

技術トピックス

UDC 621.791 : 669.14.018.41 : 669.15'24-194.57

9%Ni 鋼 の 溶 接 技 術 の 研 究*

西 武 史**

Study on the Welding of 9%Ni Steel

Takeshi NISHII

1. 緒 言

9%Ni 鋼は 1946 年米国で開発され、極低温靱性のすぐれたフェライト系合金鋼として、欧米において液体酸素、液化天然ガス (LNG) などの多くの極低温容器に使用されてきた。しかしその溶接には、異種金属溶接用として生産されていたインコネル系 (70Ni-15Cr-Nb) 被覆アーク溶接棒 INCO-WELD A¹⁾ を用いる手溶接技術が実績ある唯一のものであつた。この溶接棒は直流専用であり磁気吹きによるアーク不安定、高 Ni 系のため高温割れ感受性が高い、価格が高いなどの欠点があつた。

我国では 1969 年東京ガスの根岸工場 (東京電力と共同) に 4.5 万 m³LNG 貯槽 4 基が建造され、国産 9%Ni 鋼²⁾ の大量使用の端緒となつた。この際交流溶接を可能としたインコネル系被覆アーク溶接棒 YAWATA-WELD B¹⁾ が開発国産化され実用された。

その後、環境問題およびエネルギー危機の対策として多くの LNG 輸入プロジェクトが推進された結果、国内外に多くの大型 LNG 貯槽が 9%Ni 鋼で建造され、我国 9%Ni 鋼の生産累計は 4 万 t をこえた。

この背景には、9%Ni 鋼の基本特性から製造技術にいたる一連の研究開発にいち早く着手し、製造および使用上の問題点を早期に把握し、生産技術、設備上の諸対策を確立したことがあげられる。この結果、高品質の 9%Ni 鋼が納期どおり量産されユーザーの信頼を得ることができた。

一方、9%Ni 鋼の大量使用をささえたものとして、実用的見地に立つた溶接技術の研究開発を看過することはできない。すなわち、安全性の観点から従来の実績を尊重して実施された高 Ni 系溶接材料の高品質化、およ

び溶接自動化に関する研究成果により、9%Ni 鋼製 LNG 貯槽の建造上の問題点が解決され、その信頼性が高められた。我国における鉄鋼の溶接技術研究が社会のニーズにこたえた大きな成果の一つである。

いつそうの低コストを目指し、省資源につながるものとして、低 Ni 系溶接技術の研究が進められ、すぐれた成果をあげつつある。近い将来の実用化が期待される。

2. 溶接研究課題

LNG 貯槽は -162°C とする極低温容器であることから、安全性最優先であり、9%Ni 鋼の溶接継手に対しても、第一にすぐれた切欠靱性が要求される。しかし凝固したままの状態にある溶接金属に、すぐれた極低温靱性を確保することは、9%Ni 鋼と同じ成分系では極めて困難であつたので、完全オーステナイト組織となる 70%Ni 系溶接材料が実用されてきた。したがって溶接金属は母材と化学成分、組織が異なり、異種金属溶接部として、次のような基本的問題を有している。

(1) 母材による稀釈のため、溶接金属の強度靱性が低下する傾向がある。

(2) 母材よりも溶接金属の強度が低く、9%Ni 鋼の高い強度が設計に十分生かされていない。

(3) 溶接金属は単相凝固で高温割れ発生傾向が高い。

(4) 母材と溶接金属の融点が異なり、融合不良、ビード形状不良などを生じやすい。

このため 9%Ni 鋼と同じ成分系 (共金系) による溶接技術研究も進められていた。しかし極低温靱性の確保、ひいては安全性を立証するにいたらず、現実 LNG 貯槽を建造するためには、高 Ni 系溶接技術における以上の諸問題を改善し、溶接継手の高品質化と自動

* 昭和 54 年 9 月 20 日受付 (Received Sept. 20, 1979) (依頼技術トピックス)

** 新日本製鉄 (株) 製品技術研究所 (Products R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

表 1 高 Ni 系溶接材料の化学成分例

溶 接 法	銘 柄	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Fe
被覆アーク	YAWATA WELD B	0.05	0.18	2.02	0.006	0.006	Bal	16.4	0.72	—	2.06	9.8
	YAWATA WELD B (M)	0.07	0.25	2.00	0.013	0.007	Bal	15.7	1.97	—	1.70	10.8
	NITTETSU WELD 42	0.09	0.33	2.22	0.003	0.006	Bal	12.8	1.62	2.36	2.45	9.7
	NITTETSU WELD 44	0.09	0.13	2.67	0.006	0.004	Bal	15.4	5.26	2.10	1.85	4.13
	NIC-70S	0.08	0.30	1.71	—	—	Bal	13.7	3.76	—	1.87	9.79
	NIC-709N	0.07	0.46	5.81	—	—	Bal	13.2	—	—	6.17	7.81
ガスシールドアーク	Inconel FILLER 82	0.02	0.20	3.00	—	0.007	Bal	20.0	—	—	2.5	—
	NITTETSU FILLER 196	0.03	0.03	0.03	0.002	0.003	Bal	—	20.17	2.98	—	1.12
	MGS-709N	0.025	0.16	0.23	—	—	Bal	14.57	13.72	2.81	—	5.61
サブマージアーク	Inconel FILLER 82	0.02	0.20	3.00	—	0.007	Bal	20.0	—	—	2.5	—
	NITTETSU FILLER 196*	0.03	0.01	0.03	0.002	0.002	Bal	—	20.48	2.93	—	1.03
	US-609N*	0.022	0.19	0.21	0.001	0.004	Bal	15.05	13.3	—	—	5.54

