

技術論文

高強度Ti-Al-Fe-Mo系チタン合金製厚肉大径溶接管製造技術の開発

Development of Manufacturing Process of Large Diameter - Heavy Wall Thickness Welded Pipes of High Strength Ti-Al-Fe-Mo Titanium Alloy

森 健 一*
Kenichi MORI藤 井 秀 樹
Hideki FUJII石 井 満 男
Mitsuo ISHII小 田 高 士
Takashi ODA上 野 泰 司
Yasushi UENO阿 高 松 男
Matsuo ATAKA山 口 雅 憲
Masanori YAMAGUCHI

抄 録

CO₂ 排出量の少ない再生可能エネルギーとして期待される地熱発電用ケーシング管などの高温・高圧・高腐食性環境に適した高強度チタン合金製厚肉大径溶接管の製造技術を開発した。高強度チタン合金 Super-TIX[®]523AFM を基に成分検討を行い、Ti-5Al-1Fe-3Mo(-0.13O) および Ti-5Al-2Fe-1.5Mo(-0.13O) 合金を選定した。十分な機械的性質、溶接性、耐食性を有することをラボで確認した後、1.8ton VAR インゴットを用いて、新日鉄住金ステンレス株式会社八幡製造所で17mm厚、2400mm幅、6m長の厚板を製造した。さらに、プレスバンド法で造管した後、高効率キーホールプラズマアーク溶接によって、肉厚17mm、外径360mm、1m長の溶接管を製造した。この溶接管は、Ti-6Al-4V ELI に匹敵する良好な機械的特性および溶接品質を有することを確認した。

Abstract

In geothermal power generation which is one of the clean renewable energies without serious CO₂ emission, materials having both high strength at relatively high temperature and high corrosion resistance are used for casing pipes. For such use, the manufacturing process of large diameter - heavy wall thickness welded pipe of high strength titanium alloy were developed. Alloy compositions were examined by adjusting that of a high strength titanium alloy, Super-TIX[™]523AFM (Ti-5Al-2Fe-3Mo). As a result of the study, two alloy compositions were selected: Ti-5Al-1Fe-3Mo(-0.13O) and Ti-5Al-2Fe-1.5Mo(-0.13O). After confirming that the materials have the expected level of mechanical properties, weldability and corrosion resistance, etc. by the laboratory examinations, plates of 17 mm thick, 2400 mm wide and 6 m long were manufactured from 1.8 ton VAR ingots in an actual plate manufacturing mill (NSSC Yawata). Furthermore, welded pipes of 17 mm WT, 360 mm OD, 1 m long were manufactured by press bending and high-efficiency welding process. It was confirmed that the mechanical properties of both base and welded metals are fully competitive to Ti-6Al-4V ELI and the pipes have good tolerance and no serious defects in the weld metals.

1. 緒 言

太陽光や風力などと同様に CO₂ 排出量の少ない再生可能グリーンエネルギーであり、その発電能力の安定性も高く評価されている地熱発電では、高温、高圧、条件によっては高腐食性の熱水や水蒸気を地中から汲み上げる必要があるため、発電井用ケーシング管などに高強度・高耐食性ステンレス鋼やチタン合金等が用いられる場合がある。また、大水深化が進む海底油田・ガス田で用いられるライザー管

にも、高強度、軽量、低ヤング率、高耐食性のチタン合金が適しており、その適用例が報告されている¹⁾。

このような用途では、主として Ti-6Al-4V ELI (+Pd/Ru) (ELI: Extra Low Interstitials) が使用されているが、さらなる適用拡大には低コストの高強度チタン合金の開発が必要である。そのような合金の例として、安価な Fe を活用した Ti-5Al-1Fe (Super-TIX[®]51AF) や Ti-5Al-2Fe-3Mo (Super-TIX[®]523AFM) などが開発されている²⁻¹³⁾。また、このような用途に使用される管は一般に厚肉、大径であり、近い将

