

第 111 研 究 部 会

船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と
溶接の重畳効果およびガス加熱加工条件
の影響に関する研究

報 告 書

昭和 47 年 3 月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会

は し が き

本報告書は、日本船舶振興会の昭和46年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として日本造船研究協会が第111研究部会においてとりまとめたものである。

第111研究部会委員名簿（敬称略、五十音順）

部 会 長	木原 博（大阪大学）	
主 査	栖原二郎（九州大学）	
幹 事	安藤 見（日立造船）	池田一夫（神戸製鋼所）
	香川卓一（佐世保重工業）	金沢 武（東京大学）
	河合弘昌（三菱重工業）	栗田剛利（三菱重工業）
	黒川常夫（長崎大学）	高武淳夫（石川島播磨重工業）
	河野誠治（新日本製鉄）	越賀房夫（日本鋼管）
	辻 勇（九州大学）	寺井 清（川崎重工業）
	深江達郎（三菱重工業）	藤田 譲（東京大学）
	矢島 浩（三菱重工業）	
委 員	荒木睦郎（日本鋼管）	堀久北京朗（運輸省）
	印藤弘郷（三井造船）	大野 檀（三菱重工業）
	菅 尚史（佐世保重工業）	桑山則男（住友金属工業）
	小林三蔵（名村造船所）	酒井利夫（日立造船）
	修行 稔（長崎大学）	鈴木健之（三保造船所）
	中島正樹（三菱重工業）	野沢 登（函館ドック）
	久野正大（住友重機械工業）	深川宗光（石川島播磨重工業）
	宮下 毅（石川島造船化工機）	森 堅太郎（石原造船所）

討議参加者（敬称略50音順）

青木 満（神戸製鋼所）	安藤政明（日本鋼管）
石川兼保（三菱重工業）	因 克孝（佐世保重工業）
大塚秀明（石川島播磨重工業）	尾上泰光（新日本製鉄）
小幡良男（日立造船）	岡部利正（三菱重工業）
金子駿介（日立造船）	片岡繁夫（長崎大学）
川良重信（三菱重工業）	川辺智信（三菱重工業）
木下 勝（三菱重工業）	栗田義文（日本鋼管）
蔵田 登（日立造船）	豊貞雅宏（日立造船）
日野隆博（三菱重工業）	平部穎達（三菱重工業）
松村 隆（川崎重工業）	前原健治（日立造船）
宮田貞一（三菱重工業）	溝上達太（三菱重工業）
森 正治（三菱重工業）	山本 徹（住友重機）
幸村晟二郎（石川島造船化工機）	

目 次

1. まえがき	1
2. 試験内容	2
2.1 組織および硬度分布調査	2
2.2 低温引張試験	2
2.3 シャルピー衝撃試験	3
2.4 ディープノッチ試験	3
2.5 二重引張試験および ESSO 試験	6
2.6 残留応力計測	7
3. 船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果に関する研究	7
3.1 試験片製作要領	7
3.2 組織および硬度分布調査結果	8
3.3 低温引張試験結果	9
3.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果	10
3.5 ディープノッチ試験結果	10
3.6 二重引張試験および ESSO 試験結果	12
3.7 残留応力計測結果	14
3.8 各種靱性試験結果の評価について	15
3.9 結論	15
4. 船体用 50 キロ級高張力鋼の靱性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究	16
4.1 試験片製作要領	16
4.2 低温引張試験結果	17
4.3 組織および硬度分布調査結果	17
4.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果	18
4.5 ディープノッチ試験結果	19
4.6 二重引張試験および ESSO 試験結果	22
4.7 残留応力計測結果	25
4.8 各種靱性試験結果の評価について	25
4.9 試験結果に対する考察	26
4.9.1 材質におよぼす線状ガス加熱加工による熱履歴の影響	27
4.9.2 線状ガス加熱加工による残留応力が試験結果におよぼす影響	30
4.9.3 As Received 材の材質の差によって生ずる線状ガス加熱加工の影響の差	31
4.9.4 現場工作上における推奨条件の検討	31
4.10 結論	32
5. おまけ	34

1. ま え が き

各造船所における短期建造体制にともない、現場工作の合理化が徹底されつつある現状である。

溶接技術の進歩と相まって、船殻における鉄継手は溶接継手に次第に置き換えられて来たが、第2次大戦時に米国で建造された戦時標準船において頻発した脆性破壊事故の教訓から、脆性破壊防止対策上、数条の鉄継手をクラックアレスターとして残すことが慣例になっていた。

しかしながら、船殻の巨大化、ブロック建造法の発展、溶接技術の進歩、材料の改良等と相まって、今日では、完全溶接構造船が常識となっている。完全溶接構造船に対する現在の船級協会規則は、クラックアレスターとしての鉄継手を溶接継手に置き換える場合、その部分にE級鋼を用いることを規定している。

一方、船殻の巨大化にともない、50キロ級高張力鋼の使用量が急増してきたが、それに伴う現場工作基準は必ずしも確立されていない状態である。

日常各造船所において、船主および船級協会監督官との間のトラブルの原因になる問題点を解明し、実験による裏付資料により船主ならびに各船級協会の正式承認を得ることは、現場工作合理化の徹底上、効果大と評価され得るものである。さらに、船体の完全溶接構造超大型化にともない船殻の脆性破壊強度に関する検討は、重大災害防止対策上ますます重要な問題となってきた。

したがって、“E級鋼のクラックアレスターとしての効果への期待に関する現場工作上の問題”および“50キロ級高張力鋼使用量増加にともなう現場工作上の問題点”等を早急に解決することは、我が国各造船所にとって非常に効果の大きいものである。

この観点から、昭和44年4月発足した第111研究部会の研究として3ヶ年計画で以下の研究を実施した。

1) 船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果に関する研究

クラックアレスターの働きをさせる目的で使用されている Rounded Gunwale 部のE級鋼に、ブロック塔載用吊金具 (Eye Plate) 等を溶接により取付けることは、脆性破壊強度の低下を招く恐れがあるという見地により、船主および船級協会から禁止される場合が多く、ブロック塔載工程にトラブルを起こし、建造工程を乱す原因になることが多い。

したがって、クラックアレスターとして使用されているE級鋼について、冷間曲げ加工と溶接の重畳効果による脆性亀裂の発生・伝播停止性能の変化を明確に把握し、この種のトラブル解決に関するバックデータを得ることを目的とする。

本報告は、上記目的にしたがって実施してきた各種試験の結果¹²⁾を要約し、実用化への適否について若干検討を加えたものである。

なお、冷間曲げ加工においては、加工量の差による靱性変化が明確にあらわれないのではないかとの予測がなされたため、冷間引張加工と溶接を重畳したいわゆるTおよびT処理材に関する試験結果も併せて検討した。

試験内容ならびに供試試験片数を表 1.1 に示す。

2) 船体用50キロ級高張力鋼の靱性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究

船殻部材のひずみ取りおよび曲げ加工後の修正に線状ガス加熱加工が広く利用されている。

、船体用50キロ級高張力鋼 (HT50) は、すでに広く採用されているが、それに対する線状ガス加熱作業条件については未だ統一された見解がない。

したがって、HT50 に対する線状ガス加熱施行にあたっては加熱部の靱性劣化防止の観点から、加熱後の水冷による急速冷却を避けている現状である。

しかしながら、加熱後に水冷による急速冷却を実施すれば作業能率が大きく向上するので、HT50 に関して加熱後水冷した場合の加熱部の靱性を定量的に把握し、線状ガス加熱作業条件確立のためのバックデータを得ることを目的とする。

本報告は、上記目的にしたがって実施してきた各種試験の結果を要約し、実用条件決定への参考資料とするべくとりまとめたものである。

試験内容ならびに供試試験片数を表 1.2 および表 1.3 に示す。

2. 試験内容

前項の試験目的を達成するため、下記項目の試験を実施した。

2.1 組織および硬度分布調査

冷間加工と溶接を重畳した鋼板の材質変化および線状ガス加熱による熱履歴を受けた鋼板の材質変化を把握するため、各供試材加熱表層部および板厚中央部の顕微鏡組織ならびにビッカース硬さ分布を調査した。

顕微鏡組織写真は倍率300倍にて撮影し、ビッカース硬さは試験荷重10kgにて計測した。

2.2 低温引張試験

各供試材の低温における引張特性を把握するとともに、後述する脆性破壊発生特性の解析にも応用するため、直径6mm、平行部長さ30mm、Gage Length 24mm

のネジ付引張試験片を各供試材の板厚中央部より採取し、 $0^{\circ}\text{C}\sim-196^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で引張試験を実施した。

使用試験機は、長崎大学工学部の30 TON 島津 REH 型万能試験機である。試験要領は、既設の試験装置に冷却槽を取付け、試験片破断部附近にスポット溶接した 0.3 mm^{ϕ} の鉄-コンスタンタン熱電対により指示される設定温度を15分間以上保持して破断せしめた。

なお、温度と降伏点の間には下記の実験式が成立つことが明らかにされており、ディープノッチ試験結果の解析に応用した。

$$\sigma_y = \sigma_{oy} \cdot e^{\frac{k_y}{T_k}} \text{----- (2.1)}$$

ただし、 σ_y = 降伏点

T_k = 絶対温度

σ_{oy} , k_y = 材料定数

2.3 シャルピー衝撃試験

As Received 材に対する加工材の靱性変化を求めるための簡便な方法として、一般によく使用されている標準V-ノッチシャルピー衝撃試験を実施し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線を求めた。

試験機は、長崎大学工学部の30 Kg-m シャルピー衝撃試験機を用いた。

なお、シャルピー試験結果と後述する大形試験結果との間の相関性についても若干検討した。

2.4 ディープノッチ試験

ディープノッチ試験は、鋼板の脆性破壊発生特性を実験的に求める方法として広く利用されているが、本研究においては、その試験目的に応じて切欠き形状を変えた試験片を用いた。

すなわち、Rounded Gunwale 部の Eye Plate 除去跡に残っている可能性のある微小亀裂、いわゆる表面ノッチからの脆性破壊発生条件を求める試験片は、全幅表面ノッチ型試験片およびサイドスリット付表面ノッチ型試験片とした。

また、ガス加熱加工材においては実用上、上記のような表面亀裂の発生は想定し難いため、標準型(サイドスリット型)試験片とした。

これらの試験には、三菱重工業株式会社長崎研究所に設置してある800 TON 横型 Test Rig を使用し、ピン間距離3mとして実験した。

試験は、 $-196^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で行い、 -196°C 以外の試験温度では破断面両側・両面に取付けた冷却槽に液体窒素を注入しながら、破断部近傍を間接

的に冷却せしめた、試験温度は試験片断面近傍の表面にスポット溶接した鉄-コニスタン熱電対によって計測した。

上記各試験片についての試験結果解析法を以下に示す。

(1) 標準ディープノッチ試験結果解析法

ディープノッチ試験結果の解析に一般に用いられているGriffith-Orowan-Irwinのエネルギー条件式を応用した以下の諸式を使用して、試験結果を整理した。

Griffith-Orowanのエネルギー条件式

$$\frac{\pi \sigma^2 C}{2E} \geq S \text{ ---- (平面応力状態) ---- (2.2)}$$

ただし、E = ヤング率

S = 塑性表面エネルギー

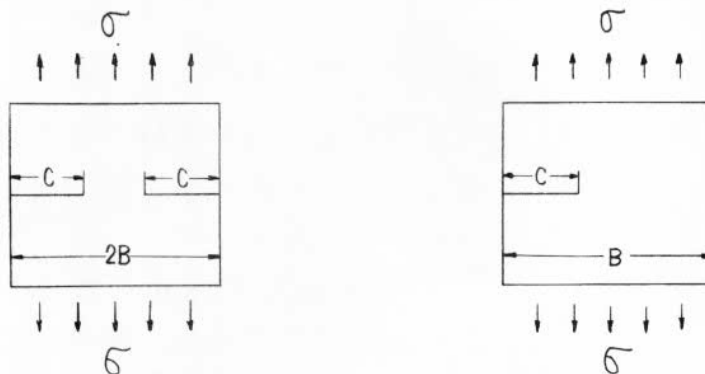
Irwinの修正エネルギー条件式

$$\frac{\pi [f(\psi) \cdot \sigma]^2 C}{2E} \geq S \text{ ---- (平面応力状態) ---- (2.3)}$$

$$f(\psi) = \sqrt{\frac{2}{\pi \psi} \left(\tan \frac{\pi \psi}{2} + 0.1 \sin \pi \psi \right)} \text{ ---- (両側切欠きの場合) ---- (2.4)}$$

$$f(\psi) = \sqrt{\frac{2}{\pi \psi} \tan \frac{\pi \psi}{2}} \text{ ---- (片側切欠きの場合) ---- (2.5)}$$

$$\psi = \frac{C}{B}$$



木原、池田ら³⁾により求められた、低応力脆性破壊発生時の塑性表面エネルギーの限界値 S_i と温度 T_K (絶対温度)との関係式

$$S_i = S_{oi} \cdot e^{\frac{-R_i}{T_K}} \text{ ---- (2.6)}$$

ただし、 S_{oi} 、 R_i = 材料定数

使用応力 σ を仮定した場合の脆性破壊発生温度 T_K と許容限界亀裂長さ $2C$ の関係式

$$\frac{\pi \left[\frac{1}{n} \sigma_{0y} \cdot e^{\frac{K_{Ic}}{T_K}} \right]^2 C}{2E} = S_{0i} \cdot e^{\frac{-K_{Ic}}{T_K}} \quad \text{---} (\sigma = \frac{1}{n} \sigma_y \text{とした場合}) \text{---} \quad (2.7)$$

$$\frac{\pi \sigma^2 C}{2E} = S_{0i} \cdot e^{\frac{-K_{Ic}}{T_K}} \quad \text{---} \quad (2.8)$$

なお、ディープノッチ試験結果より脆性破壊発生に対する塑性表面エネルギーの限界値 S_{li} は、次式により求めた。

$$S_{li} = \frac{\pi [f(\mu) \cdot \sigma_g]^2 C}{2E} \quad \text{---} \quad (2.9)$$

ただし、 σ_g = グロス応力

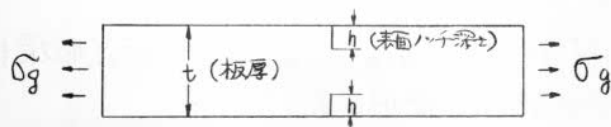
(2) 表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法

以下の諸式を使用して試験結果を整理した。深さ h の表面ノッチが板の表裏両面に存在する場合の、脆性破壊発生特性に対する Fracture Toughness の Parameter K_{Ic} を与える式

$$K_{Ic}^2 = \frac{\pi \sigma^2 h}{1 - 0.177 \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2} \quad \text{---} (\text{無限板厚の場合}) \text{---} \quad (2.10)$$

$$K_{Ic}^2 = \frac{\pi [f(\mu) \cdot \sigma_g]^2 h}{1 - 0.177 \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2} \quad \text{---} (\text{有限板厚の場合}) \text{---} \quad (2.11)$$

$$\text{ただし、} f(\mu) = \sqrt{\frac{t}{\pi h} \left(\tan \frac{\pi h}{t} + 0.1 \sin \frac{2\pi h}{t} \right)} \quad \text{---} \quad (2.12)$$



使用応力 σ を仮定した場合の脆性破壊発生限界温度 T_K と許容限界表面切欠き深さ h の関係式

$$K_{0Ic} \cdot e^{\frac{-K_{Ic}}{T_K}} = \sqrt{\frac{\pi \left(\frac{1}{n} \sigma_{0y} \cdot e^{\frac{K_{Ic}}{T_K}} \right)^2 h}{1 - 0.177 \left(\frac{1}{n} \right)^2}} \quad \text{---} (\sigma = \frac{1}{n} \sigma_y \text{とした場合}) \text{---} \quad (2.13)$$

$$K_{0Ic} \cdot e^{\frac{-K_{Ic}}{T_K}} = \sqrt{\frac{\pi \sigma^2 h}{1 - 0.177 \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2}} \quad \text{---} \quad (2.14)$$

(3) サイドスリット付表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法

今回のサイドスリット付表面ノッチ型試験片においては、サイドスリットの影響が大きいので(2.9)式を基礎とし、表面ノッチによる応力修正係数((2.12)式)を考慮した次式により試験結果を整理した。

$$S_i = \frac{\pi [F(\gamma) \cdot \sigma_g]^2 C}{2E} \text{----- (2.15)}$$

ただし $F(\gamma) = f_1(\gamma) \cdot f_2(\gamma)$

$f_1(\gamma)$ = サイドスリットによる応力修正係数((2.4)式による)

$f_2(\gamma)$ = 表面ノッチによる応力修正係数((2.12)式による)

2.5 二重引張試験および ESSO 試験

冷間曲げ加工と溶接の重畳により材質変化を生じた部分、およびガス加熱加工により材質変化を生じた部分の脆性亀裂伝播停止特性を求めるため、温度勾配型標準二重引張試験および ESSO 試験を実施した。

使用試験機は150 TON補助引張装置を装備した、前述の800 TON横型 Test Rig であり、試験片ピン間距離はディープノッチ試験の場合と同様3mとした。試験片温度分布は、冷却槽に液体窒素、ドライアイス、アルコールおよび水等を適当に注入することによって調節した。温度計測は、ディープノッチ試験の場合と同様、鉄-コンスタンタン熱電対を試験片表面に Percussion 溶接して測定した。

なお試験は、試験片幅に対する停止亀裂長さの影響および残留応力の影響等を考慮して、亀裂が試験片亀裂伝播部幅の60%前後で停止するような条件で行なった。

試験結果の整理には、Griffith - Orowan - Irwin の不安定破壊に対するエネルギー条件式を適用し、以下の諸式を使用した。

Fracture Toughness の Parameter K_{Ic} 値を与える式

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi C} \text{---(無限板の場合)----- (2.16)}$$

$$K_{Ic} = f(\gamma) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \text{---(有限板の場合)----- (2.17)}$$

$$\text{ただし、} f(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{\pi \gamma} \tan \frac{\pi \gamma}{2}} \text{----- (2.18)}$$

$$\gamma = \frac{C}{B}$$

C = 停止亀裂長さ (mm)

B = 試験片(亀裂伝播部)の幅 (mm)

σ_g = グロス応力 (kg/mm^2)

K_{Ic} 値と亀裂伝播停止限界温度 T_k との関係式

$$K_{Ic} = K_0 \cdot e^{\frac{-T_0}{T_k}} \text{----- (2.19)}$$

ただし、 K_0, T_0 = 材料定数

温度勾配型標準二重引張試験, ESSO 試験結果より求めた K_{Ic} 値を用いて、
実際の構造物での脆性亀裂阻止能力を推定する場合の関係式⁴⁾⁵⁾

$$C_{eff.} = 0.1C + 190 \text{ (mm)} \text{----- (2.20)}$$

ただし、 $C_{eff.}$ = 二重引張試験あるいは ESSO 試験結果に対する有効亀裂長さ (mm)

C = 実際の構造物中を伝播した脆性亀裂の長さ (mm)

2.6 残留応力計測

ディープノッチ試験および二重引張試験, ESSO 試験結果を解析する場合、
加工材については残留応力の影響を考慮しなければならない。ディープノッチ
試験片については、ノッチ底の残留応力を計測することが困難であったので、
二重引張試験片についてのみ試験片表面および板厚断面の残留応力分布を計測
した。

試験片表面の残留応力計測要領は、Gage Length 2mm の 2 方向抵抗線ひずみ
ゲージを用い、所定の位置に貼布されたゲージの周囲を深さ約 10mm 切削する
ことにより残留ひずみを解放して求めた。

試験片表面の残留ひずみから残留応力を求めるには次式を使用した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \end{aligned} \right\} \text{----- (2.21)}$$

ただし、 σ_x, σ_y = x 方向, y 方向の残留応力

ν = ポアソン比

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ = x 方向, y 方向のひずみ

3. 船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果に関する研究

3.1 試験片製作要領

先に述べたごとく、Rounded Gunwale 部に Eye Plate を溶接した場合を想定
するならば、供試材に冷間曲げ加工をほどこし、溶接ビードを置いたものを試
験片とすべきであろう。しかし、曲がったままの試験片で各種の試験を実施す
るのは困難であり、試験結果の解析も面倒なので、図 3.1 に示す要領で平板試

験片を製作した。

すなわち、Rounded Gunwale部と同様な冷間曲げ加工を与えたのち、 $930^{\circ}\text{C} \times 0.5 \sim 1.0^{\text{Hr}}$ A.C.ノルマ処理をほどこして、先の加工の影響を取除き、次にこれらを平らに伸ばして、表裏両面に溶接ビードを置いたB処理材、また、冷間引張加工後溶接ビードを置いたT処理材、T'処理材等を供試した。B処理材加工にあたり曲げ加工はいずれもプレスにて行なった。また冷間曲げ加工後ノルマ処理をほどこしたものを再ノルマ材と呼ぶこととした。

T処理材は、亀裂の発生・伝播方向が、引張予ひずみの方向と一致するように加工したものであり、T'処理材は亀裂の発生・伝播方向が引張予ひずみの方向に対して直交するように考慮して製作したものである。

B処理材、T処理材、T'処理材等に使用した溶接棒は、現場の実状に基づいて、全て JIS D5016とした。

Rounded Gunwale 部を対象にしたので、供試材として板厚30mmのKEN鋼とK5E鋼を使用した。供試材のMill Sheetによる化学成分ならびに機械的性質を表3.1に、溶接条件ならびにビードの置き方を表3.2に示す。

なお、ディープノッチ試験片製作にあたって、K5E鋼の各供試材については、サイドスリット付表面ノッチ型試験片を用いたが、サイドスリット長さ(120mm)に対して表面ノッチ深さ(2.8mm)が浅く、脆性亀裂が表面ノッチ底部すなわち溶接熱影響部から必ずしも発生しないことが判明した。そこでKEN鋼の場合は全幅表面ノッチとし、ノッチ深さを6mm程度にすることによって、低応力脆性破壊が発生し易くなるよう工夫した。

また二重引張試験片においては、余盛除去跡を亀裂が直進・伝播するように配慮し、残留応力のバランスを考慮して、試験片表裏両面に各3層3条溶接ビードを置いた。

3.2 組織および硬度分布調査結果

As Received材と再ノルマ材の顕微鏡組織を、写真3.1および写真3.2に示す。写真に見られるごとく、KEN鋼は比較的良好な再ノルマ処理が行なわれたものと判断されるが、K5E鋼はAs Received材と同等な組織を再現することは出来なかった。しかしながら、後述するごとく、再ノルマ材もK5E鋼に対するNK規格値($\sqrt{E-17} \geq 6.2 \text{ kg}^{-1/2}\text{mm}$)を充分満足しており、供試材として適合する材料であると判断した。

写真3.3、写真3.4は溶接(ビード置き)によるT処理材、T'処理材熱影響部の顕微鏡組織である。

ビッカース硬度調査結果の一例として、T処理材3%加工材およびT'処理材3%加工材についての硬度分布を、図3.2～図3.5に示す。

一般的傾向として、KEN 鋼、K5E 鋼とも加工材の板厚中央部の硬さは上昇しているが、冷間加工の影響によるものか、あるいは溶接熱影響によるものか判然としない。

最高硬さは、KEN 鋼の場合 258^{Hv}程度、K5E 鋼の場合 325^{Hv}程度である。板厚面の硬さ分布は、表面溶接の影響により変化しているが、板表面より約 2～3 mm の深さが最も硬く、約 6～7 mm で板中央部の硬さに漸近している。

3.3 低温引張試験結果

先に試験内容の項で述べたごとく、各供試材の低温引張特性を求めディープノッチ試験結果の解析に用いるため、6_{mm}^φ試験片により引張試験を実施した。試験片は各供試材とも板厚中央部、圧延方向より採取した。

T₁処理材、T₂処理材についての試験片採取要領を図 3.6 に、試験結果を図 3.7 ～図 3.12 に示す。また、全供試材についての降伏点と温度との関係を図 3.13 に示す。試験結果を要約すると次のごとくなる。

KEN 鋼について

As Received 材と再ノルマ材は、ほぼ同等の引張特性を有する。

また、B₁処理材、T₁処理材およびT₂処理材の各試験結果を比較しても、加工方法および加工量の違いによる引張特性の差は認め難く、かつ As Received 材、再ノルマ材との差も認め難い。

K5E 鋼について

As Received 材と再ノルマ材の引張特性はかなり異なることが認められ、B₁処理材とT₁処理材およびT₂処理材とは、再ノルマ材、As Received 材の引張特性に依存して差が認められる。しかしながら、KEN 鋼の場合と同様冷間加工および溶接による影響は認め難い。

降伏点と温度との間の実験式を求めると次のごとくなる。

$$\text{KEN 鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \\ \text{再ノルマ材} \\ \text{T}_1\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{T}_2\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{B}_1\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{B}_2\text{処理材 5\% 加工材} \end{array} \right\} \text{-----} \sigma_y = 26.5 \cdot e^{\frac{102.6}{T_K}} \text{-----} (2.22)$$

$$\text{K5E 鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \\ \text{T}_1\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{T}_2\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{再ノルマ材} \\ \text{B}_1\text{処理材 3\% 加工材} \\ \text{B}_2\text{処理材 5\% 加工材} \end{array} \right\} \text{-----} \sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}} \text{-----} (2.23)$$

3.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

As Received材, 再ノルマ材ならびに各加工材より, 図3.6に示した要領で標準V-ノッチシャルピー衝撃試験片を採取し, 切欠靱性を調べた。

T処理材, T²処理材についてのシャルピー試験結果の吸収エネルギー～温度, 脆性破面率～温度遷移曲線を図3.14～図3.27に示す。

また, 全供試材のシャルピー試験結果による各種遷移温度を表3.3, 表3.4および図3.28, 図3.29に示す。

試験結果を要約すると次のごとくなる。

KEN鋼について

- (1) As Received材, 再ノルマ材および各加工材とも, KEN鋼に対するNK規格値 ($\sqrt{E-10} \geq 6.2 \text{ kg-m}$) を充分満足している。
- (2) As Received材と再ノルマ材はほぼ同一の遷移温度を示している。
- (3) As Received材とT処理材0%加工材との比較, および再ノルマ材とB処理材0%加工材の各表層部の比較から明らかなごとく, 溶接熱影響により試験結果は若干悪くなっている。
- (4) B処理材, T処理材およびT²処理材とも冷間加工の影響は現われていない。

K5E鋼について

- (1) B処理材製作過程における再ノルマ処理に若干の問題があったが, 再ノルマ材の表層部, 中央部の衝撃値はK5E鋼に対するNK規格値 ($\sqrt{E-17} \geq 6.2 \text{ kg-m}$) を充分満足している。
- (2) K5E鋼の場合, 溶接による影響はほとんど現われていない。
- (3) 冷間加工と溶接を重ねた加工材の中央部には, 若干の靱性劣下が認められる。

3.5 ディープノッチ試験結果

As Received材, 再ノルマ材および各加工材の脆性破壊発生特性を求めるため, ディープノッチ試験を実施した。試験片形状を図3.30, 図3.31に, 試験結果を表3.5, 表3.6, 図3.32～図3.39および表3.7, 表3.8に示す。

また, T処理材, T²処理材の試験後の破面状況を写真3.5～写真3.9に示す。

KEN鋼のAs Received材と再ノルマ材とでは, 組織および硬さ調査, 引張試験およびシャルピー試験結果の何れを比較しても, ほとんど相異が見られなかった。図3.34より明らかであるが, 脆性破壊発生特性もAs Received材と再ノルマ材はほぼ同等であるとみなされる。

したがって, T処理材0%加工材とB処理材0%加工材も, 本質的に同等とみなした。また, 加工量の差は認められなかった。

As Received材あるいは再ノルマ材を基準として、T処理材、T'処理材、B処理材の試験結果を比較すると、明らかに後者が良くなっている。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{array}{l} \text{KEN鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received材} \\ \text{再ノルマ材} \end{array} \right\} \text{-----} K_{Ic} = 327 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}} \text{-----} (2.25) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{T処理材0\%加工材} \\ \text{T処理材3\%加工材} \\ \text{T'処理材3\%加工材} \\ \text{B処理材0\%加工材} \\ \text{B処理材3\%加工材} \\ \text{B処理材5\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} K_{Ic} = 407 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}} \text{-----} (2.26) \end{array}$$

K5E鋼においては、溶接の影響により脆性破壊発生特性は若干悪くなるようである。

しかしながら、B処理材およびT処理材何れの場合でも、加工量の差による有意差は認め難い。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{array}{l} \text{K5E鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received材} \text{-----} S_i = 268.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{-----} (2.27) \\ \text{T処理材0\%加工材} \\ \text{T処理材3\%加工材} \\ \text{T'処理材3\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} S_i = 168.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{-----} (2.28) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{再ノルマ材} \text{-----} S_i = 133.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{-----} (2.29) \\ \text{B処理材0\%加工材} \\ \text{B処理材3\%加工材} \\ \text{B処理材5\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} S_i = 108.5 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{-----} (2.30) \end{array}$$

試験結果を要約すると次のごとくなる。

KEN鋼について

- (1) 脆性破壊発生特性についても、先の小型試験片による調査結果と同様、As Received材と再ノルマ材とは同等とみなされる。したがって、発生特性も再ノルマ処理によって影響を受けなかったと考えられる。
- (2) B処理材0%加工材およびT処理材0%加工材は、各々再ノルマ材、As Received材に溶接ビードを置いたままのものであり、本質的に両者の脆性亀裂発生特性は同等であると考えられる。また、実験点の有意差も認められない。
- (3) B処理材、T処理材、T'処理材とでは試験結果に有意差は認められず、したがって、引張加工および曲げ加工、何れの場合でも本試験に供試した程度の加工では、加工の影響は少ないと判断される。

(4) 脆性破壊発生特性におよぼす溶接の影響はあたかも良くなっているかのように見えるが、試験結果におよぼす種々要因を検討する必要がある。

(5) 使用応力 12.5 kg/mm^2 、許容限界切欠深さ 3 mm とした場合の各供試材の脆性亀裂発生限界温度を求め、その発生限界温度が溶接残留応力により 90°C 高温側に移動する⁶⁾と仮定すれば、下記のごとくなる。

KEN 鋼	{	As Received 材	}-----	-125°C
		再ノルマ材		
	{	T 処理材 0% 加工材	}-----	-130°C
		T 処理材 3% 加工材		
		T' 処理材 3% 加工材		
		B 処理材 0% 加工材		
		B 処理材 3% 加工材		
		B 処理材 5% 加工材		

K5E 鋼について

(1) 脆性破壊発生特性は溶接熱影響により若干低下する。

(2) 冷間引張加工3%および曲げ加工3~5%の何れの場合についても、脆性破壊発生特性におよぼす加工の影響はほとんど認められない。

(3) 使用応力 16.0 kg/mm^2 、許容限界亀裂長さ 20 mm とした場合の、各供試材の脆性破壊発生限界温度を求め、その発生限界温度が溶接残留応力により 90°C 高温側に移動する⁶⁾と仮定すれば、下記のごとくなる。

K5E 鋼	{	As Received 材	}-----	-99°C
		T 処理材 0% 加工材		
	{	T 処理材 3% 加工材	}-----	-93°C
		T' 処理材 3% 加工材		
	{	再ノルマ材	}-----	-90°C
		B 処理材 0% 加工材		
	{	B 処理材 3% 加工材	}-----	-87°C
		B 処理材 5% 加工材		

3.6 二重引張試験および ESSO 試験結果

As Received 材、再ノルマ材および各加工材の脆性亀裂伝播停止特性を求めるために、温度勾配型標準二重引張試験および ESSO 試験を実施した。

二重引張試験を実施し、脆性亀裂が伝播しなかった場合、ESSO 試験片に再加工し、再試験した。

試験結果を表 3.9、表 3.10、図 3.40~図 3.43 および表 3.11、表 3.12 に、試験後の破面状況の数例を、写真 3.10~写真 3.12 に示す。

KEN 鋼についてはB処理材製作過程における再ノルマ処理は適切であったと考えられ、脆性亀裂伝播停止特性も再ノルマ処理によって影響を受けなかったものと考えられる。したがって、As Received 材と再ノルマ材は同等の脆性亀裂伝播停止特性を有するものとみなした。B処理材0%加工材およびT処理材0%加工材は、先に述べたごとく本質的には差がないものと考えられるので、両者は同等の脆性亀裂伝播停止特性を有するものとみなした。

また、B処理材、T処理材およびT'処理材の間にも、試験結果に有意差はないものとみなした。

しかしながら、溶接の影響により若干良くなっていると認められる。これは、表層部に残っている溶着金属の靱性が母材より良いためと考えられる。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{array}{l} \text{K E N 鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \\ \text{再ノルマ材} \end{array} \right\} \text{-----} \ln K_c = -3.28 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 17.84 \text{-----} (2.31) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{T処理材0\%加工材} \\ \text{T処理材3\%加工材} \\ \text{T'処理材3\%加工材} \\ \text{B処理材0\%加工材} \\ \text{B処理材3\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} \ln K_c = -3.28 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 18.53 \text{-----} (2.32) \end{array}$$

K5E 鋼については、脆性亀裂伝播停止特性におよぼす溶接の影響も冷間加工の影響もほとんど認められない。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{array}{l} \text{K 5 E 鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \\ \text{T処理材0\%加工材} \\ \text{T処理材3\%加工材} \\ \text{T'処理材3\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 16.03 \text{-----} (2.33) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{再ノルマ材} \\ \text{B処理材0\%加工材} \\ \text{B処理材3\%加工材} \end{array} \right\} \text{-----} \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.37 \text{-----} (2.34) \end{array}$$

また、図 3.42、図 3.43 は、想定使用温度 0℃、-10℃における、As Received 材、再ノルマ材および各加工材についての脆性亀裂伝播停止特性を使用応力と停止限界亀裂長さの関係で示したものである。

表 3.11 および表 3.12 は、使用応力および限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度を示したものである。

試験結果を要約すると次のごとくなる

K E N 鋼について

(1) B処理材製作過程におけるノルマ処理は適切であったと考えられ、脆性

亀裂伝播停止特性も再ノルマ処理によって影響を受けなかったものと考えられる。

(2) 脆性亀裂伝播停止特性におよぼす冷間加工の影響は、曲げ加工量3~5%、引張加工量3%程度ではほとんど現われない。

(3) 溶接の影響により試験結果が若干良くなっているが、その理由としては、表層部に残っている溶着金属の靱性が母材より良いためと考えられる。

(4) E級鋼に対するNK規格要求値の考え方、すなわち応力 12.5 kg/mm^2 （室温降伏点の $\frac{1}{2}$ ）で停止限界亀裂長さ 240 mm 、換言すれば要求 K_{Ic} 値 $=343 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ を示す温度を求めると下記のごとくなる。

KEN鋼	As Received 材	}	----- 0°C
	再ノルマ材		
	T処理材0%加工材	}	----- -15°C
	T処理材3%加工材		
	T処理材3%加工材		
	B処理材0%加工材		
	B処理材3%加工材		

K5E鋼について

(1) As Received材と再ノルマ材との試験結果より明らかなごとく、脆性亀裂伝播停止特性についても両者の間にかなり差がある。

(2) As Received材と再ノルマ材には差があるが、冷間加工の影響および溶接の影響は認められない。

(3) E級鋼に対するNK規格要求値の考え方、すなわち応力 16.0 kg/mm^2 （室温降伏点の $\frac{1}{2}$ ）で停止限界亀裂長さ 240 mm 、換言すれば要求 K_{Ic} 値 $=439 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ を示す温度を求めると下記のごとくなる。

K5E鋼	As Received 材	}	----- -15°C
	T処理材0%加工材		
	T処理材3%加工材		
	T処理材3%加工材		
	再ノルマ材	}	----- 4°C
	B処理材0%加工材		
	B処理材3%加工材		

3.7 残留応力計測結果

K5E鋼T処理材0%加工材の二重引張試験片における、表面の残留応力計測結果を、図3.44~図3.48に示す。

二重引張試験片表面の亀裂伝播部近傍には、溶接ビード余盛除去跡平行方向

および直角方向に、かなり大きな引張残留応力が認められる。

図 3.48 は、二重引張試験における目標脆性亀裂停止点、すなわち亀裂伝播部入口から 300mm の位置での表面の残留応力分布を示したものである。

3.8 各種靱性試験結果の評価について

一般船体用軟鋼 KEN 鋼、船体用 50 キロ級高張力鋼 K5E 鋼の As Received 材、再ノルマ材および各加工材について実施した、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果、ディープノッチ試験結果および二重引張試験結果・ESSO 試験結果の相関性および評価について検討してみよう。

V-ノッチシャルピー衝撃試験結果については、靱性を的確に示すと認められている 50% 脆性破面率遷移温度 $vTrs$ を評価の基準にする。

KEN 鋼のディープノッチ試験結果に対しては、使用応力 $12.5 \frac{kg}{mm^2}$ (室温降伏点の $\frac{1}{2}$)、許容限界表面切欠深さ 3mm に対する脆性破壊発生限界温度 $12.5 T_{Ih}=3$ を評価の基準にし、K5E 鋼のディープノッチ試験結果に対しては、使用応力 $16.0 \frac{kg}{mm^2}$ (室温降伏点の $\frac{1}{2}$)、許容限界亀裂長さ 20mm (すなわち $C=10mm$) に対する脆性破壊発生限界温度 $16 T_{Ic}=10$ を評価の基準にする。

さらに、二重引張試験結果・ESSO 試験結果については、E 級鋼に対する NK 規格要求値、すなわち、KEN 鋼に対しては、使用応力 $12.5 \frac{kg}{mm^2}$ 、停止限界亀裂長さ 240mm、換言すれば、要求 IK_c 値 $= 343 \frac{kg\sqrt{mm}}{mm^2}$ を示す温度 $12.5 T_{aIK_c}=343$ 、また、K5E 鋼に対しては、使用応力 $16.0 \frac{kg}{mm^2}$ 、停止限界亀裂長さ 240mm、換言すれば、要求 IK_c 値 $= 439 \frac{kg\sqrt{mm}}{mm^2}$ を示す温度 $16 T_{aIK_c}=439$ を評価の基準にする。

本試験に供試した程度の材料では、以上の各基準温度に対する材質的バラツキは、 $vTrs$ では 20~30°C 程度以下、 $12.5 T_{Ih}=3$ 、 $16 T_{Ic}=10$ 、 $12.5 T_{aIK_c}=343$ 、 $16 T_{aIK_c}=439$ 等では 15°C 程度以下と考えられる。したがって、冷間加工および溶接の重畳により、上記の各基準温度が材質的バラツキの範囲を越えて高温側に変化した場合、冷間加工および溶接の重畳による明瞭な悪影響が認められたものと判断される。

前項までに述べた各試験結果から、As Received 材、再ノルマ材および各加工材についての、 $vTrs$ 、 $12.5 T_{Ih}=3$ 、 $16 T_{Ic}=10$ 、 $12.5 T_{aIK_c}=343$ 、 $16 T_{aIK_c}=439$ 等を求め、図 3.49、図 3.50 に示す。ただし、図 3.49、図 3.50 に示した $vTrs$ は、各供試材の表層部より採取した試験片による結果である。

図 3.49、図 3.50 より明らかなごとく、KEN 鋼、K5E 鋼に、表面での加工量 3~5% 程度の冷間曲げ加工あるいは 3% 程度の冷間引張加工と溶接を重畳しても、明瞭な靱性劣化は認められない。

3.9 結論

クラックアレスターの働きをさせる目的で使用されている Rounded Gunwale

部のE級鋼に、ブロック塔載用吊金具(Eye Plate)などを溶接することの可否を明らかにするため、一般船体用軟鋼KEN鋼および船体用50キロ級高張力鋼K5E鋼について、冷間曲げ加工および冷間引張加工と溶接の重畳による脆性破壊発生および伝播停止特性の変化を実験的に求めた。

結論として次のことが判明した。

(1) 表面での加工量3~5%程度の冷間曲げ加工あるいは3%程度の冷間引張加工と溶接を重畳しても、明瞭な靱性劣化は認められず、実用上問題にならぬと考えられる。

(2) 大型船のRounded Gunwale部にEye Plateなどを溶接しても実用上は問題無いと考えられる。

4. 船体用50キロ級高張力鋼の靱性におよぼすガス加熱加工条件の影響²⁾に関する研究

4.1 試験片製作要領

線状ガス加熱加工にはバーナーを直線的に走らすStraight Line Heatingと、バーナーを円弧に動かして行なうWeaving Line Heatingとがあるが、今回はStraight Line Heatingのみを行なった。

ガス加熱により曲げられたままの状態で試験を実施するのは非常に困難であり、試験結果の解析も面倒になる。さらにSevere Sideの条件で試験した方が安全Sideの結論が得られるとの見地から、供試材の表裏両面にガス加熱加工をほどこして平板試験片を製作した。

二重引張試験片およびESSO試験片製作にあたっては、加熱線上を脆性亀裂が伝播するように配慮し、残留応力のバランスを考慮して、試験片表裏両面を各3条加熱した(図4.1)。

試験片製作に使用した線状ガス加熱条件を、表4.1および図4.2に示す。温度計測にあたっては、移動熱源のため板表面の温度を測定することは非常に困難であるので、板表面下1mmの位置にC-A熱電対をPurcussion溶接して測定した(図4.2)。

以下に述べる最高加熱温度とは、図にも記したとおり、すべて板表面下1mmの最高到達温度であり、水冷開始温度は板表面下1mmの点で水冷効果の現われたときの温度である。なお、最高加熱温度が800℃で、水冷開始温度が500℃の場合を、800℃ A.C. → 500℃ W.C.と表わす。

本年度は、主に最高加熱温度を700℃~900℃とし、空冷したものや水冷開始温度を種々変えたものについて試験を実施した。しかし、これらの温度は、全て、加熱面直下1mmの位置での最高到達温度で制御した。また、水冷開始

温度は、表4.1に示すごとく、ガストーチと水ノズルの間隔を変化させ、所定の水冷開始温度が得られるようにセットした。なお、各試験片に所定の条件のガス加熱が施されているか否かを判定するため、各試験片について、端から100 mmの位置にC-A熱電対をPurcussion溶接し温度測定を行なった。

供試材としては、板厚30 mmの船体用50キロ級高張力鋼(HT50)日本海事協会(NK)規格A級鋼(K5A鋼)、D級鋼(K5D鋼)およびE級鋼(K5E鋼)、板厚12.7 mmのD級鋼(K5D鋼)を使用した。供試材のMill Sheetによる化学成分ならびに機械的性質を表4.2に示す。以下板厚30 mmの場合にはK5D鋼(30)、板厚12.7 mmの場合にはK5D鋼(12.7)等と表わす。

4.2 低温引張試験結果

K5D鋼(12.7)について低温引張試験を実施した。低温引張試験片採取要領を図4.3に、試験結果を図4.4に示す。また全供試材についての降伏点と温度との関係を図4.5に示す。

試験結果から、降伏点と温度との間の実験式を次のごとく定めた。

$$\text{K5A鋼(30 As Received材)} \cdots \cdots \sigma_y = 25.5 \cdot e^{\frac{95.0}{T_K}} \cdots \cdots (4.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{K5D鋼(30 As Received材)} \\ \text{K5E鋼(30 As Received材)} \end{array} \right\} \cdots \cdots \sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}} \cdots \cdots (4.2)$$

$$\text{K5D鋼(12.7 As Received材)} \cdots \cdots \sigma_y = 28.4 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}} \cdots \cdots (4.3)$$

4.3 組織および硬度分布調査結果

K5D鋼(30)およびK5E鋼(30)について、高周波加熱式全自動変態点測定装置により、800℃空冷に類似した熱サイクルを与えて、計測した変態点を図4.6に示す。また、K5A鋼(30)、K5D鋼(30)、K5E鋼(30)およびK5D鋼(12.7)について、種々の条件で実施した線状ガス加熱部のマクロ組織および顕微鏡組織を写真4.1～写真4.23に示す。

K5D鋼(30)の加熱表面下1.0 mmにおける組織について述べれば、A_{c1}変態点直上の700℃～800℃の温度範囲に加熱された場合、冷却条件によって異なり、急冷されたものは高炭素マルテンサイトが生成しており、冷却速度が緩やかな空冷の場合には、細粒ベイナイトが生成している。また、加熱温度800℃～900℃の場合、加熱直後から水冷されたものは勿論のこと、575℃程度になってから水冷を開始したものにも、部分的にマルテンサイトが生成している。しかし、500℃程度になってから水冷を開始したものにはマルテンサイトは生成していない。

なお、変態点測定結果よりA_{c1}変態点は650℃～700℃、A_{r1}変態点は約550℃と思われる。

K5A鋼(30)，K5D鋼(30)，K5E鋼(30)およびK5D鋼(12.7)について、種々の条件で実施した線状ガス加熱部の、ビッカース硬さ分布を、図4.7～図4.47に示す。さらに、加熱表面下0.5mmにおけるビッカース硬さを表4.3に一覧する。

加熱部の硬度分布より概略下記のことがいえる。

(1) 加熱表面下1mmの温度で600℃～700℃に加熱したもののでも加熱表面下0.5mmにおけるビッカース硬さは~~々々~~高くなっており、線状ガス加熱の影響が明らかにみられる。

(2) 700℃～1000℃に加熱後空冷した場合は、加熱部はあまり硬化しない。

(3) A_{c1}変態点程度以上に加熱し、ただちに水冷するとかかなり硬化し、加熱温度が上昇するにつれ急激に硬くなる。

(4) 同一加熱温度でも、水冷開始温度が高い程硬くなる。また、水冷開始温度が500℃程度のときは、As Received材に比べて若干硬くなっているものの、空冷した場合とあまり変わらない。

4.4 ヴーノッチシャルピー衝撃試験結果

As Received材ならびに加熱加工材より、ヴェーノッチシャルピー衝撃試験片を図4.3の要領で採取し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度についてそれぞれの遷移曲線を求めた。

試験片は、板表面より1mm削って採取し、板厚面にノッチ加工したので、試験片断面にしめるガス加熱熱影響部の割合は、当然板厚全体のそれと比べて大きくなっている。

今年度実施した試験結果の実験点と遷移曲線を図4.48～図4.85に示す。また、供試鋼別に全遷移曲線を集め、図4.86～図4.89に示す。さらに各種遷移温度を表4.4，表4.5，図4.90，図4.91等に一覧する。

試験結果を要約すると次のごとくなる。

(1) 各鋼種とも、遷移曲線は冷却条件(空冷または水冷開始温度)によって大きく影響を受ける。しかし、影響の受け方は鋼種によって異なる。

(2) 50%脆性破面率遷移温度 vT_{rs} について検討すると、以下の点が明らかである。

空冷の場合

1) 700℃に加熱して空冷した場合には、靱性劣化はほとんどない。

2) 800℃に加熱して空冷した場合、K5A鋼(30)では靱性劣化はほとんどないが、K5D鋼(30)では約10℃程度高温側に移動しており、K5E鋼(30)では20℃以上高温側に移動している。すなわち、K5E鋼(30)ではやや靱性の受ける影響が大きいようである。

水冷の場合

1) K5D 鋼(30) および K5D 鋼(127)について、 A_{c1} 変態点以下に加熱して水冷した場合は、約 10°C 程度高温側に移動している。この場合、明らかに靱性劣化をきたしたと判断するのは疑問である。

2) A_{c1} 変態点に近い温度 700°C および A_{c1} 変態点以上の温度 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ に加熱して水冷した場合

① K5A 鋼(30) については、 A_{r1} 変態点以上から水冷したものと、 A_{r1} 変態点以下から水冷したものとで、 $v\text{Trs}$ にはほとんど差がなく、As Received 材に比べて約 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 程度高温側に移動している。

② K5D 鋼(30) については、 A_{r1} 変態点以上から水冷したものと、 A_{r1} 変態点以下から水冷したものとで、 $v\text{Trs}$ に差がみられる。すなわち、後者では、As Received 材に比べて約 10°C 程度高温側に移動するにすぎないが、前者では約 $20^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 程度高温側に移動している。

③ K5E 鋼(30) については、 A_{r1} 変態点以上から水冷したものと、 A_{r1} 変態点以下から水冷したものとでは、 $v\text{Trs}$ の As Received 材からの変化量に明瞭な差は認められず、共に $25^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 程度高温側に移動しており、 A_{c1} 変態点以上に加熱した場合には、水冷開始温度に関係なく、靱性におよぼす影響はほぼ等しい。

④ K5D 鋼(127) については、 A_{r1} 変態点以上から水冷したものと、 A_{r1} 変態点近くの温度または A_{r1} 変態点以下から水冷したものとでは、 $v\text{Trs}$ の変化量には明瞭な差が認められる。すなわち、As Received 材に比べ後者では高々 15°C 程度高温側に移動しているにすぎないが、前者では約 30°C 程度高温側に移動している。

4.5 ディープノッチ試験結果

As Received 材と線状ガス加熱加工材の脆性破壊発生特性を求めるために、ディープノッチ試験を実施した。試験には幅 400 mm 、サイドノッチ 120 mm の標準型試験片を用いた。ノッチは線状ガス加熱線中央部に加工した。

試験結果を表 4.6、表 4.7、図 4.92～図 4.99 に示す。また、試験結果を先に述べた解析法で整理した結果を図 4.100～図 4.107、表 4.8 に示す。さらに、試験片の破断面状況を、写真 4.24～写真 4.36 に示す。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{aligned} \text{K5A 鋼(30)} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \text{As Received 材} & \text{----- } S_i = 100.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}} \text{ ---- (4.4)} \\ \text{800}^{\circ}\text{C A.C. 材} & \text{----- } S_i = 56.7 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}} \text{ ---- (4.5)} \\ \text{800}^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow \text{500}^{\circ}\text{C W.C. 材} & \text{-- } S_i = 42.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}} \text{ ---- (4.6)} \\ \text{800}^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow \text{700}^{\circ}\text{C W.C. 材} & \text{-- } S_i = 25.0 \cdot e^{-\frac{610.8}{T_K}} \text{ ---- (4.7)} \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{As Received 材} \\
 650^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 575^\circ\text{C W.C. 材} \\
 800^\circ\text{C A.C. 材} \\
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 900^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 700^\circ\text{C W.C.}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{----- (4.8)}
 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{As Received 材} \\
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 900^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 31.8 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{----- (4.9)}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{As Received 材} \\
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 900^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 268.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{----- (4.10)}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 900^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 119.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{----- (4.11)}$$

$$800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 700^\circ\text{C W.C. 材} \text{----- } S_i = 35.1 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}} \text{----- (4.12)}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{As Received 材} \\
 700^\circ\text{C A.C. 材} \\
 700^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材} \\
 800^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^\circ\text{C W.C. 材}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 44.0 \cdot e^{\frac{-450.1}{T_K}} \text{----- (4.13)}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 700^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 590^\circ\text{C W.C. 材}
 \end{array} \right\} \text{----- } S_i = 18.0 \cdot e^{\frac{-450.1}{T_K}} \text{----- (4.14)}$$

図4.100～図4.103は、温度に関係なく使用応力を一定（8.0 kg/mm² および 16.0 kg/mm²）とした場合の許容限界亀裂長ささと脆性破壊発生温度との関係を求めたものである。図4.104～図4.107は降伏点に対する安全率を2とした場合の許容限界亀裂長ささと脆性破壊発生温度との関係を求めたものである。表4.8に、使用応力 8.0 kg/mm², 16.0 kg/mm², $\frac{1}{2}\sigma_y$ における許容亀裂長さ 200 mm, 120 mm, 60 mm, 20 mm, すなわち $C=100$ mm, $C=60$ mm, $C=30$ mm, $C=10$ mm, とした場合の脆性破壊発生温度を示す。

以上の試験結果を要約すると、次のごとくなる。

(1) 各鋼種とも、脆性破壊発生特性は冷却条件（空冷または水冷開始温度）によって大きく影響を受ける。しかし、影響の受け方は鋼種によって異なる。

(2) 空冷の場合

K5A 鋼（30）、K5D 鋼（30）に加熱表面下 1 mm の温度で、最高加熱温度 800 °C、K5D 鋼（12.7）に最高加熱温度 700 °C の加熱を行なって、そのまま空冷した場合には、脆性破壊発生特性は、As Received 材と同等かもしくは若干劣化する程度である。

(3) 水冷の場合

1) K5D 鋼（30）については、650 °C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 575 °C W.C.（同時水冷）材の脆性破壊発生特性は As Received 材と同等か若干劣化する程度である。

2) K5A 鋼（30）、K5D 鋼（30）および K5E 鋼（30）については、800 °C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500 °C W.C. 材の脆性破壊発生特性は、As Received 材と同等か若干劣化する程度である。

3) K5D鋼(30)およびK5E鋼(30)については, 900℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C.材の脆性破壊発生特性は, 800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C.材のそれとほとんど変わらず, As Received材と同等もしくは若干劣化する程度である。

4) K5A鋼(30), K5D鋼(30)およびK5E鋼(30)については, 800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 700℃ W.C. (同時水冷)材の脆性破壊発生特性は, かなり劣化する。

5) K5D鋼(12.7)については, 700℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C.材, 800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C.材は, いずれもその脆性破壊発生特性は As Received材と同等か若干劣化する程度である。

6) K5D鋼(12.7)については, 700℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 590℃ W.C.材の脆性破壊発生特性は劣化がみられる。

(4) 使用応力 16.0 kg/mm² における許容限界亀裂長さ 20mm に対しての脆性破壊発生限界温度, すなわち ${}_{16}T_{IC=10}$ を求め, 発生限界温度が溶接残留応力により 90℃ 高温側に移動する⁶⁾と仮定すれば下記のごとくなる。また, 各種線状ガス加熱加工により ${}_{16}T_{IC=10}$ の As Received 材からの変化量を括弧内に示す。

K5A鋼(30)	As Received 材	-----	-85℃	
	800℃ A.C. 材	-----	-76℃	(+9℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-70℃	(+15℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 700℃ W.C. 材	-----	-58℃	(+27℃)

K5D鋼(30)	As Received 材	-----	-95℃	
	650℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 575℃ W.C. 材	-----	-95℃	(0℃)
	800℃ A.C. 材	-----	-95℃	(0℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-95℃	(0℃)
	900℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-95℃	(0℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 700℃ W.C. 材	-----	-64℃	(+31℃)

K5E鋼(30)	As Received 材	-----	-99℃	
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-88℃	(+11℃)
	900℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-88℃	(+11℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 700℃ W.C. 材	-----	-66℃	(+33℃)

K5D鋼(12.7)	As Received 材	-----	-100℃	
	700℃ A.C. 材	-----	-100℃	(0℃)
	700℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-100℃	(0℃)
	800℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 500℃ W.C. 材	-----	-100℃	(0℃)
	700℃ $\xrightarrow{A.C.}$ 590℃ W.C. 材	-----	-84℃	(+16℃)

(5) As Received材と各種線状ガス加熱加工材の ${}_{16}T_{IC=10}$ の変化量を見ると,

① 最高加熱温度が A_{c1} 変態点以下のもの

② A_{c1} 変態点に近い 700℃ および A_{c1} 変態点以上の 800℃ ~ 900℃ に加

熱して空冷したもの。

③ A_{c1} 変態点に近い 700°C に加熱して、 A_{r1} 変態点に近い 590°C または A_{r1} 変態点以下の 500°C から水冷を開始したもの。

④ A_{c1} 変態点以上の $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ に加熱して、 A_{r1} 変態点以下の 500°C から水冷を開始したもの。

等は、As Received 材に比べてほぼ 15°C 程度高温側に移動するのみである。

しかるに、 A_{c1} 変態点以上の 800°C に加熱して、 A_{r1} 変態点以上の 700°C から水冷を開始したものは、約 30°C 高温側に移動し、脆性破壊発生特性は明らかに劣化している。

4.6 二重引張試験および ESSO 試験結果

As Received と線状ガス加熱加工材の脆性亀裂伝播停止特性を求めるため、温度勾配型標準二重引張試験および温度勾配型標準 ESSO 試験を実施した。発生部のノッチは、中央加熱線上の中心に入れた。

試験結果を、表 4.9，表 4.10，図 4.108～図 4.111 に示す。また、試験結果を先に述べた解析法で整理した結果を、図 4.112～図 4.115，表 4.11 に示す。さらに、試験片の破面状況を写真 4.37～写真 4.43 に示す。

試験結果から実験式を次のごとく定めた。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \text{ ----- } \ln K_c = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 18.28 \text{ --- (4.15)} \\ 800^{\circ}\text{C A.C. 材} \end{array} \right\} \\
 \text{K5A 鋼 (30)} & \left\{ \begin{array}{l} 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 17.51 \text{ --- (4.16)} \\ 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 700^{\circ}\text{C W.C. 材} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} 900^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 625^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -3.46 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 17.39 \text{ --- (4.17)} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \text{ } \end{array} \right\} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.96 \text{ --- (4.18)} \\
 \text{K5D 鋼 (30)} & \left\{ \begin{array}{l} 800^{\circ}\text{C A.C. 材} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.64 \text{ --- (4.19)} \\ 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 700^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.50 \text{ --- (4.20)} \\ 900^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.58 \text{ --- (4.21)} \\ 900^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 625^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.28 \text{ --- (4.22)} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 16.03 \text{ --- (4.23)} \\ 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.80 \text{ --- (4.24)} \end{array} \right\} \\
 \text{K5E 鋼 (30)} & \left\{ \begin{array}{l} 800^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 700^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ } \end{array} \right\} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.57 \text{ --- (4.25)} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} 900^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ } \end{array} \right\} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.37 \text{ --- (4.26)} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} 900^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 625^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.28 \text{ --- (4.22)} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{As Received} \text{ ---- } \ln K_c = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.64 \text{ --- (4.27)} \\ 700^{\circ}\text{C A.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.27 \text{ --- (4.28)} \end{array} \right\} \\
 \text{K5D 鋼 (12?) } & \left\{ \begin{array}{l} 700^{\circ}\text{C } \underline{\text{A.C.}} \rightarrow 590^{\circ}\text{C W.C. 材} \text{ ---- } \ln K_c = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.05 \text{ --- (4.29)} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

NKは、鋼材の靱性に対する要求値として、Fracture Toughness の Parameter K_c 、すなわち

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi C} \text{ ----- (4.30)}$$

ただし、 σ = 想定使用応力 (kg/mm^2)

C = 亀裂長さ (mm)

を用いて、次のごとき値を定めている。

$$\text{K5D鋼(30)} \quad K_c = 220 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2} : \sigma = 16.0 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \quad C = 60 \text{ mm}$$

$$\text{K5E鋼(30)} \quad K_c = 439 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2} : \sigma = 16.0 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \quad C = 240 \text{ mm}$$

As Received 材および各種線状ガス加熱加工材について、上記NK要求 K_c 値を満足する温度を表4.11中に示した。ただし、K5A鋼(30)に対しては、K5D鋼(30)に対する要求 K_c 値を用いて参考とした。また、K5D鋼(12.7)については、板厚効果を考慮すべきであるが、この場合も、K5D鋼(30)に対する要求 K_c 値を用いた。

以上の試験結果を要約すると次のごとくなる。

(1) 各鋼種とも、脆性亀裂伝播停止特性は、冷却条件(空冷または水冷開始温度)によって影響を受ける。しかし影響の受け方は鋼種によって異なる。

(2) 空冷の場合

K5D鋼(30)に、加熱表面下1mmの温度で最高加熱温度800℃、K5D鋼(12.7)に最高加熱温度700℃の加熱を行なって、そのまま空冷した場合には、脆性亀裂伝播停止特性はAs Received 材と同等もしくは若干劣化する程度である。

(3) 水冷の場合

1) K5A鋼(30)については、800℃ $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 500℃ W.C. 材および900℃ $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 625℃ W.C. 材いずれも脆性亀裂伝播停止特性はAs Received 材に比べて悪くなる。

2) K5D鋼(30)、K5E鋼(30)とも、最高加熱温度が800℃の場合には、500℃から水冷を開始したものが700℃から水冷を開始したものより、脆性亀裂伝播停止特性が良い。また、同様に最高加熱温度が900℃の場合には、500℃から水冷を開始したものが625℃から水冷を開始したものより脆性亀裂伝播停止特性が良い。

3) K5D鋼(12.7)については、700℃ $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 590℃ W.C. 材は脆性亀裂伝播停止特性はAs Received 材に比べて劣化する。

4) NKの要求 K_c 値を満足する温度を求めると下記のごとくなる。ただし、K5A鋼(30)、K5D鋼(12.7)については、 $K_c = 220 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ を適用した。また、

各種線状ガス加熱加工材の要求 K_c 値を満足する温度の As Received 材からの変化量を括弧内に示す。

K5A鋼(30)	As Received 材	-----	-5°C	
	800°C A.C. 材	-----	13°C	(+18°C)
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C. 材	-----	13°C	(+18°C)
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C. 材	-----	13°C	(+18°C)
	900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 625°C W.C. 材	-----	16°C	(+21°C)
K5D鋼(30)	As Received 材	-----	-30°C	
	800°C A.C. 材	-----	-30°C	(0°C)
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C. 材	-----	-22°C	(+8°C)
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C. 材	-----	-19°C	(+11°C)
	900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C. 材	-----	-21°C	(+9°C)
K5E鋼(30)	As Received 材	-----	-15°C	
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C. 材	-----	-8°C	(+7°C)
	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C. 材	-----	-2°C	(+13°C)
	900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C. 材	-----	-2°C	(+13°C)
	900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 625°C W.C. 材	-----	4°C	(+19°C)
K5D鋼(12.7)	As Received 材	-----	-52°C	
	700°C A.C. 材	-----	-42°C	(+10°C)
	700°C $\xrightarrow{A.C.}$ 590°C W.C. 材	-----	-36°C	(+16°C)

As Received 材と各種線状ガス加熱加工材の NK 要求 K_c 値を満足する温度とその変化量を見ると、

- ① 最高加熱温度が A_{c1} 変態点に近い 700°C および A_{c1} 変態点以上の 800°C ~ 900°C に加熱して空冷したもの
- ② A_{c1} 変態点以上の 800°C ~ 900°C に加熱して、 A_{r1} 変態点以下の 500°C から水冷を開始したもの
- ③ A_{c1} 変態点以上の 800°C に加熱して、 A_{r1} 変態点以上の 700°C 程度から水冷を開始したもの

等は、K5A鋼(30)を除いて、As Received 材に比べて高温側への移動量は 15°C 以下である。なお、K5D鋼(12.7)については、 A_{c1} 変態点に近い 700°C に加熱して、 A_{r1} 変態点に近い 590°C から水冷を開始したものは、ほぼ 15°C 程度高温側に移動している。

しかし、 A_{c1} 変態点以上の 900°C に加熱して、 A_{r1} 変態点以上の 625°C から水冷を開始したものは、約 20°C 程度高温側に移動し、脆性亀裂伝播停止特性がかなり悪影響を受けていることがわかる。

5) K5A鋼(30)に各種線状ガス加熱をほどこした場合のNK要求 K_c 値を満足する温度は 0°C 以上である。K5D鋼(30)およびK5D鋼(12.7)の場合は、高々 -13°C である。さらにK5E鋼(30)の場合は、 900°C A.C. $\rightarrow$ 625°C W.C.材以外は 0°C 以下である。

したがって、K5A鋼(30)については、線状ガス加熱加工を行なえば脆性亀裂伝播停止能力を期待することは出来ない。K5D鋼(30)、K5D鋼(12.7)およびK5E鋼(30)については、 900°C A.C. $\rightarrow$ 625°C W.C.材以外の上記の線状ガス加熱加工を行なっても脆性亀裂伝播停止能力を期待することが出来る。

4.7 残留応力計測結果

K5D鋼(30)に、 800°C A.C.および 800°C A.C. $\rightarrow$ 700°C W.C.の線状ガス加熱を施した二重引張試験片について、中央の加熱線を中心に表面の残留応力分布を計測した。また、 800°C A.C.材については、亀裂伝播部の中央附近での板厚方向の残留応力分布を計測した。計測結果を図4.116～図4.125に示す。

計測結果を要約すると下記のごとくなる。

- (1) 中央加熱線上において、二重引張試験における目標脆性亀裂停止点、すなわち亀裂伝播部入口から約300mmの位置における表面の残留応力は、 800°C A.C.材、 800°C A.C. $\rightarrow$ 700°C W.C.材のいずれも、引張り応力である。
- (2) 表面の残留応力は、 800°C A.C. $\rightarrow$ 700°C W.C.材に比べて、 800°C A.C.材の方が、大きい。
- (3) 800°C A.C.材について計測した亀裂伝播部入口から約200mmの位置における、脆性亀裂伝播直角方向の残留応力の板厚断面分布は、板表裏面では引張りであるが、板厚中央部では圧縮の応力になっている。

4.8 各種靱性試験結果の評価について

先に記した、Vノッチシャルピー衝撃試験結果、ディープノッチ試験結果、および二重引張試験・ESSO試験結果の相関性および評価について検討してみよう。

Vノッチシャルピー衝撃試験結果については、靱性を的確に示すと認められている50%脆性破面率遷移温度 vT_{rs} を評価の基準とする。また、ディープノッチ試験結果については、使用応力 16 kg/mm^2 、許容限界亀裂長さ20mm(すなわち $C=10\text{ mm}$)に対する脆性破壊発生限界温度 $16T_{ic=10}$ を評価の基準にする。すなわち、溶接欠陥等を考慮の対象にし、長さ20mmの板厚貫通欠陥を、許容限界亀裂長さとして仮定した。さらに、二重引張試験・ESSO試験結果については、D級鋼およびE級鋼に対するNK規格要求値すなわちK5D鋼(30)に対しては、使用応力 16.0 kg/mm^2 、停止限界亀裂長さ60mm、換言すれば、要求 K_c 値

= $220 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ を示す温度 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=220$ を、またK5E鋼に対しては、使用応力 16.0 kg/mm^2 、停止限界亀裂長さ 240 mm 、換言すれば要求 K_{c} 値 = $439 \frac{\text{kg}\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ を示す温度 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=439$ を評価の基準とする。なお、K5A鋼(30)およびK5D鋼(12.7)については、とりあえずK5D鋼(30)の場合と同一の基準とすることにした。

本試験に供試した程度の材料では、以上の各基準温度に対する材質的バラツキは、 $v\text{Trs}$ では $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 程度、 ${}_{16}\text{T}_{\text{ic}}=10$ 、 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=220$ 、 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=439$ 等では 15°C 程度以下と考えられる。したがって、線状ガス加熱により、以上の各基準温度が材質的バラツキの範囲を越えて高温側に变化した場合には、明瞭な悪影響が認められたものと判断される。

As Received材および各種線状ガス加熱加工材の $v\text{Trs}$ 、 ${}_{16}\text{T}_{\text{ic}}=10$ 、 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=220$ 、 ${}_{16}\text{T}_{\text{aKc}}=439$ 等、およびそれらのAs Received材からの変化量を、図4.126、図4.127に示す。

4.9 試験結果に対する考察

船体用50キロ級高張力鋼に対する線状ガス加熱加工の作業能率向上対策として、加熱後の水冷による急速冷却採用についてのバック データ を得るために、Straight Line Heatingにより $700^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ に加熱し、その後空冷したもの(空冷材)、加熱後ただちに水冷したもの(同時水冷材)、加熱後しばらくして水冷したもの(途中水冷材)を中心に、各種靱性試験を実施し、それらの試験結果を以上に述べて来た。

Straight Line Heating方式による各種線状ガス加熱加工を行なった加工材に対して、上述の試験結果について若干検討してみる。

前述の試験結果を要約すると下記のごとくなる。

- (1) 空冷の場合は脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性とも明確な悪影響は見られないが鋼種によってその影響度は異なる。
- (2) 同時水冷の場合でも、最高加熱温度が A_{ci} 変態点を越えなければ、脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性ともAs Received材と同等か若干の劣化を見る程度である。
- (3) 途中水冷材の場合は最高加熱温度が A_{ci} 変態点をこえているときは、水冷開始温度が A_{ri} 変態点をさかいにして、脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性とも靱性の劣化度に差が表われる傾向が強い。ただし、鋼種によって影響の受け方が異なる。
- (4) 上記(1)、(2)、(3)の傾向は、ピッカース硬さおよびシャルピー試験結果でも同じような傾向が現われている。

一般に線状ガス加熱加工部の靱性試験結果を検討するにあたり、問題になる点は下記の点であろう。すなわち、

- ① 材質におよぼす線状ガス加熱加工による熱履歴の影響
 - ② 線状ガス加熱加工による残留応力が試験結果におよぼす影響
 - ③ As Received 材の材質の差によって生ずる線状ガス加熱加工の影響の差
 - ④ 現場工作上に於ける推奨条件の検討
 - ⑤ 線状ガス加熱加工による角変形の影響
- 等である。

しかしながら、今回の供試試験片においては、先の試験片製作要領の項で述べたごとく、表裏両面に線状ガス加熱を行なったため、角変形の影響は考慮する必要はない。

4.9.1 材質におよぼす線状ガス加熱加工による熱履歴の影響

線状ガス加熱加工は、移動熱源により鋼材の板厚方向の各局部に異なる熱サイクルを与え、それによって生ずる熱歪みを利用して一定の角変形を起こさせる方法である。

したがって、鋼材の局部的材質は、その部分の最高加熱温度と加熱および冷却過程によって異なる。また、移動加熱源によって所定の最高加熱温度を与えるものであるため、その熱サイクルは加熱速度および冷却速度ともきわめて大きい。

なお、水冷をする場合には、水冷開始によって急激な冷却が行なわれるので、空冷の場合に比べて、水冷を開始された温度をさかいにして冷却速度が急激に変化する。この水冷に特有な熱サイクルは、板厚方向においては最高加熱到達温度の高い加熱表層部ほどその傾向が顕著にあらわれる。したがって、水冷をする場合には、最高加熱温度とともに水冷開始温度がその部分の組織および硬さ並びには靱性をきめる大きな要因となり、また加熱表面に近い程、その影響は受け易いのである。

次に、熱履歴による材質の変化を検討する場合には、その熱サイクルによる A_c 変態点および A_r 変態点を知る必要がある。

本研究部会に、“均一加熱法による被加熱部各部位のシャルピー衝撃特性調査”が報告されたが、これは、板厚 25mm の K5B 鋼に相当する 50 キロ HT 鋼を用いて、実際の線状ガス加熱加工による鋼材の靱性低下を明らかにするため、被加熱部の各位置を代表した熱履歴を各ブロック試験片に与えた後にシャルピー衝撃試験を行ない、その靱性低下と加熱条件との関連を求めたものである。

供試材の化学成分ならびに機械的性質および試験片寸法を表 4.12、表 4.13、図 4.128 に示す。熱処理方法および冷却速度を表 4.14、図 4.129 ～ 図 4.130 に示す。平均冷却速度は図 4.130 に示すごとく、実際の線状ガス加熱加工材の冷却速度に比べれば、かなり緩やかであり、均熱加熱材の水冷の場合の冷却速度

は、実際の線状ガス加熱加工材の空冷の冷却速度にほぼ近いことが明らかである。

各種加熱条件による衝撃性質への影響調査結果を、図4.131, 表4.15, 表4.16 および図4.132 ~ 図4.137 に示す。

$vE_{-17} \geq 6.2 \text{ kg-m}$ (K5E鋼) および $vE_{-7} \geq 4.8 \text{ kg-m}$ (K5D鋼) を判定の基準として脆化度を調査した結果、および各種加熱材の遷移曲線から試験結果を要約すると下記のごとくなる。

- (1) 加熱温度が 1000°C までは靱性の劣化はほとんど認められない。
- (2) 試験片を所定の最高加熱温度に加熱してからただちに水冷した場合、加熱温度が $650^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ までは若干の脆化がみられる程度である。しかるに、 750°C 以上になると急激に脆化する。
- (3) 加熱後冷却の途中で水冷する場合、加熱温度が $700^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ のときには、 550°C 以下から水冷を開始すれば靱性の劣化は少ない。

均熱加熱試験結果、実際の線状ガス加熱加工材の顕微鏡組織および変態点測定結果から、鋼種および加熱冷却の熱サイクルによる差はあるが、本研究で施工された線状ガス加熱条件による A_{c1} 変態点は 700°C 前後、 A_{r1} 変態点は 550°C 前後と考えられる。

線状ガス加熱によって、板厚方向の各位置の最高到達温度が異なることは先に述べたとおりであるが、この場合、高温に曝される加熱側の表層部は、顕微鏡組織の変化に伴う材質変化と、局部的な加熱冷却によって生じた内部ひずみのため一般に As Received 材の状態に比べて脆化する。

この脆化現象は加熱後水冷を行なった場合に特に著しいがその原因は次のように考えられる。

先づ、 A_{c1} 変態点以下に加熱された領域は特に顕微鏡組織の変化は観察されないが、そのうち約 600°C に加熱後急冷された領域では、フェライト中に固溶した炭素と窒素が常温で過飽和状態となるため、炭化物や窒化物を析出して、いわゆる焼入時効を起す。また、 $500^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ に加熱された領域では、熱応力による内部ひずみが残留し、固溶した窒素などが転位の周囲に拘束されて、いわゆるひずみ時効を起す。

本研究の供試鋼である K5D 鋼(30)には 0.027% 、K5E 鋼(30)には 0.025% の Al が分析結果から認められており、Al キルド鋼であるため、鋼中の窒素の多くは安定な Al 窒化物として析出し、このような時効現象を起しがたいとも云われる。しかし、K5D 鋼(30)の $650^\circ\text{C} \text{ A.C.} \rightarrow 575^\circ\text{C} \text{ W.C.}$ 材や、K5D 鋼(127)の $600^\circ\text{C} \text{ A.C.} \rightarrow 520^\circ\text{C} \text{ W.C.}$ 材、 $650^\circ\text{C} \text{ A.C.} \rightarrow 555^\circ\text{C} \text{ W.C.}$ 材の硬さ分布測定結果、ならびに均熱加熱試験による 400°C 加熱水冷材、 650°C 加熱水冷材の結果から、このような時効が起っていたものと考えられる。

次に A_{c1} 変態点附近および直上の $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に加熱された領域は、パーライトの部分的分解によって不安定組織となり、それが急冷されることによって高炭素マルテンサイトが生成されるので著しい脆化を起こす。加熱温度がさらに高くなると脆化度はさらに大きくなる。この状況は、 800°C 、 900°C 加熱同時水冷材の顕微鏡組織ならびに硬さ分布から明らかである。しかし、この領域も空冷の場合は、冷却速度が緩やかになるので、マルテンサイト生成に至らず、細粒のベイナイトとなるため、大きな脆化は起らない。

加熱後冷却途中の温度から水冷する場合、すなわち水冷開始温度を低くした場合は以下のごとくなる。

すなわち、加熱温度 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ の場合、水冷開始温度を 575°C まで下げても、脆化の程度は加熱直後から水冷した場合とあまり変わらないが、 500°C に下げると脆化の程度は急激に減少し、ほとんど空冷の場合と変らなくなる。すなわち、 A_{r1} 変態点以上の 575°C から水冷のものは部分的にマルテンサイトを生じて硬化しているが、 500°C から水冷のものはこのようなマルテンサイトの生成はなく、材質的には空冷のものと変らなくなるためと考えられる。

ディープノッチ試験における発生特性、および二重引張試験ならびに ESSO 試験における伝播停止特性は、板厚方向の材質脆化の分布に影響されることは明らかである。すなわち、発生特性においては、応力集中の問題はあるにしても、ノッチ先端部における板厚断面での局所的な脆化が試験結果に影響し、伝播停止特性においては、亀裂伝播面における全板厚の脆化傾向が大きく影響するものと考えられる。

ディープノッチ試験結果からみると、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C}$ W.C. 材に比べて、 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材、 $650^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 575^{\circ}\text{C}$ W.C. 材および 800°C A.C. 材の実験点は、As Received 材と同様に大きくバラツキている。このことは、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C}$ W.C. の加熱条件では発生特性に明らかに影響を与える脆化域が生成したためであり、後者等の条件では明らかに影響を与えるような脆化域が発生しなかったためと思われる。

なお、板厚 30mm の場合、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材より $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材の方が若干靱性（ディープノッチ試験結果）が、すぐれているように見受けられる。加熱温度が高くなって靱性が回復するという報告⁸⁾もあるが、本報告では、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材と $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材とは有意差を認めないことにした。この傾向は K5D 鋼 (127) にも見られる。

一方、伝播停止特性に関しては、 $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材は $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材よりも良い試験結果ではない。また $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 625^{\circ}\text{C}$ W.C. 材は $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C}$ W.C. 材よりも一般に悪くなっている。このことは、たとえ水冷条件をコントロールすることにより高炭素マルテンサイト生成を少なくして、組織変化

次に A_{c1} 変態点附近および直上の $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に加熱された領域は、パーライトの部分的分解によって不安定組織となり、それが急冷されることによって高炭素マルテンサイトが生成されるので著しい脆化を起こす。加熱温度がさらに高くなると脆化度はさらに大きくなる。この状況は、 800°C 、 900°C 加熱同時水冷材の顕微鏡組織ならびに硬さ分布から明らかである。しかし、この領域も空冷の場合は、冷却速度が緩やかになるので、マルテンサイト生成に至らず、細粒のベイナイトとなるため、大きな脆化は起らない。

加熱後冷却途中の温度から水冷する場合、すなわち水冷開始温度を低くした場合は以下のごとくなる。

すなわち、加熱温度 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ の場合、水冷開始温度を 575°C まで下げても、脆化の程度は加熱直後から水冷した場合とあまり変わらないが、 500°C に下げると脆化の程度は急激に減少し、ほとんど空冷の場合と変らなくなる。すなわち、 A_{r1} 変態点以上の 575°C から水冷のものは部分的にマルテンサイトを生じて硬化しているが、 500°C から水冷のものはこのようなマルテンサイトの生成はなく、材質的には空冷のものと変らなくなるためと考えられる。

ディープノッチ試験における発生特性、および二重引張試験ならびに ESSO 試験における伝播停止特性は、板厚方向の材質脆化の分布に影響されることは明らかである。すなわち、発生特性においては、応力集中の問題はあるにしても、ノッチ先端部における板厚断面での局所的な脆化が試験結果に影響し、伝播停止特性においては、亀裂伝播面における全板厚の脆化傾向が大きく影響するものと考えられる。

ディープノッチ試験結果からみると、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材に比べて、 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材、 $650^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 575^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材および $800^{\circ}\text{C} \text{ A.C.}$ 材の実験点は、As Received 材と同様に大きくバラツキている。このことは、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ の加熱条件では発生特性に明らかに影響を与える脆化域が生成したためであり、後者等の条件では明らかに影響を与えるような脆化域が発生しなかったためと思われる。

なお、板厚 30mm の場合、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材より $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材の方が若干靱性（ディープノッチ試験結果）が、すぐれているように見受けられる。加熱温度が高くなって靱性が回復するという報告⁸⁾もあるが、本報告では、 $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材と $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材とは有意差を認めないことにした。この傾向は K5D 鋼 (127) にも見られる。

一方、伝播停止特性に関しては、 $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材は $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材よりも良い試験結果ではない。また $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 625^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材は $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{A.C.} 700^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$ 材よりも一般に悪くなっている。このことは、たとえ水冷条件をコントロールすることにより高炭素マルテンサイト生成を少なくして、組織変化

性があり、また急冷されたために広範囲にマルテンサイトが生成され、このマルテンサイト変態による応力低下も残留応力をより小さくしたものと考えられる。

4.9.3 As Received 材の材質の差によって生ずる線状ガス加熱加工の影響の差
試験結果から認められるごとく、同一線状ガス加熱条件でも、鋼種によって靱性に対する影響が異なっているが、この原因として、含有元素成分や製鋼過程における圧延および熱処理条件の相違が考えられる。

K5A 鋼 (30) および K5D 鋼 (12.7) は As Rolled 材であり、K5D 鋼 (30) および K5E 鋼 (30) は Normalized 材である。

A_{ci} 変態点以上に加熱して急冷する場合には、焼入れ硬化性が含有元素成分によって異なる。また Normalized 材については、施行した線状ガス加熱の熱サイクルが、製鋼過程におけるノルマ処理の熱サイクルと異なる場合には、線状ガス加熱によって靱性に变化をきたすであろう。すなわち、Normalized 材である K5E 鋼 (30) を A_{ci} 変態点以上に加熱し、その直後に水冷したものの靱性が、同一加熱条件の線状加熱をほどこした K5D 鋼 (30) の靱性とほぼ等しくなっているのは、製鋼過程において靱性を向上させるために行なっていると思われる特別な処理の効果が失われたためと思われる。

次に変態点測定結果によれば、K5D 鋼 (30) にくらべて K5E 鋼 (30) は明らかに A_{ci} 変態点が約 50°C 低い。これは、両鋼種の添加元素 Si および Mn とその他 Ni, Cr, Mo, などの微量元素の含有量の差によるものと思われる。

両鋼種の含有元素成分を示すと表 4.17 のごとくなる。K5D 鋼 (30) に比べて K5E 鋼 (30) の A_{ci} 変態点が低いので、パーライトの分解が早く、同一加熱条件でも熱影響を受ける範囲が K5D 鋼 より K5E 鋼の方が広くなると考えられるので、靱性変化も大きくなると考えられる。

4.9.4 現場工作上における推奨条件の検討

これまでに述べて来たごとく、線状ガス加熱加工による鋼材の靱性におよぼす悪影響について検討したところ、熱履歴を受けたことによる材質変化が大きな原因になることが判明した。しかも、その脆化現象は、鋼種によって異なっている。

したがって、線状ガス加熱加工の現場施行条件を決定するにあたっては、以上に述べて来た各靱性試験結果、すなわち V-ノッチシャルピー衝撃試験結果、ディープノッチ試験結果および二重引張試験結果・ESSO 試験結果を総合的に検討する必要がある。

4.8 項でも述べたが、As Received 材および各種線状ガス加熱加工材の vT_{rs} , ${}_{16}T_{1C}=10$, ${}_{16}T_{1Kc}=220$, ${}_{16}T_{1Kc}=439$ およびそれらの As Received 材からの変化量を示した、図 4.126, 図 4.127 により検討してみよう。

4.8 項で述べた判定基準を考慮して、実施可能な推奨条件を検討してみる。

板厚 30mm のものについて、 $16T_{ic}=10$ を基準に脆性破壊発生特性をみると、 800°C $\underline{A.C.} \rightarrow 700^{\circ}\text{C}$ W.C. 材はいずれも As Received 材に比べて約 30°C 程度高温側に移動しており、明らかに劣化している。次に、 650°C $\underline{A.C.} \rightarrow 575^{\circ}\text{C}$ W.C. 材、 800°C A.C. 材、 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ $\underline{A.C.} \rightarrow 500^{\circ}\text{C}$ W.C. 材のいずれも、 $16T_{ic}=10$ の変化量は約 15°C 以下であり、明らかな劣化は認められない。

さらに、脆性亀裂伝播停止特性についてみると、K5D 鋼(30)および K5E 鋼(30)については、 900°C $\underline{A.C.} \rightarrow 625^{\circ}\text{C}$ W.C. 材以外の加熱材は、 $16T_{aKc}=220$ 、 $16T_{aKc}=439$ の変化量は約 15°C 以内であり、劣化は明らかにみとめられない。

K5D 鋼(12.7)についてみると、 700°C $\underline{A.C.} \rightarrow 590^{\circ}\text{C}$ W.C. 材以外の加熱材では、 $16T_{ic}=10$ および $16T_{aKc}=220$ の As Received 材からの変化量は 15°C 以内であり、靱性の劣化はないものとみなせる。

以上を総合すれば線状ガス加熱加工の現場適用における推奨条件としては、最高加熱温度については A_c 変態点、水冷開始温度については A_r 変態点をそれぞれ基準として決定すればよいことが明らかである。

4.10 結論

船体用 50 キロ級高張力鋼の NK 規格 A 級鋼 (K5A 鋼, 板厚 30mm), D 級鋼 (K5D 鋼, 板厚 30mm および 12.7mm), E 級鋼 (K5E 鋼, 板厚 30mm) を、最高加熱温度 $650^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ (加熱表面下 1mm の位置の温度で規定) に加熱後、種々の冷却条件を与えるような線状ガス加熱加工を施した場合の、脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性を実験的に求めて、靱性の変化を定量的に把握した。

結論として、脆性破壊発生特性および脆性亀裂伝播停止特性に明瞭な悪影響をおよぼさない加熱条件は以下に記すごとくすることが判明した。

- (1) 最高加熱温度が A_c 変態点以下の 650°C 程度のときは、加熱後ただちに水冷しても良い。
- (2) 最高加熱温度が A_c 変態点に近い温度、またはそれ以上の温度、すなわち $700^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ のときは、空冷するかまたは A_r 変態点以下の約 500°C 程度から水冷を開始すれば良い。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会“船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果およびガス加熱加工条件の影響に関する研究”(第111研究部会)
日本造船研究協会研究資料 No.113, 昭45
- 2) 日本造船研究協会“船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果およびガス加熱加工条件の影響に関する研究”(第111研究部会)
日本造船研究協会研究資料 No.128, 昭46
- 3) 木原博, 池田一夫, “脆性破壊の発生に関する研究(第2報)―鋼板の破壊発生特性について―”造船協会論文集第118号, 昭40
- 4) 木原博, 金沢武, 池田一夫, 前中浩, 木下勝, 永元隆一, 矢島浩, “クラックアレスターの有効性について(第2報)”, 日本造船学会論文集第124号, 昭43
- 5) 池田一夫, 前中浩, 岡部利正, 矢島浩, 中島正樹, “溶接型クラックアレスターの研究”三菱重工技報第6巻, 第6号, 昭44.11
- 6) 西尾安弘, 山本喜宏, 梶本勝也, “海洋構造物溶接部の脆性破壊防止の研究”三菱重工技報第7巻, 第2号, 昭45
- 7) 石川島播磨重工業(株)技術研究所“船体用50キロ級高張力鋼と軟鋼の靱性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究―均一加熱法による被加熱部各部位のシャルピー衝撃特性調査”日本造船研究協会第111研究部会提出資料 No.SR111委-11-53, 昭和46.10
- 8) 越賀房夫, 安藤政明, “線状加熱加工を受けた船体用鋼板の靱性評価に関する一考察”, 日本造船学会論文集第128号, 昭45
- 9) 佐藤邦彦, 松井繁朋, 町田隆, “高張力鋼溶接部における熱応力発生過程と残留応力”溶接学会誌第35巻第9号, 昭41

5. むすび

本研究部会の共同研究は、昭和44年4月より3ヶ年計画で実施されたものであり、本年度で計画の全試験を終了した。現場工作上における船主および船級協会監督官との間のトラブル解消に有効なバックデータを得、所期の目的を達成することが出来たものと思われる。

なお、本年度中期に、3ヶ年間の研究成果を総合的にとりまとめた最終報告書を公表する予定である。

表 1.1 “船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶材接の重畳効果に関する研究” 年度別実施状況

(MS材 板厚30mm)

年度 材料履歴	昭和44年度 B処理材製作	昭和45年度				昭和46年度				全 個 数
		As Rec- ived材	B 処 理 材 0%加工材 3%加工材 5%加工材	T処理材 0%加工材	実施 個数	T 処 理 材 0%加工材 3%加工材	T処理材 3%加工材	実施 個数		
シャルピ衝撃試験		L 40 C 40	40	40	60	60	60	80	140	480
ディープラッチ試験	予備試験 および	4	4	5	6	5	3	4	5	36
二重引張試験 ESSO試験	B処理材試験 片全数製作	4	4	5	5	—	5	5	4	32
低温引張試験		6	6	—	6	6	—	6	12	42
残留応力計測		—	—	—	—	—	—	—	—	0
組織・硬度分布調査		1	1	1	1	1	1	1	2	8

(HT50材 板厚30mm)

年度 材料履歴	昭和44年度 B処理材製作	昭和45年度				昭和46年度				全 個 数	
		As Rece- ived 材	再ルマ材	B 処 理 材 0%加工材 3%加工材 5%加工材	T処理材 0%加工材	実施 個数	T 処 理 材 0%加工材 3%加工材	T処理材 3%加工材	実施 個数		
シャルピ衝撃試験		L 40 C 40	40	40	60	60	60	60	80	140	480
ディープラッチ試験	予備試験 および	4	4	6	6	6	6	6	6	12	44
二重引張試験 ESSO試験	B処理材試験 片全数製作	4	4	5	5	—	5	5	5	10	33
低温引張試験		6	6	—	6	6	—	—	6	12	42
残留応力計測		—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
組織・硬度分布調査		1	1	1	1	1	1	1	1	2	8

表 1.2 “船体用50キロ級高張力鋼の靱性におよぼす加熱加工条件の影響に関する研究”年度別実施状況

年度 鋼種	試験項目	昭和44年度		昭和45年度				昭和46年度										実施 個数		全個数	
		加熱条件 の設定	As Received	800℃ A.C. 700℃ W.C.	650℃ A.C. 575℃ W.C.	700℃ A.C. 615℃ W.C.	750℃ A.C. 660℃ W.C.	800℃ A.C. 400℃ W.C.	800℃ A.C. 500℃ W.C.	800℃ A.C. 575℃ W.C.	800℃ A.C. 575℃ W.C.	900℃ A.C. 500℃ W.C.	900℃ A.C. 575℃ W.C.	900℃ A.C. 625℃ W.C.	900℃ A.C. 780℃ W.C.	1000℃ A.C.					
K5A 30	21 シェルビニヤ試験		40	20	60	—	—	—	20	—	20	20	20	20	20	20	—	—	160	220	
	22 テンション試験		4	4	8	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	16	
	23 二重引張試験 ESS0 試験		4	4	8	—	—	—	4	—	2	—	—	—	2	—	—	—	8	16	
	24 低温引張試験		6	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	6	
	25 残留応力計測		—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	
	26 組織硬度分布調査	線状ガス 加熱加工	1	1	2	—	—	—	—	1	—	1	1	1	1	1	—	—	8	10	
K5D 30	21 シェルビニヤ試験	条件設定 のための 基礎試験	40	20	160	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	200	360	
	22 テンション試験		4	4	12	4	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	22	
	23 二重引張試験 ESS0 試験		4	4	8	—	—	—	4	—	5	—	—	4	2	—	—	—	15	23	
	24 低温引張試験		6	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	6	
	25 残留応力計測		—	—	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	
	26 組織硬度分布調査		1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	16	
K5E 30	21 シェルビニヤ試験		40	20	60	—	20	—	20	—	20	20	20	20	20	20	—	—	180	240	
	22 テンション試験		4	4	8	—	—	—	—	—	3	—	—	3	—	—	—	—	6	14	
	23 二重引張試験 ESS0 試験		4	4	8	—	—	—	—	—	5	—	—	3	2	—	—	—	10	18	
	24 低温引張試験		6	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	6	
	25 残留応力計測		—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	
	26 組織硬度分布調査		1	1	2	—	—	—	—	1	—	1	1	1	1	1	—	—	9	11	

※ 昭和45年度実施 報告済

※※ 昭和46年度実施

表1.3 船体用50和級高張力鋼の靱性およびガス加熱加工条件の影響に関する研究"年度別実施状況

年 度	鋼 種	試験項目	昭和44年度	昭和46年度										全 個 数
			加熱条件の設定	As Received	600°C A.C. 520°C W.C.	650°C A.C. 555°C W.C.	700°C A.C. A.C.	700°C A.C. 500°C W.C.	700°C A.C. 590°C W.C.	800°C A.C. 500°C W.C.	800°C A.C. 660°C W.C.	950°C A.C. 770°C W.C.		
		2-1 シャルピー 衝撃試験		20	20	20	20	20	20 (40)	20	20	20	240	
		2-2 デイ-アロチ 試 験		6	—	—	4	4	4	—	—	—	22	
		2-3 二重引張 ESSO 試 験	線状ガス加 熱加工条件 設定のための 基礎試験	4	—	—	4	—	4	—	—	—	12	
K5D 12.7		2-4 低温引張 試 験		6	—	—	—	—	—	—	—	—	6	
		2-5 残留応力 計 測		—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	
		2-6 組織硬度 分布調査		1	1	1	1	1	1 (1)	1	1	1	11	

() は両面加熱

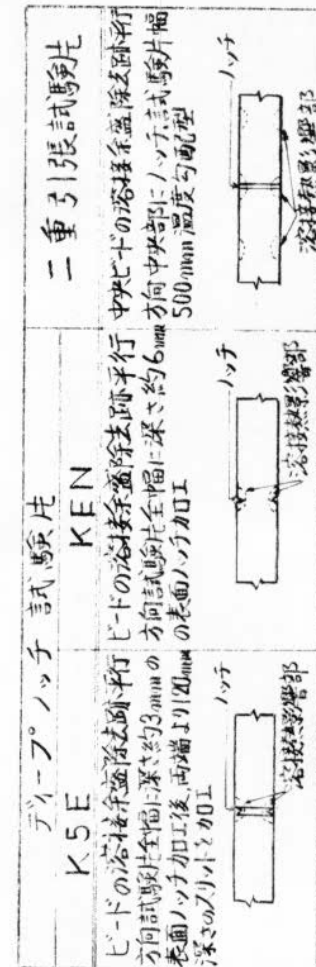
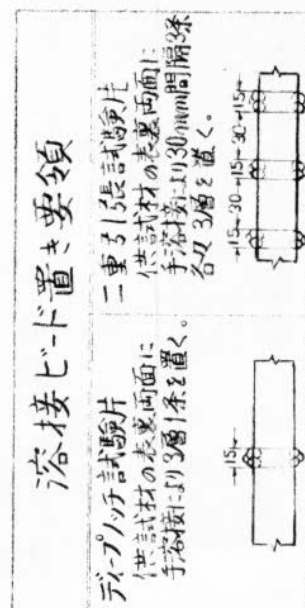
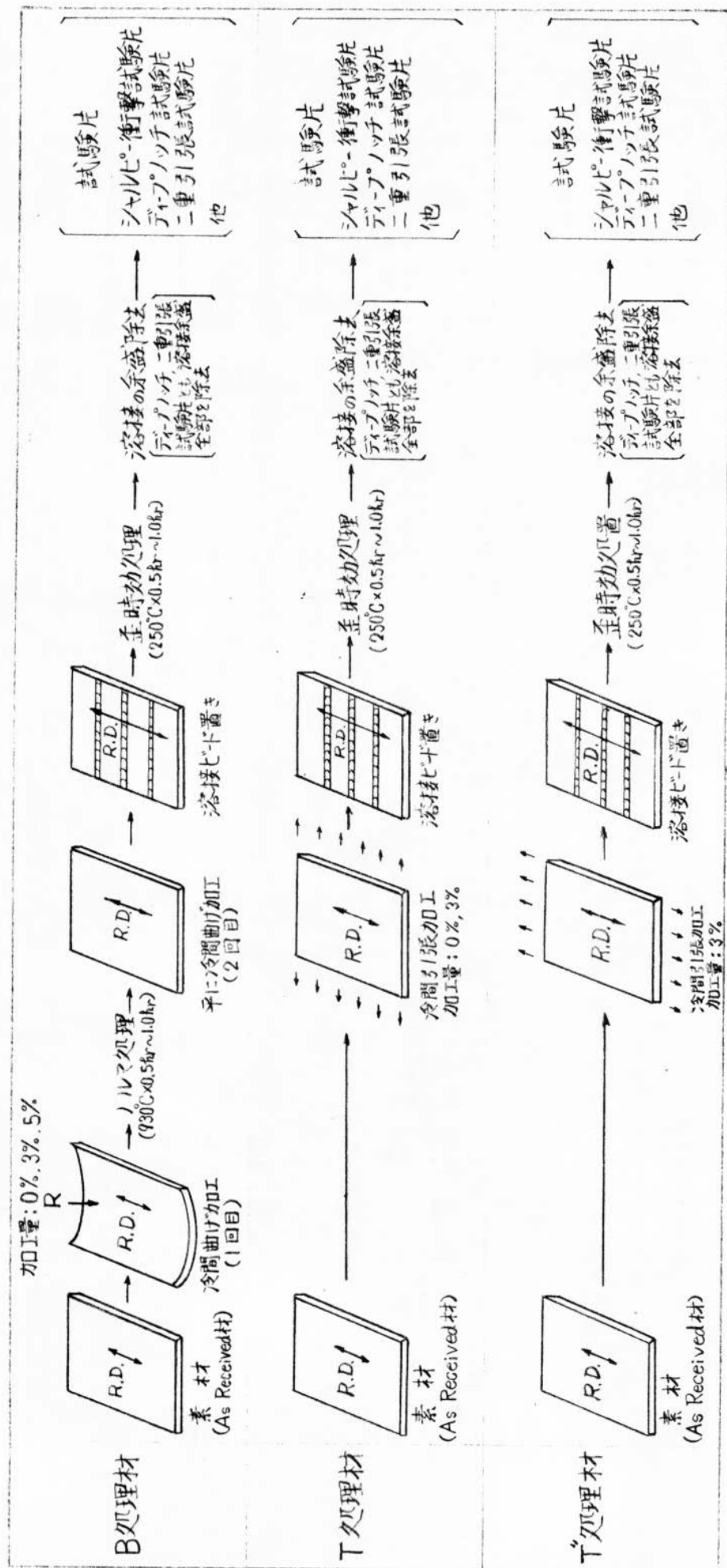


図 3.1 “船舶用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重量効果に関する研究” 試験片製作要領

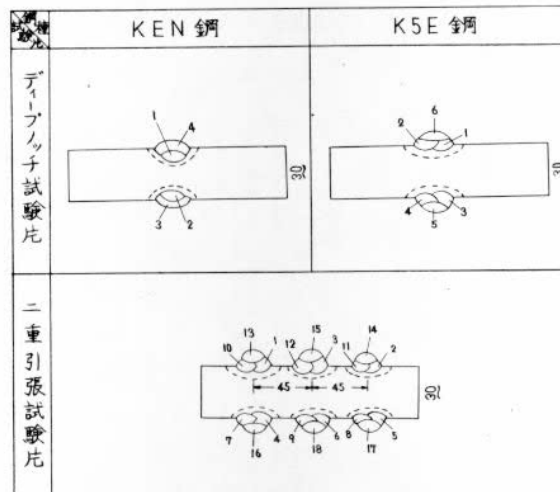
表3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼 種	熱処理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					引 張 試 験			衝 撃 試 験 kg-m
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	
KEN鋼	Normalized	30	0.13	0.28	1.01	0.010	0.016	34.0	48.0	32.0	18.8 at -10°C
K5E鋼	Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	38.2	55.1	23.7	

表3.2 溶 接 条 件

棒 種	棒 径 (mmφ)	溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	層間温度 (°C)
JIS D5016	5.0	200~210	150~160	<100

溶接順序



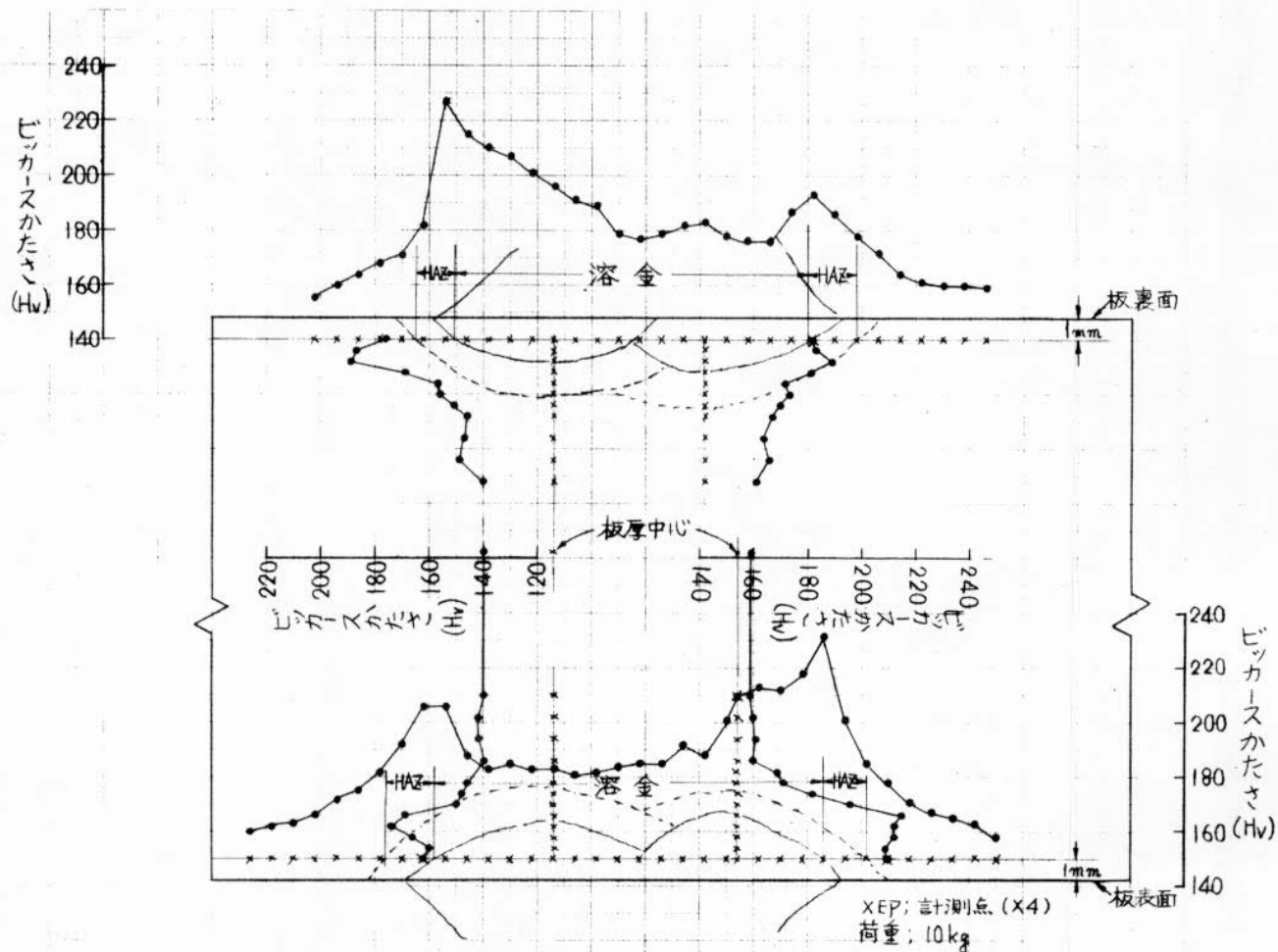


図3.2 ビッカース硬さ試験結果 (KEN鋼 T処理材3%加工材) (C15)

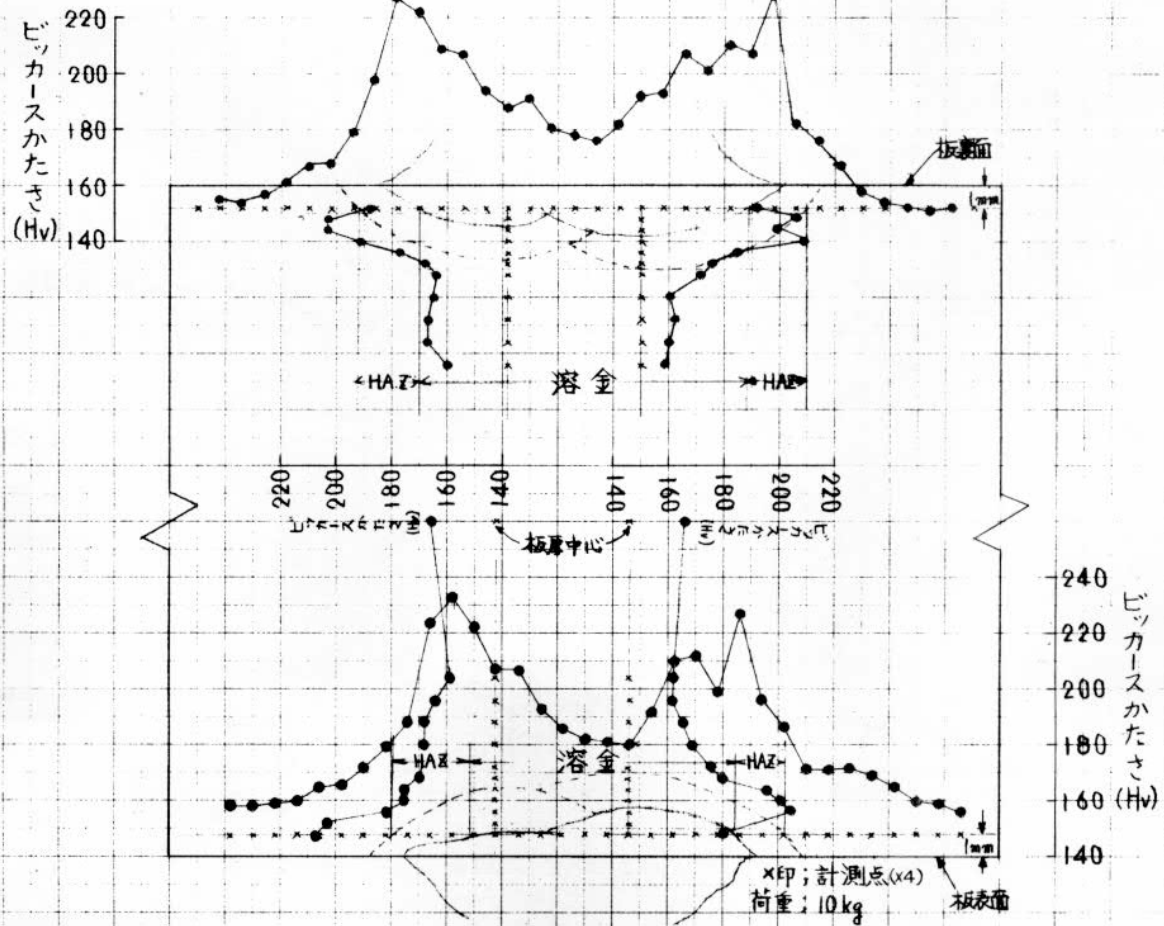
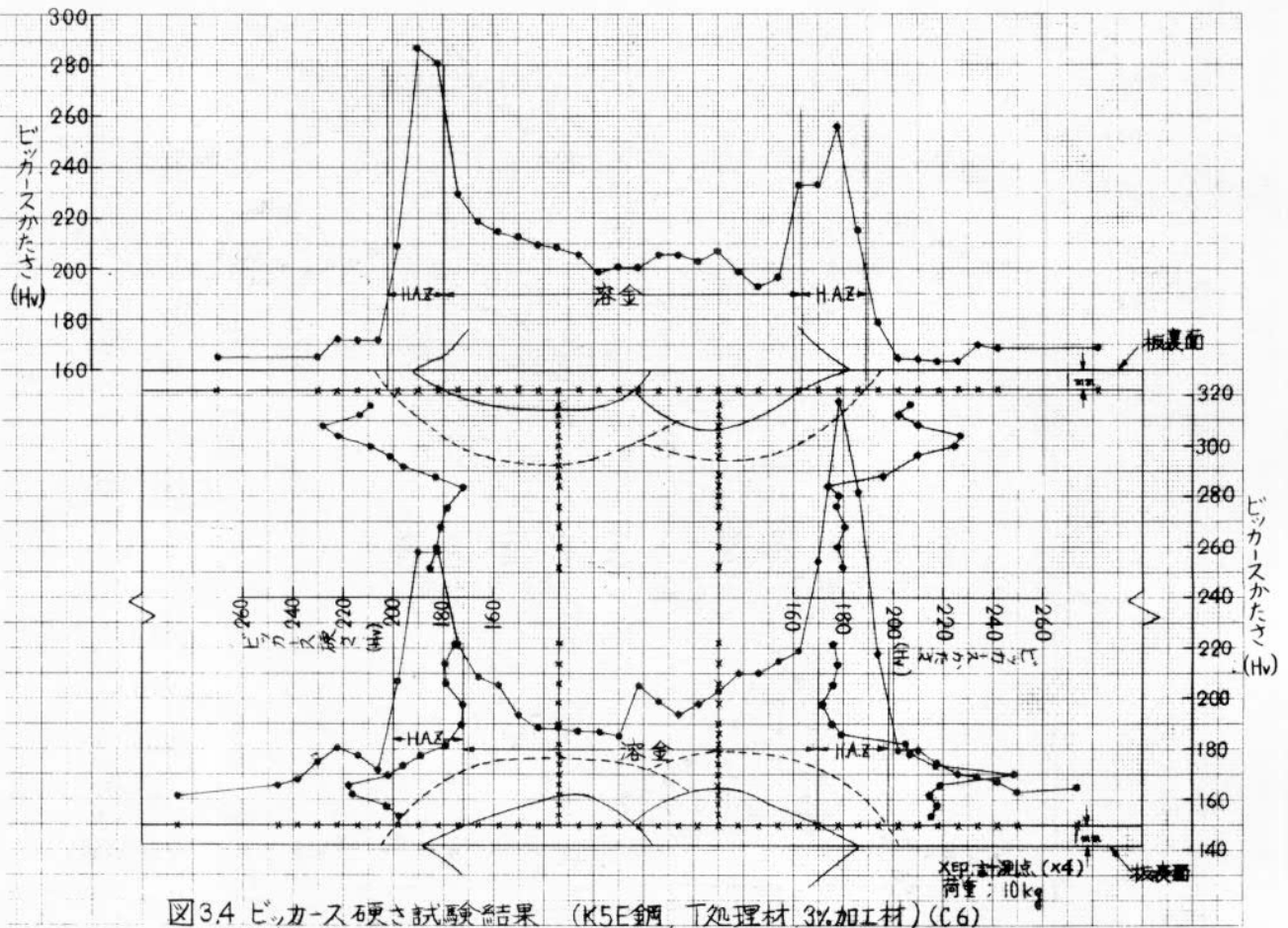


