

# 蒸気発生器伝熱管の急速破損模擬試験

— 2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管での試験結果 —

2002年9月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

# 蒸気発生器伝熱管の急速破損模擬試験

## － 2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管での試験結果 －

(試験報告)

栗原成計\* 浜田広次\*

### 要 旨

FBR 蒸気発生器 (SG) 内でナトリウム中に水がリークすると、ナトリウム-水反応によって高温・腐食性の反応ジェットが形成される。特に中規模の水リークでは、隣接する伝熱管が反応ジェットに覆われて、管壁温度の上昇に伴い機械的強度が低下する可能性があることから、内圧負荷時の機械的破損 (高温ラプチャ) 挙動の把握が重要となる。

高温ラプチャ挙動は伝熱管の材質、寸法を始めとする SG の設計や運転条件に大きく影響される。したがって、これまで SG 伝熱管についての材料強度データの取得と構造健全性評価に関する研究を行い、その成果を反映して高温ラプチャ評価手法の整備及び SG 伝熱管の急速破損模擬試験による検証を行ってきた。

本報告書では、これら検証等で用いられた伝熱管破損模擬試験装置 (TRUST-2) による 2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管の急速破損模擬試験データ及びその評価結果を取りまとめた。そして、破損温度や破損応力等についてデータ評価及び解析を行い、SG 伝熱管の高温ラプチャ解析に採用されている評価モデルの保守性を確認した。

---

\*) 大洗工学センター、要素技術開発部、熱化学安全試験グループ

# Rapid Overheating Tube Rupture Simulation Test for FBR Steam Generators

— Results of 2·1/4Cr-1Mo Tube Rupture Tests —

(Testing Document)

Akikazu KURIHARA\* and Hirotugu HAMADA\*

## Abstract

During the event of an under-sodium water leak in an FBR steam generator (SG), the high temperature and corrosive reaction jet is formed due to sodium-water reactions. Especially in case of an intermediate leak, neighboring tubes are locally covered with the reaction jet and the tube temperature rises; then, the mechanical strength of tube wall would decrease to be failed due to overheating. Therefore, the understanding of the behavior of overheating tube rupture under internal pressure loading becomes important.

The behavior of overheating rupture is mainly influenced by the operating conditions and the design of the SG, such as the material and the size of the tube, etc. Therefore, the acquisition of the strength data on the SG tube material, a research about rupture strength evaluation method, the development of the overheating rupture evaluation code, and its verification by rapid overheating simulation tests of the SG tubes were conducted.

The rapid overheating simulation test data on the 2·1/4Cr-1Mo tube obtained by the TRUST-2 (Tube Rupture Simulation Test) and its analysis results are described in this report. The data evaluation and analysis about the failure temperature, stress, and time showed the conservatism of the evaluation model that is used for the overheating rupture analysis of the SG tubes.

---

\*)Thermo-chemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

## 目次

1. はじめに	1
2. 試験装置	2
2.1 試験体	2
2.2 高周波誘導加熱装置	3
2.3 試験セル	3
2.4 加圧系統	4
2.5 計測系統	4
3. 試験条件	5
3.1 伝熱管の材質・寸法	5
3.2 伝熱管の温度設定	5
3.3 延性破損時のひずみ速度	5
3.4 クリープ破損時の管内圧力	5
4. 試験方法	6
4.1 延性破損試験	6
4.2 クリープ破損試験	6
4.3 応力算定法	6
5. 試験結果	7
5.1 Run1 の結果	7
5.2 Run2 の結果	7
5.3 Run3 の結果	7
5.4 Run4 の結果	7
5.5 Run5 の結果	8
5.6 Run6 の結果	8
5.7 Run7 の結果	8
5.8 Run8 の結果	8
5.9 Run9 の結果	8
5.10 Run10 の結果	9
5.11 Run11 の結果	9
5.12 Run12 の結果	9
5.13 Run13 の結果	9
5.14 Run14 の結果	9
5.15 Run15 の結果	9
6. 試験結果の検討	11
6.1 延性破損試験	11
6.2 クリープ破損試験	11

6.3 高温ラプチャ解析との比較 .....	12
7. 結 論 .....	14
文 献 .....	15
謝 辞 .....	16
付録1 従来結果との比較 .....	118

## 図 表

表 2-1	試験に用いた伝熱管の仕様	17
表 2-2	高周波誘導加熱装置の仕様	18
表 2-3	試験での計測項目	19
表 3-1	試験条件及び試験結果の概要	20
図 2-1	TRUST-2 の全体系統図	21
図 2-2	試験体の構造	22
図 2-3	昇温・制御系統	23
図 2-4	加圧系統	24
図 5-1 (a)	Run1 の試験結果	25
図 5-1 (b)	Run1 の試験データ	26
図 5-2 (a)	Run2 の試験結果	30
図 5-2 (b)	Run2 の試験データ	31
図 5-3 (a)	Run3 の試験結果	35
図 5-3 (b)	Run3 の試験データ	36
図 5-4 (a)	Run4 の試験結果	40
図 5-4 (b)	Run4 の試験データ	41
図 5-5 (a)	Run5 の試験結果	45
図 5-5 (b)	Run5 の試験データ	46
図 5-6 (a)	Run6 の試験結果	50
図 5-6 (b)	Run6 の試験データ	51
図 5-7 (a)	Run7 の試験結果	55
図 5-7 (b)	Run7 の試験データ	56
図 5-8 (a)	Run8 の試験結果	60
図 5-8 (b)	Run8 の試験データ	61
図 5-9 (a)	Run9 の試験結果	65
図 5-9 (b)	Run9 の試験データ	66
図 5-10 (a)	Run10 の試験結果	70
図 5-10 (b)	Run10 の試験データ	71
図 5-11 (a)	Run11 の試験結果	75
図 5-11 (b)	Run11 の試験データ	76
図 5-12 (a)	Run12 の試験結果	80
図 5-12 (b)	Run12 の試験データ	81
図 5-13 (a)	Run13 の試験結果	85
図 5-13 (b)	Run13 の試験データ	86

図 5-14 (a)	Run14 の試験結果	90
図 5-14 (b)	Run14 の試験データ	91
図 5-15 (a)	Run15 の試験結果	95
図 5-15 (b)	Run15 の試験データ	96
図 6. 1-1	材料強度基準と延性破損試験結果	100
図 6. 2-1	材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1000℃)	100
図 6. 2-2	材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1100℃)	101
図 6. 2-3	材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1200℃)	101
図 6. 3-1	Run1 の解析結果	102
図 6. 3-2	Run2 の解析結果	103
図 6. 3-3	Run3 の解析結果	104
図 6. 3-4	Run4 の解析結果	105
図 6. 3-5	Run5 の解析結果	106
図 6. 3-6	Run6 の解析結果	107
図 6. 3-7	Run7 の解析結果	108
図 6. 3-8	Run8 の解析結果	109
図 6. 3-9	Run9 の解析結果	110
図 6. 3-10	Run10 の解析結果	111
図 6. 3-11	Run11 の解析結果	112
図 6. 3-12	Run12 の解析結果	113
図 6. 3-13	Run13 の解析結果	114
図 6. 3-14	Run14 の解析結果	115
図 6. 3-15	Run15 の解析結果	116
図 6. 3-16	破損時間の試験結果と解析結果	117
図 6. 3-17	破損温度の試験結果と解析結果	117
付図-1	材料強度基準と延性破損試験結果	119
付図-2	材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1100℃)	120
付図-3	材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1200℃)	120
付図-4	破損時間の試験結果と解析結果	121
付図-5	破損温度の試験結果と解析結果	121



# 1. はじめに

高速増殖炉の蒸気発生器（以下、SG と略す）内でナトリウム中に水がリークすると、ナトリウム-水反応によって高温かつ腐食性の反応ジェットが形成される。特に中規模の水リークでは、隣接する伝熱管が局所的に反応ジェットに覆われて、管壁温度の上昇に伴い機械的強度が低下する可能性があることから、伝熱管の破損伝播を評価する上では、水蒸気の内圧負荷時における機械的な破損（高温ラプチャ）挙動の把握が重要となる。

高温ラプチャ挙動は伝熱管の材料強度と管壁応力の相対関係により評価することができるが、これらは伝熱管の材質、寸法を始めとする SG の設計や運転条件に大きく影響される。したがって、実機 SG 伝熱管についての材料強度データの取得<sup>[1, 2]</sup>と急速加熱時の円筒の内圧破損に関する構造健全性評価に関する研究<sup>[2]</sup>等が行われ、高温ラプチャに対する健全性評価手法の整備が行われてきた。その一方で、実際の SG 伝熱管を用いた高温ラプチャ試験として、高周波誘導加熱により伝熱管を破損させる模擬試験 (TRUST-1, 2 : Tube Rupture Simulation Test) 等を行い、構造健全性評価手法の検証データを蓄積<sup>[3, 4]</sup>してきている。これらの成果は、最終的に高温ラプチャ解析コード TRUE (Tube Rupture Evaluation Code) <sup>[5]</sup>に反映して、もんじゅ SG 伝熱管の高温ラプチャ評価に適用<sup>[6]~[8]</sup>された。

本報告書では、これら研究成果等<sup>[2], [5]~[8]</sup>で使用されている TRUST-2 を用いた 2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管の急速破損模擬試験データ及びその評価結果を取りまとめたものである。なお、試験データの評価方法等の詳細についてはこれら報告書にて既に記載されているので、ここでは重複する内容については割愛する。

## 2. 試験装置

図 2-1 に TRUST-2 の全体系統を示す。TRUST-2 は、試験体（模擬伝熱管）、試験体を急速加熱するための高周波誘導加熱装置、試験体と加熱コイルを納める試験セル、試験体内に窒素ガス等を供給する加圧系統、及び計測系統により構成される。この TRUST-2 は、試験体内部に蒸気を流動させた状態で急速加熱及び内圧破損が可能なように設計されているが、本試験では管内の蒸気流動を行わず窒素ガス加圧による急速破損模擬試験を行った。

TRUST-2 を構成する各々の詳細は、以下に記す。

### 2.1 試験体

#### 2.1.1 試験体構造

図 2-2 に試験体の構造を示す。試験体は模擬伝熱管、上部プラグ、接続ソケット（グレイロッククランプ）、導圧管、及び熱電対より構成される。模擬伝熱管の上部はプラグされ、下部にはグレイロックが溶接される。試験体上部は熱膨張の影響が生じないように自由端とし、また導圧管を設けて圧力伝送器により試験体の管内圧力を測定する。試験体の下部はグレイロッククランプにて圧力供給配管に固定する。この配管には加圧系統が接続されており、そこから窒素ガスが供給される。

試験体の外壁面にはらせん状の配置にて合計 12 本の R 型熱電対をスポット溶接し、加熱部の温度分布を測定する。とくに試験体の軸方向中央部断面には、周方向 90 度おきに熱電対を合計 4 箇所設置した。

試験前の加熱コイルと試験体の設置においては、模擬伝熱管の外壁面周方向に温度分布が生じないように加熱コイルと試験体の芯合わせを行った。

#### 2.1.2 模擬伝熱管

##### (1) 伝熱管材質

試験体には、「もんじゅ」蒸発器伝熱管と同じ材質である 2・1/4Cr-1Mo 鋼管の 2 ヒートを使用した。1 ヒートは JIS で規定された一般的な商用鋼管（以下、「JIS 材」と略す）であり、別のヒートは「もんじゅ」蒸発器伝熱管と同様の仕様、工程に基づき製作された鋼管（以下、「相当材」と略す）である。各ヒートの化学分析結果及び引張試験結果を表 2-1 に示す。

##### (2) 伝熱管寸法

模擬伝熱管は、「もんじゅ」蒸発器伝熱管相当として公称値 31.8mmOD×3.8mmt（JIS 材は 3.9mmt）で製作した。ただし、TRUST-2 の設計圧力 19.7MPa（200kg/cm<sup>2</sup>G）の制限により、破損圧力を設計値以下に設定する必要があることから、試験条件によっては伝熱管の外壁面を旋削するか内壁面をホーニング加工して肉厚を薄くした。そのため模擬伝熱管は、軸方向 35mm 間隔（熱電対の取付断面）、各断面においては周方向 90 度おきに試験前の肉

厚測定を行った。

## 2.2 高周波誘導加熱装置

反応ジェットに覆われた伝熱管の局所的な高温状態を模擬するため、高周波誘導加熱装置により発生させた高周波電力を整合器を経由して誘導加熱コイルに供給し、非接触方式で伝熱管を加熱する。高周波誘導加熱装置は高周波インバータ、純水循環装置、整合器、加熱コイル等で構成される。表 2-2 に高周波誘導加熱装置の仕様を、また関連する昇温・制御系統を図 2-3 に示す。各々の概要は以下に記す。

### 2.2.1 高周波インバータ

高周波インバータは、高周波誘導加熱を行うために必要な高周波電力（25～500kW）を供給する機器である。

### 2.2.2 純水循環装置

高周波インバータ内部の半導体素子の冷却には純水が使用される。純水循環装置は、インバータ冷却用の純水と、その純水を冷却するための工業用水との熱交換器である。

### 2.2.3 整合器

高周波発信器を正常に運転するための装置として整合器（コンデンサ）が使用される。これは、加熱コイルのインダクタンスに対して直列に挿入することで加熱コイルの力率を良好にするように設計されている。

### 2.2.4 加熱コイル

加熱コイルは、使用する伝熱管の材質、寸法で加熱効率が最大となるよう設計されており、ここでは巻数 11 巻、内径 100mm、長さ 300mm、均熱幅 200mm とした。

### 2.2.5 昇温・制御系統

高周波インバータに付設する温度制御プログラムを用いて、試験時の目標とする昇温速度、最高温度、高温保持等の昇温制御を行う。昇温制御においては、伝熱管壁に取り付けた R 型熱電対（図 2-2 の #12）を計測・監視し、PID 制御を行う。温度制御プログラムはパソコンにより遠隔操作される。

## 2.3 試験セル

試験体破損時の飛散物や噴出ガス等による外部への影響を防ぐ目的で、二重構造の試験セルを設置した。

内側のセル（第 1 試験セル）は SUS304 製の箱で、上部に伝熱管破損時の圧力開放のためのダクトが、下部にドレン管が取り付けられている。第 1 試験セルには観察窓を設けており、試験時の伝熱管加熱及び破損状況を CCD カメラにてビデオ撮影及び収録する。

外側のセル（第2試験セル）は SS 製の箱で、試験実施の安全性を考慮して、第1試験セルを内包するように設置している。

## 2.4 加圧系統

伝熱管内の蒸気圧力を模擬するための系統である。窒素ガスボンベから試験体へ配管が接続され、その経路上に安全弁、操作用バルブ等を配置している。図 2-3 に加圧系統の構成を示す。

## 2.5 計測系統

試験データを計測及び収録するための系統である。表 2-3 に試験での計測項目一覧表を示す。主な測定データは試験体の外壁面温度、管内圧力である。全ての測定データは、データレコーダにデジタル収録される。

### 2.5.1 試験体温度

R型熱電対（Pt-PtRh13%, JIS class 1 相当, 0.5mmφ）が試験体の外壁面にスポット溶接される。この熱起電力は、温度変換器によってゼロ点及び室温補正、並びに信号処理を施した後に電圧値にリニアライズされる。温度変換器からの出力電圧（0-5V）はデータレコーダにてデジタル収録する。

### 2.5.2 圧力伝送器

試験体上部の導圧管に接続された圧力トランスデューサ（共和電業（株）製 PGS-300KA あるいは PGS-500KA）の出力信号を圧力変換器で電圧値にリニアライズし、データのデジタル収録を行う。

### 2.5.3 データレコーダ

データ収録には、デジタルデータレコーダ（株）エヌエフ回路設計ブロック製 5881 PCM DATA RECORDER）を用いた。サンプリング周波数は 50Hz で、16Ch の同期収録を行った。

### 3. 試験条件

試験条件をまとめて表 3-1 に示す。それらの設定根拠等を以下に記載する。

#### 3.1 伝熱管の材質・寸法

伝熱管の材質としては 2・1/4Cr-1Mo 鋼を用い、寸法は実機伝熱管相当として製作した。詳細は 2.1.2 項に記載したので、ここでは割愛する。なお、伝熱管には初期欠陥を設けずに破損模擬試験を実施した。

#### 3.2 伝熱管の温度設定

ナトリウム-水反応時の高温条件を模擬する観点から、パラメータとして 1000℃、1100℃、1200℃で試験を行った。健全性評価手法の整備において実施した単軸負荷の高温引張強度試験でも同様の温度条件で実施されている<sup>[1], [2]</sup>。

ナトリウム-水反応時の昇温速度は、反応ジェットによる管外温度・管外熱伝達率、伝熱管の肉厚・比熱・熱伝導率、水蒸気による管内温度・管内熱伝達率などに関係する。4.1.2 項に示す急速加熱試験においては、実機評価<sup>[6]~[7]</sup>における伝熱管温度の最大上昇率相当として約 100℃/秒をリファレンスとした。

#### 3.3 延性破損時のひずみ速度

2・1/4Cr-1Mo 鋼では、900℃を超えるような高温域でクリープの影響が顕著に現れることが確認され、時間依存型のクリープ破断強さを考慮した材料強度基準値が設定された<sup>[2]</sup>。すなわち、延性破断については、高温引張試験で得られたひずみ速度 10%/sec に対する引張強さをしきい値とすることで、破断時間 10 秒以内の極短時間での強度基準値を設けている。TRUST-2 で実施した延性破損試験での破損直前のひずみ速度は、内圧破裂の特徴を考慮すると、破損直前で急激に変形が生じることから、10%/sec よりも十分に早いひずみ速度となる。すなわち、実機 SG 伝熱管の破損状況を模擬しているものと考えられる。

#### 3.4 クリープ破損時の管内圧力

破断時間 10 秒以上でのクリープ破断に対する強度基準値の保守性を確認する観点から、延性破損試験で得られた破損圧力の 50~60%で管内圧力を保持し、破損に至るまで圧力、温度条件を保持した。

## 4. 試験方法

TRUST-2 では、延性破損とクリープ破損を想定して試験を行った。試験方法の概要を以下に記す。

### 4.1 延性破損試験

#### 4.1.1 急速加圧試験

急速加圧試験では、試験体を加熱コイルにより加熱して、想定する温度条件を設定・保持した後で、試験体内を窒素ガスで急速に加圧して、その加圧過程で試験体を破損させる。

#### 4.1.2 急速加熱試験

急速加熱試験では、試験体の内部圧力を試験条件とする圧力条件まで設定・保持する。その後、試験体を加熱コイルにて急速に加熱して、昇温過程で破損させる。

### 4.2 クリープ破損試験

クリープ破損試験では、試験体を加熱コイルにより加熱し、試験条件とする温度条件を設定・保持した後で、試験体の内部圧力を、窒素ガスで破損圧力の 50～60%程度に保持し、その状態で試験体をクリープ破損させる。

### 4.3 応力算定法

破損応力は薄肉円筒に対する以下の式<sup>[6]～[8]</sup>で算出する。

$$\sigma = \frac{P\{D_i + 2(1-k)t\}}{2t} = \frac{P(D_o - 0.8t)}{2t} \dots\dots\dots (1)$$

$\sigma$  : 破損応力 (MPa≡N/mm<sup>2</sup>)

P : 破損圧力 (MPa)

D<sub>i</sub> : 伝熱管の内径 (mm)

D<sub>o</sub> : 伝熱管の外径 (mm)

t : 伝熱管の肉厚 (mm)

上式中のファクターkについては、JIS 圧力容器の設計公式で用いている k=0.4 を採用した。また、破損圧力は破損直前の管内圧力を、破損温度は破損口に一番近い温度測定点でのデータを採用し、伝熱管の外径と肉厚は、破損口に最も近い温度測定点において試験前に測定した値を採用した。

## 5. 試験結果

試験結果の概要を表 3-1 に、試験データを図 5. 1-1～図 5. 1-15 に整理して示す。また各試験結果の概要を以下に記す。

### 5. 1 Run1 の結果

Run1 では、JIS 材による伝熱管 (30. 6mmOD×3. 65mmt) を用いて、管壁温度を約 1200℃ に保持した状態で管内圧力を上昇させ、その途中で破損させた。図 5-1 (a) に、破損口に最も近い熱電対 #10 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。上の図は、試験開始 (昇温前) から降温による試験終了までの変化を、下の図は、特に加圧開始から伝熱管破損までの変化について示している。伝熱管は加圧開始後 9. 3 秒で破損し、その時の管壁温度は 1198℃、管内圧力は 9. 9MPa であった。図 5-1 (b) には、加圧開始から伝熱管破損に至る期間の前後数秒間を含む全ての試験データを示している。

### 5. 2 Run2 の結果

Run2 の試験条件は Run1 とほぼ同様 (伝熱管は 30. 7mmOD×3. 70mmt) であるが、管壁温度を約 1100℃ に保持した状態で管内圧力を上昇させた。図 5-2 (a) に、熱電対 #11 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、管内の圧力上昇が若干低くなっており、加圧開始後約 12 秒を過ぎると圧力上昇がほとんど見られなくなった。それでも、伝熱管は加圧開始後 18. 7 秒で破損し、その時の管壁温度は 1074℃、管内圧力は 11. 9MPa となった。図 5-2 (b) に全ての試験データを示した。

### 5. 3 Run3 の結果

Run3 の試験条件は、30. 9mmOD×3. 80mmt の伝熱管を使用した点を除けば Run1 とほぼ同様である。図 5-3 (a) に、管壁温度として熱電対 #5 と #12 の中間点の温度 (算術平均値) と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、管内の圧力上昇を低く設定したため、加圧開始後約 8 秒を過ぎると圧力は徐々に低下する結果となった。それでも、伝熱管は加圧開始後 12. 2 秒で破損し、その時の管壁温度は 1185℃、管内圧力は 8. 7MPa となった。図 5-3 (b) には全ての試験データを示した。

### 5. 4 Run4 の結果

Run4 の試験では 30. 8mmOD×3. 73mmt の伝熱管を用い、管壁温度を 1100℃ に保持したあと、破損しない程度の管内圧力 9. 4MPa まで加圧 (約 8. 5MPa で破損させるために 9. 4MPa となった時点で圧力供給弁を閉じた) して、クリープ破損を模擬した。図 5-4 (a) に、熱電対 #11 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は加圧開始後約 75 秒まで 1100℃ を維持したが、その後温度は幾らか低下して 77. 3 秒で伝熱管が破損した。破損時の管壁温度は 1061℃ で、管内圧力は 8. 4MPa 程度であった。図 5-4 (b) に全ての試験データを示し

た。

### 5.5 Run5の結果

Run5の試験では、30.7mmOD×3.74mmtの伝熱管を用い、管壁温度を1200℃に保持したあと、管内圧力を6.0MPaまで加圧（約5.5MPaで破損させるために6.0MPaとなった時点で圧力供給弁を閉じた）して、クリープ破損を模擬した。図5-5(a)に、熱電対#11の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は加圧開始後80.8秒で破損するまで約1200℃を維持したが、管内圧力は最終的に5.5MPa程度となった。図5-5(b)に全ての試験データを示した。

### 5.6 Run6の結果

Run6の試験条件は、31.4mmOD×3.20mmtの伝熱管を用い、設定温度を1100℃とした点を除けばRun1とほぼ同様である。図5-6(a)に、熱電対#10の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、加圧過程の12.5秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は1081℃、管内圧力は11.4MPaとなった。図5-6(b)に全ての試験データを示した。

### 5.7 Run7の結果

Run7の試験条件は、もんじゅ相当材による31.7mmOD×4.10mmtの伝熱管を用いた点を除けばRun1とほぼ同様である。図5-7(a)に、熱電対#12の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、加圧過程の9.9秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は1196℃、管内圧力は10.3MPaとなった。図5-7(b)に全ての試験データを示した。

### 5.8 Run8の結果

Run1の急速加圧試験に対して、ほぼ同条件（1200℃での破損を設定）で急速加熱試験を行ったのがRun8である。ここでは、30.8mmOD×3.70mmtのJIS材による伝熱管を用いて、管内圧力を約10MPaに保持した状態で管壁温度を上昇させ、その途中で破損させた。管壁温度の昇温速度は約100℃/sに設定した。図5-8(a)に、熱電対#11の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は昇温開始後12.0秒で破損し、その時の管壁温度は1170℃、管内圧力は若干上昇して10.6MPaであった。図5-8(b)には、全ての試験データを示した。なお、既報<sup>[5]</sup>では時刻ゼロを管内の加圧開始としていたが、ここでは、高周波誘導加熱装置による昇温開始を時刻ゼロとしてプロットした。

### 5.9 Run9の結果

Run8の急速加熱試験に対して、1100℃での破損を設定したのがRun9である。ここでは、31.6mmOD×3.17mmtの伝熱管を用い、管内圧力を10.5MPaにした点を除けばRun8とほぼ同様の試験条件とした。図5-9(a)に、熱電対#11の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、10.7秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は1147℃、管内圧力は若干上昇して11.2MPaであった。図5-9(b)に全ての試験データを示した。本ケースについても、



既報<sup>5)</sup>では時刻ゼロを管内の加圧開始としていたが、ここでは、高周波誘導加熱装置による昇温開始を時刻ゼロとしてプロットした。

#### 5.10 Run10 の結果

Run10 では、27.15mmOD×2.00mmt の JIS 材による伝熱管を用いて、管壁温度を約 1000℃ に保持した状態で管内圧力を上昇させて破損させた。図 5-10 (a) に、熱電対 # 5 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は加圧開始後 12.5 秒で破損し、その時の管壁温度は 1004℃、管内圧力は 11.2MPa であった。図 5-10 (b) に全ての試験データを示した。

#### 5.11 Run11 の結果

Run11 の試験は Run10 とほぼ同様である。違いは、もんじゅ相当材による 27.65mmOD×2.00mmt の伝熱管を用いた点である。図 5-11 (a) に、熱電対 # 11 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は加圧開始後 13.2 秒で破損し、その時の管壁温度は 992℃、管内圧力は 11.6MPa であった。図 5-11 (b) に全ての試験データを示した。

#### 5.12 Run12 の結果

Run12 の試験は Run11 と同様で、クリープ破損を調べたケースである。そのため、管内圧力は破損に至らない 7.5MPa に設定し、破損するまでの時間を調べた。図 5-12 (a) に、熱電対 # 12 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。伝熱管は加圧開始後 101.5 秒で破損し、その時の管壁温度は 1028℃、管内圧力の最終値は 6.8MPa であった。図 5-12 (b) に全ての試験データを示した。

#### 5.13 Run13 の結果

Run13 の試験条件は、もんじゅ相当材による 29.5mmOD×3.00mmt の伝熱管を用いた点を除けば Run2 及び Run6 とほぼ同様である。図 5-13 (a) に、熱電対 # 5 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、加圧過程の 10.4 秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は 1125~1126℃、管内圧力は 10.7MPa となった。図 5-13 (b) に全ての試験データを示した。

#### 5.14 Run14 の結果

Run14 の試験条件は、伝熱管が 31.75mmOD×4.08mmt である点を除けば、Run13 と同様である。図 5-14 (a) に、熱電対 # 11 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。この試験では、7.2 秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は 1087℃、管内圧力は 17.6MPa となった。図 5-14 (b) に全ての試験データを示した。

#### 5.15 Run15 の結果

Run15 の試験条件は、Run14 とほぼ同じである（ただし伝熱管肉厚は製作誤差により 4.04mmt となっている）。図 5-15 (a) に、熱電対 # 5 の管壁温度と管内圧力の時間変化を示す。

す。この試験では、18.0 秒で伝熱管が破損し、その時の管壁温度は 1063℃、管内圧力は 15.0MPa となった。図 5-15 (b) に全ての試験データを示した。

## 6. 試験結果の検討

伝熱管の材料強度については、材料試験により 700℃～1200℃の強度データを取得し、それに基づく材料強度基準値を設定している<sup>[2], [6]～[8]</sup>。この基準値の妥当性を、以下の 6.1 節と 6.2 節で確認し、また基準値を反映した高温ラプチャ評価手法<sup>[5]</sup>の妥当性を 6.3 節で確認した。

### 6.1 延性破損試験

図 6.1-1 に延性破損試験結果を示す。図には、クリープ破損のデータ（クリープの影響が顕著となるデータも含む）を除く全てのデータをプロットしている。図中の実線は引張延性破断基準値（6.3 節(2)式のクリープ破断曲線で、時間係数<sup>\*1)</sup>を 3、クリープ破断時間を 10 秒とした応力）であり、破線はそれに対する応力係数<sup>\*2)</sup> 1.1 と 1.5 の応力値に相当する。

試験結果から、引張延性破断基準値と同様に破損応力は破損温度に反比例しており、何れもこの基準値を上回ることがわかる。これら試験データは、引張延性破断基準値に対して応力係数 1.1～1.5 の範囲に留まっており、試験データの下限值に対する安全裕度は、応力係数にして約 1.1 であると言える。また、材料の違い（JIS 材、相当材）による破損応力への影響及び試験方法（急速加圧、急速加熱）の違いによる破損応力への影響も小さいことがわかる。

### 6.2 クリープ破損試験

図 6.2-1～図 6.2-3 に、それぞれ 1000℃、1100℃、及び 1200℃におけるクリープ破損の試験結果を示す。図には、実線で示した時間係数 3 のクリープ破断基準値に加え、時間係数を 1 及び 1.5 とした曲線も示している。ここで、破断時間 2 秒以下にプロットした試験データは、延性破損における破損応力であり参考のために示しているが、その破断時間については特に意味を持たない。また、1000℃、1100℃、1200℃から離れる試験データについては、温度補正を行いプロットしている。この補正は、試験の破損温度でクリープ破断

---

#### \* 1) 時間係数

材料試験データから求めたクリープ破断時間に対する安全裕度を意味する。時間係数 1 はクリープ破断時間の平均値に相当し、時間係数 1.5 は平均値の 2/3 倍に相当する。 ≡ (材料試験データから求めたクリープ破断時間の平均値) ÷ (急速加圧及び急速加熱試験で得られた破断時間)

#### \* 2) 応力係数

材料試験データから求めた延性破断の強度基準値に対する破損時応力の比で、破断に対する安全裕度を意味する。 ≡ (急速加圧及び急速加熱試験で得られた応力) ÷ (材料試験データから求めた引張延性破断基準値)

曲線から求められる応力に対する補正すべき温度でクリープ破断曲線から求められる応力の比を、試験データの破断応力に掛けることにより求めている。

図に示すように、周方向応力支配である内圧クリープによる破断時間は、同じ材料の単軸引張クリープ（時間係数 1 の曲線）と比較して破断時間が 2/3 程度に低下（時間係数 1.5 の曲線に近づく）している。この相違は、内圧が負荷されると伝熱管に周方向の応力が発生し、この応力が支配的な要因となって変形するのに対して、軸引張では軸方向応力が支配的な要因となる変形機構の違いによることが主な原因とされている。構造モデルによる解析的検討からは、この構造上の因子として時間係数 1.5 が導びかれており<sup>[2]</sup>、これらの検討結果と試験結果は良好に一致する。

材料強度基準値は単軸引張クリープ試験に基づいて定められており、試験データの平均値（時間係数 1 の曲線）に対して時間係数 3 の裕度が与えられる<sup>[6]~[8]</sup>。また材料試験による 950℃以上のデータのばらつきは時間係数にして 1.2 程度であり、この場合、データの下限值に対する正味の安全裕度は、 $3/1.5/1.2=1.67$ （応力係数にして約 1.1）とされる<sup>[2]</sup>。

6.1 節の延性破損及び 6.2 節のクリープ破損の試験及び検討結果から、時間係数 3 に基づく材料強度基準値を採用することにより、応力係数にして 1.1 の安全裕度を確保できるものと考えられる。

### 6.3 高温ラプチャ解析との比較

TRUST-2 試験データを用いて、高温ラプチャ解析コード TRUE の保守性を検証した。解析モデルと解析条件については、既報<sup>[5]</sup>とほぼ同様である。すなわち、伝熱管の肉厚方向に 12 個のメッシュ分割を取り、管壁の密度を  $7806\text{kg/m}^3$ 、比熱を  $837.4\text{J/kgK}$  とし、管壁は高周波誘導加熱により均一に加熱することから、管壁内外面に生じる温度差が小さくなるよう熱伝導率には十分大きい値を与えた。また実測温度を外壁面の境界条件として与え、内壁面は窒素ガス封入で流動が無いことから、自然対流オーダの熱伝達率を境界条件として与えた。そして、時間メッシュ 0.01 秒間隔で加圧あるいは加熱開始時から伝熱管の破損時刻を若干経過するまで非定常計算を行った。解析における破損の判定は、管壁応力が時間係数 3 で破断時間 10 秒とした材料強度を超える（延性破損）か、あるいは時間係数 3 で累積損傷を計算しそれが 1 を超える（クリープ破損）時点とした。材料強度と累積損傷の計算には、以下の式を用いている。ここで、 $T_k$  は温度 (K)、 $t_R$  は破断時間 (s)、 $\sigma$  は応力 ( $\text{N/mm}^2$ )、 $\alpha$  は時間係数 (-) である。なお本解析においては、クリープ破損よりも早く延性破損に達した場合にも、破断時間 10 秒以下について以下の式をそのまま適用して、累積損傷の計算を継続している。

$$T_k (\log \alpha t_R + 11.28) = 28732 - 7019 \cdot \log \sigma \dots\dots\dots (2)$$

図 6.3-1～図 6.3-15 に、各ケースについての解析と試験を比較した結果を示す。上図は

試験データ、中図は管壁温度と応力、下図は累積損傷である。累積損傷については、実機評価<sup>[6]、[8]</sup>と同様に $\alpha = 3$ をリファレンスとするが、参考として円筒容器の理論値相当<sup>[2]</sup>である $\alpha = 1.5$ とした解析結果も併せて示す。図中に示す□印は試験での破損時点を示し、○印は解析での破損時点（延性破損か $\alpha = 3$ としたクリープ破損の何れかの条件に先に達した時刻）を示す。

Run4、5、12 は破損応力以下に加圧した状態で、管壁を高温に保持して破損させたケースである。 $\alpha = 3$ の条件では何れも試験の破損時刻よりも早い時刻に解析の累積損傷が1を超えてクリープ破損しているものの、延性破損の条件には達していないことから、これらは純粋なクリープ破損のケースと分類できる。

Run8 と 9 は急速加熱により伝熱管を破損させたケースであるが、解析では試験よりも早く延性破損の条件に達して破損している。また試験の破損時刻における累積損傷は、理論値相当の $\alpha = 1.5$ の条件でおおよそ0.2以下と十分小さいことから、これらは純粋な延性破損のケースと分類できる。

前述以外のRun1～3、6、7、10、11、13～15は、急速加圧により伝熱管を破損させたケースであり、解析では試験よりも早く延性破損の条件に達して破損している。また、試験の破損時刻における累積損傷は、理論値相当の $\alpha = 1.5$ の条件でおおよそ0.5程度かそれを上回っていることから、これらはクリープを伴う延性破損のケースと分類できる。純粋な延性破損のケースとクリープを伴う延性破損のケースに別れる理由は、主に試験方法の違いに起因する。すなわち、後者の試験では、内圧負荷されている間は常に管壁が1000℃以上の高温状態となっており、その状態が加圧開始から破損まで継続（時間にすると7～19秒間）している。一方、前者の試験では、初期から内圧負荷されているものの、その状態で管壁温度が1000℃以上となる時間は3～4秒程度と短く、前者のおおよそ半分以下である。したがって、前者では延性破損にクリープの影響が有意に現れ、後者では有意に現れないものと考えられる。

クリープの影響を確認するために、破損時間について試験と解析を比較した結果を図6.3-16に示す。ここでは、参考のために純粋な延性破損のケース（Run8、9）についても同図に示した。これらより、明らかに試験結果はクリープ破損、延性破損、クリープを伴う延性破損のグループに分類でき、解析の破損時間は全て試験より10～50%短く評価することがわかる。特にクリープ破損のケースについては、時間係数 $\alpha$ の推定値は1.5～2程度となっており、 $\alpha = 3$ とすることによる保守性を確認できる。

クリープの影響が小さい延性破損のケース（Run8、9）については、破損時の応力と温度の関係が重要となる。破損時の応力は試験条件で定まることから、破損時の温度の違いという観点で解析と試験を比較した結果を図6.3-17に示す。その結果、解析の破損温度は試験結果をおおよそ100℃低く評価しており、やはり保守側の評価となることを確認できる。

## 7. 結 論

本報では、過去の研究成果等<sup>[2], [5]~[8]</sup>で使用されている、TRUST-2 を用いた 2・1/4Cr-1Mo 鋼伝熱管の急速破損模擬試験データについて取りまとめた。また、破損温度や破損応力等についてデータ評価及び解析を行い、SG 伝熱管の高温ラプチャ解析に採用されている評価モデルの保守性を確認した。

## 文 献

- [1] 青木昌典, 吉田英一, 和田雄作: “Mod. 9Cr-1Mo 鋼, 2・1/4Cr-1Mo 鋼および SUS321 の超高温引張特性 (I)”, JNC TN9410 94-262, (1994. 9)
- [2] 小峰龍司, 和田雄作: “急速加熱による円筒の内圧破断に関する構造健全性評価手法の研究”, JNC TN9410 98-086, (1998. 8)
- [3] 林田禎彦, 浜田広次: “蒸気発生器伝熱管破損模擬試験 -データ集-”, JNC TN9450 97-001, (1996. 6)
- [4] 林田禎彦, 浜田広次: “蒸気発生器伝熱管破損模擬試験 (TRUST-1) の評価”, JNC TN9410 97-002, (1996. 6)
- [5] 浜田広次, 栗原成計: “蒸気発生器伝熱管破損解析コードの開発”, JNC TN9400 2000-091, (2000. 7)
- [6] 田辺裕美, 和田雄作, 他: “蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ型破損評価手法の整備と適用”, JNC TN9410 98-029, (1998. 6)
- [7] 三宅収, 浜田広次, 他: “蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ型破損評価手法の整備と適用 (II)”, JNC TN9400 2001-099, (2001. 11)
- [8] 三宅収, 浜田広次, 他: “蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ型破損評価手法の整備と適用 (III)”, JNC TN9400 2001-130, (2002. 3)

## 謝 辞

本研究の計画・実施にあたり、有益な助言とご指導を頂いた要素技術開発部和田雄作部長、田辺裕美次長、及び熱化学安全試験グループ三宅収グループリーダーに深く感謝の意を表します。

本試験の実施においては、東興機械工業㈱の方々、また試験データの整理においては、原子力システム㈱の小野功氏の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。



表 2-1 試験に用いた伝熱管の仕様

## (a) JIS 材 (T 2)

## 1) 成分表

元 素	C	S i	M n	P	S	C r	M o
規格値	0.15 以下	0.50 以下	0.30~ 0.60	0.03 以下	0.03 以下	1.90~ 2.60	0.87~ 1.13
分析値	0.10	0.31	0.50	0.022	0.002	2.20	0.96

(単位：%)

## 2) 熱処理法

焼ならし後焼もどし (930℃ - 740℃×A C)

## 3) 機械的強度

	耐力(0.2%オフセット)	引張強さ	伸び
規格値	206 N/mm <sup>2</sup>	412 N/mm <sup>2</sup>	30 %
測定値	308 N/mm <sup>2</sup>	498 N/mm <sup>2</sup>	41 %

## (b) 「もんじゅ」相当材

## 1) 成分表

元 素	C	S i	M n	P	S	C r	M o
規格値	0.15 以下	0.50 以下	0.30~ 0.60	0.03 以下	0.03 以下	1.90~ 2.60	0.87~ 1.13
分析値	0.11	0.26	0.43	0.023	0.0072	2.06	0.93

(単位：%)

## 2) 熱処理法

焼ならし後焼もどし (920℃×10分A C - 740℃×30分A C)

## 3) 機械的強度

	耐力(0.2%オフセット)	引張強さ	伸び
規格値	206 N/mm <sup>2</sup>	412 N/mm <sup>2</sup>	30 %
測定値	333 N/mm <sup>2</sup>	490 N/mm <sup>2</sup>	48 %

表 2-2 高周波誘導加熱装置の仕様

項目	仕様
製造メーカー	日本電子株式会社
型式	JTH-500 サイリスタインバータ
入力電源	3相 440V ±10% 50 Hz
最大入力	610 kVA
公称出力	500 kW
出力範囲変化	25~500 kW
出力調整方式	サイリスタ位相制御方式
発信周波数	8 kHz ± 2 kHz の内の一波
発信方式	ブリッジインバータ方式
加熱コイル (有効均熱幅)	内径約 100 mm、長さ約 300 mm (約 200 mm)
最小所要冷却水量 (整合盤、加熱コイル)	3.0kg/cm <sup>2</sup> 215 L/min

表 2-3 試験での計測項目

収録チャンネル	収録項目	収録単位
1	試験体の外壁温度# 1	℃
2	試験体の外壁温度# 2	℃
3	試験体の外壁温度# 3	℃
4	試験体の外壁温度# 4	℃
5	試験体の外壁温度# 5	℃
6	試験体の外壁温度# 6	℃
7	試験体の外壁温度# 7	℃
8	試験体の外壁温度# 8	℃
9	試験体の外壁温度# 9	℃
10	試験体の外壁温度# 10	℃
11	試験体の外壁温度# 11	℃
12	試験体の外壁温度# 12	℃
13	試験体の管内圧力	kg/cm <sup>2</sup> G
14	試験セル内の温度	℃
15	高周波インバータ電流	A
16	高周波インバータ電圧	V

表 3-1 試験条件及び試験結果の概要

RUN	試験目的	外径		肉厚	伝熱管材	設定温度		熱電対 番号	管内圧力		昇温 速度	破損時間	
		(mm)	(mm)			設定/破損時 (°C)	破損まで/破損時 (°C)		設定/破損時 (MPa)	(°C/sec)		試験/解析 (sec)	
1	急速加圧 延性破損	30.60	30.60	3.65	J I S 規格材	1200/1198	1200/1198	10	破損まで/9.9	—	—	9.3/5.97 <sup>D</sup>	
2	急速加圧 延性破損	30.70	30.70	3.70	J I S 規格材	1100/1074	1100/1074	11	破損まで/11.9	—	—	18.7/14.26 <sup>D</sup>	
3	急速加圧 延性破損	30.90	30.90	3.80	J I S 規格材	1200/1185	1200/1185	5と12 の平均	破損まで/8.7	—	—	12.2(4)/6.75 <sup>D</sup>	
4	ｸﾘｰﾌﾞ破損	30.80	30.80	3.73	J I S 規格材	1100/ 1100~1061	1100/ 1100~1061	11	9.4~8.4/ 8.4	—	—	77.3(69)/38.21 <sup>C</sup>	
5	ｸﾘｰﾌﾞ破損	30.70	30.70	3.74	J I S 規格材	1200/1199	1200/1199	11	6.0~5.4/5.4	—	—	80.8(75)/50.62 <sup>C</sup>	
6	急速加圧 延性破損	31.40	31.40	3.20	J I S 規格材	1100/1081	1100/1081	10	破損まで/11.4	—	—	12.5/8.62 <sup>D</sup>	
7	急速加圧 延性破損	31.70	31.70	4.10	もんじゅ相当材	1200/1196	1200/1196	12	破損まで/10.3	—	—	9.9/6.81 <sup>D</sup>	
8	急速加熱 延性破損	30.80	30.80	3.70	J I S 規格材	破損まで/ 1170	破損まで/ 1170	11	10.0~10.6/10.6	100	100	12.0/11.06 <sup>D</sup>	
9	急速加熱 延性破損	31.60	31.60	3.17	J I S 規格材	破損まで/ 1147	破損まで/ 1147	6	10.5~11.2/11.2	100	100	10.7/9.87 <sup>D</sup>	
10	急速加圧 延性破損	27.15	27.15	1.90	J I S 規格材	1000/1004	1000/1004	5	破損まで/11.2	—	—	12.5/8.31 <sup>D</sup>	
11	急速加圧 延性破損	27.65	27.65	2.00	もんじゅ相当材	1000/992	1000/992	11	破損まで/11.6	—	—	13.2/9.31 <sup>D</sup>	
12	ｸﾘｰﾌﾞ破損	27.65	27.65	2.00	もんじゅ相当材	1000/1028	1000/1028	12	7.5~6.8/6.8	—	—	101.5(95)/66.34 <sup>C</sup>	
13	急速加圧 延性破損	29.50	29.50	3.00	もんじゅ相当材	1100/ 1125~1126	1100/ 1125~1126	5	破損まで/10.7	—	—	10.4/6.61 <sup>D</sup>	
14	急速加圧 延性破損	31.75	31.75	4.08	もんじゅ相当材	1100/1087	1100/1087	11	破損まで/17.6	—	—	7.2/4.66 <sup>D</sup>	
15	急速加圧 延性破損	31.75	31.75	4.04	もんじゅ相当材	1100/1063	1100/1063	5	破損まで/15.0	—	—	18.0/13.83 <sup>D</sup>	

\*) ( )内は加圧終了後からの破損時間、C及びDはそれぞれｸﾘｰﾌﾞ及び延性破損の時間を表す

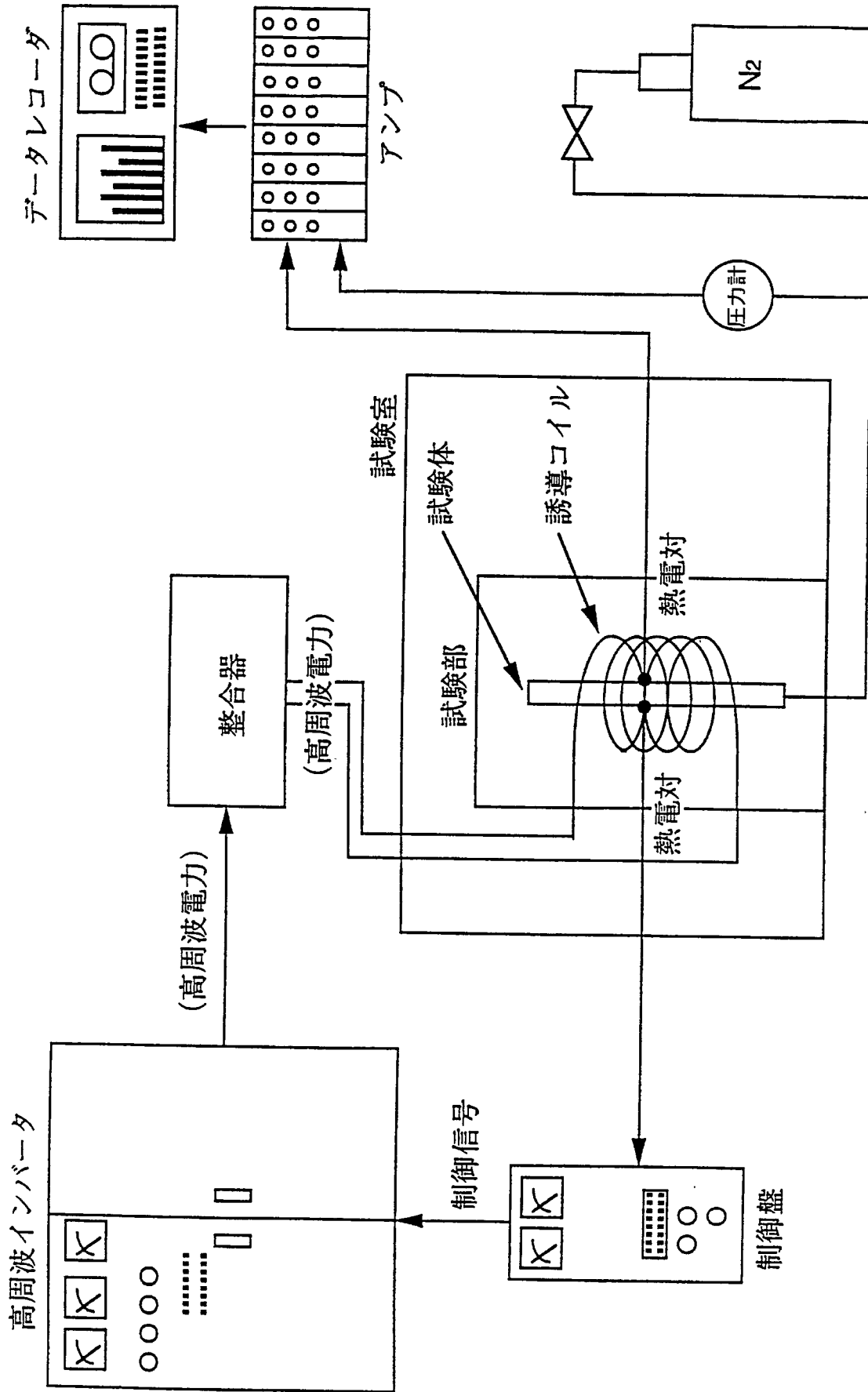
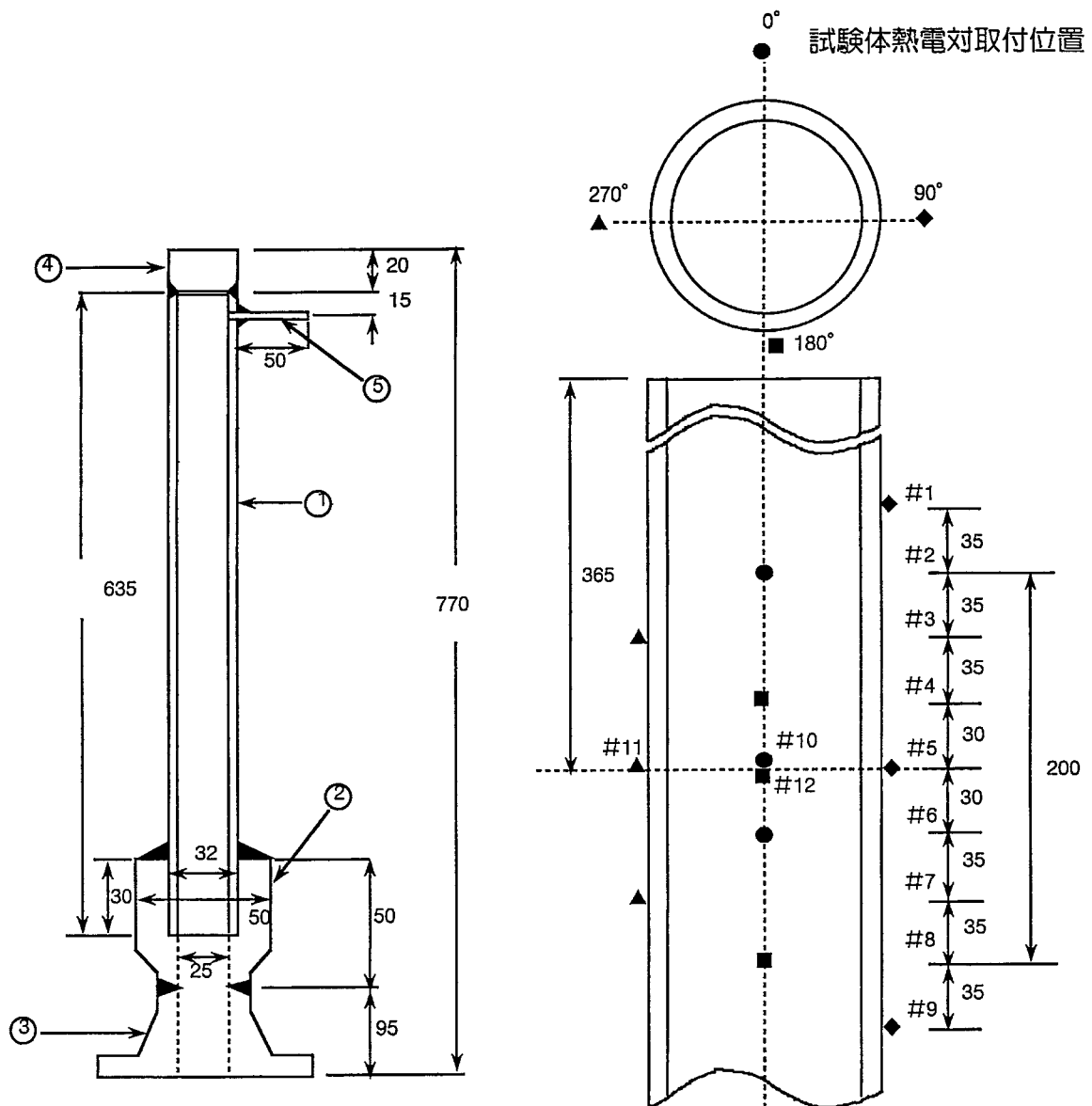


