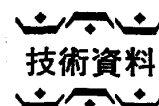


© 1984 ISIJ

最近の氷海船舶および氷海構造物用鋼材



田中 淳一*・佐藤 守*

Recent Development in Steels for Ice Breaking Ships and Ice Strengthened Off Shore Structures

Junichi TANAKA and Mamoru SATO

1. 緒 言

石油危機を契機とする原油、天然ガス価格の高騰は、北極海域に豊富に存在するエネルギー資源の開発を促進する結果となり、ここ数年来いくつかのプロジェクトが相次いで具体化するに至った。このような北極海域での資源開発活動には、砕氷船などの氷海船舶、および氷海リグなどの各種氷海構造物が大量に必要とされるが、厳しい気象、海象条件、氷荷重などに堪えるために、従来の海洋エネルギー開発に使用されて来た船舶、海洋構造物とは異なつた設計基準、使用材料が要求される。特に構造部材に使用される鋼材に関しては、極地の低い気温、氷による圧力、氷との衝突荷重などに対応して、低温における高い延性、靱性、および十分な強度が、また氷海水による特殊な腐食条件に堪える耐食性、劣悪な施工条件で実施される補修作業においても問題を生じない優れた溶接性などを兼備することが必要であり、このため氷海用鋼材の製造には特別な配慮が要求される。

一方我が国の厚板製造技術は、近年制御冷却を含む新制御圧延技術 (Thermomechanical Process 以下 TMP と略す) の開発、実用化により大きな進歩を遂げたため、前記の要求性能を満たす鋼を、大量にかつ経済的に製造する体制が整備されており、現実には北極海域向け砕氷船、氷海リグ用鋼材の製造が活発におこなわれている。

本報ではこれらの氷海構造物用鋼材の最近の動向について紹介する。

2. 氷海船舶、氷海構造物の種類と使用鋼材

2.1 氷海船舶

従来氷海船舶の主流は各国の沿岸警備隊、海軍に所属する砕氷船 (艦) であり、一般商船のための寒冷海域における航路啓開が主な任務であつた¹⁾。近年北極、南極における諸活動の活発化にともない、大型の大出力極地用砕氷艦や、氷海での輸送、資源掘削活動を目的とする各種の船舶が、相次いで建造されまたは計画されている。

氷海船舶の種類は仮りに整理するとすれば Table 1 のようになるものと思われる。また各国の主要砕氷艦の要目の抜粋を Table 2 に示す²⁾。表中の「Arctic Class」はカナダの ASPPR (Arctic Shipping Pollution Prevention Regulation) に規定される砕氷能力の尺度を示すもので、3ノットの速力で連続して砕氷航行することができる氷の最大厚さを ft で示した数値であり、この数字が大きいくほど砕氷能力が大となる。これらの船舶に使用されている主要船殻材料は、ほとんどが各主要船級協会の定める造船材であるが、最近その衝撃試験の要求値を低温側または高吸収エネルギー側に変更した Modify 材 (Mod. または M. と略す) が使用されるようになって来ている。この点については後にやや詳しく述べる。また米国の砕氷艦には A537 鋼や HY-80 鋼のような調質型厚鋼板が使用されており⁴⁾⁵⁾、さらに特殊な例では米国五大湖を航行する鉱石船の一部に A514 鋼 (YS \geq 100 ksi の調質鋼) が使用されているとの報告もある⁴⁾⁵⁾。

砕氷船が材料面で一般船舶と異なる点は耐氷帯 (ice belt) と呼ばれる氷との接触頻度の高い部分に、高強度、高靱性の厚肉材が配置されることである。Fig. 1 にその例を示す¹⁾。船首部の鋼板が特に厚くなつていくことがわかる。またプロペラ、およびプロペラ軸に関しても氷との衝突によつて損傷を受けないように高強度ステンレス鋼、特殊鋼などが使用される¹⁾。船首下部や舵まわり等には鍛鋼材が使用されることもある²⁾。最近日本で建造された砕氷船の一例を Photo. 1 に示す。

2.2 氷海構造物

氷海における掘削活動が本格化したのはここ数年のことである。しかもその初期においては、ポーフォート海の浅海域が活動の中心であり、したがつて氷海構造物は盛土による人工島 (gravel island) に限られていた^{6)~8)}。掘削活動の水深が深くなるにつれ、盛土による人工島は土砂の手当てが困難となり、しだいに鋼製ケーソンによる人工島、各種の着底式鋼構造物へと移行し、さらに大水深の海域では、種々の形式の掘削船が提案されている⁹⁾。各種構造物を稼動水深別に整理すると Fig. 2 の

昭和 58 年 8 月 12 日受付 (Received Aug 12, 1983) (依頼技術資料)

* 日本鋼管(株)本社 (Head Office, Nippon Kokan K.K., 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku 100)

Table 1. Ships for ice covered waters.

	Main ice breaker	Ice breaking cargo, tanker	Ice breaking supply-tug vessel	Ice strengthened ships
Role	<ul style="list-style-type: none"> Opening the passage in ice covered water for ships not ice strengthened Rescuing, securing of passages and supporting services for the activities in the arctic and antarctic area 	<ul style="list-style-type: none"> Mass transportation of natural resources from arctic area by selfpropelled navigation 	<ul style="list-style-type: none"> Supporting services for exploration and development activities in ice covered area (ex. ice breaking, guiding, supplying services for drill ships in Beaufort Sea) 	<ul style="list-style-type: none"> Miscellaneous no active ice breaking activity but ice strengthened to some extent to navigate ice water
Owner	Navy, Coast guard	Private companies		
Approximate displacement	≥5 000 t	≥20 000 t	3 000~6 000 t	
Example	<ul style="list-style-type: none"> Arktika (6.5) Potar Star (6.2) Shirase (4.1) L. St Laurent (3.9) 	<ul style="list-style-type: none"> Manhattan (6) Tankers with D. W. more than 100 000 t being planned for Canadian arctic sea 	<ul style="list-style-type: none"> Kigoriak (4) Ikaluk (4) 	<ul style="list-style-type: none"> CANMAR EXPLORER No. 1~No. 4 Ore carriers in Great Lakes Dredgers · Burges
Main materials for hull	Gr. D, E, DH, EH, CG-A 537M HY80 etc.	Gr. EH36M, EH36, DH36	Gr. A~E, AH~EH, EH36M	Gr. A~D, AH, A514

() Canadian ASPPR Arctic Class of each ship

Table 2. Comparison of main ice breakers²⁾.

Name	Arktika	Polar Star	Lenin	Ermak	Shirase	L. St Laurent	Moskva	Glacier	Almirante Irizar	J. A. McDonald	Pierre Radisson	Fuji
Length (m)	139.9	121.6	135.2	135	134	111.8	122.1	94.7	119	96.0	98.1	100
Breadth (m)	30	25.5	27.6	26	28	24.4	24.5	22.6	25	21.3	19.5	22
Depth (m)	17.2	13.2	16.1	16.7	14.5	13.1	14	11.7	—	12.5	10.8	11.8
Displacement (t)	23 460	13 190	19 240	20 241	約 19 000	13 800	15 360	8 584	14 000	9 307	8 311	9 120
Power (ps)	75 000	18 000(D.E) 60 000(G.T)	44 000	36 000	30 000	24 000	22 000	21 000	16 200	15 000	13 600	12 000
Propulsion system	1	3	1	2	2	4	2	2	2	2	2	2
Power/Disp.	3.20	4.55	2.29	1.78	1.70	1.74	1.43	2.45	1.16	1.61	1.64	1.49
Arctic class	6.5	6.2	4.9	4.6	4.1	3.9	3.8	3.8	3.2	3.2	3.2	2.9
Nationality	USSR	USA	USSR	USSR	JAPAN	CANADA	USSR	USA	Argentina	CANADA	CANADA	JAPAN
Build	1974	1976	1959	1974	1982	1969	1960	1955	1978	1960	1978	1965
Sisters	Sibir (1975)	Polar sea (1977)		Admiral Makarov (1975) Krasin (1976)			Lenin Grad (1962) Kiev(1966) Muramansk (1968) Vladivostok (1969)				Franklin (1979)	

1. nuclear · steam · electric 2. diesel · electric 3. diesel · electric · gas turbine 4. steam · electric

よくなる⁹⁾。これらの構造物の概要を個々に紹介することは紙数の関係で困難なので代表例として日本において建造された二つの構造物¹⁰⁾の外観図を Photo. 2 に示すにとどめる。この種の掘削活動および生産活動に関連する鋼構造物は、通常船型の掘削船を除き、最近具体化したばかりであり、実際に建造された例はいまだ少数であるが、今後の北極海域における原油、天然ガスの生産には必要不可欠のものであるため、開発が本格化するにつれて各種の構造物が数多く建造されるものと期待される。使用される鋼材は非固定式の場合は船級規格の適用を受け、A~E 級鋼、AH32~EH32 および AH36~EH36 鋼および EH36 Mod. 鋼が使用される場合が多い。一部のリグには極めて板厚の厚い 80 kgf/mm² 級高張力鋼が用いられることもある。また固定式の場合には A537 鋼⁹⁾、A633 鋼、CSA G4021 Gr 350A⁹⁾ なども使用されることがある。さらに A678, A710, A737 などの各鋼も候補材料となつているようである。また鋼以外で

