

Recent Activities in Research of Tubular Products



豊岡 高明
Takaaki Toyooka
技術研究所 鋼管・鋳
物研究部門長

要旨

シームレス鋼管の圧延技術、電縫鋼管の成形技術を中心とした、最近の鋼管製造技術の開発と、それら開発技術を生かした鋼管新製品開発の考え方と特性を主体に (1) マンネスマンプロセスによる高生産性ステンレス継目無鋼管製造技術、(2) 新規開発した高耐食性各種マルテンサイト系ステンレス継目無鋼管、(3) ステンレス電縫鋼管製造ミルの開発、(4) 中径電縫ラインパイプ造管技術、および角コラム製造技術について紹介した。

Synopsis:

The new manufacturing processes for seamless steel pipe and ERW steel pipe have been developed. The manufacturing concept of the developed steel pipe and its characteristics are summarized as follows. (1) High efficient manufacturing technologies for high alloy steel seamless tube and pipe have been established by Mannesmann rolling process. (2) New martensitic stainless steel seamless pipes with superior corrosion resistance have been developed. (3) New ERW forming mill for stainless steel pipes with excellent formability have been developed. (4) High quality ERW pipe products have been produced by manufacturing technology for medium diameter ERW linepipe and square steel pipe.

1 緒 言

鋼管は、自動車、二輪車の部材などの機械構造用にはもちろんのこと土木、建築用に、さらには配管、油井管などのエネルギー産業用や化学プラント用など産業界の広い分野で使用されており、各用途ごとに要求される特性も非常に多岐にわたっている。それぞれの用途に応じた鋼管商品を、優れた品質で、安定してかつ安価に造り込む技術の開発が望まれてきた。

以上のような背景を踏まえて行ったこの 10 年間の鋼管部門の研究の中から、継目無鋼管分野においてはマンネスマンプロセスによる高生産性ステンレス継目無鋼管製造技術の開発および各種マルテンサイト系ステンレス継目無鋼管の商品化について、溶接鋼管分野においては自動車排ガスシステム用ステンレス電縫鋼管製造ミルの開発、中径電縫ラインパイプ造管技術および角コラム製造技術の開発について紹介する。

2 シームレス鋼管の技術潮流

石油、ガス産業で使用するシームレス鋼管は、油井管を中心として最近の 10 年間で高級化が進んでいる。日本からの 13Cr 以上の高合金油井管の輸出量はこの 10 年間で 10 倍以上に増加しており、

年間 9 万トン以上となっている。また、ボイラ用鋼管などにおいても高合金化が進んでいる。

このような状況を背景として、最近の 10 年間の大きな技術の流れは (1) 高合金鋼圧延技術向上、(2) 高級化、高付加価値化の 2 つに大きく分けられる。

高合金鋼圧延技術の開発は、圧延条件最適化技術の確立、高合金鋼圧延用潤滑技術の開発が大きな技術開発課題であり、これらの問題を解決することにより、従来はマンネスマンプロセスでは製造が困難であった高合金鋼の高品質、多量生産体制が確立された。

一方、高級化、高付加価値化に関しては、油井環境の苛酷化にともない、API (American Petroleum Institute) に規定されている 13Cr 鋼管の使用限界以上の高温、高炭酸ガス環境が増加している。そのような環境では従来は 2 相ステンレス鋼以上の高合金鋼が適用されていたが、最近低 C 化し、Ni、Mo を含んだ、API 13Cr 鋼管に比べて耐食性に優れる新 13Cr 鋼管の開発が行なわれ、実際のフィールドへの適用も始まっている。

さらに、油井管への 13Cr 系鋼管の適用が進むにつれて、ラインパイプへ適用可能な 13Cr 系鋼管の開発も要望され、溶接可能なラインパイプ用 12Cr シームレス鋼管の開発も行なわれて、一部で実際に使用され始めている。