図 2-1 TRUST-2 の全体系統図



No	仕様
5	圧力計接続ライン (1/4 インチ)
4	プラグ (SUS304、φ32)
3	ハブ (11/2GR13)
2	接続ソケット (SUS304、φ50×φ32×50)
1	伝熱管 (2・1/4Cr-1Mo、φ31.8×3.9 t)

図 2-2 試験体の構造

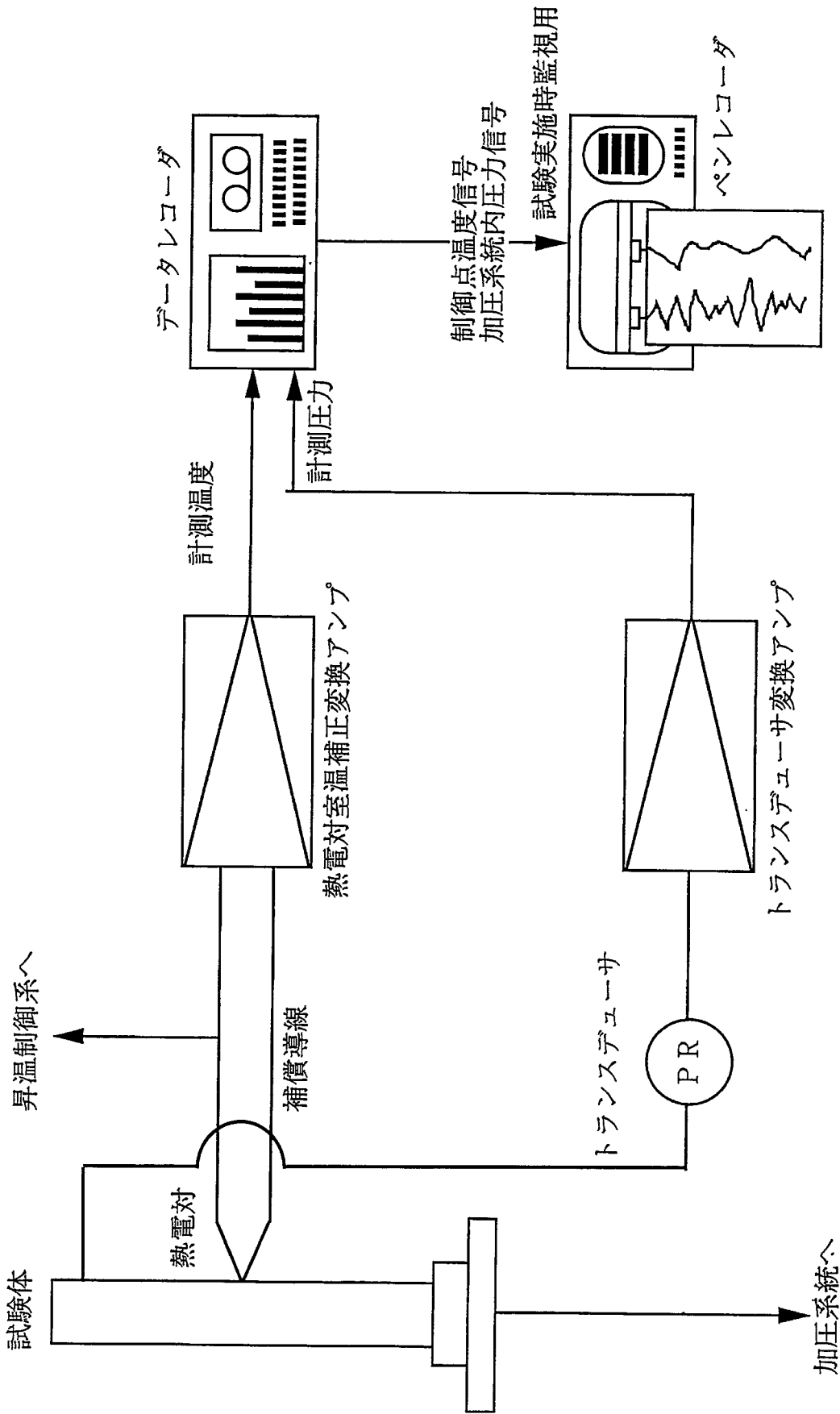


図 2-3 昇温・制御系統

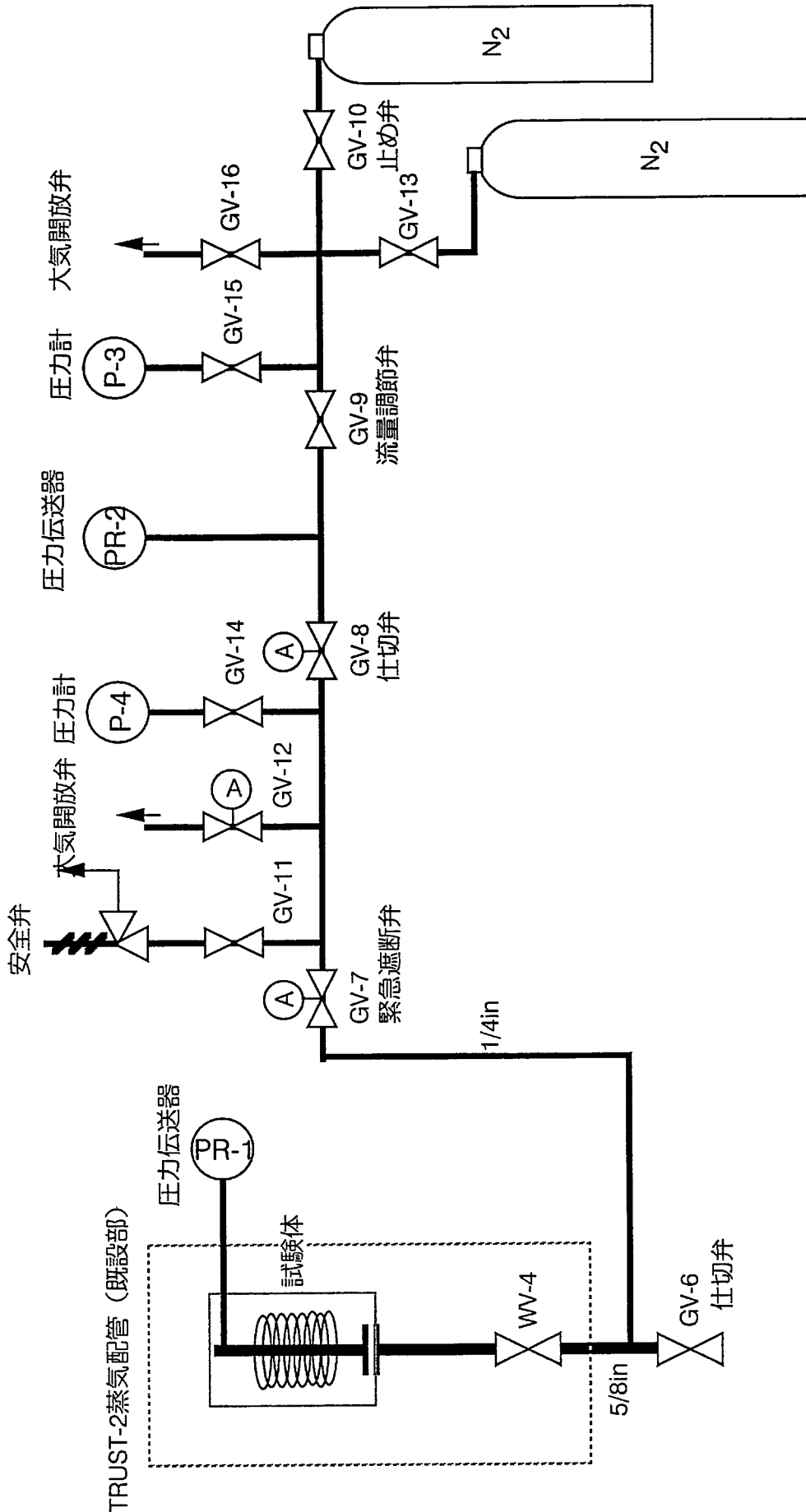


图 2-4 加圧系統



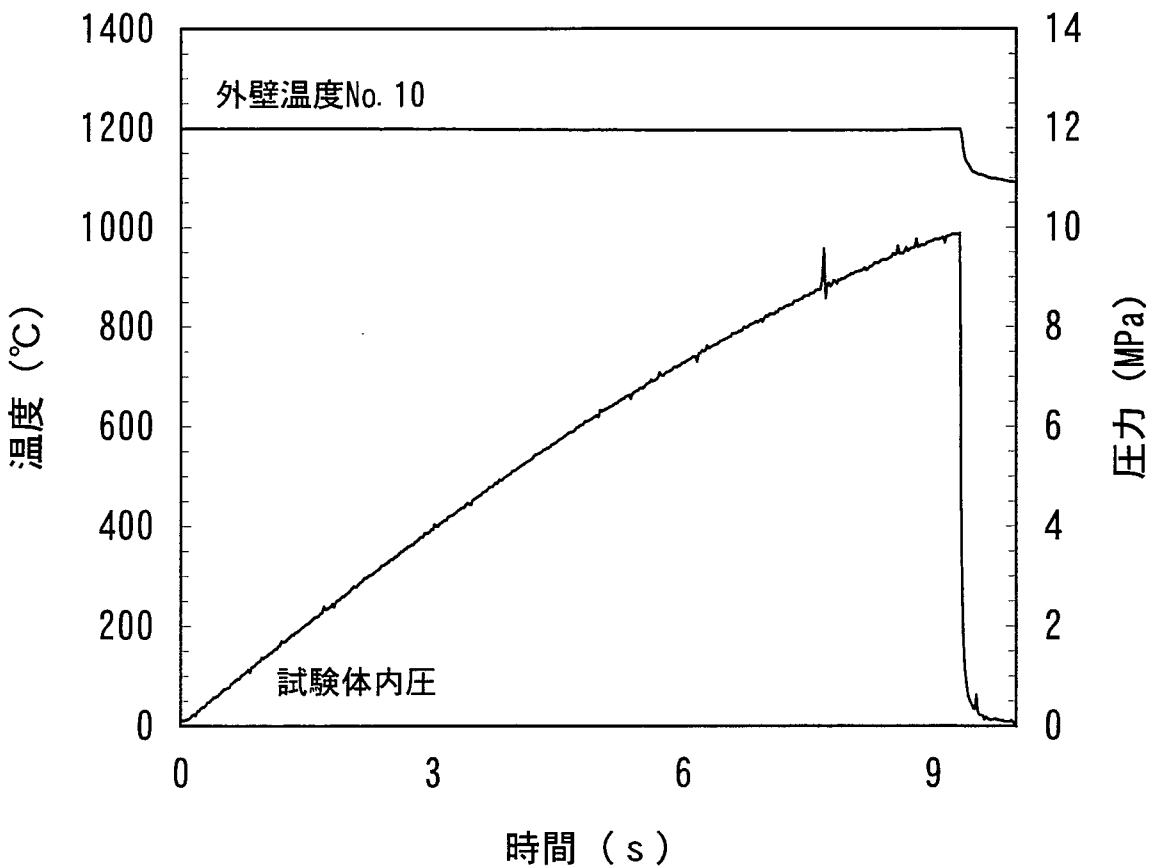
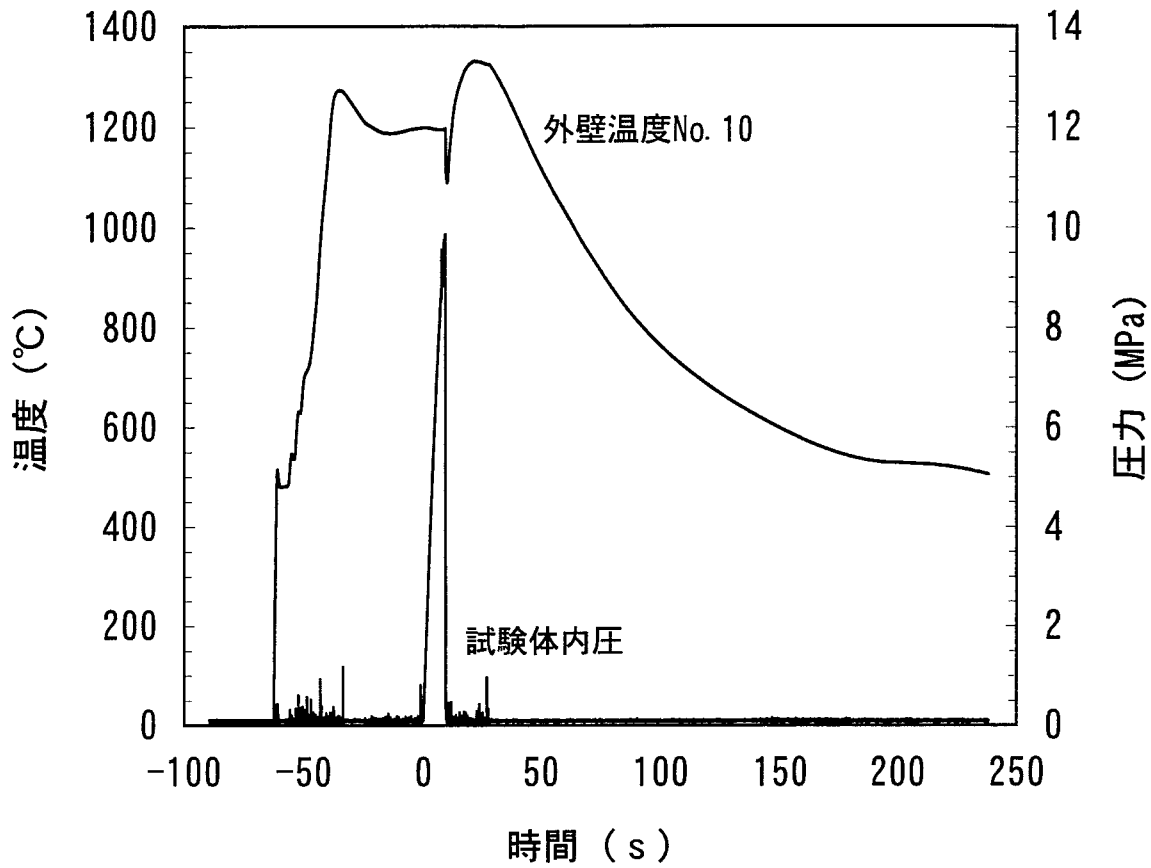


図5-1(a) Run1の試験結果(上:全体、下:試験時)

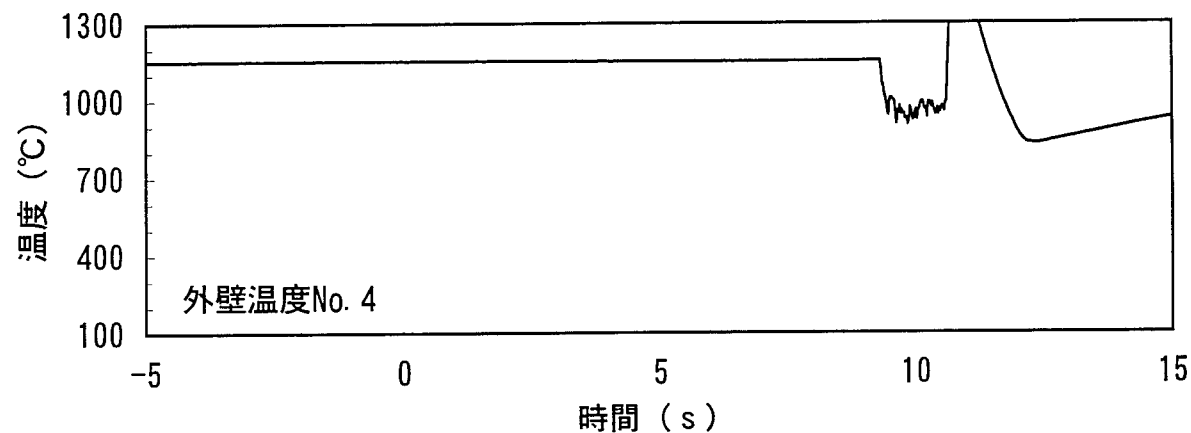
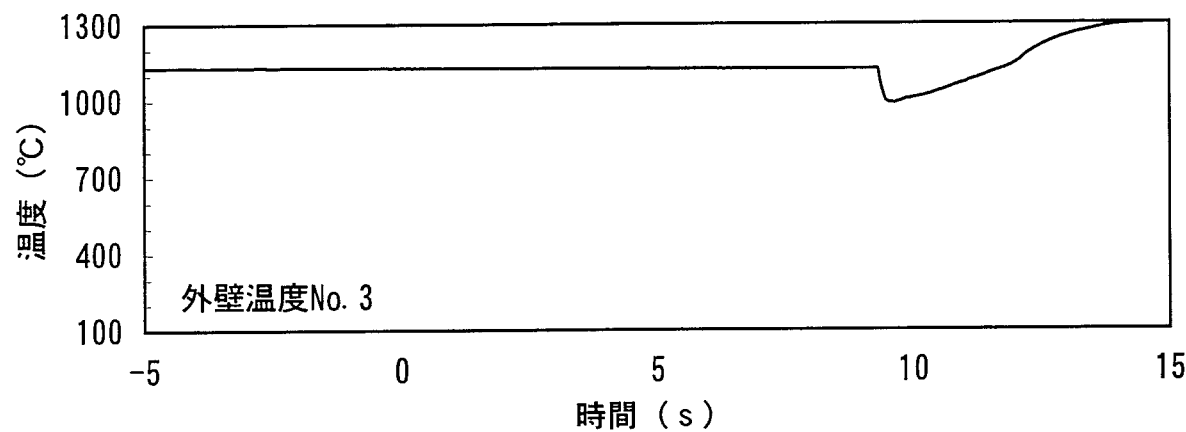
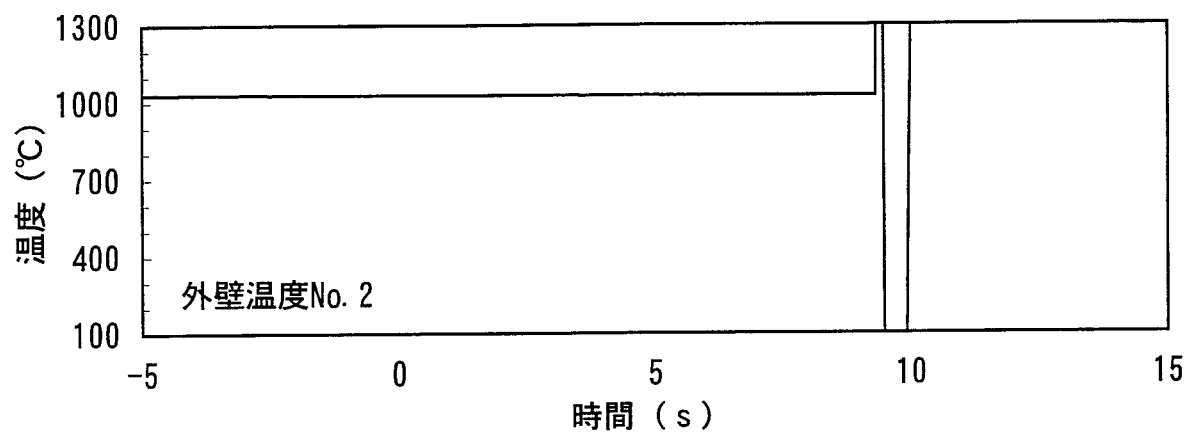
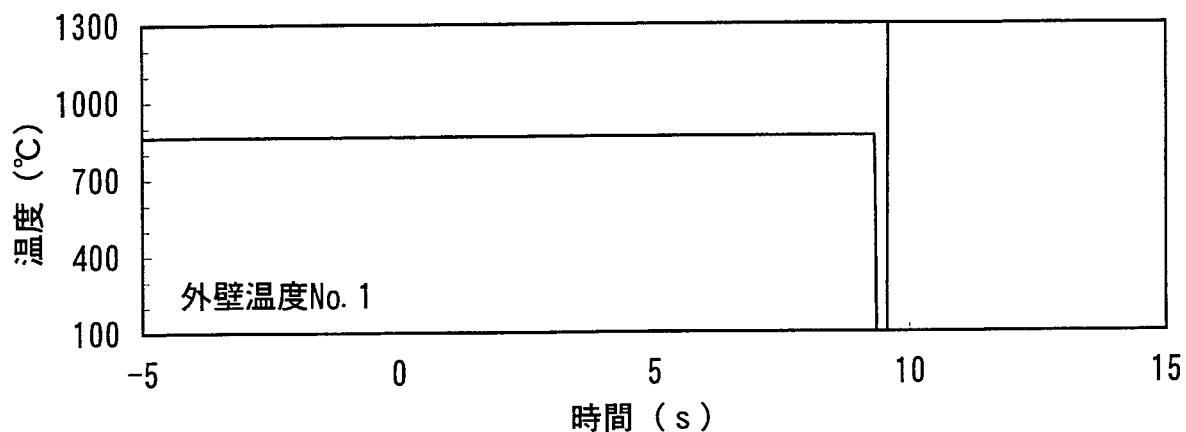


図5-1(b) Run1の試験データ(その1)

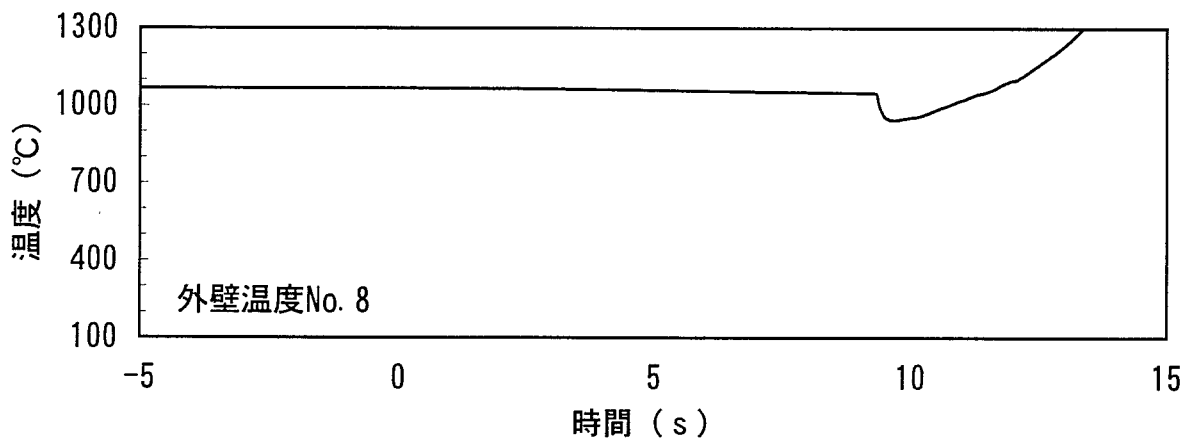
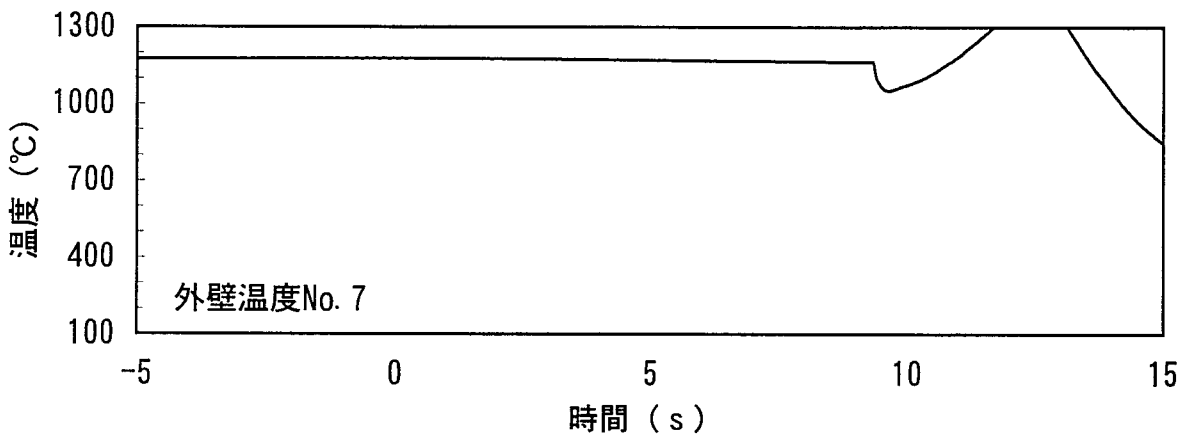
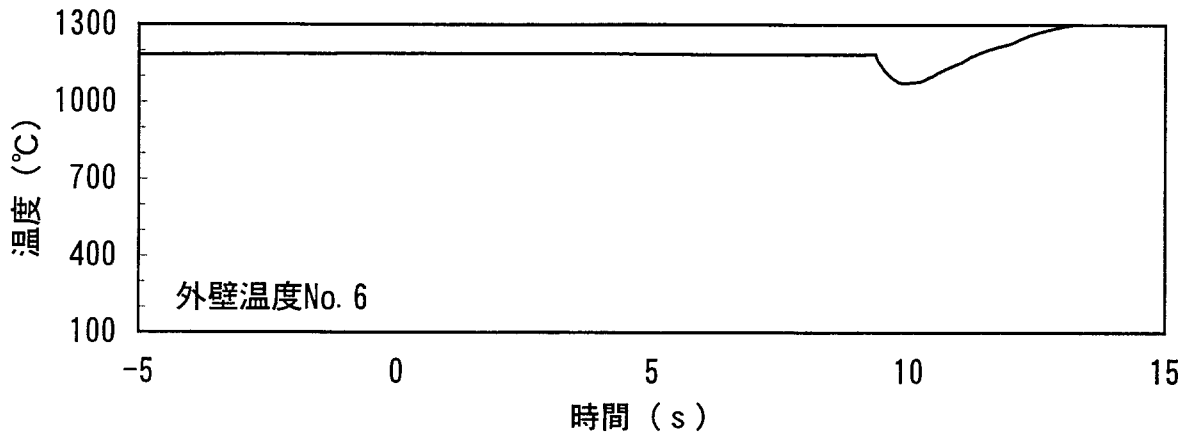
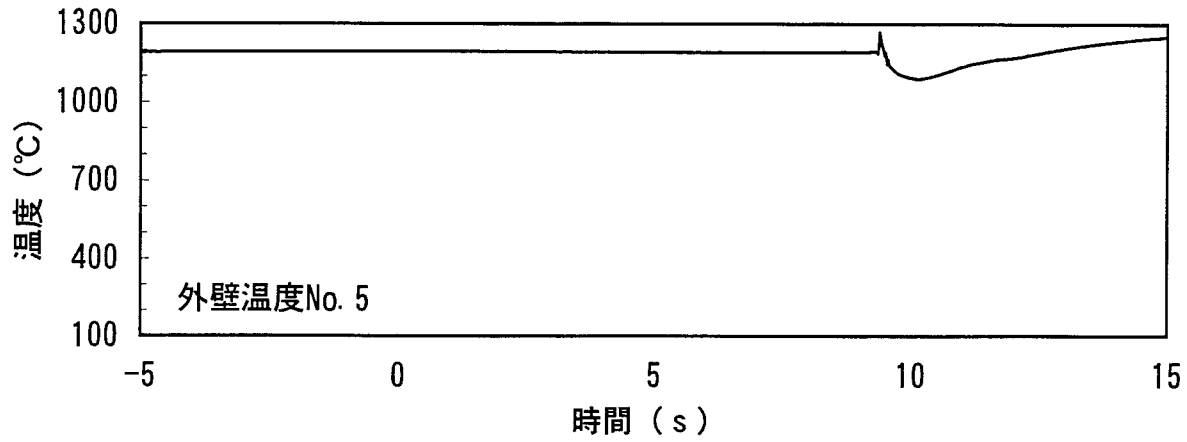


図5-1(b) Run1の試験データ(その2)

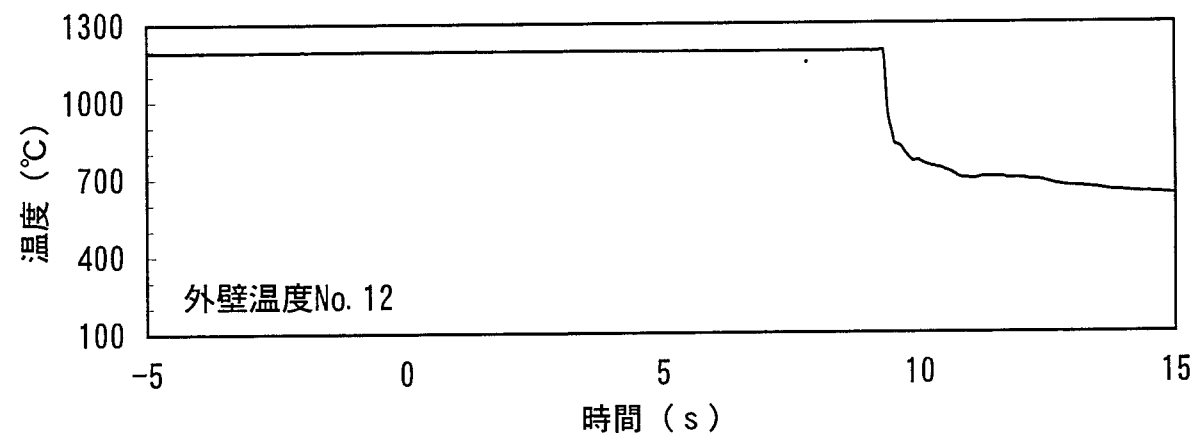
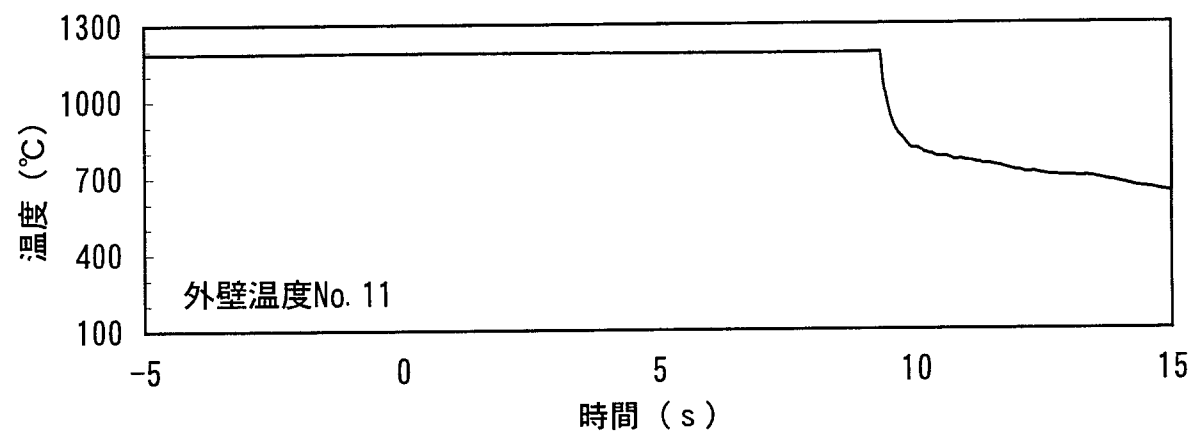
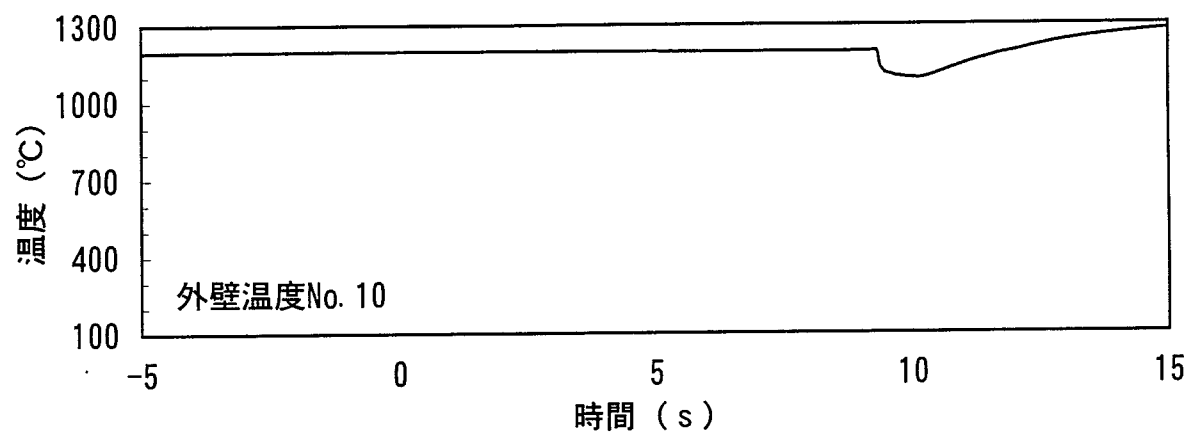
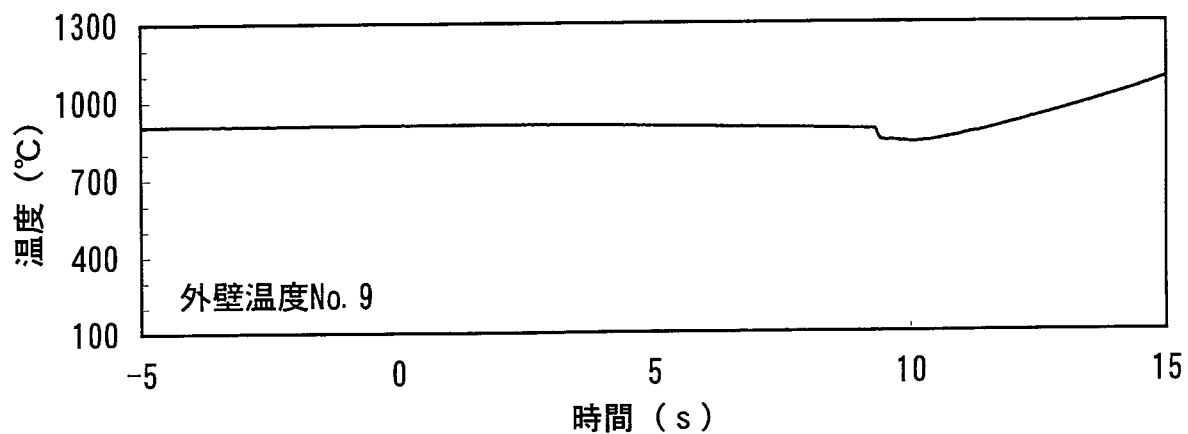


図5-1(b) Run1の試験データ(その3)

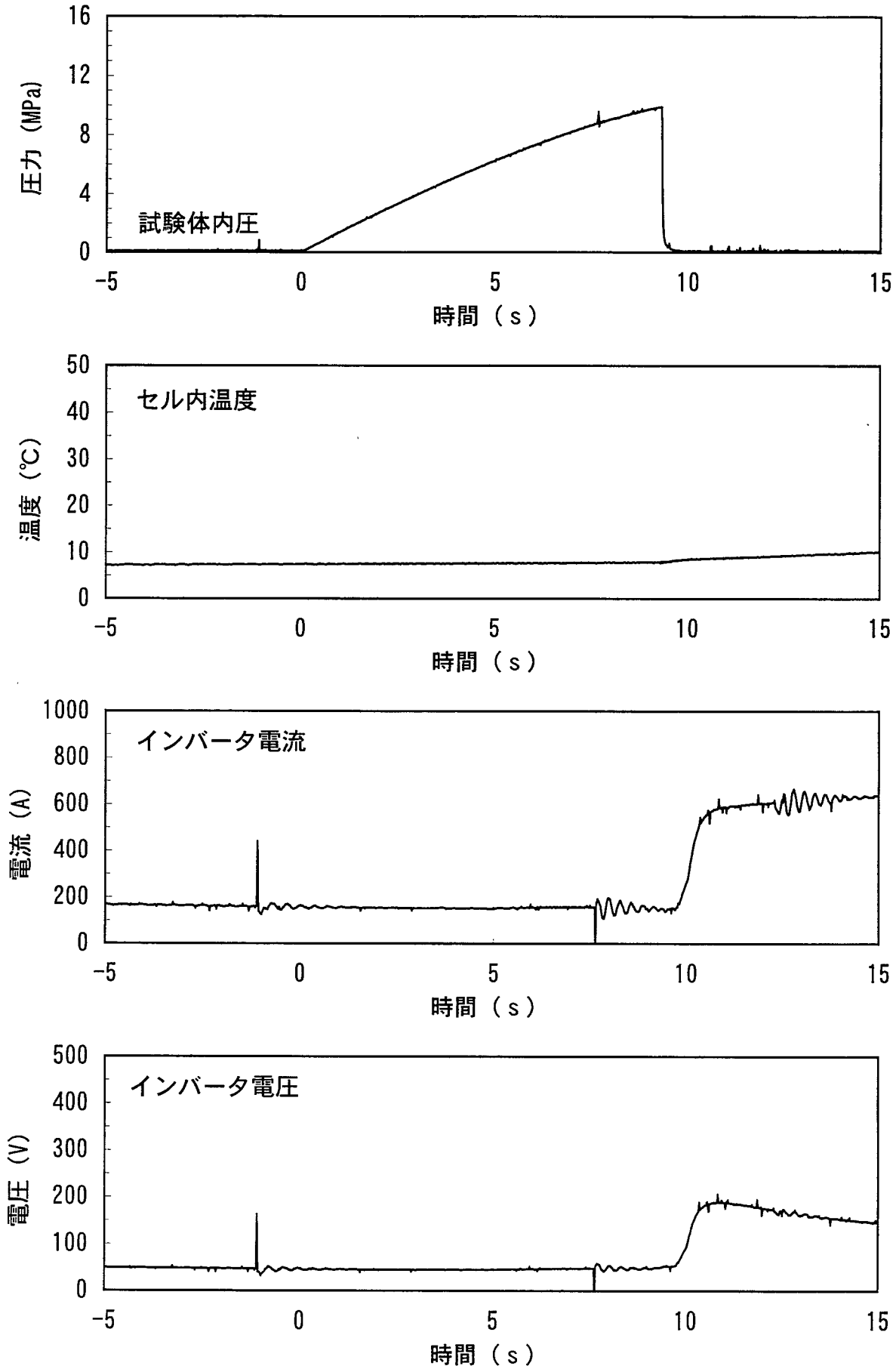


図5-1(b) Run1の試験データ(その4)

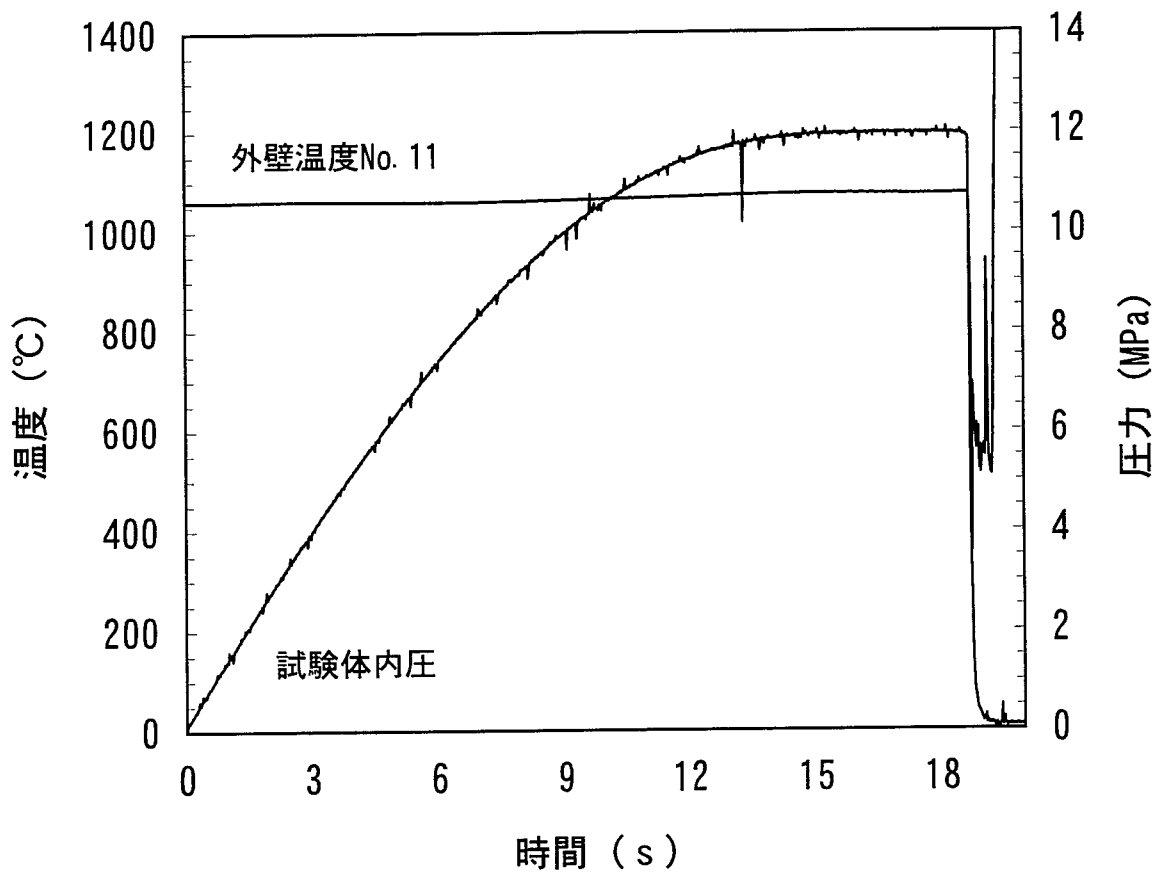
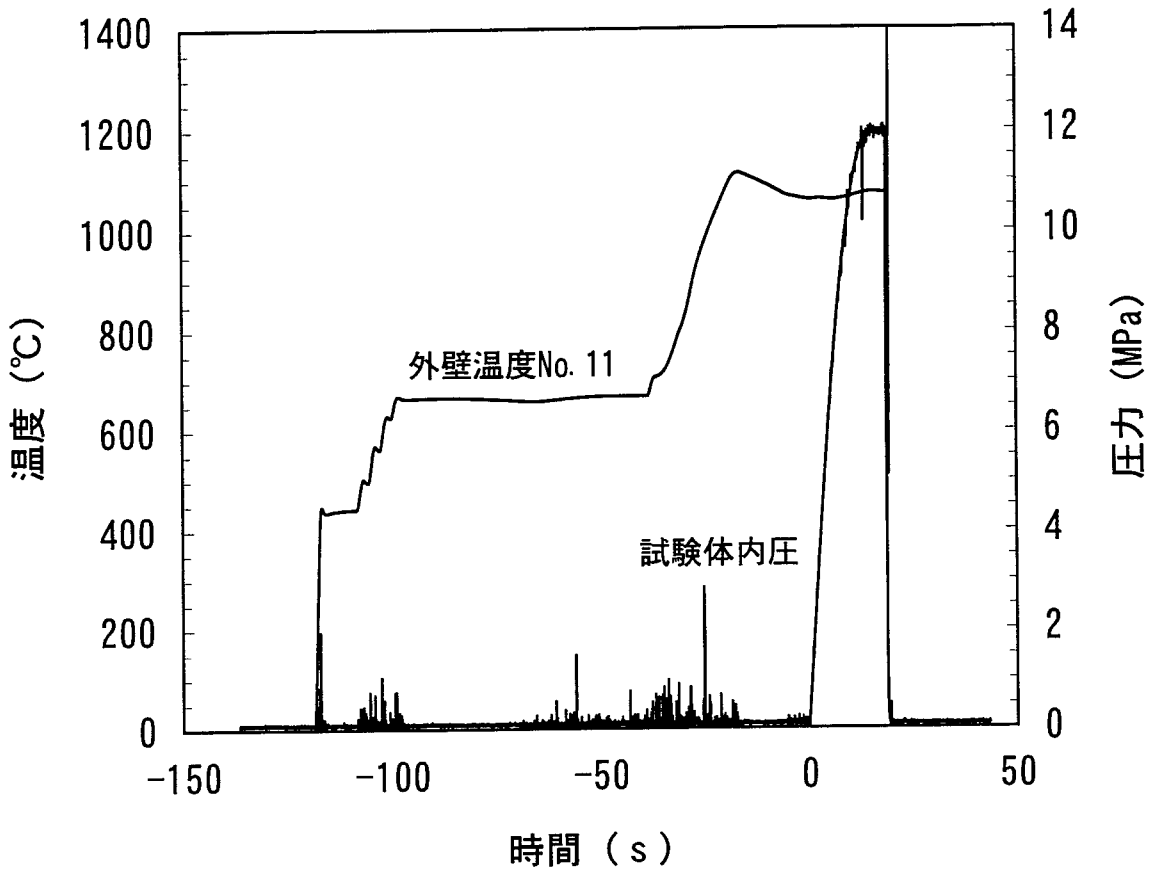


図5-2(a) Run2の試験結果(上:全体、下:試験時)

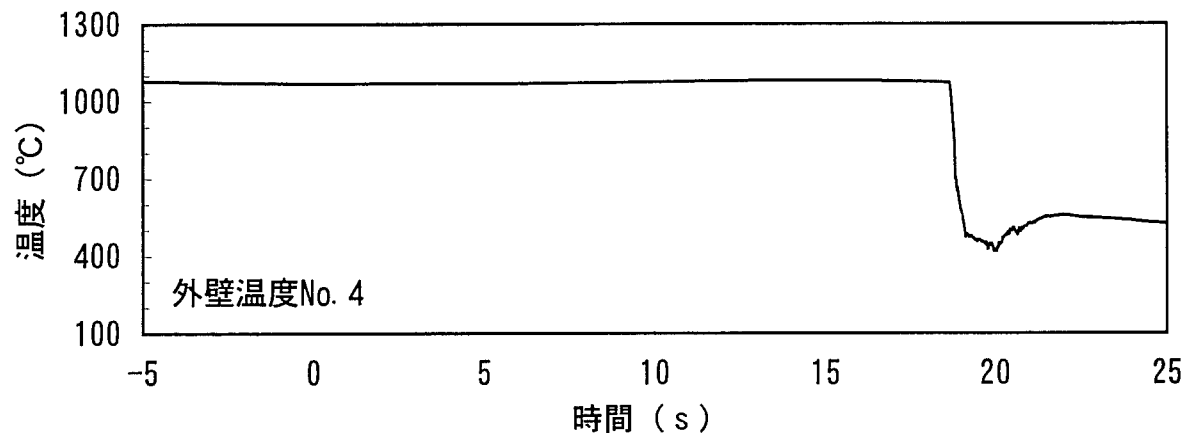
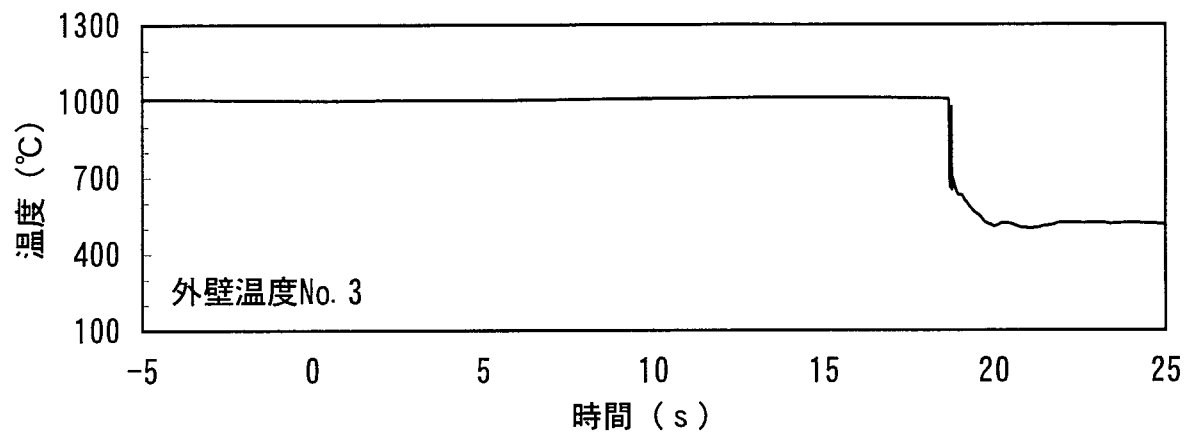
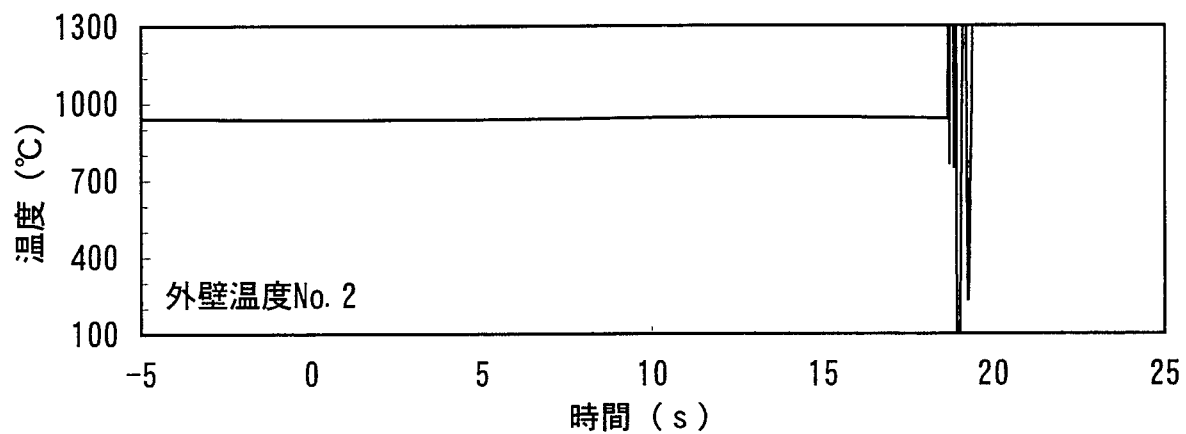
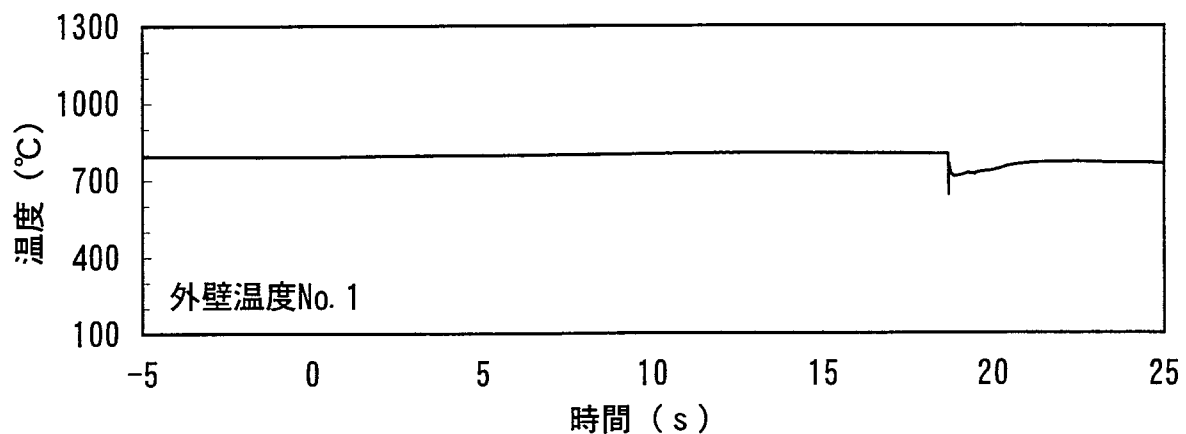


図5-2(b) Run2の試験データ(その1)

