

溶接熱影響部靱性に優れた造船用高張力鋼板 大入熱溶接部の高品質化を実現する JFE EWEL 技術

High Tensile Strength Steel Plates for Shipbuilding with Excellent HAZ Toughness

—JFE EWEL Technology

for Excellent Quality in Large Heat Input Welded Joints—

鈴木 伸一 SUZUKI Shinichi JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)
一宮 克行 ICHIMIYA Katsuyuki JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(副課長)
秋田 俊和 AKITA Toshikazu JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鑄鍛室 主任部員(副課長)

要旨

船舶の建造効率の向上を目的とした溶接入熱の増大に対応するため、大入熱溶接により形成される熱影響部 (HAZ) の靱性を向上させる新たな技術「JFE EWEL (イーウェル)」を開発した。「JFE EWEL」は、TiN の最適利用による HAZ の粒径制御、マイクロアロイング制御による HAZ の粒内組織制御 Super-OLAC の活用による最適ベース成分設計の各技術要素の統合をコンセプトとしている。本技術をコンテナ船用極厚 YS390 N/mm² 級鋼, LPG 船用低温用鋼, 船体用 YS355 N/mm²F 級鋼に適用し、優れた母材特性と溶接継手特性を兼ね備えた各種の造船大入熱用鋼板を開発した。

Abstract:

In order to meet the increase in heat input of welding to improve the productivity of shipbuilding, JFE Steel developed a new HAZ toughness improving technology for large heat input welding “JFE EWEL.” The technical factors of “JFE EWEL” are the control of grain size in HAZ by optimized TiN, the control of microstructure in HAZ grain by an advanced microalloying technology, and optimized alloy design by using Super-OLAC. By applying “JFE EWEL” to steel for shipbuilding such as YS390 N/mm² class heavy section plate for container ships, low temperature service steel plate for LPG carriers, and YS355 N/mm² class F grade plate for hull structures, excellent properties in both base plates and welded joints for large heat input welding were achieved.

1. はじめに

近年、造船分野においては、コンテナによる遠距離貨物輸送の増大を背景にコンテナ船の大型化が急速に進んでいる。最近では、従来の 6 000 TEU (twenty-foot equivalent unit: 20 フィートコンテナ換算個数) クラスから 8 000 TEU クラスの大型船が建造されており、さらには 10 000 TEU を超える超大型船の建造も一部で計画されている。大型コンテナ船に用いられる鋼材は、従来に比べ高強度化、厚肉化が著しく、降伏強度 (YS) 390 N/mm² 級最大板厚 65 mm 以上の鋼板が使用されている。このような厚肉鋼板の溶接においては、従来の多層溶接では施工能率が著しく低下するため、高能率溶接方法であるエレクトロガスアーク溶接 (EGW) が適用され、その際の溶接入熱は 500 kJ/cm を超えるこれまでにない超大入熱となる。

また、コンテナ船以外の各種船舶についても、高水準の造船需要を背景に建造効率の向上が図られており、片面 1 パスサブマージアーク溶接や EGW などの高能率大入熱溶接が行われている。

このような大入熱溶接においては、溶接熱影響部 (HAZ: heat affected zone) の組織は著しく粗大化し、継手部の靱性が大きく劣化するという問題がある。また、鋼板の高強度化、厚肉化に対しては従来の TMCP (thermo-mechanical control process) 技術では炭素当量 (C_{eq}) の増加が不可欠であり、これも溶接性や溶接継手部の靱性を劣化させる原因となる。

このような課題に対応するため、当社では高度なマイクロアロイング制御と最先端の TMCP 技術を用いた新たな大入熱溶接 HAZ 靱性向上技術「JFE EWEL」を開発し、大型コンテナ船や LPG 船などに用いられる新大入熱溶接用鋼板の開発に適用した¹⁾。本稿では、「JFE EWEL」の

