

特集：圧力容器の溶接

チューブラーリアクタの構造と溶接

株式会社 I H I

原子力セクター 横浜工場 生産技術部 兼広 尚典

原子力セクター 機器設計部 戸田 繁幸

1. はじめに

チューブラーリアクタとは内部に多数のチューブ（細管）を備えたリアクタであり、ペットボトルなどに使用される樹脂原料製造等を目的とした石油化学プラントで使用されている。石油化学プラントで使用される様々な機器のなかでもチューブラーリアクタはその中核となる重要な機器であり、機器内部で化学反応が起きていることから、高温高压に耐えられる圧力容器となっている。そのサイズ・重量は非常に巨大でありながら、耐圧部の継手は全て溶接により製作されており、その耐圧強度は高度な溶接技術によって支えられているといっても過言ではない。図1はチューブラーリアクタ出荷時の様子である。チューブラーリアクタは弊社横浜工場建屋内で組立て溶接され、図1のように横にした状態で出荷され、現地へ輸送される。



図1 チューブラーリアクタ（出荷時）

2. チューブラーリアクタの特徴と構造

チューブラーリアクタの構造を図 2 に示す。チューブラーリアクタ内部には数万本のチューブが取り付けられており、運転時にはこれらチューブの一本一本の内部には触媒が充填される。このチューブの内部を原料が流れる過程で化学反応を生じさせ、別の物質が生成される。内部を流れる原料や生成される物質は可燃物であったり、毒物であることも多く、確実な耐圧性が要求される。

また、チューブの外側は熱媒体が流れ、化学反応の際に発生する膨大な熱を除去している。熱媒体も様々な種類が使用されているが、腐食性が無く、高温でも物性が安定していて、且つ経済性の観点から、ボイラー水、熱媒油や溶融塩などが使用されることが多い。チューブの中を原料・生成物が流れ、外側を熱媒体が流れるが、これらが決して混じらないために管板とチューブの溶接にもシール性が要求される。

チューブラーリアクタ内径及び内部のチューブのサイズ・本数は、石油化学プラントの種類により様々であるが、最大クラスで直径は 8m 程度、チューブの本数は 3 万本程度となり、重量は一基あたりで 1200ton を超えるものも珍しくない。

