# チタニウムの熔接

Welding of Titanium

富安富士男\*大竹猛\*
Fujio Tomiyasu Takeshi Ōtake

## 内 容 梗 概

化学工業用機器の新しい耐食材料として工業用純チタニウムが注目され、その用途は急速に拡大されつつある。そこでこれらチタニウム製機器の製作技術を確立するために、素材の性質、ヘリアーク熔接、抵抗熔接ならびにろう接などに関する一連の研究を行った。一方製品製作においてはこれらの研究結果に基いてチタニウム製機器に対する適正な施工基準を確立し、二、三の製品をすでに納入して好成績が得られている。本報告はこれらの研究結果ならびに製品への応用例についてとりまとめたものである。

# 1. 緒 言

工業用純チタニウムは比強度および耐食性の面でほかの材料に比べ卓越した性質を有しており<sup>(1)</sup>、わが国においては特に化学工業用機器の耐食材料として注目され、この新しい金属の用途は急速に拡大されつつある。

すなわち耐食性についてはほとんどあらゆる腐食ふんい気に対してすぐれた性質を有し、点食、粒界腐食、応力腐食などの問題も少ないので、ステンレスをはじめほかの耐食材料に比較し高価であるにもかかわらず十分の経済性を有している。

しかしチタニウムは  $500^{\circ}$ C 以上の高温における  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$  などのガスとの親和力が非常に大きいため、熔接にあたってはシールドを完全にして大気ガスによる汚染を防止する必要がある。このような見地から不活性ガス熔接 $^{(3)^{\circ}(5)}$  および表面の温度上昇の少ないスポット、シームなどの抵抗熔接 $^{(6)(7)}$ のみが適用される。また Ti と Fe との合金は脆弱な性質を示すためライニングする場合、ろう接または機械的接合などの特殊な方法によらねばならない。したがってチタニウム製機器の製作においては、これらの問題点を十分検討し適正な施行技術を確立する必要がある。

本報告は工業用純チタニウムの素材の性質、ヘリアーク熔接、抵 抗熔接およびろう接などに関する研究結果ならびに製品への応用例 について紹介する。

## 2. 素材の性質

#### 2.1 試 料

実験には市販の工業用純チタニウム板ST-60, 板厚0.5, 2.0, 4.0mm および KS-50, 板厚1.2mmを使用し, 熔接用心線は径 1.6mm $\phi$ のチタニウム心線を、シールドには純度 99.99%の市販純アルゴンを使用した。第1表は供試材料の化学成分および機械的性質を、第1図は顕微鏡組織を示す。工業用純チタニウムは 885°C 以下の温度では稠密六方格子の  $\alpha$  固溶体を呈し、強度、延性ともにすぐれた値を示している。なお板および心線は実験前に NaOH 水溶液で脱脂後、5%HF+5%HNO3 水溶液でスケールを除去して表面を清浄に保った。

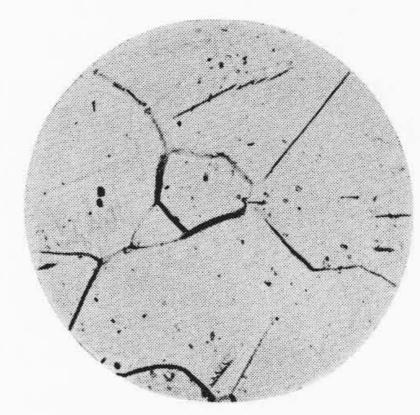
## 2.2 高温における性質および加熱の影響

素材の常温~ $500^{\circ}$ C の温度における抗張力,伸びの変化および常温~ $250^{\circ}$ C における衝撃値の変化を**第**2 図に示す。これらの値はおのおのの温度に 30 min 保持後試験した結果である。抗張力は温度が高くなるに従い低下しているが,伸びは常温の 30%から  $300^{\circ}$ Cでは 60%に達し  $500^{\circ}$ Cでは 45%に低下する。一方衝撃試験の結果ではチタニウムは遷移温度が高く常温では衝撃値が低いが,  $200^{\circ}$ C 以上の温度ではすぐれたじん性を示している。

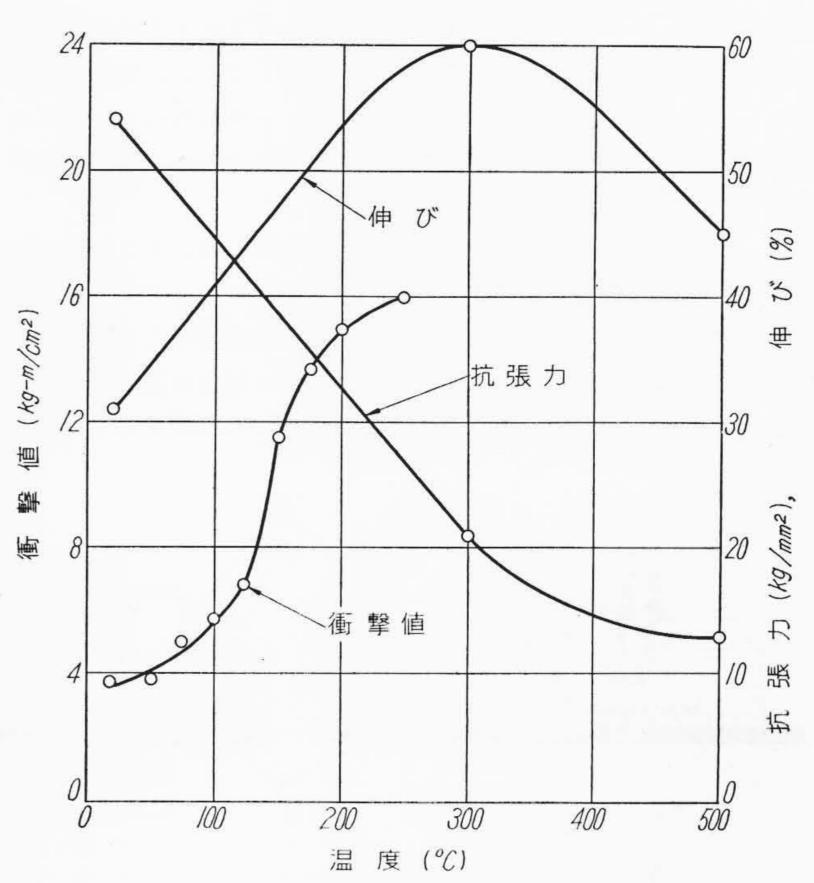
第1表 工業用純チタニウムの化学成分(%)と機械的性質

銘 杯	j Ti	C	N	0	Н	Fe	Si	その他	
ST-60	>99.4	<0.05 (0.02)	<0.05 (0.02)	<0.20 (0.12)	<0.015 (0.007)	<0.30		<0.15	
KS-50	>99.5	0.02~ 0.08	0.01~ 0.03	$0.01 \sim \ 0.10$	<100 (ppm)	0.02~ 0.15	0.02~ 0.10		
銘 杯	抗張力(	(kg/mm²	(2) 降伏点	(kg/mm	i <sup>2</sup> ) 伸び(	%)   絞	b(%)	硬度(H <sub>B</sub> )	
ST-60	>42	2 (50)	>2	7 (37)	>25(	30)		160	
KS-50	35	35~49		25~45		45 4	0~70	110~145	

