

平成 27 年度水素ネットワーク  
構築導管保安技術調査  
(配管材料の水素適用性調査)  
調査報告書

平成 28 年 3 月

一般財団法人化学物質評価研究機構

# 調査報告書目次

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 1. 経緯と目的.....                               | 3  |
| 2. 都市ガス配管材料のシール部材に対する水素影響評価手法の検討.....       | 3  |
| 2.1 調査対象材料.....                             | 3  |
| 2.2 促進劣化比の算出法.....                          | 5  |
| 2.3 促進劣化処理.....                             | 6  |
| 2.4 水素曝露後の物性測定結果.....                       | 8  |
| 2.5 劣化促進比の算出.....                           | 13 |
| 3. 配管材料の長期水素曝露影響評価.....                     | 17 |
| 3.1 調査対象となる配管材料.....                        | 17 |
| 3.2 促進劣化処理.....                             | 21 |
| 3.3 水素気密性試験.....                            | 25 |
| 3.4 配管材料の長期水素曝露影響評価 まとめ.....                | 37 |
| 4. 水素気密性試験.....                             | 38 |
| (平成 26 年度の事業において水素気密性が懸念された配管材料の再調査)        |    |
| 4.1 水素気密性試験方法.....                          | 38 |
| 4.2 ボールスライドジョイント（短縮状態・延長状態）の水素気密性試験.....    | 39 |
| 4.3 緊急遮断バルブ（バネ式，開放状態・閉鎖状態）の水素気密性試験.....     | 42 |
| 4.4 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型，開放状態・閉鎖状態）の水素気密性試験..... | 45 |
| 4.5 鋼管用サドルの水素気密性試験.....                     | 47 |
| 4.6 水素気密性試験の検討 まとめ.....                     | 50 |
| 5. PTFE 及びエポキシ樹脂の水素劣化に関する文献調査.....          | 52 |
| 5.1 PTFE.....                               | 52 |
| 5.2 エポキシ樹脂.....                             | 52 |
| 6. 結        論.....                          | 54 |
| 7. まとめ.....                                 | 55 |

## 1. 経緯と目的

内管とは、敷地境界線から需要家敷地内に引き込まれるガス栓までの導管であり、ほとんどが需要家の資産となるガス配管設備である。将来、水素供給のためのパイプラインを新設する場合に、現在都市ガスに用いている材料が適用できるかどうか確認する必要がある。本調査は、将来の水素利用における保安確保のために必要となる導管等のガス工作物のうち、これまでの調査事業で水素パイプラインへの適用性が確認されていない内管向けのシール材について、水素に関する安全基準、配管の設置方法や維持管理方法等の具体的措置を明確にするため、有用な基盤技術や知見の整理を行う。それらの得られた成果は、将来的にガス事業法の基盤基準等の見直しに反映させることで、水素ネットワーク社会構築における保安確保を図ることを目的とする。

平成 26 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査（配管材料の水素適用性調査）では、配管材料で使用されるシール部材について、長期水素曝露による影響を評価する適切な劣化評価手法を検討した。促進水素曝露後のシール部材について、使用用途と関連性の高い評価項目について各種劣化分析を行ったところ、シリコーン系シール材、NBR パッキンは、シール性との関係性が強いとされている永久ひずみを、グリースにおいては明瞭な変化が認められた見かけ粘度をそれぞれ劣化パラメータとして選定した。平成 27 年度は、得られた劣化パラメータを用いて期待耐用寿命 30 年に相当する促進劣化処理を配管材料に対して施した後、水素気密性を評価し、都市ガス供給に用いられている配管材料の水素適用への可否について確認する。また、平成 26 年度事業で水素気密性が懸念された配管材料に関して、配管の施工状況を考慮し、水素気密性を評価する。

## 2. 都市ガス配管材料のシール部材に対する水素影響評価手法の検討

ビルやマンションなどの一般集合建物内の消費機器（燃料電池を想定）までの配管を想定し、現行の都市ガス供給で使用されている配管材料について、長期間の水素影響評価を実施するにあたり、数十年間以上の長期に渡り水素環境下で使用された配管材料が現時点では入手できない。そこで、期待される耐用年数 30 年に相当する促進曝露条件をアレニウス法で得られる活性化エネルギー及び促進比から算出した。

### 2.1 調査対象材料

平成 26 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査（配管材料の水素適用性調査）では、配管部品に組み込まれるガスシール材料を調査したところ、計 5 種類のポリマー種の異なる有機材料が使用されていることが判明した。その中で水素と熱による促進劣化曝露を実施したところ明瞭な劣化現象が認められた①NBR パッキン、②シリコーン系シール材、③グリースの計 3 種類の材料を調査対象材料とした。材料ごとに定めた曝露圧力及び劣化パラメータを表 2-1 に示す。促進曝露温度は経年劣化を加速させるために通常の使用時より高い温度で設定する必要があるが、通常の使用温度では起こりえない劣化現象を誘引させぬように表 2-1 に示す各材料の耐熱温度よりも低い温度とした。

表 2-1 調査対象材料の試験圧力及び耐熱温度

| 材 料          | 劣化パラメータ | 耐熱温度<br>(℃) | 試験圧力<br>(MPa) |
|--------------|---------|-------------|---------------|
| NBR パッキン※1   | 圧縮永久ひずみ | 約 110※3     | 1.1           |
| シリコーン系シール材※2 | 引張永久ひずみ | 約 220※3     | 0.4           |
| グリース         | 見かけ粘度   | 約 150※4     | 0.1           |

※1 図 2-1, 図 2-2 にフレキ管ユニットの外観図及び保護カバーを外した状態の外観を示す。

※2 シリコーン系シール材をテフロン板上にキャストして金属板で押し広げ、1 日室温 (23℃) で静置し、厚さ約 0.4 mm シートを作製した。

※3 (社) 日本ゴム協会編, ゴム工業便覧<第四版>, (社) 日本ゴム協会, 1994, 61.

※4 (社) 日本トライボロジー学会編, トライボロジー ハンドブック, 2001, 705.



図 2-1 フレキ管ユニット外観図

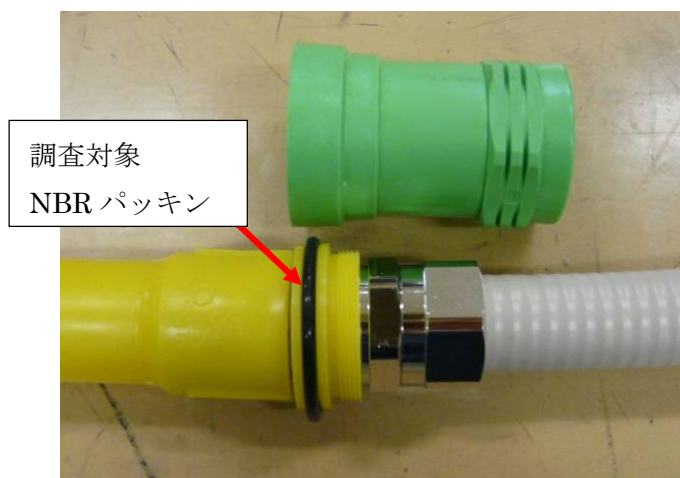


図 2-2 フレキ管ユニット保護カバーを外した状態

## 2.2 促進劣化比の算出法

### (1) アレニウス法による活性化エネルギーの算出

期待される耐用年数に相当する促進曝露条件を定めるには、活性化エネルギーに基づき求める必要がある。ゴムやプラスチックなどの有機材料の活性化エネルギー算出法として一般的に用いられているものにアレニウス法が挙げられ ISO、ASTM などで採用されている。アレニウス法は反応速度論から導かれ、速度定数の対数が絶対温度の逆数に比例することで成立する手法である。ゴムの寿命予測においては経時劣化が一次の化学反応として取り扱えると仮定したときに成立する手法であり、温度因子のみを劣化因子として考慮した式である。

ゴム材料は使用環境により劣化が進行し、酸化などの化学的变化により高分子化を伴う硬化現象や低分子化を伴う軟化現象など物理的变化を示す。劣化が進行した結果、製品に要求される性能が満たされなくなり寿命に至る。アレニウス法は反応速度論から導入されたもので化学反応、拡散等の現象において以下の式が成立する。

$$k=A \cdot e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

$k$ : 速度定数,  $A$ : 頻度因子 (反応定数),  $R$ : ガス定数 (8.314J/mol)

$T$ : 絶対温度 (K),  $E_a$ : 見かけの活性化エネルギー (J/mol) {cal/mol}

①式の両辺の自然対数をとると

$$\ln k = (-E_a/RT) + \ln A \quad (2)$$

②式より  $1/T$  と  $\ln k$  をグラフにプロットするとその勾配が  $-E_a/R$  となる。

すなわち

$$\alpha = -(E_a/R) \rightarrow E_a = -\alpha R \quad (3)$$

$\alpha$ : 勾配

すなわち種々の温度における速度定数  $k$  がわかれば活性化エネルギー  $E_a$  を求めることができる。促進曝露時間と永久ひずみ及び見かけ粘度のプロットより、促進曝露前に対して永久ひずみ及び見かけ粘度変化率がある一定の値 ( $x\%$ ) まで増加する時間  $t_x$  を求めると  $(1/t_x)$  と  $k$  が比例関係にあることより、②式から次式が得られる。

$$\ln(1/t_x) = (-E_a/RT) + \ln A \quad (4)$$

したがって種々の温度における永久ひずみ及び見かけ粘度の変化率が  $x\%$  まで増加する時間から活性化エネルギーが算出される。本調査では、ISO11346 に準じて、物性値が初期値から 50% 低下するまでの時間を閾値として、温度 3 水準で水素ガスを曝露した状態で熱処理を行い、アレニウスプロットから得られた活性化エネルギーを求め、使用温度 20℃における促進比を算出した。

### (2) 閾値と耐用年数について

アレニウス法は寿命ラインとなる閾値を設定し、劣化指標となるパラメータが閾値に到達するまでの時間を求める。本調査では ISO11346 に準じて、初期値から 50%物性値が変化した点を閾

値として、活性化エネルギーを算出した。また、数十年以上の長期間水素環境下で使用された配管材料が現時点では入手不可能のため、期待される耐用年数に相当する促進曝露条件をアレニウス法で得られた促進比から算出した。耐用年数は、平成 27 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査（総合調査）からの助言により、ビルやマンションなどの配管材料の交換目安として 30 年間の指針を受け、配管材料の期待耐用年数を 30 年に設定した。

## 2.3 促進劣化処理

配管材料で使用するゴム部品は、水素ガスに接触した状態となる。そのため、促進劣化処理についても、水素ガスを充填した状態で行なった。水素ガスの充填圧力は、配管材料の耐用圧力の 1.1 倍とした。耐圧容器の曝露状況を図 2-3、図 2-4 に示す。

### (1) NBR パッキン

試験片にひずみを与えた状態で耐圧容器に投入し、促進劣化処理した。試験状況を図 2-5 に示す。

試験方法：JIS K 6262：2013「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—常温，高温及び低温における圧縮永久ひずみの求め方」

使用試験機：水素用耐圧容器（高压システム㈱製）

処理温度：60±2℃、80±2℃、100±2℃（3 水準）

処理時間：1 日、2 日、5 日、10 日、20 日、30 日、40 日、50 日、60 日

水素充填圧力：1.1MPa

試験片作製：O リングを長さ約 15 mm に切断

試験片形状：φ 4.5 mm×約 15 mm

測定方向：試料厚さ方向

圧縮率：25%

測厚器：高分子計器(株)製 測厚器 SDA-25

### (2) シリコン系シール材

試験片にひずみを与えた状態で耐圧容器に投入した。試験状況を図 2-6 に示す。

試験方法：JIS K 6273：2006「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張永久ひずみ，伸び率及びクリープ率の求め方」

使用試験機：水素用耐圧容器（高压システム㈱製）

処理温度：60±2℃，80±2℃，100±2℃（3 水準）

処理時間：2 日、4 日、6 日、10 日、15 日、25 日

水素充填圧力：0.4 MPa

試験片作製：PTFE 板上に供試料をキャストし、室温で乾燥させた後、打ち抜き加工

試験片形状：幅 10 mm×長さ約 50 mm

試験片数：1

標線間距離：20 mm

伸長率：25%（標線 20 mm→25 mm）

測定器：ノギス

### (3) グリース

アルミ容器にグリースを充填した状態で水素曝露した。図 2-7 に水素曝露の様子（外観図）を示した。

使用試験機：水素用耐圧容器（高圧システム㈱製）

処理温度： $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $100\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $120\pm 2^{\circ}\text{C}$ （3水準）

処理時間：1日、2日、5日、7日、14日

水素充填圧力：0.1 MPa



図 2-3 耐圧容器外観

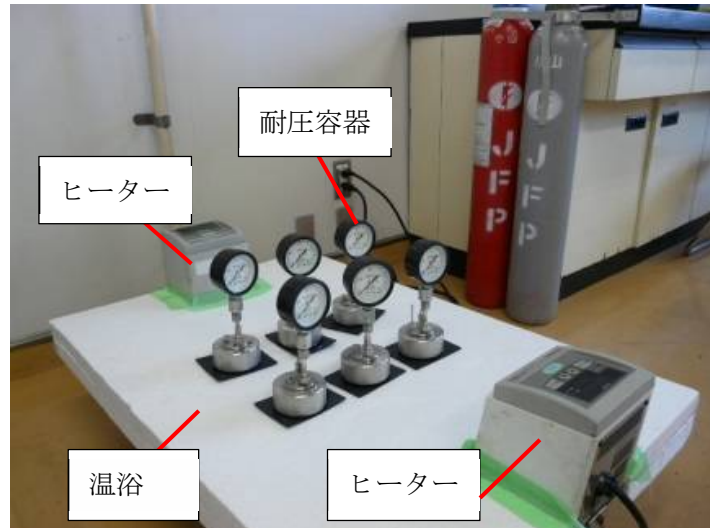


図 2-4 促進曝露状況

圧縮ひずみ（ストレス）を与えた状態で耐圧容器に投入する

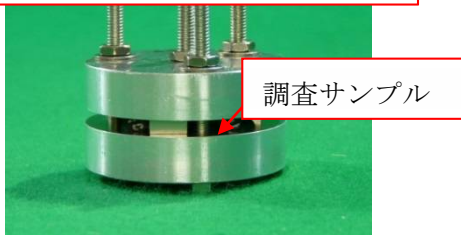


図 2-5 圧縮永久ひずみ測定治具

引張ひずみ（ストレス）を与えた状態で耐圧容器に投入する

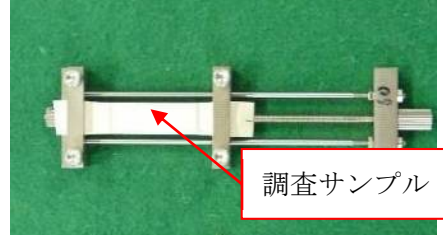


図 2-6 引張永久ひずみ測定治具

調査サンプル

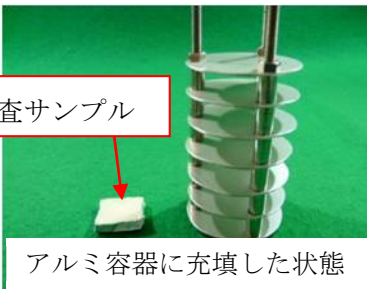


図 2-7 グリース曝露状態

## 2.4 水素曝露後の物性測定結果

### (1) NBR パッキンの圧縮永久ひずみ測定

水素曝露処理後、試験片を治具から取り外し、 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ の大気圧下で 30 分間静置して O リングの厚さを測定後、圧縮永久ひずみ率を算出した結果を表 2-2～表 2-4 及び図 2-8 に示す。

表 2-2 NBR の圧縮永久ひずみ試験結果 (60℃)

| 処理日数<br>試験片 | 圧縮永久ひずみ (%) |   |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
|             | 1           | 2 | 5  | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| n=1         | 8           | 9 | 13 | 17 | 20 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| n=2         | 8           | 9 | 13 | 17 | 20 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| n=3         | 8           | 9 | 13 | 17 | 19 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| 中央値         | 8           | 9 | 13 | 17 | 20 | 23 | 24 | 25 | 26 |

表 2-3 NBR の圧縮永久ひずみ試験結果 (80℃)

| 処理日数<br>試験片 | 圧縮永久ひずみ (%) |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|             | 1           | 2  | 5  | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| n=1         | 13          | 17 | 23 | 27 | 32 | 38 | 41 | 43 | 46 |
| n=2         | 13          | 17 | 23 | 27 | 32 | 38 | 41 | 44 | 46 |
| n=3         | 14          | 18 | 24 | 27 | 32 | 39 | 42 | 43 | 46 |
| 中央値         | 13          | 17 | 23 | 27 | 32 | 38 | 41 | 43 | 46 |

表 2-4 NBR の圧縮永久ひずみ試験結果 (100℃)

| 処理日数<br>試験片 | 圧縮永久ひずみ (%) |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|             | 1           | 2  | 5  | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| n=1         | 26          | 29 | 37 | 44 | 52 | 62 | 67 | 72 | 78 |
| n=2         | 26          | 28 | 37 | 44 | 52 | 62 | 67 | 71 | 77 |
| n=3         | 25          | 28 | 36 | 44 | 52 | 62 | 67 | 72 | 78 |
| 中央値         | 26          | 28 | 37 | 44 | 52 | 62 | 67 | 72 | 78 |



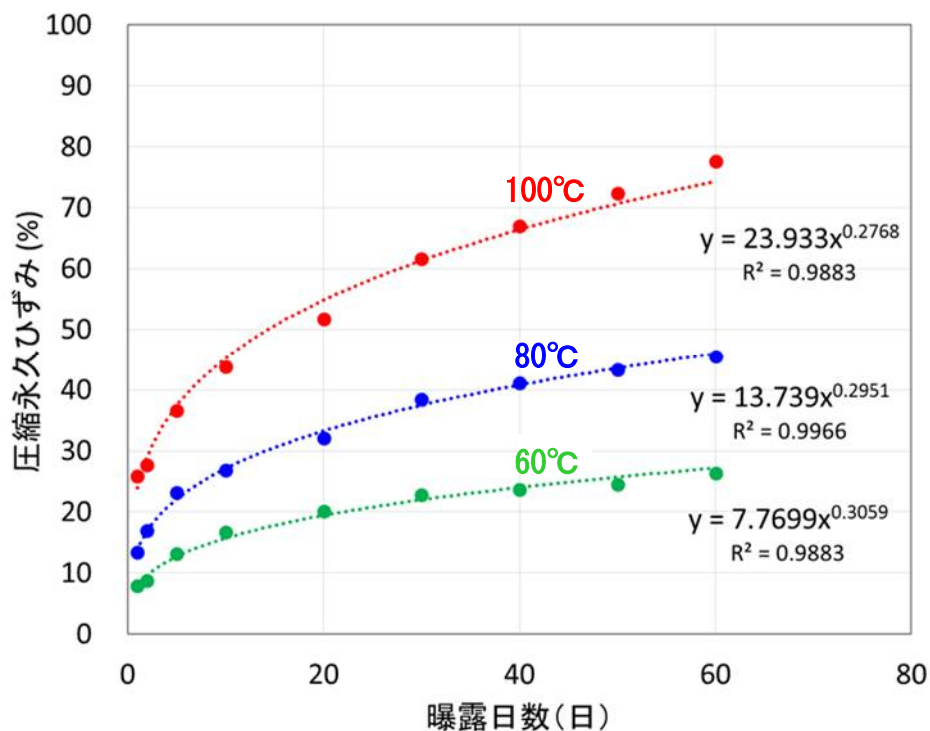


図 2-8 曝露温度と圧縮永久ひずみの関係

## (2) シリコン系シール材の引張永久ひずみ測定

水素曝露処理後、試験片の伸長を除き、 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ の大気圧下で 30 分間静置して標線間距離を測定後、下記の⑤式より引張永久ひずみを算出した結果を表 2-5～表 2-7 及び図 2-9 に示す。

$$\text{引張永久ひずみ (\%)} = \frac{\text{曝露後標線間距離 (mm)} - \text{曝露前標線間距離 (mm)}}{\text{伸長量 (mm)}} \times 100 \quad \text{⑤}$$

曝露前標線間距離 : 20 mm

伸長量 : 5 mm

表 2-5 シリコン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (60°C)

| 試験片 \ 処理日数 | 引張永久ひずみ (%) |    |    |    |    |    |
|------------|-------------|----|----|----|----|----|
|            | 2           | 4  | 6  | 10 | 15 | 25 |
| n=1        | 25          | 27 | 32 | 34 | 36 | 40 |
| n=2        | 24          | 27 | 30 | 33 | 34 | 38 |
| 平均値        | 25          | 27 | 31 | 33 | 35 | 39 |

表 2-6 シリコン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (80℃)

| 試験片 \ 処理日数 | 引張永久ひずみ (%) |    |    |    |    |    |
|------------|-------------|----|----|----|----|----|
|            | 2           | 4  | 6  | 10 | 15 | 25 |
| n=1        | 34          | 38 | 42 | 45 | 47 | 50 |
| n=2        | 33          | 36 | 40 | 44 | 44 | 48 |
| 平均値        | 33          | 37 | 41 | 44 | 46 | 49 |

