

## 岩槻地殻活動観測装置信号ケーブル接続部水密構造の開発

高橋 博\*・木下 舜\*\*・山本英二\*・中村武英†・松本地弘††・倉橋敏夫††  
国立防災科学技術センター

### On Water Sealing at the Coupler of Signal Cable with Sensor Vessel for Use in Deep Borehole of Iwatsuki Crustal Activities Observatory

H. Takahashi, S. Kinoshita, and E. Yamamoto,  
*National Research Center for Disaster Prevention*  
and  
T. Nakamura, C. Matsumoto, and T. Kurahashi  
*Ocean Cable Co, Ltd.*

#### Abstract

At the bottom of the deep borehole of Iwatsuki observatory, which has a depth of 3510m and is filled with water, the pressure reaches 350 atm. pressure and the temperature reaches about 90°C. So, it is necessary to protect the sensor from infiltration of the water particularly at the coupling portion where the signal cable penetrates through the vessel.

There are two methods to protect from infiltration of high pressure water: hermetic seal and taper mold. The former has two defects: the rubber in use is deteriorated by immersion in high temperature and high pressure water, and conglutination of the rubber and the insulator of signal cable is practically impossible. But the latter has no defects.

The signal cable consists of armed wires made of stainless steel, and nineteen cores. Each core consists of a conductor made of copper and an insulator made of Teflon FEP.

The taper mold consists of a mold body made of teflon EEP and a core mold made by conglutinating nineteen cores by partial melting. The upper portion of the mold body and the neck portion of the core mold were conglutinated by partial melting. Taper molds used to get cracked in use, and this defect was overcome after a series of improvements.

#### まえがき

首都東京は、江戸以来その直下で発生する地震により度々被害を受けているので(高橋ら, 1975), この型の地震の予知の実用化の為に、当センターは各種じょう乱の少ない関東平野の基盤中で、その前駆現象を観測することとなった。その最初の施設として埼玉県岩槻市に

---

\* 第2研究部 † 当時日本大洋海底電線株式会社  
\*\* 当時第2研究部 †† 日本大洋海底電線株式会社

深さ 3510 m の地殻活動観測井を作り、その井底で微小地震や地殻傾斜の高感度観測を行うこととなった(昭和 48 年度観測開始)。このような深層での常時観測は、これまでに行われたことがないので、作井法を初め観測装置、信号ケーブル及び、その捲上げ装置などそのほとんどを手さぐりで新たに開発しなければならなかった。それらの中で重要なものの一つに観測井には防蝕剤を含んだ水が充たされているため、350 気圧、約 100°C (計画時推定 100°C 弱、実測は 86°C) の高温高压下で信号ケーブルが観測装置の収納耐圧容器を貫通する部分の水密を完全に確保する方法の開発があった。この水密構造の開発は特に困難をきわめたものの一つで、幾度も改良に改良を重ね、ようやく実用に供しうるものが得られるに至ったので、ここにその開発・改良の経過について報告する。

### 1. 信号ケーブル接続部の概要

観測装置(図 1)は、高感度の地震計・傾斜計などの検出器と、方位計や温度計など検出器の井底設置状態を知る為の測器、耐圧容器固定器など観測装置の井底設置機器、CCL や着底検出器のような井底設置作業に必要な機器などの補器、及びこれら地中機器のデータの伝送とその遠隔操作、及び電源供給を行う搬送装置から成り、それらは外径 140 mm、内径 90 mm、長さ約 9 m (当初、現在は約 10 m) のステンレス製の耐圧容器内に収納されている。信号ケーブルは径 1.0 mm の銀メッキ軟銅線を導体とし、これをテフロン(FEP)で、1.0 mm 被覆したものを中心に 1 心、内層に 6 心、外層に 12 心配置し、それらの線間に座床としてガラス繊維糸、外側にガラス繊維布(第 2 井の下総井ではテフロン・テープ、第 3 井の府中井ではテフロン繊維布)を用い、それらの全体をステンレス線で 2 重外装したものである(図 2 写真 1)。その外径は約 26 mm、重量は空中 2.3 t/km 水中 2.0 t/km、引張破断強度は 28 t である。この信号ケーブルは、観測

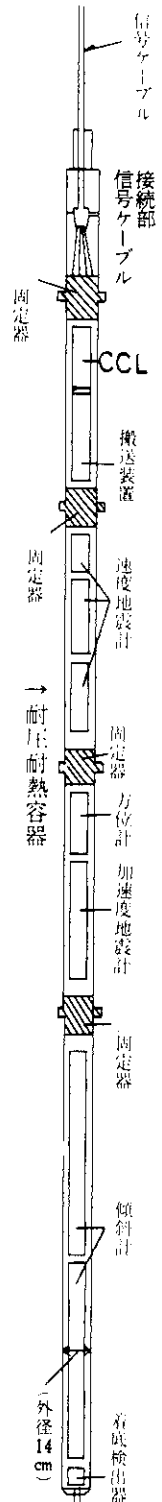


図 1 観測装置の概要

速度型地震計 (3 成分、倍率 100 万倍、極微小・微小地震の観測)、加速度地震計 (3 成分、観測範囲: 5 ミリガル~30 ガル、微小・小地震の観測、地震動の観測)、傾斜計 (直交 2 成分、感度: 0.02 秒、地殻傾斜変動の観測)、温度計 (2 組、感度: 0.1 度、孔底の温度の測定)、方位測定器 (感度: 5 度、地震計、傾斜計の設置方位の測定)、搬送装置 (多重 FM または PCM、データの伝送、材器の作動・検定のコントロール・安定電源の供給)、信号ケーブル接続部 (信号ケーブルと耐圧容器の給合部)、C.C.L. (ケーシングカラー検出装置、昇降中の深度の測定)、着底検出器 (観測装置の着底の検出)、固定器 (観測装置のケーシング固定)、耐圧耐熱容器 (外径 140 mm・長さ 9~10 m、各種機器計器を収納し、230~350 気圧、65~86°C の井内水から水密の確保)

装置と地上間の信号の送受信及び地中電力の供給に用いるだけでなく、観測装置の引き上げ降下作業、観測井の水を伝播するノイズを取り除くための吸振ケージの取り付けなど、各種の役割りを受持っている。観測装置の構成と構造、信号ケーブルの構造が定まるに従い、この両者を接続する方法とその構造(信号ケーブル接続部)をどのようにするかが問題となった。その主な課題は観測装置を信号ケーブルに機械的に確実に接続する方法と、その電気的特性を損なうことなく、かつ水密性を保って信号ケーブルを耐圧容器内の信号線と接続する方法を開発することにあった。まず、機械的接続については、その固定が不確実であると観測装置の引き上げ又は降下中、同装置が落下し、その使用が不能になるだけでなく、同装置を観測井底で支えるブリッジ上端が破壊されるなど甚大な損害を生ずる。これは油井用検層機の実績を検討の結果、帝国石油株式会社検層課の助言を得て、信号ケーブル外装線を円錐形のくさびで固定すればよいことがわかった。すなわち、信号ケーブル接続部の最上端、信号ケーブル外装線固定部(図3)がそれに当たる。なお、何らかの原因で耐圧容器の引上げが困難となった時、無理に信号ケーブルを引っぱると、精度よく仕上げた非磁気ケーシングに損傷を与え、万一信号ケーブルが破断すると、その反動で信号ケーブルが管内に強くくい込み、観測装置は落下し、観測井までも修復不能の重大事故となる。そこで耐圧容器の引上げ困難となった時、外装線固定部の直下で約7tの張力で同容器を切り離し、まず、信号ケーブルを地上に回収し、その後巻き上げ塔などの地上施設を取り除き、堀削機を据えつけ、観測井内の障害の除去作業を行ない、ついでロッド先端に耐圧容器上端部、外周にくい込む金具をつけて降し、耐圧容器を地表に回収する方法をとることに決めた。

そのようなことを行なうために必要なこととしては、所定引っ張り強度で信号ケーブル外装線固定部の下端が切り離れるとともに、耐圧容器内の信号線が器外に飛び出さないこと、及び信号線接続部の水密が破壊されないことなどがある。その理由の第一は、信号線が耐圧

