

パイプライン「プロセス・施工編」*



谷中 幸司**

Pipeline (Process & Construction)*

by YANAKA Koji**

キーワード 陸上パイプライン, 海底パイプライン, 敷設工法, 溶接プロセス, 自動溶接, 非破壊検査

1. はじめに

パイプラインは、石油・天然ガスなどの流体を長距離にわたって輸送するための管路とされている。我が国における石油、天然ガスの長距離輸送のためのパイプラインは、欧米などに比べて国土が狭いことと、LNGによるタンカー輸送という国際間の需給形態の違いもあり、その施工例は多くない。米国中央情報局（CIA）のワールドファクトブックによれば、日本のパイプラインは、2009年で天然ガス 3,897 km、石油 167 km となっている。また、国内のガスインフラ整備に関するワーキンググループ資料では2010年の高圧導管敷設延長は、約 4,400 km となっている¹⁾。本稿では、主に国内の都市ガスパイプラインおよび海外における石油・ガスパイプラインの敷設工法、溶接プロセス、検査・品質管理を概説する。なお、国内のガスパイプラインは、事業法で「導管」と称されているが「パイプライン」とした。

2. 製品と工法

石油・ガスパイプラインは、陸上パイプラインと海底パイプラインに大きく分けられる。国内は、海底パイプラインを敷設することが少ないが、2001年から長距離、高圧、海底敷設の天然ガスパイプラインを対象に技術基準が検討され、ガス工作物技術基準の解釈例に水深 50 m 以深に設置される「海底導管」の性能要求が2003年に取り入れられた²⁾。以下、陸上パイプラインと海底パイプラインについて、国内と海外に分けて敷設工法を概説する。

2.1 陸上パイプラインの敷設工法（国内）

国内における陸上パイプラインの敷設は、道路面下に

敷設する埋設工法と専用トンネルを掘りその中に敷設するシールド工法に大別できる。

埋設工法は、主に公道下に埋設する一般埋設部と、その他に特殊部とよばれる河川、道路、鉄道などを横断する箇所などがあり、それぞれ施工方法が異なる。

一般埋設部は、バックホウなどの建設機械で深さ 3 m 程度以浅の溝を掘り、敷設する開削工法で施工される（写真1）。長さ約 12 m の鋼管を掘削溝の中に吊り降ろして配列し、溶接に支障がないように掘り広げた会所とよばれる場所で、2本の鋼管を溶接接合する。溶接部は、外観検査と放射線透過試験による非破壊検査の後、塗覆装を施して埋め戻しされる。市街地では、交通および地元住民への影響を考慮し、掘削から仮復旧までを1日で実施する即日復旧工事で行われ、昼間の通行量や周辺環境によっては、夜間工事となることも多い。この他に幹線工事など、即日で埋め戻すことが困難な場合は、常設作業帯による掘削施工も行われる。市街地の幹線工事における施工能率は、直線部でも1日当たり鋼管長さの2～3本分となる。



写真1 一般埋設部の開削工法

*原稿受付 平成23年1月24日

**正 員 新日鉄エンジニアリング株式会社 Member, Nippon Steel Engineering Co., Ltd.

河川、道路、鉄道などを横断する特殊部は、非開削による推進工法が採用されている。ガスパイプラインの場合は、ヒューム管や鋼管などの推進管を鞘管（ケーシング管）として利用し、その中に、パイプラインとなる本管を引き込むのが一般的である。推進工法は、簡易推進工法（圧入方式）、刃口推進工法、オーガー方式推進工法や泥水加圧方式推進工法などが推進距離や地質・土質に合わせて採用される^{3, 4}。この他に立抗を必要としない、油井の掘削に用いられる傾斜掘削技術を利用した弧状推進工法があり³⁻⁵、立坑が不要となるため、比較的短い工期での施工が可能である。

シールド工法は、市街地の交通事情により公道を占有した掘削工事が難しい場合や港湾の横断などで開削できない場合に有効であり、パイプラインルート上に占有地を確保して、そこに立坑を掘り、立抗間をシールドトンネルでつなぐ工法である。出来形形状は推進工法に似ているが、路面下または水面下6~40mと深い場所に造られ、最深部で50mを超えることもあり、立抗間は、2~10kmになる。シールドトンネルは、掘削断面を極力減らすために内径2m程度が多い。パイプラインの敷設は、シールドトンネルにパイプを搬入し、溶接接合していく。曲線部は、パイプラインのルートに合わせて冷間曲げ加工した鋼管を用いる。工程は、鋼管吊り降ろし、鋼管搬入、開先合せ、溶接、非破壊検査、塗覆装となる。パイプライン敷設後、推進管やシールドトンネルの空隙は、中空のままとすることもありますが、一般的にモルタルまたは砂が充てんされる。

