

# 送ガス用鋼帯補強ポリエチレン管 (1)

## — 管の開発 —

### Steel Tape Armored Polyethylene Pipe for Gas Transmission (1)

#### — Development of Pipe —

竹内 友章\*  
Tomoaki Takeuchi

高橋 晃\*  
Akira Takahashi

中井 秀信\*  
Hidenobu Nakai

石井 健一\*<sup>2</sup>  
Kenichi Ishii

牧野 良之\*<sup>2</sup>  
Yoshiyuki Makino

今井 浩三\*<sup>3</sup>  
Kozo Imai

井上 哲夫\*<sup>3</sup>  
Tetsuo Inoue

**概要** 曲り部の多い開削ルートや地中管路内に無接続で長距離布設することが可能な複合構造の可撓性送ガス管を開発した。本製品は、ポリエチレン管の上に複数のステンレス鋼帯をスパイラル状にギャップ巻きした構造であり、ポリエチレン肉厚を薄く抑えて可撓性を堅持し、鋼帯厚を適正に設計して中圧から高圧まで広範囲の使用圧力に適用できるようにした。本製品は耐震性に優れる点も大きな特徴である。本報告では、ガス工作物技術基準に準拠して鋼帯補強ポリエチレン管を設計し、プロトタイプを製作して各種特性評価試験を実施した結果について述べる。

## 1. はじめに

送ガス用ポリエチレン管<sup>1)</sup>は、可撓性に富み、耐震性に優れているので、地震の多いわが国では今後広く普及する可能性がある。送ガス用ポリエチレン管では特にその可撓性を活かして、小径のロールに長尺巻いて輸送し、無接続で長距離布設できるメリットがある。これまで、送ガス用途には内圧0.1 MPaまでの低圧域に限定されていたが、2003年に圧力0.3 MPa（中圧B）までの適用が認められた。それ以上の圧力域では鋼管、鋳鉄管等が使用されているが、海外での実用例等からこれらの圧力域でもポリエチレン管適用のニーズが見込まれる。ポリエチレン管単独構造で高圧化するためには管の肉厚を更に増大させる必要性が生じて本来の特徴である可撓性が極端に低下する恐れがある。そこで、我々は必要とされる可撓性を保持した上で十分な耐圧性能と各種要求特性を満足する複合構造の中高圧用送ガス管の開発を試みた。ここでは、鋼帯補強ポリエチレン管の設計の考え方とプロトタイプの試作構造について述べる。また、ガス工作物技術基準を基に、プロトタイプを用いて実施した各種性能確認試験の内容とその評価結果について述べる。

なお、配管システムを構築する上で重要な技術要素となる端末継手の開発については、別報で報告する。

## 2. 送ガス用鋼帯補強ポリエチレン管の設計

### 2.1 ポリエチレン管の適用範囲

送ガス用ポリエチレン管の使用圧力を表1に示す。

表1 送ガス用ポリエチレン管の適用圧力  
Pressure range applicable to PE pipe for gas transmission

内圧 (MPa)	～ 0.1	0.1 ～ 0.3	0.3 ～ 0.7	0.7 ～ 1.0	1.0 ～
国内	適用	適用見込			
海外	適用			適用見込	

国内では、0.3 MPa（中圧B）までの適用範囲に限定されているが、海外ではイギリスやドイツ等で0.7 MPa用まで実用化されている。これ以上の圧力に適用するためには、ポリエチレン管の肉厚を更に増加させる必要があるが、可撓性や長距離施工性の面では逆に大きな障害が出てくる。現在のところ海外では、安全率を見なおすことにより、肉厚増加を押さえつつ適用圧力を高めることが検討されているが、更に高圧化のニーズを考慮するとこれには限界がある。

ISO 4437 (Buried PE pipes for the supply of gaseous fuels) では、ポリエチレン管の肉厚設計に適用する安全率は2.0以上であることが規定されており、海外で0.7 MPa以下に適用されるポリエチレン管は実勢として3前後の総合安全係数が採用されている。内径150 mm、内圧1 MPaのポリエチレン管について、ISO 4437にしたがって総合安全係数を3.0として肉厚を求めると22 mmとなる。このような厚肉の管では、可撓性が著

