

海洋構造物用継手CTOD保証降伏強度500N/mm²鋼

YS500N/mm² High Strength Steel for Offshore Structures with Good CTOD Properties at Welded Joints

長 井 嘉 秀^{*(1)} 深 水 秀 範^{*(2)} 井 上 肇^{*(1)} 伊 達 昭 宏^{*(1)}
Yoshihide NAGAI Hidenori FUKAMI Hajime INOUE Akihiro DATE
中 島 隆 雄^{*(3)} 児 島 明 彦^{*(4)} 足 達 智 彦^{*(5)}
Takao NAKASHIMA Akihiko KOJIMA Toshihiko ADACHI

抄 録

- 10 継手CTOD保証のYS500N/mm²海洋構造物用鋼を世界に先駆けて開発した。高強度化により高成分(Ceq, P_{cm})となるため、従来鋼では継手CTOD特性とYS500N/mm²高強度の両立が困難であった。そこで、厚板製造条件(TMCP条件)を適正化するとともに、厳格に管理することで成分上昇を最小限に抑制して、強度と靱性の向上を行なった。また、継手靱性向上のため、従来用いられてきた対策である島状マルテンサイト低減、局所的な脆化域抑制、粒内フェライト(IGF)活用等に加え、新たなHAZ細粒高靱化技術 HTUFF[®]: Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles)を適用し、溶融線近傍のHAZ組織を微細化し、継手靱性の向上を図った。これらの対策により、YS500N/mm²の高強度と-10 継手CTOD特性の両立が可能となった。当技術を活用した厚鋼板は既に50 000トンを超える製造実績を有する。

Abstract

Nippon Steel has developed the YS500N/mm² high strength offshore structural steel with good CTOD properties prior to the world. As raising strength led to raising Ceq and P_{cm}, it was difficult to reconcile high strength, YS500N/mm², and CTOD properties at welded joints in conventional steel. We managed to raise the strength and toughness with suppressing the raising of Ceq and P_{cm} by means of setting up the proper plate manufacturing conditions (TMCP conditions) and controlled them strictly. Moreover, the newly developed technology (HTUFF[®]) was applied for improving the HAZ toughness in addition to the conventional measures in reducing MA, suppressing LBZ and utilizing IGF. By these measures, it came to compatible high strength (YS500N/mm²) and good properties at welded joints (CTOD at -10°C). HTUFF high strength offshore structural steels have already been mass-produced to over 50,000 tons.

1. 緒 言

海洋構造物に用いられる厚鋼板においては、一般に、脆性破壊防止の観点から母材のみならず溶接部に対しても優れた低温靱性が求められる。特に、低温靱性としてシャルピー衝撃特性だけでなく、きわめて局所的な脆化域(Local Brittle Zone: LBZ)に支配されるCTOD特性が求められるケースが多く、溶接熱影響部(weld heat affected zone: HAZ)の組織微細化、脆化組織の低減や生成抑制などを通じた高靱化と高強度化の両立が大きな課題の一つとなっている。

過去、溶接継手部のCTOD特性を保証した鋼としては、TiN鋼、TiO鋼があり、降伏強度(YS)420N/mm²以下級の鋼が開発、実用化されている¹⁾。従来、継手靱性の要求は-10 度が一般的であったが、最近では海洋構造物敷設(設置)環境が氷海域にまで拡大し、サハリンプロジェクトのように-35 以下の極低温でのCTOD特性が要求されるケースも見受けられ、極低温継手保証鋼として既にYS355、

YS420N/mm²鋼の開発を完了している^{2,3)}。一方、近年の世界的に旺盛なエネルギー需要を背景として、海洋構造物の大型化やそれに伴う軽量化のニーズも高まりつつあり、鋼材にはより高強度かつ厳しい低温靱性が要求されてきている。そのような中、北海Graneプロジェクトでは、上部構造の軽量化を目的に従来のYS420N/mm²級からYS500N/mm²級の-10 継手CTOD保証鋼の適用を計画していた。

鋼を高強度化するためには、通常、高成分化せざるを得ず、母材はもとより溶接継手の低温靱性を劣化させる傾向にあると同時に、溶接性も劣化させる。このため、従来技術ではYS500N/mm²の高強度と-10 継手CTOD保証を両立させる鋼材を安定製造するのは困難であった。

これに対し、新日本製鐵ではTiオキサイド技術に続く新たなHAZ高靱化技術としてHAZ細粒高靱化技術 HTUFF[®]: Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles)技術を開発した⁴⁾。これは溶融線近傍のような高温状態に

