

特集：低温用鋼

低温用鋼の溶接

株式会社神戸製鋼所
菊地和幸

1. はじめに

低温で使用される構造物に対して、その要求仕様に応えるべく様々な鋼種がこれまでに開発されてきた。その中でも、アルミキルド鋼、低温用高張力鋼、3.5%Ni 鋼や9%Ni 鋼に代表される Ni 添加鋼などのフェライト系鋼材は、溶接性に優れ、多くの構造物に適用・実用化されている。本稿では、各鋼種の種類と性質、溶接継手や溶接材料の特性および溶接施工の留意点について紹介する。

2. 低温用鋼の種類と性質、使用用途¹⁾

低温用鋼は使用温度が-10℃以下の温度域での使用に適した鋼材である。実用化されている主な低温用鋼は、アルミキルド鋼、2.5%Ni 鋼、3.5%Ni 鋼、9%Ni 鋼、オーステナイト系ステンレス鋼などがある。表 1 に低温用鋼の種類と最低使用可能温度、図 1 にそれぞれの鋼材の適用温度範囲と各種液化ガスの沸点を示す。JIS G 3126 低温圧力容器用炭素鋼鋼板および JIS G 3127 低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板に対応する鋼種の種類の記事があり、使用用途、適用温度域、貯蔵対象物などから適用する鋼種を選定する必要がある。

表 1 低温用鋼の種類と最低使用可能温度^{2), 3)}

鋼種	JIS規格	種類の記号	最低使用可能温度(参考) ℃
アルミキルド鋼	JIS G 3126	SLA235A	-30
		SLA235B	-45
		SLA325A	-45
		SLA325B	-60
		SLA365	-60
		SLA410	-60
2.5%Ni鋼	JIS G 3127	SL2N255	-70
3.5%Ni鋼		SL3N255	-101
		SL3N275	-101
		SL3N440	-110
5.0%Ni鋼		SL5N590	-130
7.0%Ni鋼		SL7N590	-196
9.0%Ni鋼		SL9N520	-196
		SL9N590	-196

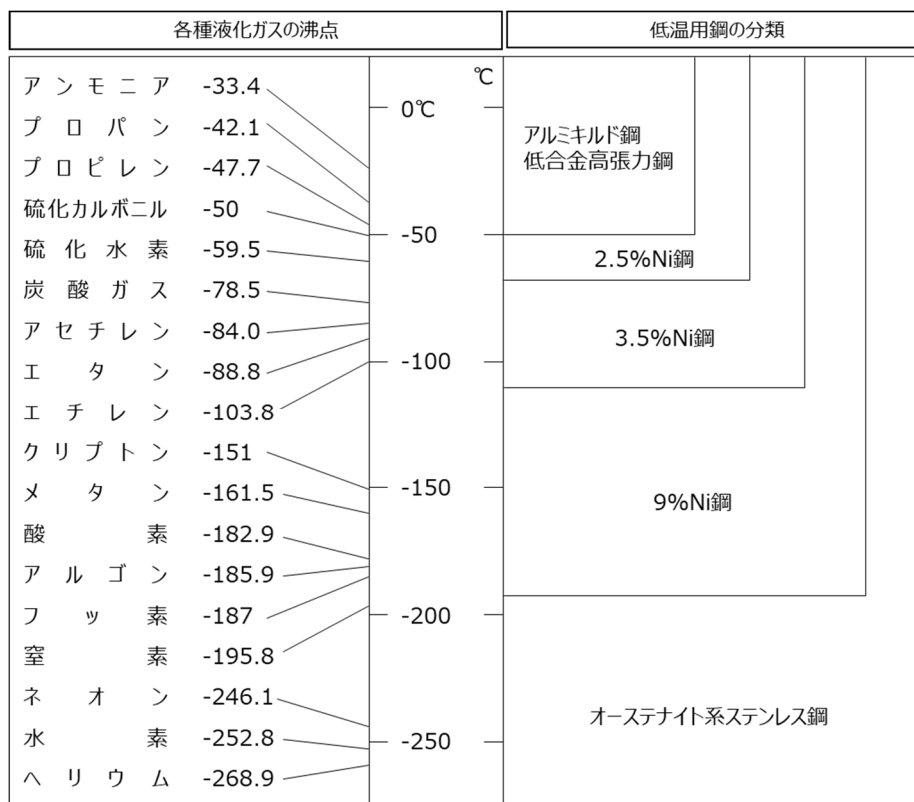


図1 低温用鋼の適用温度範囲と各種液化ガスの沸点

低温用鋼を使用する構造物の一例として、海洋構造物が挙げられる。近年、海洋構造物が大型化するにつれて、鋼材の高強度・軽量化が進んでいる。図2に、高強度鋼を使用した各種構造物の強度クラスおよび設計温度の一例を示す。強度クラスは、耐力 320~830MPa 程度であり、設計温度は強度クラスによって異なるが、-100~0℃程度となる。さらに、構造物の信頼性向上（ぜい性破壊の発生防止）や使用環境の変化（寒冷域化）への対応に伴ってじん性やぜい性破壊防止特性（CTOD; Crack Tip Opening Displacement、き裂先端開口変位）の向上等、高品質化の要求が一段と高まっている。じん性やぜい性破壊防止特性に関しては、【WE-COM マガジン第32号 ぜい性破壊試験—シャルピー衝撃試験、CTOD 試験】（https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_32/sec_1/1-3.pdf）をご参照頂きたい。

