

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.3 (1971) No.2

3.5% Ni 鋼 KLN 3A および KLN 3B

3.5% Ni Steel -KLN 3A and KLN 3B

有村 康男(Yasuo Arimura) 大橋 卓朗(Takuro Ohashi) 近藤 一(Hajime Kondo)
荘司 吉信(Yoshinobu Syoji)

要旨：

3.5%Ni 鋼 KLN3A および KLN 3B はエチレンや液化石油ガスの低温貯蔵タンク用鋼板として川崎製鉄（株）で製造されたものである。この報文は、これらの鋼板の開発経過、製造法の概要、母材特性、溶接性および加工性について述べている。熱処理は KLN 3A は焼ならし、KLN 3B は焼入れ、焼もどしである。KLN 3A（板厚 26mm、70mm）、KLN 3B（板厚 32mm）は-100℃ですぐれた靱性を有し、また十分な強度、そして溶接構造物用鋼板として十分な溶接性を有している。

Synopsis：

3.5% Ni Steel-KLN 3A and 3B have been developed and successfully industrialized by Kawasaki Steel Corporation for low temperature storage tank of ethylene and liquified petroleum gas. This paper reports on the progress of this development, an outline of the manufacturing process, the results of mechanical tests, formability tests and weldability tests of these steels. KLN 3A is normalized and KLN 3B is quench-tempered. Test results show that KLN 3A(26 ;70mm thick) and KLN 3B(32mm thick) have an excellent toughness at -100℃, a satisfactory strength and a sufficient weldability well suited for welded structures.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

3.5%Ni鋼 KLN 3A および KLN 3B

3.5% Ni Steel —KLN 3A and KLN 3B

有村 康男*

Yasuo Arimura

大橋 卓朗**

Takuro Ohashi

近藤 一***

Hajime Kondo

荘司 吉信****

Yoshinobu Syoji

Synopsis :

3.5% Ni Steel-KLN 3A and 3B have been developed and successfully industrialized by Kawasaki Steel Corporation for low temperature storage tank of ethylene and liquified petroleum gas.

This paper reports on the progress of this development, an outline of the manufacturing process, the results of mechanical tests, formability tests and weldability tests of these steels.

KLN 3A is normalized and KLN 3B is quench-tempered. Test results show that KLN 3A (26; 70 mm thick) and KLN 3B (32 mm thick) have an excellent toughness at -100°C , a satisfactory strength and a sufficient weldability well suited for welded structures.

1. 緒 言

経済成長、生活水準の向上は石油化学製品の需要を急激に増大させている。このため石油化学工業の中心ともいわれるエチレンプラントは、年々大型化しつつあり、年産50万tプラントの建設も時間の問題とされている。

ところで、プラントの大型化に際して問題になるのはエチレンの貯蔵方法であり、従来の加圧常温方式ではコストの面および安全性において常圧低温方式に劣るといわれている。貯蔵法に後者を採用した場合、貯蔵タンクに使用される材料はエチレンの沸点 -104°C （大気圧下）において十分な靱性を有するものでなければならない。鋼板でこの要求に応えられるものは、図1に示されているように3.5%Ni鋼、9%Ni鋼およびステンレス鋼である。この中で最も経済的な3.5%Ni鋼について製造法の検討を行ない、焼ならし型 KLN 3A および調質型 KLN 3Bを開発した。KLN 3A

では板厚 26 mm の厚物から極厚の 70 mm までの鋼板を製造しており、いずれもすぐれた機械的

| | | |
|---------|-------------------------|---------------|
| アンモニア | -33.4°C | Al キルド鋼 |
| プロパン | -45 | |
| プロピレン | -47.7 | |
| 硫化カルボニル | -50 | |
| 硫化水素 | -60.4 | 2.5%Ni鋼 |
| アセチレン | -84 | 低炭素 Alキルド鋼 |
| エタン | -88.3 | |
| エチレン | -103.7 | 3.5%Ni鋼 |
| クリプトン | -151 | 9%Ni鋼 |
| メタン | -161.5 | |
| 酸素 | -183 | |
| アルゴン | -185.7 | |
| 沸素 | -187 | |
| 窒素 | -195.8 | |
| ネオン | -246 | ステンレス鋼 |
| 重水素 | -249.6 | |
| 水 | -252.8 | |
| ヘリウム | -269 | |

図1 各種液化ガスの沸点 ($^{\circ}\text{C}$, 1 atm) と低温用鋼の関係

* 千葉製鉄所管理部部長

*** 千葉製鉄所管理部検査課長代理（現鋼材技術部東京鋼材技術室課長）

** 千葉製鉄所管理部検査課課長

**** 千葉製鉄所管理部検査課

性質および溶接性を有している。また KLN 3B は調質処理を行なうことにより焼ならし型よりも強度、靱性がまさり、エチレン低温貯蔵タンク用鋼板として適している。今回板厚 32 mm までの製造を行なった。

これらの鋼板は今後のエチレンプラントの大型化に十分応えうるものと考えられる。

2. 開発経過

当社の 3.5%Ni 鋼の化学成分、機械的性質の規格値は表 1 に示すとおりであり、この成分規格に

従い、よりすぐれた機械的性質を得るために焼ならし型および調質型の 3.5%Ni 鋼について以下の実験を行なった。

2-1 KLN 3A (焼ならし型) の開発

焼ならし型の 3.5%Ni 鋼の化学成分系は、C、Ni 含有量を変え、P、S などの不純物をできるだけ低めにして出鋼した鋼塊を用い、圧延および熱処理については、普通圧延—普通焼ならし法と特殊圧延—特殊焼ならし法の 2 方法で実験を行なった結果にもとずいて検討した。

実験結果を表 2 に示す。この結果からわかるよ

表 1 3.5% Ni 鋼 KLN 3A および KLN 3B の規格

| 鋼種 | 化学成分 (wt%) | | | | | | 引張試験 | | | 曲げ試験 | | 衝撃試験 |
|---------------------------------|------------|-------------------|-------------------|--------|--------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|--|------------|----------|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び (%) | 板厚 (mm) | 曲げ 半径 | |
| KLN 3A ¹⁾ (焼ならし型) | ≤0.17 | 0.15 ~ 0.32 | 0.40 ~ 0.70 | ≤0.035 | ≤0.040 | 3.25 ~ 3.75 | ≥29 | 49.21 ~ 59.75 | ≥19 (JIS1A号) | t≤26 | 0.75t | 日本溶接協会の低温構造用鋼板材質判定規程に準拠して、vTE にて判定する。ただし、吸収エネルギーの値で要求のある場合には、-101°C における 5 mmV ノッチシャルビーの値で 10mm×10mm (断面)2.08kg・m 10mm×7.5mm1.73kg・m 10mm×5.0mm1.39kg・m |
| | ≤0.20 | " | 0.40 ~ 0.80 | " | " | " | | | ≥25 (JIS 4号) | t>26 | 1.00t | |
| KLN 3B (調質型) | ≤0.17 | " | 0.40 ~ 0.70 | " | " | " | ≥45 | 55 ~ 67 | ≥23 (t≤13) ≥28(13<t≤21) ≥18 (t>21) | t≤26 | 1.5t | 日本溶接協会の低温構造用鋼板材質判定規程に準拠して vTE にて判定する。 |
| | ≤0.20 | " | 0.40 ~ 0.70 | " | " | " | | | t>26 | 2.0t | | |

