

低温用鋼溶接材料について

Welding Materials for Low Temperature Service

坪井潤一郎*

Junichiro Tsuboi

平井征夫**

Yukio Hirai

Synopsis:

The mechanical properties of various welding materials developed by Kawasaki Steel Corporation for low temperature service having 40 to 80 kg/mm² tensile strength have been reviewed, with description of main difficulties in the practice of the welding such as notch toughness and cracking of weld metal. In summary, the results obtained in this investigation are as follows:

- (1) It is proved that the electrodes, submerged-arc welding wires and fluxes and gas-shielded metal-arc welding wires for low temperature service possess excellent mechanical properties and that they can sufficiently be put to practical constructional uses.
- (2) It is necessary to select appropriate parameters in order to prevent brittle fracture and cracking in the weldment.

1. ま え が き

近年、液化ガスの使用範囲が広まり、貯蔵・運搬装置の建造に多くの低温用鋼板が使用されるようになった。これらの低温用鋼板に用いられる

溶接材料は、その構造物の使用温度域で十分な強度や延性および靱性をもち、施工時に各種溶接欠陥を発生しないものでなければならない。現在、低温用鋼板に用いる被覆アーク溶接棒の JIS 化が進められているが、従来は表 1 に示す ASTM 規格や WES の低温用鋼板判定規程などが参照され

表 1 ASTM規格 (A316-64T)

分 類	化 学 成 分 (wt %)									引 張 試 験			2mmV ノッチ
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	引張強さ (psi)	0.2%耐力 (psi)	伸 び (G.L.=2') (%)	シャルピー 衝撃試験
E 8016-C 1	≤0.12	≤1.20	≤0.03	≤0.04	≤0.60	2.00 / 2.75	—	—	—	≥80,000	≥67,000	19	20ft-16 at-60°F
E 8016-C 2	≤0.12	≤1.20	≤0.03	≤0.04	≤0.60	3.00 / 3.75	—	—	—	≥80,000	≥67,000	19	20ft-16 at-100°F
E 8016-C 3	≤0.12	0.40 / 1.10	≤0.03	≤0.03	≤0.80	0.80 / 1.10	≤0.15	≤0.35	≤0.05	≥80,000	≥70,000	22	20ft-16 at-40°F
E 9015-D 1	≤0.12	1.25 / 1.75	≤0.03	≤0.04	≤0.60	—	—	0.25 / 0.45	—	≥90,000	≥77,000	17	20ft-16 at-60°F
E10016-D 2	≤0.15	1.65 / 2.00	≤0.03	≤0.04	≤0.60	—	—	0.25 / 0.45	—	≥100,000	≥87,000	16	20ft-16 at-60°F

(注) E8016-C 3 のみ溶接のままの規格値、その他は応力除去焼鈍状態の規格値を示す。

* 技術研究所溶接研究室主任研究員

** 技術研究所溶接研究室

てきた。

溶接金属の成分は、鋼板と同等であることが望ましいが、溶接のままでの低温靱性を確保するために、Niなどの合金成分は鋼板よりも多く添加されている。たとえば、Alキルド鋼用には0~2% Niが、3.5%Ni鋼用には4~40%Niが、9%Ni鋼用には10~70%Niが採用されている。溶接施工条件によっては、溶接金属や溶接熱影響部における大入熱量による靱性低下や溶接割れが問題となることがある。すなわち、Alキルド鋼の溶接熱影響部（とくにボンド部）や2.5%Ni、3.5%Ni鋼の溶接金属では溶接入熱量を制限して靱性を保持する必要があり、鍛造品との継手部では水素による遅れ割れが発生しやすいので、低温割れ防止のために予熱や溶接棒の乾燥・吸湿などにも注意を要する。また、溶接金属のNi含有量が多いときには凝固偏析による高温割れも発生しやすくなるので適正な溶接条件を選ばなければならない。このように低温用鋼の溶接には種々の問題点もあるが、以下に当社で製造している各種低温用鋼溶接材料の性能について記す。

2. 50 kg/mm² 級低温用鋼溶接材料

（被覆アーク溶接棒：KS-76 LT
サブマージアーク溶接材料：KB-50LT×KW43）

これらの溶接材料は、Alキルド鋼や原子炉用鋼 ASTM-A 516 などに使用され、熱処理をうけた鋼板に劣らぬ良い靱性を持っている。表2に全溶着金属の化学成分を、表3にその機械的性質を示す。

溶接施工の問題として、入熱量が増すと溶接金属と熱影響部とが脆化するが、表4には入熱量による全溶着金属の機械的性質の変化を、表5には鋼板 KL33 B を種々の入熱量で溶接した継手各部の衝撃値を示す。

表6, 7にはKL33 Bと原子炉材料 ASTM-A 516 -60 LT との溶接継手性能をそれぞれ示す。

表8は KL33 B をサブマージアーク溶接したときの脆性破壊発生特性を Deep Notch 試験で調査した結果であるが、このクラスの鋼板の残留応力除去焼鈍は、脆性破壊の発生防止に効果的である。

表2 50kg/mm²級低温用鋼溶接材料の全溶着金属化学成分

溶 接 材 料	化 学 成 分 (wt %)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
KS-76LT	0.05	0.33	0.96	0.013	0.008	1.59	—
KB-50LT×KW43	0.66	0.21	1.20	0.013	0.014	1.00	0.36

表3 50kg/mm²級低温用鋼溶接材料の全溶着金属機械的性質

溶 接 材 料	熱 処 理	引 張 試 験				シャルピー衝撃試験	
		引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	vE_0 (kg·m)	vE_{-60} (kg·m)
KS-76LT	溶接のまま	58.0	52.0	33	70	24.3	8.4
	応力除去焼鈍	57.8	52.1	35	73	25.4	10.0
KB-50LT×KW43	溶接のまま	53.7	45.6	31	71	18.0	5.8
	応力除去焼鈍	55.0	50.1	32	73	15.2	5.0

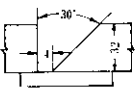
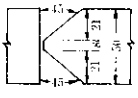
応力除去焼鈍条件；600°C×1h