* 鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

来の新エネルギー開発を円滑に進めるには、高強度チタン合金製の厚肉大径管を効率的に生産する技術が必要である。

本報では、このような背景のもとで実施した、高強度チタン合金厚板を用いた厚肉大径溶接管製造技術の開発について報告する。本開発では、板厚精度に優れる厚板圧延材を管状にプレスバンド加工し、突き合わせ部を溶接する曲げ+溶接プロセスを造管プロセスとして採用した。この中で、まず素材とするチタン合金の成分設計と厚板圧延時の集合組織制御の検討を行い、実機鉄鋼圧延設備を用いて厚板を製造した。集合組織の制御は、プレスバンド加工性を確保するための重要技術の一つである。次に、プレスバンド加工および高効率のキーホールプラズマアーク溶接¹⁴⁾を活用して厚肉大径溶接管の製造を行い、その溶接管が良好な特性を有することを確認した¹⁵⁾。本報では、これら技術開発を紹介する。なお、本開発は経済産業省補助金事業“高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト”(2005～2008年)にて実施した。

2. 合金成分設計

チタン合金厚板の成分設計にあたっては、地熱発電用地熱ケーシング管を主要なターゲットとして想定し、要求される強度および延性を得るために高強度・高延性 $\alpha+\beta$ 型チタン合金として知られる Ti-5Al-2Fe-3Mo (Super-TiX®523AFM)²⁻¹³⁾をベースに成分系を検討することで開発の効率化を図った。

次に、Ti-5Al-(1~2)Fe-(1.5~4)Mo-(0.08~0.18)O の範囲に絞った6種類の成分系を 200kgVAR (真空アーク)溶解し、鍛造の後、圧延後半で圧延方向を90°変化させた簡略化クロス圧延によって12mm厚の板を製造し、 $\alpha+\beta$ 焼鈍(750°C, 1h, 空冷)、または β 焼鈍(1000°C, 10min, 空冷+750°C, 2h, 空冷)を施した。これら素材から、丸棒引張試験片(平行部直径6.25mm, 標点間距離25mm, ASTM E8 ハーフサイズ)およびシャルピー衝撃試験片(JIS 4号, 板厚貫通方向2mmV ノッチ)を、最終圧延方向に対し平行(L方向)および垂直(T方向)に採取して、それぞれ引張試験およびシャルピー衝撃試験を室温で行った。

200kg 溶解材の引張特性は、Ti-5Al-1Fe-1.5Mo-0.18O を除く5成分系において、 $\alpha+\beta$ 焼鈍材で引張強さ1000MPa以上、伸び15%以上、 β 焼鈍材で引張強さ950MPa以上、伸び7%以上であった。シャルピー衝撃吸収エネルギーは、Ti-5Al-2Fe-4Mo-0.18O, Ti-5Al-2Fe-3Mo-0.17O を除く4成分系の β 焼鈍材で、20J以上を得た。

以上の結果を総合的に評価し、強度、延性、靱性のバランスが良好で、合金添加量の少ない、Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.13O および Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.13O の2成分を選定し、4.3で述べる実機試作を行うことにした。酸素の狙い値は一般の高強度 $\alpha+\beta$ 型合金の0.15mass%程度よりもやや低

めの0.13mass%とすることで、破壊靱性の向上を図った。

3. Ti-Al-Fe-Mo (-Pd) 系合金の耐食性

地熱ケーシング管の使用環境は高温、高圧で、場所によっては腐食性物質(H^+ , Cl^- , SO_4^{2-} など)を多量に含む流体に曝される。流体の化学組成は地熱田によって様々である。その中で、一例として、Ti-5Al-2Fe-3Mo および Pd を少量添加した材料を用いて、チタンの隙間腐食発生領域である、 $pH < 1$ の沸騰食塩水中(HCl で pH を調整)の耐隙間腐食性に及ぼす合金元素の効果を評価した。供試材は、Ti-5Al-2Fe-3Mo-(0, 0.05, 0.10, 0.20)Pd とした。試験方法は、マルチクレビスを用いる ASTM G78 に準じた。