開削工法では、海外で使われるスプレッド工法に似た高速施工が採用されたことがあるが、実績は少ない^{6, 7}。

2.2 陸上パイプラインの敷設工法（海外）

海外における陸上パイプラインは、国内と同じく一般的に埋設するが、カナダやシベリアなどの永久凍土に敷設する場合は、凍土の融解を防ぐために地上に設置架台を設けて敷設されることがある。埋設する場合は、ライトオブウェイ（Right of way : ROW）と呼ばれる占有工事帯を確保したスプレッド工法が広く採用されている⁶⁻⁸。ライトオブウェイとは、元来、米国などで公益施設とみなされる石油、天然ガスのパイプラインの敷設に際して州や自治体などが通過占有権 - right of way を与えたものに由来する⁹。ライトオブウェイは、10~30mの幅で、森林や田畑を切り開いて造成される。地形に沿って敷設されるため、急峻な傾斜や岩盤地帯は極力避けてパイプラインのルートが選定されるが、不可避の場合は、このような場所にも敷設される（写真2）。また、地形の起伏が大きい場合は、コールドバンド装置であらかじめ鋼管を曲げて使用する。工程は、ライトオブウェイの造成、溝掘削（Trenching）、鋼管配列、開先合せ、溶接、検査、防食、トレンチ内への吊り降ろし（Lowering）、埋め戻し（Back fill）、復旧（Clean-up）となる^{6, 7, 10}。パイプラインの敷設は、2~3班体制で同時に施工される。数100m毎に掘削溝（Trench）内に吊り降ろしたパイプラインは、掘削溝内で管端同士を切り合わせるか、挿し管でつなぎ込み溶接（Tie-in weld）し、1本のパイプラインとして完成させていく。耐圧試験ができないつなぎ込み

溶接は、特に優秀な熟練溶接士が溶接し「ゴールデン・ウェルド（Golden weld）」と言われている。スプレッド工法では、溶接機器を搭載したサイドブームトラクター^{6, 10}が配備され、初層から最終層までを3~4分割して溶接施工する（写真3, 4²⁰）。鋼管をストックヤードで2本継ぎ（Double joint）し、約24m長さにして現地で溶接接合することもある。これにより、1日で1.5~3kmもの高速敷設が可能となっている。河川、道路、鉄道などの横断には、主に弧状推進工法がHDD（Horizontal directional drilling）⁹と称して使われている。



写真2 岩盤地帯の敷設 (Photo by S. Nikitina)



写真3 スプレッド工法-鋼管配列と開先加工



写真4 スプレッド施工状況-溶接施工



写真5 専用敷設船による施工

写真6 大型敷設船による J-レイ施工
Saipem 7000 (Photo by S. Nikitina)

2.3 海底パイプラインの敷設工法（国内）

国内における海底パイプラインの敷設は、先に述べたように少なく、一般的に専用敷設船（写真5）を使い、鋼管を1本1本溶接接合して敷設する。陸上パイプラインとの接合部は、開削工法や弧状推進工法が採用され、一般的に海中まで延びた陸側のパイプラインの端を敷設船に曳き上げて海底敷設を開始するか、陸側のパイプラインの端と沖からの海底パイプラインの端を敷設船に曳き上げて洋上で溶接接合する。一般的な工程は、鋼管の取り込み、搬送、開先加工、開先検査、内面清掃、開先合せ、溶接、非破壊検査、塗覆装、敷設となる。

2.4 海底パイプラインの敷設工法（海外）

海外における専用敷設船による海底パイプラインの敷設工法は、大きく分けてS-レイ工法（S-Lay）、J-レイ工法（J-Lay）およびリールバージによるリール工法（Reel-Lay）があるが、ここでは、S-レイ工法、J-レイ工法について概説する。

国内と同様に専用敷設船により鋼管を1本1本溶接接合して敷設するが、大型の敷設船では、あらかじめ鋼管を2本継ぎ（Double joint）する方法も採られる。水深が数10～300m程度までは、S-レイ工法が採用される。200～1,000m以上の深海への敷設には、大型敷設船で鋼管を立てて溶接接合し敷設するJ-レイ工法が採用される。黒海を横断しロシアからトルコに至るパイプライン（Blue Stream Project）（写真6）では、最大水深が2,150mにも達している^{12, 13}。海底パイプラインの施工コストは、1日当たり数千万円にも及ぶことから高速施工が要求され、狭開先による高速な自動溶接が採用されることが多い。敷設速度は、1日（24時間稼働）当たり2500～3000mにも達する。一般的な工程は、国内とおなじである。

3. 溶接・接合プロセスおよび施工

パイプラインの溶接は米国で発し、1945年頃に陸上パイプラインの敷設技術としてスプレッド工法が確立され、それ以来、高能率の高セルロース系溶接棒による被覆アーク溶接が現在も使われ続けている。高セルロース系溶接棒に代わる高能率の溶接として、1980年頃からフラッ

クス入りワイヤによる半自動溶接が普及した。1970年頃から自動溶接機の実用化が進められ、現在は、各種の自動ガスシールドアーク溶接（GMAW）が用いられており、1つの溶接台車に2本の溶接トーチを備えた溶接機が普及し、1本のガイドレール上に2台の溶接台車を取り付けて施工するものが多い。また、デュアルタンデム（Dual-Tandem）と言われる2ワイヤ、2トーチの溶接機も実用化されている¹⁴。なお、海外では完全自動化された溶接でない限り自動溶接（Automatic welding）とは言わずに機械化溶接（Mechanized welding）と言われる。

