

過酷な使用環境に耐える品質を追求 鋼管 (2)

エネルギー産業や自動車、建設機械、建築・土木など、社会を支えるさまざまな分野における基礎部材として不可欠な鋼管。特に近年、石油や天然ガスを輸送するラインパイプでは、天然ガスの長距離・大量輸送ニーズの高まりと、安全性、コスト削減の観点から、鋼管の高強度化・高靱性化が求められ、それに対応する研究・技術開発が加速化している。シリーズの第2回目は、大深度化が進む油井管と、要求特性が厳格化するラインパイプ用鋼管の技術開発の最先端を紹介する。

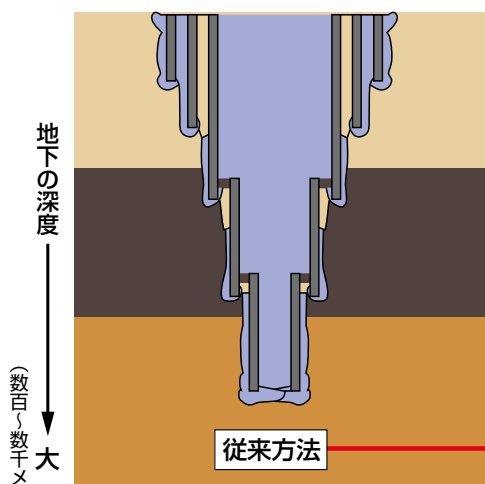
石油採掘の大深度化に貢献する 電縫鋼管

前号(※1)で紹介したように、新日鉄では高強度・高靱性の熱延鋼板開発に加えて、長年、溶接の物理的現象(鋼の溶け方と接合のされ方)、電気抵抗溶接(ERW)での最適な溶接条件(電流値、溶接速度など)の研究を進め、高級かつ安定した品質の「電縫鋼管」を開発し続けている。溶接品質への高い信頼性が求められる油井管向けに中径電縫鋼管を提供できるのは世界に数百ある電縫鋼管メーカーの中で、新日鉄を含めた数社だけだ。

地下から石油・ガスを汲み上げる油井は、約10mの油井管をねじ継手でつなぎながら、地表から挿入し、地層が変わる部分などで段階的に直径の小さい油井管を降下していく方法で施工されている。深くなるほど油井管の段数が増え、鋼管の径は深度が増すほど徐々に小さくなる。つまり最初に挿入する地表近傍の鋼管は、採掘深度が大きくなるほど、非常に大きな径にしておかなければならない(図1)。

現在、石油採掘の大深度化が進む中で、コストを抑える電縫油井管のアプリケーションの一つとして注目されているのが「エクスパンドブル」という技術。鋼製のプラグを用いて、降下した油井管(肉厚約10mm)の内径を地中で10~20%拡げ、究極的には地表部から最大深度域まで同じ径の鋼管を何段でもつなぎ合わせることができ

