

新世代中径シームレス鋼管製造技術の開発

New-generation Technologies for the Production of
Medium Size Seamless Pipes and Tubes

住友金属工業株式会社

1. 研究開発の背景と目標

当社では革新的な新世代中径シームレス鋼管製造技術を開発し、和歌山製鉄所に一貫シームレス鋼管製造設備を設置、1997年より稼動している。本報告はその技術開発に関するものであり、開発の背景は以下の2点である。

(1) ユーザニーズの高級化

エネルギー需要が石油から天然ガスにシフトし、かつ過酷な環境での採取・輸送が増加している。このため油井管やラインパイプは、中径シームレス(外径 177mm~426mm)の高品質・高強度・高耐食性の鋼管ニーズが増加している。

(2) 国際競争の激化

シームレス鋼管製造業界の世界的再編、統合の進展や、安価エネルギーコストと労働力を背景にした発展途上国のミルの出現により、競争が激化している。

これらの背景に対応するためには、従来型の製造技術では限界があるとの基本認識に立ち、中径シームレス鋼管の製造技術を抜本的に見直し、高級化するユーザニーズに対応可能で、かつ国際競争力ある新世代シームレス鋼管製造技術の開発を行った。本開発の目標とそれに対応する技術開発内容は以下のとおりである。

■シンプル&コンパクト製造技術

①直結化：リードタイム短縮、生産性向上等の効率的生産を行うため、大胆にプロセスの直結化を図り、世界で始めて丸鋳片連続鑄造設備（ラウンド CC）－製管工場－熱処理を直結した。

②コンパクト化：高交叉角拡管穿孔法の独自開発を中心として、中径ミルでコンパクトかつ高機能な独自の圧延ラインを構築した。

■ユーザニーズ高級化への対応

高級品のシェア世界一を目標に、以下の技術を開発した。

①高級鋼管製造技術の開発：疵の発生しにくい高交叉角拡管穿孔法とインライン熱処理設備の組み合わせにより、高強度厚肉ラインパイプの量産技術、ステンレス鋼管量産技術を開発した。

②高品質・高信頼性製造システムの開発

新世代中径シームレス鋼管製造技術は、図1に示す6項目の開発技術により構成されている。

2. 研究開発の経過

(1) ラウンドCC-製管の直結技術

高速・高品質鑄造技術の開発は、1980年代後半より研究所での小規模な基礎実験を開始、その後和歌山製鉄所で現場実験を行い、緩冷却パウダー、マルチテーパー鑄型等の技術確立を行った。1992年7月より設備案画を開始し、1994年10月に新工場の建設に着工、1996年7月より操業している。

(2) 圧延ラインのコンパクト化技術

基本となる製管技術については、高交叉角拡張穿孔法の開発を1980年代中ごろより開始した。1988年に研究所にロール径410mm、交叉角0~30°のパイロットミルを設置し、本格的に交叉角および拡張比の穿孔現象に及ぼす影響を解明することにより、高交叉角拡張穿孔法の目処を得た。この結果を受けて、1991年に技術を集約し、新中径シームレスミルの構想を固めた。1993年4月に新中径ミル建設を着工し、1996年に建設工事が完成、1997年2月より営業運転している。

(3) 製管-熱処理の直結技術

上記製管工場の建設にあわせて、材質設計技術および高速・真直焼入れ技術を開発した。

(4) 高品質・高信頼性製造システムの開発

工場の基本構想決定を受けて、システム構想を構築、システム開発を行った。

(5) 高強度厚肉ラインパイプの開発

深海での油井開発が活発化しており、これに伴う海底用高強度厚肉ラインパイプのニーズに対応するため、1995-2000年にかけて、研究所での材質設計・評価、工場でのパイロットテストを実施し、開発技術である高速冷却設備を駆使した高強度・高溶接性・高靱性厚肉ラインパイプを実用化した。

(6) ステンレス鋼管の大量製造技術

高温、高圧の腐食ガスを含む過酷な環境下での油井開発も活発化しており、高耐食性ステンレス鋼管へのニーズに対応するため、1996-2000年にかけてユーザとの材料開発を進めるとともに、熱間製管プロセス技術として、工具・潤滑技術、薄肉製管技術の開発に取り組み実用化に成功した。

