

爆発圧接法の化学装置への応用

Explosive Welding and Its Applications to Chemical Equipment

奥村 貞雄*
Sadao Okumura

富安 富士男*
Fujio Tomiyasu

井上 正美*
Masami Inoue

要 旨

爆薬の爆力を利用する爆発圧接法を、化学装置の特色である、特殊耐食材のライニング施行に応用するため検討を進めた。その結果、(1)点爆接法、(2)線爆接法の開発に成功し、これをハブ爆接法と名づけ、(3)全面爆接法とともに、化学装置への応用技術として、これを確立した。以後、チタン、ジルコニウム、タンタル、銅、アルミニウム、ニッケルなどの金属やその合金と、軟鋼、高張力鋼などの構造材との直接接合が可能となり、極薄板の接合技術とともに、化学装置への特殊材料の導入を技術面、経済面より容易ならしめた。

1. 緒 言

近時、化学工業の発展に伴い、化学装置の大形化、運転条件の高温高压化、処理媒質の複雑多様化は、目を見張るものがある。その結果、化学装置には、過酷な反応条件にも耐え得る各種の特殊材料が必要となり、これらの加工技術もまた高度なものが要求されるようになった。一方、化学装置は、装置工業の常として、建設原価の低減をはからねばならず、機器製作原価の低減策から、上記特殊材料も、ライニング構造、クラッド構造として利用される例が多く、化学装置の一つの特色となっている。

ライニング構造、クラッド構造の利用は、必然的に軟鋼を主とする構造材のうえに、特殊材という異種金属の接合が必要となり、ロール圧延可否、溶接可否などの問題と、希釈の問題が、この構造の制約となっている。すなわち、チタニウム、ジルコニウム、タンタルなどの高級耐食材料は異種金属との溶接が不可能であるため、せっかくの耐食性能も安価に使えない現状である。また異種金属との溶接が可能な各種ステンレス鋼、ニッケルおよび高ニッケル合金についても、ライニング材を薄くすると軟鋼母材との成分希釈により溶接部の耐食性が劣化するので問題である。

日立製作所笠戸工場ではこれらの問題を解決するために、爆薬が爆発するときに発生する強力なエネルギーを利用する爆発圧接法に着目し、昭和37年ころから基礎研究を開始して点と線からなるハブ爆発圧接法の開発に成功した⁽¹⁾。このハブ爆発圧接法は全面爆発圧接法とともに、あらゆる組合せの異種金属間の接合を可能とし、また極薄板のライニングにも最適である。このすぐれた技術により化学装置への特殊材料の導入が容易になり、新しいライニング構造の機器の製作技術が確立して、すでに多くの実績をあげた⁽²⁾。

以下、爆接法の概要、爆接部の性質および化学装置への応用例について述べる。

2. 爆 発 圧 接 法

爆発圧接法は、爆薬が爆発する際に発生する、強力な衝撃圧力を利用する一種の冷間圧接法で、金属板全面を接合しようとする、全面爆接法の開発が端緒となり、点と線の接合を目的とした、ハブ爆接法が、次いで開発されたものである。

2.1 ハ ブ 爆 接 法

ハブ爆接法は、金属ライニング施行を目的とし、点爆接法および線爆接法からなる、部分爆接を特長とする。点爆接法は、図1(a)に示すように、ライニング材と母材との合わせ面を研摩して重ね、ライニング材の上にハブキャップと称する火工品を設置する。ハブキャップは、直径16mmφ×長さ40mmの塩化ビニールケース内に

* 日立製作所笠戸工場

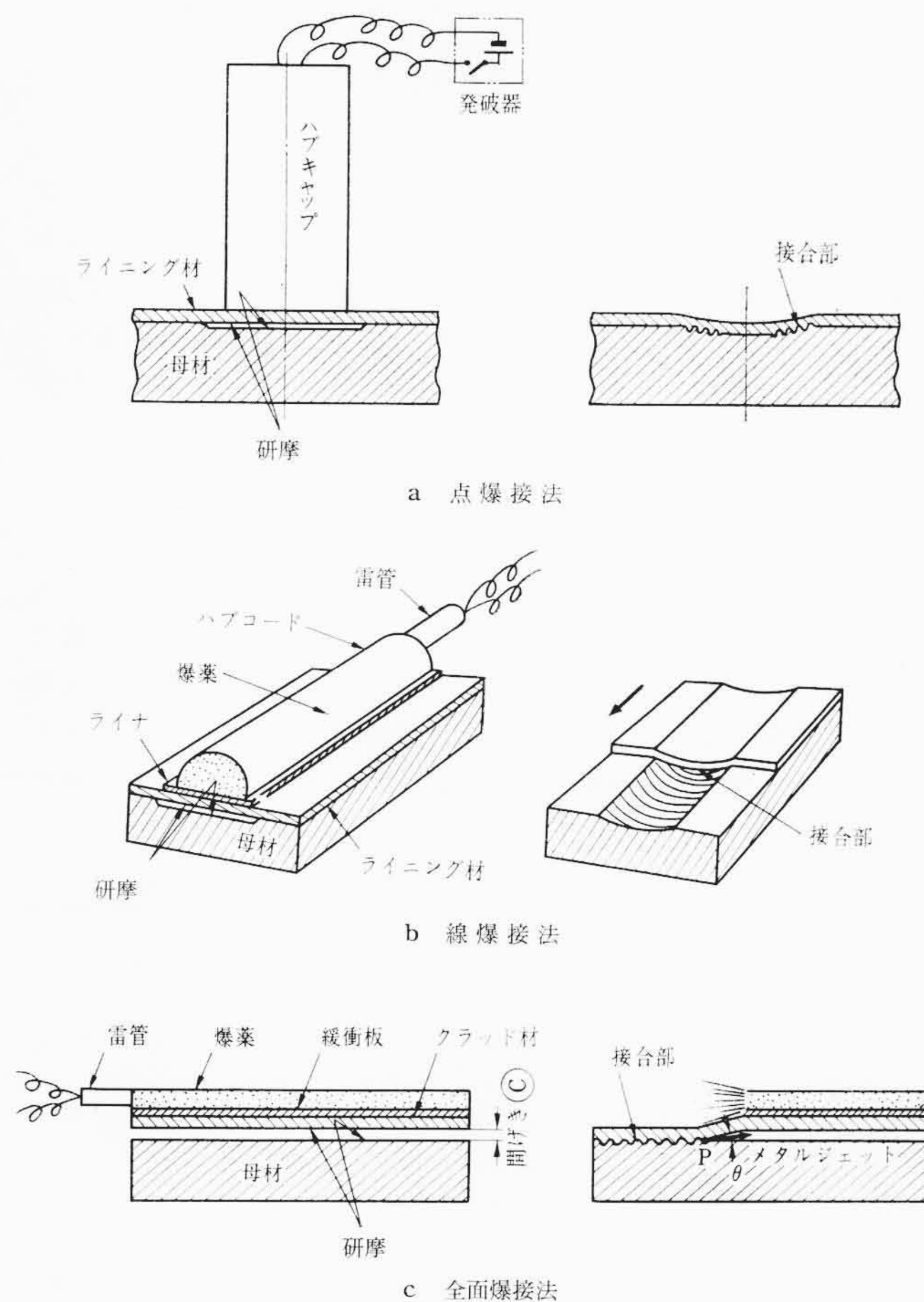


図1 ハブ爆接法および全面爆接法

爆薬と電気点火装置が内蔵されている。ハブキャップを爆発させると、図に示すように環状の範囲が接合され、断面の接合境界には、図2に示すような微細なさざ波状の塑性変形がみられる。なお、ハブキャップは、斉発も可能である。