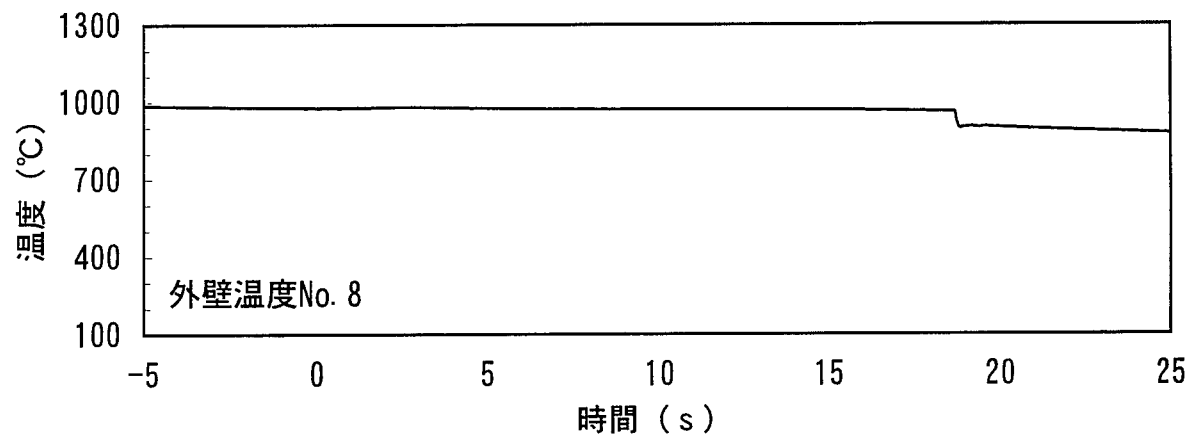
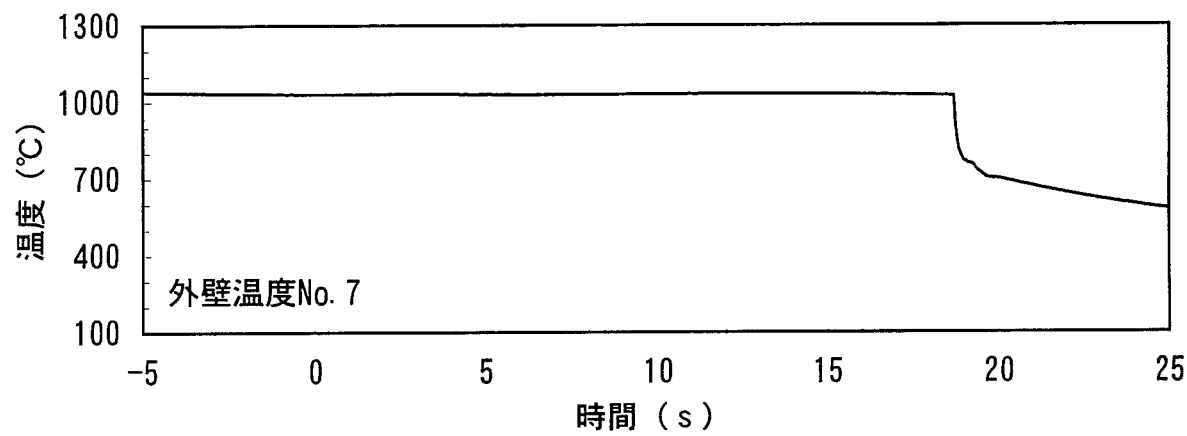
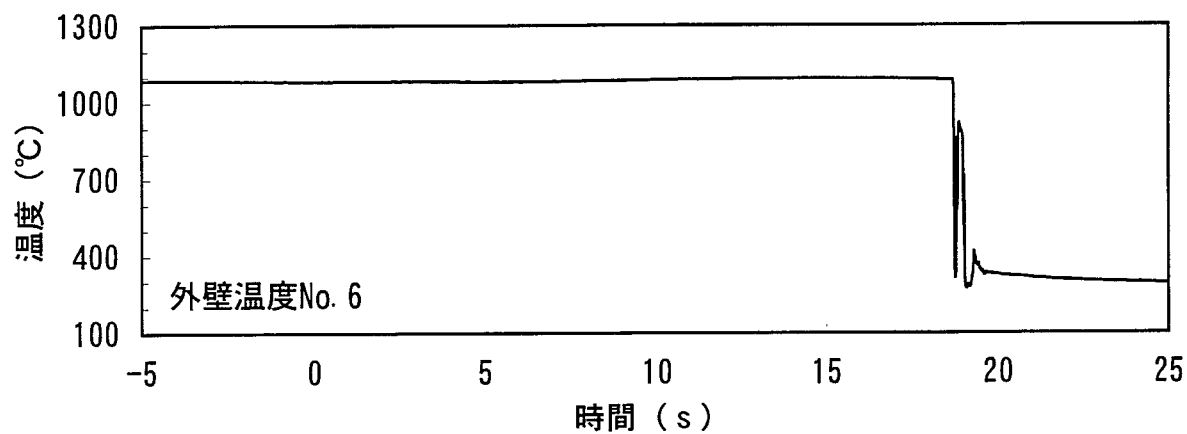
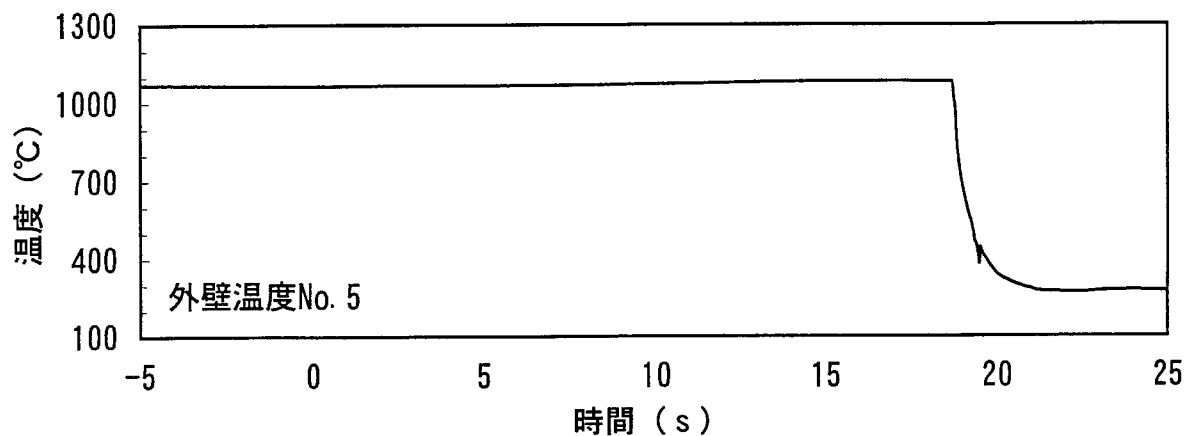


図5-2(b) Run2の試験データ(その2)



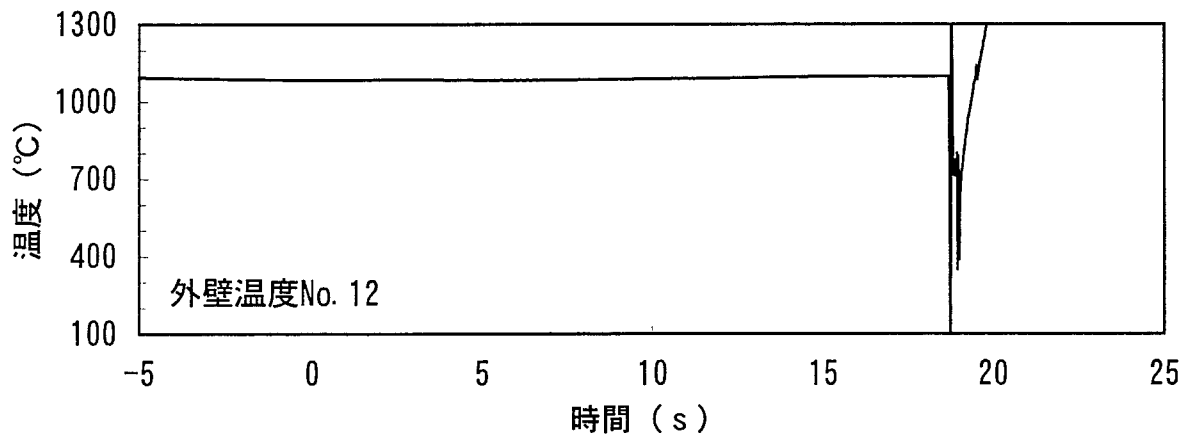
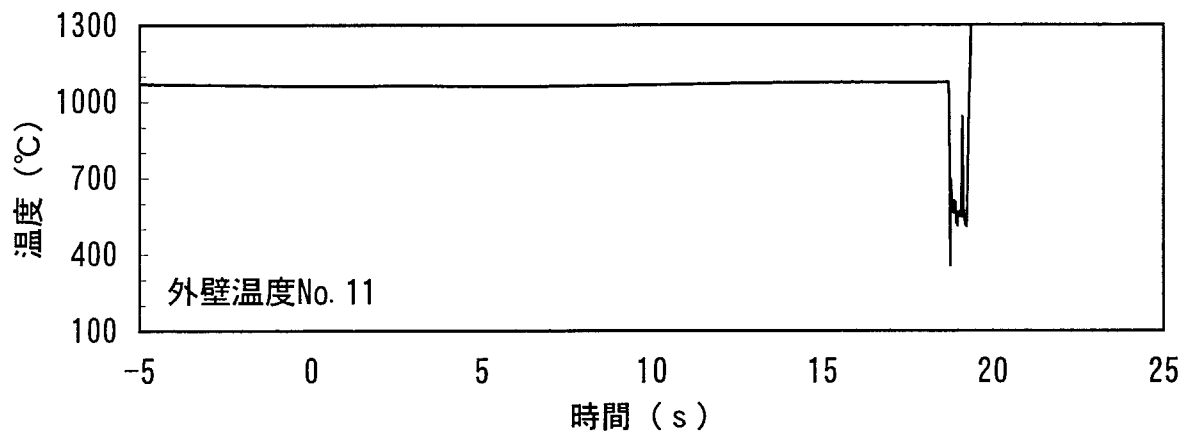
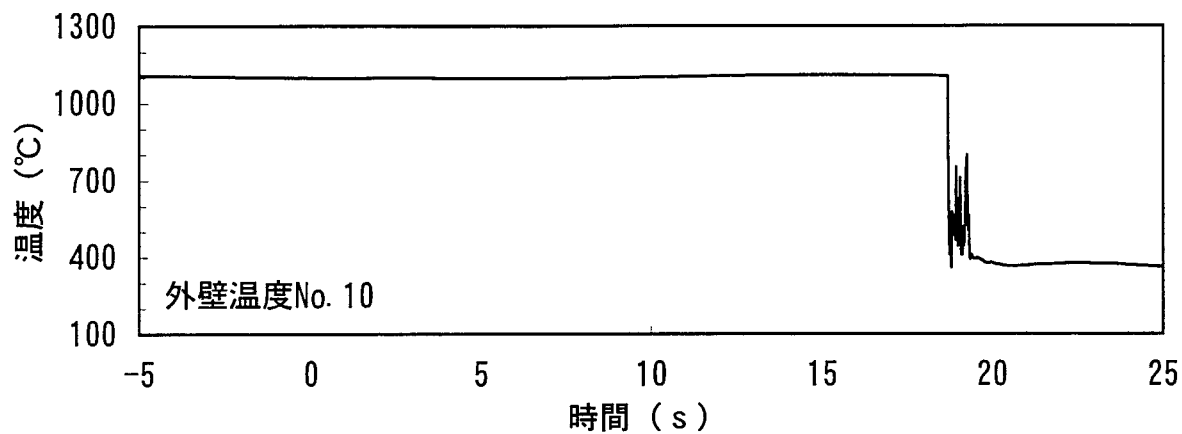
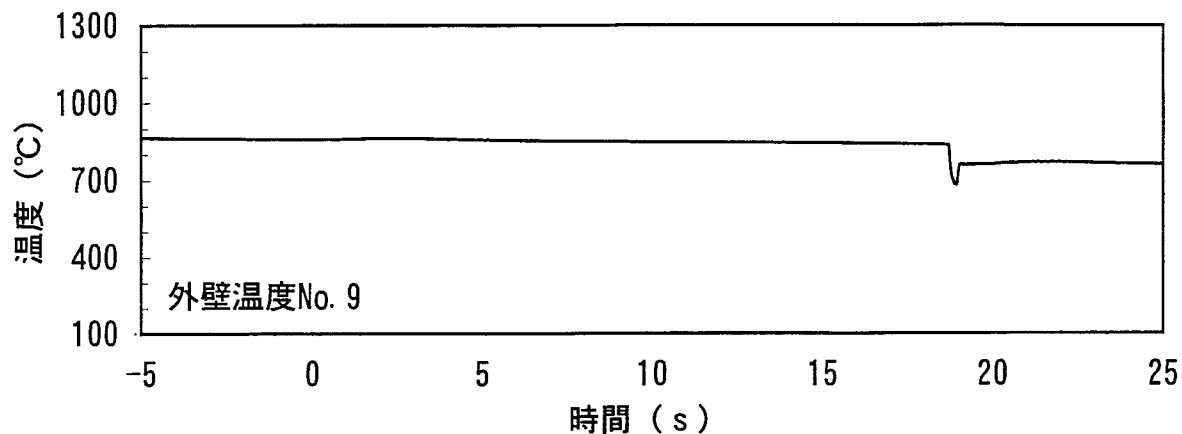


図5-2(b) Run2の試験データ(その3)

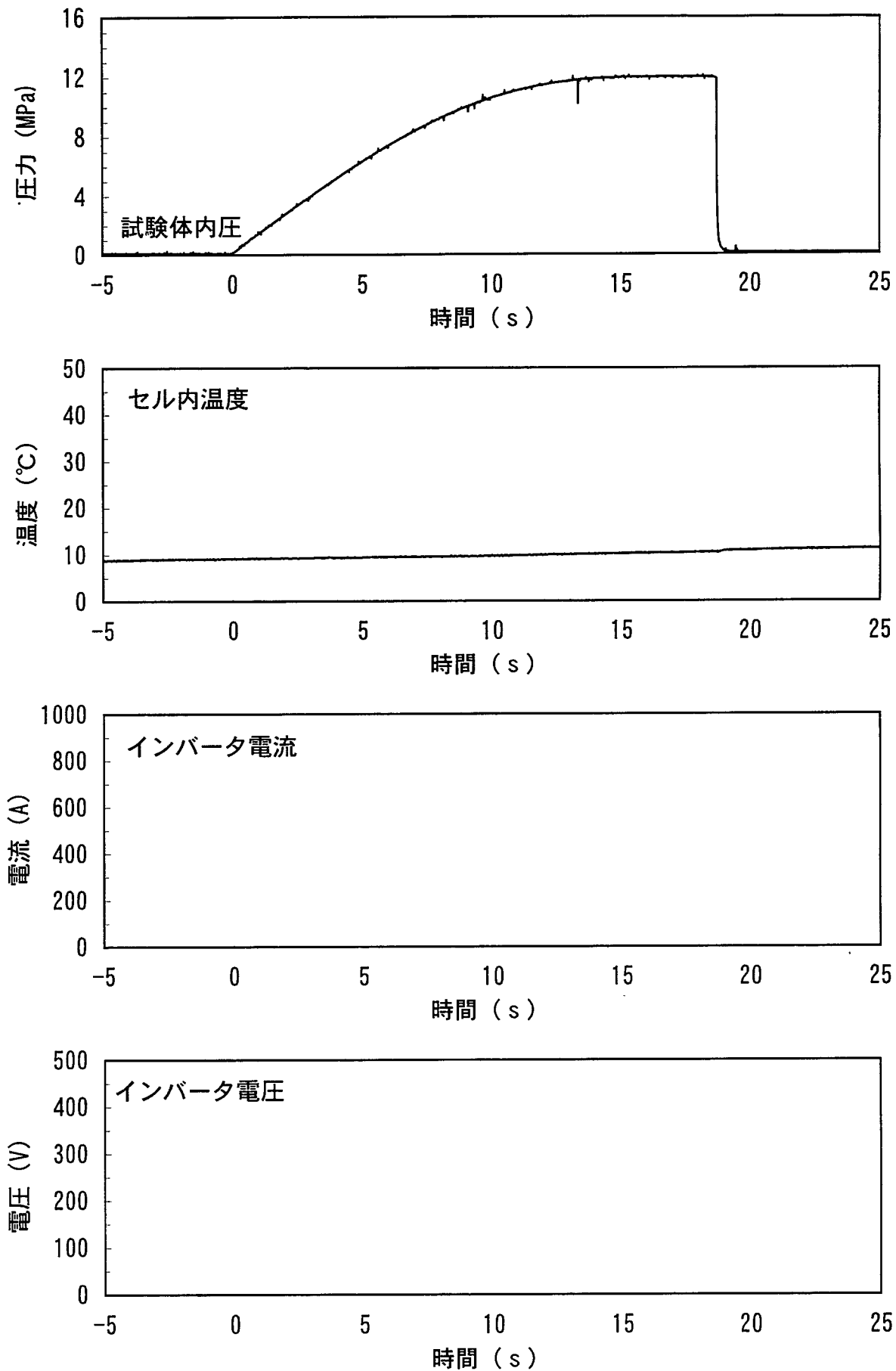


図5-2(b) Run2の試験データ(その4)

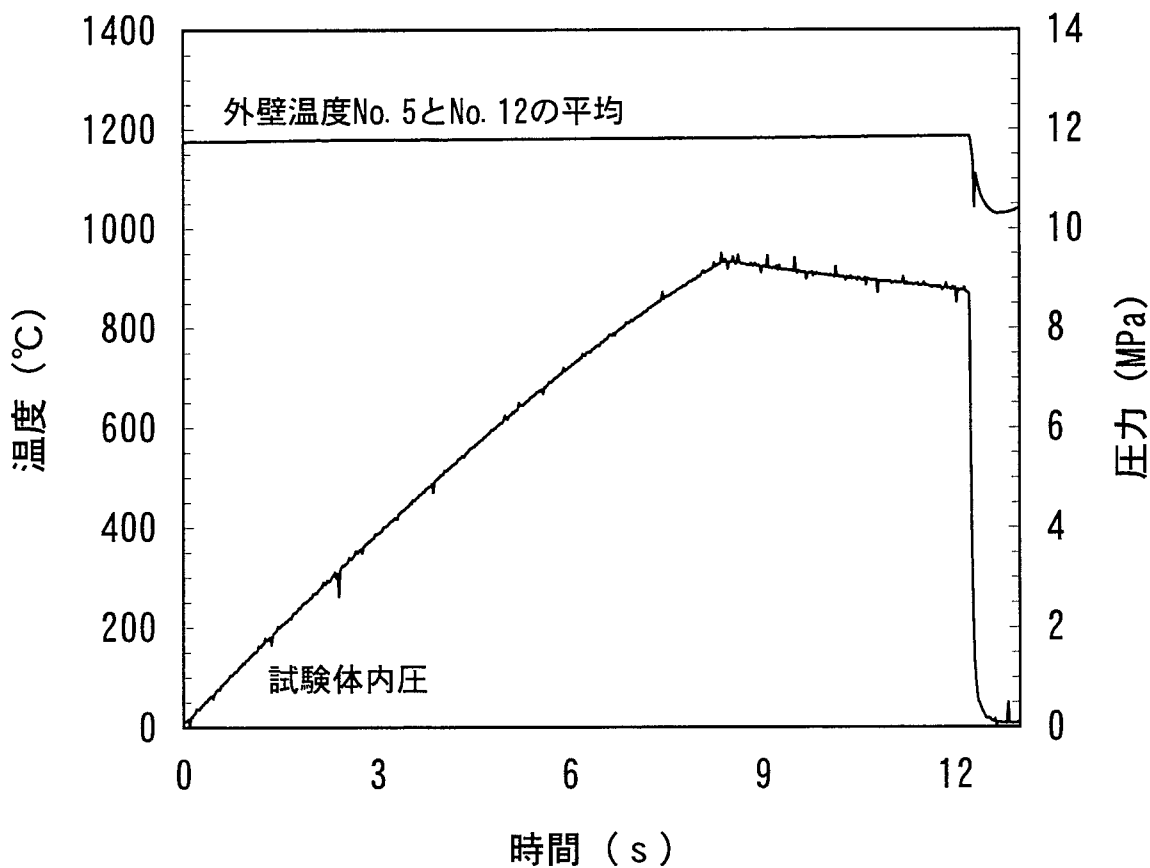
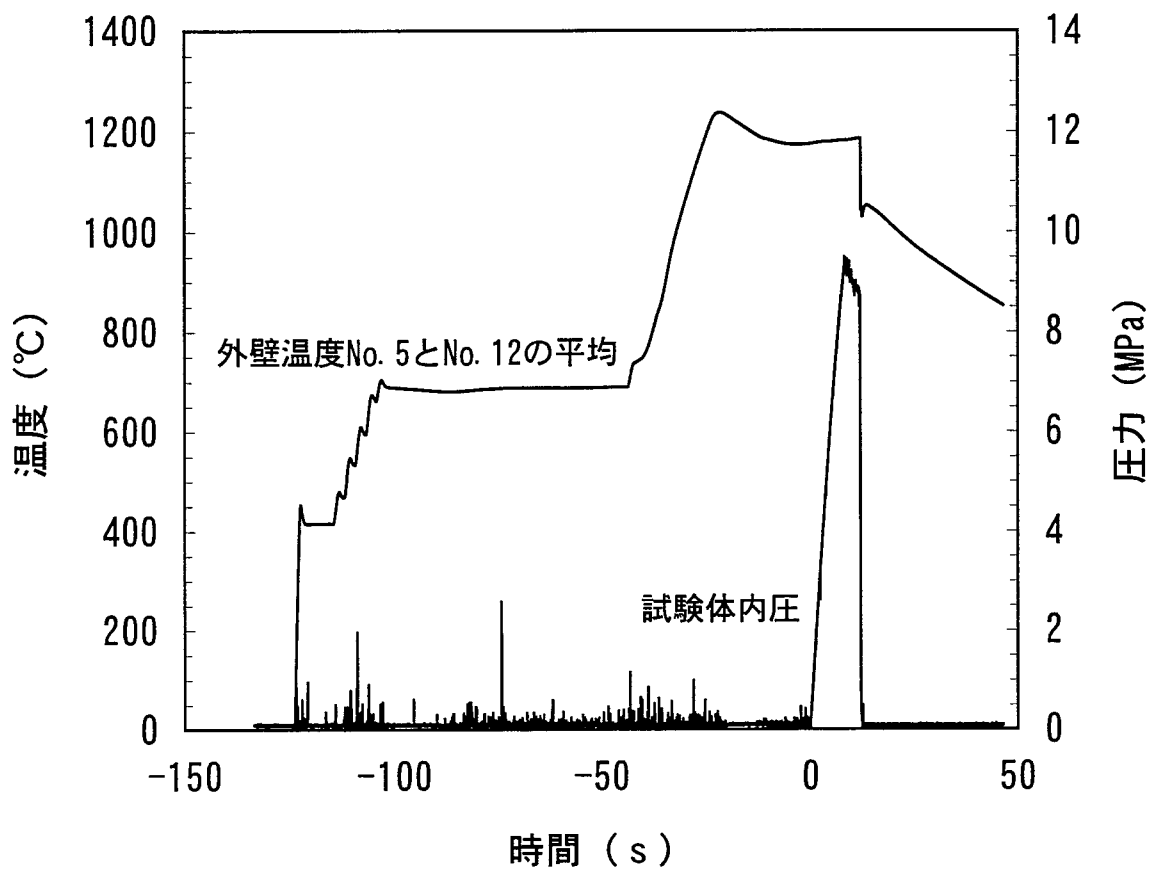


図5-3(a) Run3の試験結果(上:全体、下:試験時)

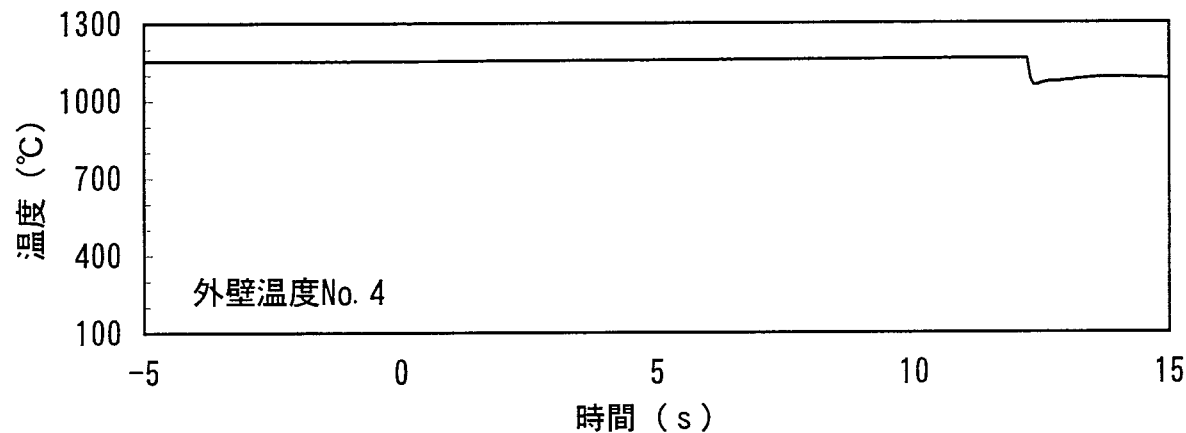
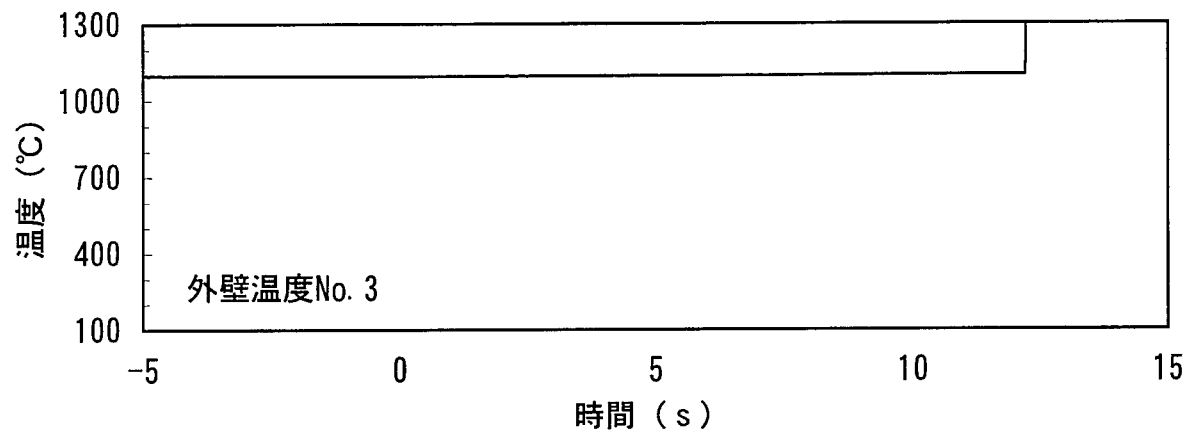
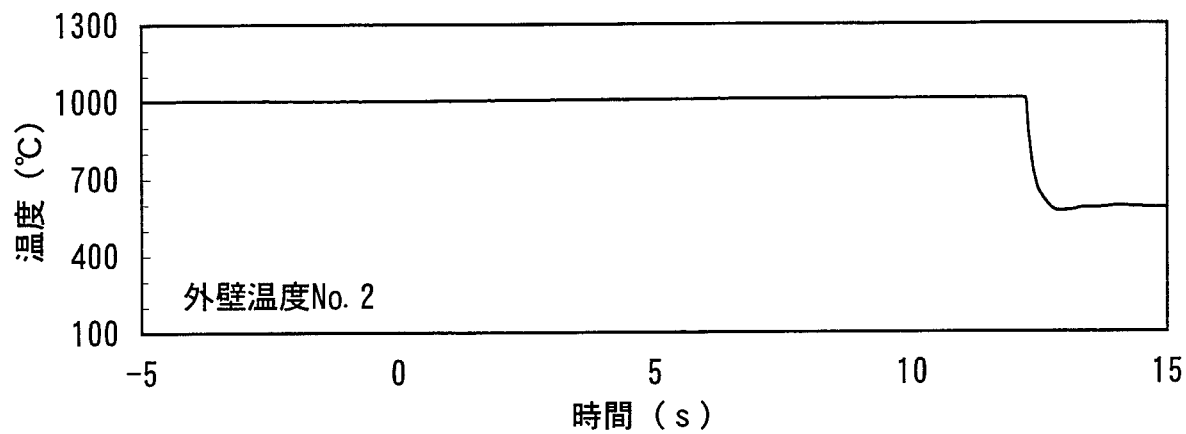
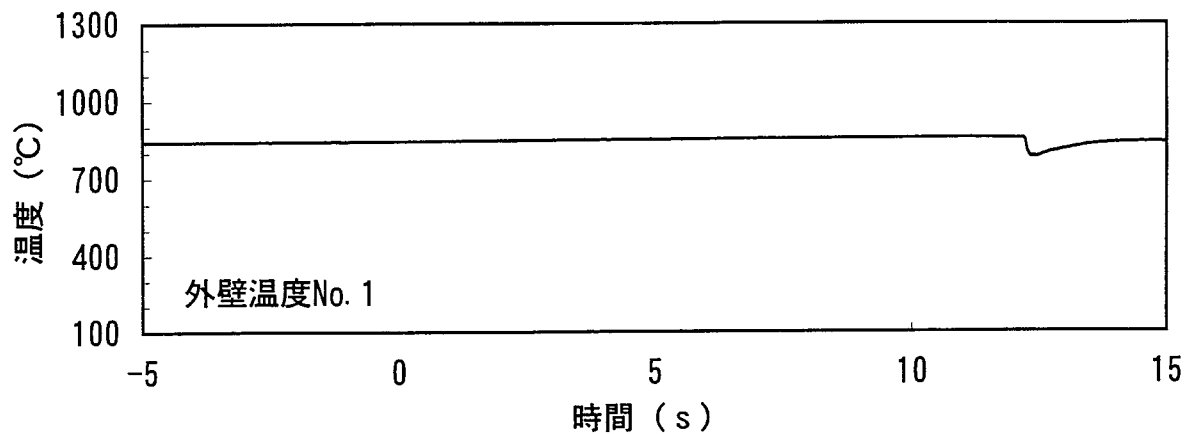


図5-3(b) Run3の試験データ(その1)

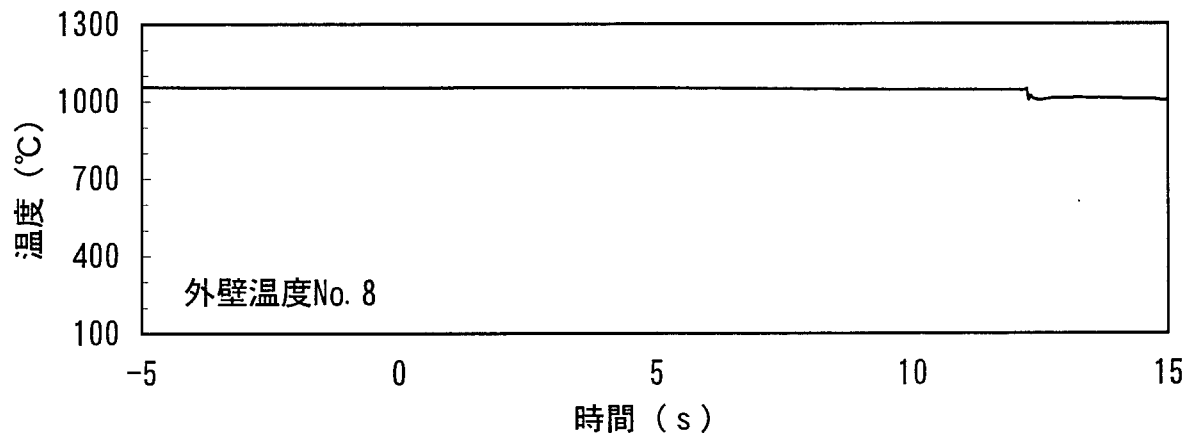
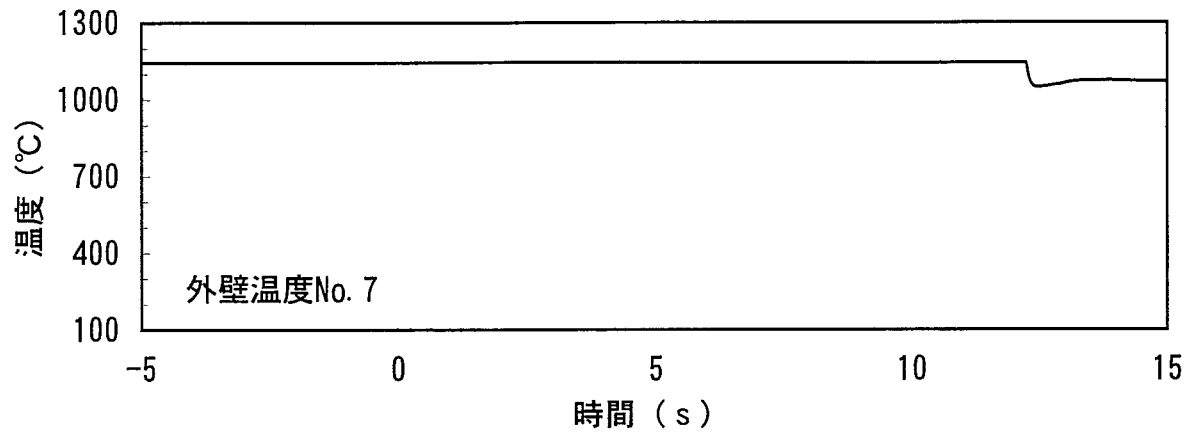
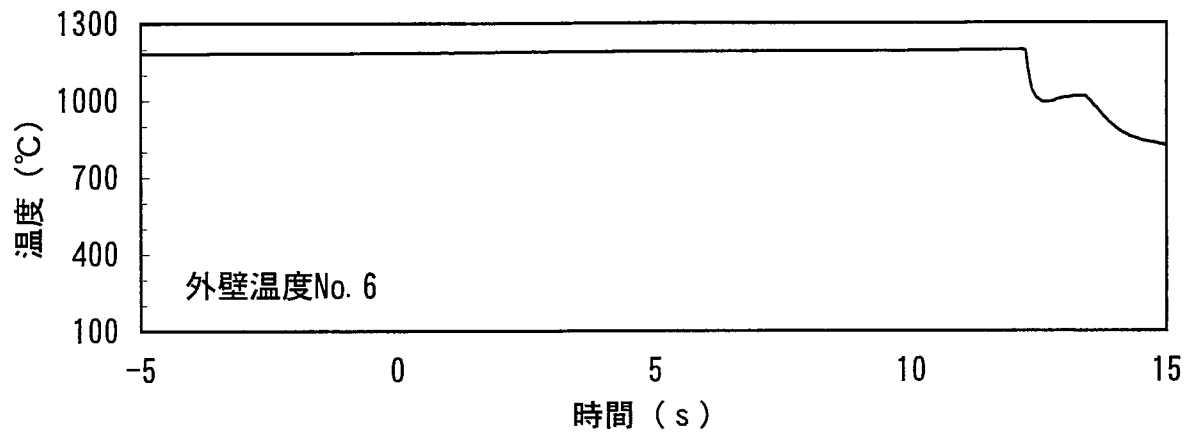
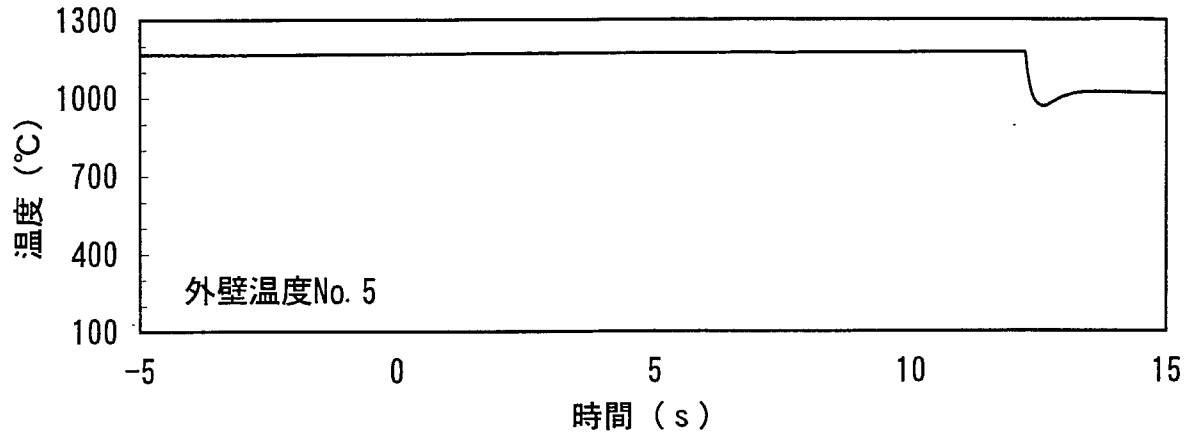


図5-3(b) Run3の試験データ(その2)

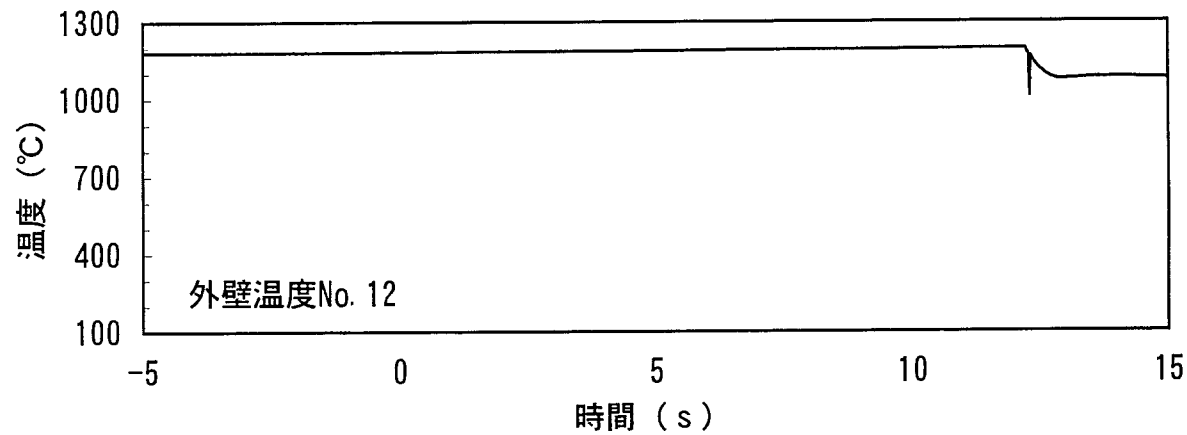
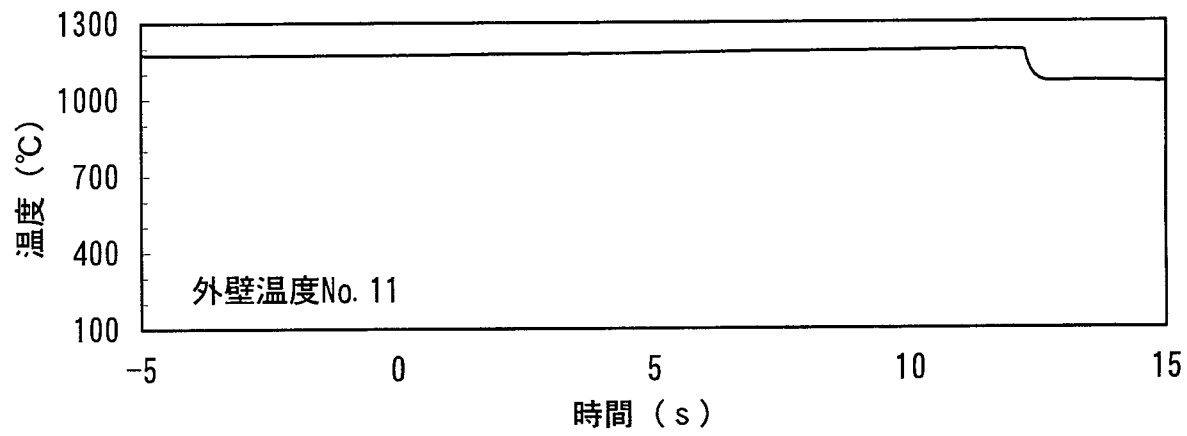
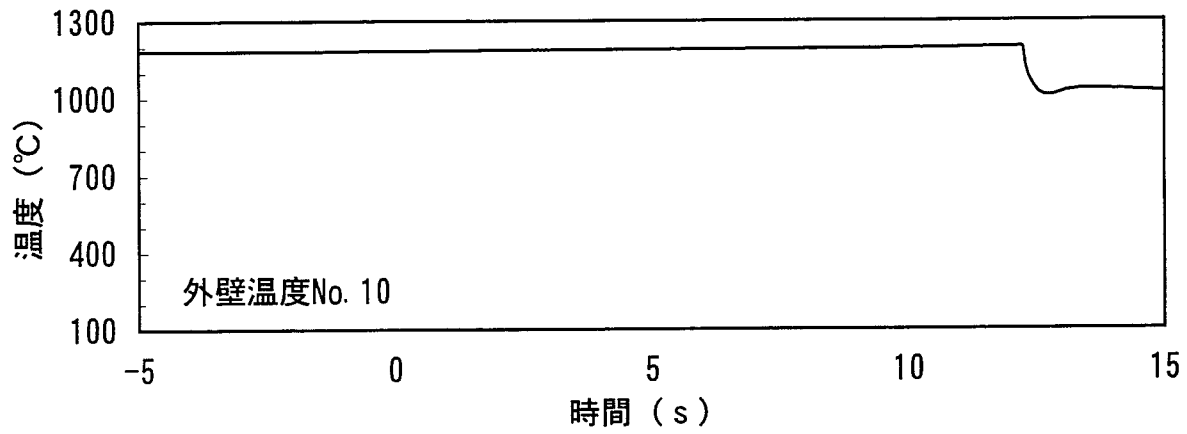
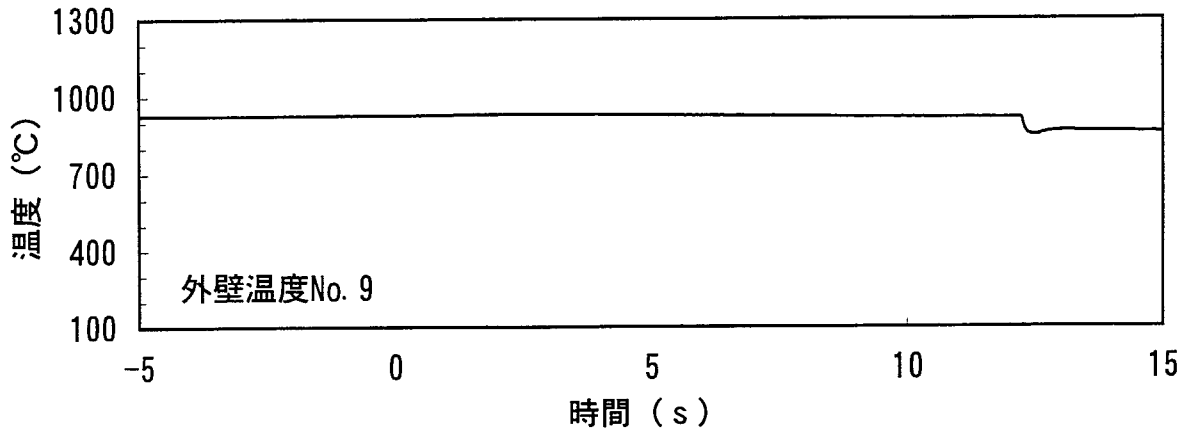


図5-3(b) Run3の試験データ(その3)

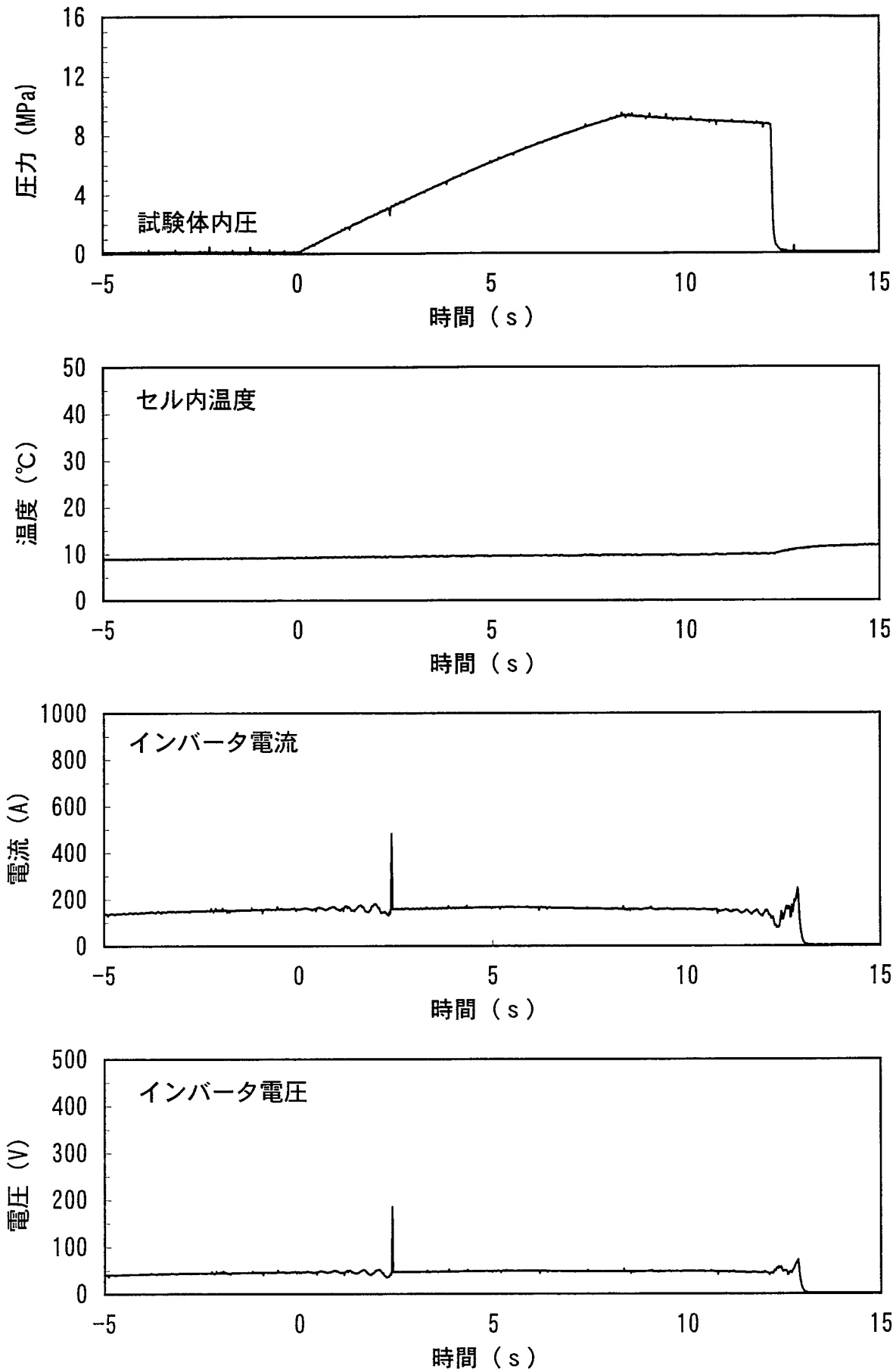


図5-3(b) Run3の試験データ(その4)

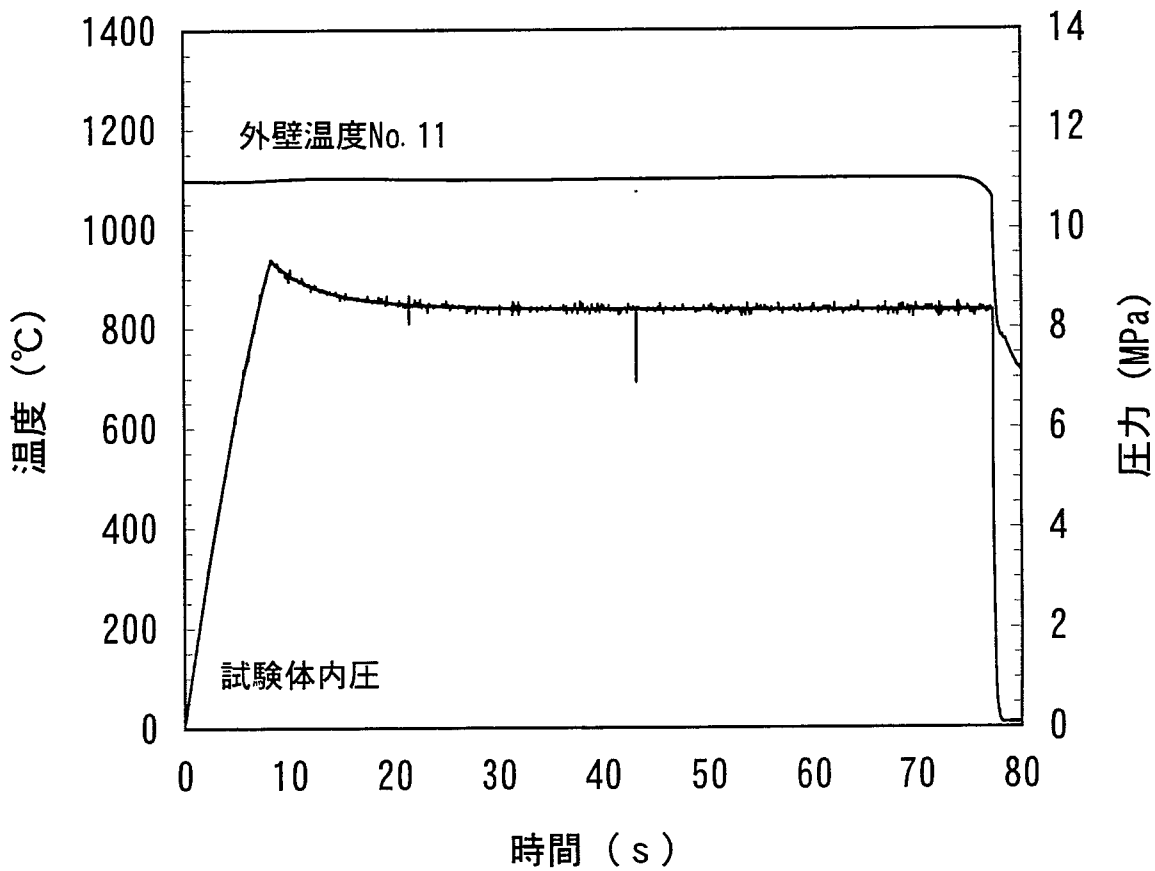
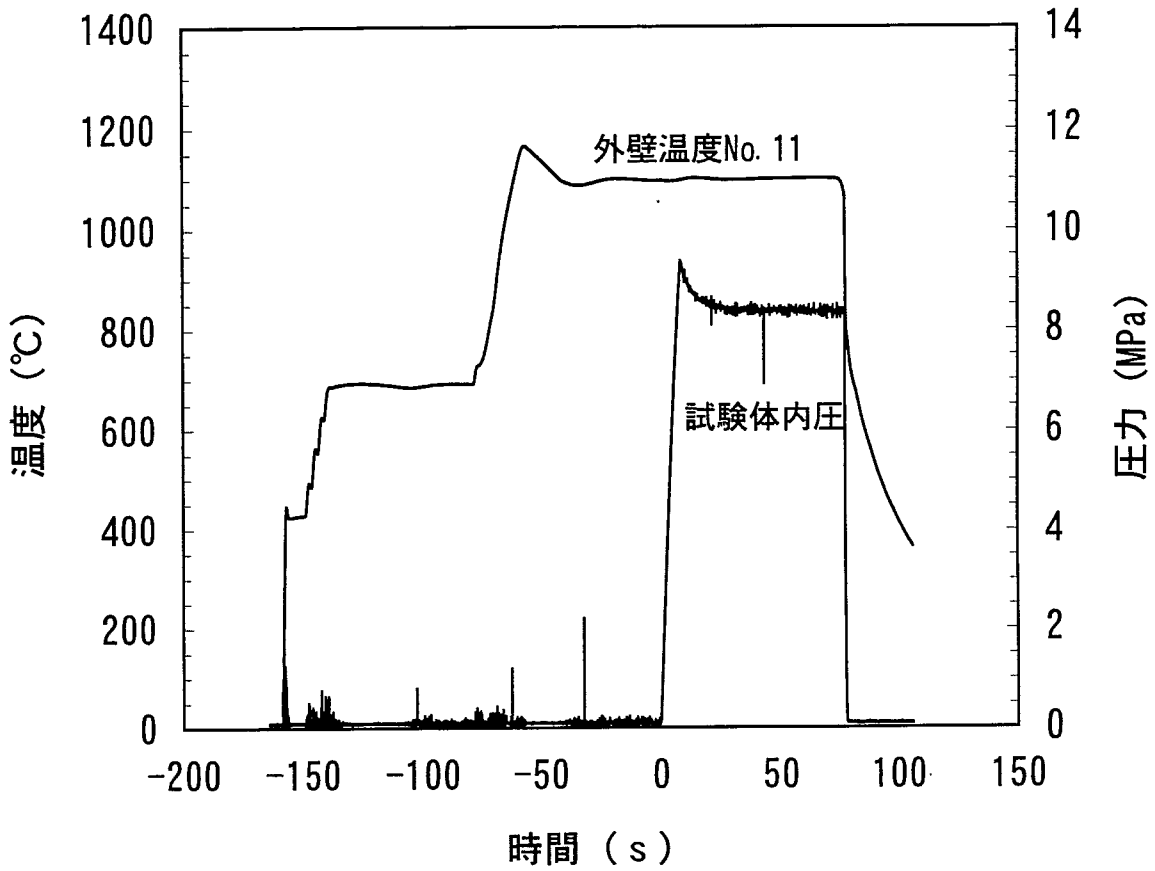