表 2-7 シリコン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (100℃)

| 試験片 \ 処理日数 | 引張永久ひずみ (%) |    |    |    |    |    |
|------------|-------------|----|----|----|----|----|
|            | 2           | 4  | 6  | 10 | 15 | 25 |
| n=1        | 39          | 45 | 48 | 54 | 57 | —  |
| n=2        | 39          | 46 | 50 | 56 | 59 | —  |
| 平均値        | 39          | 46 | 49 | 55 | 58 | —  |

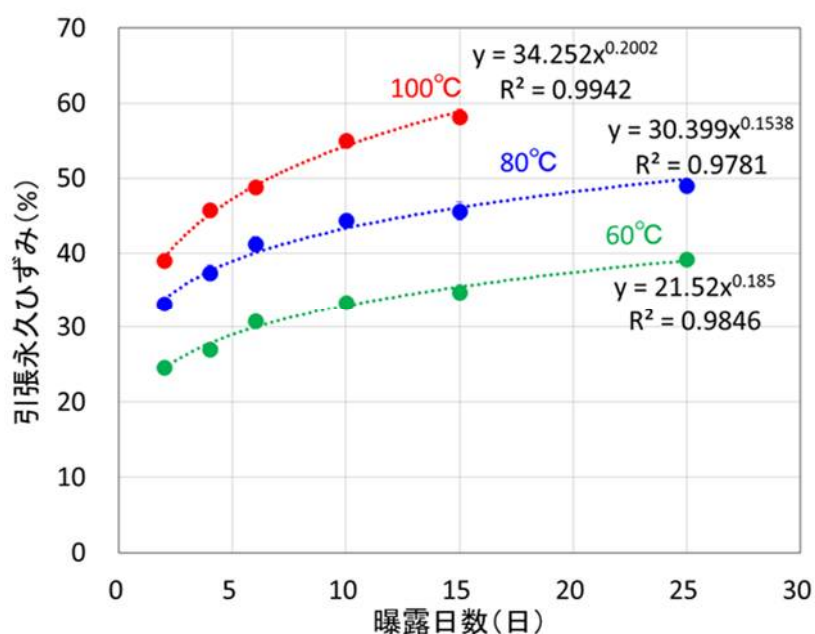


図 2-9 曝露温度と引張永久ひずみの関係

### (3) グリースの見かけ粘度測定

水素曝露処理後、グリースを採取し JIS Z 8803:2011「液体の粘度測定方法」に準じてグリースの見かけ粘度を測定した結果を表 2-8～表 2-10 及び図 2-11 に示す。

測定項目：見かけ粘度

試験片形状：グリース状

使用治具：上部コーンプレートφ25mm, 0.1rad 下部平行プレートφ25mm

プレート間距離：0.5 mm

測定モード：回転モード

測定温度：23±2℃

回転速度：0.1 [1/s]

測定時間：250 sec

使用試験機：TA・Instruments 社製 動的粘弾性測定システム ARES (図 2-10)



図 2-10 動的粘弾性測定装置

表 2-8 グリースの見かけ粘度測定結果 (80℃)

| 試験片 \ 処理日数 | 見かけ粘度 (kPa·s) |      |      |      |      |      |
|------------|---------------|------|------|------|------|------|
|            | 0             | 1    | 2    | 5    | 7    | 14   |
| n=1        | 4.23          | 4.51 | 4.56 | 4.80 | 4.80 | 5.31 |
| n=2        | 4.26          | 4.42 | 4.52 | 4.67 | 4.96 | 5.17 |
| n=3        | 4.36          | 4.41 | 4.53 | 4.77 | 4.85 | 5.10 |
| 平均値        | 4.28          | 4.45 | 4.54 | 4.75 | 4.87 | 5.19 |
| 変化率(%)     | —             | +4   | +6   | +11  | +14  | +21  |

表 2-9 グリースの見かけ粘度測定結果 (100℃)

| 試験片 \ 処理日数 | 見かけ粘度 (kPa·s) |      |      |      |      |      |
|------------|---------------|------|------|------|------|------|
|            | 0             | 1    | 2    | 5    | 7    | 14   |
| n=1        | 4.23          | 4.50 | 4.60 | 4.94 | 5.06 | 5.67 |
| n=2        | 4.26          | 4.52 | 4.67 | 5.04 | 5.03 | 5.51 |
| n=3        | 4.36          | 4.46 | 4.74 | 4.97 | 5.03 | 5.56 |
| 平均値        | 4.28          | 4.49 | 4.67 | 4.98 | 5.04 | 5.58 |
| 変化率(%)     | —             | +5   | +9   | +16  | +18  | +30  |

表 2-10 グリースの見かけ粘度測定結果 (120℃)

| 試験片 \ 処理日数 | 見かけ粘度 (kPa・s) |      |      |      |      |      |
|------------|---------------|------|------|------|------|------|
|            | 0             | 1    | 2    | 5    | 7    | 14   |
| n=1        | 4.23          | 4.69 | 5.08 | 5.50 | 5.81 | 6.46 |
| n=2        | 4.26          | 4.74 | 5.06 | 5.41 | 5.91 | 6.41 |
| n=3        | 4.36          | 4.71 | 5.11 | 5.50 | 5.74 | 6.82 |
| 平均値        | 4.28          | 4.71 | 5.08 | 5.47 | 5.82 | 6.56 |
| 変化率(%)     | —             | +10  | +19  | +28  | +36  | +53  |

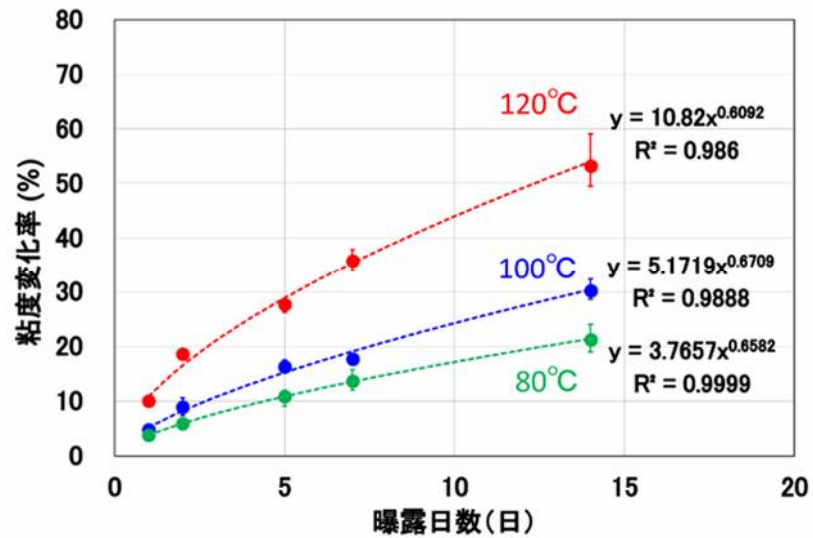


図 2-11 曝露温度と見かけ粘度変化率の関係

## 2.5 劣化促進比の算出

本調査では最大 1440 時間の促進劣化処理を行い、曝露時間に対して圧縮永久ひずみ率、引張永久ひずみ率及び見かけ粘度をそれぞれプロットした。NBR パッキン、シリコン系シール材及びグリースの各近似曲線から、圧縮永久ひずみ率、引張永久ひずみ率及び見かけ粘度変化率が 50% 変化するまでの時間をそれぞれ求めた。横軸に測定温度の逆数、縦軸に圧縮永久ひずみ率、引張永久ひずみ率及び見かけ粘度変化率が 50% 変化するまでの時間(hrs)から求めた  $\ln \frac{1}{t_x}$  をそれぞれの温度でアレニウスプロットした結果を図 2-11～図 2-13 に示す。

$$\ln \frac{1}{t_x} = -\frac{E_a}{RT} + \ln A \quad (6)$$

⑥式の勾配より、活性化エネルギー  $E_a$  が求まる。勾配  $\alpha = -\frac{E_a}{R}$  とすると活性化エネルギー  $E_a$  は

$$E_a = -\alpha R = \alpha \times 8.314 \quad (7)$$

となり、使用温度 20℃において圧縮永久ひずみ率、引張永久ひずみ率及び見かけ粘度変化率が 50% 変化した時点における活性化エネルギーをそれぞれ表 2-11 に示す。

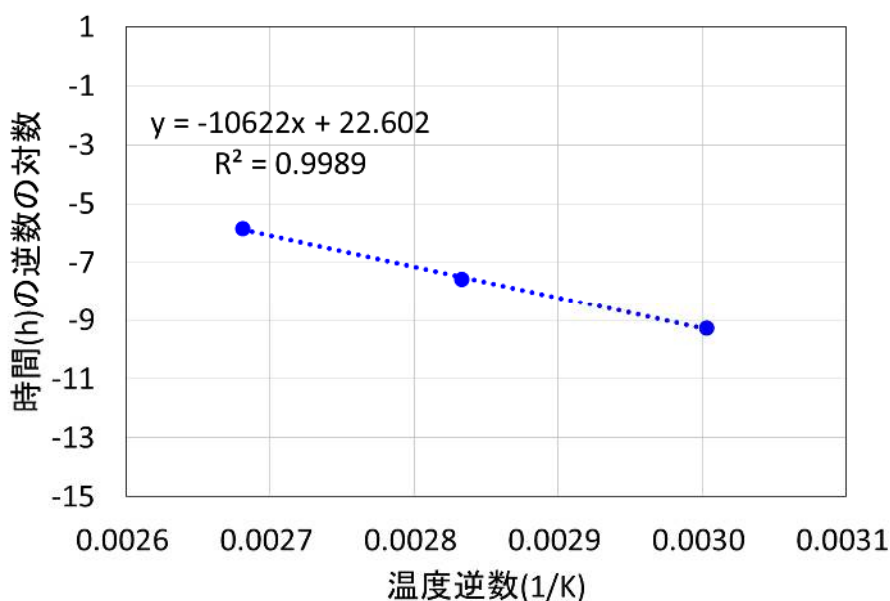


図 2-12 NBR パッキンのアレニウスプロット

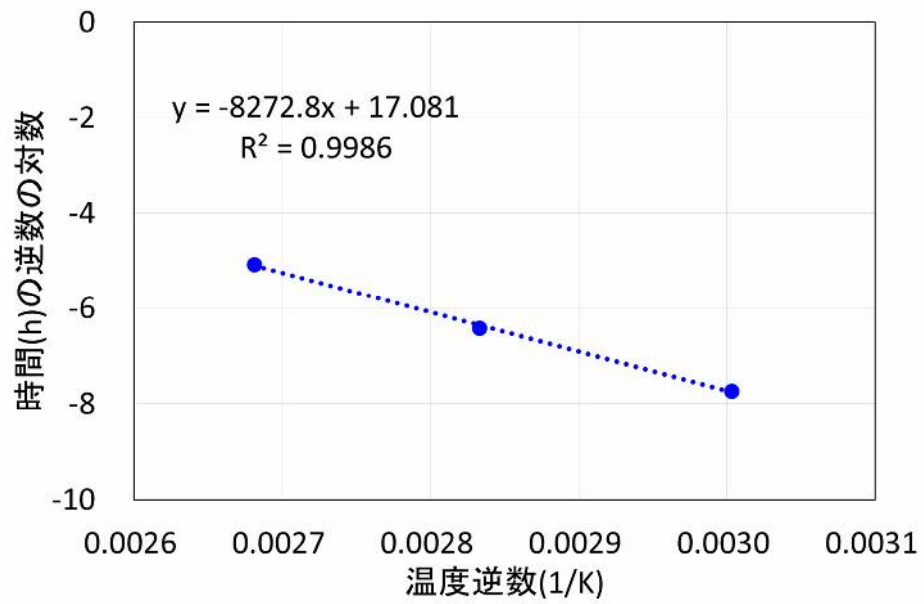


図 2-13 シリコン系シール材のアレニウスプロット

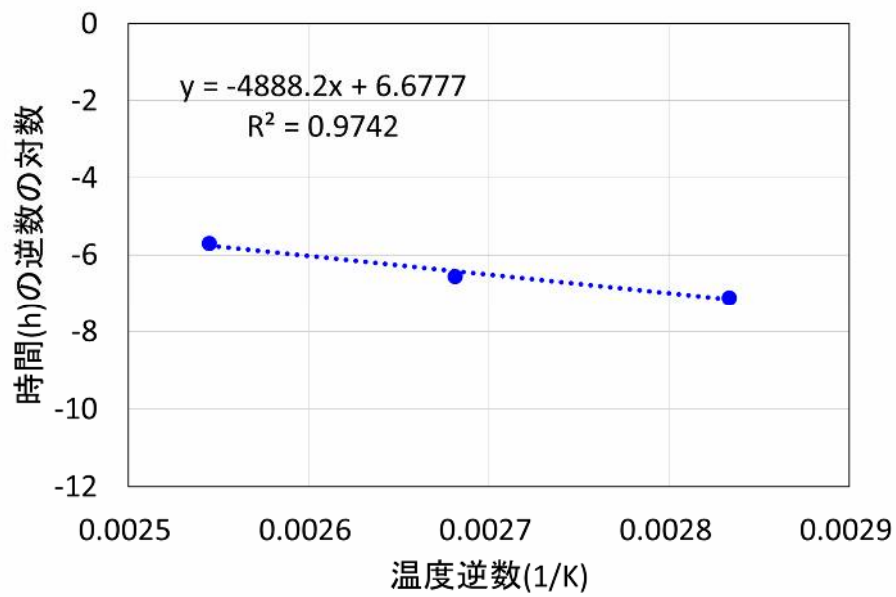


図 2-14 グリースのアレニウスプロット

表 2-11 アレニウスプロットより得られた活性化エネルギー

| 材料        | 劣化パラメータ | 活性化エネルギー<br>(kJ/mol) |
|-----------|---------|----------------------|
| NBR パッキン  | 圧縮永久ひずみ | 88.3                 |
| シリコン系シール材 | 引張永久ひずみ | 68.6                 |
| グリース      | 見かけ粘度   | 40.6                 |

下記⑧式より、使用温度 20℃における各劣化パラメータが 50%変化するまでの時間から、促進曝露による促進比を算出した結果を表 2-12 に示す。

$$\text{促進比} = \frac{\text{使用温度}20^{\circ}\text{Cで劣化パラメータが}50\% \text{に到達するまでの時間}}{\text{促進曝露温度}x^{\circ}\text{Cで劣化パラメータが}50\% \text{に到達するまでの時間}} \quad \text{⑧}$$

表 2-12 促進曝露温度と促進比

| 材料        | 使用温度 20℃で劣化<br>パラメータが 50%変化す<br>るまでの時間 (h) | 促進曝露温度 x℃で劣<br>化パラメータが 50%変化<br>するまでの時間 (h) | 促進曝露温度<br>(℃) | 促進比 |
|-----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------|-----|
| NBR パッキン  | 847935                                     | 1788                                        | 80            | 474 |
| シリコン系シール材 | 69830                                      | 164                                         | 100           | 427 |
| グリース      | 22150                                      | 619                                         | 100           | 36  |

以上の結果より、各促進曝露温度において、使用温度 20℃で耐用年数 30 年相当の促進曝露時間は表 2-13 となる。

表 2-13 使用温度 20℃において耐用年数 30 年に相当する曝露時間

| 材料        | 促進曝露温度<br>(℃) | 使用温度 20℃において耐用年数 30 年に<br>相当する曝露時間 (h) |
|-----------|---------------|----------------------------------------|
| NBR パッキン  | 80            | 554                                    |
| シリコン系シール材 | 100           | 616                                    |
| グリース      | 100           | 7339                                   |

## 2.6 都市ガス配管材料のシール部材に対する水素影響評価手法の検討 まとめ

平成 26 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査で得られた劣化パラメータを用いて、配管材料で使用される①NBR パッキン、②シリコン系シール材、③グリースのアレニウスプロットから、活性化エネルギー及び劣化促進比を算出した。算出結果を表 2-14 に示す。

表 2-14 ガスシール材料の活性化エネルギー及び劣化促進比

| 材料          | 劣化パラメータ | 活性化エネルギー                      | 劣化促進比            |
|-------------|---------|-------------------------------|------------------|
| ① NBR パッキン  | 圧縮永久ひずみ | 88.3 kJ/mol<br>(21.1 cal/mol) | 474 倍 (20℃→80℃)  |
| ② シリコン系シール材 | 引張永久ひずみ | 68.6kJ/mol<br>(16.4 cal/mol)  | 427 倍 (20℃→100℃) |
| ③ グリース      | 見かけ粘度   | 40.6 kJ/mol<br>(9.7 cal/mol)  | 36 倍 (20℃→100℃)  |

劣化促進比より、ビルやマンションなどの集合建屋における配管材料の耐用年数 30 年に相当する促進劣化条件は、表 2-15 となる。

表 2-15 使用温度 20℃において耐用年数 30 年に相当する曝露時間

| 材料        | 促進曝露温度<br>(℃) | 使用温度 20℃において耐用年数 30 年に<br>相当する曝露時間 (h) |
|-----------|---------------|----------------------------------------|
| NBR パッキン  | 80            | 554                                    |
| シリコン系シール材 | 100           | 616                                    |
| グリース      | 100           | 7339                                   |

ただし、①NBR パッキン、②シリコン系シール材及び③グリースは、いずれの材料において配合組成が異なれば、おのずと活性化エネルギー及び劣化促進比は異なるため、他の配管材料に適用する際は、取り扱いに注意が必要である。



### 3. 配管材料の長期水素曝露影響評価

第2章により得られた促進劣化比から期待寿命に相当する促進劣化処理を実施した。期待寿命は、平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査（総合調査）の助言により、30年と設定した。期待寿命30年に相当する促進劣化処理を行った配管の水素気密性を確認することで、長期間の使用を考慮した水素適用性調査を行った。

#### 3.1 調査対象となる配管材料

調査対象となる配管材料を表3-1及び図3-1～図3-12に示す。

表3-1 調査対象配管材料

| 番号 | 分類                |         | 配管部品名称            |
|----|-------------------|---------|-------------------|
| 1  | 管・材料と<br>の<br>接合部 | 埋設部     | フレキユニット※1         |
| 2  |                   | 露出部     | フレキ継手※1           |
| 3  |                   |         | ねじ込み継手※2          |
| 4  | 管からの分岐            |         | 鋼管用サドル※3          |
| 5  | メーターとの結合          |         | メーターユニオン※4        |
| 6  | ガスの               | 管路中     | 緊急遮断バルブ（ハネ式）※6    |
| 7  | 遮断                | 機器との接続部 | 検査口付ねじガス栓※6       |
| 8  | 特殊条件部             |         | ボールスライドジョイント※5, 7 |
| 9  |                   |         | エキスパンション継手        |
| 10 | その他               |         | 検圧プラグ             |

※1 フレキユニット及びフレキ継手は実際の使用状況と同様に接続し、あわせて気密性を調査した。フレキユニットのポリエチレン（PE）管はPLSM継手及びトランジション継手を用いて測定装置に接続した外観を図3-1・図3-2に示す。