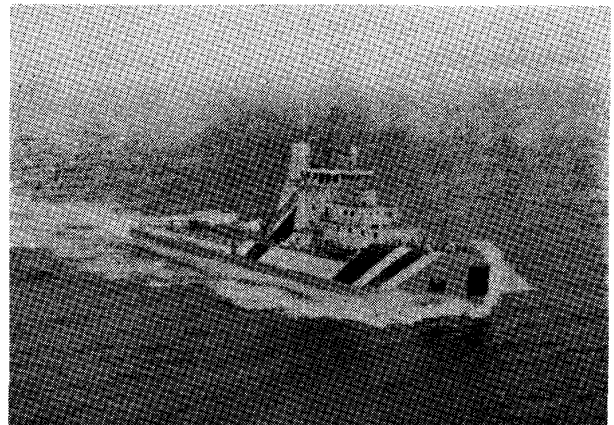
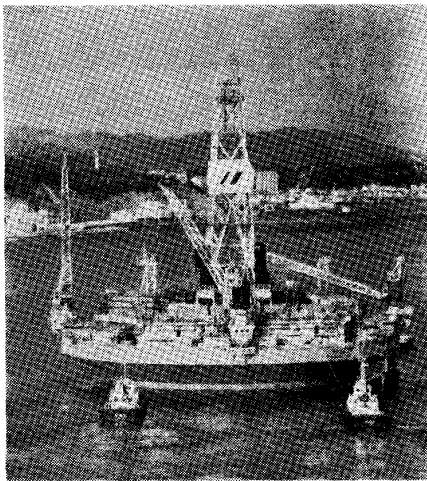
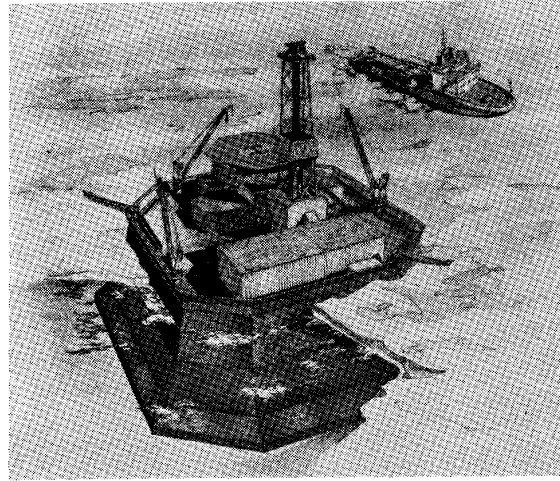


Photo. 1. Ice breaking supply vessel "IKALUK". (ASPPR 4. Displacement 3 800 t)

はコンクリートを使用する構造物の検討もさかんにおこなわれており、鋼とコンクリートを併用する構造物の具体化も時間の問題となつている。

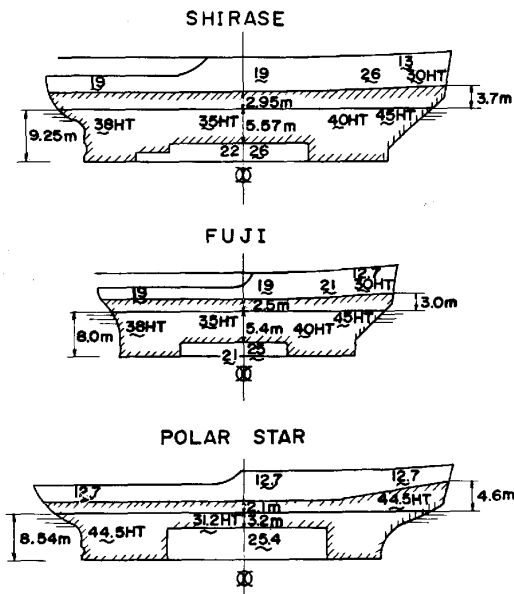


CDU (Conical Drilling Unit)



MAC (Mobile Arctic Caisson)

Photo. 2. Examples of arctic rigs (from Gulf Canada Resources Inc).



~ : thickness (mm)
 HT : high strength steels
 : ice-belt

Fig. 1. Ice-belt configurations¹⁾.

3. 要求性能および適用規格

氷海用鋼材に要求される性能は、定性的には Table 3 のように整理できる。これらの要求のうち、製造者側にとって当面重視しなければならないのは低温靱性、強度水準と板厚、溶接性と溶接部の靱性である。耐食性および疲労特性は、重要な問題ではあるものの、定量的データが少なく、現在までのところ要求性能の内容そのものが明確になつていない。むしろ今後の問題として扱われるべき性格のものであると言える。

3.1 低温靱性

鋼材の低温靱性に関する要求は、通常シャルピー衝撃試験の試験温度と吸収エネルギー値として提示される。

氷海用鋼材のシャルピー試験温度は構造物がさらされている大気および海水の温度、鋼材の強度水準、板厚、応力条件によつて決定されるが、その算定方式は各船級協会、規格協会ごとに異なっており、世界的に統一された基準はいまだできていない。一般にはシャルピー試験温度は(1)式によつて決定される。

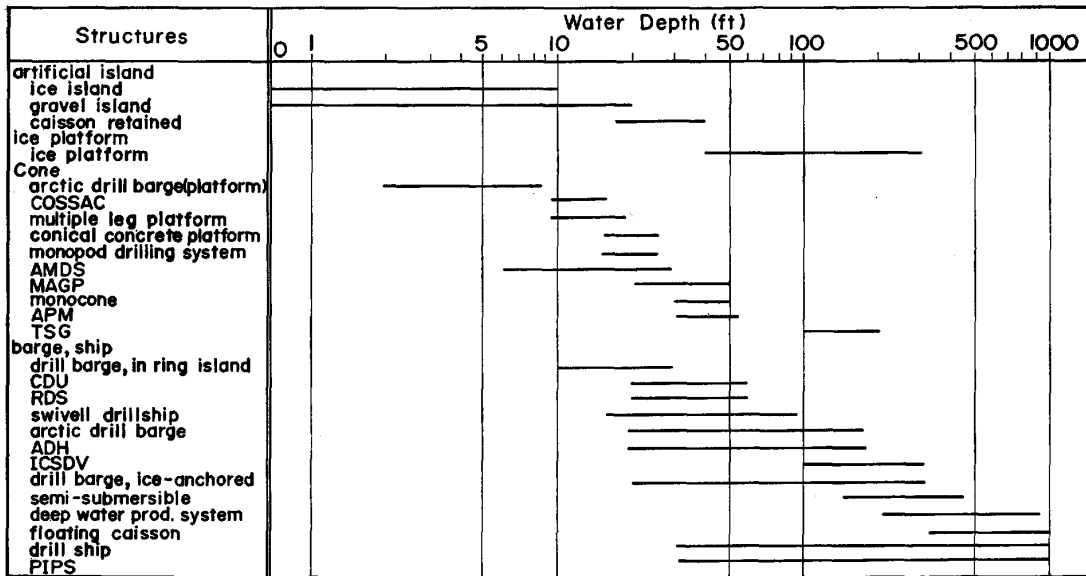
$$T_{CV} = DT - \alpha \dots\dots\dots (1)$$

T_{CV} : シャルピー試験温度

DT : 設計温度

α は安全上の配慮により、上記の種々の因子を考慮して決定される。Table 4¹¹⁾ および Fig. 3¹²⁾ にその実例を示す。Table 4 によると応力条件が厳しい重要部分に使用される厚肉材の場合には、シャルピー試験は設計温度より 30°C 低く規定されることになる。また設計温度は、通常最低温度より 5°C 低く定められる場合が多い¹³⁾。最低温度には種々の設定方法があり、1日の平均気温の過去最低値、月間平均気温の最低値などが提案されている¹³⁾。月間平均気温の最低値が -25°C の場合、設計温度は -30°C、 $\alpha = 30^\circ\text{C}$ とすれば、重要部材のシャルピー試験温度は -60°C となる。このように氷海用鋼材のシャルピー試験温度は、船殻材料としては最も高靱性材である E 級鋼および EH 32, EH 36 級鋼板の -40°C よりも厳しい場合が多く、そのような場合には強度、延性などの要求値は通常の船級規格どおりで、シャルピー試験温度のみを、より低温側に移行させた Modify 鋼 (EH 36 Mod. または EH 36-060 など) が使用される。温度条件が更に厳しい場合には、焼入れ焼もどし型の低温用鋼や、0.5%~3.5% の Ni 添加鋼の使用が考慮されるようである。しかし過去の砕氷船においては $\alpha = 0^\circ\text{C}$ の場合が多く⁴⁾、特に強度が軟鋼と同一水準の鋼では E 級鋼の Modify がおこなわれたことは無いようである。

また低温靱性を規定する場合、試験温度を変更せずに



(1) Controlled Stiffness Arctic Cone (2) Arctic Mobile Drilling Structure (3) Mobile Arctic Gravity Platform (4) Arctic Production Monocone (5) Tecnomare Steel Gravity Platform (6) Conical Drilling Unit (7) Round Drill Ship (8) Arctic Drill Hull (9) Ice-Cutting Semi-Submersible Drilling Vessel (10) Pneumatically Induced Pitching System

Fig. 2. Working depth of arctic rigs⁹⁾.