\* 東京電力(株)建設部 土木・建築技術センター

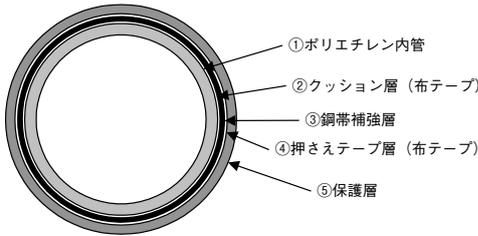
\*<sup>2</sup> 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

\*<sup>3</sup> エネルギー・産業機械カンパニー 電力事業部 電力エンジニアリング部

しく低下し、リール巻きが困難となり、送ガス線路を建設する際には短尺の直線管を数多く接続していく必要性が生じてポリエチレン管適用のメリットが失われる。

## 2.2. 鋼帯補強ポリエチレン管の構造・設計

今回開発した鋼帯補強ポリエチレン管は、**図1**に示すように内層からポリエチレン内管／鋼帯巻き層／プラスチック保護層の3層構造としている。鋼帯は、ステンレス製のテープを管軸方向に一定のギャップを有した状態でスパイラル状に2層巻かれている。また、鋼帯の上下層にはそれぞれ押さえとクッションとして、布テープ層を設けている。



**図1** 鋼帯補強ポリエチレン管の断面  
Cross section of steel tape armored PE pipe

送ガス用鋼帯補強ポリエチレン管については、現在、一般的な規格は存在しないが、ガス工作物技術基準の解釈例<sup>2)</sup>(以降、解釈例と記す)を重要な指針として設計するものとし、耐内圧設計に関する基本的な考え方は以下の通りとした。

- ①鋼帯で全圧力を負担出来るよう安全率を考慮して鋼帯厚を設計する。
- ②ポリエチレン管だけでも内圧に耐え得るよう肉厚を設計する。

### 2.2.1 鋼帯厚

鋼帯厚については従来から送水管、送油管の鋼帯補強設計に適用してきた式を用いて(1)より求めた。本算定式の適応性については、後述(3.1章)するように実験によって再確認した。また本式に適用する全圧力( $P$ )、鋼帯の許容応力( $\sigma$ )等の諸数値は解釈例を基に選定した。

$$t = \frac{1.5PD}{(2\sigma \cdot F_t \cdot \sin^2 \phi + P)} \quad (1)$$

ここで  $D$ :ポリエチレン管外径,  
 $F_t$ :鋼帯補強効率,  
 $\phi$ :鋼帯巻きつけ角度

### 2.2.2 ポリエチレン肉厚

ポリエチレン管の肉厚についてはISO, JIS等に従い、下式(2)を用いて設計した。

$$MOP = \frac{2 \times MRS}{c \times (SDR - 1)} \quad (2)$$

ここで、 $MOP$ :最高使用圧力,  
 $MRS$ :ポリエチレンの最小要求強度  
 $c$ :総合安全係数  
 $SDR$ :外径／肉厚比

ポリエチレン管肉厚については外傷等により鋼帯補強層が損なわれても、管として機能するように安全率1以上を確保する

ものとし、ISO13761の規定値や素管を用いて実施した長期クリープ試験結果を基に総合安全係数を1.4とした。

ここで性能評価試験用に試作したプロトタイプの構造を**表2**に示す。

**表2** 鋼帯補強ポリエチレン管の構造例  
Structure of steel tape armored PE pipe

主要層(材質)	機能	許容応力 (MPa)	仕様
ポリエチレン内管 (PE100)	内部流体の気密保持	10.0	内径; 156 mm 肉厚; 12 mm
鋼帯補強層 (SUS304鋼帯)	内圧補強	232	0.35 mmt × 2枚
保護層 (塩化ビニル)	外傷保護		肉厚; 5 mm 外径; 195 mm
気中重量			12 kg/m

## 3. 鋼帯補強ポリエチレン管の特性

プロトタイプを用いて各種の性能評価試験を実施した<sup>3)</sup>。

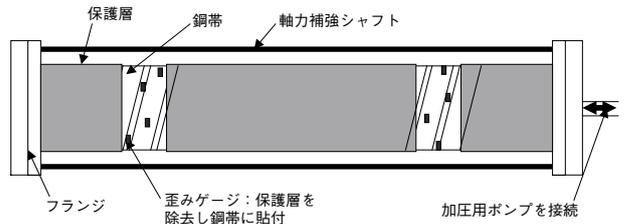
### 3.1 内圧により鋼帯に発生する応力

鋼帯補強ポリエチレン管に内圧が作用するとポリエチレン管を介して鋼帯に内圧が伝わり、鋼帯で内圧の大部分を受け持つものと考えられる。これを確認するために内圧力により鋼帯に発生する歪み測定を行い、鋼帯に発生する応力について解析した。