* 下向および横向専用フラックスあり。

溶接技術を確立せねばならなかつた。一方、高 Ni 系溶接材料は高価であり、低 Ni 化も強く望まれていた。

このような実情から、9%Ni 鋼の溶接技術研究は次の二つの方向で平行して推進されてきた。

(1) LNG プロジェクトの進展に対応して、高 Ni 系溶接技術における高品質化および自動化の追求。

(2) 共金系を含めた低 Ni 系溶接技術の開発。

以上総合して、9%Ni 鋼の溶接技術確立を指向する研究課題をとりまとめると図 1 のようになる。

3. 高 Ni 系溶接技術における高品質化および自動化

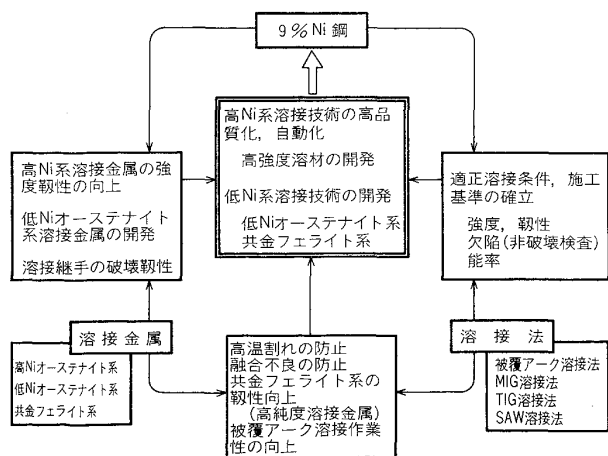


図 1 9%Ni 鋼の溶接技術開発と研究課題

安全性最優先の立場から、実績のある 70%Ni 系溶接材料をベースとした研究開発が行われ、各地の LNG プロジェクトに対応して実用化された。LNG 貯槽の溶接は各種の溶接姿勢で施工されるので、被覆アーク溶接、ガスシールドアーク溶接、サブマージアーク溶接が使われる。従つてこれらの溶接法すべてを対象とした研究が必要であつた。研究の成果として実用化されている高 Ni 系溶接材料の化学成分の例³⁾⁴⁾⁶⁾を表 1 に示した。

3.1 被覆アーク溶接技術

従来のインコネル系被覆アーク溶接棒の欠点から、磁気吹き対策としての交流溶接化を行い開発の第一歩を進めたが、つぎの高品質化研究のポイントは、溶接金属の強度、高温割れおよび溶接作業性の改良にあつた。

インコネル系溶接金属の強度、靱性、高温割れ性によろばす C, Mo, W, Nb の影響が調査された結果³⁾⁷⁾, Nb は高温割れを助長するので、主として C, Mo, W による強度アップがはかられている。各種溶接棒における溶接金属の化学成分 (Mo 当量) と強度靱性との関係を図 2⁷⁾ に示す。このように実績あるインコネル系溶接棒において保証強度の高い製品が開発されている。特に 0.2% 耐力で 42kg/mm² を保証できる高強度溶接棒が開発された結果、15 万 m³ の大型 LNG 貯槽が BS 規格 28 kg/mm² という高設計応力により建造され、通常の API 規格 (設計応力 22 kg/mm²) による場合に

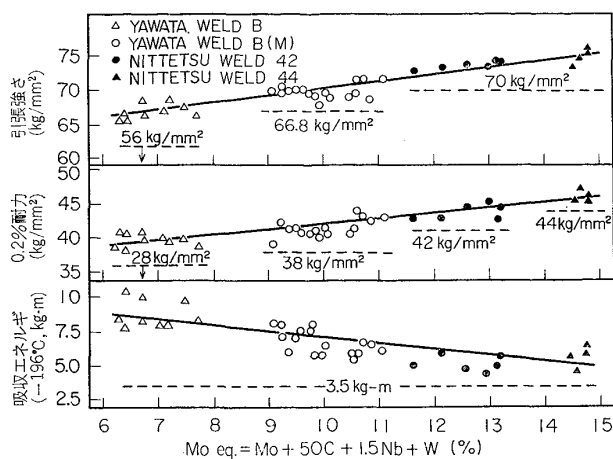


図2 インコネル系溶接金属の機械的性質におよぼす合金元素の影響

らべて、9%Ni 鋼側板の板厚節減の効果をあげた。

高合金心線を用いる被覆アーク溶接棒では、抵抗発熱により溶接棒が高温に加熱され、保護筒が劣化しアーク不安定となる現象（棒焼け）がある。しかし現在実用されている高 Ni 系溶接棒は、適正溶接電流の使用にあわせて、被覆剤が改良され保護筒の劣化は軽減され、溶接作業性は大幅に向上している。また電気抵抗の低い純 Ni 心線を用い、合金はすべて被覆剤より添加して高 Ni 溶接金属とする溶接棒も開発され、高い溶接電流により作業性を重視する用途に実績がある。

