

特集：低温用鋼

低温用鋼の組織と強度・じん性

日本製鉄株式会社  
加茂孝浩

1. はじめに

エネルギーの安定供給、経済効率性、環境適合性の重要性が高まっている中、低温用鋼の重要性は益々高まっている。すなわち、低温用鋼は旧来の化石エネルギーである液化石油ガス(LPG)や液化天然ガス(LNG)の貯蔵・運搬に用いられるのみならず、非化石エネルギーとしてのアンモニア(NH<sub>3</sub>)や液化水素(LH<sub>2</sub>)などの貯蔵・運搬にも用いられる。さらに、CCS(二酸化炭素の回収・貯蔵)対応のための液化CO<sub>2</sub>の輸送運搬にも用いられる。低温用鋼には、その用途に応じて強度やじん性などの様々な特性要求があり、必要特性に応じた材料設計が施される。本稿では、低温用鋼の種類や必要特性、および必要特性を満足するためのマイクロ組織制御を整理したうえで、具体的な開発・実用化事例を述べる。

2. 低温用鋼の種類

低温用鋼においてはニッケル(Ni)の活用が重要である。図1には低温用鋼のじん性に及ぼすNi量の影響を示すが<sup>1)</sup>、Ni量の増加とともに低温でも高い吸収エネルギー値が得られており、Ni添加により低温域での脆性破壊が抑制される。これはNi添加にともない転位移動の活性化エネルギーが低下する、すなわち転位の易動度が上昇するためとされる<sup>2)</sup>。

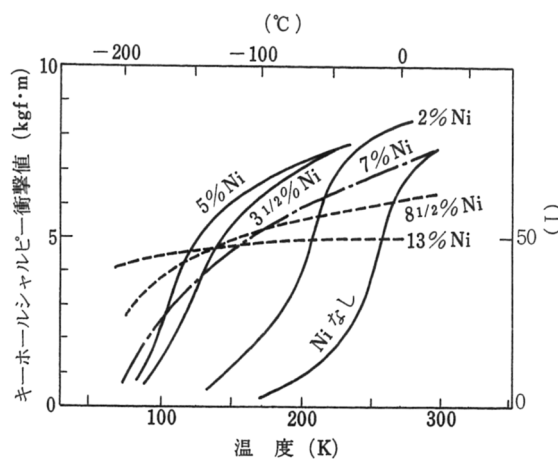


図1 低炭素鋼の切欠きじん性に及ぼすNiの影響  
(焼きならし状態, Niなしは0.20%C, 2%Niは0.15%C, 他は0.10%C)<sup>1)</sup>

表1には各種ガスと沸点、およびその温度で使用可能な材料例を示す。使用温度の低下とともに鋼材に添加するNi量が増加し、LPG貯蔵には1.5%程度以下のNi添加鋼、エタン貯蔵には3.5%Ni鋼、エチレン貯蔵には5%Ni鋼、LNG貯蔵には9%Ni鋼が用いられる。さらに低温の貯蔵にはステンレス

鋼やアルミニウム合金が用いられることが多い。

表1 各種ガスと沸点、およびその温度で使用可能な材料例

| ガス種                                 | 沸点 [°C] | 材料例                        |
|-------------------------------------|---------|----------------------------|
| アンモニア NH <sub>3</sub>               | -33.4   | 炭素鋼<br>低合金鋼                |
| プロパン C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | -42.1   |                            |
| プロピレン C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | -47.7   | 2.5%Ni鋼                    |
| 二酸化炭素 CO <sub>2</sub>               | -78.5   |                            |
| アセチレン C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | -84.0   | 3.5%Ni鋼                    |
| エタン C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   | -88.6   |                            |
| エチレン C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | -103.5  | 5%Ni鋼                      |
| メタン CH <sub>4</sub>                 | -161.5  | 7%Ni鋼<br>9%Ni鋼             |
| 酸素 O <sub>2</sub>                   | -183.0  | オーステナイト系ステンレス鋼<br>アルミニウム合金 |
| アルゴン Ar                             | -185.8  |                            |
| 窒素 N <sub>2</sub>                   | -195.8  |                            |
| 水素 H <sub>2</sub>                   | -252.8  |                            |
| ヘリウム He                             | -268.9  |                            |

表2には低温用鋼のJISおよび船級における鋼材規格例を示す。-50°C程度までは低合金鋼、更に低温域ではNi鋼として、2.5%Ni鋼（シャルピー-70°C程度）、3.5%Ni鋼（シャルピー-100°C程度）、5%Ni鋼（-110~-140°C程度）、7%Ni鋼および9%Ni鋼（シャルピー-196°C）が規格化されている。また、海外の材料規格（ASTMA553など）や圧力容器の構造規格（JIS B 8266など）ではシャルピー衝撃試験における塑性変形量である横膨出量（試験片の衝撃側における幅寸法の増加量）が規定される場合がある。