図 3.3 ビッカース硬さ試験結果 (KEN鋼 T処理材3%加工材) (C16)



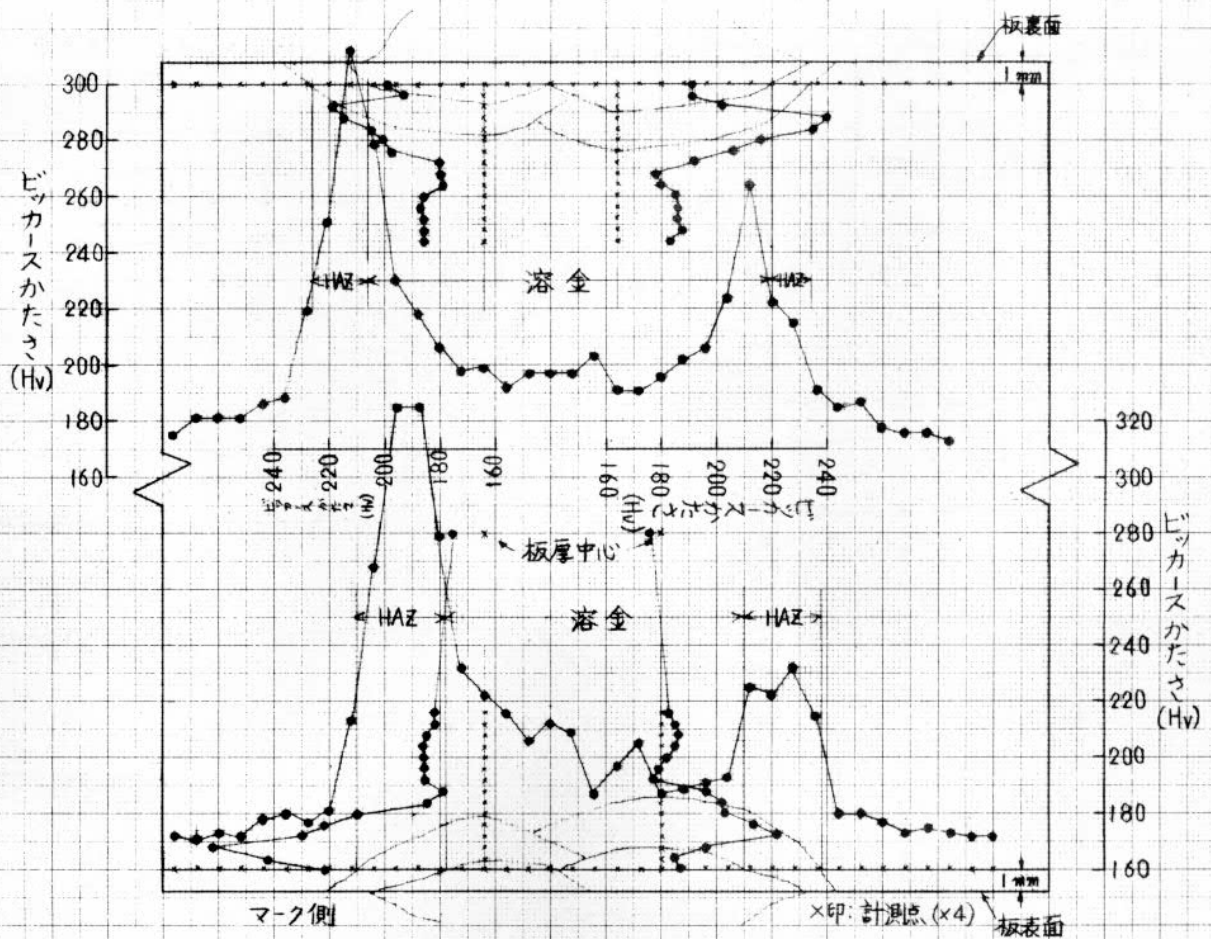


図 3.5 ビッカース硬さ試験結果 (K5E鋼, T 処理材 3% 加工材) (C7)

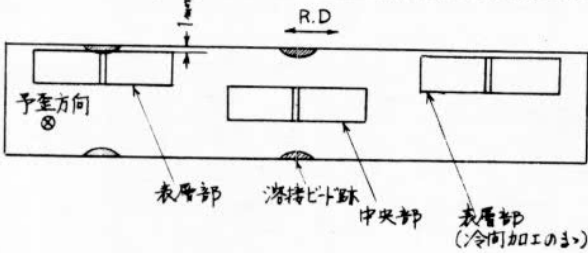
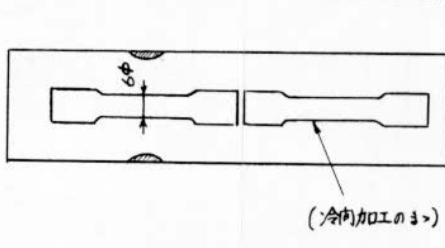
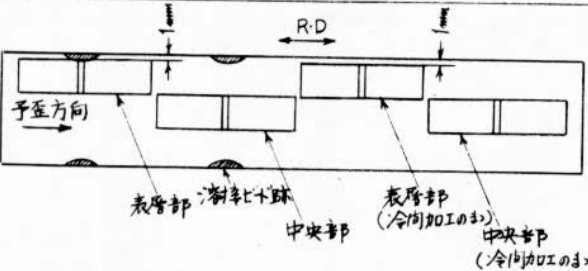
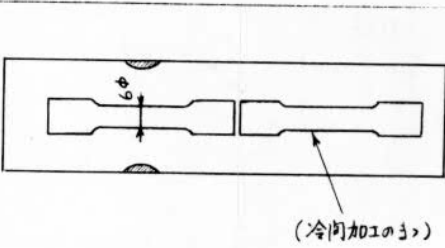
材料履歴	シャルピー衝撃試験片採取要領	低温引張試験片採取要領
T処理材 3%加工材		
T'処理材 3%加工材		

図 3.6 試験片採取要領

降伏点	○
引張強さ	●
真破断力	◇
伸び	▽
絞り	▼

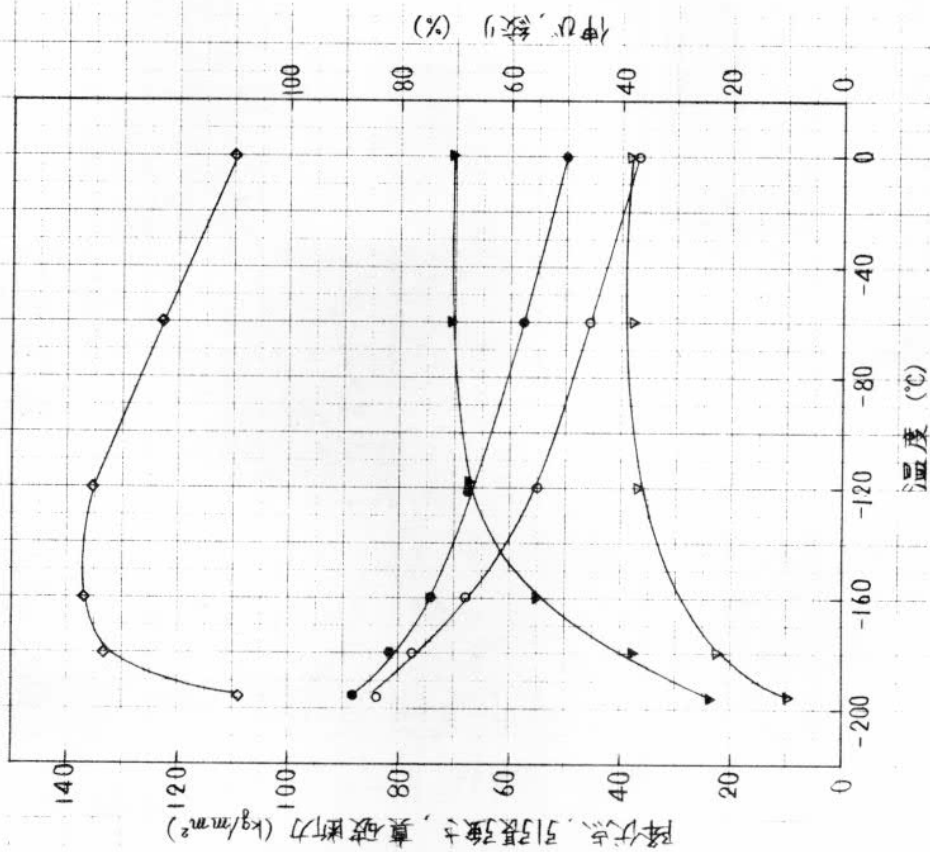


図 3.7 低温引張試験結果
(KEN鋼, 処理材 3% 加 I 材, 板厚 30 mm)

降伏点	●
引張強さ	▲
真破断力	■
伸び	▼
絞り	◆

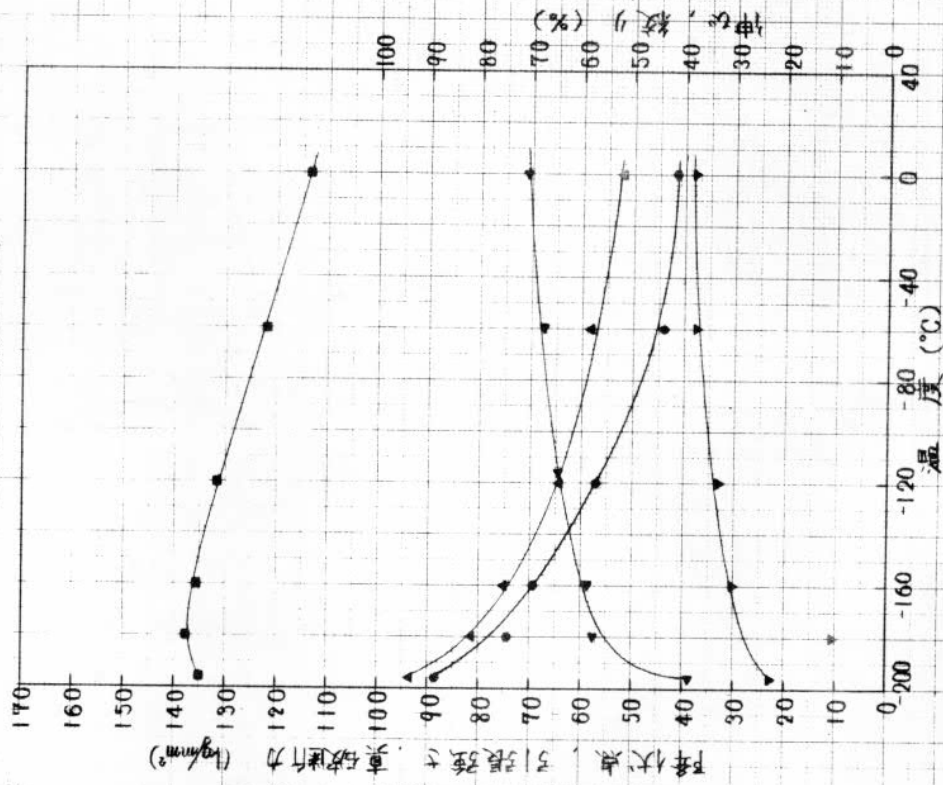


図 3.8 低温引張試験結果
(KEN鋼, T20 鋼材 3% 加 I 材, 板厚 30 mm)

●	降伏点
▲	引張強さ
■	真破断力
▼	伸び
◀▶	絞り

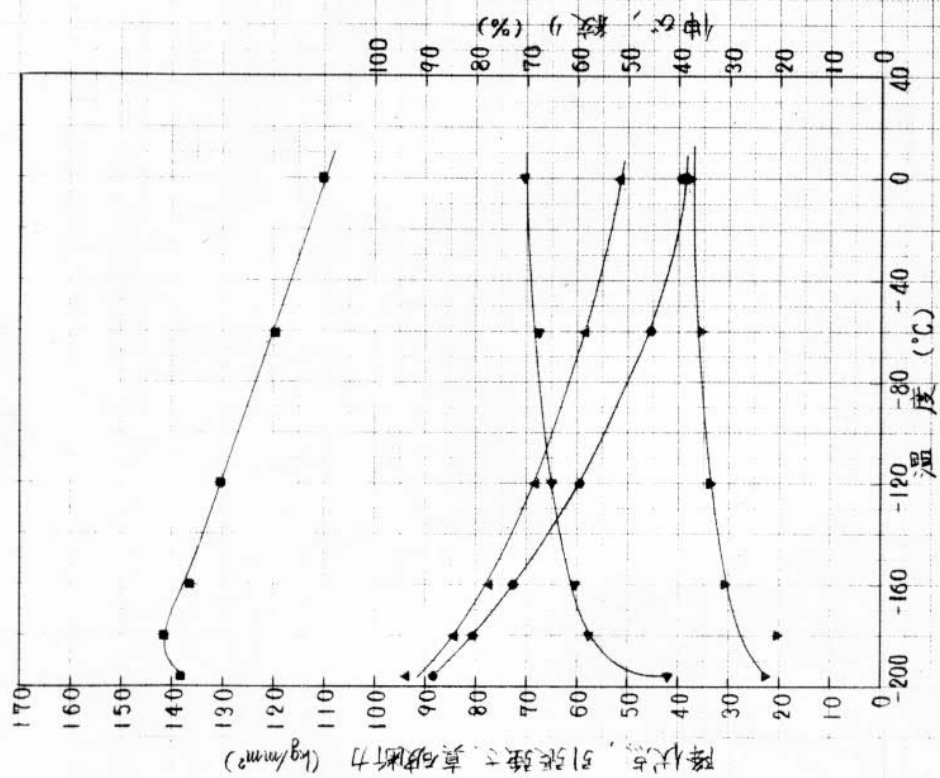


図 3.9 低温引張試験結果
(K5E鋼, T処理材 3%加工材, 板厚 30mm)
(冷間加工の法)

○	降伏点
●	引張強さ
◇	真破断力
▽	伸び
▶	絞り

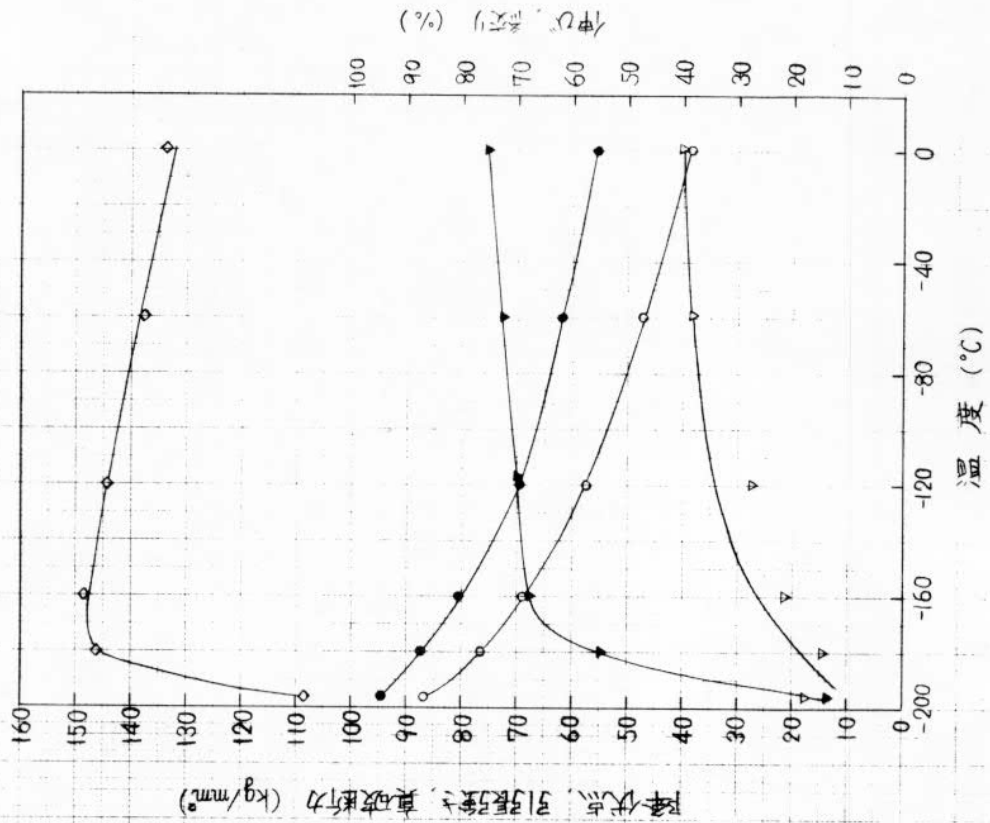


図 3.10 低温引張試験結果
(K5E鋼, T処理材 3%加工材, 板厚 30mm)

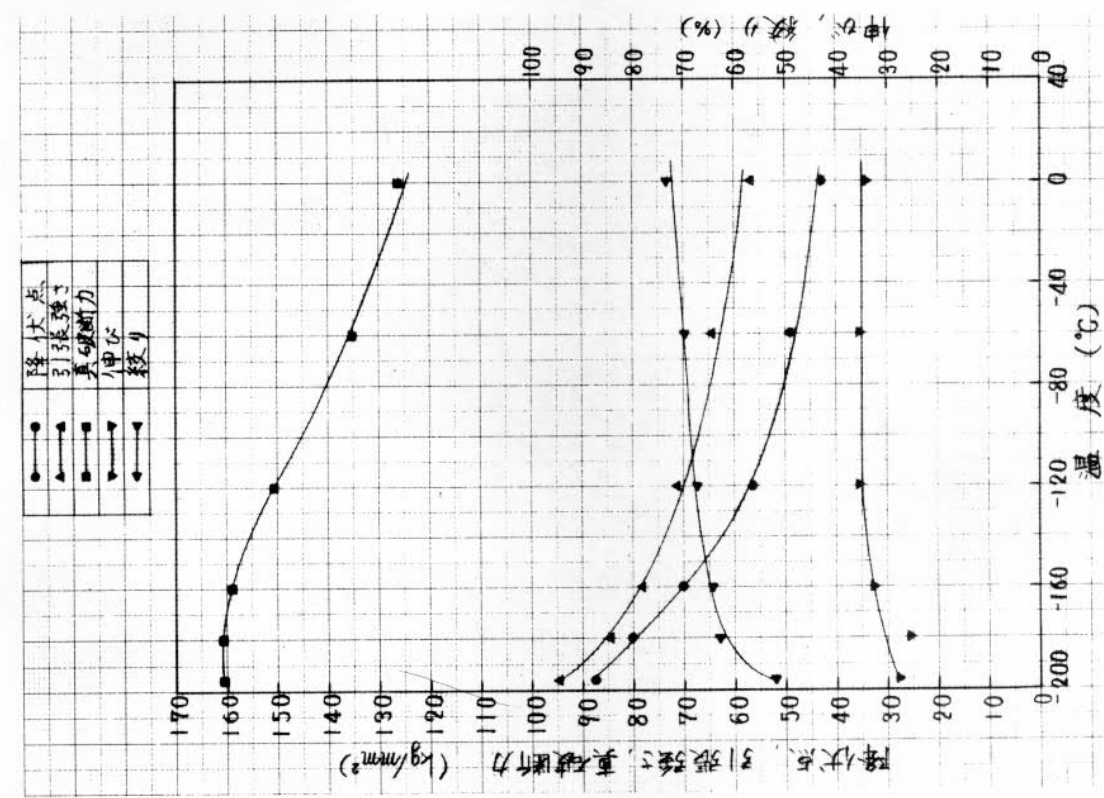


図 3.11 低温引張試験結果
(K5E鋼, 干処理材3%加工材, 板厚30mm)

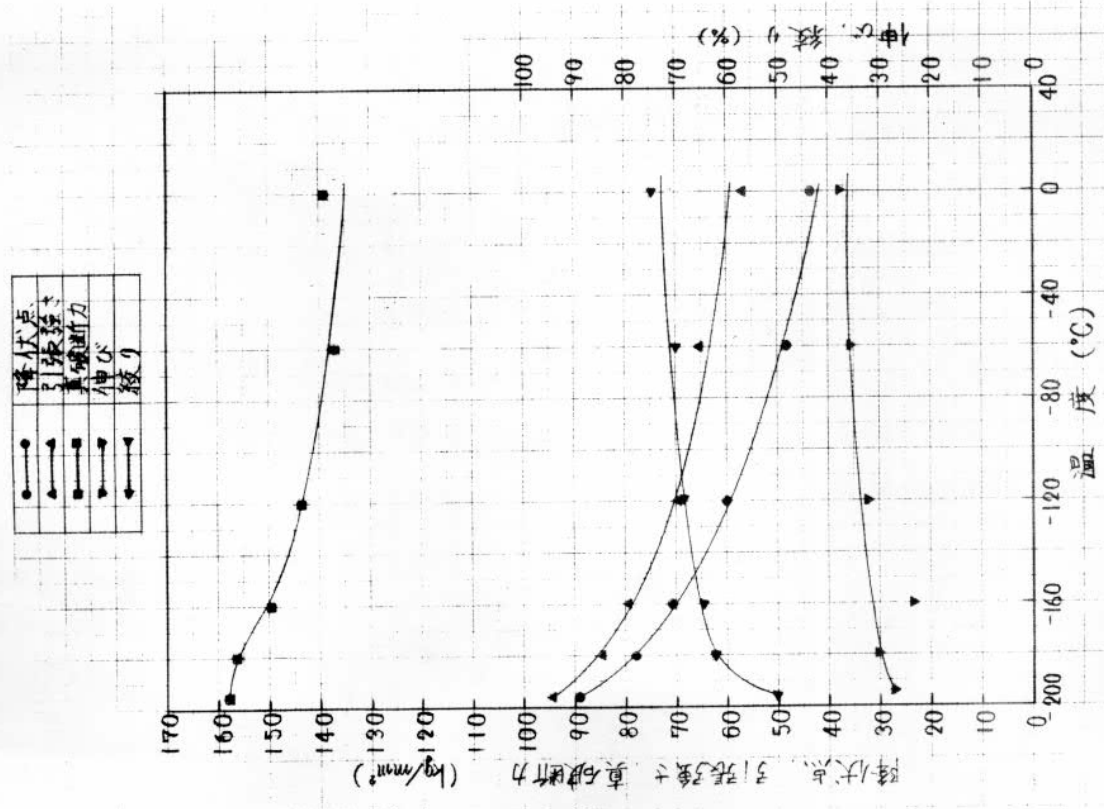


図 3.12 低温引張試験結果
(K5E鋼, 干処理材3%加工材, 板厚30mm)
(冷間加工のまは)

鋼種番号	記号	材料履歴	実験式	鋼種番号	記号	材料履歴	実験式
KEN	①	○ As Received 材	$\sigma_y = 26.5 \cdot e^{\frac{102.6}{T_K}}$	⑦	○ As Received 材	$\sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}}$	
	②	□ 処理材3%加工材		⑧	□ 処理材3%加工材		
	③	◇ 処理材3%加工材		⑨	◇ 処理材3%加工材	$\sigma_y = 25.6 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}}$	
	④	● 再ノルマ材		⑩	● 再ノルマ材		
	⑤	■ 処理材3%加工材		⑪	■ 処理材3%加工材		
	⑥	◆ 処理材5%加工材		⑫	◆ 処理材5%加工材		

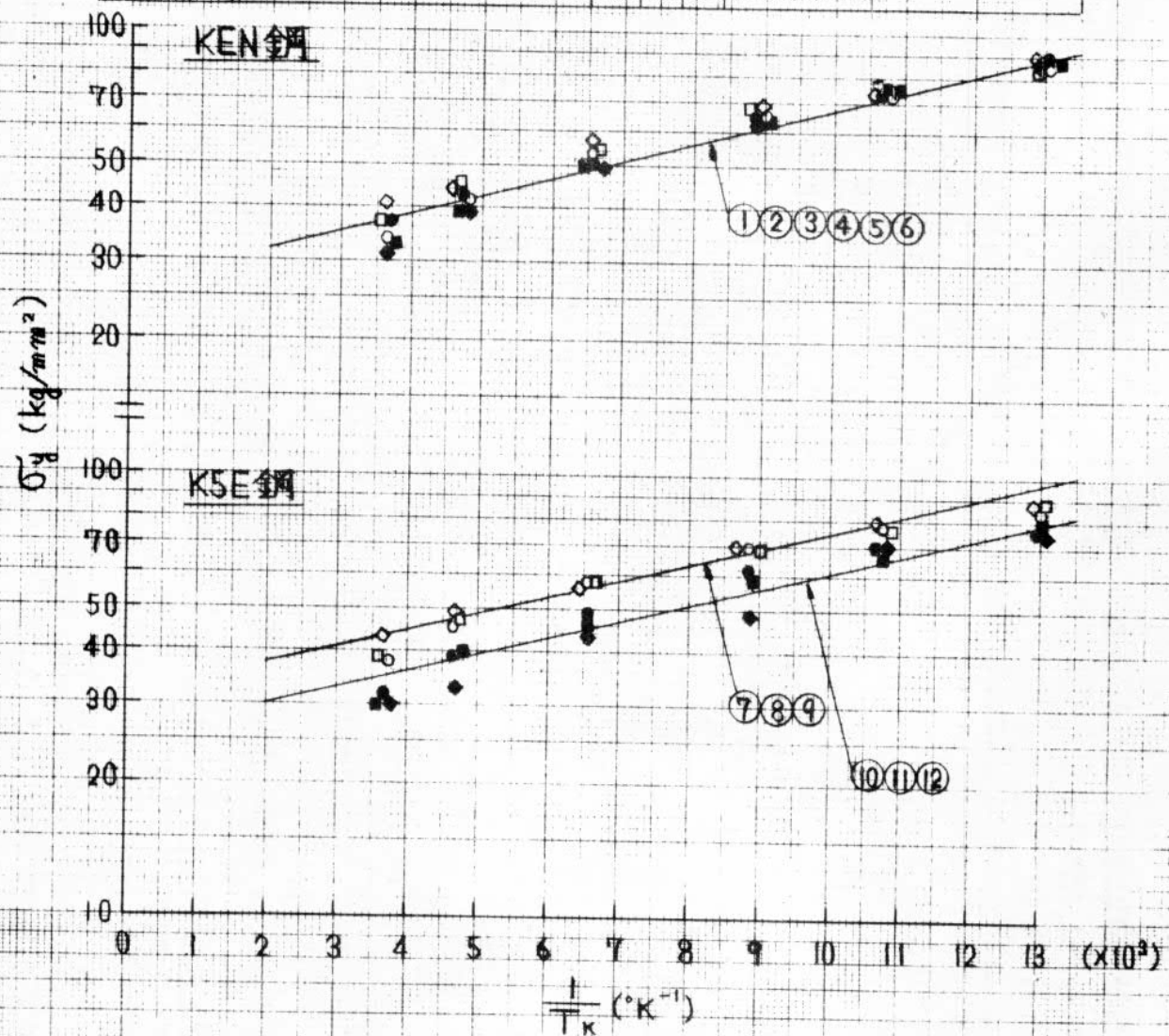


図 3.13 降伏点と温度の関係
(KEN鋼, K5E鋼, 板厚30mm)

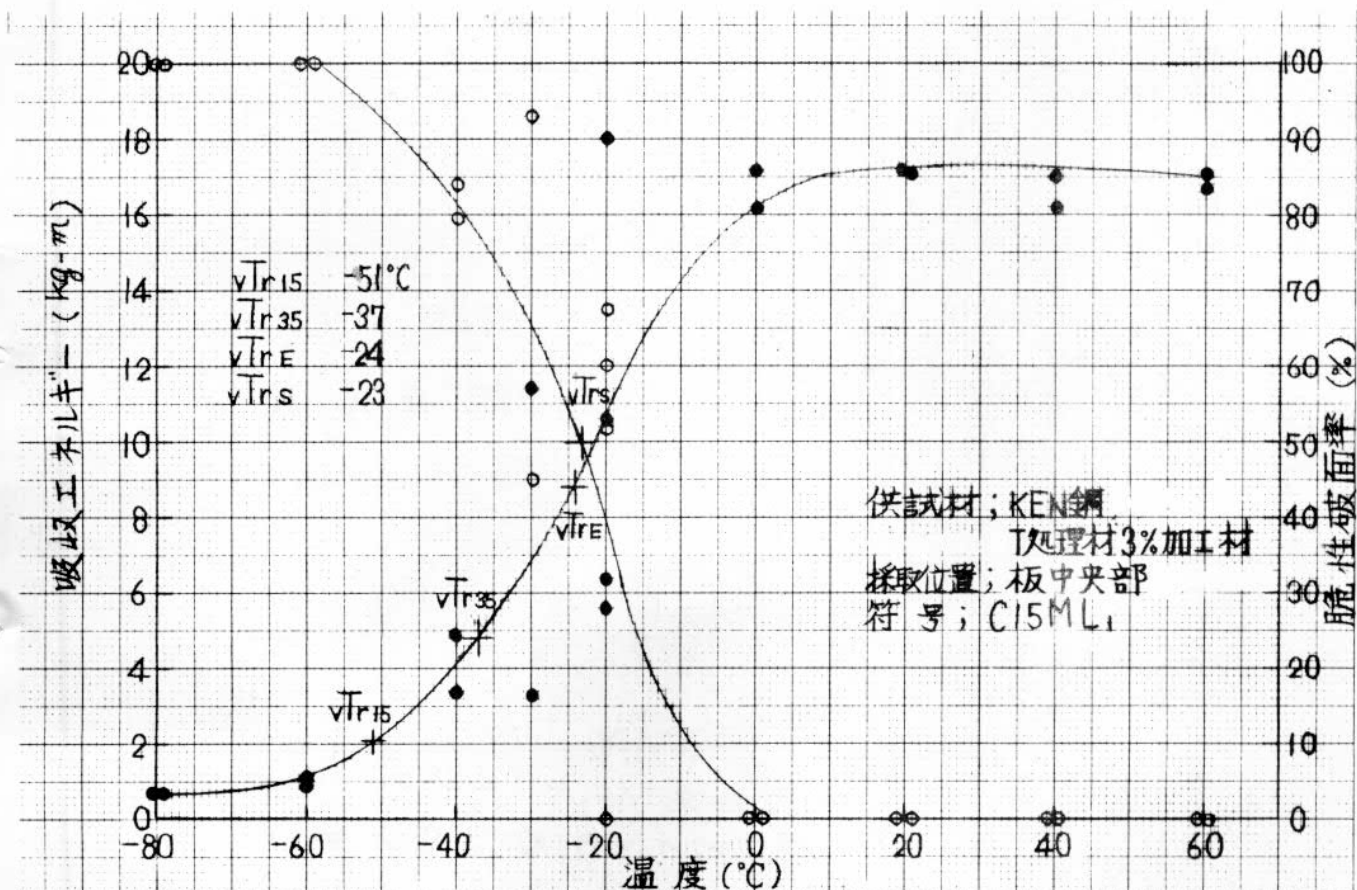


図 3.14 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

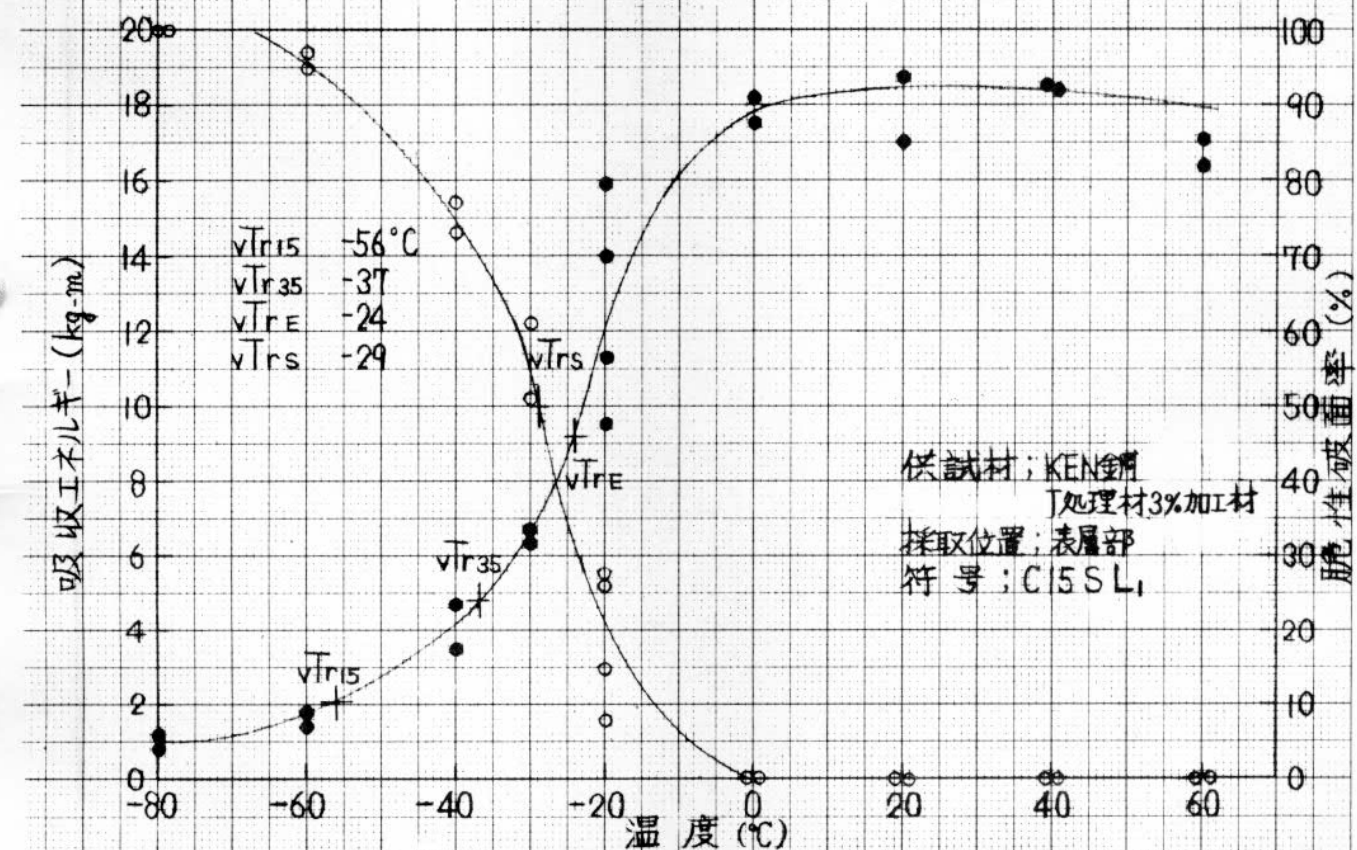


図 3.15 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

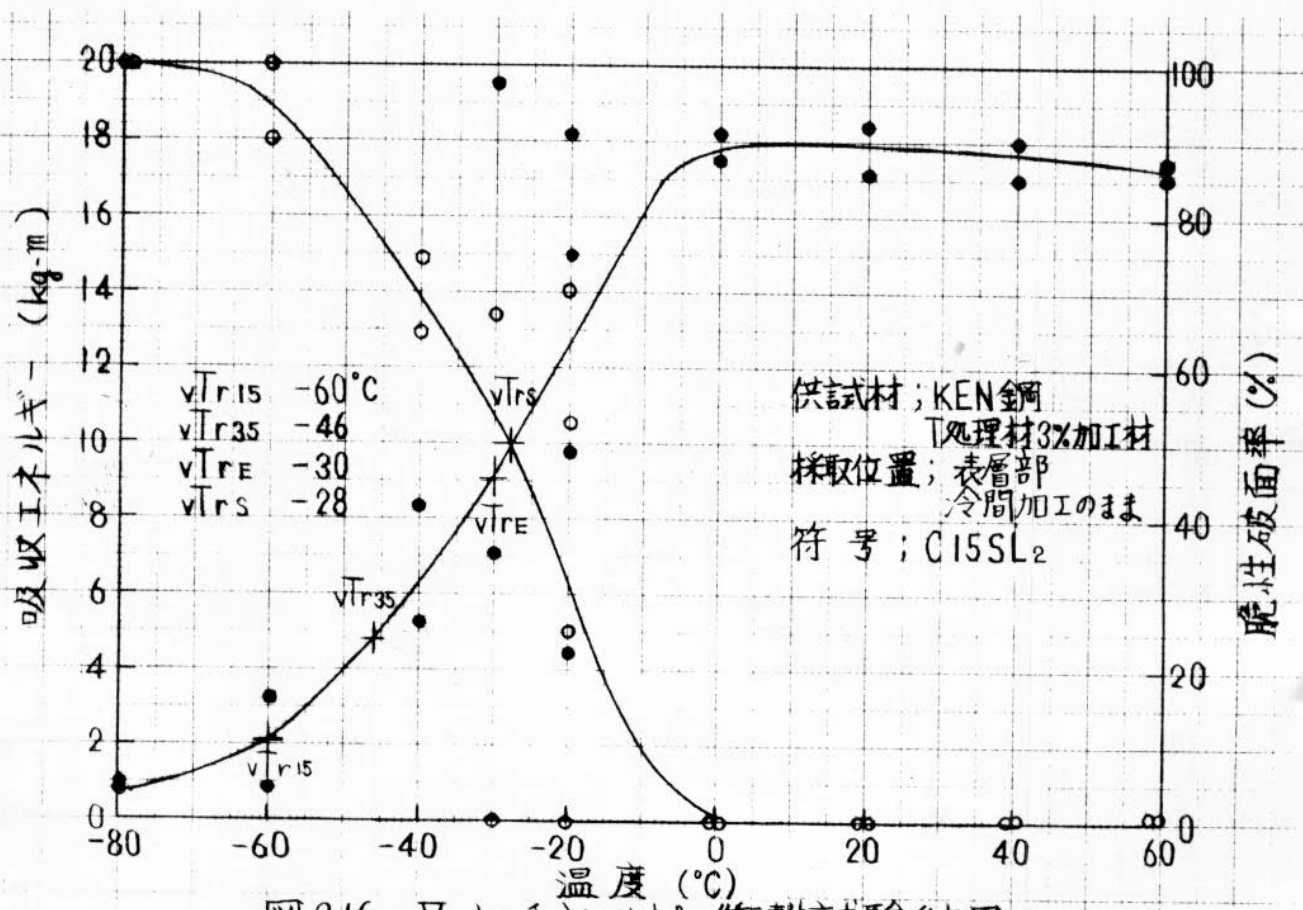


図3.16 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

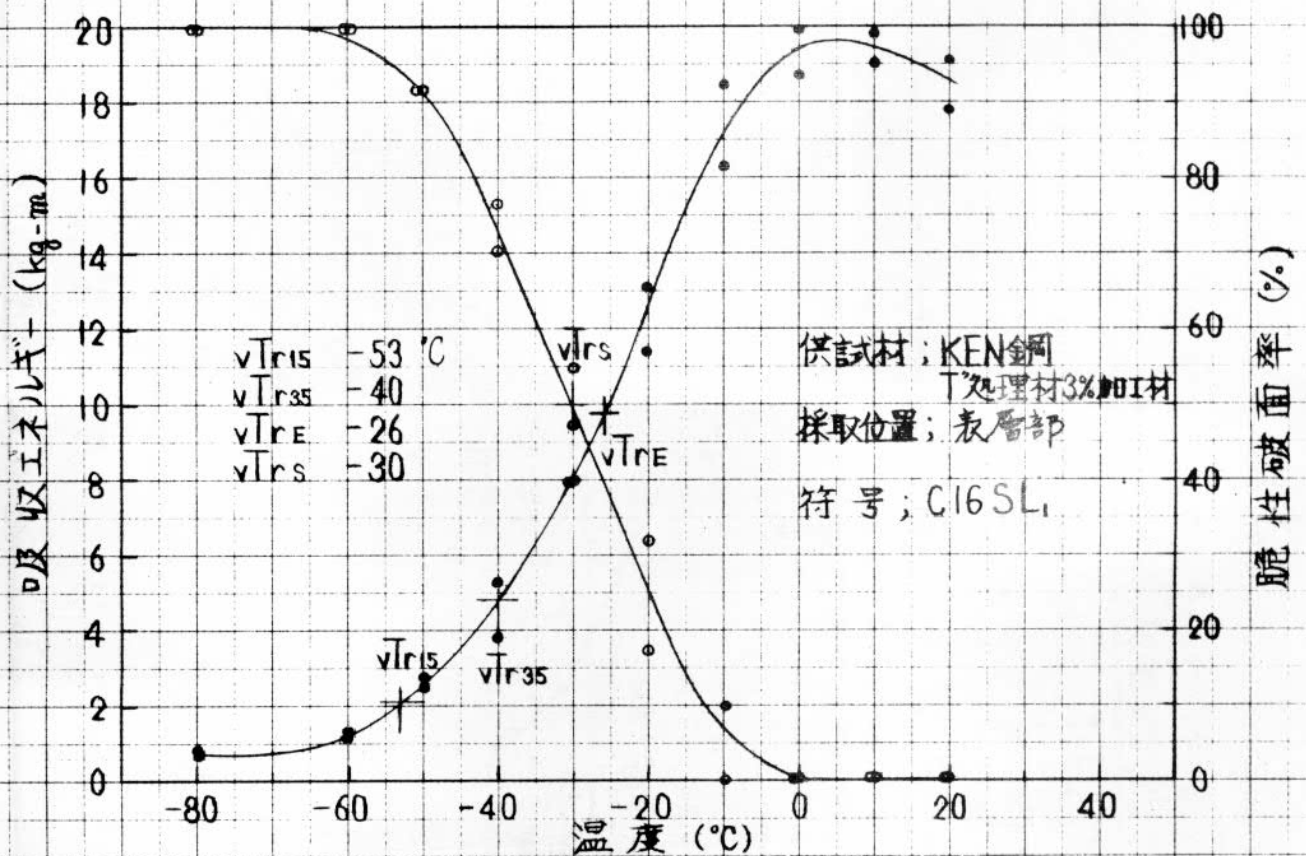


図 3.17 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

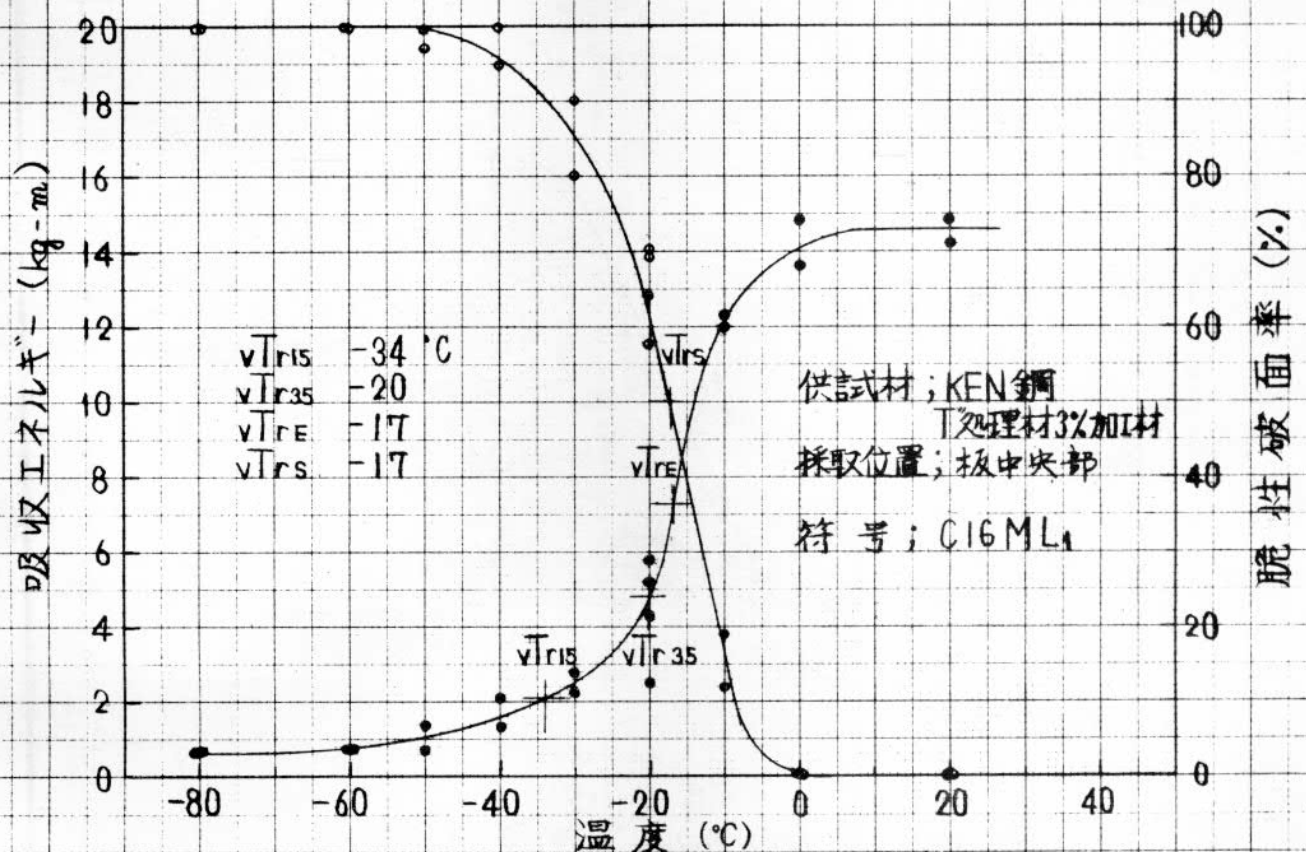


図 3.18 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

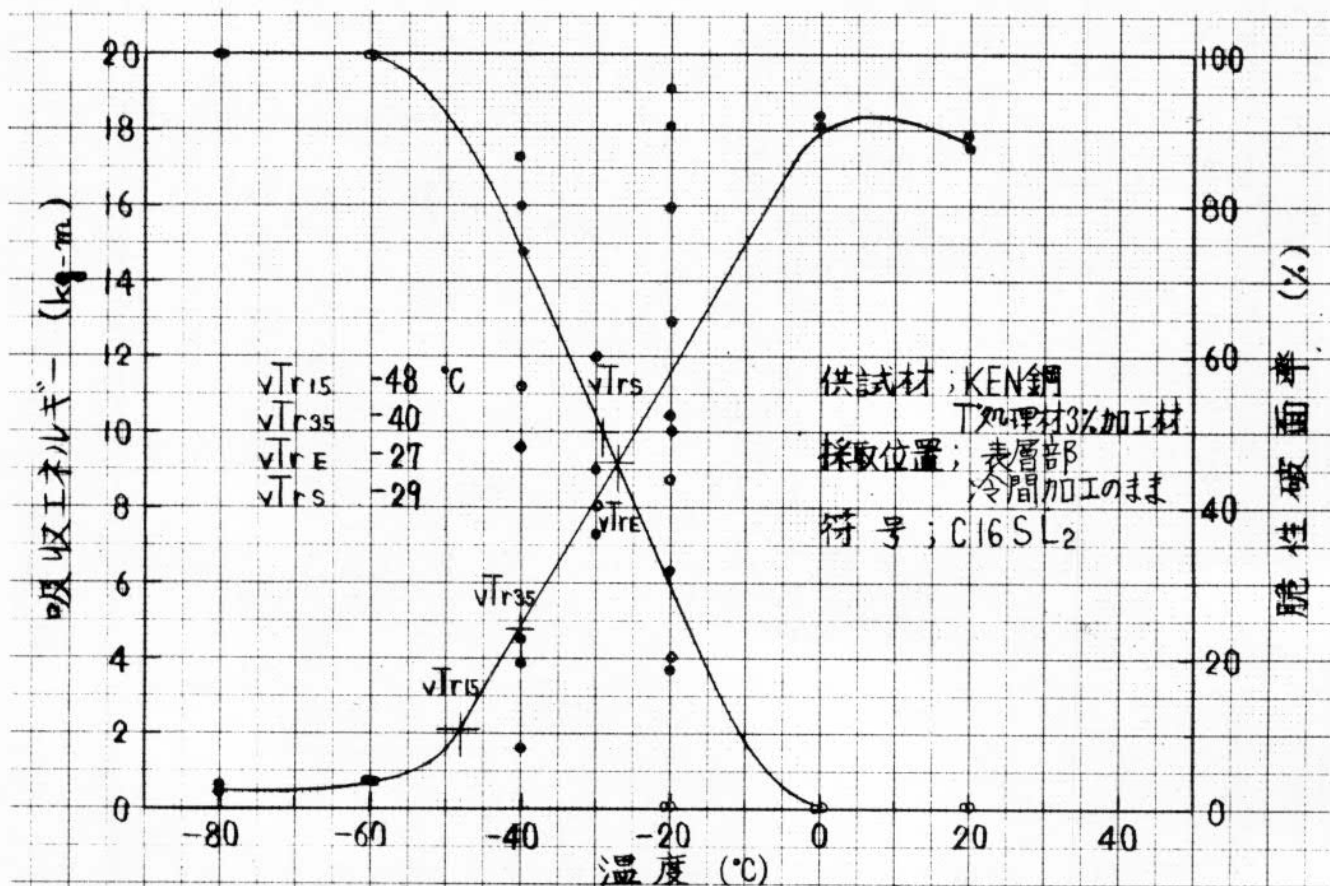


図 3.19 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

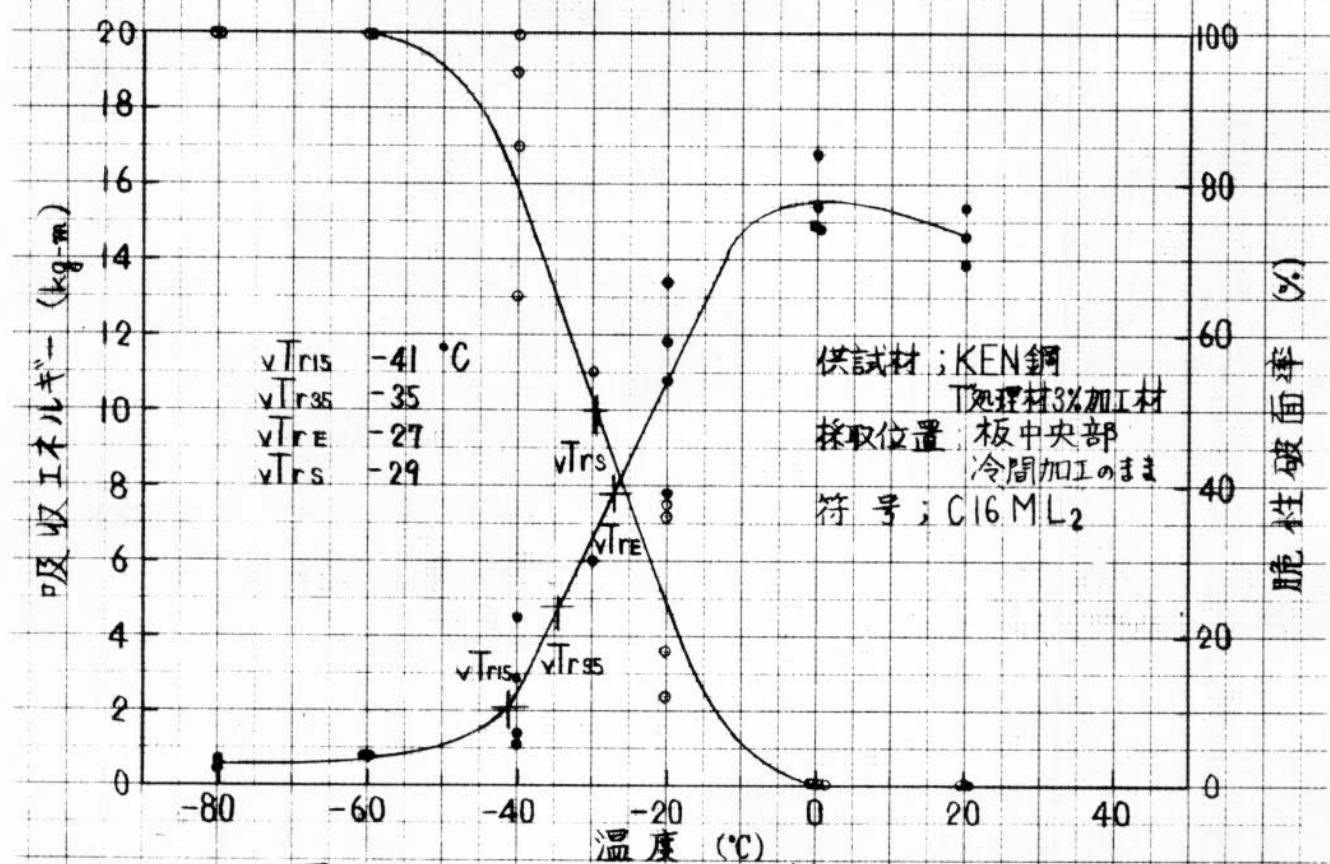


図 3.20 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

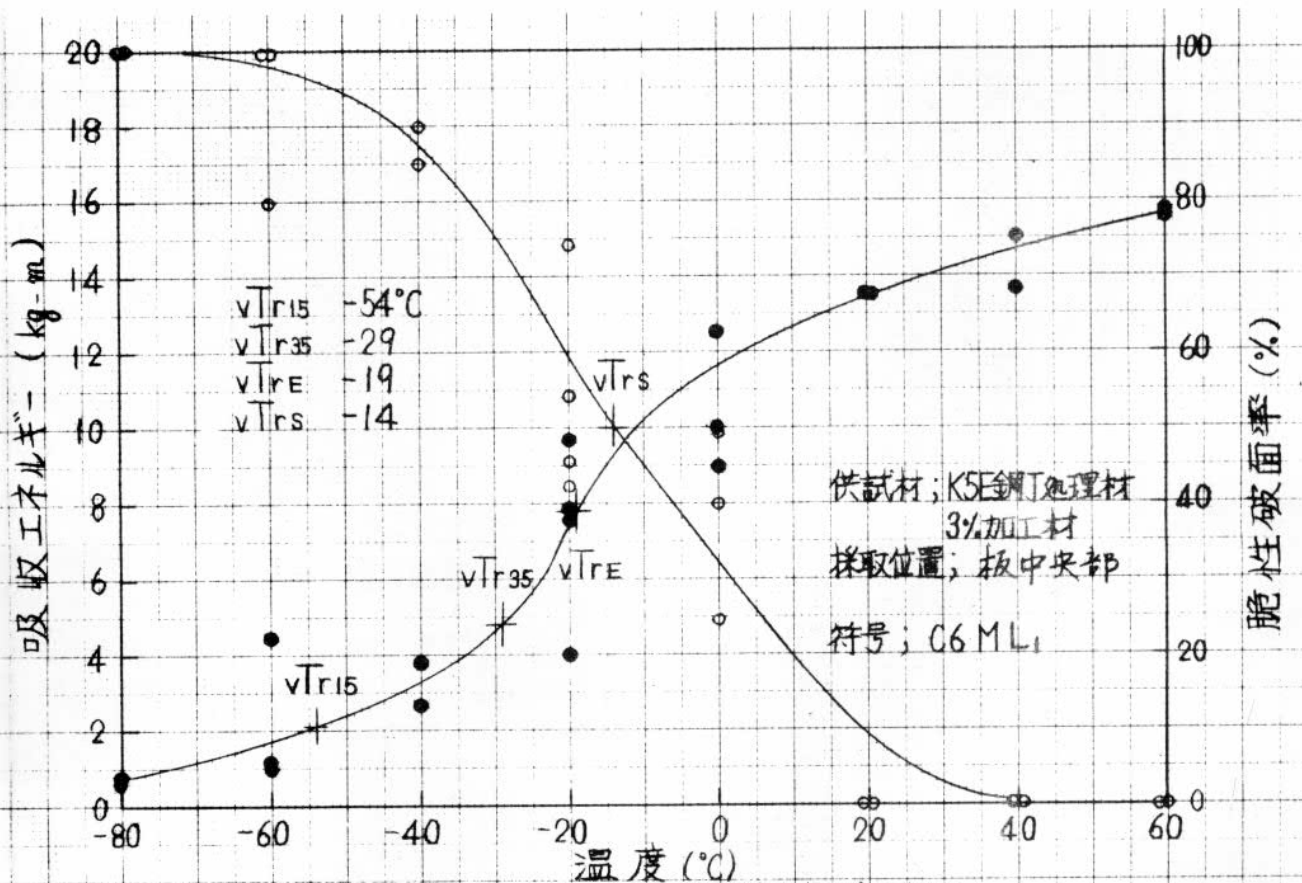


図 3.21 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

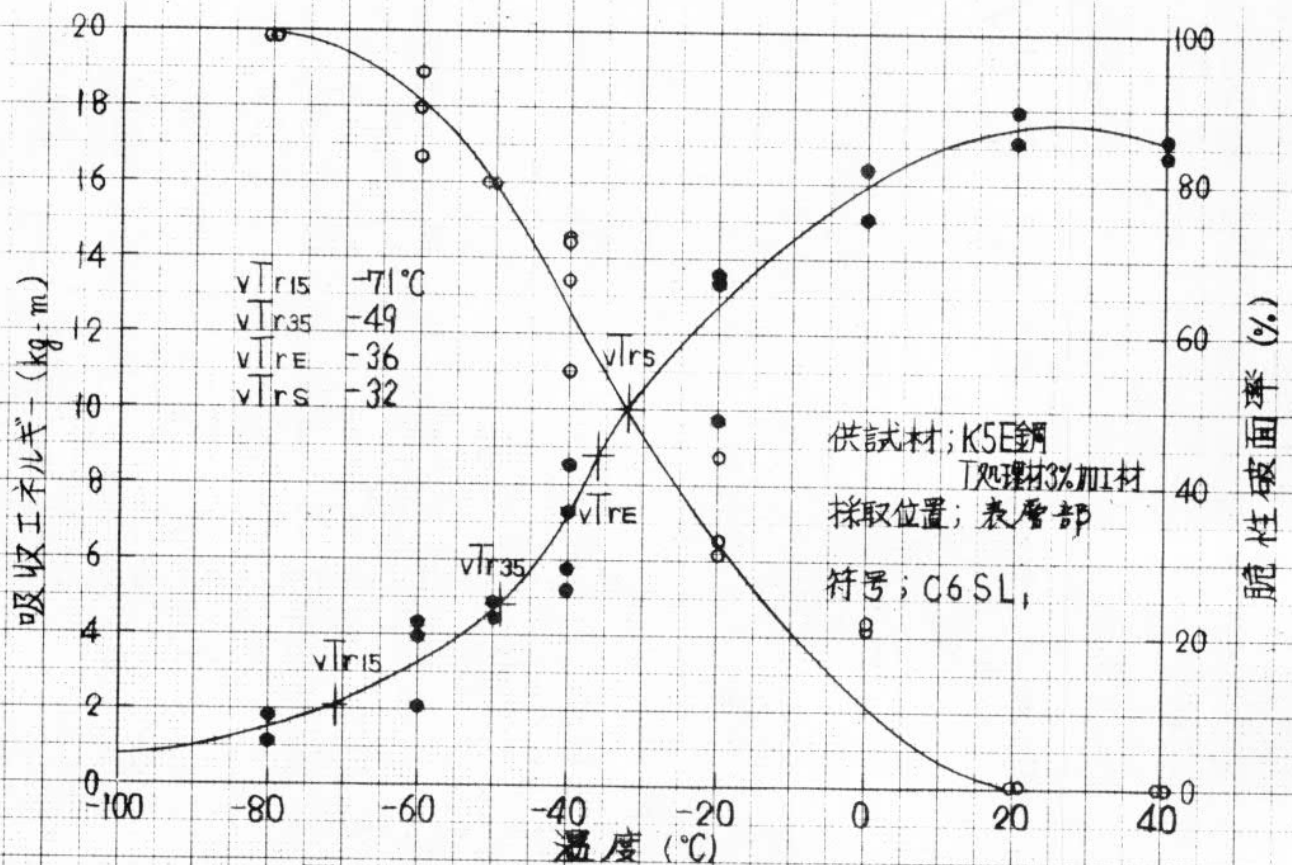


図 3.22 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

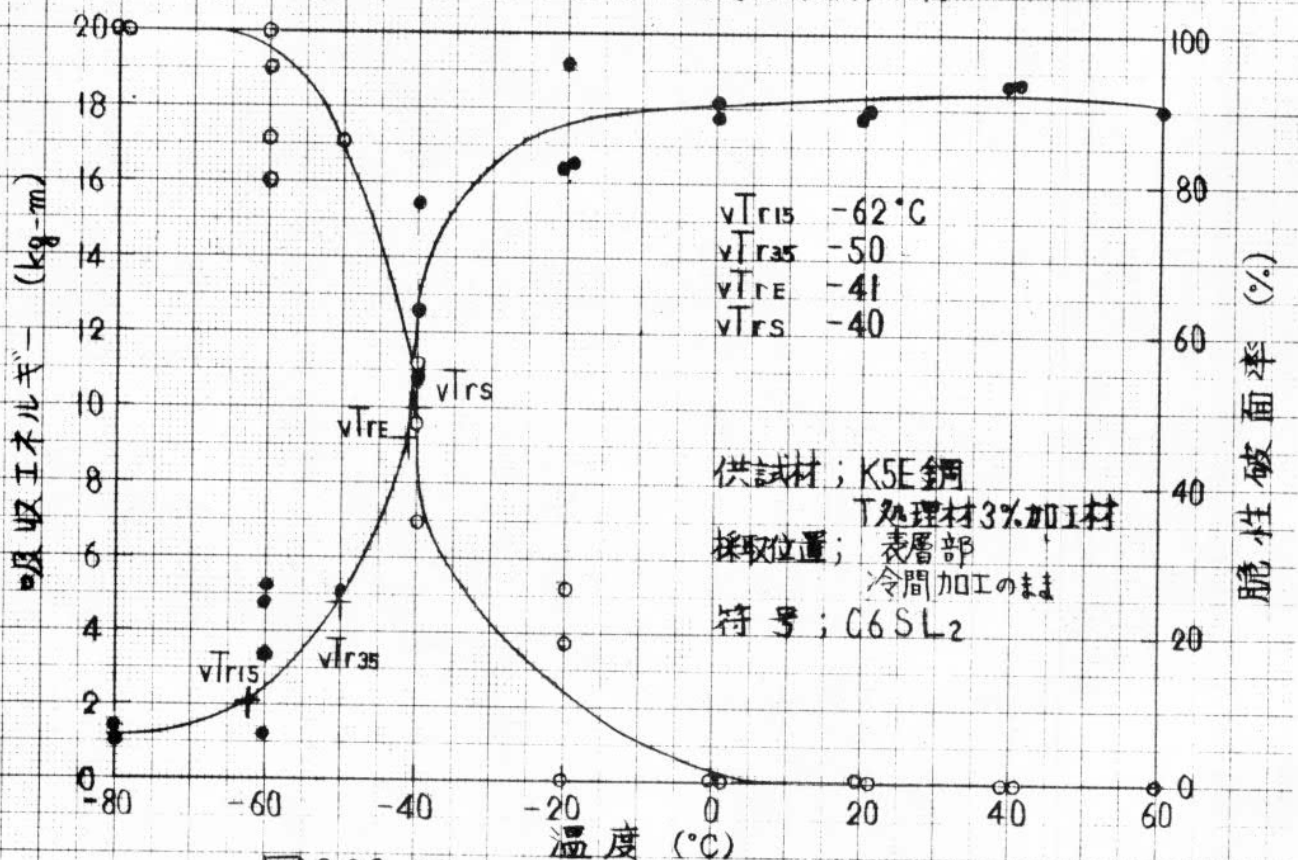


図 3.23 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

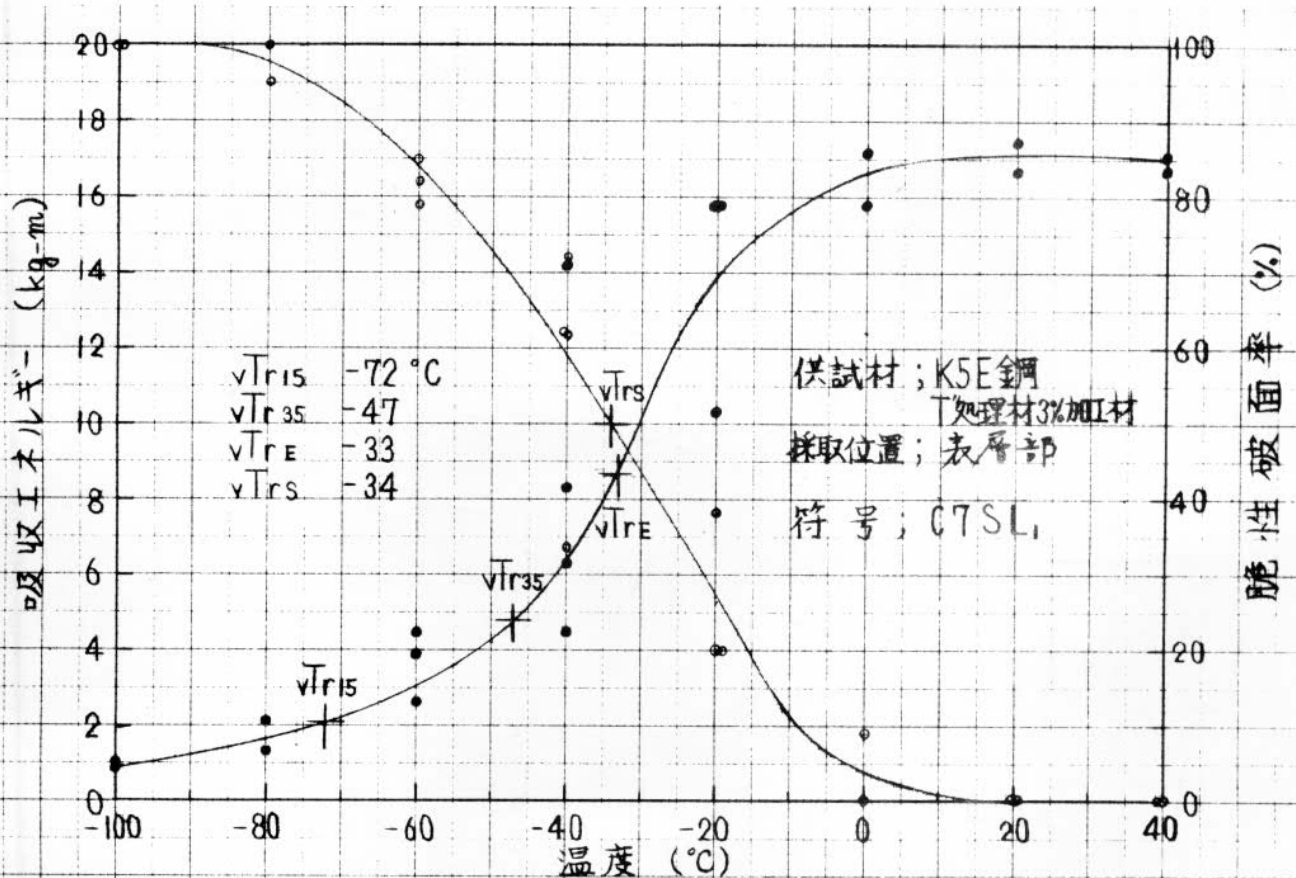


図 3.24, V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

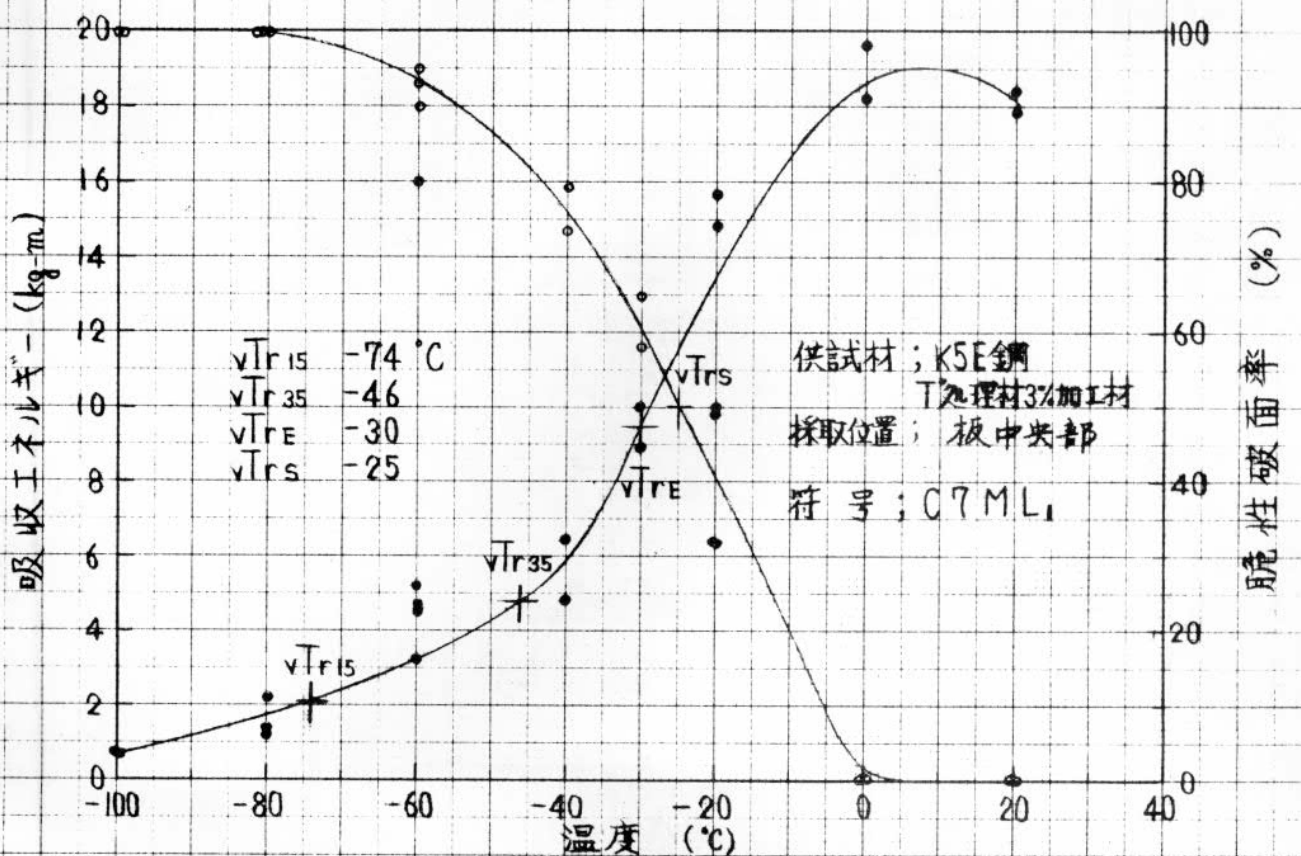


図 3.25, V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

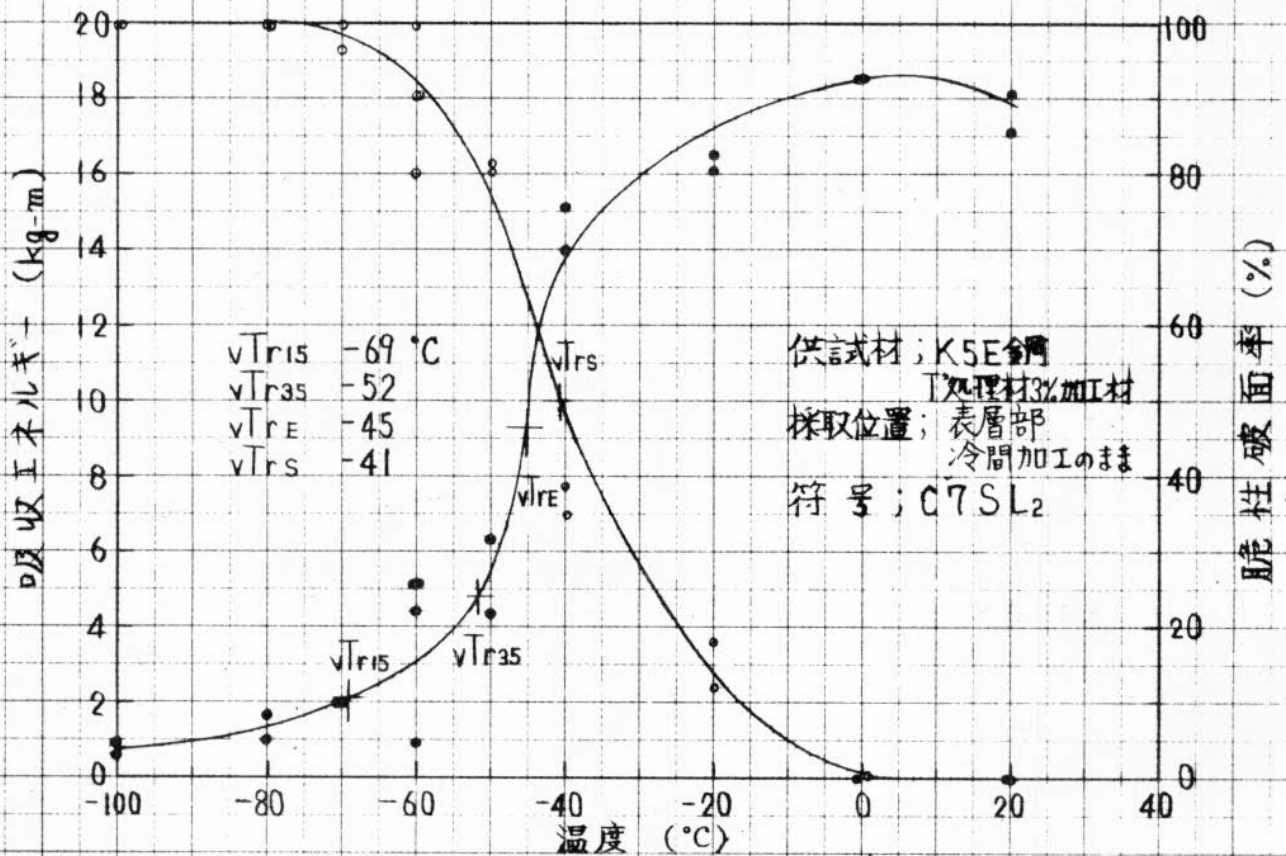


図 3.26 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

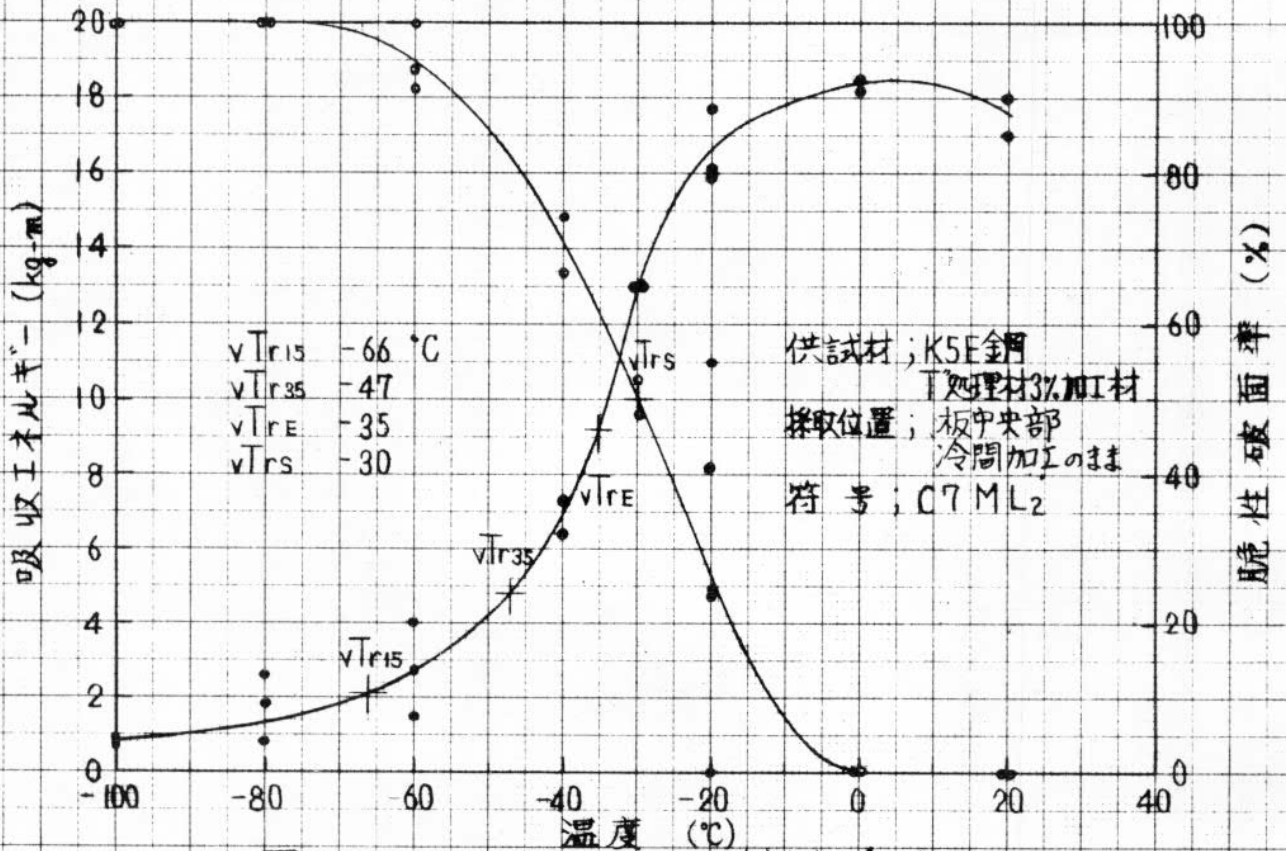


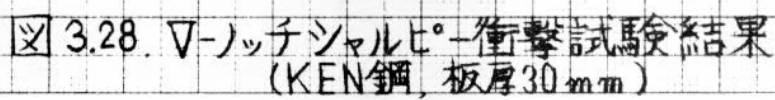
図 3.27 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

表 3.3 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果一覧
(KEN鋼, 板厚30_{mm})

材料履歴		採取位置	方位	試験片 符号	各種遷移温度 (°C)				vE ₋₁₀ (kg-m)
					vTr ₁₅	vTr ₃₅	vTr _E	vTr _s	
As Received 材		表層部	圧延平行	C10SL	-65	-51	-36	-37	17.2
		中央部	圧延平行	C10ML	-51	-41	-34	-36	13.6
		表層部	圧延直角	C10SC	-54	-19	-36	-34	5.4
		中央部	圧延直角	C10MC	-45	-23	-34	-33	5.6
再ノルマ材		表層部	圧延平行	C11SL	-65	-48	-40	-38	16.7
		中央部	圧延平行	C11ML	-53	-43	-37	-35	13.3
B処理材	0%加工材	表層部	圧延平行	C12SL	-54	-38	-20	-24	14.5
		中央部	圧延平行	C12ML	-59	-39	-22	-22	12.9
	3%加工材	中央部	圧延平行	C13ML	-56	-36	-20	-20	12.6
		圧縮側	圧延平行	C13CL	-56	-30	-12	-19	12.0
		引張側	圧延平行	C13TL	-58	-37	-16	-21	13.5
	5%加工材	中央部	圧延平行	C14ML	-50	-36	-31	-32	12.6
		圧縮側	圧延平行	C14CL	-48	-30	-19	-19	13.9
		引張側	圧延平行	C14TL	-43	-32	-22	-24	15.5
T処理材	0%加工材	表層部	圧延平行	C42SL	-61	-38	-21	-22	16.9
		中央部	圧延平行	C42ML	-59	-38	-25	-21	14.8
		中央部	圧延直角	C42MC	-47	-17	-31	-31	5.6
	3%加工材	表層部	圧延平行	C15SL ₁	-56	-37	-24	-29	16.2
		中央部	圧延平行	C15ML ₁	-51	-37	-24	-23	14.2
		表層部 (冷間加工の跡)	圧延平行	C15SL ₂	-60	-46	-30	-28	16.2
T'処理材	3%加工材	表層部	圧延平行	C16SL ₁	-53	-40	-26	-30	17.2
		中央部	圧延平行	C16ML ₁	-34	-20	-17	-17	12.2
		表層部 (冷間加工の跡)	圧延平行	C16SL ₂	-48	-40	-27	-29	15.0
		中央部 (冷間加工の跡)	圧延平行	C16ML ₂	-41	-35	-27	-29	14.8

表 3.4 V-ノッチシャルピー-衝撃試験結果一覧
(K5E鋼, 板厚30mm)

材料履歴		採取位置	方位	試験片 符号	各種遷移温度 (°C)				vE ⁻¹⁷ (kg-m)
					vTr ₁₅	vTr ₃₅	vTr _E	vTr _S	
As Received 材		表層部	圧延平行	C1SL	-94	-60	-38	-35	16.0
		中央部	圧延平行	C1ML	-92	-59	-41	-38	15.4
		表層部	圧延直角	C1SC	-78	-39	-35	-39	7.8
		中央部	圧延直角	C1MC	-68	-36	-36	-40	7.0
再ノルマ材		表層部	圧延平行	C2SL	-64	-45	-17	-8	10.0
		中央部	圧延平行	C2ML	-51	-33	-18	-9	9.8
B処理材	0%加工材	表層部	圧延平行	C3SL	-52	-31	-16	-12	8.7
		中央部	圧延平行	C3ML	-59	-39	-17	-11	8.5
	3%加工材	中央部	圧延平行	C4ML	-28	-6	13	12	3.4
		圧縮側	圧延平行	C4CL	-49	-31	-7	-14	7.5
		引張側	圧延平行	C4TL	-44	-31	-17	-15	8.6
	5%加工材	中央部	圧延平行	C5ML	-37	-13	6	8	4.4
		圧縮側	圧延平行	C5CL	-46	-27	-9	-12	7.6
		引張側	圧延平行	C5TL	-52	-32	-16	-19	8.8
T処理材	0%加工材	表層部	圧延平行	C41SL	-83	-60	-39	-36	17.3
		中央部	圧延平行	C41ML	-72	-56	-38	-36	13.2
		中央部	圧延直角	C41MC	-68	-38	-36	-36	7.4
	3%加工材	表層部	圧延平行	C6SL ₁	-71	-49	-36	-32	13.3
		中央部	圧延平行	C6ML ₁	-54	-29	-19	-14	8.4
		表層部 (冷間加工の部)	圧延平行	C6SL ₂	-62	-50	-41	-40	17.7
T処理材	3%加工材	表層部	圧延平行	C7SL ₁	-72	-47	-33	-34	14.5
		中央部	圧延平行	C7ML ₁	-74	-46	-30	-25	14.6
		表層部 (冷間加工の部)	圧延平行	C7SL ₂	-69	-52	-45	-41	17.5
		中央部 (冷間加工の部)	圧延平行	C7ML ₂	-66	-47	-35	-30	17.1



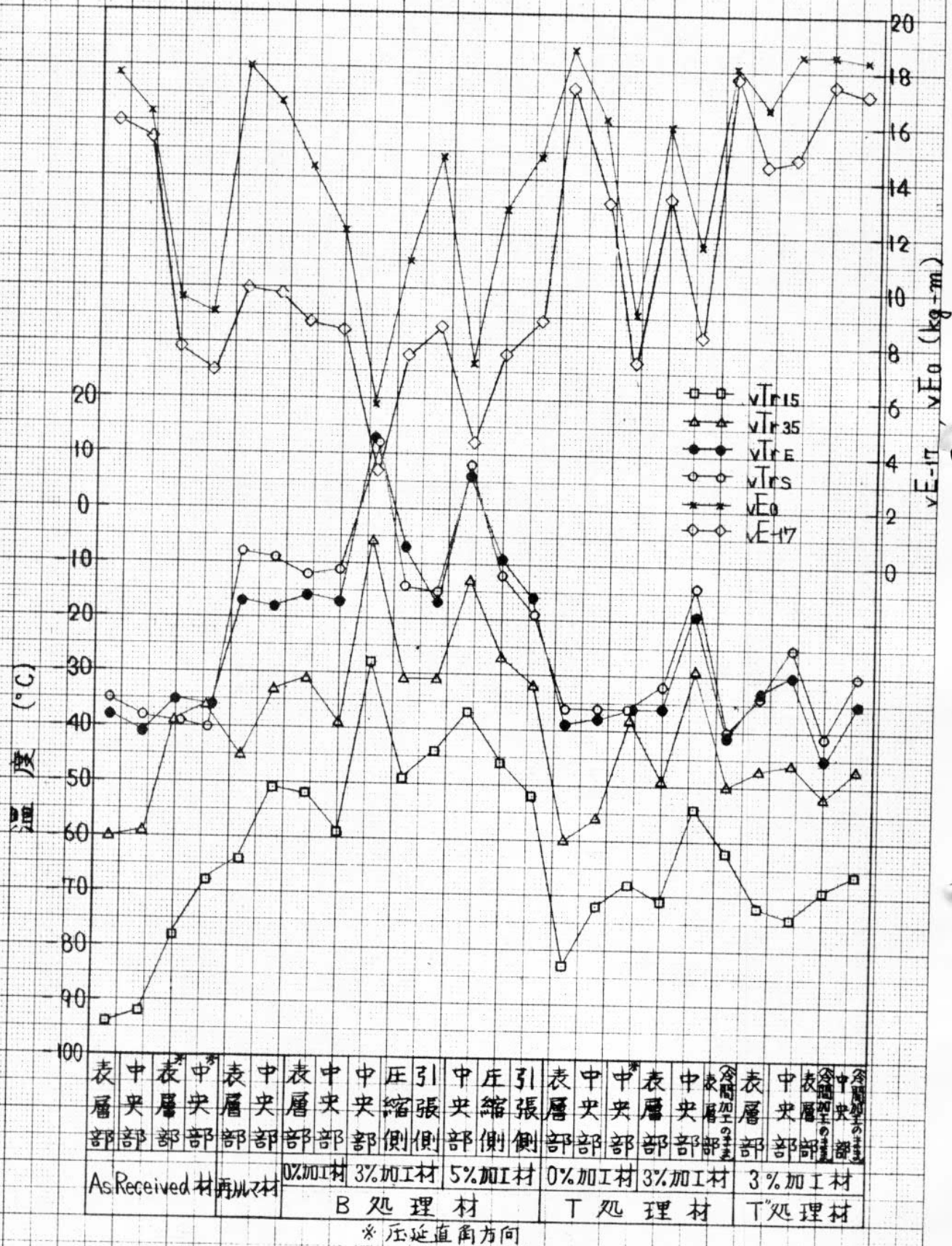


図 3.29 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5E鋼, 板厚30mm)

表 3.5 表面ハッチ型亀裂発生試験結果一覽
(KEN鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	試験片寸法			脆性亀裂 発生荷重 P (ton)	脆性亀裂 発生 Gross Stress σ_g (kg/mm ²)	脆性亀裂 発生 Net Stress σ_n (kg/mm ²)	$\frac{2R}{t}$	$f(\psi)$	K_{IC} ($\frac{kg \cdot \sqrt{mm}}{mm^2}$)	試験温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)
			板厚 t (mm)	幅 2B (mm)	表面ハッチ 深さ h (mm)								
KEN	As Rece- ived 材	N210	30.4	400	6.1	210	17.3	28.9	0.401	1.14	87	-196	12.99
		N209	30.5	400	6.0	213	17.5	28.6	0.393	1.14	87	-180	10.75
		N211	30.4	400	6.2	228	18.8	31.5	0.408	1.14	95	-140	7.52
		N212	30.3	400	6.4	434	35.8	62.0	0.422	1.14	194	-80	5.18
	再ルマ 材	N54	30.7	400	6.3	272	22.1	37.6	0.410	1.14	113	-196	12.99
		N55	30.7	400	6.6	268	21.8	38.1	0.430	1.14	114	-160	8.85
		N56	30.6	400	6.0	403	32.9	54.2	0.392	1.14	169	-110	6.13
		N53	30.4	400	6.2	415	34.1	57.4	0.408	1.14	180	-80	5.18
	B処理材 0%加工材	N61	30.3	400	6.3	278	22.9	39.1	0.416	1.14	117	-196	12.99
		N58	30.2	400	6.0	258	21.4	35.4	0.397	1.14	107	-180	10.75
		N60	30.1	400	6.2	318	26.4	44.7	0.412	1.14	135	-160	8.85
		N62	30.3	400	6.0	379	31.3	51.5	0.396	1.14	160	-120	6.54
		N57	30.1	400	6.2	440	36.5	62.1	0.412	1.14	194	-80	5.18
	B処理材 3%加工材	N64	30.2	400	6.3	220	18.2	31.3	0.417	1.14	93	-196	12.99
		N65	30.2	400	5.9	283	23.4	38.3	0.391	1.14	116	-160	8.85
		N66	30.0	400	6.2	274	22.8	38.7	0.413	1.14	116	-140	7.52
		N67	30.1	400	6.3	460	38.2	65.7	0.419	1.14	204	-120	6.54
		N63	29.9	400	6.2	350	29.3	49.4	0.415	1.14	152	-120	6.54
		N68	30.0	400	6.2	420	35.0	59.3	0.413	1.14	187	-80	5.18
	B処理材 5%加工材	N71	29.7	400	6.2	238	20.0	34.4	0.418	1.14	101	-196	12.99
		N69	30.1	400	5.9	309	25.7	42.0	0.392	1.14	128	-160	8.85
		N72	30.0	400	6.4	370	30.8	53.8	0.427	1.14	163	-120	6.54
		N70	30.0	400	6.1	472	39.3	66.3	0.407	1.14	210	-100	5.78
		N74	29.7	400	6.2	498	41.9	71.6	0.418	1.14	230	-80	5.18
	T処理材 0%加工材	N80	30.0	400	6.0	374	31.2	51.4	0.399	1.14	158	-160	8.85
		N81	30.1	400	6.0	450	37.4	62.5	0.399	1.14	194	-120	6.54
		N79	29.8	400	6.2	425	35.7	61.2	0.416	1.14	190	-80	5.18
	T処理材 3%加工材	N75	30.0	400	6.0	269	22.4	37.4	0.393	1.14	112	-196	12.99
		N76	29.8	400	5.9	347	29.1	48.2	0.396	1.14	145	-160	8.85
		N78	29.5	400	5.7	336	28.5	46.2	0.386	1.14	141	-120	6.54
		N77	29.5	400	5.9	398	33.7	56.5	0.468	1.14	173	-80	5.18
	T処理材 3%加工材	N303	30.0	400	6.0	275	22.9	38.2	0.400	1.14	114	-196	12.99
		N301	29.8	400	5.9	394	33.1	53.1	0.402	1.14	165	-180	10.75
		N305	30.2	400	6.0	400	33.1	55.6	0.398	1.14	167	-160	8.85
		N302	29.8	400	6.2	558	46.8	75.0	0.405	1.14	251	-120	6.54
		N304	29.9	400	6.0	528	44.1	73.3	0.401	1.14	236	-80	5.18

注) $K_{IC}^2 = \frac{\pi \{f(\psi) \cdot \sigma_g\}^2 \cdot h}{1 - 0.177 \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_y}\right)^2}$ $f(\psi) = \sqrt{\frac{t}{\pi h} \left(\tan \frac{\pi R}{t} + 0.1 \sin \frac{2\pi h}{t} \right)}$

表3.6 ティーブランチ試験結果一覧
(K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	試験片寸法				脆性電裂 発生荷重	脆性電裂 発生Gross Stress	脆性電裂 発生Net Stress	F(μ)	Si ($\frac{kg \cdot mm}{mm^2}$)	Kci ($\frac{kg \cdot mm}{mm^2}$)	試験温度	$\frac{10^3}{T_K}$
			板厚 t (mm)	幅 2B (mm)	サイドスリット 深さ C (mm)	表面ノッチ 深さ h (mm)	P (ton)	σ_g ($\frac{kg}{mm^2}$)	σ_n ($\frac{kg}{mm^2}$)				T (°C)	(°K ⁻¹)
K5E	As Rece- ived 材	N 3	30.8	400	120	2.8	53	4.3	13.1	1.38	0.32	115	-196	12.99
		N 1	30.8	400	120	2.8	98	8.0	24.4	1.38	1.09	214	-160	8.85
		N 2	30.5	400	120	2.8	220	18.0	55.1	1.38	5.54	482	-120	6.54
		N 4	30.1	400	120	2.8	237	19.7	60.5	1.38	6.63	528	-80	5.18
	再ルマ材	N 6	30.8	400	120	2.8	61	5.0	15.1	1.38	0.43	134	-196	12.99
		N 5	30.8	400	120	2.8	78	6.3	19.4	1.38	0.68	169	-160	8.85
		N 7	30.8	400	120	2.8	138	11.2	34.2	1.38	2.14	300	-120	6.54
		N 8	30.3	400	120	2.8	216	17.8	54.6	1.38	5.41	477	-80	5.18
	B処理材 0%加工材	N 9	30.7	400	120	2.8	53	4.3	13.1	1.38	0.32	115	-196	12.99
		N 14	30.7	400	120	2.5	74	6.0	18.0	1.38	0.62	161	-160	8.85
		N 10	30.8	400	120	2.8	77	6.3	19.1	1.38	0.68	169	-120	6.54
		N 13	30.5	400	120	2.9	221	18.1	55.7	1.38	5.60	485	-100	5.78
		N 11	30.9	400	120	2.8	173	14.0	42.7	1.38	3.35	378	-80	5.18
		N 12	30.8	400	120	2.8	220	17.9	54.6	1.38	5.47	480	-40	4.29
	B処理材 3%加工材	N 15	30.2	400	120	2.8	81	6.7	20.3	1.38	0.77	179	-196	12.99
		N 17	30.3	400	120	2.6	82	6.8	20.3	1.38	0.79	182	-160	8.85
		N 19	30.1	400	120	2.8	113	9.4	28.7	1.38	1.51	252	-140	7.52
		N 16	30.2	400	120	2.5	159	13.2	39.2	1.38	2.98	354	-120	6.54
		N 20	30.4	400	120	2.8	132	10.9	33.2	1.38	2.03	289	-100	5.78
		N 18	30.1	400	120	2.8	230	19.1	58.7	1.38	6.23	512	-80	5.18
	B処理材 5%加工材	N 24	30.4	400	120	2.8	56	4.6	14.1	1.38	0.36	123	-196	12.99
		N 23	30.3	400	120	2.8	68	5.6	17.2	1.38	0.54	150	-160	8.85
		N 22	30.1	400	120	2.7	79	6.6	19.2	1.38	0.74	177	-140	7.52
		N 21	30.4	400	120	2.8	192	15.8	48.4	1.38	4.27	423	-120	6.54
		N 25	30.0	400	120	3.0	144	12.0	37.5	1.38	2.46	321	-100	5.78
		N 26	30.3	400	120	2.8	189	15.6	47.8	1.38	4.16	418	-80	5.18
	T処理材 0%加工材	N201	30.6	400	120	2.8	48	3.9	12.1	1.38	0.26	104	-196	12.99
		N200	30.6	400	120	2.8	88	7.2	22.1	1.38	0.89	193	-160	8.85
		N202	30.6	400	120	2.8	80	6.5	20.0	1.38	0.72	174	-140	7.52
		N199	30.6	400	120	2.8	168	13.7	42.1	1.38	3.21	367	-120	6.54
		N198	30.4	400	120	3.0	230	18.9	59.0	1.38	6.10	506	-100	5.78
		N197	30.5	400	120	2.8	232	19.0	58.1	1.38	6.17	509	-80	5.18
	T処理材 3%加工材	N 27	29.8	400	120	3.0	68	5.7	17.8	1.38	0.56	153	-196	12.99
		N 29	30.0	400	120	2.8	102	8.5	26.1	1.38	1.23	228	-160	8.85
		N 32	30.2	400	120	3.0	98	8.1	25.5	1.38	1.12	217	-140	7.52
		N 28	29.7	400	120	2.9	176	14.8	46.0	1.38	3.74	396	-120	6.54
		N 31	30.0	400	120	3.0	158	13.2	41.1	1.38	2.98	354	-80	5.18
		N 30	29.6	400	120	3.0	200	16.9	53.3	1.38	4.88	451	-80	5.18
	T処理材 3%加工材	N309	30.3	400	120	3.0	53	4.4	13.6	1.38	0.33	118	-196	12.99
		N311	30.4	400	120	3.0	84	6.9	21.5	1.38	0.81	184	-196	12.99
		N312	30.2	400	120	3.0	90	7.5	23.1	1.38	0.96	198	-160	8.85
		N308	30.2	400	120	3.0	133	11.0	34.6	1.38	2.07	295	-140	7.52
		N310	30.3	400	120	2.8	180	14.9	46.2	1.38	3.79	399	-120	6.54
		N307	30.3	400	120	2.9	268	22.1	69.0	1.38	8.34	592	-80	5.18

注)
$$S_i = \frac{\pi \{F(\mu) \cdot \sigma_g\}^2 \cdot C}{2E}$$

$$Kci = F(\mu) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$$

$$F(\mu) = f_1(\mu) \cdot f_2(\mu)$$

$f_1(\mu)$ = サイドスリットによる補正係数 ($f_1(\mu) = 1.25$)

$f_2(\mu)$ = 表面ノッチによる補正係数 ($f_2(\mu) = 1.10$)

番号記号	材料履歴
①	As Received 材
②	再ノルマ材
③	B処理材0%加工材
④	B処理材3%加工材
⑤	B処理材5%加工材
⑥	T処理材0%加工材
⑦	T処理材3%加工材
⑧	T処理材5%加工材

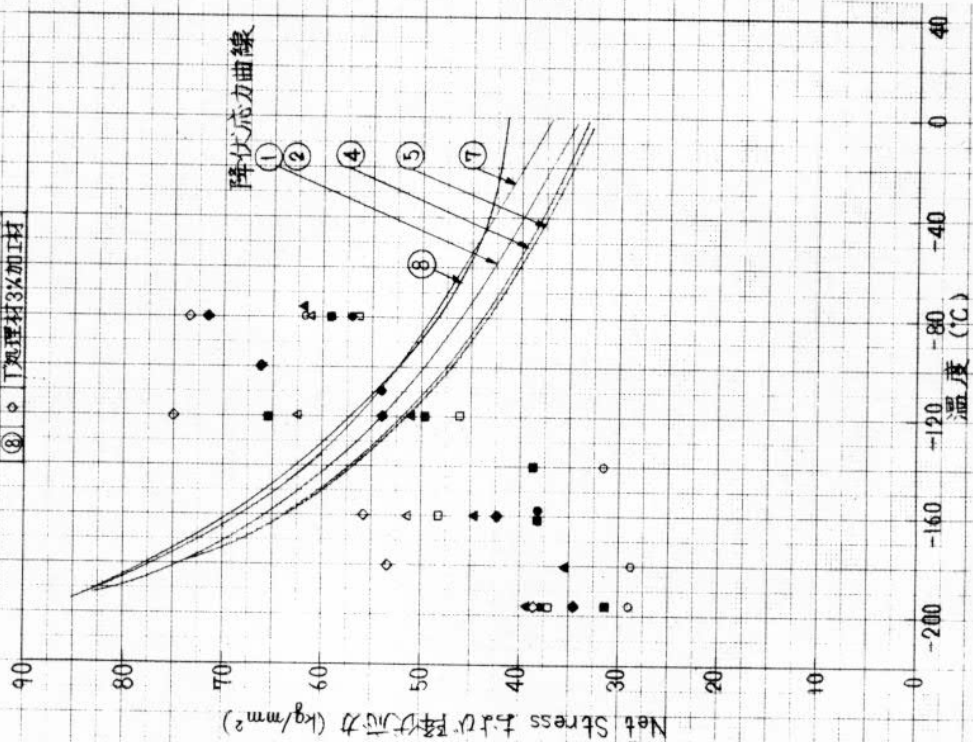


図 3.32 破壊応力 (Net Stress) 対 温度 (°C)
(K5E 鋼, 板厚 30 mm)

番号記号	材料履歴
①	As Received 材
②	再ノルマ材
③	B処理材0%加工材
④	B処理材3%加工材
⑤	B処理材5%加工材
⑥	T処理材0%加工材
⑦	T処理材3%加工材
⑧	T処理材5%加工材

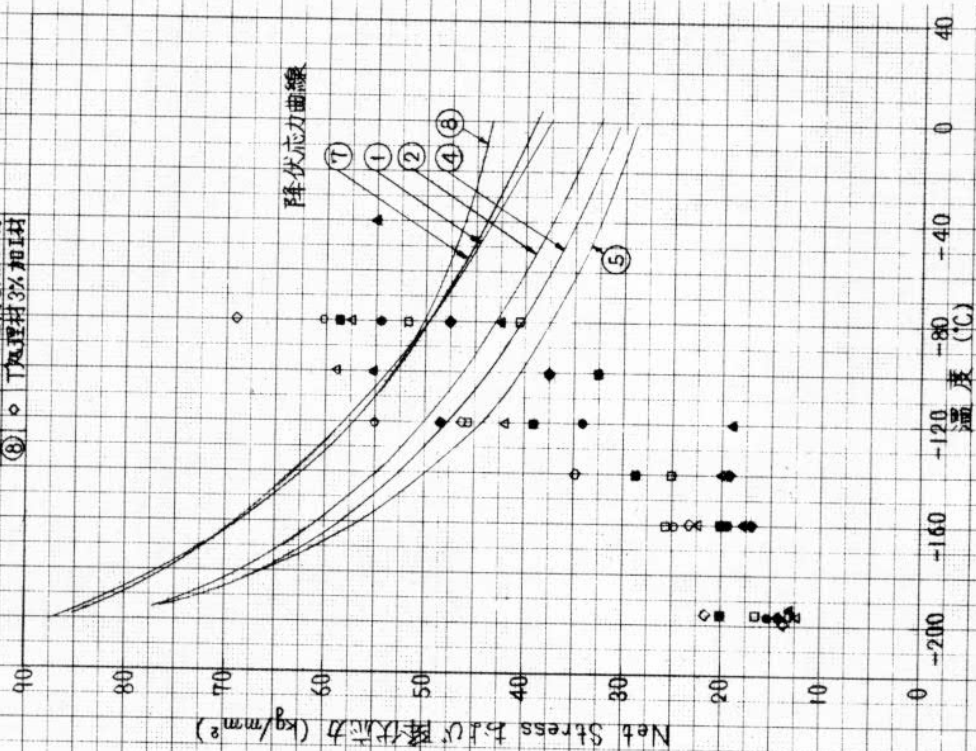


図 3.33 破壊応力 (Net Stress) 対 温度 (°C)
(K5E 鋼, 板厚 30 mm)

鋼種	記号	材料履歴	実験式	材料履歴	実験式
KEN	①	As Received	$K_{IC} = 327 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}}$	再ルマ材	$K_{IC} = 327 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}}$
	②	T処理材		B処理材	
	③	0%加工材		0%加工材	
	④	T処理材	$K_{IC} = 407 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}}$	B処理材	$K_{IC} = 407 \cdot e^{\frac{-124.7}{T_K}}$
	⑤	3%加工材		3%加工材	
	⑥	T処理材		B処理材	
	⑦	0%加工材		0%加工材	
	⑧	3%加工材		5%加工材	

