

.....
 情報センターだより

数値データ利用手引 (Numerical Data Utilization Manual)-(1)

当センターでは、鉄鋼をはじめとする金属関係の数値データを集積・整備して、研究者、デザイン技術者、サービス技術者などの便宜を計ることになっており、その蔵書および新しく入手したものは、既に逐次この情報センターだよりに掲載している。

この数値データは、今後も広く内外の刊行物から権威のあるものを収集・整理する予定であるが、この種のデータは、これを活用するに当り、相当の予備知識を必用とするものが多い。そこで、個々のデータ集について案内し、利用の手引となるものを作成することにした。

手引は都合により、作成可能となつたデータ集のものより、順次この情報センターだよりに掲載する予定なので、類別等の順序に従わないことになる。このため個々のデータ集に分類コードをかつこ内に付記することにする。現在収集中のデータ集は大別すると、一応次のように分類することができる。

数値データ集の分類(1.1.....1.2.....は分類コード)

1. 基礎データ
 - 1.1 基礎的物性値
 - 1.2 熱学的諸値
 - 1.3 機器分析用諸値
2. 応用データ
 - 2.1 規格
 - 2.2 規格に準ずる規定データ
 - 2.3 デザインマニュアルデータ

従つて、データ集に付記する分類コードはひとまずこの表によることにし、将来、この分類に入らないデータ集を入手した場合などには、その時点で必要な分類名を付加することにした。また、この分類表については改訂の有無にかかわらず毎回掲載する。

なお、この利用手引は今のところ逐次このセンターだよりに掲載して行く予定であるが、ある程度まとまつた段階で、加筆改訂し一冊の利用手引書として刊行し、その後のまとめは追録の形で発行する方針である。

(I) LNG Handbook, Materials & Fluids

(LNGハンドブック)

(分類 2.3) NBS (米国) 刊 1977 年版
1978 年追録付

1. イントロダクション

このハンドブックは、液化天然ガス(LNG)に関連する工業、すなわち、生産、輸送および貯蔵の分野での、材料と流体の特性データを NBS でまとめた、利用者の

ためのマニュアルで過去7ヶ年の歳月と12億円以上を費やした成果の一つで、そのデータには、NBS で実験的に作成されたもの、評価、算定、実証されたものが含まれており、権威あるものと考えてよい。

現在蔵している初版および1st Supplementには材料としては構造用材料と熱絶縁材料とが含まれている。構造用材料としては、最も広く用いられている、アルミニウム合金(3003, 5083, 6061)、インバー(Fe-36Ni)、ニッケル鋼(2¹/₄, 3.5, 5, 9% Ni)、およびステンレス鋼(304, 304L, 304N, 310, 316)が選ばれている。熱絶縁材料としては、ポリスチレン、ポリウレタン、ポリ塩化ビニール、バルサ、パーライト、細胞状(Celluler)ガラスが、1st Supplementで付加された。

また、流体としては、純(液体)メタン、純(液体)エタン、純(液体)プロパン、純(液体)イソブタン、純(液体)n-ブタン、純(液体)窒素の各純流体、および流体混合物として、メタン-窒素、メタン-エタン、メタン-プロパン、エタン-プロパンの二元系混合物と各種天然混合ガス(主として各産地別の)について、その特性値が収録されている。

上記のように、このハンドブックの内容は材料と流体とに2大別されているが、流体の方は、当センターの利用者には直接の関係が薄いと考えられるので、ここには材料の方のうち構造材料の分を詳しく紹介する。

2. ハンドブックの様式

このハンドブック中の個々のデータは、主として図形で表示されており、表などの形式はどうしても必要な場合にのみ用いられている。これらの図形が、差し替えにより最新のデータを維持し、あるいは、追加するのが容易なように、ルーズ・リーフ方式となつている。Supplementは発行の都度自動的に入手できるようにしてある。

図表の単位には、Btu, ポンド, °Fなどの伝統的にLNG工業で使われてきた、従来のイギリス方式単位系と、ジュール, kg, K(絶対温度)などのSI単位系(国際単位系)との両者を併用してある。ただし、将来はSI単位系1本にする方向になつている。

目次は全部を呈示する通しの表はなく、赤色のタブによるMaterialsとFluidsとの大見出しと、白色のタブによる中見出し、およびそれぞれについての個々のセクション(後述)を示す青色のタブによる小見出しがついており、各セクションには、それぞれの利用上の特性の解説と、目次表が付されている。