※2 SUSパイプニップルを両端に接続した。SUSパイプニップルとねじ込み継手のねじシール材を使用した外観を図3-4に示す。

※3 φ50mmのPLP管を組み付けた。

※4 スリーブにNBRパッキンを取り付けた。概略図を図3-3に示す。

※5 フランジ部の接続にはガスケットにシール剤を塗布して用いた。

※6 バルブを開放した状態、閉鎖した状態でそれぞれ測定した。

※7 配管を延長した状態、短縮した状態でそれぞれ測定した。

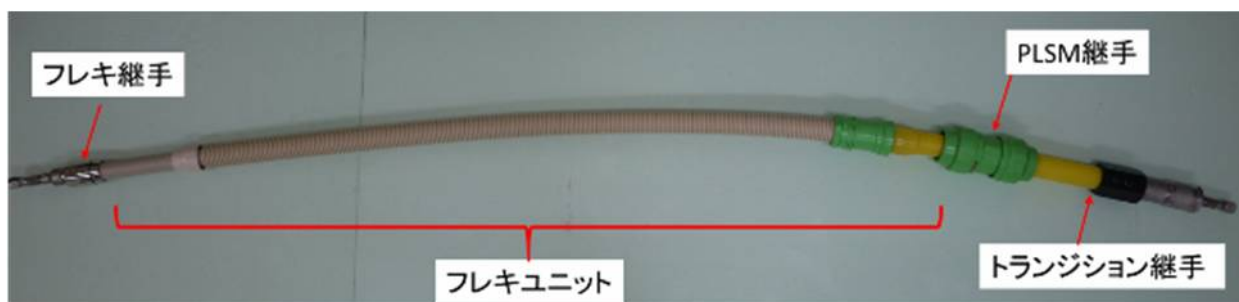


図 3-1 フレキユニット及びフレキ継手



図 3-2 フレキユニット及びフレキ継手（フレキ継手部）

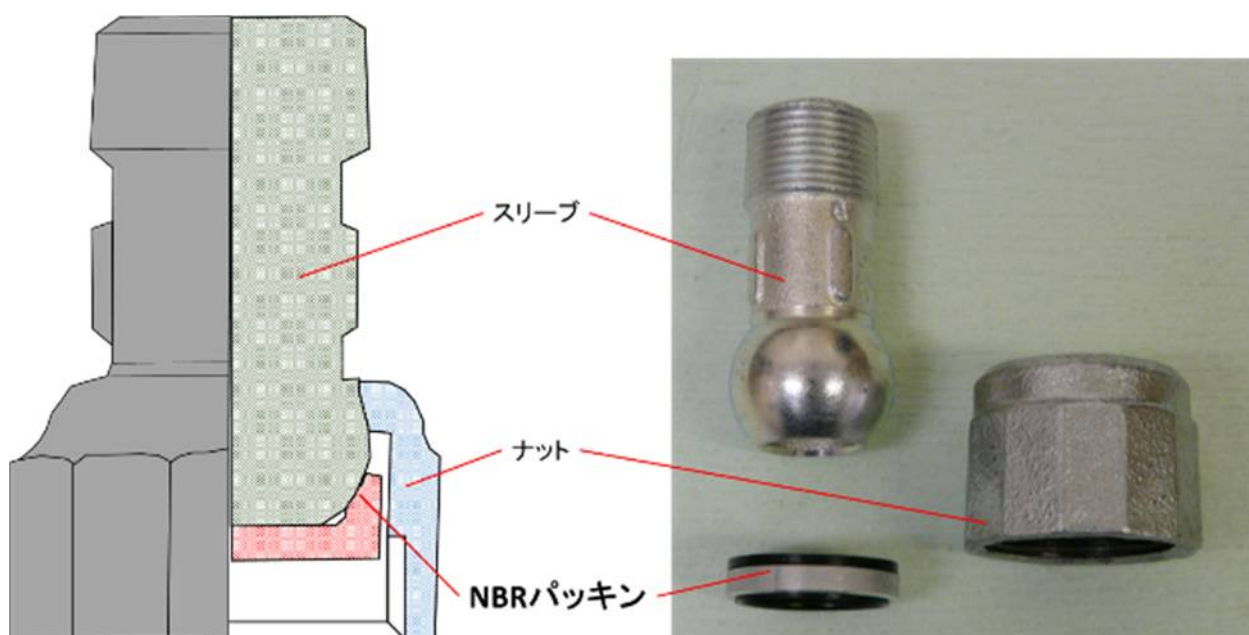


図 3-3 メーターユニオン概略図

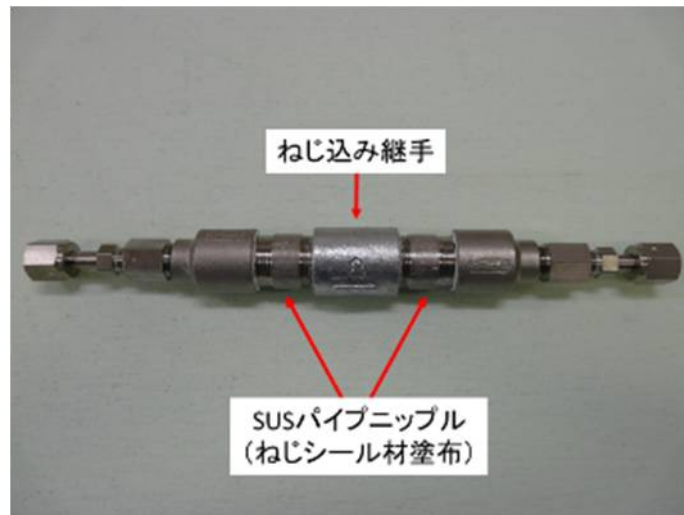


図 3 - 4 ねじ込み継手



図 3 - 5 鋼管用サドル



図 3 - 6 メーターユニオン



図 3 - 7 緊急遮断バルブ (バネ式)



図 3 - 8 検査口付ねじガス栓



図 3 - 9 ボールスライドジョイント 伸縮状態



図 3 - 10 ボールスライドジョイント 延長状態

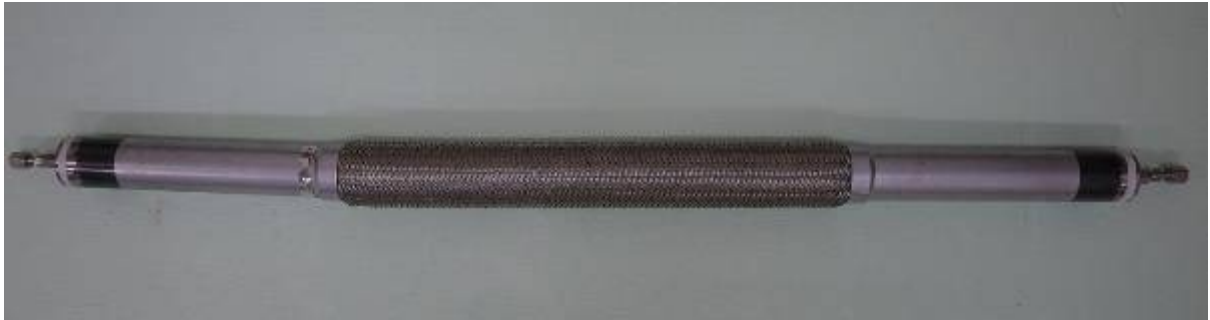


図 3 - 11 エキスパンション継手



図 3 - 12 検圧プラグ

### 3.2 促進劣化処理

#### (1) NBR パッキンを使用している配管（複雑な形状）

フレキ管ユニットの NBR パッキンから得られた値を他の配管材料にも代用し、耐用年数 30 年に相当する条件（ $80^{\circ}\text{C} \times 554$  時間）で実施した。メーターユニオンは 10 年でパッキンの交換が行われるため、10 年相当の促進劣化処理条件（ $80^{\circ}\text{C} \times 185$  時間）で実施した。配管部品に圧力計を取付け、耐用圧力の 1.1 倍で水素を封入し、防水袋に入れ水浴中にて促進劣化処理を行った。概略を図 3 - 13 に示す。実使用状況から、配管表面には熱電対を貼付け、表面温度を計測しながらヒーターの出力を調節した。配管材料の表面温度を図 3 - 14 に示す。前述しているように、ゴム材料は配合組成が異なるとアレニウスプロットから得られる活性化エネルギー

が異なる。本調査は、フレキ管ユニットで用いられている NBR パッキンから算出した活性化エネルギーを代表として用いており、加速倍率を一律に定めているので取り扱いには注意が必要である。

ヒーター：ヤマト科学(株)製 投込式恒温装置サーモメイト BF600

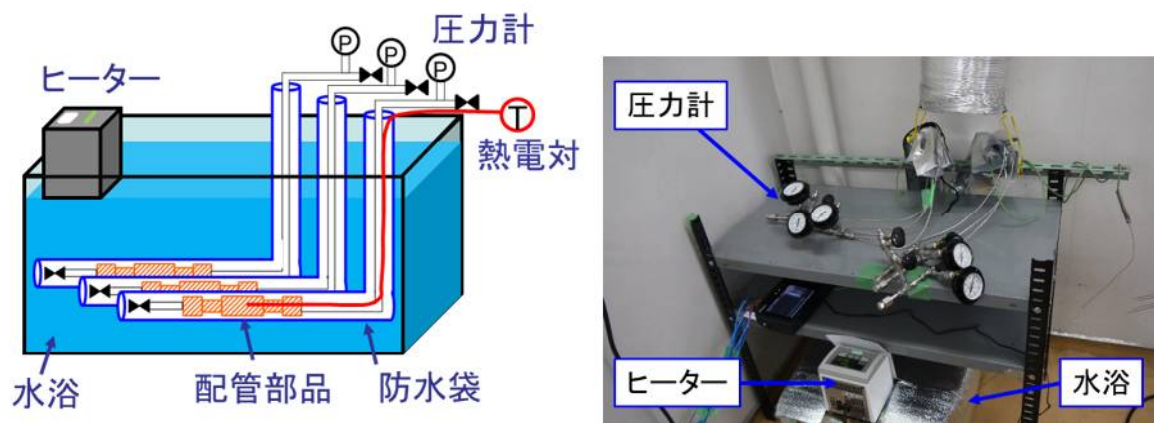


図 3-13 水浴を用いた促進劣化処理

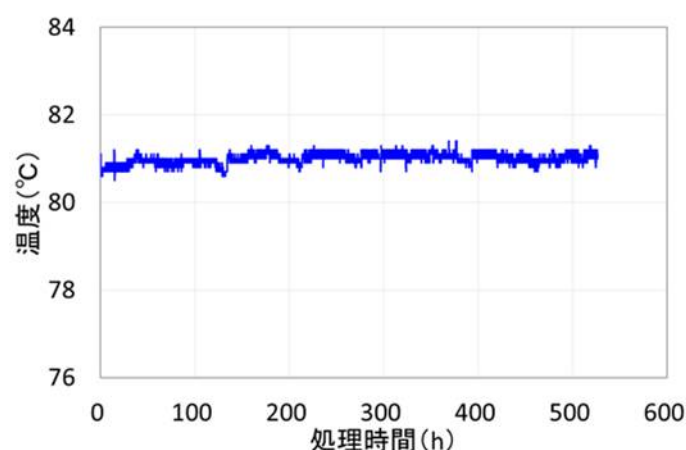


図 3-14 水浴処理における配管材料表面の温度変化

(2) NBR パッキンを使用している配管（ボールスライドジョイント， エキスパンション継手）

配管部品に圧力計を取付け、耐用圧力の 1.1 倍で水素を封入し、ジャケットヒーターを用いて配管を加熱して促進劣化処理を行った。促進劣化処理状況を図 3-15 に示す。処理条件は 2.5 項で得られた耐用年数 30 年に相当する条件（80℃×554 時間）で実施した。配管表面には熱電対を貼付け、表面温度を計測しながらジャケットヒーターの出力を調節した。表面温度の計測結果を図 3-16 に示す。

ジャケットヒーター：坂口電熱(株)製 200V 1.66 kW（ボールスライドジョイント）

坂口電熱(株)製 200V 1 kW（エキスパンション継手）

温度制御装置：アズワン(株)製 デジタル温度調節器 TR-K





図 3-15 ジャケットヒーターを用いた促進劣化処理

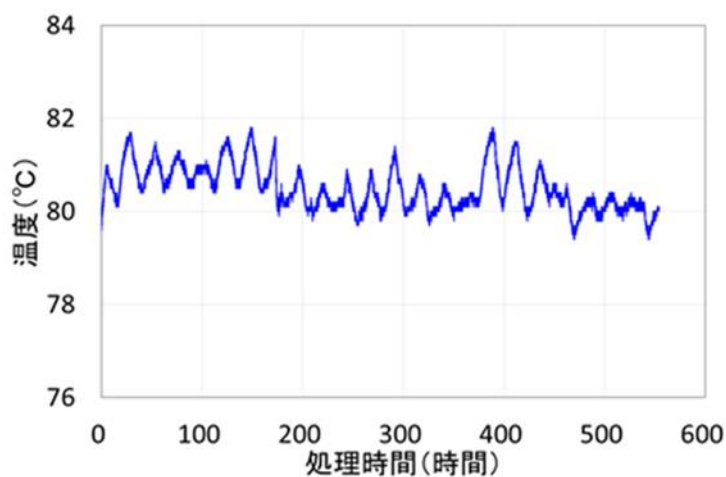


図 3-16 大型恒温槽における配管材料表面の温度変化

### (3) NBR パッキンを使用している配管（フレキユニット / フレキ継手）

フレキユニットは一部にポリエチレンが使用されている。したがって、ポリエチレンの耐熱性を考慮して処理温度は 70°C とし、2.5 項で得られた耐用年数 30 年に相当する処理時間は 1332 時間と算出した。配管部品に圧力計を取付け、耐用圧力の 1.1 倍で水素を封入した。配管が長尺のため処理は、図 3-17 に示す大型恒温槽で行い、フレキユニットとフレキ継手表面にはそれぞれ熱電対を貼付けた。表面温度の計測結果を図 3-17 に示す。

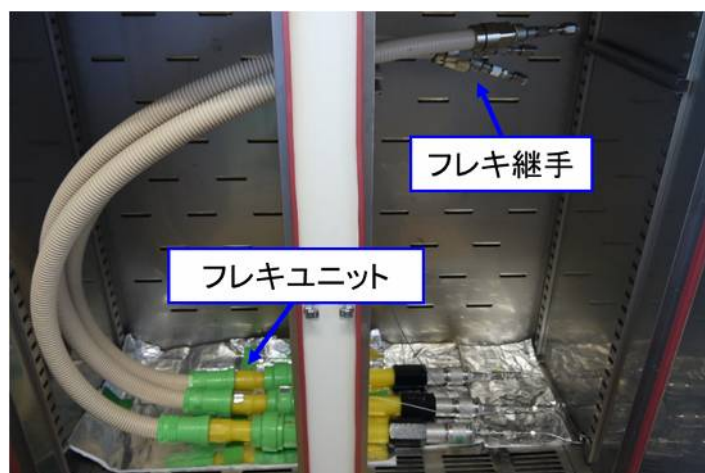


図 3-17 大型恒温槽を用いた促進劣化処理

(4) シリコン系シール材を使用している配管（ねじ込み継手）

配管部品に圧力計を取付け、耐用圧力の 1.1 倍で水素を封入し、図 3 - 16 に示す恒温槽を用いて配管を加熱して促進劣化処理を行った。処理条件は 2.5 項で得られた耐用年数 30 年に相当する条件 ( $100^{\circ}\text{C} \times 616$  時間) で実施した。配管表面には熱電対を貼付け、表面温度を計測した。表面温度の計測結果を図 3 - 17 に示す。

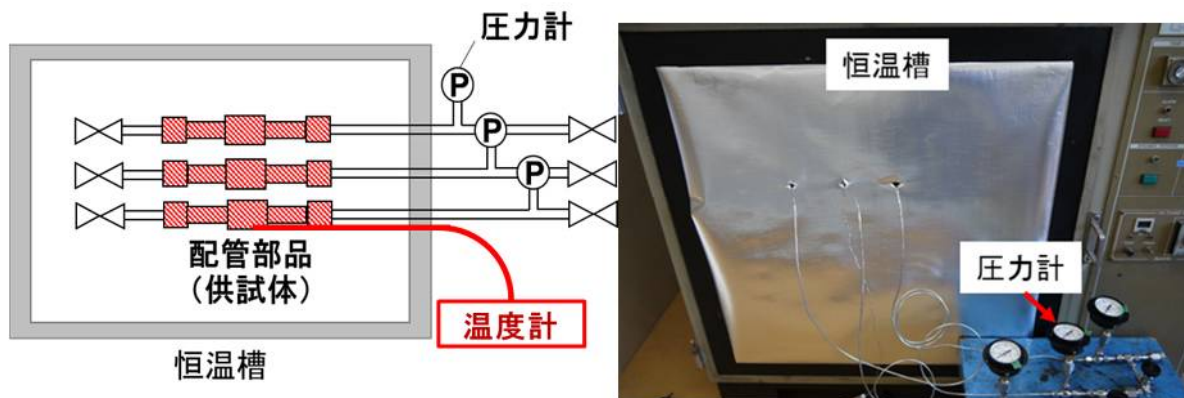


図 3 - 16 恒温槽を用いた促進劣化処理

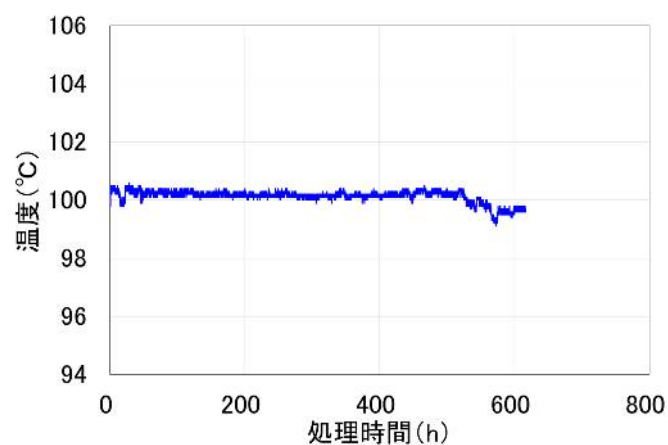


図 3 - 17 恒温槽における配管材料表面の温度変化



### 3.3 水素気密性試験

#### (1) エイジング処理の影響について

水素ガスは、金属やゴム材料などに吸着する現象が確認されている。水素気密性試験は、水素ガスを充填した直後から配管材料内部に吸着し、充填ガスの圧力が低下する現象が懸念される。本調査においては、配管材料（メーターユニオン）に水素を封入した際に、図 3・18 のように封入直後から約 8 時間圧力が徐々に低下し、その後圧力が一定となった。全ての配管材料でこのような事象が発現するか不明であるが、エイジング処理の有無が水素気密性に影響を及ぼす可能性があると考えられる。したがって、本調査では、エイジング処理として、水素ガスを各配管材料の 1.1 倍の圧力で充填した後、24 時間室温にて放置し、配管内部に十分な水素が充填されるように配慮した。

参考文献 気相水素の金属表面への吸着 南雲道彦 材料と環境 55, 92-99 (2006)

Influence of Types of Fillers on Hydrogen Solubility in Acrylonitrile Butadiene Rubber 藤原広匡 第 10 回水素先端世界フォーラム 講演要旨集 p78 (2016)

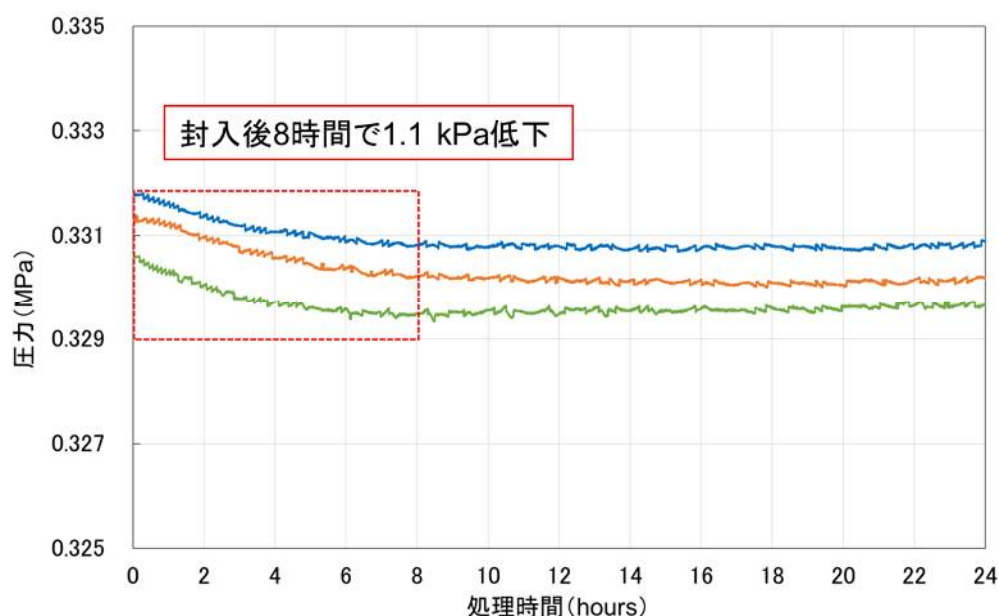


図 3 - 18 配管材料への水素封入初期の圧力低下

#### (2) 水素気密性試験方法

内管材料の水素気密性の評価は、供試体内に窒素を十分に流し、配管内を窒素で置換してから配管部品の耐用圧力の 1.1 倍で水素を封入し、密閉した状態での圧力低下を計測した。図 3・19～図 3・21 に示す水素気密性試験装置は同時に 3 検体測定可能である。配管は VCR 継手で接続し、供試体である配管部品は取り外し可能で、両端を封子バルブで閉じる構造とした。封子バルブにはメタルダイヤフラムバルブ（以下 MDV）を用いた。装置は断熱材上に設置し、配管の温度変化を低減させるため、配管を断熱材で包んだ。試験装置、水素ガス及び窒素ガスの仕様を表 3・2～表 3・7 に示す。

測定はエイジング処理後、時間の経過に伴う圧力（絶対圧）及び配管内温度の変化を測定し、シャルルの法則を用いて実測値から 23℃時の圧力を算出し、補正圧力とした。判定は試験開始時と 24 時間後の補正圧力差を求め、補正圧力が圧力精度よりも低下した場合は不合格、それ以外は合格とした。圧力計及び温度センサーの計測精度から以下のように算出した。

- ・センサーの圧力精度：±0.07 kPa
- ・熱電対の精度：±0.2℃
- ・指示調節計の精度：±0.3℃

テスト圧を  $P_A$  (kPa) とすると、測定温度誤差を考慮した圧力差精度は以下の式で求めることができる。それぞれのテスト圧で求めた 23℃での圧力差精度を表 3 - 8 に示す。

$$\text{圧力精度 (kPa)} = \frac{(P_A \pm 0.07) \times (273.15 + 23)}{(273.15 + 23 \mp 0.2 \mp 0.3)} - P_A$$