#### 3.1.1 試料および試験方法

長さ3mの鋼帯補強ポリエチレン管の両端をフランジでシールし、内圧により発生する軸力が試料に加わらないようにフランジ間を軸力補強シャフトで補強した(**図2**)。

試料の軸方向2箇所保護層を円周状に除去し鋼帯を露出させ、2層の鋼帯と平行して歪みゲージを周方向均等に鋼帯の外層と内層にそれぞれ4箇所貼付した。内層は外層の鋼帯のギャップとして露出している面に小型歪みゲージを貼付した。



**図2** 内圧試験用試料  
Sample for internal pressure test

試験では昇圧、降圧、保持のサイクルを5回繰り返し、各サイクル毎に最大圧力3 MPaまで約0.1 MPaのステップで鋼帯歪変化量を測定し、これらの歪変化量に相当する応力を算出した。

#### 3.1.2 試験結果

昇圧および降圧による発生応力のヒステリシスが安定した5サイクル目の圧力と鋼帯応力の関係を**図3**に示す。

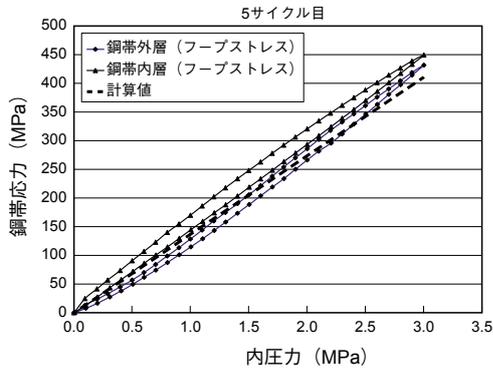


図3 内圧力と鋼帯に発生する応力の関係  
Correlation between the stress and pressure of steel tape

鋼帯応力 ( $\sigma$ ) の計算値は簡易的に薄肉円筒のフープストレスの式 (3) を用いた。

$$\sigma = PD / 2t \cdot F_p \cdot \sin^2\phi \quad (3)$$

$P$ : 内圧力,  $D$ : 外径,  $t$ : 肉厚

$F_p$ : 断面占積率,  $\phi$ : 鋼帯巻角度

図3より明らかなように、鋼帯応力の測定値は計算値と良く一致する結果が得られ、鋼帯が内圧のほとんどを分担することが確認された。

### 3.2 内圧破壊特性

#### 3.2.1 試験方法

鋼帯補強ポリエチレン管の内圧破壊値を確認するため、試料内部に水を充填し、管が破壊するまで昇圧を続けた。

#### 3.2.2 試験結果

内圧破壊圧力は9.6 MPaで、設計最低破壊圧力4 MPaに対して2倍以上の値となった。鋼帯の許容応力は鋼材最小引張強さの1/4として、常用圧力(1 MPa)の4倍以上の破壊性能を有するよう設計したがこれを満足すると共に鋼材引張強度の最小規定値に対する裕度等によって更に高い破壊強度を有することが確認された。

なお、破壊点ではステンレス鋼帯2枚が完全に破断する一方、ポリエチレン内管には膨れが発生するだけで破壊孔は生じなかった。



写真1 内圧破壊試験  
Burst pressure test

### 3.3 曲げ特性

鋼帯補強ポリエチレン管の可撓性について検証するため、曲げ変形試験を実施した。

#### 3.3.1 試料および試験手順

試料には長さ3 mの鋼帯補強ポリエチレン管とその内管のポ

リエチレン管の2種類を用いた。図4および写真2に示すように管に曲げ荷重を加えていき、曲げ角度と曲げモーメントの関係を測定した。試験条件として、1 MPa加圧状態および無加圧状態で実施した。試験は圧力の漏れまたは座屈が生じるまで実施した。