注 1) A203E相当

2) 化学成分の上段は板厚50mm以下、下段は板厚50mm超の場合である

表 2 焼ならし型 3.5% Ni 鋼の製造実験結果の一例

| 試料 | 製造条件 | | | | 引張試験 | | | 衝撃試験 vE ₋₁₀₁ (kg・m) |
|---------|---------|------|------|--------|------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| | 化学成分(%) | | 圧延方法 | 熱処理 | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び (%) | |
| | C | Ni | | | | | | |
| N - I | 0.13 | 3.40 | 普通圧延 | 普通焼ならし | 40.5 | 52.0 | 28 | 2.4 |
| N - II | " | 3.60 | " | " | 44.2 | 54.2 | 29 | 3.2 |
| N - III | 0.10 | 3.40 | " | " | 38.6 | 50.6 | 32 | 5.6 |
| N - IV | " | 3.70 | 特殊圧延 | 特殊焼ならし | 43.3 | 52.9 | 30 | 15.3 |

(板厚25~32mm, 試験片採取方向:L)

うに普通圧延—普通焼ならし法の場合、C含有量が等しいときはNi含有量が高い方が靱性が良い。一方Ni含有量が等しいときはC含有量が低い方が靱性は良い。このようにC, Niの含有量は靱性に対しかなり大きな影響をおよぼしていることがわかる。普通圧延—普通焼ならし法と特殊圧延—特殊焼ならし法とでは明らかに後者の方が低温靱性はすぐれているが、とくに焼ならしの影響が大きいと思われる。

図2はこれらの試料の圧延比と切欠靱性の関係を示したものである。普通圧延—普通焼ならし法

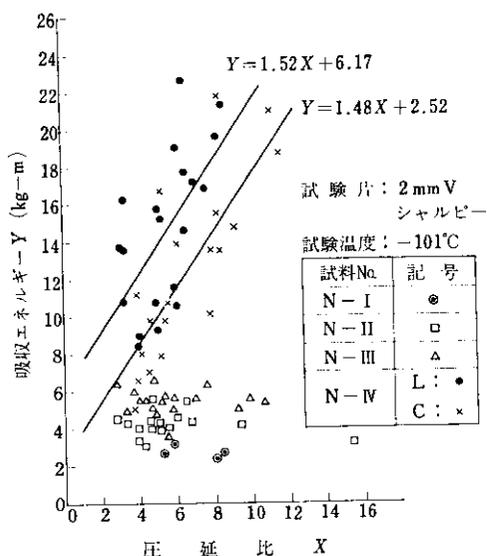


図2 圧延比と切欠靱性の関係
(試料 N-I, II, III, は普通圧延—普通焼ならし, N-IV は特殊圧延—特殊焼ならし)

にもとずいて製造された試料 N-I, N-II および N-III の切欠靱性は圧延比の影響はほとんど認められず、化学成分の影響のみを受けていることがわかる。これに対し特殊圧延—特殊焼ならしを行なった試料 N-IV では圧延比と切欠靱性との間にかなりはっきりした相関が認められ、圧延比が高いほど切欠靱性は良くなっている。

以上のような実験結果にもとづく適切な化学成分の選定と特殊圧延—特殊焼ならし法の採用によって切欠靱性のすぐれた焼ならし型3.5%Ni鋼板が製造できることがわかった。

2.2 KLN 3B (調質型) の開発

図3の連続冷却変態曲線から知られるように、3.5%Ni鋼は通常の焼入れと異なり、焼入れ後の組織にはフェライトおよび中間組織がかなり析出しており、マルテンサイト組織があるとしてもご

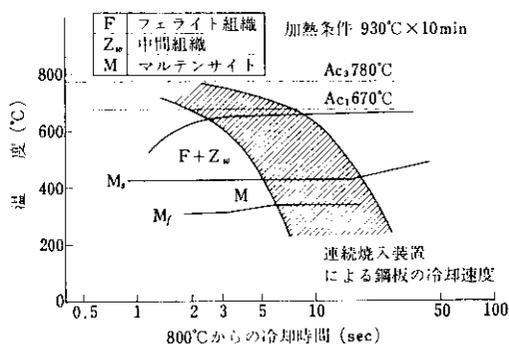


図3 熱処理連続冷却変態曲線

表3 調質型3.5%Ni鋼の製造実験結果の一例

| 試料 No. | 製造条件 | | | 引張試験 | | | 衝撃試験 | | |
|--------|-------|---------|-----|---------------------------|----------------------------|--------|----------|----------|---------------|
| | C (%) | 板厚 (mm) | 熱処理 | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び (%) | vTB (°C) | vTs (°C) | vE-100 (kg·m) |
| QT-I | 0.13 | 18 | 調質 | 58.6 | 65.3 | 28 | -140 | -140 | 24.5 |
| QT-II | 0.09 | 24 | " | 59.1 | 63.5 | 30 | -151 | -140 | 27.8 |
| QT-III | " | 32 | " | 51.8 | 58.1 | 33 | -120 | -127 | 21.0 |
| QT-IV | " | 42 | " | 56.5 | 61.5 | 30 | -123 | -122 | 20.8 |

く少ないことが知られる。こうようにマルテンサイトの少ない組織の調質処理においては、従来の焼入れ法の考え方では靱性改善が十分に発揮されない。このため 3.5%Ni 鋼の焼入れ法について種々検討し、最適焼入れ条件を求め、次に焼もどし条件を求めた。さらに、最適焼入れ条件にて各種成分の 3.5%Ni 鋼を焼入れ、焼もどしを行ない、化学成分の検討を行なったところ C% が靱性に対し大きな影響があり、その他の成分としては Mn, Si, Ni も靱性に影響をおよぼすことが知られた。また Cu, Cr, Mo は溶接硬化性に悪影響をおよぼすと考え極力これらの成分の添加を抑えた。

以上の焼入れ条件、化学成分の検討の結果、焼ならし型の 3.5%Ni 鋼より強度および靱性のすぐれた鋼板の製造が可能であることが知られた。

表 3 に調質型 3.5% Ni 鋼の製造実験結果の一例を示す。

焼ならし型の KLN 3A の規格は A 203 E とほぼ同等であるが、調質型 KLN 3B の規格値は表 1 のように定めた。

3. KLN 3A, B の製造概要

試験に供した KLN 3A 板厚 26 mm, 70 mm および KLN 3B 板厚 32 mm の製造上の諸条件は表 4 のとおりである。KLN 3A は 150 t 平炉、KLN 3B は 15 t 電気炉で溶製し、両者とも Al に

表 4 KLN 3A および KLN 3B の製造概要

| | KLN 3A | KLN 3B |
|-------|-------------------------|----------------------------------|
| 溶 解 | 150t 平炉 | 15t 電気炉 |
| 脱 酸 | Al, Si-Mn | Al, Si-Mn |
| 脱 ガ ス | PH脱ガス処理 | 粒滴脱ガス処理 |
| 造 塊 | 偏平鋳型, 上注 | 偏平鋳型, 上注 |
| 分塊圧延 | 二重分塊圧延機 | 二重分塊圧延機 |
| 厚板圧延 | 四重圧延機 | 四重圧延機 |
| 熱 処 理 | cross rolling 特殊焼ならし | cross rolling 連続焼入れ 連続焼もどし |

よる脱酸細粒化処理を行なった後、KLN 3A は RH 脱ガス、KLN 3B は粒滴脱ガスを行なって鋼塊の清浄度を高めた後、上注ぎで偏平鋼塊とし、スラブ圧延後、各板厚にクロス圧延し機械的性質の異方性を小さくした。熱処理は KLN 3A が特殊焼ならし、KLN 3B が連続焼入れ・焼もどしである。

