

ボンドアレスト性に優れたLPGタンク用1.5%Ni 鋼

1.5%Ni Steel for LPG Tank with A Superior Bond-Arrest Property

千々岩 力 雄 ⁽¹⁾ Rikio CHIJIWA	井 上 健 裕 ⁽²⁾ Takehiro INOUE	吉 田 讓 ⁽³⁾ Yuzuru YOSHIDA	磯 田 征 司 ⁽¹⁾ Seiji ISODA
土 井 直 己 ⁽⁴⁾ Naomi DOI	為 広 博 ⁽⁵⁾ Hiroshi TAMEHIRO	吉 江 淳 彦 ⁽⁶⁾ Atsuhiko YOSHIE	服 部 恵 一 ⁽⁷⁾ Keiichi HATTORI

抄 録

LPG円筒タンクの脆性破壊に対する安全性に関して、様々な提案が行われているが、新日本製鐵では、脆性亀裂の発生特性及び伝播停止特性の優れた1.5%Ni鋼を開発した。新鋼材の脆性亀裂の伝播停止特性の評価法として、混成ESSO試験法を提案した。また、この方法とNRL落重試験法等の関係についても検討を行った。

Abstract

With regard to ensuring the property of security for a brittle fracture of LPG cylindrical tank, various proposals have been put forward. Nippon Steel has developed a 1.5%Ni steel having superior characteristics to restrain generating brittle crack and to stop its propagation. As a method for evaluating the brittle crack propagation stopping characteristic of the developed steel material, the hybrid ESSO testing method was proposed. Further, the relation between this method and other testing methods such as the NRL drop weight test has been also investigated.

1. 緒 言

大型鋼構造物の破壊事故、特に脆性破壊による事故は大きな社会的損害をもたらすため、脆性破壊の防止は、その安全性を考える上で極めて重要である。ほとんどの鋼構造物で、脆性破壊の発生を防止するための鋼材要求がなされ、鋼材の開発により脆性破壊の防止に寄与してきた。

低温液化ガスの貯蔵タンク、特にLPGタンクでは、過去の脆性破壊事故が爆発事故につながり、多大な損害を生じている。これらの事故を教訓として、脆性破壊発生を防止した上で、更に万が一脆性破壊が発生したとしてもその亀裂を停止し得る、いわゆる二重の安全性確保の考え方が生まれてきた。すなわち、万が一発生したとしても亀裂を短い長さで停止してしまえば、大量のガスの拡散から爆発という最悪の事態は避けられる。

本報告では、LPGタンク用鋼として開発したLPG温度で高い耐脆性破壊発生特性、脆性破壊伝播停止(アレスト)特性を有する1.5%Ni鋼について紹介し、そのLPGタンク用鋼材としての安全性について報告する。

2. 低温タンクの安全性、その考え方と要求特性

1977年にカタールで起きたLPGタンクの脆性破壊事故では、流出ガスが蒸発して爆発を起こし、火災となり、多大な損害を生じた。

この事故の後、世界的な規模で液化ガス貯槽の安全性の見直しの気運が高まった。

事故を起こした石油精製基地の設計製造者であるシェルの研究財団は、Cuperusが1979年に脆性破壊発生に加え更にもう一つの安全性を付加する二重の安全性“ダブルインテグリティ”の考え方を提案した¹⁾。

田中らはSCA (Short Crack Arrest) 試験法を開発して、アレスト特性を確保することによりこのダブルインテグリティの実現が可能であることを実験的に証明した。また、低温液化ガスタンクの安全性確保を破壊の各ステップごとに確保する考え方も提案された。すなわち、1)無欠陥要求、2)有効な水圧試験、3)十分な破壊発生特性、4)短い脆性亀裂での停止、5)長大亀裂での伝播停止、6)不安定延性破壊の防止、7)安全なアウトータンクと、各ステップで安全性を確保する考え方である²⁾。