個々の図表には、各セクション毎に頁数が打たれており、さらにこれを特定するチャート番号が付されている。各図表の主として裏面には、その図表に盛り込まれた特定の性質に関連する摘要がつけられている。この摘要には、単位の換算式と、性質についての特定条件などが記されていて、図表のシートを外して、単独に使用するのに便利なようになっている。

3. Materials のうち構造材料 (中見出しで白色タブ付)

材料を経済的に選択したり、その機能的な姿を完全に示す特性データを得ることは困難である。ここに示す使用者のためのハンドブックでは、選定した工業的材料に対する“最善”の物理的性質と機械的性質の数値を与えることによつて、上記の問題を要約するように試みている。個々の性質については、低温材料の専門家が、利用できるデータを選抜し、最善の数値を決定した。なお、特記してない限り、これらは設計用の数値ではない。低温における信頼できる最小強度の値は、大部分の材料について未だ確立されていないのである。

現在、構造材料としては、4つの合金群が含まれている。すなわち、既述のように、アルミニウム合金、インバー、ニッケル鋼、およびステンレス鋼である。

この、使用者のためのハンドブックに含まれる固体状態の特性は2つの部類に分けられる。すなわち、物理的、および機械的である。物理的性質には、弾性定数、熱伝導率、比熱、および熱膨張が含まれる。弾性定数には4つの、すなわち、ヤング係数(縦弾性係数)、横弾性係数、体積弾性係数、ポアソン比が含まれている。機械的性質には、耐力強度、引張強さ、疲れ強さ、衝撃強さ、破壊じん性、および疲れき裂成長速度が含まれている。

弾性定数、比熱、および熱膨張は熱弾性的に材料を性格づけるのに絶対必要である。熱伝導率は熱負荷と熱こう配の計算に必要である。そして、機械的性質は最大許容機械的負荷を決定するのに必要である。破壊力学データは破壊統制手段、構造的な完全さの評価、および許容欠陥寸法の算定に絶対必要である。

4. 構造用金属および合金の特性の応用

低温での構造用合金の性質は、主として LNG のような寒冷剤が危険なものであるために重要になり、機械的な欠陥に対する構造的な安全性が確保されねばならない。

5種類の主たる欠陥様式(mode)と、ある種の物理的、機械的性質を用いての、その設計管理(control)とを示すと次のとおりである。

Mode	Control
弾性的な不安定さ(ゆがみ, buckling)	弾性係数

過度の弾性変形(つぶされ, Jamming)	弾性係数
総体の塑性変形(降伏, yielding)	耐力
引張の不安定性(くびれ, necking)	耐力
高速破壊(割れ, cracking)	破壊じん性

耐力と破壊じん性とは、片方が増大すると他の一方が減少するという逆関係になる傾向がある。弾性係数は物理的性質であるが、機械的性質とは、多少の未完成な相関が確立されているが、まあ関係がないという傾向にある。

弾性係数は構造による感受性の少ない特性である傾向にあり、比較的熱処理、化学成分組成の小変化、機械的変形、結晶粒度などに影響され難い。よく使われる合金のうちで、ニッケル基合金は最も高い弾性係数を持つ傾向がある。およその漸減順序はニッケル、鉄、銅、チタン、アルミニウム、マグネシウムである。アルミニウムに対する鉄のヤング係数比は約3である。

比弾性係数(係数/質量密度)はより変化に乏しい。冷却に際しては、ヤング係数は、合金によつては、5~15%増大する。大部分の磁性合金および結晶組織の転移を受ける合金を除けば、弾性的剛性は温度低下と共にめらかに増大する。

耐力は結晶組織に非常に敏感で、特に鉄のような体心立方晶形の金属では、少量の不純物濃度に極めて敏感である。上記のような基金属については、極低温における耐力の減少順位は：チタン、鉄、ニッケル、銅、アルミニウム、マグネシウムとなる。そしてチタンからマグネシウムまでの降伏応力の比は約10である。しかしながら、これらの合金の降伏応力比は非常に温度に敏感である。特に、鉄基の合金は降伏応力の温度依存性が強い。耐力はほとんどすべて冷却中連続的に増大する。室温と液体窒素の温度との間で、降伏応力は鉄基合金で約90%、アルミニウム基合金で約40%それぞれ増大し、これは通常の合金中でも極端な挙動を示すもので、体心形と面心形との間の基本的な相異を反映している。弾性係数は他の性質と相関関係にあるが、耐力は、弾性的でも非弾性的でも、そうでない。耐力もその温度変化も正確に予測することはできないので、綿密な設計に際しては、実験的に定めた値に対する代替値はない。

