

TN8&30 87-043  
PNC ~~I8430 87-31~~

~~内部資料~~

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. 20 [技術情報室]

チタン5%タンタル合金の溶接について

1987年 6月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

溶接方法

シールドガス

ティグ溶接

ミグ溶接

電子ビーム溶接

コンタミネーション

継手性能

有食試験

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1987 6

## チタン 5% タンタル合金の溶接について

武田誠一郎\*



### 要 旨

耐硝酸用チタン材料として開発されたチタン 5% タンタル合金 (Ti-5Ta) の溶接特性を純チタンと比較し、溶接施工仕様も確立する。

各種溶接方法を溶接条件と溶接継手を作製し、コンタミネーション、継手性能、耐食性等を検討した。

- (1) 溶接入熱量の増大およびシールドガマ中の空気混入量の増大とともに、継手部の酸化による色調変化の度合が大きくなる。
- (2) 継手部の色調に多少差異があっても金属光沢を維持していれば継手の引張り及び曲げ性能に影響を与えない。
- (3) 溶接継手の耐食性は母材より劣化することはない。

Ti-5Ta の溶接性能は純チタンと同様であり、溶接継手は純チタンに準拠した溶接仕様を採用することが妥当であることが確認された。

# チタン5%タンタル合金の溶接について

動力炉・核燃料開発事業団

再処理部

1. はじめに
  
2. 純チタン及びチタン5%タンタル合金の溶接について
  - 2-1 純チタン及びチタン5%タンタル合金の溶接概要
  - 2-2 溶接部シールド方法及び当金
  - 2-3 開先形状及び寸法
  - 2-4 溶接母材の表面処理
  - 2-5 溶接方法
    - (1) 大気中ティグ溶接
    - (2) 大気中ミグ溶接
    - (3) 不活性ガスボックスのティグ溶接
  - 2-6 溶接後の熱処理
  - 2-7 試験、検査
  
3. 純チタン及びチタン5%タンタル合金の溶接試験結果
  - 3-1 供試材の特性
  - 3-2 溶接試験結果
    - 3-2-1 基礎試験結果
      - (1) 雰囲気によるコンタミネーション試験
        - (a) 試験目的
        - (b) 供試材及び試験片
        - (c) 試験方法
          - ① ティグ溶接
          - ② 電子ビーム溶接
        - (d) 試験条件
          - ① ティグ溶接
          - ② 電子ビーム溶接

(e) 試験結果及び考察

- ① 大気中ティグ溶接の色調観察
- ② チャンバ内ティグ溶接の色調観察
- ③ 電子ビーム溶接の色調観察
- ④ 硬さ試験結果

(f) まとめ

(2) コンタミネーションと継手性能との関係

(a) 試験目的

(b) 試験片形状

(c) 試験方法

(d) 試験条件

(e) 試験結果及び考察

- ① 大気中での下向突合せ溶接ビードの色調観察
- ② 大気中での立向突合せ溶接ビードの色調観察
- ③ チャンバ内下向突合せ溶接ビードの色調観察
- ④ 電子ビーム溶接ビードの色調観察
- ⑤ 機械試験結果

(i) 引張試験結果

(ii) 曲げ試験結果

(f) まとめ

3-2-2 機器の製作を考慮した試験結果

(1) 供試材の溶接条件

(2) 継手の試験結果 (Ti-5Ta製管と管板及び管と管の継手の試験結果)

3-2-3 溶接部の腐食試験結果

(1) 試験片

(2) 試験方法

(a) 試験装置

(b) 試験液

(c) 試験材の処理および評価方法

(3) 試験結果 (Ti-5Ta溶接材, 熱処理材の硝酸溶液中における腐食速度の評価および  
Ti-5Ta応力負荷材の割れ評価)

4. その他

- 4-1 作業性の悪い環境での溶接について
- 4-2 溶接に伴うタンタルの偏析について
- 4-3 純チタンとチタン5%タンタル合金の溶接について

5. 結 論

## 1. はじめに

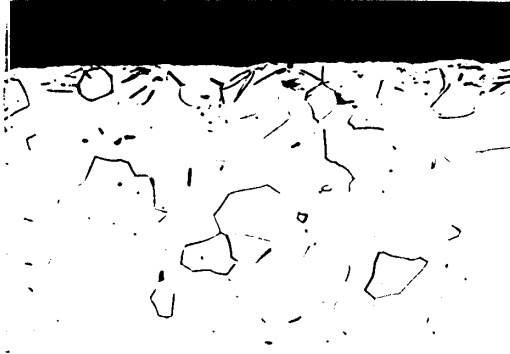
純チタンは酸化性腐食環境において広範囲にわたる不働態領域を有することから一般化学工業の分野では優れた耐食材料として利用されているが高温、高濃度の硝酸溶液に対しより優れた耐食性を有する材料としてチタン5%タンタル合金が開発され硝酸を取り扱う化学工業の分野を中心に装置材料として使用されている。

チタン5%タンタル合金は純チタンに5%のタンタルを含有した $\alpha$ 型チタン合金であり、顕微鏡組織は純チタンと変わるところがない(写真-1)。チタンとタンタルは全濃度にわたって固溶体を形成し、原子半径は各々1.45Å, 1.46Åと極めてよく似た金属元素でもある。表-1に純チタン、チタン5%タンタル合金の物理的性質を比較した。チタン5%タンタル合金の物理的性質は純チタンのそれと変わるところが無く、特に溶接特性に影響を及ぼすと考えられる融点、及び変態点(HCP-BCC)もほぼ同じであると言える。表-2に純チタンとチタン5%タンタル合金の化学成分及び機械的性質を比較した。チタン5%タンタル合金の化学成分は工業用純チタン(JIS 2種)にタンタルを4~6%加えたものであり、他の成分は工業用純チタン(JIS 2種)と全く同じである。従って機械的性質についても工業用純チタン(JIS 2種)と全く同じ規格がチタン5%タンタル合金について設定されている。

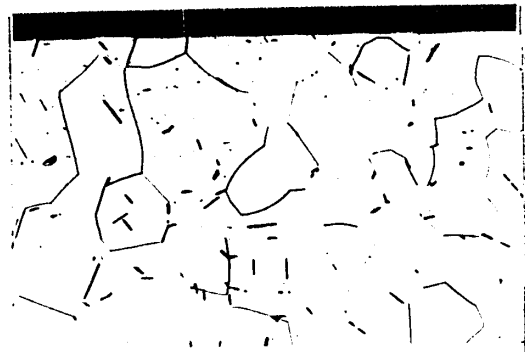
それらのことからチタン5%タンタル合金は純チタンとほぼ同程度の加工特性、溶接特性を有するものと考えられ、機器製作メーカーは工業用純チタン(JIS 2種)の製作仕様に準ずる仕様により、これまでチタン5%タンタル合金製機器を製作し実績を積んできた。

ここではチタン5%タンタル合金の溶接の特性を純チタンと比較する形で示すとともにチタン5%タンタル合金の溶接の基本的な仕様となる純チタンの溶接の仕様(日本工業規格、日本溶接協会規格等)の概要を示し、その仕様に基ついて行った溶接試験の結果をチタン5%タンタル合金及び純チタンの両材料間で比較した。





Ti-5Ta母材の顕微鏡組織  $50 \mu\text{m}$



Ti母材の顕微鏡組織  $100 \mu\text{m}$

写真-1 TiとTi-5Taの顕微鏡組織

表-1 チタンの物理的性質

材料	チタン (Ti)	チタン5%タンタル (Ti-5Ta)	ジルコニウム (Zr)	タンタル (Ta)	18Cr-8Ni ステンレス鋼
性質					
比重 (g/cm <sup>3</sup> )	4.54	4.68	6.49	16.6	7.9
結晶構造	hcp (<885°C) bcc (>885°C)	hcp (<880°C) bcc (>880°C)	hcp (<863°C) bcc (>863°C)	bcc	fcc
融点 (°C)	1730	1720	1845	3000	1400~1430
線膨張係数 (1/°C)	8.8×10 <sup>-6</sup>	8.9×10 <sup>-6</sup>	5.8×10 <sup>-6</sup>	1.5×10 <sup>-6</sup>	1.7×10 <sup>-6</sup>
熱伝導度 (Cal/cm <sup>2</sup> /sec/°C/cm)	0.041	0.038	0.040	0.13	0.039
ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> )	10850	11000	9100	18900	20400

表-2 TiとTi-5Taの化学成分と機械的性質

種類	化学成分						機械的性質				室温における組織	ASTM Grade
	H	O	N	Fe	Ta	その他	Ti	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	耐力 kg/mm <sup>2</sup>	伸び %		
Ti JIS 1種	≤ 0.013	≤ 0.15	≤ 0.05	≤ 0.20	—	—	残部	28~42	≥ 17	≥ 27	α	1
Ti JIS 2種	≤ 0.013	≤ 0.20	≤ 0.05	≤ 0.25	—	—	残部	35~52	≥ 22	≥ 23	α	2
Ti JIS 3種	≤ 0.013	≤ 0.30	≤ 0.07	≤ 0.30	—	—	残部	49~63	≥ 35	≥ 18	α	3
Ti-5Ta <sup>1)</sup>	≤ 0.010	≤ 0.20	≤ 0.05	≤ 0.25	4.0/6.0	—	残部	35~52	≥ 22	≥ 23	α	—

1) JIS 2種に準拠した事業団の仕様

## 2. 純チタン及びチタン5%タンタル合金の溶接について

### 2-1 Ti及びTi-5Taの溶接の概要

Ti, Ti-5Taは溶接温度で、酸素、窒素などと親和力が強く、Tiを大気中で250℃以上の温度に加熱すると酸化がはじまるが、その酸化速度は加熱温度とともに増加する。

図-1-1はTiを大気中に250℃～1300℃の範囲の種々の温度に加熱したときのTiの重量増加と加熱時間との関係を示したものである。850℃～900℃の温度範囲で酸化速度に大きな変化があることおよび900℃～1300℃における酸化速度は一様に非常に大きいことに注目しなければならない。Tiはこのように高温で急速に酸化するばかりでなく酸素・窒素を固溶していちじるしく硬化する。

なおTiは元来、銀白色で、かつ光沢を有するが、大気中で加熱すると図-1-2に示すようにその表面は変色する。この変色は約250℃からはじまり、加熱温度の上昇とともに金色(麦色)、紫色、青色などの順序で変化し、さらに高温になると灰色、黒白色、黄白色となり金属光沢はなくなりまったく脆弱なものとなる。

以上は、Tiについて述べたが、Ti-5Taの場合も同様である。Ti及びTi-5Taの溶接中に大気中の酸素、窒素、水素などの侵入を断することのできる溶接法でなければならぬが、この条件を満たす溶接法として考えられるものは、

- ① 大気中でのティグ溶接法
- ② 大気中でのミグ溶接法
- ③ 不活性ガスボックス中でのティグ溶接法

などがある。

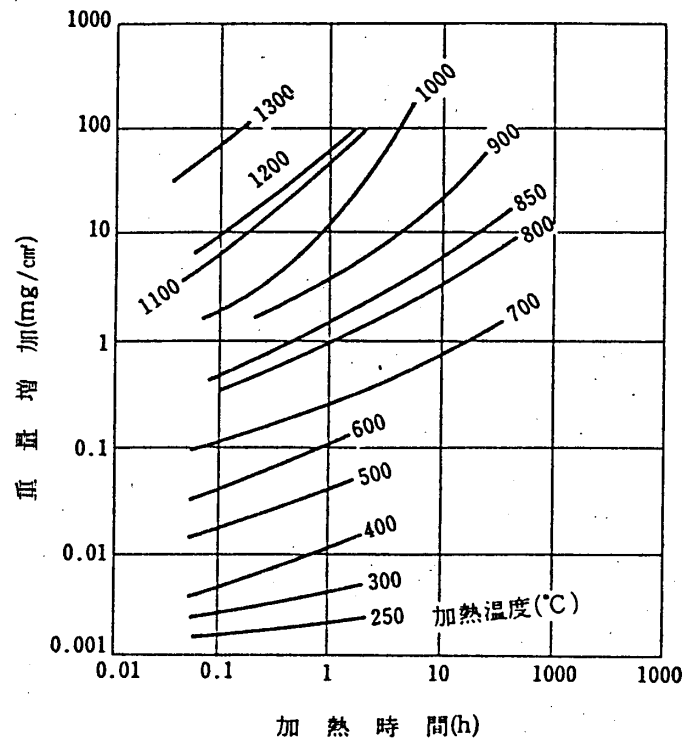


図-1-1 大気中種々の温度に加熱したときのTiの重量増加

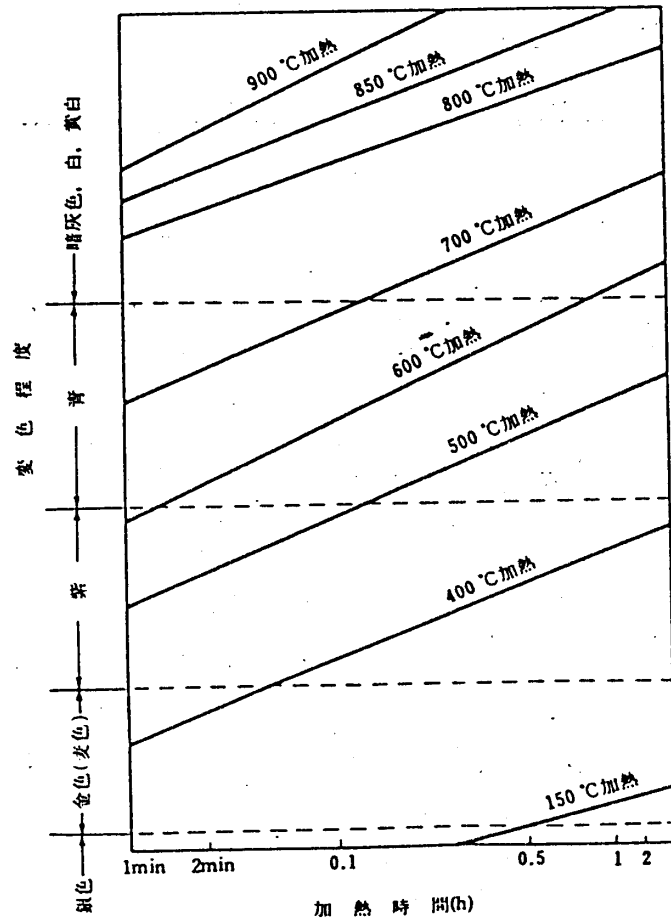


図-1-2 大気中加熱によるTi表面の変色程度(例)

## 2-2 溶接部シールド方法および当金

Ti, Ti-5Taは溶接において前述のごとく酸素、窒素、水素などを吸収し、脆化するので、アークの周囲のみならず溶接ビードが 500℃程度以下に冷却するまで不活性ガスで被覆することが大切である。このためボックス中にアルゴンガスを封入し、その中で溶接を行なうのが、理想的であるが、実際には、以下に述べる大気中で適当な治具を用いてアルゴンガスで十分シールドすれば溶接はさほど困難ではない。単にトーチより流出するアルゴンガスでアークと大気をしゃ断するだけでは、酸素、窒素、水素などの不純ガスと親和力が強いので、トーチ部分以外の溶接ビード表面のシールド（アフターシールド）、溶接ビード裏面シールド（バックシールド）を行なう。これらの金属の溶接中に侵入する不純物やガスの経路を考えてみるとつぎの4項目に大別される。

- ① 大気中からの侵入
  - (a) 溶接部表面からの侵入
  - (b) 溶接部裏面からの侵入
- ② 母材から不純物の侵入
- ③ 溶加棒から不純物の侵入
- ④ その他

これらの不純物で溶接部が汚染されると溶接部の硬度が上昇し、ブローホール発生などの欠陥を生ずる。

図-2 にアフターシールド、バックシールド治具の一例を示す。

溶接部表面の補助ガスシールド用ノズルの例

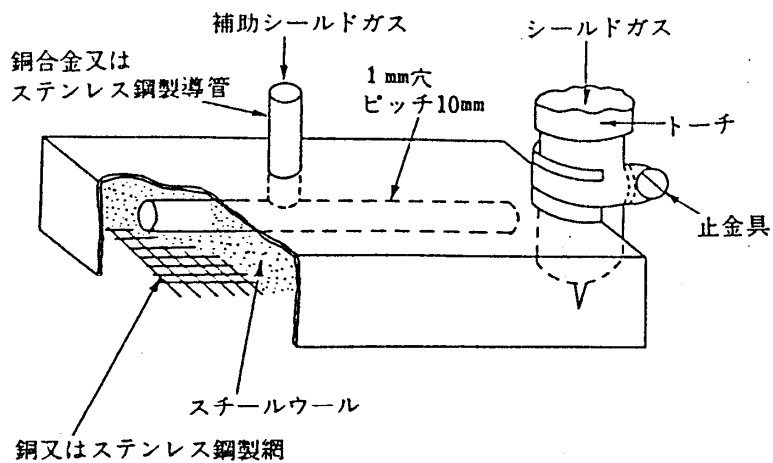
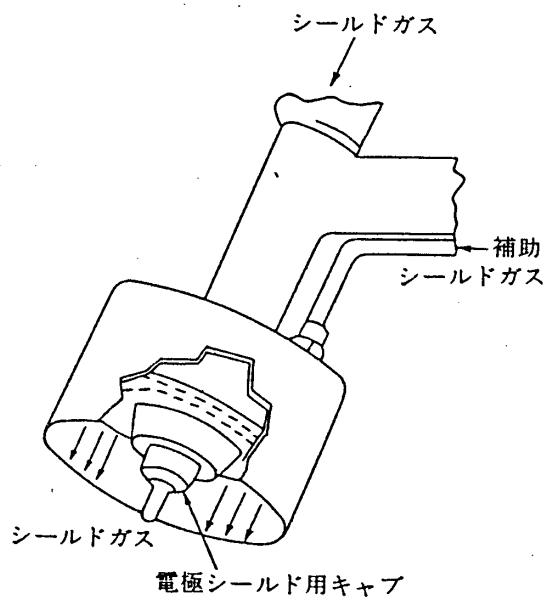
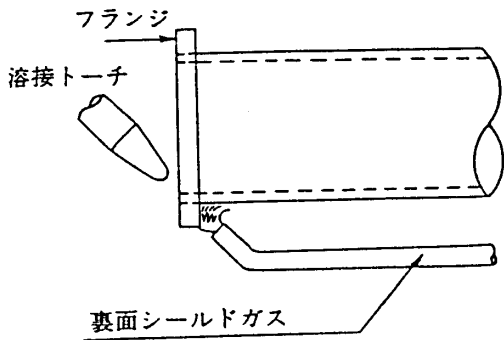
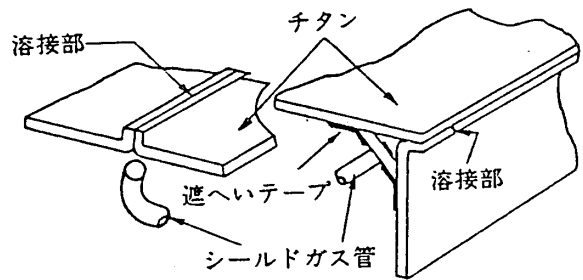


図-2-1 シールド治具の例 (1)

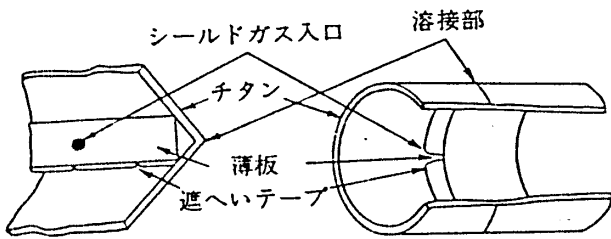
溶接部裏面の補助ガスシールド方法の例



(a) フランジ円周継手

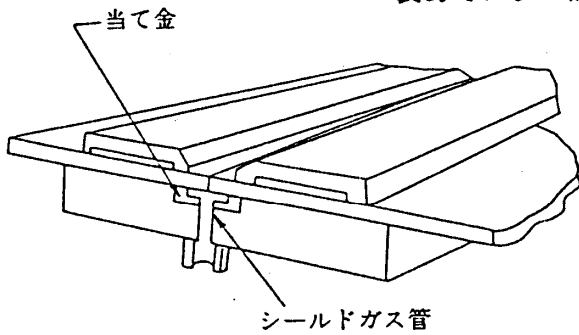


(c)へり継手

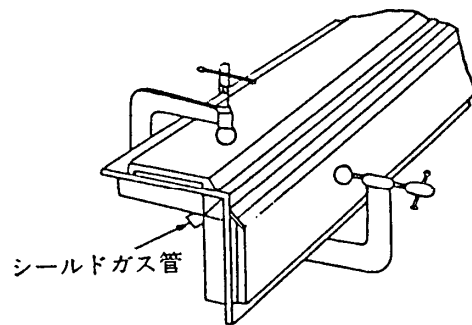


(b)突合せ、かど継手

裏あてによる補助ガスシールド方法の例



(a)突合せ継手



(b)かど継手

図-2-2 シールド治具の例(2)



### 2-3 開先形状および寸法

TiおよびTi-5Taの開先は、ステンレス鋼などの他の金属と大差なく、突合せ、重ね、T型開先などが使われる。

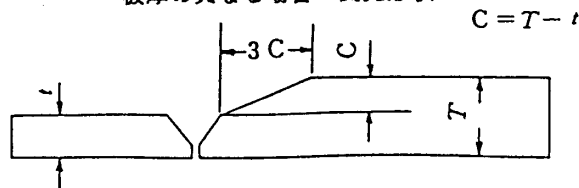
代表的開先形状および寸法の一例を表-3に示す。異種板厚の溶接においては、適当なテーパを与えて、厚板側を薄板側の板厚にするのが望ましい。

溶接継手とする材料の切断および開先は、機械加工によるのが望ましい。シャーまたはガス切断などによる切断面を開先加工する場合には、機械切削により2.0~3.0mm除去を原則とする。

表-3 Tiの溶接における開先形状

継手の種類	開先形状	板厚 $t$ mm	ルート間隔 $b$ mm	ルート面 $d$ mm	開先角度 $r$ 度	$R$ mm	パス数
突合せ	I形	0.5~1.5	0	—	—	—	1
		1~2	0				1
			0~1				2
	V形	1.5~3	0~1	0.5~1	60~90	—	1
		3~16	0~2	1~1.5			2~多層
X形	12~38	0~2	1~1.5	60~90	—	多層	
U形	12~38	0~2	1~1.5	15~30	6~10	多層	
H形	> 19	0~2	1~1.5	15~30	6~10	多層	
T	すみ肉	1~6	0~2	—	—	—	1~3
	L形	4~12	0~2	< 2	45~60	—	2~4
	K形	> 10	0~2	< 2	40~50	—	2~多層
重ね	すみ肉	> 0.5	0~0.5	—	80~100	—	1~多層
かど	すみ肉	> 2	< 0.5	—	80~100	—	1~多層
へり	I形 V形	> 1	< 0.5	—	90~180	—	1~多層

板厚の異なる場合の開先形状



## 2-4 溶接母材の表面処理

母材から溶接部に侵入する不純物は、主として開先の加工に際して付着する油脂、じんあいなどが溶接性に悪影響をおよぼすので開先面を清浄にしなければならない。

クリーニングの方法としては

- (i) HF-HNO<sub>3</sub> 溶液による酸洗浄
- (ii) アルカリ洗浄
- (iii) 有機溶剤による脱脂（アルコール、アセトン等）
- (iv) ステンレス鋼製ワイヤブラシによるクリーニング

があり、それぞれ一長一短がある。通常 (iii) (iv) が用いられる。

## 2-5 溶接方法

TiおよびTi-5Taには、大気中のティグ溶接、大気中のミグ溶接、不活性ガスボックス中のティグ溶接、電子ビーム溶接などが用いられているが、ここでは、最も良く使われている大気中のティグ溶接、大気中のミグ溶接、不活性ガスボックス中のティグ溶接の概要について述べる。

### (1) 大気中のティグ溶接

ティグ溶接はタングステンを電極に用いた溶接法で、ガス溶接と同様溶接棒をアークで溶かしつつ溶接するが板厚2mm以下のものは、溶接棒を必要としないのでアーク熱だけで溶接を行なう。ティグ溶接には、手動式、全自動式が用いられる。手動式はトーチ、アーク溶接機、制御装置およびアルゴン供給装置で構成される。アーク溶接機は、変圧器、過飽和リアクトル、セレン整流器の組み合わせで交流電源から溶接用の直流を供給する。制御装置は、溶接アークを容易に発生させるための高周波発生装置および溶接終了のリレースイッチ、シールドガスのリレースイッチの組み合わせであり、トーチはタングステン電極を支持し、その周囲にアルゴンガスを放流し、電極の酸化及び熔融池の酸化を防ぐようにし、また溶接ビードの表面の酸化を防ぐアフターシールド治具を取り付けている。

なお、タングステン電極の過熱を防ぐために水冷する構造になっている。半自動式は、溶加ワイヤのみを自動送りする。この送りは、速度調整機により一定送度で送給され、トーチの移行は手動で行なわれる。

全自動式は、溶加ワイヤおよびトーチの移動を自動送りしたものでトーチを電動車に取り付けて速度調整機により一定速度で溶接ビードが置かれるようにしたものである。

表-4にTiのティグ溶接の一例を示す。Ti-5Taの溶接条件についてもTiと融点等がほぼ同一であるので、表-4の溶接条件が使用できる。

なお、ティグ溶接用電極棒にはトリエテッドタングステン電極棒を用い、その先端の頂角が20~30°になるようにして用いるのが望ましい。予熱は行なわない。ハス間温度は、できる限り低く保くことが望ましい。

タック溶接は、本溶接に影響するので欠陥の発生およびコンタミネーションの防止に留意し慎重に行う。タック溶接は、できる限り少なくしまた固定具によって拘束するのが望ましい。表-5に各板厚に対するタック溶接のピッチおよび寸法の例を示す。

運棒は原則としてストリンガービードにて行う。運棒の先端と母材表面との距離は電極棒の 1.5 倍以下とし、かつ電極棒が母材表面にと直角又は  $15^\circ$  以下の後退角となるように溶接トーチを保持して作業を行なうのが良い。図-3 に溶加材の挿入の方法を示す。

## (2) 大気中のミグ溶接

ミグ溶接は、溶加ワイヤを電極にした溶接法である。

電源は直流逆極性とし、電極は溶加ワイヤとして消耗するので自動的に送給する。

トーチを手動で移動させる半自動式とトーチを電動車に取り付けた全自動式の 2 種類がある。溶接装置はトーチ、電動車、ワイヤ供給装置、制御装置、アーク溶接機、アルゴンガス供給装置より構成される。Ti, Ti-5Ta 板厚が 5 mm 以上になるとミグ溶接が容易に使用できる。表-6 にミグ溶接の条件の一例を示す。

表-4 Tiのテイグ溶接条件（直流，棒一）の例

板厚 mm	開先形状	パス数	開先寸法		電極 棒径 mm	* 溶接電流 A	* 溶加材 mm	シールドガス流量 **		ガスカ ップ 径 mm	
			ルート 間隔 d mm	角度 γ				トーチ	補助		
0.5		1	-	0.5	-	20~30	0.8	6~8	15~18	20~30	6.4
		1	-	-	-	25~35	-	8~12	-	-	
0.8		1	-	0.8	-	30~40	0.8	8~12	16~20	20~30	8.0
		1	-	-	-	30~40	-	-	-	-	
1.5		1	-	1	-	50~60	1.6	11~15	20~25	20~35	9.6
		1	-	1.5	-	50~60	-	-	-	-	
3.0		2	-	1.5	45~60	70~100	2.4	11~15	25~35	30~40	9.6
		1	-	3	-	90~120	-	-	-	-	
5.0		3	0~2	1.5	45~90	100~130	2.4	12~16	25~35	30~40	9.6
		2	-	5	-	110~140	-	-	-	-	
10.0		表2 裏2	0~2	1.5	60~90	120~150	2.4	12~16	25~35	30~40	9.6

\* 立向，横向（水平）の場合には溶接電流値を15%程度低くし，かつ溶接速度も遅くする。U形，X形及びH形開先を用いる場合，パス数は変わるが，溶接条件は同様である。同一板厚のパイプの溶接では溶接電流値を約20%程度低くする。

\*\* シールドガスの流量はジグの形状，寸法によりそれぞれ異なる。

表-5 仮付け溶接のピッチとその溶接長

溶接母材板厚 (mm)	ピッチ (mm)	溶接長 (mm)
< 3	40~50	2~3
3~6	50~60	3~5
> 6	60~80	10~12

(注) 仮付け溶接は飛石または対称法（現場では振分けともいう）にて行なう。

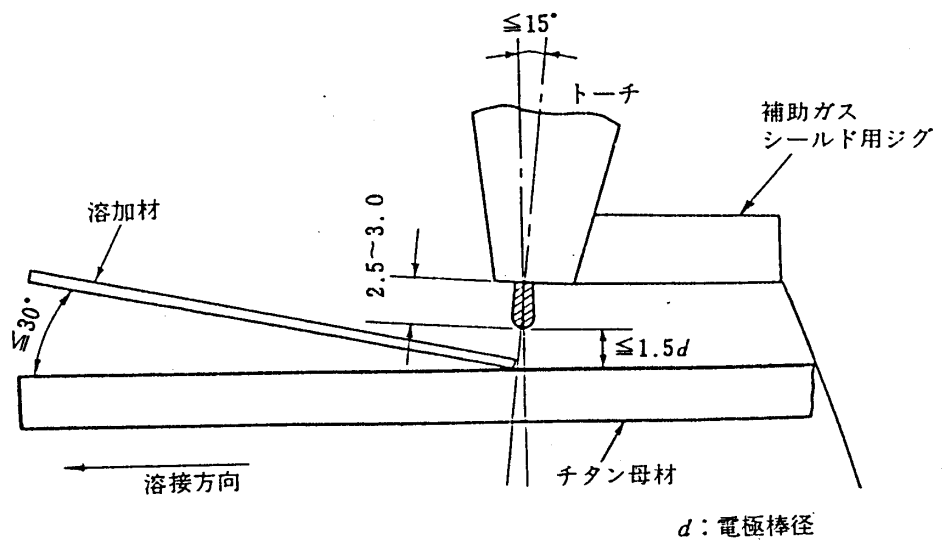


図-3 溶接方法 (溶加材の挿入の方法)



表-6 T i の ミ グ 溶 接 条 件 の 例

板 厚	開 先 形 状	パ ス 数	溶 接 心 線 <sup>2)</sup> (mmφ)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	心 線 送 り 速 度 (mm/min)	ト ー チ 間 隙 (mm)	ア ル ゴ ン 流 量 <sup>3)</sup> (ℓ/min)		
								ト ー チ	補 助	裏 面
5 ~ 9	V	1 ~ 2	1.6	260 ~ 300	550	5000 ~ 6000	27	20	20 ~ 30	30 ~ 40
> 9	V または X	> 2	1.6 ~ 2.3	260 ~ 320	450 ~ 500	6000 ~ 7000	28	20	20 ~ 30	30 ~ 40

