

大型コンテナ船用板厚 100 mm YP460 N/mm² 級高アレスト 鋼板 ARRESTEX[®] の開発

Development of t100 mm-YP460 N/mm² Class Steel Plate with Excellent Brittle Crack Arrestability (ARRESTEX[™]) for Large Container Ships

竹内 佳子 TAKEUCHI Yoshiko JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員【現 知的財産部 知財技術室
主任部員 (副課長)】
半田 恒久 HANDA Tsunehisa JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
村上 葵 MURAKAMI Aoi JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 鋼材商品技術部 厚板室 主任部員 (副課長)

要旨

大型コンテナ船向けの高アレスト鋼板 ARRESTEX[®] について、合金成分と制御圧延条件の最適化および Super-OLAC[®] (On-Line Accelerated Cooling) による制御冷却技術の適用により、板厚 100 mm の極厚鋼板においても YP460 N/mm² をこえる高強度と高アレスト特性との両立を達成した。開発鋼は、ベイナイト組織の微細化による靱性向上に加えて、特定の集合組織を積極的に発達させることによりアレスト特性の向上を図り、船体設計温度 (−10°C) での脆性き裂伝播停止靱性 (Kca) の目標である 8 000 N/mm^{3/2} を十分に満足するアレスト特性を示した。

Abstract:

YP460 N/mm² class steel with a thickness of 100 mm, which has excellent brittle crack arrestability (ARRESTEX[™]) for large container ships, has been developed. For the developed steel, optimization of alloy composition, controlled rolling conditions and controlled cooling technology using Super-OLAC[™] (On-Line Accelerated Cooling) were applied. The developed steel shows excellent brittle crack arrestability by controlling texture, in addition to improving toughness by refining crystal grains. The developed steel with a thickness of 100 mm sufficiently satisfies the target value for brittle crack arrest toughness (Kca_(−10°C) ≥ 8 000 N/mm^{3/2}) at the hull design temperature.

1. はじめに

近年、中国をはじめとするアジア諸国の経済発展に伴い、海上輸送コンテナの取扱い数は急速に増加している¹⁾。また、コンテナ船を利用した海上物流に対し、地球温暖化の原因となる排出ガス規制や輸送効率の更なる向上などへの対応が求められている。これらの要求に応えるためコンテナ船のサイズは年々大型化しており、2 000 年頃のコンテナ船は最大積載数が 8 000 TEU (TEU: Twenty-foot Equivalent Unit, 20 フィートコンテナ換算) クラスであったが、最近では 20 000 TEU をこえる超大型コンテナ船も登場している。コンテナ船の大型化に伴い、船側上弦部に使用される鋼板は YP355 N/mm² 級から YP390 N/mm² 級や YP460 N/mm² 級へと高強度化し、最新の超大型コンテナ船のハッチサイドコーミングには板厚 100 mm の YP460 N/mm² 級鋼が使用されている。

一方、船舶の安全性確保は最重要課題であり、船体に使用される鋼材には良好な脆性破壊発生特性が求められると

ともに、万一脆性き裂が発生した場合にも船体の破壊を防止するため、高いき裂伝播停止性能が求められる。板厚が 35 mm 程度の比較的薄い鋼板を使用した従来のコンテナ船は、仮に溶接部で脆性破壊が発生した場合にも残留応力などの影響によりき裂は母材側にそれるため、鋼板に E 級鋼 (−40°C 仕様鋼) を適用することで、母材で脆性き裂を停止できるとされていた^{2,3)}。しかし、船体の大型化に伴い板厚が 70 mm 程度まで拡大した場合は、溶接線に沿って脆性き裂が伝播し、最悪の場合には船体に致命的損傷を発生させる可能性がある問題提起され⁴⁾、コンテナ船の更なる大型化への課題となっていた。

これらの背景から、国際船級協会連合 (IACS; International Association of Classification Societies) により、2014 年 1 月以降に建造契約するコンテナ船に対し、船体上部に板厚 50 mm 超えの鋼板を用いる場合は、万一脆性き裂が発生した際にそのき裂を停止させる設計を行うことが義務づけられた^{5,6)}。具体的には、図 1 に示されるハッチサイドコーミング部とデッキプレート部の溶接線を 300 mm 以上ずらして溶接を行うか、あるいはアレストホールを設けることで溶接部を構造的に不連続とするとともに、脆性き裂伝

