

特別講演

□第179回春季講演大会渡辺義介賞受賞記念特別講演

鋼管分野における高付加価値製品と製造技術の開発

Development of High Value-added Products and Manufacturing Technology in Tubular Field

岡 弘 品川リフラクトリーズ(株)
代表取締役社長
Hiromu Oka



*脚注に略歴

1 はじめに

この度は、栄誉ある渡辺義介賞を頂きまして、誠に光栄に存じます。私は、1980年に川崎製鉄(当時)に入社して以来、製鋼、鋼管、生産管理部門を中心に製鉄所の現場の技術者や管理者として過ごしてきました。入社当時は、第二次石油危機以降の時期に当たり、経済が停滞し、我が国の製造業も、省エネルギー、省資源、省コストの必要性が叫ばれ、「量から質への転換」が求められた時代でした。この様な状況で製鉄業も業績の悪化に苦しみながら、生産量の伸びが期待できない状況にあり、社会の要請に応え、会社の業績を向上させるために、より付加価値の高い製品を生み出すことが技術開発の主な観点となって行きました。本稿では、鋼管分野における社会的ニーズとそれに応えるために開発された高付加価値製品と製造技術について、幾つかの例と共にご紹介したいと思います。

2 鋼管市場と製造能力

まず、鋼管の需給バランスについて、油井用シームレス鋼管を例にとりますと、1980年代初頭の油井管ブームなど、需要が急増した局面で新しいミルが建設されてきた結果、油井用鋼管市場は、長い間供給過多の状態が続いていました。更にここ数年は、中東、米国シェールなど、新興の原油ガス生産地域において、コスト競争力のある地場ミルが新設され、供給過多の状態が拡大し、汎用品を中心に競争が激化しました。このような厳しい競争に晒され続けてきた日本の鋼管

メーカーは、生き残りを懸けて、高付加価値品の製造に舵を切り、活路を見出してきました。

3 各分野の市場動向と鋼管への要求

次に鋼管が使用される各産業分野において、市場動向と鋼管への要求がどう変わってきたのかを見てみたいと思います。

3.1 石油・ガス開発動向と鋼管への要求

まず、エネルギー開発分野についてですが、世界的なエネルギー需要の増加に伴い石油、天然ガスの需要も増加していますが、その中でも特に、燃焼時のCO₂排出量が少なく、環境に優しい天然ガスの消費量は、著しく増加しています(図1)。

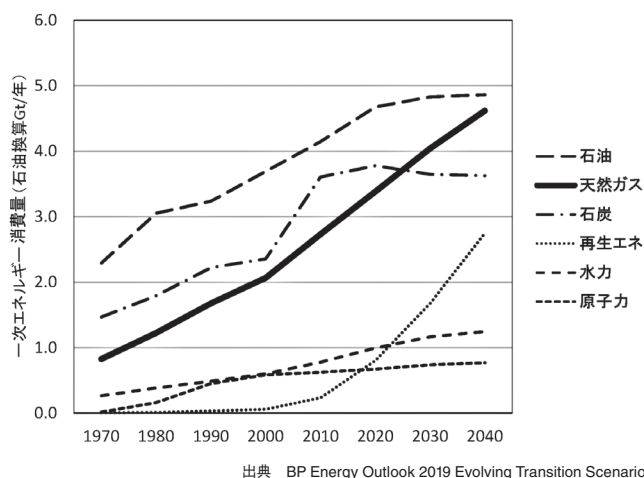


図1 一次エネルギー消費量の推移

* 1980年3月京都大学大学院工学研究科金属加工工学専攻修士課程を修了後、川崎製鉄(株)に入社。水島製鉄所製鋼部長、JFEスチール(株)西日本製鉄所工程部長、知多製造所長、西日本製鉄所長、専務執行役員、代表取締役副社長を歴任、2018年6月より現職。

掘削環境については、図2に示すように、浅い井戸の枯渇とともに高深度化が進行しましたが、2000年以降に急伸した米国シェールオイル・ガス井は、水平掘削距離は長い一方で垂直掘削深度はそれ程深くないという特徴があります。そのため鋼管の使用環境としては、厳しくないで汎用品が使われます。一方、一般の井戸では高深度化が進み、高温高压の腐食環境となってきたので、鋼管の材料には、高強度、高耐食性が求められ、13%Cr鋼（マルテンサイト系）などのステンレス鋼管の需要が増加しました。また、ねじ継手には、圧縮や曲げなど高負荷の高温高压環境でもガスが漏れない高い気密性が求められ、汎用ねじ（APIねじ）ではなく、各メーカーが独自に開発している特殊ねじの需要が増加しました。

3.2 パイプライン敷設動向と鋼管への要求

生産された原油・天然ガスは、パイプラインで精製設備、需要地に輸送されますが、その敷設動向と鋼管への要求について見てみます（図3）。環境に優しい天然ガスの開発が活性化し、遠隔の生産地域から消費地域にガスを輸送する長距離パイプラインの建設が増えました。こうした大型パイプラインの材料となる鋼管には、低コストである事に加え、高压輸送を可能とする高強度と高信頼性（耐サワー、溶接部高靱性など）が求められます。また、地震地帯や凍土地帯では、地盤変動に耐えられる変形能（耐座屈性能）が求められます。

