



UDC 669.14.018.41.001

極低温用鋼材研究の現状

吉 村 博 文*

The Research Status of Cryogenic Steels

Hirofumi YOSHIMURA

1. 結 言

昭和 30 年後半から今日に至るまでに、エネルギーとしてのメタン、エタン、エチレン、酸素等のガスの利用は飛躍的に増加してきた。また最近では、極低温工業におけるヘリウム等の利用も盛んに行われ、利用するガスの種類は日増しに増加し、使用温度もますます低温側へ拡大する傾向にある。これらのガスの貯蔵および運搬に際しては、低温液化して取り扱うのが便利であることから、ガス利用増加に伴って、低温用容器の建造も盛んに行われ、また最近では、超電導現象などを利用した極低温工業の発達に伴って、これらに使用される極低温用構造材料の需要もますます増加する傾向にある。

液体ガスとしてよく知られているものに液体天然ガス (LNG: 主成分はメタンガス) がある。わが国は、この LNG の導入によつて、ガスによる新エネルギー時代を迎えたが、これを契機に低温用材料の分野において、既存材料の実用化と併行して新材料の開発も精力的にすすめられてきた。

既存鋼材に関しては、9Ni 鋼などのようにフェライト鋼と SUS 304 (18Cr-8Ni オーステナイト系ステンレス鋼) などのようにオーステナイト鋼の実用化が行われ、また新鋼種開発としては、前者の系統では 5~6Ni 鋼があり¹⁾²⁾、後者では Ni の代わりに多量の Mn を利用した高 Mn 鋼があげられる^{3)~6)}。オーステナイト鋼としては、さらにアンパー (36Ni 鋼) 薄板によるメムブレン型低温容器材も実用化され、低温用鋼材発達において重要なウェイトを占めている。

靱性の面からは、結晶構造が体心立方格子 (BCC) を有するフェライト鋼よりも、面心立方格子 (FCC) を有するオーステナイト鋼の方が有利である。したがって、非鉄材料においても、結晶構造がオーステナイト鋼と同じ FCC の Al-Mg 合金 (例えば 5083 など) が実用化されている。

最近新しいエネルギー源としての水素が注目されはじめ、この液体ガスの貯蔵、また核融合実験炉などへの超電導磁石の適用に関して、液体ヘリウムの利用がクローズアップされてきた。これらは絶対零度近傍で取り扱われるもので、これらの構造材として使われる極低温用材料が、最近特に注目されてきている。

極低温用材料としては、FCC を有する材料が主体となる。

本資料は、これら極低温用材料、特にオーステナイト鋼について、その研究開発の現状を記述するが、順序として、(1)低温と極低温の区分、(2)低温用鋼材開発の経緯について触れ、しかるのち、(3)極低温技術の動向とその鋼材開発の現状について記述したいと思う。

2. 低温と極低温

一般に室温以下の温度の総称が低温である。しかし -100°C を境にそれ以下から絶対零度までを超低温と分けて呼ぶこともあるし、また液体窒素 (LN_2) の -196°C 付近を極低温と呼んでいることもあり、統一されていない点がある。そこで、低温とか極低温とかを論ずるまえに、記述の便宜上、これらを区別しておきたい。

すなわち、室温以下 LN_2 温度の -196°C 付近までを低温とよび、これ以下液体水素 (LN_2) および液体ヘリウム (LHe) 温度の絶対零度近傍を極低温とよぶことにする。前者は、LNG をはじめ LN_2 などのように、現在では容易に得ることのできる温度領域であり、液体ガスも比較的簡単な容器で取り扱われ、しかも物質の変化も比較的単純な現象が多い。一方後者の LHe などの絶対零度近傍では、取り扱いも複雑で、物質も特異な現象を示し、例えば Nb-Ti 合金のように超電導などの極限現象をあらわす領域である。

以上低温および極低温について区別したが、おのおの温度領域で使われる各種構造材料について表 1 に示す。なお極低温用材料に関しては、これから述べるよう

昭和 56 年 4 月 8 日受付 (Received Apr. 8, 1981) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)光製鉄所 工博 (Hikari Works, Nippon Steel Corp., 3434 Shimada Hikari 743)

表 1 温度と構造材料

工業分類	F	K	C	各種液化ガスの 常圧液化点(°C)	材 料 の 分 類				
					アルミキルド鋼 (-46°C)	低 Ni 鋼 2.20~2.60%Ni (-60°C)	低 Ni 鋼 3.25~3.70%Ni (-101°C)	5~6 Ni 鋼 9 Ni 鋼 オーステナイト系ステンレス	オーステナイト系ステンレス鋼・高 Mn 鋼 Al 合金・Ti 合金
低 温 工 業	-26.6	270-	-3						
	-27.4	240-	-33	アンモニア (-33.4) プロパン (-42.1) プロピレン (-47.7)					
	-81.4	210-	-63	硫化水素 (-61.0) ラドン (-65.0) 炭酸ガス (-78.5) アセチレン (-84.0)					
	-135.4	180-	-93	エタン (-88.6) エチレン (-103.5) キセノン (-108.0)					
	-189.4	150-	-123		5~6%Ni 8.5~9.5%Ni				
	-243.4	120-	-153	クリプトン (-151.7) メタン (-161.5)	18Cr-8Ni アンバー合金				
	-297.4	90-	-183	酸素 (-183.0) アルゴン (-185.8)	Al-Mg 合金 (-196°C)				
	-320.8	77-	-196	窒素 (-195.8)					
	-351.4	60-	-213						
	極 低 温 工 業	-401.4	30-	-243	ネオン (-246.3)	18Cr-8Ni 25Cr-20Ni 25Mn-5Cr-1Ni			
-419.4		20-	-253	重水素 (-249.6) 水素 (-252.8)	Al-Mg 合金 Ti-Al 合金				
-452.2		4-	-269	ヘリウム (-268.9)					
-459.4		0	-273		(-273°C)				