概要および本技術を用いたコンテナ船用 YS390 N/mm² 級鋼板、低温用鋼板、および YS355 N/mm²F 級鋼板の特性について紹介する。

2. 「JFE EWEL」の概要

2.1 大入熱溶接時の課題

大入熱溶接時の従来鋼の HAZ 組織を模式的に Fig. 1 (a) に示す。溶接にともない、熔融境界線（ボンド）の近傍は 1400 を超える高温に加熱され、オーステナイト粒が著しく粗大化する。このため、溶接後の冷却時にオーステナイト粒界から低靱性の粗大なフェライトサイドプレートが生成するとともに、旧オーステナイト粒内には上部ベイナイトが生成し、溶接継手部の靱性が大きく低下する。特に、高強度・厚肉材では C_{eq} を高めた成分系となるためフェライトサイドプレートや上部ベイナイトが生成しやすく、靱性の劣化が顕著となる。

2.2 「JFE EWEL」の技術要素

2.1 節で述べた大入熱溶接時の課題に対応するため Fig. 2 に示すような 3 つの技術要素、すなわち、(1) TiN の最適利用による HAZ の粒径制御、(2) マイクロアロイングの活用および独自の ACR (atomic concentration ratio 制御²⁾ による HAZ の粒内組織制御、(3) Super-OLAC の活用による最適ベース成分設計を統合した大入熱溶接対策技術「JFE EWEL」のコンセプトを策定した。なお、対象とする鋼材の必要特性などに応じて各技術要素は適宜選択している。Fig. 1 (b) に「JFE EWEL」を適用した開発鋼の HAZ 組織を模式的に示す。粒径制御により HAZ の粗粒域幅が減少するとともに、粒内組織制御と最適ベース成分設計により粒内組織の改善が行われている。以下に各技術要素の詳細を示す。

2.2.1 HAZ の粒径制御

大入熱溶接時の HAZ の粗粒域を極小化するためには

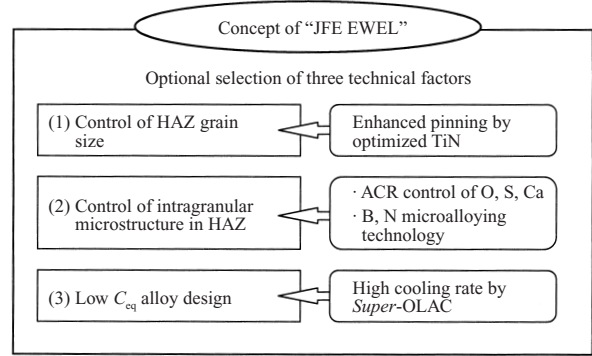


Fig. 2 Concept and technical factors of HAZ toughness improvement in “JFE EWEL” for large heat input welding

高温でのオーステナイト粒成長を抑制する必要がある。オーステナイト粒成長抑制のためには、従来より高温で安定な窒化物や酸化物の利用が行われているが³⁻⁷⁾、当社では工業的な制御性の観点から TiN 活用の最適化について検討した。従来の技術では TiN の固溶温度が低いため溶接時の温度が 1500 以上に達するボンド近傍はもとより、大入熱溶接時にはボンドから数ミリメートル離れた位置においても TiN が固溶し、オーステナイト粒が粗大化する。この問題に対し、Thermo-Calc を用いた熱力学的検討と実験的検討に基づき、TiN の最適活用を行うため TiN 量、Ti/N 比およびその他のマイクロアロイングの適正化を図った。その結果、TiN の固溶温度を従来の 1400 未満から 1450 以上に高温化するとともに、TiN の微細分散化を可能とし、HAZ のオーステナイトの粗粒化を大幅に抑制できることが明らかとなった。Photo 1 に板厚 60-65 mm 材の従来鋼および TiN の最適化を図った開発鋼に大入熱 1 パス EGW (溶接入熱 400-450 kJ/cm) を行った際の HAZ のマイクロ組織を示す。従来鋼ではボンド部近傍の粗粒域幅が 2.1 mm であったものが、開発鋼では 0.3 mm と著しく縮小されていることが分かる。