3.2 ガスシールドアーク溶接技術

立向姿勢あるいは上向姿勢などの溶接自動化にはかかせない溶接技術である。消耗電極ワイヤ方式の MIG 溶接と非消耗タングステン電極に溶加ワイヤを用いる TIG 溶接法がある。

3.2.1 MIG 溶接技術

インコネル系ワイヤはパルスアーク電源（直流逆極性）を用いて MIG 溶接可能とされていた。しかしシールドガスは純 Ar でなければならず、アークの安定性、集中性に乏しく、融合不良を発生しやすかった。また立向、上向姿勢では凸ビードとなりやすく、すぐれた自動溶接装置が見当たらないこともあつて、安定した自動溶接可能な状態ではなかった。

MIG 溶接の自動化は、溶接トーチの自動ウィービング機構を持つ全姿勢溶接装置の開発⁸⁾を中心に進められた。ウィービングの軌跡は逆 U から単振動まで連続可変とし、溶接トーチ傾動機構とあわせて、溶融プール形状に対応する三次元のウィービングを行い、融合不良、凸ビードなどの欠陥防止がはかられた。

インコネル系ワイヤの MIG アーク特性の改善には、Ar に He を混合してアークの電位傾度を高め、短

い集中性のよいアークで溶込みを大きくする研究⁹⁾がある。しかし CO₂、O₂ などの活性ガス混合の方がより効果的⁹⁾であり、ワイヤ突出し長さが変動しても溶込み形状は一定である。活性ガスの利用はインコネル系ワイヤではビード表面に Nb、Ti を含むタイトな酸化被膜を生成するため適用できない。

これに対し、国産の高 Ni-Mo 系ワイヤは Ar+5% CO₂ シールドで溶接しても、酸化被膜はタイトにならず、アーク特性も改善されるなどの成果⁹⁾が得られているが、ワイヤの比溶融速度が大きく、凸ビードになりやすいなどビード形成上の問題があり、実用には至っていない。

3.2.2 TIG 溶接技術

TIG 溶接の自動化については、アーク電圧自動制御機構を持つ自動ウィービング装置により、立向姿勢あるいは全姿勢溶接施工技術の開発^{10) 11) 12)}が行われた。

TIG 溶接では、溶接アーク条件と溶加ワイヤ送給速度がそれぞれ独立に設定できる。ワイヤはアーク中で加熱溶融されるので、MIG 溶接にくらべて溶融速度は低く、溶融金属量が少ない。従つて立向、上向などの姿勢でもビード形状はフラットになり、また溶込みも大きくなる。このような特長から高品質の溶接部が得られるので、トラブルが少なく、全工程から見ると能率的であるとの評価⁵⁾から、TIG 自動溶接技術は国内外の LNG 貯槽の立向継手などに実用^{5) 6)}され、高品質化と溶接自動化を達成した。

溶加ワイヤは、表 1 に示した耐割れ性のすぐれている、国産の高 Ni-Mo 系、高 Ni-Cr-Mo 系が実用されている^{5) 6)}。高 Ni-Cr-Mo 系ワイヤによる立向溶接金属の稀釈率と強度の関係を図 3¹⁰⁾に示す。母材による稀釈

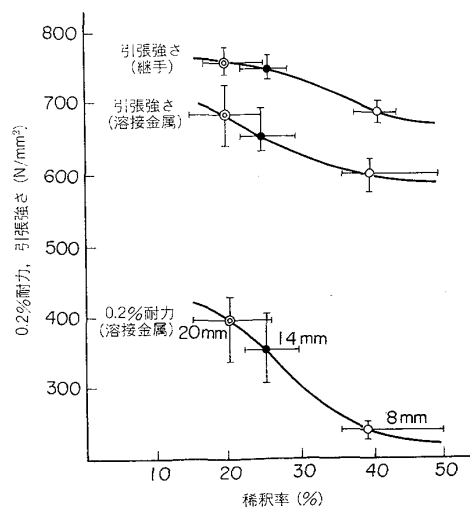


図3 立向 TIG 溶接継手の引張強さにおよぼす稀釈率の影響（溶接ワイヤ：MGS-709N）

が増加するにつれて溶接金属の強度は低下傾向を示す。薄板で特に稀釈が大きくなるような場合には、低入熱多層溶接などの溶接条件を用いる必要がある。ワイヤ溶融速度を向上させるための研究も進められ、2電極 TIG 法¹³⁾、ワイヤ通電による TIG アークの磁気駆動を利用する法¹⁴⁾などが報告されている。

TIG 溶接は純 Ar シールドで溶接できるので、溶接金属の酸素量は低く、高純度の溶接金属が得られる。またワイヤの溶融速度が小さいので多層盛溶接となり、後続溶接による熱サイクルを受ける溶接金属の割合も大きくなる。このような特長から、TIG 溶接は後述する共金溶接金属の靱性向上に最適のアーク溶接法である。すなわち TIG 自動溶接技術の確立は、共金溶接技術の研究推進に大きく貢献している。