$pH=0.5$ の沸騰20% NaCl 溶液中で350hのマルチクレビス隙間腐食試験を行った結果、各試験片はすべてわずかながら重量増加しており明瞭な腐食減量は認められなかった。この試験条件において、明瞭な隙間腐食が検出された試験片はPdを合金していないTi-5Al-2Fe-3Moのみであり、Pdを0.05%以上添加した場合には隙間腐食の発生は確認されなかった。すなわち、Ti-Al-Fe-Mo成分系のチタン合金も、純チタンや一般的なチタン合金と同様に、少量のPd添加が耐隙間腐食性の向上に有効であることが確認できた。

4. 高強度チタン合金厚板製造技術

4.1 厚板圧延方法の検討

プレスバンド法により長尺のケーシング管を製造するためには、素材となる厚板は長尺でかつ幅方向の曲げ加工(T曲げ)を有利に行える集合組織を有することが望ましい。一般に、 $\alpha+\beta$ 合金を β 単相域あるいは $\alpha+\beta$ の二相高温域に加熱して一方向圧延すると、 α 相の結晶構造であるhcpの<0001>方向が板幅方向に配向したT-textureと呼ばれる集合組織が得られる。この場合、曲げ方向であるT方向の延性が低くなり、曲げ加工に不利である。そこで、クロス圧延によるT-textureの改善を検討した。

$\alpha+\beta$ の二相域加熱では、本開発材のような高強度チタン合金では熱間変形抵抗が大きいので、地熱ケーシング管に適した長尺、広幅の厚板を製造することは強力な鉄鋼圧延機といえども困難である。そこで、変形抵抗の小さい β 単相域の加熱を選択した。その場合、延性の乏しい針状組織や強いT-textureが生じやすくなるため、後段のクロス方向の圧延は二相域の温度で行う“1ヒートの簡略化クロス圧延”を行うこととした。このプロセスにより、延性に優れたミル焼鈍組織を得やすくし、かつ、T-textureを軽減しT方向の延性確保を図った。

4.2 実機圧延を模擬したラボ圧延

Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.16O および Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.16O の200kg溶解材から製造したスラブを、1050°Cの β 単相域

に加熱して 100mm から 60mm 厚への圧延を行い、900℃ の $\alpha+\beta$ 二相域に再加熱して前段圧延と 90°異なる方向に 60mm から 12mm 厚への圧延を行うことで、“1ヒートの簡略化クロス圧延”を模擬した2ヒート圧延を行った。750℃, 1h, 空冷の焼鈍を施した後、断面マイクロ組織観察と、2. で記した方法にて室温引張試験を行った。

断面マイクロ組織を写真1に、引張特性を図1に示す。両材料とも、0.2%耐力 860MPa 以上、引張強さ 960MPa 以上、伸び 18%以上であり、Ti-6Al-4V ELI 焼鈍材と同等以上の強度延性バランスを示した。造管時に曲げ方向となる T 方向の伸びも高い値であった。

4.3 実機厚板製造

実機厚板製造に供する、Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.130 および Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 を基本組成とする 720mm径、1.8ton

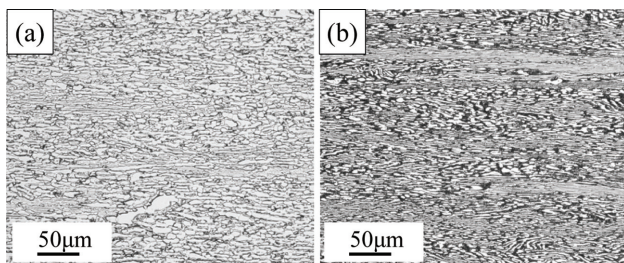


写真1 実機圧延を模擬したラボ圧延 - 焼鈍材のL断面マイクロ組織
(a) Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.160, (b) Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.160

Microstructures of the longitudinal section of the annealed plates which were rolled in the laboratory condition as the simulation of actual process