(注) 1) ミグ溶接はルートをティグ溶接にて溶加材なしで溶接したのち採用するのを原則とする。

2) アルゴン流量はジグの形状、寸法によりそれぞれ異なる。

(3) 不活性ガスボックス中のティグ溶接

溶接ボックス内をアルゴンガスで置換し、ティグ溶接トーチ用電極で溶接を行なう。溶接ボックスへのアルゴンガス封入は、ボックス内を排気装置により排気しアルゴンガスを常圧より高めに入れる。大気中でアルゴンシールド溶接を行なうものよりも酸素、窒素による汚染は少ない。しかし、事前の準備に長時間を要すること、複雑な形状の溶接が困難であること等から、溶接個所に応じて、大気中のティグ溶接と使い分けることが必要である。

## 2-6 溶接後の熱処理

Ti, Ti-5Taの溶接では、とくに後熱処理は必要としない。しかし残留応力を除去しなければならないときには、表-7に示すような後熱処理をほどこす場合もある。

表-7 Ti及びTi-5Taの応力除去処理標準条件

種 類	加 熱 温 度 (°C)	加 熱 時 間 (min)
Ti JIS 1種	550~600	15~30
Ti JIS 2種	550~600	15~30
Ti JIS 3種	550~600	15~60
Ti-5Ta	550~600	15~30

## 2-7 試験, 検査

Tiの試験, 検査を基本にして述べる。Ti-5Taの溶接の試験検査についても, 同じ方法が適用できる。

### (1) 外 観

溶接終了後, 溶接部の変色の程度と溶接部の表面の欠陥(割れ, 有害と認められるアンダーカット, オーバーラップなど)の有無を目視により調べなければならない。溶接部の変色の程度とその性能との関係を表-8に示す。

### (2) 表面形状

ビード表面は, 滑らかで均一な形状であり, かつビードの止端部において母材とビード表面のなす角は, なるべく鈍角であることが望ましい。

### (3) 内部欠陥

放射線透過試験により内部欠陥の検査を行う場合はJIS Z 3107(チタン溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法)に従って試験し, 必要かつ十分な品質であることを確認しなければならない。

### (4) 溶接継手の機械的性能

#### ① 引張強さ

溶接継手の引張強さは, 母材とほぼ同等でなければならない。

#### ② 曲げ性能

溶接部の曲げ試験を行なう場合はJIS Z 3124(突合せ溶接継手のローラ曲げ試験方法)又はJIS Z 3122(突合せ継手の型曲げ試験方法)による。ただし曲げ試験用ジグの雄型の半径は表-9による。曲げ試験後の曲げ表面には, いかなる方向にも3.0mmを超える割れ, その他有害と認められる欠陥があってはならない。

#### ③ 硬 度

硬さ測定を行なう場合, 正常な溶接部の硬さは, ビッカース硬さにおいて母材の硬さより40程度超えないことを目安とする。

表-8 溶接部の変色の程度とその性質との関係

チタン溶接部の 変色の程度	溶 接 部 の 性 質	参 考
		チタンの溶接技術 検定における合否
銀 色	コンタミネーションのない健全な溶接部である。	合 格
金色又は麦色	ほとんどコンタミネーションがない溶接部である。	合 格
紫 又 は 青	溶接部表面の延性に少し影響する。しかし溶接部全体としては、その性質にほとんど影響がないとみてよい。	合 格
青白又は灰色	かなりのコンタミネーションがある。薄板の溶接部では延性がかなり低下する。	不 合 格
白 又 は 黄 白	溶接部はせい弱となる。	不 合 格

表-9 曲げ試験における雄型のジグの半径

種	類	雄型ジグの半径 R
純チタン	J I S 1種	4 T
	J I S 2種	4 T
	J I S 3種	5 T
Ti-5Ta		4 T

### 3. チタン5%タンタル合金の溶接試験結果

#### 3-1 供試材の特性

本試験に用いた供試材料の特性は表-10, 11に示す通りである。

表-10 Ti, Ti-5Ta供試板材

品名			Ti板	Ti-5Ta板
板厚 (mm)			8	8
準拠規格			JIS H 4600 TP 35H	JIS H 4600 TP 35Hに準ずる
化学 成分 %	O	0.20 以下	0.074	0.106
	N	0.05 以下	0.003	0.003
	Fe	0.25 以下	0.058	0.031
	H	0.013以下	0.0031	0.001
	Ta	4.0~6.0	—	5.08
機 械 的 性 質	耐力 Kgf/mm <sup>2</sup>	22以上	32	35
	引張強さ Kgf/mm <sup>2</sup>	35~52	40	43
	伸び %	23以上	40	35

表-11 Ti及びTi-5Ta供試溶接材料

品名		Ti条		Ti-5Ta条	
寸法		厚さ 2mm		厚さ 2mm	
規格		JIS H 4600	TP 35C	JIS H 4600	TP 35C に準ずる
化学成分 %	H	0.013以下	0.0021	0.013以下	0.0010
	O	0.20 以下	0.077	0.20 以下	0.106
	N	0.05 以下	0.0035	0.05 以下	0.0031
	Fe	0.25 以下	0.060	0.25 以下	0.031
	Ta	—	—	4.0~6.0	5.08
機械的性質	耐力 Kgf/mm <sup>2</sup>	22以上	33	22以上	35
	引張強さ Kgf/mm <sup>2</sup>	35~52	43	35~52	43
	伸び %	23以上	38	23以上	35

## 3-2 溶接試験結果

### 3-2-1 基礎試験結果

#### (1) 雰囲気によるコンタミネーション試験

##### (a) 試験目的

非鉄金属であるTi, Ti-5Ta等は、溶接温度による空気やその他のガスとの親和力が極めて強く、これらのガスを吸収すると溶接金属及びその近傍の母材部表面に変色等の影響を及ぼすことが知られている。

本試験では、一般的に使われている大気中ティグ溶接、チャンバ内ティグ溶接それに電子ビーム溶接時に、溶接部に起る色調変化（コンタミネーション）の状況をビードオンプレート試験により確認することを目的とした。

##### (b) 供試材及び試験片

供試材は、「3-1 供給材の特性」に示した材料を使用した。また、本試験に用いた試験片の形状及び寸法を図-4に示す。

単位：mm

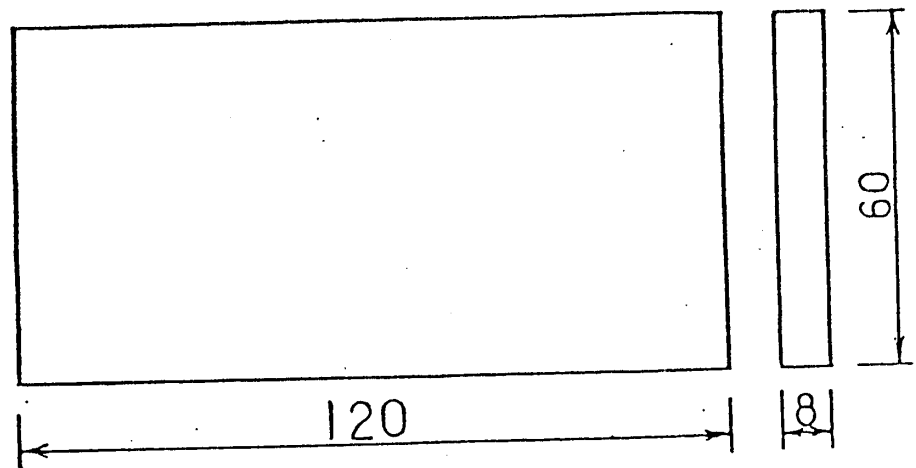


図-4 試験片の形状及び寸法

##### (c) 試験方法

###### ① ティグ溶接

ティグ溶接は、大気中及び溶接雰囲気調整装置（以下、チャンバという）内で行った。

大気中で行ったティグ溶接の溶接部後方を包むアフターシールドジグの外観及び寸法を図-5と図-6に示す。また、図-7に溶接部表面に設置するバックシールドの外観及び寸法を示す。



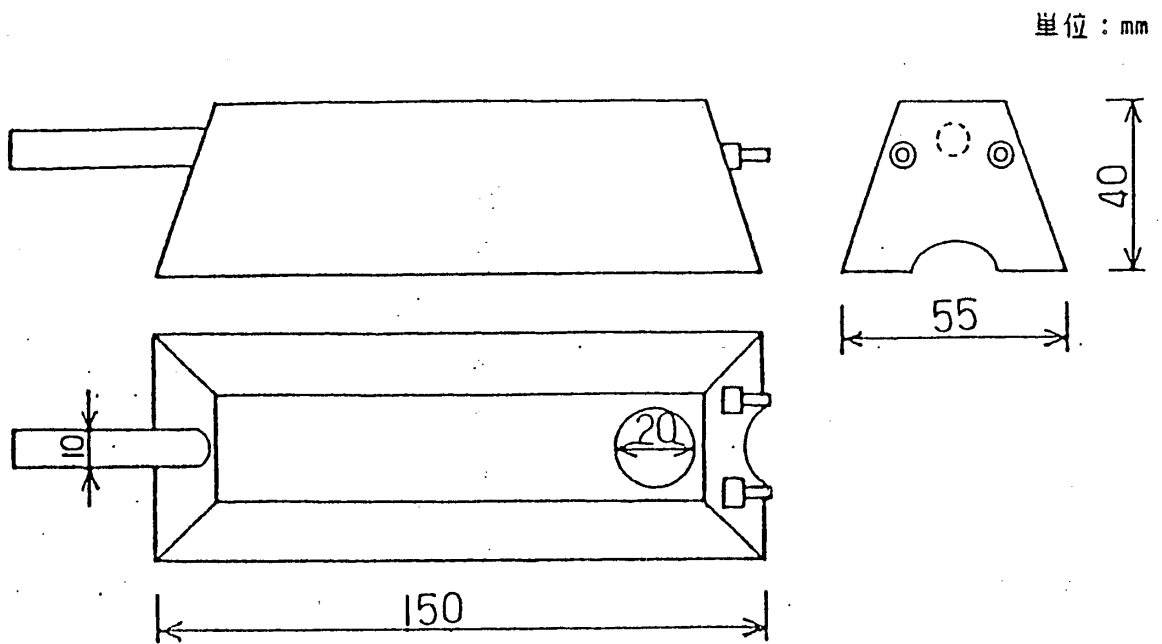


図-5 アフターシールドジグ (L) の外観及び寸法

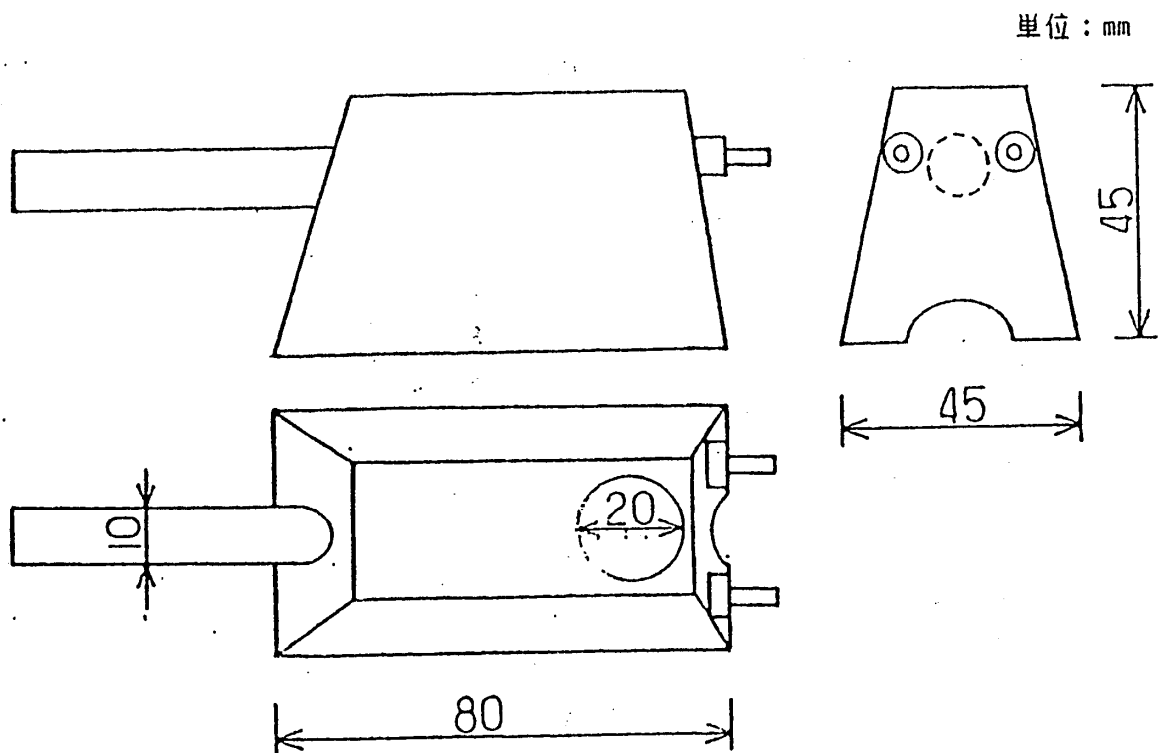


図-6 アフターシールドジグ (S) の外観及び寸法

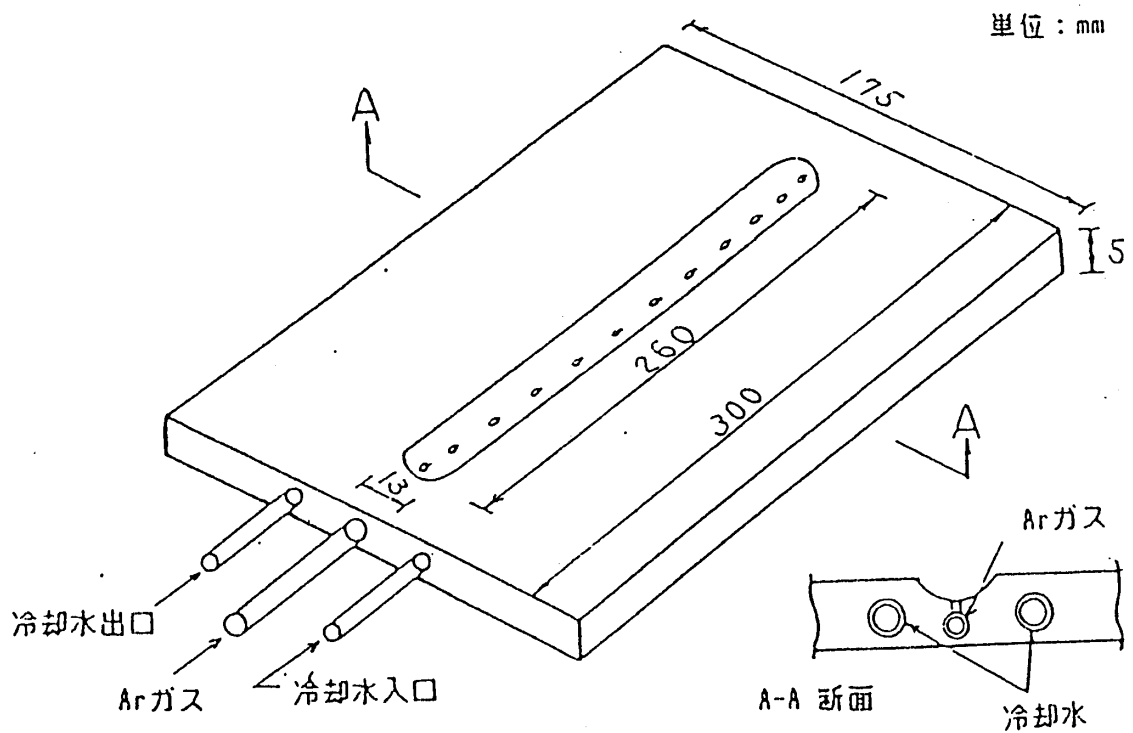


図-7 バックシールドジグの外観及び寸法

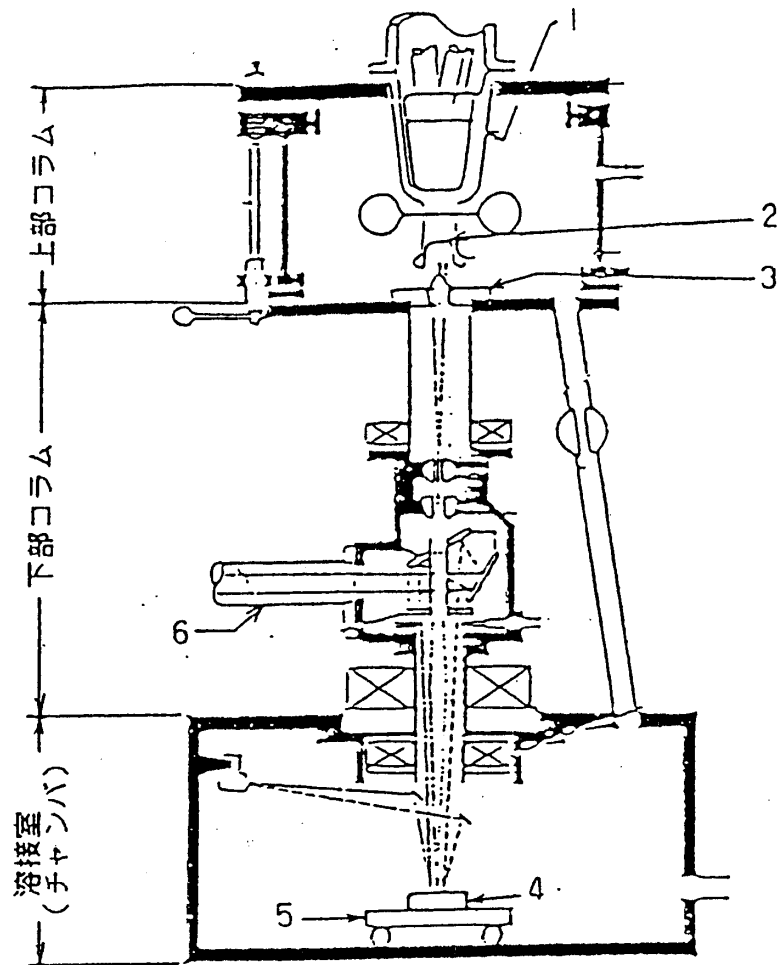
シールドジグは、加工性などより、すべて銅製とした。特に裏ビードにより高温となるバックシールドジグについては、冷却水を循環させる構造とした。アフターシールドジグは長短2種類を作り比較した。

チャンバ内ティグ溶接は、内部の見易い特殊ガラス製のドーム型の専用チャンバで行った。

試験溶接にあたっては、大気中ティグ溶接においては試験片及び溶接材料をアセトンによって脱脂洗浄し、溶接ジグ台に拘束固定し試験片の中央に長さ 100mmの溶接を実施した。シールド条件はアフターシールドガス有無の2条件とし、溶接終了後に溶接部及び周辺の色調観察を行った。チャンバ内ティグ溶接は、内部雰囲気純アルゴン及び空気を混入したアルゴンガスとし、溶接部とその周辺の色調観察を行った。また、代表的な試験片については組織観察と硬さの測定を行った。

② 電子ビーム溶接

使用した，電子ビーム溶接機の概略を図-8に示す。



- |         |          |         |        |
|---------|----------|---------|--------|
| 1-陰極絶縁体 | 2-フィラメント | 3-コラム陽極 | 4-被溶接物 |
| 5-溶接台   | 6-光学観察装置 |         |        |

図-8 電子ビーム溶接機の外観

(d) 試験条件

① ティグ溶接

表-12に大気中ティグ溶接条件を、表-13にチャンバ内ティグ溶接条件を示す。なお、大気中のものでは、コンタミネーションのことを考えアーク電圧をおさえたインバータ電源を使用して行った。

表-12 大気中ティグ溶接試験条件

材料	溶接条件			アフターシールド ジグ		アルゴンガス流量 (ℓ/min)	
	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)			トーチ	アフター
Ti (TP35)	110~160	12~13	8~12	(L) <sup>(1)</sup>	(S)	10	なし <sup>(2)</sup>
				(L)	(S)	10	20
Ti-5Ta	110~160	12~13	8~12	(L)	(S)	10	なし
				(L)	(S)	10	20

(注)1 (L)及び(S) はジグサイズを示す。  
 (注)2 アフターなしは、アフタージグに溶接に使ったトーチのアルゴンガスを流し、ジグ専用のガスを出して使わなかったことを意味する。

表-13 チャンバ内ティグ溶接試験条件

材料	溶接条件			トーチ・チャンバ 雰囲気 (vol/%)	シールドガス 流量 (ℓ/min)	
	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)		トーチ	チャンバー
Ti (TP35)	110~180	16~24	7~13	Ar 99.99%以上	15	30
				Ar+0.02%O <sub>2</sub> +0.08%N <sub>2</sub>	15	30
				Ar+0.2%O <sub>2</sub> +0.8%N <sub>2</sub>	15	30
Ti-5Ta	110~180	16~24	7~13	Ar 99.99%以上	15	30
				Ar+0.02%O <sub>2</sub> +0.08%N <sub>2</sub>	15	30
				Ar+0.2%O <sub>2</sub> +0.8%N <sub>2</sub>	15	30

② 電子ビーム溶接

表-14に電子ビーム溶接におけるビードオンプレート試験条件を示す。

表-14 電子ビーム溶接試験条件

材料	溶接条件				
	溶接電流 (mA)	溶接速度 (cm/min)	真空度 (torr)		レンズ電流 (mA)
Ti (TP35)	12	75	高	$4 \times 10^{-4}$	520 , 655
			低	$6 \times 10^{-3}$	
Ti-5Ta	12	75	高	$4 \times 10^{-4}$	520 , 655
			低	$6 \times 10^{-3}$	

電子ビーム溶接は、高真空及び低真空の二条件で溶接し、終了後直ちに試験片を大気中に放出した場合と30分間チャンバ内に放置し、試験片が冷却した後に出したのものについて溶接部及び周辺の色調観察を行った。

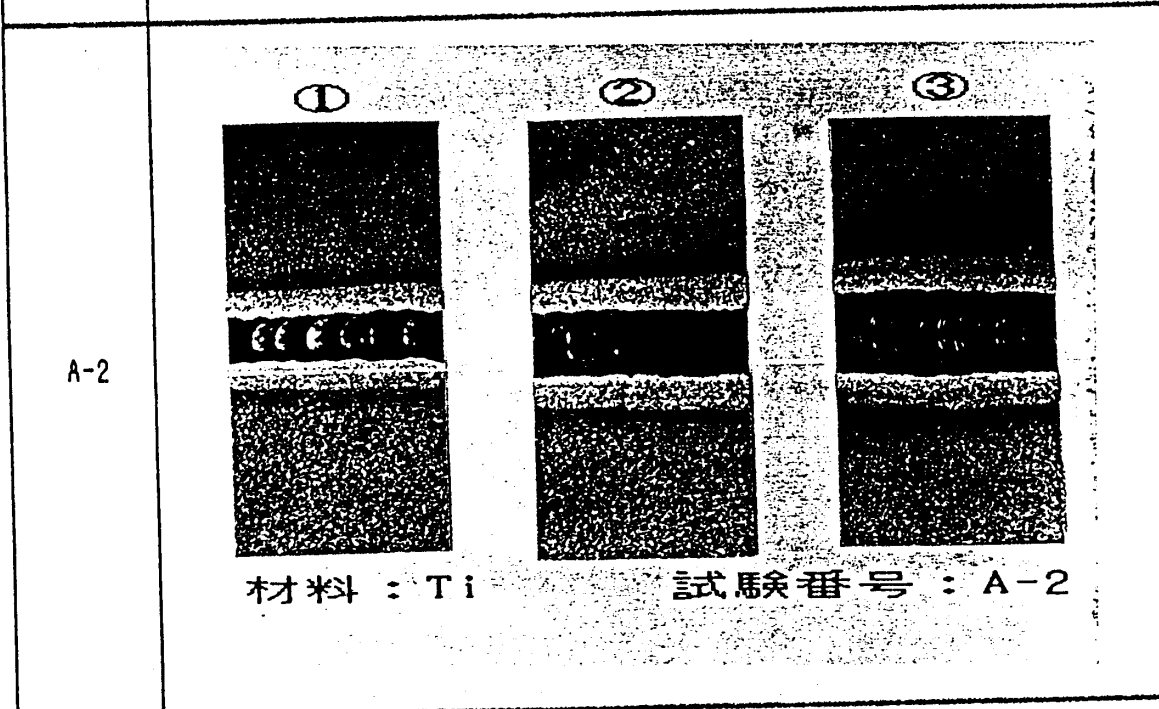
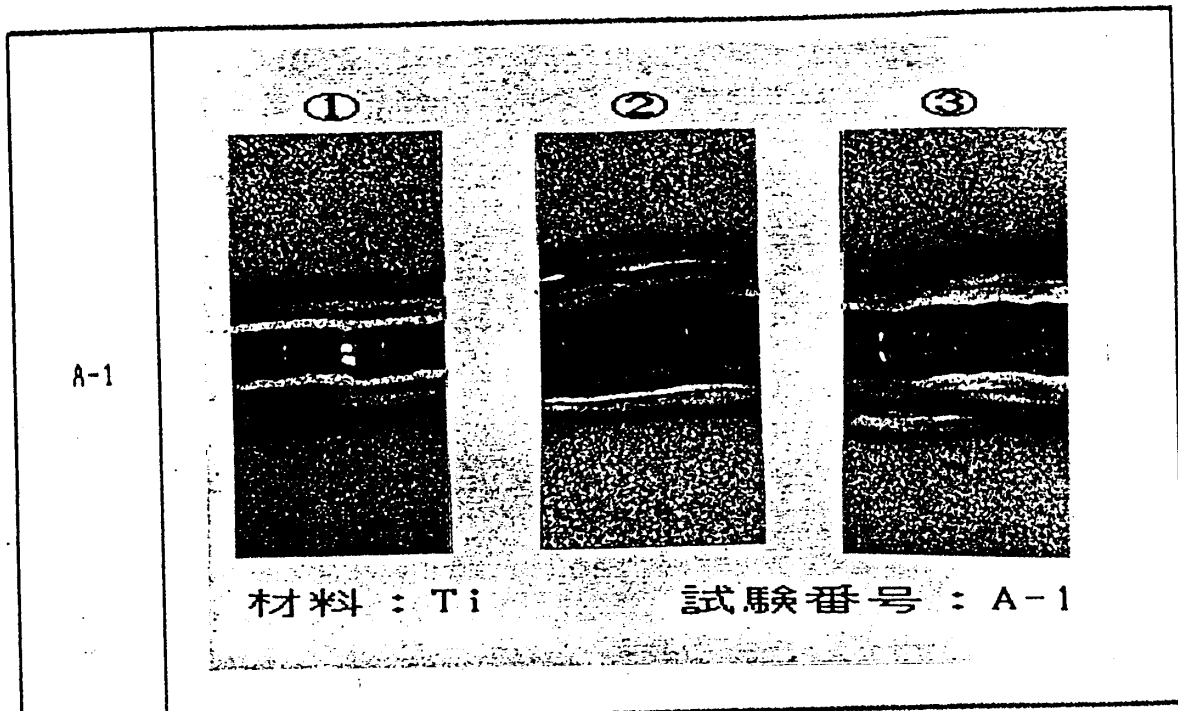
(e) 試験結果及び考察

① 大気中ティグ溶接

大気中ティグ溶接でのビードオンプレートの試験結果を以下に示す。

写真-3, 写真-4にTiのコンタミネーション状況の結果を示す。各試験片共に入熱が高くなるにつれて、色が強く出ており大入熱では、麦、青及び灰色となった。特に色の著しいのは、アフターシールドガスを使用しなかった場合で入熱量に関係なく青色近く金属光沢を失うことが判った。

写真-5, 6はTi-5Taのコンタミネーション状況を示したもので変色したものについては、入熱変化に伴って麦、青と灰の混合色となったがTi材に較べると多少着色程度はゆるやかで、色調変化の領域が狭いことが判った。しかし、Ti材と同様に、アフターシールドガスを使用しなかったものについては、金属光沢の失われる傾向のあることが認められた。



A-1				A-2			
材料 : Ti	①	②	③	材料 : Ti	①	②	③
電流(A)	110	130	160	電流(A)	110	130	160
電圧(V)	12.0	12.0	12.0	電圧(V)	11.8	12.0	12.5
速度(cm/min)	10.3	10.9	11.4	速度(cm/min)	9.3	8.5	9.1
入熱(J/cm)	7,689	8,587	10,105	入熱(J/cm)	8,374	11,012	13,187
治具 : (S)				治具 : (S)			
シールド条件 (ℓ/min)				シールド条件 (ℓ/min)			
トーチ : 10				トーチ : 10			
アフター : なし				アフター : 20			

写真-3 Tiの大気中ティグ溶接試験結果 (1)

10mm

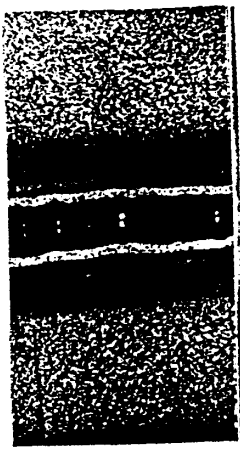
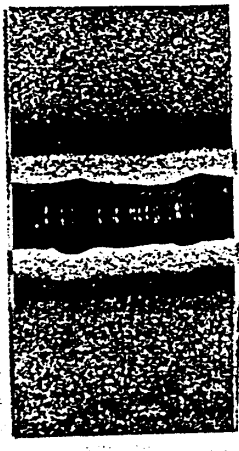
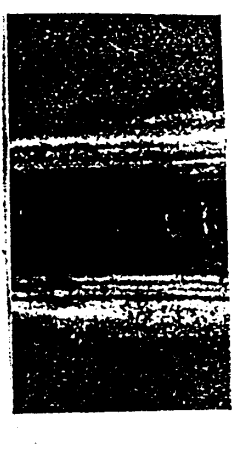
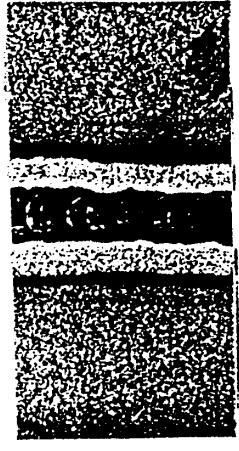

