

溶接熱影響部じん性に優れた TMCP 製ジャケット用 降伏強さ 355 MPa 級極厚鋼板*

川崎製鉄技報
19 (1987) 2, 105-110

The 355 MPa Yield Strength Grade Heavy Section Plate for Jacket Structure with Good Welding Heat Affected Zone Toughness Produced by TMCP



小林 英司
Eiji Kobayashi
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 主査(課長)



弟子丸 慎一
Shin-ichi Deshimaru
水島製鉄所 管理部厚
板管理室



平井 征夫
Yukio Hirai
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 主査(部長
補)・工博



小川 隆生
Takao Ogawa
水島製鉄所 厚板鍛
部厚板鍛技術室



天野 虔一
Keniti Amano
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室 主任研
究員(課長)・工博



中野 善文
Yoshifumi Nakano
鉄鋼研究所 水島研究
部第2研究室 主任研
究員(課長)・Ph. D

1 緒 言

石油採掘用プラットフォームやリグ等の構造物の大型化にともない、それらに使用される厚鋼板には、最近たとえば板厚 150 mm の極厚材で降伏強さ (YS) 355 MPa 以上、引張強さ (TS) 490 MPa 以上の高強度を要求されることが多くなってきた。この鋼板は、溶接時の予熱が不要である優れた耐溶接割れ感受性と母材ならびに溶接部で良好な破壊じん性を具備する必要があるため、鋼板の炭素当量を従来の焼ならし鋼より大幅に低くすることが必要である。このような極厚鋼板を低い炭素当量の化学組成で製造する場合、従来の焼ならし処理では所定の強度や板厚方向に均一な材質を得ることが困難である。そこで、TMCP (制御圧延および制御冷却) 法である当社開発の MACS (Multipurpose accelerated cooling system) 法^{1,2)} の適

要旨

エネルギー資源開発に必要な巨大構造物に使用される YS355 MPa 級板厚 75~150 mm 厚鋼板の製造にあたり当社開発の TMCP 法である MACS (Multipurpose accelerated cooling system) を適用した。従来の焼ならし工程では達成が困難であった極厚材の合金量の低減が実現でき、耐溶接割れ性の向上と溶接継手部 CTOD 値の高位安定化が図れた。さらに圧延仕上り温度と冷却の制御により板厚方向の強度とじん性が均一な板厚 150 mm までの製造方法を確立した。-10°C での溶接継手部の要求 CTOD 値を溶接のままで満足する TMCP 製海洋構造物用厚鋼板は、高さ 484 m の世界最大ジャケット (1986 年) に使用された最大板厚 100 mm を含め、現在までに 6 万 t の実績を得ている。

Synopsis:

MACS (Multipurpose accelerated cooling system) process, controlled rolling and accelerated controlled cooling, were applied to the production of the 355 MPa yield strength grade heavy section steel plates for the huge offshore jacket structure, which has been required for the development of energy resources.

By using the MACS process, the decrease in the micro-alloy amount of heavy section steel plates was achieved resulting in good welding crack characteristic and good CTOD values at the welding heat affected zone. The heavy section steel plates of up to 150 mm in thickness were thus developed which have homogeneous strength and toughness along the through-thickness direction by controlling the finish rolling temperature and accelerated cooling.

Steel plates totalling 60 000 t which were produced by MACS for offshore structures including 100-mm-thick plate and used for huge jackets of 484 m in structural height, have been supplied by Kawasaki steel with satisfying required HAZ CTOD values at minus 10°C in as-welded condition.

用について検討した。溶接継手部じん性を阻害しない微量の添加、加速冷却による第 2 相ベイナイト組織分率制御、圧延・冷却におけるフェライトの微細化などによる極厚鋼板の各板厚位置における所定の強度と同時に良好なじん性と均一性の付与について調べた。

さらに本報告では、これらの結果に基づき、予熱なしの溶接施工が可能でかつ溶接継手部のじん性が優れた MACS 製巨大ジャケット用降伏強さ 355 MPa 級極厚鋼板を製造した結果について報告する。

