
氷海域海洋構造物向大入熱溶接用厚肉鋼板の製造

Production of Heavy Thickness Steel Plates for Arctic Use Suitable for High-Heat Input Welding

弟子丸 慎一(Shin-ichi Deshimaru) 平井 征夫(Ikuo Hirai) 天野 虔一(Kenichi Amano) 上田 修三(Syuzo Ueda) 上村 尚志(Takashi Uemura) 坪田 一哉(Kazuya Tsubota)

要旨：

氷海域のエネルギー資源開発のための苛酷な環境に耐える高性能の大入熱溶接用 YP 36 kgf/mm² 級海洋構造物用鋼板(最大板厚 70 mm)を MACS(多目的制御冷却設備)プロセスにより安定大量に製造供給している。板厚 70 mm までの強度確保を考慮し、さらに入熱量 130 kJ/cm における溶接継手部じん性保証の点から、従来の Si-Mn 系に代り微量 Nb 添加による低 C_{eq} 成分系を採用した。母材強度は、低 C_{eq} にもかかわらず MACS プロセスにより YP 36kgf/mm² を十分に満足し、じん性も板厚中心部 C 方向で -80°C 以下の 50% FATT を示す。溶接部じん性は 130 kJ/cm の大入熱両側一層溶接において熱影響部のいずれの位置についても vE-60 で 10 kgf-m 以上の良好な成績を示す。

Synopsis：

For application to the energy resources development in the Arctic region, the YP 36 kgf/mm² class structural steel plates (maximum 70 mm in thickness), which have high toughness for high heat input welding, have been developed and manufactured using the multipurpose accelerated cooling system (MACS). This steel contains a small amount of Nb for the purpose of reducing C and Mn contents. Its carbon equivalent is reduced by utilizing MACS and its mechanical properties have satisfied the EH36 steel grade. For the each-side one-pass welding joint with a heat input of 130 kJ/cm, vE-60 is more than 10 kgf-m at any notch position. The preheating temperature for crack prevention has been confirmed to be below 0°C by the Y-groove resistant test.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Production of Heavy Thickness Steel Plates
for Arctic Use Suitable for High-Heat Input Welding弟子丸 慎
Shin-ichi Deshimaru
水島製鉄所 管理部厚
板管理室平井 征夫
Ikuo Hirai
鉄鋼研究所 厚板研究
部溶接研究室 主任研
究員・工博天野 慶一
Kenichi Amano
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室 主任研
究員・工博上田 修三
Syuzo Ueda
鉄鋼研究所 水島研究
部第2研究室 室長・工
博上村 尚志
Takashi Uemura
水島製鉄所 厚板鑄鍛
部厚板鑄鍛技術室 課
長坪田 一哉
Kazuya Tsubota
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 課長

要旨

氷海域のエネルギー資源開発のための苛酷な環境に耐える高性能の大入熱溶接用 YP 36 kgf/mm² 級海洋構造物用鋼板 (最大板厚 70 mm) を MACS (多目的制御冷却設備) プロセスにより安定大量に製造供給している。板厚 70 mm までの強度確保を考慮し、さらに入熱量 130 kJ/cm における溶接継手部じん性保証の点から、従来の Si-Mn 系に代り微量 Nb 添加による低 C_{eq} 成分系を採用した。母材強度は、低 C_{eq} にもかかわらず MACS プロセスにより YP 36 kgf/mm² を十分に満足し、じん性も板厚中心部 C 方向で -80°C 以下の 50% FATT を示す。溶接部じん性は 130 kJ/cm の大入熱両側一層溶接において熱影響部のいずれの位置についても vE_{-60} で 10 kgf・m 以上の良好な成績を示す。

Synopsis:

For application to the energy resources development in the Arctic region, the YP 36 kgf/mm² class structural steel plates (maximum 70 mm in thickness), which have high toughness for high heat input welding, have been developed and manufactured using the multi-purpose accelerated cooling system (MACS). This steel contains a small amount of Nb for the purpose of reducing C and Mn contents. Its carbon equivalent is reduced by utilizing MACS and its mechanical properties have satisfied the EH36 steel grade. For the each-side one-pass welding joint with a heat input of 130 kJ/cm, vE_{-60} is more than 10 kgf・m at any notch position. The preheating temperature for crack prevention has been confirmed to be below 0°C by the Y-groove restraint test.