( )は標準値



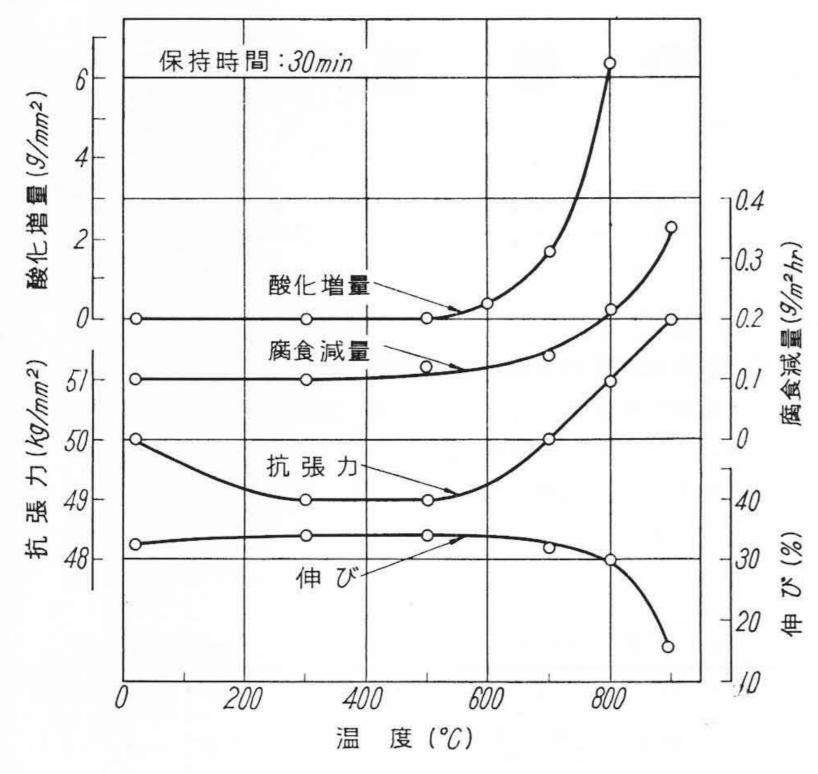
第1図 素材の顕微鏡組織 (×400)



衝撃試験片:シャルピー2mm U /ッチ

第2図 機械的性質と温度の関係

<sup>\*</sup> 日立製作所笠戸工場



第3図 加熱による諸性質の変化

つぎに常温~900°Cの温度に加熱し30 min 保持後,冷却した際の諸性質の変化を第3図に示す。この図からみられるように500°C以下の加熱は素材の性質にはほとんど影響を及ぼさないが、600°C以上に加熱すると表面が激しく汚染され耐食性および伸びが低下する。特に変態点885°C以上の加熱は諸性質を著しく害する。

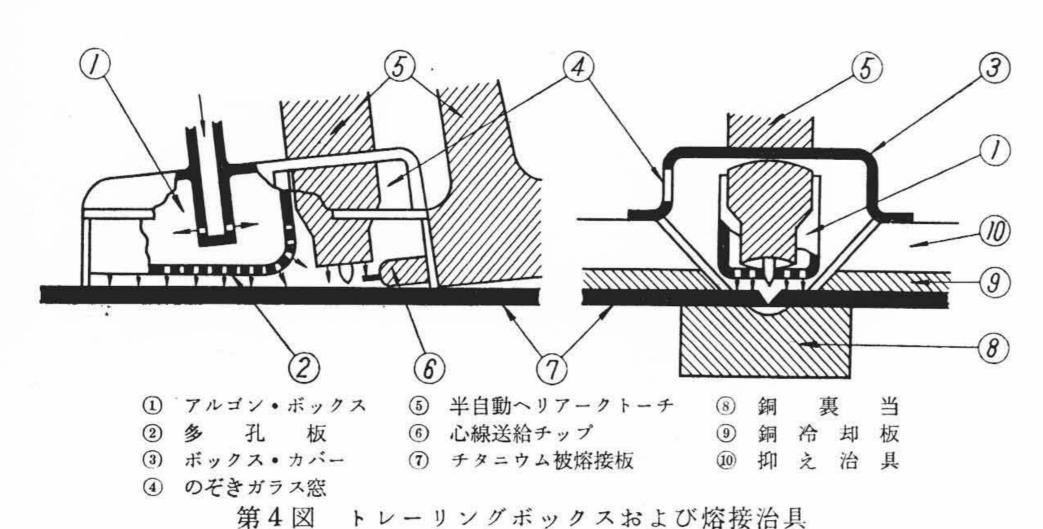
以上の結果からチタニウムを 500°C 以上の高温で空気中にさらすことは避けるべきであり、また軽度の曲げ加工は常温で行っても差つかえないが、延性、じん性が改善される 300°C 付近が加工温度として最適であると考えられる。