2.1 シームレス鋼管プロセス関係

継目無鋼管圧延分野に関し、この 10 年間は、マンネスマンプロセスによる高合金鋼継目無鋼管の製造技術確立のための研究に傾注

* 平成 10 年 12 月 3 日原稿受付

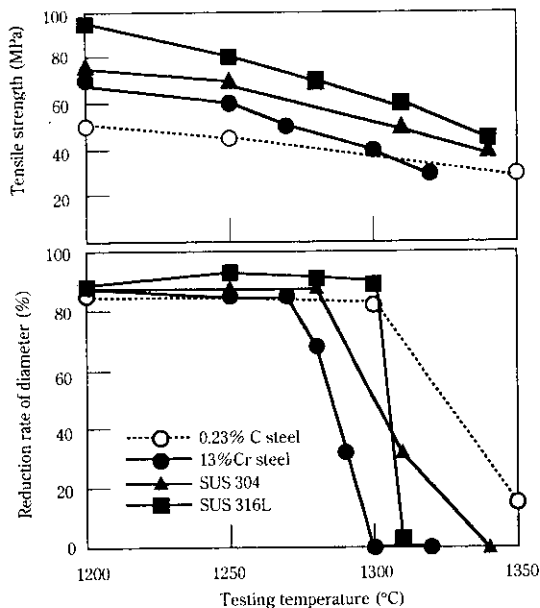


Fig. 1 Influence of testing temperature on reduction rate of diameter and tensile strength (on heating Gleeble test)

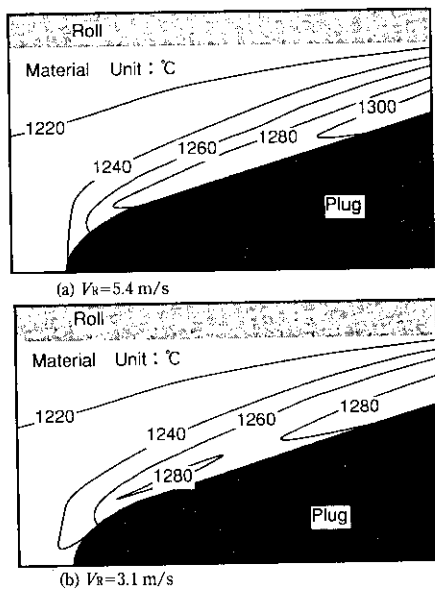


Fig. 2 Temperature distribution of SUS316L in piercing heating temperature of billet: 1230°C; roll peripheral speed (V_R): (a) 5.4 m/s, (b) 3.1 m/s

してきた。マンネスマンプロセスでは、丸ビレットを加熱した後マンネスマン式ピアサーを用いて穿孔する。小径継目無鋼管の場合、得られた中空素管をマンドレルミルにて延伸圧延し、再加熱の後、ホットストレッチレデュサーにて所定の外径に縮径圧延する。中径継目無鋼管の場合、得られた中空素管をエロンゲーター、プラグミル、リーラーにて圧延し、再加熱の後、サイザーにて定径圧延する。

以下に高合金継目無鋼管圧延に関する開発技術について述べる。まず、高合金鋼のグリーブル試験を行って変形能を明らかにし、加工発熱と摩擦発熱を考慮した伝熱解析モデルによる温度シミュレーションを実施した。高合金鋼の高温変形能を Fig. 1 に、ビレット穿孔中の温度に及ぼすピアサー穿孔圧延速度の影響を Fig. 2 に示