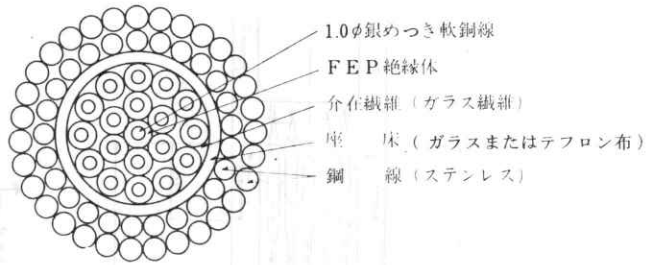


図2 信号ケーブルの断面図

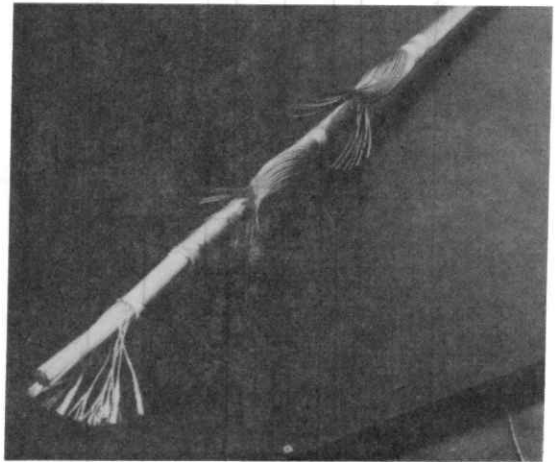


写真1 信号ケーブルの構造(左下より、19心FEP被覆線、線間座床材、座床材、外装線内層、同外層；府中観測井用)

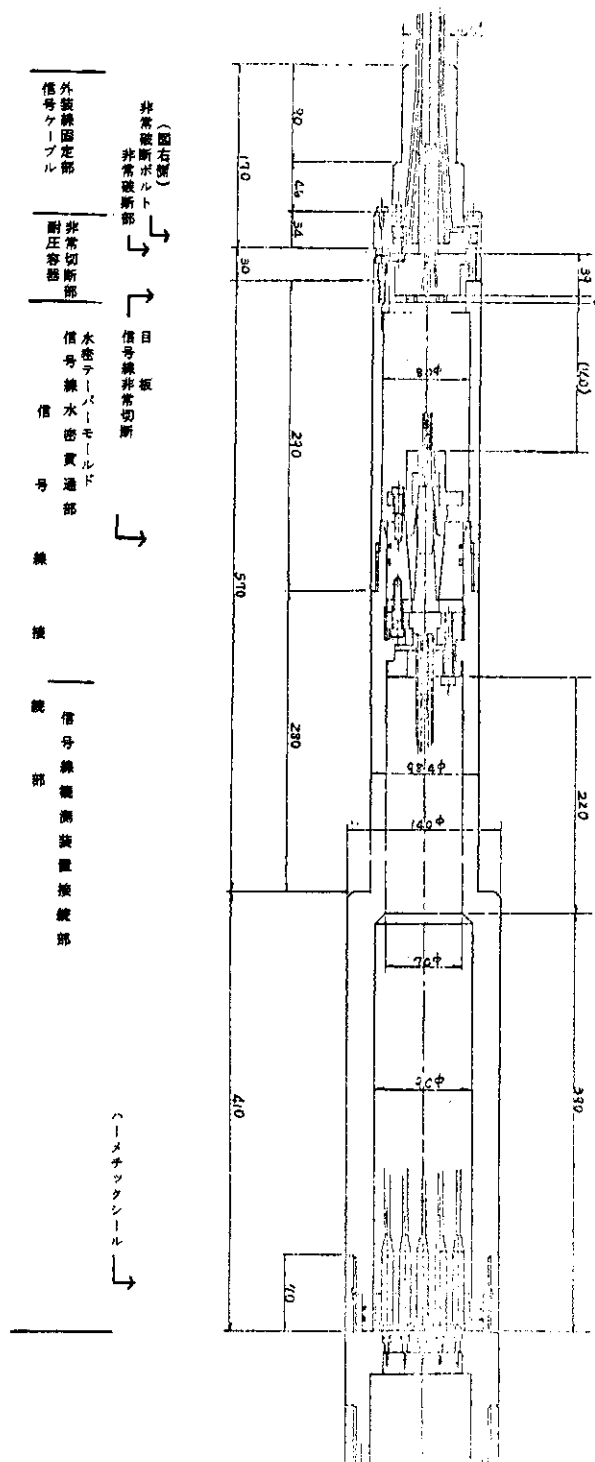


図3 信号ケーブル接続部構造図

容器を飛び出すと、その絶縁用テフロンや銅線が回収用金具を耐圧容器外周に食い込ませる際の障害になること、それらの切削片が井内水中に浮遊し、送水や観測装置引き上げの抵抗となるからである。その第二は、水密部が破壊されると高圧の水が観測装置内に侵入し、内部機器がすべて破壊されてしまうからである。以上の要求を満たすため、外装線固定部の下端は約7tで破断する破断ボルト4本でそれ以下と接続されており、信号線は、その直下の信号線非常切断目板を通り、その下で結び目が作られている。この両部を耐圧容器非常切断部と呼ぶ。その下が信号線接続部で、この部分は更に信号線水密貫通部(以下水密貫通部と略称する)と、その下の信号線観測装置接続部にわかれる。この水密貫通部は信号線が耐圧容器を貫通する所で、その貫通に際し、その電気的特性を失うことなく、観測井を充たす100℃350気圧の高温高圧水の侵入から耐圧容器を守ることがその役割である。貫通した信号線はその下の信号線観測装置接続部で耐圧容器内の電気系統と接続される。そのものは地熱用検層装置に用いている高温高圧用ハーメチック・シール器具に若干の改良を施したものである。従って、万一水密貫通部から水が入った場合、ここで耐圧容器内への水の侵入を阻止することが出来る。地熱(或は油井)検層の場合、高温高圧水下に入っている時間がせいぜい数時間であるが、深層観測井の場合は数年という長年月連続使用されること、万一水密が破壊されると耐圧容器内機器だけでなく、信号ケーブルも浸水して、使用不能となることなどから、信号線接続部を以上のような構造にした。

すなわち、その上部は信号線及び耐圧容器の高圧水に対する水密の確保と、信号線の電気的性状を耐圧容器内に損なうことなく伝える部分であり、その下部は信号線と耐圧容器内電気系統との接続端子の役割を果たすと共に、万一の場合、耐圧容器内の水密を確保出来るようにした。

## 2. 信号ケーブル水密貫通部の水密構造開発の基本構想

高圧水で、機器壁面を電線が貫通する部分には図4に例示したようなハーメチックシールの用いられることが多い。この場合、水密はハーメチックシール部が受持っている。すなわち図4に見る外側のゴム状弾性体は周囲の高圧水によって強く圧迫されるため、その内側に高圧水が侵入出来ず、導体と機器外の水とが空間的に離され、電気的に絶縁される。しかし、岩槻のような深層観測井では周囲の水温が100℃に近いと推定され(実際は86℃であった)、長期間使用しているとゴムが劣化して弾性を失い、水密を確保出来なくなると考えられる。また、FEPとゴムの接続も出来ない。ところで、万一水密性が破壊されると耐圧容器内の機器を破壊し、場合によっては信号線自体も性能を破壊される恐れがある。そこで、信号線(以下心線と呼ぶ)の絶縁体と同じ材質(FEP)でテーパ型モールド(図5)を作り、水密を得る基本構想を建てた。この方法は、水圧の増加と共にテーパ型モールドの外周と支持金

