

# 圧力容器への半自動アーク溶接の適用

## Application of Semi-automatic Arc Welding Method for Pressure Vessels

化工機事業部 第1製造部 製缶課

渡辺 和義  
Kazuyoshi Watanabe

This paper describes the application of semi-automatic arc welding method using flux-cored wire for manufacture of pressure vessels, which is one of semi-automatic arc welding methods.

圧力容器を製作する上で溶接は不可欠であるが、種々ある溶接方法のうち、半自動アーク溶接の一つであるフラックス入りワイヤーを用いたフラックスコアードアーク溶接の当社での適用について紹介する。

### まえがき

当社では炭素鋼にグラスライニングした機器、ステンレス鋼、クラッド鋼またはその他の耐食金属を用いた反応機、重合機や貯槽などの機器を製作しているが、これらのほとんどが一般に言う溶接構造の圧力容器である。これらの溶接構造の圧力容器の機能および品質を確保する上で、溶接技術は非常に重要であり、そのためにいろいろな溶接方法や溶接材料が改善され、日々に進歩してきている。そして検査技術の向上に伴って、ユーザーからの試験、検査要求も増え、より安全でかつ信頼性の高い高品質の溶接が強く要求されてきている。

また一方、オイルショックを契機に低成長時代をむかえ、溶接作業の生産性向上のために高能率化が必要となってきた。

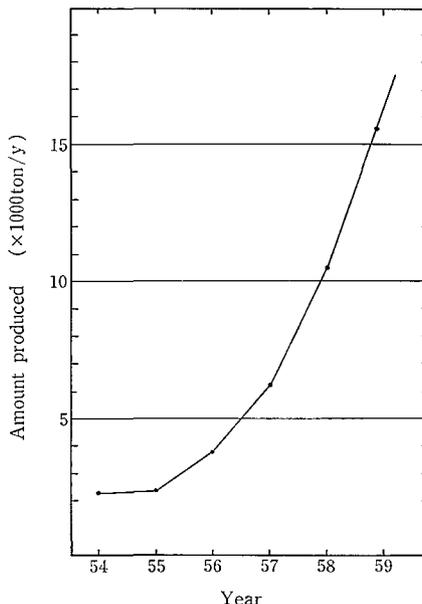
このような要求に応じる溶接として、最近、半自動アーク溶接の一つであるガスシールドアーク溶接が脚光を浴びており、溶接産業分野では被覆アーク溶接にとって代って、その使用率が急速に上昇している。第1図に最近の国内でのフラックス入りワイヤーの生産量推移を示す。ここでは、最近当社の溶接技術を改善し、高品質、高能率化を実現するため半自動アーク溶接、とくにフラックスコアードアーク溶接の圧力容器製作への適用について各種実験を行ったので簡単に紹介する。

### 1. 既存の溶接技術

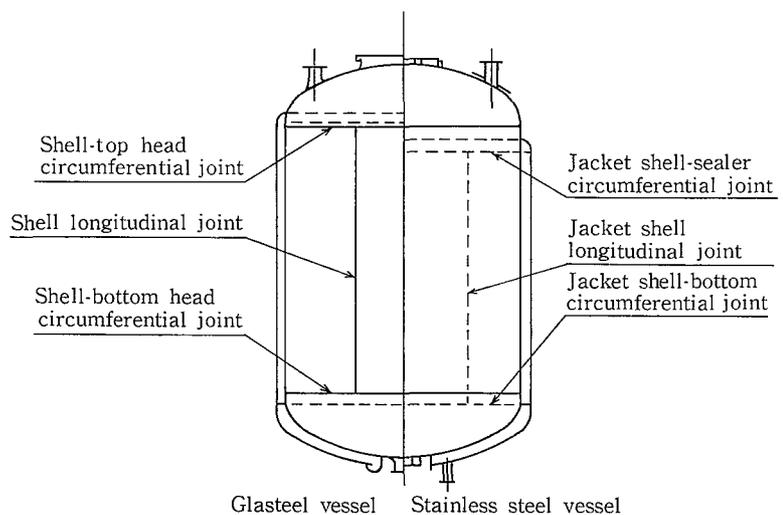
溶接には、その施工手法によって手溶接（マニュアル）半自動溶接（セミオートマチック）、自動溶接（オートマチック）の三つに分けられ、溶接方法の種類で分けると、第1表のように分類される。