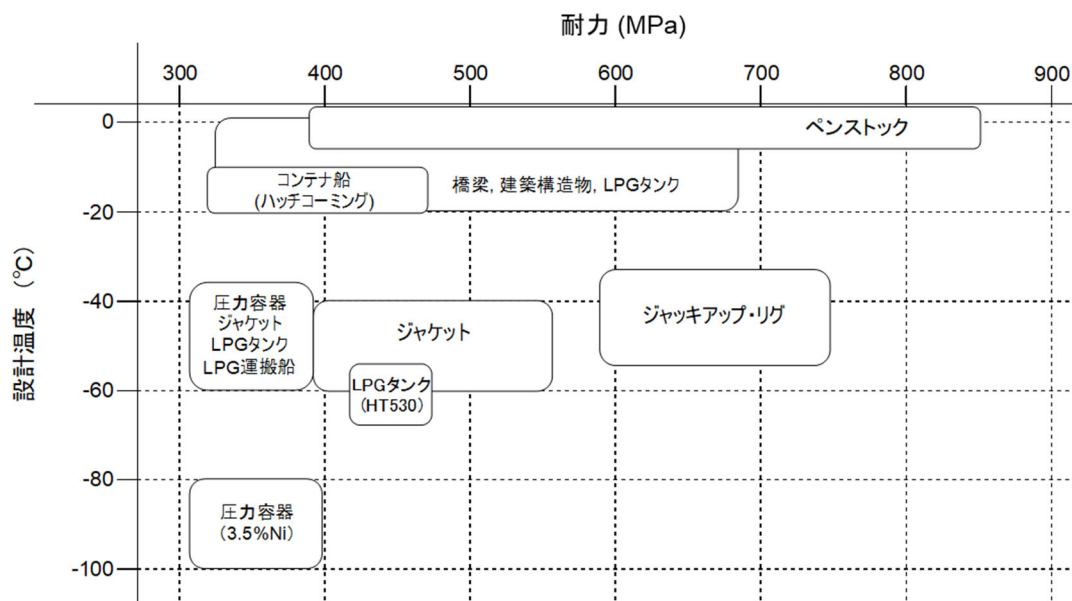


図2 高強度鋼を用いた各種構造物の強度レベルと設計温度⁴⁾

3. アルミキルド鋼、低温用高張力鋼、2.5%Ni 鋼および 3.5%Ni 鋼の溶接

2 項の通り、貯蔵する対象物や構造物の種類に応じて鋼材に要求される機械的性質は異なる。ここでは、アルミキルド鋼、低温用高張力鋼、2.5%Ni 鋼（使用温度が-60℃程度）、3.5%Ni 鋼（使用温度が-100℃程度）の溶接に関して、溶接材料に求められる特性、溶接材料の規格と代表例および溶接の留意点を示す。

3.1 溶接材料に求められる特性（強度、じん性）⁴⁾

溶接材料には低温下で良好なじん性が求められており、マイクロ組織微細化や低酸素化を活用した溶接材料が開発されている。本項では、溶接金属の高じん性化手法を記載する。

(1) 溶接金属のマイクロ組織微細化

溶接金属のじん性向上には、①マトリックスの強じん化、②変態点低下によるマイクロ組織の微細化、さらに③アシキュラーフェライト組織の生成促進が有効であり、これらは強度に関係なく共通の高じん性化手段であることが知られている。一方、溶接金属マイクロ組織は、耐力 500MPa 以下の溶接金属では主にフェライトおよびパーライト組織を、また、耐力 600MPa 以上ではベイナイトおよび／あるいはマルテンサイトを主体とした組織を呈している。このため、低温じん性確保も視野に入れた低温仕様溶接材料においては、耐力 500～600MPa 程度の強度を境として溶接金属の基本的な成分設計は大きく異なる。強度別のじん性向上手段を表 2 に示す。現在は、耐力が 500MPa 級以下の強度クラスでは主に Ti、B の複合添加によって粒界フェライトの抑制およびアシキュラーフェライトの生成を促進している。耐力が 600MPa 級以上では、主に Ni 添加量増大によりマトリックスの強じん化とマイクロ組織の微細化を図っている。

表 2 溶接金属のじん性向上手段

目的	強度レベル（耐力）	
	≤500MPa	≥600MPa
マトリックスの強化	Niの添加	Niの増量
マイクロ組織の微細化	Moの添加 酸素量の低減	酸素量の低減
アシキュラーフェライトの生成	Ti, Bの複合添加	核生成サイトの導入 (Ti酸化物等)

(2) 溶接金属の低酸素化

溶接金属の低酸素化は、変態点の低下によるマイクロ組織の微細化や延性き裂抵抗の向上が期待され、じん性向上手段の 1 つとして活用される。酸素量の低減方法は溶接法によって異なり、基本的には溶接金属中の脱酸反応を促進する必要がある。被覆剤を有する被覆アーク溶接材料やフラックスを用いるサブマージアーク溶接材料では、脱酸成分の添加と被覆剤やフラックス組成の塩基度を高める手法が有効である。また、ガスマタルアーク溶接材料（ソリッドワイヤやフラックス入りワイヤなど）においては、シールドガス中の CO₂ 比率を低減することでアーク雰囲気中の酸素源を極力抑制するとともに、ワイヤに脱酸成分を添加することが有効である。

アッパーシェルエネルギー（上部棚エネルギー）に及ぼす溶接金属の強度および酸素量の影響を

図3に示す。また、溶接金属の耐力レベル、酸素量と安定破壊モードのCTOD、 δ_m （き裂先端開口変位）の関係を図4に示す。アッパーシェルフエネルギーおよび δ_m とも、より高酸素になるほど、また、より高強度になるほど低下することが分かる。これは、より高酸素あるいはより高強度になるほど、真のひずみが小さくなり延性破壊エネルギーが低下するためである。このように、高強度になるほどじん性向上には溶接金属の低酸素化が必須であることが分かる。