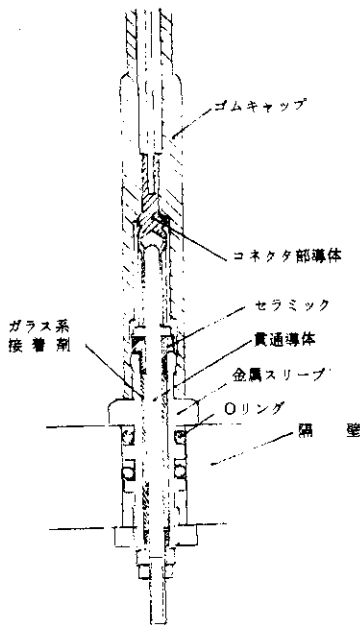


図4  
ハーメチックシールの例

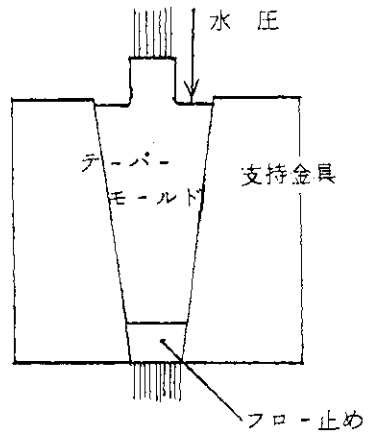


図5 水密テーパーモールドの構造図

具の内面との間の圧力が必然的に増加し、遮水効果を高める方法で、ポリエチレンケーブルでは既に実用経験のあるものである。その製作に当たっての、主要点は次のようである。すなわち、モールドのFEPは各心線の絶縁体FEPと完全に融着させ、また、心線間の隙間にもFEPを充填して一体とし、漏水を完全に防ぐ。さらに、支持金具の下部にはFEPモールドが高い水圧によって抜けることを防ぐため、フロー止めを設ける。なお、支持金具と耐圧容器の水密はOリングによって行なう。

### 3. 水密モールドの開発経過

上記のような水密モールドがたやすく開発出来るとは当初から考えなかった。この部分は地下の観測系の急所ともいべき所で、この部分の失敗は計測-搬送-信号ケーブル系各部の開発の努力を無に帰することとなるので、着手当時より真剣な努力を重ねたが、下記にみるように実用品を得るまで約5年の歳月を要した。

以下に順を追ってその経過を述べる。

#### 3. 1 単体成形水密モールド

まず、前項の基本構想どおり全体を一度に成型することを試みたが、次のような問題点があり、うまく行かなかった。

- ① モールドするFEPが心線の隙間を完全に充填せず、隙間が残り、漏水の恐れがある。

② 成型後、常温まで冷却する途中で冷却直後に亀裂が発生する。

まず、①の欠陥は成型時の材料温度を高くすれば完全に充填され、一体に融着する。しかし、心線絶縁体に比較してモールドのFEPの量が著しく多い

ため、熱容量の大きいFEPが一体になるまで高温で成型すると、心線の絶縁体全体がとけ、導体が移動し、心線間の短路が起こる。事実、そのような事が発生した。

次に、②の欠陥は(表1)

- a. FEPは融点が高く、成型温度も300°~310℃と高温であるので、成型後、全体が常温に冷えるまで水密モールド内の温度分布にかなりの不均一が生じ、かつその収縮量も大きい内部に残留応力が生ずる。
  - b. モールドが比較的大きく、その中心部に銅線からの放熱があり、冷却速度のムラが生じ、モールド内に局部的に大きな熱残留歪が発生する。
- これらにより亀裂が生じたと考えられた。

以上の考察から、①②の欠陥は一回に成型する量を少なくすることにより解決できると思われた。

### 3. 2 E型水密モールド

図6.1に示すような構造で、モールド各部の成型量が少なく、残留歪の小さいものを試作した。この構造のものは心線19心をまとめて一体化した19心モールドと、テーパーモールドを別々に成型し(写真2)、これを組合せて一部融着し、心線の隙間にはエポキシ樹脂を充填した。この型はエポキシ充填をしたので、E型と呼ぶ。このE型水密モールドは

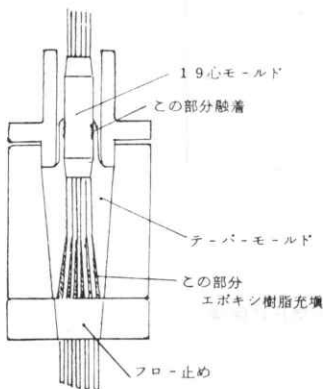


図6.1 E型水密モールド構造断面図

表1 水密モールドの材料の物理的性質

	テフロンFEP	銅
線膨張係数	$10 \times 10^{-5}$	$17 \times 10^{-6}$
熱伝導率	0.22	332
比熱cal/°C·g	0.28	0.0915
密度 g/cm <sup>3</sup>	2.15	8.96
熱容量cal/°C, cm <sup>3</sup>	0.60	0.82

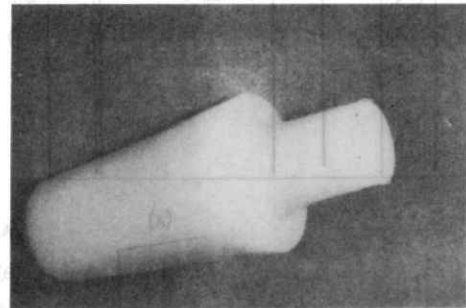
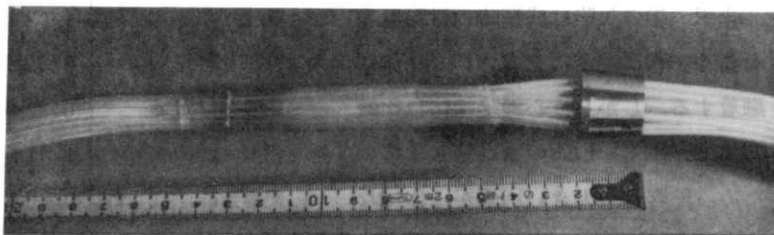


写真2 A テーパーモールド

製造直後の試験では 90℃、360 kg/cm<sup>2</sup> の高温⾼圧に耐え、又 90℃、360 kg/cm<sup>2</sup> と常温常圧の間の環境変化の試験(以下、高温⾼圧サイクル試験と呼ぶ。図 6.2)にも耐えたが、製⽬後

写真 2

B 19心モールド



月	日	工程	摘要	月	日	工程	摘要
12	15			1	8		端末記号 E
	16		端末記号 B		9		
	17		サイクルテスト		10		
	18			11		連続高温⾼圧テスト	
	19			12			
	20			13			
	21			14			
	22				15		
	23				16		
	24				17		
	25		端末記号 E		18		
	26		サイクルテスト		19		
	27			20			
	28			21			
	29			22			
	30			23			
	31				24		
	1				25		
	2		端末記号 E		26		
	3			27			
	4			28		連続高温⾼圧テスト	
	5			29			
	6			30			
	7				31		

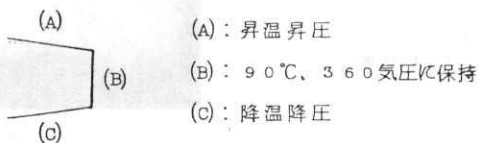


図 6.2 E型水密モールド高温⾼圧サイクル試験条件



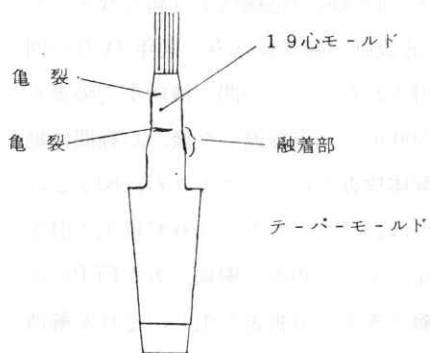


図 6. 3 E型水密モールド亀裂発生状況

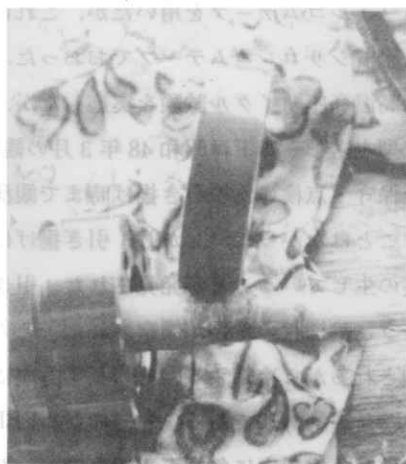


写真 3 E型水密モールドとその亀裂

約2カ月放置したところ19心モールドとテーパ-モールドの融着部に亀裂を生じた(図6.3, 写真3), その原因は, 融着時に部分的に再加熱されるため, 残留歪が増加し亀裂になったと推定された.