* 昭和62年2月14日原稿受付

2 MACS 法によるジャケット用極厚鋼板の製造技術

代表的な石油掘削装置としての海洋構造物の種類を Table 1 に、またその中でジャケット式プラットフォームの規模の変遷を Fig. 1 に示す³⁾。油田開発の深海化にともない構造物の大型化が進められ、最近の世界最大のジャケットはその高さが海底から 484 m、総重量が 45 000 t に達し、これに MACS 製 YS 355 MPa 級の板厚 100 mm の極厚鋼板が適用されたことは注目される。構造物の大型化は使用鋼板の極厚化をまねき 75 mm 以上の極厚材の要求が大きくなり、米国の一部で板厚 150 mm までの海洋構造物用 TMCP 鋼が検討されている。このような極厚鋼板についても海洋構造物の安全性確保のため優れた溶接性、加工性に加えて母材と溶接継手部の良好な強度とじん性が要求される。

Table 1 Type of offshore structures for oil drilling

Type	Sea depth for operation
Mobil type	
Submersible	< 24 m
Jack up	< 60 m
Ship	< 450 m
Semisubmersible	< 500 m
Fixed type	
Jacket	< 500 m
Tension leg	450 ~ 1 200 m
Guide tower	240 ~ 370 m
Artificial island and others	—

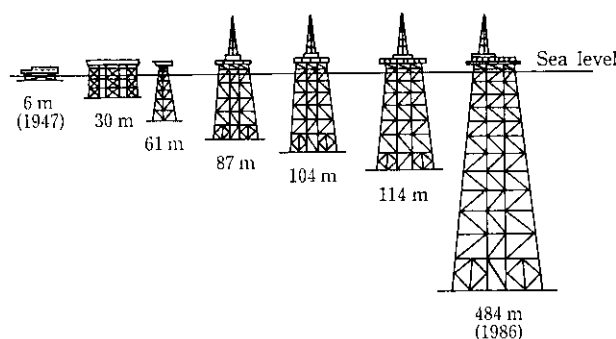


Fig. 1 History of structures' scale³⁾

2.1 要求性能

極厚鋼板の要求性能の中で最も注目されるのは、まず、材質面では破壊力学による安全性評価としての溶接継手部の CTOD 特性である。Table 2 に 0 ~ -10°C の使用温度での溶接部における CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 値の商業使用に用いられている要求値を示す。また、Table 3 に溶接継手部の光学顕微鏡組織の異なる種々の位置における要求 CTOD 値の例を示すが、板厚 75 mm を超える材料の溶接までの要求 CTOD 値が従来より高く、そのうえ多くの試験体が要求値を満足するような安定化を求められている。一方、施工面からの極厚 TMCP 鋼への期待は、ジャケット部に対する圧縮および圧縮曲げ荷重や水圧による座屈などが十分考慮されているうえ、溶接施工や冷間・温間加工の管理が従来の焼ならし鋼の場合に比べてより簡素に行えることである。それらは、たと

Table 2 Minimum CTOD values required at welded joints for commercial use (Testing temperature: design temperature)

Jacket components	Minimum required CTOD, δ_c (mm)	
	As welded	PWHT
Special/Critical joints	0.20 ~ 0.35	0.15 ~ 0.25
Primary joints	0.10 ~ 0.20	0.10 ~ 0.15

Table 3 Special required CTOD values at welded joints

Thickness t , (mm)	Minimum CTOD at -10°C	Welding conditions	Number of test*
$t \leq 75$	0.25 mm	• Groove: K-groove • Welding: SAW • Heat input: 1.5 ~ 5 kJ/mm • Preheat: 3 levels	• CGHAZ: 3 tests • SCHAZ: 2 tests
$t > 75$	0.38 mm		

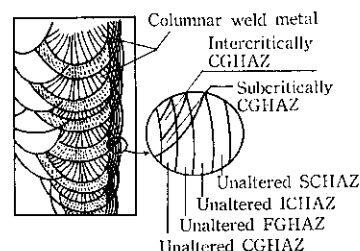
Note * (1) 5 additional tests shall be conducted if 1 test is failed.

(2) Microstructures at welded joints and validity of the CTOD notch location:

$$\text{HAZ area} \geq 75\% T$$

$$\text{CGHAZ} \geq 15\% T$$

where T is thickness of the tested plate.