Table 3. Performances required to steels for arctic application.

Item	Requirements
Low temperature toughness	To keep sufficient level of toughness below -40°C in base metal and weldments
Strength and thickness	To preserve sufficient strength against ice pressure and impact load
Weldability	To secure low hardenability and low susceptibility to cold cracking even for the repair welding under the arctic climate
Others	To have high resistance to erosion/corrosion attack in arctic sea To have high resistance to low temperature fatigue and corrosion fatigue

吸収エネルギー値の要求水準を高めることにより安全を確保するやり方もある。

3.2 強度および板厚

耐氷帯に作用する外力として下記の荷重が考慮されねばならない¹⁴⁾。

- ①氷に閉ざされた状態 (膠着状態) での等分布荷重
- ②砕氷時に経験する氷塊との接触による衝撃荷重
- ③砕氷された航路上の浮氷との接触による衝撃荷重

これらの外力を推定する普遍的な計算方式ははまだ完成されていないようであるが⁴⁾、各船級協会規格、前出のカナダ ASPPR などでは砕氷グレードに応じた設計氷圧の指針が定められている⁴⁾。いずれにしても耐氷帯では普通の船舶では考慮する必要のない大きな外力に対応しなければならないので、高い強度レベルの厚肉鋼板を使用する必要がある。耐氷帯板厚は砕氷グレードにより変化する。DnV (ノルウェー船級協会) および ASPPR に

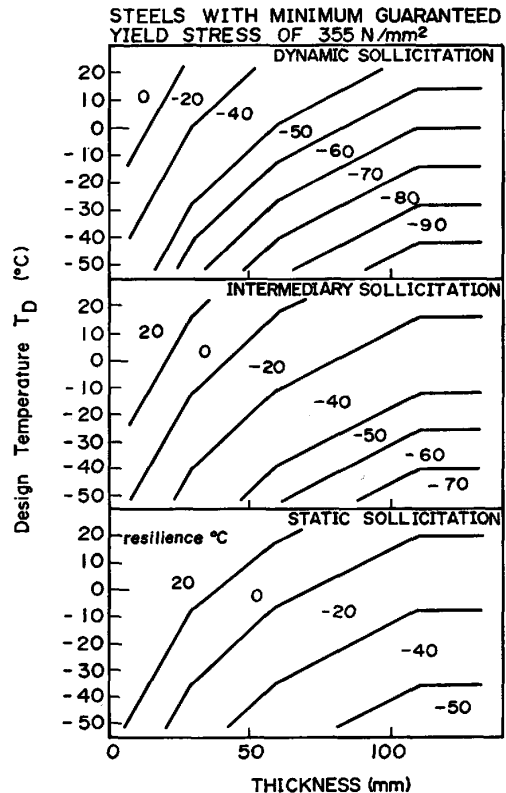


Fig. 3. Diagram indicating at which temperature the Charpy-V energy in the impact test must be higher or equal to 27 J for a given steel in service at a design temperature T_D in a given thickness¹²⁾.

Table 4. Charpy V-notch impact toughness specification for steel plates¹⁾.

Grade	Section size	C_V (long)	
		(Joules)	(ft.-lbs.)
I	>6 mm (1/4 in.), ≤38 mm (1.5 in.)	20	15
	>38 mm (1.5 in.)	27	20
II	>6 mm (0.25 in.)	34	25
III	Special consideration depending on usage and specific steel properties.	—	—

Notes to Table 4

(1) Test Temperatures

- (a) For structural members and joint cans which are fracture critical, which experience an unusually detrimental combination of stress concentration, rapid loading, cold working, restraint and thickness, the impact test guidelines of Table C-3 should be met at test temperatures to -30°C . For service temperatures below -30°C , test temperatures should be specially considered.

Grade	Test Temperature	Service Temperature
I, II	30°C (54°F) Below minimum service temperature	As determined
III	-40°C (-40°F)	0°C (32°F)
	-50°C (-58°F)	-10°C (14°F)
	-50°C (-58°F)	-20°C (-4°F)
	-60°C (-76°F)	-30°C (-22°F)

- (b) For structural members and joint cans which are to sustain significant tensile stress and whose fracture would pose a threat to the survival of the structure, the impact test guidelines of Table C-3 should be met at test temperatures as given below:

Grade	Test Temperature	Service Temperature
I, II	10°C (18°F) Below minimum service temperature	As determined
III	-30°C (-22°F)	0°C (32°F)
	-40°C (-40°F)	-10°C (14°F)
	-40°C (-40°F)	-20°C (4°F)
	-50°C (-58°F)	-30°C (-22°F)

- (c) For primary structural members subjected to significant tensile stresses and whose usage warrants impact toughness testing, the impact test guidelines of Table C-3 should be met at the following test temperatures:

Grade	Test Temperature	Service Temperature
I, II	At service temperature	As determined
III	(see note 1b)	

- (d) For structural members which are sufficiently structurally redundant so that their fracture would not pose a threat to the survivability of the structure, the toughness criteria specified for (c) above may be replaced by a demonstration that the materials used in such cases are appropriate for the loading conditions, loading rates, and temperatures encountered in service.

(2), (3) Omitted

準拠して、種々の砕氷グレードに対応した耐氷帯船首部板厚を三種類の船型について試算した計算例を Table 5 に示す⁴⁾。一般に砕氷グレードが高くなる程耐氷帯を強化しなければならず、板厚、重量は増加する。このため重量増加を低くおさえる目的で耐氷帯には高張力鋼の使用が不可欠である。大型の砕氷タンカー等では EH 36 鋼を使用しても板厚が極めて厚くなるのが容易に予測できる。しかし極端に強度の高い材料を使用すると、設

Table 5. Ice strengthened bow plating thickness for three representative ships⁴⁾.

Rule or regulation	Class	Plating thickness [in]		
		Polar Star* (s=26 in.)	MV Arctic** (s=33 in.)	Arctic Tanker*** (s=40 in.)
Canadian ASPPR	1 10	1.22	1.55	2.36
		2.98	3.80	4.56
Det norske Veritas	Ice C	0.69 ¹⁾	1.00 ²⁾	1.00 ³⁾
	Icebreaker	1.38 ¹⁾	0.85 ²⁾	3.17 ⁴⁾
	Arctic Icebreaker	1.79 ¹⁾	1.11 ²⁾	4.12 ⁴⁾

* Displacement at DWT (L.T.) : 11 000, SHP : 60 000

** " " : 36 636, " : 14 770

*** " " : 370 800, " : 210 000

1) Frame spacing = 13 ins. 2) Frame spacing = 20 ins.

3) " = 12 ins. 4) " = 27 ins.

計上板厚が薄くなりすぎて、座屈、腐食による板厚減少の影響増大等の問題を生じる危険があり、また経済的優位性も明確ではないことなどから、強度水準としては EH 36 程度が最も好まれている。一方船舶以外の氷海構造物では EH 36 級鋼の他にジャッキアップリグなどの特定の部材に降伏点 70 kgf/mm^2 以上、引張強さ 80 kgf/mm^2 以上の調質型高張力鋼が相当量まとまって使用される場合があり、しかも板厚が極めて厚くなる場合が多い。この場合にも船級規格の承認が必要とされる。

3.3 溶接性、溶接部の靱性

軟鋼の場合にはほとんど問題になることはないが、EH 36 級の鋼材で、しかも板厚が厚い場合には溶接性かなり劣化するのが普通である。施工の面からは、理想的には軟鋼と同程度の溶接性、設計の面からは母材と同水準の継手部靱性が確保されることが望ましい。しかし溶接性に関しては、母材の強度、靱性に対する規定のような定量的な要求が提示されることは少なく、施工者と材料製造者の間で、プロジェクトごとに炭素当量のとりきめがなされる程度である。溶接部の靱性は原則として母材と同等の値が要求される。このため母材と同等の靱性を確保するのに必要な溶接材料の撰定および改善、溶接方法および溶接条件の最適化が重要な課題となる。能率良く溶接でき、かつ溶接部の靱性が要求値を満たすためには、鋼材自体の改善も必要であり、この面の検討もなされている。

また極地における補修作業は砕氷船にとっては避けられない現実であり、劣悪な条件下における補修溶接によっても溶接欠陥を生じないような優れた溶接性を備えた鋼材の必要性も認識されて来ている。

3.4 適用規格

砕氷船、氷海構造物に使用することのできる各種規格のうち特に -40°C 以下のシャルピー試験が規定されている材料の抜粋を Table 6 に示す。また Table 7 には最近の砕氷船、氷海構造物に適用された EH 36 Mod. 鋼の要求性能例を示す。

Table 6. Typical material specifications with Charpy impact test temperature below -40°C .

