

埋設給水用ポリエチレン管の  
経時変化と健全性評価に関する  
検討報告書

令和3年3月

公益財団法人 給水工事技術振興財団



# 埋設給水用ポリエチレン管の経時変化と健全性評価に関する検討報告書 目次

## 本編

1. はじめに	1
2. 背景	2
1) 取組みの経緯	2
2) 埋設給水用 PE 管(等)仕様の変遷	2
3) 埋設給水用 PE 管の JIS 規格内容の変遷	3
4) 圧力用途の PE 管の破壊形態とクリープ強度について	4
5) 不具合事例	6
3. 熊本地震の分析	7
1) 協力水道事業体の給水装置の構成	7
2) 協力水道事業体の年度別漏水件数と漏水件数割合内訳	7
4. 性能確認試験結果	8
1) 供試体	8
2) 今回選定した試験項目内容	8
3) 試験結果	8
4) 考察	10
5. 掘上管の漏水部分の詳細観察による追加検証	10
1) 試験結果と考察	10
2) 漏水部分の詳細観察のまとめ	13
6. まとめ	13
7. 今後の課題	13
8. その他	14

## 資料編

1 掘上供試体の配管現場状況	1
2 環境応力亀裂の試験方法と結果	2
3 引張破断伸びの試験方法と結果	9
4 内圧クリープの試験方法と結果	22
5 熱安定性の試験方法と結果	36
6 漏水部分の詳細観察	41



埋設給水用ポリエチレン管の  
経時変化と健全性評価に関する  
検討報告書

本編



1. はじめに	1
2. 背景	2
1) 取組みの経緯	2
2) 埋設給水用 PE 管(等)仕様の変遷	2
3) 埋設給水用 PE 管の JIS 規格内容の変遷	3
4) 圧力用途の PE 管の破壊形態とクリープ強度について	4
5) 不具合事例	6
3. 熊本地震の分析	7
1) 協力水道事業体の給水装置の構成	7
2) 協力水道事業体の年度別漏水件数と漏水件数割合内訳	7
4. 性能確認試験結果	8
1) 供試体	8
2) 今回選定した試験項目内容	8
3) 試験結果	8
4) 考察	10
5. 掘上管の漏水部分の詳細観察による追加検証	10
1) 試験結果と考察	10
2) 漏水部分の詳細観察のまとめ	13
6. まとめ	13
7. 今後の課題	13
8. その他	14

## 1. はじめに

「熊本地震給水装置被害状況調査報告書(公財)給水工事技術振興財団(平成30年7月)」によれば、協力水道事業者においては埋設給水用ポリエチレン管(以下「埋設給水用PE管」という。)の漏水が発生していたことが記載されている(管種別漏水比率 鋼管48%,塩ビ管25%,PE管18%,その他9%)。しかしながら、これら漏水PE管は、新旧世代間で外観色変更がないため、漏水現場での外観識別による製造年把握が難しく、それらと漏水発生との相関にかかわる調査は困難な状況にあった。

このことを踏まえ、(公財)給水工事技術振興財団(以下「給工財団」という。)及び日本ポリエチレンパイプシステム協会(以下「JP協会」という。)は共同で、水道事業者の協力のもと、埋設給水用PE管の掘上品の性能評価を行った。これら結果から、経年埋設給水用PE管の漏水発生原因の分析を行い、今後の更新対象の指針(ガイドライン)に関わる“健全性評価”を試みてきた。

本報告書は、これらの“健全性評価”に関して、この分野の中立的な専門家を含めた内容審議を行う「埋設給水用ポリエチレン管の経時変化と健全性評価に関する検討委員会(委員長 山形大学大学院教授 栗山 卓氏)」を発足させ、計2回の審議委員会を経た最終答申をもとに完成させたものである。

### 1) 埋設給水用ポリエチレン管の経時変化と健全性評価に関する検討委員会

区分	所属	役職	氏名
学識経験者	山形大学大学院 有機材料システム研究科	教授	栗山 卓
	株式会社KR I 解析研究センター (前 京都工芸繊維大学 教授)	顧問	西村 寛之
関係団体	公益社団法人 日本水道協会 工務部技術課	担当課長	翠川 和幸
	熊本県管工事業組合連合会 (全国管工事業協同組合連合会)	副会長	清原 健志
水道事業者	熊本市上下水道局 維持管理部 水相談課	主査	仲村 春活
事務局	公益財団法人 給水工事技術振興財団 技術開発部	部長	川崎 敬生
		主任研究員	増田 伸介
		参与	染谷 直昭
	日本ポリエチレンパイプシステム協会	事務局長	藤井 嘉人
		技術委員長	檜物 友和
		技術委員	橋津 健二

### 2) 委員会の検討期間：2020年(令和2年)11月～2021年(令和3年)2月

(1) 第一回委員会：2020年11月20日

(2) 第二回委員会：2021年2月4日

## 2. 背景

### 1) 取組みの経緯

#### (1) 2018 年度

埋設給水用 PE 管は、地震以前から相当数の漏水被害の発生が見られており、地震後も給水管部位別漏水件数が比較的高い割合で続いていることが判明した。それを受け、給工財団は該当工業会である JP 協会と漏水原因分析及び更新対象の検討を行う共同研究を行うことについて協議し合意した。

#### (2) 2019 年 7 月

給工財団と JP 協会が合同で協力水道事業者を訪問し、評価用供試体として掘上 PE 管の提供を要請した。対象は以下の 2 種類と取り決めた。

- ① 漏水した埋設給水用 PE 管
- ② 配水管の更新で発生する埋設給水用 PE 管

なお、協力水道事業者からは『今回の埋設給水用 PE 管の漏水原因分析により、経年 PE 管の更新時期の目安が出るのが最善である。理由は、協力水道事業者は道路漏水による修繕工事対応が多発していた鉛管(以下「LP 管」という。)の更新が一段落したため、次の更新対象給水管として想定している PE 管の余寿命に関する知見を得ることにつながるから』との要望があった。

#### (3) 2019 年 9 月～2020 年 5 月

上記(2)を受けて、協力水道事業者より掘上 PE 管が提供され、下記に示した 2 条件を満たすものを評価対象となる供試管とした。その結果、提供された管の約 30%が評価供試管となった。

- ① 管体 1m 毎に表示されている製造ロット(メーカー名、製造年月)が判別可能であること
- ② 原則各種性能確認試験が可能な最低管長(約 70 cm以上)が確保できること

### 2) 埋設給水用 PE 管(等)仕様の変遷

1959 年に制定された JIS K 6762「水道用ポリエチレン管」では、樹脂の材質により、低密度ポリエチレン(以下「LDPE 管」という。):1 種管(軟質管)、高密度ポリエチレン(以下「HDPE 管」という。):2 種管(硬質管)が規定された。1970 年代に入り 2 種管の亀裂漏水事故が発生し、1978 年頃からは、後述する 1 種管の水泡剝離事故が発生した。これらの事故に対処すべく 2 種管は樹脂を改善・変更し、1 種管は内層にナチュラル層、外層にカーボンブラックを含む層とした二層管とした。また、樹脂を直鎖状低密度ポリエチレン(以下「L-LDPE」という。)に変更した。これらの変遷をまとめたものを表 1 に示した。

表 1 PE 管の圧力管用途仕様の変遷<sup>1)</sup>

用途 年代	水道給水			水道配水	都市ガス	解説
	低密度PE	高密度PE	協力水道事業者	高密度PE	中密度PE	
1950	①LDPE管/PE32相当	②HDPE管/PE63相当	LP管, SGP管, SGP-VB管			①水道用途としてLDPE管の使用が開始される
1960						②水道用途としてHDPE管の使用が開始される ③亀裂漏水を改善したHDPE管に仕様変更される
1970		③HDPE管/PE80相当	1972:LDPE管に切替		④MDPE管/PE80相当	④都市ガス用途にMDPE管の使用が開始される
1980	⑤L-LDPE管/PE50相当					⑤剛性・延性を改良したL-LDPE管への変更。同時に二層化し内面水泡剝離の恒久対策がなされた
1990			1991:L-LDPE二層管に切替	⑥HDPE管/PE100		⑥1990年代中頃より、水道配水管用途でHDPE管の使用が開始される
2000		⑦HDPE管/PE100	2006:被覆層付L-LDPE管に切替			⑦2004年のJIS K 6762改正でHDPEのPE100二層管が規定される

補足：20℃で50年間管が破壊しない周方向応力を、内圧クリープ試験結果から外挿する手法がISO/TR9080で1992年に、その周方向応力からPE樹脂のグレードを分類する規格ISO12162が1995年に示された。表中で「相当」としたのは、これらISO9080及びISO12162以前の樹脂の推定グレードを示す

### 3) 埋設給水用 PE 管の JIS 内容の変遷

給水用途の埋設 PE 管の日本産業規格である JIS K 6762「水道用ポリエチレン二層管」に規定されている試験項目の変遷を表 2 に示した。当初は、諸外国の規格とも同様に、樹脂の短期性能（耐力；降伏強度）と管性能として、短期耐圧性と内圧クリープ性（20℃，24h）それぞれの規定を満足することが、管の規定項目として定められていた。1970 年代の 2 種管（HDPE 管）の亀裂漏水に際し、JIS の改訂は行われずに、樹脂の変更による対応にとどめた。1978 年の 1 種管（LDPE 管）の管内面水泡剝離発生への防止策として、1982 年版で耐塩素水性試験が追加された。その後、恒久的な対策として、管内層にカーボンブラックを含まないナチュラル層を配した二層管を新たに追加した改訂がなされ 1993 年版として発行された。このとき、関連国際規格である ISO 4427 (Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure - Polyethylene (PE) -) の知見を基に、カーボンブラックに関する試験及び環境応力亀裂性試験も追加された。

1996 年の政府方針による JIS の ISO 規格整合化要請から、1998 年版の改正では、できる限りの ISO 4427 との整合を図るべく、規格の記述・書式を含めた大幅な改訂が実施され、規格名称も現在の「水道用ポリエチレン二層管」へ変更された。このとき、引張破断伸び及び熱安定性が追加された。この JIS 改定で、最も重要な変更点は、1992 年に発行された ISO /TR9080 及び ISO12162 の考え方が、JIS に組み込まれたことである。これらの ISO 規格は、その後の改訂を経て、現在の ISO 9080:2012 “Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation (外挿方法による管体形状にした熱可塑性プラスチック材料の長期静水圧強度の求め方)” 及び ISO 12162:2009 “Classification, designation and design coefficient (圧力管及びその継手に使用する熱可塑性プラスチック材料の分類、呼び方及び設計係数)” に至る。

これらの ISO 規格の引用により、JIS で規定している圧力管用途の熱可塑性樹脂管設計の考え方は、大きく変更することになった。すなわち、1993 年版より以前の設計は、使用圧力に適用可能な樹脂の短期性能（耐力；降伏強度）と総合安全係数をもとに、適応樹脂の許容設計応力を定め、管（厚さ）設計を行っていた。これに対して、ISO 規格は、適応樹脂の 20℃、50 年クリープ強度を、最小要求強度 MRS (Minimum Required Strength、この値は、ISO 9080 から求められる予測静水圧強度の下側信頼限界 $\sigma_{LPL}$ に対応する) として定め、これをもとに、製品規格で規定された設計係数により管（厚さ）設計が行われる。つまり、管路設計の終局限界は、管材料長期性能（クリープ強度）に基づくことになる。そのため、JIS のような 1 種管（LDPE 管）及び 2 種管（HDPE 管）の材料区分ではなく、公的認証を受けた長期性能基準から分類される。例えば、20℃条件で 50 年の MRS が 5MPa となる認証 PE 樹脂材料(グレード)を PE50 とよぶ。これらのことに加え、圧力水搬送用途の PE 管規格である ISO 4427-2 では、適用した樹脂で製造された管の品質保証（又は管理）試験として、使用した樹脂ごとに定められた内圧条件と、23℃、及び 80℃の試験温度条件で、最長 1,000 時間にも及ぶ熱間内圧クリープ試験を行うことが規定されている。使用材料及び管製造時の性能とも長期性能を注視した規格として設計されている。

表 2 埋設給水用 PE 管の JIS 規格試験項目の変遷(抜粋)

改訂年	引張降伏強さ	耐圧性	内圧クリープ	耐塩素水性	カーボン濃度	環境応力亀裂	熱安定性	引張破断伸び	カーボン分散
1966	○	○	△	—	—	—	—	—	—
1977	○	○	△	—	—	—	—	—	—
1982	○	○	△	○	—	—	—	—	—
1993	○	○	△	○	○	○	—	—	—
1998	○	○	○	○	○	○	○	○	—
2019	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※上表の記号は、以下のとおり。

○：性能基準に規定。(2019 版と同等の性能基準も含む。)

△：性能基準に規定。試験条件（周方向応力、試験温度 20℃、試験時間 24h）は、1998 年版で改正された条件（材料ごとの周方向応力、試験温度 23℃、80℃、試験時間 100h、165h、1000h）と異なる。  
 ー：規定なし。

その後、ISO 12162 へ認証登録される樹脂性能が向上するのにあわせて、MRS 及び設計係数も 5 年ごとに見直しされ、ISO 4427 の改訂が行われている。JIS もできる限り、整合を図るように改訂が進められ、2019 年にも性能規定値及び試験項目の追加があり、より長期信頼性を重視した規格へと変更されている。

#### 4) 圧力用途の PE 管のクリープ寿命曲線と破壊機構及び破壊形態について

PE樹脂は、一定の力を作用させると時間とともに変形が進行するクリープ現象が室温で見られる。クリープは、他材料でも観測され、融点（絶対温度）の5から6割の温度で認められる。したがって、化学プラントやボイラー等の高温配管強度設計として、1950年代から設計手法の開発が進められてきた。設計の考え方としては、終局限界を大変形が開始する三次クリープ開始ひずみを適用するとき、クリープひずみ速度を負荷応力と表した粘弾性又は粘塑性による構成式を使用する。他方で、終局限界をクリープ破壊とするときは、クリープ試験から、負荷応力とクリープ破壊するまでの時間（寿命）との関係を示すクリープ寿命曲線を得て、指定した寿命時間からクリープ強度を求める。このとき、管に求められる寿命が50年とすると材料の50年間のクリープ破壊試験データが要求される。実際の設計の際は、目的とする長期クリープ破壊強度を、それよりも短い時間で行われたクリープ寿命曲線結果を外挿して求める方法が用いられてきた。さらに、クリープ破壊時間を得るための加速試験として、アレニウス則（速度過程論）の関係を用いた、実際に使用する温度より高い試験温度でのクリープ破壊試験から寿命予測式を得る方法がある。この方法に統計解析を取り入れた試験の考え方とその手順詳細を記述した規格が、前節 3) で示したISO 9080:2012（外挿方法による管体形状にした熱可塑性プラスチック材料の長期静水圧強度の求め方）になる。

この試験方法に従って得たPE管のクリープ寿命曲線の模式図<sup>2)</sup>を図1に示した。図に示したように、すべての管体形状にした熱可塑性樹脂の管周方向応力（フープ応力） $\sigma$ とクリープ破壊時間 $t$ の各両対数の関係は、3本の外挿直線に区分して表せる。これらの各外挿直線は、それぞれ異なる独立の破壊機構に対応していることも解明されている<sup>2)</sup>。このような、各外挿直線が成立する範囲を、それぞれ、第1ステージ、第2ステージ、及び第3ステージとよび、そのときの破壊機構に対応させて、それぞれ「延性（クリープ）破壊」、「ぜい性（クリープ）破壊」及び「酸化（化学）劣化破壊」とよぶ。図中に、それぞれに対応する熱間内圧クリープ試験時の供試管破壊外観上の特徴を付記した。この $\log \sigma - \log t$  で表したクリープ寿命曲線を統計データ解析処理した結果より、適用する樹脂の20℃、50年クリープ強度、最小要求強度MRSが求められる。現行のISO 9080:2012では、室温での第1ステージ又は第2ステージの結果から求められるMRSだけでなく、試験条件を満たせば、20℃条件で100年の予測静水圧強度の下側信頼限界 $\sigma_{LPL}$ を求めることができる。なお、この図から、第1ステージで求められた20℃条件で100年のクリープ強度をもとに管設計した場合、 $\sigma_{LPL}$ の信頼幅から、最短でも200年後にぜい性クリープによる破損が開始し、酸化劣化による管破損はさらにその先に起きることになる。

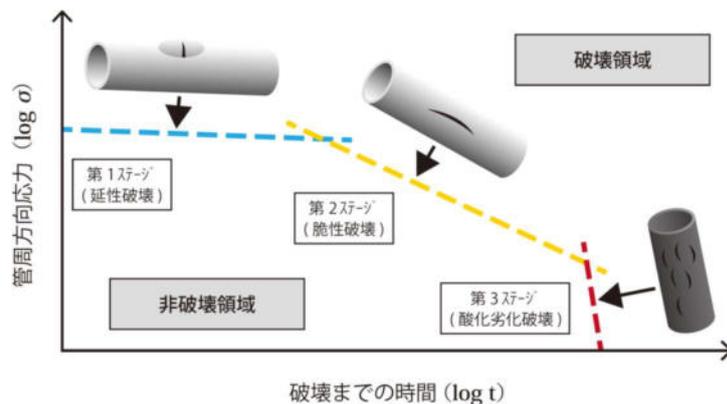


図1 PE管のクリープ寿命曲線の特徴を表す模式図と各ステージに対応する破壊形態図<sup>2)</sup>

### (1) 延性(クリープ破壊)

傾きが最も小さい外挿直線になる寿命領域（第1ステージ、多くのPE管内圧クリープ試験で80°C、1年程度の試験時間に対応する）における破壊形態で、管の一部が大きく膨らみ、やがて裂けるように破壊する。大変形を伴う破壊形態から延性クリープ破壊と呼び、その典型例<sup>3)</sup>を図2に示した。

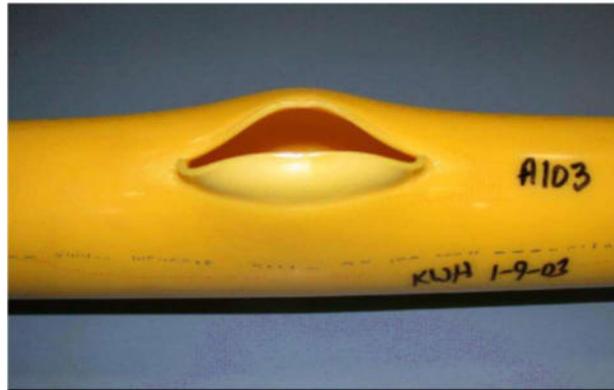


図2 PE管の延性クリープ破壊の様子<sup>3)</sup>

### (2) ぜい性(クリープ)破壊

ガス用PE管で供与開始後、10年以上経過して、1970年代に発見されたクリープ破壊で、外挿直線の傾きが延性クリープより大きくなるため、第1ステージの外挿延長から寿命を見積もると、それよりもはるかに短い時間で破壊することになる。その形態は、破壊時には、管内外面に管軸方向と平行なスリット上の亀裂として観察される。この亀裂は、管内壁面又は管壁面近くの内部を起点として、管外壁面側へと成長して貫通破壊する。そのときの破面を図3に示した。一定圧力条件にも拘わらず、金属材料の疲労破面とよく似たパラボラ状に広がった縞模様を観察される。この縞模様は、亀裂が不連続に成長したことを示すもので、亀裂は一定長時間停留してから成長を繰り返すため、低速亀裂成長破壊（SCG: Slow Crack Growth fracture）ともいう。このように、最終破壊時間は亀裂成長に支配され、目視レベルでは管のクリープ変形はほとんど確認できない。このことを延性クリープ破壊と区別するため、ぜい性クリープ破壊としたものであり、次に述べるPE樹脂の化学的変化によるものでなく、材料力学では金属材料の長期疲労破壊と同様に取り扱われている。

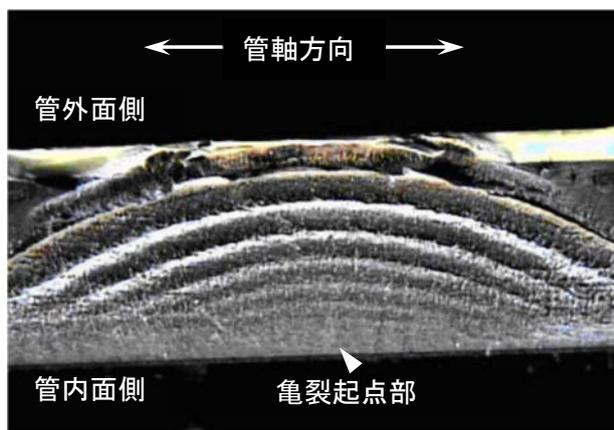


図3 ガス用PE管のぜい性クリープ破壊時に観察された破面<sup>3)</sup>

### (3) 酸化(化学)劣化破壊

PE樹脂を大気中で加熱し融解させ、さらに温度を上げると酸化反応により分子鎖が切断する自動熱酸化分解反応（熱酸化劣化）が起きるようになる。固体のPE樹脂であっても、すべてが結晶化していないので、原理的には、この分解反応は非晶相でも起き、融点又は結晶化温度付近に長時間曝されると緩慢な分解反応と過冷却状態にあった非晶部の再結晶化が同時に作用する化学結晶化が開始する<sup>4)</sup>。このとき、酸素濃度が最も高くなる管表面近傍から結晶化収縮があるため、表面に多数の細かいひび割れが観察される。PE管内部の輸送媒体中の溶存塩素の状態や金属イオン類によって、こ

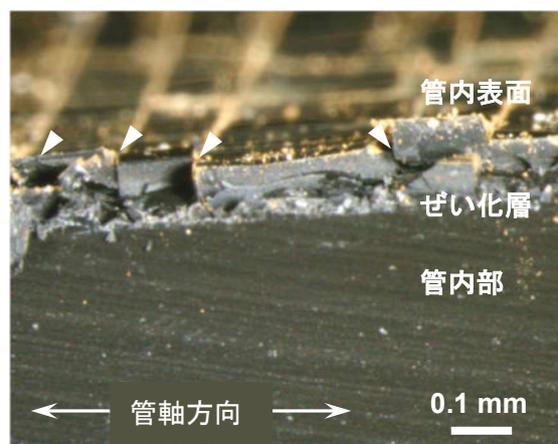


図4 酸化劣化によりPE管内壁面近傍に観察された再結晶化誘起-乾燥亀裂<sup>2)</sup> (mud cracking: 矢印)

の自動酸化反応を加速させることがあり、管内面側にもひび割れが観察される。図4に典型例<sup>2)</sup>を示した。管壁面に結晶化した多数の柱状構造の間に多数の亀裂が観察できる。このように、第3ステージは、化学反応と相変化による亀裂発生、崩壊（剥落）現象である。一般に、室温において、PE樹脂の酸化劣化による破損時間は、使用圧力でのクリープ破壊時間よりもはるかに長くなるため、第2ステージの打ち切り時間以降に、第3ステージの外挿曲線は大きな勾配を持つ直線で示される。

## 5) 不具合事例

### (1) 土中埋設時に転石との接触によるガス用PE管漏洩事例<sup>3)</sup>

米国にて1970年代の初頭に埋設されたガス用中密度PE管（MDPE管）に関して、土中埋設時に岩石と強く接触（Rock Impingement）した典型例を図5に示した。転石との接触による外部剛体接触圧痕があり、管軸方向と20°傾いた亀裂が管外壁面に観察できた。このとき、管内壁側には、管軸方向と平行な亀裂発生が認められ、そこを起点とした低速亀裂成長を起こしたことが報告されている。

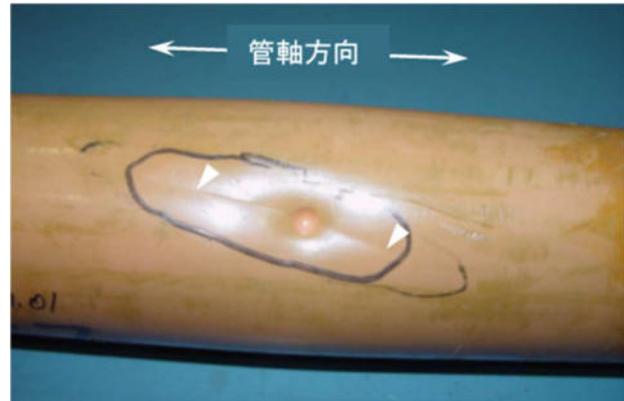


図5 埋設ガス用PE管外側に確認された剛体接触圧痕とその周囲に成長した管軸方向と20°傾いた亀裂（矢印：亀裂両端に対応）

### (2) LDPE管の水泡剥離事故<sup>4)</sup>

1970年代に一部地域でHDPE管の亀裂漏水が発生し、1978年頃からは一部都市に於いて敷設後数年以上経過した埋設給水用LDPE管の内表面に図6に示したような水泡状の膨れが発生し、稀な例として40~50 $\mu\text{m}$ 程度の厚みを有するぜい化層が生じる問題が報告された。PE管に配合されているカーボンブラックが、次亜塩素酸ナトリウムの分解を促進する触媒として作用していたことから、水道水と接触する内側にはカーボンブラックを含まない層とし、その外層はそのままに耐候性能を維持した二層管構造とした。



図6 LDPE管の水泡剥離の様子

### (3) 酸化劣化により破壊した事例<sup>2)</sup>

米国にて25年間使用された水道給水用PE管（HDPE管）の破壊事例の管内面の様子を図7(a)、内面の拡大写真を図7(b)に示した。管内面にカルボニルインデックスが0.1以下になる約125 $\mu\text{m}$ 深さの層が存在しており、管の内面層近傍の酸化劣化が確認された。管軸方向の主亀裂の他に微細な亀裂が管周方向にも発生していた。図7(b)より、低速亀裂成長によるクリープ破壊と考えられた。