⁽¹⁾ 君津製鐵所厚板工場
千葉県君津市君津1番地 〒299-1141 TEL:(0439)50-2384

⁽²⁾ 欧州事務所(元 君津製鐵所厚板工場)

⁽³⁾ 君津製鐵所製鋼部

⁽⁴⁾ 鉄鋼研究所鋼材第二研究部

⁽⁵⁾ 本社厚板営業部(元 君津製鐵所厚板工場)

おいても熱的に安定して存在する微細な酸化物、硫化物粒子をピンニング粒子として活用し、従来のTiN鋼やTiO鋼以上のHAZ組織微細化を実現させるものである。この新技術を適用することでHAZ韌性を向上させるとともに、マイクロアロイング技術と加工熱処理 (Thermo-Mechanical Control Process : TMCP) 技術を駆使することで母材の高強度、高韌性化を行い、継手 - 10 CTOD保証YS500N/mm²海洋構造用鋼を開発した。本報では、その開発結果と実機製造した結果について報告する。

2. 開発目標

化学成分および母材、継手の主な仕様を表1に示す。開発ターゲットとなった北海のGraneプロジェクトは世界で初めて海洋構造用YS500N/mm²鋼を採用したものであり、本仕様はEN-10225のYS460N/mm²海洋構造用材をベースに設定され、ノルウェーNORSOK規格に取り入れられている。強度範囲がYS 80N/mm²、引張強度 (TS) 100N/mm²と狭い仕様となったのは、溶材開発の高強度化が追いつかず、溶接金属 (WM) のオーバーマッチングを確保するためであった。

3. YS500N/mm²海洋構造用材の諸特性

3.1 化学成分および製造方法

YS500N/mm²という高強度と - 40 衝撃、 - 10 CTOD保証等高韌性を同時に満足するためには、これまで蓄積された各種技術の高度利用が不可欠である。すなわち、脱酸、非金属介在物制御や中心偏析制御などの精錬から凝固に至る製鋼技術はもちろん、厚板工程におけるTMCP技術とその効果を最大限発揮するためのマイクロアロイング技術を駆使することが必要である。そこでNb, Tiを活用す

るとともに、加熱から冷却までの諸条件を緻密に制御することにより、成分 (Ceq, P_{cm}) を必要以上に上げることなく母材の高強度、高韌性化をはかった。

図1に製造プロセスを、表2に代表的な化学成分を示す。製造プロセスにおいては、高い清浄度を確保することはもとより、中心偏析対策として分割ロールによる軽圧下を実施した⁹⁾。加熱から加速冷却までのTMCPプロセスでは条件の適正化とともに厳格管理を行なった。加熱では添加Nbが十分に固溶しかつTi (C,N)により加熱粒径の粗大化が抑制される適正温度にコントロールした。

継手韌性向上のための主な対策を表3に示す。新たなHAZ韌性向上技術であるHTUFF技術を適用し、溶接溶融線近傍の組織を従来鋼以上に微細化させるとともに、島状マルテンサイト (Martensite-Austenite constituent : MA) 低減のため低Si、無Alとし、TiC脆化回避のためTi-Nの化学量論組成バランスの適正化などを行なった。

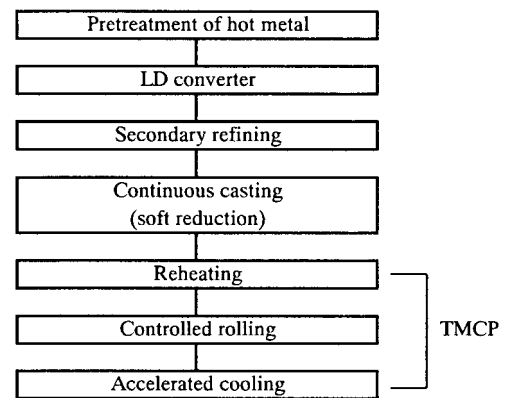


図1 製造プロセス Manufacturing process

表1 YS500N/mm²海洋構造用鋼の主な要求特性
Chemical compositions and mechanical requirements of YS500N/mm² offshore structural steel

Chemical composition

	(mass%)									(mass%)				(ppm)			(mass%)
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti	Al	N	B	Ca	P _{cm}
Min.	-	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max.	0.14	0.55	1.75	0.020	0.007	0.60	1.00	0.25	0.25	0.040	0.080	0.025	0.055	100	5	50	0.22

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

Mechanical properties of base metal

1. Tensile test

Thickness (mm)	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	YS/TS ratio (%)
t ≤ 16	500/580	600/700	17	93
t > 16				90

2. Charpy V-notch impact test

Thickness (mm)	Test temperature (°C)	Location of specimen	Energy (J)
t ≤ 40	- 40	Sub-surface	42/60
t > 40	- 40	Sub-surface and mid-thickness	(min./ave.)