Grade	Code	Heat treatment	Yield strength (kgf/mm ²)	Ultimate tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Charpy impact test		Remarks
						Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Energy (kgf·m)	
E	Ship Classification Society (NK, AB, LR, NV, BV etc.)	Nor	≥ 24	41~50	≥ 22	-40	≥ 2.8	
EH32		Nor	≥ 32	48~60	≥ 22	-40	≥ 3.2	
EH36		Nor	≥ 36	50~63	≥ 21	-40	≥ 3.5	
CG-537M	USCG*	Nor	≥ 35	49~63	≥ 22	-50	≥ 2.8	Cu \leq 0.35 Ni \leq 0.25 Cr \leq 0.25 Mo \leq 0.08
A537-I	ASTM	Nor	≥ 35	49~63	≥ 22	-60	≥ 2.1	
A537-II		QT	≥ 42	56~70	≥ 22	-60	≥ 2.1	
A633-E		Nor	≥ 42	56~70	≥ 23	-60	≥ 2.1	
HY80	US Navy	QT	≥ 56	≥ 70	≥ 20	-84	≥ 6.9	Cr 1.0/1.8 Ni 2.0/3.25 Mo 0.2/0.6
HY100		QT	≥ 70	≥ 81	≥ 18	-84	≥ 6.9	Cr 1.0/1.8 Ni 2.25/3.50 Mo 0.2/0.6

* United States Coast Guard ** transverse direction

Table 7. Specifications for EH36 Mod. steels.

Ships/Structure	Maximum thickness (mm)	Tensile test			V notch Charpy test	
		Yield strength (kgf/mm ²)	Ultimate tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Absorbed energy (kgf·m)
IKALUK	38	≥ 36	50~62	≥ 21	-50	7
Mobile Arctic Caisson	50	≥ 36	50~62	≥ 21	-60	3.5

Table 8. Comparison and evaluation of several processing routes¹⁵⁾.

Manufacturing Process			Nor ¹⁾	QT ²⁾	CR ³⁾	TMP ⁴⁾		DQT ⁶⁾
Product	Properties	Strength Toughness Weldability				Without C.C. ⁵⁾	Without C.C. ⁵⁾	
			Product	Properties	Strength Toughness Weldability	×	○	△
△	○	○				◎	○	◎
Product	Properties	Alloy Conservation Available Range of Thickness	×	◎	△	◎	◎	◎
			○	○	×	△	○	○
Facility	Properties	On Line Processing Construction Cost	×	×	○	○	○	△
			×	×	○	○	△	△
Operation	Properties	Energy Conservation Productivity Stability	×	×	◎	○	◎	◎
			×	×	○	△	○	○
Total Evaluation			×	△	○	◎	◎	◎
Comments			High cost, low productivity	High performance, but high cost, low productivity	Product range limited by mill capability	High performance, low cost, but low productivity	Most attractive	Rationalized process for QT

1) Normalizing 2) Quenching & Tempering 3) Controlled Rolling 4) Thermomechanical Processing
5) Controlled Cooling 6) Direct Quenching & Tempering

4. 製造技術

従来の船殻材料とは異なり、氷海用の場合には優れた低温靱性と十分な強度、溶接性を兼備した厚肉材が要求される。船級規格等に規定されている圧延まままたは焼ならし等の通常の製造方法では、これらの要求を同時に、経済的に満足させることは容易ではない。各種の製造方法別の、要求性能に対する対応の程度は、定性的には Table 8¹⁵⁾ のように整理される。同表よりこの種の

氷海用鋼材の製造には新制御圧延法 (TMP) が最も適していることが理解できる。

TMP には非常に多種の方式が含まれるが^{16)~18)}、強いて整理するとすれば Fig. 4¹⁵⁾ のようになり、低温加熱、低温域圧下圧延を基本とする方式と¹⁶⁾、制御圧延後に制御冷却を実施する方式¹⁶⁾¹⁹⁾に大別される。前者はいわゆる制御圧延法 (Controlled Rolling, CR と略す) の延長線上にあり、低温加熱に適したスラブ加熱炉と、強力な圧延材があれば容易に実施に可能であるが、合金

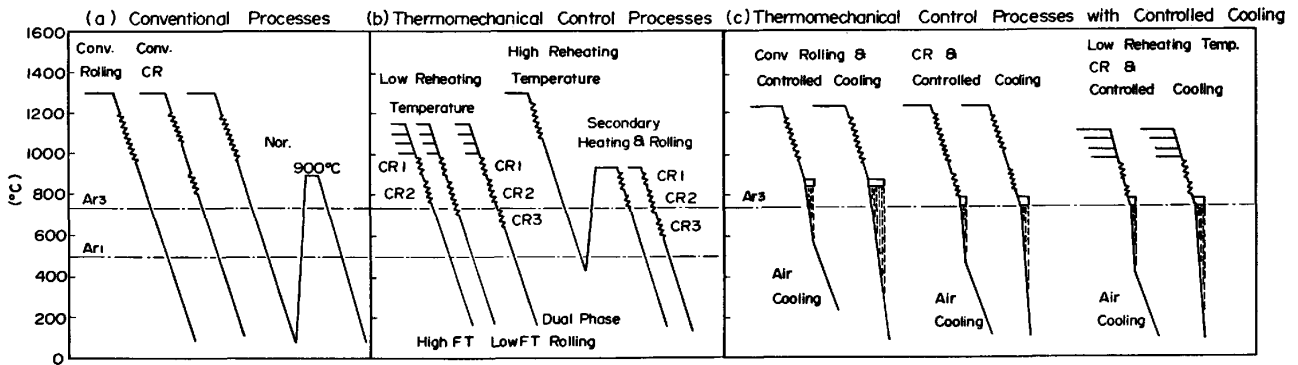


Fig. 4. Schematic presentations of various manufacturing processes for steel plates¹⁸⁾.

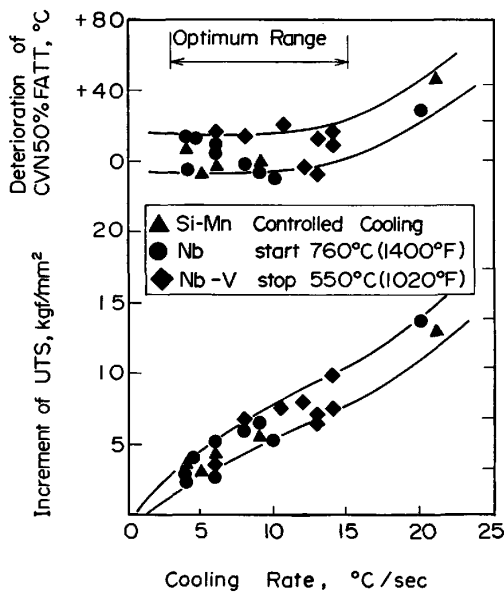


Fig. 5. Effect of cooling rate after controlled rolling on strength and toughness²⁵⁾.

元素の添加量を増加させずに大幅な強度増加を得ようとすると、異方性、セパレーション等の問題を生じる可能性があり、また適用板厚範囲も比較的限られている。これらの問題に配慮すれば、強度の上昇は合金元素の添加に頼らざるを得なくなる。一方制御冷却方式による後者は、CR終了後に所定の冷却速度で鋼板を水冷することにより、合金元素を添加することなく、また靱性を損なうことなく強度上昇が得られることを利用したもので¹⁹⁾²⁰⁾、異方性やセパレーションが比較的生じにくく、適用可能な板厚範囲も広いことから、優れた製造プロセスとして、開発されてから日が浅いにもかかわらず急速に普及しつつある^{21)~25)}。この方式は圧延工程のみならず、冷却工程の温度、時間等をグレード、板厚別に化学成分に応じて正しく制御する必要があり、計算機による制御システムが適用される。また化学成分と冷却前の圧延条件の配慮により、氷海用としての低温用鋼に十分適用可能な技術になっている^{35)~37)}。制御冷却における冷却速度の強度、靱性への影響例を Fig. 5²⁵⁾ に、また制

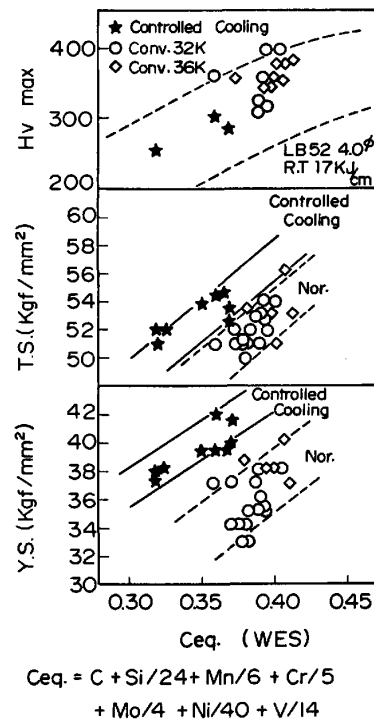


Fig. 6. Comparison between controlled cooled materials and normalized materials on $C_{eq.}$ vs properties relationships²⁵⁾.