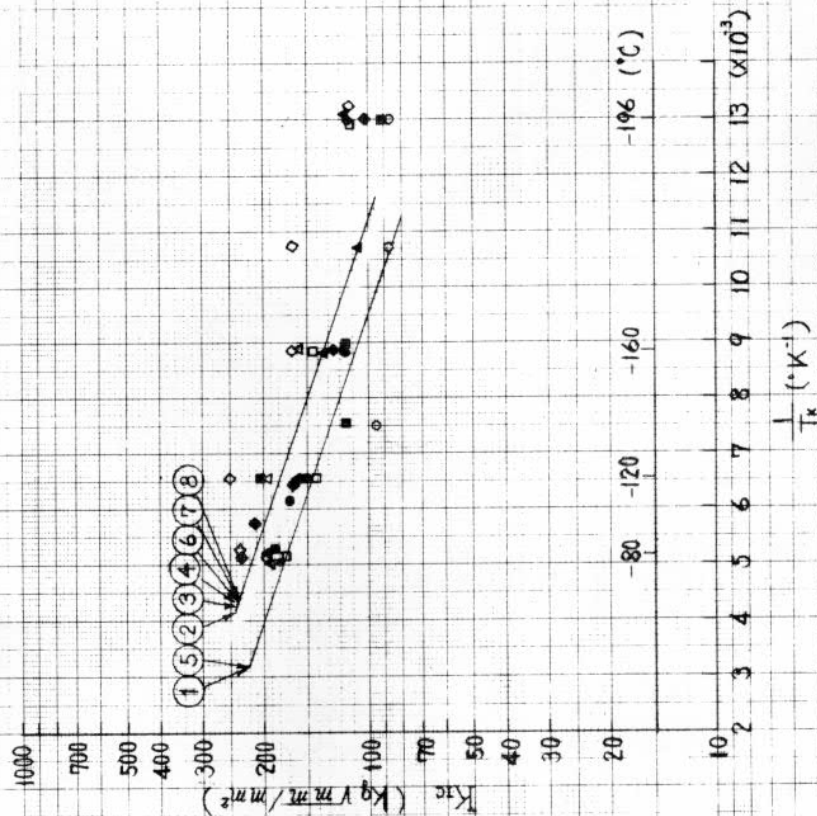


図334 表面ノッチ型亀裂発生試験結果
(KEN鋼, 板厚 30mm)

鋼種	記号	材料履歴	実験式	材料履歴	実験式
K5E	①	As Received	$S_I = 268.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$	再ルマ材	$S_I = 330 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
	②	T処理材		B処理材	
	③	0%加工材		0%加工材	
	④	T処理材	$S_I = 168.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$	B処理材	$S_I = 108.5 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
	⑤	3%加工材		3%加工材	
	⑥	T処理材		B処理材	
	⑦	0%加工材		0%加工材	
	⑧	3%加工材		5%加工材	

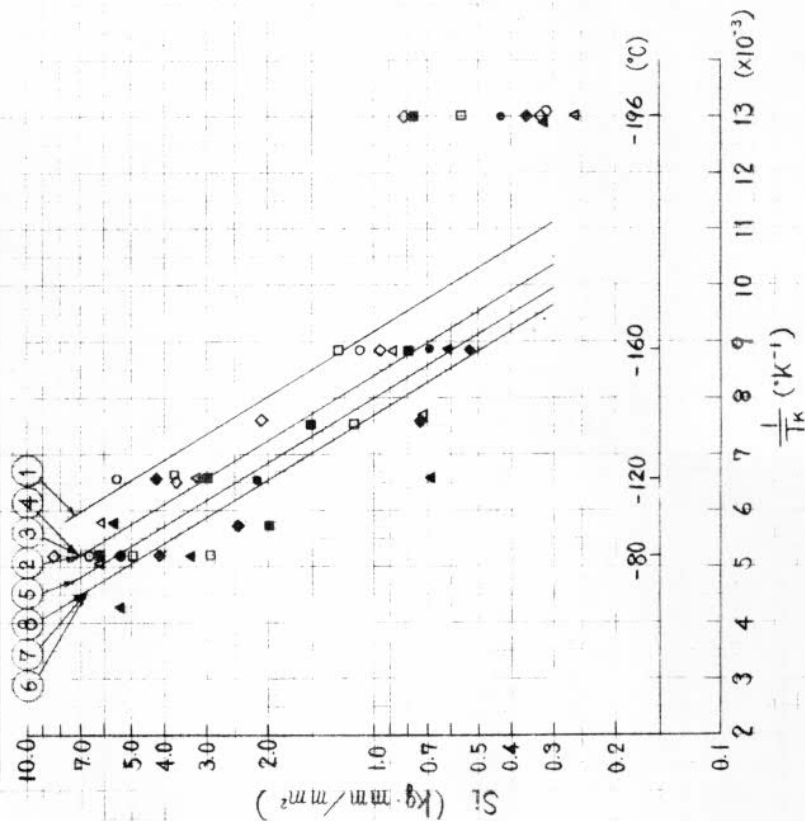


図335 デイブ・ノッチ試験結果
(K5E鋼, 板厚 30mm)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
①	As Received 材	⑤	再ノルマ材
②	T処理材0%加工材	⑥	B処理材0%加工材
③	T処理材3%加工材	⑦	B処理材3%加工材
④	T処理材3%加工材	⑧	B処理材5%加工材

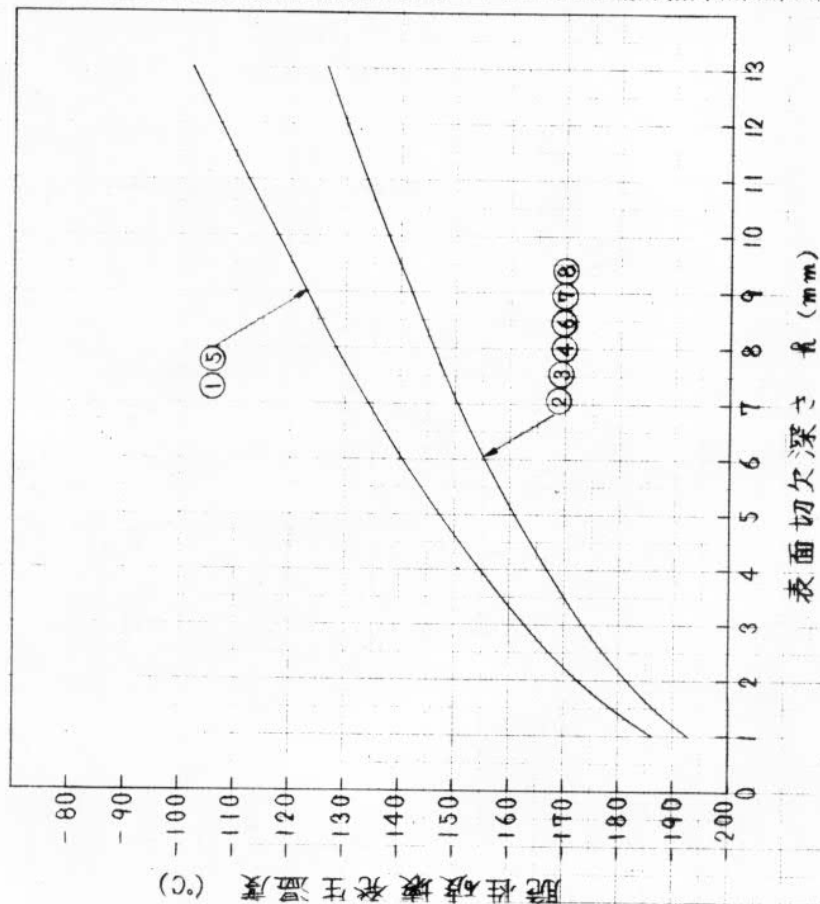


図3.37 許容限界切欠深さと脆性破壊発生温度の関係
(KEN鋼, 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
①	As Received 材	⑤	再ノルマ材
②	T処理材0%加工材	⑥	B処理材0%加工材
③	T処理材3%加工材	⑦	B処理材3%加工材
④	T処理材3%加工材	⑧	B処理材5%加工材

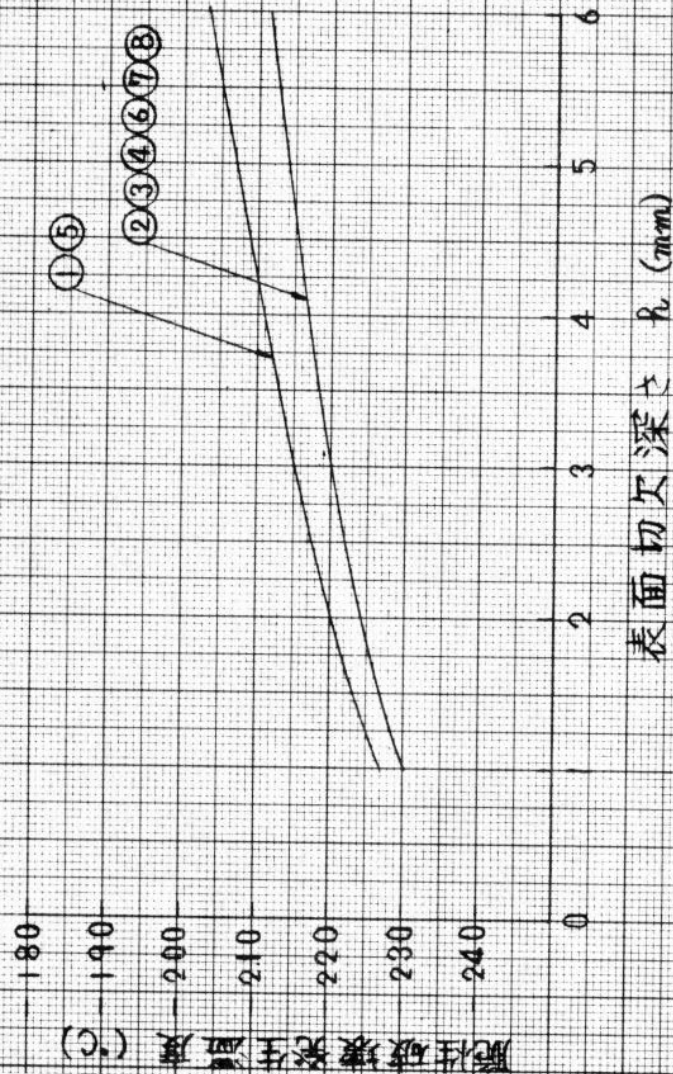
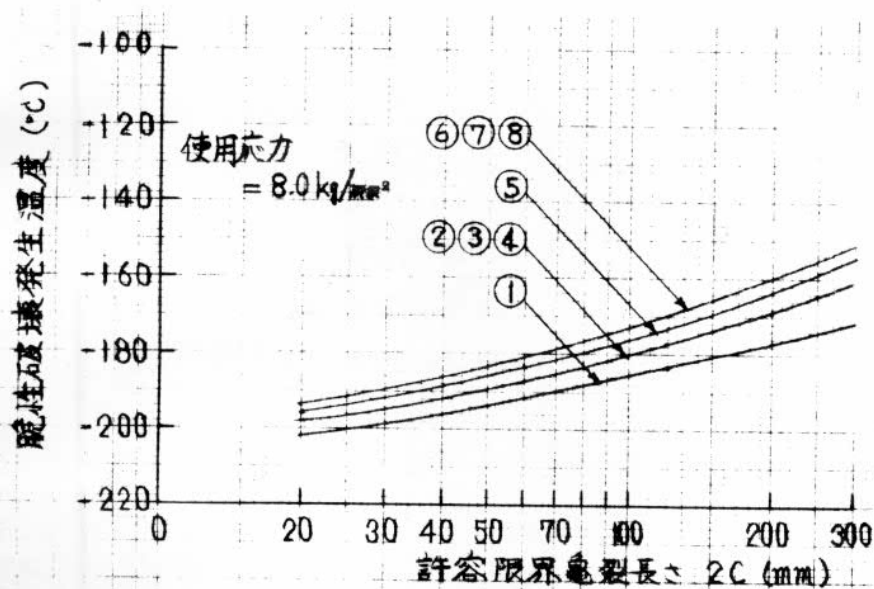


図3.36 許容限界切欠深さと脆性破壊発生温度の関係
(KEN鋼, 使用応力 = 12.5 kg/mm^2)



番号	材料履歴
①	As Received 材
②	T処理材0%加工材
③	T処理材3%加工材
④	T処理材3%加工材
⑤	再ノルマ材
⑥	B処理材0%加工材
⑦	B処理材3%加工材
⑧	B処理材5%加工材

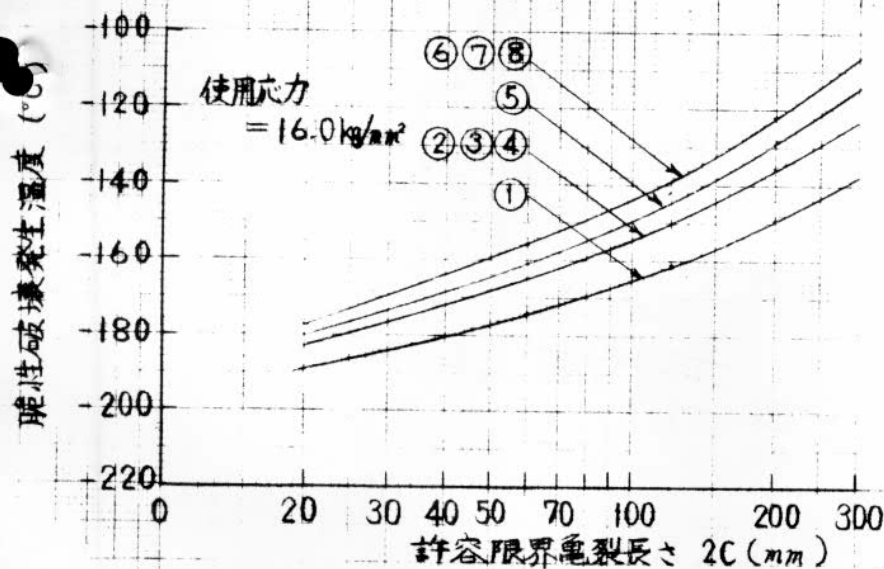


図3.38 使用応力 = 8.0 kg/mm^2 および 16.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性
(K5E鋼, 板厚 30 mm)

鋼種	番号	材料履歴	番号	材料履歴
K5E	①	As Received 材	⑤	再ノルマ材
	②	T処理材0%加工材	⑥	B処理材0%加工材
	③	T処理材3%加工材	⑦	B処理材3%加工材
	④	T処理材3%加工材	⑧	B処理材5%加工材

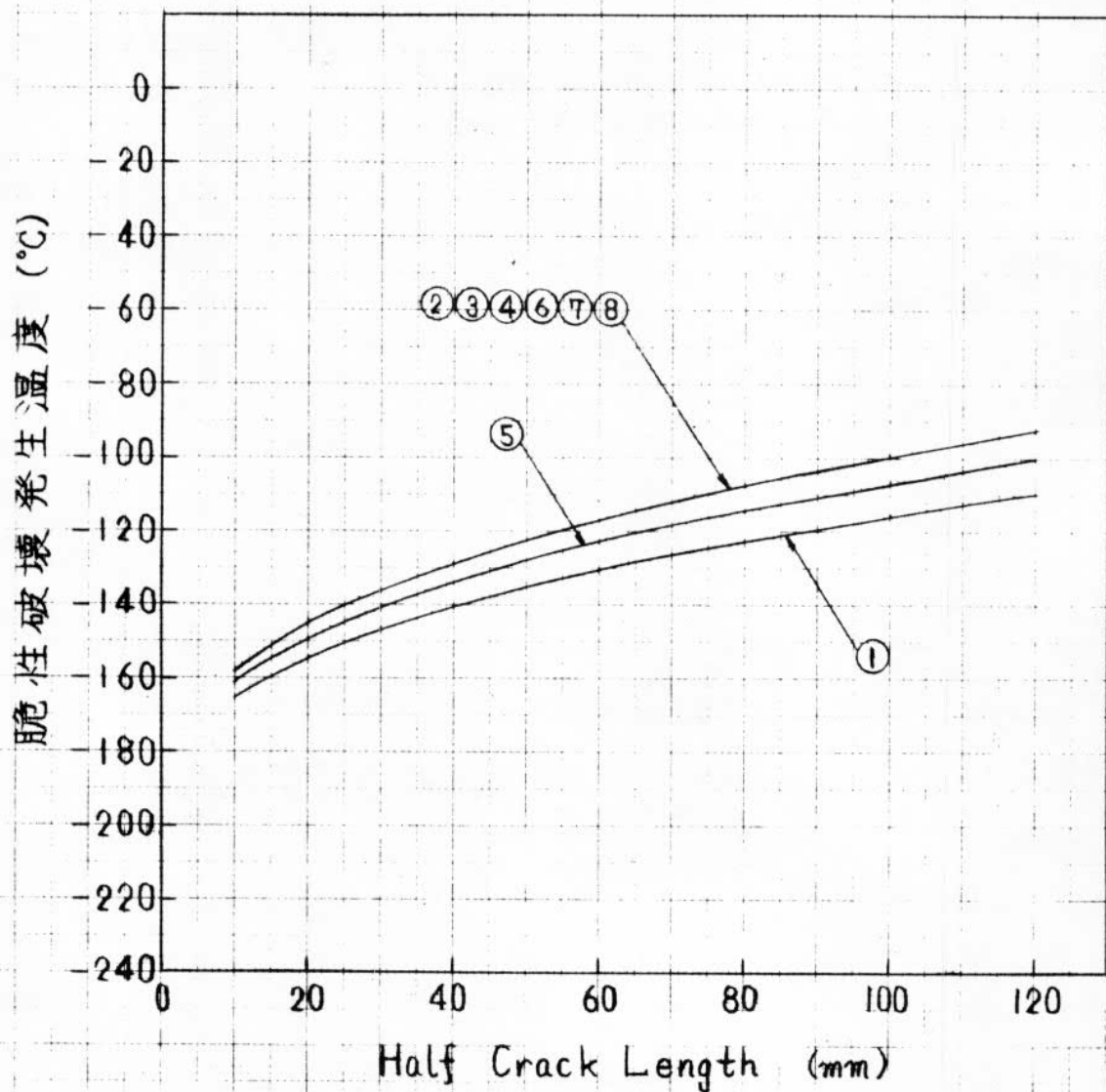


図 339 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5E鋼, 板厚 30 mm)

表3.7 許容亀裂深さと発生限界温度

(鋼種: KEN鋼
使用応力: 12.5 kg/mm^2 , $\frac{1}{2} \sigma_y$)

材 料 許 容 亀 裂 深 さ 履 歴	12.5 kg/mm^2			$\frac{1}{2} \sigma_y$		
	5 mm	3 mm	1 mm	5 mm	3 mm	1 mm
As Received 材	-207°C	-215°C	-227°C	-147°C	-163°C	-186°C
再ノルマ材						
T処理材0%加工材						
T処理材3%加工材						
T処理材3%加工材	-214°C	-220°C	-230°C	-161°C	-174°C	-193°C
B処理材0%加工材						
B処理材3%加工材						
B処理材5%加工材						

表3.8 許容亀裂長さと発生限界温度

(鋼 種 K5E 鋼
使用応力 16.0 kg/mm^2 , 8.0 kg/mm^2 , $\frac{1}{2} \sigma_y$)

材 料 許 容 亀 裂 長 さ 履 歴	16.0 kg/mm^2				8.0 kg/mm^2				$\frac{1}{2} \sigma_y$			
	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm
As Received 材	-149°C	-161°C	-174°C	-189°C	-177°C	-184°C	-192°C	-202°C	-116°C	-130°C	-147°C	-165°C
T処理材0%加工材												
T処理材3%加工材	-136	-150	-165	-183	-169	-177	-187	-198	-100	-117	-136	-158
T処理材3%加工材												
再ノルマ材	-129	-145	-161	-180	-164	-173	-184	-196	-107	-123	-141	-161
B処理材0%加工材												
B処理材3%加工材	-122	-139	-156	-177	-160	-170	-181	-194	-100	-117	-136	-158
B処理材5%加工材												

表39.二重引張試験ならびにESSO試験結果一覧
(KEN鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	板厚 t (mm)	亀裂伝播部 幅 B (mm)	亀裂伝播部 平均応力 σ_g (kg/mm ²)	亀裂長さ C (mm)	$\gamma = \frac{C}{B}$	$f(\psi) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	Kc ($\frac{kg \cdot \sqrt{mm}}{mm^2}$)	停止温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)	備考
KEN	As Rece- ived 材	T 34	30	500	5							伝播せず
		T 33	30	500	10	325	0.650	12.6	403	5	3.60	
		T 35	30	500	15	400	0.800	23.4	829	17	3.45	
		T 36	30	500	20	296	0.592	24.0	732	14	3.48	
	再ルマ 材	T 39	30	500	8							伝播せず
		T 40	30	500	10	324	0.648	12.6	402	10	3.53	
		T 38	30	500	15	287	0.574	17.9	537	11	3.52	
		T 37	30	500	20	303	0.606	24.4	753	16	3.46	
	B処理材 0%加工材	T 44	30	500	15							母材中に亀裂停止
		T 45	30	500	15	262	0.524	17.3	496	-5	3.73	
		T 41	30	500	18	283	0.566	21.2	633	2	3.64	
		T 43	30	500	20	273	0.546	23.2	679	10	3.53	
		T 42	30	500	25	250	0.500	28.3	792	6	3.58	
	B処理材 3%加工材	T 46	30	500	12							伝播せず
		T 50	30	500	12							伝播せず
		T 49*	30	400	15	173	0.433	16.4	381	-14	3.86	
		T 47	30	500	15	232	0.464	16.7	450	-12	3.83	
		T 48	30	500	20							母材中に亀裂停止
	T処理材 0%加工材	T173	30	500	15							母材中に亀裂停止
		T171	30	500	20	313	0.626	24.8	777	3	3.62	
		T172	30	500	20	262	0.524	23.0	670	-6	3.75	
		T170	30	500	25							母材中に亀裂停止
		T174	30	500	25	330	0.660	32.0	1030	14	3.48	
	T処理材 3%加工材	T179	30	500	15							母材中に亀裂停止
		T182	30	500	15							母材中に亀裂停止
		T178	30	500	20	265	0.530	23.0	663	-1	3.68	
		T180	30	500	20	398	0.796	31.0	1096	30	3.30	ビド近傍にて停止
		T181	30	500	25	381	0.762	36.3	1256	30	3.30	ビド近傍にて停止
	T処理材 3%加工材	T303	30	500	10							母材中に亀裂停止
		T304	30	500	15	250	0.500	17.0	478	-20	3.95	
		T302	30	500	17	344	0.688	22.3	733	4	3.61	
		T301	30	500	20	305	0.610	24.4	755	3	3.62	

注) 1. $f(\psi) = \sqrt{\frac{2}{\pi \psi}} \tan \frac{\pi \psi}{2}$

2. $Kc = f(\psi) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$

3. ※ ESSO試験

表3.10二重引張試験ならびにESSO試験結果一覧
(K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	板厚 t (mm)	電裂伝播部 幅 B (mm)	電裂伝播部 平均応力 σ_g (kg/mm ²)	電裂長さ C (mm)	$y = \frac{C}{B}$	$f(y) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	K _c (kg $\sqrt{mm}$ /mm ²)	停止温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)	備 考
K5E	As Rece- ived 材	T 3	30	500	5							伝播せず
		T 4	30	500	5							伝播せず
		T 1	30	500	10	316	0.632	12.4	392	-15	3.88	
		T 2	30	500	20	260	0.520	22.8	652	-8	3.77	
	再ルマ 材	T 8*	30	400	8	206	0.515	9.1	232	-14	3.86	
		T 5	30	500	10	367	0.734	13.9	472	6	3.58	
		T 7	30	500	15	325	0.650	18.9	604	16	3.46	
		T 6	30	500	20	305	0.610	24.4	755	16	3.46	
	B処理材 0%加工材	T 9	30	500	10							伝播せず
		T 11	30	500	15							伝播せず
		T 12*	30	400	15	265	0.663	19.2	554	4	3.61	
		T 10	30	500	20	322	0.644	25.2	801	22	3.39	
		T 13*	30	400	20	268	0.670	25.8	748	25	3.36	
	B処理材 3%加工材	T 14*	30	400	18							母材中に電裂停止
		T 15*	30	400	18							母材中に電裂停止
		T 18*	30	400	18							破 断
		T 16*	30	400	20	303	0.758	29.0	895	32	3.28	
		T 17	30	500	20	280	0.560	23.4	694	16	3.46	
	T処理材 0%加工材	T 153*	30	400	15							母材中に電裂停止
		T 154*	30	400	18	206	0.515	20.5	521	-19	3.94	
		T 155*	30	400	20							母材中に電裂停止
		T 157	30	500	20							母材中に電裂停止
		T 156	30	500	25	330	0.660	32.0	1030	13	3.50	
	T処理材 3%加工材	T 185*	30	400	10							破 断
		T 78*	30	400	18							母材中に電裂停止
		T 80	30	500	20	207	0.414	21.6	551	-17	3.91	
		T 79	30	500	20	297	0.594	24.0	733	-1	3.68	
		T 186	30	500	25	314	0.628	31.0	973	15	3.47	
	T処理材 3%加工材	T 305	30	500	20							母材中に電裂停止
		T 307	30	500	20	215	0.430	21.8	566	-16	3.89	
		T 309	30	500	20							母材中に電裂停止
		T 306	30	500	22	264	0.528	25.3	728	-2	3.69	
		T 308	30	500	25	304	0.608	30.5	942	13	3.50	

注) 1. $f(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi y} \tan \frac{\pi y}{2}}$

2. $K_c = f(y) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$

3. ※ ESSO試験

鋼種番号	記号	材料履歴	実験式
①	○	As Received 材	$Q_n K_C = -3.28(\frac{10^3}{T_K}) + 17.84$
②	△	T処理材0%加工材	
③	□	T処理材3%加工材	$Q_n K_C = -3.28(\frac{10^3}{T_K}) + 18.53$
④	◇	T処理材3%加工材	
⑤	●	再ノルマ材	$Q_n K_C = -3.28(\frac{10^3}{T_K}) + 17.84$
⑥	▲	B処理材0%加工材	$Q_n K_C = -3.28(\frac{10^3}{T_K}) + 18.53$
⑦	■	B処理材3%加工材	

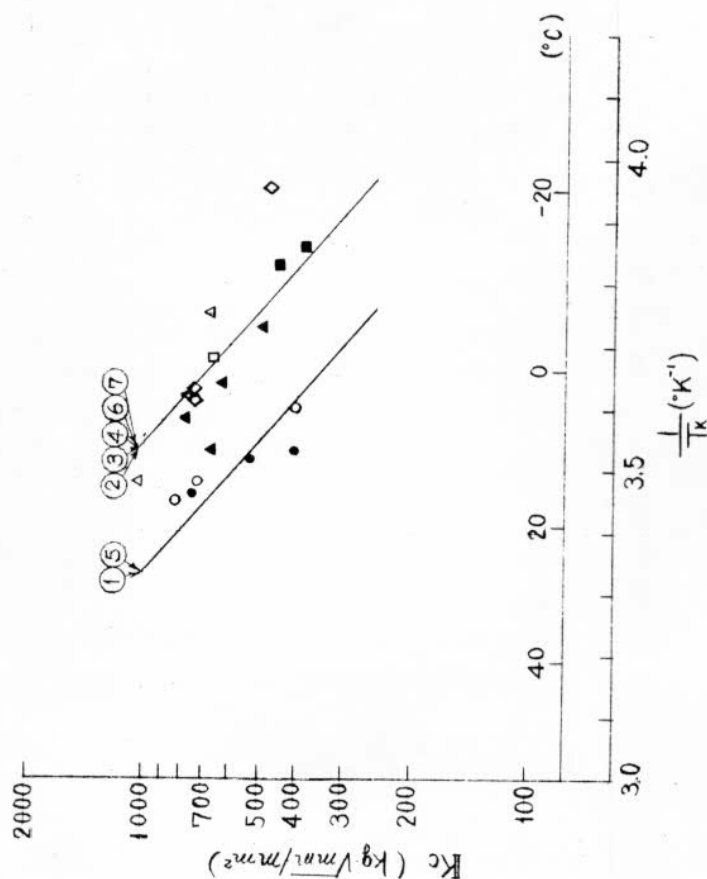


図 3.40 二重引張試験結果
(KEN鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	記号	材料履歴	実験式
①	○	As Received 材	
②	△	T処理材0%加工材	$Q_n K_C = -2.57(\frac{10^3}{T_K}) + 16.03$
③	□	T処理材3%加工材	
④	◇	T処理材3%加工材	
⑤	●	再ノルマ材	
⑥	▲	B処理材0%加工材	$Q_n K_C = -2.57(\frac{10^3}{T_K}) + 15.37$
⑦	■	B処理材3%加工材	

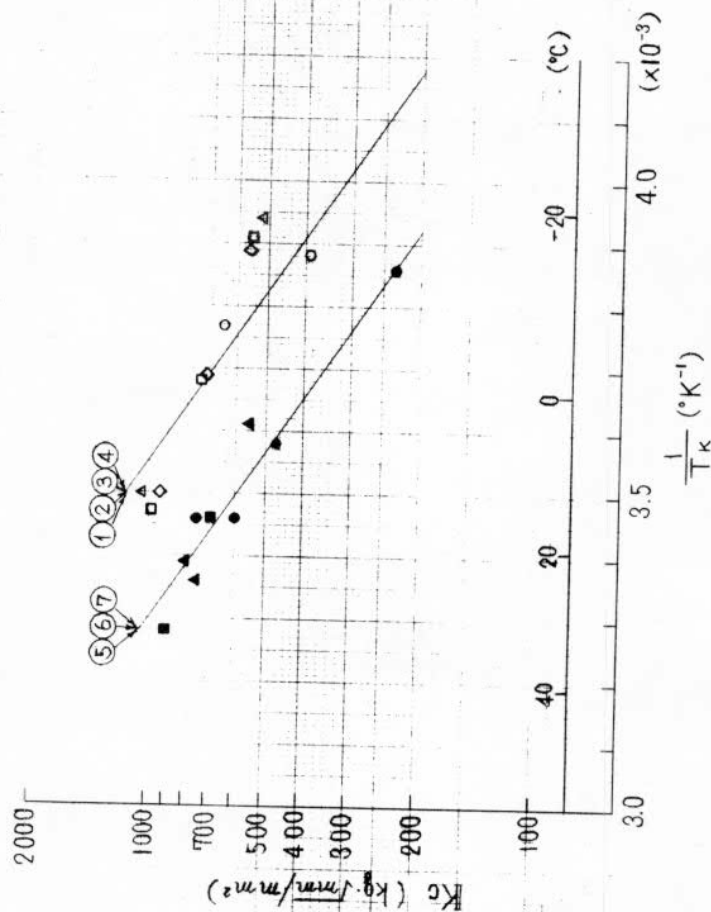


図 3.41 二重引張試験結果
(K5E鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	材料履歴	想定使用温度	番号	材料履歴	想定使用温度
KEN	① As Received 材	0°C	⑧ As Received 材	-10°C	
	② T処理材 0%加工材		⑨ T処理材 0%加工材		
	③ T処理材 3%加工材		⑩ T処理材 3%加工材		
	④ T処理材 3%加工材		⑪ T処理材 3%加工材		
	⑤ 再ノルマ材		⑫ 再ノルマ材		
	⑥ B処理材 0%加工材		⑬ B処理材 0%加工材		
	⑦ B処理材 3%加工材		⑭ B処理材 3%加工材		

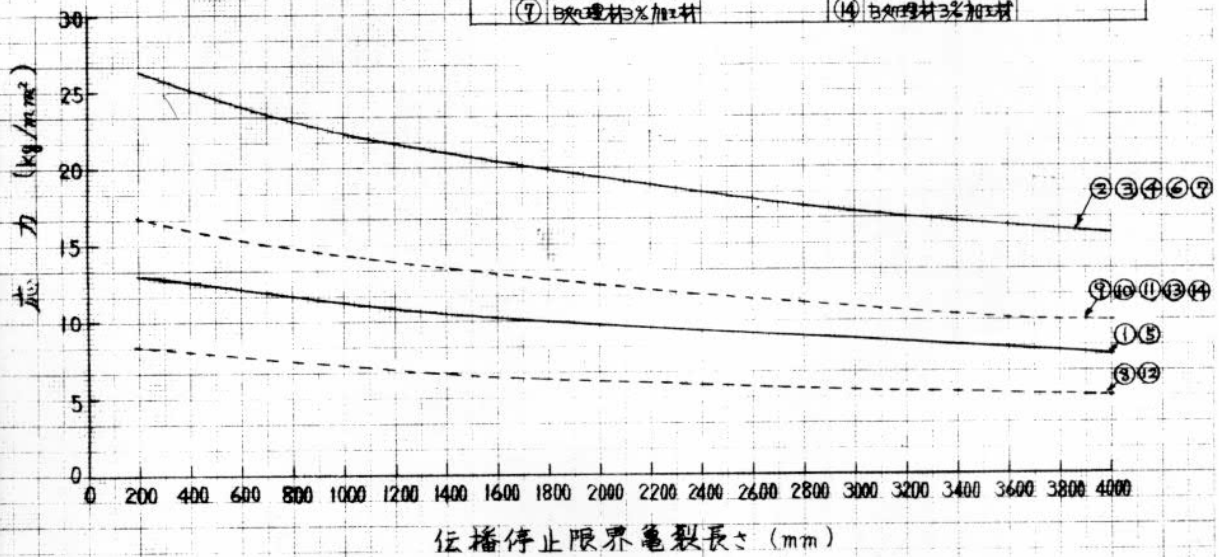


図 342 温度一定の場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さの関係 (KEN鋼, 板厚 30mm)

鋼種番号	材料履歴	想定使用温度	番号	材料履歴	想定使用温度
K5E	① As Received 材	0°C	⑧ As Received 材	-10°C	
	② T処理材 0%加工材		⑨ T処理材 0%加工材		
	③ T処理材 3%加工材		⑩ T処理材 3%加工材		
	④ T処理材 3%加工材		⑪ T処理材 3%加工材		
	⑤ 再ノルマ材		⑫ 再ノルマ材		
	⑥ B処理材 0%加工材		⑬ B処理材 0%加工材		
	⑦ B処理材 3%加工材		⑭ B処理材 3%加工材		

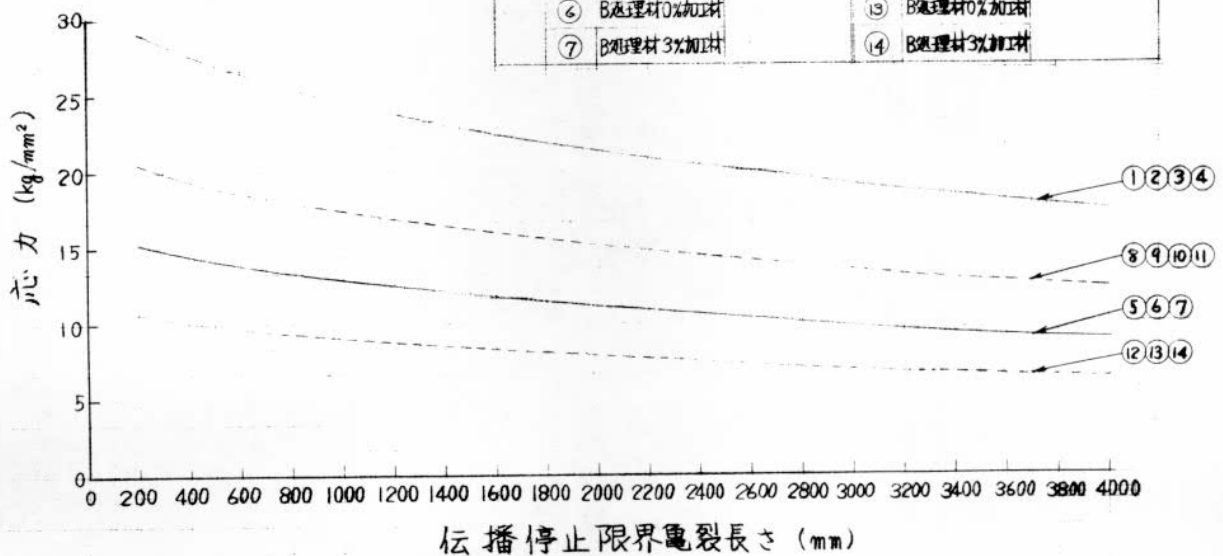


図 343 温度一定の場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さの関係 (K5E鋼, 板厚 30mm)

表 3.11 使用限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度
(KEN鋼, 板厚30mm)

鋼種	材 料 履 歴	応力 距離 K _c 値	12.5 kg/mm ²		8.0 kg/mm ²		K _c =343 $\frac{\text{kg}\cdot\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ における温度 $\left\{ \begin{array}{l} \sigma=12.5\text{kg/mm}^2 \\ C=240\text{mm} \end{array} \right.$
			3M	1M	3M	1M	
KEN	As Received 材		489	377	314	241	
	再ノルマ材		9℃	3℃	-2℃	-8℃	0℃
	B処理材0%加工材 3%加工材						
	T処理材0%加工材 3%加工材 T処理材3%加工材		-7℃	-12℃	-16℃	-22℃	-15℃

表 3.12 使用限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度
(K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材 料 履 歴	応力 距離 K _c 値	16.0 kg/mm ²		8.0 kg/mm ²		K _c =439 $\frac{\text{kg}\cdot\sqrt{\text{mm}}}{\text{mm}^2}$ における温度 $\left\{ \begin{array}{l} \sigma=16.0\text{kg/mm}^2 \\ C=240\text{mm} \end{array} \right.$
			3M	1M	3M	1M	
K5E	As Received 材		628	483	314	241	
	T処理材0%加工材 3%加工材		-5℃	-12℃	-23℃	-29℃	-15℃
	T処理材3%加工材						
	再ノルマ材 B処理材0%加工材 3%加工材		15℃	7℃	-6℃	-13℃	4

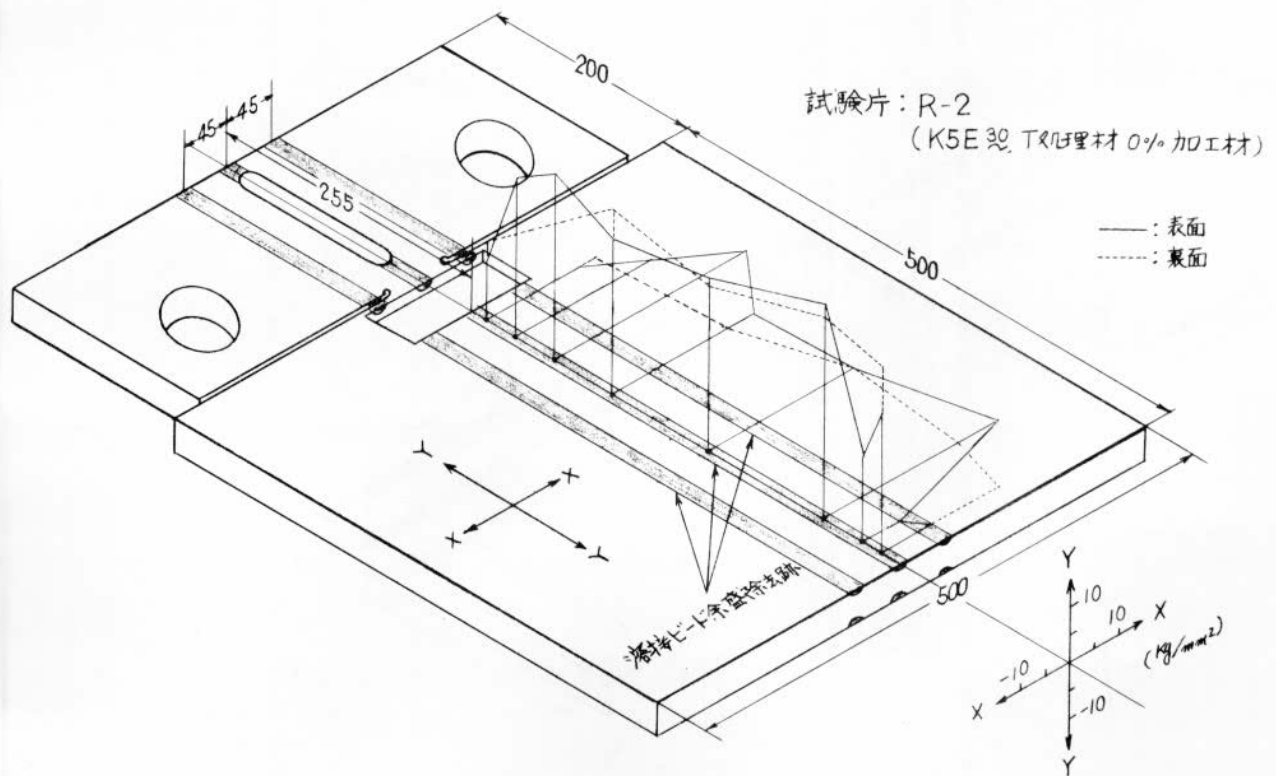


図 3.44 二重引張試験片残留応力分布 (その1)

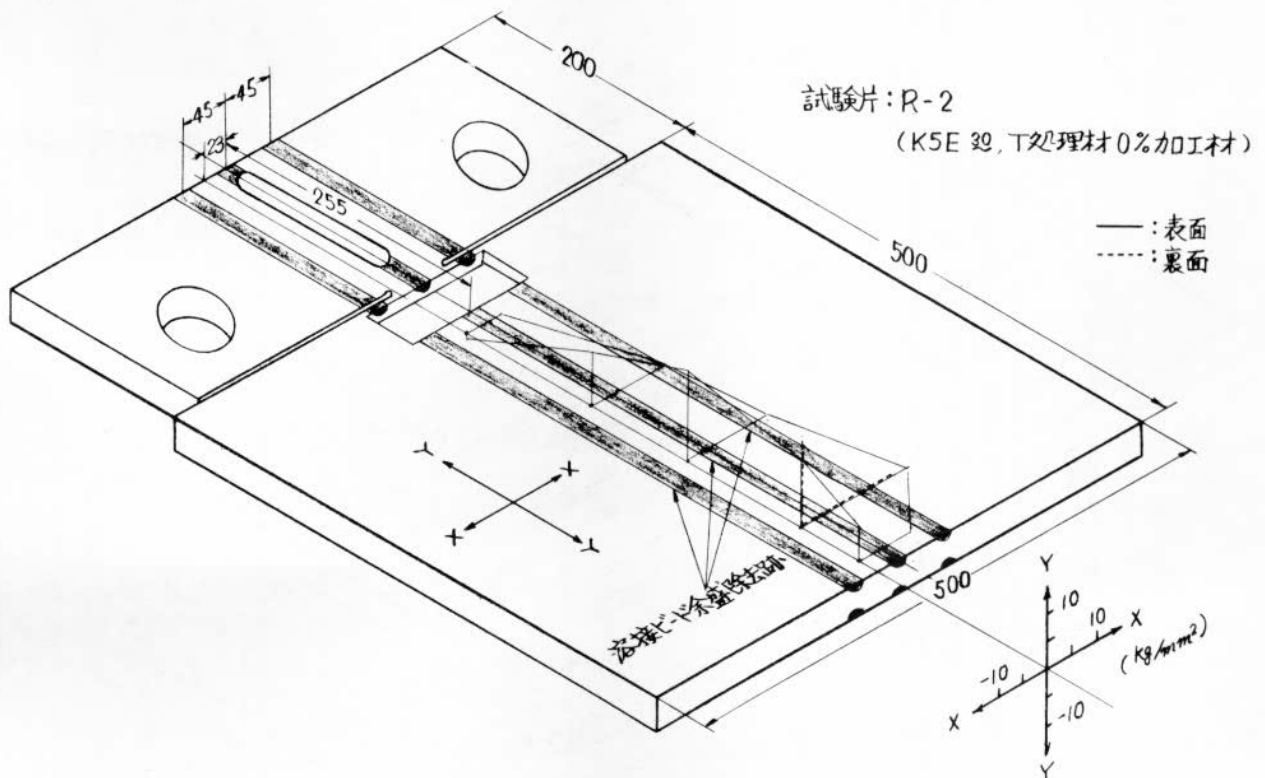


図 3.45 二重引張試験片残留応力分布 (その2)

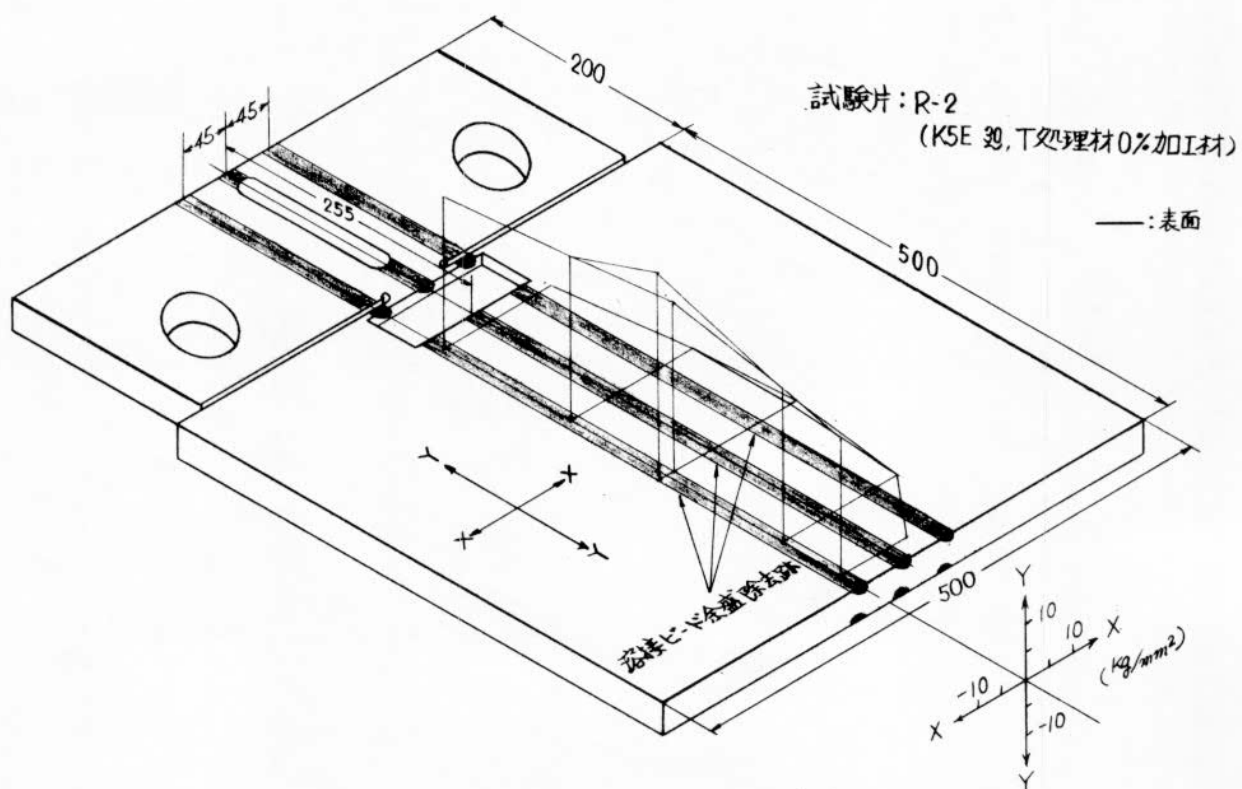


図 3.46 二重引張試験片残留応力分布 (その3)

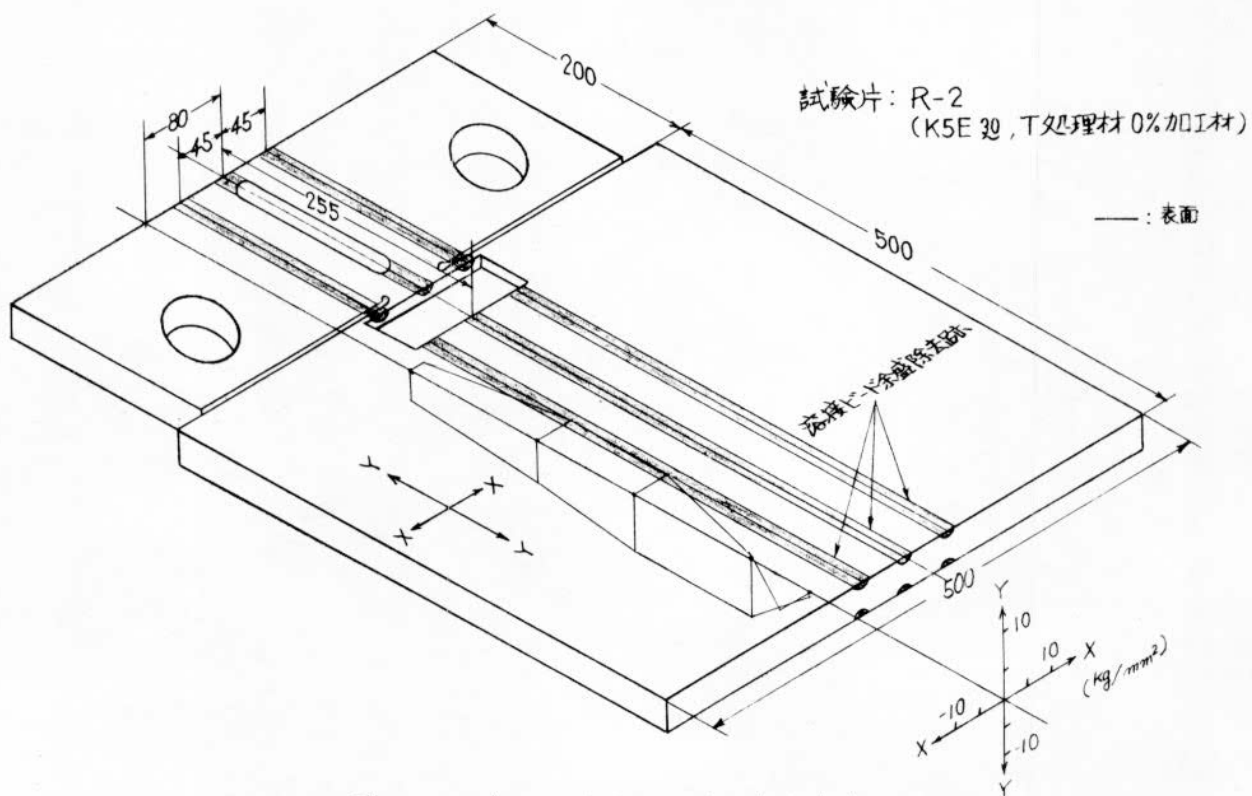


図 3.47 二重引張試験片残留応力分布 (その4)

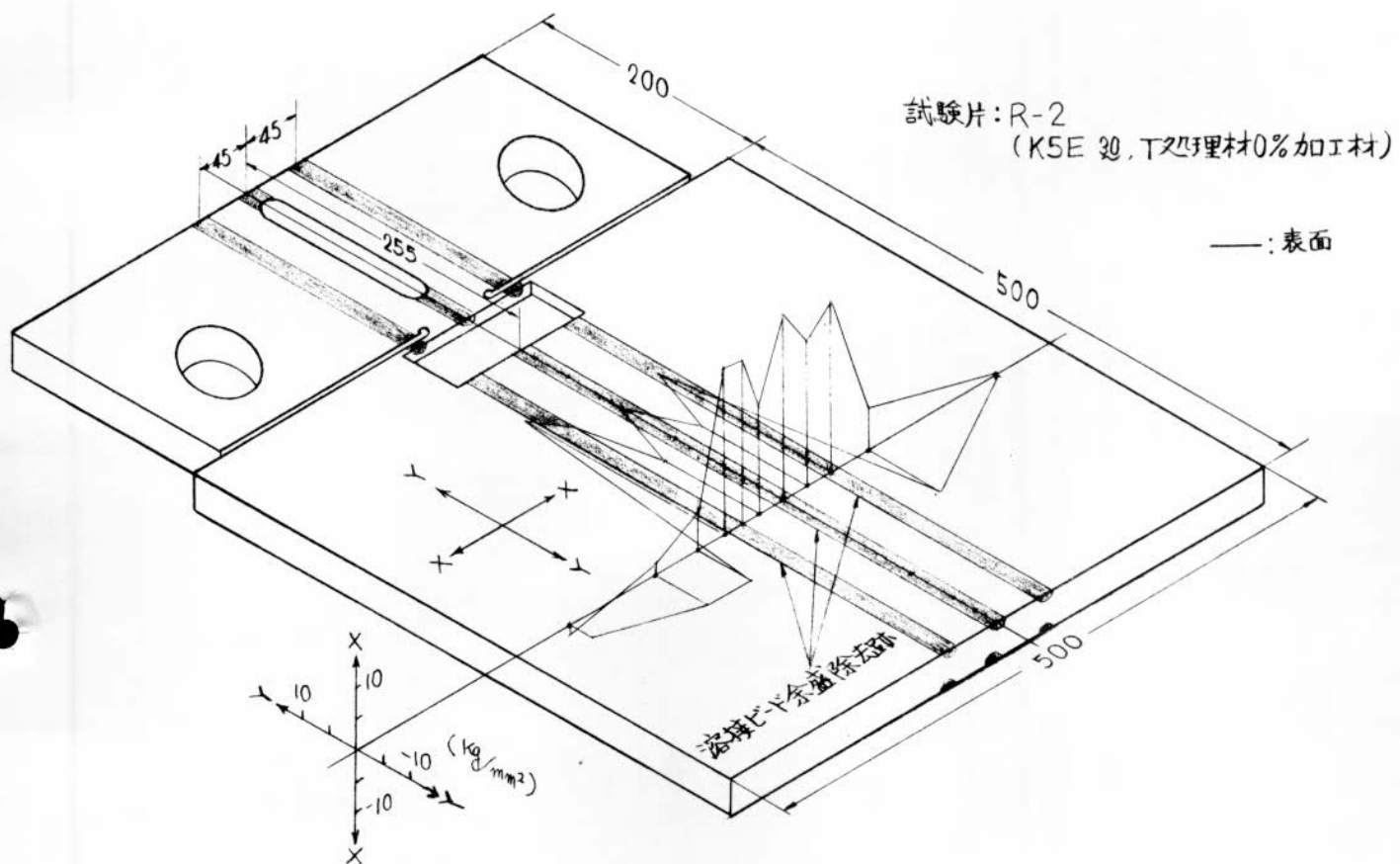


図 3.48 二重引張試験片残留応力分布 (その5)

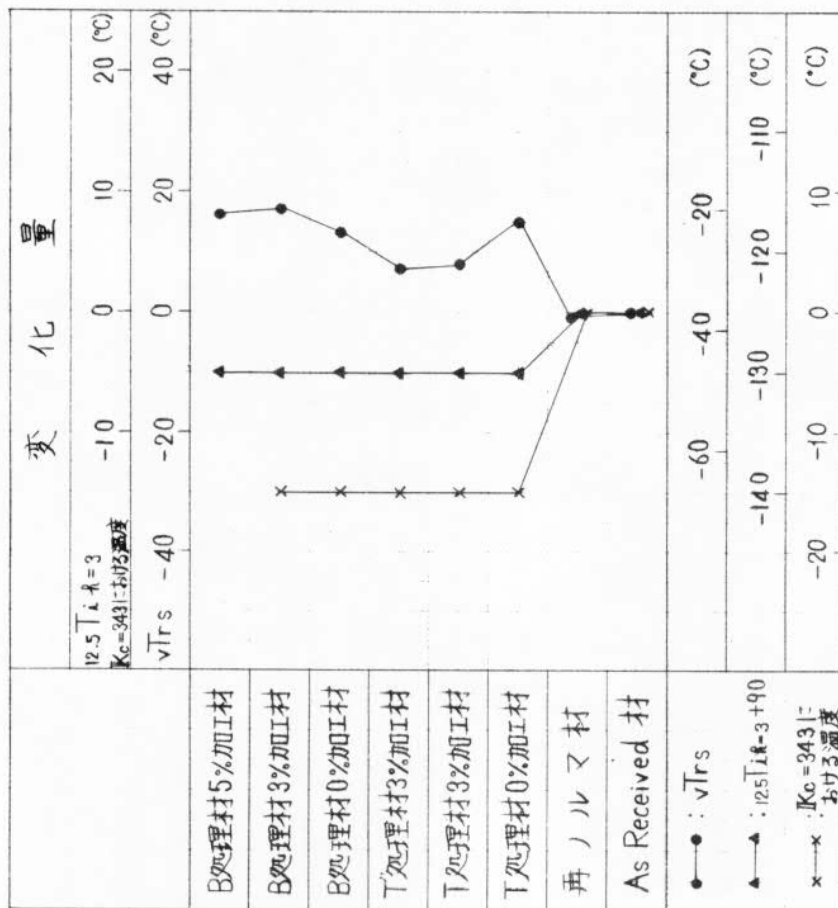


図349 各種試験結果の相関
(KEN鋼, 板厚30 mm)

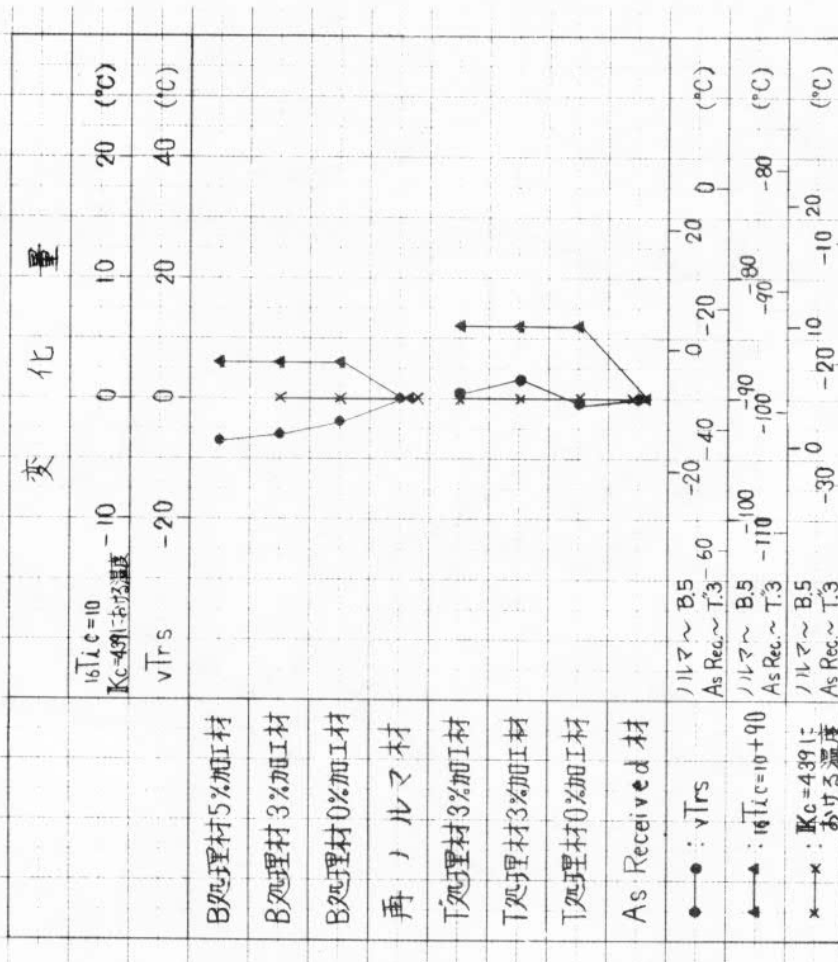
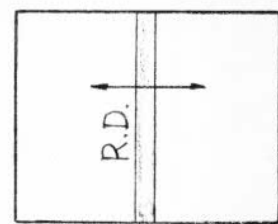


図350 各種試験結果の相関
(K5E鋼, 板厚30 mm)

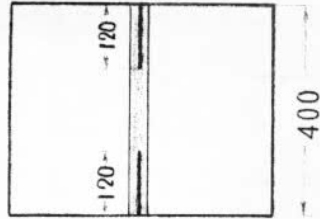
ディープノッチ試験片

素材
(As Received)



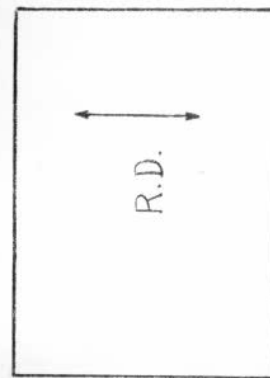
線状ガス加熱加工
〔供試材の表裏両面に線状ガス加熱を1条ずつ行う〕
(加熱順序)
1 2

線状ガス加熱材

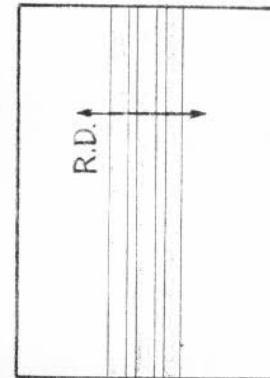


線状ガス加熱線や中央に記号試験片両端より120mm程度のノッチ加工、標準型ディープノッチ試験片

二重引張試験片

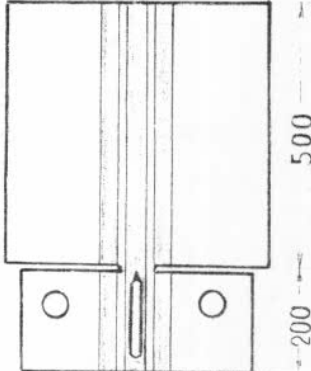


素材
(As Received)



線状ガス加熱加工
〔供試材の表裏両面に線状ガス加熱を3条ずつ行う〕
(加熱順序)
1 2 3 4 5 6
45 45

線状ガス加熱材



中央の線状ガス加熱線を行方向の中央部にノッチ加工、電線径500mmの標準型二重引張試験片

二重引張試験片

図 4.1 “船体用 50 キロ級高張力鋼板の塑性加工はばりガス加熱加工条件影響に関する研究” 試験片製作要領

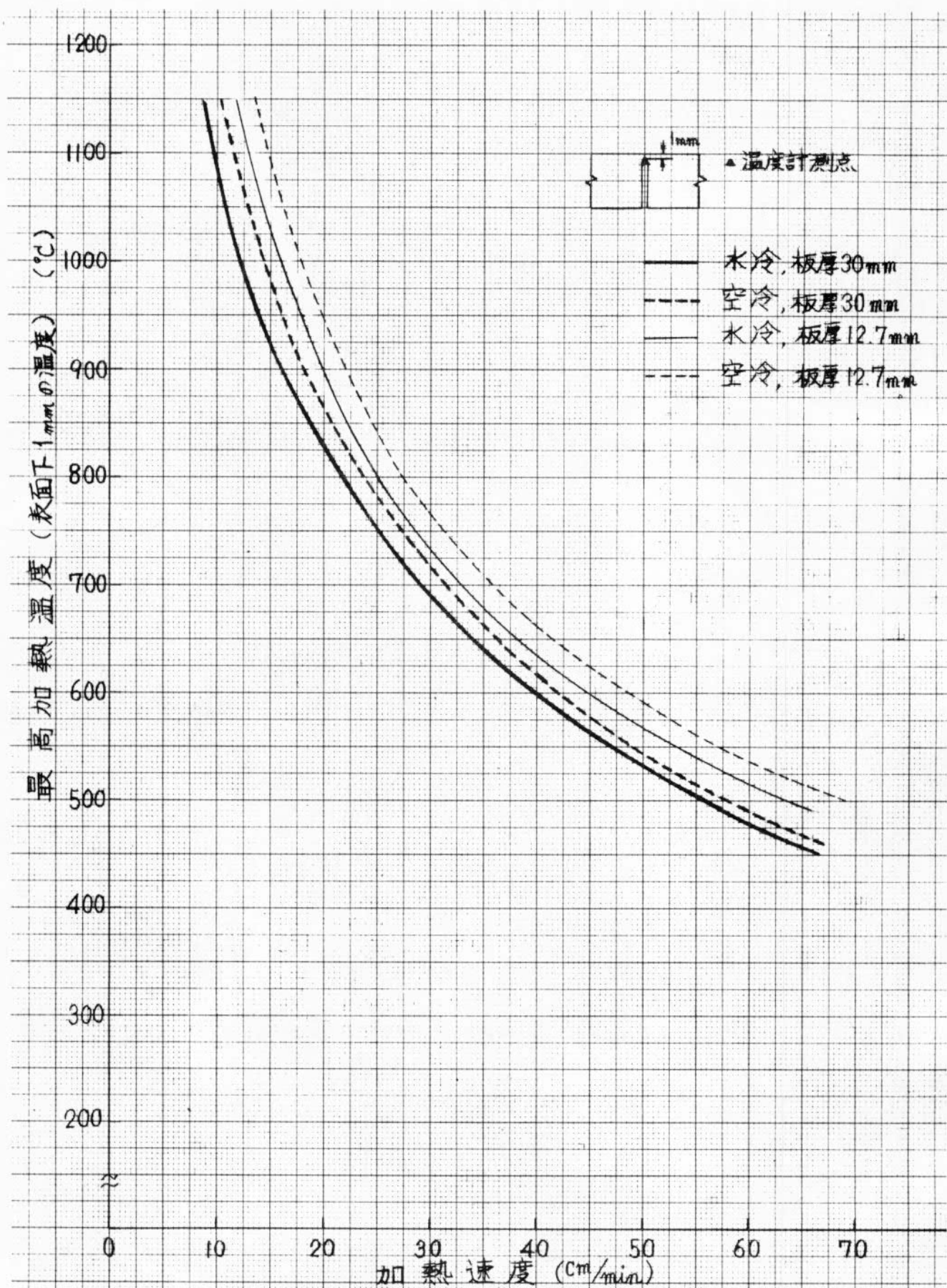


図4.2 線状ガス加熱における加熱速度と最高加熱温度の関係

表4.1 線状ガス加熱条件

項 目	条 件
火口 (口径)	帝酸バリアル G2 (2.8 mm ϕ)
酸素圧力	6 kg/cm ²
酸素流量	2.3 × 10 ³ l/h
アセチレン圧力	0.5 kg/cm ²
アセチレン流量	2.0 × 10 ³ l/h
火口高さ	20 mm
火口と水口の間隔	50 ~ 130 mm
水 量	約 2.3 l/min

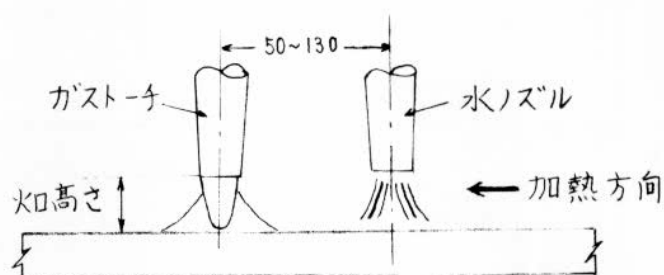
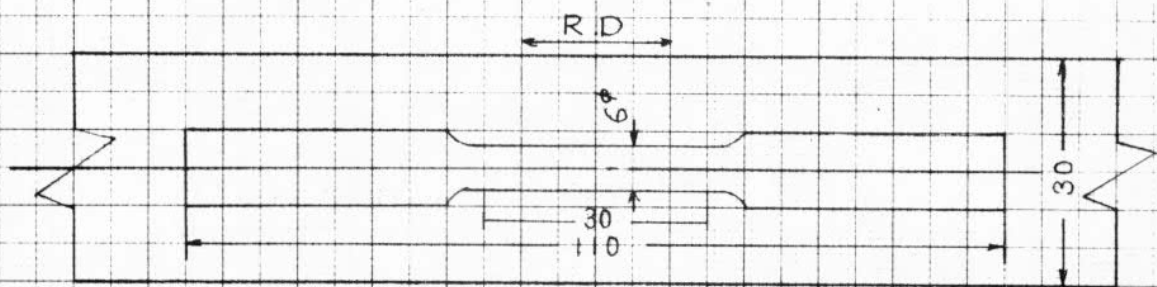
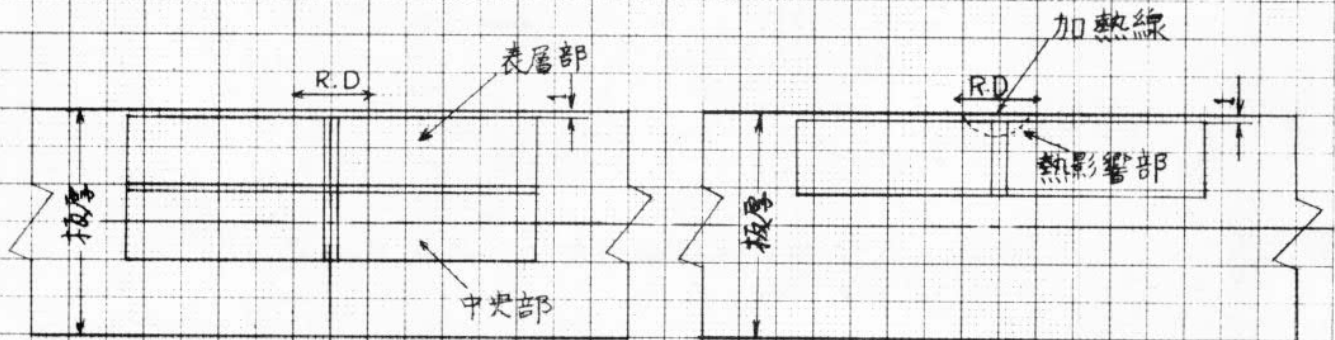
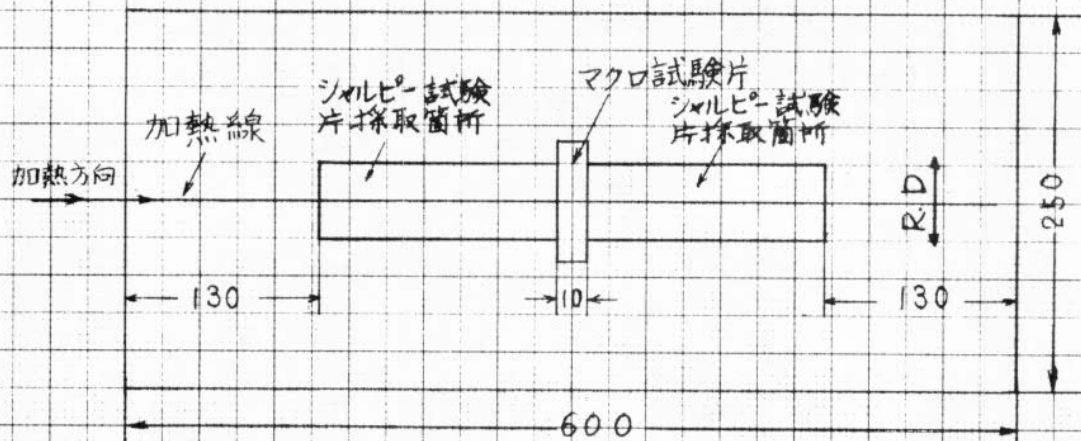


表4.2 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼 種 熱処理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					引 張 試 験			衝 撃 試 験 kg-m
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	
K5E鋼 Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	38.2	55.1	23.7	
K5A鋼 AsRolled	30	0.12	0.34	1.24	0.025	0.020	37.8	52.4	25.2	—
K5D鋼 Normalized	30	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	36.0	53.0	24.0	12.4 at -7°C
K5D鋼 AsRolled	12.7	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	39.0	55.0	23.0	9.1 at -7°C



低温引張試験片採取要領



シャルピー衝撃試験片および組織硬さ調査試験片採取要領

図 4.3 各種試験片採取要領

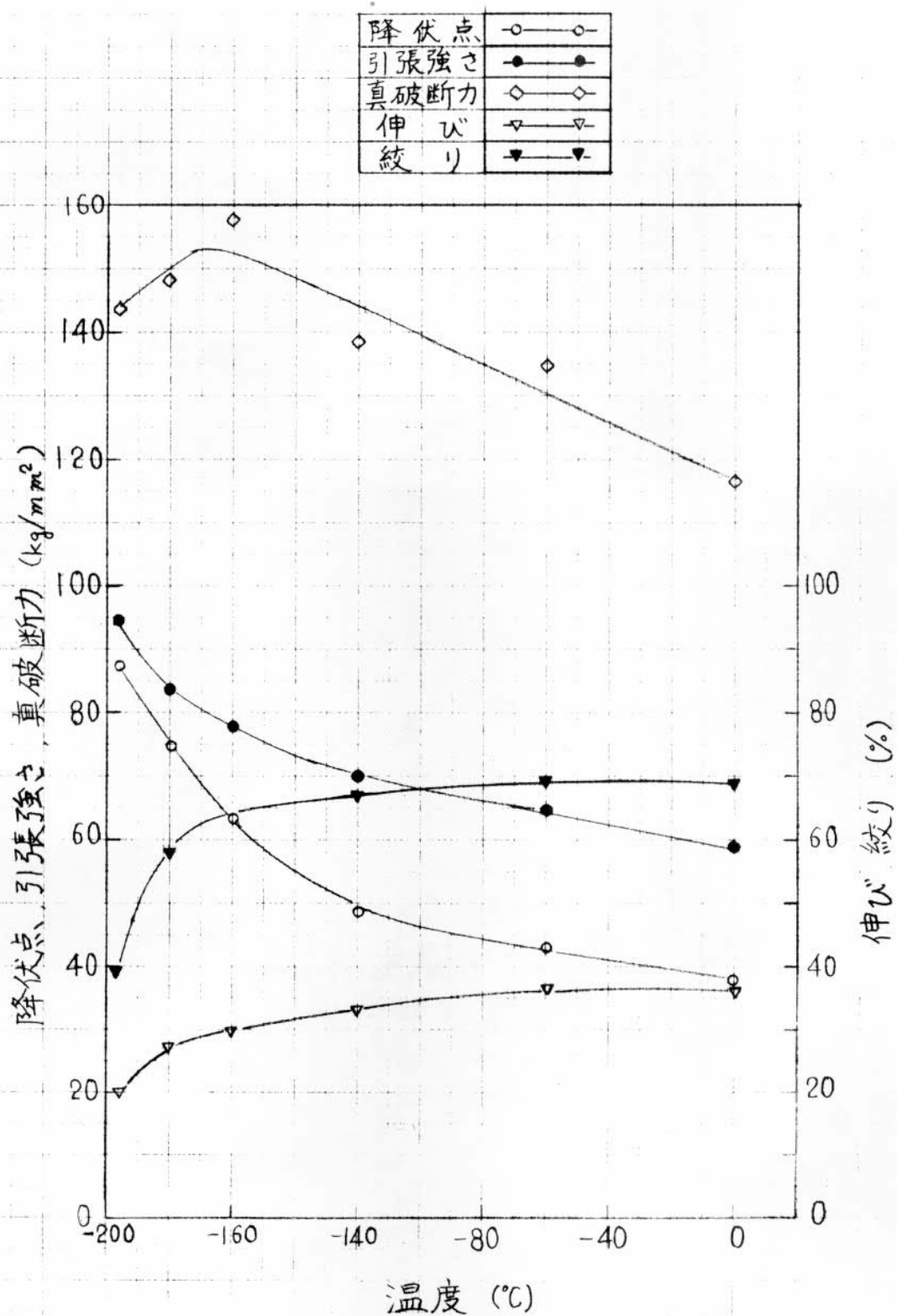


図 4.4 低温引張試験結果
(K5D鋼, 素材, 板厚 12.7mm)

鋼種記号	材料履歴	実験式
K5A	▲ 素材 30	$\sigma_y = 25.5 \cdot e^{\frac{95.0}{T_K}}$
K5D	◆ 素材 30	$\sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{88.9}{T_K}}$
K5E	● 素材 30	$\sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{88.9}{T_K}}$
K5D	■ 素材 12.7	$\sigma_y = 28.4 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}}$

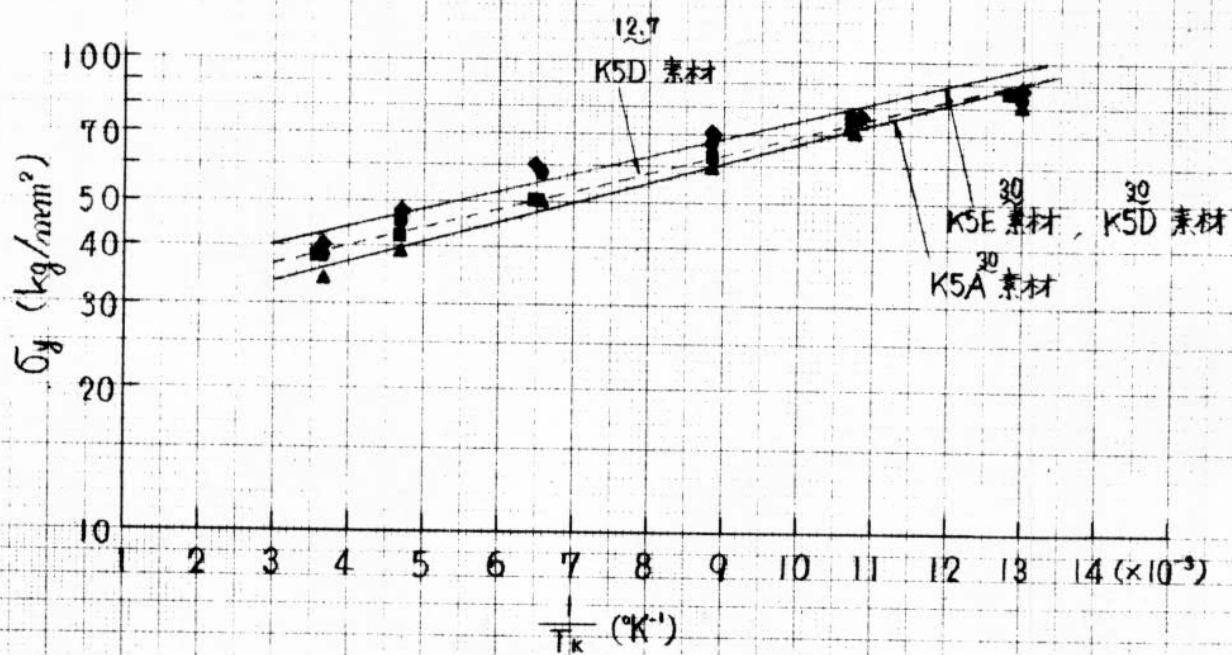
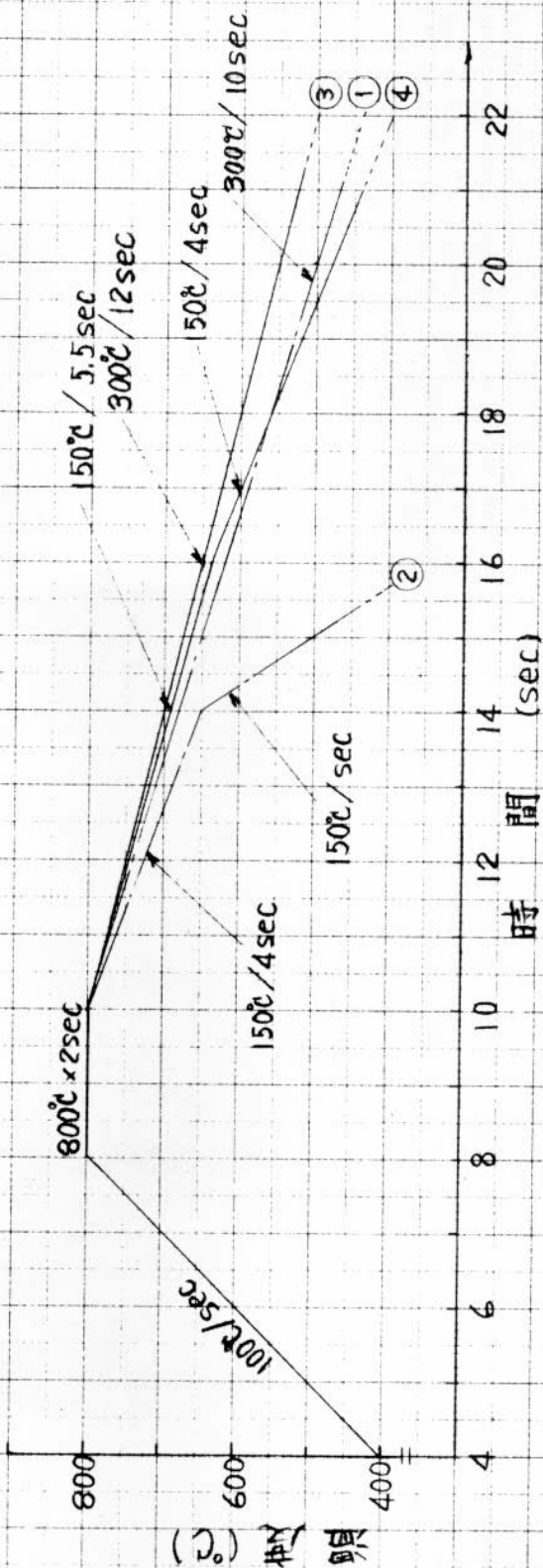


図 4.5 降伏点と温度の関係
(6 ϕ 引張試験結果)

鋼種	冷却条件	変態点	Ac ₁	Ac ₃	Ar ₃	Ar ₁
K5D	③	697℃	—	—	704℃	543℃
	④	690	—	—	690	550
K5E	③	640	—	—	698	538
	④	658	—	—	700	550

- ① 線状加熱における800℃空冷熱サイクル
 ② 線状加熱における800℃同時に冷熱サイクル
 ③ 変態点測定における熱サイクル
 ④ 変態点測定における熱サイクル



各種熱サイクル

図4.6 変態点測定結果

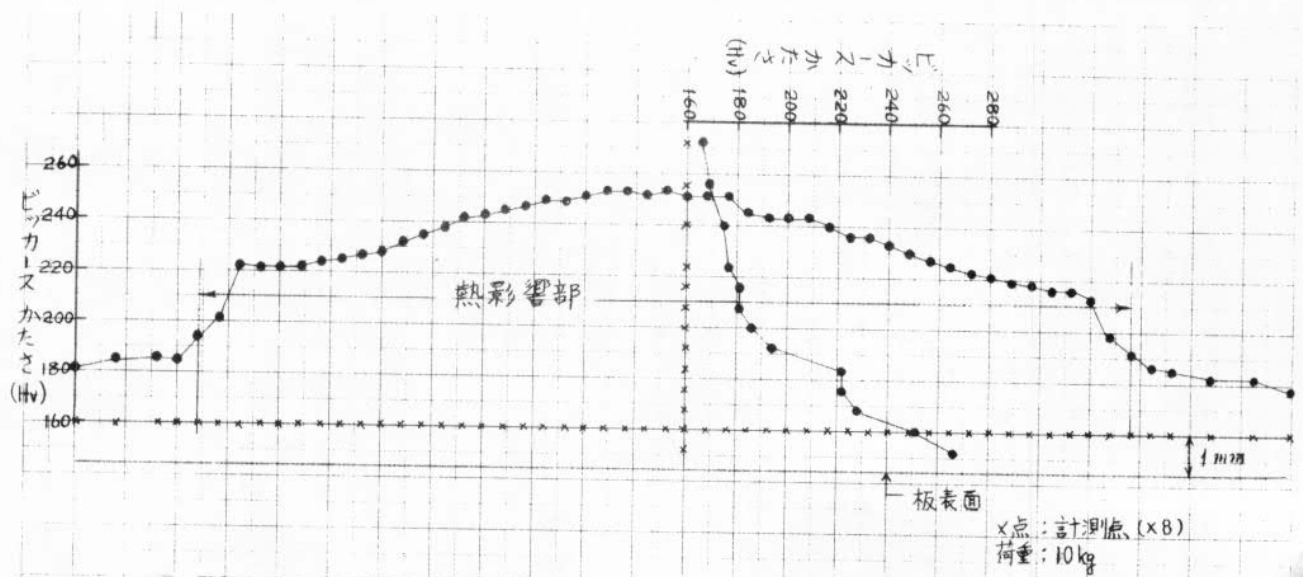


図 4.7 ビッカースかたさ測定結果 (C25A)
(K5A, 30mm⁺, 900°C $\xrightarrow{AC}$ 625°C W.C.)

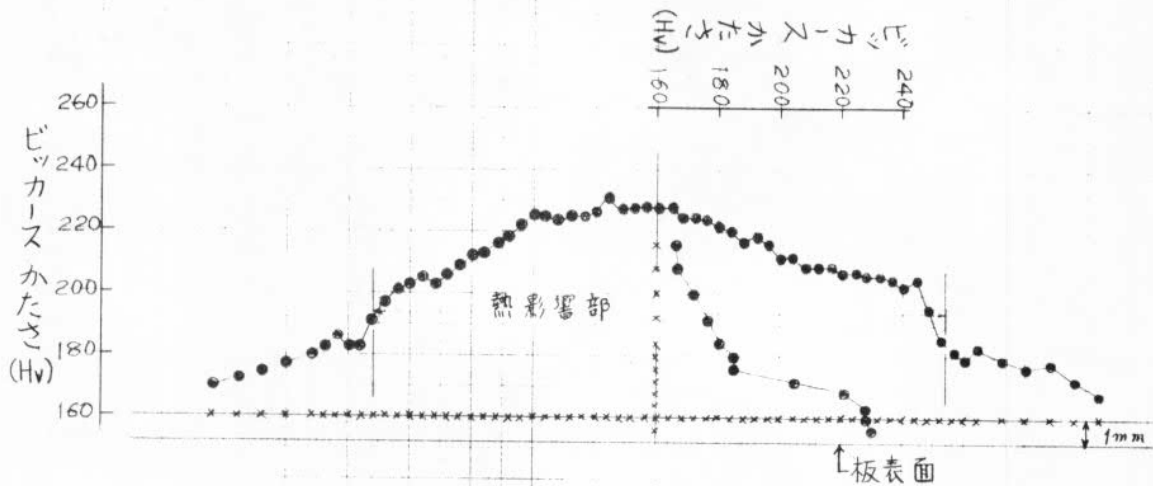
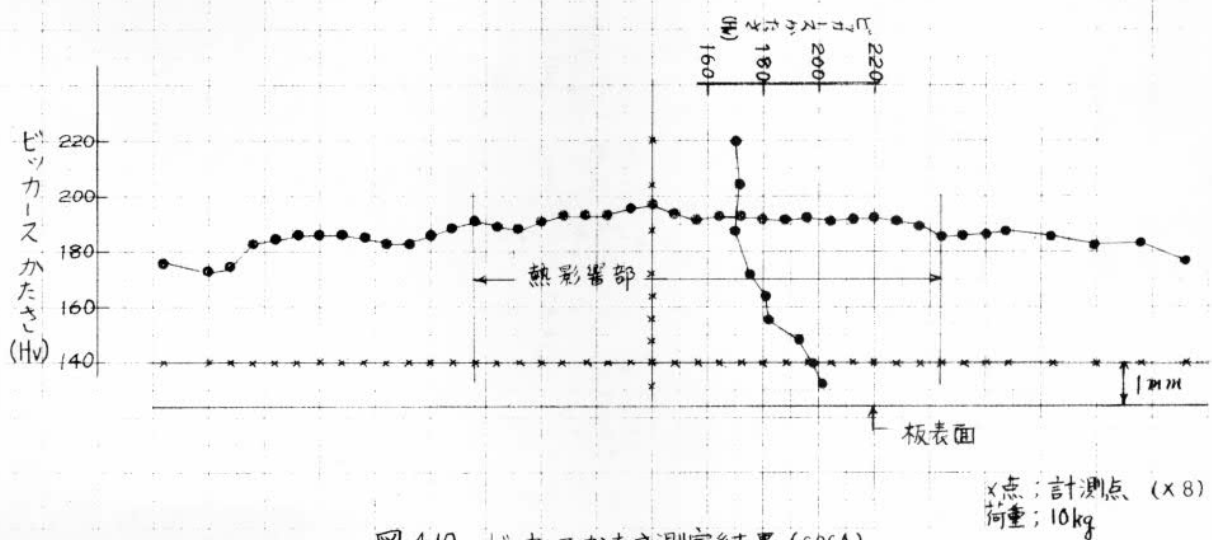
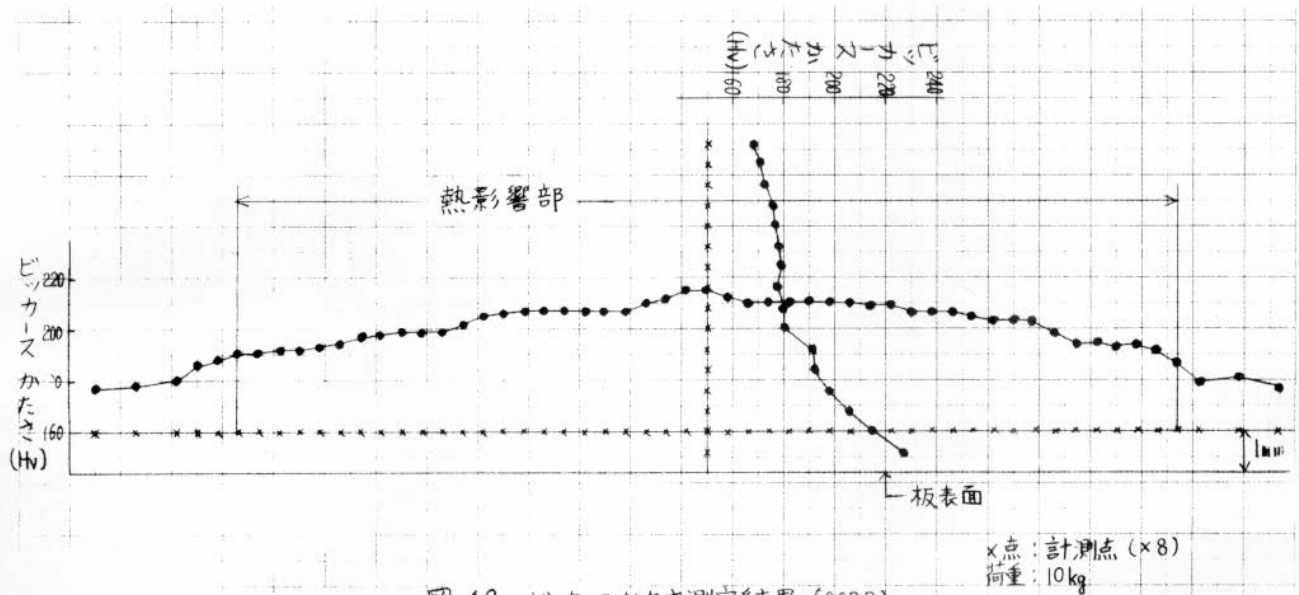


図 4.8 ビッカースかたさ測定結果 (C25B)
(K5A, 30mm⁺, 900°C $\xrightarrow{AC}$ 575°C W.C.)