⁽¹⁾ 日鉄テクノロジー
千葉県君津市君津1番地 新日本製鐵(株)君津技術研究部内
〒299-11 ☎(0439)50-2547

⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員

⁽³⁾ 君津製鐵所 厚板工場 グループリーダー

⁽⁴⁾ 君津製鐵所 生産技術部 マネジャー

⁽⁵⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員

⁽⁶⁾ 君津技術研究部 主任研究員

⁽⁷⁾ 本社 厚板営業部 マネジャー

この二重、多重の安全性の確保により低温液化ガスタンクの安全性は向上し、不測の事態が生じても重大に至らない安全な低温液化ガスタンクが実現する。

2.1 必要な脆性破壊発生特性

脆性破壊発生特性としては、CTOD(Crack-Tip Opening Displacement)による評価と K_{Ic} (Stress Intensity Factor)による評価が考えられるが、ここでは小規模降伏を超えた後の脆性破壊発生も評価可能なCTODによる評価を考える。

LNGタンク用9%Ni鋼での検討では、短周期地震を考慮した場合、必要CTOD値は0.085mmとなるとの報告がある³⁾。また、田中らによれば、過去の実績から、溶接部での限界CTOD値が0.1mm以上の鋼材を用いた構造物は安全に使用されていることが報告されている⁴⁾。

以上のことからLPGタンク用鋼の要求破壊発生特性としては、母材、溶接継手部において、-50℃(通常のLPG温度-45℃より5℃低い温度にて破壊靱性を要求)での限界CTOD値が0.1mm以上となる。

2.2 必要なアレスト特性

表面欠陥から発生した脆性破壊がアレストするチャンスは、1)材質不均質によるポップイン、2)亀裂が裏面に貫通することにより拘束が変化することによるSCA、3)他の材質(母材、クラックアレスター等)に突入したことによる材質的な不連続によるLCA(Long Crack Arrest)がある。アレスト特性については、短い亀裂で止めるSCA特性⁵⁾が最も被害が少ない上、現実的である。

このSCAをシミュレートするモデル試験として、SCA試験法が開発され⁴⁾、SCA特性を評価することが可能になった。その後の研究により、SCA試験結果がより一般的な試験である混成ESSO試験から求められる K_{Ic} により評価可能であり、助走板長さが150mmの混成ESSOによりSCA特性の安全側の評価が可能であることが明らかにされた⁵⁾。

溶接熱影響部(HAZ)のアレスト特性(ボンドアレスト特性)については、混成ESSO試験では、溶接残留応力の影響により亀裂が逃れやすく、正当な評価がされにくい、母材降伏応力の90%の応力で試験前に予歪を与えて溶接残留応力を除去することにより、SCA特性の評価が可能となる。

以上のことから、LPGタンク用鋼に要求されるアレスト特性としては、-50℃にて助走板長さ150mmの母材、溶接部の混成ESSO試験で設計応力下のアレストが必要となる。

3. 1.5%Ni鋼製造の考え方

前報⁶⁾の基礎検討で、鋼板強度や靱性の向上のためには、1.5%程度のNi添加が必要であることを明らかにした(図1参照)。

一方、溶接熱影響部を再現したCTOD試験で、6%程度までのNiの添加によりCTOD特性は劣化する傾向にあることも明らかにした(図2参照)。また、工場試作の1.5%Ni-0.1%Mo鋼の溶接継手部のCTOD試験において、フェライト(α)系溶接棒による手溶接(SMAW)部のHAZで、-50℃のCTOD値が十分でなく、0.1mmを下回る結果であった(図3参照)。

これらの実験結果を基に、以下の考えで工場試作を実施した。

- (1)鋼板の強度、靱性は前回試作鋼と同等とするためNiは1.5%とする。
- (2)溶接継手部のCTOD特性や溶接性の改善のため硬化性を増大するMoを無添加とし、粒界フェライト抑制のため微量Nbを添加する。
- (3)鋼板製造法は制御冷却/焼戻し法とする。