表2 低温用鋼の鋼材規格例

| 鋼種           | 区分      | JIS      |            |         |                        |                        |              |              | 船級 (classNK) |                  |                    |                        |                        |              |              |
|--------------|---------|----------|------------|---------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------|--------------|
|              |         | 規格<br>記号 | 板厚<br>[mm] | 熱処理     | 引張試験                   |                        | シャルピー衝撃試験    |              | 材料<br>記号     | 板厚<br>[mm]       | 熱処理                | 引張試験                   |                        | シャルピー衝撃試験    |              |
|              |         |          |            |         | YS[N/mm <sup>2</sup> ] | TS[N/mm <sup>2</sup> ] | 試験温度[°C]     | 吸収エネルギー[J]   |              |                  |                    | YS[N/mm <sup>2</sup> ] | TS[N/mm <sup>2</sup> ] | 試験温度[°C]     | 吸収エネルギー[J]   |
| 低温用<br>炭素鋼   | YS325級  | SLA325A  | 6~38       | QT, TMC | ≧325                   | 440~560                | -35          | 最高値の1/2以上    | KL33         | ≧40              | N, NT,<br>TMCP     | ≧325                   | 440~560                | -60          | ≧41 (L, 平均値) |
|              |         | SLA325B  |            |         |                        |                        | -55          |              |              |                  |                    |                        |                        |              | ≧27 (T, 平均値) |
| 低温用<br>炭素鋼   | YS360級  | SLA365   | 6~38       | QT, TMC | ≧365                   | 490~610                | -55          | 最高値の1/2以上    | KL37         | ≧40              | N, NT,<br>TMCP     | ≧360                   | 490~610                | -60          | ≧41 (L, 平均値) |
|              |         |          |            |         |                        |                        |              |              |              |                  |                    |                        |                        |              | ≧27 (T, 平均値) |
| 低温用<br>ニッケル鋼 | 2.5%Ni鋼 | SL2N255  | 6~50       | N, NT   | ≧255                   | 450~590                | -70          | ≧21 (L, 平均値) | KL2N30       | ≧40              | N, NT,<br>QT, TMCP | ≧295                   | 420~570                | -70          | ≧41 (L, 平均値) |
|              |         | SN3N255  |            |         |                        |                        | -101         | ≧21 (L, 平均値) |              |                  |                    |                        |                        |              | ≧27 (T, 平均値) |
|              | 3.5%Ni鋼 | SN3N275  | 6~50       | QT      | ≧275                   | 480~620                | -101         | ≧21 (L, 平均値) | KL3N32       | ≧40              | N, NT,<br>QT, TMCP | ≧315                   | 440~590                | -95          | ≧41 (L, 平均値) |
|              |         | SN3N440  |            |         | ≧440                   | 540~690                | -110         | ≧27 (L, 平均値) |              |                  |                    |                        |                        |              | ≧27 (T, 平均値) |
|              | 5%Ni鋼   | SL5N590  | 6~50       | QT      | ≧590                   | 690~830                | -130         | ≧41 (L, 平均値) | KL5N43       | ≧40              | N, NT,<br>QT, TMCP | ≧420                   | 540~590                | -110         | ≧41 (L, 平均値) |
|              | 7%Ni鋼   | SL7N590  | 6~50       | TMCT    | ≧590                   | 690~830                | -196         | ≧41 (L, 平均値) |              |                  |                    |                        |                        |              | ≧27 (T, 平均値) |
| 9%Ni鋼        | SL9N520 | 6~100    | NNT        | ≧520    | 690~830                | -196                   | ≧34 (L, 平均値) | KL9N53       | ≧40          | NNT, QT,<br>TMCP | ≧520               | 690~830                | -196                   | ≧41 (L, 平均値) |              |
|              | SL9N590 |          |            | ≧590    |                        | -196                   | ≧41 (L, 平均値) | KL9N60       |              |                  | ≧590               |                        |                        | ≧27 (T, 平均値) |              |

\*N:ノルマ NT:ノルマ+焼戻し QT:焼入れ+焼戻し TMCP:熱加工制御

### 3. 低温用鋼の必要特性

低温用鋼は、LPG や LNG などの漏洩時に大きな事故を招く内容物の貯蔵に用いられる場合が多く、安全性確保のために優れた破壊じん性が要求される場合が多い。一例として図2には地上 LNG 貯蔵タンクの必要破壊じん性について示す。過去の脆性破壊による爆発事故での甚大な損害を教訓に、二重の安全性確保が求められる。すなわち、欠陥が残存しやすい溶接継手における①脆性亀裂の発生阻止、および万が一亀裂が発生した場合に備えて鋼材における②脆性亀裂伝播停止特性（アレスト性）<sup>3)</sup>が要求される。脆性亀裂の発生抑制については、非破壊検査などで検出可能な許容寸法の欠

陥部から脆性破壊を発生させないための材料の抵抗値で評価する。またアレスト性とは英語の **arrest** (逮捕する) から来ており、数百~千 m/s で伝播する脆性亀裂を停止させるための材料の抵抗値で評価する。そこで、鋼材に対して一般的に要求される強度やシャルピー衝撃特性に加え、大型破壊試験による破壊じん性評価が要求される場合がある。

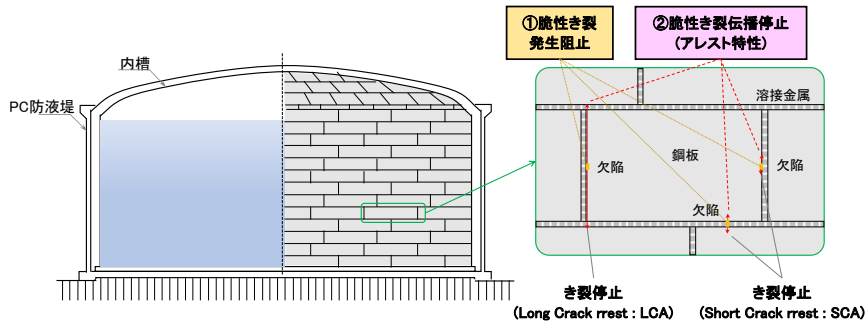


図2 地上LNG貯蔵タンクの必要破壊じん性

脆性亀裂発生阻止特性の評価としては、図3に示すCTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験が代表的である。基本的に鋼板板厚ままの試験片を用い、溶接熱影響部 (HAZ) などの評価位置には機械的な切欠き加工に加え疲労亀裂を導入する。試験片は用途に応じた材料使用環境温度で3点曲げを行い、脆性破壊を起こす際の亀裂先端の開口変位量を導出する。開口変位から算出される材料の破壊抵抗値としての限界CTOD値について、対象部位における許容欠陥寸法と歪量から求まる必要値との比較により脆性破壊の可能性を判断する。溶接継手における欠陥評価手順は日本溶接協会規格のWES2805など、CTOD試験方法はWES1108やWES1109などに規定されている<sup>4)</sup>。

