

封圧下での岩石のひずみと弾性波の多点計測のための 油圧容器用多線型および同軸型電気信号取り出し口

西澤 修*

Osamu NISHIZAWA (1997) New multi-wire type and co-axial type feedthroughs for an oil pressure-medium vessel. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48 (8), p. 431-438, 9 figs.

Abstract: New multi-wire type and co-axial type feedthroughs for an oil pressure-medium vessel were developed. The multi-wire type feedthrough is used for acquiring data from strain gauges, and the co-axial type is used for acquiring elastic waveforms detected by piezoelectric transducers. The multi-wire type feedthrough contains four wires, which are led out through a 2-mm-diameter through-hole drilled in a vessel closure. The co-axial type feedthrough reduces the noise level by insulating the shield wire from the vessel. Both types of feedthroughs are designed on the basis of Bridgman's self-sealing mechanism with unsupported area, which realizes tighter sealing as pressure increases. Because only O-rings are used for gaskets, feedthroughs can endure repeated use up to 200 MPa and also allows easy manipulation for installation or removal, so that we can easily change electrode arrangements.

要 旨

岩石実験で用いられる油圧式压力容器から、岩石のひずみや岩石中を伝播する弾性波の波形などの電気信号を外部に導くための多線型と同軸型取り出し口を開発した。多線型のリード線用取り出し口では直径2mmの孔から4本のリード線が取り出せる。同軸ケーブル取り出し口では、シールド部が压力容器と電気的に絶縁されているため、ノイズの低い高周波信号を取り出すことができる。

この取り出し口の圧力シール機構はブリッジマンシールの原理に基づいており、圧力が高くなるほどシールが強固となる。シールのためのガスケットにはエポキシ等の樹脂類やパイロフィライト等はいっさい使用せず、Oリングだけを用いているので200MPaの圧力下で繰り返し使用してもシールの破損による油の漏洩は起こらない。また、これら取り出し口はvessel closure (圧媒体を閉じこめるための栓) に簡単に着脱でき、実験の目的に応じた組み合わせを容易に作ることができるなど、従来の取り出し口にはない利点がある。

1. はじめに

岩石物性の研究では岩石中の割れ目の影響を評価あるいは除去するため、岩石を数100MPaの高い圧力下に置くことが必要で、油を圧媒体とした压力容器は取り扱いが容易なことからこの種の実験を行う装置として最適である。压力容器内部は、通常の実験では最高200MPa程度となるので、こうした高い圧力にある容器内部からの電

*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

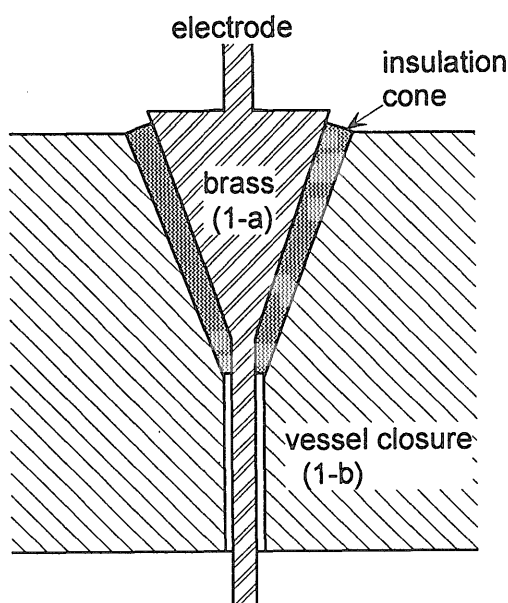
気的信号の取り出し口(feedthrough)が必要である。静水圧下での岩石物性試験や三軸応力下でのアコースティックエミッション(acoustic emission:以下AEと略記)の実験では、ひずみや弾性波などの電気的信号の取り出し口を多数使用する(Masuda *et al.*, 1990, 1993; 薛ほか1996)。こうした目的のためには、一つの孔から複数のリード線の取り出しが可能な多線式の取り出し口や、弾性波のような数MHzまでの高周波信号を取り出すことのできる同軸型の取り出し口が望ましい。油圧式の高圧発生装置でこれまで利用されてきた信号線取り出し口の実例を次節に示すが、これらは200MPaよりも高い封圧下や、高温下でも利用できる高い性能を持つものの、装置への組み込みの簡便さや、狭いスペースから多数の信号を取り出すという点では満足できるものではない。常用の最高圧を200MPaとし、装置への組み込みが簡単で、多数の信号線を取り出す手法があれば、岩石のAE実験や物性試験における利用価値は大きい。この目的にかなう油圧容器用の4線式のリード線取り出し口と、同軸ケーブル用取り出し口を新たに開発したので、ここに報告する。これらの取り出し口はすでにいくつかの压力容器に組み込まれ、最高200MPaまでの繰り返し使用に対する実績もある。また、これらの取り出し口を40個以上組み込み、三軸下での岩石破壊の際のAEやひずみを詳しく調べる実験もすでに可能となっている(増田ほか, 1997)。