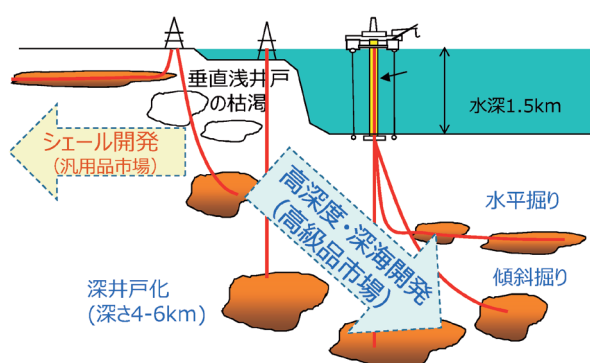


図2 石油・天然ガス掘削動向

3.3 発電用ボイラー鋼管市場と鋼管への要求

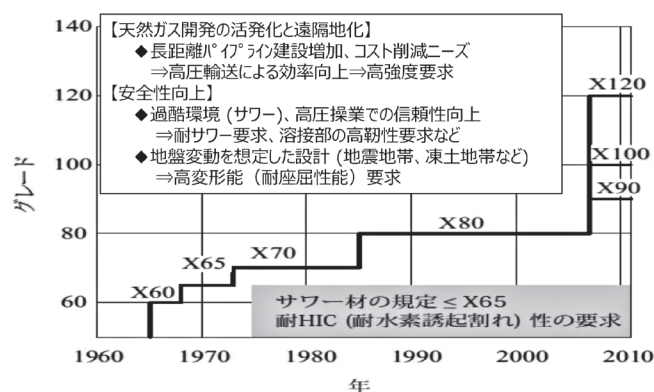
次に発電用のボイラー鋼管の市場ですが、この分野の動向としては、図4に示すように熱交換効率向上や鋼管の溶接効率向上のための鋼管の薄肉化、発電の高効率化のための蒸気温度の高温化、環境負荷の少ない天然ガス炊き排熱回収ボイラーの増加などがあります。その結果として、高温強度（クリープ）に優れた耐熱鋼として、高Crフェライト系ステンレス鋼である9%Cr鋼以上の熱交換用チューブの需要が増加しました。

3.4 自動車用鋼管市場と鋼管への要求

自動車分野については、地球環境保全の観点から様々な燃費改善の取り組みがなされていますが、鋼管に関連した動きとしては、部品の軽量化を目的として、棒材の中空化（鋼管化）、および、高強度化による鋼管の薄肉化が進んでいます。自動車部品の多くは、図5に示すように複雑な形状に加工されるので、加工性も良くなければなりません。従って、自動車用鋼管には、通常は相反する高強度と高加工性の両立が要求されます。

3.5 建材市場と鋼管への要求

建材市場では、電子商取引市場の拡大とともに、中低層の大型物流施設が増加し、一棟当たり床面積が増大していま



出典 JFE 技報 No29

図3 パイプライン敷設動向

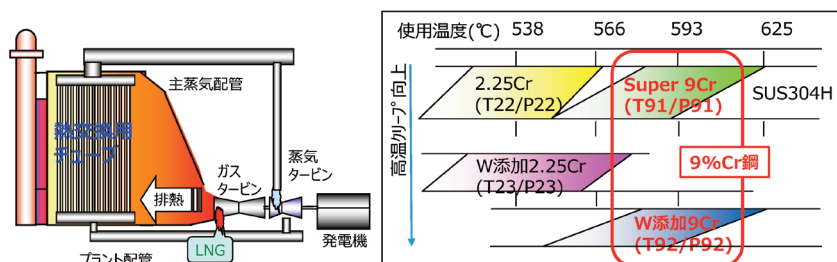


図4 天然ガス炊き排熱回収型発電用ボイラーと適用される鋼管

す。この分野の柱材としては、施工しやすい角コラムが使われますが、設計重量の増加や、建物の大スパン化に対応するために、大断面化（厚肉化）や高強度化のニーズが増加しています（図6）。

次にこうした各産業分野におけるニーズに対して、JFE スチールがどのような技術革新で応えてきたのかについて、紹介したいと思います。

4 マンネスマンプロセスでの高Crステンレスシームレス鋼管製造技術の確立

高深度の石油・天然ガス生産用の油井管や高効率発電用のボイラー管で需要が増加していた13%Cr鋼管や9%Cr鋼管などの高Crマルテンサイト系ステンレスシームレス鋼管は、熱間加工性が悪く、低生産性の熱間押し出し法で製造されていました。高生産性のマンネスマンプロセスを適用すると図7に示すようにザク起因疵、 δ フェライト起因疵、熱間加工性不良による疵など素材に起因する疵や、ガイドシュー焼付きによる外面疵、穿孔プラグ損耗による内面疵、マンドレル引き抜き不良による内面疵など、圧延に起因する疵が発生します。これらの様々な課題の解決を目的として、図8に示すように素材の欠陥を防止する技術や欠陥を発生させずに穿孔・圧延する技術など、素材製造から造管に渡る広いプロセス範囲において幾つかのブレークスルー技術が開発されました。これらが複合的に機能して、これまで難しいと考えられていたマンネスマンプロセス適用による高Crステンレスシームレス鋼管の高生産性での製造が実現しました¹⁾。この結果、製造時の工程省略に伴う省資源化・省エネルギー化による製造コストの大幅な低減、ステンレス油井管の普及、過酷環境下での石油ガスの掘削コストの低減など大きな効率化が図られました。