4. KLN 3A, B の母材特性

4.1 化学成分および顕微鏡組織

供試材の化学分析結果を表 5 に示す。

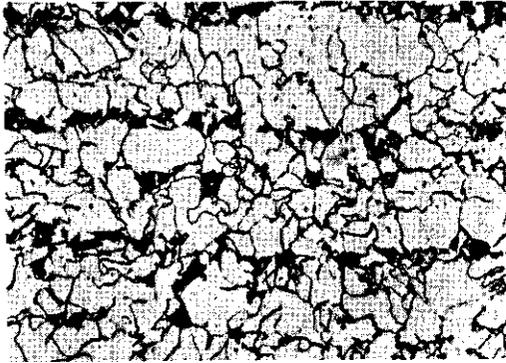
供試材の顕微鏡組織を写真 1 に示す。KLN 3A の顕微鏡組織はフェライト・パーライト組織であ

表 5 供試材の化学成分

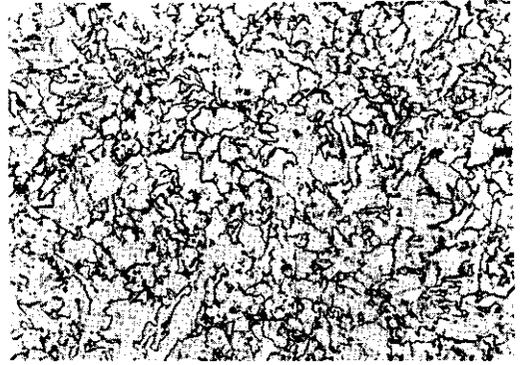
(wt %)

| 鋼 種 | 板 厚 (mm) | 分 析 | C | Si | Mn | P | S | Ni | sol. Al | Ceq* |
|--------|-------------|-----|------|------|------|-------|-------|------|---------|-------|
| KLN 3A | 26 | 取 鍋 | 0.09 | 0.21 | 0.66 | 0.008 | 0.006 | 3.64 | 0.024 | 0.300 |
| | | 照 合 | 0.10 | 0.21 | 0.69 | 0.008 | 0.006 | 3.65 | 0.029 | 0.315 |
| | 70 | 取 鍋 | 0.09 | 0.21 | 0.66 | 0.008 | 0.006 | 3.64 | 0.024 | 0.300 |
| | | 照 合 | 0.09 | 0.19 | 0.68 | 0.007 | 0.006 | 3.58 | 0.029 | 0.300 |
| KLN 3B | 32 | 取 鍋 | 0.08 | 0.21 | 0.68 | 0.006 | 0.009 | 3.65 | 0.024 | 0.292 |
| | | 照 合 | 0.09 | 0.24 | 0.70 | 0.007 | 0.009 | 3.66 | 0.029 | 0.309 |

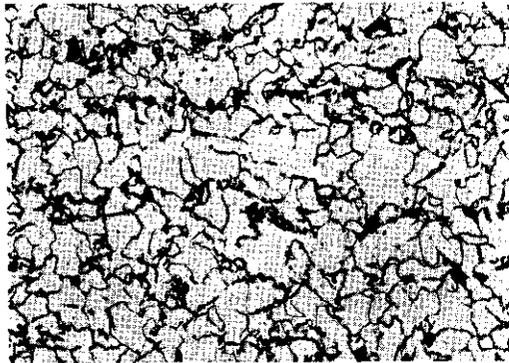
* Ceq = C + $\frac{1}{6}$ Mn + $\frac{1}{2}$ Si + $\frac{1}{16}$ Ni + $\frac{1}{5}$ Cr + $\frac{1}{4}$ Mo + $\frac{1}{4}$ V



KLN 3A (板厚26mm)



KLN 3B (板厚32mm)



KLN 3B (板厚70mm)

写真 1 顕微鏡組織 (×400)

り、KLN 3B は初析フェライトの混在する焼入れ・焼もどし組織で、KLN 3A より微細な組織を示している。

オーステナイト結晶粒度は KLN 3A が ASTM No. 9, KLN 3B が No. 9.5 である。なお試験法は浸炭法によった。

4.2 引張および曲げ試験

供試材の引張および曲げ試験の結果を表 6 に示

表 6 供試材の引張および曲げ試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 試験* 片方向 | 引張試験** | | | | 曲げ試験*** R=0.75t, 1.0t および1.5t, 180°曲げ |
|--------|---------|------------|---------------------------|----------------------------|--------|---------|---|
| | | | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び (%) | 降伏比 (%) | |
| KLN 3A | 26 | L | 41.6 | 53.3 | 29 | 78 | 良 |
| | | | 41.1 | 53.0 | 28 | 78 | 良 |
| | | C | 44.8 | 53.9 | 31 | 83 | 良 |
| | | | 45.2 | 53.8 | 30 | 84 | 良 |
| | 70 | L | 38.1 | 53.9 | 34 | 71 | 良 |
| | | | 36.9 | 54.1 | 33 | 68 | 良 |
| C | | 38.8 | 53.7 | 36 | 71 | 良 | |
| | | 38.4 | 53.8 | 36 | 72 | 良 | |
| KLN 3B | 32 | L | 50.9 | 59.5 | 27 | 86 | 良 |
| | | | 50.8 | 59.8 | 27 | 86 | 良 |
| | | C | 51.4 | 59.4 | 30 | 86 | 良 |
| | | | 51.6 | 59.2 | 28 | 87 | 良 |

* 試験片方向 L: 圧延方向, C: 直角方向 ** 引張試験片 JIS 1号試験片 *** 曲げ試験片 JIS 1号試験片

す。いずれも規格値を十分満足している。

4.3 切欠靱性試験

(1) 2 mm V, プレスおよび 5 mm U ノッチシャルピー衝撃試験

2 mm V, プレスおよび 5 mm U ノッチシャルピー衝撃試験結果を表 7 および図 4, 5, 6 に示す。

KLN 3A, B とも 3.5%Ni 鋼としてすぐれた靱性を有し、特に KLN 3B は各切欠のシャルピー試験において、焼ならし型の 3.5% Ni 鋼 KLN 3A より良好な切欠靱性を有している。

(2) ひずみ時効試験

引張試験片に 2 % および 5 % の引張り歪を与え、250°C にて 60 min/25 mm の時効処理後、

表 7 2 mmV, プレス, 5 mmU シャルピー衝撃試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 方向 | 2 mmV ノッチシャルピー | | | | | プレス ノッチシャルピー | | 5 mmU ノッチシャルピー | |
|--------|---------|----|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | vT _E (°C) | vT _S (°C) | vT ₁₅ (°C) | vE ₀ (kg·m) | vE ₋₁₀₀ (kg·m) | rT _E °C | rT ₀ °C | uT _d (°C) | uT ₁₅ (°C) |
| KLN 3A | 26 | L | -95 | -90 | -149 | 20.7 | 9.0 | -65 | -65 | -196 | -196 |
| | | C | -89 | -88 | -149 | 20.0 | 7.5 | -65 | -65 | -180 | -180 |
| | 70 | L | -76 | -78 | -128 | 24.5 | 6.2 | -50 | -50 | -140 | -140 |
| | | C | -63 | -67 | -118 | 22.4 | 3.8 | -45 | -45 | -150 | -150 |
| KLN 3B | 32 | L | -120 | -127 | -164 | 24.0 | 21.1 | -105 | -105 | -196 | -196 |
| | | C | -111 | -114 | -184 | 23.2 | 18.2 | -105 | -105 | -196 | -196 |