2. 原 理

2.1 ガスケットの圧縮とブリッジマンシール

压力容器から電気信号を取り出すための手法の実例を

Keywords: multi-wire feedthrough, co-axial feedthrough, high-pressure vessel



第1図 従来型の高圧容器用リード線取り出し口の一例。

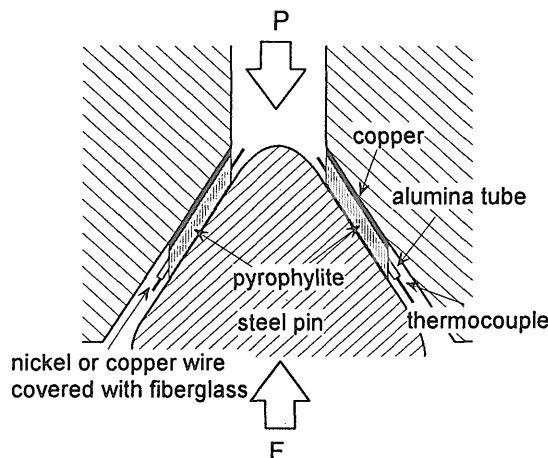
円錐形の電極と圧力容器の閉じこめ栓(vessel closure)との間に傘形の絶縁物(パイロフィライトなど)ガスケットを挟んで接着する。圧力が加わればガスケットがより強く圧着される。

Fig. 1 An example of a conventional feedthrough.

An umbrella-shaped gasket made of insulating material, such as pyrophyllite, is inserted between a circular cone brass electrode (1-a) and the vessel closure (1-b). Each part is fixed by epoxy. Strength of the gasket material must be large enough to prevent blowout. As pressure increases, pyrophyllite is more strongly compressed and a large resistance force against blowout can be attained.

第1図と第2図に示す。以下、取り出し口などの図ではすべて図面の上部を容器内部とする。第2図は、Yukutake and Shimada (1995)の考案によるもので、高温・高圧での利用が可能である。これらの方法では電気的絶縁性能と強度性能に優れた物質であるパイロフィライト($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)をガスケットとして用いることが多い。上の二つの方法では圧力シールはガスケットの圧縮によって達成されている。容器内部の高圧の油はガスケットによって封じこめられており、ガスケット内部は容器内の高圧力と外部の大気圧との間の圧力勾配を保持している。ガスケット内部の圧力勾配を保持する力は、ガスケットと金属部とのまさつおよびガスケットのせん断に対する抗力であり、これらの力がガスケットの外部へのはみ出しを防いでいる。このため、容器内部の油圧が高くなるとガスケットと金属の接触面に加わる垂直応力を増加させ、金属部分とのまさつ力を高めるとともに、ガスケット内部のまさつ力も高めてせん断に対する抗力を大きくする必要がある。

第1図のタイプでは真鍮のコーン部分(1-a)が内圧に



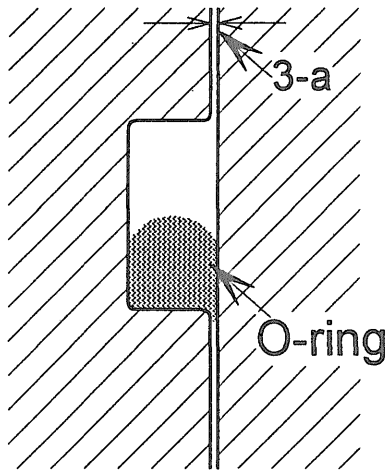
第2図 Yukutake and Shimada (1995)による高圧用リード線取り出し口。ガスケットとして使用したパイロフィライトをsteel pinで圧縮し、パイロフィライト内部を高圧にしてせん断強度、まさつ強度を増し、容器内部の高圧をシールする。

Fig. 2 A gasket-sealed lead wire for a high-temperature, high-pressure oil-medium vessel designed by Yukutake and Shimada (1995). Figure is modified from their original. Pyrophyllite is compressed through a steel pin by an external force (F), which induces high pressure inside the pyrophyllite. The shear strength of pyrophyllite and the friction force between the pyrophyllite and the metal then become high enough to prevent blowout.