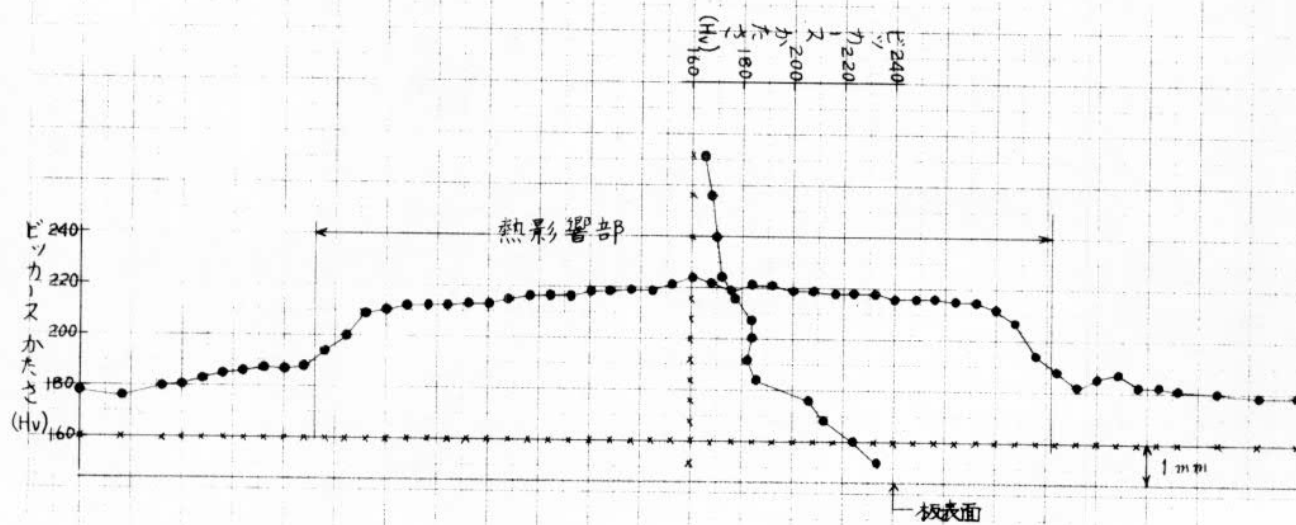


図4.11 ビッカースかたさ測定結果 (C60A)
(K5A, 30mm^t, 850°C_{A.C.}→575°C_{W.C.})

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

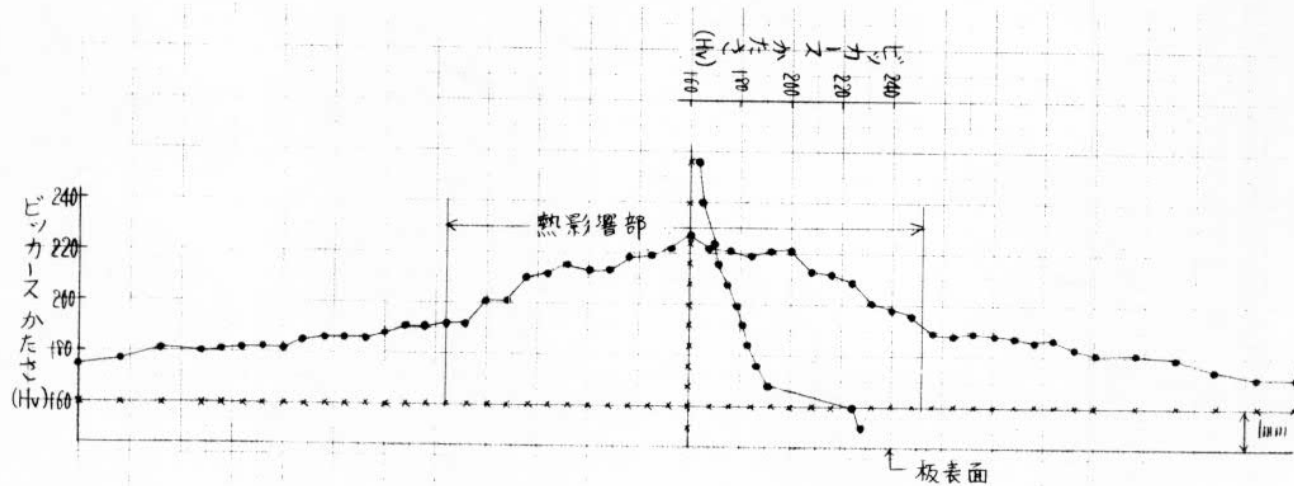


図4.12 ビッカースかたさ測定結果 (C60B)
(K5A, 30mm^t, 800°C_{A.C.}→575°C_{W.C.})

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

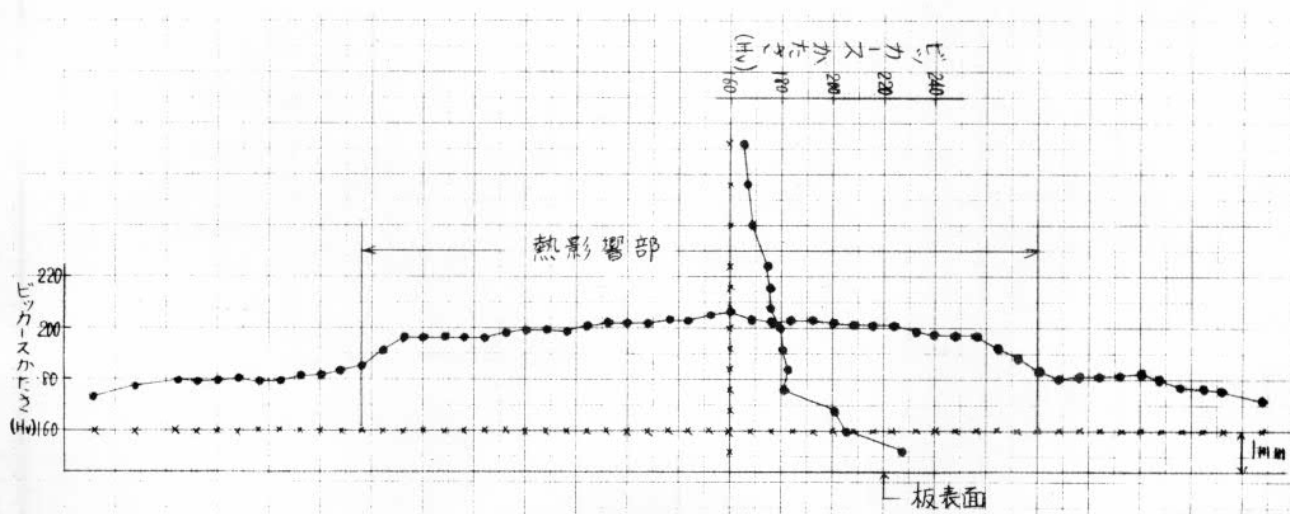


図 4.13 ビッカースかたさ測定結果 (C62A)
(K5A, 30mm^t, 800°C $\xrightarrow{AC}$ 500°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

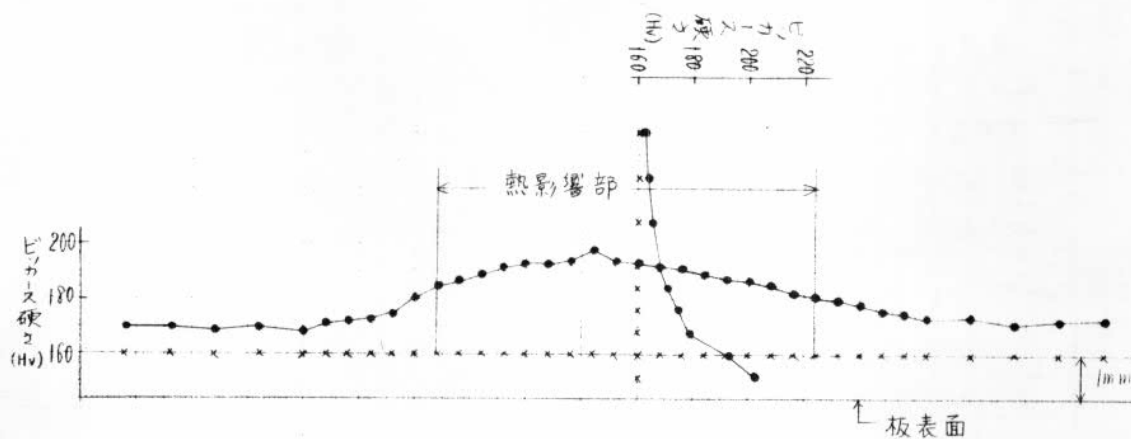
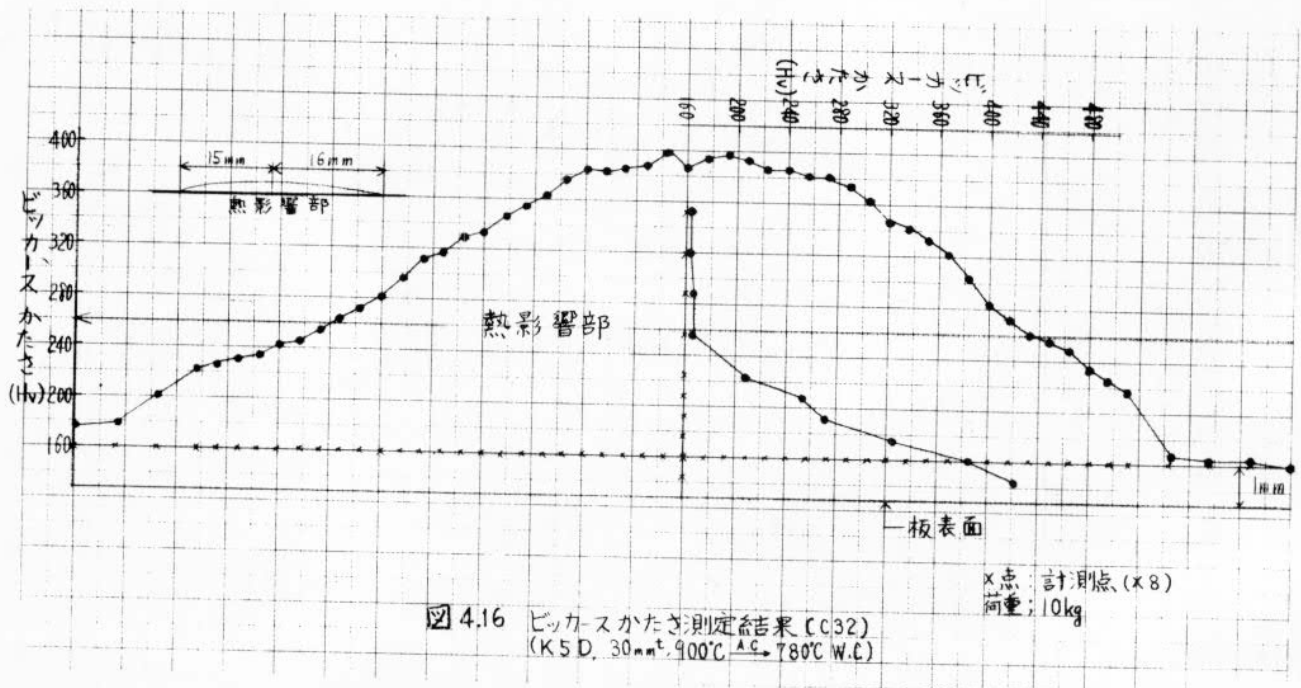
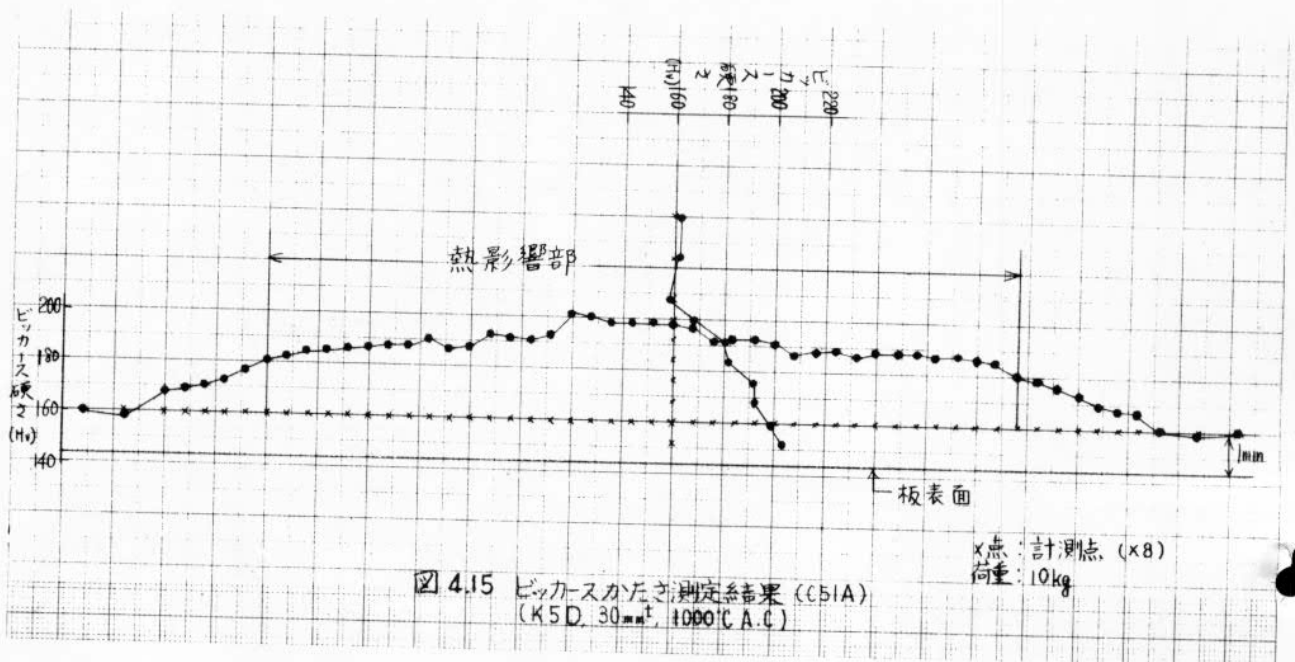


図 4.14 ビッカースかたさ測定結果
(K5A, 30mm^t, 800°C A.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg



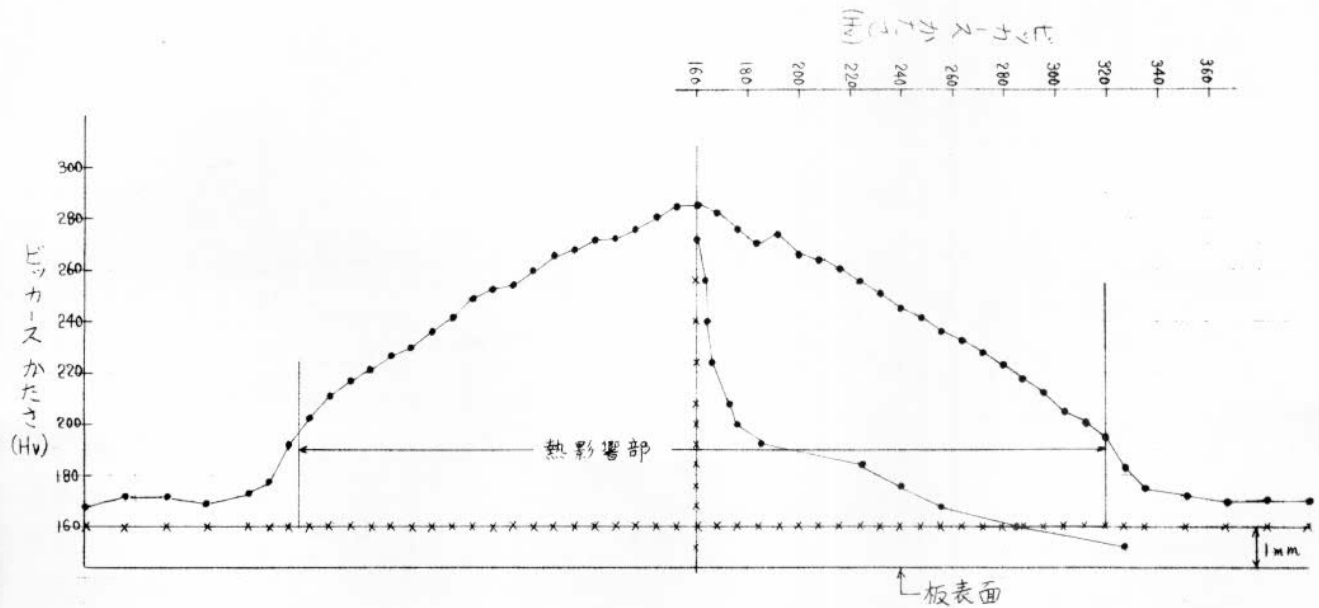


図 4.17 ビッカースかたさ測定結果 (C33A)
(K5 D, 30mm^t, 900°C A.C. → 625°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

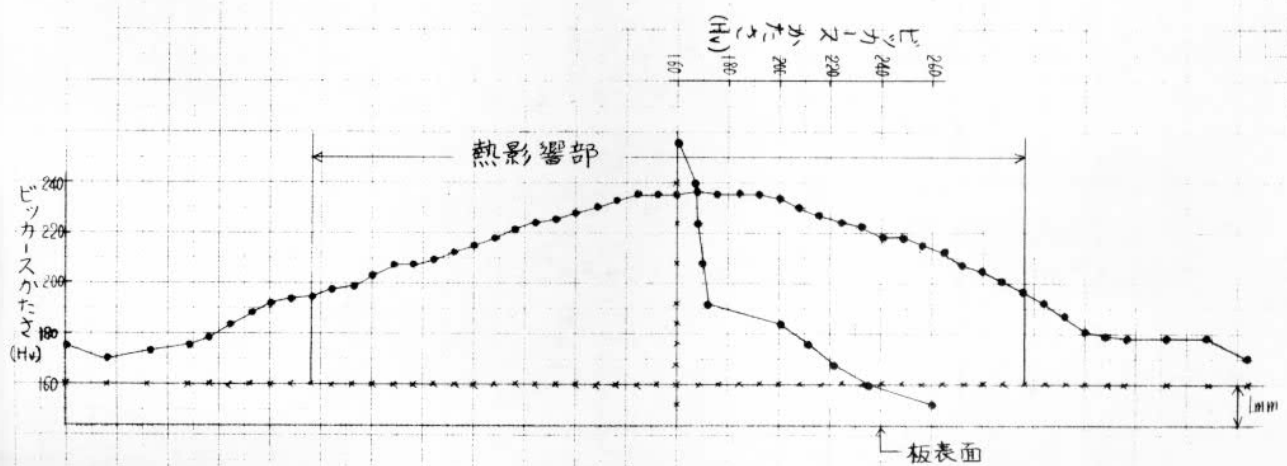


図 4.18 ビッカースかたさ測定結果 (C33B)
(K5 D, 30mm^t, 900°C A.C. → 575°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

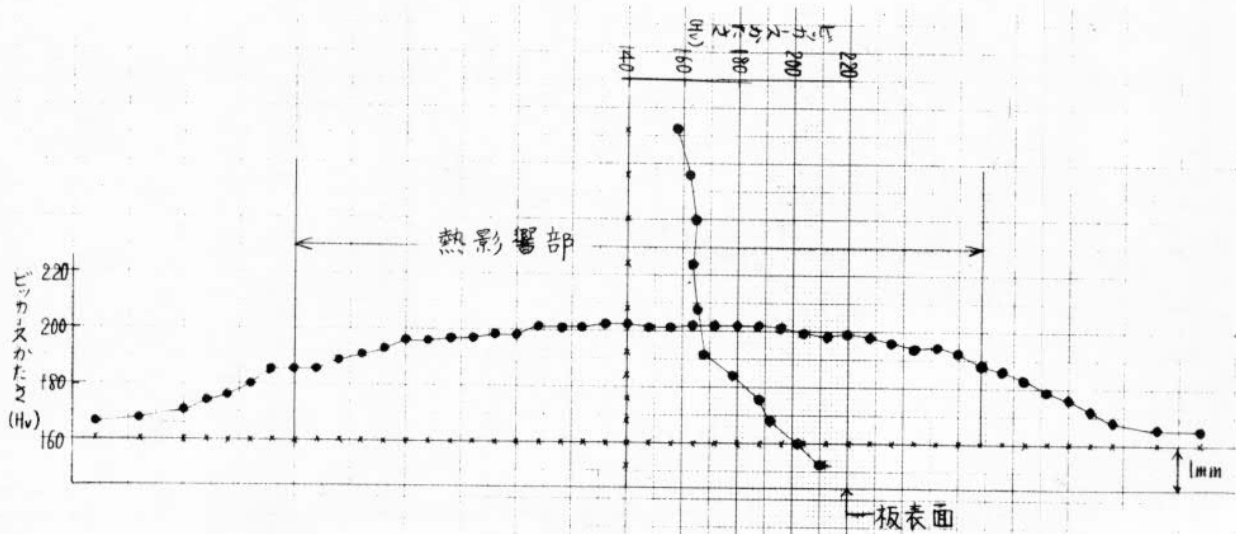


図 4.19 ビッカースかたさ測定結果 (C72B)
(K5D, 30mm^t, 900°C A.C. → 500°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

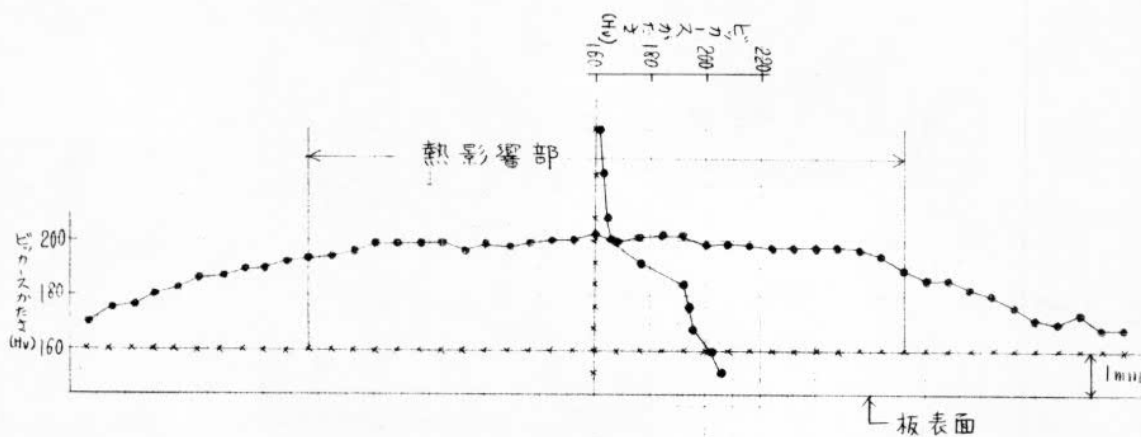


図 4.20 ビッカースかたさ測定結果 (C51B)
(K5D, 30mm^t, 900°C A.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

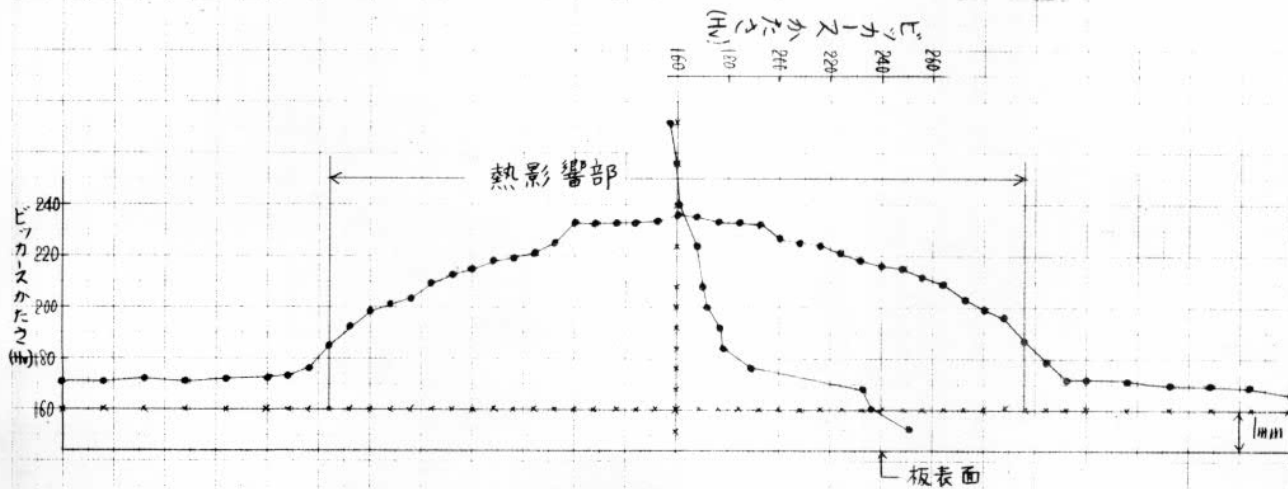


図 4.21 ビッカースかたさ測定結果 (C70A)
(K5 D, 30mm^t, 850°C Δ 575°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

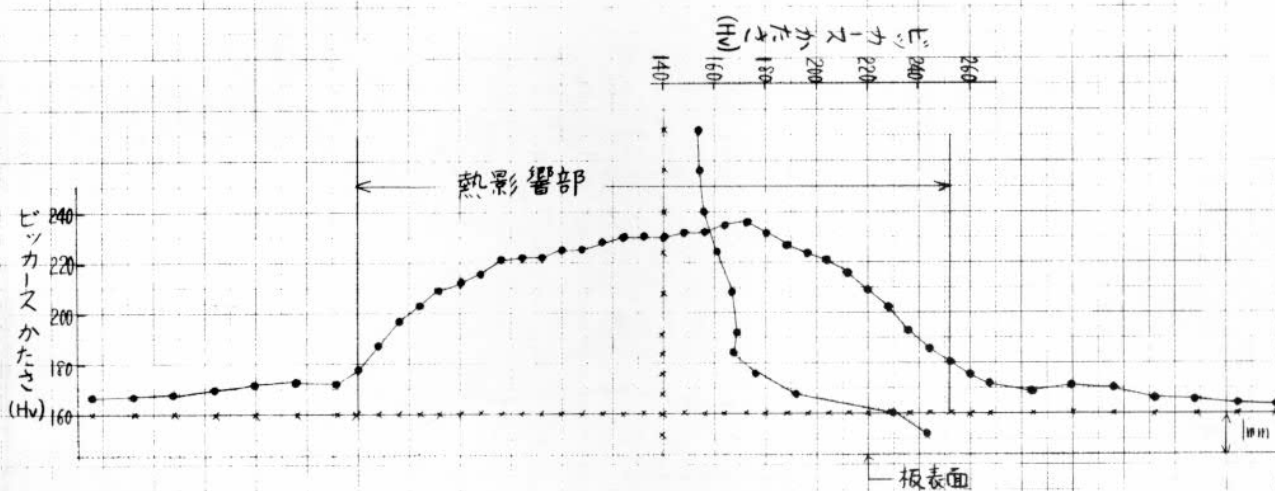


図 4.22 ビッカースかたさ測定結果 (C70B)
(K5 D, 30mm^t, 800°C Δ 575°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

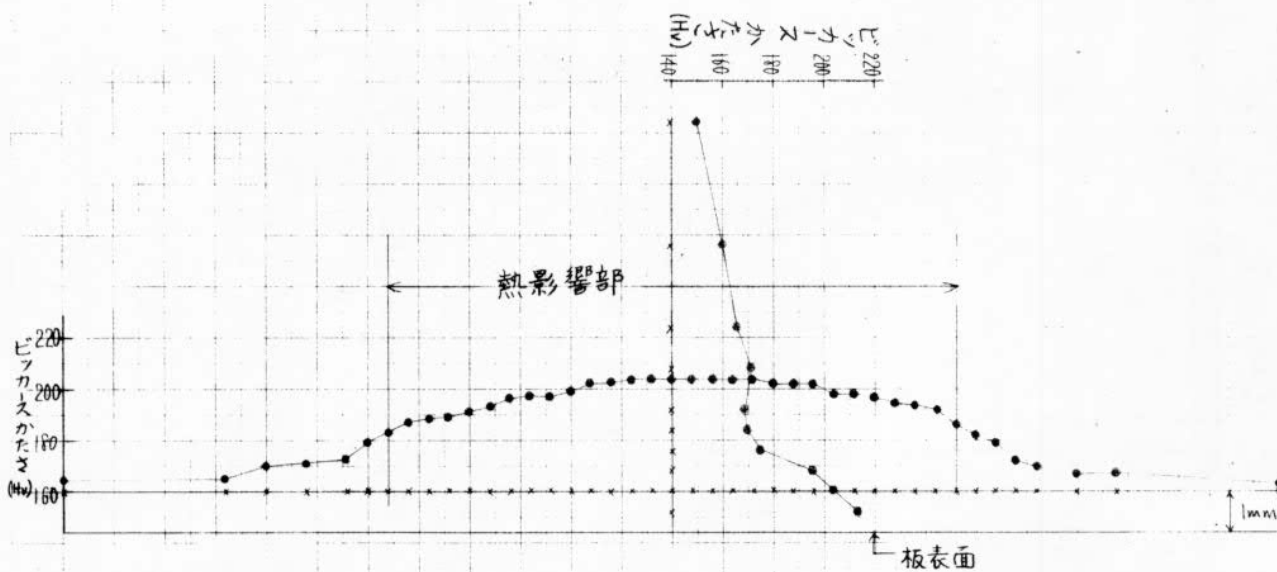


図 4.23 ビッカースかたさ測定結果 (C72A)
(K5D, 30mm^t, 800°C Δ 500°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

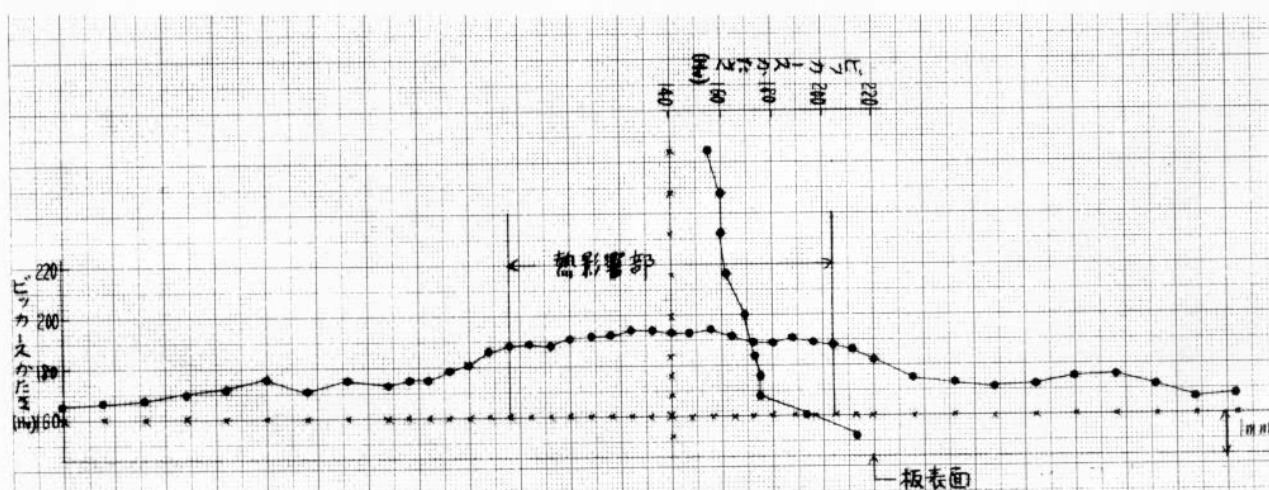


図 4.24 ビッカースかたさ測定結果 (C71I)
(K5D, 30mm^t, 800°C Δ 400°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

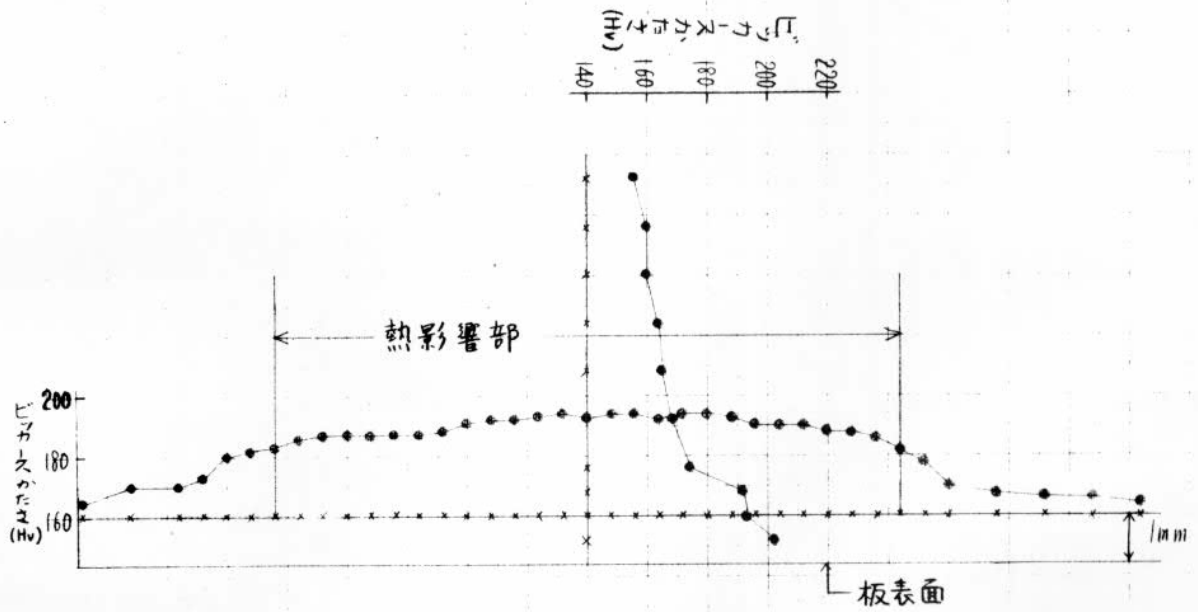


図 4.25 ビッカースかたさ測定結果 (C 30)
(K5D, 30mm^t, 800°C A.C.)

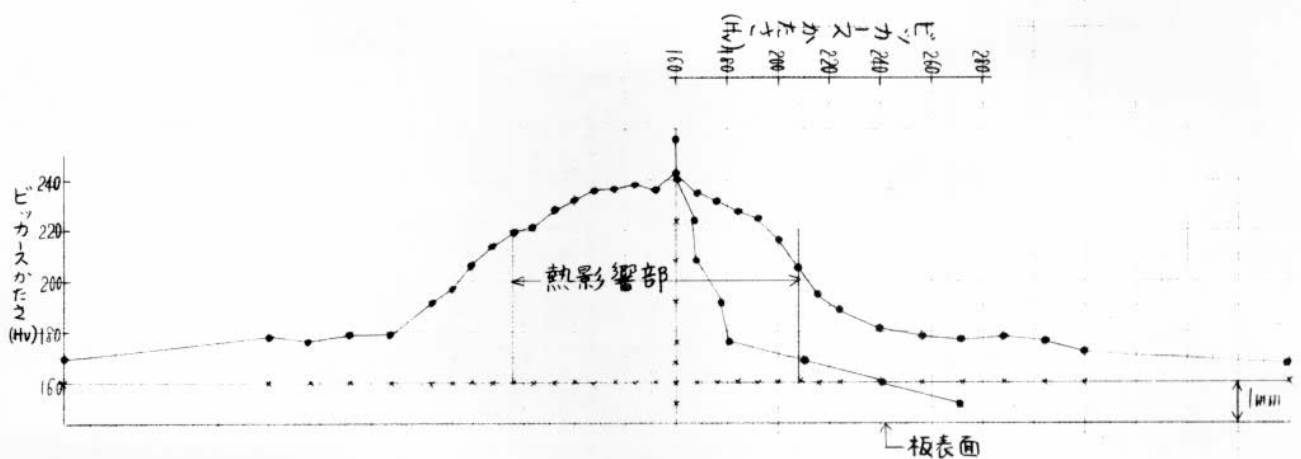


図 4.26 ビッカースかたさ測定結果 (C31A)
(K5D, 30mm^t, 750°C A.C. 660°C W.C.)

x点: 計測点 (× 8)
荷重: 10kg

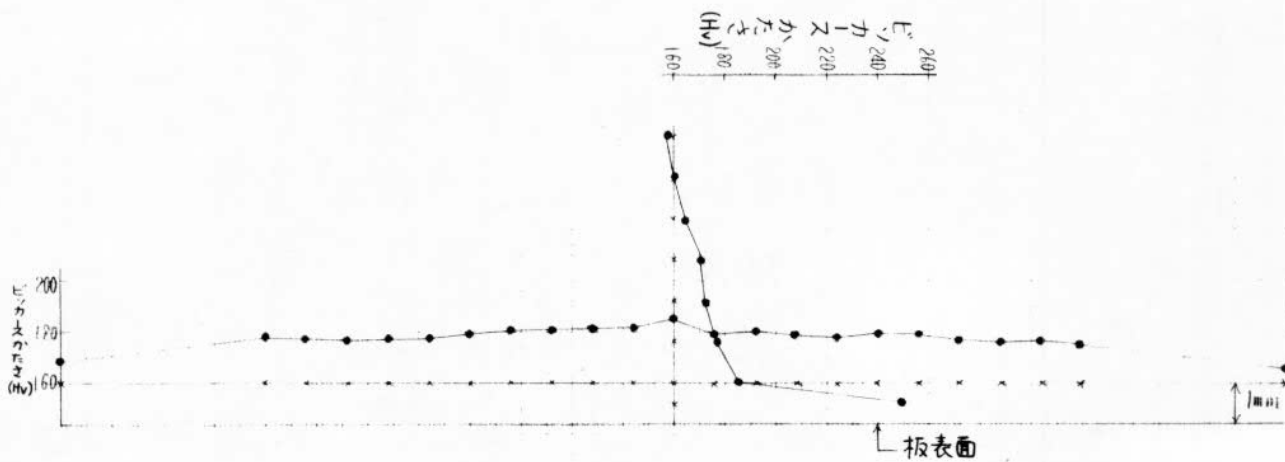


図 4.27 ビッカースかたさ測定結果 (C31B)
(K5D, 30mm², 700°C A.C. → 615°C W.C.)
x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10 kg

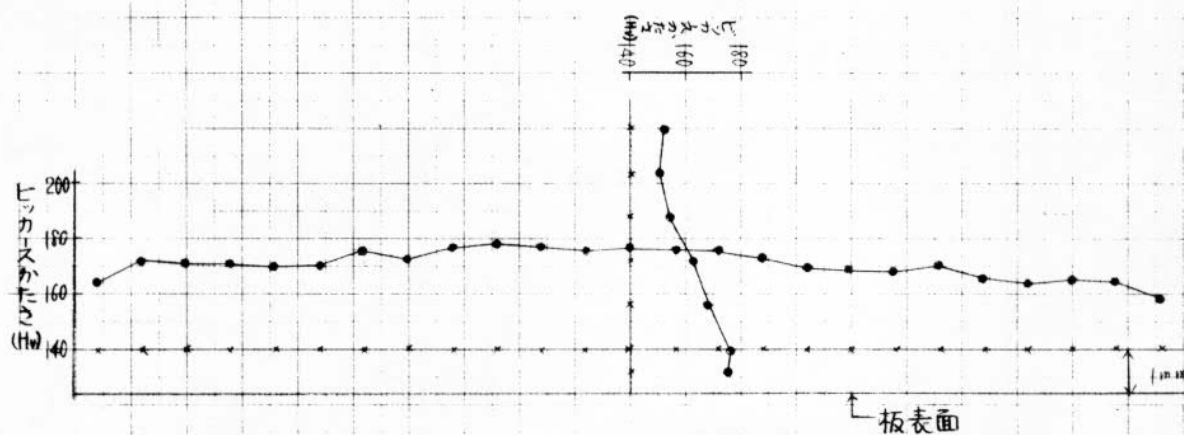


図 4.28 ビッカースかたさ測定結果 (C32B)
(K5D, 30mm², 650°C A.C. → 575°C W.C.)
x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10 kg

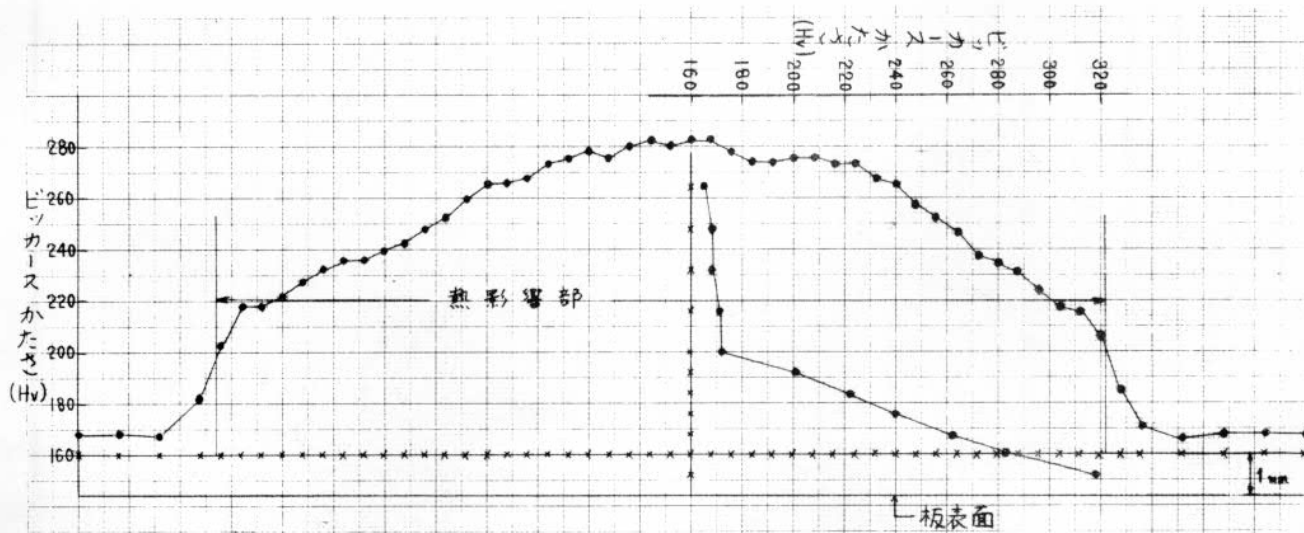


図 4.29 ビッカースかたさ測定結果 (C22A)
(K5E, 30mm², 900°C Δ 625°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

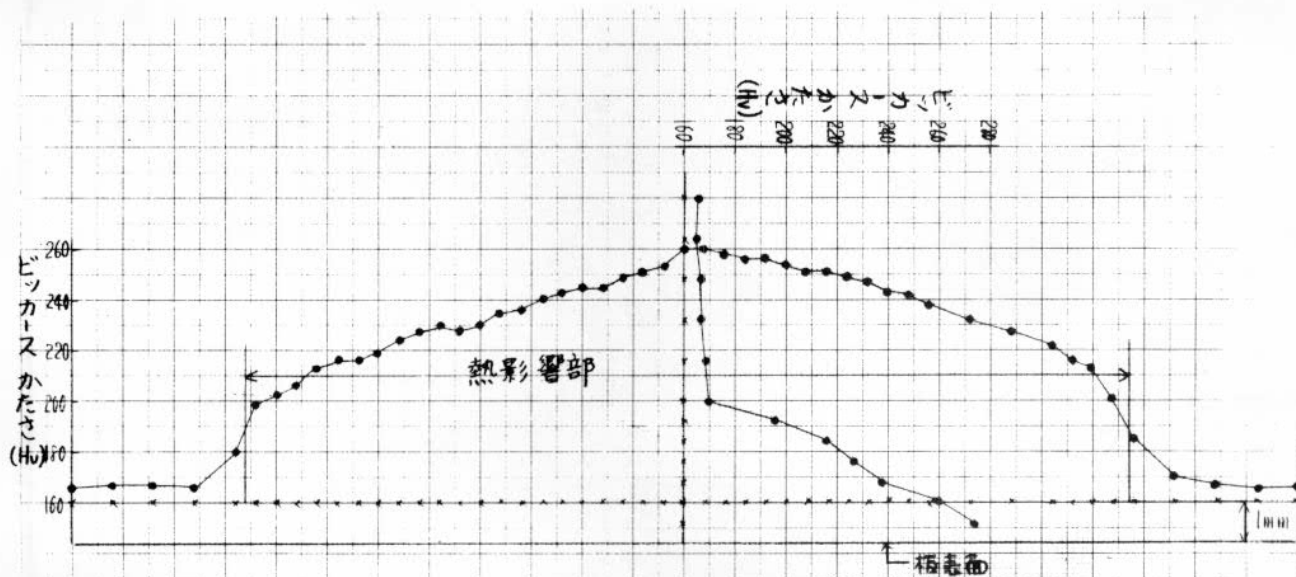
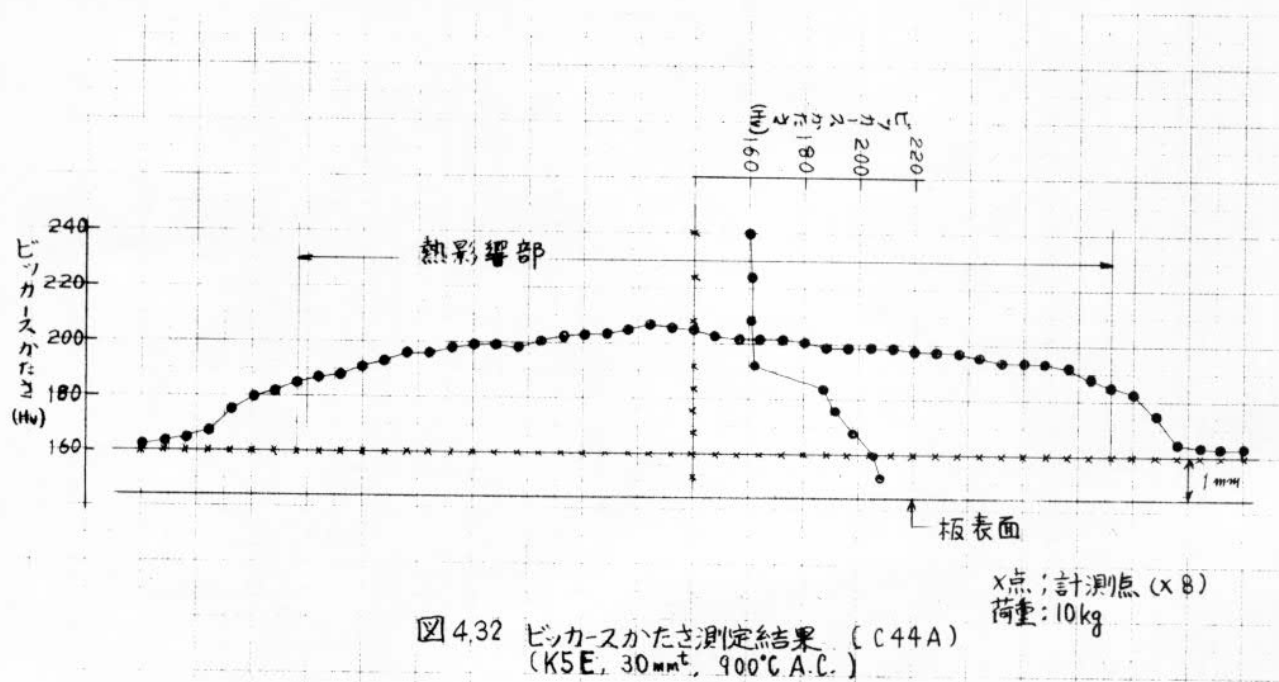
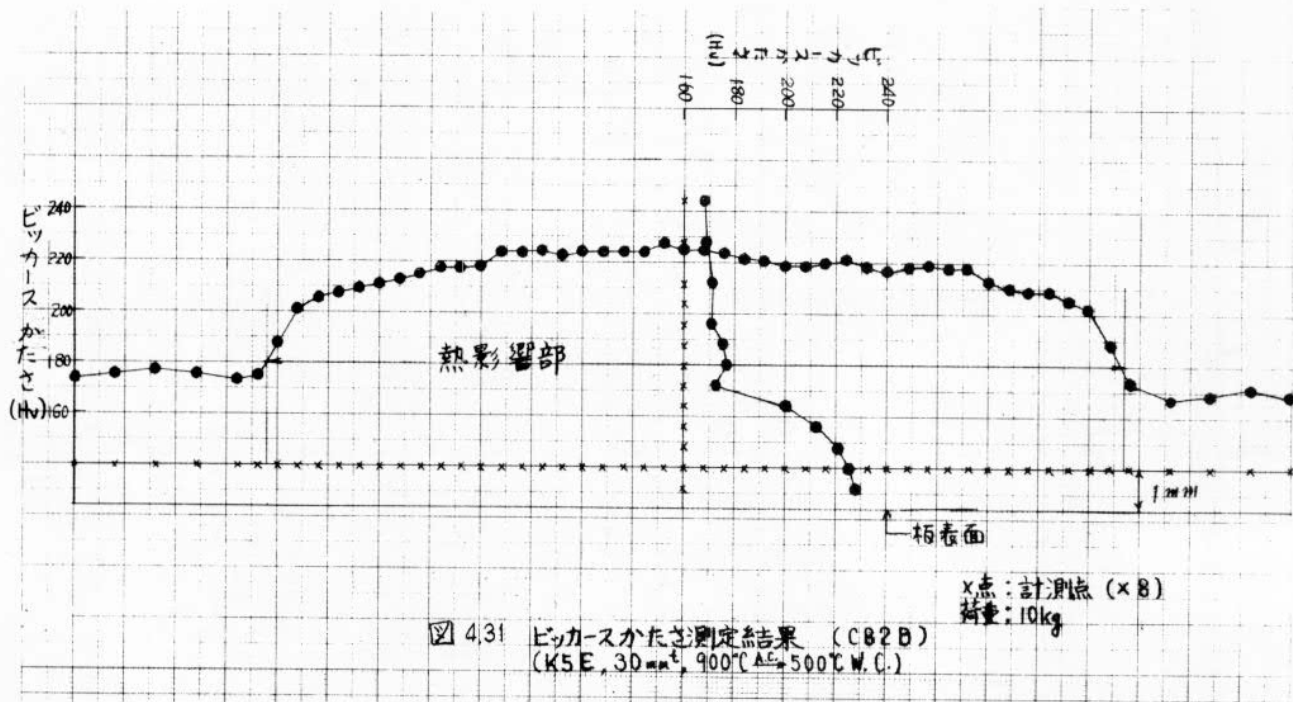


図 4.30 ビッカースかたさ測定結果 (C22B)
(K5E, 30mm², 900°C Δ 575°C W.C.)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg



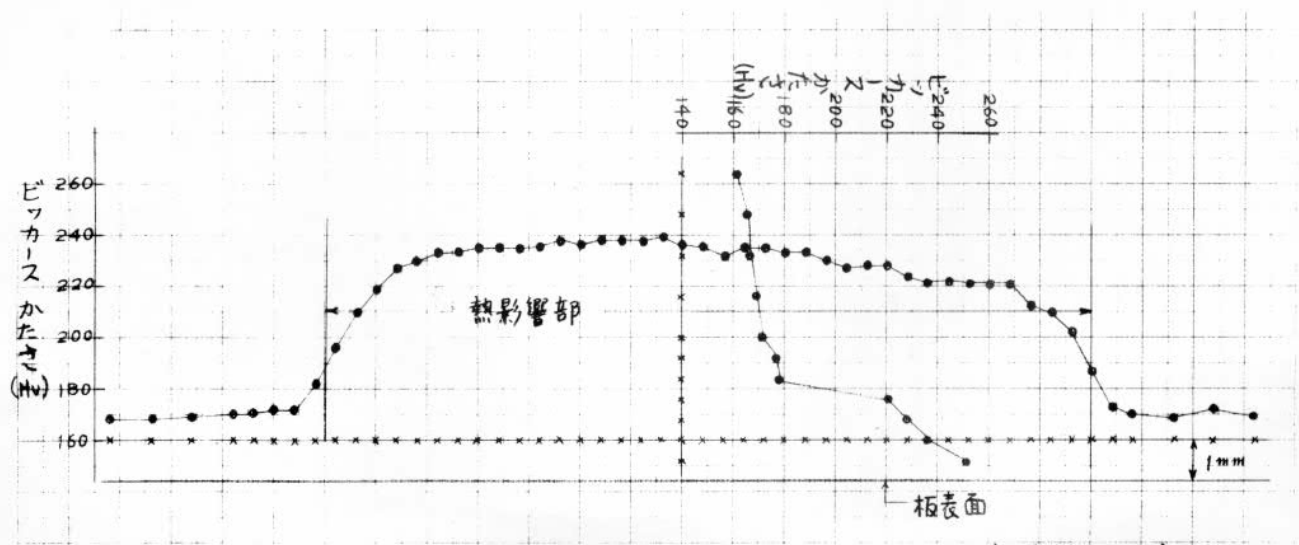


図 4.33 ビッカースかたさ測定結果 (C46A)
(K5E, 30mm ϕ , 850°C $\xrightarrow{Ac_1}$ 575°C W.C.)

×点: 計測点 (×8)
荷重: 10kg

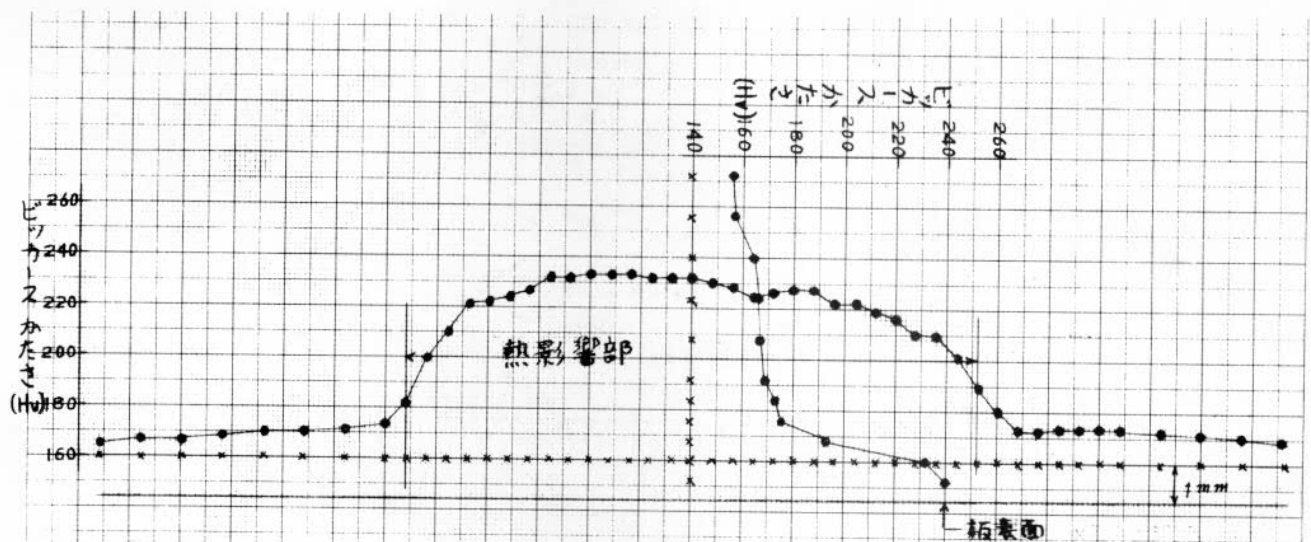


図 4.34 ビッカースかたさ測定結果 (C46B)
(K5E, 30mm ϕ , 800°C $\xrightarrow{Ac_1}$ 575°C W.C.)

×点: 計測点 (×8)
荷重: 10kg

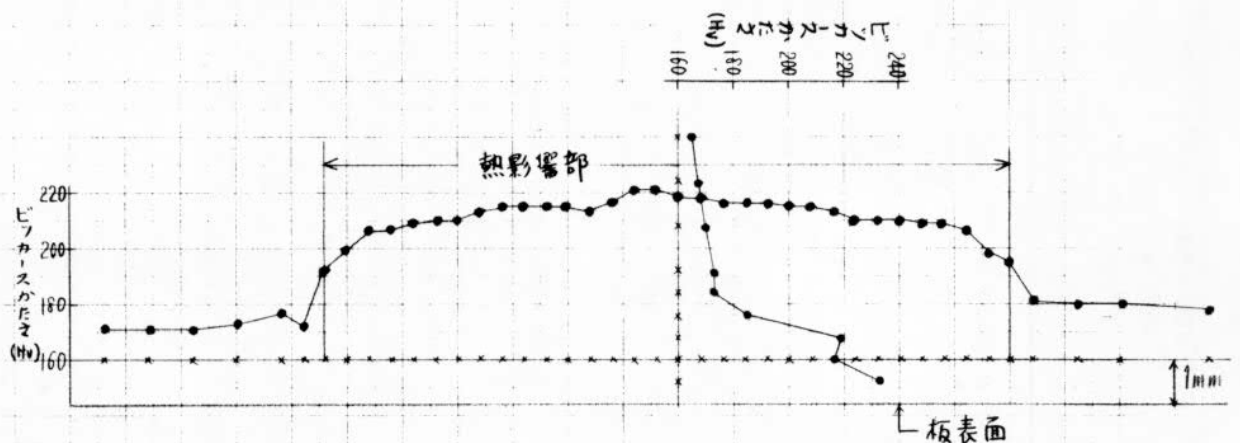


図 4.35 ビッカースかたさ測定結果 (C82A)
(K5 E, 30_{mm}^t, 800°C A.C. → 500°C W.C.)

x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10kg

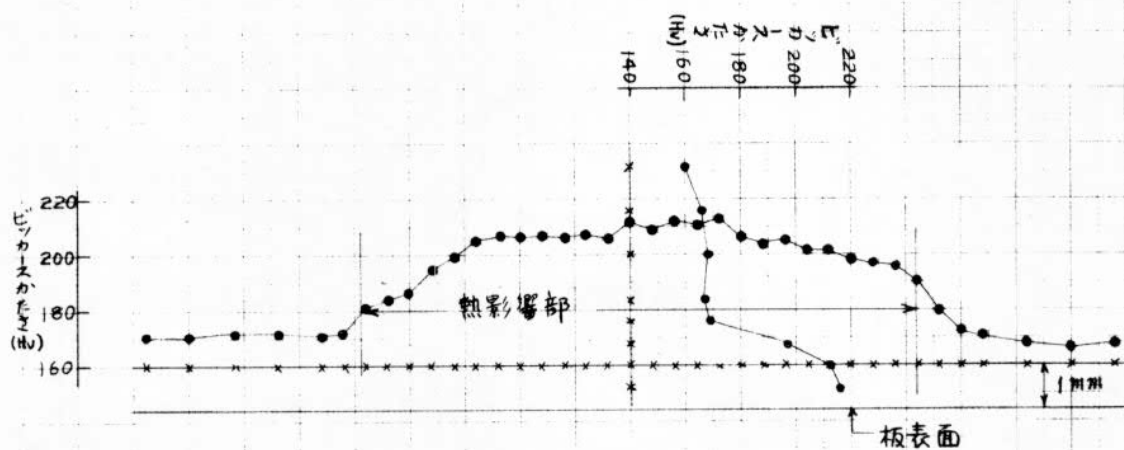
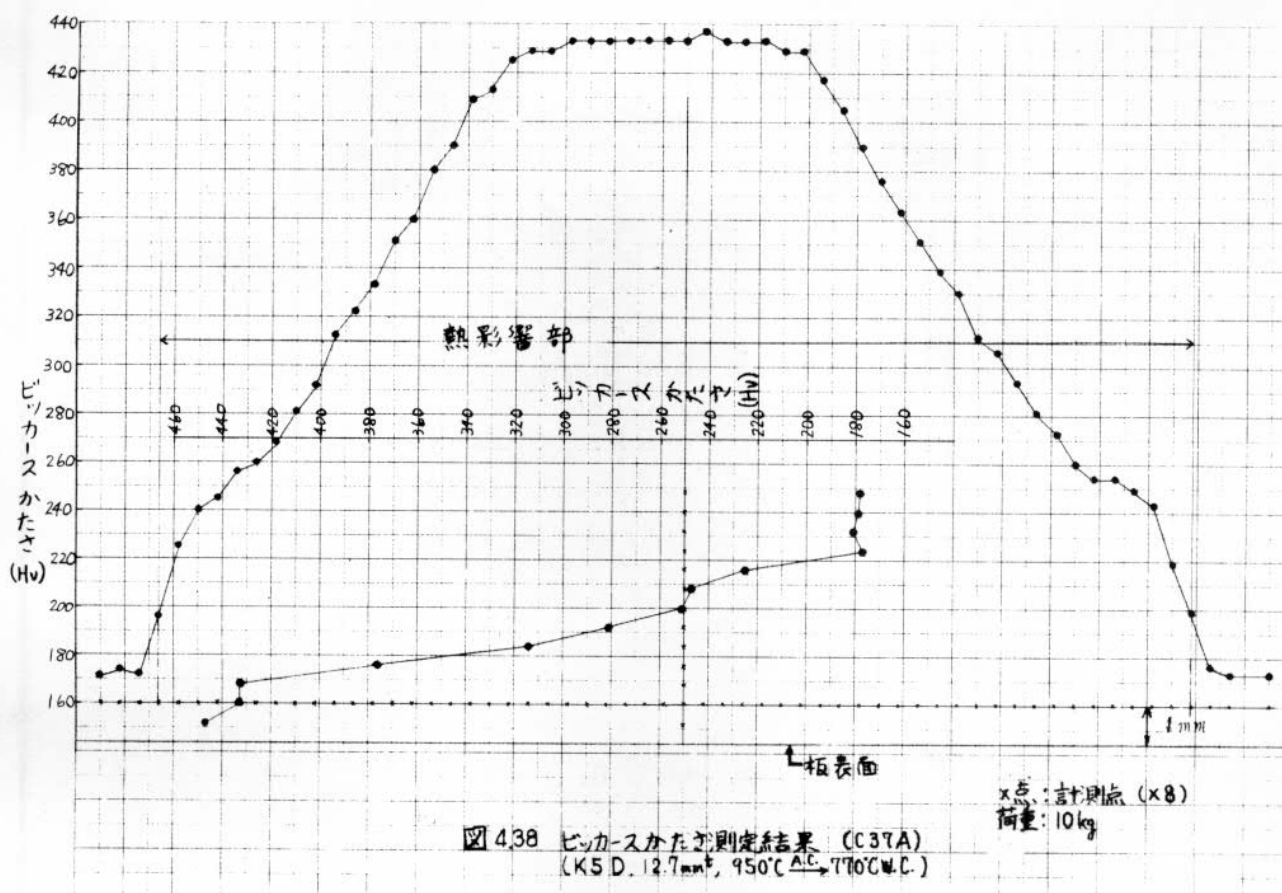
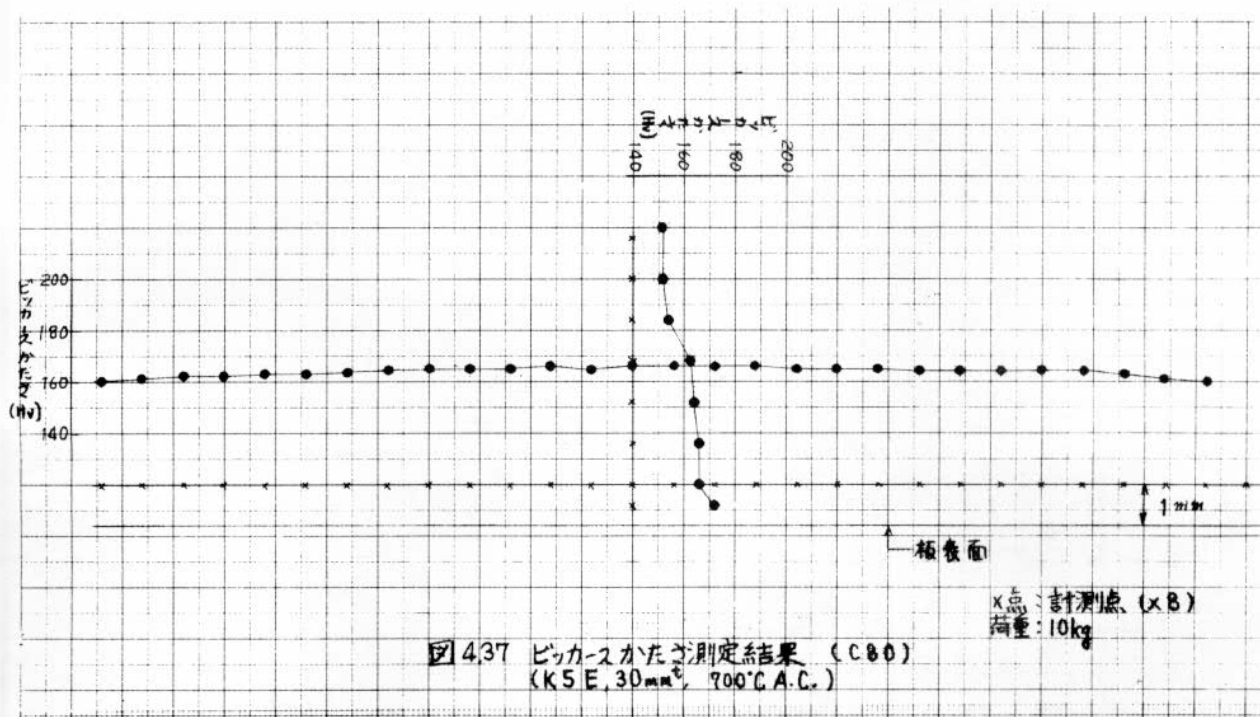
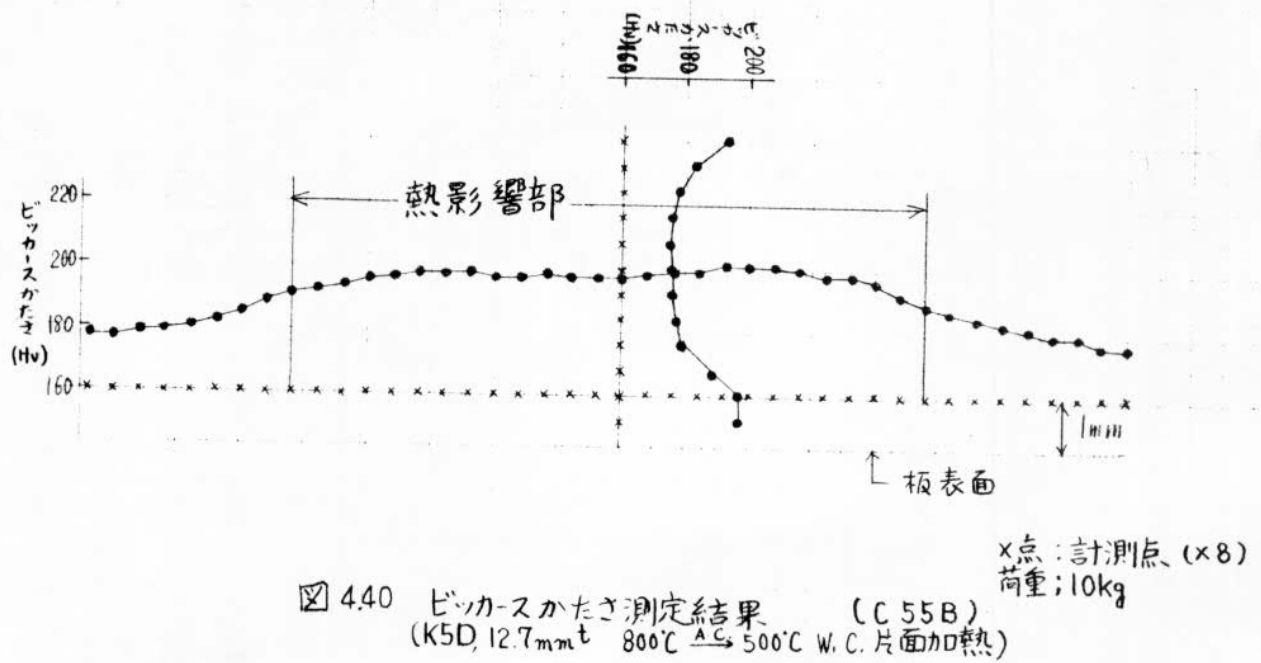
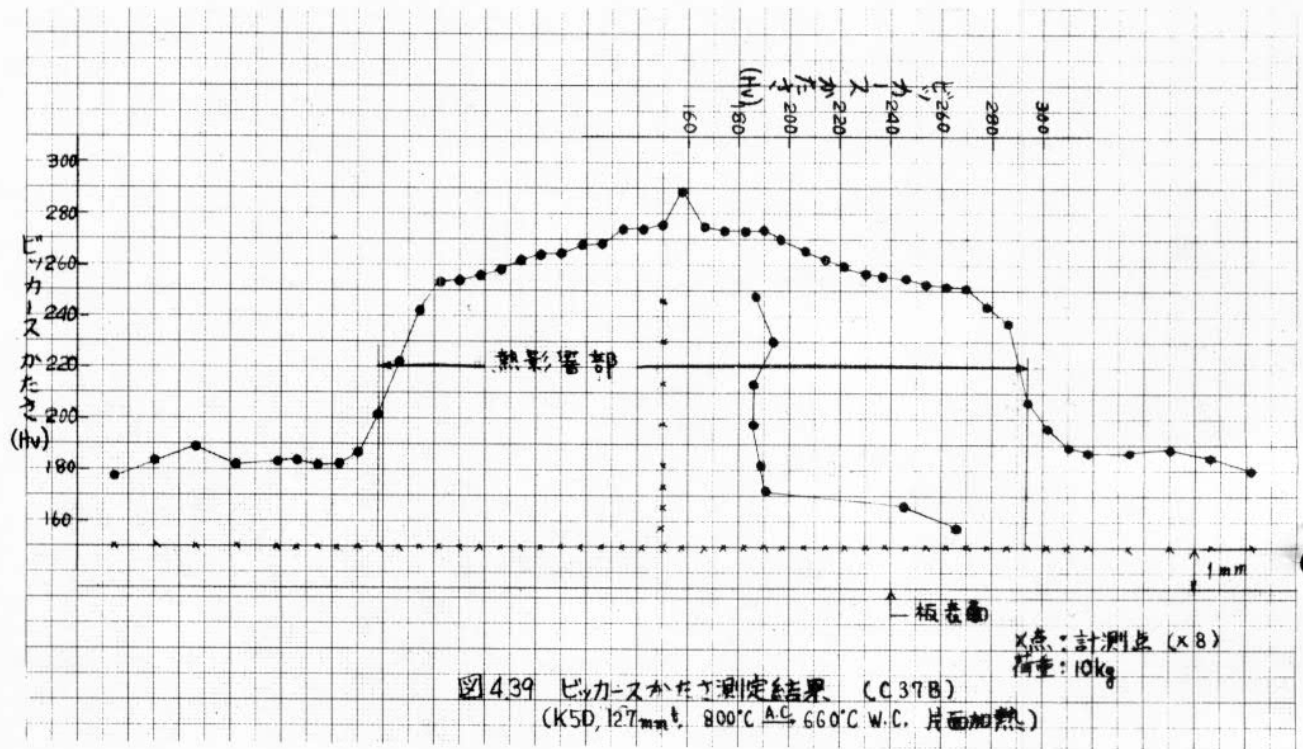


図 4.36 ビッカースかたさ測定結果 (C44B)
(K5 E, 30_{mm}^t, 800°C A.C.)

x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10kg





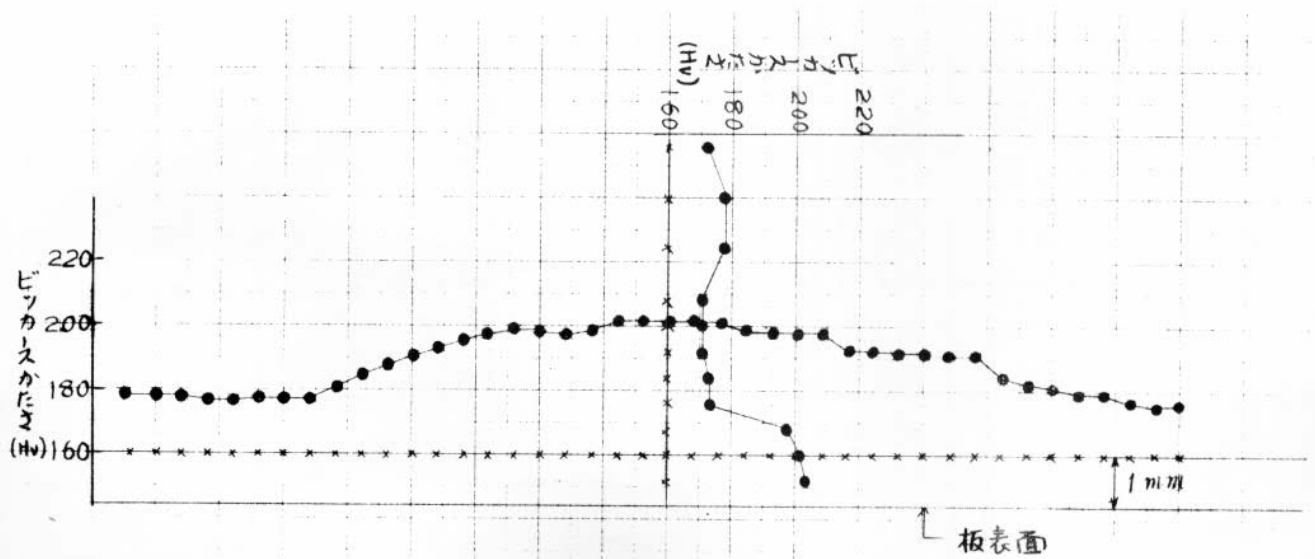


図 4.41 ビッカースかたさ測定結果 (C55A)
(K5D, 12.7 mm t, 800°C^{AC} → 500°C W.C. 両面加熱)
X点: 計測点 (x 8)
荷重: 10 kg

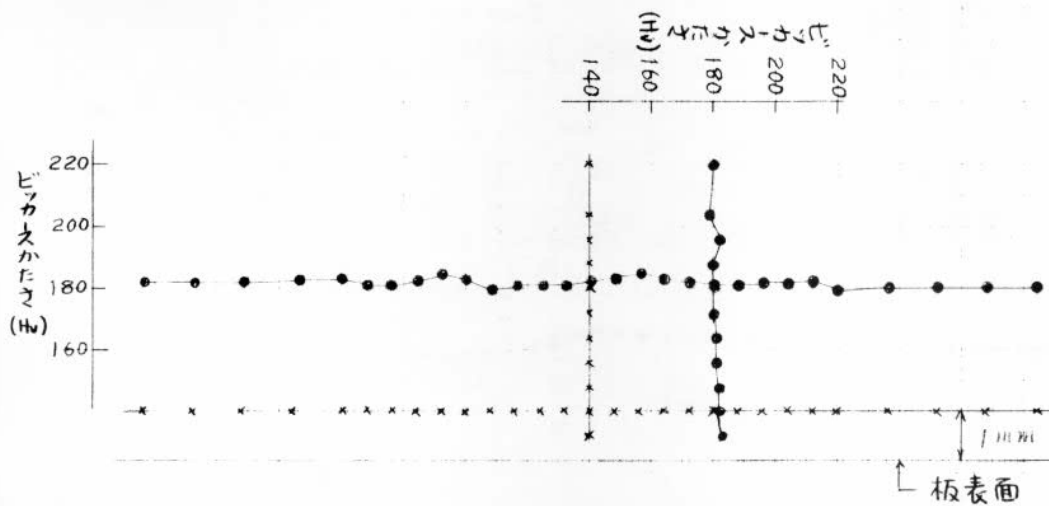


図 4.42 ビッカースかたさ測定結果 (C35)
(K5D, 12.7 mm t, 700°C^{AC} → 590°C W.C. 片面加熱)
X点: 計測点 (x 8)
荷重: 10 kg

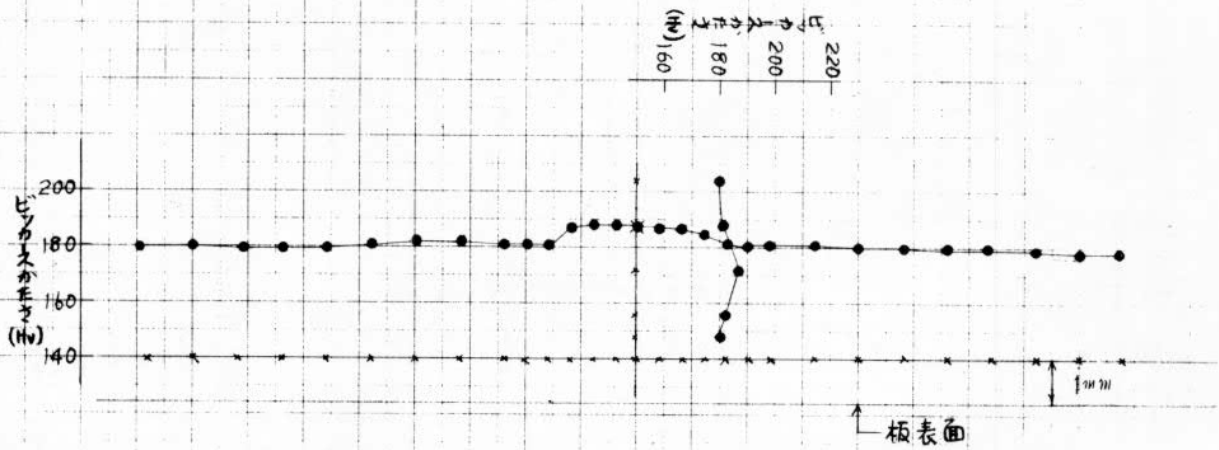


図 443 ビッカースかたさ測定結果 (C36)
(K5D, 12.7mm ϕ , 700°C A.C. $\rightarrow$ 590°C W.C. 両面加熱)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

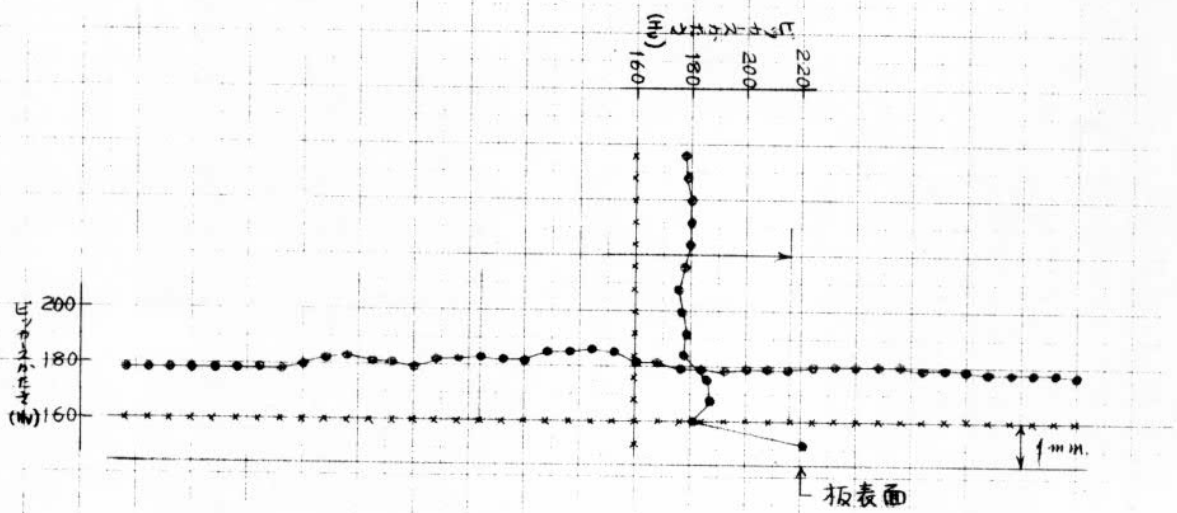


図 444 ビッカースかたさ測定結果 (C40B)
(K5D, 12.7mm ϕ , 700°C A.C. $\rightarrow$ 500°C W.C. 片面加熱)

x点: 計測点 (x8)
荷重: 10kg

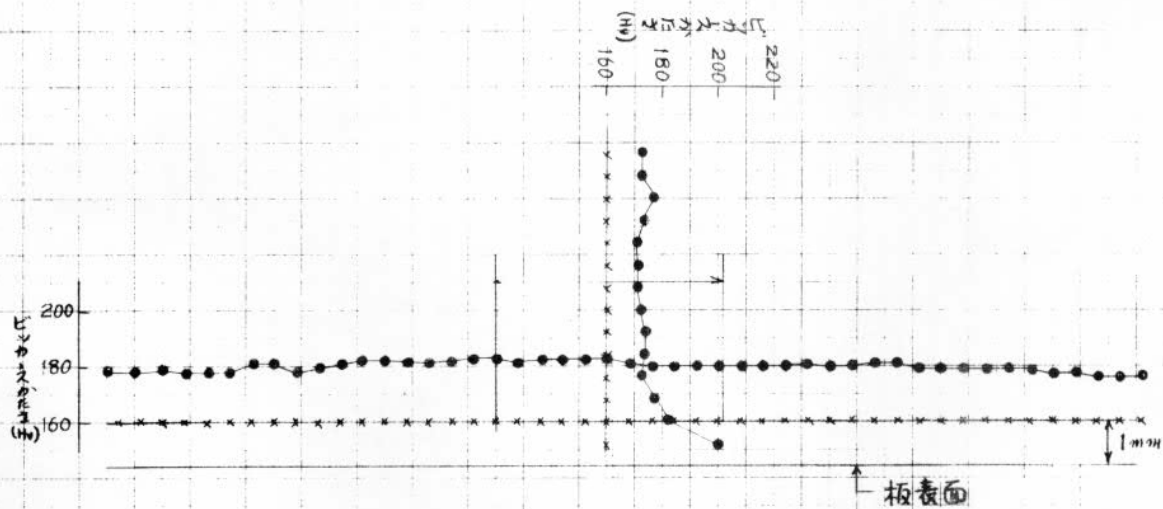


図 4.45 ビッカースかたさ測定結果 (C40A)
(K5D, 12.7mm^t, 700°C A.C. 片面加熱)
x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10kg

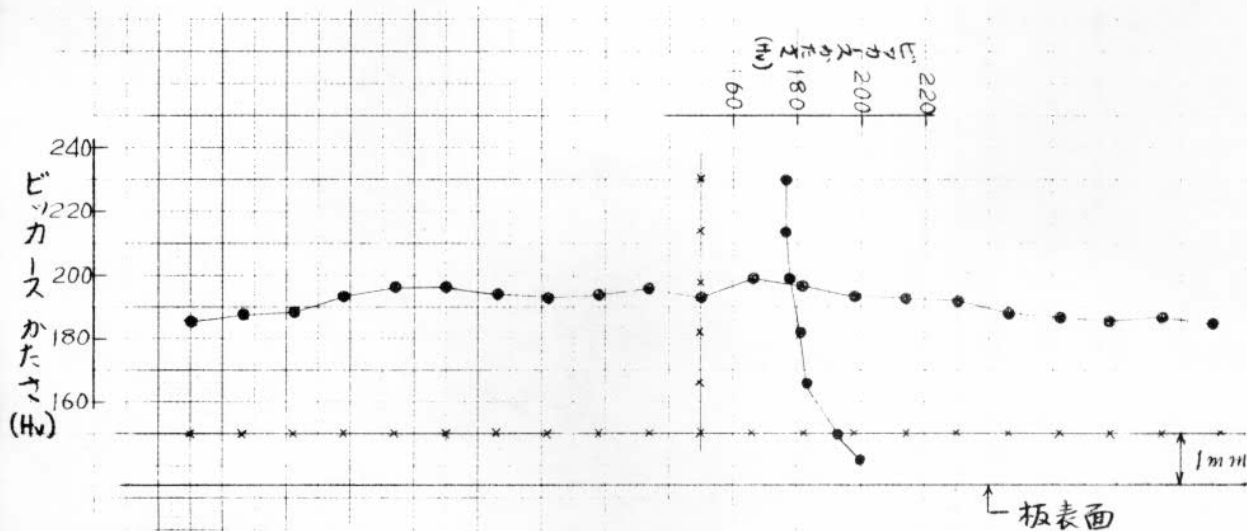


図 4.46 ビッカースかたさ測定結果 (C38B)
(K5D, 12.7mm^t, 650°C A.C. → 555°C W.C. 片面加熱)
x点: 計測点 (x 8)
荷重: 10kg

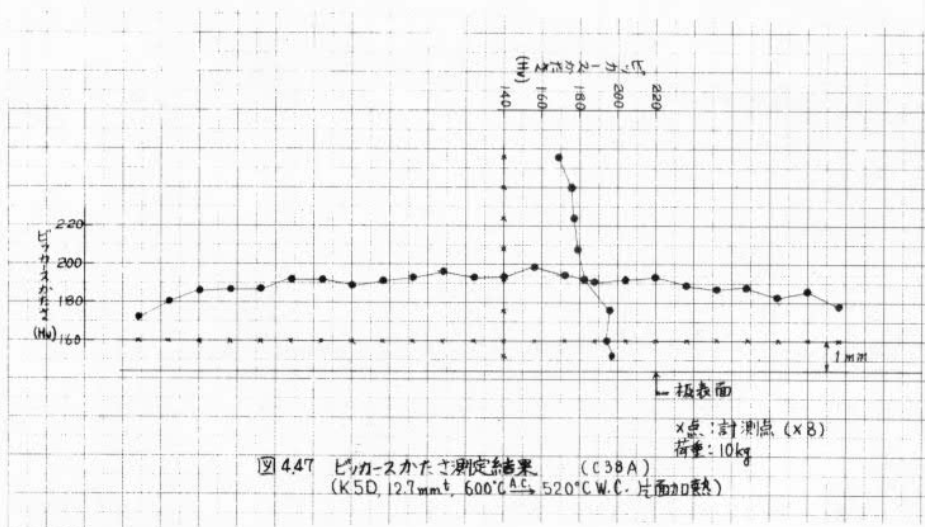


表4.3 ビッカース硬さ試験結果
(板表面下 0.5 mm)

	K5A鋼(30)	K5D鋼(30)	K5E鋼(30)
As Received 材	166	166	160
1000°C A.C.		203	
900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 780°C W.C.		422	
900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 625°C W.C.	266	328	318
900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 575°C W.C.	230	260	274
900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.	227	210	228
900°C A.C.	201	206	208
850°C $\xrightarrow{A.C.}$ 575°C W.C.	233	251	251
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C.	266	336	348
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 575°C W.C.	228	243	240
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.	227	213	233
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 400°C W.C.		213	
800°C A.C.	202	202	216
750°C $\xrightarrow{A.C.}$ 660°C W.C.		271	
700°C $\xrightarrow{A.C.}$ 615°C W.C.		249	
700°C A.C.			172
650°C $\xrightarrow{A.C.}$ 575°C W.C.		175	

	K5D鋼(12.7)
As Received 材	170
950°C $\xrightarrow{A.C.}$ 770°C W.C.	447
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 660°C W.C.	—
800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.	197 (253)
700°C $\xrightarrow{A.C.}$ 590°C W.C.	183
700°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.	221
700°C A.C.	200
650°C $\xrightarrow{A.C.}$ 555°C W.C.	200
600°C $\xrightarrow{A.C.}$ 520°C W.C.	197