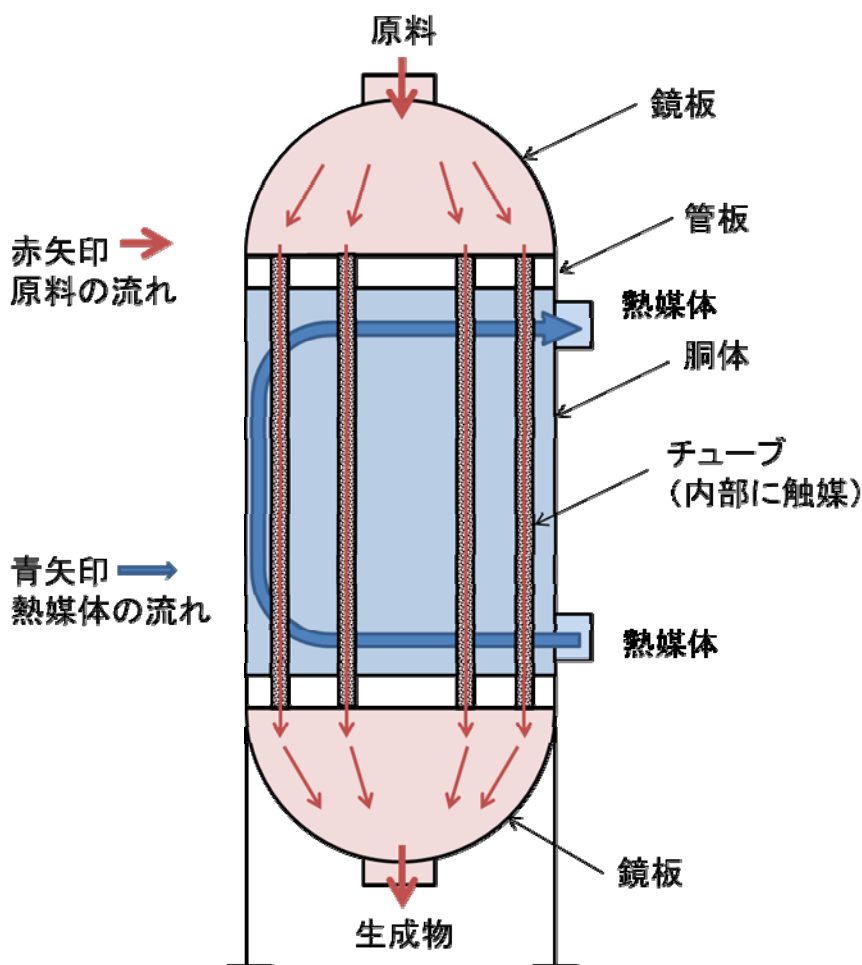


図 2 チューブラーリアクタの構造

3. チューブラーリアクタの溶接

本項では、巨大な熱交換器であるチューブラーリアクタを製作していく過程において主要となる溶接技術について紹介する。

3.1 耐圧部シェル厚肉溶接

耐圧部シェルは、圧力容器に要求される十分な耐圧性能を満足するため、100～150 mm 程度の板厚を有する極厚完全溶込み溶接構造であり、通常炭素鋼（P-1 材）あるいは低合金鋼（P-3 材）が採用される。一方で、リアクタ運転環境における熱サイクル下での健全性を確保する必要があることから、溶接部に要求される継手性能は、十分な継手強度のみならず適正な破壊じん性、延性、欠陥健全性（放射線透過試験、超音波探傷試験等の体積検査に対する要求品質の確保）を有することが求められ、慎重な溶接設計と施工管理が求められる。弊社では、継手性能要求を満足するため、板厚・構造に応じて主にタンデムサブマージーク溶接あるいは、パルスマグ溶接を適用している

(1) サブマージーク溶接

サブマージーク溶接は、主に耐圧部シェルの周継手・長手継手に対する溶接施工へ適用される。

図 3 に、当該工法による耐圧部シェル周継手の溶接施工状況を示す。



(a) 溶接状況（全景）



(b) 溶接状況（作業場所近傍）

図 3 耐圧部シェル周継手向けタンデムサブマージーク溶接

継手構造は、溶接施工能率と欠陥健全性を考慮した狭開先溶接が採用されている。これにより、施工能率の大幅な改善が経済性の向上に大きく寄与し、更に 100%放射線透過検査あるいは超音波探傷検査の適用により高度な溶接施工品質が達成されている。図 4 に狭開先タンデムサブマージーク溶接の開先形状および継手断面マクロ写真の例を示す。