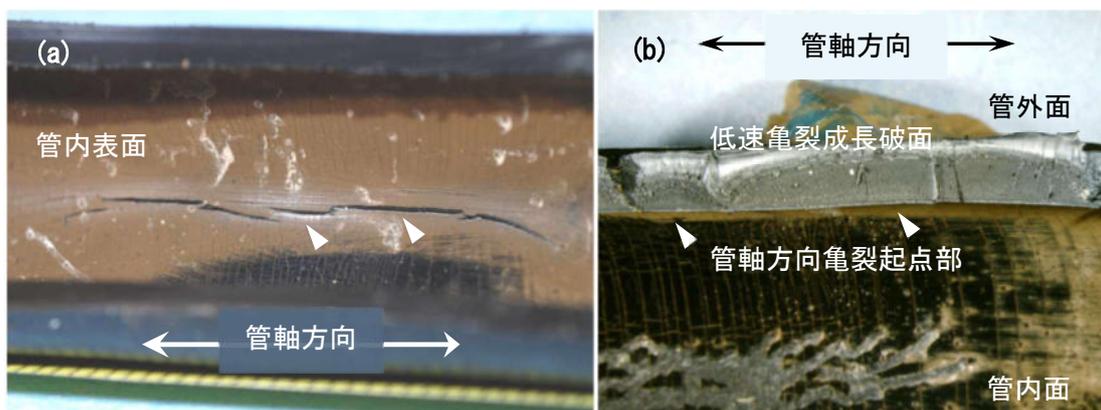


図7 水道給水用 PE 管 (HDPE) の破壊事例

(a) 管内表面に観察されるの管軸方向クリップ亀裂と管周方向乾燥亀裂 (b) 同一箇所での低速クリープ亀裂成長による破面

### 3. 熊本地震の分析

#### 1) 協力水道事業者の給水装置の構成

配水管から分岐した給水装置の標準構成は図8のとおりである

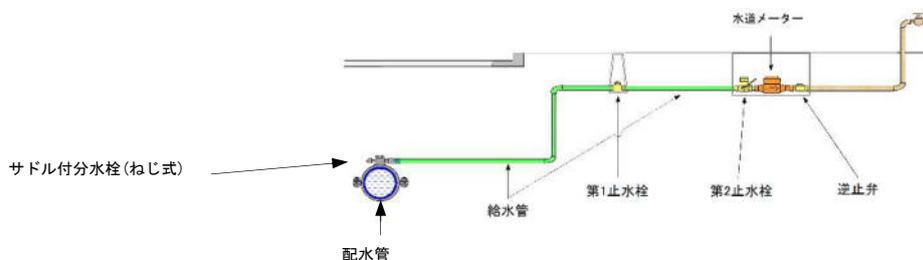


図8 協力水道事業者の給水装置の標準構成

#### 2) 協力水道事業者の年度別漏水件数と漏水件数割合内訳

表3と図9に示す通り、2016年の熊本地震前は埋設給水用PE管の漏水件数割合は、他管種に比較して増加傾向にあった。熊本地震以降は、管種比率も件数とも増加傾向が大きくなっていった。その理由の一つとして、熊本地震時に漏水したPE管以外の他管種老朽管の更新により、相対的に、地震で被害を受けなかった老朽PE管の漏水が顕在化しことが想定される。他方に、地震損傷によるPE管余寿命影響を考えることもできるが、管路寿命は地震による地盤変状及び戸別埋設状態にも依存するため、その影響の分析は難しいものがある。今後、地震影響のない地域での給水用PE管の老朽化調査との比較から、その影響の有無が明らかになる。

表3 年度別漏水件数と部位別漏水件数割合の内訳(※各管種の埋設延長は不明のため考慮していない)

年度	漏水件数/給水戸数(%)	漏水件数			PE 件数	漏水件数割合				
		全体	公道下	宅内		塩ビ	GP	LP	その他	
2012	0.6	1,980	629	1,351	526	26.6%	22.6%	16.1%	14.2%	20.5%
2013	0.7	2,175	724	1,451	662	30.4%	21.7%	15.0%	13.3%	19.5%
2014	0.6	1,989	767	1,222	665	33.4%	21.9%	16.1%	13.8%	14.7%
2015	0.7	2,170	831	1,339	758	34.9%	23.6%	21.6%	11.8%	8.0%
2016 (地震以外)	0.7	2,240	844	1,396	726	32.4%	22.3%	19.6%	11.3%	14.3%
2016 (地震被害)	0.5	1,737	1,737		258	14.9%	20.0%	38.9%	7.0%	19.3%
2016 (合計)	1.2	3,977	3,977		984	24.7%	21.3%	28.0%	9.4%	16.5%
2017	0.8	2,574	982	1,592	998	38.8%	17.7%	19.5%	10.1%	13.9%
2018	0.8	2,655	1,129	1,526	1283	48.3%	16.9%	14.4%	10.2%	10.2%
2019	0.7	2,416	1,153	1,263	1294	53.6%	16.4%	11.2%	9.0%	9.8%

※ 『埋設給水用ポリエチレン管の経時変化と健全性評価に関する検討委員会』調べ

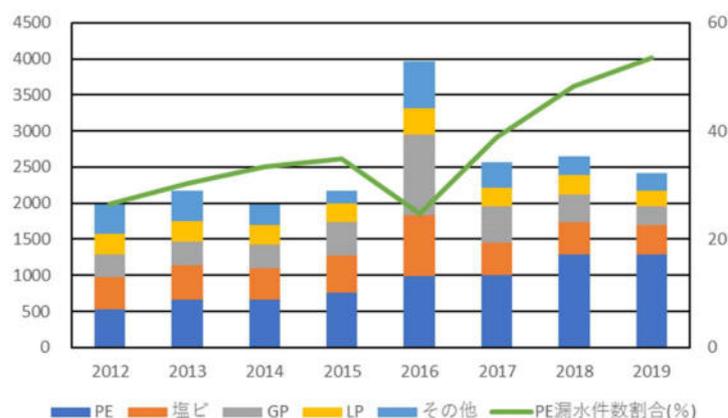


図9 年度別漏水件数とPE漏水件数割合

#### 4. 性能確認試験結果

##### 1) 供試体

埋設給水用PE管の漏水修理や更新時に、掘上採取した全67供試体の内、試験に必要な長さがあり、管の表示から製造年が判別できるものを優先し、計22供試体を試験した。

なお、詳細は資料編「1 掘上供試体の配管現場状況」を参照のこと。

##### 2) 今回選定した試験項目内容

表2の項目の内、表4に示す4項目を今回の評価で選定した。選定した理由はI 評価結果が顕著に表れやすい試験項目、II 長期的な性能を評価する尺度である(熱安定性は除く)ためである。

表4 今回選定した試験項目(JIS K 6762に準拠)

試験項目	試験条件	性能基準
環境 応力亀裂	管から作成した試験片中央部にノッチをいれ、そのノッチ面を外側に曲げた状態で、ポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル水溶液に入れる	240時間以内で亀裂発生があってはならない
引張破断 伸び	管から試験片を作製し、引張速度25mm/minで引張る	350%以上
内圧 クリープ	80℃の熱水中で、管に円周応力(1種管:2.4MPa,2種管:4.5MPa)がかかる水圧を165時間付加する	漏れ又は破損があってはならない
熱安定性	200℃に試験片を保持した状態で、酸化誘導時間(以下OITという。)を測定する	20分以上

- ・環境応力亀裂：曲げ応力や内圧に起因するクリープ応力が継続的に負荷された場合、低速亀裂成長が発生するが、その項目の簡易的評価方法の一つである。
- ・引張破断伸び：長期使用によりPE樹脂が酸化劣化すると破断伸びが低下する。
- ・内圧クリープ：規格で定められた条件で熱間内圧試験を行う。規定条件で破壊したときはその管は、規格外となり不良品になる。現行規格品のクリープ性能の有無を判定できる。
- ・熱安定性：OITを測定し埋設給水用PE管に含まれている酸化防止剤の残量を確認する方法である。

##### 3) 試験結果

試験結果は表5に示すとおりであり、熱安定性の結果を除くと下記a)~d)の4パターンとなった。

表5 埋設給水用 PE 管の性能試験結果

No	掘上管 の状況	供試体				試験結果 <sup>※6</sup>				
		補修 <sup>※1</sup> 継手	製造 <sup>※2</sup> 年	JIS <sup>※3</sup>	管種 <sup>※4</sup> (呼び径)	ガラ <sup>※5</sup> ツキ	環境応 力亀裂	引張破 断伸び	内圧ク リープ	熱安定 性 <sup>※7</sup>
1	漏水	1	(1974)	1966	②S(20)	無	×	×	—	×
2		無	(1974)		②S(20)	無	—	×	×	—
3		1	(1976)		②S(13)	あり	—	×	×	—
4		1	1980	1977	①S(20)	あり	—	○	×	—
5		1	(1981)		①S(20)	無	×	×	×	—
6		無	1981		①S(13)	あり	—	×	×	—
7		無	1981		①S(20)	無	—	○	○	—
8		無	1983		①S(25)	あり	—	×	—	—
9		1	1985		①S(20)	無	○	○	—	×
10		無	1985		①S(20)	無	—	×	×	×
11		無	1985	①S(20)	あり	○	×	×	—	
12		無	(1986)	①S(25)	無	○	○	—	×	
13		無	1986	1982	①S(20)	あり	—	○	○	—
14		無	1987		①S(25)	無	○	○	○	—
15		無	1987		①S(25)	あり	○	○	○	×
16		無	1989		①S(20)	あり	○	○	×	—
17		1	1991		①S(20)	無	○	○	—	×
18	漏水	無	1991		①S(20)	無	—	○	○	—
19	なし	無	1992	①S(20)	無	○	○	—	×	
20	(管更新 により 採取)	無	2000	1998	①W(13)	無	—	○	—	×
21		無	2000		①W(20)	無	—	○	○	—
22		無	2001		①W(20)	無	—	○	○	—

- ※1 掘上前の埋設管に対して、「1：補修継手の1個取付」「無：補修継手の取付無し」を示す。
- ※2 埋設管の表示による。( )は水道事業者にて記録されていた埋設時期による。
- ※3 埋設管の性能が規定されている JIS K 6762 の改訂年を示す。(1993 年も改訂あり。)
- ※4 管種について、「②S:2 種単層管」「①S:1 種単層管」「①W:1 種二層管」を示す。
- ※5 埋設管の外表面について、「あり:ガラツキあり」「無:ガラツキ無し」を示す。
- ※6 試験結果について、「○:適合」「×:不適合」「—:試験せず」を示す。
- ※7 熱安定性は、製造・出荷時に一定の耐熱劣化性能を確保できていることを示す。

- a) No. 1~3 に示す 1970 年代の第 1 世代 2 種管は、全て不適合。
- b) No. 4~16 に示す 1980~1989 年の 1 種単層管は、適合と不適合が混在。
- c) No. 17~19 に示す 1991 年以降の 1 種単層管は、全て適合。
- d) No. 20~22 に示す 2000 年以降の 1 種二層管は、全て適合。

これらは、現在の性能基準 (JIS K 6762:2019) で、適合判定している。なお、表 5 に示す 17 供試体については、掘上時の漏水箇所以外に、補修継手を取り付けられているものもあった。この補修継手は、掘上げ前に漏水があったことを示す。また、掘り上げた 1 つの供試体に数か所の補修継手が付いているものもあった。さらに、性能確認試験をした 22 供試体の内、8 供試体には、図 10 に示したように、埋設管の外表面にガラツキが見られた。



図 10 評価供試体に観察された表面ガラツキ (No. 11)

試験結果の詳細については、資料編「2 環境応力亀裂の試験方法と結果」「3 引張破断伸びの試験方法と結果」、「4 内圧クリープの試験方法と結果」及び「5 熱安定性の試験方法と結果」に掲載されている。

#### 4) 考察

##### (1) 製造年に対する試験結果の傾向

試験結果は、製造年の古いものは不適合が多く、新しくなるにつれて適合が多くなる傾向となった。しかし、製造年の古い供試体は比較対象とすべき生産直後の試験結果が無いため、生産当初から性能が悪かったのか、経年で性能が悪くなったのかの判別が困難である。

##### (2) 製造年に対する長期性能結果のバラツキ

1989年以前に製造した埋設給水用PE管(表5のNo.1~16)は、製造年の新旧と試験結果の適合不適合が一貫していない。この原因として、当該製品のJISでは、その後導入される1998年版JISと異なり、長期強度性能に基づいた材料及び製品の品質管理項目が存在していなかったため、経年効果によるそれらのバラツキへの影響が大きいものと考えられた。それ以外に、施工、又は埋設環境にも長期性能を考慮されていなかった影響も考えられた。

##### (3) 漏水した掘上管の試験結果

1997年以前に製造した埋設給水用PE管(表5のNo.1~19)の中には、「掘上管の状況：漏水」であるにもかかわらず、「試験結果：適合」と異なる結果のものもあった。これらの結果については、後記5.にて掘上時の漏水部分の詳細観察を実施し検証を行った。

##### (4) 漏水なしの掘上管の試験結果

1998年以降に製造した埋設給水用PE管(表5のNo.20~22)は、「掘上管の状況：漏水なし」に対して「試験結果：適合」となった。限られた評価数だが、内圧クリープの試験方法を改正した1998年以降の掘上管は健全性が確認できた。

##### (5) 掘上管の使用年数

表4に示す製造時期から掘上管の漏水までの期間は、最短で28年間(供試体No.17)、最長で45年間(供試体No.2)となる。ただし供試体No.17には「補修継手」が設置されており、今回の掘上以前にも漏水を起こしていることを示すため、漏水までの期間は28年間よりも短くなる。このように漏水までの期間の幅は17年以上となることが分かった。

##### (6) 管表面のザラツキ

外表面にザラツキがある供試体であっても、無しの供試体であっても、それぞれの試験結果に適合と不適合が混在する。このことから管の外表面のザラツキと試験結果には、因果関係は無いと推測する。ただし、管外表面のザラツキについては、今後も継続調査を行うことが必要と考えられる。

#### 5. 掘上管の漏水部分の詳細観察による追加検証

傷や曲げを起因とする漏水部分を詳細に観察することにより、破壊がどのような状態で発生したか例証するために、追加検証を行った。

##### 1) 観察結果と考察

###### <供試体 No.9>

当該管は図11の管外観を示した。管外面には、外部の剛体による接触から押し込まれて窪んだ痕跡があり、そこから長さ約12mm管軸方向と約20°傾いた亀裂が観察された。この時の破面と外部損傷に対応する管内表面側外観を図12及び図13にそれぞれ示した。亀裂は管軸方向と平行に発生しており、破面には同心円状の縞模様が観察され、



図11 管外観 (No.9)

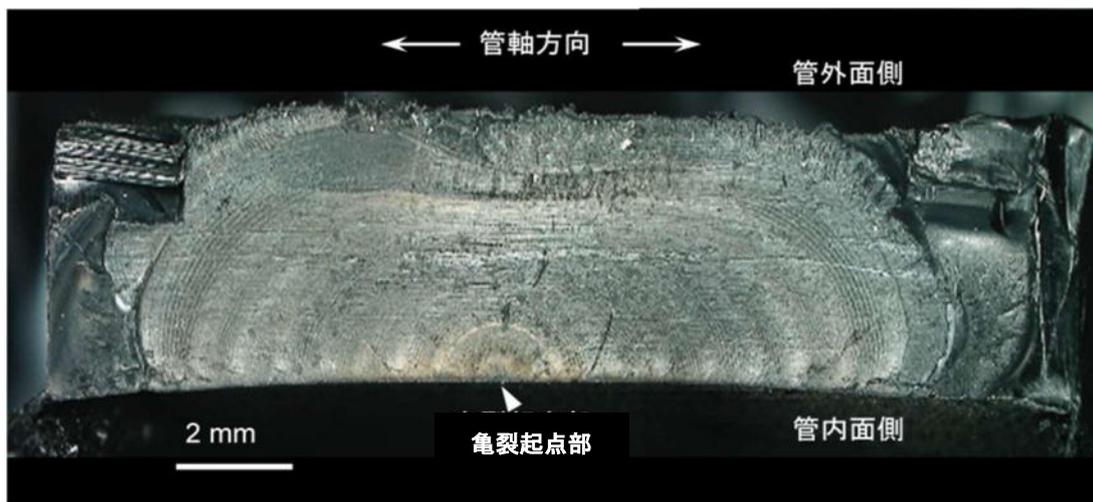


図 1 2 管軸方向亀裂成長破面 (No. 9)

ぜい性クリープ破壊の特徴である低速亀裂成長破壊であることが明らかである。ただし、図 1 3 に示すように内面亀裂の中央部には、主亀裂近傍から離れるにしたがって、平行から傾きを変えた微小非貫通亀裂が多数観察された。典型的な管外壁面点支持されたときの管内面側の張り出し変形（管周方向又は管軸の方向とは無関係に、点支持部を中心に同心円状に引張応力が広がる分布）の影響が見られる。言い換えれば、周方向クリープ変形を拘束した三軸応力が点支持背面に分布したため、低速クリープ亀裂の発生を促進したものと考えられる。

測定部位を変えた酸化誘導時間測定結果を表 6 に示した。200℃条件の OIT は、内外表面での値は 1 分未満になっており、酸化防止剤はほとんど残っておらず、中間部は 3 分と微量ではあるが、残存していることがわかった。また、測定結果が微量のため 190℃条件で測定すると 5~8 分であった。これらの結果から、残存酸化防止剤量の低下による酸化劣化が考えられた。しかしながら、管内面の形態観察には、2.4) で示したような化学結晶化に伴う柱状割れ及び内面管周方向割れも観察されなかった。したがって、この供試管の破壊原因は、第 3 ステージ破壊ではなく、第 2 ステージのぜい性クリープ破壊に帰属された。

#### <供試体 No.12>

管の外観を図 1 4 に示した。管軸方向と約 10° に屈曲していた。回収時に変形回復がなく管扁平を伴う、許容曲げ半径を大きく逸脱する小さな曲げ半径となっており、キンク曲げが推測された。管軸曲げ曲げ引張方向に、管周方向亀裂が半周長に対応する 20 mm 程度で貫通していた。

この時の主亀裂周りの管内表面側外観及びそのときの破面を図 1 5 及び図 1 6 にそれぞれ示した。図 1 5 に示したように、主亀裂発生近傍には、微小な亀裂は確認されなかった。また、破面観察より、管軸軸方向の低速亀裂成長と同様に、内表面の起点から同心円状に外表面へ向かって縞模様が見られ典型的なクリープ亀裂成長挙動が進行していた。

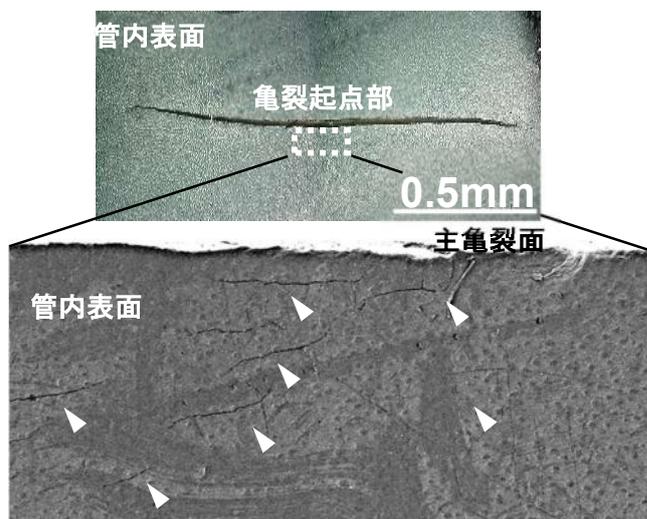


図 1 3 管内面からの主亀裂部拡大観察結果 (No. 9) 矢印は非貫通微小亀裂を示す。

表 6 OIT 測定結果

	(単位:分)	
	200℃	190℃
外表面	<1	8
中間部	3	8
内表面	<1	5

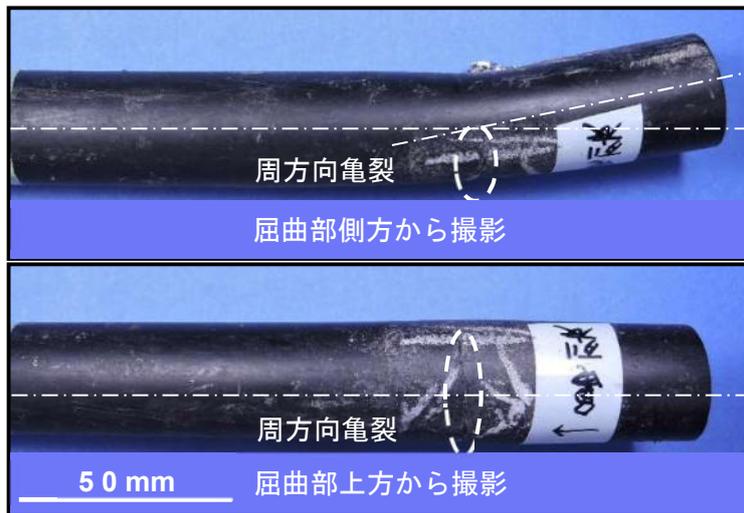


図 14 管外観観察結果 (No. 12)

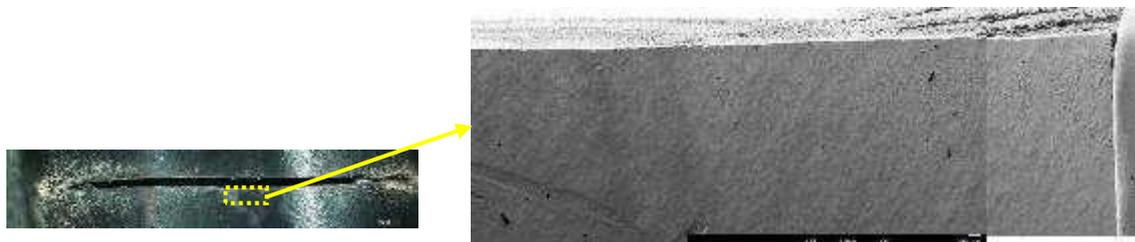


図 15 管内面からの管周方向主亀裂部拡大 (No. 12)



図 16 管周方向亀裂成長破面 (No. 12)

測定部位を変えた酸化誘導時間測定結果を表 7 に示した。200℃条件の OIT は、漏水部は全部が 1 分未満で酸化防止剤はほとんど残っておらず、健全部は 4～9 分で微量残存していることがわかった。また 測定結果が微量のため 190℃条件で測定すると、漏水部の内表面以外は 7～24 分程度の値が見られた。これらの結果から、残存酸化防止剤量の低下による酸化劣化が考えられた。しかしながら、管内面の形態は、図 15 のとおりで、2.4) で示したような化学結晶化に伴う柱状割れ及び内面管周方向割れも観察されなかった。したがって、この供試管の破壊原因は、第 3 ステージ破壊ではなく、第 2 ステージのぜい性クリーブ破壊に帰属されることになったが、直管の圧力管の亀裂の方向と異なり、管周方向亀裂が管半径方向へ低速成長していた。この供試管の管周方向の低速亀裂成長について考察する。

破損状況から、管軸方向の曲げ応力と管周方向引張応力による組合せ応力条件でのクリーブ破壊問題を考えることができる。このとき、組合せ応力の作用順序と、亀裂発生と成長のそれ

それぞれに分けて検討する必要がある。この中で、施工時に、許容曲げを超える管軸方向に曲げモーメント作用させ、その最大曲げひずみが、降伏ひずみ（10%程度）を越えたネッキング開始ひずみに達していた場合のみ、このような亀裂発生成長が想定できる。すなわち、局所的な塑性変形により、屈曲部の管厚さが小さくなる箇所が半円弧状に周方向に形成される。このまま給水供与すると、一定内水圧による屈曲部に作用するスラスト力による管軸方向応力と管軸周方向がともに引張状態で作用する三軸膨張応力となり、周方向の局所的に管厚さが薄くなった部分に亀裂発生の核となるポイドが周方向に局所分布する。このことにより、屈曲部管内面に周方向に半円弧表面亀裂が発生すると、フープ応力よりも内水圧が亀裂面を開口させ、低速亀裂成長が起きたものと考えられる。このことは、最大曲がりとなる管頂部の亀裂は、管壁内部から同心円に管半径方向へ成長しているのに対して、曲げ応力が減少する管側部では管周方向

表7 OIT 測定結果

(単位:分)

	200℃		190℃	
	漏水部	健全部	漏水部	健全部
外表面	<1	5	11	7
中間部	<1	9	9	24
内表面	<1	4	<1	7

に亀裂が成長している様子から、この作用を見ることが出来る。このとき、周方向応力は平行に作用するため、亀裂開口を作用するのは、亀裂面に侵入する媒体圧となる内水圧だけになる。なお、曲げひずみが小さいときは、管周方向応力による管軸方向の亀裂発生が優先する。

## 2) 漏水部分の詳細観察のまとめ

前記4.4(3)の異なる結果について、掘上管(No. 9, No. 12)の漏水部を観察した結果、経年使用に伴うクリープ破壊とイレギュラーな外力等との複合要因により、管内表面に応力集中が生じて内表面から亀裂が発生し、内圧による亀裂の成長、いわゆる低速亀裂成長と呼ばれるぜい性破壊(図1における第2ステージ)により、漏水に至ったものと推定された。なお、データの詳細は資料編「6 漏水部分の詳細観察」に示した。

## 6. まとめ

ひとつの水道事業者という限られた地区でのデータではあるが、下記のようにまとめた。

### 1) 漏水原因の推定

製造時期が1974～2001年にわたる総計22供試体の掘上管を評価し、その漏水原因を調査した結果、下記の2点の複合要因によるものとの結論を得た。

- (1) 製造時点の樹脂性能(長期クリープ性能や耐低速亀裂成長性)及び管設計により、使用限界に近い管が存在することが推定された。
- (2) 埋設環境要因により使用限界を早める影響があることが推察された。

### 2) 更新対象

上記のことを踏まえて、「経年給水PE管の更新対象は、PE管の長期性能規定をJISで定めた1998年より以前の規格で生産された製品とすることが望ましい」ことが示された。

