

溶接管理技術者の体験紹介**プラント・エンジニアリング会社における
溶接管理技術者の取組みと今後の展望**経済産業省 産業保安グループ 高圧ガス保安室
友 松 一 郎**1. はじめに**

私は、山九株式会社のプラント・エンジニアリング部門における材料・溶接管理技術者として、プラント設備の建設工事およびメンテナンス工事（設備検査・診断、溶接補修、設備改造・更新工事等）に関する溶接を多数経験してきた。現在は経済産業省において高圧ガス保安法の技術基準の策定、見直しに向けた安全性評価等に取り組んでいる。

石油精製・石油化学および電力プラント等には、高温・高圧・耐食用のハイグレードな金属材料が使われており、その多くが法規制にかかるため溶接施工法の確立等、溶接に関する許認可が要求される。そのような状況において、溶接・金属材料・非破壊検査・腐食防食技術などに関する、国内外の技術情報の探索および最適化（溶接の自動化や未経験材料の溶接施工法確立、技術開発による高付加価値化等）を実施して工事に適用し、技術データとして蓄積・普及すること（データベース化等）、ならびに要員の生産性向上を目的にした技術・技能教育の企画・実行を主業務としてきた。

溶接管理技術者として特に苦勞したことをはじめ経験事例の一部、ならびに現在の取組みについて紹介する。

2. 溶接工事で苦勞したことの一例**(1) 建設工事（電力プラント）****① 原子力発電所における復水貯蔵タンクの現地自動溶接**

「オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304L）の縦向および横向往動ミグ溶接」および「溶接構造用鋼（SM400B）の横向往動サブマージアーク溶接」の溶接施工法を確立し、電気事業法に係る溶接方法の認可を取得して、原子力発電所の復水貯蔵タンク建設工事に適用した。

原子力発電所は沿岸部に建設されるため海風が想定以上に強い。ミグ溶接の防風対策として、自動溶接機周辺のシート養生に加え、ミグ溶接のトーチマウントに防風箱を設置することにより、シールドガスが海風から受ける影響を最小限に抑え、電気事業法に係る溶接検査の合格率を向上させることが出来た。また、建設現場でのタンク側板周継手は、側板の曲げ加工や長手継手の溶接歪等の影響で、溶接施工法確認試験時よりも開先精度が悪くなる。横向きサブマージアーク溶接においては、スラグによって狙い位置が目視で確認出来ない状況において、寸法精度が悪くなった周継手（タンク外周約 60m）に溶接ワイヤの送給を微調節しながら連続溶接する必要がある。また、多層盛りにおける下層のビード形状はグラインダ等で均一に整形出来ていないと、スラグ巻込み等の溶接欠陥の原因になり、次層のビード形状は更に悪くなる。したがって、自動溶接士の経験と技量に依存するところが大きいですが、溶接士技能確認試験を行う等、訓練の徹底により原子力仕様の高い要求品質レベルをクリアすることが出来た。

原子力発電所の建設工事サイトにおける第三者機関の立会いが必要な検査は、複数のメーカーが共同で現場一帯となって立会検査を受検するスケジュールパターンが一般的であり、溶接検査が工事のホールドポイントになる為、品質管理と工程管理が特に重要である。

(2) メンテナンス工事（石油・石油化学プラント）

① 大型圧力容器の定期修理における中間胴部分更新

ステンレスクラッド鋼（母材 38mmt : 2・1/4Cr-1Mo 鋼、合わせ材 2mmt : SUS410S）製の第一種圧力容器の中間胴部分更新工事において、胴板の周継手溶接に自動 FCAW（Flux Cored Arc Welding）を適用した。