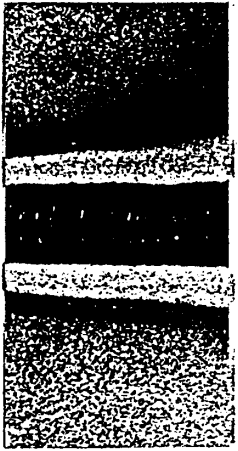
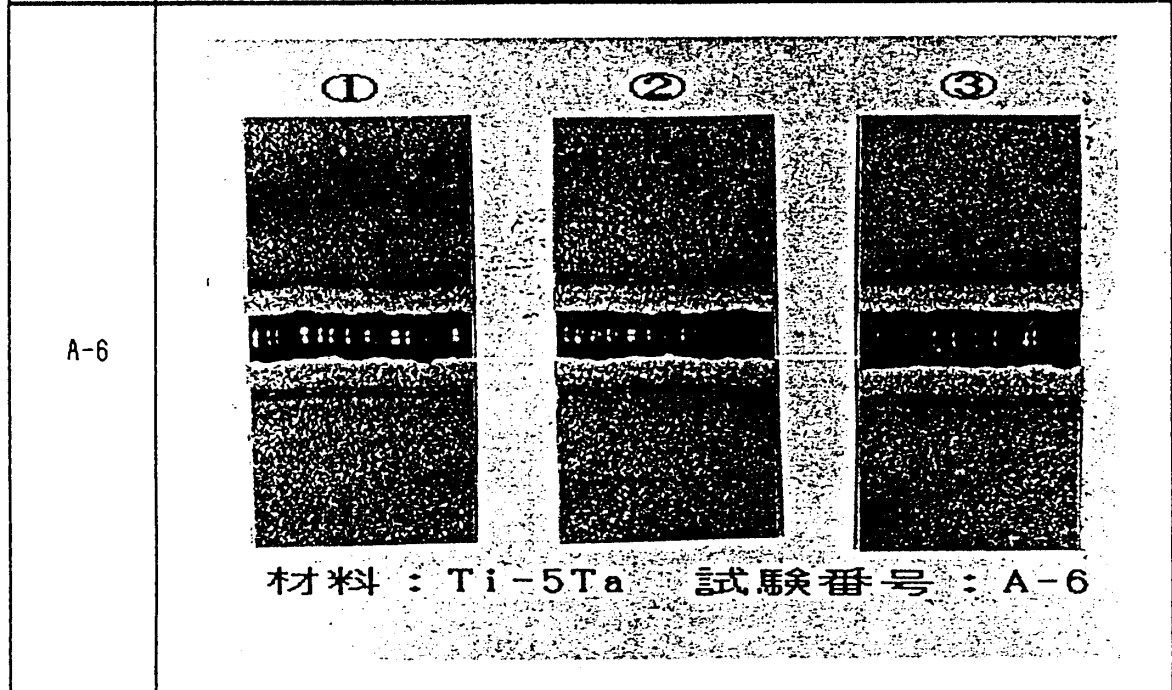
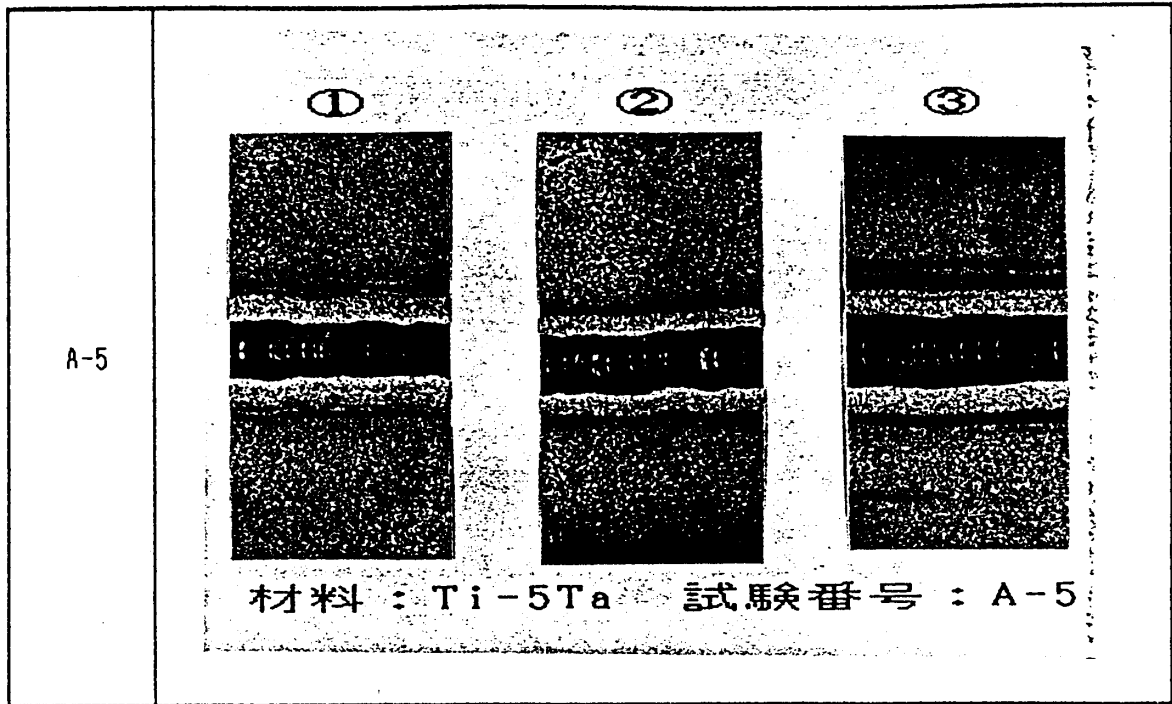
A-3	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料 : Ti                      試験番号 : A-3</p>																																								
A-4	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料 : Ti                      試験番号 : A-4</p>																																								
<p style="text-align: center;">A-3</p> <p>材料 : Ti</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>電流(A)</td> <td>110</td> <td>130</td> <td>160</td> </tr> <tr> <td>電圧(V)</td> <td>12.0</td> <td>12.0</td> <td>12.0</td> </tr> <tr> <td>速度(cm/min)</td> <td>10.0</td> <td>12.5</td> <td>8.7</td> </tr> <tr> <td>入熱(J/cm)</td> <td>7920</td> <td>7488</td> <td>13241</td> </tr> </tbody> </table> <p>治具 : (L)  シールド条件 ( ℓ/min)  トーチ : 10  アフター : なし</p>		①	②	③	電流(A)	110	130	160	電圧(V)	12.0	12.0	12.0	速度(cm/min)	10.0	12.5	8.7	入熱(J/cm)	7920	7488	13241	<p style="text-align: center;">A-4</p> <p>材料 : Ti</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>電流(A)</td> <td>110</td> <td>130</td> <td>160</td> </tr> <tr> <td>電圧(V)</td> <td>11.5</td> <td>12.0</td> <td>13.0</td> </tr> <tr> <td>速度(cm/min)</td> <td>7.5</td> <td>10.2</td> <td>8.5</td> </tr> <tr> <td>入熱(J/cm)</td> <td>10120</td> <td>9176</td> <td>14682</td> </tr> </tbody> </table> <p>治具 : (L)  シールド条件 ( ℓ/min)  トーチ : 10  アフター : 20</p>		①	②	③	電流(A)	110	130	160	電圧(V)	11.5	12.0	13.0	速度(cm/min)	7.5	10.2	8.5	入熱(J/cm)	10120	9176	14682
	①	②	③																																						
電流(A)	110	130	160																																						
電圧(V)	12.0	12.0	12.0																																						
速度(cm/min)	10.0	12.5	8.7																																						
入熱(J/cm)	7920	7488	13241																																						
	①	②	③																																						
電流(A)	110	130	160																																						
電圧(V)	11.5	12.0	13.0																																						
速度(cm/min)	7.5	10.2	8.5																																						
入熱(J/cm)	10120	9176	14682																																						

写真-4 Tiの大気中ティグ溶接試験結果 (2)

10nm

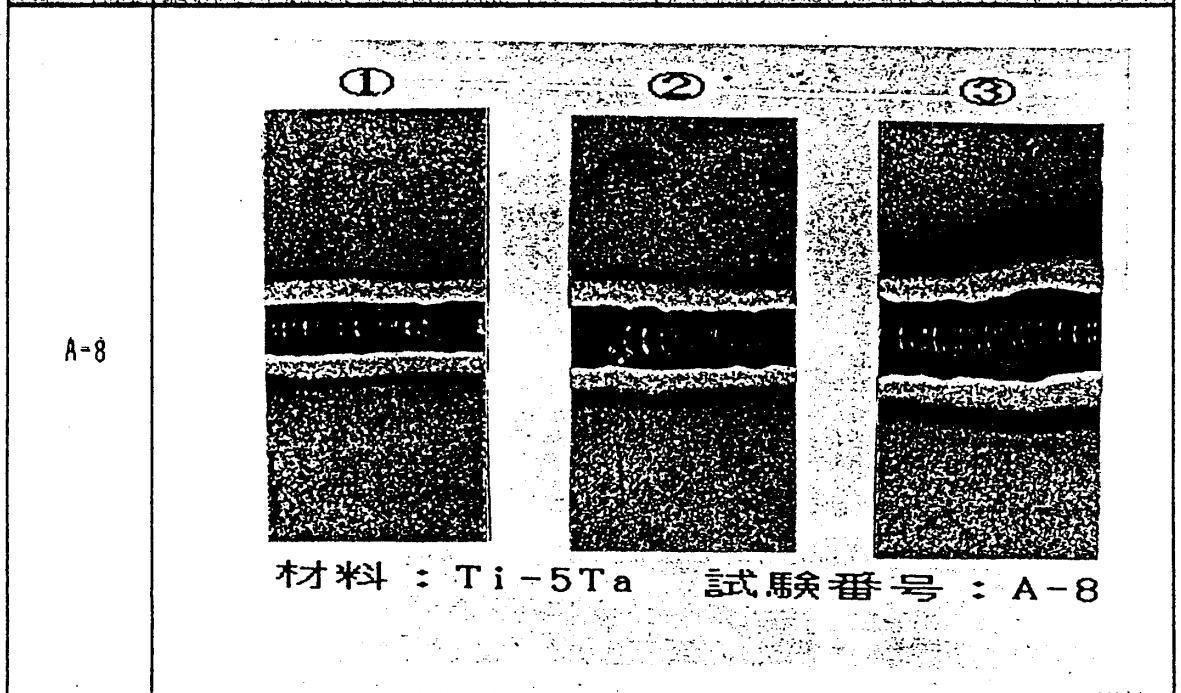
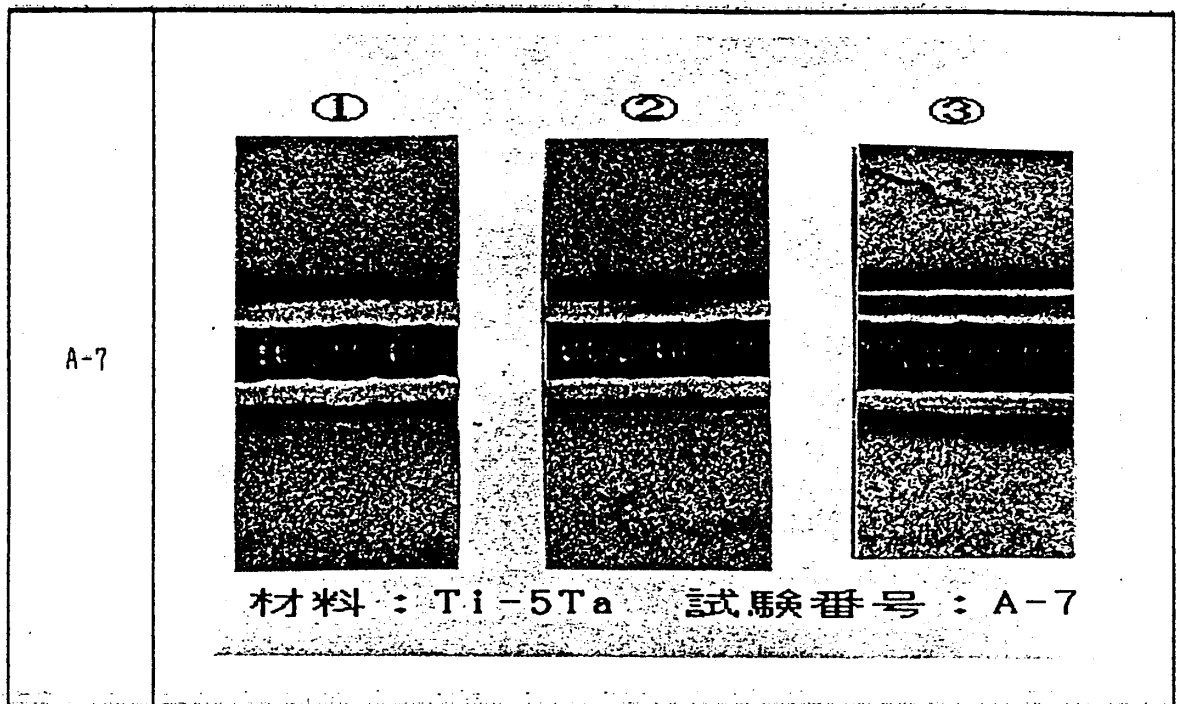


	A-5		A-6	
材料 : Ti-5Ta			材料 : Ti-5Ta	
	①	②	①	②
電流(A)	110	130	電流(A)	160
電圧(V)	11.5	12.0	電圧(V)	14.5
速度(cm/min)	7.8	10.0	速度(cm/min)	9.5
入熱(J/cm)	9,731	9,360	入熱(J/cm)	14,653
治具 : (S)			治具 : (S)	
シールド条件 (ℓ/min)			シールド条件 (ℓ/min)	
トーチ : 10			トーチ : 10	
アフター : なし			アフター : 20	

写真-5 Ti-5Taの大気中ティグ溶接試験結果 (1)

10mm





	A-7			A-8
材料 : Ti-5Ta		①	②	③
電流(A)		110	130	160
電圧(V)		11.5	12.0	13.5
速度(cm/min)		9.7	10.5	10.5
入熱(J/cm)		7825	8914	12343
治具 : (L)				
シールド条件 (ℓ/min)				
トーチ : 10				
アフター : なし				
材料 : Ti-5Ta		①	②	③
電流(A)		110	130	160
電圧(V)		11.5	12.5	13.0
速度(cm/min)		10.0	10.9	12.5
入熱(J/cm)		7590	8945	9984
治具 : (L)				
シールド条件 (ℓ/min)				
トーチ : 10				
アフター : 20				

写真-6 Ti-5Taの大気中ティグ溶接試験結果 (2)

10mm

② チャンバ内ティグ溶接

写真-7にチャンバ雰囲気 $99.99\%$ 以上のアルゴン（純アルゴン）でのコンタミネーションを示す。

この場合は2材料ともに入熱量変化に関係なく銀色の金属光沢を示し良好な結果が得られることが判った。

写真-8は雰囲気が $\text{Ar}+0.02\%\text{O}_2+0.08\%\text{N}_2$ での結果を示す。2材料共に入熱の増大とともに着色する領域が増大した。そして、溶接入熱量が高いものは、その程度と共に金属光沢も失われて行くことが判った。

写真-9は雰囲気を $\text{Ar}+0.2\%\text{O}_2+0.8\%\text{N}_2$ のもとで溶接を行った時のコンタミネーション状況を示したもので、すべての材料が巾広く金属光沢を失う色となった。Ti、Ti-5Taはほぼ同程度の着色となり、灰色が目立つがその付着領域は入熱量が高くなるにつれて広域に及んでいく傾向があった。

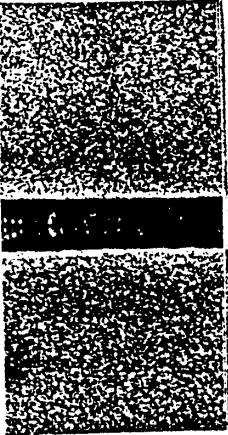
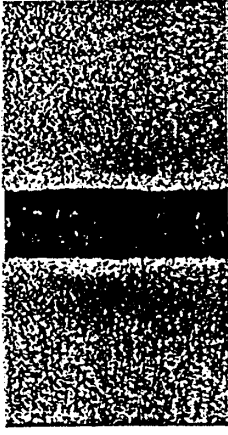
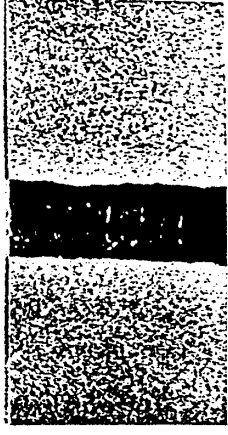
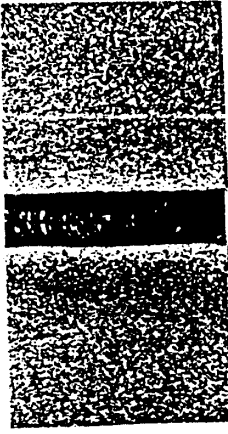

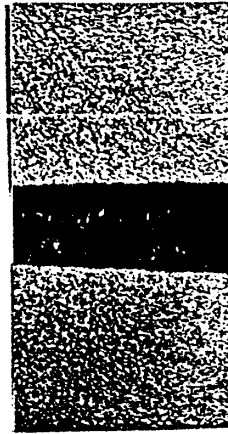
<p>B-1 材料: Ti</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 16.0 速度(cm/min) 7.6 入熱(J/cm) 13895</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 20.0 速度(cm/min) 8.6 入熱(J/cm) 20930</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 22.0 速度(cm/min) 8.3 入熱(J/cm) 28627</p> <p>シールドガス成分 純アルゴン</p> <p>シールド条件 (ℓ/min)</p> <p>トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料: Ti                      試験番号: B-1</p>
<p>B-2 材料: Ti-5Ta</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 16.0 速度(cm/min) 9.2 入熱(J/cm) 11478</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 19.0 速度(cm/min) 9.2 入熱(J/cm) 18587</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 22.0 速度(cm/min) 9.0 入熱(J/cm) 26400</p> <p>シールドガス成分 純アルゴン</p> <p>シールド条件 (ℓ/min)</p> <p>トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料: Ti-5Ta                      試験番号: B-2</p>

写真-7 純アルゴン雰囲気チャンバ内ティグ溶接試験結果


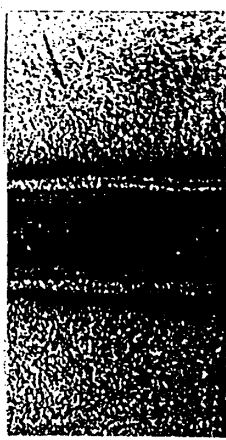
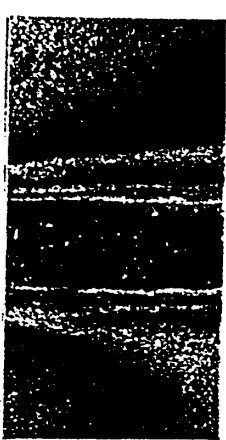
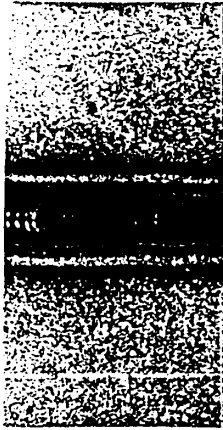

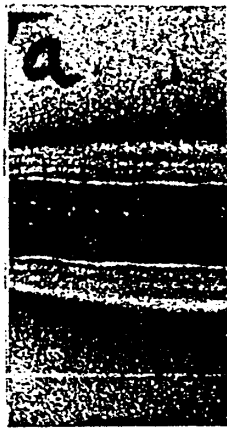
<p>B-4 材料: Ti</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 16.0 速度(cm/min) 8.3 入熱(J/cm) 12723</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 20.0 速度(cm/min) 8.2 入熱(J/cm) 21951</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 22.0 速度(cm/min) 8.7 入熱(J/cm) 27310</p> <p>シールドガス成分 Ar+0.02%O<sub>2</sub>+0.08%O<sub>2</sub></p> <p>シールド条件 (ℓ/min) トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料: Ti</p> <p style="text-align: right;">試験番号: B-4</p>
<p>B-5 材料: Ti-5Ta</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 16.0 速度(cm/min) 9.8 入熱(J/cm) 10776</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 20.0 速度(cm/min) 8.2 入熱(J/cm) 21951</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 22.0 速度(cm/min) 9.2 入熱(J/cm) 25826</p> <p>シールドガス成分 Ar+0.02%O<sub>2</sub>+0.08%N<sub>2</sub></p> <p>シールド条件 (ℓ/min) トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>①</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>②</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>③</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">材料: Ti-5Ta</p> <p style="text-align: right;">試験番号: B-5</p>

写真-8 0.1%空気混入雰囲気チャンバ内ティグ溶接試験結果

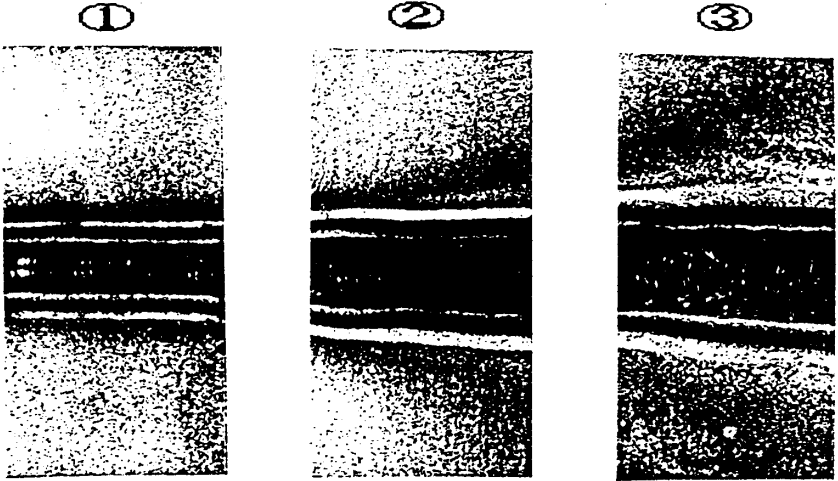
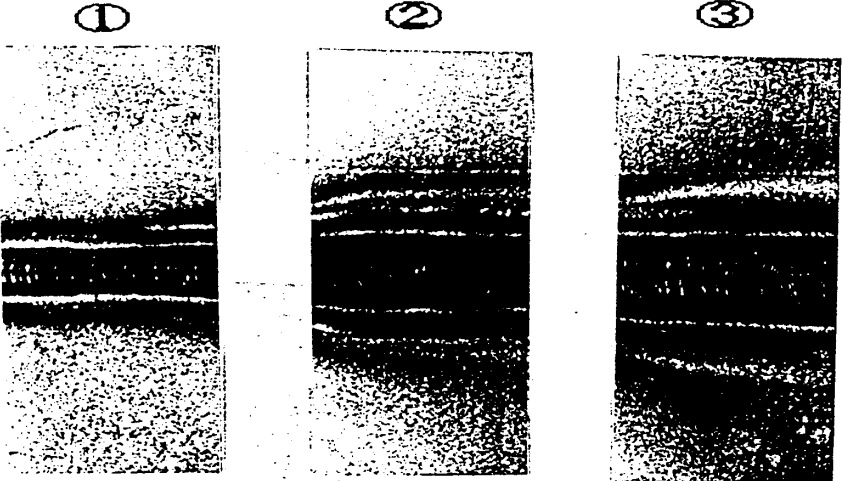
<p>B-7 材料: Ti</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 17.0 速度(cm/min) 10.5 入熱(J/cm) 10686</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 20.0 速度(cm/min) 12.0 入熱(J/cm) 15000</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 23.0 速度(cm/min) 9.6 入熱(J/cm) 25875</p> <p>シールドガス成分 Ar + 0.2%O<sub>2</sub> + 0.8%O<sub>2</sub></p> <p>シールド条件 (ℓ/min) トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	 <p>①                      ②                      ③</p> <p>材料: Ti                      試験番号: B-7</p>
<p>B-8 材料: Ti-5Ta</p> <p>① 電流(A) 110 電圧(V) 17.0 速度(cm/min) 11.7 入熱(J/cm) 9590</p> <p>② 電流(A) 150 電圧(V) 21.0 速度(cm/min) 10.8 入熱(J/cm) 17500</p> <p>③ 電流(A) 180 電圧(V) 23.0 速度(cm/min) 11.3 入熱(J/cm) 21982</p> <p>シールドガス成分 Ar + 0.2%O<sub>2</sub> + 0.8%N<sub>2</sub></p> <p>シールド条件 (ℓ/min) トーチ : 15 チャンバ : 30</p>	 <p>①                      ②                      ③</p> <p>材料: Ti-5Ta                      試験番号: B-8</p>

写真-9 1%空気混入雰囲気チャンバ内ティグ溶接試験結果

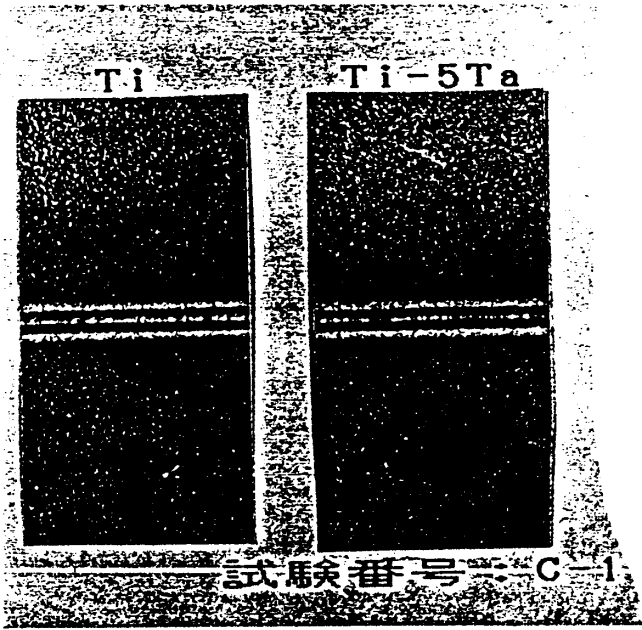
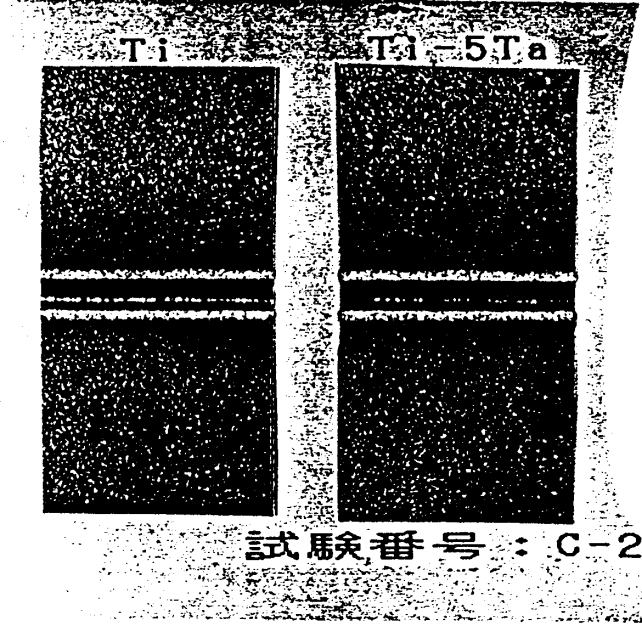
### ③ 電子ビーム溶接

写真-10に電子ビーム溶接で溶接直後、大気中へ試験片を放出した場合の結果を示す。図中に示す試験番号C-1, C-2は、チャンバ内を $4 \times 10^{-4}$  torrの高真空として行ったものであるが、すべての材料について金属光沢を有し良好なビードであった。

同一条件で真空度を $6 \times 10^{-3}$  torrの低真空とし、溶接後直ぐにチャンバより出すと、写真-11の試験番号C-3に示すようにTi, Ti-5Ta共に金、青色等の変色が認められた。

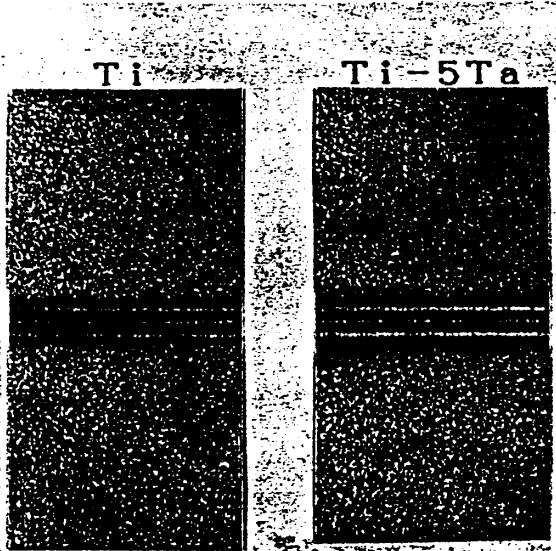
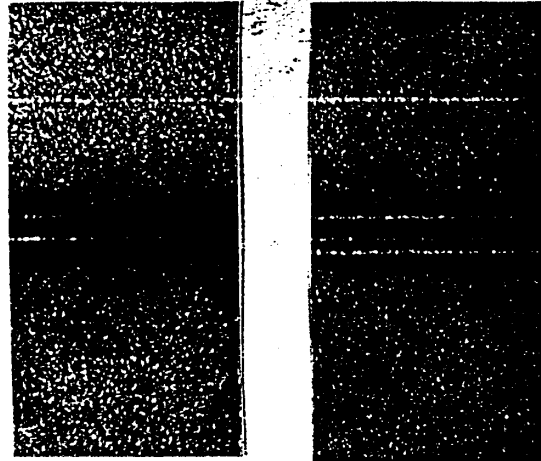
次に溶接後30分チャンバ内に保持した場合の結果を写真-12, 写真-13に示す。高真空の場合には放出時間の差異による変色は認められなかった。しかし、低真空では、溶接直後と比較すると、全材料共に変色を起したが、これはビードの終始端の変色程度よりしてティグ溶接の場合のコンタミネーションと少し様子を異にし、チャンバ内の金属ヒュームの付着によつたと判断されることも考えられる。

焦点距離を調整しビード巾に変化をもたせて見ると、ビード巾を拡げた場合が着色し易くなることが判った。

C-1		
C-2		
C-1 (焦点位置 母材表面)	C-2 (焦点位置 母材内部)	
材料記号 : Ti Ti-5Ta	材料記号 : Ti Ti-5Ta	
ビーム電流(mA) 12 12	ビーム電流(mA) 12 12	
加速電圧 (kV) 125 125	加速電圧 (KV) 125 125	
速度 (cm/min) 75 75	速度 (cm/min) 75 75	
レンズ電流(mA) 520 520	レンズ電流(mA) 655 655	
入熱 (J/cm) 1200 1200	入熱 (J/cm) 1200 1200	
真空度 (torr) $4 \times 10^{-4}$ $4 \times 10^{-4}$	真空度 (torr) $4 \times 10^{-4}$ $4 \times 10^{-4}$	

