

(解説)

# 低温海域向けLNG船用FH355MPa級鋼板

## FH355MPa Class Steel Plate for Low-temperature Use LNG Carriers



川野晴弥\*  
Haruya Kawano



岡野重雄\*  
Shigeo Okano



小林洋一郎\*  
Yoichiro Kobayashi



岡崎善臣\*\*  
Yoshitomi Okazaki



畑野 等\*\*  
Hitoshi Hatano

Demand for natural gas, with its clean energy advantages, has been increasing. In relation to natural gas trends, Kobe Steel has developed a new kind of steel plate for hull structures in low-temperature use LNG carriers. The new FH355 plate steel is 50mm thick, and has a high HAZ toughness despite large heat input SEGARC welding (40 kJ/mm). HAZ toughness was improved by low-C content levels and the addition of B. This new steel will contribute to the increased efficiency of LNG carriers.

まえがき = 天然ガスはメタンを主成分とするガスであり、石油にくらべ単位発熱量あたりのSO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>の排出量が少ないことが特長である。このため天然ガスの貿易量は環境汚染防止の観点から増え続け、2000年には全世界で98百万トンに達しており、その中で日本には約60%にあたる54百万トンが輸入されている。さらに1997年の気候変動枠組条約第3回締約国会議(京都會議COP3)を受けて、環境に優しいクリーンエネルギーとして需要の増加が見込まれる。また、今後欧州や米国への貿易量が急激に増加することが予想されており、天然ガスの輸送航路も多様化していくものと考えられる。

天然ガスの輸送方法としては、ガスの状態のままパイプラインで輸送する方法と、約-160℃まで冷却して液化天然ガス(LNG)としてLNG船で輸送する方法がある。後者のLNG船に使用される材料については、LNGタンクにはAl合金やインバ鋼などが使用されるが、船体には原油タンカやコンテナ船と同様の船体構造用鋼が使用される。通常使用されるのはEH355(-40℃での靱性保証)以下の鋼板であるが、アラスカ沖などの低温海域を航行するLNG船にはFH355鋼板(-60℃での靱性保証)が使用されることがある。また、これまで135,000m<sup>3</sup>型LNG船が主流であったが、輸送コスト削減の点からLNG船の大型化が検討され<sup>1),2)</sup>、最近では145,000m<sup>3</sup>型が建造されるに至っており、これに伴い使用される鋼板も厚肉化している。

このように従来にくらべて低温靱性が必要であり、かつ厚肉の鋼板においても、船体建造の効率を上げるために、鋼板には大入熱溶接の適用が求められる。しかし、大入熱溶接を適用すると、その溶接熱影響部(HAZ)の冷却速度は遅くなり、従来の厚鋼板製造技術では低温でのHAZ靱性を満足することは容易でなかった。当社ではこれまでにコンテナ船用厚肉EH355, EH390MPa級鋼板を開発してきており<sup>3)-5)</sup>、これらをベースに大入熱溶接が可能なFH355MPa級鋼板を開発した。本報では、この鋼板の開発の考え方と特性を紹介する。

### 1. 開発目標

表1に開発目標を示す。板厚は50mmまでを開発目標とした。母材特性はFH355の船級規則どおりであり、EH355にくらべて20℃低温の-60℃で34J以上の衝撃値が必要である。適用する溶接としては、LNG船の建造において、シャーストレイキやハッチコーミングに適用される立向1パス溶接の簡易エレクトロガスアーク溶接(SEGARC法)を想定して、40kJ/mm程度の大入熱を目標とし、F級鋼の継手部の試験温度である-40℃で34J以上の衝撃値を確保することとした。

### 2. 開発の考え方

溶接部のHAZ靱性確保には微細なTiNの分散による結晶粒粗大化の防止が有効であるが<sup>6)</sup>、前述のような大

表1 FH355鋼板の目標特性  
Table 1 Target properties of FH355

Grade	Base metal properties				Properties of welded joints		
	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	√E <sub>-60</sub> (J)	Welding method	Heat input (kJ/mm)	√E <sub>-40</sub> (J)
FH355	50	355	490 ~ 620	34	1 pass SEGARC	40	34
EH355	65	355	490 ~ 620	√E <sub>-40</sub> : 34		50	√E <sub>-20</sub> : 34