図5-4(a) Run4の試験結果(上:全体、下:試験時)



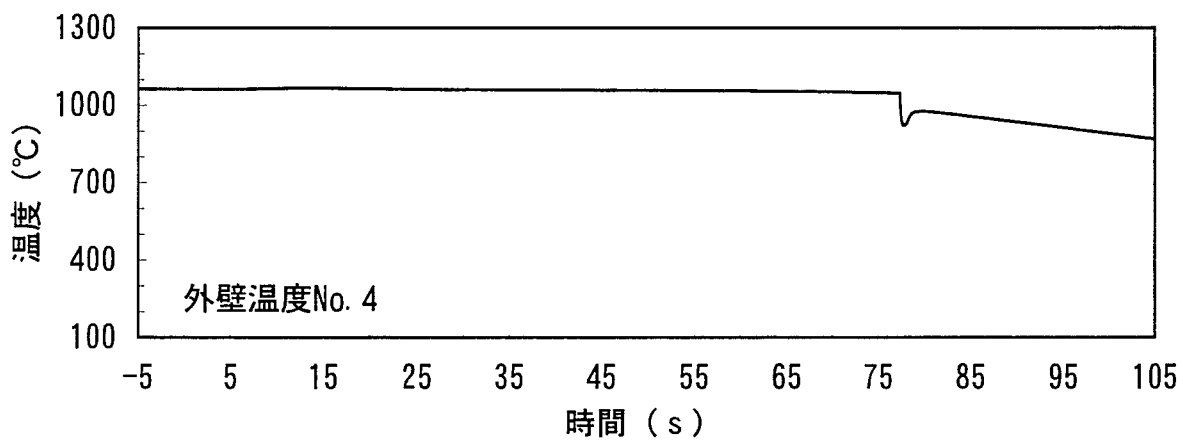
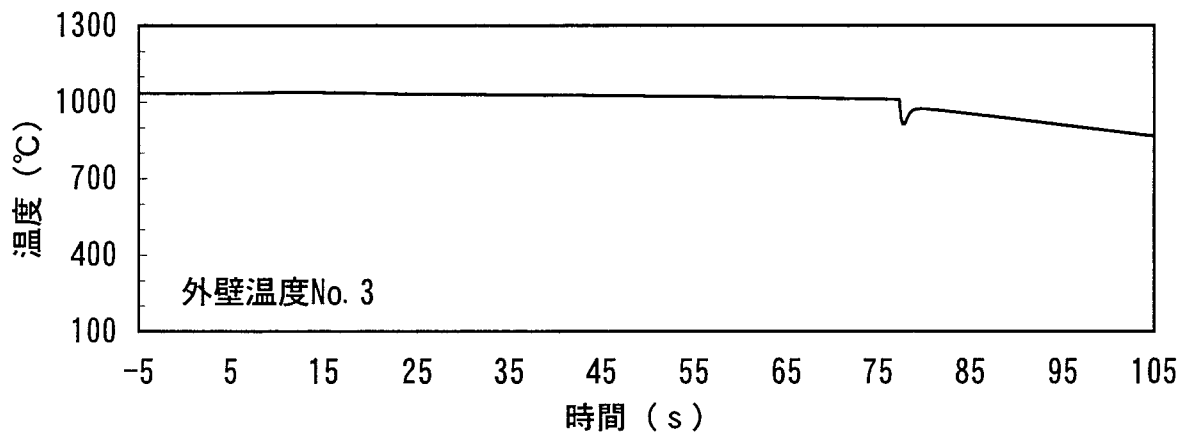
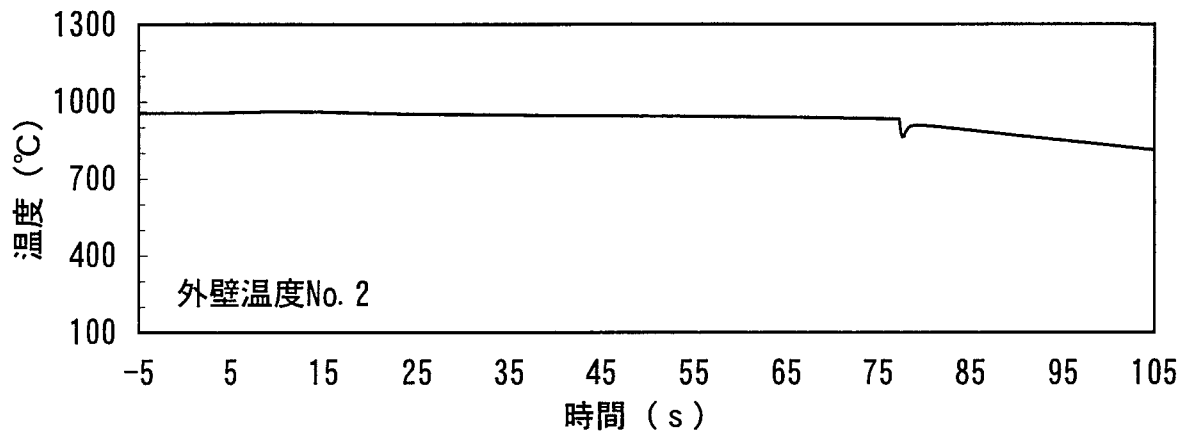
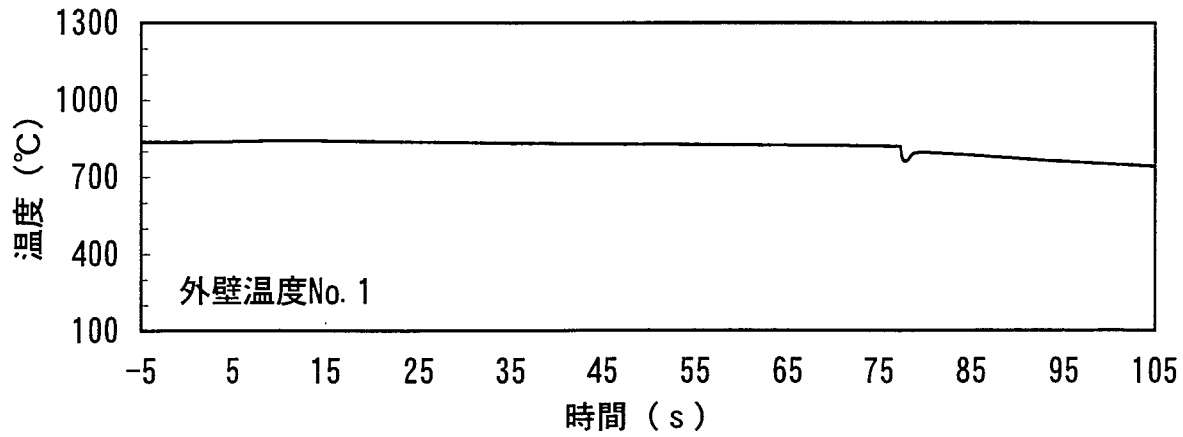


図5-4(b) Run4の試験データ(その1)

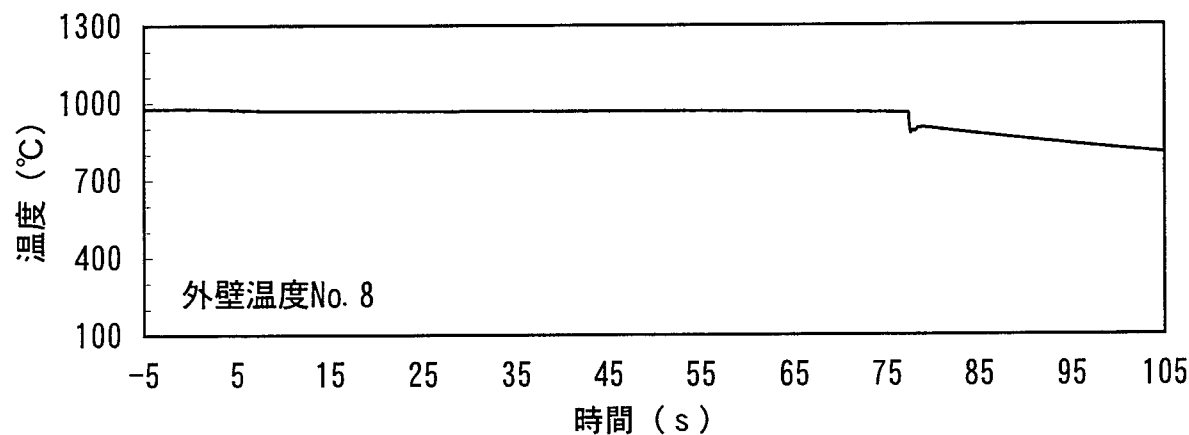
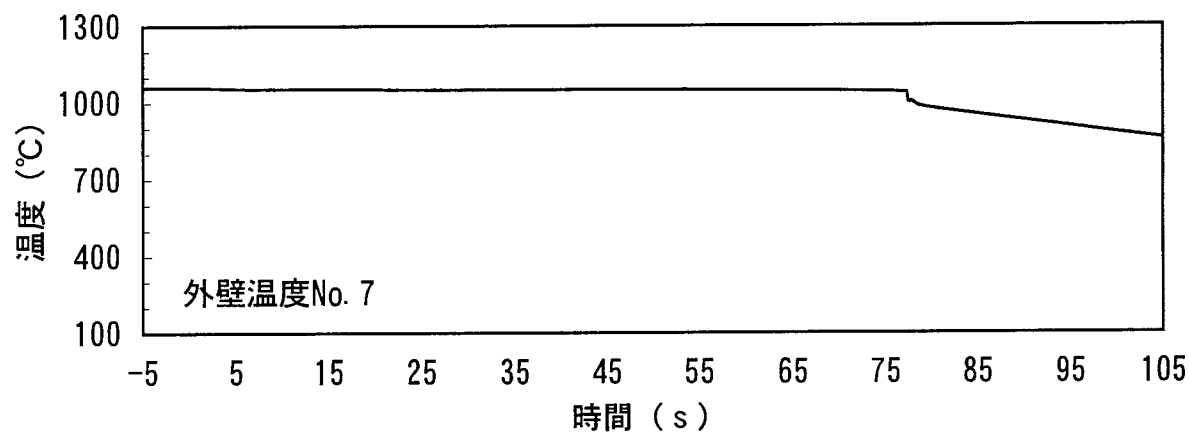
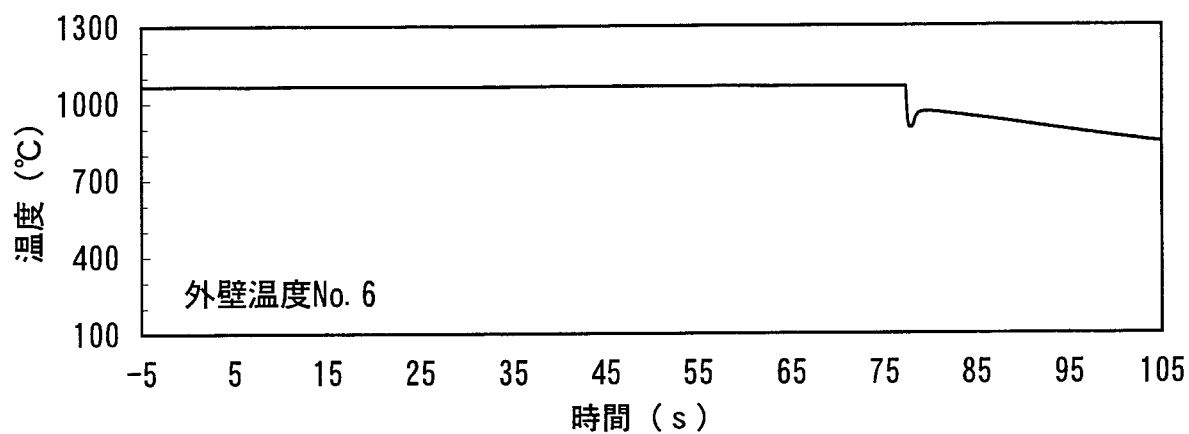
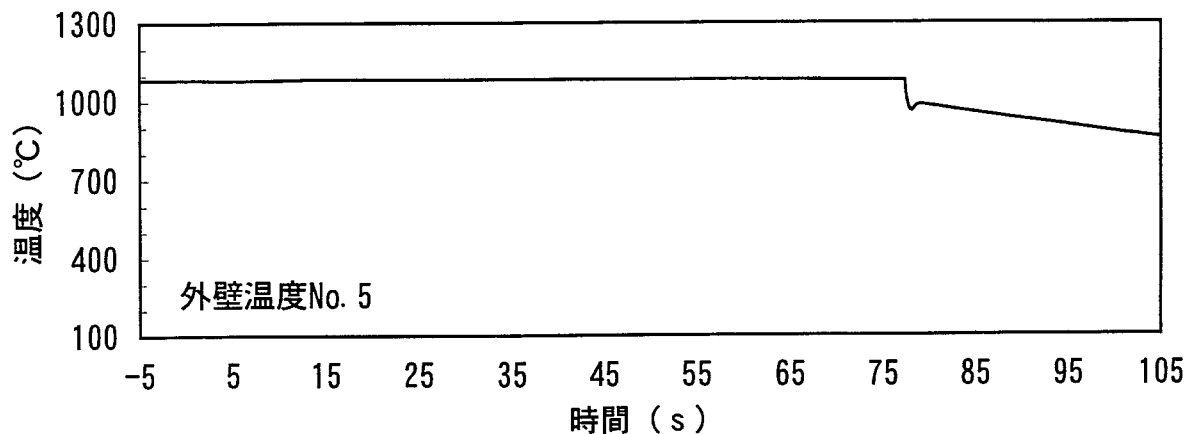


図5-4(b) Run4の試験データ(その2)

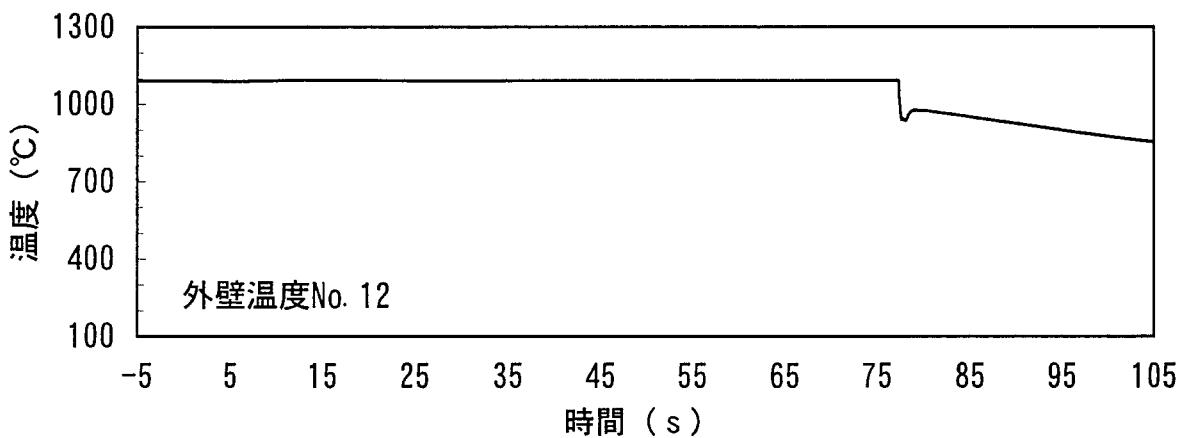
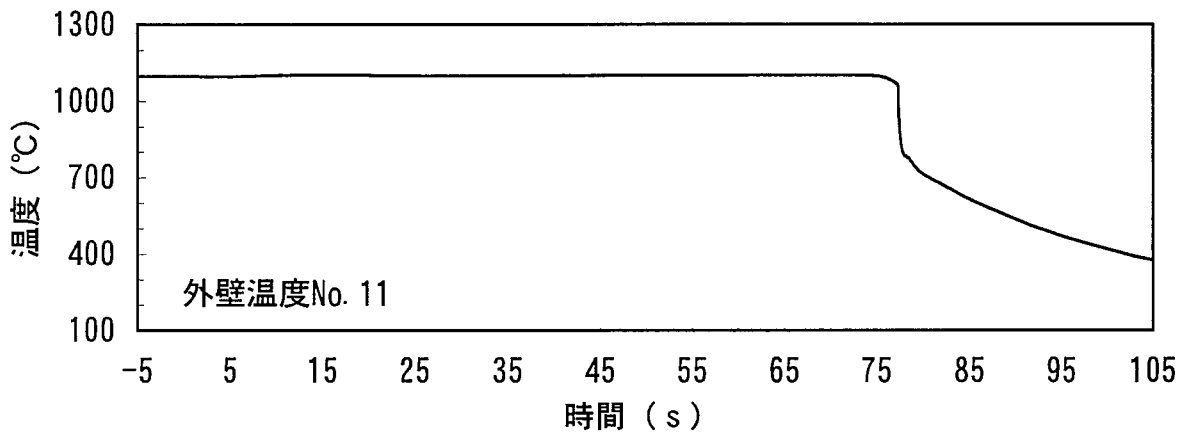
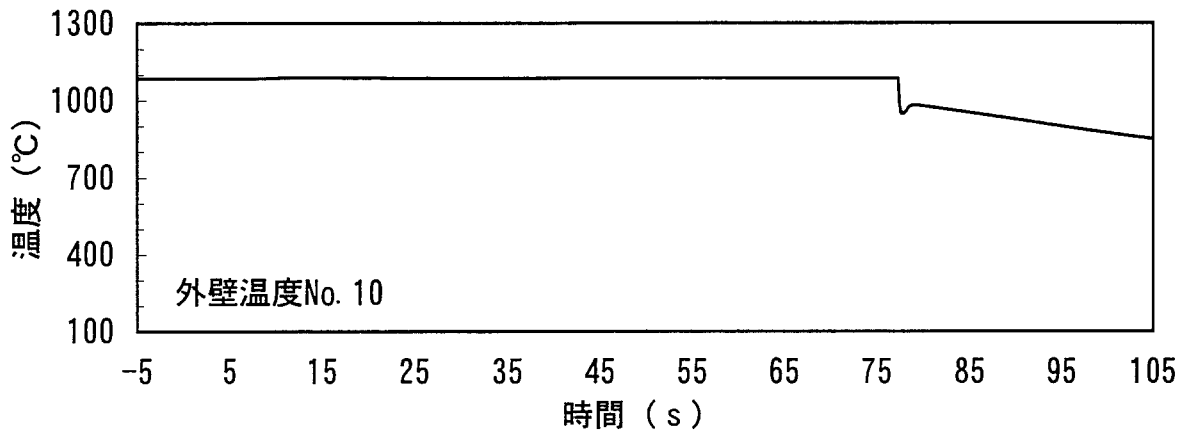
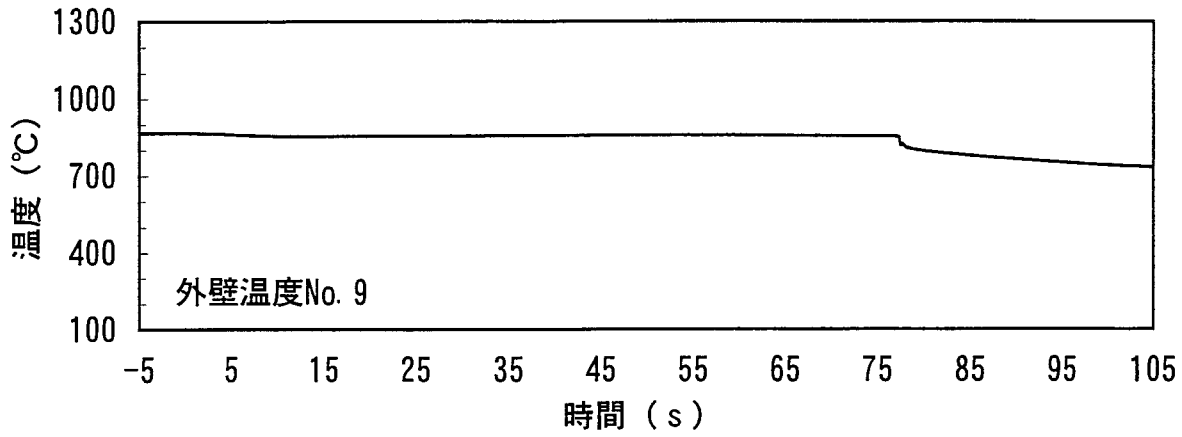


図5-4(b) Run4の試験データ(その3)

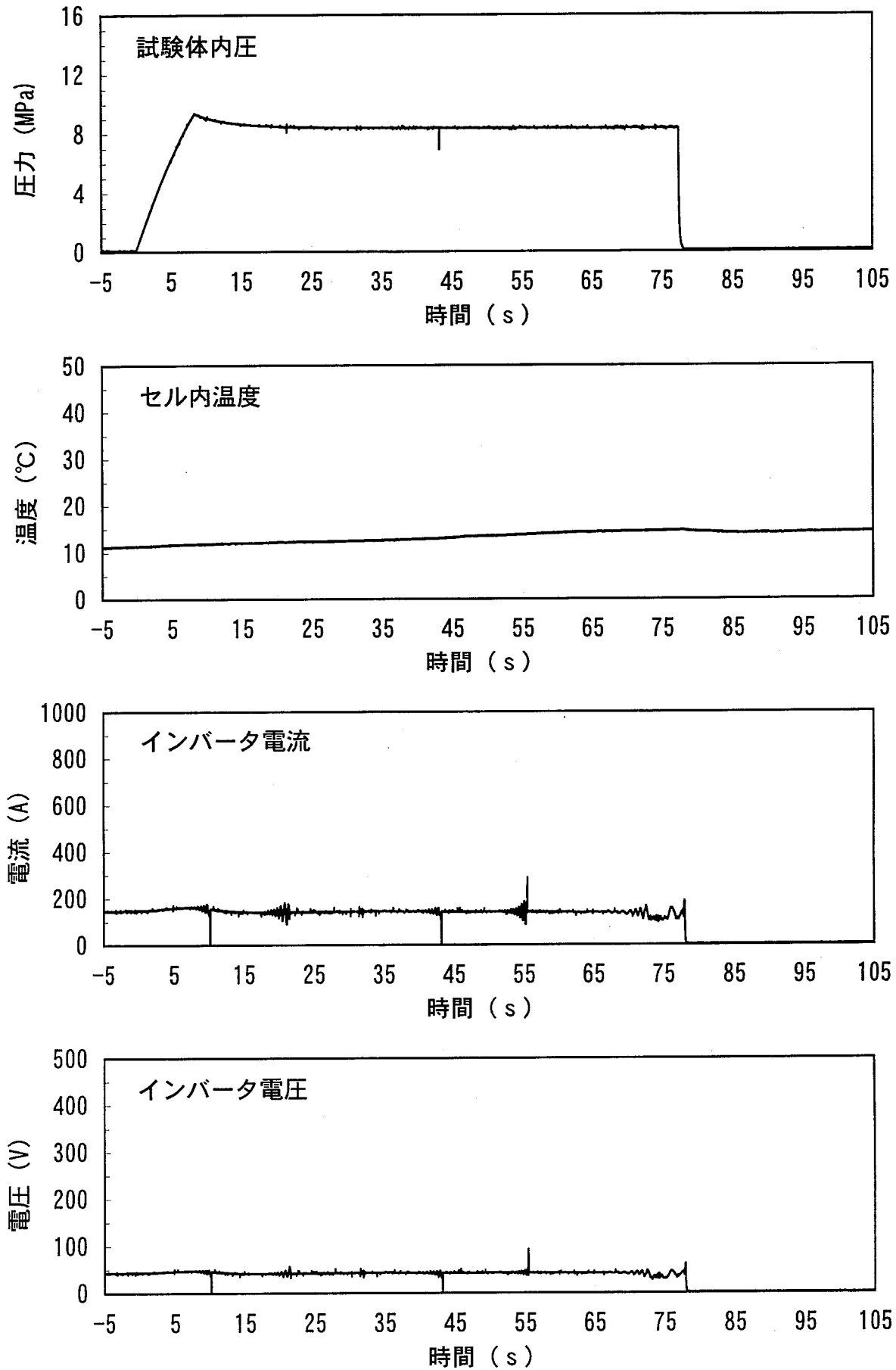


図5-4(b) Run4の試験データ(その4)

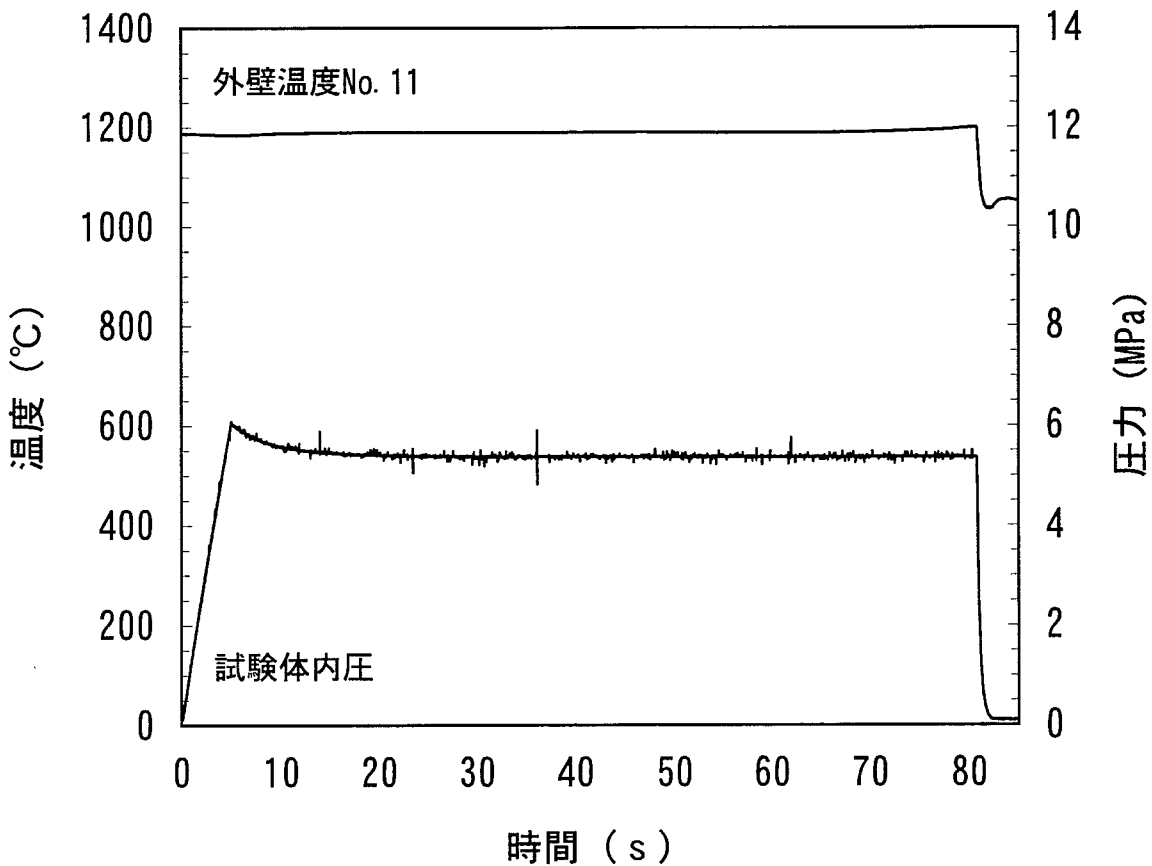
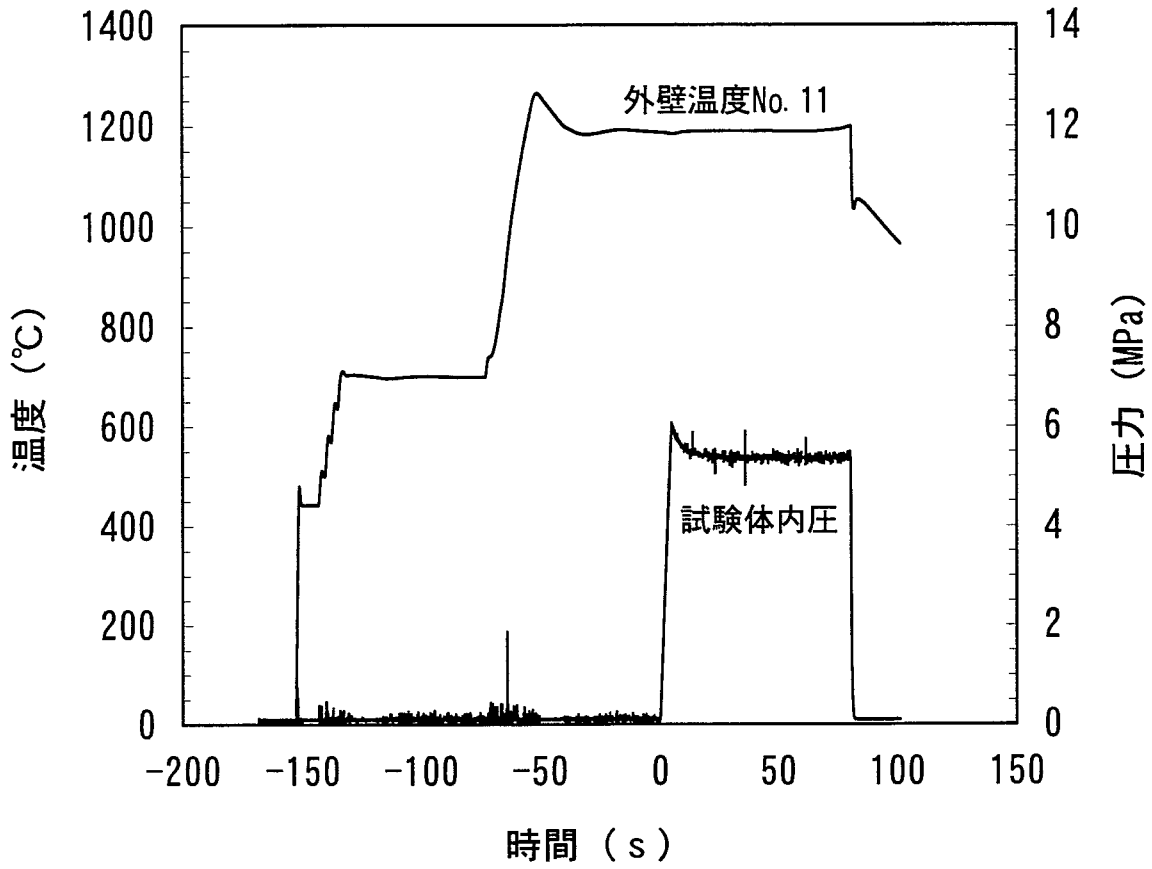


図5-5(a) Run5の試験結果(上:全体、下:試験時)

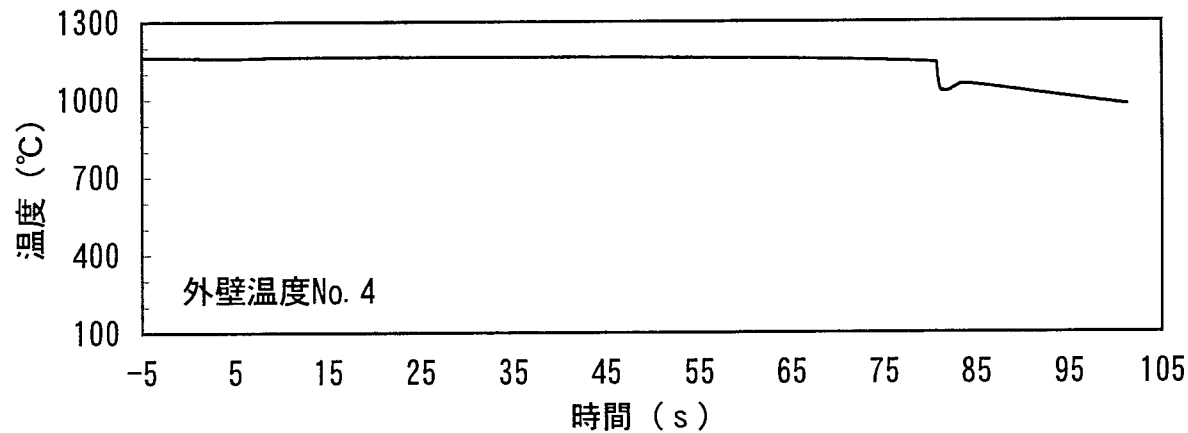
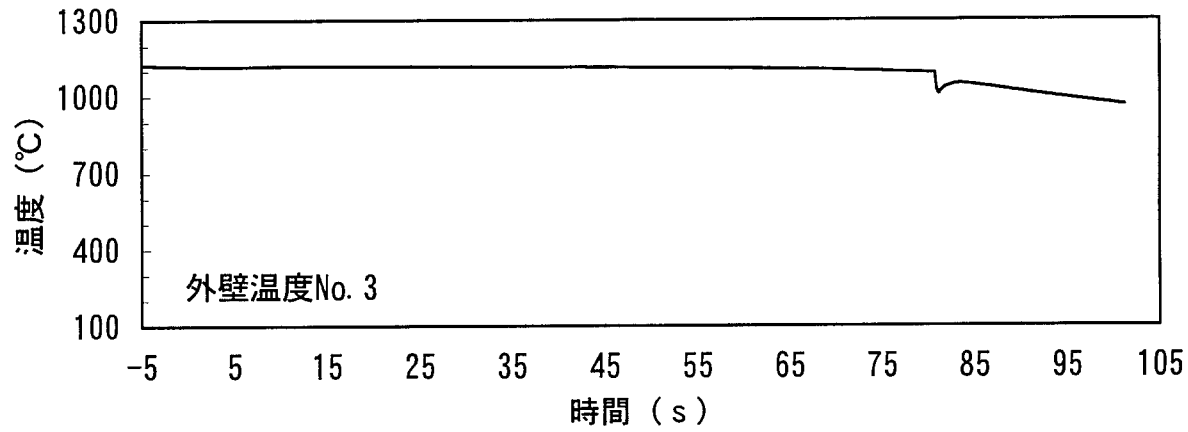
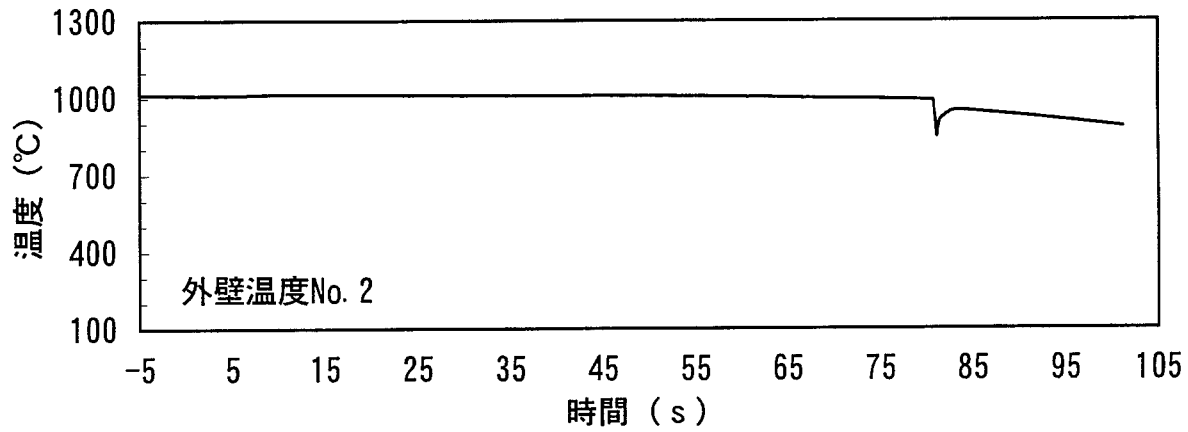
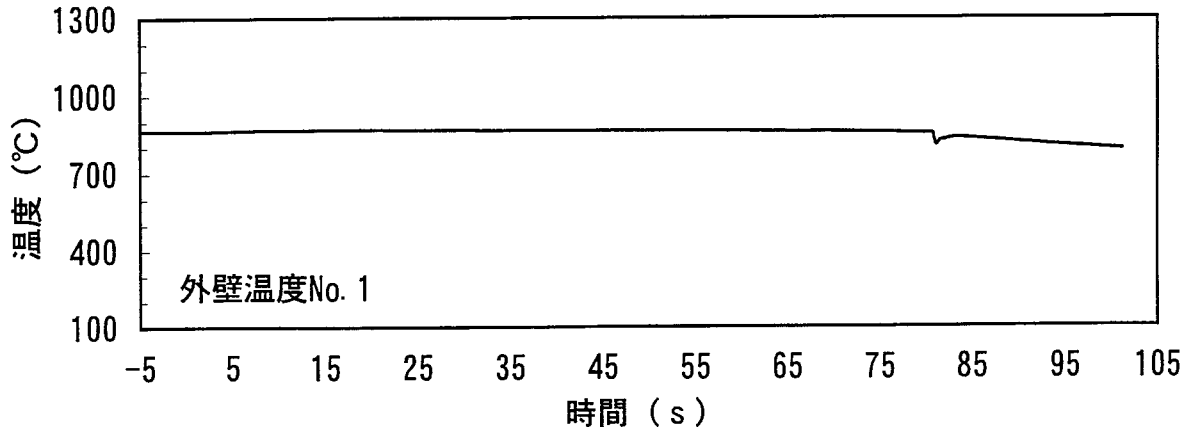


図5-5(b) Run5の試験データ(その1)

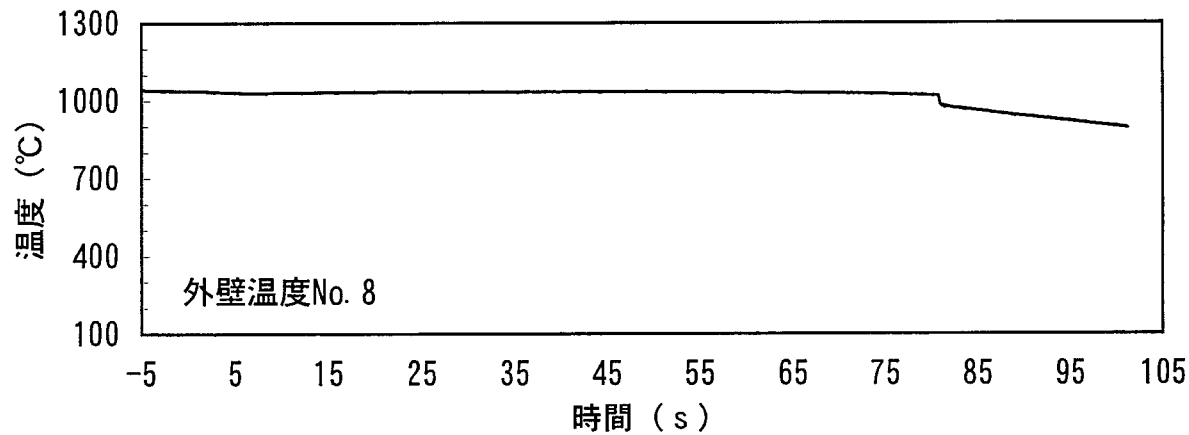
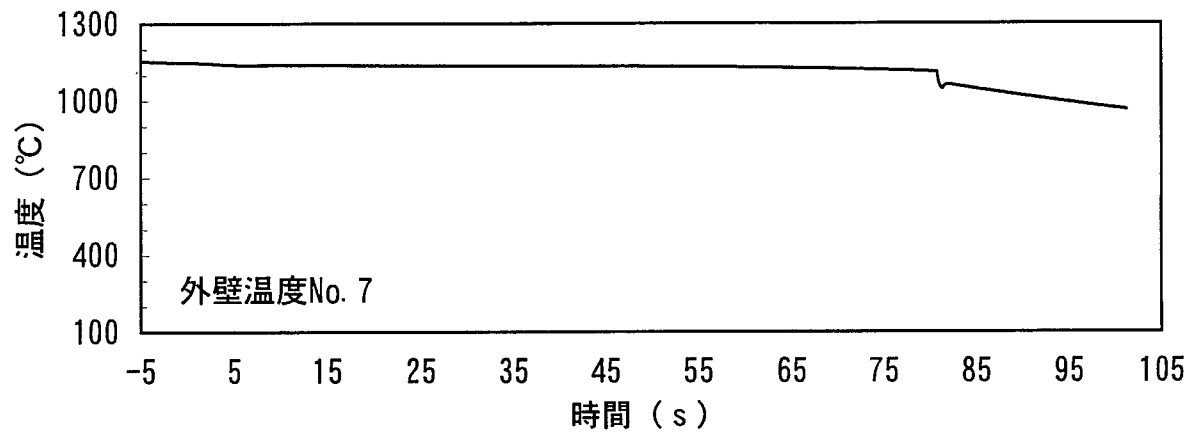
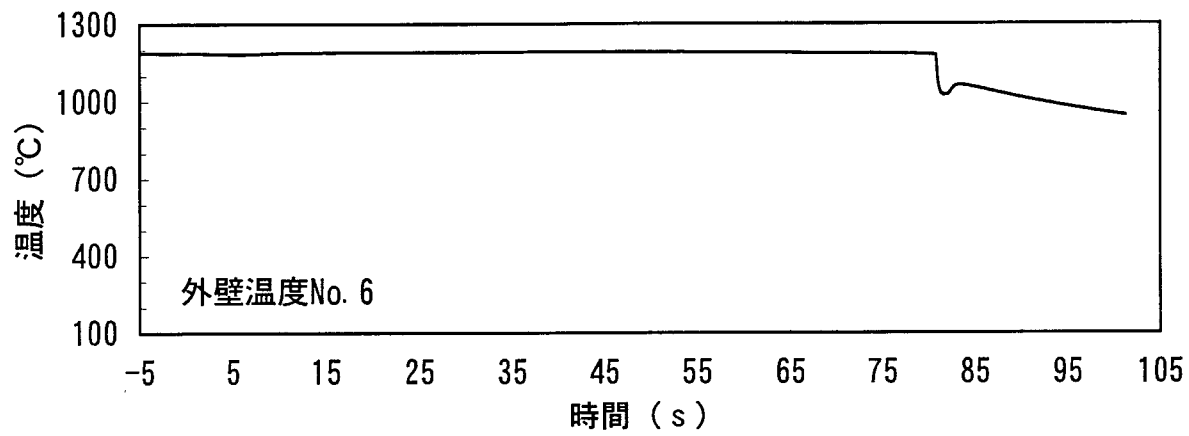
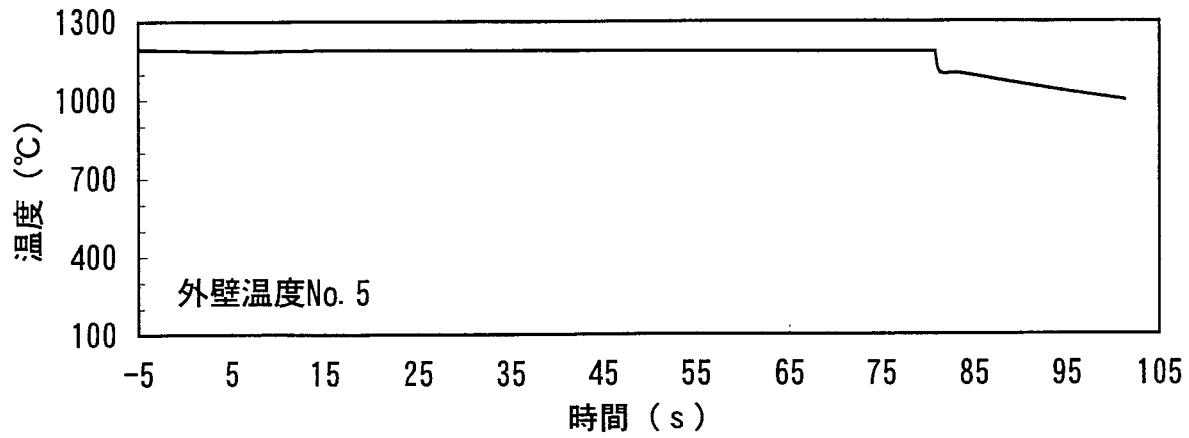


図5-5(b) Run5の試験データ(その2)

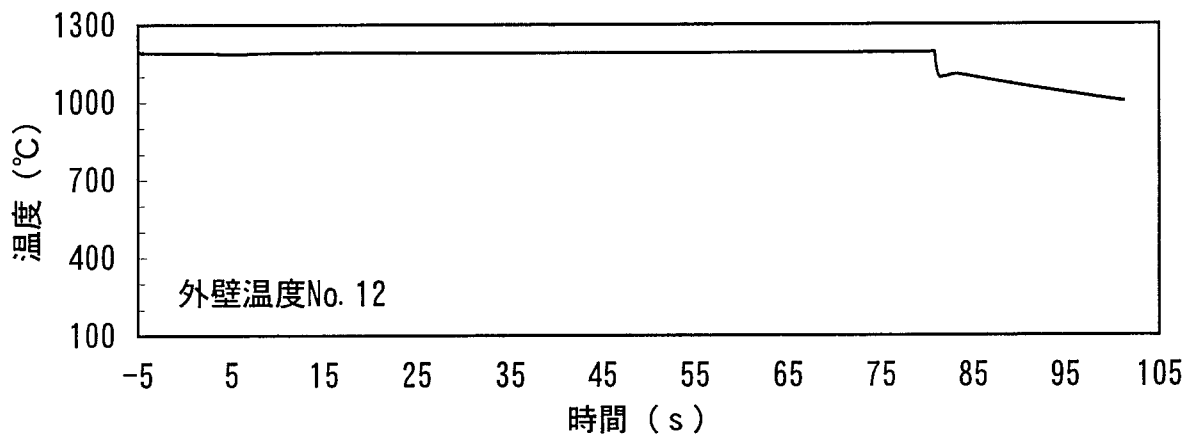
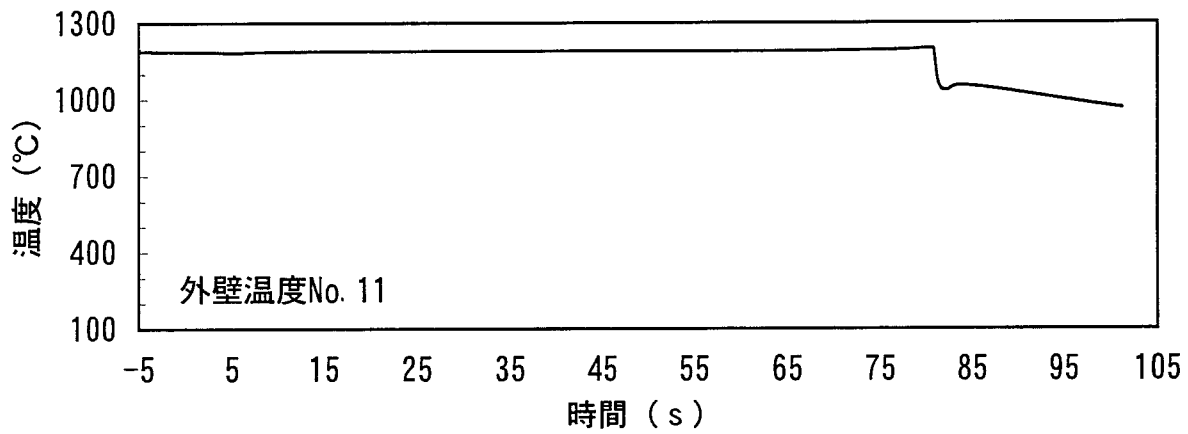
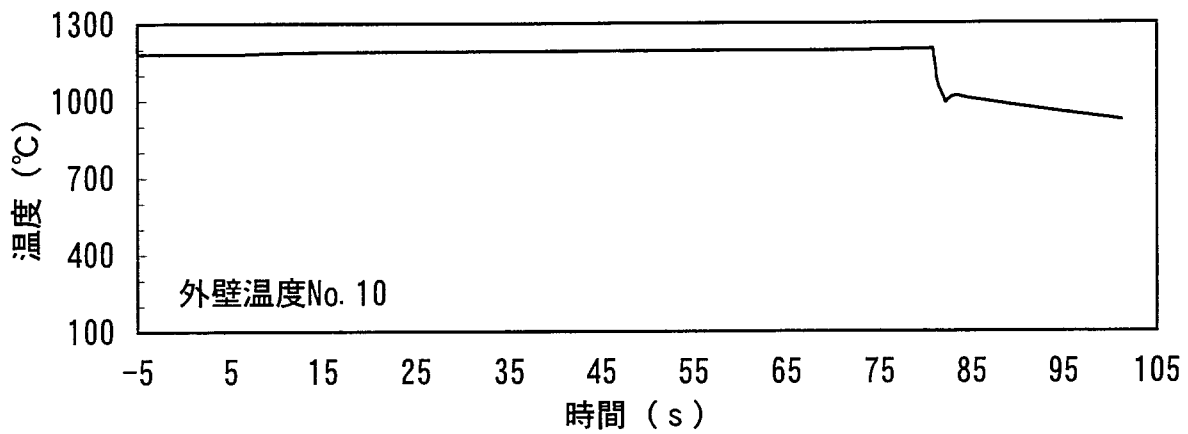
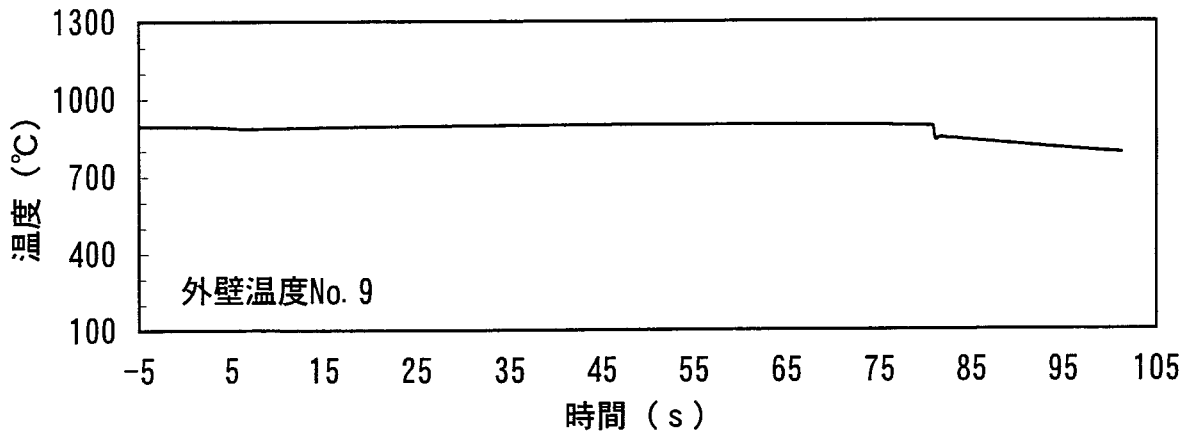