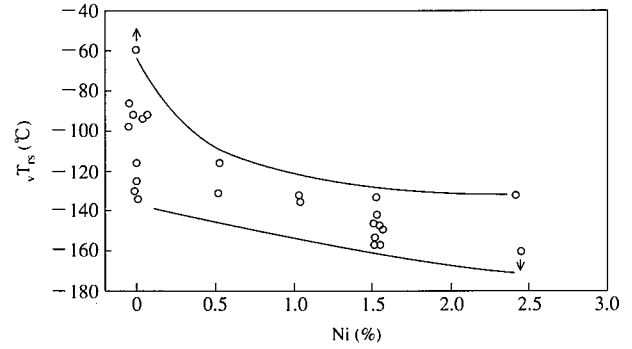


図1 鋼板のシャルピー切欠靱性に及ぼすNiの影響

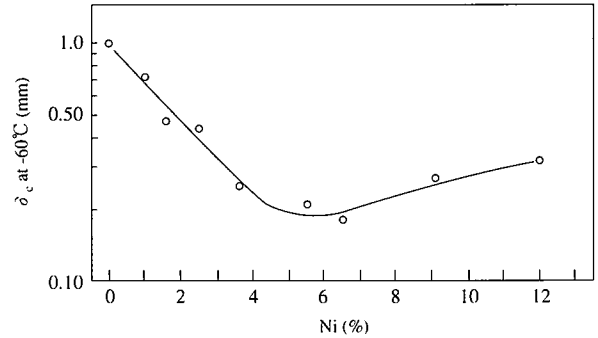


図2 再現熱影響部のCTOD特性に及ぼすNiの影響

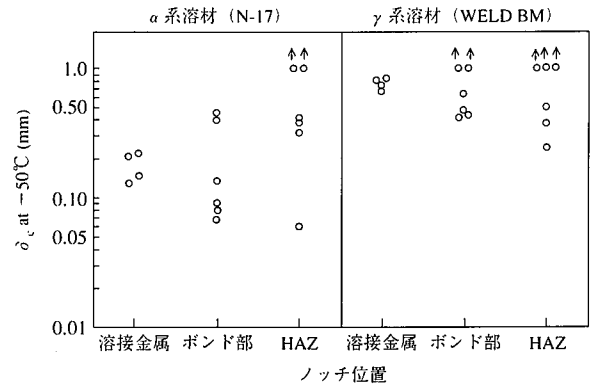


図3 溶接継手部のCTOD試験結果

4. 工場試作1.5%Ni鋼の特性

表1に工場試作鋼の主な化学成分と前回試作鋼の主な化学成分を示す。

4.1 母材の機械的性質

板厚8, 19, 38mmの試作鋼板の引張試験、シャルピー試験等の結果を表2に示す。3種の板厚とも母材の強度、靱性は良好で、N-TUF365として十分な特性が得られた。また、脆性亀裂の発生、アレスト特性ともに、板厚が厚い方が厳しいため、以降の検討は最大板厚の38mmの結果について報告する。

表1 試作鋼の主な化学成分

	(Nb, Ti: ppm, 他: mass%)							
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	Ti	Ceq _{HW}
試作材	0.06	0.19	1.39	1.51	-	80	100	0.39
前試作材	0.06	0.25	1.20	1.49	0.11	-	120	0.38

表2 母材の機械的性質

試験項目 板厚 (mm)	引張試験 (JIS No.5)				シャルピー衝撃試験 (JIS No.4)						
	方 向	降伏強さ (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	方 向	1/4t		T _{rs} (°C)	1/2t		T _{rs} (°C)
						√E _{-60°C} (J)			√E _{-60°C} (J)	T _{rs} (°C)	
						平均値	最小値	平均値			最小値
8	L	456	520	38	L	-	-	-	107	101	<-150
	T	481	527	39	T	-	-	-	118	113	<-150
19	L	510	550	52	L	372	363	<-150	390	375	<-150
	T	517	562	49	T	363	357	<-150	388	373	-135
38	L	489	545	61	L	374	370	<-150	348	267	-146
	T	506	560	59	T	353	348	<-150	335	275	-110

方向 L: 圧延方向, T: 圧延方向の直角方向, 板厚 8 mm のシャルピー試験片はサブサイズ, t: 板厚

4.2 母材のアレスト特性

母材のアレスト特性を調査するために温度勾配型 ESSO 試験及び NRL 落重試験で評価した。図 4 に ESSO 試験の結果を、図 5 に NRL 落重試験の結果を示す。

また、NRL 落重試験では、NDT (Nil Ductility Transition Temperature) のほか、各試験温度における延性破面率 (SA) も測

定した。なお、NRL 落重試験片は 12.7mm 厚の P-3 タイプである。

(1) 長大亀裂のアレスト性の指標³⁾となる K_{ca} 値が 5 900 N/mm^{3/2} を示す温度 (TK_{ca-5900}) は -60°C と良好な値が得られた。