3.3 サブマージアーク溶接技術

本溶接法は下向および横向姿勢の自動溶接法として最も一般的なものであり、高能率で品質上の信頼性も高い。しかし被覆アーク溶接、ガスシールドアーク溶接にくらべ溶込みが大きく、9%Ni 鋼と高 Ni 系溶接材料のような異種金属溶接では、母材による稀釈のため、一般に溶接金属は強度靱性の低下、高温割れ傾向の増大などの影響を受けやすい。

従来のインコネル系溶接材料は高温割れを発生しやすく、従って稀釈を少なくするため低入熱溶接によらねばならず、サブマージアーク溶接の高能率の利点をいかすことができなかった。その後我国で耐割れ性にすぐれた Mo 含有量の高い溶接ワイヤが開発³⁾⁴⁾され、サブマージアーク溶接の高能率と高品質が 9%Ni 鋼にも適用できるようになった。

本間ら¹⁵⁾は帯溶融原理を利用した溶融-凝固熱サイクル再現装置により、各種 Ni 基合金の高温延性を比較した。その結果を図 4 に、またこれと対比するために行ったサブマージアーク溶接によるリーハイ型拘束割れ試験結果を図 5 に示す。Ni-Mo 系が最も良好な高温延性と高い破断強度を有し、Ni-Cr 系の高温延性、破断強度が最も低い。割れ試験結果においても、Ni-Mo 系が最もすぐれた耐高温割れ性を示し、Cr が増加するにつれてビード本体まで割れが進展し、割れ率が増加している。インコネル系とハステロイ系 (Ni-Mo) を比較した窓型拘束割れ試験でも同様の結果⁹⁾が得られている。

Ni-Mo 系サブマージアーク溶接における、継手引張強さおよび継手溶接金属強度におよぼす稀釈の影響を図 6 に示す。稀釈率の増加とともに継手溶接金属の強度は低下する傾向を示している。しかし継手引張強さは、溶接金属が軟質化しても、9%Ni 鋼の拘束効果¹⁶⁾のため低

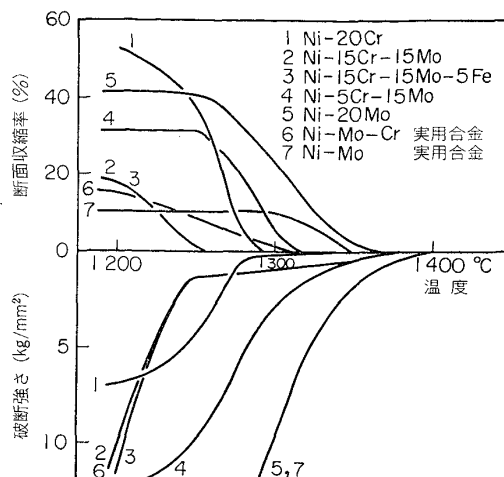


図 4 Ni 基合金の高温引張試験結果 (溶融-凝固熱サイクル再現実験)

No	供試材	20	割れ	率 (%)	100
1	Ni-20Cr				
2	Ni-15Cr-15Mo				
3	Ni-15Cr-15Mo-5Fe				
4	Ni-5Cr-15Mo				
5	Ni-20Mo				
6	Ni-Cr-Mo 実用合金				
7	Ni-Mo 実用合金				

図 5 Ni 基溶接金属の高温割れ感受性 (リーハイ型拘束割れ試験, サブマージアーク溶接)

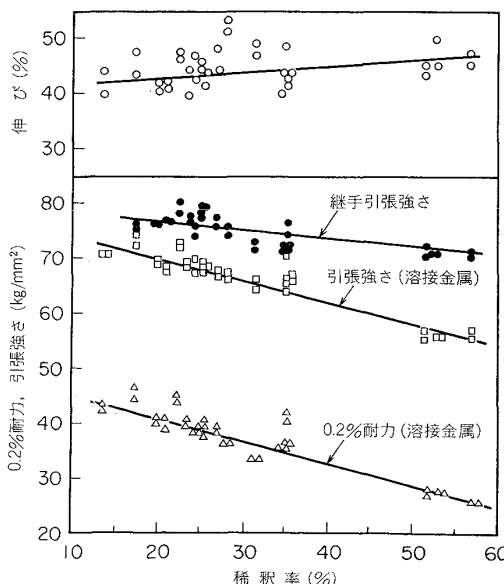


図 6 サブマージアーク溶接部の強度におよぼす稀釈率の影響 (NITTETSU FILER 196・FLUX 10)

