し、Bの焼入れ性向上効果を十二分に生かすためにMoを添加している³⁾。図3は厚板工場で作った鋼板の強度・靱性バランスであ

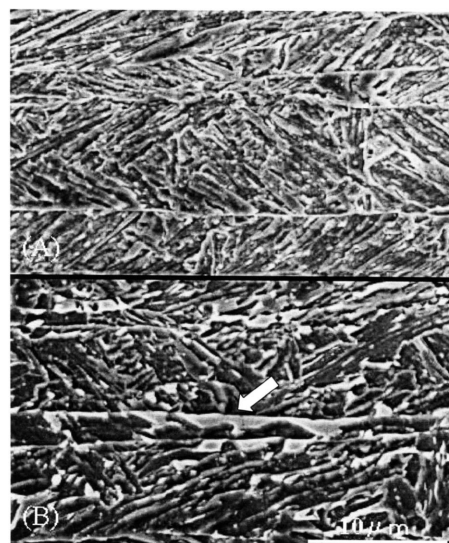


写真1 CVN値におよぼす金属組織の影響(組織、IDQ停止温度、-40でのCVN値)(A)下部ベイナイト、453、258J、(B)上部ベイナイト、533、167J

Effect of microstructure on CVN value (microstructure, IDQ stop temperature, CVN value at -40) (A) Lower bainite, 453, 258J, (B) Upper bainite, 533, 167J

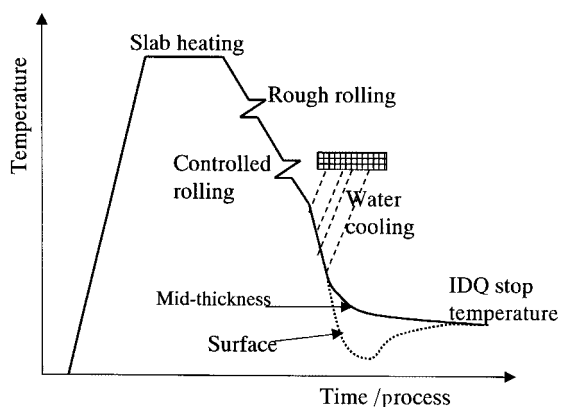


図2 IDQプロセスの概念図
Schematic illustration of IDQ process

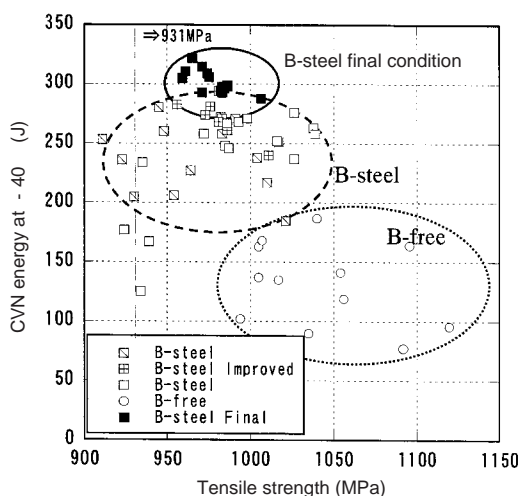


図3 引張強度とCVN値バランスにおよぼす合金系の影響
Effect of alloy system on the balance of tensile and CVN value

分に必要があるが、その範囲ではB鋼のシャルピー値は非B鋼の値と較べて高いことが明らかである。これらの高いCVN値を示すB鋼の粗粒HAZ組織は下部ベイナイト主体である。

下部ベイナイト鋼の強度は同一化学成分のマルテンサイト鋼の強度に近い。よく知られているようにマルテンサイトの強度はC量により決まる。従って、X120鋼板の強度もC量の依存性が高い。図5にはX120の引張り強度とC量の関係を示している。参考のためにX80、X100のデータも合わせて示している。X100以下のグレードではC量依存性が小さいのに対し、X120の強度はC量にほぼ比例しており、さらに最高強度(マルテンサイトの強度)に近いことも特徴である。母材強度が最高硬さに近いため、HAZの低温割れは発生しないと予測される。事実、図6のGMAW(Gas Metal Arc Welding)溶接によるy形溶接割れ試験結果からわかるように予熱を行わなくても溶接割れは発生しない。X120のような下部ベイナイト組織を呈する鋼では、溶接割れ性はC量そのものの影響が強いと考えられる。