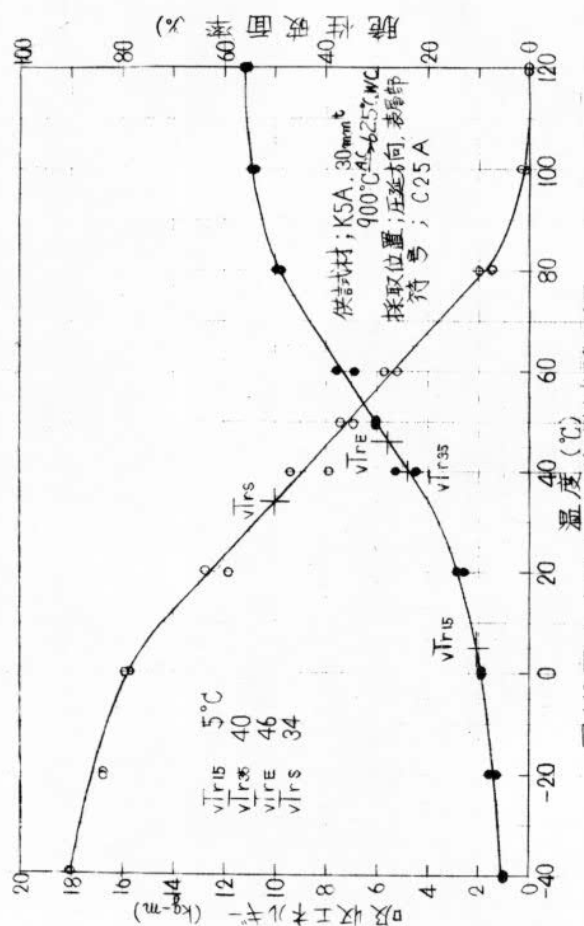


図 448 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

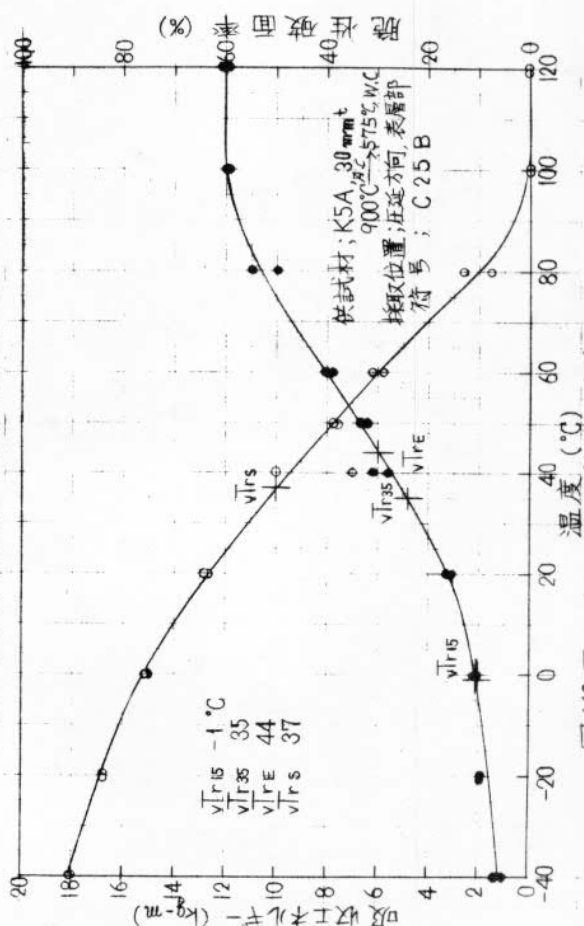


図 449 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

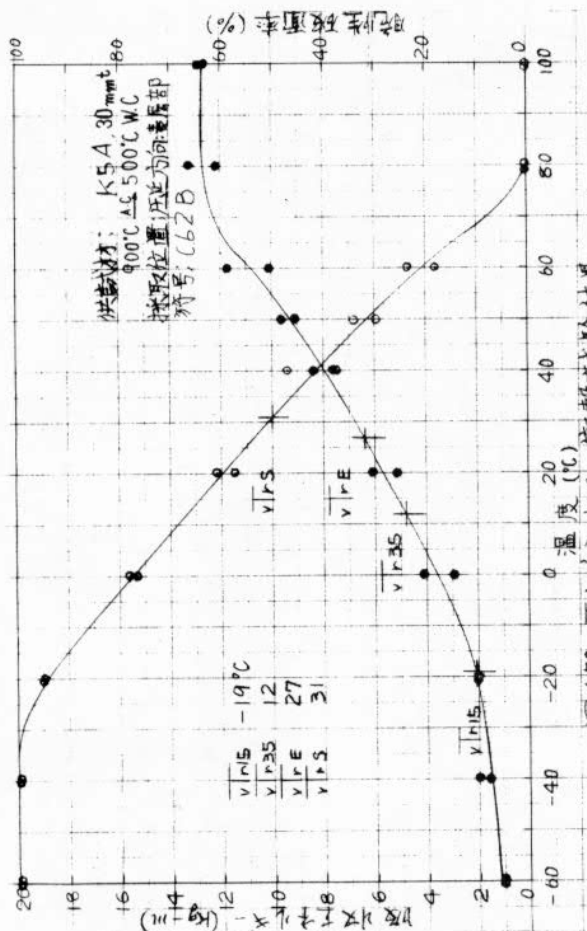


図 450 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

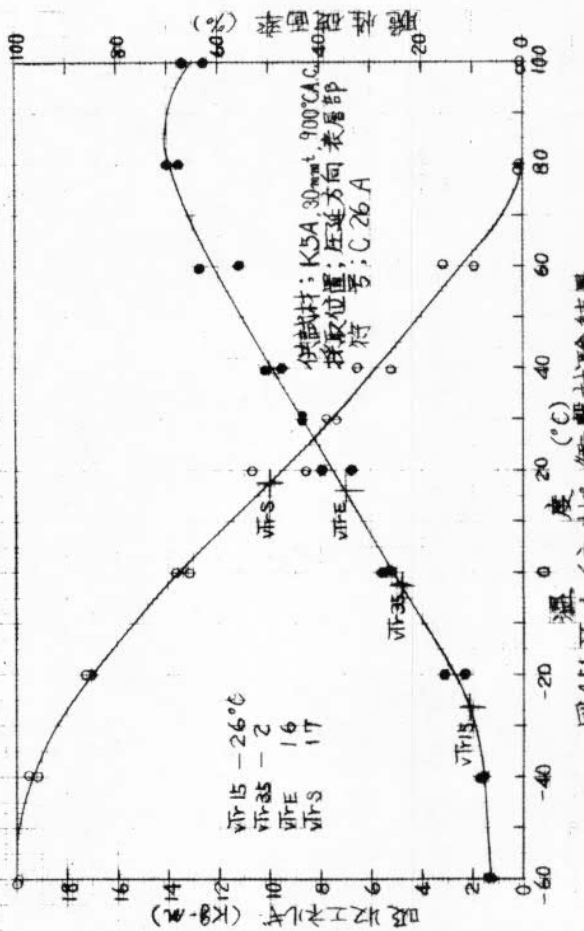


図 451 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

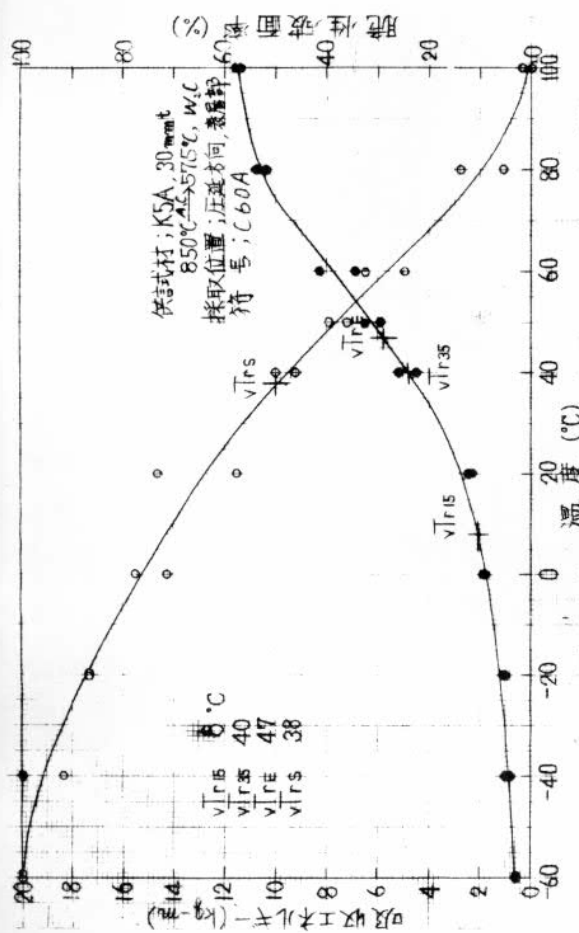


図4.52 V-タチメーター衝撃試験結果

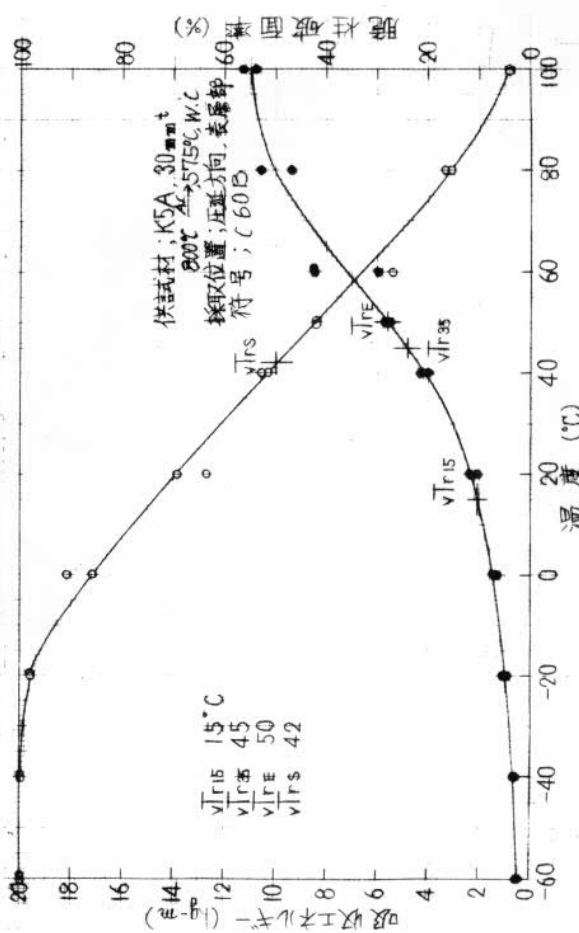


図4.53 V-タチメーター衝撃試験結果

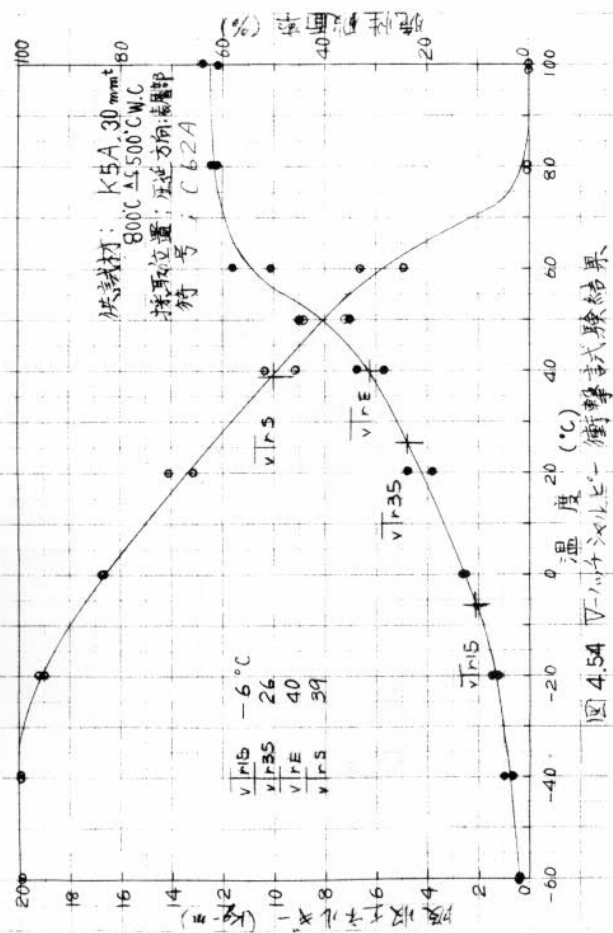


図4.54 V-タチメーター衝撃試験結果

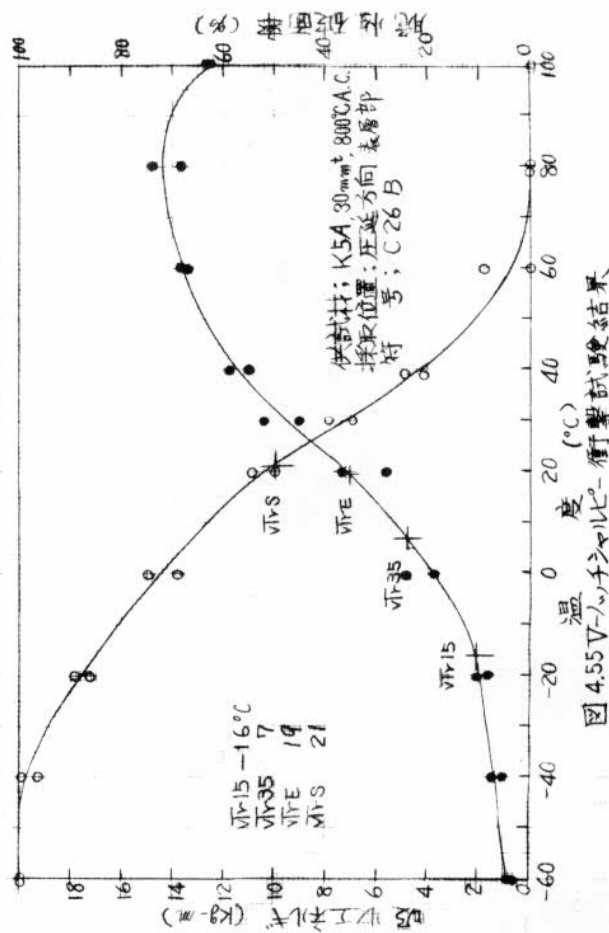


図4.55 V-タチメーター衝撃試験結果

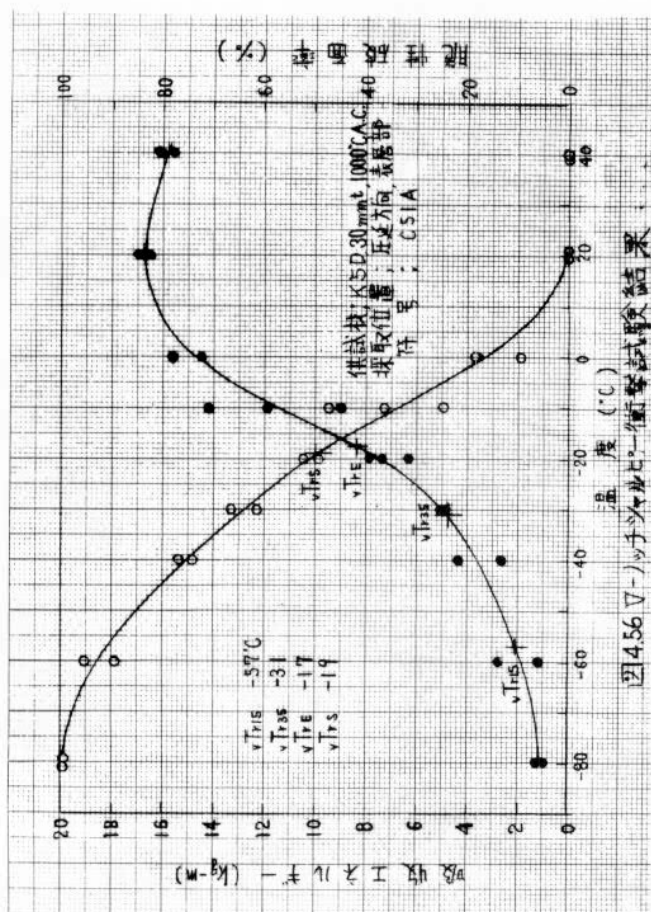


図4.56 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

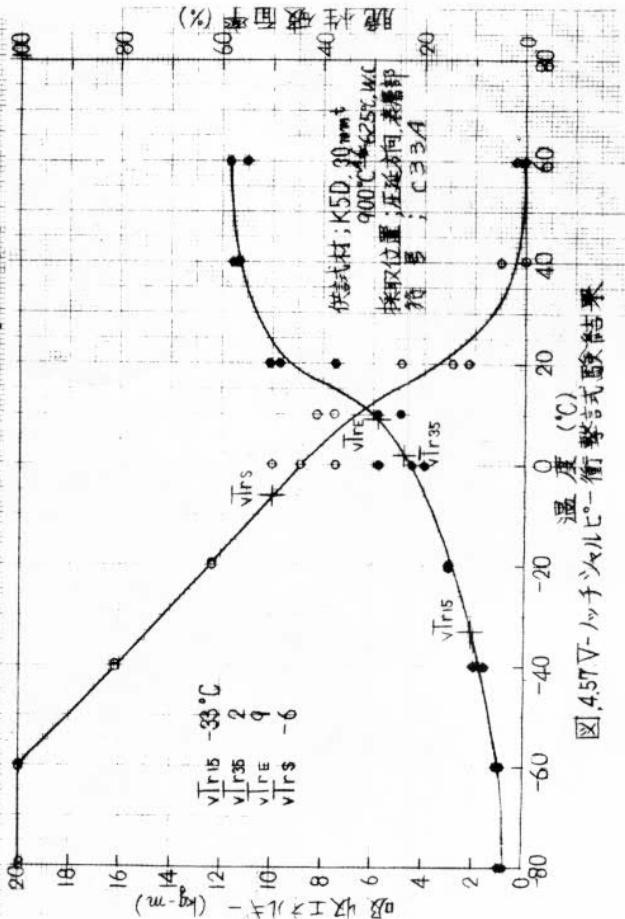


図4.57 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

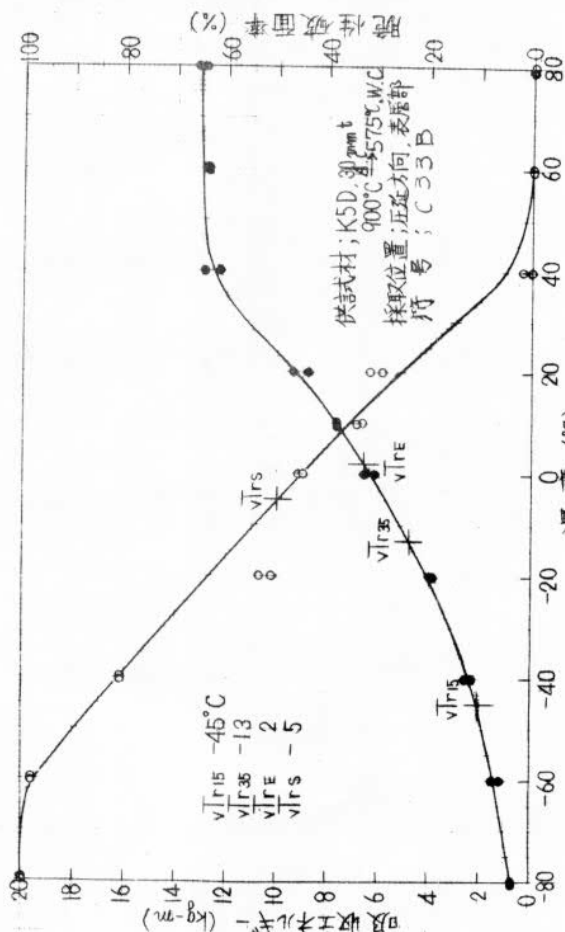


図4.58 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

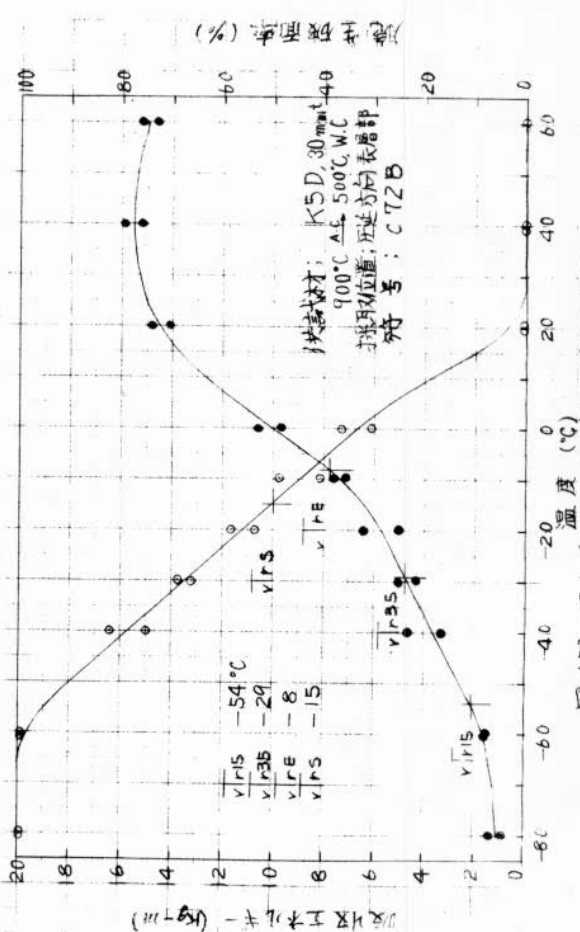


図4.59 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

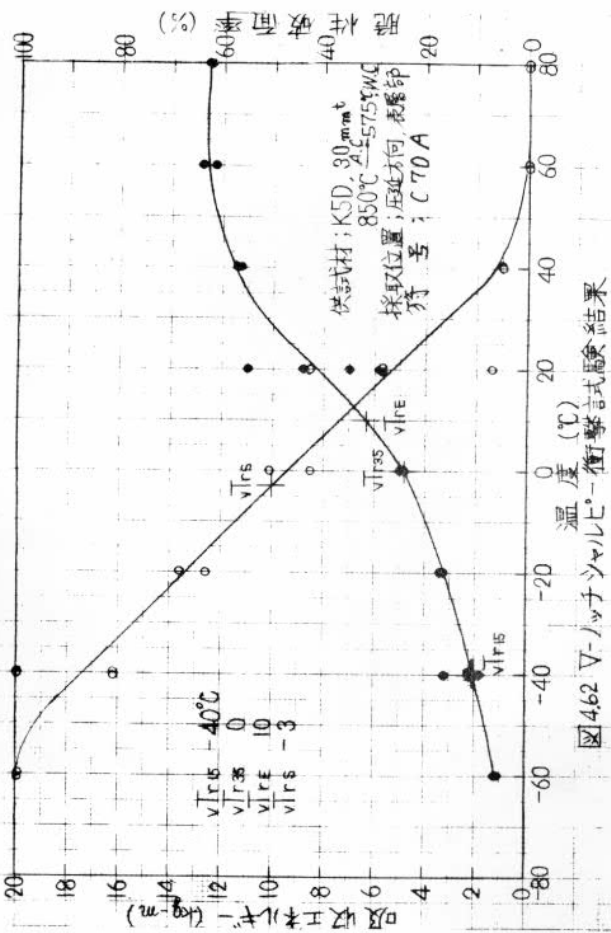


図4.62 V-トリプル点試験結果

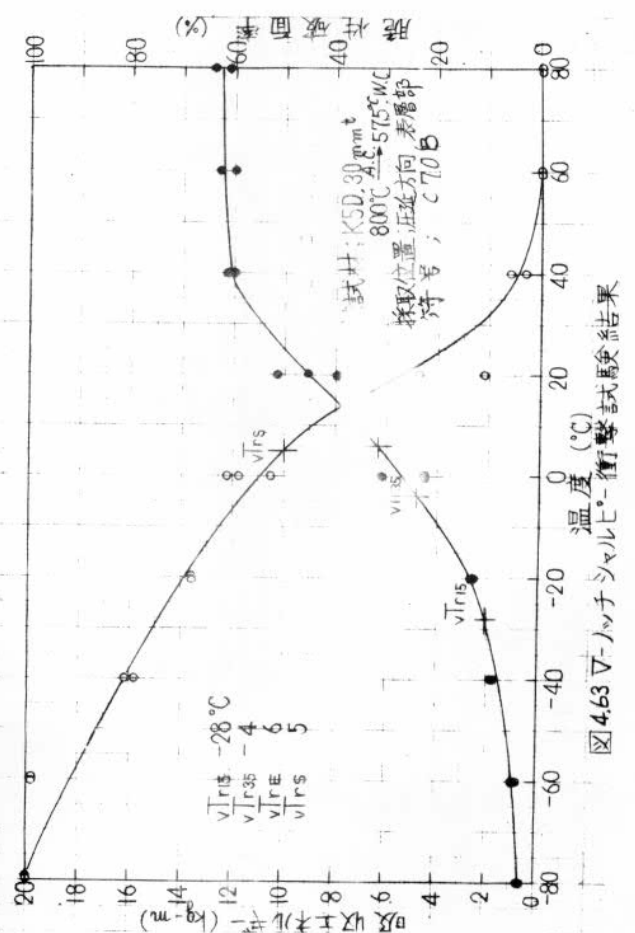


図4.63 V-トリプル点試験結果

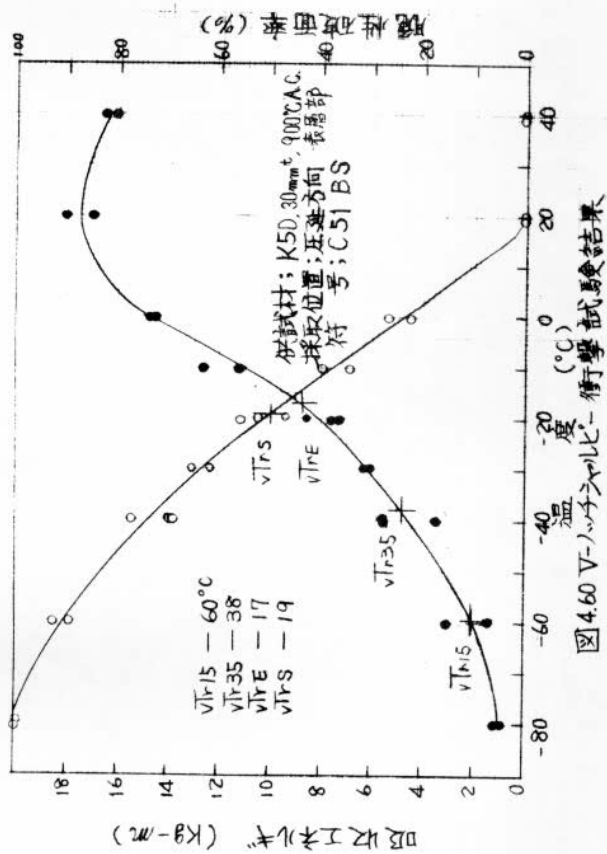


図4.60 V-トリプル点試験結果

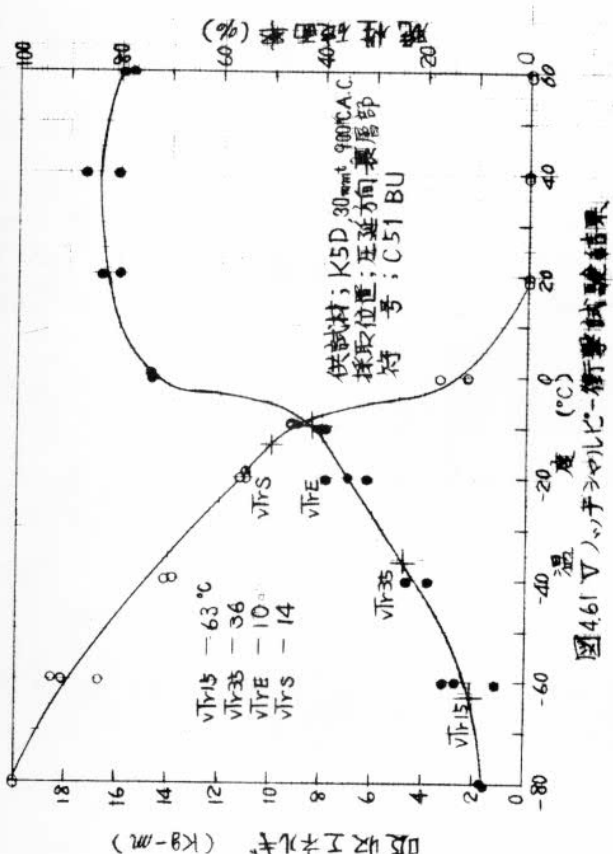


図4.61 V-トリプル点試験結果

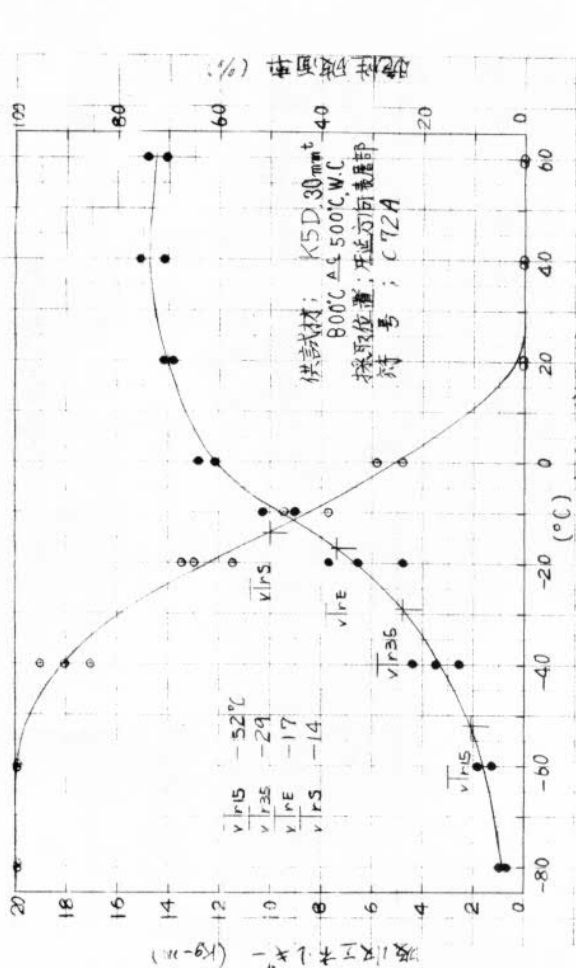


図4.64 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

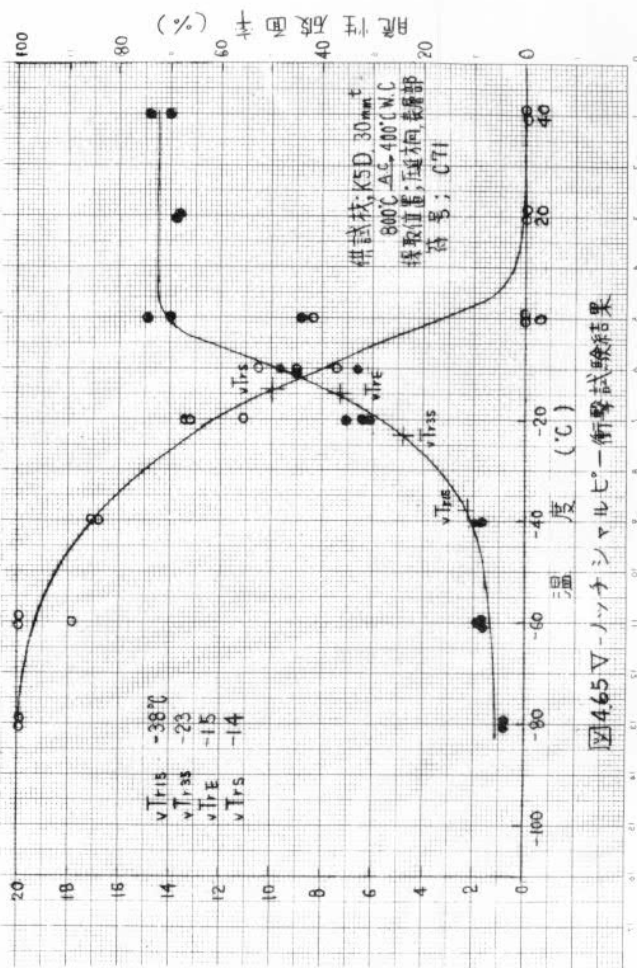


図4.65 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

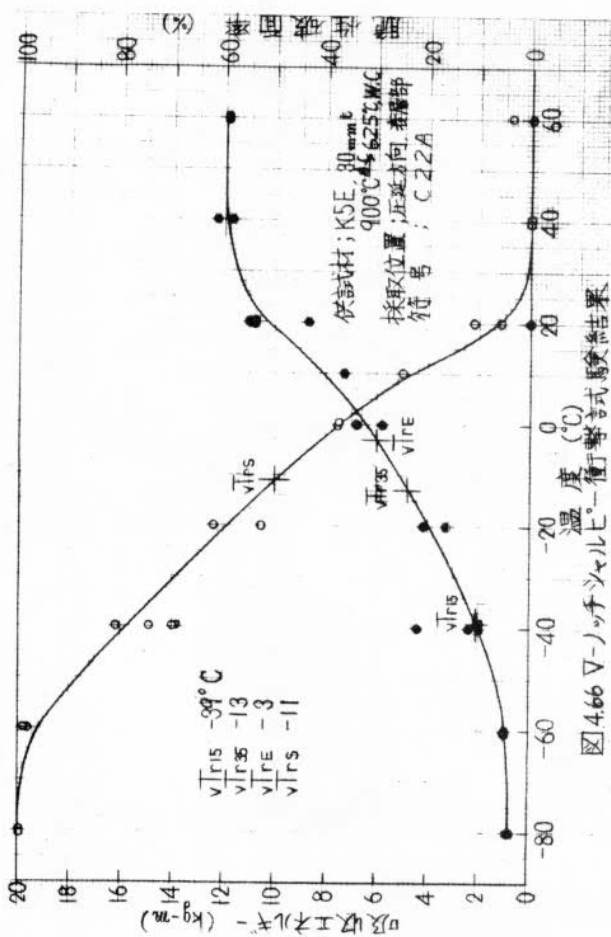


図4.66 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

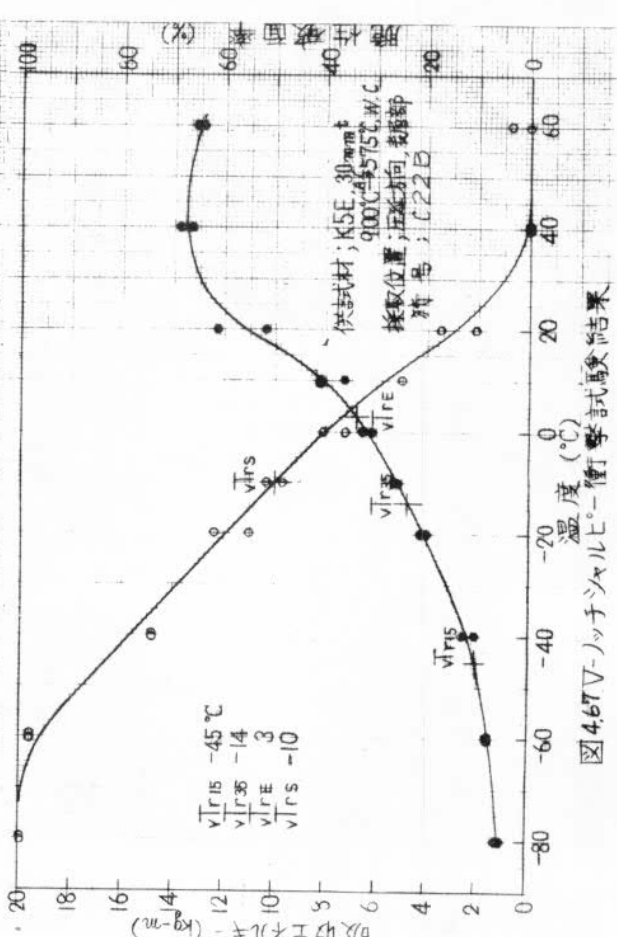


図4.67 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

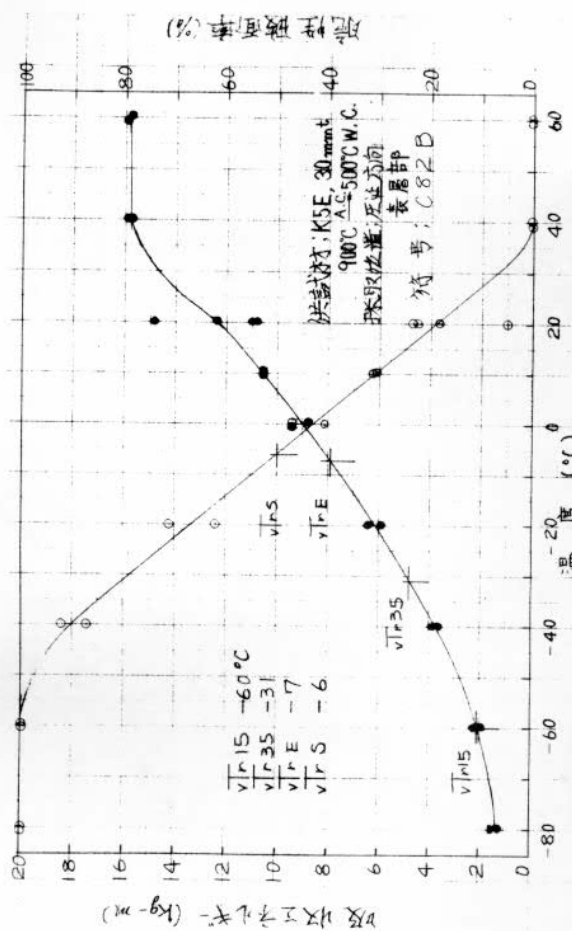


図 4.68 V-Tschalbe-衝撃試験結果

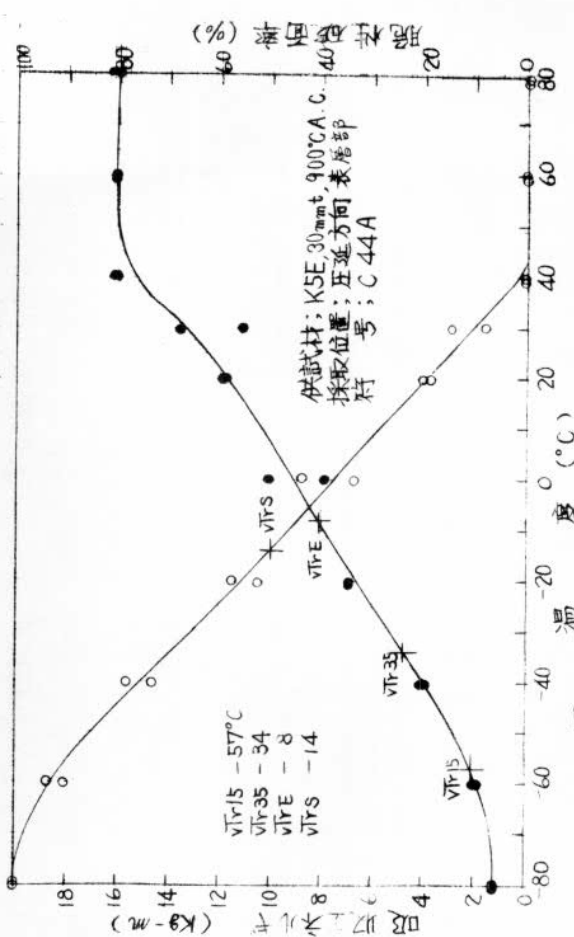


図 4.69 V-Tschalbe-衝撃試験結果

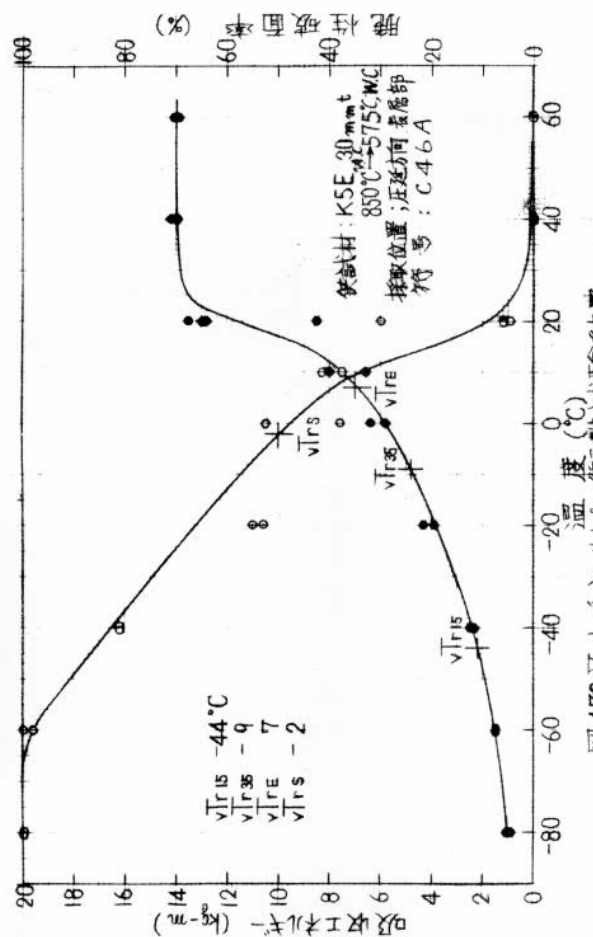


図 4.70 V-Tschalbe-衝撃試験結果

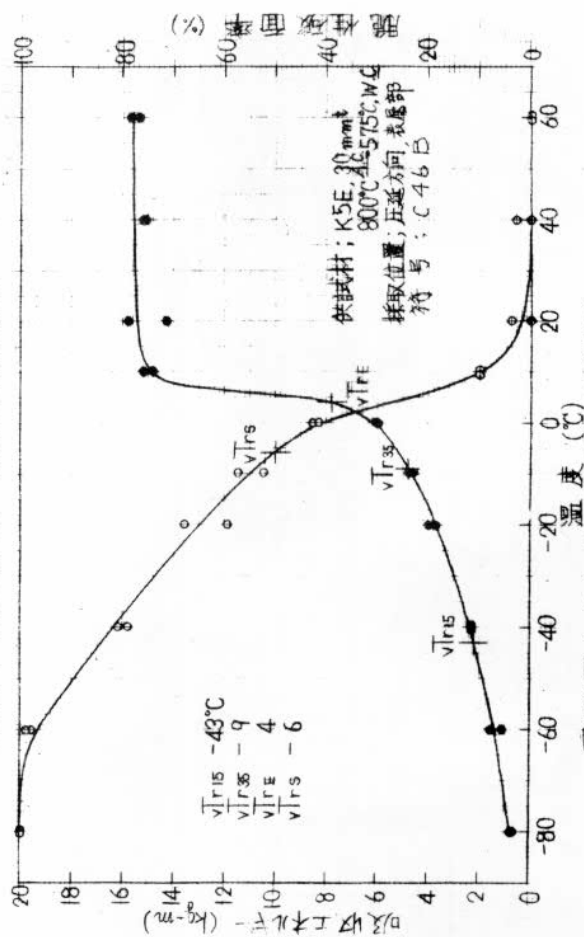


図 4.71 V-Tschalbe-衝撃試験結果

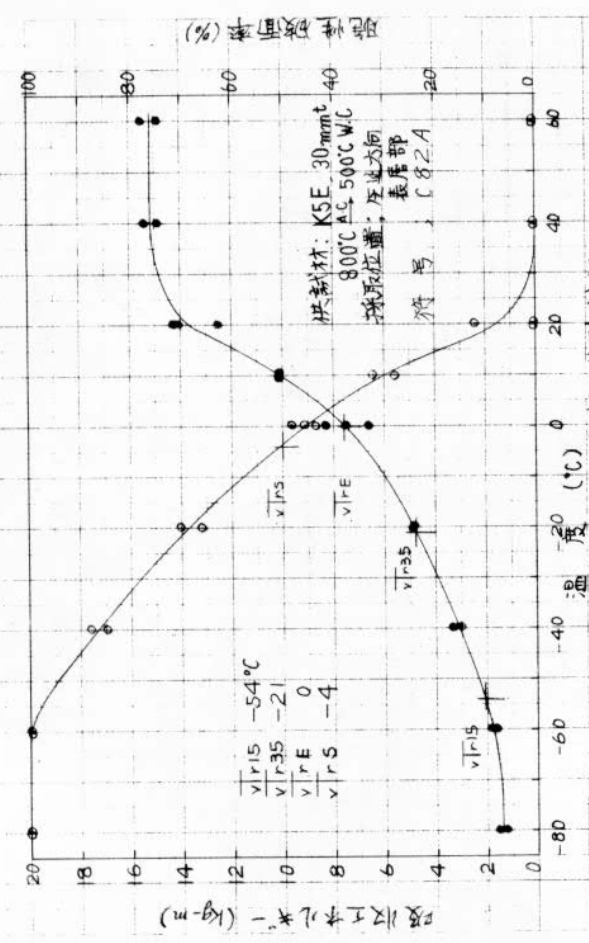


図4.72 V-タチメータ衝撃試験結果

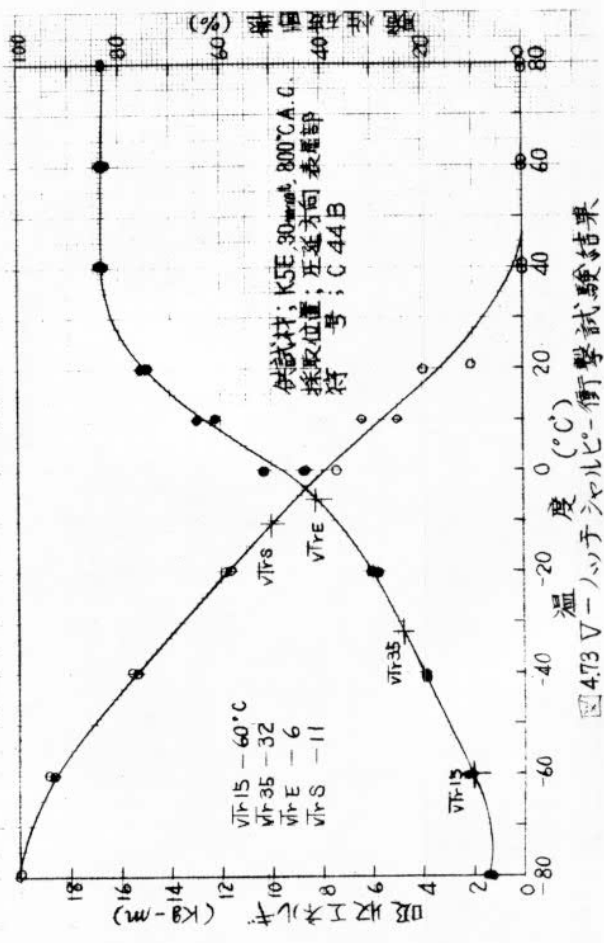


図4.73 V-タチメータ衝撃試験結果

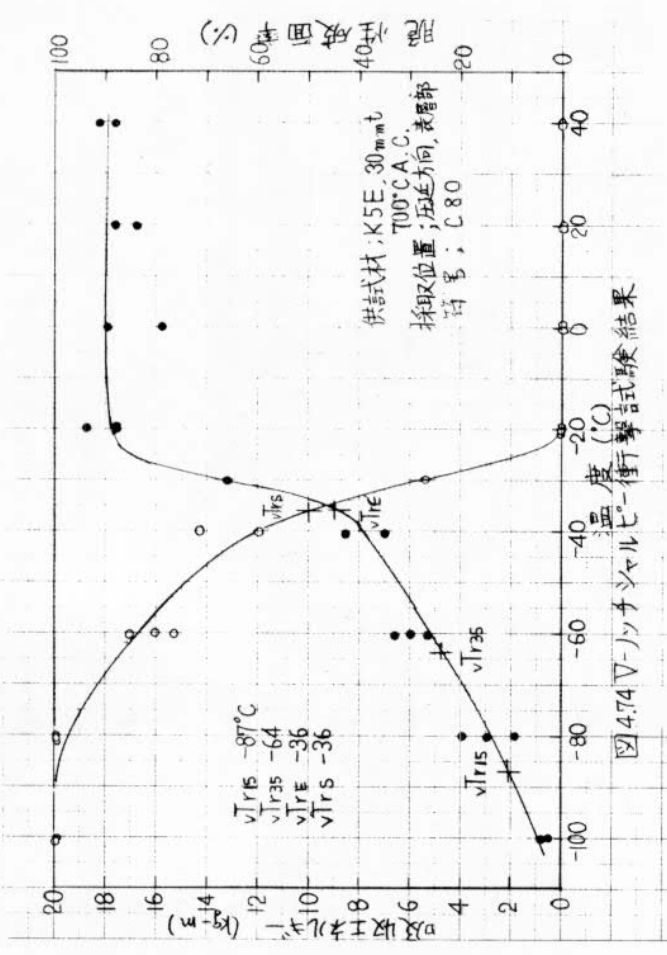


図4.74 V-タチメータ衝撃試験結果

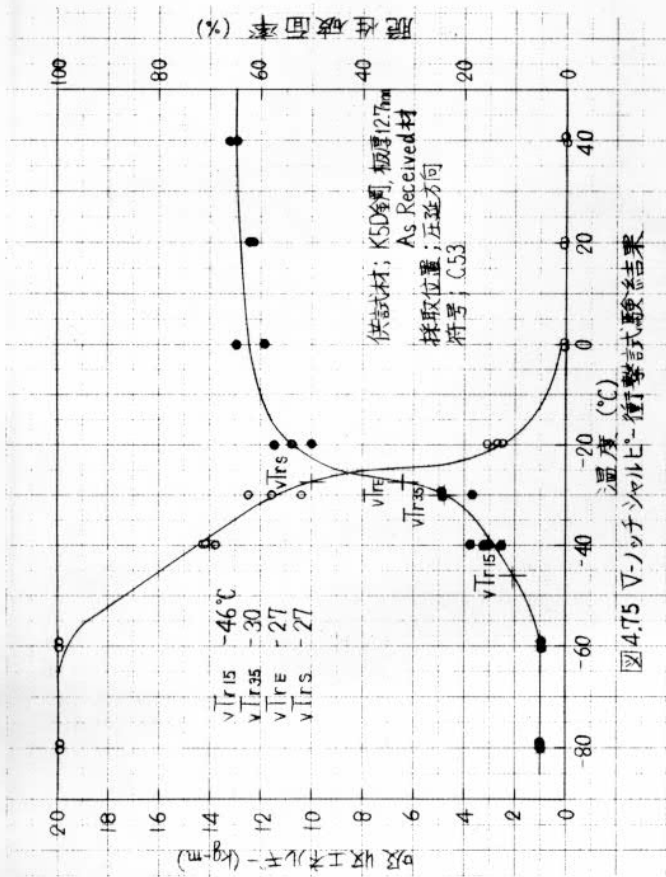


図4.75 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

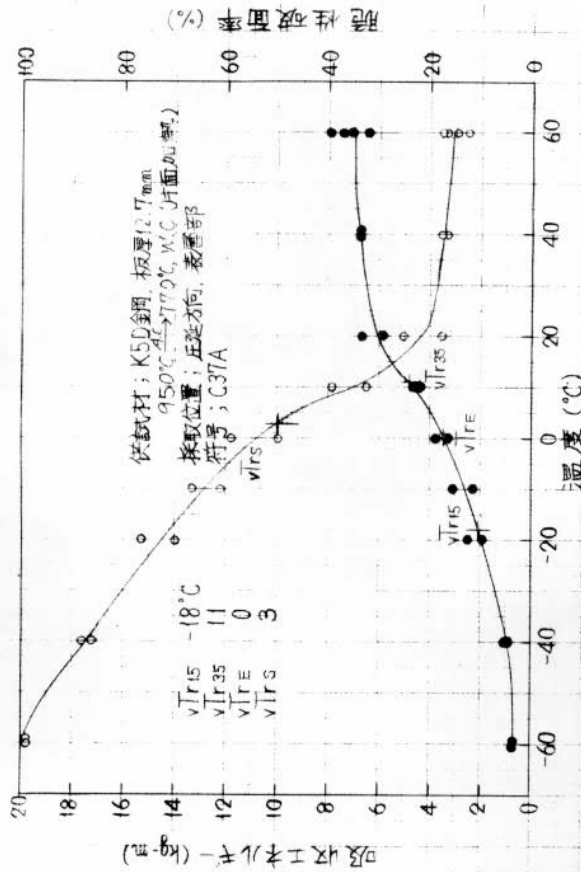


図4.76 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

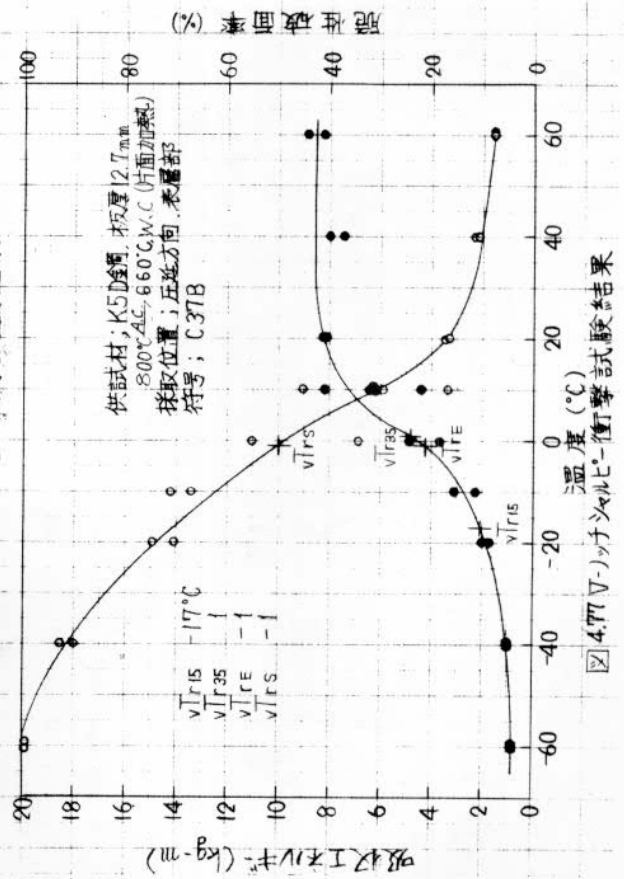


図4.77 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

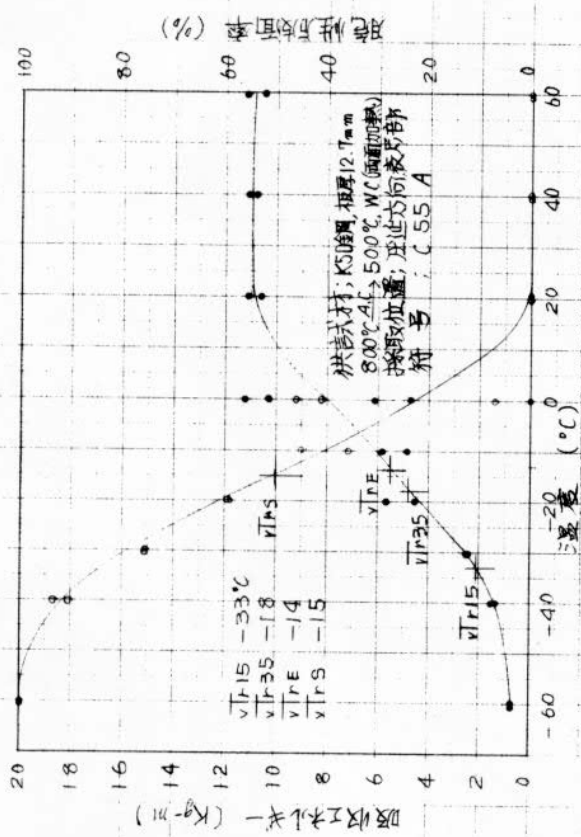


図4.78 Vノッチシャルピー衝撃試験結果

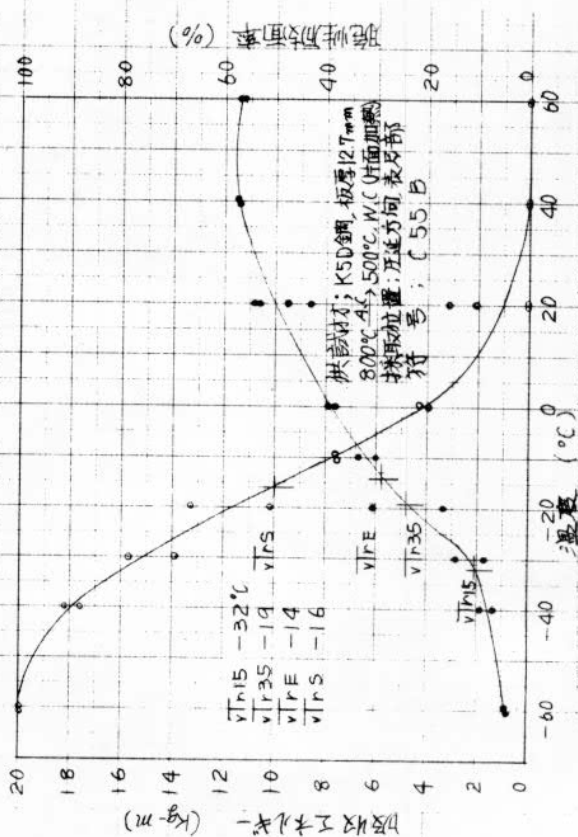


図4.79 Vノッチシャルピー衝撃試験結果

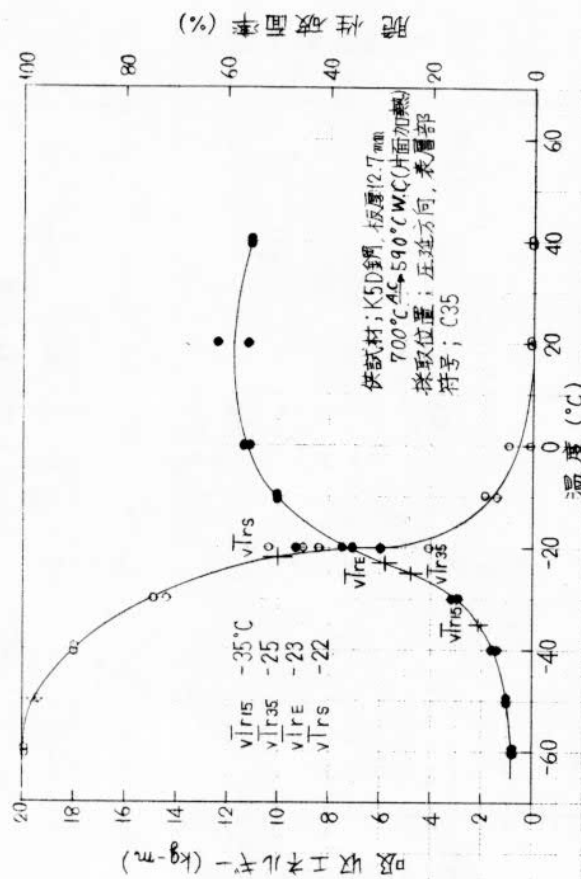


図4.80 Vノッチシャルピー衝撃試験結果

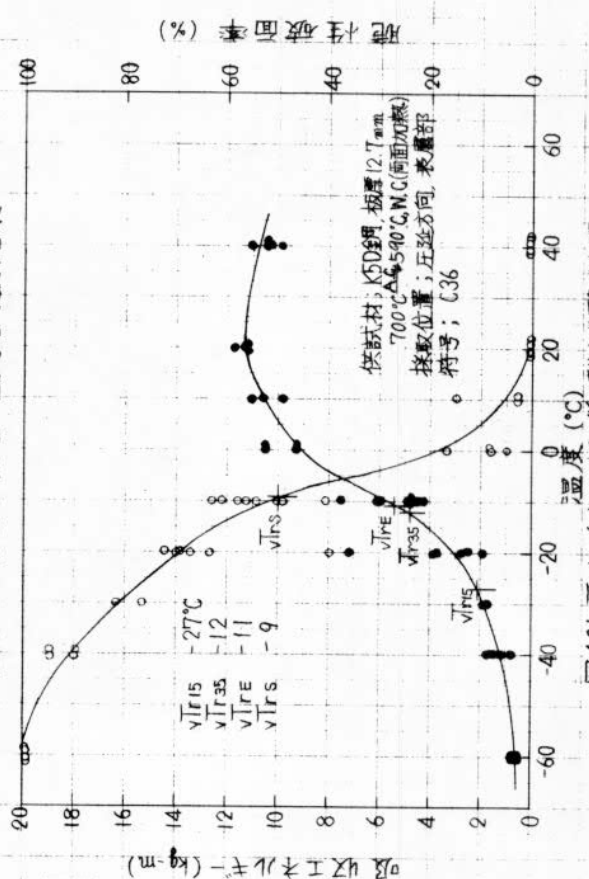


図4.81 Vノッチシャルピー衝撃試験結果

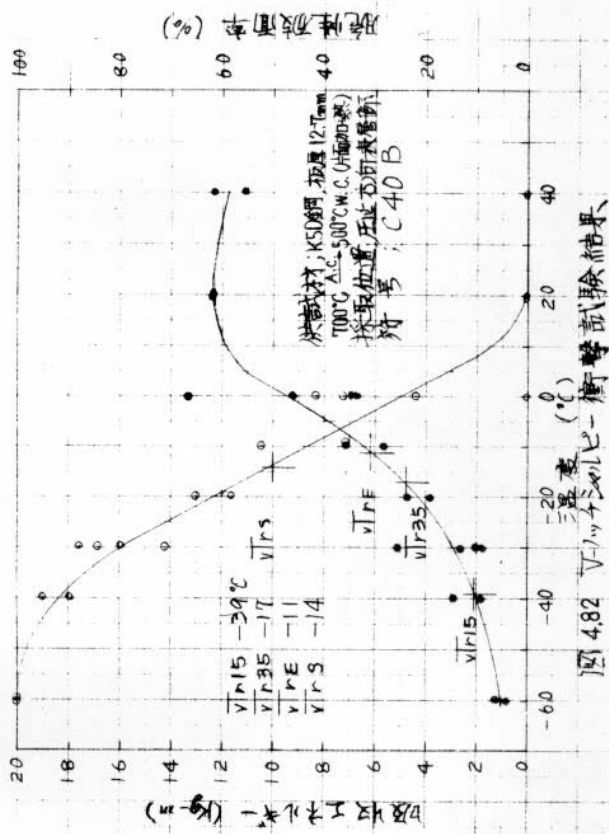


図 4.82 Vノッチ衝撃試験結果

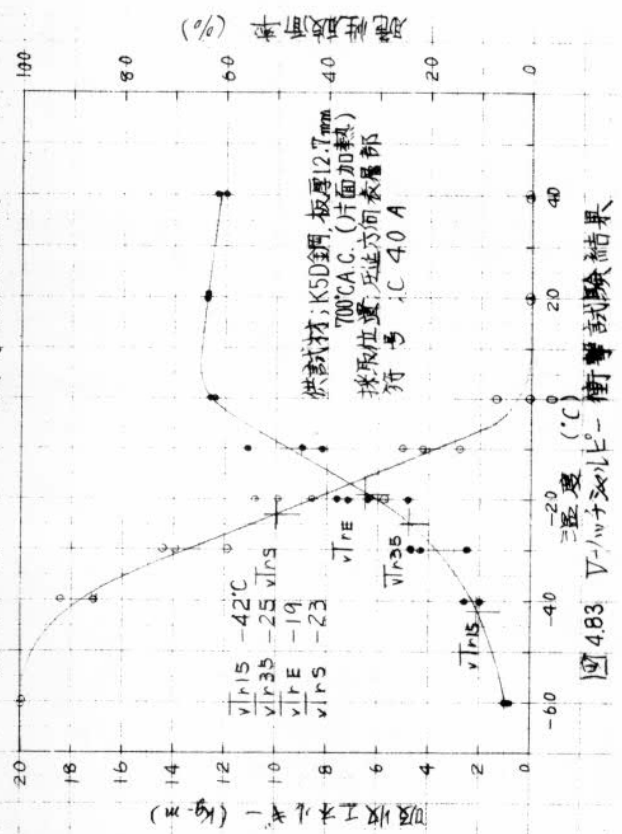


図 4.83 Vノッチ衝撃試験結果

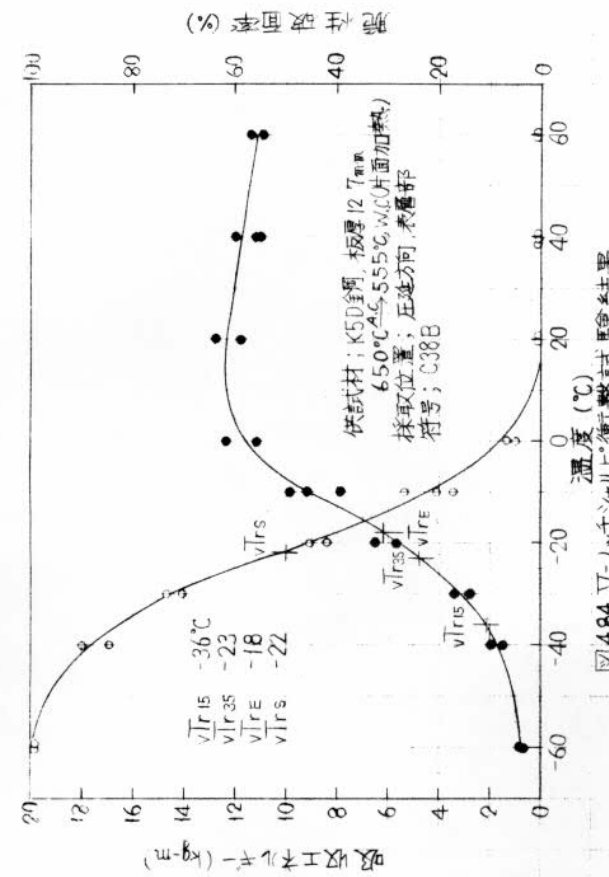


図 4.84 Vノッチ衝撃試験結果

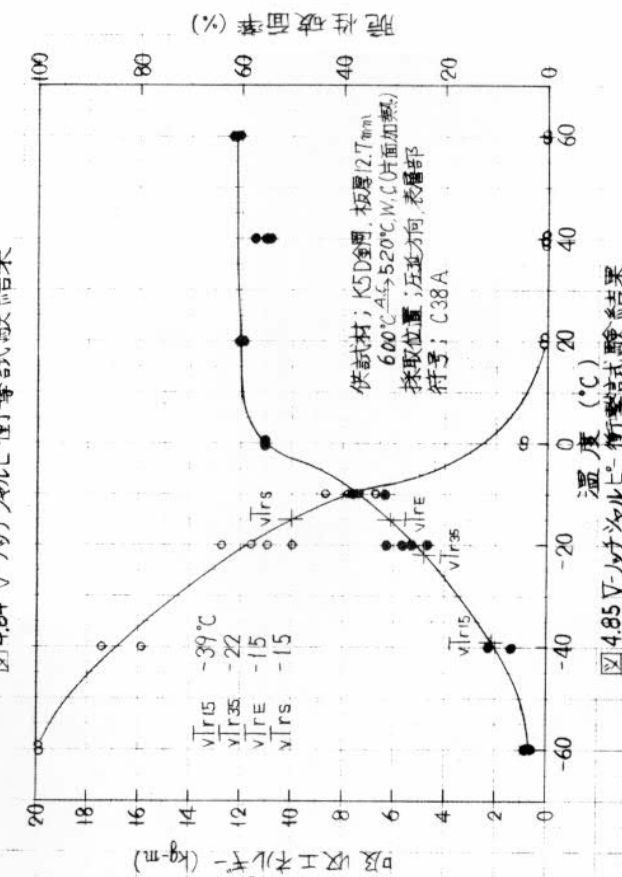


図 4.85 Vノッチ衝撃試験結果

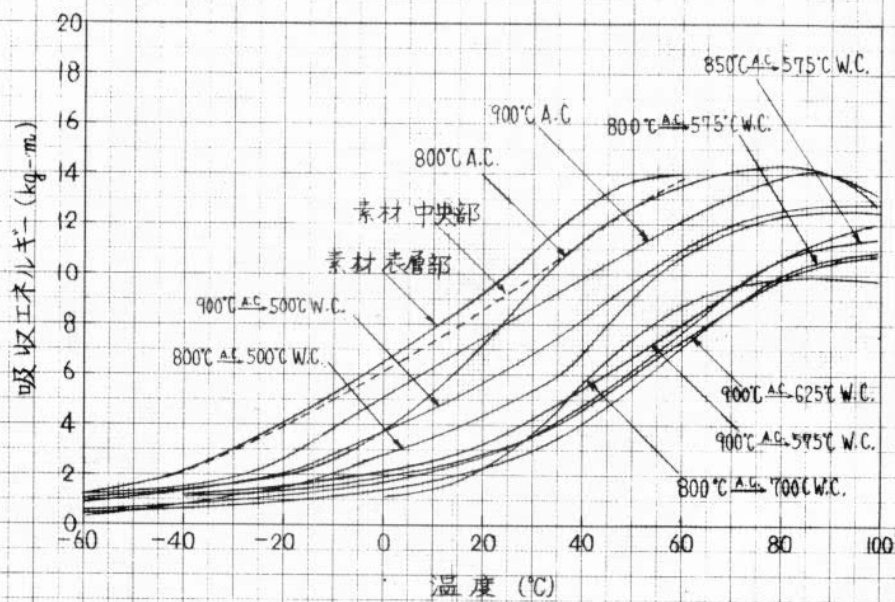


図4.86 標準V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5A鋼, 板厚30mm)

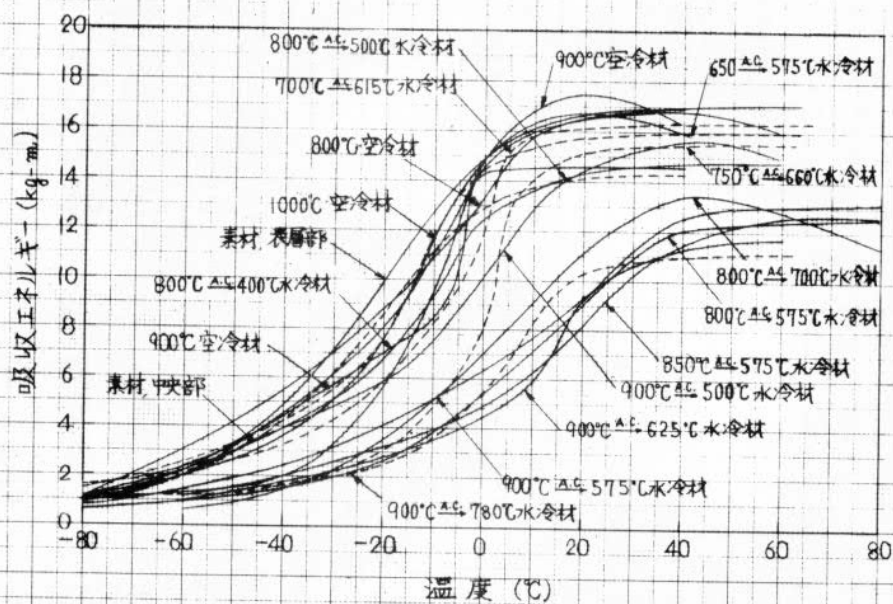


図4.87 標準V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5D鋼, 板厚30mm)

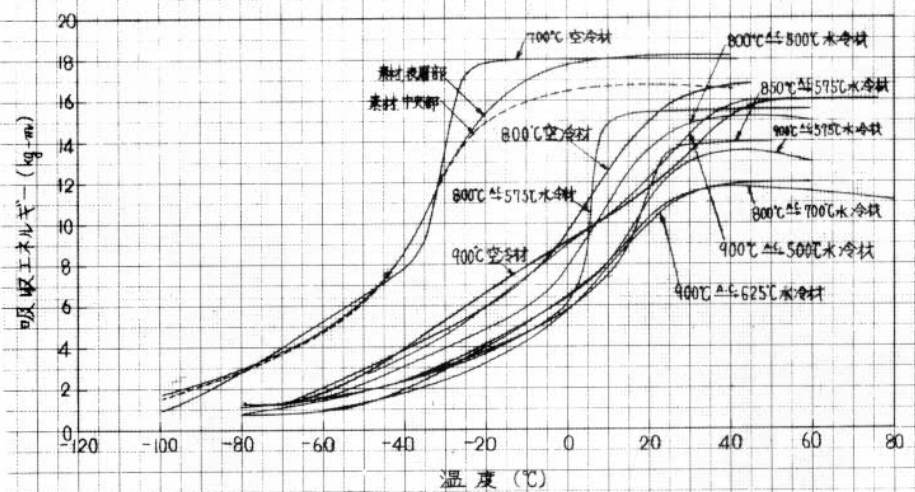


図4.88 標準V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5E鋼, 板厚30 mm)

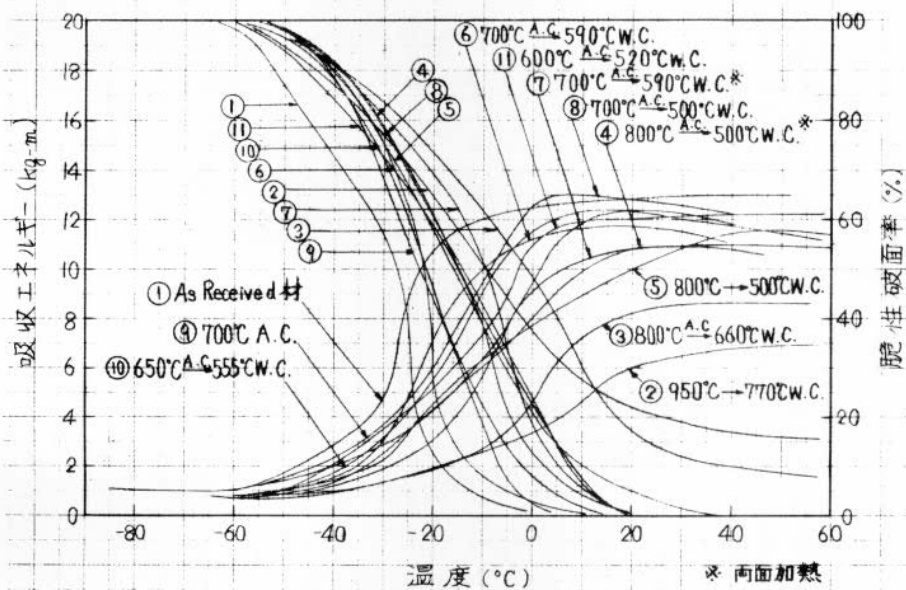


図4.89 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5D鋼, 板厚12.7mm)

表 4.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果一覧

(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼 板厚 30 mm)

鋼種	材料履歴	採取位置	方位	試験片 符号	各種遷移温度 (°C)				vE ₀ (kg-m)
					vTr ₁₅	vTr ₃₅	vTr _E	vTr _S	
K5A	As Received 材	表層部	圧延平行	C23SL	-38	-15	6	16	6.5
		中央部	圧延平行	C23ML	-39	-12	8	17	6.0
	900°C A.C.→625°C W.C.	表層部	圧延平行	C25ASL	5	40	46	34	1.9
	900°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C25BSL	-1	35	44	37	2.1
	900°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C62BSL	-19	12	27	31	3.6
	900°C A.C.	表層部	圧延平行	C26ASL	-26	-2	16	17	5.2
	850°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C60ASL	8	40	47	38	1.7
	800°C A.C.→700°C W.C.	表層部	圧延平行	C24SL	20	35	36	46	1.2
	800°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C60BSL	15	45	50	42	1.5
	800°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C62ASL	-6	26	40	34	2.5
K5D	As Received 材	表層部	圧延平行	C27SL	-61	-40	-27	-27	14.8
		中央部	圧延平行	C27ML	-58	-37	-26	-28	12.8
	1000°C A.C.	表層部	圧延平行	C51AS	-57	-31	-17	-19	14.3
	900°C A.C.→780°C W.C.	表層部	圧延平行	C32SL	-26	-3	1	2	5.6
	900°C A.C.→625°C W.C.	表層部	圧延平行	C33ASL	-33	2	9	-6	4.5
	900°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C33BSL	-45	-13	2	-5	6.3
	900°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C72BSL	-54	-29	-8	-15	10.0
	900°C A.C.	表層部	圧延平行	C51BSL	-60	-38	-17	-19	14.8
		裏層部	圧延平行	C51BUL	-63	-36	-10	-14	14.6
	850°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C70ASL	-40	0	10	-3	4.8
	800°C A.C.→700°C W.C.	表層部	圧延平行	C28SL	-31	-12	-2	7	7.2
	800°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C70BSL	-28	-4	6	5	5.5
	800°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C72ASL	-52	-29	-17	-14	12.1
	800°C A.C.→400°C W.C.	表層部	圧延平行	C71SL	-38	-23	-15	-14	14.2
	800°C A.C.	表層部	圧延平行	C30SL	-70	-45	-20	-16	13.4
	750°C A.C.→660°C W.C.	表層部	圧延平行	C31ASL	-29	-10	-1	1	8.1
	700°C A.C.→615°C W.C.	表層部	圧延平行	C31BSL	-60	-26	-10	-6	11.9
	650°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C32BSL	-68	-35	-19	-14	14.4
K5E	As Received 材	表層部	圧延平行	C19SL	-94	-60	-38	-35	17.7
		中央部	圧延平行	C19ML	-92	-59	-41	-38	16.5
	900°C A.C.→625°C W.C.	表層部	圧延平行	C22ASL	-39	-13	-3	-11	6.4
	900°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C22BSL	-45	-14	3	-10	6.3
	900°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C82BSL	-60	-31	-7	-6	9.0
	900°C A.C.	表層部	圧延平行	C44ASL	-57	-34	-8	-14	9.1
	850°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C46ASL	-44	-9	7	-2	5.8
	800°C A.C.→700°C W.C.	表層部	圧延平行	C20SL	-35	-8	3	-6	5.6
	800°C A.C.→575°C W.C.	表層部	圧延平行	C46BSL	-43	-9	4	-6	6.1
	800°C A.C.→500°C W.C.	表層部	圧延平行	C82ASL	-54	-21	0	-4	7.6
	800°C A.C.	表層部	圧延平行	C44BSL	-60	-32	-6	-11	9.6
	700°C A.C.	表層部	圧延平行	C80SL	-87	-64	-36	-36	18.0

表 4.5 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果一覧

(K5D鋼, 板厚12.7mm)

材料履歴	採取位置	方位	試験片 符 号	各種遷移温度 (°C)				vE ₀ (kg-m)
				vTr ₁₅	vTr ₃₅	vTr _E	vTr _S	
As Received材	表層部	圧延平行	C53 SL	-46	-30	-27	-27	12.5
950°C ^{A.C.} →770°CW.C.	表層部	圧延平行	C37 _A SL	-18	11	0	3	3.4
800°C ^{A.C.} →625°CW.C.	表層部	圧延平行	C37 _B SL	-17	1	-1	-1	4.4
800°C ^{A.C.} →500°CW.C.	表層部	圧延平行	C55 _B BL	-32	-19	-14	-16	7.8
	表層部 (両面加熱)	圧延平行	C55 _A SL	-33	-18	-14	-15	8.0
700°C ^{A.C.} →590°CW.C.	表層部	圧延平行	C35 SL	-35	-25	-23	-22	11.2
	表層部 (両面加熱)	圧延平行	C36 SL	-27	-12	-11	-9	9.1
700°C ^{A.C.} →500°CW.C.	表層部	圧延平行	C40 _B SL	-39	-17	-11	-14	9.4
700°C A.C.	表層部	圧延平行	C40 _A SL	-42	-25	-19	-23	12.5
650°C ^{A.C.} →555°CW.C.	表層部	圧延平行	C38 _B SL	-36	-23	-18	-22	11.6
600°C ^{A.C.} →520°CW.C.	表層部	圧延平行	C38 _A SL	-39	-22	-15	-15	11.0

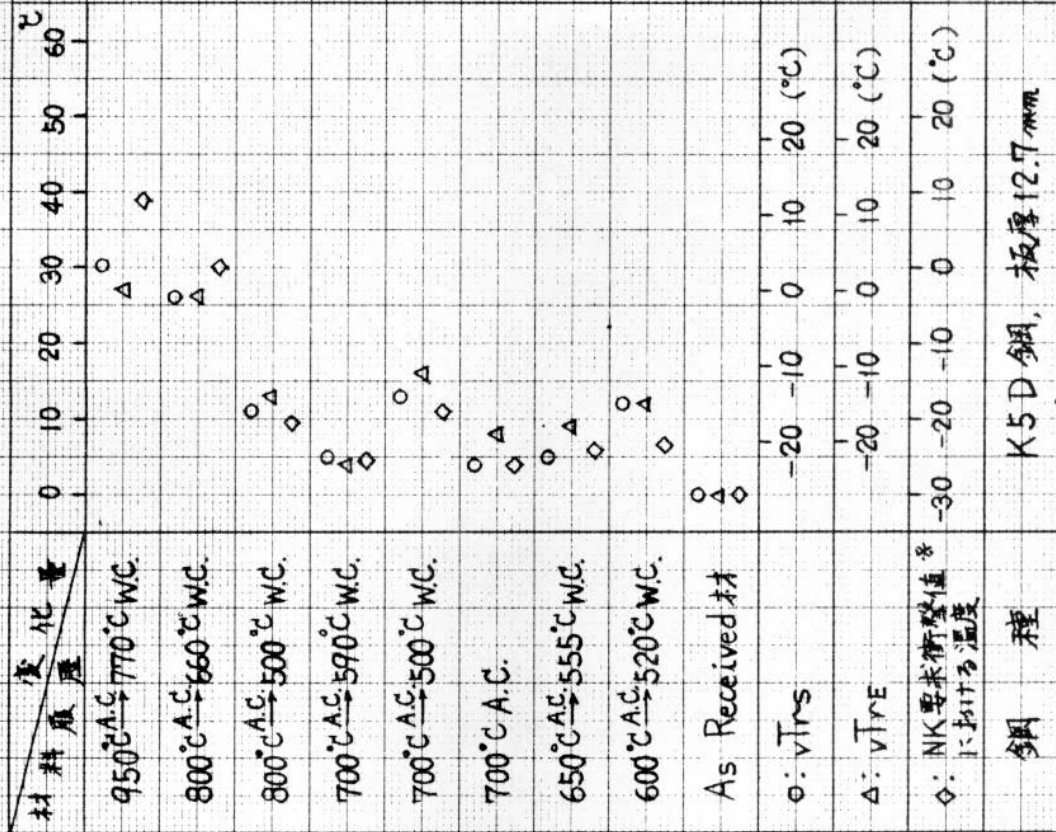


図4.91 線状ガス加熱加工条件と各種遷移温度

表4.6 ティーブロッチ試験結果一覧

(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料履歴	試験片 符号	試験片 板厚 t (mm)	試験片 幅 2B (mm)	試験片 寸法 C (mm)	脆性亀裂 発生荷重 P (ton)	脆性亀裂 発生 Stress Gross σ_g (kg/mm ²)	脆性亀裂 発生 Stress Net σ_n (kg/mm ²)	f(μ)	S _i (kg/mm ²)	K _{ci} (kg/mm ²)	試験温度 T (°C)	10 ³ T _K (°K ⁻¹)
K5A	As Received 材	N115	30.5	400	121	57	4.7	11.7	1.26	0.32	115	-196	12.99
		N113	30.5	400	122	59	4.8	12.2	1.26	0.33	118	-160	8.85
		N116	30.2	400	121	159	13.2	32.9	1.26	2.50	324	-120	6.54
		N114	30.3	400	121	200	16.5	41.3	1.26	3.91	405	-80	5.18
	800°C A.C. 700°C W.C.	N120	30.5	400	120	62	5.1	12.7	1.25	0.36	124	-196	12.99
		N118	30.6	400	120	56	4.6	11.4	1.25	0.30	112	-160	8.85
		N119	30.7	400	120	75	6.1	15.3	1.25	0.52	148	-120	6.54
		N117	30.3	400	120	97	8.0	20.0	1.25	0.90	194	-80	5.18
	800°C A.C. 500°C W.C.	T92B	30.5	400	120	52	4.3	10.7	1.25	0.26	104	-196	12.99
		T91B	30.4	400	120	72	5.9	14.8	1.25	0.49	143	-160	8.85
		T92A	30.5	400	120	87	7.1	17.8	1.25	0.71	173	-120	6.54
		T91A	30.3	400	121	137	11.3	28.6	1.26	1.83	277	-80	5.18
	800°C A.C.	T93A	30.3	400	120	58	4.8	12.0	1.25	0.32	116	-196	12.99
		T94A	30.4	400	120	64	5.3	13.2	1.25	0.39	128	-160	8.85
		T94B	30.4	400	123	100	8.2	21.4	1.27	1.00	205	-120	6.54
		T93B	30.2	400	117	163	13.5	32.5	1.24	2.45	321	-80	5.18
K5D	As Received 材	N130	30.2	400	120	60	5.0	12.3	1.25	0.35	121	-196	12.99
		N131	30.1	400	120	76	6.3	15.8	1.25	0.56	153	-160	8.85
		N129	30.0	400	121	248	20.7	52.0	1.26	6.15	508	-120	6.54
		N132	30.0	400	121	239	19.9	50.1	1.26	5.69	488	-80	5.18
	900°C A.C. 500°C W.C.	N272	30.0	400	120	126	10.5	26.3	1.25	1.55	255	-160	8.85
		N270	29.9	400	120	208	17.4	43.6	1.25	4.25	423	-140	7.52
		N271	30.0	400	120	210	17.5	43.8	1.25	4.30	425	-120	6.54
	800°C A.C. 700°C W.C.	N135	29.8	400	120	58	4.9	12.2	1.25	0.34	119	-196	12.99
		N134	30.0	400	121	59	4.9	12.4	1.26	0.35	120	-160	8.85
		N136	30.0	400	121	77	6.4	16.1	1.26	0.59	157	-120	6.54
		N133	29.9	400	120	118	9.9	24.7	1.25	1.37	240	-80	5.18
	800°C A.C. 500°C W.C.	N154	30.0	400	120	90	7.5	18.8	1.25	0.79	182	-160	8.85
		N153	30.0	400	120	96	8.0	20.0	1.25	0.90	194	-120	6.54
		N155	29.7	400	120	198	16.7	41.8	1.25	3.92	406	-80	5.18
	800°C A.C.	N150	30.0	400	120	70	5.8	14.6	1.25	0.47	140	-196	12.99
		N148	30.0	400	120	97	8.1	20.2	1.25	0.92	197	-160	8.85
		N149	30.0	400	120	185	15.4	38.5	1.25	3.32	374	-120	6.54
		N147	29.9	400	120	199	16.6	41.6	1.25	3.87	403	-80	5.18
K5E	As Received 材	N137	30.0	400	120	58	4.8	12.1	1.25	0.32	116	-196	12.99
		N138	29.9	400	119	141	11.8	23.2	1.25	1.95	286	-160	8.85
		N140	29.9	400	120	113	9.4	29.4	1.25	1.24	228	-120	6.54
		N139	29.9	400	120	212	17.7	44.2	1.25	4.39	429	-80	5.18
	900°C A.C. 500°C W.C.	N103	30.4	400	120	63	5.2	13.0	1.25	0.38	126	-196	12.99
		N101	30.6	400	121	157	12.8	32.3	1.26	2.35	314	-160	8.85
		N102	30.7	400	120	238	19.4	48.5	1.25	5.28	471	-120	6.54
		N104	30.6	400	120	239	19.5	48.8	1.25	5.33	473	-80	5.18
	800°C A.C. 700°C W.C.	N110	30.5	400	120	89	7.3	18.2	1.25	0.75	177	-160	8.85
		N111	30.5	400	120	174	14.3	35.7	1.25	2.95	347	-135	7.25
		N113	30.7	400	120	130	10.6	26.7	1.25	1.58	258	-120	6.54
		N 98	30.7	400	120	70	5.7	14.3	1.25	0.46	138	-196	12.99
	800°C A.C. 500°C W.C.	N 99	30.7	400	120	68	5.5	13.8	1.25	0.42	133	-160	8.85
		N100	30.5	400	120	80	6.6	16.4	1.25	0.61	160	-120	6.54
		N 97	30.5	400	120	132	10.8	27.0	1.25	1.64	262	-80	5.18
	800°C A.C. 500°C W.C.	N314	30.5	400	120	81	6.6	16.6	1.25	0.61	160	-160	8.85
		N316	30.6	400	120	117	9.6	23.9	1.25	1.29	233	-120	6.54
		N315	30.2	400	121	165	13.7	34.5	1.25	2.65	334	-80	5.18

注) $S_i = \frac{\pi \{f(\mu) \cdot \sigma_g\}^2 C}{2E}$

$f(\mu) = \sqrt{\frac{2}{\pi \mu}} \left(\tan \frac{\pi \mu}{2} + 0.1 \sin \pi \mu \right)$

$K_{ci} = f(\mu) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$

-124- $\mu = \frac{C}{B}$

表 4.7 デイープ ノッチ 試験結果一覽
(K5D 鋼, 板厚 12.7mm)

鋼種	材料履歴	試験片符号	試験片寸法			発生荷重 P (ton)	脆性亀裂発生 Gross Stress (kg/mm ²) (Op. mm ²)	脆性亀裂 Net Stress (kg/mm ²)	f(d)	Si (kg/mm ²) (kg/mm ²)	Kci (kg/mm ²) (kg/mm ²)	試験温度 T (°C)	10 ³ T _K (°K ⁻¹)
			板厚 t (mm)	幅 2B (mm)	ノッチ深さ C (mm)								
K5D	As Received	N159	13.2	400	120	33	6.3	15.6	1.25	0.56	153	-196	12.99
		N157	13.1	400	121	27	5.2	13.0	1.26	0.39	128	-160	8.85
		N231	13.1	400	120	42.5	8.1	20.3	1.25	0.92	197	-160	8.85
		N230	12.9	400	120	61	11.8	29.6	1.25	1.95	286	-140	7.52
		N160	13.1	400	120	87	16.6	41.5	1.25	3.87	403	-120	6.54
		N158	13.1	400	121	86	16.4	41.0	1.26	3.87	403	-80	5.18
	800°C A.C.	T149	13.2	400	121	63	11.9	30.0	1.26	2.00	290	-160	8.85
		T150	13.4	400	121	61	11.4	28.6	1.26	1.87	278	-160	8.85
		T147	13.4	400	121	63.6	11.9	29.9	1.26	2.04	290	-140	7.52
		T148	13.3	400	120	64	12.0	30.1	1.25	2.02	291	-120	6.54
	700°C A.C.	N163	13.1	400	120	37	7.1	17.7	1.25	0.70	172	-196	12.99
		N161	13.2	400	121	34	6.4	16.2	1.26	0.59	157	-160	8.85
		N162	13.3	400	120	45	8.5	21.1	1.25	1.01	206	-120	6.54
		N164	13.3	400	121	57	10.7	27.0	1.26	1.65	263	-80	5.18
	700°C A.C.	T136A	13.1	400	120	40.5	7.7	19.3	1.25	0.83	187	-160	8.85
		T137A	13.2	400	120	45.5	8.6	21.5	1.25	1.04	209	-140	7.52
		T137B	13.2	400	120	57.8	10.9	27.4	1.25	1.67	264	-120	6.54
		T136B	13.0	400	120	100	19.2	48.1	1.25	5.17	466	-80	5.18
	700°C A.C.	N166	13.0	400	146	22	4.2	15.7	1.41	0.38	127	-196	12.99
		N165	13.2	400	119	39	7.4	18.4	1.24	0.75	177	-160	8.85
		N167	13.3	400	120	57	10.7	26.8	1.25	1.61	260	-120	6.54
		N168	13.3	400	120	69	13.0	32.4	1.25	2.36	315	-80	5.18

注) 1. $\bar{\sigma}_g$ = Gross Stress 3. $S_i = \frac{\pi[f(\gamma) \cdot \bar{\sigma}_g]^2 C}{2E}$ 5. $f(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{\pi \gamma}} (\tan \frac{\pi \gamma}{2} + 0.1 \sin \pi \gamma)$

2. $\bar{\sigma}_n$ = Net Stress 4. $K_{ci} = f(\gamma) \cdot \bar{\sigma}_g \cdot \sqrt{\pi C}$ $\gamma = \frac{C}{B}$

番号記号	材料履歴
① ▲	As Received 材
② ▲	800°C A.C. 700°C W.C.
③ ▲	800°C A.C. 500°C W.C.
④ ▲	800°C A.C.

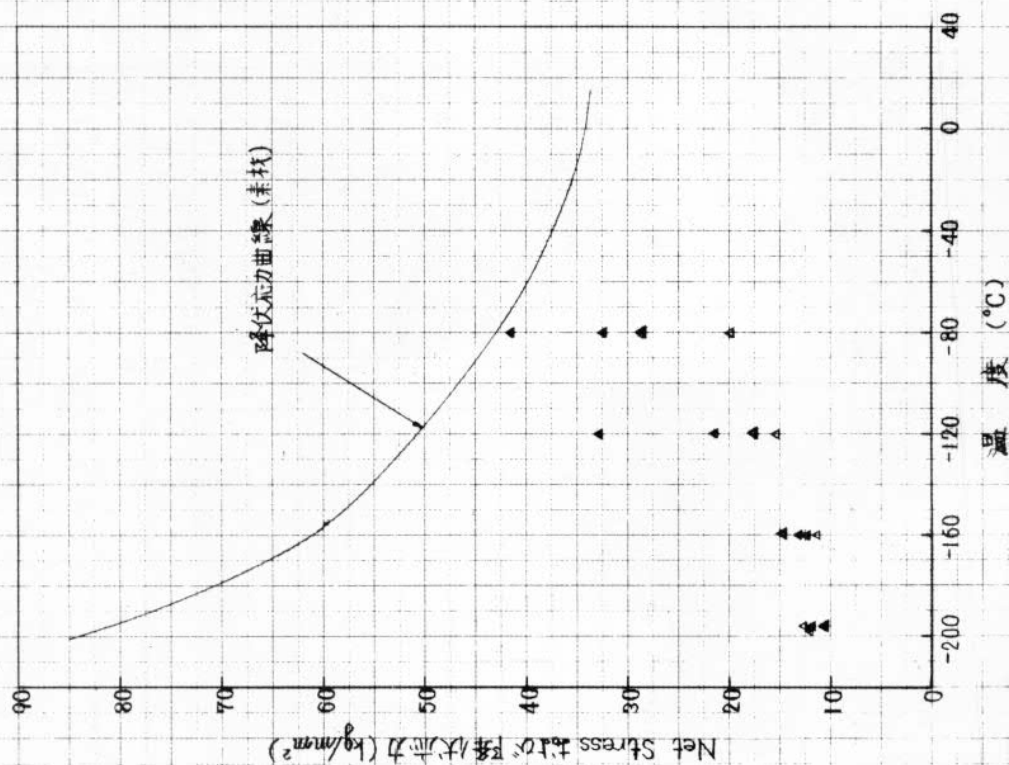


図4.92 デイ-ブノッチ試験結果
(K5A鋼, 板厚30mm)

番号記号	材料履歴	番号記号	材料履歴
① ◆	As Received 材	④ ◆	800°C A.C. 500°C W.C.
② □	900°C A.C. 500°C W.C.	⑤ ◆	800°C A.C.
③ ◇	800°C A.C. 700°C W.C.	⑥ ×	650°C A.C. 575°C W.C.

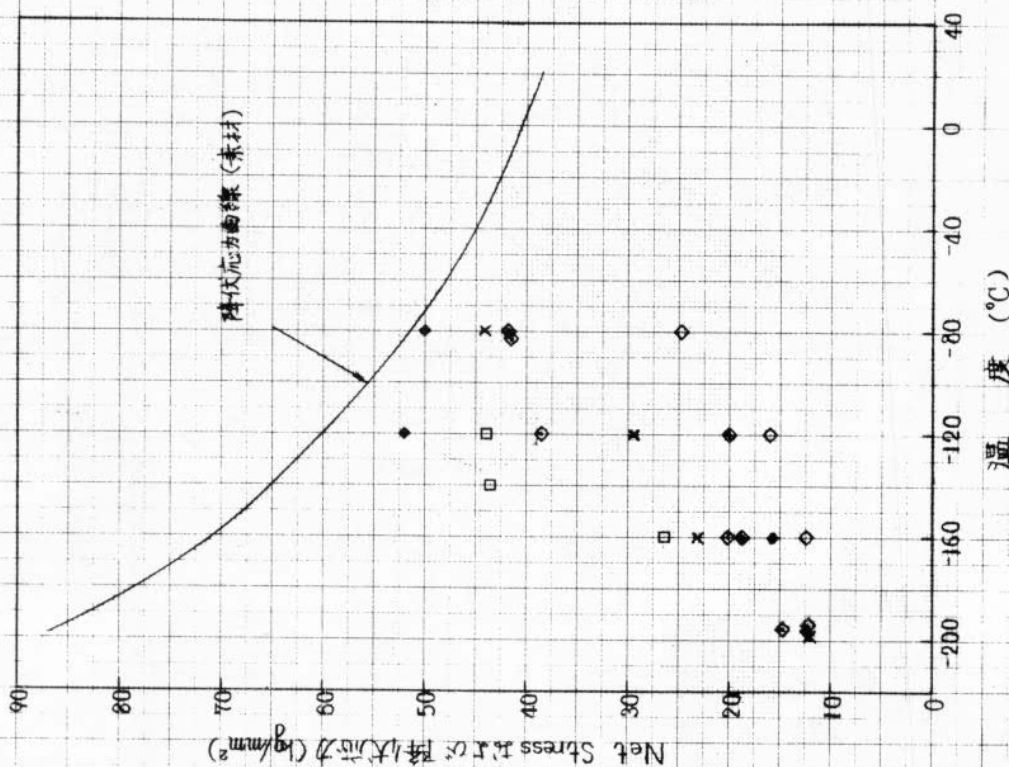


図4.93 デイ-ブノッチ試験結果
(K5D鋼, 板厚30mm)

番号記号	材料履歴
①	● As Received 材
②	○ 900°C A ₅ 500°C W.C.
③	◇ 800°C A ₅ 700°C W.C.
④	⊙ 800°C A ₅ 500°C W.C.

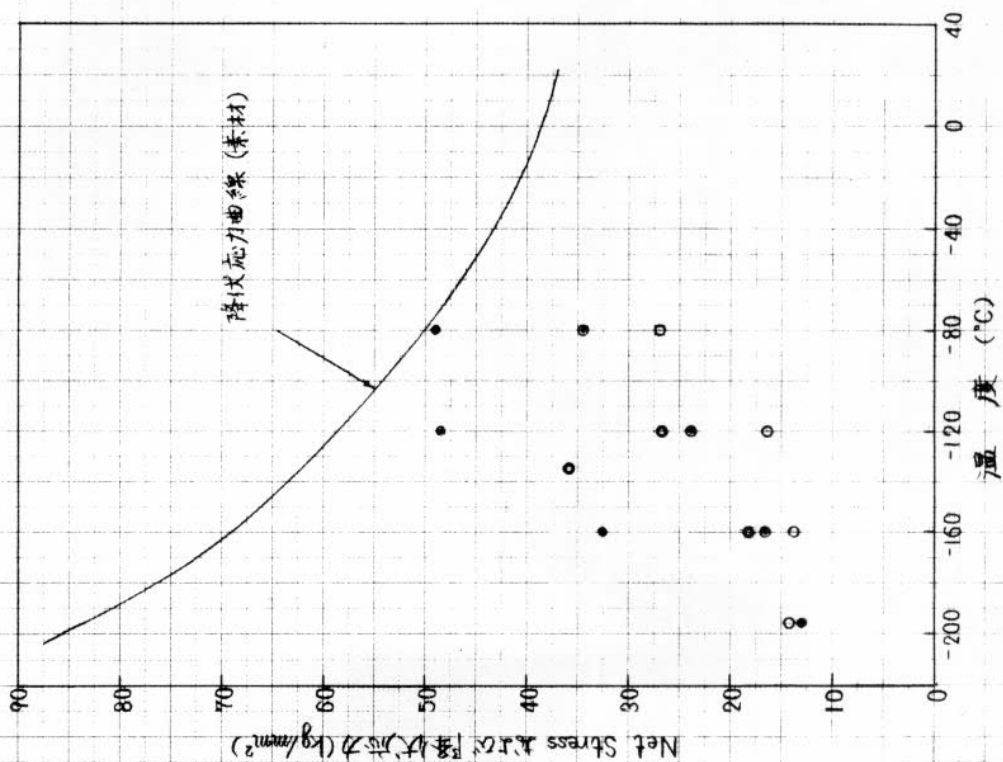


図 4.94 デイアブロッチ試験結果
(K5E鋼, 板厚 30mm)

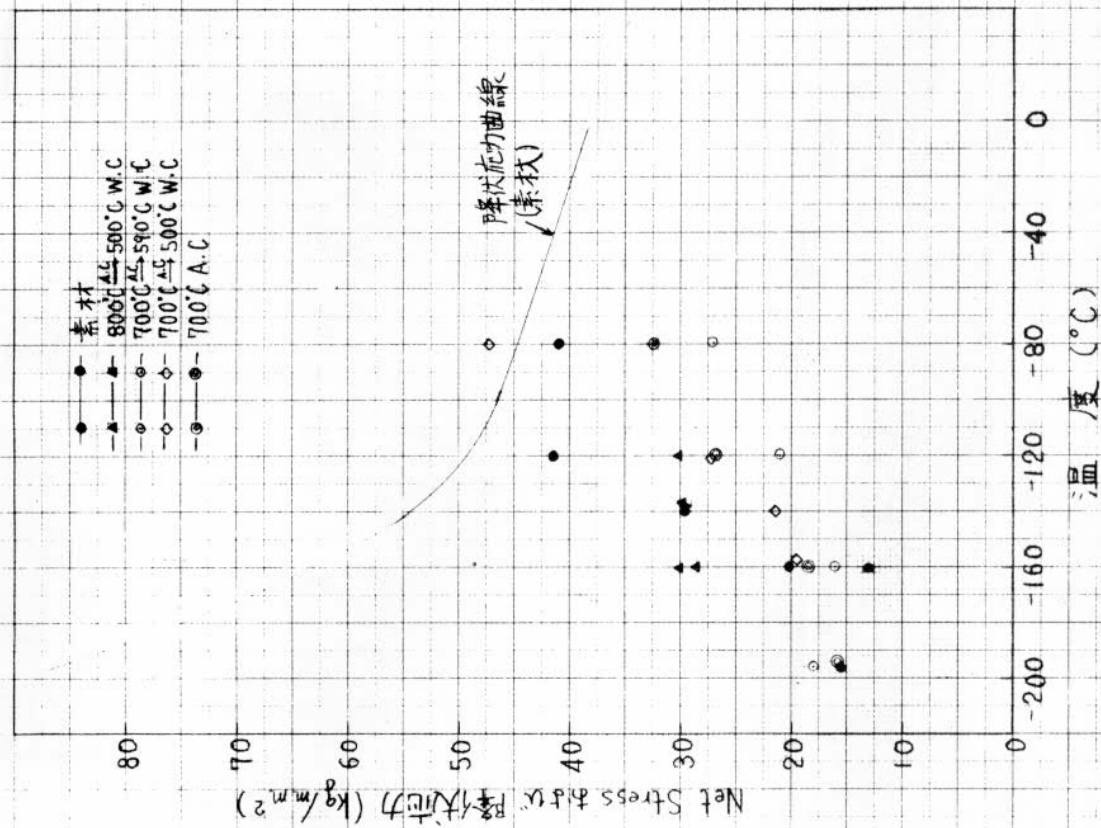


図 4.95 デイアブロッチ試験結果
(K5D鋼, 板厚 12.7mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
① ▲	As Received 材	$S_i = 100.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
② △	800°C A.C. 700°C W.C.	$S_i = 25.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
③ ▲	800°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 42.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
④ ▲	800°C A.C.	$S_i = 56.7 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$

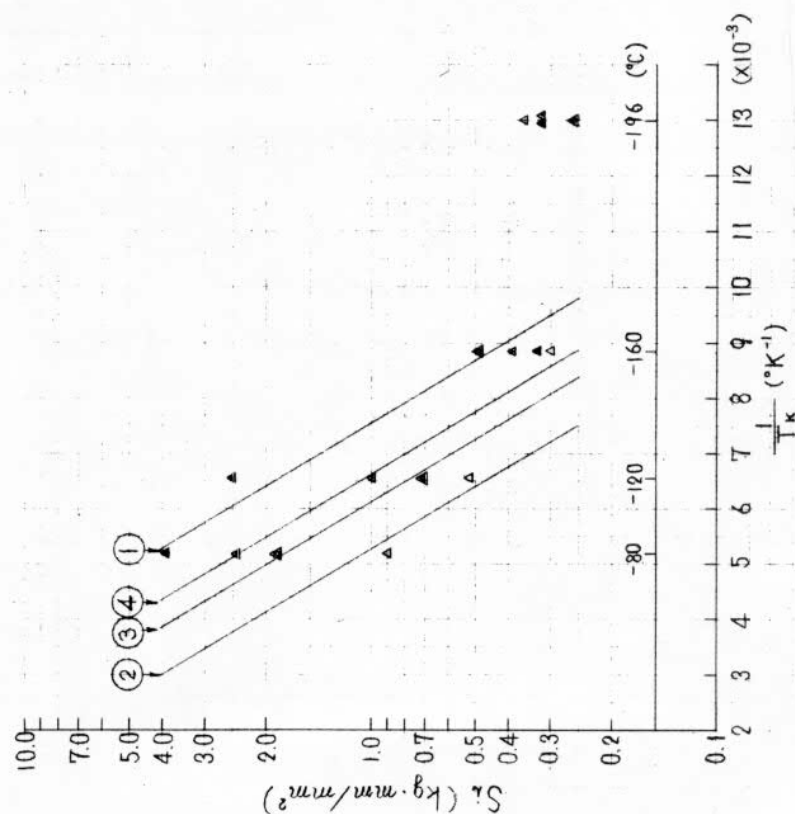


図4.96 ディープノッチ試験結果
(K5A鋼, 板厚30mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
① ◆	As Received 材	$S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
② □	900°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
③ ◇	800°C A.C. 700°C W.C.	$S_i = 31.8 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
④ ◆	800°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
⑤ ◇	800°C A.C.	$S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$
⑥ ×	650°C A.C. 575°C W.C.	$S_i = 193.0 \cdot e^{\frac{-610.8}{T_K}}$

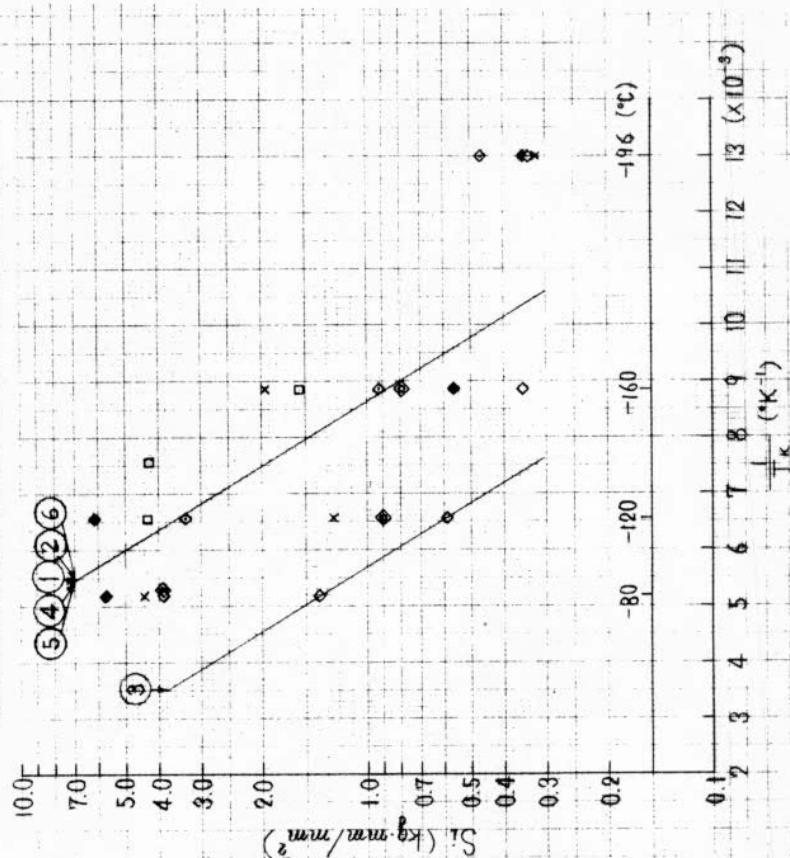


図4.97 ディープノッチ試験結果
(K5D鋼, 板厚30mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
①	As Received	$S_i = 268.0 \cdot e^{-\frac{410.8}{T_K}}$
②	900°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 119.0 \cdot e^{-\frac{410.8}{T_K}}$
③	800°C A.C. 700°C W.C.	$S_i = 35.1 \cdot e^{-\frac{410.8}{T_K}}$
④	800°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 119.0 \cdot e^{-\frac{410.8}{T_K}}$

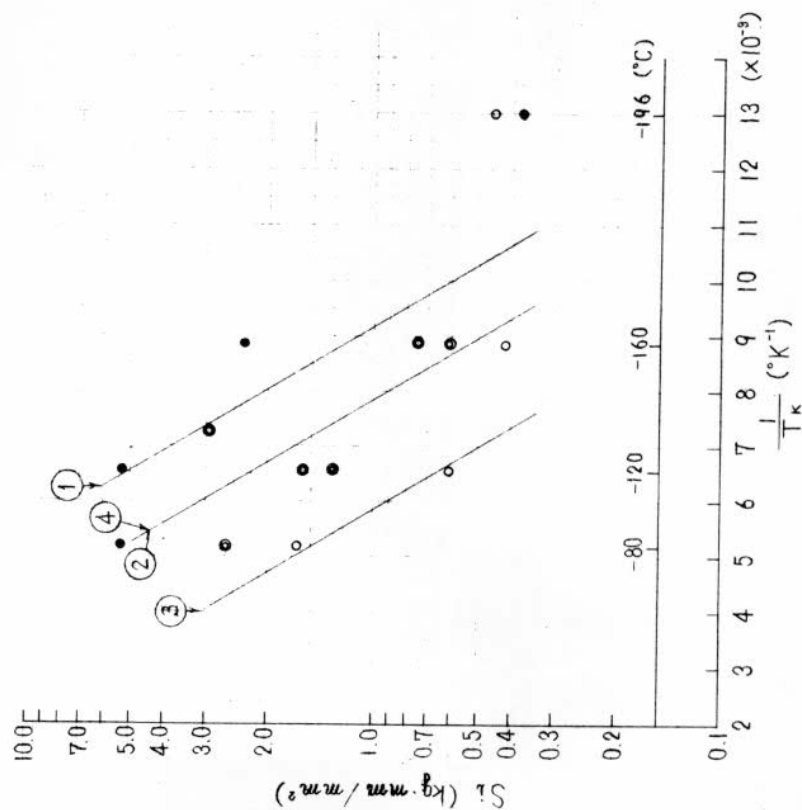


図4.98 ティープロッチ試験結果
(K5E鋼, 板厚30 mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
①	As Received	$S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
②	800°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
③	700°C A.C. 590°C W.C.	$S_i = 18.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
④	700°C A.C. 500°C W.C.	$S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$
⑤	700°C A.C.	$S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{450.1}{T_K}}$

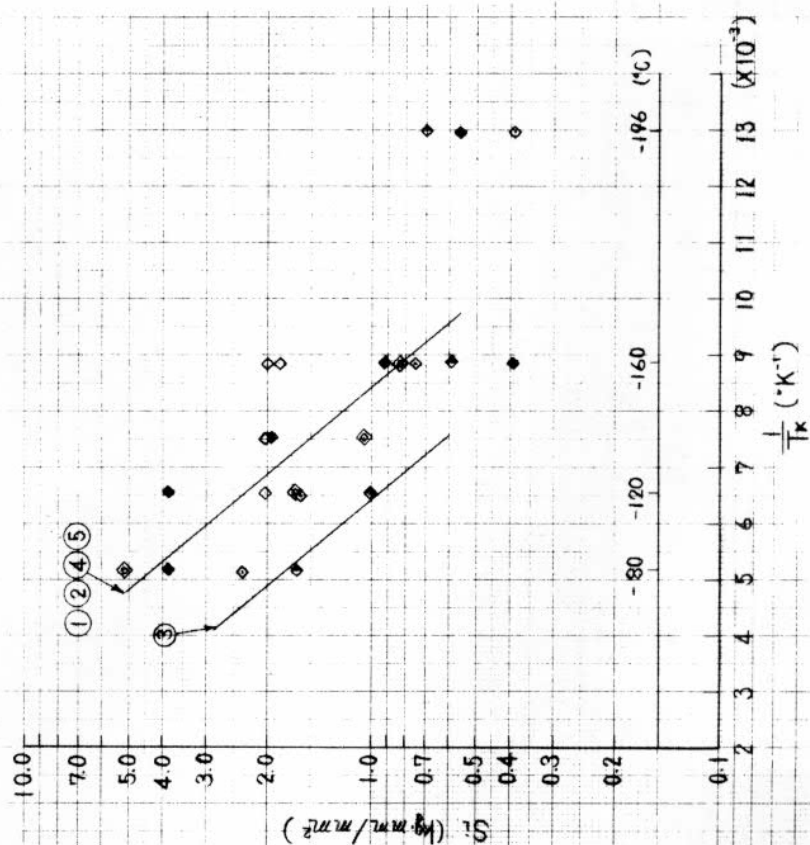
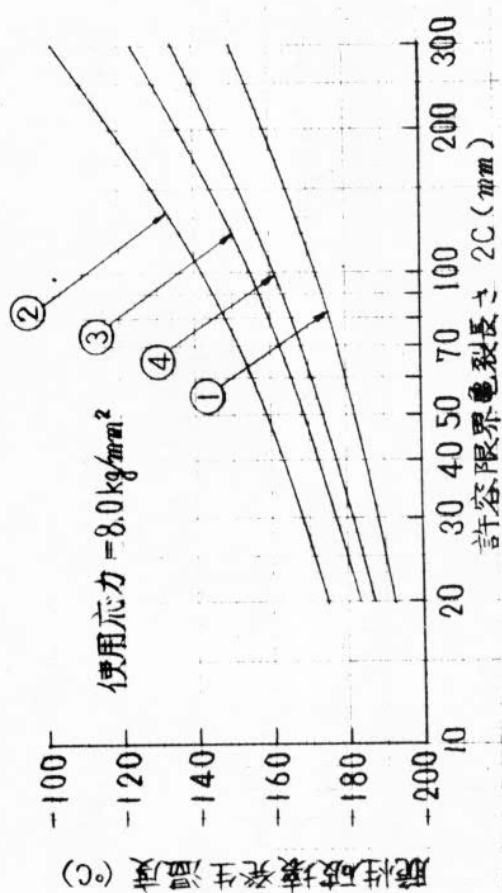


図4.99 ティープロッチ試験結果
(K5D鋼, 板厚12.7 mm)



番号	材料履歴
①	As Received 材
②	$800^\circ\text{C A.C.} \rightarrow 700^\circ\text{C W.C.}$
③	$800^\circ\text{C A.C.} \rightarrow 500^\circ\text{C W.C.}$
④	800°C A.C.

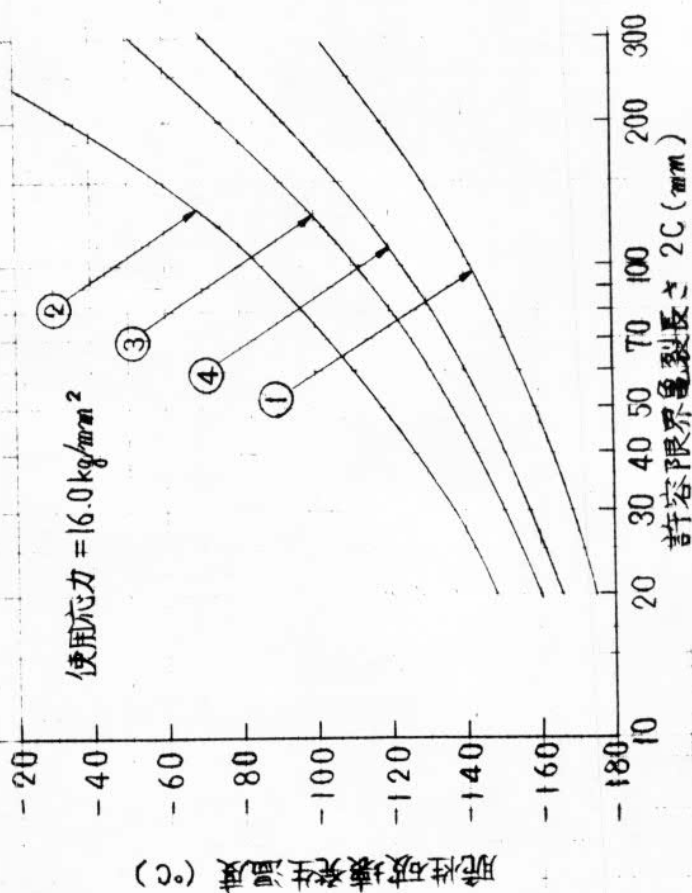
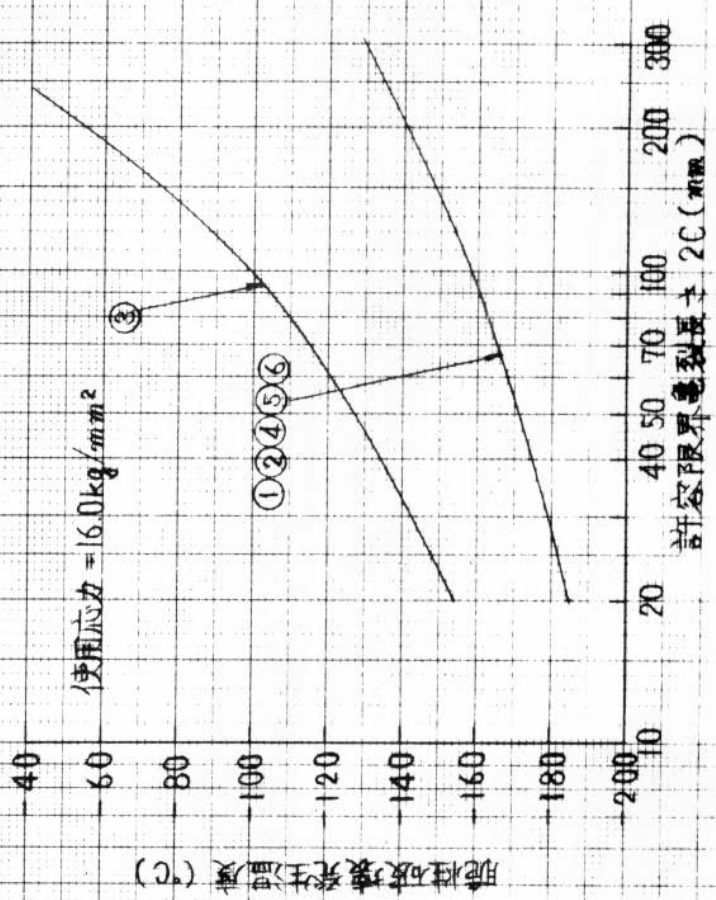
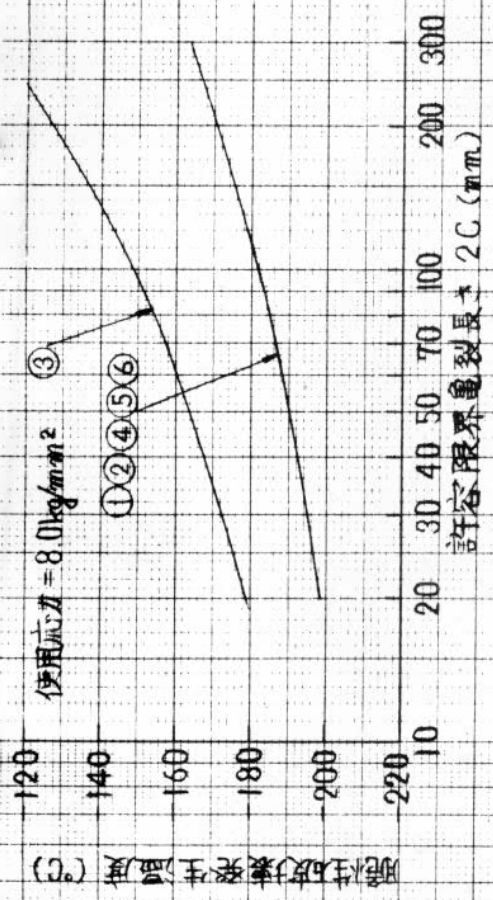
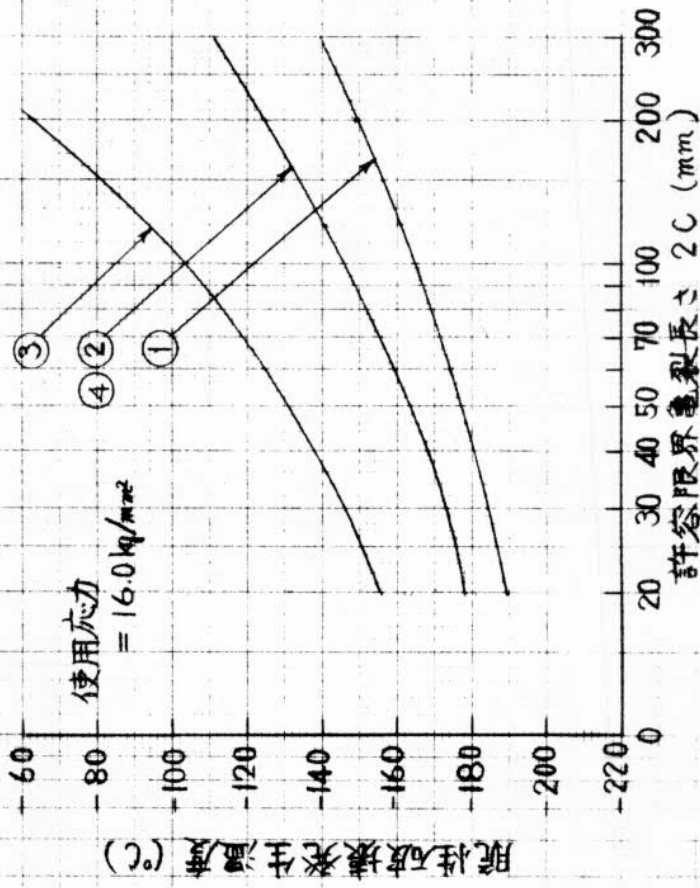
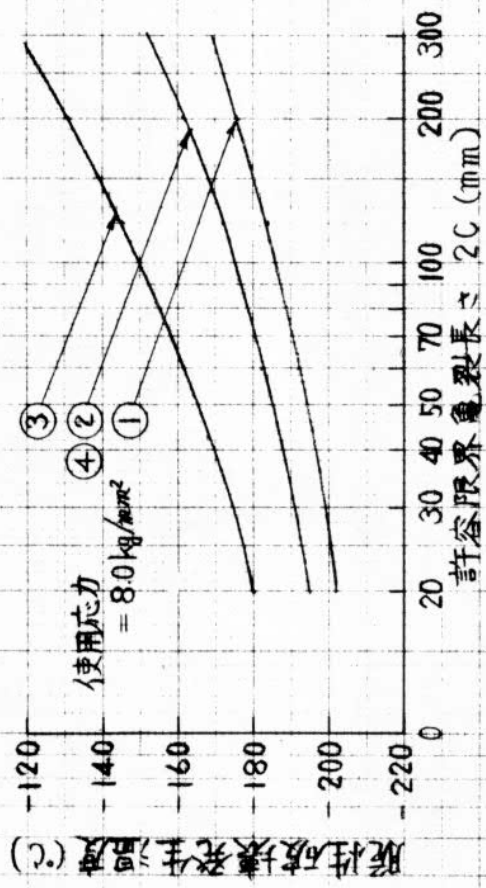


図 4.100 使用応力 = 8.0 kg/mm^2 および 16.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性
(K5A鋼, 板厚 30 mm)



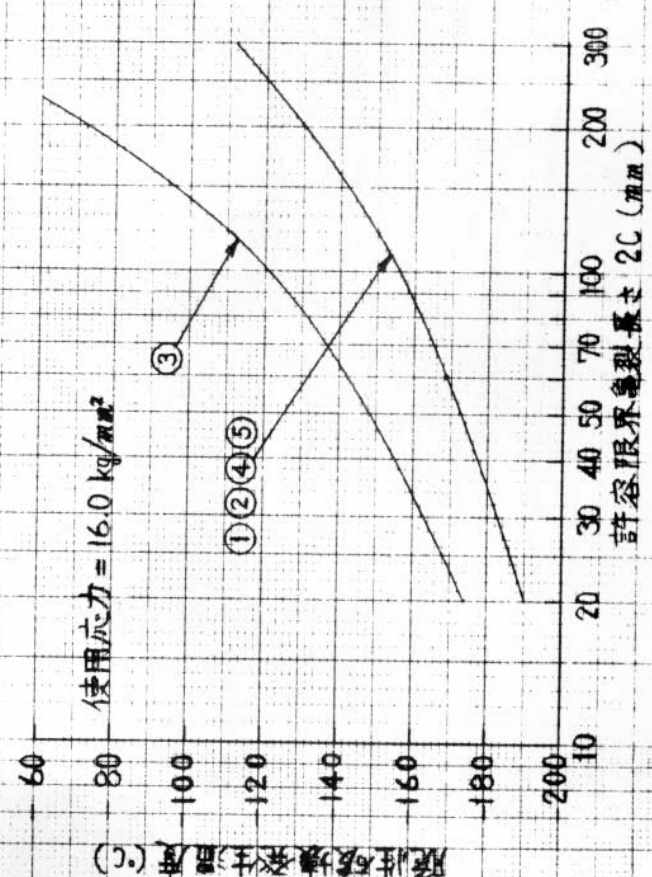
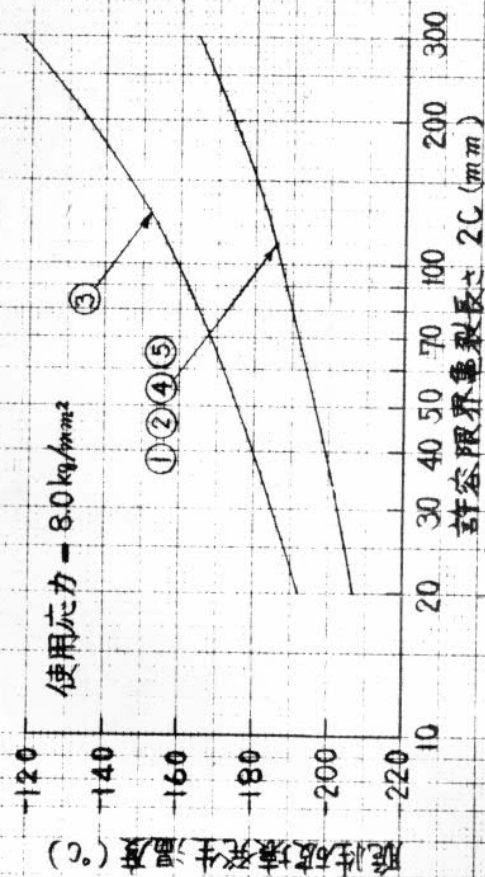
番号	材料履歴
①	As Received 材
②	900°C A.C. 500°C W.C.
③	800°C A.C. 700°C W.C.
④	800°C A.C. 500°C W.C.
⑤	800°C A.C.
⑥	650°C A.C. 575°C W.C.

図4.101 使用応力 = 8.0 kg/mm² および 16.0 kg/mm² における脆性破壊発生特性
(K5D鋼, 板厚 30 mm)



番号	材料履歴
①	As Received 材
②	900°C A.C. 500°C W.C.
③	800°C A.C. 700°C W.C.
④	800°C A.C. 500°C W.C.

図4.102 使用応力 = 8.0 kg/mm² および 16.0 kg/mm² における脆性破壊発生特性
(K5 E 鋼, 板厚 30 mm)



鋼種	材料履歴
①	As Received 材
②	800°C A.C. 500°C W.C.
③	700°C A.C. 590°C W.C.
④	700°C A.C. 500°C W.C.
⑤	700°C A.C.

図4.103 使用応力 = 8.0 kg/mm² および 16.0 kg/mm² における脆性破壊発生特性 (K5D鋼, 板厚 12.7 mm)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
K5A	① As Received	③	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.
	② 800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C.	④	800°C A.C.

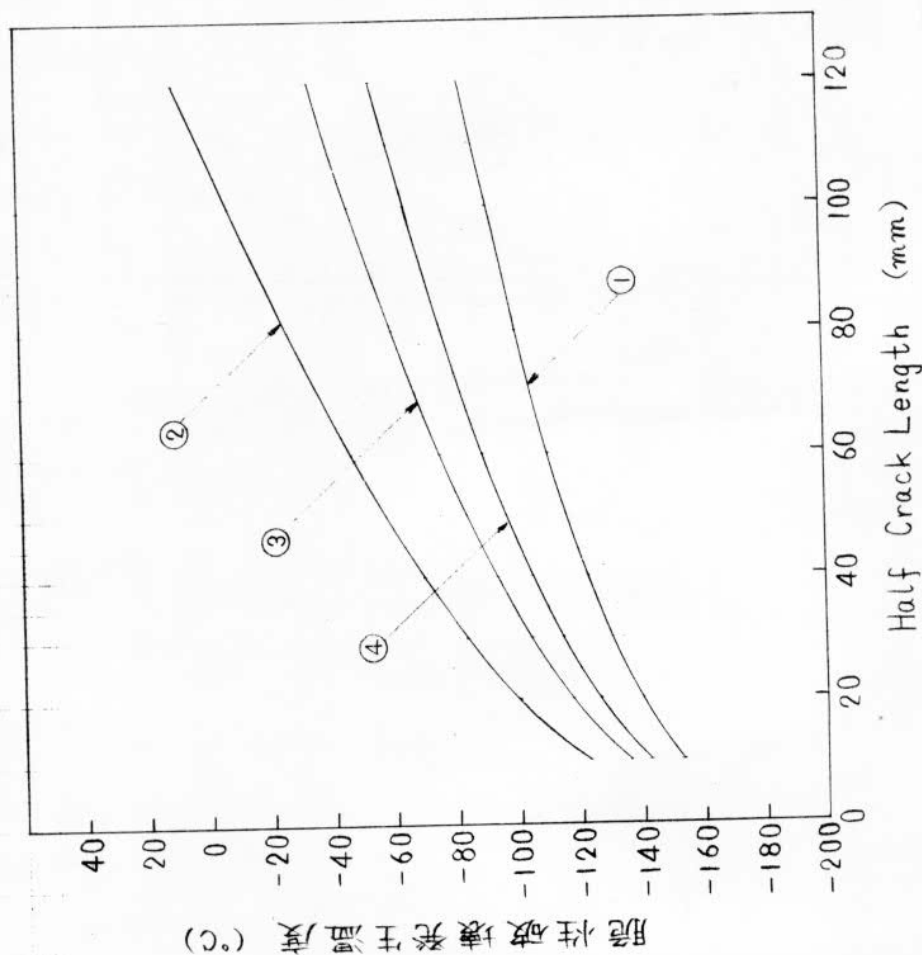


図 4.104 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5A 鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
K5D	① As Received	④	800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 500°C W.C.
	② 900°C $\rightarrow$ 500°C W.C.	⑤	800°C A.C.
	③ 800°C $\xrightarrow{A.C.}$ 700°C W.C.	⑥	650°C $\xrightarrow{A.C.}$ 575°C W.C.

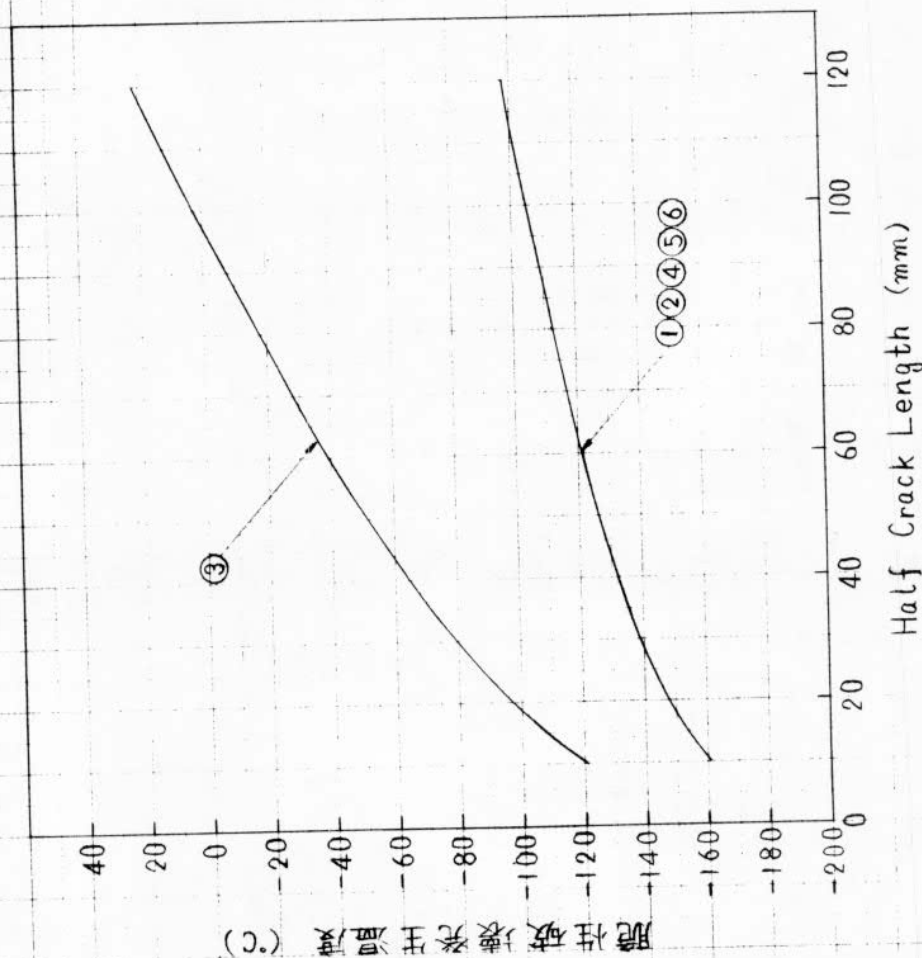


図 4.105 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5D 鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
K5E	① As Received	③	800°C A ₅ 700°C W.C.
	② 900°C A ₅ 500°C W.C.	④	800°C A ₅ 500°C W.C.

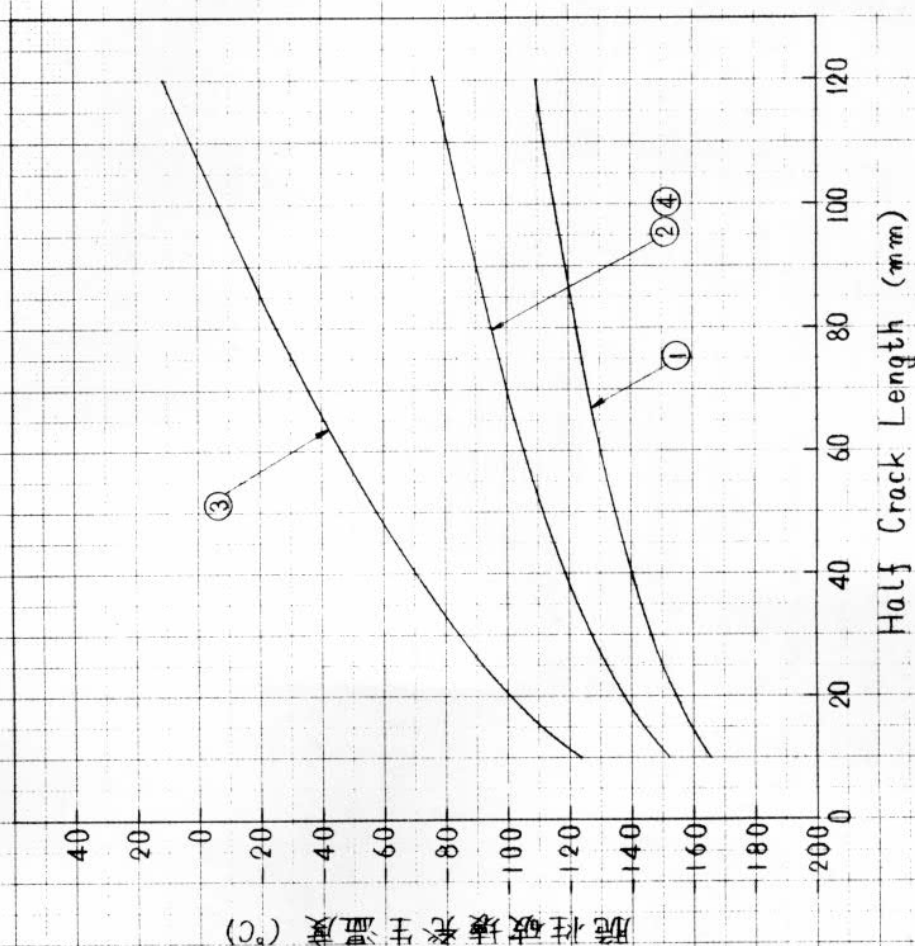


図4.106 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5E 鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	材料履歴	番号	材料履歴
	① As Received	④	700°C A ₅ 500°C W.C.
	② 800°C A ₅ 500°C W.C.	⑤	700°C A.C.
	③ 700°C A ₅ 590°C W.C.		