線爆接法には、ハブコードと称し、図1(b)に示すような塩化ビニール製ライナの上に爆薬をかまぼこ状に接着したひも状の火工品を用いる。一端から電気雷管で爆発させると、爆薬直下の範囲が帯状に接合される。接合境界には、爆ごう方向に凸向きのU字形等高線をもった、さざ波状の塑性変形がみられ、その顕微鏡写真は、図2の点爆接のものと同様である。

2.2 全 面 爆 接 法

ハブ爆接法が、点および線状の部分爆接であるのに対し、全面爆

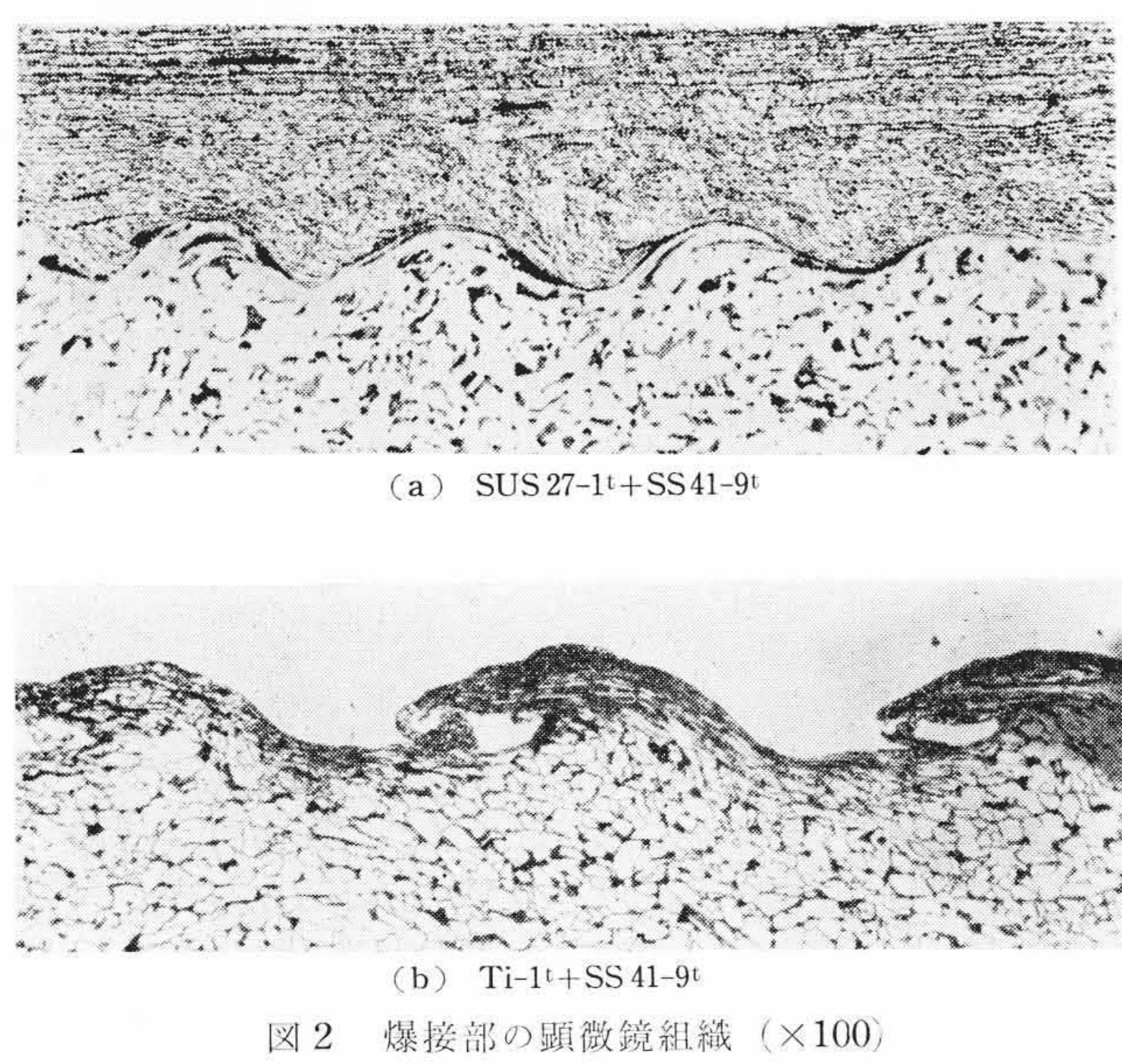


図2 爆接部の顕微鏡組織 (×100)

接法は、クラッド鋼の製造を目的として、ライニング材と母材とを全面にわたって接合することを特長とする。方法は、図1(c)に示すようにライニング材と母材とを、間げき③を隔てて平行に設置し、ライニング材上に緩衝板を介して爆薬を全面に装置する。爆薬を一端から爆発させると、全面に及んで接合し、爆ごう方向と平行な断面に、図2に示すような塑性変形がみられる。

爆発圧接法の接合機構については、次のように説明されている。たとえば、図1(c)において、爆発のある一時点を考えてみると、ライニング材は、間げき③、爆速などに支配される、角度 θ をもって母材に衝突する。このように2枚の金属板が角度をもって高速で衝突すると、金属は流体的挙動をし、接合面側の表面層は塑性流動を生じ、爆発圧接特有のさざ波状の変形を呈する。この現象はメタルジェットと呼ばれ、衝撃点Pにおいてはメタルジェットの生成に

よって、新たに露出された、新鮮な金属面をもって強力に加圧されるため、従来の冷間圧接法のように、固相接合するとされている⁽³⁾⁽⁴⁾。ハブ爆接法では施行的に間げきの取り方などが全面爆接法と異なるが、上に述べた接合機構は同様である。

3. 爆接部の性質

3.1 ハブ爆接法

表1は点爆接部の試験結果を示す。圧痕は抵抗溶接に比べてやや深いが、なめらかな球面状の凹みで外観は美麗である。ライニング材は圧痕の中央で10~20%の板厚減少がある。接合面に平行な引張荷重を負荷するせん断試験では、1点あたりの破断荷重は、比較のために引用した抵抗溶接に対するMIL規格値を上回っており、平均偏差、すなわちばらつきは小さい。接合部断面の板厚方向のかたさ分布は、図3に示すように、加工硬化しやすい材質では境界の塑性流動した範囲が硬化しているが、表面側では、かたさ、組織とも、ほぼ素材と変わらない。

表2は線爆接部の試験結果を示す。ライニング材側の圧痕深さ、板厚減少率は点爆接の場合と同様である。接合幅はほぼハブコードの爆薬の幅にひとしく、8~12mmである。接合面に平行に負荷するせん断試験では、破断が接合部以外の素材部で起こるため、ハク離試験を行ない、爆接線単位長さ当たりの破断荷重で示した。表2に併記した試験方法でも、接合部がハク離することなく、接合端部に応力集中を生じて、板厚方向に破断が進む。端末の応力集中の影響を少なくするため、Ti-2mmとSS41-12mmとの組合せについて、表3に併記するような、比較的純粋なハク離荷重を負荷しうる試験を行なうと、爆接線単位長さ当たりの破断荷重はきわめて大きく、また、接合単位面積当たりについては、ほぼチタンの抗張力に近い。

接合断面の板厚方向のかたさ分布は、図3に示した点爆接の場合とほぼ同じである。図4は線爆接継手の疲労試験結果である。重ね継手であるために接合端末に応力集中を生ずることは避けられないので、この部分から板厚方向に割れが伝播して破断に至る。表4は