試験片採取位置: 1/4 t

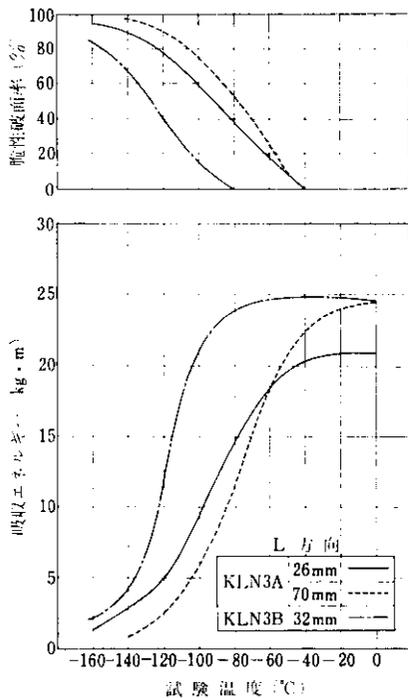


図 4 KLN 3A および KLN 3B の 2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験結果

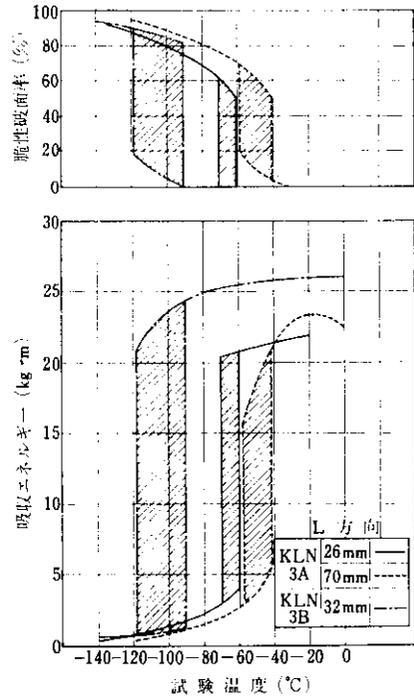


図 5 KLN 3A および KLN 3B のプレス ノッチシャルピー衝撃試験結果

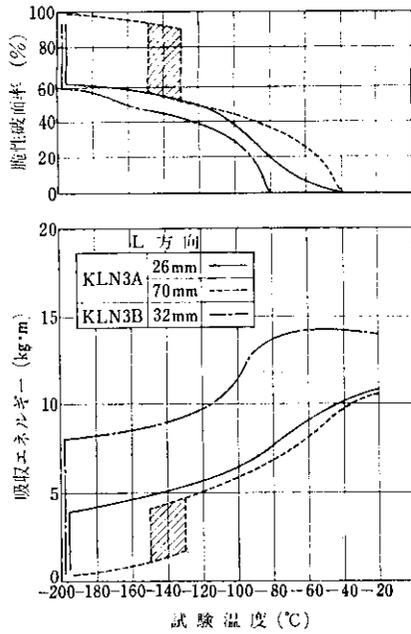


図 6 KLN3A および KLN3B の 5mm Uノッチシャルピー衝撃試験結果

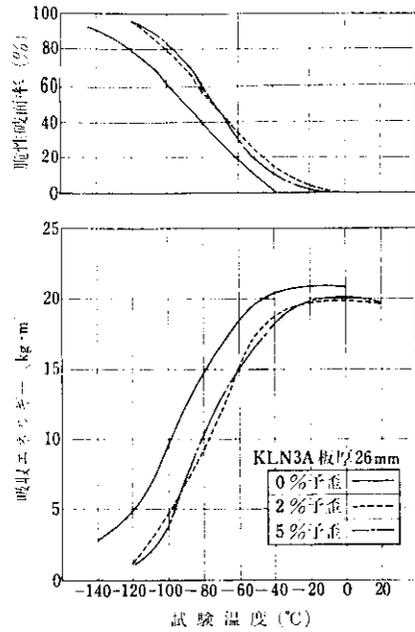


図 7 KLN3A の歪時効シャルピー衝撃試験結果

表 8 ひずみ時効試験結果

| 鋼 種 | 板 厚 (mm) | 歪 量 (%) | vT _E (°C) | vT _S (°C) | vT ₁₅ (°C) | vE ₀ (kg·m) | vE ₋₁₀₀ (kg·m) |
|-------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| KLN3A | 26 | 0 | -95 | -90 | -149 | 20.7 | 9.0 |
| | | 2 | -76 | -77 | -117 | 19.6 | 5.0 |
| | | 5 | -76 | -72 | -113 | 20.0 | 4.0 |
| | 70 | 0 | -76 | -78 | -128 | 24.5 | 6.2 |
| | | 2 | -57 | -58 | -90 | 19.8 | 2.4 |
| | | 5 | -53 | -51 | -83 | 19.7 | 1.3 |
| KLN3B | 32 | 0 | -120 | -127 | -164 | 24.0 | 21.1 |
| | | 2 | -111 | -107 | -140 | 22.8 | 19.5 |
| | | 5 | -97 | -99 | -131 | 22.0 | 9.0 |

試験片採取方向：L
試験片採取位置：1/4 t

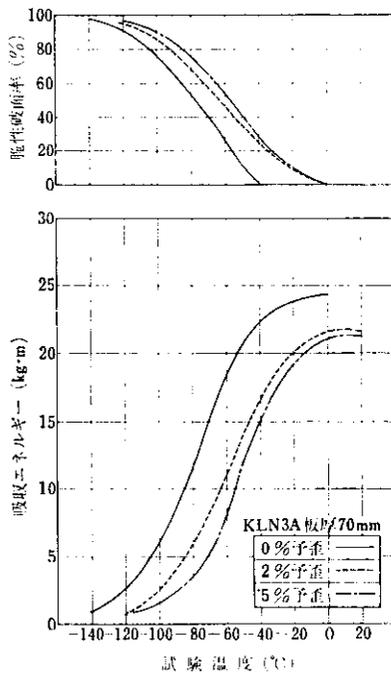


図 8 KLN 3A の歪時効シャルピー衝撃試験結果

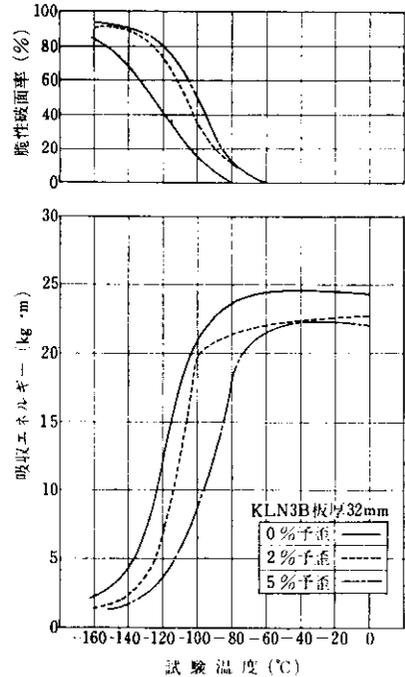


図 9 KLN 3B の歪時効シャルピー衝撃試験結果

表 9 落重試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 試験温度 (°C) | 試験結果 | N.D.T |
|--------|---------|-----------|---------|--------|
| KLN 3A | 26 | -90 | ○ ○ ○ | -100°C |
| | | -95 | ○ ○ ○ | |
| | | -100 | ● ○ ○ ○ | |
| | | -105 | ● ● ● | |
| | 70 | -85 | ○ ○ ○ | -95°C |
| | | -90 | ○ ○ ○ | |
| | | -95 | ● ● ● | |
| KLN 3B | 32 | -100 | ● ● ● | -130°C |
| | | -120 | ○ ○ ○ | |
| | | -125 | ○ ○ ○ | |
| | | -130 | ● ● ● | |
| | | -135 | ● ● ● | |

2 mm V ノッチシャルピー試験片の長手方向を引張方向に平行して、試験片を採取し試験を行なった。

試験結果を表 8 に、また遷移曲線を図 7, 8, 9 に示す。ひずみ時効感受性は特に大きくはないことが知られる。

(3) NRL 落重試験

図 10 に示す試験片を所定温度に冷却し、KLN 3A には 81 kg·m、KLN 3B には 108 kg·m の衝撃エネルギーを与えたときのクラックの発生伝播状況を表 9 に示す。

