

解 説

UDC 669.14.018.41 : 622.691.03 : 621.79

LNG タンクの構造とその材料および溶接*

小川泰之輔**・坂本 光弘**・豊増 清明**

大山 光男**・深川 宗光***・雑賀 喜規***

LNG Tank-Its Structure, the Materials and Welding Techniques

Yasunosuke OGAWA, Mitsuhiro SAKAMOTO, Kiyooki TOYOMASU,
Mitsuo OHYAMA, Munemitsu FUKAGAWA, and Yoshinori SAIGA

1. ま え が き

液化天然ガス (Liquefied Natural Gas, LNG) は、メタンを主成分とする天然ガスを約 -160°C へ冷凍液化したもので、産地によつて成分は若干異なり、比重は $0.42\sim 0.46$ である。

LNG はその無公害性、高カロリー、一酸化炭素ゼロなどの特性から、都市ガス、発電、鉄鋼その他産業用燃料に最適で、石油に代るエネルギーとして原子力発電とともに石油危機以降急速に脚光を浴びるようになった。

この LNG の貯蔵、運搬には約 -160°C という極低温が必要なため、貯蔵容器、運搬用船舶などにはとくに低温で機械的性質の優れた材料が使用されている。

以下に 2, 3 の代表的な LNG 用材料と、その溶接について解説する。

2. LNG の需要と動向¹⁾²⁾

材料の解説に先立つて、わが国における LNG の需要と動向について簡単に触れておきたい。

天然ガスの全世界での確認埋蔵量は 1975 年現在で約 73 兆 m^3 、共産圏、中近東がほぼ 30% ずつを占め、アフリカ、アメリカ、ヨーロッパが各 10% 前後となっており、アジア・オセアニア地域は約 5% と量は多くないが、日本に近いガスソースとして重要である。

LNG のわが国への導入は昭和 44 年アラスカから東京ガス根岸工場 (東電と共同) へ入つたのが最初で、その後ブルネイからも輸入されるようになり、さらにアブダビ産、インドネシア産の輸入も始まるので、昭和 52 年末の LNG 輸入量は年間 1566 万 t に達する予定である。このほかイラン、サラワク、オーストラリアなどのプロジェクトも計画されており、昭和 55 年度にはわが国の

一次エネルギーの 5.2% (約 2000 万 t)、昭和 60 年度には同 7.9% (約 4200 万 t) に達すると推定されている。

最近の経済環境の落込みで、輸入量は計画値を下回る可能性が強いが、いずれにしてもこのような大量の LNG の輸入には出荷基地における液化、貯蔵能力、LNG 船の容量、運航さらに受入基地での貯蔵能力が問題となりかなりの数の貯蔵タンク、LNG 運搬船を必要とする。

3. LNG タンク

3.1 LNG 船のタンク

3.1.1 LNG 船の特徴

天然ガスを運搬する方法は、運搬の距離が比較的短かい場合はガス状のままパイプラインで運搬しているが遠距離を大量に運搬する場合には天然ガスを産地で液化して消費地まで船で運搬するのが一般的な方法である。

しかしながら、LNG は大気圧で約 -160°C という超低温のため船による運搬に際してはタンクの材料に十分の考慮が必要となる。また、LNG 気化ガスの引火爆発や気化による体積膨張の二次的事故についての考慮も必要である。

低温に対しては、タンク材料の低温における性能や防熱材の保冷性能について数多くの実験を繰り返して十分なものを装備している。爆発に対しても、信頼性の高い付属機器を必要に応じて二重三重に装備し、航海中に発生する LNG の気化ガスは船体の機関室で燃料として使用するといったような特別な考慮を払っており、万が一の事故の場合でも十分対処できる設計となつている。

船による LNG 運搬が商業ベースでスタートして今年で早 13 年になり、建造船の数も 40 隻を越えるがまだ LNG 船の大きな事故は発生していない。日本に始め

* 昭和 52 年 7 月 11 日受付 (Received July 11, 1977)

** 石川島播磨重工業(株) (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

*** 石川島播磨重工業(株) 工博 (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15 Toyosu Koto-ku Tokyo 135-91)

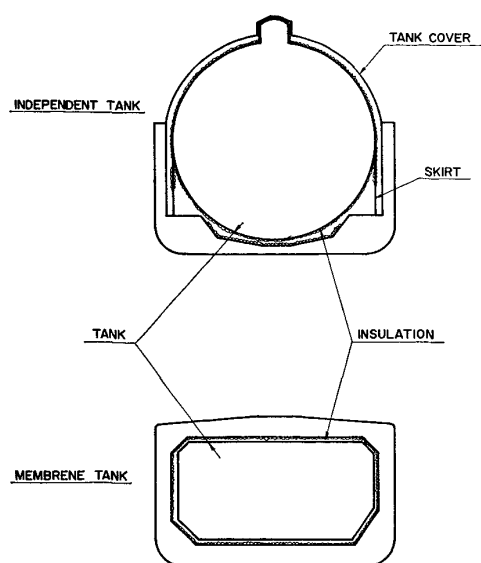


Fig. 1. Type of tank of LNG carrier.

てLNG船が入港したのは、70 000m³の Polar Alaska号がアラスカから横浜へ入港した昭和44年11月である。その後日本のLNG輸入プロジェクトも次々に発足し、現在では125 000m³のLNG船を含めて15隻程が日本航路に従事している。

3.1.2 タンクの種類とその特徴

LNG船のタンクは、Fig. 1に示すように独立タンクとメンブレンタンクに大別される。独立タンクとは、LNGの船体動揺による変動荷重をタンク自体で保持できるように十分な強度を有したタンクを、船倉内に船体構造とは別に独立して装備したものである。一方、メンブレンタンクは、船倉内に防熱材を貼り付けてその上面にLNGの漏洩を防ぎ更に熱収縮にも対処し得るようなメンブレンを張りつめるものであり、タンク自体は強度的に自立しない。なお、この2つの方式のほかに、両者の特徴を取り入れたセミメンブレン方式が提案されている。

独立タンクでは、タンク自体が船体と分業で別工場で作製可能なためLNG船の建造期間がメンブレン方式よりも一般に短い。これに対してメンブレン方式は船体を完成したあとで防熱材やメンブレンを船倉内全面に貼り付けるという建造方法をとるのでLNG船の建造期間は独立タンク方式よりも一般に長くなる。また、独立タンクは、船体運動によってタンクが移動しないようにタンクと船体構造との結合部に特別の考慮が必要となるが、メンブレン方式では防熱材に十分な耐圧強度を持たせておけばそれ以外の特別の考慮は不要である。さらに、メンブレン方式では、secondary barrier と称するメンブレンを先述のタンクを構成するメンブレンに加えて二重に装備して万一の事故に備えて安全性を確保しているが、独立タンクではタンクの強度解析を十分に行なつて

タンクの大破壊が生じないことを確認した上でこの secondary barrier を一部省略している例が多い。

3.1.3 タンクの使用材料

タンクに要求される性質は、先述の通り、LNGが約-160°Cという超低温であるためこの低温雰囲気においても十分な靱性を保ち、かつLNGの大量運搬に従事するLNG船のタンクは大きな構造物としての十分な加工性や溶接性を有することである。