米国でスプレッド工法と高セルロース系溶接棒による溶接が定着していた頃、日本では高セルロース系溶接棒の入手が難かったことから、低水素系の裏波溶接棒が開発され、初層の裏波溶接に用いられるようになった。なお、低水素系の国産裏波溶接棒は、1959年に開発、実用化されている¹⁵。積層は、イルミナイト系溶接棒を使っていたが、使用する鋼管の強度、靱性の要求が高まるに従い、積層にも低水素系の溶接棒が使われるようになった。国産の高セルロース系溶接棒は、現在もJIS Z3211に残されており、過去に製造された時期もあったが、現在は受注生産となっている。高セルロース系溶接棒は、特殊な溶接技法を用いることと品質があまり良くないことから、国内ではパイプラインの溶接には使われていない。初層溶接は、殆どスラッグの発生しないことからティグ溶接が、1980年代から使われるようになり現在も使われている。国内のパイプラインの自動溶接の開発は1960年代初頭から始まり、1970年代に実用化がされ、1990年代に入るとより高能率化を目指した開発が行われ多種の自動溶接機・プロセスが実用化された^{16, 17}。1975年頃には、品質が良いことから自動ティグ溶接機が実用化されたが、その後より施工能率の良い自動GMAWが使われるようになった。現在は、自動GMAWが、被覆アーク溶接、ティグ溶接と共に溶接プロセスの主流となっている。以下、国内と海外の溶接プロセスについて概説する。

3.1 国内の溶接プロセス

国内のパイプラインの溶接には、初層ティグ溶接と被覆アーク溶接の組合せが使われている。鋼管の強度に合せてティグ溶接棒は、JIS Z3316の軟鋼および高張力鋼

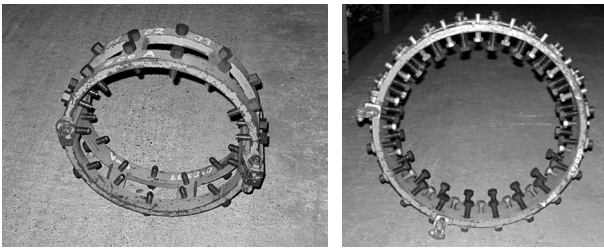


写真7 外面クランプと内面クランプ



写真8 初層ティグ溶接（シールド工法）

用の YGT50, YGT60 の径 1.0~1.2mm が、被覆アーク溶接棒は、JIS Z3211 の軟鋼, 490~590MPa 級高張力鋼用の径 3.2~4.0mm が主に使われる。溶接電源は、直流電源が用いられることが多い。

一般埋設部の工事で使う溶接電源は、発電機付きのティグ溶接と被覆アーク溶接の兼用溶接電源が使われ、シールドトンネル内の工事では、ティグ溶接と被覆アーク溶接兼用の定格出力 300 KVA 程度の小型のインバータ溶接電源などが使われる。開先形状は、60°V 形開先が標準であるが、溶着量を減らし施工能率を上げるために 50~55°の開先が使われることもある。ティグ溶接と被覆アーク溶接は、いずれも上進溶接で行われる。開先合せは、外面クランプまたは内面クランプを使って行う（写真7）。開先検査でルートギャップ、食違いを確認し、鋼管径により 4~8か所をティグ溶接で対角位置を均等にタック溶接する。タック溶接（クランプ溶接と呼ばれることもある）は、本溶接の一部になるので、十分な品質が要求され、仮付け溶接と明確に区別される。続いてティグ溶接の本溶接が行われる（写真8）。事業法の初層ティグ溶接（Tf）は、2~3層溶接することが認められており、ビードの厚みは約 3~5mm となる。その後に被覆アーク溶接が行われる。溶接士は、1~2名で、呼び径 500A 以上では一般的に 2名での溶接となる。

自動溶接には、JIS Z3312 の YGW 11~19 の径 0.9~1.2mm のソリッドワイヤが主に使われ、溶接アークの安定性、品質からシールドガスとしてアルゴンと炭酸ガスの混合ガスを使うことが多い。多くの自動溶接機は、鋼管に取付けたガイドレール上を溶接台車が走る機構となっている（図1）¹⁷。開先合せは、鋼管の中から内面クランプ装置で行う（写真9）。内面クランプ装置には、裏波