播停止靱性値 (Kca 値) が、-10℃において 6 000 N/mm^{3/2} 以上の脆性き裂伝播停止性能に優れる鋼板 (高アレスト鋼板) を使用することとなった。さらに 2019 年 12 月には、これまで板厚 80 mm までしか規定されていなかった Kca 値が、板厚 100 mm まで拡大された⁷⁾。板厚 80 mm 超えから 100 mm までのハッチサイドコーミング部については、-10℃における Kca 値 (Kca_(-10℃)) が 8 000 N/mm^{3/2} 以上の鋼板を用いることとなり、板厚の拡大によりこれまでより高いアレスト特性が要求される。この規則は 2021 年 1 月以降に建造契約する大型コンテナ船に対して適用される予定である。

鋼材のアレスト特性向上に関しては、おもに鋼材の結晶粒微細化による特性向上が検討されており、多くの報告がある⁸⁻¹⁰⁾。JFE スチールでは、従来の結晶粒微細化による向上に加えて、これまで厚板分野ではほとんど注目されてこなかった集合組織制御技術に着目しアレスト特性を格段に向上させる技術を開発した¹¹⁾。本報告では、超大型コンテナ船用 YP460 N/mm² 級鋼板 ARRESTEX[®] について、前報¹²⁾ で報告した技術をさらに製造条件を厳密に管理することで、100 mm までの板厚拡大に成功したので、その特性を報告する。

2. アレスト特性の向上手法

これまで、アレスト特性を向上させるうえで TMCP (Thermo Mechanical Control Process) を活用した結晶粒微細化による低温靱性の改善が非常に有効であるとされてきた。しかし、板厚が 70 mm 程度まで拡大した場合には熱間圧延による鋼板内部の結晶粒の微細化効果が不十分となり、要求されるアレスト特性を安定的に達成することが困難となることから、従来技術に代わる新たな組織制御指針が必要となった。そこで当社は、従来の結晶粒微細化に加え、これまで厚板分野では注目されていなかった集合組織制御技

術に着目し、高いアレスト特性を有する極厚材の鋼材開発に取り組んだ。

集合組織制御とアレスト特性の考え方について説明する。結晶構造が bcc である鋼組織の場合、脆性き裂はへき開面である {100} 面に沿って伝播する。結晶方位がランダムである場合、発生した脆性き裂は図 2 (a) のように主応力方向と垂直方向に伝播する。一方開発鋼では、板厚中央部の集合組織を制御することで、脆性き裂が図 2 (b) のように主応力方向に対して 45 度方向に分岐進展し、き裂伝播抵抗を増大させることができる。集合組織強度がアレスト特性に及ぼす影響としては、半田らが脆性き裂伝播停止温度 (T_{K(6000)}; Kca 値が 6 000 N/mm^{3/2} となる温度) に対するシャルピー遷移温度 (vTrs) と集合組織の寄与度について求めている。脆性き裂伝播停止温度 (T_{K(6000)}) は、Y 指数と呼ばれる下式 (1) とよい相関を示し、Y 指数の絶対値が大きいほど脆性き裂伝播停止性能が優れることを明らかにした¹³⁾。

$$Y = vTrs - 12 \times I_{\{100\}} - 22 \times I_{\{211\}} \dots \dots \dots (1)$$

I_{100} : 供試鋼板と標準試料の {100} 面強度比

I_{211} : 供試鋼板と標準試料の {211} 面強度比

板厚 100 mm では、結晶粒微細化効果による靱性向上でのアレスト特性の向上はより一層困難となるため、上記の式にのっとり板厚中央部に導入される歪量を増大させ、1/2t 部の {100} 面および {211} 面を向上させるよう集合組織分布を制御する必要がある。また津山らは、通常鋼板の脆性亀裂停止部はサムネイル状の破面形態を示すのに対し、鋼板の 1/4t 部から 1/2t 部にかけて {100} 面や {211} 面を発達させた鋼板ではスプリットネイル状の破面形態を示し、またスプリットネイル状の破面形態ではサムネイル状の破面状態に比べて亀裂進展にともなう亀裂先端の応力拡大係数の低下が大きくなることを示した¹⁴⁾。これらの検討結果は、特定の集合組織を活用することで従来達成できなかった高いレベルのアレスト特性が得られる可能性があることを示唆している。

