

寒冷地用パイプラインに貢献する 鉄鋼技術

世界における天然ガスパイプラインの建設は、寒冷地など環境の厳しい地域へと拡大している。使用される鋼管への要求特性はより高度になっており、これに応えるのがメイドインジャパンの高品質鋼管である。

寒冷地用パイプラインは、アラスカやシベリアなどの寒冷地に敷設されている。
(写真提供: JFEスチール(株))

厳しい環境への建設が進むパイプライン

パイプラインは、石油や天然ガスを生産地から需要地まで運ぶ、長大な設備である。海外では、北アメリカ、ヨーロッパ、ロシアなどで天然ガスの長距離輸送を行う国際間のパイプラインが敷設されており、4,000kmを超えるようなものもある。パイプラインは、このような長距離の輸送パイプラインのほか、生産地から処理施設までのギャザリングパイプラインや、需要家まで運ぶ供給パイプラインがある。このようなパイプラインで使用される鋼管をラインパイプと呼んでいる。

最近では、世界的にエネルギー需要が増大し、石油・天然ガスの開発は、従来からあった生産地にとどまらず、寒冷地や海底などの未開発の地域へと広がっている。なかには地球上でも有数の寒冷地に敷設されるパイプラインもある。

原野や耕作地、都市部などさまざまな環境を通過し、長い道をつなぐパイプラインは、その途中で損傷して石油や天然ガスを搬送できなくなったり、事故を起こして寸断したりするわけにはいかない。そのため、使用される鋼管には高い品質が求められる(図1)。

溶接部の靱性を確保した電縫鋼管

ラインパイプに使われる鋼管には、溶接せずに圧延で製管する継目無鋼管と、溶接により製管するUOE鋼管や電縫鋼管がある。今回は、このラインパイプ用溶接鋼管の最先端技術について紹介する。ラインパイプ用溶接鋼管は、鋼管の直径に応じて、おおむね直径20インチ以上はUOE鋼管、24インチ以下は電縫鋼管というように使い分けられている。これらの鋼管は、

●ラインパイプの要求特性の変遷(図1)

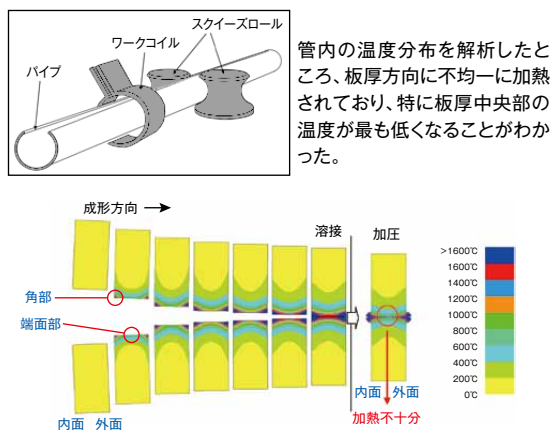
年代	1970	1980	1990	2000	2010~
強度	X60~65	X65~70	X80		X100~120
低温靱性保証		0℃	-20℃	-30℃	-46℃
				-60℃(X70以下)	-20℃(X80以上)
					-30℃(X80以上)
環境及び特性	オイルLP	ガスLP	耐サワーLP	厚肉高強度LP	厚肉耐サワーLP 極低温用LP
					超高強度LP
					高変形能LP
					深海用極厚肉LP

ガス輸送では輸送量を増やすために高圧輸送のニーズが高まり、ラインパイプには高強度化が求められてきた。最近では、敷設地環境などの条件に合わせ、ラインパイプへの要求特性は多用化、複合化する傾向にある。

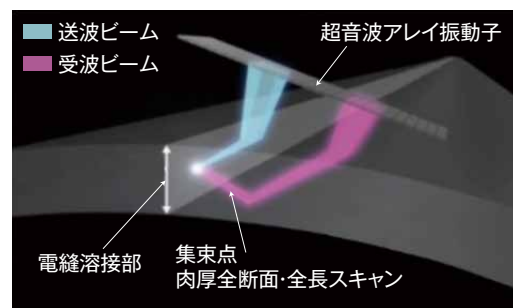
(資料提供: 新日鐵住金(株))

寒冷地でも靱性が低下しないラインパイプ用電縫鋼管

●電縫溶接部の管内部の温度分布の数値解析例(管の断面図)(図2)