表 4 KS-76LTの全溶着金属機械的性質におよぼす溶接入熱量の影響

溶 接 棒	入 熱 量 (KJ/cm)	引 張 試 験				シャルピー衝撃試験	
		引張強さ (kg/mm ²)	降 伏 点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	vE_0 (kg·m)	vE_{-60} (kg·m)
KS-76LT	18	57.0	50.5	36	72	18.8 (8)	10.4 (62)
	40	51.5	44.5	36	73	15.5 (12)	8.0 (77)
	60	50.9	42.4	36	73	14.7 (15)	7.3 (84)
	80	49.9	40.4	36	73	10.2 (50)	5.8 (100)

() ; 脆性破面率 %

表 5 KL33B 溶接継手部の衝撃特性におよぼす溶接入熱量の影響

溶接材料	開 先 形 状	入 熱 量 (KJ/cm)	熱 処 理	-60°Cでのシャルピー衝撃値 (kg·m)			
				溶接金属	ボンド部	熱影響部	母 材
KS-76LT		15	溶接のまま	9.8 (65)	15.7 (49)	27.0 (0)	28.0 (0)
			応力除去焼鈍	10.2 (65)	16.3 (44)	25.3 (0)	27.7 (4)
KB-51LT ×KW43		30	応力除去焼鈍	6.0 (73)	7.1 (53)	8.6 (10)	9.7 (0)
		40	応力除去焼鈍	5.6 (76)	5.2 (67)	8.1 (40)	9.3 (20)

() ; 脆性破面率 %

表 6 KL-33B の溶接継手性能試験結果

溶 接 材 料	入 熱 量 (KJ/cm)	引 張 試 験			シャルピー衝撃試験 (溶接金属)		側曲げ試験 (R=2t, 180°)
		引張強さ (kg/mm ²)	降 伏 点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	vE_0 (kg·m)	vE_{-60} (kg·m)	
KS-76LT	15	(A) 55.7	43.7	24	16.8 (10)	4.6 (75)	良 好
KB-50LT×kW43	28	(B) 66.0	51.2	26	18.0 (0)	7.5 (58)	良 好
	35	(B) 63.3	50.7	26	16.0 (0)	6.6 (50)	良 好

(注) (A): 継手引張試験片

(B): 全溶着金属部引張試験片

() : 脆性破面率 %

表 7 原子力容器用鋼板 A516-60LT の溶接継手性能試験結果

溶接材料	板 厚 (mm)	入熱量 (KJ/cm)	熱 処 理	継手引張試験		側曲げ試験 (R=1.5t, 180°)	-33°Cにおけるシャルピー衝撃値 (kg・m)		
				引張強さ (kg/mm ²)	破断位置		溶接金属	熱影響部	母 材
KS-76LT	80	47.4	溶接のまま	52.2	母 材	良 好	8.3 (53)	12.8 (34)	10.6 (51)
			応力除去焼鈍	49.7	母 材	—	12.9 (32)	6.5 (73)	8.5 (58)
	50	51.2	溶接のまま	52.1	母 材	良 好	9.6 (52)	12.2 (45)	9.0 (56)
			応力除去焼鈍	49.5	母 材	—	5.2 (52)	7.9 (62)	6.7 (68)
	20	46.7	溶接のまま	52.3	母 材	良 好	7.4 (69)	21.7 (11)	19.6 (19)
			応力除去焼鈍	49.6	母 材	—	13.8 (42)	29.9 (0)	8.4 (61)
KB-50LT ×KW43	80	45.8	溶接のまま	49.7	母 材	良 好	19.8 (10)	19.8 (7)	10.7 (56)
			応力除去焼鈍	46.2	母 材	—	20.5 (3)	20.4 (2)	16.5 (34)
		109.0	溶接のまま	48.3	母 材	良 好	8.3 (54)	15.3 (39)	9.2 (51)
			応力除去焼鈍	46.7	母 材	—	7.5 (64)	7.4 (61)	4.7 (72)
	50	45.8	溶接のまま	50.1	母 材	良 好	15.1 (25)	17.5 (19)	11.3 (71)
			応力除去焼鈍	47.3	母 材	—	20.1 (3)	14.0 (50)	9.3 (71)
		109.0	溶接のまま	50.6	母 材	良 好	17.1 (18)	15.5 (34)	11.4 (48)
			応力除去焼鈍	48.2	母 材	—	6.1 (55)	12.5 (42)	13.3 (41)
	20	36.0	溶接のまま	50.3	母 材	良 好	14.0 (33)	16.3 (32)	8.5 (64)
			応力除去焼鈍	47.8	母 材	—	15.1 (36)	14.0 (63)	9.3 (79)

(注) (): 脆性破面率 %

応力除去焼鈍条件: 625°C×4h 炉冷

3. 60 kg/mm² 級低温用鋼溶接材料(被覆アーク溶接棒: KS-86M, KS-86N
サブマージアーク溶接材料: KB-60LT×KW-43)

これらの溶接材料は、低温用鋼板 RIVER ACE 60 L や 2.5%Ni および 3.5%Ni 鋼の溶接に用いられる。表 9 に全溶着金属の化学成分を、表 10 にその機械的性質を示す。

表 11 には、RIVER ACE 60 L を溶接入熱量を

かえて KS-86 M で溶接したときの継手性能をしめす。

溶接金属の Ni 量は、靱性と溶接割れ感受性から決定されるが、一般には Ni 量が増すにしたがって、2%までは低温側の靱性がよくなり、それ以上になると高温側での衝撃値が低下する。しかし、-100°C 付近で良好な靱性を必要とする場合には 5%程度まで添加することもある。さらに Ni 量を増すと、普通の溶接施工ではマルテンサイ