(a) Ti-5Al-2Fe-1.5Mo, (b) Ti-5Al-1Fe-3Mo

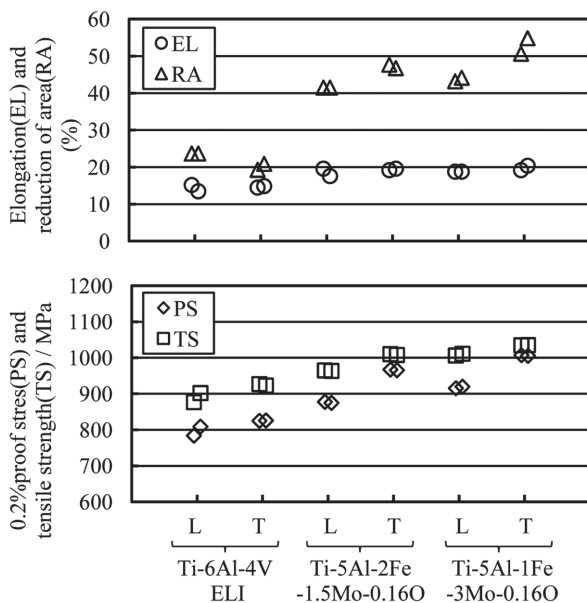


図1 実機圧延を模擬したラボ圧延 - 焼鈍材の引張特性
Tensile properties of the annealed plates which were rolled in the laboratory condition as the simulation of actual process

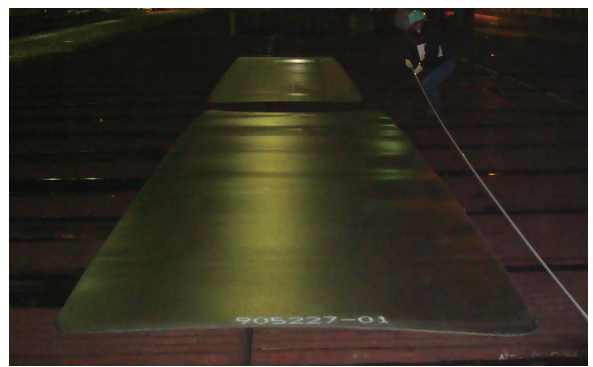


写真2 実機製造した Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 合金厚板 (17mm厚×2400mm幅×6m長)の外観
Appearance of Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 plate of 17mm thick, 2400mm wide, 6m long rolled at actual heavy plate mill

インゴットを、VAR2回溶法により溶製した。 β 域加熱により鍛造した後、スラブ表面を切削した。品質上問題となる疵や割れは生じなかった。その後、新日鐵住金ステンレス株式会社八幡製造所で厚板圧延を行った。

厚板圧延は、1050℃の β 単相域に加熱して前段の圧延を行い、910℃以下の $\alpha+\beta$ 二相域まで温度が低下したことを厚板表面温度測定により確認した後に、後段のクロス方向の圧延を行った。これにより、約 17mm 厚× 2400mm 幅× 6m 長の厚板を製造した (写真2)。

4.4 実機製造厚板の材質

実機試作厚板の720℃, 4h, 空冷の焼鈍後のマイクロ組織 (写真3) は、写真1に示したラボ試験材と異なり針状組織主体の組織であった。これは圧延中の板内部の温度がやや高く、一部未変態の状態でもクロス方向の圧延を行ったためと考えられる。実機試作厚板から切断した小片を $\alpha+\beta$ 焼鈍 (720℃, 4h, 空冷) または β 焼鈍 (1000℃, 10分, 空冷+750℃, 2h, 空冷) し、引張試験と破壊靱性試験 (J_{IC}) を行った。丸棒引張試験片 (平行部直径12.5mm, 標点距離 50mm, ASTM E8) を、最終圧延方向に対し平行 (L方向) および垂直 (T方向) に採取した。

引張試験は、0.2%耐力まで 15MPa/s の応力制御、0.2%

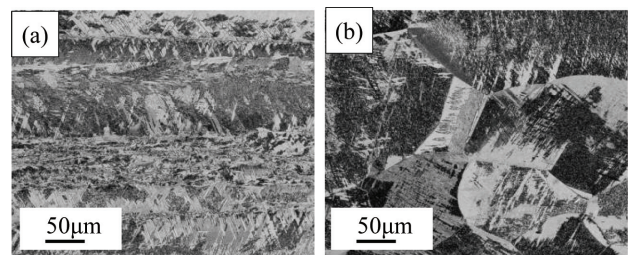


写真3 実機製造した Ti-5Al-2Fe-1.5Mo 厚板のL断面マイクロ組織
(a) $\alpha+\beta$ 焼鈍材, (b) β 焼鈍材
Microstructures of the longitudinal section of the Ti-5Al-2Fe-1.5Mo plate rolled at actual mill
(a) alpha+beta annealed, (b) beta annealed