### 3. 3 T型水密モールド

E型水密モールドで19心モールドとテーパ-モールドの熱融着部に亀裂が発生したことから, 熱融着の代りに自己融着テープで両者を接合させたものがT型水密モールド(図7.1)である.

自己融着テープとしては融着性及び耐水性などに優れ

自己融着テープとしては融着性及び耐水性などに優れ

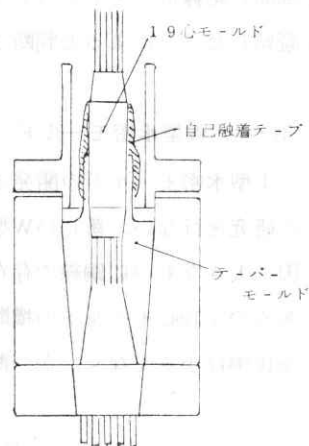
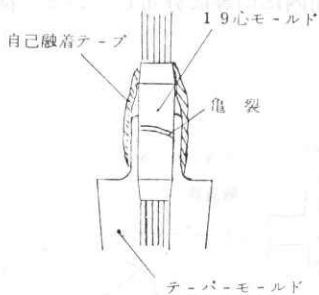
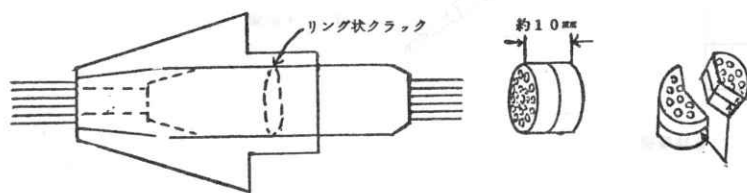


図 7. 1 T型水密モールド構造断面図

図 7. 2

A. T型水密モールド亀裂発生状況



B. 同亀裂切り取り調査結果

ているブチルゴムテープを用いたが、これは耐熱性に劣るので、その上を耐熱性に優れている自己融着シリコンゴムテープでおおった。これを数箇試作し、E型水密モールドの場合と同様の高温高压サイクル試験を実施したが、亀裂の発生や心線間の絶縁低下は起らなかった。このT型水密モールドは昭和48年3月の観測装置の井底設置の際に組込み、同年11月の同装置の保守・点検の為の引き揚げ時まで観測井底で使用されたが、この間、機能上の障害を起こすことはなかった。しかし、引き揚げに際し深度500mで一夜経過した後、心線間に絶縁不良の生じていることが発見された。引き揚げ後、解体検査を行なったところ、図7.2にみるように輪切状の亀裂が観察された。その原因としては19心モールドは300℃以上の温度で成型されるが、冷却する際その長手方向に串差しになっている19本の銅線の方がFEPに比べ熱収縮量が約1/10である(表1)のためFEPが十分収縮できず、引張歪が生じ、それが解消されないため使用中に亀裂が入ったのか、あるいは引き上げ時の圧力と温度の変化が刺激となって亀裂を生じたのかの何れかと思われる。なお、亀裂箇所には水の入っていないことから、心線間の絶縁低下をもたらした原因は引き揚げによる温度降下のため、亀裂部に微量の水適が凝結したことによると判断された。

### 3.4 W型水密モールド

T型水密モールドの開発と平行してE型水密モールドの亀裂発生を防ぐより有効な方法の研究を行ない、新しいW型水密モールドを開発した。19心モールドに亀裂の発生する原因の大きなものに銅線の存在がある。心線の銅線の径が1mmであり、FEPの厚さも1mmであるので19心モールドの横断面における銅線対FEPの占有面積比は1:8で、銅線の占める比率は小さくなく、かつ断面内に均等に分布している。従って19心モールド成型時に高

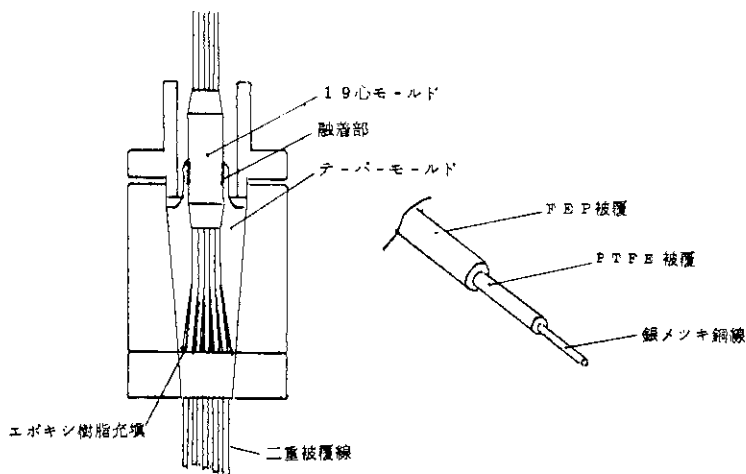


図8 W型水密モールド構造断面図

温か冷却する際、熱膨脹係数の大きいFEPは銅線を強くしめつけながら、より大きく縮むのでFEP内には大きな引張歪が残る。更にFEPは熱を著しく伝えにくいのに比べ銅線はその1,000倍も熱伝導率が大きいため(表1)銅線近傍に冷却速度の局部的なムラが生じ、それも残留歪を増加させると考えられる。これらの点を改善する方策として銅線とFEP被覆の間にPTFE(四フッ化エチレン重合体)の層を設けると亀裂発生が非常に少なくなることがわかった。これは、PTFEも融点は高いが、FEPと融着せず、かつその表面が滑りやすい

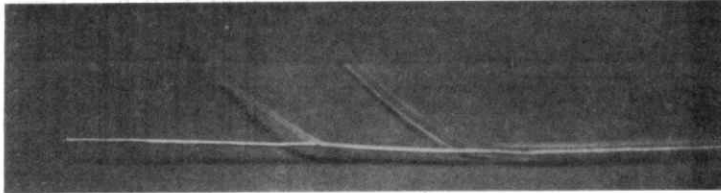


写真4

PTFE・FEP二重被覆心線(左より銀メッキ銅線,PTFE被覆,FEP被覆,二重被覆心線)

ため、冷却時のFEPの収縮が自由に行なわれ、残留歪が減少する為と考えられる。また、PTFEで熱絶縁されるので、銅線からの放熱による局部的な冷却ムラによる残留歪の増加も少なくなる。この方式は亀裂の発生が起りにくくなることに加えて、万一FEPに亀裂を生じて、融着していないため、亀裂はPTFE層に達せず、PTFE層で導体の絶縁が保たれる利点がある。このような発想のもとに作られたのがW型水密モールド(図8)である。

### 3. 4. 1 W型水密モールドの試作

W型水密モールドについて二重被覆心線(写真4)の寸法を変えた2種類、すなわち、W-1型とW-2型を試作し、これらについて主として残留歪による亀裂発生の促進試験を下記のように行なった。なお、水密モールド部にこのような構造の線を用いても信号ケーブルの電気特性に影響を与えないことは最初に確かめてある。