に、開発段階にあるものも記述している。

3. 低温用鋼材開発の概要

極低温用鋼材について論ずるまえに、今までの LNG などを対象とした低温用鋼材の開発の概要について触れてみる。

現在わが国で低温用鋼材として使用されているものは、9Ni 鋼、オーステナイト系ステンレス鋼およびアンバーである⁷⁾。このように、わが国の低温用鋼材の発達は、まず既存鋼種の実用化からはじまった。

まず 9Ni 鋼は、現在市場化されている既存のフェライト鋼のうちでは、低温切り欠き靱性のもつともすぐれたものである。その後これより低 Ni 型の 5~6Ni 鋼が開発された¹⁾²⁾が、これは 9Ni 鋼とほぼ同等の特性を有するものであつて、これよりもすぐれたものではなく、Ni 節約型のものであつた。したがつて 9Ni 鋼よりも高い特性が要求されるものに対しては適用されない。また 9Ni 鋼も例えば溶接部靱性は、LNG の -162°C で破壊靱性 K_C 値約 $400 \text{ kgf}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ であり⁸⁾(図 1)、低温用としては十分な特性を有するが、これ以上の低温靱性を要求される、いわゆる極低温域での使用に対しては適用

されない。フェライト鋼で 9Ni 鋼以上の特性を有するものとして 13Ni-3Mo-0.2Ti 鋼が研究されている⁹⁾が、实用には至っていない。そこで 9Ni 鋼よりも高い靱性が要求されるものについては、やはりオーステナイト鋼が適用される。

一般に实用オーステナイト鋼は、SUS 304 のように、Ni と Cr をともに高くして耐食性向上を目的として実

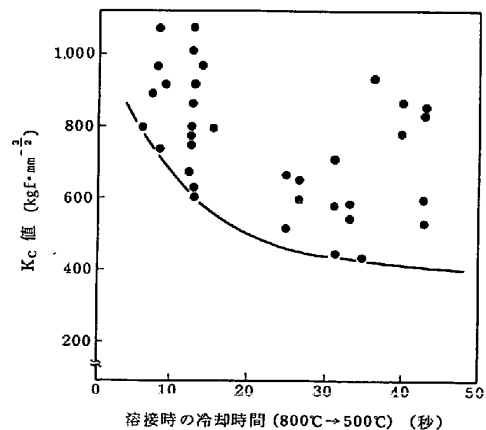


図 1 9Ni 鋼の溶接部の K_C 値⁸⁾

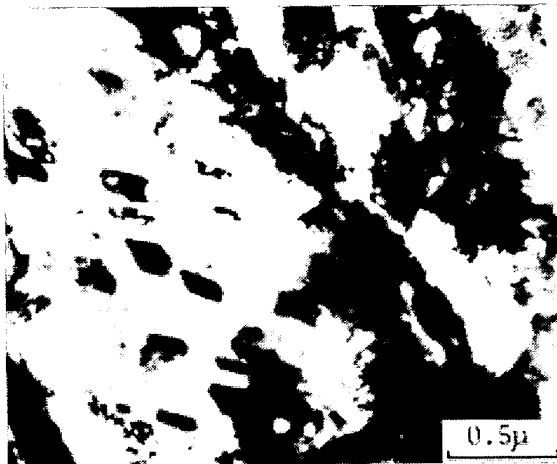


写真 1 Ni 系フェライト鋼のオーステナイト相の析出状態 (透過電顕組織)

用化されたものであるが、オーステナイト鋼は、結晶構造が FCC であるために、低温脆性を示すことなく完全延性というもう一つの特性を有している。すなわち、これら耐食用として開発されたオーステナイト鋼も、そのまま低温用として適用されているのである。

さきのフェライト鋼も、その金属組織を詳細に検討してみると、フェライト地に微細にオーステナイト相を分散析出させているものであり (写真 1)、この析出オーステナイト相が破壊の発生伝播を阻止していると考え¹¹⁾ ならば、これらフェライト鋼の靱性も、やはりオーステナイトの靱性を利用しているものと解釈できる。このようにオーステナイト鋼は、低温靱性の点で、きわめて有利な特性を有している。

低温用鋼材としては、靱性の他に常温から使用温度に至るまでの熱膨張率を考慮する必要がある。そこで熱膨張率の小さいアンバーが適用される場合もある。

低温用鋼に適用される溶接材料も、実用化されているものは主にオーステナイト鋼である。例えば 9Ni 鋼などのように鋼板がフェライト鋼でも、溶接材料は 70Ni 系のオーステナイト鋼である。これは、きわめて高い靱性を示すものであるが、なにしろ素材そのものの、Ni 量が高く非常に高価なものであるために、その後これよりも Ni 量の低い 37~40Ni 系の溶接材料も開発された¹¹⁾¹²⁾。

Ni 系のオーステナイト鋼に代わる低温用鋼として高 Mn オーステナイト鋼がある^{3)~6)}。これは低温用はもちろんのこと、後述する極低温用としても使用可能であり注目されている。一例として、成分は表 2 に示すように、25Mn-5Cr-1Ni-Nb 鋼 (以下 25Mn 鋼と記す) である。主に Mn と Cr とによつて完全オーステナイト相とし、Ni1% 添加で靱性の高位安定化を計り、Nb 添加によつて組織の細粒化を行い、適正な強度をもたせると同時に、熱膨張率を従来のステンレス鋼の約半分にするまで下げたものである。Mn25% で熱膨張率が最小となる (図 2)。これは、わが国が世界に先がけて開発したもの

