
LPG 貯蔵タンク用極低 C-Nb-2.5%Ni 鋼

Ultra Low C-Nb-2.5% Ni Steel for LPG Storage Tanks

古君 修(Osamu Furukimi) 中野 善文(Yoshifumi Nakano) 平井 征夫(Masao Hirai) 阿草 一男(Kazuo Agusa) 楠原 祐司(Yuji Kusuhara)

要旨：

2.5% Ni 鋼の母材特性および溶接部靱性に及ぼす、C 量(0.005~0.05%)と Nb 添加の影響を調べた。その結果、Nb 鋼の焼ならし材では、C 量を 0.05%から 0.01%まで低減しても強度は低下せず、また、0.01% C-Nb 鋼の焼ならし材は、母材および溶接部ともに極めてすぐれた靱性を有することがわかった。この知見に基づき、0.01% C-Nb-2.5% Ni 鋼を工場で作製し、各種試験を実施した。得られた主な結果を、以下に示す。(1)焼ならし材の脆性き裂伝ぱ停止靱性 Kca は、 -46°C で約 $1600\text{kgf}\cdot\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ であった。(2)MIG 溶接およびサブマージアーク溶接継手部のシャルピー吸収エネルギーは、 -60°C で $14\text{kgf}\cdot\text{m}$ 以上であった。

Synopsis：

The effects of C content of less than 0.05% and Nb addition on the mechanical properties of the 2.5% Ni steel plate and the toughness of its welded joints were studied. The laboratory test indicated that the reduction in C content from 0.05% to 0.01% did not lower the strength of the normalized Nb bearing steel, and improved the toughness of the welded joints as well as the base metal. On the basis of the laboratory test results, a 0.01% C-Nb-2.5% Ni steel was produced on the factory scale to be studied further. The ESSO test indicated that the crack arrest toughness Kca of the 25 mm thick normalized plate was as high $1600\text{kgf}\cdot\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ at -46°C . The heat affected zone of the MIG welding joint of this plate gave a Charpy impact energy and a COD value of more than $25\text{kgf}\cdot\text{m}$ and 1 mm, respectively, at temperatures above -60°C . The heat affected zone of the submerged arc welding joint gave a Charpy impact energy of more than $14\text{kgf}\cdot\text{m}$ at temperatures above -60°C .

(c)JFE Steel Corporation, 2003

古君 修^{*2} 中野 善文^{*3} 平井 征夫^{*4} 阿草 一男^{*4} 楠原 祐司^{*5}

Ultra Low C-Nb-2.5% Ni Steel for LPG Storage Tanks

Osamu Furukimi, Yoshifumi Nakano, Masao Hirai, Kazuo Agusa, Yuji Kusuvara

要旨

2.5% Ni 鋼の母材特性および溶接部靱性に及ぼす、C 量 (0.005~0.05%) と Nb 添加の影響を調べた。その結果、Nb 鋼の焼ならし材では、C 量を0.05%から0.01%まで低減しても強度は低下せず、また、0.01% C-Nb 鋼の焼ならし材は、母材および溶接部ともに極めてすぐれた靱性を有することがわかった。この知見に基づき、0.01% C-Nb-2.5% Ni 鋼を工場で作製し、各種試験を実施した。得られた主な結果を、以下に示す。

- (1) 焼ならし材の脆性き裂伝ば停止靱性 K_{ca} は、 -46°C で約 $1600 \text{ kgf}\cdot\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ であった。
- (2) MIG 溶接およびサブマージアーク溶接継手部のシャルピー吸収エネルギーは、 -60°C で $14 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上であった。

Synopsis:

The effects of C content of less than 0.05% and Nb addition on the mechanical properties of the 2.5% Ni steel plate and the toughness of its welded joints were studied. The laboratory test indicated that the reduction in C content from 0.05% to 0.01% did not lower the strength of the normalized Nb bearing steel, and improved the toughness of the welded joints as well as the base metal.

On the basis of the laboratory test results, a 0.01% C-Nb-2.5% Ni steel was produced on the factory scale to be studied further. The ESSO test indicated that the crack arrest toughness K_{ca} of the 25 mm thick normalized plate was as high $1600 \text{ kgf}\cdot\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ at -46°C . The heat affected zone of the MIG welding joint of this plate gave a Charpy impact energy and a COD value of more than $25 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ and 1 mm, respectively, at temperatures above -60°C . The heat affected zone of the submerged arc welding joint gave a Charpy impact energy of more than $14 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ at temperatures above -60°C .

1 緒 言

LPG 貯蔵タンク、脱メタン装置などの石油化学プラントあるいはエチレン貯蔵タンクは、 $-46\sim-104^{\circ}\text{C}$ の低温で使用される。これらの圧力容器の脆性破壊は甚大な災害をもたらすため、使用される鋼板には溶接部も含め低温で極めて高い靱性が要求される。

従来、LPG 貯蔵タンク用としては低温用アルミキルド鋼が用いられてきた。しかしながら、最近の安全性重視の観点から、低温用アルミキルド鋼より脆性き裂伝ば停止靱性がすぐれた鋼材の要求が強くなっている。この鋼材としては9% Ni 鋼があるが、高 Ni 鋼は経済的に不利なため、低 Ni で母材の脆性き裂伝ば停止靱性および溶接部靱性のすぐれた鋼材の開発が望まれている。