えば、溶接時の予熱の省略、溶接後熱処理 (PWHT) の省略、10% を超える冷間加工の適用などが可能であることといえる。

2.2 製造技術

材質面および施工面からの要求特性を満足する MACS 製極厚鋼板製造の基本的な考え方を Fig. 2 に示す。まず、溶接部の諸性能および冷間加工部や PWHT 部の諸特性を満足する化学組成を設計し、つぎに母材の強度とじん性を保証する MACS の条件を選定する³⁾ ことにある。

2.2.1 溶接部の CTOD 値の安定化

溶接部の粗粒 HAZ (Heat affected zone) の CTOD 値の向上には鋼板の C 当量 (C_{eq}) を低下させることが有効であることは多くの研究結果⁴⁾ から明らかであり、それは脆化の原因となる島状マルテンサイトの発生が抑制されるからである。この島状マルテンサイトの抑制には鋼中 N 量を低減することも有効であり^{5,6)}、当社では適中精度の高い取鋼精錬技術⁷⁾ により Fig. 3 に示すように低 N 量の鋼板の製造が可能となっている。さらに低 P 化によるじん性向上も有効な手段となっている。また、極厚鋼板製造には結晶粒微細化および析出硬化を制御するための Nb の利用が有効であるが、Nb の過剰な添加は溶接部じん性を阻害することが知られているので注意が必要である。約 5 kJ/mm の溶接入熱の場合、0.03% までの Nb の添加は HAZ じん性を阻害しないという結果が得られている⁸⁾。

2.2.2 溶接時の予熱の省略

溶接時の予熱温度について室温以下を目標とした場合の C_{eq} を設

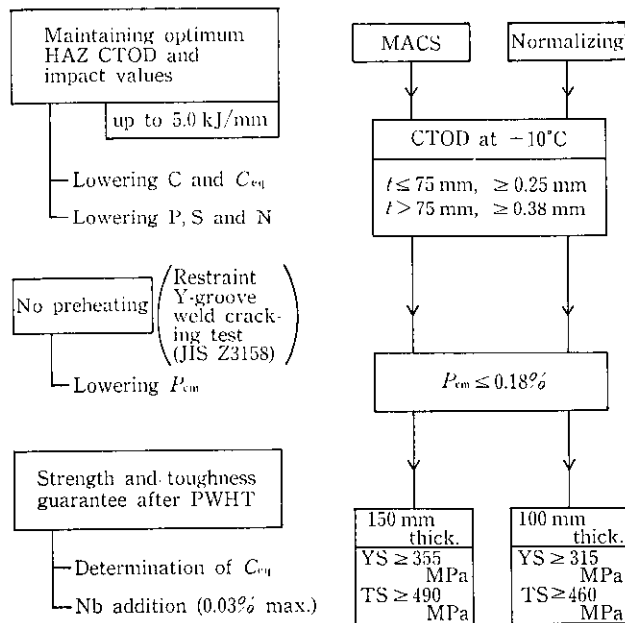


Fig. 2 Design basics of 75~150 mm heavy section offshore structural steel

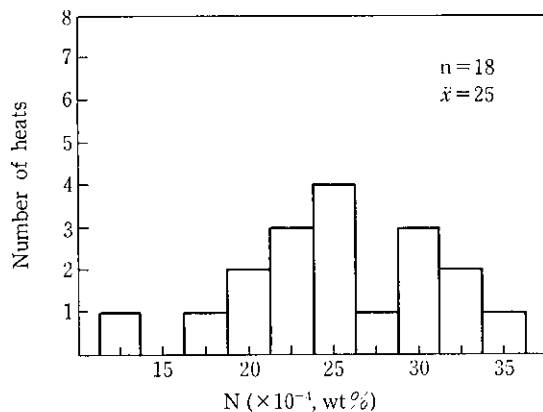


Fig. 3 A histogram of nitrogen content for steel plates refined by rimmed tapping

定するため、JIS Z3158 による斜め Y 形開先拘束割れ試験による評価を行った。Fig. 4 に示すように、鋼板の化学組成の P_{cm} 値を 0.18% 以下にすることが必要である。

2.2.3 強度とじん性の均質性

MACS 設備を用いた場合、板厚 75~150 mm の鋼板の板厚中心部での加速冷却速度は 5.0~1.1°C/s である。Fig. 5 に加速冷却速度と強度との関係を示す。板厚 75 mm 材および 150 mm 材のいずれの場合も C_{eq} が極厚材としては低く、0.36% であるにもかかわらず、同組成材を焼ならし工程で製造した場合よりも YS, TS とともに 50~60 MPa 程度高いといえる。そのうえ板厚 100 mm 以上においてもなお冷却速度依存性も存在していることがわかる。これらは、加速冷却による第 2 相ベイナイトの組織分率増大に起因する強度上昇に加えて、冷却中のフェライト微細化による強度上昇が寄与しているためである。このフェライト粒微細化は鋼板の高じん性化にも同時に役立つものである。