表 8 KL 33B 溶接継手部の Deep Notch 試験結果

試 験 片	入熱量 (KJ/cm)	切欠位置	熱処理	試験温度 (°C)	破 壊 応 力		材 料 定 数		ノーズ 温 度	
					σ_{netg} (kg/mm ²)	σ_{ross} (kg/mm ²)	Soi (kg・mm/mm ²)	ki (°K)	Tn (°C)	
母 材		L 方 向		-150	19.3	7.7	1,650	962	-94	
				-120	33.8	13.5				
				-100	62.0	24.9				
				C 方 向	-150	24.2	9.7	892	946	-94
					-120	28.1	11.2			
					-100	58.0	23.3			
被覆アーク溶接 継手(KS-76LT)	30	ボンド部	溶接のまま	-150	18.9	7.5	52	508	- 9	
				-100	24.4	9.8				
				- 60	45.5	18.2				
		溶接金属		-150	17.6	7.0	40	472	-15	
				-100	25.2	10.1				
				- 58	57.2	22.9				
サブマージ アーク溶接継手 (KB-50LT ×KW43)	30	ボンド部	応力除去 焼鈍	-145	17.1	6.8	107	647	-24	
				-100	30.6	12.2				
				- 60	29.0	11.2				
		溶接金属		-150	16.6	6.7	18	714	-30	
				-100	32.6	13.1				
				- 60	50.0	20.0				
	40	ボンド部		-150	14.1	5.7	245	695	-37	
				-120	25.2	10.8				
				- 90	53.9	21.5				
				- 60	59.8	23.9				

表 9 60kg/mm² 級低温用鋼溶接材料の全溶着金属化学成分

溶 接 材 料	化 学 成 分 (wt %)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
KS-86M	0.03	0.40	0.96	0.009	0.009	2.59	0.09
KS-86N	0.05	0.42	0.84	0.010	0.009	3.60	—
KB-60LT×KW43	0.08	0.28	1.35	0.015	0.012	4.03	0.65

表 10 60kg/mm² 級低温用鋼溶接材料の全溶着金属機械的性質

溶 接 材 料	引 張 試 験				シャルピー衝撃試験	
	引張強さ (kg/mm ²)	降 以 点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	vE_0 (kg·m)	vE_{-60} (kg·m)
KS-86M	63.7	53.9	32	77	24.9	14.2
KS-86N	65.0	55.5	26	70	18.0	10.2
KB-60LT×KW43	70.1	58.7	26	65	15.2	7.2

表 11 RIVER ACE 60L の溶接継手性能試験結果

溶接材料	入熱量 (KJ/cm)	継手引張試験片		試験片採取位置	シャルピー衝撃試験				側曲げ試験 (R=2.0t, 180°)
		引張強さ (kg/mm ²)	破断位置		溶 接 金 属		熱 影 響 部		
					vE ₀ (kg・m)	vE ₋₆₀ (kg・m)	vE ₀ (kg・m)	vE ₋₆₀ (kg・m)	
KS-86M 4.0mmφ	20	64.5	溶接金属	初 層 側	24.3 (0)	13.8 (55)	21.7 (0)	18.4 (13)	良 好
		64.3	溶接金属	最終層側	20.1 (0)	8.5 (78)	20.1 (2)	21.3 (0)	良 好
	40	64.0	溶接金属	初 層 側	22.3 (0)	10.3 (72)	22.7 (0)	13.9 (30)	良 好
		64.0	溶接金属	最終層側	18.4 (2)	7.0 (87)	23.4 (0)	10.6 (50)	良 好
KS-86M 5.0mmφ	20	66.4	溶接金属	初 層 側	27.0 (0)	14.5 (53)	23.1 (0)	20.7 (5)	良 好
		64.0	溶接金属	最終層側	19.2 (2)	9.5 (73)	21.2 (3)	7.5 (68)	良 好
	60	62.0	溶接金属	初 層 側	19.1 (8)	7.8 (83)	18.2 (0)	4.7 (78)	良 好
		64.0	溶接金属	最終層側	17.8 (18)	5.5 (87)	21.2 (0)	5.5 (78)	良 好
KB-60LT* ×KW43	84	66.8	母 材	初 層 側	13.5 (0)	6.0 (80)	—	—	良 好
		67.1	母 材	最終層側	13.0 (0)	6.0 (80)	—	—	良 好

(注) * 溶接金属化学成分: C=0.06 Si=0.31 Mn=1.34 P=0.014 S=0.012
Ni=1.84 Mo=0.37

() : 脆性破面率 %

ト組織が生成しはじめ、強度は上昇するが衝撃値は低下する。したがって、3.5%Ni 鋼の焼入れ、焼もどし処理材の溶接材料としては、フェライト系のものでは靱性の確保が困難となり、オーステナイト系のものを使用する必要性が生じる。

溶接金属の靱性を良くするためには、

- (1) 素地の脆化要素を少なくする
- (2) 転位の移動を容易にする
- (3) 粒界の脆化要素を少なくする
- (4) 組織を微細化する
- (5) 溶接金属中の微細な内部欠陥を少なくする
- (6) 溶接の冷却速度域で最も強靱な組織になる

表 12 全溶着金属の機械的性質におよぼす C と Mn の影響

溶接棒	溶接金属の化学成分 (wt %)			引 張 試 験				シャルピー衝撃試験	
	C	Mn	その他の 元素	引張強さ (kg/mm ²)	降 伏 点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	νE_0 (kg·m)	νE_{60} (kg·m)
1	0.02	0.95	Si : 0.40 P : 0.010 S : 0.010 Ni : 2.50	61.7	55.0	32	76	22.3 (6)	14.6 (33)
2	0.05	0.52		60.3	55.0	28	74	17.7 (6)	8.2 (63)
3	0.06	0.78		65.0	55.0	25	65	18.7 (8)	6.9 (80)
4	0.05	0.95		62.6	55.7	30	76	19.0 (6)	9.3 (42)
5	0.06	1.13		67.6	61.5	21	57	17.8 (6)	7.3 (75)

() : 脆性破面率 %

ように合金成分を調整する
などが考えられる。

これらに基づいて開発した 2.5%Ni 系の溶接棒 KS-86 M は、転位の移動を容易にするために C 量を低くし、低温でも延性破壊するように Ni 量を 2.5%としている。また、少量の Mo により組織を微細化し、スラグの塩基度を高めて O や S による粒界の脆化を防止している。関口理論によれば、Si=0.40 (wt%) の溶接金属が凝固するときに脱酸生成物が浮上しやすい融体となるためには Mn は 0.8%以上必要である。鋼材の場合には、Mn はフェライト中の炭素と結合してパーライト中に析出するから、フェライト地の靱性を高めるといわれているが、溶接金属では表12に示すように、Mn をある値以上添加すると、強度が増して破壊時の開口部周辺の塑性変形量が減少するので靱性改善にはあまり期待できない。