この案件は、壺型圧力容器（直径：約 8m、高さ：約 28m）の中間胴の一部（重量が約 40ton のリング状ブロック）を定期修理時に部分更新する工事である。圧力容器製造工場で作成されたリング状ブロックの中間胴を製作、溶接後熱処理を施工後、海上輸送し、定期修理中の工場施設内で切断撤去した中間胴部分に組み込み、周継手 2 本を現場溶接するとともに、クラッド鋼合わせ材の広範囲損傷部を補修オーバーレイする工事である¹⁾。中間胴部分更新工事の概要を図 1、圧力容器の既設胴板の現地プラズマ切断状況を図 2、現地突合せ溶接部の周継手開先及びカットバック形状を図 3、オーバーレイ補修部のカットバックに使用した自動プラズマガウジング装置を図 4、オーバーレイ溶接ビード外観（FCAW）を図 5 に示す。定期修理現場での胴板更新部分のプラズマ切断、開先加工（クラッド鋼合わせ材のカットバック加工を含む）、高所における重量物の開先合わせ、クラッド鋼合わせ材オーバーレイ自動溶接金属の希釈管理、既設経年材側の割れ対策、予熱・直後熱・溶接後熱処理の管理等、多くのホールドポイント（検査等）の管理に苦労した²⁾。

特に、重量物である胴板更新部分を定期修理工事現場の高所作業において、溶接継手の食違いを最小の寸法精度内に開先合わせすることが重要であり、図 6、図 7 に示すマイクロドーリ（薄型重量物搬送台車）により高精度の開先合わせを可能にした。また、ライニング補修溶接における既設材熱影響部の微細な割れの進展を溶接入熱管理と溶接金属が凝固する際の熱収縮を少なくするウィービング操作により、要求品質レベルをクリアすることが出来た。