破壊じん性は平面ひずみ負荷のもとにおける鋭いき裂の近傍での破壊に対する材料の抵抗力を意味する。これは臨界線形弾性応力拡大係数、 K_{Ic} で表現される。異つた基金属の合金を比較するとき、臨界き裂寸法は破壊じん性と破壊応力の双方に影響されることを思い出すことが重要である。大い設計規定では、設計許容応力は材料の強さに関連させている。臨界き裂寸法は $(K_{Ic}/\sigma)^2$ (σ は応力)に比例しているの、高強度材料は低強度材料よりも高い破壊じん性が要求される。破壊に対する抵抗を比較すると、許容応力 30,000 psi (207MN/m²)の鋼は許容応力 10,000psi (69MN/m²)のアルミニウ

ム合金の9倍の破壊じん性を持つ必要がある。同様に、疲れき裂成長速度は作用応力に著しく依存する。このようにして、合金の成長速度を比較するに際しては、 da/dN 対 ΔK 曲線の縦軸 ΔK は作用応力すなわち $\Delta K/\sigma$ によつて標準化されるべきである。通常の破壊試験方法は、シャルピーとアイゾットの衝撃試験、切欠き引張試験、および引き裂き試験である。このようなデータは破壊機構の解析には不適當であるが、相対的のじん性を示している。低温における金属の破壊に関する性質は、当該基金属系において、まず第一に結晶組織、次いで耐力に支配される。耐力が増大するにつれて破壊じん性は通常減少する。破壊じん性は面心立方晶系の金属（アルミニウム、銅、ニッケル、オーステナイトステンレス鋼）では高くなり、体心立方晶系（大部分の鋼および耐熱金属）では低くなる。最密六方晶系の金属では低温では混和したふるまいを示す。チタン合金はかなりじん性があるがマグネシウムおよびベリリウム合金はもろい。

このハンドブックでは、以上のような低温用金属材料についての簡単な解説に引続いて、アルミニウム合金、インバー、ニッケル鋼、ステンレス鋼について、これら各合金種にそれぞれの小見出し（青色のタブ）をつけ、それに引続いて青色用紙にて各合金種毎にその特徴を解説し、更に各合金種に属する個々の合金について簡単な解説を加え（後掲）、各合金種毎に、目次（後掲）がついている。

その後は個々の合金に関する各種個々の性質のシート

が白色用紙にて収納されている。シートにある個々の物理的あるいは機械的性質については、先に解説した通りの諸性質をあつかつており、これは後掲の目次によつても知ることができる。この白色シートに引続いて、再び青色用紙にて Design Specifications の類が付加されている。

シートに収納されている各合金種に属する個々の合金の種類は先にも触れ、また目次を見れば知りうることであるが、ここに再び言及すると次のとおりである。アルミニウム合金については、Alloy 3003, Alloy 5083, Alloy 6061 の3種類であり、インバーについては通常の Fe-36Ni 1種類であり、ニッケル鋼については、2.25-Ni 鋼, 3.5-Ni 鋼, 5-Ni 鋼, 9-Ni 鋼の4種類であり、ステンレス鋼については、AISI 304, AISI 304L, AISI 304N, AISI 310, AISI 316 の5種類である。

次に先に付記したように、4種の各合金についての、およびそのうちの個々の合金についての利用上の特性の解説と、目次を原文のまま掲載しておく。

また、この末尾に図表シートの1例としてニッケル鋼の破壊じん性に関するものについて、図形とその裏面に付された摘要を原文のまま掲載しておく。なお図形は縮小されており現物はほぼA4版の用紙一杯に2色刷りにて印刷されており、大略は黒色を用い、SI単位系の軸、その目盛り、その用語等は赤色を用いている。例示のものには図中の曲線に付されたSI単位はないが、必要に応じて図中にも赤色のSI単位系が付記されている。

ALUMINUM ALLOYS

Aluminum alloys are used extensively in cryogenic applications. Their principal advantages include: low as-fabricated costs, light weight, a stable crystal structure, and good retention of both strength and toughness at low temperatures. Large structures can be fabricated readily because aluminum alloys can be easily forged, formed and machined. Possible disadvantages of aluminum alloys include: low elastic modulus, high thermal expansion, and high thermal and electrical conductivities.