型名	* 導体径	PTFE肉厚	FEP肉厚
W-1型	0.8 mm φ	0.25 mm	0.6 mm
W-2型	0.5 mm φ	0.15 mm	0.15 mm

\* 銀メッキ軟銅線

#### イ. 常圧ヒートサイクル試験

常圧下で図9.1に示すような条件のヒートサイクルを連続10回行なった。試験の結果はW-1型、W-2型とも異常はなかった。

#### ロ. 高温高圧サイクル試験

前項のヒートサイクル試験を行なった後に、図9.2に示すような装置により図9.3

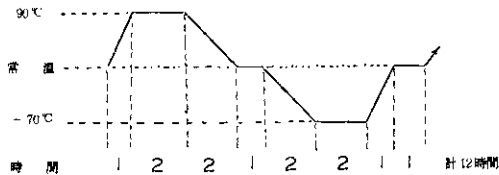


図 9.1 W型水密モールド常圧ヒートサイクル試験条件

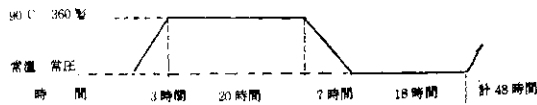


図 9.3 W型水密モールド高温高圧サイクル試験条件

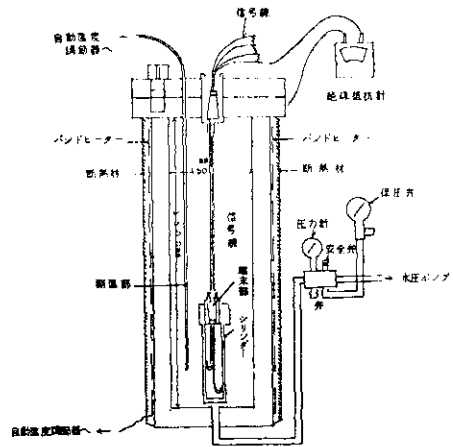


図 9.2 水密モールド高温高圧試験装置  
内径：150 mm φ、内部深さ：1500 mm、最高温度：110°C、最高圧力：400 kg/cm<sup>2</sup> (加温時)、1000 kg/cm<sup>2</sup> (常温)

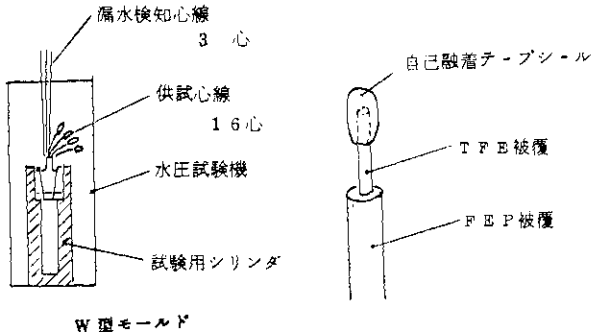


図 9.4 W型水密モールド用心線PTFE-FEP層境界面よりの漏水試験法及び心線端末処理

に示すような条件の高温・高圧サイクル試験を連続2回行なった。その結果、W-1型では19心モールドに亀裂の発生がみられたが(ただし絶縁抵抗は良好)、W-2型では異常はなかった。

ハ、急冷サイクル試験

次に、資料を液体窒素(-196°C)中に投入し、0.5時間後取り出し、常温に1時間放置する急冷サイクル(1サイクル：1.5時間)を連続3回行なった。試験結果はW-1型、W-2型とも異常はなかった。

ニ、急冷サイクル試験後の高温高圧サイクル試験

急冷サイクル試験を行なった後、図9.3に示す条件の高温高圧サイクル試験を連続2サイクル行なった。試験結果はW-1型・W-2型ともに異常はなかった。

ホ、PTFE-FEP境界面よりの漏水試験

W型水密モールドの心線には、PTFEとFEPの間に融着していない面が存在する。万一、心線被覆(外層)に外傷を受けた場合、この境界面を伝わって水が浸入するか否かを調べる目的で、図9.4に示したような方法で常温下で400 kg/cm<sup>2</sup>の水圧を24時間加えて漏水の有無を調べた。試験結果はW-1型、W-2型ともに異常はなかった。

### 3. 4. 2 W-2型水密モールドの使用実績

前項の試験結果からW-2型の方に亀裂発生がなく、他の試験結果も良好であったので、この型を採用することにした。昭和48年11月からの観測装置保守工事の際にT型モールドをW-2型水密モールドに取り換え、融着面付近をT型と同様にブチルゴムとシリコンゴムの自己融着テープにより各1/2ラップ1層巻きを行なった。この型は昭和48年12月から昭和50年1月までと昭和50年3月から昭和50年12月までの2期にわたって使用された。この使用期間中及び引き揚げ作業中とも漏水・絶縁不良は発生しなかった。しかし、引き揚げた後に解体調査したところ、テーパーモールドの首の所にいずれかの場合も亀裂の発

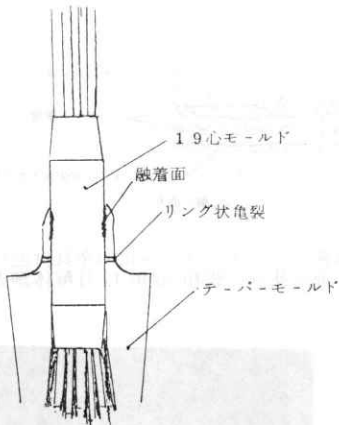


写真5 W-2型水密モールドの亀裂のX線写真(昭和50年1月31日撮影、亀裂はテーパー・モールド内できとまっている)

図10.1 W-2型水密モールドの亀裂発生状況(昭和50年1月観察)

生していることがわかった。以下にその使用後の状況を述べる。

#### イ. 自己融着テープの劣化

昭和50年1月に引き揚げた時、水密モールド首部のシリコン・ゴムテープはすっかり老化し、接着力を失ない、バラバラにはがれる状態になっており、ブチルゴムテープの表面は湿っていた。そのブチルゴムテープも弾性を失ない、さらに接着により接着面が識別出来ないように一体化するはずの自己融着テープが接着面から剥れる状態になっていた。しかし、水密性は保ち、ブチルゴムテープ内面に湿気は認められな

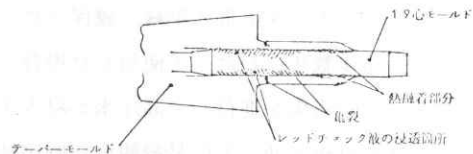
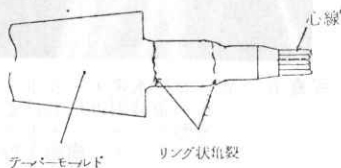


図10.2 A W-2型水密モールドの亀裂発生状況(昭和50年12月観察)

B レッド・チェック滴の浸透状況

った。

昭和50年12月に引き揚げた時はシリコン・ゴムテープは老化していたが、ブチルゴムテープとは良く密着しており、弾性があり、融着面で剥れるような事はなかった。

ロ. 水密モールドの亀裂

昭和50年1月に引き揚げた際、テーパームールドの19心モールドとの融着箇所の下側に間隙約1.5mmの亀裂が入っており(図10.1),その亀裂は古そうにみえた。X線撮影したところ19心モールドには異常がなかった(写真5)。この

場合、老化はしていたが、自己融着テープが水密性を保持していたことと、亀裂が19心モールドに及ばなかったため、電気的機能は損なわれずに済んだ。

昭和51年12月に引き揚げた際には、図10.2に示したようにテーパームールド首部の全周にわたって環状の亀裂が観察され、0.1~0.5mm位の間隙を生じていた。浸透探傷剤レッド・チェック液を滴下し、モールドを縦割りにして調査したところ、亀裂は19心モールドの境界面にまで達していた。しかし、電気的機能は前回同様損なわれることはなかった。ただし、これらは好ましい現象ではなく、19心モールド部の絶縁が確保されていても、このまま数年にわたって使用した場合、自己融着テープの劣化が進行し、高圧水が浸入するとフロー止め目板を通して信号線観測装置接続部に浸水の生ずる恐れがあるので、その原因を調べ、その改善策を検討した。

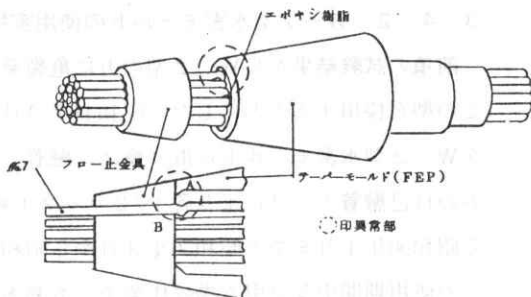


図 11.1 W-2型水密モールドフロー止め金具付近における心線の圧潰状況(テーパームールド先端Aが突出して、フロー止め金具の孔Bで心線が圧潰し、絶縁不良を起した。昭和50年1月解体調査)