表1 点爆接試料の試験結果

試料	上板材質		ステンレス	ステンレス	ステンレス	チタン	アルミ	銅
	板厚 (mm)		SUS-27 0.3	SUS-27 1.0	SUS-27 2.0	ST-60 1.0	AIP3-0 1.0	CuP2-0 1.0
圧痕	直 径 (mm)		14.9	14.9	14.7	15.1	16.2	13.2
	深 さ (mm)		0.64	0.80	0.96	0.81	0.37	1.00
	板厚減少比 (%)		11	19	18	20	12	14
接合部	外 径 (mm)		15.0	14.8	7.7	13.9	13.9	15.1
	内 径 (mm)		10.5	9.4	4.0	9.2	8.1	8.8
	面 積 (mm ²)		91.0	106.4	40.8	81.9	100.5	119.1
せん断試験	平均荷重 (kg)		763	2,016	1,506	1,370	487	1,096
	M I L規格 (kg)		105	590	1,465	620	130	175
	平均偏差 (%)		8.4	6.4	32.7	7.1	7.8	4.8
	破断個所	母材接合面	14	3	0	0	10	12
			0	11	14	14	4	2

(注) 母板はすべて SS41-9mm

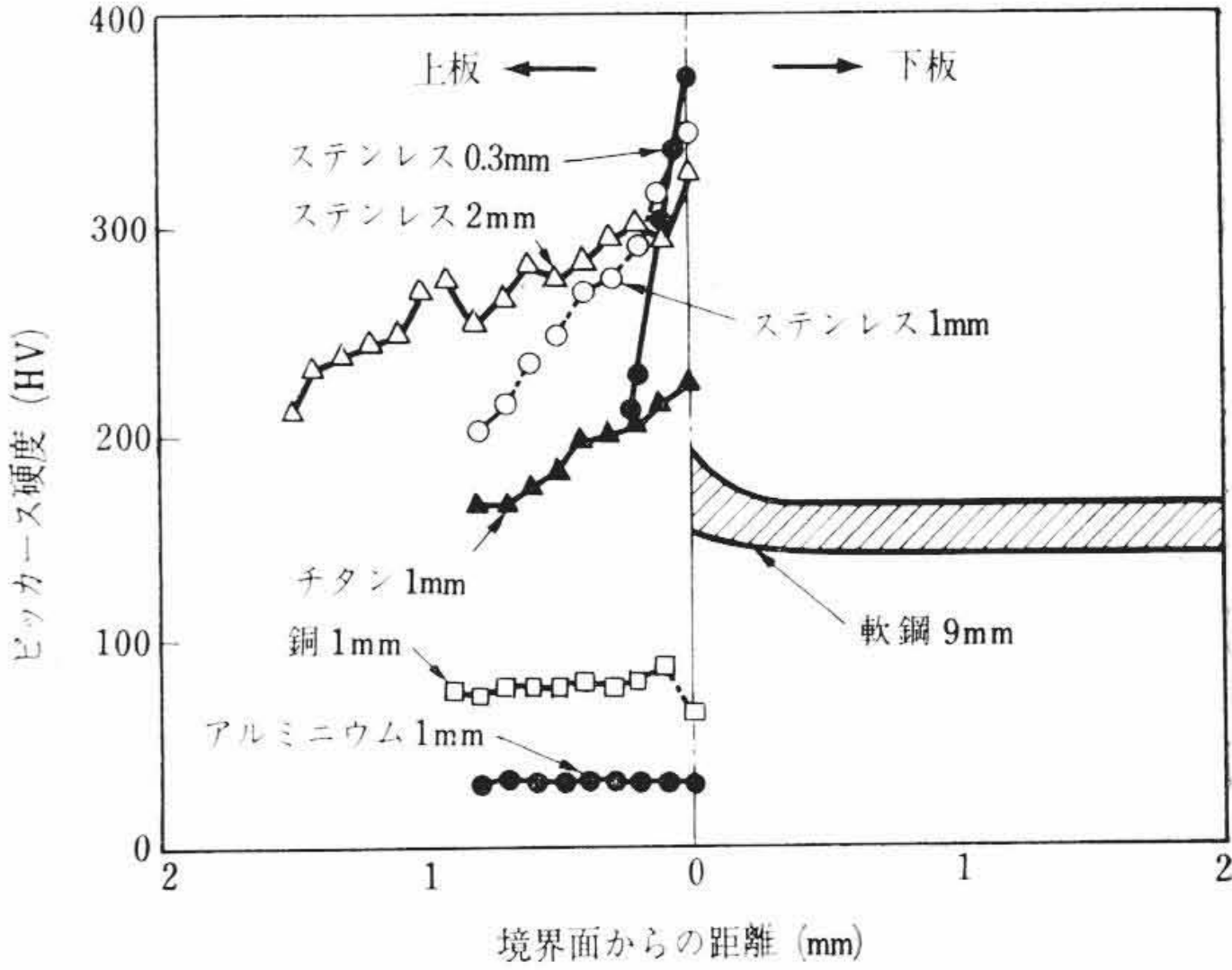


図3 爆接部の硬度分布(板厚方向)

表2 線爆接試料の試験結果

上板	SUS-27 1mm	Ti 1mm	Ti 1mm	Ti 1.5mm	Cu 1mm	Cu 1mm	ABP 1mm	Al 1mm	Al 1mm	Al 2mm	Al 2mm
下板	SS41 9mm	Ti 1mm	SS41 9mm	SS41 9mm	Cu 1mm	SS41 9mm	SS41 9mm	Al 1mm	SS41 9mm	Al 2mm	SS41 9mm
ハク離荷重(kg/mm)	49.3	21.3	18.6	20.1	15.1	29.3	14.1	7.3	14.4	16.2	30.7
平均偏差(%)	26.0	19.0	14.5	6.0	1.52	24.6	18.4	17.8	27.0	1.85	21.5

備考 1. 試験方法

2. ハク離荷重は5個の平均値

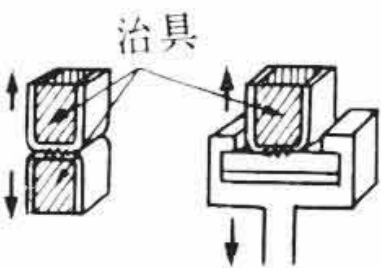


表3 線爆接のハク離強度 (Ti-2^t+SS41-12^t)

No.	1	2	3	4	5	平 均
ハク離荷重 (kg/mm)	262	302	329	338	341	314
接 品 幅 B (mm)	10	10.5	11.0	10.4	10.5	—
ハク離強度 (kg/mm ²)	26.2	28.8	30.0	32.4	32.5	30.0