3. 研究開発の内容と特徴

従来の製造技術の問題点・限界を打ち破り、高級化するユーザニーズ、激化する国際競争に対応可能な新世代中径シームレス鋼管製造技術を実現するための開発内容は以下

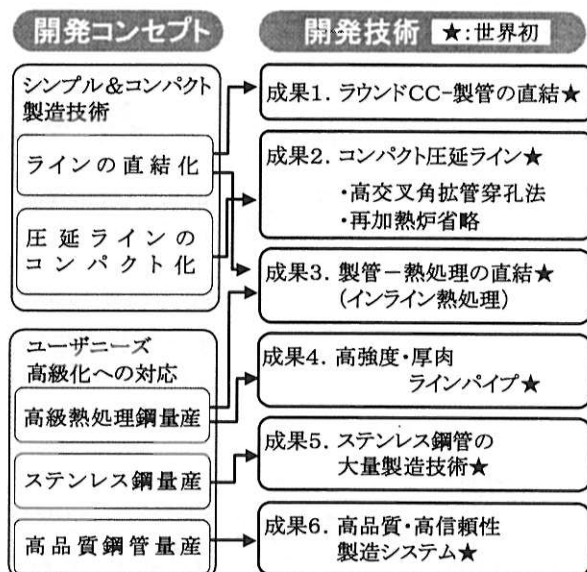


図1 開発コンセプトと開発技術

のとおりである。

(1) シンプル&コンパクト製造技術の開発

従来ラインの問題点と開発ラインの特徴を図2に示す。

従来の最新ラインは、鑄造、圧延、熱処理が非直結で、圧延ラインも多くの設備で構成されていた。開発ラインでは、従来不可能とされていた鑄造－圧延－熱処理の直結と圧延ラインのコンパクト化技術を開発し、競争力のある世界最大径・高効率のマンデルミルラインを実現した。

開発ラインは、まずラウンドCCで素材の丸ビレットを鑄造し、加熱炉で加熱した後、世界初の独自開発・最新型ピアサで穿孔する。次に、世界最少5スタンドのコンパクトマンデルミルで管内面のマンデルバーと圧延ロール間で肉厚を加工し、マンデルミルと直結したエキストラクタサイズで製品外径に仕上げる。圧延終了後、パイプは熱処理のため、圧延ラインと直結している焼入れ炉にて焼入れ温度まで加熱し、焼入れ装置で急速冷却した後、焼戻し炉で焼戻しする。

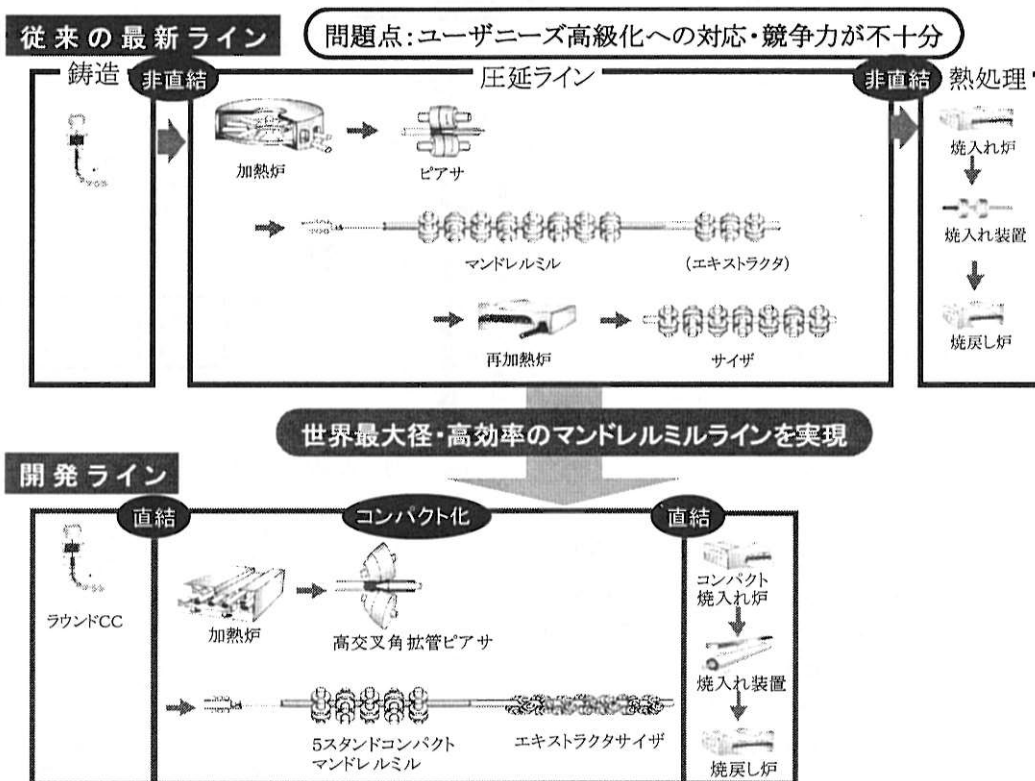


図2 従来ラインの問題点と開発ラインの特徴

1) ラウンドCC－製管工場の直結技術の開発

従来のビレット供給工程（当社）は、角鑄片鑄込み－分塊圧延（丸鋼）－検査・手入れ－製管工場であり、分塊工程を経るため、生産性が悪くリードタイムが長い問題があった。また従来の丸鑄片鑄込み技術では、鑄造可能範囲が狭く、品質・鑄造速度に問題があり、製

管工場との直結が不可能であった。そこで、鑄造可能範囲を拡大し、製管工場との直結を可能とする丸鑄片鑄込み技術を開発した。

これらの課題を解決するための最重要技術は、均一な初期凝固シェルを形成させること

である。不均一凝固の問題点を図3に示す。鑄込み中は外面より凝固シェルが成長するが、変態により収縮力が加わる。丸い凝固シェルは座屈しやすいため、部分的に鑄型と離れて抜熱が不均一となり、凝固シェルに薄い部分が生じ、割れが発生する問題があった。