よって押され、絶縁物質のガスケット内にせん断に対する抗力を発生させる機構となっている。また第2図のタイプではガスケットのパイロフィライトに容器の外側から鋼鉄ピンで圧縮力Fを与え、パイロフィライトのせん断に対する抗力を大きくして、容器内の圧力に耐えるようになっている。内圧(P)によってガスケットが飛び出す現象(blowout)を防ぐため、ガスケットの厚さや圧縮力(F)の大きさを決める必要があるが、Fの大きさはガスケットや周囲の金属の材質に依存する。このため、実際の設計にあたってはガスケットとして使う物質の性質をよく把握しておくことが重要である。

第1図の構造では狭いスペースに多数の電極を構成するのは容易ではない。また第2図は機構が複雑なため多数の電極を組み込んだり、同軸型の電極を構成するには不向きである。さらに、これらは破損した際の修理も面倒である。先に述べたような通常の岩石物性実験では、これらの方法による取り出し口は簡便とは言えず実用的でない。

通常の圧力シールではOリングが利用されている。Oリングは規格がJISで定められ、寸法・材質も各種のものが製造されているので、使用目的に適した製品を容易に入手できる。Oリングシールの原理は第3図に示すように、Oリング内部に発生する圧力差とOリングのはみ



第3図 O-リングによる圧力シールの原理。

O-リングのはみ出し部分が圧を支えることによってシールが得られる。必要な性能を得るには、O-リングのサイズに応じた適正な隙間にする必要がある。

Fig. 3 O-ring sealing mechanism.

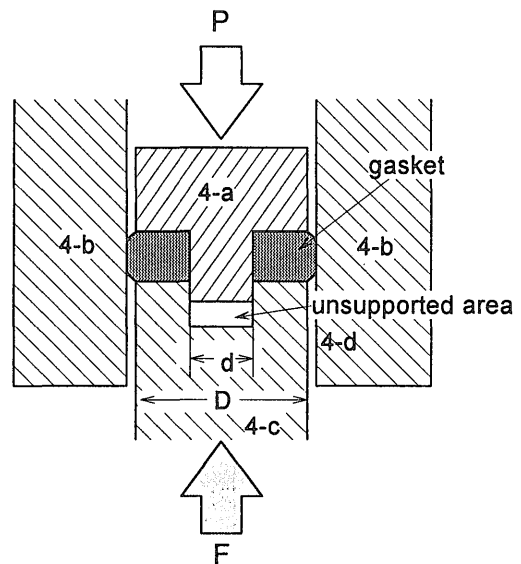
The seal can be made by squeezing the O-ring out to the gap (3-a). The optimum aperture of the gap depends on the O-ring size.

出しである(蔦田・黒田, 1969; 福長, 1979)。O-リングのつぶししろやはみ出しのための隙間(3-a)にはJIS規格で推奨された値があり、これに従えば容易に所定の耐圧が得られる。さらに、第4図に示すようなブリッジマンシールにO-リングを利用すれば、簡単に高い性能のシールが得られる。ブリッジマンシールの重要なポイントは非支持領域(unsupported area: 4-d)である。まず、あらかじめガスケットを圧縮しておけば容器内のシールが保たれる。圧力の上昇とともにガスケットが強く押しされ外側にはみ出そうとしてシリンダ(4-b)の壁に圧着され、シールはますます強固なものとなる。これは非支持領域が内圧による力を支えていないため、ピストン部(4-a)および非支持領域(4-d)の半径をそれぞれ D , d とすれば、ガスケットを圧縮する力は内圧の $D^2/(D^2-d^2)$ 倍に強められ、ガスケット内部の圧力が油圧より高くなるからである。

今回開発した取り出し口は同様の原理にもとづき、ガスケットにエポキシやパイロフィライトを使用せず、すべてO-リングをガスケットとしたブリッジマンシール機構によるガスケット自己圧縮型の多線用および同軸用の取り出し口である。

2.2 ブリッジマンシールによる多線用取り出し口と同軸用取り出し口の構成

O-リングには各種のゴムでできたものが用意されており、これらの中から絶縁性能および力学的・化学的耐久性に優れたものを選び出すことができる。例えばテ



第4図 ブリッジマン(Bridgman)シールの原理。

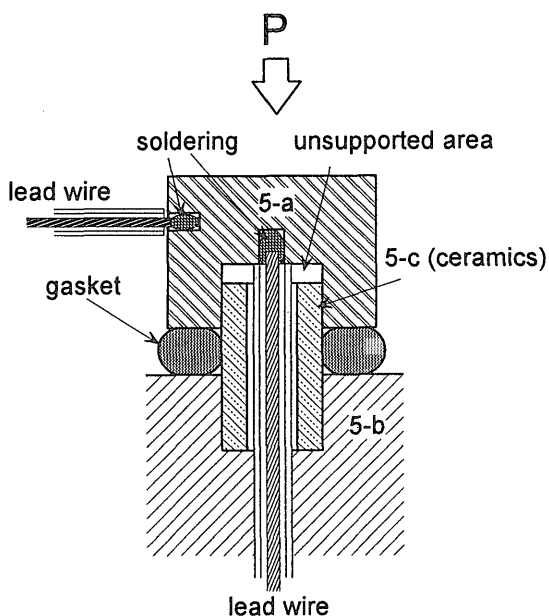
内部の油圧は軸方向の力となってvessel closure(4-a)を押すため、ガスケットを外側へはみ出させる。いっぽう、油はガスケットを押し戻して外へ出ようとする。ガスケットがシリンダの壁を押す圧着力のほうが、油が外へ出ようとする力より大きければ圧力はシールされる。非支持領域(unsupported area)に軸方向の力が加わらないため、ガスケットを潰して外へはみ出させようとする軸方向の力は常に油圧より大きく、圧力が上がるほどシールは強固になる。