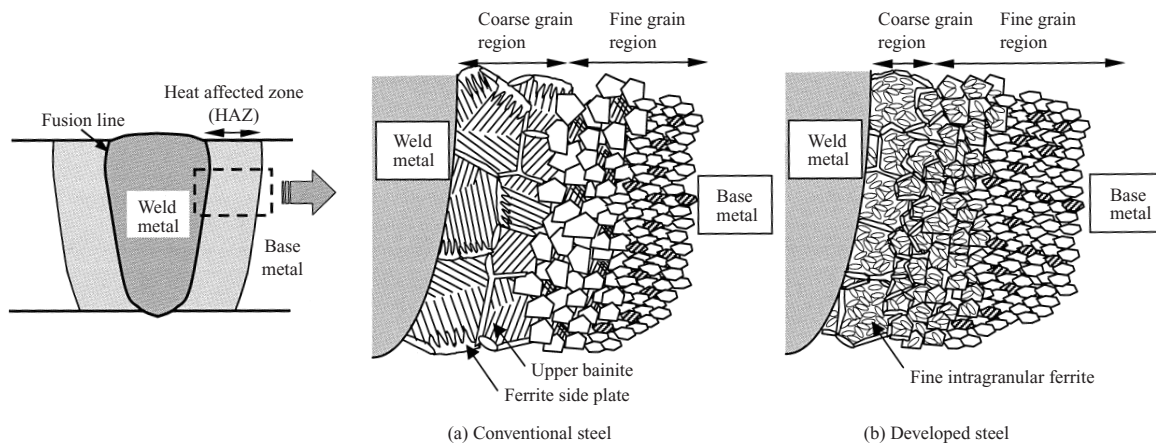


Fig. 1 Schematic diagram of large heat input welded joint

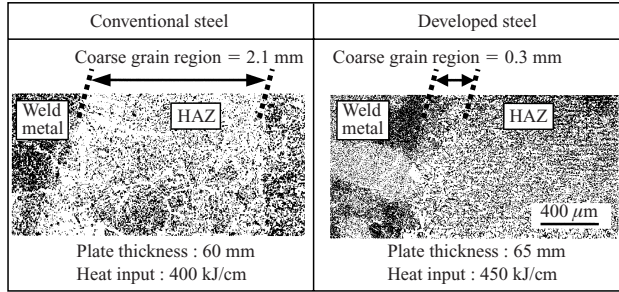


Photo 1 Microstructure of HAZ in electro-gas arc welded joint

2.2.2 HAZ の粒内組織制御

「JFE EWEL」では、粗大なフェライトサイドプレートや上部ベイナイトを抑制し、微細な粒内フェライトを生成させる粒内組織制御を適用することで、さらなる高靱化を図っている。粒内フェライト変態の核としては、各種の酸化物や窒化物が有効であることが知られている^{8,9)}が、「JFE EWEL」では、必要に応じ Ca 系の非金属介在物および BN を利用する。以下に、それぞれの技術的内容について示す。

1) ACR 制御

粒内フェライト核生成サイトの一つとして、(Ca Mn)S 系非金属介在物が挙げられる。これにより、フェライトサイドプレートや上部ベイナイトの生成が抑制されるとともに、粒内組織が微細化し、HAZ の高靱化が図られる。ただし、粒内フェライトの核生成サイトとして機能させるためには、O, S および Ca の厳密な管理が必要であり、これを実現させるために Ca 系介在物に関する当社独自の形態制御指標 ACR²⁾を用いた制御を実施している。ACR を適正範囲に制御して、O, S, Ca 添加量を最適化することにより、フェライト核生成に好適な CaS, MnS などの複合介在物を微細分散することができる。