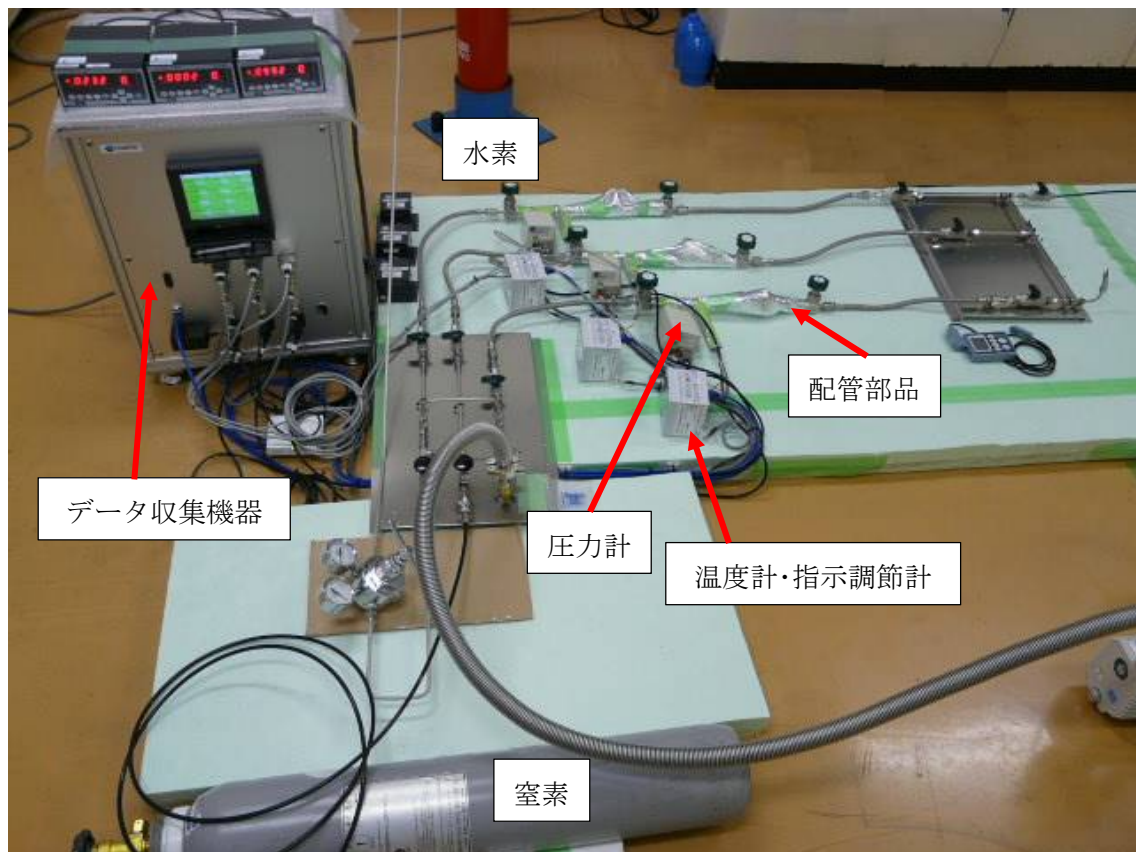


図 3 - 19 水素気密性試験装置

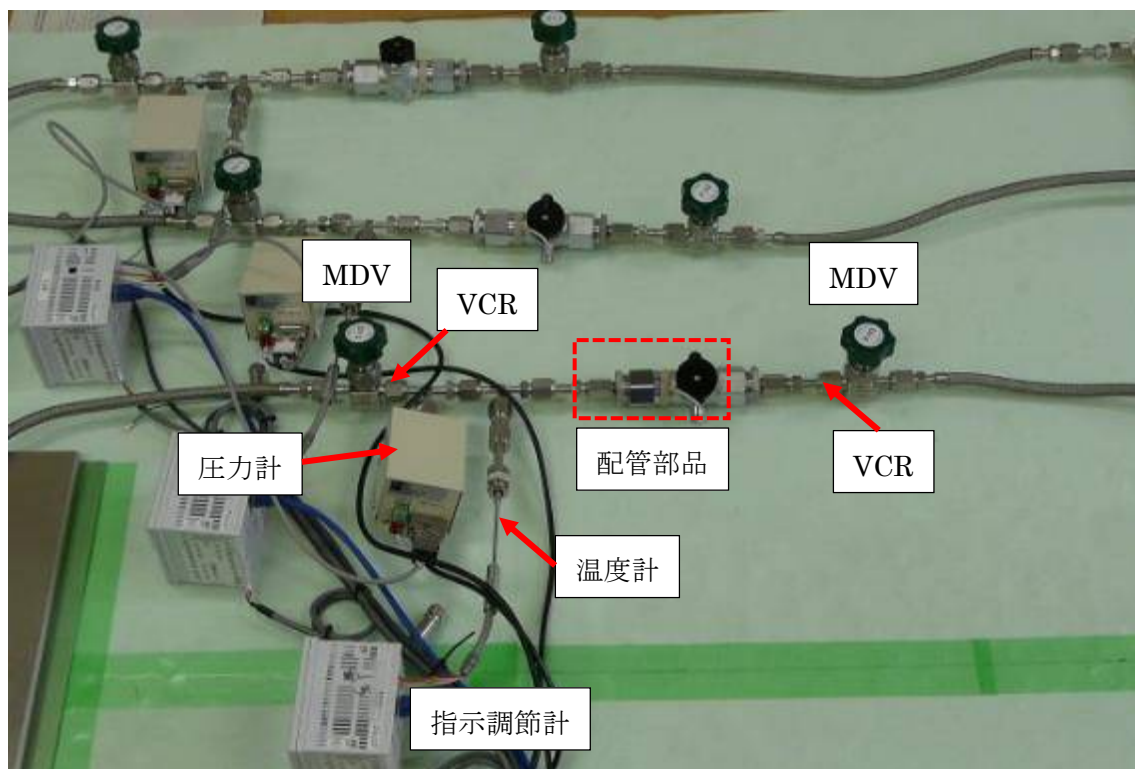


図 3 - 20 水素気密性試験装置詳細

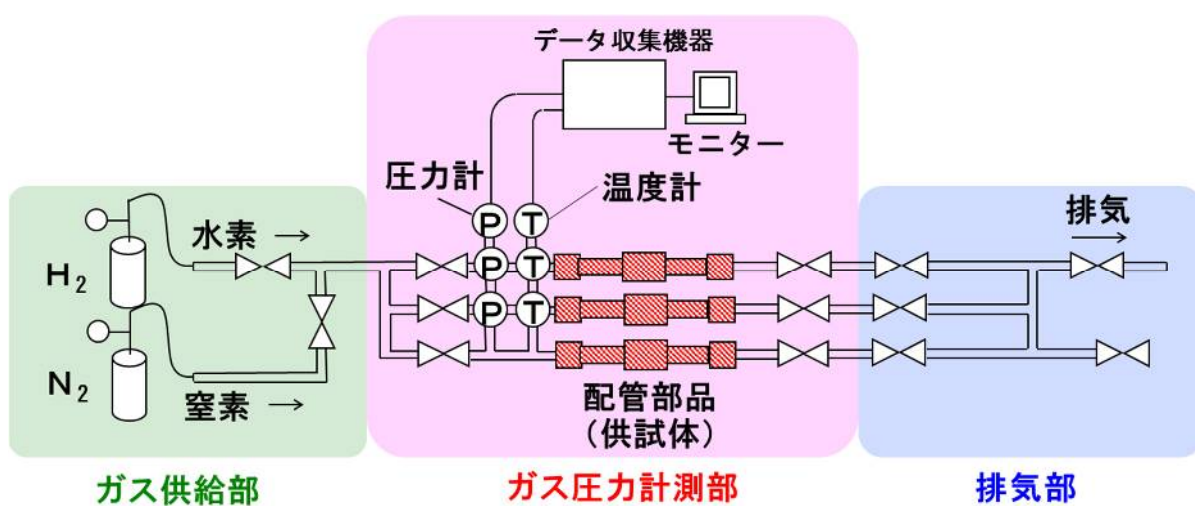


図 3 - 21 水素気密性装置概略図

表 3 - 2 圧力計の仕様（低圧用）

|        |                  |
|--------|------------------|
| メーカー   | 横河電機株式会社         |
| 型式     | MU101-GH1Z       |
| 検出原理   | シリコンレゾナント        |
| 測定範囲   | 0 ~ 700 kPa（絶対圧） |
| 精度     | 0.01% F.S        |
| 補償温度範囲 | 5 ~ 45℃          |

表 3 - 3 温度計の仕様

|       |                          |
|-------|--------------------------|
| メーカー  | 株式会社岡崎製作所                |
| 型式    | シース測温抵抗体 R35             |
| 測定範囲  | -200 ~ 500℃ (JIS C 1604) |
| 公称抵抗値 | Pt 100Ω at 0℃            |
| クラス   | A                        |
| 許容差   | ±0.2℃ (23℃時)             |

表 3 - 4 指示調節計の仕様

|       |              |
|-------|--------------|
| メーカー  | 横河電機株式会社     |
| 型式    | UT35A        |
| 入力種類  | 測温抵抗体        |
| 計測レンジ | -200 ~ 500℃  |
| 許容差   | ±0.3℃ (23℃時) |

表 3 - 5 データロガーの仕様

|       |           |
|-------|-----------|
| メーカー  | 株式会社キーエンス |
| 型式    | TR-W500   |
| 測定周期  | 10 sec    |
| 時間軸精度 | ±5 ppm    |

表 3 - 6 水素リークディテクタの仕様

|      |                              |
|------|------------------------------|
| メーカー | SENSISTOR 社                  |
| 型式   | Hydrogen Leak Detector H2000 |
| プローブ | H50                          |
| 検知形式 | 半導体センサー                      |
| 検知方式 | 非スニフアー式                      |
| 検知感度 | 0.5 ppm                      |
| 許容差  | ±(0.15+0.002 t )℃            |

表 3 - 7 ガスの仕様

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| 水 素 | Grade 1 純度 >99.99999 vol.% |
| 窒 素 | Grade 2 純度 >99.9998 vol.%  |

表 3-8 測定温度誤差を考慮した 23℃時の圧力差精度

| テスト圧 (kPa) | 23℃時の圧力差精度 (kPa) |
|------------|------------------|
| 5.5        | ±0.16            |
| 16.5       | ±0.20            |
| 110        | ±0.51            |
| 330        | ±1.25            |

## (3) 水素気密性試験結果

各配管部品における気密性試験結果を表 3-9 及び表 3-10、図 3-22～図 3-33 に示す。全ての配管部品で補正後の圧力は測定精度以内の変化であり、圧力降下判定は合格となったことから、期待寿命に相当する促進劣化処理後も水素気密性を有していることを確認した。ただし、緊急遮断バルブ（バネ式）においては、開放・閉鎖状態ともに測定終了後のバルブ開閉部保護キャップ内で最大 20 ppm の水素を検知した（4.3 項参照）。

表 3-9 促進劣化処理後の水素気密性試験結果

| 番号  | 配管部品名称                   | 検体  | 温度    |        | 補正圧力   |        | 圧力<br>変化<br>(kPa) | 圧力<br>精度<br>(kPa) | 圧力降下<br>判定 |
|-----|--------------------------|-----|-------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|------------|
|     |                          |     | 初期    | 24 h 後 | 初期     | 24 h 後 |                   |                   |            |
|     |                          |     | (℃)   | (℃)    | (MPa)  | (MPa)  |                   |                   |            |
| 1,2 | フレキユニット<br>フレキ継手         | ST1 | 22.92 | 22.31  | 0.0163 | 0.0162 | -0.1              | ±0.20             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 23.48 | 23.83  | 0.0163 | 0.0162 | -0.1              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 22.79 | 23.28  | 0.0164 | 0.0163 | -0.1              |                   |            |
| 3   | ねじ込み継手                   | ST1 | 22.98 | 23.05  | 0.3309 | 0.3310 | +0.1              | ±1.25             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 24.57 | 23.70  | 0.3294 | 0.3289 | -0.5              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 24.26 | 23.29  | 0.3294 | 0.3289 | -0.5              |                   |            |
| 4   | 鋼管用サドル                   | ST1 | 23.51 | 23.40  | 0.1101 | 0.1100 | -0.1              | ±0.51             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 23.91 | 23.89  | 0.1100 | 0.1101 | +0.1              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 23.21 | 23.14  | 0.1102 | 0.1101 | -0.1              |                   |            |
| 5   | メーターユニオン                 | ST1 | 24.05 | 23.51  | 0.3322 | 0.3322 | ±0.0              | ±1.25             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 24.61 | 24.10  | 0.3319 | 0.3317 | -0.2              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 24.18 | 23.58  | 0.3321 | 0.3319 | -0.2              |                   |            |
| 6   | 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>開放状態 | ST1 | 23.15 | 23.13  | 0.0167 | 0.0166 | -0.1              | ±0.20             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 23.11 | 22.91  | 0.0166 | 0.0166 | ±0.0              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 23.51 | 23.68  | 0.0166 | 0.0165 | -0.1              |                   |            |
| 6   | 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>閉鎖状態 | ST1 | 22.37 | 22.61  | 0.0166 | 0.0165 | -0.1              | ±0.20             | 合格         |
|     |                          | ST2 | 22.71 | 22.76  | 0.0166 | 0.0166 | ±0.0              |                   |            |
|     |                          | ST3 | 22.86 | 22.73  | 0.0166 | 0.0165 | -0.1              |                   |            |

表 3 - 10 促進劣化処理後の水素気密性試験結果

| 番号 | 配管部品名称               | 検体  | 温度    |        | 補正圧力   |        | 圧力<br>変化 | 圧力<br>精度 | 圧力降下<br>判定 |
|----|----------------------|-----|-------|--------|--------|--------|----------|----------|------------|
|    |                      |     | 初期    | 24 h 後 | 初期     | 24 h 後 |          |          |            |
|    |                      |     | (℃)   | (℃)    | (MPa)  | (MPa)  | (kPa)    | (kPa)    |            |
| 7  | 検査口付ねじガス栓<br>開放状態    | ST1 | 22.46 | 22.40  | 0.0165 | 0.0164 | -0.1     | ±0.20    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 22.81 | 22.75  | 0.0165 | 0.0164 | -0.1     |          |            |
|    |                      | ST3 | 23.15 | 23.55  | 0.0165 | 0.0164 | -0.1     |          |            |
| 7  | 検査口付ねじガス栓<br>閉鎖状態    | ST1 | 22.51 | 22.35  | 0.0167 | 0.0167 | ±0.0     | ±0.20    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 22.74 | 22.96  | 0.0167 | 0.0167 | ±0.0     |          |            |
|    |                      | ST3 | 23.37 | 23.35  | 0.0167 | 0.0166 | -0.1     |          |            |
| 8  | ボールスライドジョイント<br>短縮状態 | ST1 | 21.93 | 22.04  | 0.0051 | 0.0050 | -0.1     | ±0.16    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 22.07 | 22.29  | 0.0053 | 0.0053 | ±0.0     |          |            |
|    |                      | ST3 | 22.28 | 22.90  | 0.0052 | 0.0052 | ±0.0     |          |            |
| 8  | ボールスライドジョイント<br>延長状態 | ST1 | 22.52 | 22.10  | 0.0054 | 0.0055 | +0.1     | ±0.16    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 22.90 | 22.51  | 0.0055 | 0.0056 | +0.1     |          |            |
|    |                      | ST3 | 23.53 | 22.79  | 0.0055 | 0.0055 | ±0.0     |          |            |
| 9  | エキスパンション継手           | ST1 | 23.55 | 23.66  | 0.3296 | 0.3299 | +0.3     | ±1.25    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 24.36 | 24.25  | 0.3287 | 0.3291 | +0.4     |          |            |
|    |                      | ST3 | 24.15 | 24.00  | 0.3288 | 0.3290 | +0.2     |          |            |
| 10 | 検圧プラグ                | ST1 | 22.22 | 22.17  | 0.0171 | 0.0170 | -0.1     | ±0.20    | 合格         |
|    |                      | ST2 | 22.72 | 22.59  | 0.0172 | 0.0171 | -0.1     |          |            |
|    |                      | ST3 | 22.78 | 23.10  | 0.0172 | 0.0171 | -0.1     |          |            |