Fig. 4 Mechanism of the Bridgman seal.

The pressure inside the vessel gives an axial force to the vessel closure (4-a), and the axial force squeezes the gasket. Because of the unsupported area (4-d), the internal stress on the gasket is always larger than the pressure inside the vessel. This results in stronger contact between the gasket and the cylinder (4-b) so that the seal becomes tighter as pressure increases.

フロンゴム製O-リングの良好な絶縁性を利用すれば、O-リングを挟む金属のいっぽうに電流を流しても、O-リングと接触するもういっぽうの金属部分との間で十分な電氣的絶縁を保つことができる。したがって、第5図のようにO-リングを挟んだ状態で導体となる金属部分(5-a)と台座の部分(5-b)とを重ね、中央部に二つの金属が接触しないよう絶縁用素材(5-c)を介在させれば、各金属部分は互いに絶縁される。金属部分(5-a)に導線を接続し、O-リングの内側を通して外部へ導線を引き出せばブリッジマンシールに基づいたシール機構を作ることができる。中央部の絶縁素材としては、十分な肉厚のセラミックス管を使用すれば必要な力学強度が得られ、O-リングが受ける内側への力を支えることができる。

あらかじめ5-aと5-bに軸方向の圧力を与えてO-リングを圧縮しておけば、5-a内部の非支持領域のため、圧力の上昇とともにシールは強固になる。いっぽう、中央部



第5図 金属とO-リングの重ね合わせによって電極とシールを構成する方法。電極(5-a)をあらかじめ軸方向の力によってO-リングと圧着させておけば、電極内部の非支持領域によって圧力の上昇に伴いガスケットがより強く圧縮される。
 Fig. 5 A method to construct a self-sealing mechanism by stacking metal electrodes and O-rings. When an electrode (5-a) is initially compressed, the seal can be obtained. The unsupported area produces an axial stress larger than the oil pressure so that Bridgman's self-sealing mechanism is obtained as pressure increases.

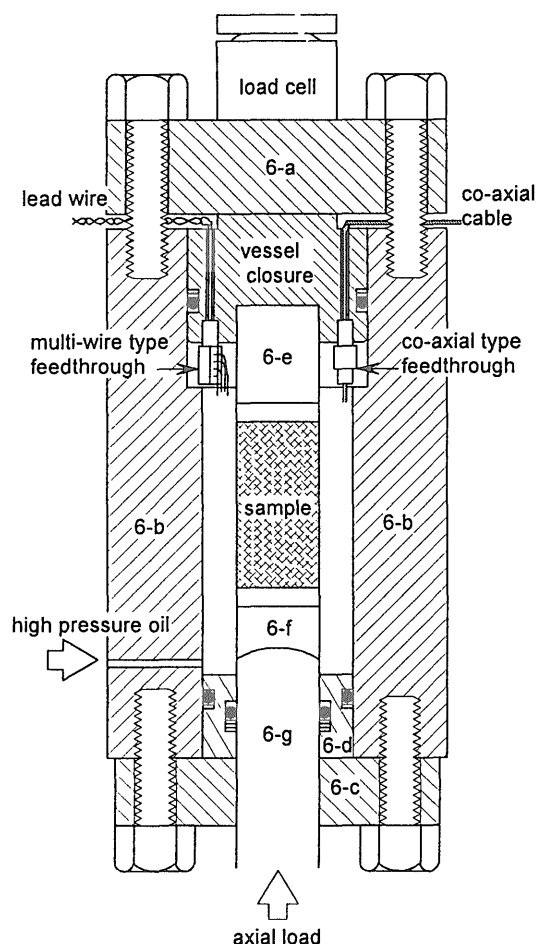
の絶縁素材がなくとも内側への力を支える部分をどちらかいはぼうの金属で作し、金属間に絶縁用のテフロン等を挟めば同様の取り出し口を構成することができる。ここで開発した取り出し口では中央部の絶縁管をジルコニアパイプにした場合、および金属だけの構成でテフロンシートを挟み込んだ場合の、二つの方法が利用されている。

