



受賞技術-15

天然ガスの大幅増産に貢献する 高合金油井管および製造技術の開発

Development of High-alloy Seamless OCTG and Their Manufacturing Technologies That Contribute Production Increase of Natural Gas

高部秀樹*1、山崎正弘*2、照沼正明*3、木谷 茂*4、山口晴生*5、岩本宏之*6、
下田一宗*7、山根明仁*7、相良雅之*8、乙咩陽平*9、永瀬 豊*10

1 緒言

中国やインド等、新興国に牽引された世界経済活動の活発化により、世界のエネルギー需要が年々拡大している。一方、地球温暖化防止のための二酸化炭素 (CO₂) 排出削減が急務となっている。これらを両立させるため、燃焼時に排出される CO₂ ガス量が石炭や石油に比べて少ない天然ガスの需要が急増している^{1,2)}。

天然ガス田の開発・生産とは、図1に示すように、天然ガス層まで井戸を掘削し、最終的に油井管チュービング (以下、油井管) を通して天然ガスを採掘することである。天然

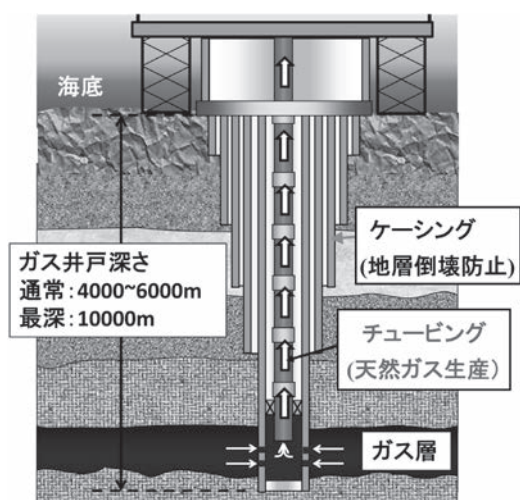


図1 天然ガス採掘の概要

ガスは、多くの場合、硫化水素や炭酸ガスを多量に含んだ高圧・高温の地層に存在するため、天然ガスの採掘に使用される油井管は厳しい腐食環境に曝される。従って、天然ガスを採掘し増産するためにはCr、Ni、Mo等の高価な合金元素を多く含んだ高耐食性の高合金油井管を大量安定供給する必要がある。ここで高合金油井管とは、二相ステンレス鋼 (20~30%Cr-4~8%Ni-2~4%Mo鋼) とNi合金 (19~30%Cr-25~60%Ni-2~14%Mo) の事である。

また、天然ガス採掘用の高合金油井管は製品外径が7インチ (177.8mm) 以下の中小径管が主流であるが、近年、天然ガス生産の効率化と天然ガス田の開発費削減のため、高合金油井管の大径長尺化への要望が高まっている。さらに、超高温過酷環境のガス田開発加速のための超高強度油井管の開発も天然ガス採掘業界から切望されている。そこで、天然ガスの大幅増産に貢献するため、中小径高合金油井管の量産技術開発、大径長尺高合金油井管の製造技術開発、および超高強度高合金油井管の開発に取り組んだ。本稿では、これらの開発技術の概要を述べる。

2 開発技術内容

2.1 中小径高合金油井管の量産技術開発

従来から天然ガス採掘用に中小径高合金油井管が製造販売されていたが、天然ガスのさらなる増産には、その供給能力は充分ではなかった。そこで、'90年代半ば以降、中小径高合金油井管のさらなる大量且つ、安定的な供給を目指し、世界

*1 新日鐵住金 (株) 和歌山製鐵所 カスタマー技術部 継目無管材料開発室 室長
*2 新日鐵住金 (株) 和歌山製鐵所 カスタマー技術部 特殊管技術室 主幹
*3 新日鐵住金 (株) 尼崎製造所 カスタマー技術部 製品技術室 室長
*4 新日鐵住金 (株) 尼崎製造所 生産管理部 部長
*5 新日鐵住金 (株) 技術開発本部 圧延研究開発部 上席主幹研究員