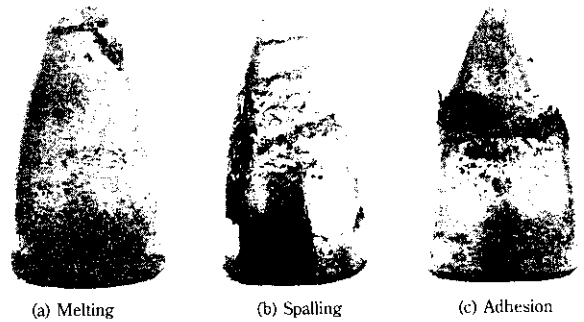


Photo 1 Deterioration of plug after piercing stainless steel billets

す。これからビレット加熱温度とピアサー穿孔速度制御によるビレット温度制御技術を開発し、二枚板状内面疵を防止した。さらに、高合金鋼ビレットの穿孔においても内外面疵や噛込みおよび戻抜け不良などの発生を抑制できるピアサー設定最適化技術を開発した¹⁾。

しかし、マンネスマン式ピアサーで高合金鋼ビレットを穿孔圧延すると、ガイドシュー、ロールおよびプラグが著しく損耗し、これらを起因として、管内外面に疵が発生しやすくなり、製品歩留まりと生産性の低下を招く。そこで、ラボ実験によってそれぞれの損耗機構を解明し、対策技術を開発した²⁾。

高合金鋼は表面の酸化被膜が薄く、かつ熱間変形抵抗が大きいので、圧延時に酸化被膜が破られ、ガイドシューに焼付きやすい。ガイドシュー焼付きに対するハード面からの対策として、ローラー型のシューが円周方向に回転し、被圧延材との滑りが極めて減少できるドライプロローシューを開発した³⁾。また、円盤型のシューが被圧延材の長手方向に回転するディスクシューには、ホウ酸と弱塩基性の被膜形成剤の混合水溶液および弱酸性の補助水溶液を用い、中和反応によってガイドシュー表面に潤滑被膜を形成させ、焼付きを防止する潤滑技術を開発した。

高合金鋼ビレット穿孔圧延時、ピアサーロールは塑性流動をともなうて損耗するため、ロール表面が平滑になる。そこで、炭化ケイ素微粉を高分子ポリマーによって水に分散させたスリッパ防止剤を開発し、ピアサーロール表面の平滑化による圧延不能を解消した。

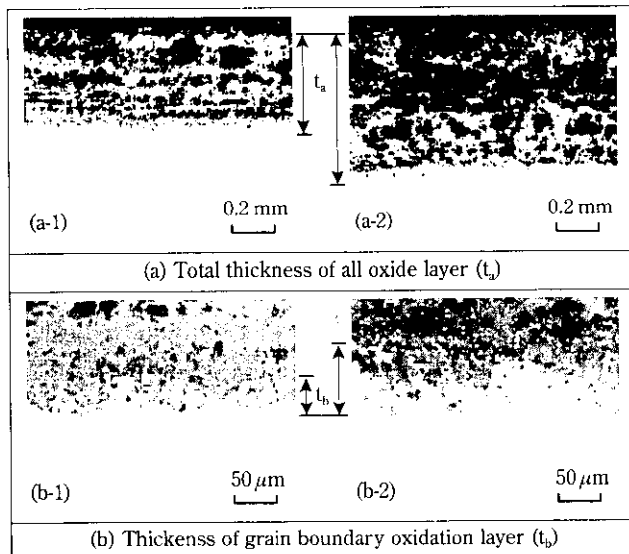
さらに、高合金鋼ビレット穿孔圧延時、ピアサープラグにかかる圧延負荷と熱負荷は非常に過酷で、プラグは溶損、変形、欠損状に損傷しやすい。プラグの損傷状況を Photo 1 に示す。0.3%C-0.5%Cr-1%Ni-0.5%Nb-1.5%Mo-3%W-1%Co の新成分系プラグを開発し、熱処理時間を見直した。開発プラグは高温強度が高く、表面酸化被膜の耐剥離性に優れ、プラグ寿命は従来の3倍以上に向上した。開発プラグの表面酸化被膜を従来プラグと比較して Photo 2 に示す。