以上の観点から、LPG 貯蔵タンク用鋼材として極低 C (0.01%) -Nb-2.5% Ni 鋼の開発を行った。極低 C 化および Nb 添加は低温用アルミキルド鋼の靱性改善に有効であることが知られており¹⁾、2.5% Ni 鋼の開発にあたってはこの方針を適用した。

2 基礎実験

2.1 実験方法

2.5% Ni 鋼の母材特性および溶接部靱性に及ぼす、C 量と Nb 添加の影響を調べた。供試材の化学組成を、Table 1 に示す。供試材は100 kg 真空溶解炉で溶製し、 1200°C で60分加熱後、厚さ20 mm の鋼板に熱間圧延し、焼ならしあるいは焼入れ焼もどし処理を施した。焼ならしおよび焼入れ処理の加熱条件は 930°C で60分、焼もどしのそれは 640°C で80分とした。

機械的性質は、JIS 4 号2 mmV ノッチ試験片を用いたシャルピー衝撃試験による50%延性破面遷移温度 (FATT)、および平行部長さ40 mm、直径5 mm の小型丸棒試験片を用いた室温での引張試験による引張強さ (TS) と下降伏点 (LYP) で評価した。各試験とも、き裂の進展方向が主圧延方向に直角となるように試験片を採取した。また、ナイタル溶液で腐食した試料から作成した二段レプリカを用い、透過電子顕微鏡観察を100 kV で行い、C 量低減による組織変化を調べた。Nb 鋼では、焼入れ処理後の析出 Nb の定量分析を行った。その方法は、試料をアセチルアセトン系溶液で電解した後、 $0.2 \mu\text{m}$ のゲルマンフィルターでろ過し、残渣を定量分析するものである。

溶接部靱性は、焼ならし材に入熱量 $30 \text{ kJ}/\text{cm}$ に相当する再現溶接熱サイクルを与え、そのときの FATT で評価した。試験方

*1 昭和58年9月12日原稿受付

*2 技術研究所第2研究部厚板研究室主任研究員 (部長)

*3 技術研究所第2研究部厚板研究室主任研究員 (部長) Ph.D.

*4 技術研究所第2研究部溶接研究室主任研究員 (課長)

*5 水島製鉄所管理部厚板管理室主査 (課長)

Table 1 Chemical compositions of 100 kg ingot steels

(wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo	Ni	Al	N
1	0.050	0.25	0.69	0.008	0.002	0.032	0.15	2.50	0.032	0.0042
2	0.029	0.25	0.68	0.008	0.002	0.032	0.15	2.48	0.031	0.0032
3	0.014	0.25	0.65	0.007	0.002	0.031	0.15	2.47	0.037	0.0033
4	0.007	0.27	0.69	0.003	0.001	0.032	0.15	2.50	0.027	0.0048
5	0.004	0.27	0.68	0.009	0.004	0.011	0.15	2.49	0.033	0.0040
6	0.054	0.27	0.69	0.004	0.001	—	0.16	2.50	0.028	0.0050
7	0.032	0.25	0.68	0.008	0.002	—	0.15	2.49	0.040	0.0051
8	0.009	0.27	0.70	0.009	0.004	---	0.15	2.48	0.033	0.0036

法は、母材と同様である。

2.2 実験結果と考察

焼ならし処理あるいは焼入れ焼もどし処理をしたときの、母材強度に及ぼすC量とNb添加の影響をFig. 1²⁾に示す。焼ならし処理の場合、C量の低減に従い、Nb非添加鋼ではTSおよびLYPは低下するが、0.03% Nb鋼ではTSはあまり変化せず、LYPはむしろ上昇した。また、C量が0.01%の場合には、Nb量の増加による強度上昇はTSよりLYPのほうが大きかった。

Nbを添加した0.01% C鋼と0.03% C鋼焼ならし材の電子顕微鏡組織を、Photo 1に示す。0.03% C鋼ではフェライト・パーライト組織であるが、0.01% C鋼ではパーライト組織に代わり低温変態組織が生じていた。930°Cで再加熱後、焼入れ処理して析出Nb量を測定した結果を、Fig. 2に示す。C量を0.01%まで低減すると、再加熱時に添加したNbの約50%は固溶状態にあることがわかる。これらのことより、Nb鋼でC量の低減による強度低下が生じなかった現象は、C量が0.01%の極低C域では焼ならし処理の再加熱時にNbが固溶し、この固溶Nbが焼入性を増加させC量の低減による強度低下を補ったためと考えられる。

焼入れ焼もどし処理を施したNb非添加鋼およびNb鋼は、焼ならし材と異なりともにC量の低下に従い強度も低下した。これは、Photo 2に示す0.01% CのNb非添加鋼およびNb鋼焼入れ焼もどし材の電子顕微鏡写真より明らかのように、両鋼材とも同じ低温変態組織を有していることに対応している。

焼ならし処理あるいは焼入れ焼もどし処理を施したNb鋼の、FATTとC量の関係をFig. 3に示す。焼ならし材の靱性は極低C化により顕著に改善されたが、焼入れ焼もどし材ではあま

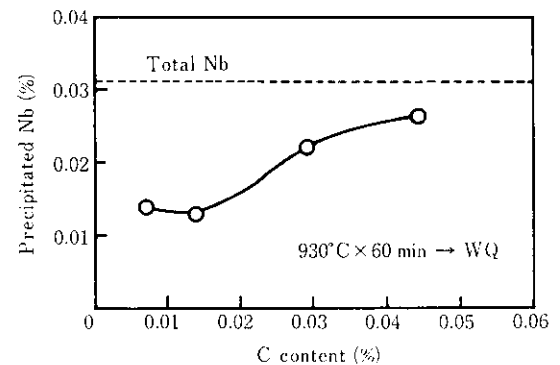


Fig. 2 Relation between C content and precipitated Nb content for 2.5% Ni steels at 930°C