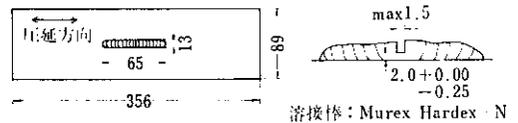


図 10 NRL 落重試験片形状およびビード詳細

(4) 二重引張試験および ESSO 試験

供試材の脆性亀裂伝播停止特性を調べるため、二重引張試験および ESSO 試験を行なった。試験

表 10 試験結果一覧

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 試験片 | 試験片番号 | 応力 (kg/mm ²) | 亀裂長さ (mm) | Kc kg/mm ² √mm | 亀裂停止温度 | | |
|---------|------------|---------|---------|-----------------------------|--------------|------------------------------|--------|-------------------------------|-------|
| | | | | | | | (°C) | 1000/T (°K ⁻¹) | |
| KLN 3 A | 26 | 二重引張試験片 | 1 | 15.0 | 185 | 217 | -71 | 4.95 | |
| | | | 2 | 30.0 | 240 | 516 | -61 | 4.72 | |
| | | | 3 | 9.7 | 65 | 78.7 | -92.5 | 5.54 | |
| | | | 4 | 13.5 | 40 | 85.5 | -98 | 5.72 | |
| | | | 5 | 10.0 | 114 | 110 | -102 | 5.85 | |
| | 70 | 二重引張試験片 | 1 | 30.0 | 171 | 414 | -36 | 4.22 | |
| | | | 2 | 10.0 | 125 | 115 | -64 | 4.79 | |
| | | | 3 | 15.0 | 195 | 224 | -51 | 4.51 | |
| | | | 4 | 7.25 | 162 | 96.9 | -72 | 4.98 | |
| | | | 5 | 30.0 | 305 | 637 | -19 | 3.94 | |
| | | E S S O | 6 | 16.9 | 124 | 198 | -41.5 | 4.32 | |
| | | | 7 | 24.0 | 191 | 368 | -22 | 3.92 | |
| | KLN 3 B | 32 | 二重引張試験片 | 1 | 23.0 | 250 | 411 | -72 | 4.98 |
| | | | | 2 | 10.0 | 40 | 63.2 | <-132 | >7.09 |
| 3 | | | | 15.0 | 140 | 184 | -98 | 5.71 | |
| 4 | | | | 36.0 | 336 | 849 | -58 | 4.68 | |
| 5 | | | | 10.0 | 80 | 90.4 | -128 | 6.80 | |

表 11 1/2公称降伏点に対応する亀裂停止温度

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 公称降伏点 (kg/mm ²) | C=10mmとした時の $\sigma_y/2$ に対応する亀裂停止温度(°C) | | C=100mmとした時の $\sigma_y/2$ に対応する亀裂停止温度(°C) | |
|---------|------------|--------------------------------|--|--|---|--|
| | | | G 種 | | A 種 | |
| KLN 3 A | 26 | 29 | -115 | | -90 | |
| | 70 | 29 | -90 | | -61 | |
| KLN 3 B | 32 | 45 | -129 | | -100 | |

片の形状を図 11 および図 12 に示す。試験結果を表 10 および図 13 に示す。

この結果を用いて設計応力を公称降伏点の 1/2

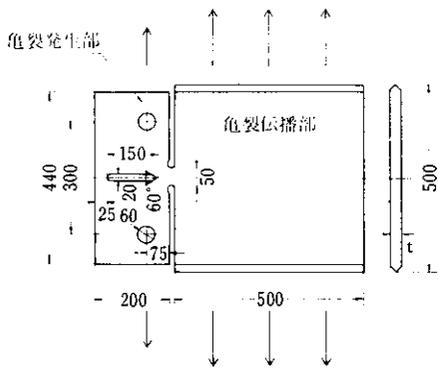


図 11 二重引張試験片

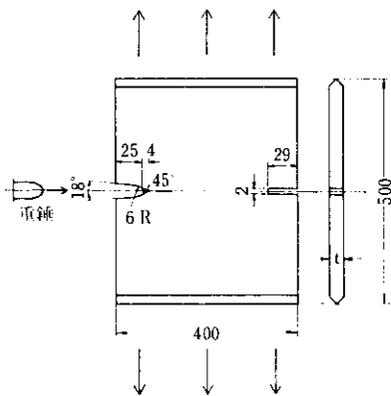


図 12 ESSO 試験片

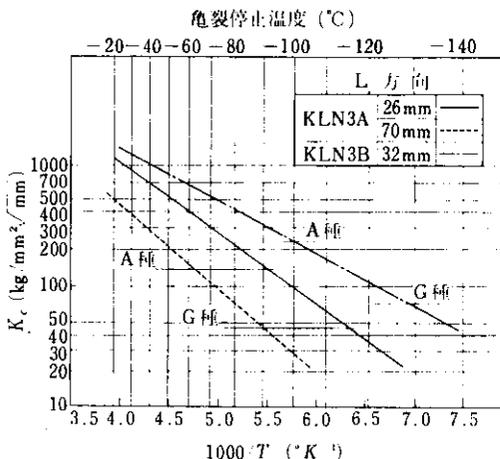


図 13 Kc 値と亀裂停止温度の関係

とし、設定停止亀裂長さを 100 mm (WES, A種) および 10 mm (WES, G種) とした場合の亀裂停止温度を求める。この結果を表 11 に示す。これらの結果から供試材は非常にすぐれた低温靱性を有することが知られる。

5. KLN 3A, B の加工性

供試材についての加工性を調べるため、一様伸び試験および応力除去焼鈍試験を行なった。

5.1 一様伸び試験

KLN 3A, B の加工時の施行条件確立資料とするため、供試材の圧延方向および直角方向の一様伸び試験を行なった。試験方法は図 14 に示す試験片を 10 mm ピッチで野書きし、引張破断後の伸びより一様伸びを求めた。試験結果を図 15 に示す。KLN 3A 26 mm は 16%, 70 mm は 17%, KLN 3B 32 mm は 13% の一様伸びがあり加工性は良好なことがわかる。



図 14 一様伸び試験片

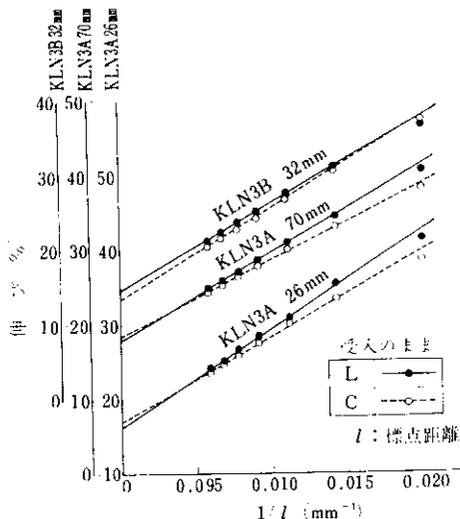


図 15 一様伸び引張試験結果

5.2 応力除去焼鈍試験

応力除去焼鈍後の母材機械的性質の変化を調べるため、応力除去焼鈍後の引張試験および衝撃試験を行なった。各々の結果を表12および表13に示す。なお、応力除去条件は各応力除去焼鈍温度に1hr/25mm、保持した。昇温・降温速度は100°C/hrである。引張試験においては、焼ならし型のKLN 3Aは応力除去焼鈍温度が高くなっても引張特性の変化はみられない。これに対し調質型のKLN 3Bでは降伏点、引張強さがわずかであるが