その他、マンドレルミルでの延伸圧延に際し、MAP システム⁴⁾とバルジ幅計⁵⁾の開発およびロールの穴型形状やバルジ幅の適正化による高合金鋼適正圧延技術を開発した。また、疵防止と生産性向上を目的として導入したハイスロールを使いこなすための潤滑圧延技術も開発した。

2.2 シームレス鋼管の製品開発

シームレス鋼管の製品開発は主として石油産業の発展と結びついており、最近の 10 年間に開発された新製品も、油井管、ラインパイプに関するものが多い。

油井管の新製品としては高強度耐サワー油井管 (KO110SS 鋼管)、



(a-1), (b-1): Conventional plug (0.3%C-0.35%Si-0.5%Mn-3.0%Cr-1.0%Ni)

(a-2), (b-2): Developed plug (0.3%C-0.35%Si-0.5%Mn-0.5%Cr-1.0%Ni-1.0%Mo-2.0%W-0.5%Nb-1.0%Co)

Photo 2 Effect of chemical composition of plug material on surface oxidation

および HP13CR 鋼管がある。前者は硫化水素濃度の高いサワー環境を対象とし、後者は高温で高圧の炭酸ガスが存在するスウィート環境、および少量の硫化水素が存在するライトサワー環境を対象として開発された。

硫化水素が存在する環境においては、腐食反応によって発生した水素が鋼中に侵入し、水素脆化を引き起こす。水素脆化は感受性は、高強度になるほど高くなる。低合金鋼の耐 SSC 性を改善するためには、均一なマルテンサイト組織にすること、焼入れ時の結晶粒径を小さくすることが有効である。それに加えて鋼中に侵入した水素と欠陥の相互作用を減少させることが耐 SSC 性向上に有効であることを見出した。そのためには水素との相互作用の高い転位を減少させるための高温焼戻しが有効であるが、強度が低下するという問題があった。そこで強度低下を補うために、析出炭化物の 2 次硬化現象を活用することにより、耐 SSC 性と高強度の両立を可能にした 110 ksi 級の高強度耐サワー油井管 (KO110SS) を開発し、工程生産に至っている。

一方、スウィート環境では、その優れた耐炭酸ガス腐食性から、13Cr 鋼管の使用が急増している。しかし、高温あるいは高炭酸ガス環境においては 13Cr 鋼管の耐食性は十分ではなく、その使用範囲は限定されている。また、硫化水素が存在する環境では SSC が発生しやすいという問題があった。それらの問題に対し、全面腐食に対しては析出しにくい有効 Cr 量を増加させること、および Ni 添加が有効であること、また耐孔食性向上には Mo 添加が有効であることを見出した。以上の考え方に加えて、シームレス圧延の際の熱間加工性を考慮し、低C-13Cr-4Ni-1Mo 系の HP13CR 鋼管を開発した²⁾。Fig. 3 に高温、高炭酸ガス環境における 13Cr 鋼管と、HP13CR 鋼管の適用範囲を示す。HP13CR 鋼管は 13Cr 鋼管に比べてより高温、高炭酸ガス環境で使用可能である。さらに耐サワー用に耐 SSC 性を改善した低C-13Cr-5Ni-2Mo 系の HP13Cr-2 鋼管を開発し³⁾、工程生産に至っている。