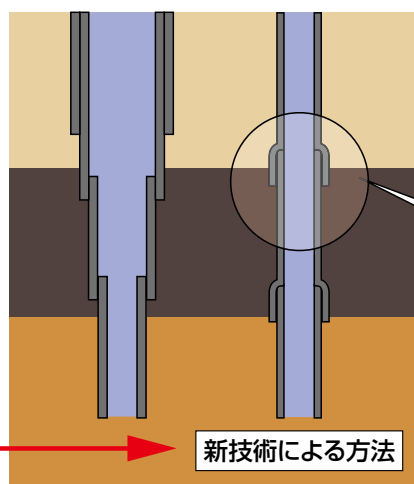
従来の作井方法



従来の方法
径の大きい油井管から少しずつ径を小さくして作井していく。抗底で200mm 径でも地表では1,000mm 近くになることもある。

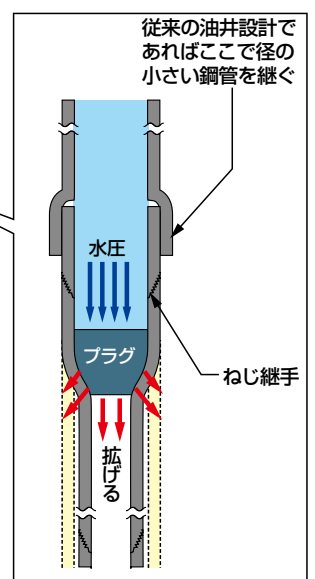
図 1

「エクスパンドブル」技術による作井方法



新技術による方法
中間段階の技術で 油井管の肉厚分、径が細くなる。 全長単一径の油井設計。究極のエクスパンドブル技術。

図 2



小径の油井管を降下して地中で拡管することで、究極の技術では地表から抗底まで同一径で作井できる。使用する掘削リグが小型で済むため大きなコストダウンになる。

※ 1 本誌 2009 年 3 月号 モノづくりの原点—科学の世界 VOL.45 参照 (新日鉄 HP URL : http://www.nsc.co.jp/monthly/pdf/2009_3_186_11_14.pdf)。

期的な施工技術だ。これにより深度にとらわれない油井設計と大幅なコストダウンが可能となる(図2)。

この技術は、新日鉄の優れた電縫鋼管製造技術があって可能になると言っても過言ではない。現在一般的に油井管にはシームレス管が使用されている。シームレス管は円柱型の鋼材(ビレット)に孔を開けて製造するため肉厚(鋼材の厚み)の均一化が難しく、仮にこのような鋼管を拡管した場合、肉厚が薄い部分に歪みが集中して割れが生じやすくなる。それに対して、板厚精度が高い熱延鋼板から製造する電縫鋼管は、肉厚の変化(偏肉率)が2%程度とシームレス管に比べて均一であり、高い拡管率が達成できる。

新日鉄では、高い形状精度と、拡管時の変形に耐える電縫溶接品質の信頼性を確立するとともに、拡管加工により材料の硬さが増す「加工硬化特性」を上手に利用するノウハウを活用して、拡管性能が高く、拡管後の材質特性が優れた電縫鋼管を提供している(図3)。

強度と靱性に挑む ラインパイプ用UO鋼管の最先端

微細なベイナイト組織を活用して 強度と靱性を両立

近年、世界的なエネルギー需要の拡大と地球環境保全の観点から、主に遠隔地で産出する天然ガスの長距離・

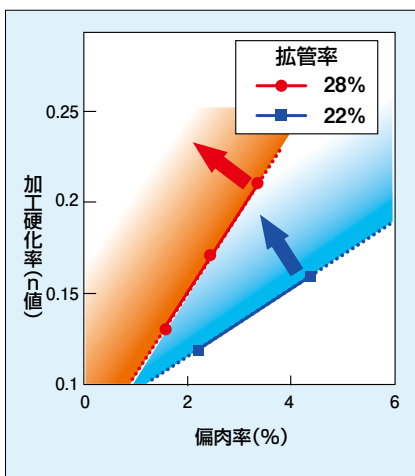
大量輸送の必要性が生じている。それに伴い、敷設コストに加えて輸送コストを下げるための高圧操業に耐え得る小径・薄肉のラインパイプ用高強度鋼管へのニーズが高まっている。鋼材の強度を高めると、例えば、内径とガス量が同じ場合は鋼管の肉厚を薄くでき、肉厚とガス量が同じであれば内圧を高めて径を小さくできる。

2007年には、ラインパイプ用高強度UO鋼管の最先端を走る「X100」と「X120(エクソンモービル社と新日鉄の共同開発)」が規格化され、高強度と低温靱性(粘り強く壊れにくい性質)を両立する最新かつ最高級のラインパイプ用鋼管として注目を集めている。天然ガス輸送用ラインパイプは、鋼管の開発だけではなく、現地での円周溶接技術の開発や、地形に合わせるための低温下での曲がり鋼管の製造試験、安全性の評価などが行われてきた。新日鉄は他社に先駆けてX120までの高強度UO鋼管の量産化体制を整えており、今後の本格的な実用化が待たれる