\*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\*技術開発本部 材料研究所

入熱溶接においてはこれだけでは十分でない。従来鋼に大入熱溶接を適用すると、HAZ 部は旧オーステナイト粒界に沿って生成する粗大なフェライトと粒内に生成するベイナイト組織から形成され、低温における HAZ 靱性を確保することが困難であった。そこで、フェライトの生成を促進するとともに、靱性劣化因子である島状マルテンサイトやパーライトなどの第二相組織分率を低減するための手段として、炭素 (C) 量を低減することとした。さらに、ボロン (B) を添加することで旧オーステナイト粒界のフェライト生成を抑制し、粒内のフェライト生成を促進し<sup>7)</sup>、フェライト組織を均一微細化することを狙った。ボロン添加は、大入熱 HAZ 部の組織改善だけでなく、低炭素化することによって生じる母材強度の低下を補うことも念頭に置いたものである。

しかし、このような手段を用いても従来の製造方法では強度低下を招くため、TMCP (Thermo Mechanical Control Process) における冷却を最大限に活用し、目標の母材強度を確保できるプロセスを実用化した。その際、冷却の不均一分布に起因した残留応力による条切断時の曲がりが発生するといった問題についても考慮し、残留応力分布の均一化を図った。

また、 $-60$  での母材靱性を確保のため加熱・圧延・冷却に至るプロセスを厳格に管理することとした。

### 3. HAZ 靱性改善の検討

適正成分を明確にするために、小型溶製により表 2 に示す成分を調査した。供試鋼 A は比較鋼としてコンテナ船用厚肉 EH355 の成分とした。

ボロン量が母材強度に及ぼす影響について、熱間加工再現試験装置を用いて実機製造と同等の履歴を与えた各成分の硬さ測定結果を図 1 に示す。この結果から、ボロン添加量の増加にともない母材強度が高くなるのがわかる。低炭素 (0.05%) ベースで従来鋼と同程度の母材強度を確保するには、10ppm 以上のボロン添加で実現できることが確認できた。

溶接再現熱サイクル処理を施したのものについてシャルピ衝撃試験 ( $-60$ ) を行い、大入熱 HAZ 靱性を評価した。溶接再現熱サイクル条件は、最高加熱温度を  $1350 \times 5s$  とし、 $800$  から  $500$  までの冷却時間 ( $T_c$ ) を  $320sec$  (入熱  $40kJ/mm$  相当) とした。低炭素 (0.05%) をベースにボロン量が入熱 HAZ 靱性に及ぼす影響を従来鋼と比較して図 2 に示す。従来鋼 A は非常に低い靱性値であるが、低炭素化した供試鋼は、いずれも大幅に靱性が改善されていることがわかる。また、10ppm 程度のボロン添加により衝撃値がさらに改善されるが、それ以上では靱性は劣化することがわかる。溶接再現熱サイクル処理材のミクロ組織を写真 1 に示す。従来鋼 A に比べ、低炭素化した供試鋼 B はフェライトが促進されベイナイト組織が低減していることがわかる。また、10ppm 程度のボロン添加により、フェライト組織が微細化されている。これは旧オーステナイト粒界から生成するフェライトが抑制され、粒内からのフェライト生成が促進されたためと考えられる。しかし、それ以上添加した場合

表 2 試験鋼板の化学成分

Table 2	Chemical compositions of tested steel plates (wt%)						
	C	Si	Mn	Nb	Ti	B	$C_{eq}^{*1)}$
A	0.08	0.17	1.59	0.020	0.012	0	0.35
B	0.05	0.16	1.59	0.019	0.012	0	0.32
C	0.05	0.17	1.59	0.020	0.013	0.0010	0.32
D	0.05	0.17	1.58	0.021	0.012	0.0027	0.32

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

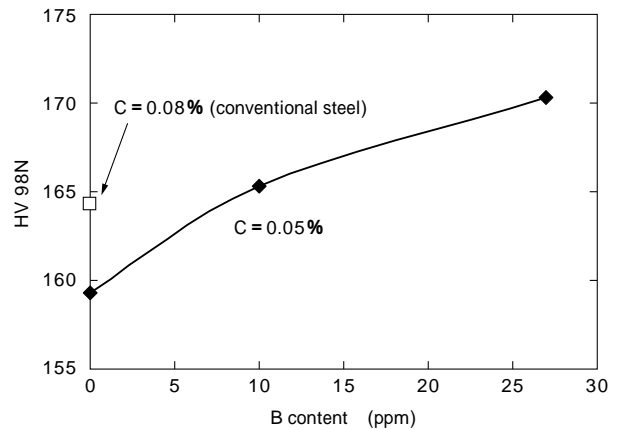


図 1 熱間加工再現試験材の硬さに及ぼす C, B 量の影響

Fig. 1 Effect of C and B content on Vickers hardness of thermo-mechanical simulated specimens