独立タンクに使用される材料は15mmから200mmにもおよぶ厚板のアルミニウム合金または9%Ni鋼であり、メンブレンタンクには0.5mmないし1.2mm程度の薄板のアンバーやオーステナイト系のステンレス鋼が使用されている。セミメンブレン方式のタンクはまだ実船の建造実績がないが使用材料としては独立タンクと同じアルミニウム合金あるいは9%Ni鋼が計画されている。

3.2 LNG貯蔵タンク

3.2.1 タンク型式

LNG貯蔵タンクの型式は細かく分けると多種にわたるが、大きく分けると、地上型と地下型に集約される。さらに、構造別に分類してまとめるとTable 1のようになる。

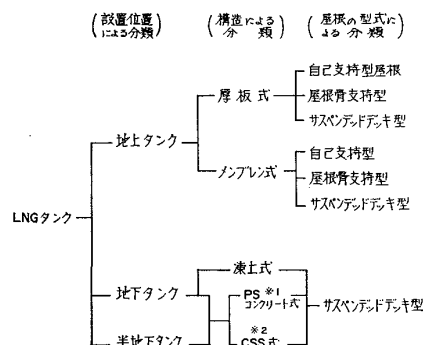
このうち、現在最も多く建造されている「地上二重殻平底円筒ドーム屋根型タンク」と「地下メンブレンタンク」について、使用材料を中心として主に記し、他の型については簡単に記してみたい。

(1) 地上二重殻平底円筒ドーム屋根型タンク

最も一般的なタンクといえはこの型であり、構造は完全に二重殻で、LNG容器となる内槽と、保冷カバーとなる外槽よりなり、内槽と外槽の間に保冷材が入れられている型で、略図をFig. 2に示す。

この型は、地上に建設されるため、建設が比較的容易であるため実績が多い。しかし敷地が広く必要であり、また外観上の威圧観があるなどの点では地下タンクに一步ゆずる。

Table 1. Types of LNG tank.



注記.

*1: PRE-STRESSED

*2: COMPOSITE SHELL SEGMENT

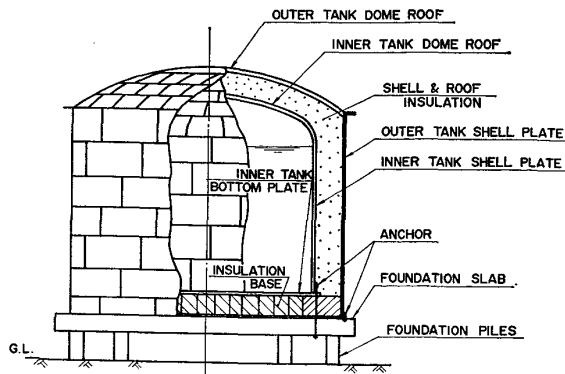


Fig. 2. General plan of double wall-dome roof on-ground LNG tank.

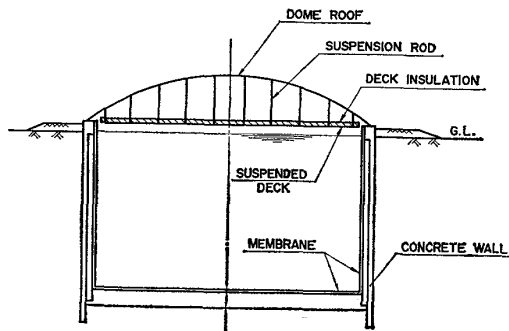


Fig. 3. CSS (Composite Shell Segment) type in-ground LNG tank.

内槽の材料としては、オーステナイト系ステンレス鋼 9% Ni 鋼およびアルミニウム合金が考えられるが、許容応力あたりのコストの点から、9% Ni 鋼とアルミニウム合金 (A5083-0) に絞られる。9% Ni 鋼製とアルミニウム合金製タンクの優劣はつけ難いが、今後の動向として、タンクが大型になり高い設計応力が許容されるようになれば、9% Ni 鋼が優位に立つてくる。

ここで、この両材料についての今後の課題を考えると、9% Ni 鋼については、現状の母材より低強度の溶材材料に頼らず、母材と同程度の強度を有する溶接材料の開発が望まれる。一方アルミニウム合金については A5083-0 材より、強度の高い、いわゆる高力アルミニウム合金を使用できるような技術の研究開発および技術の安定化が必要になってくる。

(2) 地下メンブレン型タンク

この型のタンクとして、日本で一番多く建造されている、CSS (Composite Shell Segment) 型地下タンクについて略図を Fig. 3 に示す。

このタンクは (鉄筋コンクリート+保冷材+液密用メンブレン) より構成され、側部にメンブレン付きセグメントを使用するためにこの名前がついている。

この型のタンクのメンブレンだけ見てみると、低温冷却時の熱収縮を吸収するヒダ、いわゆるエキスパンシ

Table 2. Material list for various equipments of LNG plant.

EQUIPMENT	MAIN PART'S MATERIAL
PIPING	18-8 STAINLESS STEEL (SUS 304) LARGE DIAMETER PIPE ALUMINUM ALLOY (A5083-0)
PUMP	ALUMINUM ALLOY (AA 356-T6) CASTING
COMPRESSOR	(BODY) 18-8 STAINLESS STEEL (SUS 304) CASTING (IMPELLER) 9% NI STEEL
VAPOURIZER	ALUMINUM ALLOY (A3203S-F) EXTRUDED SHAPE

ンが縦横に取付けられており、このエキスパンションをどう設置するかが、この型のタンクの生命となっている。メンブレンの材料としては 18-8 ステンレス鋼 (ほとんど SUS 304) の 2~3mm 厚さの板が使用される。

地下タンクの特徴としては、土木的に常に新工法を取り入れてゆく必要はあるが、地下に埋込まれているという安心感があるので、今後の LNG タンクの指向方向に合った有望な型式である。

(3) その他の型式のタンク

その他として、地上と地下の間にある半地下タンクがあり、これは地下タンクの半分が地上に出た形と考えることができ、特徴も両者の中間にあるといえる。

ほかに、地上メンブレン型というタンクがあり、前述の二重殻タンクの内槽が薄板メンブレンより形成されるもので、熱収縮を吸収できるメンブレンの支持材の構造及びメンブレンの安全性に問題はあがあるが、今後有望な型としてあげられる。

3.2.2 LNGプラント関係の機器

LNGプラントとして各種機器があるが、その主たる物についてどのような材料が使われているのかまとめてみると Table 2 のようになり、用途によつて各種の材料が使われているのがわかる。

4. LNGタンク用金属材料の特性と使用上の問題点

LNGは約 -160°C という極低温で貯蔵されるため使用される材料はとくに低温靱性がすぐれていることが必要である。さらに溶接性を主体とする加工性、耐食性および疲労強度を具備していなければならない LNG 用材料としては 9% Ni 鋼、アルミニウム合金、オーステナイト系ステンレス鋼およびアンバー (36%Ni鋼) が使用されている。いずれもすぐれた低温靱性を示す。本章では LNG 貯蔵タンクに多く使用されている 9% Ni 鋼に主体をおいて概説する。

4.1 9% Ni 鋼の物理的性質と機械的性質

Table 3 ④は 9%Ni 鋼のほか A5083, SUS304 およびアンバーの物理的性質を参考値として比較したものであ

Table 3. Physical properties of low temperature materials for LNG⁴⁾.

