
原子炉圧力容器用極厚鋼板の溶接について

Properties of Weldment of Heavy-Section Reactor-Vessel Steel Plate

広 紀治(Toshiharu Hiro) 西山 昇(Noboru Nishiyama) 坪井 潤一郎(Junichiro Tsuboi) 岡部 龍二(Ryuji Okabe) 森 徳明(Tokuaki Mori)

要旨：

原子炉圧力容器用 ASTM A533 Gr.B Cl.1170mm 極厚鋼板と、この鋼板用に新しく開発した溶接材料を用いて、サブマージアークおよび被覆アーク溶接を行ない、その継手性能を試験した。鋼板は水島製鉄所において、取鍋精錬炉、6000t プレス、厚板圧延機を用い、また、一連の熱処理を行なって試作した。サブマージアーク溶接には高塩基性焼成型フラックス KB-150A と心線 KW-40C を、被覆アーク溶接には極低水素系溶接棒 KS-86A を使用した。サブマージアークおよび被覆アーク溶接継手は溶接欠陥がまったくなく、すぐれた引張特性、曲げ延性を示し、十分な吸収エネルギー NDT 温度を有し、ASTM および ASME 規格を満足することがわかった。

Synopsis：

Using a 170 mm thick plate specified by ASTM Specifications A533, Grade B, Class 1 for reactor vessel and welding materials designed specially for the plate, characteristics of weldments by a submerged arc and a covered arc are studied. The plate is fabricated by Ladle-Refining-Furnace, a forging press of 6000t in capacity, a plate mill and by a series of heat treatments in Mizushima Works. A combination of high basic agglomerated flux KB-150A and wire KW-40C for submerged arc welding and an ultra low hydrogen type electrode KS-86A for covered arc welding are prepared for securing the joint efficiency. Both weldments by a submerged arc and a covered arc are found to have no weld defects, excellent tensile properties and bending ductilities, as well as sufficient absorbed energies and NDT temperatures for meeting the requirements of ASTM or ASME Specifications.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

原子炉压力容器用極厚鋼板の溶接について

Properties of Weldment of Heavy-Section Reactor-Vessel Steel Plate

広 紀 治*

Toshiharu Hiro

西 山 昇**

Noboru Nishiyama

坪 井 潤一郎***

Junichiro Tsuboi

岡 部 龍 二****

Ryuji Okabe

森 徳 明*****

Tokuaki Mori

Synopsis:

Using a 170 mm thick plate specified by ASTM Specifications A533, Grade B, Class 1 for reactor vessel and welding materials designed specially for the plate, characteristics of weldments by a submerged arc and a covered arc are studied. The plate is fabricated by Ladle-Refining-Furnace, a forging press of 6 000t in capacity, a plate mill and by a series of heat treatments in Mizushima Works.

A combination of high basic agglomerated flux KB-150A and wire KW-40C for submerged arc welding and an ultra low hydrogen type electrode KS-86A for covered arc welding are prepared for securing the joint efficiency. Both weldments by a submerged arc and a covered arc are found to have no weld defects, excellent tensile properties and bending ductilities, as well as sufficient absorbed energies and NDT temperatures for meeting the requirements of ASTM or ASME Specifications.

1. 緒 言

高度成長政策による産業界の飛躍的發展にともない、電力需要も急速に伸び、その原子力発電に依存する割合も年々増大している。最近の石油紛争はこの傾向をますます強めると予想でき、原子炉用の鋼板需要は一層高まる気運にある。

当社では、原子炉压力容器に使用される極厚鋼板 ASTM A533 Gr.B Cl. 1 の試作研究をここ数年間積重ねてその製造法を確立し、同時にこ

れに適合するサブマージアーク、および被覆アーク溶接材料の開発も行なってきた。

本報告では、大型鋼塊による第2回目の試作である 170mm 厚の鋼板について、これらの溶接材料による継手性能について述べる。

2. 供 試 材

2.1 鋼 板

水島製鉄所の ASEA-SKF プロセス (LRF) に

* 技術研究所溶接研究室

*** 技術研究所溶接研究室室長・工博

**** 技術研究所水島研究室主任研究員

** 技術研究所溶接研究室主任研究員

***** 技術研究所水島研究室

Table 1 Chemical composition of plate (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al _{sol}
ASME Spec.	≤0.25	0.13/0.32	1.10/1.55	≤0.035	≤0.035	—	0.37/0.73	—	0.41/0.64	—
Ladle analysis	0.19	0.30	1.35	0.013	0.007	0.02	0.69	0.01	0.54	0.032
Check analysis	Top surface	0.19	0.28	1.37	0.013	0.007	0.02	0.66	—	0.55
	1/4 t	0.19	0.29	1.37	0.014	0.007	0.02	0.66	—	0.55
	1/2 t	0.20	0.30	1.40	0.014	0.008	0.02	0.68	—	0.57
	3/4 t	0.19	0.29	1.38	0.014	0.007	0.02	0.66	—	0.55
	Bottom surface	0.19	0.29	1.37	0.012	0.007	0.02	0.66	—	0.55

t : Thickness

Table 2 Tensile properties of plate (JIS Z2201-10)

	Yield strength (0.2% off set) (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
ASME Spec.	≥35.2	56.2~70.3	≥18	—
Top surface	53.1	64.7	30	73
	53.2	64.4	28	73
1/4 t	49.0	62.0	30	71
	48.5	62.2	30	72
1/2 t	47.4	61.7	30	71
	48.4	61.9	28	70

Stress relieving condition: 620°C×45h, heating and cooling rate 48°C/h

Table 3 Charpy V-notch impact properties of plate (JIS Z2202-4)

Sampling position	Direction	vE ₋₁₂ (kg·m)		vT _{rs} (°C)	vT _{ra0} (°C)
		Individual value	Mean value		
Top surface	L	9.2 8.8 9.0	9.0	- 1	- 24
1/4 t	L	7.0 8.3 9.3	8.2	- 7	- 34
1/2 t	L	6.4 6.7 5.9	6.3	+12	- 20

Stress relieving condition: 620°C×45h, heating and cooling rate 48°C/h

よって精錬脱ガス処理した鋼塊を、鍛造、厚板圧延工程で所定の板厚にして、焼ならし、焼もどし処理を行ない、その後、170mm×1400mm×2400mmのテストクーポンに、施工時の熱間加工に相当する925°C×7hの焼ならし、870°C×5h加熱後水焼入れ、665°C×5hの焼もどしを施したものを供試鋼板とした。

その化学組成は Table 1 に示すもので、どの成分も ASTM 規格値を満足している。

溶接後の最終熱処理(620°C×45h応力除去焼鈍)を想定した場合の母材の引張および衝撃試験結果を Table 2, Table 3 に示す。板厚方向のどの位置でもすべて ASTM 規格値を満足している。

2.2 サブマージアーク溶接材料

極厚 A533 B 鋼は 60kg/mm² 級溶接構造用鋼板にくらべて、C 量が多いため溶接われ感受性が高く、溶接後の低温われを防止するためには、溶

接金属中の拡散性水素量を極力少なくする必要がある。したがってこの点では CO₂ ガスを多量に発生する高塩基性焼成型フラックスを使用することが望ましいが²⁾、いっぽう焼成型フラックスを極厚高張力鋼に使用するにあたり、吸湿に対する管理および繰返し使用による劣化などの点で、その使用を危惧するむきがある。そこで、本鋼種用にあらたに開発したフラックス KB-150A とほぼ同様の組成をもつ高張力鋼用高塩基性焼成型フラックス KB-80C を用いて、その吸湿および除湿性について検討した。その結果が Fig. 1, Fig. 2 であり、焼成型フラックスは吸湿性はあるが、その量は被覆アーク溶接棒よりもかなり少ない。また、いったん吸湿した水分も 200°C までの加熱で完全に除去されることが Fig. 2 の示差熱分析曲線から明らかである。