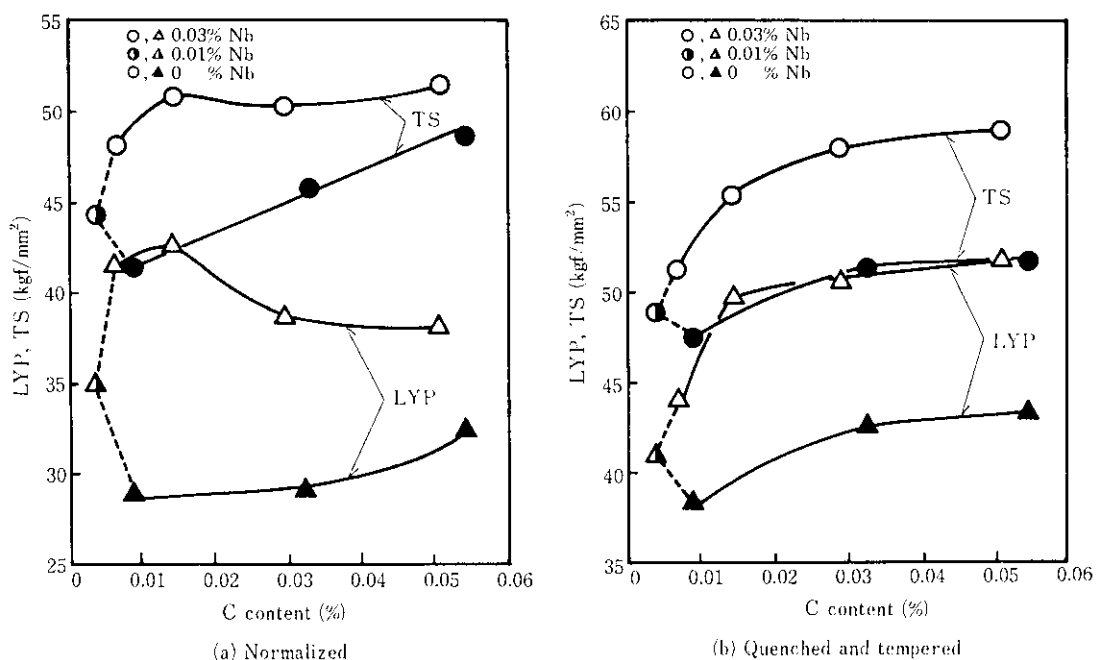


Fig. 1 Effects of C content and Nb addition on lower yield point and tensile strength of (a) normalized and (b) quenched and tempered 2.5% Ni steels

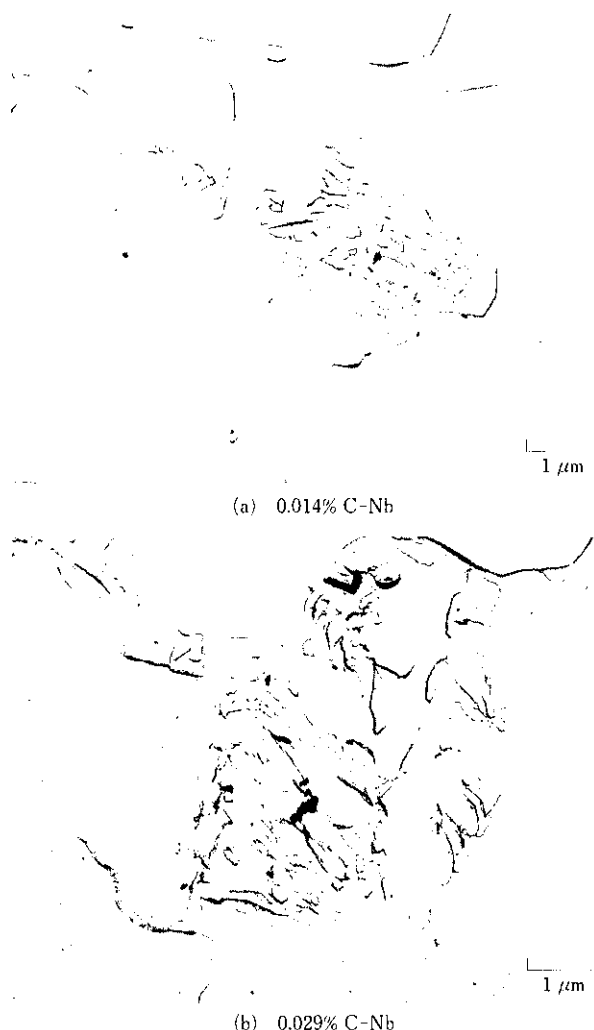


Photo 1 Electron microstructures of normalized, Nb bearing 2.5% Ni steels with the C content of (a) 0.014% and (b) 0.029%