MATERIALS	9% Ni STEEL	5083	304 SS	INVAR
DENSITY, (g/cm ³)	7.85	2.66	2.93	8.14
HEAT CONDUCTIVITY, (cal/(cm deg))	0.031~0.064 (-196 ~ 20°C)	0.12 (-200°C)	0.021~0.037 (-196 ~ 0°C)	0.013~0.025 (-196 ~ 20°C)
YOUNG'S MODULUS, (kg/mm ²)	21,000~19,000 (-196 ~ 20°C)	7,450~7,000 (-196 ~ 24°C)	19,700 (-196 ~ 0°C)	14,700~14,600 (-196 ~ 18°C)
SPECIFIC HEAT, (cal/(g deg))	0.088 (-200 ~ 25°C)	0.07 ~ 0.21 (-200 ~ 0°C)	0.040 ~ 0.115 (-200 ~ 0°C)	0.092 (-196 ~ 20°C)
MEAN THERMAL EXPANSION COEFFICIENT, (10 ⁻⁶ /deg)	7.2 ~ 10.4 (-196 ~ 20°C)	6.3 ~ 2.1 (-200 ~ 0°C)	12.5 (-196 ~ 20°C)	1.0 ~ 2.0 (-180 ~ 0°C)

Table 4. Specifications for nickel alloy steels (Chemical composition, wt%).

SPECIFICATION	TYPE	THICK. in (mm)	ANALYSIS	C	Mn	P	S	Si	Ni	Mo	T _{At}	N
ASTM A353-74	9% Ni (NNT)	≤2" (50)	Heat	≤0.13	≤0.90	≤0.035	≤0.040	0.15 0.30 0.30	8.50 9.50 9.50	—	—	—
			Product	—	—	—	—	0.13 0.30 0.30	8.40 9.60 9.60	—	—	—
ASTM A553-74	Type I 9% Ni (QT)	≤2" (50)	Heat	≤0.13	≤0.90	≤0.035	≤0.040	0.15 0.30 0.30	8.50 9.50 9.50	—	—	—
			Product	—	—	—	—	0.13 0.30 0.30	8.40 9.60 9.60	—	—	—
	Type II 8% Ni (QT)	≤2" (50)	Heat	≤0.13	≤0.90	≤0.035	≤0.040	0.15 0.30 0.30	7.50 9.50 9.50	—	—	—
			Product	—	—	—	—	0.13 0.30 0.30	7.40 9.60 9.60	—	—	—
ASTM A522-72	9% Ni (NNT)	NNT≤3" (76)	Ladle	≤0.13	≤0.90	≤0.040	≤0.040	0.15 0.30 0.30	8.50 9.50 9.50	—	—	—
		QT≤5" (127)	Check	—	—	—	—	0.13 0.30 0.30	8.40 9.60 9.60	—	—	—
ASTM A645-74a	5% Ni (IQT)	—	Heat	≤0.13	0.30 0.60 0.60	≤0.025 ≤0.025 ≤0.025	≤0.025 ≤0.025 ≤0.025	0.20 0.35 0.35	4.75 5.25 5.25	0.02 0.12 0.12	≤0.020	—
			Product	≤0.15	0.25 0.64 0.64	≤0.035 ≤0.035 ≤0.035	≤0.035 ≤0.035 ≤0.035	0.18 0.37 0.37	4.85 5.35 5.35	0.17 0.38 0.38	≤0.025	—
N-TUF CR196	5.5% Ni (IQLT)	≤ (40)	Ladle	≤0.13	0.60 1.50	≤0.030 ≤0.030	≤0.030 ≤0.030	0.15 0.30	5.00 6.00	0.10 0.30	0.10 0.10	1.00
			Check	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table 5. Specifications for nickel alloy steels (Mechanical properties).

SPECIFICATION		TENSILE PROPERTIES				IMPACT PROPERTIES			HEAT TREATMENT
		Y.S. ksi (kg/mm²)	T.S. ksi (kg/mm²)	EL (%) GL = 2"	R.A. (%)	TEMP. °F (°C)	L.E. in (mm)	VE ft-lb (kg-m/m²)	
ASTM A353-74		275 ksi (52.8)	100-120 ksi (70.3 - 84.4)	≥20.0	—	- 320°F (-195°C)	LE(C) 0.015" (0.381)	Ave. ≥ 25(3.5) Min. ≥ 20(2.8) Ave. ≥ 20(2.8) Min. ≥ 15(2.1)	900°C ±15°C AC 790°C ±15°C AC 565 - 605°C AC or WQ
ASTM A553-74	Type I	≥85 ksi (59.8)	100 - 120 ksi (70.3 - 84.4)	≥20.0	—	- 320°F (-195°C)	♦	♦	800°C - 925°C WQ
	Type II					-275°F (-170°C)	♦	♦	565 - 635°C AC or WQ
ASTM A522-72		275 ksi (52.8)	≥100 ksi (70.3)	≥22	≥45	-320°F (-195°C)	LE ≥ 0.015" (0.38)	♦	NNT 900°C AC QT 790°C AC 900°C AC 565 - 605°C AC or WQ
ASTM A645-74a		≥65.0 ksi (45.7)	95.0 - 150 ksi (66.8 - 80.9)	≥20.0	—	-275°F (-170°C)	LE(C) 0.0015" (0.38)	Ave. ≥ 25(3.5) Min. ≥ 20(2.8) Ave. ≥ 20(2.8) Min. ≥ 16(2.2)	855 - 915°C WQ 790°C AC 690 - 760°C WQ 620 - 665°C AC or WQ
N-TUF CR 196		≥160	(70 - 84)	≥22	Bend Test 1519 R-101 1789 R-225 180°	(-196°C)	—	Ave. ≥ 25(3.5) Ave. ≥ 20(2.8)	800 - 850°C WQ 720 - 760°C WQ 550 - 600°C AC or WQ

Y.S.: Yield Strength, T.S.: Tensile Strength, EL.: Elongation, R.A.: Reduction of Area, L.E.: Lateral Expansion, VE: Absorbed Energy (2 mm v)

* Supplementary Requirement.

る。設計の際これらの特性は十分に考慮されなければならない。Table 4 および 5 は 9%Ni 鋼, 5%Ni 鋼および 5.5%Ni 鋼の化学組成および機械的性質に関する規格を示す。

9%Ni 鋼の開発当初は、鋼板に対する熱処理設備の問題があり NNT (二回焼ならし、焼もどし) 材に限定されていたが、その後、熱処理技術の進歩により QT (焼入れ焼もどし) 材の製造が可能となつたため、現在ではこれが大勢を占めている。後者は調質処理により生成する微細な焼もどしマルテンサイト組織のため低温靱性はよりすぐれているが、前者より降伏比が高い傾向がみられる。

9%Ni 鋼の高価な Ni 量を資源節約の立場から減少さ

せ Cr, Mo などの合金元素を添加させ特殊処理を施した 5 および 5.5%Ni 鋼が開発された。これらは 9%Ni 鋼に近いすぐれた低温靱性を有しており、将来はこの種の材料の適用面が拡大されていくものと予想される。