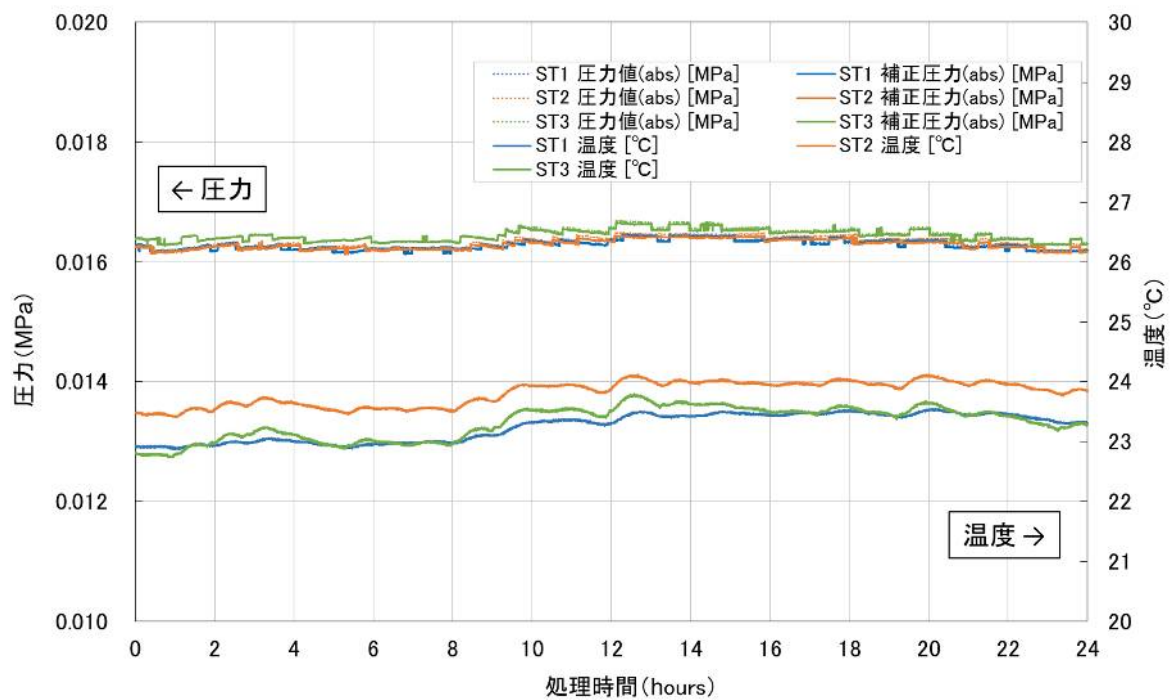


図 3 - 22 フレキユニット及びフレキ継手の促進劣化後水素気密性試験

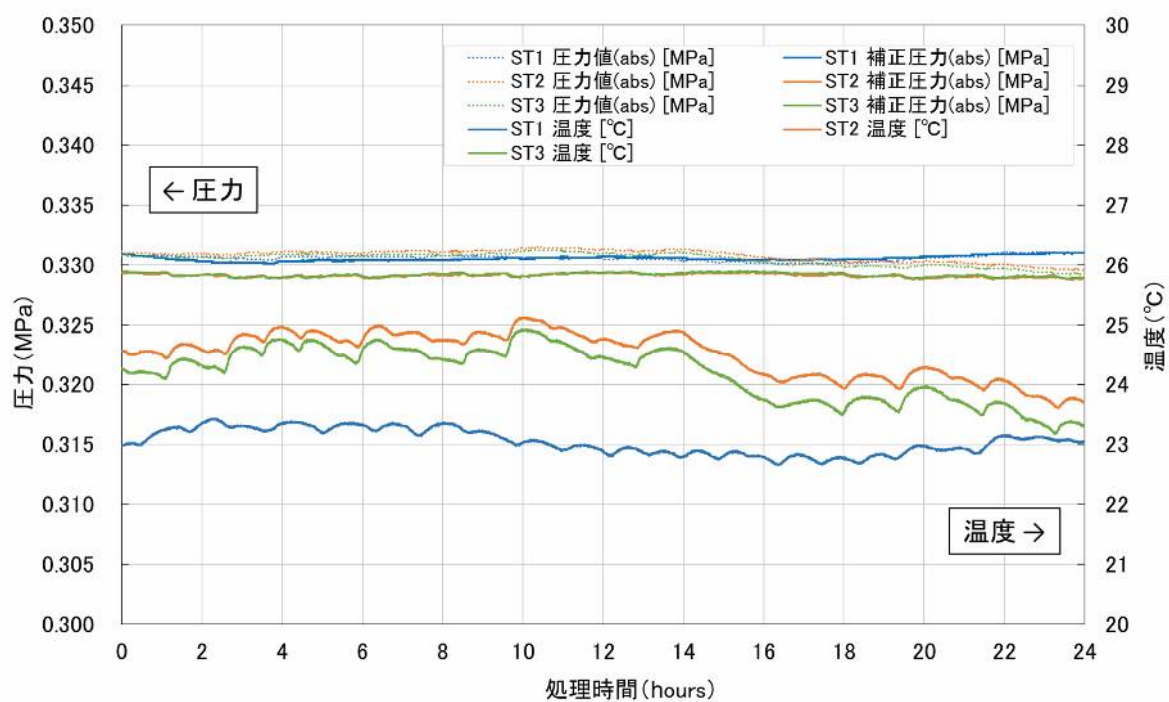


図 3 - 23 ねじ込み継手の促進劣化後水素気密性試験

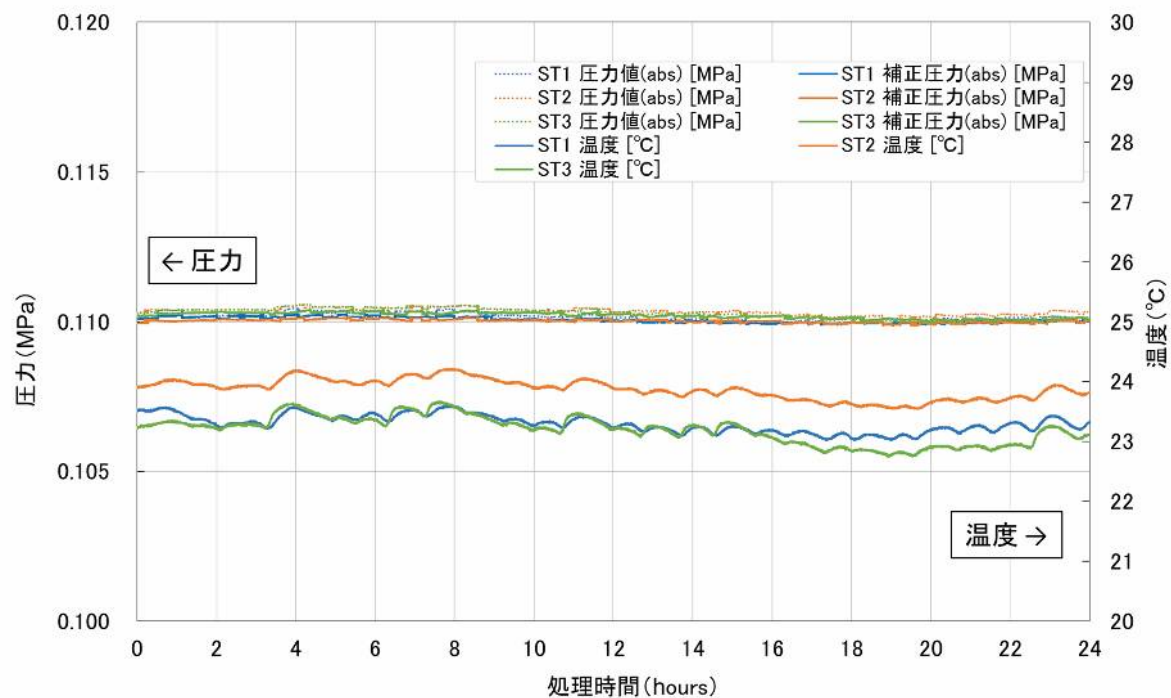


図 3 - 24 鋼管用サドルの促進劣化後水素気密性試験

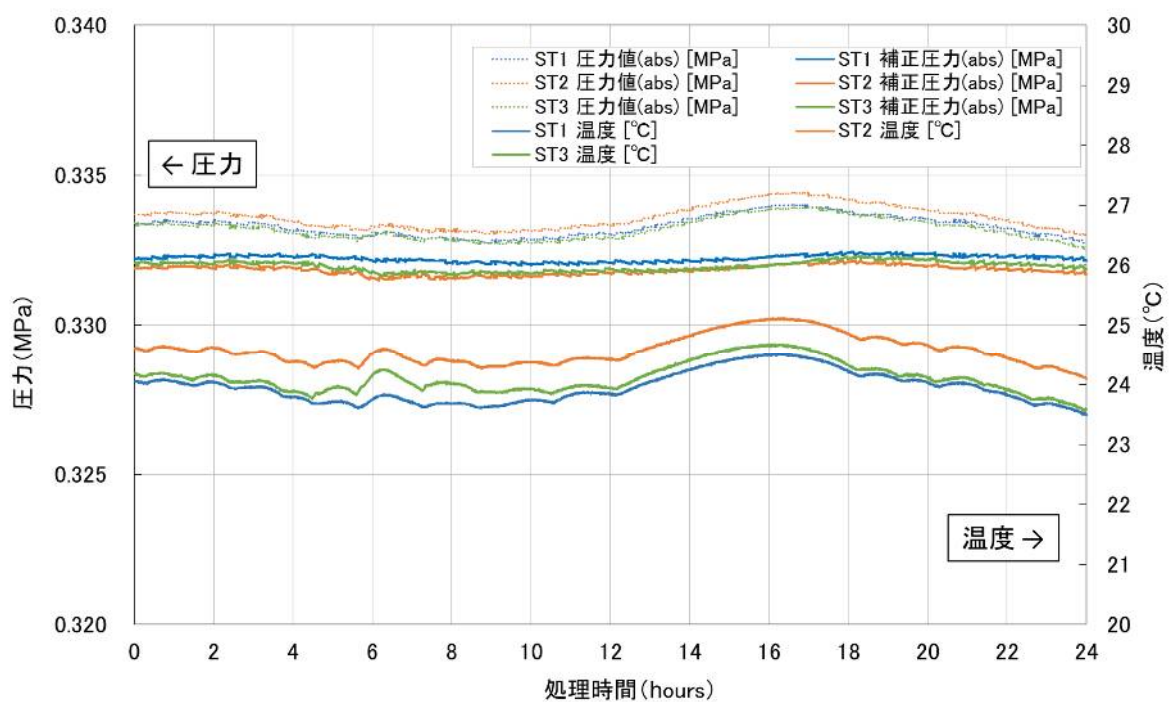


図 3 - 25 メーターユニオンの促進劣化後水素気密性試験



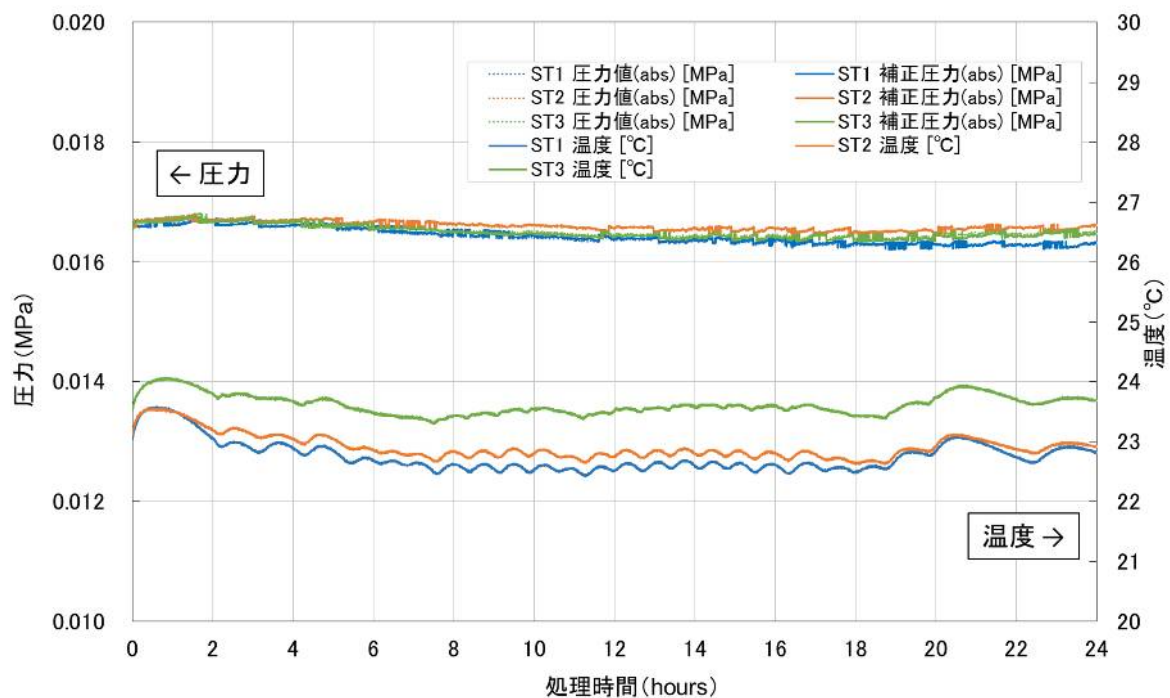


図 3 - 26 緊急遮断バルブ（バネ式）開放状態の促進劣化後水素気密性試験

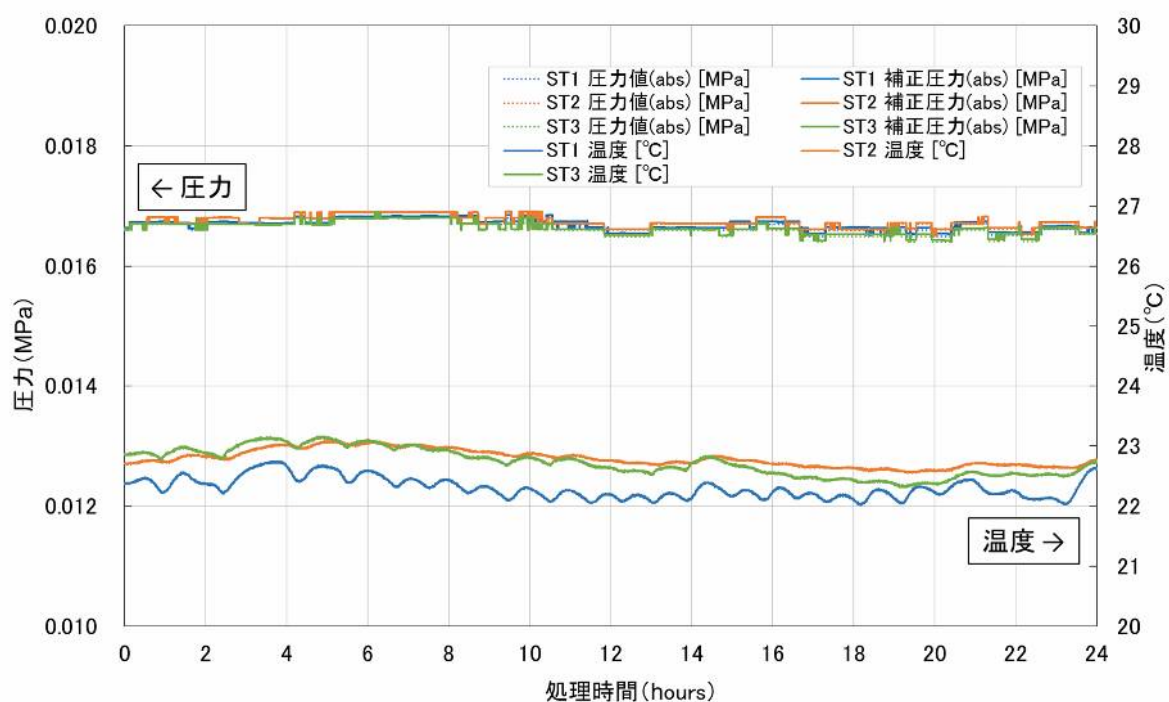


図 3 - 27 緊急遮断バルブ（バネ式）閉鎖状態の促進劣化後水素気密性試験

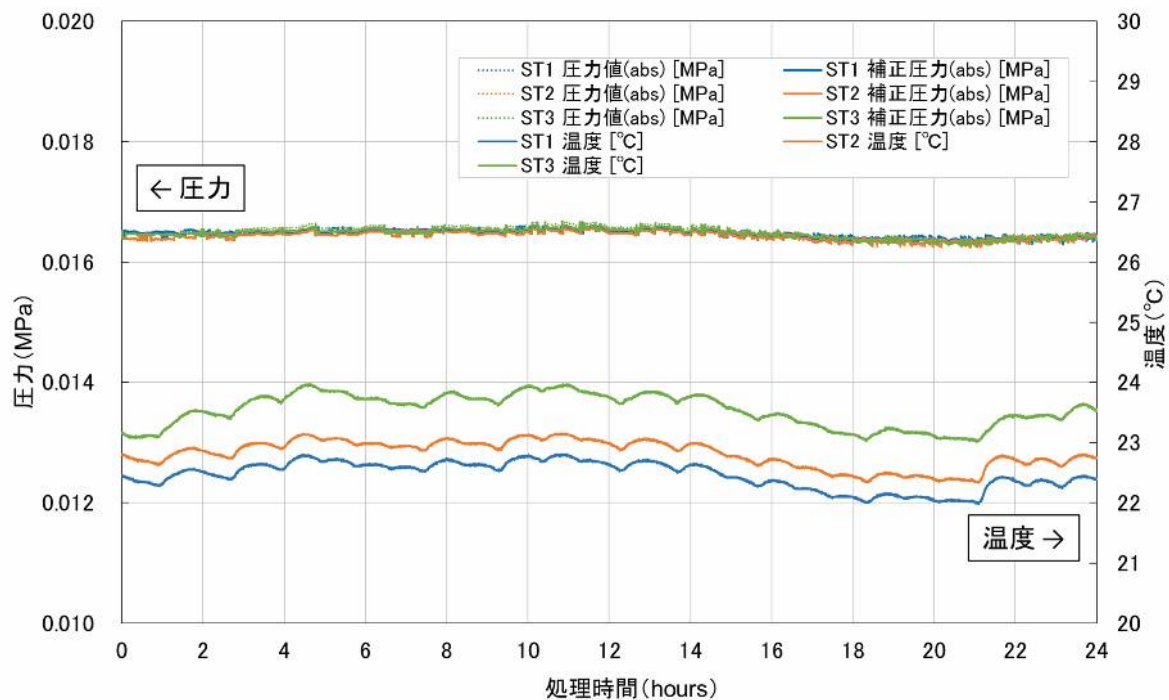


図 3 - 28 検査口付ねじガス栓 開放状態の促進劣化後水素気密性試験

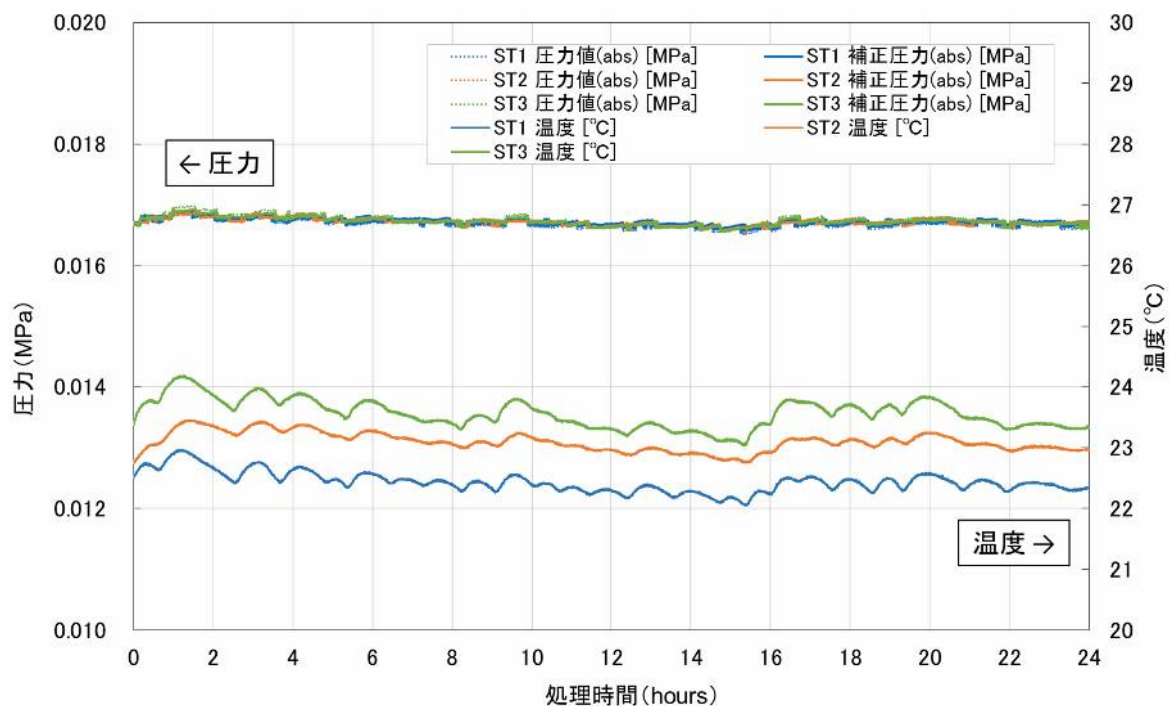


図 3 - 29 検査口付ねじガス栓 閉鎖状態の促進劣化後水素気密性試験

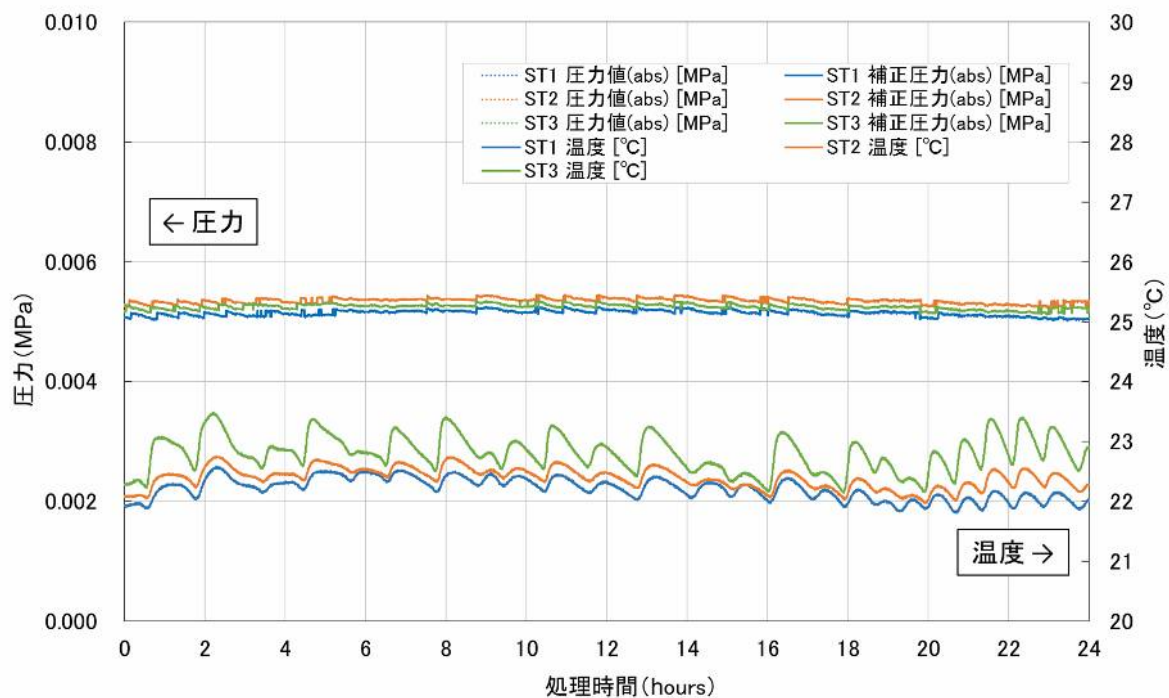


図 3 - 30 ボールスライドジョイント（短縮状態）の促進劣化後水素気密性試験

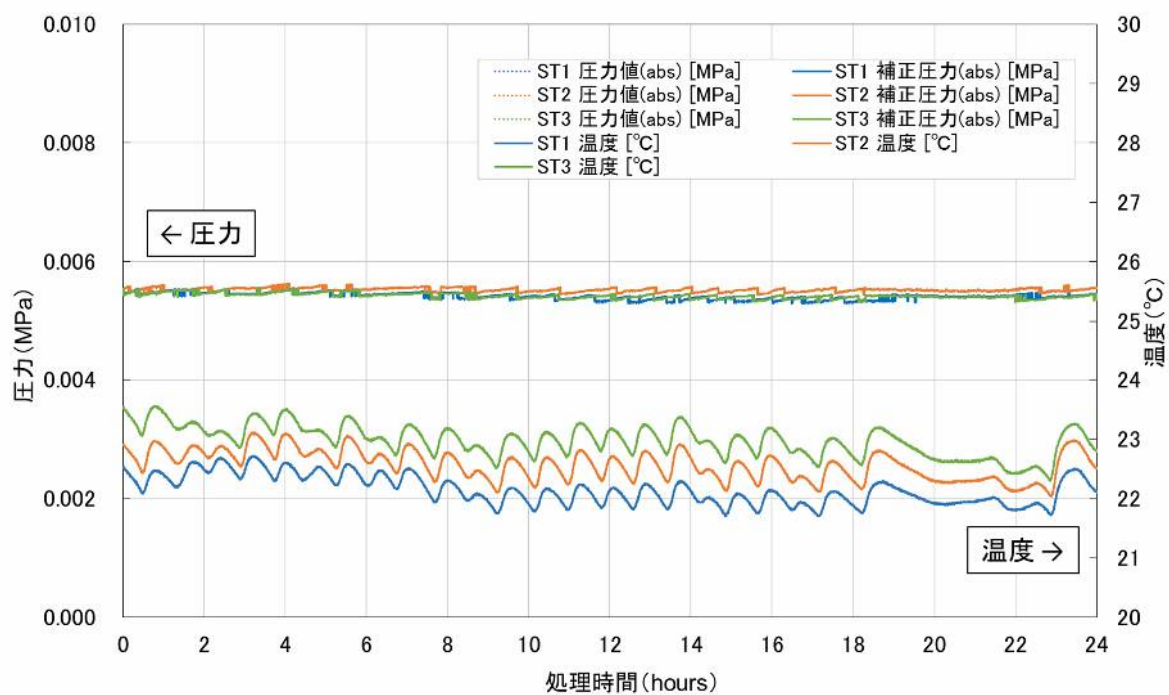


図 3 - 31 ボールスライドジョイント（延長状態）の促進劣化後水素気密性試験

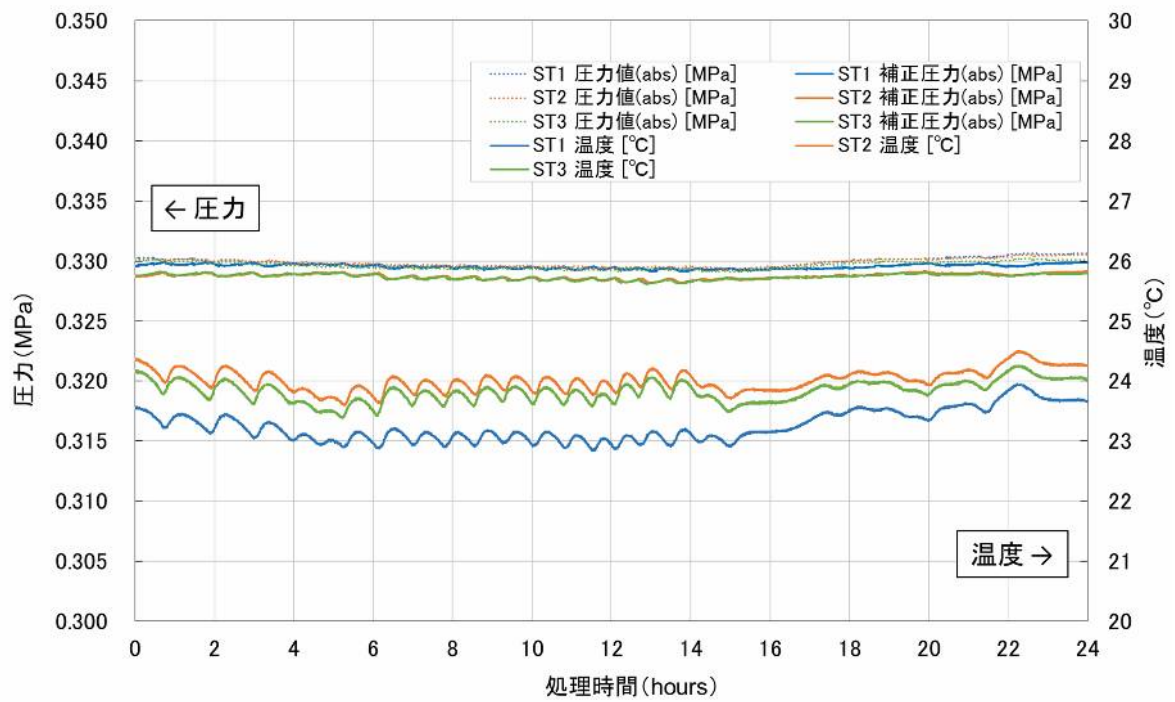


図 3 - 32 エキспанション継手の促進劣化後水素気密性試験

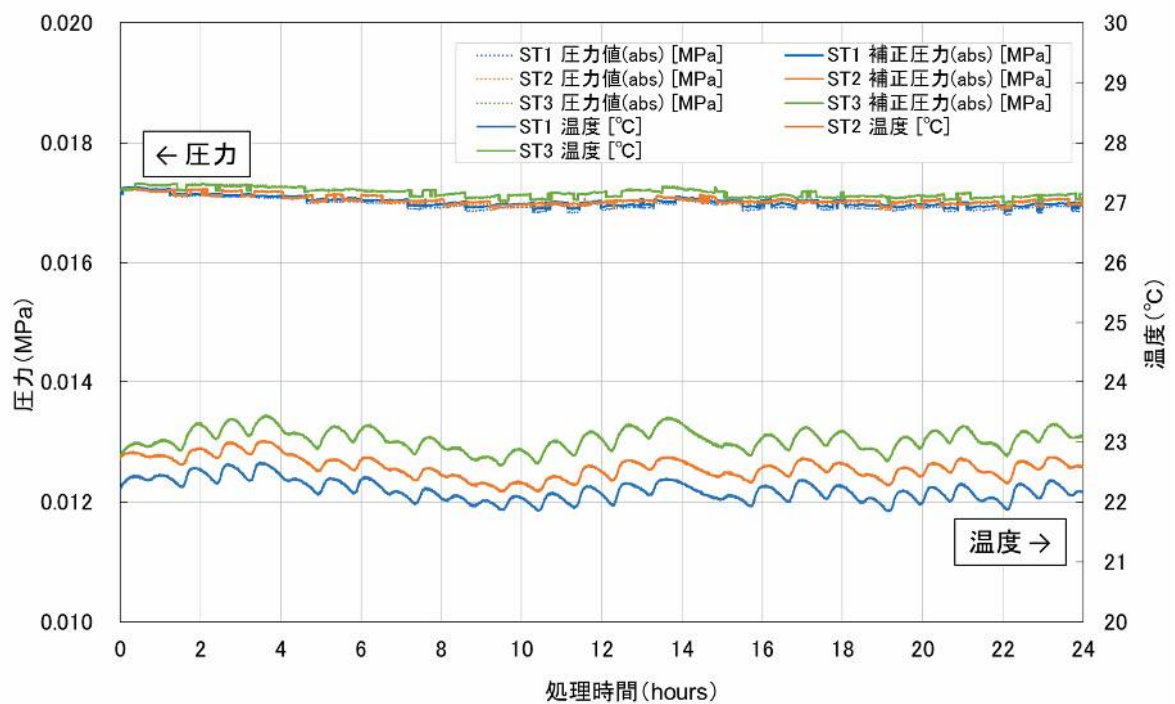


図 3 - 33 検圧プラグの促進劣化後水素気密性試験

### 3.4 配管材料の長期水素曝露影響評価 まとめ

第2章「都市ガス配管材料のシール部材に対する水素影響評価手法の検討」で得られた促進劣化比を用いて、水素を充填した状態で期待寿命30年に相当する促進曝露処理を配管材料に行い、期待寿命後の水素気密性について調査した。ただし、メーターユニオンは使用10年でパッキンの交換が行われるため、期待寿命を10年で設定した。その結果、10検体の配管材料全てにおいて、期待寿命後の水素気密性を充分有していることを確認した。

## 4. 水素気密性試験

### (平成 26 年度の事業において水素気密性が懸念された配管材料の再調査)

平成 26 年度事業で水素気密性が懸念された材料に関して、圧力低下の要因の検討を目的とした対応調査を実施し、都市ガス供給に用いられている配管材料の水素適用への可否について確認する。調査対象は①ボールスライドジョイント（短縮状態）、②ボールスライドジョイント（延長状態）、③緊急遮断バルブ（バネ式、開放状態）、④緊急遮断バルブ（バネ式、閉鎖状態）、⑤緊急遮断バルブ（ボールバルブ型、開放状態）、⑥緊急遮断バルブ（ボールバルブ型、閉鎖状態）、⑦鋼管用サドル、以上 7 種類である。

### 4.1 水素気密性試験方法

水素気密性試験は 3.3 項に示す方法と同様に行った。なお、測定圧力 1.08 MPa の場合は表 4・1 に示す高圧の圧力計を用い、圧力精度は以下のように算出した。

表 4・1 圧力計の仕様（高圧用）

|        |                |
|--------|----------------|
| メーカー   | 株式会社コスモ計器      |
| 型式     | DP-330BA       |
| 検出方式   | キャパシタンス型       |
| 測定レンジ  | 0 ～ 2 MPa（絶対圧） |
| 精度     | ±0.25% F.S     |
| 補償温度範囲 | 5 ～ 40℃        |

- ・ センサーの圧力精度：±5 kPa
- ・ 温度計の精度：±0.2℃
- ・ 指示調節計の精度：±0.3℃

テスト圧を  $P_A$  (kPa) とすると、測定温度誤差を考慮した圧力差精度は以下の式で求めることができる。それぞれのテスト圧で求めた 23℃での圧力差精度を表 4・2 に示す。

$$\text{圧力精度 (kPa)} = \frac{(P_A \pm 5) \times (273.15 + 23)}{(273.15 + 23 \pm 0.2 \pm 0.3)} - P_A$$

表 4・2 測定温度誤差を考慮した 23℃時の圧力差精度

| テスト圧 (MPa) | 23℃時の圧力差精度 (kPa) |
|------------|------------------|
| 1.08       | ±13.64           |



## 4.2 ボールスライドジョイント（短縮状態・延長状態）の水素気密性試験

平成 26 年度事業ではフランジの接続方法や延長状態での試験の際に配管に曲げたわみが生じることによる圧力低下が懸念された。本事業では配管の接続作業を都市ガス施工業者にて実施し、通常の現場における施工状況に近い状態で接続を行い、図 4-1 に示すように延長状態での試験の際に支持台の有無で結果を比較した。