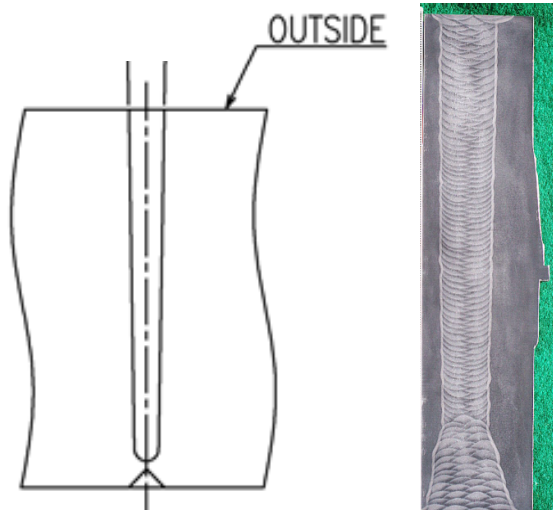
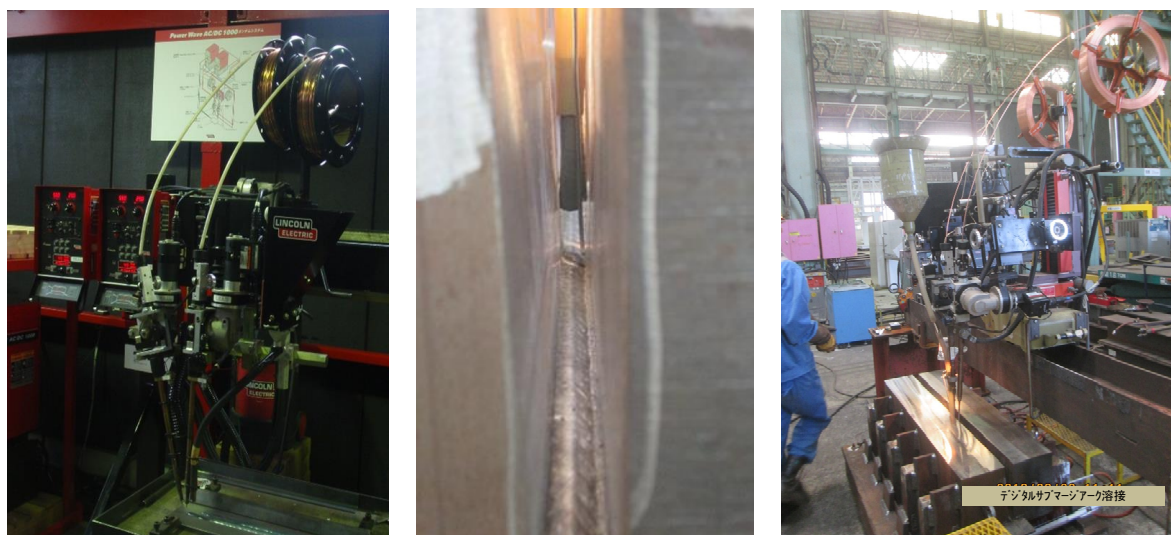


図4 狭開先タンデムサブマージアーク溶接の開先形状および継手断面マクロ写真

また、近年はデジタル溶接電源制御技術の向上により、サブマージアーク溶接においても、従来のアナログ溶接電源から、デジタル電源へとシフトしており、弊社においてもその採用を開始している。当該デジタル溶接電源では、直流矩形波電流を採用することにより、従来までのアナログ電源では不可能であったビード形状及び、溶込み形状制御が可能となった。この技術は、融合不良等の欠陥防止に有効だけでなく、適切な入熱管理・熱影響部管理によって、多層溶接施工における結晶粒の細粒化範囲の拡大ができ、継手性能（主に破壊じん性）の向上が可能となる。図5にデジタルサブマージアーク溶接の例を示す。