*6 新日鐵住金 (株) 技術開発本部 制御研究開発部 上席主幹研究員
*7 新日鐵住金 (株) 技術開発本部 圧延研究開発部 主幹研究員
*8 新日鐵住金 (株) 技術開発本部 鋼管研究部 主幹研究員
*9 新日鐵住金 (株) 和歌山製鐵所 カスタマー技術部 継目無管材料開発室 主査
*10 新日鐵住金 (株) 和歌山製鐵所 カスタマー技術部 部長

最高の供給能力を目標として、従来の製造・加工プロセス全体 (図2) を見直し二相ステンレス鋼およびNi合金の量産技術を開発した。量産技術開発では、加工用素材となる丸鋼 (ビレット) の生産性を上げるためにインゴット鑄造から連続鑄造へと変更するとともに、油井管の加工能力を高めるべく押出し製管法における生産性向上に関する技術開発を行った。

2.1.1 連続鑄造技術

インゴット鑄造では低生産性と低歩留が量産の制約となるため連続鑄造化した。連続鑄造化の課題は、モールド (鑄型) 内の鑄片割れとオシレーションマークを起点とした分塊圧延後のビレット表面割れの防止だった (図3)。いずれも、そのままでは製品となり得ない深刻な割れだったが、新モールドパウダーの開発およびモールド振動条件の最適化によってこれらを解決し、無手入れで分塊圧延に提供できる高品位な高合金連続鑄造を実現した。

連続鑄造ではモールドパウダーを介して溶鋼が冷却され凝固シェルが成長するが、高合金の場合、凝固シェルに表面割れが発生しやすい。溶鋼 (液相) から鑄片 (固相) に状態が変化する時の高合金の強度変化は、SUS304等のオーステナイト系ステンレス鋼などに比べ急激であり (図4)、凝固過程の温度ばらつきが起こると、凝固シェルの不均一変形が大きく且つ凝固遅れ部に応力が集中することで表面割れとなりやすいと推測された。そこで、均一な冷却を実現するため断熱性を

を重視した新モールドパウダーを開発した (図5)。モールドパウダーは、モールドオシレーションによりモールドと凝固シェルとの間に流入してパウダーフィルムを形成し、潤滑剤として機能するだけでなく、凝固シェルならびにモールドに直接接触して凝固シェルの形成状況を左右する伝熱媒体として機能する。

凝固シェルとモールド間の潤滑性が低下すると最悪の場合、鑄片の割れによって溶鋼の漏れ出しにいたることがあるため、従来のモールドパウダーは潤滑性を重視していた。しかし、本発明ではパウダーフィルムの断熱性を重視し、フィルム内に Caspidine ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$) と呼ばれる結晶相を積極的に析出させた³⁾。この結果、フィルムの輻射伝熱抵抗が高まり、凝固シェルの均一な冷却が可能となった。さらに、NaやMgO等を添加し潤滑性能も最適化した。これにより、高合金の連続鑄造に適した、断熱性と潤滑性に優れた新モールドパウダーの開発に成功し、モールド内の鑄片割れが防止できた。さらに、モールド振動条件を最適化することでオシレーションマークを起点としたビレット表面割れの防止にも成功し、無手入れで分塊圧延に提供できる表面品質

