

低温用鋼材と脆性破壊*

金 沢 武**

Brittle Fracture of Steels for Low Temperature Application

Takeshi KANAZAWA

記号説明

- r : 切欠き底曲率半径
- t : 板厚
- C : 亀裂長さあるいはその 1/2
- HT80等 : 80 kg/mm² 級高張力鋼など
- Kc : 脆性亀裂伝播抵抗値
- Si : 脆性亀裂発生時の塑性表面エネルギー
- ${}_5Tr_{15}$: 5 mm U切欠きシャルピー試験の 15ft-lb 遷移温度
- ${}_2Tr_{15}$: 2 mm V 切欠きシャルピー試験の 15ft-lb 遷移温度
- ${}_2Trs$: 2 mm V 切欠きシャルピー試験の脆性破面率 50% 遷移温度
- pTc : プレス切欠きシャルピー試験の脆性破面率 50% 遷移温度
- vE : 2 mm V 切欠きシャルピー試験における吸収エネルギー
- N : 焼準し
- Q : 焼入れ
- T : 焼戻し
- WM : 溶着金属
- HAZ : 溶接熱影響部
- BZ : 溶接融合部 (ボンド)
- AW : 溶接のまま
- SR : 応力除去焼鈍
- 後熱 : 溶接後冷却しないで加熱すること

知られていることである。

したがって低温構造物に使用される鋼材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。かつてのように低温用構造物の需要が少ない時代には低温脆性を示さない面心立方格子の金属、Al 合金、Cu 合金、あるいはオーステナイト系ステンレス鋼など高価で特殊な材料が使用されていた。しかし最近の事態においては経済性からはもちろん工業材料技術の観点からも、各種構造物の使用温度に応じ、必要にして十分な低温靱性を有する各種鋼材が開発され、使用されていることは当然のことである。

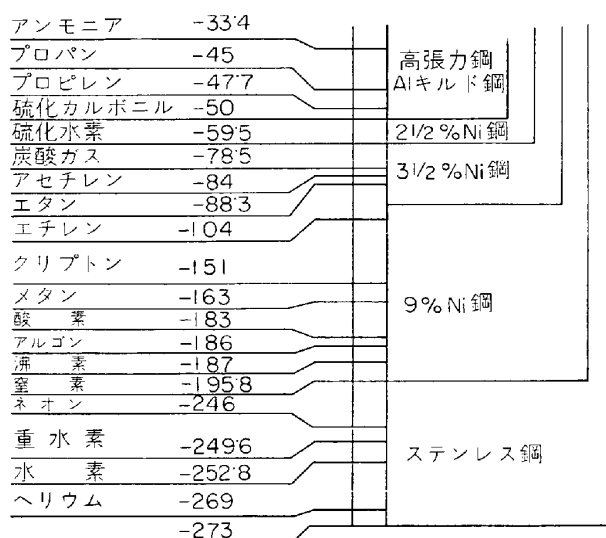
一般に低温構造用鋼としてはその使用温度にしたがって Al キルド鋼、調質高張力鋼、低ニッケル鋼、9% Ni 鋼、およびオーステナイト系ステンレス系ステンレス鋼などがあるが、各種液化ガスの沸点 (°C, 1 atm.) とその容器に使用されている鋼種を概念的に示したものが第 1 図である。

しかし同一鋼種であつても合金成分、熱処理などの相違によつて脆性破壊特性は当然異なつたものとなるので、特に新鋼種開発に際しては次章に述べる適当な脆性破壊特性試験を行なつて、その特性を確認することが必要である。

以下本稿ではまず各種鋼材の脆性破壊特性判定のための試験法について簡単に述べた後、低温構造用鋼の特性およびその問題点、材質判定の考え方について概説することにする。

最近の工業技術の飛躍的發展にともなつて、LPG (Liquefied Petroleum Gas), あるいは LNG (Liquefied Natural Gas) 輸送用パイプライン、運搬船、および貯蔵タンクの建造をはじめとし、液体酸素あるいは液体窒素の貯蔵タンクなどの低温用圧力容器の建造が急激に増大しつつあることは周知のとおりである。これら低温にさらされる構造物に使用される材料に対して要求される最も重要な性能は、“低温”という特殊な条件の下で、その構造物の使用目的を十分満足するに必要なだけの強度、溶接性、および経済性であろう。

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、その化学組織、熱処理、加工度のいかにかわからず、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



第 1 図 各種液化ガスの沸点 (°C, 1 atm.) と低温材料

* 昭和42年 9 月 7 日受付 (依頼原稿)

** 東京大学工学部 工博

1. 脆性破壊特性試験法

一般に鋼材の脆性破壊特性は発生と伝播の相異なる2つの特性に分けて論じられている。たとえば2つの鋼材A, Bを比較する場合に、脆性破壊の発生に対する抵抗値はAがBよりすぐれていても、伝播に対する抵抗値はかならずしもAがBよりすぐれているとはかぎらない。したがって脆性破壊特性試験法は発生特性判定のための試験法(発生試験)と、伝播特性判定のための試験法(伝播試験)とに区別して論じなければならない。

現実の脆性破壊現象は非常に複雑であり、純粋に発生特性あるいは伝播特性だけを判定できる試験法は現在のところ確立されていないが、試験結果の大勢が発生特性に支配されるかあるいは伝播特性に支配されるかに従って発生試験と伝播試験とに分けることにする。なお従来提案されている脆性破壊特性試験法は非常に数が多いが、大別すると実際の構造物使用状態をできるだけ忠実に試験条件にとり入れようとする研究室の大型試験と、現業的立場から生産現場において使用鋼材量をできるだけ少なく、また容易に行なえる点を重視した工業的小型試験とがある。一般に工業的小型試験では破壊の発生に先立つて切欠部試験片全断面が降伏し、いわゆる全面降伏(general yield)を生ずるので、実際の構造物の脆性破壊とは事情を異にしているが、小型試験では経済性と実施能率を重んじている以上避けがたいところである。

以下重要と思われる代表的試験法について簡単に述べることにする。

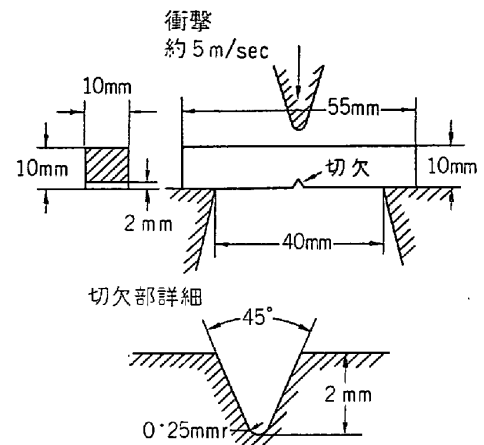
1.1 発生特性試験

1.1.1 V・シャルピー試験(V-Charpy Test)-(工業的小型発生特性試験)

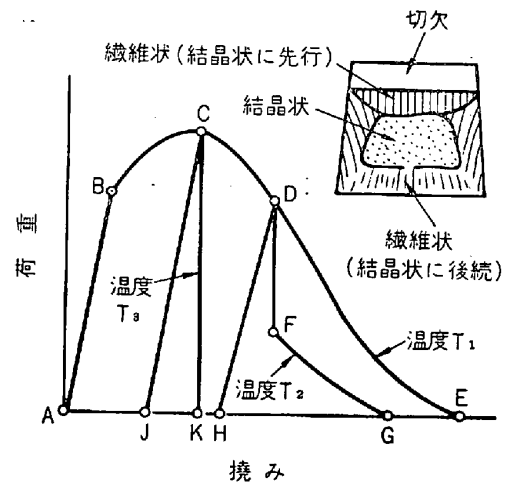
第2図に試験片形状などを示してあるが、この試験法は現在世界的に最も広く使用されている工業的小型試験である。各国の鋼材規格、特に脆性破壊を考慮しなければならない構造物に使用される構造用鋼の規格には、ある定められた試験温度あるいは使用温度におけるV・シャルピー試験の吸収エネルギーの値あるいは破面率の値が規定されている。これら各規格では鋼材の脆性破壊発生特性あるいは伝播阻止特性に関連して定められているものかどうかは一般に不明であるが、たとえば英国船級協会LRの損傷調査の結果に基づいて定められた造船用鋼材のD級鋼(重要部材を構成する厚板)に対する要求値、あるいは日本溶接協会WES規格「低温構造用鋼板材質判定規準」などでは明らかに鋼材の脆性破壊伝播阻止特性の判定にこの試験法を採用している。

しかしこの理由はV・シャルピー試験が現場的に最も普及している試験であるというだけの理由にすぎない。

越賀はV・シャルピー試験の荷重・撓み曲線の形状と破面外観の関連を調査している¹⁾が、その結果を第3図に示す。一般に切欠底部からはまず繊維状外観の亀裂が発生し、それがある深さまで進展すると脆性破壊(結晶状外観の不安定破壊)発生の条件を満足するようになり、結晶状外観の亀裂に転換し、外力による試験片の撓み速度に比べて桁違いの高速で試験片の圧縮側に伝播したのち停止する。停止後間もなく外力が追いついて試験片の残部は延性的に破断される。



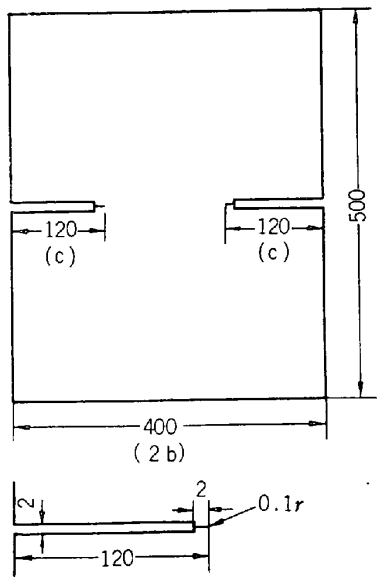
第2図 V・シャルピー試験の概要



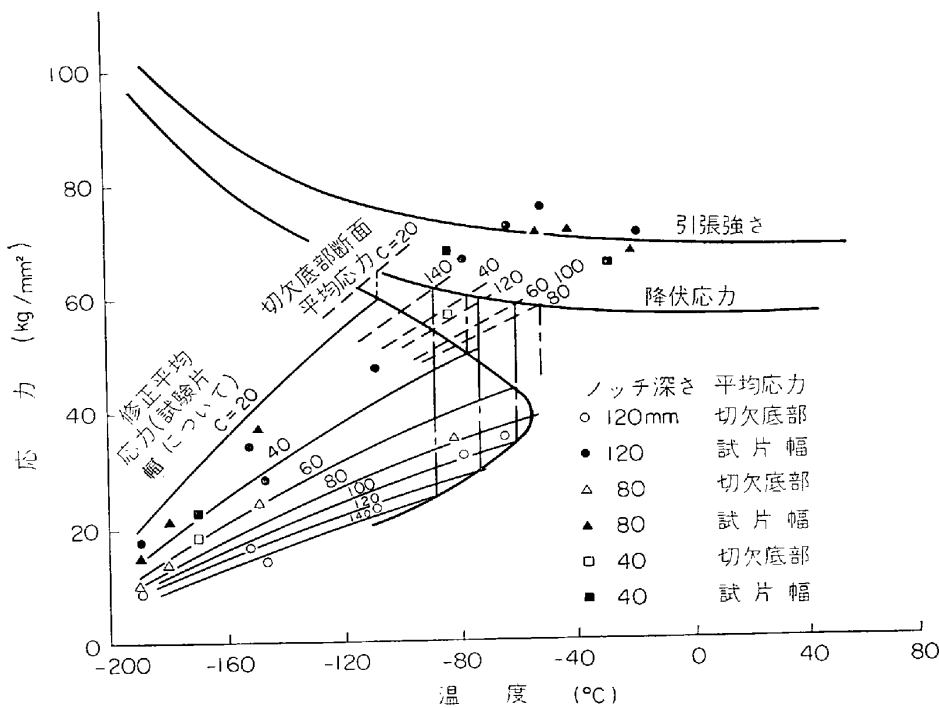
第3図 V・シャルピー試験の荷重・撓み曲線と破面外観

第3図に示した破面外観はこのようにして形成されたものであるが、これを荷重・撓み曲線について考察すると次のようになる。すなわち図に示した温度 T_1 では荷重・撓み曲線の形状はABCDEのようになり、破面はすべて繊維状破面を示し、吸収エネルギーも大きい、それより適当に低い温度 T_2 で試験を行なうとABCDFGのような荷重・撓み曲線を示し、さらに低温側の温度 T_3 ではABCKのようになり、荷重・撓み曲線で囲まれた面積で示される吸収エネルギーは減少し、DF, CK部分のように撓みの増加をほとんどともなわずに荷重が急減する割合が増大するとともに結晶状破面率も増大する。もちろん試験温度が異なれば、鋼材の降伏点の相違などにより第3図に示した温度 T_1 , T_2 および T_3 における荷重・撓み曲線が図のようになるとは限らないが、実測結果によるとほぼ第3図に示したもので表わされることが確かめられている。図中のC点は切欠底部に繊維状外観の亀裂が発生する点を示すものであり、したがって温度 T_3 では切欠底部から繊維状亀裂が発生すると同時に結晶状亀裂に転換するので巨視的には破面は100%結晶状となる。

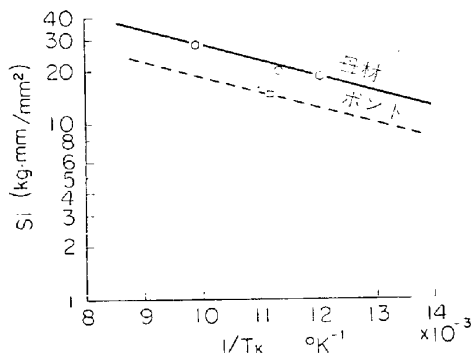
以上のことから考えるとV・シャルピー試験の破面遷移はエネルギー遷移に密着した現象であり、いずれも曲



第4図 ディープ・ノッチ試験片および切欠部詳細 (単位 mm)



第5図 60キロ高張力鋼の破壊発生特性



第6図 Si と温度の関係

線CD上のどの位置にD点が位置するかによつて試験結果の大勢が決定される。面積ABCDHAは結晶状亀裂が発生するまでに試験片によつて吸収されるエネルギーをあたえるもの、すなわち脆性破壊の伝播開始(脆性破壊発生)に対応するものと考えられる。したがつてV・シャルピー試験は鋼材の脆性破壊発生特性を判定するための試験法であると本質的には考えられる。

V・シャルピー試験以外に2mmU・シャルピー、キーホール・シャルピー、シユナット試験などの工業的小型発生試験が数多く提案されているが紙面の都合で省略することにする。

1.1.2 ディープ・ノッチ試験 (Deep Notch Test)- (研究室的大型発生特性試験)

実際の構造物に生ずる脆性破壊と同様に低い荷重のもとで起こる脆性破壊の伝播開始の現象を小型の試験で実現させようとする努力は多くの研究者によつてなされたが、降伏点が130 kg/mm²程度以上のいわゆる超高張力鋼薄板以外ではすべて失敗に終わつており、数種の研究室的大型試験で成功したにすぎない。

研究室的大型発生特性試験としてはWells木原らによる溶接ビード付広幅引張試験²⁾、エッソー (Esso) 試験³⁾などもあるが、ここでは、最近、木原、秋田、池田らによつて開発されたディープ・ノッチ試験 (Deep Notch Test)⁴⁾について述べることにする。

第4図は同試験に用いられる試験片の形状を示すものである。図に示すように十分深い切欠を付けた試験片の引張試験を行なうと、切欠底部の拘束が十分高いことによつて高張力鋼のみならず軟鋼でもある温度以下で全面降伏荷重よりも低い荷重で切欠底部から直接脆性破壊を発生させることができる。

木原、池田ら⁴⁾は切欠深さを種々にかえて実験を行ない、脆性破壊発生に対しても、いわゆるGriffith-Orowanのエネルギー条件式が適用できることを実験的に検証し低温用鋼材を含む

多数の鋼種およびその溶接部について切欠底部断面が全面降伏をおこす以前に脆性破壊が発生する範囲を第5図に示すように右側に凸の曲線で囲まれた低温側領域として求めている。