フラックスの劣化については、繰返し使用回数が溶接金属中の拡散性水素量におよぼす影響を調べた。拡散性水素量の測定は JIS 法に準拠し、フ

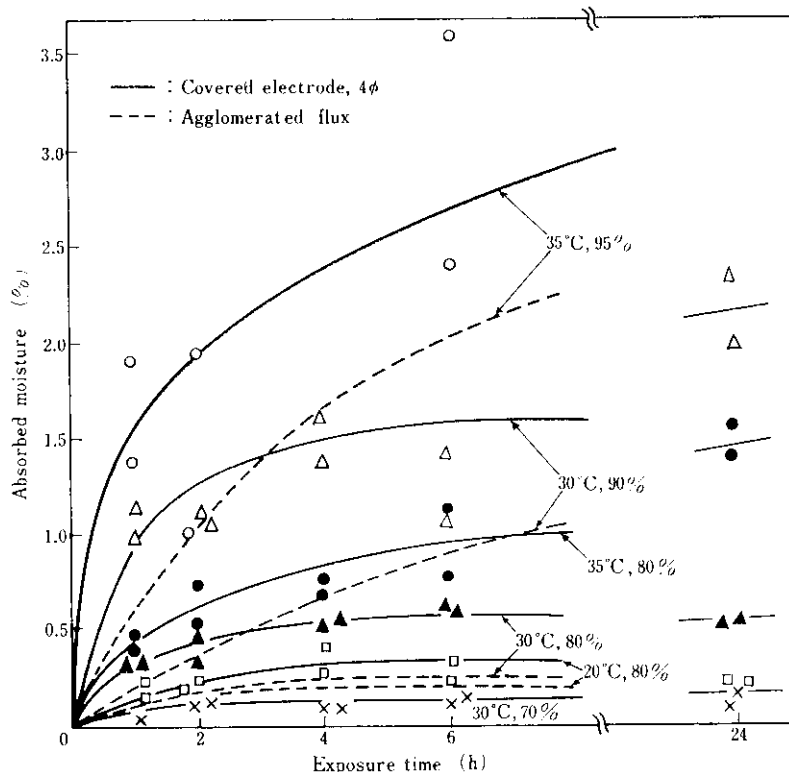


Fig. 1 Absorption characteristics of welding materials for HT-80 steel

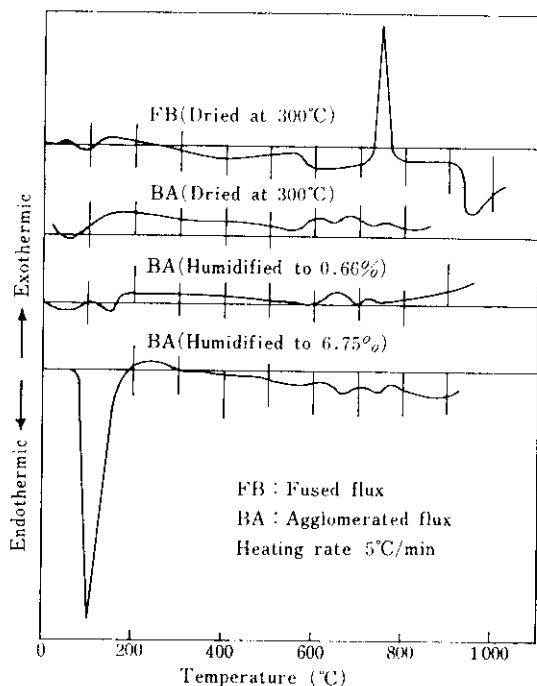


Fig. 2 Differential thermal analysis curves of humidified fluxes

ラックスは溶接後回収して順次使用を続けた。この試験結果が **Table 4** であり、フラックスの繰返し使用6回目においても、JIS に規定されたグリセリン法の精度では拡散性水素量は零であり、繰返し使用によるフラックス特性の劣化は生じないことがわかる。

本実験では、以上の点を確認したのち、A533 B 鋼用に開発した高塩基性焼成型フラックス KB-150A (塩基度 $B_L=2.6$) と 0.5%Mo 系の心線 KW-40C (4.8mm径) を組合わせて使用した。KW-40C の化学組成の代表例は **Table 5** であり、これを用いて **Table 6** の条件で溶接した全

Table 4 Relation between repeating use of flux and diffusible hydrogen in weld metal

Repeating usage times	Diffusible hydrogen in weld metal (ml/100g)
1	0.0
	0.0
	0.0
2	0.0
	0.0
	0.0
3	0.0
	0.0
	0.0
4	0.0
	0.0
	0.0
5	0.0
	0.0
	0.0
6	0.0
	0.0
	0.0

溶着金属の化学組成および機械的性質はそれぞれ **Table 7**, **Table 8** となる。これらは鋼板規格値ならびに -12°C における吸収エネルギー $4.2\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上の要求に対し、かなりの余裕をもって合格している。

Table 5 Typical chemical composition of wire KW-40C (wt %)

Diameter (mm)	C	Si	Mn	P	S	Mo
4.8	0.09	0.04	1.53	0.010	0.011	0.53

Table 6 Submerged arc welding conditions for all deposited metal

Flux and wire	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (J/cm)	Interpass temperature ($^{\circ}\text{C}$)
KB-150A × KW-40C	600	32	30	38 400	≤ 250

Table 7 Chemical composition of submerged arc all deposited metal (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
0.06	0.36	1.67	0.012	0.006	0.83	0.500

2.3 被覆アーク溶接材料

被覆アーク溶接棒としては全姿勢で良好な作

業性を有し、耐われ性にすぐれた極低水素系の K S-86A を開発した。

Table 9 に示す溶接条件で全溶着金属を作製し、その化学組成および機械的性質を試験した結果が **Table 10**, **Table 11** であり、引張強さ、吸収エネルギーとも鋼板規格値および -12°C での吸収エネルギー $4.2\text{kg}\cdot\text{m}$ を十分満足し、サブマージアーク溶接による全溶着金属に比較して高強度でかつじん性もすぐれている。

Table 8 Mechanical properties of submerged arc all deposited metal

Tensile properties				Absorbed energy ($\text{kg}\cdot\text{m}$)				
Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	vE_{-60}	vE_{-40}	vE_{-20}	vE_0	vE_{20}
55.4	63.6	31	72	1.82	5.92	9.02	9.24	20.08
				1.66	5.88	6.04	18.32	19.94
55.5	63.7	31	71	2.69	4.40	9.02	11.76	19.21
				(2.1)	(5.4)	(8.0)	(13.1)	(19.7)

Stress relieving condition: $615^{\circ}\text{C}\times 45\text{h}$, heating and cooling rate $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$

Table 9 Covered arc welding conditions for all deposited metal

Electrode	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (J/cm)	Interpass temperature ($^{\circ}\text{C}$)
K S-86A	210	24	15	20 100	≤ 100