#### 1.1 主要継手の溶接

ここで言う主要継手とは第2図に示す、胴の長手継手、胴と鏡の周継手であるが、これらは自動溶接であるサブマージドアーク溶接による内外面の溶接が一般的に用いられ



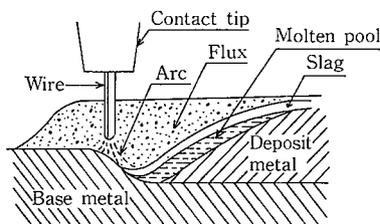
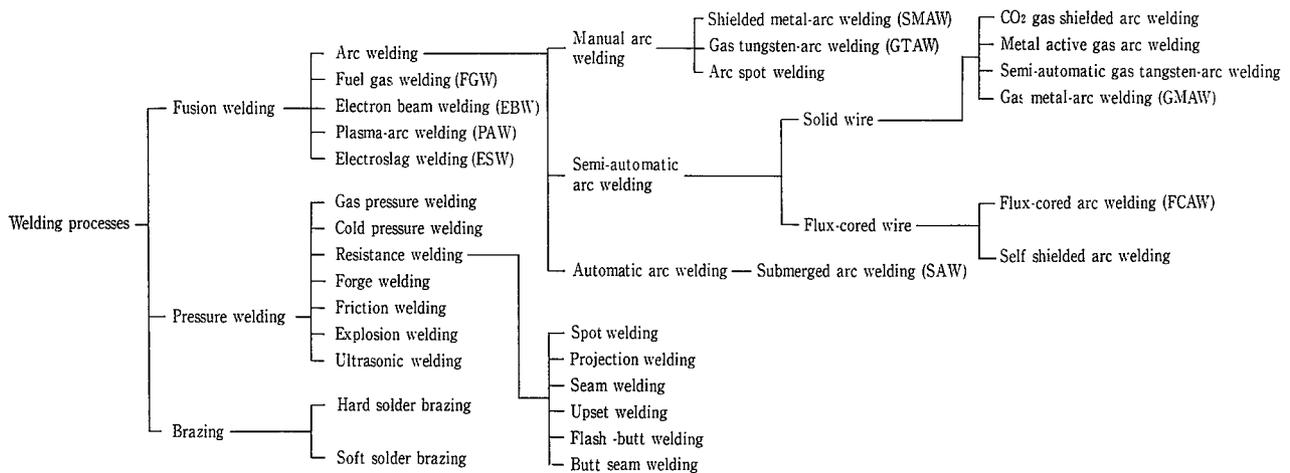
第1図 フラックス入りワイヤ（炭酸ガス用）の生産量推移（日本）  
Fig. 1 Production amount of flux-cored wire



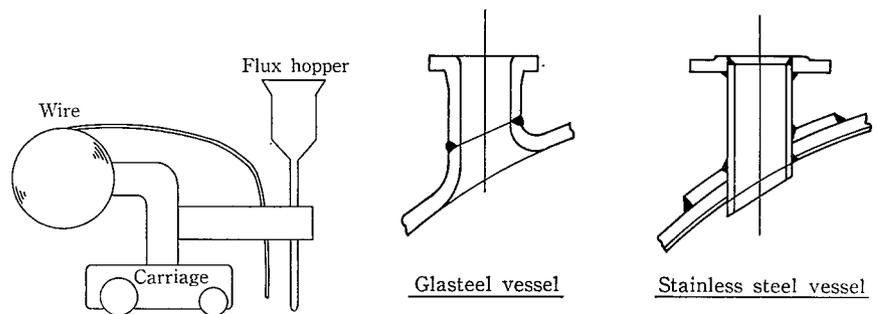
第2図 圧力容器主要継手  
Fig. 2 Main seams of pressure vessel