なお脆性破壊発生のための塑性表面エネルギー

$$S_i = \pi [f(\gamma)\sigma]^2 C/E$$

ただし $f(\gamma) = \sqrt{(2B/\pi C) \tan(\pi C/2B)}$. 試験片幅

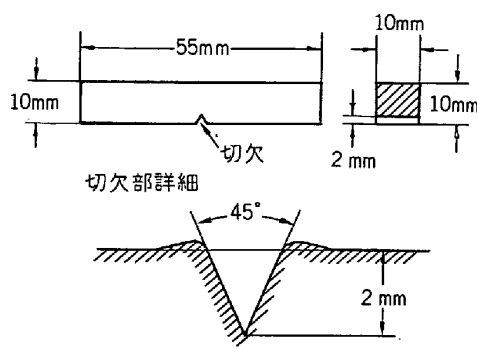
が有限であるための補正係数

σ = 破壊発生応力 (試験片幅の平均応力)

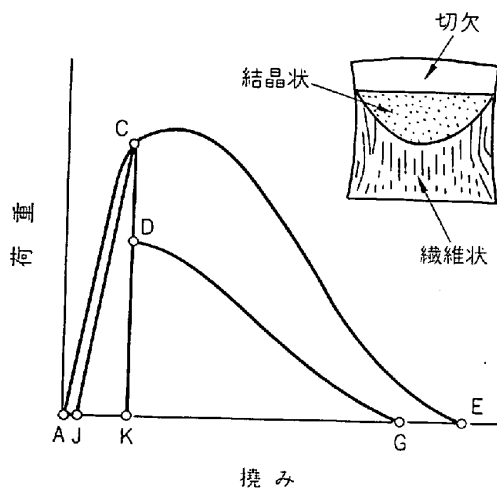
C = 切欠深さ

$2B$ = 試験片幅

E = ヤング係数



第7図 プレス・ノッチシャルピー試験の試験片



第8図 プレス・ノッチシャルピー試験の荷重・撓み曲線と破面外観

を本試験法から求め試験温度（絶対温度）の逆数との関係を求めると第6図のごとくなり、

$$S_i = S_{i0} \exp(-k_i/T)$$

ただし T = 試験温度（絶対温度）

S_{i0}, k_i = 材料常数

なる関係が成立することがわかる。本試験片による低温構造用鋼および溶接部の特性その他については後述することにする。

1.2 伝播特性試験

1.2.1 プレスノッチ・シャルピー試験 (Pressed-Notch Charpy Test)-(工業的小型伝播特性試験)

プレスノッチ・シャルピー試験は Christensen と Augland⁶⁾ によつて最初用いられたものであるが、越賀がこれについてその破面様相の特徴などに着目して詳細な検討を加え、伝播特性試験であることを明らかにして以来日本では広く行なわれるようになった試験法である。

第7図に試験片の形状と寸法を示す。本試験はV・シャルピー試験片の機械切削によるV切欠の代わりに刃角45°の鋭利な刃型の圧入による切欠に置き換えたものである。

このような試験片によるシャルピー試験結果の破面外観と荷重・撓み曲線は一般に第8図に示すごとくなる。

すなわち切欠の圧入によつて生じた加工硬化帯の存在

により、V・シャルピー試験とは異なり一般に切欠底部から直ちに結晶状外観の脆性亀裂が生じ、ある深さに達すると停止する。荷重・撓み曲線の形状は全面繊維状破面を呈する温度ではACE曲線で示されるが、破面に結晶状破面が現われる温度では結晶状亀裂の発生が常にC点というほぼ定まった点に生じ、結晶状亀裂の長さによつて図のCD部分に変化し、全面結晶状破面を呈する温度ではACDKの径路をたどる。

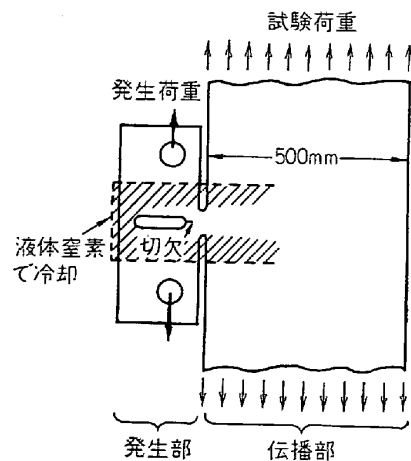
したがつて荷重・撓み曲線の形状よりも知られるように遷移領域内での結晶状亀裂の発生までに要するエネルギーは面積ACJAで示されるように一定であり、試験結果は図のD点、すなわち結晶状亀裂の停止点がDK上のどの位置に存在するかによつて支配される。すなわちこの試験法は鋼材の脆性破壊伝播阻止特性を判定するものといえる。

このほか工業的小型伝播特性試験としては、標準の切欠深さより深い切欠を入れた深切欠ファン・デア・ベーン試験 (Van der Veen Test)⁷⁾、表面を窒化させたB.B (Brittle Boundary) シャルピー試験 (Newhouse および Wundt)⁸⁾、あるいはプレスノッチを試験断面周辺に入れたP.B (Pressed-Boundary) シャルピー試験 (金沢)⁹⁾、などがある。

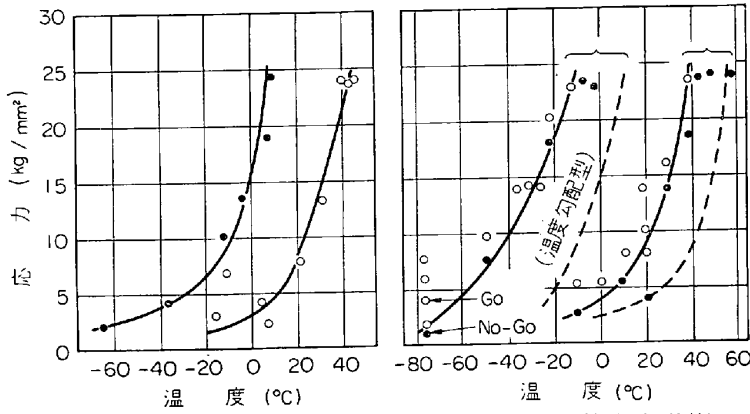
1.2.2 二重引張試験 (Double Tension Test)-(研究室的な大型伝播特性試験)

大型伝播試験は1953年 Robertson によつて提案されたロバートソン試験¹⁰⁾が最初のものであるが、その後吉識、金沢によつて開発された二重引張試験 (Double Tension Test)¹¹⁾¹²⁾は現在この種の目的に最も適合した試験法と考えられている。第9図にその試験片形状と試験要領を示す。図に示すように試験片は脆性亀裂の発生部と伝播部とからなり、この特殊な試験片の形状のため伝播部にあたえられた一様な引張応力の方は発生部にあたえる荷重の影響をほとんど受けない。

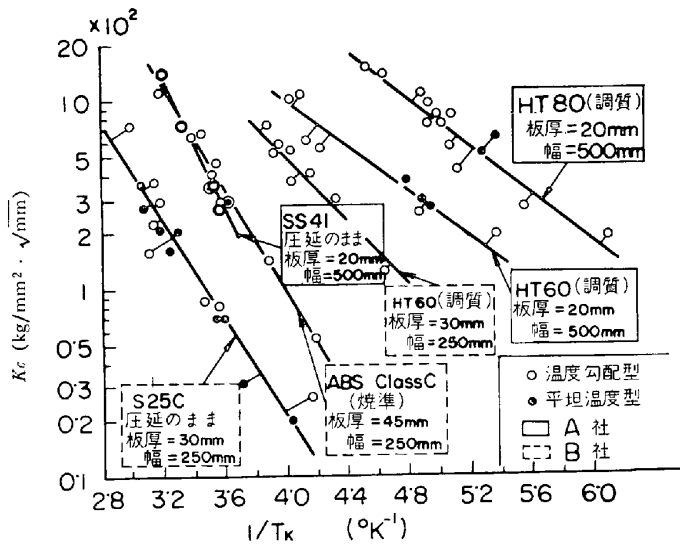
本試験法は伝播部にあたえる温度分布によつて温度勾配型 (伝播部にあたえられる温度を発生部に近い部分を低温にし他端にむかつてほぼ直線的に高くする) と平坦温度型 (発生部のみを低温にし、伝播部をほぼ一様な試験温度に保つ) に大別できる。いずれの場合も伝播部にあたえる一様な応力、および温度を種々にかえて試験を行



第9図 二重引張試験



(a) 温度勾配型 (b) 平坦温度型(勾配型と比較)
第10図 二重引張試験結果の例



第11図 各種鋼板の K_c と絶対温度の逆数の関係

ながら、前者の場合は一般に脆性亀裂が停止するまで比較的長い距離伝播し、後者の場合は発生部の切欠から脆性亀裂が発生するが、伝播部の応力、温度によつて亀裂は短い距離だけ進行して停止するか、あるいは試験片を完全に横切ってしまう。

二重引張試験によつて得られた脆性亀裂伝播特性をあたえる応力と温度の関係を第10図に示す¹³⁾。図に示すように停止特性をあたえる応力・温度曲線は同一鋼材であつても試験法の相違によつて異なつた曲線であたえられる。これは停止亀裂長さの相違によるもので縦軸の応力の代わりに破壊力学で用いられている K_c (脆性亀裂伝播抵抗値) をとり横軸に停止点における絶対温度の逆数をとつて示すと第11図のように一つの特性曲線として求めることができる。すなわち脆性破壊の伝播(停止)特性は、

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi C} \cdot f(\gamma) = K_0 \exp(-k/T)$$

ただし、 $f(\gamma) = \sqrt{(2B/\pi C) \tan(\pi C/2B)}$ 試験片の

- 幅が有限であるための補正係数
- σ = 伝播部にあたえられた一様応力
- C = 停止亀裂長さ
- B = 試験片幅 (標準 500 mm)
- T = 亀裂停止点の絶対温度
- K_0, k = 材料常数

なる式であたえられる。

本試験によつて得られる鋼材特性は現在日本溶接協会の低温構造用鋼材質判定規準の基礎となつているものであつて、国産の低温用鋼によつてそのデータが得られている。

大型の伝播特性試験としてはこのほか温度勾配型エッソー試験¹⁴⁾などもあるが省略することにする。

2. 各種低温構造用鋼およびその溶接部の脆性破壊特性

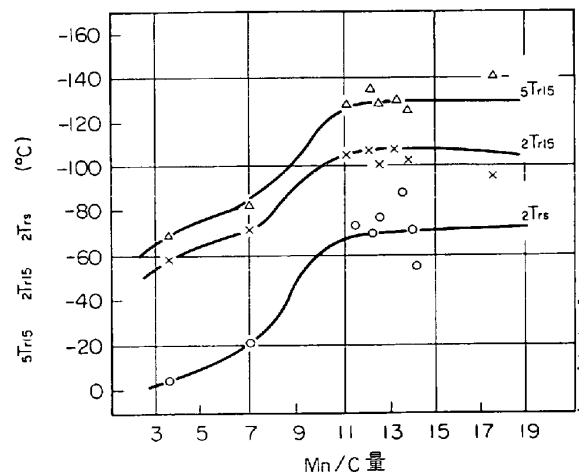
先に述べたように低温構造用鋼としては細粒 Al キルド鋼、高張力鋼、低ニッケル鋼 (2¹/₂% Ni, 3¹/₂% Ni 鋼), 9% Ni 鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼などがそれぞれ使用温度区分に従つて用いられているが、以下これら低温用鋼およびそれらの溶接部の脆性破壊特性について述べることにする。

2.1 低温用軟鋼

戦時中の米国戦艦船の脆性破壊事故以来、Mn/C を 2.5 以上とし低温靱性に改良を加えたセミキルド、あるいはキルド鋼が多量に生産されているが、Al で脱酸した細粒キルド鋼はさらに靱性がすぐれている。これらの鋼は元来低温用鋼としてよりも、むしろ一般溶接構造用鋼として、脆性破壊防止の目的で改良が加えられたものであるが、-40°C あるいは -50°C 程度までの低温容器用として使用できるものもある。

ここ数年來、わが国では数多くの低温用軟鋼が開発されている。これらはいずれも Mn-Si 系低炭素鋼で低炭素 (0.1% 程度) で、Mn 量をやや多く (1% 程度) して Mn/C が約 10 以上とし靱性の向上をはかつたキルド鋼である。第12図にシャルピー試験の遷移温度におよぼす Mn/C の影響を示す。この図より Mn/C が大となるにつれて遷移温度は低下するが、Mn/C が約 10 以上になるとその影響がなくなることがわかる。

圧延後の熱処理としては、焼準しを施した程度のもの、および焼入れ焼戻し (いわゆる調質処理) を施した



5Tr₁₅ = 5mm U-シャルピー試験の 15ft-lb 遷移温度
2Tr₁₅ = 2mm V-シャルピー試験の 15ft-lb 遷移温度
2Tr₈ = 2mm V-シャルピー試験の破面遷移温度
第12図 シャルピー試験の遷移温度におよぼす Mn/C の影響

第 1 表 国 産 低 温 用 軟 鋼 の 例

製鋼所	鋼板名称	適用板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質				熱処理	最低使用温度†	その他		
			C	Si	Mn	P	S	Ni	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び					
八 幡 製 鉄	YND33	6~26	≤0.14	≤0.35	≤1.50	≤0.035	≤0.040	—	≥33	≥45	13 ≤ t < 13 20 ≤ t < 20	24 29 26*	QT	t ≤ 26	-50G -29A	
	YND37	6~26	≤0.14	≤0.35	≤1.50	≤0.035	≤0.040	≤0.70	≥37	≥50	13 ≤ t < 13 20 ≤ t < 20	22 27 24*	QT	t ≤ 13 13 < t ≤ 26	-90G -60A -70G -50A	
富 士 製 鉄	ELT2A	6~26	≤0.15	0.15 ~0.30	0.80 ~1.35	≤0.030	≤0.030	—	≥29	46~55	25 ≤ t < 25	28 25*	NT	t ≤ 26	-50G -20A	
	FLT2B	6~32	≤0.15	0.15 ~0.30	0.80 ~1.35	≤0.030	≤0.030	—	≥33	46~55	25 < t ≤ 25	25 22	QT	t ≤ 26 26 < t ≤ 32	-90G -60A -80G -40A	
日 本 鋼 管	NK-LTC -ALK	≤32	≤0.15	≤0.30	≤1.40	≤0.030	≤0.030	—	≥33	≥45	13 ≤ t < 13 21 ≤ t < 21	22 32 22*	QT	t ≤ 20 t ≤ 32	-80G -50A -60G -30A	IN処理
日 本 製 鋼	Teyon 100A	6~50	≤0.14	0.15 ~0.35	≤1.50	≤0.030	≤0.035	—	≥33	≥45	5 < t ≤ 13 13 < t ≤ 38	22 28*	NT	t ≤ 13 13 < t ≤ 26 26 < t ≤ 50	-90G -70A -70G -50A -70G -40A	
川 崎 製 鉄	KL-33	6~32	≤0.10	0.15 ~0.45	1.00 ~1.50	≤0.030	≤0.030	—	≥33	≥45	t = 6 6 < t < 24 24 ≤ t	25 34 23*	NT QT	t ≤ 20 20 ≤ t ≤ 32	-90G -70A -90G -60A	
	KL-36	6~32	≤0.10	0.15 ~0.45	1.00 ~1.50	≤0.030	≤0.030	—	≥36	≥45	t = 6 t = 24 24 ≤ t	24 35 21*	QT	t ≤ 20 20 < t ≤ 32	-90G -60A -60G -50A	
住 友 金 属	SLT-29	≤26	≤0.14	0.15 ~0.35	0.70 ~1.50	≤0.035	≤0.035	—	≥29	≥41	t ≤ 25 t > 25	28 25*	N	t ≤ 26	-70G -30A	
	SLT-33	≤26	≤0.14	0.15 ~0.35	0.70 ~1.50	≤0.035	≤0.035	—	≥33	≥46	t ≤ 25 t > 25	25 22*	QT	t ≤ 26	-70G -30A	

(注) * は JIS 4 号, 他は JIS 5 号 QT 焼入れ焼戻し NT 焼準し焼戻し
 † WES 規格による 例 -50G (G種 最低使用温度 -50°C)
 -20A (A種 最低使用温度 -20°C)