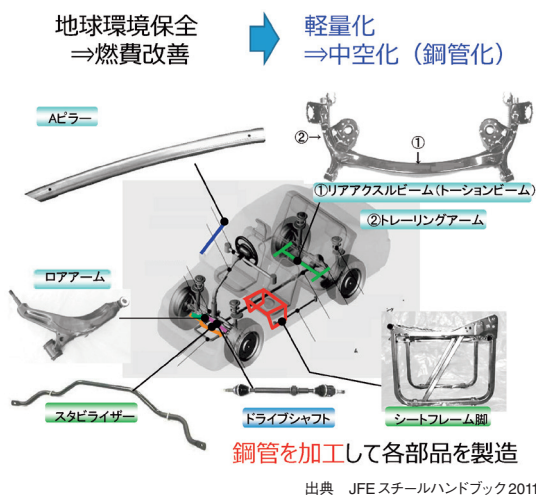


図5 自動車部品と鋼管適用状況

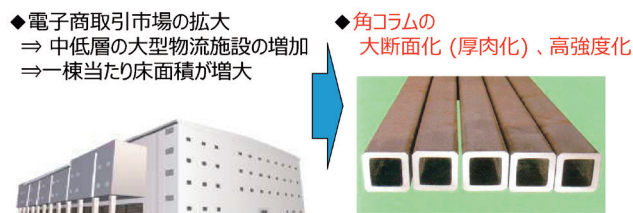
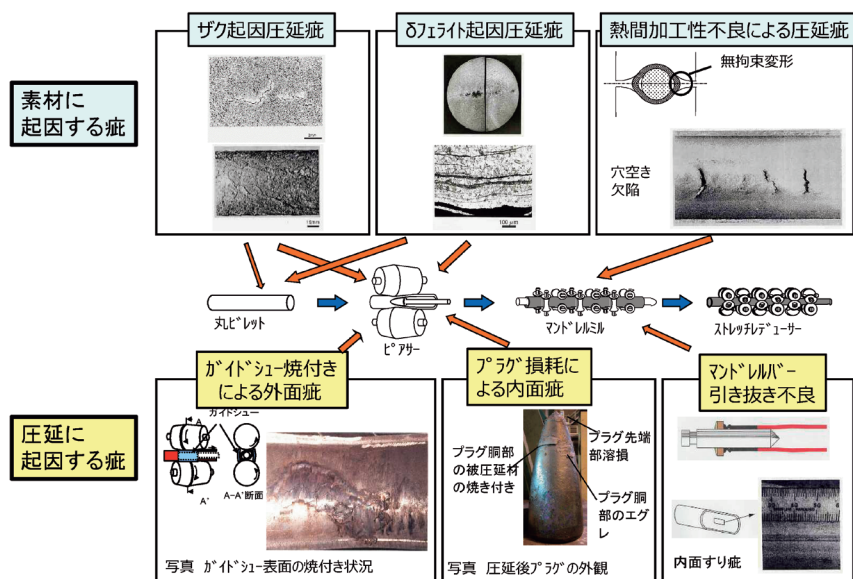
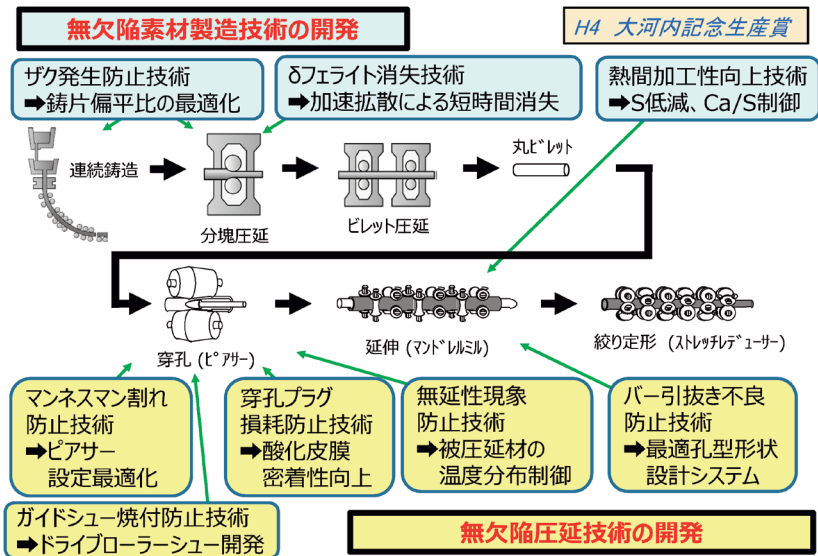