御冷却による炭素当量低減効果の例を Fig. 6²⁵⁾ に示す。

一方溶接継手部の靱性に関しては、製造プロセスのくふうによる組織制御よりは、溶接時の熱履歴と、鋼の化学成分そのものの影響が大きいことが知られている²⁶⁾。溶接部の靱性向上の検討は、従来主に造船用鋼、タンク用鋼の大入熱溶接に関して活発に進められて来たが、氷海用鋼材に関してこの知見が応用される。氷海用鋼材の溶接は必ずしも大入熱溶接に限定されないにもかかわらず大入熱溶接が重視されるのは、本来小入熱溶接の場合には、溶接部靱性の確保が比較的容易であることと、砕氷船はもちろん、氷海ケーソン、氷海リグなどの鋼構造物も造船所のドックでの建造が多いため、結果的に造船所における工作、溶接手法が前提となり、またコスト

Table 9. Causes of and countermeasures to the embrittlement of heat affected zone of high heat input welding²⁶⁾.

Factors	Cause of Embrittlement	Counter measures to Embrittlement		Steels
		Metallurgical	Practical	
grain size	coarsening of γ grains	fine distribution of stable constituents at high temperature	Distribution of fine TiN	<ul style="list-style-type: none"> Al-killed steels for low temperature service HT-50 HT-60
micro-structure	formation of upper bainite (formation of martensite island)	formation of fine F+P	<ul style="list-style-type: none"> distribution of TiN, BN, REM and Ca constituents as nucleus of α from γ lowering Ceq. 	<ul style="list-style-type: none"> HT-60 HT-80
		to decrease martensite island in bainite	<ul style="list-style-type: none"> lowering C%, Ceq. lowering Si% 	<ul style="list-style-type: none"> HT-80 HT-100
		formation of lower bainite	<ul style="list-style-type: none"> to increase hardenability by adding Ni, Cr, Mo etc. 	<ul style="list-style-type: none"> HT-80 HT-100
toughness of matrix	—	<ul style="list-style-type: none"> to decrease impurities addition of element which increases toughness 	<ul style="list-style-type: none"> to decrease P, S, N addition of Ni 	<ul style="list-style-type: none"> all steels HT-80 HT-100

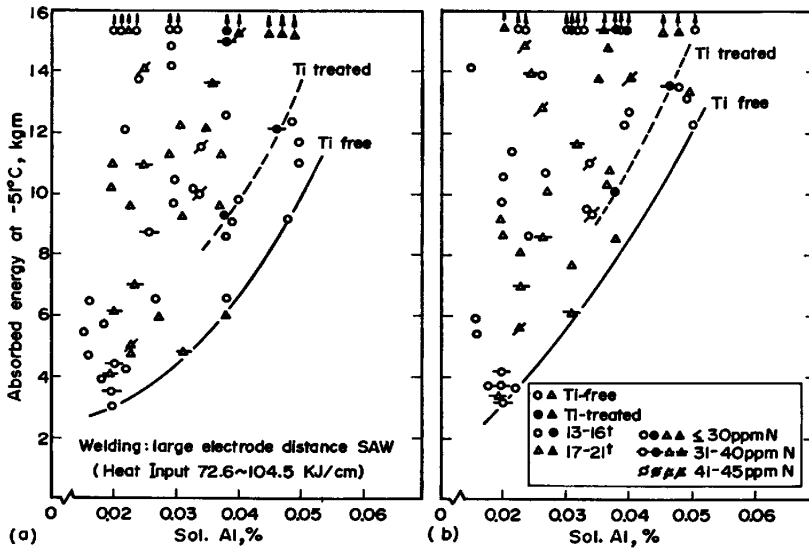


Fig. 7. Effect of Sol. Al content on HAZ toughness; notch position: (a) bond, (b) HAZ 1mm³¹⁾. (Al killed steel for low temperature service)

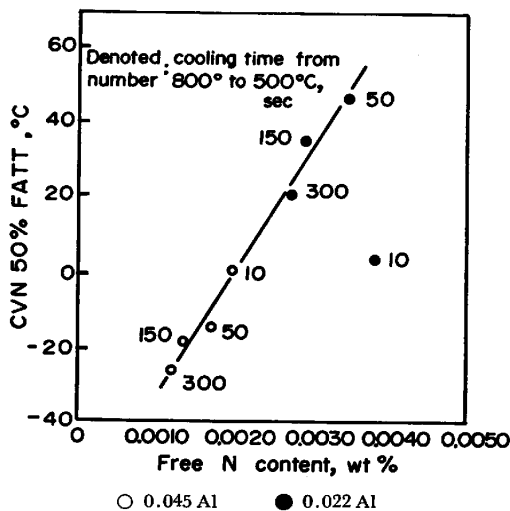


Fig. 8. Free N content v. CVN 50% FATT of synthetic HAZ³²⁾. (Al killed steel for low temperature service)

的観点からも大入熱溶接の適用が検討されており、大入熱溶接による施工をおこなつても溶接部の性能が劣化しない鋼材が要望されるためである。大入熱溶接の熱影響部の脆化原因と脆化軽減法は Table 9²⁶⁾ のように整理される。EH 36 級程度の強度の材料の場合には、靱性の改善は主に熱影響部の組織の微細化と、不純物の低減により達成されると考えて良い。前者に関しては TiN や Ca, REM の酸硫化物等の高温で安定な微細第二相を分散して存在させることにより、オーステナイト粒径の成長を抑制するとともに、冷却の際にも $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の核として機能させ熱影響部組織を微細なフェライト・パーライト組織にしようとするものである^{27)~30)} が、これらの微量添加元素はいずれもその最適添加量の範囲が狭く、過剰に添加するとかえつて靱性が劣化するので注意を要する^{29)~32)}。この種の組織の微細化による熱影響部の靱性改善策のみでは、対象となる温度領域が低温にな

るにつれて、目標靱性を達成するのが困難になって来る。一方不純物低減の効果としては、最近特にNに関する検討が進んでおり、フェライト基質中の固溶Nを減少させることにより、組織のいかにかわらず、Bond部、熱影響部の靱性を効果的に改善できることが明らかにされた³¹⁾³²⁾。固溶N量を低下させるには Total N 量を低減させるだけでなく、Ti, Sol Al, V, B 等の適量の添加も、Nを窒化物等として固定するため有効である³¹⁾。Fig. 7 および 8 に熱影響部および再現 HAZ のシャルピー衝撃試験特性に及ぼす Sol Al, Ti, N 量の影響の一例を示す³¹⁾³²⁾。Nの他の不純物に関しては、S, P 等の延靱性への害、および、偏析による害を減ずる意味で、極低 S, P 化や Ca 処理等が検討されており、必要に応じて実施される。またこの種の鋼材の溶接部靱性は炭素当量依存性を示し、炭素当量が低い程溶接部の靱性は高くなることが知られている²⁶⁾。これらのことから低不純物の低炭素当量の鋼を TMP で製造することにより、低温靱性、溶接性に優れ、かつ大入熱溶接を適用しても溶接部の靱性劣化がすくない厚物高張力鋼を経済的に製造することが可能になったことが理解される。

5. 氷海用鋼材の諸特性

各種の氷海用鋼材のうち、最近実用化されたため、比

較的公表データの少ない制御冷却型 TMP による EH 36 Mod. 鋼³⁷⁾についてやや詳しく紹介する。

5.1 製造実績

カナダ向け氷海ケーソン用として TMP によつて製造された EH 36 Mod. 鋼の炭素当量、機械的性質のヒストグラムを Fig. 9 に示す。また比較のために焼ならしにより製造された従来型の EH 36 鋼の製造実績例を Fig. 10 に示す。TMP の製造条件は、低温加熱鋼片 (1000°C~1050°C) に 800°C 以下 70% 以上の制御圧延をおこない、Ar₃ 点以上で圧延を終了した後、直ちに 3~15°C/s の冷却速度で 550°C まで制御冷却をおこなったものである。比較鋼の焼ならし材に比べて炭素当量が低く、低温靱性が大幅に向上していること、また板厚方向の延性も極めて優れていることが示されている。

5.2 代表的鋼板の諸特性

代表的鋼板および厚肉材の化学成分と母材の強度、靱性値を Table 10~12 に示す。比較のために焼ならし型の厚肉材も同表中に示されている。低温靱性に関しては脆性き裂発生特性の一例として COD 試験結果を Fig. 11 に、また脆性き裂伝播停止特性の一例として二重引張試験結果を Fig. 12³⁷⁾ に示す。溶接部の靱性を確認するために実施した各種溶接条件下における継手部シャルピー試験結果を Table 13 に示す。また入熱 70~100 kJ/cm のサブマージドアーク溶接継手の