(a) 装置外観

(b) 開先内部とトーチ

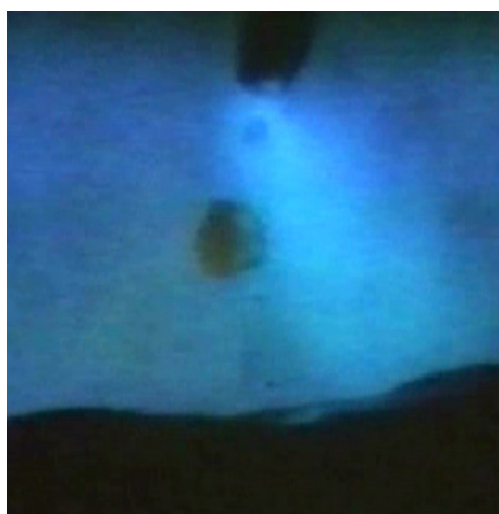
(c) 溶接状況

図5 デジタルサブマージアーク溶接

(2) パルスマグ溶接

パルスマグ溶接は、従来からのデジタルマグ溶接電源の発展に伴い幅広く採用されてきた溶接工

法であるが、近年は更なるデジタル波形制御技術の発展によりより繊細な溶滴移行制御が可能となり、弊社においても幅広く採用されている。マグ溶接では、適切な波形制御パラメータの設定により、適用する溶接シールドガス混合比、溶接電流・電圧、開先形状、更には溶接士の好みやくせに応じた最適な溶滴移行形態を選定することで、要求される放射線透過試験や超音波探傷試験等の体積検査に合格し得る溶込み形状を達成することが可能である。弊社では、溶接電源と適用する溶接施工条件（母材・溶材材質、シールドガス混合比、電流・電圧他）との組合せに応じた標準波形を独自に開発し、溶接品質の継続的な改善を展開している。更には、溶接電源制御技術と溶接自動化技術の組み合わせにより、作業性の向上による溶接士作業負荷の低減、作業能率の改善を展開している。図 6 に弊社にて適用しているパルスマグ溶接の溶滴移行例ならびに、自動溶接施工例を示す。



(a) 溶滴移行



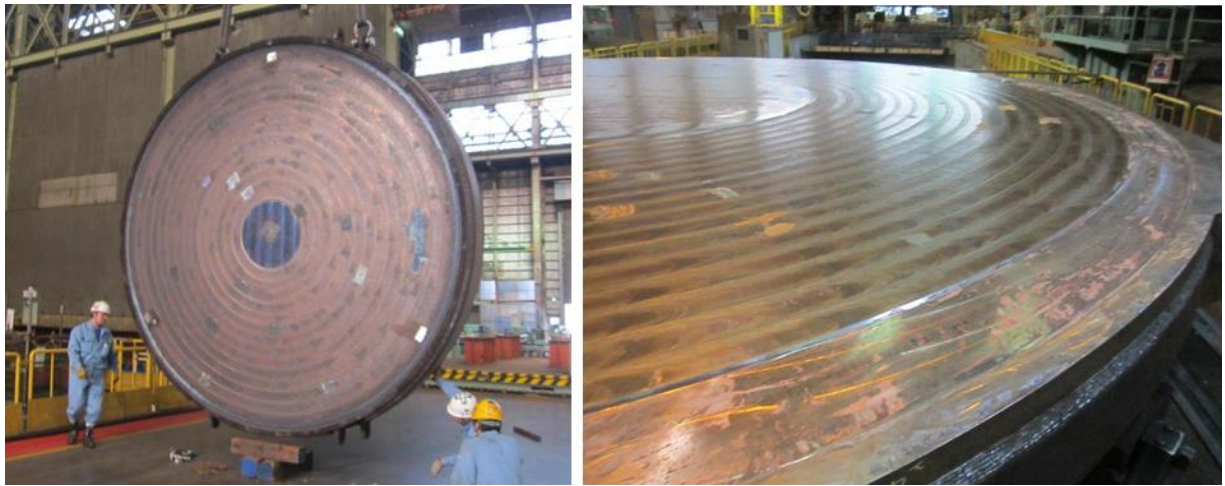
(b) 溶接状況

図 6 パルスマグ溶接

3.2 管板クラッド溶接

チューブラーリアクタでは、管内部を流れる流体の性状に応じて、リアクタ内部（上鏡、下鏡、一次側管板面、ノズル内面等）への耐食性肉盛溶接が要求される場合がある。特に管板面は、チューブラーリアクタの心臓部である熱交換用の管と、管板の溶接を形成する部位であることから、高い品質を要求される。また、広範な面積への溶接施工であることから、高効率な溶接施工が必要となる。このため当該部へは、従来より帯状電極エレクトロスラグ肉盛溶接によるオーステナイトステンレス耐食性肉盛溶接が一般的に適用されるが、近年は新たな溶接材料の開発に伴い、溶接速度を従来の1.5～3 倍程度に高速化した高速エレクトロスラグ肉盛溶接適用による施工効率の向上が達成されている。