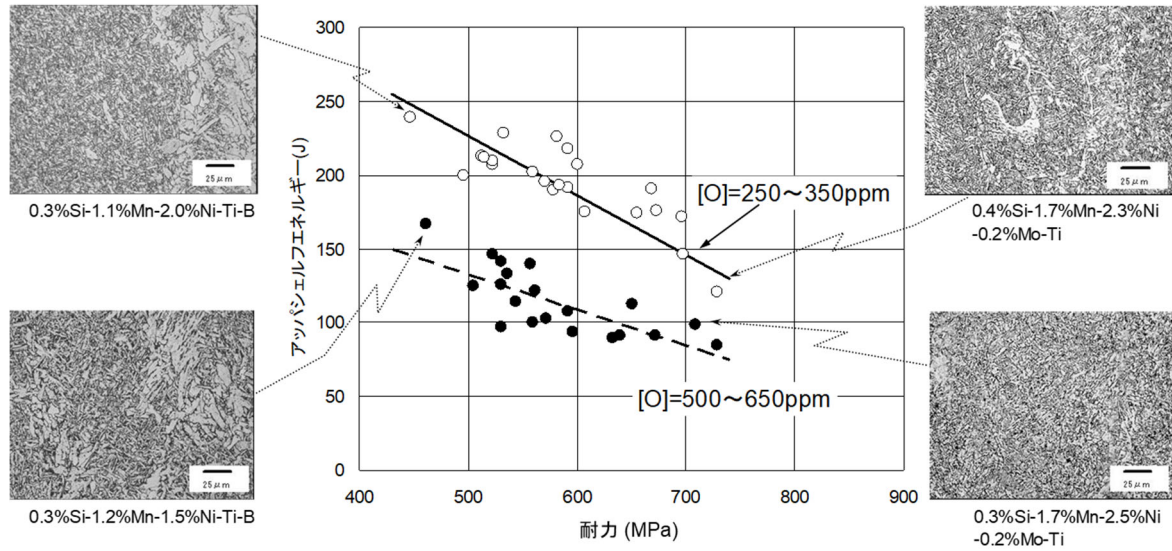


図3 アッパーシェルフエネルギーに及ぼす溶接金属の強度および酸素量の影響

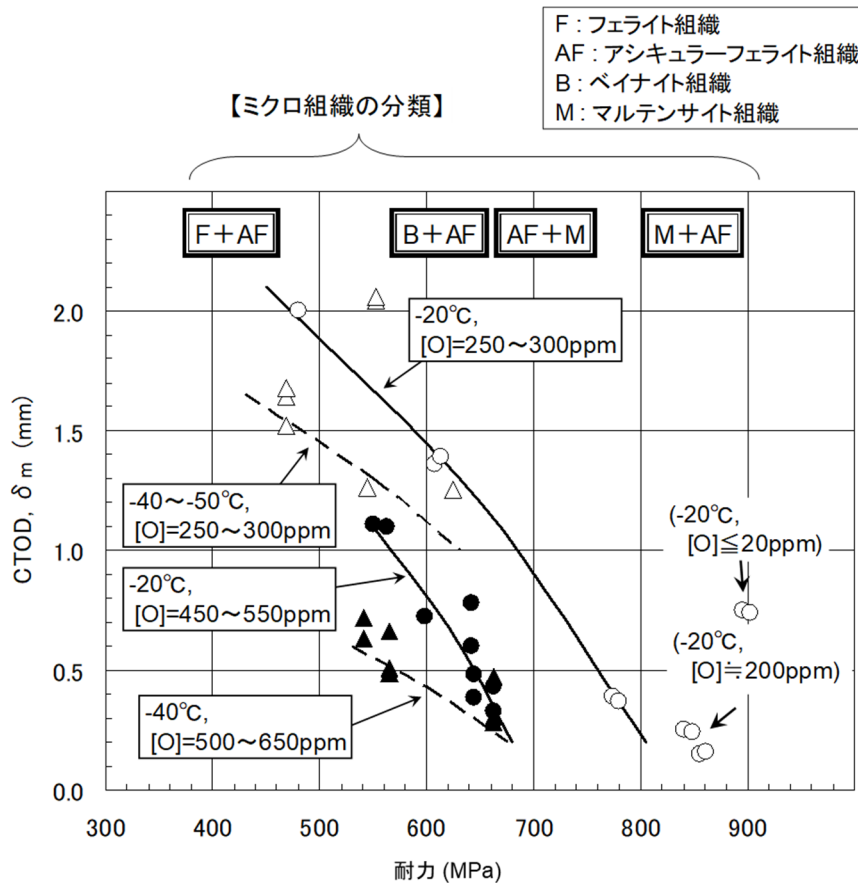


図4 CTOD に及ぼす溶接金属の強度および酸素量の影響（板厚 50mm）

3.2 溶接材料

(1) JIS 規格

JIS G 3126 に規定されるアルミキルド鋼および JIS G 3127 に規定される 2.5%Ni 鋼は、鋼種毎に最低使用可能温度が定まっており、鋼種毎の機械的性質を加味して適用可能な溶接材料の選定を行う必要がある。表 3 に JIS G 3126 で規定されているアルミキルド鋼の機械的性質および化学成分を示す。例えば、鋼種 SLA325A における機械的性質は、降伏点または耐力が 325MPa 以上、引張強さ 440~560MPa、最低使用可能温度は-45℃まで使用可能と規定されている鋼種であることがわかる。

表 3 アルミキルド鋼²⁾

種類の記号	最低使用可能温度(参考) °C	降伏点または耐力		引張強さ MPa	化学成分 (%)					
		厚さ mm	MPa		C	Si	Mn	P	S	Ni
SLA235A	-30	6以上40以下	235以上	400~510	0.15以下	0.30以下	0.70~1.50	0.015以下	0.010以下	規定なし
		40超え50以下	215以上							
SLA235B	-45	6以上40以下	235以上	400~510	0.15以下	0.30以下	0.70~1.50	0.015以下	0.010以下	規定なし
		40超え50以下	215以上							
SLA325A	-45	6以上38以下	325以上	440~560	0.16以下	0.55以下	0.80~1.60	0.015以下	0.010以下	規定なし
SLA325B	-60	6以上38以下	325以上	440~560	0.16以下	0.55以下	0.80~1.60	0.015以下	0.010以下	規定なし
SLA365	-60	6以上38以下	365以上	490~610	0.18以下	0.55以下	0.80~1.60	0.015以下	0.010以下	規定なし
SLA410	-60	6以上38以下	410以上	520~640	0.18以下	0.55以下	0.80~1.60	0.015以下	0.010以下	規定なし

溶接材料の選定は、一般的に、その溶接金属が鋼材規格下限値と同等以上の強度・延性を有し、必要じん性を満足するものが選定される。溶接材料の規格は溶接法別に下記の通り JIS に規定されている。

- JIS Z 3211 軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用被覆アーク溶接棒
- JIS Z 3312 軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用のマグ溶接及びミグ溶接ソリッドワイヤ
- JIS Z 3313 軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用アーク溶接フラックス入りワイヤ
- JIS Z 3316 軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼のティグ溶接用ソリッド溶加棒及びソリッドワイヤ

一例として、JIS Z 3313：軟鋼、高張力鋼及び低温用鋼用アーク溶接フラックス入りワイヤにおけるワイヤの種類記号の付け方を図 5、マルチパス溶接の溶着金属の引張特性を表 4 に、衝撃特性を表 5 に示す。表 3 に示した各鋼種に対して、同等以上の強度・延性を有し、要求されるじん性を満足するものを選定する場合は、図 5 における引張特性および衝撃試験温度の記号に着目する。SLA325A の最低使用可能温度は-45℃であり、衝撃試験温度の記号は 5 (-50℃) または 6 (-60℃) が候補になる。ただし、構造物の要求性能次第では 4 (-40℃) も候補となる。耐力は 325MPa 以上、引張強さは 440~560MPa であるため、同等以上という観点では引張特性の記号は 49 (引張強さ 490~670MPa) 以上が候補となる。

(記号例) T 55 6 T1-1 C A-N3-U H10

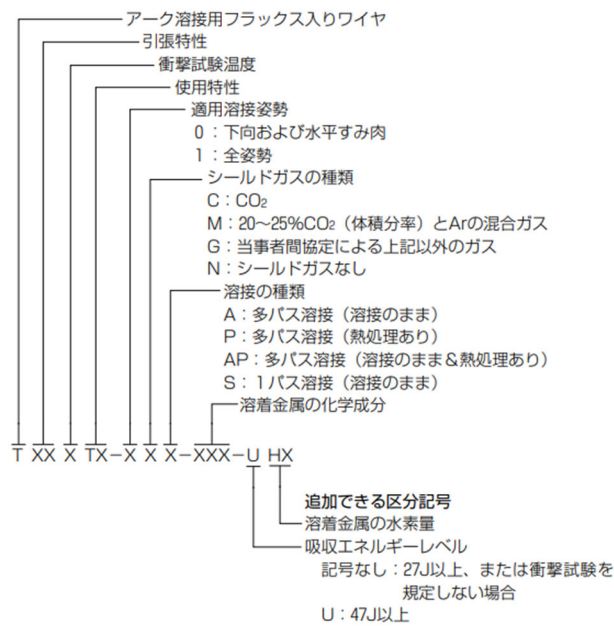


図5 フラックス入りワイヤにおけるワイヤの種類記号の付け方

表4 マルチパス溶接の溶着金属の引張特性

記号	引張強さ MPa	耐力 MPa *)	伸び %
43	430~600	330以上	20以上
49	490~670	390以上	18以上
49J	490~670	400以上	18以上
55	550~740	460以上	17以上
59	590~790	490以上	16以上
59J	590~790	500以上	16以上
62	620~820	530以上	15以上
69	690~890	600以上	14以上