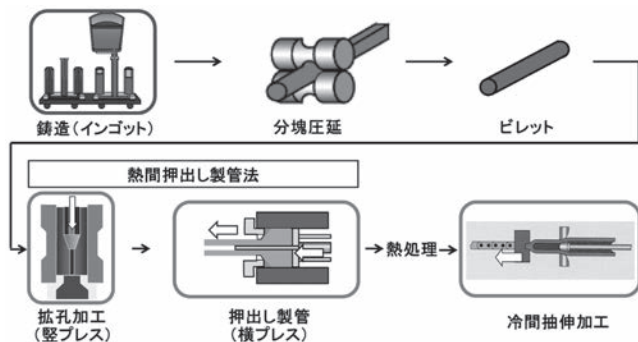


図2 中小径高合金油井管の従来の製造・加工プロセス

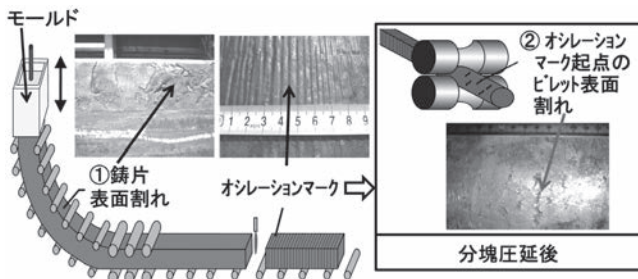


図3 高合金連続鑄造化の課題

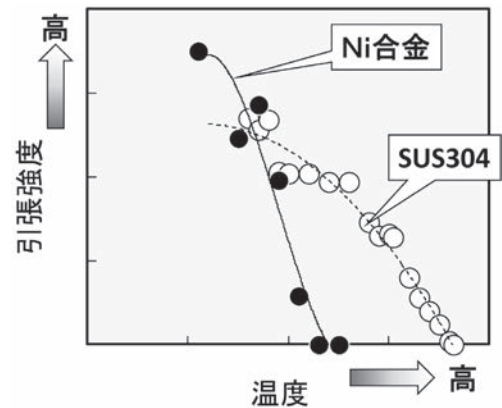


図4 Ni合金とSUS304の高温強度
(高合金の一例としてNi合金 (25%Cr-30%Ni-3%Mo) を示す)

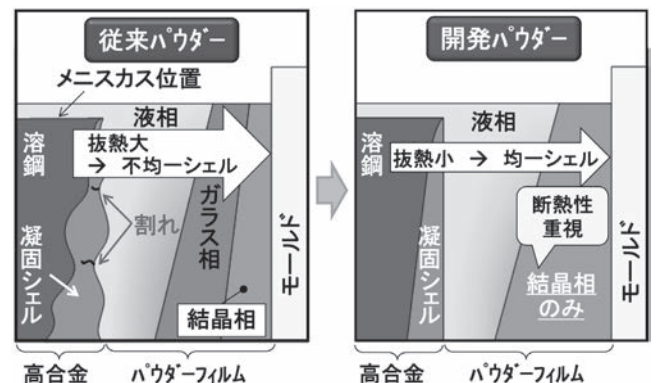


図5 モールドパウダーの改善

に優れた高合金の安定鑄造を達成し、鑄造量の生産性を約10倍に向上させることができた。

2.1.2 高品位・高生産性押出し製管技術

熱間押出し製管法を用いた油井管の製造プロセスを図6に示す。あらかじめガイド孔を明けたビレットを加熱してから拡孔加工し、その後、押出し製管により母管とする。この母管に複数回の冷間抽伸加工を施し、冷間仕上げ管とする。

高合金の押出し製管の問題点は、ステンレス鋼に比べ、変形抵抗が高く、熱間加工性が悪いいため押出し可能な温度範囲がステンレス鋼に比較して大幅に狭くなることである。従来、押出し可能温度範囲で製造できない鋼管サイズは、母管の押出し寸法を厚肉に変更して加工度を下げ、次工程の冷間加工の回数を増やすことで最終寸法に仕上げており、生産性と製造コストの大幅な低下を招いていた。押出し製管では、材料加熱温度の下限値は、押出し初期に発生する荷重ピークによって定まる(図7)。このピークを低減し、材料加熱温度の下限値を低くできれば、押し出し可能温度範囲が拡大し、冷間加工の回数を増やすことなく最終寸法に仕上げることが可能となる。そこで、生産性を向上させるために押し出し荷重低減技術の開発に取り組んだ。各種実験および有限要素解析を鋭意実施した結果、荷重ピークを低減できる押し出し条件を明らかにし押し出し荷重の低減と押し出し可能温度範囲の拡大に成功した。その結果、従来ステンレス鋼に比べ押し出し製管後の肉厚を厚くして製造していた高合金油井管が薄い肉厚で製管可能となり生産性が大幅に改善された。