Alloy 3003, an aluminum-manganese alloy, is a good choice when brazing is needed, in heat exchangers for example. Available product forms include sheet, plate, wire, bar tubing, and pipe.

Alloy 5083, an aluminum-magnesium alloy, is the largest-tonnage alloy in cryogenic service. It is used in land-based storage tanks and in mobile dewars, and large quantities of this alloy provide primary containment in prismatic and spherical tanks for LNG ships. It is now also used for LNG storage tanks as large as 25,000 cubic meters. Plates up to seven inches thick have been welded into shipboard containment systems. Welding is done with conventional gas-metal-arc and gas-tungsten-arc methods. Alloy 5083 is available as sheet and plate, and extruded tubing, bars, and shapes. Tapered plates can also be produced. For most largescale applications the strength of aluminum alloys is limited to the as-welded strength. Thus, alloy 5083, which retains full strength as welded, is preferred over high-strength 2000-series and 7000-series alloys. Its usual condition is annealed, designated 5083-0.

Alloy 6061, an aluminum-magnesium-silicon alloy, is usually used in a heat-treated condition. It is stronger than alloys 3003 and 5083, but weaker than the 2000-series and 7000-series aluminum alloys. Alloy 6061 is available as pipe, pipe fittings, extruded tubing, and structural shapes.

Most codes require using room-temperature design-allowable stresses for cryogenic applications. However, the ASME Boiler and Pressure Vessel Code recently increased the allowable stresses for alloy 5083 at low temperatures, recognizing its increased strength and adequate toughness at lower temperatures.

PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS

	Page
ELASTIC	
YOUNG'S MODULUS	1.
SHEAR MODULUS	2.
BULK MODULUS	3.
POISSON'S RATIO	4.
THERMAL	
THERMAL CONDUCTIVITY	5.
SPECIFIC HEAT	6.
LINEAR THERMAL EXPANSION	7.
INSTANTANEOUS THERMAL EXPANSION	8.
MEAN THERMAL EXPANSION	9.
MECHANICAL	
DESIGN TENSILE AND YIELD STRENGTHS	10.
TENSILE STRENGTH	
3003 ALUMINUM	11.1
5083 ALUMINUM	11.2
6061 ALUMINUM	11.3
TENSILE YIELD STRENGTH	
3003 ALUMINUM	12.1
5083 ALUMINUM	12.2
6061 ALUMINUM	12.3
TENSILE ELONGATION	
3003 ALUMINUM	13.1
5083 ALUMINUM	13.2
6061 ALUMINUM	13.3
TENSILE REDUCTION OF AREA	
WELDED ALUMINUM ALLOYS	14.
5083 ALUMINUM	14.2
6061 ALUMINUM	14.3
AXIAL FATIGUE STRENGTH	
5083 ALUMINUM	15.2
6061 ALUMINUM	15.3
FLEXURAL FATIGUE STRENGTH	
6061 ALUMINUM	16.3
FATIGUE CRACK GROWTH RATE	
5083 ALUMINUM (WELDED)	17.25
IMPACT ENERGY	
FRACTURE TOUGHNESS	18.
SHEAR STRENGTH	
6061 ALUMINUM	20.3
HARDNESS	
6061 ALUMINUM	21.3

INVAR

During cooling to low temperatures most materials contract 0.2 to 0.4 percent. Sometimes a low-thermal-expansion alloy is required for close dimensional tolerances or to prevent large thermo-elastic stresses. Invar (Fe-36Ni) is the most commonly used low-expansion alloy. This alloy has moderate strength, good toughness, and good weldability. Welding usually involves either gas-metal-arc or gas-tungsten-arc methods, especially when matching thermal and mechanical properties are required. A typical application of invar is the internal liner of membrane tanks in LNG ships.

Invar's low thermal contraction (about 0.03 percent between room temperature and LNG te-

perature) results from invar having a large, positive magnetostriction that approximately cancels the usual thermal contraction. Invar has a stable face-centered cubic crystal structure. Unlike iron-nickel alloys containing 0~30 percent nickel, invar exhibits no low-temperature crystallographic (martensitic) transformations.