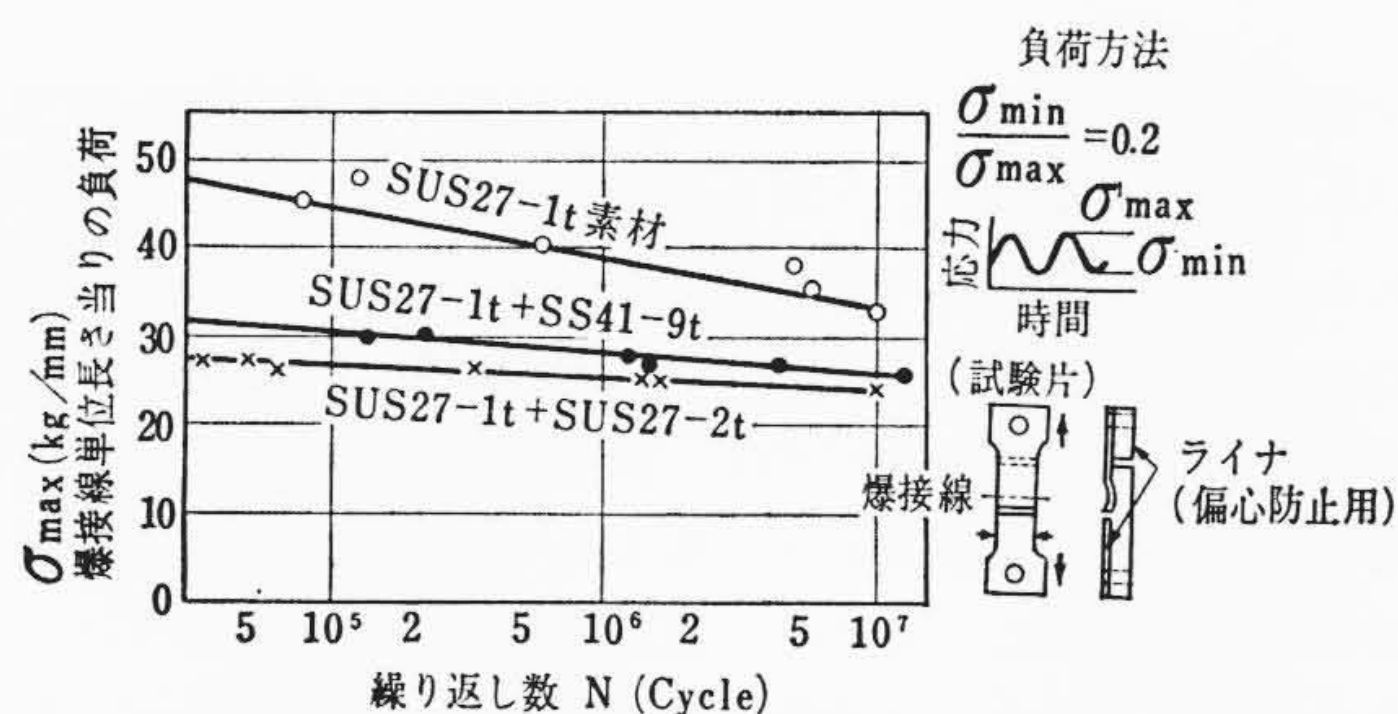
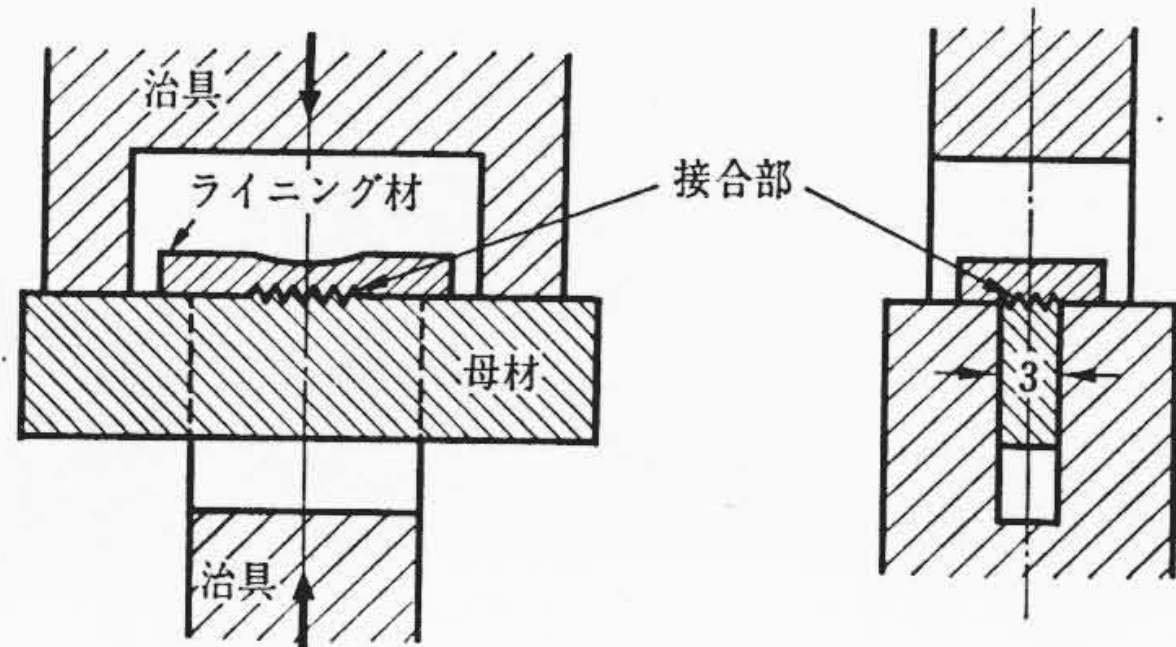


図4 線爆接継手の疲労試験結果

線爆接部表面の腐食試験結果を示す。いずれも素材に比べて耐食性の劣化は認められない。

3.2 全面爆接法

表5は全面爆接法によるクラッド鋼の各種試験結果を示す。全面爆接法においても接合境界近傍は、図3に示すような加工硬化が認められるが、引張りおよび曲げ試験の結果からみて、硬化層が材料の機械的性質に及ぼす影響は無視できるようである。

せん断強度は、ステンレスクラッド鋼に対するASTM規格値の14 kg/mm²を大幅に上回っている。また、耐食性も素材あるいは、ロールクラッド鋼に比べて変わらないことが明らかにされている。

4. 化学装置への応用

4.1 基本的施行法

爆発圧接法の化学装置への応用方法には、(1)点爆接によるライニング構造の採用、(2)線爆接によるライニング構造の採用、および(3)全面爆接によるクラッド構造の採用の三つがある。また、(1)(2)については、機器製作手順として、次の二つの方法がある。

(a) 平板の状態ではライニング材を母材と爆接し、その後、種々の形状に成形し組立てる方法。

表5 全面爆接法によるクラッド鋼の機械的性質

材 質	板 厚 (mm)	引 張 試 験			曲げ試験 (R=1t)		接 合 性 試 験	
		降 伏 点 (kg/mm ²)	抗 張 力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	内	外	せん断強度 (kg/mm ²)	ハク離強度 (kg/mm ²)
クラッド材	母 材							
チ タ ン (TP35)	SS41	2+16	33.0	45.5	32	良	31.6	39.4
チ タ ン (TP35)	SB42B	5+40	31.5	44.0	30	良	28.6	37.8
ス テ ン レ ス (SUS27)	SS41	2+9	37.7	50.7	32	良	39.9	55.8
ス テ ン レ ス (SUS29)	SB49B	3+25	44.1	56.1	29	良	40.9	60.2
ス テ ン レ ス (SUS33)	SB42B	2+9	34.9	44.0	34	良	41.7	59.7
ニ ッ ケ ル	SB42B	2+12	34.6	46.6	29	良	32.2	43.1
ハ ス テ ロ イ C	SB42B	2+12	31.0	50.8	36	良	44.6	59.2
銅 (CuP 2-0)	SS41	2+12	28.3	41.9	30	良	20.3以上	11.9
ア ー ム ス ブ ロ ン ズ	SS41	2+26	37.1	46.2	33	良	35.0	55.8
ア ー ム ス ブ ロ ン ズ	SF45	9+56	39.8	53.1	29	良	36.0	59.7
ア ル ミ ニ ウ ム (A1P3-0)	SB42B	2+12	24.1	39.6	33	良	14.0以上	9.8