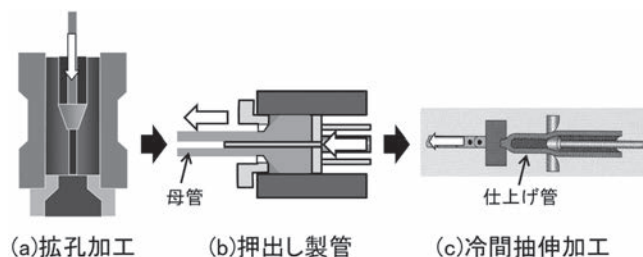


図6 熱間押出し製管法を用いた高合金油井管製造工程の概略

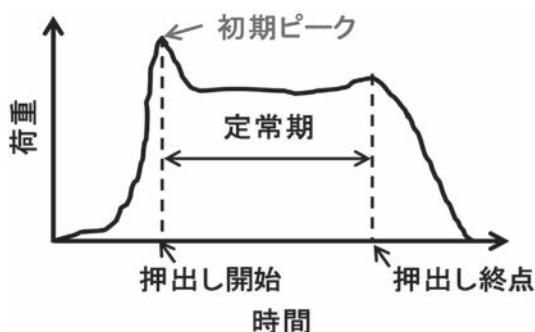


図7 押し出し荷重ピーク

2.1.3 量産技術開発のまとめ

高品位連続鑄造技術と押し出し製管技術の開発により、高合金油井管の製造可能性が'90代後半よりも飛躍的に拡大した。

2.2 大径長尺高合金油井管の製造技術開発

天然ガスの開発では、油井管を大径化し、その断面積を大きくするほど天然ガスの生産効率が向上する場合が多く、ガス田開発費用も削減できる。例えば、油井管の外径を7インチ(177.8mm)から9.6インチ(244.5mm)と大径化することにより開発費を約30%削減できるという試算もある。そこで、従来量産品としては商品化されていなかった二相ステンレス鋼およびNi合金の大径油井管(外径244.5mm以上)の製造に取り組んだ。従来の押し出し製管法では製造設備・プロセス上の制約から、大径化と必要長さを同時に確保することは困難であったため、炭素鋼やオーステナイト系ステンレス鋼等の大径長尺油井管製造に適用されてきた穿孔圧延製管法(マンネスマン・マンドレルミル製管法、図8)による大径長尺高合金油井管の製造技術開発を進めた。この開発の課題は、ピアサによる穿孔圧延時の管内面の疵とマンドレルミルによる延伸圧延時の内面工具の引き抜き不良等の圧延トラブル防止であった。

今回、各々、高合金高品位穿孔圧延技術、高合金高品位延伸圧延技術を開発し、穿孔圧延製管法による大径長尺高合金油井管の量産技術を確立した。

2.2.1 高合金高品位穿孔圧延技術

高合金、特にNi合金は変形抵抗が高く、熱間加工性が低い。その結果、穿孔圧延中に、図9のような製品となり得ない内面疵が発生する。この疵を効果的に抑制する穿孔圧延技術の開発が望まれた。高合金の内面疵を防ぐには、穿孔圧延

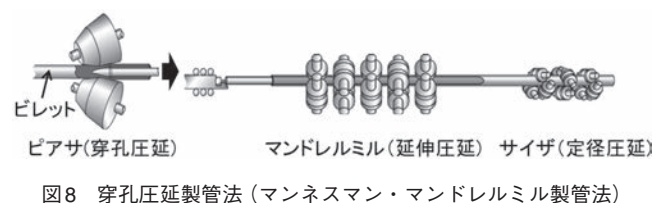


図8 穿孔圧延製管法(マンネスマン・マンドレルミル製管法)