Invar is available as : strip, sheet, plate, wire, bar, tube, pipe, billets, and forgings. All these forms are used at low temperatures in an annealed condition.

PROPERTIES OF INVAR

	Page
ELASTIC	
YOUNG'S MODULUS	1.
SHEAR MODULUS	2.
BULK MODULUS	3.
POISSON'S RATIO	4.
THERMAL	
THERMAL CONDUCTIVITY	5.
SPECIFIC HEAT	6.
LINEAR THERMAL EXPANSION	7.
INSTANTANEOUS THERMAL EXPANSION	8.
MEAN THERMAL EXPANSION	9.
MECHANICAL	
TENSILE STRENGTH	10.
TENSILE YIELD STRENGTH	11.
TENSILE REDUCTION OF AREA	12.
TENSILE ELONGATION	13.
IMPACT ENERGY	14.

NICKEL STEELS

Nickel steels with 2.25, 3.5, 5, and 9 percent nickel were developed primarily for low temperature applications as low as -323°F (94 K) and for relatively low cost compared to stainless steels. Their advantageous properties include : high yield strength, low thermal expansion, high elastic modulus, and good weldability. They are used extensively for storing and transporting liquid hydrocarbons that include LPG (2.25 and 3.5 Ni), liquid ethylene (5 Ni), and LNG (9 Ni).

Nickel steels are mainly body-centered cubic, and they undergo a ductile-brittle transition upon cooling to low temperatures. The transition temperature depends on nickel content; high nickel alloys have lower transition temperatures. To assure toughness, codes and regulations specify a minimum temperature at which various iron-nickel alloys can be used safely. All the nickel steels considered here are readily weldable using austenitic consumables. Matching-composition fillers can be used in certain cases. Low heat inputs must be used for 5-nickel and 9-nickel steels.

3.5-nickel steel is used down to approximately -150°F (190 K) for containing liquid ethylene, ethane, acetylene, carbon dioxide, and propane. It is available in both wrought and cast forms. Three heat treatments may be specified : normalized at $1600-1650^{\circ}\text{F}$ (1162-1190 K), normalized and tempered at 1100°F (884 K), or quenched from $1600-1650^{\circ}\text{F}$ (1162-1190 K) and tempered. ASTM specification A203 further describes this steel. The microstructure of 3.5-nickel steel is primarily martensitic.

5-nickel steel is used for high-pressure liquid-ethylene storage. However, the alloy was developed for LNG applications and is being considered for use in LNG storage tanks. The heat treatment required to produce suitable toughness at -260°F (129 K) is : double normalize at $1470-1555^{\circ}\text{F}$ (1090-1137 K) and temper at 1100°F (884 K). The resulting microstructure is martensite (body-centered cubic) and 3-8 percent retained austenite (face-centered cubic). ASTM specification A645 further describes this steel.

Like the 5-nickel steel, the 9-nickel steel was developed specifically for cryogenic applications. It is used for LNG, liquid-oxygen, and liquid-nitrogen processing, storage, and transporting. Two heat treatments are used : double normalized at 1650°F , 1470°F (1190, 1090 K) and tempered

at 1075°F (870 K) ; or quenched from 1470°F (1090 K) and tempered at 1075°F (870 K). Usually 5–10 percent retained stable austenite results with the remainder of the microstructure being martensite. ASTM specifications A353 and A553 further describe this steel.

PROPERTIES OF NICKEL STEELS

	Page
ELASTIC	
YOUNG'S MODULUS	1.
SHEAR MODULUS	2.
BULK MODULUS	3.
POISSON'S RATIO	4.
THERMAL	
THERMAL CONDUCTIVITY	5.
SPECIFIC HEAT	6.
LINEAR THERMAL EXPANSION	7.
INSTANTANEOUS THERMAL EXPANSION	8.
MEAN THERMAL EXPANSION	9.
MECHANICAL	
TENSILE STRENGTH	10.
TENSILE YIELD STRENGTH	11.
TENSILE REDUCTION OF AREA	12.
TENSILE ELONGATION	13.
TENSILE STRESS-STRAIN	
3.5-NICKEL STEEL	14.2
5-NICKEL STEEL	14.3
9-NICKEL STEEL (A353)	14.4
9-NICKEL STEEL (A553-I)	14.41
FLEXURAL FATIGUE STRENGTH	
5-NICKEL STEEL	15.3
9-NICKEL STEEL (A353)	15.4
9-NICKEL STEEL (A553-I)	15.41
FATIGUE CRACK GROWTH RATE	
3.5-NICKEL STEEL (A203-E)	16.2
5-NICKEL STEEL (A645)	16.3
5-NICKEL STEEL (WELDED)	16.35
9-NICKEL STEEL (A553-A)	16.4
CHARPY V-NOTCH IMPACT ENERGY	
2.25 and 3.5-NICKEL STEELS	17.15
5 and 9-NICKEL STEELS	17.35
CHARPY KEYHOLE-NOTCH IMPACT ENERGY	
9-NICKEL STEEL	18.4
FRACTURE TOUGHNESS	19.
HARDNESS	
9-NICKEL STEEL	20.4