一方、HAZ じん性を阻害しない程度の Nb の添加は Fig. 6 に示すように 0.02% の添加量で鋼板の YS および TS の増加に有効であり、また Fig. 7 にみられるように PWHT による TS 低下を小さく

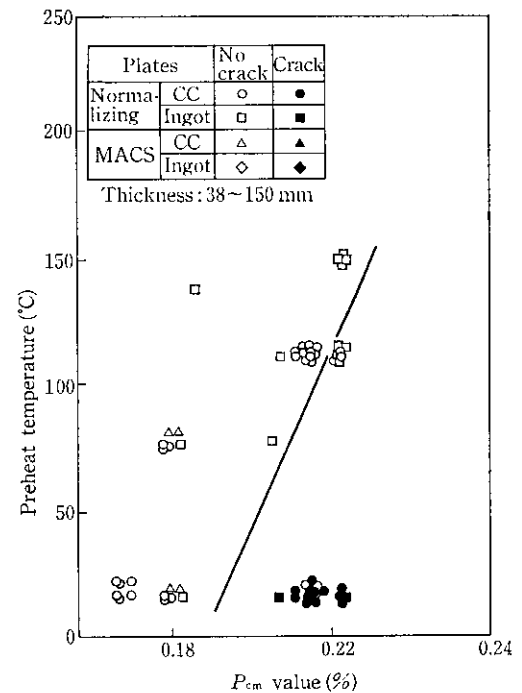


Fig. 4 Results of oblique Y-groove restraint weld cracking (JIS Z 3158)

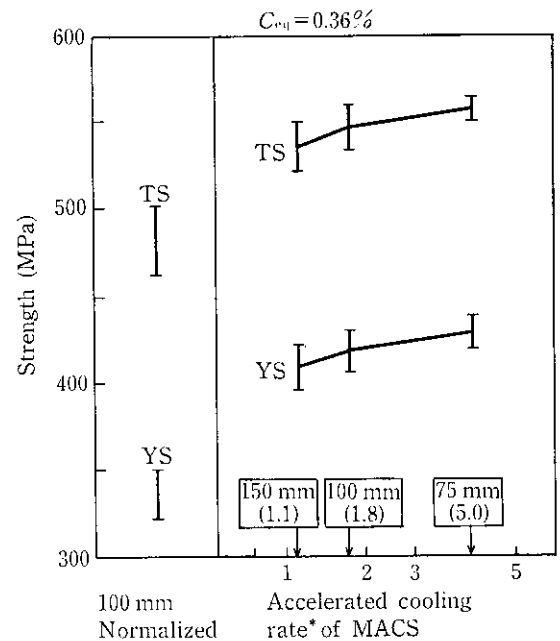


Fig. 5 Accelerated cooling rate* dependence of strength (* the values does not mean maximum capacity of controlled cooling rate)

する。さらに板厚方向の強度とじん性の均質化を図るため、板厚方向の温度分布を考慮した γ 未再結晶低温域から ($\alpha + \gamma$) 2 相域での制御圧延によるフェライト粒微細化促進、さらに圧延仕上り温度の適切な選定による冷却中の第 2 相ベイナイト組織の導入が不可欠である。

Fig. 8 に圧延仕上り温度と強度、じん性との関係を示す。この例では、板厚 150 mm の板厚方向温度分布に対応する 710~800°C の圧延仕上り温度において、均一な強度とじん性を得られることがわかる。