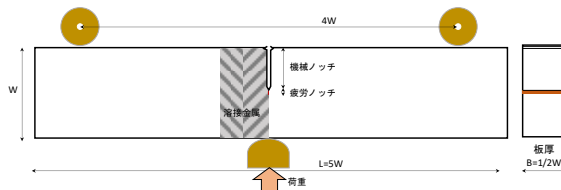


図3 CTOD試験片

アレスト性としては、図2に示した通り、亀裂を短い距離 (例えば板厚2倍程度) で停止させるショートクラックアレスト (SCA) および溶接部全長 (例えば側板一段の半分1.5m程度) にわたって進展した亀裂を停止させるロングクラックアレスト (LCA) があり、前提として想定する破壊過程により必要なアレスト性が異なる。アレスト性の評価試験として、図4には混成ESSO試験の試験体を示す。温度勾配型ESSO試験は、亀裂の進展方向に温度勾配を設け、上端部を低温に設定することで亀裂発生を確実にしたうえで、き裂が伝播するほど高温域となるよう温度勾配をつけることで確実に亀裂を停止させる。亀裂長さ増大とともに拡大する駆動力 (応力拡大係数) と、材料が有する温度の関数である抵抗値  $K_{Ic}$  値 (脆性亀裂伝播を停止可能な破壊じん性値を限界応力拡大係数で表記) のつり合いにより亀裂が停止する。混成ESSO試験は亀裂伝播を助長する脆化板と評価鋼板を溶接した試験体であり、規定温度に保定したうえで応力を付加し、上部のノッチに衝撃を与えて脆性破壊を誘発し、脆化板を伝播した亀裂が供試材鋼板で停止するか確認する。亀裂長さとお荷重から定まる駆動力としての  $K_{Ic}$  値に対して亀裂が伝播するか否かの判定を行う。9%Ni鋼では低温靱性が高いため脆性き裂の発生が困難なため混成ESSO試験での評価が行われ、雰囲気温度 $-165^{\circ}\text{C}$ 、負荷応力 $392\text{MPa}$ での試験を行うことで地震時 (板厚40mmで $K_{Ic}=159\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) を満足するかが評価される<sup>5)</sup>。

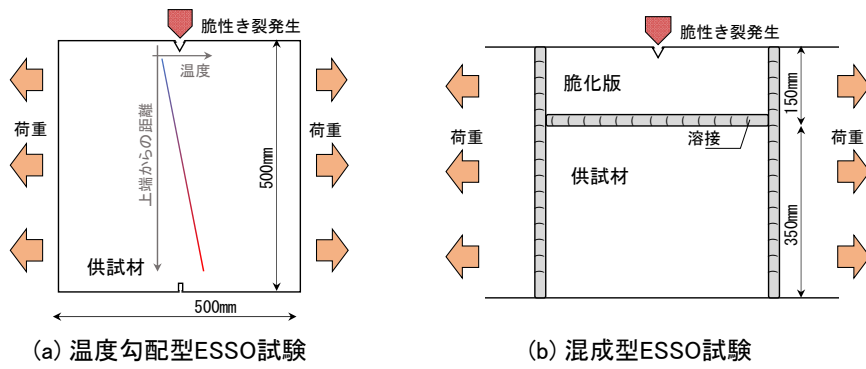


図 4 混成 ESO 試験片

さらに図 5 に示す貫通切欠付き十字継手広幅引張試験が実施される場合もある。溶接残留応力が最も厳しく重畳する継手交差部に貫通切り欠きを導入し、規定温度下で応力を付加し、破断発生時の応力、亀裂先端の CTOD 値、亀裂の伝播経路を評価する試験である。ここで述べた以外にも、亀裂発生特性やアレスト性評価には様々な試験が提案されている。

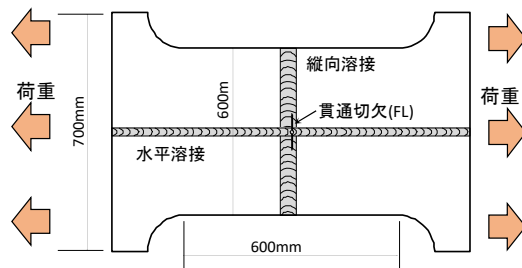


図 5 貫通切欠付き十字溶接継手広幅引張試験

#### 4. 強度、じん性向上のためのミクロ組織制御

低温用鋼として高い強度と優れた破壊じん性を確保するためにはミクロ組織の制御が不可欠である。図 6 に鉄の降伏点、へき開破壊応力、粒界破壊応力の結晶粒径依存性を示す<sup>6)</sup>。結晶粒の微細化にともない降伏応力 (YS) は上昇する。一般に強度上昇によるじん性は低下するが、結晶粒微細化はへき開破壊応力や粒界破壊応力を高めるため、強度とじん性の両方が向上する。図 7 にフェライトの結晶粒径とじん性の関係を示す<sup>6)</sup>。結晶粒微細化とともにシャルピー試験の延性脆性遷移温度が改善する。同様にベイナイトやマルテンサイトにおいてもじん性向上には有効結晶粒径に微細化が有効である。結晶粒微細化は強度とじん性の両方を改善できる重要な組織制御指針である。