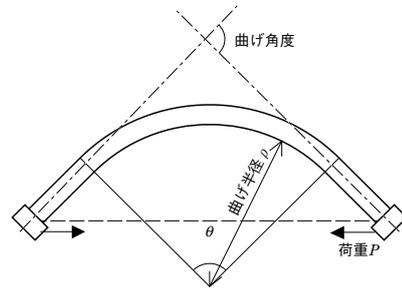


図4 曲げ試験方法  
Bending test method



写真2 曲げ試験  
Bending test

#### 3.2.2 試験結果

曲げ変形試験により得られた各試料の曲率と曲げモーメントの関係を図5に示す。

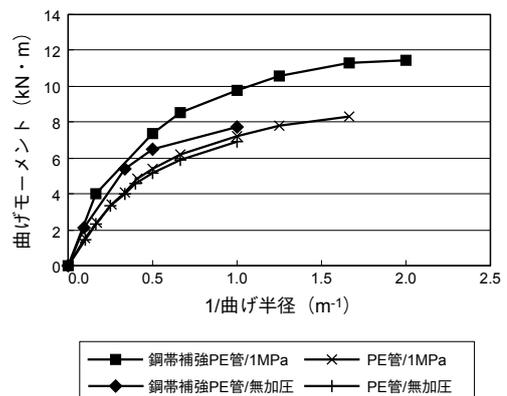


図5 曲げ試験結果(曲げ半径-モーメント)  
Correlation between bending moment and bending radius

曲げ変形試験結果より以下のことが確認できた。

- (1) 鋼帯補強ポリエチレン管の曲げ剛性は約24 kNm<sup>2</sup>であり、同等使用圧力のポリエチレン単管の曲げ剛性56 kNm<sup>2</sup> (換算値) に対して1/2以下の可撓性が得られる。

(2) 鋼帯補強ポリエチレン管の限界曲げ角度は80度以上であり、曲げ座屈が発生し難く、同サイズの鋼管の限界曲げ角度と比較しても2倍以上の曲げ耐久性を有する。

### 3.4 軸圧縮特性

鋼帯補強ポリエチレン管の耐震性能評価の一環として、軸圧縮変形試験を実施した。

#### 3.4.1 試料および試験手順

試料は長さ0.5 mおよび1 mの鋼帯補強ポリエチレン管とその内管のポリエチレン管を用い、管軸方向に座屈するまで圧縮荷重を加え、圧縮荷重と変位の関係を測定した。試験条件は、1 MPaの加圧条件および無加圧条件で実施した。図6に軸圧縮試験の概要図、写真3に試験状況(座屈時)を示す。

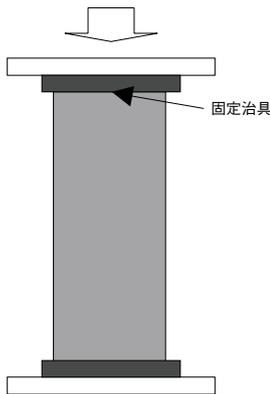


図6 軸圧縮試験  
Setup for axial compression test



写真3 軸圧縮試験(座屈時)  
Crash by axial compression

#### 3.4.2 試験結果

試料長0.5 mで測定した軸圧縮荷重と軸方向変位量の関係を図7に示す。これらの結果から以下のことが確認できた。

- (1) 鋼帯補強ポリエチレン管では、管軸方向歪が7~10%の大歪変形領域に達するまで座屈に耐え、同等サイズの鋼管と比較すると座屈限界変位は大きい。
- (2) 鋼帯補強ポリエチレン管の座屈耐力はポリエチレン単管に比べて30%程度大きくなり、鋼帯や保護層によって多少の補強効果がみられた。
- (3) 鋼帯補強ポリエチレン管の座屈時歪は無加圧時よりも1 MPa加圧時には15%程度増加し、僅かではあるが鋼帯による補強効果が見られた。

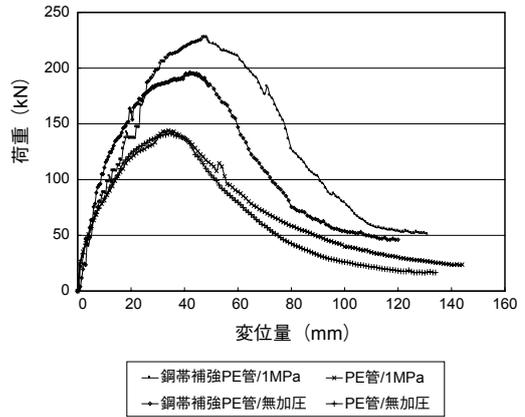


図7 軸圧縮試験結果(変位量-軸圧縮荷重)  
Correlation between axial compression load and deformation

