

「化学プラント(プロセス・施工編)」*



坂田健太郎



荻田 玄

坂田健太郎**, 荻田 玄**

Chemical Plant(Process&Construction)*

by SAKATA Kentaro**, OGITA Gen**

キーワード プラント, 海外, 圧力設備, LNG, 自動化, モジュール, 品質管理, 溶接技術

1. はじめに

石油精製, 石油化学などのプロセスプラント(以下, プラントと呼ぶ)は多種多様な設備から構成される複合設備であり, その規模は製品の種類, 原料, 処理量(生産量), 予算, 敷地面積, 等の因子によって決定される。規模を表す単位としては, 石油精製プラント(製油所)であればバレル/day, 天然ガスの液化装置(LNGプラント, LNG=Liquefied Natural Gas)であれば年あたりの生産量というように, プラントの原料処理量や年産量がその指標として使用されることが多い。年産780万トンの世界最大級のLNGプラントのパイプラック(鉄骨構造の大型の棚で, 配管を集中的に通す目的で設けられる)は600m近くにおよび, その規模の大きさが伺える。石油精製プラントの国内における新設工事は1980年代以降ほとんどないが¹⁾, 海外においてはベトナムやマレーシアをはじめ20~30万バレル/day規模の製油所建設プロジェクトが今なお進行中である。

天然ガスはCO₂排出量が他の化石燃料と比較して30~50%削減できるクリーンエネルギーとして注目を浴びている。2011年3月11日の東日本大震災以降原子力発電が停止していることから, 国内発電のエネルギー源として図1に示すように40%を占めるまでに天然ガスの輸入量が上昇している²⁾。日本は現在世界で生産されるLNGの40%を輸入する, LNGの一大消費国である。近年のシェール革命により北米およびカナダにおけるLNGプラント建設プロジェクト計画が活発化している³⁾。2018年末頃までに10件のプロジェクトが計画されており, 日本への輸出が決定している案件も含め5件が進行中である(図2)。

プラントの構成要素は圧力設備, 回転機械, パッケージ設備(水処理等のシステムとして複数の機器から構成される装置), 加熱炉, 発電装置・変電設備等の電気関連装置, プラント制御のための計装品, 電気室・計器室や事務所等の建屋, 鉄骨類の非耐圧構造物, 製品の出荷設備, 原料入荷・製品出荷のための栈橋等の多岐に渡る。プラントにおける溶接構造物として圧力設備が注目されるのは, プラントの安全性が圧力設備の個々の信頼性に大きく依存するためである。圧力設備以外の構成要素においても, ほとんど全ての製作過程を通して溶接作業を伴う。

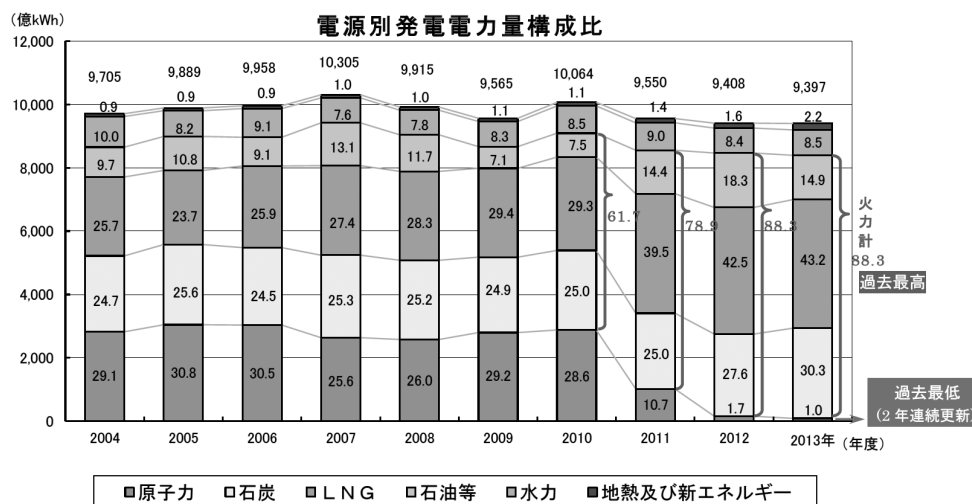
圧力設備に用いられる材料は, 基本的に内流体の性状, 運転条件について腐食・損傷因子を考慮して, 選定される。材料選定においてはプラントの設計寿命を考慮に入れてライフサイクルコストの視点も加味し, プラント建設時の初期費用だけでなくプラント稼働後の操業思想に基づいた保全費用も加えた総合評価が必要である。さらに, 詳細設計においては, 材料の溶接性・加工性, 市場性などの観点からの検討も行われる。ここでは, エンジニアリング会社の視点からプラントの圧力設備に主眼をおいて, その材料選定から製作管理を中心に解説する。