Table 10 Chemical composition of covered arc all deposited metal (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Diffusible hydrogen in weld metal ($\text{ml}/100\text{g}$)
0.06	0.40	1.06	0.006	0.009	0.61	0.406	1.35

Table 11 Mechanical properties of covered arc all deposited metal

Tensile properties				Absorbed energy ($\text{kg}\cdot\text{m}$)				
Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	vE_{-60}	vE_{-40}	vE_{-20}	vE_0	vE_{20}
60.8	67.0	30	67	0.91	7.71	12.63	17.49	19.95
				1.06	7.71	13.67	14.48	19.95
					9.48	14.25	17.88	17.93
				1.0	8.3	13.5	16.6	19.3

Stress relieving condition: $615^{\circ}\text{C}\times 45\text{h}$, heating and cooling rate $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$

3. 溶接継手の諸性能

上述の極厚鋼板 A533B と溶接材料を用いてその溶接継手の諸性能を調べた結果を以下に示す。

3.1 溶接および熱処理条件

サブマージアークおよび被覆アーク両溶接法に

おける溶接条件と果層方法を **Table 12, Fig. 3** および **Fig. 4** に示す。サブマージアーク溶接の初層は高温われを防止するため、電流、電圧、速度を低めに制限した。被覆アーク溶接は立向姿勢で行ない、入熱量は 35~40kJ/cm の範囲で多少高めている。

溶接後の応力除去焼鈍は両溶接方法ともに **Fig. 5** に示す条件で行なった。

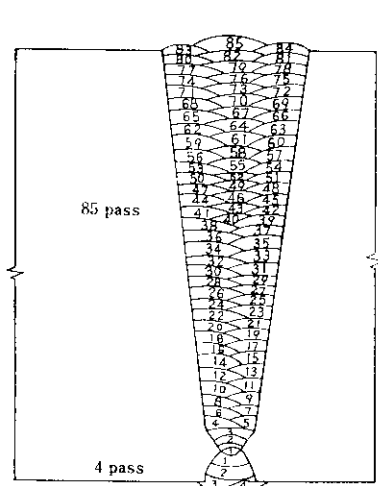


Fig. 3 Pass sequence of submerged arc welding process

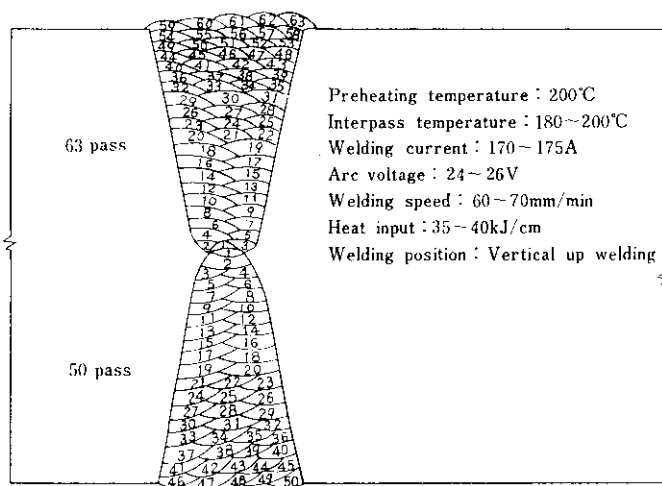


Fig. 4 Welding conditions and pass sequence of covered arc welding process

Table 12 Welding conditions for submerged arc welding process

Pass No.	Diameter (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (J/cm)	Preheating and interpass temperature (°C)
1	4.8	500	24	20	36 000	200~250
2	"	550	33	35	31 000	"
3~7	"	600	33	30	39 600	"
8~82	"	700	34	30	47 600	"
83~85	"	600	33	30	39 600	"
Back tip side	1	"	600	30	39 600	"
	2~4	"	650	32	40 200	"

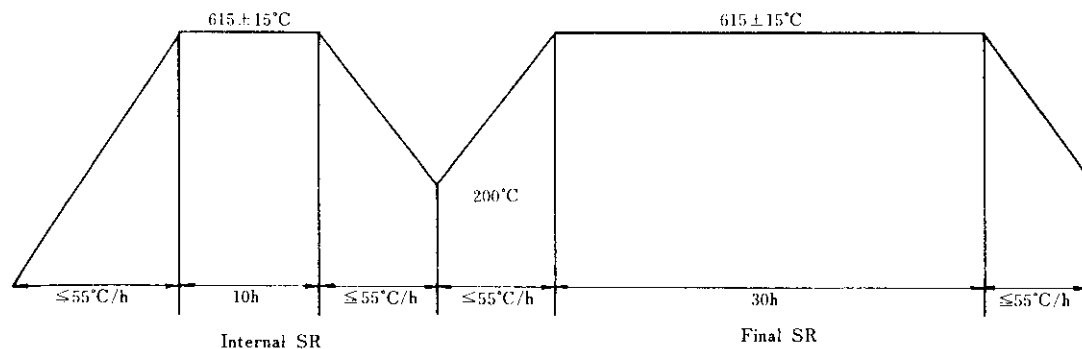


Fig. 5 Diagram of stress relieving for submerged arc and covered arc weldment

3.2 継手マクロ組織

両溶接法による継手部の断面マクロ組織が Photo. 1 および Photo. 2 であり、スラグまき込み、ブローホール、われなどの欠陥のない良好な溶接部がえられた。

3.3 常温継手引張性能

板厚方向を4等分して、JISに規定されたZ3121の1号継手試験片を採取し、室温で引張試験を行った。それらの結果を Table 13 と Table 14

に示すが、サブマージアーク溶接継手では、引張強さは板厚各位置で ASME 規格値を満足し、規格範囲のほぼ中央値に等しかった。またその値は板厚表面側ほど低下したが、これは試験片の平行部が表面側ほど長いため、塑性拘束の影響が小さくなったものと考えられる。これに対して被覆アーク溶接継手の場合、破断位置はすべて母材で、引張強さは $66 \sim 67.5 \text{ kg/mm}^2$ を確保しており、母材のそれに比べ塑性拘束の影響度が低くなって $3 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$ の上昇がみられた。



Photo. 1 Macrostructure of submerged arc weldment



Photo. 2 Macrostructure of covered arc weldment

Table 13 Results of tensile test for submerged arc butt weld joint

Notation	Tensile strength (kg/mm ²)		Location of rupture
	Individual value	Mean value	
ASME Spec.	56.2~70.3		—
A 1	62.4 62.9	62.7	Weld metal Weld metal
A 2	64.4 63.6	64.0	Weld metal Weld metal
A 3	64.8 64.9	64.9	HAZ Base metal
A 4	66.0 66.5	66.3	HAZ Weld metal

Top surface

Notation

Specimen: JIS Z3121-1



Bottom surface

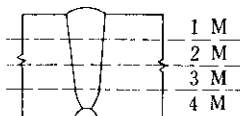
Table 14 Results of tensile test for covered arc butt weld joint

Notation	Tensile strength (kg/mm ²)		Location of rupture
	Individual value	Mean value	
ASME Spec.	56.2~70.3		—
1 M	67.4 67.5	67.5	Base metal Base metal
2 M	66.4 66.4	66.4	Base metal Base metal
3 M	66.0 67.3	66.7	Base metal Base metal
4 M	67.2 66.7	67.0	Base metal Base metal