下の程度は小さく、70kg/mm² 以上の強さを安定して示している。

耐割れ性、強度のすぐれた高 Mo ワイヤにあわせて、作業性のすぐれた高塩基性フラックスの開発により、横

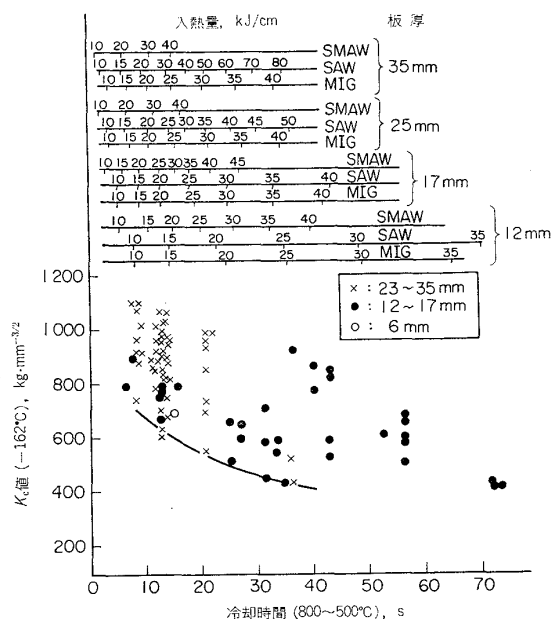


図7 溶接継手熱影響部の破壊靱性値と冷却速度、入熱の関係（高 Ni 系溶接材料）

向継手の溶接自動化、底板の溶接自動化、地上で大板継ぎを行い高所溶接を減少させるなど、LNG 貯槽の高品質化、建造の高能率化、合理化に貢献している。

3.4 高 Ni 系溶接継手の破壊靱性

LNG 貯槽の安全性評価の上で、溶接継手部の極低温における破壊挙動、破壊靱性を知ることは重要である。高 Ni 系溶接材料を用いた継手では、9%Ni 鋼にくらべて溶接金属の強度は低く、軟質であるため、ボンド部近傍に切欠をつけた広幅引張試験を行うと、 -196°C でも脆性亀裂の発生はほとんど認められず、高 Ni オーステナイト溶接金属の延性破壊となる¹⁷⁾¹⁸⁾。また熱影響外縁の靱性劣化部に切欠をつけた場合でも、いつたん発生した脆性き裂は必ず軟質の溶接金属部へ曲がり込み、延性

破壊となる傾向がある¹⁷⁾。

高 Ni 系溶接材料による 9%Ni 鋼溶接継手のボンドおよび熱影響部に切欠をつけた各種大型試験を行い、得られた -162°C における K_{IC} 値をまとめて図 7¹⁷⁾に示す。最低値は K 開先継手などの垂直ボンドについて得られたものであるが、冷却時間と関連し、溶接入熱が高くなるほど若干低下する傾向を示す。この図から、広い範囲の溶接条件全般にわたって、高 Ni 系溶接継手は実用的に良好な破壊靱性値を有することがわかる。

このように 9%Ni 鋼の高 Ni 系溶接継手は、極低温においても、溶接金属の延性破壊挙動を示すことが多くの脆性破壊発生試験より解明されており、その安全性は多くの使用実績と共に高く評価されている。

4. 低 Ni 系溶接技術の開発

9%Ni 鋼の溶接には、溶接ままの状態においてすぐれた極低温靱性を確保するため、高 Ni 系溶接材料が実用されており、継手の破壊靱性にもすぐれた特長を示している。しかし高 Ni 系溶接材料は高価であり、貯槽建造費に占める溶接材料費の割合が高いことから、低価格溶接材料の開発が強く望まれており、不断の研究が続けられている。

低価格化は Ni 量を減らす方向で検討されている。代表的な低 Ni 系溶接材料の化学成分を表 2 に示す。現在までの開発状況を見ると、大別して次に示す二つの思想のもとに研究されている¹⁹⁾ことがわかる。

(1) 破壊に対する安全性を第一に考え、完全オーステナイト組織において、Ni にかわる Mn などのオーステナイト形成元素を利用し、低 Ni 化、高品質化をはかる。

(2) 異種金属溶接の諸問題解決を目指し、9%Ni 鋼

表 2 低 Ni 系溶接材料の化学成分例

タイプ	成分系	溶接法	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
オーステナイト系	50Ni	被覆アーク	0.01	0.33	2.44	—	—	48.6	13.1	1.83	—
	40Ni	被覆アーク	0.12	0.24	2.29	0.008	0.005	39.3	8.8	6.4	—
		MIG TIG	0.15	0.22	6.43	0.003	0.007	37.0	9.9	8.2	—
	高 Mn	被覆アーク	0.22	0.38	12.2	0.009	0.003	14.1	8.3	3.9	—
		MIG TIG	0.26	0.20	17.2	0.002	0.008	15.0	9.9	5.2	—
		サブマージアーク	0.20	0.44	12.1	0.007	0.005	13.4	7.1	5.7	—
フェイアラ系	共金	TIG	0.03	0.003	0.36	0.003	0.005	11.22	—	Co 0.36	0.01
			0.024	0.15	0.21	0.001	0.002	11.1	—	—	0.024

と同じ成分系でフェライト組織である共金溶接金属の極低温靱性を改善し、施工技術を開発する。

4.1 低 Ni オーステナイト系溶接技術

表 2 に示すように、現在実用されている各溶接法に適用できる溶接材料が開発されている。うち 50~40% Ni については、LNG 実験船で使用された実績²⁰⁾がある。

40%Ni 系溶接技術は、吉村ら²¹⁾の研究した 37%Ni-6%Mn-10%Cr 系溶接金属の膨張係数が 9%Ni 鋼と等しく、極低温靱性がすぐれるという特長にもとづき、実用性能向上研究が行われ開発されたものである。

高温割れ性²²⁾、継手強度²³⁾、切欠靱性²⁴⁾の向上のため S, P を低め、Mo が添加され、Si が調整されている。溶接金属本体の高温割れには粒界マイクロ偏析が主要因と考えられる。高温割れ性におよぼす Si と S の関係を図 8²²⁾ に示す。