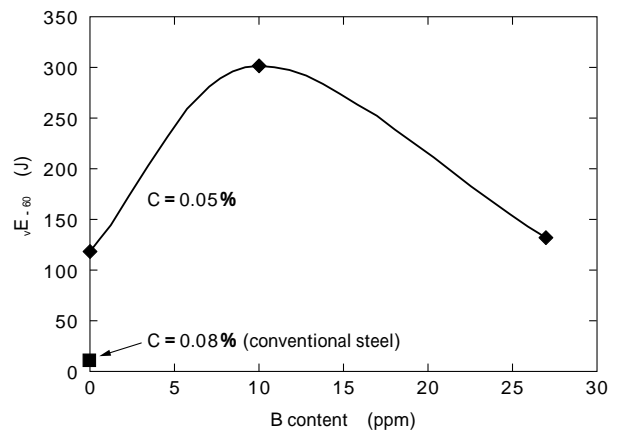


図 2 溶接再現熱サイクル衝撃値に及ぼす C, B 量の影響 ( $T_c = 320s$ )  
Fig. 2 Effect of C and B content on Charpy absorbed energy of simulated HAZ ( $T_c = 320s$ )

は、フェライト生成が抑制され、ベイナイト主体の組織となっている。これらのことから、低炭素化によるベイナイト組織の低減、最適ボロン量の添加によるフェライト組織の均一微細化により、従来鋼に比べ大幅に入熱 HAZ 靱性を改善できることが明らかとなった。

### 4. 開発鋼板の特徴

#### 4.1 母材特性

表 3, 表 4, 図 3 に開発鋼板の化学成分と母材の機械的性質を EH355 鋼板と比較して示す。従来の EH355 にくらべ炭素量を 0.06% と低減し、微量のボロンを添加している。その結果、 $C_{eq}$  は 0.31 と低減している。

機械的特性は目標強度を十分に満足し、靱性も  $\sqrt{E_{-60}}$  が  $350J$  以上と規格値 ( $34J$  以上) を十分に満足するとともに、破面遷移温度は  $-120$  と良好である。

