論 説

鋳鋼の低温衝撃特性について

寺 井 和 人*

The Low-temperature Impact Properties of Cast Steel

Kazuto Terai

Synopsis

The object of the work is to provide data on the low-temperature impact properties of cast steels.

Data are mainly taken from many other technical reports.

It seems that the low-temperature impact toughness of cast steel is close to that of roll and forging steels, if the casting design, deoxidizing and heat-treatment of cast steels are proper.

Therefore, if the lower temperature limits are adequately selected, there may be no problem on its using in various fields at low-temperature.

1. ま え が き

最近の工業技術の発展にともなう、LPG（液化石油ガス）あるいはLNG（液化天然ガス）の輸送、および貯蔵のため、低温用圧力容器の建造が増大している。また、寒冷地の開発にともなう、低温で使用される各種の構造物や原子力発電関係では、原子炉の冷却機器などにも鋳鋼品が次第に適用されてきている。このため、鋳鋼品の低温特性について、当社のデータおよび文献データをまとめ、鋼材と鋳鋼品の比較ならびに経済性を考慮し、用途に対する最適材質把握のための参考資料としたい。

2. 低温用鋼の種類と使用温度限界

通常、構造用材料として最も広く使用されている軟鋼、およびフェライト系鋼などの体心立方格子の金属は、その化学成分、熱処理、加工度のいかんにかかわ

らず、それぞれ特有な温度以下で低温脆性を示し、いわゆる脆性破壊という瞬間的かつ致命的な破壊を生ずることは、よく知られている。したがって、低温構造物に使用される材料は、その使用温度下でも脆性破壊を生じないだけの母材、溶接部の靱性を有しなければならない。

2. 1 各種液化ガスと低温用鋼の使用温度範囲

Table 1 は、低温における靱性を考慮し、各種液化ガスの沸点（℃，1 atm）と対応鋼種を概念的に示したものである¹⁾。しかしながら、これらの低温鋼は、主として圧延または鍛造材が対象であり、鋳鋼の場合低温特性に関するデータが少ないこと、および鋳造欠陥などの影響も考慮されるため、低温用鋳鋼として規定されている材質は特定のものに限定され、その適用範囲も比較的せまい。

2. 2 各国における低温用鋳鋼の規格

Table 2 は各国の低温用鋳鋼の種類と規格を示したものである。JISには、ASTMで規定されている高張力鋼が含まれておらず、またBSのようにオーステナイト系ステンレス鋼についての低温衝撃値の規

昭和47年5月19日受付

*大同製鋼株式会社工場

定がない。一方、衝撃試験片の形状についても異なっており、厳密な比較は困難である。また、使用温度が $-115\sim-196^{\circ}\text{C}$ の範囲では、適用材質が規定されておらず、今後の研究課題として残されている。

Table 1. Applied steel for various liquid gas.

Gas	Boil. Temp. ($^{\circ}\text{C}$, 1 atm)	Steel
Ammonia	-33.4	High strength steel Al-killed steel Low alloy steel
Propane	-45	
Propylene	-47.7	
Carbonyl sulfide	-50	
Hydrochloric	-59.5	$2\frac{1}{2}\%$ Ni Steel
Carbonic acid	-78.5	$3\frac{1}{2}\%$ Ni Steel
Acetylene	-84	
Ethane	-88.3	
Ethylene	-104	
Krypton	-151	9 % Ni Steel
Methane	-163	
Oxygen	-183	
Argon	-186	
Fluorine	-187	
Nitrogen	-195.8	
Neon	-246	Austenitic stainless steel
Hydrogen	-252.8	
Helium	-269	

3. 各種低温用鉄鋼の特性

3.1 炭素鉄鋼

低温用炭素鉄鋼は、各国とも大体、C : 0.3%以下、Mn : 1.1%以下であり、使用温度も -50°C までである。Fig. 1 は、SCPL1のシャルピー遷移温度曲線を示したものである²⁾。 -45°C における衝撃値は、 $2.3\sim 2.7\text{kg}\cdot\text{m}$ 位であり、問題はない。Fig. 2 は、この材料を用いて溶接した場合の、 -45°C における溶接部のシャルピー試験結果である²⁾。母材との比較のため、5mm Uノッチ試験片を使用した。予熱および後熱を実施しない場合でも、溶着金属および融合部の衝撃値は、母材よりも優れている。熱影響部は、母材と

Fig. 1. Low-temperature impact toughness (5mm U-notch) of carbon steel casting.