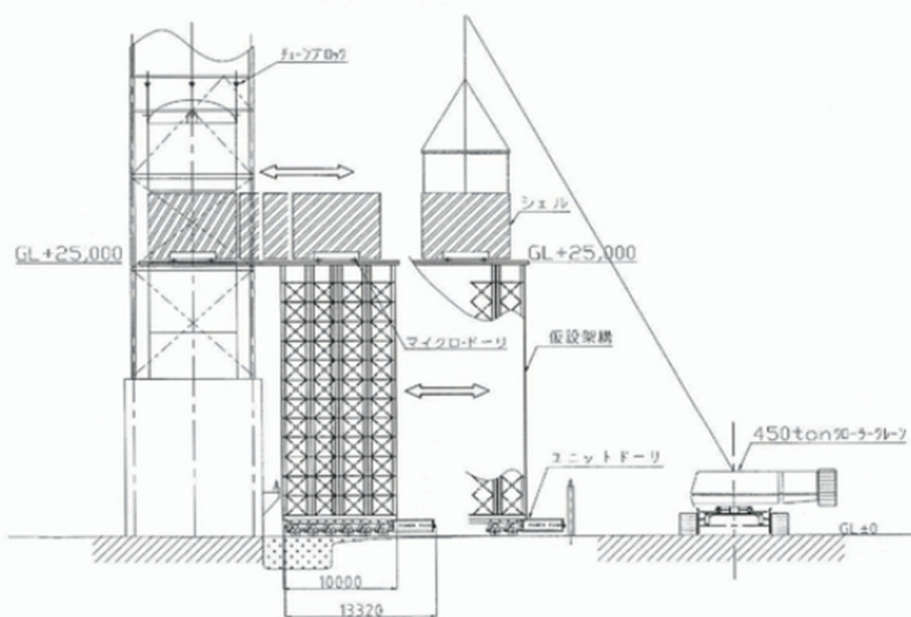


図 1 中間胴部分更新工事の概要

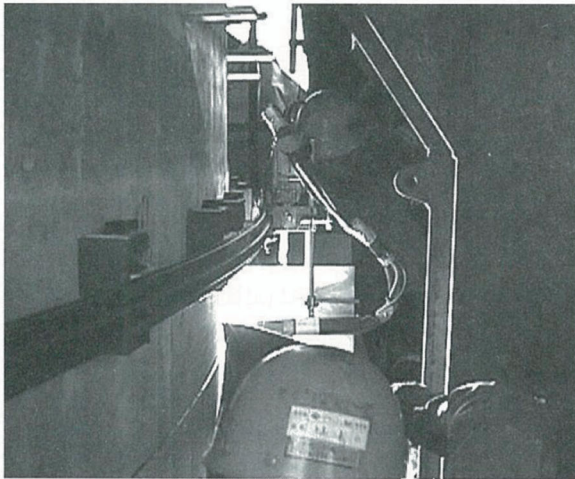


図2 現地プラズマ切断状況

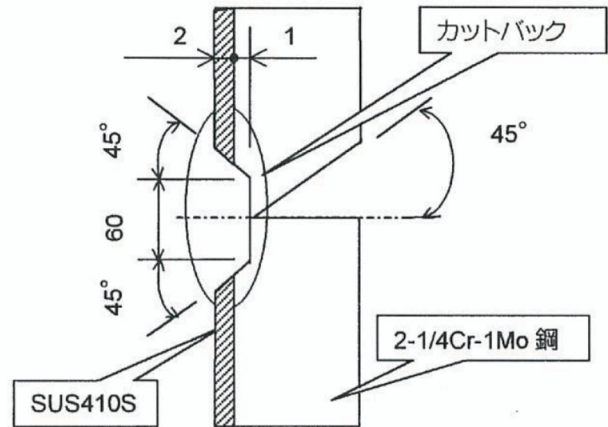


図3 カットバック形状

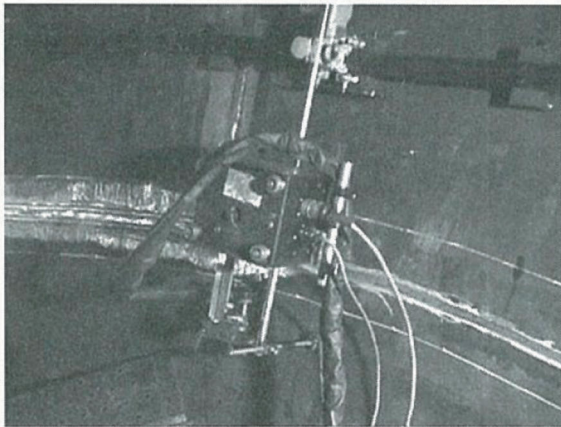


図4 現地プラズマガウジング装置



図5 オーバーレイ溶接ビード外観 (FCAW)



図6 マイクロドローリによる
胴板更新部分の引き込み

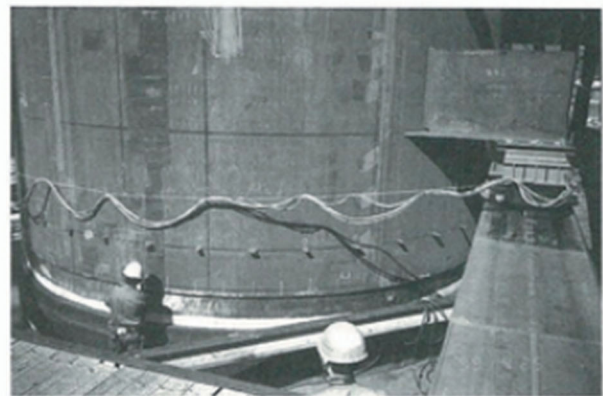


図7 マイクロドローリによる開先合せ

② エチレン分解炉のリチュービング

石油精製・石油化学プラントは高度成長期に建設された設備が現在も国内に数多く稼働しており、定期修理工事などで検出された欠陥評価とともに、金属材料の経年化に伴う材質変化の把握とその補修溶接の検討が重要課題である。

例えば、エチレン分解炉等の輻射管（ラジエーションチューブ）は極めて高温の使用環境のため

め、クリープ変形による曲がりや浸炭および酸化などの劣化が著しく、定期的な検査および補修が必要になる。劣化部を部分更新すると、必ず既設の経年材（熱履歴材）と新材の溶接継手が発生する。この時、既設材は、割れ感受性が高い浸炭等が生じた劣化部分を完全に除去し、さらに固溶化熱処理を実施後に、新材との溶接を施工する必要がある。固溶化熱処理により、金属結晶粒内・粒界に析出したクロム炭化物などの析出物を再固溶させ健全化を図っているにもかかわらず、既設材の溶接熱影響部において溶接割れが発生しやすい等の課題がある。