## 7. 今後の課題

前記の結論が全国的に合致するか、他の水道事業者の事例について追加検証するとともに、今回の結果の精度を上げるための追加研究を行うことにより、各水道事業者が台帳情報に基づき、更新対象を判断できるようにしていくことが必要であると考えられる。

## 8. その他

1998年版JIS (K 6762)「水道用ポリエチレン二層管」に先立ち、1997年に、公益社団法人日

本水道協会の規格として制定された JWWA K 144「水道配水用ポリエチレン管」は、長期性能（MRS）基準により設計された管の仕様を定めており、この規格に準拠する「水道配水用ポリエチレン管」は、50年を超えた使用寿命を有することを付記する。

#### 参考文献

- (1) 配水用ポリエチレンパイプシステム協会：水道配水用PE管及び管継手 設計マニュアル P2, 2019年10月を加筆・修正
- (2) D. E. Duvall, D. B. Edwards, “FIELD FAILURE MECHANISMS IN HDPE POTABLE WATERPIPE”, SPE-ANTEC2011, pp.1436-1440(2011)
- (3) GTI report, “Plastic Pipe Failures, Risk, and Threat Analysis, (2009)
- (4) Thermal Analysis of Polymeric Materials: B. Wunderlich, Springer Nature Switzerland (2005)



埋設給水用ポリエチレン管の  
経時変化と健全性評価に関する  
検討報告書

資料編



# 埋設給水用ポリエチレン管の経時変化と健全性評価に関する検討報告書

## 目次

### 資料編

1	掘上供試体の配管現場状況 .....	1
2	環境応力亀裂の試験方法と結果 .....	2
3	引張破断伸びの試験方法と結果 .....	9
4	内圧クリープの試験方法と結果 .....	22
5	熱安定性の試験方法と結果 .....	36
6	漏水部分の詳細観察 .....	41



## 1 掘上供試体の配管現場状況

試験した掘上供試体(22供試体)の内、配管現場状況の写真のある4供試体を以下に示す。  
なお、供試体 No. は本文の**表5**と共通である。

### 1.1 供試体 No. 1



写真 1.1.1 掘り出し時



写真 1.1.2 管の状態



写真 1.1.3 破損部

### 1.2 供試体 No. 3



写真 1.2.1 掘り出し時



写真 1.2.2 破損部

1.3 供試体 No. 10



写真 1.3.1 管の状態



写真 1.3.2 管の状態



写真 1.3.3 破損部

1.4 供試体 No. 17



写真 1.4.1 管の状態



写真 1.4.2 管の状態

## 2 環境応力亀裂の試験方法と結果

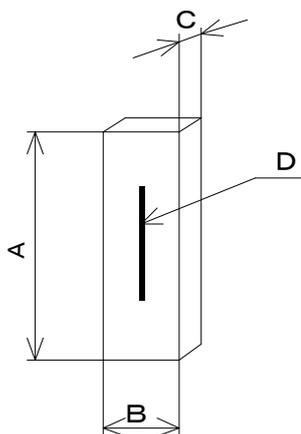
環境応力亀裂の試験方法と結果を以下に示す。

### <試験方法>

環境応力亀裂の試験は、**JIS K 7151** に従って作製した圧縮成形板を用い、**JIS K 6762** の附属書 JB による。

この場合、供試体の内面側を切削加工して切り開いた円弧上のもの又は供試体を切り開いて加熱プレスした板状のものから図 2.1 に示す形状・寸法に切り取り、その外側にノッチを入れたものを試験片とし、温度  $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  のポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル質量分率 10% 水溶液中に 240 時間浸漬する。

なお、試験器具として、試験片および試験液を入れた硬質ガラス製試験管（栓付）の例を図 2.2 に示す



密度 (g/cm <sup>3</sup> )		0.915 以上 0.930 未満	0.930 以上
A	試験片の高さ	38 ± 2.5	
B	試験片の長さ	13 ± 0.8	
C	試験片の厚さ	3 $\begin{smallmatrix} +0.3 \\ 0 \end{smallmatrix}$	2 $\begin{smallmatrix} +0.2 \\ 0 \end{smallmatrix}$
D	ノッチの深さ	0.50 $\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}$	0.30 $\begin{smallmatrix} +0.10 \\ 0 \end{smallmatrix}$
	ノッチの長さ	19.1 ± 0.1	

図 2.1 環境応力亀裂試験片

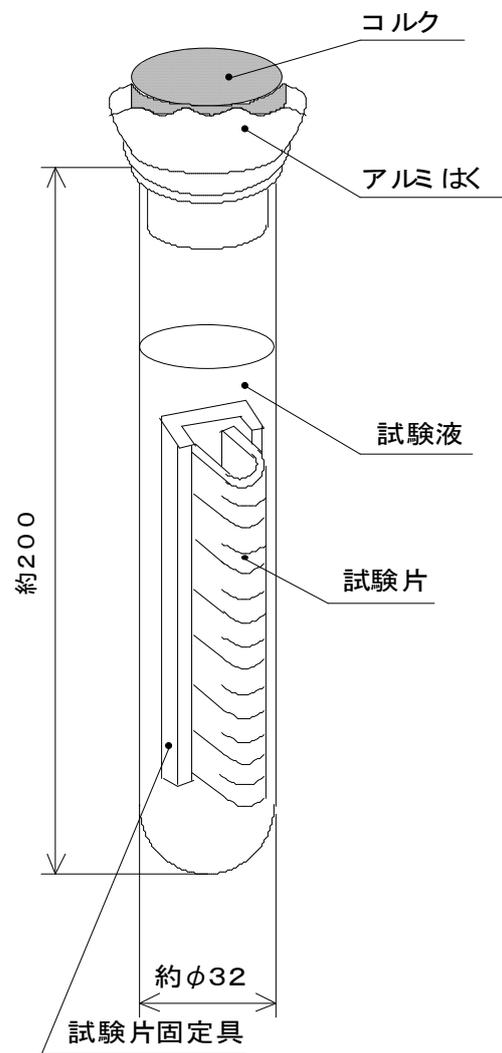


図 2.2 硬質ガラス製試験管（栓付）の例

<試験結果>

環境応力亀裂の試験結果を以下に示す。なお，供試体 No. は本文の**表 5**と共通である。また，写真は代表例を示す。

表 2.3 環境応力亀裂の試験結果

供試体 No.	亀裂発生 の試料数	判定	備考
1	10	不適合	
5	2	不適合	
9	0	適合	
11	0	適合	
12	0	適合	
14	0	適合	
15	0	適合	
16	0	適合	
19	0	適合	

2.1 供試体 No. 5 (2個割れ/10個中)



写真 2.1.1 試験前



写真 2.1.2 試験後



写真 2.1.3 試験後



写真 2.1.4 亀裂発生試料

2.2 供試体 No. 14 (適合)



写真 2.2.1 試験前



写真 2.2.2 試験後



写真 2.2.3 試験後

2.3 供試体 No. 15 (適合)



写真 2.3.1 試験前



写真 2.2.2 試験後



写真 2.2.3 試験後

2.4 供試体 No. 19 (適合)



写真 2.4.1 試験後

### 3 引張破断伸びの試験方法と結果

引張破断伸びの試験方法と結果を以下に示す。

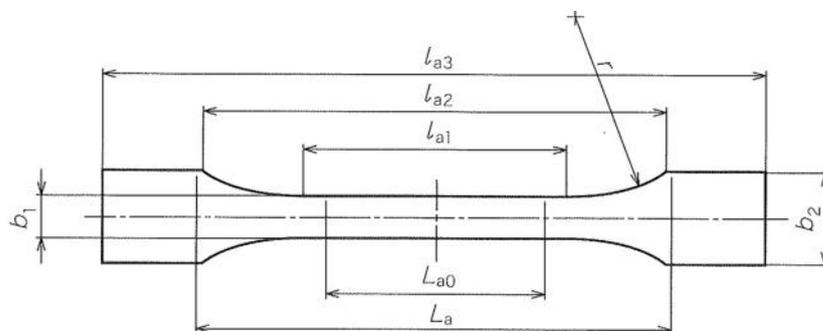
#### <試験方法>

引張破断伸びの試験は，JIS K 6815-1，JIS K 6815-3 に従って行う。ただし，呼び径 25 以下及び公称外径 32 以下の試験片は，図 3.1 に示す 1BA 形試験片とする。

なお，厚さは原管のままとし，打ち抜き又は切削によって試験片を作製し，これを測定する。ここで，伸びが 400% を超える場合は測定を打ち切ってもよい。

また，写真 3.2～写真 3.6 に試験片および試験状況の例を示す。

単位：mm



$l_{a3}$	全長	$\geq 75$
$l_{a1}$	幅の狭い平行部分の長さ	$30 \pm 0.5$
$r$	半径	$\geq 30$
$l_{a2}$	幅の広い変更部分までの間隔	$58 \pm 2$
$b_2$	エッジ部の幅	$10 \pm 0.5$
$b_1$	狭い部分の幅	$5.0 \pm 0.5$
$L_{a0}$	標線間距離	$25.0 \pm 0.5$
$L_a$	つかみ具間距離	$l_{a2} \begin{matrix} +2 \\ 0 \end{matrix}$

図 3.1 1BA 形試験片



写真 3.2 原管および試験片



写真 3.3 試験状況（引張前）

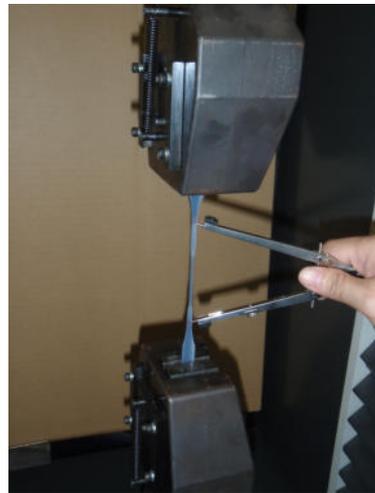


写真 3.4 試験状況（伸びの測定）



写真 3.5 試験状況（伸び 400%）



写真 3.6 試験状況（破断）

<試験結果>

引張破断伸びの試験結果を以下に示す。なお、供試体 No. は本文の**表5**と共通である。また、写真は代表例を示す。

表 3.7 引張破断伸びの試験結果

供試体 No.	引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定	総合判定	備考
1	1	140	不適合	不適合	
	2	380	適合		
	3	400	適合		
2	1	404	適合	不適合	
	2	668	適合		
	3	308	不適合		
3	1	520	適合	不適合	
	2	72	不適合		
	3	100	不適合		
4	1	608	適合	適合	
	2	640	適合		
	3	580	適合		
5	1	560	適合	不適合	
	2	580	適合		
	3	260	不適合		
6	1	196	不適合	不適合	
	2	132	不適合		
	3	380	適合		
7	1	492	適合	適合	
	2	364	適合		
	3	484	適合		
8	1	380	適合	不適合	
	2	300	不適合		
	3	304	不適合		
9	1	>644	適合	適合	
	2	>632	適合		
	3	>640	適合		
10	1	12	不適合	不適合	
	2	188	不適合		
	3	484	適合		
11	1	132	不適合	不適合	
	2	124	不適合		
	3	100	不適合		

表 3.7 引張破断伸びの試験結果(続き)

供試体 No.	引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定	総合 判定	備考
12	1	>400	適合	適合	
	2	>400	適合		
	3	>400	適合		
13	1	572	適合	適合	
	2	600	適合		
	3	596	適合		
14	1	748	適合	適合	
	2	672	適合		
	3	584	適合		
15	1	588	適合	適合	
	2	588	適合		
	3	584	適合		
16	1	620	適合	適合	
	2	740	適合		
	3	620	適合		
17	1	640	適合	適合	
	2	>820	適合		
	3	>820	適合		
18	1	564	適合	適合	
	2	540	適合		
	3	520	適合		
19	1	588	適合	適合	
	2	588	適合		
	3	584	適合		
20	1	760	適合	適合	
	2	672	適合		
	3	748	適合		
21	1	568	適合	適合	
	2	564	適合		
	3	572	適合		
22	1	580	適合	適合	
	2	564	適合		
	3	568	適合		

### 3.1 供試体 No. 2 (不適合)

表 3.1.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	404	適合
2	668	適合
3	308	不適合
平均値	460	—

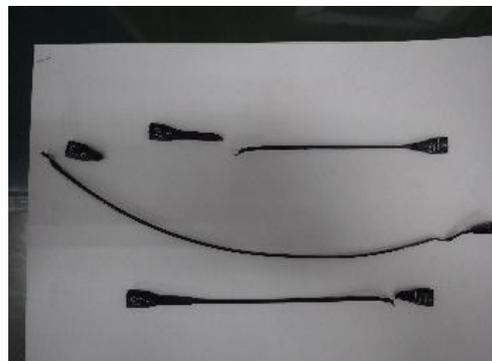


写真 3.1.2 試験後

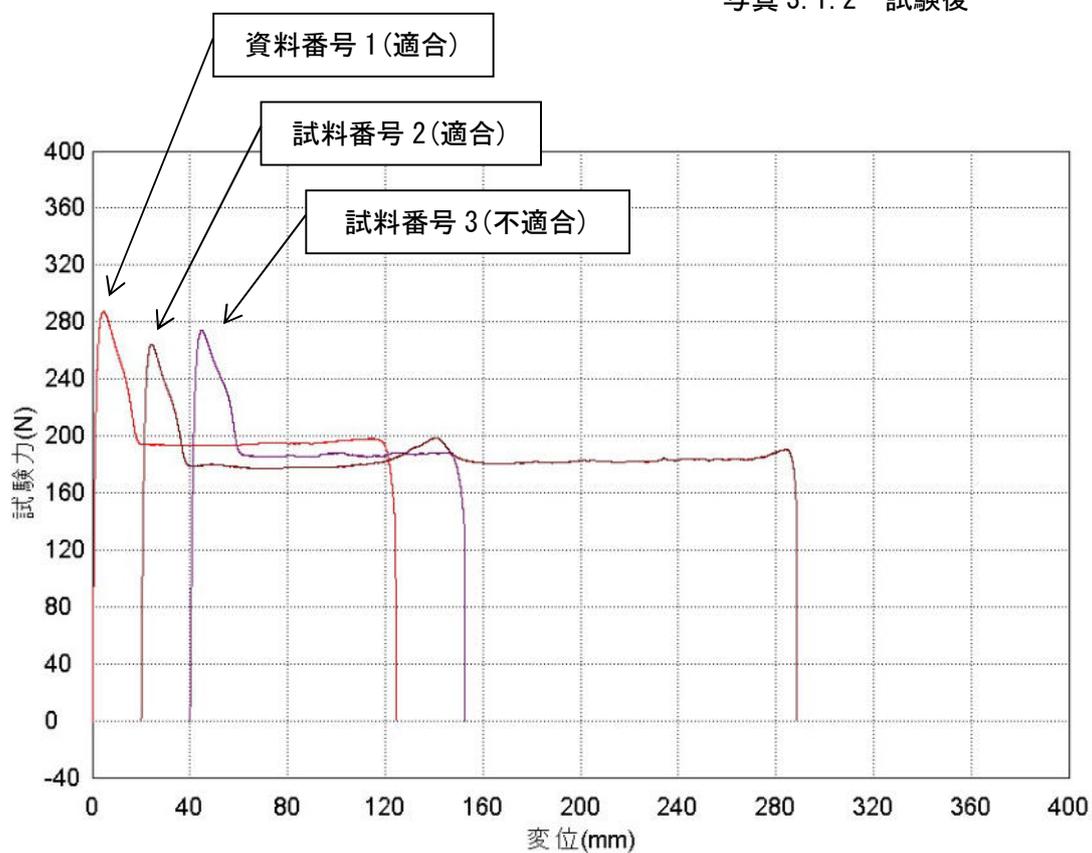


図 3.1.3 荷重-変位曲線

### 3.2 供試体 No. 3 (不適合)

表 3.2.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	520	適合
2	72	不適合
3	100	不適合
平均値	231	—



写真 3.2.2 試験後

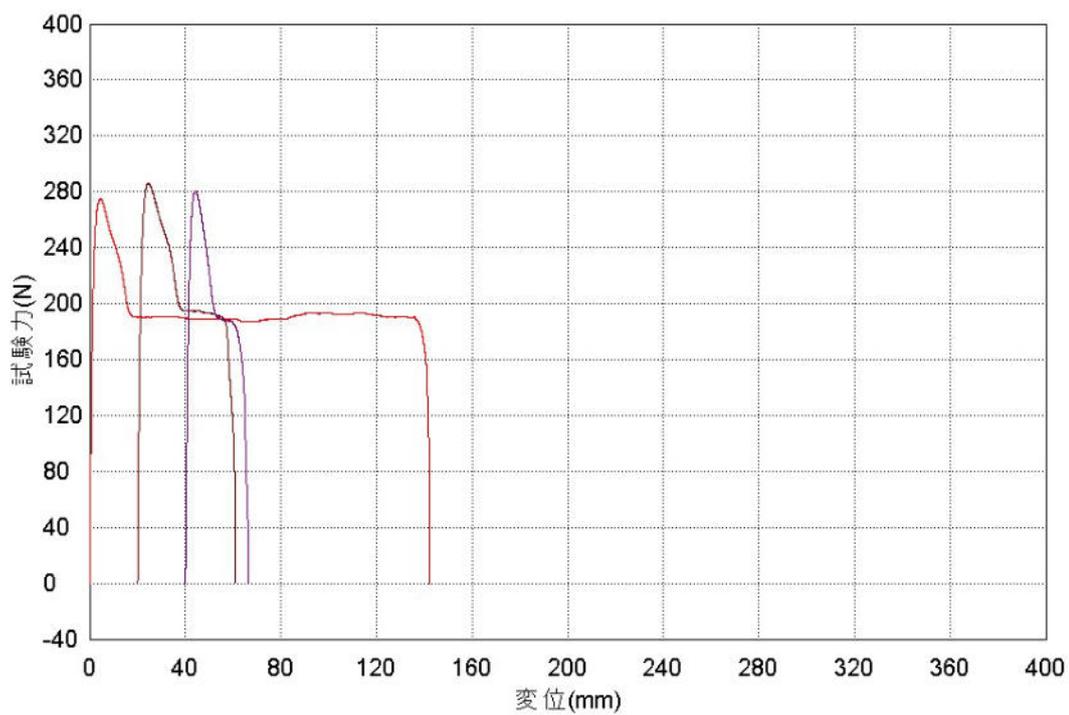


図 3.2.3 荷重-変位曲線

### 3.3 供試体 No. 4 (適合)

表 3.3.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	608	適合
2	640	適合
3	580	適合
平均値	609	—



写真 3.3.2 試験後

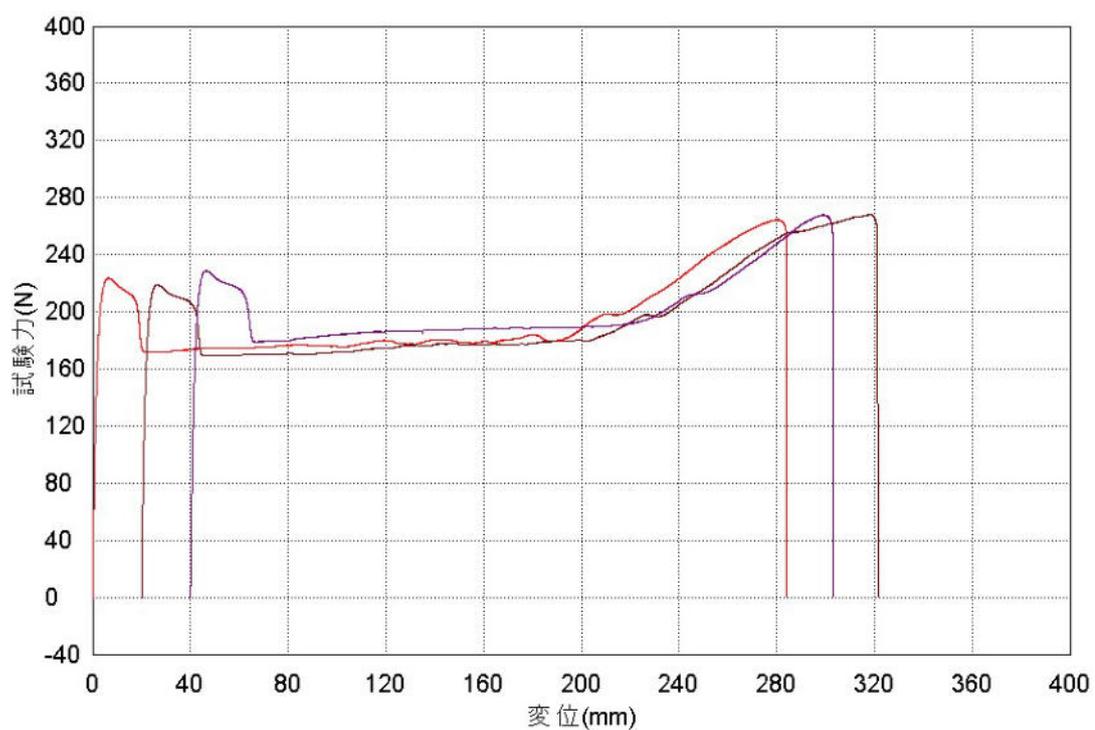


図 3.3.3 荷重-変位曲線

### 3.4 供試体 No. 5 (不適合)

表 3.4.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	560	適合
2	580	適合
3	260	不適合
平均値	467	—

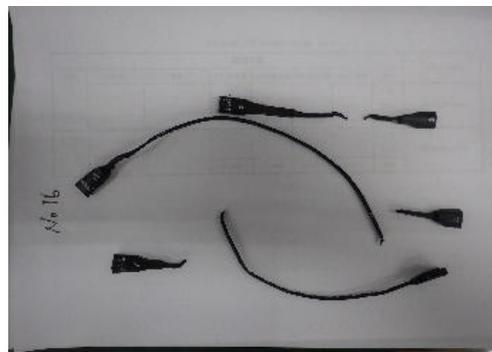


写真 3.4.2 試験後

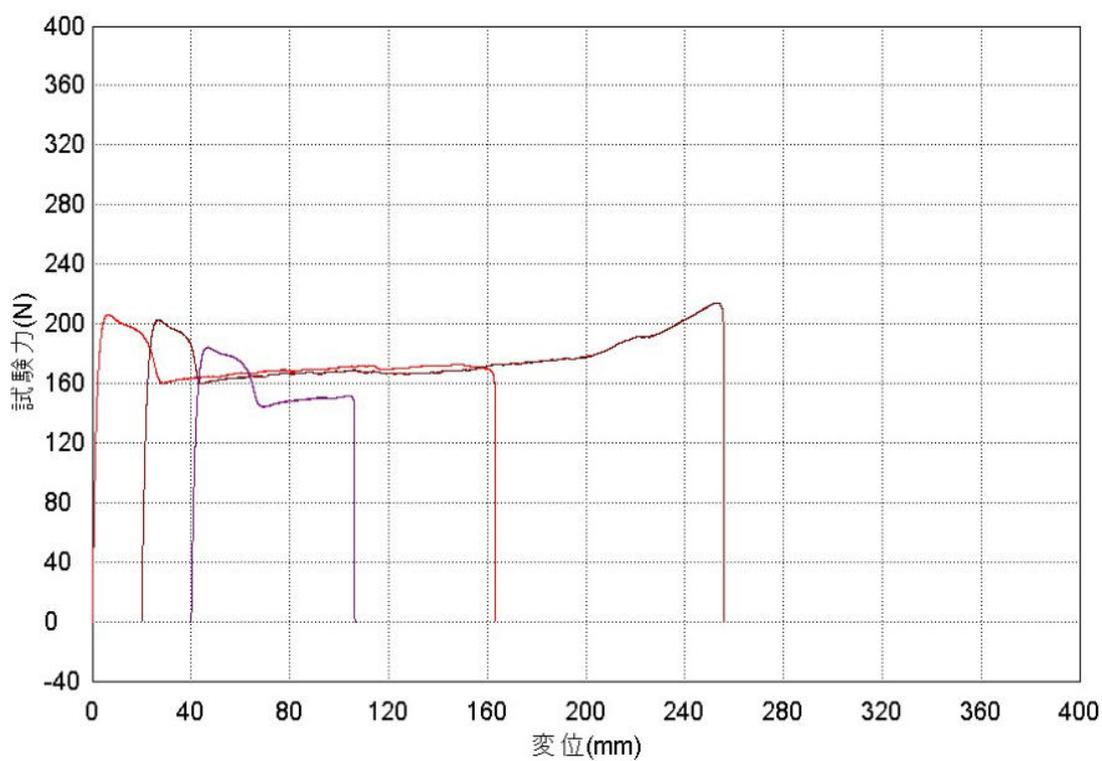


図 3.4.3 荷重-変位曲線

### 3.5 供試体 No. 6 (不適合)

表 3.5.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	196	不適合
2	132	不適合
3	380	適合
平均値	236	—