ラインパイプは油井管とは異なり、優れた溶接性が要求されることから、従来は炭素鋼、もしくは 2 相ステンレス鋼が使用されるの

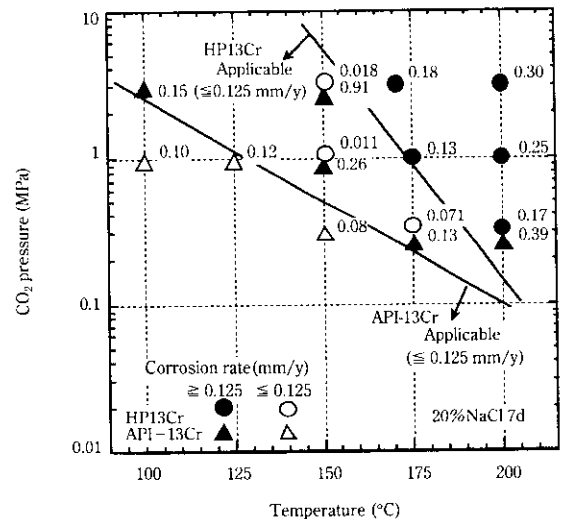


Fig. 3 CO₂ corrosion test results of HP13Cr and API-13Cr pipes

Table 1 Positions of 13Cr seamless steel pipes for OCTG and linepipe application

Environment Use	Sweet (CO ₂)	High CO ₂ High temperature	Light sour (CO ₂ + H ₂ S)
OCTG	13Cr	HP13Cr-I	HP13Cr-II
Linepipe	11Cr (KL12CR)	12Cr (KL-HP12CR)	

みであった。炭素鋼を使用する場合は、耐食性確保の面からインヒビターが使用されることが多いが、インヒビターの使用は環境汚染につながることから、その使用を抑えようとする動きがある。また、高温環境ではインヒビターの効果が十分期待できないという問題がある。一方、2 相ステンレス鋼は耐食性は優れているが、非常にコスト高のため、その使用は限定されている。油井環境においては両者の間に位置する材料として、13Cr 鋼管があるが、溶接性に劣ることからラインパイプとしては使用されていなかった。

それに対して、当社では、13Cr 鋼の溶接性を改善した新マルテンサイト系ステンレス鋼管 (Weldable 12Cr 鋼管) を開発した⁴⁾。この鋼管は、炭酸ガスのみのスウィート環境用としての 11Cr 鋼管 (KL-12CR) と、少量の硫化水素を含む環境用としての 12Cr 鋼管 (KL-HP12CR) がある。Table 1 に両鋼管の位置付けを示す。いずれも溶接性を向上させるために C, N を低減し、さらに Ni, Cu, Mo などの添加により、耐食性、機械的性質、熱間加工性を満足させている。本開発鋼管は北海を中心にすでに使用が始まっている。

3 溶接鋼管の技術潮流

近年において電縫鋼管は、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り、その用途は多岐にわたっている。

このような状況を背景として、最近 10 年間の技術の大きな流れとしては、(1) 生産性の向上、(2) 高級化、高品質化、(3) 自動車、建材分野の用途の拡大、の 3 つがあげられる。

生産性の向上に関して、サイズ替え時間短縮を図るために電縫鋼管では成形ロールのサイズ兼用化技術があり、幅広く成形方法およ

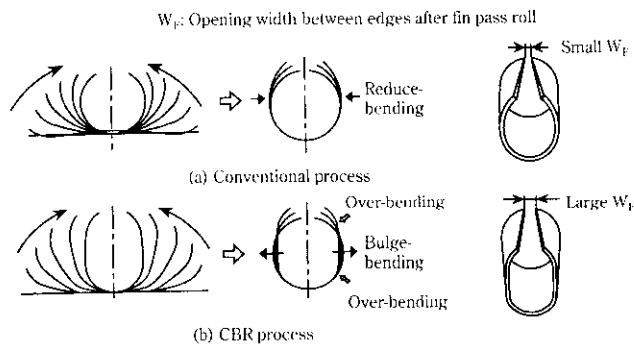


Fig. 4 Comparison of the forming flowers between conventional forming process and CBR forming process

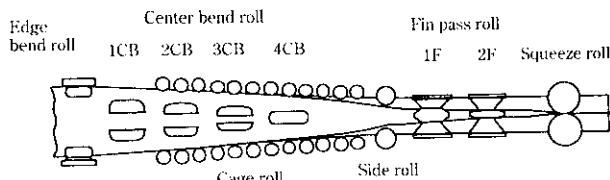


Fig. 5 Layout of the CBR forming mill for manufacturing ERW stainless steel pipes