ラインパイプ用鋼管は、高強度と低温靱性を備え、寒冷地の敷設現場での溶接時に、溶接予熱温度を低くしても溶接欠陥が発生しにくい(溶接性の良い)鋼材品質のつくり込みが重要だ。一方、国際的なエネルギー開発プロジェクトでは、短期間で数十万トンから百万トン単位の鋼管が使用されるため、鋼管の材料となる厚板も短工期で量産できる体制が求められる。高級厚板は、圧延後の熱処理プロセスで品質の信頼性を高めることがあるが、ラインパイプ用鋼管はその制約から、TMCP(※2)を駆使して、熱処理をせず、

正常に拡管できる 偏肉率と加工硬化率

図3

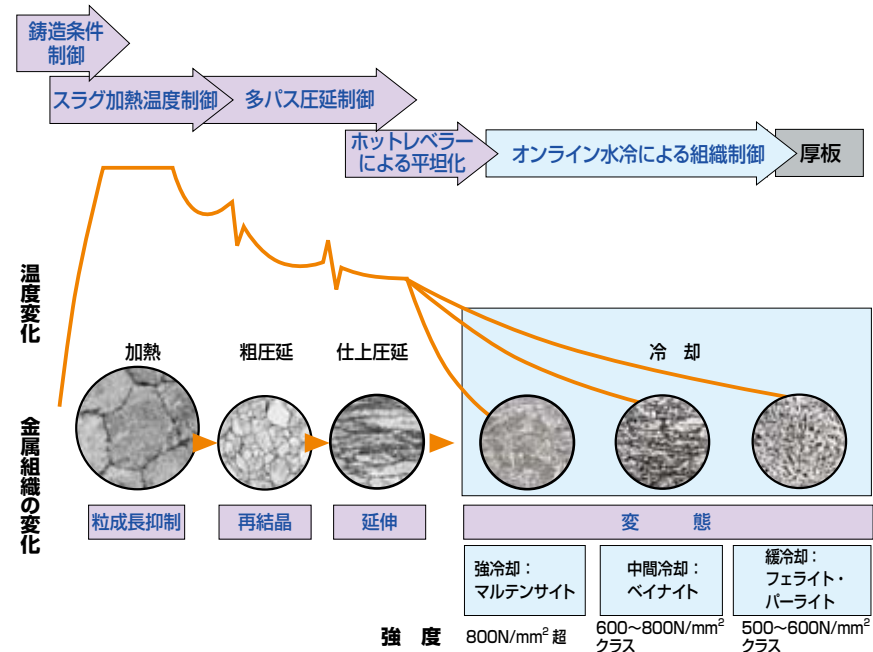


各々の線より左上方の領域の偏肉率と加工硬化率をもつ鋼管は正常に拡管できることを示す。偏肉率が低く肉厚の均一な鋼管ほど拡管性能が高い。

厚板のTMCPによる制御冷却例

図4

プロセス



※2 TMCP: Thermo Mechanical Control Process

加工熱処理法または熱加工制御法。圧延と圧延後の冷却の組み合わせによって、組織制御する技術。

詳しくは、本誌2007年6月号モノづくりの原点—科学の世界VOL.33参照(新日鉄HP URL: http://www.nsc.co.jp/monthly/pdf/2007_6_169_07_10.pdf)。

圧延工程までで、材質をつくり込む難しさがある。

鋼材の強度と靱性は炭素量・合金量と鉄の結晶組織によって決まる。通常、炭素が多いと強度は上がるが、鉄を脆くして靱性や溶接性を悪化させる。そこで炭素を減らしながら(0.04%)、いかに強度を維持するかが材料開発の大きなハードルだ。鉄は冷却途上の高温域で(800℃付近)生成する比較的軟らかいフェライトや、急速冷却によって低温域で生成する硬いマルテンサイトなど、温度制御によって多彩な結晶組織に変態するが、新日鉄では、低炭素下でもX100、X120を満足する高強度と低温靱性を実現できる微細なベイナイト組織を、TMCPだけで製造する技術を確認している(図4)。