2. 圧力設備

プラントを, マクロ的な視点から見ると複数のプロセス装置から構成され, ミクロ的な視点では個々の圧力容器や配管資材にまでたどり着く。時系列的な観点からは, 詳細設計から始まり圧力容器などの製作メーカーにおける工場製作の期間と, 建設現場における土木工事から始まり鉄骨, 機器据付, 配管, 電気・計装, 塗装, 保温保冷, 試運転の現場建設作業の期間に大別ができる。圧力設備の種類としては, 塔・槽, 反応容器, 加熱炉管, 熱交換器, 配管(バルブも含む), 貯槽などに区分できる。ここでは圧力設備の材料選定における一般的な考

*原稿受付 平成26年9月4日

** 千代田化工建設株式会社 Chiyoda Corporation



(注) 10 電力計、他社受電分を含む。石油等にはLPG、その他ガスを含む。
グラフ内の数値は構成比(%)。四捨五入の関係により構成比の合計が100%にならない場合がある。

図1 電源別発電電力量構成比

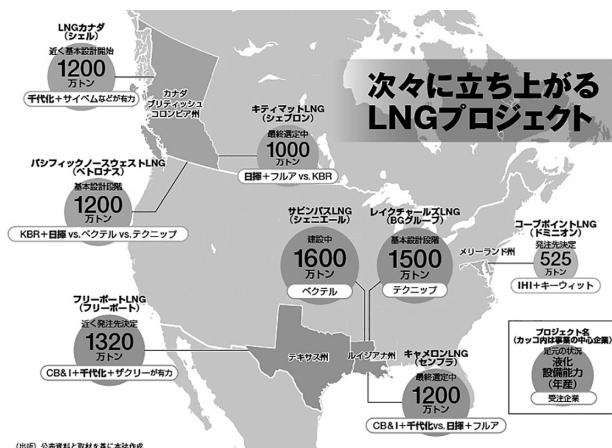


図2 北米のLNG案件

え方、工場製作と現場施工について述べ、具体例としてLNGプラント建設について記述する。

2.1 プラントの材料選定の考え方

圧力設備に用いられる材料は、天然ガスの液化温度である -162°C の極低温から、たとえばエチレン分解炉における 900°C 以上の高温サービスまで幅広い温度域に晒される。材料選定で考慮すべき内流体による腐食・損傷劣化事象はガス、原油等の原料の性状やプロセスにより異なり、低温域の湿潤環境下では腐食・応力腐食割れ(SCC)等、高温域では高温損傷・脆化等に大別される。具体的な事象として、前者には湿潤環境下の硫化水素による水素誘起割れ(HIC)、酸腐食(炭酸、塩酸、硫酸等)、応力腐食割れ(硫化水素、アミン、苛性ソーダ、ポリチオン酸、塩化物)等があり、後者の代表例として高温クリープ損傷、高温酸化、高温硫化、水素侵食、浸炭、焼戻脆化、 475°C 脆化、シグマ脆化等が挙げられ、鋼種と運転条件の組み合わせで発生する。また、機械的な損傷としては疲労、低温での脆性破壊等がある。プラントの健全な運転に影響を及ぼすこれらの損傷劣化事象は過去の事故事例を通じて特定されてきており⁴⁾、それらを発生させないような適切な設計がなされる。損傷劣化事象には、例えばクリープ損傷や浸炭のように経年変化に

より発生が避けられないものもあり、これらに対しては想定される事象に応じた保全計画により対応がなされる。実際に使用される材料は炭素鋼を主体として低合金鋼、ステンレス鋼、Ni合金、チタン、アルミニウム等がある。最近では外面腐食に対する対応も強く求められる傾向にあり、代表的な例として保温材下の腐食(CUI, Corrosion Under Insulation)が挙げられる。炭素鋼の場合はNACE SP0198によると $-4^{\circ}\text{C}\sim 175^{\circ}\text{C}$ の温度領域でかつ間欠運転の状態が最も発生する可能性が高いとされ、保温材の状態が悪い箇所から雨水等の浸入があり、減肉により内流体の漏えいに至ることがある。オーステナイト系ステンレス鋼であれば海塩粒子の飛沫等に起因した塩化物イオンによる外面応力腐食割れ(ESCC, External Stress Corrosion Cracking)が問題となる。CUIの対策として、従来の塗装に代わる、より寿命の長い外面保護塗膜の要求、例えばアルミ溶射(TSA, Thermal Spray Aluminum)等への関心が高まっている⁵⁾。この背景としては、TSAの施工によるCUIの検査のインターバルの長期化と、保温材を剥す作業が不要となることで保全費用が削減できることが期待される。TSAの効果はアルミの犠牲陽極としての防錆効果と皮膜としての環境遮断の二点による。オーステナイト系ステンレス鋼のESCCに対しては、TSAに加え、内流体の運転温度に応じて二相ステンレス鋼等の高耐食材料に変更するなどの対策が費用対効果も考慮に入れて検討される。