溶接時の冷却速度がフェライト生成臨界冷却速

度にほぼ等しい領域が最良の靱性をもっているから、溶接入熱量が大きいときの脆化を少なくするには連続冷却変態曲線を長時間側に移するとよい。Mo, B は、溶接金属の組織を微細化するとともに、この目的で添加してある。N は溶接中に大気のみき込みによって熔融池で吸収されるから、これを少なくするにはアーク雰囲気を十分にシールドしなければならない。溶剤中の炭酸塩の分解による CO₂ でこれを行なうことも考えられるが、被覆アーク溶接ではその効果は少なく、サブマージアーク溶接では有効に作用して N 量は少なくなる。

4. 80 kg/mm² 級低温用鋼溶接材料

(被覆アーク溶接棒: KS-116LT
サブマージアーク溶接材料: KB-80C×KW103B)
MIG 溶接ワイヤ: KM-80LT

これらの溶接材料は、低温用鋼 RIVER ACE 80 L の溶接用に開発されたもので、今後構造物の

表 13 80kg/mm²級低温用鋼溶接材料の全溶着金属化学成分

溶接材料	化 学 成 分 (wt %)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
KS-116LT	0.06	0.40	1.02	0.009	0.008	2.95	0.43	0.44
KB-80C×KW103B	0.05	0.32	1.44	0.011	0.005	2.90	0.34	0.47
KM-80LT	0.05	0.25	1.20	0.005	0.008	2.10	0.60	0.40

表 14 80kg/mm² 級低温用鋼溶接材料の全溶着金属機械的性質

溶 接 材 料	引 張 試 験				シャルピー衝撃試験	
	引張強さ (kg/mm ²)	降 伏 点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	νE_0 (kg·m)	νE_{50} (kg·m)
KS-116LT	81.0	74.2	23	65	15.3	8.2
KB-80C×KW103B	83.8	70.0	25	65	16.4	8.6
KM-80LT*	86.5	82.4	22	68	15.1	11.2

* シールドガス：80% Ar+20%CO₂

大型化にともなってこれらの溶接材料の使用も多くなると思われる。

表13に全溶着金属の化学成分を、表14にその機械的性質を示す。

強度が 80 kg/mm² 級の溶接材料になると、低温での高靱性を得ることが非常に困難になり、溶接金属中のガス成分などにも十分な考慮が必要である。したがって、これらの成分を低くできる MIG 溶接法やサブマージアーク溶接法が適当となる。MIG 溶接法では、シールドガスの種類によって溶接金属中のガス成分は変化するが、Ar だけでは溶融金属のなじみや溶込み、アークの広がりなどの作業性が悪いので少量の O₂ か CO₂ を添加している。図 1 にシールドガス成分と溶接金属中の O との関係を示す。

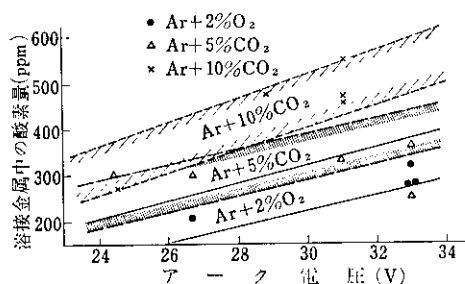


図 1 MIG 溶接金属中の酸素量とシールドガスの関係

強靱性鋼の MIG 溶接については米国でも広く研究されており、靱性の点からは、2%O₂ は 5%CO₂ と等価であって、溶接金属の靱性をよくするためにはシールドガス中の CO₂ はできるだけ少ないほうがよいが、前記作業性改良のために 60 %

He-35%Ar-5%CO₂ が推奨されている¹⁾。さらに強度の高い材料の溶接方法としては、真空チャンパー中での電子ビーム溶接やTIG溶接がしだいに実用化されている。

溶接割れは溶接施工上の大きな問題であり、高ニッケル系溶接材料では、高温割れの原因となる Cu, P, S などの成分をできるだけ低くしなければならない。これはオーステナイト生成元素である Ni が多いと、凝固時に P, S 溶解度の低い γ 凝固が多くなり、とくに最終凝固部のデンドライト間にこれらの成分が偏析して高温割れを起しやすいからである。表 15 に高温割れにおよぼす P, S の影響を示す。この試験では、溶接線に直角に採取した試験片の両端を拘束状態で溶接再現熱サイクルを与え、冷却中の試験片には図 2 に示す拘束応力がかかって、高温で延性の少ないものは割れ

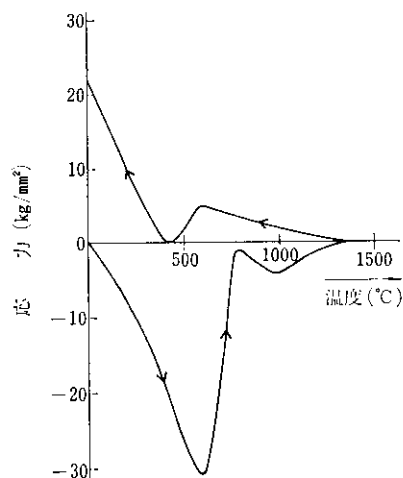


図 2 拘束熱サイクル割れ試験片にはたらく応力サイクル

表 15 拘束熱サイクル割れ試験結果

溶 接 法	溶接金属化学成分 (wt %)					割 れ 試 験 結 果			
	C	P	S	Ni	その他の元素	最高加熱温度(°C)			割れ位置
						1350	1375	1400	
被覆アーク溶接	0.07	0.014	0.011	3.08	Si : 0.40 Mn : 1.36 Mo : 0.55				熱影響部
									ボンド部
									—
									—
	0.07	0.014	0.024	3.08					ボンド部
									—
									—
									—
	0.07	0.14	0.033	3.08					溶接金属
									溶接金属
									—
									—
	0.07	0.21	0.017	3.08					ボンド部
									—
									溶接金属
									—
0.07	0.025	0.011	3.08				溶接金属		
							—		
							溶接金属		
							溶接金属		
MIG溶接	0.06	0.008	0.005	3.33	Si : 0.35 Mn : 1.10 Cu : 0.25 Cr : 0.36 Mo : 0.50				溶接金属
									溶接金属
									—
									—
	0.06	0.008	0.005	3.15					ボンド部
									ボンド部
									—
									—