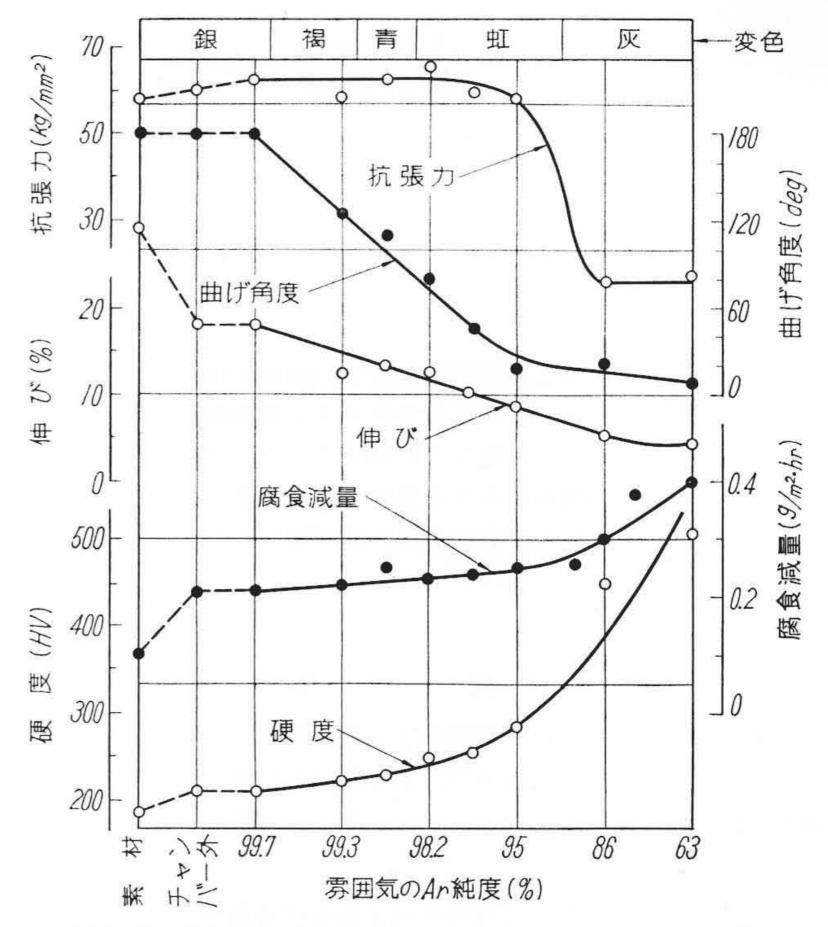
## 3. ヘリアーク熔接

## 3.1 シールドの方法

チタニウムのヘリアーク熔接においては、トーチからのみによるアルゴンシールドでは不十分で、第3図から明らかなように熔着部および熱影響部が $500^{\circ}$ C以下の温度に冷却されるまで完全かつ連続に大気からしゃへいして $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ などのガスによる汚染を防止する必要がある。したがってアルゴンを充満してふんい気を調整したチャンバー内で熔接を行う方法、およびトーチ以外にシールドの範囲を拡大するための補助的な装置を使用する方法など熔接部のシールドに特殊な方法を採用せねばならない。

シールドチャンバーは密閉して内部を真空にしたのちアルゴンを 充満するのが理想的であるが、実験ではビニール張りの簡便なチャ ンバーを製作し、内部の空気をアルゴンと自然置換する方法を採っ た。この場合チャンバー内ふんい気のアルゴン純度は拡散が完全に 行われるものと仮定すると次のような関係式から推定することがで





第5図 熔接部の諸性質におよぼすシールドガスの影響

$$x = b \left( 1 - e^{-\frac{Q}{V}t} \right)$$

ここで x: チャンバー内のアルゴン純度 (%)

p: 送給アルゴンの純度 (%)

V: チャンバーの容積 (l)

Q: 送給アルゴン流量 (l/min)

t: 送給を開始してからの時間 (min)

このような方法でふんい気のアルゴン純度を変えた場合の熔接結果に及ぼす影響を検討した。

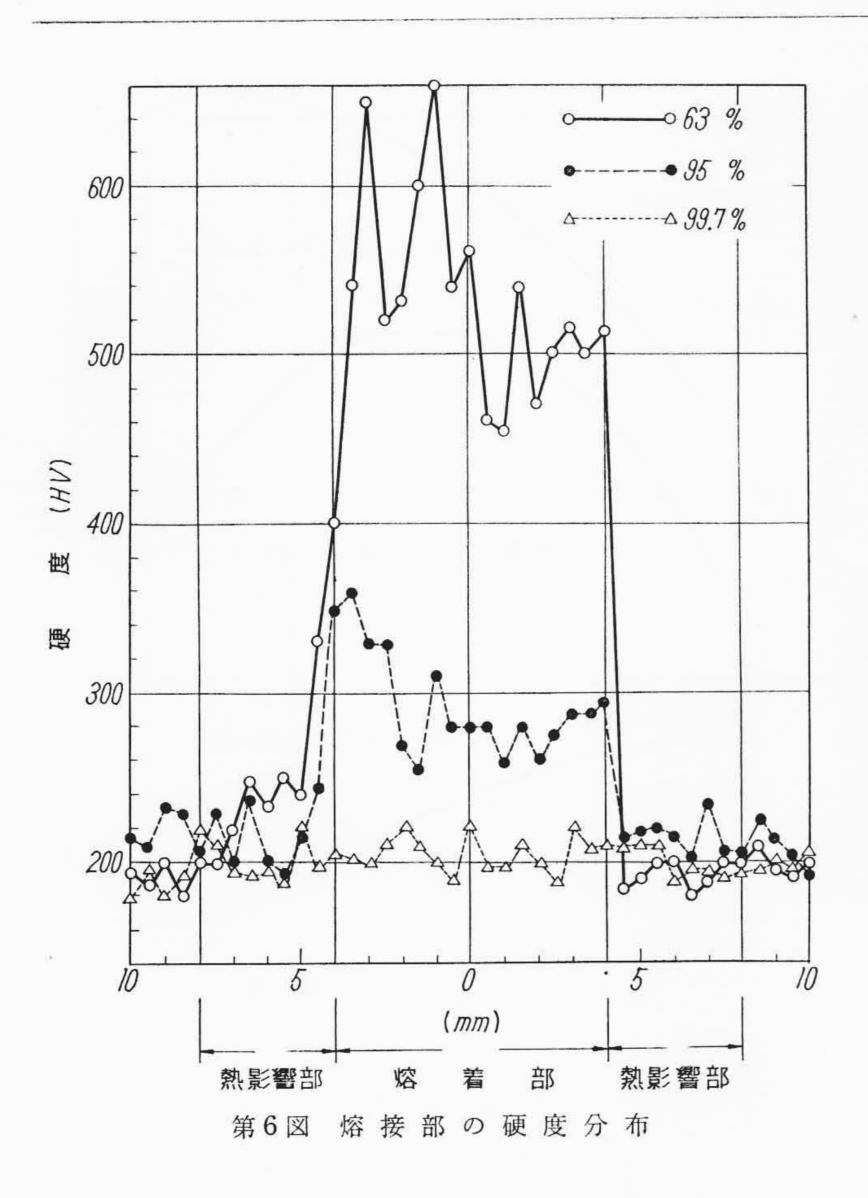
次にチャンバー内での熔接作業は必然的に動作に制約を受け、また製品の大きさに応じたチャンバーを個々に必要とする点およびアルゴン消費量が大きい点など経済的でない。したがってチャンバーの利用は小形で複雑な部品の熔接に限られ、ほかの大部分の熔接作業は適切な方法でチャンバー外で行うのが有利である。そこで第4図に示すようなトレーリングボックスを考案し、これをトーチに取付けて使用した。すなわちトーチの後部に設けたボックスにアルゴンを送給し、多孔板から均一に噴射して熔着部および熱影響部を広範囲にわたってシールドする。また外側にカバーをして二重構造とし外部の風やトーチの振れによる空気の巻き込みを防ぎ安定で良好なふんい気が得られるようにくふうした。

なお高温での大気による汚染と結晶粒の粗大化を最小限にするた

め図に示すような銅製の裏当金および、押え治具を使用して熔接部の冷却を速くした。また熔接部裏面のシールドも当然考慮する必要があるが、このように裏当金を密着した場合は裏面のアルゴンシールドを省略しても良好な結果が得られる。

#### 3.2 熔接部の性質

種々のシールド条件における熔接部の諸性質の変化を第5図に示す。シールドの条件はチャンバー内では $63\sim99.7\%$ のアルゴン純度にふんい気を調整した場合について、またチャンバー外ではあらかじめ選定した適正アルゴン流量(トーチ:  $10 l/\min$ , トレーリングボックス:  $10 l/\min$ ) の場合について行った。熔接は