3. Through thickness tensile test

Thickness (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Reduction of area (%)
All thickness	480	25/35 (min./ave.)

Fracture toughness of welded joints

Charpy test				CTOD		
Test temperature	Location of specimen	Notch location	Energy	Test temperature	Notch location	
- 40	Cap Mid-thickness Root	Weld metal Fusion line (FL) FL+2mm (HAZ) FL+5mm (HAZ)	Min. 42J Ave. 60J	- 10	Weld metal (WM) Grain coarsened HAZ (GHAZ) Subcritical / intercritical HAZ boundary (SC/IC HAZ)	0.25mm

表2 YS500N/mm²海洋構造物用鋼の化学成分例
Typical chemical compositions of YS500N/mm² offshore structural steel

	(mass%)						Othres	P _{cm}
	C	Si	Mn	P	S	Al		
YS500N/mm ² developed steel	0.09	0.15	1.60	0.005	0.002	0.003	Cu, Ni, Nb, Ti, Mg	0.21

表3 HAZ靱性向上手段
Measures of improving HAZ toughness

Measures	Purpose
Ti-killed and fix the nitrogen	Improving matrix toughness and nucleation IGF
Low Silicon	Decreasing LBZ(MA)
Low Aluminum	Enhancing nucleation IGF and decreasing LBZ(MA)
Control the Ti-N balance	Suppressing TiC embrittlement
Low impurity elements	Improving matrix toughness and decreasing LBZ
Add the magnesium	Refining HAZ microstructure (utilizing HTUFF technology)
Low P _{cm}	Improving matrix and HAZ toughness

3.2 母材の機械的性質

Graneプロジェクトに続き、北海のKVITEBJORNプロジェクト向けに表1の仕様鋼板を製造し、最大板厚70mmまでの継手CTOD保証YS500N/mm²海洋構造物用鋼を併せて約7000トン製造完了している。製造鋼板の機械的性質を図2に示す。十分な強度を示すと共に、YS:80N/mm²級、TS:100N/mm²級も達成している。また-40の衝撃試験において、鋼板表層部にて200J程度、板厚中心部でも150J程度の値を実現し、良好な低温靱性を有している。板厚70mm材のミクロ組織を図3に示す。TMCPプロセス条件の適正化や厳格管理により、70mmの厚手材においても鋼板全領域にわたり微細なフェライト-ベイナイト組織が得られており、良好な機械的性質を達成した。

3.3 継手特性

3.3.1 HTUFF技術のプロパー安定性

HTUFF技術のポイントとなる微細粒子によるピンニング効果について、プロパー製造における安定性を再現熱サイクル試験にて確認した。試験は各出鋼ヒート毎に行い、1400で60秒保定したのち直ちに急冷し高温状態組織を凍結させ、旧粒径を画像処理装置にて円相当径を測定した。HTUFF高強度海洋構造物用鋼の再現熱サイクル粒径の測定結果を図4に示す。いずれも粒径は200μm以下となり、プロパー製造においても安定したピンニング力を示す。