1 緒 言

氷海域における石油資源開発にともない、この地域で用いられる海洋構造物には、高張力化とともに溶接効率の向上を考慮した溶接割れ感受性が低く大入熱溶接部じん性に優れた鋼材が要求される¹⁾。

最大板厚 70 mm の氷海域 YP 36 kgf/mm² 保証鋼の要求性能は次のとおりである。

- (1) YP ≥ 36 kgf/mm², TS ≥ 50 kgf/mm² の強度と $vE_{-60^\circ\text{C}} \geq 3.5$ kgf・m のじん性を満足し、溶接割れ感受性が低いこと。
- (2) 入熱 130 kJ/cm の大入熱溶接継手部において、 $vE_{-60^\circ\text{C}} \geq 3.5$ kgf・m のじん性を満足すること。例えば次の溶接施工で優れていること。

板厚 43 mm 以上のものの両側多層溶接

板厚 30 mm から 43 mm までのものの両側一層溶接

板厚 30 mm 以下のものの片側一層溶接

このような性能を達成するために、前報²⁾ で述べた Si-Mn 系極地向大入熱溶接用鋼板の最大板厚を従来の 32 mm から 70 mm へ拡大するために、微量 Nb を添加した低炭素当量 ($C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$) の鋼板について母材の基本特性と大入熱継手特性を調べた。実生産では当社の多目的制御冷却設備 MACS を用いて鋼材を製造し、鋼板の母材および溶接継手特性を評価した。

2 基本成分系の検討

板厚 70 mm までの厚肉 YP 36 kgf/mm² 鋼を大量に安定して製造するに当たって溶接割れ感受性を損なわずに母材強度および入熱量 130 kJ/cm 大入熱溶接継手部の強度と低温じん性を保証するためには、Nb 添加と MACS プロセスの採用が有効であり、とくに継手じん性の確保には低 C_{eq} 化、低炭素化、希土類元素 (REM)-Ti 処理が必要条件となる。

* 昭和61年7月18日原稿受付

2.1 大入熱溶接継手じん性改善について

大入熱継手部の脆化因子としては、オーステナイト (γ) 粒の異常成長と、上部ベイナイト中の島状マルテンサイトの生成があげられる。これらに対してじん性改善方法としては以下の方策が考えられる。

(1) 結晶粒の異常成長の防止

溶接熱サイクルにおいて難溶性である微細析出物による結晶粒界に対するピンネング効果の利用。

(2) 上部ベイナイト中の島状マルテンサイトの生成の抑制

Nb 添加による低 C_{eq} 化および低 N 化による組織の微細フェライト-パーライト化。

2.1.1 結晶粒の微細化

再現熱サイクルと両側一層溶接による試験材を用いて各種入熱条件でのじん性を比較し、さらに溶接継手における溶融線 (FL) および熱影響部 (HAZ) について微細析出物の効果とそれらの制御方法に関して検討を行った。