2.2 LNGプラントの構成装置

LNGプラントの代表的なプロセスフロー図を図3に示す。

井戸元からの原料にはメタンを主成分とする炭化水素ガス、油、水分、不純物としての硫化水素や二酸化炭素、塩化物、固形不純物(スラッジ)等が含まれる。井戸元からの原料は、パイプラインを經由しスラッグキャッチャーという装置へ送られ、ガス成分が液分(油、水分)から粗分離される。原料ガスの圧力は100 BarG付近であり、スラッグキャッチャーにはAPI-5L X65等の高強度炭素鋼が用いられ、上流での脱水設備、インヒビター(腐食防止剤)の使用有無等に依存する腐食環境に応じ

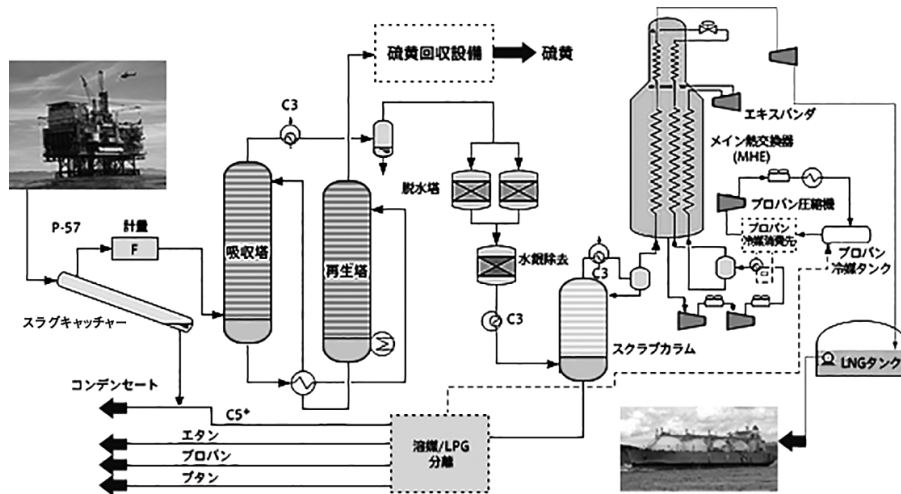


図3 LNGの代表的なプロセスフロー図

て、耐食合金によるクラッド/オーバーレイが使用されることもある。原料ガスは、次いでAGR (Acid Gas Removal) 装置に送られ、硫化水素や二酸化炭素はアミン溶液により吸収・除去される。AGR装置は吸収塔と再生塔で構成され、その間をアミン溶液が循環する。吸収塔は高圧であるため100mmを超える厚肉、大型機器となる。ライセンサーによっては部分的に内面のステンレスクラッド/オーバーレイが採用される。再生塔も塔頂クラッドで、AGR内の炭素鋼範囲はアミンSCC対策としてPWHTが要求される。その後、液化過程で水の生成を避けるため、水分を分子レベルで吸着・除去する脱水装置へ送られ、さらに、後続のアルミ製の液化装置の損傷(マーキュリーアタック)防止のため不純物である水銀が取り除かれる。これらの構成材料は炭素鋼であり、脱水装置にある吸着材を含むドラム(ドライヤー)は一定期間吸着を行った後に300℃程度に加熱された空気により再生されるため、吸着と再生を繰り返す運転が行われる。完全に不純物と水分が除去されたガスは液化装置に送られ、-160℃以下まで冷却、液化される。液化プロセスの過程において主成分のメタンを取り出す分離塔はSS304(L)製の厚肉・大型機器となる。冷却の心臓部である大型冷凍熱交換器はアルミニウム合金が用いられる。冷却の過程において、運転温度に応じ、低温用炭素鋼、3.5%Ni鋼やSS304(L)鋼の低温材料が選定される。冷媒にはプロパン、エタン、メタン等の混合ガスが採用された液化プロセスに応じて使われる。生成されたLNGは貯蔵タンクに送られ、出荷設備を通じてLNGタンカーで輸送される。LNGの貯蔵タンクの内槽には低温靱性に優れる9%Ni鋼が使用される。定常運転温度が常温以上であっても、スタートアップ時や緊急脱圧時に断熱膨張により0℃を下回る急激な温度低下が起こる場合があり、その脱圧時の温度低下分を考慮した材料選定が行われることもLNGプラントの材料選定における一つの特徴である。この場合、炭素鋼の溶接部を含めた低温靱性が懸念事項となり、衝撃性能を有する配管・機器資材の適用範囲を明確にすることが求められる。このように、LNGプラントの構成材料は炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼が中心で、特殊材料の適用は比較的限定される。

2.3 圧力設備の工場製作

圧力設備の製作は製作メーカーの工場で行われ、完成出荷の後、建設現場へ搬入される。エンジニアリング会社が手掛けている海外顧客向け化学プラントでは、多種多様な機器資材が海外の製作メーカーへ発注されることが多い。これら機器資材の品質と納期管理が建設現場での工事進捗に直接的に影響を及ぼし、ひいてはプロジェクトの損益にまで関わるため、非常に重要なプロセスとなる。