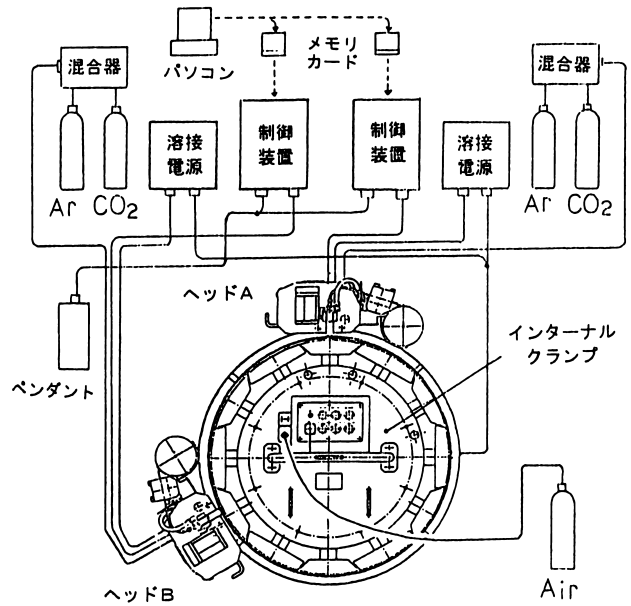


図1 自動 GMAW の装置構成

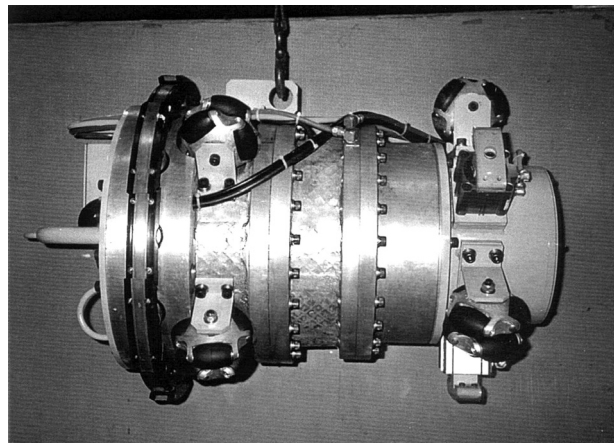
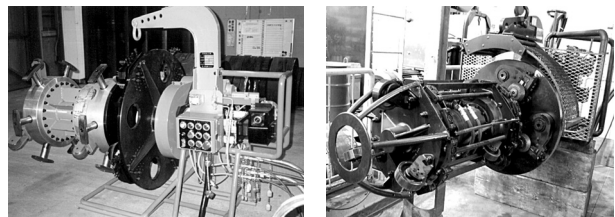


写真9 内面クランプ装置



(a) 国内 (b) 海外

写真10 開先加工機

溶接のために銅の裏当て金が開先裏面の全周に当たるように取り付けられている。自動溶接機には、内面から溶接するものも開発されており、内面クランプ装置と溶接機が一体の構造となっている¹⁷。開先形状は、施工能率を向上させるために、開先加工機（写真10 a）で 20~40°V 形開先や U 形開先などに加工して使われる¹⁷。開先合せ、開先検査の後に、溶接機のガイドレールを取り付けて溶接を開始する（写真11, 12）。溶接条件は、層および姿勢ごとにプリセットされた適切な溶接電流、電圧、速度などを呼び出せるようになっている。溶接は、短絡移行で行われ、鋼管の12時位置（頂部）から下進溶接でスタートし、6時位置（底部）からそのまま上進溶接で1周す

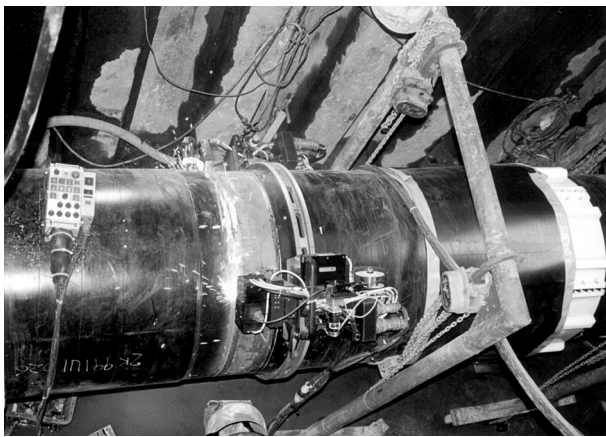


写真11 自動溶接施工（開削工法／一般埋設部）



写真13 内面自動溶接施工（海外・陸上パイプライン）



写真12 自動溶接施工（シールド工法）

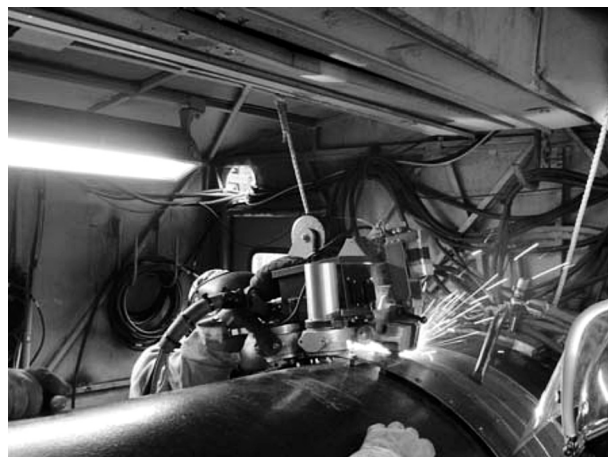


写真14 自動溶接施工（海外・陸上パイプライン）

るものや、さらに1周半から2週の溶接を連続で行うものもある。また、2台の溶接台車で12時位置から下進で振り分けて溶接するものもあり¹⁰⁾、多くの溶接シーケンスが実用化されている。