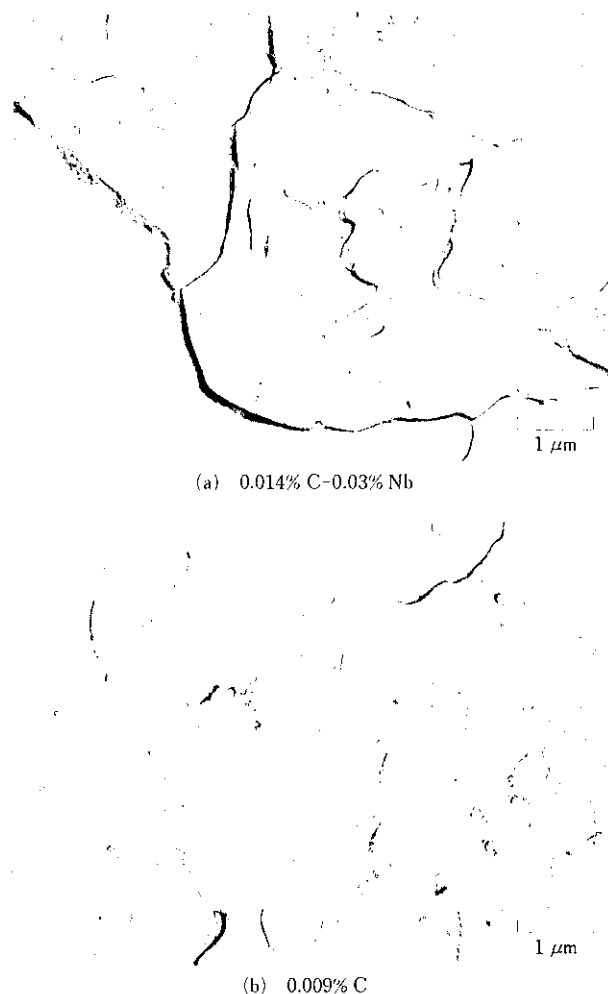


Photo 2 Electron microstructures of quenched and tempered, 0.01%C-(a) Nb bearing and (b) Nb free 2.5% Ni steel

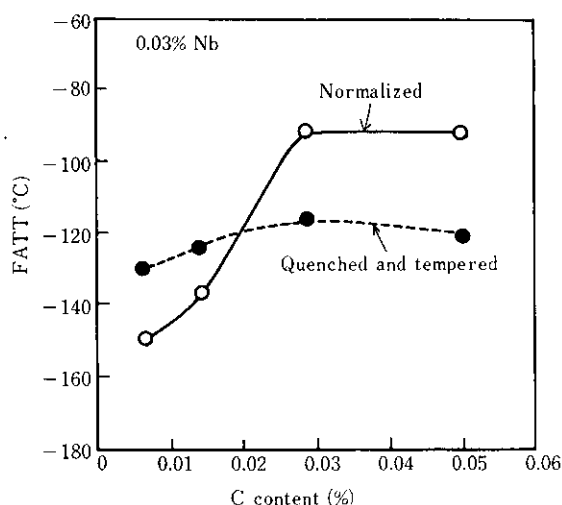


Fig. 3 Effect of C content on FATT for normalized and quenched-tempered Nb bearing 2.5% Ni steels

り改善効果は認められなかった。その結果、極低C域では焼ならし材のほうが焼入れ焼もどし材よりすぐれた靱性を与えた。これは、極低C-Nb鋼を焼入れ焼もどし処理すると、焼入れ加熱時に固溶したNbが焼もどし時に微細析出し、脆化の要因と

なるためと推定される。

再現溶接熱サイクル付与材のFATTに及ぼすC量の影響を、Fig. 4²⁾に示す。極低C化により、溶接部靱性は著しく改善された。

2.3 基礎実験のまとめ

100 kg鋼塊を用い、2.5% Ni鋼の母材特性および溶接部靱性に及ぼすC量とNb添加の影響を調べた。その結果、Nb鋼の焼ならし材では、C量を0.05%から0.01%まで低減しても強度は低下せず、また、0.01% C-Nb鋼の焼ならし材は、母材および溶接部ともに極めてすぐれた靱性を有することがわかった。この知見に基づき、0.01% C-Nb-2.5% Ni鋼を工場で試作し、大型試験を含む確性試験を実施した。

3 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼の工場試作結果

3.1 実験方法

供試鋼の化学組成を、Table 2に示す。A鋼は、100 kg鋼塊を用いた実験結果からすぐれた母材および溶接部靱性を有することがわかった0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼で、B鋼は比較

Table 2 Chemical compositions of 5 t ingot steels

(wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo	Ni	Al	N
A	0.014	0.25	0.68	0.010	0.004	0.030	0.16	2.51	0.029	0.0034
B	0.043	0.27	0.67	0.009	0.004	—	—	2.57	0.036	0.0037

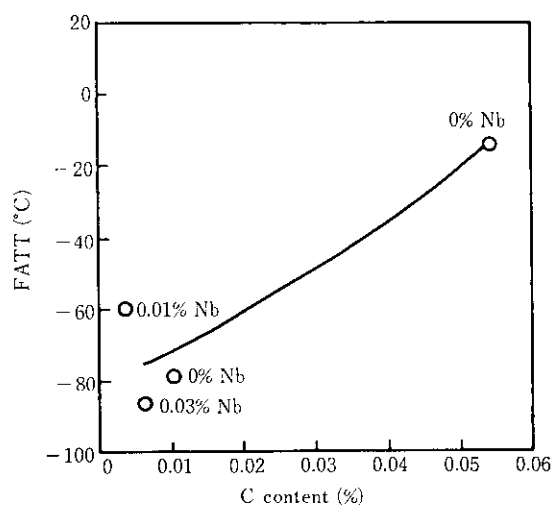


Fig. 4 Relation between C content and FATT for the synthetic HAZ (30 kJ/cm)