注) 1MPa = 1N/mm²

*) 降伏が発生した場合は、下降伏点とし、それ以外は0.2%耐力とする

表5 マルチパス溶接の溶着金属の衝撃特性

試験温度の記号	試験温度 °C	シャルピー吸収エネルギー	
		規定値27Jの場合 (記号なし)	規定値47Jの場合 (記号: U)
Y	+20	試験片数が5の場合、最大値と最小値を除いた3個を評価する。 試験片数が3の場合、最大値と最小値を除いた2個を評価する。 平均値: 27J以上、 最小値: 20J以上 (2個は27J以上)	3個の平均値: 47J以上
0	0		
1	-5		
2	-20		
3	-30		
4	-40		
5	-50		
6	-60	試験片数: 5個または3個	試験片数: 3個
Zまたは記号なし		衝撃試験を規定しない。	

(2) 溶接材料の一例⁵⁾

海洋構造物の溶接には、耐力 320~420MPa 級、460~500MPa 級および 690MPa 級高強度鋼用と幅広い強度クラスの溶接材料が用いられる。耐力 690MPa 級高強度鋼を除く上記の溶接材料は、造船用として取得した船級協会認定材料も用いられるが、厳寒海域での使用、構造部材の厚板化と高強度鋼材の使用など、海洋構造物に特有の設計要求を満足するためには既取得の認定品質以外の品質を要求される場合が多い。特に低温じん性への要求が厳しいため、海洋構造物の溶接には低温用鋼用溶接材料が多く用いられる。

溶接法別に代表的な低温仕様溶接材料の例を表 6 に示す。表中のほとんどの材料は、-60℃程度までのシャルピー衝撃性能要求に対応可能であり耐力 690MPa 級鋼用および一部の材料を除き、-10℃以下での CTOD 要求にも対応可能な溶接材料が開発されている。3.5%Ni 鋼用溶接材料は、基本的には共金系であり、溶接金属に 3~4%程度の Ni を含有するものが用いられる。Ni を多く含有することによって発生しやすくなる凝固割れを防止するために、P、S が低減され、さらに低 C 系の溶接金属となっている。3.5%Ni 鋼、特に厚板では 570~620℃程度の PWHT が施されるのが一般であり、溶接材料も PWHT 後の強度、延性とじん性が考慮された設計となっている。

表 6 代表的な低温仕様溶接材料

溶接法	適用強度 (MPa) ^{*1}		適用温度 (°C) ^{*1}		溶着金属の化学成分一例 ^{*3} (mass%)						
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	吸収エネルギー ≥47J	CTOD (d) ≥0.25mm or ≥0.10mm※	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	B
被覆アーク溶接	400/390 ^{*2}	520/490 ^{*2}	-60	-30	0.08	0.4	1.4	0.5	-	0.02	0.002
	460/400 ^{*2}	550/520 ^{*2}	-60	-40	0.08	0.3	1.3	1.3	-	0.02	0.002
	530/460 ^{*2}	620/550 ^{*2}	-60	-10	0.07	0.3	1.0	2.1	0.1	0.02	0.002
	530	620	-60	-40 ※	0.07	0.4	1.1	2.6	-	0.02	0.002
	690	770	-60	-	0.04	0.6	1.8	2.6	0.7	-	-
	440 ^{*5}	530 ^{*5}	-100 ^{*4, *5}	-	0.05	0.3	0.7	3.5	-	-	-
サブマージアーク溶接	400	520	-60	-50	0.08	0.2	1.4	-	-	0.02	0.004
	465	550	-60	-20	0.09	0.3	1.7	-	-	0.02	0.004
	530	620	-60	-20	0.08	0.3	1.3	2.3	0.2	-	-
	690	770	-60	-	0.08	0.3	1.7	2.5	0.7	-	-
	440 ^{*6}	530 ^{*6}	-100 ^{*4, *6}	-	0.06	0.2	1.0	3.5	-	-	-
マグ溶接・ソリッドワイヤ	400	520	-60	-30	0.09	0.4	1.9	-	-	0.08	0.006
	690	770	-60	-	0.06	0.5	1.6	3.6	0.8	-	-
マグ溶接・フラックス入りワイヤ	400	520	-60	0	0.04	0.4	1.3	1.4	-	0.05	0.003
	420	550	-60	-10	0.06	0.3	1.2	1.5	-	0.05	0.004
	460	550	-60	-20	0.06	0.3	1.2	1.4	-	0.06	0.003
	690	770	-40	-	0.07	0.3	1.9	2.5	0.2	0.07	-

*1) 機械性能は溶接のままの値 (PWHTなし)

*2) 左側：極性AC / 右側：極性DCEP

*3) 被覆アーク溶接における、上3つおよび1番下の溶接材料は極性AC、他は極性DCEPにおける一例値

*4) ≥27J

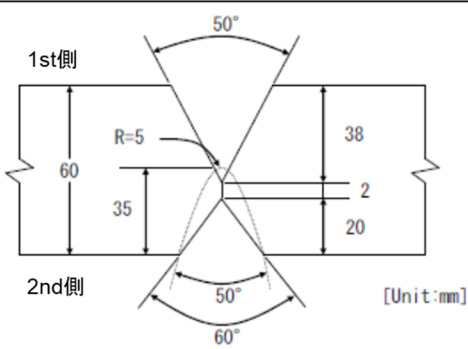
*5) PWHT 620℃で1時間

*6) PWHT 610℃で1時間

(3) 溶接継手性能⁶⁾

引張強さ 610MPa 級高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いて、下向溶接 (1G)、横向溶接 (2G) および立向上進溶接 (3G) の 3 姿勢で板厚 60mm の両面多層溶接継手を作製し、AW (As welded、溶接のまま) および PWHT 後 (620℃で 8 時間) の溶接金属の性能確認を実施した結果を示す。供試鋼板として、引張強さ 610MPa 級高張力鋼板を用いた。開先形状および溶接条件を表 7 に示す。開先形状は圧力容器や海洋構造物で用いられる X 開先として、溶接入熱量は約 1~2kJ/mm とし、1st 側溶接後、機械加工を行い、2nd 側の溶接を行った。

表 7 開先形状および溶接条件

溶接材料	フラックス入りワイヤ ワイヤ径：1.2mm
母材	引張強さ610MPa級高張力鋼板 板厚：60mm
開先形状	 <p>1st側 2nd側 [Unit:mm]</p> <p>1st側溶接後、2nd側を50°、35mm深さに機械加工</p>
溶接姿勢および溶接条件 (溶接入熱量)	(1) 下向：270A-28V (1.2kJ/mm) (2) 横向：260A-28V (0.8kJ/mm) (3) 立向上進：220A-24V (2.4kJ/mm)
PWHT条件	溶接のまま、620℃で8時間 (L.M.P.*=18.7x10 ³)
予熱・パス間温度	90~110℃ (予熱) 140~160℃ (パス間温度)
シールドガス	80%Ar-20%CO ₂