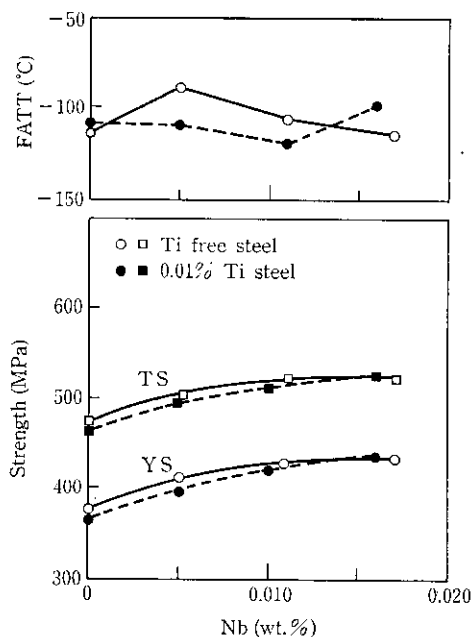


Fig. 6 Effect of Nb content on strength and CVN FATT

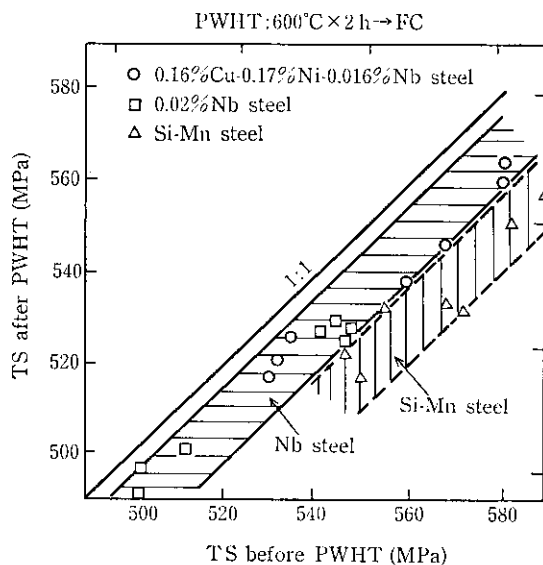


Fig. 7 Effect of Nb on TS after PWHT

3 板厚 75~150 mm 材の諸特性

3.1 機械的性質と溶接性

Table 4 に板厚 75~150 mm の化学組成を示す。C_{eq} は 0.36~0.37%, P_{cm} は低く 0.18% であり、予熱なし施工が可能なおものである。温間加工や PWHT を考慮し、強度を保証するために微量の Cu, Ni および Nb を添加している。Nb 量は溶接継手部じん性を低下させない量である。また N 量は 40 ppm 以下になるよう留意したものである。Table 5 は母材強度とじん性を示したもので、600°C の PWHT が施された場合についても YS 355 MPa, TS 490 MPa が確保されることがわかる。

斜め Y 形拘束割れ試験の結果を Table 5 に併記しているが、板厚が 75~150 mm のいずれの場合も、鋼板初温 10~20°C で割れは観察されない。

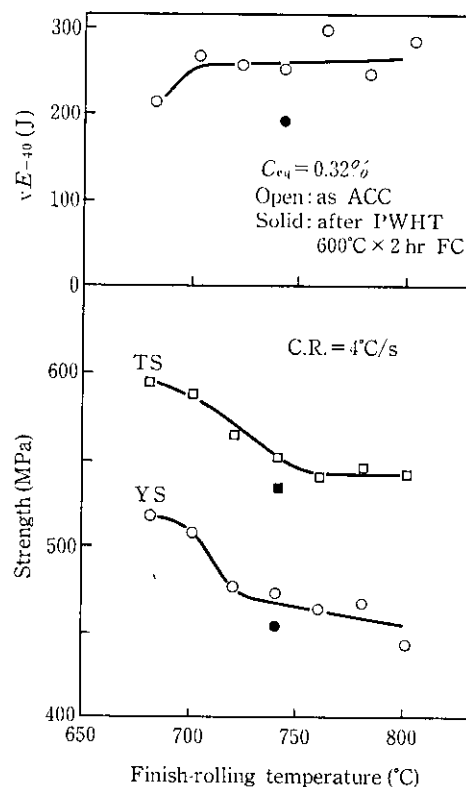


Fig. 8 Relation of finish-rolling temperature with strength and Charpy impact value

Table 4 Chemical compositions of plates tested (wt.%)

Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	Al	N (ppm)	C _{eq}	P _{cm}
75	0.08	0.39	1.54	0.005	0.002	0.19	0.20	0.026	0.028	31	0.36	0.18
100	0.08	0.39	1.54	0.007	0.003	0.20	0.25	0.026	0.028	30	0.36	0.18
150	0.08	0.39	1.54	0.007	0.003	0.19	0.31	0.019	0.023	27	0.37	0.18

Table 5 Results of tensile and Charpy impact test and preheat temperature for prevention of cold weld cracking at HAZ (Y restraint cracking test, JIS Z 3158)

Thick- ness (mm)	Tensile and Charpy impact test (Transverse)								Preheat temp. for prevention of cold weld cracking (°C)
	As received				PWHT (600°C × 1h/25 mm)				
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E_{-60}}$ (J)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E_{-60}}$ (J)	
75	430	516	36	265	419	503	37	247	R.T.
100	413	524	35	261	403	509	35	243	R.T.
150	414	512	39	218	392	500	39	202	R.T.