均一凝固シェル形成技術を図4に示す。第1は、渦流センサとステッピングシリンダを用いた高精度湯面制御技術であり、湯面レベル変動を±3mm以内に抑制可能となった。

第2は、鑄型のマルチテーパ化である。円筒形の凝固シェルは、凝固の進行とともに収縮するが、鑄型の内径をこの収縮に合わせた形状にすることが重要である。従来の鑄型は、鑄込み方向に対して直線的に内径を変化させていたが、今回は、FEM計算によって凝固シェルの収縮を計算し、その収縮に合致するように鑄型の内径を決定した。

第3は、ラウンドCC専用の緩冷却パウダーの開発であり、凝固直後に発生する凝固シェルの座屈変形を防止した。

以上の技術開発により、従来ラウンドCCでは鑄造できなかった低炭素鋼、亜包晶鋼の鑄造が可能となった。また、最大鑄込み速度の会社比較を図5に示すが、すべてのピレット径で、世界最高速の高品質鑄込みを実現した。その結果、ラウンドCC—製管工場の直

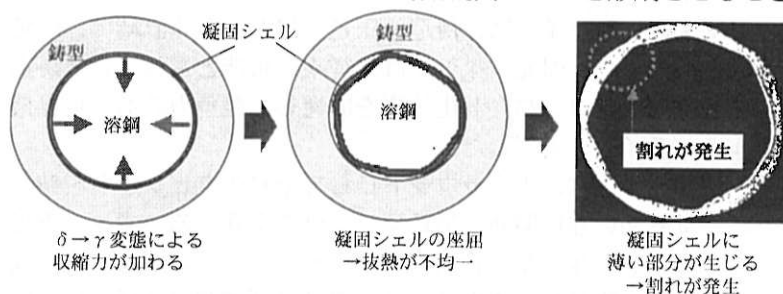


図3 不均一凝固の問題点

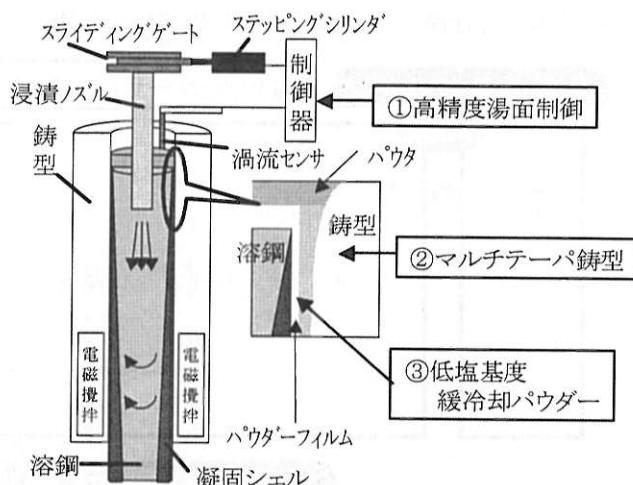


図4 均一凝固シェル形成技術

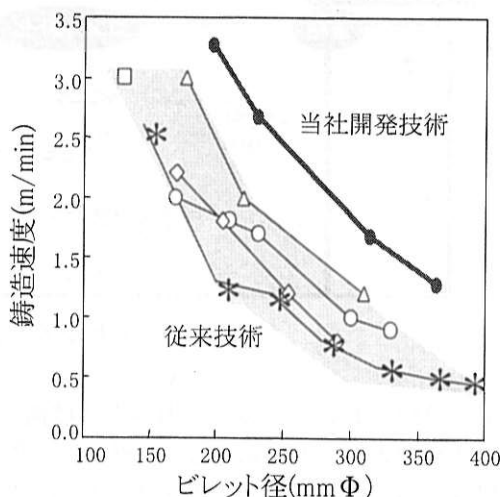


図5 最大鑄込み速度比較

結を実現でき、鋳込みリードタイムを従来の 1/8 に短縮した。

2) 圧延ラインのコンパクト化技術の開発

従来の圧延ラインでは、主圧延機であるマンドレルミルのスタンド数が多いことに加えて、巨大な再加熱炉で温度を一定にした後にサイズで仕上げていた。生産性の向上を図るため、圧延ラインのコンパクト化を追及し、高交叉角拡管穿孔法の開発によるマンドレルミルのコンパクト化とステンレス鋼の高品質穿孔技術、圧下位置可変 3 ロールサイズと製品外径一定制御の開発による再加熱炉の省略を特徴とした独自の圧延ラインを構築した。