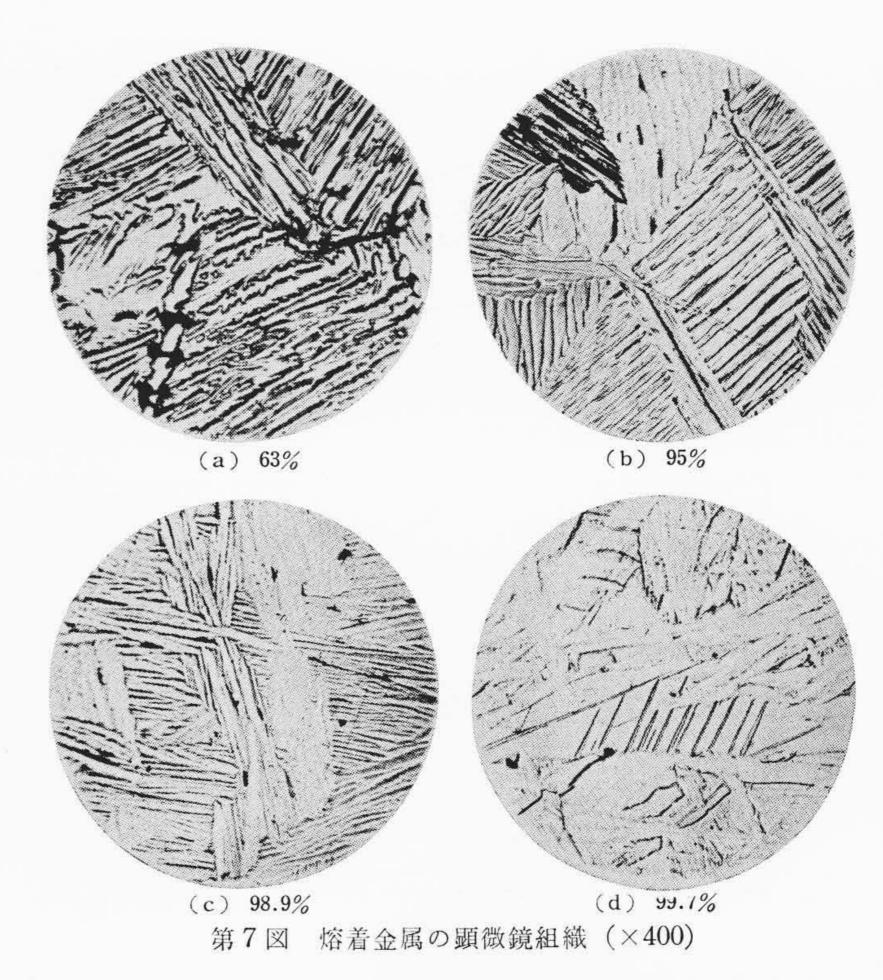


90度のV型開先を設けた板厚 4 mm のチタニウム板を半自動へリアーク熔接機で突合わせ熔接を行い(熔接条件は電流: D. C., S. P., 150 A, 速度: 100 mm/min, 心線送給:  $1 \text{ 層目 } \text{ at } 1.6 \text{ mm} \phi$ , 600 mm/min), それより引張り,曲げ,腐食,硬度組織の試験片を採取した。

第5図に示されるようにアルゴン純度が63~99.7%と高くなるにしたがって抗張力、曲げ角度、伸び、耐食性、硬度はそれぞれ改善され99.7%では抗張力62 kg/mm²、伸び18%、熔着部の平均硬度210 Hvを示している。また熔接部表面の変色は灰色-虹色-青-褐色-銀色と変化し、この変色の状況からもシールドの良否がほぼ判定できる。一方チャンバー外で第4図のトレーリングボックスを使用した場合はチャンバー内で99.7%の純度に匹敵する良好なシールドが得られた。

第6図に熔接部の硬度分布を示す。シールドの純度が63%の場合は熔着部の硬度は最高 660 Hv と著しく硬化しているが,99.7%では190~220 Hv となり素材と比較して硬化していない。また熱影響部の硬度の上昇は少なくシールドによる影響は熔着部ほど顕著でない。これを第7図に示す熔着部の顕微鏡組織において比較するとふんい気純度の低い63%の場合は最もエッチされやすく針状のウィッドマンステッテン組織を呈す。これは $\alpha$  チタニウム固溶体中に多量の窒素の固溶および窒化物,酸化物などが生じているためと考えられる $^{(2)}$ 。窒素その他の不純物の含有量の少ないチタニウムは針状よりも板状の組織を呈すといわれているが,純度 99.7%の場合にはその傾向が認められ針状組織が少ない。また熔着部は素材に比べ結晶粒が粗大化している。

以上の実験結果から適正なシールドの条件を選定すると、素材に対する ASTM 規格<sup>(8)</sup>(抗張力: 42 kg/mm², 伸び: 18%)を考慮に入れて、ふんい気のアルゴン純度は 99.7%以上であればよいと考えられる。またチャンバー外でトレーリングボックスを使用した場合もこれに匹敵する良好な結果が得られることが明らかとなった。



したがって実際製品の作業ではその状況に応じてチャンバーおよびトレーリングボックスを使用する二つの方法のいずれかを選択する。すなわち熔接線の形状が比較的単純な場合は被熔接物や拘束冷却治具の形状に合致するように底面を設計したトレーリングボックスを利用してその長所を十分に生かし、小形で複雑な部品の熔接ではトレーリングボックスの使用が困難となるので、チャンバー内で行う方法を推奨する。

熔接部裏面のシールドについては銅当金を密着するか、または裏面からもアルゴンを送給すべきである。また必要に応じて水冷治具を使用して熔接部の冷却をできる限り速くすることに努める必要がある。

#### 4. 抵抗熔接およびろう接

## 4.1 点 熔 接

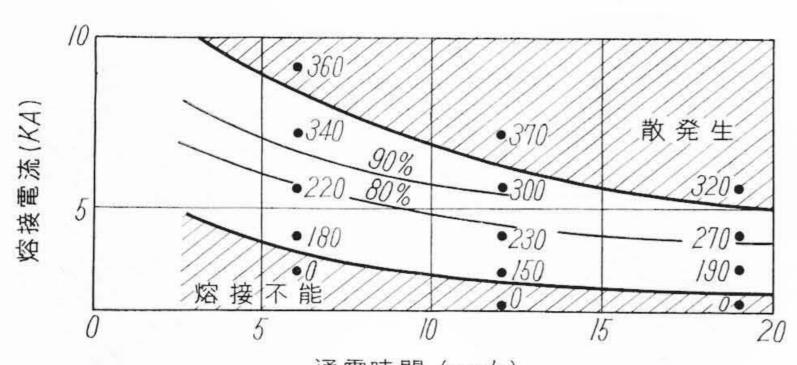
点熔接の実験は単相 250 kVA 点熔接機 (電極: 球面曲率半径 100 mm)を使用し、板厚 0.5, 1.2, 2.0 mm に対する熔接電流、通電時間, 加圧力の三要因の影響を検討し、適正熔接条件を選定することとした。まず第8 図に各板厚における熔接電流、通電時間と重ね継手のせん断強度との関係を示す。図中に等せん断強度線を記入し最大せん断強度に対する比率で表わした。ここで90%の線と散発生の線にまれた部分が適正条件であると判定される。次に加圧力とせん断強度との関係を第9 図に示す。この場合熔接電流、通電時間は先に選定した条件と同一である。