### 3.5 せん断特性

鋼帯補強ポリエチレン管の耐震性能評価のため、せん断変形試験を実施した。

#### 3.5.1 試料および試験手順

試料は長さ2mの鋼帯補強ポリエチレン管とその内管のポリエチレン管を用い、図8のように両端を固定し、中央部に変位を加え3点曲げ変形を与えた。せん断スパン200 mmとするせん断荷重を加えて、荷重と変位の関係を測定した。1 MPa加圧状態および無加圧の試験条件で内水が漏れるまで測定を継続した。

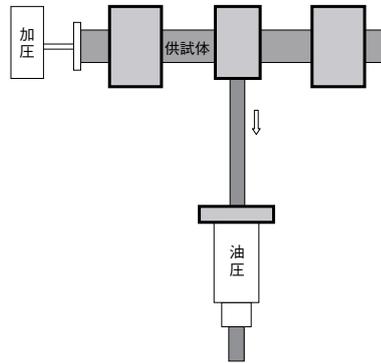


図8 せん断試験  
Setup for shear test

#### 3.5.2 試験結果

せん断試験の結果を図9に、試験状況を写真4に示す。これらの結果から以下のことが確認できた。

- (1) 鋼帯補強ポリエチレン管のせん断弾性率はポリエチレン単管に比べ約2倍となり、鋼帯および保護層による補強効果がみられた。内圧の有無に対しては、せん断弾性率に大きな差は認められない。
- (2) 鋼帯補強ポリエチレン管のせん断による亀裂発生変位は、無加圧ではポリエチレン管と同等であるが、加圧時には約40%上昇し、鋼帯がポリエチレン管を保護し局所的歪み集中を緩和する効果が現れた。

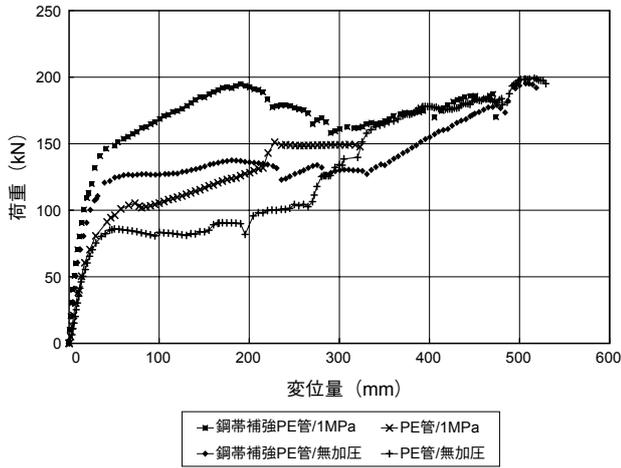


図9 せん断試験結果(変位量-荷重)  
Correlation between shearing load and deformation

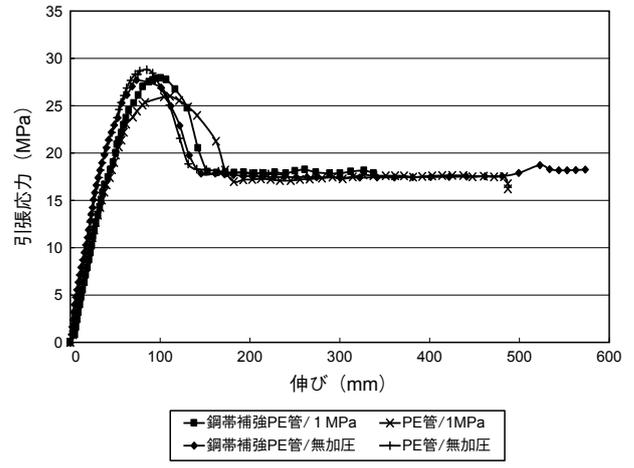


図10 引張破壊試験結果(伸び-引張応力)  
Correlation between tensile load and elongation



写真4 せん断試験(破壊時)  
Shear test where the sample broke down

### 3.6 引張特性

鋼帯補強ポリエチレン管の耐震性評価のため、引張破断試験を実施した。

#### 3.6.1 試料および試験手順

試料に圧力(水圧)を1 MPa加えた状態と加圧しない状態で破断限界まで引張るものとする。また比較のためにポリエチレン単管についても同様の試験を行った。

#### 3.6.2 試験結果

引張破断試験における伸びと応力の関係を図10に、試験後の状況を写真5に示す。試験結果から以下のことが確認できた。

- (1) 鋼帯補強ポリエチレン管の引張破断伸びは60%以上、降伏点は約20%であり、大きな伸縮にも追従可能である。
- (2) 引張特性に関しては鋼帯補強の有無や内圧による大きな差が無く、ポリエチレン管の引張特性に依存することが確認された。