Top surface

Notation

Specimen: JIS Z 3121-1



Bottom surface

3.4 高温引張性能

板厚方向の $1/4t$, $3/4t$ の溶接金属部から Fig. 6 に示す形状の高温引張試験片を採取し、オートグラフを用いて、室温から 350°C の温度範囲で短時間高温引張試験を行なった。サブマージアーク溶接金属の結果を Fig. 7 被覆アーク溶接金属の結果を Fig. 8 に示す。試験温度範囲で両溶接金属の引張強さおよび降伏点はともに SA533 Gr. B Cl. 1 鋼板の Supplementary requirement に示される値を満足している。しかし、被覆アーク

溶接金属のほうが引張強さ、降伏点とも高くなっている。また、板厚方向の強度差はほとんどみとめられなかった。

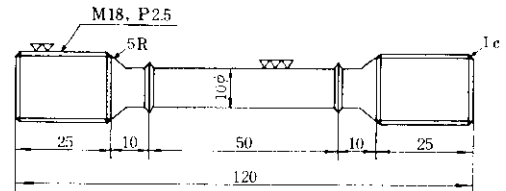


Fig. 6 Dimensions of high temperature tensile test specimen

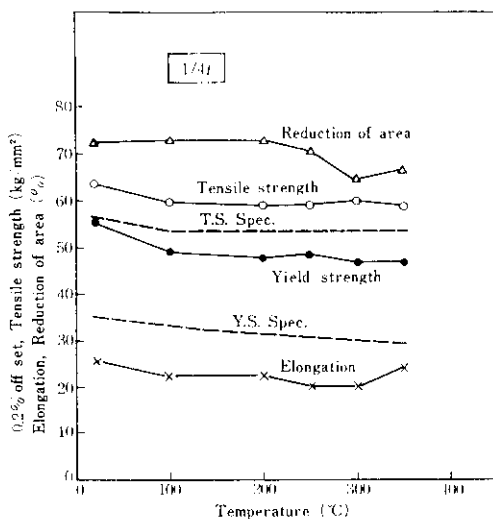


Fig. 7 Results of high temperature tensile test for submerged arc weld metal

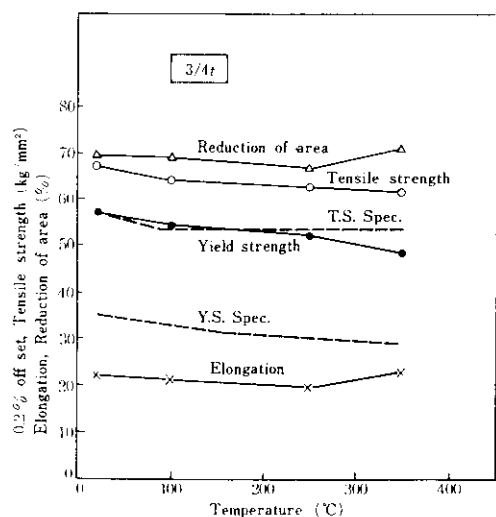
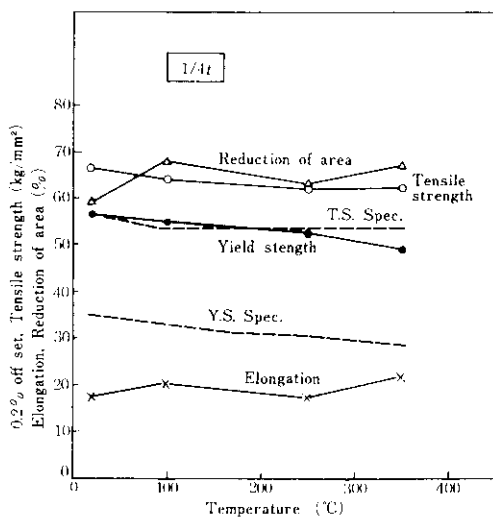
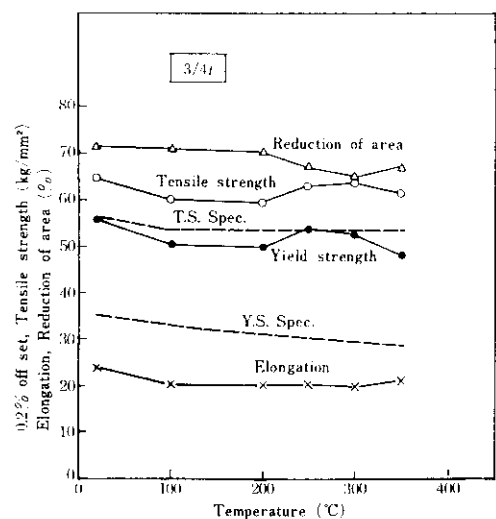


Fig. 8 Results of high temperature tensile test for covered arc weld metal

Table 15 Results of Charpy V-notch impact test for submerged arc weldment (JIS Z2202-4)

Sampling position	Location of notch	+20°C		+4.4°C		-12°C		-20°C		-40°C	
		Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)
Top surface 2 mm	W.M. center	18.23	0	15.56	10	11.86	10	7.71	30	1.78	90
		18.76	3	14.12	10	10.60	20	5.43	75	1.78	90
		16.83	3	14.67	10	12.79	10	5.57	65	1.61	90
		(17.9)	(2)	(14.8)	(10)	(11.8)	(13)	(6.2)	(57)	(1.7)	(90)
	Bond	19.85	0	18.39	10	16.12	0	5.92	65	3.41	75
		19.85	0	17.94	5	11.76	20	13.74	50	3.41	90
		19.98	0	18.76	5	13.74	50	10.54	50	7.88	65
		(19.9)	(0)	(18.4)	(7)	(13.9)	(23)	(10.1)	(55)	(4.9)	(77)
	H.A.Z. center	18.07	0	17.81	0	10.54	40	7.94	65	3.55	90
		18.13	0	14.96	10	9.30	45	9.58	55	5.12	85
		16.23	5	14.78	10	14.68	10	8.34	55	4.40	85
		(17.5)	(2)	(15.9)	(7)	(11.5)	(32)	(8.6)	(58)	(4.4)	(87)
1/4 t	W.M. center	15.56	5	13.23	20	6.67	30	4.39	60	1.78	85
		15.22	5	9.48	20	5.61	60	2.82	65	2.28	75
		11.69	20	10.23	20	4.79	60	3.91	60	1.44	80
		(14.2)	(10)	(11.0)	(20)	(5.7)	(50)	(3.7)	(62)	(1.8)	(80)
	Bond	/	/	/	/	19.08	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	14.34	3	/	/	/	/
		/	/	/	/	14.62	10	/	/	/	/
		/	/	/	/	(16.0)	(4)	/	/	/	/
	H.A.Z. center	/	/	/	/	22.01	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	21.53	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	18.66	5	/	/	/	/
		/	/	/	/	(20.7)	(2)	/	/	/	/
1/2 t	W.M. center	19.03	3	17.48	10	14.84	5	5.47	60	5.24	75
		20.12	0	17.96	5	14.73	5	9.64	45	3.42	75
		19.03	3	17.42	5	11.26	10	8.90	30	5.47	65
		(19.4)	(2)	(17.6)	(7)	(13.6)	(7)	(8.0)	(45)	(4.7)	(72)
	Bond	19.27	0	18.70	0	13.22	30	13.16	60	8.13	85
		19.39	0	18.39	5	13.56	30	13.16	20	4.46	85
		19.08	5	19.85	0	16.81	20	17.63	0	7.46	80
		(19.2)	(2)	(19.0)	(2)	(14.5)	(27)	(14.7)	(27)	(6.7)	(83)
	H.A.Z. center	19.98	0	13.33	5	14.96	25	5.08	75	3.27	80
		18.64	0	18.13	0	14.78	20	9.30	60	2.69	90
		19.85	0	16.23	0	12.64	50	6.30	70	3.31	85
		(19.5)	(0)	(15.9)	(2)	(14.1)	(32)	(6.9)	(68)	(3.1)	(85)
3/4 t	W.M. center	19.08	0	17.20	5	14.56	5	11.97	20	5.71	60
		19.24	0	15.45	5	12.24	15	12.02	10	5.61	50
		16.66	3	13.73	5	16.33	5	10.28	10	3.46	50
		(18.3)	(1)	(15.5)	(5)	(14.4)	(8)	(11.4)	(13)	(4.9)	(53)
	Bond	/	/	/	/	18.50	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	14.45	15	/	/	/	/
		/	/	/	/	15.72	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	(16.2)	(5)	/	/	/	/
	H.A.Z. center	/	/	/	/	16.33	30	/	/	/	/
		/	/	/	/	18.71	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	20.38	0	/	/	/	/
		/	/	/	/	(18.5)	(10)	/	/	/	/
Bottom surface 2 mm	W.M. center	16.66	5	17.42	5	11.53	15	10.01	10	3.50	55
		17.09	0	16.77	3	11.91	5	7.01	20	4.56	55
		14.78	5	14.23	5	15.17	5	16.61	5	4.13	50
		(16.2)	(3)	(16.1)	(4)	(12.9)	(8)	(11.2)	(12)	(4.1)	(53)
	Bond	17.81	0	15.60	0	17.18	0	5.66	65	9.12	65
		15.60	5	12.04	10	12.04	20	5.12	65	6.30	70
		16.42	0	18.83	0	13.74	0	9.98	45	3.55	75
		(16.6)	(2)	(15.5)	(3)	(14.3)	(7)	(6.9)	(58)	(6.3)	(70)
	H.A.Z. center	18.13	0	14.50	10	13.56	30	6.14	70	4.46	85
		14.68	0	13.33	15	13.74	40	9.74	50	4.92	85
		17.81	0	16.23	5	12.64	45	9.30	60	5.66	85
		(16.9)	(0)	(14.7)	(10)	(13.3)	(38)	(8.4)	(60)	(5.0)	(85)