表 2 25Mn 鋼の化学成分⁵⁾⁶⁾

鋼 種	成 分 (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
25Mn-5Cr-1Ni	0.15	0.25	24.50	0.026	0.005	1.09	5.08	0.050	0.110

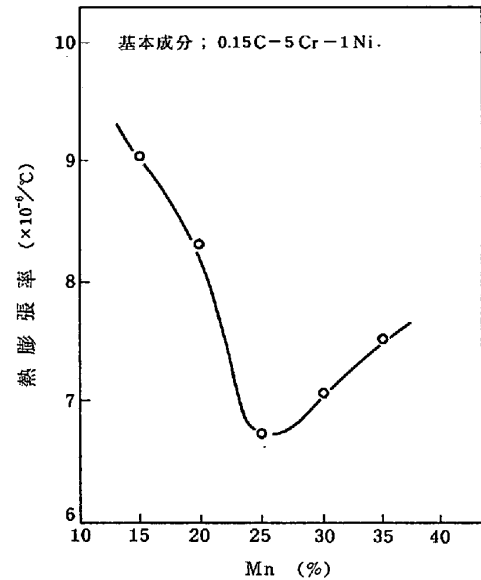


図 2 Mn 系オーステナイト鋼の Mn 含有量による熱膨張率の変化 (室温~LN₂温度間の平均熱膨張率)³⁾。

であり、低熱膨張率を有するオーステナイト鋼という点で、アンバーと並んで注目し値する新鋼材である。国内のみならず、特に米国において注目されており¹³⁾、将来の低温用鋼として、また極低温用鋼としての期待は大きい。

4. 極低温技術の動向

極低温化する目的の、その主なるものは、LH₂ などのように燃料として使うガスの貯蔵のためと、LHe のように、極低温における物質の特異性、例えば超電導などを得るための極低温冷媒を利用するための二つがある。これらの目的に使われる構造材料 (主に容器材) には、いずれも極低温において所要の特性を有すればよいわけであるが、後者の冷媒として使われる場合には、極低温状態で磁界などによつて構造材にかなりの荷重がかかる場合があり、前者の単なる貯蔵のみで使われる構造材の場合とやや異なる点がある。これら用途に応じた主なる例について記述する。

4.1 液体ガスの貯蔵

化石燃料、LNG につづいて大衆燃料として注目されつつあるのが水素である。原料も無尽蔵の水という利点がある。さらに電気などと異なりエネルギーとしての貯蔵が容易である。

この大量貯蔵は LH₂ としてタンクに貯蔵する方法が

とられ、 -253°C (20K) の極低温となつている。米国では、すでに宇宙センターなどでロケット用燃料貯蔵に適用されている。水素の生産量は、米国では数百 t/d の規模に達しており、またわが国でも将来の新エネルギーとして注目されつつある。

冷媒として使われる LHe 貯蔵用としては、一般にタンク形式のものが多く、その容器用鋼材での設計応力などは、さきの LH_2 の貯蔵の場合とほぼ同じ考え方で行われている。

冷媒に使われるヘリウムガスは、空気中にはきわめて少ないものであるが、カナダの北方ロッキー山脈近郊に発生する天然ガス中には、1% 近いヘリウムガスが含まれており、資源的にもかなり楽観視されている¹⁴⁾。ヘリウムは高価であるが可燃物ではなく、使用后、安全に回収して再利用できるため将来相当の利用が期待されている。

4.2 超電導技術

(1) 超電導現象

1911 年オランダの K. ONNES が LHe を使つて極低温における水銀の電気抵抗をはかり、突然抵抗がなくなる現象を発見した。これが超電導現象と呼ばれるものである。その後 Nb 合金などで同様の現象が見いだされ、最近では、この超電導の起こる遷移温度が -253°C (20 K) 近いものまであらわれている¹⁵⁾。

この超電導線に直流を流すと、抵抗はほとんどないので損失はなく、短絡回路をつくれれば電流はほとんど無限の寿命をもつて流れる。したがって、例えば数 10 万ガウスの磁界をもつ磁石でも、消費電力はきわめてわずかで済むことになる。

(2) 超電導の応用

(i) 極低温送電

わが国の電力需要は、大都市に集中しており、しかもその伸び率も大きい。これらに伴い、送電線の大容量化が要望されている。従来は、鉄塔による架空送電方式が行われ、高圧化により送電容量の増加が計られているが、特に都市近郊では、誘導障害、ジュール熱損による電力損失などで、現状では、その能力の限界に達している。そこで登場するのが、極低温ケーブルによる大電力送電である¹⁶⁾。

まず LHe 温度における超電導現象を利用した Nb 系合金電線による送電は、電気抵抗 0 によつてきわめて効率のよい送電方法といえる。しかし大容量送電のためには、数万 V 以上の送電圧が必要で、低コストの交直変換器が必要であること、さらに長距離の送電線を LHe で極低温に保つ技術の面で解決すべき点が多々あるため、実験段階であり、実用にはまだ時間がかかる。しかし将来技術として、その実用性は十分ある。

(ii) 超高速磁気浮上車

現在のような車輪を回転させて走る車両は、現在の新

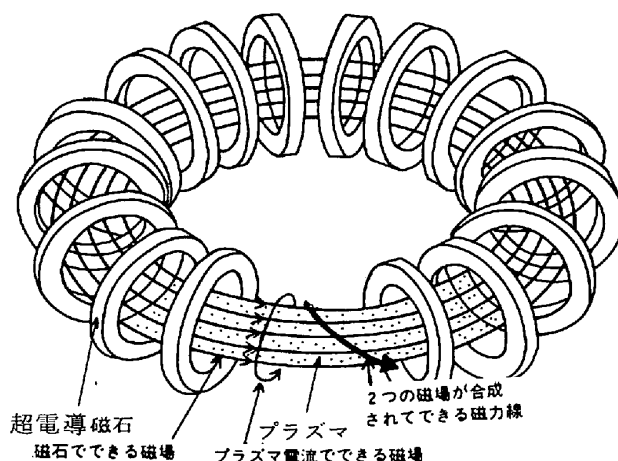


図 3 トーラス型臨界プラズマ実験装置の原理¹⁷⁾。

幹線の速度が限度であると考えられている。これ以上のものについては、車両を浮上させ、駆動にはリニアモーターを使つて推進する方式がとられ、すでに実験車がつくられている。これには、極低温による超電導磁石を利用した磁気浮上方式が採用されている¹⁶⁾。