耐力以降 20mm/min のストローク制御にて、室温で行った。破壊靱性試験片は、図2に示すサイドグループ付き 1/2T CT 試験片を、き裂進展方向が最終圧延方向に対し平行 (L 方向) および垂直 (T 方向) となるよう採取し、疲労予き裂 ($a_0/W \approx 0.55 \sim 0.60$) を導入した。破壊靱性試験は、ASTM E-1820 に従って除荷弾性コンプライアンス法にて行った。ここで、0.2%耐力と引張強さは各合金の測定値を使用した。ポアソン比は 0.3、ヤング率は 118GPa の固定値とした。破壊靱性値は、 J_Q 値より換算した $K(J_Q)$ 値を用いて整理した。

引張試験結果を図3に示す。T 方向の強度がやや高く、それに伴って T 方向の伸びがやや低い。圧延時の板温度がやや高く針状組織が残存しているため、伸びは 200kg 溶解ラボ試験材の結果よりも低めとなったが、 $\alpha + \beta$ 焼鈍材では 10% 以上の伸びが得られた。破壊靱性試験結果を図4に示す。ASTM 判定基準で Invalid のものは図中に * で示した。どちらの材料とも、 J_Q 値から換算した $K(J_Q)$ 値は、 $\alpha + \beta$ 焼鈍材で 56~68MPa \cdot m^{1/2}、 β 焼鈍材で 75~78MPa \cdot m^{1/2} であり、

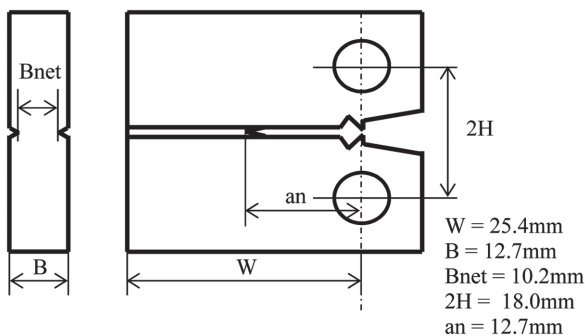


図2 破壊靱性試験で使用した CT 試験片の形状と寸法
Dimensions of the compact tension specimen for the fracture toughness test

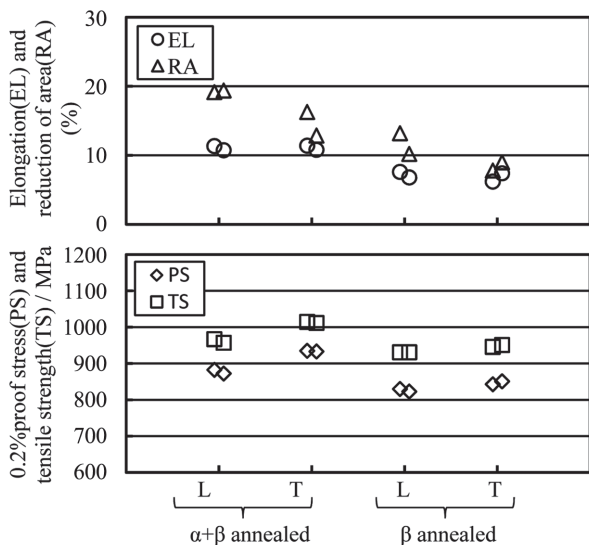


図3 実機製造した Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 厚板の引張特性
Tensile properties of the Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 plate rolled at actual mill

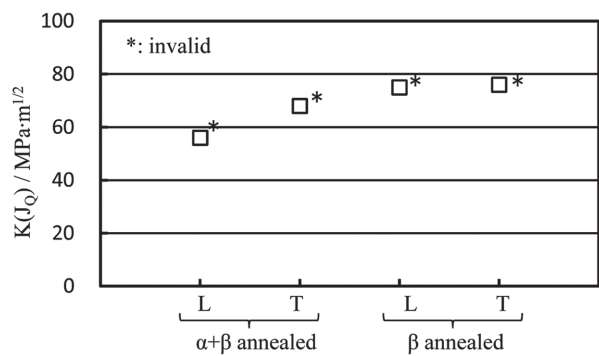


図4 実機製造した Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 厚板の破壊靱性
Fracture toughness of the Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 plate rolled at actual mill