3. 同軸電極と多線型電極の構成

3.1 多線型電極

地質調査所では、第6図のような圧力容器を三軸下での岩石の変形破壊実験に用いている。油を容器内部に閉じこめるための栓(vessel closure)は岩石に軸圧を加えるためのエンドブロックの役割も持つ。軸圧は図の下方より6-f、6-gのピストンの押し上げで加えられる。

vessel closureに取り出し口を設置すれば、試料とvessel closureとを一体のものとして扱うことができるため、リード線や同軸線のセンサーへの結線は、vessel closureを取り出してここに試料をセットした状態で簡単に行うことができる。結線の終わった試料を圧力容器内にセットするだけで、岩石変形時のひずみやAE波形あるい

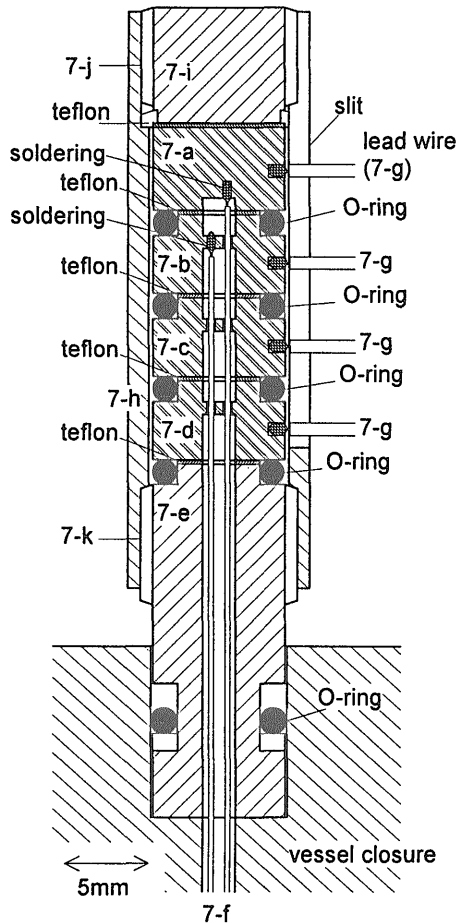


第6図 AE実験で利用されている圧力容器の概略。

上下にあるふたつのvessel closureで容器内部の圧力を保持する。下部のvessel closureは中央部に軸圧を加えるためのピストンを通すようになっている。上部のvessel closureは軸圧を支えるとともに信号線取り出しのための電極の取り付け場所ともなっている。上部のvessel closureをさらに保持用のプレート(6-a)で押さえる。プレート(6-a、6-c)は6本のネジで締め付けられ圧力容器のシリンダ部分と一体となっている。プレート(6-a)とシリンダ(6-b)との隙間からリード線や同軸ケーブルを取り出す。

Fig. 6 A pressure vessel used for triaxial experiments.

Oil (pressure medium) is sealed by the upper and the lower vessel closures. A through-hole in the lower vessel closure allows insertion of a piston (6-g) for the axial load. Feedthroughs are attached to the upper vessel closure which supports the piston (6-e). The upper and lower vessel closures are supported by plates (6-a and 6-c) which are fixed by bolts. Lead wires for strain gauges and coaxial cables for waveforms are fed through the gap between the plate (6-a) and the cylinder (6-b).



第7図 多線型取り出し口。

タンデム状に重ねられた真鍮電極をネジ(7-j, 7-k)で押しあておけばシールが得られる。電極の間に挟みこまれたドーナツ状テフロンはOリングより大きいので、軸方向の力はOリングで支えられる。このため圧力の上昇に伴いOリングはより強く押しあえられることになる。

Fig. 7 A multi-wire type feedthrough.

Four brass electrodes are stacked to construct a tandem assembly. An initial seal can be obtained by pushing the tandem assembly in the axial direction by tightening screws 7-j and 7-k. The O-rings are more tightly squeezed as the pressure increases, because the compressibility of teflon is larger than that of the O-ring and a donut-shaped area of the teflon seat acts as an unsupported area.