車両は、停止時には浮力がないため、はじめは車輪で助走するが、ある程度の速度になると、超電導磁石のつくる磁束で、地上面のコイル内に誘起された電流と超電導磁石との間に電磁力が働き、車両を浮上させる。

この超電導磁気浮上車は、将来の高速輸送方式としてもつとも期待されているものである。

(iii) 核融合実験炉

地球上に“ミニ太陽を”のスローガンで、現在核融合炉の開発が世界各国で精力的にすすめられている。その目的は、今までの化石エネルギーからの脱皮であり、永久エネルギーの発生源として注目されているものである。原料は海水中に含まれる重水素であり、その源は無尽蔵に近い。

核融合は、超高温によつて原子をプラズマ状態とし、原子核の互いの反発による逃散を閉じ込めることによつて行われる。この閉じ込めに磁界を使う。

この方式には種々あるが、現在もつとも有望視されているものが、トーラス型、とくにトカマク型である¹⁷⁾ (図 3)。ドーナツ型の超電導磁石による磁場と、プラズマ電流による磁場とによつて、プラズマを閉じ込めるのである。

米国をはじめわが国においても、日本原子力研究所において、この型式のプラズマ実験装置 (例えば JT-60) の開発が行われており、臨界プラズマ条件に挑んでいる。ここで使われる超電導磁石の極低温用鋼材は、使用時に極低温そして磁界による強力な荷重がかかるために、高強度、高靱性のものが要求される。この鋼材の開発が、現在もつとも注目されている材料の研究課題である。

5. 極低温用鋼材

5.1 要求特性

以上のように、極低温の利用分野は今後ますます拡大される傾向にあるが、これに伴って極低温で使用される鋼材の需要もしだいに増加してくることが予想される。極低温構造物としては、単なる液体ガスの貯蔵容器あるいはパイプとして使われる場合と、超電導磁石のように磁界のかかる構造物として使われる場合の二つが考えられる。ここでは主に後者の場合に重点をおいて、鋼材に要求される特性について記述する。

(1) すぐれた靱性を有すること。

極低温領域で鋼材を構造物として用いるときに、もつとも重要な必要特性が極低温靱性である。例えば、フェライト鋼では、極低温まで温度が下がると、降伏点、引張強さは増大するが、伸び、絞り、絞りが低下し、破壊様式も脆性破壊となる可能性がでてくる。そこで FCC を有する高延性のオーステナイト鋼を使用する。代表的オーステナイト鋼 SUS 304 については、液体ガスの貯蔵容器の場合には、あまり問題ないが、強力な磁界がかかるような場合には、使用条件を十分検討する必要がある。

極低温構造物の構造安全評価法としては、簡単なシャルピー衝撃試験法⁵⁾⁶⁾¹⁸⁾の他に、弾塑性破壊力学にもとづく J_{IC} 破壊靱性試験¹⁹⁾が行われ、これをもとに、 K_{IC} 値をもとめる方法がとられている。

一般に線形破壊力学にもとづく K_{IC} 値は、平面歪み破壊条件の要求を満足するためかなりの大型試験片を必要とするが、極低温用構造物では、こまかい部材の性能評価をする場合もあり、また LHe などによる試験操作の複雑さから、極低温の破壊靱性試験においては、小型試験法が望まれる。それには、まず J_{IC} 値を求め、これより K_{IC} 値を求める方法がとられている。この方法は、 J_{IC} 値の精度、き裂発生点検出の妥当性、 J_{IC} 値と K_{IC} 値との相関性などの点で今後さらに検討を加える必要があるが、今のところ、高延性材料の評価法として、妥当な方法であろう。

超電導磁石での構造物に要求される破壊靱性値は、LHe 温度で、 K_{IC} 値 $100\sim 150 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上*が必要であるとされている²⁰⁾。

(2) 高強度を有すること。

構造物、例えば超電導磁石の極低温容器、コイルの巻わく、フランジ、超電導送電の極低温用パイプに使用される材料などでは、極低温において、構造応力の他に超電導線材に働く巨大な電磁力、また室温から極低温に冷却する際に生ずる熱歪みによる応力なども支える強度が必要である。このようなことから室温および極低温において強度が高いほど安全性そして経済性を高める。これ

らを考慮して、LHe 温度では耐力は少なくとも $70 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 以上が必要であるとされている²⁰⁾。

(3) 非磁性であること。

構造物には、磁氣的に非磁性であることが要求される。もし磁性を帯びると構造物自体に電磁力が働き、磁界に影響をおよぼす。

(4) 熱膨張率が小さいこと。

構造物は室温と極低温の熱サイクルによつて膨張収縮で熱歪みを生じ、これより生ずる応力に耐えなければならぬ。また超電導送電ケーブルなどには一定間隔にベローズを入れて、これを吸収させるように考えられている。そこで構造物には熱膨張率のできるだけ小さいものが要求される。

(5) 熱伝導率が小さいこと。

極低温をうるには、一般に LHe を使用している。しかし構造物が大型になつてくると、LHe などの使用も増大すると同時に、構造物の熱伝導率が大きいと、その損失も多大である。したがって構造物の熱伝導率は小さいほど望ましい。