以上の実験結果から選定した各板厚における適正熔接条件および そのときの重ね継手の標準強度をまとめると 第2表のとおりにな る。これらはチタニウムの点熔接性がすぐれていることを示し、か なり広い範囲の条件に対して良好な結果が得られている。また熔接 部および熱影響部の硬度の上昇および表面の変色は認められず、抵 抗熔接では大気と接触する表面の温度上昇が少ないため熔接部のシ ールドはまったく不必要であると考えられる。このようにチタニウ ムの抵抗熔接はほかの一般材料の場合とまったく同じ要領で施工す ることが可能で、シールドの必要もなく非常に有利な点が多い。

#### 4.2 抵抗ろう接

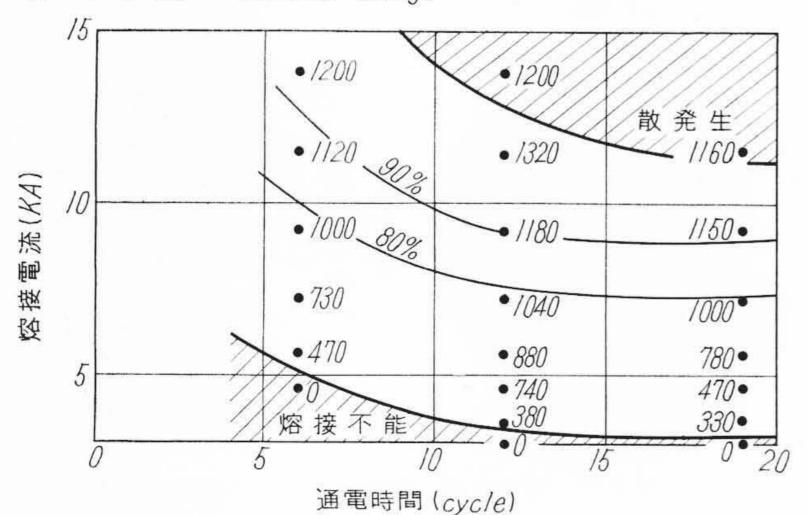
チタニウムを化学工業用材料として使用する場合, 構造用として

H

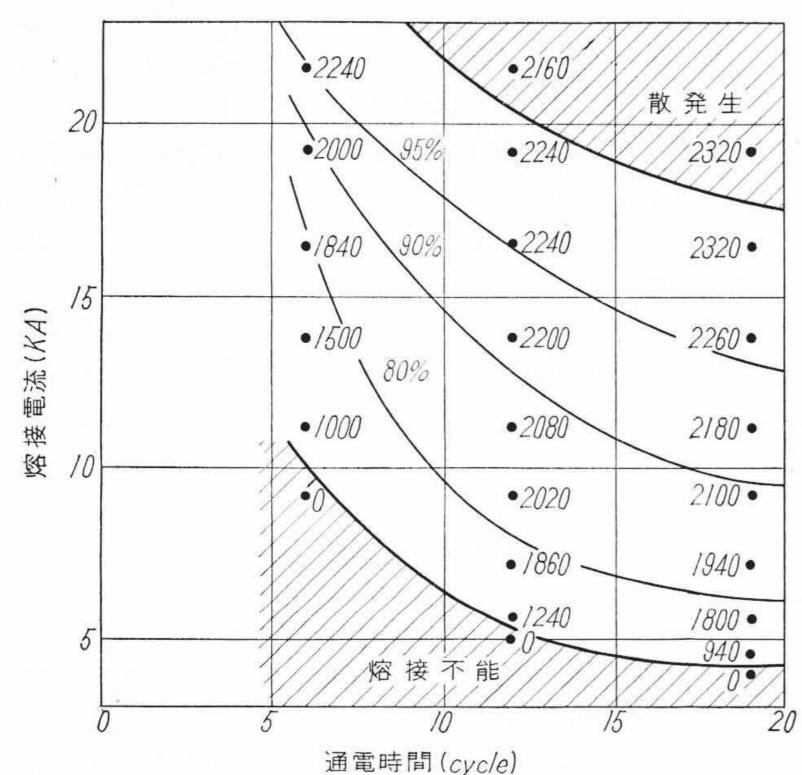


通電時間 (cycle)

(a) 板厚:0.5 mm (加圧力:320kg)



(b) 板厚:1.2 mm (加圧力:550kg)

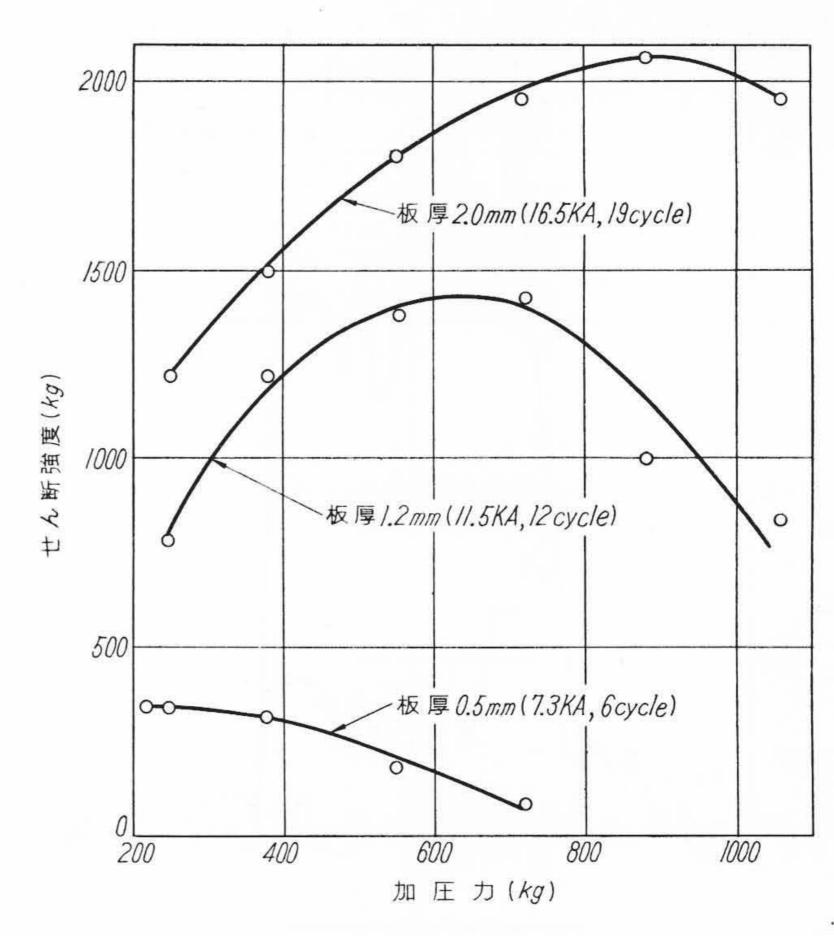


(c) 板厚:2.0<sup>mm</sup>(加圧力:880kg)