は弾性波速度測定のための波形などを簡単に容器外部に取り出すことができる。この方法によって、AE実験など多数の導線・同軸線を必要とする実験を簡便に行うことができる。

第7図は低周波信号用多線式取り出し口の構造である。これによってvessel closureのひとつの孔から4本のリード線を取り出すことができる。電極は7-aから7-dまでの4個の真鍮ブロックの重ねあわせで構成され、これらがステンレス製の台座(7-e)に取り付けられている。台

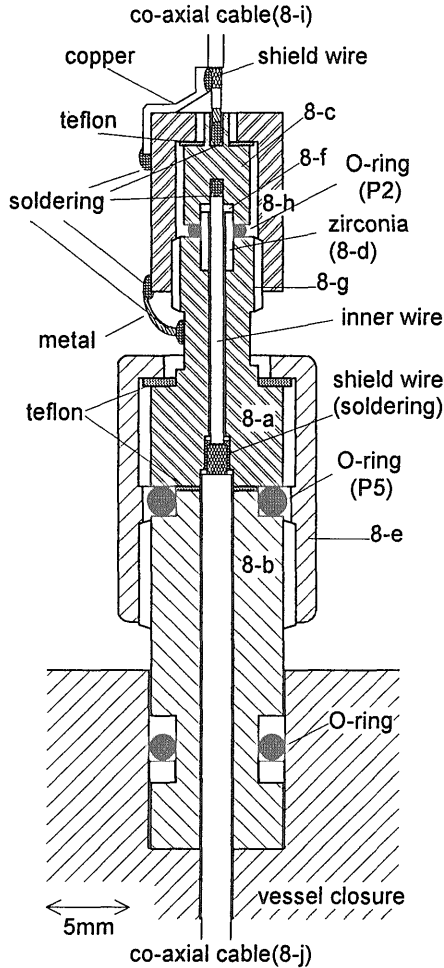
座までを含め電極を一体のものとして作成すれば、vessel closureへの取り付けは引き出し用導線(7-f)と台座(7-e)を孔に差し込むだけでよい。台座にはバックアップリング付きのOリングが取り付けられ、200MPaまでの圧力を保持することができる。

電極を構成する各真鍮ブロック(7-a,b,c,d)はシール用Oリングとテフロンシートによってそれぞれが絶縁されている。真鍮ブロックには圧力容器内部と外部に向かってそれぞれ被覆導線(7-f, 7-g)がはんだ付けされており、これらの導線をそれぞれひずみゲージと計測器に結線すればよい。外側のカラー(7-h)にはスリットがあり、スリットの間隙から導線を圧力容器内部へ引き込む。第7図の上部の押しあえネジ(7-i)と真鍮との間にはテフロンが挟まれており絶縁が保たれる。押しあえネジと台座のネジ(7-j, 7-k)を締めつけて台座および各真鍮ブロック間のOリングを圧縮する。これによってそれぞれの真鍮ブロックの間あるいは台座との間のシールが保たれ、油はそれぞれの隙間に侵入することはない。油圧が上昇すれば油はOリングと真鍮ブロックまたは台座との隙間に入りこもうとするが、油が隙間に入り込む力よりOリングと金属を圧着させる力のほうが大きいのでシールを保つことができる。この構造では、真鍮ブロックを軸方向に押す力は、各真鍮ブロックの間のOリングとテフロンシートで支えられている。あらかじめ、各真鍮ブロック内側の凸部の高さを、最高圧力でのOリング圧縮時の厚さより少し低めに設計しておく。最初に押しあえネジと台座のネジで各Oリングを締めつける。油圧が上昇するとOリングが潰されテフロンも圧縮されるが、テフロンの圧縮率はOリングより大きく、また塑性変形する。ここで圧力を下げれば塑性変形したテフロンシートの厚さは回復することはない。こうして、テフロンが挟まれた部分の高さはOリングより少し低くなり隙間が残るため、ブリッジマンシールにおける非支持領域の役割を果たすことになる。非支持領域を形成する隙間は十分に薄いので、Oリングがこの隙間に入り込みOリング自身が破損することもない。テフロンは絶縁性能に優れているので、塑性変形で厚さが薄くなっても各電極間の絶縁を十分保つことができる。

以上のようにして、圧力上昇時の自己締め付け機構を持った多線式取り出し口が構成できる。

3.2 同軸型電極

上で述べたと同様の原理で第8図に示すような同軸用取り出し口を構成することができる。同軸用取り出し口ではシールド部分と台座との間を電氣的に絶縁する。AE信号など高周波信号の圧力容器外部への取り出しにあたってノイズの低い信号を得るためには、個々の同軸線のシールド部分を電氣的に絶縁し互いに独立させることが必要である。



第8図 同軸型電極の構成。

外側のシールド部分が下部の真鍮にはんだ付けされており、内側の電線は上部の真鍮にはんだ付けされる。上部と下部とはOリングを介して絶縁が保たれており、それぞれはネジによってあらかじめ圧着されている。

Fig. 8 A co-axial type feedthrough.

The outer shield wire of the co-axial cable (8-j:RG-195/U) is attached to the brass column (8-a) by soldering. Initial axial forces for squeezing two O-rings (P5 and P2) are given by tightening the screws of the caps, 8-e and 8-h.