MIG 溶接においては、Ar+5%CO₂ シールドでパルスアーク溶接され、安定した溶け込み形状を示す²⁵⁾。TIG 溶接においても溶け込み良好で、フラットなビード余盛り形状を示す。いずれの溶接でも、融合不良などのない高品質継手が得られる。

40%Ni 系ワイヤによる立向 TIG 溶接継手について実施された各種広幅引張試験結果²⁶⁾を図 9 にとりまとめた。なお高 Ni-Mo 系ワイヤによる結果も比較のため示した。補修溶接、表面切欠、十字溶接貫通切欠をいずれもボンド部に加工し、-170°C で試験された。十字溶接試験片を除けば、いずれも 1m あたり 3~10mm の角変形、1~3mm の目違いを生ずるよう溶接された。すべての試験片が 9%Ni 鋼の 0.2% 耐力とほぼ同等あるいはそれ以上の破壊発生応力を示しており、高 Ni 系溶接継手と比較しても、全く同等のすぐれた性能を有することが確認された。

さらに Ni を低減したものとして、高 Mn オーステ

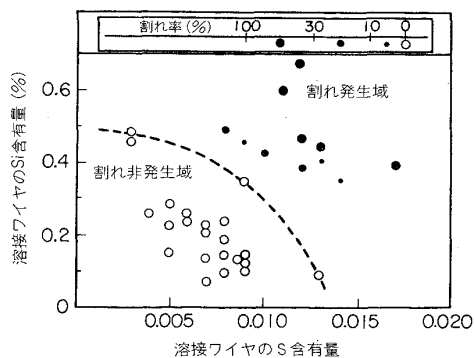


図 8 40%Ni 系溶接金属の高温割れ感受性におよぼす S, Si の影響

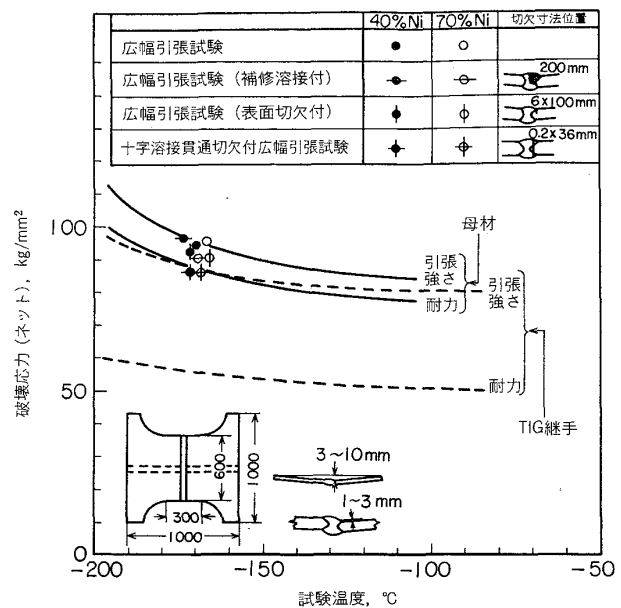


図 9 40% Ni 系 TIG 溶接継手の各種広幅引張試験結果 (70%Ni 系との比較, 9%Ni 鋼: 30 mm厚)

ナイト系溶接材料がある。これは高 Mn-Cr-Ni オーステナイト鋼の特性研究²⁷⁾にもとづき、溶接金属としての強度靱性、ボンド部の靱性などにおよぼす成分元素の影響を研究し開発された。

12%Mn-7%Cr-13%Ni 系および 25%Mn-5%Cr-2%Ni 系が基本成分として選定され、被覆アーク溶接棒、MIG 溶接ワイヤ、サブマージアーク溶接材料を試作し継手靱性が比較された²⁸⁾。その結果、前者の成分系の方がすぐれた靱性を示し、高 Ni 系にくらべてそんなに良好であることが確認された。12%Mn-7%Cr-13%Ni 系溶接材料による各種溶接継手の性能試験結果²⁹⁾を表 3 に示す。

高 Mn オーステナイト系溶接金属の特長は、高 Ni 系にくらべて高い耐力を示すこと、ならびに高温割れ感受性が低いことである。

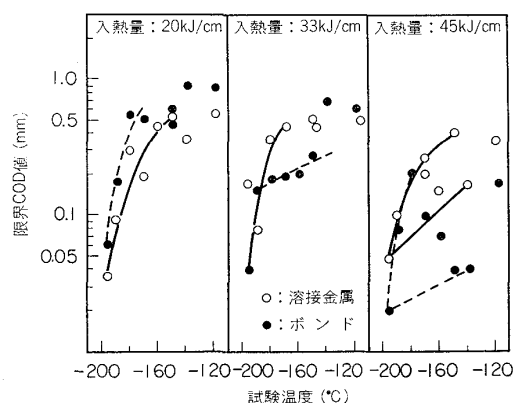
4.2 共金系溶接技術

9%Ni 鋼の共金溶接において、溶接ままのフェライト系溶接金属に高い低温靱性を確保するためには、酸素、窒素などのガス成分、りん、硫黄などの不純物元素を極力低減する必要がある。したがって溶接ワイヤは原料を厳選し真空溶解で製造される。