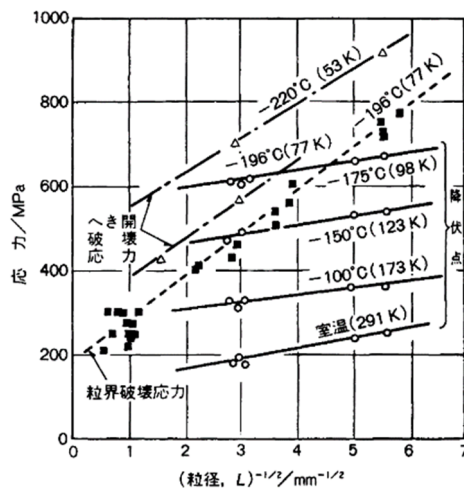


図 6 鉄の降伏点、へき開破壊応力、粒界破壊応力の結晶粒径依存性<sup>6)</sup>

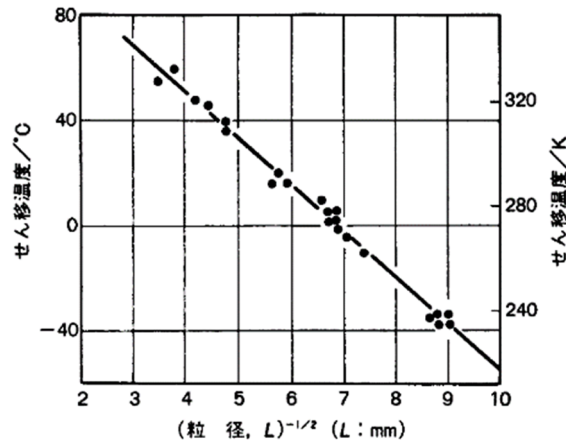


図7 フェライトの結晶粒径とじん性の関係<sup>6)</sup>

鋼の靱性はマイクロ組織により決定され、靱性改善には冷却過程の変態生成相の制御が必要である。特に、9%Ni 鋼などの引張強さ (TS) 600MPa 級以上の高張力鋼においてはベイナイトやマルテンサイトの組織制御が重要となる。図8には高強度鋼の CCT (連続冷却変態) 線図と、機械的性質に及ぼす冷却速度の影響について TS780MPa 級鋼を一例として示す<sup>7)</sup>。CCT 線図は、材料を種々の冷却速度で連続的に冷却した時に各温度で生成する金属組織と、冷却完了後の硬さを示すものである。生成する金属組織は、冷却速度が小さい場合にはフェライト主体であり、冷却速度の増加とともにベイナイトおよびマルテンサイトへと変化し、冷却後の硬さが増加する。TS は冷却速度の増加とともに上昇する。一方じん性は、連続冷却ままでは、冷却速度の上昇により粗大なフェライトからベイナイトになることで改善 (シャルピー破面遷移温度が低下) し、下部ベイナイトおよびマルテンサイトの混合組織が最も良好となり、さらなる冷却速度の上昇によりマルテンサイト単相となることで劣化する。また大部分の条件では加熱温度が低めのほうがじん性は良好になるものの、一部で逆転が生じている。これはじん性が加熱時のオーステナイト粒径ではなく冷却後の有効結晶粒径に対応するためである。ベイナイトおよびマルテンサイト組織を連続冷却後に焼戻した場合には強度低下とともにじん性は改善するが、じん性の冷却速度依存性としては連続冷却ままとほぼ同じ傾向であり、焼入れ組織の制御の重要性が示唆される。

0.12%C-0.30%Si-0.83%Mn-0.004%P-0.005%S-0.30%Cu-1.11%Ni-0.53%Cr-0.49%Mo-0.03%V-0.0031%Al

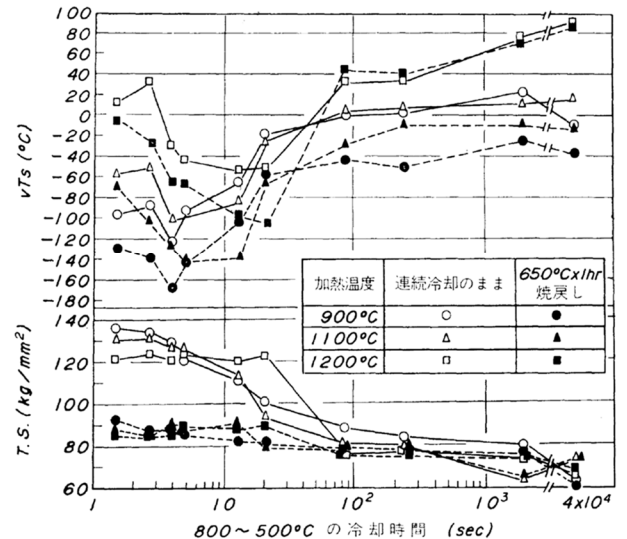
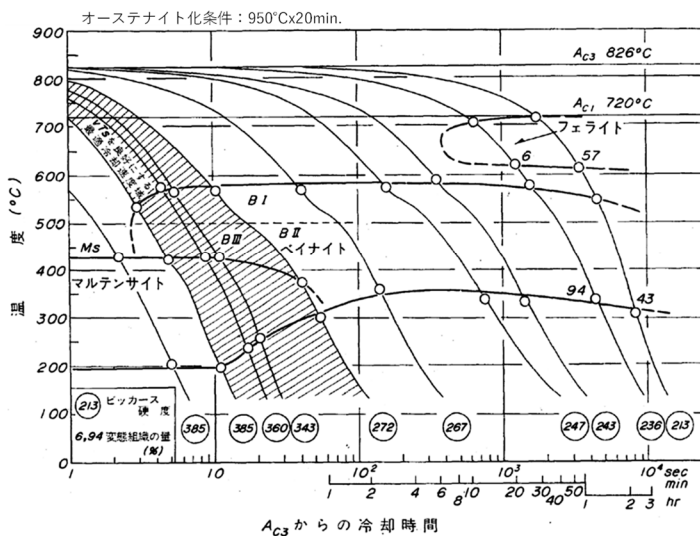