以上の特性のほか、材料の適用性として次のようなものがある。

(6) 極厚板への適用が可能なこと。

超電導磁石の構造物として $50\sim 100 \text{ mm}$ の極厚板材が使用される。したがって板厚が厚く、特性的にも均一なものが要求される。また成形加工および熱処理による材質変化の少ないものでなければならない。

(7) 溶接部特性 (含む健全性) が良好なこと。

He は極めてリークしやすい気体である。したがって溶接部での靱性、強度はもちろんのこと健全性が極めて良好でなければならない。

5.2 オーステナイト鋼

(1) オーステナイト系ステンレス鋼

オーステナイト鋼といえば、まず SUS 304 を中心とするステンレス鋼が主流となつてくる。LHe などの単なる貯蔵用容器には、SUS 304 がそのまま使用される場合が多い。しかし核融合実験炉の超電導磁石に使用される LHe 用構造物では、さらに高強度のものが必要である。これについては、米国商務省、NBS (Dept. of commerce ; National Bureau of Standard) を主流として、関係部門で盛んに研究が行われている²⁰⁾²¹⁾。またわが国においても、日本原子力研究所において研究され、その結果、SUS 304 LN および 316 LN が考えられている²²⁾。

これらに要求される具体的特性は、前述のように、LHe 温度において、強度として耐力約 $70 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 、 K_{IC} 値 $100\sim 150 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ が必要であるとされている。通常の SUS 304 あるいは 316 では、まず耐力が低いなどの欠点があり、これらの鋼に (C+N) 量を増量して強化したもの²³⁾(図 4) が取り上げられている。N によつて強化された SUS 304 LN もしくは 316 LN は、

* $1 \text{ MPa} = 0.10192 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ であり、 $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} = 323 \text{ kgf}\cdot\text{mm}^{-2/3}$ となる。

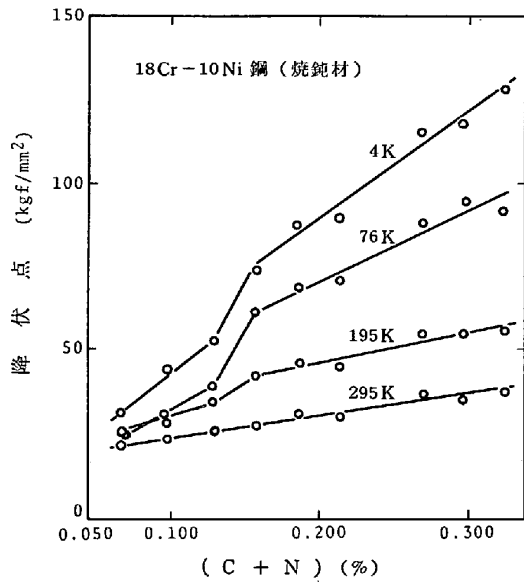


図4 SUS 304 の降伏点におよぼす (C+N) 量の影響²³⁾.

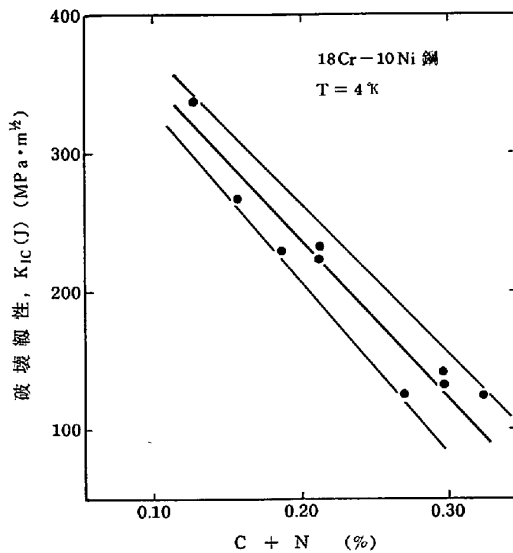


図5 SUS 304 の LHe 温度における K_{1c} 値におよぼす (C+N) 量の影響²⁴⁾.

-269°C, (4 K) において, 高い耐力および引張強さを有しており, 構造設計上有利と考えられるが, 一般に C あるいは N 含有量が増すと破壊靱性は低下する (図 5) とともに, 疲労におけるき裂伝播速度も早くなる²⁴⁾. したがって, 上記の要求特性を満足するものとして, C ≤ 0.03%, N 0.08~0.18% を含む SUS 304 LN もしくは 316 LN が今のところ適用されている.

破壊靱性が問題になるのが溶接部である. 溶接材料には, SUS 316 L 系のものが適用されている. しかしながら, 溶接金属に微小割れを生じたり, また多層盛によつて炭空化物が析出して脆化をおこしたりすることがある²⁵⁾ (写真 2). これは溶接金属の健全性を損なうばかりでなく, 延性が低下する. これを防止するには, 溶接金