表4 ハブ爆接部の耐食性

材 質 (板厚: 1 mm)	腐 食 液 (沸騰状態)	腐 食 度 (mm/y)	
		素 材	線 爆 接 部
ス テ ン レ ス (SUS-27)	5% H ₂ SO ₄ 65% HNO ₃	0.085 0.63	0.095 0.56
チ タ ン (ST-40)	5% H ₂ SO ₄ 65% HNO ₃	0.092 0.31	0.097 0.28
銅 (CuP 2-0)	1% H ₂ SO ₄ 1% HCl	0.99 0.27	0.81 1.33
ア ー ム ス ブ ロ ン ズ (ABP 1-0)	1% H ₂ SO ₄ 1% HCl	0.105 0.65	0.150 0.63

(b) 母材のみで構造物の成形組立を完了し、その後ライニング材を母材に爆接する方法。

なお(b)については、既存の装置の補修方法としても用いられる。これらの応用方法については、それぞれの化学装置の使用条件を十分考慮し、ライニング材の材質や板厚および構造物の寸法形状に応じて、最も適正な方法を採用しなければならない。爆発圧接に必要な作業の基本は、(1)母材の表面仕上、(2)ライニング材の表面処理、(3)母材とライニング材の組合せ、(4)爆薬設置および発破、(5)洗浄の5項目より構成されている。なおハブ爆接の場合、ライニング端部の基本的な継手形状は、図5のとおりである。

4.2 ライニング応用例

4.2.1 点爆接法

点爆接法の化学装置への応用は、主として手順(b)の場合が多く、既製の構造物に耐食材料をライニングとして張りつける場合に、最も簡便な方法として利用される。点爆接に用いるハブキャップは、その爆発音も単発では銃の発射音程度であり、特殊なポータブルガンでの施行も可能である。したがって、高度な耐食度のみを要求する化学容器や、既存装置の腐食事故に対する高級耐食材での補修には最適である。

図6は、板厚1mmのチタンを点爆接ライニングした化学容器を示す。従来のチタンライニングにはビス止め後TIG溶接する方法が採用されていたが、それに比べると作業がスピード化され、高い性能のものが得られる。