図8 鋼の CCT 図 (左図) および機械的性質に及ぼす冷却速度の影響 (右図)<sup>7)</sup>

## 5. 低温用鋼の開発・実用化事例

これまで様々な用途に対応した低温用鋼が開発・実用化されてきた。ここではそのうち代表的なものを紹介する。

### 5.1 LPG タンク用アレスト鋼:

LPG 運搬船の安全性,信頼性を確保するために、高アレスト型低温用鋼の開発が行われた。表 3 に鋼板の開発目標を示す<sup>8)</sup>。船級規格の KL33、KL37 を満足することを前提とし、母材アレスト性として設計温度の-46°Cにおいて  $K_{ca}$  値  $3,900\text{N/mm}^{3/2}$  以上であることを目的に、化学成分と TMCP 条件を最適化した。母材アレスト性能の向上方法について図 9 に示すが<sup>8)</sup>、結晶粒径の細粒化および結晶方位のランダム化を通じてアレスト性能の向上が図られる。図 10 に鋼板のマイクロ組織、図 11 には温度勾配型二重引張試験により求めた  $K_{ca}$  値と破面単位の関係を示す<sup>7)</sup>。破面単位の細粒化とともに  $K_{ca}$  値が改善し、開発鋼では目標の  $K_{ca}$  値を満足した。

表 3 供試材概要

|      | 目標値                    |                        |        |                          |          | 化学成分一例[wt%] |      |      |      |       |       |      |      |       |        |       |      |
|------|------------------------|------------------------|--------|--------------------------|----------|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|--------|-------|------|
|      | YS[N/mm <sup>2</sup> ] | TS[N/mm <sup>2</sup> ] | 板厚     | Kca(at-46°C)             | 適用溶接法    | シャルピー試験     | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Ti    | B      | Al    | Ceq. |
| KL33 | ≧325                   | 440~560                | 8~18mm | ≧3900N/mm <sup>3/2</sup> | 片面1パス溶接等 | vE-51°C≧41J | 0.06 | 0.25 | 1.38 | 0.004 | 0.002 | -    | -    | 0.007 | 0.0009 | 0.043 | 0.29 |
| KL37 | ≧360                   | 490~610                |        |                          |          |             | 0.08 | 0.24 | 1.49 | 0.005 | 0.002 | 0.01 | 0.02 | 0.01  | 0.0009 | 0.053 | 0.34 |

Ceq=C+Mn/6+(Cu+Ni)/15

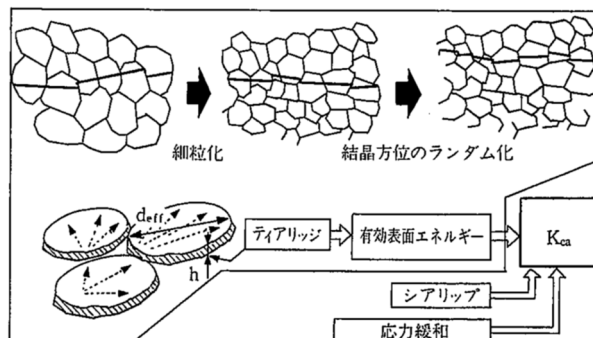


図 9 アレスト性能向上方法の考え方 (模式図)<sup>7)</sup>

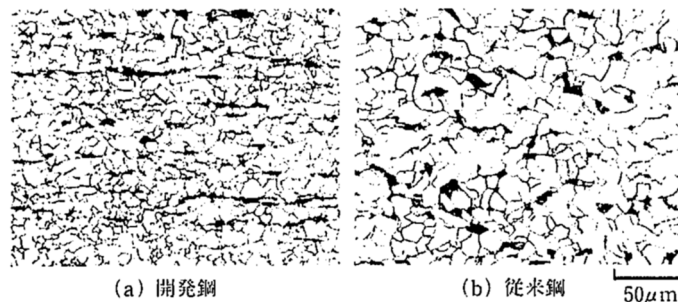


図 10 LPG 向け鋼板母材のマイクロ組織の例 (板厚 16mm 材)<sup>8)</sup>

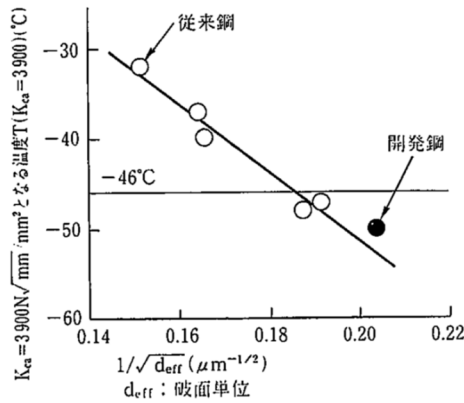


図 11 アレスト性能の指標として定義した  $K_{ca}=3,900\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  を示す温度と破面単位の関係<sup>8)</sup>

地上 LPG 円筒タンク向けの脆性亀裂発生および伝播停止特性に優れた厚肉（最大 38mm）の鋼板として、ボンドアレスト性に優れた鋼板が提案されている。表 4 に供試鋼板の概要を示す<sup>9)</sup>。図 12 に示す強度とじん性向上検討の結果として 1.5%程度の Ni 添加を前提としている<sup>9)</sup>。溶接継手部の CTOD 特性改善のためモリブデン（Mo）無添加としたうえで微量ニオブ（Nb）が添加されており、製造方法は TMCP（制御冷却+焼戻し）である。供試鋼板においては、母材のみならず HAZ におけるアレスト（ボンドアレスト）特性も評価された。図 13 にボンドアレスト特性評価のための混成 ESSO 試験を示す。助走板を伝播した亀裂がボンド部に直進するように構成されている。供試材（板厚 38mm）の混成 ESSO 試験結果を表 5 に示す<sup>9)</sup>。亀裂伝播が溶接残留応力の影響を受ける可能性もあるため、荷重予負荷による応力除去条件でも試験が実行された。フェライト系溶接材料を用いた溶接継手では脆性亀裂が試験板を貫通したのに対し、オーステナイト系溶接材料を用いた溶接継手では脆性亀裂は試験板で停止した。負荷荷重と亀裂長さから計算される  $K_{ca}$  値は  $6,300\sim 8,900\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  であり、長大亀裂伝播停止に必要な値（ $5,900\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ）を満足しており、十分なアレスト性を有しているといえる。