*) ラルソンミラーによるパラメータ

溶接金属の AW および PWHT 後 (620℃で 8 時間) の引張試験結果および衝撃試験結果の一例を表 8、断面マクロを図 6 に示す。

引張強さは、AW および PWHT 後 (620℃で 8 時間) で何れも 620MPa 以上であり、引張強さ 610MPa 級鋼用溶接材料として適用可能な性能を有している。-40℃において何れの溶接姿勢でも優れた衝撃性能を有している。なお、表 8 は、板厚中央のみの結果だが、表側 (1st 側) および裏側 (2nd 側) でも同等の良好な結果が得られている。

表 8 溶接継手における機械的性質 (試験片採取位置：板厚中央)

溶接姿勢	PWHT条件	引張性能			衝撃性能
		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー(J) -40℃
下向	AW *1)	713	748	22	81
	PWHT *2)	627	692	22	61
横向	AW *1)	722	752	22	91
	PWHT *2)	678	721	27	62
立向上進	AW *1)	640	706	24	90
	PWHT *2)	619	686	28	64

*1) AW: As welded (溶接のまま)

*2) PWHT: 620℃で8時間

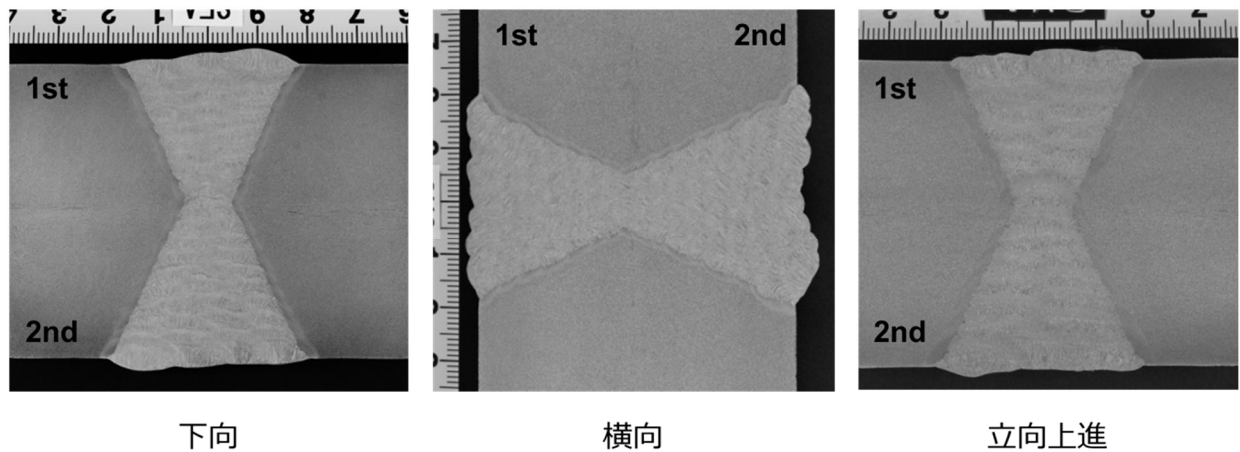


図6 断面マクロ

3.3 溶接時の留意点

JIS 規格分類の他、鋼材規格とは別に実構造物の設計温度や溶接継手部に求められる機械的性質、溶接後熱処理の有無および低温割れなども留意する必要がある。

低温用鋼の溶接施工手順および材料選定に際して留意すべき点は、溶接継手の強度とじん性を考慮して検討することである。溶接金属の強度とじん性に影響する因子としては、溶接時の冷却速度や溶接後熱処理などが挙げられる。

(1) 溶接金属の強度・じん性^{4), 5), 7), 8)}

溶接金属の強度・じん性について検討すると、引張強さが 400~480MPa 級鋼材の溶接では、鋼材と同一強度の溶接材料を選択すれば、特別な場合を除いて、溶接金属の強度が鋼材に対して不足することはほとんどないとされる。一方、高強度鋼、例えば引張強さが 690~950MPa 級高張力鋼の溶接では、溶接時の冷却速度が溶接部の強度に大きく影響する。冷却速度が速いと、溶接金属の強度が上昇し、鋼材熱影響部が硬化する。冷却速度が遅いと、溶接金属の強度が不足し、じん性低下などが生じることがある。

引張強さ 780MPa 級高張力鋼用サブマージアーク溶接材料における溶接金属の強度に及ぼす冷却速度の影響を図 7 に示す。冷却速度が遅いと（すなわち、板厚が小さい、溶接入熱が大きい、あるいは予熱・パス間温度が高い場合）、耐力と引張強さがともに低下し、鋼材の強度を確保できないことがある。また、耐力の方が冷却速度の影響がより大きいことがわかる。この強度クラスの溶接材料の溶接金属強度は、溶接時の冷却速度と密接に関係しており、所定の強度を得るためにはある程度の施工条件管理が必要である。

低温仕様耐力 500MPa 級フラックス入りワイヤによる溶接金属のじん性に及ぼす冷却速度の影響一例を図 8 に示す。溶接金属の機械的性質は、溶接の際の冷却速度によって大きく影響を受ける。溶接施工の各因子によって溶接金属の冷却速度が変化し、溶接金属組織が変化する。例えば、フラックス入りワイヤにおける溶接入熱は、横向溶接では 0.7~1.5kJ/mm、立向上進溶接では 1.5~3.0kJ/mm が採用されている。すなわち、溶接条件の幅が広い施工法であり、それぞれの要求性能に対し板厚に応じた溶接入熱、予熱・パス間温度の設定が重要である。

