

省合金型極低温用高変形能天然ガス輸送用鋼管 Super Tough-Ace[®] の開発

原 卓 也¹⁾ 篠 原 康 浩²⁾
重 里 元 一³⁾ 津 留 英 司⁴⁾

1. はじめに

天然ガスは、多く存在する北極圏から大消費地までパイプラインで輸送される。厳寒地域、特に断層、地震地帯、不連続凍土地帯のような地殻変動が起こる地域を通過する場合があります(図1)、天然ガス輸送用鋼管(ラインパイプと呼ぶ)は低温靱性に加えて変形能に優れた厚肉高強度鋼管が要求される。不連続永久凍土、地すべり、断層などの地盤変動が起きやすい地域ではパイプラインが塑性変形するため、円周溶接部からの破壊や、管体での座屈を抑えるようなパイプラインの設計が必要である。このようなパイプラインの設計をひずみ設計(Strain-Based Design; SBD)と呼ぶ。SBDでは、プロジェクト毎に決定される要求ひずみ内で、溶接部からの破壊および管体からの座屈をさせない設計にしなければならない。円周溶接部からの破壊を防止するための重要な設計は、円周溶接金属と鋼管長手方向の強度のオーバーマッチングである。通常、鋼管は防食を目的とした加熱塗装を実施するので、ひずみ時効による鋼管強度の上昇を抑える必要がある。鋼管強度の下限値は、必要グレードの最小強度であり、上限値は、現地溶接金属強度の最小値未満の値となり、狭レンジの強度を満足するような鋼管の製造法を検討しなければならない。一方、曲げ変形時に鋼管の座屈性能を向上させるには、鋼管の高一様伸び化かつ低降伏比化が基本となる⁽¹⁾。

次に低温靱性について述べる。鋼管では、き裂発生抵抗性とき裂伝播抵抗性の2つが要求される。まず、脆性破壊が発生しないような特性を得るには、極低温で高い衝撃値(例

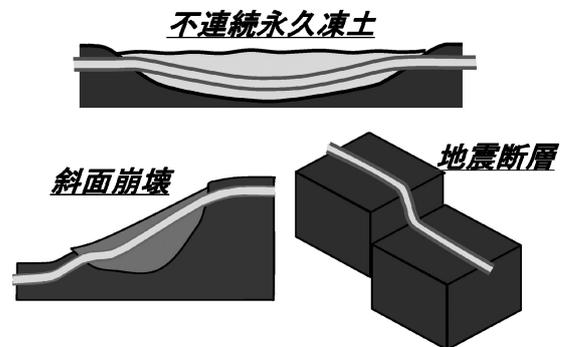


図1 地殻変動に伴う鋼管の変形⁽¹⁾。

えばシャルピー吸収エネルギー)が要求されるため、低炭素化などの合金元素の最適化が重要となる。もう1つ、腐食や人為的に万一破壊が発生しても、き裂を停止させる特性が要求される。-40°Cのような極低温にて、脆性破壊でなく、延性破壊させることが大前提となる。これを達成するには、マイクロ組織の微細化が重要な解決策となる。

本開発では、4つ(低温靱性・変形能・厚肉・高強度)の複合特性を確保するために、従来では、MoやNiなどの希少高価元素を多く添加していたが、今回、従来以上の複合特性を有し、かつ省合金化した天然ガス輸送用鋼管(Super Tough-Ace[®])を開発したので内容を紹介する。

2. 開発鋼の設計思想

本開発鋼の設計思想について述べる。高変形能を確保するために、加工硬化能に優れたフェライト(軟質組織)とベイナイト(硬質組織)の複合組織を適用した。

次に、極寒地域での適用を考慮して、-40°Cのような最も厳しい低温靱性を保証することを目的として、平均粒径5 μm以下(ASTM法)の微細複合組織を基本とした。この鋼管には従来にない3つの大きな特徴がある。