プラント設備の定期修理工事等における補修溶接は、必ず既設経年材の溶接部が発生する。経年材の溶接施工法確認試験は事前に実施出来ないケースが多いので、操業設備の熱履歴等による経年変化の程度を推定して溶接を施工する必要があり、新材の溶接よりも難易度が高い。溶接入熱をなるべく低くすることに加え、溶接金属が凝固する際に既設材側の熱収縮を少なくするウィービング操作、及びクレータ処理を新材側の開先面で行う等、補修溶接のテクニックが必要になる³⁾。

3. 石油化学プラントの経年劣化評価と補修溶接

石油化学プラントの経年劣化評価については、主に腐食による減肉量を推定することによる寿命予測が行われている。破壊力学の応用により一般的な割れ等の評価が出来るが、あくまでも実験室的な規模のモデル化の前提であり、現場の複雑な条件に適用するには危険な面があることを忘れてはならない。クリープや水素脆化の評価については更に難しく、一般的な金属材料のクリープデータは公開されているが、特殊な金属材料のクリープデータは公開されていない等の課題もある。加熱炉管などの機器メーカーでは、自社で取り扱う金属材料のクリープデータは蓄積しているので、定期的にクリープデータの更新の有無を確認するとともに、必要に応じて検査計画の見直しを行うことが重要である。

材料劣化が起りやすい高温機器の代表的な劣化現象に対する診断技術及び溶接補修の可否例を表1に示す⁴⁾。

表1 高温機器の経年劣化に対する診断技術および溶接補修可否（450℃以上の機器が対象）

機器区分	対象鋼種	問題となる劣化現象 ^{※1}	診断技術		溶接補修の可否	
			非破壊検査法	材料試験法 (サンプリング試験)		
一般加熱炉管およびボイラ管 (配管にも適用可)	炭素鋼	(1)黒鉛化 (2)水素侵食 (3)腐食	・肉厚測定 ・スンプ試験(金属組織試験観察) ・超音波検査など	・金属組織試験 ・引張試験 ・硬さ測定	材料に水素脆化、脱炭、その他の材料的劣化がなければ可	
	低合金鋼 (Cr-Mo鋼)	(1)クリープ (2)水素侵食 (3)腐食	・寸法検査(外径又は外周測定) ・肉厚測定 ・スンプ試験 ・硬さ測定など	・金属組織試験 ・クリープ破断試験 ・引張試験 ・硬さ測定など	クリープ割れ、水素脆化が発生している場合は不可	
	オーステナイト系 ステンレス鋼	(1)クリープ (2)シグマ相脆化 (3)促進酸化 (ハナシウム・アタック)	・寸法検査(外径又は外周測定) ・スンプ試験 ・硬さ測定 ・超音波検査など	・金属組織観察 ・クリープ破断試験 ・引張試験 ・衝撃試験など	クリープ割れがなく、シグマ相脆化の程度が軽い場合のみ、固溶化熱処理をすれば可	
特殊加熱炉管	スチーム・リフォー ミング反応管 ^{※2}	耐熱鋳鋼管	(1)クリープ (2)シグマ相脆化	・寸法検査(外径又は外周測定) ・超音波検査(透過法)など	・金属組織試験 ・クリープ破断試験 ・引張試験など	ほとんどの場合不可
	エチレン製造装置 分解炉管	・耐熱鋳鋼管 ・インコイロ800合金	(1)浸炭 (2)クリープ	・浸炭程度の測定 ^{※3} ・寸法測定(チューブの曲がり測定など)	・金属組織観察で 浸炭深さを測定	・浸炭程度が大きい部位を新管と取 替え ・クリープ割れが発生している場合 は不可
高温機器 (反応器、熱交換器など)	低合金鋼 (Cr-Mo鋼)	(1)焼き戻し脆化 (2)クラック	・鋼材中の不純物分析 ・金属組織観察 ・磁粉探傷試験 ・超音波検査など	テストピースを挿入 し必要時期に試験	表面クラックを除去後に、脱炭化処 理すれば可	
	低合金鋼 + ステンレス鋼 ライニング	(1)母材部:同上 (2)ライニング材の劣化 (フェライト系ステンレ ス鋼:475℃脆化)	・母材部:同上 ・ライニング材: 浸透探傷試験 金属組織観察 硬さ測定など	同 上	・母材部:同上 ・ライニング材: 475℃脆化 ⇒程度が軽い場合 は、固溶化熱処理をすれば可	