4.2.2 線爆接法

化学装置への線爆接法の利用は、手順(a),手順(b),いずれの場合にも用いられ、それぞれの特色により、爆接ライニング施行

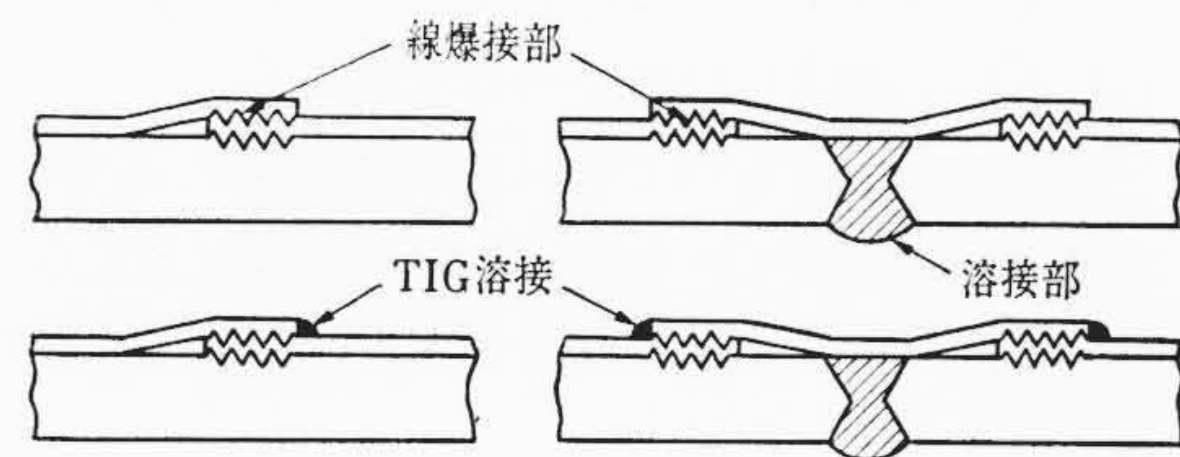


図5 継手部の施工方法

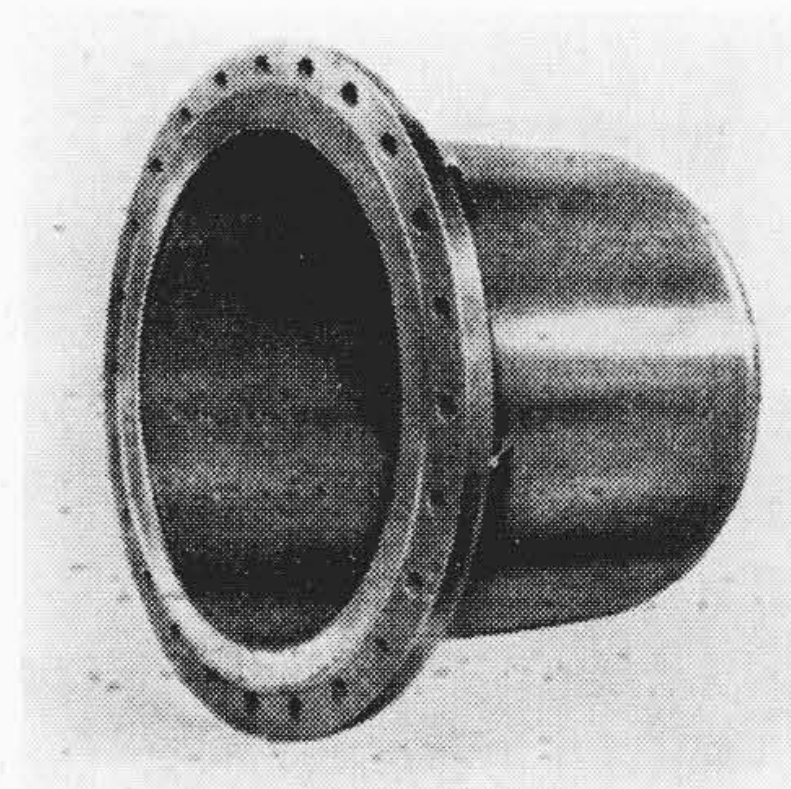


図6 点爆接法によるチタンライニング容器

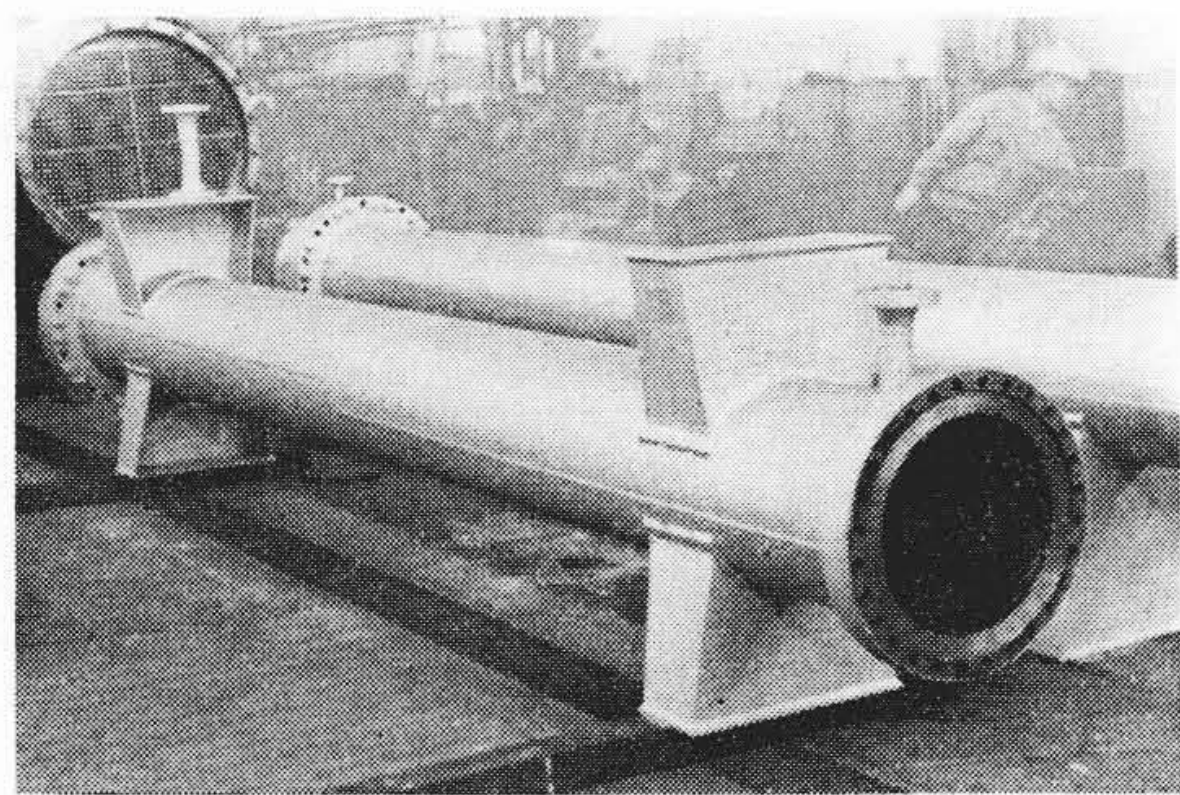


図7 線爆接法によるステンレスライニングした熱交換器の胴体

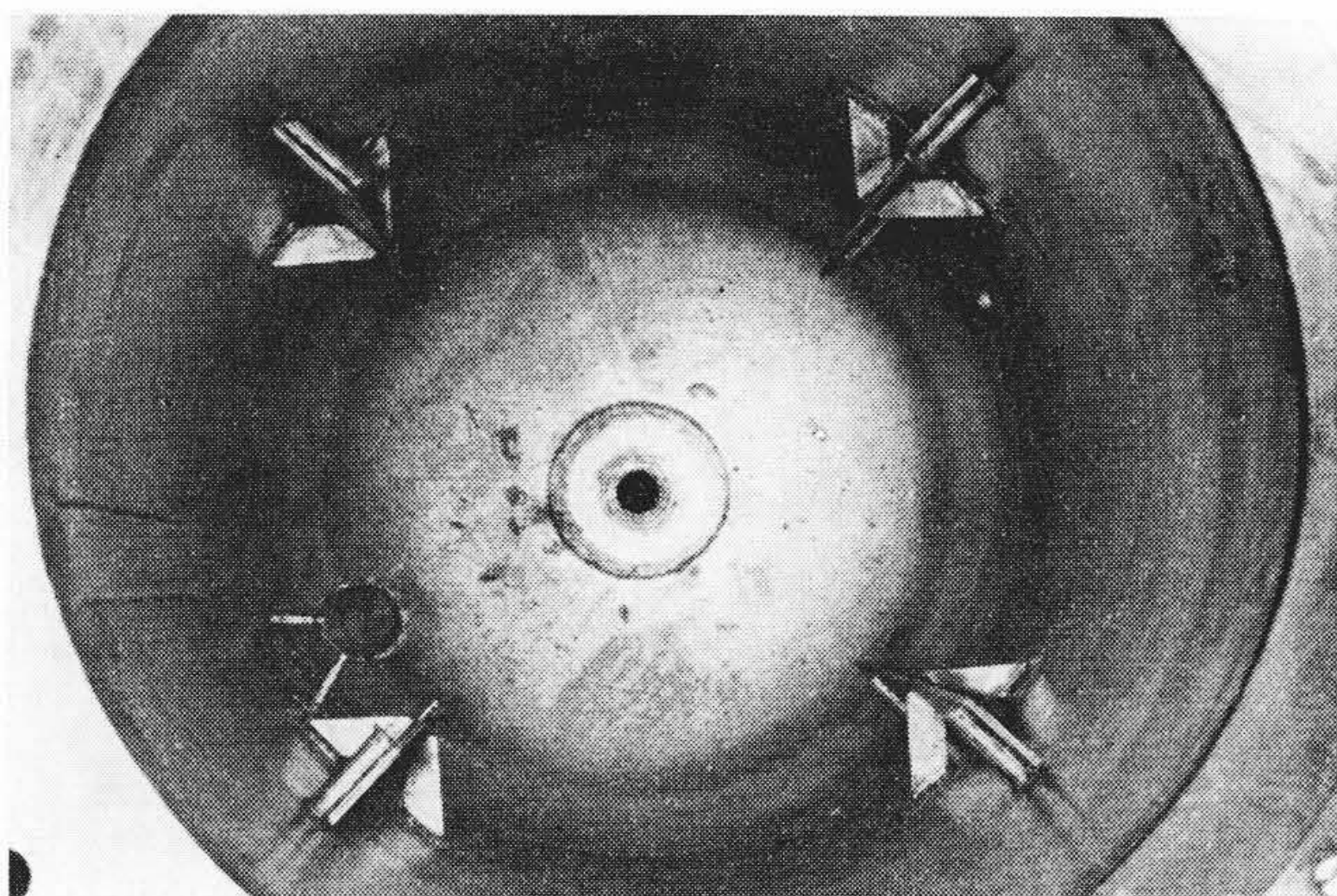


図8 全面爆接法によるチタンクラッド反応器の内部

法の主力となっている。すなわち、手順(a)では、爆接作業を平板の状態で行なうので作業が容易であり、その後の加工はクラッド鋼を使用する場合と、まったく同じとなる。化学容器の鏡板、胴板などには、この方法がよく用いられる。一方手順(b)は、ライニング材が非常に薄い場合や、大径の円筒内面の場合でライニング材をあらかじめ成形しなくとも、母材の形状に合致させることのできる構造に用いられる。この場合、前述の点溶接同様、既存の構造物にも適用できる。そして点爆接の場合より、熱応力、負圧力など使用条件が過酷な機器にでも応用が可能である。

図7は既存の構成材料では腐食がはげしいとされた構造物に、高級耐食材料として、板厚0.5mmのSUS28を線爆接ライニングした、熱交換器の胴体をしたものである。この例は8基に及び、その後の腐食を完全に防止することができ、プラントの寿命をいじめるしく伸ばした例の一つである。

線爆接に用いるハブコードの爆発音は、長さによって異なるが、点爆接と異なってかなり大きな衝撃音を発するので、日立製作所笠戸工場では、特殊な設計を施した作業場を設置し、外部への影響を防止している。

4.2.3 全面爆接法

化学装置の特色としてあげられる過酷な使用条件の要求は、前述のライニング構造では満足しない場合が生じてくる。すなわち化学装置は、高温稼動の場合もあり、負圧稼動の場合もある。また運転中は問題ないとしても、運転停止時に負圧を生ずる場合が非常に多い。したがって、部分爆接の場合、ライニング材には、負圧力や熱応力が作用し、これを母材に固定している部分は、これらの作用に十分耐えられる考慮が必要で、これを怠ると機器の性能に重大な影響を与えることになる。