4.2 9%Ni 鋼の問題点

9%Ni 鋼の常温および -196°C における引張特性をみると Fig. 4³⁾ に示されているように、0.2% 耐力および引張強さは室温に比べいずれも高くなっているが、伸びはほとんど不変であり、同様の傾向は Fig. 5⁴⁾ にもあらわれている。これらの結果から 9%Ni 鋼は低温においてすぐれた延性を有していることがわかる。

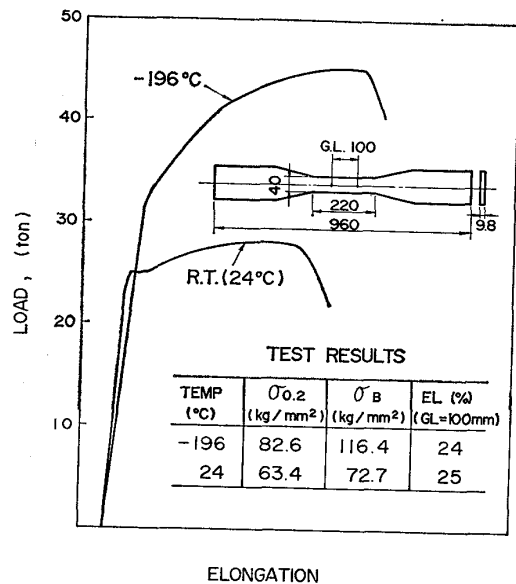


Fig. 4. Comparison of tensile properties of 9%Ni steel at room temperature and -196°C³⁾.

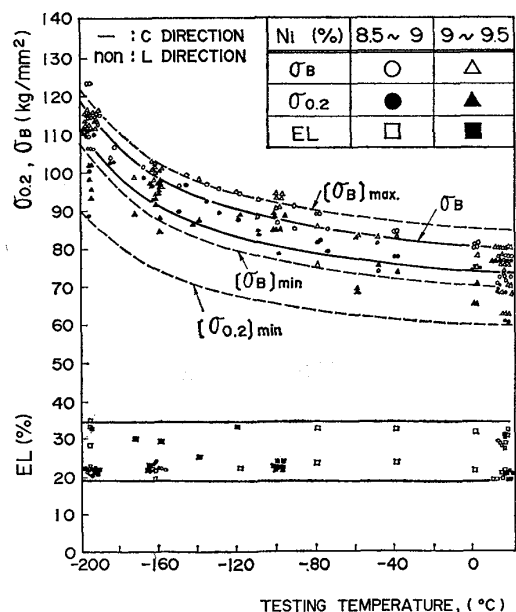


Fig. 5. Temperature dependence of tensile properties of 9%Ni steel (base metal)⁴⁾.

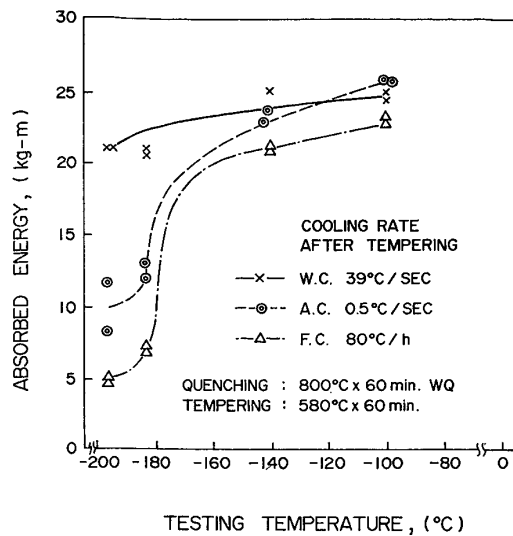


Fig. 6. Charpy transition curves of 9% Ni steel, showing the effect of cooling rate after tempering heat treatment on absorbed energy at low temperature⁵⁾.

一方、9% Ni 鋼は焼もどし脆性の感受性が大きい。Fig. 6⁵⁾は 9% Ni 鋼に焼入れを施した後の焼もどし後の冷却速度を早めた方が低温靱性には有効であることを示している。板厚の比較的うすい場合は水冷などの方法により冷却速度を早めることができるが、鍛造品のように肉厚の厚い場合は徐冷されやすく、このため吸収エネルギーが低くなるという問題点がある。これを改善するための一方法として 9% Ni 鋼の基本組成を検討することが考えられる。Fig. 7⁵⁾は 9% Ni 鋼の -196°C における吸収エネルギーの焼もどし後冷却速度依存性におよぼす C (%) の影響を検討したもので、C (%) は低めにした方がよいことを示している。

Fig. 8⁵⁾は著者らが Mo および Cr の微量添加の影響を調べたもので、Mo : 0.25% またはこれに Cr : 0.5% を添加した場合、強度を低下させないで、吸収エネルギーの焼もどし後冷却速度依存性が改善されることが確認された。従来、9% Ni 鋼は電気炉鋼を主体としており、溶製時にスクラップから Cr, Mo が微量入りこんだ場合は、上述のごとくむしろ有効に作用するものと考えられる。しかし製鋼時間からくる生産性では転炉製鋼の方が圧倒的にすぐれているため、転炉鋼に少しずつ移行していくことが予想される。この場合もアルミキルドによる微細組織に加えて、C を低めとし Cr, Mo などの合金元素成分を添加することはきわめて有効であろう。

つぎに焼もどし温度の問題がある。9% Ni 鋼は true Ac₁ 変態点 (570°C) をはさみ、550°C 以下は焼もどし脆化域に入り、オーステナイト粒界破断をおこす。600°C 以上では析出オーステナイト変態により脆化するといわれている。このことから Table 3 の規格を考慮して 565°C ~ 600°C という狭い温度範囲で焼もどし温

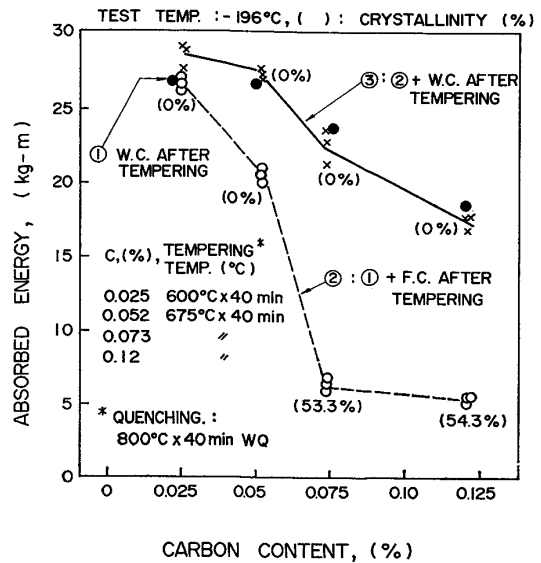


Fig. 7. Effect of carbon content of 9% Ni steel on cooling rate dependence after tempering in absorbed energy at -196°C⁵⁾.