①高交叉角拡管穿孔法の開発とマンドレルミルのコンパクト化

従来穿孔法と比較して高交叉角拡管穿孔法（開発穿孔法）の優れた特性を図 6 に示す。従来穿孔法では、穿孔外径を入側のビレット径と等しく圧延するため、薄肉材製造が困難であった。開発穿孔法では、ロール軸に交叉角を 20° 付けることにより、拡管穿孔すなわち穿孔外径をビレット外径より大きくすることが可能となり、薄肉穿孔技術を確立した。穿孔中の圧延材の断面写真を図中に示すが、開発穿孔法により薄肉穿孔でき、世界最薄肉穿孔を実現した。また、開発穿孔法は、難加工性材の品質が良好で、穿孔動力が小さいという優れた特性も有しており、世界14カ国で特許を取得している。

ピアサ薄肉穿孔が可能となったことで、後続ミルであるマンドレルミルの肉厚圧下量を低減でき、世界最少スタンド数である5スタンドのコンパクトマンドレルミルを実現した。

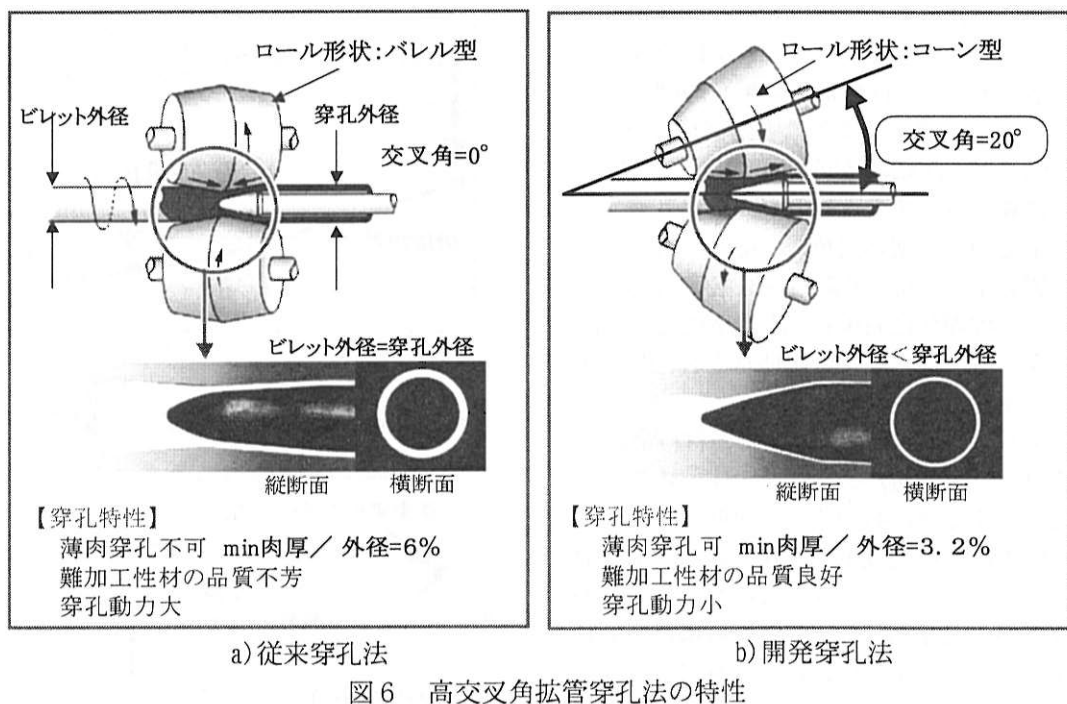


図 6 高交叉角拡管穿孔法の特性

②ステンレス鋼の高品質穿孔技術

開発穿孔法は、ステンレス鋼等の難加工性材料の穿孔が容易であるという特性も有して

いる。図7に穿孔圧延過程における内面疵の発生メカニズムを示す。発生原因は大別して2種類あり、一つは中実ビレットがロールに噛み込んでプラグ先端に到達するまでに、引張り・圧縮を繰り返すことにより、回転鍛造効果で材料中心部に割れが発生するマンネスマン破壊であり、この欠陥が円周方向剪断歪みによって助長され、穿孔後に内面疵となる。もう一つは、圧延域でのロールとプラグによる肉厚加工時の加工発熱に起因したもので、材料の延性値がゼロとなる温度（ゼロ延性温度）に達すると肉厚内部に粒界溶融割れが発生する。

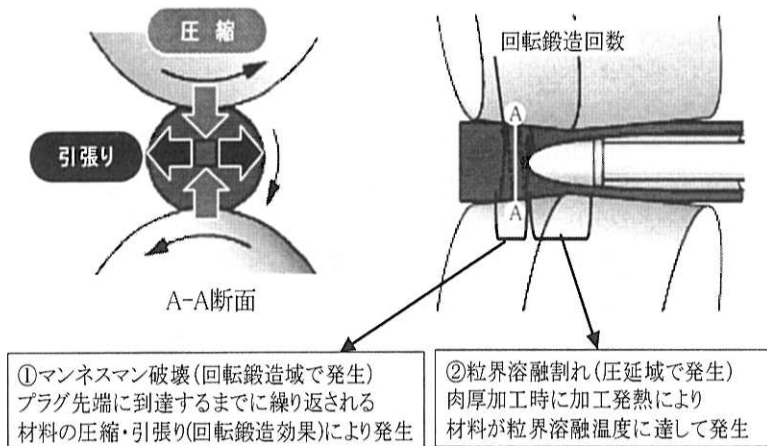


図7 穿孔圧延課程における内面疵発生メカニズム

ステンレス鋼は炭素鋼に比べ変形抵抗が大きく、熱間加工性が悪いので、特に加工度の大きい薄肉材穿孔時に内面疵を発生しやすい。従って、高品質なステンレス鋼管を製造するには、回転鍛造効果を抑制し、かつ、加工発熱を抑えることが必要である。