Fig. 1 に Ti および N 含有量の異なる試験材の Ti/N 比と種々

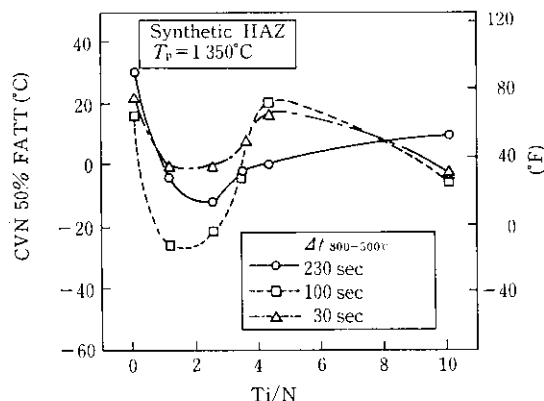


Fig. 1 Effect of Ti/N ratio on CVN 50% FATT in synthetic heat affected zone

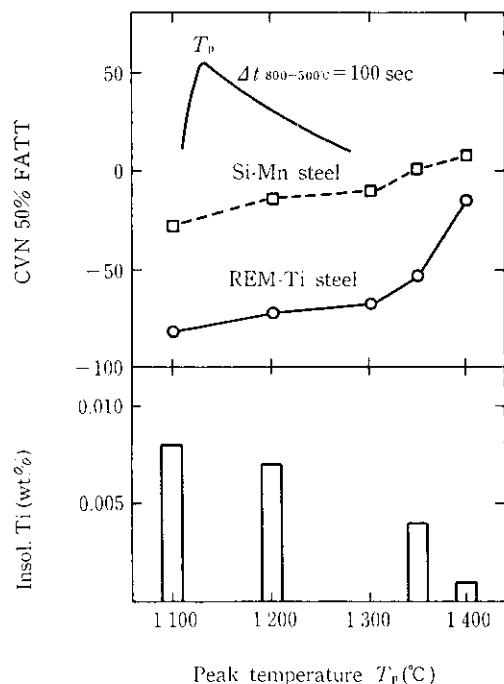


Fig. 2 Relation of peak temperature in synthetic HAZ with toughness and insol. Ti content

の入熱量に相当する熱サイクルを受けた場合のじん性の関係を示す。Ti/N 比には、2.5 近傍に最適値が存在する。Fig. 2 に熱サイクルの最高加熱温度とじん性および不溶性 Ti (Insol. Ti) 量の関係を示す。1350°C 以下においては、未溶解 TiN がかなり残存し γ 粒成長抑制効果を示すことがわかる。また、REM 添加による FL 部のじん性改善効果を Fig. 3 に示す。1350°C 以下に加熱される HAZ 領域においては、TiN の微細分散析出により γ 粒の成長が抑制され、1350°C 以上に加熱される FL 部においては、TiN は溶解するため、難溶性の微細 REM (O, S) 粒子が γ 粒の成長を抑制する。REM-Ti 添加効果の概念図を Fig. 4 に示す。

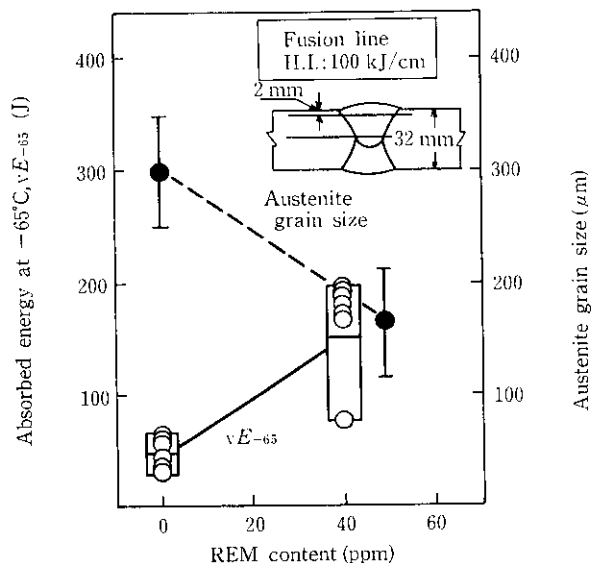


Fig. 3 Effect of REM addition on HAZ toughness

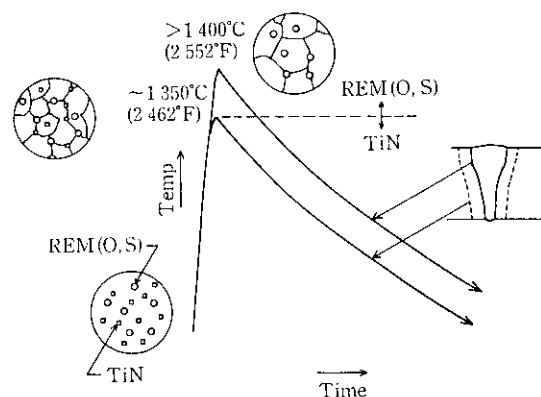


Fig. 4 Schematic model of effect of TiN and REM on austenite grain size at HAZ

2.1.2 組織のフェライト-パーライト化

低 C_{eq} 化による FL 部のじん性改善効果を Fig. 5 に示す。低 C_{eq} 化とくに低 C 化および低 Mn 化の効果とともに、低 N 化による効果も Fig. 6 に示すように明らかである。