写真5 引張試験(破壊時)  
Tensile test where the sample broke down

### 3.7 耐衝撃特性

鋼帯補強ポリエチレン管の耐衝撃特性を確認するため、ISO13477 (S4試験)に基づいて、急速亀裂進展試験を実施した。

#### 3.7.1 試料および試験手順

試料は一部の保護層及び鋼帯を除去してポリエチレン管部分を露出させ、この部分に刃を当て亀裂進展の様子を評価した。

次に、鋼帯補強ポリエチレン管の端部でポリエチレン管を剥き出しにして亀裂を発生させ、鋼帯で亀裂進展が抑止できるかを評価した。

#### 3.7.2 試験結果

図11にポリエチレン管の亀裂進展限界温度の測定結果を、写真6にその試験状況を示す。主な試験結果は以下のとおりである。

- (1) ポリエチレン管は通常の温度では全く亀裂進展性は無く、  
-40℃以下の低温領域で初めて亀裂進展が確認された。
- (2) 鋼帯補強ポリエチレン管端部の試験では-40℃、内圧2 MPaでポリエチレン管に亀裂を発生させると管長手方向に進展し、鋼帯および保護層で被覆された区間のポリエチレン管にまで亀裂は進展した。鋼帯には割れ・裂け等の異常は見られなかった。試験後の試料の様子を写真7に示す。

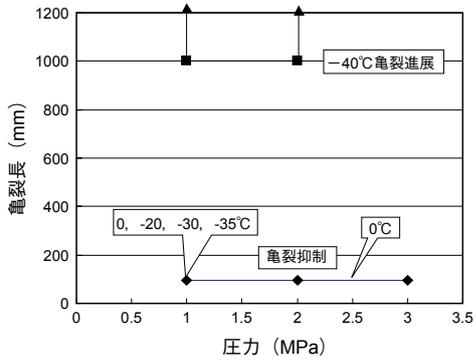


図11 ポリエチレン管のS4特性  
S4 properties of PE pipe



写真6 ポリエチレン管のS4試験状況  
S4 test of PE pipe



写真7 鋼帯補強PE管の衝撃試験後の試料  
S4 tested sample of steel tape armored PE pipe

通常、ポリエチレン管のS4試験では亀裂は波状に減衰しながら進展していくが、鋼帯補強管の場合は、衝撃の分散が鋼帯により妨げられたため亀裂が直線状に進展し、その衝撃は鋼帯を介してプラスチック保護層にも伝播するものと考えられる。ただし-40℃以下でなければ亀裂進展はしないので実用上の問題はないものと考えられる。

### 3.8 耐燃焼性能

#### 3.8.1 試料および試験手順

IEEE383 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Specification 383) に基き、鋼帯補強ポリエチレン管の耐燃焼性確認試験を実施した。約2 m長の試料を垂直に架台に固定し、バーナを床面から600 mm、試料表面から75 mmの位置に設置

した。20分間バーナより火炎を出し続け、試料の燃焼区間長および試料の燃焼が終わるまでの残炎時間を測定した。

#### 3.8.2 試験結果

燃焼長:610 mm, 残炎時間:2分33秒でIEEE383の合格基準を十分満足することが確認された。写真8と9に試験状況を示す。



写真8 燃焼試験中  
During burning



写真9 バーナ停止直後  
After burning

### 3.9 ガス透過特性

#### 3.9.1 試料および試験手順

図12に示す方法により、鋼帯補強ポリエチレン管のガス透過性確認試験を実施した。試料外側にステンレス製シリンダを気密に取り付け、メタンガス供給装置より常時1 MPaで鋼帯補強ポリエチレン管内にメタンガスを加圧した。シリンダはガスクロマトグラフに接続し、シリンダ内にビルドアップしてくるメタンガスを長期的に計測した。比較のために同サイズのポリエチレン単管についても測定を行った。