図 4-1 ボールスライドジョイント延長状態での支持状況

### (1) 配管接続方法

配管の接続は組付けフランジの両面内側にシール材を薄く塗布し、片締めにならないよう注意しながらレンチで規定トルク以上になるよう強く締めこんだ。配管材料の施工状況の様子を図 4-2 に示す。

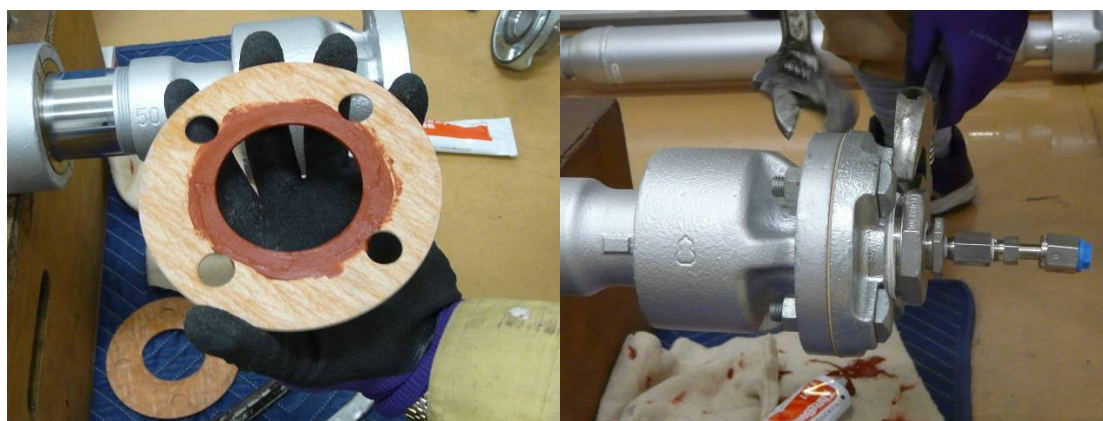


図 4-2 配管施工状況

### (2) 水素気密性試験結果

試験結果を表 4-3 及び図 4-3～図 4-5 に示す。全ての条件で補正後の圧力は測定精度以内の変化であり、圧力降下判定は合格となったため、ボールスライドジョイントの水素に対する気密性が確認された。

表 4-3 ボールスライドジョイントの水素気密性試験結果

| 配管部品名称                       | 検体  | 温度    |       | 補正圧力   |        | 圧力<br>変化 | 圧力<br>精度 | 圧力降下<br>判定 |
|------------------------------|-----|-------|-------|--------|--------|----------|----------|------------|
|                              |     | 初期    | 24h 後 | 初期     | 24h 後  |          |          |            |
|                              |     | (℃)   | (℃)   | (MPa)  | (MPa)  | (kPa)    | (kPa)    |            |
| ボールスライドジョイント<br>短縮状態         | ST1 | 23.35 | 23.28 | 0.0056 | 0.0056 | ±0.0     | ±0.16    | 合格         |
|                              | ST2 | 23.63 | 23.29 | 0.0056 | 0.0056 | ±0.0     |          |            |
|                              | ST3 | 23.93 | 23.59 | 0.0056 | 0.0055 | -0.1     |          |            |
| ボールスライドジョイント<br>延長状態<br>支持なし | ST1 | 23.23 | 22.66 | 0.0054 | 0.0053 | -0.1     | ±0.16    | 合格         |
|                              | ST2 | 23.44 | 23.03 | 0.0055 | 0.0054 | -0.1     |          |            |
|                              | ST3 | 23.52 | 23.06 | 0.0055 | 0.0054 | -0.1     |          |            |
| ボールスライドジョイント<br>延長状態<br>支持あり | ST1 | 23.45 | 23.36 | 0.0055 | 0.0056 | +0.1     | ±0.16    | 合格         |
|                              | ST2 | 23.45 | 23.53 | 0.0056 | 0.0056 | +0.1     |          |            |
|                              | ST3 | 23.67 | 23.63 | 0.0055 | 0.0056 | +0.1     |          |            |

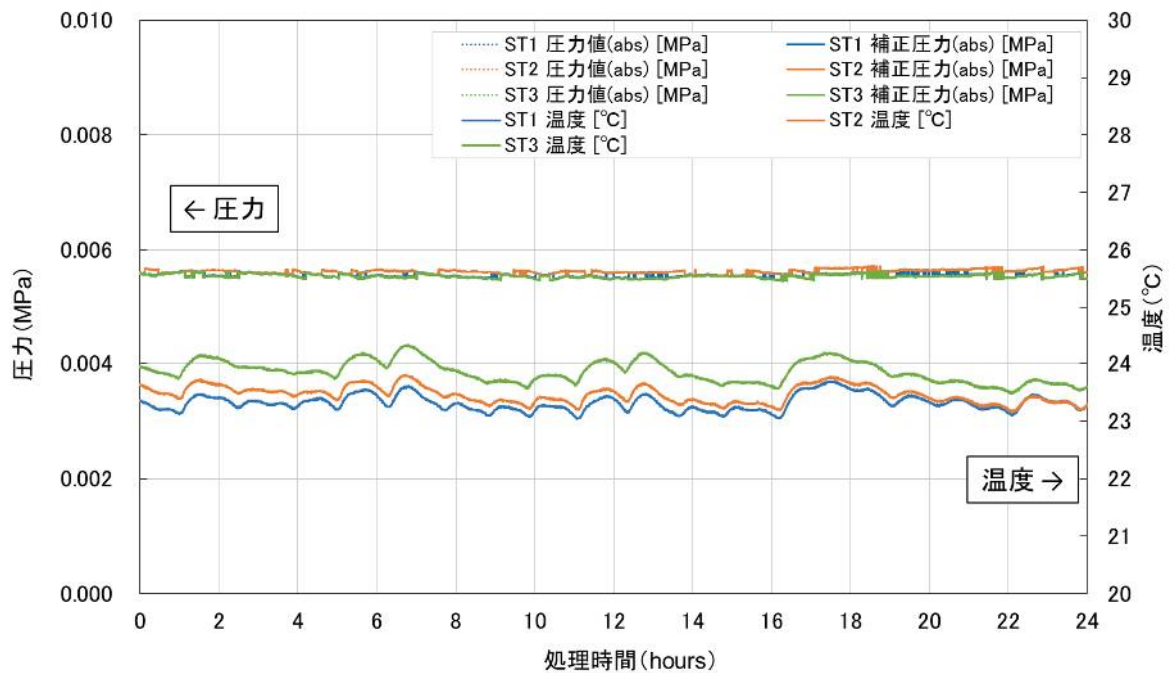


図 4-3 ボールスライドジョイント（短縮状態）の水素気密性試験



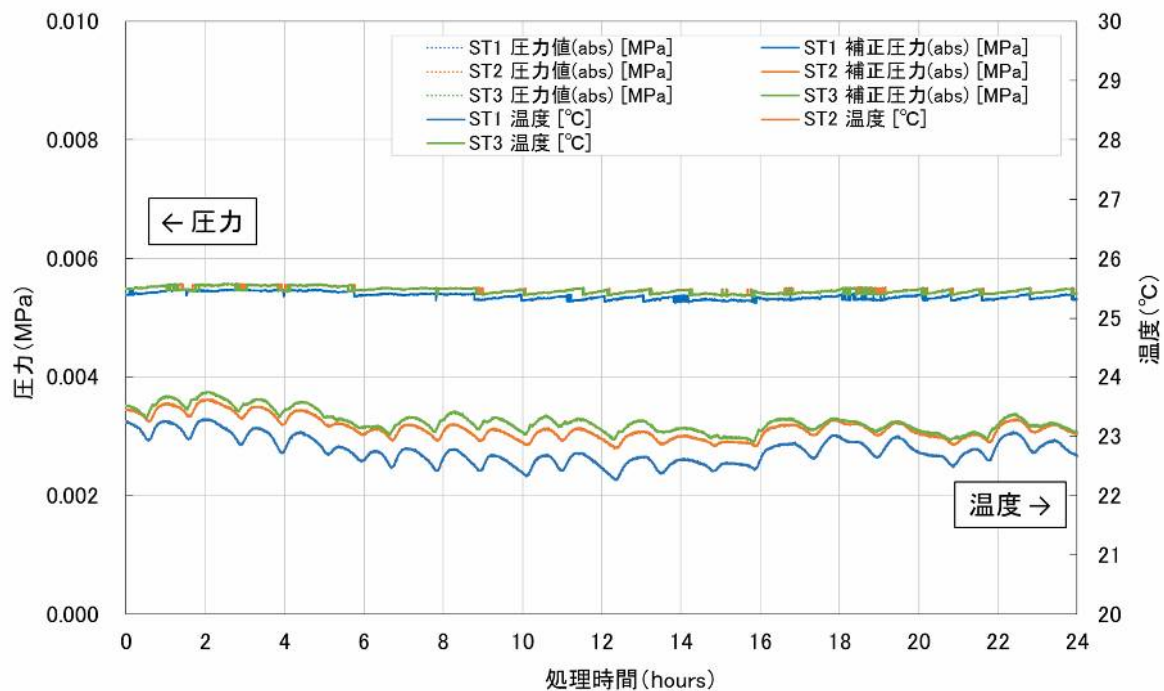


図 4-4 ボールスライドジョイント（延長状態）の水素気密性試験

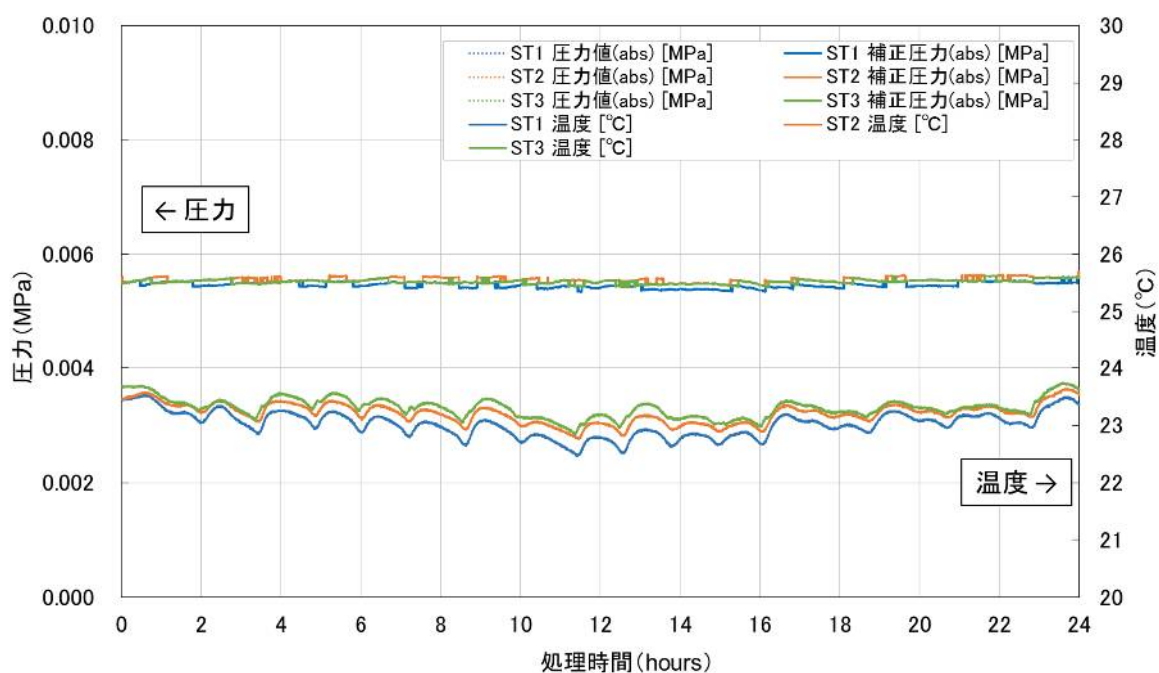


図 4-5 ボールスライドジョイント（延長状態）を支持台で固定した状態での水素気密性試験

#### 4.3 緊急遮断バルブ（バネ式、開放状態・閉鎖状態）の水素気密性試験

平成 26 年度事業では実施していなかったエイジング処理後に測定を実施し、昨年度測定した検体に新たに 3 検体加えた計 6 検体で水素気密性の確認を行った。

水素気密性試験結果を表 4・4 及び図 4・6～図 4・9 に示す。全ての条件で補正後の圧力は測定精度以内の変化であり、圧力降下判定は合格となったため、緊急遮断バルブ（バネ式）の水素に対する気密性が確認された。しかし、水素気密性試験後の配管材料を水素リークディテクターで確認したところ、開放状態、閉鎖状態ともに試験後の保護キャップ内で最大 20 ppm の水素を検知した（図 4-10）。