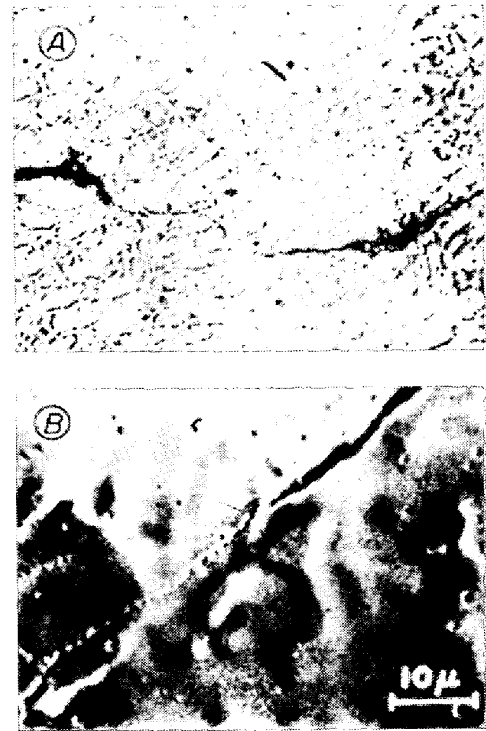


写真 2 316L 溶接金属にあらわれた微小割れ

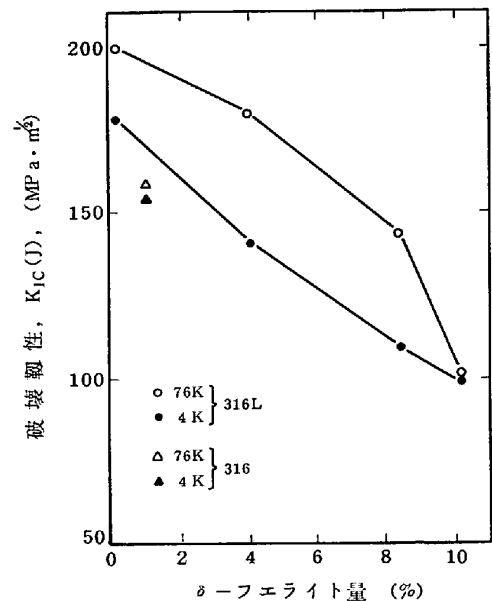


図6 SUS 316L 溶接金属の K_{1c} 値におよぼす δ-フェライト量の影響²⁶⁾.

属に適量のフェライトを含むべく調整しなければならない. ただフェライト量の増加によつて, また靱性は低下する²⁶⁾ (図 6). またフェライトが存在すると, 例えば超電導磁石などに適用される場合には, 磁界の影響がでてくるので, 構造設計上に細心の注意を払う必要がある.

また, 原子力関係装置をはじめ, 大型で, かつ構造上精度の高いものが要求される構造物の溶接では, 電子ビーム溶接法を適用して成功している例がある²⁷⁾. 電子ビーム溶接法は, 非常に少ない溶接熱量によつて極厚材の

溶接ができ、溶接による構造物の変形量も少ないという利点を有している。このことから、極低温用極厚材の溶接施行面で、電子ビーム溶接法は今後注目すべきものである。

以上のように、SUS 304 LN もしくは SUS 316 LN を主流とするオーステナイト系ステンレス鋼が、今のところ極低温用鋼材として有力な鋼材である。しかしながら、Cr, Ni を含むオーステナイト系ステンレス鋼は、もともと耐食鋼として開発されたものであり、これを極低温に転用したにすぎず、熱膨張率も高く、極低温適用を考えた場合、最適成分系になつているかは、もう少し検討してみる必要があるように思われる。また SUS 304, SUS 316 系よりも、Cr 量, Ni 量の多い、例えば SUS 310, SUS 314 系の 25Cr-20Ni 鋼などは、オーステナイト相は安定であるが、経済的に有利でない。

このようなことから、より安く安定したオーステナイト相をうるには、どうすればよいかということになる。

(2) 高 Mn オーステナイト鋼

以上のような問題を背景に登場してくるのが高 Mn オーステナイト鋼である。

25Mn-5Cr-1Ni 系オーステナイト鋼 (表 1 参照) は、LHe 温度でも安定したオーステナイト相を有し、高強度、高靱性を示し、しかも非磁性である。これらの特性を表 2 に示す⁶⁾。また熱膨張率も小さく (図 2 参照)、SUS 304 の約半分、Al 合金の 3 分の 1 程度である。しかも熱電導度も SUS 304 並みである。このように極低温用鋼材としては、すぐれた特性を有している。ただ高 Mn 系オーステナイト鋼は、一般に機械加工性がやや劣るため、現在その改善研究が続けられており、さらに溶接性、耐食性などの検討もすすめられている²⁸⁾。

高価な Ni の代わりに Mn を利用することによってオーステナイト化することは、上記のように特性的に有利であることのほかに、将来の Ni 資源の節約に備えて、海底などに無尽蔵に埋蔵しているといわれる Mn の有効利用の点からも大きな意義がある。

5.3 オーステナイト鋼の極低温における挙動

オーステナイト鋼の LHe 温度における引張および衝撃試験における挙動について、一例として 25Mn 鋼の結果を SUS 304 と比較しながら記述する⁶⁾。

25Mn 鋼の LHe 温度における荷重-変位曲線を図 7 に示す。まず弾性域の終わり近傍から、わずかの不連続性を示しながら降伏し、降伏点 (ここでは 0.2% 耐力) は 103.5 kgf/mm² と高い値を示す。そして降伏後はつ

表 3 25Mn 鋼の LHe 温度における強度と靱性⁶⁾

鋼 種	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	
				試験片 サブサイズ	エネルギー (kgf·m)
25Mn-5Cr-1Ni 鋼	103.5	183.3	31.4	27	5.1

☆ 5×10×55 (←)

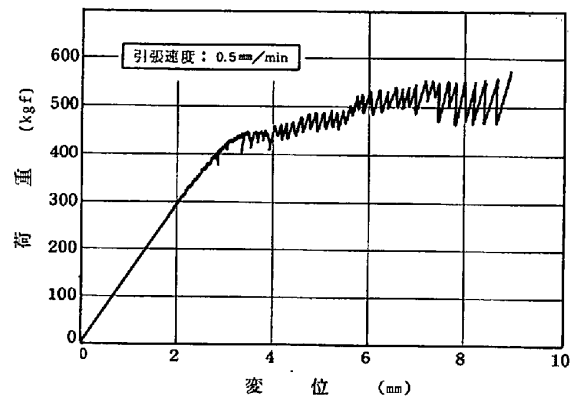


図 7 25Mn 鋼の LHe 温度における荷重-変位曲線⁶⁾ (引張試験片形状: 直径 2mm の丸棒型)