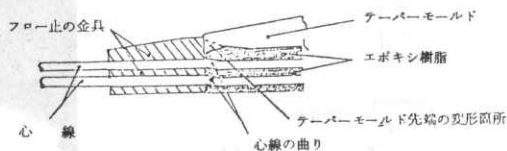


図 11.2 W-2型水密モールド・フロー止め金具付近における心線の変形状況(昭和50年12月解体調査)



写真6 W-2型水密モールド・フロー止め金具付近における心線の変形(テーパームールド下部とエポキシ樹脂を取り除いて、コアを見やすくした。昭和50年12月撮影)。

#### ハ. フロー止め金具箇所での絶縁不良

昭和50年1月末、W-2型水密モールドの新品と交換し、観測井底での地震観測に使用し、同年3月、観測井底沈澱物の採取作業を3回行なった後、モールドと支持金具上端のしめつけ金具との間のゆるみをしめつけ、絶縁測定をしたところ、信号線とモールド支持金具との間に絶縁不良(0.5 MΩ)が発見され、予備の水密モールドと直ちに交換し、観測装置の井底設置を行なった。絶縁不良発生の原因は上述したような経過からみてモールドの亀裂でないと判断し、障害箇所をフロー止め金具箇所と推定した。解体調査したところ、図 11.1 に示したようにFEPテーパモールドと、フロー止め金具の間で信号線が折れ曲り、フロー止め金具の孔の所で導体が絶縁体を破っていることがわかった。隣接の心線にも同様の屈曲現象がみられた。この調査から、同様の現象が交換した水密モールドにも起り得るはずであり、昭和50年12月に観測装置を保守点検の為に引き上げた時、解体調査をしたところ、図 11.2 に示すようにフロー止め金具の所で心線に少し曲ったものが幾つか認められたが、圧潰までには至ってなかった(写真6)。

#### ニ. その他

この他発生した水密モールドに関係した障害として、昭和48年11月からの観測装置保守・点検中も微小地震観測のみを継続するため、地震観測装置を降下中、心線1本に絶縁不良が発生した。地震観測に支障がなく、考察した結果、水密モールドではないと判断し、地震観測を実施した。昭和49年2月に整備をおえた観測装置と交換のため地震観測装置を引き上げた際、調査したところ、W-2型水密モールドを取り付けた後、耐圧容器内での組立中に心線の被覆に損傷を与えた為であることが明らかとなった。これ以後は同じ事故の発生しないよう、組立ての際に注意が払われるようになった。

### 3. 4. 3 水密モールド首部の亀裂の原因とその防止策

テーパ・モールドは高圧水下におかれると構造上支持金具内に喰い込むため、その上端の押え金具との間にゆるみを生ずるので、降下引き揚げを行なう度に押え金具のしめつけを行なう。その実態を表2に示す。このような増しじめを繰返すとモールド首部に引張り性歪が蓄積し、もっとも弱いモールド首部に亀裂を与える可能性がある。そこで次のような調査を行なった。

表2 水密モールドおさえ金具の締めつけ実績

観測井	岩				機		下	総
取付年月	S. 48. 12	S. 50. 1	S. 50. 3	S. 51. 2	S. 52. 2	S. 53. 2		
型	W-2	W-2	W-2	W-3	改 W-3	改 W-3		
締めつけ状況	S. 49. 2 約20°	S. 50. 3 約90°	S. 50. 3 約20°	S. 51. 3 1 1/2回転 1.8mm	S. 52. 2 1 1/4回転 15mm	S.53.2.10 0° 0mm		
実施年月	井底地震観測後	井底地震観測及び井底の探泥3回後	1500m試験降下後	1500m試験降下後	1500m試験降下後	第1次井底昇降後		
回転角度*								
締めつけ長*	S. 49. 2 約20°		S. 51. 1 約60° 0.2mm		S. 52. 10 160° 1mm	S.53.2.12 180° 0.6mm		
実施時期	1500m試験降下後		井底観測後		井底観測後	第2次井底昇降後		
	S. 49. 3 約20°				S. 53. 10 0° 0mm	S.53.2.12 0° 0mm		
	井底降下後				井底観測後	S波測定後		
						S. 54. 2 0° 0mm		
						井底観測後		

\* 締めつけ用ボルトの回転角度及び締めつけ深度

イ. 増し締め時の亀裂発生に対する影響調査

W-2型水密モールドを9個作り、下に示す①, ②, ③の状態で作各3個ずつにつき常圧ヒートサイクル試験を行なった。これは大気圧下で、95℃オープン中で48時間加熱、その後、室温で24時間放置を1サイクルとする試験で、次のような結果を得た。

試料の状態	ヒート・サイクル後の結果
① 金具に装着せず	3個共10サイクル後異常なし
② 金具に装着し増し締めなし	3個共10サイクル後異常なし
③ 金具装置し7サイクル毎に増し締め	3個共22サイクル後異常なし
	3サイクル後 首部に亀裂発生

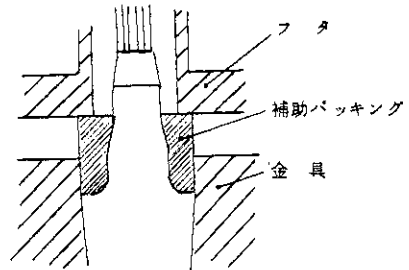


図12 A 水密モールド首部の押え金具補助パッキング

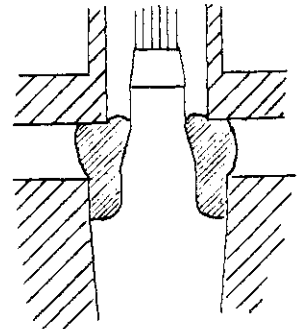


図12 B 水密モールドが観測井底で熱膨張した場合の状態図(補助パッキングは熱膨張した水密モールドで上に押し上げられ、横にみくらむ)



以上の結果から亀裂発生には、増し締めが大きく影響していると考えた。

ロ. 増し締めによる亀裂発生の機構

増し締めの影響について細部にわたる検討の結果、観測井で使用後テーパー・モールドの首の部分に亀裂発生が見られる原因は、次のようであると推定した。水密モールドは金具中に密閉されているため高温になって熱膨張すると、他に逃げ場所がなく、金具のふたの孔からテーパー・モールドの首の部分と19心モールドが共に押し出されてくる。次に冷却されてモールドが収縮しても19心モールドの中に銅線ははいつているため、これに支えられて完全には元の状態に戻れない。従って19心モールドに融着されているテーパー・モールドの首の部分も収縮できず、引っ張り応力が発生する。この状態で増し締めを行なって再び密閉状態にした後加熱すると、更に、19心モールドとテーパー・モールドの首の部分が押し出されてくる。これを繰返すと、テーパー・モールドの首の部分の引っ張り応力は累加して行く。一方、テーパー・モールドの首のつけ根の部分は、FEPの融点以下の温度で無理に孔から押し出し加工されたと同じ状態となるので、細かい傷が表面に発生する。このように表面に細かい傷が存在する状態で引っ張り応力が生じると傷の部分に応力集中が起り、遂に亀裂に至る。即ち、増し締めで金具のふたの孔隙以外に逃げ場所を無くして再加熱を繰返すことが、亀裂発生の主な原因である。

ハ. 亀裂発生防止策

上記のような原因により、亀裂が発生すると考え、その防止策としてテーパー・モールドと押え金具の間にゴム製の補助パッキングを設けた(図 12 A)。この補助パッキングを入れる目的は、次の通りである。