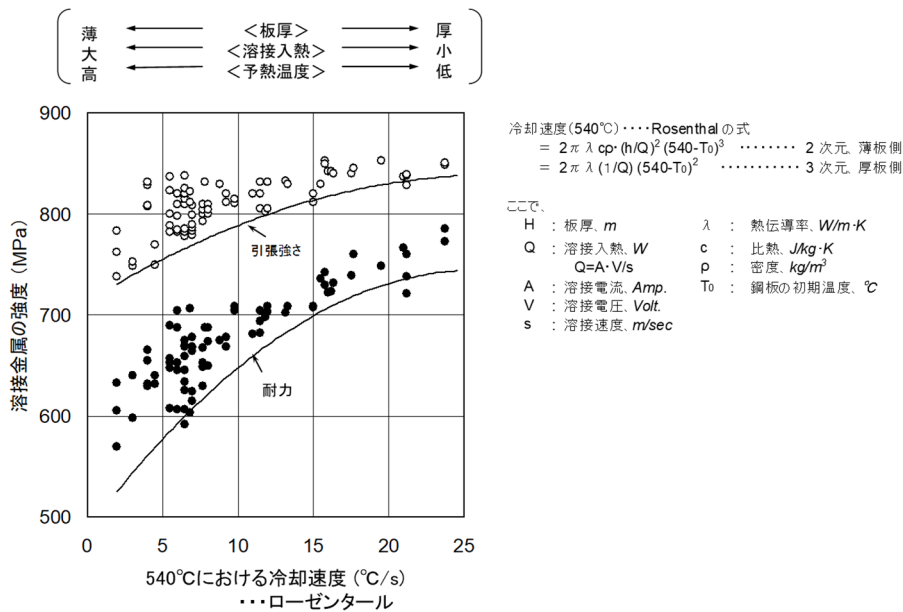


図7 引張強さ 780MPa 級高張力鋼用サブマージアーク溶接材料における溶接金属の強度に及ぼす冷却速度の影響

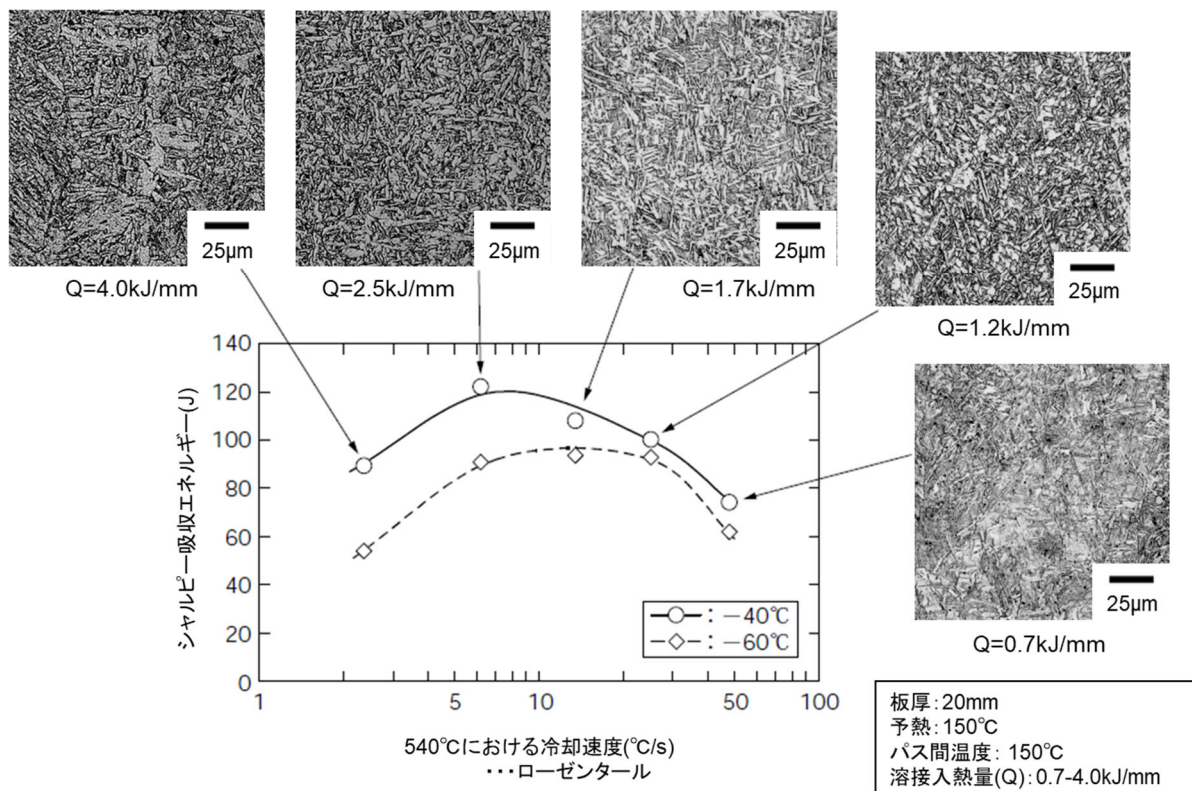


図8 耐力 500MPa 級フラックス入りワイヤによる溶接金属のじん性に及ぼす冷却速度の影響

(2) 溶接後熱処理 (PWHT) と強度・じん性⁷⁾

通常、引張強さ 610MPa 級高張力鋼程度までの溶接金属では、600°C前後のPWHTによって強度は単調に低下し、じん性はひずみの開放によって若干改善される。

一般的に、引張強さ 690~950MPa 級高張力鋼用溶接金属では、ベイナイト-マルテンサイト組織であるために PWHT 後の冷却過程において焼き戻しぜい化を生じ、じん性が劣化する傾向にある。したがって、この強度レベルの構造物で PWHT 処理が施される場合には、溶接施工条件がより厳しく制限される。なお、高強度溶接金属でなくても、溶接材料によっては不可避不純物によって、PWHT 後のじん性が低下する場合がある。例えば、PWHT 時のじん性低下を引き起こす要因として PWHT 時における Nb、V をはじめとした炭化物析出が挙げられる。

一方、近年研究が進み、引張強さ 620~780MPa 級高張力鋼に対して PWHT 可能な溶接材料の開発の報告がされている^{9), 10)}。PWHT 後の溶接金属について、破面形態やマイクロ組織を調査し、良好なじん性を確保するための設計指針が得られている。それは、Mn 量の調整が有効であること、また PWHT 後に形成・成長する炭化物の析出強化によって生じるぜい化を低減するには Cr および Mo 量の調整が有効であることが示された。さらに、その他の合金添加量も最適化することで、幅広い PWHT 条件下でも、良好な強度・じん性を得ることが可能となっている。

(3) その他

① 低温割れ

炭素当量の高い鋼材、特に 690~950MPa 級高張力鋼などの溶接においては、水素による低温割れも考慮する必要がある。低温割れの対策に関しては、【WE-COM マガジン第 37 号 低温割れとその評価方法および対策】(https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_37/sec_1/1-1.pdf)をご参照頂きたい。

② 風とじん性

アーク溶接は、基本的にシールドガスなどによって大気を遮断し酸素と窒素の悪影響を除外することを前提としている。被覆アーク溶接では溶接棒の被覆剤から発生するガスで、またガスシールドアーク溶接ではシールドガスによって熔融金属を大気から保護しているが、風の存在によって遮断効果が損なわれ溶接金属中の窒素量が増加し、じん性が低下する。溶接金属中の窒素量に及ぼす風の影響を図 9、衝撃性能に及ぼす溶接金属中の窒素量の影響を図 10 に示す。風速 1m/s 以下での溶接が推奨され、1m/s を超える場合は防風対策が必要である。