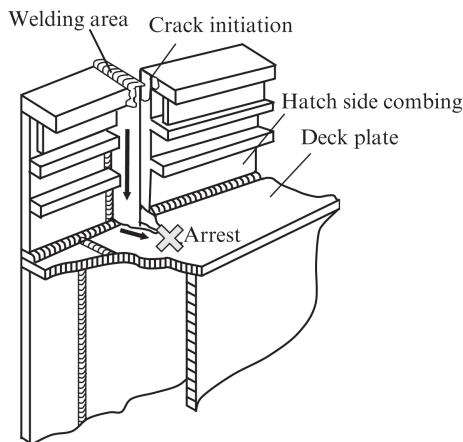


図 1 コンテナ船上部構造とアレスト設計の考え方

Fig. 1 Container ship superstructure and concept of brittle crack arrest design

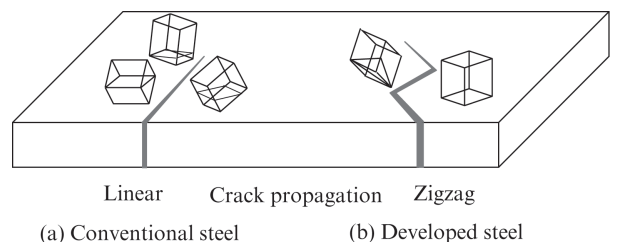


図 2 集合組織制御によるアレスト性向上の考え方

Fig. 2 Concept of improving brittle crack arrestability by texture control

表 1 開発鋼の化学成分

Table 1 Chemical composition of developed steel plate

Steel	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq} (IIW)	P _{CM}
Developed	0.06	0.15	1.93	0.004	0.001	Cu, Ni, Cr, Nb, Ti	0.47	0.20
Specification of EH47-BCA (IACS UR W31)	≤0.18	≤0.55	0.90-2.00	≤0.020	≤0.020		≤0.55	≤0.24

C_{eq} (IIW) = C, Mn/6, 1/5 (Cr, Mo, V), 1/15 (Ni, Cu)
 P_{CM} = C, Si/30, Mn/20, Cu/20, Ni/60, Cr/20, Mo/15, V/10, 5B

3. 開発鋼の母材特性

3.1 化学組成および製造方法

開発鋼の化学成分を表 1 に示す。成分設計の方針として、造船所での溶接施工性を考慮し、溶接割れ感受性指数(P_{CM})が低値となるように設計した。また比較として、2019 年 12 月に改訂された IACS 統一規則の UR-W31 の値を載せた。改訂された規格では新たに成分ごとに上限・下限の範囲が規定されたが、本開発鋼ではすべての成分で規格値を満足している。

連続鋳造で得られたスラブを用いて、板厚 100 mm まで熱間圧延を行った。板厚中央部に目標とする組織を得るための手段として、厚鋼板の代表的な製造プロセスである TMCP で加熱温度・圧延条件を、また圧延後は Super-OLAC[®](On-Line Accelerated Cooling) で冷却条件を、それぞれ最適な範囲で厳密に制御した。

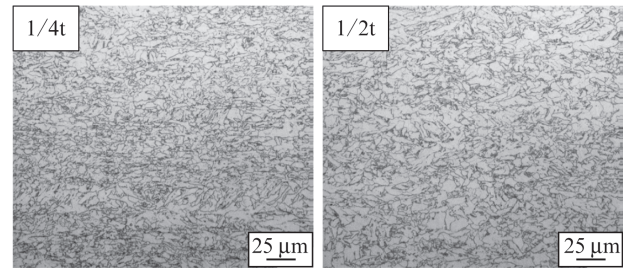


写真 1 開発鋼のマイクロ組織

Photo 1 Microstructures of developed steel plate

3.2 機械的特性

開発鋼のマイクロ組織は、写真 1 に示すとおりベイナイト単相組織が得られている。集合組織制御を活用した開発鋼および従来の結晶粒微細化技術のみを適用した比較鋼(板厚 70 mm)の引張試験結果を表 2 に、シャルピー衝撃試験の結果を表 3 に示す。開発鋼は強度、靱性とも、いずれの試験位置においても YP460 N/mm² の E 級鋼の目標特性を十