3-5 じん性

表面 2 mm, $1/4t$, $1/2t$, $3/4t$ および裏面 2 mm から JIS の 4 号試験片を採取し, サブマージアーク溶接の場合は溶接金属中央部, ボンド部および熱影響部で, 被覆アーク溶接の場合は溶接金属中央部でその衝撃特性を調査した。それぞれの試験結果が **Table 15** および **Table 16** であり, **Table 17** に示す一般に要求されている鋼板の吸

収エネルギー値をすべてのノッチ位置で満足し, 被覆アーク溶接でも入熱量 40kJ/cm まで溶接可能である。

3-6 NRL 落重試験結果

板厚方向の $1/4t$, $1/2t$ から ASTM E208 P-3 型落重試験片を溶接線と直角方向に採取し, ノッチを熱影響部中央および溶接金属部中央に入れて, ASTM 規格にしたがって落下エネルギー

Table 16 Results of Charpy V-notch impact test for covered arc weldment (JIS Z2202-4)

Sampling position	Location of notch	+20°C		+4.4°C		-12°C		-20°C		-40°C	
		Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Crystallinity (%)
Top surface 2 mm	W.M. center	14.83	20	13.44	25	6.37	60	6.90	75	2.33	90
		11.76	20	8.59	40	8.92	60	2.86	70	1.58	85
		12.05	25	8.81	40	8.76	50	4.89	80		
		(12.9)	(22)	(10.3)	(35)	(8.0)	(57)	(4.9)	(75)	(2.0)	(88)
$1/4t$	W.M. center	16.03	20	14.94	15	5.70	65	3.68	75	2.90	90
		16.87	15	15.86	15	9.31	50	11.94	40		
		16.47	10	9.15	30	9.03	60	9.31	45		
		(16.5)	(15)	(13.3)	(20)	(8.0)	(58)	(8.3)	(53)	(2.9)	(90)
$1/2t$	W.M. center	10.05	25	6.43	55	7.87	65	3.68	85	2.37	90
		8.04	35	8.87	40	3.82	80	3.63	85		
				7.82	45	4.40	75	3.08	80		
		(9.0)	(30)	(7.7)	(47)	(5.4)	(73)	(3.5)	(83)	(2.4)	(90)
$3/4t$	W.M. center	16.15	15	11.71	20	7.22	65	6.32	75	3.17	85
		16.03	10	11.48	20	11.48	40	10.39	40	1.91	85
		14.13	5	14.94	15	7.71	65	7.66	65		
		(15.4)	(10)	(12.7)	(18)	(8.8)	(57)	(8.1)	(60)	(2.5)	(85)
Bottom surface 2 mm	W.M. center	15.17	15	10.56	45	8.42	70	7.66	50	4.79	85
		16.64	10	17.04	10	7.71	65	8.04	55	2.72	80
		11.65	40	11.99	40	7.49	70	6.64	80		
		(14.5)	(22)	(13.2)	(32)	(7.9)	(68)	(7.4)	(62)	(3.8)	(83)

Table 17 General specification of Charpy V-notch absorbed energy for nuclear reactor pressure vessel material

Applying position of plate	Specimen	Temperature	Absorbed energy
Shell and head materials	JIS Z2202 4	+ 4.4°C	Individual value: $\geq 3.5\text{kg}\cdot\text{m}$
Connecting to the main closure franges		-12.0°C	
Pressure containing materials other than in the above		+ 4.4°C	Mean value of 3 specimens: $\geq 4.2\text{kg}\cdot\text{m}$

Table 18 Results of NRL drop weight test for submerged arc weldment
(ASTM E208 P-3, drop weight energy: 41kg·m)

Location of notch and sampling position	Test temperature and results (°C, mm)										NDT temperature (°C)
	-12	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	
HAZ center 1/4 t	00 00			00 00		00 78	● 32	57 10	176 ●		-50
Weld metal center 1/2 t	00 00			00 00			75 00	00 513	3 ●	●	-60

Table 19 Results of NRL drop weight test for covered arc weldment
(ASTM E208 P-3, drop weight energy: 41 kg·m)

Location of notch and sampling position	Test temperature and results (°C, mm)										NDT temperature (°C)
	-12	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60		
HAZ center 1/4 t	00 00	00 21	21 3	0 32	22	● ●					-30
Weld metal center 1/2 t	00 00			00 00		00 35	● 00	●	●	●	-50

41kg·m で試験を行なった。その結果が**Table 18**と **Table 19** であり、サブマージーク溶接の熱影響部の NDT 温度は-50°C、溶接金属部中央の NDT 温度は-60°Cである。いっぽう被覆アーク溶接の場合はそれぞれ-30°Cと-50°Cになり、溶接金属の NDT 温度は大差ないが、熱影響部中央では被覆アーク溶接のほうが 20°C 高温側