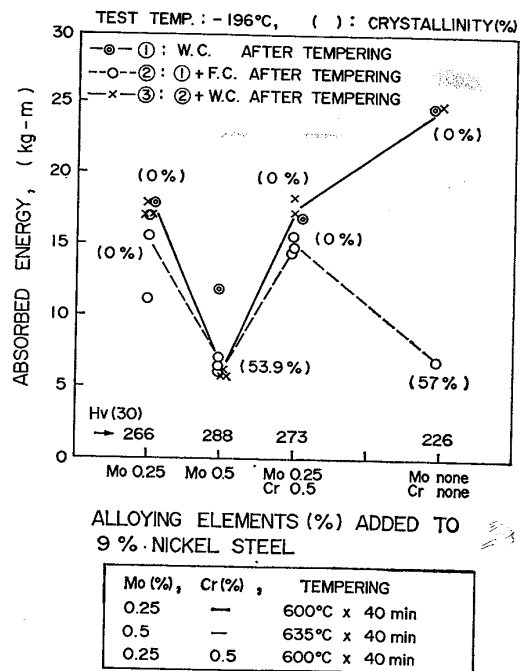


Fig. 8. Effect of Mo and Cr addition to 9% Ni steel on cooling rate dependence after tempering in absorbed energy at -196°C⁵⁾.

度を選ぶ必要がある。

さらに冷間曲げ加工の問題がある。LNG貯蔵タンク用の鋼板はこの問題の対象とはならないが、付属される円筒管のように3%以上の冷間曲げ加工を行なうものについては API 620 の Appendix Q において 552~583°C の温度で焼なましを施すことが規定されている。Fig. 9⁶⁾は 5% および 10% の引張予歪を与えたのち、570°C x 1 h AC の焼なましを行なうと吸収エネルギーが非常に改善されることを示している。

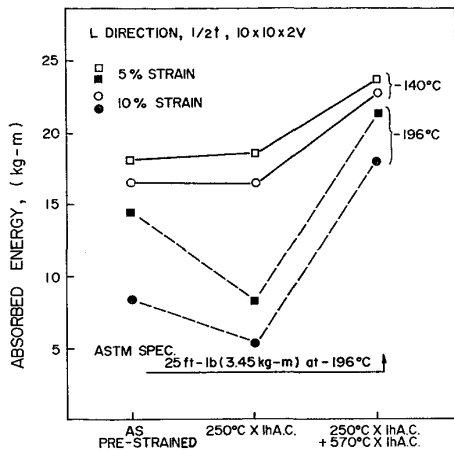


Fig. 9. Effect of strain aging and stress relief annealing on absorbed energy of 9% Ni steel at -140°C and -196°C).

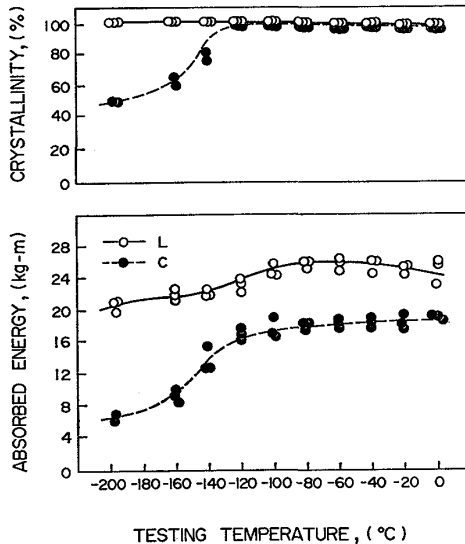


Fig. 10. Comparison of absorbed energy of 9% Ni steel (24 mm thick) in longitudinal and transverse directions to rolling direction⁷⁾.

また円筒管のように冷間曲げ加工を行なう場合、Fig. 10⁷⁾に示すように鋼板の吸収エネルギーには圧延方位による異方性があることを考慮して、使用時の主応力方向が圧延方向となるように配慮すべきである。

一方、溶接後熱処理についてであるが、周知のごとく 1960 年米国の U. S. Steel Co., Chicago Bridge & Iron Co. (CBI) および INCO の 3 社が合同で「Operation Cryogenics」という大型実用試験を企画し、溶接材料として Ni 基合金を使用した 9%Ni 鋼製模型タンクの破壊試験が行なわれた。そして ASME Case 1308-5 に板厚 2 in (50.8 mm) までは溶接後熱処理なしでよいことが規定された。以後 9% Ni 鋼製の LNG 貯蔵タンクは溶接後熱処理なしで建設されている。

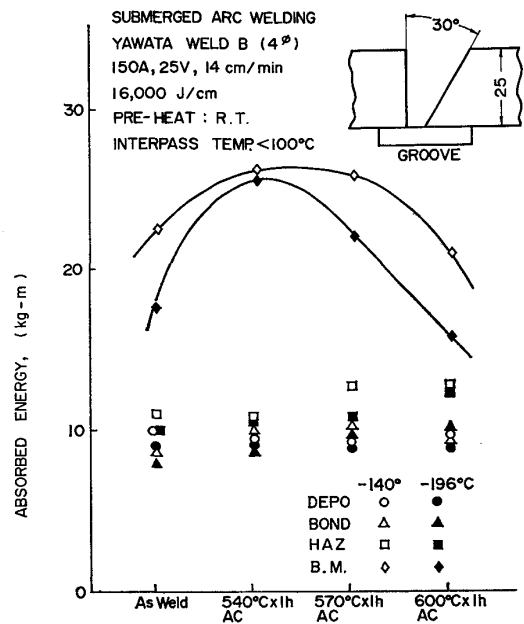


Fig. 11. Effect of stress relief annealing on absorbed energy of base metal and weld metal of 9% Ni steel at -140°C and -196°C).

溶接後熱処理が対象となるのは上述の 3% 以上の冷間曲げ加工を行なった 9% Ni 鋼製円筒管の溶接継手ならびに 9% Ni 鋼製圧縮機用溶接インペラなどである。Fig. 11⁶⁾は 9%Ni 鋼板 (25 mm) の V 形開先に対して、高 Ni 系の溶接棒を用いて被覆アーク溶接した溶接部の吸収エネルギーにおよぼす応力除去焼なまし (SR) の影響を検討した結果を示している。これによると母材、溶接熱影響部 (HAZ)、ボンドおよび溶接金属の吸収エネルギーはいずれも SR により低下することではなく十分な低温靱性を有していることがわかる。なお ASME Sec. VIII Div. 2 の溶接後熱処理 (PWHT) の規定として、P-No. 11A Gr. 1 において、PWHT: $1025 \sim 1085^{\circ}\text{F}$ ($550 \sim 585^{\circ}\text{C}$) が規定されている。この場合 600°F (315°C) まで下げるのに、冷却速度を 300°F/h (150°C/h) 以上としている。2 in をこえるものについてはすべて行なうことが規定されている。

9%Ni 鋼製溶接インペラの鍛造品の溶接に際しては十分な脱酸を行なう必要がある。とくに水素を吸収しやすいため、白点を生じさせないように溶解、造塊において脱水素の配慮が必要である。

つぎに極低温における変形の問題がある。LNG タンクに付帯する 9% Ni 鋼製のサドル、圧縮機インペラおよびシャフトなどは極低温での使用に際してできるかぎり変形を起こさないよう十分な配慮が必要である。SR によつて残留応力を前もつて極力減少させておく必要がある。ここで問題なのは、焼もどし温度レベルによつては不安定オーステナイトを生じることである。Fig. 12³⁾は C. W. MARSCHALL らが 9%Ni 鋼について焼もどし温度と保持時間をかえた場合の常温と -196°C における

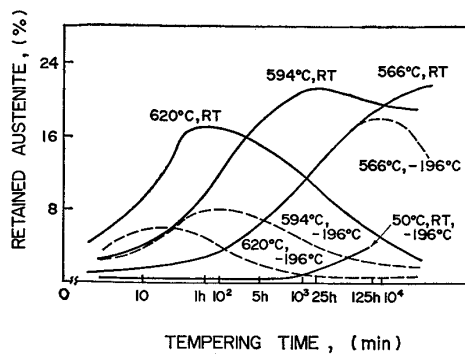


Fig. 12. Effect of tempering temperature and holding time on retained austenite (%) stable at room temperature and -196°C).