(注) × : 割れ
○ : 割れなし

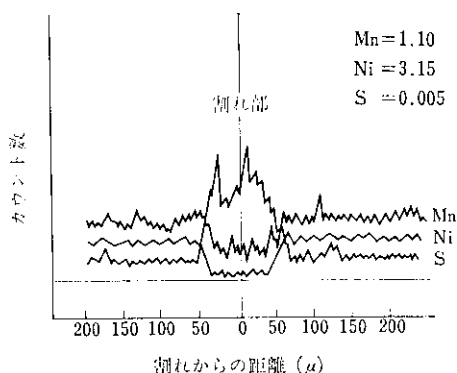


図 3 MIG 溶接金属高温割れ近傍の Mn, Ni, S の分布

を発生する。被覆アーク溶接金属では、凝固時の偏析が少ないので、かなり高い P, S 量まで割れが発生しないのに対して、MIG 溶接金属ではそれらが少ないにもかかわらず、図 3 に示す割れ近傍のマイクロ分析結果のごとくデンドライト中央部に偏析が生じて高温割れが発生している。

表 16 にはサブマージアーク溶接金属の高温割れ感受性におよぼす Cu, P の影響を示す。

多量の合金成分を必要とするサブマージアーク

溶接材料では、偏析防止のために合金成分は心線から供給し、溶剤としては靱性向上と拡散性水素量減少のために高塩基性焼成型のものを用いるほうが有利である。施工にあたっては、初層での高温割れが最も起りやすく、その防止策として原則的には低電流、低速度とするのが望ましいが、個々の継手や開先に対して適正な溶接条件をえらばなければならない。初層のみ被覆アーク溶接をするのも一方策であり、表 17 にこれら溶接条件と高温割れの関係を示す。水素による低温割れを防止するには、割れ感受性の低い鋼板の使用や継手拘束度の軽減はもちろんであるが、溶接金属中の水素溶解量を少なくすることと溶接後にその拡散を促進するための予熱・後熱が重要である。

溶接金属に溶解する水素の主な供給源は、溶剤に含まれる水分と溶接雰囲気である。低水素系被覆剤中の吸湿水分と結晶水のそれぞれ 1 wt % をアーク雰囲気の水蒸気分圧に換算すれば、17.0 mmHg, 280 mmHg となることが実験的にもとめられている²⁾。低水素系被覆アーク溶着金属中の拡散性水素量は次式²⁾でもとまる。

表 16 Cu, P のサブマージアーク溶接高温割れにおよぼす影響 ——窓型拘束割れ試験——

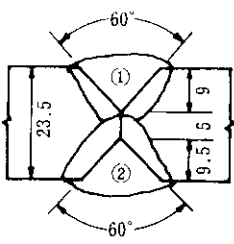
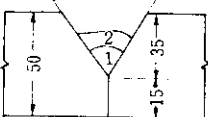
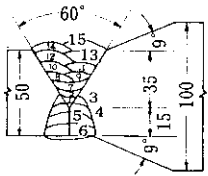
溶接材料	溶 接 継 手	溶接金属化学成分 (wt %)			表面割れ率 (%)	
		Cu	P	その他の元素	初 層 側	最 終 層 側
1		0.08	0.015	C : 0.11 Si : 0.40 Mn : 1.30 S : 0.011 Ni : 1.90 Mo : 0.50	0.9	0
2		0.08	0.024		0	14.2
3		0.09	0.030		4.5	2.8
4		0.08	0.042		2.3	5.3
5		0.18	0.017		0	0.9
6		0.25	0.017		19.8	6.9
7		0.53	0.015		100	3.3
8		0.18	0.023		0	0.6
9		0.29	0.028		0	3.1
10		0.35	0.035		16.9	19.2

表 17 80kg/mm²級高張力鋼サブマージアーク溶接の施工条件と高温割れの関係

鋼板 (Ceq)	溶接材料	開先形状	溶接条件 (入熱量=43kJ/cm)				割れ有無
			順序	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	
RIVER ACE 80 (0.501)	KB-80C ×KW103B		1 2	600	32	26	割れ
			1 2	550	26	20	割れなし
RIVER ACE 80 (0.537)			1 2	550	26	20	割れ
			1 2	500	24	16	割れなし
RIVER ACE 80 (0.590)			KS-116 (5mmφ) 被覆アーク溶接				割れなし
			1	500	24	16	
			2	600	32	26	
			アークエアガウジング				
	3		500	24	16		
	4		600	32	26		
	7		600	32	26		

(注) $Ceq = C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{24} Si + \frac{1}{40} Ni + \frac{1}{5} Cr + \frac{1}{4} Mo + \frac{1}{14} V$ (%)