※1 応力腐食割れは除く。

※2 水素製造、アンモニア製造、都市ガス製造、オキソ合成ガス製造などの装置。

※3 電磁氣的に測定する浸炭度計を用いて測定。

例えば、加熱炉管などの取替え時期を決定する為の材料試験(サンプリング試験)を実施する場合、非破壊検査で経年的な損傷・劣化程度をフォローし⁵⁾、最も材料劣化が進行していると判断される部位からサンプリング材を採取する。クリープ割れ、水素脆化、脱炭等の材料劣化が無ければ、溶接補修が一般的に可能である。シグマ相脆化についても、その脆化程度が軽い場合は固溶化熱処理を行えば靱性が回復するので溶接補修が可能である。

応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) が広範囲に発生した場合、一般的に溶接補修が困難なので、ライニング補修や溶射などの環境遮断対策も検討する必要がある。局所的な SCC を溶接補修する場合、溶接補修後の残留応力や局部溶接後熱処理 (PWHT : Post Weld Heat Treatment) によって再度 SCC が発生する可能性が高い。SCC に対する恒久対策として、材質変更による機器更新を次回定期修理時に行う等の検討も重要である。⁶⁾⁷⁾

4. 山九メンテナンスセンターと人材育成

昨今の石油・石油化学プラント等のメンテナンスは、生産設備に対する「安全性・耐震性の確保」、ならびに設備の削減が進む中で益々重要度が増す「信頼性の向上」、「高稼働率の確保」、「長寿命化への高度な対応」が求められている、他方でベテラン保全マンの減少や溶接を含む熟練技能者の高齢化が顕在化している。

山九株式会社は千葉縣市原市に「山九メンテナンスセンター」を設置し、設備診断・補修溶接等のメンテナンス技術対応の強化とノウハウの蓄積に加えて、人材育成の拠点としている。さらに、日本工業検査株式会社を山九グループに加えること等で、設備検査から補修・改造までをワンストップで実施する一貫施工を可能にしており、私は山九メンテナンスセンターおよび日本工業検査株式会社の一員として、メンテナンス技術の強化を担った。

また、山九グループ内の溶接技術者・技能者のレベルアップを目的に、1977年より山九溶接競技大会を開始し、1992年に4部門(初級、被覆アーク溶接、半自動溶接、TIG+被覆アーク溶接(鋼管)の部)において国内4ブロック予選会からなる溶接競技大会に発展させ、現在ではグローバル化の推進から海外現地法人と一体となった「山九グローバル溶接競技大会」として、高品質な溶接施工体制や溶接技術・技能の向上を通じた人材育成の手段に発展させている。2018年第3回グローバル溶接競技大会における競技種目別課題を図8に、種目別・国別本大会参加者数を表2に、大会関係者の写真を図9に示す。なお、国内の溶接競技大会は毎年開催されており2021年度は第37回大会となり、グローバル溶接競技大会は5年ごとに開催されている。