10mm

写真-10 高真空電子ビーム溶接直後、大気中への試験結果

C-3	 <p style="text-align: center;">Ti                      Ti-5Ta</p> <p style="text-align: center;">試験番号：C-3</p>	
C-4	 <p style="text-align: center;">Ti                      Ti-5Ta</p> <p style="text-align: center;">試験番号：C-4</p>	
C-3 (焦点位置 母材表面)	C-4 (焦点位置 母材内部)	
材料記号：    Ti    Ti-5Ta ビーム電流(mA)    12    12 加速電圧 (kV)    125    125 速度 (cm/min)    75    75 レンズ電流(mA)    520    520 入熱 (J/cm)    1200    1200 真空度 (torr) $6 \times 10^{-3}$ $6 \times 10^{-3}$	材料記号：    Ti    Ti-5Ta ビーム電流(mA)    12    12 加速電圧 (KV)    125    125 速度 (cm/min)    75    75 レンズ電流(mA)    655    655 入熱 (J/cm)    1200    1200 真空度 (torr) $6 \times 10^{-3}$ $6 \times 10^{-3}$	

10mm

写真-11 低真空電子ビーム溶接直後、大気中への試験結果




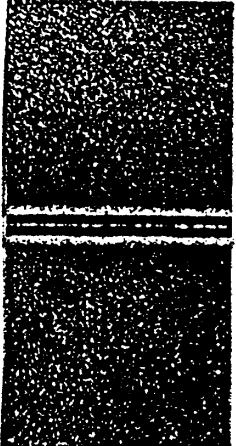
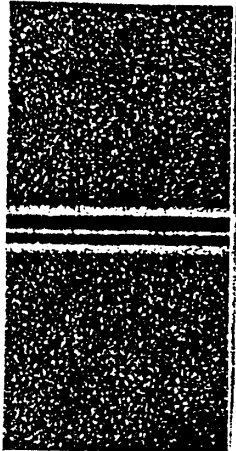
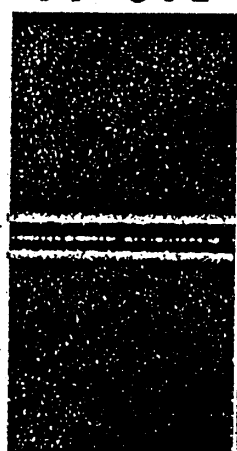
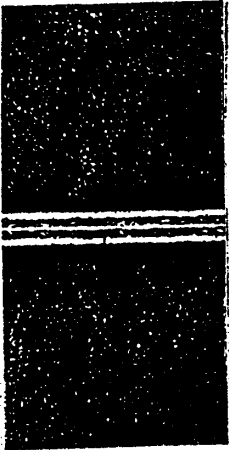
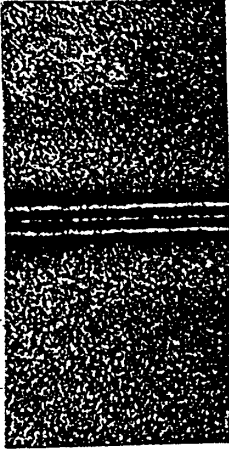
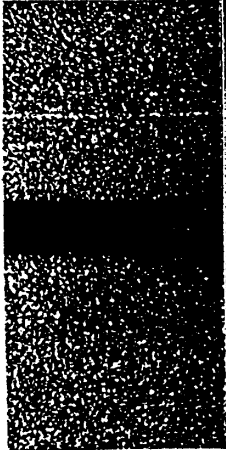
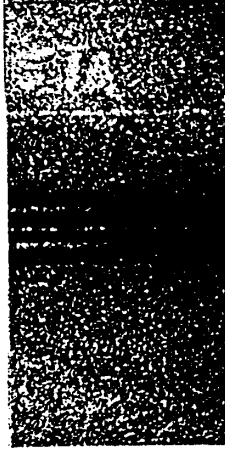
C-5	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ti</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Ti-5Ta</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">試験番号 : C-5</p>	
C-6	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ti</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Ti-5Ta</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">試験番号 : C-6</p>	
C-5 (焦点位置 母材表面)	C-6 (焦点位置 母材内部)	
材料記号 :    Ti    Ti-5Ta ビーム電流(mA)    12    12 加速電圧 (kV)    125    125 速度 (cm/min)    75    75 レンズ電流(mA)    520    520 入熱 (J/cm)    1200    1200 真空度 (torr) $4 \times 10^{-4}$ $4 \times 10^{-4}$	材料記号 :    Ti    Ti-5Ta ビーム電流(mA)    12    12 加速電圧 (KV)    125    125 速度 (cm/min)    75    75 レンズ電流(mA)    655    655 入熱 (J/cm)    1200    1200 真空度 (torr) $4 \times 10^{-4}$ $4 \times 10^{-4}$	

写真-12 高真空電子ビーム溶接後、チャンバ内30分保持の試験結果

C-7	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ti</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Ti-5Ta</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">試験番号：C-7</p>	
C-8	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Ti</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Ti-5Ta</p>  </div> </div> <p style="text-align: center;">試験番号：C-8</p>	
C-7 (焦点位置 母材表面)		C-8 (焦点位置 母材内部)
材料記号： Ti Ti-5Ta		材料記号： Ti Ti-5Ta
ビーム電流(mA) 12 12		ビーム電流(mA) 12 12
加速電圧 (kV) 125 125		加速電圧 (kV) 125 125
速度 (cm/min) 75 75		速度 (cm/min) 75 75
レンズ電流(mA) 520 520		レンズ電流(mA) 655 655
入熱 (J/cm) 1200 1200		入熱 (J/cm) 1200 1200
真空度 (torr) $6 \times 10^{-3}$ $6 \times 10^{-3}$		真空度 (torr) $6 \times 10^{-3}$ $6 \times 10^{-3}$

10mm

写真-13 低真空電子ビーム溶接後、チャンバ内30分保持の試験結果

#### ④ 硬さ試験結果

図-9から図-12にTi及びTi-5Taの硬さ試験結果を示す。試験片として電子ビーム溶接で高真空のものと、同一条件で行なった低真空のについて測定を行なった。

一方、溶接金属断面の内部での硬さについては、溶接条件の違いによって溶込み差が原因とおもわれる硬度分布の違いはあるもののコンタミネーションの影響による差異は認められなかった。これからしてコンタミネーションの差異による、溶着金属の表面及び内部の硬さの変化は今回は認められなかった。

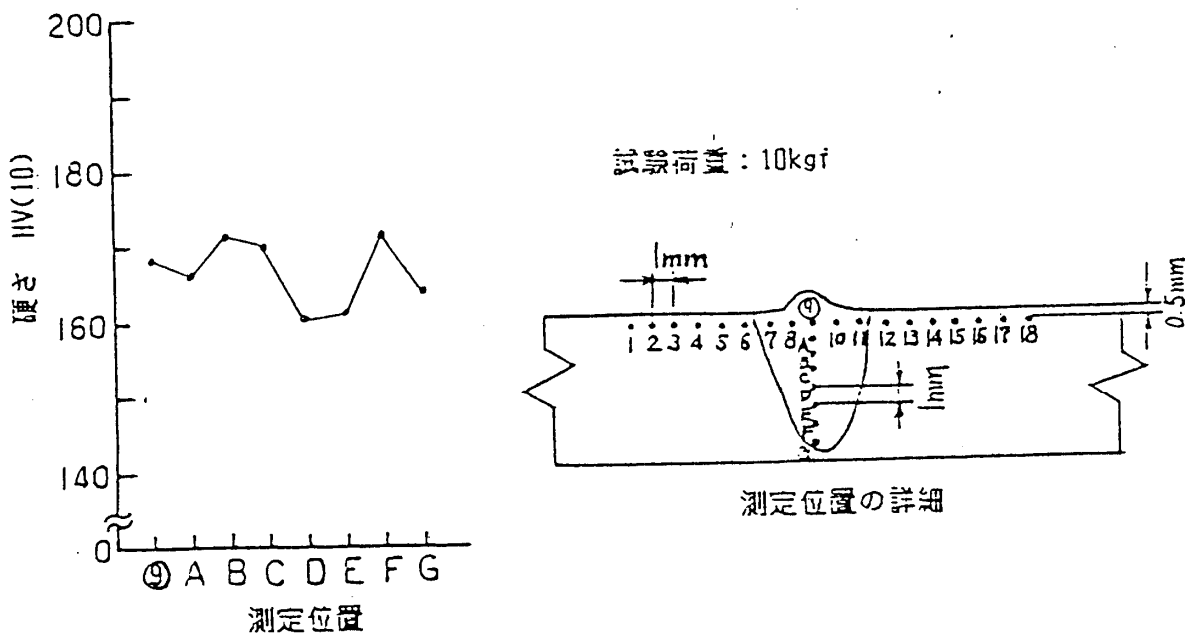
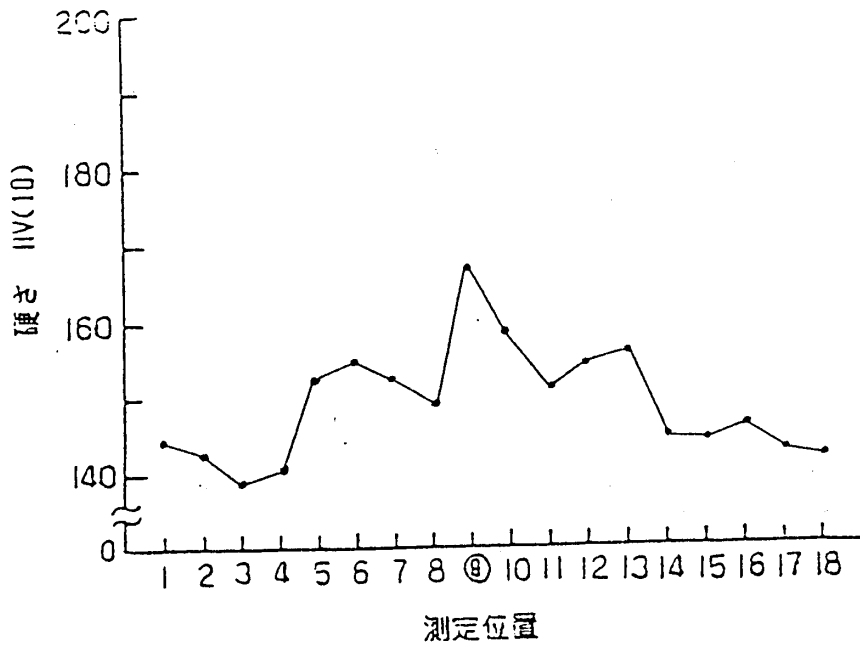


図-9 Tiのビッカース硬度測定結果 (1)

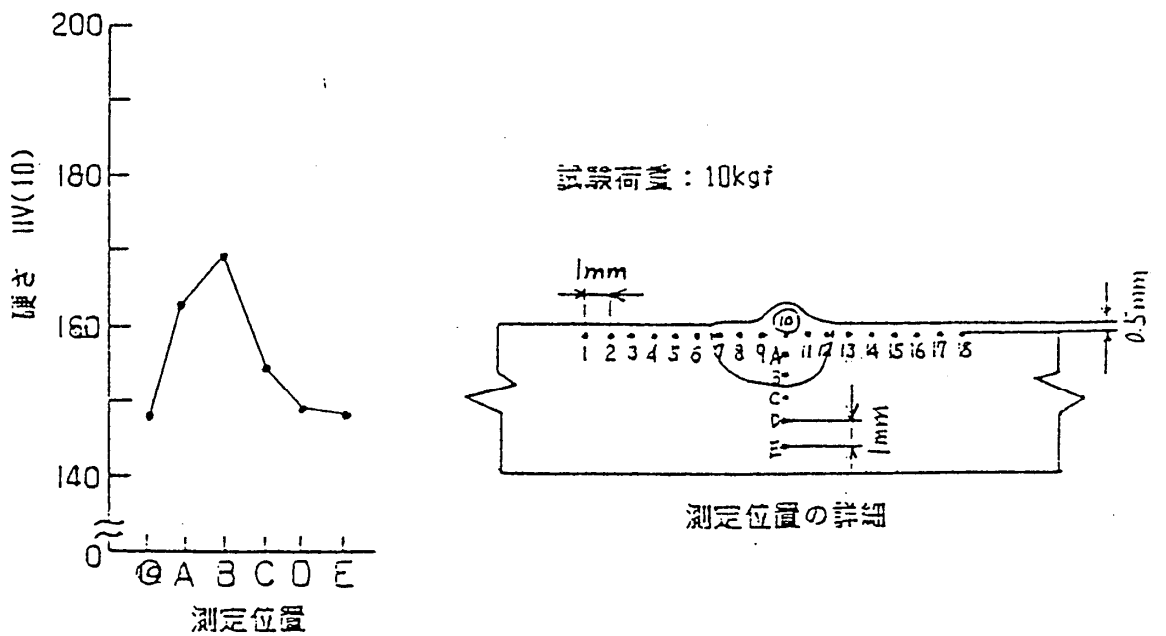
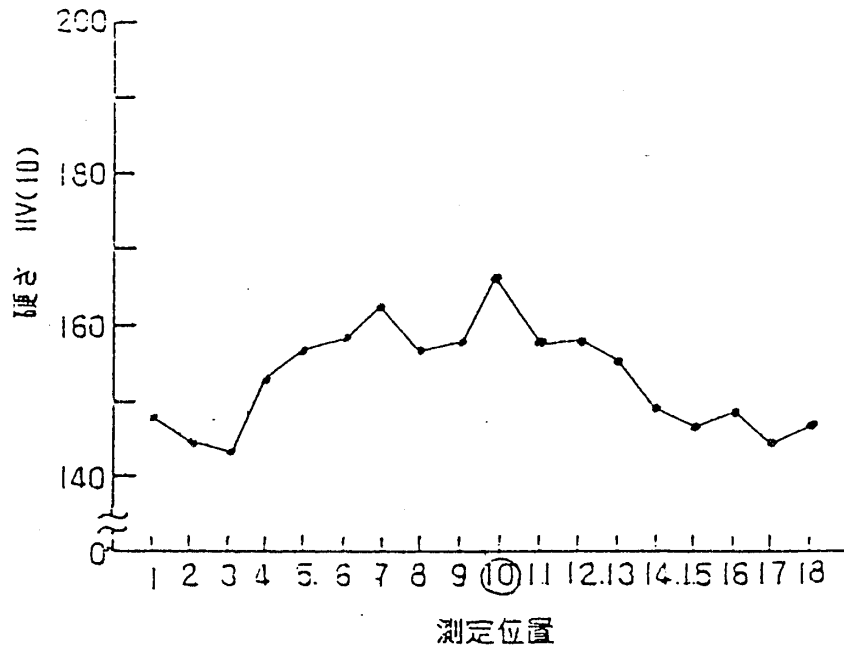


図-10 Tiのビッカース硬度測定結果 (2)

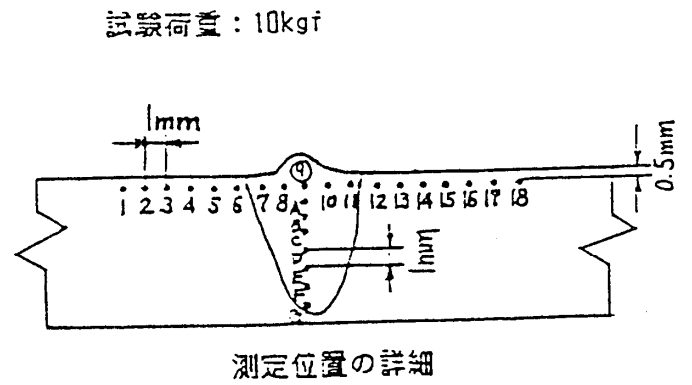
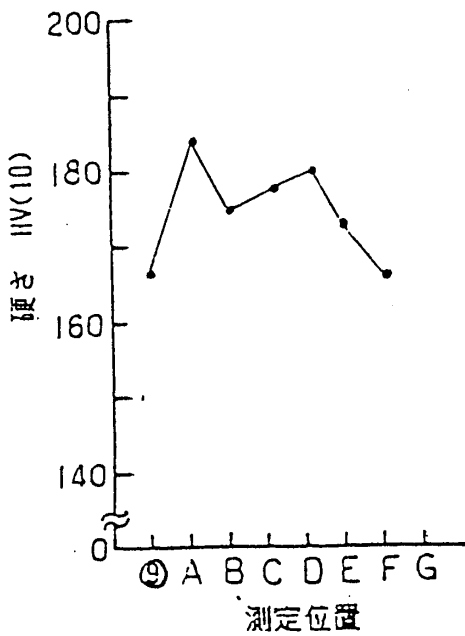
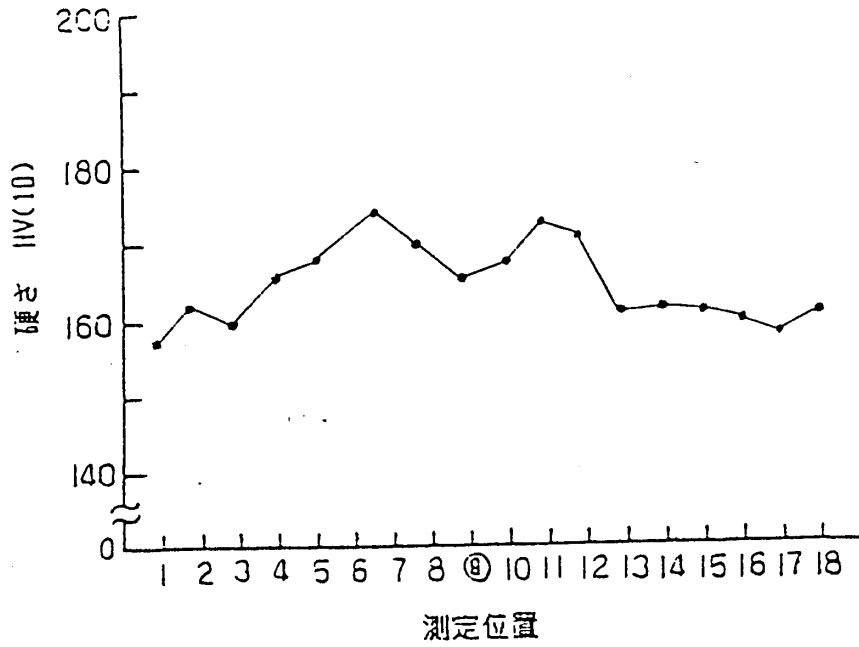


図-11 Ti-5Taのビッカース硬度測定結果 (1)

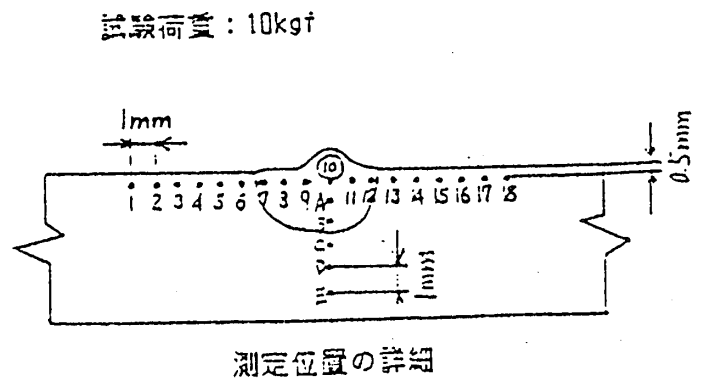
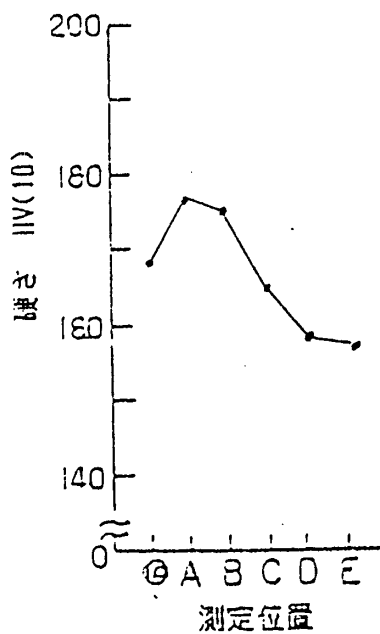
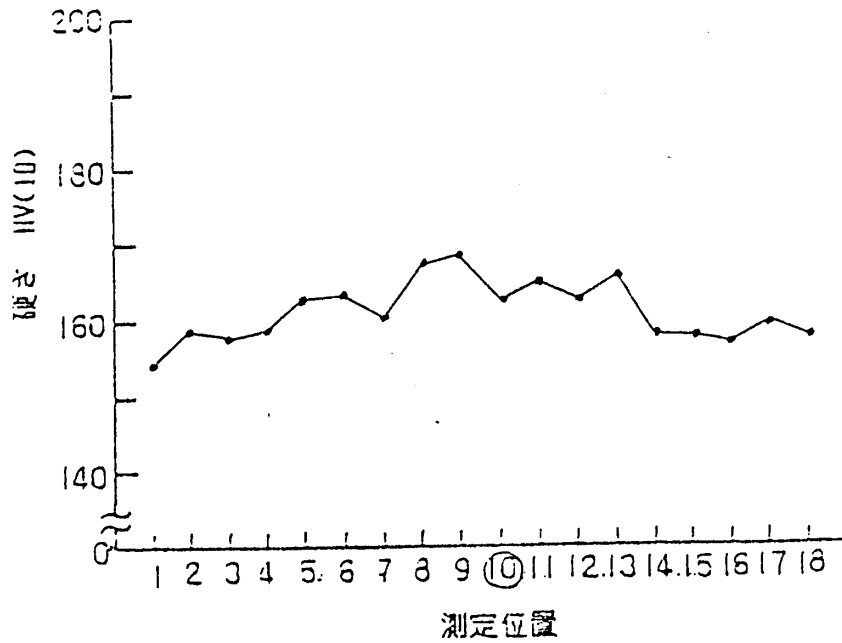


図-12 Ti-5Taのビッカース硬度測定結果 (2)

(f) まとめ

- ① 大気中ティグ溶接では、入熱量が増加するとその変色領域も増す。そして、アフターシールドガスを使った場合には、チャンバとほぼ同一の変色程度でおさえられる。
- ② チャンバ内ティグ溶接では、雰囲気を純アルゴンにすることによって大きな色調変化は認められずに銀色の金属光沢を示した。  
雰囲気を $\text{Ar}+0.02\%\text{O}_2+0.08\%\text{N}_2$ 、 $\text{Ar}+0.2\%\text{O}_2+0.8\%\text{N}_2$ と空気混入量を増すことによって、Ti、Ti-5Taともに金、青、灰色等の変化を示す。
- ③ 電子ビーム溶接では高真空のもとでは2材料ともに金、銀色の好ましい溶接ビードとなる。これが低真空では色調変化が強くなるが、金属光沢が失われるまでとはならない。
- ④ コンタミネーションと硬さとの関連を知る上で硬度測定を行ったが、これも差異は認められずコンタミネーションが組織や硬さに及ぼす影響はこの場合は認められなかった。

(2) コンタミネーションと継手性能との関係

(a) 試験目的

Ti、Ti-5Taをアフターシールドジグを有するティグ溶接、チャンバ内でのティグ溶接それに電子ビーム溶接を行い、それぞれの継手部の色調変化が引張強さ、曲げ性能試験に与える効果などを調べた。

(b) 試験片形状

ティグ溶接の試験片の形状及び寸法を図-13に示す。



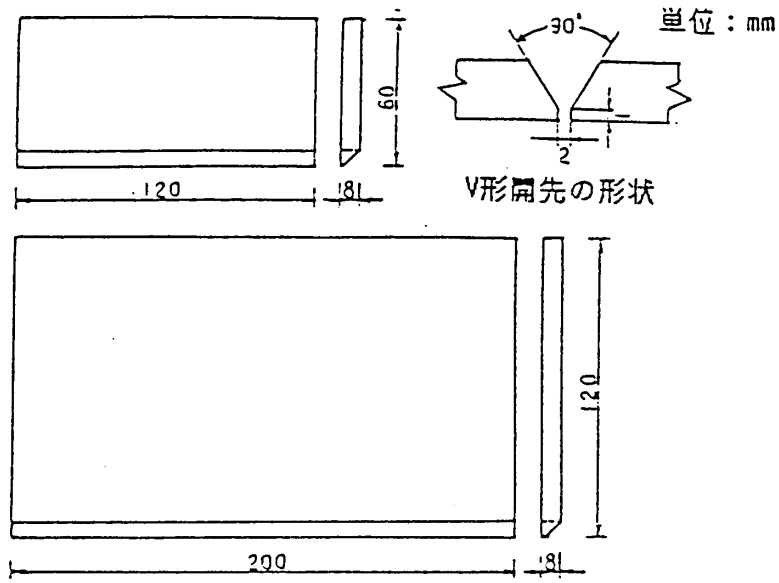


図-13 試験片の形状及び寸法

電子ビーム溶接については、同種形状で開先部はI形とした。

(c) 試験方法

試験に使用したティグ溶接のアフターシールドジグ外観及び寸法を図-14に、バックシールドジグの外観及び寸法を図-15に示す。

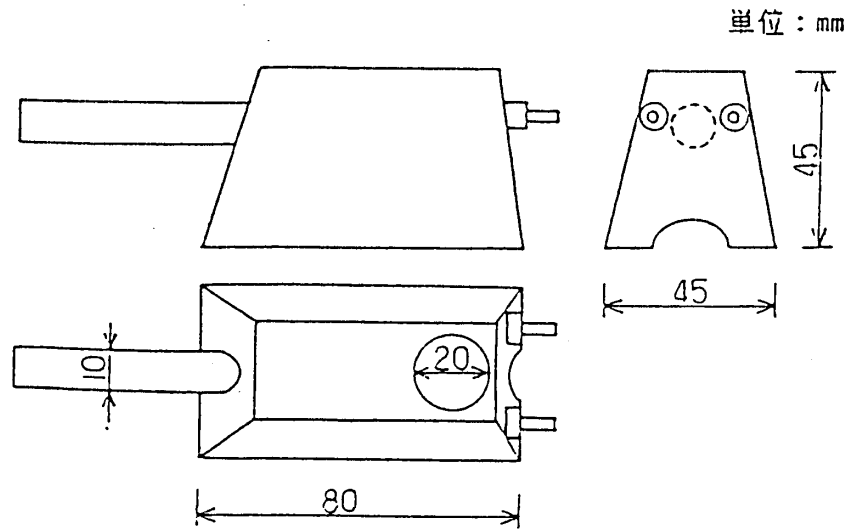


図-14 アフターシールドジグの外観及び寸法

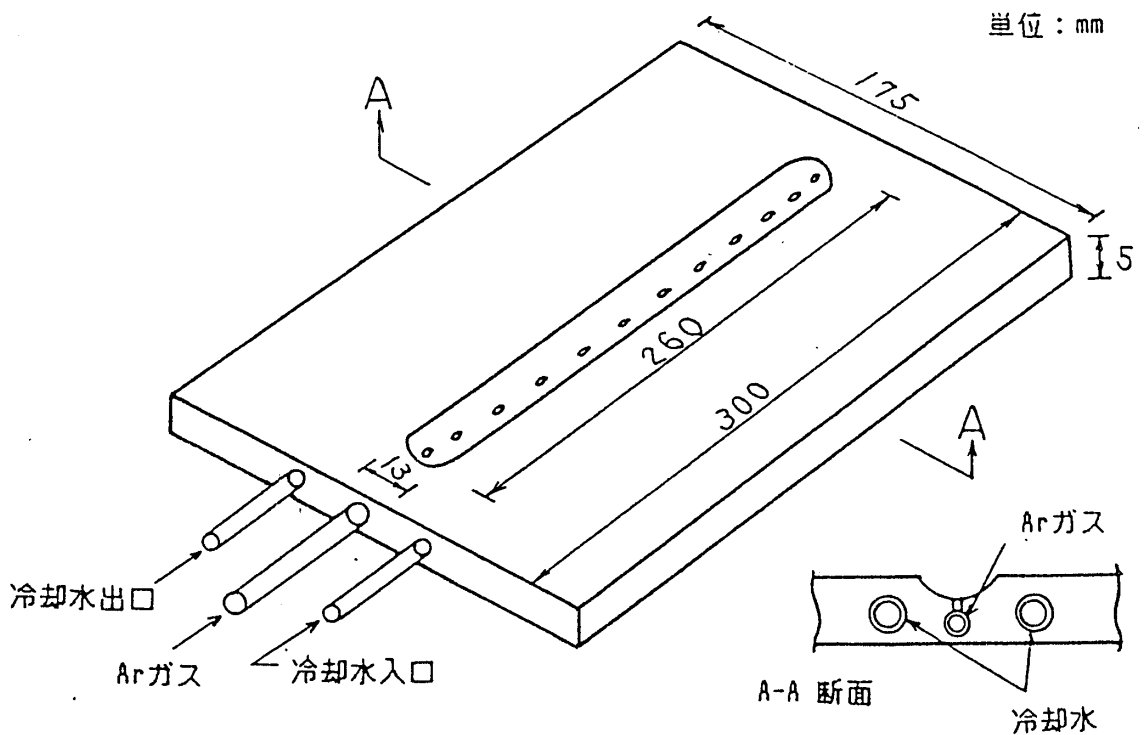


図-15 バックシールドジグの外観及び寸法

ティグ溶接では、試験片及び溶接材料をアセトンによって脱脂し、試験片は溶接用ジグ台に拘束し、積層溶接を行った。チャンバ内ティグ溶接においてはチャンバ内を純アルゴンガス雰囲気とした。溶接後の試験片は色調の変化を調べた後、放射線透過試験や引張試験、曲げ試験を行った。

(d) 試験条件

表-15に大気中ティグ溶接の条件を示す。

表-15 大気中ティグ溶接の突合せ溶接試験結果

材料	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	シールドガス流量 (ℓ/min)		
				トーチ	アフター	バック
Ti (TP35)	120~140	12~13	4.0~6.0	10	20	20
Ti-5Ta	120~140	12~13	4.0~6.0	10	20	20

表-16にチャンバ内ティグ溶接の条件を示す。

表-16 チャンバ内ティグ溶接の突合せ溶接試験条件

材料	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	シールドガス流量 (ℓ/min)	
				トーチ	チャンバ
Ti (TP35)	120~180	15~20	5.0~10.0	15	30
Ti-5Ta					

表-17に電子ビーム溶接の条件を示す。

表-17 電子ビーム溶接の突合せ溶接試験条件

材料	ビーム電流 (mA)	レンズ電流 (mA)	溶接電圧 (kV)	溶接速度 (cm/min)	真空度 (torr)
Ti (TP35)	12 ~ 14	520	125	75	$4 \times 10^{-4}$
Ti-5Ta					