表 4・4 緊急遮断バルブ（バネ式）の水素気密性試験結果

| 配管部品名称                     | 検体  | 温度    |       | 補正圧力    |        | 圧力<br>変化 | 圧力<br>精度 | 圧力降下<br>判定 |
|----------------------------|-----|-------|-------|---------|--------|----------|----------|------------|
|                            |     | 初期    | 24h 後 | 初期      | 24h 後  |          |          |            |
|                            |     | (℃)   | (℃)   | (MPa)   | (MPa)  |          |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>昨年度品開放 | ST1 | 22.90 | 22.88 | 0.0167  | 0.0167 | ±0.0     | ±0.20    | 合格         |
|                            | ST2 | 23.18 | 23.17 | 0.0167  | 0.0167 | ±0.0     |          |            |
|                            | ST3 | 23.80 | 23.75 | 0.0164  | 0.0164 | ±0.0     |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>昨年度品閉鎖 | ST1 | 22.60 | 22.47 | 0.0165  | 0.0164 | -0.1     | ±0.20    | 合格         |
|                            | ST2 | 22.84 | 23.10 | 0.0166  | 0.0166 | ±0.0     |          |            |
|                            | ST3 | 23.38 | 23.66 | 0.0165  | 0.0164 | -0.1     |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>新規品開放  | ST1 | 23.40 | 22.98 | 0.00165 | 0.0164 | -0.1     | ±0.20    | 合格         |
|                            | ST2 | 23.83 | 23.30 | 0.0165  | 0.0165 | ±0.0     |          |            |
|                            | ST3 | 24.13 | 23.53 | 0.0164  | 0.0164 | ±0.0     |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(バネ式)<br>新規品閉鎖  | ST1 | 22.78 | 23.09 | 0.0166  | 0.0166 | ±0.0     | ±0.20    | 合格         |
|                            | ST2 | 22.82 | 23.14 | 0.0166  | 0.0166 | ±0.0     |          |            |
|                            | ST3 | 23.00 | 23.39 | 0.0165  | 0.0164 | -0.1     |          |            |

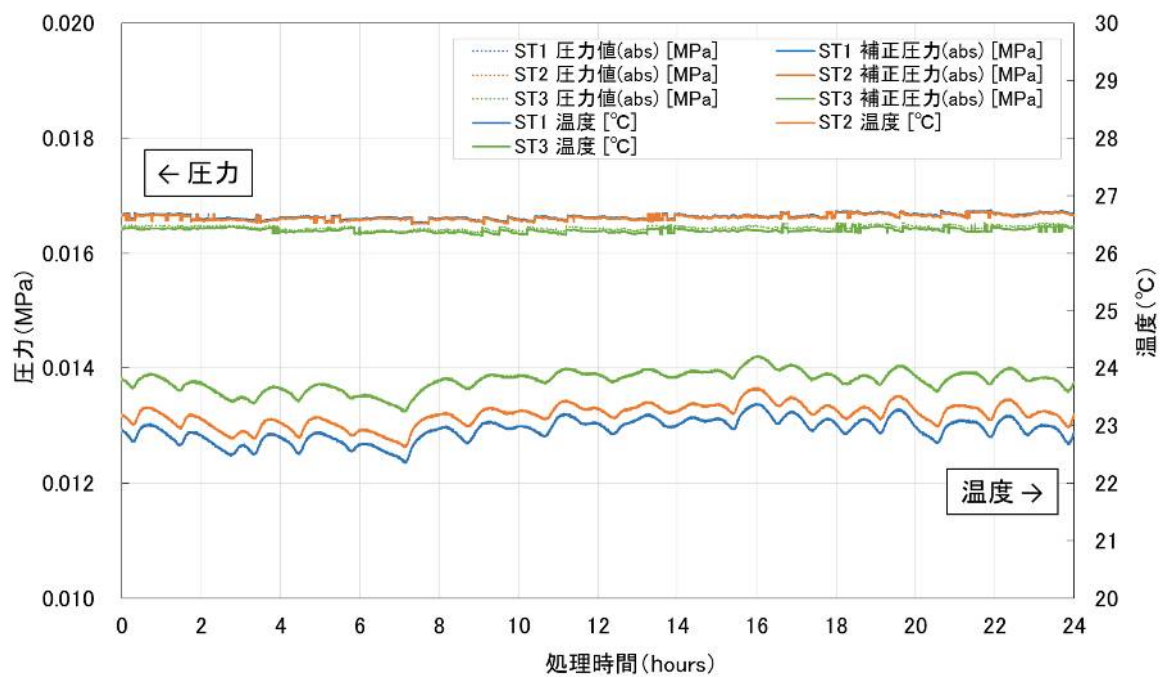


図 4 - 6 緊急遮断バルブ（バネ式，開放状態）昨年度品の水素気密性試験

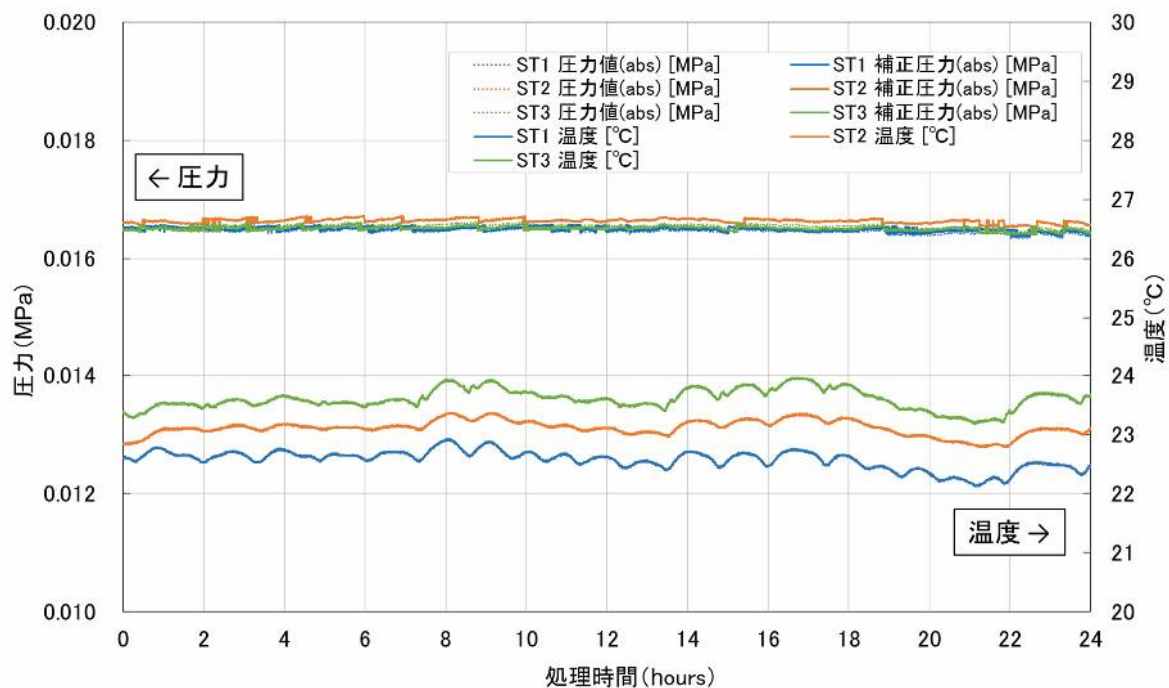


図 4 - 7 緊急遮断バルブ（バネ式，閉鎖状態）昨年度品の水素気密性試験

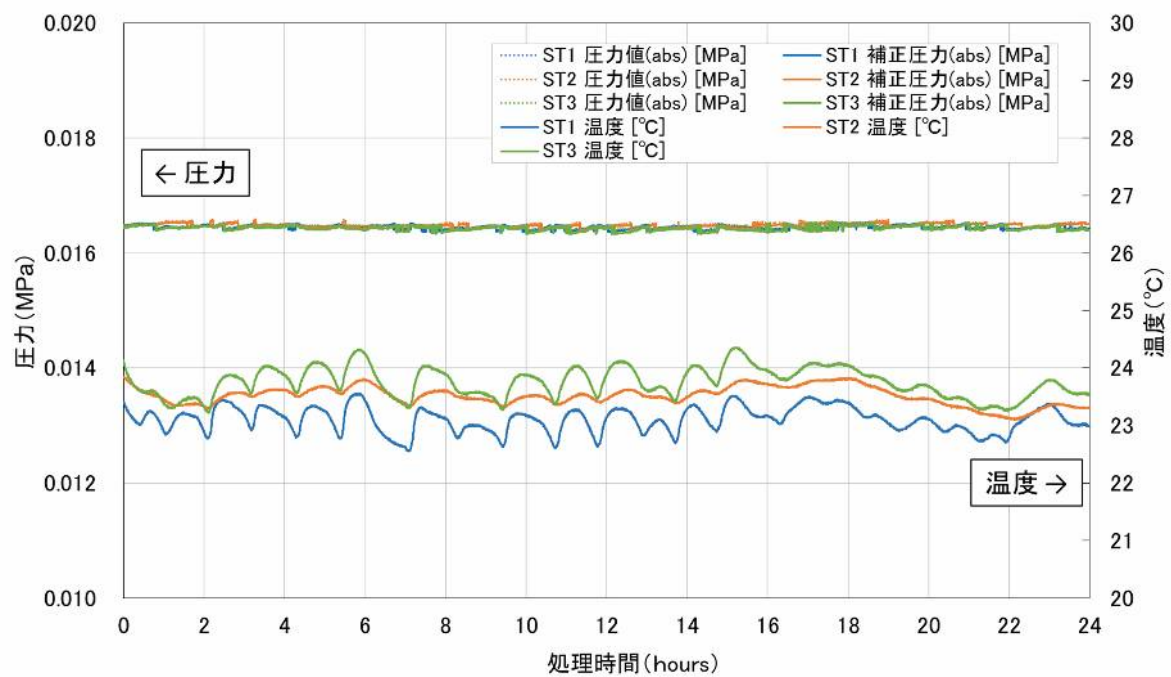


図 4 - 8 緊急遮断バルブ（バネ式，開放状態）新規品の水素気密性試験

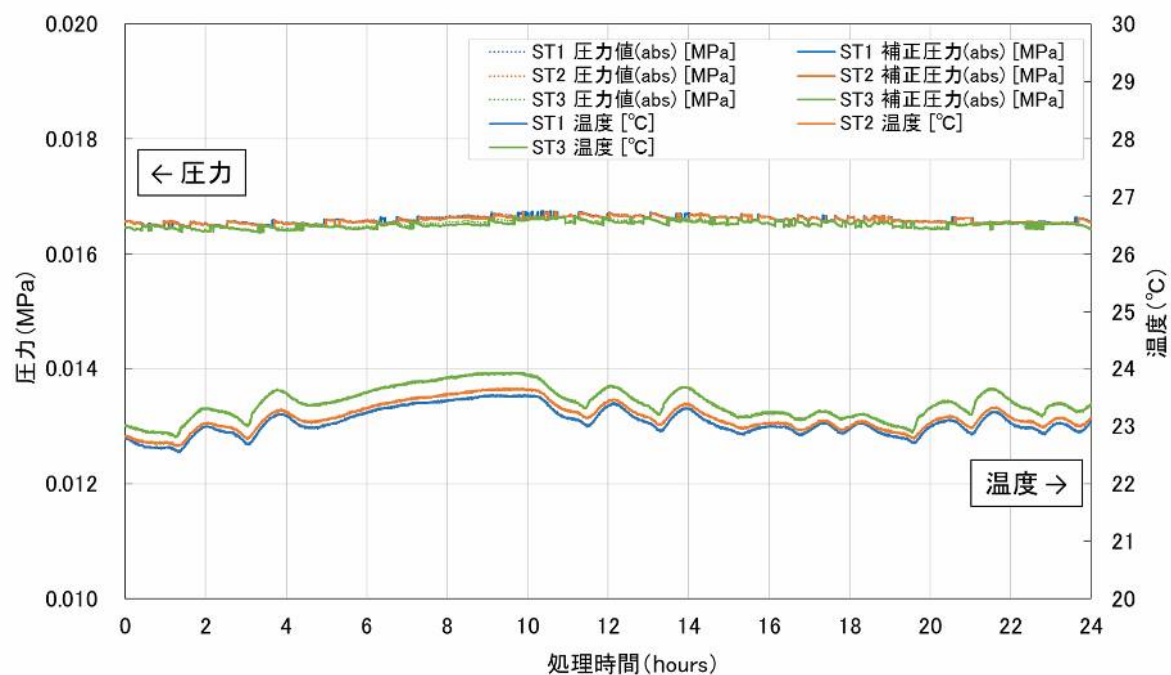


図 4 - 9 緊急遮断バルブ（バネ式，閉鎖状態）新規品の水素気密性試験



図 4-10 水素気密性試験後の水素リーク部位の確認状況

#### 4.4 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型、開放状態・閉鎖状態）の水素気密性試験

平成 26 年度事業では実施していなかったエイジング処理後に測定を実施し、水素気密性の確認を行った。

水素気密性試験結果を表 4-5、図 4-11 及び図 4-12 に示す。全ての条件で補正後の圧力は測定精度以内の変化であり、圧力降下判定は合格となったため、緊急遮断バルブ（ボールバルブ型）の水素に対する気密性が確認された。

表 4-5 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型）の水素気密性試験結果

| 配管部品名称                       | 検体  | 温度    |       | 補正圧力   |        | 圧力<br>変化 | 圧力<br>精度 | 圧力降下<br>判定 |
|------------------------------|-----|-------|-------|--------|--------|----------|----------|------------|
|                              |     | 初期    | 24h 後 | 初期     | 24h 後  |          |          |            |
|                              |     | (℃)   | (℃)   | (MPa)  | (MPa)  |          |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(ボールバルブ型)<br>開放状態 | ST1 | 23.18 | 23.25 | 1.0729 | 1.0716 | -1.3     | ±13.64   | 合格         |
|                              | ST2 | 23.90 | 24.00 | 1.0834 | 1.0823 | -1.1     |          |            |
|                              | ST3 | 24.59 | 24.77 | 1.0800 | 1.0788 | -1.2     |          |            |
| 緊急遮断バルブ<br>(ボールバルブ型)<br>閉鎖状態 | ST1 | 23.85 | 23.73 | 1.0798 | 1.0784 | -1.4     | ±13.64   | 合格         |
|                              | ST2 | 24.82 | 24.70 | 1.0818 | 1.0810 | -0.8     |          |            |
|                              | ST3 | 25.31 | 25.00 | 1.0762 | 1.0758 | -0.4     |          |            |

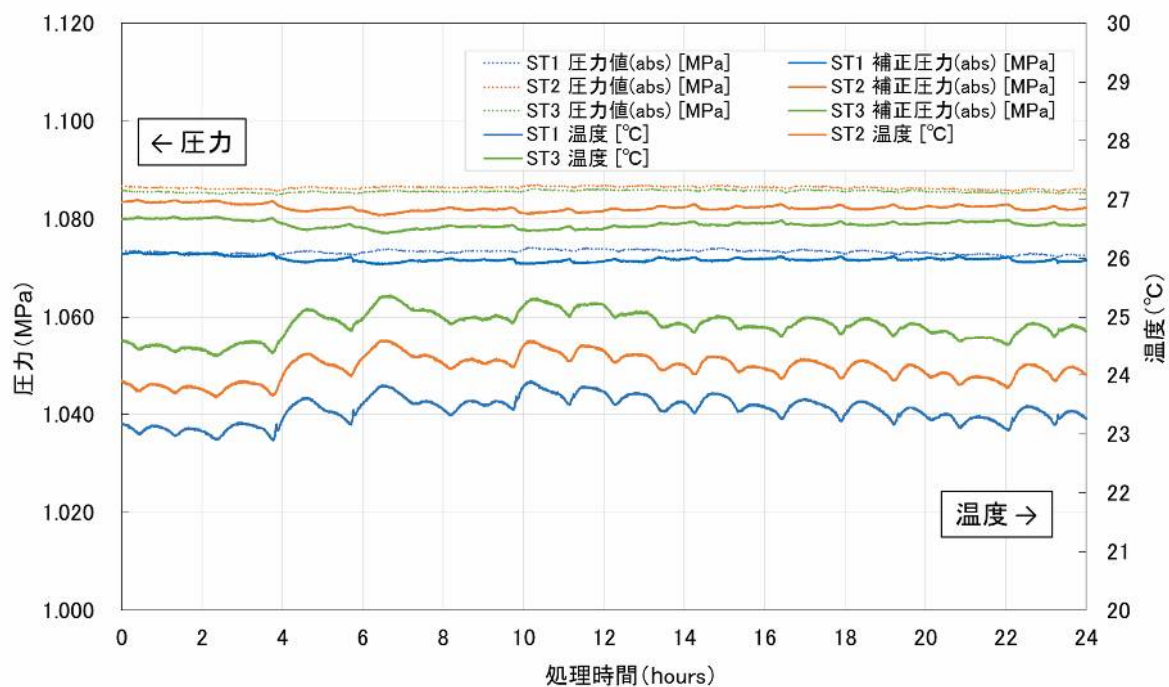


図 4 - 11 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型，開放状態）の水素気密性試験

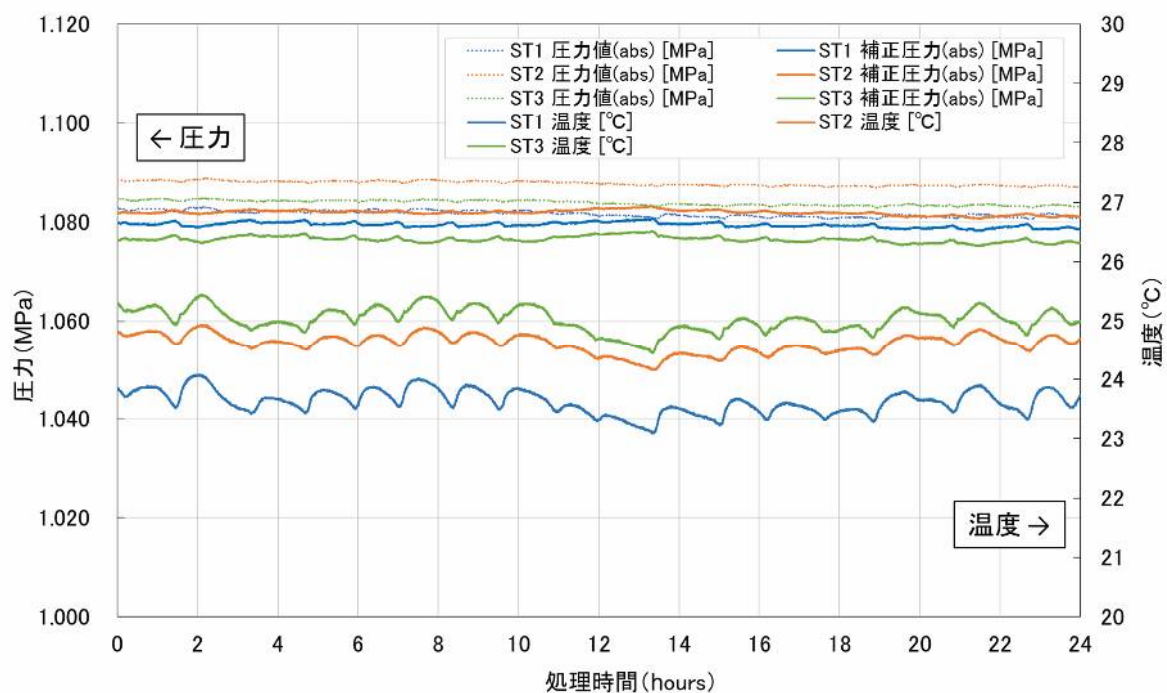


図 4 - 12 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型，閉鎖状態）の水素気密性試験



#### 4.5 鋼管用サドルの水素気密性試験

平成 26 年度事業ではφ50mm の白ガスを組み付けて試験を実施したが、配管部品と測定装置接続用継手の間でリークが認められ、接続方法が課題となっていた。本事業では配管の接続を都市ガス施工業者にて実施し、従来の施工状況に近い状態で測定を実施した。鋼管用サドルの施工状況を図 4-13～4-16 にそれぞれ示す。

##### (1) 配管接続方法

①PLP 管を被覆している防食層を傷つけないよう専用工具を用いて剥離した。

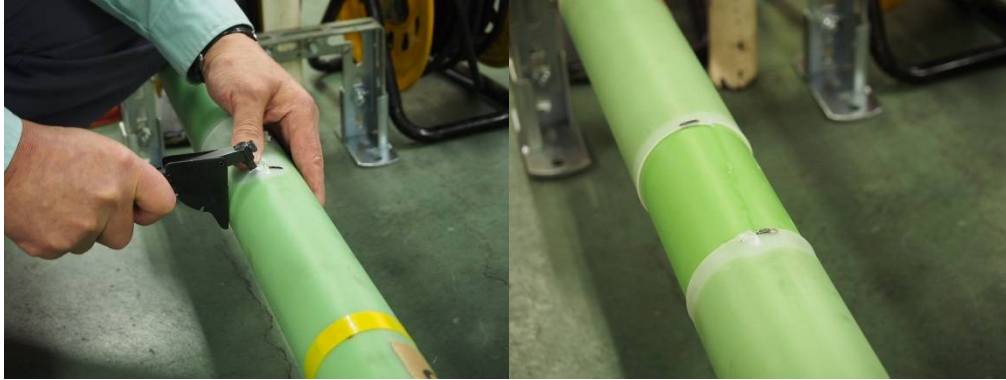


図 4-13 鋼管用サドルの施工状況①

②配管部品を取付けてレンチで締め込み、トルクレンチで規定トルク（60 N・m）以上になっていることを確認した。



図 4-14 鋼管用サドルの施工状況②

③ねじ込み式可鍛鉄製管継手（PC ニップル）にねじシール材を塗布し、パイプレンチで締め込み、防水シールを巻いた。なお、通常は立ち上げ配管にポリエチレン管用連絡継手を使用されるが、測定装置への接続の都合上使用できず、ねじ部が同等である PC ニップルを使用した。





図 4 - 15 鋼管用サドルの接続継手

④PC ニップルにねじシール材を塗布し、水素気密性試験装置継手を接続した。施工を確認するため、配管に空気を 3 kPa 以上で封入し、5 分間圧力が低下しないことを確認した。