LNGプラントでの主たる圧力設備の工場製作における特殊性は、他のプロセスプラントと比較しても大きくかけ離れる点はないが、ガスを取り扱うため体積が大きく大径・厚肉容器が多いことがその特徴である。一例を挙げれば、湿潤硫化水素環境下におけるAGR装置の吸収塔は前述した通り極厚で重量もある炭素鋼製大型機器となる傾向にあるが、以下の条件を満足することが求められるため、対応できる素材メーカーおよび製作メーカーが限定される。

- 脱圧のケースを想定した最低設計温度での衝撃性能 (母材および溶接部)
- 母材の耐HIC性能、炭素当量の制限、熱処理要求
- PWHT温度の制限
- 溶接部(HAZ)の硬さ制限
- 補修も想定した最長のPWHTサイクルで母材と溶接部が機械的特性(強度と靱性値)を満足すること。

圧力設備の種類によっては、パッケージ設備など一次発注先が完全な設計会社で、材料の調達と製作は別の下請会社(国も異なる)であるケースも多い。このようなケースにおいては素材、製作(溶接・非破壊検査)に関する品質要求事項を確実に末端の製作メーカーへ伝達させ、理解を求めることが重要となる。压力容器の種類には前述の通り塔・槽・熱交換器などがあるが、LNGプラントの主冷凍熱交換器は、外観上は通常の塔類と類似した形状であるものの、内部はそれぞれのプロセスライセンサーの固有技術に応じた特殊な構造をしている。同熱交換器はアルミニウムが用いられているため、接続するステンレス配管との取合いのノズルフランジはアルミとステンレス鋼の爆着クラッド材から製造された特殊な継手が使用される。

2.4 現場施工

建設現場における圧力設備に関する主たる溶接施工は配管工事と貯蔵タンクの組立である。配管工事はプレファブ工事と現場工事とに大別され、配管サポートも含め現場溶接および必要に応じてPWHTと非破壊検査が完了後に耐圧試験を実施する。プレファブ工事は第三国で実施されることもあり、この場合はプレファブされた配管スプールを建設現場へ持ち込み現場では現場溶接継手の施工を実施し、組み立てられる。配管資材の耐圧部材にはパイプ、フィッティング（エルボ、ティー、レデューサー）、フランジがあり、バルブやストレーナも配管との取り合いが溶接構造となるものがある。プラントの配管資材の総重量は例えば10～20万トンにもおよび、一つのプロジェクトで消費する溶接材料重量は200～400トンにもなる。配管工事はアイソメトリック図に基づいて施工されるが、最近ではプラントの3Dモデルから自動的にアイソメトリック図を出図することが可能である。海外におけるプラントの配管設計・施工はASME B31.3に基づくことが多い。配管工事は配管資材の受入検査とその管理から始まり、溶接施工要領書（WPS）と施工法確認

試験記録（PQR）に始まる各種施工要領書の準備、溶接工の技量格付試験を経て、作業に入る。配管工事の詳細のワークフローを表1に示す⁶⁾。配管現場工事の品質管理上の留意点については後段で詳述するが、膨大な作業点数を抜けなく確実に抑えるためには、日々の溶接作業の進捗管理を地道に確実にを行うことが肝要である。

LNGの貯蔵タンクには古くから9%Ni鋼が用いられるが、その形式からシングルコンテナメントタンク、ダブルインテグリティータンク、フルコンテナメントタンクの3種類に区分され、最近ではフルコンテナメントタンクが主流である⁷⁾。LNGタンクは設計から現場施工まで一括で請け負う会社へ発注される。側板の曲げ加工や付帯するステージ等の鉄骨や配管はプレファブ工事としてプラント建設地とは異なる第三国で行い、建設現場へ持ち込んで組立られることが多いが、最近ではミルメーカーで9%Ni鋼製の側板の曲げ加工と開先加工まで行って建設現場へ送るケースもある。