使用した溶接棒は KSA76N (AWS 5.5 E7016G) であり拡散性水素量は 3~4 cc/100 ml である。

3.2 CTOD 特性

溶接入熱量が 3.5~4.0 kJ/mm における 75~150 mm 極厚材の溶接のままでシャルピー衝撃試験と CTOD 試験結果を Table 6 に

Table 6 Results of Charpy impact and CTOD tests at welded joints (As welded condition)

Thickness (mm)	Welding method	Groove	Heat input (kJ/in)	E_{40} at CGHAZ (J)	CTOD at CG~SCHAZ (mm)
75	SMAW and SAW	K	4.0	223	>0.6
100	SAW	K	3.5	206	>0.4
150	SAW	K	3.5	234	>0.4

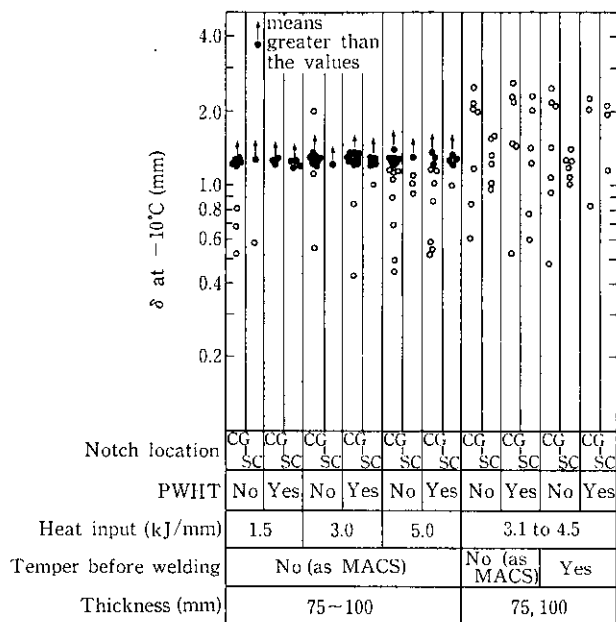
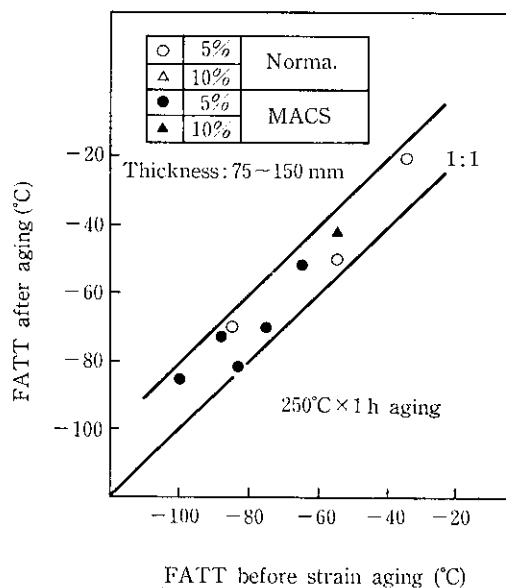


Fig. 9 CTOD values at welded joints for MACS and MACS-temper plate (CG, coarse grain; SC, Sub Critical; PWHT, 565 to 575°C × 1~2 h/25 mm; CTOD values, the values obtained from "valid" specimens)

Fig. 10 Changes in T_{rs} after strain aging of heavy section offshore steel

示し、板厚が100 mmまでの場合の入熱量1.5~5 kJ/mmにおける溶接のままおよびPWHT後のCTOD試験結果をFig. 9に示す。粗粒HAZおよび2相域加熱HAZでの-10°CにおけるCTOD値は溶接ままおよびPWHT後ともに0.4 mm以上の良好な値を示し、十分な安全性をもつものといえる。

3.3 ひずみ時効特性と熱間加工性

Fig. 10に10% ひずみ時効後のシャルピー破面遷移温度(50% FATT)を示す。ひずみ時効によるじん性低下は最大で30°C程度であり十分なものといえる。Fig. 11および12にそれぞれPWHT温度および再加熱温度の強度とじん性におよぼす影響を示す。600°Cまでの熱加工温度において所定の強度とじん性を満足することがわかる。