微量の合金添加と圧延の工夫で最適な組織を生成させる

ラインパイプ用高強度鋼管では、母材となる厚板の加速冷却時に粗大なフェライトを生成させずに均質なベイナイト組織を作るため、製鋼工程でマンガン(Mn)の他にモリブデン(Mo)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)など少量の合金元素を添加しているが、さらに高い強度が求められるX120では、従来の合金元素に加えて「ボロン(B)」を添加している。結晶組織の粒界(結晶同士の境界)に微量のボロン原子を偏析させることによって、粒界からのフェライトの生成を抑制してベイナイトへの変態を容易にする(写真1)。しかも、ボロンはわずか10ppm(10万分の1)

でマンガン1%、モリブデン0.5%に相当する強度をもたらすため、合金コストの削減効果も非常に大きい。

ボロンを添加すると、化学組成や冷却条件の制御が難しいため、熱処理で材質をつくり込む高級厚板製造ではボロンが使われてきたが、TMCPで金属組織をつくり込まなければならぬ高強度鋼管の製造では、これまで本格的に使用されるケースがなかった。新日鉄では、ボロンを含む化学組成とTMCP条件の緻密な制御手法を確立し、X120の開発を実現した。

また、鋼材の靱性を高めるためには結晶粒径の細粒化が不可欠だ。そこで、圧延時に細粒化効果を発揮するニオブ(Nb)を微量添加するとともに、圧延温度をコントロールして、結晶の粗大化をもたらす再結晶化を抑制。その後、細粒組織のまま加速冷却を行うことで、極めて微細なベイナイト組織を生成させている(写真2)。

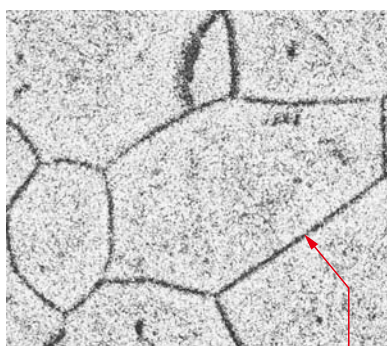
さらに新日鉄では、顧客ニーズに合わせた一品生産である高強度UO鋼管(X80~X120)において、例えば、極めて優れた低温靱性や、凍土地帯で起こる地盤変動に耐える変形能(延性)が特に求められる場合は、加速冷却時にベイナイトだけではなく少量のフェライトを微細分散させて、靱性とともに変形能を強化するなど、自在な組織制御によって要求特性に応じた材質のつくり分けを行っている(図5)。

X120の開発では、こうしたメタラジーの技術開発だけではなく、鋼管成形時の材料の反発力(スプリングバック)

強度を高める ボロンの組織制御 メカニズム

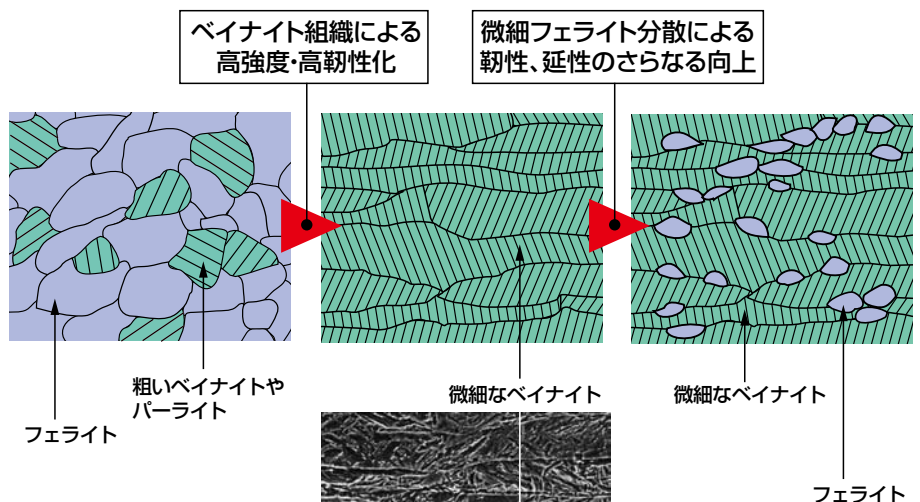
写真1 靱性・変形能を高めるための組織制御例

図5



結晶粒界にボロンが偏析していることを示す黒い点々がボロンの存在を示す(点1個がボロン原子1個ではない)