Fig. 2. Impact toughness (5mm U-notch) of arc-welded joint in 25mm thick SCPL1 casting plate.

同程度であるが、予熱または予熱および後熱（バーナ加熱）を行なうと更に向上する。

Fig. 3 および Fig. 4 は、原子力発電用鉄鋼品を受注した際のSCPL1の無延性遷移温度、NDTT (Nil Ductility Transition Temperature) 確認試験の結果を示したものである³⁾。試験は、S20Cの鍛造材（板厚25mm）とSCPL1（板厚25mm）の鍛造材をアーク溶接し（溶接棒：LB-26）、 620°C の歪取焼鈍後、熱影響部および溶着金属の -17°C における、Vノッチシャルピー衝撃値を測定した。Fig. 3 は、S20CおよびSCPL1母材の遷移曲線を示したものである。Fig. 4 に、この材料の溶接部の衝撃値を示す。S20CとSCPL1の衝撃値はほぼ同じであり、溶着金属の衝撃値は著しく優れている。規格は、 -17°C において $2.8\text{kg}\cdot\text{m}$ であるので、いずれも完全に合格している。（NDTTの内容については後述す

Table 2. JIS and foreign specifications for cast steels
used at low-temperatures.

Spec.	Steel	Chemical composition								Mechanical properties				Impact properties			
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Y.S. (kg./sq.in.)	T.S. (kg./sq.in.)	E.L. (%)	R.A. (%)	a.v.g. (kg.-m.)	min. (kg.-m.)	test temp. (°C)	
ASTM *1 A352 (1970)	L C A	≤0.25	≤0.60	≤0.70	≤0.04	≤0.045	—	—	—	≥21.1	≥42.2	≥24	≥35	≥1.80	≥1.38	— 31.7	
	L C B	≤0.30	"	≤1.00	"	"	—	—	—	≥25.3	≥49.2	≥22	≥35	≥1.80	≥1.38	— 45.6	
	L C C	≤0.25	"	≤1.20	"	"	—	—	—	≥28.1	≥49.2	≥22	≥35	≥2.07	≥1.66	— 45.6	
	L C 1	"	"	0.50 ~0.80	"	"	—	—	0.45 ~0.65	≥24.6	≥45.7	≥24	≥35	≥1.80	≥1.38	— 59.4	
	L C 2	"	"	"	"	"	2.00 ~3.00	—	—	≥28.1	≥49.2	≥24	≥35	≥2.07	≥1.66	— 73.3	
	LC2-1	≤0.22	≤0.50	0.55 ~0.75	"	"	2.50 ~3.50	1.35 ~1.85	0.30 ~0.60	≥56.2	≥73.8	≥18	≥30	≥4.15	≥3.45	— 73.3	
	L C 3	≤0.15	≤0.60	0.50 ~0.80	"	"	3.00 ~4.00	—	—	≥28.1	≥49.2	≥24	≥35	≥2.07	≥1.66	— 101.0	
	L C 4	"	"	"	"	"	4.00 ~5.00	—	—	≥28.1	≥49.2	≥24	≥35	≥2.07	≥1.66	— 115.0	
BS *2 3100 (1967)	Grade A	≤0.20	≤0.60	≤1.10	≤0.040	≤0.040	—	—	—	≥23.5	≥44	≥22	—	≥2.07	≥1.38	— 40	
	Grade B	"	"	≤1.0	"	"	—	—	0.45 ~0.65	≥28	≥47	≥18	—	≥2.07	≥1.38	— 50	
	Grade C	≤0.12	"	≤0.80	≤0.030	≤0.030	3.00 ~4.00	—	—	≥28	≥47	≥20	—	≥2.07	≥1.38	— 60	
	Grade A*4	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.040	≤0.040	≥8.0	17.0 ~21.0	—	≥21	≥49	≥26	—	≥4.15	≥3.45	— 196	
	Grade B*4	≤0.06	"	"	"	"	≥8.5	"	Nb 8X C % ~0.90	≥21	≥49	≥22	—	≥2.07	≥1.38	"	
	Grade C*4	≤0.03	"	"	"	"	≥8.0	"	—	≥19	≥44	≥26	—	≥4.15	≥3.45	"	
	Grade B*4	≤0.08	"	"	"	"	≥10.0	17.0 ~20.0	2.0 ~3.0	≥21.5	≥49	≥26	—	≥3.45	≥2.76	"	
	SCPL 1	≤0.30	≤0.60	≤1.00	≤0.040	≤0.040	≤0.50	≤0.25	—	≥25	≥46	≥24	≥35	≥2.1	≥1.4	— 45	
JIS *3 G5152 (1969)	SCPL 11	≤0.25	"	0.50 ~0.80	"	"	—	≤0.35	0.45 ~0.65	≥25	≥46	≥24	≥35	≥2.1	≥1.4	— 60	
	SCPL 21	"	"	"	"	"	2.00 ~3.00	"	—	≥28	≥46	≥24	≥35	≥2.1	≥1.4	— 70	
	SCPL 31	≤0.15	"	"	"	"	3.00 ~4.00	"	—	≥28	≥46	≥24	≥35	≥2.1	≥1.4	— 100	