鋼である。製造工程は、5 t 鋼塊→分塊圧延→厚板制御圧延→熱処理（焼ならし処理あるいは焼入れ焼もどし処理）であり、板厚25 mmの鋼板を製造した。圧延、熱処理条件を Table 3 に示す。

母材について、引張試験、シャルピー衝撃試験、COD 試験および ESSO 試験を行った。同時に、溶接後熱処理 (PWHT) に相当する熱履歴を与えた試料について、引張試験とシャルピー衝撃試験を行った。溶接後熱処理の温度は590°Cと630°C、加熱時間は3時間とした。引張試験は JIS 5 号試験片、シャルピー衝撃試験は JIS 4 号2 mmV ノッチ試験片を用いた。COD 試験は、英国規格協会 BS 5762 に従った。試験片厚さは25 mmの原厚とし、切欠は板厚貫通とした。限界 COD 値 (δ_c) は、(1)式で評価した。

Table 3 Conditions for plate production from 5 t ingots

(t = 25 mm)

Steel	Slab reheating temperature	Finishing rolling temperature	Heat treatment condition
A	1 150°C	720°C	N : 930°C × 37 min AC Q : 930°C × 37 min WQ T : 640°C × 95 min AC
B	1 150°C	757°C	N : 930°C × 95 min AC Q : 930°C × 37 min WQ T : 605°C × 95 min AC

N : Normalizing

Q : Quenching

T : Tempering

$$\delta_c = \frac{K_{IC}^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2\sigma_y \cdot E} + \frac{0.4(W - a) \cdot V_p}{0.4W + 0.6a} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに K_{IC} : 限界クリップゲージ開口変位 (V_c) に対応する荷重から求めた応力拡大係数 ($\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$)

 V_p : V_c の塑性成分 (mm) ν : ポアソン比 σ_y : 降伏応力 (kgf/mm^2) E : 縦弾性係数 (kgf/mm^2) W : 試験片幅 (mm) a : 切欠長さ (mm)

ESSO 試験は温度勾配型とし、 K_{IC} 値は(2)式により求めた。

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi c} \sqrt{\frac{2B}{\pi c} \cdot \tan \frac{\pi c}{2B}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに c : 伝播したき裂の長さ (mm)

 B : 試験片幅 (mm) σ : 負荷応力 (kgf/mm^2)

Table 4 Welding conditions

Welding process	Diameter of wire	Welding position	Shielding gas	Flux	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Weld build up
MIG	1.2 mm ϕ	Flat	100%Ar	—	300	24	35	12.3	
SAW	4.0 mm ϕ	Flat	—	High basicity agglomerated flux	550	32	30	35.2	

なお、各試験ともき裂の進展方向が主圧延方向に直角となるように試験片を採取した。

A 鋼の焼ならし材を用いて、Table 4 に示す溶接条件で MIG 溶接継手を製作し、シャルピー衝撃試験および COD 試験で溶接部靱性を評価した。シャルピー衝撃試験片は最終溶接側表面より1mmのところから採取し、COD 試験片は原厚試験片とした。また、Table 4 に示す溶接条件でサブマージアーク溶接継手を製作し、シャルピー衝撃試験で溶接部靱性を評価した。シャルピー衝撃試験片は、板厚中央部から採取した。両溶接の溶接棒の成分を、Table 5 に示す。さらに、MIG 溶接継手に関して

は590℃で180分、サブマージアーク溶接継手に関しては625℃で180分の溶接後熱処理を施し、シャルピー衝撃試験により靱性に及ぼす溶接後熱処理の影響を調べた。なお、両溶接継手とも溶接線は主圧延方向と直角とし、各試験片は、き裂進展方向が主圧延方向と直角になるように採取した。試験方法は母材と同様である。

3.2 実験結果

母材の引張試験およびシャルピー衝撃試験結果を、Table 6 および Fig. 5 に示す。A 鋼のほうが比較鋼にくらべ、強度が高

Table 5 Chemical composition of wire

(wt.%)

Welding process	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	REM	N
MIG	0.029	0.034	0.50	0.001	0.0011	12.26	—	0.046	0.0032
SAW	0.05	0.20	1.00	0.012	0.005	2.75	0.20	—	0.0040

Table 6 Mechanical properties of the plates produced from 5 t ingots

Steel	Heat treatment	Tensile test			Charpy test
		Y _P (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	FATT (°C)
A	Quenched and tempered	53.7	55.1	28	-125
	Normalized	42.9	50.9	31	-136
	Normalized + PWHT(630°C×3h)	43.1	49.9	30	-138
	Normalized + PWHT(590°C×3h)	48.6	54.5	26	-133
B	Quenched and tempered	44.6	49.0	27	-108
	Normalized	33.7	46.6	35	-113