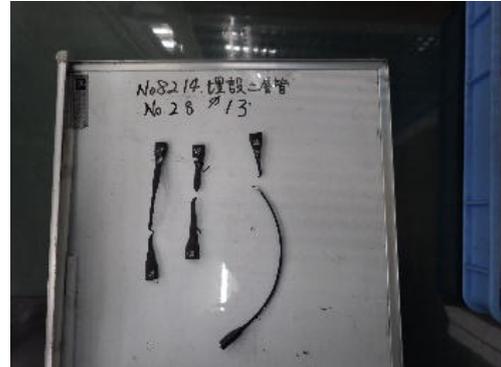


写真 3.5.2 試験後

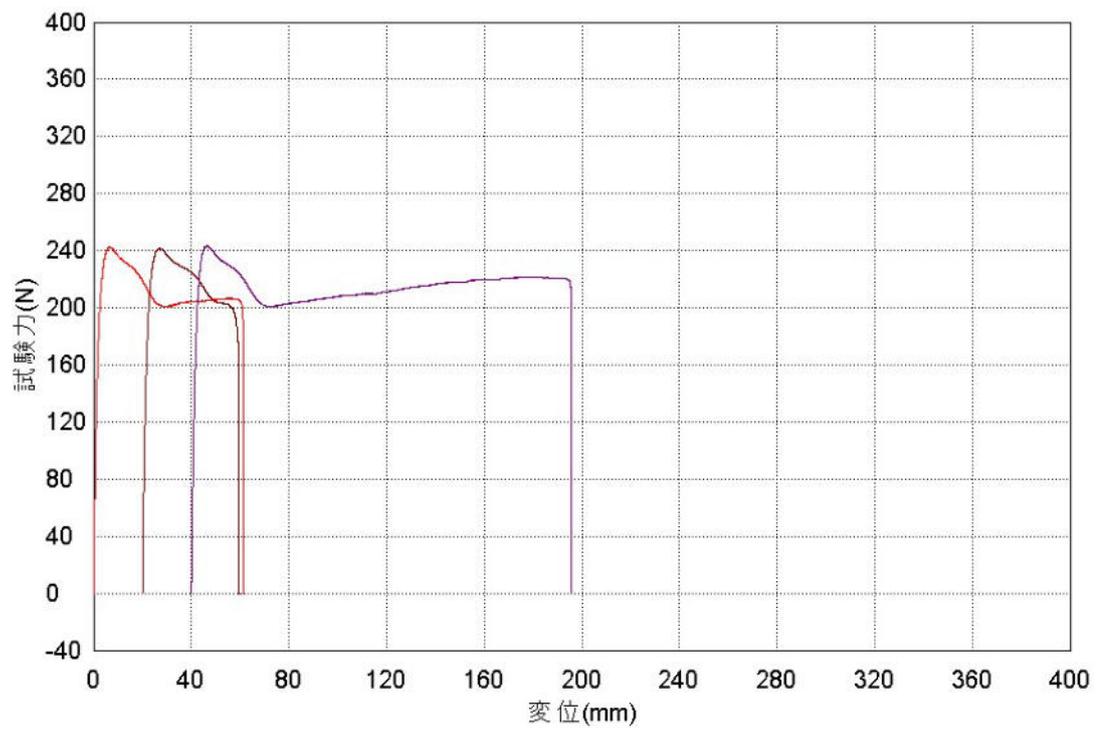


図 3.5.3 荷重-変位曲線

### 3.6 供試体 No. 8 (不適合)

表 3.6.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	380	適合
2	300	不適合
3	304	不適合
平均値	328	—



写真 3.6.2 試験後

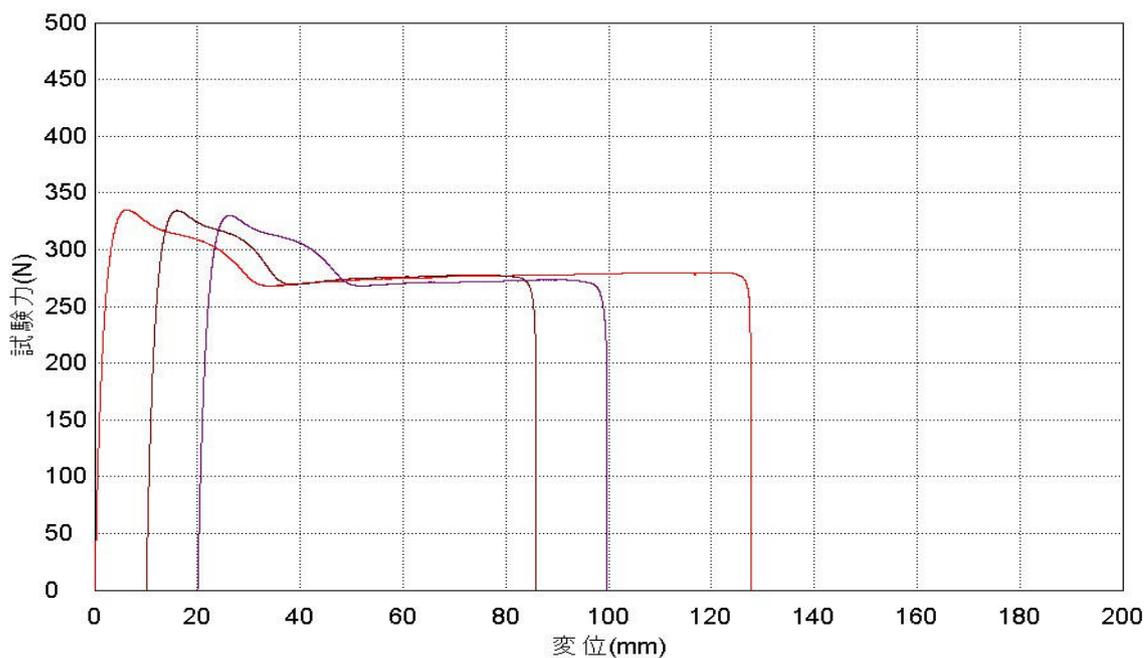


図 3.6.3 荷重-変位曲線

### 3.7 供試体 No. 10 (不適合)

表 3.7.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	12	不適合
2	188	不適合
3	484	適合
平均値	228	—

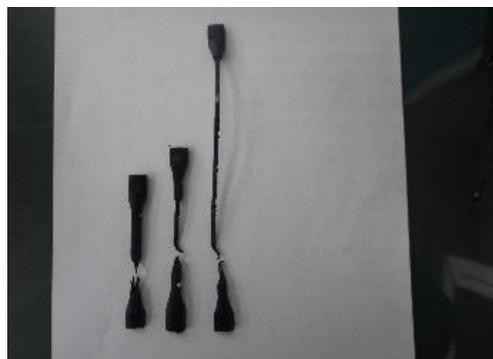


写真 3.7.2 試験後

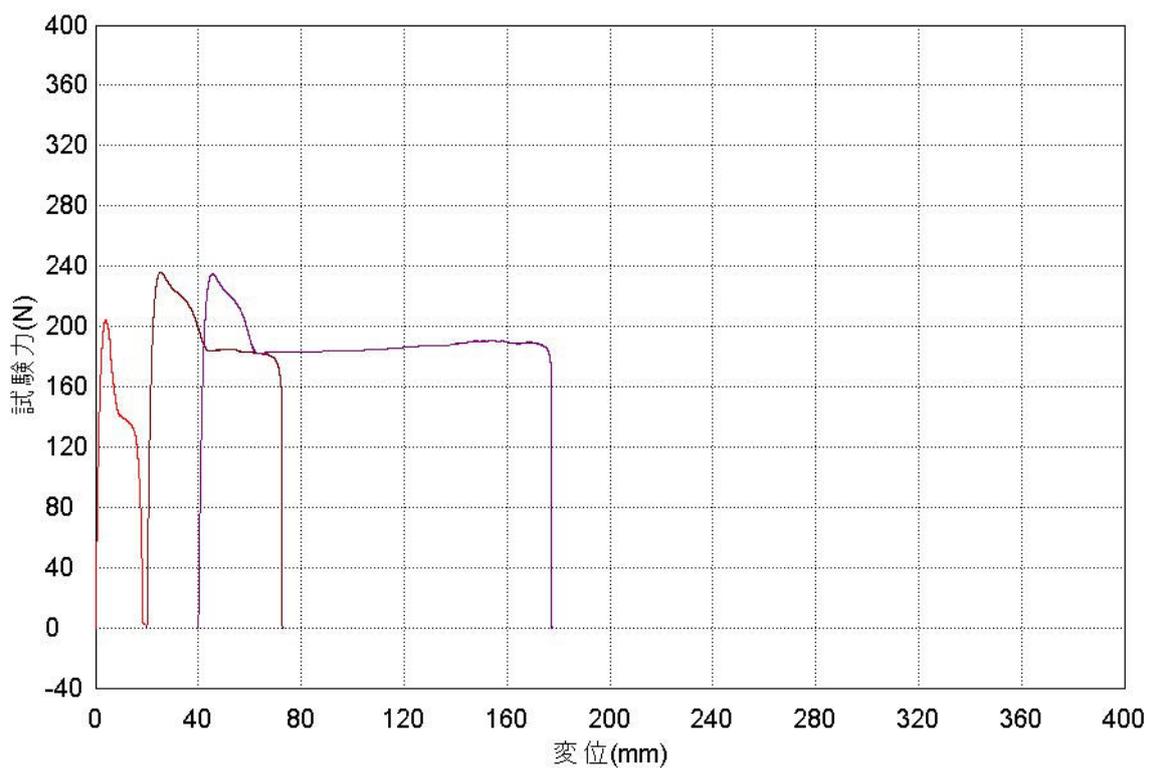


図 3.7.3 荷重-変位曲線

### 3.8 供試体 No. 11 (不適合)

表 3.8.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	132	不適合
2	124	不適合
3	100	不適合
平均値	119	—



写真 3.8.2 試験後

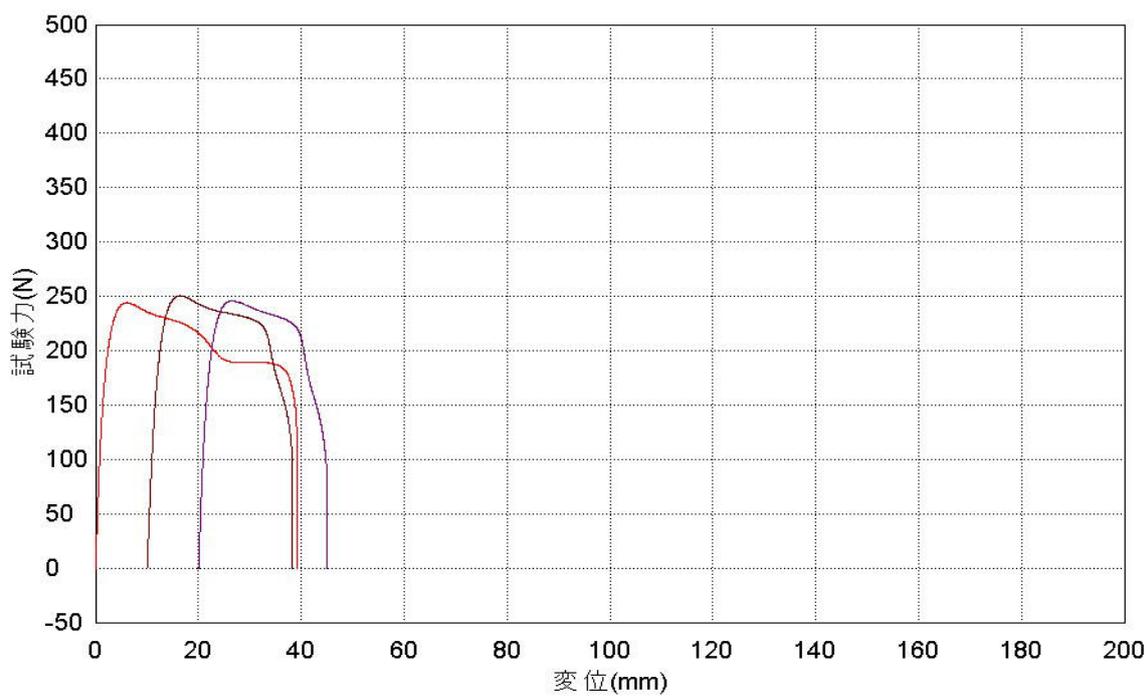


図 3.8.3 荷重-変位曲線

### 3.9 供試体 No. 16 (適合)

表 3.9.1 引張試験結果

引張 試料番号	伸び率 (%) 350%以上	判定
1	620	適合
2	740	適合
3	620	適合
平均値	660	—



写真 3.9.2 試験後

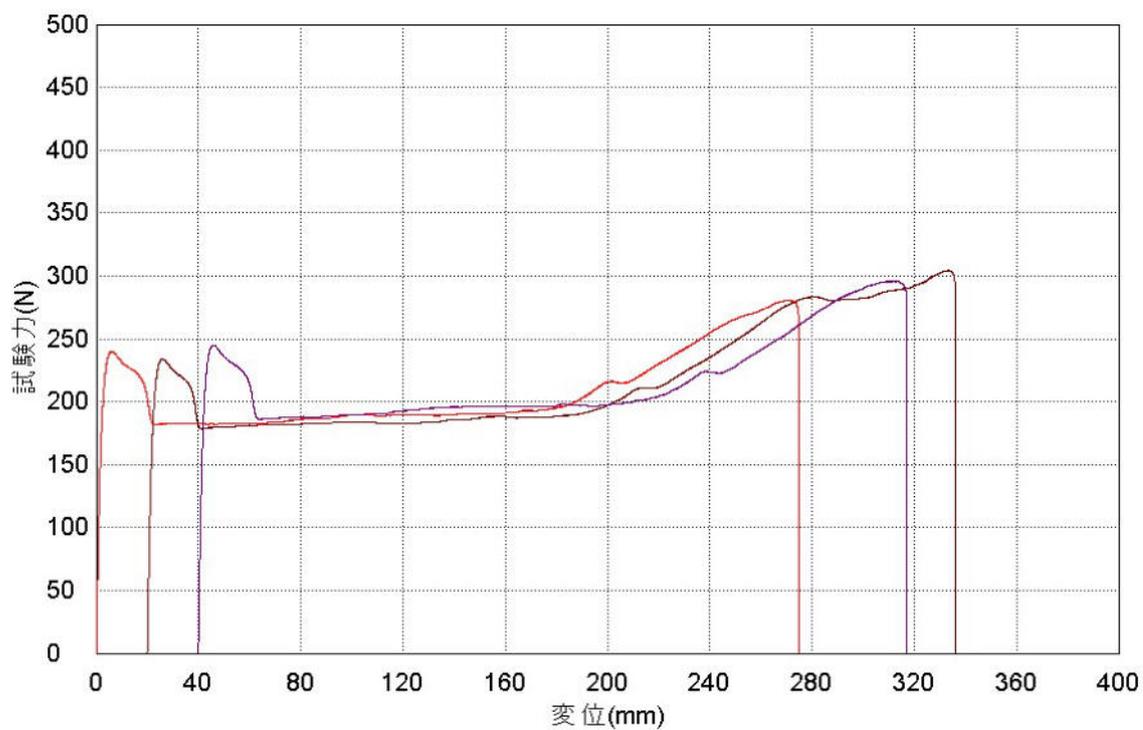


図 3.9.3 荷重-変位曲線

#### 4 内圧クリープの試験方法と結果

内圧クリープの試験方法と結果を以下に示す。

##### <試験方法>

内圧クリープの試験は、供試体から管外径の3倍以上の長さの試験片を切り取り、水又は空気、窒素などの不活性ガスを試験片内に満たした後、試験温度に保った水中に浸せきし、所定の試験圧力をかけ試験時間保持する。試験は次式によって算出した圧力を用い、本評価においては、表4.1の試験条件のうち”80℃, 165時間”とした。

$$P = \frac{2\sigma}{SDR - 1}$$

ここに、  
 $P$  : 試験圧力 (MPa)  
 $\sigma$  : 管の円周応力 (MPa)  
 $SDR$  : 外径厚さ比 (基準外径/最小寸法厚さ)

表 4.1 内圧クリープの試験条件

温度 (°C)	円周応力 MPa			試験時間 (h)
	PE100	PE80	PE50	
20	12.4	10.0	7.1	100
80	5.4	4.5	2.4	165
80	5.0	4.0	2.2	1000

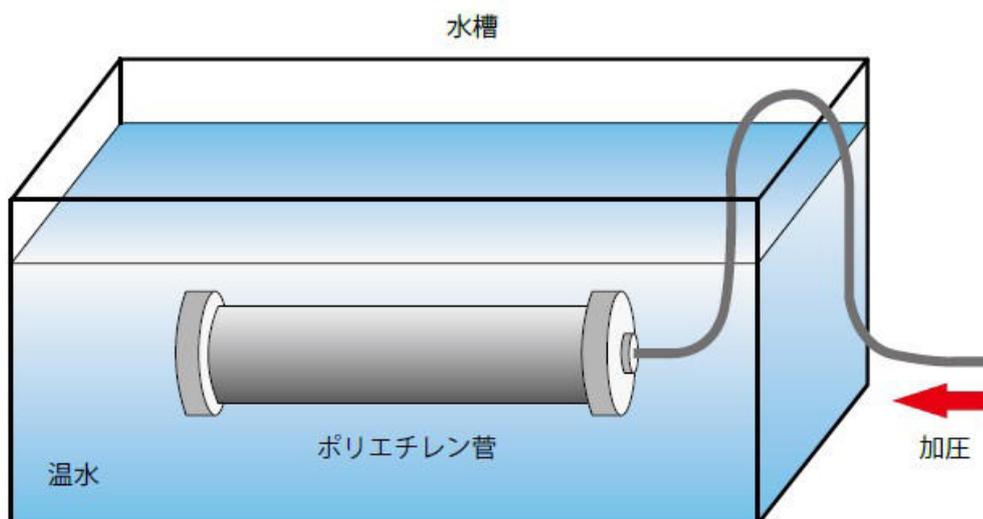


図 4.2 内圧クリープの試験装置

<試験結果>

内圧クリープの試験結果を以下に示す。なお、供試体 No. は本文の**表 5** と共通である。また、写真は試験をしたすべての結果を示す。

表 4.3 内圧クリープの試験結果

供試体 No.	クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	総合判定	備考
2	1	29	不適合	不適合	
	2	121	不適合		
	3	—	—		
3	1	29	不適合	不適合	
	2	121	不適合		
	3	—	—		
4	1	16	不適合	不適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
5	1	0	不適合	不適合	
	2	140	不適合		
	3	1	不適合		
6	1	0	不適合	不適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
7	1	>165	適合	適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
10	1	1	不適合	不適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
11	1	51	不適合	不適合	
	2	247	適合		
	3	0	不適合		
13	1	>165	適合	適合	
	2	>165	適合		
	3	>165	適合		
14	1	>165	適合	適合	
	2	>165	適合		
	3	>165	適合		
15	1	>165	適合	適合	
	2	—	—		
	3	—	—		

表 4.3 内圧クリープの試験結果(続き)

供試体 No.	クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	総合 判定	備考
16	1	4	不適合	不適合	
	2	5	不適合		
	3	—	—		
18	1	>165	適合	適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
21	1	>165	適合	適合	
	2	—	—		
	3	—	—		
22	1	>165	適合	適合	
	2	—	—		
	3	—	—		

#### 4.1 供試体 No. 2 (不適合)

表 4.1.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	29	不適合	
2	121	不適合	
3	—	—	



写真 4.1.2 試験前(試料番号 1)



写真 4.1.3 試験後(試料番号 1)



写真 4.1.4 試験後(試料番号 2)



写真 4.1.5 試験後(試料番号 2)

## 4.2 供試体 No. 3 (不適合)

表 4.2.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	29	不適合	
2	121	不適合	
3	—	—	



写真 4.2.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.2.3 試験後(試料番号 1)



写真 4.2.4 試験後(試料番号 2)



写真 4.2.5 試験後(試料番号 2)

#### 4.3 供試体 No. 4 (不適合)

表 4.3.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	16	不適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.3.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.3.3 試験後(試料番号 No. 1)

#### 4.4 供試体 No. 5 (不適合)

表 4.4.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	0	不適合	常温では漏水無し。80℃にて漏水。
2	140	不適合	
3	1	不適合	



写真 4.4.2 試験前(試料番号 1)



写真 4.4.3 試験後(試料番号 1)



写真 4. 4. 4 試験後(試料番号 2)



写真 4. 4. 5 試験後(試料番号 2)



写真 4. 4. 6 試験後(試料番号 3)



写真 4. 4. 7 試験後(試料番号 3)

4. 5 供試体 No. 6 (不適合)

表 4. 5. 1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	0	不適合	常温では漏水無し。80°Cにて漏水。
2	—	—	
3	—	—	



写真 4. 5. 2 試験後(試料番号 1)



写真 4. 5. 3 試験後(試料番号 1)

#### 4.6 供試体 No. 7 (適合)

表 4.6.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.6.2 試験前(試料番号 1)



写真 4.6.3 試験後(試料番号 1)

#### 4.7 供試体 No. 10 (不適合)

表 4.7.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	1	不適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.7.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.7.3 試験後(試料番号 1)

4.8 供試体 No. 11 (不適合)

表 4.8.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	51	不適合	
2	247	適合	
3	0	不適合	常温では漏水無し。80℃にて漏水。



写真 4.8.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.8.3 試験後(試料番号 1)



写真 4.8.4 試験後(試料番号 2)



写真 4.8.5 試験後(試料番号 2)



写真 4.8.5 試験後(試料番号 3)



写真 4.8.7 試験後(試料番号 3)

4.9 供試体 No. 13 (適合)

表 4.9.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	>165	適合	
3	>165	適合	



写真 4.9.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.9.3 試験後(試料番号 1)



写真 4.9.4 試験後(試料番号 2)



写真 4.9.5 試験後(試料番号 2)



写真 4.9.6 試験後(試料番号 3)



写真 4.9.7 試験後(試料番号 3)

4.10 供試体 No. 14 (適合)

表 4.10.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	>165	適合	
3	>165	適合	



写真 4.10.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.10.3 試験後(試料番号 1)



写真 4.10.4 試験後(試料番号 2)



写真 4.10.5 試験後(試料番号 2)



写真 4.10.6 試験後(試料番号 3)



写真 4.10.7 試験後(試料番号 3)

#### 4.11 供試体 No. 15 (適合)

表 4.11.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.11.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.11.3 試験後(試料番号 1)

#### 4.12 供試体 No. 16 (不適合)

表 4.12.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	4	不適合	
2	5	不適合	
3	—	—	



写真 4.12.2 試験後(試料番号 1)



写真 4.12.3 試験後(試料番号 1)

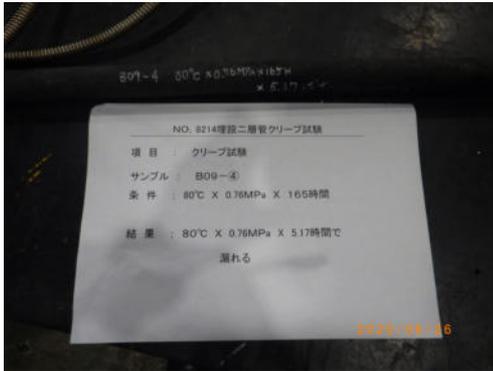


写真 4. 12. 4 試験後(試料番号 2)



写真 4. 12. 5 試験後(試料番号 2)

#### 4. 13 供試体 No. 18 (適合)

表 4. 13. 1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4. 13. 2 試験後(試料番号 1)

#### 4.14 供試体 No. 21 (適合)

表 4.14.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.14.2 試験後(試料番号 1)

#### 4.15 供試体 No. 22 (適合)

表 4.15.1 内圧クリープ試験結果

クリープ 試料番号	破壊時間 165h 以上	判定	備考
1	>165	適合	
2	—	—	
3	—	—	



写真 4.15.2 試験後(試料番号 1)

## 5 熱安定性の試験方法と結果

熱安定性の試験方法と結果を以下に示す。

### <試験方法>

熱安定性の試験は、**JIS K 6762**の附属書 JA による。

#### 1) 原理

酸素雰囲気中、200℃に試験片を保持した状態で、試験片中に含まれている酸化防止剤が酸化を抑制し続ける時間を測定する。酸化の進行は、熱分析装置内の試験片と基準物質間との温度差又はエネルギーフローの差を時間に対して測定することで観察できる。熱安定性（酸化誘導時間）はこの測定結果から求める。

#### 2) 測定

供試体から小さい円盤（質量：5mg～20mg）を打ち抜き、試験片を作製する。試験片を示差走査熱量計（DSC）装置にセットして、窒素中で設定温度（200℃）まで速やかに昇温した後、5分後に酸素ガスに切り換える。この酸素ガスへの切換え点を測定開始時間とし、酸化による発熱ピークが発生するまでの時間（OIT）を読み取る。写真 5.1 に試験装置の例を示す。



写真 5.1 試験装置の例

### 3) 試験結果の解析

結果の解析は図 5.2 に示すとおり、酸素導入から、ベースラインの延長線と最大傾斜点で発熱曲線に対し引かれた接線との交点までの時間を求める。

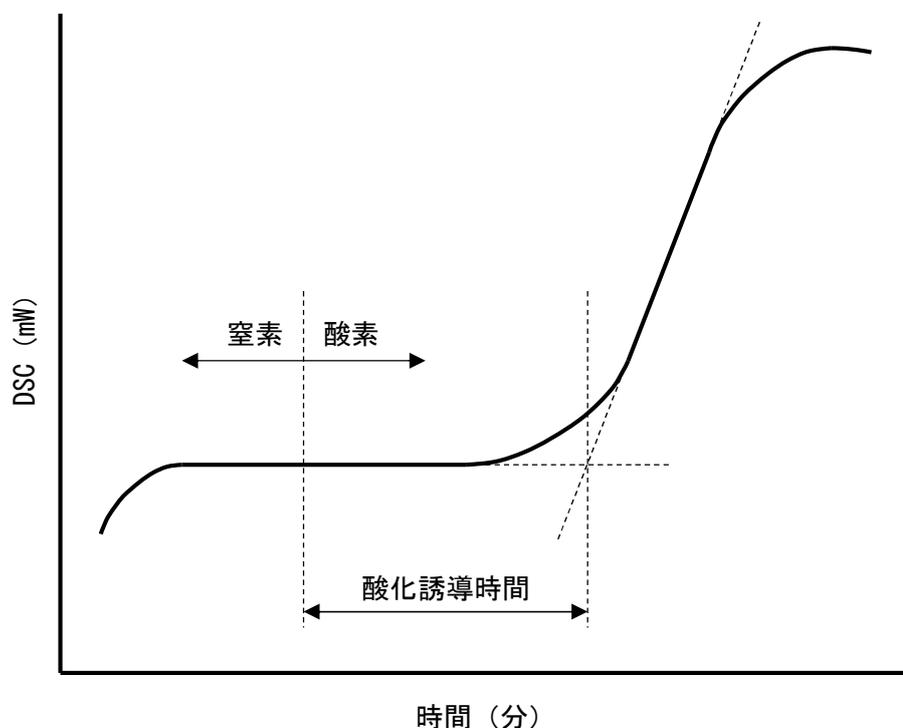


図 5.2 試験結果の解析例

#### 補足 1) 1 分以下の試験結果

1 分以下の試験結果は、「<1」と表示する。

OIT は窒素雰囲気です試験温度まで溶解させて、酸素に切り替えた瞬間をゼロとして酸化燃焼による発熱信号の立ち上がる時間を測定する。

酸素に切り替えてからの試料に酸素がいきわたるまでのタイムラグや発熱信号の立ち上がるタイムラグを考慮すると、1 分までは誤差の範囲と考えた。

#### 補足 2) 190℃での試験温度

JIS K 6762 では新管を想定して 200℃が規定されているが、酸化防止剤が消費された回収品の場合には、微量で残存していてもゼロになる可能性があり、一部の試験は 190℃でも実施する。

