特 集

低温貯槽の大型化と
溶接技術の動向

片山 典彦

今村 和久

山川 武人

広瀬 仁志

③ 地上式低温貯槽と溶接技術
—現状と今後の動向—*

片山 典彦**, 今村 和久**
山川 武人***, 広瀬 仁志****

Welding Technique for Low Temperature Service Storage Tank
—Trend and Subjects—

by Norihiko Katayama**, Kazuhisa Imamura**,
Taketo Yamakawa***, Hitosi Hirose****

キーワード: LNG, LNG 地域貯槽, 970Ni 鋼, 溶接技術, 非破壊検査, 大型貯槽

1. はじめに

LNG は地球規模の環境問題からもクリーンエネルギー源としての特長が再び大きく評価され, 世界的に需要増大にある。わが国では地下式では 14~20 万 kl, また地上式では 14 万 kl 容量¹⁻³⁾のいずれも世界最大級の LNG 貯槽が建設中で, これらを貯蔵する貯槽はサテライト基地分を含め 170 基以上に及んでいる。LPG に関しては日本はアメリカに次ぐ世界第二の消費国であるとともに, 世界の LPG 貿易量の約 50% を占める最大の輸入国となっている。低温 LPG 貯槽は 1989 年末で稼働中のものは 140 基 (3 基が地下式メメン貯槽, 残りすべては地上式平底円筒形金属二重殻形式) で, このうち貯槽容量 4 万 t 以上の新鋭大形貯槽は 27 基である。平底低温貯槽の基数は全体の 1.32% にすぎないが, 貯蔵能力の 75.5% は同タンクが占めている⁴⁾。低温 LPG 貯槽はさらに増強の必要性が叫ばれているものの, 立

地難などから貯槽基数, 容量は 1989 年末から変わっていない。

ここでは紙面の都合もあり, 地上式低温貯槽のうち, LNG 貯槽に絞って溶接技術の現状と将来動向について紹介する。

2. 大容量 LNG 貯槽の構造と使用材料

大容量 LNG 貯槽としては下記の 1), 2), 4) のものが建造されており, さらに 3), 5) といった形式のものも検討されている。

- 1) 地上式金属二重殻平底円筒形貯槽
- 2) 地上式 PCLNG 貯槽
- 3) ピットインタイプ金属二重殻貯槽
- 4) 地下式 LNG 貯槽
- 5) 地中式 LNG 貯槽

地上式 LNG 貯槽の形式としては 1) の金属二重殻のものが世界的に最も多くの建造実績を有している。この場合, 極低温の LNG (-162°C) に接する内槽材料には, 低温でも十分な強度と靱性を有する 9%Ni 鋼またはアルミニウム合金 (A 5083-0) が用いられるが, 大形化に伴い, 最近では 9%Ni 鋼製のものがほとんどである。また断熱材およびこれを保持するための外槽材には軟鋼が用いられる。金属二重殻貯槽の構造を図 1 に示す。

最近では土地の有効活用, および安全性のさらな

*原稿受付 平成 6 年 2 月 1 日

**正 員 石川島播磨重工業(株) Member, Ishikawajima Harima Heavy Industries Co., Ltd.

***正 員 川崎重工業(株)鉄鋼事業部 Member, Kawasaki Heavy Industries Co., Ltd.

**** トーヨーカネツ(株) Toyo Kanetsu K.K.

図 1 地上式金属二重殻 LNG 貯槽の概略図

図 2 世界最大級 PCLNG 貯槽の外観
(容量: 140,000 kl)

る向上を目指して、PC コンクリート製防液堤を金属二重殻の外槽に限りなく近づけ、外槽と一体化させた PCLNG 貯槽が開発され、地上式としては世界最大級の 14 万 kl 容量のものが建設されている。図 2 に同貯槽の外観を示す。内槽の直径は 79 m、最高液面高さは約 28.6 m で、最大板厚 40 mm の 9%Ni 鋼が用いられており²⁾、さらに容量 20 万 kl クラスの貯槽も検討が進められている。