- ① 温度が高くなってモールドが膨張したとき、モールドは柔らかいゴムで押えられているので、全体に上方に膨張し、特別に首の部分や19心モールドだけが押出されることはない。従って、テーパー・モールドの首に発生する引っ張り応力ははるかに少なくなり、首のつけ根が無理に押し出しを受けて表面に傷の発生することもなくなる。全体に膨張した分は補助パッキングが図 12・B のように変形することにより逃げることになる。
- ② 多少、押え金具の締めつけが緩くなっても、補助パッキングで水密を保ち、水漏れの心配が無い(高圧下では、テーパー部が上からの水圧で押えつけられて水密を受け持つので、補助パッキングは上

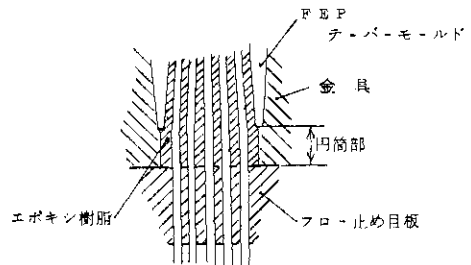


図 13 テーパーモールド下端フロー止め部の改良した構造

に乗っているだけになり、高圧で水密性が破壊されることはない。

- ③ 付随効果として温度が下がってモールドが収縮するとき、ゴムの弾性で元にもどり、増し締めを全然行なわなくてもよい可能性がある。

なお、補助パッキングのゴムの材質には、耐熱性・耐水性の優れたパーオキサイド加硫のエチレン-プロピレンゴム(EPゴム)を用いることにした。

### 3. 4. 4. フロー止め金具上面における心線圧潰原因とその防止策

すでに述べたようにテーパー・モールド下端、フロー止め金具の上面で昭和50年1月、心線が圧潰し、交換したのものにも圧潰までは達しない変形が生じた。

#### イ. 心線圧潰の再現実験

心線圧潰の原因を調べるため、次の様な再現実験を行なった。

- ① 高温・高圧試験をしたW-2型水密モールドの古いサンプル10個を解体して詳細に調べたところ、いずれも多少、心線が内側に寄せられて、フロー止め金具とエポキシ樹脂の境界面で、圧潰に至らない程度の変形が見られた。
- ② 新しくW-2型水密モールドを2個作り、その際、エポキシ注入時にフロー止め金具に剝離剤をつけ、フロー止め金具とエポキシ樹脂が接着しないようにした。
- フロー止め金具をはずして心線に変形の無いことを確かめた後、フロー止め金具に組み込み95℃ 360 kg/cm<sup>2</sup>の高温高圧サイクル試験を3サイクル行なった後、解体して心線の変形を調べた所、何れも心線が内側に寄せられており、フロー止め金具とエポキシ樹脂の境界面で心線に段がついていた。

#### ロ. 心線圧潰の発生機構

上記の再現実験の結果、次のような原因が考えられた。すなわち、水密モールド上面から高圧が加わると、テーパー面では周囲から中心に向う半径方向の分力が働き、テーパー・モールドは周囲から締めつけられた状態になる。エポキシ樹脂は90℃位の高温になると多少軟らかくなるため、締めつけ力が働くと僅かであるが変形しようとする。そのため、中に入っている心線もこれに伴って中心方向に移動しようとする。一方、フロー止め金具は金属製で硬く、変形しないため、エポキシ樹脂とフロー止め金具(目板)の境界面では心線に剪断力が働く。多くの場合はFEPの強度でこの剪断力に耐え、多少FEPが変形する程度で障害は発生していないが、エポキシ樹脂の変形が大きく起りやすい条件、例えば背面に気泡があったり、テーパー・モールドに多少の不平整があると、心線の移動量が大きくなり、さらに心線と目板が正確に一致していないなどの条件が加わると、FEPの強度では耐えきれなくなって心線に圧潰が発生する。

#### ハ. 心線圧潰防止策

対策として、テーパー・モールド下部を図13のように変えた。このようにすると、

エポキシ樹脂の下端は並行円筒なので、内側に締めつける力が働かず、フロー止め目板との境界面に剪断力が発生しない；テーパー部と平行円筒部はエポキシ樹脂が一体であるので力は分散し、心線に無理な力が加わらない；円筒部の心線をフロー止め金具の目板の位置に正確に、かつ垂直に入るように作ることが出来る；さらにエポキシ樹脂硬化成形後、内側に気泡・異物等の欠陥がないかを目視でチェックできる、など原因の除去や製品の検査の点で改善される。

### 3.5 W-3型水密モールド

#### 3.5.1 W-3型水密モールドの試作

前項に述べた問題点に関する防止法を取り入れて新しく設計試作したW-3型水密モールドを図14に示す。なお、W-3型では前記改良点の外にフロー止め目板の外形も変更した。これはW-2型までに用いたフロー止め目板は、上から押す力には約4～5tonにしか耐えられないことが実験によりわかり、高圧下の使用に多少不安があったので、図14の形に変更してその不安を取り除いた。実験の結果、このフロー止め目板は上からの力で約20tonでも破壊しなかった。水密モールド支持金具はこれらに合うように改設計された。試作したW-3型水密モールドの試験結果は次のようである。

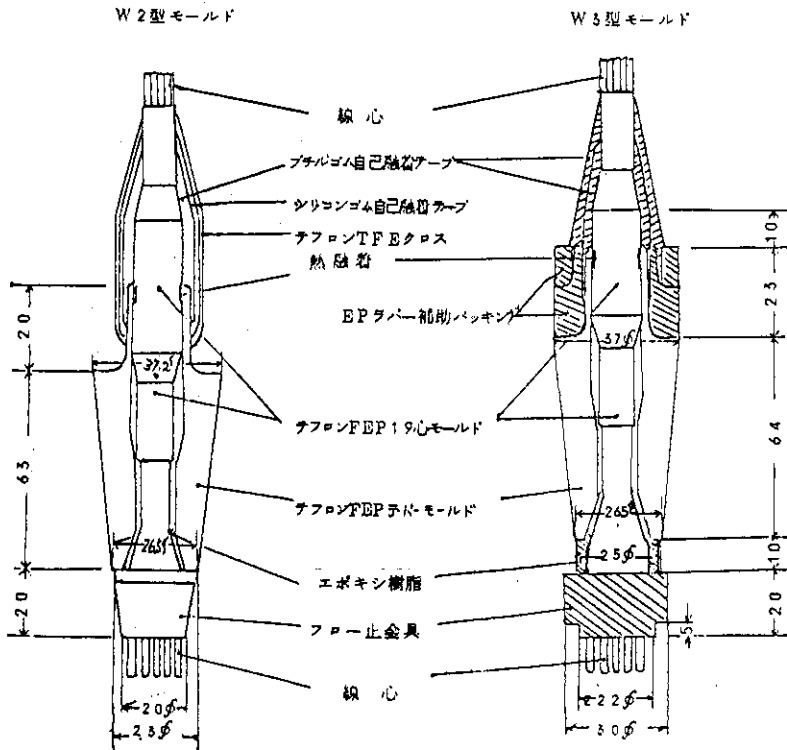


図14 W-3型水密モールド(左)とW-2型水密モールド(右)との比較(改良箇所斜線部, 単位mm)

イ. 常圧ヒートサイクル試験

W-3型水密モールドを2個試作し、支持金具に装着した状態で、常圧下で95℃48時間、室温24時間を7サイクルとするとヒートサイクル試験を20サイクル行なったが、亀裂の発生、その他の異常は2個とも見られなかった。なお、この試験で増し締めを全然行なわないと補助パッキングの永久歪の分だけ押え金具のネジがゆるむので、1サイクル毎にそのゆるみ分だけ増し締めを行なった。

ロ. 高温高压サイクル試験

前項の常圧ヒートサイクル試験を10サイクル行なった後、図9.3に示した高温高压サイクル試験を3サイクル行なったが、異常はなかった。

ハ. 増し締めしない状態での水密試験

W-3型水密モールドを支持金具に装着し、増し締めをしないで常圧ヒートサイクル試験を3サイクル行ない、押え金具の締めつけがゆるんだ状態で水圧試験を行ない、漏水の有無を調べた。結果は次の通りであった。