OIT は、試験温度により増減し、試験温度を 170℃ぐらいまで下げた場合、酸化防止剤の残存量ではなく樹脂自身の酸化耐性が律速となり目的に反する。

しかし、190℃であれば酸化防止剤の残存有無を評価できると考えた。

<試験結果>

熱安定性の試験結果を以下に示す。なお、供試体 No. は本文の**表 5**と共通である。また、試験結果の図は代表例を示す。

表 5.3 熱安定性の試験結果

供試体 No.	OIT (分)	判定	備考
1	2.7	不適合	
9	10.0	不適合	
10	5.2	不適合	
12	7.0	不適合	
15	3.3	不適合	
17	2.7	不適合	
19	3.7	不適合	
20	<1	不適合	

### 5.1 供試体 No. 10 (不適合)

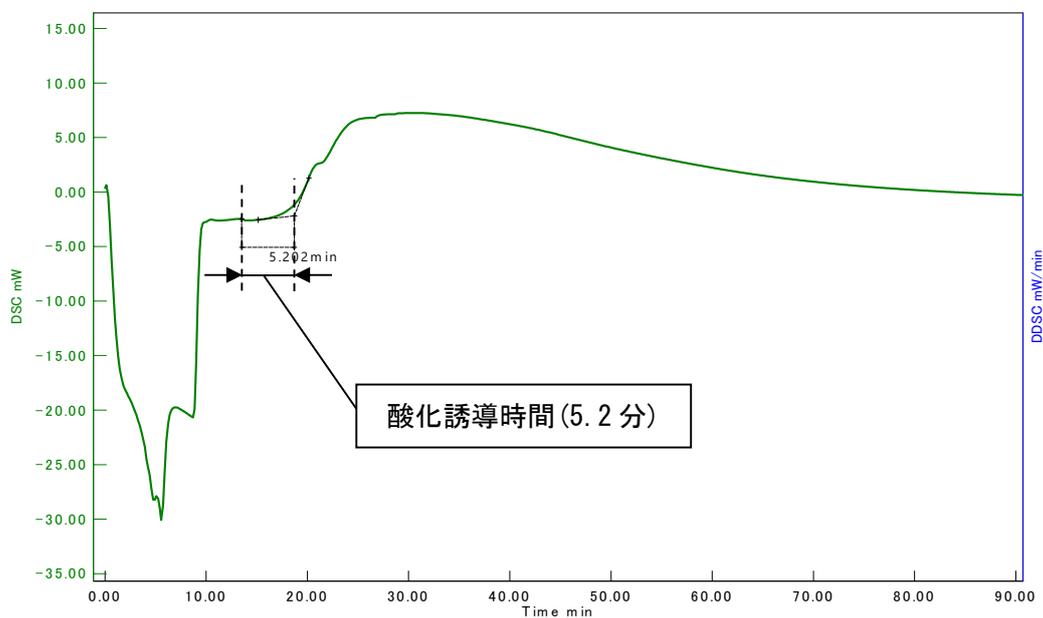


図 5.1.1 酸化誘導時間測定曲線

### 5.2 供試体 No. 15 (不適合)

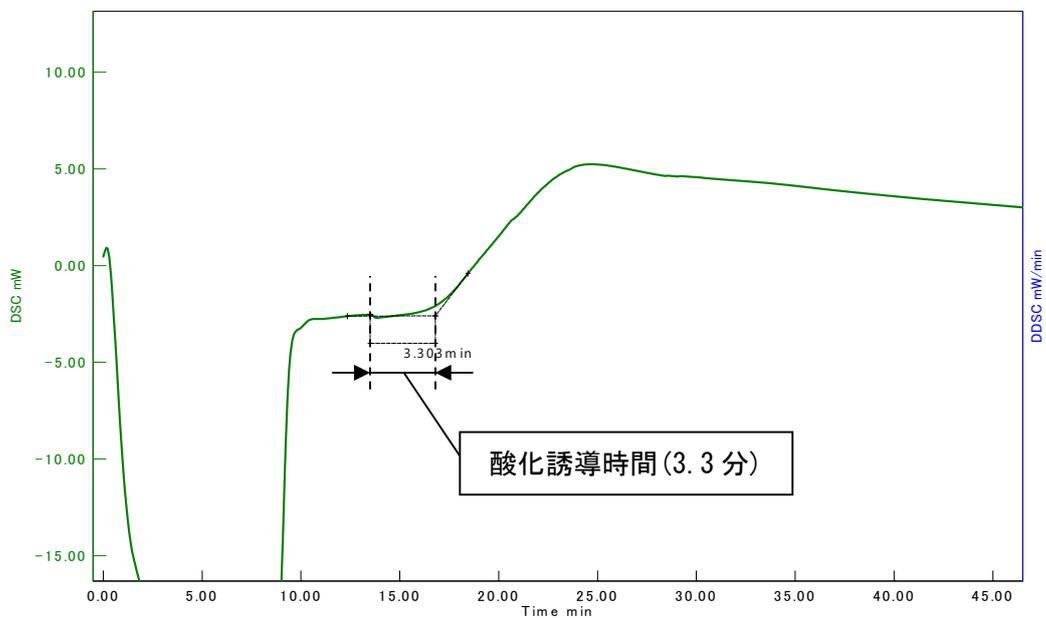


図 5.2.1 酸化誘導時間測定曲線

### 5.3 供試体 No. 19 (不適合)

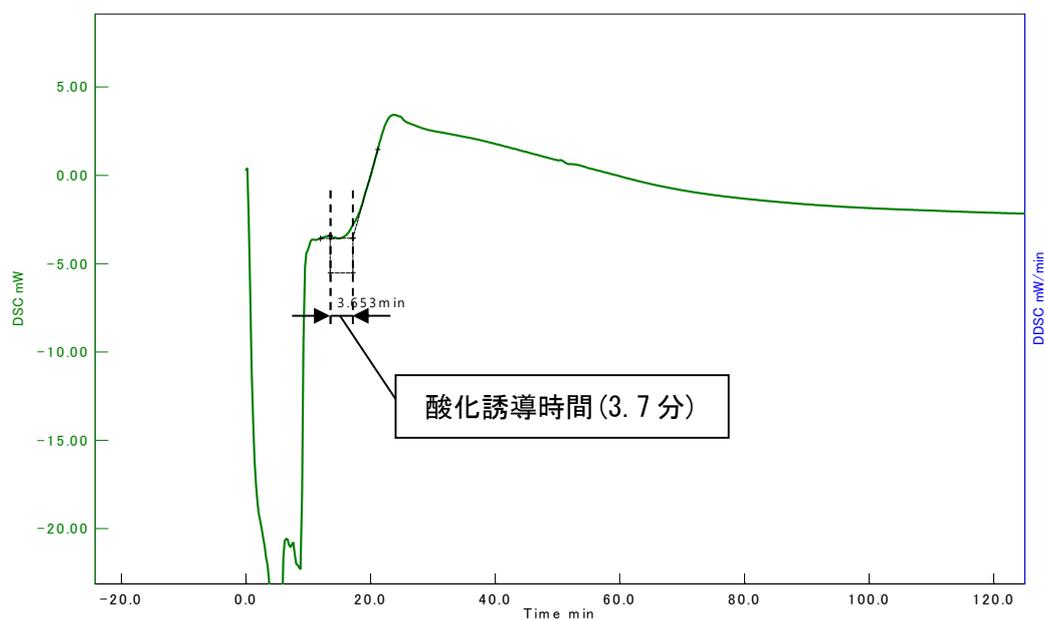


図 5.3.1 酸化誘導時間測定曲線

### 5.4 供試体 No. 20 (不適合)

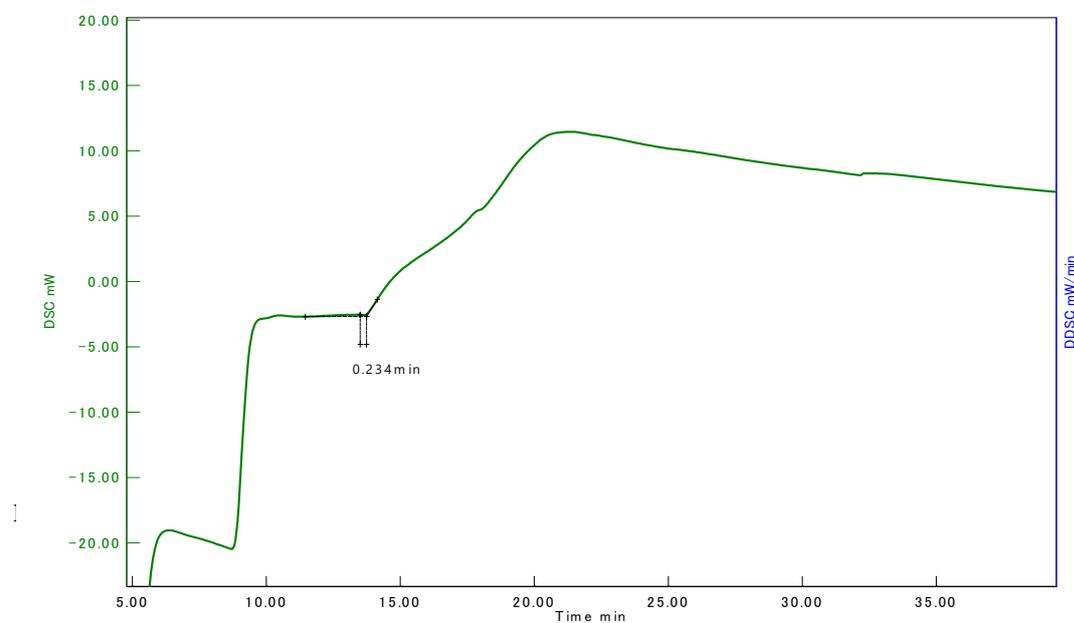


図 5.4.1 酸化誘導時間測定曲線

## 6 漏水部分の詳細観察

漏水部分の詳細観察について、以下に示す。

### <供試体>

供試体はNo. 9 と No. 12（供試体と試験結果は表 6.1 参照，外観は写真 6.2 参照）。

表 6.1 埋設給水用 PE 管の性能試験結果

供試体				試験結果 <sup>※3</sup>		
No.	掘上管 の状況	製造 <sup>※1</sup> 年	管種 <sup>※2</sup> (呼び径)	環境 応力亀裂	引張破断 伸び	内圧 クリープ
9	漏水	1985	①S(20)	○	○	—
12	漏水	(1986)	①S(25)	○	○	—

※1 埋設管の表示による。( ) は水道事業者にて記録されていた埋設時期による。

※2 管種について、「①S:1種単層管」を示す。

※3 試験結果について、「○:適合」「×:不適合」「—:評価せず」を示す。



写真 6.2 供試体の全体外観観察 (No. 9 と No. 12)

## <分析方法>

### ①破面と内表面の観察

- ・前処理
  - 超音波により洗浄後，観察した。
- ・光学顕微鏡（マイクロスコープ）
  - 装置：HIROX 社製 KH-2700
- ・電子顕微鏡（SEM）
  - 装置：日本電子社製 FE-SEM（JSM-7400F）
  - 加速電圧：5kV
  - 蒸着処理：0s

### ②耐酸化性測定（OIT 値）

- ・測定部位：No.9 については，漏水（破断）付近の管の厚み方向で，内（表面），中間部，外（表面）で採取して測定した。  
No.12 については，漏水（破断）付近と，離れた健全部の 2 か所の管の厚み方向で，内（表面），中間部，外（表面）で採取して測定した。
- ・装置：TA インストルメント製 DSC Q20
- ・測定温度：200℃（参考として 190℃も実施）
- ・昇温速度：99.9℃/min  
N2(50ml/min) 気流雰囲気（200℃に到達後 O2 に切り替えて測定）
- ・測定数：n = 3

## <分析結果>

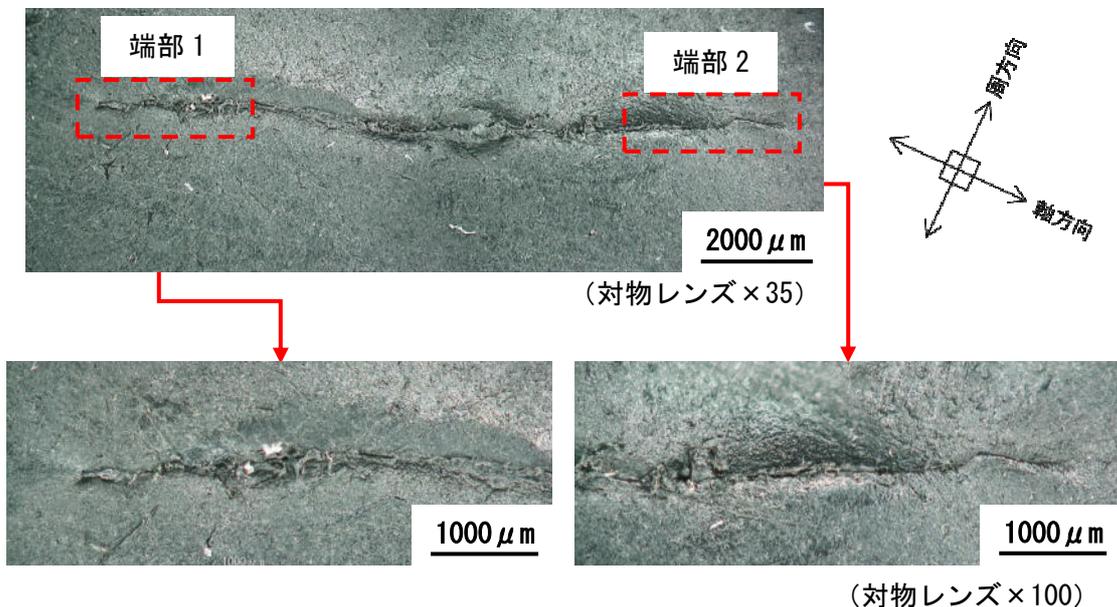


写真 6.3 光学顕微鏡での観察（No.9 漏水部 外表面）

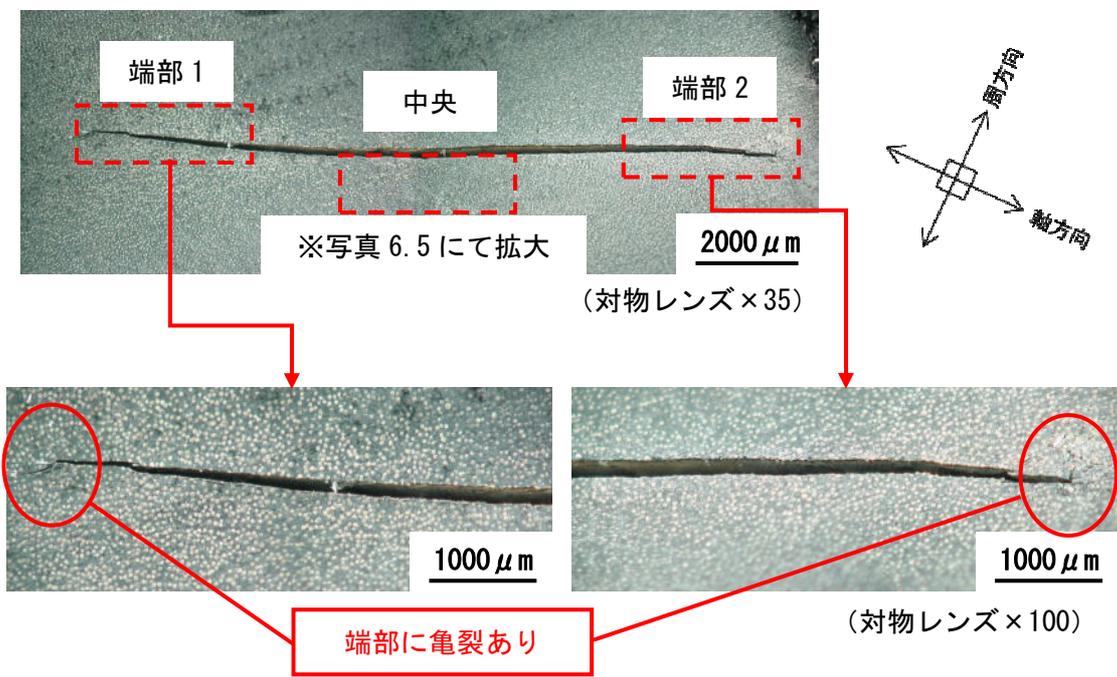


写真 6.4 光学顕微鏡での観察 (No. 9 漏水部 内表面)

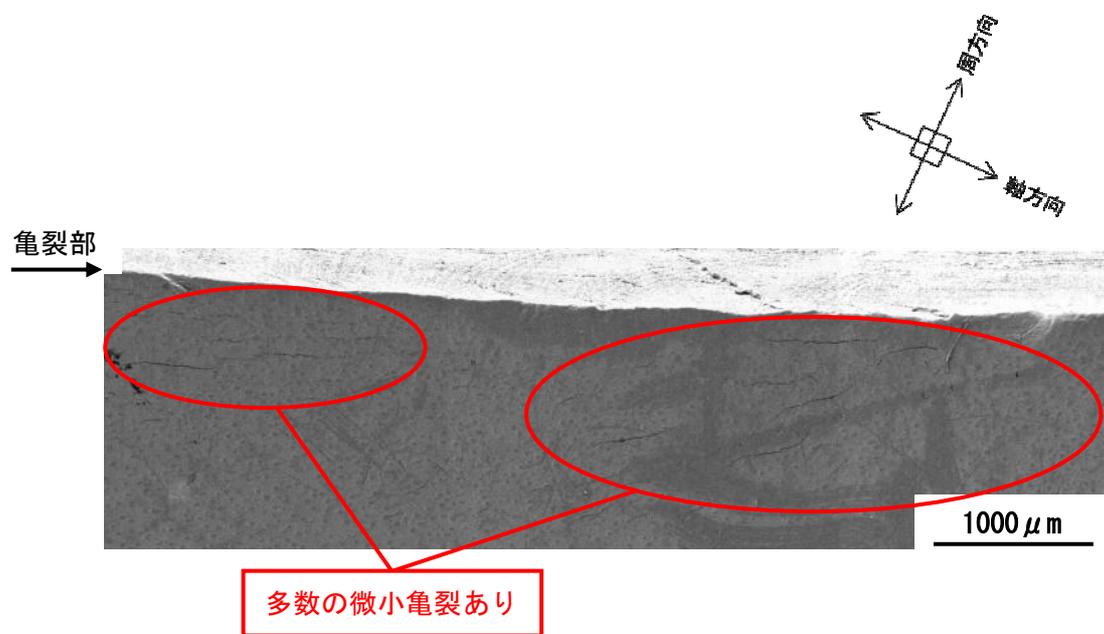


写真 6.5 電子顕微鏡での観察 (No. 9 漏水部 内表面)

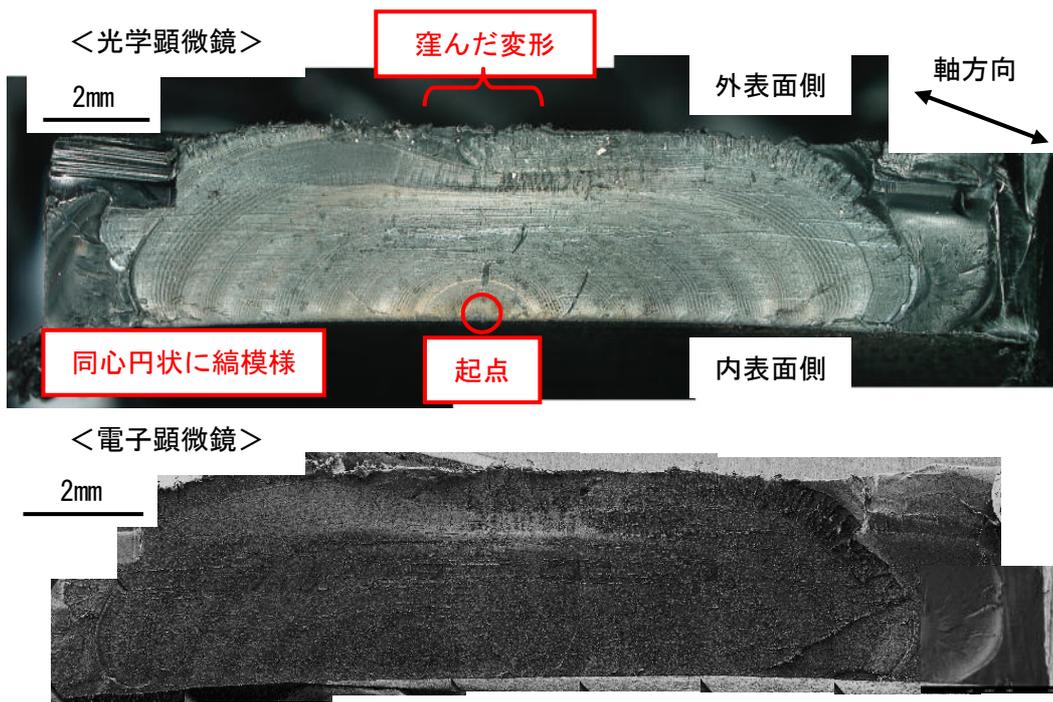


写真 6.6 破面観察 (No.9 漏水部)

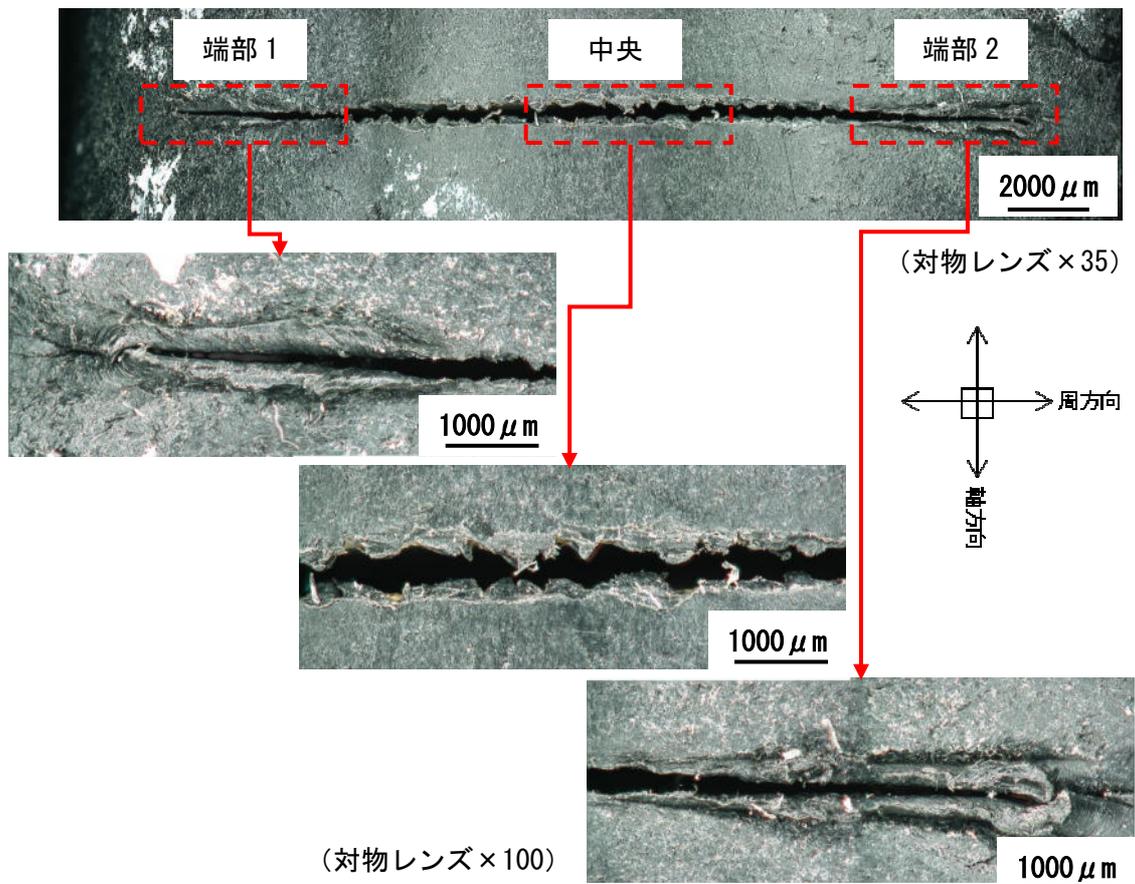


写真 6.7 光学顕微鏡での観察 (No.12 漏水部 外表面)