第 1 表 溶接方法の種類

Table 1 Welding methods



第 3 図 サブマージドアーク溶接法  
Fig. 3 Submerged arc welding



第 4 図 ノズル管台概略図  
Fig. 4 Nozzle necks

ている。

サブマージドアーク溶接とは第 3 図にその原理を示すが、コイル状に巻かれたワイヤー先端と母材との間にアークを発生させ、これに連続的に供給される粒状の溶剤（フラックス）で溶融部を完全に覆い、進行していく自動溶接法である。このサブマージドアーク溶接は大電流で施工されるため、溶着速度が大きく、能率かつ経済的で、信頼度の高い溶接継手が得られるので、今日下向きの溶接では最も広く用いられている方法である。

しかし、クラッド鋼の突合せ両側溶接継手で内面（合せ材）側の溶接の場合、サブマージドアーク溶接では粒状の溶剤で溶融部が完全に覆われてしまい、クラッド鋼の合せ材と母材との境界が確認できないので余り用いられていない。このためクラッド鋼内面の溶接は、被覆アーク溶接が用いられているのが通常である。

### 1. 2 ノズル管台、外部ラグ等の溶接

圧力容器には主要継手以外に、いろいろなサイズのノズル管台、また外部ラグ類がかならず取り付けられている。

これら部品類の溶接は、その溶接姿勢や溶接の作業性から、被覆アーク溶接が多く用いられている。アーク溶接の中で最も一般的に用いられている方法である。参考までに第 4 図にノズル管台の概略図を示す。

もちろん一部の溶接部位では、炭酸ガスアーク溶接、MAG溶接やMIG溶接といった半自動アーク溶接も使用されているが、ソリッドワイヤー特有のビード外観の悪さや、また、X線性能の悪さから、圧力容器への適用は十分なされていなかったのが実状である。第 5 図に半自動アーク溶接の原理を示すが、シールドガスに炭酸ガスを用いるものを炭酸ガスアーク溶接といい、不活性ガス（イナートガス）を用いてステンレス鋼など炭素鋼以外の溶接を行う場合をMIG溶接といている。またMAG溶接はそのガス成分を酸化性のあるガス（アクティブガス）に変えたもので一般的には、アルゴンガスと炭酸ガスとの混合ガスを用いて行う溶接で、スパッタの発生が炭酸ガスアーク溶接と比較し、少ないのが特長である。

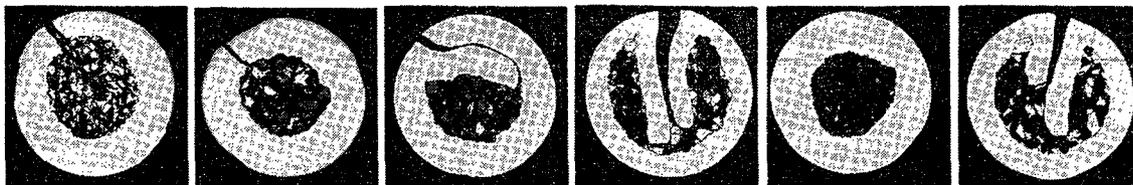
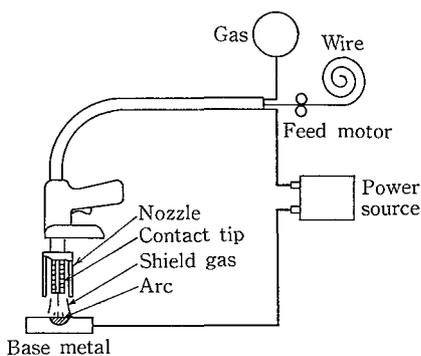
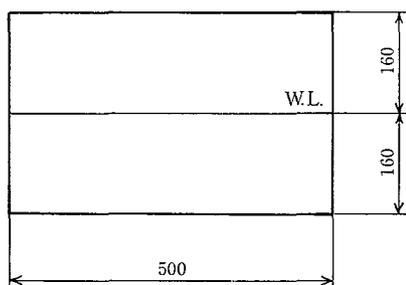