表 12 応力除去焼鈍後引張試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 応力除去焼鈍温度 (°C) | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び (%) |
|---------|---------|---------------|---------------------------|----------------------------|--------|
| KLN 3 A | 26 | 受入のまま | 43.5 | 56.4 | 40 |
| | | | 46.1 | 55.0 | 38 |
| | | 575 | 46.5 | 55.9 | 36 |
| | | | 46.0 | 55.8 | 40 |
| | | 600 | 45.7 | 55.8 | 39 |
| | | | 45.5 | 55.9 | 35 |
| | 625 | 43.7 | 53.5 | 38 | |
| | | 42.9 | 54.3 | 38 | |
| | 70 | 受入のまま | 40.5 | 52.2 | 40 |
| | | | 40.2 | 52.8 | 40 |
| | | 575 | 42.4 | 51.8 | 39 |
| | | | 42.5 | 51.8 | 39 |
| 600 | | 40.6 | 50.7 | 41 | |
| | | 42.3 | 50.7 | 40 | |
| 625 | 42.7 | 50.8 | 40 | | |
| | 40.9 | 50.6 | 41 | | |
| KLN 3 B | 32 | 受入のまま | 50.3 | 58.0 | 36 |
| | | | 52.2 | 58.2 | 34 |
| | | 575 | 49.6 | 58.4 | 34 |
| | | | 50.7 | 58.6 | 34 |
| | | 600 | 47.5 | 56.9 | 36 |
| | | | 47.9 | 57.3 | 36 |
| | | 625 | 49.1 | 57.1 | 34 |
| | | | 48.9 | 57.3 | 35 |

試験片採取方向：L
試験片：JIS 4号

表 13 応力除去焼鈍後の衝撃試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 応力除去焼鈍温度 (°C) | vTE (°C) | vTS (°C) | vT15 (°C) | vE-100 (kg·m) | |
|---------|---------|---------------|----------|----------|-----------|---------------|------|
| KLN 3 A | 25 | 受入のまま | -95 | -90 | -149 | 9.0 | |
| | | 575 | -83 | -89 | -134 | 7.5 | |
| | | 600 | -75 | -80 | -132 | 7.3 | |
| | | 625 | -75 | -86 | -128 | 7.1 | |
| | 70 | 受入のまま | -76 | -75 | -128 | 6.2 | |
| | | 575 | -70 | -74 | -128 | 4.6 | |
| | | 600 | -72 | -78 | -102 | 2.7 | |
| | | 625 | -72 | -76 | -109 | 5.5 | |
| | KLN 3 B | 32 | 受入のまま | -120 | -127 | -164 | 21.1 |
| | | | 575 | -118 | -118 | -169 | 17.2 |
| | | | 600 | -113 | -119 | -157 | 17.2 |
| | | | 625 | -115 | -104 | -176 | 13.0 |

低下する。

衝撃試験においては、応力除去焼鈍温度が高くなるにつれて、KLN3 A、KLN 3Bとも切欠靱性の低下がみられるがごくわずかである。

6. KLN 3A, B の溶接性

供試材の溶接性を調べるため、溶接硬化性について、テーパ硬さおよび最高硬さ試験を、また溶接硬化部の延性についてはビード曲げ試験を、さらに溶接割れ感受性についてはY開先拘束割れ試験を行なった。

なお、溶接性試験に使用した溶接棒は当社製被覆アーク溶接棒 KSN-9 (9%Ni鋼用溶接棒) で標準溶接条件は次のとおりである。

- 溶接条件
- 溶接棒 KSN 9 4 mmφ
- 溶接電流 150A
- 溶接電圧 25V

溶接速度 15 cm/min

6.1 テーパー硬さおよび最高硬さ試験

テーパー硬さおよび最高硬さ試験結果を表 14 に示す。KLN 3A の溶接硬化性は普通であるが KLN 3B は最高硬さ(H max)値が低く優れている。

6.2 ビード曲げ試験 (コマレル試験)

母材の溶接硬化部の延性および靱性を調べるため図 16 に示す試験片を予熱して溶接ビードを置き 1 週間放置してから溶接ビード曲げ試験を行なった。この結果を表 15 に示す。各供試材とも -120°C で 120° 以上曲げても溶接熱影響部に割れを生ぜず、延性、靱性ともに良好であることがわかる。

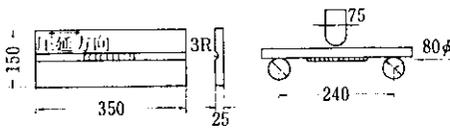


図 16 溶接ビード曲げ試験片および治具

6.3 y 開先拘束割れ試験

図 17 に示す試験片の温度をかえて溶接し、48 hr 経過した後、割れ検査を行なった。y 開先拘束割れ試験結果は各供試材とも良好で室温 (28°C) でも熱影響部に割れが生じなかった。ただ始末端部の溶接金属に割れが見られたがいずれも高温割れで粒界で割れており、これは水素による低温割れと無関係であるため、これを結果から除くと、ルート割れ阻止温度は KLN 3A, B とも 28°C 以下ということになるが、溶接金属に高温割れが生

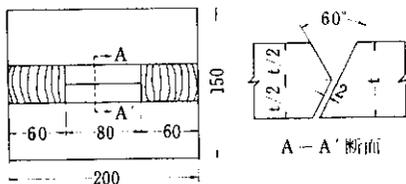


図 17 y 開先拘束割れ試験片

じ、溶接部の拘束度が低下するために、ルート割れが生じない可能性がある。この点を確認するため、強度の対応した当社製被覆アーク溶接棒 KS-86 (4 mmφ) を用い追試験を行なった。溶接電流は 170±10A, 溶接速度 150 mm/min である。

図 18 および 19 に試験結果を示す。この結果から知られるように、ルート割れ阻止温度は 50°C であり、拘束度の低下もある程度影響することが知られる。

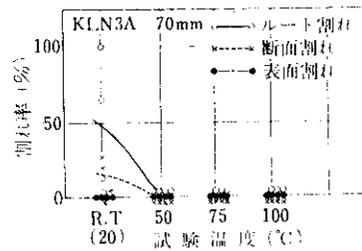
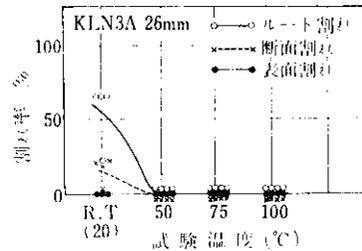


図 18 y 開先拘束割れ試験結果

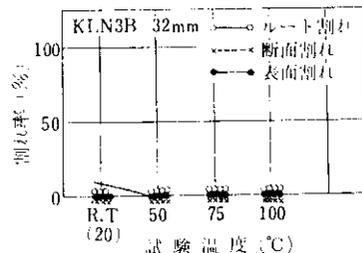


図 19 y 開先拘束割れ試験結果

7. KLN 3A, B の溶接継手性能

供試材の溶接継手性能を調べ、溶接施行条件確立の資料とするため、手溶接継手性能試験として

表 14 テーパー硬さおよび最高硬さ試験結果

| 鋼 種 | 板 厚 (mm) | テーパー硬さ試験 | |
|---------|-------------|---|----------|
| | | Bondにおいて800°Cから500°Cまでの冷却時間 が6 secに相当する最高硬さ Hv (10) | Hmax |
| KLN 3 A | 26 | 320 | 357, 357 |
| | 70 | 355 | 376, 380 |
| KLN 3 B | 32 | 330 | 339, 339 |