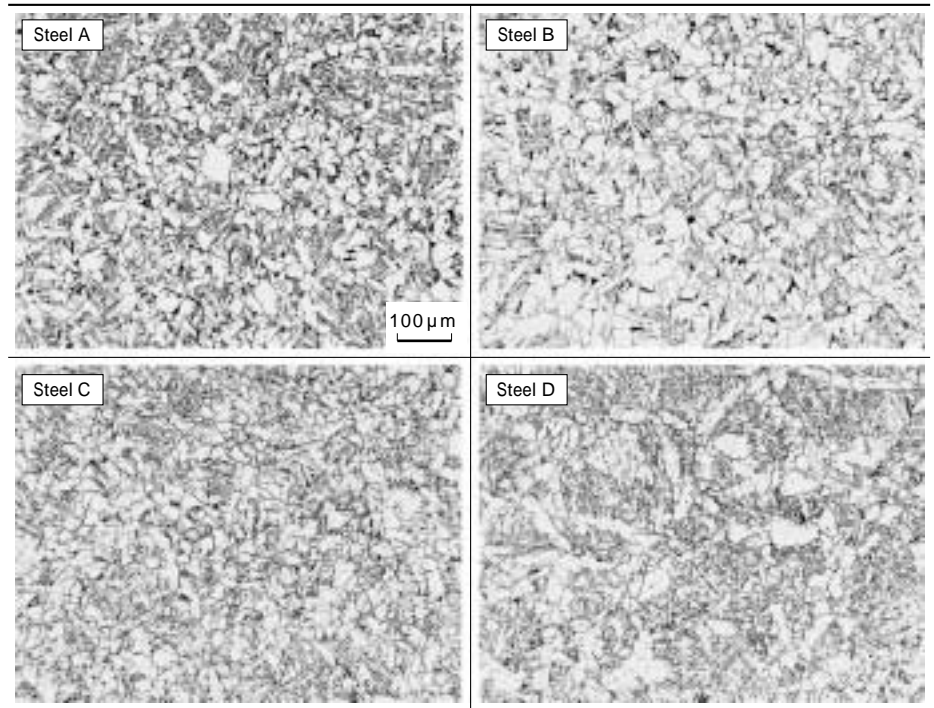


写真 1 溶接再現熱サイクル試験材のマイクロ組織 ( $T_c = 320s$ )  
Photo 1 Microstructure of simulated HAZ ( $T_c = 320s$ )

表 3 開発鋼板の化学成分の一例  
Table 3 Examples of chemical composition of developed steel plates

Grade	Thickness (mm)	Chemical composition (wt%)								
		C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	B	$C_{eq}^{*1)}$
FH355	50	0.06	0.14	1.54	0.006	0.001	0.019	0.012	added	0.31
EH355	50	0.08	0.17	1.50	0.004	0.001	0.021	0.011	-	0.33

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

表 4 開発鋼板の機械的特性の一例  
Table 4 Examples of mechanical property of developed steel plates

Grade	Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	$vE_{-60}$ (J)
FH355	50	438	516	384
EH355	50	478	559	$vE_{-40} : 364$

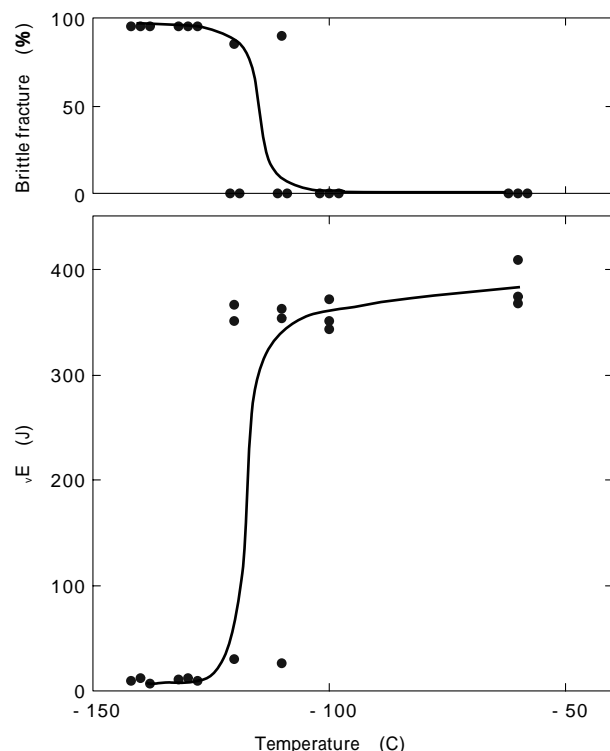


図 3 開発鋼板のシャルビ遷移曲線  
Fig. 3 V-notch Charpy transition curve of developed steel plates

#### 4.2 溶接性

y 型溶接割れ試験を行ったが、常温においても低温割れは全く発生せず、耐溶接割れ性は良好である。

#### 4.3 条切断後の曲がり

幅 1600mm × 長さ 19000mm の鋼板を幅 400mm の条に切断し、切断後の条の曲がり量を計測した。その結果、全長で 6mm 以下の曲がり量であり、使用上全く問題のない程度であることが確認できた。

#### 5. 大入熱溶接継手特性

上記で説明した開発鋼板に対し、大入熱 SEGARC 溶接を行い、継手部の靱性を確認した。表 5 に溶接条件を示す。ここでは実施工における開先精度のパラツキを想定して、ギャップを広めの 10mm として溶接を行った。その結果、溶接入熱は 40kJ/mm 程度の大入熱溶接となっている。

マイクロ組織の一例を写真 2、継手靱性を表 6 に示す。溶接金属を含むすべてのノッチ位置で -40 におけるシャルビ吸収エネルギーは 50J 以上、熱影響部では 100J 以上であり、継手靱性は良好である。