表 4 供試材概要<sup>9)</sup>

| 板厚   | 方向 | 引張試験(JIS5号)                |                            | シャルピー衝撃試験(JIS4号) |          |             |          | 化学成分[wt%] |      |      |      |    |       |       |      |
|------|----|----------------------------|----------------------------|------------------|----------|-------------|----------|-----------|------|------|------|----|-------|-------|------|
|      |    | YS<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | TS<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 1/4t             |          | 1/4t        |          | C         | Si   | Mn   | Ni   | Mo | Nb    | Ti    | Ceq. |
|      |    |                            |                            | vE-60°C [J]      | vTs [°C] | vE-60°C [J] | vTs [°C] |           |      |      |      |    |       |       |      |
| 38mm | L  | 485                        | 542                        | 374(平均)          | <-150    | 348(平均)     | -146     | 0.06      | 0.19 | 1.39 | 1.51 | -  | 0.008 | 0.010 | 0.34 |
|      | T  | 506                        | 560                        | 353(平均)          | <-150    | 335(平均)     | -110     |           |      |      |      |    |       |       |      |

$$\text{Ceq.} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5$$

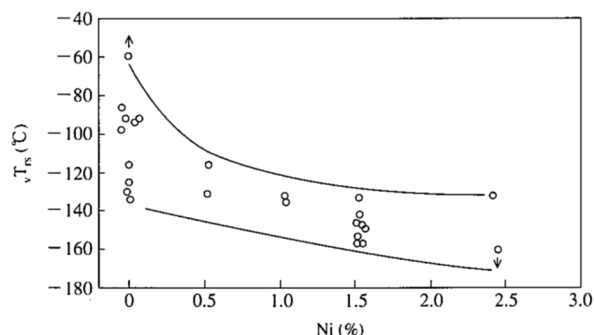


図 12 鋼板のシャルピーじん性に及ぼす Ni 量の影響<sup>9)</sup>

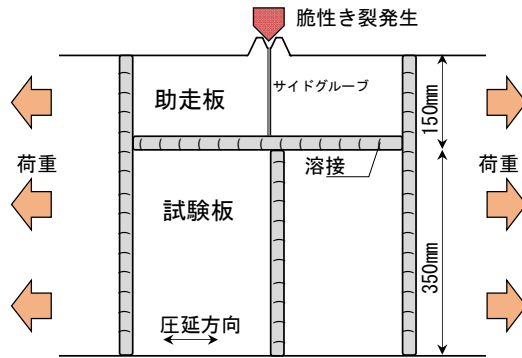


図 13 混成 ESSO 試験概要

表 5 混成 ESSO 試験結果<sup>9)</sup>

| 溶接法  | 溶接材料                             | PWHT | ノッチ位置 | 予負荷応力<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 試験負荷応力<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 試験結果判定 | き裂伝播長さ<br>[mm] |
|------|----------------------------------|------|-------|-------------------------------|--------------------------------|--------|----------------|
| SMAW | N-13mod.<br>(フェライト系)             | 無し   | bond  | -                             | 265                            | ●      | -              |
|      |                                  |      |       | 436                           | 262                            | ●      | -              |
| GTAW | NITTETEU FILLER196<br>(オーステナイト系) | 無し   | bond  | -                             | 265                            | ○      | 176            |
|      |                                  |      |       | 436                           | 262                            | ○      | 197            |

\* 予負荷応力:母材YSx90%、試験判定:○き裂伝播停止、●き裂伝播

## 5.2 LNG タンク用 9%Ni 鋼

9%Ni 鋼は、1944 年に米国クリーブランドで発生した 3.5%Ni 鋼製 LNG タンクの爆発事故を契機に米国 INCO 社で開発され、1952 年に ASTM (米国試験材料協会) に規格化されて以来長年にわたり LNG タンクに広く適用されている<sup>10)</sup>。図 14 には 9%Ni 鋼のミクロ組織を示す<sup>11)</sup>。マルテンサイト組織主体であり、QT (焼入れ+焼戻し) 材では微量の残留オーステナイト組織および黒色で示される多くの炭化物が結晶粒界 (旧  $\gamma$  粒界) やマルテンサイトラス境界に生成している。QLT (焼入れと焼戻しの間で、二相域に加熱後急冷する L 処理を実施) では旧  $\gamma$  粒界が不明瞭で旧  $\gamma$  粒界やマルテンサイトラス境界に微細な炭化物や残留オーステナイトが分散した組織を呈する。L 処理により旧  $\gamma$  粒界やマルテンサイトラス境界で優先的に  $\gamma$  再変態した箇所に C などの元素が濃縮し、その後の冷却において残留  $\gamma$  や合金元素の多いマルテンサイトが形成される。その後の焼戻し処理において、合金元素が高い組織から安定な  $\gamma$  相が生成する。図 15 には 9%Ni 鋼における残留オーステナイト量に及ぼす焼戻し温度の影響を示す<sup>11)</sup>。上記説明の通り、QT に比べ QLT にて多くの残留  $\gamma$  が生成し、残留  $\gamma$  量の増加とともに低温じん性が向上する。残留  $\gamma$  生成によるじん性向上機構としては、①脆化組織の低減 (不純物元素の優先固溶) ②亀裂先端での応力緩和 (加工誘起マルテンサイトの生成) ③細粒化 (粒界などへの生成による破面単位の分断による有効結晶粒微細化) が影響するとされる<sup>12)</sup>。