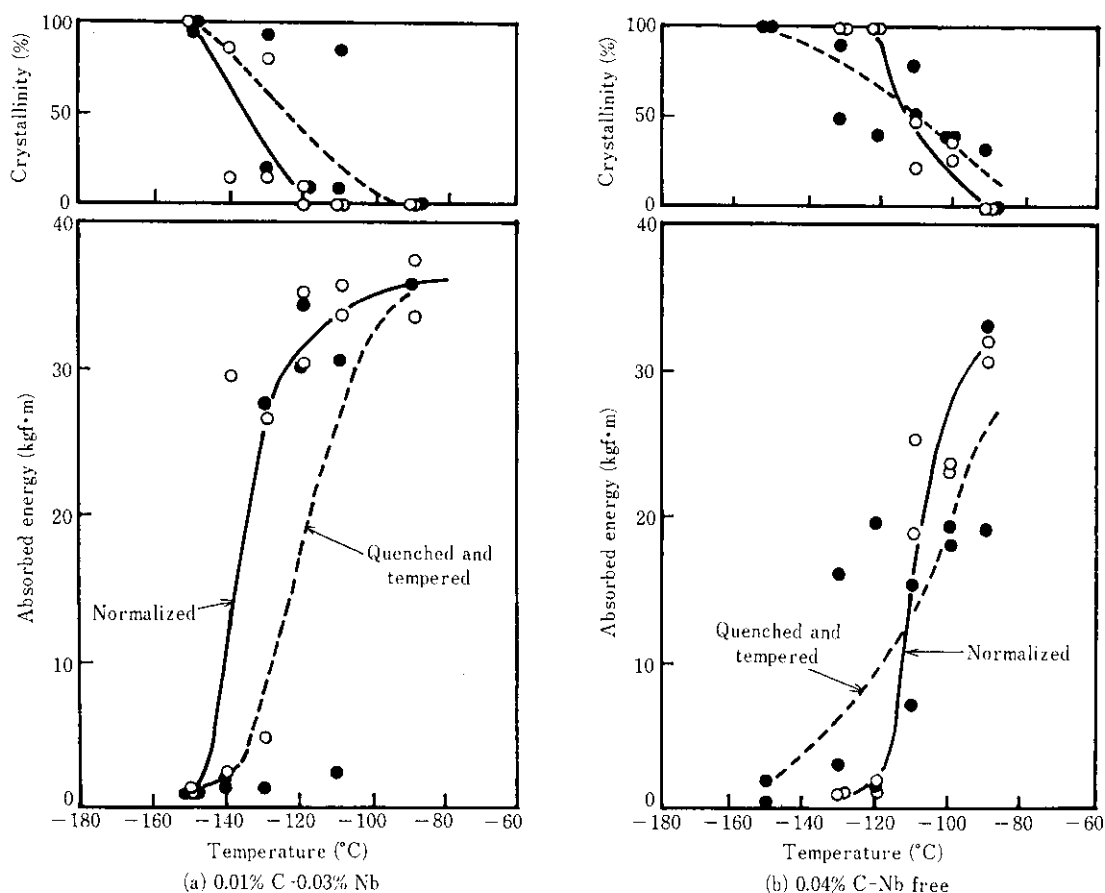


Fig.5 Charpy test results for (a) 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni and (b) conventional 0.04% C-Nb free-2.5% Ni steels

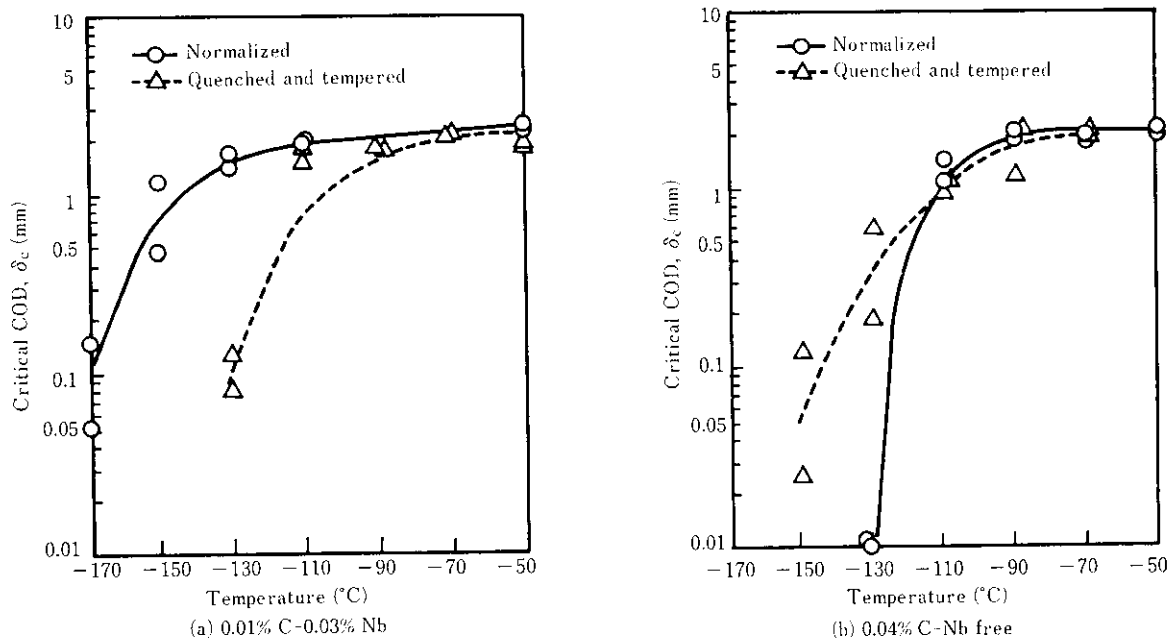


Fig. 6 COD test results for (a) 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni and (b) conventional 0.04% C-Nb free-2.5% Ni steels