図9 Ni合金(25%Cr-32%Ni-3%Mo)の内面疵の例(モデル穿孔圧延途中止め材)

中の材料の変形挙動を予測し、熱間加工性が低下しない条件で穿孔することが必要となる。

物理実験無しでは、穿孔中の変形挙動を定量的に予測することは従来困難であった。そこで、穿孔圧延途中止めによる材料変形挙動と履歴の詳細な研究の結果に基づき、材料とロールの接触領域のメッシュ細分化と摩擦条件の合わせ込みを行い、穿孔圧延中の材料の変形挙動を精度良く予測する三次元数値解析技術を開発、実用化した^{4,5)}。

モデル圧延等によって得られた実験事実を最大限活用することにより、有限要素法による三次元解析モデルおよび計算の境界条件の最適化を図り、穿孔圧延中の材料変形を精度良く予測することに取り組んだ。今回開発した解析モデルを用いた数値解析結果と、モデルミルによる実験結果を比較して図10に示す。解析結果と物理実験の材料変形形状（外形寸法）の履歴は良好に一致している。また物理実験に用いたビレットの端面にあらかじめピンを埋め込んでおき、穿孔圧延途中のせん断変形の履歴も調査したが、こちらでも解析結果は物理実験と良好に一致した。

以上のように今回開発した解析技術によって、穿孔圧延における変形履歴を正確に予測することが可能となった。この穿孔圧延解析モデルを活用して、工具設計を含む穿孔圧延条件を最適化した。その効果を実機圧延で確認したところ、従来、高合金の穿孔圧延で不可避であった内面割れの発生が皆無となった。以上により、図11に示すように穿孔圧延製管法による製管可能鋼種の範囲を従来のオーステナイト系ステンレス鋼からNi合金へと大きく拡大することに成功した。

2.2.2 高合金高品位延伸圧延技術

マンドレルミルによる延伸圧延は、ピアサで穿孔された素

管にマンドレルバーを挿入し、2本1対の孔型ロール列とマンドレルバーの間で連続的に肉厚を圧延加工する多スタンド連続圧延である（図12、図13）。出側に配置したエキストラクタサイズで、圧延された素管を前進させながら、マンドレルバーを後方に引き抜く。

この延伸圧延における課題は2つあり、1つは、圧延時に素管からマンドレルバーが引き抜けなくなってしまう引き抜き不良、もう1つは、ロール孔型直下で圧延変形のバランスが崩れて発生する圧延疵である。そこで、熱間連続圧延における高合金材料の強度特性を詳細に研究し、連続圧延中の熱間強度特性を考慮した解析モデルを新たに導入した。その結果、ロール設計と圧延条件の最適化に成功し、引き抜き不良と圧延疵が防止でき、高合金の安定延伸圧延が可能となった。