3. LNG 貯槽用材料の変遷と現状

3.1 鋼板

内槽に用いられる 9%Ni 鋼の最大板厚は、容量 8 万 kl クラスでは 30 mm 程度であるが、容量 14 万 kl クラスになると 40 mm 程度となる。現行 JIS 規格の最大板厚 50 mm まで使用できるとすれば容量 20 万 kl 程度のものが製作可能となる。鋼板に関しては、すでに板厚 38~55 mm 程度のものにつき、強度および破壊特性の面から十分な検討が加えられている^{5,6)}。これらは転炉精練、および炉外精練により溶製した細粒キルド鋼を圧延したもので、極めて清浄な鋼質を有するとともに、厳格な成分調整と最適

表 1 厚肉 9%Ni 鋼の性質

Thickness (mm)	Chemical composition (wt%)						Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elong. (%)	v _i (-196℃) (J)
	C	Si	Mn	P	S	Ni				
40	0.05	0.25	0.64	0.001	0.001	9.46	622	734	33.0	262
40	0.05	0.25	0.57	0.002	0.001	9.46	678	718	30.0	256
45	0.05	0.22	0.65	0.001	0.001	9.21	657	712	30.5	248
45	0.05	0.24	0.56	0.002	0.001	9.39	613	712	33.0	260
50	0.05	0.05	0.58	0.002	0.001	9.41	636	731	31.0	251
50	0.05	0.23	0.62	0.001	0.001	9.23	612	710	34.3	237
55	0.05	0.05	0.58	0.002	0.001	9.41	642	742	30.0	233
55	0.05	0.25	0.66	0.001	0.001	9.32	604	716	33.9	257

熱処理条件の設定により、強度とのバランスがとれた高レベルのじん性を有するように配慮されたものである。その性質の一例を表 1 に示す。また低 C-Mo 添加タイプの厚肉 9%Ni 鋼 (板厚 20~60 mm) に関しても強度、じん性面から優れた特性を有することが報告されている⁷⁾。

3.2 溶接材料

9%Ni 鋼製 LNG 貯槽用溶接材料としては、極低温下で優れた強度と靱性を有する 70%Ni 合金系材料が用いられている。自動溶接用には母材の希釈による強度低下の影響がインコネル系溶接材料に比べてより少なく、また耐高温割れ性の優れたハステロイ系のものが開発され、現在では 70 Ni-20 Mo-3W 系のハステロイ B 系のものが一般的に使用されている。被覆アーク溶接用には従来から実績のあるインコネル系溶接材料が一般的に用いられている。自動溶接部の補修などには X 線透過度等を考慮してハステロイ B 系被覆アーク溶接棒が用いられているが、電気抵抗が大きいインコネル系溶接材料に比べて溶接性の点ではやや難がある。70%Ni 系フラックス入ワイヤの開発も進められているが、現時点では適用実績は少ない。今後は非耐圧部のすみ肉溶接などへの適用が進むと予測される。溶接材料としてはティグ溶接 (GTAW)、サブマージアーク溶接 (SAW)、および被覆アーク溶接 (SMAW) 用のものが 1985 年に JIS に制定されている。溶接材料の性質の例を表 2 に示す。

4. 溶接技術の変遷と現状

4.1 内槽の溶接

9%Ni 鋼製 LNG 貯槽 (内槽) に適用されている現地における溶接法の変遷を表 3 に示す。施工法、適用開始時期に関してはファブリケータにより若干異なるが、高品質な継手が得られる自動 GTAW 法の大幅な適用拡大が図られている⁸⁻¹⁰⁾。

1) 自動ティグ溶接法

ミグ溶接法に比べて溶着速度の点では劣るが、極

表2 溶着金属の性質の一例

Welding method	JIS	Brand name	Chemical composition (wt%)												$\sigma_{D.2}$	$\sigma_{T.S.}$	El.	vE_{198}
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Fe	(MPa)	(MPa)	(%)	(J)	
SMAW	Z3225 D9Ni-1	YAWATA WELDB(M) NIC-70S	0.09	0.31	3.21	0.008	0.005	67.7	14.9	2.2	-	1.7	9.9	419	680	41.0	64	
			0.08	0.34	2.02	0.004	0.003	67.2	14.3	4.0	0.6	1.7	9.9	421	686	45.0	67	
	Z3225 D9Ni-2	NITTETSU WELD196 NIC-1S	0.04	0.13	2.17	0.002	0.002	75.3	-	17.6	3.2	-	2.5	442	742	46.0	111	
			0.03	0.29	1.00	0.003	0.002	68.3	1.9	18.3	2.8	-	7.4	451	725	46.0	79	
GTAW	Z3332 YGT9Ni-2	NITTETSU FILLER196 TGS-709S	0.02	0.03	0.03	0.003	0.005	74.0	-	19.4	2.8	-	1.2	487	742	40.1	157	
			0.02	0.01	0.01	0.001	0.001	70.5	2.0	19.1	2.9	-	5.5	470	764	49.0	147	
SAW	Z3333 FS9Ni-H	FILLER196*FLUX10H US-709S*PFN4	0.03	0.40	1.15	0.006	0.004	73.2	-	19.4	2.9	-	2.5	398	701	49.0	78	
			0.03	0.74	0.58	0.002	0.001	62.2	1.7	17.2	2.7	-	14.9	402	686	42.0	83	