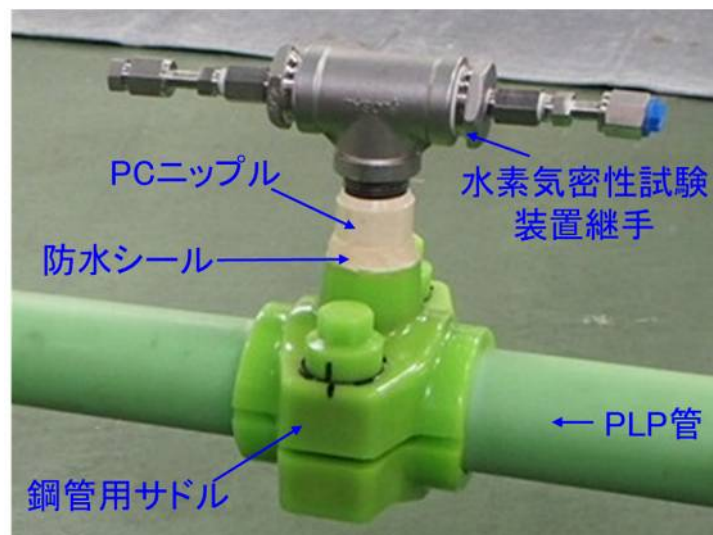


図 4 - 16 鋼管用サドルの接続状況

## (2) 水素気密性試験結果

水素気密性試験結果を表 4-6 及び図 4-17 に示す。全ての条件で補正後の圧力は測定精度以内の変化であり、圧力降下判定は合格となったため、鋼管用サドルの水素に対する気密性が確認された。

表 4-6 鋼管用サドルの水素気密性試験結果

| 配管部品名称 | 検体  | 温度    |       | 補正圧力   |        | 圧力<br>変化 | 圧力<br>精度 | 圧力降下<br>判定 |
|--------|-----|-------|-------|--------|--------|----------|----------|------------|
|        |     | 初期    | 24h 後 | 初期     | 24h 後  |          |          |            |
|        |     | (°C)  | (°C)  | (MPa)  | (MPa)  |          |          |            |
| 鋼管用サドル | ST1 | 24.18 | 24.61 | 0.1100 | 0.1098 | -0.2     | ±0.51    | 合格         |
|        | ST2 | 22.92 | 23.49 | 0.1108 | 0.1110 | +0.2     |          |            |
|        | ST3 | 23.55 | 23.92 | 0.1103 | 0.1103 | 0.0      |          |            |

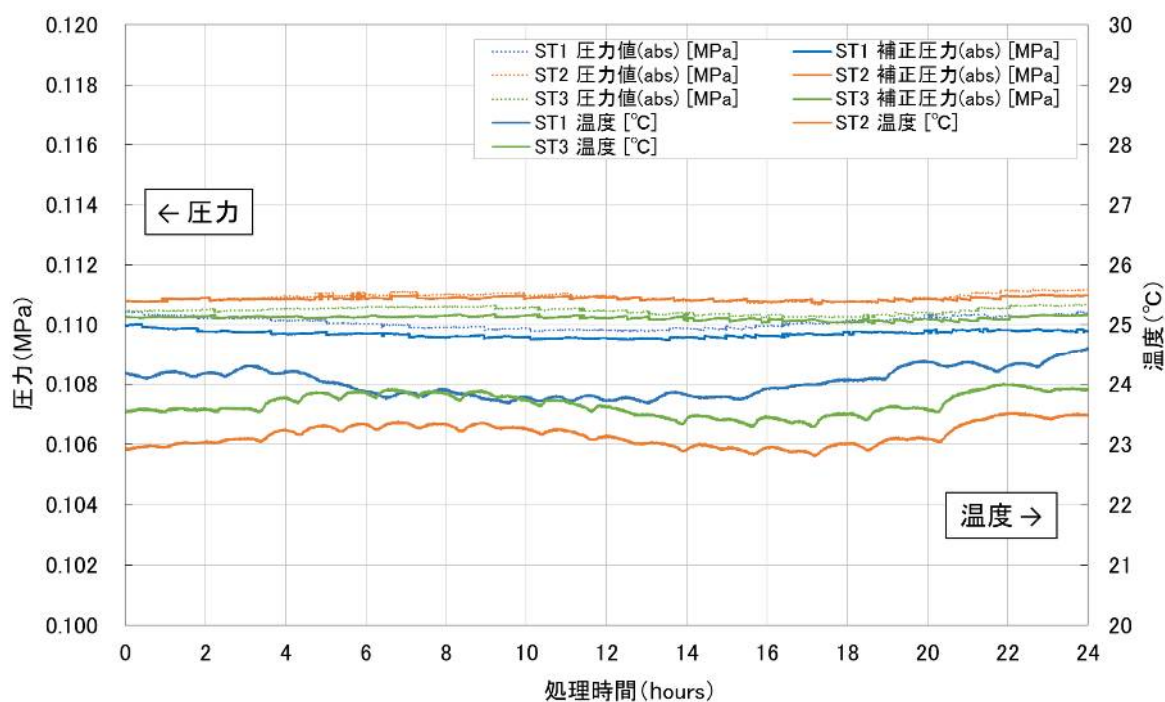


図 4-17 鋼管用サドルの水素気密性試験結果

#### 4.6 水素気密性試験の検討 まとめ

平成 26 年度事業で水素気密性が懸念された材料に関して、配管の施工を考慮して水素気密性試験を実施し、都市ガス供給に用いられている配管材料の水素適用への可否について確認した。平成 26 年度事業と平成 27 年度事業の水素気密性試験で異なる点を表 4-7 にまとめた。

表 4-7 平成 26 年度実施の水素気密性試験と平成 27 年度実施の水素気密性試験との相違点

| 配管材料               | 平成 26 年度の水素気密性試験                                                                                                                | 平成 27 年度の水素気密性試験                                                                                                                |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ① ボールスライドジョイント     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・液状ガスケットシール剤を多めに塗布</li> <li>・エイジング処理を未実施</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・フランジを規定トルク以上で固定</li> <li>・液状ガスケットシール剤を薄く塗布</li> <li>・エイジング処理を実施</li> </ul>              |
| ② 緊急遮断バルブ（バネ式）     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エイジング処理を未実施</li> </ul>                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エイジング処理を実施</li> </ul>                                                                   |
| ③ 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型） | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エイジング処理を未実施</li> </ul>                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エイジング処理を実施</li> </ul>                                                                   |
| ④ 鋼管用サドル           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・白ガス管を使用</li> <li>・SUS パイプニップルを使用</li> <li>・エポキシシール剤を塗布</li> <li>・エイジング処理を未実施</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・PLP 管を使用</li> <li>・PC ニップルを使用</li> <li>・アルキド樹脂系ガスシールを塗布</li> <li>・エイジング処理を実施</li> </ul> |

##### ① ボールスライドジョイント

配管材料の接続は組付けフランジの両面内側に液状ガスケットシール剤を薄く塗布し、フランジが片締めにならないよう注意しながらレンチで規定トルク以上になるよう強く締込み供試体とした。水素気密性試験の結果、水素圧力の降下は、測定器機の圧力精度内の変化であり、水素に対する気密性が認められた。

##### ② 緊急遮断バルブ（バネ式）

エイジング処理として、配管に水素を充填した状態で室温×24 時間以上放置し、供試体とした。バルブを開放した状態と閉鎖した状態の 2 条件で水素気密性試験を実施した結果、水素圧力の低下は測定精度以内であり、緊急遮断バルブ（バネ式）の水素に対する気密性が確認された。しかし、水素リークディテクターで試験後の保護キャップ内で最大 20 ppm の水素が検知された。水素配管にこの材料を用いるために、このような現象を改善する処置として、例えば通気口を設けるなど、キャップ内に水素が充満しない構造にすることや、シール材を水素が透過しにくい材料に変更するなどの対応を行うことが望ましい。

##### ③ 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型）

エイジング処理として、配管に水素を充填した状態で室温×24 時間以上放置し、供試体とした。バルブを開放した状態と閉鎖した状態の 2 条件で水素気密性試験を実施した結果、水素圧力の低下は測定精度以内であり、緊急遮断バルブ（ボールバルブ型）の水素に対する気密性が確認された。

#### ④ 鋼管用サドル

平成 26 年度事業ではφ 50mm の白ガス管を組み付けて試験を実施したが、配管部品と測定装置接続用継手の間でリークが認められたため、本年度は、従来の施工状況に近い状態で配管を組み込み、測定した。配管は PLP 管を用い、継手部はアルキド樹脂系ガスシール剤を塗布し、規定トルク以上で締込み供試体とした。水素気密性試験の結果、水素圧力の降下は、測定器機の圧力精度内の変化であり、水素に対する気密性が認められた。

## 5. PTFE 及びエポキシ樹脂の水素劣化に関する文献調査

平成 26 年度事業で劣化が確認されなかった PTFE 並びにエポキシ樹脂について、水素曝露による劣化に関して文献調査を実施した。

### 5.1 PTFE

タイトル：樹脂複合材の水素ガスシール性と摩耗の評価

著者：澤江義則，井手口隼人，森田健敬，中嶋和弘，杉村丈一

雑誌名：日本機械学会 2012 年度年次大会後援論文集”， pp.32－37，（2012）

要旨 水素ガスの流れ制御に用いるバルブのシール部分では樹脂製の運動シール材が水素ガスをシールしつつ金属部品と摺動している。そのためバルブで用いる運動シール材の選定には、水素ガスに対するシール性だけでなく水素雰囲気下での摩擦・摩耗特性が重要となる。著者らは無充てん PTFE、グラファイト添加 PTFE 及びブロンズ添加 PTFE について、円管形状の樹脂試験片を金属板に定速・一定荷重で擦り付けた場合、充てん材の有無・種類と水素ガスシール性及び樹脂比摩耗量の関係を検討した。さらに金属板の表面粗さとシール性との関係も検討されている。

摺りつけ前においては、金属板の表面粗さが小さく、また樹脂の圧縮弾性率（無充てん＜グラファイト＜ブロンズ）が小さいほど水素ガス漏洩量が減少し、特に樹脂材質の違いがシール性により大きな影響を与えていた。摺りつけ後においては、グラファイト添加及びブロンズ添加 PTFE は無充てん PTFE と比較して摩耗量が減少しており、フィラー充てんによる耐摩耗性の向上が認められた。金属面と樹脂の摺動により削れた樹脂が移行して金属面に樹脂の転移膜を形成するが、この転移膜が形成されることでシール性はさらに向上し、特にグラファイト添加 PTFE では顕著なシール性改善効果が認められた。一方、ブロンズ添加 PTFE については形成される転移膜の表面粗さが大きいためシール性改善効果は限定的であった。本文献では樹脂・金属界面におけるガスシール性は樹脂材質の違いと金属の表面粗さに影響されており、PTFE 複合材の使用により耐摩耗性とシール性が向上することが示された。

### 5.2 エポキシ樹脂

タイトル：Evaluation of the Long-Term Durability of Epoxy Resin Used for Gas Pipeline Rehabilitation

著者：H. Minagata, M. Kubouchi

雑誌名：International Conference on Structure Analysis of Advanced Materials（2009）

要旨 都市ガス配管に用いられているアスファルト被覆鉄管等は 30 年以上使用されガス漏れの原因となるような老朽化が進行している。このような老朽ガス配管の補修手段の一つとして配管内壁にエポキシ樹脂を貼り付ける更生がある。エポキシ樹脂により更生された配管には施工から 20 年を経過しているものがあるが、その長期耐久性については評価されていなかった。著者らは熱促進劣化させたエポキシ樹脂について引張特性を評価し、長期耐久性の推測法を確立するとともに、実使用サンプルと比較することでその推測法の妥当性を考察している。

エポキシ樹脂に高温で促進劣化処理を行ない、相当経過年数と引張強さの関係を示すマスターカーブが作成された。作成したマスターカーブからはガス管の実使用環境においてエポキシ樹脂

は 40 年以上の長期耐久性を持つことが示された。この推測方法の妥当性を評価するために 11 年及び 15 年使用したサンプルの引張試験を行ないマスターカーブと比較を行ったが、カーブと実使用サンプルの結果は概ね一致しており、本文献で確立した方法でガス配管更生に用いられたエポキシ樹脂の長期耐久性を評価可能であることが示された。

## 6. 結 論

平成 27 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査（配管材料の水素適用性調査）から、次の項が結論付けられる。

### I 都市ガス配管材料のシール部材に対する水素影響評価手法の検討

平成 26 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査で得られた劣化パラメータを用いて、配管材料で使用される①NBR パッキン、②シリコーン系シール材、③グリースのアレニウスプロットから、活性化エネルギー及び劣化促進比を算出した。結果を表 6-1 に示す。

表 6-1 各材料の活性化エネルギーと劣化促進比

| 材料           | 劣化パラメータ | 活性化エネルギー                      | 劣化促進比            |
|--------------|---------|-------------------------------|------------------|
| ① NBR パッキン   | 圧縮永久ひずみ | 88.3 kJ/mol<br>(21.1 cal/mol) | 474 倍 (20℃→80℃)  |
| ② シリコーン系シール材 | 引張永久ひずみ | 68.6 kJ/mol<br>(16.4 cal/mol) | 427 倍 (20℃→100℃) |
| ③ グリース       | 見かけ粘度   | 40.6 kJ/mol<br>(9.7 cal/mol)  | 36 倍 (20℃→100℃)  |

ただし、①NBR パッキン、②シリコーン系シール材及び③グリースは、いずれの材料においても配合組成が異なれば、活性化エネルギー及び劣化促進比は異なるため、他の配管材料に適用する際は、取り扱いに注意が必要である。

### II 配管材料の水素曝露影響評価

I で得られた劣化促進比を用いて、水素を充填した状態で期待寿命 30 年に相当する促進曝露処理を各配管材料に行い、期待寿命後の水素気密性について調査した。ただし、メーターユニオンは期待寿命を 10 年で設定した。その結果、全ての配管材料において、水素ガスのリークは認められず、水素気密性を有していることを確認した。

### III 水素気密性試験

平成 26 年度事業で水素気密性が懸念された配管材料について、水素気密性試験前のエイジング処理と配管材料の施工を考慮して測定を実施したところ、全ての配管材料で水素気密性を確保していることを確認した。ただし、緊急遮断バルブ（バネ式）は、水素気密性試験後の配管材料を水素リークディテクターで確認したところ、保護キャップ内で最大 20 ppm の水素を検知した。水素配管としてこの材料を用いる際は、このような現象を改善する処置として、例えば通気口を設けるなど、キャップ内に水素が充満しない構造にすることや、シール材を水素が透過しにくい材料に変更するなどの対応を行うことが望ましい。



## 7. まとめ

平成 26 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査で得られた劣化パラメータを用いて、10 種類の配管材料に対して、期待される耐用寿命約 30 年に相当する促進劣化処理を行ったのち、水素気密性を評価した結果、いずれの配管材料においても水素気密性を有していた。ただし、緊急遮断バルブ（バネ式）は、水素気密性試験後の配管材料を水素リークディテクターで確認したところ、保護キャップ内で最大 20 ppm の水素を検知した。したがって、緊急遮断バルブ（バネ式）を水素ガスに適用するためには、水素を溜め込まず拡散させる配管構造や水素を透過しにくい材料を用いるなどの対応を行うことが望ましい。

以 上

## 二次利用不可リスト

平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査報告書

平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査

一般財団法人化学物質評価研究機構

| 頁  | 図表番号  | タイトル                          |
|----|-------|-------------------------------|
| 4  | 表2-1  | 調査対象材料の試験圧力及び耐熱温度             |
| 4  | 図2-1  | フレキ管ユニット外觀図                   |
| 4  | 図2-2  | フレキ管ユニット保護カバーを外した状態           |
| 8  | 表2-2  | NBRの圧縮永久ひずみ試験結果 (60℃)         |
| 8  | 表2-3  | NBRの圧縮永久ひずみ試験結果 (80℃)         |
| 8  | 表2-4  | NBRの圧縮永久ひずみ試験結果 (100℃)        |
| 9  | 図2-8  | 曝露温度と圧縮永久ひずみの関係               |
| 9  | 表2-5  | シリコーン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (60℃)  |
| 10 | 表2-6  | シリコーン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (80℃)  |
| 10 | 表2-7  | シリコーン系シール材の引張永久ひずみ試験結果 (100℃) |
| 10 | 図2-9  | 曝露温度と引張永久ひずみの関係               |
| 11 | 表2-8  | グリースの見かけ粘度測定結果 (80℃)          |
| 11 | 表2-9  | グリースの見かけ粘度測定結果 (100℃)         |
| 12 | 表2-10 | グリースの見かけ粘度測定結果 (120℃)         |
| 12 | 図2-11 | 曝露温度と見かけ粘度変化率の関係              |
| 13 | 図2-12 | NBRパッキンのアレニウスプロット             |
| 14 | 図2-13 | シリコーン系シール材のアレニウスプロット          |
| 14 | 図2-14 | グリースのアレニウスプロット                |
| 15 | 表2-11 | アレニウスプロットより得られた活性化エネルギー       |
| 15 | 表2-12 | 促進曝露温度と促進比                    |
| 15 | 表2-13 | 使用温度20℃において耐用年数30年に相当する曝露時間   |
| 16 | 表2-14 | ガスシール材料の活性化エネルギー及び劣化促進比       |
| 16 | 表2-15 | 使用温度20℃において耐用年数30年に相当する曝露時間   |
| 17 | 表3-1  | 調査対象配管材料                      |
| 18 | 図3-1  | フレキユニット及びフレキ継手                |
| 18 | 図3-2  | フレキユニット及びフレキ継手 (フレキ継手部)       |
| 18 | 図3-3  | メーターユニオン概略図                   |
| 19 | 図3-4  | ねじ込み継手                        |
| 19 | 図3-5  | 鋼管用サドル                        |
| 19 | 図3-6  | メーターユニオン                      |
| 20 | 図3-7  | 緊急遮断バルブ (パネ式)                 |
| 20 | 図3-8  | 検査口付ねじガス栓                     |
| 20 | 図3-9  | ボールスライドジョイント 伸縮状態             |
| 21 | 図3-10 | ボールスライドジョイント 延長状態             |
| 21 | 図3-11 | エキスパンション継手                    |
| 21 | 図3-12 | 検圧プラグ                         |
| 25 | 図3-18 | 配管材料への水素封入初期の圧力低下             |
| 29 | 表3-9  | 促進劣化処理後の水素気密性試験結果             |
| 30 | 表3-10 | 促進劣化処理後の水素気密性試験結果             |

| 頁  | 図表番号  | タイトル                                   |
|----|-------|----------------------------------------|
| 31 | 図3-22 | フレキシユニット及びフレキ継手の促進劣化後水素気密性試験           |
| 31 | 図3-23 | ねじ込み継手の促進劣化後水素気密性試験                    |
| 32 | 図3-24 | 鋼管用サドルの促進劣化後水素気密性試験                    |
| 32 | 図3-25 | メーターユニオンの促進劣化後水素気密性試験                  |
| 33 | 図3-26 | 緊急遮断バルブ（バネ式）開放状態の促進劣化後水素気密性試験          |
| 33 | 図3-27 | 緊急遮断バルブ（バネ式）閉鎖状態の促進劣化後水素気密性試験          |
| 34 | 図3-28 | 検査口付ねじガス栓 開放状態の促進劣化後水素気密性試験            |
| 34 | 図3-29 | 検査口付ねじガス栓 閉鎖状態の促進劣化後水素気密性試験            |
| 35 | 図3-30 | ボールスライドジョイント（短縮状態）の促進劣化後水素気密性試験        |
| 35 | 図3-31 | ボールスライドジョイント（延長状態）の促進劣化後水素気密性試験        |
| 36 | 図3-32 | エキスパンション継手の促進劣化後水素気密性試験                |
| 36 | 図3-33 | 検圧プラグの促進劣化後水素気密性試験                     |
| 40 | 表4-3  | ボールスライドジョイントの水素気密性試験結果                 |
| 40 | 図4-3  | ボールスライドジョイント（短縮状態）の水素気密性試験             |
| 41 | 図4-4  | ボールスライドジョイント（延長状態）の水素気密性試験             |
| 41 | 図4-5  | ボールスライドジョイント（延長状態）を支持台で固定した状態での水素気密性試験 |
| 42 | 表4-4  | 緊急遮断バルブ（バネ式）の水素気密性試験結果                 |
| 43 | 図4-6  | 緊急遮断バルブ（バネ式，開放状態）昨年度実施品の水素気密性試験        |
| 43 | 図4-7  | 緊急遮断バルブ（バネ式，閉鎖状態）昨年度実施品の水素気密性試験        |
| 44 | 図4-8  | 緊急遮断バルブ（バネ式，開放状態）新規入手品の水素気密性試験         |
| 44 | 図4-9  | 緊急遮断バルブ（バネ式，閉鎖状態）新規入手品の水素気密性試験         |
| 45 | 図4-10 | 水素気密性試験後の水素リーク部位の確認状況                  |
| 45 | 表4-5  | 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型）の水素気密性試験結果             |
| 46 | 図4-11 | 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型，開放状態）の水素気密性試験          |
| 46 | 図4-12 | 緊急遮断バルブ（ボールバルブ型，閉鎖状態）の水素気密性試験          |
| 49 | 表4-6  | 鋼管用サドルの水素気密性試験結果                       |
| 49 | 図4-17 | 鋼管用サドルの水素気密性試験結果                       |
| 54 | 表6-1  | 各材料の活性化エネルギーと劣化促進比                     |