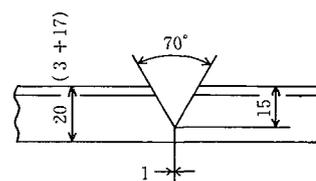
写真 1 各社フラックス入りワイヤー断面  
Photo. 1 Cross section of flux-cored wire



第 5 図 半自動アーク溶接法  
Fig. 5 Semi-automatic arc welding



第 6 図 クラッド鋼テストピース  
Fig. 6 Clad steel test pieces



Welding bevel detail  
Material : SUS 304 + SM41B

## 2. フラックスコアードアーク溶接の導入

以前から半自動アーク溶接方法としてソリッドワイヤーによるものと、ワイヤーの中にフラックスを入れたフラックス入りのワイヤーの二種類があったが、フラックス入りワイヤーはワイヤー内部にフラックスを包み込んでいることから、ワイヤー径が太く、またその性能もいまひとつで、圧力容器関係には余り使用されていなかった。

しかし、最近になって細径のワイヤーが生産され、その溶接作業性、また溶接性能が改善され、造船、橋梁関係で多く使用されるようになった。そして今ではフラックス入りワイヤーはソリッドワイヤー以上に使用されており、またステンレス鋼用のフラックス入りワイヤーも生産販売されるようになった。

当社では先に述べたように、クラッド鋼内面溶接（バッククラディング）ノズル管台、外部ラグ類の溶接は被覆アーク溶接が主流であったが、これらの背景を踏まえて、溶着効率が大きく、そしてビード外観、ビード形状のよいフラックス入りワイヤー、つまりフラックスコアードアーク溶接への変換を図った。

なお、写真1はフラックス入りワイヤーの断面を拡大したものである。

### 2.1 クラッド鋼への適用

先に述べたようにクラッド鋼突合せ継手部の内面側は、今まで被覆アーク溶接法を適用していたが、その溶着効率の改善を図るべく、バッククラディング部へフラックスコアードアーク溶接（ステンレス鋼）の試験を行った。

テストピースは第6図に示すSUS 304 クラッド鋼を用いて行なった。第2表に溶接方法およびその溶接条件を示す。

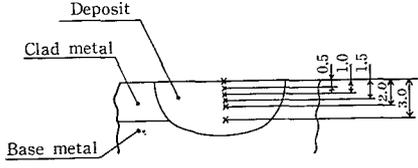
第 2 表 クラッド鋼溶接条件

Table 2 Welding data for clad steel (SUS304+SM41B)

Pass	Welding processes	Filler metal (trade name)	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Welding procedure
1	Shielded metal arc welding (SMAW)	LB-26	280~300	31	150	
2	Flux-cored arc welding (FCAW)	DW-309L	230~250	34~35	280	
3		DW-308L	240~260	34~35	260	
4			240~260	34~35	260	
5	Submerged arc welding (SAW)	MF-38×US-36	580~600	34	700	
6					400	
7						

第 3 表 溶接継手試験結果 (クラッド鋼)

Table 3 Results of welded joint test (Clad steel)

Test piece No.	Tensile test					Bend test		Radiographic examination
	Specimen's dimension (mm)	Sectional area (mm)	Load (kg)	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Location of fracture	Face bend	Root bend	
						2TR×180°		
1	18.2×25.0	455.0	23600	51.9	Base metal	Good	Good	JIS Code Gr.1 Good
2	18.6×25.0	465.0	23800	51.2	〃	〃	〃	
3	Chemical composition analysis (EPMA) %			Depth (mm)	Cr	Mn	Fe	Ni
				0	19.84	1.74	67.38	10.07
				0.5	19.47	1.87	67.27	9.60
				1.0	18.88	1.90	67.78	10.52
				1.5	19.27	1.76	68.12	9.46
				2.0	19.39	1.65	67.82	9.83
				3.0	17.70	1.64	68.88	10.70