図5-5(b) Run1の試験データ(その3)



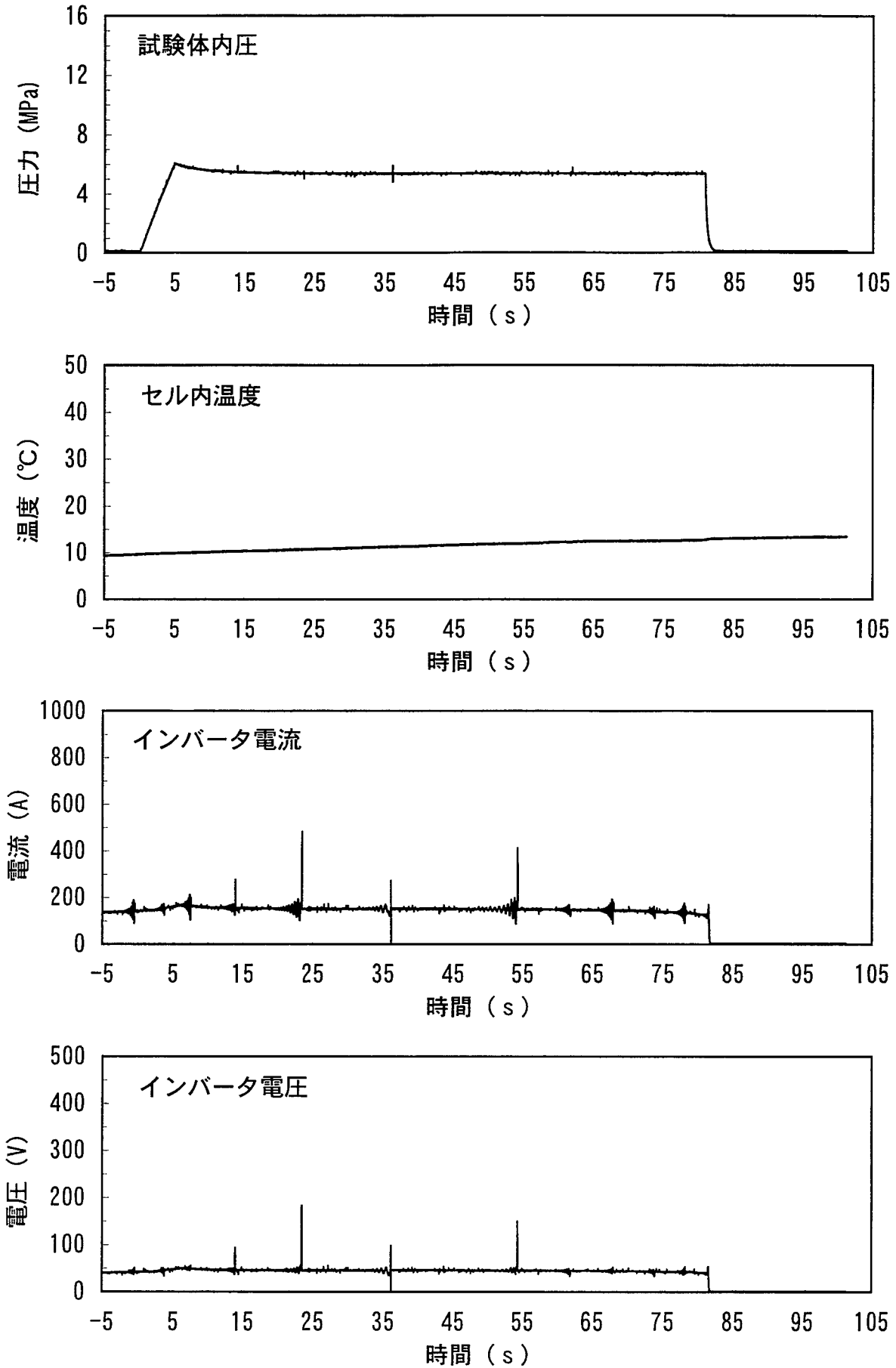


図5-5(b) Run5の試験データ(その4)

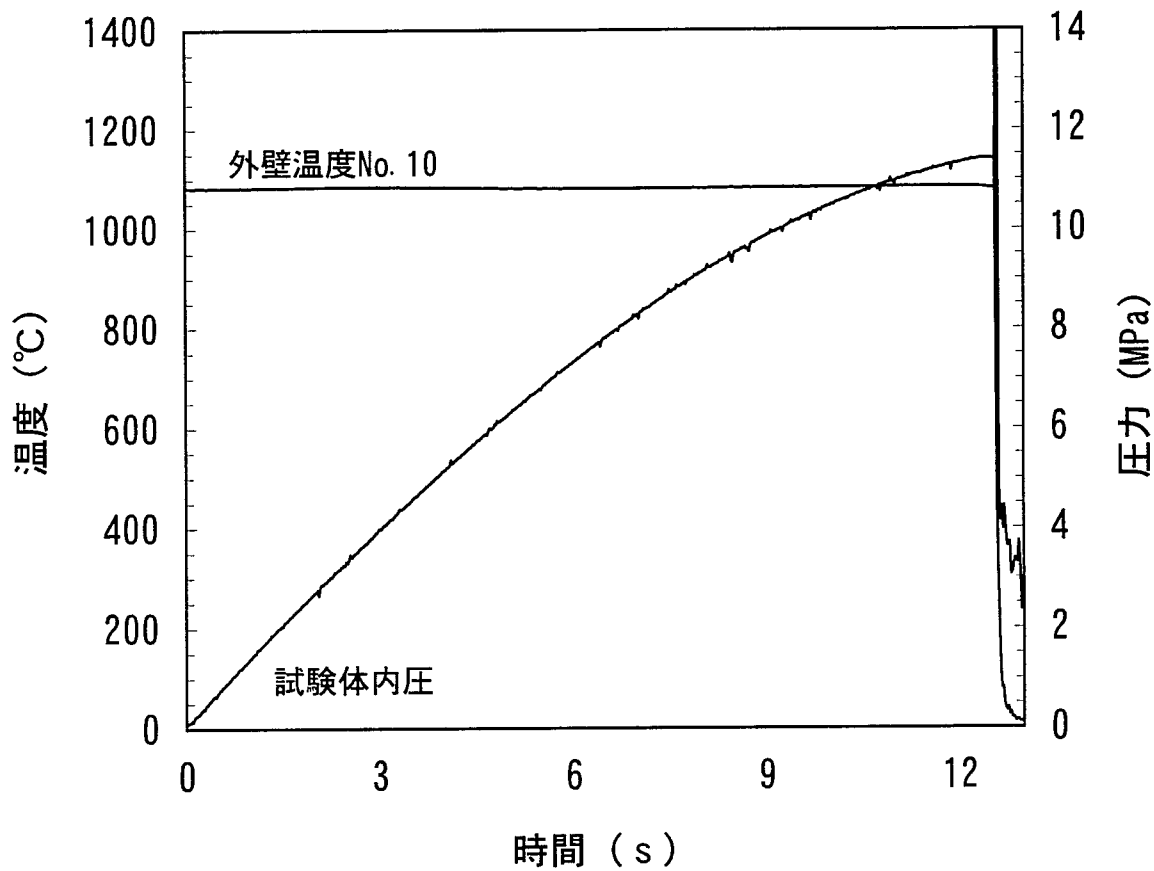
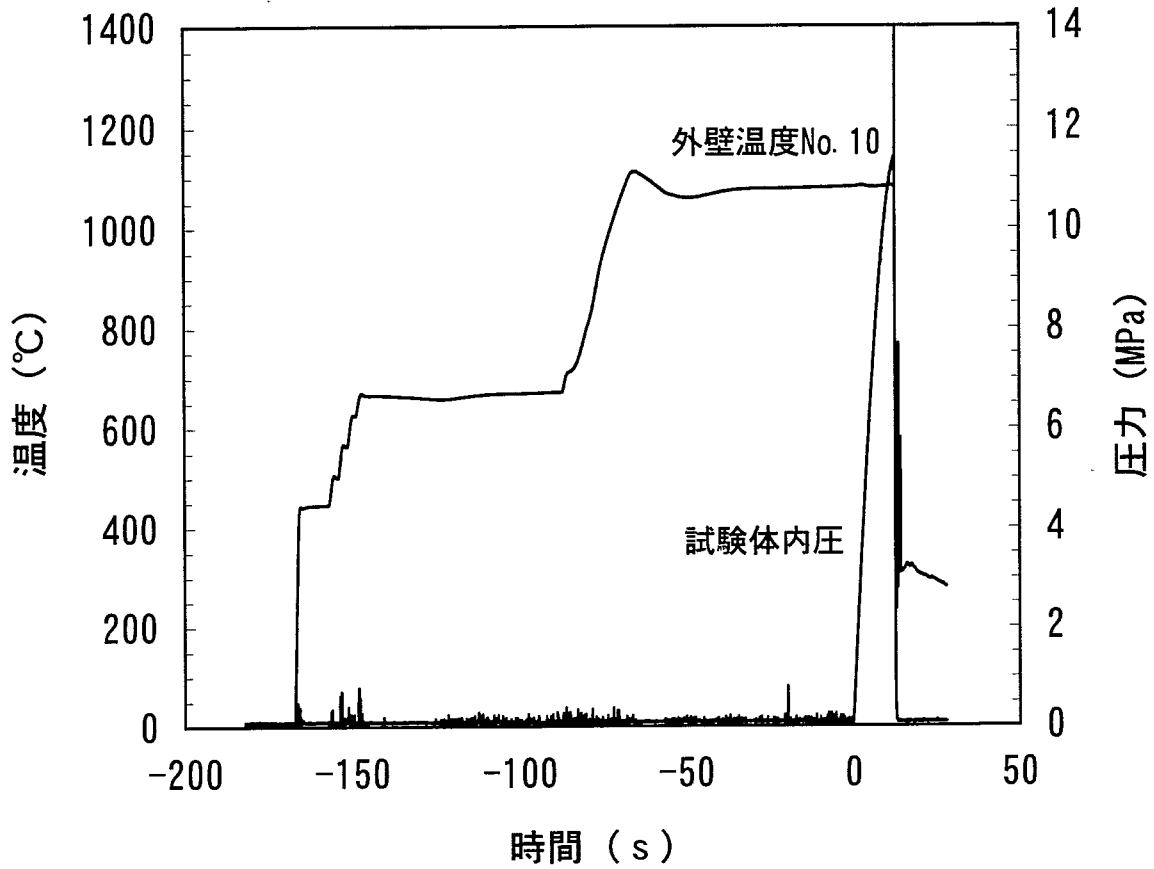


図5-6(a) Run6の試験結果(上:全体、下:試験時)

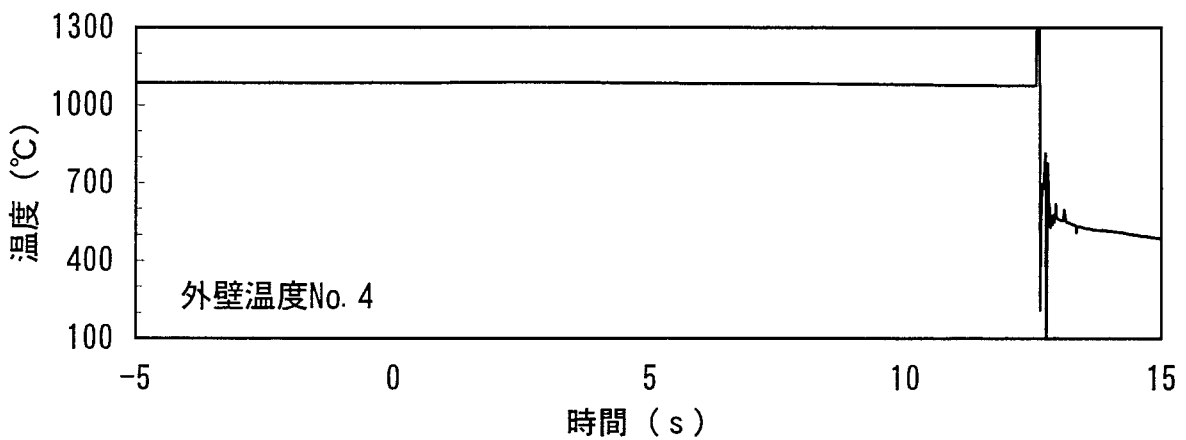
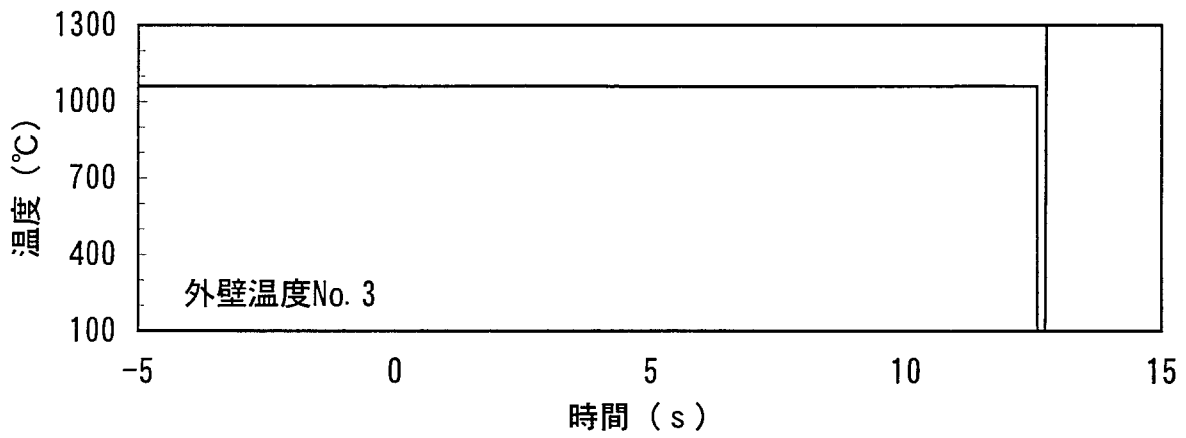
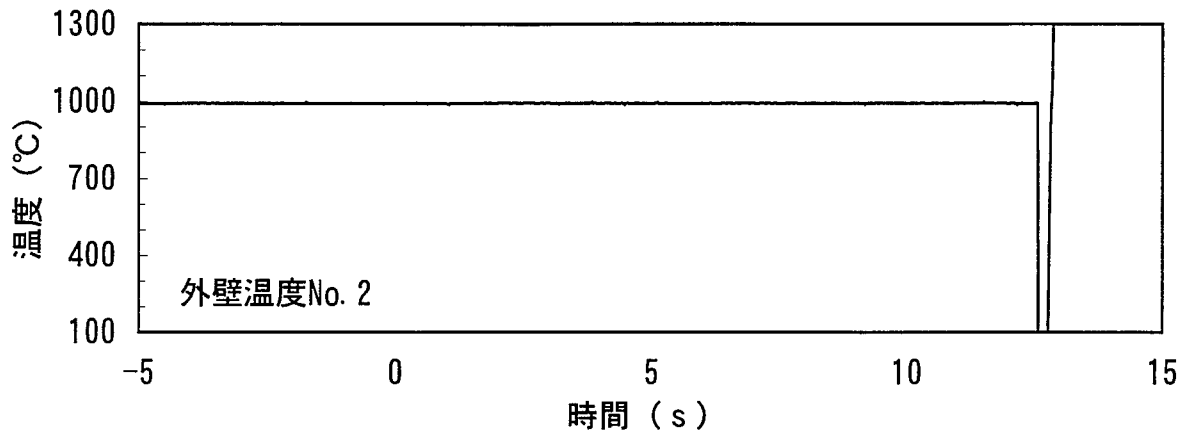
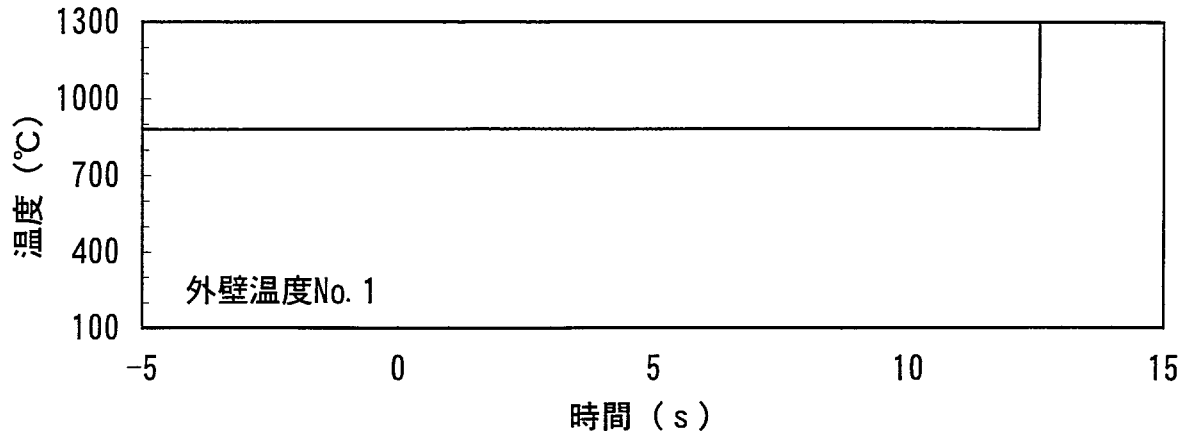


図5-6(b) Run6の試験データ(その1)

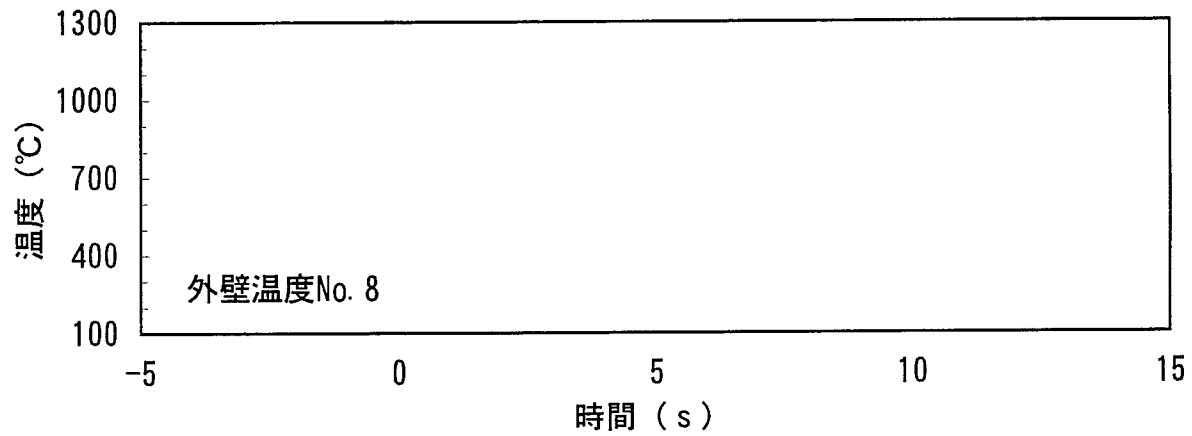
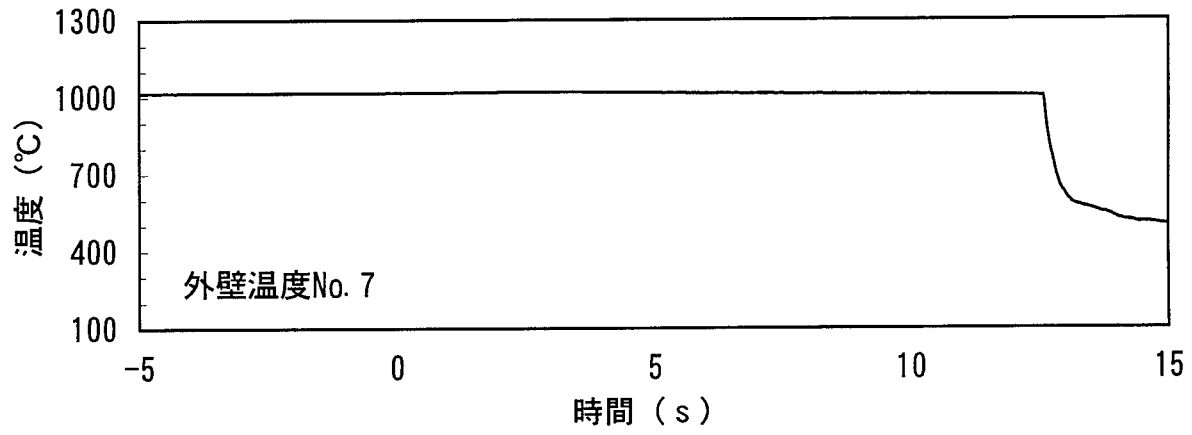
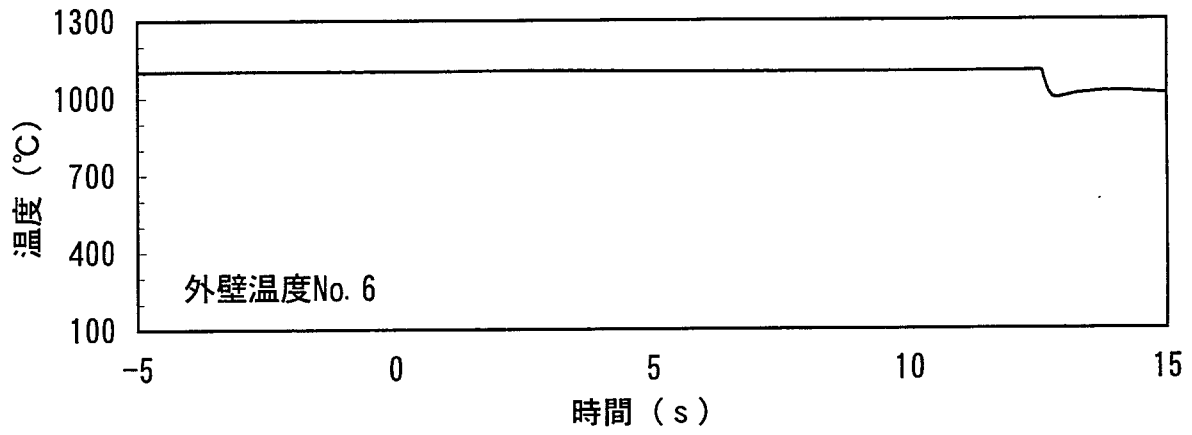
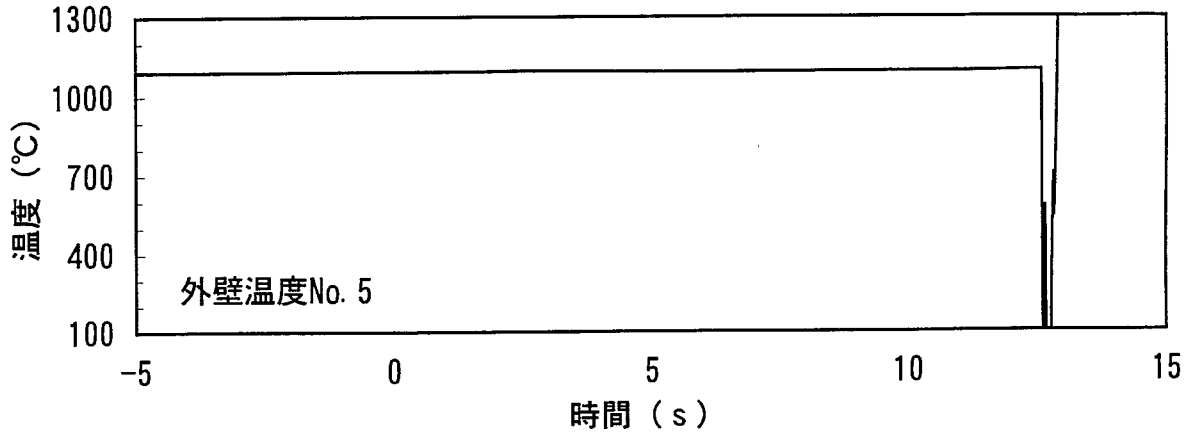


図5-6(b) Run6の試験データ(その2)

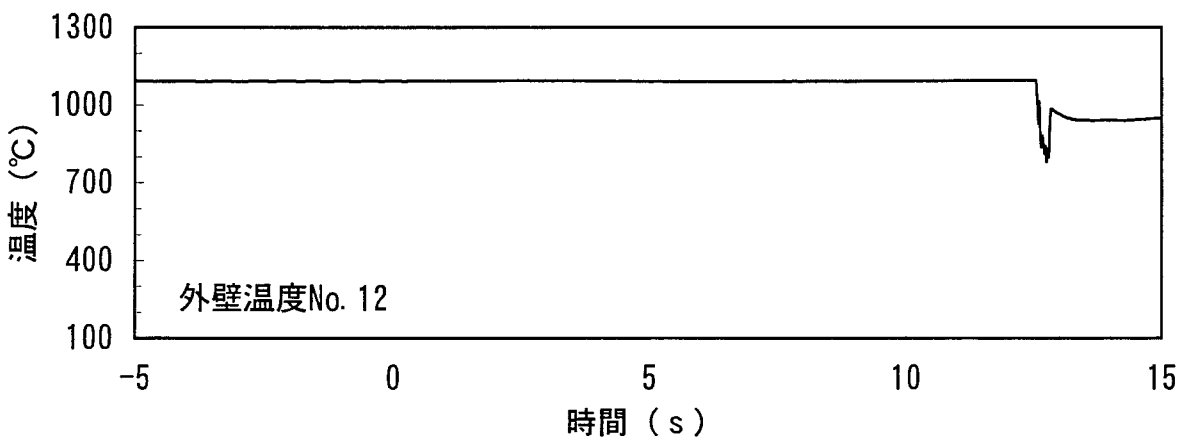
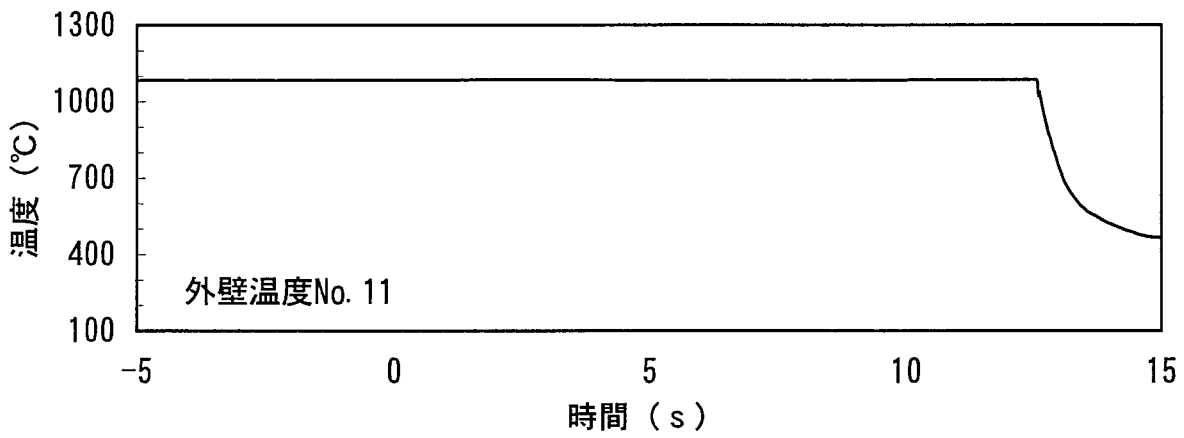
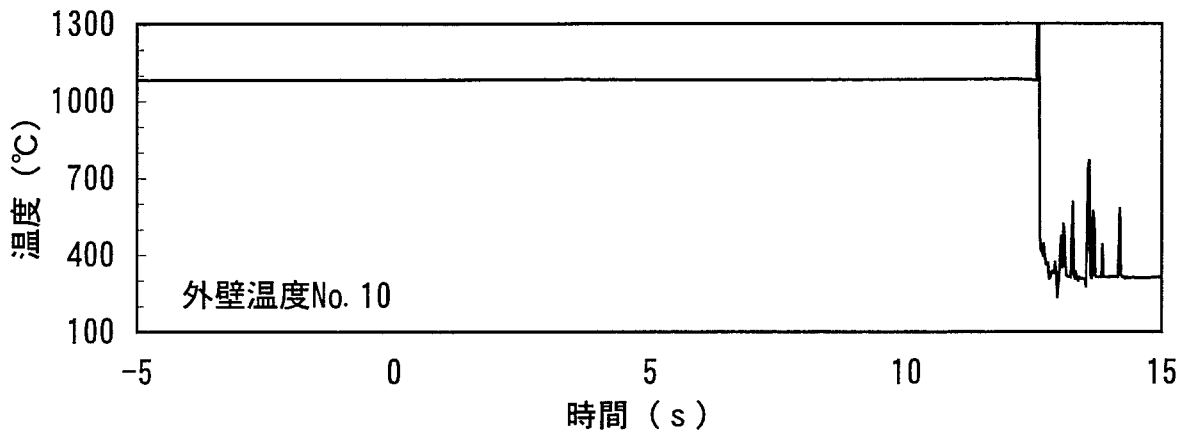
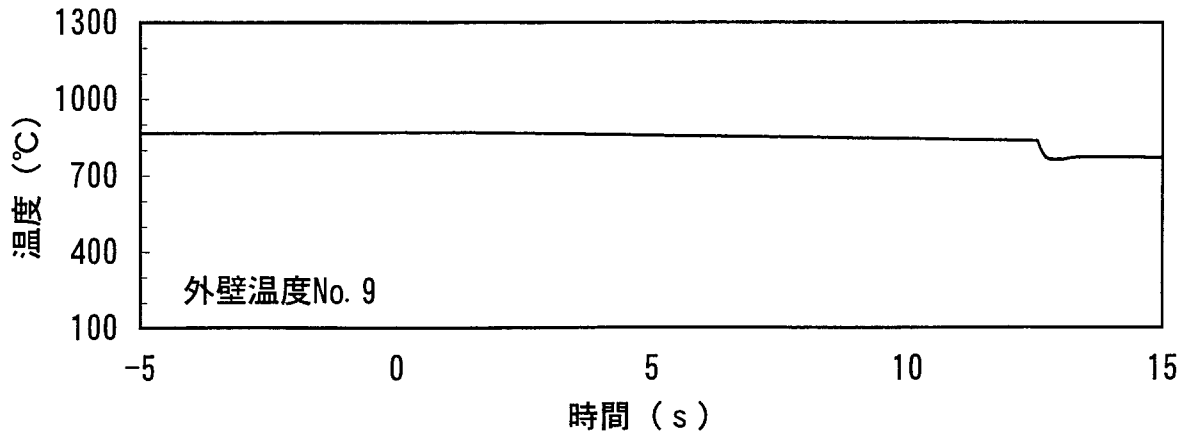


図5-6(b) Run6の試験データ(その3)

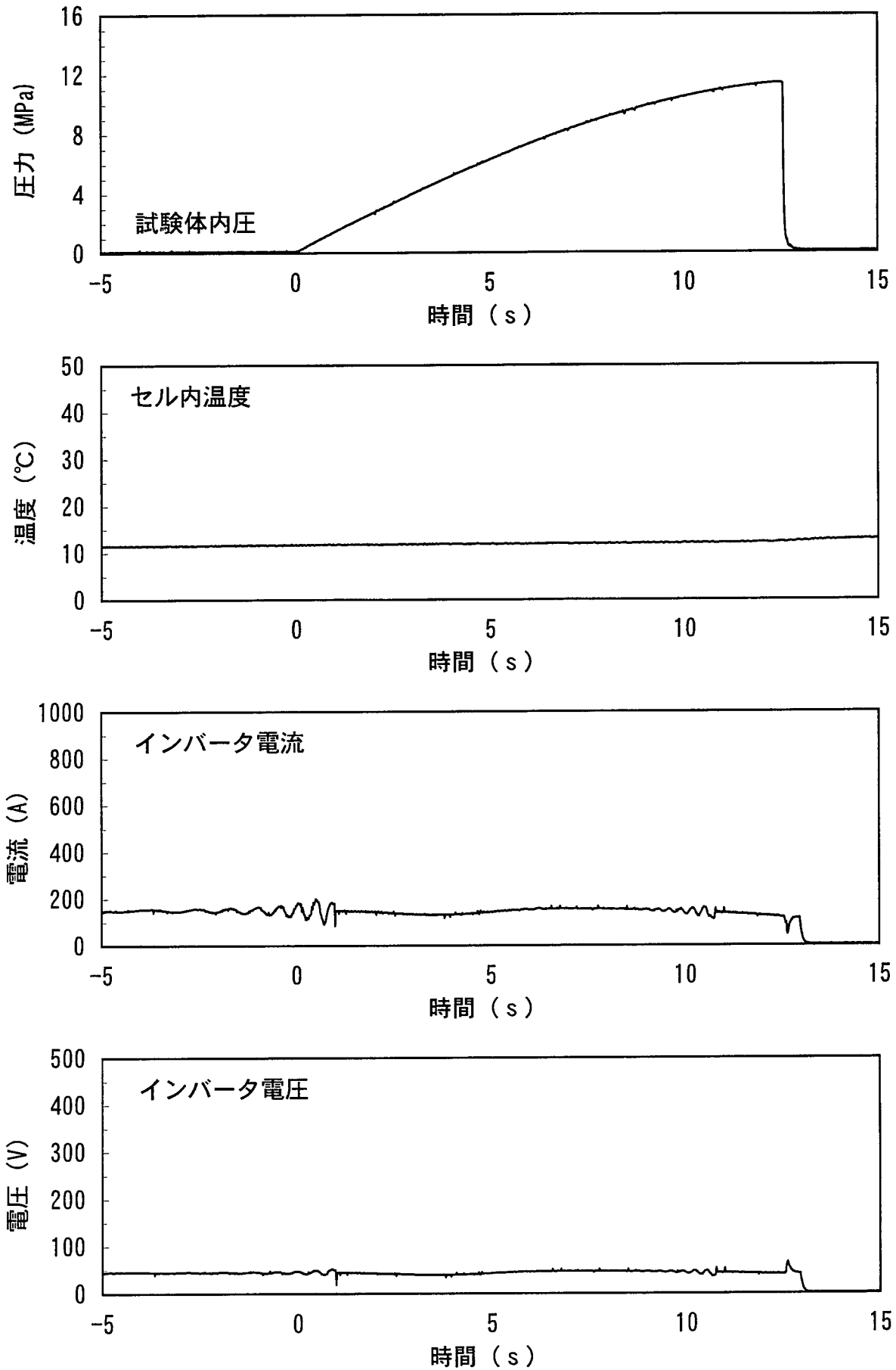


図5-6(b) Run6の試験データ(その4)

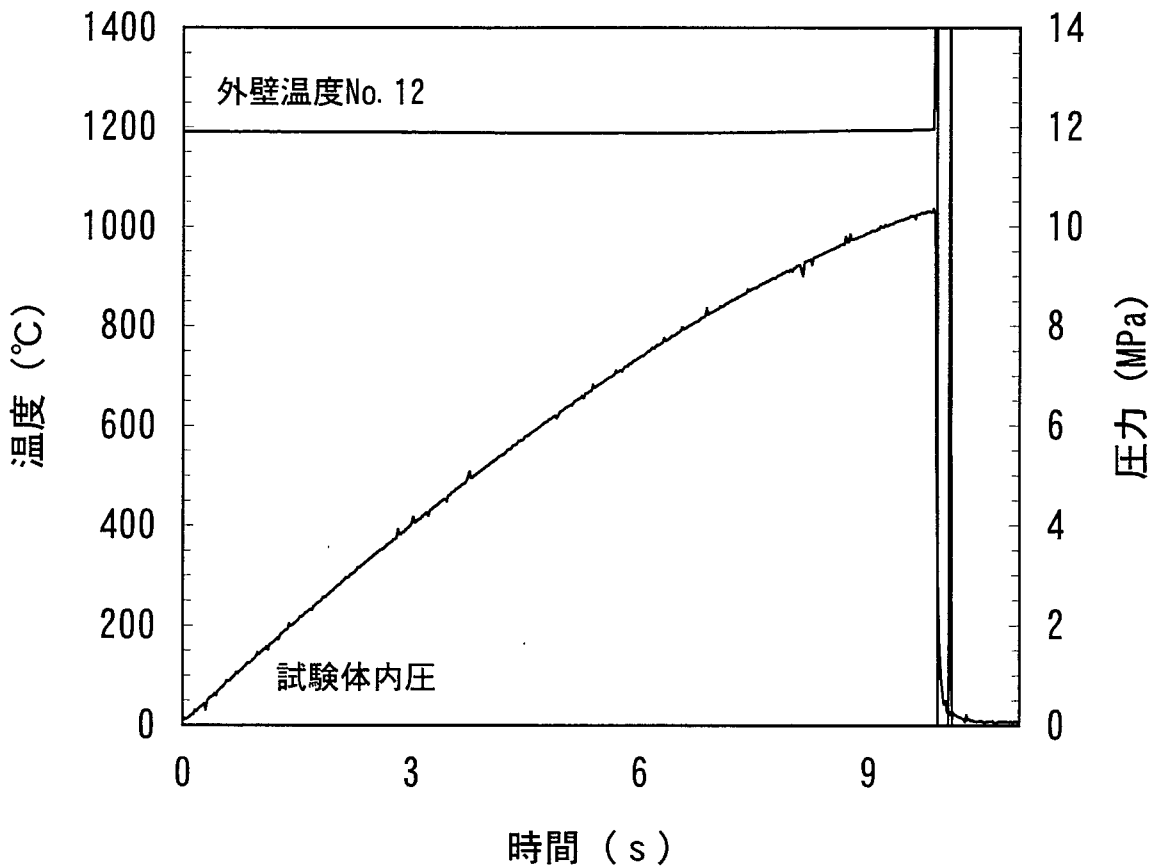
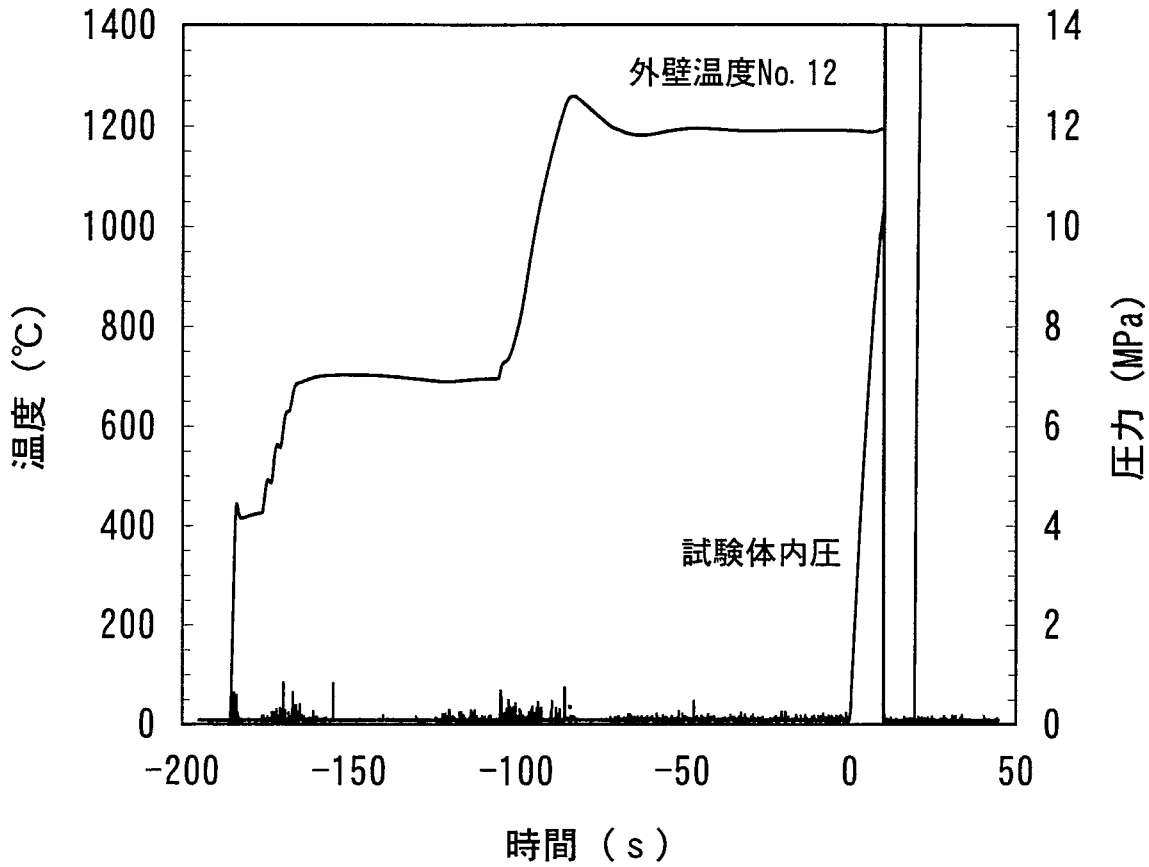


図5-7(a) Run7の試験結果(上:全体、下:試験時)

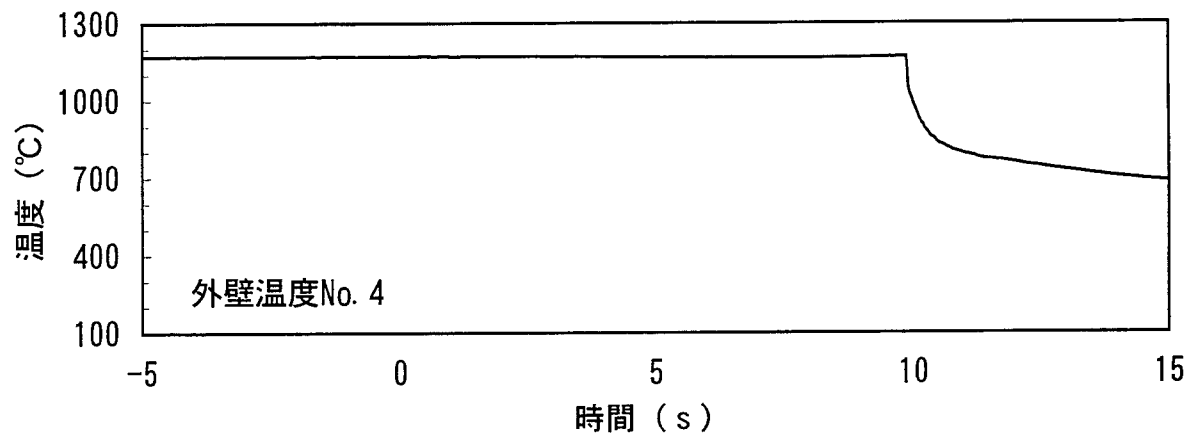
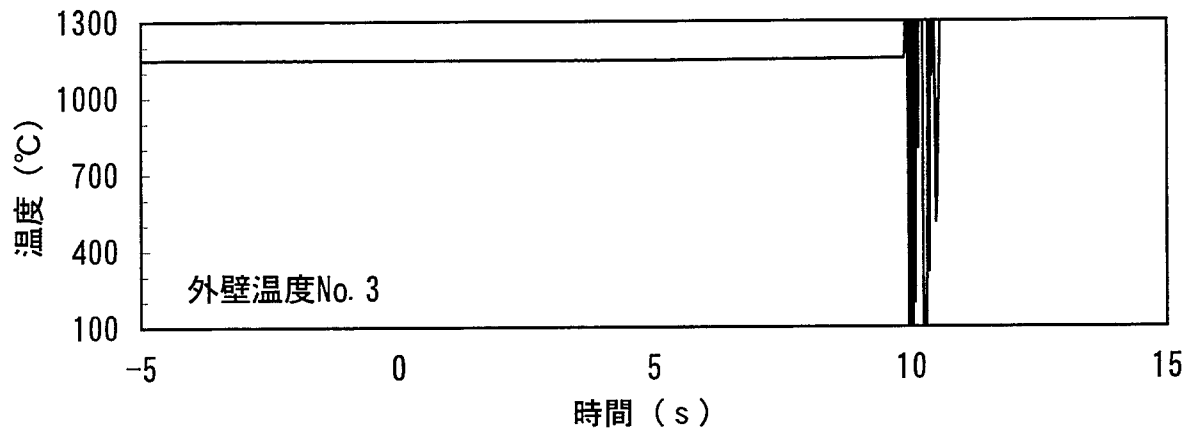
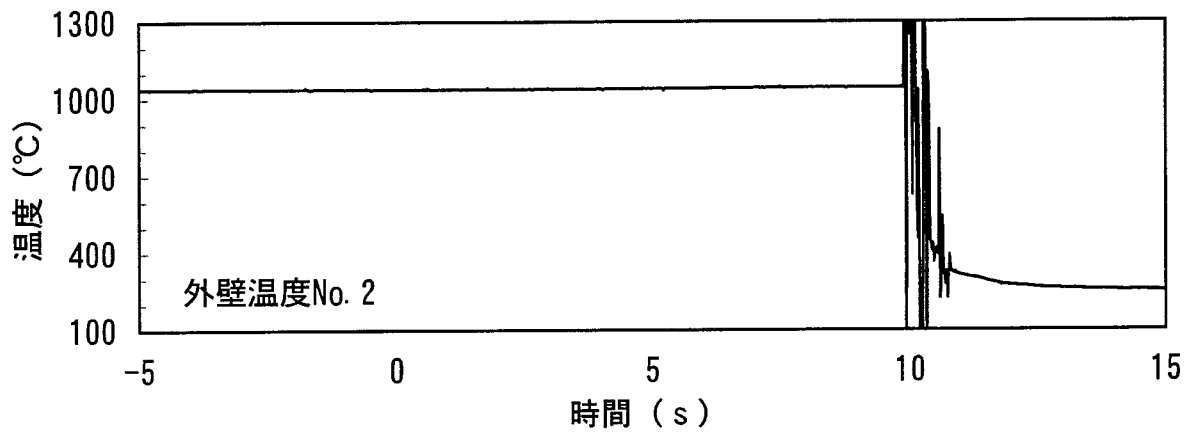
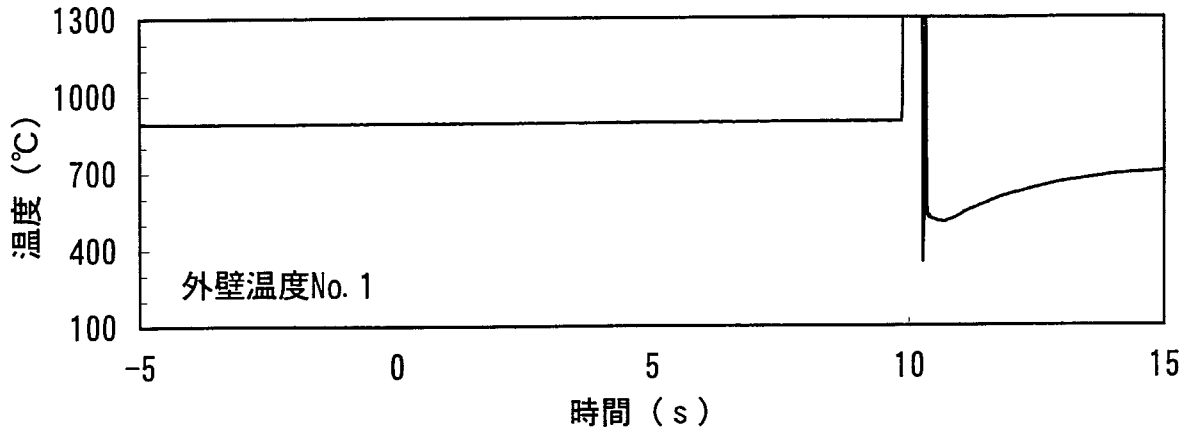


図5-7(b) Run7の試験データ(その1)



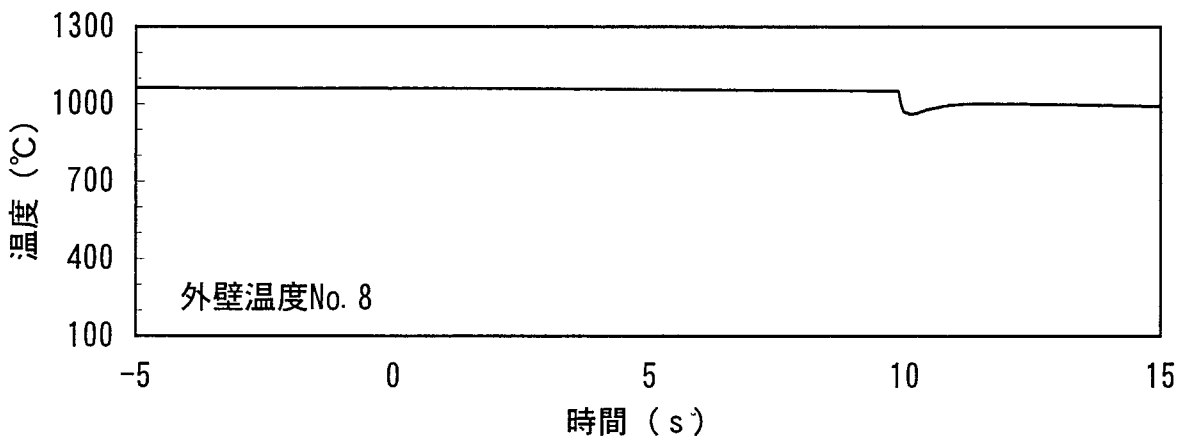
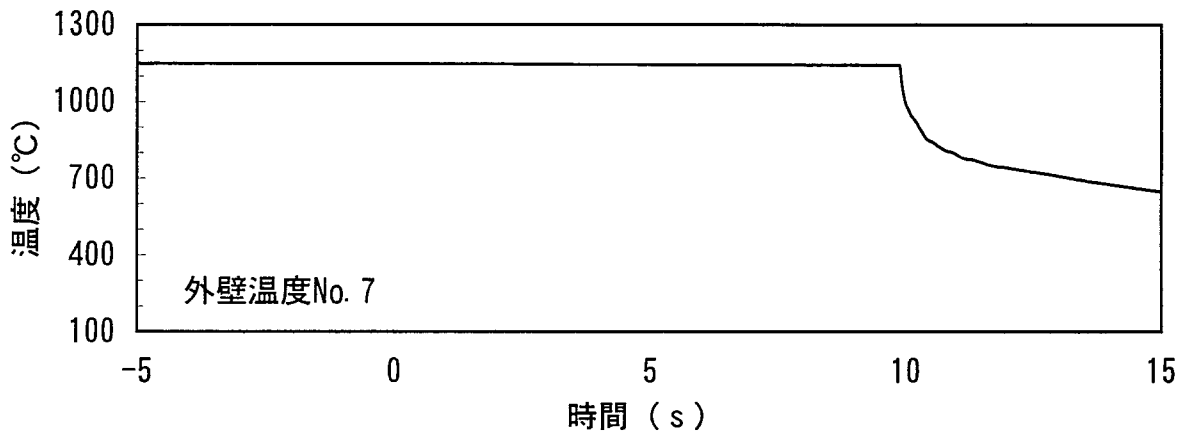
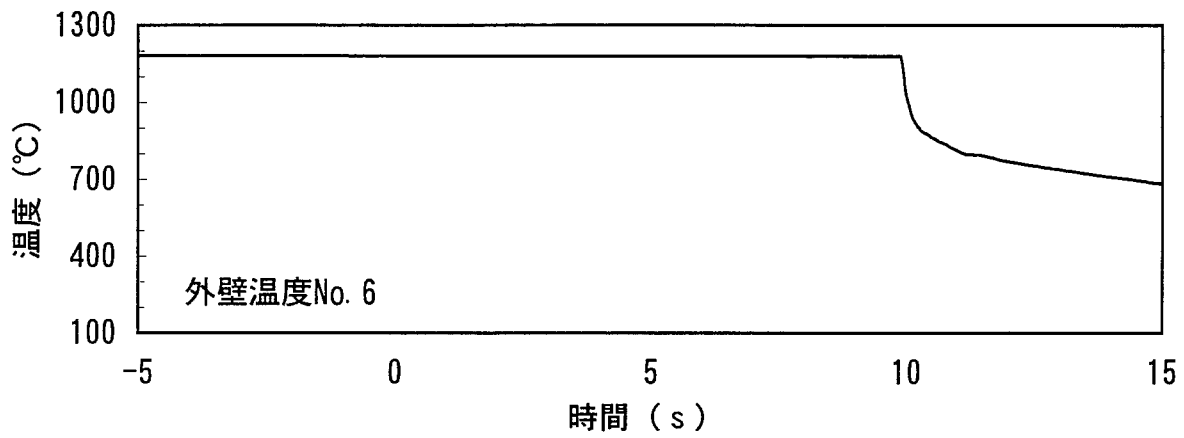
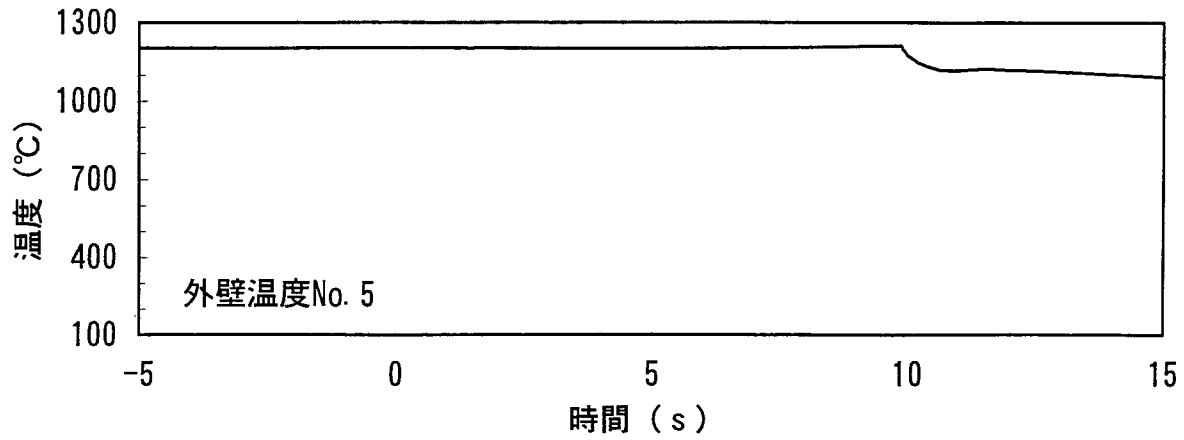