ものがある。第 13 図にはこの種の鋼の V・シャルピー試験成績の例を、第 1 表はわが国市販の低温用軟鋼の例を示したものである。

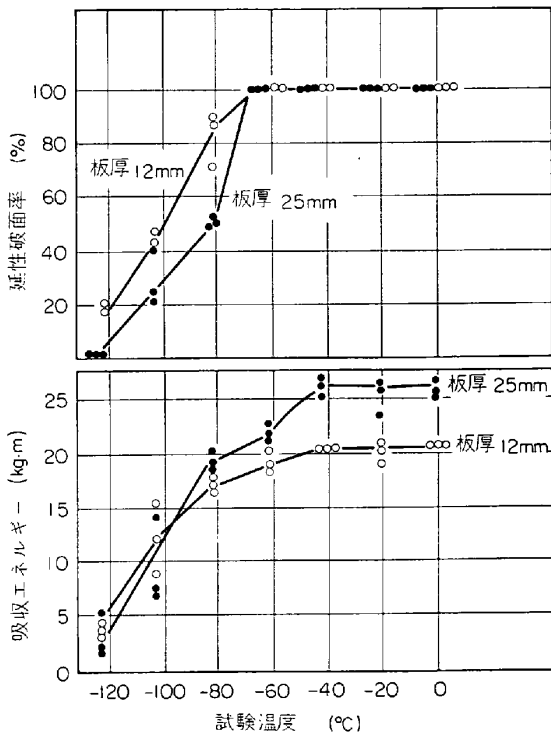
低温用軟鋼のディープ・ノッチ試験結果は第 14 図に示すようになり、全面降伏限界曲線(右に凸の曲線)の低温側の領域(I)は切欠断面部の平均応力が降伏応力より低い応力で脆性破壊が発生する領域で、後に述べる調質高張力鋼に比べてかなり低温側にある。限界曲線の高温側の領域(II)は切欠断面部の平均応力が降伏応力よりやや高い程度の応力で脆性破壊が発生する領域で、温度範囲は図では約 100°C 程度である。さらに高温側の領域(III)では切欠断面部の平均応力は引張強さに近く、この場合には切欠底部に小さい三角形の延性破壊が生じたのち脆性破壊に転化したり、あるいは全断面が延性破壊となる。このように領域(II)が現われることは軟鋼材の特徴であつて、調質高張力鋼の場合には現われないが、その範囲が約 100°C にもおよんでいることは注意する必要がある。

各種低温用軟鋼のディープ・ノッチ試験より求められた脆性破壊発生のための塑性表面エネルギー Si と絶対温度の関係を示す第 15 図に、またこれより計算によつて推定された $\sigma = \sigma_y / 2.5$ ($\sigma_y =$ 降伏応力) に等しい作用応

力下での脆性破壊発生温度と亀裂長さの 1/2 の関係を示す第 16 図に示す。これらの図より軟鋼板のディープ・ノッチ試験結果はかなりすぐれたものとなつてはいるが、この結果からただちに実際の構造物の脆性破壊発生を推定できるかどうかについては疑問の点がある。すなわち上述した切欠断面部の平均応力が降伏応力より高く脆性破壊が発生する領域(II)の解釈の問題とともに、溶接部に生ずる残留応力、溶接部の材質、構造的な不連続によつて生ずる三次元的応力集中拘束度の相違などによつて脆性破壊発生特性が大きく変動する可能性があるからである。なお溶接部の特性については後述する。

低温用軟鋼の脆性破壊伝播阻止能力を二重引張試験で求めた例を第 17 図に示す。鋼により差違はあるが図より $\sigma = \sigma_y / 2$ ($\sigma_y =$ 降伏応力) の使用応力で停止亀裂長さ(2C)が 20 mm, および 200 mm (日本溶接協会 WES 規格の G 種, および A 種に相当する) に対応する温度はほぼ -50°C, -30°C 以下となつてはいる。

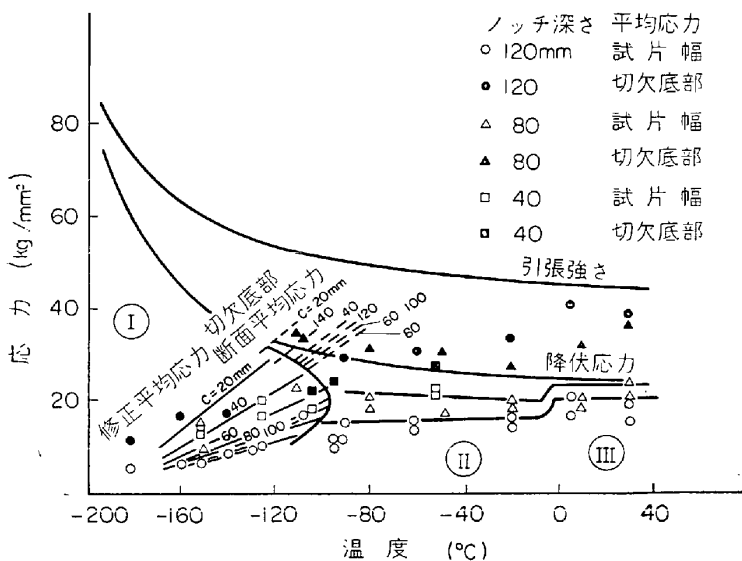
さてこれら低温用軟鋼の溶接部については、これらの鋼がいずれも低炭素で、しかも合金元素が少ないので、引張強さも普通軟鋼よりいくぶん高い程度であり、溶接性に関しては問題はない。しかし板厚が著しく大きい場合には安全のため 50°C 前後の予熱が必要あろう。た



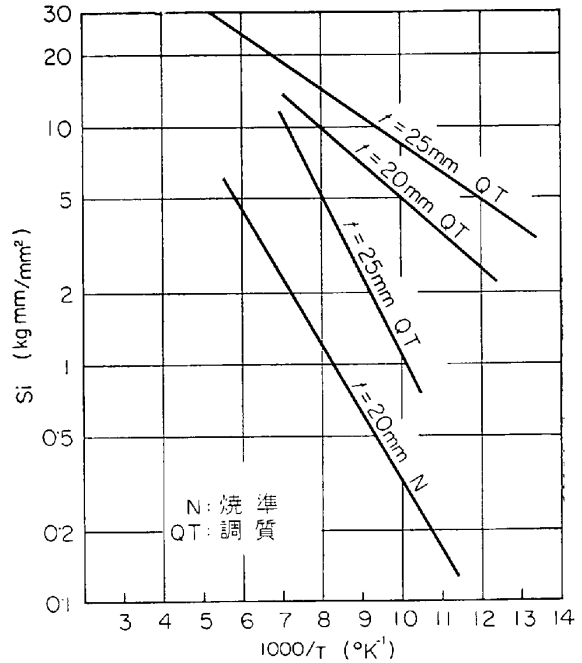
第13図 Teyon-100A鋼のV・シャルピー遷移温度曲線

だ現状では溶接金属の靱性がともすると母材より低下しやすいので、溶接棒の選定、溶接条件の設定には十分注意する必要がある。

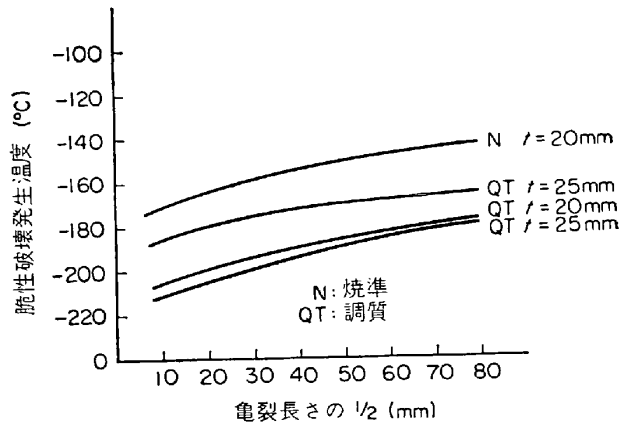
現在一般に用いられている被覆アーク溶接棒は、低水素系 (Mn-Si系) と 1.5% および 2.5% 程度の Ni を含んだ低合金溶接棒である。第2表に溶着金属の化学成分の一例を示す。低温鋼用の溶接部の切欠靱性はもちろん溶着金属の化学組成に負うところが大きい、同一溶接棒でも溶接姿勢、溶接入熱、母材の厚さなどによって著しく変化する。いま各種溶接棒の -50°C における V・シャルピー試験の吸収エネルギーと平均入熱量の関係を図



第14図 軟鋼の破壊発生特性



第15図 低温用軟鋼の脆性破壊発生時の表面塑性エネルギーと温度の関係



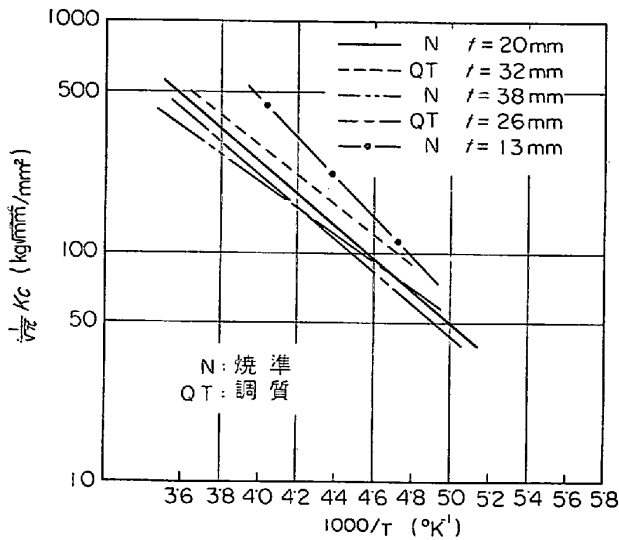
第16図 低温用軟鋼の脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係

18図に示す。いずれも吸収エネルギーは入熱量の増加とともに低下する。

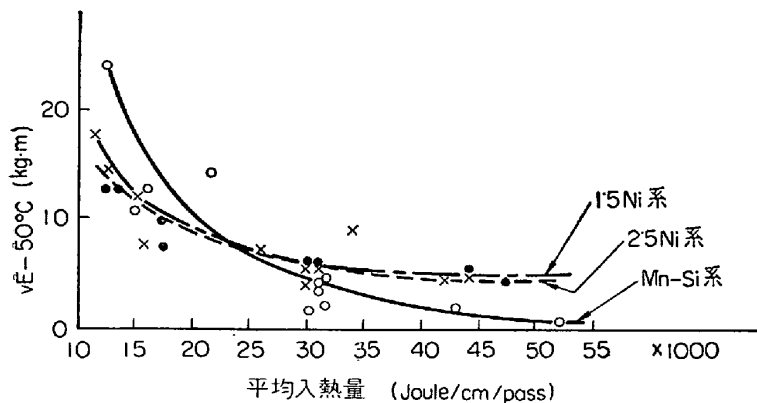
また Mn-Si 系溶接棒は入熱の小さい範囲では Ni の入ったものより高い吸収エネルギーを示すが、入熱の大きいところではその低下が著しい。他方、Ni の入ったものは入熱量が多くなっても吸収エネルギーの低下の割合が少なく、ある値で飽和する傾向がみられる。

したがつていまかりに -50°C で吸収エネルギーを 5 kg-m 以上とすると、Mn-Si 系溶接棒では 27,000joule/cm/pass 以下に、1.5%Ni 2.5% Ni 溶接棒では 32,000 joule/cm/pass 以下の入熱で溶接する必要がある。

この他サブマージアーク溶接材として高塩基性フラックスと 1.5% Ni-Mo ワイヤ、あるいは中性溶融フラックスと 2.5% Ni-Mo ワイヤなどが開発され、かなり良好な成績が得られている。一例を第 19 図に示す。入熱量の増加と



第17図 低温用軟鋼の脆性亀裂停止特性



第18図 各種溶接棒の-50°Cにおける衝撃値と平均入熱量の関係

第2表 アルミキルド鋼用各種溶接使の溶着金属化学成分の一例 (%)

溶接棒	C	Mn	Si	P	S	Ni
Mn-Si系	0.08	0.98	0.52	0.014	0.009	—
1.5%Ni系	0.06	0.90	0.45	0.011	0.007	1.62
2.5%Ni系	0.06	0.85	0.48	0.010	0.009	2.38

ともに衝撃値が減少していることは手溶接の場合と同様である。

2.2 高張力鋼

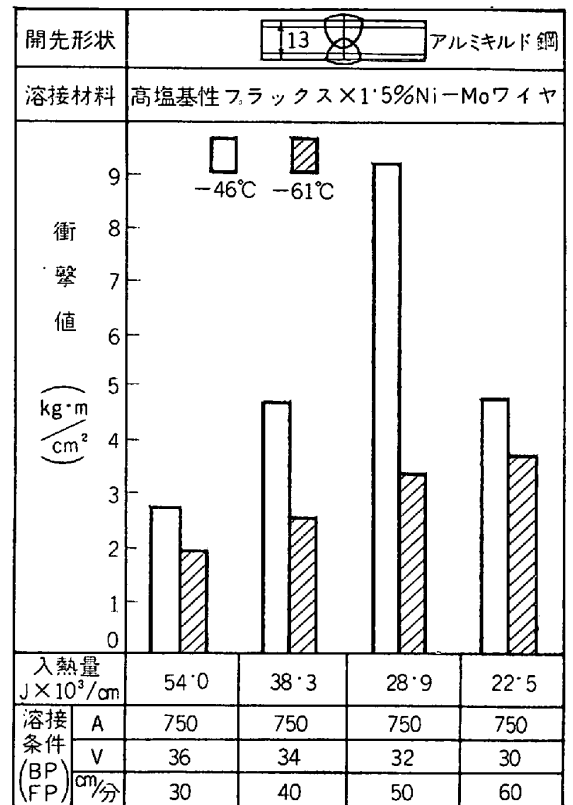
現在わが国で製造されている溶接構造用高張力鋼は、引張強さ 100 kg/mm² 程度まで種々あるが、引張強さ 60 kg/mm² 以上のものは普通焼入れ焼戻しを施した調質鋼で、いわゆる焼戻しマルテンサイト組織で一般に低温靱性がすぐれており、前述の軟鋼と同様-50°C程度までの低温容器材として使用に耐えるものが多い。第20図はこれら高張力鋼のV・シャルピー試験の結果の例を示したものである。

ディープ・ノッチ試験によつて求められる調質高張力鋼の脆性破壊発生のための塑性表面エネルギーと温度の関係を第21図に、降伏応力の1/2.5倍の作用応力下での脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係を第22図に示す。

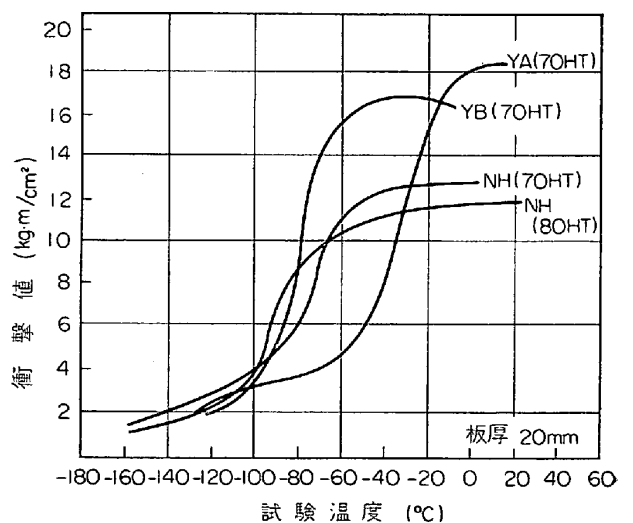
これらを先に示した低温用軟鋼の特性と比較すると一般にやや高温側にあるようである。

なおこの特性値を実際の構造物の脆性破壊発生特性と関連させることについては先に軟鋼のところで述べたように検討しなければならない点が多い。

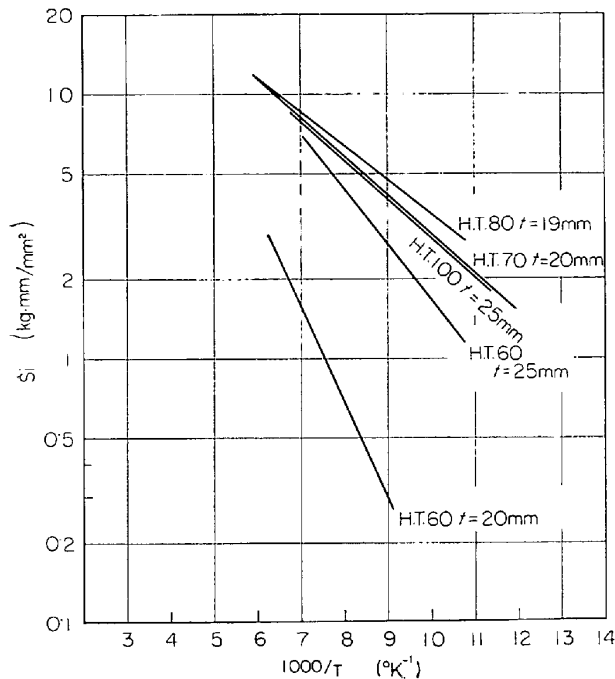
調質高張力鋼の脆性破壊伝播停止特性の例を第23図に示す。この図で示されたものについては鋼種によつて特性がまちまちであるが使用応力が公