第 4 表 腐食試験

Table 4 Corrosion test

1) 308 L

Huey Test (65% HNO <sub>3</sub> Corrosion test) (IPM)		Intergranular corrosion test (Strauss: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> • CuSO <sub>4</sub> test)	
As weld	0.00059	PWHT (650°C×2Hr A. C)	Bend test: No defect
PWHT (650°C×2 Hr A. C)	0.00093		
〃 (1050°C×0.5 Hr W. Q)	0.00044		

2) 316 L

5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Corrosion test (g/m <sup>2</sup> h)		Intergranular corrosion test (Strauss: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> • CuSO <sub>4</sub> test)	
As weld	5.8	PWHT (650°C×2Hr A. C)	Bend test: No defect
PWHT (1050×0.5 Hr W. Q)	5.6		

試験は機械試験、放射線透過試験およびバッククラッピング部の化学成分分析について行い、その結果を第 3 表に示す。

MIG 溶接と比較すると、スラグはビード上を覆うが、その剝離性や X 線性能が良く、溶接性能およびその作業性とも良い結果を得た。また現状の被覆アーク溶接との工数比較をみると、フラックスコアードアーク溶接では 1/2 ~ 3/4 の工数減が期待ができ、その性能も圧力容器製作に何ら支障はないと判断された。また、溶着金属部の耐食試験結果を第 4 表に示す。

## 2. 2 グラスライニング機器への適用

ガラスライニング機器への適用に当っては、フラックスコアードアーク溶接の溶接性はもちろんのこと、ガラスと溶着金属とのガラスライニング性についても検討を加えておく必要がある。

溶接性については、一般軟鋼では被覆アーク溶接の感じ度スムーズに溶接ができ、ステンレス鋼と同様の工数削減

が見込まれる。

またガラスライニング性については、ガラスと軟鋼溶接部の熱膨張の差によってクラックが発生し、ガラスがかからない場合がある。

第 7 図はガラスと軟鋼の熱膨張曲線である。溶接材料の多くに被覆剤やフラックスには作業性や溶接性を良くするために、いろいろな添加剤や合金元素が含まれているが、これらが溶接金属部の変態点を移動 (低下) させ、第 7 図の T<sub>0</sub>—T<sub>1</sub> 間で引張応力が大きくなり、クラックを発生させる。

これらを生じさせないことを確認することを含めて、フラックスコアードアーク溶接による突合せ継手部についての熱衝撃試験と再加熱試験を実施した。

熱衝撃試験はガラスライニングに許容される急激な温度変化を確認することであり、再加熱試験はガラスライニングをガラスの軟化温度まで加熱して昇温過程におけるクラックの発生の有無をチェックすることで、いずれも母材

第 5 表 溶接継手試験結果 (軟鋼・ステンレス鋼)

Table 5 Results of preliminary welded joint test (Carbon steel & Stainless steel)

Test piece	Tensile test					Bend test		Radiographic examination
	Specimen's dimension (mm)	Sectional area (mm <sup>2</sup> )	Load (kg)	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Location of fracture	Face bend	Root bend	
						2TR×180°		
Carbon steel to carbon steel	18.49×19.09	352.9	18020	51.0	Base metal	Good	Good	JIS Code Gr.1 Good
Carbon steel to stainless steel	18.61×19.08	355.0	18030	50.7	〃	〃	〃	
Stainless steel to stainless steel	19.26×19.05	366.9	23300	63.5	Weld metal	〃	〃	

および溶着金属の熱的挙動の変化，バラツキによりガラス層に異常な応力が発生し，フィールドでの使用中の熱的性能の劣化，焼成途中のトラブルによる品質低下を防止するために行う試験である。

写真 2 は熱衝撃試験の試験結果である。温度差230°C以上でクラックの発生が確認されるが，溶着金属によるものではなく，通常のガラスライニングと同等の性能を示している。

また再加熱試験についても250°Cから600°Cまで50°C間隔で炉中に入れ1時間放置後，スタティフラックステストを行ったが，全てについてクラックの発生は認められなかった。