(2) NRL 落重試験の NDT は -110°C を示したが、この温度における延性破面率は 18% の小さな値であった。写真 1 に代表的な破面の例を示す。

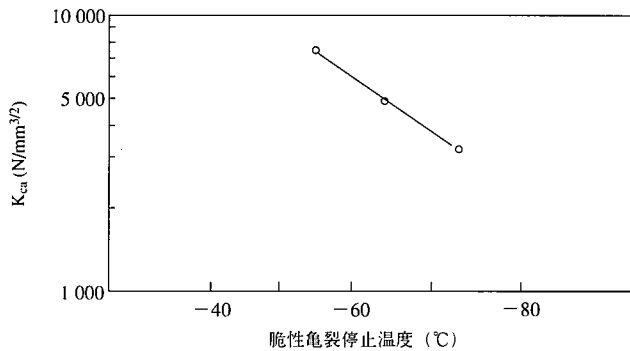


図4 温度勾配型 ESSO 試験結果

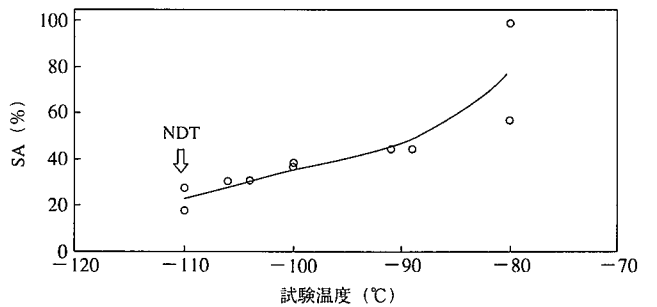


図5 NRL 落重試験結果

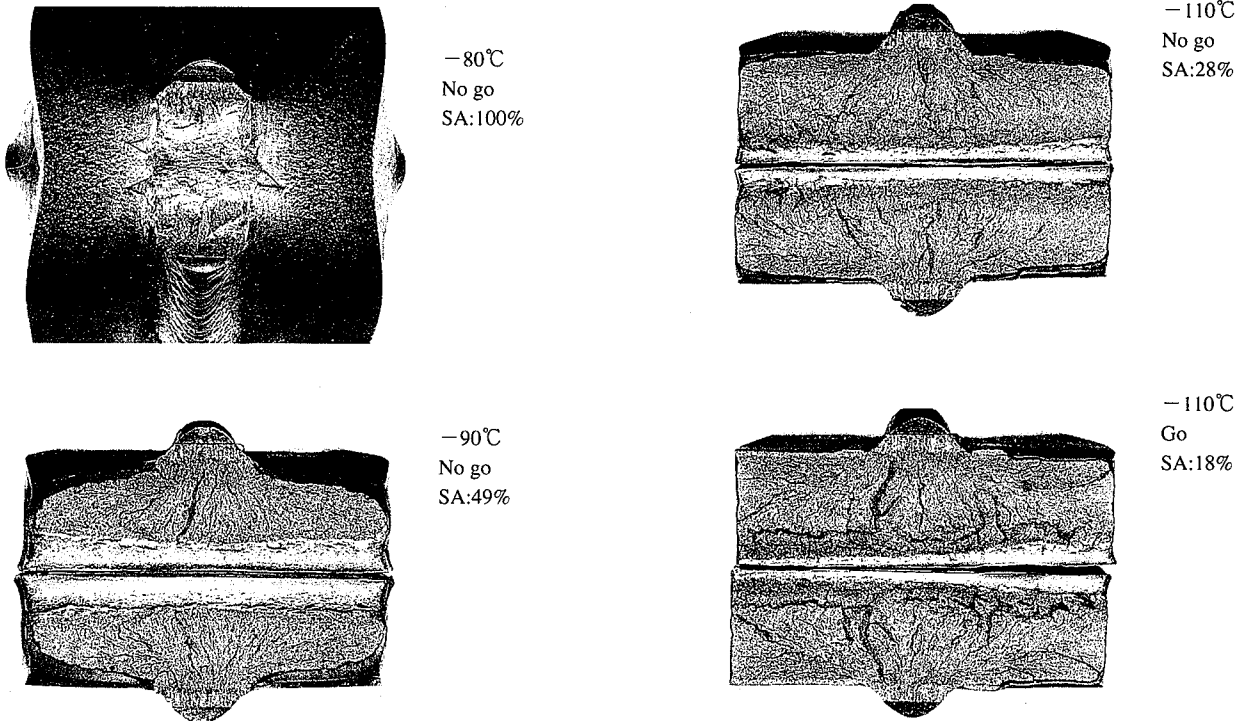


写真1 NRL 落重試験の代表的な破面

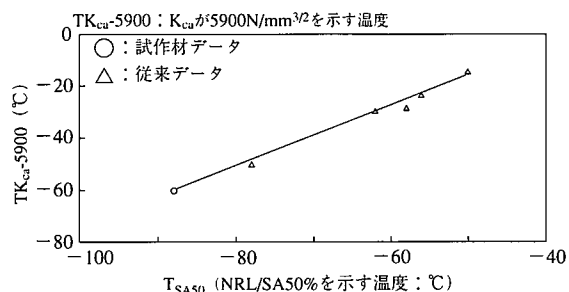


図6 NRL落重試験とESSO試験の関係

筆者らは以前の検討⁷⁾で、アレスト特性の評価法としてNRL落重試験の延性破面率が50%を示す温度(T_{SA50})が有効であることを明らかにしているため、 $TK_{ca-5900}$ と T_{SA50} との関係づけを行った。その結果を図6に示す。

(3) $TK_{ca-5900}$ と T_{SA50} は直線関係で表され、試作材は T_{SA50} 、 $TK_{ca-5900}$ ともに従来材より改善されたことが分かる。この関係から、LPGタンクの設計温度 $-50^{\circ}C$ で K_{ca} 値が $5900N/mm^{3/2}$ をクリアーすることを想定した場合、NRL落重試験の必要 T_{SA50} は $-79^{\circ}C$ である。

T_{SA50} とNDTは約 $20^{\circ}C$ 程度の温度差が見られるため、 $T_{SA50} : -79^{\circ}C$ はNDTで $-100^{\circ}C$ 程度が必要となることを意味している。

4.3 試作鋼の溶接性

溶接性試験は板厚38mm鋼板で、テーパー硬さ、斜めy開先拘束割れ試験を実施した。