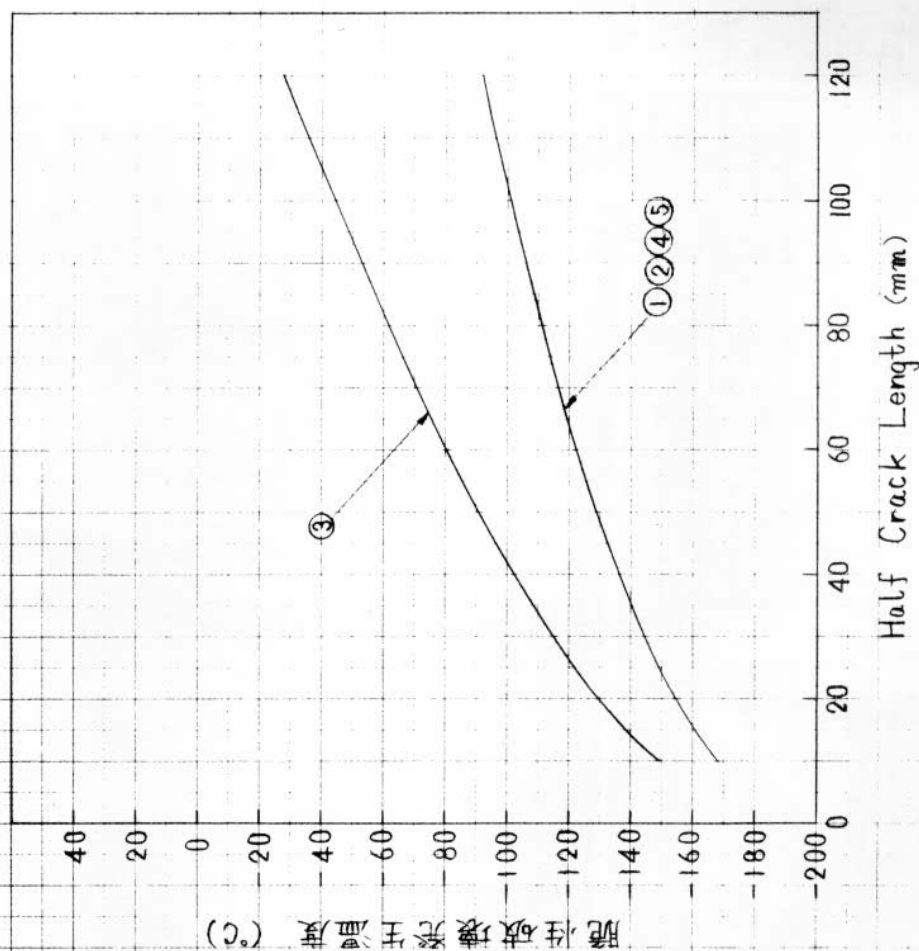


図4.107 使用応力 = $\frac{1}{2} \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5D 鋼, 板厚 12.7 mm)

表4.8 許容亀裂長さの発生限界温度

(鋼種 K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼)
(使用応力 16.0 kg/mm^2 , 8.0 kg/mm^2 , $\frac{1}{2} \sigma_y$)

鋼種	材料履歴 許容亀裂長さの $\frac{1}{2}$ 応力	16.0 kg/mm^2					8.0 kg/mm^2					$\frac{1}{2} \sigma_y$				
		100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	10 mm	100 mm	60 mm	30 mm	10 mm	10 mm
K5A (30)	As Received 材	-118°C	-136°C	-155°C	-175°C	-159°C	-169°C	-136°C	-180°C	-193°C	-92°C	-110°C	-130°C	-83	-123	-153°C
	800°C A.C. 700°C W.C.	-35	-75	-111	-148	-118	-136	-155	-175	-175	-8	-46	-83	-123	-123	-123
	800°C A.C. 500°C W.C.	-75	-103	-131	-160	-136	-150	-165	-183	-183	-46	-75	-104	-136	-136	-136
	800°C A.C.	-92	-116	-140	-166	-145	-157	-171	-187	-187	-65	-89	-115	-143	-143	-143
K5D (30)	As Received 材	-141	-154	-168	-185	-171	-179	-188	-199	-199	-105	-121	-139	-161	-161	-161
	900°C A.C. 500°C W.C.	-55	-89	-121	-154	-127	-143	-160	-179	-179	3	-39	-80	-121	-121	-121
	800°C A.C. 700°C W.C.	-141	-154	-168	-185	-171	-179	-188	-199	-199	-105	-121	-139	-161	-161	-161
	800°C A.C.	-141	-154	-168	-185	-171	-179	-188	-199	-199	-105	-121	-139	-161	-161	-161
K5E (30)	650°C A.C. 575°C W.C.	-149	-161	-174	-189	-176	-184	-192	-202	-202	-116	-130	-146	-166	-166	-166
	As Received 材	-125	-141	-159	-178	-162	-172	-182	-195	-195	-86	-106	-128	-152	-152	-152
	900°C A.C. 500°C W.C.	-63	-94	-125	-156	-131	-146	-162	-180	-180	-7	-46	-84	-124	-124	-124
	800°C A.C. 700°C W.C.	-125	-141	-159	-178	-162	-172	-182	-195	-195	-86	-106	-128	-152	-152	-152
K5D (127)	800°C A.C. 500°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
	As Received 材	-72	-110	-142	-174	-135	-154	-172	-192	-192	-44	-80	-115	-149	-149	-149
	800°C A.C. 500°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
	700°C A.C. 590°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
K5D (127)	700°C A.C. 500°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
	As Received 材	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
	800°C A.C. 500°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168
	700°C A.C. 590°C W.C.	-130	-150	-169	-190	-174	-184	-194	-207	-207	-101	-122	-144	-168	-168	-168

表4.9 二重引張試験からびにESSO試験結果一覧
(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料履歴	試験片符号	板厚 t (mm)	亀裂伝播幅 B (mm)	亀裂伝播平均応力 σ _g (kg/mm ²)	亀裂長さ C (mm)	$\gamma = \frac{C}{B}$	$f(r) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	K _c (kg√mm/mm ²)	停止温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)	備考
K5A	As Received 材	T 81	30	500	10	311	0.622	12.3	384	8	3.56	
		T 84	30	500	10	342	0.684	13.1	429	18	3.44	
		T 83	30	500	15	323	0.646	18.9	602	10	3.53	
		T 82	30	500	20	278	0.556	23.4	691	17	3.45	
	900°C A.C.	N124*	30	400	10	280	0.700	13.3	394	33	3.27	
	625°C W.C.	N123*	30	400	15	256	0.640	18.8	533	37	3.23	
	800°C A.C.	T 86*	30	400	10	270	0.675	13.0	379	26	3.35	
	700°C W.C.	T 88*	30	400	10	218	0.545	11.6	303	15	3.47	
		T 85	30	500	15	353	0.706	20.1	669	42	3.17	
		T 87	30	500	20	367	0.734	27.8	944	50	3.10	
		T 90*	30	400	15	254	0.635	18.8	531	36	3.24	
	500°C W.C.	T 89	30	500	20	315	0.630	24.8	780	49	3.11	
	800°C A.C.	N125*	30	400	10	265	0.663	12.8	369	29	3.31	
		N128*	30	400	15	263	0.658	19.1	549	38	3.22	
		N126*	30	400	20	230	0.575	23.8	640	39	3.21	
		N127*	30	400	20	229	0.573	23.8	638	38	3.22	
K5D	As Received 材	T 98	30	500	10	317	0.634	12.4	391	-5	3.73	
		T 100	30	500	15	313	0.626	18.6	583	-2	3.69	
		T 99	30	500	20	252	0.504	22.6	636	-2	3.69	
		T 97	30	500	20	273	0.546	23.2	679	-4	3.72	
	900°C A.C.	N151*	30	400	10	290	0.725	13.8	416	8	3.56	
	625°C W.C.	N152*	30	400	15	250	0.625	18.6	521	8	3.56	
	900°C A.C.	N143*	30	400	10	260	0.650	12.6	360	-4	3.72	
		N145*	30	400	15	250	0.625	18.6	521	5	3.60	
		N144*	30	400	20	240	0.600	24.2	664	6	3.58	
		N146*	30	400	20	233	0.583	23.8	644	5	3.60	
	800°C A.C.	T 101*	30	400	15							母材中に亀裂発生
	700°C W.C.	T 102	30	500	15	258	0.516	17.1	487	2	3.64	
		T 103	30	500	18	286	0.572	21.2	635	11	3.52	
		T 104	30	500	20	312	0.624	24.6	770	19	3.43	
		T 113*	30	400	15	269	0.673	19.5	567	5	3.60	
	800°C A.C.	T 109	30	500	20	276	0.552	23.4	689	7	3.57	
	500°C W.C.	T 110	30	500	20	327	0.654	25.4	814	14	3.48	
		T 111	30	500	20	234	0.468	22.2	602	10	3.54	
		T 112	30	500	20	305	0.610	24.4	755	11	3.52	
		T 107	30	500	15							伝播せず
	800°C A.C.	T 108	30	500	20							伝播せず
		T 105	30	500	20	302	0.604	24.2	745	2	3.64	
		T 106	30	500	25	300	0.600	30.3	930	8	3.56	
K5E	As Received 材	T 67	30	500	5							伝播せず
		T 65	30	500	5							伝播せず
		T 68	30	500	10	316	0.632	12.4	391	-15	3.88	
		T 66	30	500	20	260	0.520	22.8	651	-8	3.77	
	900°C A.C.	N106*	30	400	10	300	0.750	14.3	439	8	3.56	
	625°C W.C.	N105*	30	400	15	253	0.633	18.6	524	5	3.60	
	900°C A.C.	N107*	30	400	10	244	0.610	12.2	338	-6	3.75	
		N108*	30	400	15	244	0.610	18.3	507	3	3.62	
		N109*	30	400	20	257	0.643	25.0	710	11	3.52	
		T 69*	30	400	10	214	0.535	11.5	298	-15	3.88	
	800°C A.C.	T 70	30	500	15	248	0.496	17.0	474	0	3.66	
	700°C W.C.	T 72	30	500	15	275	0.550	17.6	517	2	3.64	
		T 71	30	500	20	265	0.530	23.0	663	10	3.53	
		T 75	30	400	15	263	0.658	19.1	548	-2	3.69	
		T 76	30	400	16	267	0.668	20.6	598	5	3.60	
	500°C W.C.	T 73	30	500	20	314	0.628	24.8	779	5	3.60	
		T 74	30	500	20	245	0.490	22.4	621	-2	3.69	
		T 77	30	500	20	313	0.626	24.8	778	10	3.54	

注) 1. $f(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r}} \tan \frac{\pi r}{2}$ $\gamma = \frac{C}{B}$ 3. ※ ESSO 試験

2. $K_c = f(r) \cdot \sigma_g \sqrt{\pi C}$

表 4.10 二重引張試験 ならびに ESSO 試験結果一覽
(K5D 鋼, 板厚 12.7mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	板厚 t (mm)	亀裂広がり 幅 B (mm)	亀裂広がり 平均応力 σ_g (kg/mm ²)	亀裂長さ C (mm)	$\gamma = \frac{C}{B}$	$f_y \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	K_C (kg·mm ^{3/2})	停止温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)	備考
K5D	As Rece- ived	T126	12.7	500	10	276	0.552	11.7	343	-37	4.24	
		T125	12.7	500	15	281	0.562	17.6	524	-34	4.19	
		T127	12.7	500	15	222	0.444	16.4	434	-29	4.10	
		T128	12.7	500	20	267	0.534	23.0	667	-28	4.08	
	700°C AC	T130	12.7	500	10	237	0.474	11.1	303	-29	4.10	
		T132	12.7	500	15	195	0.390	16.1	397	-16	3.89	
		T133	12.7	500	15	309	0.618	18.5	575	-6	3.75	
		T131	12.7	500	20	318	0.636	24.9	787	+2	3.64	
	700°C AC	N178*	12.7	400	10	254	0.635	12.5	353	-28	4.09	
		N179*	12.7	400	10	259	0.648	12.6	359	-27	4.07	
		N180*	12.7	400	15	251	0.628	18.6	523	-15	3.88	
		N177*	12.7	400	20	235	0.509	24.0	653	-16	3.89	

※ ESSO 試験

鋼種番号	記号	材料履歴	実験式
①	▲	As Received	$\ln K_C = -3.46\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 18.28$
②	▲	900°C A.C. 625°C W.C.	$\ln K_C = -3.46\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 17.39$
③	▲	800°C A.C. 700°C W.C.	
④	▲	800°C A.C. 500°C W.C.	$\ln K_C = -3.46\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 17.51$
⑤	▲	800°C A.C.	

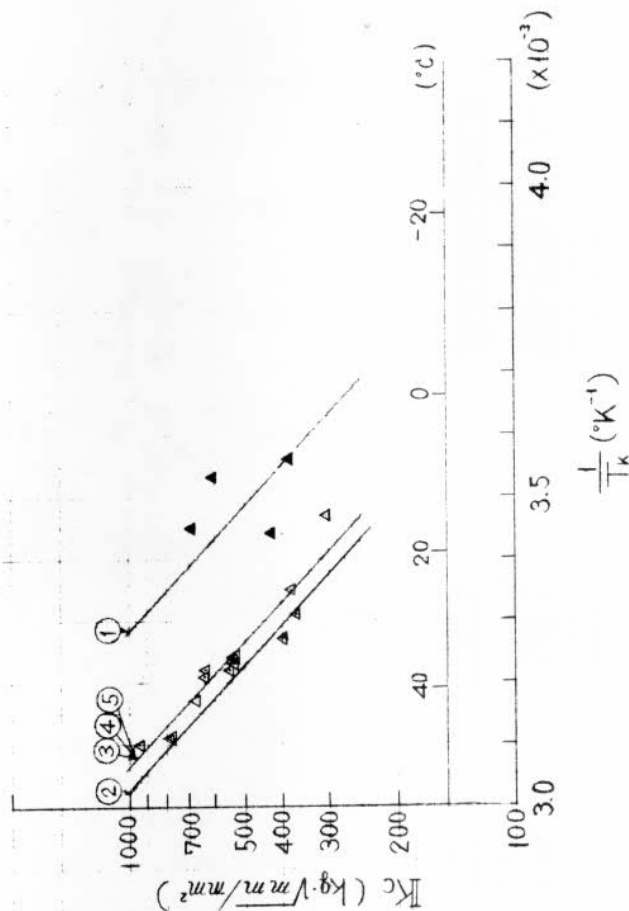


図 4.108 二重引張試験結果
(K5A鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号	記号	材料履歴	実験式
①	◆	As Received	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.96$
②	◆	900°C A.C. 625°C W.C.	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.28$
③	□	900°C A.C. 500°C W.C.	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.58$
④	◇	800°C A.C. 700°C W.C.	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.50$
⑤	◆	800°C A.C. 500°C W.C.	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.64$
⑥	◇	800°C A.C.	$\ln K_C = -2.57\left(\frac{10^3}{T_K}\right) + 15.96$

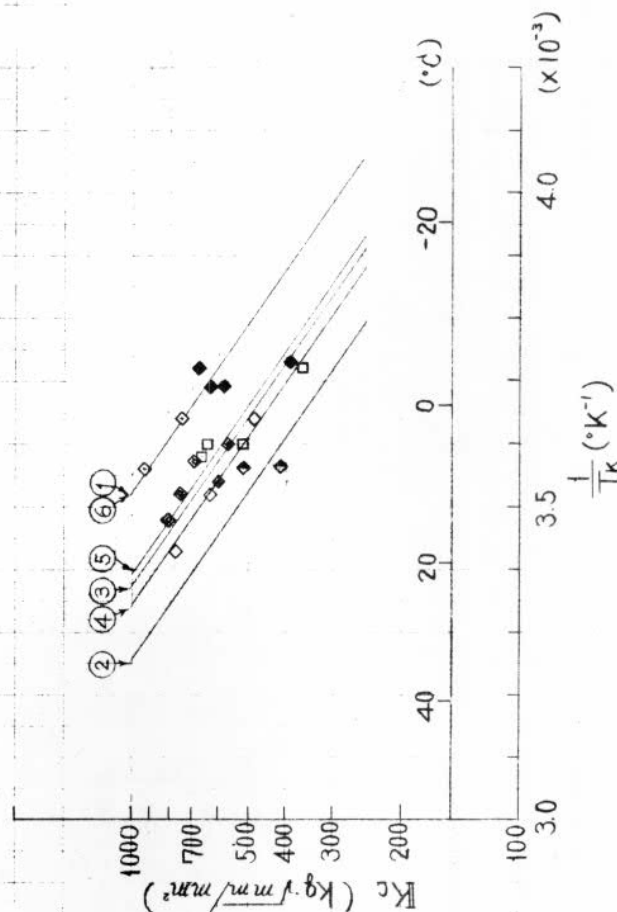


図 4.109 二重引張試験結果
(K5D鋼, 板厚 30 mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
①	● As Received	$\ln K_C = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 16.03$
②	○ 900°C A.C. 625°C W.C.	$\ln K_C = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.37$
③	● 900°C A.C. 500°C W.C.	$\ln K_C = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.57$
④	○ 800°C A.C. 700°C W.C.	$\ln K_C = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.57$
⑤	● 800°C A.C. 500°C W.C.	$\ln K_C = -2.57 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 15.80$

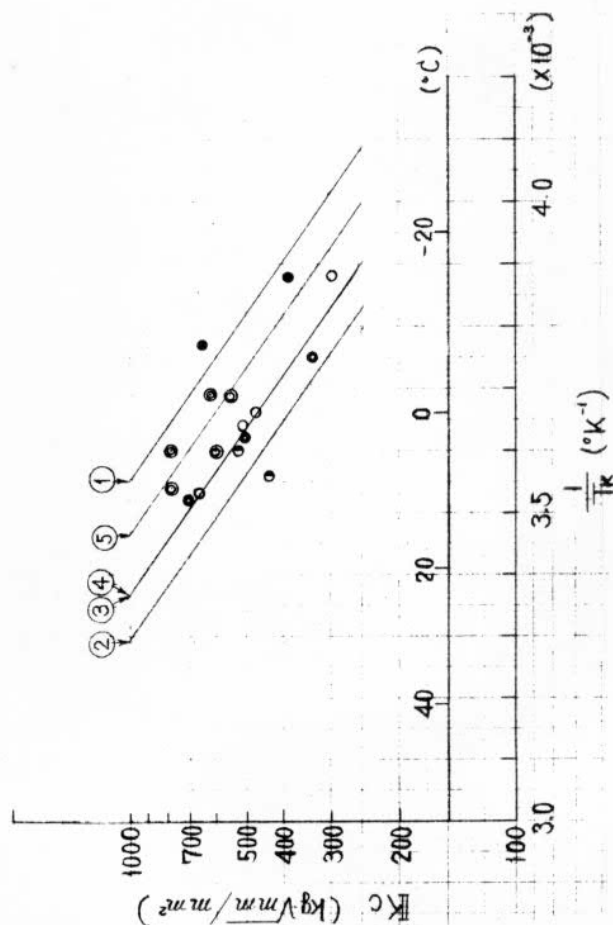


図 4.110 二重引張試験結果
(K5E鋼, 板厚 30mm)

鋼種番号記号	材料履歴	実験式
①	◆ As Received	$\ln K_C = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.64$
②	◆ 700°C A.C. 590°C W.C.	$\ln K_C = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.35$
③	◇ 700°C A.C.	$\ln K_C = -2.05 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 14.27$

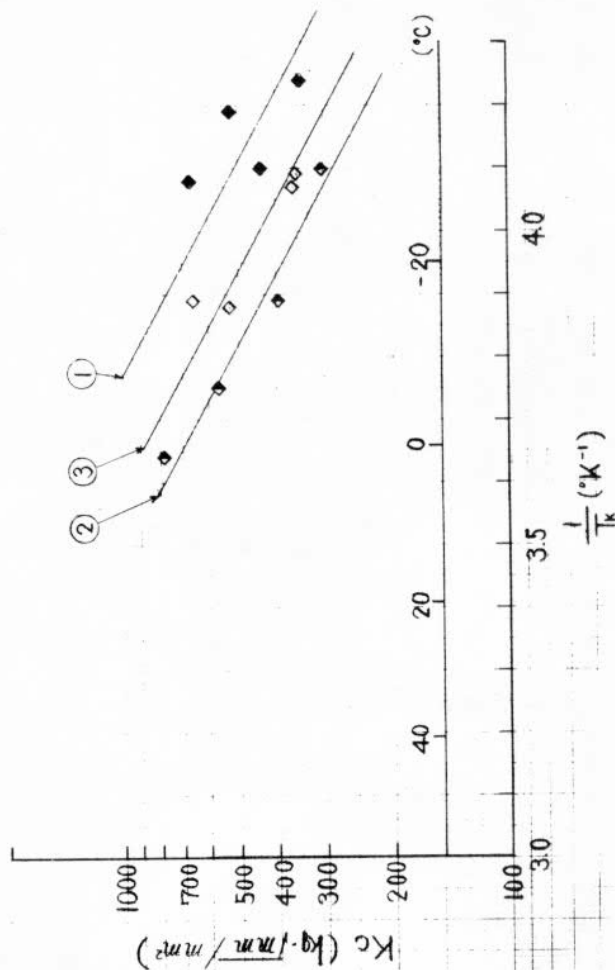


図 4.111 二重引張試験結果
(K5D鋼, 板厚 12.7mm)

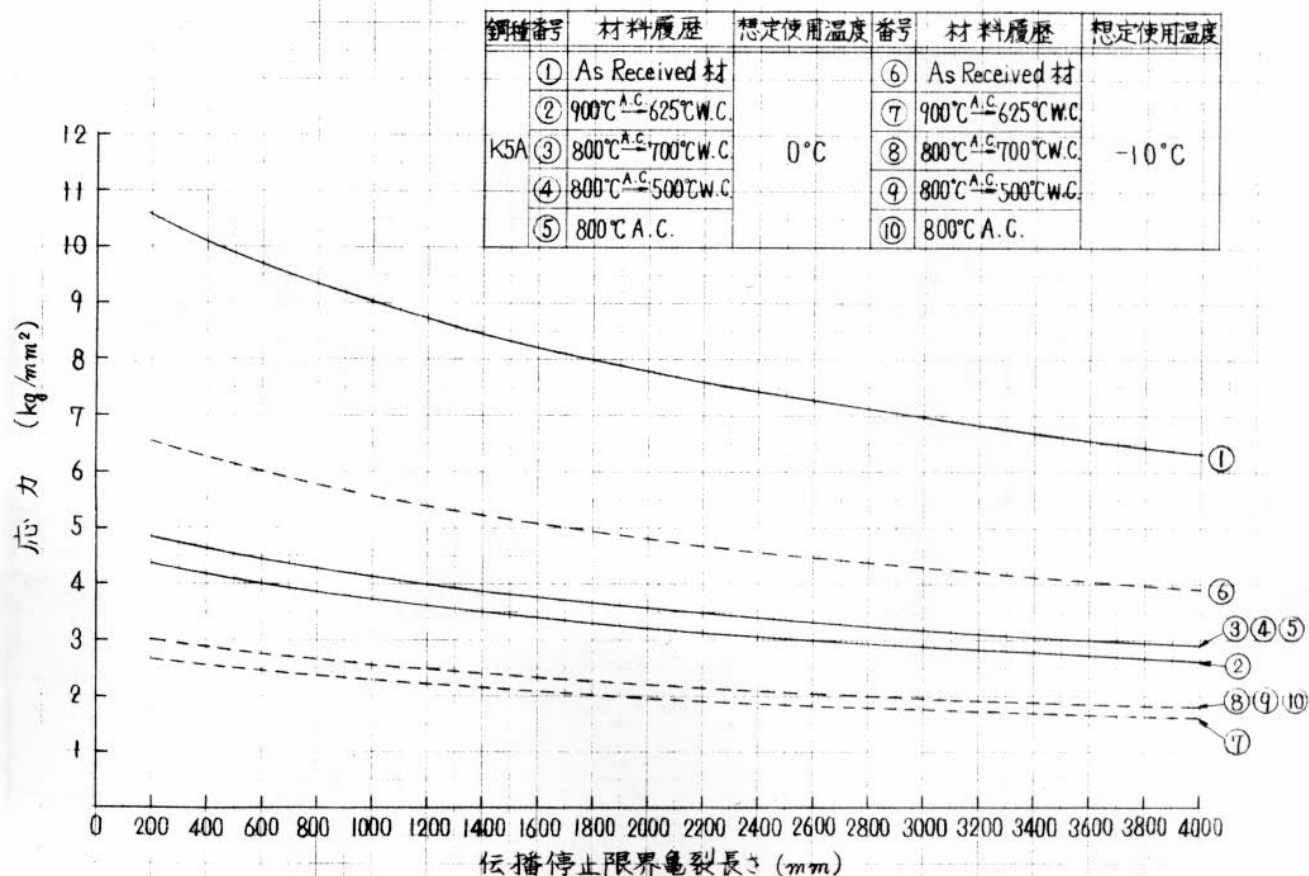


図4.112 温度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(K5A鋼, 板厚30mm)

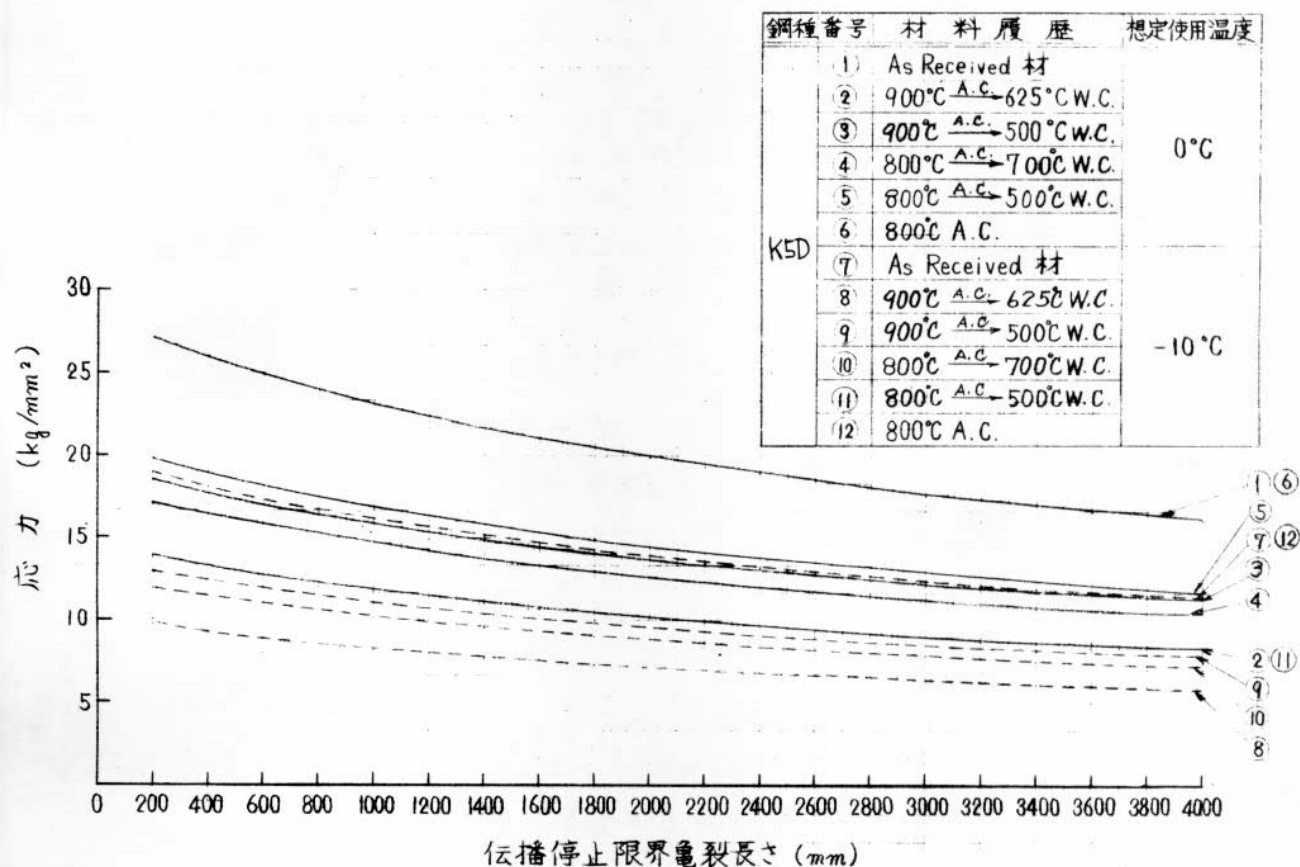


図4.113 温度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(K5D鋼, 板厚30mm)

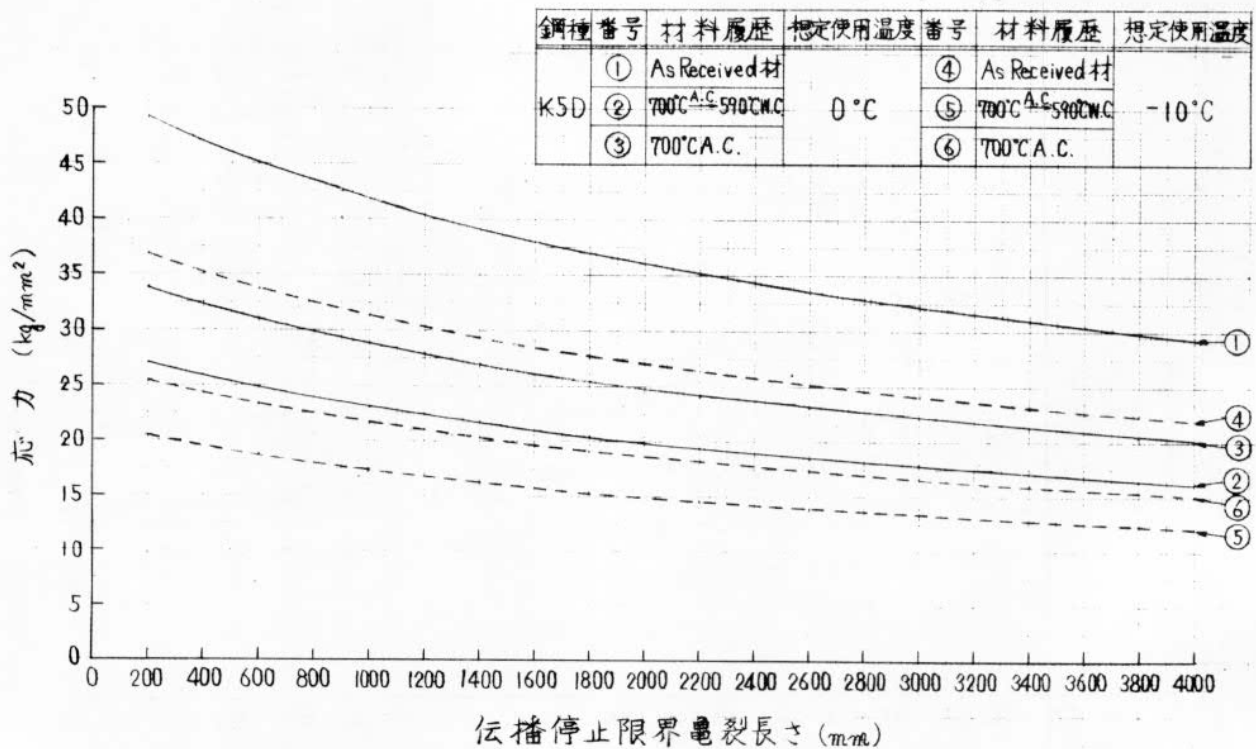
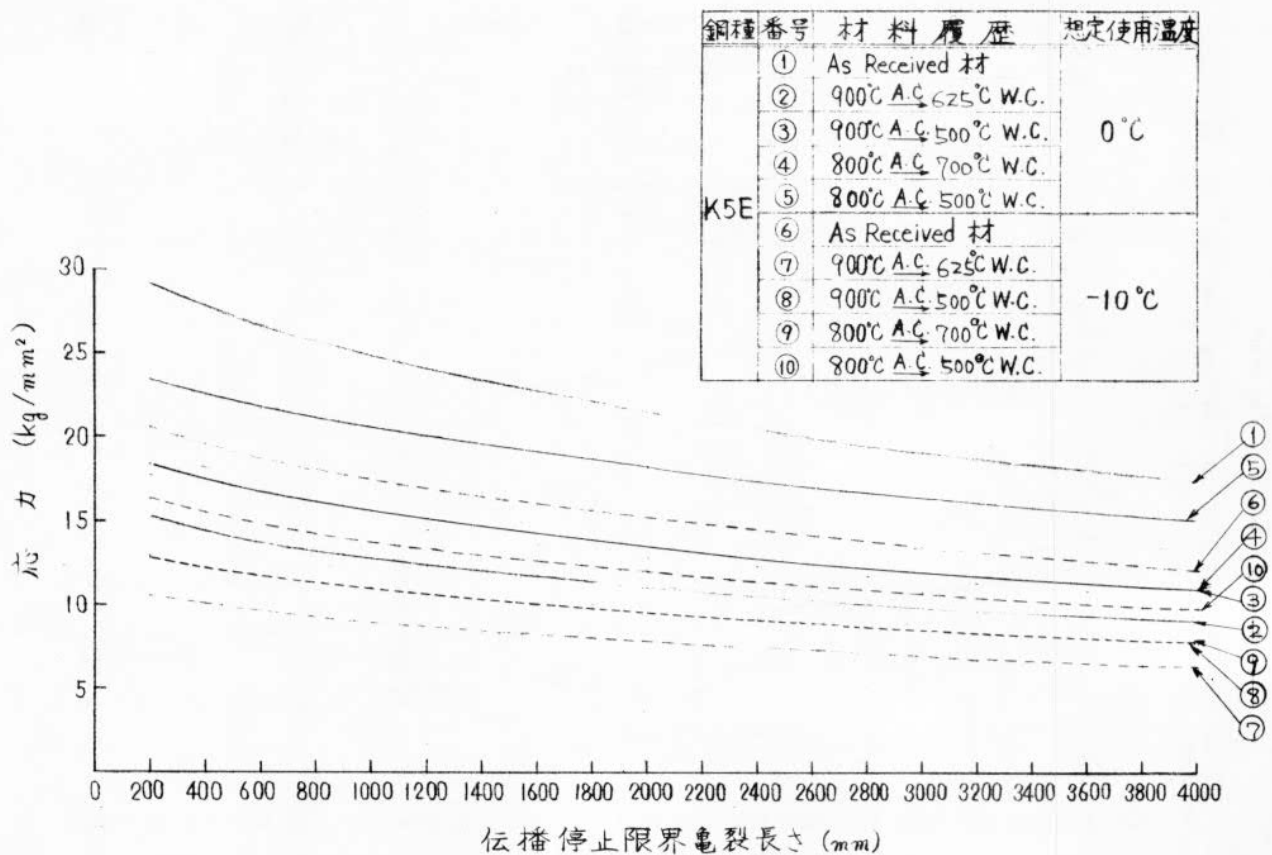


表4.11 停止亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(K5A鋼, K5D鋼, K5鋼, 板厚30 mm)

(K5D鋼, 板厚12.7 mm)

鋼種	材料履歴	応力 距離		16.0 kg/mm ²		8.0 kg/mm ²		要求K _{IC} に おける温度
		3 M	1 M	3 M	1 M	3 M	1 M	
K5A (30)	As Received 材	19 °C	13 °C	3 °C	-3 °C	-5 °C		
	900 °C ^{A.C.} →625 °C W.C.	43	36	24	18	16		
	800 °C ^{A.C.} →700 °C W.C.	40	32	21	15	13		
	800 °C ^{A.C.} →500 °C W.C.	40	32	21	15	13		
	800 °C A.C.	40	32	21	15	13		
K5D (30)	As Received 材	-3	-10	-21	-28	-30		
	900 °C ^{A.C.} →625 °C W.C.	18	9	-3	-11	-13		
	900 °C ^{A.C.} →500 °C W.C.	8	0	-12	-18	-21		
	800 °C ^{A.C.} →700 °C W.C.	11	3	-9	-16	-19		
	800 °C ^{A.C.} →500 °C W.C.	5	-2	-14	-21	-22		
	800 °C A.C.	-3	-10	-21	-28	-30		
K5E (30)	As Received 材	-5	-12	-23	-29	-15		
	900 °C ^{A.C.} →625 °C W.C.	15	7	-6	-13	4		
	900 °C ^{A.C.} →500 °C W.C.	9	1	-11	-18	-2		
	800 °C ^{A.C.} →700 °C W.C.	9	1	-11	-18	-2		
	800 °C ^{A.C.} →500 °C W.C.	2	-6	-17	-24	-8		
K5D (12.7)	As Received 材	-23	-31	-43	-49	-52		
	700 °C ^{A.C.} →590 °C W.C.	-4	-12	-26	-34	-36		
	700 °C A.C.	-11	-20	-33	-40	-42		

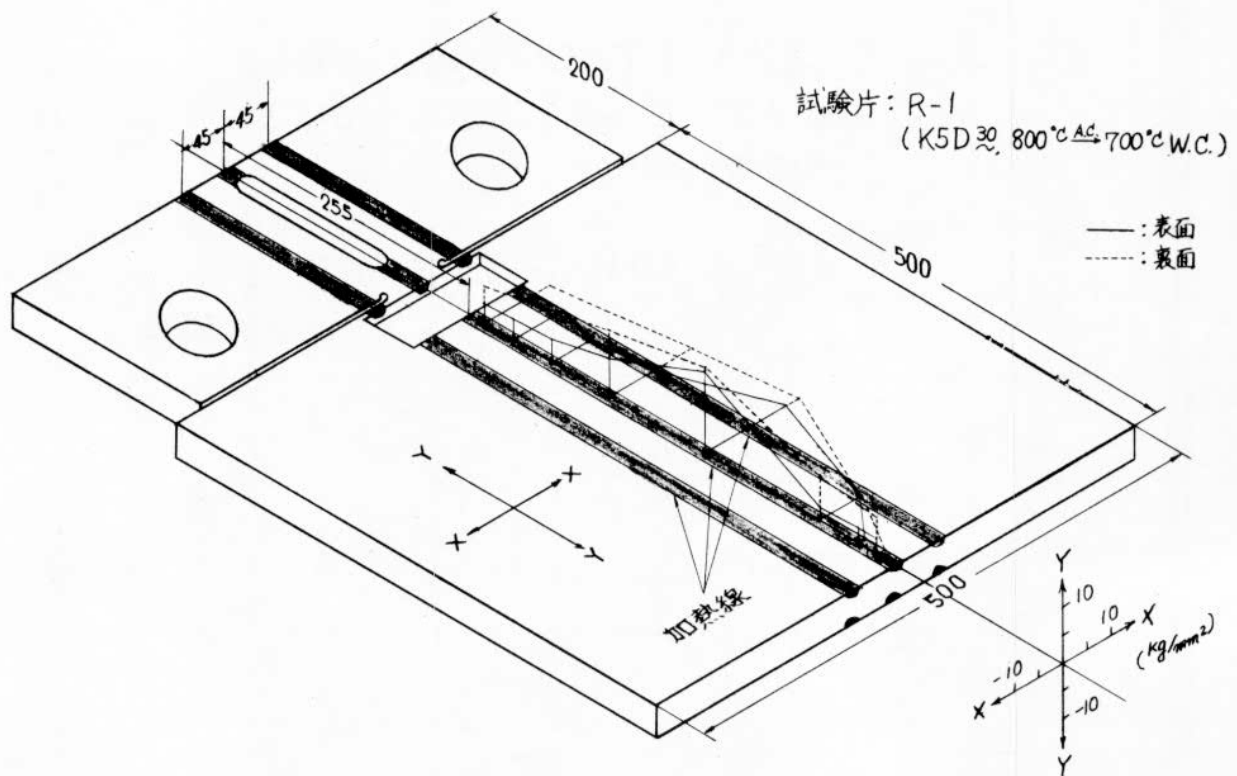


図4.116 二重引張試験片残留応力分布 (初1)

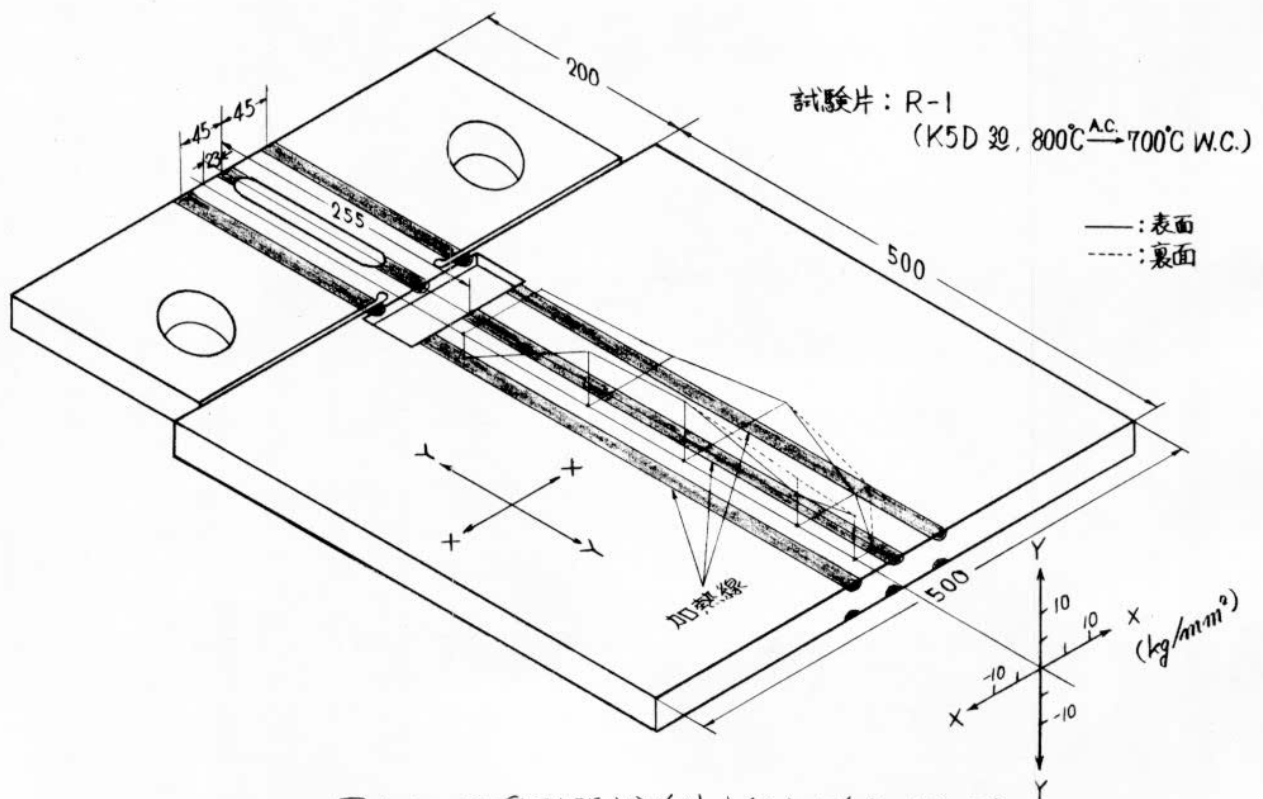


図4.117 二重引張試験片残留応力分布 (その2)

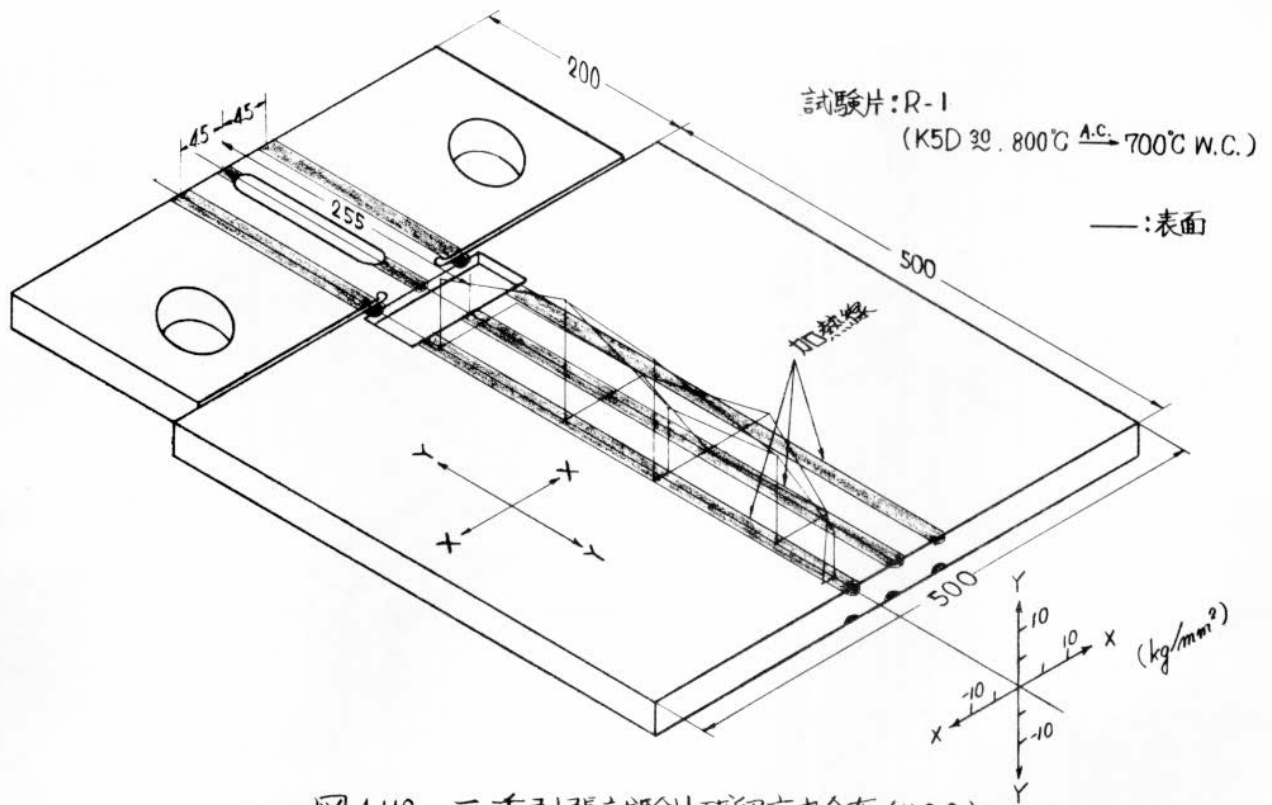


図4.118 二重引張試験片残留応力分布(その3)

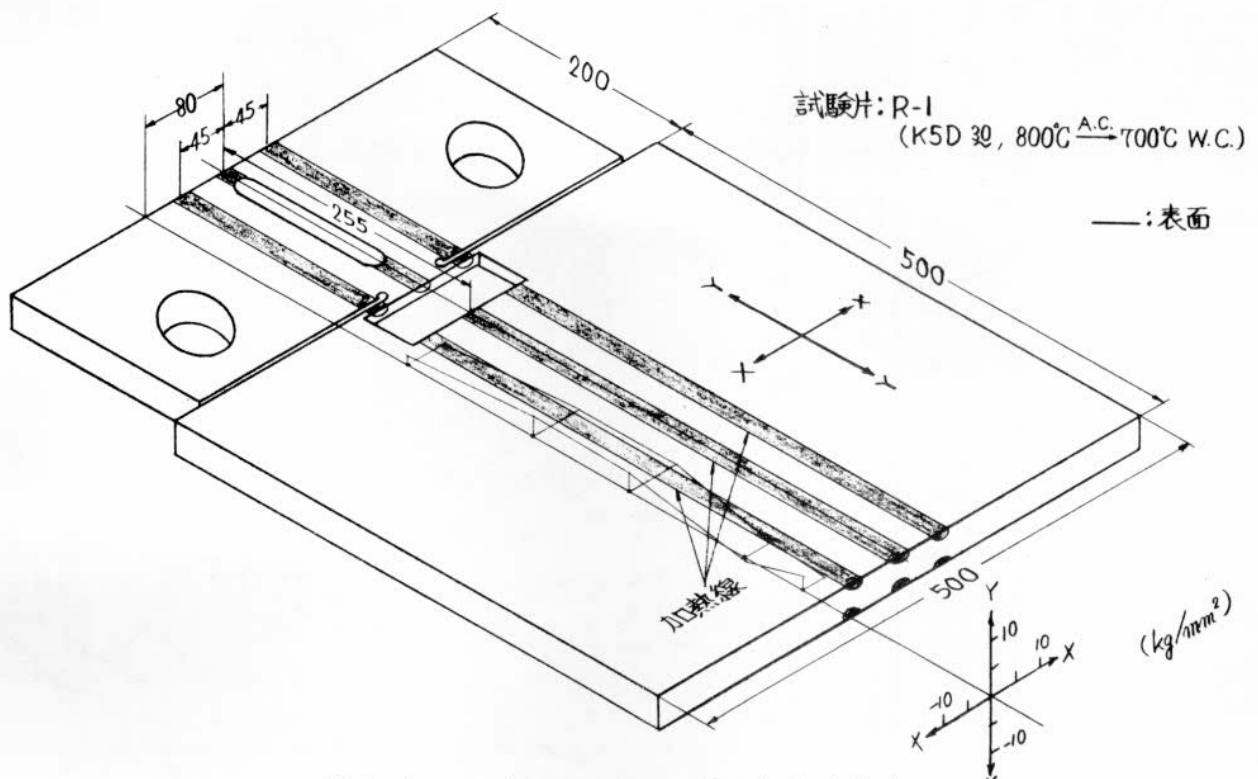


図4.119 二重引張試験片残留応力分布(その4)

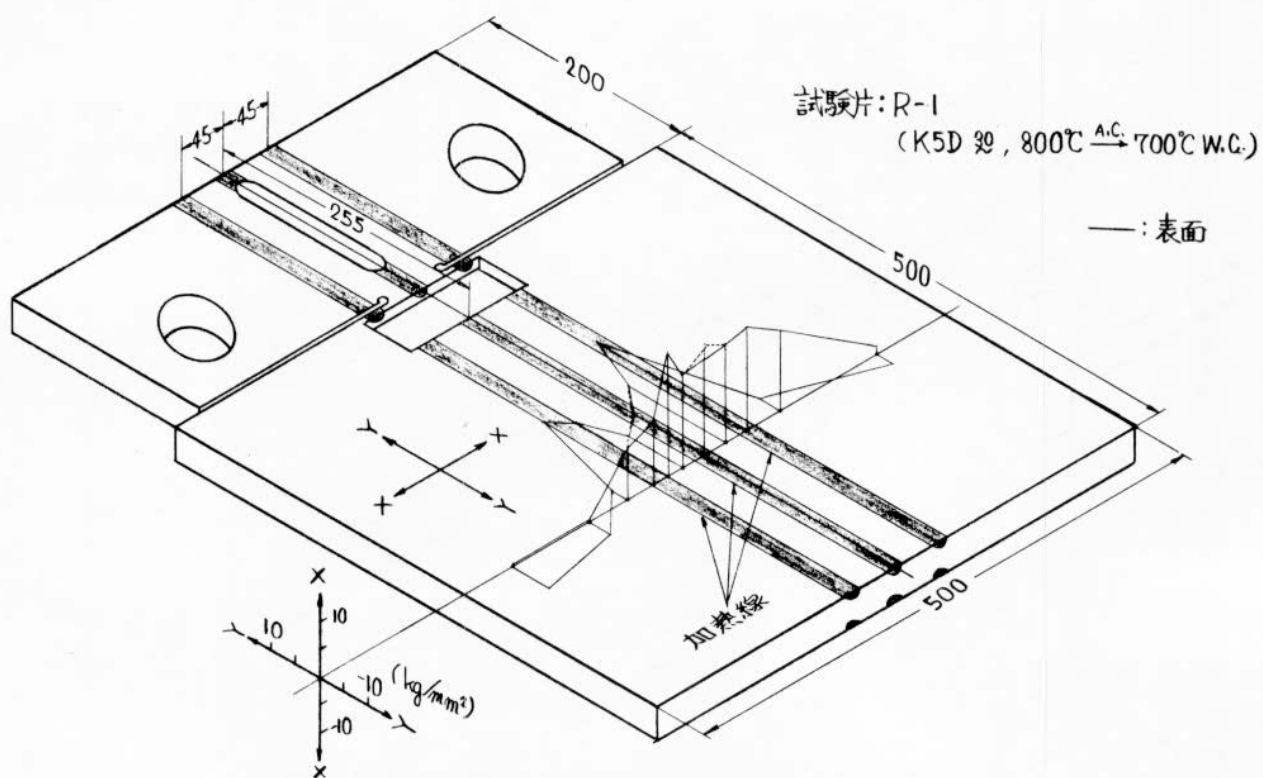


図 4.120 二重引張試験片残留応力分布 (705)

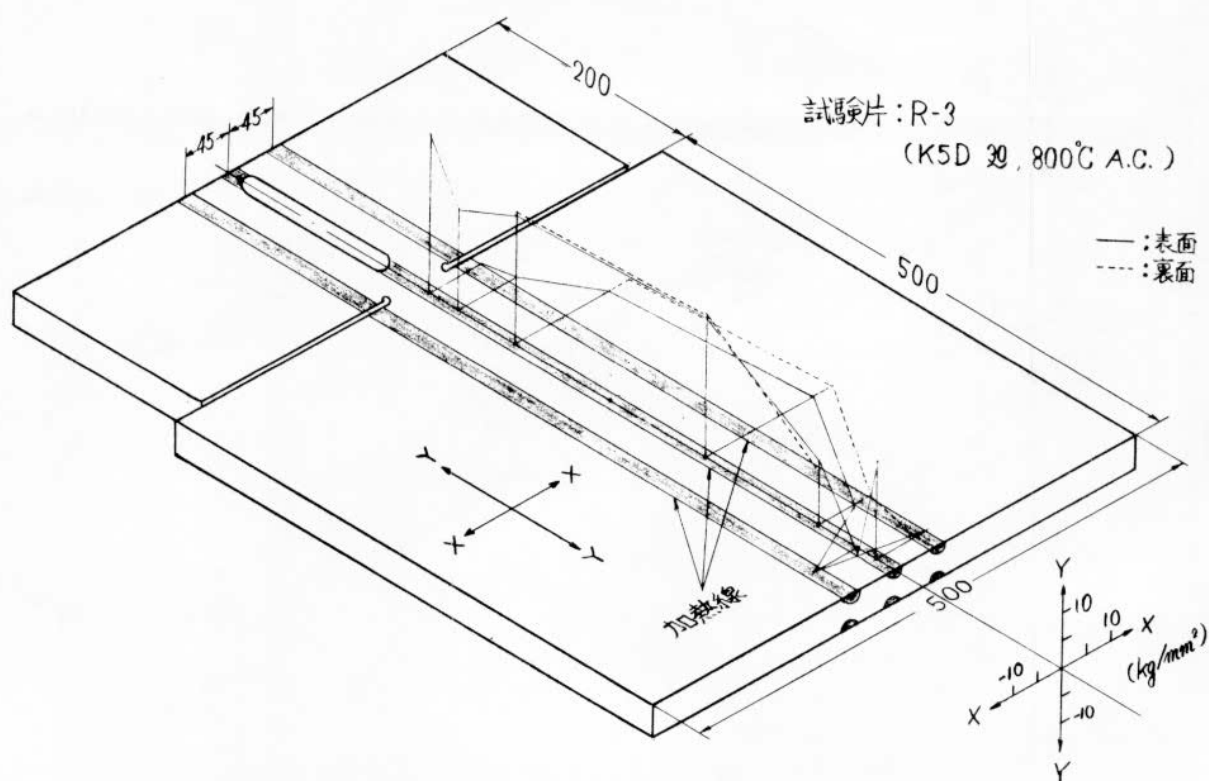


図 4.121 二重引張試験片残留応力分布 (701)

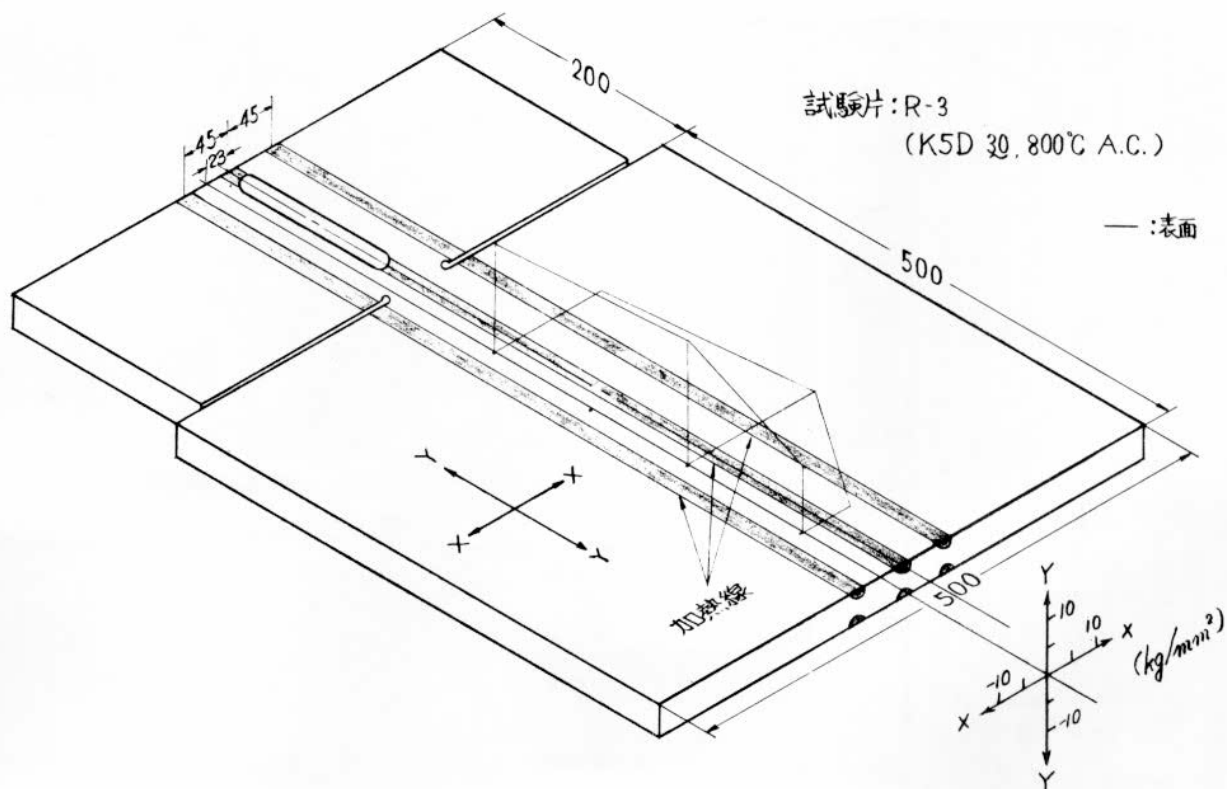


図 4.122 二重引張試験片残留応力分布 (その2)

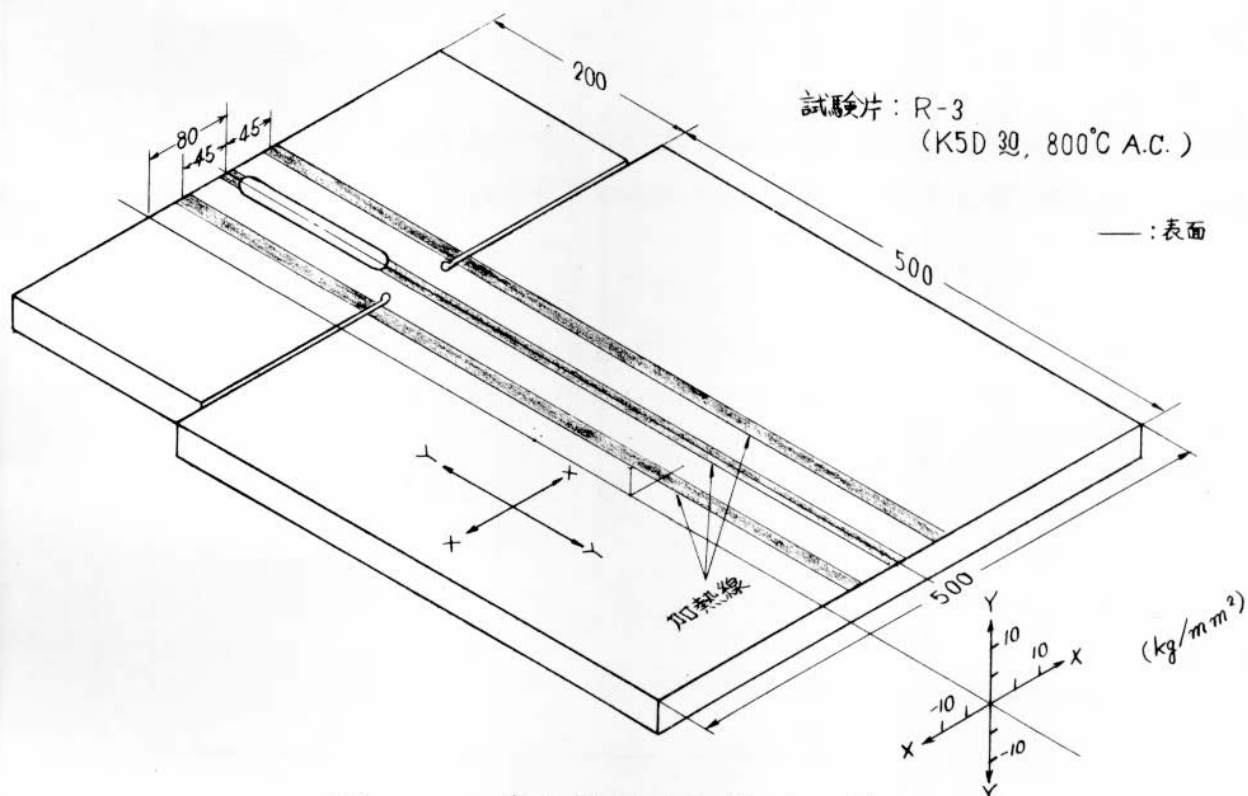


図 4.123 二重引張試験片残留応力分布 (その3)

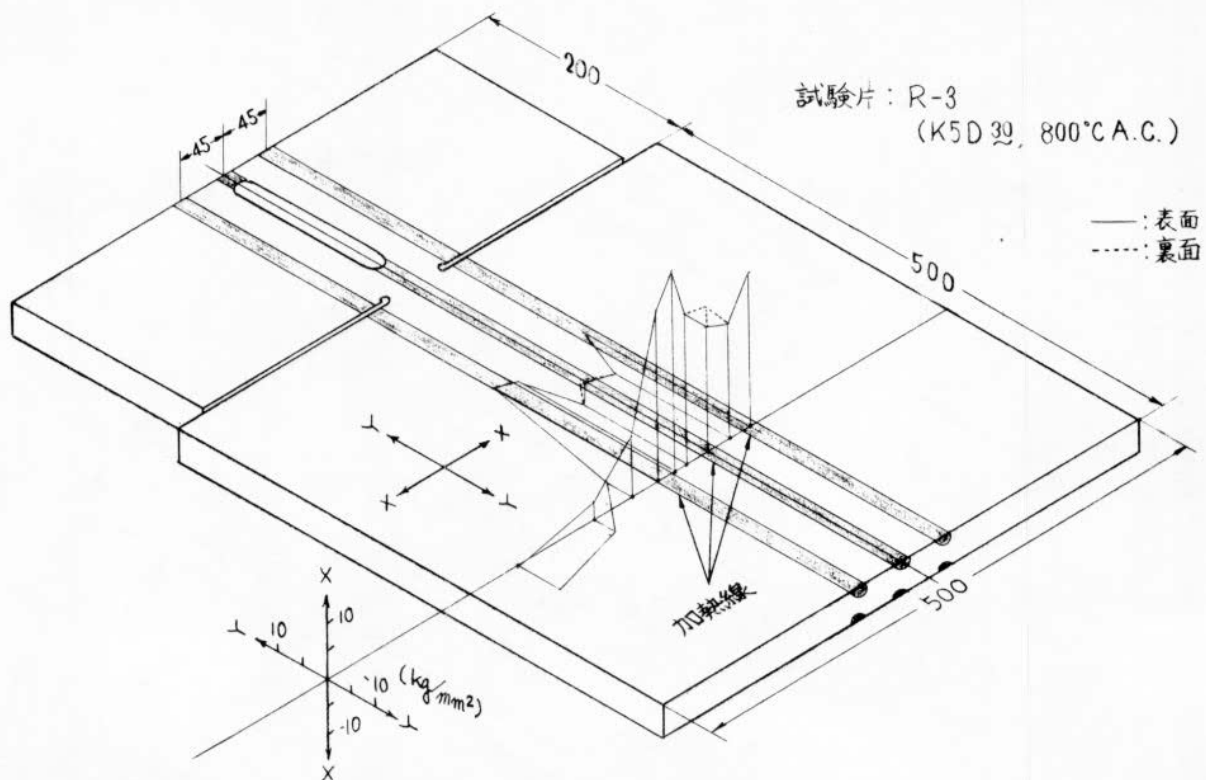


図 4.124 二重引張試験片残留応力分布 (その4)

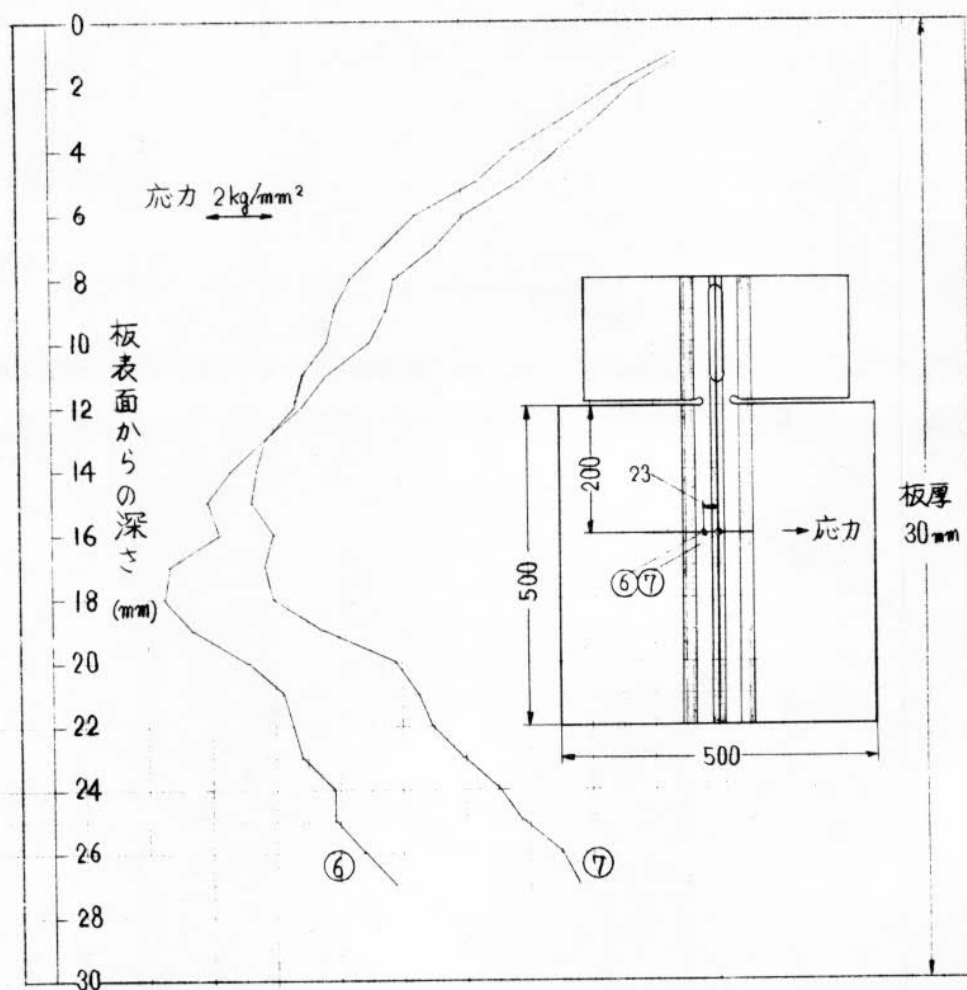
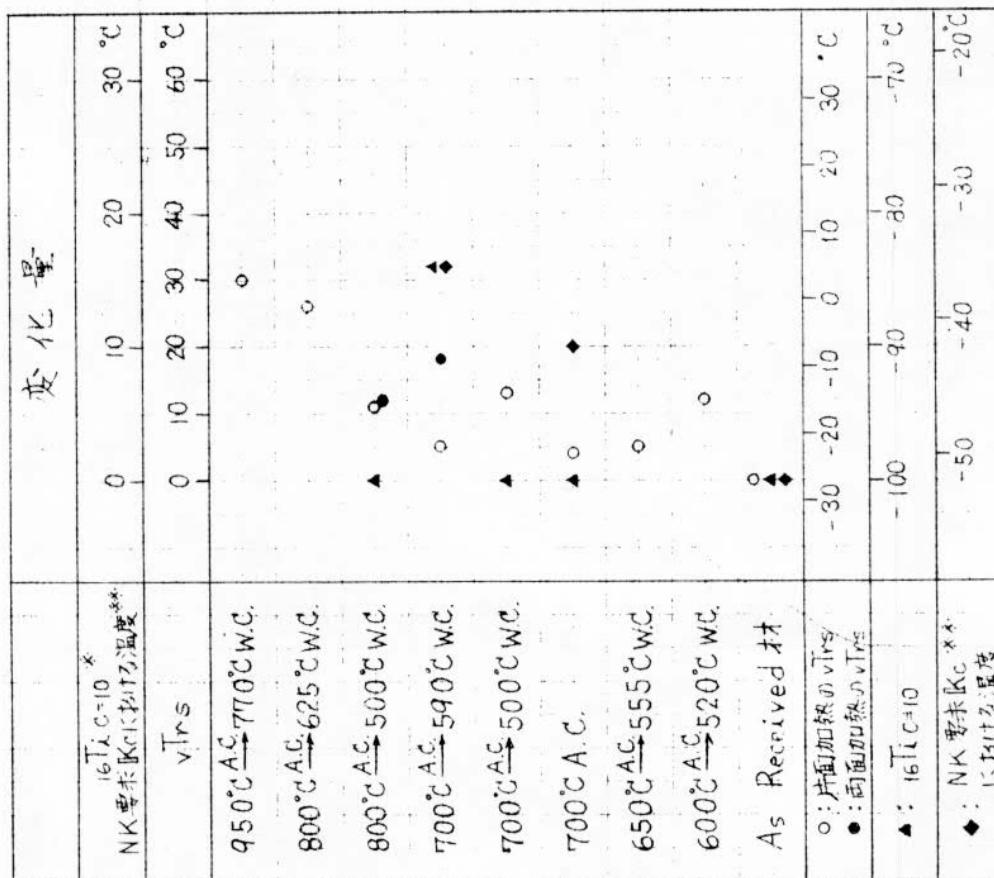


図 4.125 板厚断面における残留応力分布
(供試材; K5D鋼, 板厚30 mm, 800°C A.C.)

変 化 量	変 化 量	変 化 量
$^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ NK要求 K_C における温度 vT_{rs}	$^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ NK要求 K_C における温度 vT_{rs}	$^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ NK要求 K_C における温度 vT_{rs}
1000°C A.C. 900°C A.C. 780°C W.C. 900°C A.C. 625°C W.C. 900°C A.C. 575°C W.C. 900°C A.C. 500°C W.C. 900°C A.C. 850°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 700°C W.C. 800°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 500°C W.C. 800°C A.C. 400°C W.C. 800°C A.C. 750°C A.C. 660°C W.C. 700°C A.C. 615°C W.C. 700°C A.C. 650°C A.C. 575°C W.C. As Received 材	1000°C A.C. 900°C A.C. 780°C W.C. 900°C A.C. 625°C W.C. 900°C A.C. 575°C W.C. 900°C A.C. 500°C W.C. 900°C A.C. 850°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 700°C W.C. 800°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 500°C W.C. 800°C A.C. 400°C W.C. 800°C A.C. 750°C A.C. 660°C W.C. 700°C A.C. 615°C W.C. 700°C A.C. 650°C A.C. 575°C W.C. As Received 材	1000°C A.C. 900°C A.C. 780°C W.C. 900°C A.C. 625°C W.C. 900°C A.C. 575°C W.C. 900°C A.C. 500°C W.C. 900°C A.C. 850°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 700°C W.C. 800°C A.C. 575°C W.C. 800°C A.C. 500°C W.C. 800°C A.C. 400°C W.C. 800°C A.C. 750°C A.C. 660°C W.C. 700°C A.C. 615°C W.C. 700°C A.C. 650°C A.C. 575°C W.C. As Received 材
○: vT_{rs} ▲: $^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ ◆: NK要求 K_C における温度 ※: 鋼 種	○: vT_{rs} ▲: $^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ ◆: NK要求 K_C における温度 ※: 鋼 種	○: vT_{rs} ▲: $^{16}T_{LC}=10^{\circ}\text{C}$ ◆: NK要求 K_C における温度 ※: 鋼 種
K5A 鋼, 板厚 30 mm	K5D 鋼, 板厚 30 mm	K5E 鋼, 板厚 30 mm

図4.126 線状ガス加熱条件と各種試験結果



○: 温度は加熱表面下(1mm)の温度を表す,
*: 残留応力等の影響を考慮して+90°C補正
***: 要求K_C = 220を採用

図4.127 線状ガス加熱条件と各種試験結果
(K5D鋼, 板厚12.7 mm)

表4.12 供試材

Charge No.	Roll No.	寸 法	熱処理
9500	FL 719	25 ^{mm} × 1000 × 2000	Normalized

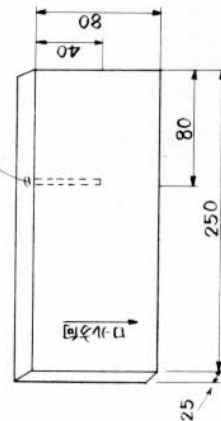
日本鋼管製

表4.13化学成分ならびに機械的性質 (ミルシートより)

化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質	
C	Si	Mn	P	S	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²
0.17	0.23	1.30	0.021	0.011	39.8	53.6
						伸 び %
						32.5

注) 海事協会クラスなら K5B ABクラスなら ABH

PR熱電対



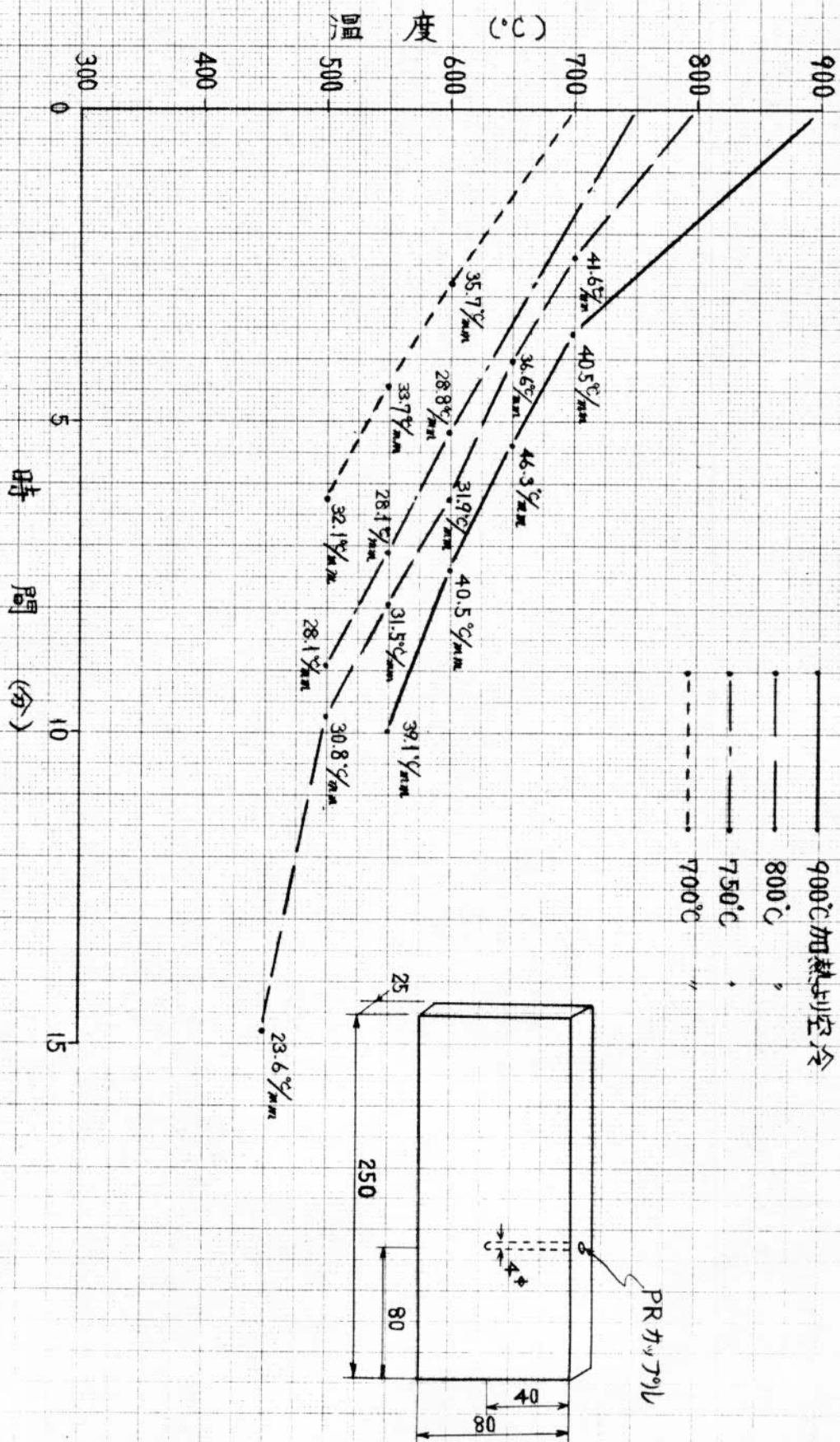
注) 衝撃試験片は板厚中心部の
ロール方向より採取

図 4.128 均熱加熱試験片

表4.14 熱処理方法

熱 処 理 方 法	線 図
700°C × 10分 → 空冷 500°C → 水冷	
700°C × 10分 → 空冷 550°C → 水冷	
700°C × 10分 → 空冷 600°C → 水冷	
750°C × 10分 → 空冷 500°C → 水冷	
750°C × 10分 → 空冷 550°C → 水冷	
750°C × 10分 → 空冷 600°C → 水冷	
800°C × 10分 → 空冷 450°C → 水冷	
800°C × 10分 → 空冷 500°C → 水冷	
800°C × 10分 → 空冷 550°C → 水冷	
800°C × 10分 → 空冷 600°C → 水冷	
800°C × 10分 → 空冷 650°C → 水冷	
900°C × 10分 → 空冷 550°C → 水冷	
900°C × 10分 → 空冷 600°C → 水冷	
900°C × 10分 → 空冷 650°C → 水冷	
900°C × 10分 → 空冷 700°C → 水冷	
400°C × 10分 → 水冷	
650°C × 10分 → 水冷	
700°C × 10分 → 水冷	
750°C × 10分 → 水冷	
800°C × 10分 → 水冷	
900°C × 10分 → 水冷	
1000°C × 10分 → 水冷	
650°C × 10分 → 空冷	
750°C × 10分 → 空冷	
800°C × 10分 → 空冷	
900°C × 10分 → 空冷	
1000°C × 10分 → 空冷	

図4.129 各種均熱加熱温度より水冷開始温度までの空冷冷却曲線



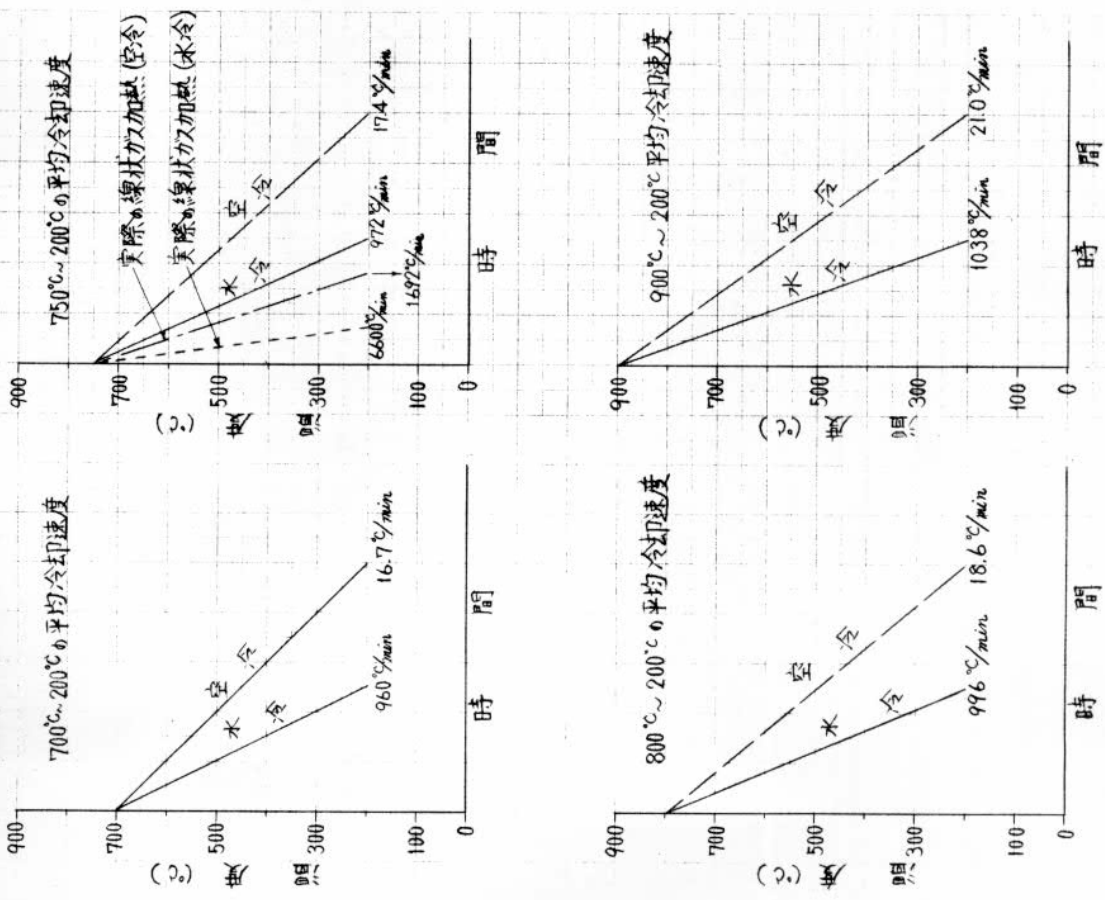


図4.130 均熱加熱後の水冷、空冷材の平均冷却速度

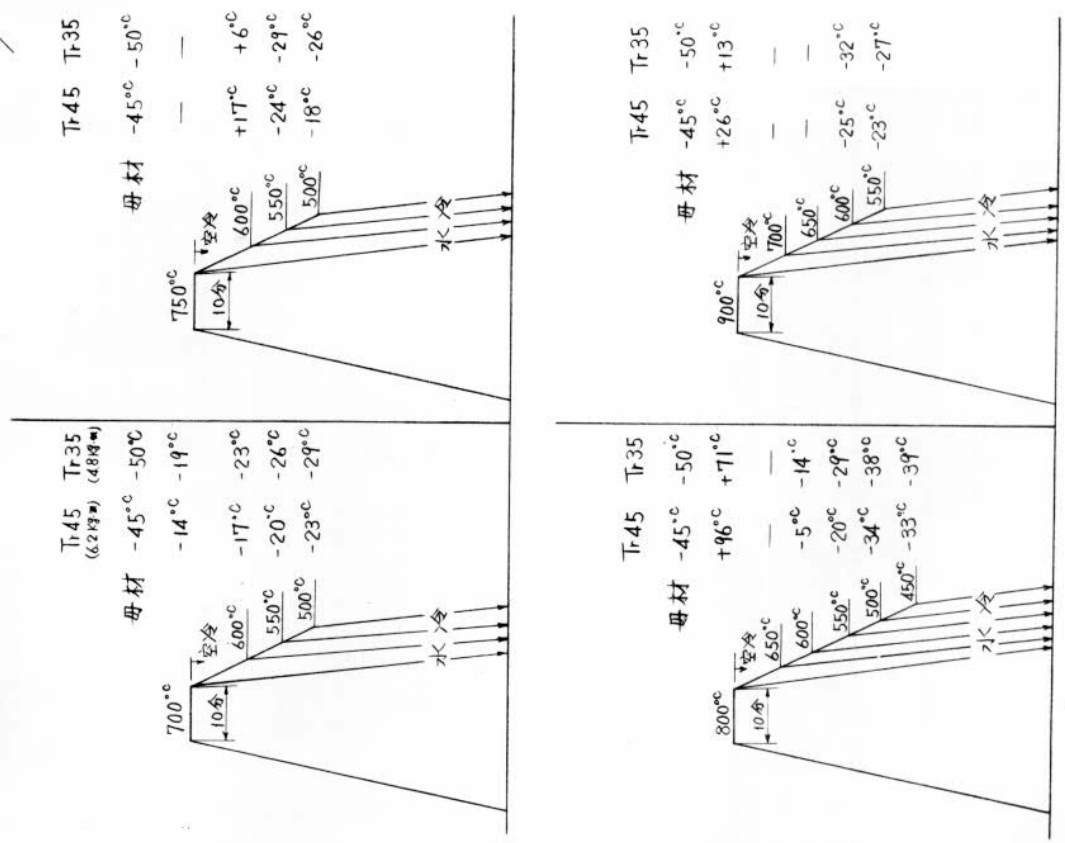


図4.131 各種均熱温度と水冷開始温度における衝撃遷移温度
K5E鋼の規格 Tr45 ≤ -17°C
K5D鋼の規格 Tr35 ≤ -7°C

表4.15各種加熱温度と水冷開始温度による衝撃への影響

規格 K5Eは-17℃で6.2kg・m以上
K5Dは-7℃で4.8kg・m以上

加熱温度 ℃	700	750	800	900
水冷開始温度℃	Tr45	Tr35	Tr45	Tr35
水冷	○	○	○	○
700	—	—	—	—
650	—	—	—	—
600	○	○	○	○
550	○	○	○	○
500	○	○	○	○
450	—	—	—	—

注) Tr45: -17℃の衝撃値が6.2kg・mを満足した○ 満足しない●

Tr35: -7℃の衝撃値が4.8kg・mを満足した○ 満足しない●

表4.16各種加熱温度と冷却方法による衝撃性質への影響

加熱温度 ℃	400	650	700	750	800	900	1000
冷却方法	Tr45	Tr35	Tr45	Tr35	Tr45	Tr35	Tr45
水冷	○	○	○	○	○	○	○
空冷	—	—	—	—	—	—	—

注) Tr45: -17℃の衝撃値が6.2kg・mを満足した○ 満足しない●

Tr35: -7℃の衝撃値が4.8kg・mを満足した○ 満足しない●

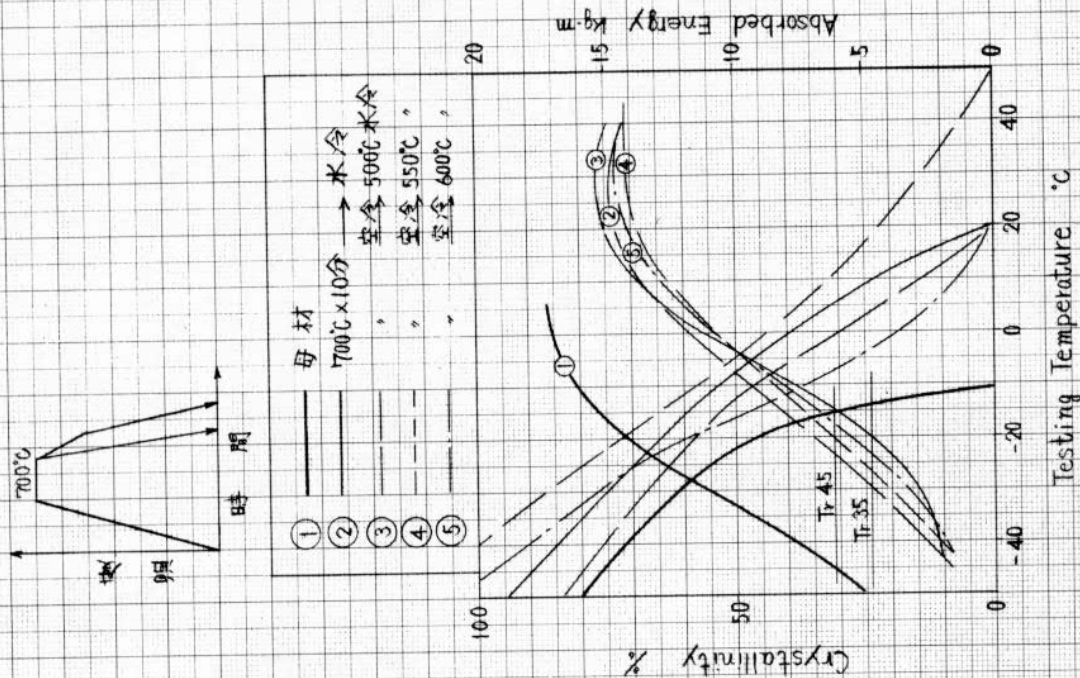
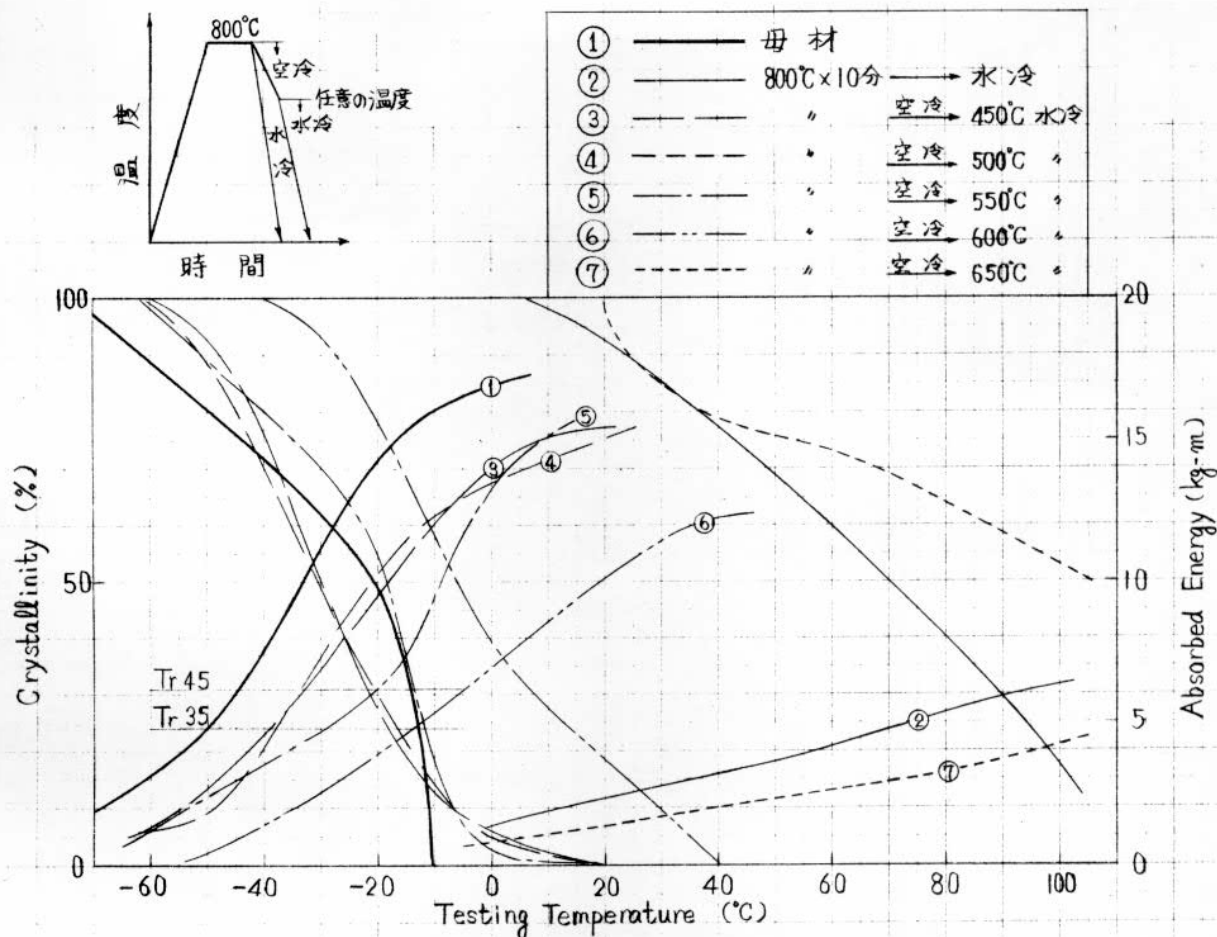
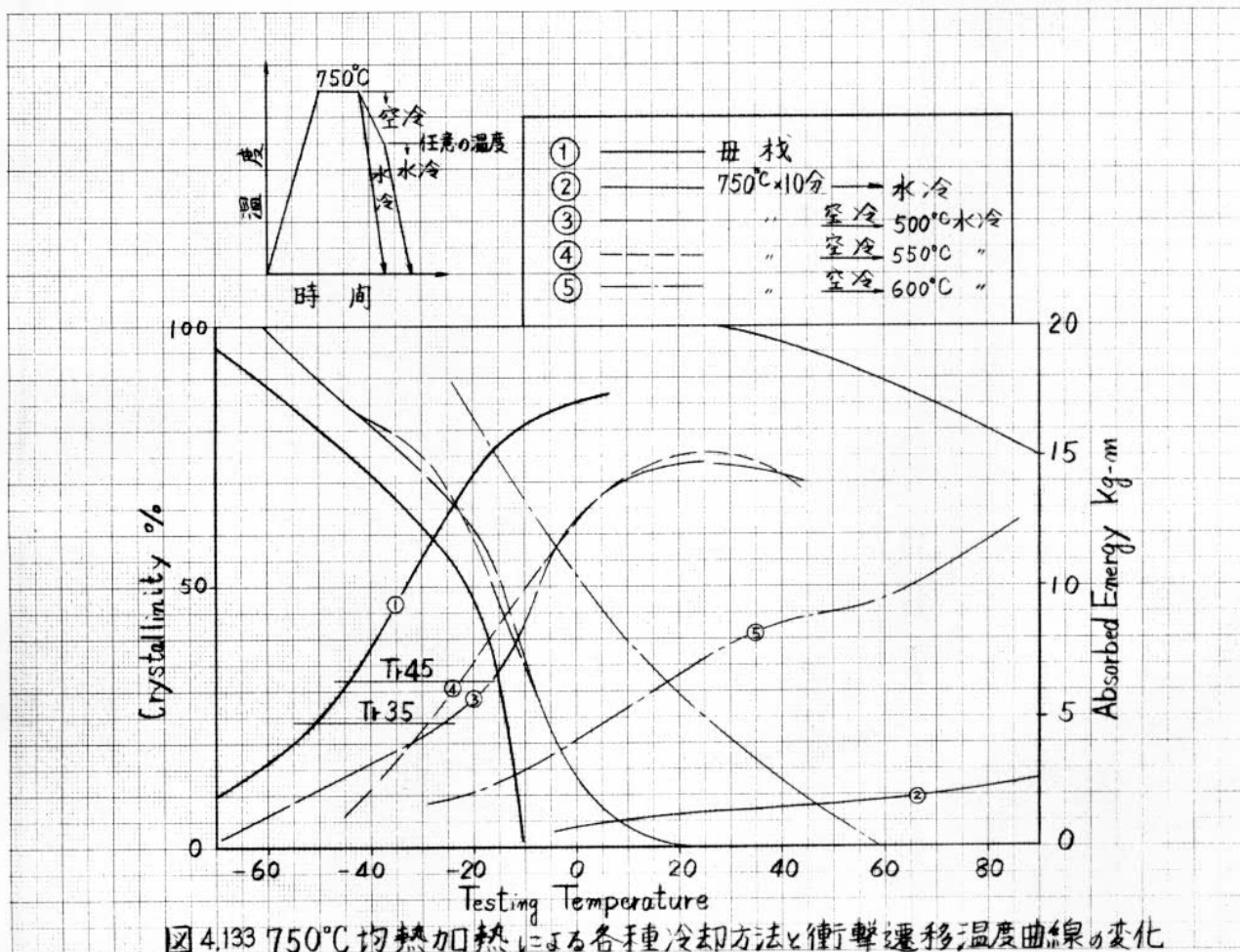


図4.132 700℃均熱加熱による各種冷却方法と衝撃遷移温度曲線の変化



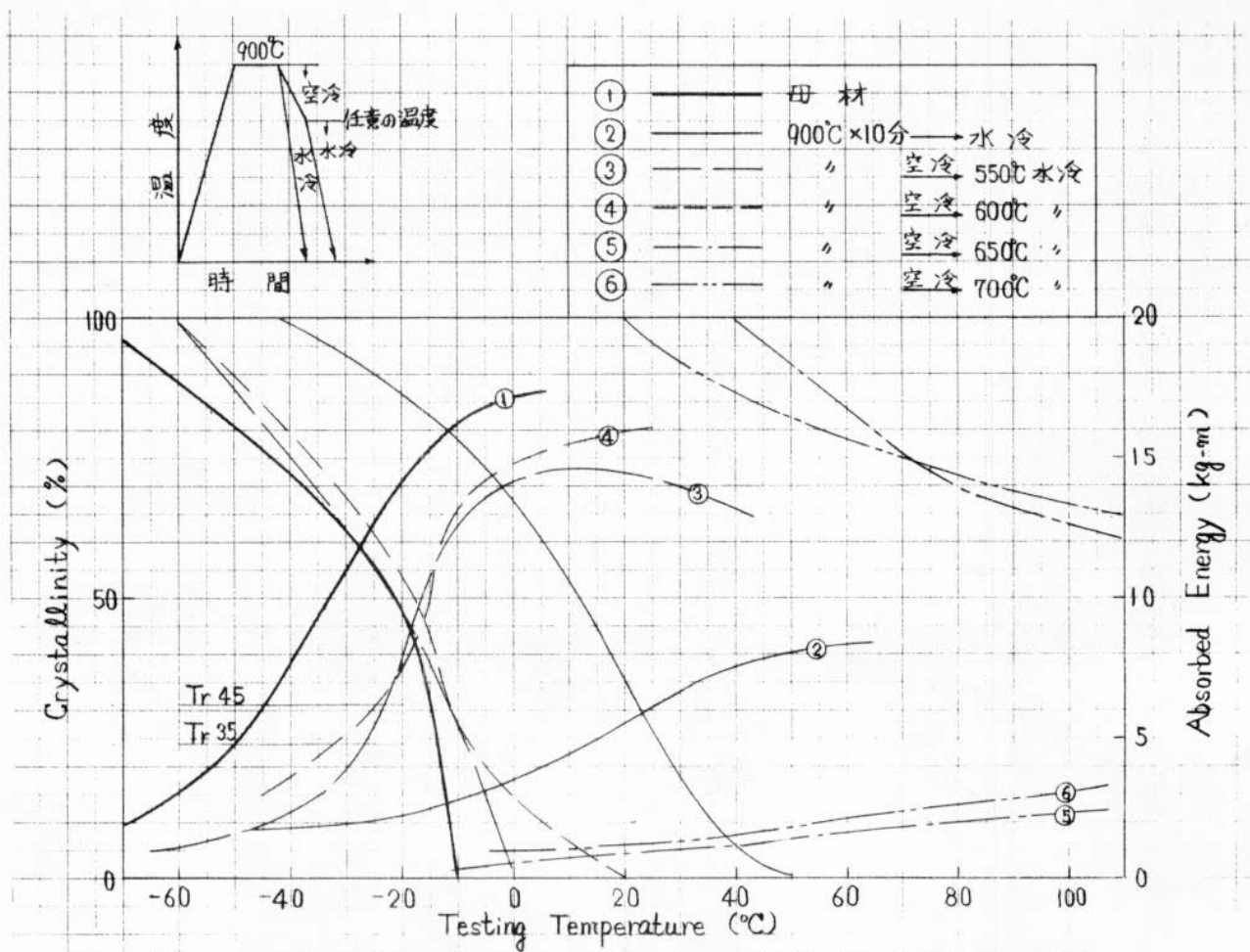


図4.135 900°C 均熱加熱による各種冷却方法と衝撃遷移温度曲線の変化

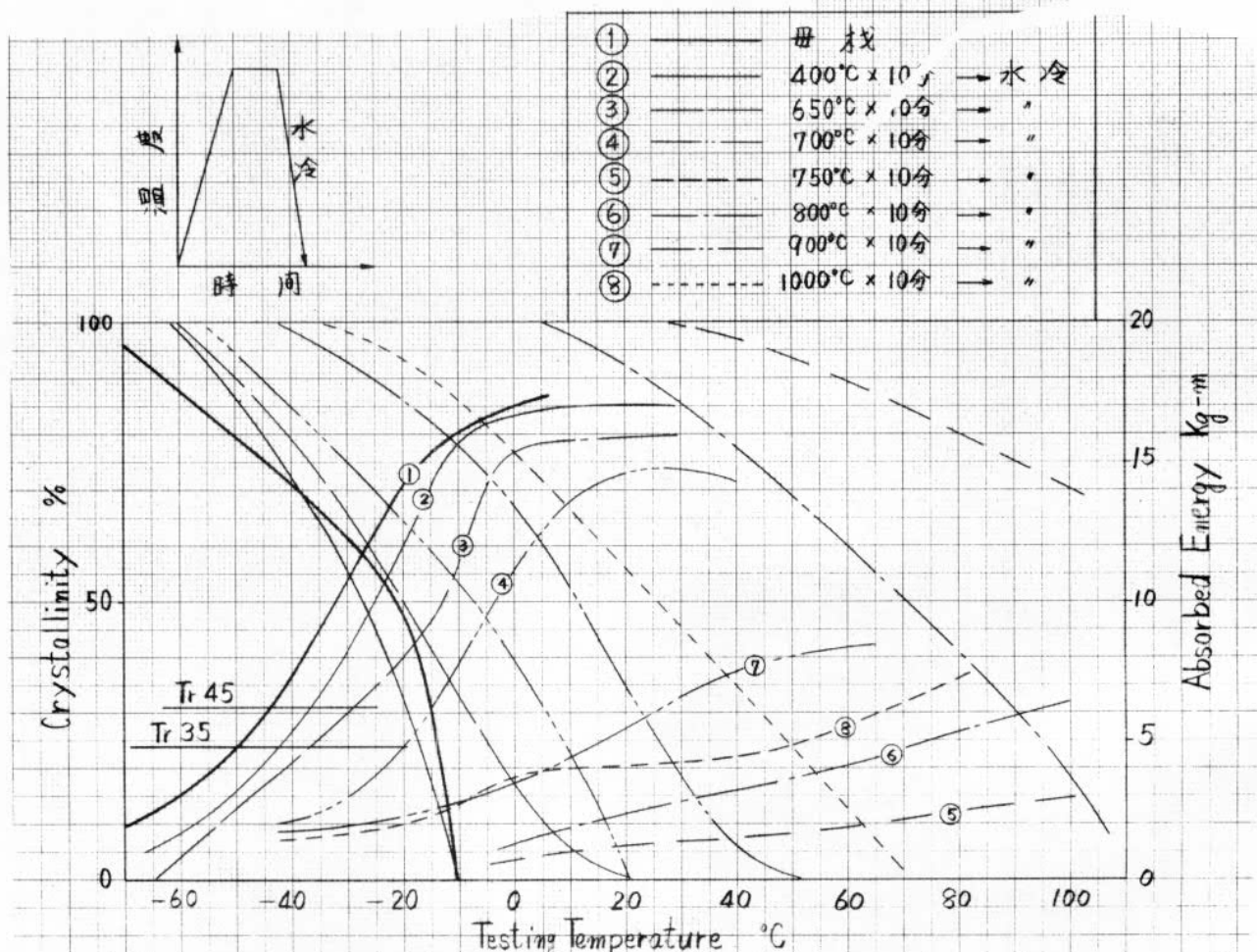


図4.136 各種均熱加熱後水冷による衝撃遷移温度曲線の変化

表 4.17 K5D 鋼, K5E 鋼の含有元素成分

鋼種	熱處理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
K5D鋼	Normalized	30	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	0.06	0.05	0.01	0.027
K5E鋼	Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	0.18	0.10	0.03	0.025

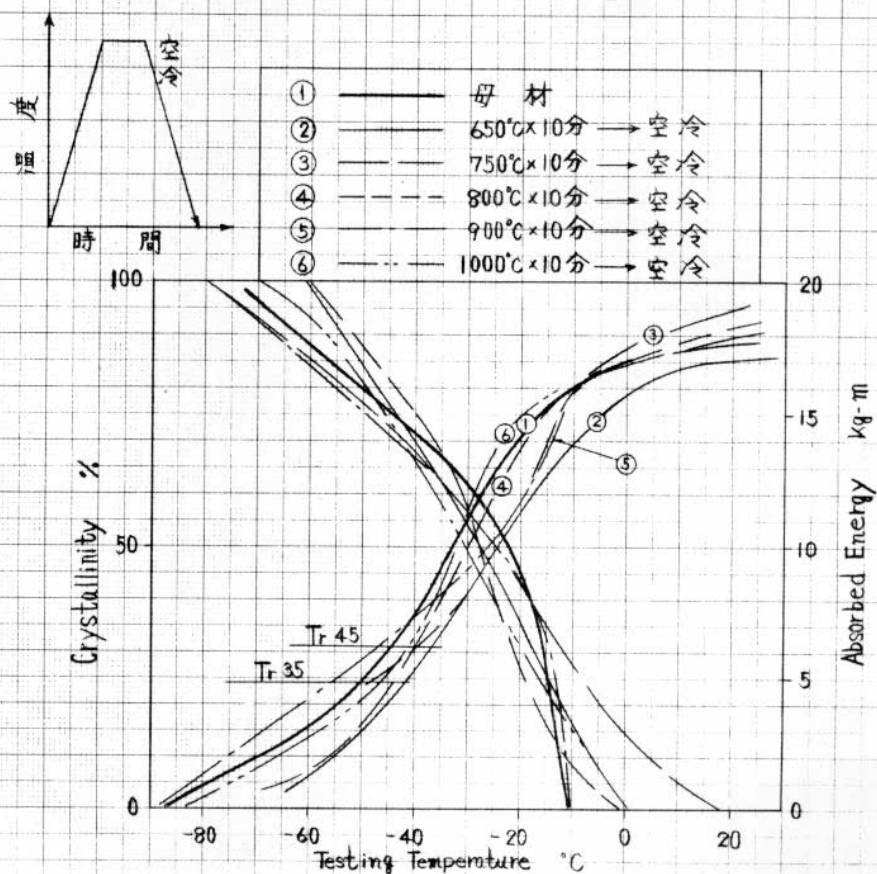


図4.137 各種均熱加熱後空冷による衝撃遷移温度曲線の変化

		6,000													
		2,000				2,000				2,000					
2500		N113	N117	*	N125					T91A	T94A			2-1	2-1
		N114	N118	*	N126	T85	T88			T91B	T94B	C23	C60	2-1	2-1
		N115	N119	N123	N127					T92A		C24	*	2-1	2-1
		N116	N120	N124	N128	T86	T89			T92B		*		2-1	2-1
										T93A		C25	C62	2-1	2-1
		T81	T82	T83	T84	T87	T90			T93B	*	C26		2-1	2-1