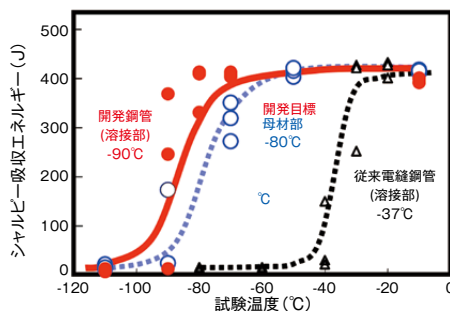


●フェーズドアレイ超音波探傷技術の構成(図4)



微小な振動子を多数配列したアレイ探触子による超音波探傷検査を連続的に行い、溶接部全長に対しリアルタイムで品質検査することが可能となった。

●電縫溶接部の低温靱性(図3)



ロール成形条件と電縫溶接条件を最適に制御することにより、溶接部の低温靱性を母材と同程度とすることができた。



ノルウェーでの海底敷設用ラインパイプに、世界で初めて非熱処理電縫鋼管が採用された。全長約6kmの鋼管がリールに巻かれ、敷設地まで運ばれるようす。

(資料提供: JFEスチール(株))

いずれも鋼板を溶接して作られるため、材料となる鋼板の強度と溶接部品質の確保は重要なポイントである。

電縫鋼管は、帯鋼を円弧状に成形し、継目を連続的に電気抵抗溶接して接合する。外観が美しく、比較的安価なため、建材や自動車部品など幅広く使われている。1980年代以降、高周波溶接が導入されるようになり、ラインパイプへの適用も進んだが、-50℃以下の極寒冷地では使用できなかった。その原因は、溶接部の低温靱性の低下であった。寒冷地では、溶接時に発生する酸化物の影響で靱性が著しく低下するため、電縫鋼管の使用は困難とされてきた。

この問題に対応し、低温下でも溶接部の靱性が低下しないラインパイプ用電縫鋼管が開発された。開発された主要な技術は、溶接時に発生する酸化物の形態や分布を制御する溶接技術、および連続的に溶接部全長をリアルタイムで超音波探傷する検査技術である。

まず酸化物を制御する溶接技術の開発にあたっては、鋼管を高周波溶接する際にどのような現象が起こっているか、鋼板断面の超音波検査を行った。高周波溶接では、溶接部に高周

波電流を流し加熱する。このとき鋼板の角部や端面部などには電流が集中し融点以上に加熱されるが、板厚方向中央部の温度は最も低くなる。次に、鋼板の両側から圧力をかけて溶接すると、鋼板内部の酸化物は外側に盛り上がり、後工程で除去することができる。しかし、加熱された角部や端面部がくっつく急速に冷えるため、板厚内部の酸化物は内側に閉じ込められてしまう(図2)。

そこで、溶接条件や成形条件、鋼管の形状などが溶接部に残存する酸化物にどのように影響するかを調べ、酸化物の形態や分布を最適に制御することに成功した。この技術により、従来は-40℃で溶接部の靱性が低下したのに対し、-50℃以下でも母材と同程度の靱性が保たれることが明らかになった(図3)。

こうして開発された鋼管には、信頼性を確認するための試験が実施される。例えば低温バースト試験(低温下で鋼管の内圧を上げて破壊の様子を観察する試験)では、脆性破壊により爆発するのではなく、小さな穴から徐々に壊れることが確認されている。

酸化物の全長検査を行う超音波探傷技術

もう一つの重要な技術は、溶接部の酸化物の全長検査技術である。電縫鋼管溶接部の品質保証は、一般的に超音波斜角探傷などの非破壊試験やシャルピー衝撃試験などの機械試験が実施されている。低温靱性は機械試験で検査されているが、これまで全長にわたる保証はされていなかった。そこで、低温靱性に影響を及ぼす酸化物を非破壊で、溶接直後に全長検査するためにフェーズドアレイ超音波探傷技術が開発された。

電縫鋼管の溶接モニタリング技術の開発

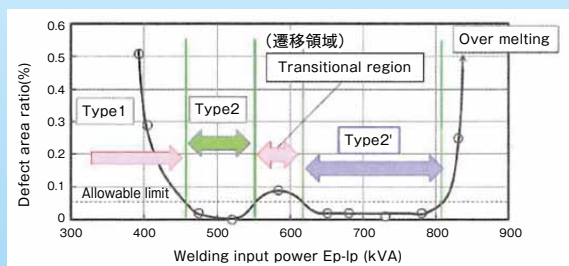
電縫鋼管の溶接工程の中で、特に入熱量と品質の關係に着目したオンラインでのモニタリング技術が開発されている。電縫溶接では入熱量、突き合せ角度、溶接速度などの条件が制御されるが、このうち入熱については、低過ぎ高過ぎ最適な入熱量にする必要がある。