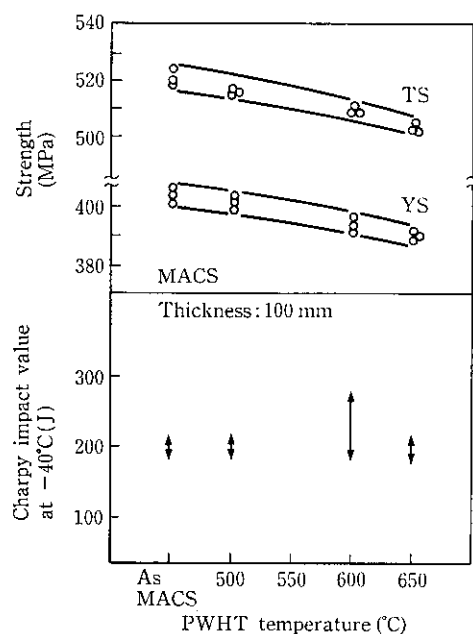


Fig. 11 Effect of PWHT temperature on strength and toughness

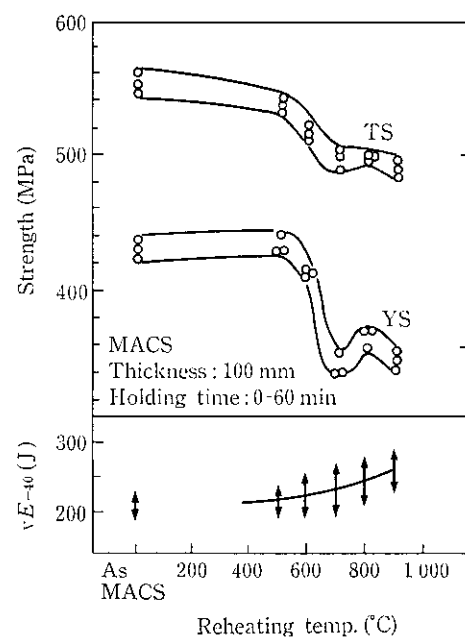


Fig. 12 Effect of reheating temperature on strength and toughness

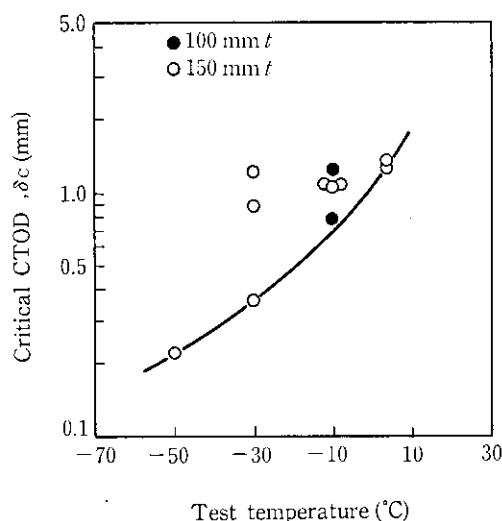


Fig. 13 Critical CTOD values of heavy section base plate

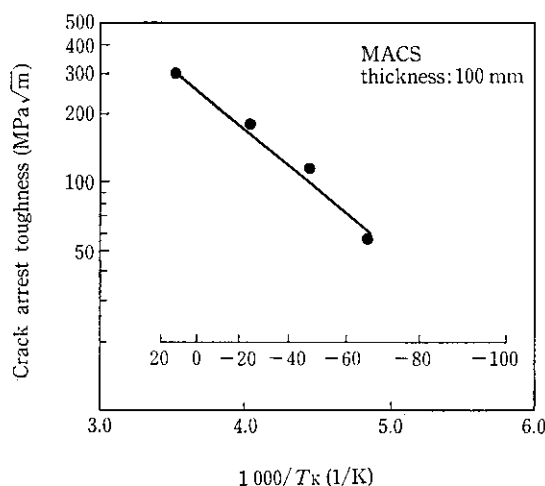


Fig. 14 Crack arrest toughness of heavy section base plate

3.4 破壊じん性

板厚 100 および 150 mm 材の母材 CTOD 試験結果を Fig. 13 に、また脆性破壊伝ば停止特性 K_{IC} 値を Fig. 14 に示す。母材の破壊発生抑止特性は良好で、また使用温度での十分なき裂停止特性を具備している。