1つは、これまでラインパイプで必須元素であったMoをフリーにし、鋼管の加熱塗装後の変形能を改善した。一般

* 新日鐵住金株式会社

1) 鉄鋼研究所 主幹研究員 2) 君津技術研究部 主幹研究員
3) 先端技術研究所 主幹研究員 4) 鉄鋼研究所 主幹研究員

Development of High Strength and High Deformable Line Pipe for Ultra Low Temperature Usage (Super Tough-Ace); Takuya Hara*, Yasuhiro Shinohara*, Genichi Shigesato*, Eiji Tsuru*
(1) Steel Research labs. 2) Kimitsu R&D lab. 3) Advanced Technology Research Labs. 4) Steel Research labs. Nippon Steel and Sumitomo Metal Corporation)

2012年10月31日受理

に、防食のために鋼管を200℃以上に加熱塗装する際、ひずみ時効の影響を受ける。フリーな炭素量が多く存在するほどひずみ時効が生じやすく、降伏比が上がり、一様伸びが低下するため、変形能が低下する。Moフリーにすると、鉄炭化物(セメンタイト)が多く形成し、フリーな炭素量が著しく低下した結果、変形能が著しく改善される。

図2にMoフリー鋼とMo添加鋼を1%の予ひずみを付加した後、240℃のひずみ時効前後での降伏応力の上昇量を示す⁽²⁾。Moフリー鋼のひずみ時効後の降伏応力の上昇量が大幅に抑制されていた。

図3にMoフリー鋼とMo添加鋼のひずみ時効前のTEM(Transmission Electron Microscopy)像を示す⁽³⁾。Moフリー鋼のセメンタイトはMo添加鋼よりも多く生成していた。焼入れ性の指標である β ⁽⁴⁾がほぼ同じであり、 γ/α 変態開始温度も同じであった。Mo添加鋼は変態停留が生じるため⁽⁵⁾、室温まで冷却後、未変態 γ やマルテンサイトが生成することが知られている。本実験でも、Mo添加鋼は未変態 γ やマルサイトが生成していたのに対して、Moフリー鋼では、未変態 γ やマルテンサイトは多く生成せずに、セメンタイトが多く生成したと考えられる。もう1つの特徴は、独自の加速冷却装置(CLC- μ : Continuous on-Line Control- μ)を適用し、Moフリーの強度不足を補うとともに、高精度、均一冷却を実現させ、強度の狭レンジ化を可能とした。すなわち、フェライトとベイナイトのそれぞれの組織分率を最適化させ、大量生産時に同じ組織分率を常に確保できるような

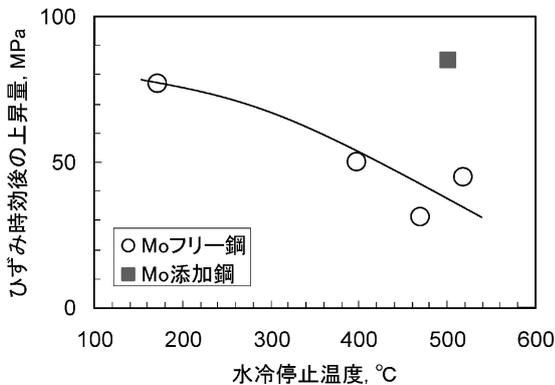


図2 Moフリー鋼とMo添加鋼のひずみ時効後の降伏応力上昇量(1%予ひずみ+240℃加熱)⁽²⁾。

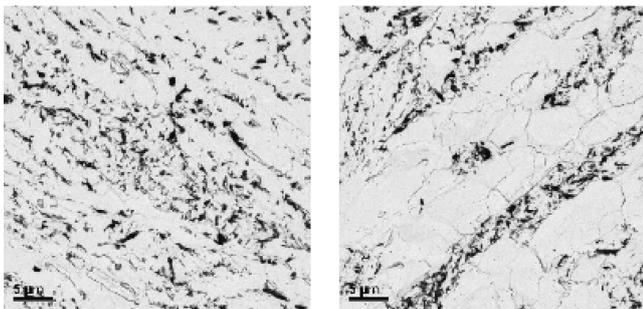


図3 MoフリーとMo添加鋼のTEM像⁽³⁾。(左図: Moフリー鋼, 右図: Mo添加鋼)。

緩冷却(mild accelerated cooling; MAC)プロセスを確立した。

図4に緩冷却プロセスの概念図を示す⁽²⁾。これは独自の冷却技術である。その結果、強度の狭レンジ化(引張り強度50MPa以内)が達成できた。

最後に、極低温にて高靱性を確保するためには結晶粒の微細化が有効であり、厚板圧延条件の各工程の最適化と加速冷却の高精度化、均一冷却を行い、平均粒径3 μ m以下(ASTM法)という超微細組織を得ることに成功した。図5に代表的なマイクロ組織を示す(SEM(Scanning Electron Microscopy)像)。