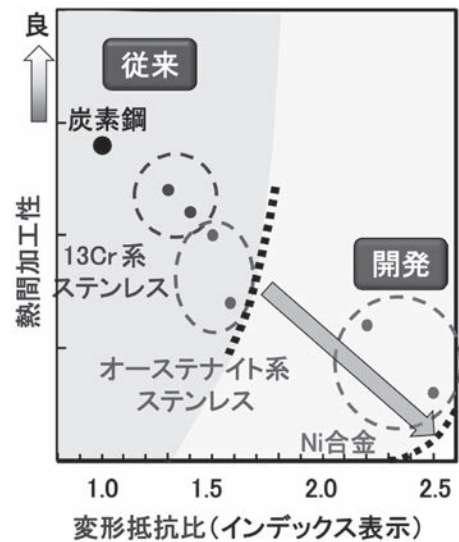


図11 開発による製造可能範囲の拡大

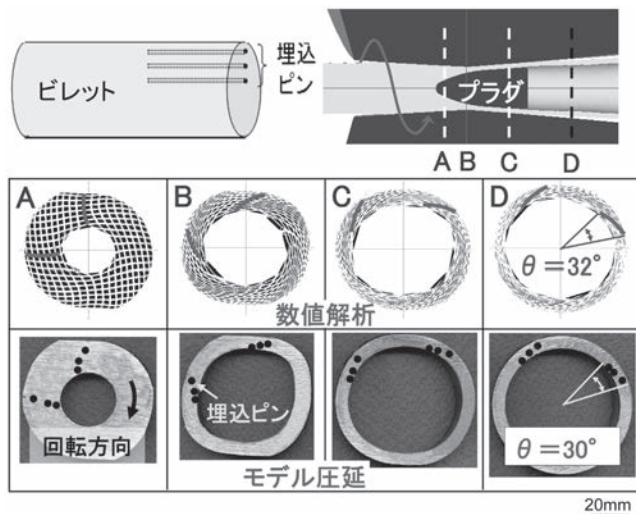


図10 穿孔圧延解析モデルによる数値解析結果とモデル実験結果の変形比較

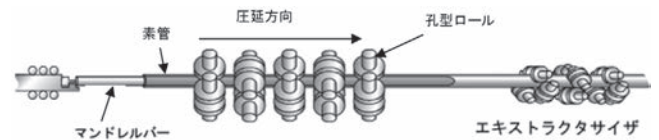


図12 マンドレルミルの模式図

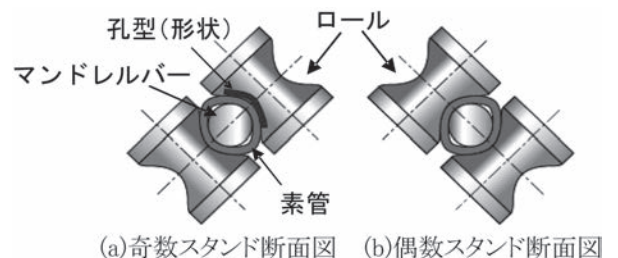


図13 マンドレルミル圧延の断面

2.2.3 大径長尺高合金油井管の製造技術開発のまとめ

大径長尺高合金油井管の製造技術開発では、高合金高品位穿孔圧延技術と高合金高品位延伸圧延技術を開発した。その結果、穿孔圧延製管法による大径長尺高合金油井管の量産技術を実現した。

2.3 超高強度高合金油井管の開発

天然ガスをさらに増産するために、天然ガス田の開発環境は年々大深度かつ高圧高温（HPHT：High Pressure High Temperature）化しており、近年では、超高圧高温環境（Ultra HPHT：地層圧力20000psi（138MPa）以上かつ、地層温度400°F（204℃）以上）の天然ガス田開発が始まっている⁶⁾。Ultra HPHT環境の天然ガス田を開発するためには、油井管は生産する天然ガスによる高い内圧に耐える必要があるとともに耐食性も要求されるため、従来よりも強度の高い、0.2%耐力が140ksi（965MPa）以上の超高強度と高耐食性を併せ持った高合金油井管が必要であった。そこで、Ni合金（成分系：25%Cr-32%Ni-3%Mo）の高強度化に取り組んだ。

2.3.1 REM添加による耐SCC性向上技術 （転位構造制御技術）の開発

一般にステンレス鋼や高合金の耐応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）性を向上させる場合、CrやNi、Mo等の高価な合金元素を添加することにより表面に形成される皮膜の耐食性や修復能を強化させる方法がとられてきた⁷⁻⁹⁾。しかし今回、希土類元素（REM：Rare Earth Metal）添加によって材料組織内部の転位構造を制御し、耐SCC性を向上させるという新しい技術思想で新材料の開発に成功した。

図14に転位構造に及ぼすREM添加の影響を示す。高N添加によって140ksi級に高強度化したNi合金に関して、REM添加により転位構造をプラナー構造から非プラナー構造に変化させることができた。後述するように、プラナー構造は