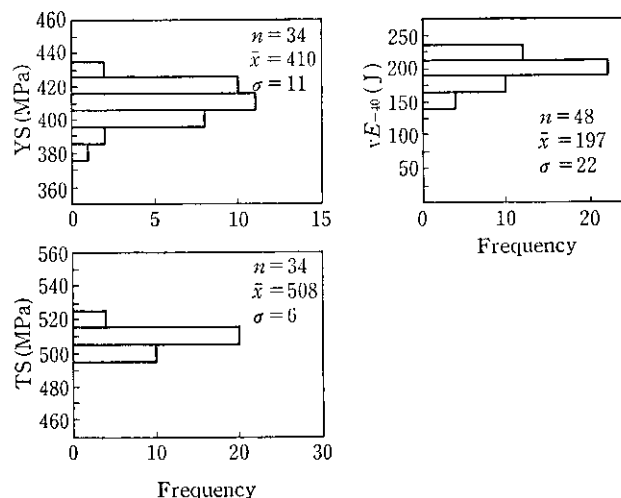


Fig. 15 Example of quality characteristics of 75 to 100 mm in thickness steel plates produced by MACS ($C_{eq} = 0.36\%$ (5 heats); NDTT $< -50^\circ\text{C}$; Restraint cracking test of JIS Z 3158, no crack at preheat temperature of R.T.)

4 MACS 製ジャケット用極厚鋼板の実績

ジャケットを始めリグやケーソンに用いられた MACS 製厚鋼板は 75~100 mm の極厚材を含んで約 6 万 t に達し世界各地で実用されている。Fig. 15 にはジャケット高さが 484 m に達する構造物に使用された最大板厚 100 mm までの極厚鋼板の品質の例を示す。

5 結 言

エネルギー資源開発に必要な巨大構造物を支える YS 355 MPa 級極厚鋼板の製造にあたり MACS 法を適用した。溶接時の鋼板初温が室温で割れを防止する性能をもち、溶接継手部の CTOD 値が十分安全側であるための化学組成を設計した。P, S および N 等の鋼中不純物やガス成分のより一層の低減と化学組成の高精度適中が可能な製鋼・精錬設備ならびに所定の強度とじん性を均質に得るための制御圧延と制御冷却からなる MACS 設備を有効に機能させることにより板厚 150 mm までの製造方法を確立した。最低使用温度である -10°C での溶接継手部要求 CTOD 値を溶接のままで満足する本 MACS 製海洋構造物用厚鋼板は、構造物の高さ 484 m の世界最大ジャケット (1986 年) に使用された最大板厚 100 mm を含め、現在までに約 6 万 t の実績を得ている。今後とも本鋼板の多方面への適用が期待される。

参 考 文 献

- 1) C. Shiga, K. Amano, T. Enami, M. Tanaka, R. Tarui and Y. Kusu-hara: "Application of Multipurpose Accelerated Cooling System (MACS) to the Production of HSLA Steel Plate", Int. Conf. on Technology and Application of High Strength Low Alloy (HSLA) Steels, AIME, Philadelphia (USA), (1983)
- 2) 三宮好史, 西崎 宏, 永井 潤, 志賀千晃, 寺嶋久栄, 関根稔弘: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, 60-67
- 3) 石油公団・石油開発技術センター編集: 「石油鉱業の技術講座」昭和 58 年 8 月 [石油経済ジャーナル社] を参考
- 4) 天野虔一, 志賀千晃, 田中智夫: 「TMCP 鋼の溶接冶金」, シンポジウムテキスト-溶接冶金研究委員会第 100 回記念シンポジウム, 日本溶接

学会 (1985), 101

- 5) 坪井潤一郎, 平井征夫, 山口忠政: 日本溶接学会全国大会概要, Vol. 18 (1976), 86
- 6) 坪井潤一郎, 平井征夫, 山口忠政: 日本溶接学会全国大会概要, Vol. 19 (1976), 74
- 7) M. Yoshida, M. Ohnishi, Y. Oguchi and K. Nakanishi: "Secondary Refining Process at Mizushima Works" Macmaster Symposium, Hamilton (Canada) May (1986)
- 8) 弟子丸慎一, 平井征夫, 天野虔一, 上田修三, 上村尚志, 坪田一哉: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 4, 297