結晶粒界にボロンが偏析すると粒界からのフェライト生成を抑制してベイナイト組織への変態を容易にする。



最適なプロセス制御により生成されたベイナイト組織

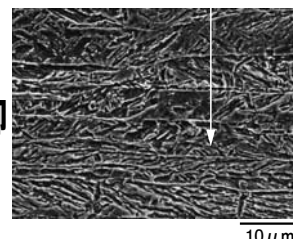


写真2

10μm

が大きい高強度鋼板を高精度に成形するためUO鋼管の成形プロセスの刷新や、新たなシーム溶接材料開発も製品化のために必須の要素だった。2004年には、鋼材製造と成形、シーム溶接の3つの要素技術を組み合わせた総合力と、利用技術にまで踏み込んだお客様との共同研究・開発で培った信頼を基盤に、X120の1マイルのデモンストレーションラインを厳冬期のカナダで完成させ、高い評価を得ている(写真3)。

3,000m級深海での採用を目指す 新たな挑戦

近年、天然ガスの長距離輸送ニーズと、海底パイプライン敷設や鋼管製造の技術進歩により、地中海などの2,000~3,000m級の深海パイプラインの敷設が計画・実行されており、200気圧にも及ぶ水圧に耐える**深海ラインパイプ用UO鋼管**が求められるようになってきた。その鋼管開発は、厚板をUO成形できる範囲で厚肉化して(24インチ径では約30mmが限界値)水圧で潰れ(圧潰)ないことを前提とするが、製造工程の最後に拡管して真円度を高めるUO鋼管は、外圧で発生する逆方向の応力(圧縮応力)で潰れやすいという弱点がある(バウシンガー効果)。

新日鉄では1990年代半ばから圧潰の研究に取り組み、拡管前のOプレスでの成形方法を工夫するとともに、耐食性を高めるコーティング時の加熱(約250℃)によってバ

ウシンガー効果を最小化できる鋼板を開発して圧縮強度を高める対策を確立している。その背景には、圧力とパイプの圧潰の現象把握とデータの蓄積がある。大規模な試験となる大径のUO鋼管は、海外の試験機関に依頼して行い、実管の圧潰試験結果をもとに構築した**FEM**(有限要素法)を使い、小さな試験片で測定した円周方向の圧縮強度と残留応力、形状などの計測データから圧潰に至る圧力限界を正確に導き出し、品質の信頼性を高めている。(写真4)。こうした努力が実り、2007年には世界最深クラスとなる地中海横断プロジェクト(スペイン-アルジェリア)の深海域(最大2,160m)に新日鉄が開発したUO鋼管が採用された。

シリーズ最終回となる次号では、薄手で肉厚精度が高い特長を活かし、適用部材に応じた多彩な板厚・径の製品を提供している小径電縫鋼管の利用技術の最先端を紹介するとともに、鋼管技術の未来を展望する。

監修 技術開発本部鉄鋼研究所 鋼材第二研究部
鋼管総括 主幹研究員 工学博士
朝日 均 (あさひ・ひとし)

プロフィール
1956年生まれ大阪府出身
1981年入社
以後、鋼管商品、プロセスの研究開発、特に油井管、ラインパイプの商品開発に従事
1994年 工学博士(大阪大学)
2004年 英国金属学会 パナジウム賞
2009年 日本鉄鋼協会 西山記念賞



X120のデモンストレーション ライン 写真3



現地での円周溶接が終わった直後。その後、溝に降下され埋設される。

UO鋼管の圧潰試験光景と 圧潰した鋼管 写真4



水を満たした圧力容器に試験用鋼管を入れるところ。その後蓋をして鋼管が圧潰するまで水圧を高める。