図-16に引張試験片の形状及び寸法を、図-17に曲げ試験片の形状及び寸法を示す。

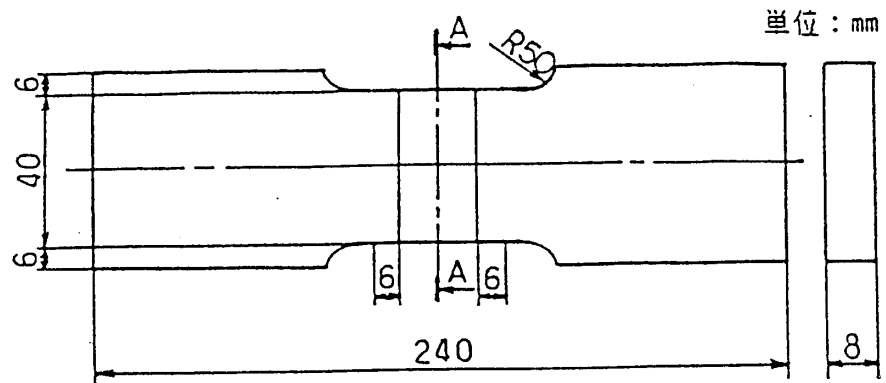


図-16 引張試験片の形状及び寸法

単位：mm

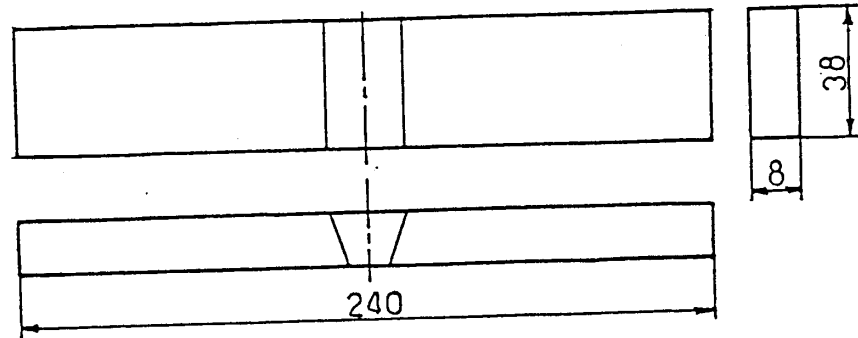


図-17 曲げ試験片の形状及び寸法

引張試験片はJIS Z 3121（突合せ溶接継手の引張試験方法）の1号試験片に準じ曲げ試験片はJIS Z 3122（突合せ溶接継手の型曲げ試験方法）の3号試験片とした。引張試験方法はJIS Z 2248（金属材料曲げ試験方法）にて行った。

しかし、図-16の引張試験片はJISの1号試験片と全長が多少異なるが、試験結果に影響しないものとして、これを採用することにした。

なお、材料の曲げ試験の曲げ半径は、溶接継手については特に規定がない。ここでは、溶接継手性能の検討のためにTi、Ti-5Taの曲げ半径は5Tで行った。

#### (e) 試験結果及び考察

##### ① 大気中での下向突合せ溶接ビード

写真-14のII-1Aは大気中ティグ溶接、下向姿勢での表ビードの状況を示す。

2材料とも、溶接熱影響部付近に変色が認められた。

II-1Bは裏ビードの結果である。裏ビードにも同様に色調変化が認められた。その傾向はほぼ表ビードと同様であった。

##### ② 大気中での立向突合せ溶接ビード

写真-15に大気中ティグ溶接（立向）のビード外観を示す。その色調は下向姿勢のそれとほぼ同様傾向であったが入熱量が多くなるために幾分広域に変色が見られた。

II-2Bは裏ビードの外観で、この場合も表ビードと類似したものであったがその領域はより広がった結果となっている。

③ チャンバ内下向突合せ溶接ビード

写真-16にチャンバ内ティグ溶接の表及び裏ビードの外観を示す。表ビードは両材料共、色調変化は少く十分な金属光沢を有していた。

裏ビードについては熱影響部付近で多少の色調の変化があったが溶接金属での変色は認められなかった。この熱影響部付近での変色はバックシールドを使用しなかったことに起因するものと考えられる。

④ 電子ビーム溶接ビード

写真-17に電子ビームによって溶接した3材料の表ビード及び裏ビードの試験結果を示す。表、裏ビード共に外観は銀又は金色に示し十分な金属光沢を有していた。

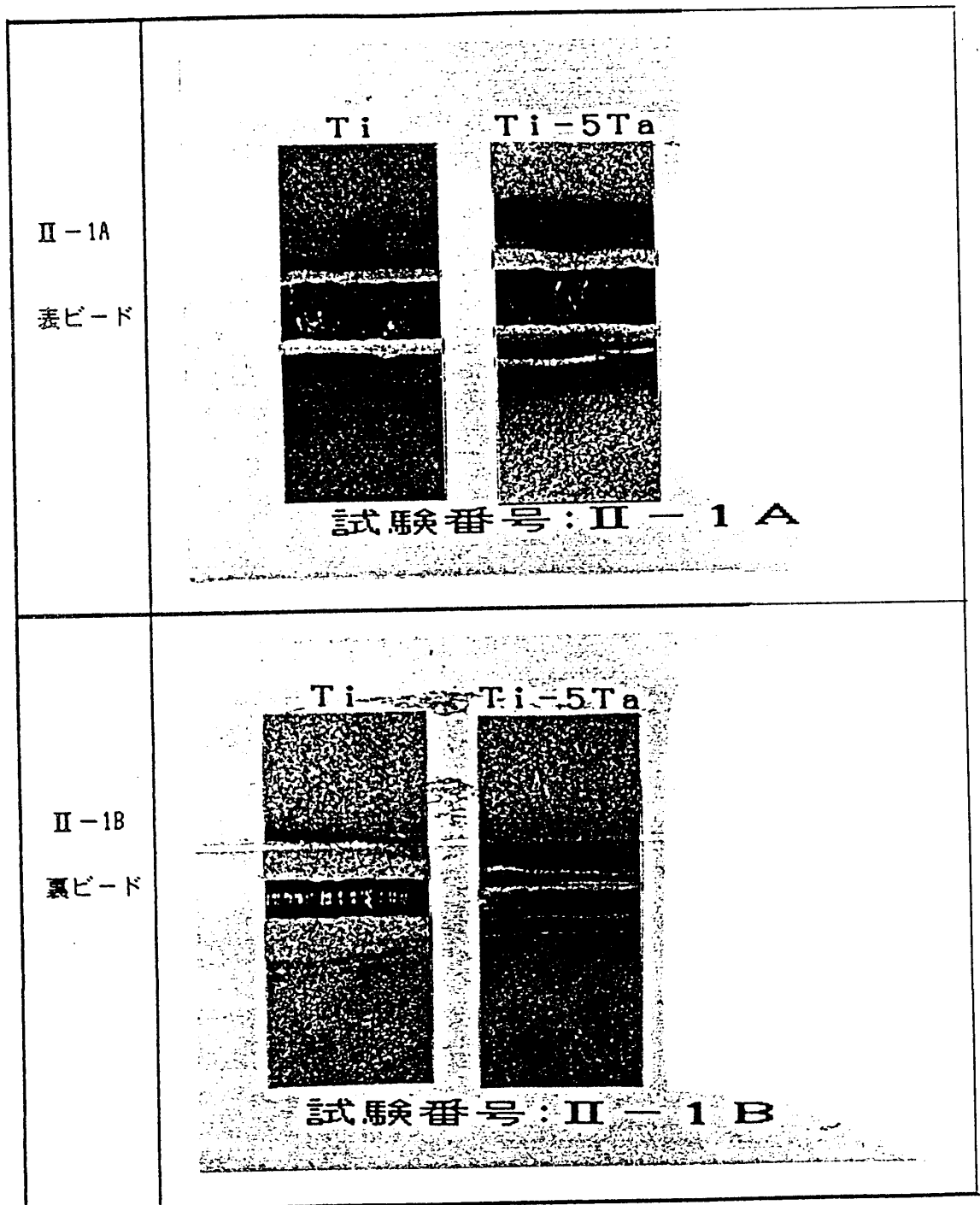


写真-14 大気中ティグ溶接（下向）でのビード外観

20mm

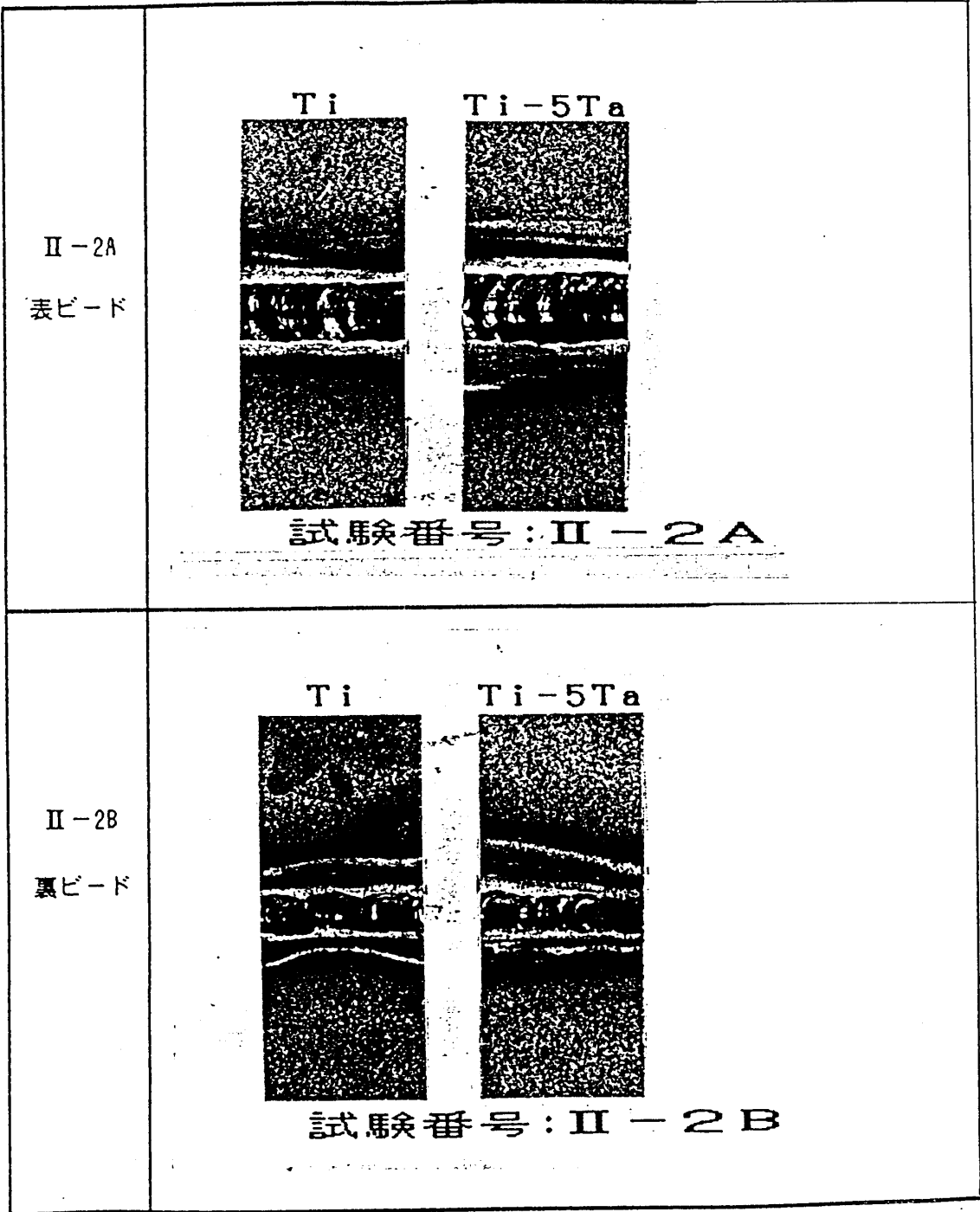


写真-15 大気中ティグ溶接 (立向) でのビード外観

20mm

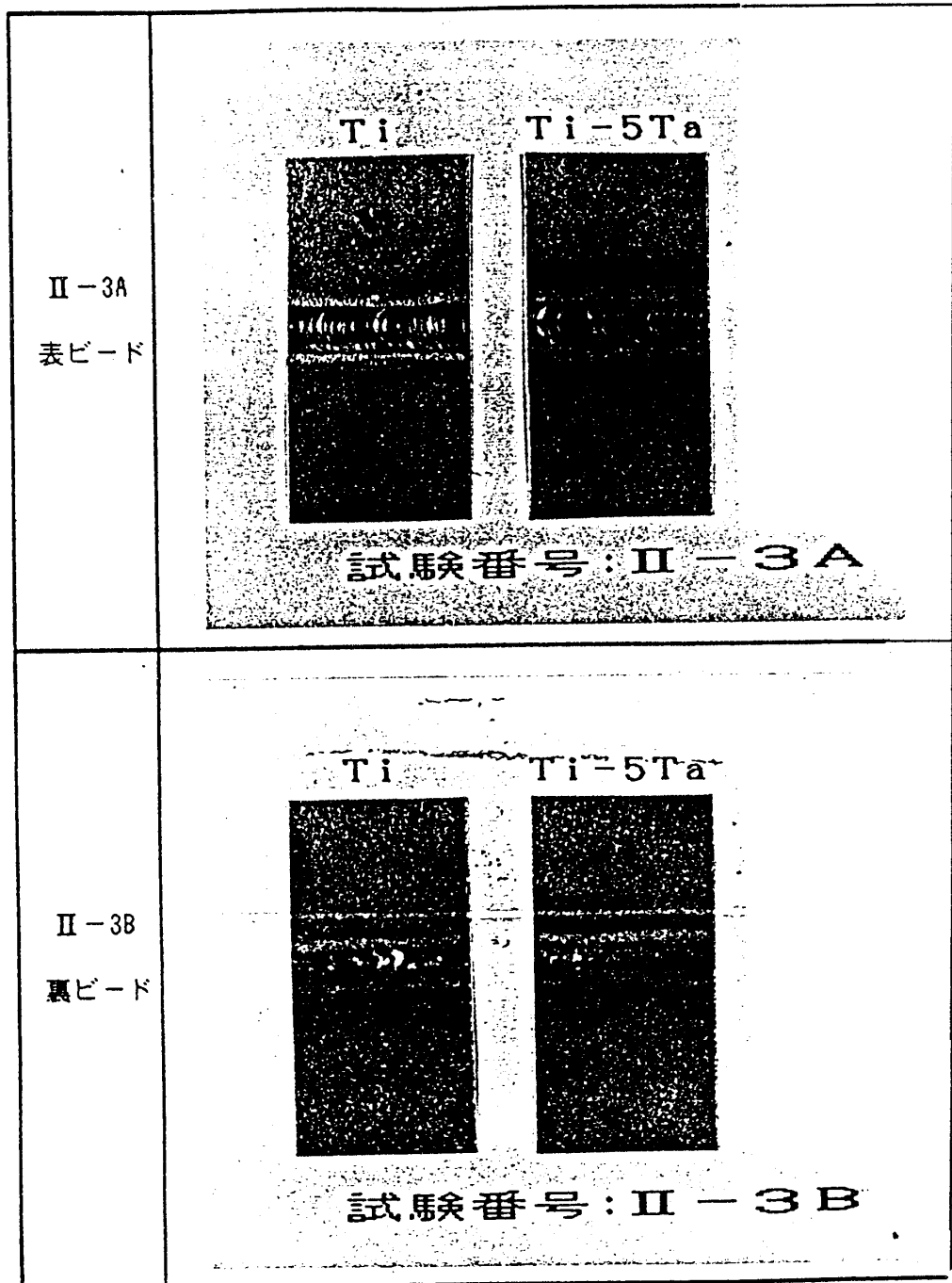


写真-16 チャンバ内ティグ溶接のビード外観

20mm



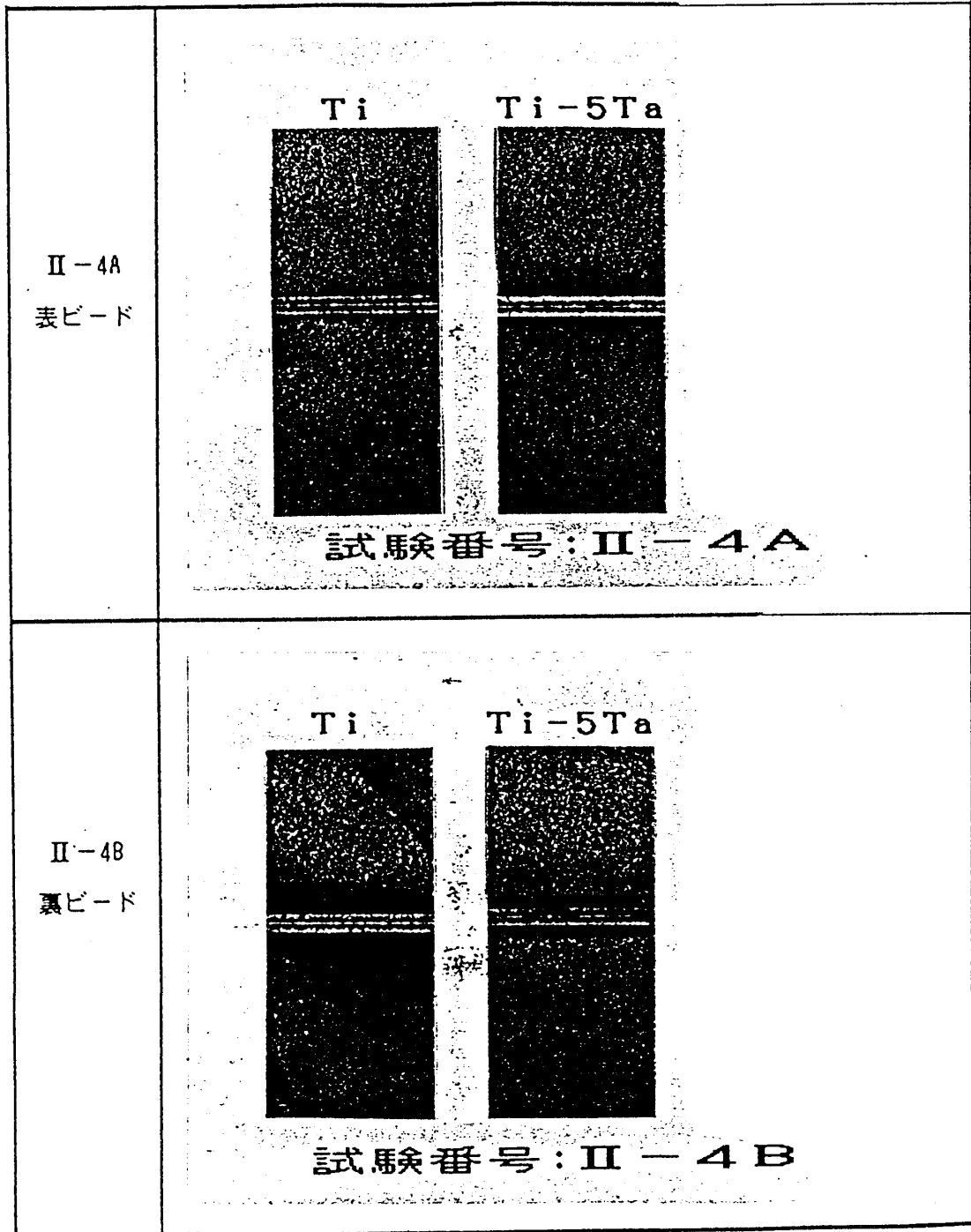


写真-17 電子ビーム溶接のビード外観

20mm

⑤ 機械試験結果

(i) 引張試験結果

写真-18~21に大気中ティグ溶接（下向）、（立向）、チャンバ内ティグ溶接、電子ビーム溶接の引張試験の破断後の試験片の外観を示す。

すべての溶接法において両材料ともに溶接金属部より破断した。また、各溶接法における両材料の引張強さを表-18に示す。

表-18 各溶接における継手引張強さ

溶接方法 \ 材料	引張強さ(kgf/mm <sup>2</sup> )	
	Ti	Ti-5Ta
大気中ティグ溶接（下向）	42.0	45.8
大気中ティグ溶接（立向）	41.9	46.4
チャンバ内ティグ溶接	42.2	46.2
電子ビーム溶接	44.5	47.1
規格値	35~52	35~52

溶接法の差異による引張強さは、両材料とも、大気中の下向、立向、チャンバ内では差はなく、電子ビーム溶接での場合のみ少し高い値となった。

大気中での下向、立向及びチャンバ内ティグ溶接において、コンタミネーション程度の差異があったにもかかわらずこのように引張強さでは、ほとんど変色が認められなかったことは溶接ビードが十分な金属光沢を有している限りにおいては引張強さに影響はないものと思われる。

(ii) 曲げ試験結果

写真-22~25に大気中ティグ溶接下向、同立向、チャンバ内ティグ溶接、電子ビーム溶接による曲げ試験結果を示す。これらのすべての試験面に割れ、欠陥等は認められず健全な曲げ性能を示した。したがって、これからも同様コンタミネーション程度の差異は多少あっても同様に金属光沢を有している限りにおいては、曲げ性能での差はないものと思われる。