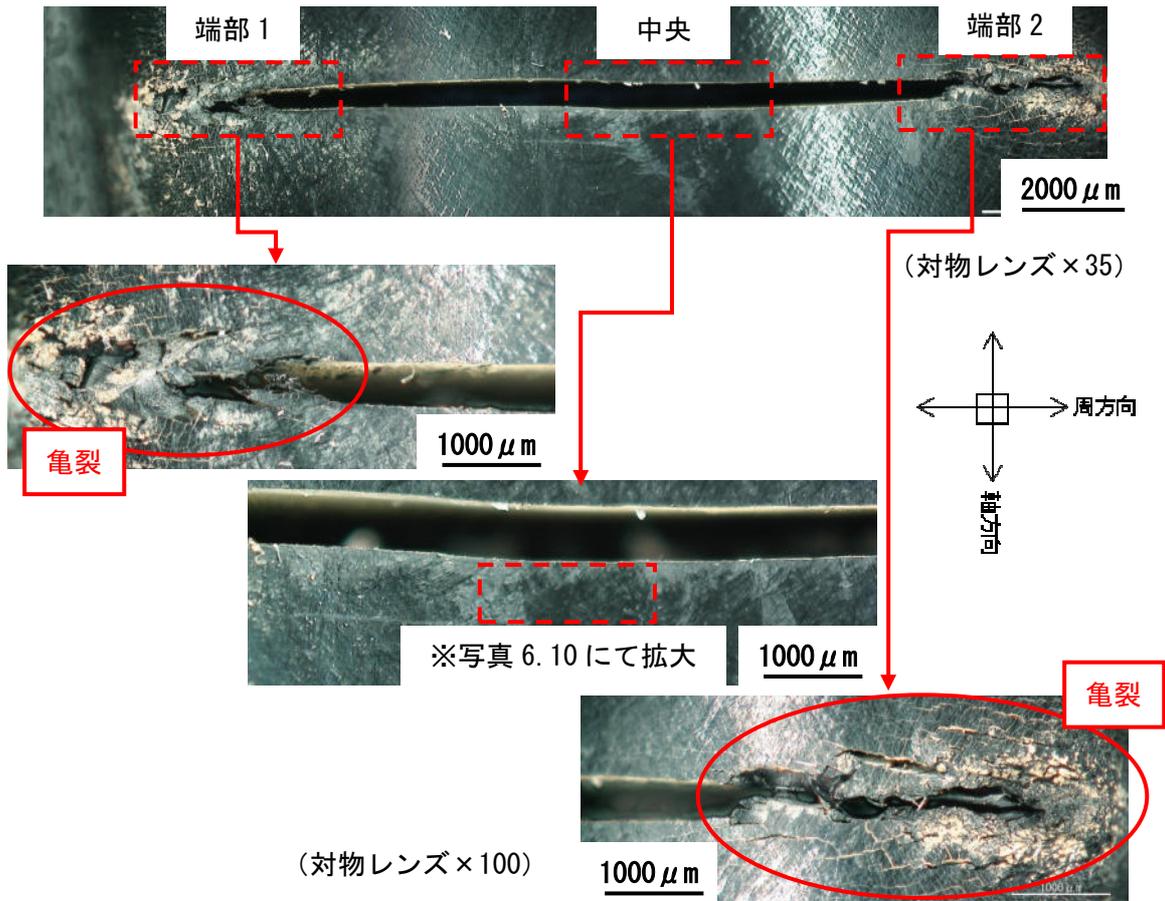


写真 6.8 光学顕微鏡での観察 (No. 12 漏水部 内表面)

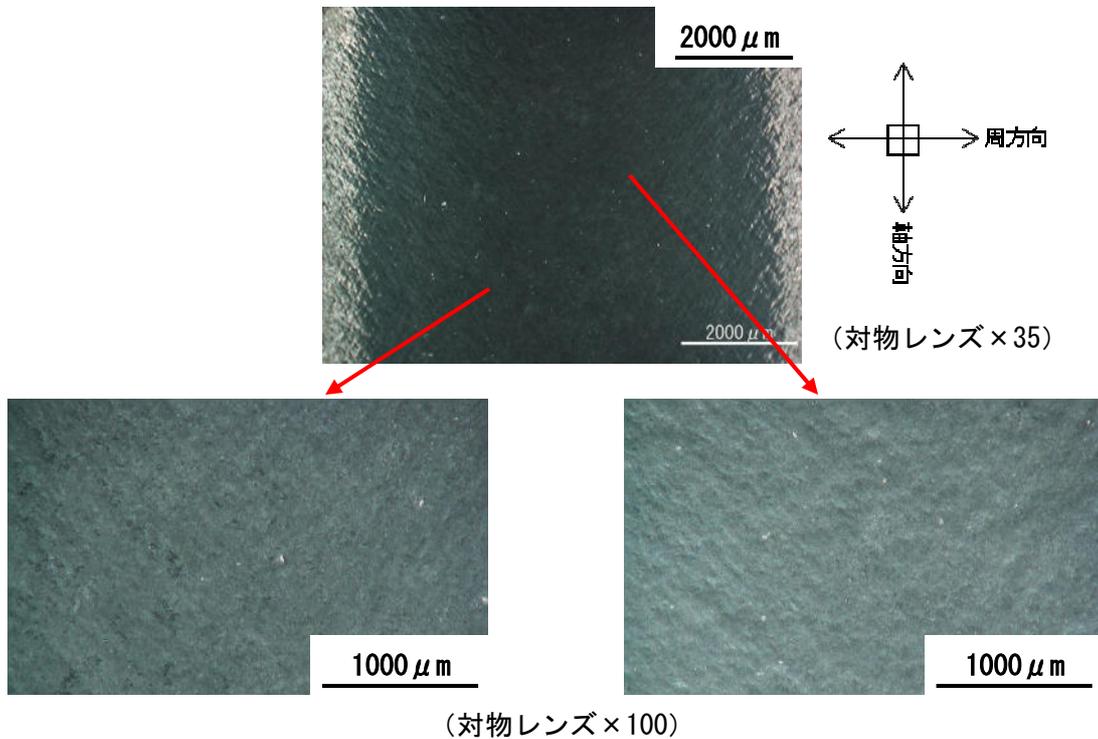
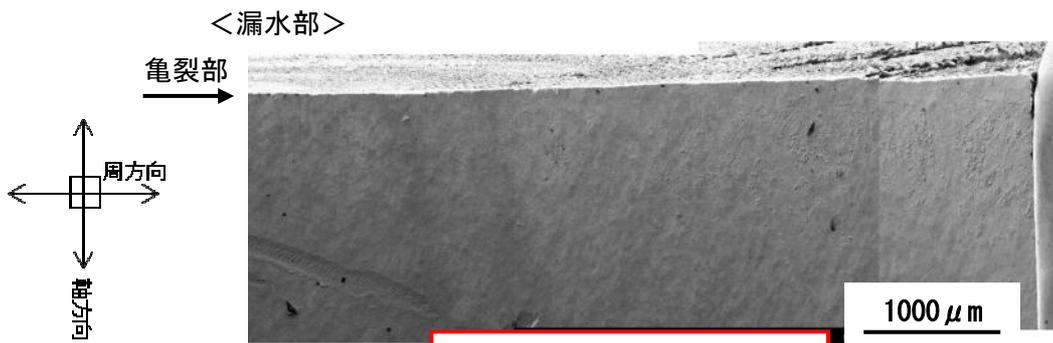


写真 6.9 光学顕微鏡での観察 (No. 12 漏水部から離れた箇所 内表面)



微小な亀裂は見られない

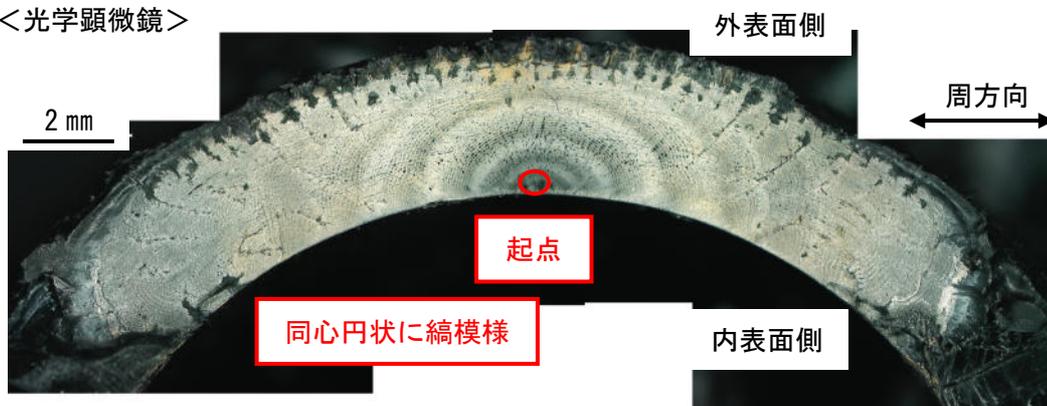
<漏水部から離れた健全部>



微小な亀裂は見られない

写真 6.10 電子顕微鏡での観察 (No. 12 内表面)

<光学顕微鏡>



<電子顕微鏡>

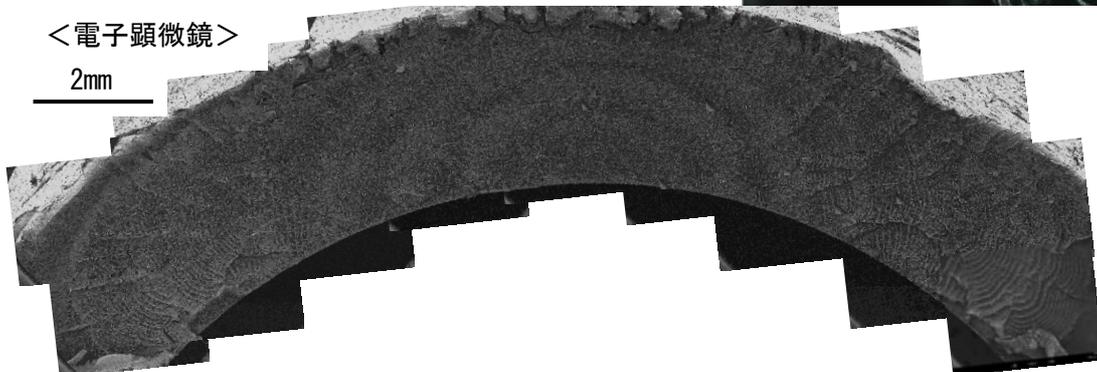


写真 6.11 破面観察 (No. 12 漏水部)

表 6.12 OIT 測定結果 (200°C測定)

(単位:分)

	No. 9 漏水部	No. 12 漏水部	No. 12 健全部
外表面	<1	<1	5.0
	<1 <1	<1 <1	4.6 5
	<1	<1	4.5
中間部	3.3	<1	8.5
	3.8 3	<1 <1	9.7 9
	3.1	<1	9.0
内表面	<1	<1	4.9
	<1 <1	<1 <1	3.4 4
	<1	<1	3.8

※結果の詳細は、図 6-12-1～図 6-12-9 参照。

表 6.13 OIT 測定結果 (190°C測定)

(単位:分)

	No. 9 漏水部	No. 12 漏水部	No. 12 健全部
外表面	7.6	11	7.7
	8.1 8	11 11	7.0 7
	7.4	11	7.6
中間部	5.5	8.8	23
	6.6 8	8.8 9	24 24
	12	8.2	24
内表面	4.3	<1	7.9
	5.8 5	<1 <1	7.4 7
	5.9	<1	7.0

※結果の詳細は、図 6-13-1～図 6-13-9 参照。

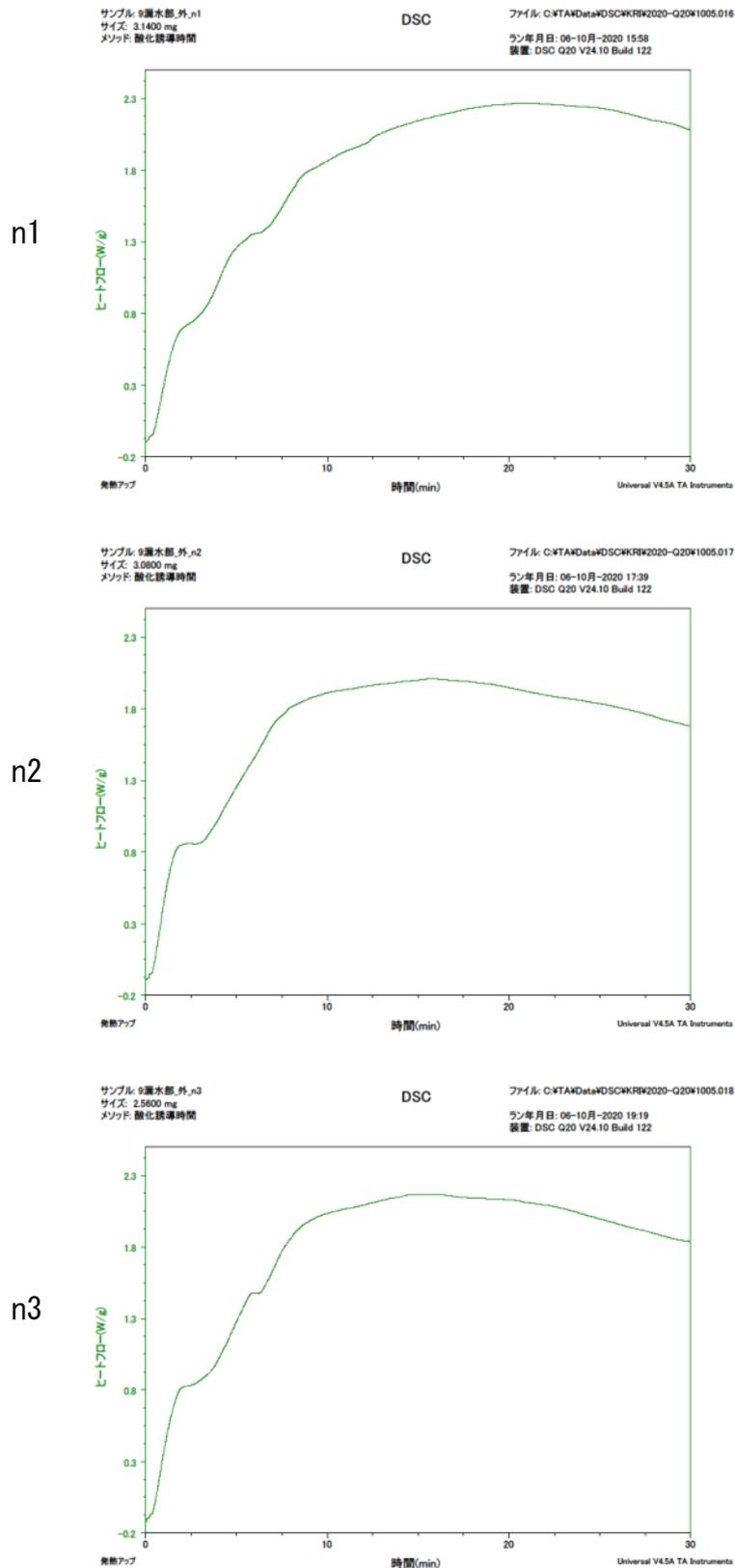


図 6-12-1. OIT 測定チャート\_200℃ (No.9 漏水部 外表面)

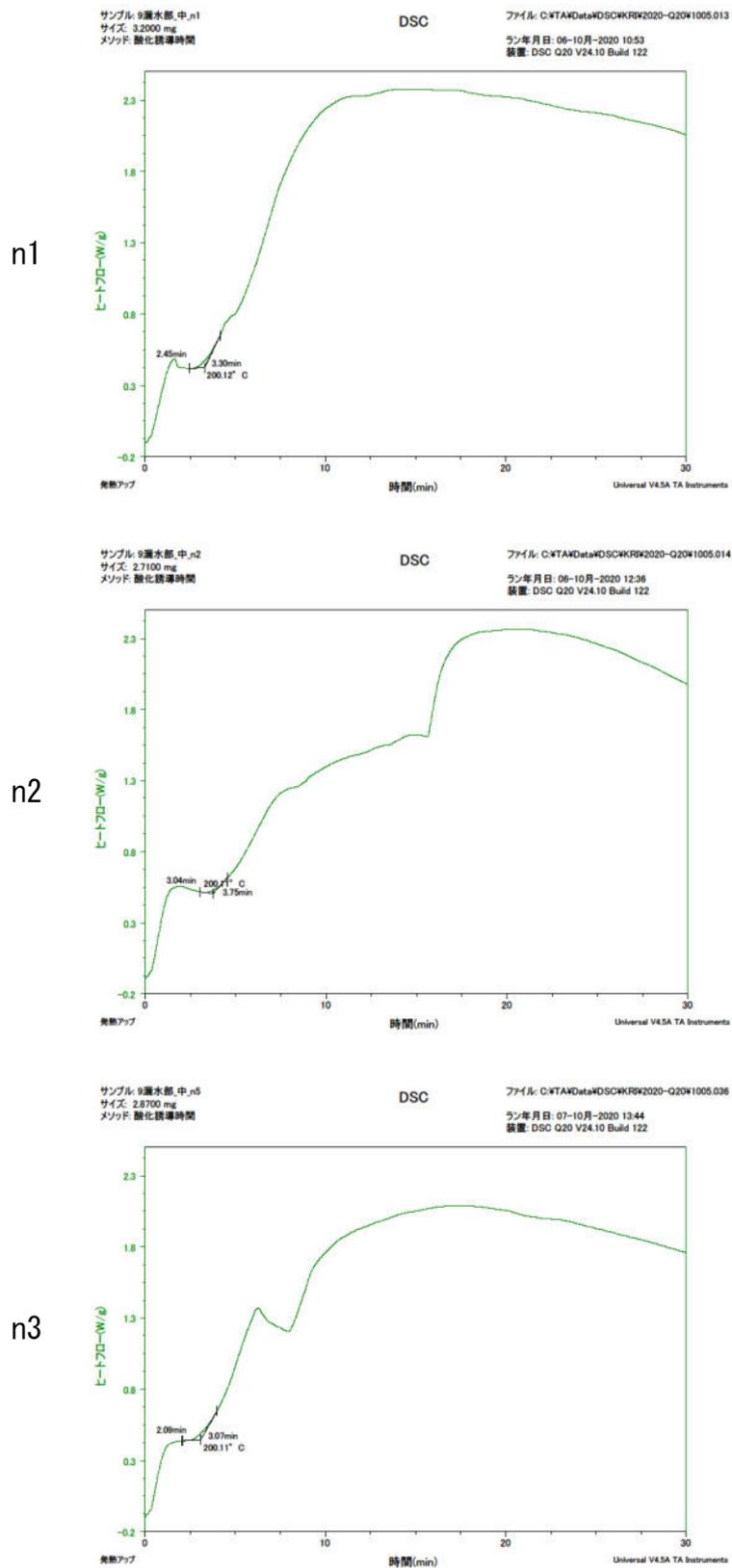


図 6-12-2. OIT 測定チャート\_200°C (No.9 漏水部 中間部)

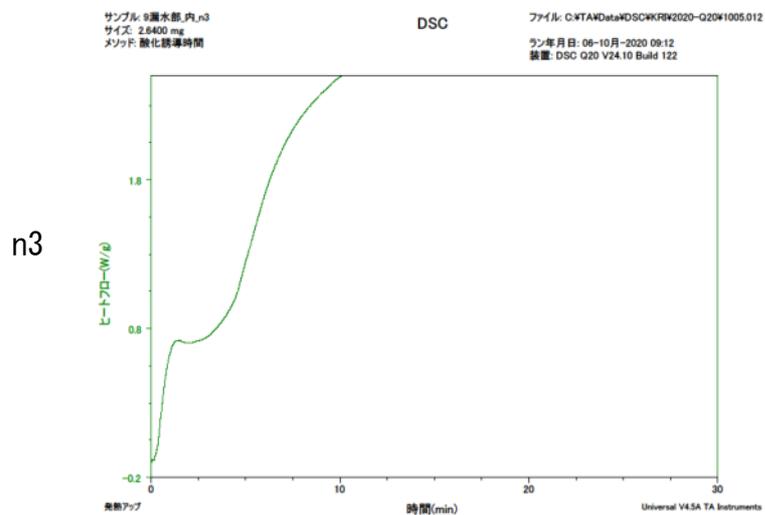
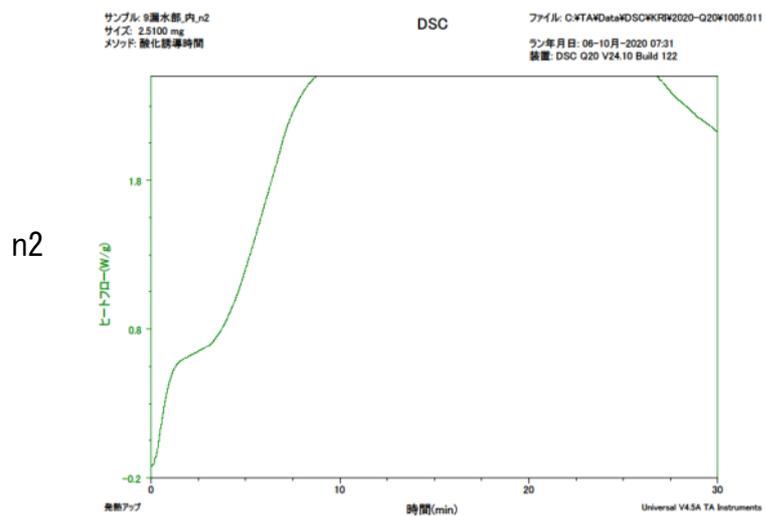
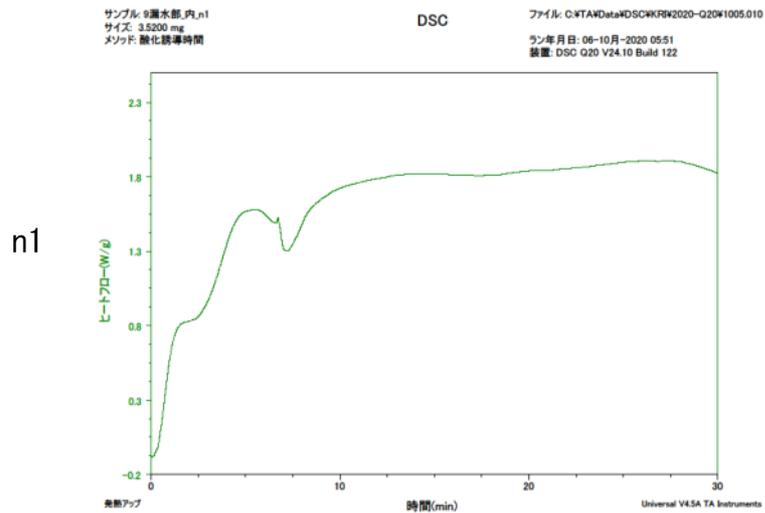


図 6-12-3. OIT 測定チャート\_200°C (No. 9 漏水部 内表面)

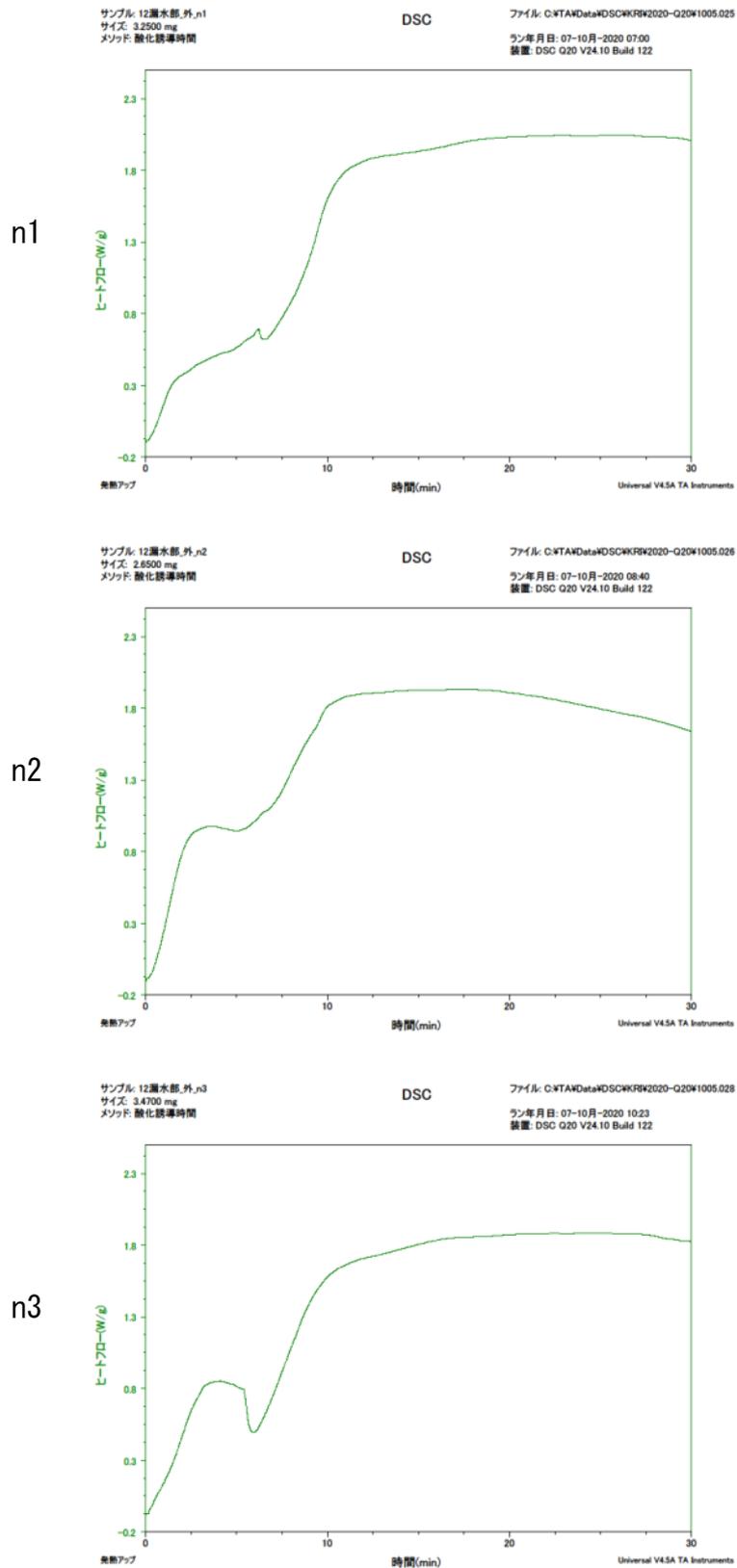


図 6-12-4. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 漏水部 外表面)