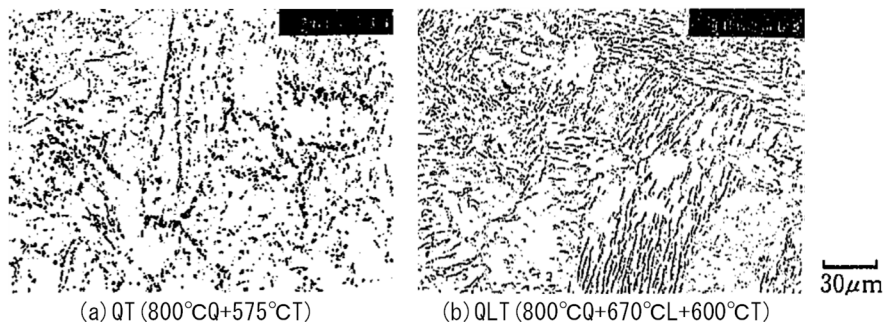


図 14 9%Ni 鋼のミクロ組織<sup>11)</sup>

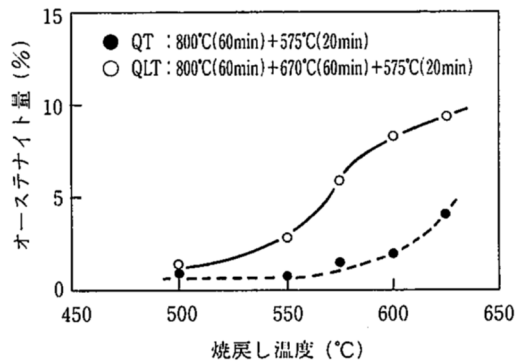


図 15 QT、QLT 鋼における残留オーステナイト量に及ぼす焼戻し温度の影響  
(0.05%C-0.25%Si-0.53%Mn-9.09%Ni)<sup>11)</sup>

天然ガスの需要増大とともに地上式 LNG 貯蔵タンクの大型化が進んでおり、それに伴い適用される 9%Ni 鋼板の板厚も 50mm にまで厚肉化している。このような極厚 9%Ni 鋼の実用化に向け化学成分の改善も進んできた。表 6 には極厚 9%Ni 鋼の一例としてスーパー 9%Ni 鋼の化学成分について一般的な 9%Ni 鋼と比較して示す<sup>13)</sup>。リン (P) の極低下に加えシリコン (Si) 低減および微量の Mo 添加が特徴である。図 16 には 9%Ni 鋼の溶接継手 CTOD 特性に及ぼす Si 量および P 量の影響を示す<sup>13)</sup>。P 量の増加は HAZ じん性を低下させるが、低 Si 化した場合には HAZ じん性が格段に向上している。これは脆化組織である島状マルテンサイトの生成量が低 Si 化により減少したことによる。図 17 には 9%Ni 鋼の母材強度に及ぼす Si, Mo 添加量の影響を示す<sup>11)</sup>。Si 量の低減により強度が低下するが、Mo の微量添加により強度上昇が可能となり、0.1mass%程度まで添加しても低 Si 化による HAZ じん性向上を阻害しない。以上の材料設計を通じて製造された板厚最大 50mm の 9%Ni 鋼板について、継手 CTOD 試験、混成 ESSO 試験、貫通切欠付十字継手広幅引張試験などの各種評価試験を通じて破壊安全性が確認され<sup>13)</sup>、LNG タンクに実適用されている。

表 6 9%Ni 鋼の化学成分一例 (mass%)<sup>13)</sup>

|                    | 板厚      | C     | Si    | Mn    | P      | S      | Mo   | Ni        |
|--------------------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|------|-----------|
| JIS G 3127 SL9N590 | 6-100mm | ≦0.12 | ≦0.30 | ≦0.90 | ≦0.025 | ≦0.025 | -    | 8.50-9.50 |
| Conventional 9%Ni  | 45mm    | 0.05  | 0.24  | 0.56  | 0.002  | 0.001  | -    | 9.39      |
| Super 9%Ni         | 50mm    | 0.05  | 0.08  | 0.59  | 0.003  | 0.000  | 0.08 | 9.35      |