表 2 開発鋼の引張特性

Table 2 Tensile properties of developed steel plate

Steel	Thickness (mm)	Position	Direction	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI (%)
Developed	100	1/4t	C	483	594	26
		1/2t	C	472	585	24
Conventional	70	1/4t	C	478	582	24
Specification of EH47 (IACS UR W31)				≥460	570~720	≥17

表 3 開発鋼のシャルピー衝撃特性

Table 3 Charpy impact properties of developed steel plate

Steel	Thickness (mm)	Position	Direction	vE-40 (J)	vTrs (°C)	Y index
Developed	100	1/2t	L	293	-79	-147
Conventional	70	1/2t	L	298	-71	-118
Specification of EH47 (IACS UR W31)				≥75		

Y index = vTrs - 12 × I₍₂₀₀₎ - I₍₂₁₁₎¹³⁾

表 4 NRL 落重試験結果

Table 4 Results of NRL drop weight test

Steel	Position	Direction	Drop weight energy (N·m)	NDTT (°C)
Developed	surface	L	402	-80
	1/4t	L	402	-80
	1/2t	L	402	-70

分に満足している。1/2t 部においては、靱性値のみでは同程度であるが、集合組織寄与分を加味した Y 指数の絶対値においては、開発鋼の方が大きい値を示している。

また、開発鋼の落重試験の結果を表 4 に示す。試験は ASTM E208 に準拠して実施し、試験片形状は P-3 タイプの試験片とした。鋼板の表層、1/4t 位置および 1/2t 位置から採取し試験を実施し、無延性遷移温度 (NDTT) を求めた。表層位置および 1/4t 位置で -80°C、1/2t 位置では -70°C と良好な結果が得られた。

表 5 に母材の CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験条件および試験結果を示す。試験は ISO12135 に準拠して実施し、試験片形状は全厚の B×B 試験片とした。試験温度は -10°C とし、同一条件で 3 本試験を行った。試験結果から、板厚 100 mm の極厚材においても母材の CTOD 試験では低値が発生せず、良好な結果が得られた。

3.3 溶接性

開発鋼は、造船所での溶接施工性を考慮して溶接割れ感受性指数 (P_{CM}) が低値となるように設計したため、予熱フ

表 5 母材 CTOD 試験結果

Table 5 CTOD test results of base metal

Steel	Specimen size	Direction	Test temperature (°C)	CTOD (mm)
Developed	B×B (B = 100 mm)	L	-10	0.89 (δ_u^M)
				1.59 (δ_u^M)
				2.81 (δ_u^M)

表 6 y 形溶接割れ試験結果

Table 6 y-groove weld cracking test results

Welding atmosphere	Crack ratio (%)		
	Surface crack	Root section	Cross section
20°C, RH60%	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
0°C, RH60%	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0

Welding material: LB-62UL (4.0 mmφ), Kobe Steel, Ltd.
Welding condition: 170A-22V-150 mm/min (1.5 kJ/mm)

リー溶接での割れ感受性を評価した。板厚 100 mm の開発鋼を用い、試験温度を 20°C および 0°C、湿度を 60% とし、JIS Z 3158 に従い、溶接入熱 1.5 kJ/mm で y 形溶接割れ試験を行なった。試験結果を表 6 に示す。開発鋼は 0°C においても表面割れ、断面割れ、およびルート部割れは発生せず、優れた耐低温割れ性を有することが分かった。

3.4 アレスト特性

板厚 80 mm をこえる鋼板には、 $K_{Ic(-10^\circ C)} \geq 8000 \text{ N/mm}^{3/2}$ のアレスト特性値が求められる。板厚 70 mm および 100 mm の開発鋼について、温度勾配型の標準 ESO 試験の結果を図 3 に示す。比較のため、結晶粒微細化技術のみを用いた板厚 70 mm の鋼板の試験結果もあわせて記載する。従来鋼では、板厚 70 mm においても -10°C における K_{Ic} 値は