2) B, N 制御

粒内フェライト生成のためのもう一つの方法として、B を活用している。大入熱溶接においては溶接後の冷却速度が小さいため、鋼板に添加した B が冷却中に BN として析出する。この BN を $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態時における粒内フェライトの核生成サイトとすることにより、HAZ 靱性の向上を図ることが可能である。BN の活用は、靱性劣化の一因である鋼中の固溶 N を低減させる点でも、HAZ の高靱化に有効である。

さらに、著者らは大入熱溶接時に溶接金属中の B が HAZ へ拡散することを見出しており¹⁰⁾、これを HAZ 粗粒域での新たな B, N 制御技術として確立し HAZ の靱性向上に有効に利用している。Fig. 3 はボンド近傍の TiN 固溶と溶接金属からの B の拡散を模式的に示したものである。高融点 TiN であってもボンドのごく近傍では一部固溶は避けられず、その結果

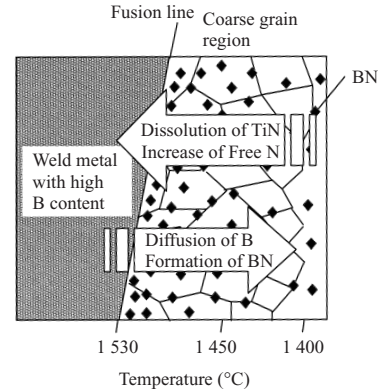


Fig. 3 Schematic diagram of dissolution of TiN and diffusion of B near fusion line

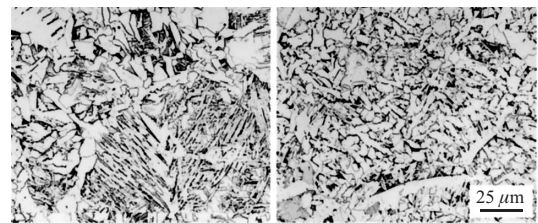


Photo 2 Microstructure of simulated HAZ (Peak temperature : 1 400°C, cooling time from 800°C to 500°C : 390 s)

固溶 N が生じる。一方、大入熱 EGW に用いられる溶接材料は B を含有しているため、比較的 B 含有量が多い溶接金属から HAZ 側へ B が拡散する。この拡散 B が母材に添加した B と同様に固溶 N と結びつくことにより、粒内フェライト生成核が増加するとともに、鋼中の固溶 N が低減する。B の拡散量は、板厚や溶接条件によって変化するため、必要に応じて鋼板に添加する B 量を制御することにより HAZ 全体にわたり BN による粒内フェライトの生成が可能となる。また、溶接金属中の B を活用する効果は、溶接後の冷却速度が小さく B の拡散距離が大きくなる厚物材の大入熱溶接ほど有効というこれまでにない特長を有する。

Photo 2 に微量 B 添加および ACR 制御を行った開発鋼の溶接再現熱サイクル付与後のマイクロ組織を従来鋼と比較して示す。従来鋼では粗いフェライトサイドプレートや上部ベイナイト主体の組織であるのに対し、開発鋼は微細なフェライト主体の組織となっている。

2.2.3 Super-OLAC の活用による最適成分設計

最近の大型コンテナ船には、YS390 N/mm² 級、板厚 65 mm 以上というこれまでにない高強度、厚肉の鋼材が用いられている。一般に、鋼の高強度化、厚肉化を達成するためには C 量の増加や合金元素の添加を行う場合が多いが、これらは C_{eq} を増加させて HAZ 靱性を劣化させるため、その量は必要最小限とすることが望ましい。Fig. 4 に鋼板の C_{eq} と 1 パスでの溶接入熱、および溶接後に生成する HAZ のマイクロ組織の関係を模式的に示す。一般の船