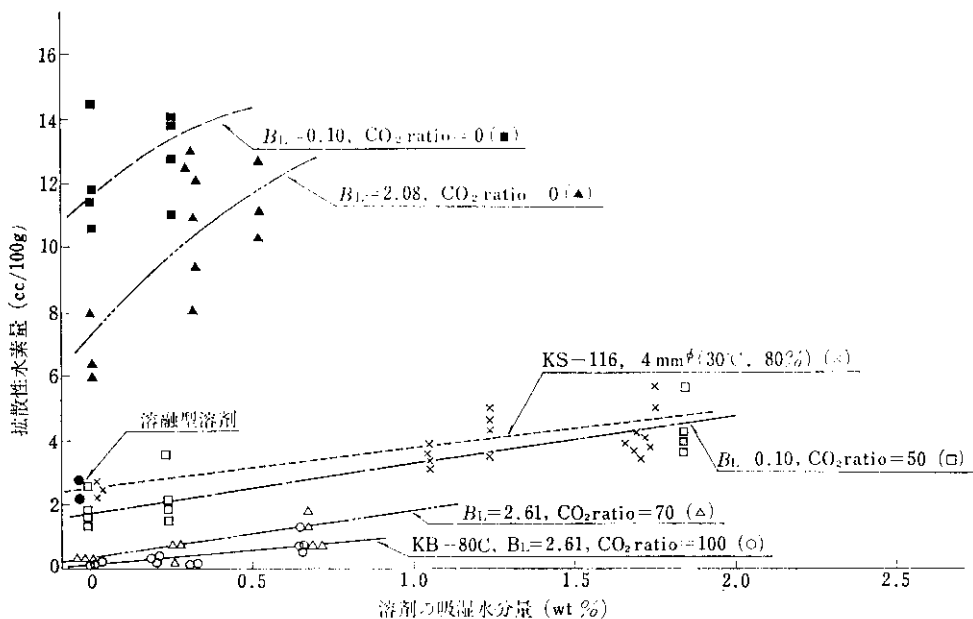


図 4 溶着金属の拡散性水素量におよぼす溶剤の吸湿水分量の影響

$$[H]_t = \{190a_1 + 12a_2 + 0.67b\}^{1/2} - 1.7$$

ここで、

$[H]_t$: JIS 拡散性水素試験で求まる水素量
(cc/100 g)

a_1 : 高温度で被覆剤から放出される水分量,
たとえば結晶水 (wt%)

a_2 : 低温度で被覆剤から放出される水分量,
たとえば吸湿水分 (wt%)

b : 溶接雰囲気の水蒸気分圧 (mmHg)

したがって、溶接金属中の水素量を規制するには、前記 a_1 に関連して溶接棒の選択、 a_2 に関連して溶接棒の管理と乾燥 (375~425°C を推奨) のほかに、 b に関連して溶接時の大気中水分を十分に考慮せねばならない。この大気中水分の重要性については a_1 、 a_2 、 b のオーダーを考えれば明らかである。

サブマージアーク溶接の場合には、炭酸塩を多く含んだ高塩基性溶剤を用いるならばアーク雰囲気中の水素分圧の低下が大きく、またスラグに吸収される水素も多くなるので被覆アーク溶接の場合よりも吸収水素量は、はるかに少ない³⁾。図4に溶接材料の吸湿水分量と拡散性水素量の関係を示すが、溶接スラグが高塩基性であるほど、また熔融型溶剤よりも焼成型溶剤のほうが水素量が少なくなることに注目すべきである。図5は大気中の水蒸気分圧と拡散性水素量の関係であり、サブマージアーク溶接は外気の影響をあまりうけない。

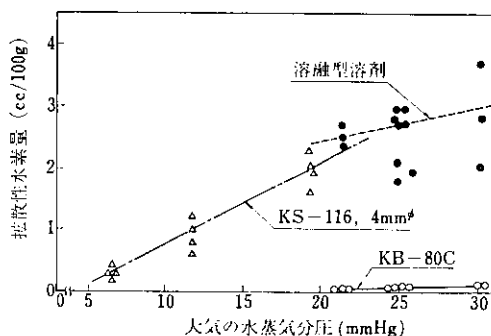


図5 溶着金属の拡散性水素量におよぼす大気の水蒸気分圧の影響

5. オーステナイト系溶接材料

(被覆アーク溶接棒: KSN-9)

9%Ni鋼用の溶接材料としては、従来 INCO 社で開発された 70 Ni 系の完全オーステナイト組織のものが使用されてきたが、Ni 量が非常に多く高価であるために、その添加量を減じた溶接材料の開発が日本溶接協会鉄鋼部会 9 N 委員会を中心として進められてきた。その結果、インコネル系のほかに 45 Ni-10 Cr 系、40 Ni-15 Cr 系、35 Ni-15 Cr 系などのものが実用しうることが明らかになった。

当社で製造している KSN-9 は 35 Ni-15 Cr 系に属し、表18に全溶着金属の化学成分を、表19にその機械的性質を示す。

表 18 KSN-9 の全溶着金属化学成分

溶 接 棒	化 学 成 分 (wt %)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
KSN-9	0.09	0.35	4.52	0.012	0.015	35.4	13.5	1.75

表 19 KSN-9 の全溶着金属機械的性質

溶接材料	引 張 試 験				シャルピー衝撃特性		
	引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	vE_0 (kg·m)	vE_{100} (kg·m)	vE_{196} (kg·m)
KSN-9	62.2	42.3	44	57	11.3 (0)	10.5 (0)	8.5 (0)

() : 脆性破面率 %

9%Ni 鋼用溶接材料の具備すべき条件として
は、

- (1) 溶接金属はボンド部を含めて、極低温でも靱性があること、
- (2) 鋼板に匹敵する強度をもつこと、
- (3) 溶接割れ感受性が低いこと、
- (4) 鋼板と溶接金属との熱膨張係数の差が小さいこと、
- (5) 溶接作業性がよいこと、

