

(技術資料)

液化CO₂輸送タンク向け溶接材料

菊地和幸*¹・徐 培尔*¹・加納 寛*¹・伊藤孝矩*²(博士(工学))・高嶋康人*²(博士(工学))・名古秀徳*³(博士(工学))

Welding Consumables for Liquefied CO₂ Carrier Tanks

Kazuyuki KIKUCHI・Baini JO・Satoru KANO・Dr. Takanori ITO・Dr. Yasuhito TAKASHIMA・Dr. Hidenori NAKO

要旨

液化CO₂輸送タンクに適した溶接材料開発が求められている。本研究では、低温・低圧仕様向けに、-55℃環境下でじん性を確保し、耐力390 MPa以上を満たす材料を開発した。Ni添加と組織微細化により限界CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 0.15 mm以上を達成し、将来の大型化に備え、耐力500 MPa級材料も検討した。また、中温・中圧仕様向けには、PWHT (Post Weld Heat Treatment) 後に耐力690 MPa以上、-35℃での良好なCTOD性能を有するTRUSTARC™ LB-80LSRを開発した。

Abstract

There is a need for the development of welding consumables suitable for liquefied CO₂ carrier tanks. In this study, welding consumables have been developed for low-temperature/low-pressure service that ensure sufficient toughness at -55℃ and achieve a proof strength of 390 MPa or higher. By adding Ni and refining the microstructure, a critical crack tip opening displacement (CTOD) of 0.15 mm or greater has been obtained. Materials with a proof strength of around 500 MPa have also been examined for future upsizing. For medium-temperature/medium-pressure service, TRUSTARC™ LB-80LSR has been developed, providing a proof strength of 690 MPa or higher after post weld heat treatment (PWHT) and excellent CTOD performance at -35℃.

検索用キーワード

液化CO₂, PWHT, 510 MPa級, 610 MPa級, 780 MPa級, じん性, 溶接金属, 固溶軟化, 被覆アーク溶接棒, フラックス入りワイヤ, サブマージアーク溶接

まえばき = 火力発電所や製鉄所から排出される二酸化炭素 (CO₂) を回収し、貯留または有効活用する技術として CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) または CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) が注目されている。回収したCO₂の輸送方法として、大規模輸送が可能な海上輸送が検討されており、CO₂を液化して輸送すればコスト面で有利との報告がある¹⁾。図1に示すように、CO₂の特性上、液体状態を保つには

温度を-55~-20℃程度、圧力を1.0弱~2.0 MPaの範囲にすることが必要であり、その環境に適した材料が必要となる^{2), 3)}。液化CO₂輸送タンク的设计として、欧州のCCSプロジェクトであるNorthern Lightsプロジェクトでは、中温・中圧仕様を採用されている。タンク設計として、約2.0 MPaの中圧設計であり、タンク容量約7,500 m³/隻で建造されているが、輸送効率向上のため大型化検討も進められている^{4), 5)}。また、タンクの大型化検討に伴い、圧力を0.7~1.0 MPa程度へ下げた低温・低圧仕様のタンクの検討も国内外で進められており、設計圧力・温度の異なるタンクに好適な溶接材料の要望が高まっている。

本稿では、液化CO₂輸送タンク的设计を鑑みて、開発が完了した低温・低圧仕様および中温・中圧仕様の溶接材料について紹介する。溶接材料の種別は、被覆アーク溶接棒 (以下、SMAWという)、フラックス入りワイヤ (以下、FCWという) およびサブマージアーク溶接 (以下、SAWという) 材料を対象とした。

1. 低温・低圧仕様液化CO₂輸送タンク向け溶接材料

溶接材料の設計として、0.7~1.0 MPa圧力条件下でCO₂の液相が存在しうる-55℃付近において27 J以上のじん性を有すること、強度クラスは耐力390 MPa以上を有