3.3.2 実継手の機械的性質

最大厚である70mm材について、入熱量(Heat Input: HI)0.7kJ/mm, 3.5kJ/mmの2条件で実継手を作成し、特性評価試験を行なっ

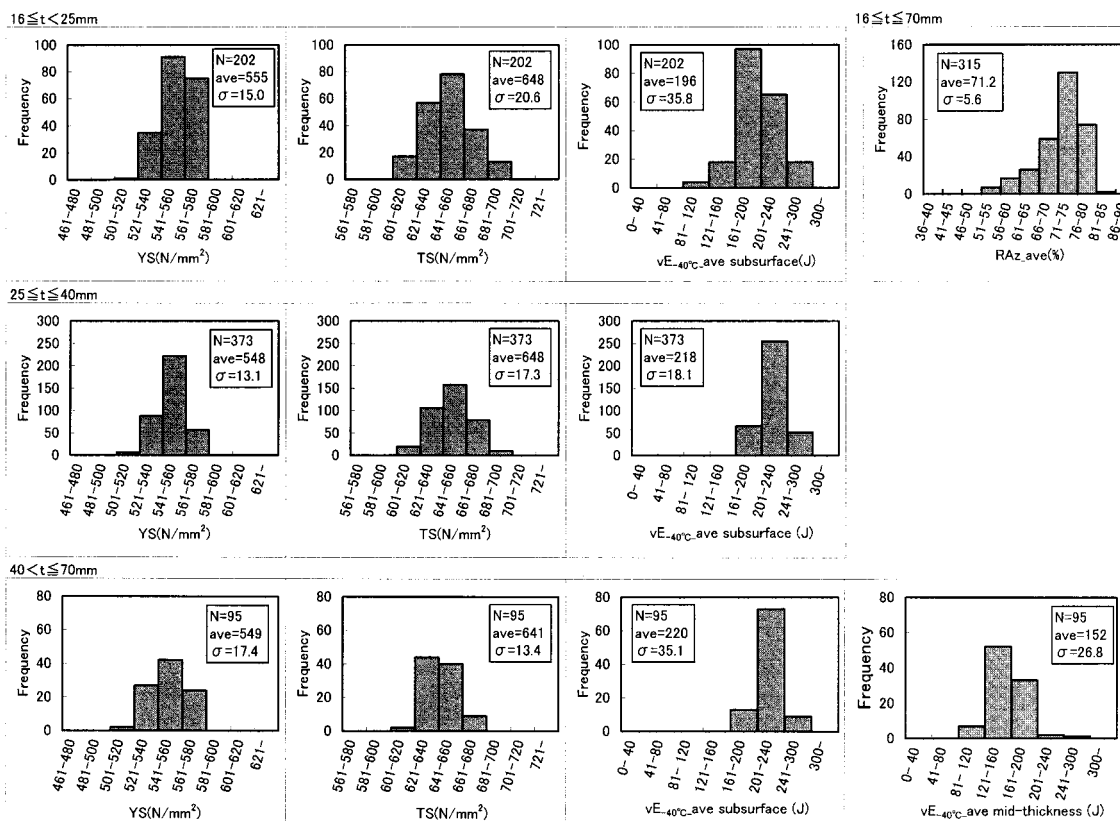


図2 母材の機械的性質
Mechanical properties of base metal

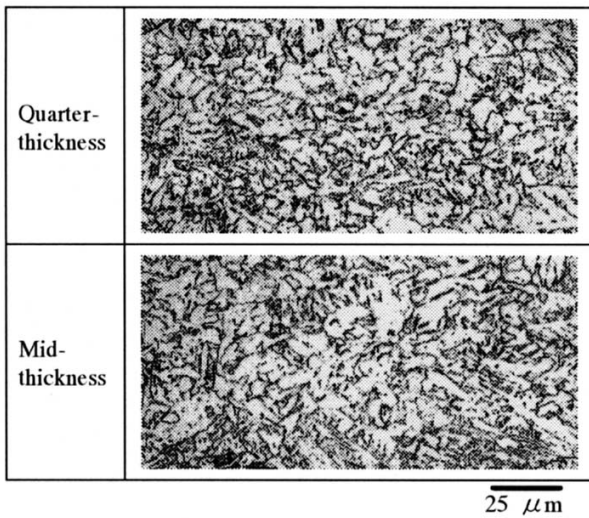


図3 板厚70mm材のマイクロ組織

Microstructures of YS500N/mm² steel plate of 70mm thickness

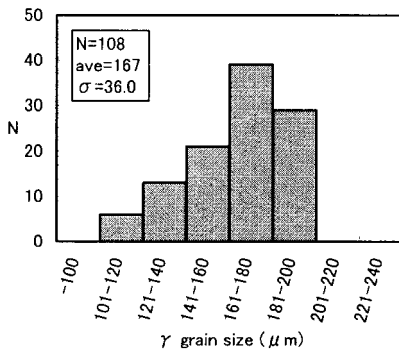


図4 高温(1400 × 60s)における 粒径 grain size reheated at 1400 for 60 s

た。開先形状、溶接条件は図5に示す。また、潜弧(SAW)溶接については、Post weld heat treatment(PWHT)後についても試験を実施した。PWHTの条件は580 に4時間保定とした。図6に溶接部断面の硬さ分布を示す。HAZの軟化は小さく、WMが母材に対して十分オーバーマッチングしていることが分かる。図7に-10 での継手CTOD試験の結果を示す。ノッチ位置はEN-10225に従い、WM, 粗粒HAZ(Grain Coarsened HAZ: GCHAZ), Subcritical HAZ(SCHAZ)とIntercritical HAZ(ICHAZ)の境界(SC/IC HAZ)^{*)}とした。全ての条件において目標である 値0.25mmをはるかに超える良好なCTOD特