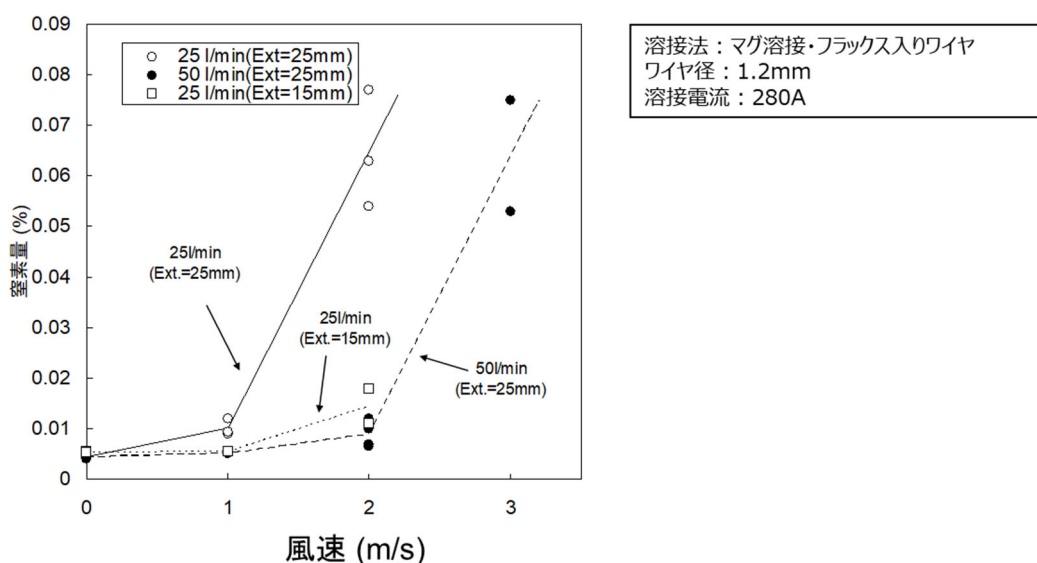


図 9 炭酸ガスアーク溶接における溶接金属中の窒素量に及ぼす風の影響

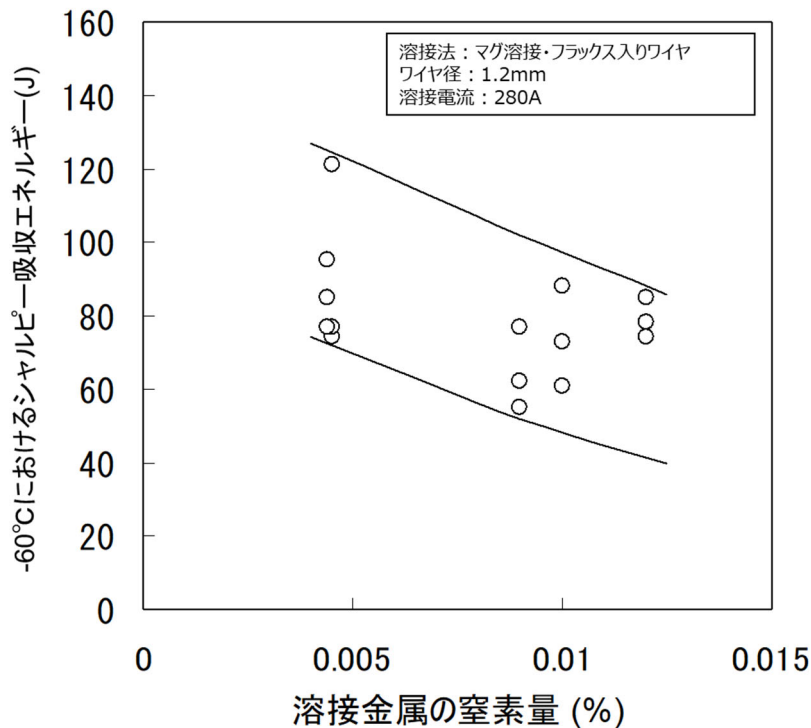


図 10 衝撃性能に及ぼす溶接金属中の窒素量の影響

4. 9%Ni 鋼の溶接^{11), 12)}

9%Ni 鋼は極低温でも優れたじん性を有するフェライト系高張力鋼として開発され、オーステナイト系ステンレス鋼やアルミニウム合金と比べて安価であることと高強度であることから、LNG（液化天然ガス）貯蔵用タンクをはじめ多くの極低温用の構造部材として使用されている。JIS G 3127 で規定されている 9%Ni 鋼の種類を表 9 に示す。

表 9 9%Ni 鋼³⁾

種類の記号	最低使用可能温度(参考) °C	降伏点または耐力		引張強さ MPa	化学成分 (%)					
		厚さ mm	MPa		C	Si	Mn	P	S	Ni
SL9N520	-196	6以上50以下	520以上	690~830	0.12以下	0.30以下	0.90以下	0.015以下	0.015以下	8.50~9.50
SL9N590	-196	6以上100以下	590以上	690~830	0.12以下	0.30以下	0.90以下	0.015以下	0.015以下	8.50~9.50

取扱い上、一般の鋼材と異なる点は、磁化しやすいということであるので注意が必要である。この残留磁気は、溶接時にアークの磁気吹きを生じさせ、著しい場合には溶接を阻害することもある。従って、鋼板を帯磁させないように配慮することが重要で、例えばマグネットクレーンの使用を禁止することや、高圧電線の下に近づけない等々の注意が必要である。

4.1 溶接金属に求められる特性（強度、じん性、耐割れ性）

国内の LNG タンクは、電気事業法やガス事業法に基づいて設計されており、溶接部には引張強さ 660MPa 以上の強度、-196°Cの吸収エネルギーは 34J 以上が求められる。一方、海外では母材と同じ引張強さ 690MPa 以上が必要とされることが多く、-196°Cの吸収エネルギーは 45~55J 以上が一般的に求められる。

溶接材料はぜい性破壊防止の観点からオーステナイト系の材料が適用される。その中でも高強度

の溶接金属が得られ、また母材である 9%Ni 鋼と線膨張係数が近く、母材と溶接金属の遷移層の硬化を抑制することができるニッケル合金が溶接材料に適用される。

ニッケル合金は強度、じん性に優れた材料であるが完全オーステナイト組織であり、溶接時の高温割れ感受性が高い。そのため、耐割れ性に優れた溶接材料を選定するとともに、溶接施工時にも留意することが求められる。

4.2 溶接材料

(1) JIS 規格、溶接材料の一例

9%Ni 鋼用溶接材料の JIS には、Z 3225 (9%ニッケル鋼用被覆アーク溶接棒)、Z 3332 (9%ニッケル鋼用ティグ溶接棒及びソリッドワイヤ)、Z 3333 (9%ニッケル鋼用サブマージアーク溶接ソリッドワイヤ及びフラックス) があり、国内の地上式 LNG タンクの溶接に多くの実績がある。これら溶接材料の一例を表 10 に示す。適用部位は円筒タンクの立向溶接には被覆アーク溶接 (SMAW)、横向溶接にはサブマージアーク溶接 (SAW) が主に適用されるが、自動ティグ溶接により、全姿勢での溶接がされる例もある。

表 10 9%Ni 鋼用溶接材料の化学成分および機械的性質一例

溶接法	JIS規格	溶接金属の化学成分 (mass%)											0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	VE _{-196℃} (J)
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Nb			
SMAW	Z3325 DNi-1	0.09	0.26	2.26	0.004	0.002	67.6	13.9	3.7	9.8	0.6	1.7	430	680	67
	Z3225 DNi-2	0.03	0.49	0.28	0.003	0.002	68.6	1.9	18.6	6.8	2.9	-	440	730	83
GTAW	Z3332 YGT9Ni-2	0.02	0.03	0.03	0.002	0.001	70.4	2.0	19.0	5.5	3.0	-	460	730	160
SAW	Z3333 FS9Ni/YS9Ni	0.03	0.74	0.58	0.003	0.002	64.0	1.7	17.2	14.9	2.7	-	410	680	70