び装置の開発がなされている。一方では、上流の母管サイズを集約し、その下流工程において3ロールレデュースで種々の外径の製品を作り分けることで生産性を上げる方法が開発されている。

溶接部の高品質化や製品高級化の要求に応えるため、従来の高周波溶接に代わって、高エネルギー密度熱源であるレーザーを利用した溶接技術が実用化されつつある。当初はTIG溶接の代替として小径ステンレス鋼管への適用がなされ、近年ではレーザーの大出力化が可能となり、ラインパイプを対象とした中径サイズの高強度炭素鋼や、2相ステンレス鋼への適用が検討されている。

ラインパイプの使用環境の苛酷化や低コスト化の流れの中で、高品質化、高強度化の要求に対応するため、電縫鋼管において溶接品質向上のための溶接部熱処理技術、シールド技術、あるいは高強度、高靱性、高耐食性などの複合特性に優れた材料の開発が行われている。

近年の電縫管の用途の拡大は、特に自動車用鋼管と建材用鋼管において顕著である。自動車用鋼管には高強度化、軽量化が要求されており、ドア補強用鋼管や駆動軸用鋼管が開発されている。また排気系用鋼管についても、排ガス的高温化、耐食性の向上の観点から使用部位に適した各種ステンレス鋼管が開発されている。

建材用鋼管では、中低層鉄骨建築物の柱として冷間成形角形鋼管の使用が広がり、各メーカーにおいて設備の新設、増強が行われた。

3.1 電縫鋼管プロセス開発

当社では、電縫鋼管において小ロットに対する高生産性と高品質化を両立させた新しい成形技術である CBR 成形法（チャンスフリー張出しロール成形法）ミルを独自に開発した¹⁰⁾。これはソフト技術の帯板の張出し曲げ成形法と、ハード技術の高精度ケージフォーミングミルを持散としており、ロールの管サイズ兼用性と帯板の成形性、溶接性を両立させ、さらに高い2次加工性能を有する電縫鋼管の製造を初めて可能にした。

CBR 成形法では、帯板の成形および溶接の安定化を図るために

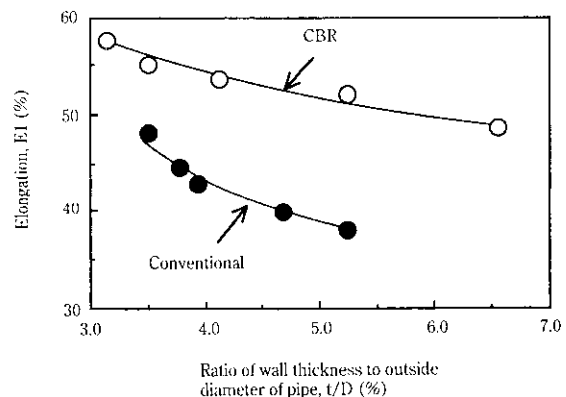


Fig. 6 Comparison of elongation of ERW stainless steel exhaust pipe by tensile test between CBR and conventional forming (SUH409L)

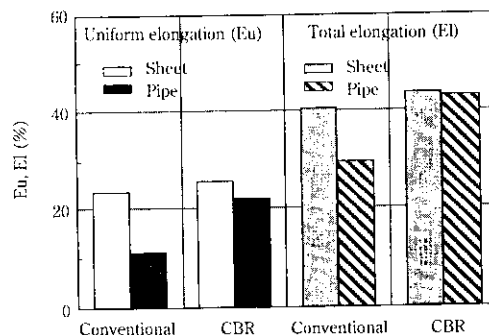


Fig. 7 Comparison of elongation of carbon steel tubes between the CBR forming mill and conventional forming mill (SAE1006, $\phi 89.1 \times 3.2$ mm)