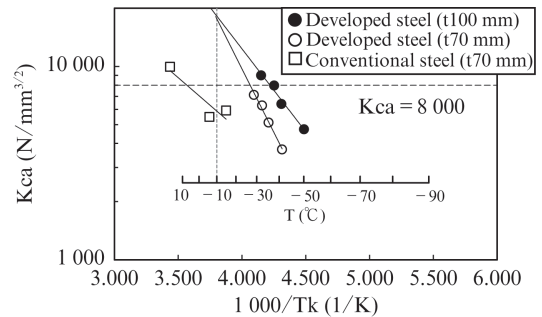


図 3 温度勾配型標準 ESO 試験結果

Fig. 3 Results of temperature gradient type standard ESO test

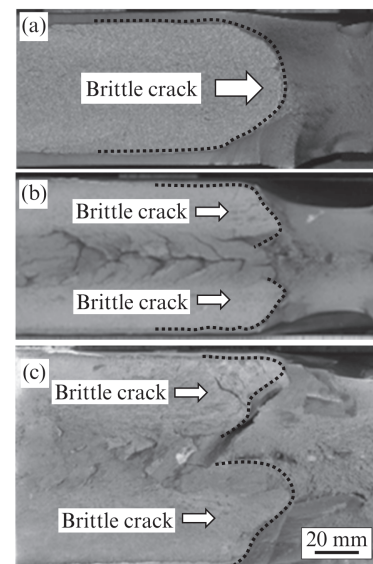


写真 2 温度勾配型標準 ESO 試験後の破面

(a) 従来鋼 (板厚 70 mm) (b) 開発鋼 (板厚 70 mm)
(c) 開発鋼 (板厚 100 mm)

Photo 2 Comparison of fracture appearance of temperature gradient ESO specimens

(a) Conventional steel (t70 mm) (b) Developed steel (t70 mm)
(c) Developed steel (t100 mm)

6 000 N/mm^{3/2} 程度であり、目標の $K_{ca(-10^{\circ}C)} \geq 8 000 \text{ N/mm}^{3/2}$ は達成できない。しかし、集合組織制御を活用した開発鋼では、十分に目標を達成する値が得られた。写真 2 に、標準 ESSO 試験後の破面の写真を示す。従来鋼では (a) に示すとおり一般的なサムネイル状の破面を呈しているのに対し、開発鋼では、板厚中央部のき裂伝播抵抗が高くなることにより、(b) に示すとおりスプリットネイル状の破面が得られた。さらに、この破面形態が板厚 100 mm においても維持されている (c)。このことから、板厚 100 mm においても集合組織制御によるアレスト特性向上の効果が十分に発揮されていることが分かる。

従来の結晶粒微細化技術のみを用いた鋼板では、板厚の拡大に伴い K_{ca} 値が低下していき、板厚 70 mm 程度でも 8 000 N/mm^{3/2} を達成することができない。一方で開発鋼は、集合組織制御技術も活用することで、板厚が 70 mm から 100 mm に増加しても高い K_{ca} 値を確保できている。この手法を用いることで、今後板厚がさらに拡大しても、必要 K_{ca} 値を十分に満足した鋼板が得られると考えられる。

4. 開発鋼の溶接継手特性

4.1 溶接条件

開発鋼の多層溶接継手性能を評価した。溶接条件を表 7 に示す。ガスメタルアーク溶接 (GMAW: Gas Metal Arc Welding) およびサブマージアーク溶接 (SAW: Submerged Arc Welding) により継手を作製した。溶接入熱は、それぞれ 1.5 kJ/mm および 5.0 kJ/mm とした。

4.2 継手特性

継手の引張試験およびシャルピー衝撃試験の結果を表 8 に示す。いずれの試験においても目標値を十分に満足する結果が得られた。また、継手の破壊靱性値を評価する CTOD 試験も行った。試験条件および結果を表 9 に示す。参考のため、継手 CTOD 値が規定されている DNV GL 船級の規格値も一緒に記載したが、スペックを十分に満足する良好な結果が得られており、脆性破壊発生特性にも優れた鋼板であることが確認できた。

5. おわりに

従来の結晶粒微細化技術に加え、集合組織制御を正確に実施することで、板厚 100 mm の極厚材でも非常に高いアレスト特性と溶接性を兼ね備えた、YP460 N/mm² 級鋼板 ARRESTEX[®] を開発した。なお、本開発鋼は板厚 100 mm まで開発を完了したが、今後板厚が更に拡大し、求められる K_{ca} 値が高くなった場合においても、必要なアレスト特性を十分に満足した鋼板が製造可能と考えている。