図5-7(b) Run7の試験データ(その2)

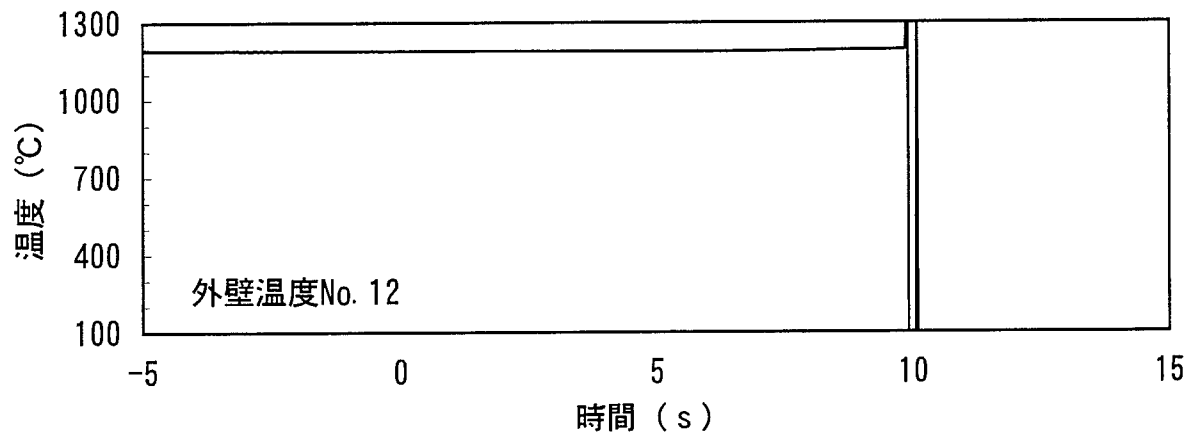
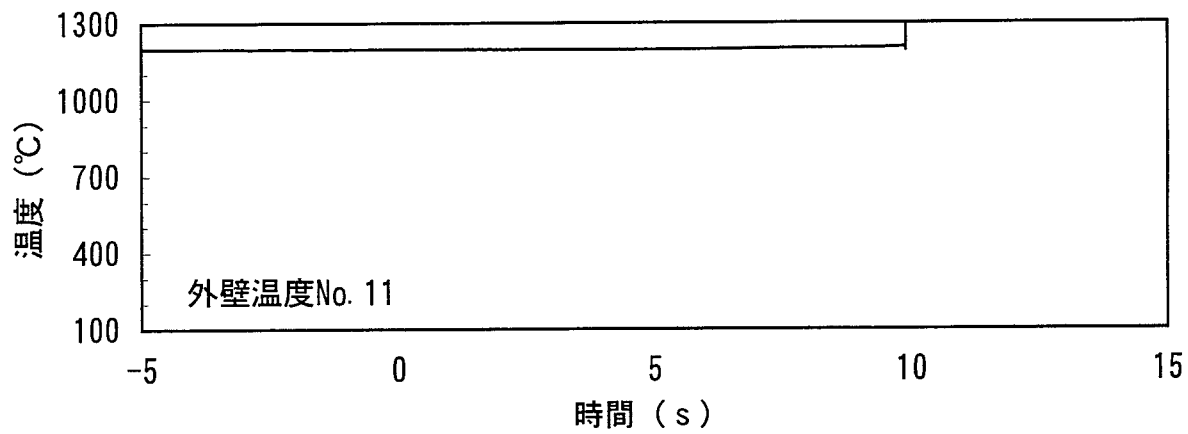
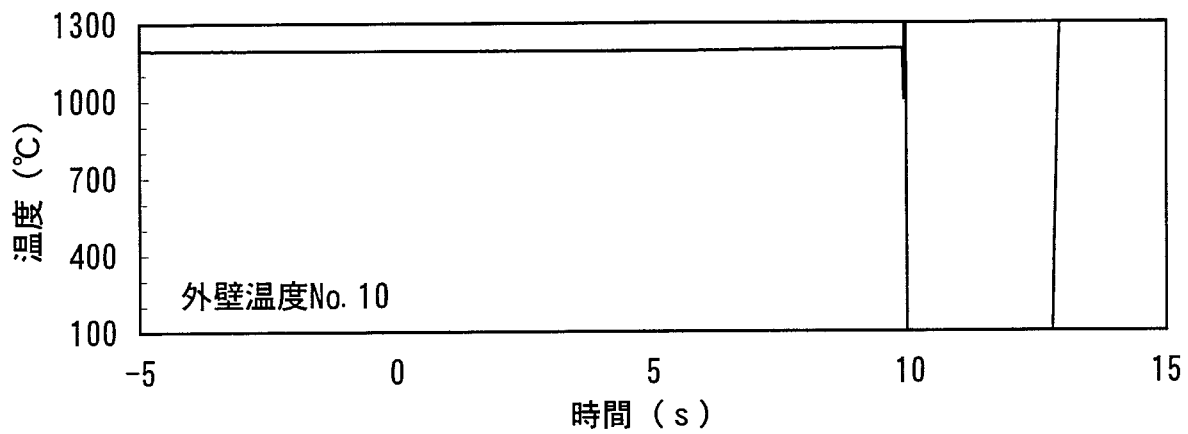
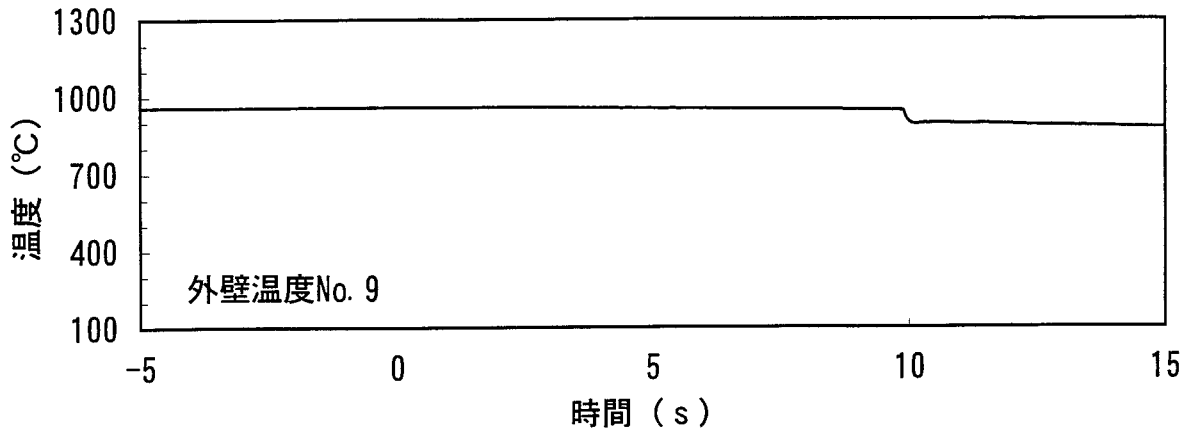


図5-7(b) Run7の試験データ(その3)

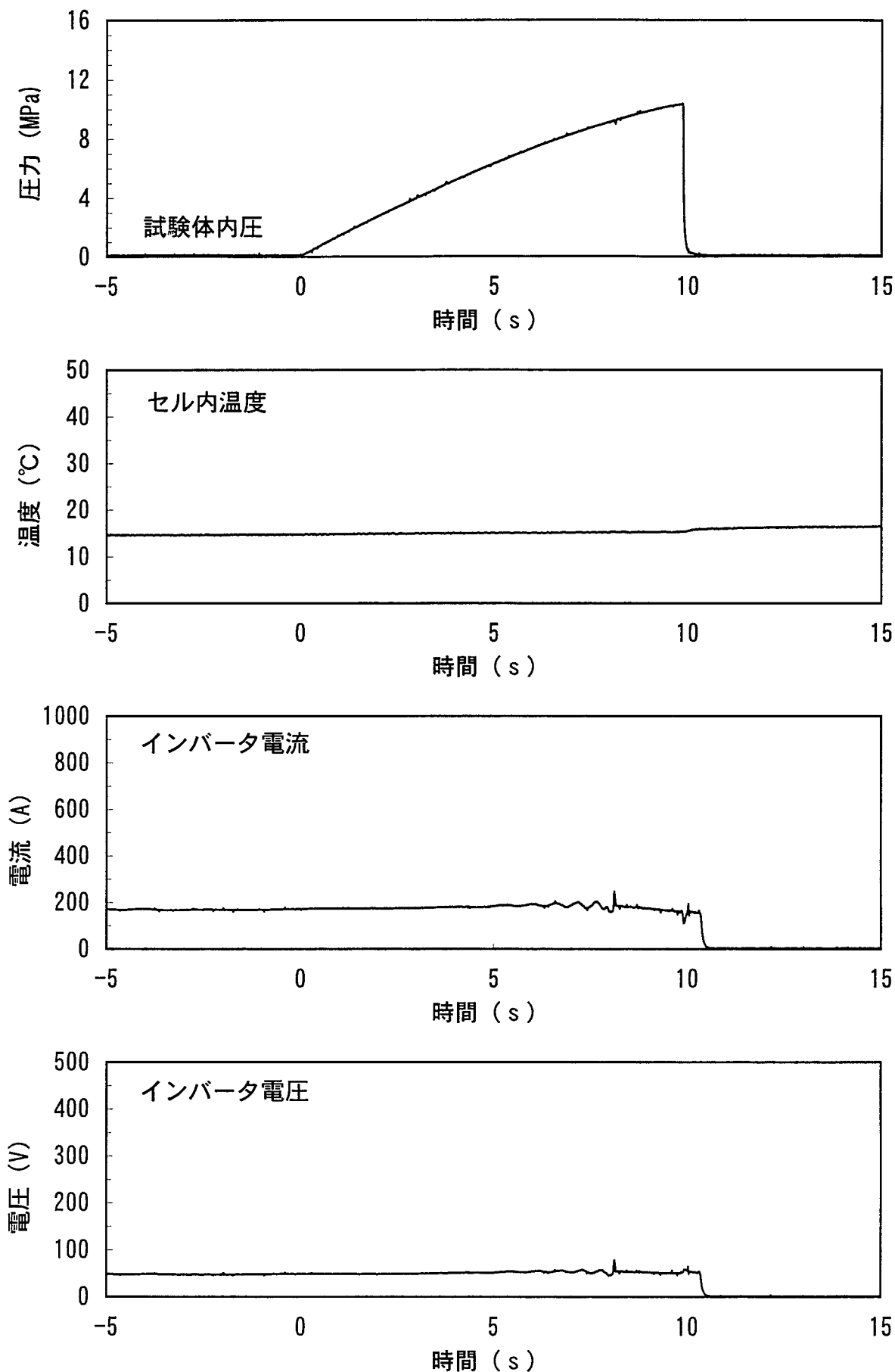


図5-7(b) Run7の試験データ(その4)

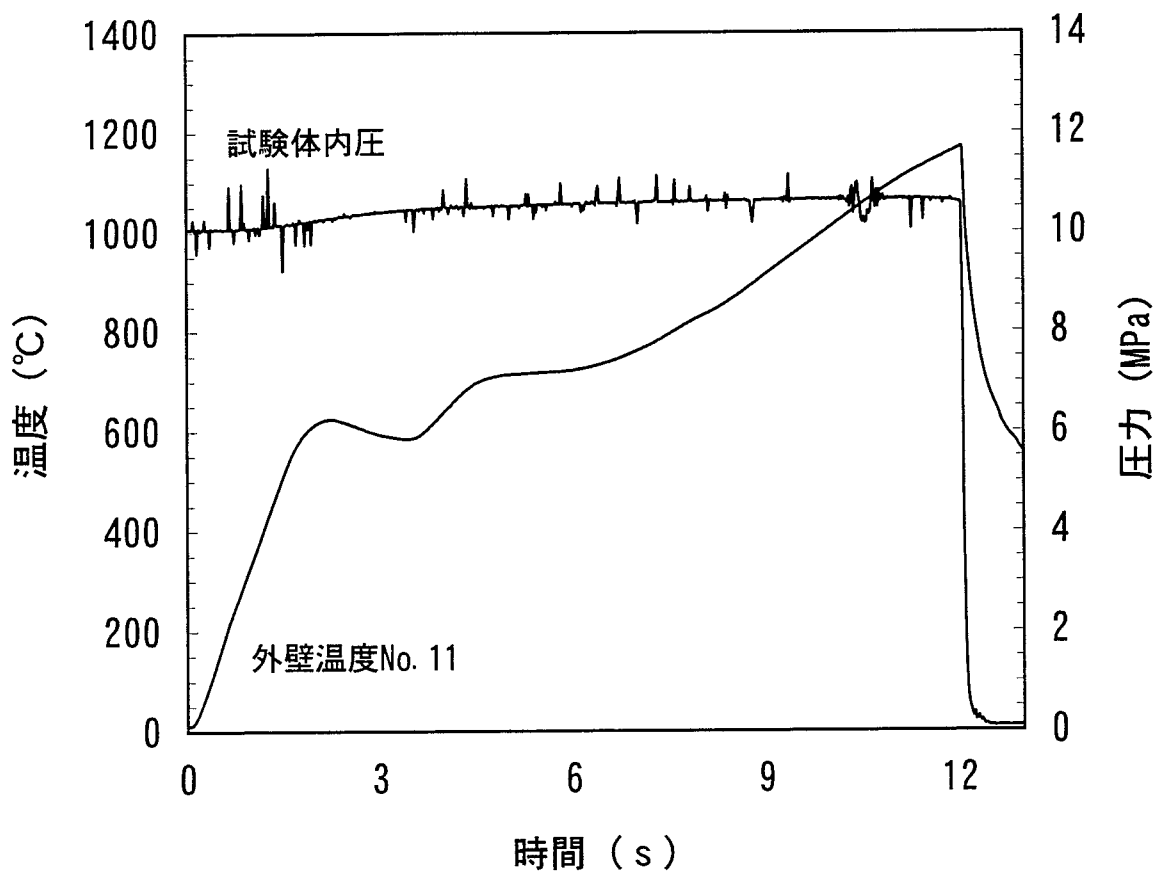
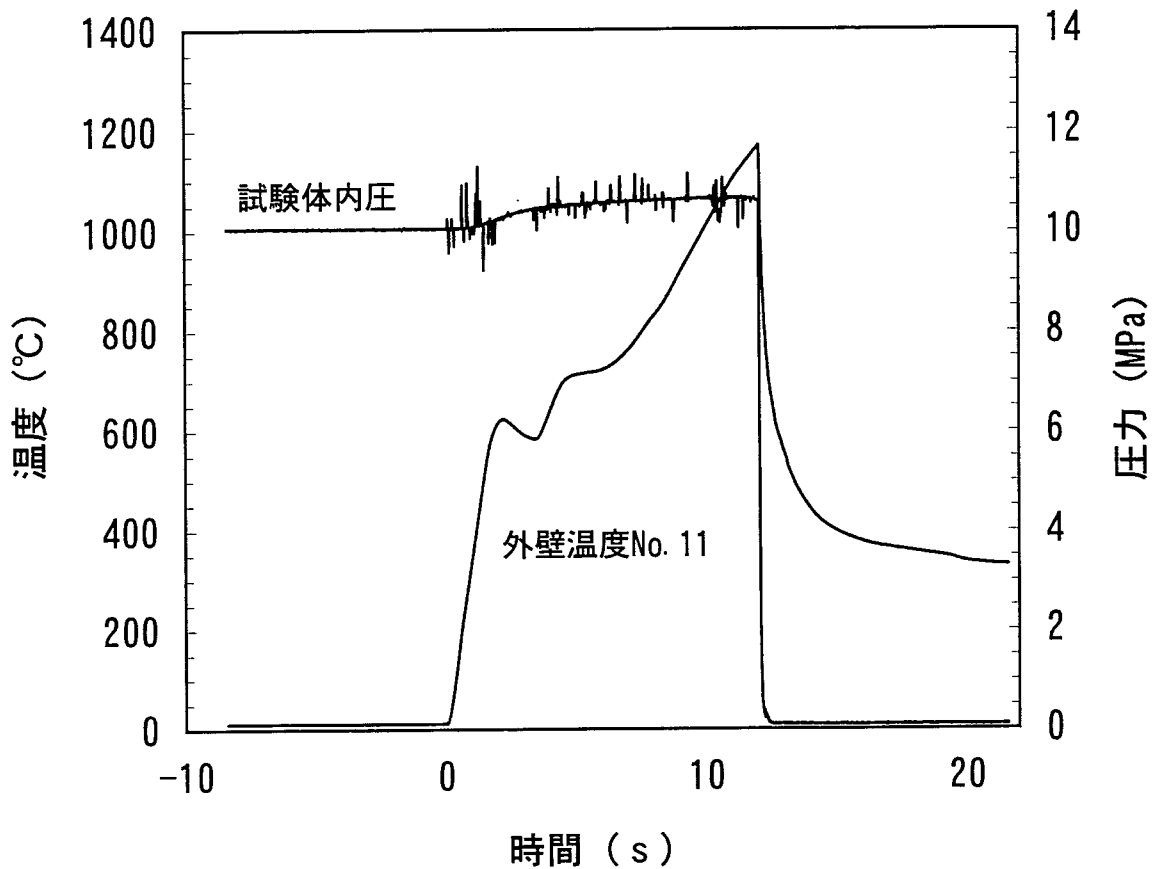


図5-8(a) Run8の試験結果(上:全体、下:試験時)

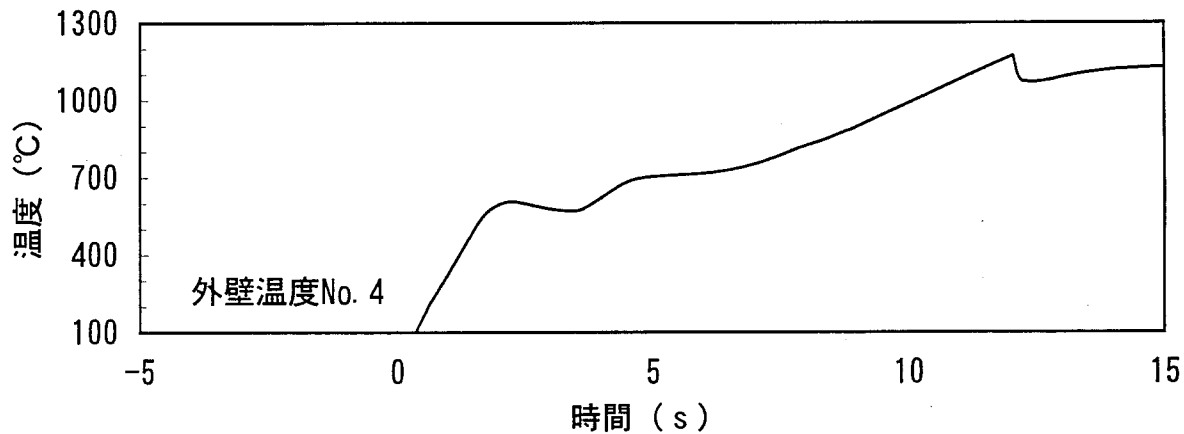
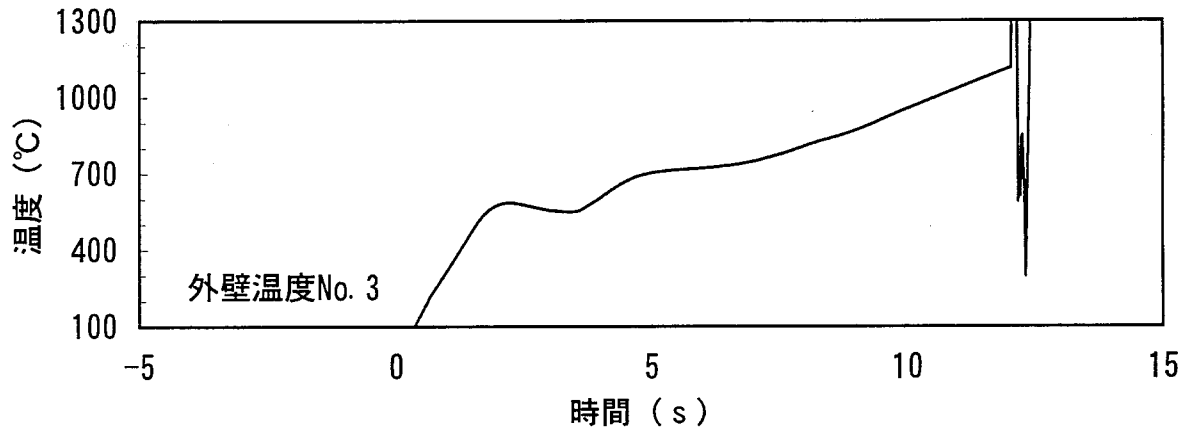
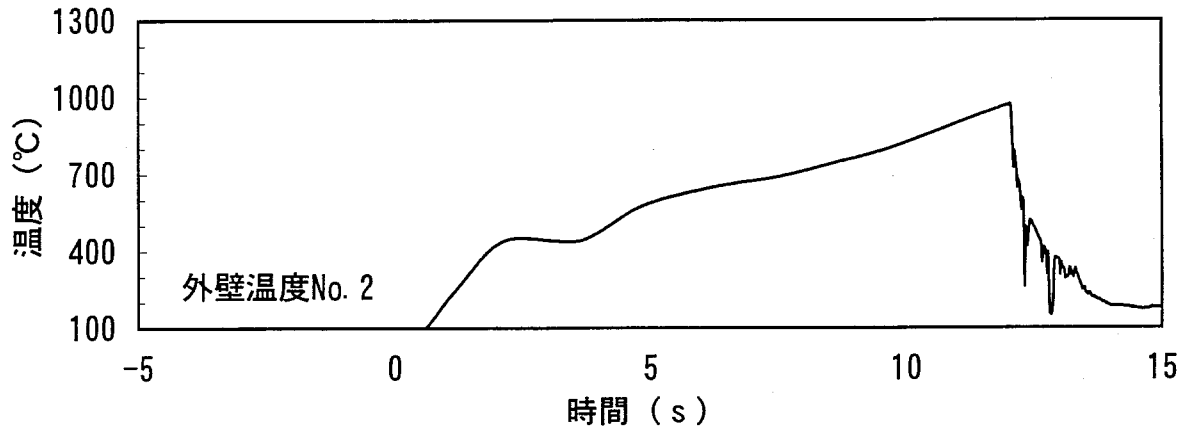
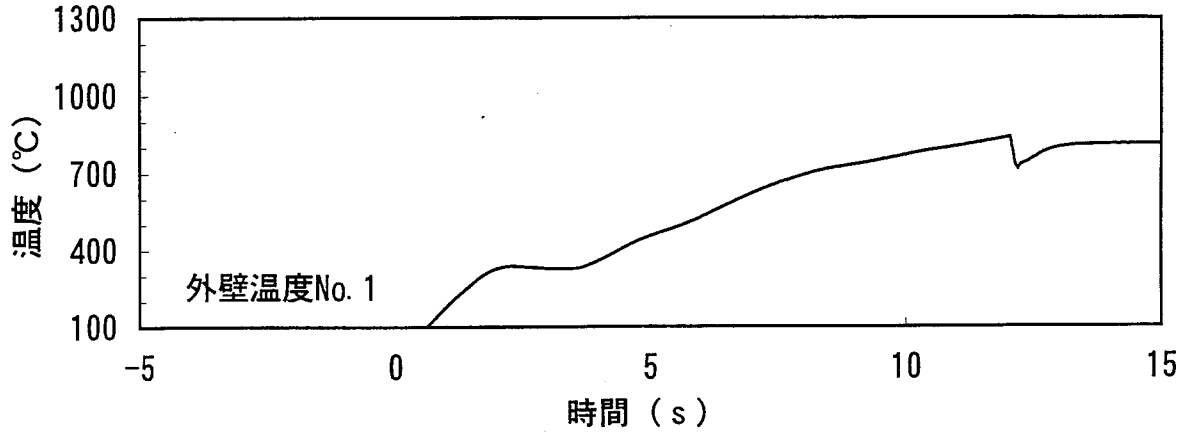


図5-8(b) Run8の試験データ(その1)

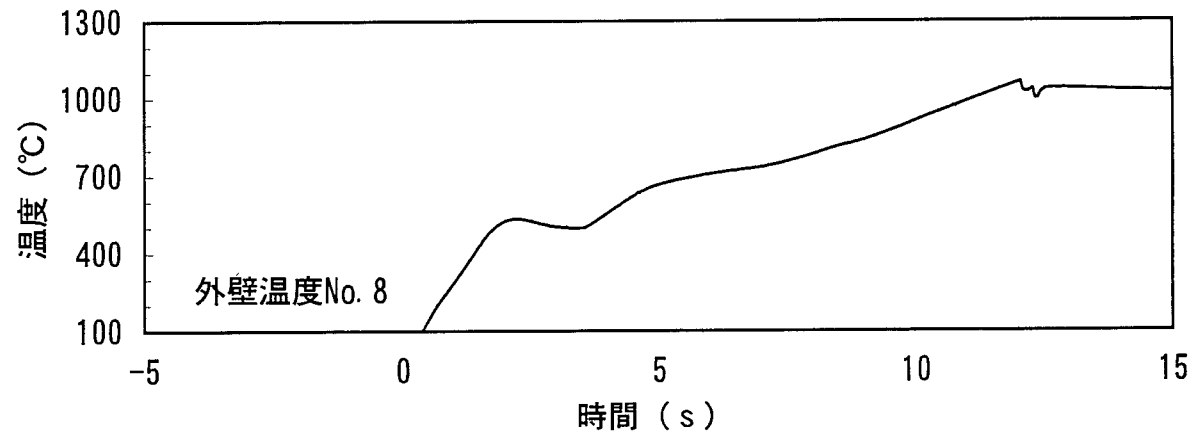
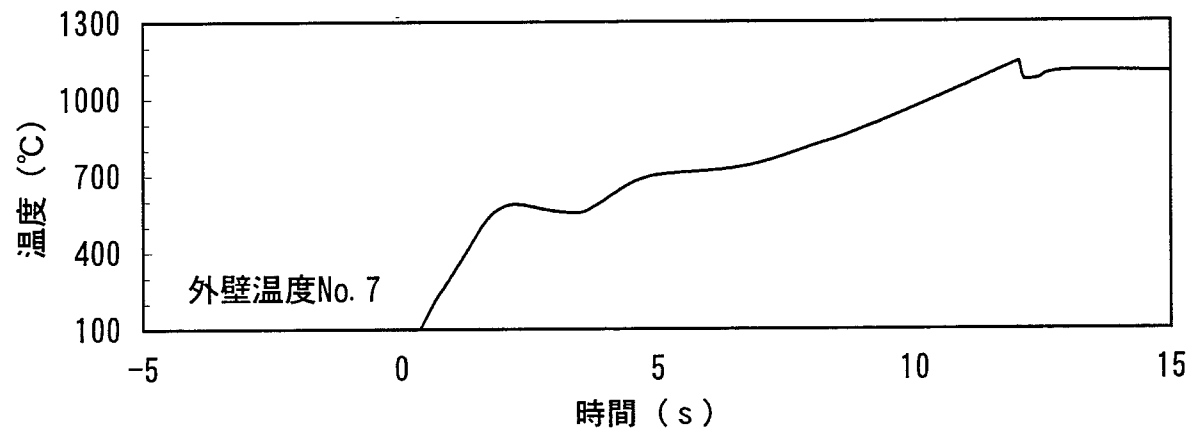
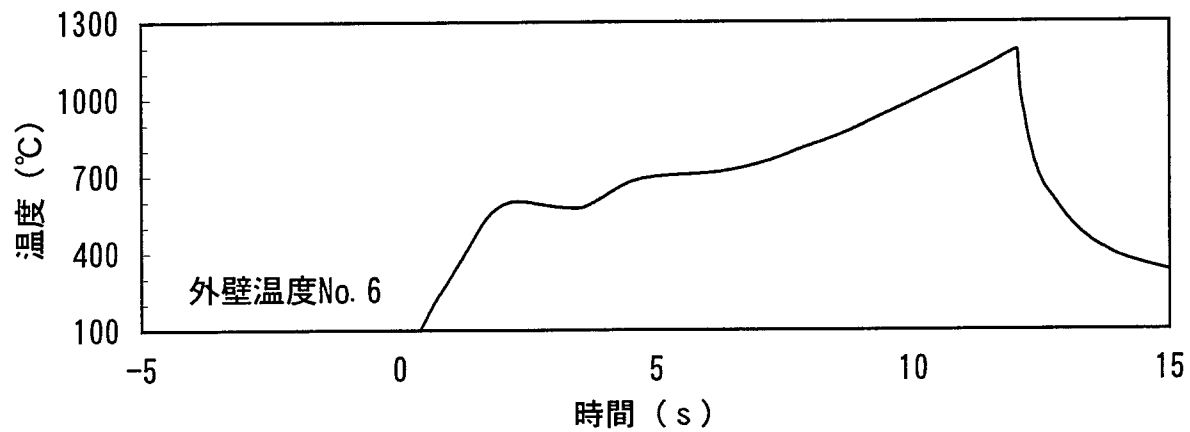
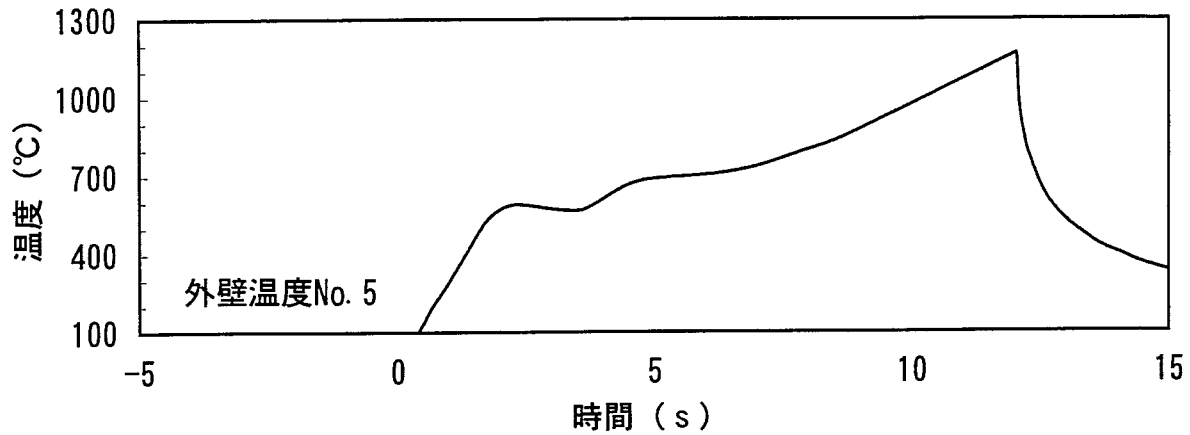


図5-8(b) Run8の試験データ(その2)

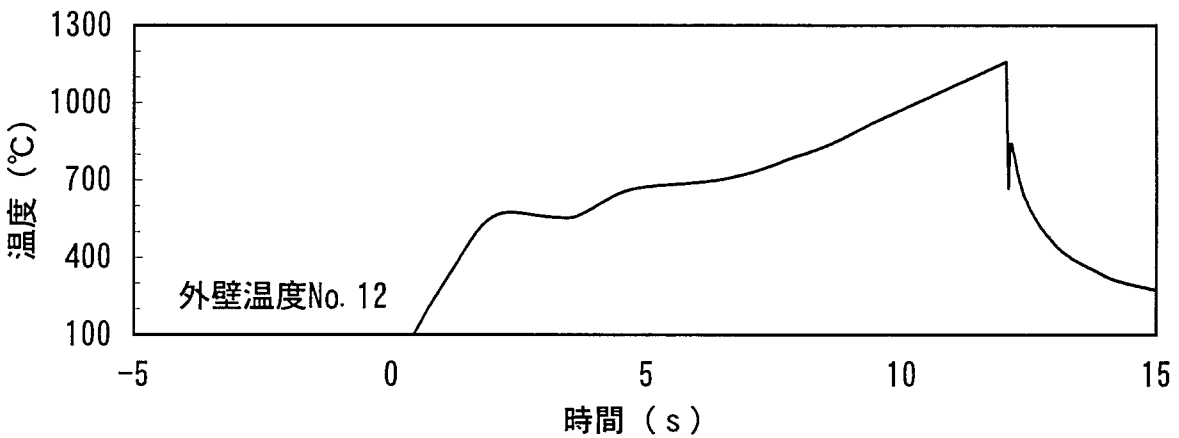
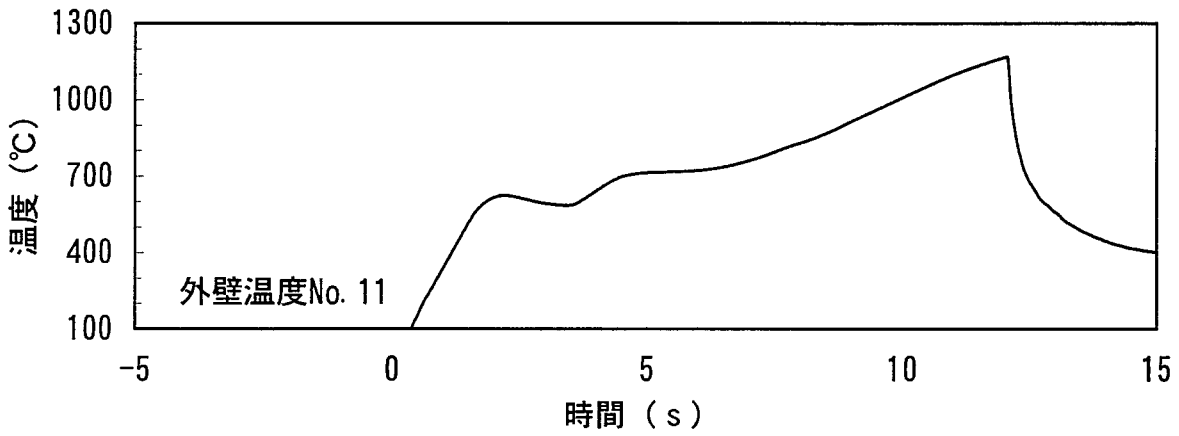
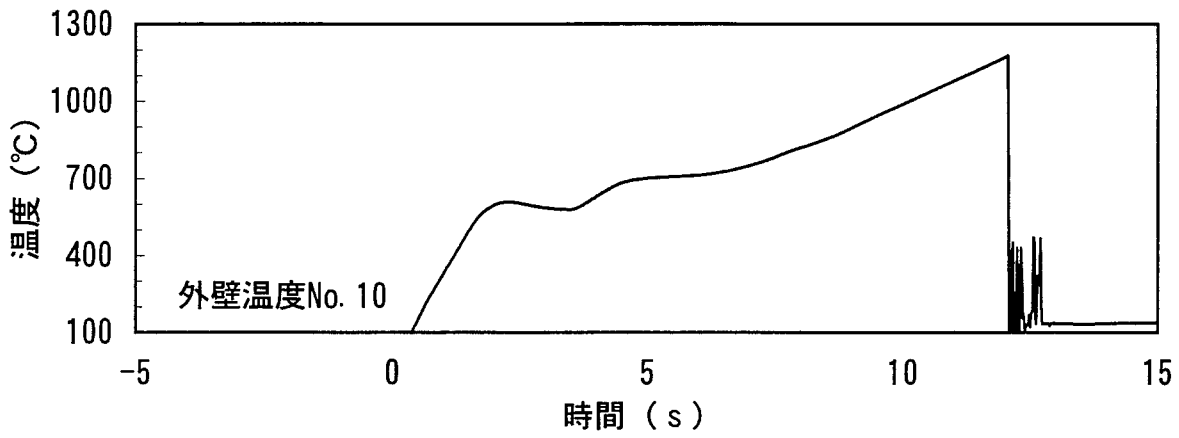
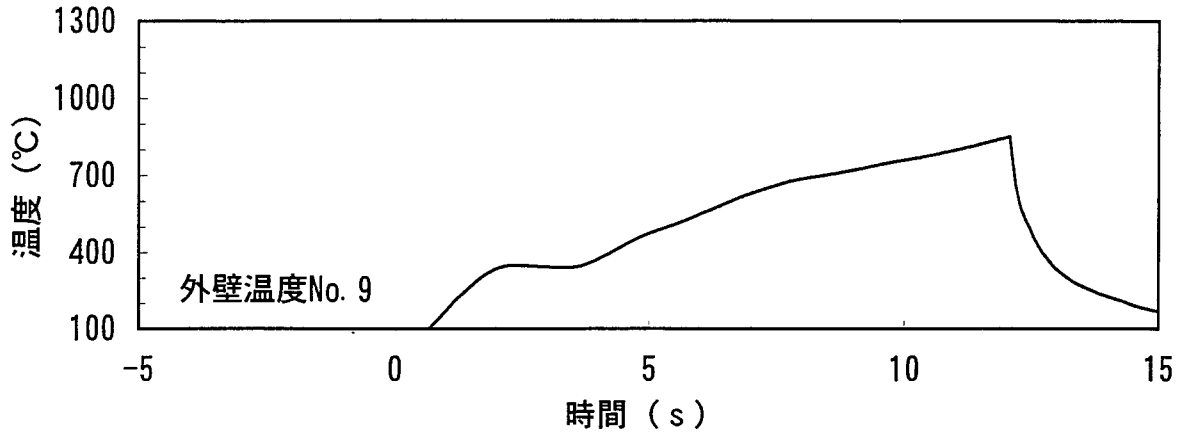


図5-8(b) Run8の試験データ(その3)

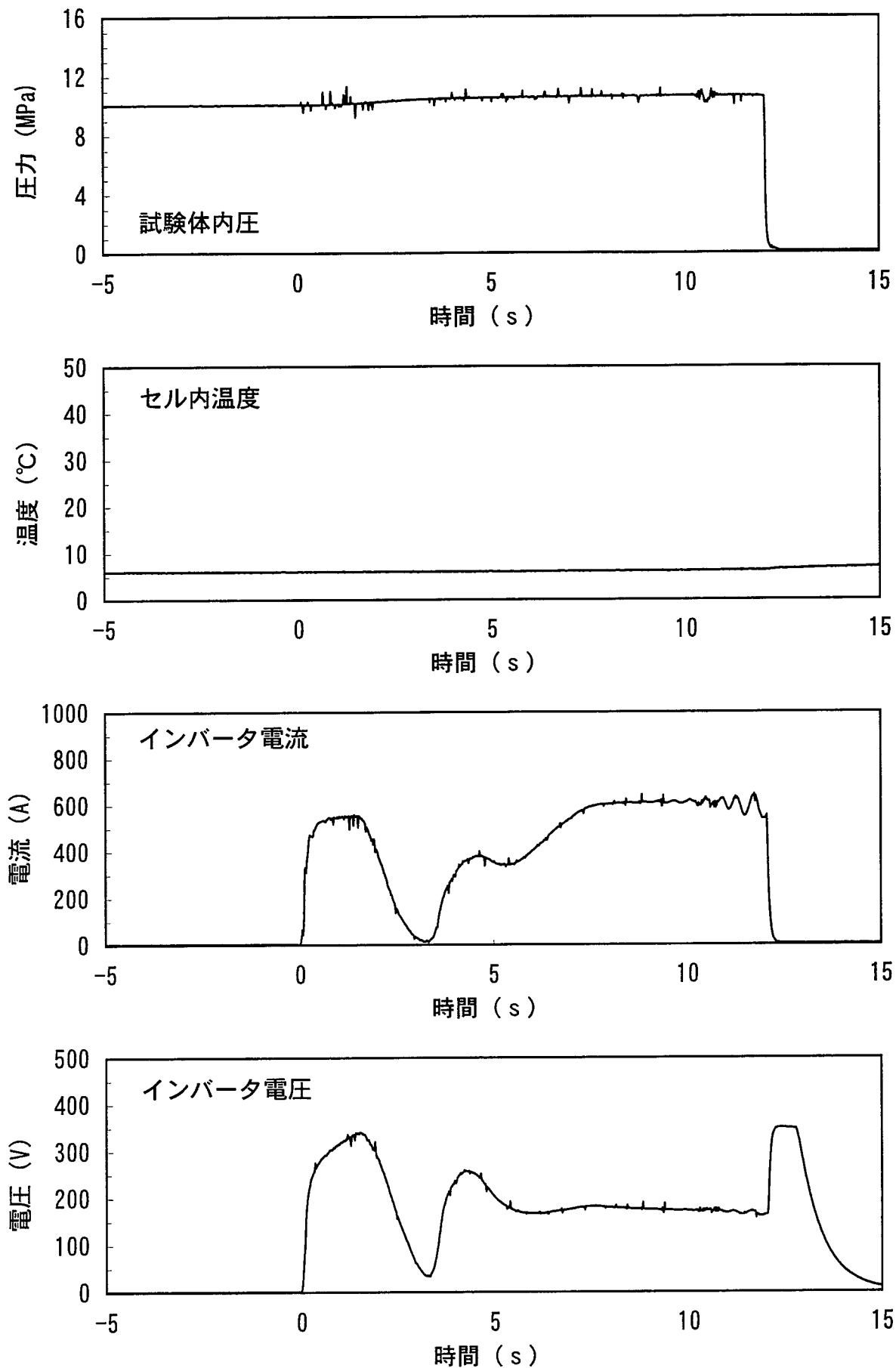


図5-8(b) Run8の試験データ(その4)



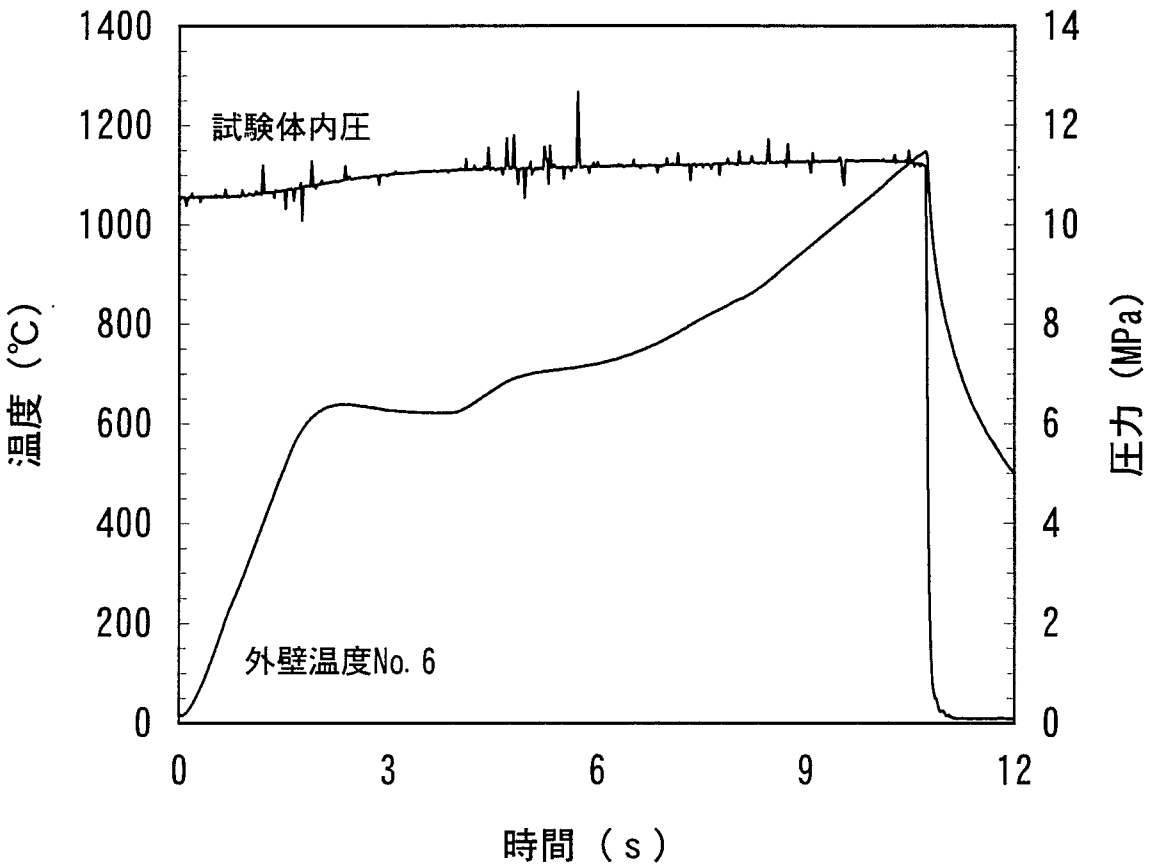
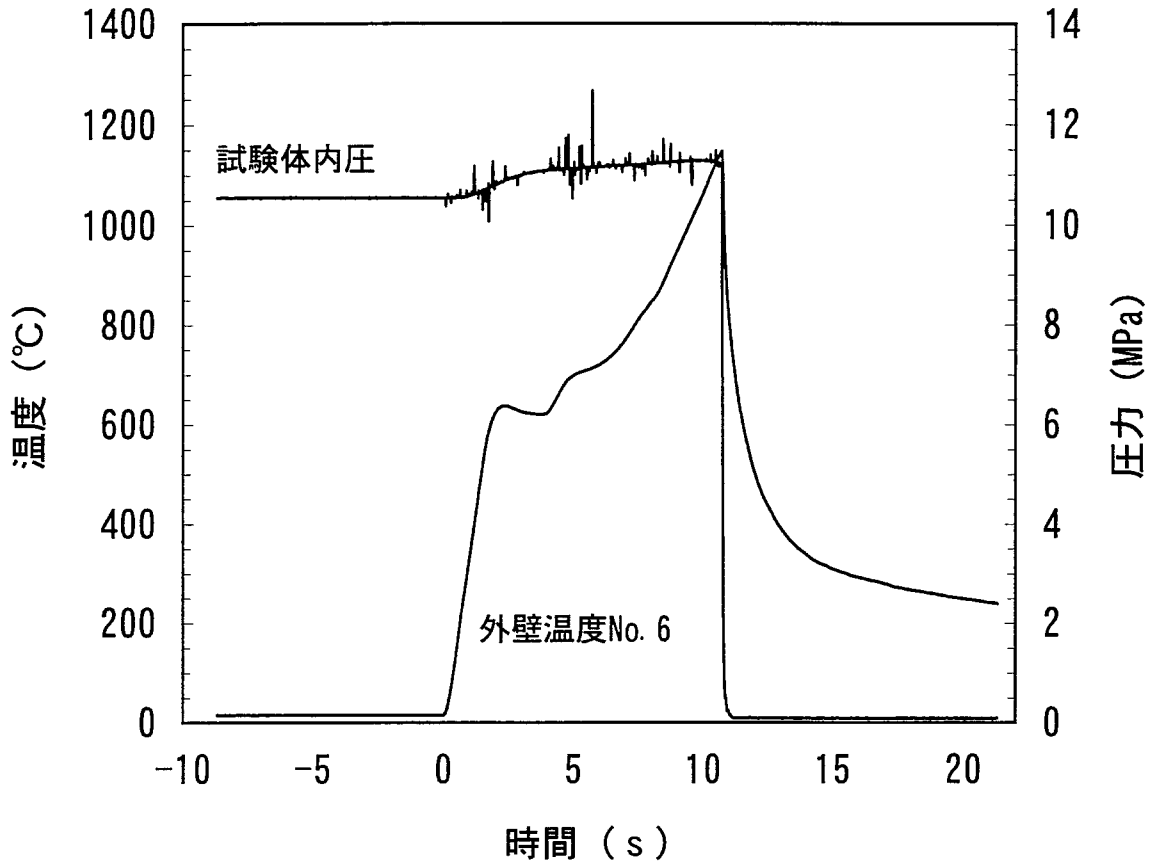


図5-9(a) Run9の試験結果(上:全体、下:試験時)