STAINLESS STEELS

Austenitic chromium-nickel stainless steels are the most widely used alloys for structural applications below -323°F (76 K). And they are used extensively in the LNG industry for piping, valves, etc. Their physical properties offer advantages over those of competing materials. The elastic modulus is high and the thermal expansion, magnetic permeability, and electrical and thermal conductivities are low. Their principal disadvantages are their relatively high cost and low strength-to-weight ratios.

Most austenitic (face-centered-cubic crystal structure) stainless steels are metastable at low tem-

peratures, tending to undergo martensitic transformations during cooling or stressing. There are two martensites; one has a body-centered-cubic crystal structure and the other a close-packed hexagonal crystal structure. Transformation to the body-centered cubic phase is accompanied by volume expansion and ferromagnetism. AISI 310 stainless steel is completely stable against martensitic transformation, but both AISI 304 and AISI 316 transform during plastic deformation at low temperatures. Usually, types 304 and 316 do not transform during cooling without plastic deformation.

The most widely used stainless steels for cryogenic service are AISI 304 and AISI 304L. These alloys have been used for LNG piping and membrane-type containment systems for specialized applications. Type 316 is a commonly used stainless steel and is sometimes used for shipyard piping systems because of its salt-water corrosion resistance. Type 310 costs more; it is used to ensure complete austenite stability.

Availability of 304, 310, and 316 stainless steels is essentially unlimited in standard product forms. These include plate, sheet, strip, bar, and forging billets. Each alloy can be cast, extruded, or welded into pipe or tubing.

Austenitic stainless steels are readily fabricated. Heat treatment is usually not required. Some exceptions include annealing at 1800–2000°F (1255–1367 K) following severe forming operations and stress relief at 800–900°F (700–755 K) to reduce peak residual stresses and improve dimensional stability. They are readily weldable by all common welding processes if the appropriate consumables and procedures are used. The austenitic stainless steels have excellent formability and sufficient forgeability for many applications. But they are more difficult to forge than most common structural alloys because of their high strength at high temperatures. Among the austenitic stainless steels, types 304 and 315 have good forgeability. Annealed austenitic stainless steels are more difficult to machine than carbon steels or aluminum alloys because of their relatively high tensile strength, high work hardening rate, and low thermal conductivity.

Austenitic stainless steels are used for manufacturing castings for cryogenic applications such as valve bodies. The casting alloys equivalent to types 304 and 316 are Alloy Casting Institute (ACI) types CF8 and CF8M, respectively.

PROPERTIES OF STAINLESS STEELS

ELASTIC

YOUNG'S MODULUS	1.
SHEAR MODULUS	2.
BULK MODULUS	3.
POISSON'S RATIO	4.

THERMAL

THERMAL CONDUCTIVITY	5.
SPECIFIC HEAT	6.
LINEAR THERMAL EXPANSION	7.
INSTANTANEOUS THERMAL EXPANSION	8.
MEAN THERMAL EXPANSION	9.