MoフリーでNiを最小限に添加した系において、高精度冷却条件で製造したSuper Tough-Ace鋼管は、APIグレードX60からX100までの鋼管製造が可能となった。

3. 開発鋼の特性

ロシア向けに製造したAPIグレードX60鋼管のひずみ時効前後の機械的性質について述べる。図6に240℃でのひずみ時効前後での降伏比と一様伸びを示す⁽⁶⁾。降伏伸びはひずみ時効前後とも88%以下で、かつ、一様伸びは10%以上を達成した。

低温靱性については、厚板圧延の適正化によって、平均粒径3 μ m以下という超微細組織を創製して、-40℃での極低

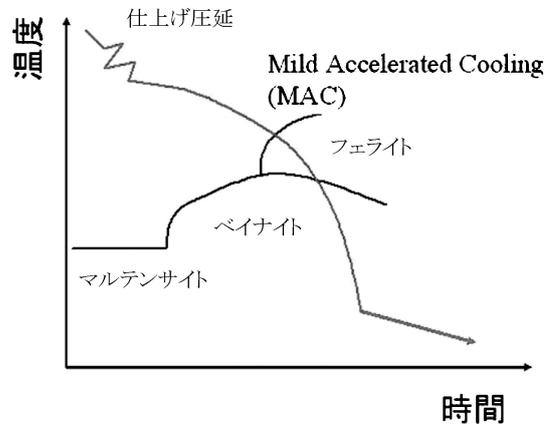


図4 CLC- μ での冷却中の温度時間曲線⁽²⁾。

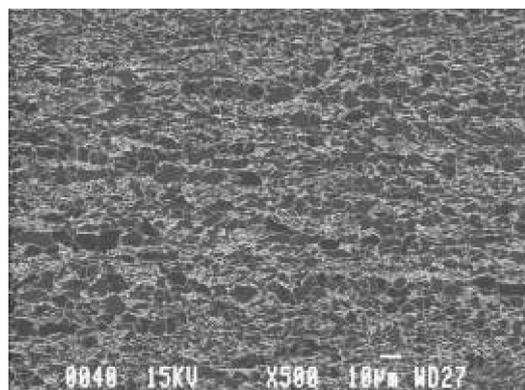


図5 鋼管のSEM像⁽⁶⁾。

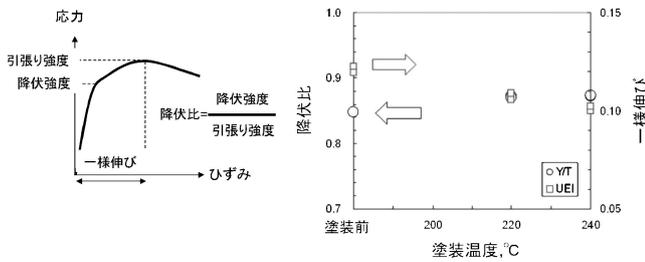


図6 APIグレード X60 鋼管のひずみ時効特性⁽⁶⁾.



図8 APIグレード X60 鋼管の敷設状況.

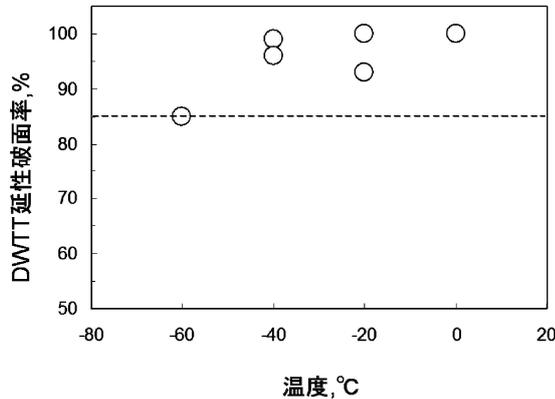


図7 APIグレード X60 鋼管のDWTT 延性脆性遷移温度⁽⁶⁾.