図8は、回転鍛造回数（ビレットがロールに噛み込んでからプラグ先端に到達するまでの回転鍛造回数）に及ぼす拡張比の影響を示す。回転鍛造回数は拡張比を大きくする程顕著に減少し、開発穿孔法では従来穿孔法に比べ約半分に抑制され、内面疵の発生が抑制される。

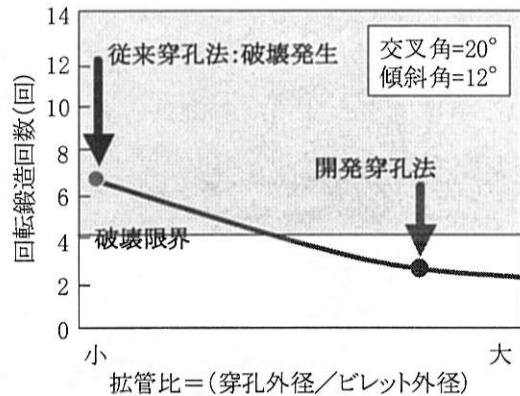


図8 回転鍛造回数と拡張比の関係

図9には、拡張比と穿孔時の材料最高到達温度（計算値）の関係を示す。拡張比を大きくすると最高到達温度が低下し、材料の粒界溶融温度以下で穿孔できる。加工発熱は加工量と共に大きくなるが、同一肉厚外径のシェル（素管）に穿孔する場合、拡張穿孔では径の小さいビレットを用いて穿孔するので加工量が小さくなり、加工発熱量を抑制できるためである。

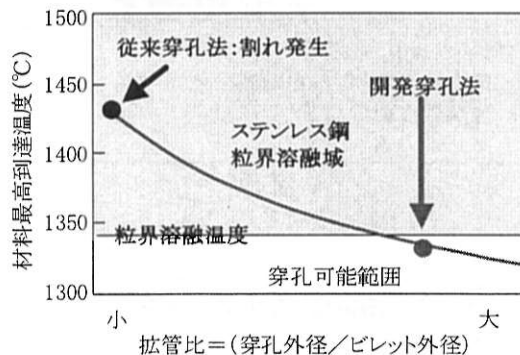
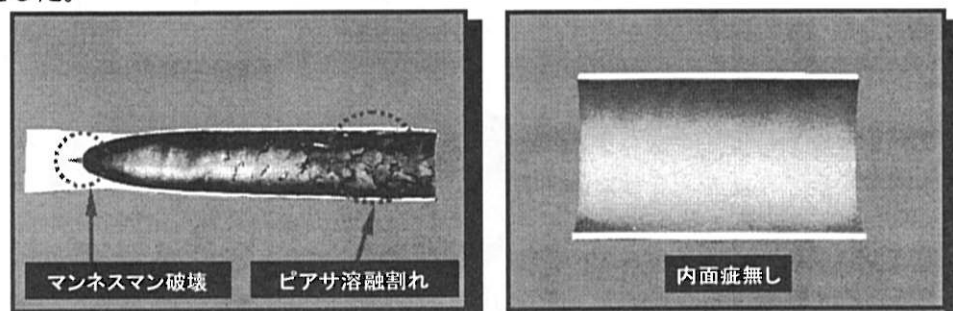


図9 拡張比と材料最高到達温度の関係

図10にステンレス鋼穿孔時の内面品質比較結果を示す。従来穿孔法によるモデル

ミル穿孔結果では、穿孔直前のマンネスマン破壊と管内面のピアサ溶融割れ疵が発生している。一方、開発穿孔法により実機で製造した製品には、管内面疵は発生していない。本技術によりオーステナイト系ステンレス鋼、13%Cr系ステンレス鋼の高品質大量製造を可能とした。



a) 従来穿孔法（モデルミル穿孔結果）

b) 開発穿孔法（実機製品サンプル）

図 10 ステンレス鋼穿孔時の内面品質比較結果（オーステナイト系ステンレス鋼）

3) 製管－熱処理の直結技術の開発

高級鋼管の製造では熱処理が必要となる。従来のオフライン熱処理の問題点とインライン熱処理の開発技術を図 11 に示す。従来は、圧延後鋼管を常温に冷却し、オフラインで熱処理していたため、熱処理能力が低く高級品の量産が不可能で、リードタイムが長い問題があった。そこで、これらの課題を解決すべく、均一焼入技術、高速冷却・真直焼入技術、インライン熱処理用材質設計技術を開発した。その結果、機械的性質の確保と圧延ラインと同期した高能率安定操業の両立が可能となり、インライン熱処理化することで、熱処理能力を従来比 5 倍、熱処理品比率を 80% というこれまでにない生産能力を実現した。