このような結果に基づき、低C-高Mn-Mo-Ti-B鋼が開発された。931MPa以上の高い引張り強度と高靱性の厚鋼板を圧延のままですべて製造できた。また、目標強度を満足するためには通常より狭い範囲のC量の鋼を製鋼工程で量産する必要があり、この技術も確立した。

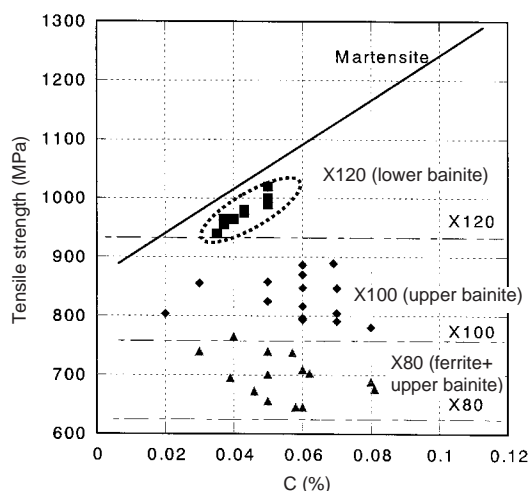


図5 高強度ラインパイプでのC量と引張強度の関係
Relationship between C content and tensile strength for high strength linepipe

るがB鋼の方が高いシャルピー値が得られる。C量を特に低くしたB鋼は極めて高い靱性を示す。

図4は粗粒HAZ(Heat Affected Zone: 溶接熱影響部)の再現熱サイクル試験片のCVN値と焼入れ性指数 値との関係を示している。X120用鋼板を製造するためには >3程度の焼入れ性を有する鋼成

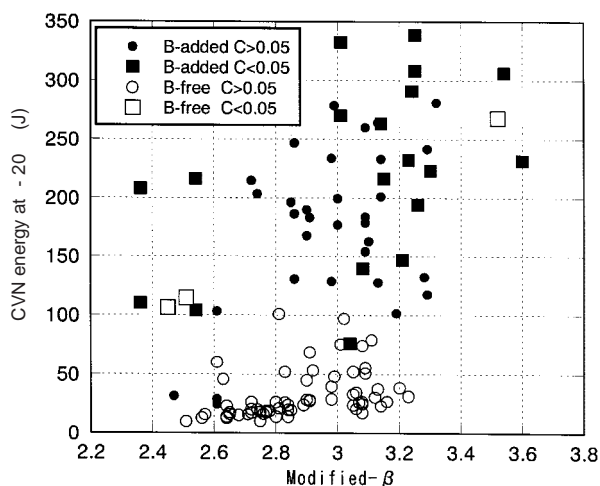


図4 シームHAZ靱性(CVN値)におよぼす焼入れ性指数の影響
Effect of hardenability index, on HAZ toughness (CVN value)

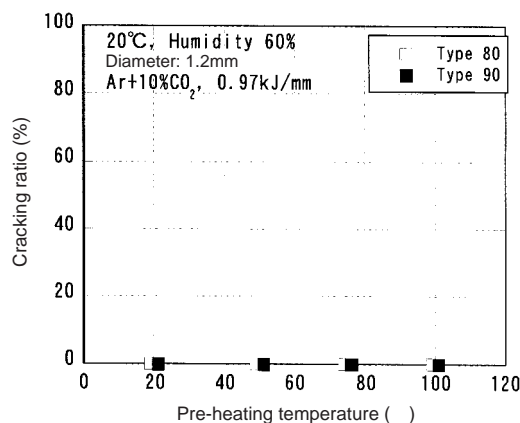


図6 円周溶接部の低温割れ特性 - y形溶接割れ試験結果
Cold cracking sensitivity of girth weld - Results of y-groove weld cracking test

3.2 シーム溶接技術の開発

X120のシーム溶接には、既存の生産設備をできるだけ生かすために、従来グレードで使用されている内外面一層のSAW(Sub-Merged Arc Welding)法を適用した。