Ti-6Al-4V ELI などと同程度であった。

5. プレスバンド造管技術

5.1 造管方法の検討

造管技術には、継目無管方式（穿孔式、熱間押し出し式、など）と、溶接管方式（UOE、スパイラル、プレス、など）があるが、プレスバンド法に着目した理由は、①大径厚肉管の製造が可能なこと、②多様な肉厚、サイズ、材料種の小ロット製造に対応可能なこと、③既存の鋼管製造用設備を使用可能であり、設備投資が比較的安価で済むこと、などである。一方で、プレスバンド法の不利な点は、①溶接が必要なこと、②真円度の確保が比較的難しいこと、などが挙げられる。①の溶接については、チタン合金厚肉材で実績のあるキーホールプラズマ溶接を行うことで、効率的な溶接が可能である¹⁴⁾。②の真円度確保については、本報では説明省略するが、造管後の熱処理工程において真円度の向上を図ることができる。

5.2 成形シミュレーションによる検討

チタン材のプレスバンド加工時の最適圧下方法を提案するため、FEMによる成形シミュレーションモデルを用いた検討を行った¹⁶⁾。プレスバンド加工では、突き合わせ精度向上、スプリングバックによって発生する管軸方向の反りの防止、管断面形状が多角形になる現象の抑制が課題となる。スプリングバックの影響を低減するためには加圧曲げが有効であることを示した。また、加圧なしで所定の曲率を得るための金型形状について検討した。詳細は文献¹⁶⁾を参照頂きたい。

5.3 実機厚板のプレスバンド造管

チタン合金厚板のプレスバンド造管は、炭素鋼の造管方法をベースとし、スプリングバックなどのチタン特有の現象を考慮して、西村工機株式会社にて実施した。

溶接管の寸法は、肉厚 17mm、外径 360mm を狙いとした。これは、現在使用されている地熱ケーシング管でも採

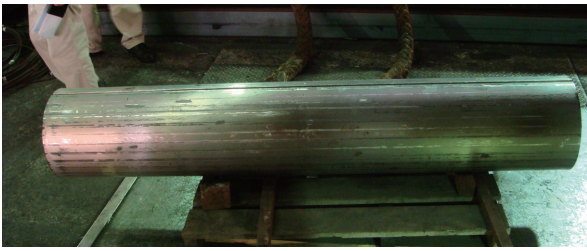


写真4 プレスベンド加工した長さ2m管(肉厚17mm×外径360mm)の外觀
Appearance of the 17mmWT, 360mmOD, 2m long pipe formed by press bending

用されている寸法である。はじめに1m長の短尺管を試作し、次いで2m長の中尺管を試作した。Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 および Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.130 の実機製造厚板から切断した板を、焼鈍、ショットブラスト、酸洗、研磨した後、端面は成形後にI開先となることを想定した形状に開先加工を行った。

プレスベンド加工は、製造した板が針状組織からなりややT方向の延性が低かったことから安全をみて、プレス前に板をバーナーで加熱することにより200~350℃の温間で行い、肉厚17mm、外径360mm、1m長および2m長の素管を製造した。加工温度は、事前の温間引張試験による検討結果を踏まえて決定した。成形後の突き合わせ部のギャップは十分に小さく、良好な形状であった。プレスベンド加工後の管の外觀を写真4に示す。

6. 溶接および試作溶接管の評価

6.1 溶接方法

チタン材の溶接にはTIG溶接が汎用的に用いられているが、厚肉材の溶接を行う場合は、大断面積のV字型開先をとり、フィラーワイヤーを多層盛る必要がある。この場合、もともと溶接速度の遅いTIG溶接で多層にするため溶接時間が長くなり生産性が著しく低下することや、溶接歪が大きいことが課題である。そこで、本開発では、高効率・高品質溶接法として20mm厚までの $\alpha+\beta$ 型チタン合金を1パスで溶接可能で実績のあるキーホールプラズマアーク溶接¹⁴⁾を採用し、I開先突き合わせ1パス溶接にて行うこととした。