### 2. 3 溶接施工法認可予備試験

压力容器等に新しい溶接方法を適用する場合は，法規に基づいて溶接施工法の確認試験を実施して，認可を取得する必要がある。

そのための予備試験として

- 1) 軟鋼+軟鋼の突合せ継手
  - 2) ステンレス鋼+ステンレス鋼の突合せ継手
  - 3) 軟鋼+ステンレス鋼の異材突合せ継手
- の三種類について，フラックスコアードアーク溶接法を用いて実施した。

写真 3 はそれぞれの継手部のマクロ写真および組織ミクロ写真を示す。

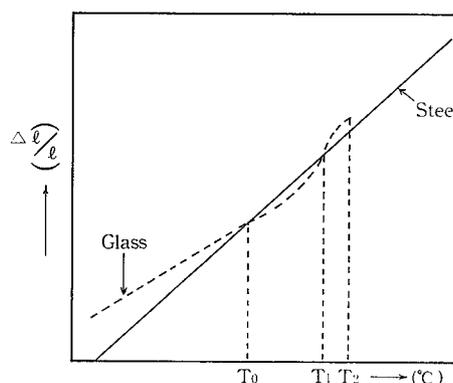
第 5 表は機械試験結果の一例を示す。

これらの結果より，フラックスコアードアーク溶接は軟鋼およびステンレス鋼とも，使用上は 何ら 差しつかえなく，実機器へ適用できるものである。

### 3. 溶接施工法確認試験の実施と認可

压力容器の製作においてはそのほとんどがある種の法規に基づき，構造や製作方法について規制がある。国内法規では，ボイラーおよび压力容器安全規則からなる第一種，第二種压力容器があり，また高圧ガス取締法の特定設備検査規則からの高圧ガス該当の容器があり，ほとんどがこの二つの法規で規制されている。溶接方法についてもこれらの規則により，実機器に適用する前に，溶接工法についての認可が前もって必要である。