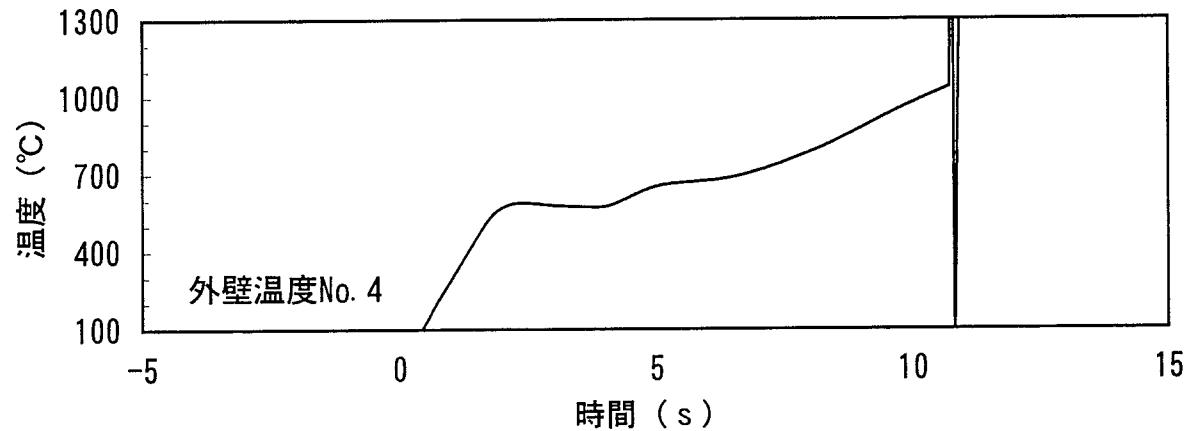
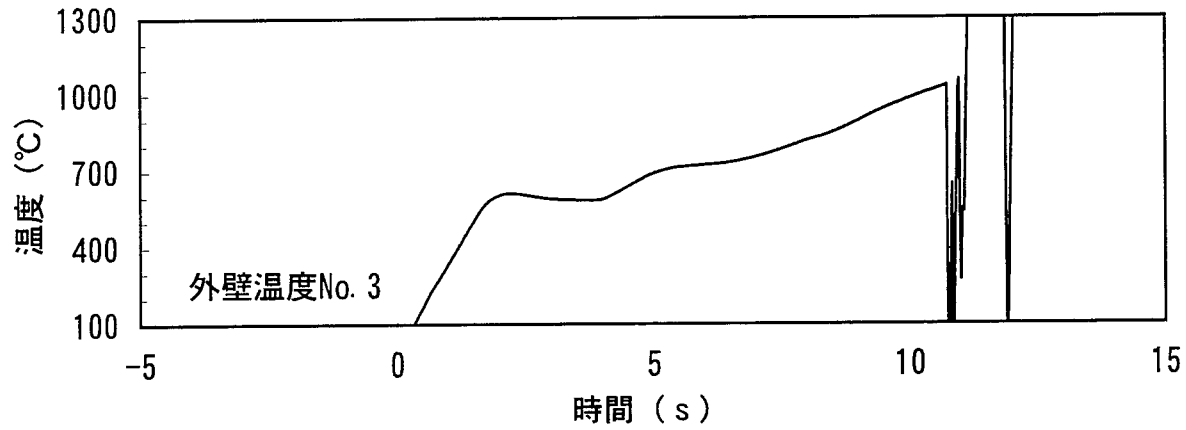
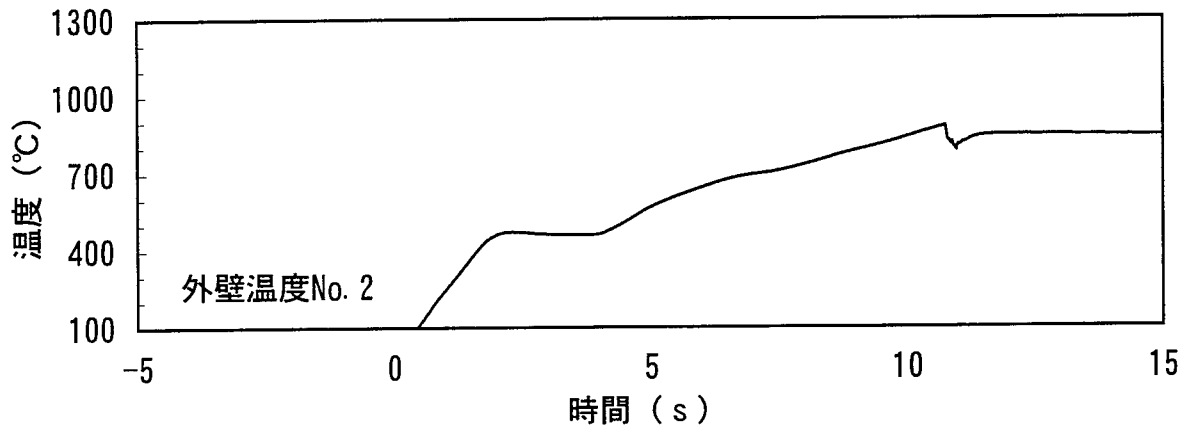
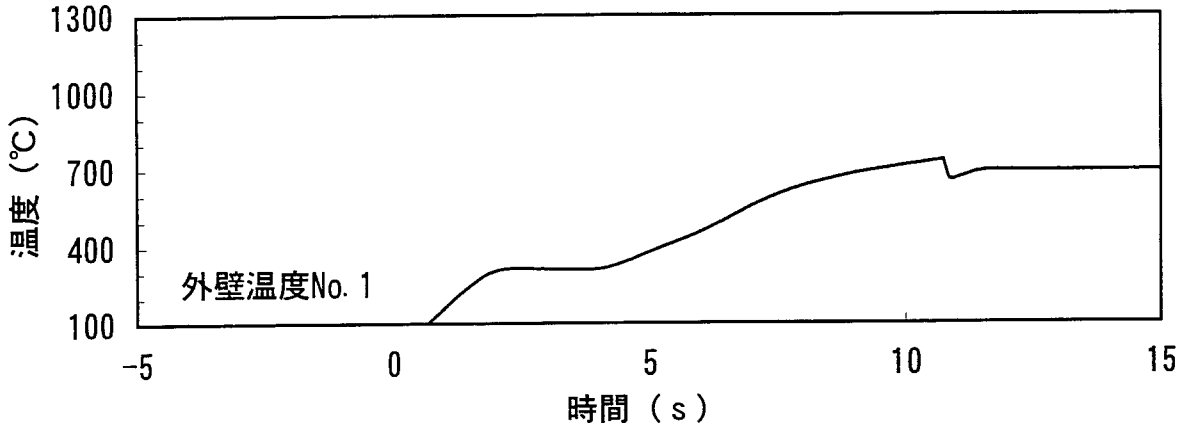


図5-9(b) Run9の試験データ(その1)

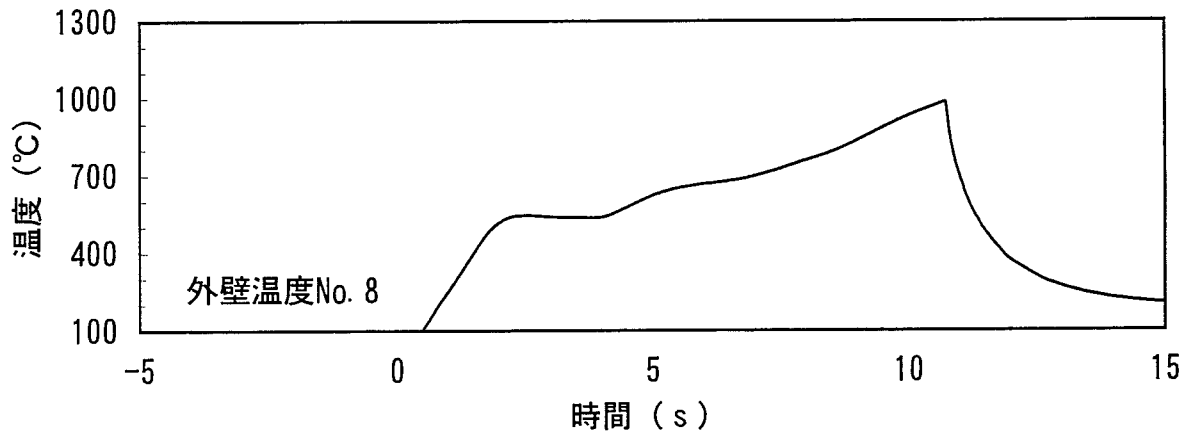
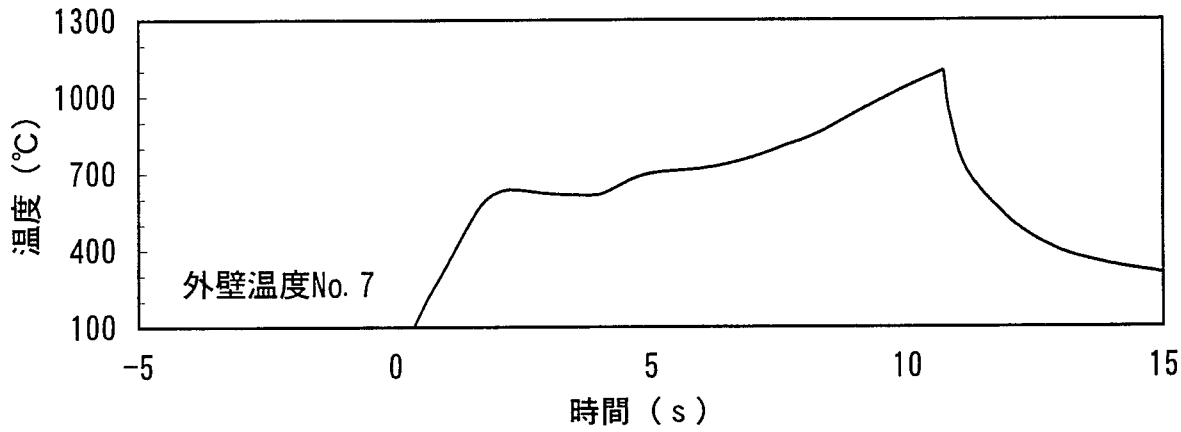
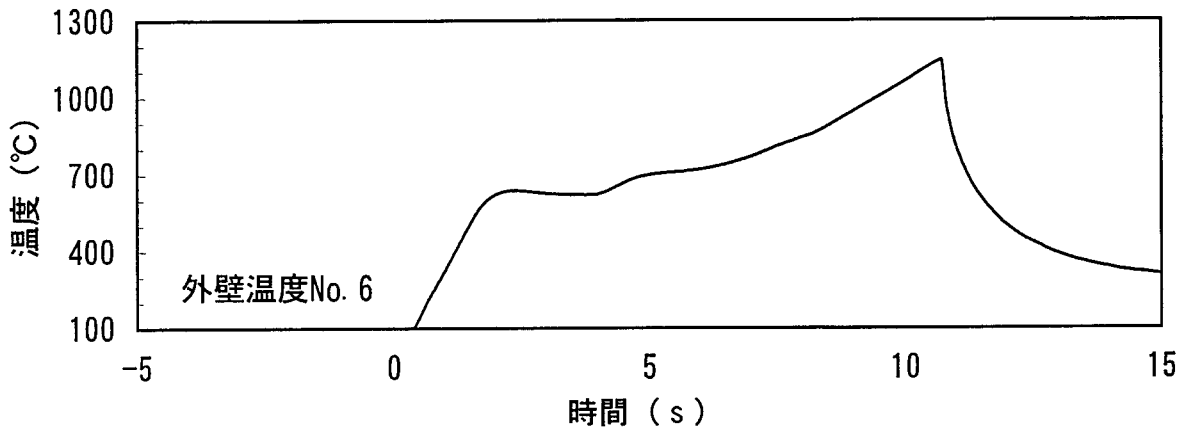
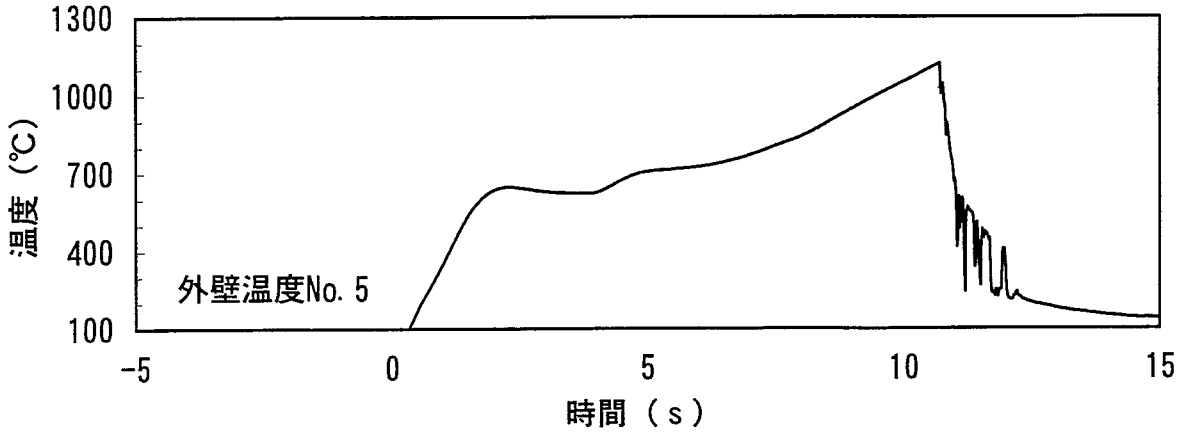


図5-9(b) Run9の試験データ(その2)

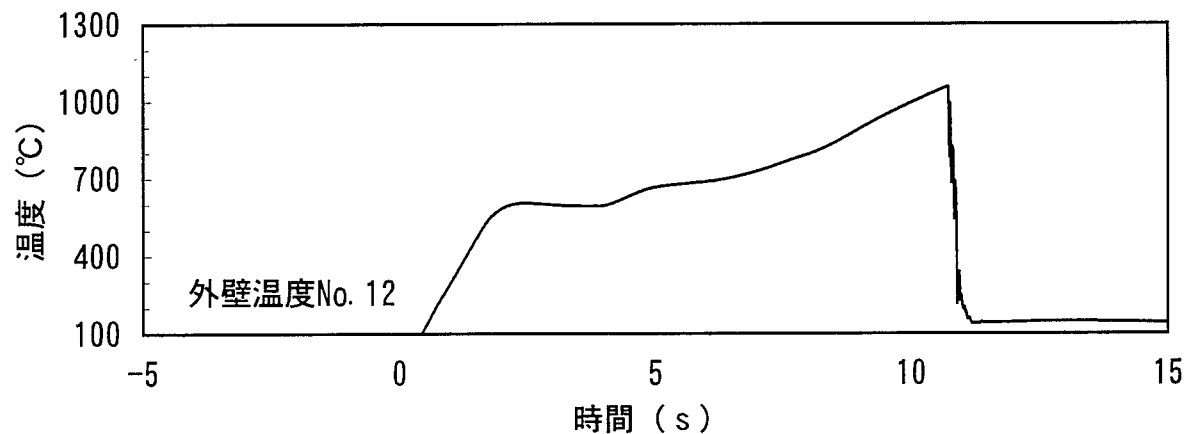
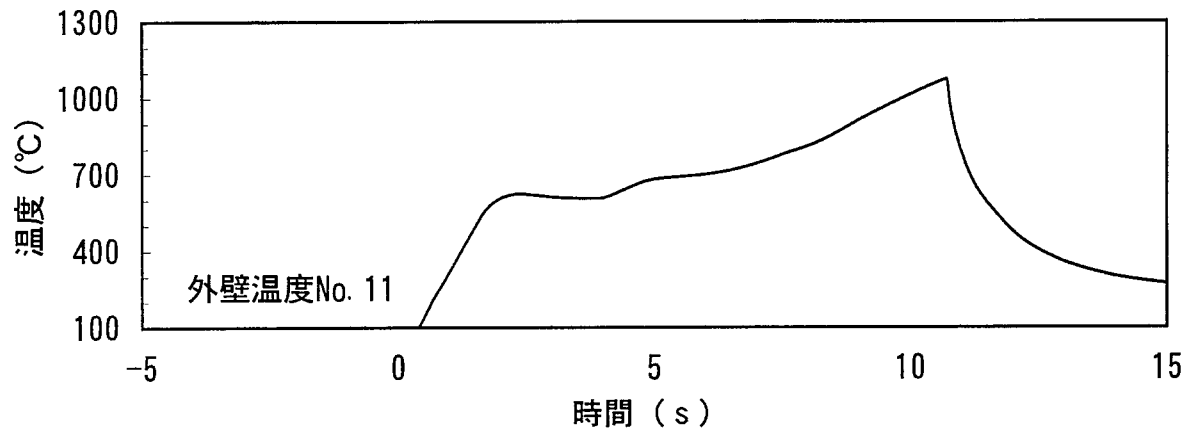
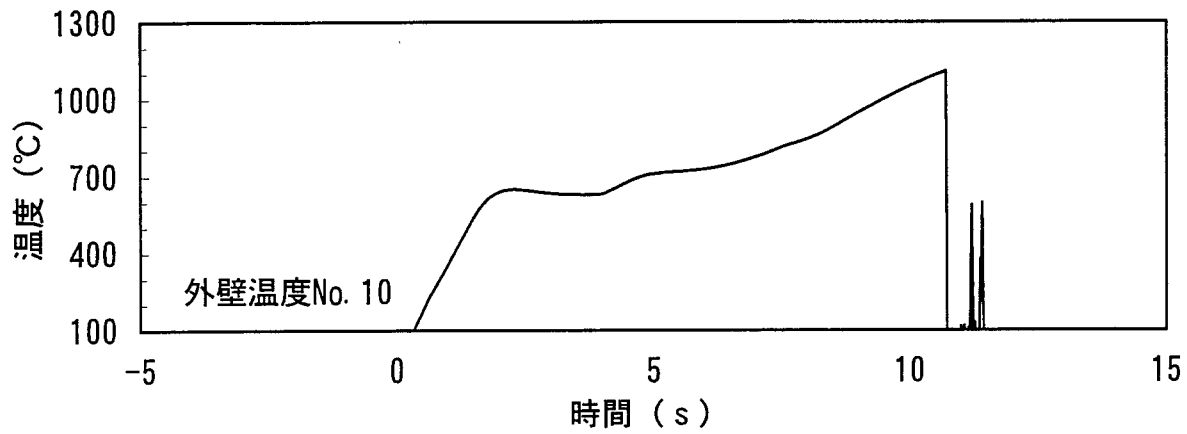
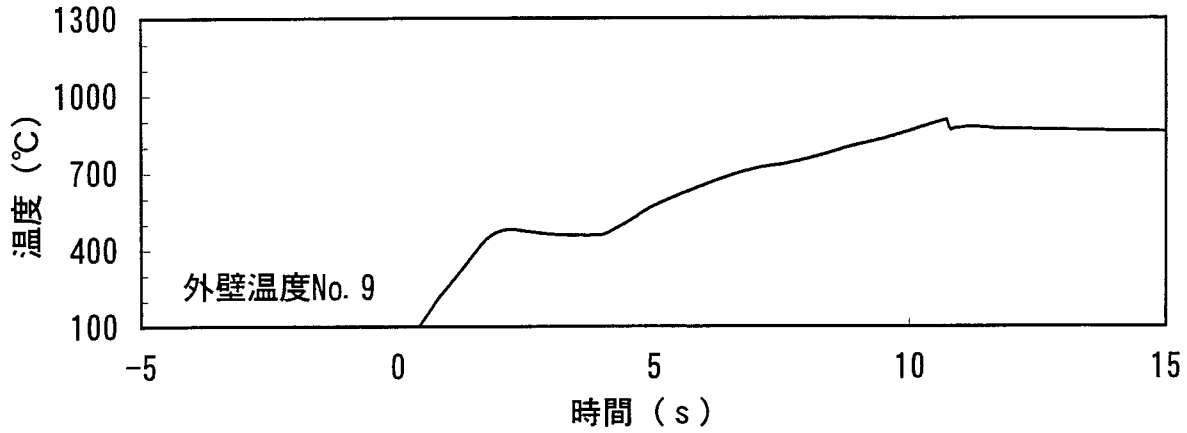


図5-9(b) Run9の試験データ(その3)

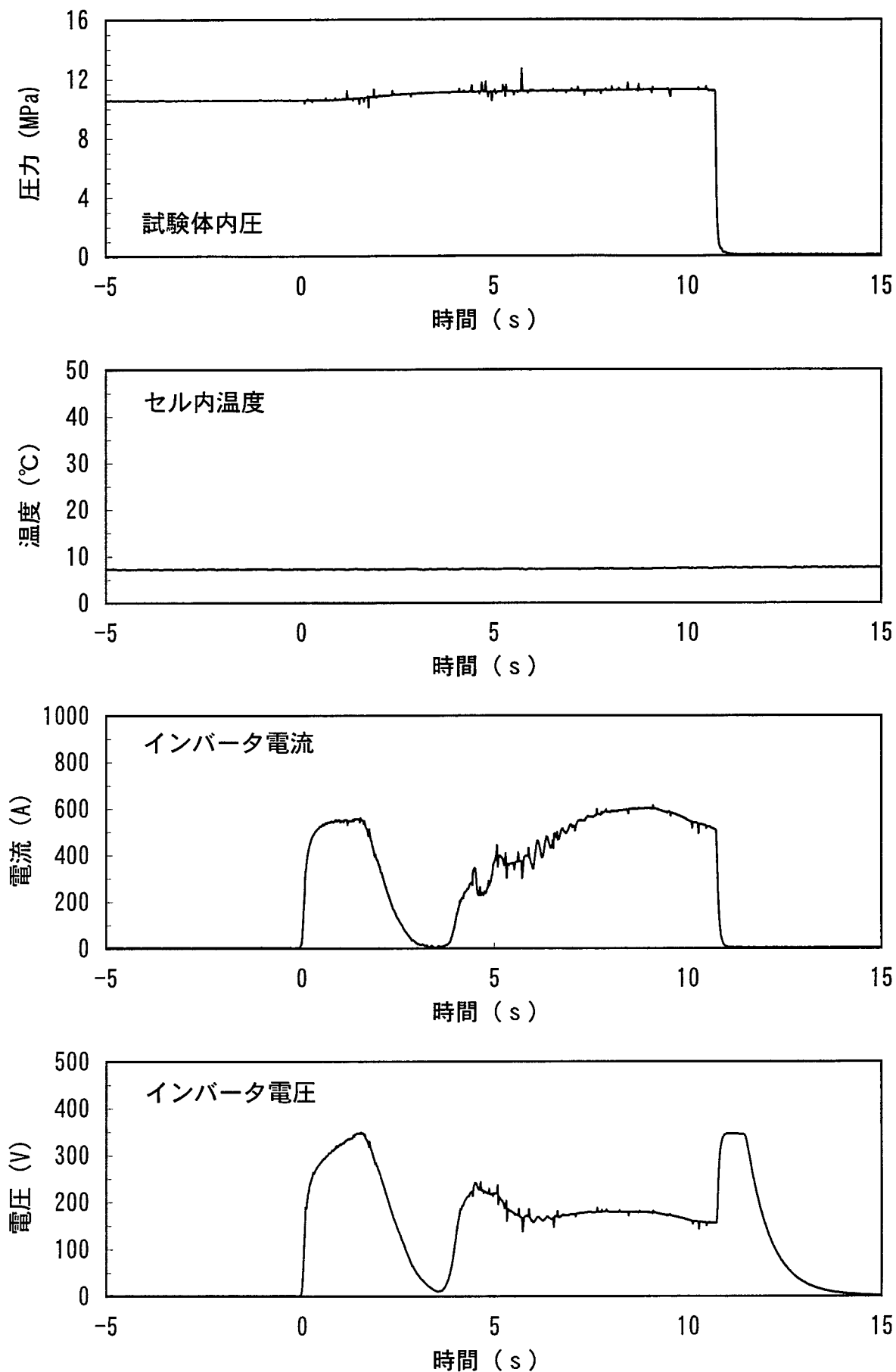


図5-9(b) Run9の試験データ(その4)

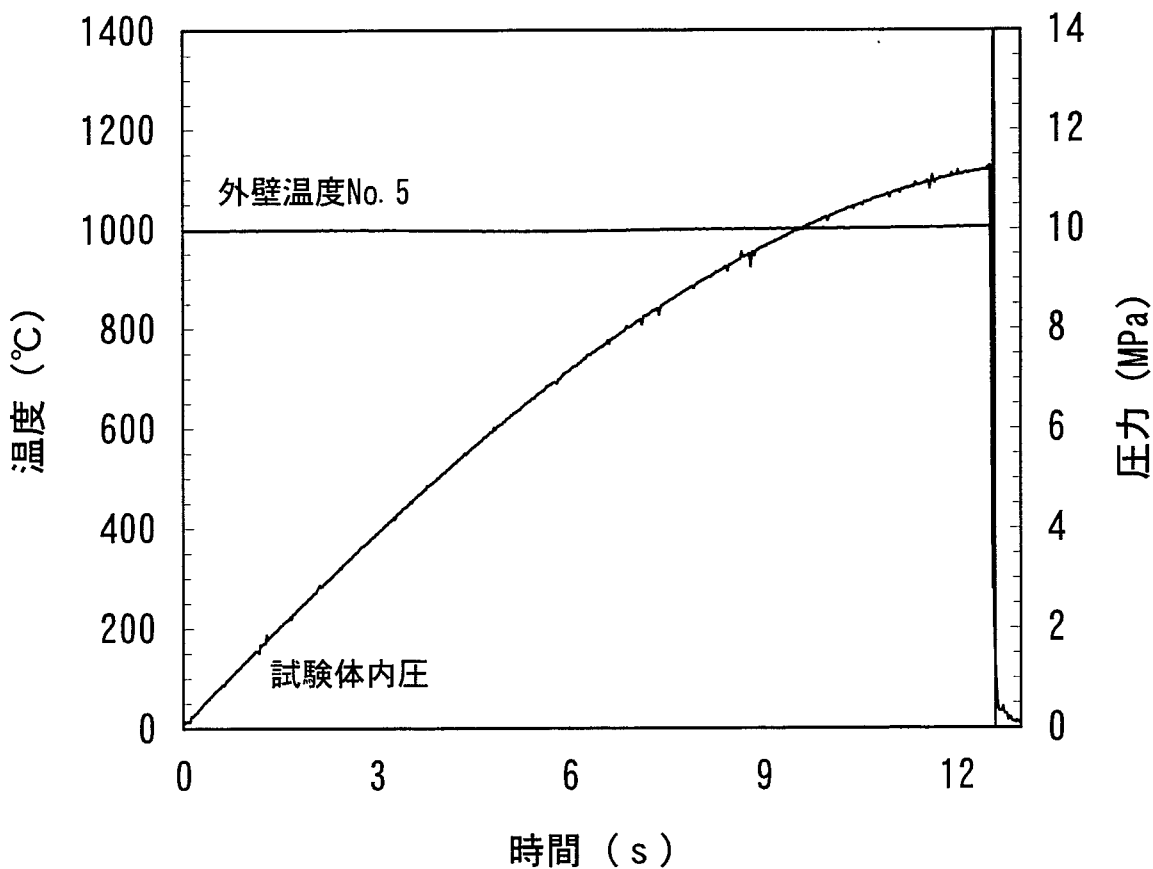
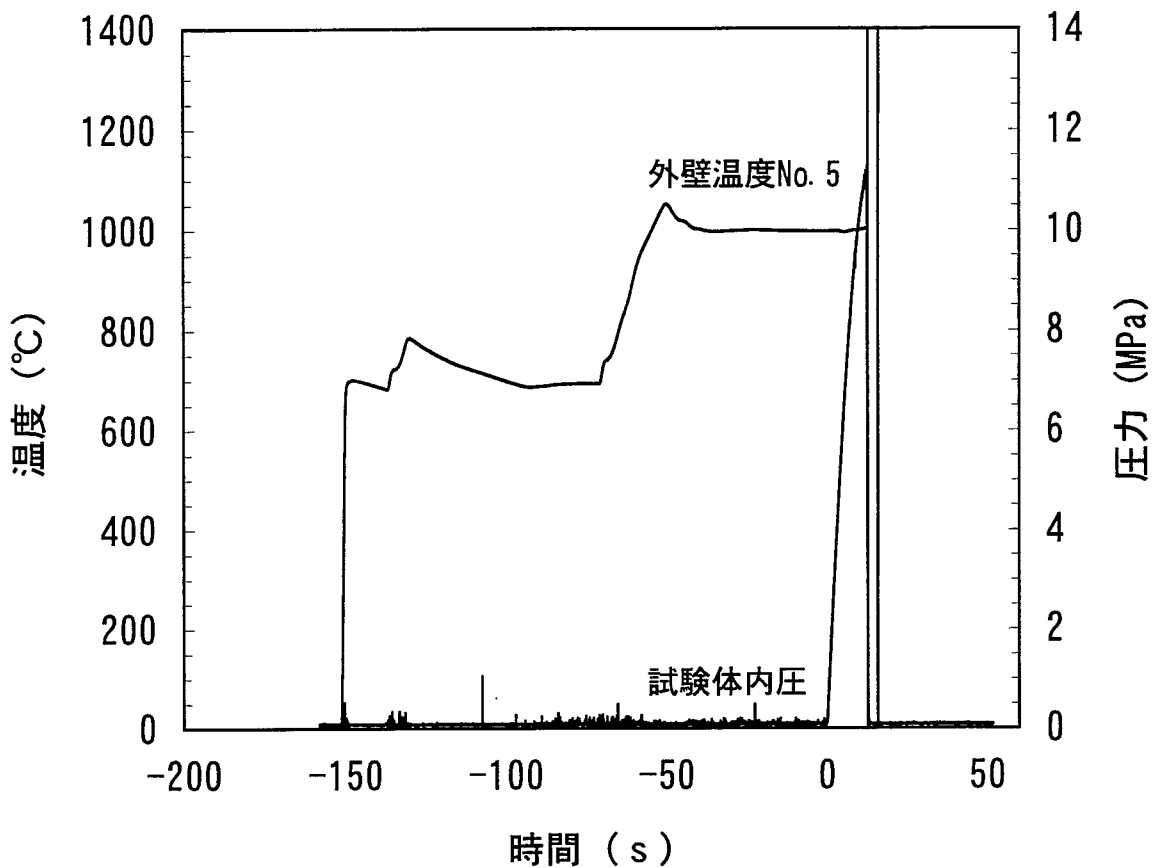


図5-10(a) Run10の試験結果(上:全体、下:試験時)

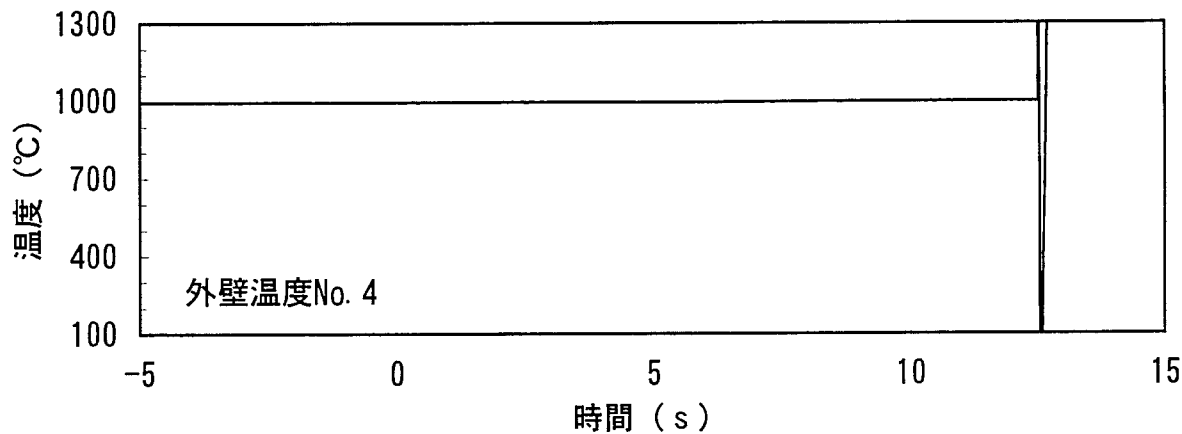
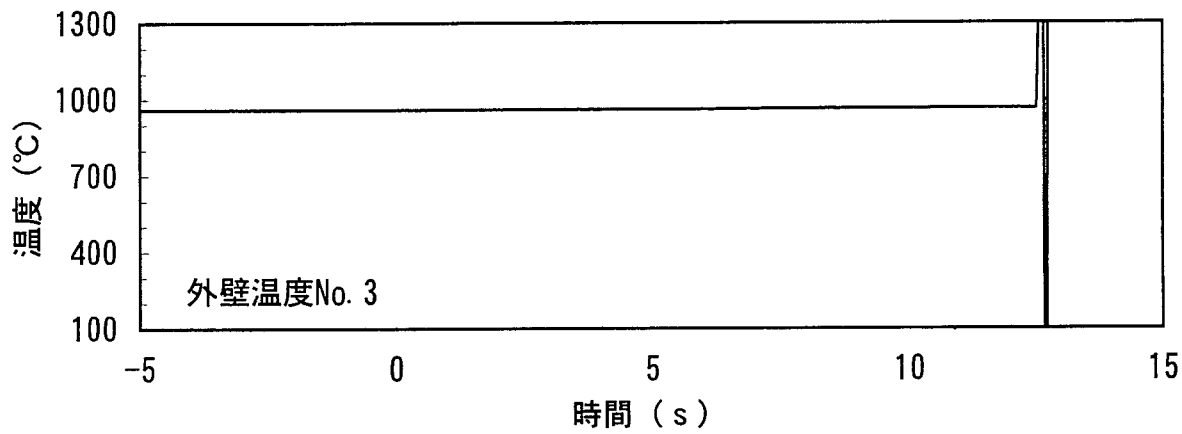
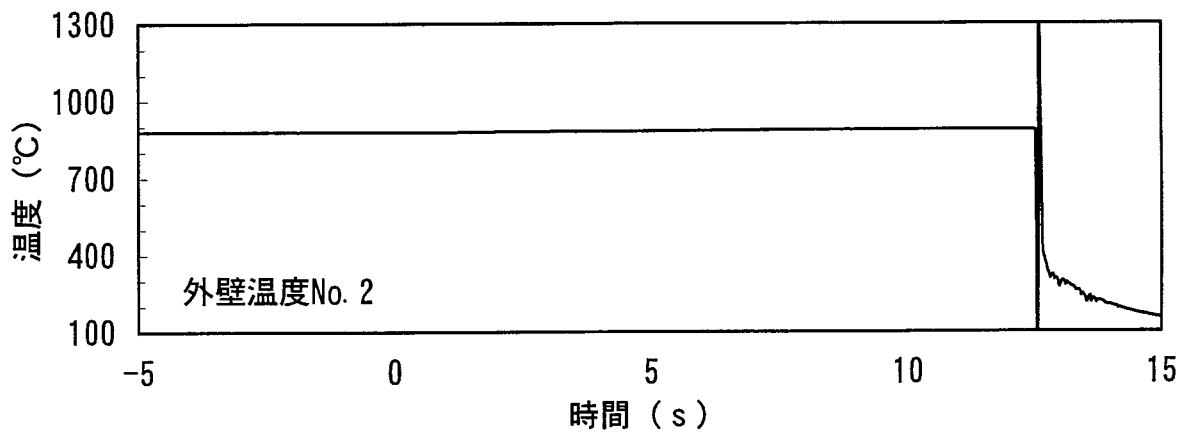
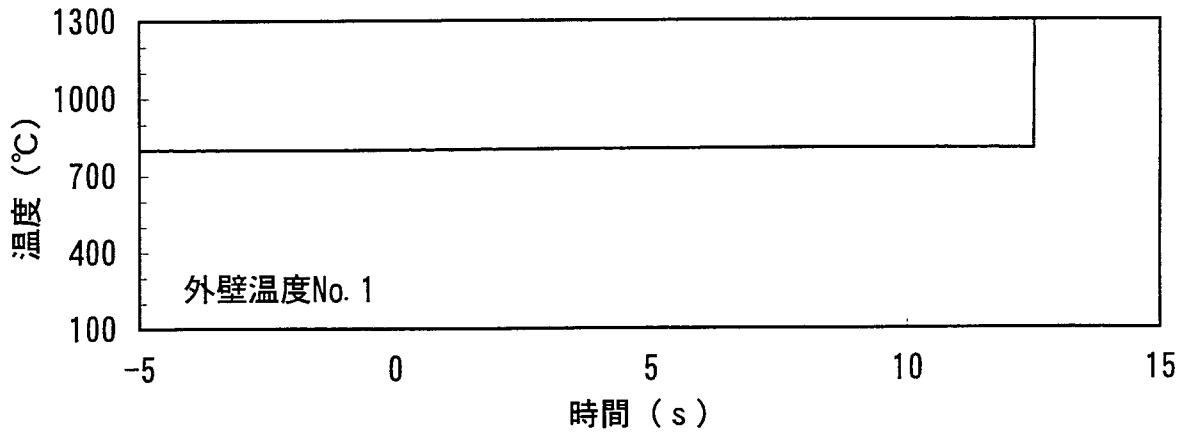


図5-10(b) Run10の試験データ(その1)

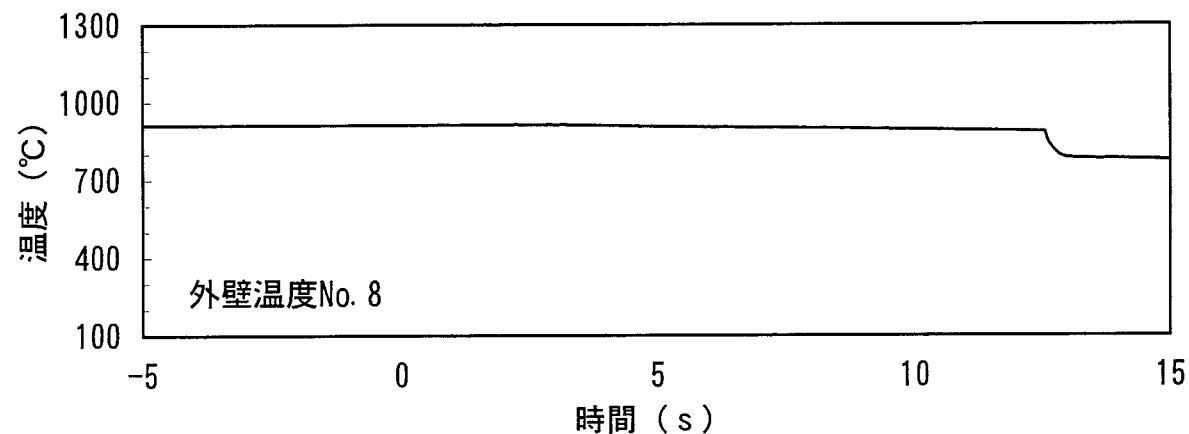
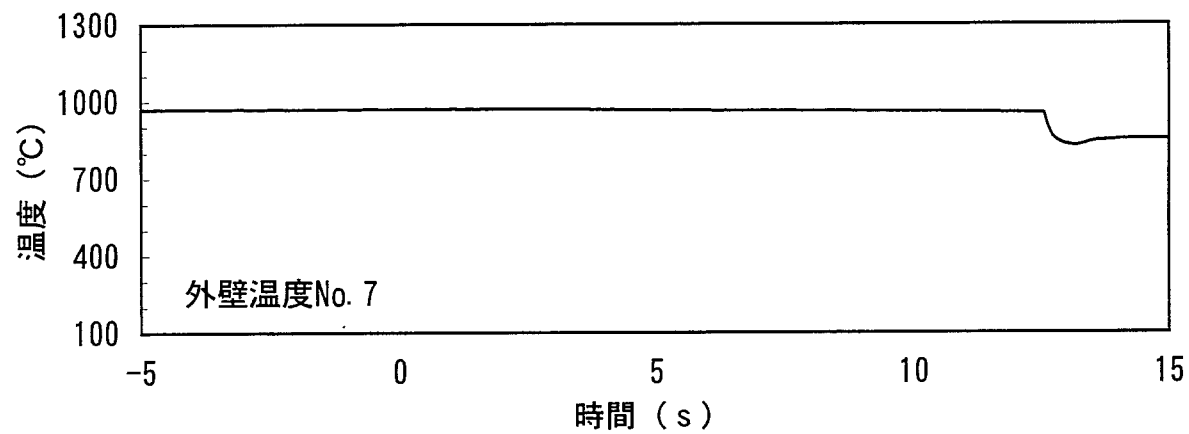
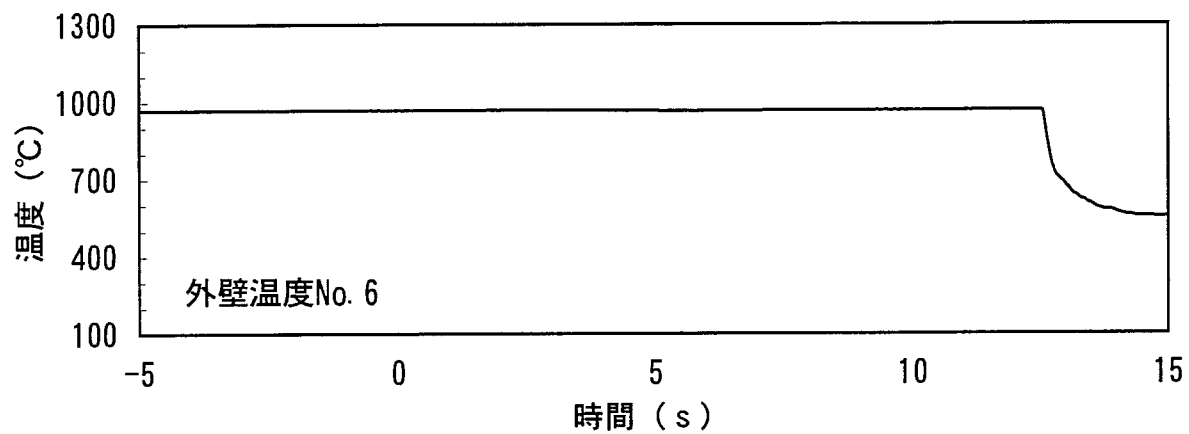
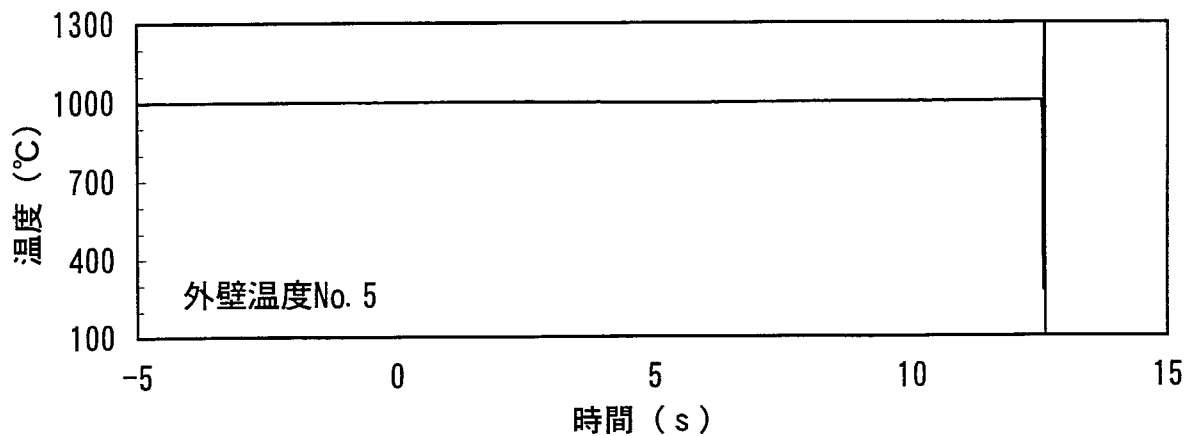


図5-10(b) Run10の試験データ(その2)



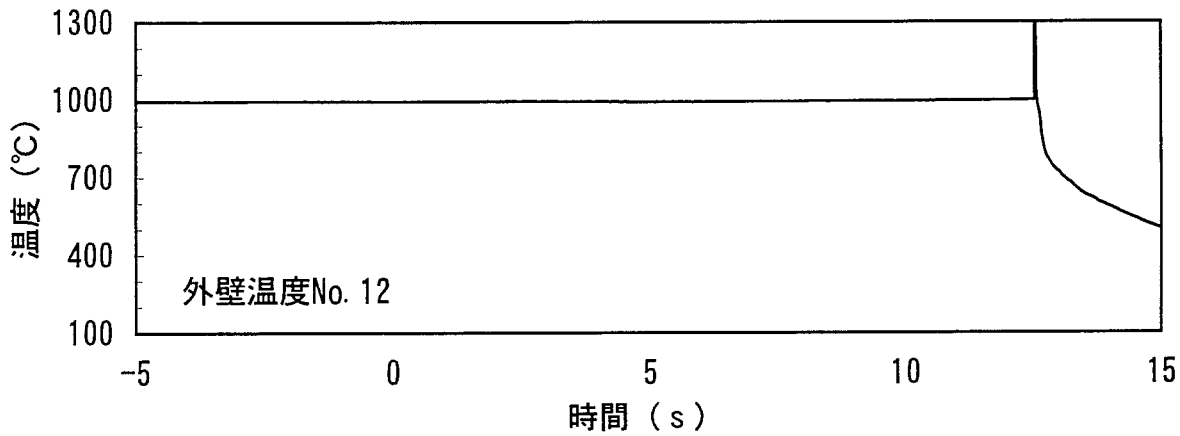
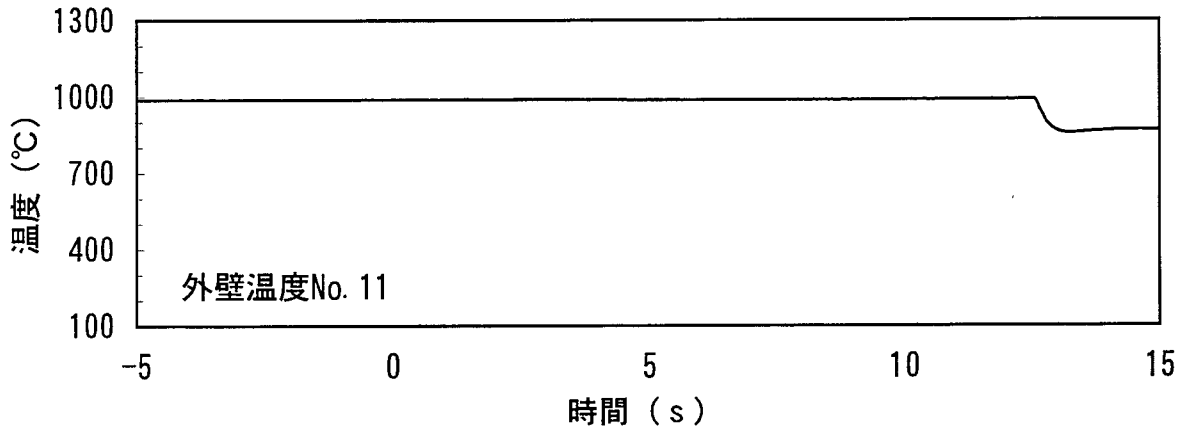
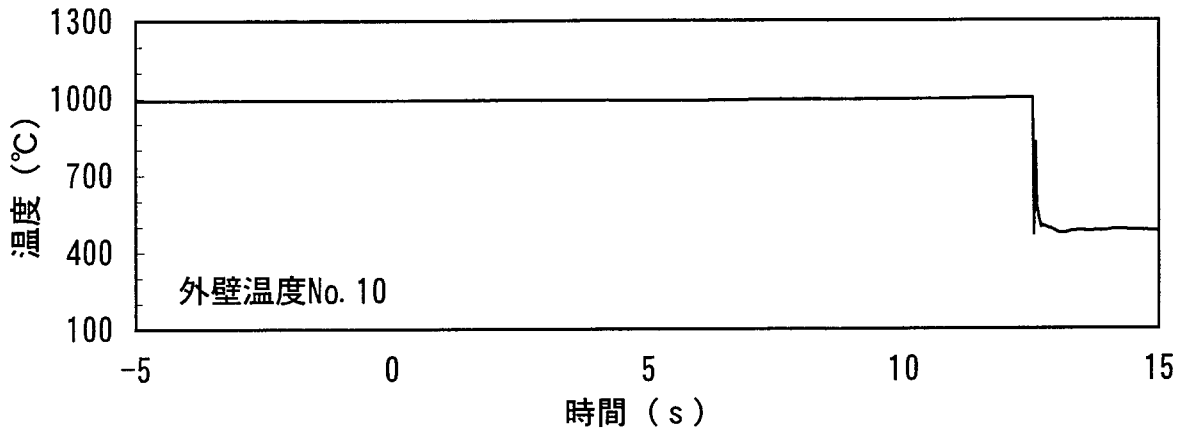
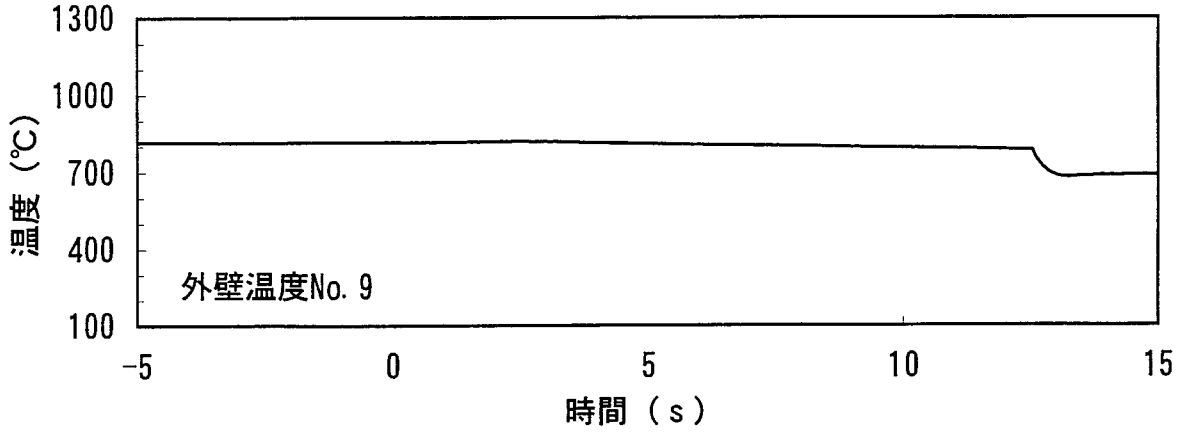


図5-10(b) Run10の試験データ(その3)

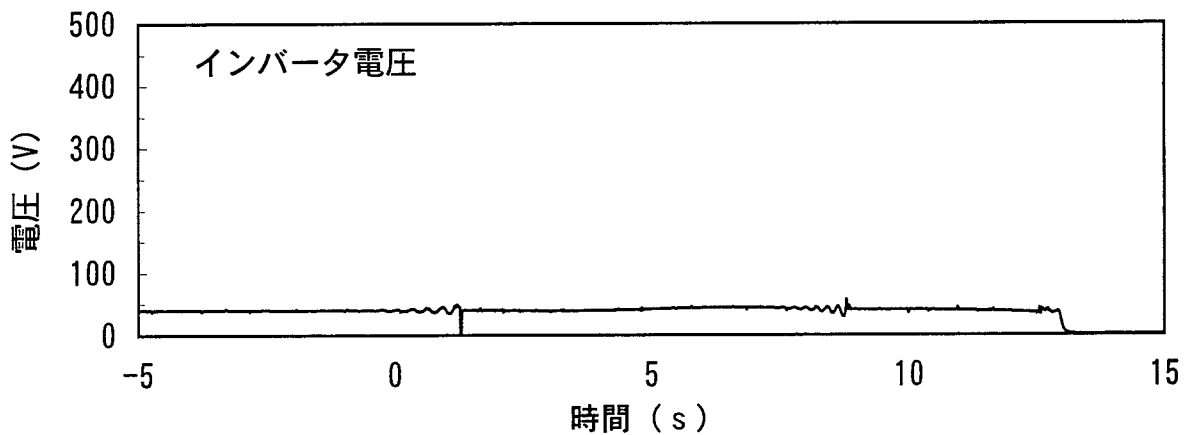
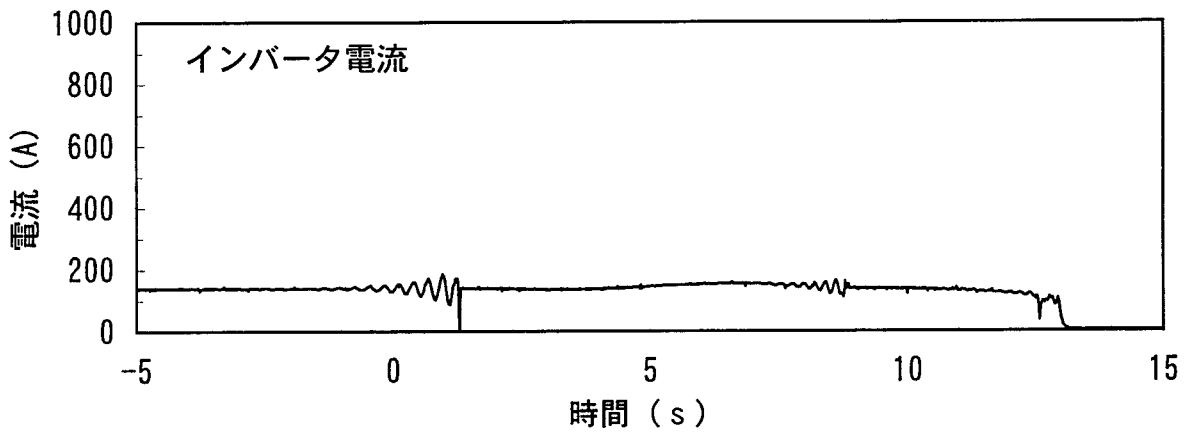
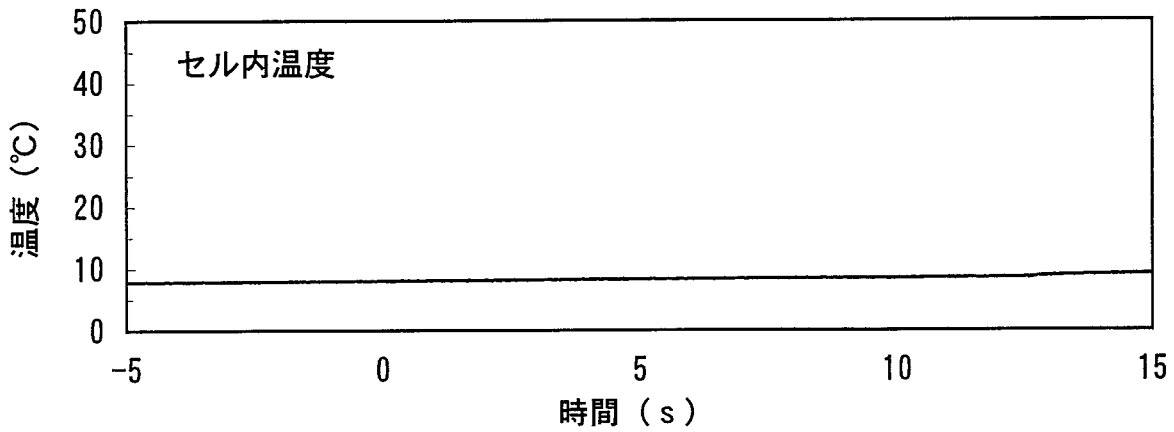
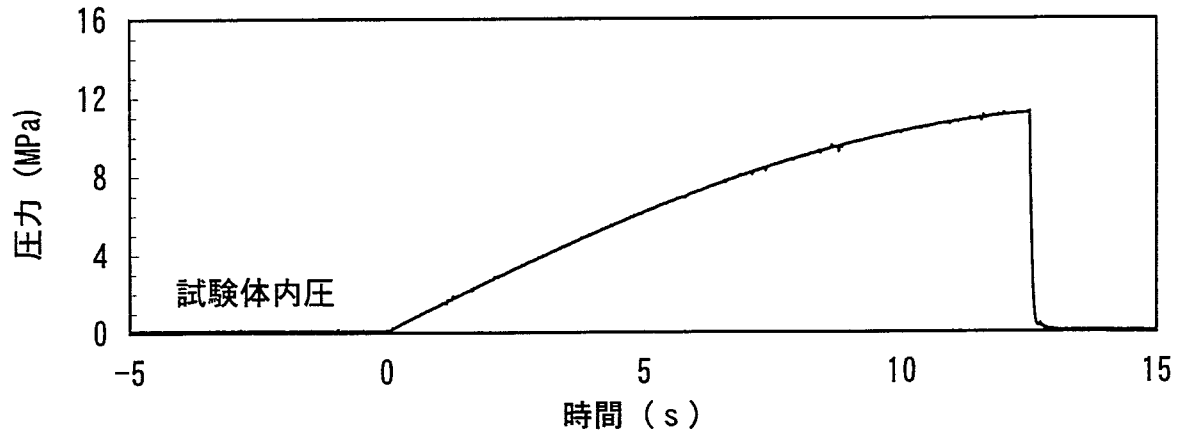