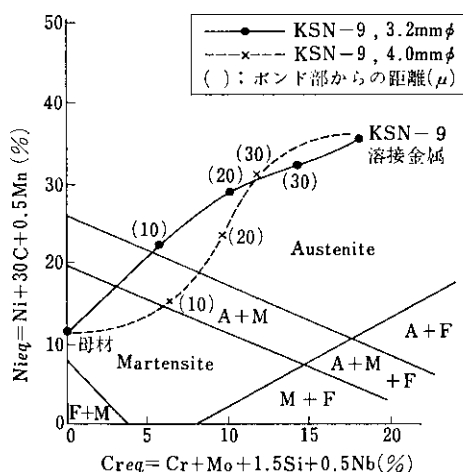


図6 ステンレス鋼溶接金属のシェフラー状態図

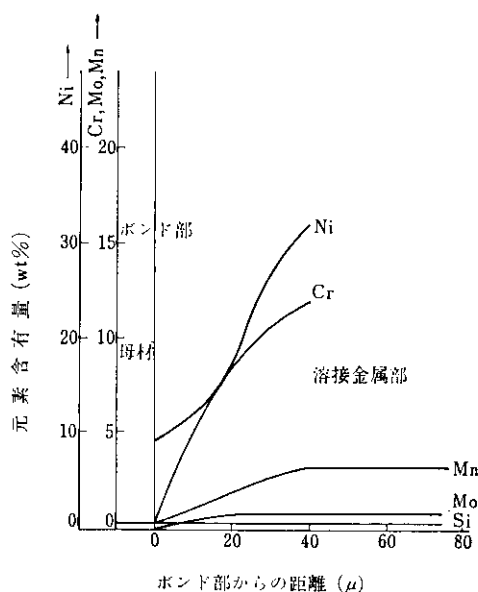


図7 ボンド部近傍の濃度分布 (KSN-9.4 mmφ)

などが挙げられる。

KSN-9 は、低温での靱性を確保するためにオーステナイト組織にしてあるから、 -196°C でも延性破壊する。図6に示すシェフラー状態図によれば、溶接金属組織をオーステナイトにするためにはNi, Cr 当量がさらに少なくともよいが、その場合は極低温での靱性が悪くなり、9%Ni 鋼を溶接したときに熱影響部から溶接金属にかけて図7に示す成分変動が生じて広い領域にわたってマルテンサイト組織となる。図6にはこの成分変動も併記したが、KSN-9 ではボンド部から約15μmまでマルテンサイト組織となる。このマルテンサイト組織の領域はNi 量が少ない溶接棒ではさらに広くなり継手部の脆化が問題となる。

図8⁴⁾は溶接金属中のNi, Cr 量とボンド部の衝撃値との関係であり、Ni 量が約35%以上あればボンド部の脆化は問題にならない。

溶接残留応力を小さくするためには、溶接金属の熱膨張係数は小さいことが望ましい。しかし使用中に発生する熱疲労を少なくするためには鋼板の熱膨張係数に近いほうがよい。熱膨張係数はNi, Cr 量により図9のように変化するがKSN-9

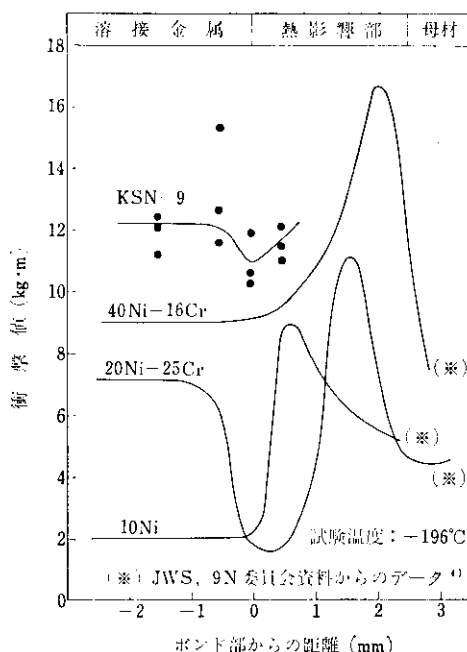


図8 9%Ni 鋼ボンド部近傍の衝撃特性とNi 量の関係

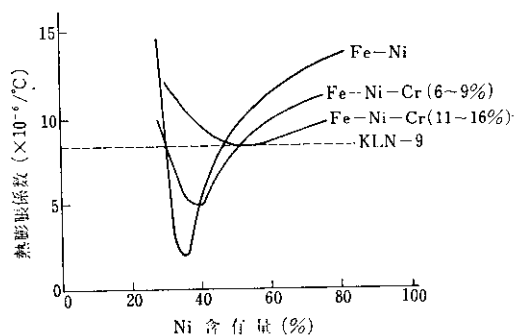
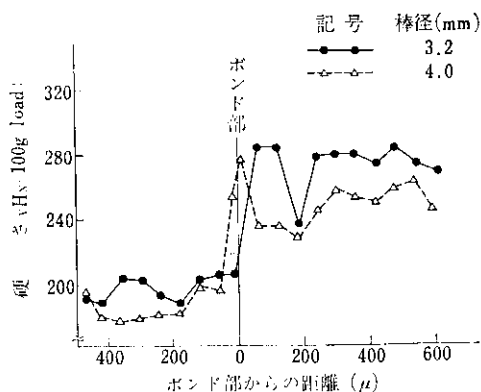
図9 Ni, Cr 量と熱膨張係数の関係⁵⁾

図10 ボンド部近傍の硬さ分布

溶接金属のそれは $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ($-196^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ の平均値) であり、鋼板の $8.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に近い。

溶接金属の組織がオーステナイトであると、鋼板に近い強度、とくに降伏点を得るのが困難となる。KSN-9 の溶接金属の強化はおもに、侵入型元素 C, N とオーステナイトの固溶化元素 Ni, Cr, Mo でおこなうとともに、1次凝固組織の微細化についても考慮している。

KSN-9 を用いた 9%Ni 鋼の継手引張と縦継手曲げ試験結果を表20に、そのボンド部近傍の硬さ分布を図10にしめす。また継手の脆性破壊は、図11の Deep Notch 試験結果に示すように、極低温でも起こりにくい。

被覆アーク溶接棒 KSN-9 は、9%Ni 鋼だけでなく 3.5%Ni 鋼にも適用でき、その溶接継手性能を表 21 に示す。オーステナイト系の溶接材料

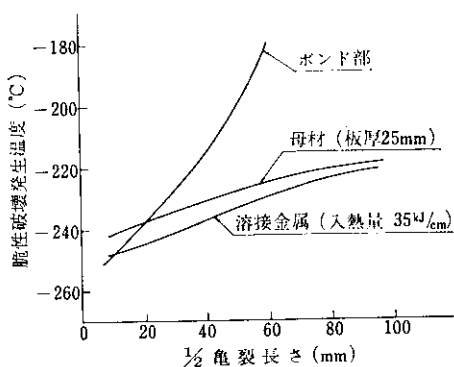


図11 脆性破壊発生温度と亀裂長さとの関係 (n=2.5)