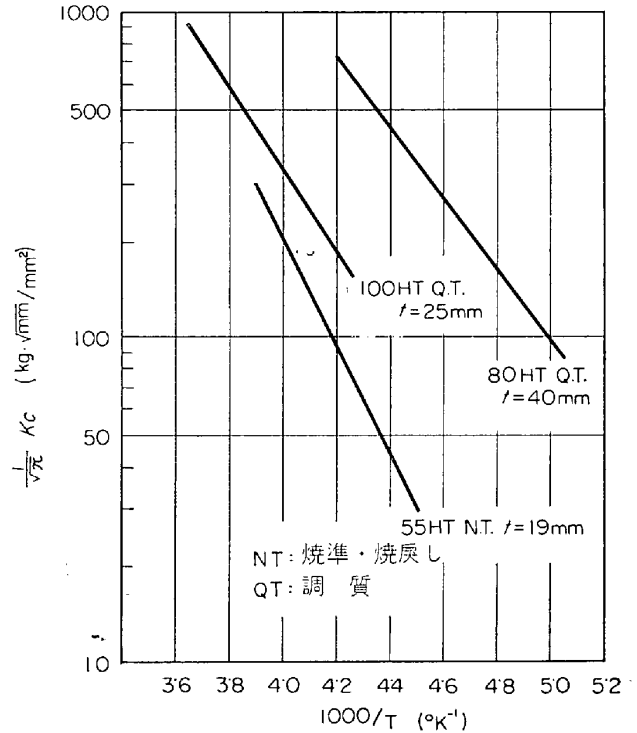
第19図 サブマージ溶接における入熱量が衝撃値におよぼす影響



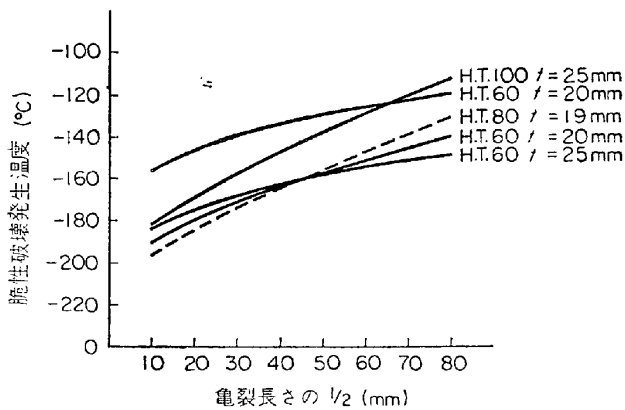
第20図 各種高張力鋼のV・シャルピー遷移曲線 (70 HT および 80 HT 鋼)



第21図 調質高張力鋼の脆性破壊発生時の表面塑性エネルギーと温度の関係



第23図 高張力鋼の二重引張試験結果

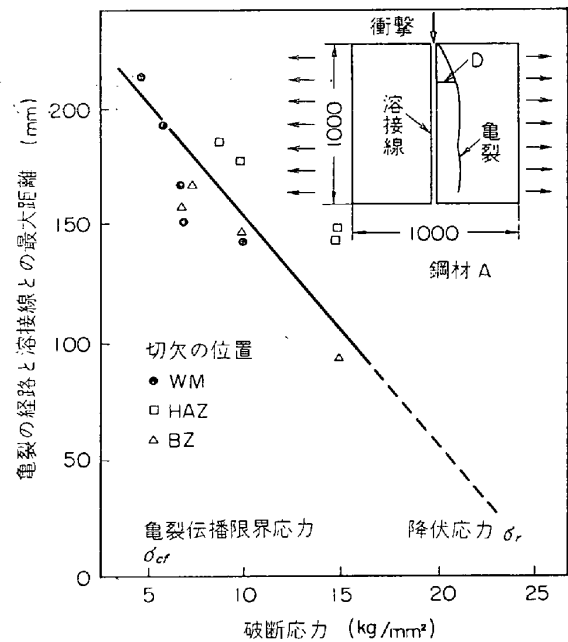


第22図 調質高張力鋼の脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係

称降伏応力の $1/2$ の場合、亀裂長さ $2C$ が 200 mm および 200 mm の脆性亀裂を阻止する温度は 100 キロ級高張力鋼でそれぞれ約 -30°C および -10°C 、 80 キロ級高張力鋼でそれぞれ約 -70°C および -50°C となっている。

しかしこれら調質高張力鋼の溶接継手各部の低温靱性は、一般に溶接金属および熱影響が母材に比べて劣っており、溶接欠陥、およびある限界以上の溶接変形量が存在するときには比較的高温でも脆性破壊の発生が考えられるので十分な注意が必要である。したがって使用条件に適合した溶接条件に従って工作を行なわねばならないことはもちろん、特に調質高張力鋼の場合には鋼種によって適当な温度の予熱あるいは後熱処理を行なわねばならない。

さて、一般に脆性亀裂は、第 24 図に実験結果を示したように溶接線に沿って伝播することはないと考えられていたが、調質高張力鋼、特に 80 キロ級以上の高張力

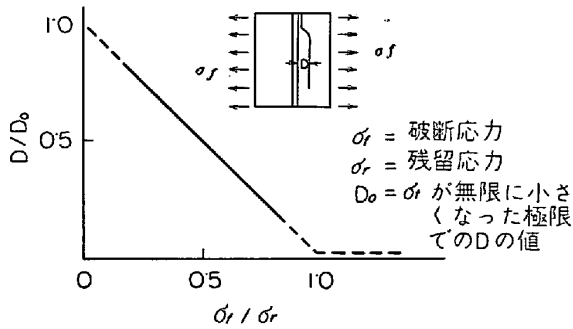


第24図 亀裂の伝播経路と破断応力の関係⁶⁾

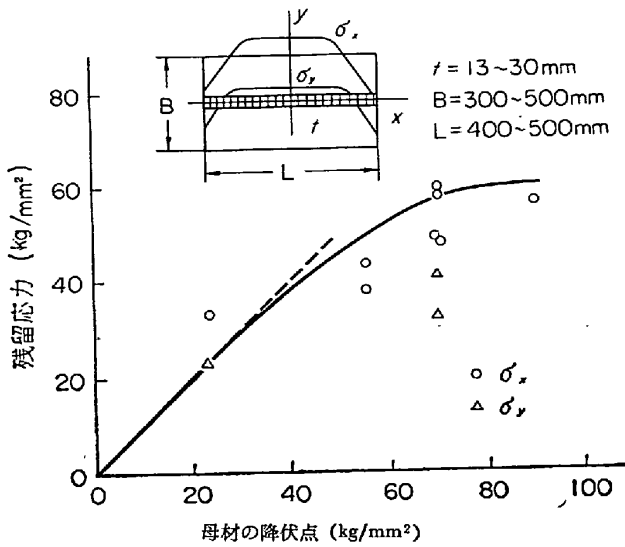
鋼では溶接線に沿って伝播することが実験的にも、また実際の圧力容器の破壊事故例でも明らかになった。この理由として前田は次のように説明している¹⁵⁾。

すなわち第 24 図を、低応力下における脆性破壊の伝播経路は溶接残留応力に左右されることを考慮してかきなおすと第 25 図のようになると考えられる。

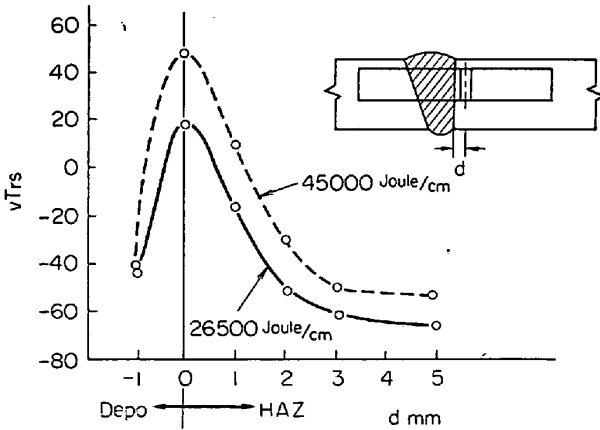
軟鋼溶接部の残留応力は降伏点に近い値に達するので低応力破壊の場合には σ_f/σ_r は 1 よりかなり小さな値となる。しかし第 26 図に示すように母材の降伏点が上昇するにつれて、溶接残留応力の値は母材の降伏点より



第25図 亀裂の伝播経路におよぼす残留応力の影響 (概念図)



第26図 軟鋼および高張力鋼溶接部の残留応力⁷⁾

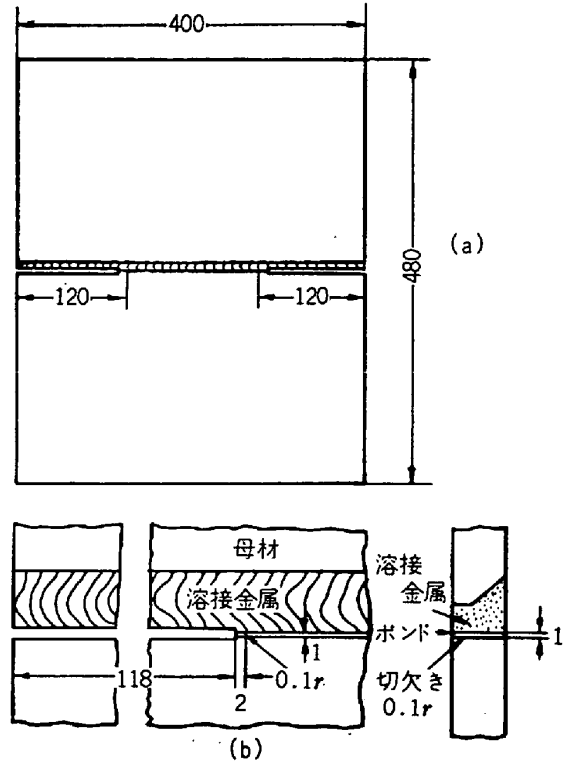


第27図 高張力鋼溶接部近傍の切欠靱性⁷⁾

もかなり低い値となる。しかも設計応力の絶対値は高いので σ_f / σ_r が1に近づき、脆性亀裂は溶接線に沿って進展する傾向を生ずる*。

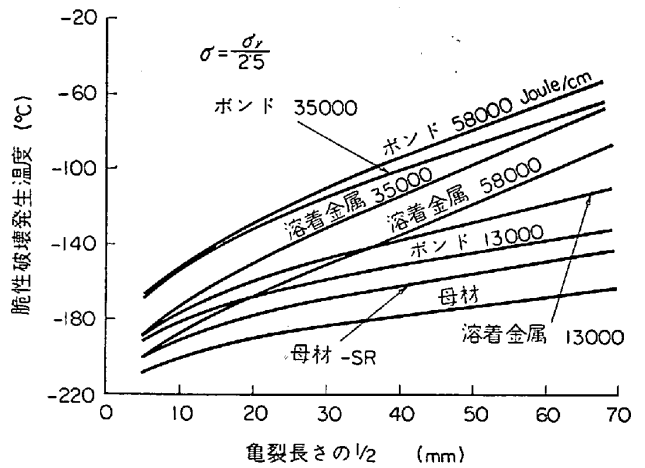
したがって調質高張力鋼 (特に80キロ級以上) の場合は熱影響部、およびボンド部の切欠靱性を低下させないよう、またこの部分の応力集中を緩和するよう、特に溶接工作上注意を要する。

* ここで σ_f , σ_r はそれぞれ破壊応力および残留応力



(a) ボンド用試験片
 (b) 溶接金属用はV開先かX開先とし溶接金属の中央部に切欠をつける

第28図 ボンド用および溶接金属用ディープ・ノッチ試験片



第29図 80キロ級調質高張力鋼の脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係

ボンド部の切欠靱性を低下させる工作上的な主要な因子は溶接入熱量である。第27図は80キロ級調質高張力鋼のボンド部近傍のV・シャルピー試験結果の一例であるが、入熱を26,500joule/cm/passとしたときに比べて45,000joule/cm/passとしたときはボンドの破面遷移温度 $vTrs$ は約30°C上昇していることがわかる。

調質高張力鋼の溶接継手部の脆性破壊発生特性におよぼす溶接入熱の影響について、第28図に示すディープ・ノッチ試験片を用いて実験を行なった結果の一例を第29図に示す。図より溶着金属、ボンド部は母材にくらべ

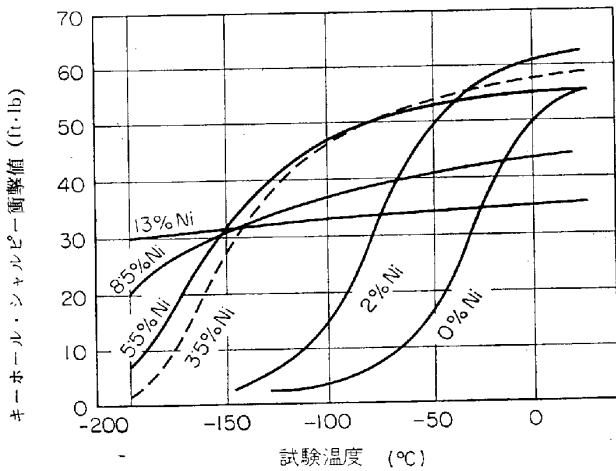
てかなり劣化しており、特に溶接入熱が大となるにつれてその差が大となることわかる。図に示された値は-50°C 程度までの低温容器に対してかならずしも危険であるとはいえないが、実際の構造物では、構造的不連続による応力集中、拘束の増加、あるいは溶接継手部の角変形などによる応力集中などが考えられるので十分注意しなければならない。

2.3 低ニッケル鋼

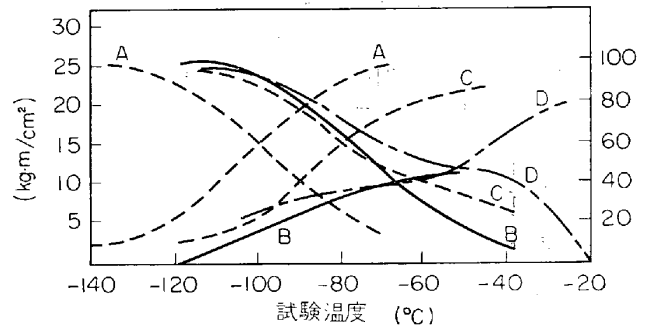
この種の鋼で現在実用に供されている鋼は2½%Ni 鋼と3½%Ni 鋼がある。鋼中の Ni が増加すると低温靱性は第30 図に示すように向上することはすでによく知られている。これらの鋼種は上述した低温用軟鋼、調質高張力鋼よりもさらに低温にさらされる容器に使用され

るもので、一般には-100°C 程度までのものに使用可能である。しかしこの温度範囲の低温容器の需要は、後述する 9% Ni を使用せねばならない。さらに低温にさらされる容器に比べれば比較的少なく、現在のところエチレン製造、ならびに人造ゴム製造装置における容器、熱交換あるいはパイプなどに用いられているにすぎない。わが国で市販されている低 Ni 鋼の例を第3 表に示す。これらの中には YND 58 のように高張力鋼の性質を兼ねたものもある。これらの鋼種は特に低炭素で、一般に焼準し、焼戻しの熱処理がとられているが、なかには焼入れ、焼戻し(調質)を行なつて強度と靱性を高めたもの、あるいは焼準しだけを施したものもある。

2½%Ni 鋼および3½%Ni 鋼のV・シャルピー試験の結果を第31 図に示す。いずれもすぐれた低温靱性を示しているが同一鋼種でもその特性にはかなりの差があ



第30図 低炭素鋼の衝撃値におよぼす Ni の影響 (いずれも焼準し状態, 0%Ni は 0.20%C, 2%Ni は 0.15%C, 他はいずれも 0.10%C)