溶接時の入熱量と品質を表したグラフを見ると、投入電力が460kV以上となる領域 (Type1、2、2') では欠陥率が低いが、550～620kVAでは比較的高い欠陥率を示す領域 (遷移領域) があり、それを超えるとまた欠陥率が低くなることからわかる。遷移領域では、その他の温度帯と溶接部の電流の流れが異なり、酸化物が多く排出されることがわかっている。そこで、遷移領域以外 (Type1、2、2') の入熱量を最適条件として、これを見つけるモニタリング技術を開発した。

この技術は、すでに実際の高周波溶接工程に適用されている。鋼板端部の赤熱しているパターンをCCDカメラによって撮影し、この画像をリアルタイム処理することにより、入熱の適正と溶接状態の情報を、全長にわたり、連続的に監視する。また通電した高周波電流による誘起電流の周波数測定を行い、入熱条件を監視する。

このように、溶接部を直接監視して可視化し、さらに製造途中で最適条件を外れる恐れがあればその場で条件を制御するのがこの技術のポイントであり、電縫鋼管の品質向上に寄与している。

●品質 (欠陥面積率) の入熱依存性評価 (図5)



欠陥率の低い入熱量450～800kVAの間に、一時的に電磁力が消失する「遷移領域」がある。この部分では酸化物排出が適正に行われず、欠陥が増加しやすい。

(資料提供: 新日鐵住金(株))

フェーズドアレイ超音波探傷技術とは、微小な振動子を多数配列したアレイ探触子を用いた超音波探傷技術であり、各振動子の送受信タイミングの時間差を制御することにより、超音波ビームの方向や集束位置を任意に変えながら探傷検査ができる。このため、欠陥の位置や大きさ、形状を推定しやすいというメリットがある。

鋼管製造ラインでは、選択された振動子から超音波ビームを溶接部で集束するように送信し、溶接部の正反射方向に位置する別の振動子で受信を行う。ここで送信の振動子群と受信の振動子群の位置を適切に切り替えることによって、溶接部の内面から外面までを点集束ビームで走査することが可能となる (図4)。この検査により、従来行っていた抜き取りによる機械試験ではなく、製品全長の非破壊検査が可能となった。

結晶粒微細化により厚板の靱性を向上

UOE鋼管は、厚板をプレス機で「U」字状、次に「O」字状に成形して、サブマージドアーク溶接で接合した後、内側からエキスパンダーで拡張して仕上げる。直径1,500mm前後まで製造可能で、大径管としては寸法精度が良好な特徴を持つ。

サブマージドアーク溶接は、電縫鋼管の高周波抵抗溶接に比べ入熱量が大きい。このため溶接の熱影響部の結晶粒が粗大化し、強度が低下する問題があった。

その対策として重要な役割を果たしたのが、厚板のオキサイドメタラジーである。結晶粒の粗大化を防ぐために酸化物や硫化物の微細な粒子を数多く分散させ、結晶粒が成長するのをピン止め (抑止) する、という考え方である。具体的方法としては、マグネシウムやカルシウムなどを添加し、結晶組織中にナノオーダーの超微細な酸化物や硫化物を高密度に分散した。

さらに重要なのが、熱間圧延時の温度調整と加速冷却の最適化である。一般的な結晶粒の大きさは10 μ mであるが、これをさらに微細化することで靱性の低下を防ぐことができる。

これらの開発成果を活用して開発されたのが、寒冷地用ラインパイプである。

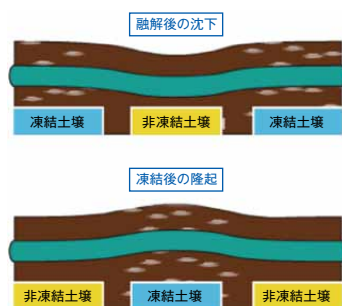
不連続永久凍土にも耐える高変形能鋼管

寒冷地用ラインパイプは、いかに低い温度で脆くならず使用できるかの観点が開発目標となって進歩してきた。一般的なラインパイプの適用温度の目安は-30℃までだが、寒冷地への利用が進むにつれ、高強度で適用温度が低いラインパイプが求められるようになってきた。