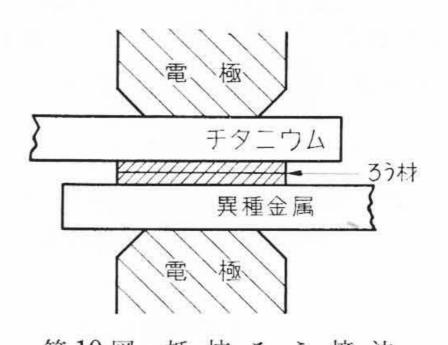
(図中の数字は継手のせん断強度 kg を示す) 第8図 熔接電流および通電時間の影響

単独に用いるよりその耐食性のみを活用して薄板を軟鋼あるいはステンレス鋼などにライニングするほうが有利となる場合が多い。しかしTiとFeの合金は非常に脆弱な性質を有するため直接熔接することは不可能で、機械的に接合するかあるいはろう接により間接的に接合する方法しか採用できない。ここでは前節に述べたようにシールドの必要のない抵抗加熱の方法を採用し、チタニウムと異種金属とのろう接について検討した。

ろう材としてはチタニウムに対して最も良好といわれている純銀および軟鋼, ステンレス鋼に対し銀ろうBAg-7(Ag:56, Cu:22, Zn:17, Sn:5) を選び, これを第 10 図に示す要領でチタニウムと異種 金属の間に 0.05mm の箔に加工してそう入した。これら2種のろう材をおのおの単独に使用した場合および Ti 側にAg を Fe 側にBAg-7



第9図 加 圧 力 の 影 響



第10図 抵抗ろう接法

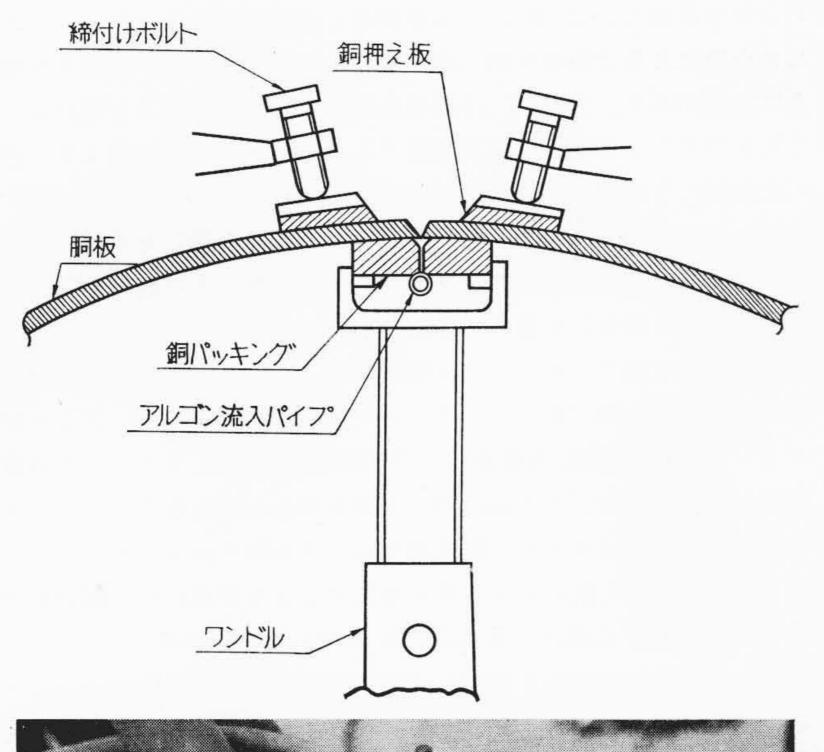
第2表 点熔接の適正条件と標準強度

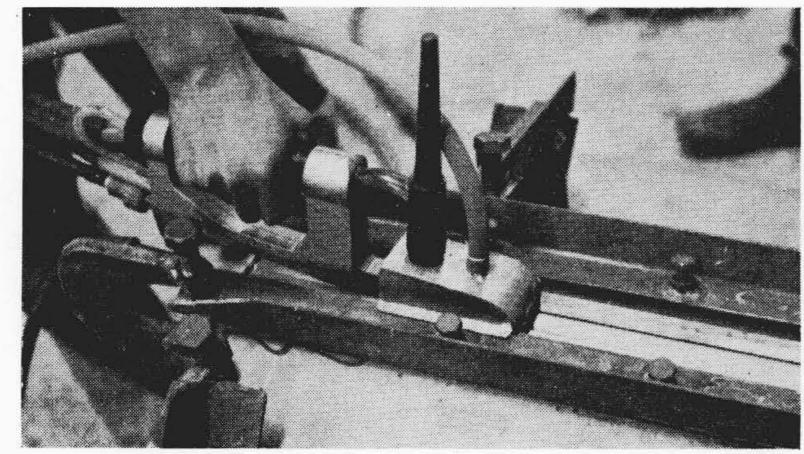
		DATE OF THE SAME OF	ALTER COMPANY A ST. TO STORY	A PERMITTE		
板 厚 (mm)	熔接電流 (kA)	通電時間 (cycle)	加 圧 力 (kg)	せん断強度 (kg)	引張強度 (kg)	
0.5	7~ 8	5∼ 8	200~ 400	300	100	
1.2	10~12	9~14	500~ 800	1,100	300	
2.0	14~18	14~19	700~1,100	2,200	600	

第3表 抵抗ろう接条件とろう接部の強度

チタニウム		異 種 金 属		A > 11	電流	時間	加圧力	せん断強度
材 質	板 厚	材 質	板厚	ろう材	(kA)	(cycle)	(kg)	
	(mm)		(mm)	Ag	5.4	37	320	800
KS-50	1.2	SUS 27	1.0	BAg-7	5.4	37	320	0
				Ag+BAg-7	7.0	37	320	510
				Ag	7.0	46	320	820
K S-50	1.2 SS41	1.5	BAg-7	7.0	46	320	0	
				Ag+BAg-7	7.0	46	320	520

を二枚重ねてそう入した場合の実験結果を第3表に示す。すなわち BAg-7 を単独で使用した場合 Ti 側が接合不能であったが、Ag 単 独および Ag+BAg-7 の場合はすぐれた強度の接合が得られている。一般に純銀は軟鋼あるいはステンレス鋼用のろう材としては不 適当とされ純銀および銀ろうを 2 枚重ねにする方法が推奨されているが、本実験の結果から純銀単独でも接合可能であることが判明した。しかしこの方法をライニング作業に適用するには製品の板厚や 形状により制限されるので、実用上にはなお検討すべき問題が残されている。