表3 9%Ni鋼製 LNG 貯槽における現地溶接の変遷

Location	Main Joints of inner tank	Kind of Joint	'70	'75	'80	'85	'90	'95
Roof	Roof plate X Roof plate	Butt	SMAW		SMAW, GTAW(MC)			
		Fillet	SMAW					
	Roof plate X Frame structure Frame structure	Fillet	SMAW					
	Roof plate X Knuckle plate	Fillet	SMAW					
	Knuckle plate X Knuckle plat	Butt	SMAW			GTAW(MC)		
Shell	Vertical joint	Butt	SMAW	GTAW	GTAW(MC)			
	Horizontal joint	Butt	SMAW	SAW		SAW, GTAW(MC)		
	Shell plate X Knuckle plate	Butt	SMAW			SMAW, GTAW(MC)		
Bottom	Bottom plate X Bottom plate	Butt	SMAW	SAW, GTAW		GTAW(MC)		
	Annular plate X Annular plate	Butt	SMAW		SAW	GTAW(MC)		
	Bottom plate X Annular plate	Butt	SMAW	SMAW, SAW		SAW, GTAW(MC)		
	Shell plate X Annular plate	T-Fillet	SMAW			SMAW, SAW-T		

Note: SAW-T: Tandem SAW

めて高品質な継手が安定して得られること、溶接ビード形状のコントロールが容易で、特に金属光沢のある滑らかな余盛り形状が得られるため、非破壊検査のための余盛りのグラインダ作業や、中間層でのビード表面の酸化被膜の除去などの作業がほとんど不要なこと、溶接を中断して再スタートさせる場合でも、欠陥のない安定した溶込みが得られ補修をほとんど必要としないことなど多くの利点を有し、総合的に高効率であるとの判断から、わが国では大幅に適用されている。側板立継手に適用が開始されたのは1972年ごろからであったが、1979年頃からワイヤに直流電流を流し、磁気制御を行うMC-

GTAW法が開発され、溶着速度が30-40 gr/minレベルに向上するに伴い適用対象継手が拡大し、現在では表3に示すように主要な突合せ継手に大幅に適用されている。溶接入熱は極低温におけるじん性に配慮して通常最大4.5 kJ/mm以下に抑えられている。内槽側板周継手の溶接には直流電源を用いたSAW法が一般的に用いられているが、ビード余盛りのグラインダによる除去作業工数の削減や、裏はつり作業におけるガウジングの騒音および粉塵の問題から同継手に対しても、GTAW(MC)法や2電極でのGTAW法¹⁰⁾を採用しているものもある。図3にGTAW(MC)法による溶接状況を示す。

板厚 40 mm および 50 mm 材に対する立向溶接条件の一例を図 4 (A) に示す。初層は銅裏当金を用いて裏波ビードを形成し、グラインダのみの裏はつりを行っている。

2) サブマージアーク溶接

側板周継手は溶接量が多いことから、耐高温割れ性の優れたハステロイ系溶接材料の開発に伴い、1972 年頃から横向き姿勢での SAW 法が適用されている。通常は $\Phi 1.6$ mm あるいは $\Phi 2.4$ mm のシングルワイヤを用いて直流電源を用いて施工されているが、溶着速度の向上を図った 1 電極 2 ワイヤ方式の高電流密度 SAW 法も一部適用されている¹¹⁾。通常法による厚板材の施工条件の一例を図 4 (B) に示す。またブロック工法を採用する場合には、側板周継手の一部を下向き姿勢で交流電源を用いて施工している。厚板を X 開先で溶接する場合にも銅裏当金とグラスファイバパッキング材を用いて裏波を形成し、ガウジングによる裏はつりを省略する工法が採用されている。通常 $\Phi 3.2$ mm のシングルワイヤを用い、溶接入熱として 3.0 kJ/mm 以下で施工されてい