(試験条件) テーパー硬さおよび最高硬さ試験は「日本溶接協会鋼種認定要領および試験要領」に従った。
溶接は室温 (30°C) で行なった。

表 15 溶接ビード曲げ試験結果

| 鋼 種 | 板 厚 (°C) | 予熱温度 (°C) | 試験温度 (°C) | 曲げ角度 (°) | 表面伸び率 (%) | 結 果 |
|---------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| KLN 3 A | 26 | 100 | 22 | > 120 | > 32 | 割れ 発生せず |
| | | | | > 120 | > 32 | // |
| | | | -100 | > 120 | > 32 | 割れ 発生せず |
| | | | | > 120 | > 32 | // |
| | 70 | 100 | -120 | > 120 | > 32 | 割れ ビードに発生, 停止 |
| | | | | > 120 | > 32 | 割れ 発生せず |
| | | | 22 | > 120 | > 32 | 割れ 発生せず |
| | | | | > 120 | > 32 | // |
| KLN 3 B | 32 | 100 | 22 | > 120 | > 34 | 割れ 発生せず |
| | | | | > 120 | > 34 | // |
| | | | -100 | > 120 | > 34 | 割れ 発生せず |
| | | | | > 120 | > 34 | // |
| | -120 | > 120 | > 34 | 割れ 発生せず | | |
| | | > 120 | > 34 | // | | |

(試験条件) 試験片寸法 (mm) : 25 × 150 × 350
 スパン (mm) : 240
 ポンチ径 (mm) : 75
 溶接速度 : 150mm/min

表 16 手溶接および自動溶接継手溶接条件

| 鋼種 | 開先形状 | 溶接材料 | 予熱・パス間 | | 電圧 (V) | 速度 (mm/min) | 入熱量 (Joule/cm) | 試験 |
|--------|----------------------------------|----------------|-------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------------|
| | | | 温度 (°C) | 電流 (A) | | | | |
| 手溶接継手 | KLN 3A 26mm 70mm | KSN 9 5mmφ | 室温 100°C | 185 | 30 | 150 | 22,200 | 引張 曲げ 硬さ |
| | KLN 3B 32mm | " | " | " | " | " | " | 衝撃 |
| 自動溶接継手 | KLN 3A 70mm | KB-60 KW-43 | 室温 200°C | 800 ~950 | 33 | 330 ~350 | 54,000 ~57,000 | " |
| | KLN 3A 26mm KLN 3B 32mm | " | " | " | " | " | " | " |

引張および曲げ試験、継手硬さ分布試験およびシャルピー衝撃試験を行なった。なお溶接継手シャルピー衝撃試験においては入熱量の影響を見るため、手溶接の 22,000 Joule/cm に対し 50,000 Joule/cm 以上の入熱量を自動溶接にて加え、溶接熱影響部靱性の変化を調べた。溶接条件を表16

に示す。

7-1 手溶接継手の引張および曲げ試験

突き合わせ手溶接継手の引張および曲げ試験結果を表17に示す。溶接のまま、SR後とも十分な継手強度を有している。また曲げ試験においても

表 17 手溶接継手の引張および曲げ試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 熱処理 | 引張試験 | | | | | | | | 曲げ試験 | |
|--------|---------|---------|------------------------|-------------------------|------|------|------------------------|-------------------------|------|------|----------|-------------|
| | | | 短ゲージ | | | | 長ゲージ | | | | 側曲げ R=19 | ローラー曲げ R=4t |
| | | | 降伏点 kg/mm ² | 引張強さ kg/mm ² | 伸び % | 破断位置 | 降伏点 kg/mm ² | 引張強さ kg/mm ² | 伸び % | 破断位置 | | |
| KLN 3A | 26 | As Weld | — | 59.6 | — | 母材 | 41.7 | 55.2 | 23 | 母材 | 良 | 良 |
| | | | — | 60.5 | — | 溶接金属 | 42.5 | 55.8 | 22 | 母材 | 良 | 良 |
| | | S.R* | — | 56.3 | — | 母材 | 42.5 | 53.3 | 26 | 母材 | 良 | 良 |
| | | | — | 57.3 | — | 母材 | 39.8 | 52.8 | 26 | 母材 | 良 | 良 |
| KLN 3A | 70 | As Weld | — | 56.6 | — | 溶接金属 | 40.0 | 54.8 | 28 | 母材 | 良 | 良 |
| | | | — | 57.8 | — | 溶接金属 | 39.6 | 53.8 | 29 | 母材 | 良 | 良 |
| | | S.R* | 41.9 | 55.3 | — | 母材 | 39.7 | 52.1 | 33 | 母材 | 良 | 良 |
| | | | — | 57.0 | — | 溶接金属 | 40.3 | 51.7 | 35 | 母材 | 良 | 良 |
| KLN 3B | 32 | As Weld | — | 61.4 | — | 溶接金属 | 50.6 | 59.3 | 14 | 溶接金属 | 良 | 良 |
| | | | — | 60.1 | — | 溶接金属 | 50.4 | 59.3 | 12 | 溶接金属 | 良 | 良 |
| | | S.R* | — | 57.3 | — | 溶接金属 | 50.2 | 58.6 | 13 | 溶接金属 | 良 | 良 |
| | | | — | 59.0 | — | 溶接金属 | 49.2 | 57.6 | 13 | 溶接金属 | 良 | 良 |

* SR条件 625°C × 1h/25mm

各試験とも良く曲り、亀裂の発生がなく、良好である。

7.2 手溶接継手の硬さ分布

手溶接継手の硬さ分布を図 20, 21 に示す。図 20 は KLN 3A, 26 mm の溶接のままの硬さ分布で、硬さの最高値は表裏面近傍で Hv 350 以下である。板厚 70 mm も表裏面近傍で Hv 350 以下であり、硬さ分布も図20とはほぼ同様である。図21 は KLN 3B, 32 mm, 溶接のままの硬さ分布で、硬さの最高値は表裏面近傍で Hv 300 以下で溶接硬化性の低いことを示している。

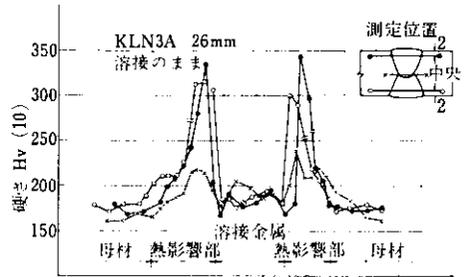


図 20 手溶接継手硬さ試験結果

表 18 手溶接および自動溶接継手シャルピー試験結果

| 鋼種 | 板厚 (mm) | 切欠き位置 | 手溶接 (約22,000 Joule/cm) | | | | 自動溶接 (約55,000 Joule/cm) | | | |
|---------------|------------|---------------|------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------|------------------|
| | | | As Weld | | S.R. | | As Weld | | S.R. | |
| | | | vTs (°C) | vE-100 (kg·m) | vTs (°C) | vE-100 (kg·m) | vTs (°C) | vE-100 (kg·m) | vTs (°C) | vE-100 (kg·m) |
| KLN 3 A | 26 | 溶接金属 | <-196 | 7.0 | <-196 | 9.8 | — | — | — | — |
| | | ボンド | -150 | 6.8 | -87 | 4.0 | -77 | 3.3 | -92 | 10.4 |
| | | 熱影響部境界 | -128 | 22.7 | -106 | 16.0 | -93 | 11.5 | -94 | 10.2 |
| | | 熱影響部境界より 2 mm | -85 | 5.9 | -85 | 7.7 | -98 | 11.3 | -84 | 6.3 |
| | | 熱影響部境界より 4 mm | -83 | 7.2 | -88 | 6.2 | -91 | 9.2 | -87 | 8.0 |
| | | 溶接金属 | <-196 | 9.0 | <-196 | 9.8 | — | — | — | — |
| | 70 | ボンド | <-129 | 7.3 | -80 | 4.5 | -70 | 2.7 | -89 | 14.5 |
| | | 熱影響部境界 | -90 | 7.0 | -104 | 14.4 | -91 | 12.8 | -77 | 5.5 |
| | | 熱影響部境界より 2 mm | -57 | 2.5 | -72 | 5.2 | -80 | 5.2 | -80 | 2.8 |
| KLN 3 B | 32 | 熱影響部境界より 4 mm | -71 | 3.5 | -77 | 6.4 | -74 | 8.0 | -84 | 5.3 |
| | | 溶接金属 | <-196 | 8.1 | <-196 | 9.1 | — | — | — | — |
| | | ボンド | -110 | 8.5 | -96 | 4.9 | -93 | 5.0 | -93 | 5.7 |
| | | 熱影響部境界 | -138 | 24.8 | -126 | 22.1 | -117 | 16.7 | -127 | 19.6 |
| | | 熱影響部境界より 2 mm | -109 | 19.8 | -113 | 16.1 | -132 | 21.0 | -106 | 15.5 |
| 熱影響部境界より 4 mm | -112 | 22.7 | -101 | 20.0 | -127 | 22.0 | -110 | 17.0 | | |