北極圏などの寒冷地で、天然ガスを輸送する長距離ラインにはUOE鋼管が多く用いられているが、このような地域では不連続永久凍土地帯や、地震、地滑りが起きやすい場所

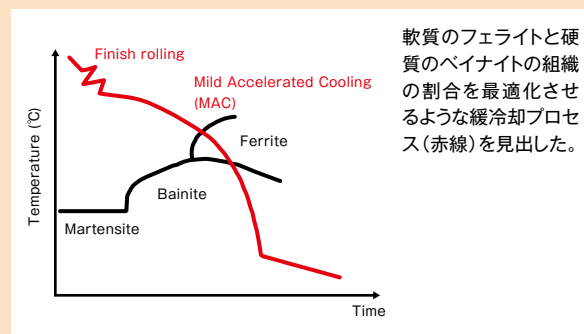
低温下の地殻変動でも破壊や座屈のない高変形能ラインパイプ用UOE鋼管

●不連続永久凍土帯の地殻変動(図6)



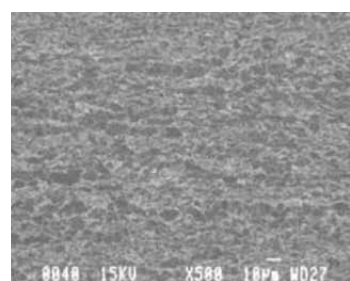
ロシア極東地域で敷設される高変形能UOE鋼管。この地域には不連続凍土帯も多く凍土の融解や凍結によってラインパイプが変形してしまうため、高変形能鋼管が採用された。

●開発鋼の冷却中の温度時間曲線(図7)



軟質のフェライトと硬質のベイナイトの組織の割合を最適化させるような緩冷却プロセス(赤線)を見出した。

●開発鋼のSEM像(図8)



図中の白い部分がベイナイト、黒い部分がフェライト。ナノレベルの酸化物を微細分散させて結晶粒径粗大化をピン止めによって防いだ。平均粒径 $3\mu\text{m}$ 以下の微細組織とし、低温下での靱性を確保した。

(資料提供: 新日鐵住金(株))

も多く存在する。とくに不連続永久凍土地帯では、冬は地面が凍結していたが夏には氷が溶け、冬には再度凍結し、鋼管には曲げ、曲げ戻しなどの力がかかる(図6)。そこで、使用される鋼管には、想定される歪みに耐えられる変形能が必要である。

このようなニーズに対応して、高変形能ラインパイプが開発された。高変形能を実現するためには、超微細組織の実現が重要であった。ラインパイプの一般的な組織はベイナイトであるが、ベイナイトの組織は硬質であるため変形能は高くない。そこでベイナイトの組織中に、軟質のフェライト相を生成、分散させた後に、再びベイナイトとなるような複合組織を作った。これを可能としたのは、フェライトとベイナイトのそれぞれの比率を最適化して安定生産でできるような加速冷却技術の開発である(図7)。この結果、平均粒径 $3\mu\text{m}$ 以下の超微細組織が得られた(図8)。

すでにAPI(American Petroleum Institute)グレードX60(数字はksi単位での強度レベル)では、シベリアの寒冷地パイプラインに採用された実績がある。またX100グレードは、カナダの寒冷地パイプラインでの実証試験を行っている。最近では、天然ガス輸送の高圧化ニーズに伴い、ラインパイプに

求められる強度レベルが高度化しているが、高強度化すると低温靱性が低くなるため、稼働前の実証試験が念入りに行われる。それぞれの敷設場所の環境に合わせ、最適な性能を発揮できるようなラインパイプが求められている。

最近の寒冷地の凍土層は、温暖化の影響を受けて融解が進む傾向にあり、道路や土木施設、建築物なども損傷を受けることが懸念されている。変化する自然の中にあっても求められた性能を発揮し、安全な社会を守るのがインフラ施設であり、それを支えるのは鉄鋼材料の役目である。

ラインパイプは、敷設国の製品が採用されることが多いが、世界のハイレンドのラインパイプの3割強は日本製が占めている。その中で認められる日本のラインパイプの強みは、高い品質と信頼性である。世界のエネルギー需要が高まるなか、日本の鉄鋼製品への期待はますます高まっている。

●取材協力 JFEスチール(株)、新日鐵住金(株)
●文 杉山 香里