溶接条件の検討には、実機製造厚板から採取した17mm厚、140mm幅、280mm長の平板を開先加工して用いた。電流、チップ径、ガス流量、シールド性などの諸条件を最適化することで、溶接速度 $1.4 \times 10^{-3} \text{m/s}$ にて良好な溶接継手が得られた。この条件にて、5.で説明した1000mm長の素管の突き合わせ部の溶接を行った。溶接後の外觀写真を写真5に示す。

6.2 試作溶接管の評価

溶接後の管に、720℃、4h、空冷あるいは800℃、1h、

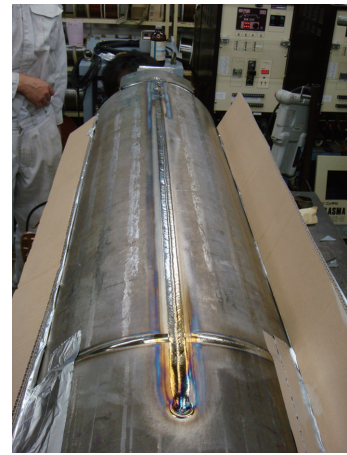


写真5 溶接後の長さ1m管(肉厚17mm×外径360mm)の外觀
Appearance of the 17mmWT, 360mmOD, 1m long welded pipe

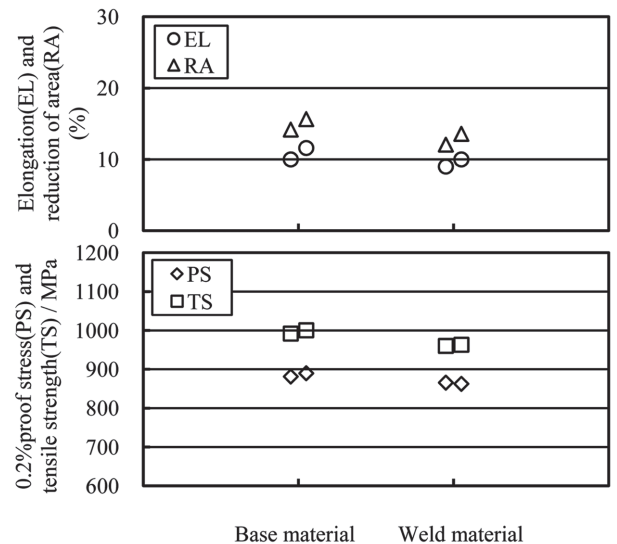


図5 Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 溶接管の周方向の引張特性
Circumferential tensile properties of the welded pipe of Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130

空冷の焼鈍を施した後、引張特性、破壊靱性を評価した。各試験片は、試作管の溶接部およびその周方向の反対位置から、管長手方向がき裂進展方向となるように採取した。引張試験は2.項に記載した丸棒試験片を用いた。破壊靱性試験は図2の1/2T CT試験片を用い、4.4項と同様に J_Q 値より換算した $K(J_Q)$ 値を用いて整理した。

Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130の800℃、1h焼鈍後の引張試験結果を図5に示す。母材および溶接部とも、0.2%耐力860MPa以上、引張強さ960MPa以上、伸びは9%以上であり、Ti-6Al-4V ELIと比べて高強度であった。破壊靱性試験結果を図6に示す。 J_Q 値より換算した $K(J_Q)$ 値は、720℃、1hの $\alpha+\beta$ 焼鈍材ではTi-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130が $64 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.130が $72 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上、 β 焼鈍材は両合金とも $72 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上の十分な値であった。