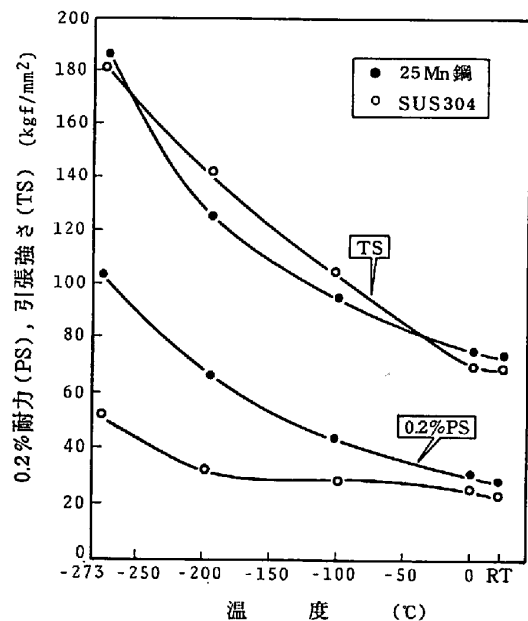


図 8 25Mn 鋼および SUS 304 の試験温度による強度変化⁶⁾。

きりとしたセレーションを示しながら比較的小さな勾配で加工硬化する。同様の現象は、20Mn-10Ni-15Cr 鋼においても確認されている²⁹⁾。

また 25Mn 鋼と SUS 304 の強度の温度依存性を図 8 に示す。

25Mn 鋼は、強度の温度依存性が大きく、LHe 温度ではさきに述べた要求値をはるかに上回り、しかも破断後においてもマルテンサイトは生成していない。

これに対して、SUS 304 では、極低温になつてもそれほど耐力は上昇せず、例えば、さきの要求値 70 kgf/mm² にも達していない。しかし降伏後破断までは加工硬化し、引張強さは高い値を示し、変形中に多量のマルテンサイトを生ずる。

このように、オーステナイト鋼の極低温における引張変形挙動において注目すべきことは、高 Mn 鋼では、温度低下とともに、耐力が著しく増加し、極低温においてきわめて高い耐力を示すこと、そして降伏後セレーション

ンを示しながら破断するに至ることである。

まず高耐力を示すのは、高 Mn というよりも、やはり C, N による固溶硬化³⁾⁶⁾²³⁾, そして結晶粒の細粒化³⁾ によるものと考えられる。SUS 304 は、低 C 系であり、N もそれほど高くなく、また Nb などの細粒化元素も含まれていない。だから、304 系で高強度化を計るには、前述のように N を増量するのである²³⁾。

セレーションについては、これまでに、いくつかの研究が行われている。それによると、発生の理由は、(1) マルテンサイト変態による、(2) 双晶変形による³⁰⁾³¹⁾、(3) 双晶変形および ε 変態に関して、その生成と消滅による⁶⁾、そして(4) 変形による断熱的発熱による³²⁾ などが考えられている。

25Mn 鋼では、引張変形後もマルテンサイトの変態は認められていないので、(1) によるものではない。(2) および(3)については、互いに関連するものであり、積層欠陥エネルギーの低い鋼においては、これらが関与していると推察される。(4) の、変形による断熱的発熱によるものとする考えは、たしかに変形と発熱は同時におこるものと考えられるが、考え方に少し無理があるように思われる。これらのいずれかが主因かは、もつとよく検討してみる必要があるが、仮に(4)によるとしても、(2) もしくは(3)は、付随的に関与するものと考えられる。

両鋼種の靱性の温度依存性を図 9 に示す。

25Mn 鋼では、温度低下にしたがって強度が上がるので靱性は低下する。もとの結晶粒径が小さく、格子欠陥としての結晶粒界が多く存在すれば、それだけ靱性に対して不利である。しかしながら、LHe 温度でシャルピー衝撃吸収エネルギー(vE)が 10 kg·m 以上横膨出量 (L·E)

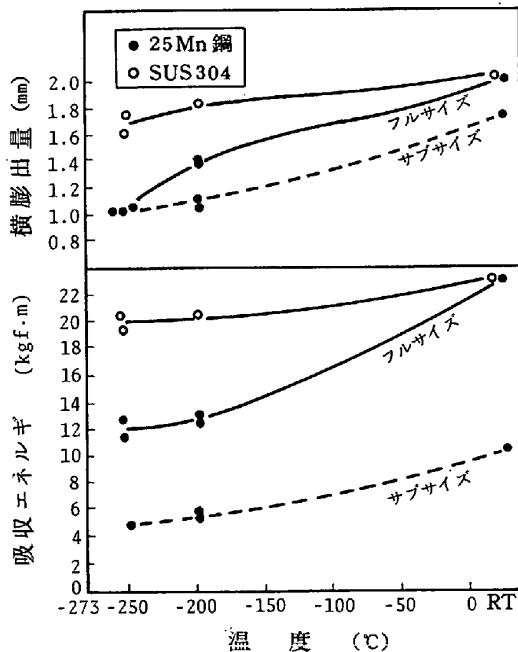


図 9 25Mn 鋼および SUS 304 の試験温度による衝撃特性。

1.0 mm 以上を示せば、構造物としての使用に対する特性値としては十分である。

SUS 304 は耐力が低いが靱性は高い。強度と靱性とは反比例の関係があるので、例えばさきに述べた SUS 304 LN などは、その分だけ靱性は低下する。

6. む す び

最近核融合実験炉などに使われる超電導磁石の開発が盛んに行われるようになってきた。これにともないその構造物に使われる極低温用鋼材の需要が高まってきた。このような背景のもとに、そのベースとなる今までの低温用鋼材開発の経緯を述べ、しかるのち極低温用鋼材として既存のオーステナイト系ステンレス鋼および開発鋼の高 Mn オーステナイト鋼について、その主なる特性を述べてきた。