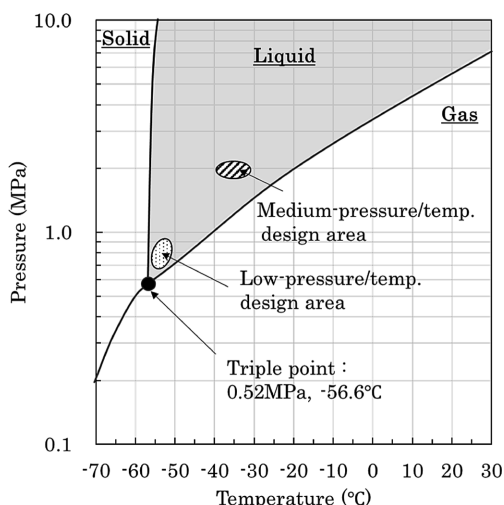


図1 CO₂状態図および液化CO₂輸送タンク設計一例
Fig.1 CO₂ phase diagram and an example of tank design for liquefied CO₂ tank

*¹ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部 *² 技術開発本部 材料研究所 *³ 技術開発本部 応用物理研究所

することを目標とした。また、タンクの安全性の観点から破壊じん性の指標として、限界CTOD (Crack Tip Opening Displacement) も考慮した。限界CTODは、DNV 発刊の船級規格 DNV-OS-C401 に記載のある 0.15 mm 以上を目標とした⁶⁾。

いっぽう、球形タンクや圧力容器などの建造においては、溶接で導入される残留応力の低減や疲労特性向上を目的に、溶接後熱処理 (Post Weld Heat Treatment, 以下、PWHT という。) が施される。日本海事協会発刊の鋼船規則 N 編 6.4 項によると、最大板厚が 40 mm 超え 50 mm 以下の鋼材を独立型タンクタイプ C およびプロセス用圧力容器に適用する場合は PWHT を実施しなければならないと記載されている⁷⁾。そこで、溶接材料の設計指針においても PWHT を考慮した。

1.1 溶着金属性能

1.1.1 実験方法

各施工法における溶接材料に対して、種々の合金成分を調整することで、強度と低温じん性を両立する溶着金属化学成分の抽出を試みた。試作対象とした溶着金属の化学成分範囲を表 1、溶着金属の作製に用いた溶接条件を表 2 に示す。SMAW は板厚 20 mm、開先角度 20°、ルート間隔 16 mm の試験板を用い、直流 (DCEP) にて多層溶接し、溶着金属を作製した。また、FCW は同

板厚、開先角度 45°、ルート間隔 13 mm の試験板を用い、シールドガス CO₂ にて多層溶接し、溶着金属を作製した。SAW は板厚 25 mm、開先角度 30°、ルート間隔 13 mm の試験板を用い、直流にて多層溶接し、溶着金属を作製した。

各溶接材料における溶着金属溶接時の入熱は、SMAW が約 2.1 kJ/mm、FCW が約 1.6 kJ/mm、SAW が約 2.3 kJ/mm である。SMAW では、予熱、パス間温度を 95~105°C、FCW では、予熱 100~110°C、パス間温度を 140~160°C、SAW では予熱、パス間温度を 140~160°C とした。PWHT 条件は、溶接のまま (As-welded) および 580°C で 2 時間保持した 2 条件で試験を実施した。

各溶着金属の中央部から AWS (American Welding Society) 規格に準じて引張試験片とシャルピー衝撃試験片を作製し、引張性能およびじん性を評価した。また、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (以下、SEM という。) を用いて溶着金属のミクロ組織を観察し、低温におけるじん性を低下させる粗大組織の有無を確認した。

1.1.2 溶着金属のミクロ組織観察および機械的性質

開発した各溶接材料の溶着金属ミクロ組織の一例を図 2 に示す。いずれの開発材においても粗大組織 (粗大な粒界フェライト) は確認されず、微細なアシキュラーフェライト主体の組織であった。一般的に溶接金属のじん