以上をまとめ大入熱溶接継手部のじん性改善の冶金的考え方を Table 1 に示す。

2.2 Nb 添加に対する検討

板厚 70 mm までの厚肉 YP 36 kgf/mm² 鋼について大量安定生産を考慮した場合、溶接割れ感受性を損なわずに母材強度を確保す

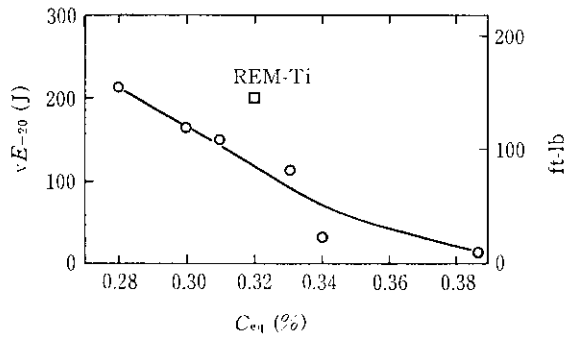


Fig. 5 Relation between carbon equivalent and charpy impact energy of synthetic HAZ at -20°C (Synthetic HAZ: peak temp. $=1350^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{800-500^{\circ}\text{C}}=230$ S-corresponding to 200 kJ/cm for 25 mm thick plate)

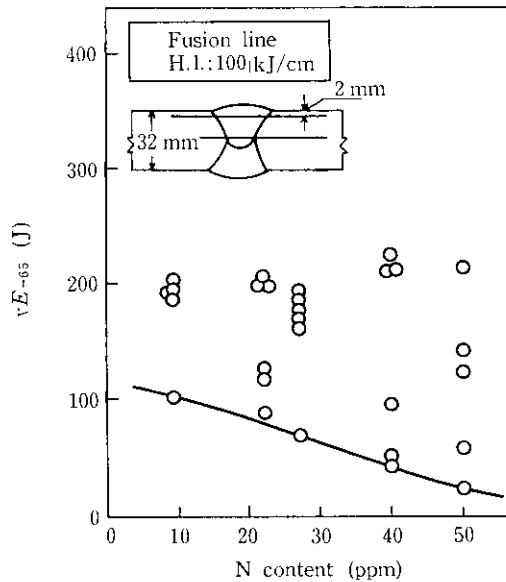
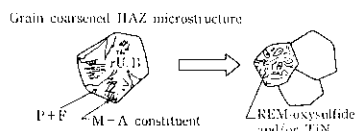


Fig. 6 Effect of N content in steel plate on HAZ toughness

Table 1 Metallurgical action for improving HAZ toughness of high heat input welding

Item	Improvement of HAZ toughness Metallurgy	Action
Grain Size	Utilizing pinning effect by insoluble fine precipitate (TiN)	REM-Ti treatment
Microstructure	Decreasing M-A constituent in upper bainitic structure	Lowering C_{eq} (MACS process)
	Fine ferrite-pearlite structure	
Matrix	Decreasing free N and sol. Ti	Lowering C and N and controlling of Ti/N ratio



るためには、微量 Nb の添加と MACS プロセスの採用が有効手段となる³⁾。大入熱溶接継手じん性と Nb 量との関係を Fig. 7 に示す。適正 Nb 量は 0.02% 以下である。また母材強度に対する Nb 添加の効果を Fig. 8 に示す。Fig. 7 および 8 より強度および継手部じん性の両面から最大 0.02% が Nb 添加条件となる。板厚 70 mm の制御冷却鋼における微量 Nb の強度上昇効果を調べた結果を Fig. 9 に示す。Nb 無添加の場合、 C_{eq} が 0.34% と最も高いものでも TS は規格値を下まわる。板厚 70 mm までの製造を考慮した場合、Nb を 0.015% 添加し、 C_{eq} 0.31% 以上を確保する必要がある。Fig. 10 に MACS 適用の効果を示す。Fig. 9 および 10 から低 C_{eq} -Nb 鋼の製造には MACS プロセスが有効な手段であるといえる⁴⁾。