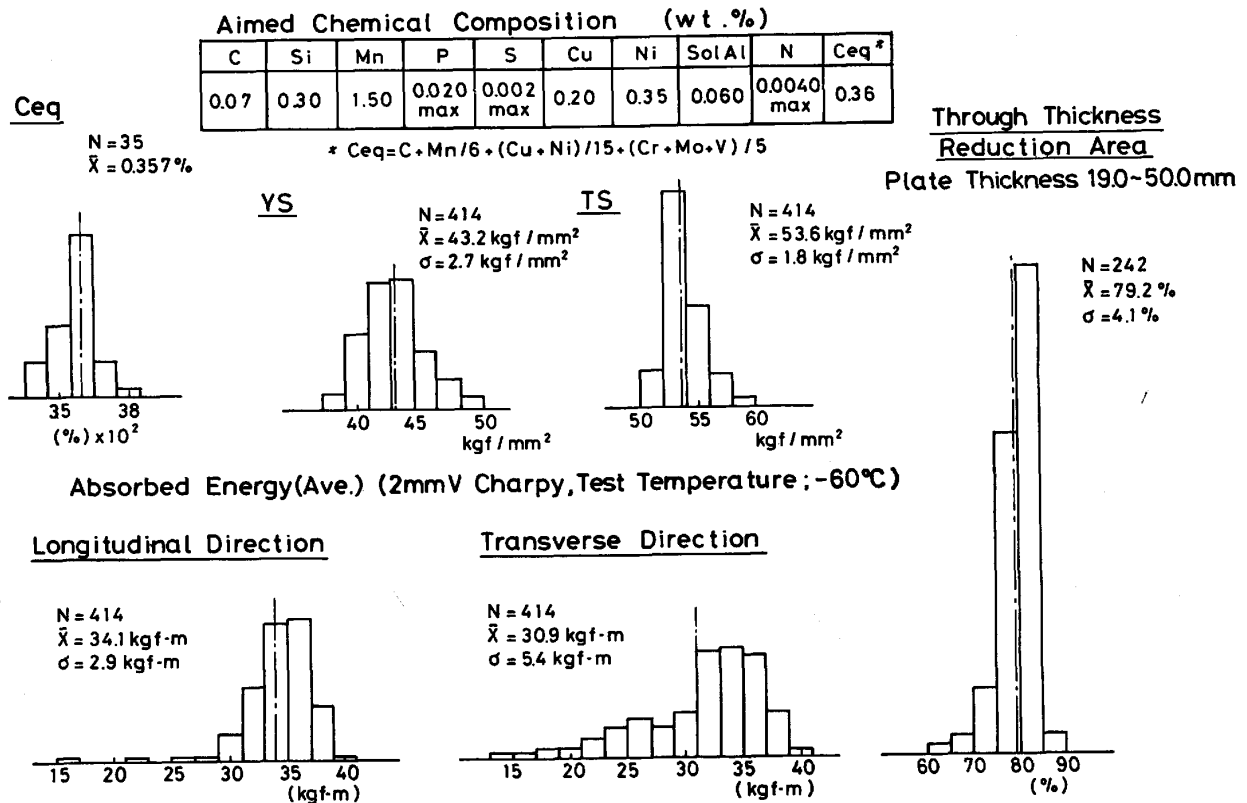


Fig. 9. Histograms of mechanical properties of EH36 Mod. steels, manufactured by TMP with controlled cooling.

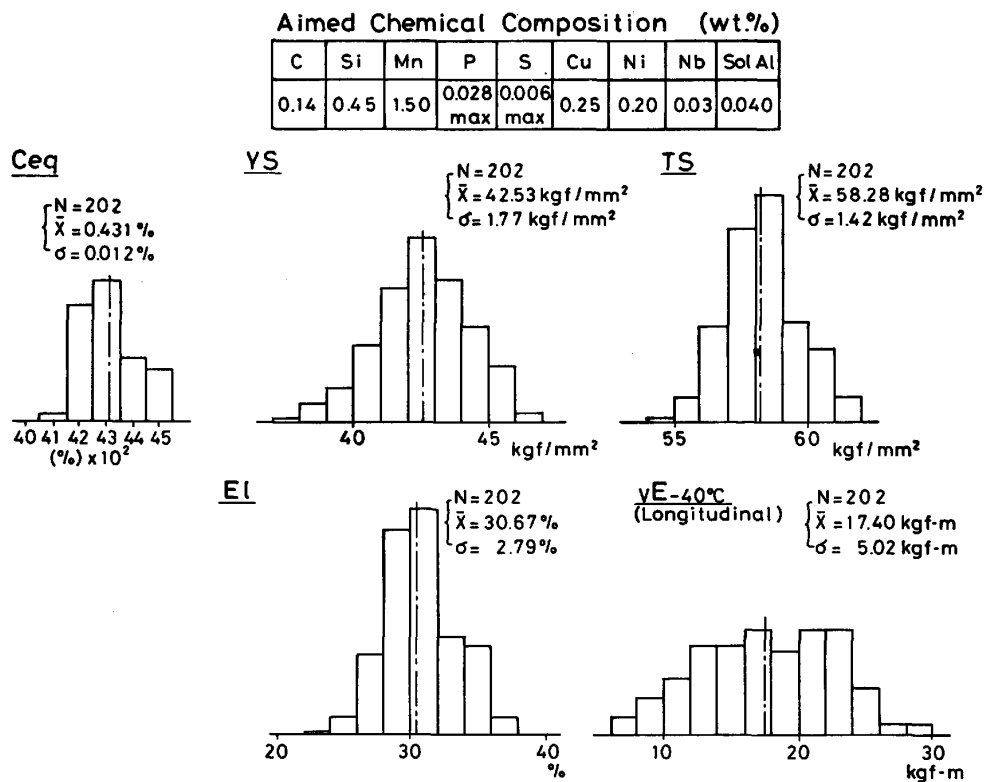


Fig. 10. Histograms for mechanical properties and carbon equivalent of EH36 steels (Normalized).

Table 10. Chemical composition and manufacturing conditions of EH36 Mod. steels.

(Ladle, wt%)

Steel	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Ti	Sol. Al	T. N	Ceq. *	P_{CM} **
A	32	0.07	0.29	1.46	0.017	0.002	0.20	0.35	0.012	0.063	0.0022	0.35	0.17
B	40	0.08	0.29	1.50	0.015	0.001	0.20	0.34	0.010	0.062	0.0020	0.37	0.18
C	75	0.08	0.29	1.50	0.013	0.001	0.21	0.33	0.008	0.061	0.0023	0.37	0.18
D***	75	0.14	0.47	1.48	0.025	0.003	0.13	0.12	—	0.033	0.0043	0.40	0.24

Steel	Thickness (mm)	Slab reheating temp. (°C)	Controlled rolling		Finish rolling temp. (°C)	OLAC†		Heat treatment
			CR-1	CR-2		Final temp. (°C)	Cooling rate (°C/s)	
A	32	980		68% below 740°C	720	540	7.0	—
B	40	980	80% below 900°C	60% below 740°C	720	525	4.0	—
C	75	1000		52% below 760°C	740	530	3.0	—
D	75	1300	—	—	1050	—	—	Nor

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

** $P_{CM} = C + 1/30Si + 1/20(Mn + Cr + Cu) + 1/60Ni + 1/15Mo + 1/10V + 5B$

*** Reference Steel, Nb 0.034%

† On Line Accelerated Cooling.

各切り欠き位置別シャルピー試験値を Fig. 13³⁷⁾ に示す。いずれの例においても入熱が極端に大きい場合を除いて、 -60°C 以下の温度で十分な靱性を有していることがわかる。本鋼種の溶接性を確認するためにおこなった溶接部テーパ硬さ試験、斜めY型拘束割れ試験の結果を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。溶接熱影響部の硬化性は十分小さく、また割れ感受性も低いことが示されている。溶接割れ感受性に関しては低温における補修

溶接性を検討するため、 $C_{eq.}$, P_{CM} を変化させて 0°C 以下の温度における拘束割れ試験を実施した。結果は Fig. 16 に示されるが³⁸⁾、鋼板の温度がまわりの大気温度と同じ場合には、 P_{CM} , $C_{eq.}$ が低ければ 0°C 以下においても予熱なしで割れを発生せず、極地における溶接補修性が極めて優れていることが推定される。この他歪み時効特性、再加熱特性についても問題のないことが確認されており、調査した範囲ではあらゆる面で氷海用鋼材

Table 11. Tensile test results.

Steel	Thickness (mm)	Sampling location	Sampling direction	Tensile test			
				Yield strength (kg·f/mm)	Tensile strength (kg·f/mm)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
A ¹⁾	32	full thickness	L C	40.0 42.8	50.9 52.8	31.7 28.6	— —
B ²⁾	40	1/4 t	L C	43.1 43.9	50.9 51.9	43.5 43.5	82.8 83.3
		1/2 t	L C	42.2 48.9	51.6 52.0	40.1 41.0	78.3 78.8
C ²⁾	75	1/4 t	L C	39.4 38.7	51.4 51.9	40.9 36.8	83.4 82.2
		1/2 t	L C	37.3 38.2	51.1 52.3	39.6 36.1	81.2 78.3
D ²⁾	75	1/4 t	L C	36.8 36.5	54.1 54.0	40.6 40.2	77.3 75.6
		1/2 t	L C	37.6 36.4	55.1 54.6	37.4 35.5	70.2 68.4

1) G.L.=200 mm full thickness 2) G.L.=50 mm, 14 mm ϕ

Table 12. Charpy impact test results.