水圧試験の条件	24時間後の漏水
常温 400 kg/cm <sup>2</sup>	漏水なし
90℃ 400 kg/cm <sup>2</sup>	漏水なし

以上の実験結果から前に述べた補助パッキングの使用の目的の中、3.4.3ハ①、②については良い結果が得られ、W-2型水密モールドの当面の問題点の克服は一応達成された。この実験結果から、振動の無い状態では増し締めを行なわなくてもよいとも考えられるが、実際には引き揚げ時や引き揚げ後の取り扱い中の振動で、ネジのゆるみが増加するので、効果的なネジのゆるみ止めが無い限り、増し締めは必要と考えられる。

3.5.2 W-3型水密モールド使用実績

前項の試験結果から、W-3型水密モールドはW-2型の欠点を取り除けたと判断し、昭和51年2月の観測装置の保守・点検工事の際に、この型に交換した。このW-3型水密モールドは昭和51年10月の観測装置の保守・点検工事で引き揚げた際に、その効果を実際の使用実績により確認するため、これを取りはずし、次に述べる改良W-3型水密モールドと交換した。8カ月使用後この水密モールドの解体調査を行なったが、亀裂の発生・心線の変形・圧潰、その他の異常はまったく見られず改良目的が達成できたことが確認された(写真7)。EPラバー製の補助パッキングも製作当初に比較して殆んど硬さ

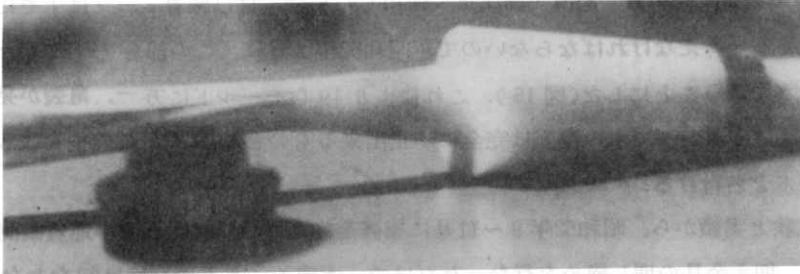


写真7 W-3型水密モールドと補助パッキング(左)の使用(昭和51年2月~10月)後の状態(まったく異常がない)。

の変化はなく、劣化は認められなかった。

### 3.5.3 改W-3型水密モールド

W-3型水密モールドはEPラバー製補助パッキングの上部をブチルゴム自己融着テー

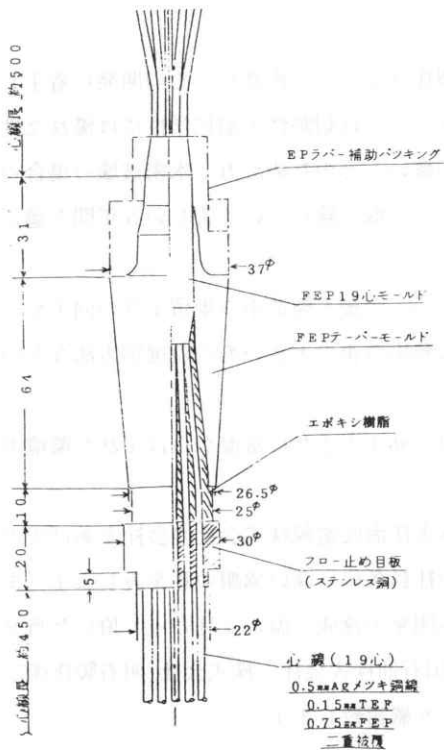


図15A 改W-3型水密モールド構造断面図(寸法は支持金具に装着前のもの、単位mm)

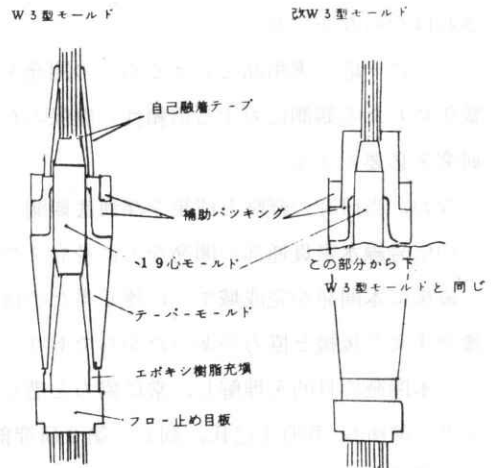


図15B 改W-3型水密モールド(右)とW-3型水密モールド(左)との比較

プで保護してある。長年月、高温・高圧下で使用した場合、自己融着テープはすでに述べたように劣化すると考えなければならないので、昭和52年2月に、この部分をEPラバー製の補助パッキングで覆うことにした(図15)。これにより19心モールドに万一、亀裂が発生しても、この補助パッキングで水の浸入は完全に防止出来るものと考え、この型を改W-3型水密モールドと名付ける。

以上の試験と実績から、昭和52年9～11月に補修を終えた観測装置と微小地震観測装置を交換した際、押え金具の増し締めを行なっただけで、水密モールドの交換は行なわなかった。更に、下総観測井(深度2,300m)の観測装置にも改W-3型モールドを用いた。その設置工事に際して、信号ケーブルの巻き揚げ装置へのまきとり(観測井内に信号ケーブルを降下して行なう)、観測井通り試験・S波速度の測定等を行ない、観測井内を幾度も揚降したが、水密モールドによる障害はまったくなく、押え金具の増し締めも、終りの頃にはほとんど不用なほど安定に装着されていた。

#### 4. 終りに

信号線水密貫通部をテーパ型水密モールドで製作することを決意し、その開発に着手したのは昭和46年春の観測井作井の最中であつた。テフロンは耐熱性・耐化学性には優れた性質を示すが、加工上取り扱いの容易な物質とはいえない。そのため、万一水密破壊の場合の防護策を講じながら、その完成の為に問題点を一つ一つ取り除いていく苦しい5年間を過ごさねばならなかつた。

ここに一応、実用品といえるものの開発を終えたが、今後も製造中の歩留まりの向上や、数年にわたる観測に対する信頼性の確保のためには熱応力歪の大きいものの選別方法などの研究を必要とする。

なお、当研究の経験と成果を深海底観測、その他の高圧下または常温からはずれた環境下での信号線水密貫通部の開発などに役立てたい。

最後に本開発が完成域までに達し得たのは、日本大洋海底電線株式会社の社をあげての腰をすえた後援と協力があつたからであり、各級の社員各位に深い感謝の意を表します。また、本開発の目的を理解し、常に協力を惜しまず本開発の達成を温かく見守って頂いた当センター前所長 菅原正巳氏、同じく第2研究部、帝国石油株式会社、株式会社 明石製作所、東京芝浦電気株式会社の深層観測関係の各位に心より感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 高橋 博・村瀬敏男・宮本滝男・倉橋敏夫(1974)：深層地震観測用信号ケーブルと地震計筐体との水密接続. 昭和49年度電子通信学会全国大会予稿集, No. 2178.
- (2) 村瀬敏男・宮本滝男・藪崎正男(1973)：深層地震観測用信号ケーブル及び地震計筐体との水密接続用モールドの開発. 日本大洋海底電線(株)研究開発室設立5周年記念研究開発報告集, P. 83.
- (3) 高橋 博(1973)：深層観測井による地震予知観測. 土と基礎, No. 184, 27 - 31.
- (4) 高橋 博・高橋末雄(1975 ~ 76)：東京の地震予知の研究(11-(4)). 防災科学技術, No. 28, 2 - 5, No. 29, 2 - 7, No. 30, 7 - 11, No. 32, 17 - 22
- (5) Takahashi, H and Hamada, K.(1975)：Deep Borehole Observation of the Earth's Crust Activities Around Tokyo- Introduction of the Iwatsuki Observatory. Pure and Applied Geophysics, vol. 113, 311-320.
- (6) 高橋末雄(1976)：岩槻深層観測井データ搬送装置とその信頼性. 国立防災科学技術センター研究報告, No.13, 35 - 57.

(1979年11月14日 原稿受理)