になった。しかし、いずれも NDT 温度は-12°C 以下であり、両溶接法による継手はすぐれたじん性を有することが確認できた。

3.7 継手曲げ特性

板厚方向を 4 等分し、板厚 38mm、板幅 57mm の自由曲げ試験片を採取して試験に供した。その

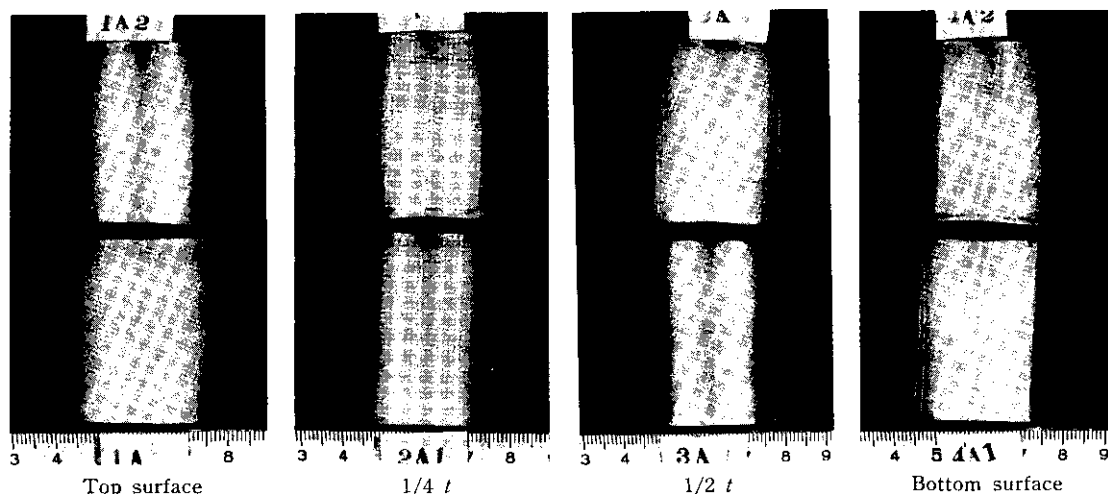


Photo. 3 Appearance of face and root bend test specimens of submerged arc weldment

結果が Table 20 と Table 21 であり、両溶接継手部とも欠陥の発生なしに 180 度まで曲がり、そのときの溶接金属の伸び率は、板厚のどの位置でも 30% 以上となってすぐれた曲げ延性を示し

た。

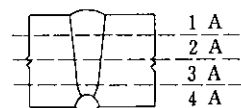
型曲げ試験としてサブマージーク溶接継手では、表、裏曲げおよび側曲げを、被覆アーク溶接継手では側曲げを行なった。表、裏曲げは表面、

Table 20 Results of free bend test for submerged arc weldment

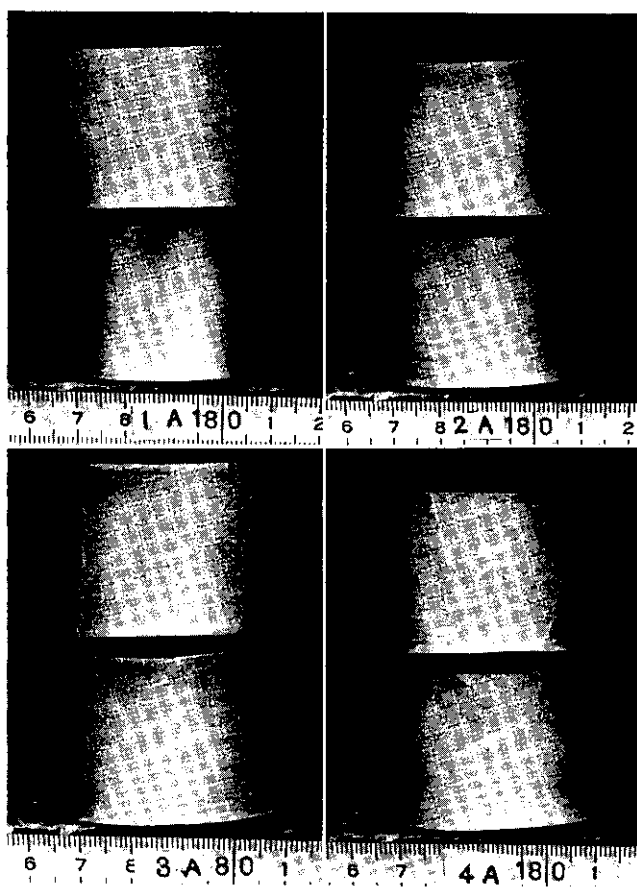
Notation	Gauge length(mm)	Elongation (%)	Judgement
1 A	41.4	30.5	Good
	55.9	30.2	Good
2 A	34.1	31.2	Good
	39.6	31.0	Good
3 A	26.9	31.0	Good
	32.7	30.3	Good
4 A	20.5	32.6	Good
	24.7	30.7	Good

Specimen: 38×57mm

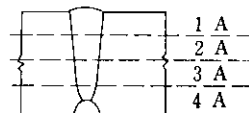
Top surface Notation



Bottom surface



Top surface Notation



Bottom surface

Photo. 4 Appearance of side bend test specimens of submerged arc weldment

1/4 t , 1/2 t および裏面から板厚 9.5mm, 板幅 38mm の試験片を, 側曲げは板厚方向を 4 等分した位置から試験片を採取して, おのおの試験を行った。 **Photo. 3, Photo. 4** および **Photo. 5**

にその結果を示すように, 変形時の欠陥発生はまったくなく, 良好な曲げ延性が確認できた。

Table 21 Results of free bend test for covered arc weldment

Notation	Gauge length(mm)	Elongation (%)	Judgement
M 1	41.7	30.0	Good
	32.0	30.6	Good
M 2	27.6	32.9	Good
	16.5	31.5	Good
M 3	11.8	32.3	Good
	25.7	32.4	Good
M 4	30.6	30.4	Good
	45.3	30.5	Good

Specimen : 38×57mm

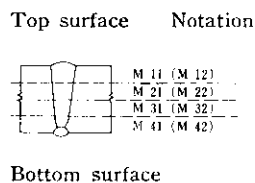
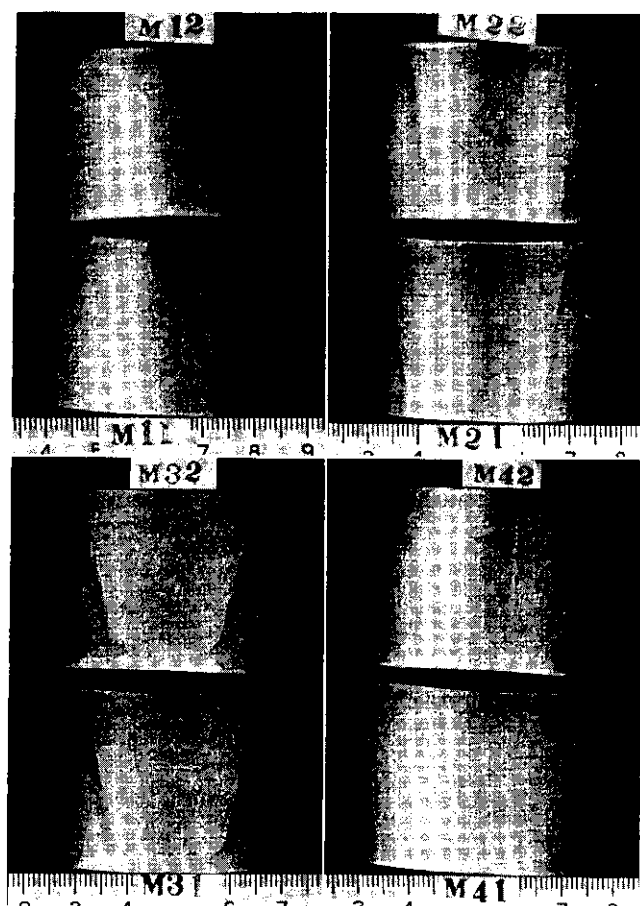
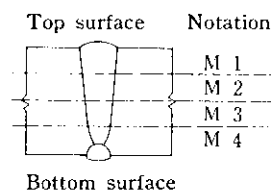