継手硬さ分布を図 4、継手引張特性を表 7 に示す。熱影響部に軟化域があるものの、継手強度は確保されており、使用上問題ない程度といえる。

むすび = クリーンエネルギーとしての天然ガスの需要増加が見込まれる中、低温海域向け LNG 船に使用される鋼板として、溶接入熱 40kJ/mm 程度の大入熱 SEGARC 溶

表 5 SEGARC 溶接条件  
Table 5 Conditions of SEGARC welding

Grade	Thickness (mm)	Groove preparation		Welding consumable	Pass number	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
		Angle of groove	Root gap (mm)						
FH355	50	20 °V	10	Wire : DWS-1LG ( 1.6mm)	1	420	42	27	39.2
EH355	50	20 °V	10	Shielding gas : CO <sub>2</sub>		400	43	29	35.6

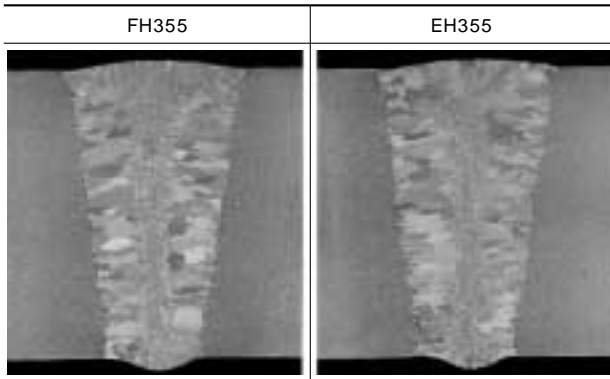


写真 2 SEGARC 溶接継手の断面マクロ組織の一例  
Photo 2 Examples of cross section macrostructure of SEGARC welded joints

表 6 SEGARC 溶接継手部の衝撃試験結果  
Table 6 Impact test results of SEGARC welded joints

Grade	Heat input (kJ/mm)	Position	$\sqrt{E_{-40}}$ (J)		
			Weld metal	Fusion line	FL + 1mm
FH355	39.2	Surface	87	124	185
		t/2	52	221	213
		Back surface	65	102	253
EH355	35.6	Surface	73	29	214
		t/2	57	49	137
		Back surface	64	83	188

接でも十分な継手特性を確保できる FH355 鋼板を開発した。今後はさらに大型化が予想される LNG 船の需要に応えるべく、厚肉化・高強度化を図っていきたいと考える。また将来、圧縮天然ガス (CNG) やメタンハイドレートなどエネルギー資源の輸送形態の多様化が検討されている中、これらに貢献できる鋼材の開発に取り組んでいく。

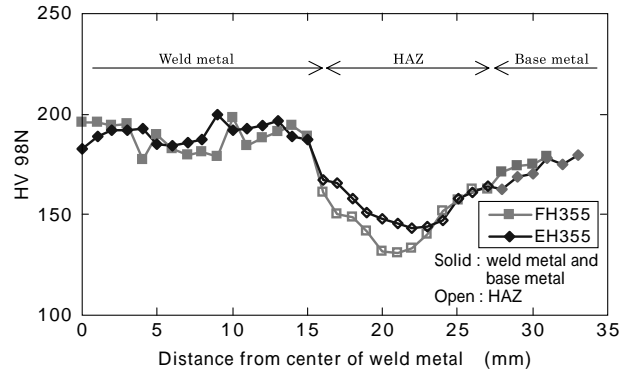


図 4 SEGARC 溶接継手部の継手硬さ試験結果  
Fig. 4 Hardness test results of SEGARC welded joints

表 7 SEGARC 溶接継手部の引張試験結果  
Table 7 Tensile test results of SEGARC welded joints

Grade	Heat input (kJ/mm)	Tensile stress (MPa)	Fracture position
FH355	39.2	521	HAZ
		530	HAZ
EH355	35.6	509	HAZ
		508	HAZ

#### 参考文献

- 1) 難波直愛ほか：三菱重工技報，Vol.40, No.1 (2003) p.32.
- 2) 上谷秀雄：三井造船技報，No.178, (2003) p.5.
- 3) 塩飽豊明ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.45, No.1 (1995) p.75.
- 4) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.47, No.2 (1997) p.6.
- 5) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.1 (2002) p.2.
- 6) 笠松 裕ほか：鉄と鋼，Vol.65, No.8 (1979) p.102.
- 7) 大野恭秀ほか：鉄と鋼，Vol.73, No.8 (1987) p.1010.