このような観点から、全面爆接法は上述のような過酷な使用条件に用いられる圧力容器、反応器、晶出器などの本体および各種耐食熱交換器の管板などに多く用いられている。

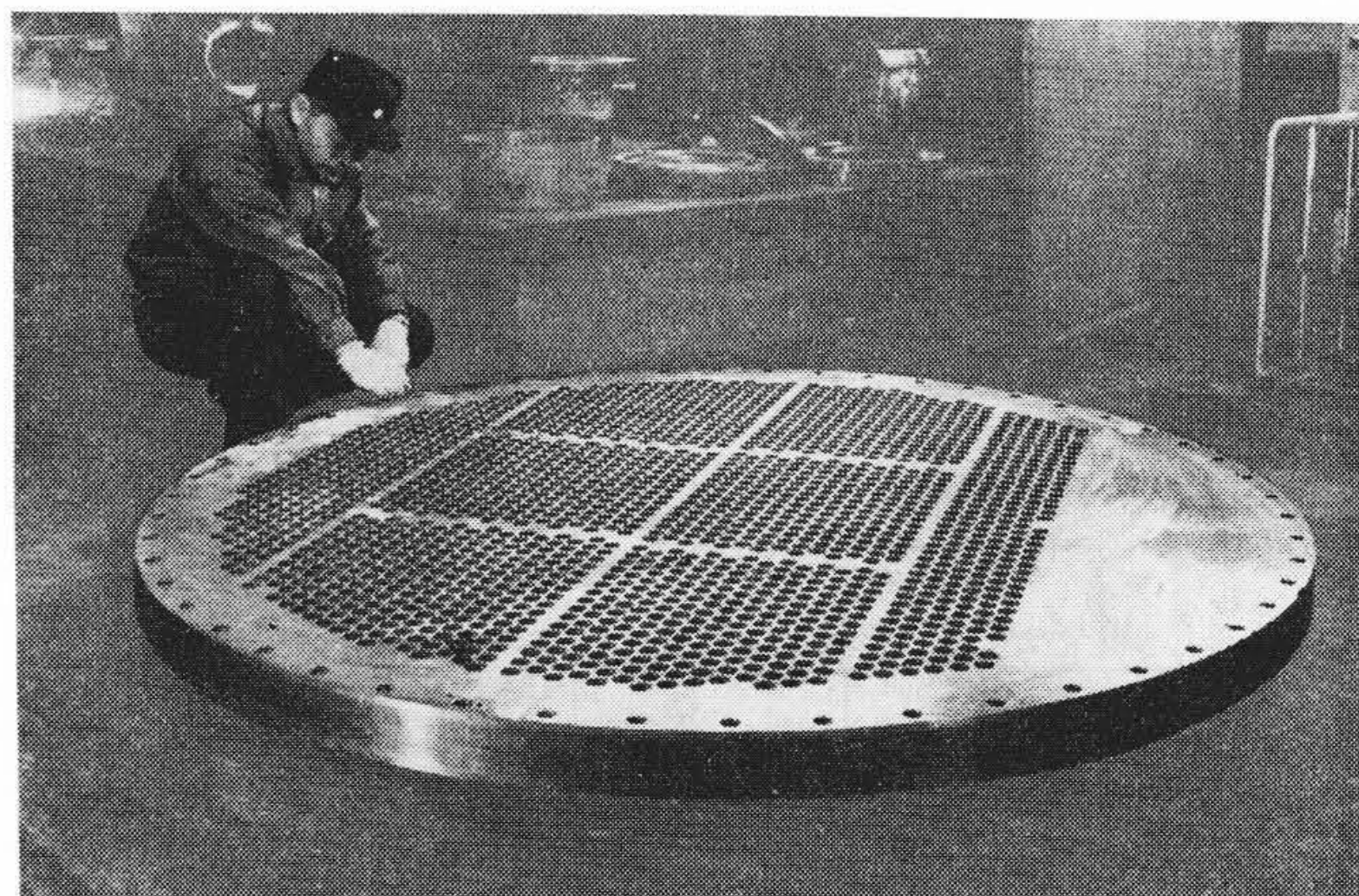


図9 全面爆接法によるアームブロンズ製クラッド管板（海水用熱交換器）

全面爆接法は、ライニング材全面を母材に接合するもので、従来の圧延法によるクラッド鋼とその後の工作要領はまったく同じである。ただ、圧延法の場合、接着機構に種々問題のある材料の組合せがあり、その接着強度は低いものが多い。この点全面爆接法によるクラッドライニングは、あらゆる種類の材料の組合せに応用でき、その接着強度も大であるので工作は容易である。

図8は全面爆接によるチタン板厚2mmのクラッドライニング構造の反応器を示す。従来の圧延法のクラッド鋼に比べ、接着強度は数倍の値を示し、工作性能および使用性能ともすぐれたものを示している。また、図9はアームスブロンズ9mmを全面爆接した海水用熱交の管板を示す。なお、全面爆接は母材の板厚に制限がないので、施行場所への輸送さえ可能であれば、超厚板構造鋼材への耐食材のクラッドライニングが可能であり、圧延法では不可能な組合せの各種のクラッド鋼を得ることが可能である。

5. 結 言

以上、爆発圧接法の概要と化学装置への応用について述べたが、爆発圧接法は、従来の溶融溶接によるライニング法、およびロール圧延によるクラッド法には見られない、多くのすぐれた特色をもっている。化学装置への応用という観点から得られた結論を要約すると、下記のとおりである。

(1) ハブ爆接法

- (a) 0.5~2.0mmの薄板ライニングに適し、接合部の強度、耐食性などの性能が良好である。
- (b) あらゆる金属の薄板間、および極薄板対厚板の接合に適している。
- (c) チタン、ジルコニウム、タンタル、銅、アルミニウム、ニッケルなどの金属やその合金と、軟鋼、高張力鋼などの構造物との直接接合ができる。
- (d) 熱影響や合金層の生成による劣化がなく、ひずみ取りや熱処理などの後熱処理が不要である。
- (e) 既存の構造物にもライニング施行でき、簡便で作業性がすぐれている。
- (f) 火薬消費量が少ないので場所的制約が少ない。
- (g) 材料費の節減や、能率の向上など、経済的な効果も大きい。

(2) 全面爆接法

- (a) クラッド比の制約を受けず、ライニング材0.5~12mmの厚さに適用でき、接合強度、耐食性は、ロールクラッド法よりすぐれている。
- (b) あらゆる組合せの金属材料に適用できる。

- (c) ライニング材が高価なほど、母材が厚いほど、経済的に有利である。
- (d) 製作期間が短い。
- (e) 高温操業、負圧操業の化学装置に応用が可能である。

爆発圧接法によるライニング施行は、今後、石油化学、化学繊維、合成樹脂、ソーダ、肥料、薬品などの化学工業で使われる各種耐食機器のライニング法として、また、薬品、食品、発酵、醸造などの

容器類のさび止め用薄板ライニング法として、性能の向上、価格の低減に大きな効果をあらわしてゆくものと期待される。

参 考 文 献

- (1) 亀石, 富安: ケミカルエンジニアリング 9, p. 26 (昭 39-2)
- (2) 佐々木, 富安: 精密機械 31, p. 106 (昭 40-7)
- (3) Abrahamson: J. Appl. Mech. 28, p. 519 (Dec. 1961)
- (4) Cowan & Holtzman: J. Appl. Phys. 34, p. 928 (Apr. 1963)



特 許 の 紹 介



特 許 第 446802 号 (特 公 昭 39-26258)

松 島 宰・村 岡 忠 雄

回 転 ド ラ ム 式 熱 交 換 機

回転するドラム内に冷媒または熱媒を流通させ、ドラム外周に被冷却物または被加熱物を接触させるようにした回転ドラム式乾燥機においては、冷媒または熱媒を回転ドラムの一端より流入し、ドラムの回転力を利用してドラム内を螺旋状に流通させた後ドラムの他端より排出するようになっているため、入口付近の冷媒または熱媒と出口付近の冷媒または熱媒とは温度差を生じてドラムの軸方向に温度こう配を生じ、被冷却物または被加熱物に乾燥むらができる。