表 7 溶接条件

Table 7 Welding conditions

	GMAW	SAW
Welding material	DW-460L (1.2 mm ϕ) (Kobe Steel, Ltd.)	KW-101B (4.0 mm ϕ) (Kobe Steel, Ltd.)
Shield gas/Flux	CO ₂	KB460 (Kobe Steel, Ltd.)
Groove shape	single bevel groove Groove angle: 35° Gap: 10 mm	single bevel groove Groove angle: 35° Gap: 10 mm
Welding condition	280A-32V-360 mm/min (1.5 kJ/mm)	650A-32V-260 mm/min (5.0 kJ/mm)

表 8 溶接継手の機械的特性

Table 8 Mechanical properties of welded joint

	TS	F.L. vE-20 (J)		
		Surface 2 mm	1/2t	Root 2 mm
GMAW	615	136	99	194
SAW	647	298	299	255
Specification of EH47 (IACS UR W31)	570~720	≥ 64		

表 9 溶接継手の CTOD 試験結果

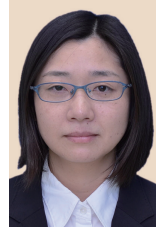
Table 9 CTOD test results of welded joint

	GMAW	SAW
Heat input (kJ/mm)	1.5	5.0
Specimen size	B × B (B = 100 mm)	B × B (B = 100 mm)
Noch position	CG-HAZ	CG-HAZ
Test temperature (°C)	-10	-10
CTOD (mm)	0.47 (δ_u^M) 0.90 (δ_u^M) 0.93 (δ_u^M)	0.44 (δ_u^M) 0.61 (δ_u^M) 0.82 (δ_u^M)
Specification of EH47-BCACOD (DNV-GL)	min ≥ 0.18 , ave ≥ 0.20	

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局. 国際コンテナ戦略港湾制作推進委員会 第 7 回資料 2-1. 2016.
- 2) 社団法人 日本造船研究協会 第 147 研究部会. 日本造船研究協会報告. 1978, no. 87.
- 3) 社団法人 日本造船研究協会 第 193 研究部会. 日本造船研究協会報告. 1985, no. 100.
- 4) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩. 超大型コンテナ船の開発: 新しい高強度極厚鋼板の実用. KANRIN. 2005, no. 3, p. 70-76.
- 5) 国際船級協会連合統一規則 UR S33 Rev. 1. 2015.
- 6) 国際船級協会連合統一規則 UR W31 Rev. 1. 2015.
- 7) 国際船級協会連合統一規則 UR W31 Rev. 2. 2019.
- 8) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 栗飯原周二. 表層超細粒鋼の脆性き裂伝播停止特性 (その 1). 日本造船学会論文集. 1995, no. 177, p. 259-267.
- 9) 金子雅人, 谷徳孝. 大形コンテナ船向け大入熱溶接用高アレスト鋼板

- の特性. R&D 神戸製鋼技報. 2011, no. 61, p. 2-5.
- 10) 白幡浩幸, 大川鉄平, 中島清孝, 柳田和寿, 井上健裕, 稲見彰則, 石田浩司, 皆川昌紀, 船津裕二. 脆性亀裂アレスト靱性に優れた大型コンテナ船用極厚 YP460 N/mm² 級鋼. 新日鉄住金技報. 2014, no. 400, p. 26-30.
- 11) Hase, K.; Ichimiya, K.; Ueda, K.; Handa T.; Eto, T.; Aoki, M. Texture-controlled YP460 N/mm² Class Heavy Thick Plate for Ultra-large Container Carriers. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2019, vol. 29, no. 3, p. 315-321.
- 12) 長谷和邦, 半田恒久, 衛藤太紀. 脆性亀裂伝播停止性能に優れたコンテナ船用極厚 YP460 N/mm² 級鋼. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 13-18.
- 13) 半田恒久, 田川哲哉, 南二三吉. 集合組織を考慮した脆性き裂伝播停止温度とシャルピー遷移温度の相関. 鉄と鋼. 2012, vol. 98, no. 1, p. 32-38.
- 14) 津山青史, 竹内佳子, 西村公宏, 半田恒久. 造船用厚肉鋼材の板厚方向組織制御と脆性き裂伝播停止挙動. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 2, p. 188-195.



竹内 佳子



半田 恒久



村上 葵