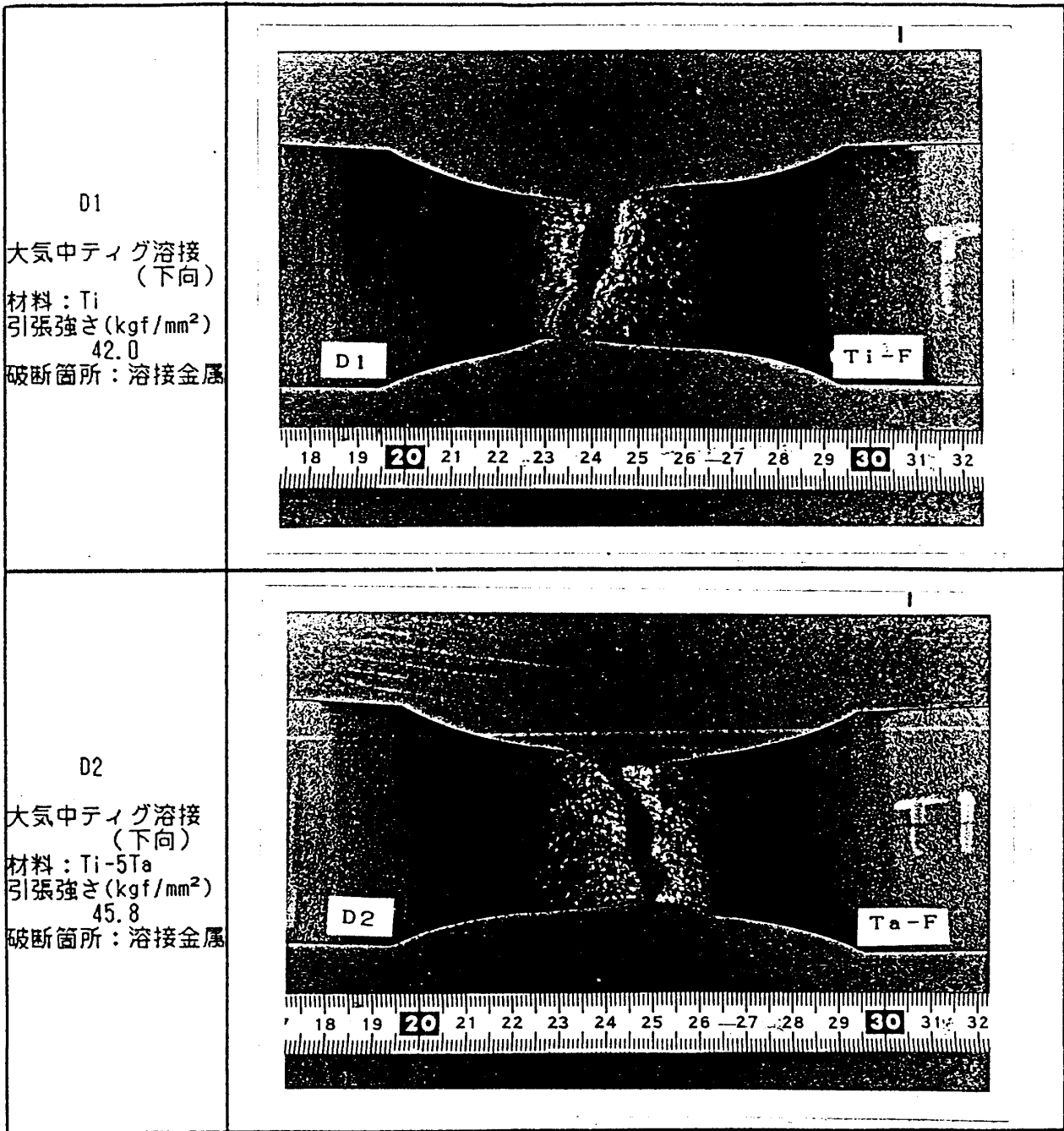


写真-18

大気中ティグ溶接(下向)の突合せ溶接継手の引張試験結果

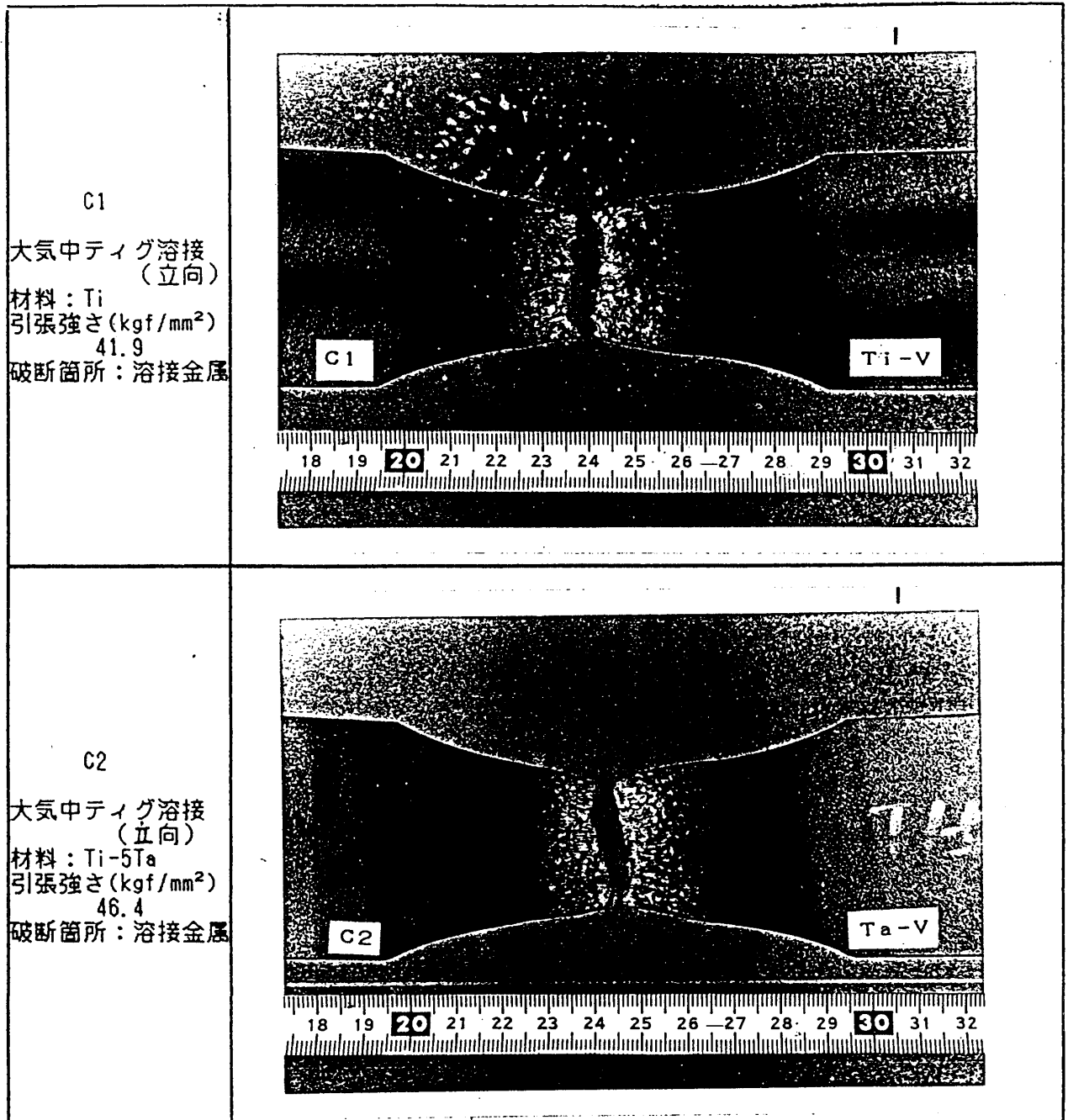


写真-19 大気中ティグ溶接(立向)の突合せ溶接継手の引張試験結果

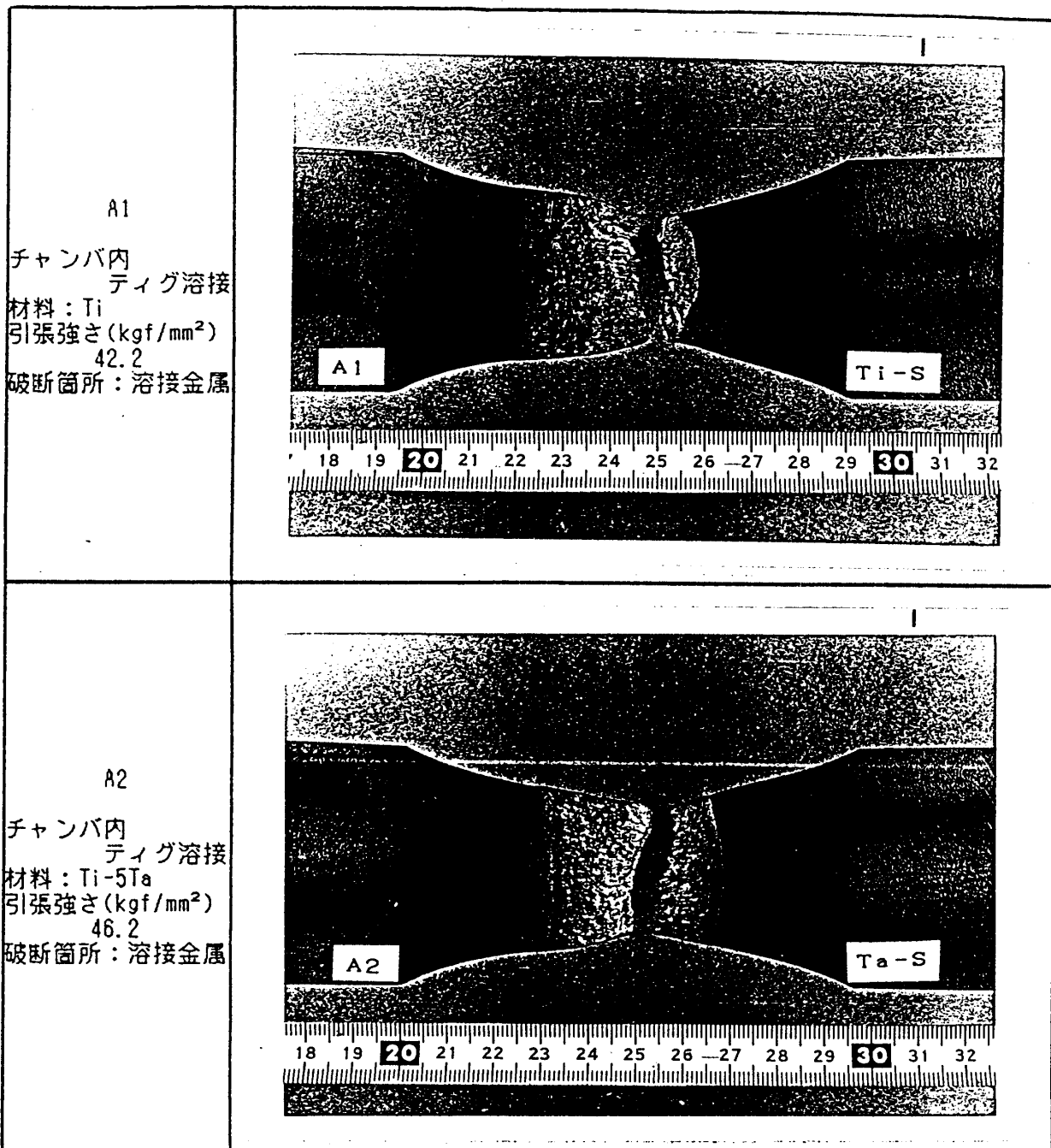


写真-20 チャンバ内ティグ溶接の突合せ溶接継手の引張試験結果

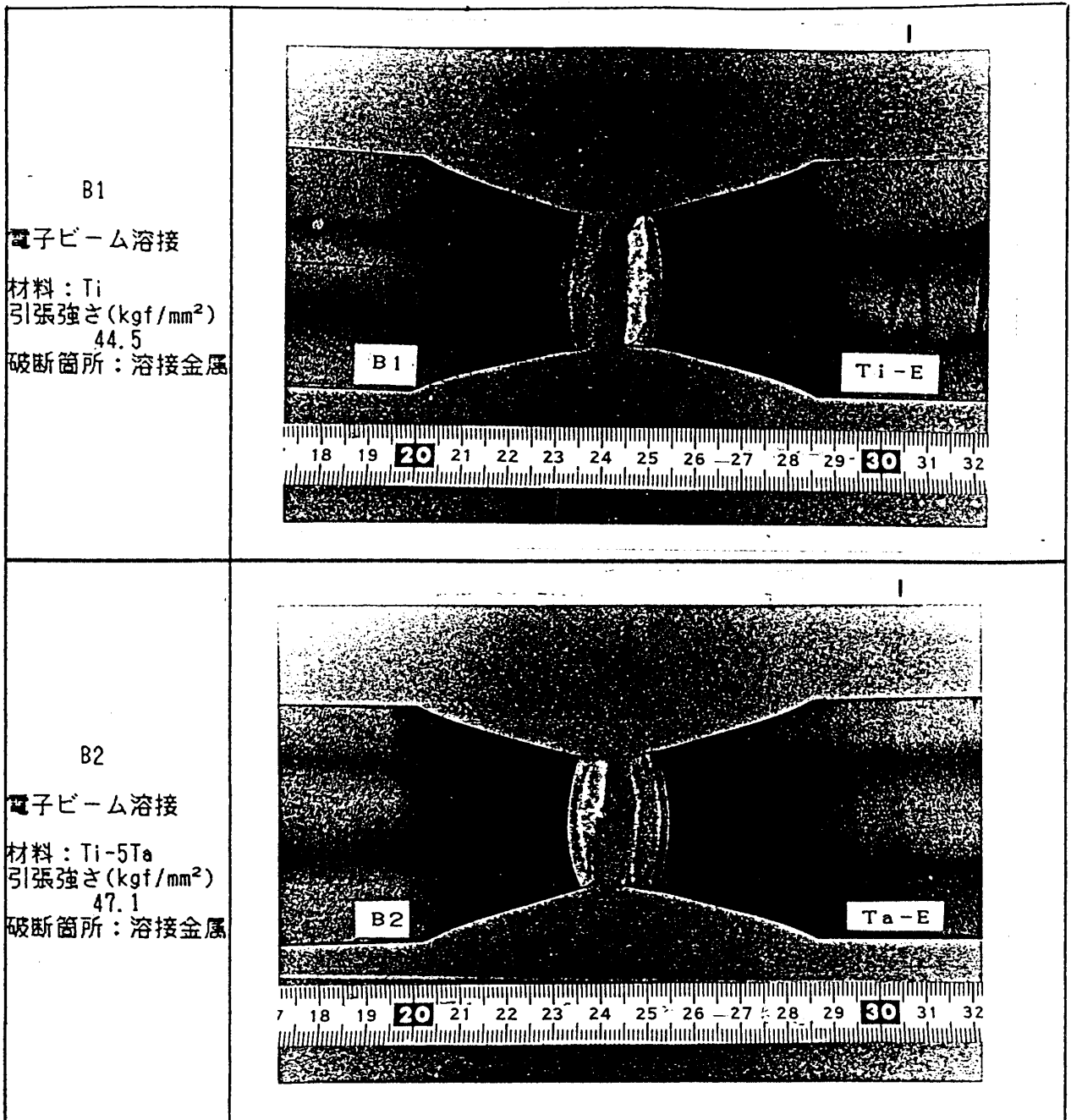


写真-21 電子ビーム溶接の突合せ溶接継手の引張試験結果

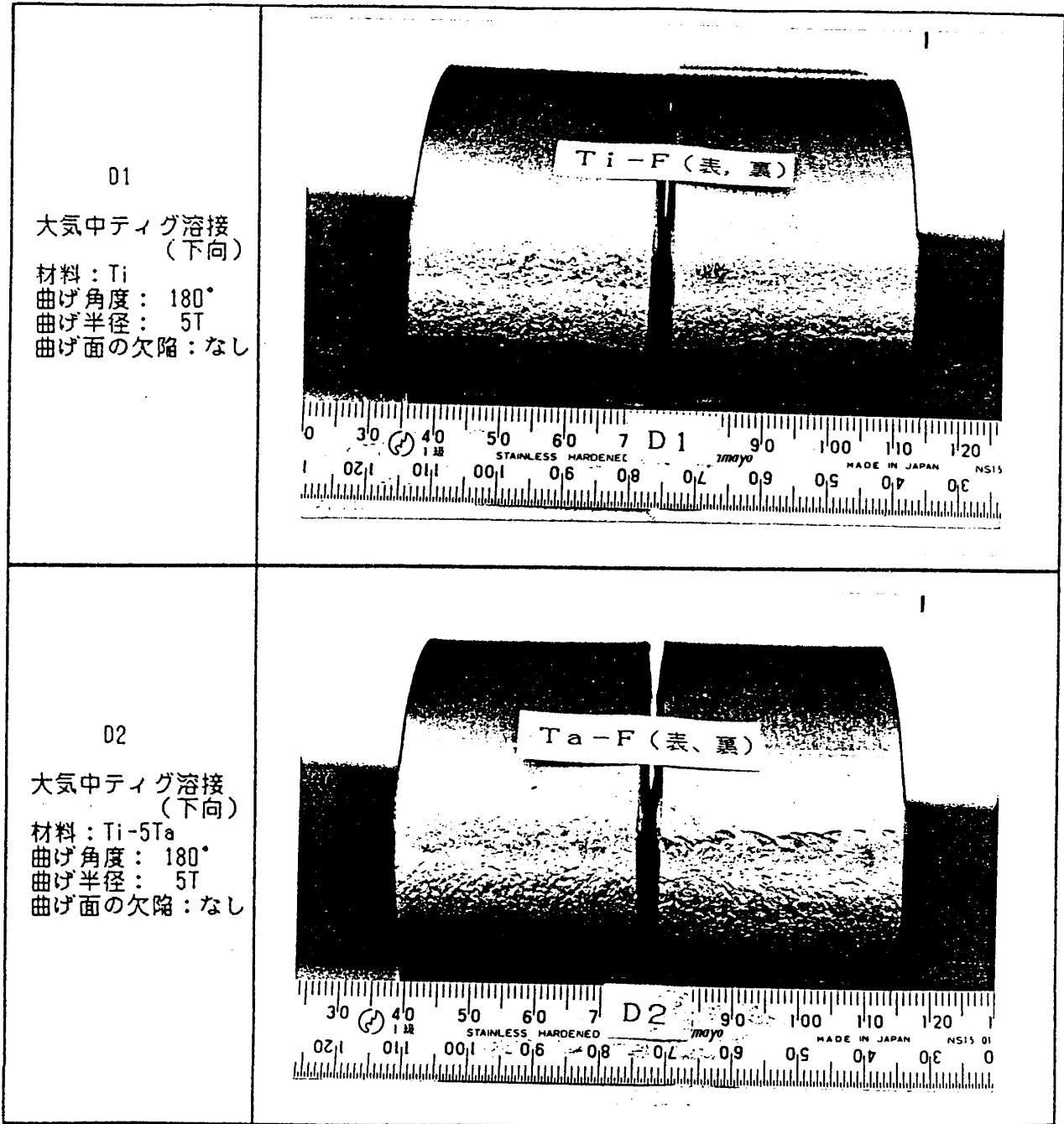


写真-22 大気中ティグ溶接(下向)の突合せ溶接継手の曲げ試験結果

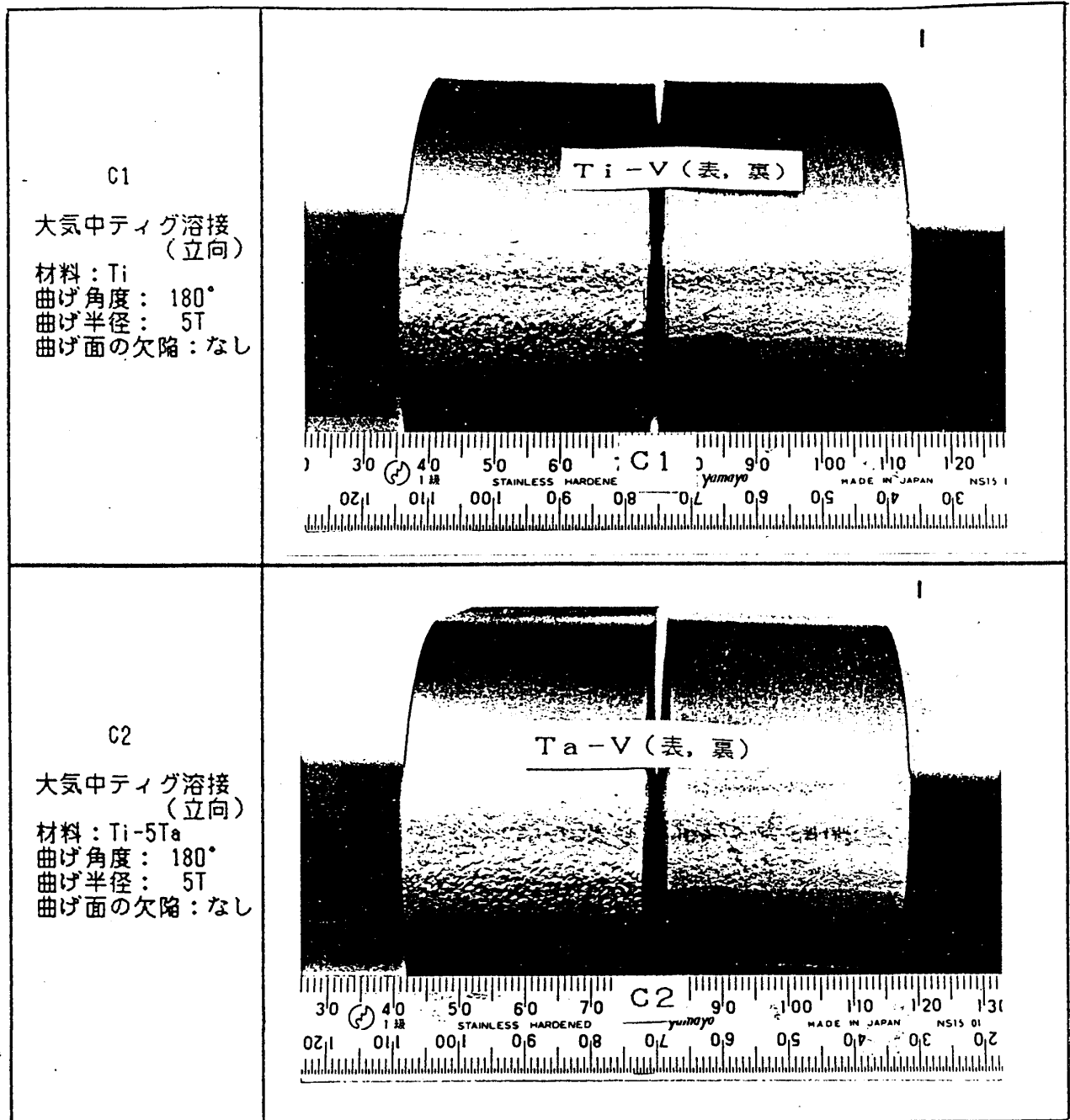


写真-23 大気中ティグ溶接(立向)の突合せ溶接継手の曲げ試験結果



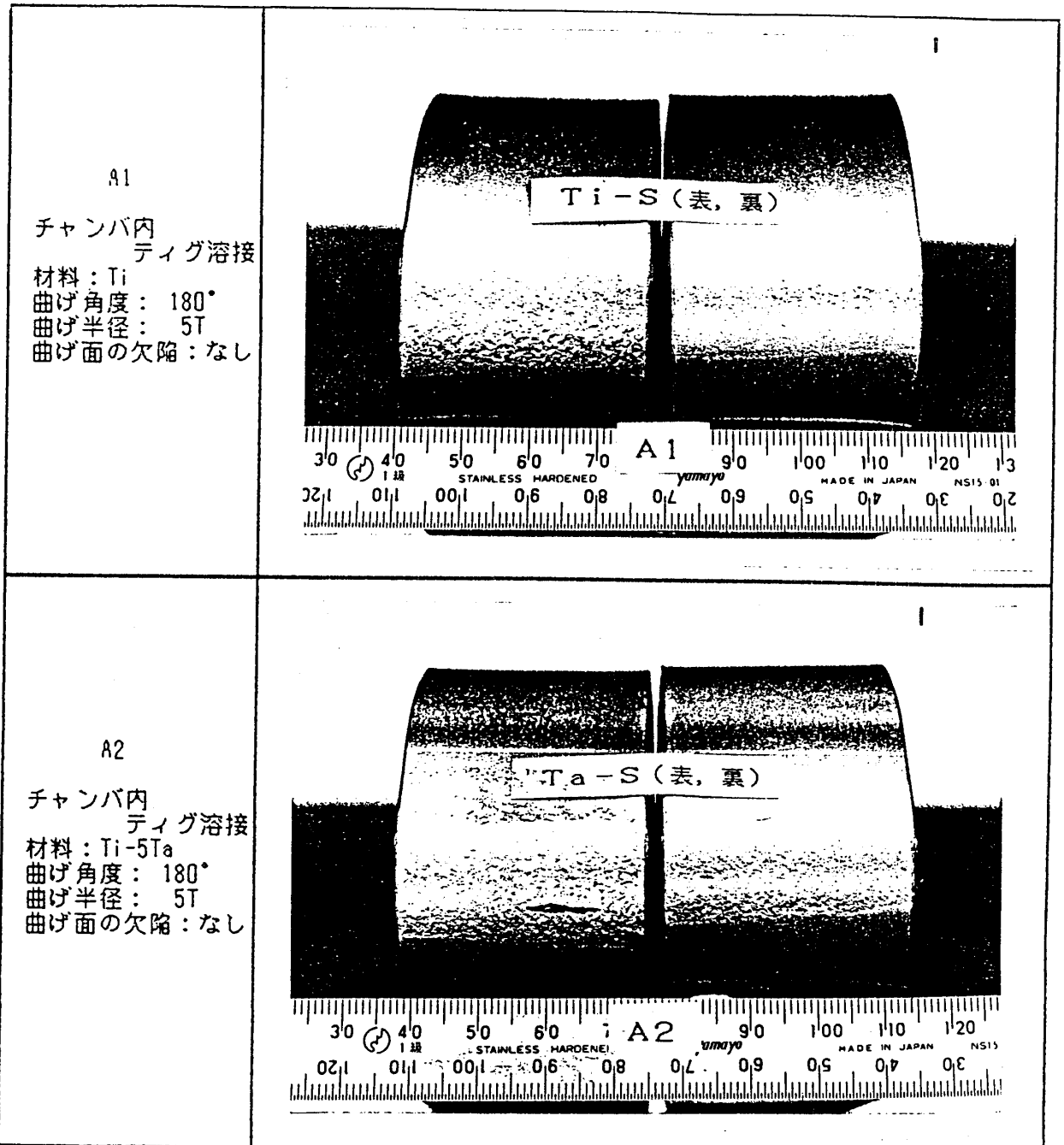


写真-24 チャンバ内ティグ溶接の突合せ溶接継手の引張試験結果

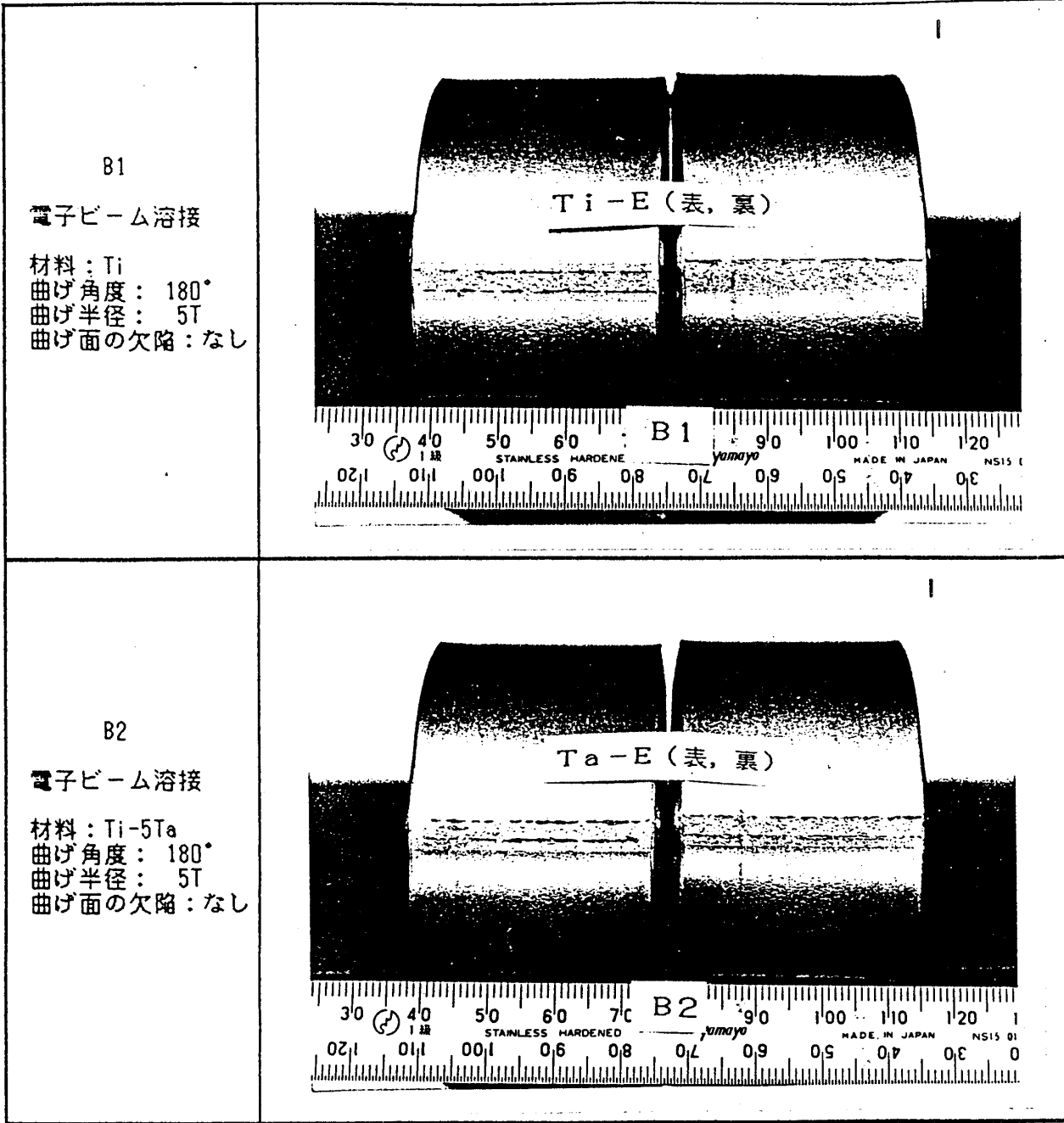


写真-25 電子ビーム溶接の突合せ溶接継手の曲げ試験結果

(f) まとめ

Ti及びTi-5Taについて、同一条件で多層での大気中のティグ溶接とチャンバ内ティグ溶接、それに単層での電子ビーム溶接による溶接継手を作成した。ついで、それ等継手の色調程度と引張り、曲げ試験の結果を対比した。その結果次のことが言える。

- ① 大気中のティグ溶接では、入熱量の多い立向溶接が下向溶接より変色域が広がる傾向にある。
- ② チャンバ内ティグ溶接の施工では、チャンバ内であってもバックシールド・ガスを流す場合が変色域を少なくすることができる。
- ③ 大気中のティグ溶接、チャンバ内ティグ溶接、それに電子ビーム溶接によって作られた継手部の色調に差異があっても、そのビード表面に光沢があれば、溶接部の引張り及び曲げ試験結果には影響を与えない。

### 3-2-2 機器の製作を考慮した試験結果

実際の機器の製作を想定し、チタン5%タンタル合金による管と管の溶接継手試験及び管と管板の溶接継手試験を行った。

#### (1) 供試材の溶接条件

表-19にTi-5Taの管と管板及び管と管の継手の溶接条件を示す。

表-19 供試材の溶接条件

項目	Ti-5Ta	
	テストピースNo.A	テストピースNo.B
	管と管板	管
間先形状	U形	V形
溶接材料	No Filler (1パス) KS50Ta(φ0.8)	KS50Ta (φ1.6)
溶接方法	GTAW-Auto	GTAW
電流電圧	100~200A 12~14V	52A 10V

(2) Ti-5Ta製管と管板および管と管の継手の試験結果

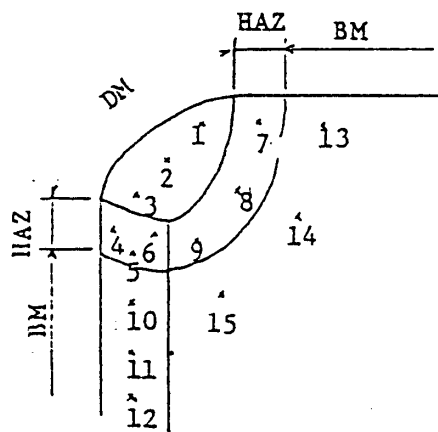
表-20にTi-5Ta製の管と管板および管と管の継手の試験結果を示す。  
 管と管板溶接試験片の硬さ試験結果については図-18に、マクロ組織に  
 ついては図-19に示した。

表-20 供試材の試験結果

項目		材料	
		Ti-5Ta (ks50Ta)	
		テストピースNo. A	テストピースNo. B
		管と管板	管
引張強さ (kg f / mm <sup>2</sup> )		—	45.8 46.2
曲 げ 性 能	曲げ条件	—	8 mm × 180°
	試 験 結 果	表曲げ	—
		裏曲げ	—
硬 さ		良 注3	良 注5
マクロ組織		良 注4 (特に異常なし)	良 注6 (特に異常なし)

ビッカース硬度 Hv:10kg

試験片測定位置



DM : 溶着金属

HAZ : 熱影響部

BM : 母材

テストピースNo. A

試験片No.	溶着金属部 (DM)			チューブ熱影響部 (HAZ)			チューブシート熱影響部 (HAZ)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TN-T5-1-B	142	154	168	151	160	181	152	151	148
TN-T5-A-B	150	150	159	148	159	178	155	153	156
試験片No.	チューブ母材 (BM)			チューブシート母材 (BM)					
	10	11	12	13	14	15			
TN-T5-1-B	171	167	167	135	138	142			
TN-T5-A-B	156	152	155	136	145	145			

図-18 硬度試験結果

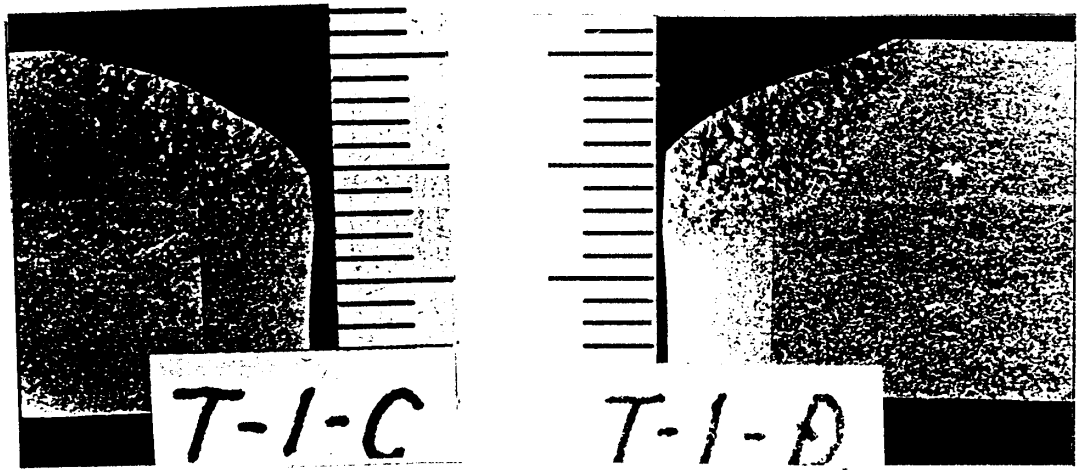


図-19 マクロ組織試験 (Ti-5Ta管と管板の継手断面)

### 3-2-3 溶接部の腐食試験結果

チタン5%タンタル合金製溶接継手の耐食性能を確認するため、腐食試験を実施した。

#### (1) 試験片

##### (a) 溶接材

Ti-5Ta材は、適正溶接条件、不適切溶接条件（バックシールなし）および補修溶接1回、2回の条件のものを製作した。

なお、溶接要領は、表-21~24に示す。

溶接不適材の外観写真は写真-26に示す。

##### (b) 熱処理材

熱処理材は、電気炉（空気雰囲気）内で450℃、650℃で1時間加熱して製作した。



表-21 溶接要領 (Ti-5Ta 材適正条件)

Joints No. 継手番号 DWPS No. 溶接明細書番号									
Welding Process(es) 溶接方法 <input type="checkbox"/> SMAW 被覆マーク <input type="checkbox"/> SAW サブマーシ <input checked="" type="checkbox"/> GTAW テイグ <input type="checkbox"/> GMAW ミイグ Qualified WPS No. 認定溶接施工要領書番号 Supporting PQR No. 認定記録書番号									
Base Metals KS 50TA (Ti-5Ta) to K50TA (Ti-5Ta)									
Filler Metals 溶接材料 ASME SFA No. AWS Class No. Trade Name - - - K50TA			Ar Gas Flow Rate アルゴンガス流量 トリ12-16l/min Gas Backing バックシールド Ar 20-40l/min Size of Electrode 電極径 2.4mmφ*3.2 2% Thoriated Tungsten <input checked="" type="checkbox"/> 2%トリウム入りタングステン Others (その他) <input type="checkbox"/>						
Welding Condition 溶接条件									
Side 面	Layer No. 層数	Welding Process 溶接方法	Size 径	Position 姿勢	Current Polarity 極性	Amps (A) 電流	Volts (V) 電圧	Speed (mm/min) 速度	Other その他(名柄, 電極数など)
	全層	GTAW	φ2	下面	DC/SP	90~160	11~15	80~120	KS50TA(母材から加工)
Preheat Temp. 予熱温度 予熱なし Preheat Maintenance 予熱保持 <input type="checkbox"/> YES する <input checked="" type="checkbox"/> NO しない Interpass Temp. 層間温度 100°C以下 PWHT 後熱処理 <input type="checkbox"/> YES 有 <input checked="" type="checkbox"/> NO 無									
Note 備考									
Joint 継手 									
Rev	Date	Accept	Rev	Date	Accept				
QA REVIEW									
Doc. No.				Sheet No. of					

表-22 溶接要領 (Ti-5Ta 材不適切条件)

Joints No. 継手番号 DWPS No. 溶接明細書番号									
Welding Process(es) 溶接方法 <input type="checkbox"/> SMAW 被覆マーク <input type="checkbox"/> SAW サブマーシ <input checked="" type="checkbox"/> GTAW テイグ <input type="checkbox"/> GMAW ミイグ									
Base Metals KS50TA (Ti-5Ta) to KS50TA (Ti-5Ta)									
Filler Metals 溶接材料 ASME SFA No. AWS Class No. Trade Name - - KS50TA									
Ar Gas Flow Rate アルゴンガス流量 ト-ナD~16l/min Gas Backing バックシールド 無し Size of Electrode 電極径 $\phi 2.4$ #32 2% Thoriated Tungsten <input checked="" type="checkbox"/> 2%トリウム入りタングステン Others (その他) <input type="checkbox"/>									
Welding Condition 溶接条件									
Side 面	Layer No. 層数	Welding Process 溶接方法	Size 径	Position 姿勢	Current Polarity 極性	Amps (A) 電流	Volts (V) 電圧	Speed (mm/min) 速度	Other その他(名柄, 電極数など)
	全属	GTAW	φ2	下向	DC/sp	90~160	11~15	80~120	KS50TA(母材から加工)
Preheat Temp. 予熱温度 予熱なし Preheat Maintenance 予熱保持 <input type="checkbox"/> YES する <input checked="" type="checkbox"/> NO しない Interpass Temp. 層間温度 100°C以下 PWHT 後熱処理 <input type="checkbox"/> YES 有 <input checked="" type="checkbox"/> NO 無									
Note 備考									
Joint 継手 									
Rev	Date	Accept	Rev	Date	Accept				
QA REVIEW						Doc. No.	Sheet No. of		

表-23 溶接要領 (Ti-5Ta 材補修溶接1回)