変形時に大きな新生面を生成して耐食性を損なうが、これを非プラナー構造とすることによって耐食性の改善が期待される。REM添加の効果を調査するために、耐SCC性をSSRT（Slow Strain Rate Test）法¹⁰⁾により評価した。SSRT法ではH₂S環境中での引張試験の絞り値が大気環境中での絞り値に対して比率0.8以上であると、H₂S環境中でSCCが起らないとされている¹⁰⁾。SSRT法での評価によると、140ksi級の強度を有するREM添加材の耐SCC性は図15のように向上する。

REM添加による超高強度Ni合金の耐SCC性改善機構は転位構造と皮膜破壊時の腐食活性面の関係から図16のように推定している^{11,12)}。すなわち、腐食環境において形成される不動態皮膜の初期破壊と修復の過程において、REM非添加材は転位がプラナー化する傾向にあるため、すべり変形が一部のすべり面に集中して発生し、皮膜の初期破壊時に大きな腐食活性面が生成しやすい。このため不動態皮膜の修復、再不動態化が容易でなくSCCが発生する。一方、REM添加材では多くのすべり面に分散して変形が生じるため、腐食が活性な新生面が相対的に小さく再不動態化が容易であり、SCCが発生しにくくなる。

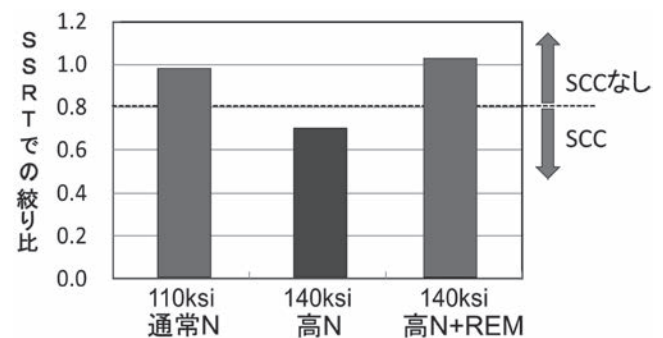


図15 耐SCC性に及ぼすREM添加の効果
(0.7MPaH₂S、25%NaCl+0.5%CH₃COOH、175℃)