注) GTAWはワイヤの分析値

また、近年では特に立向溶接でフラックス入りワイヤを用いたマグ溶接が適用されることも多い。9%Ni 鋼用の溶接に適用されるニッケル合金フラックス入りワイヤの例として、JIS Z 3335 の Ni 1013、Ni 6625 (Alloy 625)、Ni 6276 (Alloy C276) 系がある。

JIS Z 3335 の記載一例を表 11 に示す。

表 11 JIS Z 3335 「ニッケル及びニッケル合金アーク溶接フラックス入りワイヤ」の一例

化学成分を表す記号	化学成分表記による記号	溶接金属の化学成分 (mass%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Fe	Mo
Ni6082	NiCr20Mn3Nb	0.10以下	0.50以下	2.5~3.5	0.030以下	0.015以下	67.0以上	0.5以下	18.0~22.0	3.0以下	2.0以下
Ni1013	NiMo17Cr7W	0.10以下	0.75以下	2.0~3.0	0.020以下	0.015以下	58.0以上	0.5以下	4.0~8.0	10.0以下	16.0~19.0
Ni6276	NiCr15Mo15Fe6W4	0.02以下	0.2以下	1.0以下	0.030以下	0.030以下	50.0以上	0.5以下	14.5~16.5	4.0~7.0	15.0~17.0
Ni6456	NiCr16Mo10Nb	0.10以下	0.8以下	5.0~8.0	0.020以下	0.015以下	58.0以上	0.5以下	15.0~18.0	10.0以下	9.0~11.0
Ni6625	NiCr22Mo9Nb	0.10以下	0.50以下	0.50以下	0.020以下	0.015以下	58.0以上	0.5以下	20.0~23.0	5.0以下	8.0~10.0

化学成分を表す記号	化学成分表記による記号	溶接金属の化学成分 (mass%)						0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
		Nb	Co	Al	Ti	V	W			
Ni6082	NiCr20Mn3Nb	2.0~3.0	---	---	0.75以下	---	---	360以上	550以上	22以上
Ni1013	NiMo17Cr7W	---	---	---	---	---	2.0~4.0	400以上	690以上	27以上
Ni6276	NiCr15Mo15Fe6W4	---	2.5以下	---	---	0.35以下	3.0~4.5	400以上	690以上	22以上
Ni6456	NiCr16Mo10Nb	1.5~3.0	---	---	1.0以下	---	---	400以上	690以上	27以上
Ni6625	NiCr22Mo9Nb	3.15~4.15	---	---	0.40以下	---	---	420以上	690以上	22以上

(2) 溶接継手性能¹³⁾

Ni1013 系全姿勢用フラックス入りワイヤを用いて、立向上進姿勢で板厚 12mm の両面多層溶接継

手を作製し、溶接金属の性能確認を実施した結果を示す。供試鋼板として、9%Ni 鋼板を用いた。開先形状および溶接条件を表 12 に示す。開先形状は圧力容器で用いられる X 開先として、溶接入熱量は約 1~2kJ/mm とし、機械加工を行い、2nd 側の溶接を行った。

表 12 開先形状および溶接条件

溶接材料	フラックス入りワイヤ (JIS: Ni1013系) ワイヤ径 : 1.2mm
母材	9%Ni鋼板 板厚 : 12mm
開先形状	<p>※棒状のセラミックバックング使用 (mm)</p> <p>1st 60°</p> <p>12 ルート 間隔=3</p> <p>7</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>10</p> <p>2nd 60°</p> <p>R=5~7</p> <p>7</p> <p>1st側溶接後、2nd側を60°、約7mm深さに機械加工</p>
溶接姿勢および溶接条件 (溶接入熱量)	立向上進 150~160A-26V (1.7kJ/mm)
シールドガス	100%CO ₂

溶接金属のビード外観、断面マクロおよび機械的性質を表 13 に示す。引張強さおよびシャルピー吸収エネルギーは良好な値を示している。

表 13 溶接金属のビード外観、断面マクロおよび機械的性質

ビード外観	
断面マクロ	
継手引張強さ (MPa) (試験温度 : 20℃)	754 破断位置 : 溶接金属
シャルピー吸収エネルギー (J) (試験温度 : -196℃)	91,78,92 Avg.87

4.3 溶接時の留意点

9%Ni 鋼溶接時に発生しやすい課題および対策を表 14 に示す。また、ニッケル合金による 9%Ni 鋼

の溶接に際しては、溶接金属が完全オーステナイト組織であるため高温割れが発生しやすい。高温割れ防止の観点から、開先形状を狭くしすぎないことや低電流、低速度の溶接条件での施工、およびクレータ部の除去などが推奨される。

表 14 9%Ni 鋼溶接時の注意点

課題	内容	溶接時の対策
高温割れ	溶接金属は完全オーステナイト組織であり、高温割れが発生しやすい	低電流、低速度施工 適切な開先形状の選定 クレータ部を除去する
ブローホール	水分、油分が原因となる。スタート等シールドが不安定な箇所が発生しやすい	開先面の水分、油分の除去 捨て金法などのアークスタート法を適用する
融合不良	Ni基合金は湯流れが悪く、融合不良が発生しやすい	適切な開先形状の選定 母材(ルート部)を十分に溶かす運棒法
磁気吹き	9%Niは磁化しやすい	タブ板の使用 アース位置の変更 母材の消磁処理
強度低下	異材溶接であり、母材希釈が大きい場合には、溶接金属の強度が低下する	特にサブマージアーク溶接において、 過大な溶接電流での施工を避ける

5. おわりに

本稿はアルミキルド鋼をはじめとした、低温用鋼の溶接に関して紹介を行った。適切な材料の選択と溶接技術の適用により、高品質な溶接の実現が可能である。この記事が、低温用鋼溶接に関わる方々に少しでも参考になれば幸いである。

引用文献

- 1) 神戸製鋼所 ぼうだより 技術ガイド 溶接 110 番 低温用鋼の溶接について
- 2) JIS G 3126 : 2015 低温圧力容器用炭素鋼鋼板
- 3) JIS G 3127 : 2013 低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板
- 4) 川崎 : 神戸製鋼所 技術レポート vol. 51 2011-10
- 5) 北川ら : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 63 No. 1 (Apr. 2013) p.16-21
- 6) 加納ら : 神戸製鋼所 技術レポート vol. 61 2020-1
- 7) 原 : 溶接技術 1999.9 vol.47 p.89-93
- 8) 末永ら : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 54 No. 2 (Aug. 2004) p.38-42
- 9) 加納ら : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 72 No. 1 (Jun. 2023) p.60-64
- 10) 井元ら : まてりあ 第 62 巻(2023) 2 号 p.122-124
- 11) 鈴木 : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 59 No. 1 (Apr. 2009) p.111-115
- 12) 河田ら : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 67 No. 1 (Mar. 2018) p.27-32
- 13) 山崎ら : R&D 神戸製鋼技報/Vol. 72 No. 1 (Jun. 2023) p.49-54

<略歴>

菊 地 和 幸 (きくち かずゆき)

2013年3月 筑波大学 大学院 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻 修士
課程 修了

2013年4月 株式会社神戸製鋼所 入社
現在に至る