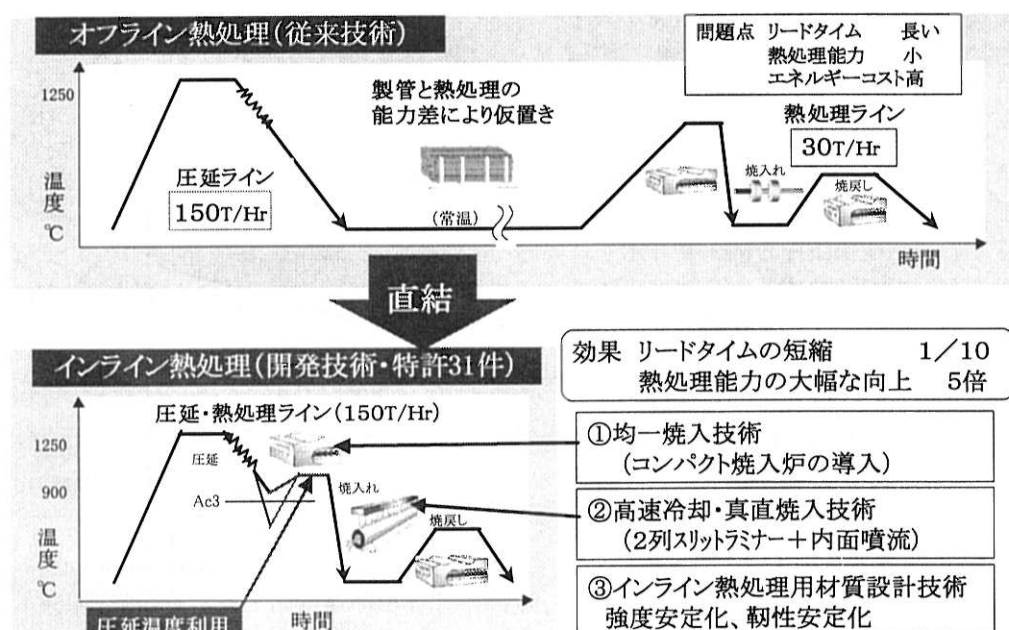


図 11 オフライン熱処理の問題点とインライン熱処理の開発技術

均一焼入技術については、圧延直後にコンパクト焼入れ炉を導入することにより、焼入れ温度 A_{c3} 点以上を確保した。

高速・真直焼入れ技術は、圧延ラインと同等の能率、すなわち熱処理能力の5倍化と高強度化実現のため、冷却速度 $40^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上で、かつ曲がりを抑制することを目標に設定した。冷却速度向上のため、図12に示す2列近接スリットラミナー冷却法を開発した。本技術の特徴は、ラミナー間に水膜を形成することにより、鋼管外表面と冷却水の接触周長を従来の1列ラミナー冷却法に較べて5倍にしたことである。

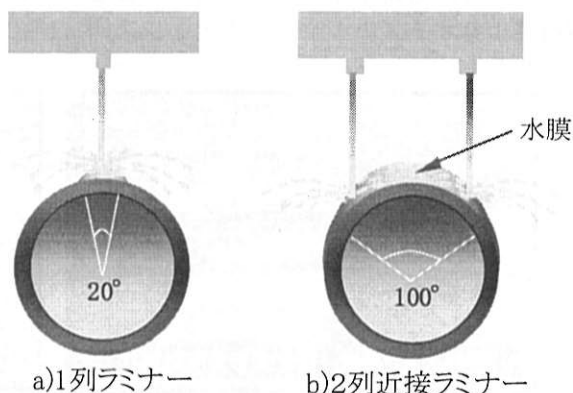


図12 スリットラミナー冷却法

冷却速度比較を図13に示すが、目標冷却速度に対し従来冷却法では未達であるが、開発法では同一水量で達成した。また、弾塑性FEM解析に基づく曲がり抑制技術を確立し、世界最長の25m鋼管の安定焼入れを実現した。

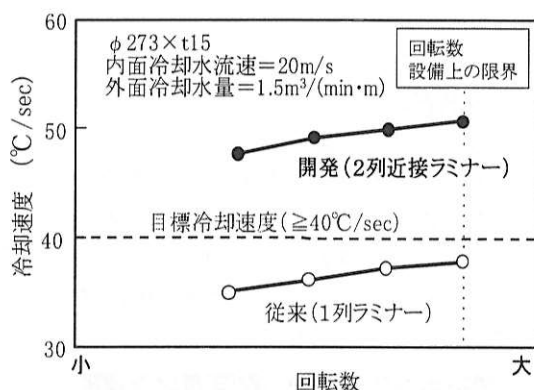


図13 冷却速度比較

(2) ユーザニーズ高級化への対応技術

1) 高強度厚肉ラインパイプの開発

近年エネルギー安定供給の観点から、従来に比べてさらに深海の油田開発がメキシコ湾、西アフリカ沖等で活発化している。その中でシームレスのラインパイプは主にフローラインとして使用され、高強度厚肉鋼管の需要が増加している。