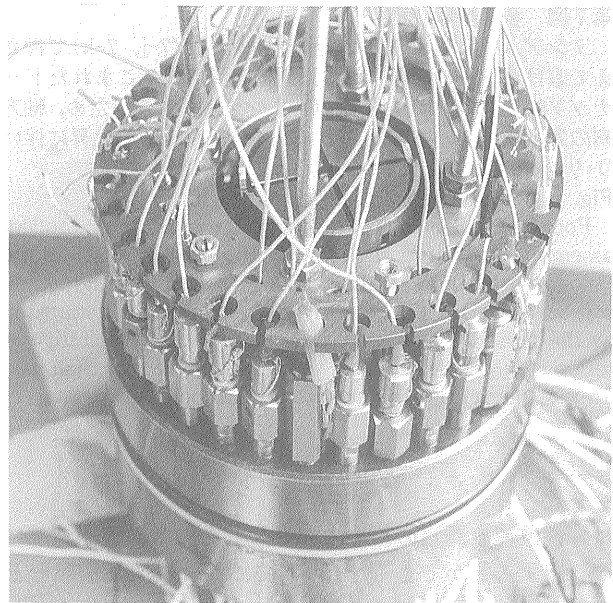
このため、多線式と同様の方法でシールド線の結合された真鍮ブロック(8-a)と台座(8-b)との間を電氣的に絶縁する。シールド線(外部導線)が結線された真鍮ブロックと中心導線が結線された真鍮ブロック(8-c)のそれぞれに孔をあけ内部にジルコニア管(8-d)が入るようにする。シールド線に接続された真鍮ブロック(8-a)と中心導線に接続された真鍮ブロック(8-c)との間はジルコニア管とOリングで絶縁されている。孔全体の長さはジルコニア管の長さより少し大きくして隙間(8-f)をつくる。この隙間のためジルコニア管には軸方向の力が加わらず非支持領域ができる。ジルコニア管の外側にOリングを置き、あらかじめ外側のネジ(8-g)を締めてO-

リングを圧縮しておく。外側の締めつけ用キャップ(8-h)ネジと内側の真鍮ブロック(8-c)との間はテフロンシートで絶縁する。油圧が上昇すれば軸方向の力によってOリングが圧縮される。非支持領域(8-f)があるため軸方向の力はOリングだけに加わり、圧力の上昇とともにシールはより強固になる。台座とシールド部分との間の絶縁とシールは先に述べた多線型と同様の原理が使用されており、金属どうしをテフロンとOリングで絶縁しシールしている。

4. 実用化の事例と応用

以上のように、エポキシを用いずOリングによるシールだけで多線あるいは同軸の取り出し口を構成することができる。この取り出し口は常温下で200MPaまでの繰り返し使用が可能で、すでにいくつかの装置に組み込まれてその性能は実証済みである。取り出し口の組み立てはネジとはんだ付けだけなので修理も可能である。使用部品の複雑さから1本あたりの単価は高くなるが、高い信頼性と耐久性を考慮すれば、エポキシ等を使った従来の方式よりも利点は大きい。

台座のvessel closureへの取り付けを着脱式にすることで、容易に取り出し口を取り替えることができ、実験の目的に応じた電極構成を簡単に作る事ができる。第



第9図 多線型電極と同軸型電極の使用例。電極の信頼性の高さにより、多数の信号線を取り出すことが可能となる。

Fig. 9 A photo showing a vessel closure for the pressure vessel shown in Figure 6. Forty-seven holes are used for installing feedthroughs. During triaxial experiments on rock samples, we can obtain many channels of strain and AE waveform data.

9 図はAE実験に用いられるvessel closureとそこに取り付けられた取り出し口の例である。vessel closureには48個の孔があり、そのうち47個に電極や間隙圧用流体の出入り口を取り付けることができる。図は取り出し口を組み込んだ様子を示しており、多チャンネルでのAE計測、ひずみ計測が可能である。個々の取り出し口は高い信頼性を持つため、多数の電気的信号を扱う実験が可能となる。

以上のように、ブリッジマンシールの原理に基づけばさまざまなタイプの電極の構成が可能である。同様の手法でガス圧容器にも適用可能な取り出し口を設計することもできる。

ここに示した原理に基づく取り出し口の他の構成例は、公開特許公報平8-201124「高圧容器用電極」に示されている。本方式による取り出し口は日本国特許取得済みである(特許第2636195号,平成9年4月25日,特許権者:工業技術院長,発明者:西澤 修)。