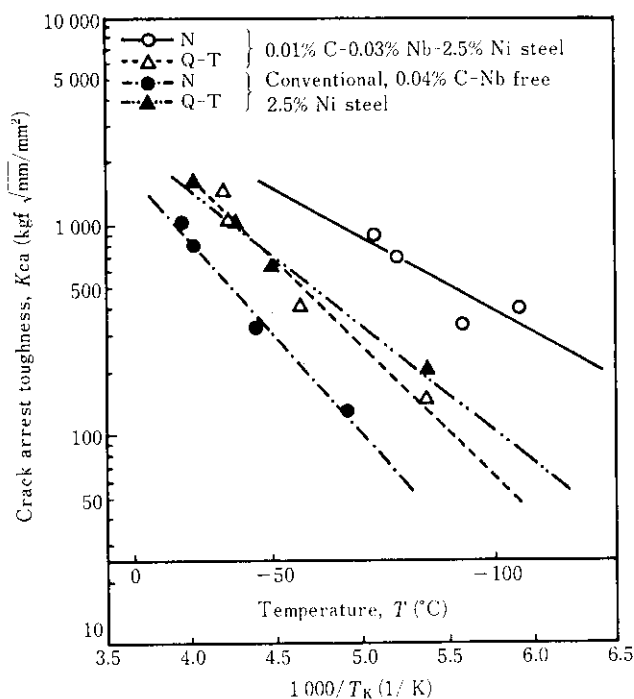


Fig. 7 Relation between crack arrest temperature and K_{ca} for various 2.5% Ni steels

く靱性もすぐれていることがわかる。

COD 試験で求めた δ_c と温度の関係を Fig. 6 に、また、ESSO 試験で求めた K_{ca} と温度の関係を Fig. 7²⁾ に示す。

日本溶接協会「低温構造用鋼板判定基準」WES 3003 G 種改訂案³⁾に与えられている(3)式により、2.5% Ni 鋼に要求される COD 値を計算すると 0.29 mm になる。

$$\delta = \frac{3.5(\sigma + \sigma_{ys})}{E} \times \begin{cases} \frac{1100}{\sigma_{ys}} & : \sigma_{ys} \leq 40 \text{ kgf/mm}^2 \\ 106 \exp\left(-\frac{\sigma_{ys}}{30}\right) & : \sigma_{ys} > 40 \text{ kgf/mm}^2 \end{cases} \quad (3)$$

ここに δ : 要求 COD (mm)

σ : 使用応力 (kgf/mm²) (G 種に対しては $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{ys}$)

σ_{ys} : 鋼板の保証降伏点 (kgf/mm²)

E : 縦弾性係数 (kgf/mm²)

COD 試験結果にこの要求 COD 値をあてはめると、A 鋼の焼ならし材の G 種温度は -160°C、焼入れ焼もどし材のそれは -120°C となった。一方、ESSO 試験の結果から、A 鋼の焼ならし材および焼入れ焼もどし材の WES3003 G 種温度 (保証降伏点の $\frac{1}{2}$ の応力下で、 $C=10$ mm のき裂を停止できる温度、つまり $K_{ca}=146 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を得る温度) は、それぞれ -125°C と -105°C で、A 種温度 (保証降伏点の $\frac{1}{2}$ の応力下で、 $C=100$ mm のき裂を停止できる温度、つまり $K_{ca}=461 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を得る温度) は、それぞれ -100°C と -65°C であった。また、LPG 貯蔵タンクの使用温度である -46°C では、A 鋼の焼ならし材の K_{ca} は $1600 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ 程度と推定され、長大き裂を考慮しても十分な脆性き裂伝ば停止靱性であると考えられる⁵⁾。

以上の結果から、A 鋼の焼ならし材は LPG 貯蔵タンク用として、極めてすぐれた脆性き裂発生および伝ば停止靱性を有することがわかった。

A 鋼焼ならし材の MIG 溶接継手ボンド部のシャルピー衝撃試験結果を、Fig. 8 に示す。溶接ままおよび溶接後熱処理を施した溶接継手ボンド部は、ともに -60°C では上部棚エネルギーに相当する $25 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ の値を示した。MIG 溶接継手部の COD 試験結果を、Fig. 9 に示す。-60°C では、ボンド部、HAZ 1 mm 部ともに δ_c は 1 mm 以上で、日本溶接協会の低温構造用鋼板判定基準³⁾として与えられている要求 COD 値よりはるかに高い値であった。サブマージアーク溶接継手ボンド部のシャルピー衝撃試験結果を、Fig. 10 に示す。溶接ままおよび溶接後熱処理を施した溶接ボンド部は、ともに -60°C で $14 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上の吸収エネルギーであった。

以上の結果から、A 鋼焼ならし材はきわめてすぐれた溶接部靱性を有することがわかった。

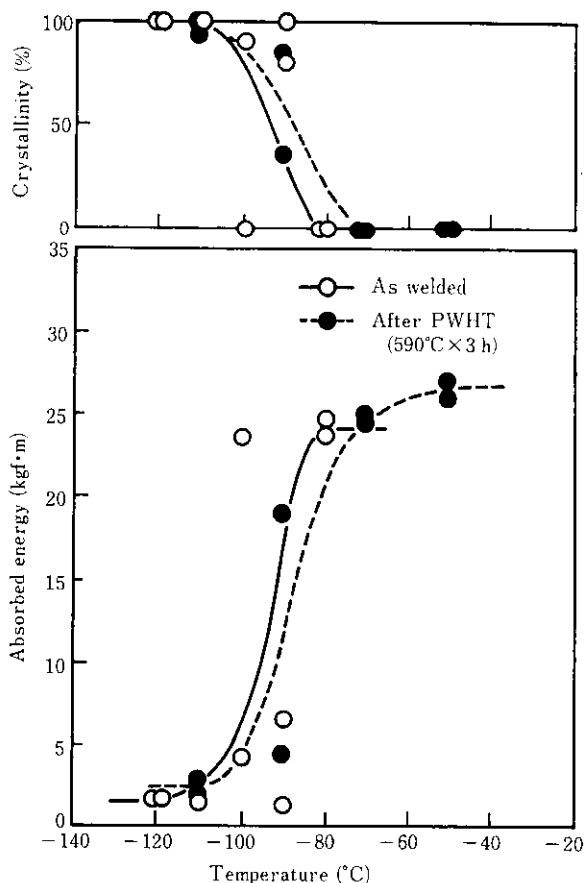


Fig. 8 Charpy test results of the fusion line of MIG welding joint of normalized 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni steel