図7に試作鋼板のテーパー硬さ試験の結果を示す。アークストライク部でもピッカース硬さが340程度であり、一般的な溶接入熱が $18kJ/cm$ の条件では230程度と良好な値であった。

また、図8に斜めy開先拘束割れ試験結果を示す。板の初温が $0^{\circ}C$ でも溶接低温割れは発生しなかった。これらの結果から試作鋼の溶接性は良好であることが確認された。

4.4 溶接継手の機械的性質

表3に溶接継手の引張試験の結果を示す。溶接は溶接入熱が比較的大きく、応力条件が厳しいタンク側板の立向き部を想定して、立向きのSMAW, GTAW(Gas Tangsten Arc Welding)を行い、特性を評価した。

4.4.1 溶接継手の強度

SMAWは3.5%Niのフェライト(α)系のN-13, 6.5%NiのN-16と70%Niのオーステナイト(γ)系のWELD196で、GTAWは75%Niの γ 系のFILLER196で継手を作製した(いずれも日鐵溶接工業

製)。

検討したSMAW, GTAW継手の強度は十分で、破断位置も母材(BM)部で満足できる結果であった。 γ 系の溶接材料を使用した継手では、 $580^{\circ}C$ の溶接後熱(PWHT)条件でも引張試験を行っているが、十分な強度が得られた。

4.4.2 溶接継手のシャルピー衝撃試験結果

表4に溶接継手のシャルピー試験の結果を示す。

(1) α 系のN-13を用いたSMAWのシャルピー試験の結果では、 $-50^{\circ}C$ のシャルピー値は最低値でも96Jであり、良好な結果であった。 $-80^{\circ}C$ では、溶接金属(WM)で8Jと低い値で、HAZ(Bond-1~3)でも30J程度の値が見られた。

(2) α 系のN-16を用いたSMAWのシャルピー試験の結果では、 $-50^{\circ}C$ 、 $-80^{\circ}C$ のシャルピー値はいずれも高く、HAZ(Bond, Bond-