また、シーム溶接金属には母材と同等以上の高い強度が要求されるため既存の溶接材料を用いることができない。そこで新たに、高強度、高靱性のSAW用溶接材料を開発した。溶接金属の強度と靱性は一般に相反し、高強度になるほど靱性は低下する。図7は試作した溶接ワイヤーとフラックスで得られたSAW溶接金属の強度と靱性の関係を示した図である。靱性は平均値で示し、1点が1組合せの結果に相当する。1000MPa級のSAW溶接金属でも全体的には高強度になるに従い靱性は低下する傾向が見られる。

しかし、靱性の値には同じ強度レベルでも幅があり、適正にフラックスとワイヤーを選択し溶接金属の化学成分を設計することにより、開発目標としている1000MPa付近で84Jを超える高靱性を有する溶接金属を得られることができた。この場合の溶接金属の組織は上部ベイナイトである。このような実験結果に基づき、溶接作業性に優れた高強度・高靱性溶接金属用のワイヤーとフラックスを開発した。また、シーム溶接部のHAZ靱性は溶接入熱が低いほど良好になる。このため、X120のシーム溶接条件は従来グレード材と比較して低入熱の溶接条件を採用している。これに伴い、開先形状の最適化や溶接条件を含めた溶接技術の開発も行った。これらの新開発の溶接材料および溶接技術により母材と同等の強度を有する高靱性のシーム溶接部を得ることができた。

3.3 鋼管成形技術

X120でのUOE成形技術のチャレンジは、高強度鋼に共通の課題

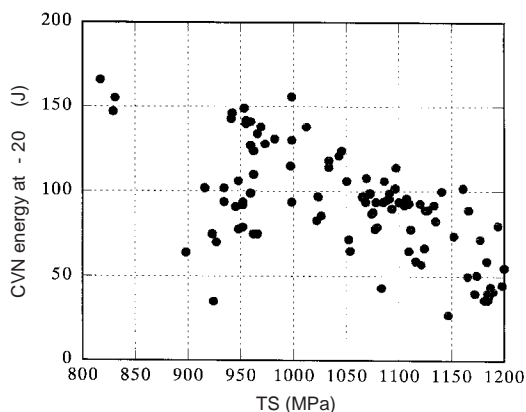


図7 SAW溶接金属の強度と靱性の関係

Relationship between tensile strength and CVN value of submerged arc weldmetal

である大きなスプリングバックをいかにして克服するかであった。成形時のスプリングバックを解決する成形技術をFEA(有限要素解析)と工場実験を連関させて初期段階から開発した。

例えば、X65と同様な成形を行うとUプレスで曲げられた鋼板の開口量は大きくなり、次工程のOプレス金型に挿入できない。また、真円度を満足する条件も極めて狭い。UOE造管全工程をFEAでのシミュレーションによって再現できるようにして、適正な成形条件、成形工具を開発した。その結果、目標とする形状の鋼管が製造可能になった。

3.4 鋼管試作および特性

以上述べた技術開発と並行して開発の早い段階から工場での試作実験を繰り返し、問題点を抽出して開発を進めた。鋼板については厚さ14~20mm、鋼管は直径28~36inで試作を行った。

表2には鋼管母材(鋼板)およびシーム溶接金属の化学成分の一例を示す。また、表3には鋼管の機械的特性の一例を示す。

鋼管周方向の強度はRing Expansion試験での測定も行い、100% SMYSを十分超える強度を有することを確認した。図8は鋼管長手方向引張りの応力-歪曲線である。一様伸びは約3%であり、大部分のパイプラインの設計に耐えうる十分な塑性変形能を有しているといえる。

母材のCVNの破面遷移温度(DBTT)は全て-50より十分低く、-30のCVN値も目標を達成する高い値である。B-DWTT試験の延性破面率は開発目標値は満足していないものの、実際のガスバースト試験での破面が延性であったこと、き裂伝播速度も最大300m/s程度とガスの減圧速度より十分小さいことを確認しており、特に問題は無いと考えられる⁴⁾。

溶接金属の特性は目標値を満足しており、HAZ靱性も粗粒HAZに相当するFL(会合部)+2mmの値は高い。しかし、local brittle zoneに当たる可能性が高いFL+1mmでは低い値も存在する。そこで、実際の破壊特性を評価する破壊力学に基づく評価を行った。シーム溶接

表2 代表的な母材およびシーム溶接金属の化学成分(mass%)
Typical chemical compositions of plate and seam weld