表 1 溶着金属の化学成分範囲
Table 1 Chemical composition range of deposited metal

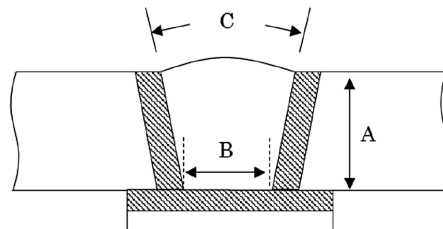
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Others
0.03 - 0.08	0.1 - 0.4	0.7 - 1.5	1.0 - 4.0	Max. 0.3	Max. 0.4	Ti, B

Unit: mass%

表 2 溶着金属における溶接条件
Table 2 Welding condition for deposited metal

Welding consumables	SMAW	FCW	SAW
Base metal (thickness: 20, 25 mm)	JIS G 3106 SM490A (Buttered by each welding consumables)		
Welding position	Flat (1G)		
Current and polarity	DCEP		
Welding current	160 A	280 A	525 A
Arc voltage	24 V	30 V	30 V
Heat input	2.1 kJ/mm	1.6 kJ/mm	2.3 kJ/mm
Preheating temperature	95~105°C	100~110°C	140~160°C
Interpass temperature	95~105°C	140~160°C	140~160°C
PWHT condition	As-welded, 580°C × 2 h		

Groove configuration



[Thickness, Root gap, Groove angle]
SMAW: A=20mm, B=16mm, C=20°
FCW: A=20mm, B=13mm, C=45°
SAW: A=25mm, B=13mm, C=30°

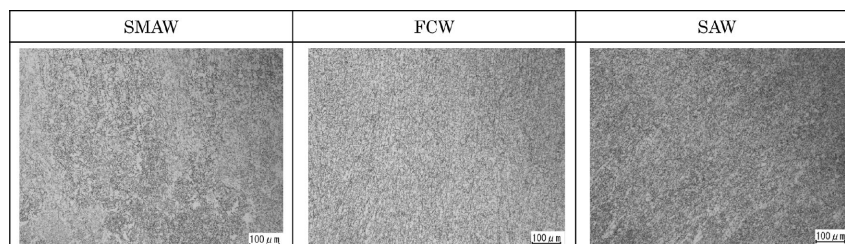


図 2 溶着金属のミクロ組織

Fig.2 Microstructure of deposited metal

性向上には、マトリクスが強じん化およびマイクロ組織の微細化（アシキュラーフェライトの生成促進）が有効であり、いずれの開発材においても同様の手法を適用した⁸⁾。また、合金成分のNiは、その添加量に応じて低温で固溶軟化の効果が発現し、じん性改善に寄与することが知られている⁹⁾。図3に、引張強さ610 MPa級の溶接金属を対象に、1%から3%のNiを添加した場合における固溶軟化の影響を示す。固溶軟化を示す指標とし

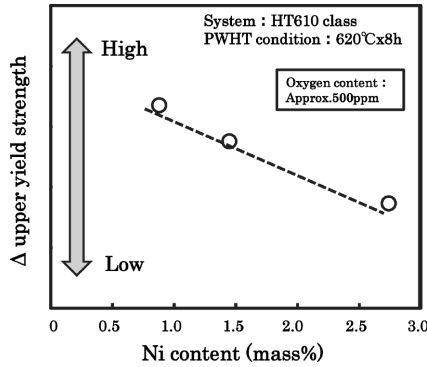


図3 Ni量と上降伏点の関係

Fig.3 Relationship between Ni content of weld metal and Δ upper yield strength

※ Δ upper yield strength = upper yield strength [-60°C or lower] - upper yield strength[RT]

て、縦軸には低温（-60°C以下）および室温引張試験における上降伏点の差分を、横軸にはNi添加量を用いた。Ni添加量の増加に伴い、上降伏点の差分が減少する傾向がみられ、低温領域での固溶軟化を示す結果と判断される。本結果も加味し、開発材には一定量のNiを添加する設計とした。

溶着金属の機械的性質を表3に示す。各開発材において、耐力はPWHT 580°Cで2時間保持した条件を含めて目標とした390 MPa以上を満足しており、-60°Cにおけるシャルピー吸収エネルギーに関しても27 J以上の良好な値を示していた。