*1 V-notch *2 V-notch *3 U-notch (5mm) *4 If required by the purchaser

Fig. 3. Comparison of low-temperature impact toughness for SCPL1 and S20C.

Fig. 4. Impact toughness (V-notch) of arc-welded joint (SCPL1+S20C) in 25mm thick plate tempered at 620°C after welding.

Fig. 5. Effect of aluminum on Charpy V-notch value of normalized and tempered medium-carbon steels.

る。

炭素鋼の低温衝撃値におよぼす各種要因の影響について、現在までの研究結果を参考のためここに記載する。Fig. 5 は、Al の影響を示したものであり⁴⁾、Al は0.10% までは遷移温度を下げる効果を有している。このため、Al で脱酸した Al キルド鋼が L P G

Fig. 6. Effect of carbon content on Charpy V-notch value and transition temperature of as-rolled carbon steels.

Fig. 7. Variation of 15ft-lb temperature with Mn/C ratio, for normalized carbon steels.

Fig. 8. Comparison of V-notch transition curves for carbon steel in various condition of heat-treatment.

の貯槽や容器に使用されてきている。Al は、AIN の微細な析出によってオーステナイト結晶粒の成長をさまたげ、微細化し、同時にフェライト結晶粒を微細化

する。さらに、歪時効を起す有害なNを固定することによって脆性を少なくする。

Fig. 6 にCの影響⁴⁾, Fig. 7 に Mn/C の比の影響⁵⁾を示す。Mn/C 比が大きいほど、遷移温度は低下する。このためBS規格の中には、 $Mn/C \geq 3.0$ を規定した鋳鋼もある。Fig. 8 は、炭素鋳鋼の各種熱処理条件と衝撃値の関係を示したものである⁵⁾。焼鈍+焼準のものがよい結果となっているが、焼入れ+焼戻しの場合が最もよいことは、圧延あるいは鍛造材のデータなどから判明している。

3. 2 低合金鋳鋼

低温用低合金鋳鋼は、Mo 鋼と低 Ni 鋼に大別され使用温度は4.5% Ni 鋳鋼(LC4)で、 -115°C までである。Fig. 9, 10, 11にそれぞれSCPL11, SCPL21, SCPL31の遷移曲線を示す⁶⁾。Fig. 12 は、Ca-Si 脱酸を行なったSCPL31(15チャージ)の -100°C における衝撃値のヒストグラムである⁷⁾。大部分は規格に合格しているが、Fig. 11 に示したAl脱酸材の場合にくらべて、若干衝撃値は低い。

Fig. 9. Impact toughness of low-alloy cast steel. (SCPL11)

Fig. 13 は、各種低合金鋳鋼の強度レベル(引張強さ)をそれぞれ一定にした場合、衝撃値が15ft-lb(2.07kg·m)になる温度を比較して示したものである⁵⁾。焼入性がよく、焼戻脆性の少ない材料が低温用の場合でも最適であることがわかる。

Fig. 10. Impact toughness of low-alloy cast steel. (SCPL21)

Fig. 11. Impact toughness of low-alloy cast steel. (SCPL31)

Fig. 14 に、低合金鋼の低温靱性におよぼす水素の影響⁴⁾を参考のため示す。低 Ni 鋼は炭素量を低くおさえているので、比較的溶接性はよいが、溶接部の靱性向上のため 100°C 程度の予熱を行なうことが望ましい。溶着金属は $630\sim 680^{\circ}\text{C}$ の後熱を行なった場合、か

Fig. 12. Histogram of impact toughness (5mm U-notch) for SCPL31 cast steel.