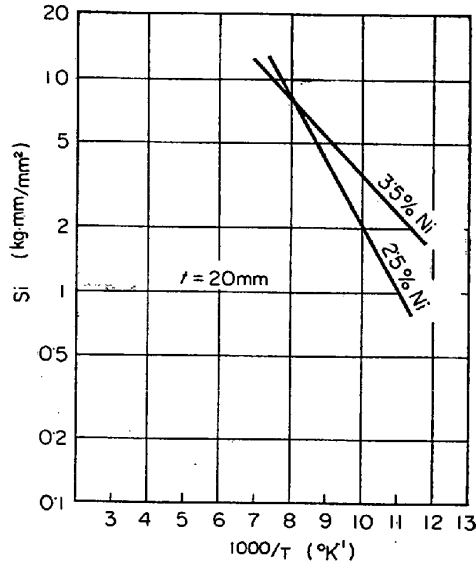
C Si Mn Ni
A 0.07 0.35 0.54 2.38 焼準し焼戻し
B 0.10 0.24 0.67 2.46 板厚 12 mm
C 0.12 0.19 0.48 3.38
D 0.07 0.23 0.70 3.48

第31図 2½%Ni 鋼および3½%Ni 鋼のV・シャルピー試験の例

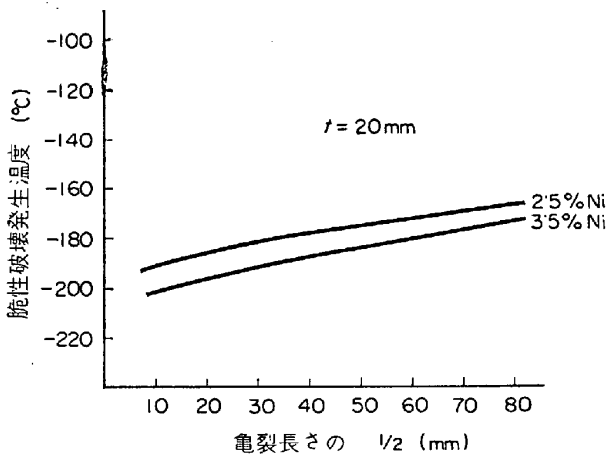
第3表 国産低Ni鋼の例

製鉄所	鋼板名称	化学成分 (%)						機械的性質 (kg/mm²)		最低使用温度* (°C)	備考
		C	Mn	Si	P	S	Ni	降伏点	引張強さ		
八幡製鉄	YND58	≤0.14	≤0.70	≤0.35	≤0.035	≤0.040	2.0 ~2.75	≥58	68~82	t ≤ 13 { -90A -100G -80A } 13 < t ≤ 26	調質高張力鋼 Cr ≤ 0.50, Mo ≤ 0.55
富士製鉄	FLT 2 N	≤0.15	≤0.70	0.15 ~0.30	≤0.030	≤0.030	2.1 ~2.5	≥29	46~55	t ≤ 20 { -60G -40A }	
	FLT 3 N	≤0.15	≤0.70	0.15 ~0.30	≤0.030	≤0.030	3.25 ~3.75	≥29	46~55	t ≤ 20 { -80G -60A }	
日本鋼管	2½Ni 鋼	≤0.17	≤0.80	0.15 ~0.30	≤0.035	≤0.040	2.20 ~2.60	≥28	49~60	t ≤ 13 { -70G -60A }	
日本製鋼	Teyon-100X	≤0.21	≤0.70	0.15 ~0.30	≤0.035	≤0.040	2.10 ~2.50	≥28	49~60	t ≤ 13 { -90G -70A }	
	Teyon-120X	≤0.20	≤0.70	0.15 ~0.30	≤0.035	≤0.040	3.25 ~3.75	≥28	49~60	t ≤ 13 { -90G -80A }	
住友金属	SLT-3N	≤0.14	~0.70	~0.35	≤0.035	≤0.035	3.25 ~3.75	≥29	≥46	t ≤ 26 { -80G -60A }	

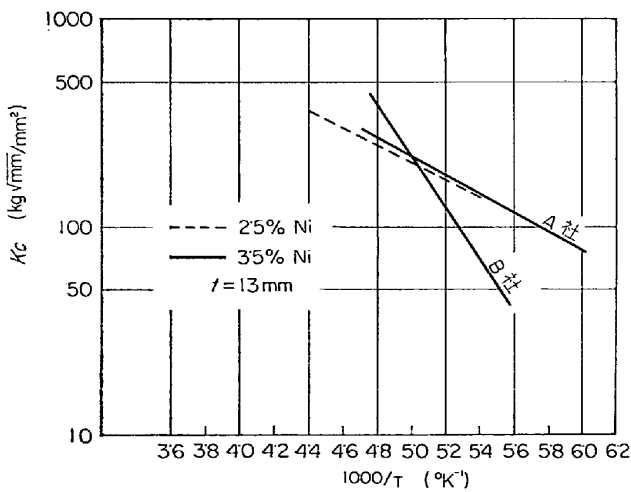
* WES 規格による (例: -90A; A種-90°C, -80G; G種-80°C)



第32図 低 Ni 鋼の脆性破壊発生時の塑性表面エネルギーと温度の関係

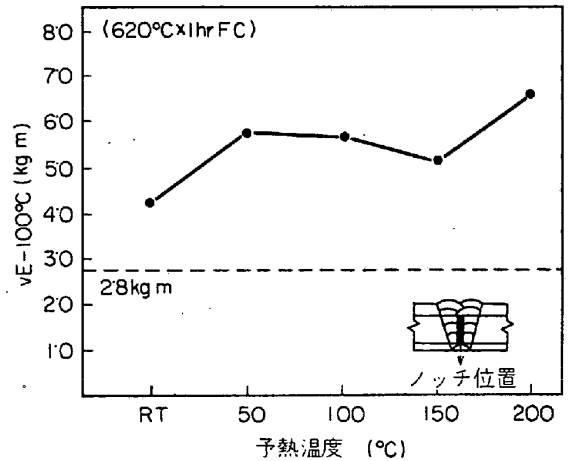


第33図 低 Ni 鋼の脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係

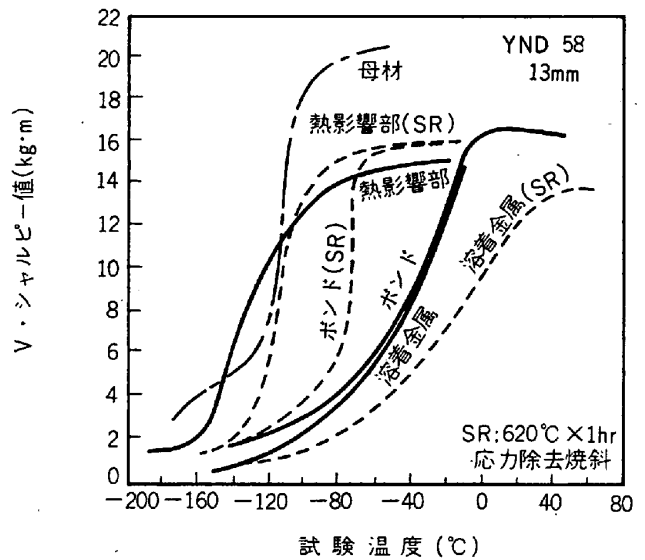


第34図 低 Ni 鋼の脆性亀裂停止特性

ること, 2¹/₂%Ni 鋼と 3¹/₂%Ni 鋼との差があまり判然としないことがわかる。



第35図 -100°C の衝撃値におよぼす予熱温度の影響



第36図 YND58 鋼(2¹/₂%Ni)の溶接継手各部のV・シャルピー遷移温度曲線

低 Ni 鋼の脆性破壊発生特性の一例をディープ・ノッチ試験より求めた結果を第 32 図および第 33 図に示す。これより低 Ni 鋼は Al キルド鋼, あるいは調質高張力鋼よりもすぐれていることが知られる。また二重引張試験結果の一例を第 34 図に示してあるが, これによれば WES 低温用鋼板材質判定規準の G 種*(2C**=20 mm) および A 種 (2C=200 mm) として最低使用温度はそれぞれ約 -80°C および -60°C 程度である。

低 Ni 鋼は炭素量を低くおさえているので比較的良好な溶接性を示す, 板厚の薄い場合にはその熱影響部の最高硬さも低く予熱はしなくともよいが, 一般には熱影響部の性質向上, 衝撃値の向上のため 100°C 程度までの予熱を行なうことが望ましい。予熱温度が V・シャルピー衝撃値におよぼす影響の一例を第 35 図に示す。

しかし不必要に予熱温度を上げると, 結晶粒の粗大化酸化物の粒界析出などにより劣化することが考えられる

* 第 3 章参照

** 2C = 伝播阻止亀裂長さ

ので、板厚および溶接条件に応じて適当な予熱温度を備ふべきである。

低 Ni 鋼を溶接する場合は、上述の予熱温度以外に溶接の施工条件（入熱、板厚、運棒法、開先形状など）も重要であるが、溶接後の熱処理条件が溶着金属、ポンド部の衝撃値に大きな影響をあたえる。第 36 図は 2½% Ni 高張力鋼の溶接継手各部の V・シャルピー遷移曲線を比較したものである。溶着金属、および溶接ポンド部は母材に比べてかなり遷移温度が高い、またポンド部は 620°C 1hr の応力除去焼鈍によつて遷移温度は低下するが、溶着金属はかえつて遷移温度が上昇している。また第 37 図は 4.5%Ni-0.2%Mo 溶接棒を用いて 3½% Ni 鋼を溶接した場合の -100°C における溶着金属のシャルピー衝撃値におよぼす後熱温度の影響を示し、第 38 図には同じく後熱後の冷却条件の影響を示したものである。第 37 図から衝撃値は後熱温度の上昇とともに低下するが、特に 630°C 以上 680°C までは急激に減少することがわかり、第 38 図からは水冷したものもつともすぐれており、冷却速度がおそくなるにつれて衝撃値が低下していることがわかる。すなわち溶接後の熱処理は 630°C 以下のできるだけ低温で、冷却速度も速いほうが

第 4 表 4.5Ni-0.2Mo系溶接棒の溶着金属の化学成分の一例 (%)

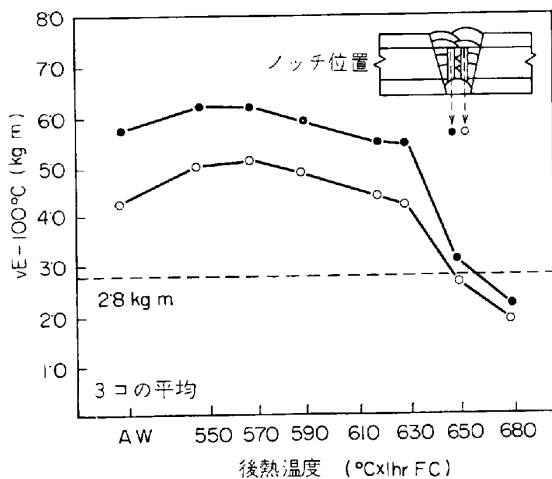
溶接棒	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo
4.5Ni-0.2Mo系	0.03	0.85	0.29	0.007	0.009	4.65	0.19

望ましい。

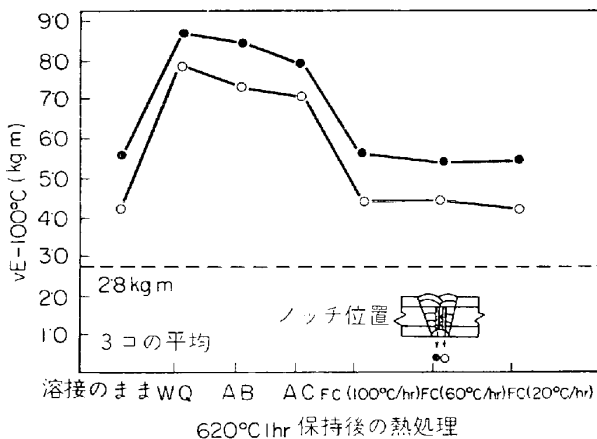
溶接棒としては普通 2½%Ni および 3½% Ni 溶接棒が使用されているが、低温での衝撃値を厳格に要求される場合にはオーステナイト系ステンレス溶接棒が従来使用されていた。しかしオーステナイト系ステンレス溶接棒を使用することは、母材と溶着金属の熱膨張係数の相違による熱疲労、あるいは後熱処理の際に起こる炭素の移動などが予測されるので必ずしも好ましいとは考えられない。

また 3.5%Ni 溶接棒で溶接した低 Ni 鋼の溶接部の靱性は第 35 図および第 36 図に示したように溶接後の残留応力除去焼鈍によつて劣化するので、これを防止する目的で最近では第 4 表に示す化学成分をもつた 4.5 Ni-0.2Mo 系溶接棒が使用されている。

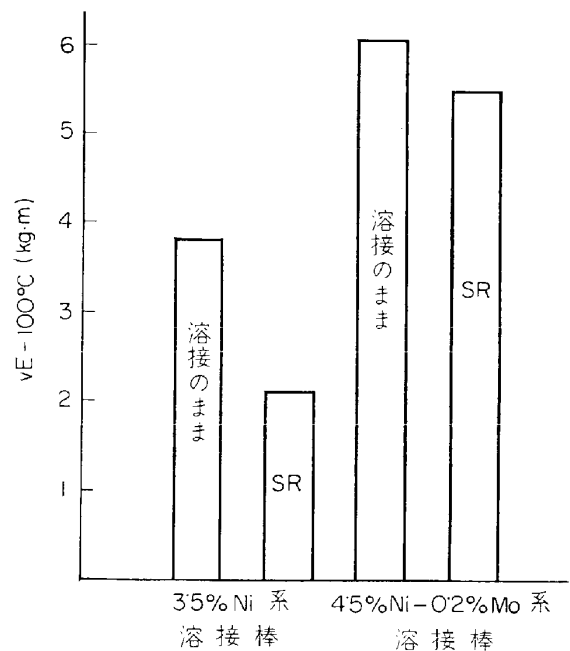
4.5Ni-0.2Mo 系溶接棒は P, O, N, C, H などの不純物を極力少なくし、少量の Mo を添加したもので、低温における衝撃値を保証すると同時に Ni による焼戻し脆性を抑えることを目的としたものである。第 39 図は 3.5%Ni 系と 4.5Ni-0.2Mo 系の -100°C における衝撃値を溶接のままの場合と応力除去焼鈍を施したものについて比較したものである。これによると溶接のままの場合でも衝撃値に相当な差違がみられるが、また 620°C 1hr の応力除去焼鈍による劣化の度合は 4.5Ni-0.2Mo 系溶接棒の場合がはるかに小さいことがわかる。



第37図 -100°Cの衝撃値におよぼす後熱温度の影響



第38図 -100°Cの衝撃値におよぼす後熱後の冷却条件の影響
(注：A.B.……衝風冷却)



第39図 3.5%Ni系および 4.5%Ni-0.2%Mo系溶着金属の溶接のまま、および 620°C x 1hr 炉冷後の -100°C における衝撃値

第5表 極低温用材料のコストの比較
(U.S. Steel による)

	304 ステンレス	5083 アルミ合金	9%Ni 鋼
1/4 インチ板厚1平方 フィート当たりの重 さポンド	10.96	3.77	10.7
1ポンド当たりのコ スト	\$ 0.475	\$ 0.50	\$ 0.313
85%継手効率設計応 力	15,950psi	10,000psi	24,200 psi
1/4 インチ板厚1平方 フィート当たりのコ スト	\$ 5.20	\$ 1.88	\$ 3.35
1/4 インチ板厚の9% Ni 鋼の設計応力ま で負荷をかける場合 のコスト*	\$ 7.89	\$ 4.55	\$ 3.35

* 9%Ni 以外はこの応力にみあうだけ板厚を増加して
考える。

2.4 9%Ni 鋼

9%Ni 鋼は -190°C 程度までの低温容器材として使用されている。とくにメタン、酸素、窒素などの各種液化ガスの需要が製鋼や化学工業において著しく増加しており9% Ni 鋼の需要はわが国においても最近急速に伸びる情勢にある。しかし Ni が多いため冶金学的にも複雑な問題があり、とくに溶接材料、溶接施工の点では現在でも改善の努力がはらわれている。

超低温用材料としての9% Ni 鋼が同じく超低温用材料として従来使用されてきた Al, Cu合金およびステンレス鋼などに比べて次のような利点を有している。

(1) ステンレス鋼より価格が安く、また価格/強度から考えると Al 合金と同程度またはそれ以下である。

(2) -196°C まですぐれた靱性を持ち、また熱膨張係数が小さいので熱応力上有利である。

(3) 降伏応力、引張強さが最も高いので薄い断面のものが使用できる。

第5表は厚さ1/4"の板を使用する場合のコストの一例を示したものであるが、容器が小型で大きな応力が作用しない場合は Al 合金が有利であるが、容量が大き

第6表 9%Ni 鋼の化学成分の規格 (重量%)

規 格	C	Si	Mn	P	S	Ni
ASTM A353-64 " A553-65	0.13max	0.15~0.30	0.90max	0.035max	0.040max	8.50~9.50
ASME case 1308-5	0.13max	0.15~0.30	0.90max	0.040max	0.040max	8.50~9.50

第7表 9%Ni 鋼の熱処理規格

規 格	熱 処 理	
ASTM-A353-64 ASME case 1308-5	N. N. T	① 1650±25° F (899±14°C) 1hr/in(ただし最低15分以上)後空冷
② 1450±25° F (788±14°C) 1hr/in(ただし最低15分以上)後空冷		
③ 1050~1125° F (566~608°C) 1hr/in (ただし最低15分以上) 300° F/hr 以上で空冷		
ASTM-A553-65 ASME case 1308-5	Q. T	① 1475±25° F (803±14°C) 1hr/in(ただし最低15分以上)後水冷
② 1050~1125° F (566~608°C) 1hr/in (ただし最低15分以上) 300° F/hr 以上で冷却		

注 * A353-64 の場合 1650~1750° F で熱間加工を受ける素材については、1650° Fでの焼準しを省略できる。

第8表 9%Ni 鋼の引張および曲げ試験の規格

規 格	最大板厚 (in) · (mm)	引 張 試 験			曲 げ 試 験	
		引張強さ(psi) (kg/mm ²)	降伏点*(psi) (kg/mm ²)	伸 び** (%) GL2"(50.8mm)	板厚(in) · (mm) t	曲げ 直径
ASTM A353-64 ASME case 1308-5	2"(50.8)	100,000~120,000 (70.3~84.3)	75,000(52.7) 以上	22.0以上	3/4"(19.05)以下 3/4"超, 1 1/4"(31.75) 以下	2 t 2.5 t
ASTM A553-65		100,000~120,000 (70.3~84.3)	85,000(59.8) 以上	22.0以上	1 1/4"超, 2"(50.8) 以下	3 t

注 * ASTM 0.2% offset(ただし協定により 0.5% extension-under-load でもよい.)