表 20 9%Ni 鋼板の溶接継手性能試験結果

溶接棒	溶接法	溶 接 条 件			継手引張試験		-193°C における シャルピー衝撃値 (kg・m)	縦継手曲げ試験	
		電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (mm/min)	引張強さ (kg/mm ²)	破断位置		初 層 側	最 終 層 側
KSN-9	V	125	24	50	71.2	溶接金属	11.4 (0)	良 好	良 好
	F+V	125	24	150 50	78.8	溶接金属	8.1 (0)	良 好	良 好

(注) F: 下向溶接

V: 立向溶接

(): 脆性破面率 %

は、フェライト系のものにくらべて高温割れを発生しやすい。これは、前者では P, S の溶解度が小さく、かつ固液共存領域が広いために凝固時の

表 21 3.5% Ni 鋼板 KLN3 の溶接継手性能試験結果

銅板		溶接棒	溶接後の 熱処理	継手引張試験				側曲げ試験 (R=2.0t, 180°)
板厚 (mm)	熱処理			引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)	破断位置	
26	焼ならし	KSN-9	溶接のまま	55.8	42.5	22	母材	良好
			応力除去焼鈍	53.3	42.5	26	母材	良好
70	焼ならし		溶接のまま	54.8	40.0	28	母材	良好
			応力除去焼鈍	52.1	39.7	33	母材	良好
32	焼入れ+ 焼もどし		溶接のまま	59.3	50.6	14	溶接金属	良好
			応力除去焼鈍	58.6	50.0	13	溶接金属	良好

表 22 9% Ni 鋼用フェライト系 MIG 溶接材料の化学成分⁸⁾

MIGワイヤー	化 学 成 分 (wt %)									ガス成分 (ppm)		
	Fe	Ni	C	Mn	Al	Ti	Si	P	S	O	N	H
F-23 (INCO)	Bal	12.5	0.05	0.65	0.02	0.02	≤0.10	≤0.005	≤0.005	≤100	≤100	≤3

- (注) 1. 真空溶解
2. シールドガス: Ar

表 23 9% Ni 鋼のフェライト系 MIG 溶接継手性能試験結果⁸⁾

溶接ワイヤー	熱処理	引張試験 片の種類	引 張 試 験					シャルピー衝撃試験 (溶接金属)		
			引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置	VE-21 (kg·m)	VE-93 (kg·m)	VE-160 (kg·m)
F-23 (INCO)	溶接のまま	全溶着金属	110.0	74.0	10.0	32.0	—	9.0 (0)	8.4 (0)	6.2 (2)
		継手	80.4	64.3	7.0	63.0	母材			
	応力除去 焼鈍	全溶着金属	83.5	73.4	22.0	61.5	—	13.0 (0)	11.2 (0)	7.8 (0)
		継手	76.0	63.2	14.5	68.0	母材			

(注) () : 脆性破面率 %

応力除去焼鈍条件: 565°C × 2 h 空冷

偏析傾向が大きいからである。ステンレス鋼用の溶接棒は少量のフェライトを生成させることによって高温割れ感受性を改良しているが、完全オーステナイト系の KSN-9 では溶接金属中の P, S, Si をできるだけ少なくし、Mn や Mo を添加して割れ感受性の改良を行なっている。ステンレス鋼溶接金属では、Si は凝固過程でオーステナイト粒界に低融点シリケートフィルムを形成するので有害である。また $C/\sqrt{Si}$ を大きくすれば割れ発生が防止される⁶⁾。Mn は S と結合しフィルム状硫化物を球状硫化物とし、Mo は凝固残液中の C 濃度を下げ S の活量を減ずるから高温割れ防止に有益であるといわれている⁷⁾。

被覆アーク溶接棒の作業性は、溶接施工にあたり欠陥のない継手を得るために重要な因子である。オーステナイト系溶接棒は、心線の電気抵抗が大きいので、棒焼け防止のために溶接電流を下げて使用しなければならず、能率や作業性の面でフェライト系のものにくらべて劣っている。さらに、オーステナイト系溶接材料はまだ高価であり、クレーター部の高温割れや全溶着金属の強度など未解決の点もあって共金系溶接材料の開発が望まれている。しかし、この場合は低温での靱性と延性に最大の問題点があり現在のところ実用化される

に到っていない。参考のために米国で開発された共金系 MIG 溶接金属の化学成分と機械的性質をそれぞれ表 22, 23⁸⁾に示すが、この種のものは後熱処理をおこないうる溶接部分に近い将来使用されるようになるであろう。

6. む す び

40~80 kg/mm² 級低温用鋼に用いられる溶接材料の諸性質と溶接に当たってのそれぞれの問題点について概説した。

溶接金属の靱性は、鋼板と同じ成分系では熱処理により強靱化した鋼板のそれよりも劣る。したがって、溶接金属には Ni, Mo などの合金元素を鋼板よりも多く添加し、溶接フラックスはできるだけ高塩基性として所定の靱性を確保している。しかし、強度と靱性でさらに余裕をもたせてより広範な使用性のある溶接材料の開発が必要な現状である。

いっぽう、溶接施工面においても、靱性に対する溶接入熱量の制限や溶接割れに対する予熱、後熱、溶接材料の乾燥、溶接雰囲気など、適正な溶接条件の選定に十分な注意が必要である。

参 考 文 献

- 1) A. Enis, R. T. Telford : Welding Journal, 47 (1968), 271 S
- 2) 坪井他：昭和46年度日本溶接学会春季大会発表予定
- 3) 坪井他：第33回溶接法委員会発表予定
- 4) 渡辺正紀他：日本溶接協会 9 N 委員会資料 9 N-4-66
- 5) 伊藤他：住友技報 21 (1969) 3, 280
- 6) S. Polgáry : Metal Construction and British Welding Journal 1 (1969) 2, 93
- 7) 中根金作他：昭和43年度日本溶接学会講演概要, 57
- 8) C. E. Witherell, J. V. Peck : Welding Journal 43 (1964) 11, 473 S