Welding method	SAW / multipass welding	FCAW / multipass welding
Groove profile (Unit:mm)		
Welding wire	Y-204B ^{*1} (4.8mm φ)	SF-45L.mod. ^{*1} (1.2mm φ)
Flux	NB-250H ^{*1}	-
Shielding gas	-	80%Ar-20%CO ₂
Current (A)	600	230
Voltage (V)	29	26
Speed (mm/s)	5.0	5.8
Heat input (kJ/mm)	3.5	0.7

*1 Nippon Steel & Sumikin Welding Co.,Ltd.

図5 溶接条件
Welding condition

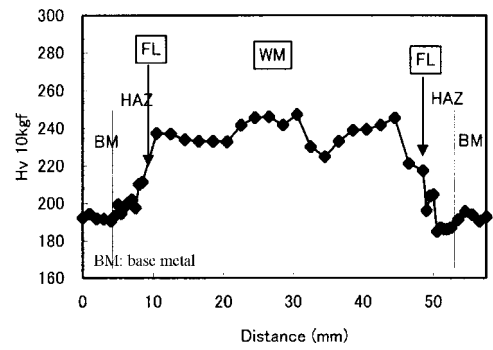


図6 継手の断面硬さ(t=70mm, SAW)
Hardness distribution across the welded joints

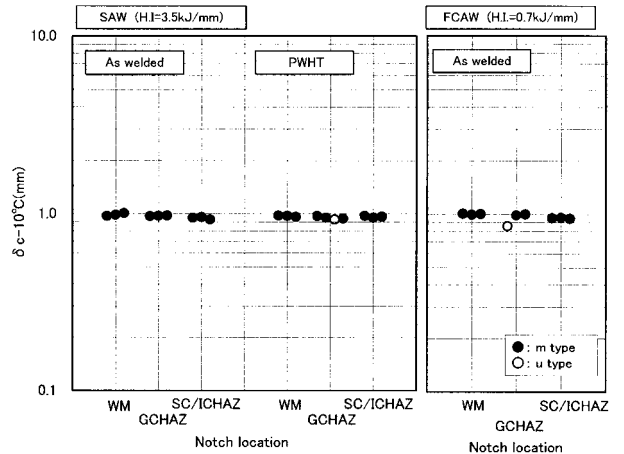


図7 継手CTOD試験結果
CTOD test results of welded joints

性が得られた。-40 における継手衝撃試験の結果を図8に示す。Root部、板厚中心部、Cap部いずれにおいても各HAZ位置で100Jを超える良好な低温特性を示した。

また、Controlled Thermal Severity 試験(CTS)⁹⁾、y形溶接割れ試験⁷⁾により溶接性についても調査を実施した。低P_{cm}としたことにより、いずれの試験においても予熱フリー条件下で割れは発生せず、良好な溶接性を示した(表4, 5)。

4. 結 言

TMCP技術、マイクロロイニング技術を最大限活用するとともに、HTUFF技術を適用することにより、最大厚70mmまでのYS500N/mm²クラスの継手CTOD保証高強度海洋構造用鋼を開発した。表6に示すように、これまでHTUFF高強度海洋構造用鋼としては既に5万トン以上製造しており、本鋼材はプロパー製造においても、安定して良好な母材、継手特性を示す。

参考文献

- Chijiwa, R. et al.: Proc. Int. Conf. OMAE. Houston, 1988, ASME, p165
- Aihara, S. et al.: Proc. 18th Int. Conf. OMAE. St.Jphn's, 1999, ASME, MAT-2100
- Chijiwa, R. et al.: Proc. 18th Int. Conf. OMAE. St.Jphn's, 1999, ASME, MAT-2101.
- 児島明彦 他, 新日鉄技報 (380), (2004)
- Ogibayashi, S. et al.: Proc. 7th Japan-Germany Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking. Dusseldorf, 1987, p309
- EN-10225(2001) Annex G
- JIS Z 3158