	C	Mn	Mo	Ti	B		Pcm
Plate	0.041	1.93	0.32	0.020	0.0012	Others	0.21
	0.036	1.96	0.34	0.017	0.0012	Others	0.21
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	Pcm
OW	0.05	0.23	1.63	2.2	0.92	1	0.31
IW	0.05	0.18	1.69	2.6	0.98	1.1	0.32

OW: Outside weld, IW: Inside weld

表3 鋼管の機械的特性の一例
Examples of mechanical properties of pipes

	Tensile test*1								Trans-weld TS (MPa)	Charpy V-notch				B-DWTT		
	Circumferential				Longitudinal					J (average of 3 specimens)				Shear Area (%)		
	YS (MPa)	TS (MPa)	EI*2 (%)	YS/TS (%)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	YS/TS (%)		Base metal	Weld metal	FL+ 1mm*3	FL+ 2mm*3		Base metal	
Pipe 1	897	974	25	92	905	938	27	96	941	0	287	200	228	249	0	64, 65
										-30	287	178	126	172	-20	62, 59
Pipe 2	920	1,017	24	90	911	981	23	93	988	0	287	172	156	226	0	88, 81
										-30	290	167	43	106	-20	90, 79

*1 API strap specimen, *2 Elongation, *3 Distance from the intersection of the SAW

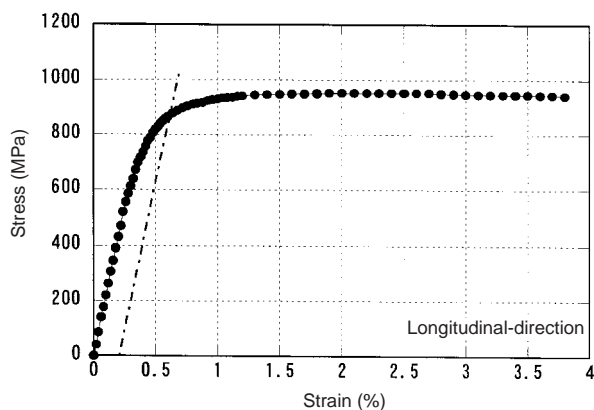


図8 典型的な長手方向応力 歪曲線
Typical stress-strain curve in the longitudinal direction

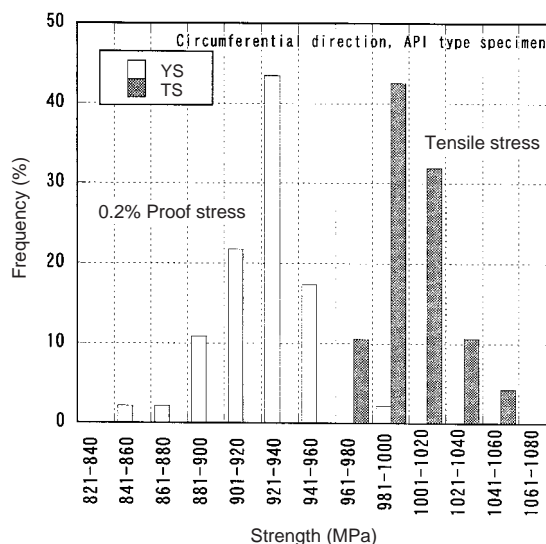


図11 少量商業生産で製造された鋼管の降伏強度と引張強度の分布
Distribution of YS and TS for pipes manufactured in a small scale commercial production

止端部に存在する2mm深さの表面開口欠陥および現実に起こりうる形状不整と応力分布を想定して必要CTOD(Crack Tip Opening Displacement)を計算した結果, 0.08mm以上あればよいとの結論を得た。2mm以上の欠陥は非破壊検査で検出され, しかも同じ限界CTODが許容する内部欠陥は幅4mmに相当するので極めて安全サイドの目標値である。図9は溶接金属およびHAZの脆化部のCTOD値を示しており, これらは全て必要最小値0.08mmを上回っている。すなわち, シーム部は十分に高い裂発生特性を有しており - 20 において使用可能である。