Steel	Thickness (mm)	Sampling location	Sampling direction	Charpy impact test				NDT (°C) ⁽⁴⁾
				vE-80 ⁽¹⁾ (kgf·m)	vE-60 ⁽²⁾ (kgf·m)	vE-40 ⁽³⁾ (kgf·m)	50% FATT (°C)	
A	32	1/4 t	L C	33.5 32.1	34.7 34.7	34.9 34.8	-145 -133	-105
B	40	1/4 t	L C	35.3 36.8	36.6 37.8	39.0 41.4	-122 -119	-70
		1/2 t	L C	>30 >30	38.6 35.0	38.7 36.8	-128 -111	
C	75	1/4 t	L C	31.0 26.0	30.6 32.9	37.3 36.2	-91 -88	—
		1/2 t	L C	12.7 8.5	31.5 19.0	33.3 27.4	-74 -69	—
D	75	1/4 t	L C	7.7 3.5	16.7 13.2	20.7 18.9	-63 -57	—
		1/2 t	L C	— —	5.4 4.3	9.8 7.7	-36 -28	—

Note: (1) vE-80=Absorbed Energy at -80°C (2) vE-60=Absorbed Energy at -60°C
(3) vE-40=Absorbed Energy at -40°C (4) P-1 Specimen

Table 13. Results of Charpy impact test on weldments of various welding conditions.

Steel (Thickness)	Welding conditions	Bevel	Heat input (kJ/cm)	Notch* position	50% FATT (°C)	vE-60 (kgf·m)
A (32 mm)	One sided SAW (3 electrodes) 1 pass	∇	203	WM FL H1 H3	—	2.7 6.5 4.1 5.1
	One sided SAW (tandem) 5 passes	∟	100	WM FL H1 H3	—	6.9 11.8 14.3 30.7
	One sided SAW (tandem) 6 passes	∟	70	WM FL H1 H3	—	9.0 13.5 29.1 35.0
B (40 mm)	Multi pass SAW US36 (4 mm ϕ) PFH 55LT 11 passes	×	50	WM FL H-Center	-87 -64 -118	15.9 12.0 26.2
C (75 mm)	Multi pass SAW US36 (4 mm ϕ) PFH 55LT 23 passes	∩	49.5	FL H1 H3	-98 -98 -65	31.6 33.2 22.6
D** (75 mm)	Multi pass SAW US36 (4 mm ϕ) PFH 55LT 23 passes	∩	49.5	FL H1 H3	-41 -80 -22	1.4 17.0 1.5

* WM: weld metal, FL: fusion line, H1: HAZ 1mm, H3: HAZ 3mm

** reference steel (Normalized)

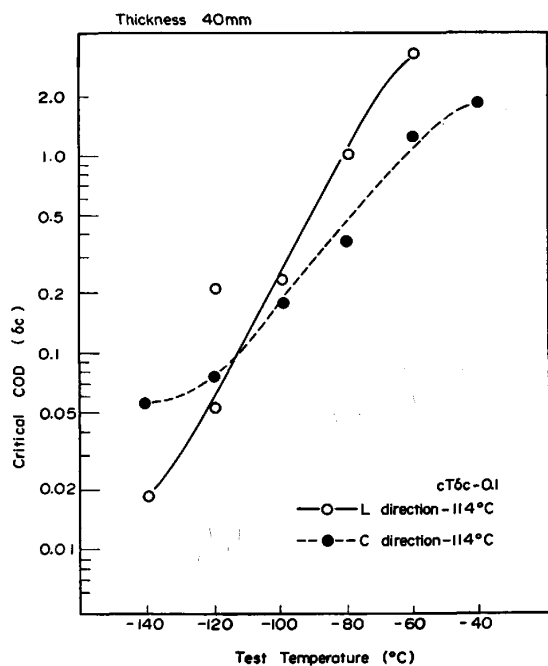


Fig. 11. Results of COD test (Steel B).

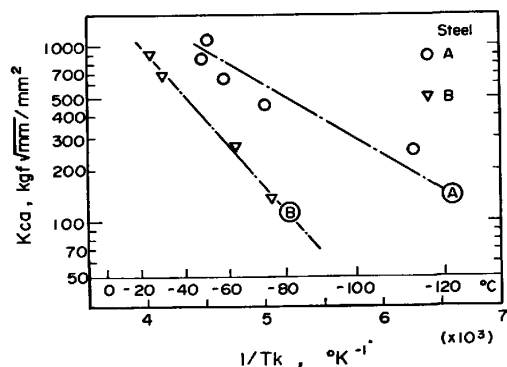


Fig. 12. Results of double tension test (Steel A and B).

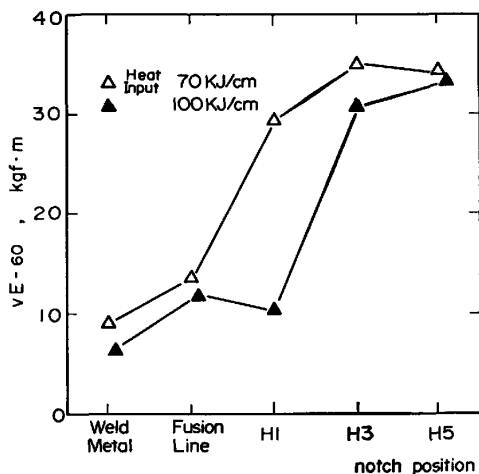


Fig. 13. Toughness distribution in SAW weldments with large heat input (Steel A).

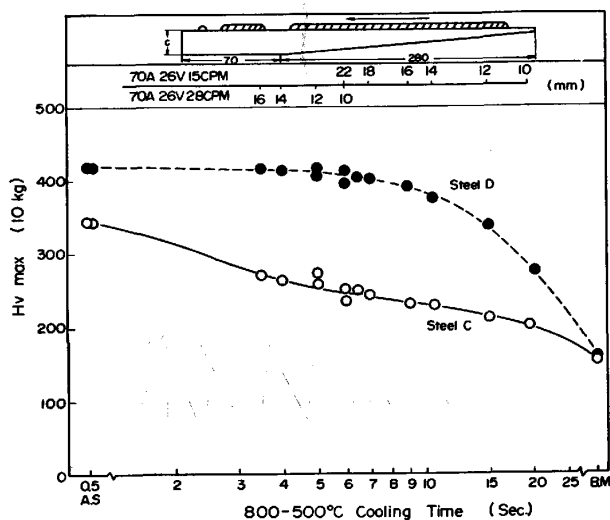
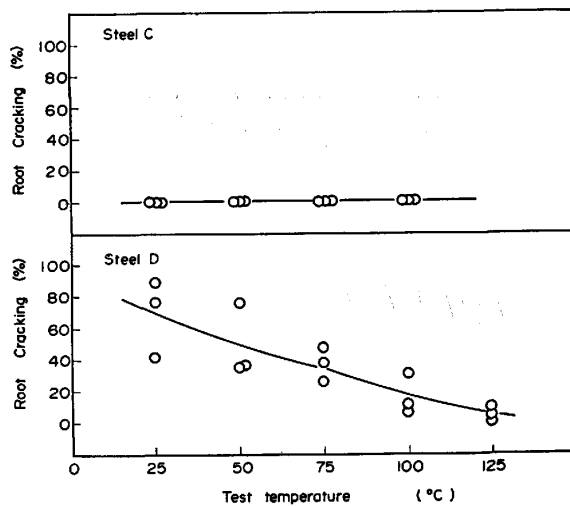


Fig. 14. Results of taper hardness test.



atmospheric condition : 20 $^{\circ}\text{C}$ -60% R.H
 electrode : NB-1 4mm dia. (AWS E8016-G)
 welding condition : 170 Amp.-24 Volt-15cm/min
 (heat input 16.3 kJ/cm)

Fig. 15. Results of Tekken type cracking test.