渡辺ら³⁰⁾は MIG 自動溶接により強度靱性のすぐれた共金溶接継手性能を得た。実用化推進を目的としたその後の共同研究結果³¹⁾によれば、耐ブローホール性、低温靱性、アークの安定性のすべてを満足する結果が得られなかった。しかし TIG 溶接法によれば、細粒化による

表 3 高 Mn オーステナイト系溶接における継手性能
(12Mn-7Cr-13Ni 系, 板厚 25 mm 9 %Ni 鋼)

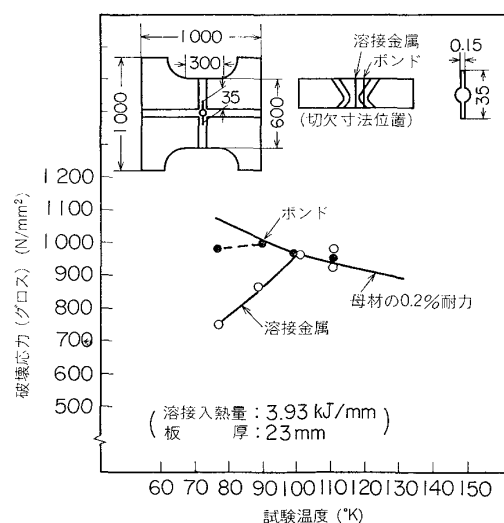
溶 接 法	姿 勢	入 熱 kJ/cm	溶接金属引張			継 手 引張強さ kg/mm ²	衝 撃 値 vE-196, kg·m	
			0.2%耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %		溶接金属	ボ ン ド
被覆アーク	下 向	16	51.0	67.5	37.3	74.7	8.2	8.9
	横 向	12	50.0	67.4	41.3	75.5	9.9	10.8
	立 向	32	53.6	72.5	34.9	72.1	10.7	11.5
	上 向	27	55.5	73.3	36.5	73.3	7.7	10.8
MIG	立 向	28	51.1	73.5	33.3	76.4	11.0	9.8
TIG	立 向	32	53.7	72.4	30.0	73.9	14.6	13.3
サブマージアーク	下 向	20	43.0	66.2	40.9	73.5	6.1	7.6
	下 向	31	43.0	64.9	38.9	72.3	8.0	7.8
	下 向	41	42.5	62.9	39.5	71.2	9.6	6.4

図10 共金系 TIG 溶接継手の COD 試験結果
(疲労切欠)

靱性の向上, 安定した作業性などの特長からみて, 実用化の可能性が考えられると報告されている。

TIG 溶接金属の靱性は溶接入熱量の増加とともに低下するが, この傾向は薄板でさらに顕著になる³²⁾。TIG 溶接部の COD 試験結果 (疲労切欠) の一例を図10³³⁾に示す。溶接入熱 33kJ/cm における値は, ほぼ 9%Ni 鋼母材の COD 特性値に匹敵するとしている。また最終層溶接金属は靱性が低く, 継手全体の破壊靱性値を低下させる結果となるが, 最終層表面を TIG アークで再溶融することにより靱性は母材なみに改善される³³⁾³⁴⁾。

溶接金属およびボンド部に貫通切欠をつけた十字継手広幅引張試験の結果を図 11³⁵⁾に示す。溶接金属は -172°C 以上の温度域で, ボンド部は -183°C 以上の温度域ではほぼ全面降伏破壊している。このような各種

図11 共金系 TIG 溶接継手の貫通切欠付十字溶接
継手広幅引張試験結果

大型試験の結果と, 球形モデルタンク (直径 2 m, 板厚 16 mm) の液体窒素中の耐圧試験の成功から, 共金 TIG 溶接継手が LNG 温度で脆性破壊しないことが立証されたとしている³⁵⁾。

TIG 溶接は純 Ar シールドにより高純度の溶接金属が得られ, これが多層溶接時の熱サイクルで細粒化されるので極低温靱性がすぐれている。従つて共金系 TIG 溶接施工にあつては, 適正溶接条件の選定と管理, ならびに大気の影響を受け靱性を劣化させることのないよう, シールドを完全に行うことが本質的に必要である。また仮付けおよび補修溶接などのため, 簡便な半自動

TIG 溶接技術が開発され、総合的な溶接施工基準の確立が重要と考えられる。

5. む す び

9%Ni 鋼の溶接技術研究についてその成果を要約した。

高 Ni 系溶接技術については、材質改善、欠陥防止、溶接自動化など、その進歩は著しく、9%Ni 鋼溶接継手の高品質化はほぼ達成されたと思われる。今後とも、低成長社会におけるエネルギー対策の一環として、大型 LNG 貯槽の建造に貢献を続けるものと期待される。

低 Ni 系溶接技術についても、技術的には実用化段階にあるものと考えられる。今後は施工基準の確立とともに安全性の確証を集積し、LNG 貯槽のオーナーおよび社会に対し与えるメリットを明確にしつつ、実用化を推進することが重要と考える。