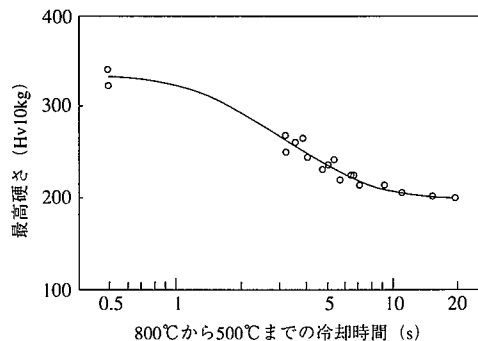


図7 テーパー硬さ試験結果

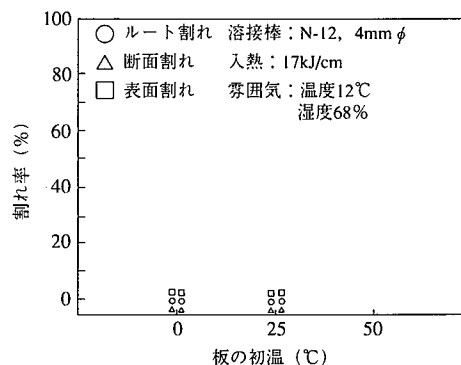


図8 斜めy開先拘束割れ試験結果

表3 溶接継手の引張試験結果

溶接法	溶接条件			溶接材料	PWHT (580°C)	引張試験		
	溶接姿勢	開先形状	入熱 (kJ/cm)			試験片	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
SMAW	立向	X	21~35	N-13mod	無し	継手1号	576	母材
						継手1号	570	母材
	立向	X	42~56	N-16mod	無し	継手1号	573	母材
						継手1号	556	母材
	立向	X	41~51	WELD196	無し	継手1号	560	母材
						継手1号	546	母材
継手1号	544	母材						
GTAW	立向	X	41~51	FILLER196	無し	継手1号	547	母材
						継手1号	544	母材
継手1号	540	母材						

表4 溶接継手部のシャルピー衝撃試験結果

溶接法	溶接材料	PWHT	温度 (°C)	シャルピー衝撃試験結果 σ_c (平均値/最小値)					
				板厚位置	ノッチ位置				
					WM	Bond	Bond-1	Bond-2	Bond-3
SMAW	N-13mod.	無し	-50	1/4t	103/ 96	100/ 96	214/201	-	268/227
			-80	1/4t	34/ 8	63/ 28	122/ 31	-	233/194
	N-16mod.	無し	-50	1/4t	141/132	154/137	260/240	-	-
			-80	1/4t	83/ 80	168/139	147/129	-	-
			-50	1/2t	90/ 69	96/ 74	79/ 59	-	-
			-80	1/2t	47/ 34	65/ 38	90/ 79	-	-
	WELD196	無し	-50	1/4t	120/113	213/167	230/204	281/266	322/304
			-80	1/4t	109/104	154/146	175/131	260/197	324/316
			-50	1/2t	120/116	124/112	125/116	149/115	324/312
			-80	1/2t	107/102	100/ 79	109/ 87	192/ 65	308/278
		有り	-50	1/4t	113/108	155/135	208/178	223/190	-
			-80	1/4t	111/104	155/145	251/229	289/265	-
GTAW	FILLER196	無し	-50	1/4t	149/141	168/129	265/254	267/256	-
			-80	1/4t	159/153	262/254	269/264	287/280	-
			-50	1/2t	141/138	111/ 41	254/230	242/218	-
			-80	1/2t	160/158	194/ 57	166/101	265/252	-
		有り	-50	1/4t	108/ 99	168/154	195/185	270/254	-
			-80	1/4t	144/144	171/135	217/153	254/250	-
	FILLER196	有り	-50	1/2t	104/93	152/111	161/143	241/214	-
			-80	1/2t	135/132	193/137	199/197	175/ 72	-

ノッチ位置 Bond: WMとHAZが50%, Bond-1: Bondより1mmHAZ, Bond-2: Bondより2mmHAZ, Bond-3: Bondより3mmHAZ

1)の最低値でも59Jであり、良好な結果であった。

(3) γ 系のWELD196を用いたSMAWのシャルピー値はN-13, N-16に比較して高く、-80°Cの最低値が溶接まま(AW)条件で112J, PWHT条件でも112Jであった。

(4) γ 系のFILLER196を用いたGTAWのシャルピー試験の結果では、-80°Cの最低値がAW条件で41J, PWHT条件で111Jであり、良好な結果であった。

4.4.3 溶接継手部のCTOD試験結果

図9にSMAWの α 系のN-16と γ 系のWELD196を用いた溶接継手部のCTOD試験の結果を示す。

(1) N-16では、WMで0.1mm未満の値が見られたが、Bondでは0.36mm以上の良好な結果であった。

(2) WELD196では、WMで0.31mm以上、Bondで0.48mm以上の良好な結果であった。図10にGTAWの γ 系のFILLER196を用いた溶接継手部のCTOD試験の結果を示す。