残留オーステナイト (%) を測定した結果である。これによると 566°C 以上の焼もどし温度の場合 -196°C に保持すると残留オーステナイトのうち不安定オーステナイトがマルテンサイトに変態するため残留オーステナイトは減少することを示している。このことから、とくに変形を重要視するものは深冷処理を施して極低温で安定なオーステナイトにしておくことが変形防止のうえで重要なポイントであると考えられる。

また、ラミネーションの問題があるが、最近はリン、イオウなどの不純物は非常に少なく清浄度が高くなっており、しかも鋼板の出荷、受入れの段階で非破壊試験による十分な管理が行なわれているためこの種の懸念は非常に少なくなった。9%Ni 鋼は軟鋼と比較すると一般的な耐食性は良好であるが、すきま腐食による局部腐食の問題があり、とくに大気中における保管および工事に際して湿潤環境に長期間さらさないよう十分な配慮が必要である。

4.3 アルミニウム合金

アルミニウム合金は軽量でしかも脆性破壊しない面心立方系の材料であるため、9%Ni 鋼とならんで LNG を主体とした低温タンクに多量に使用されている。アルミニウム合金のうち、強度、延性、相対的な靱性および溶接性の点から Mg 4.5% を含む A5083 が最も適当と考えられており、これが大勢を占めている。この化学組成および機械的性質を Table 6 に示す。9%Ni 鋼にくらべると強度レベルが低いので相対的に厚めの板厚となるが、軽量でしかも曲げ加工および溶接性は良好であり、とくに問題とはならない。

4.4 SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼

SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼は低温靱性、延性および溶接性ともにすぐれているため、LNG 貯蔵タンク内側の メンブレン用材料として多量に使用されている。この化学組成および機械的性質を Table 6 に示す。また、常温および -196°C における吸収エネルギーを後述のアンバーとともにまとめて Table 7⁴⁾ に示す。いずれも高い低温靱性を示す。問題は平均熱膨張係数が 9%

Table 6. Specifications for 304 stainless steel, 5083 aluminum alloy and invar.

TYPE	SPEC.	ANALYSIS	C	Mn	P	S	Y.S. ¹⁾	T.S.	EL. ²⁾	HARDNESS	COLD BEND
304	ASTM A240-74a	Heat or Product	≤ 0.08	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	ksi(kg/mm ²)	ksi(kg/mm ²)	(%)	Ha Hb	Not Required
			1800-2000		800-1050		$\geq 30(\geq 21.1)$	$\geq 70(\geq 49.2)$	≥ 40.0	$\geq 183 \geq 89$	

1) 0.2% Off-Set, 2) Elongation in 2 in. or 50mm, 3) Either Ha or Hb is permissible.

TYPE	SPEC.	ANALYSIS	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Elements	AI
5083	ASTM B209-74	Heat or Product	≤0.40	≤0.40	≤0.10	0.40-1.0	40-4.9	0.05-0.25	≤0.25	≤0.15	Each ≤0.05 Total ≤0.15	Remainder
TEMPER ¹⁾		SPECIFIED THICK. (in.)	Y. S. ²⁾		T. S.		EL. ³⁾					
			ksi	(kg/mm ²)	ksi	(kg/mm ²)	(%)	(%)				
O	0.051-1.500	18.0-29.0(12.7-20.4)	40.0-51.0(28.1-35.9)	≥16								
	1.501-3.000	17.0-29.0(20.0-20.4)	39.0-50.0(27.4-35.2)	≥16								
	3.001-4.000	≥16.0 (≥11.2)	38.0 (≥26.7)	≥16								
	4.001-5.000	≥16.0 (≥11.2)	38.0 (≥26.7)	≥14								
	5.001-7.000	≥15.0 (≥10.5)	37.0 (≥26.0)	≥14								
	7.001-8.000	≥14.0 (≥9.8)	36.0 (≥25.3)	≥12								

1) Temper: H321, H323, H343 and H112 were abbreviated here.

2) 0.2% Off-Set, 3) Elongation in 2 in. or 4 x Diameter.

TYPE	THICK (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe	Y.S. ¹⁾	T.S.	EL. ²⁾
INVAR	0.5-1.5	≤ 0.04	≤ 0.25	$0.20-0.40$	≤ 0.012	≤ 0.012	35-36.5	Remainder	≥ 28	≥ 47	≥ 30

1) 0.2% Off-Set, 2) At room temperature and -196°C

52 11

Table 7. Examples of charpy absorbed energy on 304 SS and INVAR⁴⁾.

	2 ^o ABSORBED ENERGY	
	R. T.	-196°C
304 SS	29.3	21.6
INVAR	35.9	21.0

(kg m/cm²)

Ni 鋼の約 1.5 倍と大きいので、メンブレン構造においてこの点を配慮する必要がある。

4.5 アンバー

アンバーは Ni を 36% 含む低 C-Ni 鋼であるが、平均熱膨張係数が 9%Ni 鋼の約 6 分の 1 と小さく、また、SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼と同様に低温靱性、延性および溶接性いずれもすぐれているのでメンブレン用材料として好適である。その化学組成、機械的性質および吸収エネルギーを各々、Table 6 および 7 に示す。アンバーは SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼と比較するとメンブレンへの適用実績は国内的にみてまだ少ないが、逐次増加するものと予想される。メンブレンは 0.5~1.2 mm という薄板で使用されるため、曲げ加工、内槽への取付および溶接作業において、表面きずなどの欠陥を発生させないよう十分な注意が必要である。取付後の非破壊検査方法およびその判定基準などが今後の課題である。

5. LNG タンクの溶接

前章までに述べたとおり、LNG タンクの種類、形式によつてタンクの内槽材として各種の材料が使われており、溶接法を含めた工作法も異なってくる。ここでは紙面の制約上、主として 9% Ni 鋼製地上円筒形タンクの溶接について述べるが、末尾にステンレス鋼メンブレン構造の地下タンクおよび船用タンクの溶接についても若干触れる。

Table 8. Examples of welding materials for 9% Ni steel.