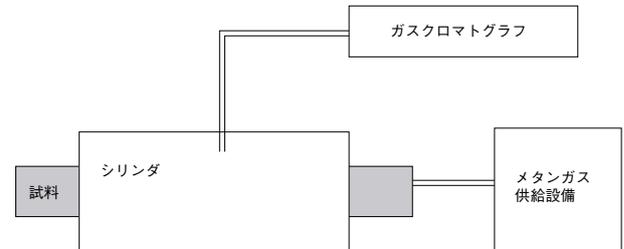


図12 ガス透過試験装置  
Setup for gas permeation test

#### 3.9.2 試験結果

鋼帯補強ポリエチレン管とポリエチレン管のメタンガス透過試験の結果を図13に示す。

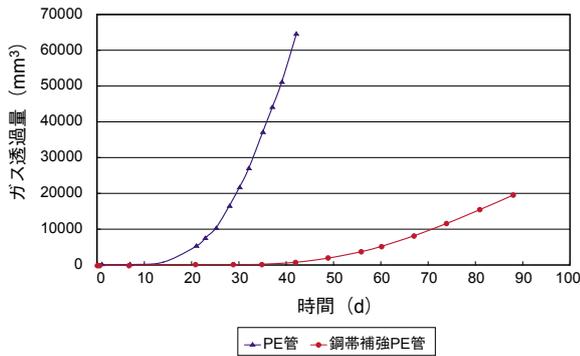


図13 メタンガス透過試験結果  
Permeation of methane gas

この試験結果から単位長さあたりのメタン透過速度を求めると表3のようになる。鋼帯補強ポリエチレン管のガス透過量はポリエチレン単管の約3%となり、補強鋼帯による大きなガス遮蔽効果が認められた。

表3 メタン透過量  
Permeation rate of methane

試料	メタン透過量 (ml/d/m)
鋼帯補強ポリエチレン管	0.88
ポリエチレン管	27.2

### 3.10長期耐久性

鋼帯補強ポリエチレン管の内圧耐久性を確認するため、連続加圧時間10000 hに及ぶ長期耐久性試験を実施した。表4の試験結果に示すように鋼帯補強ポリエチレン管は設計圧力の2倍以上の長期加圧に十分問題無く耐え得ることが確認された。

表4 長期耐久性試験概要  
Long-term pressure tests

試験条件			試験結果
試料温度(℃)	加圧力 (MPa)	加圧時間 (h)	
20	2.0	10000	異常なし
80	2.9	10000	異常なし
80	3.5	10000	異常なし
80	4.4	10000	異常なし

## 4. おわりに

長尺輸送、長距離布設に適した中高圧用可撓性送ガス管路の開発を進めた。薄肉厚のポリエチレン管に内圧補強用ステンレス鋼帯を設ける複合構造管の設計、試作を行い、各種の性能評価試験を実施して以下の結論を得た。

- (1) 内圧1 MPa用、内径156 mmのプロトタイプ管を用いて内圧印加時にステンレス鋼帯に発生する応力を測定し、設計理論と良く一致することを確認した。曲げ特性試験よりリール巻きに適した可撓性を有することを確認した。
- (2) プロトタイプ管を用いて内圧破壊試験、長期耐内圧試験、耐燃焼試験、ガス透過試験等を実施し、中高圧送ガス用

に必要な各種性能を満足すること確認した。

- (3) プロトタイプ管を用いて軸圧縮特性、せん断特性、引張伸び特性、耐衝撃特性等について評価し、鋼帯補強ポリエチレン管が耐震性に優れることを確認した。

今後は鋼帯補強ポリエチレン管を中高圧の送ガス用管路として実用化していくために法令面での適用性についても確認し、効率的で信頼性の高い施工方法の開発を進めていきたい。

### 参考文献

- 1) 日本ガス協会:「ガス用ポリエチレン管技術資料」, (2001)
- 2) 資源エネルギー庁:「ガス工作物技術基準の解釈例・1次改訂版」, (2003)
- 3) 牧野, 他:「鋼帯補強ポリエチレン管の特性評価」成型加工03 (2003), 69.
- 4) 石井, 他:「エアリフト型取水管の設計及び布設」, テクノオーシャン2000, 447.
- 5) 籠浦, 他:「パイプインパイプ用フレキシブルパイプの開発」, 古河電工時報, 112号, (2003), 64.