*1 SCHAZとICHAZの境界とは、金属組織学で見た場合、ちょうどAc₁点まで再熱された領域を繋ぎ合わせた線である。

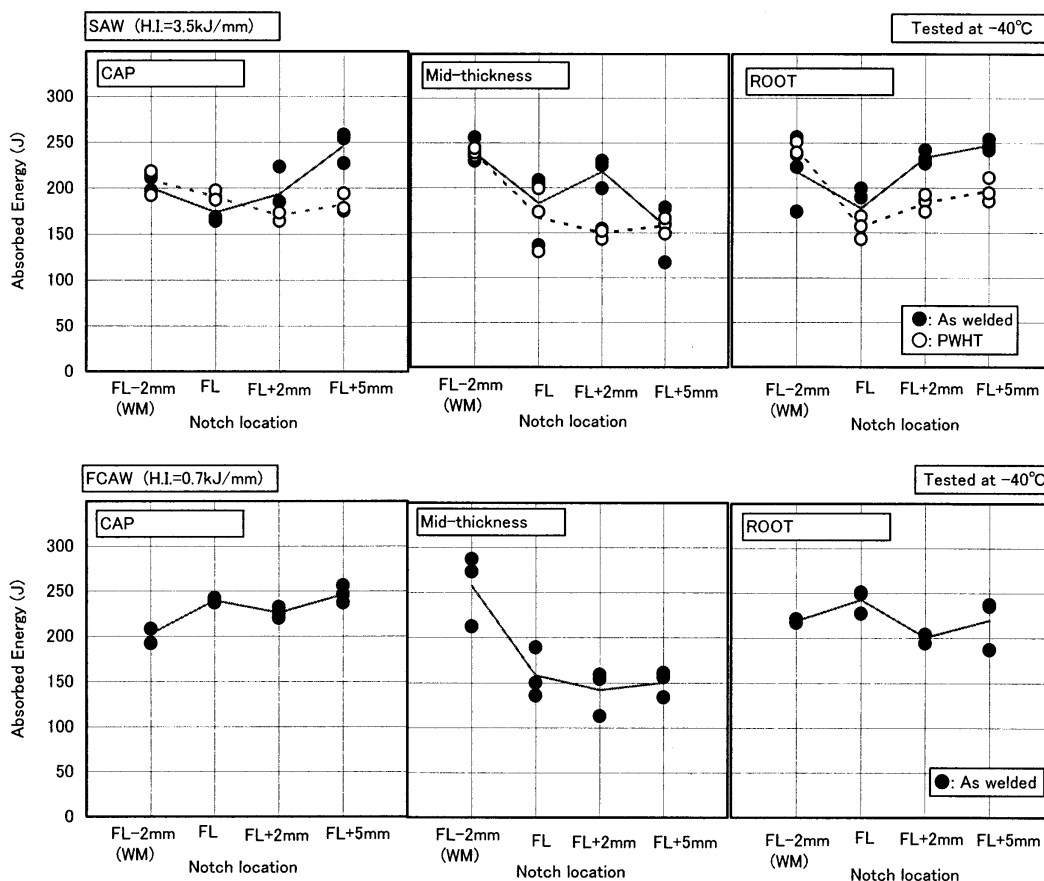


図8 継手衝撃試験結果
Charpy impact test results of welded joints

表4 CTS試験結果
CTS weldability test results

Preheat temperature ()	Hardness			Crack evaluation
	Hv load : 5kgf			
	Min.	Max.	Ave.	
25	278	328	307	No cracking
50	277	329	304	No cracking
75	283	320	304	No cracking

SMAW, 1.0kJ/mm

表5 y形溶接割れ試験結果
y-groove weldability test results

Preheat temperature ()	Surface cracking ratio (%)						Section cracking ratio (%)						Root cracking ratio (%)					
	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	5	Average
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表6 HTUFF海洋構造物用鋼の製造実績
Supply records of HTUFF offshore structural steels

Production period	Project Name	Area	YS class(N/mm ²)	Toughness of welded joint		Quantities(ton)
				Charpy	CTOD	
2000-2001	Bayu Undan	Timor Sea	460	-40	-10	20.4
2000-2001	Grane	North Sea	500	-40	-10	4.0
2001	Kvitebjorn	North Sea	500	-40	-10	3.0
2001-	ACG	Caspian Sea	460	-40	-10	17.5
2002-2003	Thunder Horse	Gulf of Mexico	500	-40	Not required	0.6
2002-2003	Western Libya	Mediterranean Sea	460	-40	-10	5.2

Total 50.7