図6 建材市場と角コラムへの要求



出典 川崎製鉄技術 Vol.29 (1997) No.2 より作成

図7 高Crステンレスシームレス鋼管のマンネスマンプロセス適用時の課題



出典 川崎製鉄技術報 Vol.29 (1997) No.2 より作成

図8 マンネスマンプロセスにおける高Crステンレスシームレス鋼管の製造技術開発

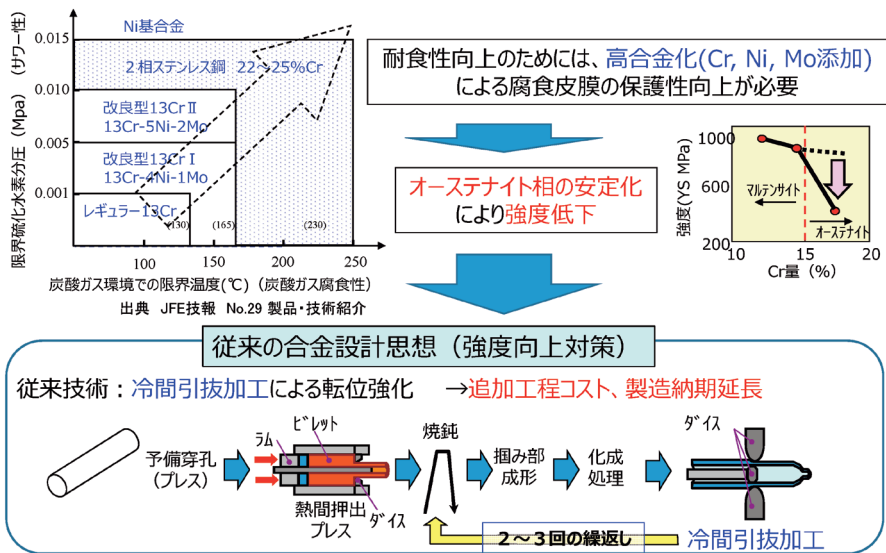


図9 耐食性材料と強度向上プロセス (従来)

5 高強度高耐食性油井用シームレス鋼管「UHP[®]-15CR、UHP[®]-17CR」と特殊ねじ継手「JFELION[®]」の開発

天然ガスの需要が増加し、高深度井の掘削が活発化しました。このような井戸では高耐食性が要求され、主に13%Cr系のステンレス鋼が使用されてきましたが、近年は、さらに深い井戸が掘削されるようになり、鋼管の使用環境は、益々厳しくなっています。そのような過酷な環境では、2相ステンレス鋼や高Ni合金など、合金元素を多量に含有し、かつ、強度確保のために冷間引抜加工を必要とする高価で製造納期も長い材料が使われます (図9)。そのため、市場では、これ

らを代替する安価で高強度と高耐食性を兼ね備えた新しい材料が求められてきました。一般的に耐食性を上げるためには、Crなどの合金元素の添加量を増やしますが、そうすると図10のシェフラーの組織図に示すようにオーステナイト相が安定して強度が低下してしまいます。この対策として、合金元素添加を多少抑制してオーステナイトの安定化を抑止し、かつ、Nbなどの添加で析出強化を図る方法で開発されたのが、新マルテンサイト系ステンレス鋼管である15%Cr鋼管 (UHP[®]-15CR)^{2,3)} です。これでは耐食性が不足する井戸環境に対しては、Crの添加量を増やす代わりにNi添加を抑制することによって組織をマルテンサイトとフェライトとして強度を確保する方法が検討され、新しい2相鋼管である17%