3.2 海外の陸上パイプラインの溶接プロセス

海外の陸上パイプラインは、被覆アーク溶接、半自動ノンガス溶接および自動溶接で施工されている。敷設にスプレッド工法が採用され、溶接 TENT を吊るして移動するサイドブームトラクターを3~4台並べて使われる。溶接 TENT は、しっかりとした骨組やパネルが入っており、パイプラインの上から被せられるように下が開いた構造で、人の出入り口や換気口が設けられている。以下、被覆アーク溶接、半自動ノンガス溶接および自動溶接について概説する。

1) 被覆アーク溶接

高セルロース系溶接棒を使った被覆アーク溶接が普及している。溶接棒は、米国溶接学会（American Welding Society: AWS）規格のものが使われることが多く、鋼管の強度に合わせて AWS A5.1 の E6010 や AWS A5.5 の E7010, E8010 が使われる。溶接機は、直流電源のみで、国内で見られる交流電源は、使われない。開先形状は 60°V 形開先が使われ、現地で専用の開先加工機（写真10 b）で再度加工されることもある。溶接には、国内と同様の外面クランプが用いられるが、タック溶接を行わないため、

国内のものよりもクランプの棧の間隔が広いものが使われる。また、外面クランプより溶接作業性の良いエアー駆動の内面クランプ装置も使われている。初層（Root pass）の溶接は、2名の溶接士により対角位置で同時に行われ、2層目以降は管の頂部からほぼ2名同時に溶接スタートする。初層溶接の後、直ちに2層目を溶接することから、2層目をホットパス（Hot pass）と言う語源になった。これは、高セルロース系溶接棒の溶接金属に拡散性水素が多いため、初層の割れを防止するためであり、ホットパスが開始されるまでの時間が厳密に管理される。溶接は、全て下進溶接で行われ、初層は、開先に溶接棒を強く押し付けながら、溶接棒の先端に形成される長いアーク筒をつぶすようにして溶接される。2層目は、ウィッピング（Whipping：鞭打ち）と言われる特殊な技法が使われる。3層目以降も軽いウィッピングが行われ、上進溶接で見られるようなウィービング（Weaving）と異なる。X80以上の高強度鋼管の場合は、低水素系溶接棒が使われる。なお、高セルロース系溶接棒は、乾燥器で再乾燥せず、現場で開封してそのまま使用する。

2) 半自動ノンガス溶接

半自動のノンガス溶接は、米国で発達したもので、国内で鋼管杭などの溶接に使われている溶接材料とは基本的に異なるものである。1.7~2.0mmの細径フラックス入りワイヤを用い、下進で溶接される。このフラックス

入りワイヤは、AWS A5.29 の E71T8, E91T8 などの溶接材料で、8ml/100g 以下に拡散性水素を抑えたものもある。このワイヤは、乾燥器で再乾燥ができない。この溶接は、裏波溶接ができないため、高セルロス系溶接棒による初層 (Root), 2層 (Hot) の被覆アーク溶接と組み合わせで使われる。溶接技法は、ウィーピングを用いるが、下進溶接に独特のものとなる。

3) 自動溶接

国内と同様にソリッドワイヤを用いた自動 GMAW で、棒径 0.9~1.2mm のワイヤが多く使われ、溶接は、主に下進溶接で行われる。初層溶接は、内面クランプ装置に内面自動溶接機を組み込んだものが普及しており、鋼管の口径に合わせて溶接トーチを 2~6 個備えている。外面は、国内と同様のガイドレール上に取り付けられた溶接台車によって溶接されるものが主流である。開先は、内面に小さな V 形開先が取られ、外面は、2 段 V 形開先などの狭開先が使われる。開先加工は、現場にて開先加工機で行われる。スプレッド工法では、開先合せの後、内面の自動溶接によって下進で溶接され (写真13²⁵⁾)、内面溶接の完了後、移動してきた外面自動溶接機で積層の溶接を開始する (写真14²⁵⁾)。2~3 層の積層溶接が終わると、次の継手へ移動し、その後次に次の自動溶接機が移動してきて続きの積層溶接し、継手を仕上げて行く一連の作業が連続される。

なお、近年、パイプラインを対象としたレーザ・マグハイブリッド溶接機 (Hybrid laser/gas metal arc welding) が開発されている^{18, 19)}。

3.3 海外の海底パイプラインの溶接プロセス

海底パイプラインは、専用敷設船上で被覆アーク溶接、半自動ノンガス溶接および自動溶接で施工されている。溶接は、敷設船上に 3~4ヶ所の溶接ステージが設けられ、スプレッド工法と同じように、各ステージで分業して行われる。なお、敷設作業は、1日24時間を 2シフト、12時間交代で昼夜連続して行われる。そのために溶接士は、30人近くが必要となる。ダブルジョイントの溶接は、鋼管を回しながら内外面からサブマージアーク溶接で行われる。

1) 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接は、陸上パイプラインと同じように高セルロス系溶接棒により下進溶接で行われ、開先形状は 60°V 形開先が使われる。海底パイプラインでは、施工能率を上げるためにエアー駆動の内面クランプ装置が使われることが多く、開先合せの後、直ちに溶接が開始される。この内面クランプ装置に裏当て金は、付いていない。