第 6 表にフラックスコアードアーク溶接関係の取得した溶接方法の組合せを示す。



第 7 図 グラスと鋼の熱膨張曲線  
Fig. 7 Thermal expansion curve of glass and steel

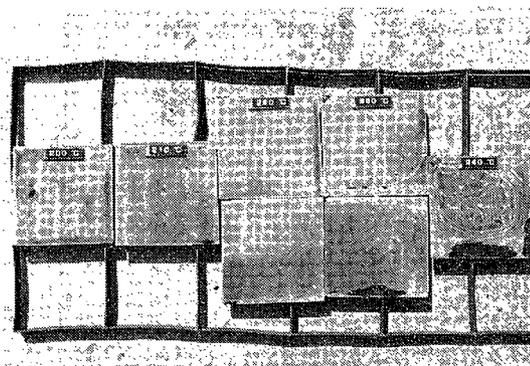


写真 2 熱衝撃試験テストピース  
Photo.2 Thermal shock test specimens

### 4. フラックスコアードアーク溶接の優位性

今までにフラックスコアード溶接の予備試験等を通してその成果を述べてきたが，ここにその溶接方法の特長についてまとめる。

- 1) 高能率の溶接が可能である。

被覆アーク溶接と比較し，フラックスコアードアーク溶接は溶着速度また溶着効率とも約二倍程度の能率向上が図れる。第 7 表にその一例を示す。

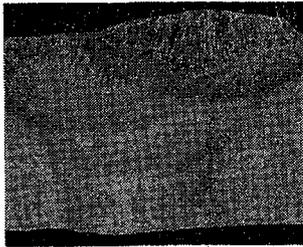
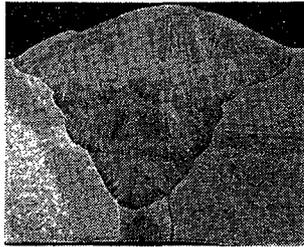
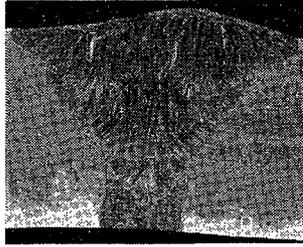
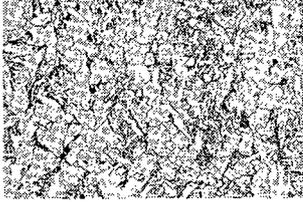
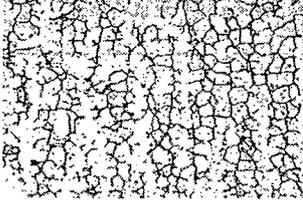
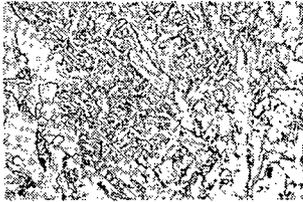
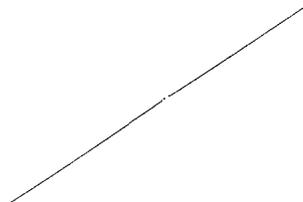
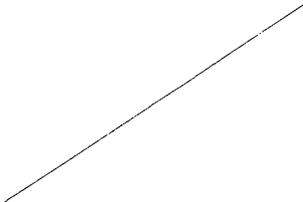
	Carbon steel to carbon steel	Carbon steel to stainless steel	Stainless steel to stainless steel
Welded joint			
Deposit metal			
Bond line			
// (Carbon steel side)			

写真 3 フラックスコアード溶接によるデボ部マクロ観察, ミクロ観察

Photo. 3 Photomicrographs & photomicrographs of cross sections of welded joints by flux cored arc welding

ソリッドワイヤーとフラックス入りワイヤーとの差ではソリッドワイヤーではスパッタの発生による損失, またフラックス入りワイヤーではフラックスによるスラグの損失があり, 両者の差異は余りない。

2) ビード形状・外観が優れている。

これは被覆アーク溶接, またソリッドワイヤーによる炭酸ガスアーク溶接やMAGおよびMIG溶接と比較してであるが, ビード形状・外観が優れている。

一般に隅肉溶接部は放射線透過試験等の溶接部内部の検査は施工しないため, そのビードの外観だけで溶接の良否が判断される。まして压力容器では, できるかぎり溶接姿勢を下向きにしようとするが, 被溶接物の形状や溶接治工具類に限度があり, 立向きや上向きの溶接姿勢を取らざるをえない場合がある。このような時はその姿勢にかかわらず, 良いビード形状やその外観が良く保てるフラックスコアード溶接は, その品質を維持できるので, メーカーにとってもユーザーにとってもメリットがある。

3) 溶込み形状がよく, RT性能がよい。

MAG溶接やMIG溶接と比較した場合, フラックスコ

アード溶接はアークがソフトで広がりがあり, MAG溶接やMIG溶接の場合におこる融合不良等が少ない。第8図にソリッドワイヤーとフラックス入りワイヤーの溶込状況の差を示す。この融合不良が少ないため, 多層盛り溶接においてもRT性能がよくなっている。

4) スラグの剥離性がよい。

被覆アーク溶接と比較した場合, 一般の压力容器に使用される被覆アーク溶接棒は低水素系が多く, これらは他の溶接棒と比較するとスラグの剥離性が悪い。しかしフラックスコアードアーク溶接では拡散性水素量はほぼ低水素系と同等で, そのスラグ剥離性はほとんどが自然に剥離するものが多く, 数段優れているといえる。

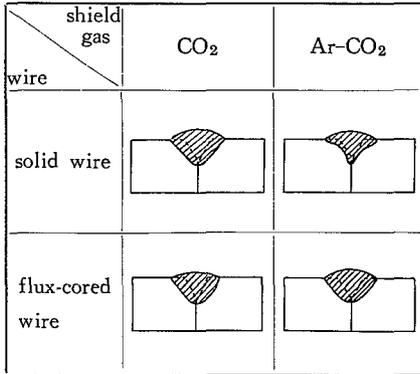
5) 溶接工数の節減

先に述べた高能率の溶接が可能であるため, 当然その溶接工数も節減でき, 生産性の向上を図ることができる。

第9図に被覆アーク溶接のコストを100とした時の他の溶接方法との比較を示す。図から明らかなようにフラックスコアードアーク溶接は被覆アーク溶接と比較し, 約1/2以下である。フラックス入りワイヤーとソリッドワイヤーを