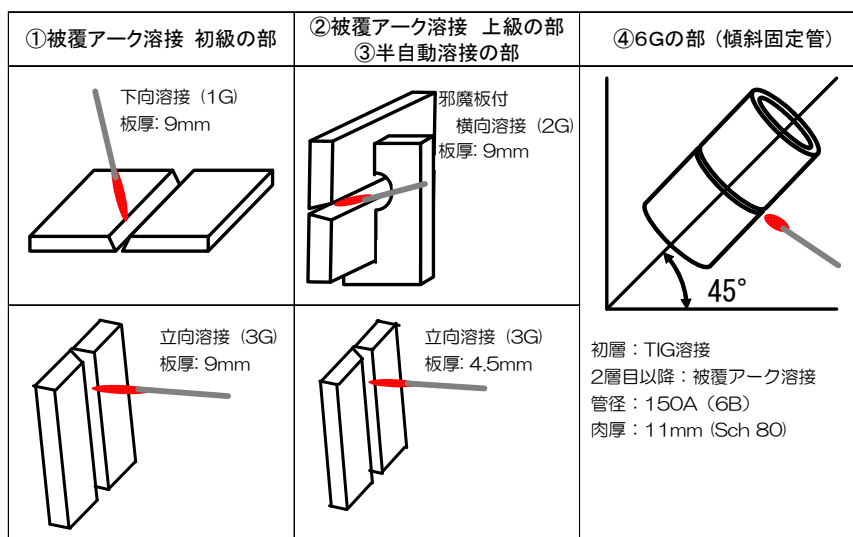


図8 山九グローバル溶接競技大会競技種目別の課題

表2 第3回山九グローバル溶接競技大会種目別・国別本大会参加者









	日本	ブラジル	中国	インドネシア	マレーシア	サウジアラビア	シンガポール	タイ	合計
									
初級	6	2	0	0	0	1	0	0	9
上級	5	0	0	0	1	0	0	0	6
半自動	5	0	0	0	0	0	0	1	6
6G	5	0	1	1	0	2	1	0	10
計	21	2	1	1	1	3	1	1	31



図9 山九グローバル溶接競技大会関係者の写真

山九株式会社は2022年秋にマレーシア ジョホール州に、図10に示す人材育成センター「SANKYU TECHNICAL ACADEMY」を開設し、将来に向けた高度な技術・技能を有する人材の確保並びに育成、自社技術・技能の高度化を通して、日本を含めた世界で活躍できるグローバルな技術・技能集団の育成を図る計画がある。https://ssl4.eir-parts.net/doc/9065/ir_material/153681/00.pdf

【施設概要】

- 名称 : 「SANKYU TECHNICAL ACADEMY」
- 開設時期 : 2022年秋
- 住所 : マレーシア国 ジョホール州ジョホール・バル イスカンダルプテリ市MEDINI開発区「Plot11」区画
- 敷地面積 : 16,794 m²
- 施設面積 : 7,560 m² (研修棟 4,140 m²、事務所棟 2,000 m²、宿泊棟 1,420 m²)
- 研修内容 : 階層別研修、安全教育、品質教育、技術研修、技能向上研修、競技大会など



図 10 「SANKYU TECHNICAL ACADEMY」完成予想図

前述した山九メンテナンスセンター（日本）から SANKYU TECHNICAL ACADEMY や中東等へ技術・ノウハウの移転を行い、SANKYU TECHNICAL ACADEMY から日本や中東等へ人材を供給するなどして、グローバルな動員体制の構築を目指している。技術・技能の高度化、ならびに安全・品質・生産性の維持向上を継続的に実現する手段として IoT や AI の利活用が期待される。

5. 高圧ガス保安行政における課題

現在、高圧ガス保安行政は大きな転換期を迎えている。国内の既存プラント設備の多くは老朽化しており人材不足も顕著である。体制が十分な事業者は自主保安に移行するなどしてスマート保安を加速させる、他方で過剰規制や旧来規制の改革の検討も必要な状況である。

我が国は「2050 年カーボンニュートラルの実現を目指すこと」を宣言している。水素は、多様な資源から製造でき、また、水の電気分解や、化石燃料と二酸化炭素の貯留・再利用技術を組み合わせることで、カーボンフリーなエネルギーとして活用可能であることから、カーボンニュートラル実現に向けた鍵になると期待されている。経済産業省のホームページに掲載されている「カーボンニュートラルの広がり」イメージを図 11 に示す。

(https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/images/img_main.png)