2) 半自動ノンガス溶接

陸上と同様に半自動ノンガス溶接は、高セルロス系溶接棒による被覆アーク溶接との組合せで使用される。

3) 自動溶接

陸上パイプラインと同様のソリッドワイヤを用いた自動 GMAW が使われ、径 0.9~1.2mm のワイヤを用いた下進溶接で施工される。溶接台車は、1継手に 2台セットされ、1台に 2本の溶接トーチを備えているものが多い。シールドガスは、炭酸ガスとアルゴンの混合ガスが



写真15 自動溶接施工 (海外・海底パイプライン)

使われるが、炭酸ガスの比率が、40~60% 程度と国内より多い傾向がある。内面クランプ装置は、国内と同様で、銅裏当て金付きが使われ、エアー駆動、油圧駆動のものがある。開先合せの後に、ガイドレール、溶接台車を取り付けられ直ちに溶接が開始される (写真15)。

4. 検査・品質管理

4.1 検査

検査は、溶接前検査、溶接中検査および溶接後検査に分けることができる。

溶接前検査は、鋼管端面 (板厚、ベベル) の検査、開先 (ギャップ、食違い) の検査などが、溶接中検査は、溶接電流・電圧、パス間温度、層間手入れ状況などの検査がある。ここでは、溶接後検査である、溶接継手の非破壊検査について概説する。

1) 国内における非破壊検査

溶接継手の非破壊検査は、外観検査の他にエックス線による放射線透過試験が実施されている。放射線透過試験は、事業法では抜き取り検査が許されているが、事業者責任において 100% の検査が実施されることが多く、JIS Z3104 に従って行われる。呼び径 500A 以上は、内部線源撮影方法で、これ未満の径は、主に二重壁片面撮影方法が使われる。判定基準は、ガス事業法で JIS Z3104 の 3 類以上が合格となっているが、事業者の自主基準により厳しい判定基準が採用されることもある。放射線透過試験が困難な場合は、超音波探傷試験などが実施される。

超音波探傷試験は、JIS Z3060 のパルスエコー法による斜角探傷で行われる。日本ガス協会で「ガス導管円周溶接部の超音波自動探傷方法」が定められ、ガス工作物技術基準の解釈例に取り入れられており、これに準拠した自動超音波探傷システムが実用化されている。また、一部では、200~300mm の小口径の溶接継手を対象にした溶込み不足 (IP) の検査に特化した超音波自動探傷装置や²⁰⁾、フェイズドアレイ方式探傷システムも開発されている²¹⁾。

なお、パイプライン溶接部の非破壊試験方法として外観検査、放射線透過試験、超音波探傷試験などが JIS Z3050 に定められており、水道分野のパイプラインの検査基準と

して広く使われている。この規格の A 基準は、API 1104 をベースにして定められた規格であるが、外観検査を除いて、ガスパイプラインの検査には使われていない。

2) 海外における非破壊検査

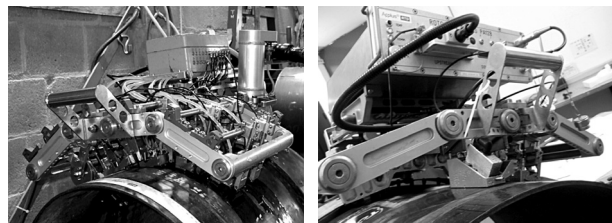
海外でも、外観検査と放射線透過試験の 100% の溶接継手検査が実施されている。かつて、放射線透過試験は、放射性同位元素を用いたガンマ線装置がエックス線発生装置よりも機構が簡易であることと、小口径の鋼管でも中に入れて使えることから多く使われていたが、保管・管理や被ばくの危険性など安全面の問題と、特にイリジウム 192 では半減期が 74.3 日と短く劣化が早いという問題があった。現在は、360°照射が可能な小型の自走式（クローラータイプ）エックス線装置が普及し、これが主に使われている。これは、バッテリー駆動のため、使用頻度にもよるが 1 日に 1～2 回のバッテリー交換が必要である。

1990年代から、放射線透過試験に代わって超音波自動探傷試験（Automated Ultrasonic Testing: AUT）が使われるようになった。1990年代初頭までは、放射線透過試験が主体であったが、当時、普及してきた自動溶接の融合不良、溶け込み不足などの有害な面状欠陥の検出に、超音波自動探傷試験が優れていることから、放射線透過試験に代わって長距離の陸上パイプラインを中心に急速に普及してきた。1993年頃までは、放射線透過試験と超音波自動探傷試験が併用されていたが、以降に超音波自動探傷試験が単独で使われるようになり、1990年代末には、海底パイプラインにも使われ始めた。

海底パイプラインの場合、検査も専用の検査ステージを持ち、敷設作業の流れに合わせて、5～10分程度で検査結果を出さなくてはならない。そのため、放射線透過試験は、増感紙入りのロングフィルムと内部線源を使い 1 回照射で撮影され、自動現像装置で直ちに現像されて判定される。判定は、通常、検査会社の技術員、施工会社の品質管理者、施主から派遣された検査官で行われている。超音波自動探傷試験も同じく 5～10分程度の時間の制約があるが、探傷速度が速く、口径 600 mm の鋼管では、約 90 秒で 1 周の探傷が完了する。また、板厚 35 mm 程度でも探傷時間が変わらないため、厚肉のパイプラインの検査には放射線透過試験より有利となる。超音波自動探傷では、探傷と同時にデータがコンピュータに送られ画像（C スキャン）表示される。きず寸法（長さ・高さ）の判断は、専門技術者が行い、放射線透過試験と同じく品質管理者、検査官が合否を確認し判定を下す。