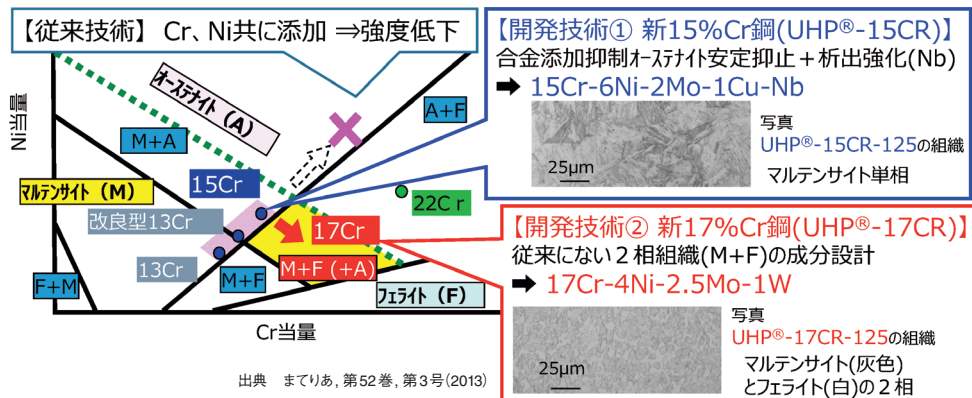


図10 シェフラーの組織図と新15%Cr鋼、17%Cr鋼の成分・組織設計

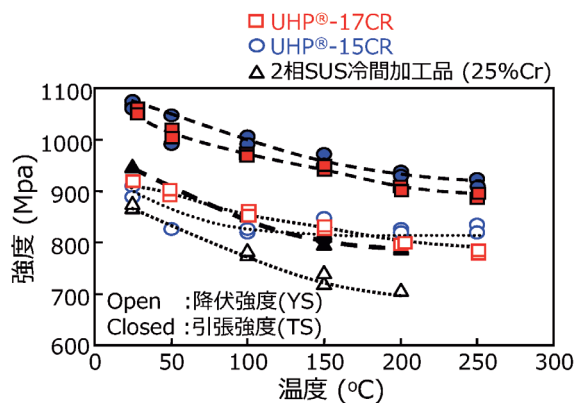


図11 高温強度の比較

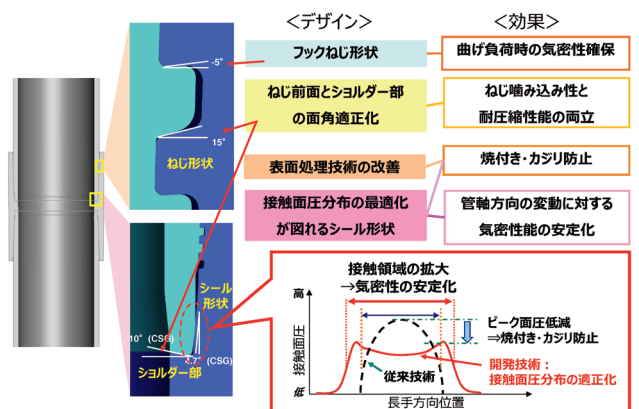


図12 高気密性特殊ねじ継手の開発

Cr鋼管 (UHP®-17CR)⁴⁾ が開発されました。いずれも、低コスト化、短納期化が図れたことに加え、冷間加工によって強度を確保している従来の高合金鋼と比較して、高温での強度低下が少なく (図11)、井戸設計もしやすくなりました。

また、高温高压の苛酷な環境で使用されるこれら鋼管の接続には、高気密性のねじ継手が必要となります。気密性を向上させるには、雄ねじと雌ねじの金属接触部において十分な接触面圧を確保する事が必要となりますが、局部的に接触面圧が高過ぎる箇所があると高合金鋼では、その箇所にかじりが発生するので、FEAを用いて接触面圧分布の適正化を図ります (図12)。こうして、高温高压の過酷な環境でも気密性を保つことのできる特殊ねじ継手「JFELION®」が開発されました⁵⁾。

この新しい材料と新しいねじ継手の組み合わせからなる新しい油井用鋼管は、従来と比較して、合金元素の削減による省資源化、冷間引抜加工の省略による省工程化、短納期化が図られ、また、高温高压ガス生産における安全性向上に寄与するなど、環境に優しい天然ガスの開発に大きく貢献しています (図13)。

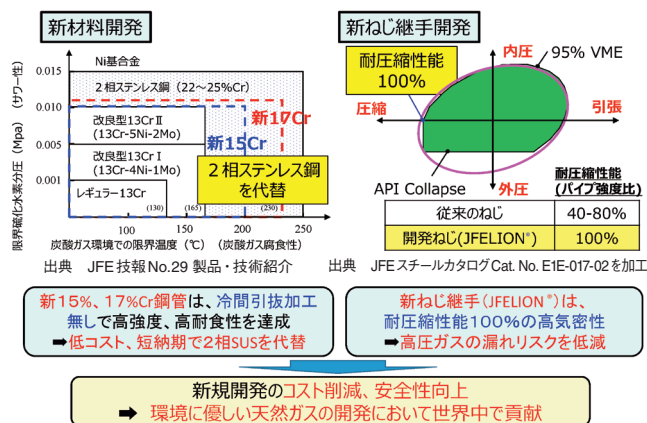


図13 新材料、高気密性特殊ねじ継手の開発による貢献

6 パイプライン用高信頼性電縫溶接鋼管「マイティーシーム®」の開発

電縫溶接鋼管は、低コストでありながら、寸法精度、薄肉製造、仕上肌にも優れ、幅広い用途に適用されていますが、深

海、寒冷地など苛酷環境に敷設される石油・ガス輸送用ラインパイプにおいては、電縫溶接部の酸化物の存在に起因した靱性悪化の懸念があるため使用されず、これまでは高信頼性のシームレス鋼管やUOE鋼管が使用されてきました（表1）。

- しかし、電縫溶接鋼管において、
- ①管全長に渡って良好な靱性を確保する製造技術
 - ②電縫溶接部に存在する微小酸化物の分布をフェイズドアレイ超音波検査でオンライン測定し、機械的性質を全長評価する技術

が開発され（図14）、次世代電縫溶接鋼管「マイティーシーム®」が製品化^{6,7)}された結果、苛酷な環境への電縫溶接鋼管の適用が可能となり、パイプライン敷設コストの削減に大きく貢献する事ができるようになりました。