1.2 溶接継手性能

1.2.1 実験方法

表4に示す溶接条件において、各開発材における厚板継手性能を評価した。JIS G 3106 SM490Aの母材を用い、SMAWおよびFCWは立向上進姿勢（3G）、SAWは下向姿勢（1G）において、溶接入熱量約2.0~3.0 kJ/mm、X形開先とした両面溶接継手を作製した。いずれの施工法も予熱温度は100°C以上、パス間温度は140~160°Cとして試験を実施した。PWHT条件は、溶接のままおよび580°Cで6時間保持した2条件で試験を実施した。

表3 溶着金属の機械的性質

Table 3 Mechanical properties of deposited metal

Welding consumables	PWHT	Tensile properties ^{*1)}			Notch toughness ^{*2)}	
		0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J)	
					-80°C	-60°C
SMAW	As-welded	494	586	33	158	192
	580°C × 2 h	478	566	31	155	167
FCW	As-welded	492	585	30	93	122
	580°C × 2 h	462	551	32	95	128
SAW	As-welded	518	598	30	188	235
	580°C × 2 h	481	569	32	198	218
Target		min. 390	min. 510	min. 27

Location of specimen: t/2 (Center of deposited metal)

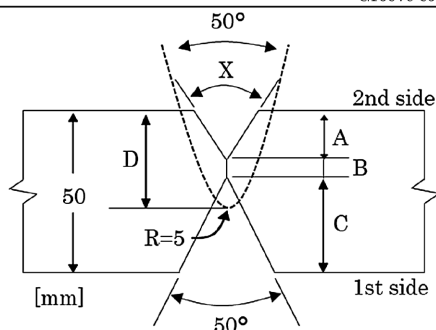
*1) Size of tension specimen: Dia.=12.7 mm, G.L.=50.8 mm

*2) Size of Charpy impact test specimen: 10 mm × 10 mm, 2 mm V-notch

表4 溶接継手における溶接条件

Table 4 Welding condition of butt joint

Welding consumables	SMAW	FCW	SAW
Base metal (thickness: 50 mm)	JIS G 3106 SM490A		
Welding position	Vertical-up (3G)		Flat (1G)
Current and polarity	DCEP		
Welding current	130 A	200 A	500~550 A, 26~32 V
Arc voltage	24 V	24 V	26~32 V
Heat input	2.7 kJ/mm	1.9 kJ/mm	2.5 kJ/mm
Preheating temperature	Min. 100°C		
Interpass temperature	140~160°C		
PWHT condition	As-welded, 580°C × 6 h		
Groove configuration			



[Groove dimension(mm), angle(°)]
 SMAW: A=15, B=2, C=33, D=30, X=70
 FCW: A=15, B=2, C=33, D=28, X=60
 SAW: A=15, B=5, C=30, D=24, X=80

1.2.2 溶接継手の断面マクロおよび機械的性質

各開発材で作製した溶接継手の断面マクロを図4に示す。各開発材いずれも良好な溶込み形状を有していた。

各開発材を用いた溶接金属の機械的性質を表5に示す。いずれの溶接金属においても、耐力390 MPa以上かつ、-60℃におけるシャルピー吸収エネルギーも良好であった。

各溶接継手において、CTOD試験を実施した結果を表6に示す。CTOD試験片におけるノッチは溶接金属中央とし、WES 1108 (2016)を参照して試験を実施した。いずれの開発材も、試験温度-60℃において限界CTODは開発目標0.15 mmを満足することを確認した。

1.3 溶接金属の高強度化検討

今後、タンクのさらなる大型化に伴い、鋼材の高強度・軽量化も進むことが考えられる。そこで、前述の開発材の高強度化、すなわち耐力500 MPa以上を目標とした溶接材料も検討した。

高強度化に向けて、表1に示す合金成分を対象に添加量の最適化を行った。溶接金属のマイクロ組織とシャルピー衝撃試験片の破面単位に着目し、とくにMoの添加量を最適化した。溶接金属マイクロ組織およびシャルピー衝撃試験片におけるSEMによる破面観察結果を図5に示す。合金成分の最適化により、溶接金属マイクロ組織が微細化し、さらに破面単位の減少が確認された。一般的に破面単位の減少はじん性向上に寄与することが知られて