図 3 GTAW (MC)法による周継手の溶接状況

るが、最近では溶接入熱を同レベルに抑えた 1 電極 2 ワイヤ方式の高電流密度 SAW 法も一部適用されている。現地溶接と同じく溶接量が多い側板×アニュラプレート板の T 継手にはタンデム SAW 法も適用されている。現地における底板やアニュラプレート同志あるいは底板×アニュラプレートの突合せ溶接にも SAW 法が適用されているが、最近は安定してより高品質な継手が得られる GTAW 法にほとんど変わっている。

3) 被覆アーク溶接

自動溶接法の発達に伴い、現在主要な溶接継手は自動溶接に切り替えられているが、複雑な構造や溶接線が短く自動化しにくい屋根骨や補強部材などの付属品に関しては、現地および工場においても被覆アーク溶接法で行っている。

4.2 外槽の溶接施工

金属二重殻貯槽の場合、外槽は内槽から熱伝導を受ける一部を除き軟鋼が使用されている。これまで標準的であった 8 万 kL 容量の貯槽では、外槽側板の板厚は 10~19 mm 程度であるが、立継手の溶接には 1983 年頃より貯油タンクに適用され始めた狭開先エレクトロガス溶接法 ($\Phi 1.6$ mm のフラックス入ワイヤを使用) の適用が始まり、現在も引続き適用されている。また周継手の溶接には横向き SAW 法 (通常法、あるいは 1 電極 2 ワイヤ方式高電流密度法) が採用されている。また屋根や底板のすみ肉溶接には従来の被覆アーク溶接に代わり、フラックスワイヤを用いたマグ半自動溶接が多く用いられている。

5. 貯槽の大形化と施工技術の動向

貯槽の大容量化を可能にするには構造解析、材料、溶接施工、非破壊検査などの総合的な技術開発が必

Welding method	(A) GTAW(MC), Vertical, Wire: $\Phi 1.2$ mm		(B) SAW, Horizontal, Wire: $\Phi 2.4$ mm	
Pass sequence
Thickness, (mm)	40	50	40	50
Current, (A)	230-280	230-300	380	360-380
Voltage, (V)	10-11	10-11	26-28	26-28
Travel speed, (cpm)	4.0-8.0	4.0-5.0	40-55	35-65
Heat input (kJ/mm)	2.30-4.20 (2.55)	3.36-4.50 (3.80)	1.12-1.54 (1.33)	0.86-1.60 (1.26)

Note: () mean value

図 4 厚肉 9%Ni 鋼の溶接条件の一例

要となる。ここでは特に溶接施工の観点から技術開発が進んでいるいくつかの例について述べる。

5.1 継手の安全性評価

厚肉化に伴い溶接継手の破壊に対する安全性に関し、脆性破壊特性(発生および伝播停止特性)、および延性破壊特性に関して膨大な検証がなされ、板厚 38~60 mm 程度の 9%Ni 鋼の大容量 LNG 貯槽への適用性が確認されている⁵⁻⁷⁾。

5.2 非破壊試験

溶接部の非破壊試験法には、放射線透過試験(以下 RT と略す)と浸透液探傷試験が用いられている。超音波探傷試験(以下 UT と略す)は、溶接金属がオーステナイト系のため粗い柱状晶組織を示すので、血管検出能力の点で技術的に難しいことから現状では適用されておらず、報告も極めて少ないが、適用のための検討もなされている¹²⁻¹⁴⁾。また磁粉探傷試験は 9%Ni 鋼は磁気を帯びやすいため適用できない。

RT では溶接材料に 70%Ni 合金材料を用いるため、母材と溶接金属部の X 線透過度を補正する必要があり、特殊なマスクを用いて撮影を行う。貯槽の大容量化に伴い最大板厚も増大するが、従来現場で用いている可搬式の線源(300 kVp)を用いる場合には、撮影に非常に長時間を要することになり、貯槽の建設工期に大きな影響を及ぼすことになる。図 5¹⁵⁾は可搬式線源(300 kVp)と X 線フィルム #100 を用いて撮影した場合の照射時間と 9%Ni 鋼溶接継手の板厚との関係を示したものである。板厚 40 mm では照射時間は 45~50 min 程度を要し、板厚 50 mm になると 225 min 程度になることが予測され、実用上可搬式線源(300 kVp)での対応は不可能となる。このため照射時間を短縮するための試みがなさ