7 耐座屈性能に優れたパイプライン用高強度UOE鋼管「HIPER®」の開発

地震、凍土地帯に敷設されるパイプラインでは、地盤変動による座屈や破壊の懸念があり、パイプラインの安全性確保

のためには、鋼管の耐座屈性能向上が課題となります。従来のパイプライン設計では、座屈防止のために管厚を厚くしていましたが、この場合、より強度の高い鋼管に置き換えて鋼管を薄肉化することによってパイプラインのコストを削減するのは、困難となります。そこでまず、耐座屈性能向上につながる機械的特性と組織について調査しました。寸法や機械的特性の異なる鋼管に対して軸圧縮座屈実験を実施し、フェライト-ベイナイトの2相鋼など軟質相と硬質相からなる複相鋼に見られる連続降伏型の応力-ひずみ曲線を示す高n値（加工硬化指数）の鋼材が耐座屈性能に優れる事を突き止めました（図15）⁸⁾。しかし、フェライト-ベイナイト型の高変形鋼管は、防食用の外面コーティングが200～250℃の高温で実施される際、歪み時効によって変形性能が劣化する問題がありました。

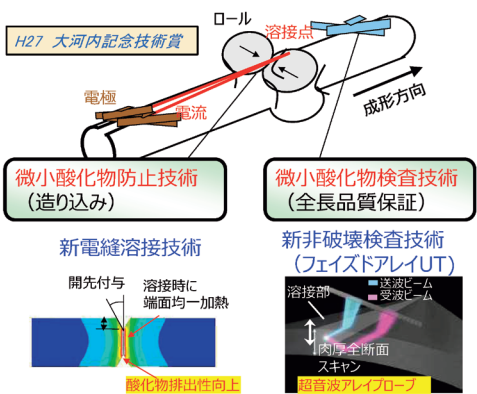
この問題を解決するために、鋼板製造時の加速冷却後にオンライン熱処理「HOP®（Heat-treatment On-line Process）」⁹⁾を適用する技術を開発し（図16）、組織をベイナイト-MA（島状マルテンサイト）の複相に制御することにより（図17）、歪み時効の低減が可能となりました。このベイナイト-MA組

表1 パイプライン用鋼管の製法・性能比較

	製造コスト	施工コスト	信頼性	低温靱性	主な用途
電縫鋼管	安価 (連続製造可)	寸法精度良好 薄肉可能	電縫溶接部	-20℃	中径薄肉向き 一般のパイプ含め幅広い用途
UOE鋼管	連続製造不可 溶接速度遅い	溶接部の除去必要		-40℃	大径厚肉管向き ラインパイプなど
継目無鋼管	高価 (熱間製造)	寸法精度		-40℃	小径厚肉管向け エネルギー用途など

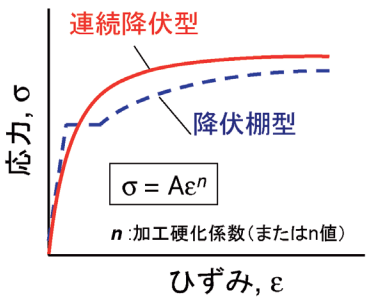
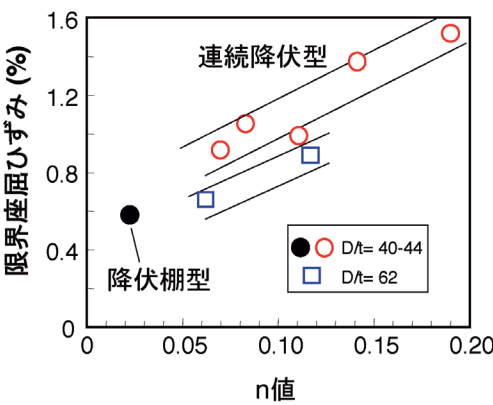
電縫溶接部の酸化物の存在に起因した靱性悪化の懸念

深海、寒冷地など苛酷環境に敷設される石油・ガス輸送用のラインパイプには、高信頼性のシームレス鋼管やUOE鋼管を適用



出典 JFE技報, No.29, No34

図14 次世代電縫溶接鋼管「マイティーシーム®」



出典 ふえらむ, Vol.21(2916) (2916)