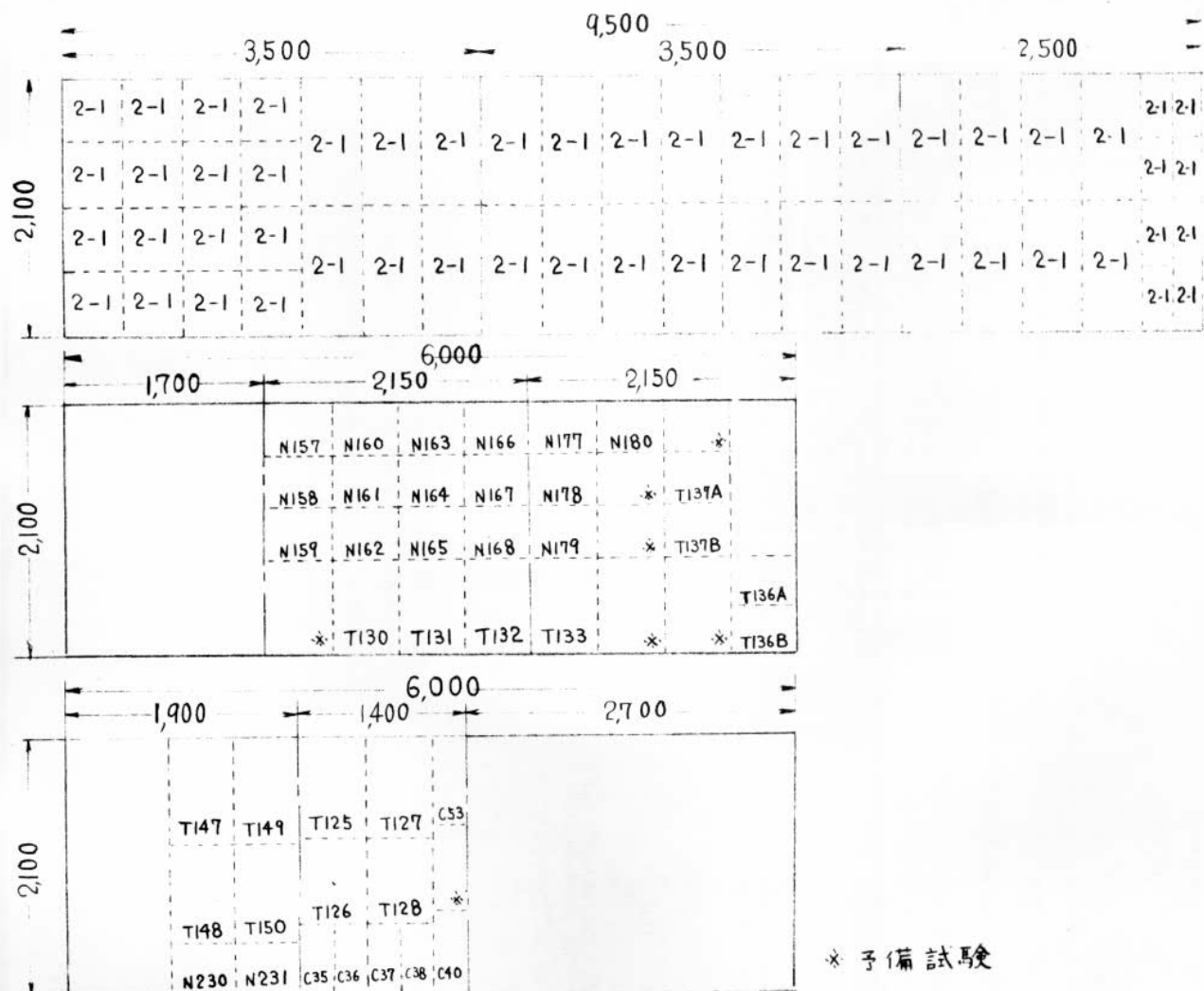
* 予備試験

附図1, 供試鋼板K5A(板厚30mm)板取り要領

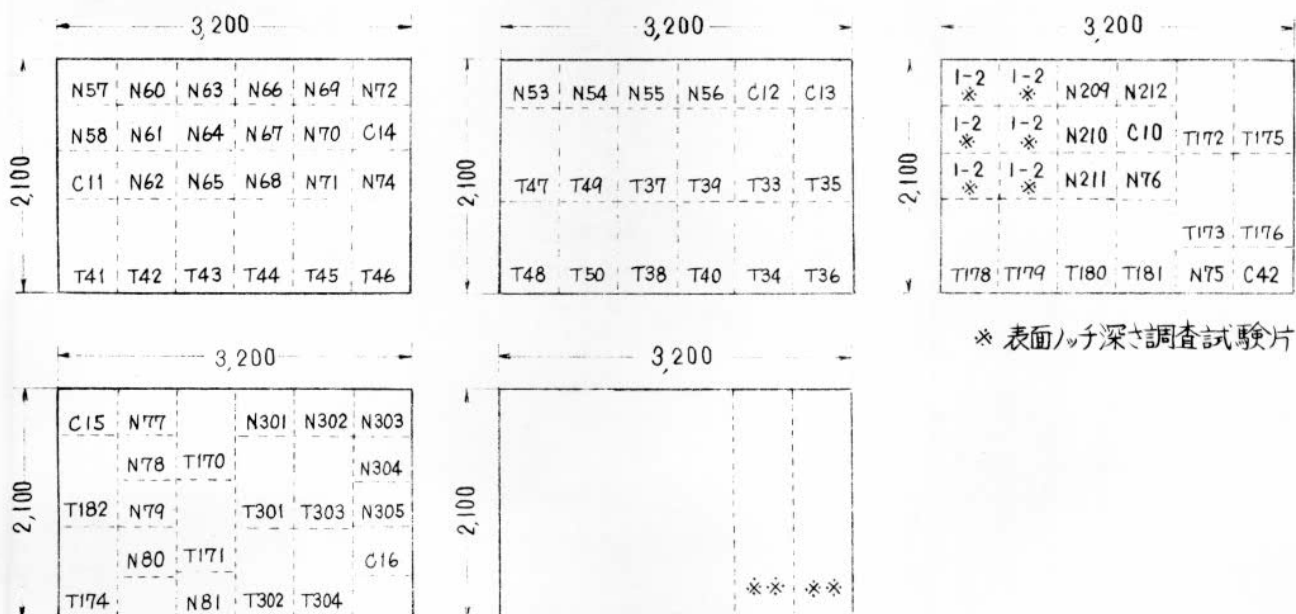
		10,000													
		3,500				3,500				3,000					
2100		2-1	2-1	2-1	2-1									2-1	2-1
		2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1
		2-1	2-1	2-1	2-1									2-1	2-1
		2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1	2-1
		6,000													
		2,150				2,150				1,700					
2100		**	N144	*	N290	N129	N132	N135	N138						
		**	N145			N130	N133	N136	N139	T109	T111	T113			
		N143	N146	*	*	N131	C27	N134	N137	N140			N149		
		T105	T106	T107	T108	T101	T102	T103	T104	T110	T112	N150			
		6,000													
		2,700				1,400				1,900					
2100												N151			
	R3					C51	T97	T99	C70			N152			
	N291											N153			
	N292					C28	T98	T100	C71			R1	N154		
		6,000													
		2,700				1,400				1,900					
2100															

* 予備試験
** ウェブ調査

附図2, 供試鋼板K5D(板厚30mm)の板取り要領



附図3, 供試鋼板K5D鋼(板厚12.7mm)の板取り要領



附図4, 供試鋼板KEN (板厚30mm)の板取り要領

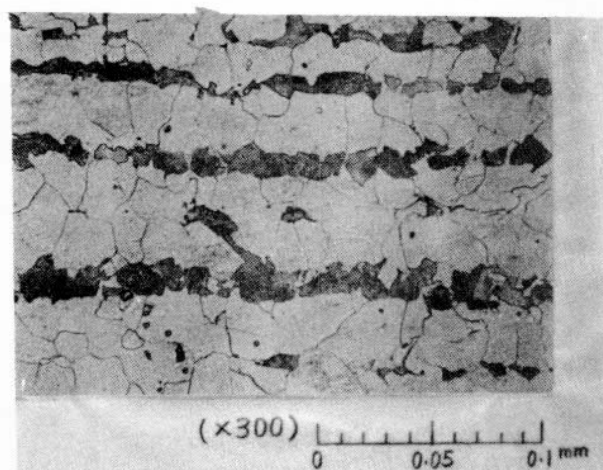
3390										3390									
10,170					3390					10,170					3390				
**	N16	N17	N18	N19	*	N8	C2	C1	N1	N2	N3	C20	T6	T5	T13	T12	T11	T10	
T14	T15	T16	T17	***	T9	T7	T8	T1	T2	T3	T4	C19	N7	N4	N11	C5	N126	N23	
T69	T70	T71	T72	T73	T74	T75	T76	T77	T78	T79	T80	C22	N6	N13	N10	C4	*	N22	
													N5	N12	N9	C3	N24	N21	

3390										3390									
10,170					3390					10,170					3390				
N111						N4	N25	N103	N197	N199	N201	C44	T186	T185	R2	N108	N105	N100	
*						N15	N101	N104	N198	N200	N202	C48				N107			
N113						N20	N102	C41	N97	N98	N99	***	N32	C6	N29	N106	T156	T154	
***						T18	*	*	*	*	*	C46	N31	N28	N110				
												C80	N30	N27	N109	T157	T155	T153	

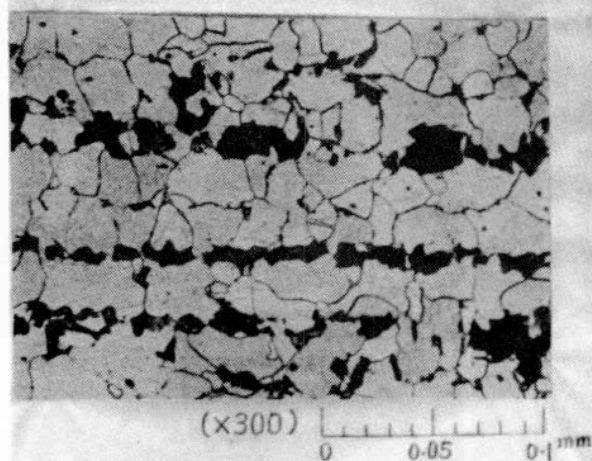
3390									
T305	T306	T69	T67	T66	T65				
			N312	N315	N316				
T307	T308	T309	N311	N314	***				
N307	N308	N309	N310	C7	***				

※ 予備試験
 ※ ※ ノルマ調査
 ※ ※ ※ 十字型拘束引張脆性亀裂発生試験

附図 5, 供試鋼板 K5E (板厚 30mm) の板取り要領



KEN鋼 素材 (C-10)



KEN鋼 ノルマ材 (C-11)

写真31 素材およびノルマ材の顕微鏡組織
(板中央部)

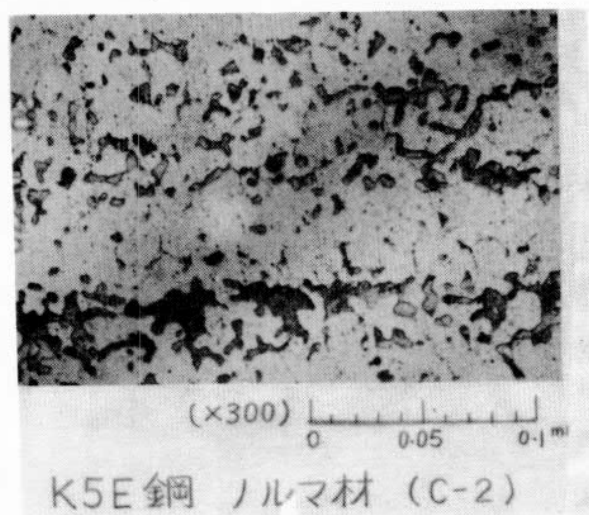
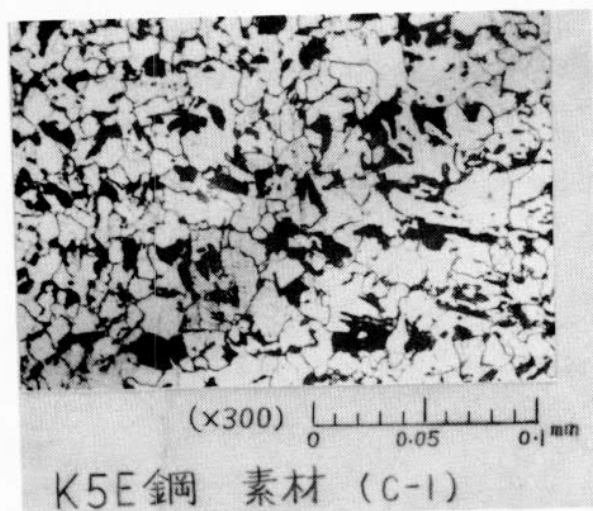


写真3.2 素材およびノルマ材の顕微鏡組織
(板中央部)

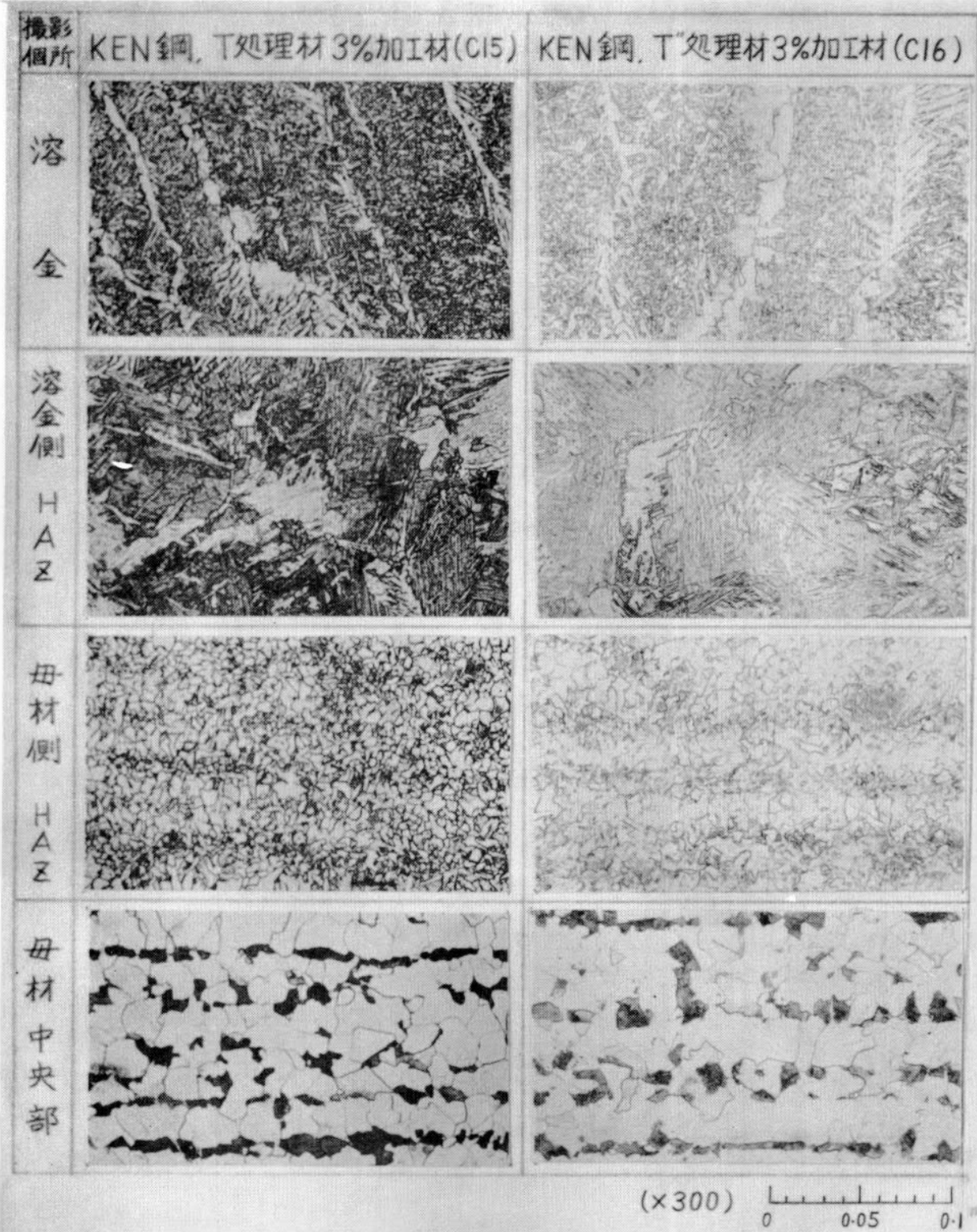


写真33 溶接部および母材の顕微鏡組織

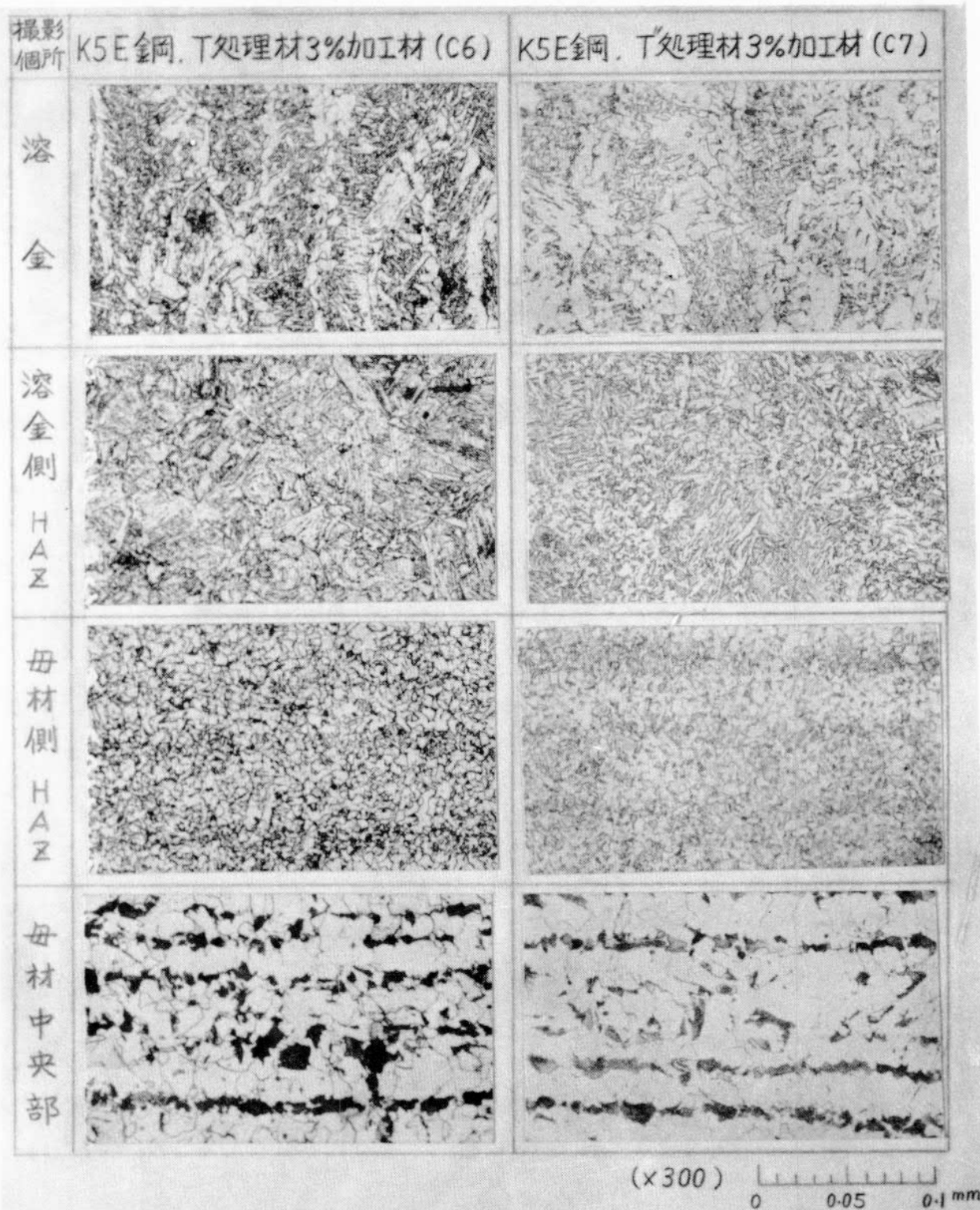


写真34 溶接部および母材の顕微鏡組織

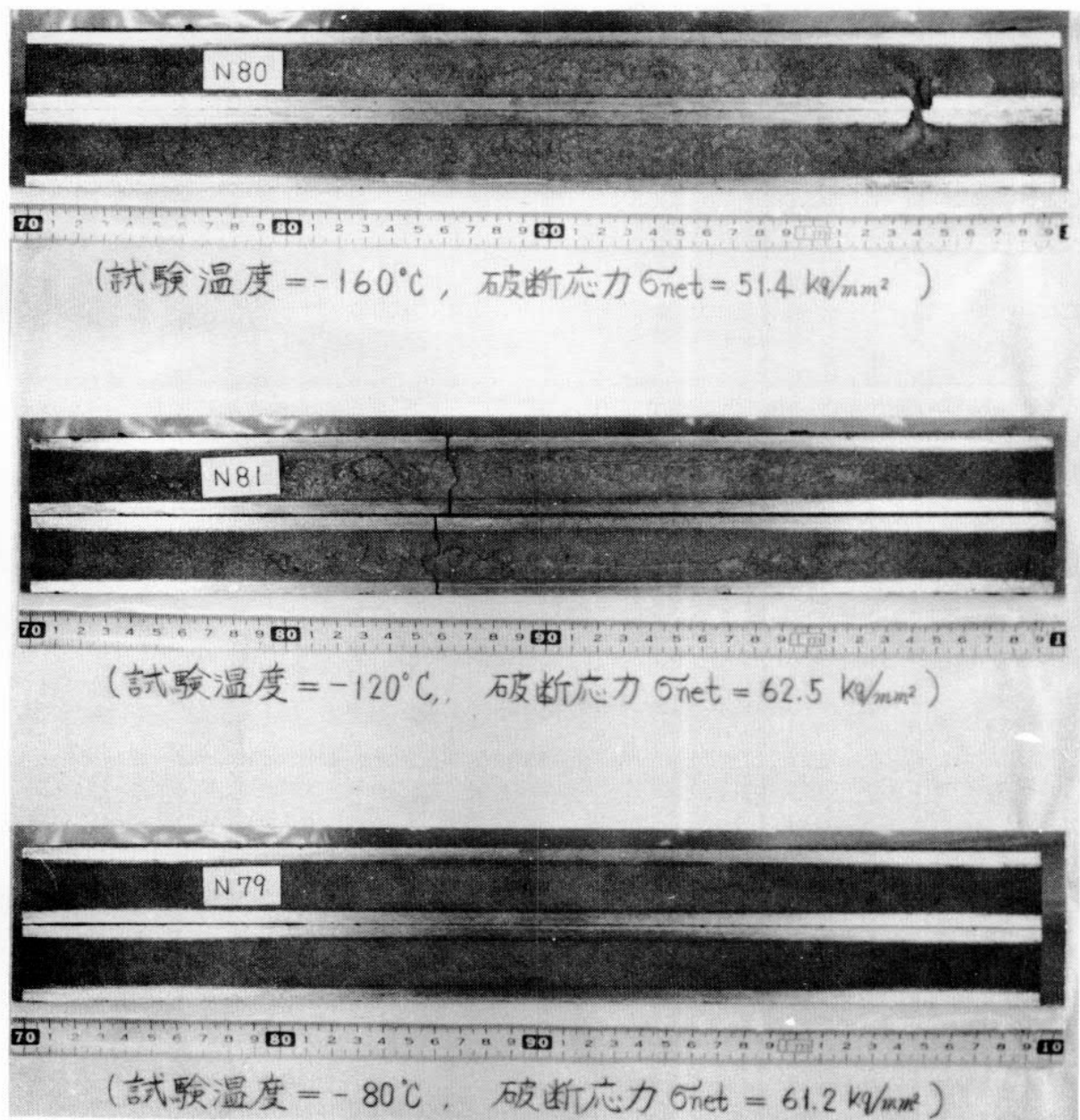


写真3.5 表面ノチ型亀裂発生試験片破面状況
(KEN鋼, T処理材0%加工材, 板厚30mm)

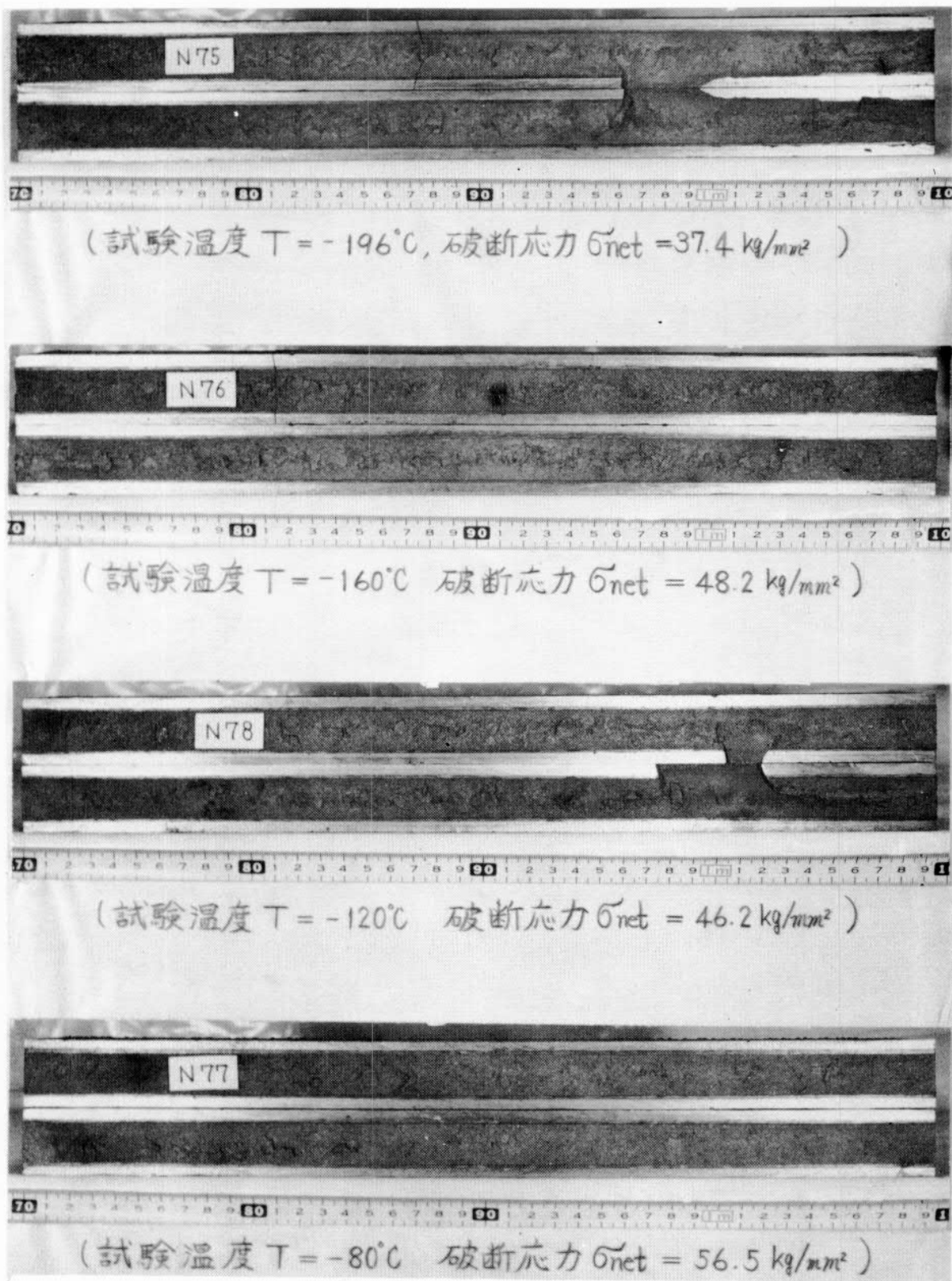
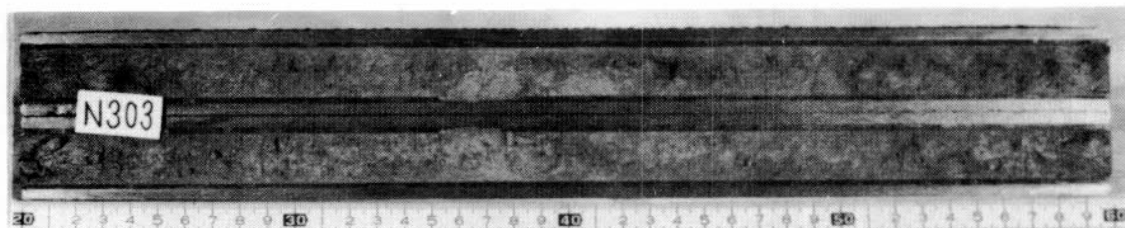
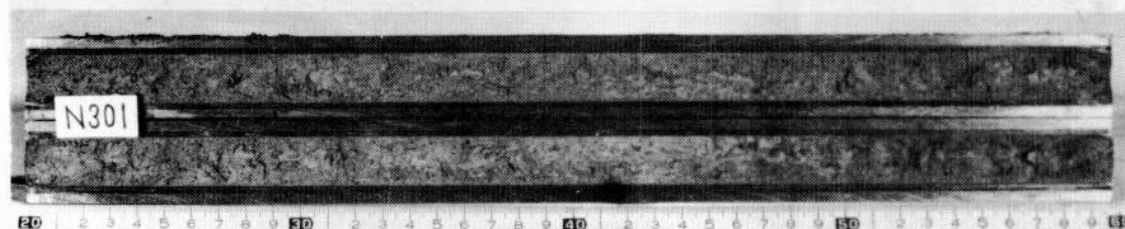


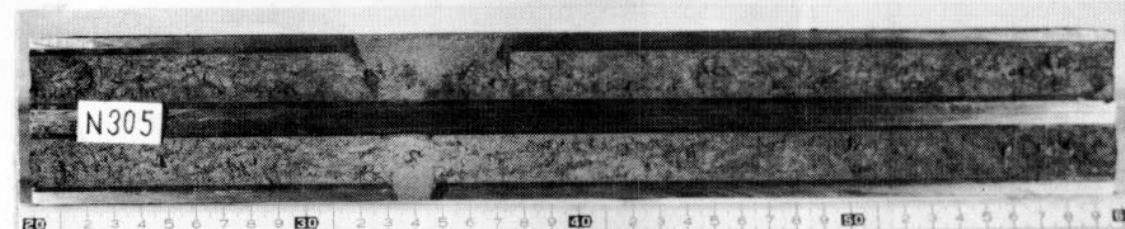
写真 3.6 表面ノッチ型亀裂発生試験片破面状況
(KEN鋼, T処理材 3%加工材, 板厚 30 mm)



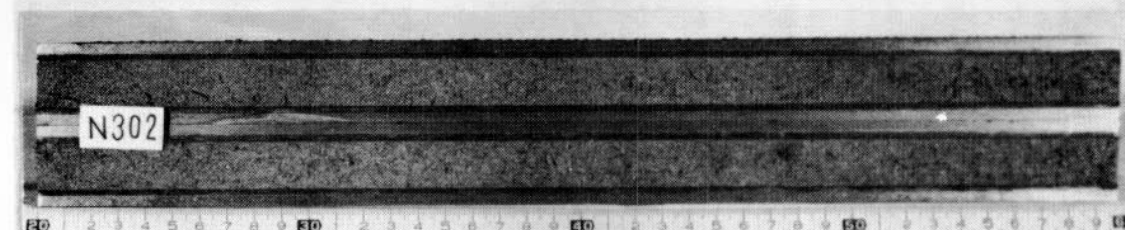
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$ 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 38.2 \text{ kg/mm}^2$)



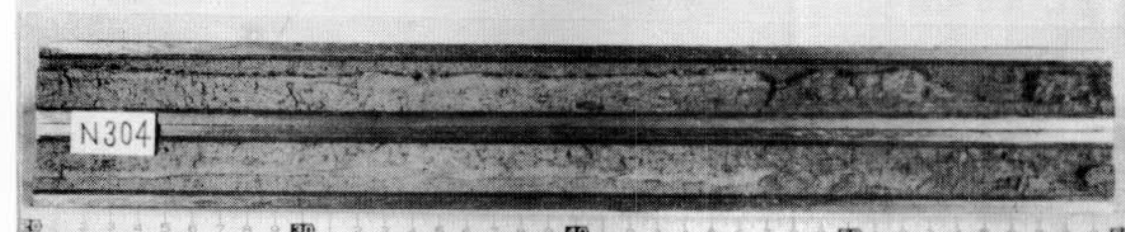
(試験温度 $T = -180^{\circ}\text{C}$ 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 53.1 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$ 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 55.6 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$ 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 75.0 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$ 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 73.3 \text{ kg/mm}^2$)

写真 3.7 表面ハチ型亀裂発生試験片破面状況
(KEN鋼, T処理材 3%加工材, 板厚 30mm)

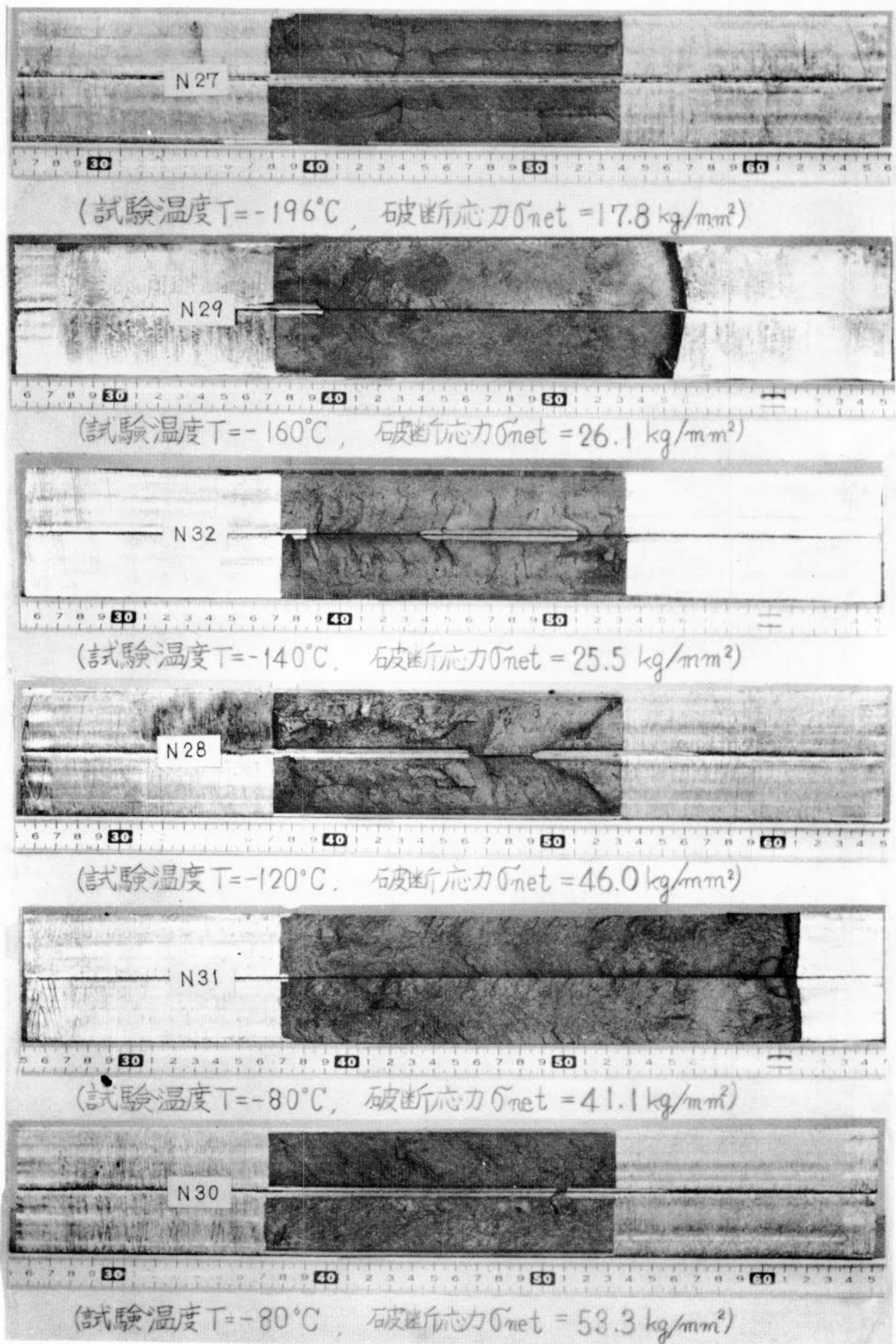


写真3.8 テーパーノッチ試験片破面状況
(K5E鋼 下処理材3%加工材, 板厚30mm)

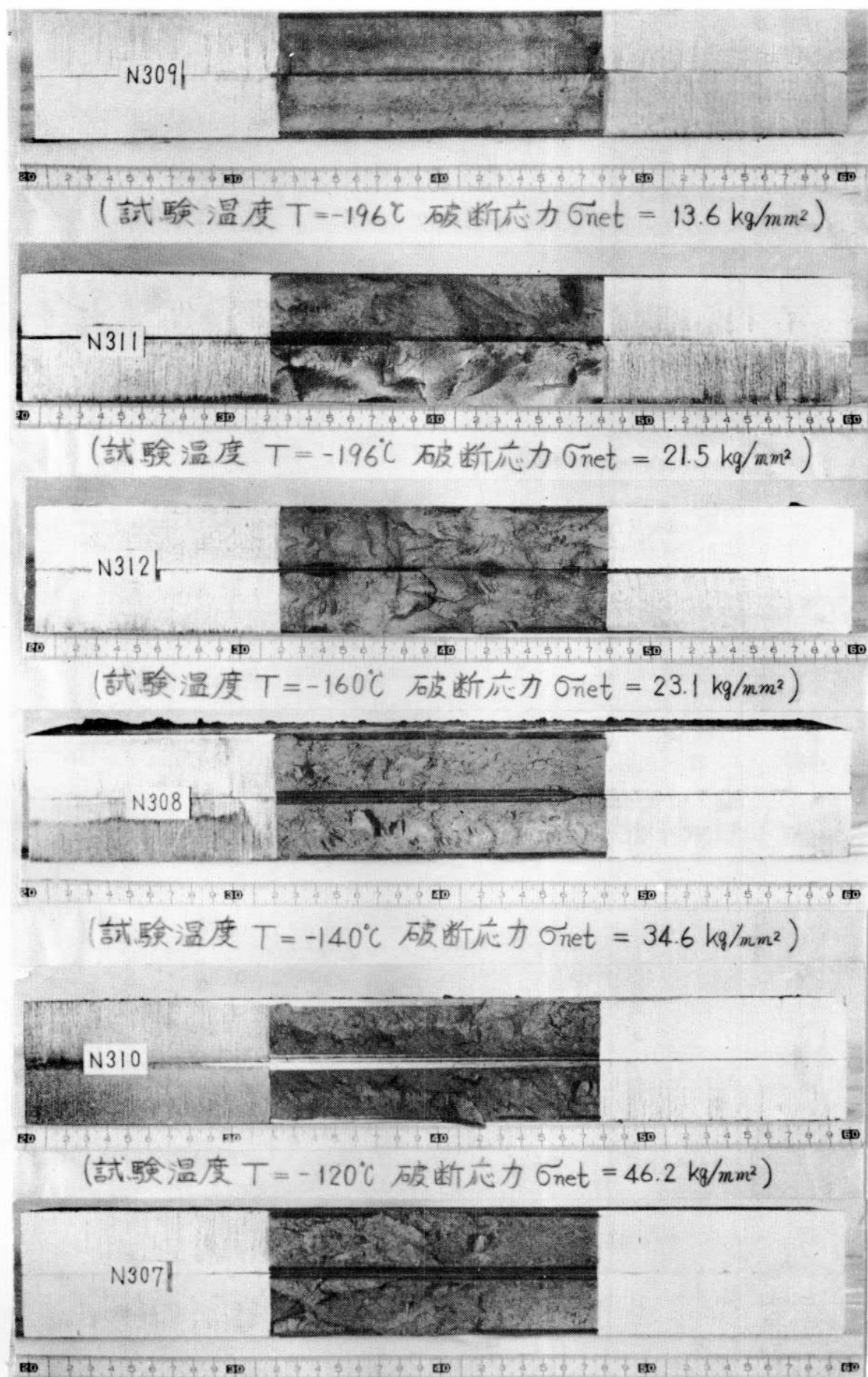
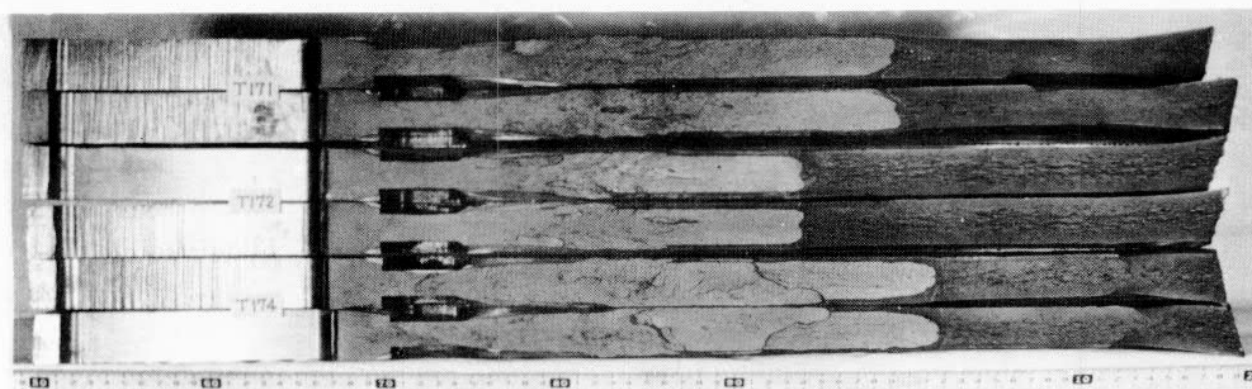
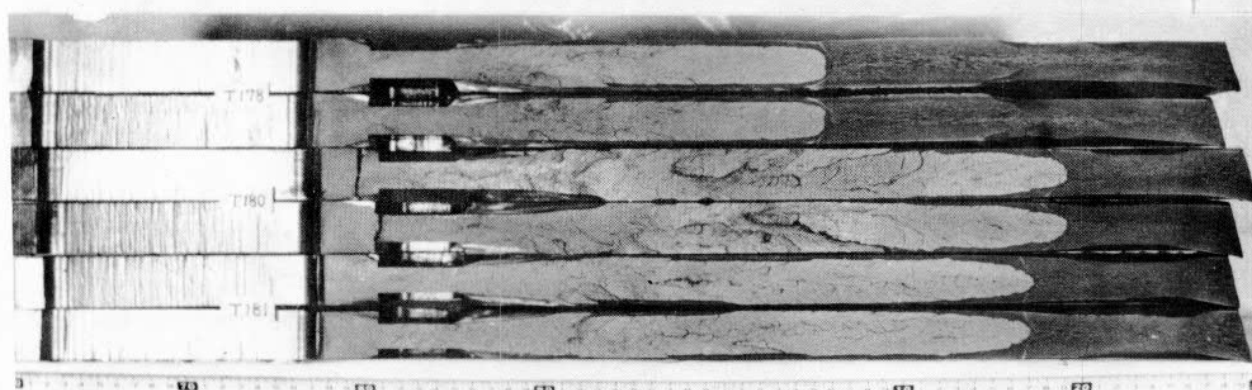


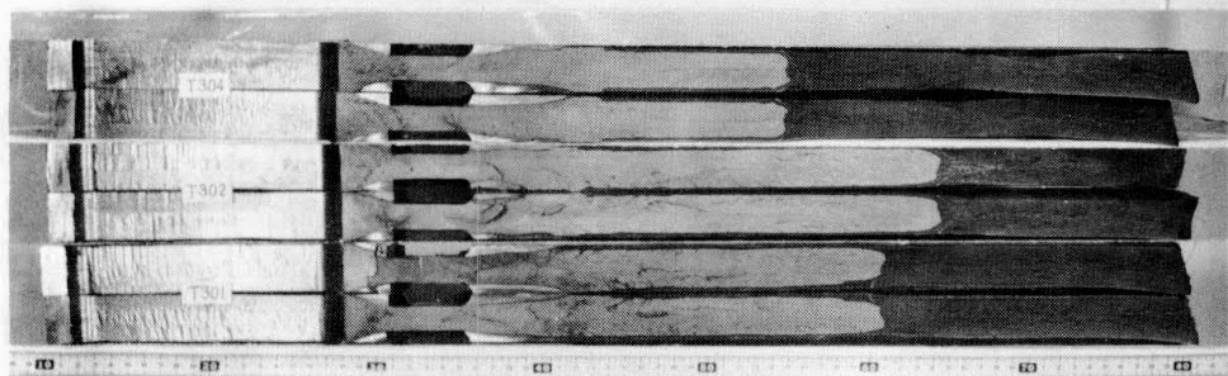
写真 39 ティーブロッチ試験片破面状況
(K5E鋼, T処理材 3%加工材, 板厚 30mm)



(T処理材 0% 加工材)



(T処理材 3% 加工材)



(T処理材 3% 加工材)

写真 3.10 二重引張試験片破面状況
(KEN鋼, 板厚 30mm)



写真3.11 二重引張試験片破面状況
(K5E鋼, 板厚 30mm)

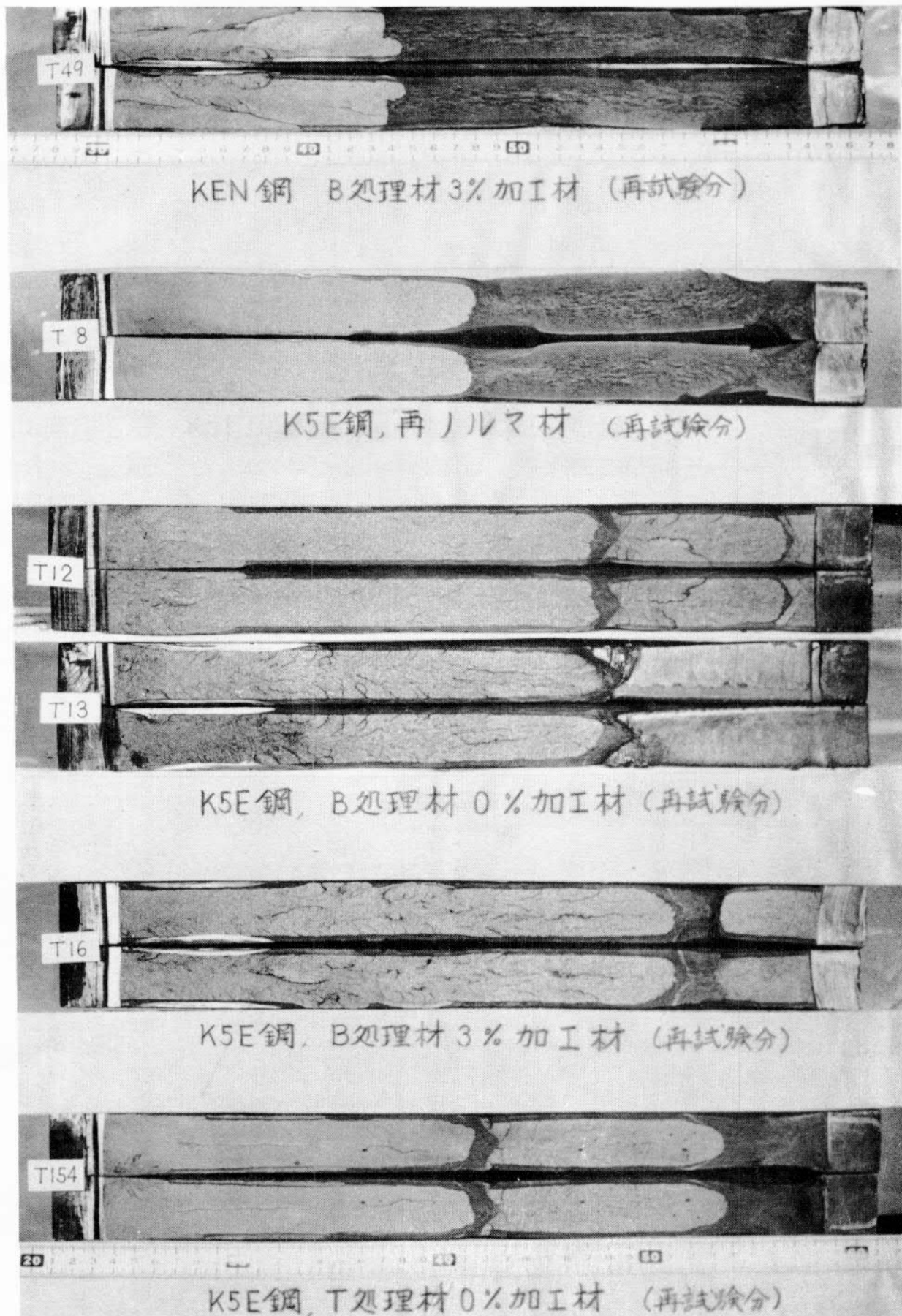


写真3.12. ESS0試験片破面状況
(KEN鋼, K5E鋼, 板厚30mm)

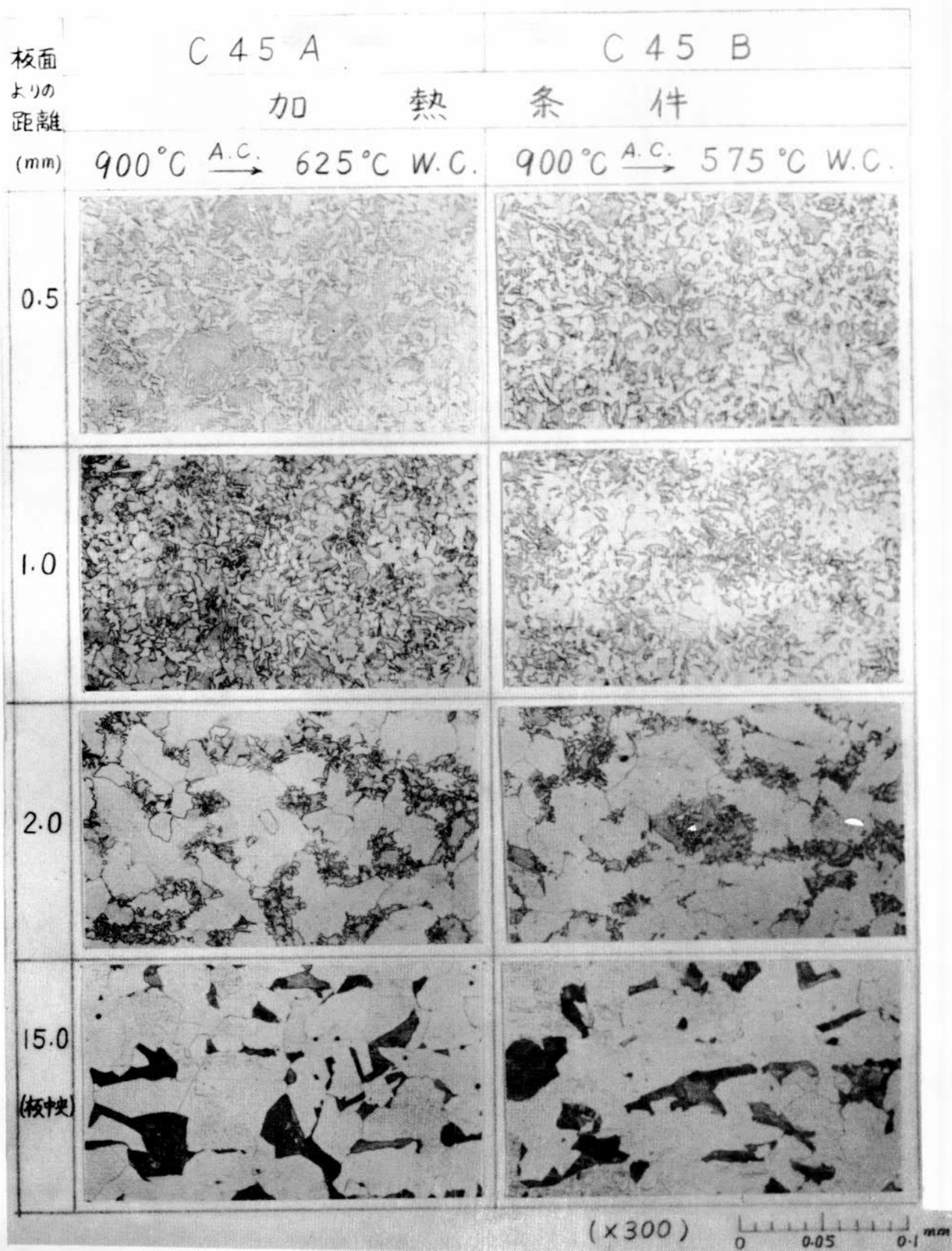


写真4.1 K5A 鋼 (板厚 30mm) の顕微鏡組織

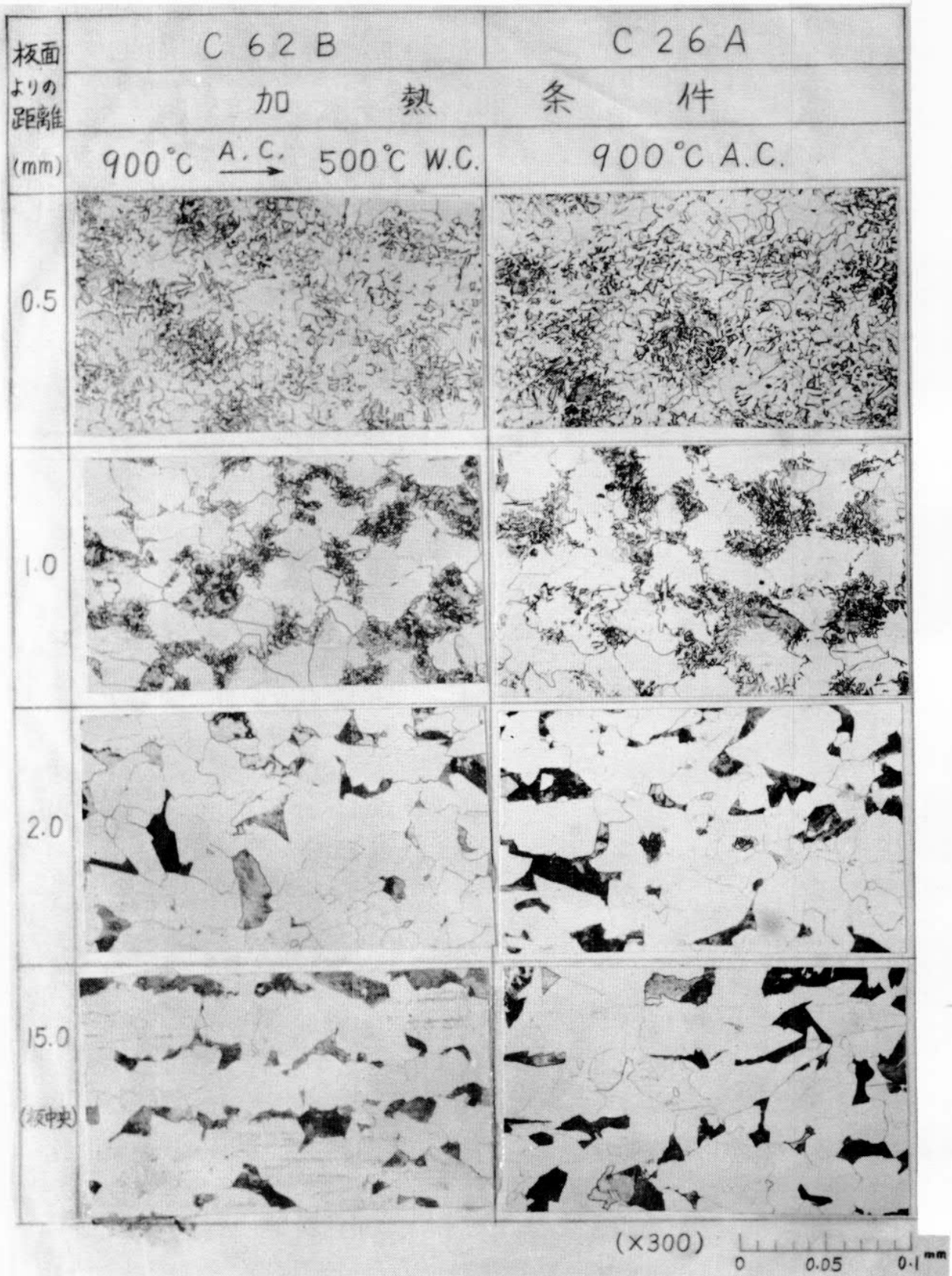


写真42 K5A鋼(板厚30 mm)の顕微鏡組織

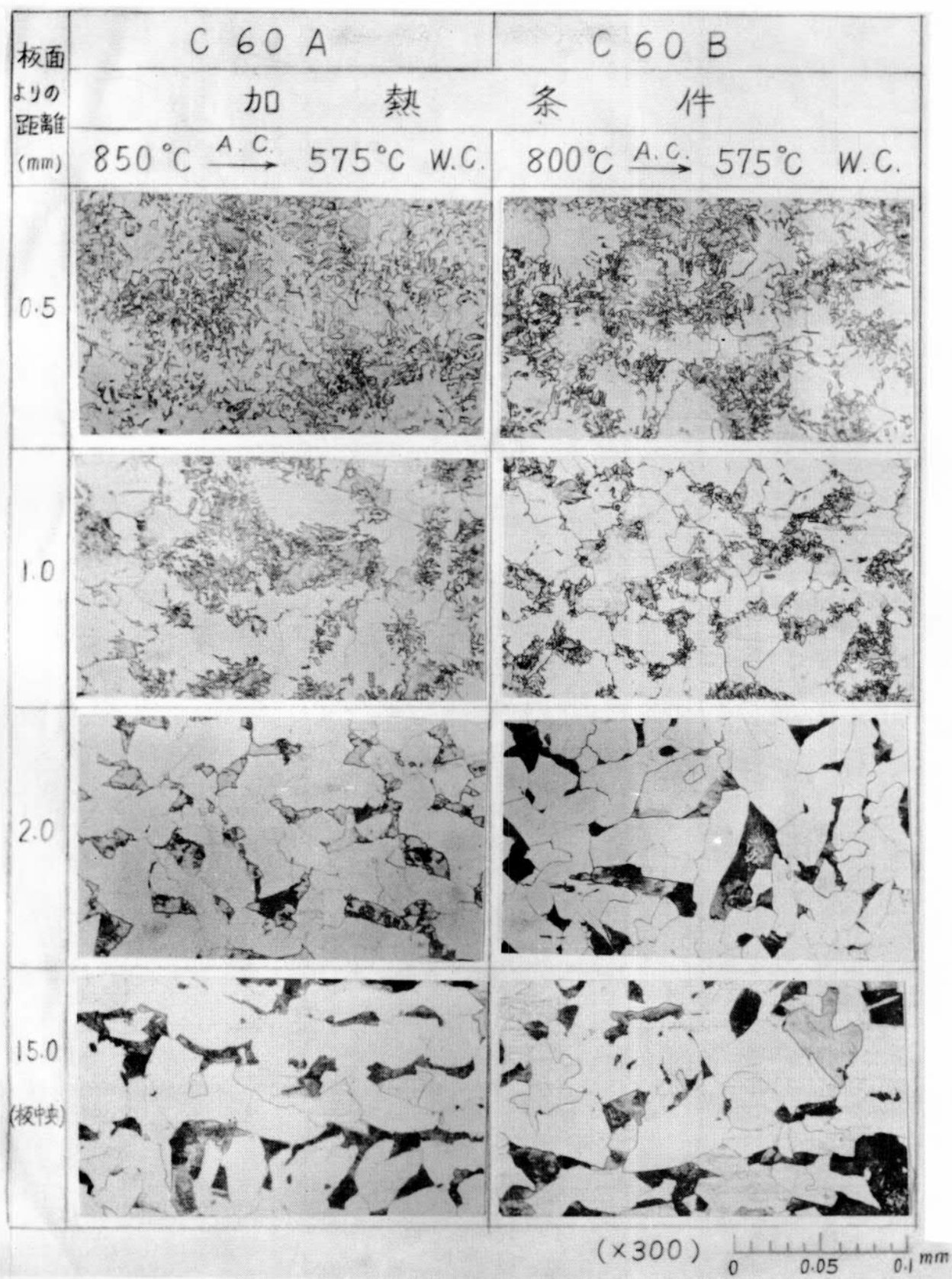


写真4.3 K5A鋼(板厚30^{mm})の顕微鏡組織

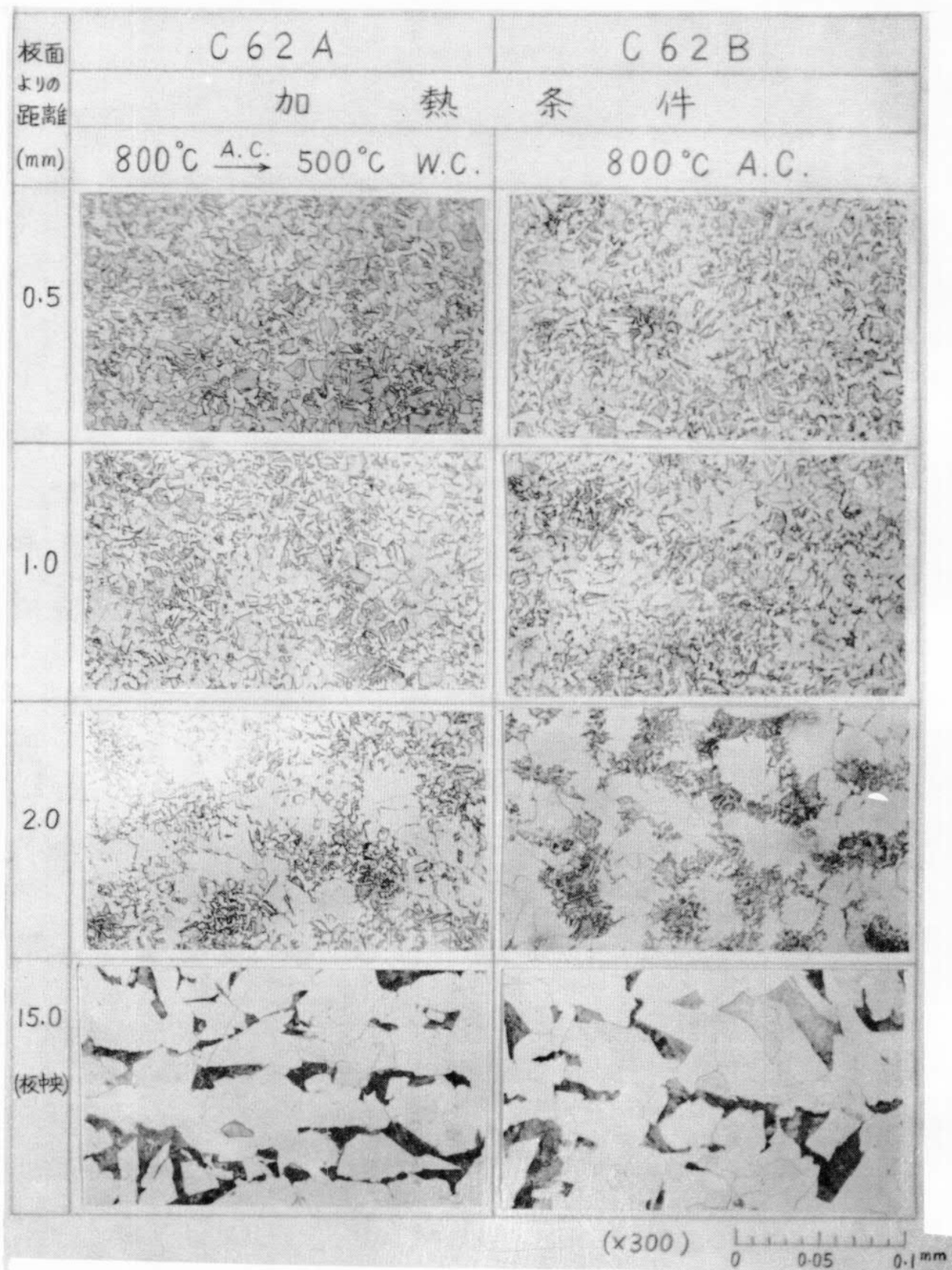


写真44 K5A鋼(板厚30mm)の顕微鏡組織

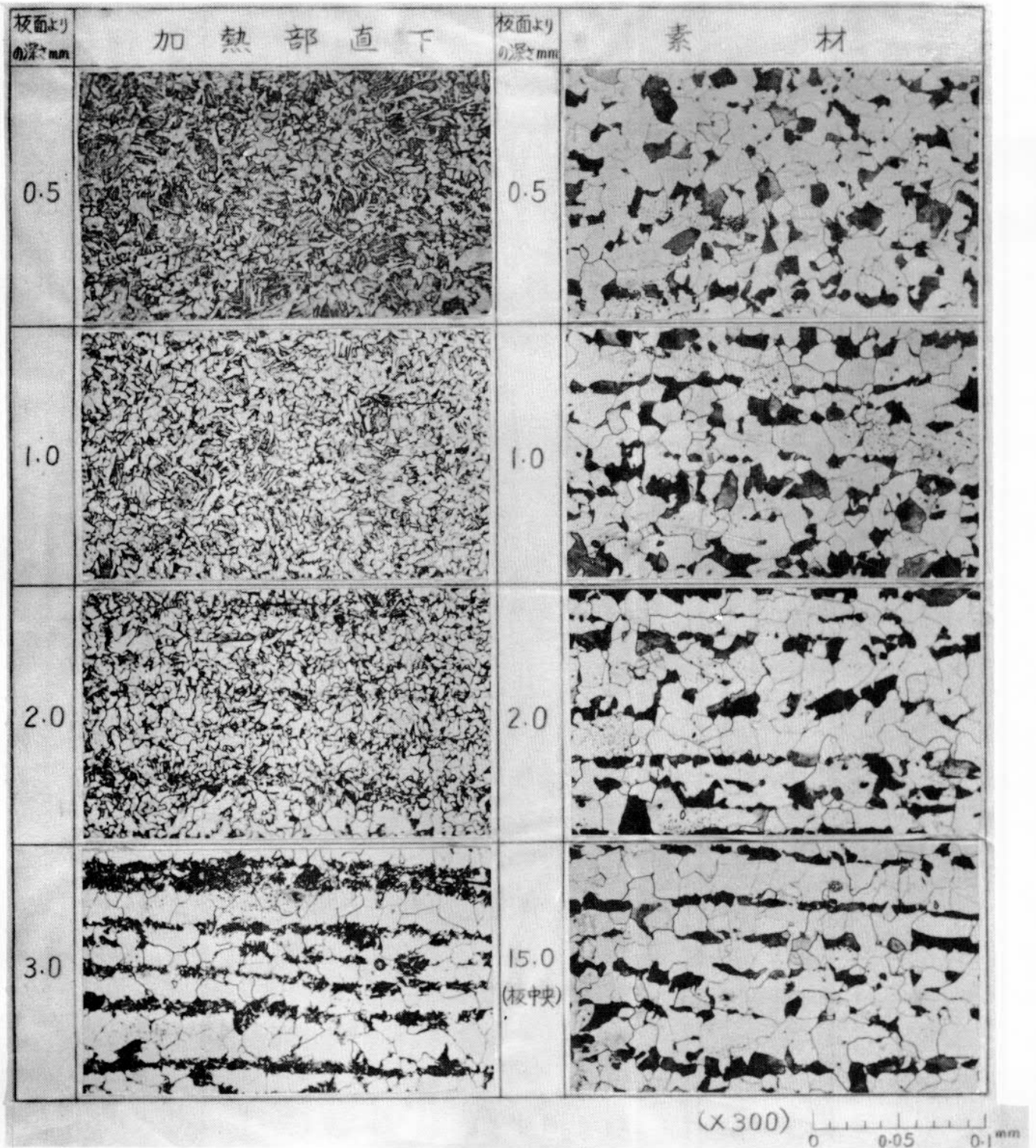


写真4.5 1000℃ A.C.材のマクロおよび顕微鏡組織
K5D鋼, 板厚 30 mm (符号: C51A)

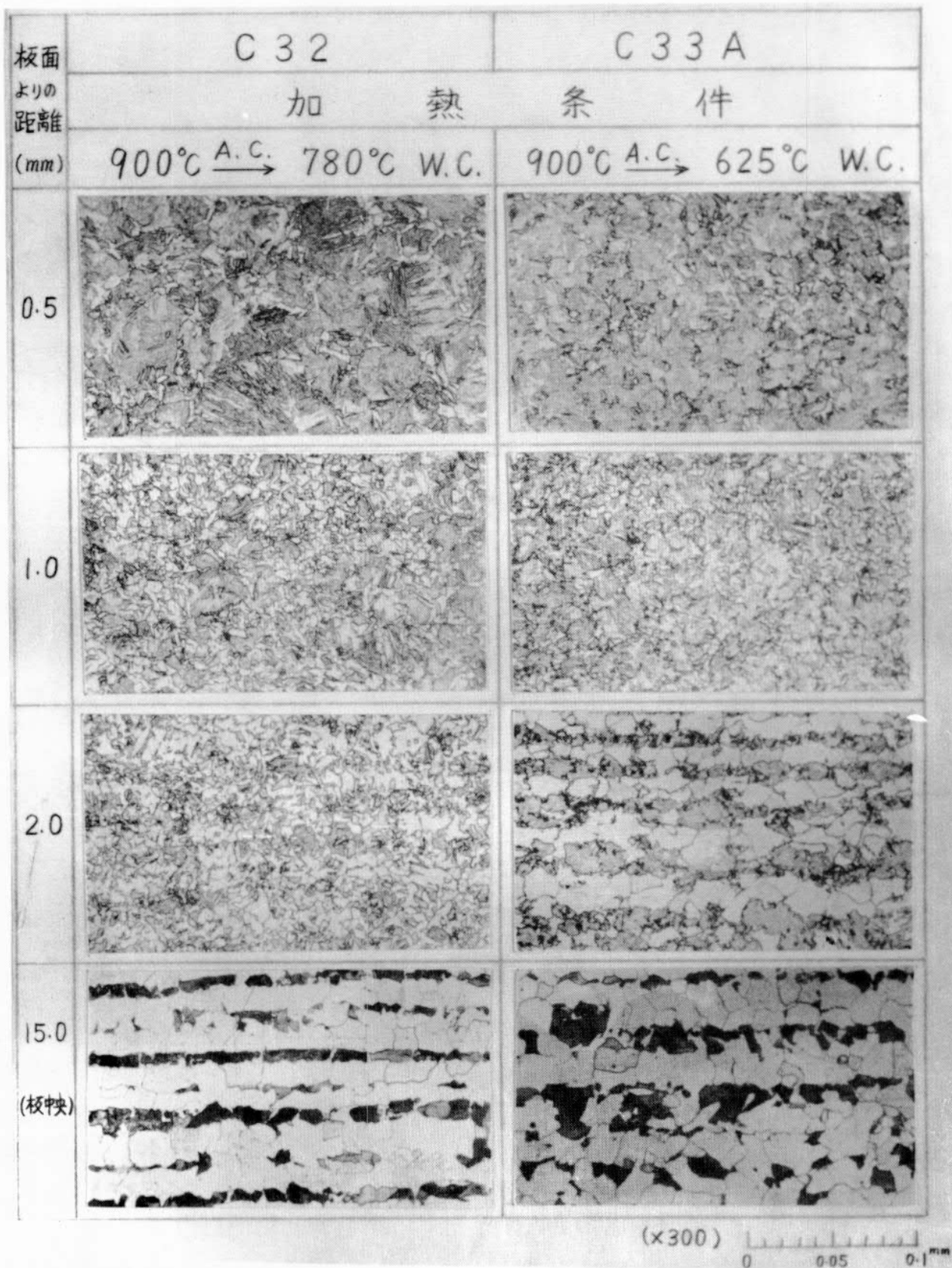


写真46 K5D鋼 (板厚30mm) の顕微鏡組織

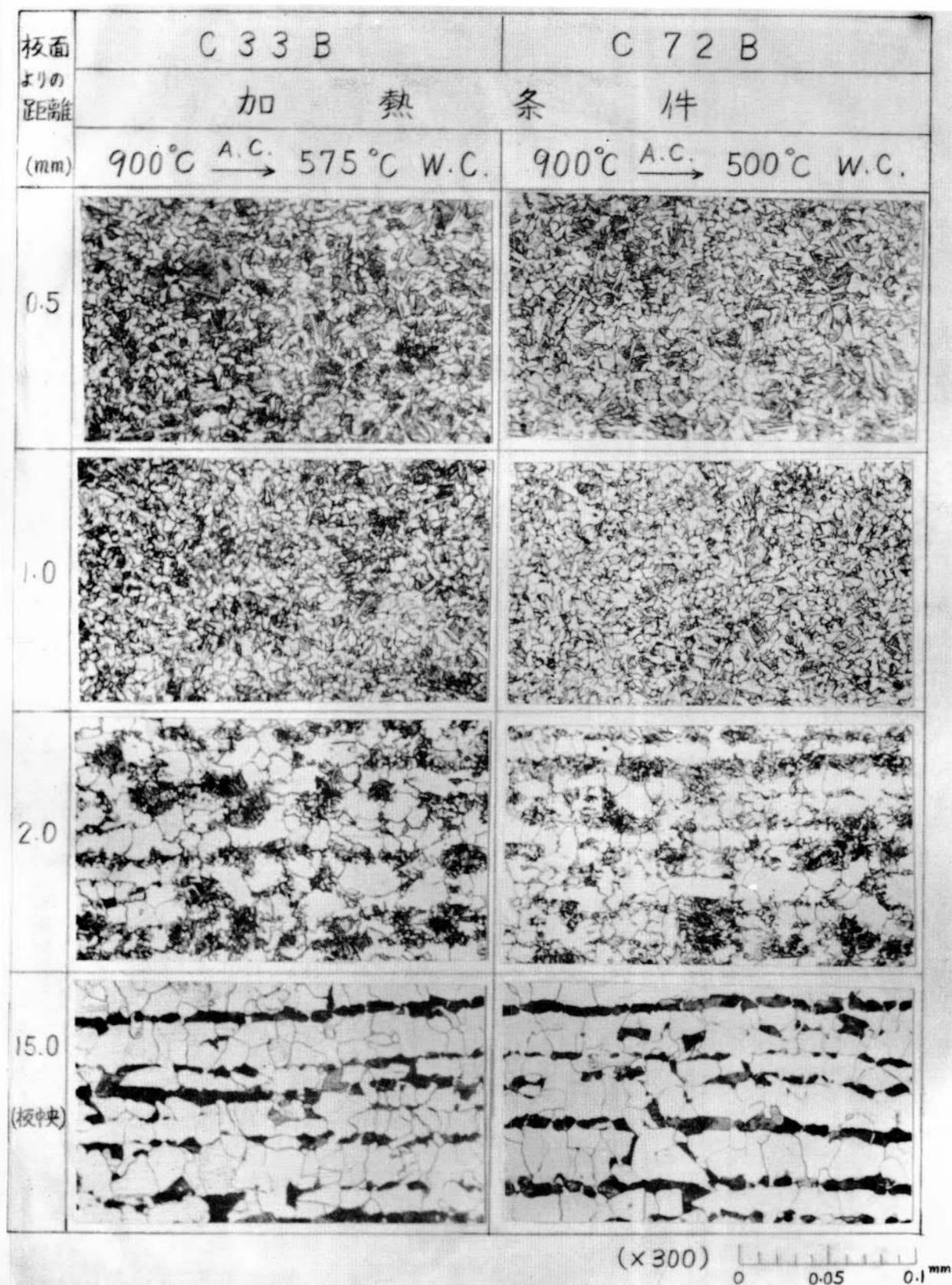


写真4.7 K5D鋼(板厚30^{mm})の顕微鏡組織

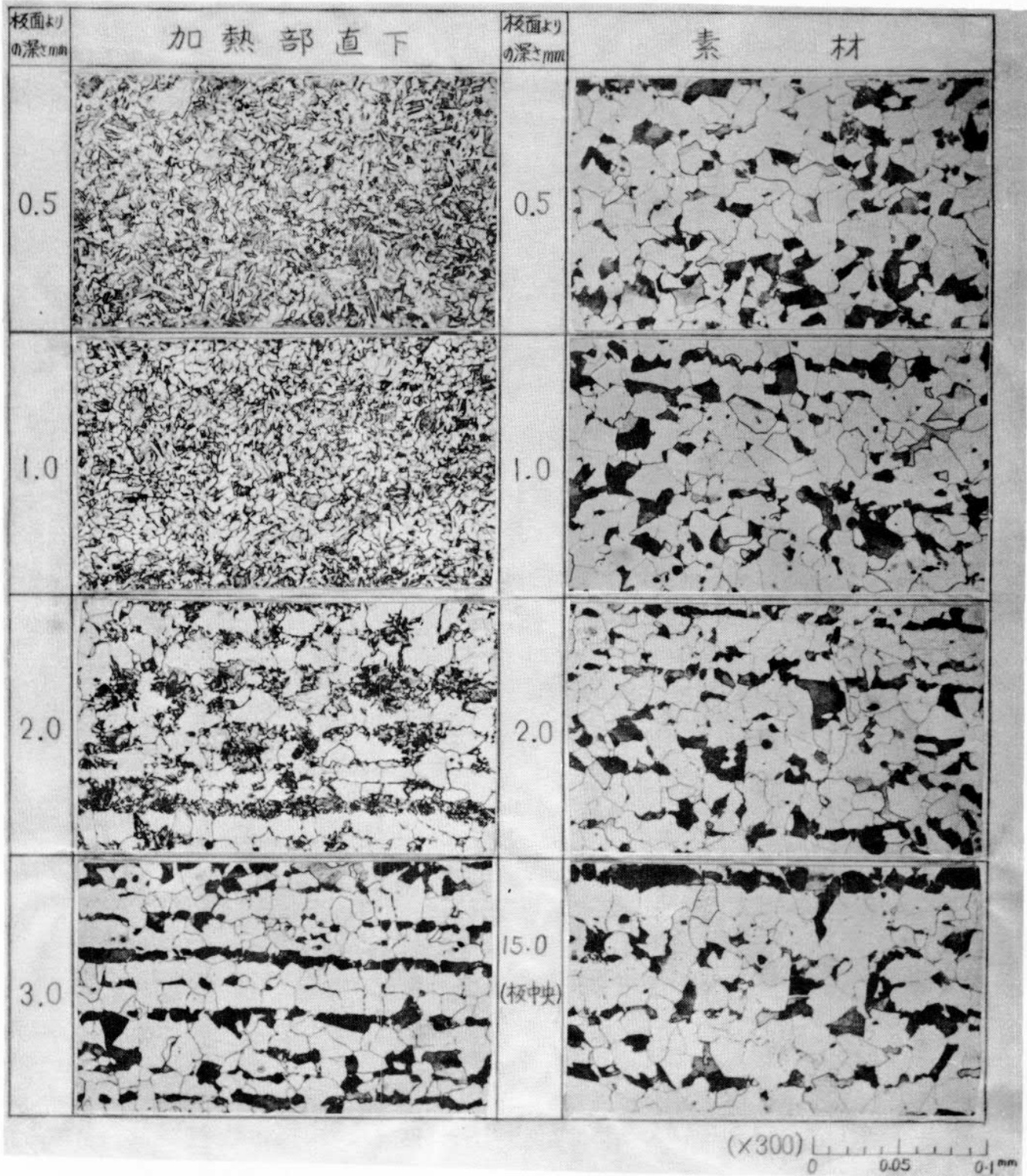
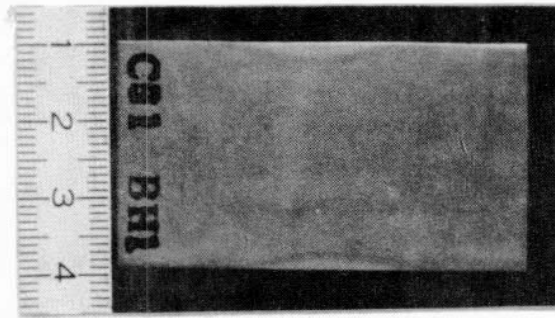


写真 48 900°C A.C.材のマクロおよび顕微鏡組織
K5D鋼, 板厚 30 mm, (符号: C51B)

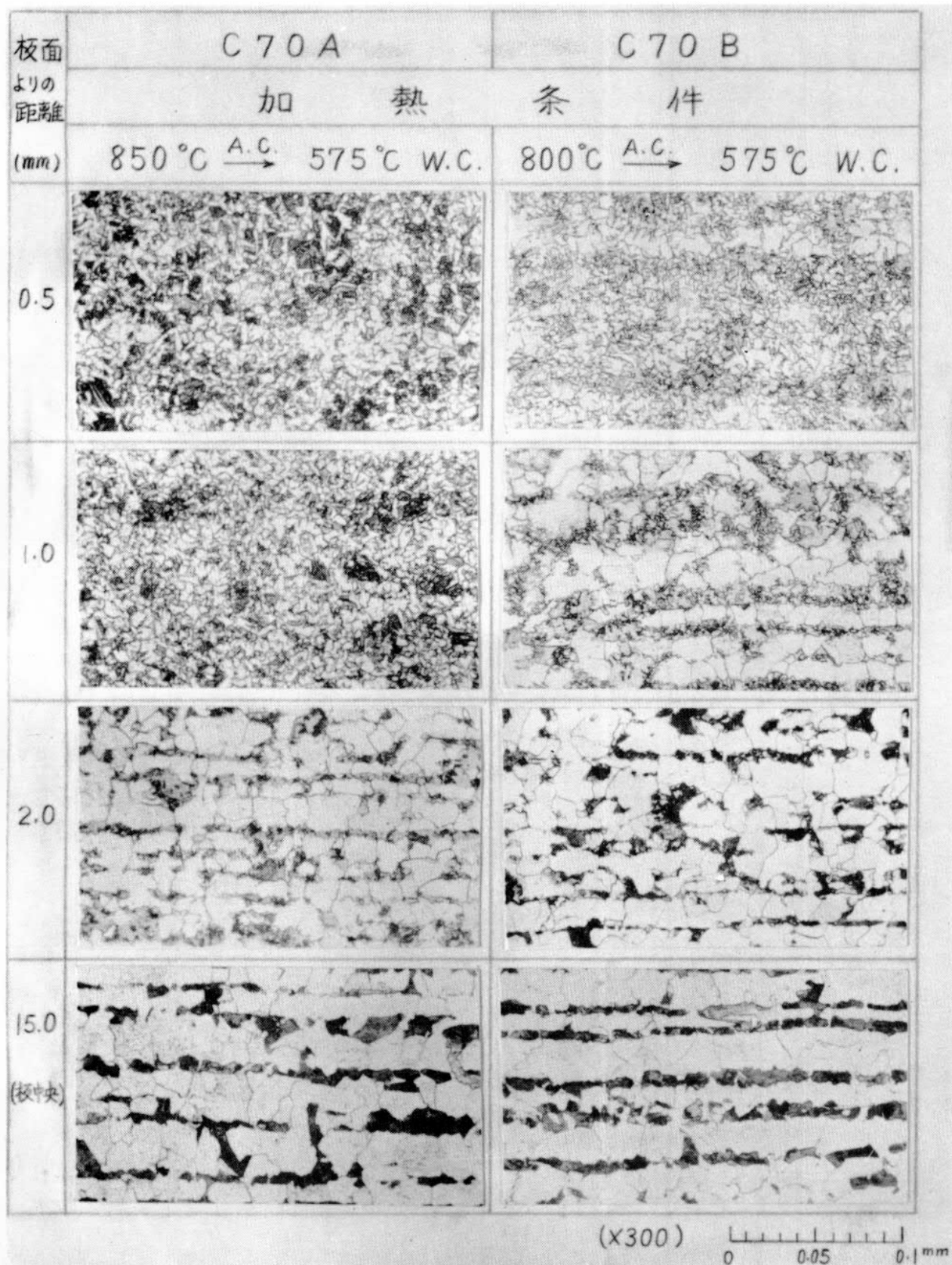
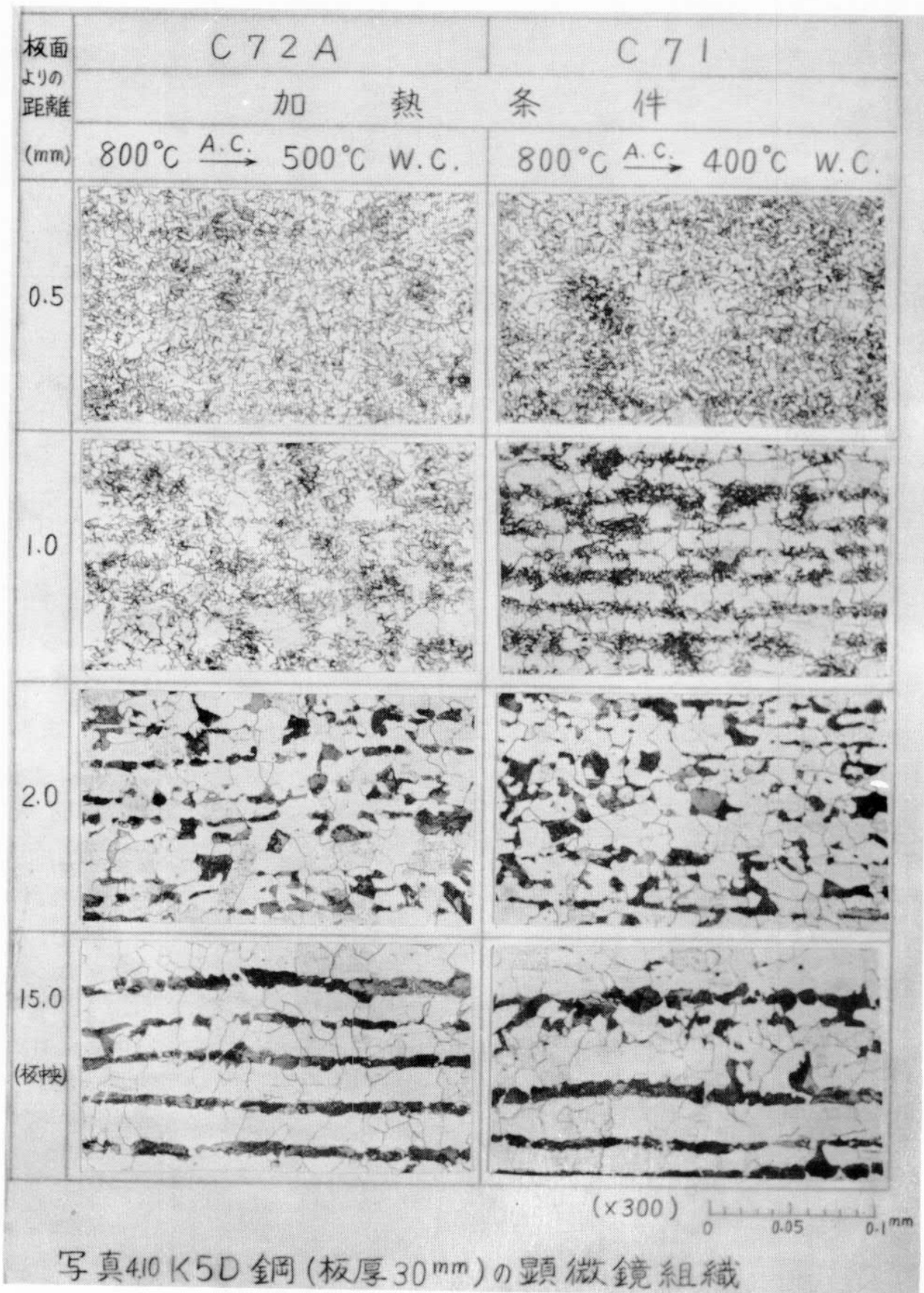
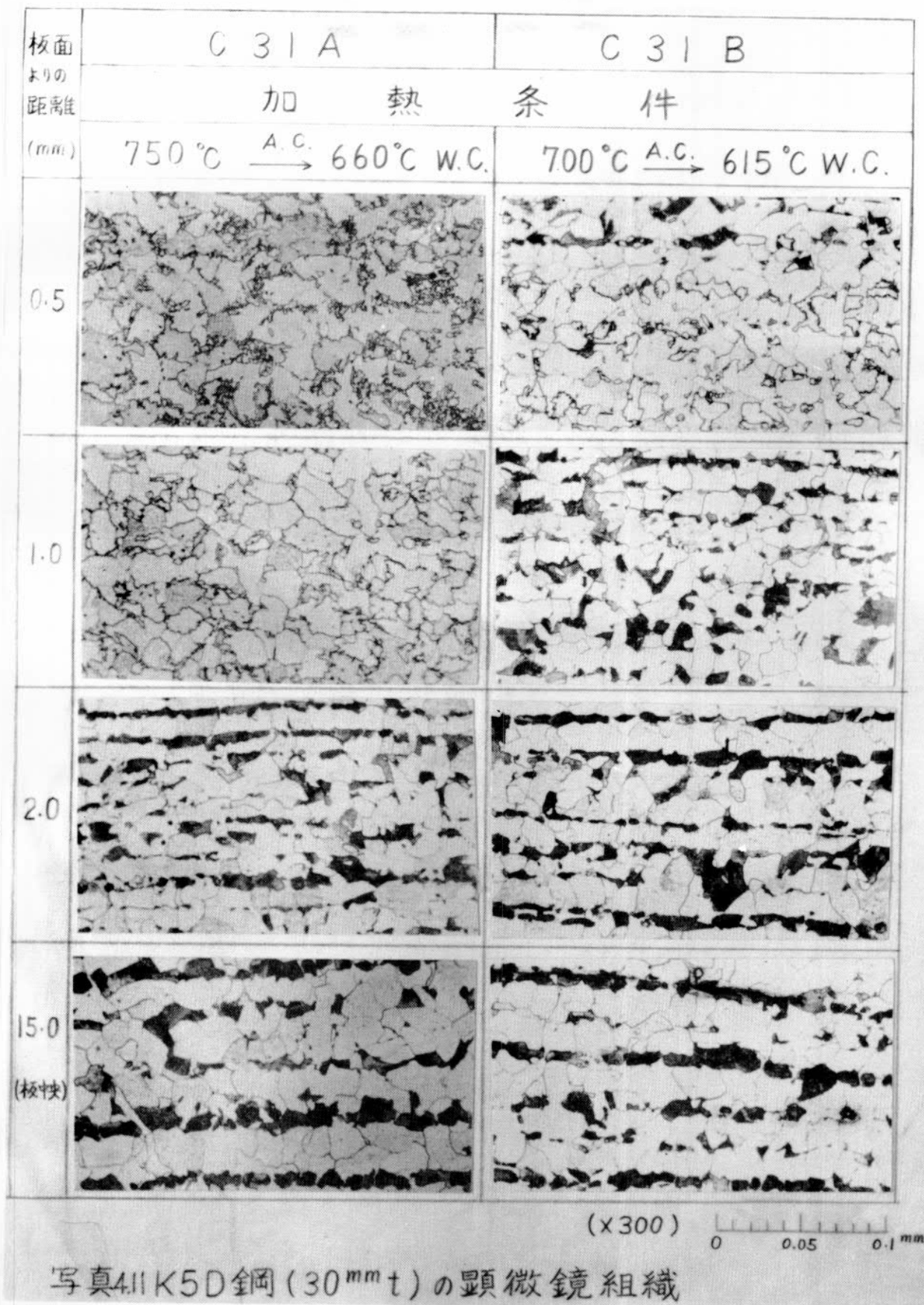
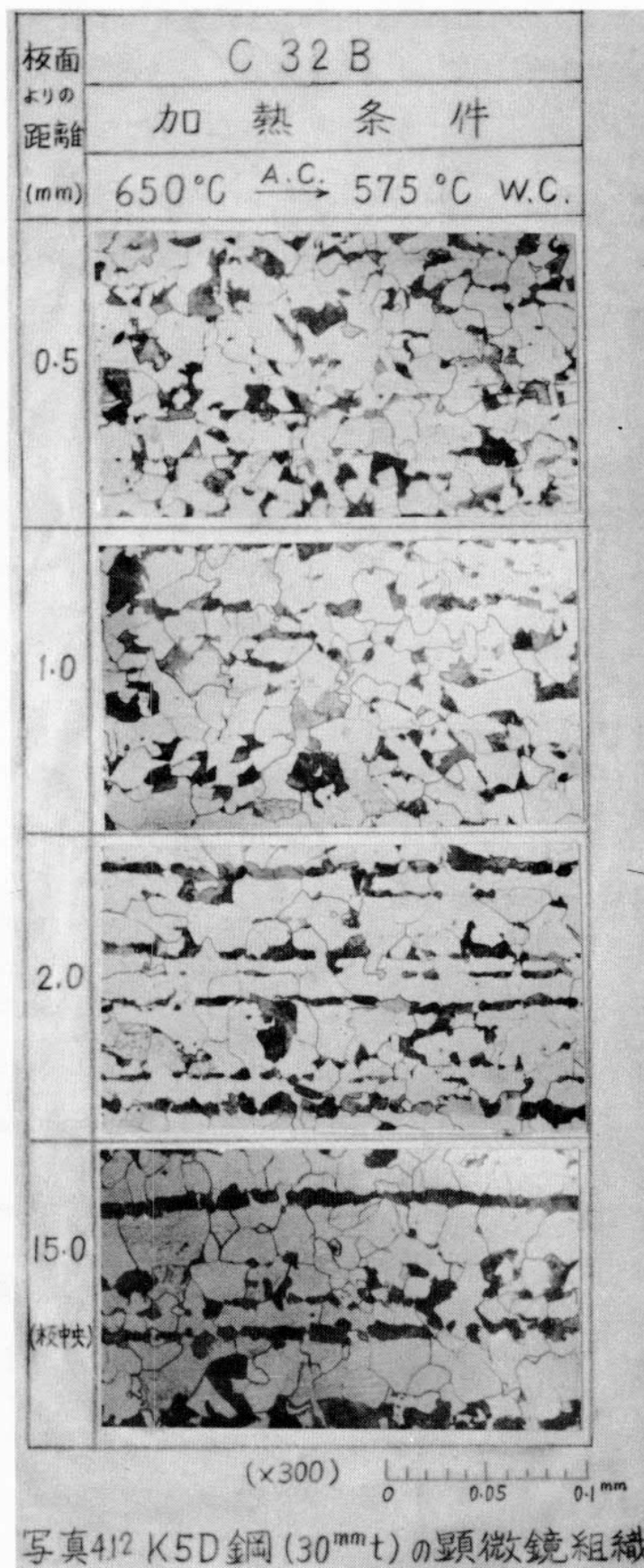