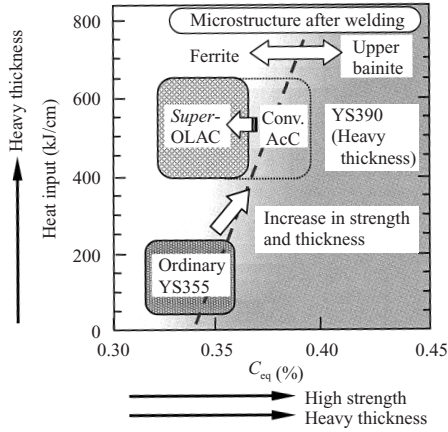


Fig. 4 Schematic diagram of the relationship between C_{eq} , heat input, and microstructure after welding

舶に用いられる薄物の YS355 N/mm² 級鋼では C_{eq} が低く溶接入熱が小さいため 1 パス溶接後にフェライト主体の組織となる。これに対し、コンテナ船に適用される極厚の YS390 N/mm² 級鋼では加速冷却を適用しても強度と板厚の増加に対応して C_{eq} が 0.40% 近くまで増加するため、溶接後に低靱性の上部ベイナイトが生成する。この問題を軽減するため、「JFE EWEL」では、理論限界相当の冷却速度を実現可能な Super-OLAC¹¹⁾ の適用により C_{eq} の増加を極限まで抑制した高強度化技術を基盤に、HAZ の上部ベイナイトの生成を極力抑制し、靱性の大幅な向上を図っている。

以上に「JFE EWEL」の 3 つの技術要素を述べたが、各種厚板への適用にあたっては、板厚、要求される母材特性や実際に適用される溶接方法などを考慮して各技術要素を適正に組み合わせ、母材・継手性能の最適化を行っている。

3. 造船用厚板への適用例

大入熱溶接 HAZ 靱性向上技術「JFE EWEL」の造船用各種鋼板への適用例を以下に紹介する。

Table 1 に「JFE EWEL」を適用したコンテナ船用 YS390 N/mm² 級鋼の化学組成および母材特性の例を示す。HAZ の粒径制御および粒内組織制御のために、Ti, B, Ca を添加している。

Super-OLAC を活用した最適成分設計により、板厚 80 mm という極厚材にもかかわらず C_{eq} ($C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$) が 0.36 mass% 以下で十分な母材強度を有している。この鋼板に 2 電極 EGW で 1 パス施工を行った。溶接継手の作製条件を Table 2 に継手のマクロ写真を Photo 3 に、継手の特性を Fig. 5 に示す。入熱 600 kJ/cm 以上の超大入熱溶接にもかかわらず -20 はもとより、母材と同じ試験温度である -40 においても非常に良好な溶接継手特性を有している。

また、優れた低温靱性が要求される LPG 船用の低温用鋼や F 級鋼についても、本技術を適用して開発・実用化を行っている。これらの鋼材の溶接においては、厚物材で

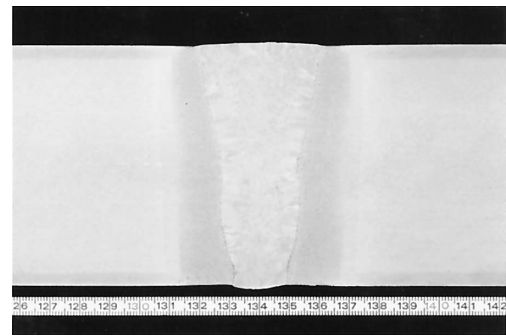


Photo 3 Macrostructure of YS390 N/mm² class welded joint (Electro-gas arc welding, heat input = 680 kJ/cm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of YS390 N/mm² class plate

Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)							Tensile property (Transverse)			Charpy impact property (Longitudinal)
	C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq} *	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	\sqrt{E}_{-40} (J)
80	0.08	0.22	1.54	0.007	0.001	Ti, B, Ca, etc.	0.36	411	532	28	265

* $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

Table 2 Welding conditions for YS390 N/mm² class plate

Thickness (mm)	Welding method	Edge preparation	Welding consumable	Pass	Electrode	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
80	EGW		DWS-50GTF DWS-50GTR KL-4GT (Kobe Steel, Ltd.)	1	Face side	400	42	2.9	680
					Root side	400	40		