図10は単管水圧バースト試験結果を薄肉円筒式で規格化した値で

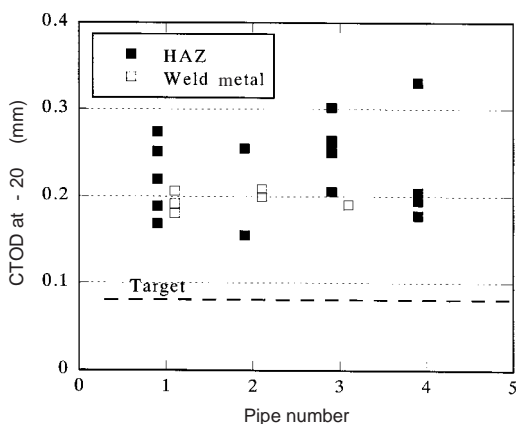


図9 シーム溶接とHAZのCTOD試験結果
CTOD test results of the seam weld centerline and heat affected zone

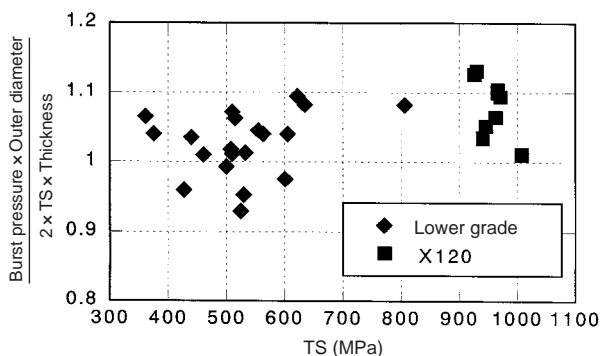


図10 引張強度の関数で示したバースト圧力
Burst pressure as a function of tensile strength

示している⁴⁾。X120は全て1を超えており, また低グレードでの結果と較べても遜色なく, むしろ優れている。すなわち, 内圧に十分に耐える特性である。

3.5 周辺技術の開発

X120を実用化するためには敷設現場で行う円周溶接の実用化が必須である。共同研究の一環としてGMAW用溶接ワイヤーの開発, 溶接技術の確立はExxonMobil社が実施し, 実用化可能である⁵⁾。

その他, 新日本製鐵は高周波バンド管を開発した。冷間曲げ管の試験も行い, 2°の曲げに成功した。この曲げ角度は各種パイプラインコードが許容している曲げ角度を超えているので, 現地曲げ特性は問題ないことが確認された。

4. 鋼管製造試験結果

商業生産時の問題点を抽出するため少量商業生産試験を行った。直径36in, 肉厚16mmの鋼管を約300本製造した。各種製造条件の最適化を行いつつ, 特性分布のデータを得た。図11は円周方向の全厚試験片による引張試験の結果であり, 全て目標を満足している。他の試験結果についても3.4節と同等の特性を有していた。これらの鋼管を用いて現地敷設, 溶接技術を確立するための試験が実施され, 特性や効率に関するデータが収集された。また, 実際の商業生産時には, 鋼管の製造条件はさらに最適化され, 特性の向上, 安定化が期待できる。

5. 結 言

従来グレードをはるかに凌ぐ超高強度ラインパイプX120を開発した。X120にはX65, X80と較べて飛躍した高い製造技術が要求され, 材質設計, 製鋼, 鑄造, 鋼板製造, 鋼管製造(UOE鋼管成形, シーム溶接技術)等, 全ての分野で互いに有機的につながった研究開発を実施した。少量商業生産まで含めた鋼管の開発, ラインパイプとしての実使用性能の評価を完了し, さらに敷設現場で行う円周溶接の実用化等パイプラインとしての総合的な開発を実施し, 商業化可能であることを明らかにした。

謝 辞

超高強度ラインパイプX120の開発はExxonMobil社との共同研究で行われたものであり、鋼管の評価、周辺技術の開発はもとより、鋼管の基本製造技術も両社の共同開発の成果である。ExxonMobil社研究開発部門のJ. Y. Koo, N. V. Bangaru, M. J. Luton, D. P. Fairchild, M. L. Macia, S. D. Papka, C. W. Petersen氏をはじめとして多くの人に多大な協力を頂いた。さらに、本開発の初期段階で千葉工業大学教授 為広博士(当時、鉄鋼研究所鋼材第二研究部 主幹研究員)が大きな寄与をされた。

参考文献

- 1) Corbett, K. T. et al.: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, p.10
- 2) Koo, J. K. et al.: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, p.105
- 3) Asahi, H.: ISIJ International, 1150(2002)
- 4) Papka, S. D. et al.: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, p.50
- 5) Fairchild, D. P. et al.: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003, p.26