Welding process	Welding material	Chemical composition (%)											Mechanical properties			
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe	Ni	Cr	Mo	Nb+Ta	W	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	vE-196 (kg-m)
Shielded metal - arc welding	Welding rod A	≤0.10	≤0.75	1.00 ~ 3.50	≤0.020	0.020	≤0.50	6.00 ~ 12.00	Bal	13.00 ~ 17.00	0.50 ~ 2.50	1.00 ~ 3.00	—	≥ 38.0	≥ 66.8	≥ 3.5
	Welding rod B	≤0.15	≤0.75	1.00 ~ 3.50	≤0.020	≤0.020	≤0.50	≤12.00	Bal	11.00 ~ 17.00	3.50 ~ 6.00	1.50 ~ 3.00	≤2.50	≥ 42.0	≥ 70.0	〃
	Welding rod C	≤0.15	≤0.75	1.00 ~ 3.50	≤0.020	≤0.020	≤0.50	≤12.00	Bal	11.00 ~ 17.00	3.50 ~ 6.00	1.50 ~ 3.00	≤2.50	≥ 44.0	〃	〃
TiG or MIG welding	Wire A	≤0.05	≤0.30	≤0.10	≤0.015	≤0.015	≤1.30	≤3.00	≥70.0	—	17.00 ~ 20.00	—	200 ~ 350	≥ 38.0	≥ 66.8	〃
	Wire B	≤0.13	≤0.50	≤0.50	≤0.010	≤0.010	≤1.30	4.00 ~ 8.00	Bal	12.00 ~ 17.00	10.00 ~ 15.00	—	200 ~ 4.00	〃	〃	〃
Submerged-arc welding	{ Wire A } x { Flux A }	≤0.10	≤0.50	1.00 ~ 3.50	≤0.020	≤0.020	≤1.30	≤5.00	≥68.0	—	16.00 ~ 20.00	—	150 ~ 350	〃	〃	〃
	{ Wire C } x { Flux B }	≤0.10	≤0.50	2.50 ~ 3.50	≤0.015	≤0.015	—	4.00 ~ 8.00	Bal	12.00 ~ 17.00	10.00 ~ 15.00	—	200 ~ 4.00	〃	〃	〃

5.1 9% Ni 鋼製地上タンク

5.1.1 9% Ni 鋼の溶接性

9%Ni 鋼の溶接性は良好であり、溶接熱影響部で割れが発生することはないので、一般に予熱は不要である。しかし、強度および低温における靱性確保のために溶接入熱は 45 000 J/cm 以下に、またパス間温度は 150°C 以下に抑えるのが望ましい。

また、9%Ni 鋼は強磁性体であるため残留磁気を帯びやすい。溶接中、溶接継手部に大きな磁気が存在すると、とくに直流溶接では磁気吹きの現象が起きる。これは、磁気により、アークが曲げられビードが片寄ったり、著しい場合には溶接ができなくなる現象である。また、開先部に残留磁気があると錆や鉄粉などが付着しやすく、溶接欠陥発生の原因となることがある。したがって、磁気を抑えて溶接する必要があるため、鋼板の製造段階では 50 ガウス以下に管理し、その後の運搬、加工の段階でも帯磁の機会を少なくするよう考慮しなければならない。また、交流溶接機を用いると、その影響を緩和することができる。

5.1.2 9% Ni 鋼の溶接材料

溶接材料が具備すべき条件としては、母材である 9% Ni 鋼と同様に十分な機械的性質を有し、さらに、つぎのような事項を満足する必要がある。①低温における靱性および延性が優れていること。②熱膨張係数やヤング率など物理的性質が母材に近いこと。③溶接性が優れ、溶接欠陥が発生しにくいこと。④耐食性を含め耐久性がよいこと。

このような観点から、母材と同一成分系の溶接材料が理想的であるが、溶接金属は母材と異なり、いわば鑄放しの状態で用いられることになり、母材と同様なフェライト系材料では極低温における靱性を確保することが難しい。そこで、現在までのところ、Table 8 に示すような 70Ni 系のオーステナイト系異種金属が実用化されている。被覆アーク溶接用としては主としてインコネル系 (Ni-Cr-Nb 系)、自動溶接用のワイヤには主としてハステロイ系 (Ni-Mo 系) の材料が使われている。

これらの高 Ni 基合金は、低温での切欠き靱性が良好で、9%Ni 鋼と比較的性質が似かよっているが、化学成分が全く異なるほか、高温割れ感受性が高いこと、強度

とくに耐力が母材のそれに比べて低いこと、母材よりも融点が 100~150°C 低いこと、高価であることなど留意すべき点もある。高温割れについては、溶接材料、施工法に関する研究、開発が重ねられた結果、最近では被覆アーク溶接、自動溶接ともに、クレータに発生する割れを除いて問題になるような割れは極端に減っている。また、溶接金属の耐力向上策や、母材とほぼ同一化学成分系のいわゆる共金系材料や、35%Ni あるいは 50%Ni 系の溶接材料の開発も進められており、近く実用に供される可能性もある。さらに、鋼材についても、9%Ni 鋼と同等の性能が期待でき、しかも経済的である材料として 5.5% Ni 鋼などの実用化の検討¹⁰⁾がなされている。

5.1.3 溶接方法

9%Ni 鋼の溶接材料として高 Ni 基合金を用いる場合には、先に述べたような制約があるため数年前までは主として被覆アーク溶接で施工されており、溶接の自動化は遅れていた。しかし、最近では新しい溶接材料や溶接装置の改良、開発が進み、主な継手はほとんど自動溶接で施工されている。その改良点の主なものを挙げると、溶接材料としてインコネル系の材料に比べ耐溶接割れ性 (高温割れ) が良好であり、また母材の稀釈量が溶接部の強度におよぼす影響度の少ないハステロイ系の材料が開発されたこと。溶接装置として、溶接入熱のコントロールが容易な、ウィービング機構を持つ自動溶接機器が開発されたことなどである。

円筒形タンクの継手について、溶接法の適用個所を見ると、側板、屋根板および底板の地上ブロック溶接には主として下向きサブマージアーク溶接¹¹⁾¹²⁾が用いられているが、一部では TIG 溶接¹³⁾が実用化されている例もある。

側板の現地水平溶接には横向きサブマージアーク溶接が用いられているが、一部で TIG 溶接の採用も検討されている。側板の現地縦継手に対しては、立向き自動 TIG、自動パルス TIG 溶接法が用いられている。

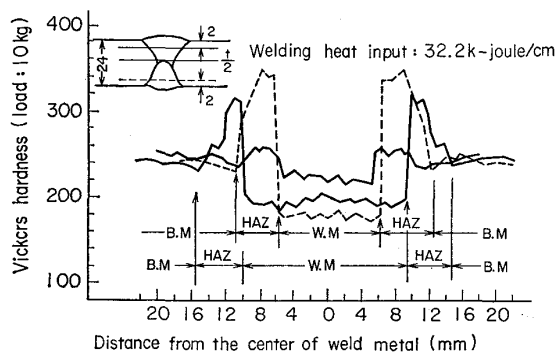
さらに、今後の問題として、溶接品質の均一性と能率向上のために自動溶接法の適用個所を拡大して行く必要がある。

5.1.4 溶接継手の性能

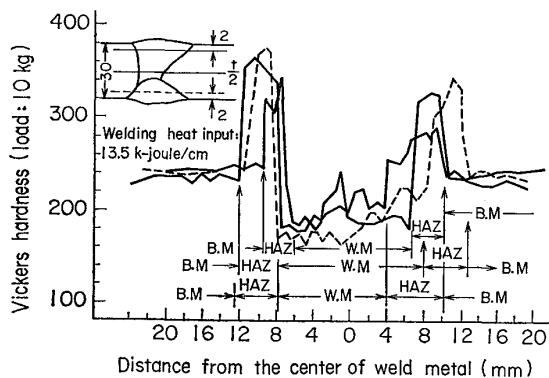
各溶接法で得られた溶接継手性能の一例を Table 9

Table 9. Examples of welded joints (9%nickel steel).