(3) AW条件, PWHT条件ともに高い値で、良好な結果であった。

4.4.4 溶接継手部のNRL落重試験結果

表5に溶接継手部のNRL落重試験の結果を示す。

(1) α 系の溶接材料を用いたN-13, 16では、NDTが-85~-90°C程度であり、やや不十分な結果であった。

(2) γ 系の溶接材料を用いたFILLER196では、NDTが-115°C以下の良好な結果であった。

4.4.5 溶接継手の混成ESSO試験結果

図11に示す方法で大型の溶接継手(ノッチ位置: Bond)の混成ESSO試験を行い、その結果を表6に示す。なお、助走板及び試験板との接合部は脆性亀裂が伝播しやすいように、靱性が良くない溶接材料を使用した。また、亀裂がBondに直進するように、助走板

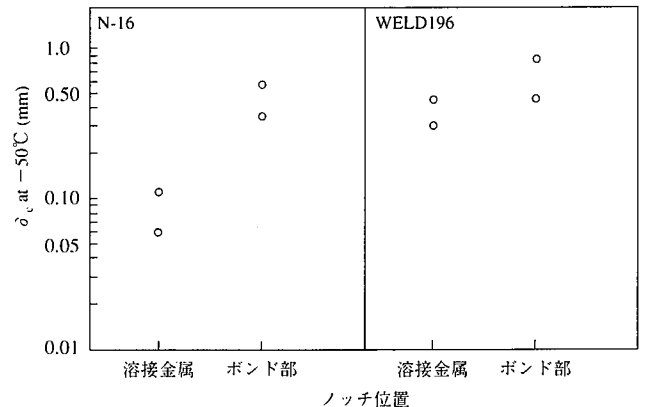


図9 溶接継手部のCTOD試験結果(SMAW/AW)

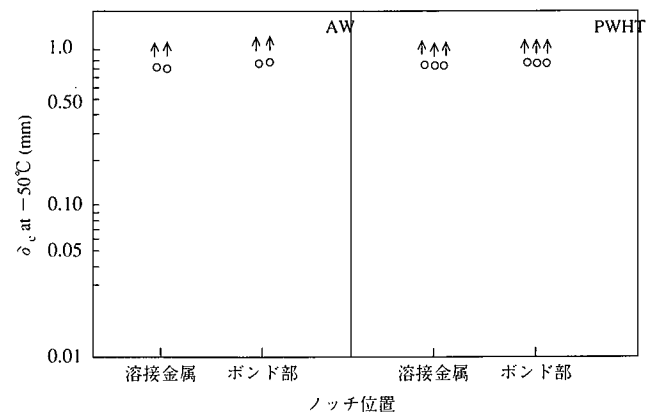


図10 溶接継手部のCTOD試験結果(GTAW)

表5 溶接継手部のNRL落重試験結果

溶接法	溶接材料	PWHT	ノッチ位置	試験温度(°C)						NDT(°C)
				-80	-85	-90	-95	-100	-110	
SMAW	N-13mod.	無し	WM*			●●				-
			Bond*	○	○	●●	●●		≐-85	
	N-16mod.	無し	WM			○	○			-
			Bond			●				-
WELD196	無し	無し	WM			○○○		○○○	○○○	≤-115
			Bond			○○△				-
GTAW	FILLER196	無し	Bond			○	○	○	○	≤-115

試験片：P-3タイプ，*P-1タイプ
 評価：○：No go，●：Go，△：No test

表6 溶接継手部の混成ESSO試験結果

溶接法	溶接材料	PWHT	ノッチ位置	予負荷応力(N/mm ²)	試験負荷応力(N/mm ²)	試験結果判定	亀裂伝播長さ(mm)
SMAW	N-13mod.	無し	Bond	-	265	●	-
				436	262	●	-
GTAW	FILLER196	無し	Bond	-	242	○	188
				-	265	○	176
				-	294	○	236
				436	262	○	197