従来技術では到達不可能であった厚肉鋼管での高強度化技術を図14に示す。C量や合金元素を増加すると、強度自体は容易に向上するが、ラインパイプとして良好な溶接性を確保するためには、C当量 (mass%) $= \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15$ において、上限0.42%程度がユーザからの要望であった。従来の熱処理で厚肉の40mmの鋼管を製造する場合、X70 (YS $\geq 482\text{MPa}$) の高強度を得ようとする、C当量が上限を越えてしまい、ユーザニーズに対応出来なかった。今回開発した高速

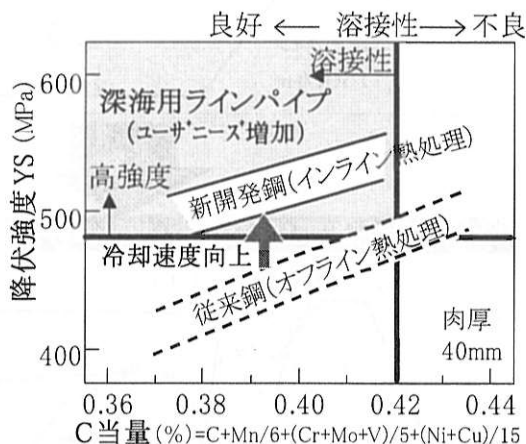


図14 冷却速度向上による高強度化

冷却焼入れ装置により、従来の熱処理に比較して、低C当量でも高強度が得られるようになった。

また、深海で使用される鋼管は補修が困難なため、高靱性の高信頼性鋼管が必要であり、高強度鋼で靱性を確保する方法を検討した。その結果、図15に示すようにインライン熱処理鋼において、低S化、低Ti化による靱性向上効果が極めて大きいことを明らかにした。低S化、低Ti化により、鋼中の介在物が低減し、破壊起点が減少することにより、靱性の大幅向上が可能となった。

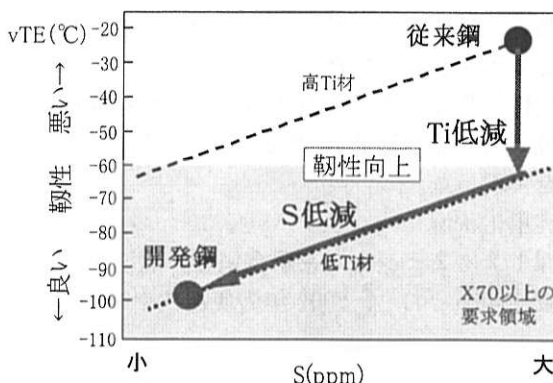


図15 低S化、低Ti化による靱性向上

以上の検討結果からインライン熱処理を活用し、低Ti、低Sを特徴とした、低C-Cr-Mo系のX70厚肉耐サワーシームレスラインパイプを開発した。メキシコ湾海底油田向けに肉厚30～40mmのX70耐サワーシームレス鋼管を既に2300T出荷している。今回建設した高性能の製管設備により、寸法精度に優れ、また、製鋼から製管、インライン熱処理まで、連続したラインの特徴を利用して、短納期で出荷対応し、ユーザから高い評価を得た。今後、同地域では、同規模の海底油田開発が多く計画されており、サワー環境で使用される深海フローライン用厚肉シームレス鋼管として、短納期で大量供給できる体制を整えた。従来採掘が困難であった深海油田の開発を可能とし、石油エネルギーを安価に安定供給する責任に、大きな貢献ができるものとする。

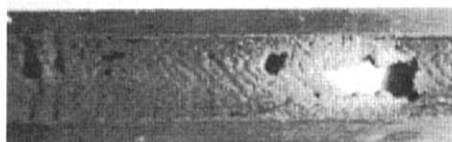
2) ステンレス鋼管の大量製造技術の開発

腐食性ガスを含む天然ガスの輸送用ラインパイプには、従来25%Cr系の2相ステンレス鋼等の高価で量産の困難な材質が使用されていたが、開発穿孔法とインライン熱処理技術を活用した安価なスーパー13%Cr鋼の量産技術を世界で初めて開発した。

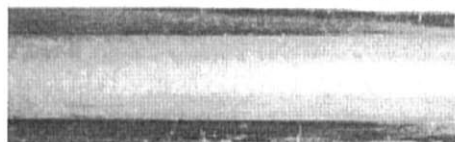
スーパー13%Cr鋼の成分は、13%Cr-6.5%Ni-2.5%Moとすることで耐食性を確保し、さらに水焼入れ可能な極低Cにすることで、インライン熱処理を可能とし、量産化を実現した。