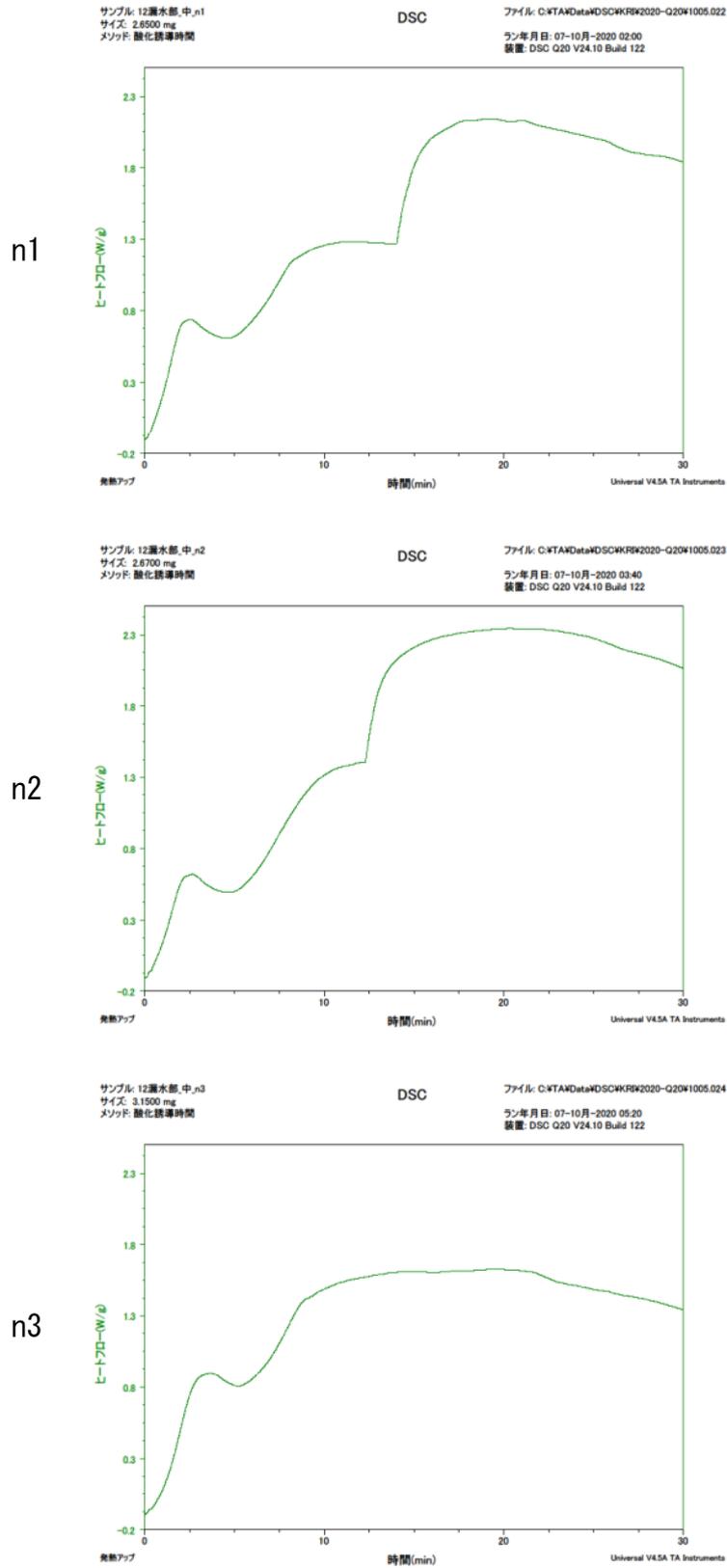


図 6-12-5. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 漏水部 中間部)

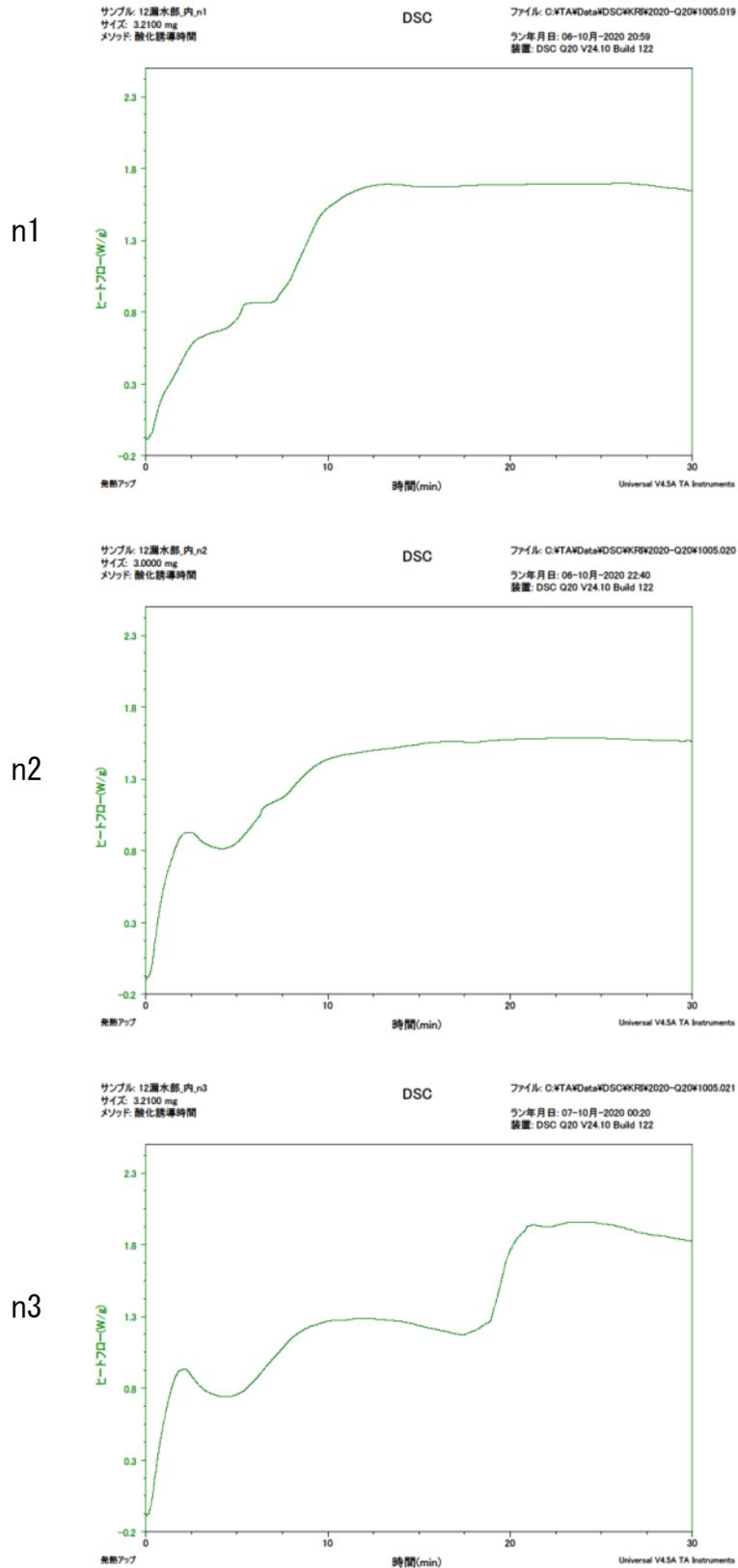


図 6-12-6. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 漏水部 内表面)

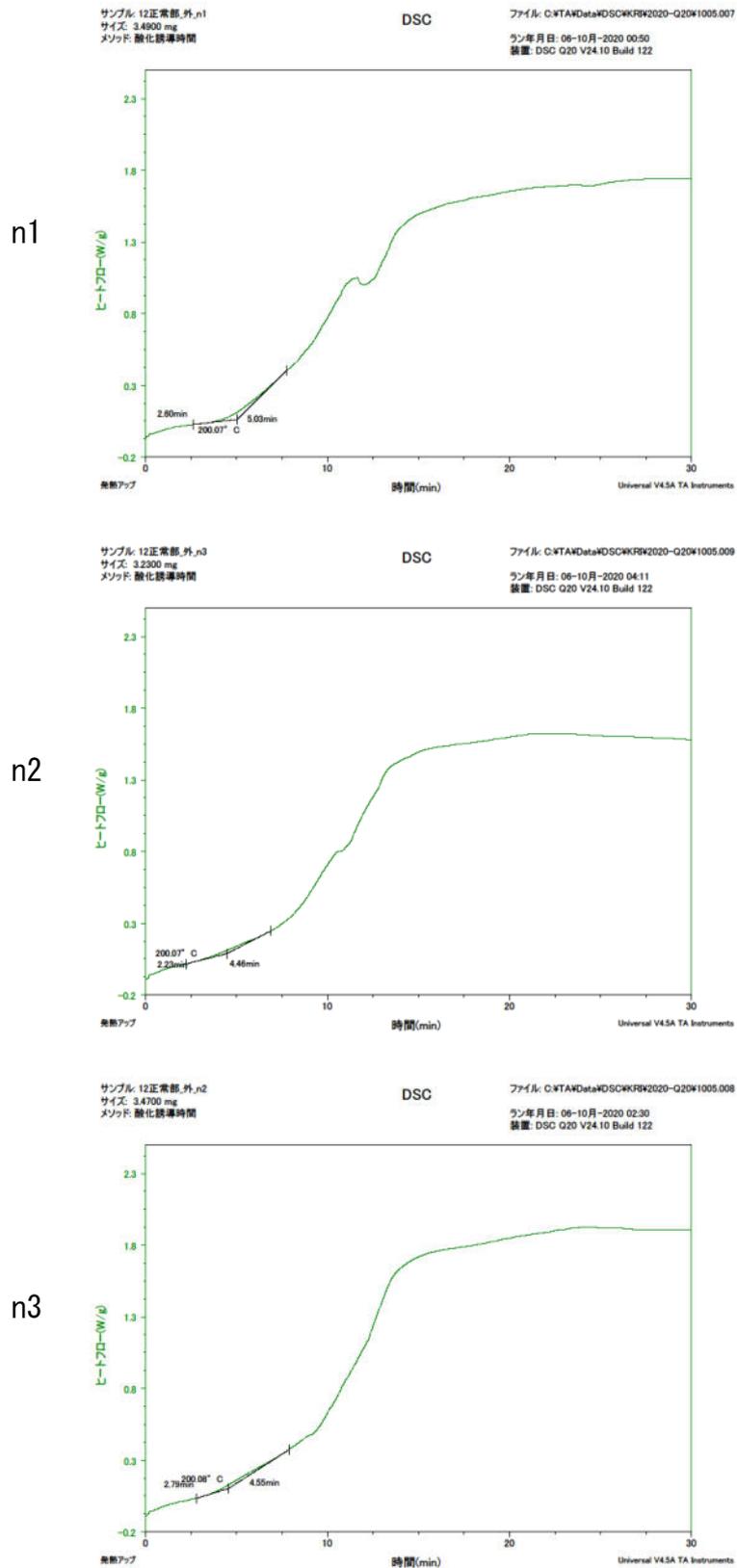


図 6-12-7. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 健全部 外表面)

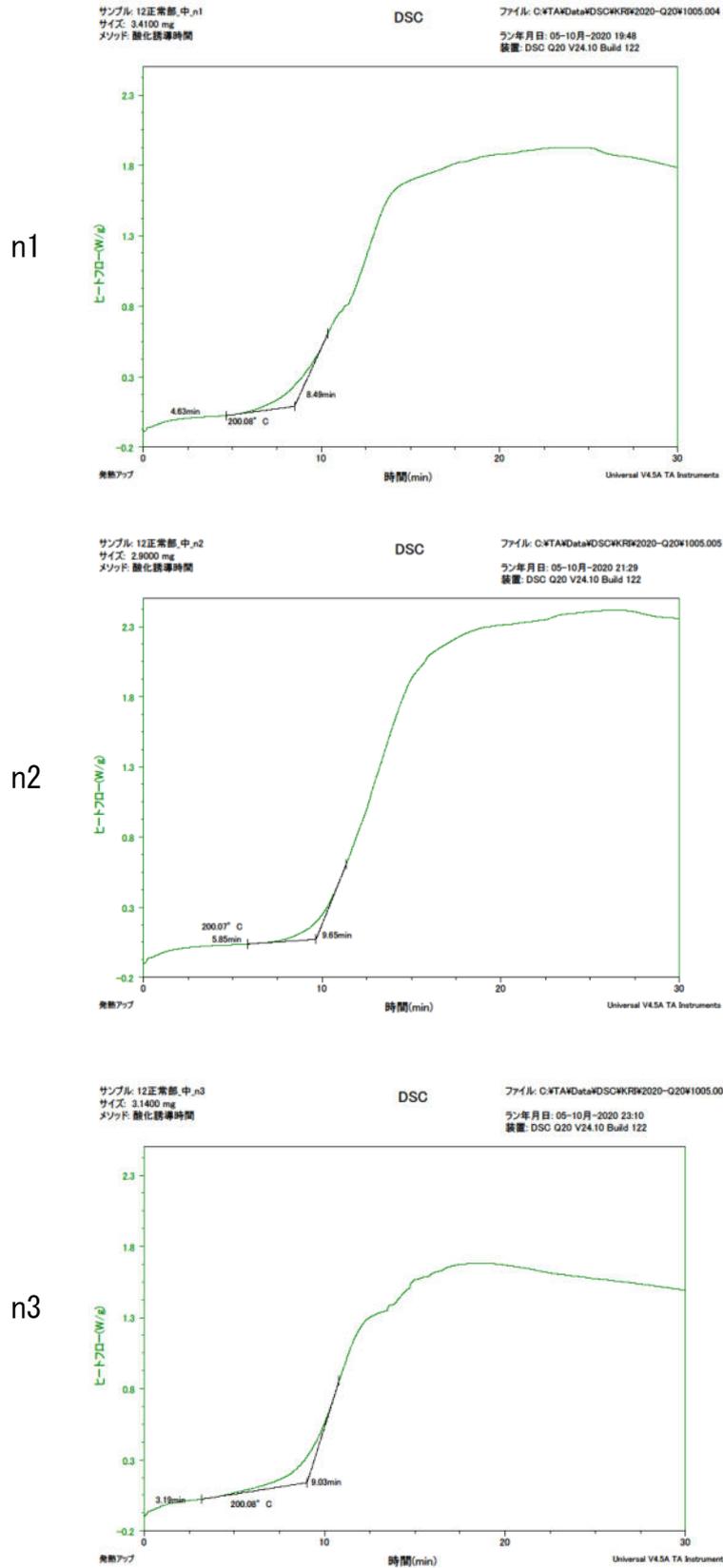
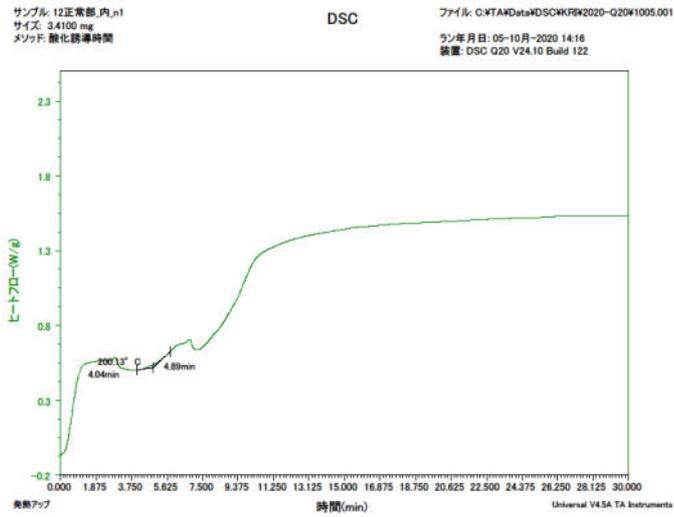
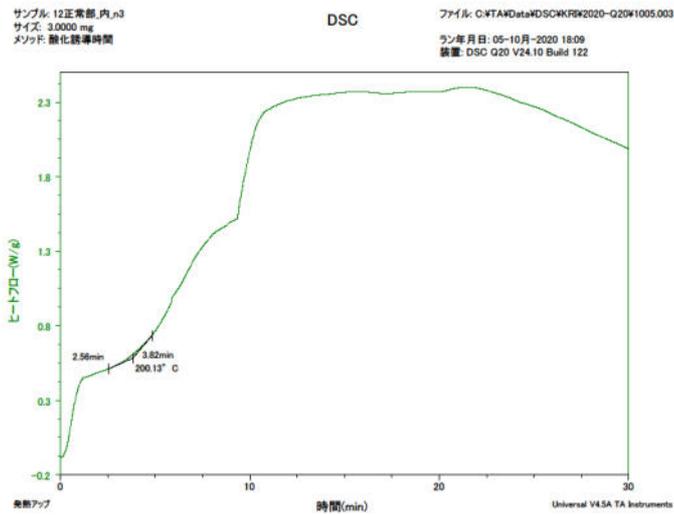


図 6-12-8. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 健全部 中間部)

n1



n2



n3

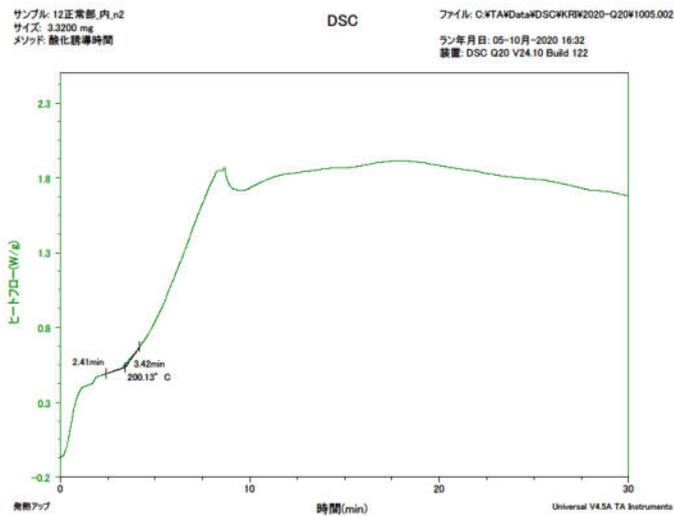


図 6-12-9. OIT 測定チャート 200°C (No. 12 健全部 内表面)

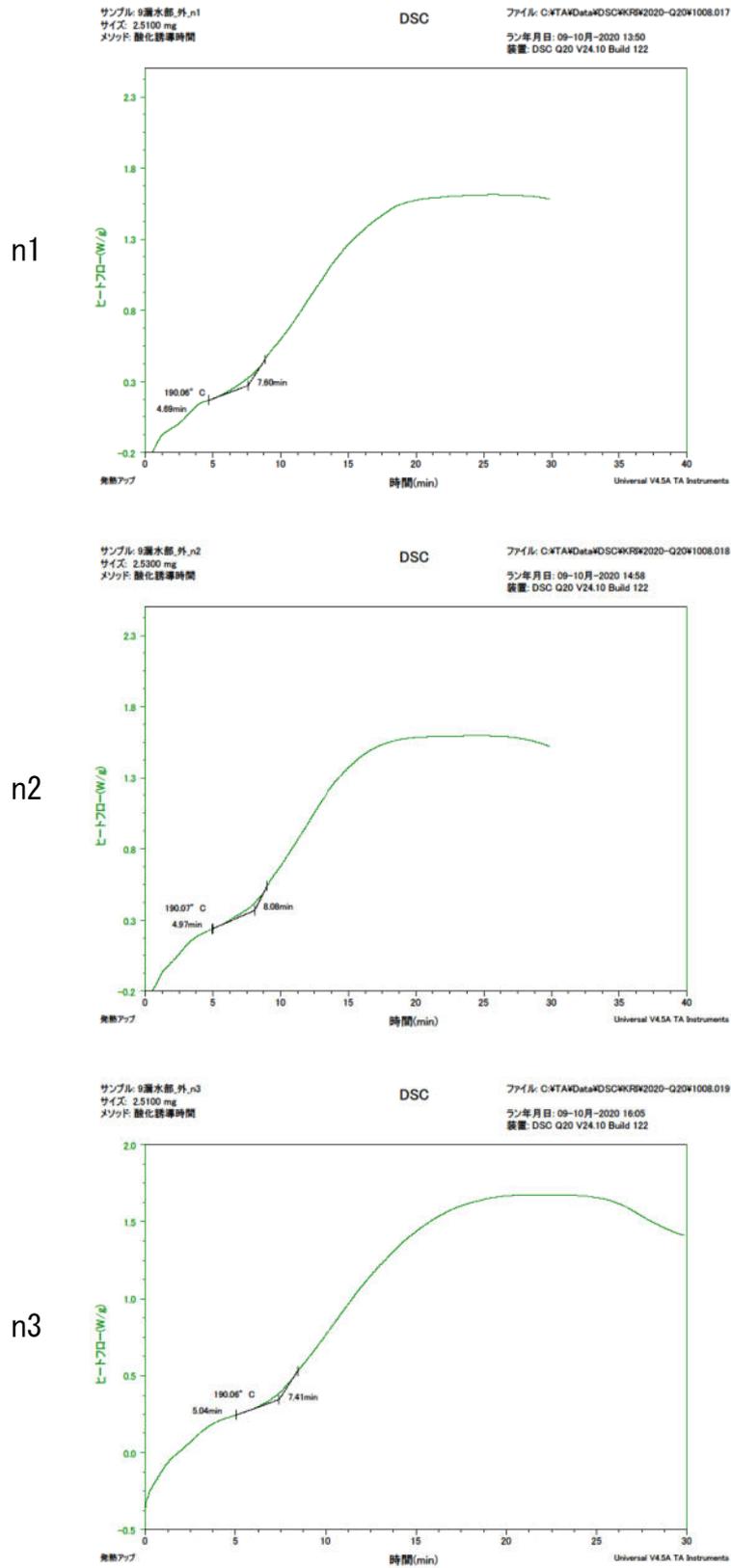
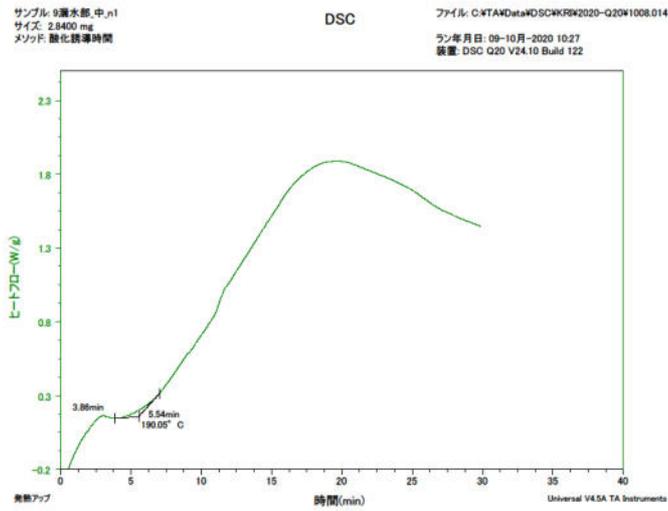
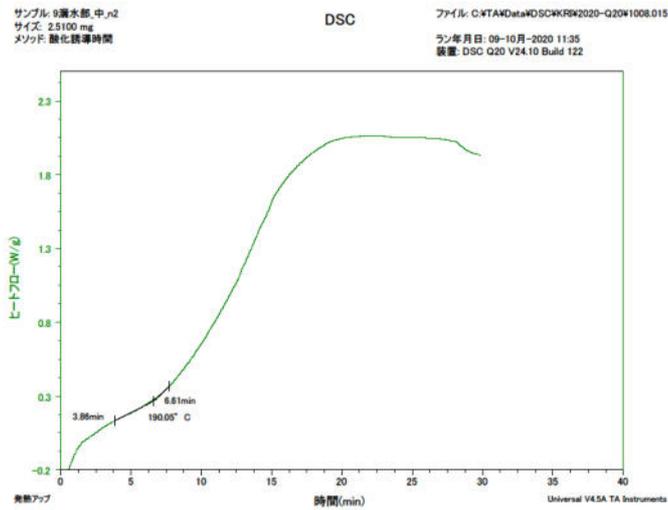


図 6-13-1. OIT 測定チャート 190°C (No. 9 漏水部 外表面)

n1



n2



n3

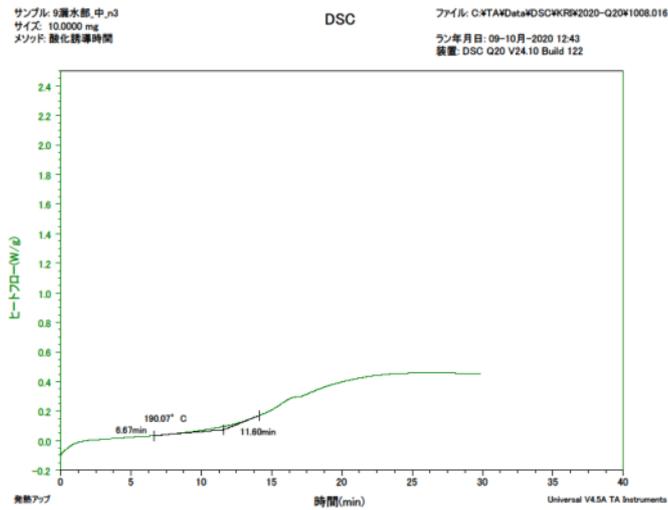


図 6-13-2. OIT 測定チャート 190°C (No. 9 漏水部 中間部)