図5 放射線透過試験における 9%Ni 鋼溶接継手の照射時間と板厚の関係

れている^{15,16)}。一つは線源として 420 kVp の大形発生装置と極微粒子のフィルム(#80)を用い、補正マスクと遮蔽板の組み合わせを配慮した方法であり、もう一つは高感度のイメージングプレートを用いる方法である。実用化にあたっては、420 kVp の線源を用いる場合には、大形で重量も重いため現地でのハンドリング設備が必要となる。イメージングプレートを用いた場合はレーザー処理した間接画像によるため、試験方法の許可が必要となるが、照射時間の短縮とともに検査システムを大幅に改善できる可能性を秘めている。

5.3 新しい接合技術の動向

1) 高速 GTAW 法の開発¹⁷⁾

GTAW 法の高溶着化を目的として、一般のトーチガスノズル内にもう一つのガスノズルを設け、適正なガス流量のもとでアーク柱を絞るとともに、主ワイヤによる溶融地に冷却ワイヤを挿入する方式の高集束 TIG-DSP 溶接法が開発されている。本法の原理図を図 6 に示す。LNG 貯槽には現時点では適用されていないが溶接能率の向上が期待できる方法として注目される。

2) 遠隔操作溶接システムの開発¹⁸⁾

前述したように、内槽には自動 GTAW 法が大幅に採用されているが、自動溶接といってもその作業はあくまで機械溶接であり、熟練した作業者が長時間溶接装置につきっきりで作業しているのが現状である。こうした状況を打破するために、GTAW 法による遠隔操作溶接システムが開発されている。本溶接システムはツインパルスステイグ溶接法を採用し、1人で複数台の溶接機の操作を可能にすることを狙ったものである。実工事への展開はこれからであるが、溶接の高品質化とともに脱技能化、溶接省力化技術として注目される。

3) IPA 溶接システム¹⁹⁾

IPA (In Process Assurance) 溶接システムは、溶接中の刻々の溶接条件の変化をサンプリングし、適正な溶接条件範囲を逸脱していないかどうかを監視し、初パスから最終パスまでの実際の溶接記録を作成するとともに継手全体の健全性を表示し、適正

図6 ダブルシンクロパルスステイグ溶接法の概略図

条件から逸脱した場合はその位置と溶接条件を表示する診断システムである。溶接が開始されれば自動的に溶接諸条件のデータが入力され、溶接終了時に自動的にデータ入力を終了する。溶接士は溶接作業を行うだけで、終了時には溶接条件の保証が行われ、溶接記録も作成できるシステムであり、一部適用が開始されている。異常信号と欠陥の有無、欠陥の種類と大きさなどとの関連については今後多くの実験・検討を要するが、溶接部の品質管理をより進める上からも有効な手段となろう。

4) 配管の自動溶接化

LNG プラントにおける配管も多くの種類があるが、低温で使用するステンレス鋼あるいはアルミニウム合金製配管の現地溶接はほとんど自動化されておらず、熟練作業者の技量に頼っているのが現状である。自動化を図る場合にはガスシールド溶接法になるが、現地での防風対策や、狭隘な場所での装置のハンドリング、安定した裏波溶接を行うための現地での開先精度の確保などが自動化を困難にしている要因である。しかしながら、配管におけるここ数年の技術的進歩には目覚ましいものがあり、地上式 LNG プラントの送ガス配管 (SB 410 炭素鋼管、直径: 610 mm, 肉厚: 25 mm) で、特に地中埋設管の溶接は、狭隘なピット内での作業に加えて、配管周辺のスペースが狭いことから、コンピューター制御による自動パルス GTAW 法が適用され始めている²⁰⁾。周辺技術の進歩と相まって、近い将来現地における低温配管関係にもこうした技術の適用拡大が図られてゆくであろう。

6. お わ り に

大容量 LNG 貯槽と接合技術の動向について概説した。LNG の国内外での需要増大に伴い新規プロジェクトが計画されており、国内でも地上式、地下式 LNG 貯槽のさらなる大形化が具体化してくるであろう。