Welding process	Welding material	Welding position	Heat input (k-joule/cm)	All weld metal tension test			Welded joint tension test		Longitudinal bend test (R=3/31)		V-notch Charpy impact test (VE-196) (kg-m)		
				0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fracture stress (kg/mm ²)	Location of fracture	Face bend	Root bend	Weld metal	Bond	HAZ
Shielded metal-arc welding	Welding rod A	Vertical position	30.2	49.5	73.4	26.5	71.9	W.M	Good	—	6.9	8.4	10.7
				50.6	73.2	25.4	71.9	—	—	—	—	—	—
	Welding rod B	—	24.4	51.7	77.8	27.2	76.0	—	—	—	6.3	5.9	10.1
Automatic TIG welding	Wire A	—	34.9	38.8	71.5	42.0	76.0	W.M+ Bond	—	—	11.2	15.2	11.2
				38.4	70.6	42.2	75.8	W.M+ B.M	—	—	—	—	—
	Wire B	—	31.0	58.7	75.4	33.6	76.1	W.M	Good	Good	9.9	12.3	17.2
Automatic pulsed-MIG welding	Wire A	—	25.2	39.8	71.8	47.4	76.5	—	—	—	13.6	12.0	15.9
				39.3	71.1	50.2	75.5	Bond	—	—	—	—	—
	—	—	—	40.7	69.7	41.0	74.6	W.M	—	—	—	—	—
Submerged-arc welding	Wire A x Flux A	Horizontal position	11.9	41.6	70.1	48.0	74.7	—	—	—	11.4	9.8	11.6
				—	—	—	76.2	—	—	Good	10.8	11.0	16.4
	—	Flat position	23.5	—	—	—	76.5	—	—	—	—	—	—



(a) Wire-B (Automatic vertical TIG welding)



(b) [Wire-A] x [Flux-A] (Horizontal submerged-arc welding)

Fig. 13. Examples of hardness distribution at weld joint (9% nickel steel)

Note: B.M...Base metal
W.M...Weld metal

に示す。いずれの溶接法でも継手引張試験および衝撃試験の結果は良好である。全溶接金属の引張試験では、引張り強さは大きい、0.2% 耐力は 40 kg/mm² 程度のものが多く母材に較べて低い。

溶接部のかたさ分布の一例を Fig. 13 に示す。この図は立向き TIG 溶接法と横向きサブマージアーク溶接法の例であるが、溶接金属が一番軟らかく、熱影響部にかたさのピークがあることがわかる。

さて、これらの溶接法を採用し、LNGタンクを建設するに当たっては、とくに低温における靱性確保の見地か

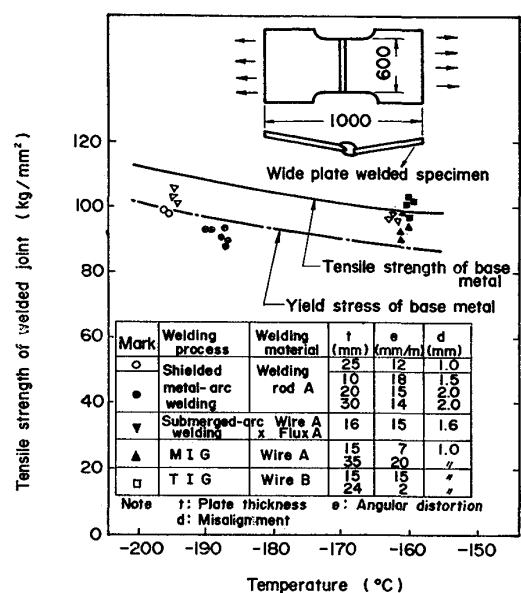


Fig. 14. Test results of wide plate welded test-plates with angular distortion and misalignment (9% nickel steel).

ら、前もって各種の小形、大形の確性試験を行ない、使用状態での安全性を確認している。その一例として、角変形、目違い付溶接継手の広幅引張試験結果を Fig. 14 に示す。

5.2 ステンレス鋼メンブレン構造タンク

地下タンクあるいは船用メンブレンタンクの内殻材として SUS 304 や SUS 304L の薄板 (1~3 mm) が用いられている。これらのオーステナイト系ステンレス鋼の溶接性は良好で、溶接材料としては同一成分系の SUS 308 や SUS 308L が用いられる。溶接法としては、ファイヤーワイヤ有り、またはなしの TIG 溶接法が基本になるが、一部ではパルス MIG 溶接法が実用化され効果を上げている。

継手の形式としては、重ねすみ肉溶接が多いが、永久裏当付あるいは裏当なしの片面突合せ溶接が実用化されている例もある。

このようなステンレス鋼メンブレン構造において、高品質の溶接部を安定して得るためには、高い技術の溶接士が適切な溶接条件によつて、入念な施工管理のもとに溶接する必要がある、また、薄板のすみ肉溶接あるいは突合せ溶接部を対象とした品質管理体制を整え、適正な非破壊検査により品質を確認する必要がある。

さらに、溶接による変形防止については、開先精度など工作精度の向上を計るほか、拘束法、接溶部冷却方法など対策が講じられている。

6. あとがき

LNG関係については、前述のもの以外に付属機器など多くあるが、今回は主としてLNG船、貯蔵タンクについてその構造、材料、溶接の面について説明した。

今後の需要にこたえ、材料屋と設計者の連携によつて安全性、経済性、生産性の改善への努力がまだまだ必要であろう。

文 献

- 1) 有本雄美: 超低温技術, No. 26 (1975) April, p. 26
- 2) 秋山哲郎: 日本機械学会誌, 80(1977) 703, p. 512
- 3) 伊藤誠一, 高橋厚生: 「靱性, 溶接性よりみた低温貯蔵タンク用鋼板」金属材料, 10 (1970) 11

p. 31-40

- 4) 「第8基準研究部会, LNG運搬船の安全基準に関する調査研究報告書(その1)」日本造船研究協会 (1976) 昭和 51 年 3 月
- 5) 雑賀喜規, 深川宗光, 伊藤誠一: 「9%Ni 鋼の低温じん性に関する研究」石川島播磨技報, 昭和48年 1 月, 13 (1973) 1, p. 17-27
- 6) 住金技術資料
- 7) 新日鉄技術資料
- 8) C. W. MARSCHALL, et al.: 「The Characteristics of 9%Ni Low Carbon Steel」Transactions of the ASM, 55 (1962) 1, p. 135-148
- 9) 「LNG基地建設総合資料集」経営開発センター出版部 (1976 年 8 月 25 日)
- 10) 栗山良員, 他: 「5.5%Ni 鋼の陸上LNG貯蔵タンクへの適用性」石川島播磨技報, 17 (1977) 2, p. 125
- 11) 片山典彦: 「9%Ni 鋼製LNG貯蔵タンクにおける溶接の自動化」石川島播磨技報, 16 (1976) 3, p. 253
- 12) Y. KURIYAMA, et al.: 「Automatic welding for an LNG storage tank of 9% nickel steel」IIW Committee X (1976), Document No. X 640-76 [IHI]
- 13) 荒川敏夫: 「貯槽類の自動溶接」溶接学会誌, 45 (1976) 10, p. 30