①耐食性の確保

腐食性ガス(0.03気圧 H_2S と CO_2)を含む高腐食環境下での耐食性、特に硫化物割れを防止するため水素脆化感受性の低減を検討した結果、低C化による表層のCr酸化物安定化、Moを2%以上含有させることによるCr酸化物修復力強化が有効であることを見出した。さらに、局部腐食防止のためNi添加によるマルテンサイト単相化を図った。図16に高温 CO_2 腐食試験結果を示すが、炭素鋼に較べて開発鋼の耐食性が優れていることがわかる。



a)炭素鋼



b)スーパー13%Cr鋼

図16 高温 CO_2 腐食試験結果

②製管－熱処理の直結プロセス対応

従来用いられていた 13%Cr マルテンサイト系ステンレス鋼は、C 量が 0.1% であり焼入れ感受性が高く、水焼入れすると焼割れを発生していた。そこで、製品性能を満足しながら水焼入れ可能な極低 C (0.03% 以下) とすることで、インライン熱処理が可能となり、量産化を実現した。

③実用化状況

図 1 7 にステンレス系耐食鋼管の需要動向を示す。スーパー 13%Cr 鋼の累積施工距離は急激に伸びており、2002 年の使用比率は 80% に達し、当社が世界シェア一位である。

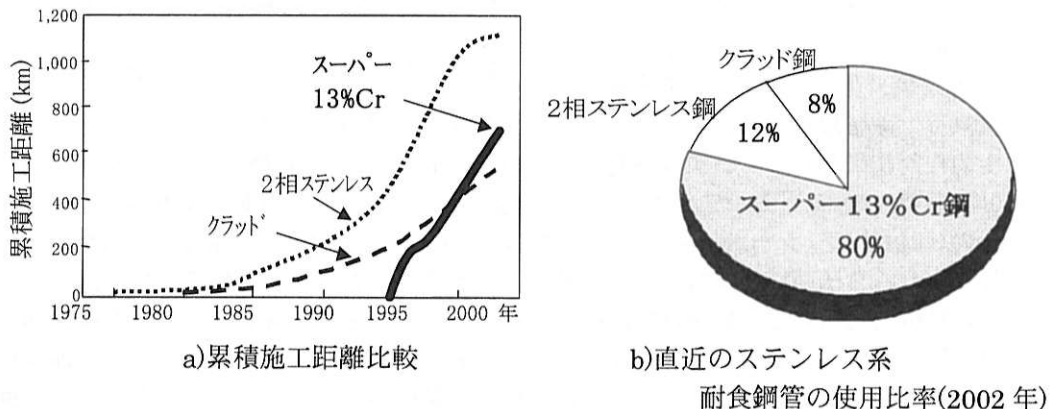


図 1 7 ステンレス系耐食鋼管の需要動向

(出典：Liane Smith and Mario Celant, "Martensitic stainless steels in context", Supermartensitic Stainless Steels 2002, Brussels October 3-4, 2002)

3) 高品質・高信頼性製造システムの開発

ユーザニーズ高級化への対応および競争力強化には、高品質化（高寸法精度化）と品質保証体制の高度化も非常に重要である。そこで、高品質生産システムと品質保証システムから構成する総合システムを構築し、高度に情報武装したインテリジェントな製造技術を確立した。

4. 研究開発の成果

(1) 開発成果の総括

1) ユーザニーズ高級化対応

高交叉角拡管穿孔技術、インライン熱処理技術の開発により、熱処理鋼・ステンレス鋼などの高級鋼管の高品質、短納期、大量製造が可能となり、高級品比率を45%から80%（2002年度）に増加し、ユーザニーズ高級化に対応した。

2) 競争力の強化

ラウンドCC－圧延－熱処理の直結化、圧延ラインのコンパクト化技術の開発により、生産性3.9倍と平均リードタイム1/3を実現した。

(2) 社会への貢献

1) 国内シェア拡大と国内産業空洞化の防止

本開発により、中径シームレス鋼管の国内シェアを63%に向上した（2002年度、新聞情報からの推定値）。また、中径スーパー13%Crラインパイプは世界シェア1位であり（2002-2003年、通関統計より推定）、世界の供給基地となり、国内産業空洞化防止に貢献した。

2) 地球環境への貢献

中径スーパー13%Cr鋼管の安定供給により、68億Nm³/年の天然ガス生産を実現し、石油に比べてCO₂排出量128万トン/年の削減に貢献している。

3) 世界のエネルギー産業への貢献

開発工程で製造している油井管、ラインパイプの主な出荷先は、世界各国の大規模な石油・天然ガス開発プロジェクトであり、特に深海、深井戸、高腐食環境で使用される高級鋼管を大量に出荷している。

5. 学会発表、特許等

学術発表は国内外で論文発表 22 件、講演 23 件であり、特許は国内外で登録 105 件、公開中 113 件、未公開 12 件である。

6. 将来展望

本技術開発は多くの特許に裏付けられた独自開発技術であり、他社には容易に模倣できないものである。今後は、エネルギー需要の天然ガス化の加速化による高級品ニーズの増大が進み、中国での新設ミル稼動により国際競争もさらに激化するものと予想されるが、本技術開発はこれらの世界的な傾向に十分対応可能で、今後とも優位性を確保できるものと考えられる。その結果、わが国の産業空洞化防止への寄与や地球環境への貢献度もさらに拡大していくと期待される。