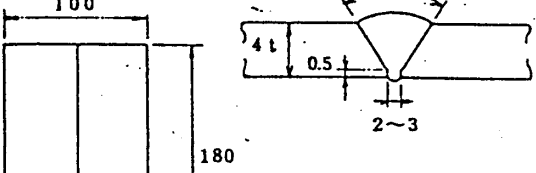
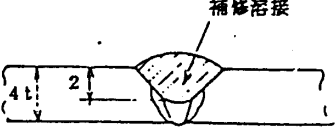
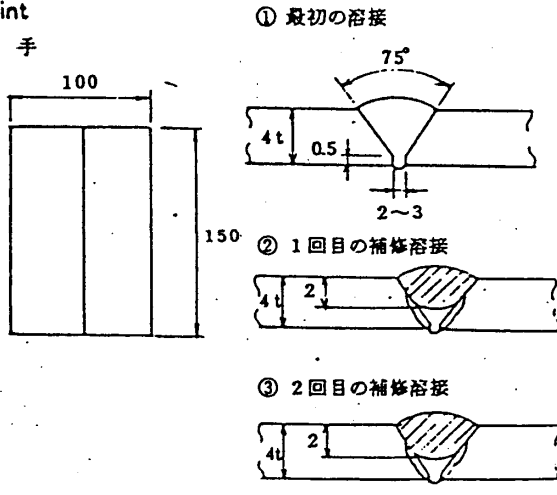
Joints No. 継手番号 DWPS No. 溶接明細書番号										
Welding Process(es) 溶接方法 <input type="checkbox"/> SMAW 被覆マーク <input type="checkbox"/> SAW サブマーン <input checked="" type="checkbox"/> GTAW テイグ <input type="checkbox"/> GMAW ミイグ Qualified WPS No. 認定溶接施工要領書番号 Supporting PQR No. 認定記録書番号										
Base Metals KS 50TA (Ti-5Ta) to KS 50TA (Ti-5Ta)										
Filler Metals 溶接材料 ASME SFA No. AWS Class No. Trade Name - - - KS 50TA				Ar Gas Flow Rate トナ 12~16 l/min アルゴンガス流量 補助 25~35 l/min Gas Backing バックシールド Ar 20~40 l/min Size of Electrode 電極径 $\phi 2.4$ $\phi 3.2$ 2% Thoriated Tungsten <input checked="" type="checkbox"/> 2%トリウム入りタングステン Others (その他) <input type="checkbox"/>						
Welding Condition 溶接条件										
Side 面	Layer No. 層数	Welding Process 溶接方法	Size 径	Position 姿勢	Current Polarity 極性	Amps (A) 電流	Volts (V) 電圧	Speed (mm/min) 速度	Other その他(名稱, 電極数など)	
	全層	GTAW	$\phi 2$	下向	DC/SP	90~160	11~15	80~120	最初の溶接 KS 50TA (母材から加工)	
	全層	GTAW	$\phi 2$	下向	DC/SP	90~160	11~15	80~120	補修溶接 KS 50TA (母材から加工)	
Preheat Temp. 予熱温度 予熱なし Preheat Maintenance 予熱保持 <input type="checkbox"/> YES する <input checked="" type="checkbox"/> NO しない Interpass Temp. 層間温度 100°C以下 PWHT 後熱処理 <input type="checkbox"/> YES 有 <input checked="" type="checkbox"/> NO 無										
Note 備考										
Joint 継手  <p>① 最初の溶接</p>  <p>② 補修時の溶接</p>										
Rev	Date	Accept	Rev	Date	Accept					
QA REVIEW						Doc. No.	Sheet No. of			

表-24 溶接要領 (補修溶接2回)

Joints No. 継手番号					DWPS No. 溶接明細書番号				
Welding Process(es) 溶接方法					Qualified WPS No. 認定溶接施工要領書番号				
Base Metals KS 50TA (Ti-5Ta) to KS 50TA (Ti-5Ta)					Supporting PQR No. 認定記録書番号				
Filler Metals 溶接材料			ASME SFA No.	AWS Class No.	Trade Name	Ar Gas Flow Rate アルゴンガス流量			
			-	-	KS 50TA	Ar 12~16 l/min 補加 25~35 l/min			
						Gas Backing バックシールド Ar 20~40 l/min			
						Size of Electrode 電極径 4.0 for 3.2			
						2% Thoriated Tungsten <input checked="" type="checkbox"/>			
						2%トリウム入りタングステン <input type="checkbox"/>			
						Others (その他) <input type="checkbox"/>			
Welding Condition 溶接条件									
Side 面	Layer No. 層数	Welding Process 溶接方法	Size 径	Position 姿勢	Current Polarity 極性	Amps (A) 電流	Volts (V) 電圧	Speed (mm/min) 速度	Other 其他(名称, 電極数など)
	全層	GTAW	φ2	下向	DC/SP	90~160	11~15	80~120	最初の溶接 KS 50TA (母材から加工)
	全層	GTAW	φ2	下向	DC/SP	90~160	11~15	80~120	1回目及び2回目の補修溶接 KS 50TA (母材から加工)
Preheat Temp. 予熱温度 予熱なし					Preheat Maintenance 予熱保持 <input type="checkbox"/> YES する <input checked="" type="checkbox"/> NO しない				
Interpass Temp. 層間温度 100°C以下					PWHT <input type="checkbox"/> YES 有 <input checked="" type="checkbox"/> NO 無				
Note 備考					Joint 継手 				
QA REVIEW									
Rev	Date	Accept	Rev	Date	Accept	Doc. No.		Sheet No. of	

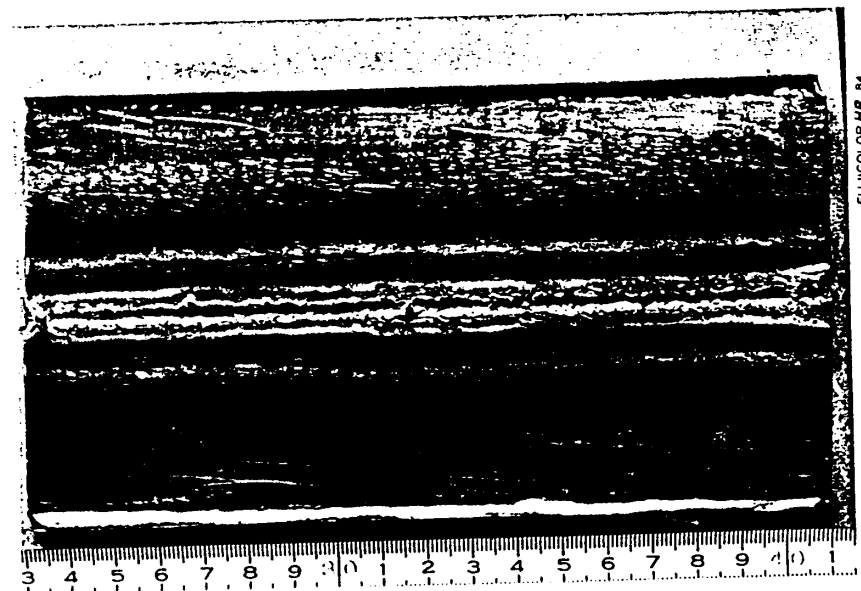


写真-26 溶接条件不適材の裏面外観写真

## (2) 試験方法

### (a) 試験装置

#### (i) 浸漬腐食試験装置

浸漬腐食試験装置の略図を図-20及び図-21に、外観を写真-27に示す。

図-20に示す試験装置は、沸点以下の温度条件に使用し、図-21に示す試験装置は、沸点条件の場合に使用した。また試験材数は1条件あたり2枚とした。(比液量は応力負荷材を除いて49ml/cm<sup>2</sup>)

#### (ii) 電気化学試験装置

電気化学試験装置の略図および外観を図-22、写真-28に示す。フラスコ内に試験溶液を入れた後、試料極(Ti-5Ta)、体極(pt)およびルギンキャピラリーを入れる。ルギンキャピラリーは、飽和KCl溶液/Ag/AgCl照合電極に接続する。まず、自然電位を測定し、安定後試料極の電位を掃引速度20.8mV/minで1.9Vまで連続的に走査し、その後15分保持し分極曲線を求めた。

硝酸中におけるTi-5Taの電気化学的測定系の陰極ではHNO<sub>3</sub>の還元反応、陽極では金属の酸化反応を生じている。Ti-5Taのアノード分極曲線には明瞭な不動態領域が現われ、腐食反応はアノード律速であることがわかった。また腐食反応が試験溶液中金属イオンの影響を受けるので、アノード分極挙動について検討した。

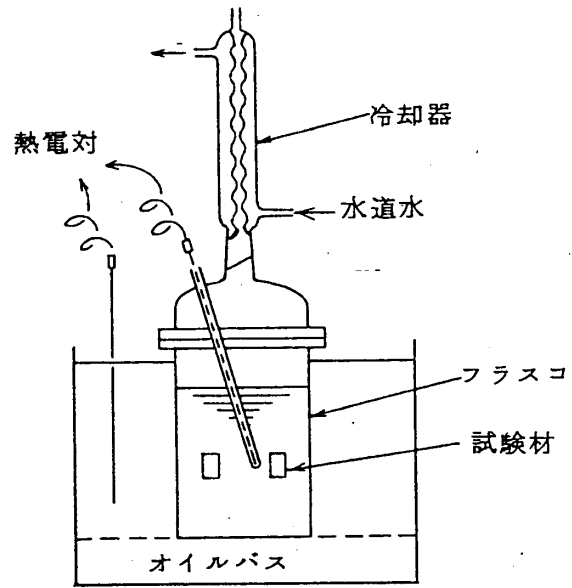


図-20 浸漬腐食試験装置(1)略図

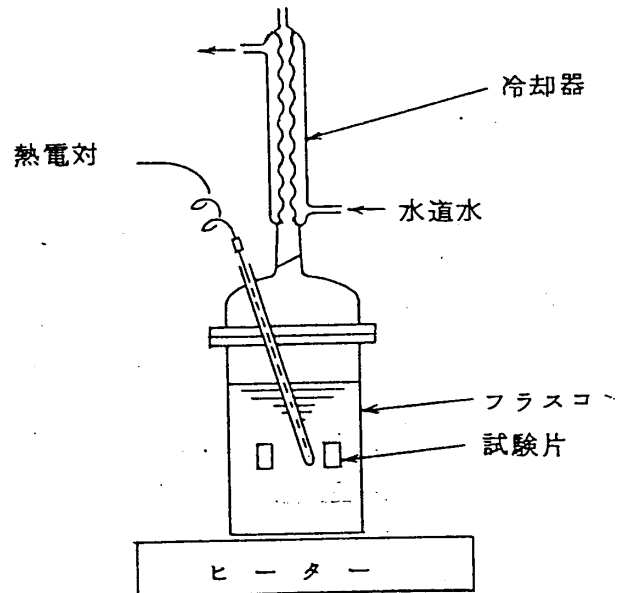


図-21 浸漬腐食試験装置(2)略図

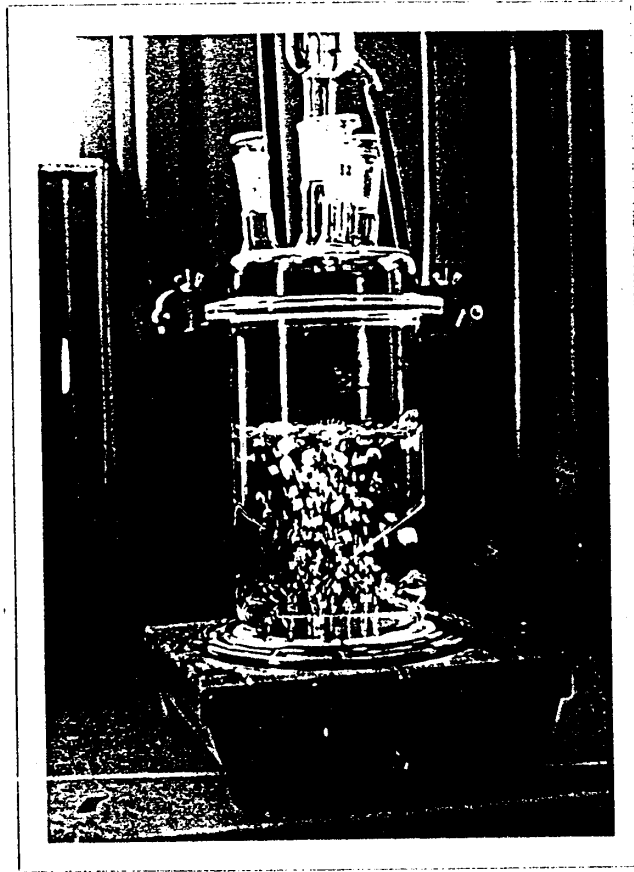


写真-27 浸漬腐食試験装置外觀



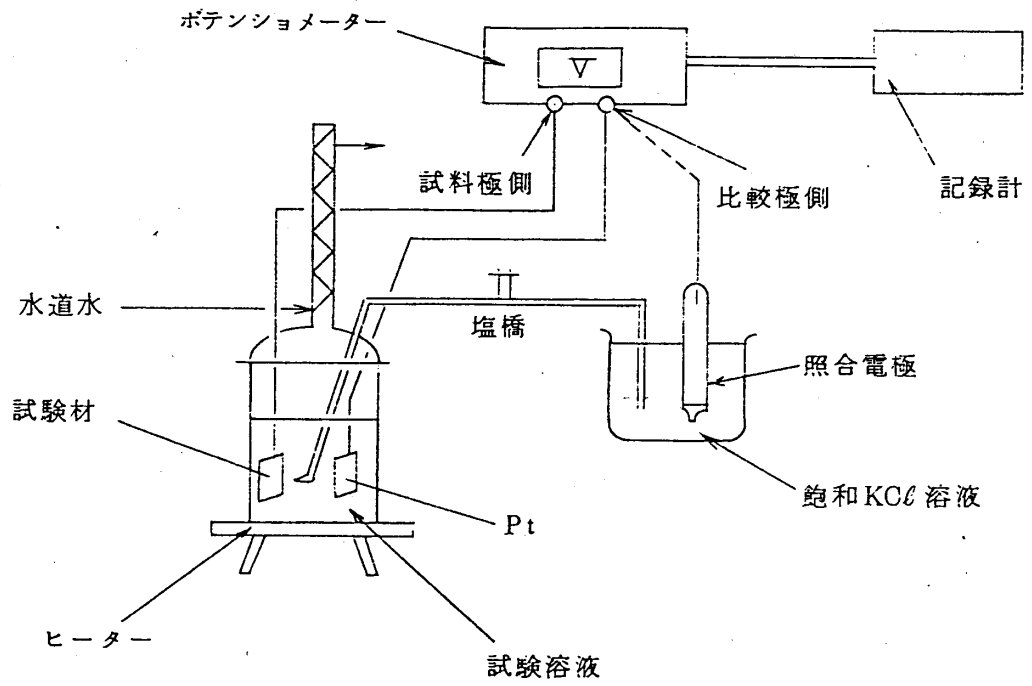


図-22 電気化学試験装置略図

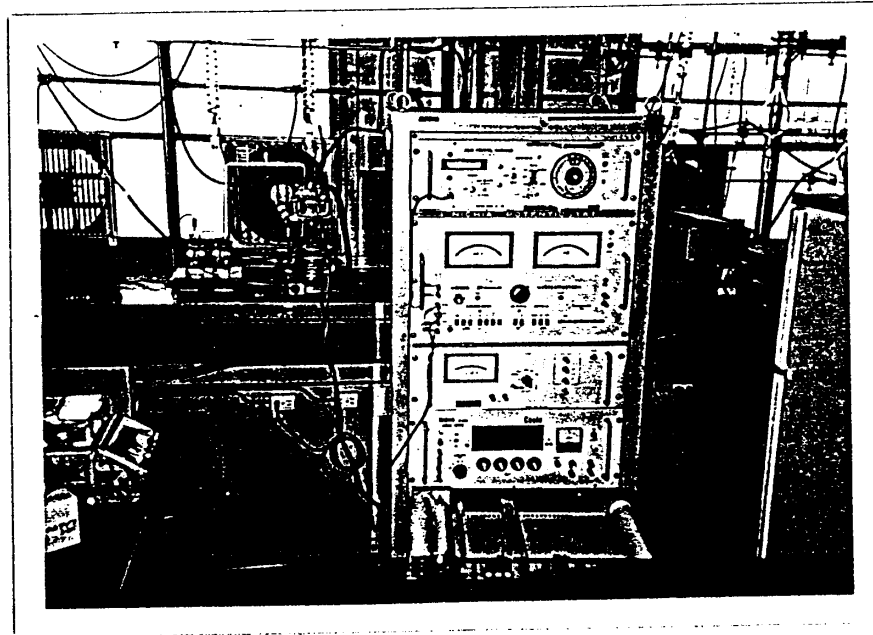


写真-28 電気化学試験装置外観

(b) 試験液

試験液は、表-25に示す試薬およびイオン交換水を用いて、6 N, 8 Nおよび10.5Nの硝酸溶液およびこれに溶存金属として $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ru}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$ , を添加した。添加金属イオン濃度は、酸回収蒸発缶の運転濃度を基準とした。

なお、Ruは試薬が塩化物のため添加する前に以下に示す要領でコンディショニングを行った。

$\text{RuCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ を $\text{RuCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (Ru Assay 44%) として、3倍モルの $\text{AgNO}_3$ を加え、約10分間攪拌後濾別する。濾別後さらに0.03倍モルの $\text{AgNO}_3$ を加え同様に操作する。再度0.03倍モルの $\text{AgNO}_3$ を加え生成沈澱量が前回よりも少量であることを確認し、操作を終了した。

表-25 試薬一覧表

名称	項目	化学式	メーカー	等級
硝酸		$\text{HNO}_3$	関東化学(株)	試薬特級
硝酸第2鉄		$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	関東化学(株)	試薬特級
硝酸クロム		$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	関東化学(株)	鹿特級試薬
塩化ルテニウム		$\text{RuCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	三津和化学薬品(株)	試薬特級
硝酸第1セリウム		$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	関東化学(株)	試薬特級
硝酸ニッケル		$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	関東化学(株)	JIS 試薬特級

(c) 試験材の処理および評価方法

(i) 試験材の前処理

まず#400まで研磨した試験材の外観写真を撮影した。次に純水を入れた超音波洗浄機に試験材を浸漬し、15分間超音波洗浄を行った。次に試験材をアセトンで洗浄脱脂し、風乾後デシケーター中に入れて一夜乾燥後、精密化学天秤で0.1 mgまで精秤し試験に供した。

(ii) 試験材の後処理

試験が終了した試験材はフラスコより取り出し、風乾後試験材の外観を肉眼で観察した。次に試験材を純水流水下で水洗した後、純水を入れた超

音波洗浄機で15分間洗浄した。次に試験材をアセトンで洗浄風乾した後デシケーター中で一夜乾燥後、精密化学天秤で精秤し、試験材の重量減を測定した。その後外観を肉眼で観察し、写真撮影を行った。

### (iii) 腐食速度の算定

腐食速度は、重量減の結果から以下に示す式で求めた。

$$V = \frac{W \times 24 \text{時間} / \text{日} \times 365 \text{日} \times 10 \text{ (mm/cm)}}{S \times \rho \times H}$$

V : 腐食速度 (mm/y)

W : 重量減 (g)

S : 表面積 (cm<sup>2</sup>)

ρ : 比重 (g/cm<sup>3</sup>)

H : 浸漬時間 (h)

なお、平均腐食速度は2個の試験材の平均とした。

### (iv) ミクロ組織観察

重量減測定および外観撮影終了後の一部の試験材および電気化学試験終了後の一部の試験材は、表面の光学顕微鏡写真(倍率: 200倍)または、操作型電子顕微鏡(倍率: 1280, 3520倍)写真を撮影した。また試験材断面をバフ研磨後エッチングして、ミクロ組織を撮影した。

## (2) 試験結果

(Ti-5Ta溶接材、熱処理材の硝酸溶液中における腐食速度の評価およびTi-5Ta応力負荷材の割れ評価)

沸騰8N-HNO<sub>3</sub>中におけるTi-5Ta溶接材の腐食速度を図-23に示す。HNO<sub>3</sub>は金属イオン無添加の溶液および200mg/l Fe<sup>+</sup>イオン, 50mg/l Cr<sup>3+</sup>イオン, 1mg/l Ru<sup>3+</sup>イオン, 50mg/l Ni<sup>2+</sup>イオン, 0.5mg/l Ce<sup>3+</sup>イオンを添加した溶液の2種類である。溶接材の溶接条件は適切、裏面補助ガスシールのない不適、補修溶接を1回および2回である。Ti-5Ta溶接材の腐食速度は、溶接条件不適の試験片を除いて、前述した通常のTi-5Ta材の腐食速度に一致している(金属イオン無添加のHNO<sub>3</sub>中: 0.09mm/y ~ 0.10mm/y, 金属イオン添加HNO<sub>3</sub>中: 0.01mm/y)。

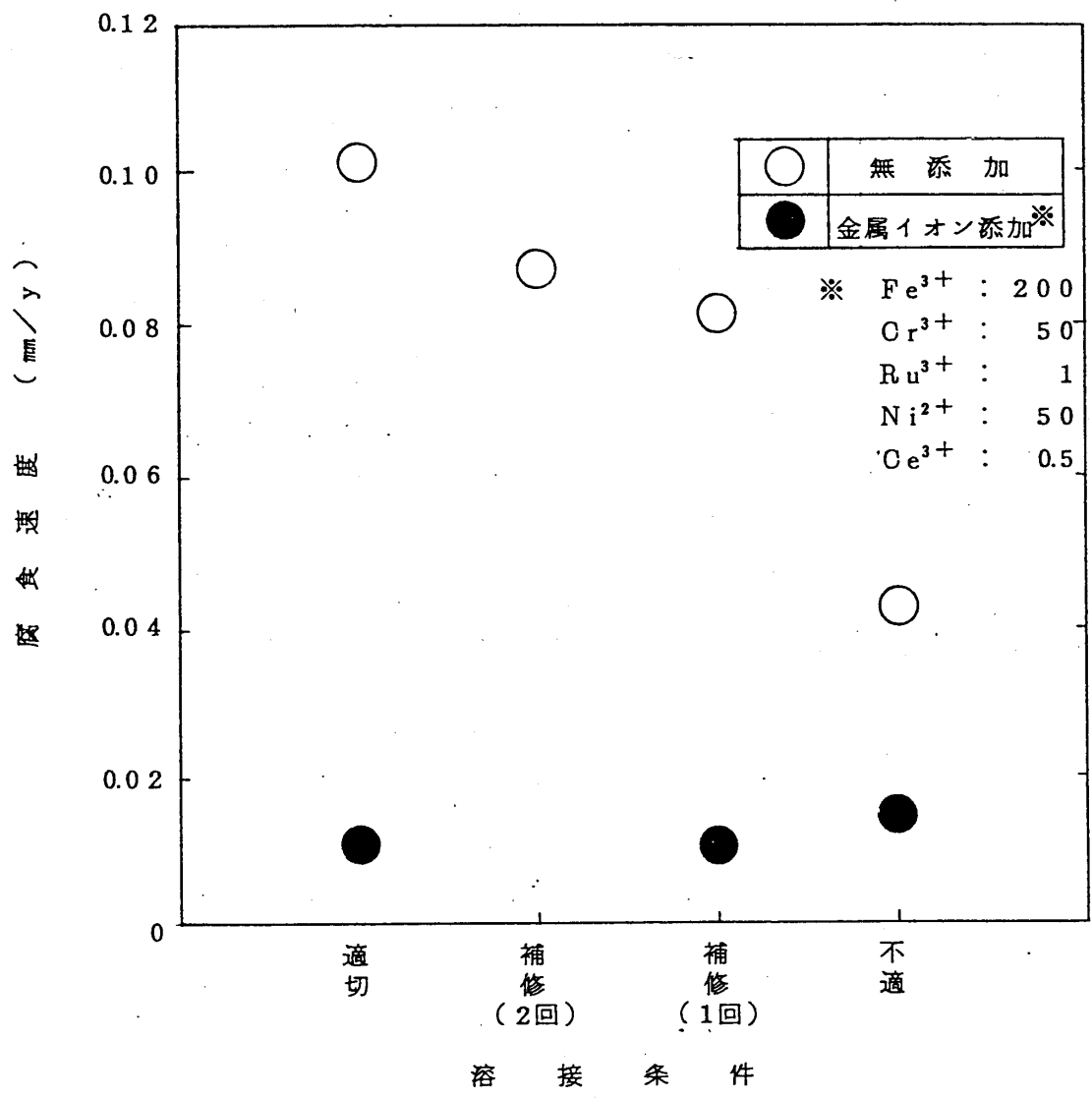


図-23 8N-HNO<sub>3</sub> 中におけるTi-5Ta溶接材の腐食速度  
 (BP, 120hr)

溶接条件不適の試験片の腐食速度は、通常のTi-5Ta材および溶接条件適切の試験片のその約 $\frac{1}{2}$ に低下した。腐食速度の低下は、溶接時、厚く緻密に生じた酸化皮膜は腐食反応の抵抗となるので、強固な皮膜の影響とも考えられる。

写真-29に、金属イオン添加 $\text{HNO}_3$ 中におけるTi-5Ta溶接材（溶接条件適切）の断面および表面の腐食損傷状況を示した。写真-29(a), (b), (c)は溶接金属、熱影響部、母材である。金属イオン添加 $\text{HNO}_3$ 中ではTi-5Ta材の腐食速度が小さく、断面および表面の腐食損傷は軽微である。

沸騰8N- $\text{HNO}_3$ 中におけるTi-5Ta熱処理材の腐食速度を図-24に示す。 $\text{HNO}_3$ は金属イオン無添加と、金属イオン添加の2種類である。金属イオン無添加 $\text{HNO}_3$ 中におけるTi-5Ta熱処理材の腐食速度は、熱処理温度 $450^\circ\text{C}$ のとき $0.109\text{mm}/\text{y}$ 、 $650^\circ\text{C}$ のとき $0.082\text{mm}/\text{y}$ であった。金属イオン添加 $\text{HNO}_3$ 中におけるそれは、 $650^\circ\text{C}$ のとき $0.014\text{mm}/\text{y}$ であった。Ti表面に積極的に酸化皮膜を形成することによって、沸騰 $\text{HNO}_3$ 中におけるTiの腐食速度を低下させるともいわれているが、金属イオン無添加 $\text{HNO}_3$ 中、熱処理温度 $650^\circ\text{C}$ の場合の腐食速度は、若干低い、特に大きな影響は認められなかった。沸騰 $\text{HNO}_3$ 中における $450^\circ\text{C}$ で熱処理したTi-5Ta材のアノード分極曲線を図-25に示したが、電気化学試験結果からも、非熱処理材と大きな差異は認められなかった。写真-30は、金属イオン無添加8N- $\text{HNO}_3$ 中におけるTi-5Ta U字曲げ材の一例を示したもので、断面および表面の腐食状況である。U字曲げは、母材、溶接材とも割れの発生は認められなかった。

状

况

食

腐

面

表

断

面

食

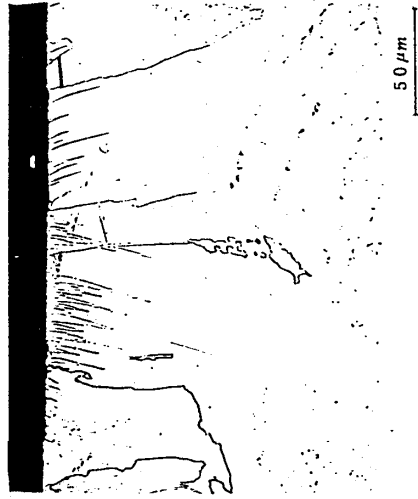
状

况

×400

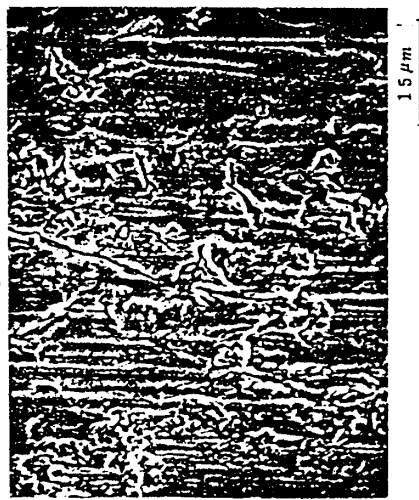
(a)

Ti-5Ta  
 < 溶接部 >  
 金属イオン添加  
 120hr  
 B.P  
 溶接条件適切



(b)

Ti-5Ta  
 < 熱影響部 >



(c)

Ti-5Ta  
 < 母材 >

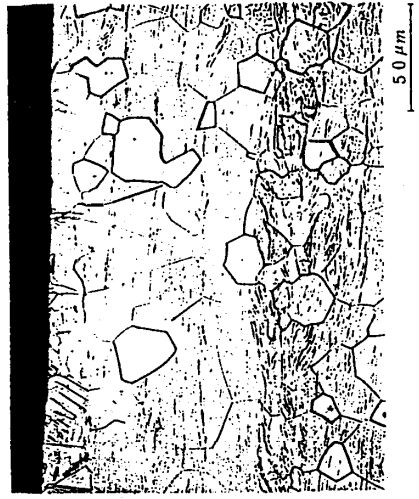


写真-29 溶接部の腐食試験結果

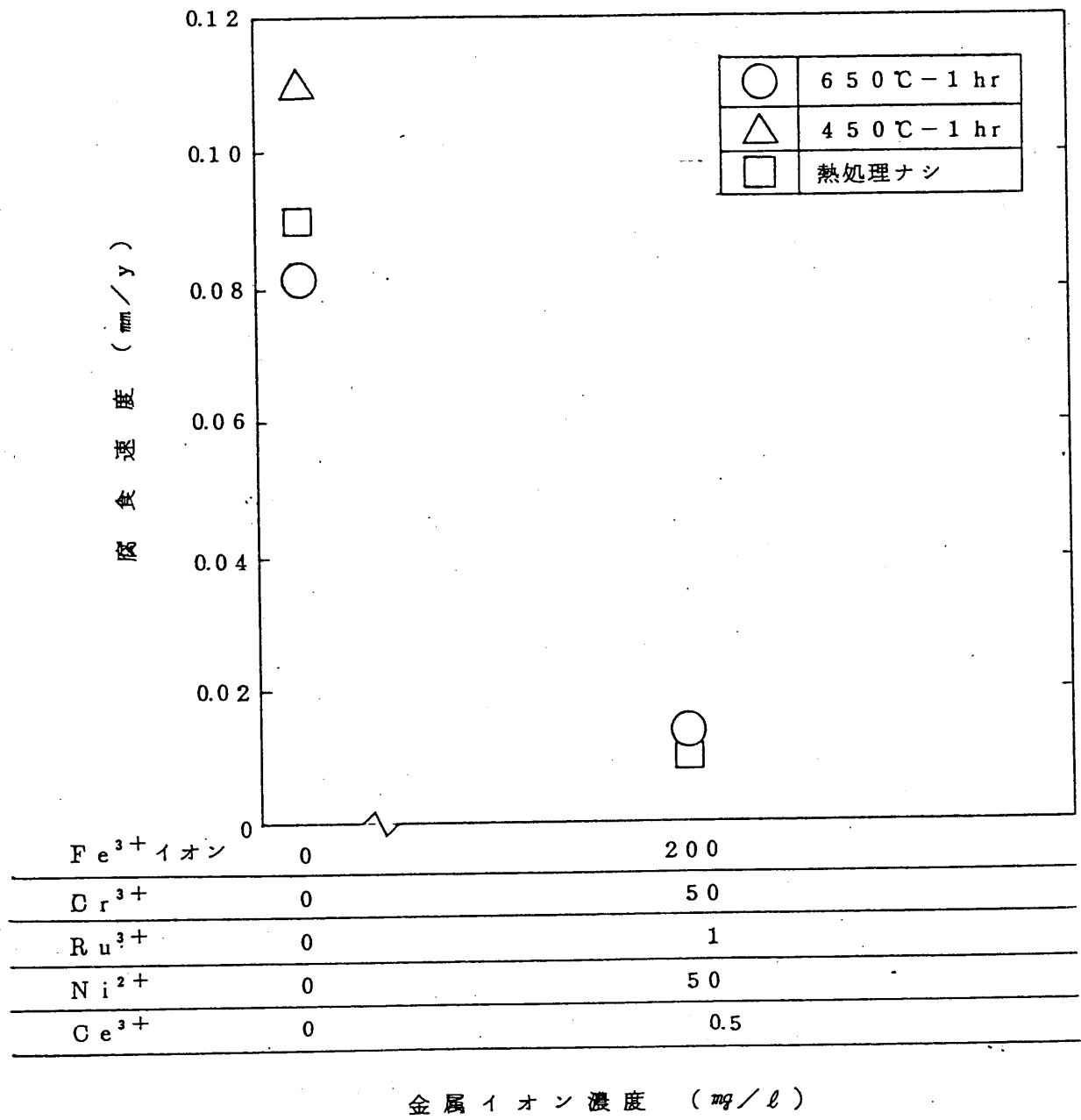


図-24 8N-HNO<sub>3</sub> 中におけるTi-5Ta熱処理材の腐食速度  
(BP, 120 hr)