Photo. 5 Appearance of side bend test specimens of covered arc weldment

3・8 継手かたさ分布

溶接継手部の断面かたさの分布を、ピッカース荷重 10kg を用いて板厚方向の 5 位置で測定した結果が Fig. 9 と Fig. 10 である。サブマージアーク溶接ボンド部の最高かたさは H_v 242~306

の範囲にあり、次層の熱影響のない表面部で多少高い値を示した。これに対し被覆アーク溶接継手では H_v 270~313 となり、サブマージアーク溶接ボンド部のかたさにくらべて、板厚方向中央部近傍に高い傾向が認められた。

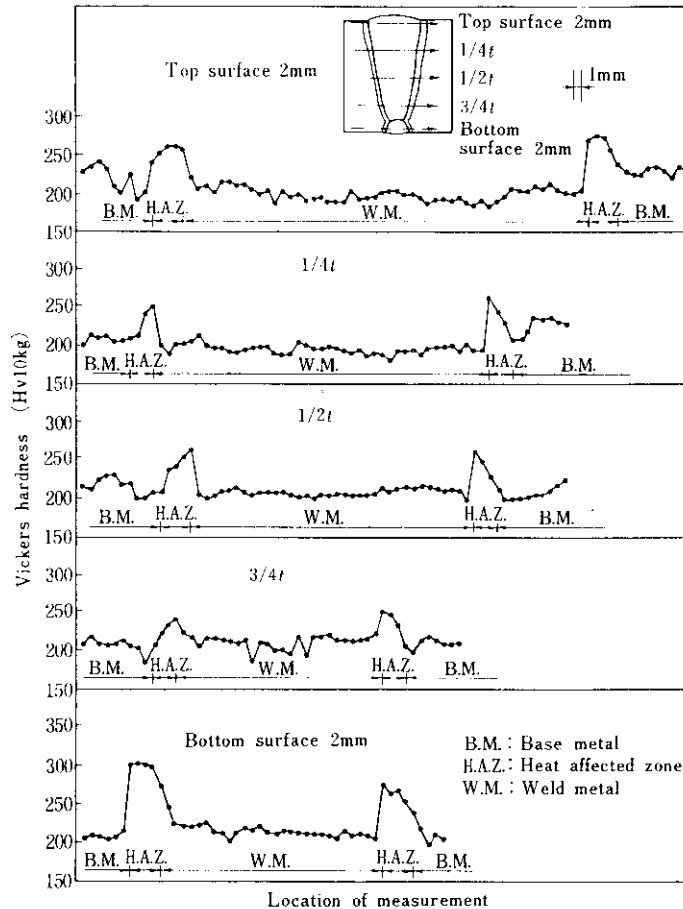


Fig. 9 Hardness on cross section of submerged arc weldment

Table 22 Chemical composition of submerged arc weld metal (wt %)

Sampling position	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
ASME Spec. of plate	≤ 0.25	0.13/0.32	1.10/1.55	≤ 0.035	≤ 0.040	0.37/0.73	0.41/0.64
Top surface	0.07	0.29	1.59	0.011	0.012	0.87	0.597
1/4 t	0.07	0.32	1.56	0.013	0.013	0.89	0.583
1/2 t	0.07	0.33	1.56	0.012	0.012	0.85	0.551
3/4 t	0.08	0.44	1.70	0.014	0.012	0.90	0.562
Bottom surface	0.09	0.39	1.60	0.013	0.011	0.81	0.521

3・9 溶接金属の化学組成

サブマージアーク溶接金属，および被覆アーク溶接金属の板厚方向5位置の化学組成を調べた結果が，Table 22 と Table 23 である。サブマージアーク溶接金属は鋼板にくらべてC量を低くして

いるので Si, Mn, Ni 量が ASME 鋼板規格の上限値をわずかに超えているが，板厚方向の位置間では成分変動が少なく，焼成型フラックスの使用による偏析傾向は認められない。いっぽう，被覆アーク溶接金属では母材の希釈率も少なくな，板厚方向の位置間の成分変動はさらに少なく

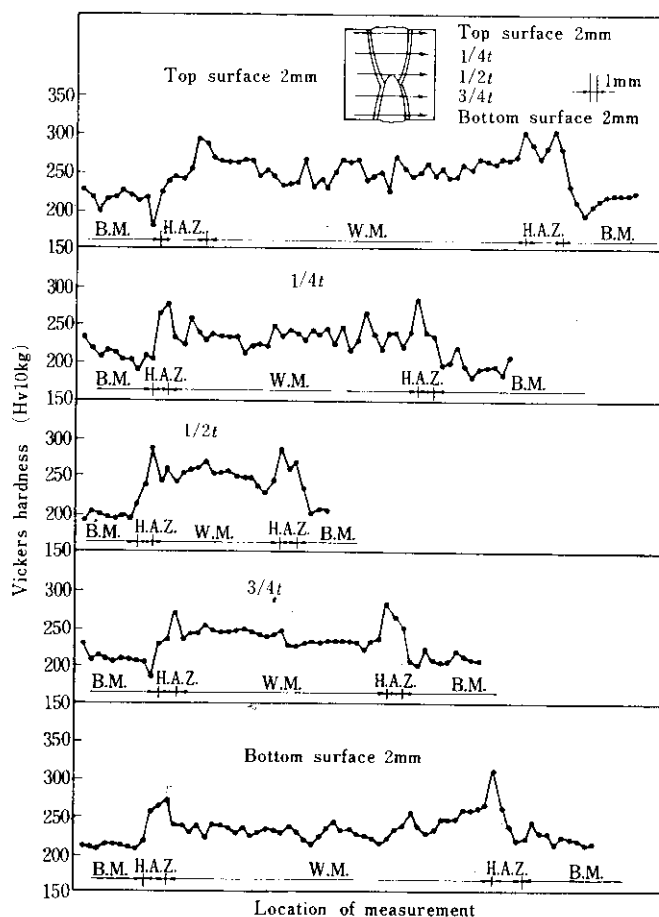


Fig. 10 Hardness on cross section of covered arc weldment

Table 23 Chemical composition of covered arc weld metal (wt %)

Sampling position	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
ASME Spec. of plate	≤0.25	0.13/0.32	1.10/1.55	≤0.035	≤0.040	0.37/0.73	0.41/0.64
Top surface	0.07	0.52	1.11	0.005	0.008	0.61	0.407
1/4 t	0.07	0.51	1.14	0.005	0.008	0.68	0.413
1/2 t	0.09	0.51	1.24	0.007	0.006	0.69	0.482
3/4 t	0.07	0.52	1.13	0.005	0.008	0.66	0.432
Bottom surface	0.07	0.53	1.14	0.005	0.007	0.67	0.432