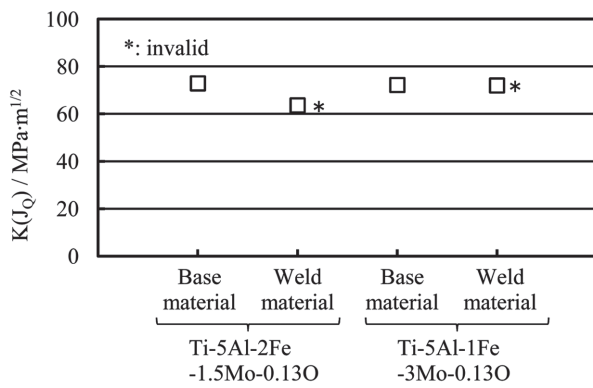


図6 Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 および Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.130 溶接管の破壊靱性

Fracture toughness of the welded pipe of Ti-5Al-2Fe-1.5Mo-0.130 and Ti-5Al-1Fe-3Mo-0.130

7. 結 言

以上に述べたように、Ti-6Al-4V (ELI) より高強度の Ti-Al-Fe-Mo 系チタン合金の厚板製造技術および厚肉大径溶接管製造技術を開発し、1000MPa 級 $\alpha+\beta$ 型チタン合金の厚肉大径管をプレスバンドおよび溶接により製造できる目処を得た。本開発によって製造された厚肉大径溶接管は、地熱発電用（地熱井）ケーシング管以外にも、石油、ガス、メタンハイドレード等のライザー管などのエネルギー源開発への適用をはじめとして、広範な用途への活用が期待される。

参照文献

- 1) Schutz, R.W.: Materials Sci. & Eng. A243, 305 (1998)
- 2) Fujii, H., Takahashi, K., Soeda, S., Hanaki, M.: Titanium'95 Science and Technology. Ed. Blenkinsop, P.A., Evans, W.J., Flower, H.M., TIM, 1996, p. 2539
- 3) 藤井秀樹, 高橋一浩: 新日鉄技報. (375), 99 (2001)
- 4) 藤井秀樹, 高橋一浩, 山下義人: 新日鉄技報. (378), 62 (2003)
- 5) Fujii, H., Otsuka, H., Takahashi, K.: 19th ITA Conference and Exhibition, CD-ROM, 2004
- 6) 森 健一, 藤井秀樹: CAMP-ISIJ. 19, 616 (2006)
- 7) Mori, K., Fujii, H.: Ti-2007 Science and Technology. Ed. Ninomi, M., Akiyama, S., Ikeda, M., Hagiwara, M., Murayama, K., The Japan Institute of Metals, 2007, p. 729
- 8) 森 健一, 高橋一浩, 藤井秀樹: チタン. 55 (2), 118 (2007)
- 9) 森 健一 ほか: CAMP-ISIJ. 22, 1459 (2009)
- 10) Mori, K., Fujii, H., Fukaya, N., Tominaga, T.: Ti-2011 Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Ed. Lian Zhou, Hui Chang, Yafeng Lu, Dongsheng Xu, The Nonferrous Metals Society of China, 2012, p. 2232
- 11) 國枝知徳, 高橋一浩, 森 健一, 藤井秀樹: CAMP-ISIJ. 21, 700 (2008)
- 12) 國枝知徳, 高橋一浩, 森 健一, 藤井秀樹: CAMP-ISIJ. 21, 1628 (2008)
- 13) Kunieda, T., Takahashi, K., Mori, K., Fujii, H.: Ref(10), p. 1049
- 14) 藤井秀樹, 菊池正夫, 正木基身, 作野文彦: CAMP-ISIJ. 16, 1489 (2003)
- 15) 森 健一 ほか: CAMP-ISIJ. 22, 704 (2009)
- 16) 阿高松男 ほか: チタン. 60 (1), 46 (2012)



森 健一 Kenichi MORI
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



上野泰司 Yasushi UENO
元 東京電機大学 工学部 機械工学科



藤井秀樹 Hideki FUJII
鉄鋼研究所 チタン・特殊ステンレス研究部長
工博



阿高松男 Matsuo ATAKA
東京電機大学 名誉教授,
産官学交流センター 顧問



石井満男 Mitsuo ISHI
元チタン事業部 技術グループ
マネージャー



山口雅憲 Masanori YAMAGUCHI
東邦チタニウム(株)
チタン事業本部 スポンジ技術部 部長



小田高士 Takashi ODA
東邦チタニウム(株)
執行役員 技術開発本部長 工博
(元チタン事業部 部長)