図15 限界座屈ひずみとn値の関係

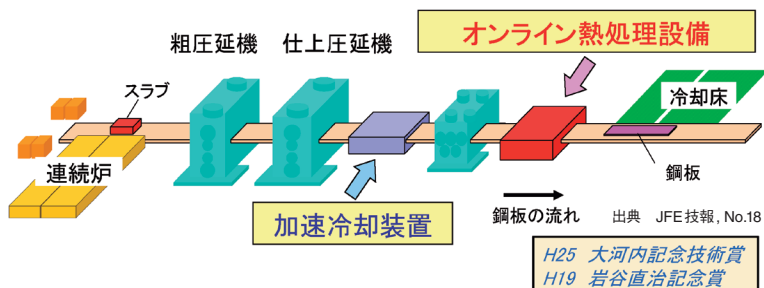


図16 厚鋼板製造ライン（JFE スチール西日本製鉄所福山地区）

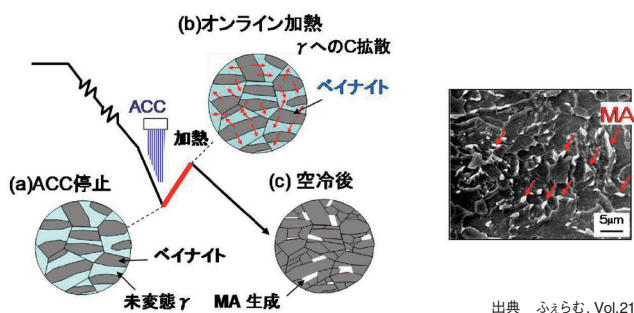


図17 オンライン熱処理による複相組織形成プロセス

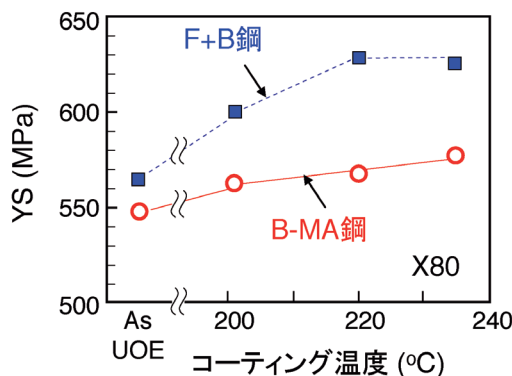


図18 コーティング加熱によるYS変化

組織鋼は、加熱過程でのNb, Mo等の炭化物析出によって固溶C量が低減されるので、図18に示すようにフェライトーベイナイト組織鋼と比べてコーティング加熱による強度特性の変化が少なく、コーティング後も高n値が得られます(図19)⁸⁾。こうして、最新の厚板加工熱処理技術を駆使した複相組織制御により、従来の鋼管に比べ優れた耐座屈性能を有する高強度鋼管が開発され⁸⁾、地震・凍土地帯に敷設されるパイプライン用鋼管として世界で初めて実用化されました。既にカナダや中国等などの地震凍土地帯に大量に適用されていますが、今後、さらなる適用拡大が期待されます。

8 高強度・高加工性の電縫溶接鋼管「HISTORY®」の開発

地球環境保全のため燃費改善に寄与する鋼材のニーズが高まり、従来、棒鋼が用いられてきた自動車のスタビライザーなど足回りの重要保安部品においても、鋼管を用いて中空化することで高強度と軽量化を両立させる試みがなされています。

これらの部品は、高い疲労強度を得るために、一般に高炭素鋼(0.20~0.45%)の電縫溶接鋼管を用いて、成形後、焼き入れ、焼き戻しなど熱処理が施されます。しかし、従来の電縫溶接鋼管には、溶接部が著しく硬化することや、伸びが低いという加工性の問題がありました。また、その製造におい

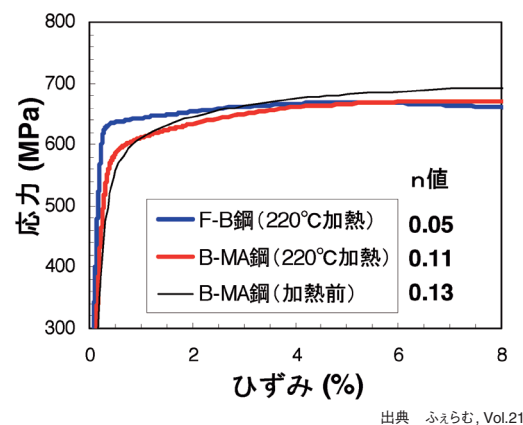
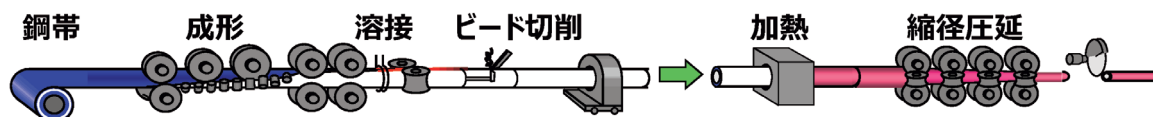


図19 コーティング加熱による応力-ひずみ曲線の変化

ては、素材の強度が高いために、これらの部品で必要とされる細径厚肉の鋼管を冷間で造管することが困難であるという問題もありました。一方、シームレス鋼管を適用する場合には、高コスト、肉厚精度と仕上肌の悪化の問題がありました。

これらの問題を解決するために、電縫溶接鋼管を4ロール絞り圧延機で制御縮径圧延する独自の新技术が開発され(図20)、HISTORY®鋼管が商品化されました¹⁰⁾。HISTORY®鋼管は、従来は実施されていない温間で縮径圧延すること



出典 JFE スチールハンドブック 2014

図20 HISTORY[®]鋼管の製造プロセス

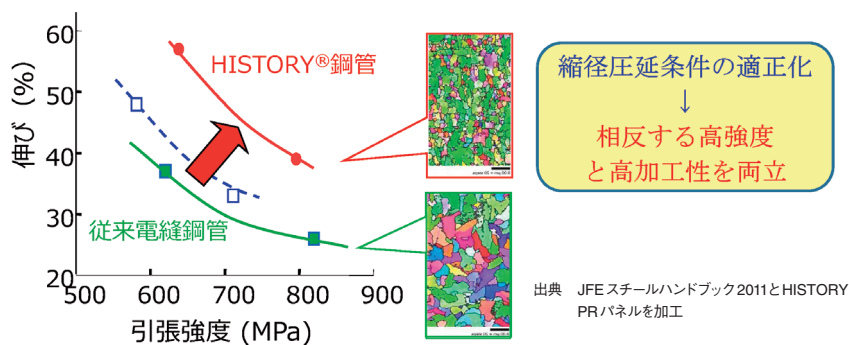
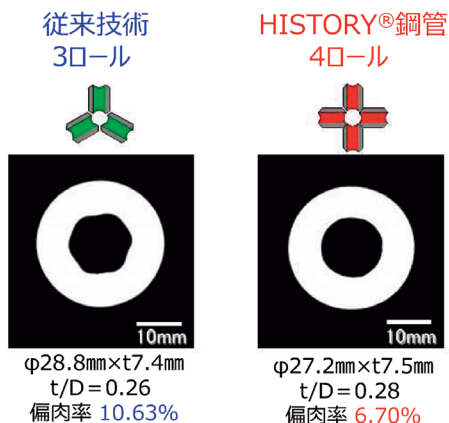