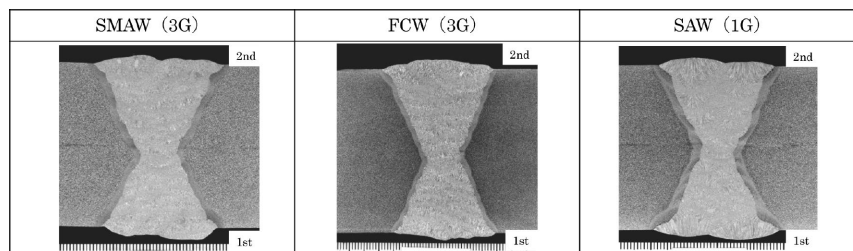


図4 溶接継手の断面マクロ
Fig.4 Cross-sectional macrostructure of butt joint

表5 溶接継手における機械的性質
Table 5 Mechanical properties of butt joint

Welding consumables	PWHT	Location ^{*1)}	Tensile properties ^{*2)}			Notch toughness ^{*3)}
			0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J)
SMAW	As-welded	F	515	609	27	168
		B	544	617	25	195
	580°C ×6 h	F	494	583	27	169
		B	518	601	32	168
FCW	As-welded	F	490	599	31	100
		B	531	617	28	109
	580°C ×6 h	F	474	567	31	106
		B	478	572	31	69
SAW	As-welded	F	490	584	34	209
		B	520	597	31	194
	580°C ×6 h	F	474	563	36	222
		B	498	587	33	162
Target			min. 390	min. 510	...	min. 27

*1) Location of specimen: [F] 7 mm from 2nd side surface, [B] 7 mm from 1st side surface

*2) Size of tension specimen: Dia.=6.0 mm, G.L.=24 mm

*3) Size of Charpy impact test specimen: 10 mm × 10 mm, 2 mm V-notch

表6 CTOD試験結果
Table 6 CTOD test result

Welding consumables	Test temp. (°C)	PWHT	Critical CTOD (mm)
SMAW	-60	As-welded	0.30, 1.29
		580°C ×6 h	1.04, 0.49
FCW		As-welded	0.54, 0.39
		580°C ×6 h	0.26, 0.52
SAW		As-welded	0.44, 0.67
		580°C ×6 h	0.63, 0.76
Target			min. 0.15

Note) According to WES1108 (2016) (Size: W=B,50 mm)

Notch: Center of weld metal

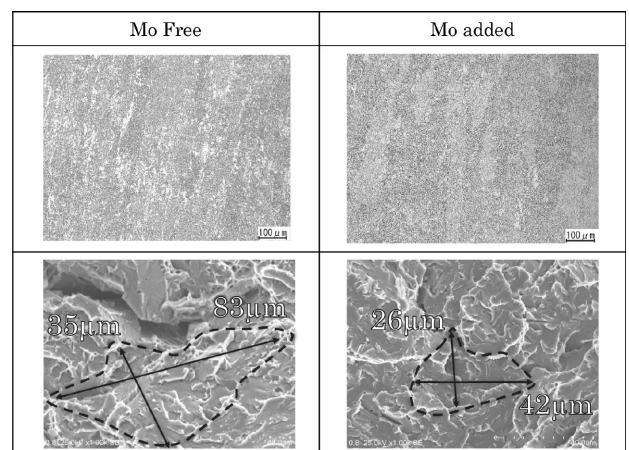


図5 溶接金属のマイクロ組織(上段)およびシャルピー破面(下段)写真
Fig.5 Microstructure (upper) and SEM image (lower) of weld metal

表7 降伏応力500MPa級溶接材料を用いた溶接継手における機械的性質
Table 7 Mechanical properties of butt joint of YP500 MPa welding consumables