2.5 モジュール工法

洋上プラントの一つであるFPSO（Floating Production, Storage and Operation）は井戸元のある洋上で石油・ガス

表1 配管工事の作業と検査内容

ワークフロー	検査項目	主要な検査内容	検査方法		
製作・施工	資材管理 ↓ 受入 ↓ 入出庫 ↓ 保管	資材受入検査	数量、仕様、サイズ、表示、損傷/表面欠陥等の有無 材料識別記号、識別色の確認	VI メタスコープ、アロイア ナライザー等(注)	
	作業段取り ↓		作業計画・手順、使用機器、安全確認、足場		
		配管資材検査	材料の図面との照合(配管材料の識別記号、識別色)、寸法		
	切断作業 ↓		砥石の使い分け、材料の照合マーク、切断方法		
	加工・製作 ↓	開先検査	形状(角度)、寸法、清浄	VI. ゲージ	
		曲げ加工検査(注)	扁平率、減肉率、曲げ半径、外観	VI. ゲージ、ノギス	
	溶接作業 (プレファブ及び組立溶接)	作業前	溶接施工法確認および溶接工技量確認[又は資格証]、溶接棒管理室の準備		
		仮付け	仮付け検査	目違い、ルート間隔、割れの有無、治具、ピース材質、溶接材料	VI
		作業中	溶接材料管理、溶接施工条件、溶接環境	ルートバス、スラグ除去、クレータ処理、バックシールド、乾燥、溶接工、施工法、溶接材料	VI
			熱管理	予熱、直後熱、パス間温度	テンピルスティック等
		作業後	溶接部外観検査	外観、のど厚、溶接サイズ、継手の位置・寸法	VI
			非破壊検査		PT,MT,RT
	熱処理作業 ↓	熱処理検査	方法、加熱幅、温度測定、加熱・冷却速度、保温範囲	熱電対温度計	
		硬さ検査	溶接後熱処理温度記録(チャート)	テレビネラー等	
	組立・取付作業 ↓	組立検査	外観、寸法、アライメント、水平度、垂直度	VI. ゲージ	
サポート検査		形式、位置	VI		
肉厚測定検査(注)			超音波厚み計、ノギス		
ラインチェック		ラインの構成、材質、クラス、バルブ、計器類の配置、ボルトの長さ・締め付け、サポート等	VI		
試験等 ↓	圧力試験 (耐圧) 試験前 (気密) 試験中 ↓ 試験後	段取り	使用機器、手順、溶接/熱処理検査等完了チェック		
		洩れ検査	昇圧、安全	VI	
	クリーニング	清浄度の検査			
	フラッシング	駄目押し検査	閉止板・仮設の撤去、ガスケット・ボルトの誤使用	VI	
	総合気密試験	洩れ検査	安全弁、調節弁、計器類フランジ等接続部の洩れ	VI	
片づけ					

VI: 目視検査, PT: 浸透探傷試験, MT: 磁粉探傷試験, RT: 放射線透過試験

注: 個別仕様書で要求された場合に適用

等の製品を生産し、製品を船上設備内のタンクに貯蔵して、直接輸送タンカーへの出荷を行う設備である。FPSOは鉋区を自身で移動し、操業することができる。この船上設備はモジュール工法と呼ばれる、プラントを細切れにしてブロック毎に製作し船上で組み立てる手法がとられる。このモジュール工法は、プラントの建設地が極寒冷地である等の工事上の制約のため、もしくは豪州など人件費が非常に高額なために人件費の安い第三国でモジュールを製作し、現地での建設期間を短縮させることで建設コストを抑える目的のためにも用いられる。最近では Floating LNG と呼ばれる、洋上での LNG プラント建設プロジェクトも遂行中である。Floating LNG の機運が高まっている背景としては、陸側建設予定地の自然環境保護規則が厳しくその対応コストが高い、また、10～20年で枯渇する中小ガス田の有効活用などがある。モジュール工法は広大な敷地のモジュールヤードで製作され、小規模な化学プラント建設現場と捉えることができる。最近では中国、フィリピン、インドネシア、タイ等アジア諸国でのモジュール建設が目立つ。一つのモジュールの重量は数千トンのレベルとなるため、モジュールヤードにおける大型クレーン等のハンドリング設備も充実していなければならない。当工法での留意点はモジュール間の取合い精度であり、特に配管は建設現場でのモジュール間でのフィットアップ作業の容易さとその正確性を如何に出すかという点に各社のノウハウがある。

3. 溶接・接合プロセスおよび施工

圧力設備の製作、即ち製作メーカーの工場および建設現場で用いられる溶接施工方法は、従来から実績のある TIG 溶接、被覆アーク溶接、MIG/MAG 溶接（含む FCAW）、サブマージアーク溶接が主流で、製品の母材、板厚、形状に合わせて適材適所で適用されている。薄肉の溶接管には電縫管やプラズマ溶接が用いられることもある。

圧力設備の基本的な製作工程の大きな流れは、素材の受入・切断 → 成型・加工 → 肌付・溶接 → (PWHT) → 非破壊検査 → 耐圧試験 → 塗装 → 出荷となる。PWHT の有無は基本的には炭素鋼・低合金鋼を対象に、適用規格に加えプロセス上の要求で SCC 対策や溶接部の硬度低減を目的に実施される。PWHT は専用炉内で実施されることが多いが、炉のサイズの制約がある場合、局部 PWHT との組み合わせが取られる場合もある。建設現場での PWHT も新設時（現地組み立てが行われるタンクなど）もしくは保全作業、改造工事期間において実施されるケースがある。建設現場での PWHT は熱源として電気ヒーターパッドを用いた局部熱処理方法の他、大型機器の PWHT には Inner Firing としてバーナーにより火炎を吹き込む方法が採用されることがある。いずれにせよ実績・実力のある専門業者による均一な加熱を実現させ、局部的な変形を抑える対策をとることが重要である。耐圧試験はほとんど全ての圧力設備で要求され、その必要有無はその機器・資材の適用規格に応じて決まる。前述の通り CUI 対策として従来の塗装に代わって TSA が一部