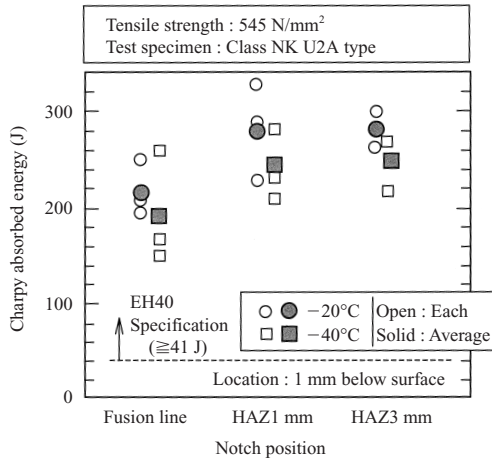


Fig.5 Mechanical properties of electro-gas arc welded joint of YS390 N/mm² class plate

あるコンテナ船用 YS390 N/mm² 級鋼に比べ入熱量は小さいものの、片面サブマージーク溶接や EGW で 1 パス施工をする場合などは板厚に対する相当入熱が大きく、かつ低温での良好な靱性も要求されるため、大入熱溶接への対

策が必要である。Table 3 に「JFE EWEL」を適用した LPG 船用の YS355 N/mm² 級低温用鋼板（板厚 17.5 mm）の化学組成および母材特性をそれぞれ示す。本鋼板は低温靱性を含め、低温用鋼としての十分な母材特性を有している。この鋼板に入熱 108 kJ/cm で片面サブマージーク溶接を行った。この時の溶接条件を Table 4 に、作製した継手の特性を Table 5 に示す。本継手は十分な継手強度と低温での優れた継手靱性を有している。

Table 6 に板厚 50 mm の船体用 YS355 N/mm² F 級鋼板の化学組成および母材の機械的特性を示す。この鋼板に高能率な極厚鋼板のサブマージーク溶接法である KX 法¹²⁾にて両面 1 パス溶接を行った時の溶接条件を Table 7 に示す。KX 法は深溶け込みを得るため高電流での溶接であり、1 パスあたり約 130 kJ/cm の大入熱溶接となっている。作製した継手の -40 における HAZ 靱性を Fig. 6 に示す。「JFE EWEL」を用いて開発した鋼板はばらつきを含め FH36 の要求値に対して十分に余裕のある良好な継手特性を有していることが分かる。

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of YS355 N/mm² class plate for low temperature service

Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)							Tensile property (Transverse)			Charpy impact energy (Transverse)
	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq} *	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	$\sqrt{E_{-55}}$ (J)
17.5	0.08	0.19	1.56	0.013	0.002	Ti, Ca, etc.	0.34	426	522	22	351

* C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5

Table 4 Welding conditions of YS355 N/mm² class plate for low temperature service

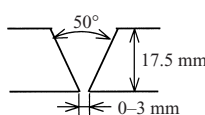
Thickness (mm)	Welding method	Edge preparation	Welding consumable	Pass	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
17.5	1 side SAW (FAB)		US255 PFI-50LT RR-3 FAB-1 (Kobe Steel, Ltd.)	1	950	38	20	108

Table 5 Mechanical properties of welded joint of YS355 N/mm² class plate for low temperature service

Thickness (mm)	Welding method	Heat input (kJ/cm)	Tensile strength* (N/mm ²)	Charpy impact energy $\sqrt{E_{-55}}$ (J)**			
				Fusion line	HAZ1 mm	HAZ3 mm	HAZ5 mm
17.5	1 side SAW (FAB)	108	523	84	100	262	301

* Test specimen : Class NK U2A type

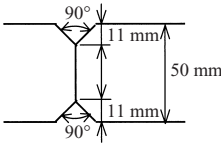
** Location of specimen : 1 mm below surface

Table 6 Chemical composition and mechanical properties of YS355 N/mm² class F grade plate