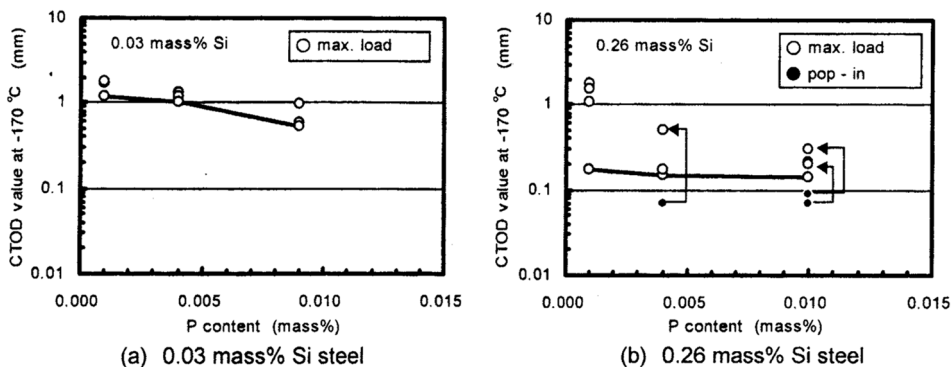


図 16 9%Ni 鋼の溶接継手 CTOD 特性に及ぼす Si 量および P 量の影響 (GTAW、K 開先)<sup>13)</sup>

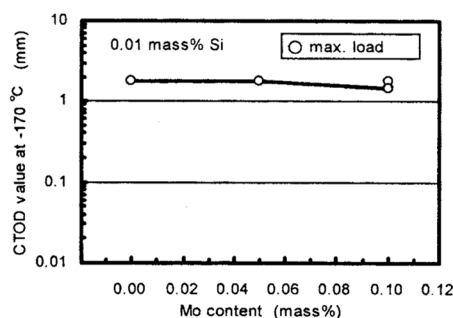


図 17 9%Ni 鋼の母材強度に及ぼす Si、Mo 添加量の影響<sup>13)</sup>

### 5.3 LH2 タンク用 15%Ni 鋼

近年、クリーンエネルギーとして LH<sub>2</sub> 利用への期待が高まっている。LH<sub>2</sub> を貯蔵・運搬するタンクにはオーステナイト系ステンレス鋼が使用されることが多いが、汎用材料の室温強度が炭素鋼に比べ低いことがタンク大型化において課題であった。近年、LH<sub>2</sub> 向けのニッケル鋼として 15%Ni 鋼が開発された。板厚 20mm の鋼板を QLT にて製造している。表 7 にはその代表的な特性をオーステナイト系ステンレスである SUS304L 鋼と比較して示す<sup>14)</sup>。マイクロ組織は図 18 に示すとおり細粒のマルテンサイト主体で、適切な量の安定な残留 $\gamma$ を含有する<sup>14)</sup>。室温における YS は SUS304L の約 3 倍であり、破壊じん性の値は溶接継手を含めて SUS304L と同等以上である。このような高強度の Ni 添加低温用鋼を適用することで大型タンクの薄肉軽量化が可能であり、来るべき水素社会への貢献が期待される。

表 7 SUS304L と比較した 15%Ni 鋼の特性<sup>14)</sup>

| 鋼種      | 組成            |                          | 母材       |          |                           |           | 溶接継手                        |                             |
|---------|---------------|--------------------------|----------|----------|---------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
|         |               |                          | 強度       |          | 靱性                        |           | 靱性                          |                             |
|         |               |                          | 室温       |          | 20K (in LH <sub>2</sub> ) |           | 20K (in LH <sub>2</sub> )   |                             |
|         |               |                          | YS [MPa] | TS [MPa] | YS [MPa]                  | TS [MPa]  | K <sub>IC</sub> (J) [MPa√m] | K <sub>IC</sub> (J) [MPa√m] |
| SUS304L | Fe-18%Cr-8%Ni | オーステナイト相                 | 175-     | 480-     | -                         | -         | 150-200                     | 150-200                     |
| 15%Ni 鋼 | Fe-15%Ni      | フェライト相<br>(+少量のオーステナイト相) | 550-750  | 700-850  | 850-1350                  | 1350-1650 | 200-                        | 150-200                     |

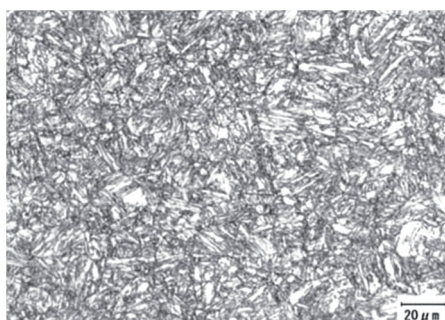


図 18 15%Ni 鋼板のマイクロ組織<sup>14)</sup>

## 6. おわりに

低温用鋼の組織と強度およびじん性について、LPG、LNG、LH<sub>2</sub> などのエネルギー分野向け鋼材を主体に整理した。今回紹介したものの以外にも CCS 向け LCO<sub>2</sub> 貯蔵タンク用鋼<sup>15)</sup> など開発が進んで

おり、エネルギーの安定供給、経済効率性、環境適合性への対応に向け、低温用鋼の益々の貢献が期待される。

## 参考文献

- 1) 溶接学会編:溶接・接合便覧 第2版(2003),p.884
- 2) 前野圭輝,田中將己,吉村信幸,白幡浩幸,潮田浩作,東田賢二:鉄と鋼 98-12(2012),pp.667-674  
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.98.667>
- 3) 川畑友弥:WE-COM マガジン Vol.35(2020)  
[https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol\\_35/sec\\_2/2-1/2-1.jsp](https://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_35/sec_2/2-1/2-1.jsp)
- 4) 南二三吉:溶接学会誌 79-7(2010), pp.666-676 <https://doi.org/10.2207/jjws.79.666>
- 5) 町田進,石倉則義,久保尚重,片山典彦,萩原行人,有持和茂:圧力技術 29-6(1991), pp.341-355  
<https://doi.org/10.11181/hpi1972.29.341>
- 6) 児島明彦:溶接学会誌,77-3(2008),pp.237-247 <https://doi.org/10.2207/jjws.77.237>
- 7) 邦武立郎,大谷泰夫:日本金属学会会報 14-9(1975),pp.689-697  
<https://doi.org/10.2320/material1962.14.689>
- 8) 石川忠,大下滋,益永英勝,間淵秀里,土師利昭:新日鉄技報 348(1993),pp.3-9  
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/34802.pdf>
- 9) 千々岩力雄,井上健裕,吉田讓,磯田征司,土井直己,為広博,吉江敦彦,服部恵一:新日鉄技報 365(1997),pp.44-49 <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/36507.pdf>
- 10) 長尾年道:溶接学会誌 88-1(2019),pp.74-80 <https://doi.org/10.2207/jjws.88.74>
- 11) 斎藤直樹,山場良太,村岡寛英,佐伯修:新日鉄技報 348(1993),pp.25-31  
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/34805.pdf>
- 12) 古谷仁志,田川哲哉,石川孝司:鉄と鋼 100-5(2014),pp.678-687  
<https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.678>
- 13) 星野学,斎藤直樹,村岡寛英,佐伯修:新日鉄技報 380(2004),pp.17-20  
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/nsc/pdf/38006.pdf>
- 14) 滑川哲也,星野学,大川鉄平:日本製鉄技報 422(2023),pp.40-44  
<https://www.nipponsteel.com/common/secure/tech/report/pdf/422-07.pdf>
- 15) 臼杵博一,吉村信幸,中西大貴,大久保武史,住谷早俊,猪狩玄樹,奥島基裕:日本製鉄技報 422(2023),pp.45-49 <https://www.nipponsteel.com/common/secure/tech/report/pdf/422-08.pdf>

<略歴>

### 加茂孝浩(かも たかひろ)

1998年 九州大学大学院 材料物性工学科 修了

1998年 住友金属工業株式会社 入社 総合技術研究所 配属

2021年 日本製鉄株式会社 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究部 室長

現在に至る