MECHANICAL

TENSILE STRENGTH

304 STAINLESS STEEL	10.1
304L STAINLESS STEEL	10.2
304N STAINLESS STEEL	10.25
310 and 316 STAINLESS STEELS	10.35

TENSILE YIELD STRENGTH

304, 304L, and 304N STAINLESS STEELS	11.25
310 and 316 STAINLESS STEELS	11.35

TENSILE ELONGATION

304, 304L, and 304N STAINLESS STEELS	12.25
310 and 316 STAINLESS STEELS	12.35

TENSILE REDUCTION OF AREA

304, 304L, 304N, 310, and 316 STAINLESS STEELS	13.
--	-----

TENSILE STRESS-STRAIN	
304 STAINLESS STEEL (COLD ROLLED)	14.1
304 STAINLESS STEEL (ANNEALED)	14.15
304L STAINLESS STEEL	14.2
304N STAINLESS STEEL	14.25
310 STAINLESS STEEL	14.3
316 STAINLESS STEEL	14.4
AXIAL FATIGUE STRENGTH	
304L STAINLESS STEEL	15.1
310 STAINLESS STEEL	15.4
AXIAL HIGH-STRAIN-RATE FATIGUE STRENGTH	
304 STAINLESS STEEL	15.15
AXIAL FATIGUE STRAIN	
304 and 304L STAINLESS STEELS	16.2
310 STAINLESS STEEL	16.3
FATIGUE CRACK GROWTH RATE	
304, 304L, and 304N STAINLESS STEELS	17.25
310 and 316 STAINLESS STEELS	17.35
IMPACT ENERGY	
304, 304L, and 304N STAINLESS STEELS	18.25
310 and 316 STAINLESS STEELS	18.35
FRACTURE TOUGHNESS	
304N, 310, and 316 STAINLESS STEELS	19.35
SHEAR STRENGTH	
304 STAINLESS STEEL	20.1
HARDNESS	
304 STAINLESS STEEL	21.1

NICKEL STEELS : FRACTURE TOUGHNESS

(次頁の図形の裏面に付された摘要)

SOURCES : N. J. Huettich, A. W. Pense, and R. D. Stout, The toughness of 2¹/₄ and 3¹/₂% nickel steels at cryogenic temperatures, *Welding Res. Bull.* 165 (1971).
Materials Research for Superconducting Machinery, Parts 1-6 (March 1973-September 1976), available from NTIS, order numbers AD 780596, ADA 004586, ADA 012365, ADA 019230, ADA 030170, ADA 036919.

H. J. McHenry and R. P. Reed, Fracture behavior of the heat affected zone in 5% Ni steel weldments, *Welding J.*, forthcoming.

R. L. Tobler, R. P. Mikesell, R. L. Durholz, and R. P. Reed, Low temperature fracture behavior of iron-nickel alloy steels, in *Properties of Materials for Liquefied Natural Gas Tankage*, STP 579 (Amer. Soc. Test. Mater., Phila., 1975).

UNITS	to convert	to	multiply by
	°F	K	$T_K = (t^{\circ}F + 459.67) / 1.8$
	$10^3 \text{ psi} \sqrt{\text{in}}$	$\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$	1.0989

COMMENTS : (1) 2.25-nickel steel data are from one source. With LT (normal to crack plane in rolling direction and direction of crack growth in transverse direction), 1.6-in plate, compact-tensile specimens. A suitable normalizing temperature for ASTM specification A203-A is 1650°F.