ASME は 0.5% extension-under-load

** 伸び規格は、5/16"以下の板厚のものは、5/16"から1/32"ずつ減ずるごとに、22.0%から1.25%差引いた値とする。ただし、差引く値は3%を越えない。

第9表 9%Ni 鋼の低温衝撃値の規格

規 格	方 向	試験温度 (°F)・ (°C)	試 験 片		シャルピー衝撃値 (ft-lb)・(kg-m)	
			ノッチ	サイズ (mm)	3個の平均 値**	1個の最低値
ASTM A353-64 A553-65 ASME case 1308-5	L	-320 (-196)	V	10×10	25(3.5)	20(2.8)
				10×7.5	21(2.9)	17(2.4)
				10×5.0	17(2.4)	14(1.9)
				10×2.5	8(1.1)	6(0.8)
ASTM A353-64 A553-65	C*	-320 (-196)	V	10×10	20(2.8)	16(2.2)
				10×7.5	17(12.4)	14(1.9)
				10×5.0	14(1.9)	11(1.5)
				10×2.5	6(0.8)	5(0.7)

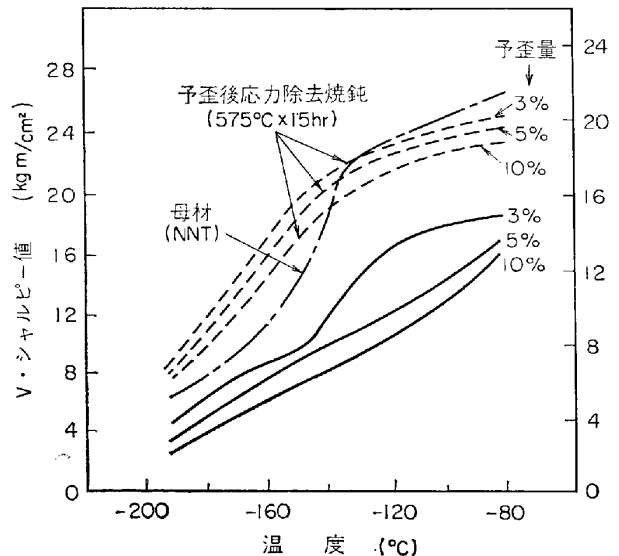
注 * C方向の衝撃試験は、要求された場合のみ実施する。

** ASME case 1308-5 では個々の値

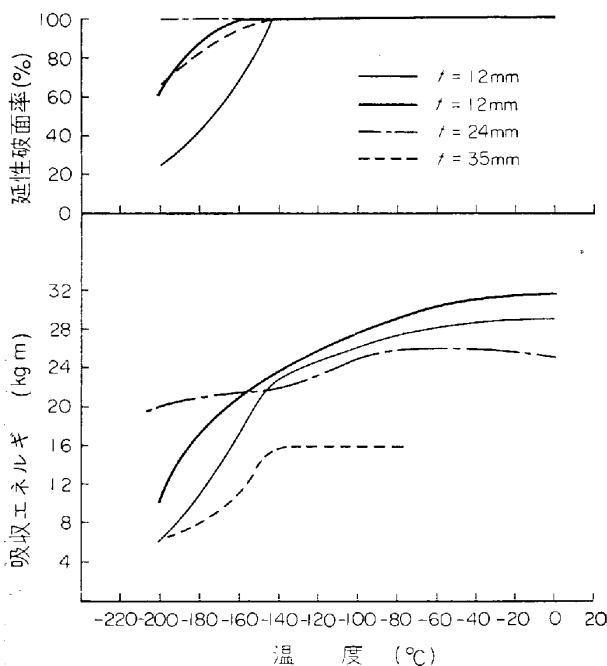
なり作用応力も大となると 9% Ni 鋼が最も経済的であることを示している。

9% Ni 鋼の化学成分、熱処理および機械的性質は ASTM A353-64, ASTM A553-65 および ASME case 1308-5 にそれぞれ規定されている。第6表～第9表にそれぞれの規格を示してある。熱処理はオーステナイト化温度から焼準し(N), または水冷(Q)することによつて、主としてマルテンサイト組織にし、これを適当な温度に焼戻しすることによつてすぐれた機械的性質を有するようにするためのものである。現在使用されている9% Ni 鋼はNNT, すなわち2度焼準し後焼戻ししたものと, QT, すなわち焼入れ、焼戻ししたものの2種類がある。NNT材とQT材との差異は、前者は後者に比べて引張強さは大差ないが降伏点が低く、靱性はやや劣るようである。したがつてNNT材はどちらかといえば冷間加工性からみて適当な材料であるといえる。わが国で製造されている 9% Ni 鋼の降伏点 (0.2%耐力) はNNT材で

% kg/mm²
(NNT) C Si Mn Ni Y.P. T.S.
9%Ni 0.06 0.24 0.41 8.84 59 76



第41図 9% Ni 鋼の切欠靱性におよぼす予歪およびその後の応力除去焼鈍の影響 (日本鋼管)



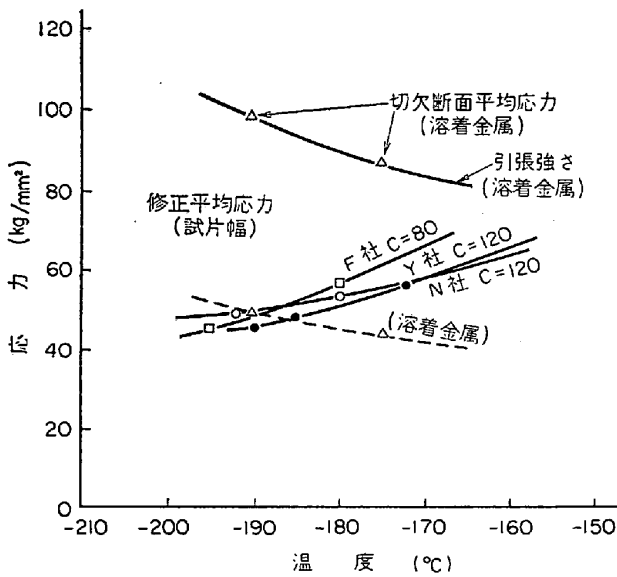
第40図 調質 9%Ni 鋼の V・シャルピー試験結果

60 kg/mm² 以上, QT 材では 70 kg/mm² 以上の高い値を示している。

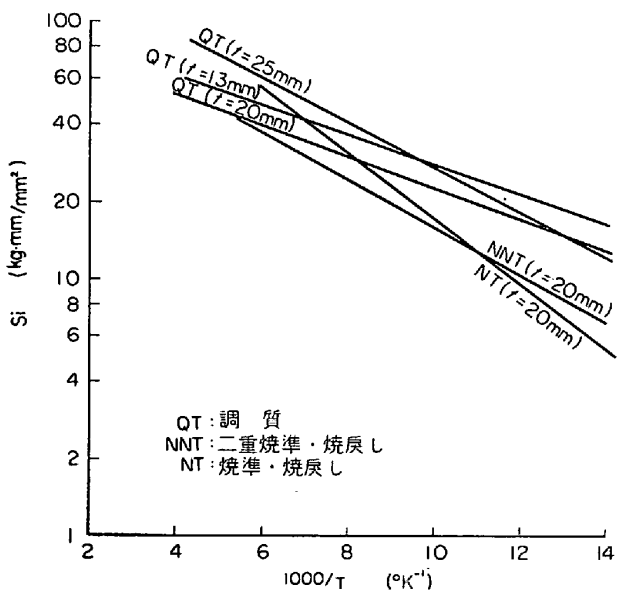
9% Ni 鋼の V・シャルピー試験の遷移曲線の例を第40図に示す。また第41図は予歪による衝撃値の低下を示したもので、3、5および10%の予歪によつてかなり劣化するが 575°C、1½ hr の応力除去焼鈍で完全に靱性は回復していることがわかる。

9% Ni 鋼の脆性破壊発生特性を求めるための大型試験としては前述したディープ・ノッチ試験が用いられている。第42図は試験結果の一例である。これより発生温度は他の鋼種、Al キルド鋼、調質高張力鋼、低Ni鋼などに比べてさらに低いことがわかるが、さらに破面の様相が特異であつて、-190°Cでの破断面でも非常に大きなせん断唇 (Shear Lip) を伴つており、高温になると脆性亀裂は途中で停止することがわかつている。

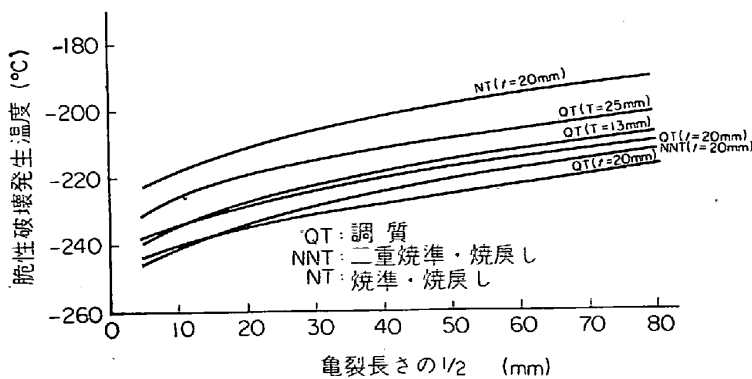
すなわち 9% Ni 鋼の発生特性は非常にすぐれたものであることが推察される。第43図および第44図はそ



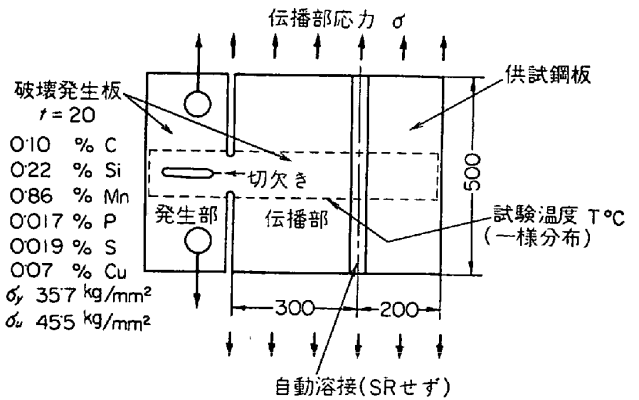
第42図 9% Ni 鋼のディープ・ノッチ試験結果



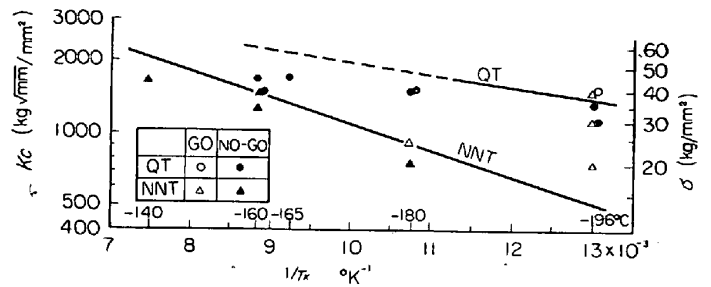
第43図 9% Ni 鋼の脆性破壊発生時の表面塑性エネルギーと温度の関係



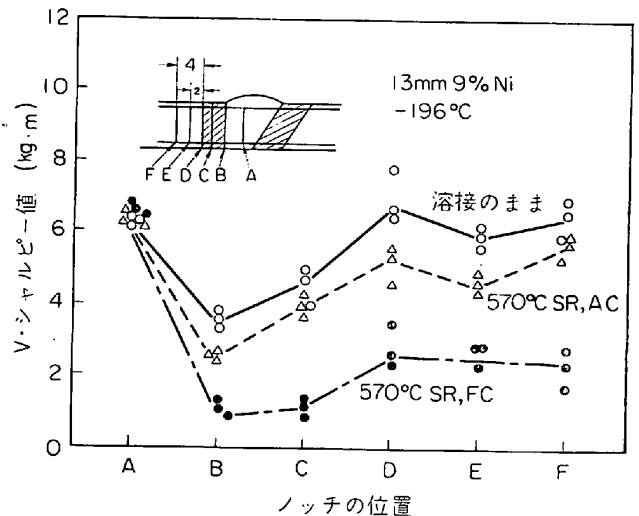
第44図 9% Ni 鋼の脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係



第45図 混成型二重引張り試験



第46図 Kc と絶対温度の逆数の関係



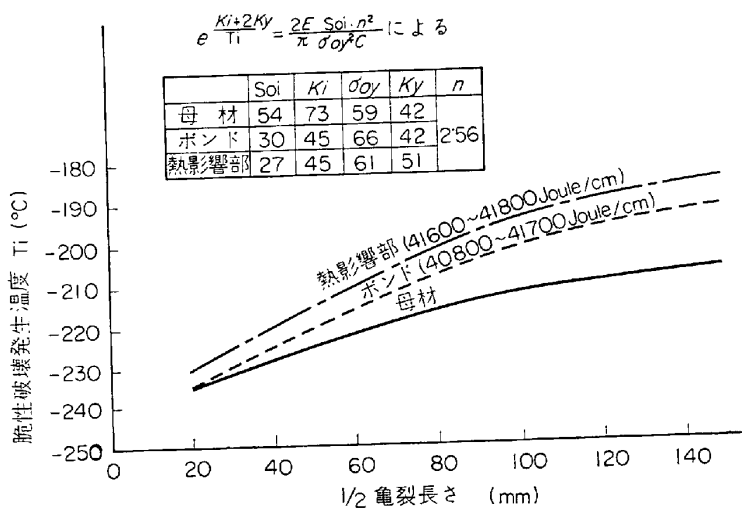
第47図 9% Ni 鋼溶接継手各部の切欠靱性(八幡技研) 伸び(2'') ≥22% V・シャルピー(-196°C) ≥30ft-lb(4.2kg-m)(QT) ≥25ft-lb(3.5kg-m)(NNT)

れぞれ脆性破壊発生時の表面塑性エネルギーと発生温度との関係および降伏応力の1/2・56倍の応力での亀裂長さとの関係を示したものである。これらの図より発生時の表面塑性エネルギーの絶対値は高く、発生温度は非常に低温であることがわかる。

9% Ni 鋼の伝播停止特性は上述した二重引張試験では脆性亀裂を発生させることができないので第45図に示す混成二重引張試験によらなければならない。この試験法によつて得られた Kc 値と伝播停止温度との関係を第46図に示す。この結果より停止特性は上述した他の低温用鋼のいず