極低温用鋼材に関しては、いまだ実験データも少なく、開発的要素を多分にもつている。今後さらに極低温用鋼材の実用化と、極低温における特異現象の解明に関する研究が強力にすすめられることを期待する。

文 献

- 1) 長島晋一, 大同耕之, 関野昌蔵, 三村 宏, 藤島敏行, 矢野清之助, 桜井 浩: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 128 および矢野清之助, 桜井 浩, 三村 宏, 脇田信雄, 小沢 勉, 青木宏一: 鉄と鋼, 59(1973), p. 752
- 2) F. E. HAVENS and D. A. SARNO: ASME Publication 70-Pet-18 (1970)
- 3) 吉村博文, 山田直臣, 矢田 浩, 本間弘之, 伊藤梯二: 鉄と鋼, 61(1975), p. 321
- 4) 吉村博文, 清水高治, 山田直臣: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1434
- 5) 吉村博文, 清水高治, 矢田 浩, 北島一徳: 鉄と鋼, 65(1979), p. 681
- 6) 吉村博文, 清水高治, 北島一徳: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2010
- 7) 小川泰之輔, 坂本光弘, 豊増清明, 大山光男, 深川宗光, 雑賀喜規: 鉄と鋼, 64(1978), p. 135
- 8) H. TAKASHIMA, H. YOSHIMURA, and K. TANAKA: Fatigue Properties and Fracture Toughness of 9% and 51/2% Nickel Steels", IIW Doc. XIII (1974)
- 9) 津谷和男, 石川圭介, 古林英一: 極低温構造材料に関する研究, 金属材料技術研究所研究報告集 (昭和 55 年版), p. 42
- 10) C. W. MARSHALL, R. F. HEHEMANN, and A. R. TROIANO: Trans. ASM, 55 (1962), p. 135
- 11) H. YOSHIMURA, K. KAKU, I. KIMURA, T. MUTA, K. FUJIWARA, and M. KUWAHARA: Trans JWS, 1 (1970), p. 72
- 12) 西 武央, 堀井行彦, 鈴木克己: 溶接学会誌, 49 (1980), p. 319
- 13) J. W. MORRIS Jr, S. K. HWANG, K. A. YUSH-

- CHENKO, V. I. BELOTZERKOVETZ, and O. G. KVASNEVSKI: Fe-Mn Alloys For Cryogenic Use ; A Brief Survey of Current Research, *Advances in Cryogenic Engineering*, ed. by K. D. TIMMERHAUS, R. P. REED, and A. F. CLARK: 24 (1978), p. 91 [Plenum Press, New York]
- 14) 竹中康雄: 鉄道技術研究資料, 27(1970), p. 396
- 15) 相山義道: 電気評論, (1976) 12, p. 1015
- 16) 竹中康雄: 新金属工業, (1973年3月), p. 8
- 17) 日本原子力研究所: 核融合研究開発の現状 (1980)
- 18) S. JIN, W. A. HORWOOD, J. W. MORRIS, Jr., and V. F. ZACKAY: A Simple Method for Charpy Impact Testing Below 6K; *Advances in Cryogenic Engineering*, 19 (1974), p. 373
- 19) J. R. RICE: *J. Appl. Mech. (Trans. ASME)*, 35 (1968), p. 379
- 20) 例えば *Technical Reports. Materials Studies For Magnetic Fusion Energy Applications At Low Temperatures*, ed. by R. P. REED, Fracture and Deformation Division, National Bureau of Standards. Boulder. Co. (June, 1980)
- 21) 例えば *NBS-DOE Workshop Materials at Low Temperatures. (Oct. 1980)*
- 22) K. YOSHIDA, E. TADA, K. KOIZUMI, T. ANDO, S. SHIMAMOTO, N. TADA, T. MORI, and K. YASUKOUCHI: *NBS-DOE Workshop. "Materials at Low Temperatures"* (Oct. 7-9. 1980). Vila Colorado
- 23) R. L. TOBLER and R. P. REED: Interstitial Carbon and Nitrogen Effects on the Tensile and Fracture Parameters of AISI 304 Stainless Steels. 文献 20) と同じ
- 24) D. T. REED and R. P. REED: Toughness, Fatigue Crack Growth, and Tensile Properties of Three Nitrogen-Strengthened Stainless Steels at Cryogenic Temperatures, *The Metal Science of Stainless Steels*, ed. by E. W. COLLINGS and H. W. KING (Proceedings of a Symposium, March, 1978)
- 25) C. E. WITHERALL: *Welding Journal* (1980), p. 326s
- 26) H. I. MCHENRY and R. P. REED: *Nuclear Engineering and Design*, 58 (1980), p. 219
- 27) 喜多久直, 和田辰治, 中崎隆光, 坪 洋二, 加沢義彰, 本島 修, 飯吉厚夫, 宇尾光治: *溶接学会誌*, 50(1981) 3, p. 296
- 28) 例えば, 榎本弘毅, 吉村博文: *鉄と鋼*, 67 (1981) 2 (第 101 回講演大会討論会講演概要), p. 105
- 29) 石川圭介, 丸山典夫: *鉄と鋼*, 65(1979), p. 219
- 30) 福島英二, 後藤 昭: *日本金属学会誌*, 37 (1975), p. 182
- 31) T. H. BLEWITT, R. R. COLTMAN, and J. K. REDMAN: *J. Appl. Phys.*, 28 (1957), p. 651
- 32) Z. S. BASINSKI: *Proceedings, Royal Society of London, Series A*, 240 (1957), p. 229