海外で使われている超音波自動探傷装置は、溶接部を深さ方向にゾーン分け（Zonal discrimination）する探傷方法が使われる。この方法だとプローブの前後走査が必要ないため、10～40 mm/sec の高速探傷が可能となる。このゾーン分け探傷の超音波自動探傷装置には、使用するプローブによって、マルチプローブタイプとフェーズドアレイタイプがある（写真16）。

判定基準は、API 1104 や DNV OS-F101 が採用されることが多い。放射線透過試験の判定基準は、融合不良（LF）で 25～50 mm と長く、JIS Z3104 の判定基準の 4 倍以上の長さが許容されている。



(a) マルチプローブタイプ (b) フェーズドアレイタイプ

写真16 超音波自動探傷装置

超音波自動探傷試験では放射線透過試験で見逃すような細長い LF も検出するために、結果としてきずが長く判定され補修が増えることがある。そのために、破壊力学の手法を用いて、技術的な裏付けからきずの判定基準を定めることがあり、これを ECA（Engineering Critical Assessment）と称している。海外では、API 1104 Appendix A、DNV OS F-101、CSA Z662 などに ECA の採用の規定があり、BS 7910、API 1104 Appendix A、CSA Z662 Annex K などに ECA の手法が定められている。この他に、広幅試験の一種であるカーブド・ワイド・プレートテスト（Curved wide plate test: CWPT）の結果から許容欠陥寸法を決める手法も多く使われている。国内では、パイプラインの耐震を目的としているが、日本ガス協会の高圧ガス導管耐震設計指針が ECA とも言い、レベル 2 地震動に対する許容きずを板厚 19 mm の場合にきず長さ t （板厚）、きず高さを $t/3$ としている。

4.2 品質管理

品質管理は、PDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルで表わされるが、ここでは、設計、施工、試験・検査および保守点検の 4 つに分けて概説する。

1) 設計

設計段階では、パイプラインの敷設環境、操業条件に合わせて、使用する溶接材料や溶接条件を十分に検討する必要がある。また、溶接法、施工方法についても鋼管のサイズ・材質や溶接姿勢を考慮して決めなくてはならない。また、この段階で予熱の条件、実施方法などの検討も必要となる。これらに続いて溶接施工法確認試験、溶接士技量試験の計画がある。

2) 施工

ここでの品質管理が、一般的に言われる狭義の品質管理である。鋼管や溶接材料などの受入れ管理、使用機器、計測機器の整備、校正記録などの確認、溶接前管理（鋼管の板厚、ベベル角度、開先寸法、残留磁気、予熱温度）、溶接中管理（溶接条件、パス間温度、積層方法、溶接技法の確認など）がある。

3) 試験・検査

溶接施工前、施工中、施工後に実施される試験・検査に分けられる。溶接施工前には溶接施工法確認試験、溶接士技量試験があり、溶接施工法確認試験は、計画された溶接施工法が十分な品質を確保するに足りるかどうかを確認するために、溶接士技量試験は、溶接士の技量が品質を確保するために十分かを確認するために実施するもので品質を左右する重要なものとなる。国内では、事業法の認可を受けた溶接法が使われ、溶接士も認証を受けた溶接士が従事する。海外では、ロシアなどの一部の



写真17 塗覆装損傷検査

国を除いて、このような認可・認証制度はなく、事業者や工事を統括する会社が溶接施工法確認試験と溶接士技量試験を施工業者に要求し、実施するのが一般的である。溶接施工中は、プロダクション試験（Production Test）と溶接継手の非破壊検査がある。プロダクション試験は、国内で要求されることはまずないが、海外では間々要求されることがあり、実際のパイプラインの溶接継手から試験片を切り出して、引張、曲げ、衝撃試験などの機械試験を実施することが要求される。溶接継手の非破壊検査は、前述の放射線透過試験、超音波探傷試験などである。溶接継手の塗覆装後に絶縁検査が行われる。また、パイプラインが完成した後、または、陸上パイプラインではバルブステーション間ごとにピグ検査、耐圧・漏洩試験が実施される。

4) 保守点検

保守点検は、操業中のパイプラインの健全性、安全性を確認するための保守管理であり、漏えい事故などを未然に防ぎ安全操業を行うために重要となる。保守点検としては、漏洩磁束を利用した検査ビグによる腐食減肉検査²⁹⁾やカメラロボットによる内面検査²⁹⁾が行われている。また、陸上パイプラインでは、地表からの磁気探査法や電位差法による外面の塗覆装損傷検査²⁹⁾（写真17）などが行われている。

5. おわりに

本稿では、紙面の都合でバルブステーション、ピグ・ステーションなどのパイプライン設備、ポリエチレン管で敷設されるパイプライン、ならびに上下水道のライフライン、農業・工業用水の送水ライン、水力発電所の導水路などを割愛した。また、海外の海底パイプラインで使われるリール工法や水中タイ・イン（Tie-in）、ライザー管（Riser pipe）なども言及できなかったのでまたの機会があれば紹介したい。