第 6 表 取得した溶接方法の組合せ (一圧, 高圧ガス)

Table 6 Combination of qualified welding procedure (P.V, 1HPG)



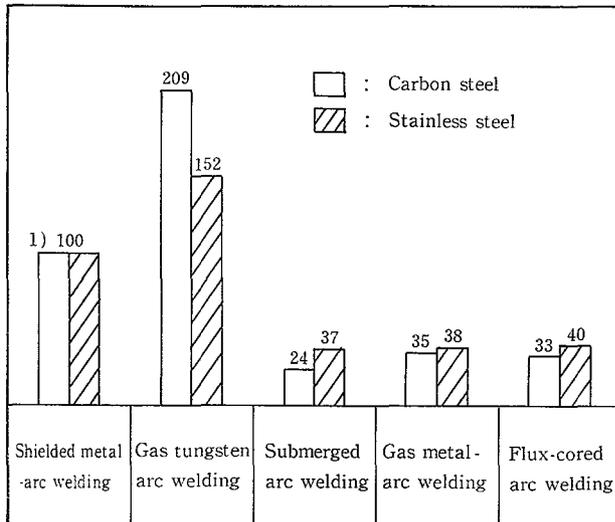
第 8 図 溶込み状況  
Fig. 8 Shape of penetration

	Welded joint (combination of base metal)	Combination of welding processes
1	Clad steel to clad steel	Flux-cored arc welding (FCAW) Flux-cored arc welding+Submerged arc welding (FCAW+SAW)
2	Carbon steel to Carbon steel	Flux-cored arc welding (FCAW)
3	Stainless steel to stainless steel	Flux-cored arc welding (FCAW) Flux-cored arc welding+Submerged arc welding (FCAW+SAW) Gas tungsten arc welding+Flux-cored arc welding (GTAW+FCAW)
4	Carbon steel to stainless steel	Flux-cored arc welding (FCAW)
5	Stainless overlay to carbon steel	Flux-cored arc welding (FCAW)

第 7 表 溶着効率と溶着速度

Table 7 Deposition efficiency & deposition rate

Welding processes	Deposition efficiency (%)	Deposition rate (g/min)
Shielded metal-arc welding (SMAW)	50	40
Flux-cored arc welding (FCAW)	85	85



NOTE 1) Based on shielded metal arc welding cost set at 100 %

第 9 図 溶接方法による経済比較  
Fig. 9 Comparison of cost for welding processes

比較するとややコストはソリッドワイヤーが優っているが RT性能やその手直し工数を考えると、フラックス入りワイヤーが数段優っていると見える。

む す び

本稿において、重合機や反応機類の圧力容器を製作する場合の溶接技術について、とくに半自動アーク溶接のうち

最近目ざましい伸びをしめしているフラックスコアードアークについて述べ、当社でのフラックスコアードアーク溶接方法の適用やその施工法確認試験等について紹介したが、今後も圧力容器を製作する上で、より高品質な、より信頼性ある製品をユーザーへ提供するように進めていきたい。

圧力容器の製作に関しては、ユーザーの要求、材料の選定、設計そして溶接、これらを一体として考えることが必要である。グラスライニング機器、ステンレス鋼機器等の圧力容器メーカーとして、当社溶接技術の発展過程のほんの一部の紹介であるが、本稿が圧力容器を実際に発注されているユーザーとの情報交換の一つとして、参考になれば幸いである。

〔参考文献〕

㈱神戸製鋼所 DW-100カタログ  
 ㈱神戸製鋼所 溶参資第 880 号ステンレス鋼フラックス入りワイヤー  
 溶接学会編 新版溶接技術入門  
 日本溶接協会 鋼構造溶接工作法通論  
 神鋼フアウドラ-技報 Vol. 29 No. 1