Welding consumables	PWHT	Location ^{*1)}	Tensile properties ^{*2)}			Notch toughness ^{*3)} Absorbed energy (J)	Critical CTOD (mm) ^{*4)}
			0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)		
			Test temp.: -60°C				
SAW	As-welded	F	533	670	31	127	0.34, 0.52
		B	556	653	31	150	
	600°C ×6 h	F	537	617	35	175	0.28, 0.25
		B	544	622	33	152	
Target			min. 500	min. 610	---	min. 27	min. 0.15

*1) Location of specimen: [F] 7 mm from 2nd side surface, [B] 7 mm from 1st side surface

*2) Size of tension specimen: Dia.=6.0 mm, G.L.=24 mm

*3) Size of Charpy impact test specimen: 10 mm × 10 mm, 2 mm V-notch

*4) According to WES1108 (2016) (Size: W=B,50 mm), Notch: Center of weld metal

表8 溶接継手における溶接条件
Table 8 Welding condition of butt joint

Welding consumables	TRUSTARC™ LB-80LSR	
Base metal (thickness: 50 mm)	JIS G 3128 SHY685N	
Welding position	Flat (1G)	Vertical-up (3G)
Current and polarity	DCEP	
Welding current	160 A	130 A
Arc voltage	24 V	22 V
Heat input	1.8 kJ/mm	2.7 kJ/mm
Preheating temperature	140~160°C	
Interpass temperature	140~160°C	
PWHT condition	620°C×4 h	

Groove configuration

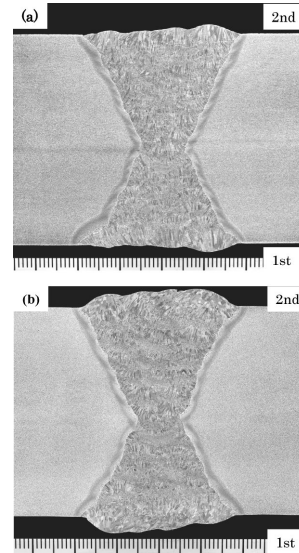
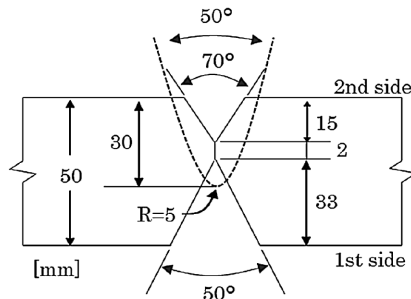


図6 溶接継手の断面マクロ (a) 下向 (1G), (b) 立向上進 (3G)
Fig.6 Cross-sectional macrostructure of butt joint (a) Flat (1G), (b) Vertical upward (3G)

おり、添加対象とした合金成分の効果と考えられる。

SAW 開発材における溶接継手の機械的性質を表7に示す。表4に示すSAW継手溶接条件に準じ、母材はJIS G 3115 SPV490Qを用いた。PWHT条件は、溶接のままおよび600°Cで6時間保持した2条件で試験を実施した。

溶接金属の引張性能は高強度化検討における目標耐力500 MPa以上を満足した。また、試験温度-60°CのCTOD試験においても、限界CTODは、開発目標の0.15 mmを満足した。

2. 中温・中圧仕様液化CO₂輸送タンク向け溶接材料

中温・中圧仕様の液化CO₂タンク向け鋼材には、EN10028-6 P690QL2に代表されるPWHT可能な780 MPa級高張力鋼が用いられる。既報では、780 MPa級高張力鋼用に開発されたPWHTに対応する直流 (DCEP) 用 SMAW として TRUSTARC™^{注)} LB-80LSR について紹介した¹⁰⁾。本溶接材料の特長として、合金設計を最適化することにより、PWHT後の焼き戻しぜい化と炭化物起因のぜい化を軽減できることが挙げられる。さらに、620°Cで8時間保持など高温長時間の熱処理条件下で逆

変態により生成するオーステナイトが、熱処理後のじん性確保に寄与することも明らかとなっており、この知見が材料設計に反映されている。

ここでは、当該溶接材料の溶接継手における溶接金属の引張性能や、じん性およびCTOD特性を紹介する。なお、中温・中圧設計を考慮し、シャルピー衝撃試験の温度を-60°Cとし、CTOD試験の温度を-35°Cに設定し、評価した。