第11図 胴体突合せ熔接

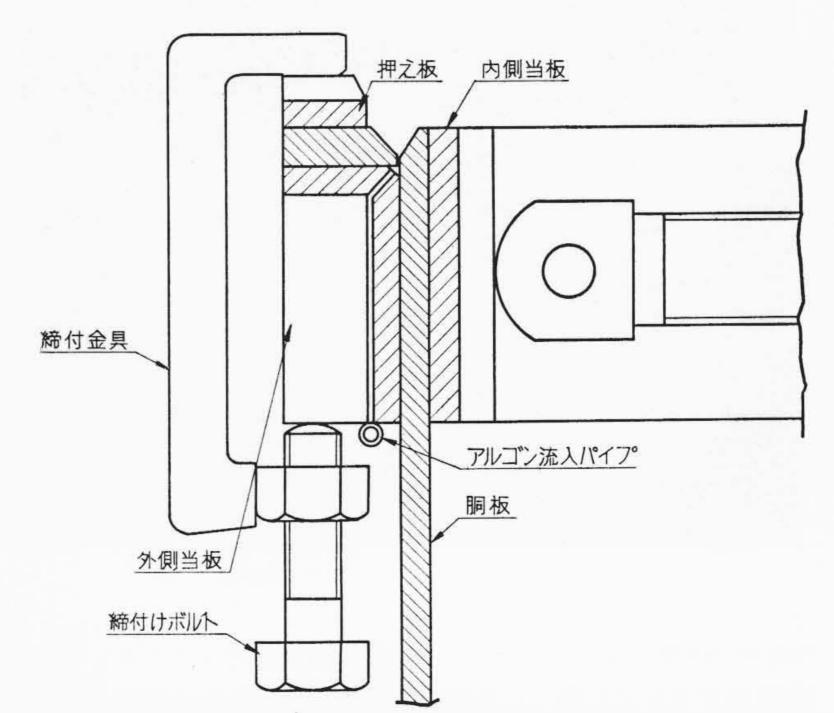
## 5. 製品への応用

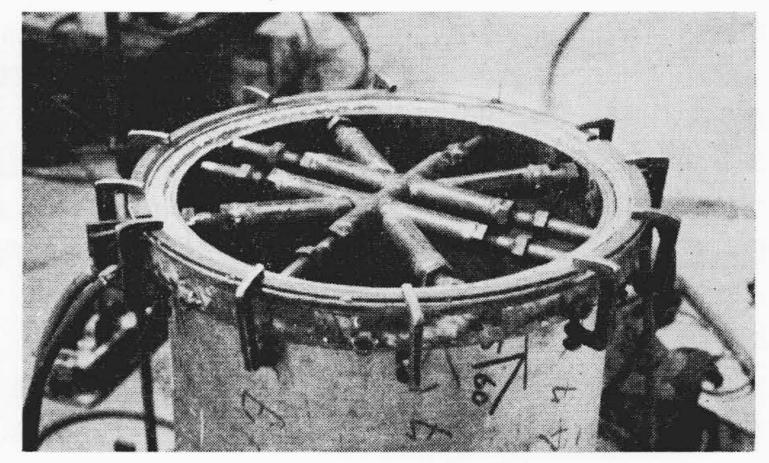
#### 5.1 ヘリアーク熔接による塔類の製作

酢酸系統の精溜塔は従来18-8系ステンレス鋼が用いられていたが、耐食性に問題があり約半年で使用に耐えない状態となるので、これを工業用純チタニウムで製作することにした。この塔では胴板に5 mm 厚のチタニウム板を使用し、その熔接には全面的にヘリアーク熔接を採用した。以下この塔を製作する際に用いた熔接方法、シールドの方法および拘束冷却治具などについて概略を記す。

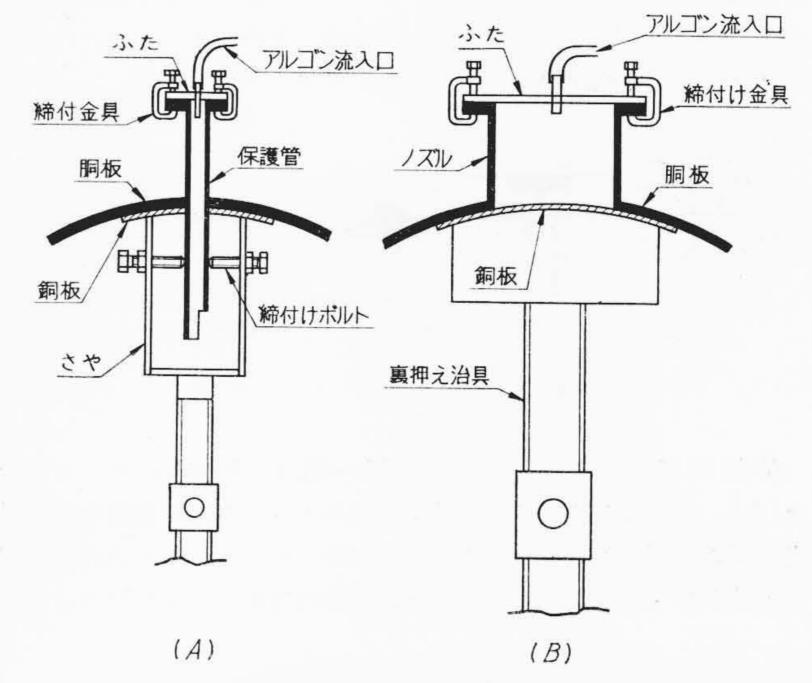
まず胴体の長手および円周方向の突合わせ継手では第11図に示すような治具を使用した。すなわち熔接部両面より銅製の当板を密着し冷却効果を上げるとともに、裏面のシールドは裏当板の上面のみぞに 2 mm 径の孔を 20 mm ピッチに設けこれよりアルゴンを送給した。表面のシールドは第4図の実験に用いたものと同種のトレーリングボックスを半自動へリアークトーチに取付け、心線送給は自動とした。

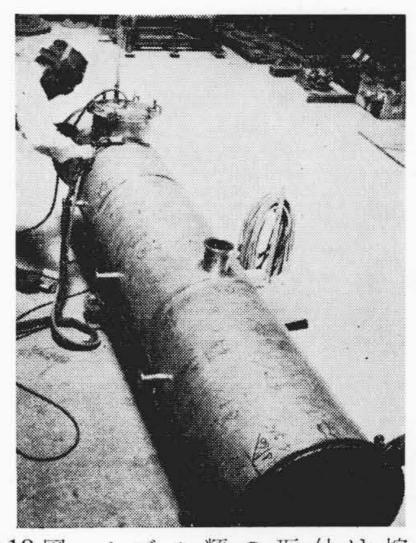
次に胴体両端に熔接されるフランジの取付けには 第12 図のように組合わせ熔接治具を用いた。フランジ上面の熔接では前述の突合わせ熔接とほぼ同様の要領で施工できるが、下面すなわち胴体との隅肉熔接では胴体外側の当板を取り除き、トレーリングボックスの底面をフランジおよび胴板の形状に合致するように改造して、この場合は心線送給を手動で熔接した。ノズル類の胴体への取付け熔接では熔接部両面に銅当板を設けることが困難となるので、第13 図に示すとおり胴板内面に銅板を密着した。第13 図(A)は温度計保護管、(B)はハンドホールの取付け熔接における治具を示す。すなわちふた、銅板、さやなどによって熔接部裏面に密閉した空間を設け、これにアルゴンを送給して裏面のシールドが完全に行われるようにした。小部品類の熔接では冷却治具ならびにトレーリングボックス