としての要求を十分に満たすものであるとすることができる。

6. 今後の課題と展望

氷海用鋼材に関する設計上、施工上の要求とその対応策については既に見たとおりであり、ほぼ解決されていると考えられる。一方今後の課題として検討すべき点は、主に使用中の損傷、破壊、寿命に関するものであろう。特に氷海中においては、船体または構造物を腐食から保護すべき塗料の塗膜や、陰極防食の電極等が氷により損傷を受けることがあるため、一般の船舶、海洋構造物よりも、鋼材そのものの耐食性が問題にされる場合が多いようである³²⁾。この点に関しては北欧における検討結果があるが^{32)~34)}、より突っ込んだ検討をおこなうためには、事実関係の正確な認識と、定量的なデータが必

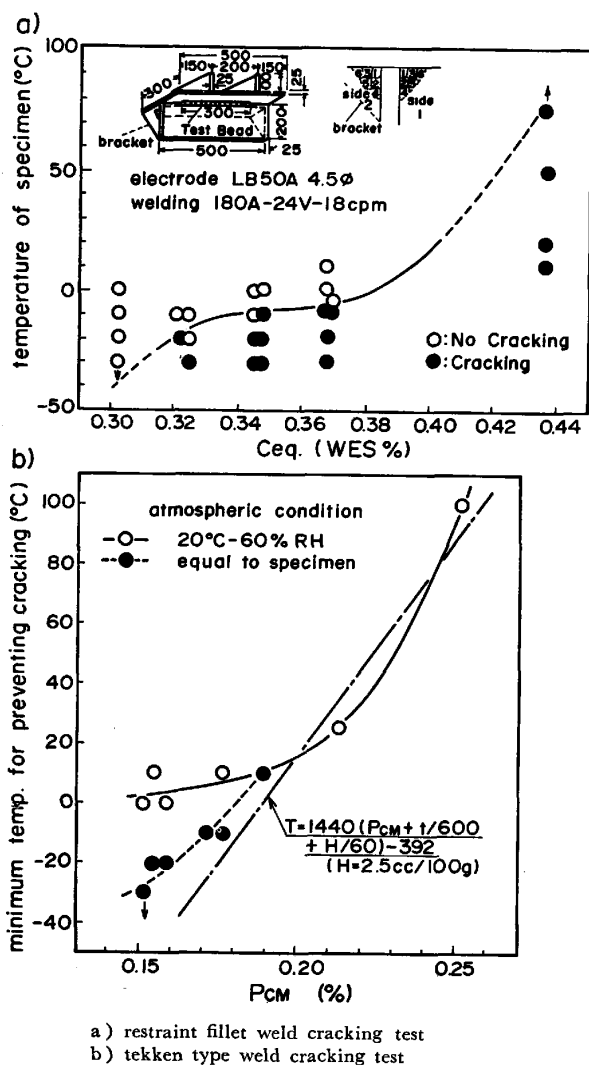


Fig. 16. Effect of $C_{eq.}$ and P_{CM} on susceptibility to low temperature cracking.

要である。また低温における低サイクル疲労や氷海水中の腐食疲労についても、試験データが少ないばかりでなく、実構造物において生じるであろう諸問題とこれらの特性値との対応関係もいまだ明らかではない。今後の長期にわたる構造物、船舶の追跡調査が必要であろう。

材料開発の面では、80 kgf/mm² 級高張力鋼の分野で、溶接性、低温靱性の優れた極厚鋼板の需要が具体化し、経済的で、溶接部靱性劣化の少ない成分系、製造方法の検討がおこなわれるものと思われる。また超大型砕氷タンカー等の建造が具体化すれば、より低温靱性の優れた、よりいつそう厚肉の船体構造用厚鋼板が要求されることが予測される。この要求に対しては Ni 鋼の TMP 材等が検討されつつある。また氷海構造物用鋼材の平均的な強度水準も TMP 鋼の本格的採用にともなって降伏点 36 kgf/mm² 級から 42 kgf/mm² 級へと向上するきざしも見えはじめており、北極海域のエネルギー開発活動が軌道に乗るにつれて、その要求に対応した鋼材の開発、製造活動もさらに活発化するものと期待される。

7. 結 言

氷海用鋼材の現状を概観した。氷海特有の条件に起因する厳しい要求に応え得る製造技術、設備、生産体制が整っている我が国において、他国の追随を許さない優れた鋼材が開発され、実生産に移されていることが注目される。しかしこれらの鋼材は実際に北極海域で使用された場合予想どおりの特性を示すか否かは現段階では未確認である。今後実地の使用を通して、設計上の要求の妥当性を含めた使用性能に関する追跡調査の実施が必要であろう。特に極地の自然は厳しく、時に予測できないような暴威をふるうことがあると言われる。このような場合には船体、構造体は設計時の前提条件を超えるような過酷な状況に置かれることも覚悟しなければならないであろう。使用者側との密接な協力により、必要な情報を入手して、鋼材の製造面に適切に反映させる努力が望まれる。

文 献

- 1) 本多一郎: 防衛技術 (1982 年 11 月), p. 1 [(財)防衛技術協会]
- 2) 篠崎慶幹, 寺本 清, 佐藤 守: 船の科学, 35 (1982) 4, p. 1
- 3) 駒野啓介: エネルギー, 15 (1982) 12, p. 41
- 4) Ship Structure Committee: A Rational Basis for the Selection of Ice Strengthening Criteria for Ships, Vol. 1, SSC309(1981) [U.S. Coast Guard]
- 5) Ship Structure Committee: A Rational Basis for the Selection of Ice Strengthening Criteria for Ships, Vol. 2, SSC310(1981) [U.S. Coast Guard]
- 6) 大島正直, 田淵 寛: エネルギー, 15 (1982) 12 p. 30
- 7) 矢部 孟: 同上, p. 22
- 8) 清水正俊: 同上, p. 36
- 9) 日本造船研究協会第 186 研究部会: 氷海用船舶、海洋構造物の設計、建造に関する研究報告書, (1982 年 3 月) [(社)日本造船研究協会]
- 10) Gulf Canada Resources Inc.: "Canadian Frontier Development and Transportation Scenarios to the Year 2000", A presentation to the special committee of the Senate on the northern pipeline (1982. Mar.)
- 11) OSC Platform Verification Program: "Appendices to Requirements for Verifying The Structural Integrity of OCS Platforms" (1979) Oct. [The Conservation Div., U.S. Geological Survey]
- 12) J. CHARLEUX: "Selection of Steel Quantities for Welded Structural Elements" [Bureau Veritas]
- 13) W. KESSEL: "Survey of Requirement for Plate Steel in Offshore Structures and Arctic Vessels", (1982) May [Chinook Fuel Innovations Ltd.]
- 14) 山蔦 充: "氷海船舶技術の最新動向", (1982 年 7 月), 経営能率研究会講演会予稿
- 15) 鉄鋼界報, No. 1300 (1983 年 6 月 21 日), p. 4
- 16) 渡辺 元, 片上幹史, 榎並禎一, 住友芳夫, 高嶋修嗣, 安田建二: 日本造船学会誌 (1983) 649, p. 374

- 17) 関根 寛: 第 86 回西山記念技術講座 (1982), p. 123 [日本鉄鋼協会]
- 18) 山田桑太郎, 矢島 浩, 安田建二: 日本造船学会誌 (1982) 639, p. 452
- 19) K. TSUKADA, C. OUCHI, and I. KOZASU: Proc. 23rd Mech Working Conf. (1981), p. 347 [AIME]
- 20) C. OUCHI, I. KOZASU, J. TANAKA, and K. TSUKADA: "Micon '78", ASTM STP 672 (1979), p. 105 [ASTM]
- 21) 橋本 保, 大谷泰夫, 中川 洋, 中村昌明, 別所清, 鈴木秀一: 鉄と鋼, 68 (1982), A211
- 22) 町田正弘, 川田昭二, 勝亦正昭, 梶 晴男, 秋山憲昭: 同上, A223
- 23) 志賀千晃, 波戸村太根生, 天野虔一, 榎並禎一: 同上, A227
- 24) 尾上泰光, 森川博文, 十河泰雄, 岩永 健: 同上, A231
- 25) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 新倉正和, 山本定弘, 平部謙二, 有方和義: 同上, A235
- 26) 笠松 裕: 「新しい構造用鋼材とその諸特性」(1981), p. 103 [日本鋼構造協会]
- 27) 例えば, 金沢正午, 中島 明, 岡本健太郎, 金谷研: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2589
- 28) 大谷泰夫, 渡辺征一, 川口喜昭, 山口洋治: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 2206
- 29) 笠松 裕, 高嶋修嗣, 鍋谷昭生: 鉄と鋼, 61 (1975), S 327, S 328
- 30) 船越督己, 田中智夫, 上田修三, 石川正明, 腰塚典明, 小林邦彦: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 303
- 31) 渡辺 之, 鈴木元昭, 山崎善崇, 徳永高信: 溶接学会誌, 51 (1982), p. 118
- 32) 渡辺 之, 鈴木元昭, 小嶋敏文, 土田正治: 同上, p. 650
- 33) A. V. A. SAARINEN: Proc. ICSTIS. Suppl, Trans. ISIJ, 1 (1971), p. 1101
- 34) E. RÄSÄNEN and K. RELANDER: Scand. J. Metallurgy, 7 (1978), p. 11
- 35) 東田幸四郎, 大北智良, 大内千秋, 長嶺多加志, 平部謙二, 八子一了: 日本鋼管技報 (1981) 89, p. 121
- 36) 東田幸四郎, 山崎善崇, 小菅茂義, 徳永高信, 平部謙二, 有方和義: 同上, (1982) 94, p. 312
- 37) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 城之内幸夫, 鈴木元昭, 渡辺 之: 同上 (1983) 99, p. 34
- 38) 山崎喜崇, 平林清照, 東田幸四郎, 渡辺 之, 鈴木元昭: 溶接学会春期全国大会講演概要, 32 (1983), p. 4