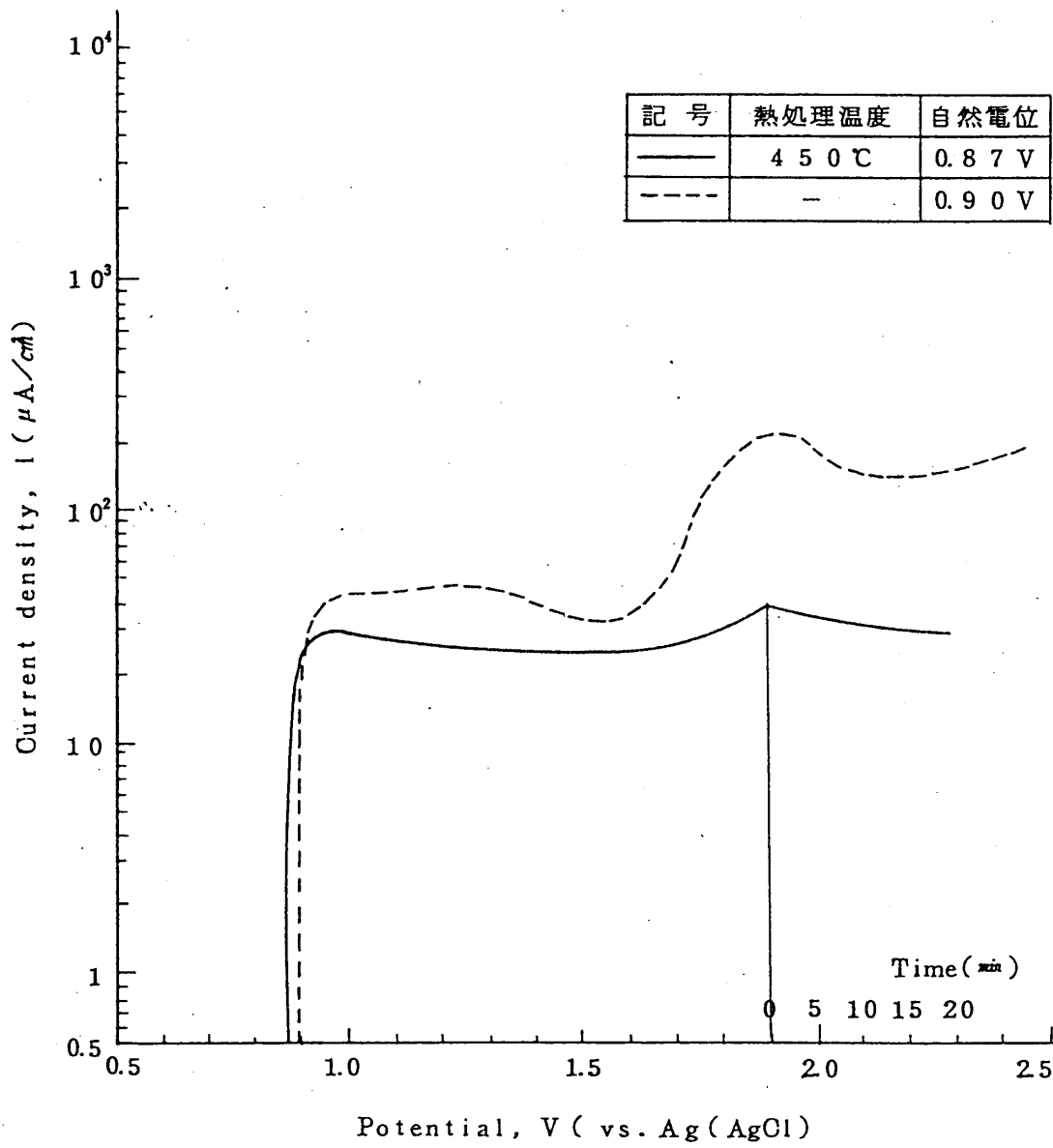
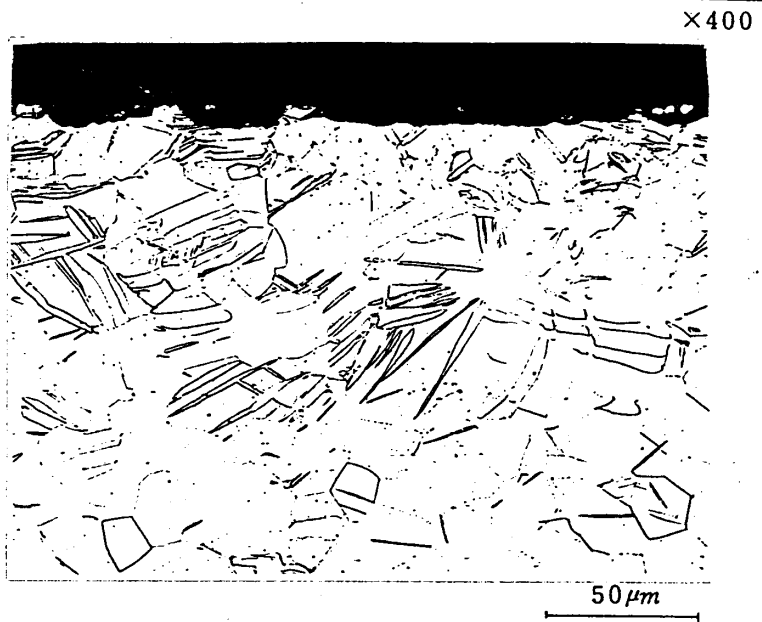


図-25 Ti-5Ta熱処理材の分極曲線  
(BP, 8N-HNO<sub>3</sub>)



Ti-5 Ta  
240 hr  
B.P  
U字曲げ

断  
面  
腐  
食  
状  
况



断  
面  
腐  
食  
状  
况



写真-30 溶接部のU字曲げ腐食試験結果

#### 3-2-4 試験結果のまとめ

TiとTi-5Taの溶接特性を板状の溶接試験片で比較した。その結果、Ti及びTi-5Taは、ほぼ同一の試験条件において同様の溶接性能を示した。またTi-5Taについて行った管と管板の溶接継手試験結果によりTi-5Ta製の溶接継手はTi製の継手で要求される性能を満足した。

以上の結果からTi-5TaはTiの仕様で溶接することによりTiと同程度の溶接継手性能を有することを確認した。

尚Ti-5Ta製溶接継手について行った腐食試験の結果、Ti-5Ta製溶接継手は硝酸溶液中でTi製溶接継手同様、良好な耐蝕性を示した。

## 4. その他

### 4-1 作業性の悪い環境での溶接性について

これまでに述べたようにTi-5Taの溶接は、Tiとほぼ同じであるので作業性の悪い環境でも同様の配慮が必要となる。以下に、TiおよびTi-5Taについての作業性の悪い環境での溶接について述べる。

- (1) 作業場の安全；作業場は常に整理し、作業の安全を確保しなければならない。作業性の悪い場合、安全な足場等により、よりらかな姿勢で施工できるようにする。出入口が狭い場合、非常のための手段を準備しておく必要がある。
- (2) 溶接設備の安全；漏電、ショートなどの危険がないようにしなければならない。
- (3) 火災の予防；火災の予防は万全の準備をほどこす。
- (4) 換気；とくに狭い場所で溶接を行なうときは、換気に注意し、窒息あるいは、アセトン等の溶剤による中毒を起さないよう措置を講ずる。
- (5) じん埃、湿気などは、溶接に悪い影響を与えるため注意が必要。
- (6) 風が強い（風速 2 m/sec 以上）場合は、溶接部のガスシールドが乱れないようにする。
- (7) 放射線防護服を着用した溶接作業で、作業性が特に悪いと考えられる溶接については、作業を模擬したモックアップにより練習を行っておく必要がある。
- (8) 構成上、シールドが不十分となると考えられる所については、ビニールシートなどでおい、局部シールドを行なう事を検討する必要がある。

また、現地溶接を行なう場合で、溶接部の裏面のシールドについては、図-26, 27 に示す方法が使用される。

① ゴム風船を使用する方法

現地溶接を行う管の開先の両側にゴム風船をセットし、専用に設けたノズルからアルゴンガスを供給し、ゴム風船を膨張させ、別途アルゴンホースによりガスシールドを行なう。

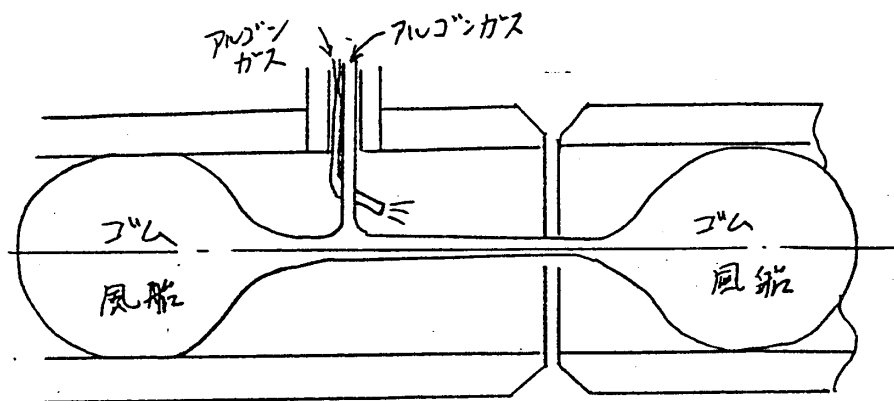


図-26 ゴム風船を使用する補助ガスシールドの例

② 水溶性薄膜を使用する方法

配管の開先部の近傍に水溶性薄膜を貼り、開先間隙よりアルゴンガスを供給し、バックシールドを行なう。

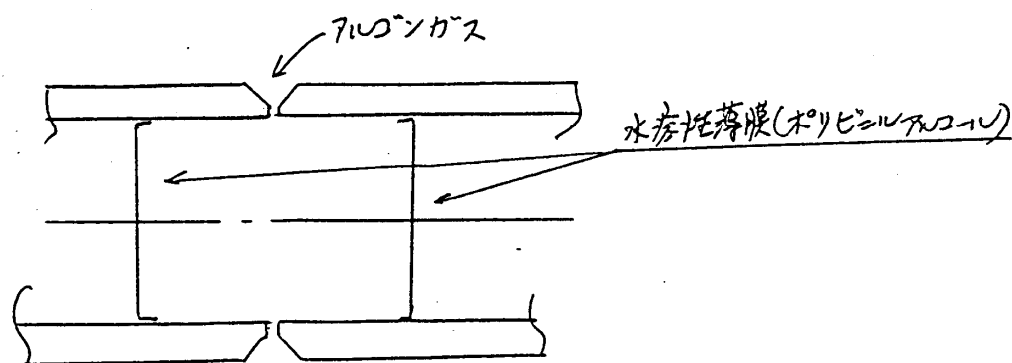


図-27 水溶性薄膜を用いた補助ガスシールド方法の例

#### 4-2 溶接に伴うTaの偏析について

Ti-5Taの場合平衡状態図で見るとTa 5% 付近では液相線と固相線は、近接しており、理論的には凝固偏析は起らないので溶接によって偏析は起らないと考えられる。

また実際の溶接では、平衡状態図を求める時より冷却速度が早く、平衡状態図の場合よりさらに偏析は起りにくいと考えられる。

尚、母材、熱影響部、溶着金属部について図-28に示すとおりEPMAで線分析を行い、Ti、Taの偏析のないことを確認した。

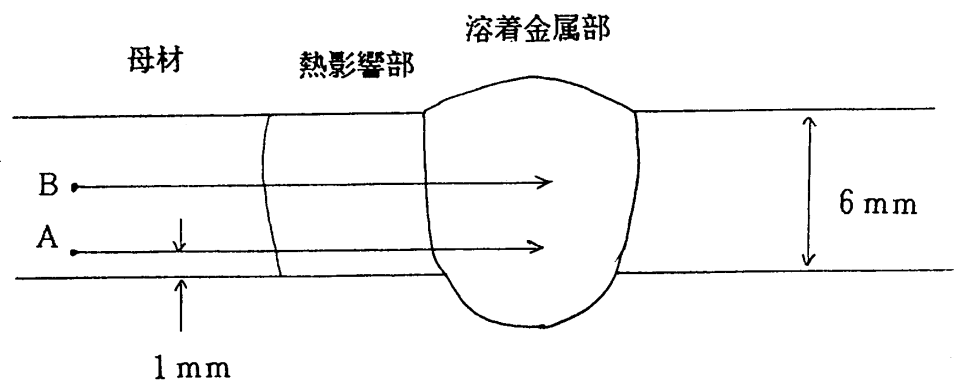


図-28 EPMAによる線分析方法の概要

#### 4-3 純チタンとチタン5%タンタル合金の溶接について

Tiの溶接特性とTi-5Taの溶接特性がほぼ同じであることから、TiとTi-5Taを溶接する場合も同種材料の溶接と同じ結果が予想される。ここではそれを確認する為、TiとTi-5Taの溶接継手を製作し、その継手性能を試験した。

##### (1) 試験方法

###### (a) 供試材料

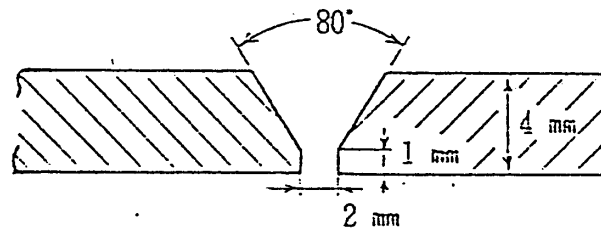
(i) 材質 : Ti 板厚 : 4 mm (JIS H4600 2種相当)

(ii) 材質 : Ti-5Ta 板厚 : 4 mm (JIS H4600 2種準拠)

材料の化学成分、機械的性質を表-27に示す。

###### (b) 溶接条件

###### (i) 開先形状



###### (ii) 溶接材料

Ti-5Ta : 2.4φ mm

Ti : 2 □ mm

###### (iii) 溶接方法

GTAW (マニュアル)

###### (iv) 予熱および後熱処理

実施せず。

###### (v) 溶接電圧

12~14V

###### (vi) 溶接電流

1 パス : 90A

2, 3 パス : 110A

(c) 供試材料と溶接材料の組合せ

供試材料 溶接材料	Ti + Ti-5Ta	Ti + Ti
Ti-5Ta 2.4φ <sub>原形</sub>	○ (ケース 1)	
Ti 2 <sup>□</sup> <sub>原形</sub>		○ (ケース 2)

(2) 試験結果

(a) ケース 1 (板材: Ti, Ti-5Ta, 溶接材料: Ti-5Taの場合)

試験結果を表-28 (1), (2) に示す。

(b) ケース 2 (板材: Ti, Ti, 溶接材料: Tiの場合)

試験結果を表-29 (1), (2) に示す。

(3) まとめ

Ti-5TaとTiとの溶接性の検討を行った。方法としてTi-5TaとTiの板材に溶接棒としてTi-5Taを用いた場合及びTiの溶接棒を用いてTi同志の溶接を行った場合の比較検討を行った。その際、溶接の条件等はTiについて定められた仕様に準拠した。

その結果、Ti-5TaとTiの溶接及びTi同志の溶接では表-30に示すように引張り、曲げ、硬度に関する試験結果について両者に差はなく、ミクロ組織、マクロ組織もほぼ同じであることからTi-5TaとTiを溶接した場合もTi同志の場合と同等の溶接継手性能を有することを示した。

尚、Ti-5TaとTiの溶接にはTiの溶接棒を用いても同様の結果が得られるものと考えられるが、ここでは通常の溶接棒の考えに従って高級側(耐食性に勝る)のTi-5Ta合金製溶接棒を用いた。

表-27 供試材料の化学成分および機械的性質

項目および規格		材 質	KS50	KS50Ta
			(ヒートNo D2020)	(ヒートNo AT6043)
化 学 成 分	H	$\leq 0.013$ ( $\leq 0.010$ ) (%)	0.0024	0.0010
	O	$\leq 0.20$	0.11	0.106
	N	$\leq 0.05$	0.01	0.0031
	Fe	$\leq 0.25$	0.06	0.031
	Ta	4.0 ~ 6.0	—	5.08
	Ti	痕部	痕部	痕部
引 張 試 験	UTS	$35 \sim 52$ ( $\geq 35$ ) (kg/mm <sup>2</sup> )	45	45
	YS	$\geq 22$ (25 ~ 45) (kg/mm <sup>2</sup> )	34	39
	E <sub>l</sub>	$\geq 23$ ( $\geq 25$ ) (%)	29	37
曲 げ 試 験	内側半径 曲げ角度	2T 180°	Good	Good
硬 さ	Hv	— ( $\geq 110$ )	150	150

注 ( ) 内は, KS50Ta の規格値



表-28 (1) 溶接試験結果 (ケース1)

TENSILE TEST

Specimen No.	Test Temp	Specimen		Ultimate Total load (kg)	Ultimate Unit Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Charactor of Failure & Location (*)
		Size (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )			
TP-1-1	RT	40.1 <sup>w</sup> x 3.85 <sup>t</sup>	154.4	7050	45.7	KS50Ta Side BM
TP-1-1	RT	40.1 <sup>w</sup> x 3.85 <sup>t</sup>	154.4	7200	46.6	KS50Ta Side BM

(\*) BM : Base Metal WD : Weld Deposit F.A.Z : Heat Affected Zone

GUIDE BEND TEST

Specimen No.	Type of Testing	Specimen Size (mm)	Bending Radius	Result
TP-1-F1	Face Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable
TP-1-F2	Face Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable
TP-1-F3	Face Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable
TP-1-R1	Root Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable
TP-1-R2	Root Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable
TP-1-R3	Root Bend	40 <sup>w</sup> x 4 <sup>t</sup>	R=4 <sup>t</sup>	Acceptable

OTHER (S)

1. Macro Strucuter Test } Refer to Attached Sheet  
 2. Micro Strucuter Test }  
 3. Hardness Test  
 HV: 10kg.f

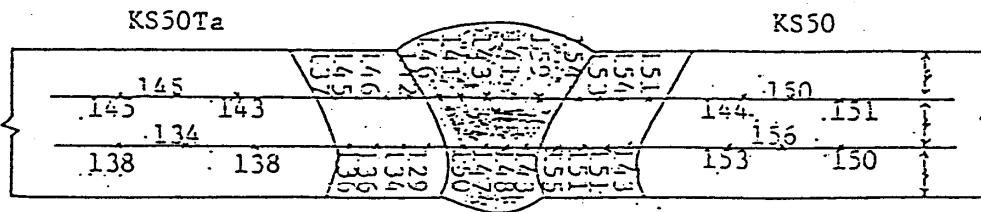
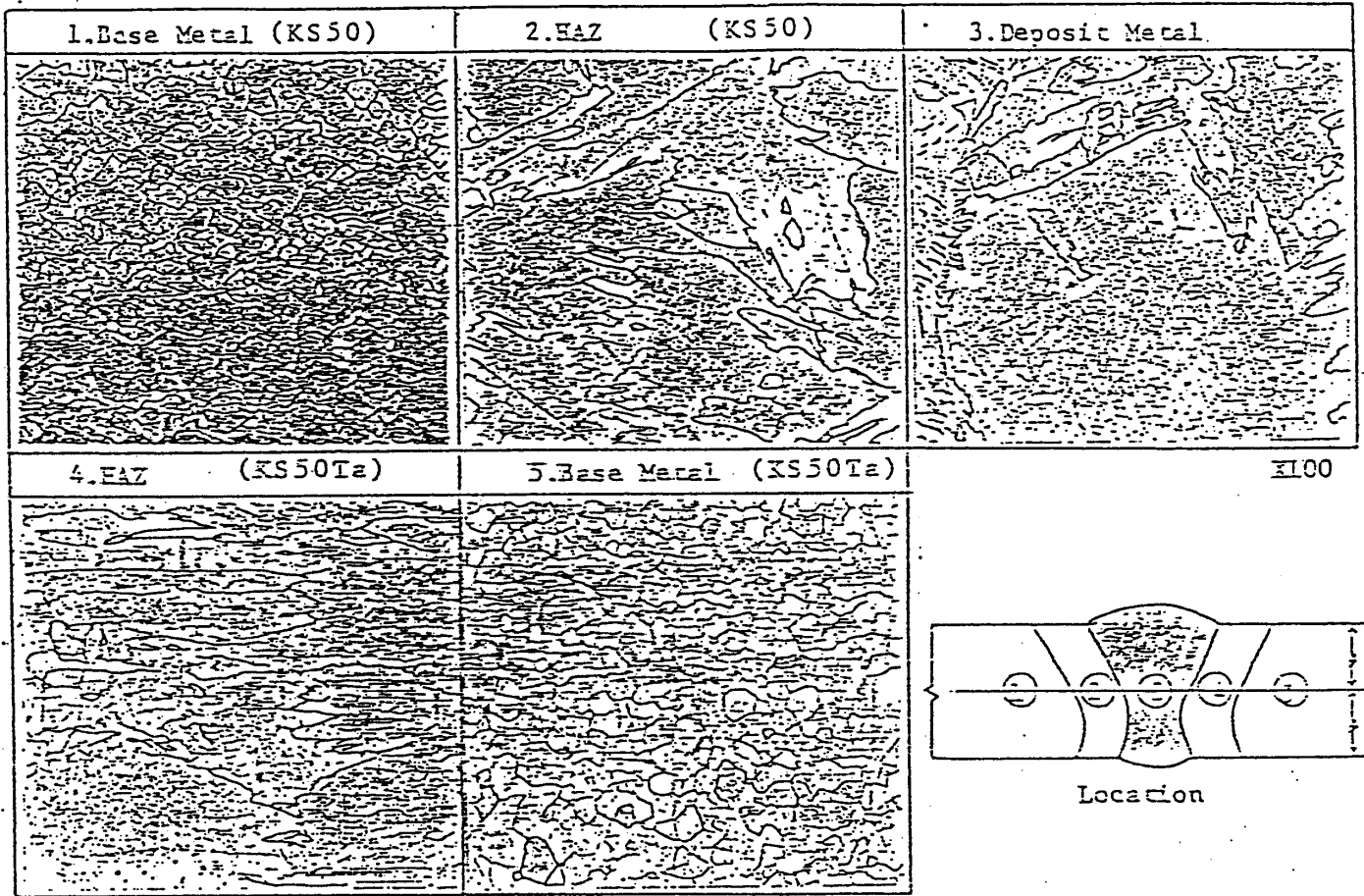
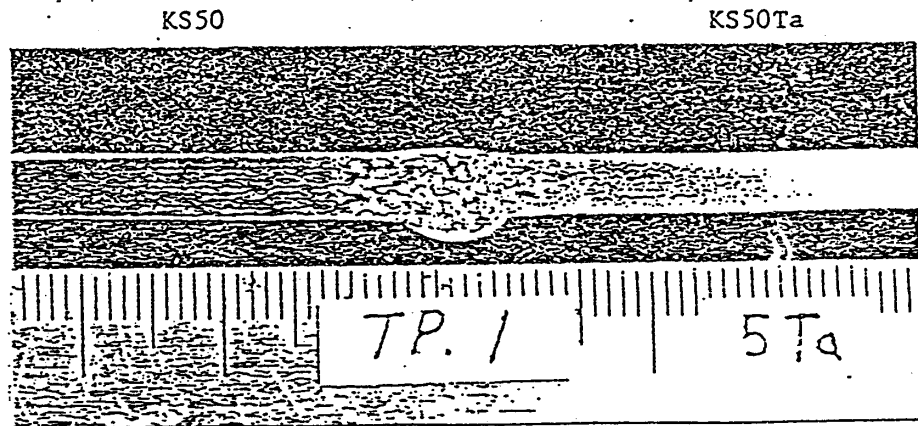


表-28 (2) 溶接試験結果 (ケース1)

Micro Structure Test



Macro Structure Test



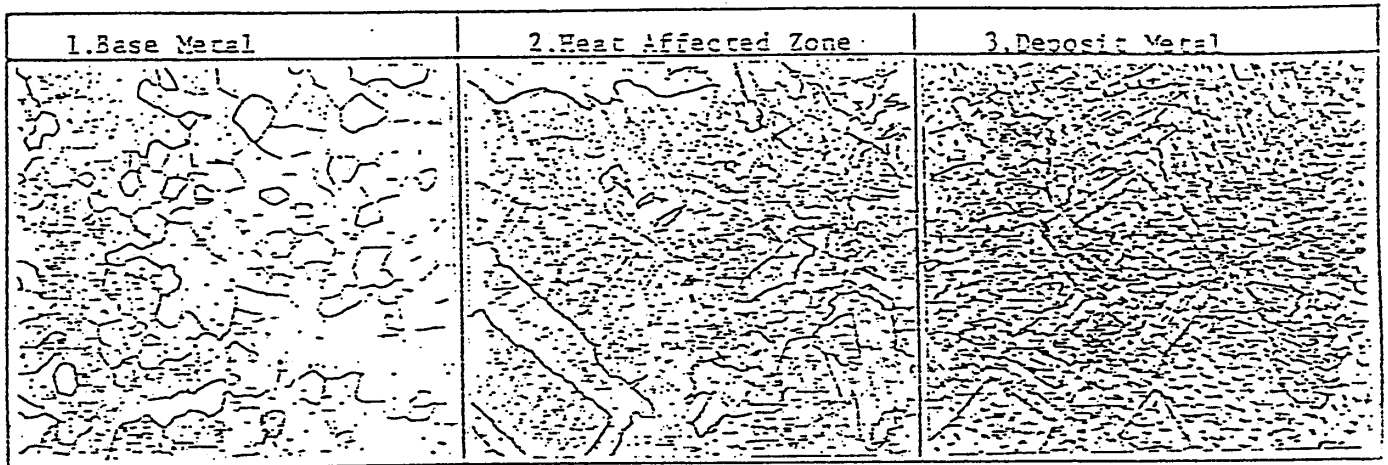
Macro Structure

x: 1.8

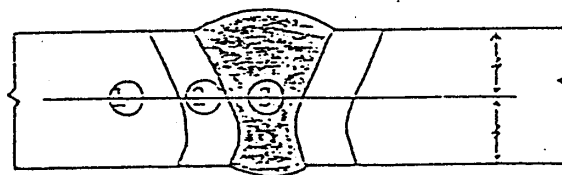


表-29 (2) 溶接試験結果 (ケース 2)

Micro Structure Test

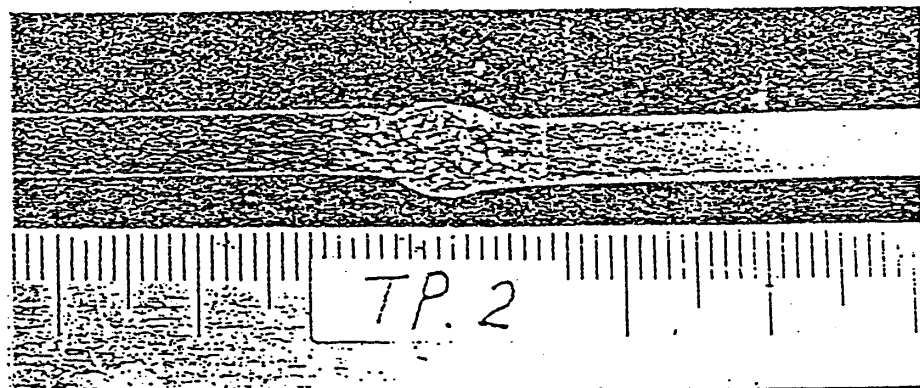


100



Location

Macro Structure Test



Macro Structure

x 1.8

表-30 Ti-5TaとTi, Ti同志の溶接試験結果の比較

	チタン5%タンタルと純チタンの溶接	純チタンの溶接
引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	45.7, 46.6	46.1, 45.8
曲 げ 性 能	曲げ半径 4T Acceptable	同 左
硬 度 (Hv)	チタン5%タンタル 母材 138~145 純チタン 母材 144~156 溶 着 金 属 141~159 熱 影 響 部 129~155	母 材 144~156 溶着金属 138~151 熱影響部 135~161

## 5. 結 論

チタン5%タンタル合金はその物理的性質及び機械的性質等が、工業用純チタン（JIS 2種）とほぼ同じであることから、その溶接にあたっては日本工業規格、日本溶接協会規格等で定められた純チタンの仕様に準拠する形で施工され実績を積んできた。ここではそれらの仕様の概要を示すとともに、実際の溶接試験により純チタンの溶接継手性能との比較を行った。

その結果、チタン5%タンタル合金の溶接継手性能は、硝酸溶液中での腐食試験も含めて純チタンの溶接継手性能とほぼ同程度であることから、純チタンに準拠した溶接仕様を採用することの妥当性を確認した。

尚純チタンとチタン5%タンタル合金を溶接する場合も同様の仕様で行なうことの妥当性を確認した。