要求される場合もあり、圧力容器の製作メーカーにて TSA の専門業者が施工することとなる。TSA の施工は溶接作業と同様に施工法確認試験と施工者の格付けを通じて、施工要領書に従って行われ、最終検査で検証される。

3.1 関連規格・基準の動向

材料設計および製作面での規格、顧客仕様書は過去の事故やトラブル事例の原因分析から得られた知見を反映されたものが多いことは言うまでもない。石油関連業界では、国内外全般的に JPI/API/NACE 等の団体を通して、40～50年以上にわたって経験・蓄積されてきた劣化・損傷事例とその対策事項が、補修や保全作業に活用されている時期であり、材料選定および溶接施工関連の既存の規定・要求事項も見直されている。特に補修に関する取り組みは近年活発化しており、供用中の設備の劣化診断における定量的評価手法を示した API 579/ASME FFS-1, FFS (Fitness for Service) と相まって維持規格として整備されている⁸⁻¹⁰⁾。また、要求事項の見直しの例として API RP941 の水素侵食に対するガイドラインである Nelson Chart も改定案に関して検討がなされている。最近の損傷・劣化事例が規格に反映された例として、2.25Cr-1Mo-0.25V 鋼溶接部の工場製作中における SR 割れ事例がある。2.25Cr-1Mo-0.25V 鋼は耐水素侵食性に優れ、かつ2007年の ASME Section VIII Div.2 の改訂で従来材に比して高い許容応力を採用できるようになり、機器の重量軽減のメリットが受けられるため、石油精製プラントの脱硫装置のリアクターにおいてはその使用が顕著である。一方、同材料のサブマージアーク溶接による溶接金属の SR 割れ現象が問題とされ、API RP934A でその対策と検査方法 (UT) についてガイドラインが設けられた。

海外向けプラントの溶接施工に関する要求事項として API RP582 が引用されることが多く、エンドユーザー、エンジニアリング会社、製作メーカー、溶接材料メーカーがその動向を注視している。近年は二相ステンレス鋼の施工上の要求事項、例えばフェライト量の制限、予熱・パス間温度の制限、シールドガス、溶接部に求められる衝撃性能と耐食性評価について溶接施工法試験と実機に対する試験要求についての議論が頻繁に交わされている。本文中に引用した関連規格・基準をまとめて表2に示す。

3.2 圧力容器関連

圧力容器関連では、鏡、胴などの主たる圧力部材は基本的に両側開先であり、厚板になればなるほど開先断面積を減らし溶着量と溶接入熱を抑えて角変形と HAZ 幅を低減させようという基本的な思想は変わらない。サブマージアーク溶接やエレクトロスラグ溶接を用いた容器内面へのステンレス肉盛溶接の幅広一層盛溶接技術も同様に、日本をはじめとする先進国で開発されてきた狭開先溶接や肉盛溶接技術は、技術後進的な海外諸国の製作メーカーにおいても実用されてきている。ノズルと胴との溶接、熱交換器の Tube to Tubesheet の溶接等の自動化も海外製作メーカーにおいても珍しくなく、更なる作業効率化と品質の安定化が追求されている。

3.3 建設現場における施工

プラントの建設現場における配管工事で用いられる溶接施工法は TIG 溶接と被覆アーク溶接が依然として主流

表2 本文中で引用した関連規格・基準

関連規格・基準	タイトル	発行元
NACE SP0198	Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing Materials—A Systems Approach	NACE International
API RP934-A	Materials and Fabrication of 2 1/4Cr-1Mo, 2 1/4Cr-1Mo-1/4V, 3Cr-1Mo, and 3Cr-1Mo-1/4V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service	American Petroleum Institute
API RP941	Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants	
API RP582	Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries	
API 579-1/ ASME FFS-1	Fitness-For-Service	
API RP571	Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry	
WES 7700	圧力設備の溶接補修	
JPI-8R-16-2003	溶接補修	(社)石油学会
ANSI/NB-23	National Board Inspection Code	The national board of boiler and pressure vessel inspectors
ASME Section VIII Div.2-2013	Rules for Construction of Pressure Vessels Alternative Rules	The American Society of Mechanical Engineers
ASME PCC-2	Repair of Pressure Equipment and Piping	
ASME B31.3	Process Piping	
ASME Section V Article 4 Mandatory Appendix III	Time Of Flight Diffraction (TOFD) Technique	
ASME Section V Article 4 Mandatory Appendix IV	Phased Array Manual Raster examination techniques using Linear Arrays	
ASME Section V Article 4 Mandatory Appendix V	Phased Array E-scan and S-scan Linear scanning examination techniques	