図21 強度と加工性の関係



出典 JFEスチールハンドブック2011とHISTORY PRパネルを加工

図22 4ロールレデューサでの縮径圧延技術

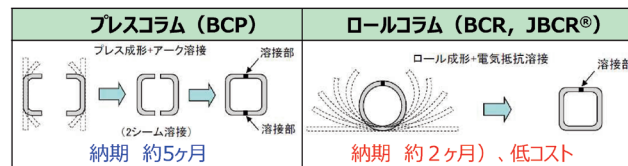
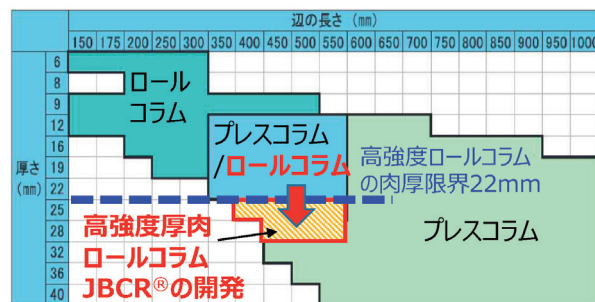


図23 角コラムの製法比較



出典 JFE技報, No.43を加工

図24 製法別角コラムの製造可能範囲

により結晶粒を制御し、高強度と加工性を両立させ(図21)、かつ、新開発の4ロールレデューサで縮径圧延を行うことにより、小径厚肉の鋼管における肉厚の高精度化(図22)を達成した革新的な電縫溶接鋼管であり、自動車用途以外でも採用が拡大しています。

9 高強度厚肉ロールコラム「JBCR®」の開発

近年、需給が逼迫している建築鉄骨市場において、特に中低層建築分野では、従来のプレスコラムよりも高生産性で製造納期が短いロールコラムに対するニーズが高まっています(図23)。母板製造時の制御圧延適用により、従来のBCR 295

と同等の品質特性を持ちつつ、①板厚を厚くしたJBCR® 295 (図24) は、強度の違い等による設計変更を行なうことなく、大スパン化や高層化など、ロールコラムが適用できる建築規模の拡大を可能とし、また、②高強度JBCR® 385は、更なる大スパン化、高層化へのロールコラムによる対応を可能とし、建設工期短縮、コスト低減など、社会に大きく貢献することができました¹¹⁾。

10 結び

過去、日本の製造業が厳しい状況に追い込まれ、「量から質への転換」が求められた時代において、鋼管分野では、高級品へのより効率的なプロセスの適用や、低コスト製品の性能改善による高級品の代替がなされてきました。その結果、資材・敷設・運転コスト削減、環境負荷低減、工期短縮につながる新しい高付加価値製品の提供が可能となり、様々な産業分野に大きく貢献し、こうした技術革新が鋼管事業の存続、発展につながりました。

今後は、人口減少による内需縮小、保護貿易の拡大、高機能材料の台頭による鉄離れなど、ニューノーマルと呼ばれる時代の到来によって、ますます鉄鋼業への逆風は強まるものと予想されます。しかし、これまでもこうした逆境が技術革新の糧となってきました。これからも、後輩の皆様が技術革新を続け、新しい時代を切り拓いていくことを切に願い、結びの言葉と代えさせていただきます。

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) 木村光男, 宮田由紀夫, 島本健: JFE技報, (2007年8月) 17, 42.
- 3) 製品・技術紹介, JFE技報, (2012年2月) 29, 61.
- 4) 石黒康英, 鈴木健史, 中橋哲, 石川和俊, 佐藤秀雄: まてりあ, 52 (2013) 3, 125.
- 5) JFE スチールカタログ, Cat. No. E1E-017-02.
- 6) 井上智弘, 鈴木雅仁, 岡部能知, 松井健: JFE技報, (2012年2月) 29, 17.
- 7) 岡部能知, 飯塚幸理, 伊木聡: JFE技報, (2014年8月) 34, 77.
- 8) 津山青史, 遠藤茂, 石川信行, 近藤丈, 村岡隆二: ふえらむ, 21 (2016) 1, 33.
- 9) 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂: JFE技報, (2007年11月) 18, 1.
- 10) 豊田俊介, 河端良和, 鈴木孝司: JFE技報, (2005年8月) 9, 30.
- 11) 梅田敏弘, 坂本義仁, 安田享平: JFE技報, (2019年2月) 43, 73.

(2020年4月6日受付)