末尾ながら、引用させていただいた研究論文の各著者に、厚くお礼を申し上げる。

文 献

- 1) 鈴木丈夫, 村上嗣郎, 桑原守正: 溶接技術, 16 (1968) 11, p. 26
- 2) 新日本製鉄: LNG タンク用鋼材の紹介
- 3) Y. HORII, N. MIZUHASHI, R. FUJIMOTO, T. NISHI, T. SUZUKI, and T. ITO: IIW Document No. XII-B-138-73
- 4) 杉山 暢, 西川 裕, 古賀保行: R & D 神戸製鋼技報, 28 (1978) 4, p. 40
- 5) Y. KURIYAMA, T. KOHNO, K. TOYOMASU, N. KATAYAMA, and M. YOKOKURA: IIW Document No. XII-640-76
- 6) 大井淳司, 荒井敏夫, 関野昭幸: R & D 神戸製鋼技報, 25, (1975) 4, p. 79
- 7) 藤本六郎, 堀井行彦, 三宅聰之, 西 武史, 森垣脩, 鈴木丈夫: 溶接学会全国大会講演概要, 14 (1974), p. 80
- 8) S. HASEBA, S. KITAGUCHI, N. MIZUHASHI, S. TAKEI, T. NISHI, T. HAGIWARA, and T. ITO: IIW Document No. XII-B-162-74
- 9) Y. HORII, N. MIZUHASHI, T. NISHI, H. YANAGIDATE, S. SAITO, and T. NAKANO: 第2回国際シンポジウム「Advanced welding technology」(Aug. 1975 大阪)
- 10) M. ARIKAWA, A. OHI, T. SUGIYAMA, and C. HASHIMOTO: IIW Document No. XII-B-164-74
- 11) 小西一郎, 村上俊三, 渋谷義秋, 白根裕作, 中田強: 日立造船技報, 37 (1976) 4, p. 33
- 12) 中島正樹, 堺 英輔, 森内祥二, 草野豊明, 仁藤弘: 三菱重工技報, 12 (1975) 6, p. 112
- 13) 笹川哲三, 藤田治男, 石川 泰, 立川 博: 溶接学会全国大会講演概要, 20(1977), p. 160
- 14) 市原 泉, 庵地朗彦, 藍田 勲, 水島 仁: 溶接学会全国大会講演概要, 24(1979), p. 144
- 15) H. HOMMA, N. MORI, and K. ASANO: IIW Document No. II-897-79, IX-1113-79
- 16) 佐藤邦彦, 豊田政男: 溶接学会誌, 40 (1971) 9, p. 49
- 17) 矢島 浩, 山本 豊, 安藤 清, 萩原行人, 田中潔, 桑辺行正, 片岡繁夫, 牛島正夫, 出羽昭夫: 日本造船学会論文集 (1975) 137, p. 350
- 18) T. SAKAI, H. TAKASHIMA, K. TANAKA, H. MATSUMAE, and H. YAJIMA: ASTM Special Publz, 579(1975), p. 205
- 19) 堀田知道, 西 武史: 溶接技術, 22 (1974) 4, p. 26
- 20) 鎌田 勲, 中田 強, 早川浩司: 日立造船技報, 38 (1977) 1, p. 49
- 21) H. YOSHIMURA, K. KAKU, I. KIMURA, T. MUTO, K. FUJIWARA, and M. KUWAHARA: Trans. JWS, 1(1970) 2, p. 72
- 22) 西 武史, 斎藤昭治, 中野武人, 堀井行彦: 溶接学会誌, 48 (1979) 8, p. 645
- 23) 西 武史, 斎藤昭治, 中野武人, 堀井行彦: 溶接学会誌, 48 (1979) 10, p. 781
- 24) 西 武史, 堀井行彦, 鈴木克己: 溶接学会誌, 投稿中
- 25) T. NISHI, S. SAITO, T. NAKANO, and Y. HORII: ASTM Special Publz, 579(1975), p. 324
- 26) Test Report on the Application of N-TUF CR 196 for LNG Storage Tanks, (April 1976) (Nippon Steel Corp.), Summary of Tests Performed by the 55 Committee
- 27) 吉村博文, 本間弘之: 鉄と鋼, 61 (1975) 3, p. 321
- 28) 吉村博文, 矢田 浩, 安楽純利, 加来勝夫, 西武史, 本間弘之, 柳館文吉: 溶接学会全国大会講演概要, 17(1975), p. 34
- 29) 西 武史, 本間弘之, 藤本六郎, 緒方雅人: 溶接学会全国大会講演概要, 17(1975), p. 36
- 30) M. WATANABE, J. TANAKA, and I. WATANABE: IIW Document No. IX-795-72, X-666-72
- 31) 日本溶接協会 9NT 委員会: 9Ni 鋼用共金溶接材料の実用化に関する試験研究 (1975)
- 32) 市原 泉, 杉山 暢, 藍田 勲, 西川 裕: R & D 神戸製鋼技報, 28 (1978) 4, p. 46
- 33) 田中甚吉, 渡辺 之, 高村登志博, 大越重俊: 溶接学会全国大会講演概要, 21(1977), p. 98
- 34) 五代友和, 杉山 暢, 西川 裕, 池田一夫, 青木満, 木内 晃: R & D 神戸製鋼技報, 28(1978) 2, p. 55
- 35) 日本鋼管: 第106回化学機械溶接研究委員会資料 CP-79-21 (1979)