であるが、プレファブ工事では高能率化を狙ってプレファブショップ内に必要機材を持ち込みサブマージアーク溶接が用いられることもある。FCAWも近年は配管溶接に採用されているが、配管の溶接は片側溶接であるために初層溶接はTIG溶接が用いられる。STT (Surface Tension Transfer) という特殊な波形制御によるMIG溶接機が開発され、配管の初層溶接が全姿勢で行えるという利点から、従来の短絡移行型MIG溶接よりも高能率化が期待されている。

LNGタンクの内槽の9%Ni鋼の溶接施工については専門メーカーによる技術開発が行われ各種報告がなされているが、作業の効率化を追求し側板縦横継手の全線に裏はつりを伴わない自動溶接が採用される傾向にある。ただし、建設現場での人件費が安くマニュアル溶接を採用したとしても全体でのコスト競争力があるのであれば、現場での実際の適用はその限りではない。

4. 検査・品質管理

エンジニアリング会社にとってプラントの製作・建設における検査・品質管理業務の目的は、合否判定を行うための単純なプロセスではなく、観念的ではあるが、「対象とする機器資材が要求事項を満足し、その機能を満たしているかどうかの検証作業」と、「トラブルの未然防止活動」および「作業の進捗に応じて万一トラブルが発生したとしてもプロジェクトへの負の影響を最小限にすべく取り組むこと」と定義づけられる。この目的を達成するため、品質管理に携わる者は要求事項を理解し、製作・建設の状況をリアルタイムで把握し常に冷静に情報を分析した上で、製作・建設期間中に起こりうる不具合を予想するための洞察力が求められる。

各論としての検査業務にはもちろん個々の機器・資材

で要求される外観、寸法、非破壊検査、性能試験等が含まれるが、広義としての検査となると、圧力設備に対してはプラントの圧力設備の気密性の確認、いわゆる総合気密試験までがその対象であり、最終的にはプラントの製品が顧客の仕様を満たしているかの性能確認試験までがその範疇と捉える事が出来る。

4.1 非破壊検査技術の動向

工場製作および建設現場における非破壊検査は基本的にRT (放射線透過試験)、UT (超音波探傷試験)、MT (磁粉探傷試験)、PT (浸透探傷試験) の4種類がその要求に応じた適用箇所 (溶接部) に必要なタイミングに応じて適用される。厚板の圧力容器の溶接部に対するRTの代替としてのUTの適用が拡大しており、ASME Section Vで規格化されたTOFD (Time of Flight Diffraction) やPhased Arrayなどの自動UTも製作メーカーにおいては適用されている。LNGタンクの9%Ni鋼溶接部への自動UT技術も適用されている。近年の画像処理技術の発達に伴うRTのデジタル化も進み、溶接管メーカーにおいては長手溶接線に対して従来のフィルムタイプに代わり、Real Time X-Ray技術として実用化されている事例も多くみられる。PMI (Positive Material Identification, 合金材料識別検査) も非破壊検査の一種といえるが、その適用はプロジェクトの種類や大小に関わらず、対象範囲の違いこそあれ、異材混入、溶接材料の誤使用の防止と発見の目的で多用されている。PMIが幅広く適用されている背景として、蛍光X線分析法を利用した非接触型PMI機材の精度向上、軽量化・コンパクト化と操作し易さが挙げられる。材料の誤使用が原因で運転後に事故が引き起こされる事例もあり、材料管理とトレーサビリティの確保は品質管理の基本である。建設現場における配管工事の突き合わせ周溶接継手において

はRTが依然として主流であり、撮影枚数は大規模なプロジェクトで数十万枚となる場合もある。

4.2 品質管理業務

エンジニアリング会社の品質管理の目的を達成するため、製作メーカーへ機器資材を発注する以前から広義の品質管理業務が始まる。これは、発注品が製作メーカーの製作・技術能力を超えていないか、素材や部品の調達において困難さはないか、工場の稼働率はどうか、等の評価を行い、将来起こりうる品質問題に起因した納期遅延を未然に防ぐことを目的とするものである。製作メーカーでも建設現場においても、時系列的には図面一式と各種施工要領書（WPS/PQR, 熱処理要領書, 検査要領書, 耐圧試験要領書, 塗装要領書, 等）を揃え、材料（素材）の購入仕様書を確実にするところからその業務は始まる。材料管理は非常に重要なプロセスで、受入時に購入仕様書通りのものが間違いなく搬入されているかどうか、ミルシートと突き合わせての検証がなされる。製作メーカーにおいてヒートナンバーを製品に刻印し材料のトレーサビリティを確保することはISO 9001やASME上の要求もあるため社内品質システムとして取り込まれている場合が多い。現場の配管工事においても、材料のトレーサビリティ管理は重要性を増し、重要度の高い配管や合金鋼の適用箇所などにはヒートナンバーを記録する要求が課せられることがある。LNGプラントにおいては衝撃試験要求付き低温用炭素鋼が通常の炭素鋼と混在することを防ぐため、低温用炭素鋼の識別とトレーサビリティ確保の仕組みを工事の初期段階から導入して遂行することが非常に重要である。品質管理上の要求事項を確実に履行するためのツールとして、表3に示すITP（Inspection & Test Plan）と呼ばれる書類に落とし込み、試験・検査項目毎に関連する組織（エンドユーザー、エンジニアリング会社、製作メーカーもしくは工事サブコントラクター、サブベンダー）の立会区分を明確にすることが多い。製作メーカーにおける工場での着工時、建設現場における新たな作業の開始時には、PIM（Pre Inspection Meeting）を開催し、作業対象を明確とし、ITPの内容確認を中心に対象の製作・工事上の注意点の明確化と共通理解を得る。建設現場における配管溶接工事の検査員は、非破壊検査のオペレータや判定者に限らず、AWS（American Welding Society）、ASNT（The American Society For Nondestructive Testing）、CSWIP（The Certification Scheme for Welding and Inspection Personnel）などの有資格者であることが要求されることが多い。