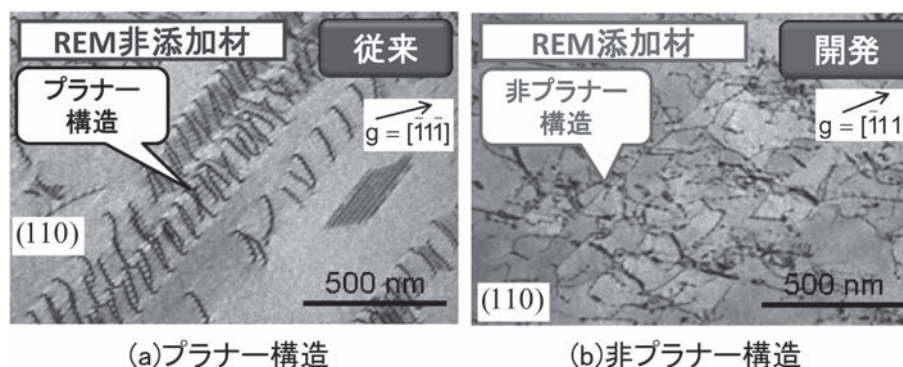


図14 転位構造に及ぼすREM添加の影響（観察面：(110)面）

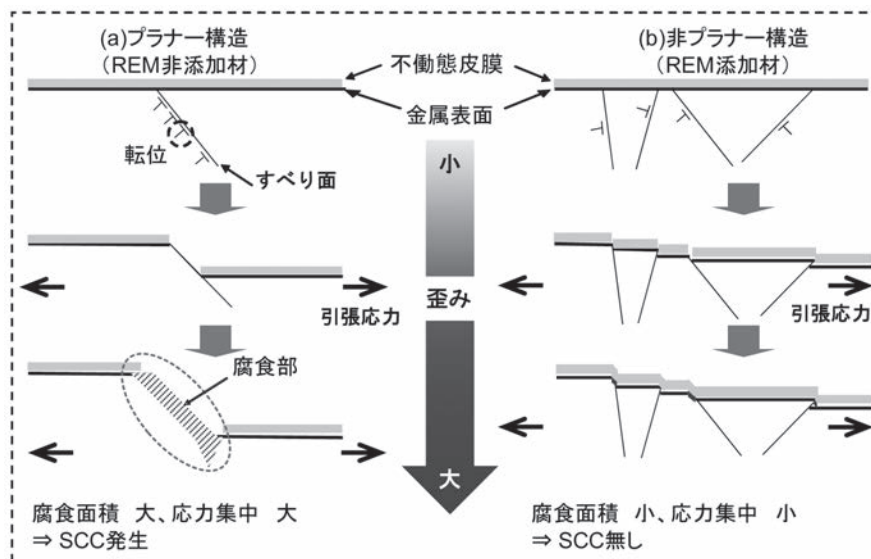


図16 転位構造制御技術による耐SCC性向上機構

2.3.2 超高強度高合金油井管開発の成果

硫化水素や炭酸ガスを含有する天然ガス田開発環境で使用可能な超高強度、140ksi級の高合金油井管材料を開発した。

本技術開発により、これまで採掘不可能であったUltra HPHTの大深度ガス井が採掘可能となり、また、Ultra HPHTほど厳しくない環境の天然ガス田においても鋼管を薄肉にして軽量化することによって井戸をコンパクトな設計とでき、天然ガス田開発費用の削減が期待される等、本材料は、今後の天然ガス増産・安定供給に大きく貢献すると期待される。

実用化に関してはメキシコ湾でのUltra HPHTの大深度ガス田開発用途に製品を出荷済みであり、さらに今後、大深度の天然ガス・油田開発に活用されていく見通しである。

3 結言

「中小径高合金油井管の量産技術」、「大径長尺高合金油井管（新製品）の製造技術」、および「140ksi級超高強度高合金油井管（新製品）」を開発し、それによって、天然ガスの開発、生産に必要な高合金油井管を安定的に供給すると共に、天然ガスの生産効率向上とガス田開発費用の削減を可能とし、かつUltra HPHTの大深度ガス田の開発を実現した。以上のように、高合金油井管に関する一連の開発によって天然ガスの大幅増産が可能となった。

参考文献

- 1) BP Energy Outlook 2030, (2012)
- 2) 平成22年度 エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2011）、経済産業省エネルギー庁、(2011)
- 3) 花尾方史, 川本正幸, 原昌司, 村上敏彦, 菊地祐久, 花崎一治: 鉄と鋼, 88 (2002), 23.
- 4) 山根康嗣, 下田一宗, 井上祐二: 穿孔圧延の三次元変形解析, 日本鉄鋼協会, (2012)
- 5) 井上祐二, 下田一宗, 山根康嗣: ピアサにおける穿孔圧延中の材料と工具の速度解析, 日本鉄鋼協会, (2012)
- 6) 石油技術協会誌, 76 (2011) 5, 415.
- 7) M.Ueda, H.Amaya and H.Okamoto: Proceedings of Corrosion97, Houston, TX: NACE International, (1997), 25.
- 8) J.Murayama, H.Miyuki, T.Kudo, N.Fujino and F.Terasaki: Proceedings of TMS of AIME Meeting, (1984), A84-45.
- 9) M.Ueda and T.Kudo: Proceedings of Corrosion94, Houston, TX: NACE International, (1994), 69.
- 10) NACE Standard TM0198-2004 Item No. 21232, NACE International, (2004)
- 11) Y.Otome, H.Okada, H.Amaya and M.Igarashi: Proceedings of the 2nd International Symposium on Steel Science (ISSS 2009) Oct. 21-24, Kyoto, Japan: ISIJ., (2009)
- 12) 相良雅之, 乙咩陽平, 澤渡直樹, 天谷尚, 五十嵐正晃: まてりあ, 51 (2012) 3, 117.

(2013年8月8日受付)