一般的に帯状電極エレクトロスラグ肉盛溶接では、溶接速度の高速化に伴い希釈率が增大し、溶接部に要求される冶金的性能（化学成分組成やフェライト量）を達成することが難しくなる。そのため、溶接速度と電流（フープ送給量）に応じた適切な溶材（フープ、フラックス）選定と施工条件の確保が重要となる。弊社では、独自の施工技術開発により、当該高速エレクトロスラグ溶接による溶接速度の高速化を達成するだけでなく、適用するフープ幅の増大（従来比1.5 倍程度）により更なる施工時間の短縮と、溶接部冶金性能確保を達成している。図 7 に高速エレクトロスラグ肉盛溶接の施工例を示す。



(a) 肉盛り溶接部の外観



(b) 溶接状況

図 7 高速エレクトロスラグ肉盛り溶接

3.3 管と管板の溶接（管端シール溶接）

管と管板の溶接（管端シール溶接）は、チューブラーリアクタの性能を大きく左右する最も重要な溶接施工部位である。一次側流体と二次側流体を隔離するシール性能のみならず、強度部材としての継手引抜き強度、欠陥健全性が要求される。また、リアクタの大きさに応じて管の本数は様々であるが、最大で約3万本を超える。前述した通り、最重要部位であることを考慮すれば、膨大な数となる全ての溶接部の継手品質を高いレベルで保証する必要がある、その品質管理には慎重な溶接施工管理が要求される。

溶接部の継手品質に影響を与える因子は複数存在するが、溶接施工条件、溶接士、溶接装置等の溶接施工工程に直接的に影響を与える因子のみならず、母材成分組成、開先加工精度、清浄度、環境条件、組立精度等、多岐に渡る施工管理を確実に達成することが求められる。このためには、当該溶接工程だけでなく、リアクタの製作工程全体を通して各工程における品質要件を確実に達成し、その積み重ねの結果、当該部位の施工環境を高い次元で成立させる必要がある。図 8 に管端シール溶接品質に関する特性要因図の一例を示す。