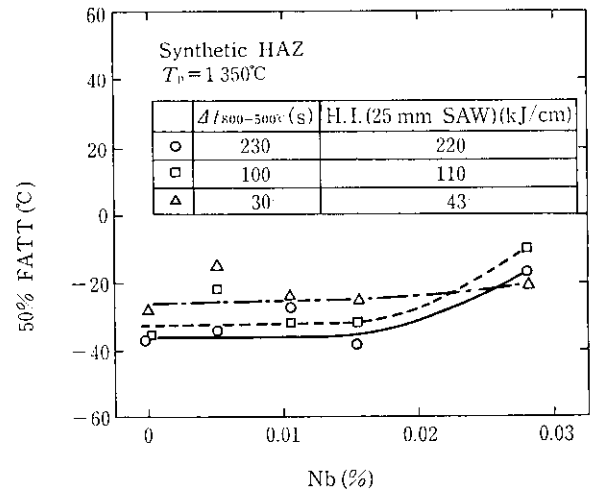


Fig. 7 Relation between Nb content and charpy absorbed energy of synthetic HAZ

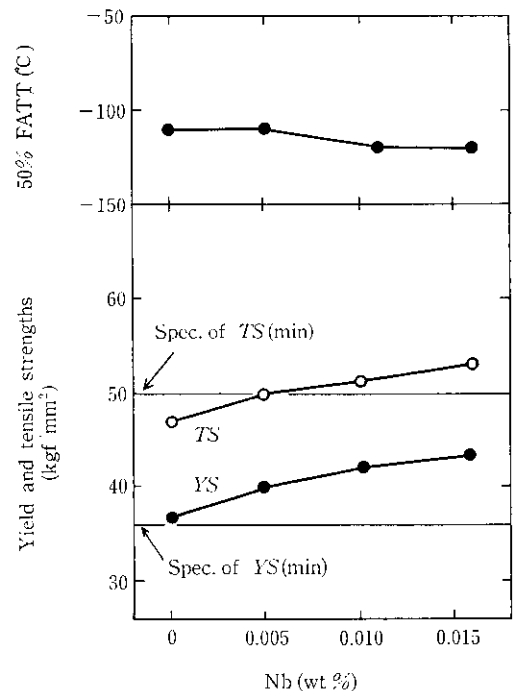


Fig. 8 Effect of Nb addition on yield and tensile strengths of base metal

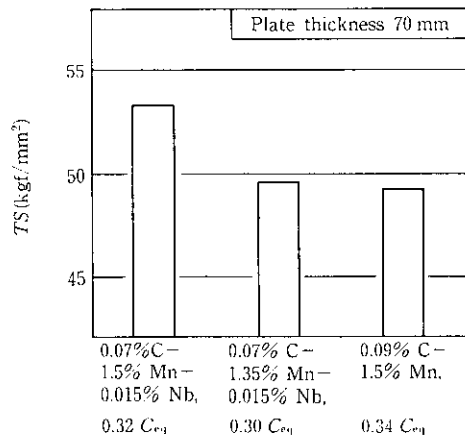


Fig. 9 Effect of Nb addition on tensile strength of accelerated-cooled steel

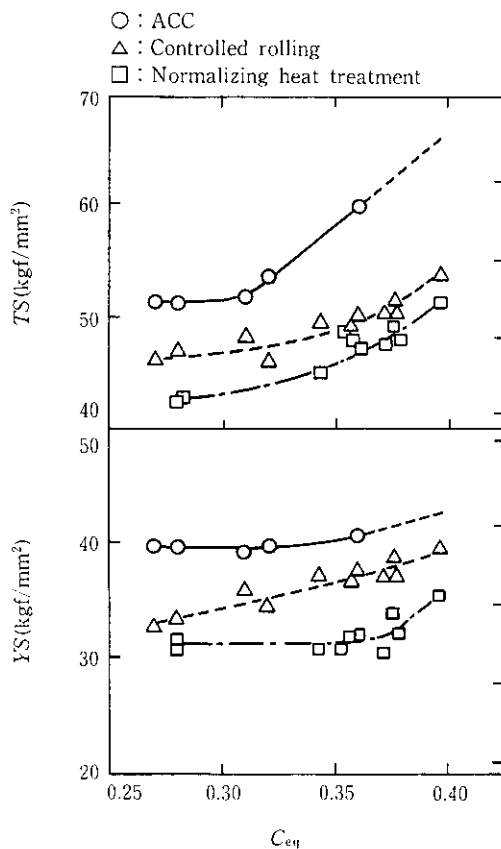


Fig. 10 Relation between carbon equivalent and tensile properties for Si-Mn steel plates