Fig. 4 に示すような張出し成形と称する帯板の曲げ方式を採用した。この張出しロール成形フラワーにより、フィンパス成形でのロール疵発生を抑制でき高速ミルでは初めて無水無潤滑造管を実現し、さらに帯エッジ部のI型突き合わせとV収束角度の拡大を両立させ電縫溶接の安定化を達成した。また、Fig. 5 に示すように、帯板を連続的に成形するケージロールと帯板の中央部を成形するセンターベンドロールを組み合わせたミルとすることにより上流成形ロールの大幅な兼用化を達成すると同時に、ミルを高精度化することにより成形精度の向上および薄肉成形の安定化がなされ、薄肉の製造可能範囲が0.6 mmまで拡大された。

さらに、ケージロール成形と張出し成形フラワーにより成形時の付加ひずみが減少し、Fig. 6 に示すように伸びの高い2次加工性の優れたステンレス電縫鋼管の製造が可能となった。また、炭素鋼においてもFig. 7 に示すように、従来成形ミルに比べ、高い伸びを得ることが可能である。

この CBR 成形ミルは、知多製造所小径電縫鋼管工場のステンレス電縫管ミルに導入され、従来の製造法に比べて歩止り、生産性の大幅な向上を達成し、溶接品質および2次加工性能に優れた自動車排ガスシステム用ステンレス電縫管の製造を可能にした^{10)~12)}。また、CBR 成形法は当社の外販技術として国内外でミルが導入されるようになり、高い評価を得つつある。

ラインパイプの高級化の要求に対応するため、オンラインでの溶接部熱処理技術を開発した。これは、特に厚肉高強度材に対して電縫溶接部に2段熱処理を実施することにより、溶接部の靱性を向上

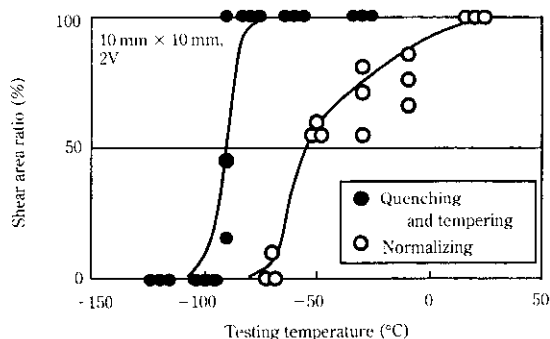


Fig. 8 Charpy impact property of weld seam

させるとともに強度の低下を抑制し、パイプ全体として均質な特性を得るものであり¹⁰⁾、本技術が適用された製品は電縫管としては世界で初めてオフショア用ラインパイプとして、北海において使用されるに至った。

建材用鋼管では、知多製造所第2中径電縫鋼管ミルを角鋼管製造用に改造し、冷間ロール成形角形鋼管としては最大サイズの外径550 mm、肉厚22 mmが製造可能となった。この角形鋼管に関しては、4ロールによる角鋼管成形時の変形挙動の解明¹¹⁾、さらには切り口変形の発生機構¹²⁾といった基礎的な研究を実施し、高寸法精度の角鋼管の製造に寄与している。

3.2 電縫鋼管の製品開発

電縫鋼管は信頼性がUOE鋼管より劣ることから、従来は海底パイプラインに使用されたことはなく、その対象は陸上のパイプラインに限られていた。最近のラインパイプはX65クラスの高強度、破面遷移温度が -46°C 以下の高靱性、および硫化水素環境を考慮した高耐HIC性、耐SSC性が要求される。これらの課題への対応の一つとして、電縫溶接部の靱性を向上させるため、熱処理技術の確立を目指した。Fig. 8に示すように、溶接部にQT処理を施すこ

とにより、破面遷移温度が -46°C 以下の溶接部靱性が得られた。この電縫溶接部QT技術の確立により溶接品質が大幅に改善されたのを契機に、海底ハイブライン用電縫鋼管の開発に取り組んだ。