予負荷応力は母材の降伏応力の90%

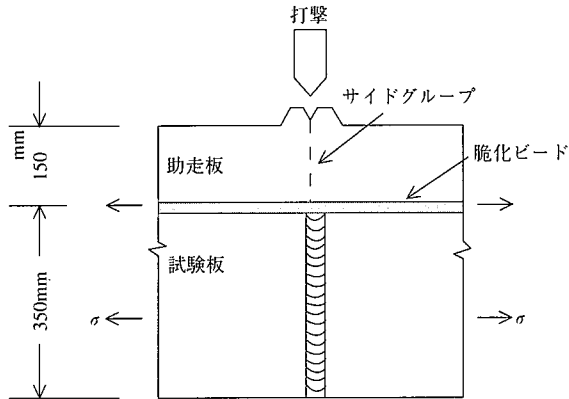


図11 混成ESSO試験概要

にサイドグループをつけた。

更に、脆性亀裂の伝播が溶接残留応力の影響を受ける恐れもあるため、溶接残留応力除去の条件(予負荷で応力除去)でも、試験を行った。

(1) α系の溶接材料のN-13を用いた溶接継手部では、予負荷有り無しとも、脆性亀裂は試験板を貫通した。

(2)これに対し、γ系の溶接材料FILLER196を用いた溶接継手部では、予負荷有り無しとも、脆性亀裂は試験板で停止した。

負荷応力と亀裂長さから計算される応力拡大係数(K_{ca})は6 300～8 900N/mm^{3/2}であり、母材のアレスト特性の項で述べた長大亀裂停止に必要な値(5 900N/mm^{3/2})を満足した。また、NRL落重試験との関係では、母材部の長大亀裂停止のためには、-100℃程度のNDTが必要であることを前述したが、-100℃以下のNDTを示す場合は溶接継手のNRL落重試験の結果でも、混成ESSO試験の結果でも、十分なアレスト性を有することが確認できた。

5. 1.5%Ni鋼の製造実績

新日本製鐵では、破壊靱性の優れた低温用鋼を開発し、これまでに、LPGタンク建設の二つのプロジェクト向けに計1 200tの鋼材を製造し、供給した。なお、これらのプロジェクトの主な鋼材仕様として、NDT≤-95℃が求められ、前述したように開発鋼は十分な特性を示した。

6. 今後の課題

6.1 低Ni化の検討

破壊靱性の優れたLPGタンク用の1.5%Ni鋼の開発は完了したが、粒内変態によるHAZのマイクロ組織微細化技術を適用して、鋼板のNi量の低減を検討しており、0.5%Ni程度でも良好な特性を示すことを実験室検討で明らかにしている。今後、実用化に向けた検討を継続する。

6.2 ポンドアレストに及ぼす溶接材料の検討

本実験では、α系のN-13で作製した溶接のポンドアレスト性は不十分であったが、N-13以外のα系の溶接材料との組み合わせにより、ポンドアレスト特性の向上の可能性も考えられるため、今後検討を行う。

6.3 アレスト試験法について

溶接部のアレスト試験法については、発生のコントロールと残留応力の評価・除去が重要になる。溶接部の靱性は母材靱性より低くなるのが一般的であり、発生・伝播部は更に脆化させる必要がある。混成ESSO試験では、靱性の低い助走板を伝播部に用いる。また、SCA試験では、脆化ビードを置くことにより脆性破壊の伝播を容易にさせる。

近年、試験板内の脆化方法として電子ビーム溶接(EBW)による方法等も提案されており、従来試験法と比較検討されるべきである。

参考文献

- 1) Cuperus, N.J.: Proceedings for 10th World Petroleum Congress. London. Heyden & Son.1979.Panel Discussion 17.Paper3
- 2) Tanaka,K.Sato,M. Isikawa,T.: Proceedings for Intern.Confon Fracture Toughness Testing-Method,Interpretation and Application.London.March1982.Paper 18
- 3) 町田, 石倉, 久保, 片山, 萩原, 有持: 圧力技術. 29(6), 25-39 (1991)
- 4) Tanaka,K.,Sato,M., Isikawa,T.: Nippon Steel Technical Report. (32), 37-43 (1987)
- 5) The ASTM Committee on Fracture Testing of High-Strength Sheet Materials:ASTM Bulletin. (Jan. 1960), 29-40
- 6) 今輩倍, 千々岩, 相川, 南雲, 堀谷, 大橋: 製鉄研究. (318), 51 (1985)
- 7) 千々岩, 今輩倍, 松田: 鉄と鋼. 80, S436 (1994)