溶接施工技術の観点からは、据付従事者の不足、熟練溶接上の不足と高齢化の問題を抱え、技術的に主要な地位を占める溶接とそれに関連する作業を合理化することが重要な課題の一つになっている。現場作業においては作業環境の問題もあり溶接の省人化、高度化が遅れているが、溶接関連技術もここ数年めざましい進歩を遂げていることから、現地作業においても溶接の省人化、脱技能化の動きもますます活発化すると思われる。

参 考 文 献

- 1) 渋谷, 池浦: “LNG 地下タンクの現状と今後の動向” 圧力技術 29 (2), 1991, P 22
- 2) 淵元, 岡井: “LNG 地上式貯槽の現状と将来の展望” 圧力技術 29 (2), 1991, P 29
- 3) 中島, 西崎: “液化天然ガスの PC 製貯槽の開発” 土木学会誌, 75 (11), 1991, P 14
- 4) 日本エルピーガスプラント協会: “全国 LP ガス貯槽の貯蔵能力調査結果”, LP ガスプラント, 28 (11), 1991, P 34
- 5) 町田, 石倉, 久保, 片山, 萩原, 有持: “厚肉 9% Ni 鋼の脆性破壊特性と大形 LNG タンクへの適用性” 圧力技術 29 (6), 1991, P 25
- 6) 町田, 石倉, 久保, 片山, 村本, 萩原, 有持: “厚肉 9% Ni 鋼の破壊特性と大形 LNG タンクへの適用性 (第 2 報)” 圧力技術 31 (1), 1993, P 19
- 7) 町田, 出口, 香川: “LNG 貯槽用厚肉 9% Ni 鋼の脆性破壊特性” 圧力技術 31 (6), 1993, P 31
- 8) 片山: “大容量 LNG 貯槽と接合技術の動向” 第 180 回溶接協会化学機械研究委員会資料 1992, 9.
- 9) 村本: “溶接技術はどう展開しているかー貯槽ー” 溶接技術 41 (1), 1993, P 76
- 10) 土田: “溶接技術はどう展開しているかーLNG タンクー” 溶接技術 41 (1), 1993, P 114
- 11) 河野, 片山, 和気, 呉橋: “高電流密度サブマージアーク溶接法の 9% Ni 鋼への適用” 圧力技術 27 (6), 1989, P 31
- 12) 磯野, 宇田川, 石井, 野口: “9% Ni 鋼溶接継手の非破壊検査について” 非破壊検査 24 (5), 1975
- 13) 緒方, 平澤, 長谷川, 山川, 佐伯: “9% Ni 鋼溶接継手の超音波探傷試験 (第 1 報) 日本非破壊検査協会 平成 5 年度春季講演大会講演概要 P 113
- 14) 緒方, 平澤, 長谷川, 山川, 佐伯: “9% Ni 鋼溶接継手の超音波探傷試験 (第 2 報) 日本非破壊検査協会 平成 5 年度春季講演大会講演概要 P 115
- 15) 石井, 桑, 片山: “厚肉 9% Ni 鋼溶接部の溶接欠陥検出性能 (第 1 報: イメージングプレートによる溶接欠陥検出性能) 溶接学会平成 5 年度春季講演大会概要 第 52 集 P 158
- 16) 本郷, 高田, 山川, 佐伯, 緒方, 大友: “大容量地上式 LNG 貯槽の放射線透過試験” 日本非破壊検査協会 平成 5 年度秋季講演大会講演概要 P 95
- 17) 村山, 片山, 今泉, 加藤, 中島: “高速 TIG 溶接法の開発” 溶接学会 第 139 回溶接法研究委員会資料 SW-2206, 1992.
- 18) 谷岡, 中野, 片山, 手島, 山岡, 山田, 斉藤: “大形構造物への遠隔溶接システムの開発” 石川島播磨技報 26 (5), 1986, P 298
- 19) 貝原, 頼綱, 斉藤, 村山: “IPA (In Process Assurance) 溶接システムの開発” 石川島播磨技報 32 (2), 1992, P 69
- 20) 片山, 手島, 平野: “容器・配管におけるアーク溶接自動化技術の現状と課題” 本誌 62 (6) 1993, P 64