要求される強度、靱性、耐食性をすべて満足させるために、成分と素材圧延条件の両面から検討を加えた。低C化した新成分系を見出し、かつ熱間圧延条件を適正化することにより、要求特性を満たす母材の開発に成功した^{13, 10)}。さらにシーム溶接部の欠陥を低減化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ERWラインパイプ開発に成功した。本開発鋼管は工程生産化され、世界初の海底ラインパイプとして、北海で使用された。川崎製鉄の電縫鋼管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評価を受けた。

4 結 言

鋼管は、製品から見ればほぼ全産業分野との関わりがあるが、輸出品ではエネルギー産業との関わりが深く、その需要動向やニーズは常に世界のエネルギー事情の影響を受けてきた。特に、継目無鋼管は世界的な供給過剰の中での相対的な需要減に対して、高合金鋼管を主軸とする品種戦略と、その量産技術を開発することで収益性の確保をめざした。一方、国内市場に目を向ければ汎用鋼種分野ではメーカー間の競争激化を受けて、コストダウン、あるいは品種の高級化に注力してきた。

今後は、従来にも増して競争の激化にともなうコストダウンの要求が高まると予想される。このような状況の中で収益力を向上させるためには、より競争力のある新しい製造技術の開発が求められると同時に、大きな流れである地球環境問題などから派生する鋼管のニーズを視野に入れた新製品の開発、品種の高級化、および用途の拡大に力を入れていく必要がある。

鋼管分野における研究部門としては、営業部門や生産現場と一体となって技術開発を進め、差別化技術、製品の開発を目指し、より一層の競争力を培っていく。

参 考 文 献

- 1) 森岡信彦, 岡 弘, 清水哲雄: 川崎製鉄技報, **29**(1997)2, 57
- 2) たとえば, 坪内憲治, 中西哲也, 藤井 悟, 永瀬 豊: 材料とプロセス, **6**(1993), 386
- 3) 依藤 章, 豊岡高明, 金山太郎: 川崎製鉄技報, **29**(1997)2, 64
- 4) K. Takahashi, E. Yokoyama, M. Kodaka, M. Kagawa, T. Kobayashi, and S. Kanari: 31th Mechanical Working & Steel Proc. Conf., USA, (1989), 565
- 5) 今江敏夫, 山本健一, 岡 弘: 塑性と加工, **34**(1993)390, 806
- 6) 岡 弘, 村瀬文夫, 紺屋雄雄, 船生 豊, 山本健一, 今江敏夫: 鉄と鋼, **72**(1986)4, S404
- 7) K. Tamaki, T. Shimizu, Y. Yamane, and Y. Kitahaba: Proc. of the Int. Conf. on Stainless Steel 1991, Chiba, ISIJ
- 8) 木村光男, 宮田由紀夫, 北嶋山一: 川崎製鉄技報, **29**(1977)2, 84
- 9) 宮田由紀夫, 木村光男, 村瀬文夫: 川崎製鉄技報, **29**(1977)2, 90
- 10) 豊岡高明, 橋本裕二, 小林邦彦, 板谷 進, 井手 勉, 西田保夫: 川崎製鉄技報, **22**(1990)4, 236
- 11) 豊岡高明, 橋本裕二, 郡司牧男: 川崎製鉄技報, **29**(1997)2, 78
- 12) T. Toyooka and Y. Kusakabe: Proc. of the 10th Annual World Tube Congress(1994)
- 13) 板谷元品, 豊岡高明, 富永博友, 置田孝一, 捻橋真一, 渡辺修三: CAMP-ISIJ, **7**(1994), 747
- 14) 板谷元品, 豊岡高明: CAMP-ISIJ, **9**(1996), 1025
- 15) 板谷元品, 豊岡高明: CAMP-ISIJ, **10**(1997), 1121
- 16) 川端文丸, 森田正彦, 山根康義, 古君 修, 佐伯真事, 塩谷 修: CAMPS-ISIJ, **7**(1994), 746