写真49 K5D鋼 (板厚 30^{mm}) の顕微鏡組織







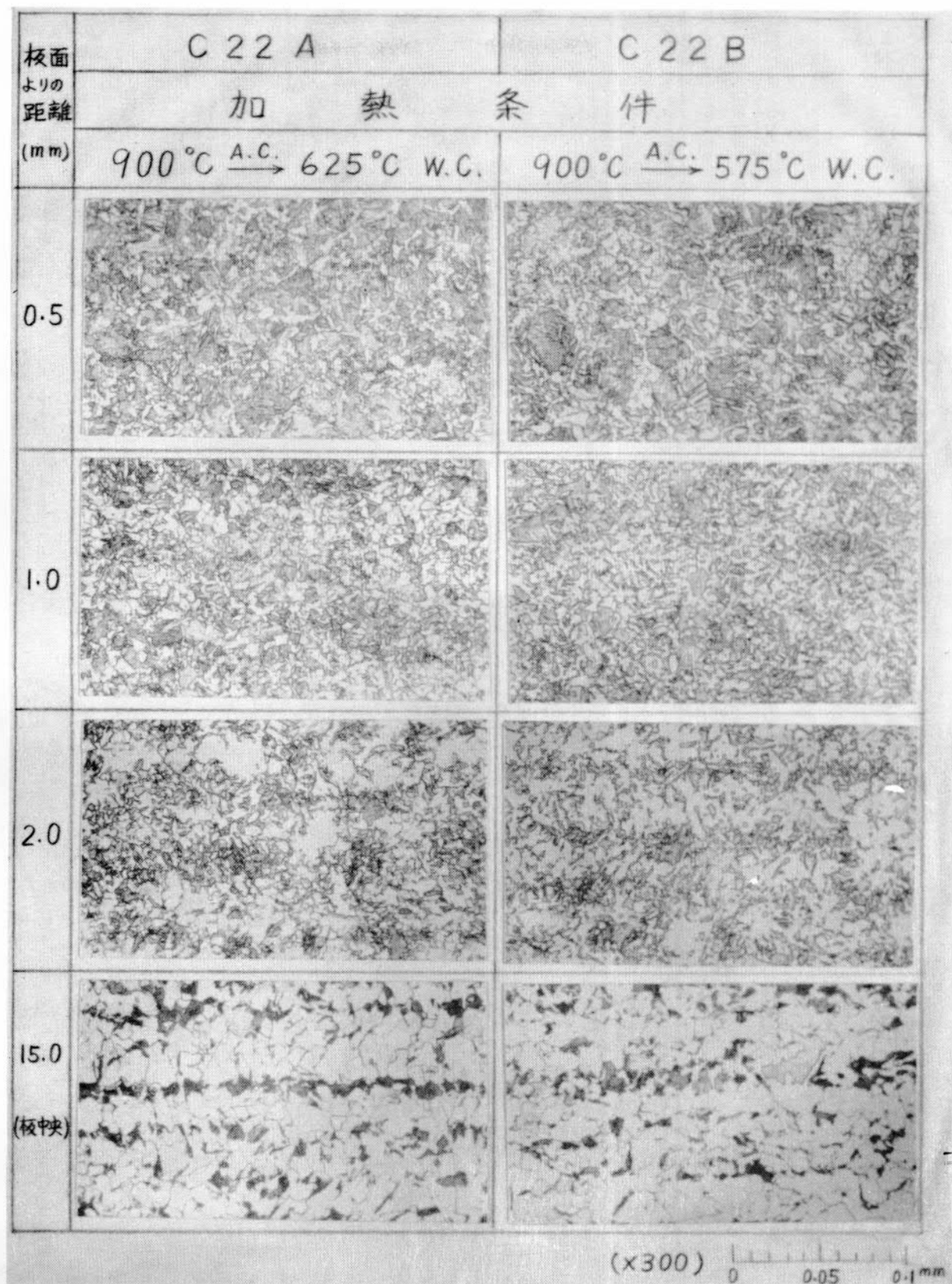


写真413 K5E鋼 (30^{mm}t) の顕微鏡組織

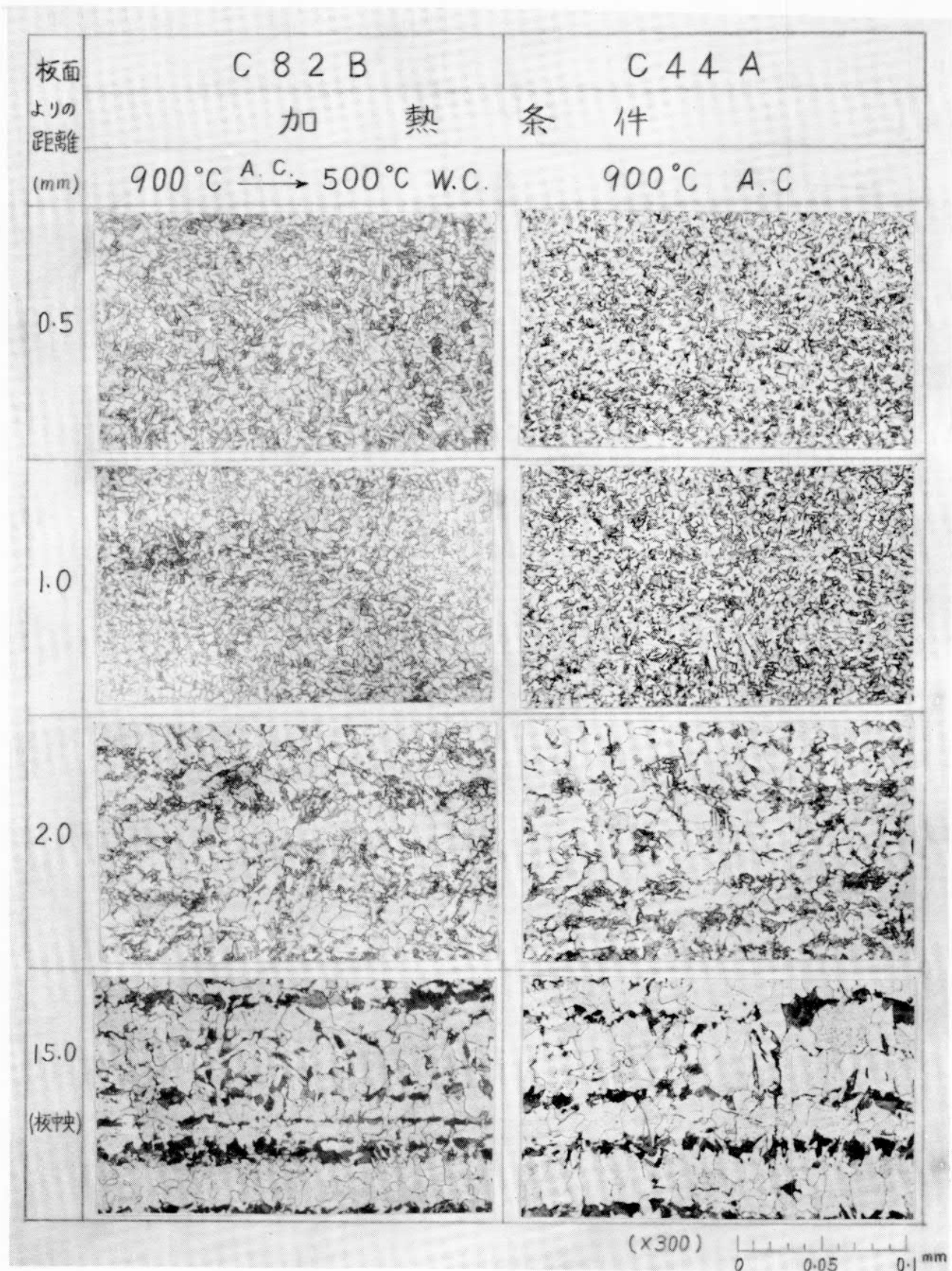


写真414 K5E鋼 (30 mm t) の顕微鏡組織

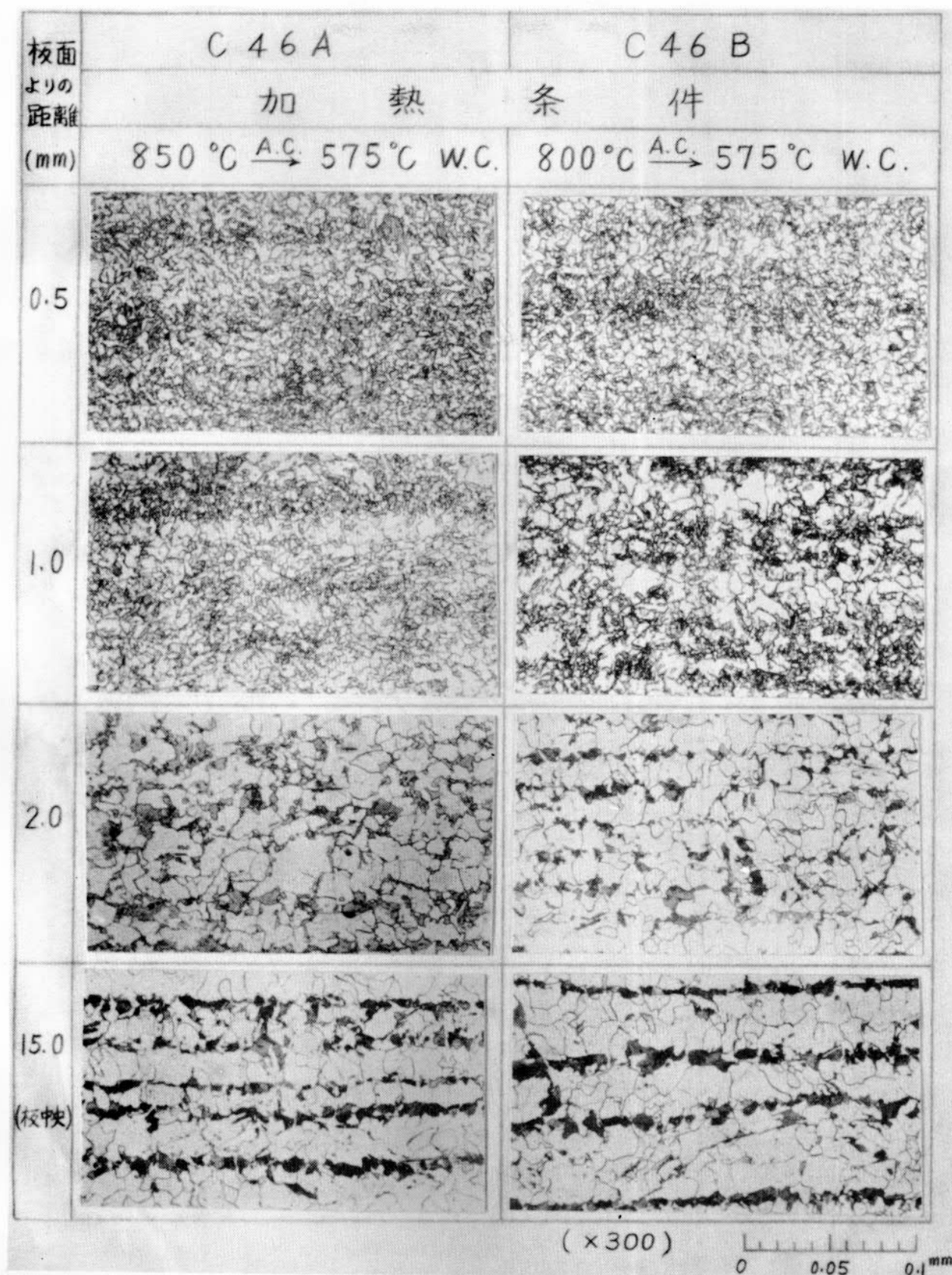


写真4.15 K5E鋼 (30^{mm} t) の顕微鏡組織

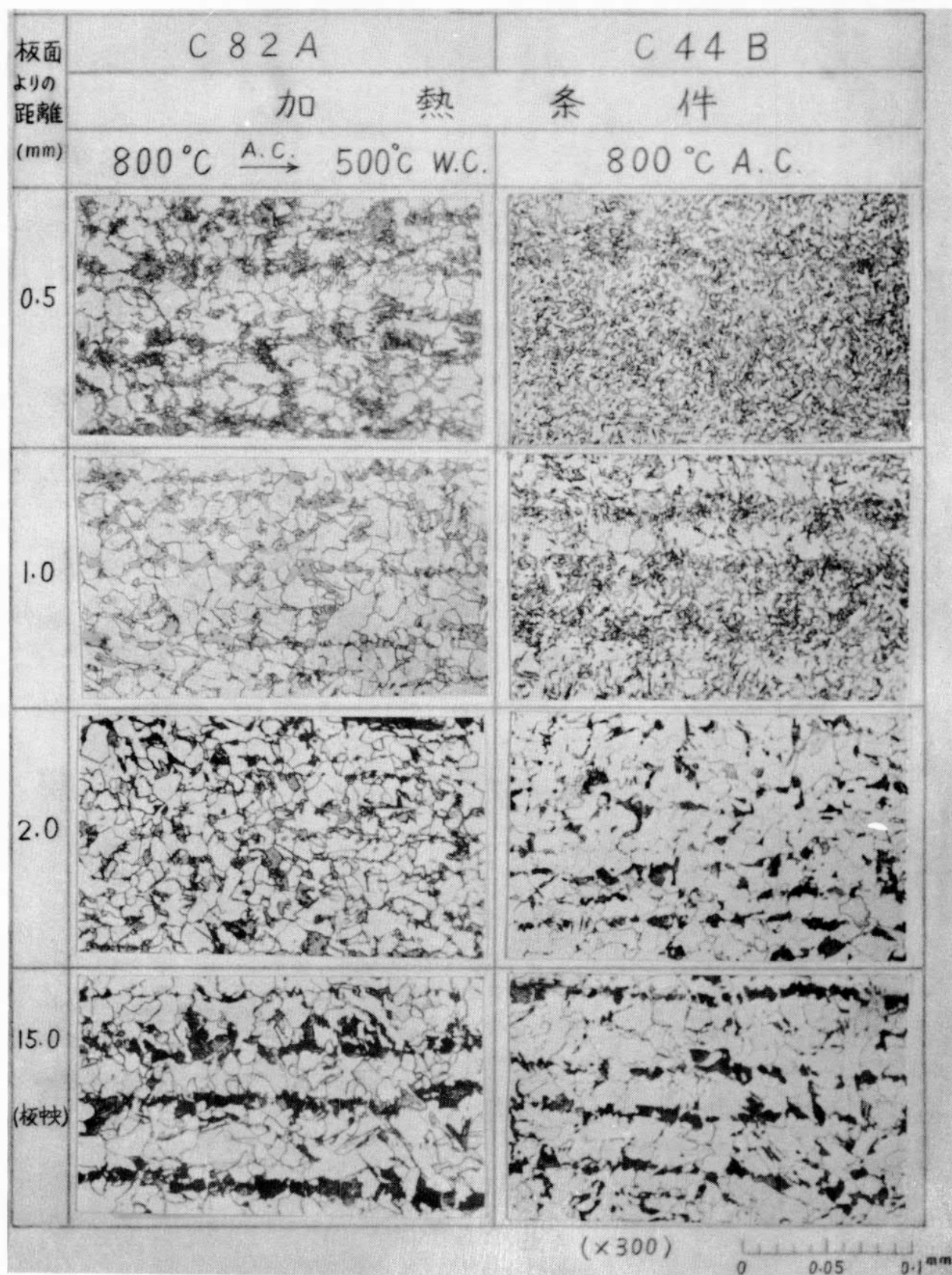


写真46 K5E鋼 (30^{mm}t) の顕微鏡組織

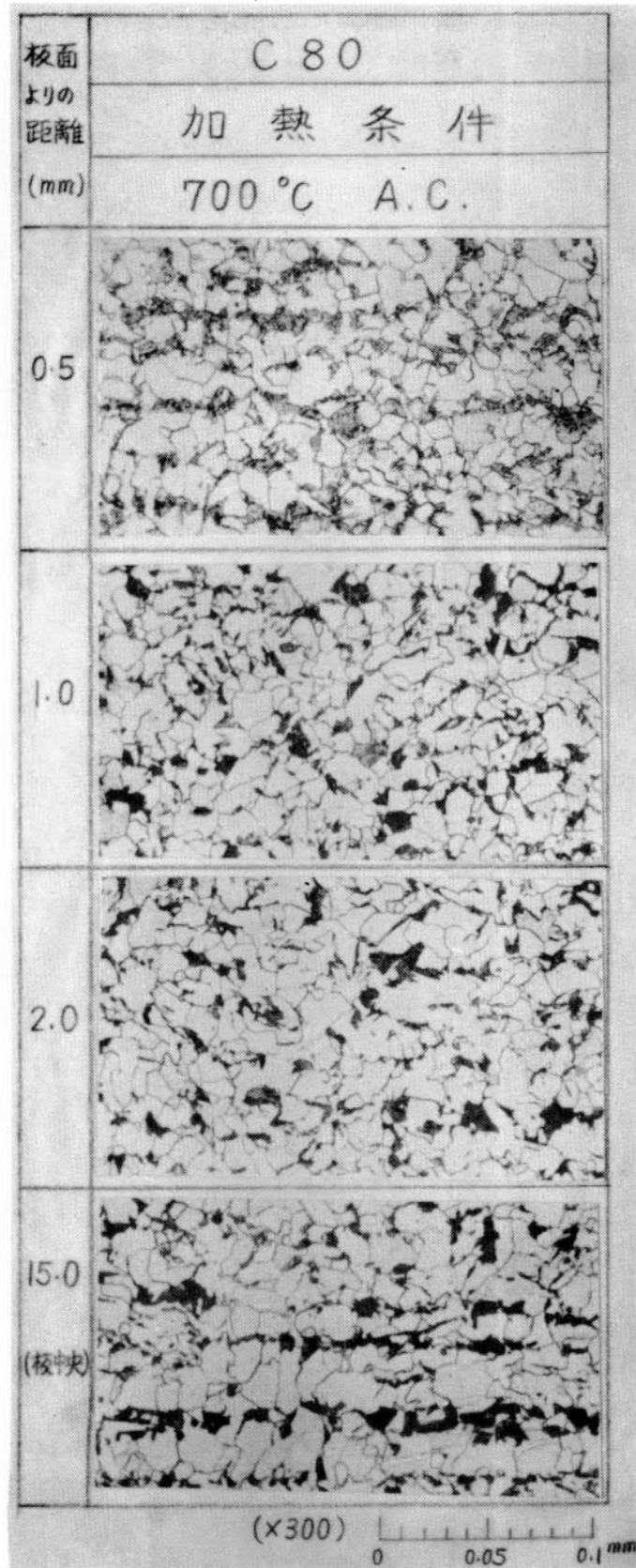


写真4.17 K5E鋼 (30^{mm}t) の顕微鏡組織

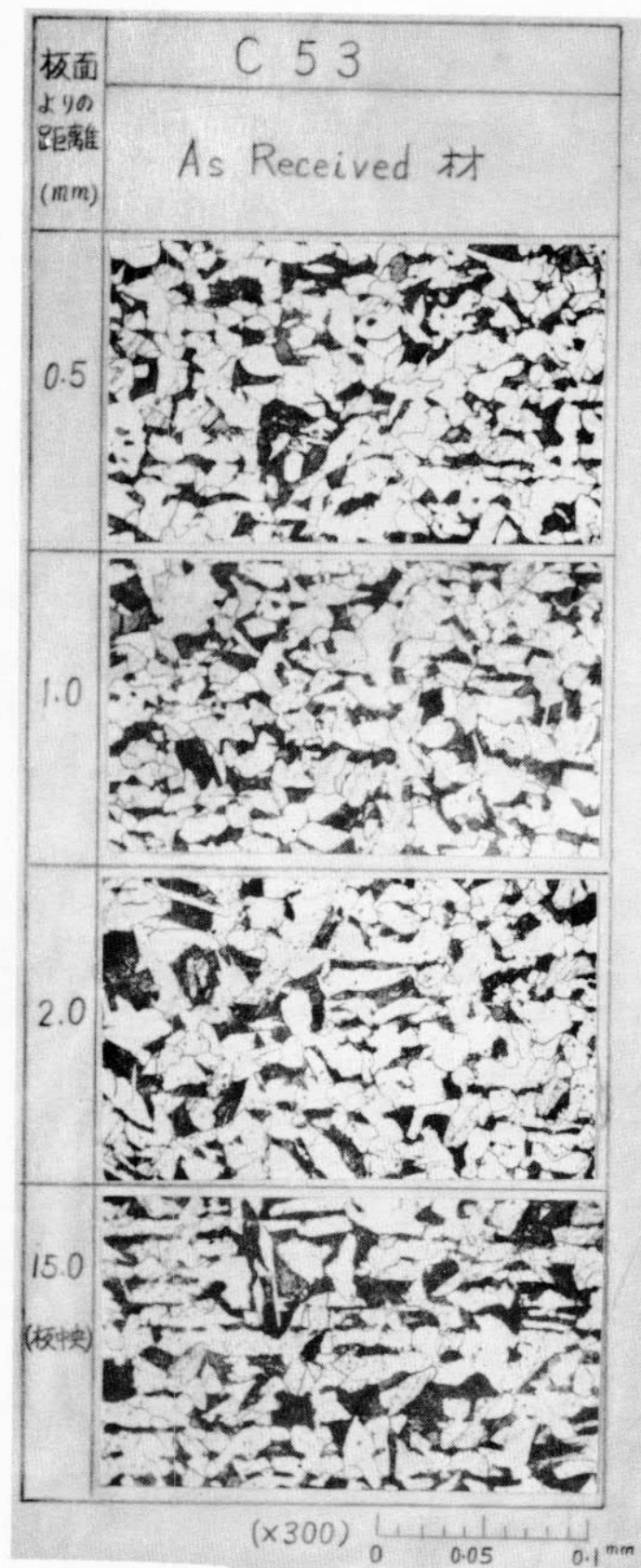


写真4.18 K5D鋼(12.7mm $\pm$)の顕微鏡組織

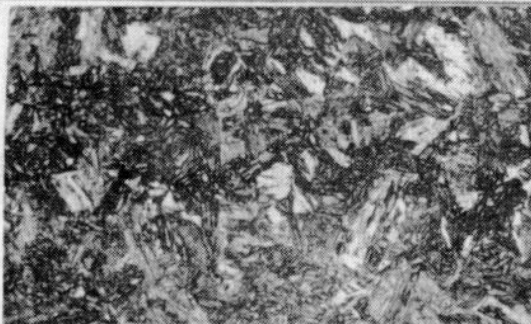
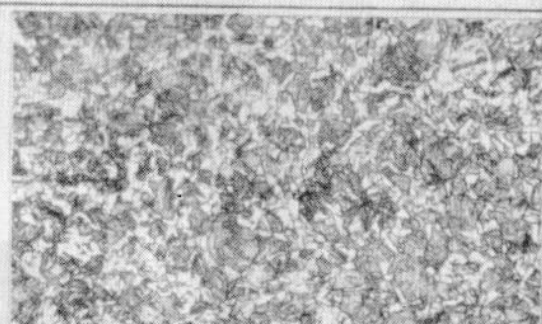
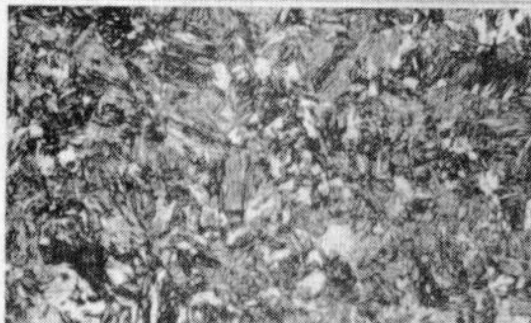
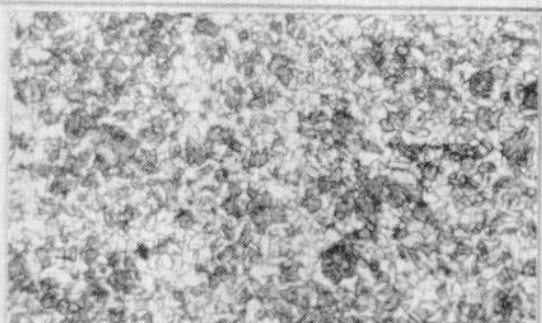
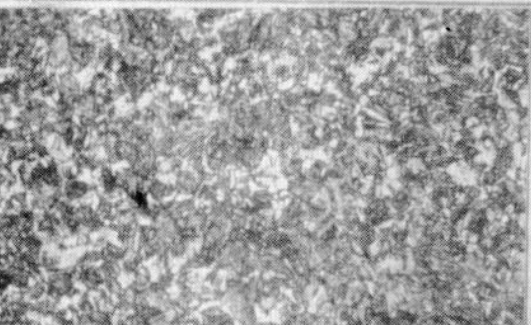
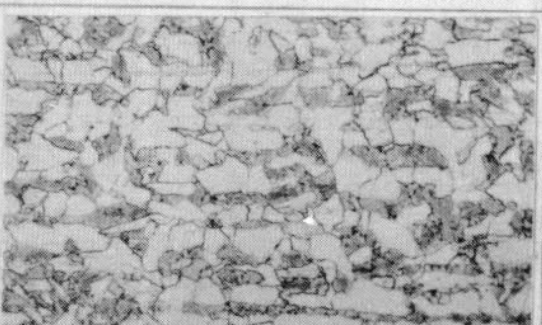
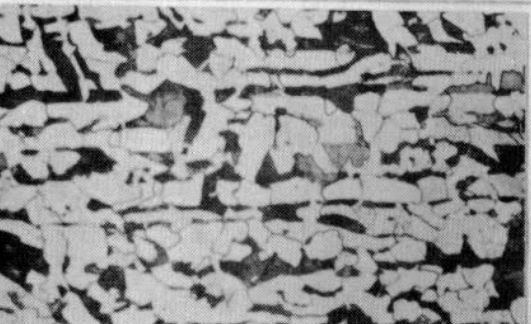
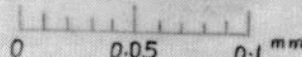
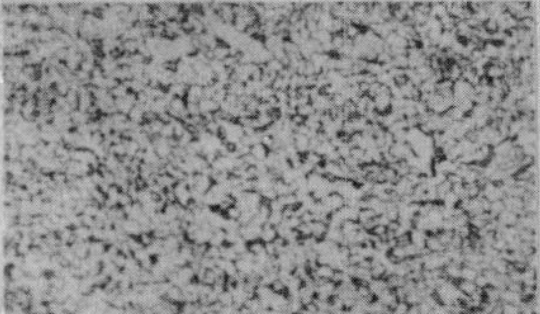
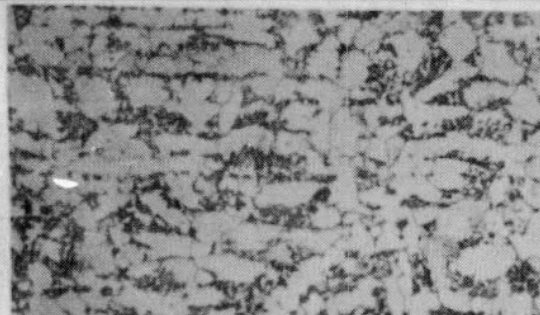
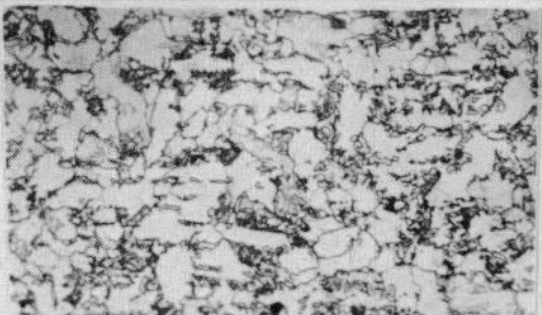
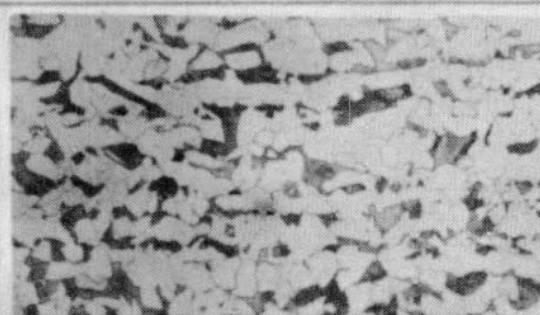
板面 よりの 距離 (mm)	C 37 A	C 37 B
	加 熱 条 件	
	950℃ $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 770℃ W.C.	800℃ $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 660℃ W.C.
0.5		
1.0		
2.0		
15.0 (板中央)		
(x300) 		

写真419 K5D鋼(12.7^{mm}t)の顕微鏡組織

板面 よりの 距離 (mm)	C 5 5 A	C 5 5 B
	加 熱 条 件	
	800°C A.C. → 500°C W.C. (両面加熱 先行加熱面)	800°C A.C. → 500°C W.C. (片面加熱)
0.5		
1.0		
2.0		
15.0 (板鉄)		

(×300) 0 0.05 0.1

写真420 K5D鋼(12.7^{mm}t)の顕微鏡組織

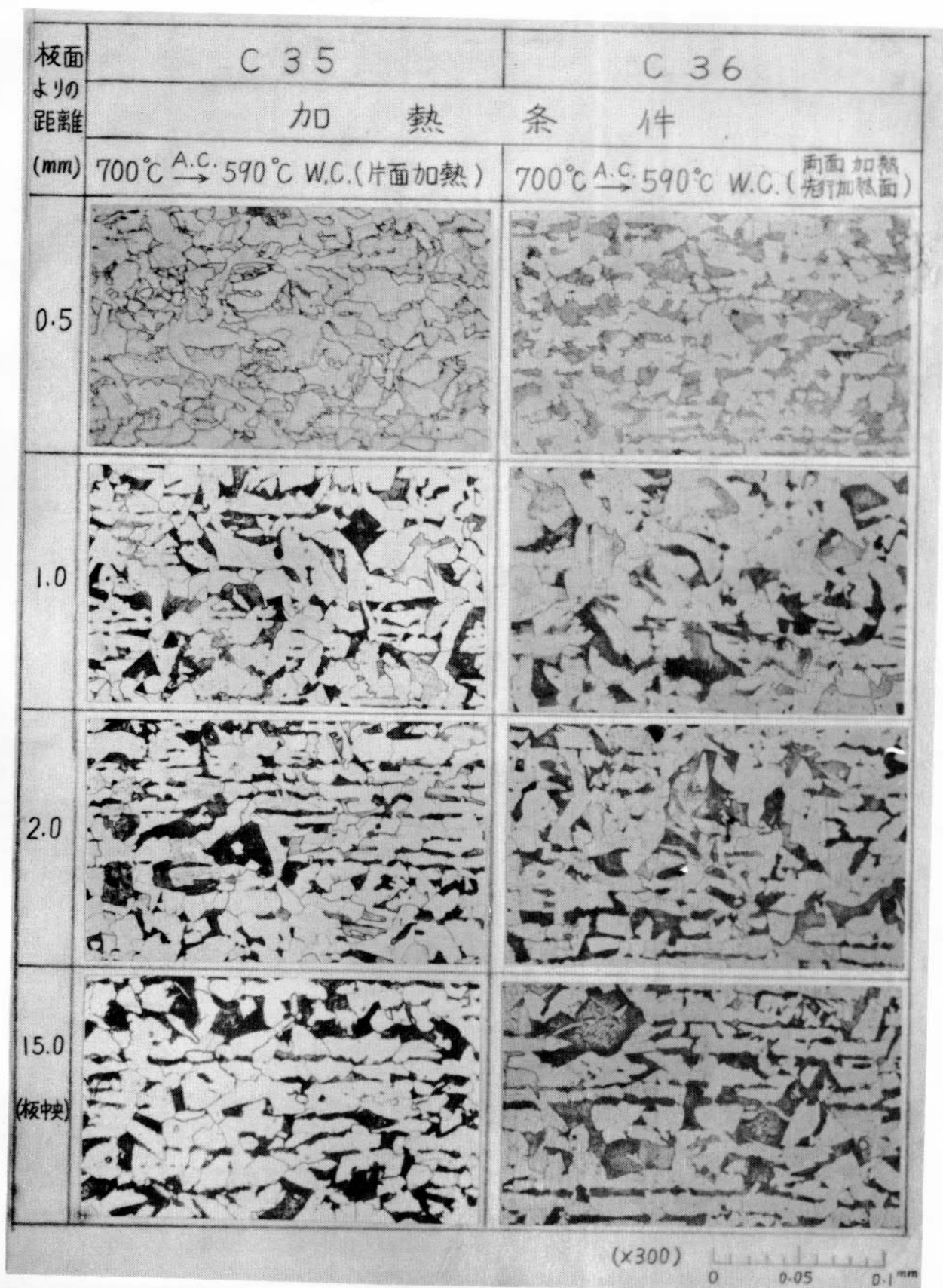


写真4.21 K5D鋼(12.7mm^t)の顕微鏡組織

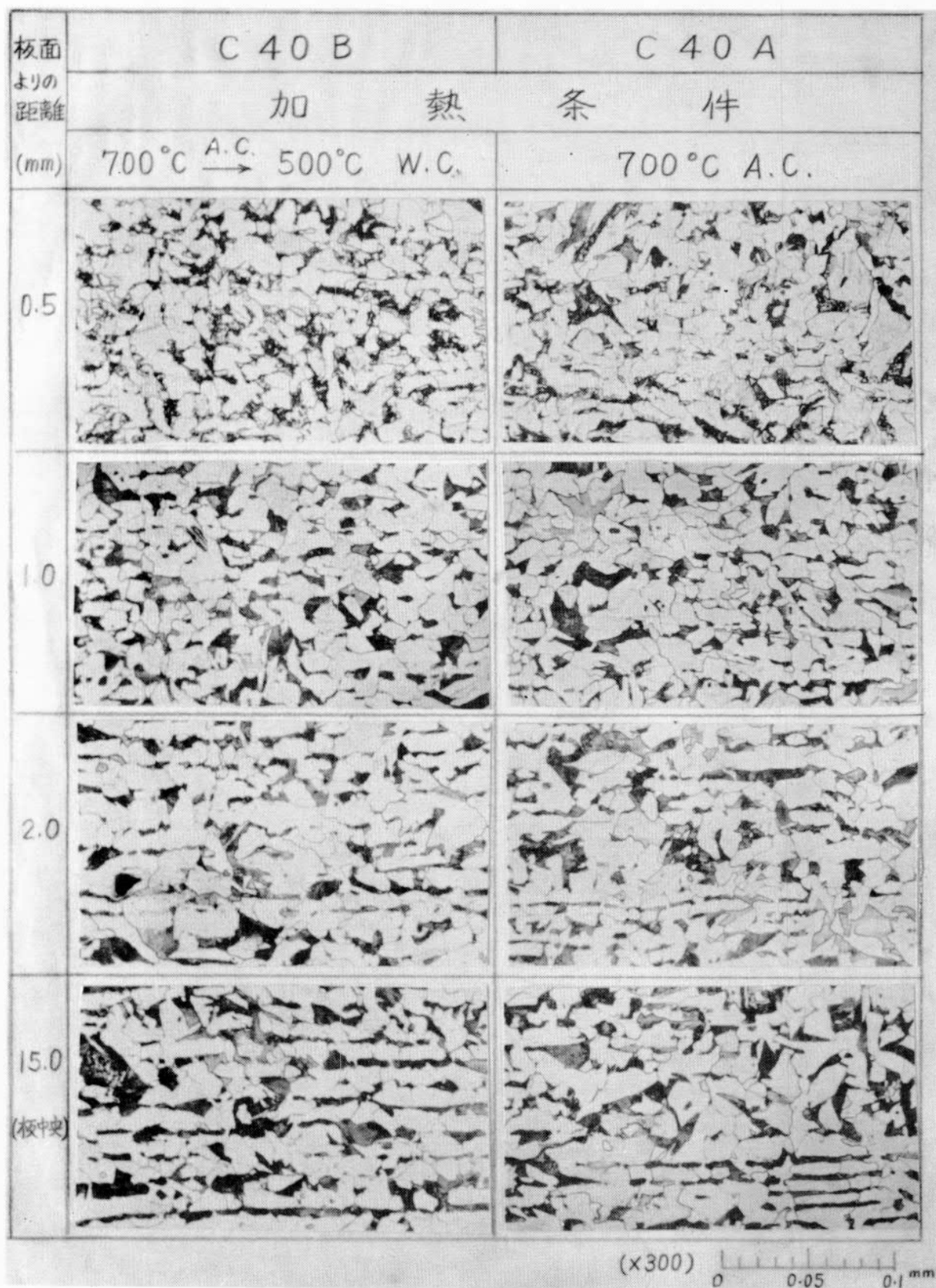
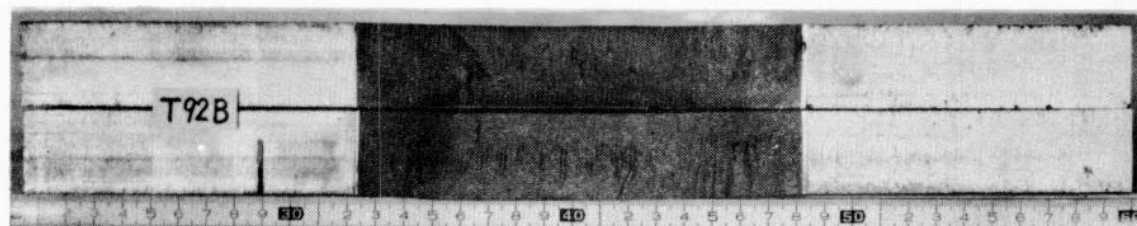


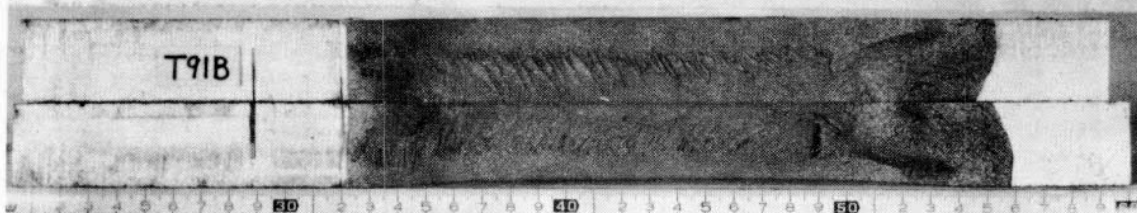
写真4.22 K5D鋼(12.7mm^t)の顕微鏡組織

板面 よりの 距離 (mm)	C 3 8 B	C 3 8 A
	加 熱 条 件	
	650°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 555°C W.C.	600°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 520°C W.C.
0.5		
1.0		
2.0		
15.0 (板中央)		
		(×300) 0 0.05 0.1 mm

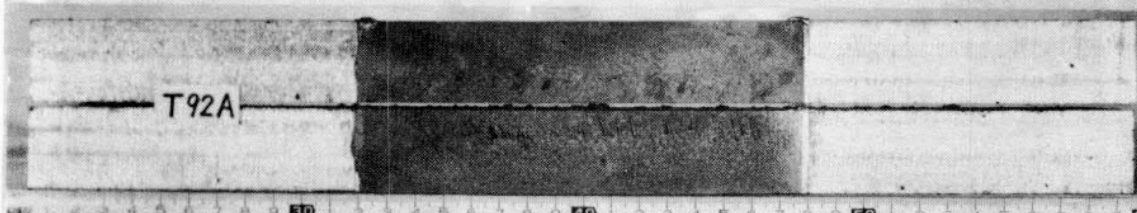
写真423 K5D鋼(12.7^{mm}t)の顕微鏡組織



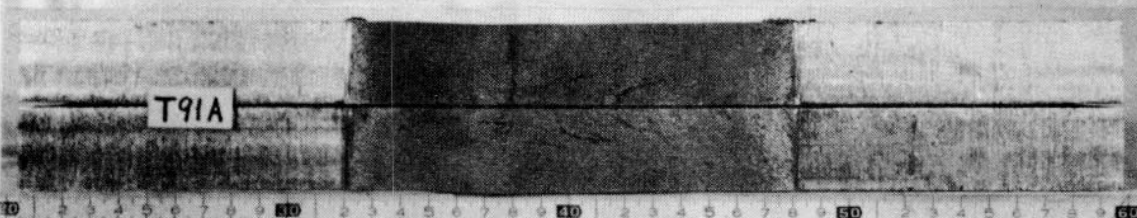
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 10.7 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 14.8 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 17.8 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 28.6 \text{ kg/mm}^2$)

写真424. デープノッチ試験片破面状況
(K5A鋼, $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^{\circ}\text{C}$ WC., 板厚 30 mm)

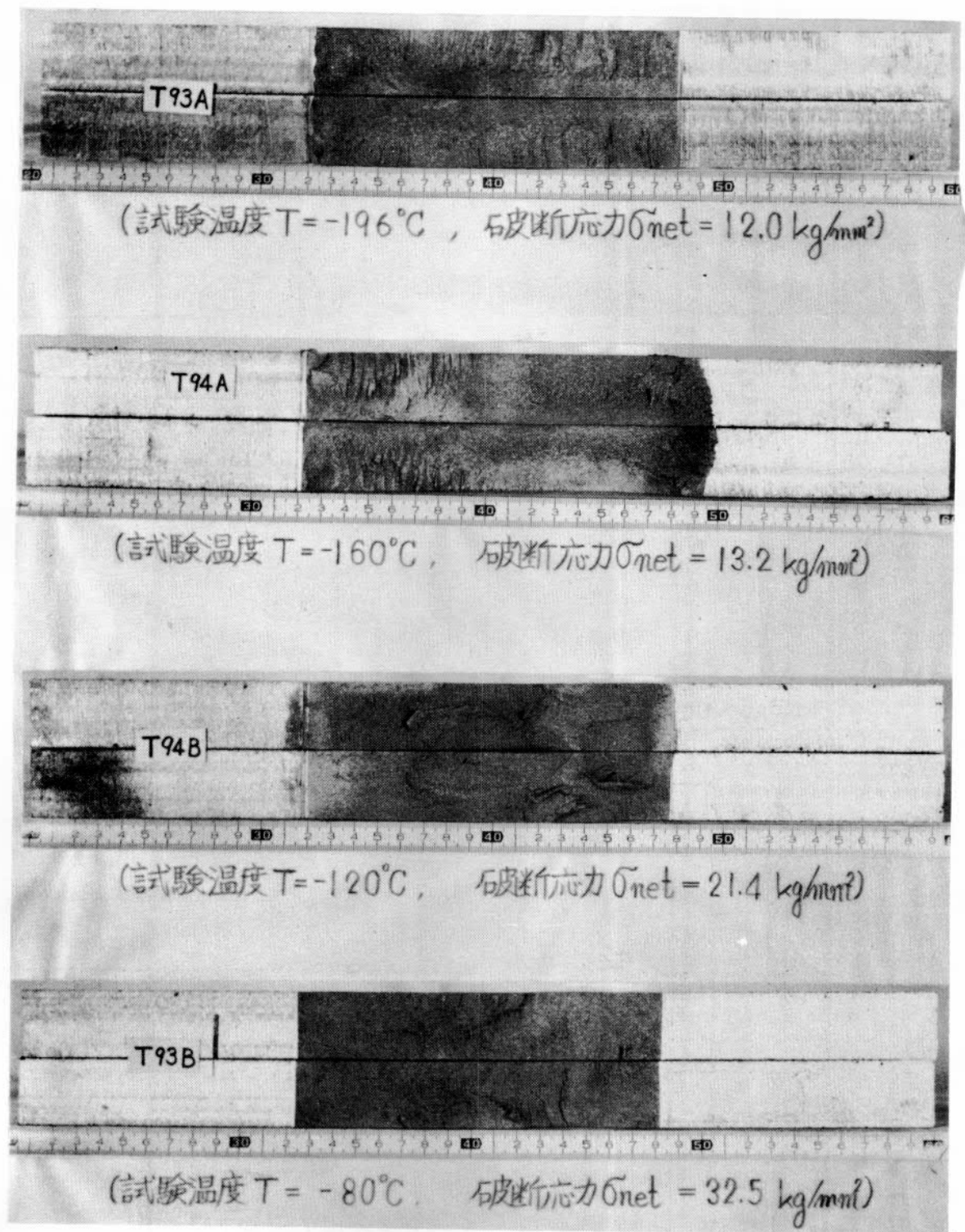


写真4.25. ディープノッチ試験片破面状況
(K5A鋼, 800°C A.C., 板厚30mm)

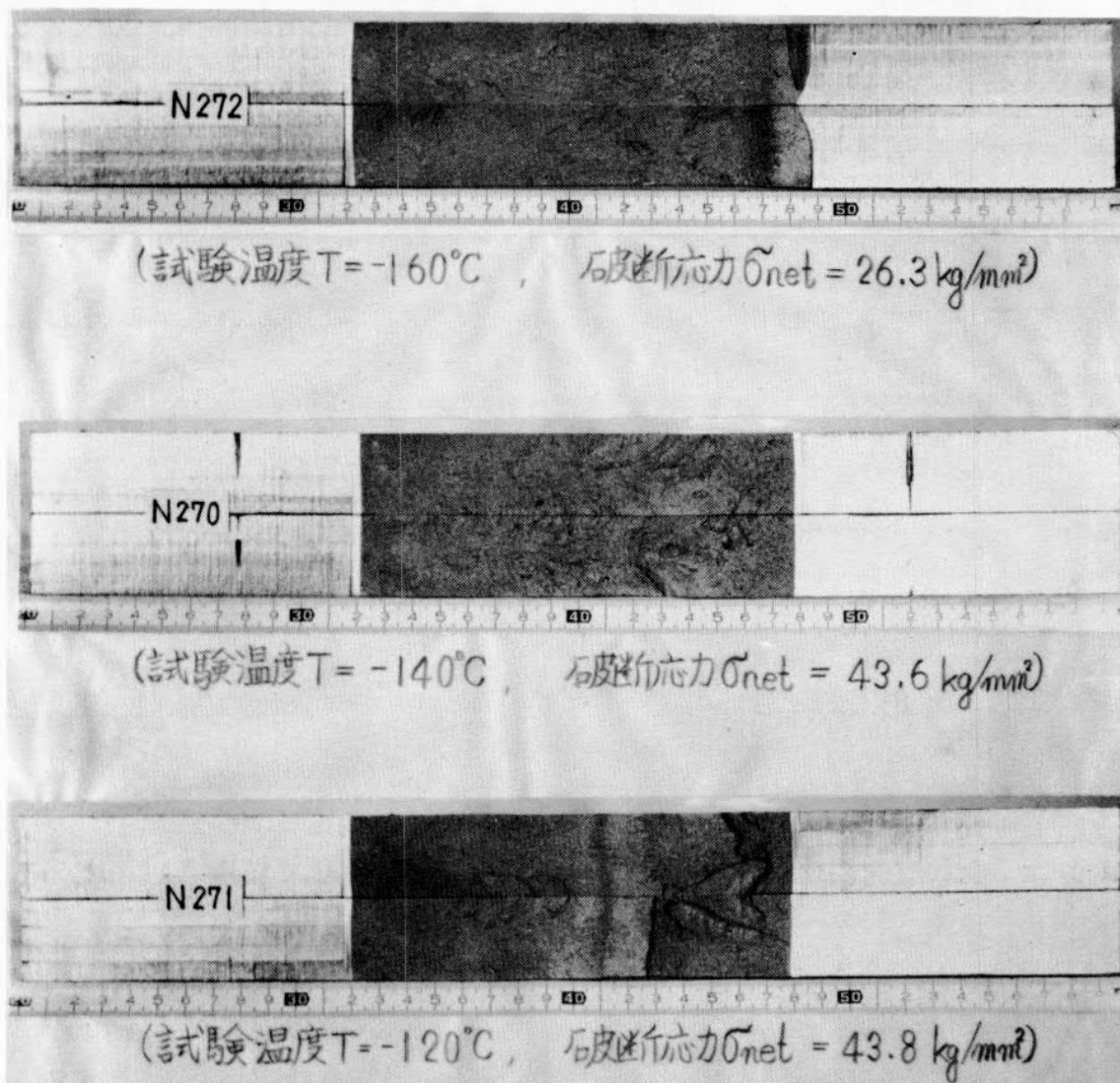
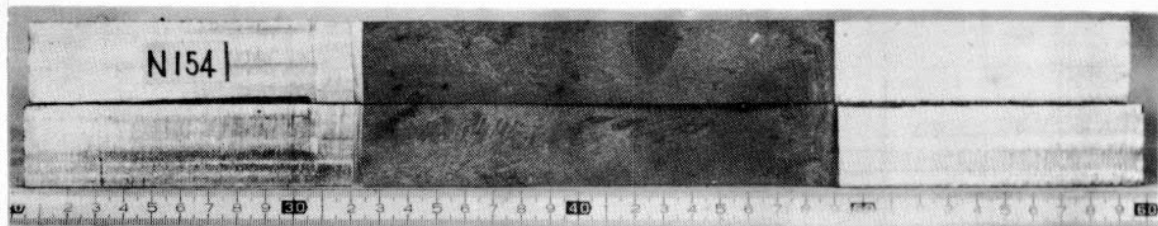
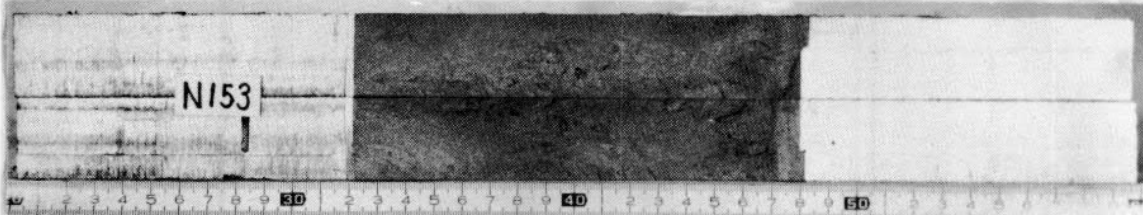


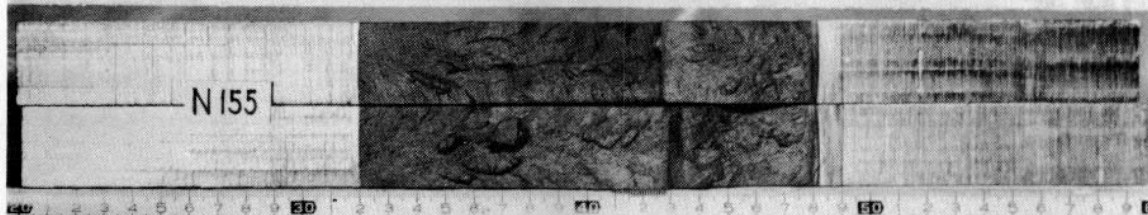
写真4.26. デープノッチ試験片破面状況
(K5D鋼. $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^{\circ}\text{C}$ W.C., 板厚30mm)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 18.8 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 20.0 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 41.8 \text{ kg/mm}^2$)

写真4.27. ティ-ブロッケ試験片破面状況
(K5D鋼, $800^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 500^{\circ}\text{C} \text{ W.C.}$, 板厚 30 mm)

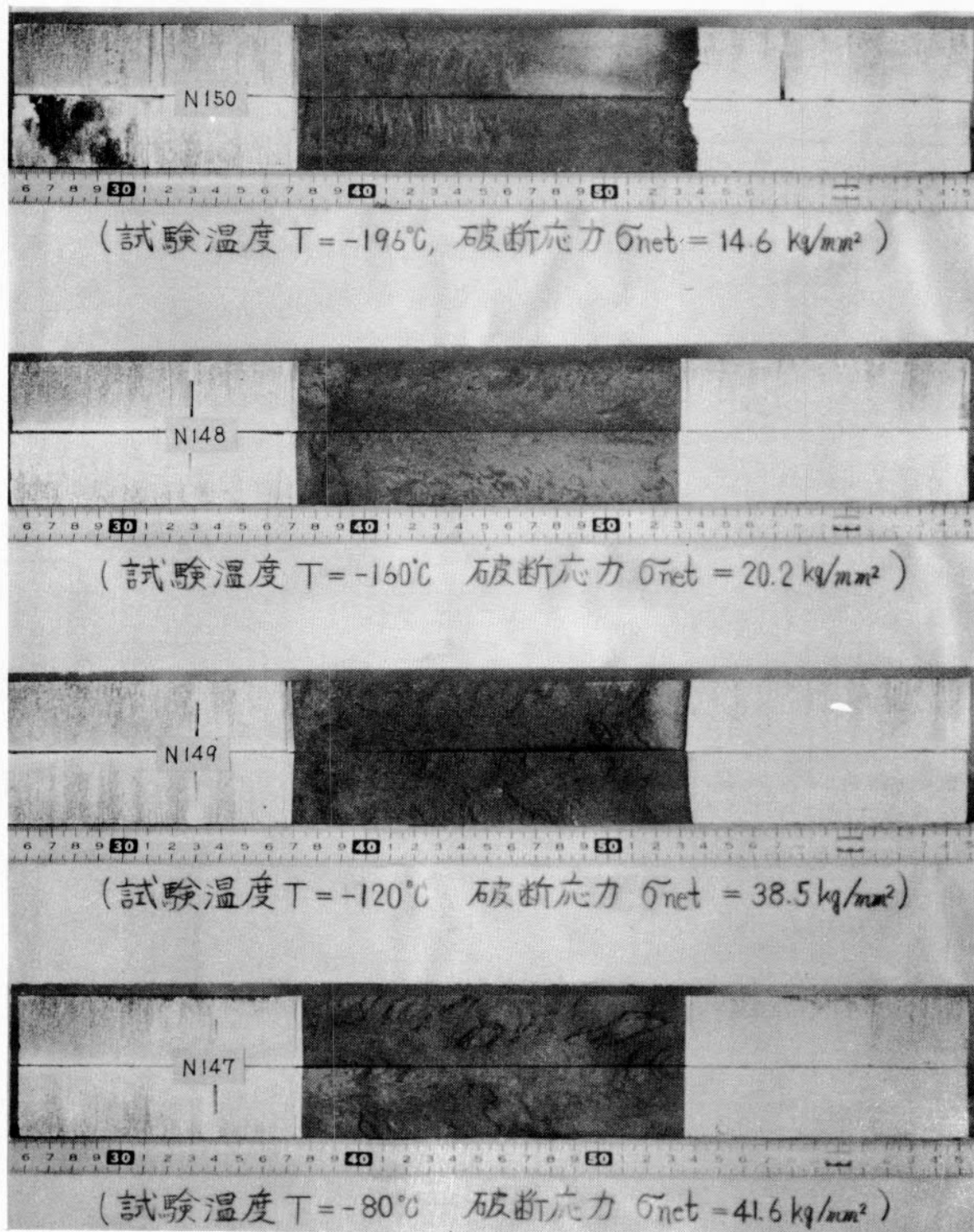


写真4.28. ディープノッチ試験片破面状況
 (K5D鋼, 800°C A.C., 板厚 30mm)

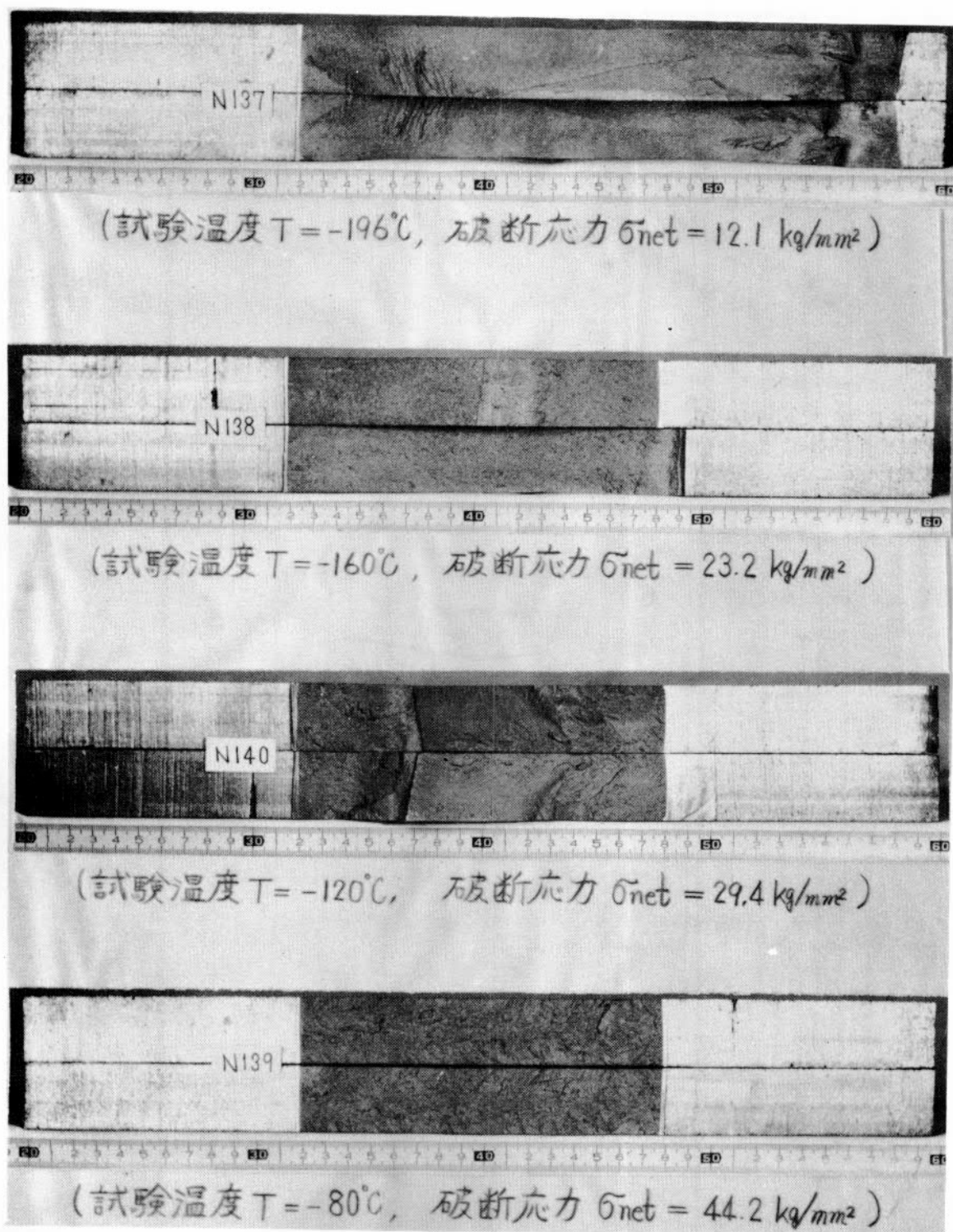


写真4.29 ティ-フノチ試験片破面状況
(K5D鋼, 650°C A.C. $\rightarrow$ 575°C W.C., 板厚 30mm)

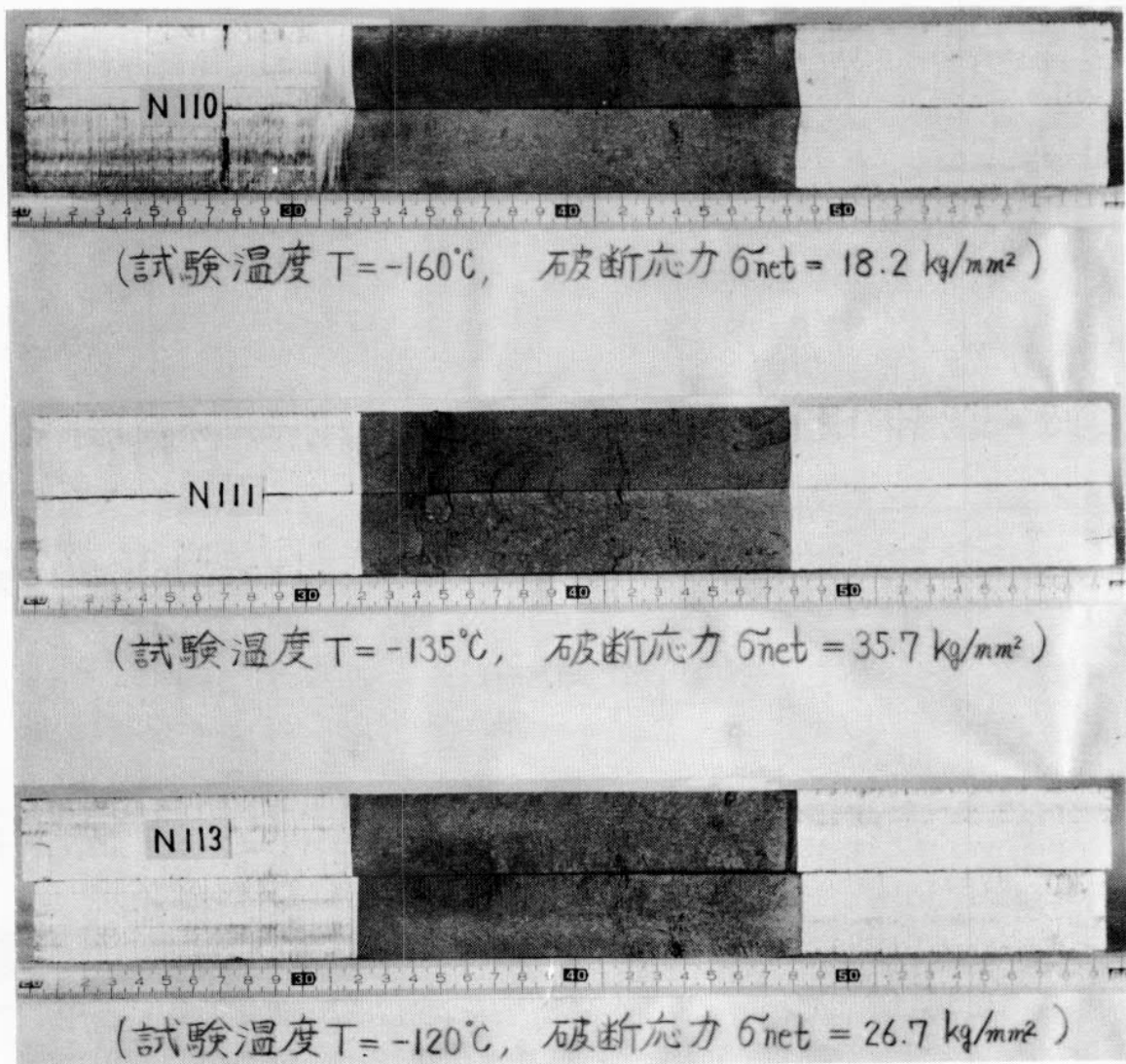
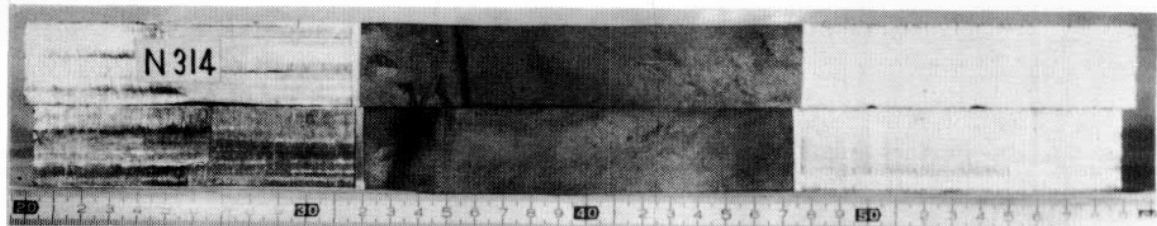
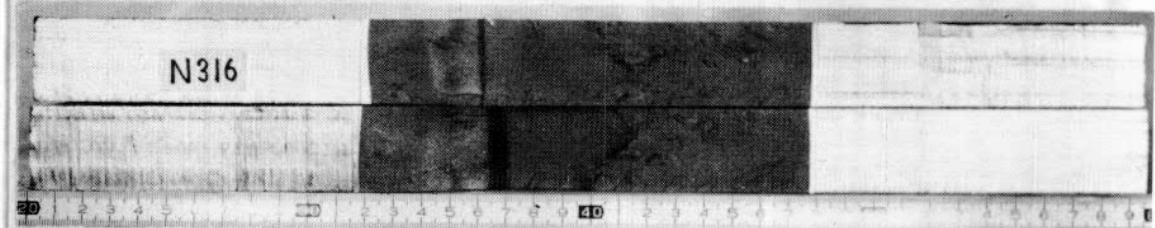


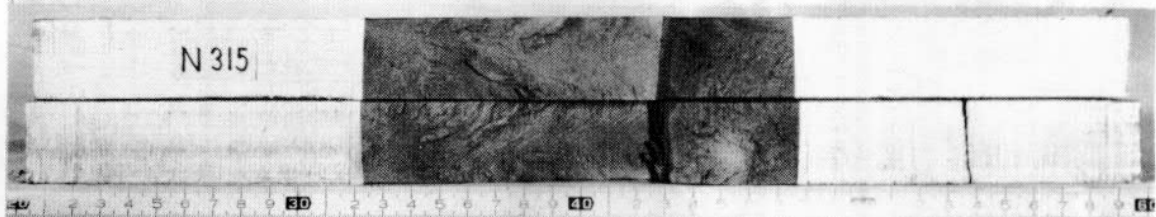
写真4.30. ティ-ブロッチ試験片破面状況
(K5E鋼, 900°C A.C., 500°C W.C. 板厚 30mm)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 16.6 \text{ kg/mm}^2$)

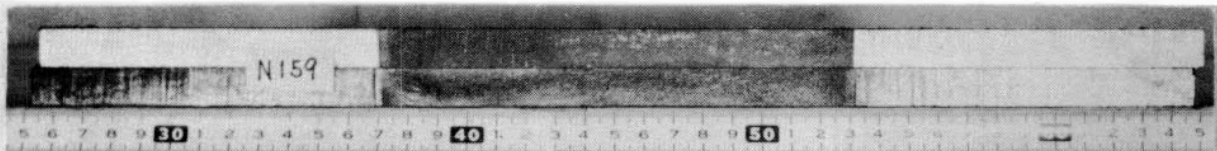


(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 23.9 \text{ kg/mm}^2$)

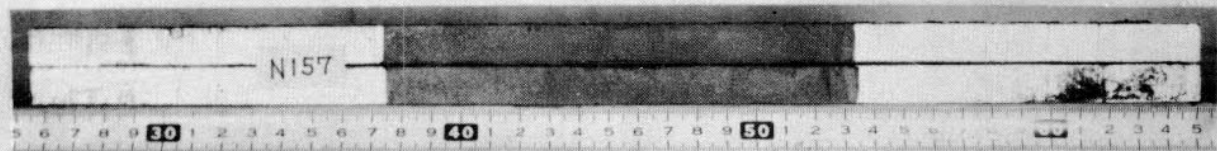


(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 34.5 \text{ kg/mm}^2$)

写真 4.31. ティ-ブノチ試験片破面状況
(K5E 鋼, 800°C A.C. $\rightarrow$ 500°C W.C. 板厚 30mm)



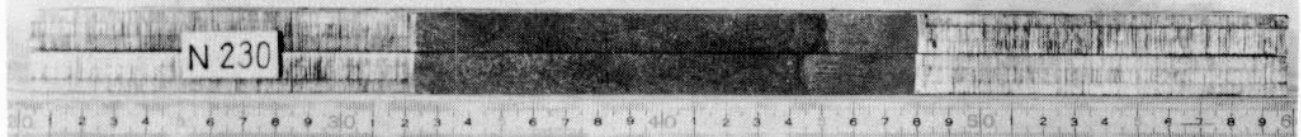
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 15.6 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 13.0 \text{ kg/mm}^2$)



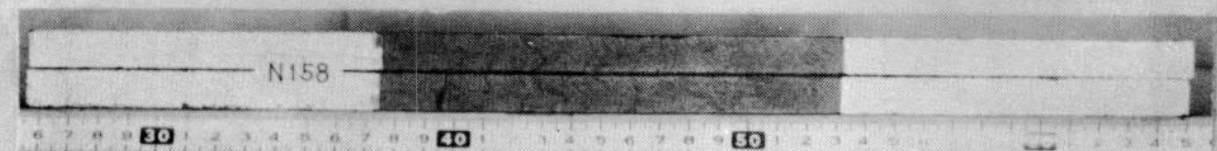
(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 20.3 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -140^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 29.6 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 41.5 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 41.0 \text{ kg/mm}^2$)

写真 4.32 ティ-ブノッチ試験片破面状況
(K5D鋼, As Received材, 板厚 12.7 mm)

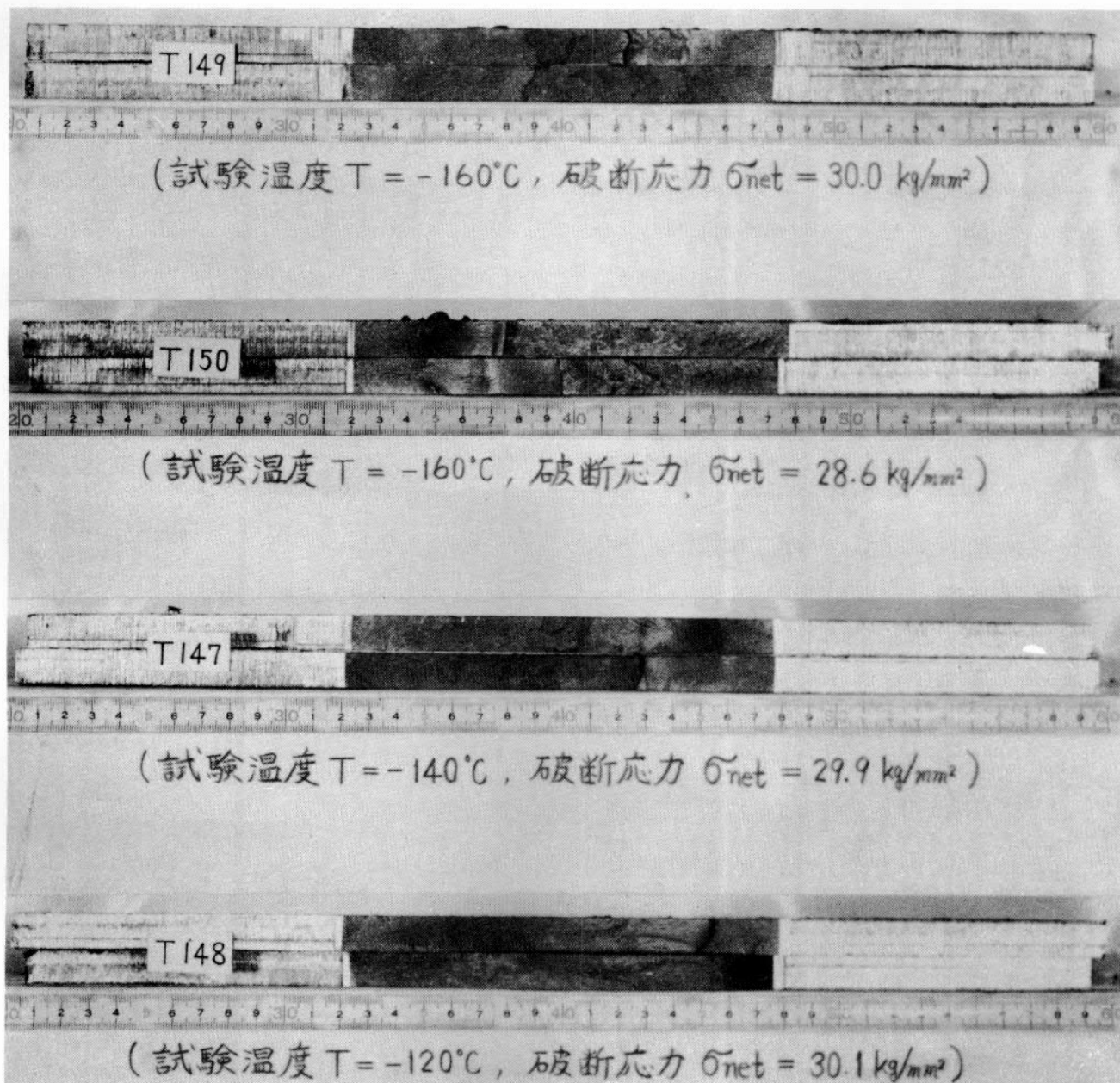


写真 4.33 ティ-ブロッチ試験片破面状況
(K5D鋼 $800^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C W.C.}$, 板厚 12.7 mm)

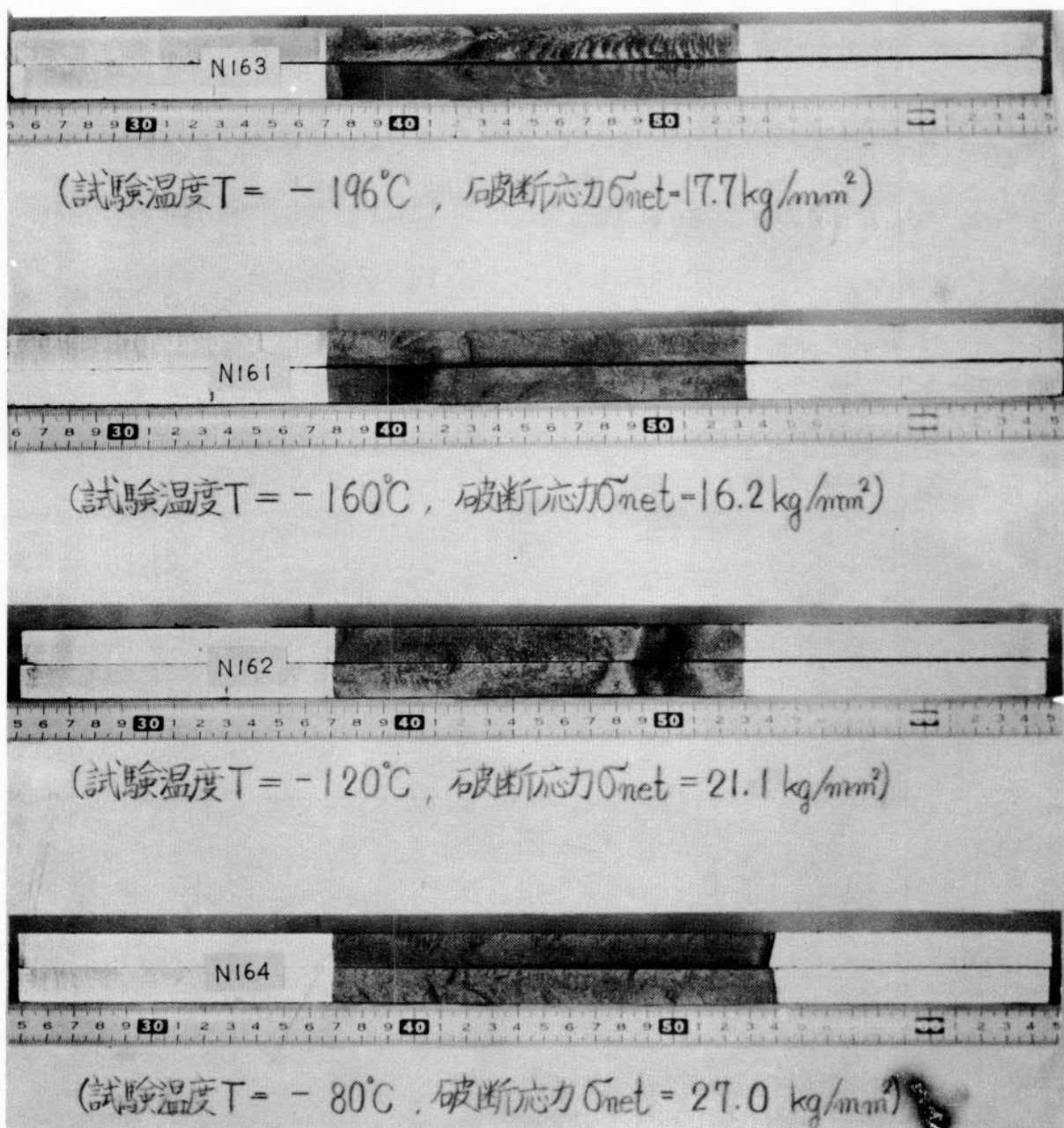


写真 4.34 ティーフノッチ試験片破面状況
(K5D鋼, $700^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons 590^{\circ}\text{C W.C.}$, 板厚 12.7 mm)

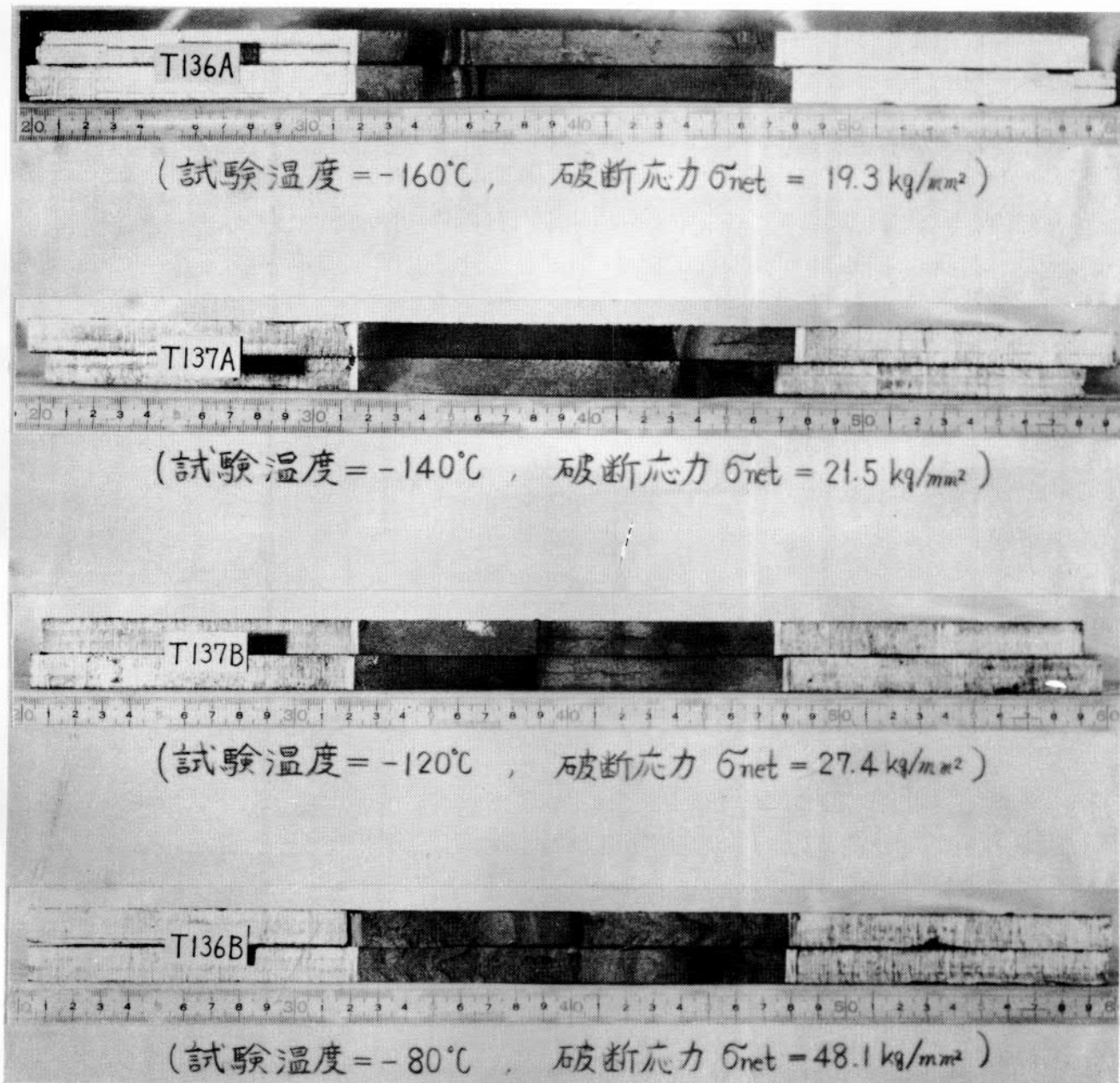


写真 4.35 ティーブロッチ試験片破面状況
(K5D鋼, $700^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C.W.C.}$, 板厚 12.7 mm)

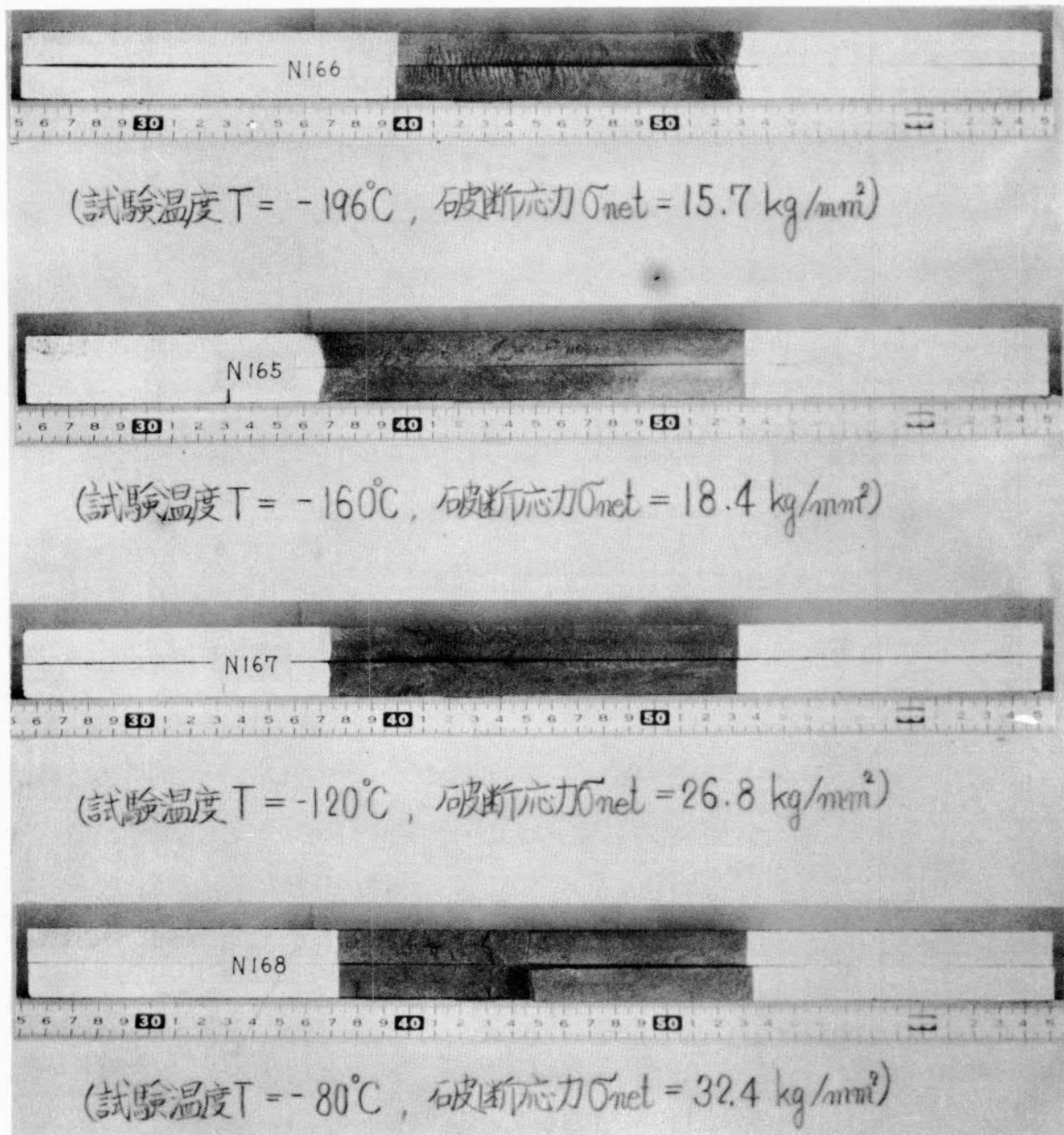
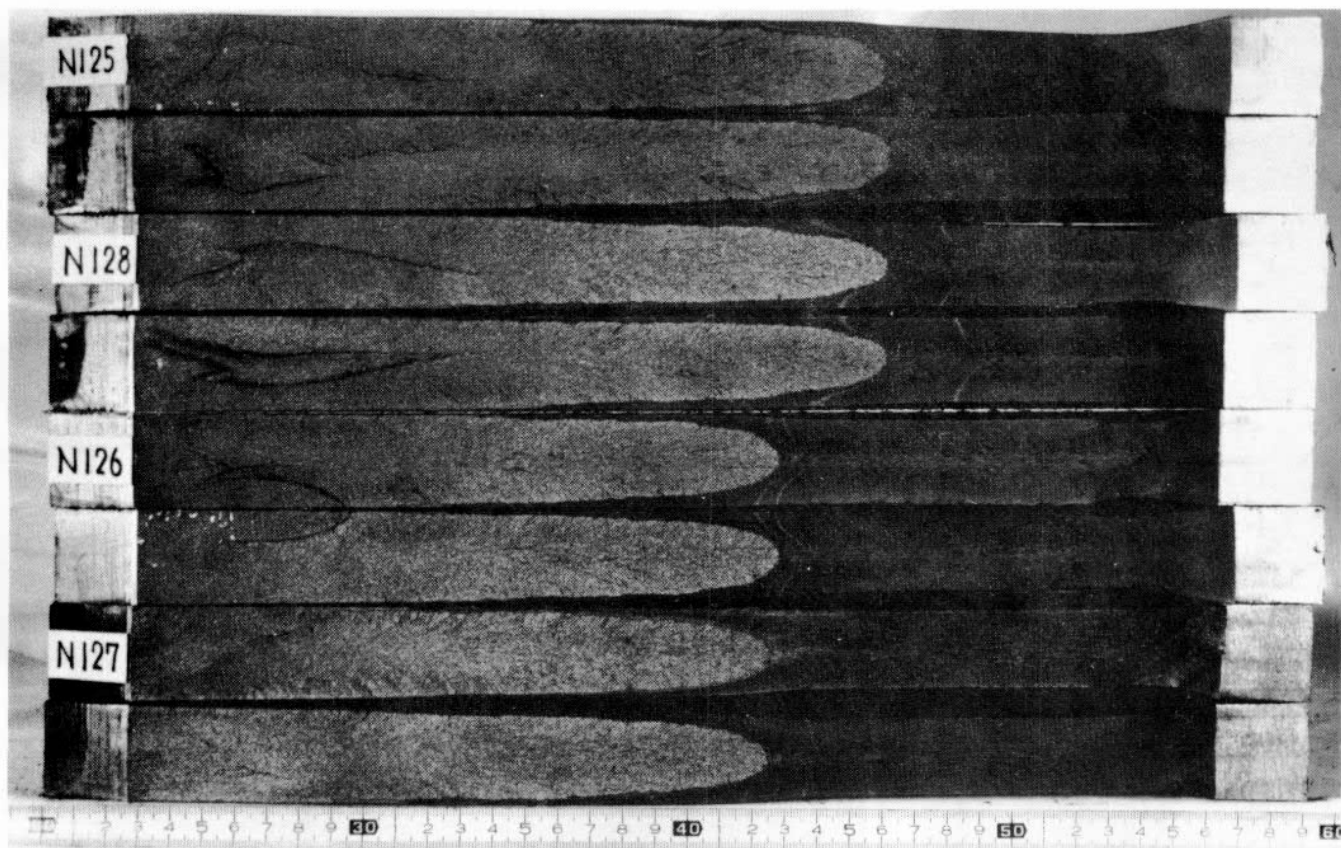
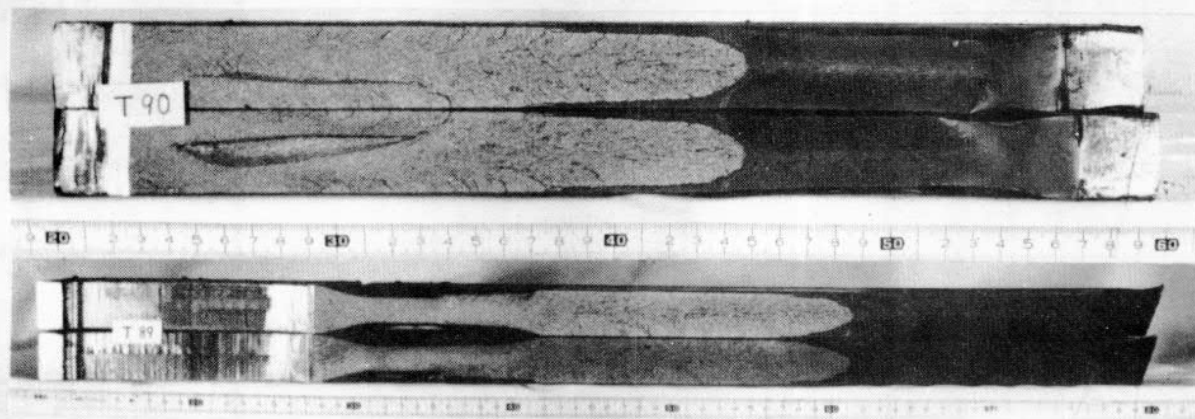


写真 4.36 ディープ・ノッチ試験片破面状況
(K5D鋼, 700°C A.C, 板厚 12.7 mm)



800°C A.C.



800°C A.C. 500°C W.C.

写真437. 二重引張試験がひにESS0試験片破面状況
(K5A鋼, 板厚 30mm)

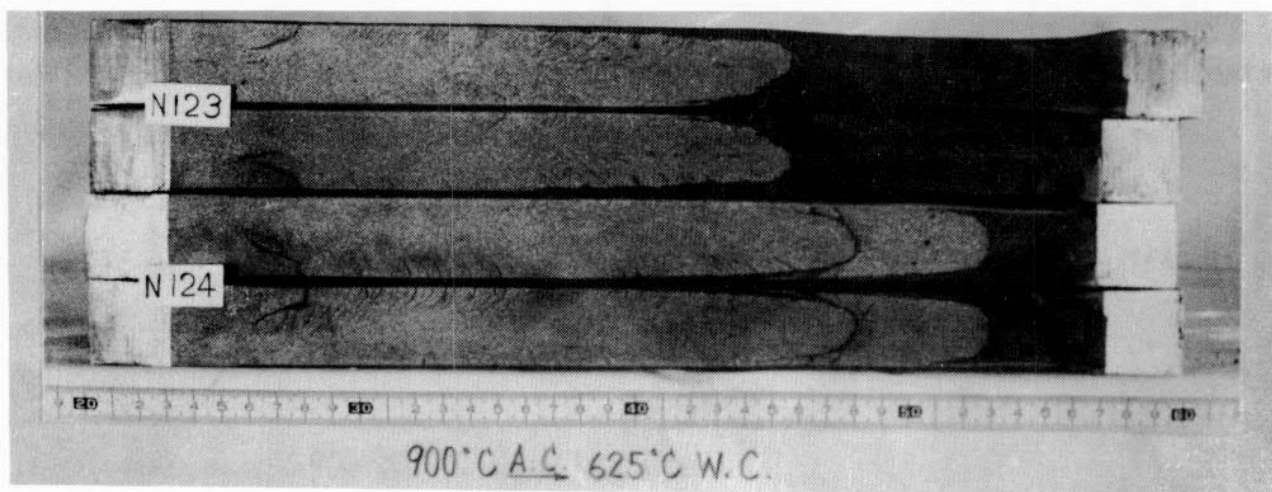
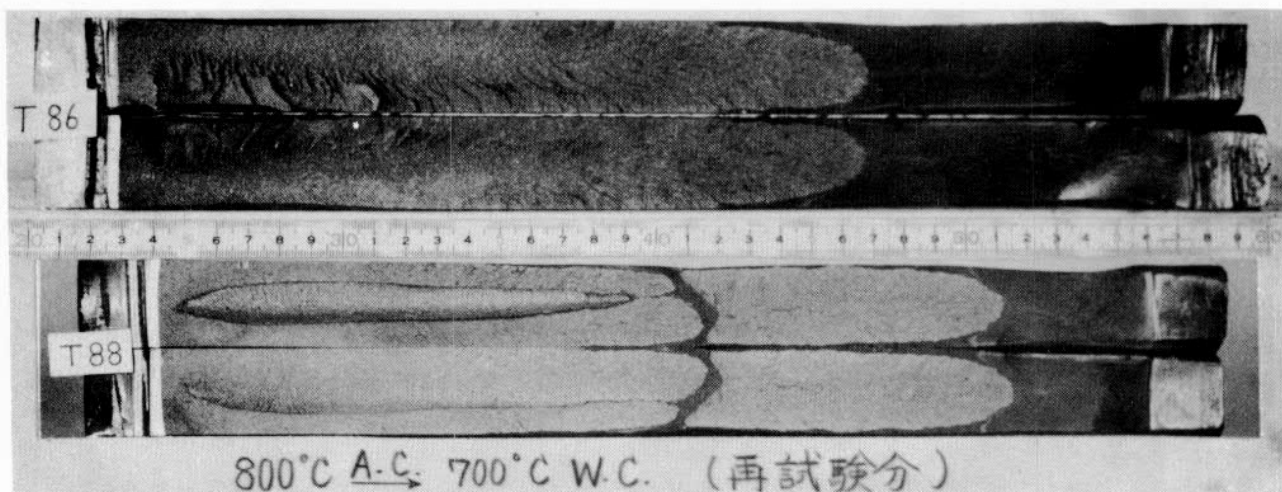


写真4.38. ESSO試験片破面状況
(K5A鋼 板厚 30 mm)

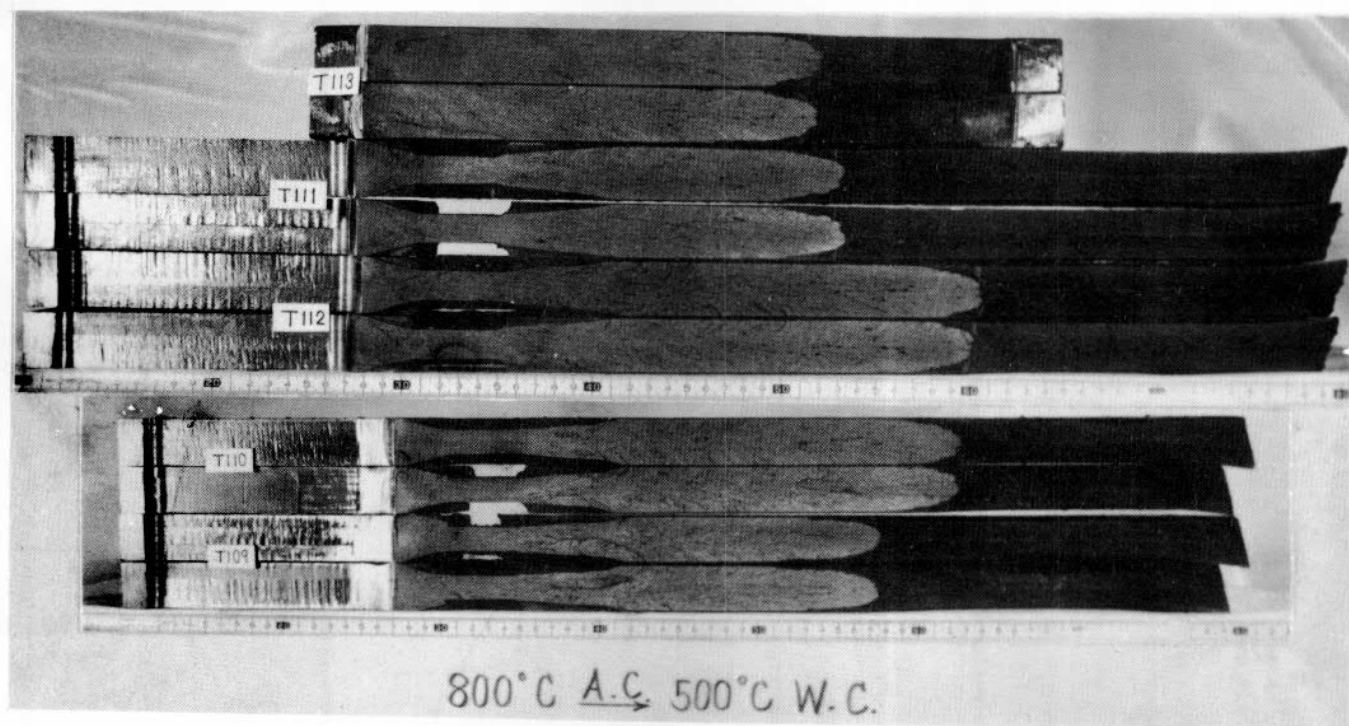
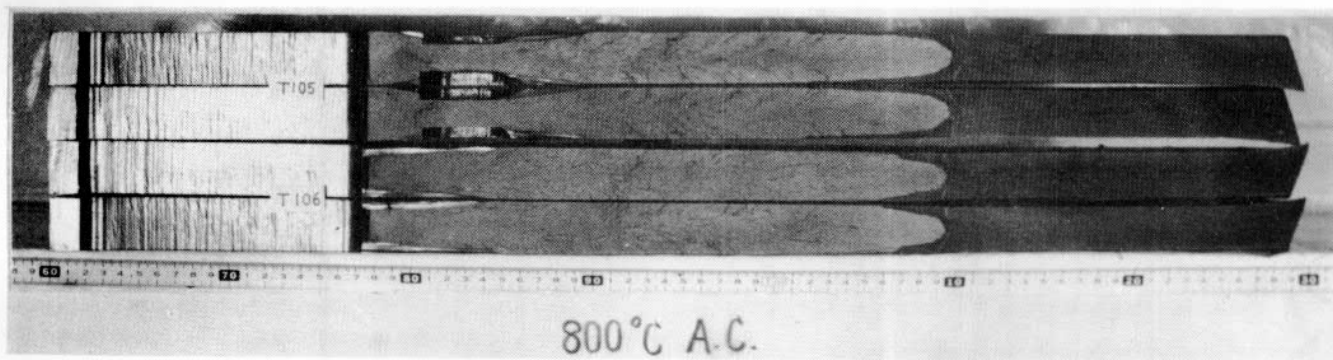


写真4.39. 二重引張試験後のESSO試験片破面状況
(K5D鋼, 板厚 30 mm)

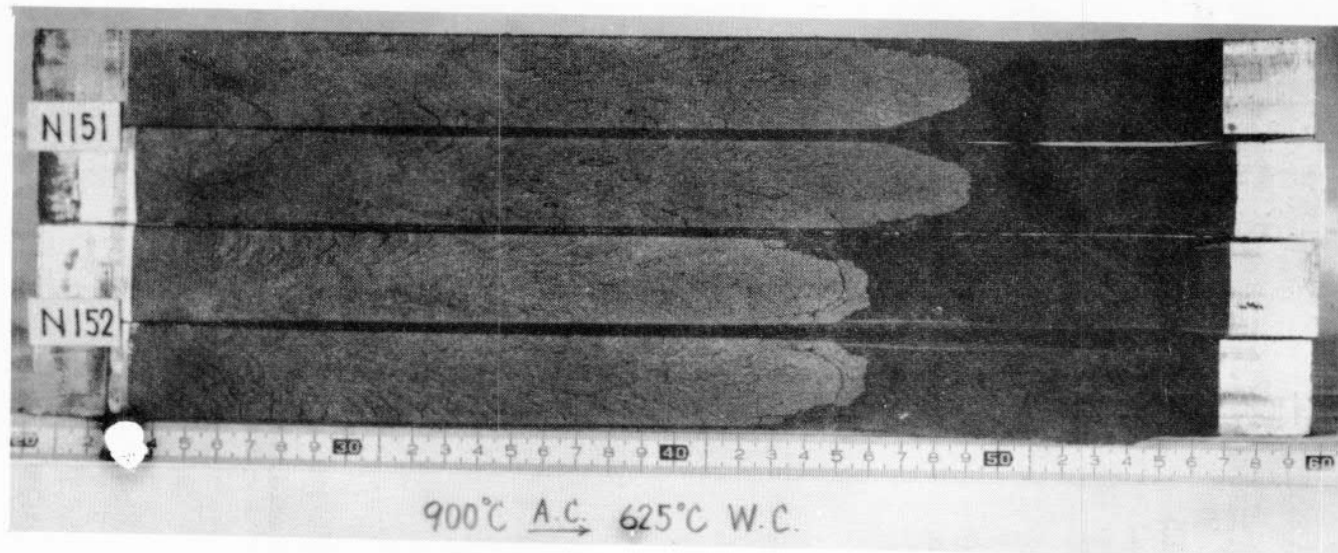
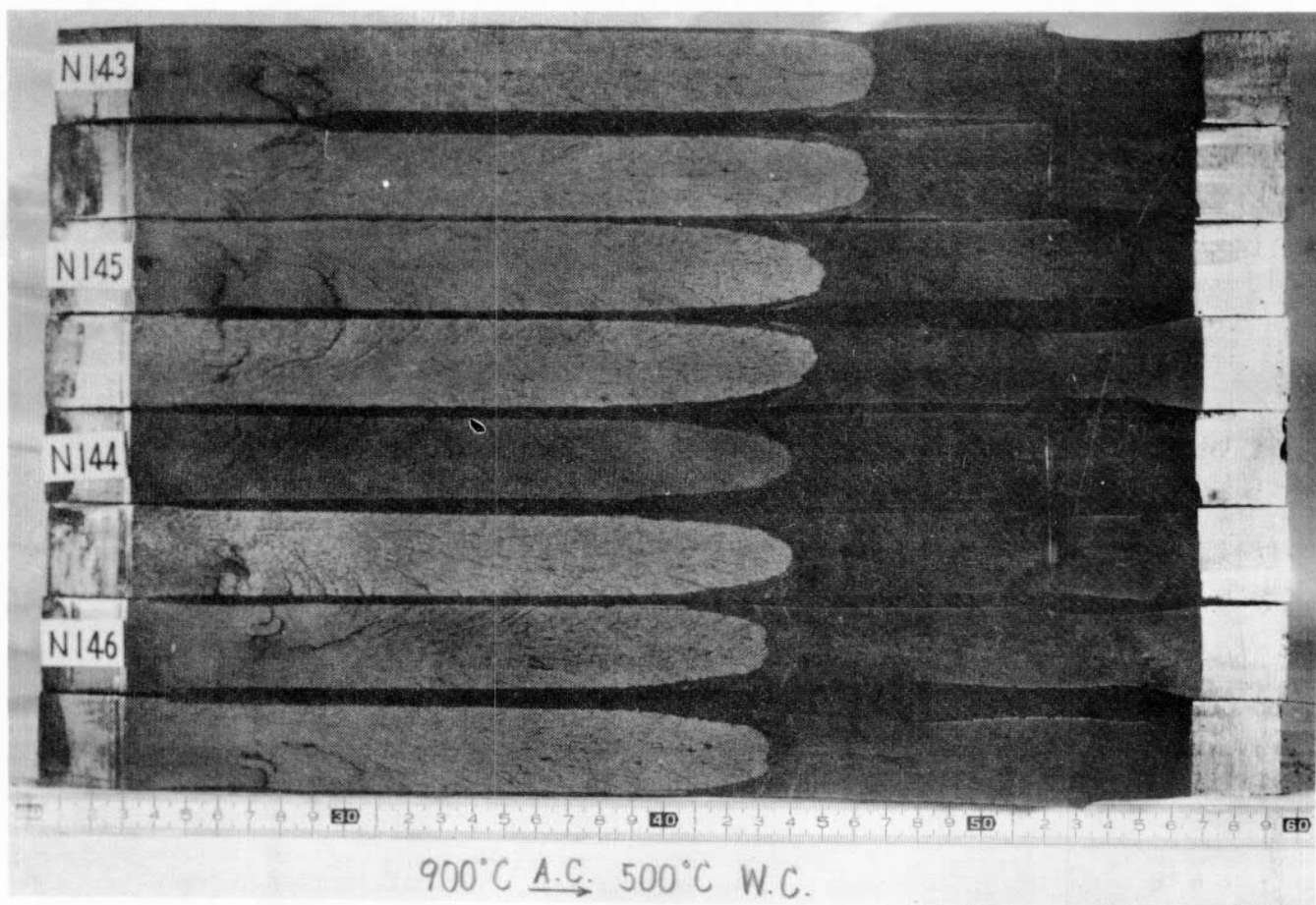


写真440. ESS0 試験片破面状況
(K5D鋼, 板厚 30mm)

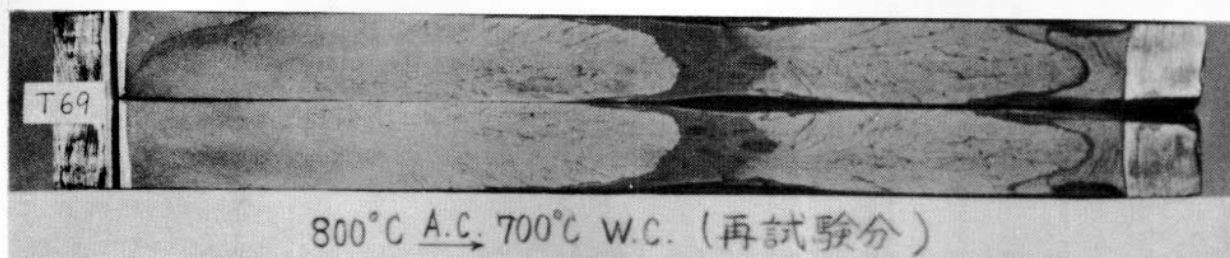
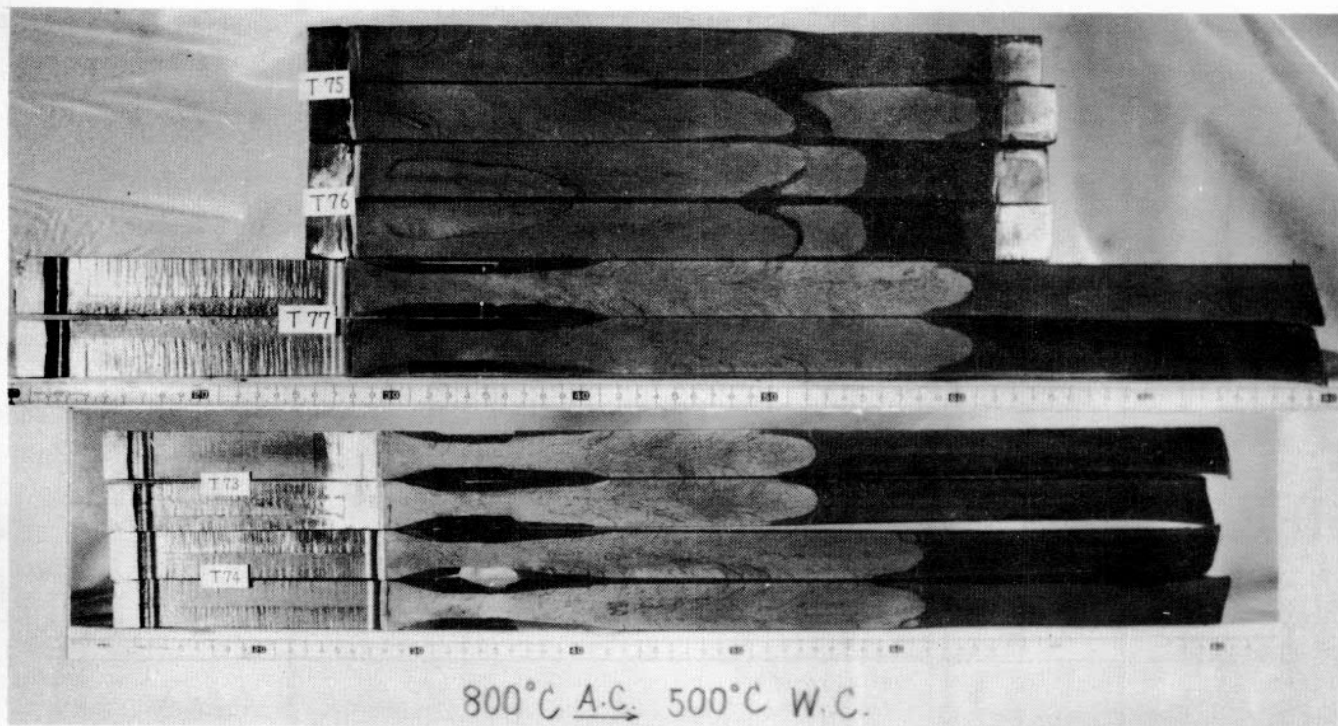


写真4.41. 二重引張試験片並びにESSO試験片破面状況
(K5E鋼, 板厚 30mm)

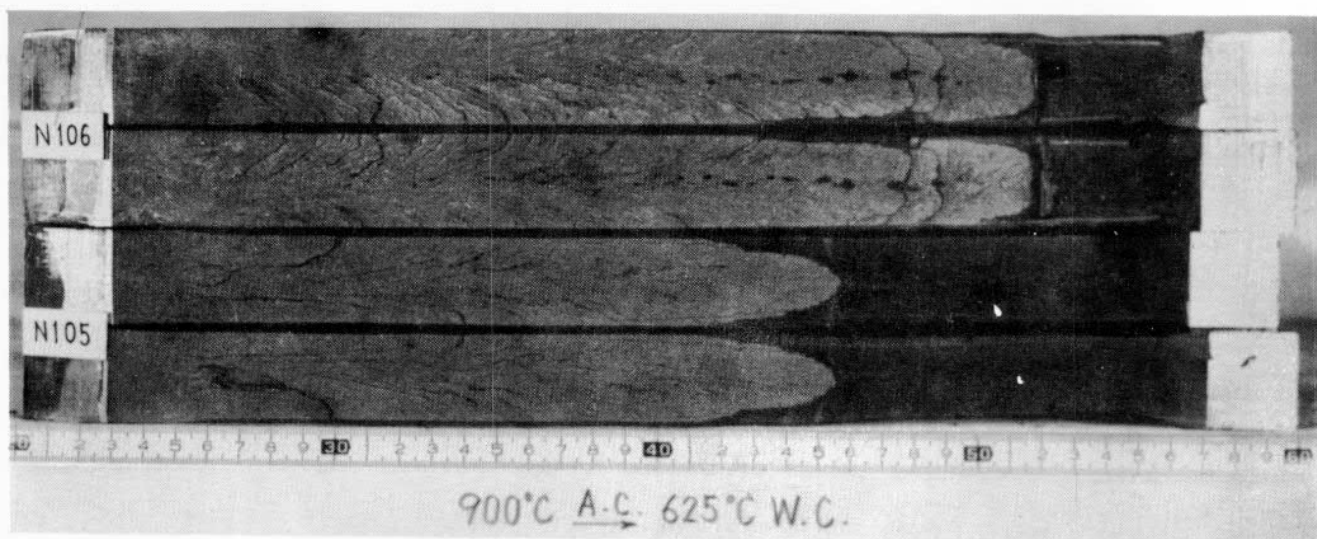
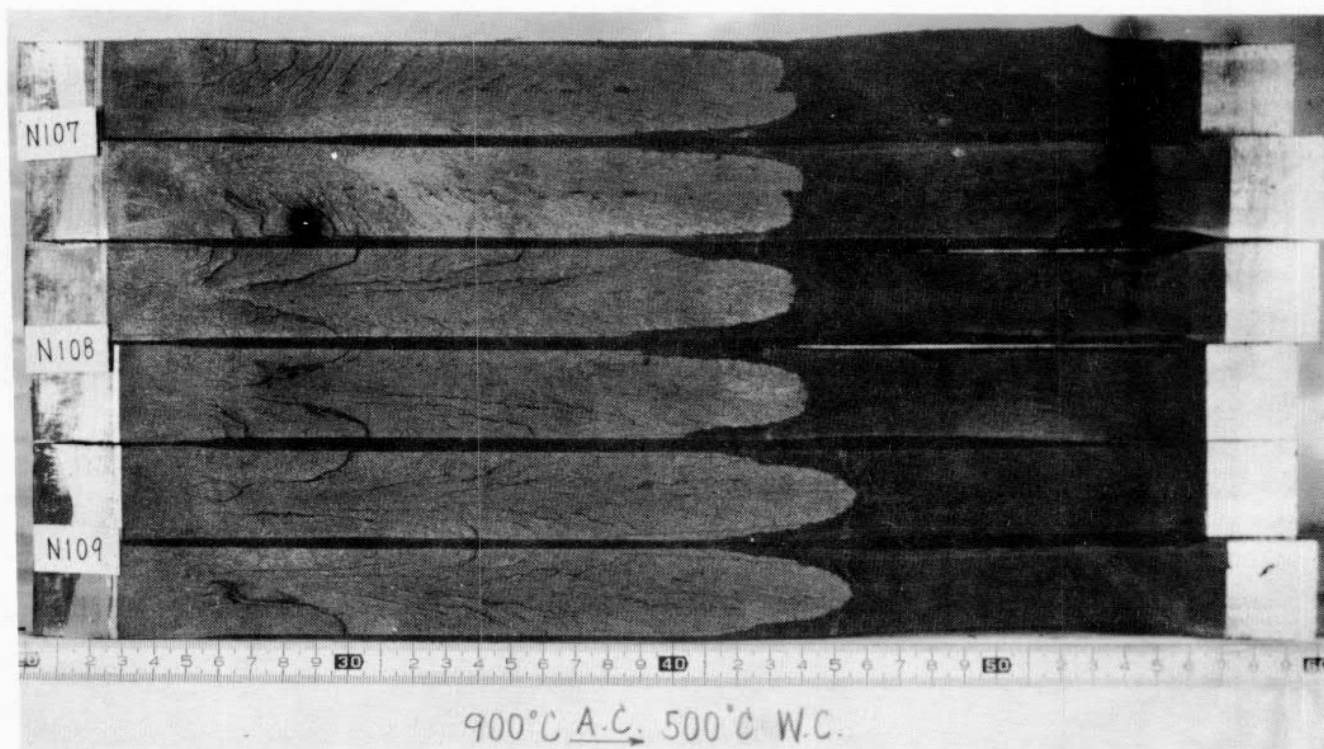


写真4.42 ESS0試験片破面状況
(K5E鋼, 板厚 30mm)

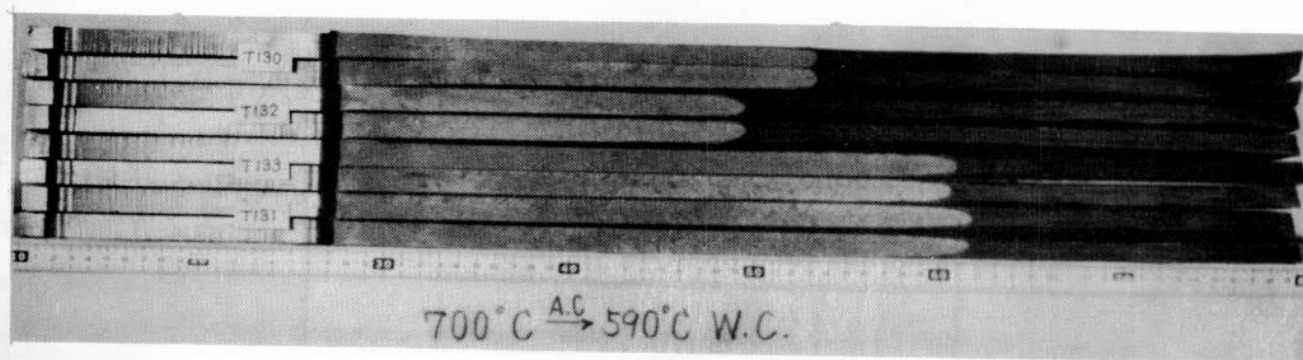
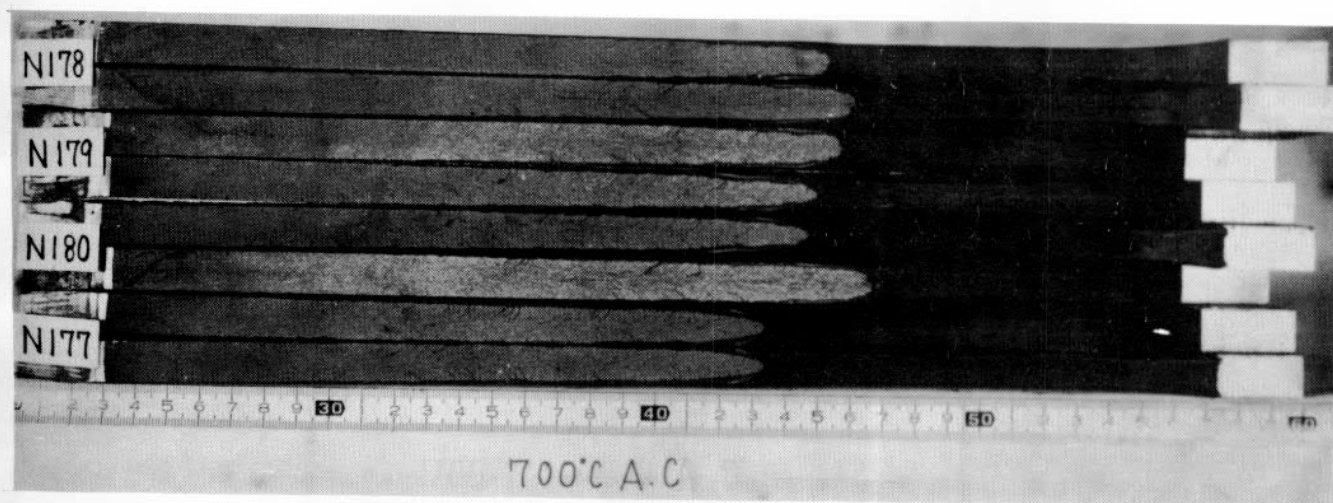
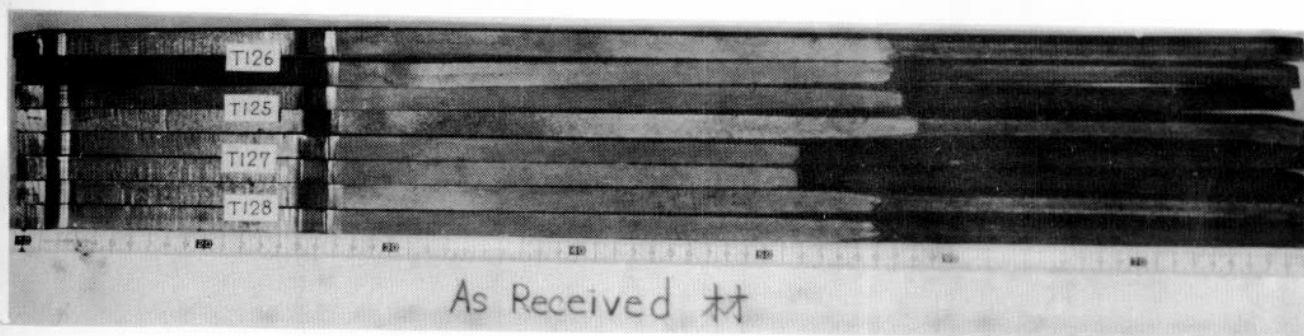


写真 443 二重引張試験片破面状況
(K5D鋼, 板厚 12.7mm)