図 11 「カーボンニュートラルの広がり」イメージ

しかし、高圧水素ガス環境中で用いられる鋼材に取り込まれた水素は、水素脆化による損傷（水素誘起割れ等）を引き起こす可能性が懸念される。設備に使用する材料の高圧水素環境における特性（各温度におけるニッケル当量と水素適合性の相関等）の検討と材料選定が急がれており、オーステナイト安定化の評価指標となる鋼材の「ニッケル当量」について、高圧ガス保安法に定める技術上の基準（一般高圧ガス保安規則等の例示基準）の見直しが令和2年に行われた。溶接継手の高圧水素適用性評価についても研究開発が急がれているところである。

水素社会の到来により、近い将来高圧ガスの使用が大幅に拡大されることが予想されるなか、高圧ガスを安全安心に使用する為の更に次元の高い接合技術開発とその適用普及に向けて邁進すべきである。

6. おわりに

私は山九株式会社プラント・エンジニアリング部門において、溶接関連（金属材料、腐食防食、非破壊検査等も含む）の技術情報を探索し、技術課題を明確にして溶接施工することを主業務としてきた。その職務遂行においては、ユーザーの要求品質レベルを早い段階で見極め、都度発生する課題を事前に予測し、必要な技術の最適化対応を迅速に行う必要がある。また、品質マネジメントシステムの維持管理が、溶接管理技術者として重要な責務であると肝に銘じている。

我国の経済が今後も継続的に発展するためには、製造業がしっかりしていないと危ない。昨今のプラント・エンジニアリング業界では、大型プラントの建設プロジェクトが減少している、他方でプラント・メンテナンスのニーズは増加しており、経年変化した鋼材における溶接の難易度は建設時よりも高くなっている。更に水素社会の到来に向けた材料の接合ニーズにも準備が必要である。我国の製造業を支えてきたのは「モノ作りへのこだわり」であり、多くの製造業の生産技術の重要な部分を担っているのが溶接技術である。私は溶接管理技術者としての誇りと情熱を持って、高度化する高圧ガス保安の専門業務に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 永友隆則、佐藤秀樹、野口和久、” 堅型大口径ドラムの部分更新工事”、山九技報 Vol.10 2000 P28-34
- 2) 友松一郎、梶栗幸雄、”ステンレスグラッド綱の溶接技術の開発”、山九技報 Vol.10 2000 P58-63
- 3) 和田洋二、友松一郎、小林秀稔、” 耐熱鋳鋼 HP40 高温長時間使用材の材質変化およびその溶接性についての検討ーエチレン分解炉輻射管についてー”、山九技報 Vol.9 1999、 P16-23
- 4) 吉本辰也、登坂弘、友松一郎、” 石油・化学プラントにおける現場溶接補修”、山九技報 Vol.18 2008 P23-38
- 5) 友松一郎、和田洋二、萩原春実、為成邦洋、” 過流探傷試験によるラジアントチューブの欠陥評価”、山九技報 Vol.1 1991 P30-37
- 6) 吉本辰也、友松一郎、高宮和宏、” 化学プラントの経年劣化評価技術と化学技術部の取組み”、山九技報 Vol.11 2001 P15-24
- 7) 吉本辰也、井上洋、”化学プラントの設備診断”、山九技報 Vol.17 2007 P22-28

友 松 一 郎 （ともまつ いちろう） 溶接管理技術者特別級

<略歴>

1982年3月 芝浦工業大学 工学部 金属工学科 卒業
1982年4月 岡崎工業株式会社（現山九株式会社）へ入社
2010年4月 山九株式会社 プラント・エンジニアリング事業本部 メンテナンス技術部長
2013年7月 日本工業検査株式会社 代表取締役副社長
2015年4月 日本工業検査株式会社 代表取締役社長
2019年7月 経済産業省 産業保安グループ 高圧ガス保安室専門職員
現在に至る

<主な保有資格>

- ・溶接管理技術者 特別級
- ・非破壊試験技術者
 - 磁気探傷試験レベル3 (MT3)
 - 浸透探傷試験レベル3 (PT3)
- ・防錆管理士 (施設防食)