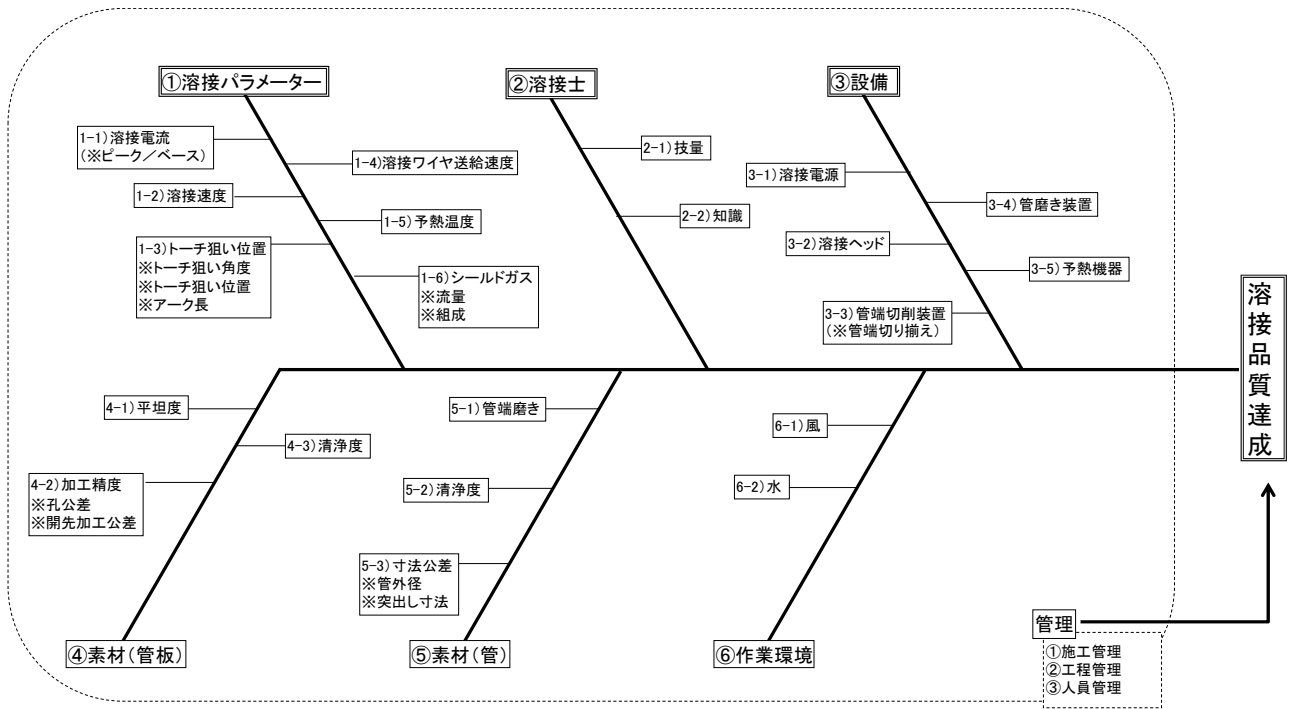


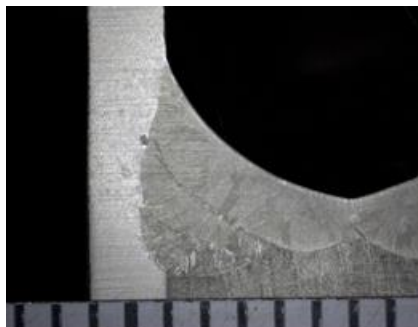
図 8 管端シール溶接 品質達成に係る特性要因図

当該部への溶接には、一般的に専用に開発された可搬式の自動ティグ溶接装置が適用される。当該溶接装置は、通常 1 人の溶接士が複数台の溶接装置を同時に操作し、溶接施工を実施する。図 9 に当該装置を適用した管端シール溶接の施工例を示す。



(a) 可搬式自動ティグ溶接装置

(b) 溶接状況 (全景)



(c) 溶接部断面マクロ



(d) 溶接部外観



(e) 溶接状況 (作業場所近傍)

図 9 管端シール溶接

4. おわりに

チューブラーリアクタは、石油化学プラントにおいて中核をなす最重要機器として位置づけられ、高い品質確保が要求されている。一方で、厚板・大型圧力容器の製作においても経済合理性に合致した製作コストが要求される。本稿では、弊社における品質と製作コストの両立を目指した溶接施工の一例を紹介した。今後は、各種溶接施工技術開発だけでなく、IT 技術の活用による厳密なプロセス管理により、重要な施工手順及びその要領などのシステム化や、容器製作ノウ・ハウのビジュアル化等を通して、品質向上および効率化に貢献してことが期待される。今後も、更なる製品品質の向上をめざし、さまざまな技術開発を展開していきたいと考えている。

<略歴>

兼広 尚典 (かねひろ たかのり)

1999年 横浜国立大学 工学部 生産工学科 卒業
2001年 横浜国立大学 大学院 工学部 生産工学専攻 修了
2001年 石川島播磨重工業株式会社 入社 原子力事業部 配属
2016年 株式会社 I H I 原子力セクター横浜工場 生産技術部 主査
現在に至る

戸田 繁幸 (とだ しげゆき)

1990年 武蔵工業大学 工学部 機械工学科 卒業
1990年 石川島播磨重工業株式会社 入社 原子力事業部 配属
2016年 株式会社 I H I 原子力セクター 機器設計部 主査
現在に至る