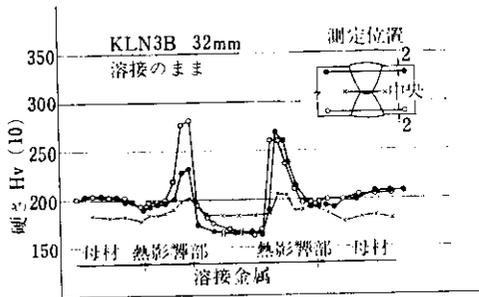
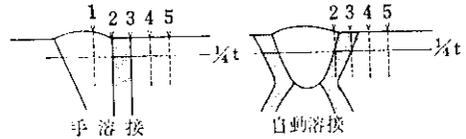


図 21 手溶接継手硬さ試験結果

7.3 手溶接および自動溶接継手
シャルピー試験

溶接継手部の溶接金属から母材熱影響部にいたる各位置での切欠靱性を調べるため、図22に示す各位置から2mm V ノッチシャルピー試験片を採取して試験を行なった。試験結果を表18に示す。また手溶接継手、溶接のままの遷移曲線を図23、

24, 25に示す。溶接部各位置の切欠靱性は KLN 3A で母材より低下する位置があるが、わずかである。KLN 3B ではどの位置も母材と同等の切欠靱性を有し、応力除去焼鈍を行なっても切欠靱性の変化はほとんどない。また入熱量を変えて切欠靱性を調べたが、大きな切欠靱性低下はなかった。



- 1 溶接金属
- 2 ボンド部(自動溶接は熱影響部寄り)
- 3 熱影響部境界
- 4 熱影響部境界より2mm
- 5 熱影響部境界より4mm

図 22 切欠き位置

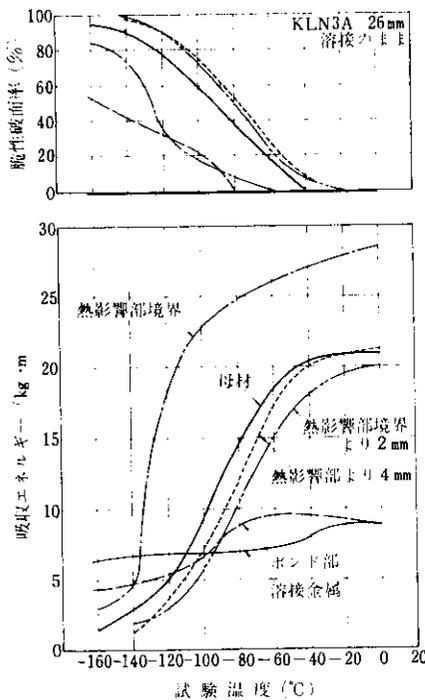


図 23 手溶接継手シャルピー試験結果

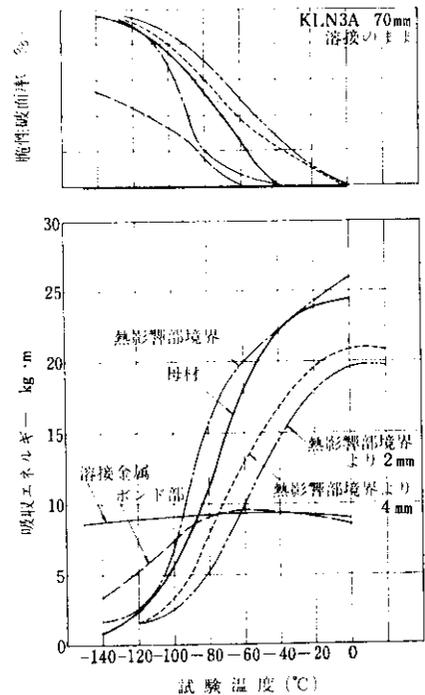


図 24 手溶接継手シャルピー試験結果

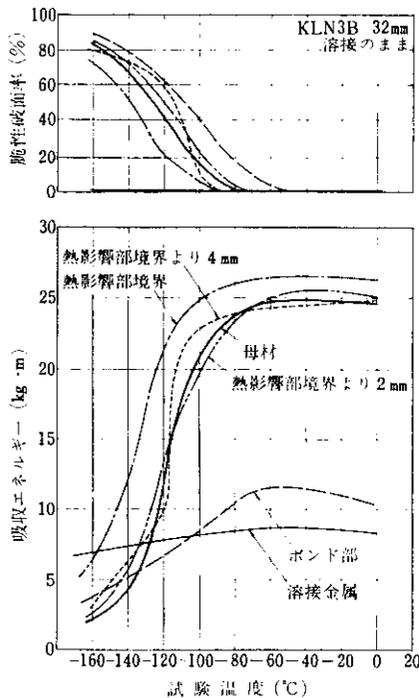


図 25 手溶接継手シャルピー試験結果

8. 結 び

極厚 3.5%Ni 鋼および強靱性 3.5%Ni 鋼が今回新たに製造された。これらの鋼板の開発経過、製造概要ならびに各種確性試験結果について報告

したが要約すると次のとおりである。

(1) 焼ならし型 3.5%Ni 鋼 KLN 3A, 調質型 3.5%Ni 鋼 KLN 3B とともに C 含有量を 0.07~0.10% にすることにより靱性向上を計り、熱処理法にて組織の細粒化を促進する。

(2) KLN 3A, B とともに引張試験, 曲げ試験の規格値を十分満足している。

(3) 母材の切欠き靱性は KLN 3A, KLN 3B とともに従来の 3.5%Ni 鋼の靱性よりはるかにすぐれており, KLN 3A 26mm は WES 規格「低温構造用鋼板材質判定基準」認定により, LT 29-III-110 G-90 A, 70 mm は LT 29-70 mm-90 G-60 A であり, いずれも ASTM 規格 A 203 E も満足している。KLN 3B は LT 45-IV-120 G-100 A でエチレン低温貯蔵タンク用鋼板としての十分な靱性を有する。

(4) KLN 3A および KLN 3B の加工性は一様伸びが十分あり, 応力除去焼鈍後も引張特性, 衝撃特性の低下がほとんどないかまたはわずかである。

(5) C 当量を低くしてあるため溶接最高硬さは KLN 3A で $H_{max}=357\sim380$, KLN 3B で $H_{max}=339$ と低く, 熱影響部の延性も十分であり, 溶接割れ阻止温度も 50°C 以下と良好である。

(6) 溶接継手性能もすぐれており, 引張特性, 曲げ特性および衝撃特性とも良好であり, 特に衝撃特性は入熱量が大きくなっても溶接部の切欠靱性はほとんど低下せずすぐれている。