2.1 溶接継手性能

2.1.1 実験方法

表8に示す溶接条件において、TRUSTARC™ LB-80LSRにおける溶接継手性能を評価した。母材には、JIS G 3128 SHY685Nを用いた。溶接姿勢は、下向姿勢 (1G) および立向上進姿勢 (3G) とした。開先形状はX形開先とし、溶接入熱は約2~3 kJ/mmにて溶接継手を作製した。予熱温度およびパス間温度は140~160°Cとした。各種機械試験は、PWHT後 (620°Cで4時間保持) を対象に実施した。

2.1.2 溶接継手の断面マクロおよび機械的性質

各溶接姿勢における断面マクロを図6に示す。いずれの溶接姿勢においても良好な溶込み形状が得られていた。また、溶接継手の機械的性質を表9に示す。いずれの溶接継手においても、780 MPa級高張力鋼用溶接金属として具備すべき耐力690 MPa以上、引張強さ780

脚注) TRUSTARCは当社の登録商標である。

表9 HT780鋼用溶接材料における溶接継手の機械的性質
Table 9 Mechanical properties of butt joint of HT780 welding consumables

Welding consumables	Welding position	Location ^{*1)}	Tensile properties ^{*2)}			Notch toughness ^{*3)}	Critical CTOD (mm) ^{*4)} Test temp.: -35°C
			0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J) Test temp.: -60°C	
SMAW	Flat (1G)	F	759	815	23	126	0.38, 0.31
		B	782	830	25	106	
	Vertical-up (3G)	F	750	823	22	85	0.25, 0.25
		B	757	825	24	109	
Target			min. 690	min. 780	---	min. 69	min. 0.15

*1) Location of specimen: [F] 7 mm from 2nd side surface, [B] 7 mm from 1st side surface

*2) Size of tension specimen: Dia.=6.0 mm, G.L.=24 mm

*3) Size of Charpy impact test specimen: 10 mm × 10 mm, 2 mm V-notch

*4) According to WES1108 (2016) (Size: W=B,50 mm), Notch: Center of weld metal

MPa以上および-60℃におけるシャルピー吸収エネルギーも開発目標である69J以上を満足した。各溶接継手においてCTOD試験も実施した。CTOD試験片におけるノッチは溶接金属中央とし、前記と同様に試験を実施した。いずれのCTOD試験結果でも、限界CTODは、開発目標の0.15 mmを満足した。

むすび = 本研究では、液化CO₂輸送タンク設計における、低温・低圧および中温・中圧仕様において必要な強度・じん性・CTOD性能を有する各種溶接材料を開発した。これらの溶接材料により、CCSおよびCCUSの推進に不可欠なCO₂の安全かつ効率的な海上輸送が可能となり、脱炭素社会への実現に寄与すると期待される。

参考文献

- 1) 経済産業省. CCS長期ロードマップ検討会, 第3回CCS事業コスト・実施スキーム検討WG, 資料4CCSバリューチェーンコスト(RITE). 2022-10-31.
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/jisshi_kento/pdf/003_04_00.pdf, (参照2025-12-24).
- 2) 三菱造船株式会社. 三菱重工技報. 2024, Vol.61, No.2, p.1-3.
- 3) 白杵博一ほか. 日本製鉄技報. 2023, 第422号, p.45-49.
- 4) Northern Lights Project Concept report. RE-PM673-00001. 2019.
- 5) 国土交通省. 第6回「船舶産業の変革実現のための検討会」資料. 2025-06-19.
- 6) DNV-OS-C401. Fabrication and testing of offshore structure. July 2021, p.43-44.
- 7) 一般財団法人日本海事協会. NK鋼船規則N編 液化ガスばら積船. 2025-06, p.65-70.
- 8) 菊地和幸. 日本溶接協会. WE-COMマガジン. Vol.53, 2024-07.
- 9) 前野圭輝ほか. 鉄と鋼. 2012, Vol.98, No.12, p.667-674.
- 10) 加納 覚ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.60-64.