3 MACS 製低 C_{eq} -Nb 鋼の特性

前章における検討から厚肉 YP 36 kgf/mm² 鋼の基本組成を Table 2 に示す。 C_{eq} (IIW) は前報²⁾の Si-Mn 系鋼と同等の 0.36% 以下とし、厚肉化、大入熱仕様を考慮して微量 Nb 添加、REM-Ti 処理を施した低 C_{eq} -Nb 系の組成である。この成分系の ACC (Accelerated Control Cooling) 製 YP 36 kgf/mm² 鋼を製造し母材特性および溶接部特性を評価した。

3.1 供試材

今回製造した MACS 製 YP 36 kgf/mm² 級鋼の供試材組成を

Table 2 Aimed composition of steel for YP 36 kgf/mm² produced by MACS

										(wt %)	
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N	Others*	REM-Ti treatment	C_{eq} **	P_{cm} ***
0.08	0.30	1.40	≤ 0.018	≤ 0.003	0.025	0.015	≤ 35 ppm			≤ 0.36	0.16

* For plate thickness over 40 mm, Cu and/or Ni should be added.

** $C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu+Ni}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5}$

*** $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

Table 3 Chemical composition of steel for YP 36 kgf/mm² of 40 mm thick plate

										(wt %)	
Grade	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N	Others	C_{eq}	P_{cm}
EH 36	0.08	0.26	1.34	0.009	0.002	0.024	0.017	23 ppm	REM-Ti treatment	0.30	0.156

Table 3 に示す。板厚は、大入熱溶接において熱影響部じん性に対して厳しい条件の両側一層溶接施工が可能な 40 mm である。

3.2 母材特性

3.2.1 基本特性

Table 4 に母材の引張試験および 2 mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。母材強度は YP 36 kgf/mm² 以上、TS 50 kgf/mm² 以上を十分に満足している。また母材じん性も -60°C において 3.5 kgf・m を十分に満足している。板厚中心部でわずかにじん性低下が認められるが、50% FATT では -75°C 以下の良好な特性を示す。Photo 1 に供試鋼の光学顕微鏡写真を示す。微細なポリゴナルフェライト、パーライトおよびベイナイトの混合組織を示している。

Table 4 Results of tensile test and Charpy impact test

Steel	Location	Direction	Tensile properties			Absorbed energy $\sqrt{E_{50}}$ (kgf・m)	CVN 50% FATT ($^{\circ}\text{C}$)
			YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EL (%)		
EH 36 $t=40$ mm	1/4 t	L	44.2	55.5	23	28.0	-85
			45.0	56.9	23	31.7 32.0 (30.6)	
		C	44.9	55.4	24	20.8	-80
			44.4	55.6	23	29.8 25.6 (25.4)	
	1/2 t	L	44.5	55.9	24	28.0	-83
			43.9	55.7	25	32.5 29.2 (29.9)	
		C	45.1	56.1	23	16.3	-75
			45.0	56.3	23	18.1 18.6 (17.7)	
Aimed	1/4 t	C	≥ 36	≥ 50	≥ 20	≥ 3.5	—