Thickness (mm)	Chemical composition (mass%)							Tensile property (Transverse)			Charpy impact energy (Transverse)
	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq} *	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	$\sqrt{E_{-60}}$ (J)
50	0.07	0.19	1.56	0.008	0.002	Ti, Ca, etc.	0.36	399	546	30	292

* C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5

Table 7 Welding conditions for YS355 N/mm² class F grade plate

Thickness (mm)	Welding method	Edge preparation	Welding consumable	Pass	Electrode	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
50	Double side SAW (KX)		KW-101B KB-110 (JFE Steel)	1	L T	1 600 1 200	35 45	50	132
				2	L T	1 700 1 300	35 45	55	129

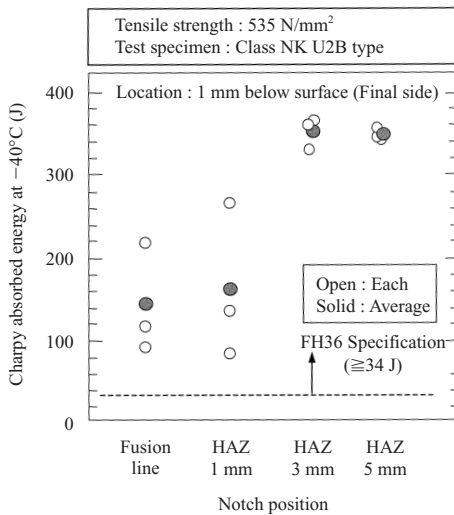


Fig. 6 Mechanical properties of arc welded joint of YS355 N/mm² class F grade plate

4. おわりに

新たな大入熱溶接 HAZ 靱性向上技術「JFE EWEL」、および本技術を用いて開発した各種の造船用厚板について概要を紹介した。「JFE EWEL」を適用した鋼板は大型コンテナ船や LPG 船などに数多く採用されており、造船用厚板としてこれまでに 4 万トン以上の製造実績を有している。JFE スチールでは、今後ますます活況を呈する造船分野において、母材特性と高能率溶接時の継手性能に優れた大入熱溶接用厚鋼板がさらにご採用いただけるよう努めるとともに、建築、原油タンク、ラインパイプ、海洋構造物などの各分野への「JFE EWEL」の適用を進めている。

参考文献

1. 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明. までりあ vol. 43, no. 3, 2004, p. 232-234
2. 拜田治, 江見俊彦, 河西悟郎, 内藤雅夫, 森脇三郎. 鉄と鋼 vol. 66, 1980, p. 354-362
3. 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研. 鉄と鋼. vol. 61, no. 11 1975, p. 2589-2603
4. 笠松裕, 高嶋修嗣, 細谷隆司. 鉄と鋼. vol. 65, no. 8, 1979 p. 1232-1241.
5. 中西睦夫, 小溝裕一, 瀬田一郎. 溶接学会誌. vol. 52, no. 2, 1983 p. 117-124.
6. 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. vol. 18, no. 4, 1986, p. 295-300
7. 児島明彦, 清瀬明人, 皆川昌紀, 平野篤志, 吉井健一, 中島隆雄 星野学, 上島良之. 材料とプロセス. vol. 16, 2003, p. 360-363
8. 船越督巳, 田中智夫, 上田修三, 石川正明, 腰塚典明, 小林邦彦 鉄と鋼. vol. 63, no. 2, 1977, p. 303-312
9. 山本広一, 長谷川俊永, 高村仁一. 鉄と鋼. vol. 79, no. 10, 1993 p. 1169-1175.
10. 木谷靖, 池田倫正, 大井健次, 一宮克行. 溶接学会全国大会講演概要 no. 72, 2003, p. 108-109
11. 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 57-62
12. 赤秀公造, 浮辺輝夫, 阿草一男, 坪井潤一郎. 川崎製鉄技報 vol. 10, no. 1, 1978, p. 34-47



鈴木 伸一



一宮 克行



秋田 俊和