Fig. 13. Comparison of mean temperatures to give 15 ft-lb (V-notch) for various cast steels heat treated to different tensile levels.

Fig. 14. Effect of hydrogen on notch toughness of alloy steel rotor forgings, double normalized and tempered.

えて靱性が低下する。また、後熱後の冷却速度が遅いほど靱性が低下するので、低 Ni 鋼の後熱は 630°C 以下で、冷却速度はできるだけ速いほうが望ましい。溶接棒は、残留応力除去焼鈍による靱性低下度の少ない 4.5%Ni-0.2%Mo 系のものがよいとされている¹⁾。

3.3 中合金鋳鋼

低温用中合金鋼は、各国とも規格化していない。圧延および鍛造材では、9%Ni 鋼について詳細な研究がなされているが、鋳鋼ではほとんどなされていない。

Fig. 15 は、低温衝撃値におよぼす Ni の影響⁴⁾を示したものであるが、Ni 含有量が多くなるにしたがって、遷移温度は低下する。

Fig. 15. Effect of nickel on Charpy keyhole notch toughness. All steels were normalized and contained 0.10% C except the 2% Ni grade, which contained 0.15% C.

Fig. 16. Impact toughness of 9% Ni cast steel. (V-notch)

Fig. 16 は、9%Ni 鋳鋼の遷移曲線⁸⁾を示したものであるが、焼準状態のままのため、圧延材のものに比較して衝撃値はかなり劣っている。しかし、3.5%Ni 鋼などよりはるかに低温靱性が優れているので、-115~-196°C までの低温用材料として、今後最も期待される。

3.4 ステンレス鋳鋼

ステンレス鋳鋼のうち、フェライトあるいはマルテンサイト型の 13Cr 系は、低温脆性を生じるが、18Cr-8Ni 系のオーステナイトステンレス鋼などでは、通常低温脆性を示さない。

Fig. 17 は、13%Cr 鋳鋼の衝撃値におよぼすオーステナイト化温度の影響を示したものである⁹⁾。1000°C から焼入れした場合が衝撃値が最も高く、遷移温度は-43°C 位である。また低炭素 (0.04~0.05%) の 13Cr-4Ni 鋳鋼は、950°C 焼準、600°C 焼戻しにより、遷移温度は約-160°C に下がると報告されている⁹⁾。

Fig. 17. Effect of quenching temperatures on the low-temperature impact toughness (V-notch) of 13% Cr stainless steel.

Fig. 18 は、18Cr-8Ni 鋳鋼 (ASTM, CF8) の遷移曲線⁸⁾を示したものであるが、-200°C においても高い衝撃値を有している。オーステナイト系のステンレス鋼は、結晶粒が微細なほど、炭素量や δ フェライト量が少ないほど、また、オーステナイトの安定なものほど低温衝撃値は高い。常温以下の温度に過冷した場合、不安定オーステナイトはマルテンサイト変態を起こすが、この温度と化学成分との関係は、大体次の式で定まる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} Ms(^{\circ}F) = & 75(14.6 - Cr) + 110(8.9 - Ni) \\ & + 60(1.33 - Mn) + 50(0.47 - Si) \\ & + 3000 [0.068 - (C + N)] \end{aligned}$$

Fig. 18. Impact toughness of cast 18Cr-8Ni stainless steel.

いっぽう、Ms 点以上の温度においても、塑性加工した場合マルテンサイト変態を起こし、その温度と化学成分の関係は

$$\begin{aligned} Md(^{\circ}C) = & 413 - 462 [(C + N)] - 9.2[Si] \\ & - 8.1[Mn] - 13.7[Cr] - 9.5[Ni] \\ & - 18.5[Mo] \end{aligned}$$

となることが言われている¹¹⁾。従って、極低温で使用するオーステナイトステンレス鋼は、安定なものほどよいが、CやN含有量があまり多過ぎるものは、それ自身靱性を低下させるので注意する必要がある。

溶接を行なった場合、一般に溶着金属は低温脆性の感受性が大いと言われている。Fig. 19 は、SCS 13の溶接部の低温衝撃値を示したもので¹²⁾、溶接の

Position: Flat
Amp: 110~140 A (A.C.)
Interpass temp.: $\leq 50^{\circ}C$
Rod dia.: 4.0mm

Fig. 19. Impact toughness (V-notch) of arc welded joint in 30mm thick SCS 13 casting plate.