我が国における長距離パイプラインは、1990年代末から国土幹線ガスパイプライン構想および日本-サハリン間の天然ガスパイプラインや北東アジアのパイプライン網などの国際間の石油・天然ガスパイプライン構想が活発に議論され、具体化された計画も進められたが、残念

ながら現在もその実現に至っていない。

現在、低炭素社会に向けた取り組みの中で、CO₂排出量の少ない天然ガスの位置付けが大きくなってきており、インフラとしてのガスパイプラインの整備が国で活発に議論され、事業者間のパイプラインの連結のあり方などが検討されている。一方では、燃料電池を中心とする水素エネルギー社会に向けた動きがあり、水素パイプラインによる水素供給技術の実証も行われている。これらを背景に我が国のパイプライン網の整備が今後さらに進むものと考えられる。また、近年、話題の非在来型天然ガスのシェールガスや、次世代の資源として考えられているメタンハイドレートや炭層ガスなどの将来における採取、回収の可能性を考えると、天然ガスの枯渇時期も大きく延びパイプライン敷設の需要が続くであろう。さらなる将来、これらの枯渇性エネルギーに代わり再生可能エネルギーの社会になると思われるが、水素やバイオ燃料などをパイプラインで輸送する可能性が残ると考えられる。本稿が今後のパイプラインの敷設に多少でも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部：ガスのインフラ整備に関するワーキンググループ（第1回）資料5 - ガスインフラ整備の現状と課題，2010.10.
- 2) 経済産業省 原子力安全・保安院：第8回ガスパイプライン安全基準検討会（最終報告）について（プレス発表），2003.12.
- 3) 土木学会：第II編ライフライン施設の建設技術，都市ライフラインハンドブック，2010.1，P147-159 P257-299.
- 4) 笠井：パイプライン推進工法の現状，配管技術，580-Vol 44.3，2002，P81-85.
- 5) 島，長谷川，野崎，小野：PLAD工法における新しい掘削技術，新日鉄技報，350，1993，P74-79 P124-125.
- 6) 苦米地：日本に適應した新しいガスパイプライン建設方法，石油／天然ガスレビュー2004，1.3，70-84.
- 7) 苦米地：ガスパイプラインの合理的建設システム-クイックパイプライン工法（QPL工法）の開発，博士論文（京都大学），2003.1.
- 8) 武見：鋼管によるパイプラインの事故解析とその対策に関する研究，博士論文（大阪大学），2000.6.
- 9) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構：石油用語辞典，1986.3.
- 10) 成田・富士：溶接の実際シリーズ3 - 配管・導管溶接の実際，1983.11.
- 11) 浅原：パイプライン建設用建設機械，配管技術，580-Vol 44.3，2002，P49-55.
- 12) 大橋：世界の最新天然ガス・パイプライン・プロジェクト，配管技術，580-Vol 44.3，2002，P8-19.
- 13) M. Pulici, M. trifon, A. Dumitrescu: Deep Water Sealines Installation by Using the J-Lay Method - The Blue Stream Experience, Proceedings of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003.5, P38-43.
- 14) D. Yapp and S. A. Blackman: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXVI, No. 1/91, 2004.3, P89-97.
- 15) 日本溶接協会：50年史，船舶・鉄構海洋構造物部会.
- 16) 箱田，谷中ら：海底パイプライン自動溶接技術開発の変遷と現在，新日鉄エンジニアリング技報，Vol.01，2010，P56-65.
- 17) 杉谷ら：パイプライン，容器・配管溶接の最新技術-溶接法ガイドブック4（溶接学会溶接法研究委員会編），1999，

- P I52-I61 1.8.
- 18) I. D. Harris, M.I. Norfolk: Hybrid laser/gas metal arc welding of high strength steel gas transmission pipeline, Proceedings of IPC2008, 2008. 10, IPC2008-64129.
 - 19) S. Keitel, J. Neubert, M. strofer: Laser MAG Hybrid Girth Welding Technologies for Transmission Pipelines, IIW 63th Annual Assembly & International Conference, 2010. 7, P635-649.
 - 20) 東邦ガスホームページ：
(<http://www.tohogas.co.jp/rd/seisan/58.html>)
 - 21) 山田, 矢野, 宇田川：フェイズドアレイ方式超音波探傷システムの開発, 新日鉄技報, 379, 2003, P25-28.
 - 22) 新日鉄技報：スポットライト／海底配管リフレッシュ工法, 350, 1993, 114-115.
 - 23) 嶋津：パイプライン検査の技術動向, 配管技術, 580-Vol 44. 3, 2002, P68-73.
 - 24) 大平：パイプライン塗覆装調査監視の新しい技術 580-Vol 44. 3, 2002, P56-61.
 - 25) K. O'Hashi: Potential Hydrogen Capability for the Proposed Northeast Asia Natural Gas Pipeline Network, IPC 2004 -Panel Forum -Challenges of Hydrogen Pipeline Transmission, 2004. 10.
-