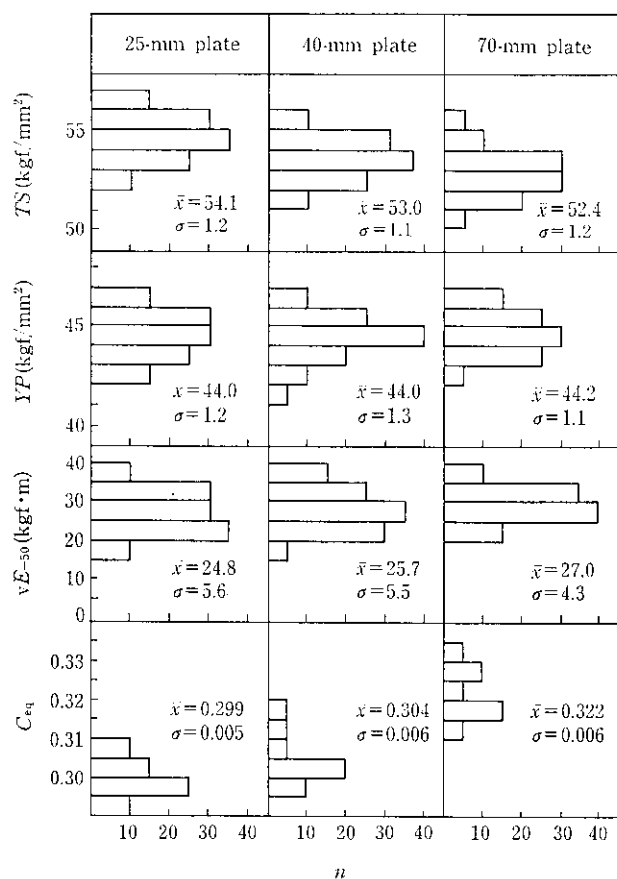


Fig. 12 Results of tensile properties and impact properties of steel plates at commercial production level

(2) 母材特性

Fig. 12 に工程材の強度、じん性を示す。母材強度、じん性とも規格値を十分に満足している。

(3) 溶接部特性

両側一層溶接を行った板厚 40 mm および両側多層溶接を行った板厚 70 mm の溶接部じん性について、Table 10 に示す。工程材についても -60°C において継手じん性を十分に保証できることが確認された。

(4) 製造実績

Table 11 に寒冷地向 YP 36 kgf/mm² 鋼の製造実績を示す。低 C_{eq}-Nb 添加成分系により、実生産における氷海域向大入熱鋼の安定大量生産が確立されている。

この結果、MACS プロセスを用いた本鋼板は、母材および溶接

Table 10 Results of Charpy impact test at high heat input welding joint of steel plates at commercial production level

Plate thickness (mm)	Heat input (kJ/cm)	Notch location	Absorbed energy (kgf·m) vE_{-50}
40	127.5 (Each side one pass welding)	WM	17.7
		Bond	15.3
		HAZ 1 mm	17.1
		HAZ 3 mm	13.7
		HAZ 5 mm	27.2
70	104 (Each side multi pass welding)	WM	15.9
		Bond	14.3
		HAZ 1 mm	17.8
		HAZ 3 mm	14.0
		HAZ 5 mm	28.2

Table 11 Production records of steel plates for offshore structure

	Case 1	Case 2
Type of structure	Caisson	Semi-submersible rig
Operation field	North sea	North sea
Maximum thickness	70 mm	50 mm
Production period	Sep. 1986-Dec. 1985	Aug.-Nov. 1985
Quantity of plates		
MACS plates	25 000 t	12 000 t
Others (as-rolled)		1 000 t

部ともに材料特性のばらつきが少なく、大量安定生産に十分対応しうることが確認された。

5 結 言

氷海域向 YP 36 kgf/mm² 鋼として MACS プロセスにより製造した低 C_{eq}-Nb 系鋼について母材および大入熱溶接継手特性を調べた。本鋼材は入熱 130 kJ/cm の大入熱溶接継手において安定した強度およびじん性を具備し、そのうえ板厚 70 mm までの母材強度とじん性の保証ができる。

これらはすでに大量安定生産レベルにあり、 -80°C 仕様にも対応しうるもので、今後 MACS による氷海域向海洋構造物用鋼板の適用範囲拡大が期待される。

参 考 文 献

- 1) 村田征一郎, 豊原雅宏, 宮崎建雄, 鴨井紀之, 松村裕之, 村松修一, 岡村義弘, 堀井行彦, 萩原行人: 「氷海船用船殻材料の開発と溶接工作法について」, 日本造船学会論文集, (1984) 156, 436
- 2) 楠原祐司, 小林英司, 大西史博, 平井征夫, 天野虔一, 垂井 稔: 「厚板制御冷却設備による極地向低温用鋼板の開発」, 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, 68-72
- 3) 小林英司, 三宮好史, 上村尚志, 平井征夫, 天野虔一: 鉄と鋼, 71

(1985) 13, S 1384

- 4) 志賀千晃, 波戸村太根生, 天野虔一, 榎並慎一: 「制御圧延後の冷却速度および冷却停止温度が材質特性におよぼす影響」, 鉄と鋼, 68 (1982) 10, A 227
- 5) 赤秀公造, 浮辺輝男, 阿草一男, 坪井潤一郎: 「低温用アルミキルド鋼の高能率溶接法」, 川崎製鉄技報, 10 (1978) 1, 34-47