ままでは靱性は著しく低下するが、1050°Cの溶体化処理を行えば、靱性はかなり回復する。

4. 低温特性の評価

低温用鋼の低温特性の評価としてJIS, およびBSならびにASTMでは、主として、一定の吸収エネルギーレベル 1.8~2.1kg・m という基準で行なっているが、これはある温度におけるシャルピー吸収エネルギーが1.8あるいは2.1kg・mを下回る材料を、その温度で使用することは危険であるという見解に立ったものである。

いっぽう、材料の低温特性を評価する場合、Fig. 20に示すように、微小割れから破壊が発生するのに必要な応力 σ_F と、降伏応力 σ_Y が等しくなる温度として定義される無延性遷移温度、NDTTは脆性破壊を論じる上で大きな意味を持っている。一般に、NDTTは、約85%結晶性破壊（脆性破面率85%）と関連があり、FTE（弾性—破壊遷移、Fracture—Transition Elastic……これ以上の温度では、割れがいくら大きっても降伏応力に等しい応力では破壊しない）は、約55%結晶性破壊（脆性破面率55%）と関連があるとされている¹⁸⁾。白石、岡山らは⁹⁾、FTE—NDTT=30°Cと言われていることと、NDTT付近の温度において、CAT曲線（き裂阻止曲線、Crack—Arrest temperature curve……割れの大きさを無限に大きくしていった時、不安定へき開破壊

を起こすのに必要な最低応力 σ_M の温度に関する曲線）の値は、3.5~4.0kg/mm²であることから、NDTT+15°C（約70%の脆性破面率に相当）の温度において、約 $\sigma_Y/2$ の応力で使用されるならば、不安定へき開破断は決して起こらないとし、許容最低使用温度（ T_{AL} ）を次のごとく設定している。

$$T_{AL} = NDTT + 15^\circ\text{C} = {}_2T_{rs85} + 15^\circ\text{C}$$

${}_2T_{rs85}$: 2mmVノッチ試験片で脆性破面率が85%になる温度

前述した原子力発電用鋳鋼品の場合も、NDTT+17°Cを最低使用温度に設定していることから考えると、上記の許容最低使用温度の設定は妥当と考えられる。

5. ま と め

以上のごとく、低温用鋳鋼の衝撃に対する低温特性について、社内および文献データをまとめて概述した。鋳鋼品は、製品形状が複雑な場合、鍛造材からの削り出し加工品に比較してコストも安く、最近、原子力発電関係の冷却機器にもどしどし採用されてきている。従って、許容最低使用温度の設定さえ誤らなければ、各種低温用途に採用しても、全然問題はないものとする。

終わりに、本稿の執筆に当り、発表を許可された堀速水 築地工場長、および適切な助言をいただいた、片岡次長ならびに伊藤技術課長に深く感謝いたします。

（文 献）

- 1) 金沢：鉄と鋼 53 (1967) 14, 1605
- 2) 大同製鋼社内データ
- 3) ibid
- 4) ASM: Metals Handbook, (1960), 227
- 5) W.J. Jackson, G.M. Michie: JISI, 187 (1957) 10, 104
- 6) 白石、岡山：鋳・鍛鋼品の低温衝撃特性について、(日本海事協会), (1972), 293
- 7) 大同製鋼社内データ
- 8) Steel Casting Handbook 3rd Edition by SFSA (1960), 412
- 9) G.M. Gill et al.: British Foundryman, 59 (1966) 11, 463
- 10) G.H. Eichelmann Jr, F.C. Hull: Trans. ASM. 45 (1953), 77
- 11) T. Angel: JISI. 177 (1954) 5, 165
- 12) 大同製鋼社内データ
- 13) 宮本博訳「構造材料の強度と破壊①」(培風館)

Fig. 20. Effect of temperature on the σ_Y , UTS, σ_i , σ_F