謝辞 ここに記載された取り出し口の開発は主に工業技術院特別研究「地熱技術等検証調査・断裂貯留層探査法開発—岩石物性・断裂モデル」で行われた。開発の初期段階では、ここに記載された構造以外のさまざまなタイプが試作されたが、とくに工業技術院特別研究「活断層等による地震発生ポテンシャル評価の研究・大地震の震源核形成過程に関する実験的研究」によって試作されたいくつかのプロトタイプは、今回の取り出し口試作にとっての重要な基礎となった。地震地質部地震物性研究室楠瀬勤一郎室長,佐藤隆司技官にはプロトタイプの試作を援助していただいた。浦辺徹郎首席研究官には原稿の査読をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

付 録

製作における注意点など

ここでは実際の製作の技法や注意点などを述べるが、これらは筆者の経験に基づくものであり、製作および実用化にあたっては他にも有効な手法があると思われる。

最初に注意すべき点は、O-リングの選択に関するものである。多線型,同軸型とも電極間の絶縁にO-リングが使用されているので、O-リングは絶縁性能の高いものを選定しなければならない。O-リングの中には性能向上のためにカーボンを配合したものもあり、これらは導電性を持つ場合があるので注意が必要である。また、耐油性も重要な点で、油圧容器内での長時間使用においても油と化学反応することなく所与の力学的性質を維持できなければならない。後で述べるように我々の取り出し口の製造過程では、O-リングが瞬間的に200°C程度の高温状態になることがあり、この程度の温度でも劣化しない耐高温性も必要である。以上の点を考慮して、我々はフッ素ゴムO-リングを用いている。フッ素ゴムはバイトン

(Viton: Du Pont社)など、各メーカー固有の商品名で呼ばれることもある(田中,1996)。

ここで示した設計では導線や同軸ケーブルは真鍮の電極用ブロックにはんだ付けされている。これは、油の中でも電気的接触を確実に維持するためである。はんだ付けは、真鍮部分を炎で熱しはんだの付着した導線や同軸線を差し込んで行っている。第8図では圧力容器内部の同軸ケーブル(8-i)には外径1.78mmの潤工社製シールド付きPTFE電線AT01H070を、容器外に引き出す同軸ケーブル(8-j)にはテフロン同軸ケーブルRG-195/Uを用いている。第8図8-cの真鍮部を同軸ケーブルRG-195/Uの芯線にはんだ付けする際、O-リングは高温の8-cに直接接触することになるが、フッ素ゴムO-リングを用いればこうした手順の作業も可能である。また、第7図の電極用真鍮7-a, b, c, dは、外側の7-hとの間の絶縁を確実にするため、これらブロックの側面を熱収縮チューブで覆っている。実際の製作にあたってはここで示した方法以外の方法も可能であり、原理をふまえた上で設計・製作の細部を変更すればよい。

なお、ここでとりあげた製品名等はそれぞれの社の商標であり、試作の便を図るために示したが、筆者はこれらの製品を推奨するものではなく、同等の製品でも使用可能である。さらに圧媒体や使用圧力、製作手順の変更などに応じて、異なる製品を使用する場合もありうる。

文 献

- Bridgman, P. W. (1958) The physics of high pressure, G. Bells and Sons, Ltd., London, 445 p.
- 福長 脩(1979) 静的超高压発生法。化学総説 no. 22, 9-30.
- 蒔田 董・黒岩玲子(1969) 基礎実験技術。高压実験技術とその応用, 日本材料学会高压力部門委員編, 42, 391-403.
- Masuda, K., Nishizawa, O., Kusunose, K., Satoh, T., Takahashi, M. and Kranz, R. L. (1990) Positive feedback fracture process induced by nonuniform high-pressure water flow in dilatant granite. *J. Geophys. Res.*, **95**, 21583-21592.
- Masuda, K., Nishizawa, O. Kusunose, K. and Satoh, T. (1993) Laboratory study of effects of in situ stress and strength on fluid-induced seismicity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **30**, 1-10.
- 増田幸治・Jouniaux, L.・西澤 修・雷 興林・劉力強・馬 文濤・佐藤隆司・楠瀬勤一郎(1997) X線CTとAE震源分布による破壊面の観察。地

調月報 48, 469-473 (本号).

薛 自求・西澤 修・桑原保人・鈴木茂之(1996)封
圧下のP波速度変化とひずみ変化から推定され
た湯坪地熱コア試料の割れ目の性状. 地調月報
47, 599-617.

澤岡 昭(1992) 流体圧の発生と圧力測定. 第4版
実験化学講座 4, 熱・圧力, 第11章 高压下での
実験. 丸善 534p.

田中年男(1996) フッ素ゴムを取り巻く現状と技

術課題. 工業材料, 44, 26-36.

Yukutake, H. and Shimada, M. (1995) A novel
triaxial testing apparatus for deformation,
fracture and frictional sliding of rocks at
high pressure and temperature. *Int. J. Rock
Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 32, 181-
184.

(受付: 1997年6月10日; 受理: 1997年8月4日)