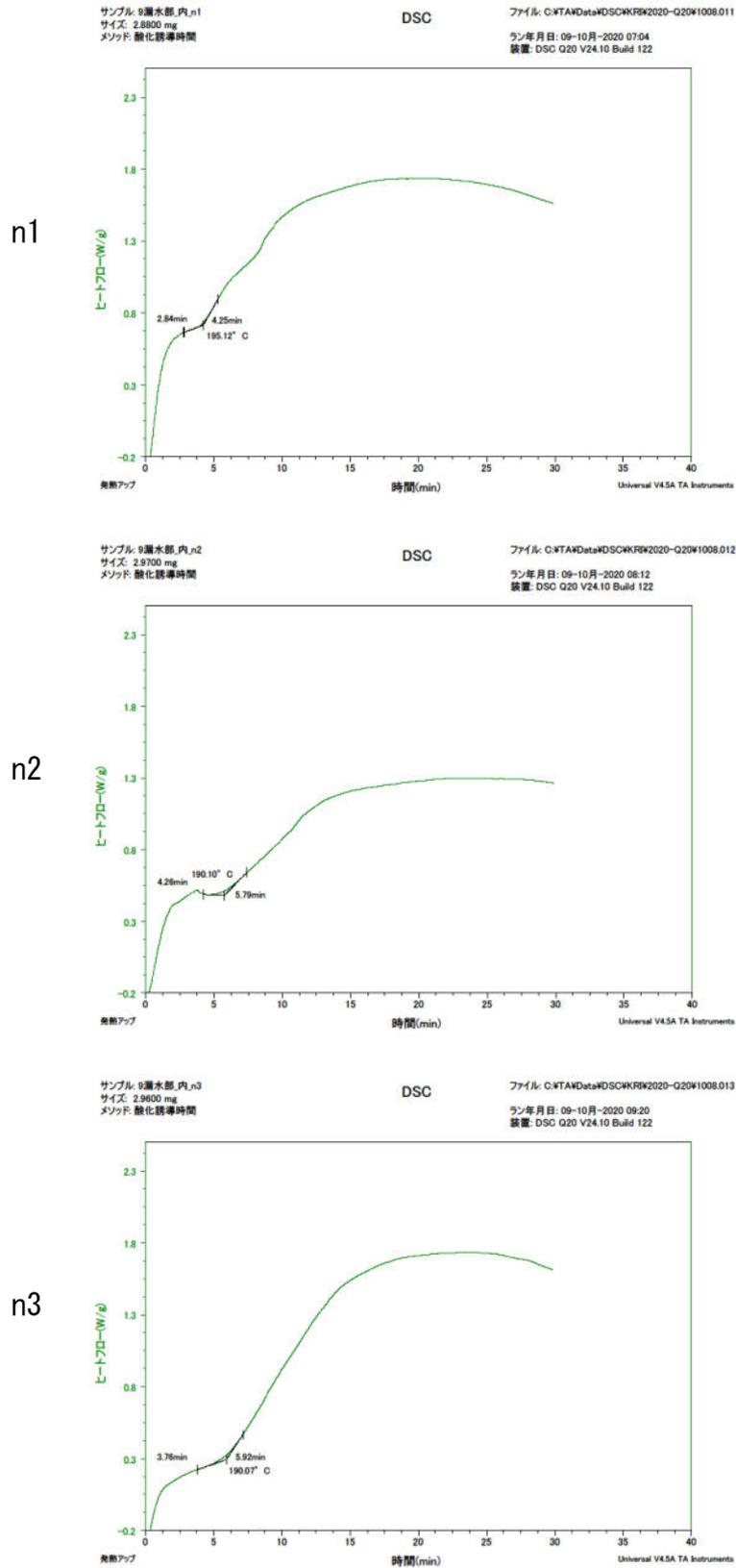


図 6-13-3. OIT 測定チャート 190°C (No. 9 漏水部 内表面)

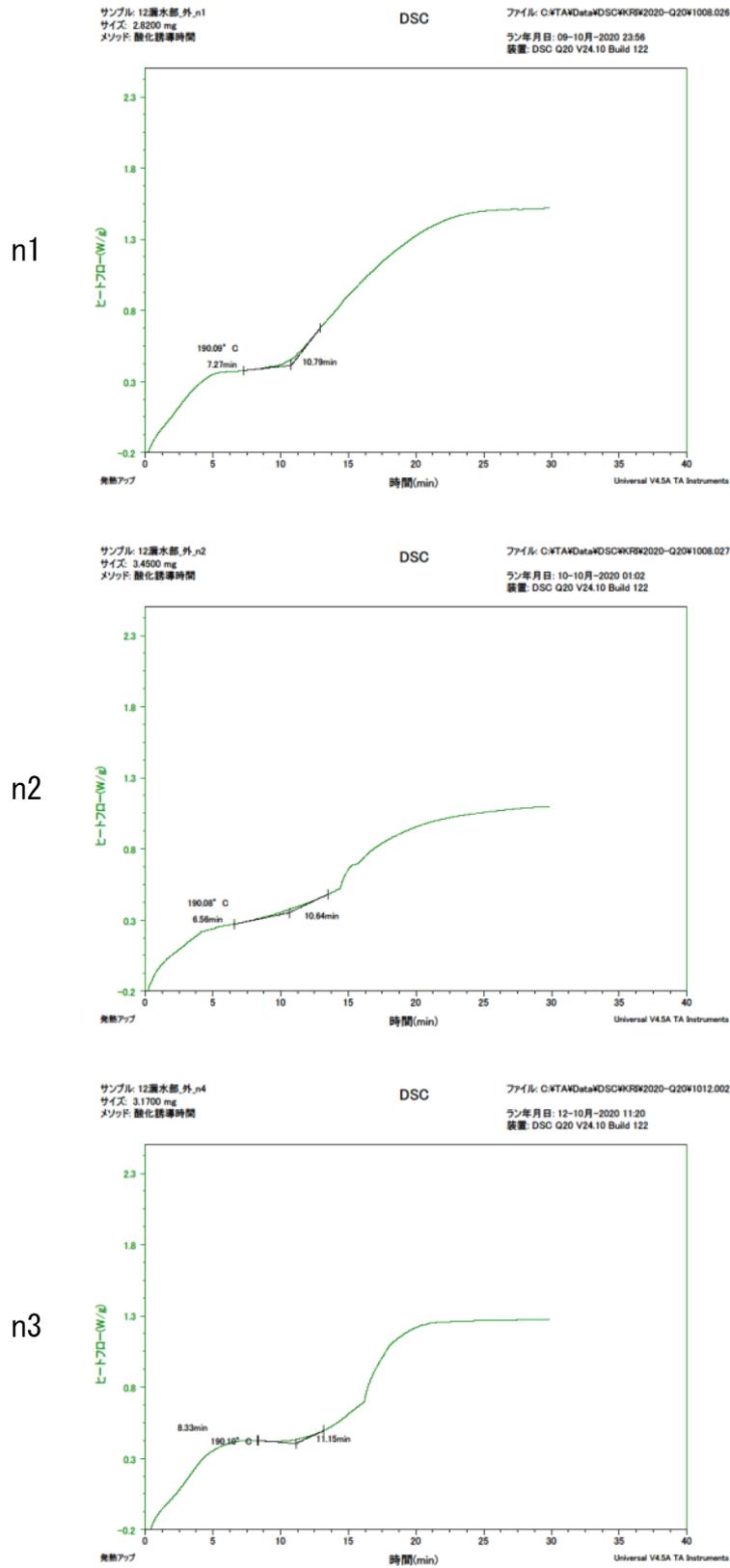
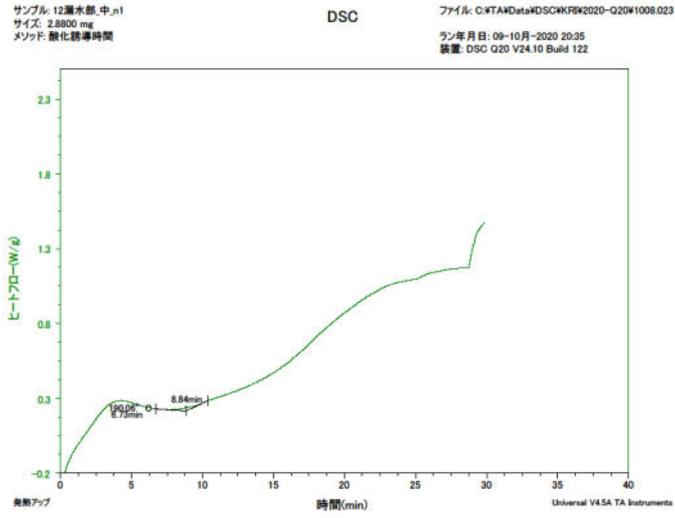
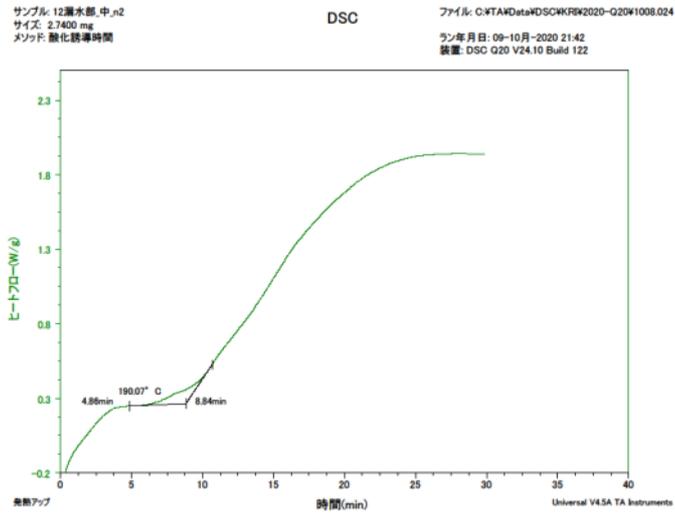


図 6-13-4. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 漏水部 外表面)

n1



n2



n3

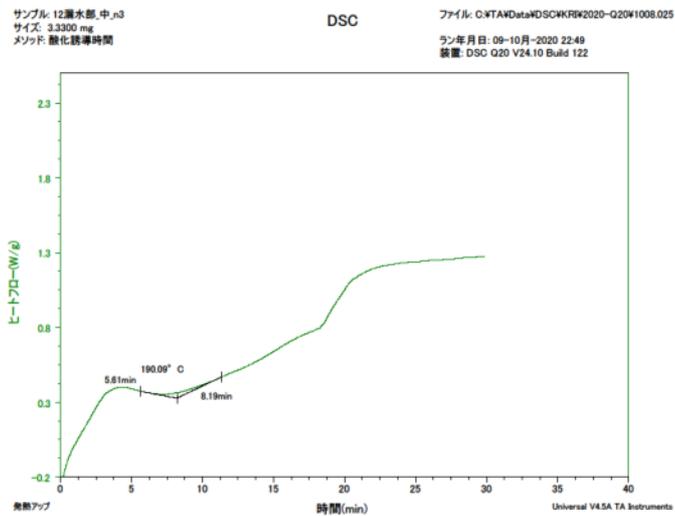


図 6-13-5. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 漏水路 中間部)

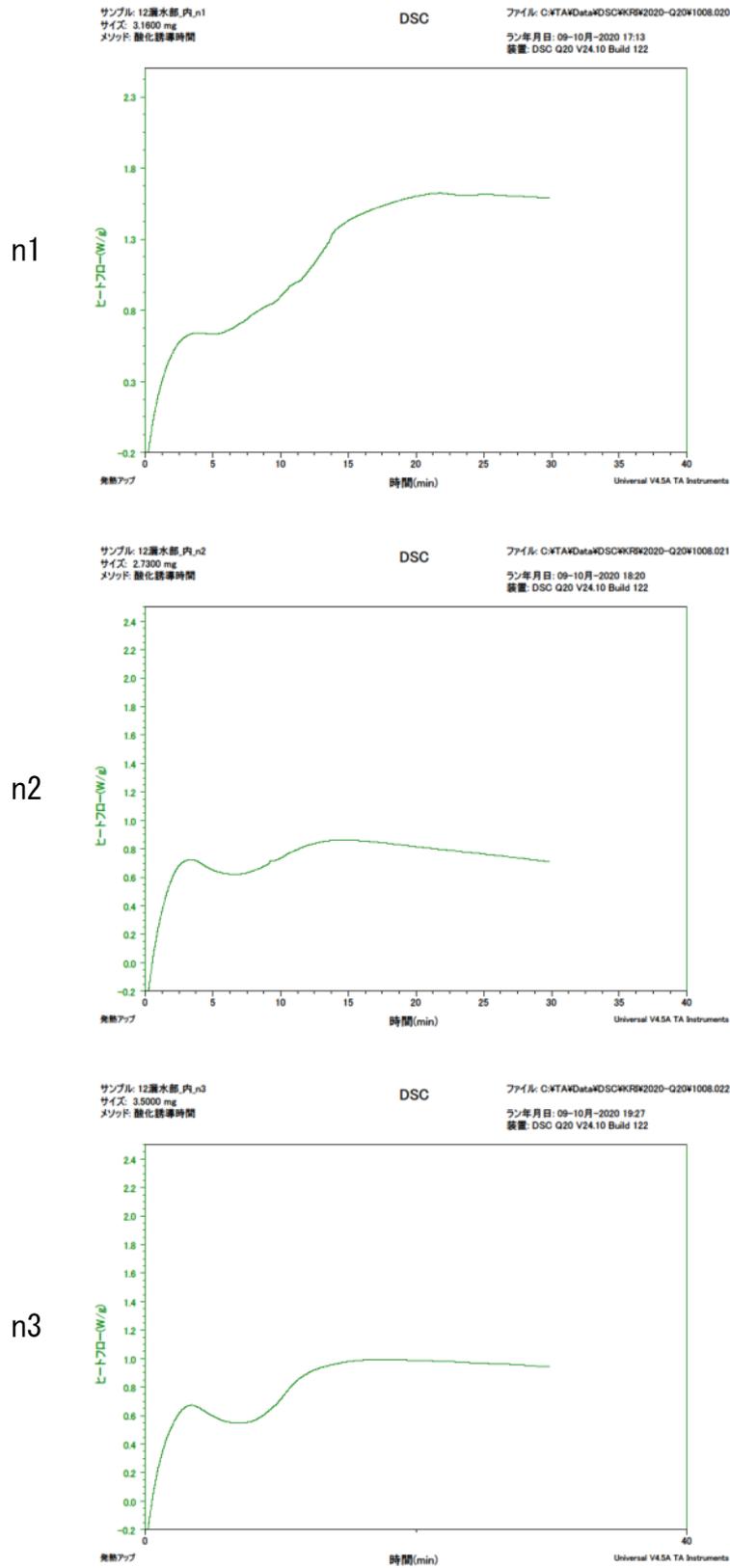


図 6-13-6. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 漏水部 内表面)

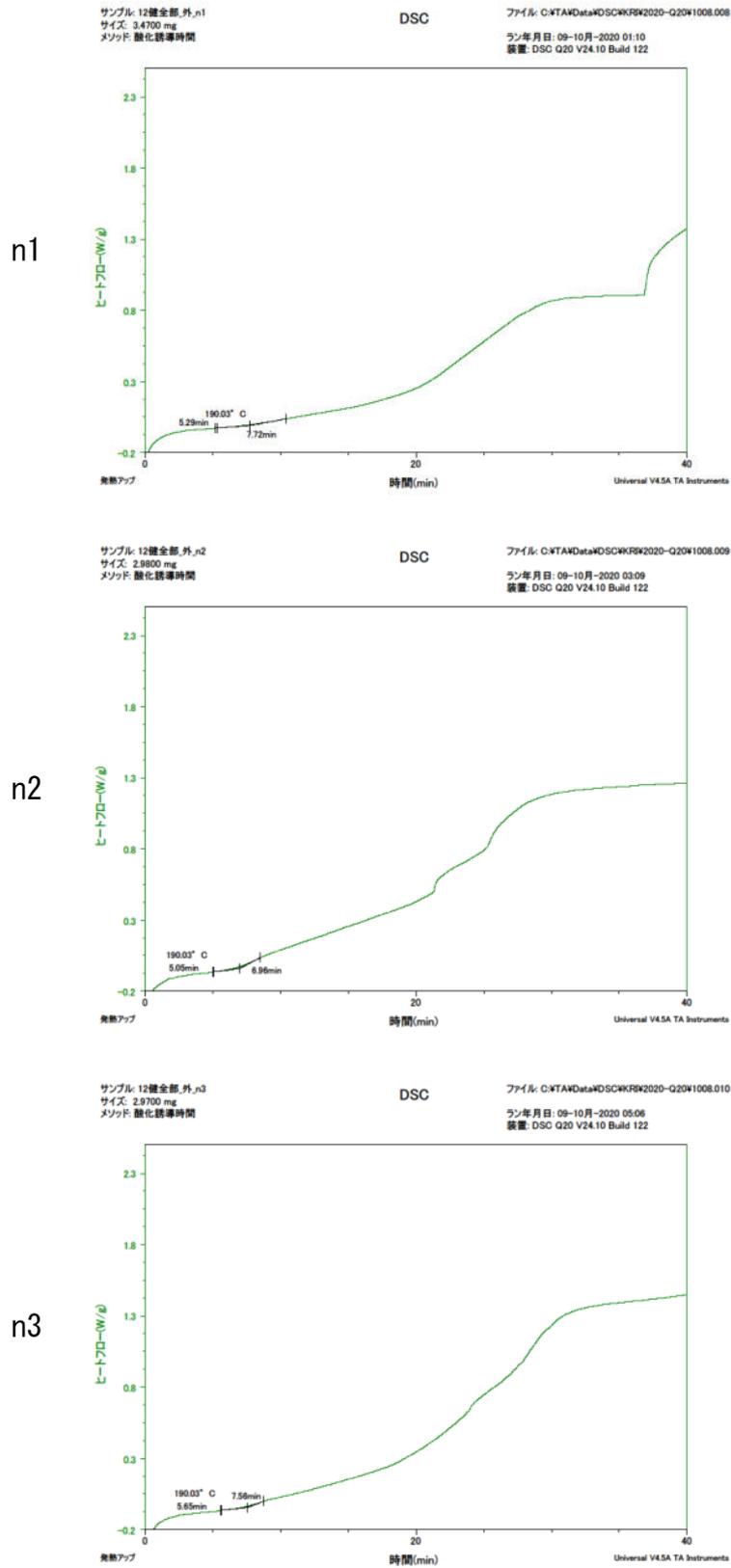


図 6-13-7. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 健全部 外表面)

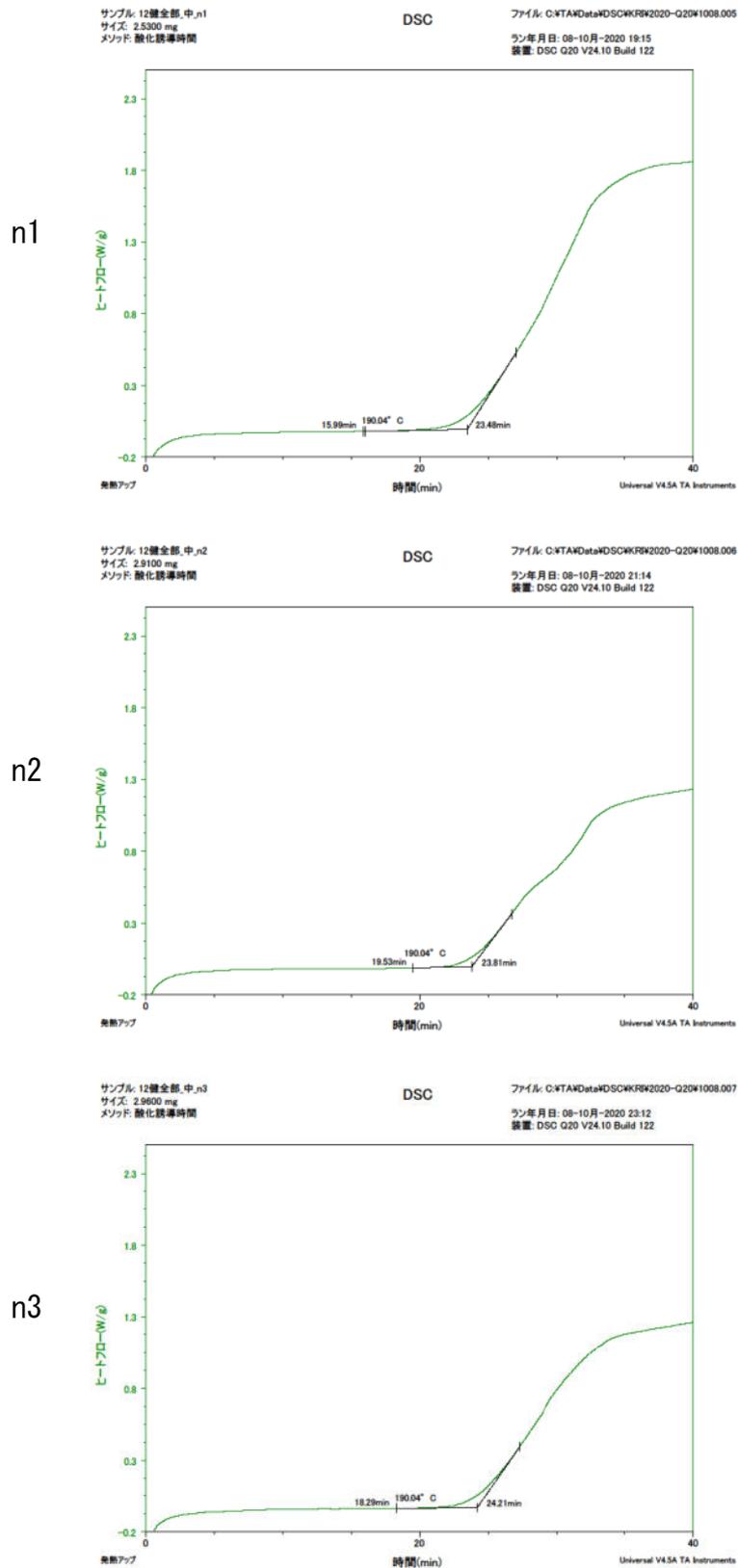


図 6-13-8. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 健全部 中間部)

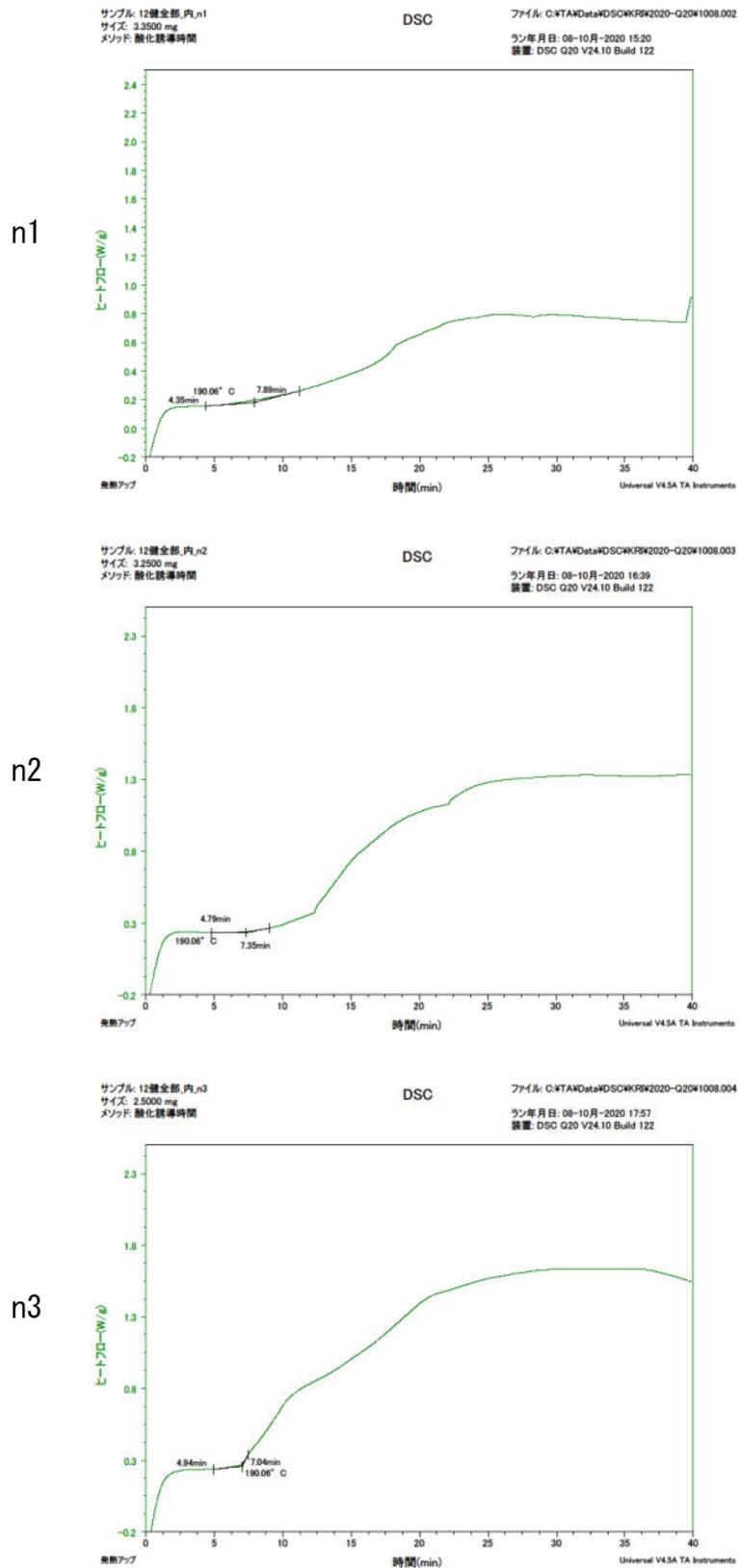


図 6-13-9. OIT 測定チャート 190°C (No. 12 健全部 内表面)