なっている。また、Si量が高い場合は各成分とも ASME 鋼板規格値の範囲内に収まっている。

3.10 顕微鏡組織

両溶接継手の溶接金属、ボンド近傍および熱影響部中央の $1/4 t$ における顕微鏡組織が **Photo. 6**, **Photo. 7** である。熱影響部はともに微細化され、サブマージアーク溶接の場合は多少球状化さ

れた組織を示した。

4. 結 言

水島製鉄所において、大型鋼塊から ASTM A533 Gr. B Cl. 1 鋼の 170mm 極厚鋼板を試作し、あらたに開発した溶接材料を使用して、この鋼板のサブマージアーク溶接、および被覆アーク

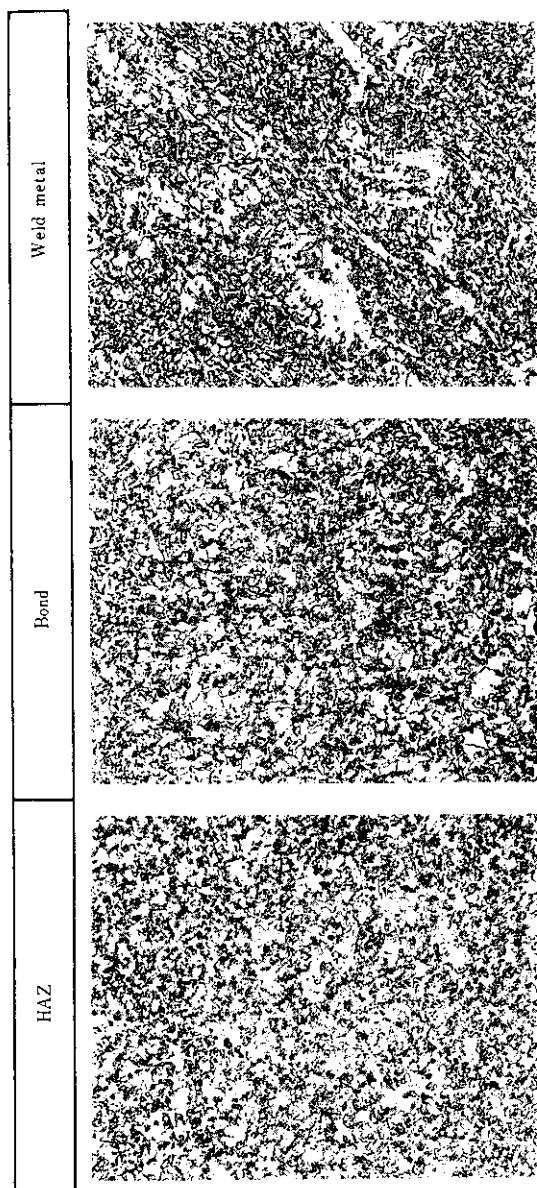


Photo. 6 Microstructure of submerged arc weldment at $1/4 t$ ($\times 200$)

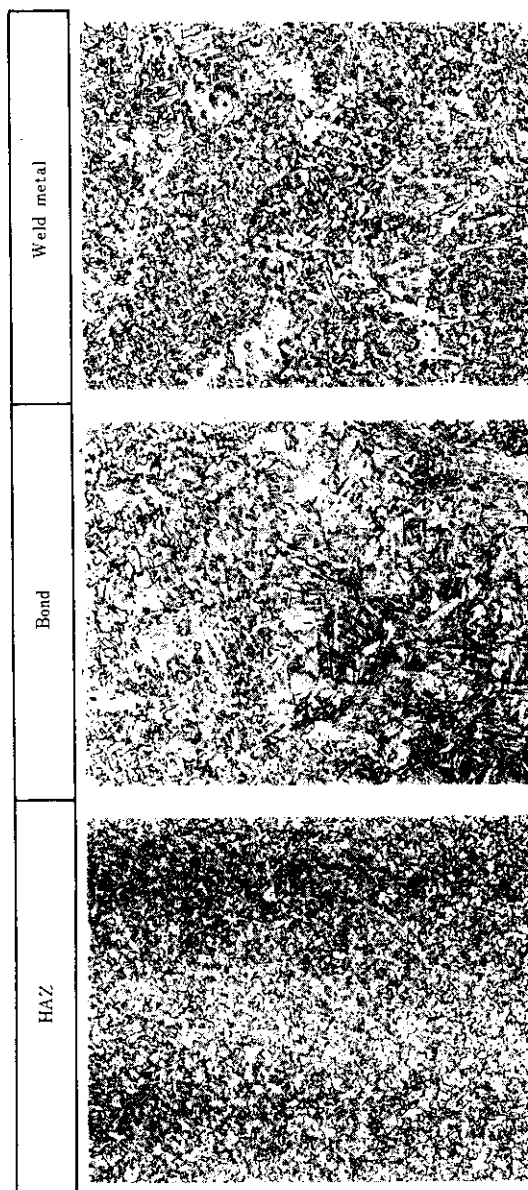


Photo. 7 Microstructure of covered arc weldment at $1/4 t$ ($\times 200$)

溶接による継手性能試験を実施した。

得られた結果をまとめると以下のことが明らかになった。

- (1) サブマージアーク溶接には高塩基性焼成型フラックスKB-150Aと心線KW-40Cの組合せを、また、被覆アーク溶接にはKS-86Aを使用することによって欠陥のない溶接継手が得られる。
- (2) 両溶接継手とも常温引張特性は、ASME規格の下限値を 6kg/mm^2 以上超えて、かなり余裕をもって満足する。
- (3) 高温引張強さは、ASME Section III規格の下限値をサブマージアーク溶接で 2.7kg/mm^2 以上、被覆アーク溶接で 6kg/mm^2 以上超えて満足する。
- (4) シャルピー衝撃試験結果では、 -12°C での吸収エネルギーは、サブマージアーク溶接部では溶接金属部が最低で $5.7\sim 14.4\text{kg}\cdot\text{m}$ であり、被覆アーク溶接では $5.4\sim 8.8\text{kg}\cdot\text{m}$ とな

り良好であった。

- (5) NDT温度はサブマージアーク溶接の熱影響部中央で -50°C 、溶接金属部中央で -60°C であり、被覆アーク溶接ではそれぞれ -30°C 、 -50°C である。
- (6) 曲げ性能は自由曲げ、型曲げとも欠陥がまったく発生せず曲げ角度 180 度まですぐれた曲げ延性をそなえている。
- (7) 断面かたさはボンド部で最高値を示し、サブマージアーク溶接継手で $H_v\ 242\sim 306$ 、被覆アーク溶接継手で $H_v\ 270\sim 313$ である。
- (8) 焼成型フラックスの吸湿量は被覆アーク溶接棒におけるよりもかなり少なく、吸湿水分は 200°C までの加熱で完全に脱水できる。
- (9) 焼成型フラックスの使用回数が溶接金属の拡散性水素量におよぼす影響は、6回使用まで認められず、繰返し使用によるフラックス性能の劣化は認められない。また、極厚継手における極厚方向の成分変動も認められなかった。

参考文献

- 1) 楠原、吉村ほか：川崎製鉄技報，6（1974）2，44
- 2) 坪井、寺嶋：アーク溶接過程における水素の挙動（第4報），溶接学会誌，42（1973）6，38