第10表 代表的な 9% Ni 鋼用溶接材料

溶接材料	メーカー	溶着金属の化学成分								溶着金属の機械的性質				
		C	Mn	Fe	Cr	Nb	Ni	その他	0.2%耐力 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	vE-196 kg-m		
被覆アーク溶接用	Ni	INCO-WELD A	INCO	0.04	1.5	8.0	15.0	2.0	Bal	Mo 1.0	36.8	65.0	45	7.6
		YAWATA WELD B	八幡棒	0.04	1.7	10.4	16.2	1.9	68.7	Mo 0.8	41.6	64.8	44	8.8
	Cr-Ni ステンレス系	OKSP 184	E S A B	0.20	8.0	Bal	16.0	—	12.5	W 3.5	49.8	65.0~69.9	40	5.5
		Ⓢ N-19	八幡棒	0.17	2.6	Bal	24.9	—	21.9	Mo 1.8	47.4	66.2	40	3.9
ガルク スド溶 シア接 11用	Ni 合金系	Inconel 92	INCO	0.03	2.4	6.9	16.8	—	Bal	Ti 3.4	38.0	49.4	40	5.5



第48図 9%Ni 鋼のディープ・ノッチ試験結果

れよりもすぐれていることがわかる

この鋼材の溶接性はNi量が多いため硬化性が強く、溶着金属、熱影響部に高温割れが生じやすくなると同時に溶接熱によつて熱影響部のかなりの範囲にわたつて靱性が低下する。この傾向は溶接入熱が大きくなるとますます著しくなるので注意が必要である。第47図は溶接接手部の切欠靱性を求めた例であるが、570°Cの応力除去焼鈍によつてかなり衝撃値が低下している。このようなことから溶接の際の予熱、および溶接後の応力除去焼鈍は行わないほうがよいとの見解も打出されている。また9%Ni鋼の溶接部の脆性破壊発生特性を第48図に示す。母材に比してボンド部、熱影響部が劣化していることがわかる。

被覆アーク溶接棒としては通常 Ni 基合金 (70Ni-15Cr-Cb, 50Ni-15Cr) のものと Cr-Ni ステンレス系の2種類が使用されている。これらの代表的なものの化学成分、機械的性質を第10表に示す。これらの溶着金属はいずれもすぐれた衝撃値を示すが、なかでも INCO-WELD A は広く欧米で 9%Ni 鋼用として用いられている。また YAWATA WELD B は A を交流用に改めたものでわが国の 9%Ni 鋼の溶接棒としては広く実績をもつたものである。しかし Ni 系の溶接棒は高価な Ni を多量に含んでいるため価格が高く、また高温割れが生じ

やすい。これに対してステンレス系の溶接棒は作業性もよく、価格も安い、母材と溶着金属の熱膨張係数の差が大きいのが欠点である。

2.5 オーステナイト系ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼は面心立方格子構造をもつものである。低温になつても靱性が劣化することがほとんどなく問題はない。溶接棒としては一般に D 308 (19Cr-9Ni), D 310 (25Cr-20Ni), D 309 (25Cr-12Ni), D 316 (19Cr-12Ni-2Mo) などがあるが、これらの溶接棒によつて得られる溶着金属は铸造粗大組織のままであるので母材よりも一般に低い衝撃値となるので注意する必要がある。第49図に各溶着金属の衝撃値を示す。この図よりフェライト含有量が全くない D 310 がもつともすぐれ、フェライト含有量が約9%程度と認められる D 309 が劣っている。また衝撃値は 1100

°C/lhr 水冷の熱処理によつていずれも向上している。D 310 は溶接第一層の高温割れの感受性が比較的高く、価格も高いことから普通 D 316 系が使用されている。

3. 低温用鋼材の材質判定と脆性破壊防止対策

低温構造物の強度設計で最も問題となる脆性破壊の防止のためにはまず使用材料(鋼材、溶接材)が適切なものでなければならぬことが第一であると同時に、設計工作上からも適切な対策が必要である。

各種低温容器に使用される鋼材の種類は、すでに述べたようにそれぞれ特徴があり、それぞれの使用目的に応じて材料の特性を生かした適切な材料選択を行なうことが肝要である。

低温用鋼については ASTM をはじめとして各国において規格によりその特性を定めている。これらはいわゆる material specification の性格をもつものが多いが、一方与えられた設計条件ないし使用条件(使用応力、使用温度など)に応じて、材料にどのような性能を要求すべきかを定める design code、ないし材料選定のための材質判定基準はとくに設計者の立場からはなほ重要なものであるが、この種のもは技術的になかなか難かしい問題も多いことによるのか、比較的少ない。

以下各国の低温材料規格の代表的例と、最近わが国で

第11表: 低温用鋼規格 (ASTM)

規格	鋼 種	主 成 分	降 伏 点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	最低試験温度 (°C)	適用規格 (試験片*)
A 516	Mn-Si鋼	Mn 0.85~1.20 Si 0.15~0.30	グレード55 ≥21 " 60 ≥22 " 65 ≥25 グレード70 ≥27	39~46 42~50 46~54 49~60	-46	A-300† (Uまたはキーホール)
A 537	Mn-Si鋼	Mn 0.70~1.40 Si 0.15~0.50	焼準 $t \leq 1\frac{1}{4}''$ ≥35 $1\frac{1}{4}'' < t \leq 2''$ ≥32	49~60 46~56	-60	A-300† (Vまたはギーホール)
			調質 Mn 0.70~1.40 Si 0.15~0.50	$t \leq 1\frac{1}{4}''$ ≥42 $1\frac{1}{4}'' < t \leq 2''$ ≥39		
A 203	低 Ni 鋼	Ni 2.10~2.50 Ni 3.25~3.75	A. B ≥26 D. E ≥28	46~54 49~60	-75 -150	A-300† (Uまたはキーホール)
A 543	Ni-Cr-Mo鋼 (調質)	Cr 1.50~2.00 Mo 0.45~0.60 Ni 2.6~3.25($t \leq 4''$) Ni 3.0~4.0($t > 4''$)	クラス 1 ≥60 クラス 2 ≥70	74~88 81~95	協議*	A-300† (V)
A 353	9Ni 鋼	C ≤ 0.13 Ni 8.50~9.50	≥53	70~84	-196	A 353, A 553** (V)
A 553						

* 鋼材メーカーと容器製造者との協議による
† 次表による (A300)

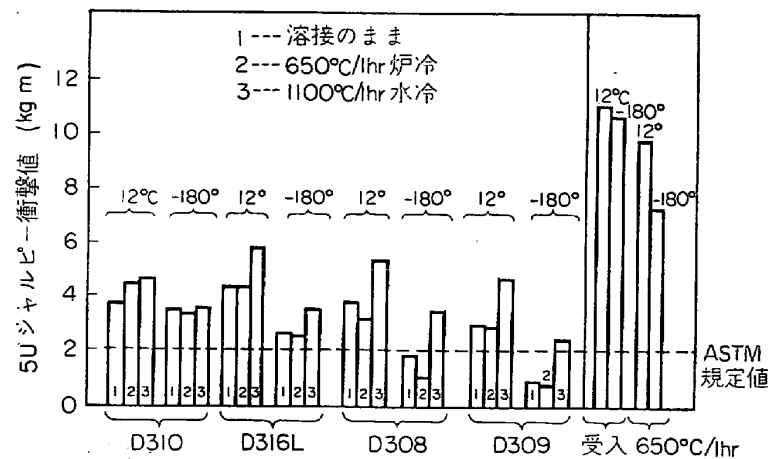
** 第9表参照

試験片 (mm)	3本の吸収エネルギーの 平均値 (kg-m)	それぞれの 最低値 (kg-m)
10×10×55	2.1	1.4
7.5×10×55	1.7	1.2
5×10×55	1.4	1.0
2.5×10×55	0.7	0.5

* V: Vシャルピー試験片
U: Uシャルピー試験片
キーホール: キーホールシャルピー試験片

提唱されている材質判定の考え方を簡単に紹介する。

4.1 各国の低温用鋼材規格



第49図 オーステナイト系ステンレス鋼用溶着金属の低温での衝撃値

材料規格として各種低温用鋼の切欠靱性を規定しているものはアメリカ (ASTM), ドイツ (DIN), イギリス (BS), など各国にある。これらは各鋼種についての特性に関する最低要求値を定めるものであるが、どのような条件ではどれを用いるべきかという点は、別の問題として明確な思想は打ち出されていない。ASTM の低温用規格を第 11 表に示す。

使用条件との関連において材料に要求される規格値を定めているものは比較的少ないが、第 12 表に示すのはイギリス (BS), アメリカ (ASME), ドイツ (ADM) の各国における低温容器用炭素鋼および低合金鋼板に対する設計条件とシャルピー衝撃値の最低要求値の関係を比較したものである。これらの規格値の設定は、主として従来の多くの経験の積み重ねに基づくものであると考えられる。

これに対してわが国では、大型試験と小型試験の相関関係を基にして大規模な研究が行なわれ、日本溶接協会により WES 低温用鋼板材質判定規程が制定されている。この判定規程はわが国における脆性破壊伝播停止特性に関する破壊力学的研究成果に立脚して定められたもので、設計応力、最低使用温度、板厚によつて V シャルピー試験温度を定め、その温度での衝撃値が完全に延性的に破断するときの衝撃値の 1/2 以上であればよいという形式となつており、設計条件と定量的な関連を持つたシャルピー値の規格は世界的にも類のないものといえる。その概要はつぎのようになつている。

まず二重引張試験によつて得られた結果を整

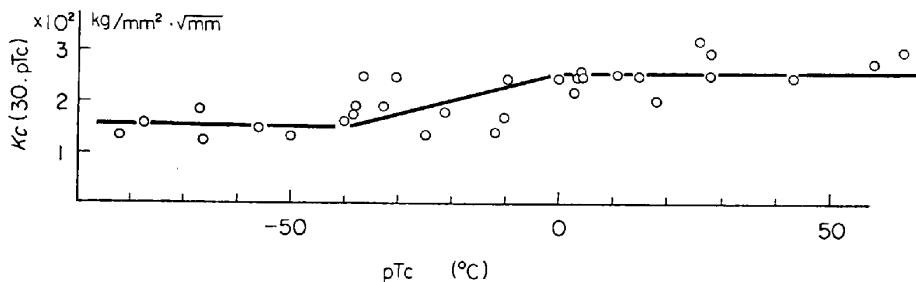
第12表 低温容器用炭素鋼および低合金鋼板の衝撃吸収エネルギー規格要求値 (ft-lb)

国別規格	英国 (BS 15000)									米国 (ASME Unfired Pressure Vessel Code)		西独 (AD Merkblätter) (Sheet WI:1960)	
	Vシャルピ (BS 131 Part 2)									Uシャルピ (ASTM F23 Type B)		DVM (DIN 50115)	
	応力除去せず			応力除去						応力除去せず	応力除去	応力除去せず	応力除去
板厚 (インチ)	1/4	3/4	1	1 1/4	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/4 以上	1 1/4 以下	全板厚	30 mm 以下	全板厚
最低使用温度 (°C)										なし		鋼種, 板厚による (a) 要求なし (b) 5 kg-m/cm ² (20°C) (c) 4 kg-m/cm ² (20°C)	
										使用応力が容 応力の 1/5 以 下でなければ ならない。 この場合, シ ャルピ試験は やらなくても よい		7 kg-m/cm ² 3.5 kg- m/cm ² (最低使用温 度) (最低使用温 度)	

* シリコンキルド鋼の場合は無要求の範囲を 10°C 下げる

() 内は試験温度を示す。

15ft-lb=2.70 kg-m, 20ft-lb=2.76 kg-m



第50図 Kc (30, pTc) と pTc の関係

理すると先に述べたように脆性破壊伝播停止特性 K_{Ic} は次式で表わされる

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi C} \cdot f(\gamma) = K_0 \exp(-k/T)$$

$$\text{ただし, } f(\gamma) = \sqrt{(2B/\pi C) \tan(\pi C/2B)}$$

σ = 付加応力 (kg/mm²)

C = 亀裂長さ (mm)

B = 試験片幅 (標準 500 mm)

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} K_{Ic} = \sigma \sqrt{C} = \begin{cases} = 2.6 \times 10^2 \cdot f(t) \cdot \exp\{3.1 \times 10^3(1/pTc - 1/T)\} & : 273^\circ K \leq pTc \\ = \{1.5 \times 10^2 + 2.75(pTc - 233)\} \cdot f(t) \cdot \exp\{[2.2 \times 10^3 + 22.5(pTc - 233)] \times [1/pTc - 1/T]\} & : 233^\circ K \leq pTc \leq 273^\circ K \\ = 1.5 \times 10^2 \cdot f(t) \cdot \exp\{2.2 \times 10^3(1/pTc - 1/T)\} & : pTc \leq 233^\circ K \end{cases}$$

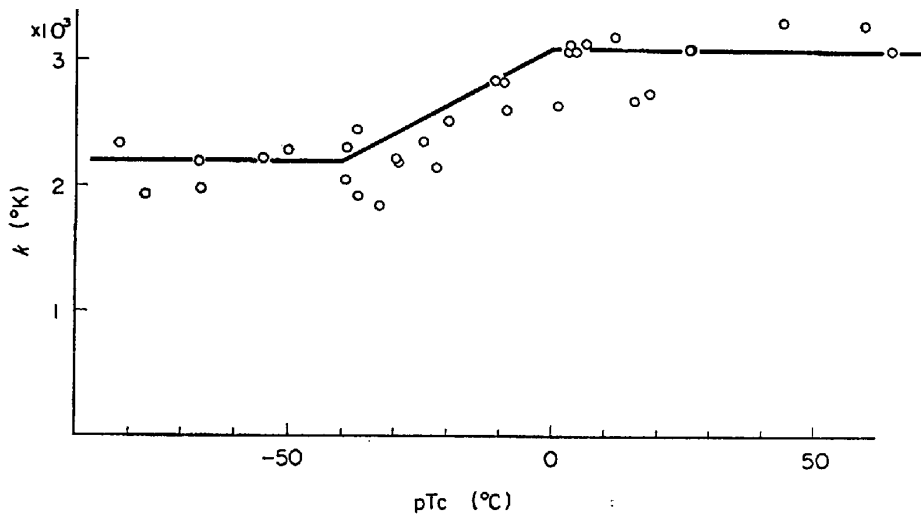
$$f(t) = \begin{cases} 1 - 1/20(t - 30); & t < 35 \text{ mm} \\ 0.75 & ; t \geq 35 \text{ mm} \end{cases}$$

T = 停止温度 (°K)

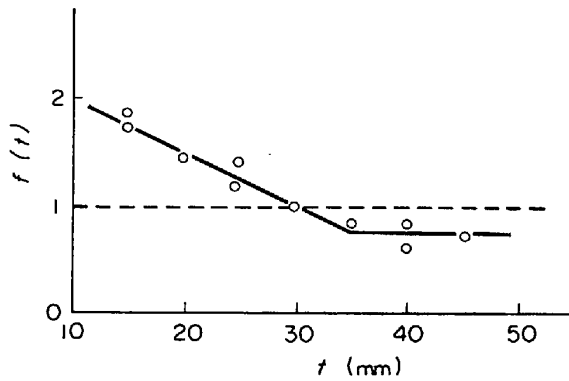
K_0, k = 材料定数

第 50 図, 第 51 図に示すように, プレスシャルピーの 50% 破面率遷移温度 pTc (°K) と k, K_0 (板厚 30 mm の場合に換算) の関係, および第 52 図に示す板厚効果係数 $f(t)$ と板厚の関係を実験結果より求めると次式が得られる。

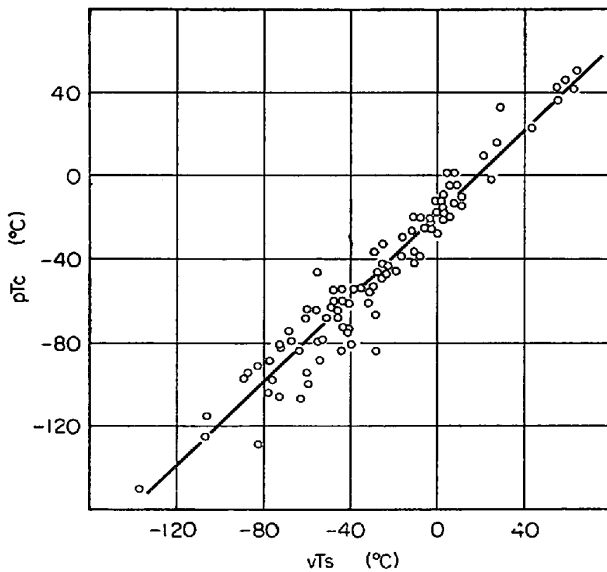
ただし上式では $B \rightarrow \infty$, すなわち $f(\gamma) \rightarrow 1$ の場合を考えている。 σ を設計応力, T (°K) を最低使用温度, t