温での靱性を確保した。図7にAPIグレード X60 鋼管でのDWTT(Drop Weight Tear Test)の延性脆性遷移曲線を示す⁽⁶⁾。本鋼管の32 mm厚の厚肉鋼管のDWTT 延性破面率を確保することは、極めて困難であるが、本鋼管は微細組織を有しているため、 -60°C の極低温でも85%の延性破面率を満足することができた。

4. 特許および実用化状況

APIグレード X60 から X100 までの省合金型天然ガス輸送用鋼管(Super Tough-Ace[®])を開発した。このうち、APIX60 グレードについては、2010年ロシア向けに1.7万トン製造した⁽⁶⁾。また、APIグレード X100 については、カナダに5 km 敷設した⁽⁷⁾。直近、ミャンマー向けAPIグレード X70 を0.5万トン受注し、製造完了した。

本省合金型天然ガス輸送用鋼管(Super Tough-Ace[®])の特許に関しては、5件の基本特許(特許3869747, 特許4116817, 特許4205922, 特許3745722, 特許3749704)の成立に加えて、26件の特許を申請し、12件が登録となっている。

査読論文および国際会議にも26件を報告している。また、2010年12月にロシアガスプロム社のパイプラインに約2万トン採用の際は、新聞発表を行なった。

極地などの寒冷地から天然ガスを輸送するパイプラインの

長距離化は明白であり、それに伴う鋼管の高靱化、高変形能化などの複合特性化は必須である。さらに、レアメタルの価格高騰、価格変動も今後必至である。そうした背景の中、省合金でかつ複合特性を有する Super Tough-Ace[®] 鋼管は今後多くの需要が見込まれることは確実である。さらに、この鋼管が適用されることで天然ガスの安定供給につながり、国民生活に必要なエネルギーの確保に大きく貢献できる。

5. ま と め

石油・石炭の化石資源に代わるクリーンなエネルギーとしての天然ガスの埋蔵場所は北極圏などの厳寒地に多く存在すること、さらに、その場所から大消費地にまでパイプラインで輸送する際、不連続凍土や地すべり、断層などの地殻変動を伴う地域を通るために、 -40°C のような極低温にて破壊しない、かつ、変形しても破壊・座屈しない複合特性を有する鋼管が要求された。この鋼管製造を実現するために、モリブデン(Mo)やニッケル(Ni)などのレアメタルを抑制した省合金鋼を採用し、また、高変形能に優れた複相組織を最適化するための高精度冷却装置を君津製鉄所に導入し、極低温用高変形能天然ガス輸送用鋼管(Super Tough-Ace[®])の開発に成功した。

文 献

- (1) E. Tsuru, Y. Shinohara and H. Asahi: International Journal of Offshore and Polar Engineering., 18(2008), 176.
- (2) Y. Shinohara, E. Tsuru, H. Asahi, T. Hara, N. Doi, N. Ayukawa and M. Murata: International Journal of Offshore and Polar Engineering., 18(2008), 220.
- (3) G. Shigesato, Y. Shinohara, T. Hara, M. Sugiyama and H. Asahi: Proceedings of the 17th ISOPE Conference, Lisbon, (2007), ISOPE.
- (4) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼, 74 (1988), 1073-1080.
- (5) 高橋健二, 宮本五郎, 古原 忠: 材料とプロセス, 20(2008), 37.
- (6) T. Hara, Y. Shinohara, Y. Hattori, T. Muraki and N. Doi: Proceedings of the 21th ISOPE Conference, Hawaii, (2011), ISOPE.
- (7) T. Hara, Y. Shinohara, H. Asahi, Y. Terada and N. Doi: Proceedings of International Pipeline Conference, Calgary, ASME, (2008).