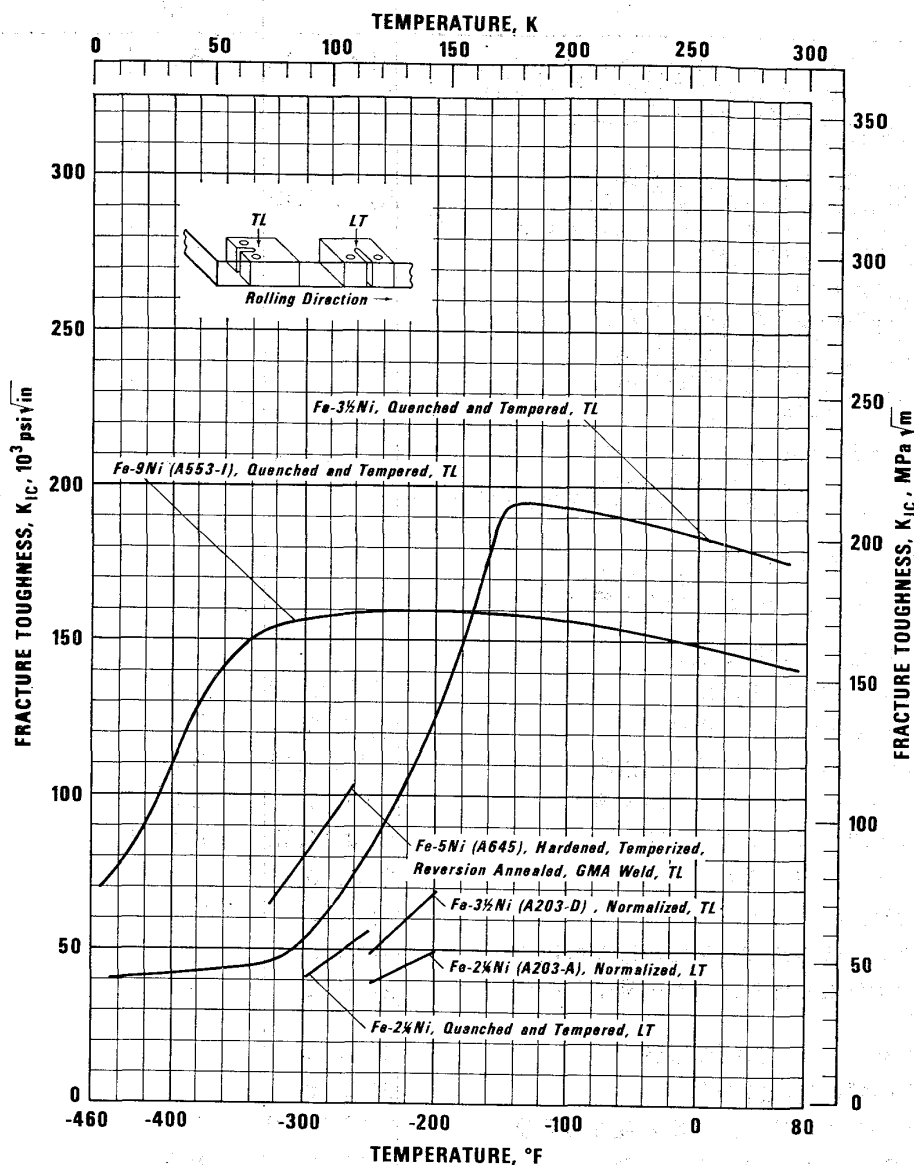
(2) 3.5-nickel steel normalized-condition data are from one source; quenched-and-tempered data are from two sources. In both cases, compact-tensile specimens had TL orientations and were 1-2 in thick. In the quenched-and-tempered case, J-integral K_{IC} values were computed from measured J_{IC} values by :

$$K_{IC} = (J_{IC}E / (1-\nu^2))^{1/2},$$

where J_{IC} is the critical value of the J-integral, E is Young's modulus of elasticity, and ν is Poisson's ratio. Heat treatment for the quenched-and-tempered condition was : (1) 1650°F for 1 h, (2) water quench, (3) 1155°F for 1 h, and (4) water quench. A suitable normalizing temperature for A203-D is 1600°F.

LNG Materials & Fluids Data

NICKEL STEELS
Fracture Toughness



Cryogenics Division, NBS-IBS, Boulder, Colorado
Chart 1151 (5-1-78)

19.

(3) 5.0-nickel steel data were from two sources, both used TL-orientation specimens. The weld-material data, TL orientation, were from one source: the single point was generated from an LT-orientation test specimen. Compact tensile specimens, approximately 1 in thick, were used. K_{IC} values were obtained by a J-integral method. Heat treatment for ASTM specification A645 is: (1) 1575-1675°F for 1 h/in, (2) water quench, (3) 1275-1400°F for 1 h/in, (4) water quench, (5) 1150-1225°F for 1 h/in, and (6) water quench or air cool. For the GMA weld, the filler rod was Inconel 92, weld position was horizontal, joint design was double vee, shielding gas was 75% He-25% Ar, interpass temperature was 100°F maximum, wire diameter was 0.043 in. Pass 1 conditions were: 110 amperes (DCRP), 30 volts, 8 in/min, and 24.8 KJ/in. Pass 2 conditions were: 140 amperes (DCRP), 32 volts, 12 in/min. Passes 3-21 conditions were: 140 amperes (DCRP), 32 volts, 10 in/min, and 26.9 KJ/in.

(4) 9-nickel steel data were from one source. K_{IC} values were obtained by a J-integral method. Heat treatment for ASTM specification A553-1 is: (1) 1450-1500°F for 1 h/in, (2) water quench, (3) 1050-1125°F for 1 h/in, (4) air cool or water quench.