第51図 k と pTc の関係



第52図 板厚効果係数 $f(t)$ と板厚 t mm の関係



第53図 pTc と vTs の関係

を板厚とすれば、これより脆性破壊を考慮しなければならない低温構造物に用いられる鋼種(G種)として、 $C = 10$ mm, どんな原因で脆性破壊が発生しても、これを阻止しうる性能を要求する鋼種 (A種) として、 $C = 100$

mmをとると、試験温度としての $pTc(°K)$ が上式より求まる。さらに

$$\begin{cases} pTc = vTrs + 18°C & \text{(第 53 図)} \\ vTrs = vTrE \end{cases}$$

ただし、

$vTrs = V \cdot$ シャルピー試験の破面遷移温度($°C$)

$pTc =$ プレス・シャルピー試験の破面遷移温度($°C$)

$vTrE = V \cdot$ シャルピー試験のエネルギー遷移温度($°C$)

によつて、各板厚区分、使用温度区分(第13表)に対し $V \cdot$ シャルピー試験の試験温度を表示し、その温度での衝撃値が完全に延性破面を示すときのその1/2以上であればよいものと規定している。第14表はその一部である。

この判定基準は強度の高い調質高張力鋼、あるいは特に9%Ni鋼に対してはその適用性について疑問がある。最近越賀は第54図に示すような Kc 値と停止温度 $T(°K)$ の関係にみられる一般的傾向を基にして上述した材料定

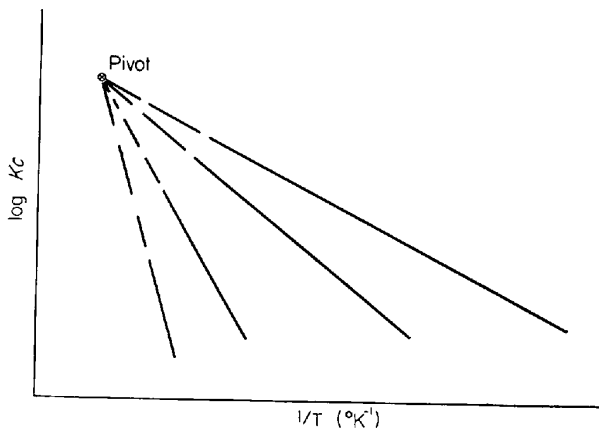
第 13 表

板厚区分 (WES低温用鋼板規格1964)

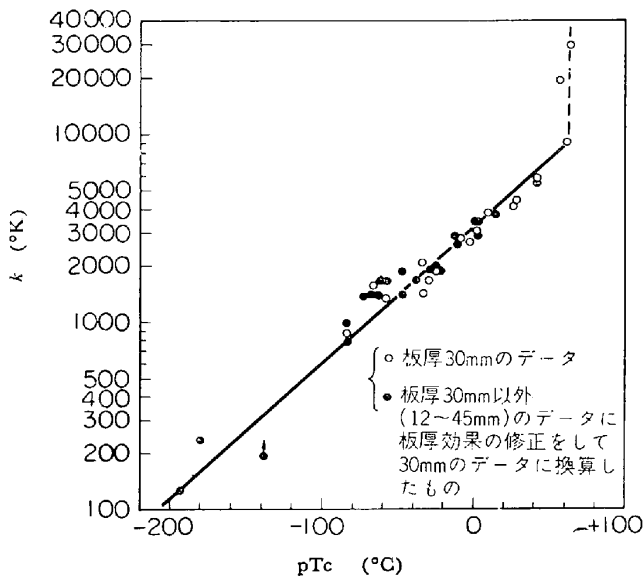
板厚 t (mm)	板 厚 区 分
$5 < t \leq 13$	I
$13 < t \leq 20$	II
$20 < t \leq 26$	III
$26 < t \leq 32$	IV
$32 < t \leq 40$	V
$40 < t \leq 50$	VI

最低使用温度区分 (WES 低温用鋼板規格1964)

最低使用温度 T_0 ($°C$)	使用温度区分
$0 \leq T_0$	0
$-30 \leq T_0 < 0$	-30
$-50 \leq T_0 < -30$	-50
$-70 \leq T_0 < -50$	-70
$-90 \leq T_0 < -70$	-90
$-110 \leq T_0 < -90$	-110
$-170 \leq T_0 < -110$	-170



第54図 Kc-T 関係にみられる一般的傾向(定点の設定)



第55図 二重引張試験結果とプレス切欠きシャルビー試験結果の相関

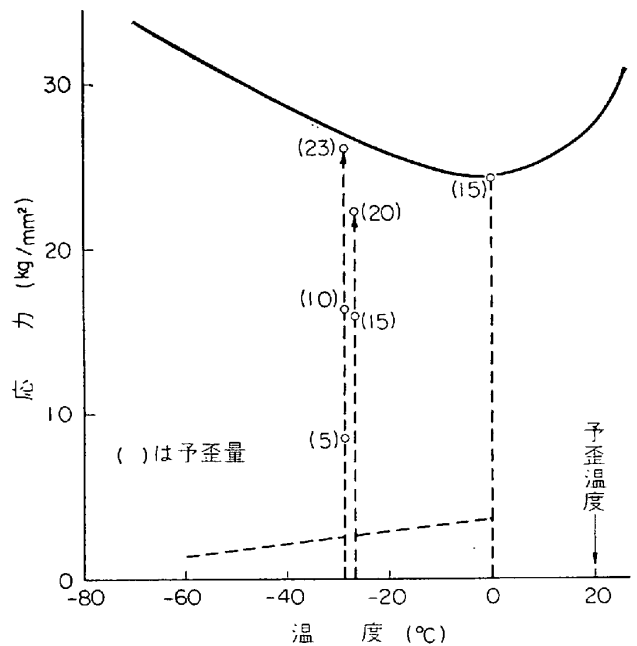
数 k とその材料の pTc の関係を整理すると第 55 図が得られることから上記 WES 判定基準の式に代るものとして

$$pTc(°K) = 139 \log_{10} \left[\frac{\log_{10} \{ \sigma \sqrt{\pi C} / (3 \cdot 16 \times 10^3) \}}{1 \cdot 31 \times 10^{-3} - 0 \cdot 4343/T} \right] - 1 \cdot 42 t - 170$$

なる式を提案している¹⁶⁾。

たとえば液体窒素貯蔵槽とし設計応力 17 kg/mm^2 、板厚 13 mm 、温度 -196°C の使用条件があたえられた場合に、設定亀裂長さを上述した WES 低温用鋼板判定基準の G 種、および A 種と同一の値 $C = 10 \text{ mm}$ および $C = 100 \text{ mm}$ を採用すれば、上式より使用鋼材のプレス・シャルビー試験の破面遷移温度 pTc はそれぞれ -107°C および -131°C 以下のものであればよいことになる。この要求値は WES 基準 (第 14 表) に比べてかなり緩和された値であり、国産 9% Ni 鋼にとつて十分ゆとりのあるものである。

また、船級協会国際統一規格の D 級鋼および E 級鋼に対してそれぞれ $C = 30 \text{ mm}$ および $C = 120 \text{ mm}$ を採用することとし、応力 13 kg/mm^2 、温度 0°C 、板厚 25



第56図 溶接ビードつき広幅引張試験片での溶接残留応力除去が破壊応力におよぼす影響(○印は実験点)

mm とすれば pTc はそれぞれ 28°C および 12°C となり、規格であたえられている V・シャルビー規格値とほぼ一致する。

上述した判定基準はいずれも脆性亀裂の伝播停止特性によつて材質を判定する方法であるが設定亀裂長さ C については種々検討すべき点が残されている。また一般の構造物は脆性亀裂の発生特性で材質判定を行なうべきと考えられる場合も多く、前述したディープ・ノッチ試験などに基礎をおいた基準の設定が、先の越賀の提案とともに現在日本溶接協会 L T 委員会で検討されており、その成果が各方面から期待されている。

4.2 溶接構造物に適用する場合の考え方

上述したような材質判定基準はこれを溶接構造物に適用する際にはその特性を十分考慮する必要がある。溶接構造物を大別して溶接のままの場合と、残留応力を除去する場合とに分けることにする。これは脆性破壊の発生、伝播に残留応力の有無、大きさが大きな影響をあたえるからである。

4.2.1 溶接のままの場合

溶接のままの構造物は溶接による残留応力が存在するため前述したように一般には溶接線にそつて脆性亀裂が進展することはないが母材中を進展する。したがつたとえ溶接部あるいはその近傍が脆化していても、母材の特性さえよければ重大な事故にはならないと考えられていた。しかし調質高張力鋼、特に 80 キロ級以上のものではすでに述べたように溶接線に沿つて脆性亀裂が進展するので熱影響部、ボンドの切欠靱性を著しく低下させないような工作上的考慮、特に溶接入熱をできるだけ低くおさえることが必要である。

したがつて 80 キロ級高張力鋼以下の鋼を使用する場合には母材の脆性亀裂伝播停止特性で判定すればよく、この場合の設定亀裂長さとしてはその構造物の脆性破壊事故の危険度に応じて $C = 10 \sim 200 \text{ mm}$ を考えればよい

第14表 WES 低温用鋼板判定基準 (1964年) のV・シャルピ試験温度 (°C)

板厚 区分	鋼材 区分	使用温度区分							
		使用応力 (kg/mm ²)	0	-30	-50	-70	-90	-100	-170
I	G	5	40	40	5	-30	-55	-85	-170
		10	40	15	-15	-40	-65	-95	-175
		15	40	5	-25	-50	-75	-105	-180
		20	40	-5	-30	-55	-80	-110	-180
		25	35	-10	-35	-60	-85	-110	-180
		30	30	-15	-40	-65	-90	-115	-180
		35	25	-20	-45	-70	-95	-115	
		40	20	-25	-45	-70	-95	-120	
		45	15	-25	-50	-75	-100	-120	
	50	10	-30	-50	-75	-100	-120		
	A	5	40	5	-15	-50	-80	-105	-180
		10	25	-15	-40	-65	-90	-115	-180
		15	10	-25	-50	-75	-100	-120	-185
		20	5	-35	-60	-80	-105	-125	-185
		25	0	-40	-65	-85	-105	-125	-185
		30	-5	-45	-70	-90	-110	-130	-190
		35	-10	-50	-75	-90	-110	-130	
		40	-15	-55	-75	-95	-115	-135	
45		-15	-60	-80	-95	-115	-135		
50	-20	-65	-80	-100	-115	-135			
II	G	5	20	20	-5	-25	-55	-90	-175
		10	20	15	-20	-45	-20	-100	-175
		15	20	0	-30	-55	-80	-105	-150
		20	20	-10	-35	-60	-85	-110	-180
		25	20	-15	-40	-65	-90	-115	-180
		30	20	-20	-45	-70	-95	-115	-185
		35	15	-20	-50	-75	-95	-120	
		40	10	-25	-55	-80	-100	-120	
		45	10	-25	-55	-80	-100	-125	
	50	5	-30	-60	-85	-105	-125		
	A	5	20	5	-30	-55	-80	-110	-180
		10	15	-20	-45	-70	-95	-115	-185
		15	5	-30	-55	-80	-100	-120	-185
		20	0	-40	-65	-85	-105	-125	-190
		25	-5	-45	-70	-90	-110	-130	-190
		30	-10	-50	-75	-95	-115	-130	-190
		35	-15	-55	-80	-95	-115	-135	
		40	-20	-60	-85	-100	-120	-135	
45		-25	-65	-85	-100	-120	-135		
50	-25	-65	-85	-100	-120	-135			

であろう。しかし圧力容器などで長さの短い板厚貫通亀裂でも許せない場合は溶接部の発生特性も考慮する必要がある。

また 80 キロ級以上の高張力鋼、あるいは 9% Ni 鋼などの場合は溶接部の発生、伝播特性も十分考慮しなければならない。

以上述べたいずれの場合も溶接線に作用する応力としては外荷重による応力と残留応力との和が作用することに注意を要する。なお圧力容器などの完成後行なわれる水圧試験は機械的に残留応力を除去、あるいは軽減することになるが、実施温度は脆性破壊が発生しない程度の高温で行なうよう十分の考慮が必要である(第56図参照)

4.2.2 残留応力除去を施した場合

残留応力除去を行なった構造物では一般に脆性破壊は発生しにくくなる。しかし熱処理などによつて溶接部の材質変化が生じ、場合によつてはかなりの劣化を生ずる

場合もあるので、この点の考慮が必要である。なおこの場合は残留応力が存在しないので溶接部の切欠靱性を考慮する時は設計応力のみ(応力集中なども考慮した)を考えればよいことになる。

5. む す び

以上低温用鋼材と脆性破壊と題し、脆性破壊特性試験法、各種低温用鋼の特性、材質判定規準と脆性破壊防止法の考え方などについて述べたが、脆性破壊の基礎的解説や、各種構造物の設計および施工をめぐる問題点に関しては紙面の関係で触れなかつた。

鋼材の脆性破壊の研究は各方面で活発に行なわれ、低温で使用される材料も最近いちじるしい進歩発達をとげている。これは鋼材の低温における性質が解明されてきたこともその一因となつている。

一方複雑な現象を伴う溶着金属、熱影響部について

は、残された問題が多いのが現状である。たとえば 9% Ni 鋼の溶接には現在 Ni 基溶接棒が使用されているが、経済性を考えた場合、当然合金溶接棒を使用する方向に進むものと思われる。また安定した衝撃値が得られる 3.5% Ni 鋼用自動溶接材料の開発も今後に残された問題であろう。

文 献

- 1) 越賀房夫: Pressed-notch Charpy Test について 造船協会論文集, 第 104 号, 昭和34年 1 月
- 2) 木原 博, 増淵興一: 脆性破壊におよぼす残留応力の影響に関する一考察. 造船協会論文集, 第 103 号, 昭和33年 7 月
- 3) F. J. FEELY JR., M. S. NORTHUP, S. R. KLEPPE and M. GANSAMER: Studies on the Brittle Failure of Tankage Steel Plates. *Welding Journal*, Dec. 1955
- 4) 秋田好雄, 池田一夫, 岩井宣雄: 脆性破壊の発生に関する研究(第 1 報)—Deep Notch Test について. 造船協会論文集, 第 116 号, 昭和39年12月
- 5) 木原 博, 池田一夫: 脆性破壊の発生に関する研究(第 2 報)—鋼板の破壊発生特性について. 造船協会論文集, 第 118 号, 昭和40年11月
- 6) N. CHRISTENSEN and B. AUGLAND: Method of Notch Toughness Testing of Ship Steel Engineering Research Foundation at the Technical University of Norway 1956
- 7) de GRAAF, J. E., and van der VEEN, J. H.: The Notched Slow-Bend Test as a Brittle Fracture Test. *Journal of the Iron and Steel Inst.*, Jan. 1953
- 8) D. L. NEWHOUSE and B. M. WUNDT: Brittle Boundary Test Specimens for Determination of Brittle Fracture Characteristics of Alloy Steels Memo. BMW-14 1960
- 9) 金沢 武: P. B. Charpy Test について. 溶接研究委員会第 6 分科会資料 Doc. 6-36-77 造船協会, 昭和36年
- 10) T. S. ROBERTSON: Propagation of Brittle Fracture in Steel *Journal of the Iron and Steel Inst.*, vol 175, 1953
- 11) 吉識雅夫, 金沢 武: 脆性破壊の伝播機構に関する一考察(第 1 報) 造船協会論文集, 第 102 号 昭和32年 2 月
- 12) 吉識雅夫, 金沢 武, 町田 進: 鋼材の脆性破壊伝播試験に関する一考察 —とくに平坦型および勾配型二重引張試験について. 造船協会論文集, 第 113 号, 昭和38年 6 月
- 13) 越賀房夫, 今沢 理, 竹花莊治: 鋼板における脆性亀裂の停止遷移特性現象. 造船協会論文集, 第 114 号, 昭和38年12月
- 14) 池田一夫: 脆性破壊伝播に関する研究(第 4 報) 造船協会論文集, 第 106 号, 昭和35年 1 月
- 15) 前田豊生: 圧力容器. 金属材料, 8 月号, 1965, 日刊工業新聞社
- 16) 越賀房夫: 構造用鋼板の切欠靱性評価に関する 2, 3 の提案. 高圧力, 第 4 巻第 6 号, 昭和41年 11 月, 日本高圧力技術研究会