この発明は回転ドラムの一端中心部および他端中心部よりドラム内全長に延在する流入管および流出管を設け、流入管より冷媒または熱媒をドラム内に均等にかつドラムの回転方向と反対方向に流出させるとともに流出管よりドラム内の冷媒または熱媒を排出させて、ドラム内の冷媒または熱媒の温度差をなくし、ドラムの軸方向の温度こう配発生を防止するとともに冷却または加熱効果を向上さ

せたものである。

ドラム 1 を図 2 の矢印方向に回転しながら、流入管 11 の入口 8 より冷媒または熱媒を導入すると、冷媒または熱媒は流入管 11 内を軸方向に流動してノズル 9 よりドラム 1 内に均等にかつドラム 1 の回転方向とは反対の方向に流出する。したがってドラム 1 内軸方向の冷媒または熱媒温度はほぼ均一であり、またドラム 1 内に流出した冷媒または熱媒はドラム 1 の回転方向とは反対の方向に流れながら伝熱面であるドラム 1 の内壁に押付けられるため、ドラム 1 外周面の被冷却物または被加熱物 14 との相対速度は大きくなり、冷却または加熱効果は向上する。一方ドラム 1 内の冷媒または熱媒は圧力差によって流通穴 13 より流出管に入り、出口 10 を経て外部に排出される。

(寺田)

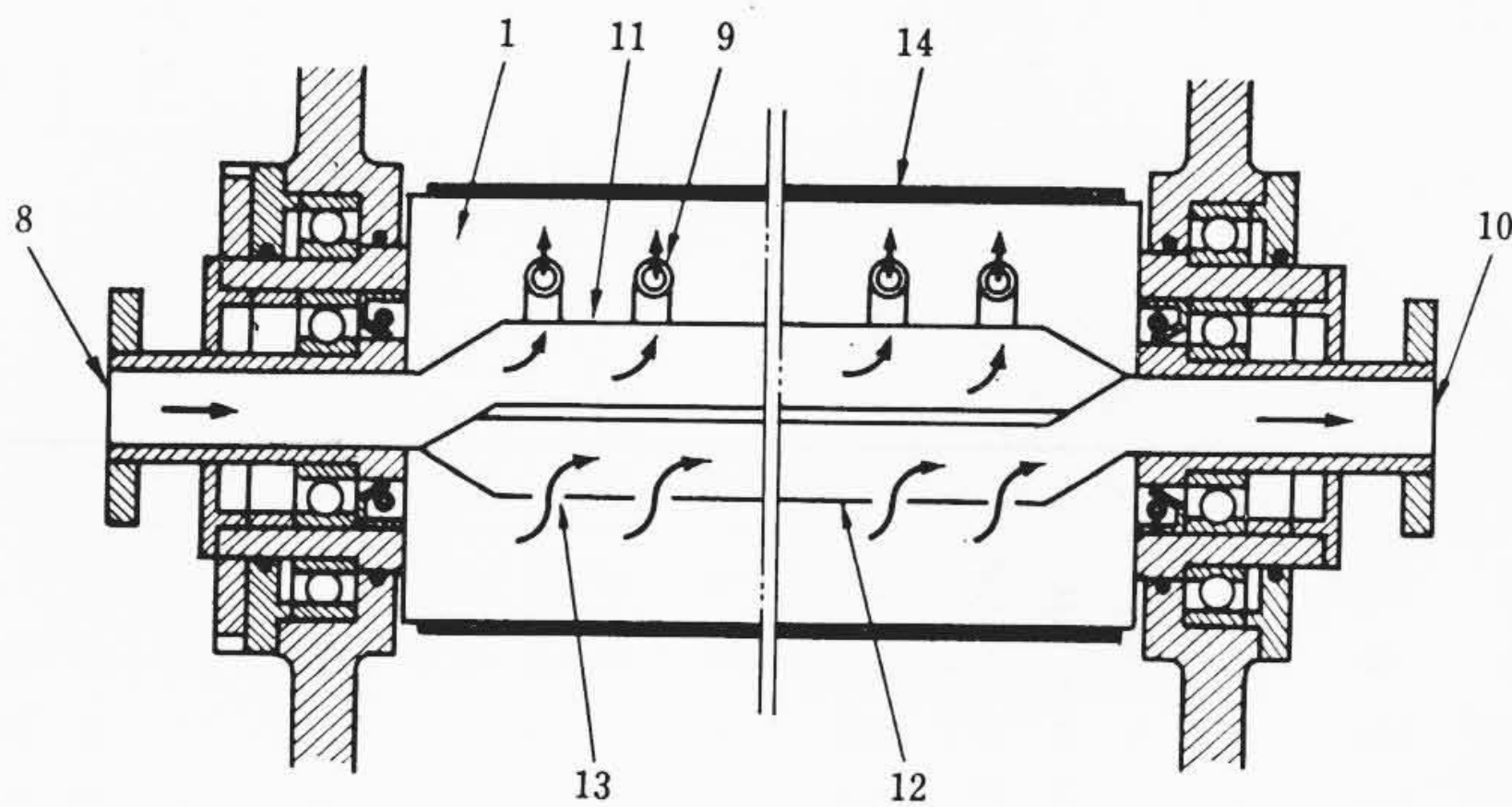


図 1

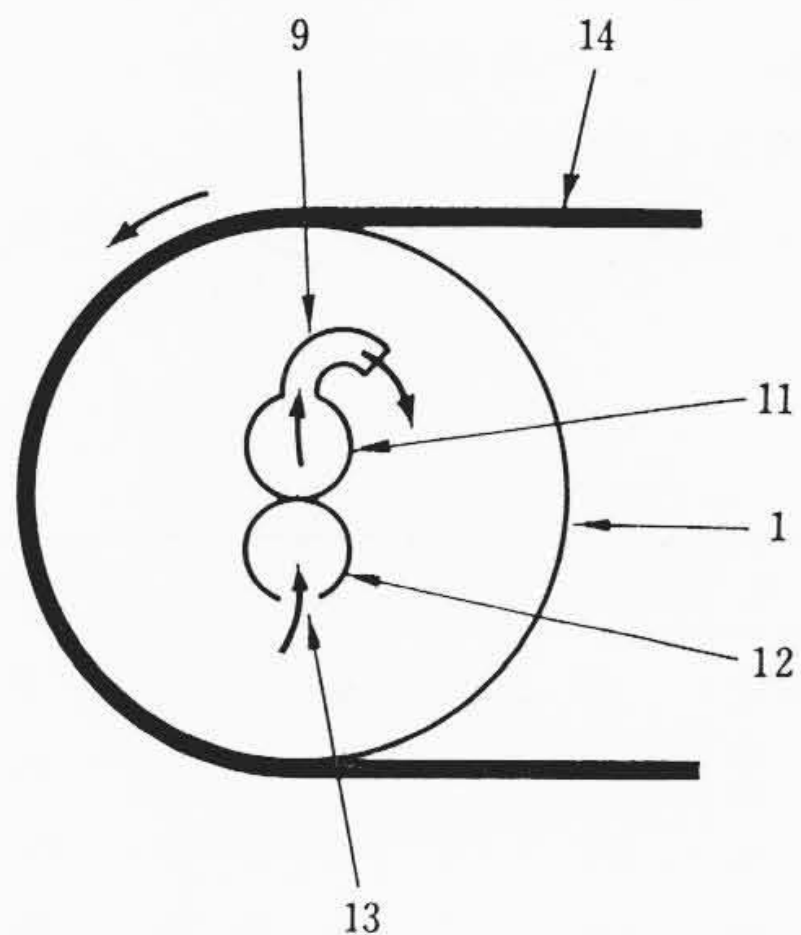


図 2