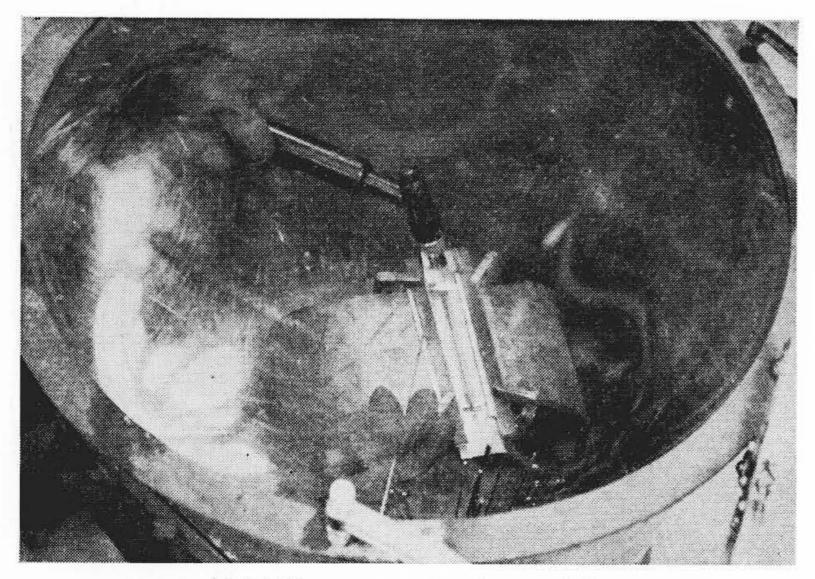


第12図 フランジ取付け熔接





第13図 ノズル類の取付け熔接



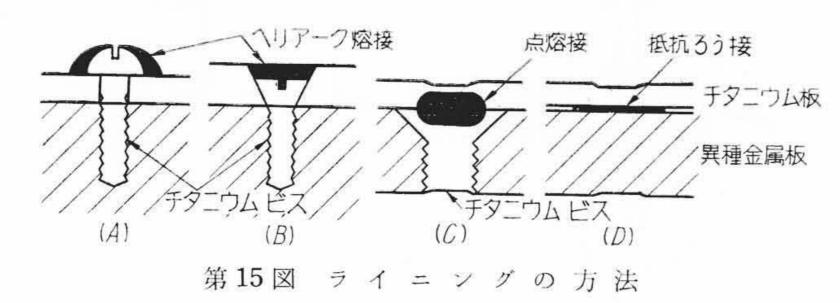
第14図 チャンバー内での熔接

の使用が困難となるのでチャンバー内で熔接を行うこととした。第 14図はチャンバー内での熔接作業の状況を示す。このチャンバー は鉄製の円筒の上面に透明な不燃性セルロイドでふたをし、側面に ゴム手袋が取付けてある。また内部には回転テーブルを設けて被熔 接物が簡単に移動でき熔接作業を容易にしてある。

以上述べたように種々の方法により熔接を行った結果、熔着部および熱影響部は両面ともにまったく変色が認められず、いずれも銀白色の光択を有していたが、製品納入後の使用状態においても好成績が報告されている。

#### 5.2 ライニングの方法

チタニウムを化学工業用の反応器あるいは熱交換器などに使用する場合,高価であるためそのすぐれた耐食性のみを活用し、強度は軟鋼またはステンレス鋼に依存するライニング構造とするほうが経済的である場合が多い。しかしチタニウムは前述のように異種金属と直接熔接することが不可能であるため、そのライニングには特殊な方法を採用せねばならない。



第15図にチタニウムライニングの一般的な方法を示す。 すなわち(A), (B)はチタニウム製のビスでライニング材を異種金属に固定しビスの頭をヘリアーク熔接する方法である。シェルの内面などで凹凸があっても支障のない場合は(A)の方法を, またフランジの

パッキング面などは(B)の方法を採用し熔接後機械加工する。この ビス止めによる方法は実用上最も安易な方法であるが、工数や外観 上に難点がある。次に(C)は異種金属にチタニウムビスを植込み、 これとライニング材とを抵抗熔接する方法であり、(D)は 4.2 で述 べた抵抗ろう接による方法である。(C)、(D)の方法は強度、外観、 工数などすぐれた点を多く有しているが、条件の選定を非常に厳格 に行う必要があり製品の板厚や形状によって施工上の制約を受ける ので限られた場合しか適用できない現状である。

ライニング施工にあたっては使用温度、圧力、ふんい気などを十分に検討する必要があるが、ライニングの内面への座屈、ライニングとシェル間の間隙、異種金属との熱膨脹係数の差、ライニング固定箇所の応力集中などの問題は特に注意を払わねばならない。ライニングされるチタニウム板の熔接継手はできる限りシェルやフランジなどの異種金属と組合わせる前に熔接するほうが良いが、組合わせたのちに熔接する場合は重ね継手あるいは裏面にチタニウムの当板をした突合わせ継手を採用して熔接部に合金を生じないようにする。またライニングの端部は間隙に腐食液が浸入するのを防止するためヘリアークを利用して銀ろう接する方法を採用している。

## 6. 結 言

以上工業用純チタニウムの熔接について化学工業用機器製作上の問題点を究明するための研究を行い、その研究結果ならびに製品における施工法について報告したが、これらを要約すると次のとおりである。

- (1) 国産工業用純チタニウム素材の性質を確認するとともに、その最適加工温度ならびに空気中加熱の許容温度を選定した。
- (2) ヘリアーク熔接においてチャンバ内外二つの適正シールド 法を確立し、熔接部の諸性質をはあくした。
- (3) 点熔接における適正熔接条件を選定し、抵抗加熱の有利な点を確認した。また異種金属との抵抗ろう接についても検討した。
- (4) これらの研究結果にもとづいて熔接, ライニング, 曲げ加工などのチタニウム製化学工業用機器製作における施工技術を確立することができた。

#### 参 考 文 献

- (1) 長谷川, 飯高: 金属チタン (昭30-8)
- 2) R. W. Hanzel: Metal Prog., 63, 89 (Mar. 1954)
- (3) R. Meredith: Weld. J., 36, 371 (Apr. 1957)
- (4) E. F. Nippes: Weld. J., 32, 461 S (Oct. 1953)
- (5) D. C. Martin: Weld. J., 32, 139 S (Mar. 1953)
- (6) D. C. Martin: Weld. J., 35, 241 S (May 1955)
- (7) 岡田,新:熔学誌 24,18 (昭 30-1)
- (8) A. S. T. M. Standards: Part 2, 734 (1958)

# Vol. 22 日

発行所 日 立 評 論 社

取次店 株式式社オーム社書店

# 立 No. 9

○トランジスタを使った時計
 ○明日への道標(ヒタクレーマ)
 ○新しいヒッターライト
 ○安全電線のスーパマン
 ○日立 だ よ り
 ○放射線による測定

東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地振替口座東京71824番東京都千代田区神田錦町3の1振替口座東京20018番