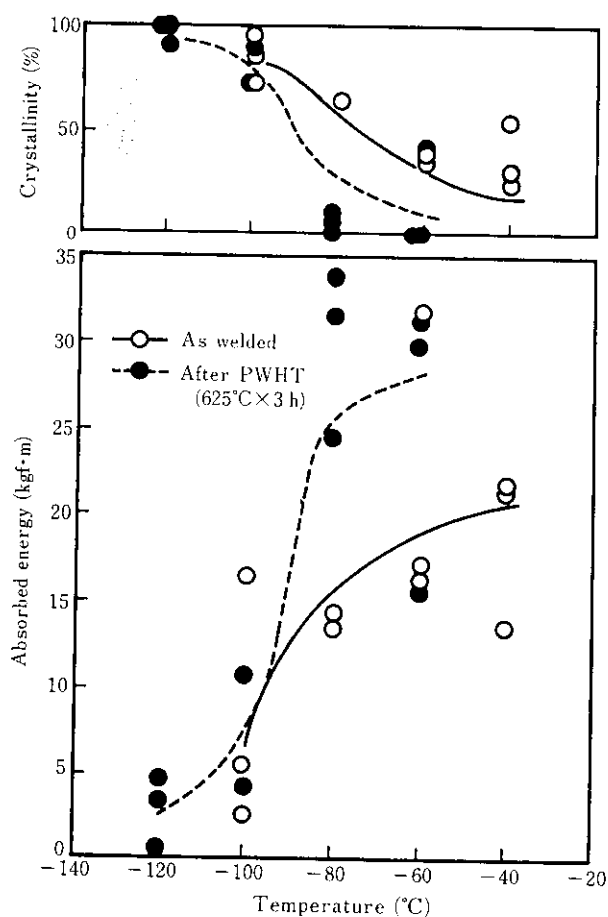


Fig. 10 Charpy test results of the fusion line of SAW joint of normalized 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni steel

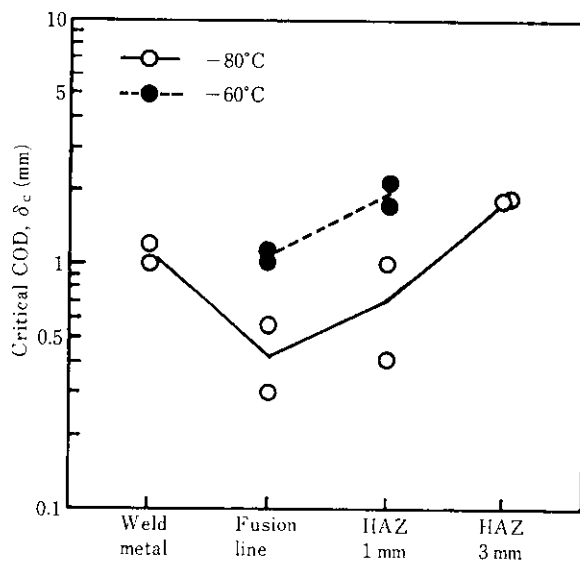


Fig. 9 Critical COD at various positions of MIG welding joint of normalized 0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni steel

3.3 工場試作材結果のまとめ

0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼を工場で試作した結果、すぐれた母材および溶接部靱性を有することが明らかになった。とくに、焼ならし材の脆性き裂伝ば停止靱性は従来型の2.5% Ni鋼よりすぐれ、長大さ裂を考慮しても LPG 貯蔵タンク用として安全なものであると考えられる。

4 結 言

2.5% Ni鋼の母材および溶接部の靱性を改善することを目的として、C量の低減(0.01%)とNb添加について基礎実験を行った。その結果をもとに0.01% C-0.03% Nb-2.5% Ni鋼を工場で試作し、種々の実験を実施した結果、LPG 貯蔵タンク用としてきわめてすぐれた諸特性を有していることが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 古君, 鈴木, 鎌田: 「アルミキルド低温用鋼の母材特性, 溶接部靱性におよぼすCおよびNbの影響」, 鉄と鋼, 68 (1982) 16, 2561-2568
- 2) 古君, 中野, 榎並: 「2.5% Ni鋼の母材特性, 溶接部靱性に及ぼすCおよびNb量の影響」, 鉄と鋼, 69 (1983) 5, S523
- 3) 楠原, 郡山, 井門, 古君, 中野, 阿草: 「極低C-Nb-2.5% Ni鋼の工場試作」, 鉄と鋼, 69 (1983) 5, S524
- 4) 日本溶接協会規格: 「低温構造用鋼板判定基準」(案)WES 3003 (1983)
- 5) 中野, 片岡: 「動的破壊じん性とぜい性き裂伝ば停止」: 日本材料学会第2回破壊力学シンポジウム講演論文集(1983), 239-243