5. おわりに

本稿ではプラントに用いられる圧力設備の材料選定と施工・組立プロセスについてLNGプラントを具体例に、最近のトピックスを交えて述べた。プラント分野では、材料の技術的進歩はあるものの、用いられる溶接プロセス・施工方法は従来通りの手法の適用がほとんどで、革新的な技術の適用例が見出しにくいいため、製作・建設工

表3 ITPの一例

Inspection and Test Plan (ITP)							
No.	Work Item	Test/Inspection Item	Criteria / Tolerance	Inspection / Test Form	Activity		
					Subcontractor	Contractor	Company
A. Dimension check							
1	Dimensional check	Dimensions	Repair plan drawing	Dimension results	H	W	
B. Reference marking							
1	Reference marking	Dimensions	Repair plan drawing	N/A	H	W	
C. Cutting and Edge preparation							
1	Cutting	Visual inspection	Repair plan drawing	N/A	H	W	
2	Edge preparation	Dimension & Visual inspection	Repair plan drawing	N/A	H	W	
D. Fit - up inspection							
1	Fit - up inspection	Dimension & Visual inspection	Repair plan drawing	Dimension record	H	W	
E. Welding Monitoring							
1	Welding Parameters	Dimension & Visual inspection	WPS & DWG	N/A	H	W	
F. Final Dimension and Visual Inspection							
1	Final Dimension & Visual Inspection	Dimension & Visual inspection	Repair plan drawing	Dimension record	H	W	
G. Surface Preparation and Paint inspection							
1	Surface preparation	Environment & Surface	Painting procedure	Painting record	R	W	
2	Painting inspection	Visual & DFT inspection	Painting procedure	Painting record	R	W	

W - Witness
S - Spot Witness
R - Record Review / Sign-off

事について全般的に概説した。

圧力設備は海外製作メーカーからの調達が多く、建設現場においても世界中で溶接作業が行われている。溶接に起因する不具合の未然防止のためにも、溶接管理技術者のレベルアップは製品・工事の品質安定の観点から重要な項目であり、取り組むべき課題であると考えられる。この点において、溶接管理技術者の育成スキームが充実している日本が果たせる役割は非常に大きい。2004年から始まったAWF（アジア溶接連盟）活動により、WES 8103に基づいた溶接管理技術者認証制度に対するアジア各国溶接協会の理解が深まった。2006年にはタイ溶接協会、フィリピン溶接協会と日本溶接協会の間で溶接管理技術者認証制度導入のための協力協定が締結された¹²⁾。現在では日本溶接協会の溶接管理技術者認証委員会・海外対応小委員会によりインドネシアをはじめ東南アジア地域を中心に海外認証制度の導入活動が展開されている。

参考文献

- 1) 製油所とエチレンプラントの連携強化
(http://www.dbj.jp/pdf/investigate/mo_report/0000015845_file3.pdf) 日本政策投資銀行資料
- 2) 電源別発電電力量構成比 - 電気事業連合会
(http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/pdf/kaiken_s1_20140523.pdf)
- 3) 週刊東洋経済2013年11月18日発売号
- 4) API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
- 5) EFC #55 Corrosion-under-insulation (CUI) guidelines
- 6) 清水, 小杉; 石油・化学プラントにおける配管の溶接と品質管理, 配管技術 41 (11) (546), p51~58, 1999
- 7) 廣瀬; LNGタンクの構造の変遷, 溶接構造シンポジウム2009講演論文集
- 8) WES 7700 圧力設備の溶接補修, 一般社団法人 日本溶接協会
- 9) ASME PCC-2 Repair of pressure equipment and piping
- 10) 溶接補修 JPI-8R-16-2003 公益社団法人 石油学会
- 11) National Board ANSI/NB-23
- 12) 一般社団法人, 日本溶接協会60年史 資料