図5-10(b) Run10の試験データ(その4)

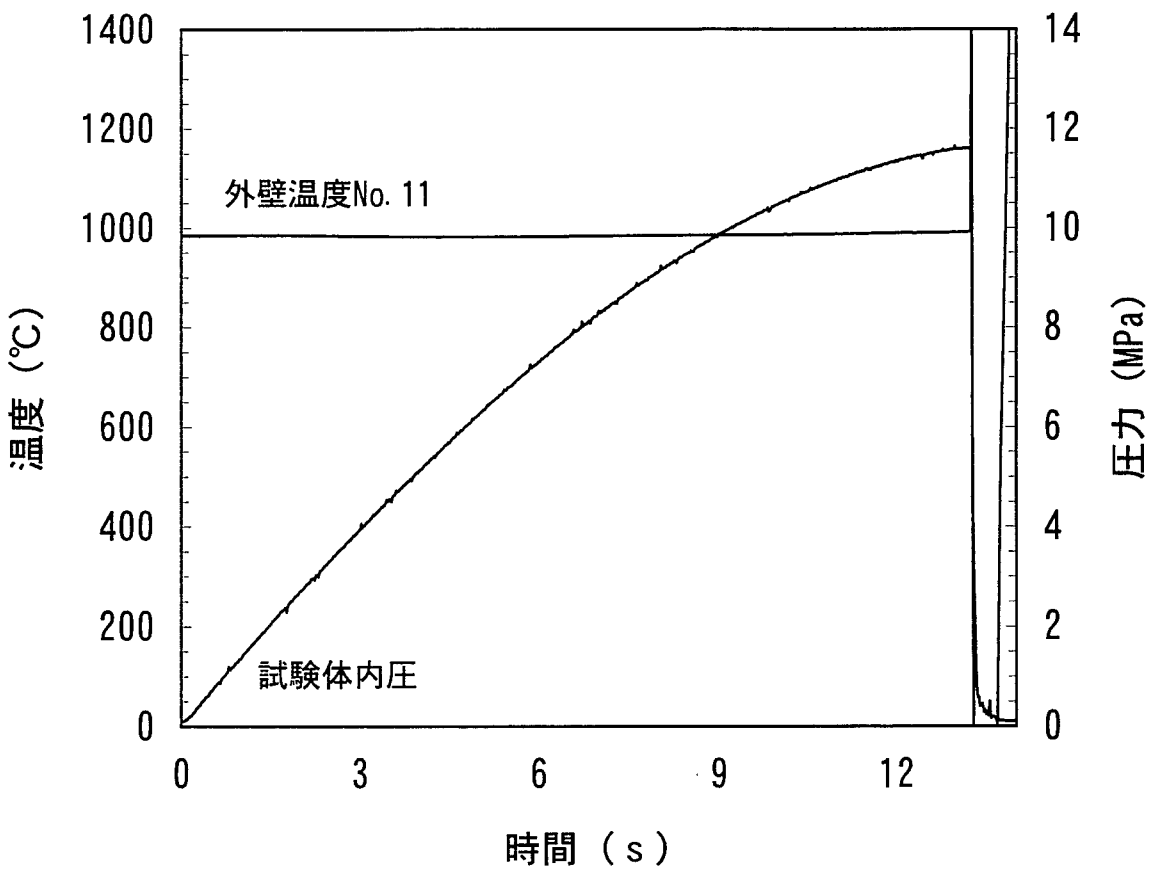
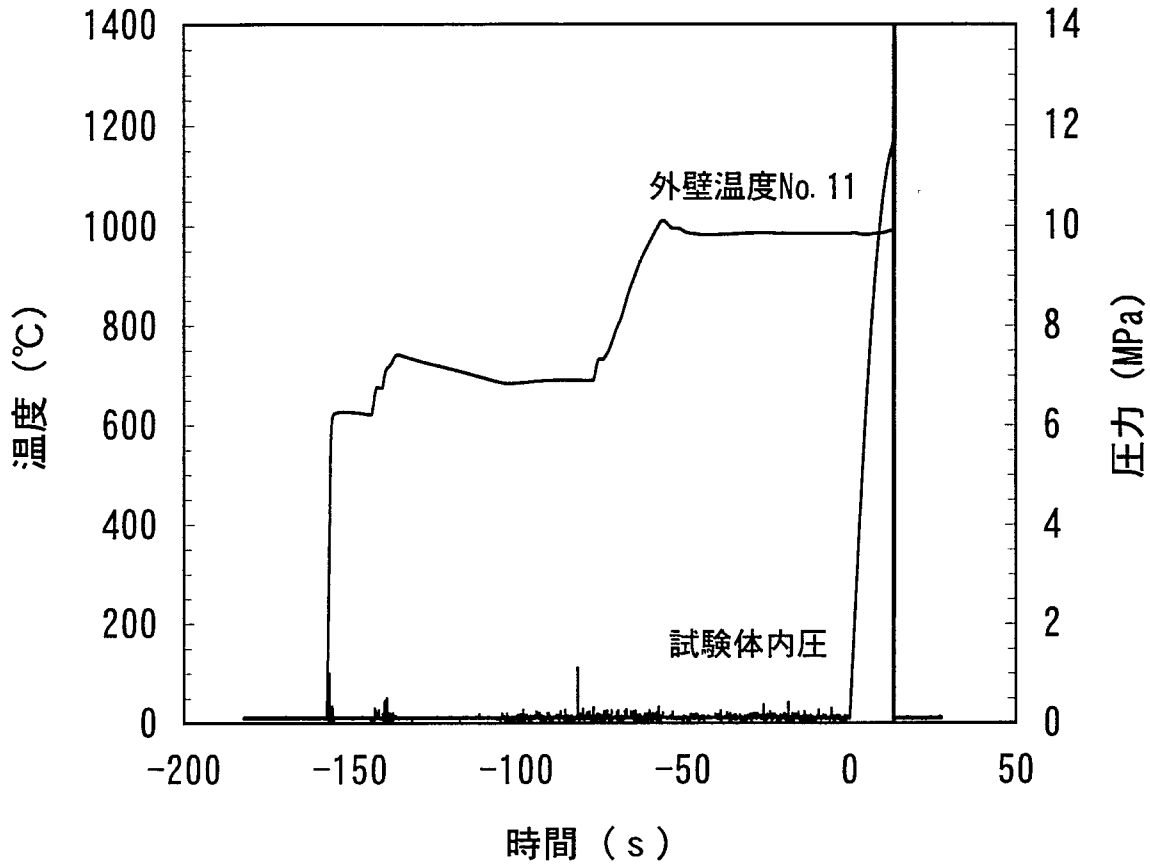


図5-11(a) Run11の試験結果(上:全体、下:試験時)

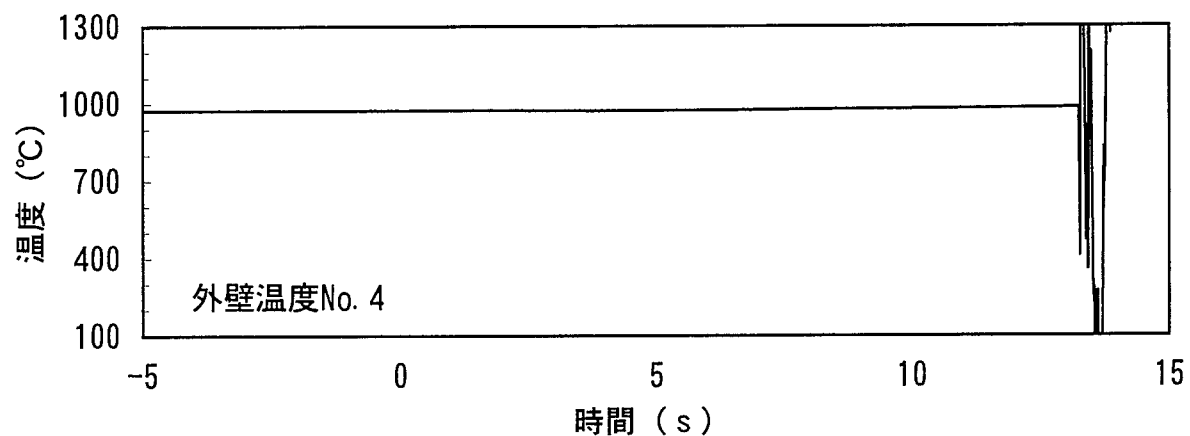
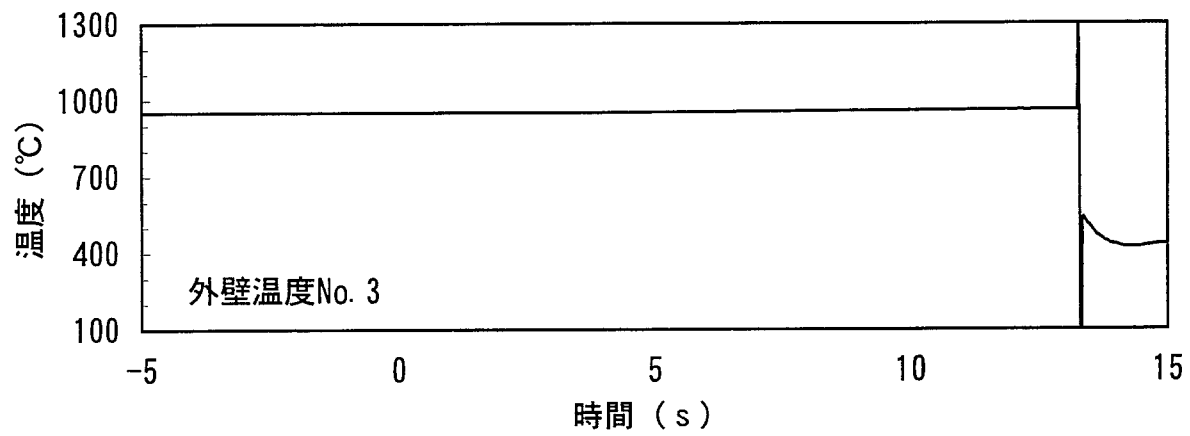
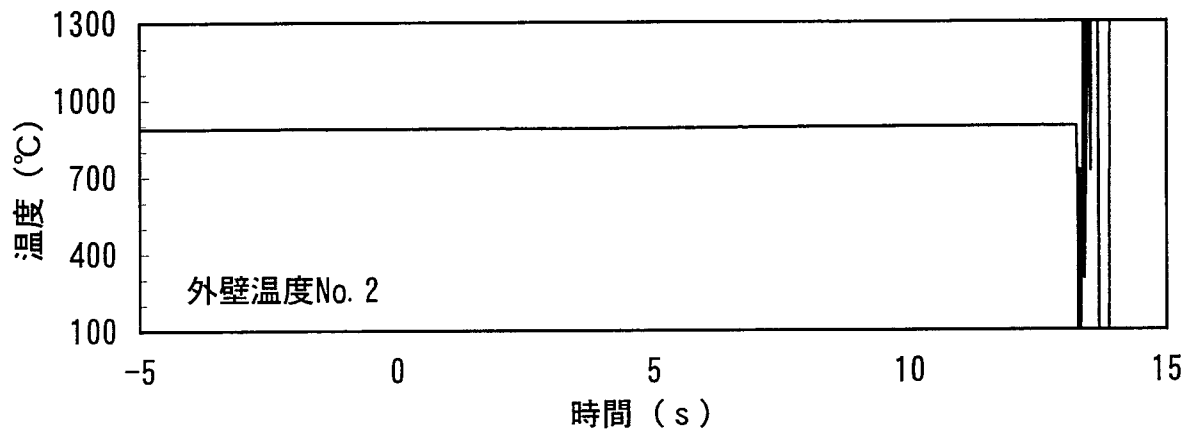
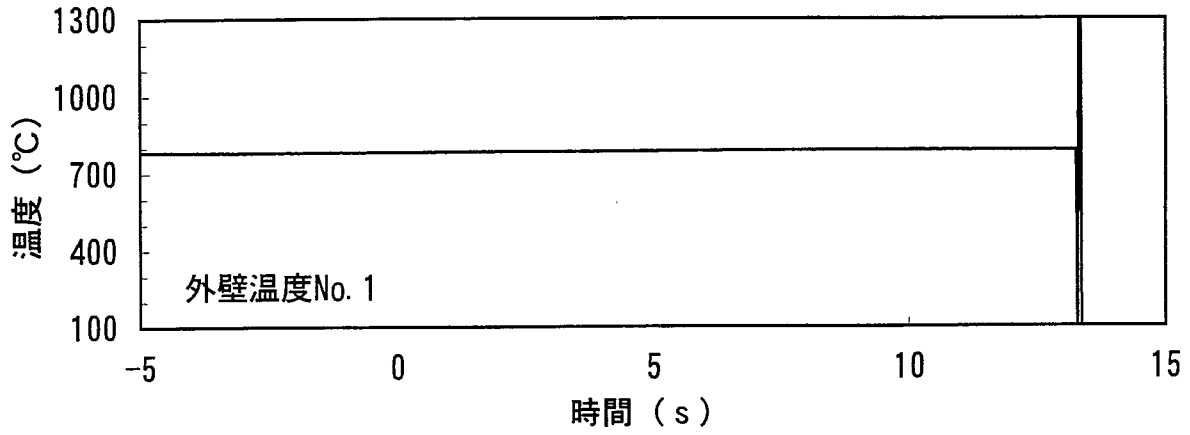


図5-11(b) Run11の試験データ(その1)

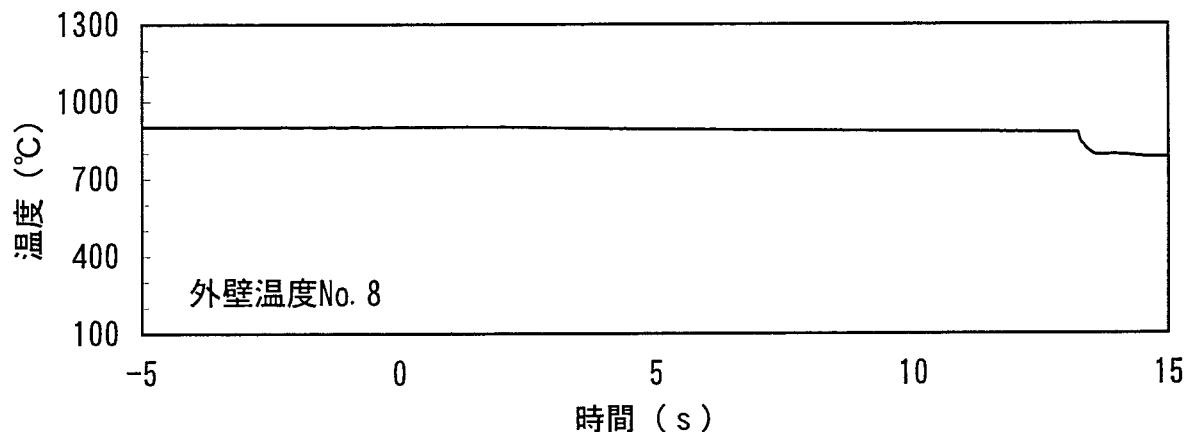
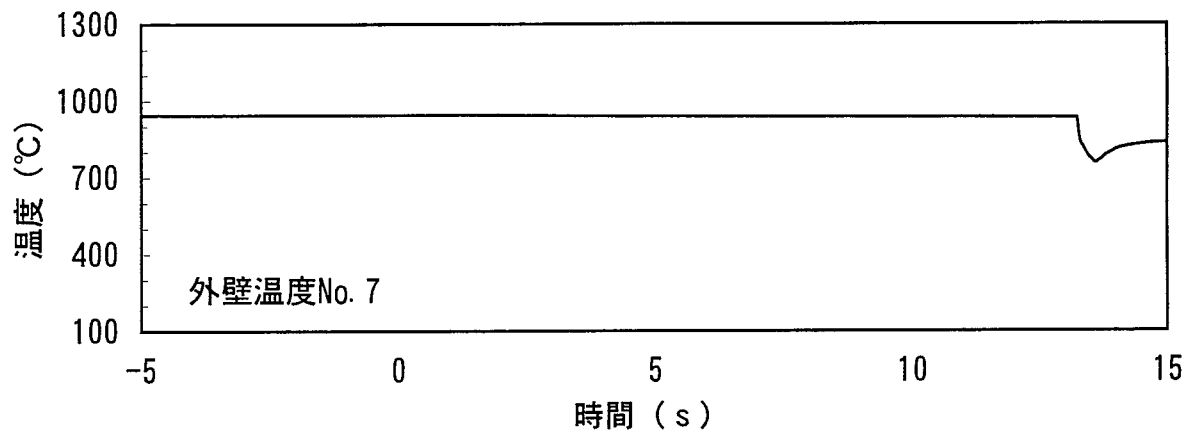
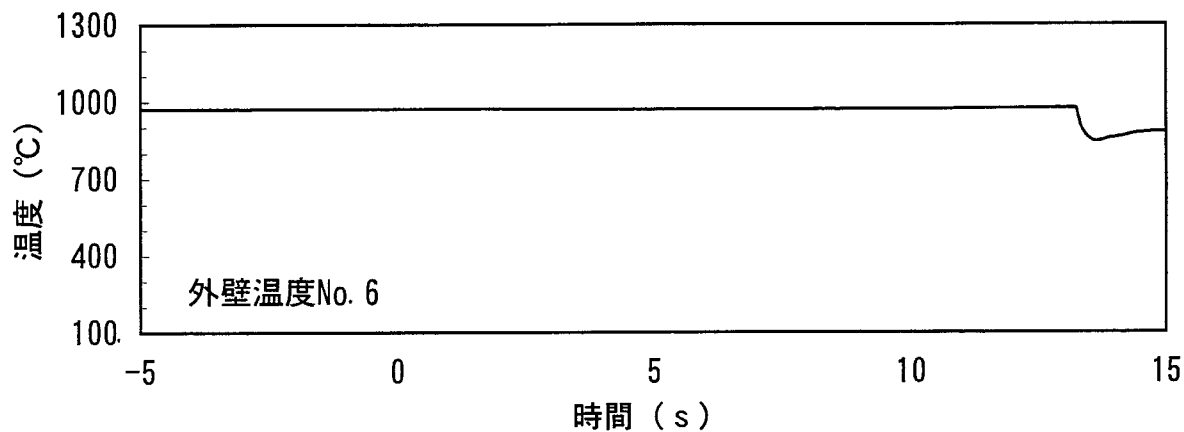
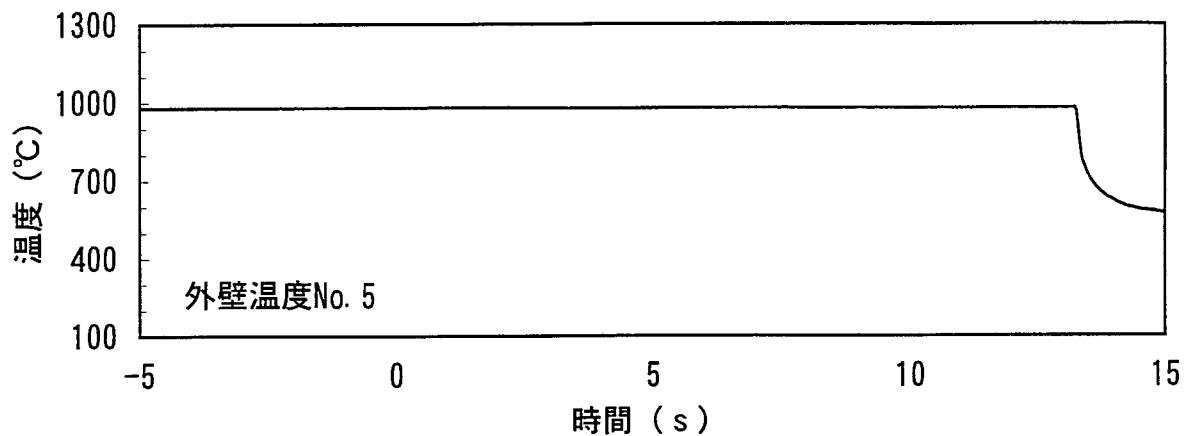


図5-11(b) Run11の試験データ(その2)

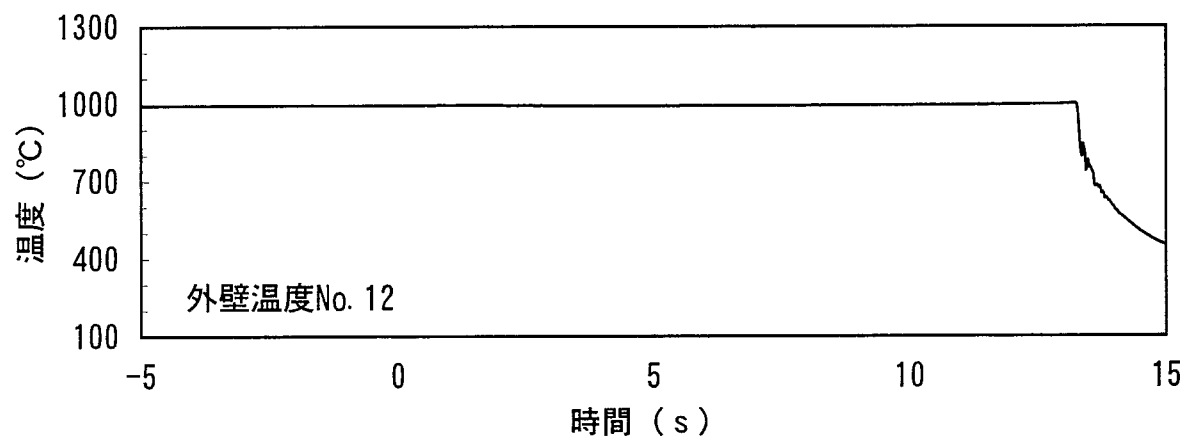
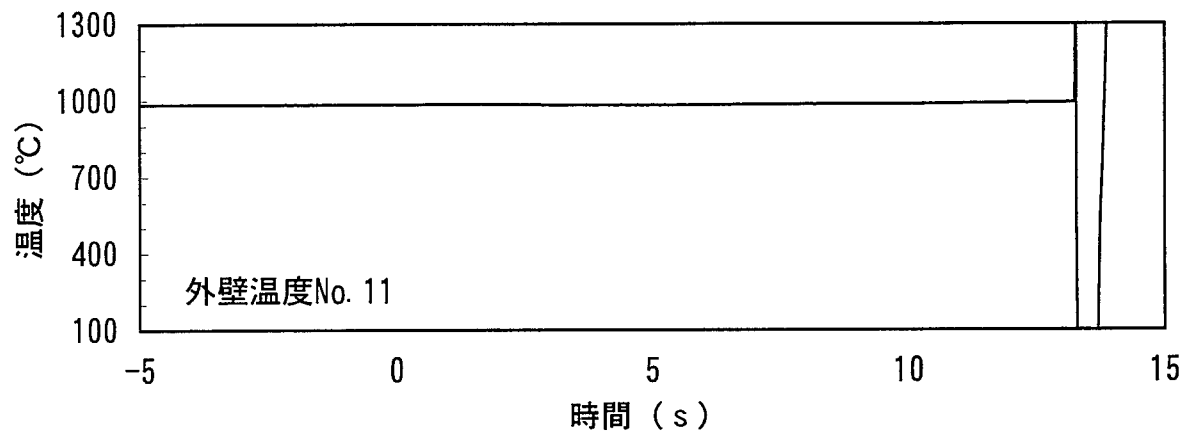
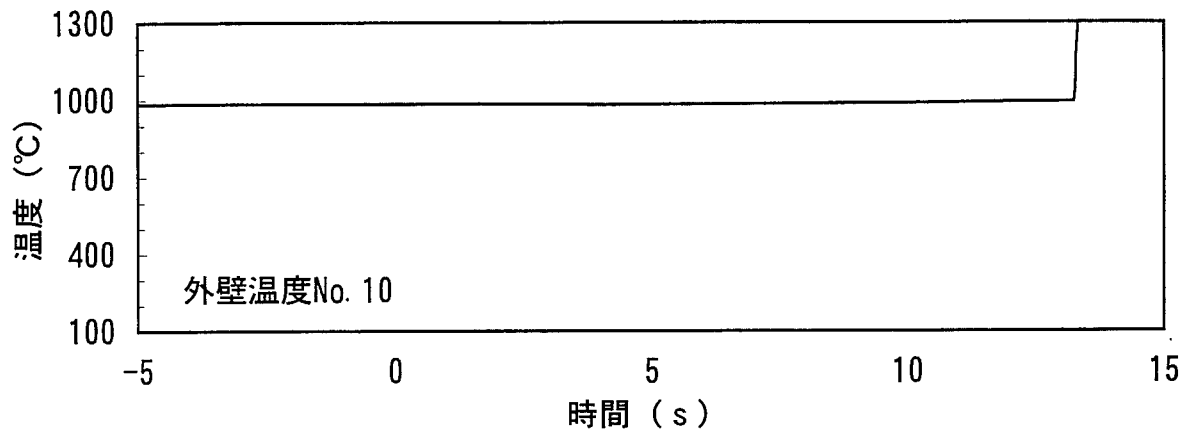
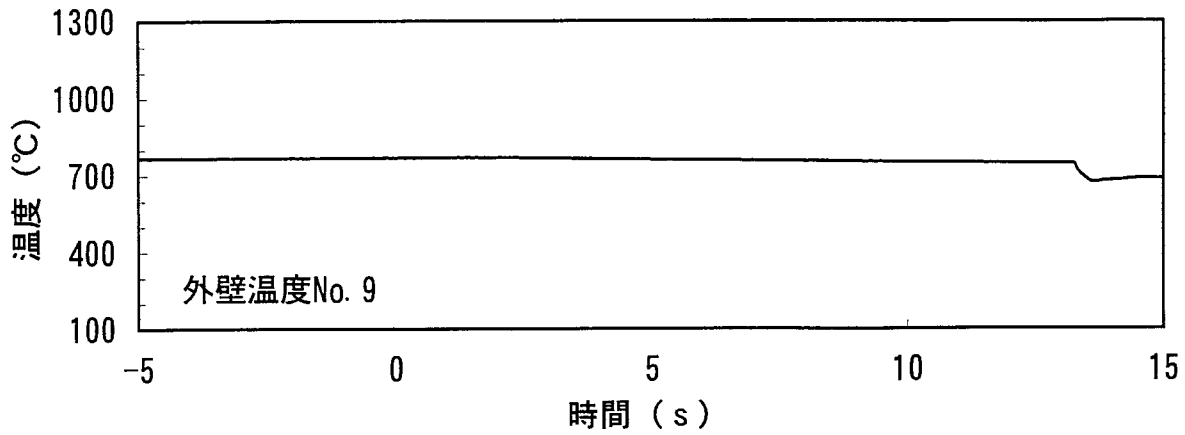


図5-11(b) Run11の試験データ(その3)

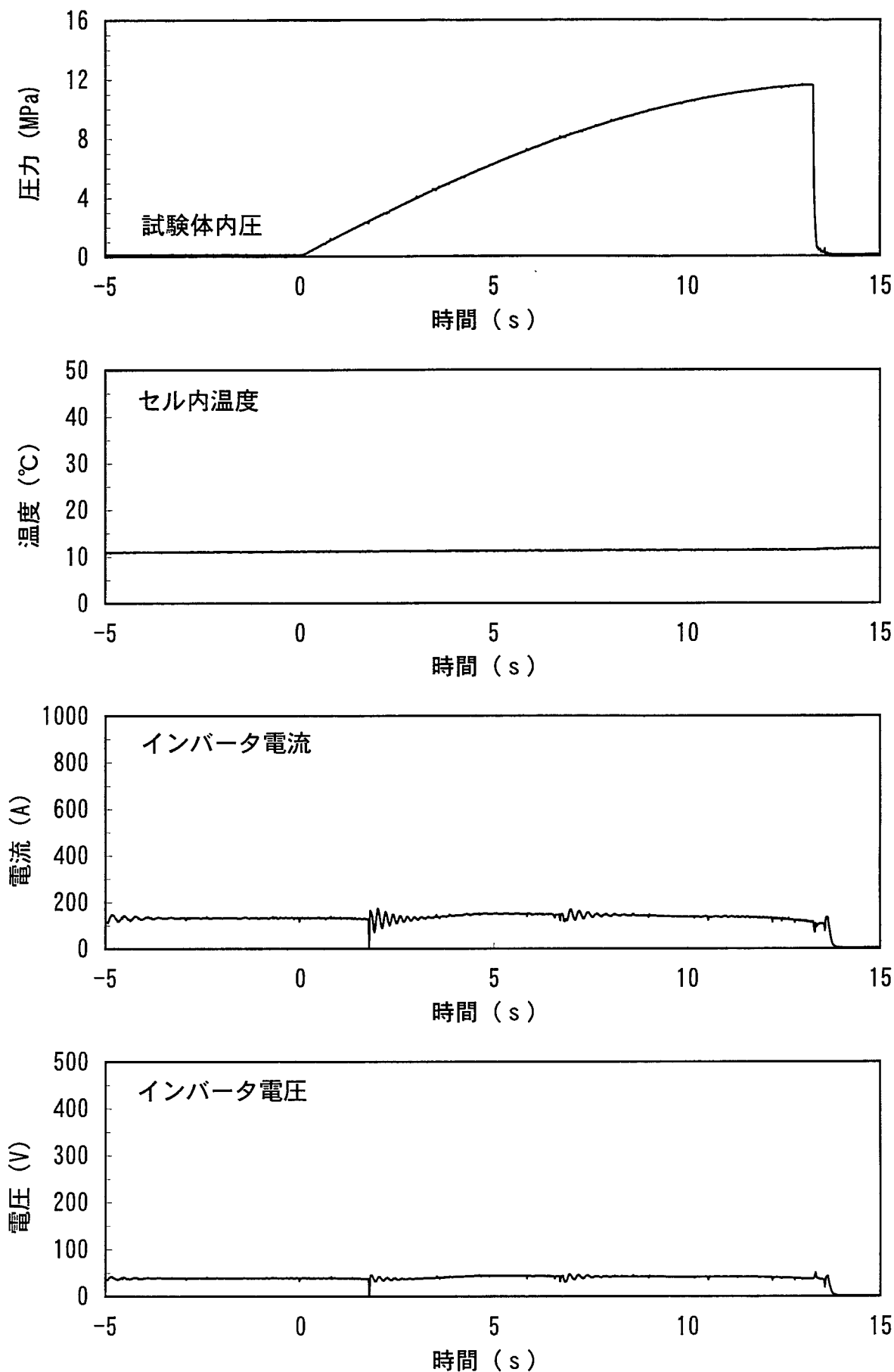


図5-11(b) Run11の試験データ(その4)

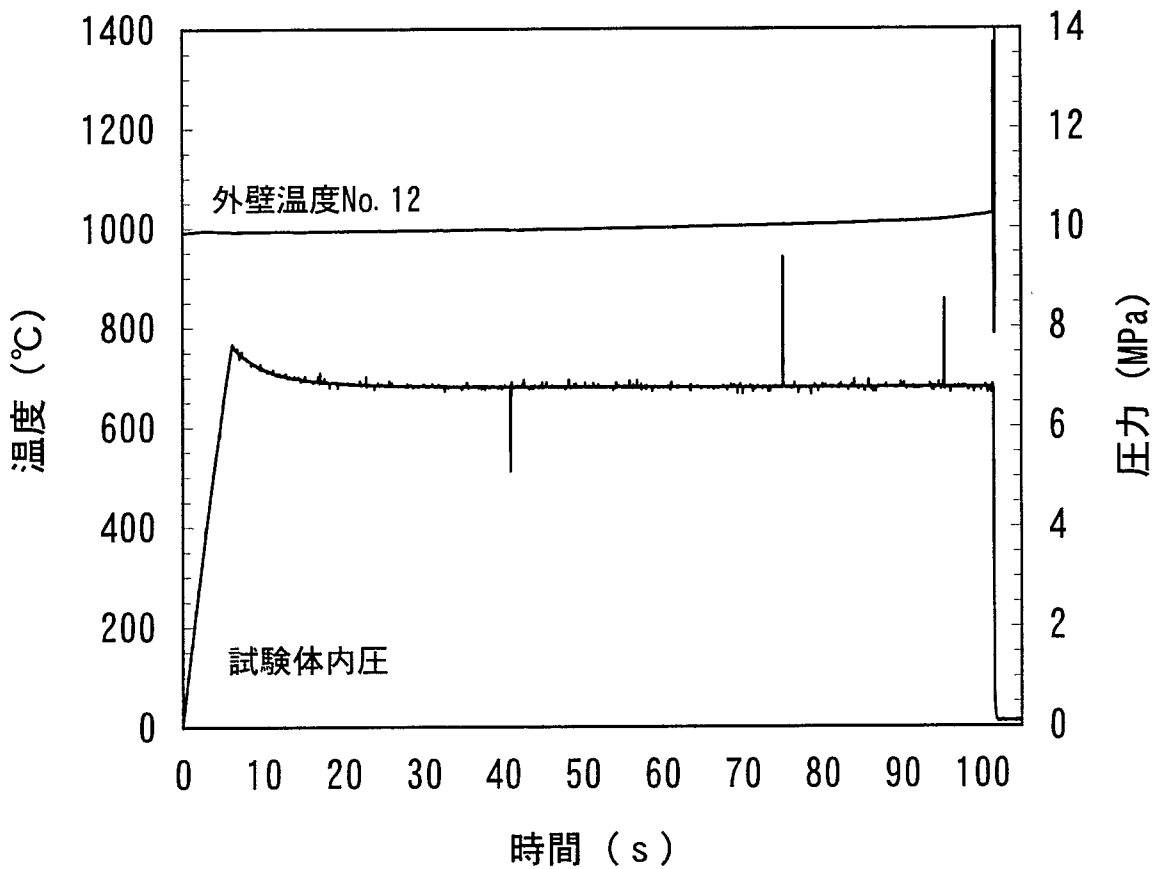
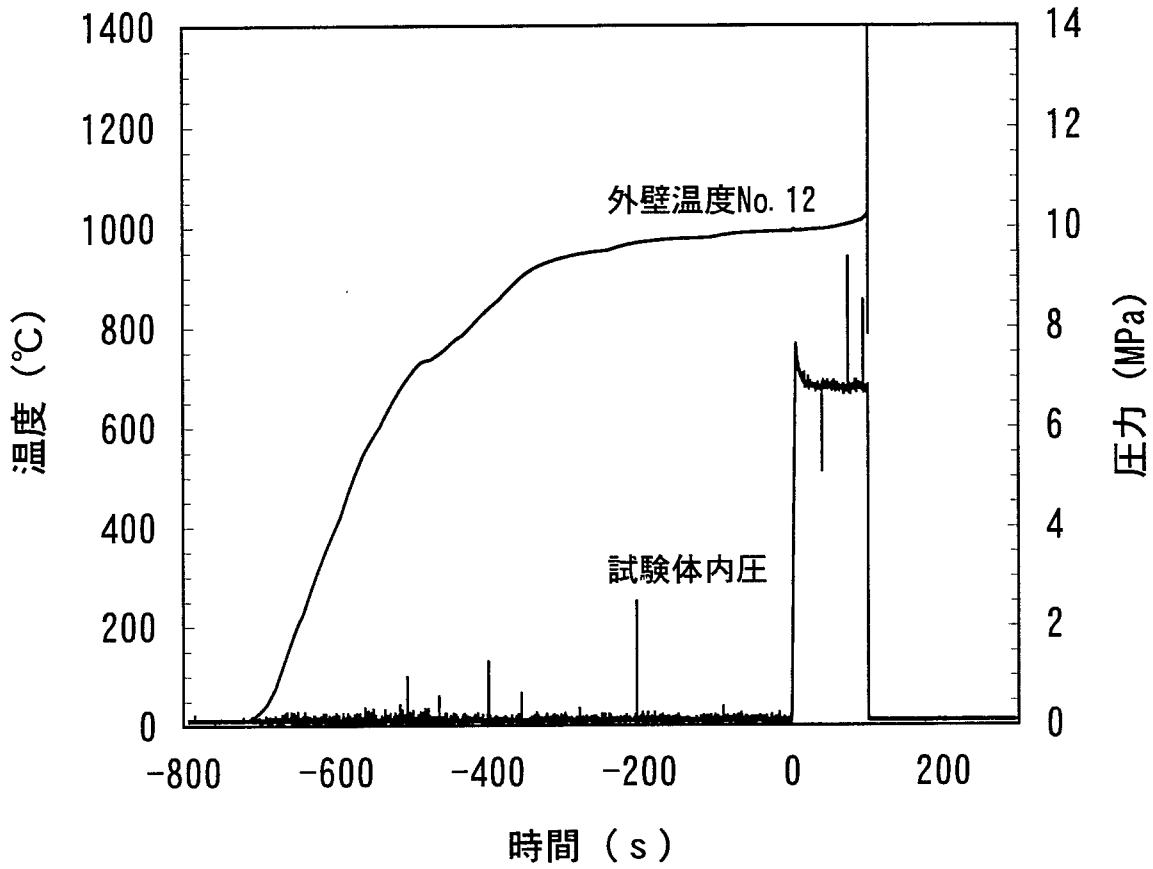


図5-12(a) Run12の試験結果(上:全体、下:試験時)



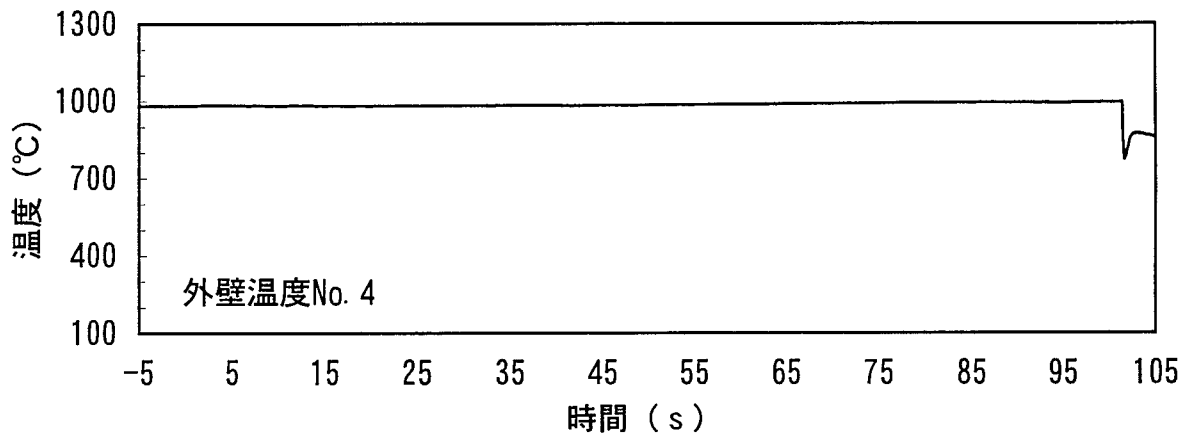
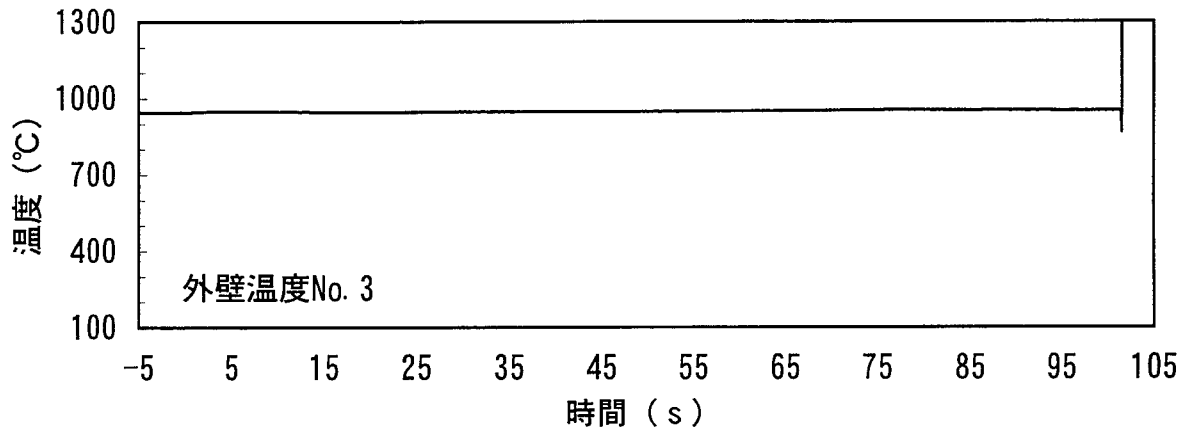
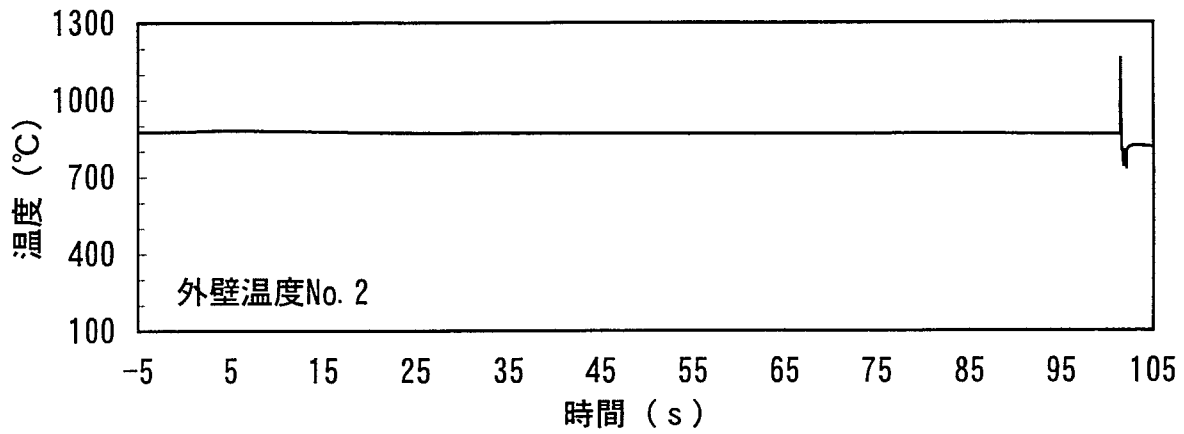
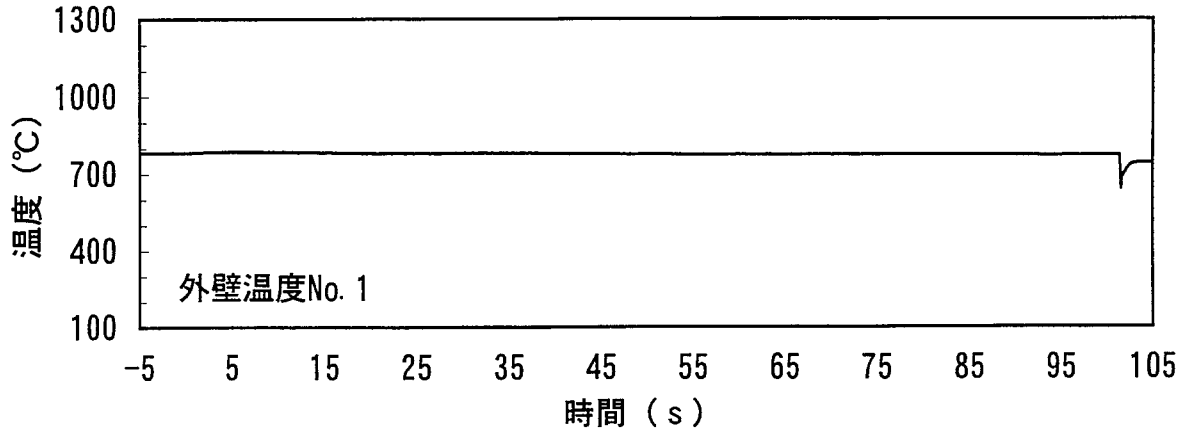


図5-12(b) Run12の試験データ(その1)

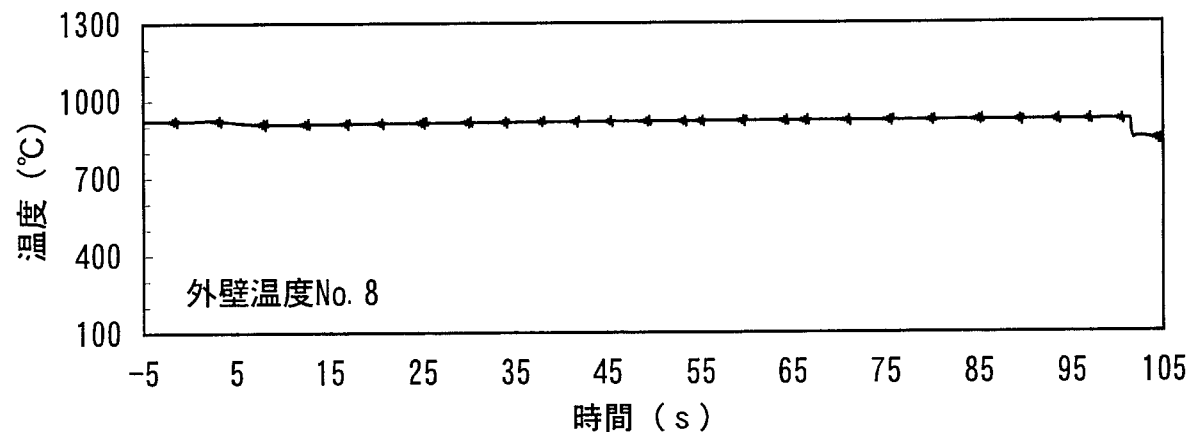
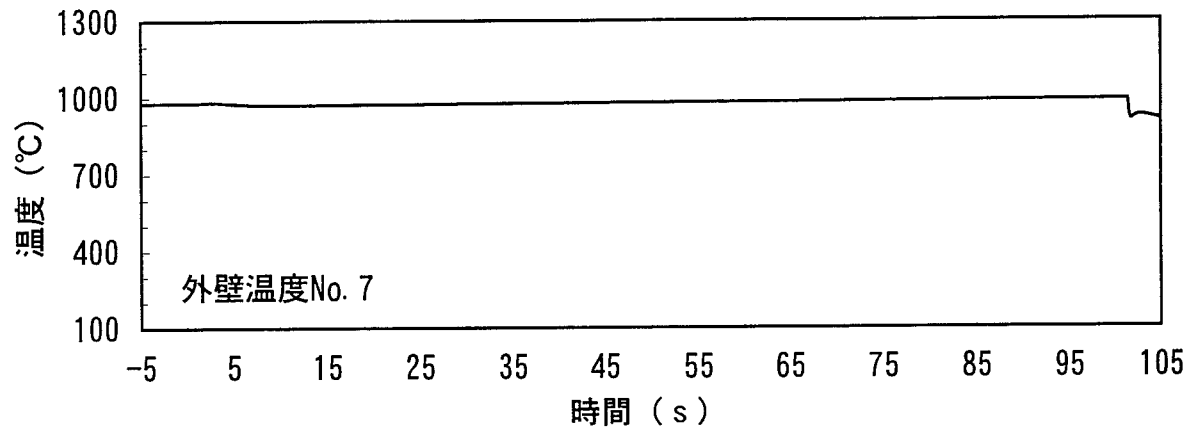
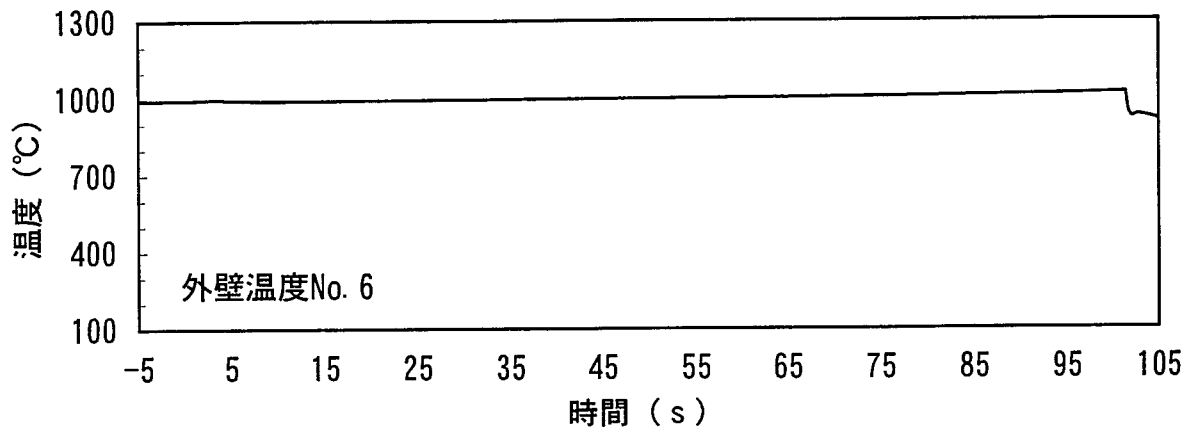
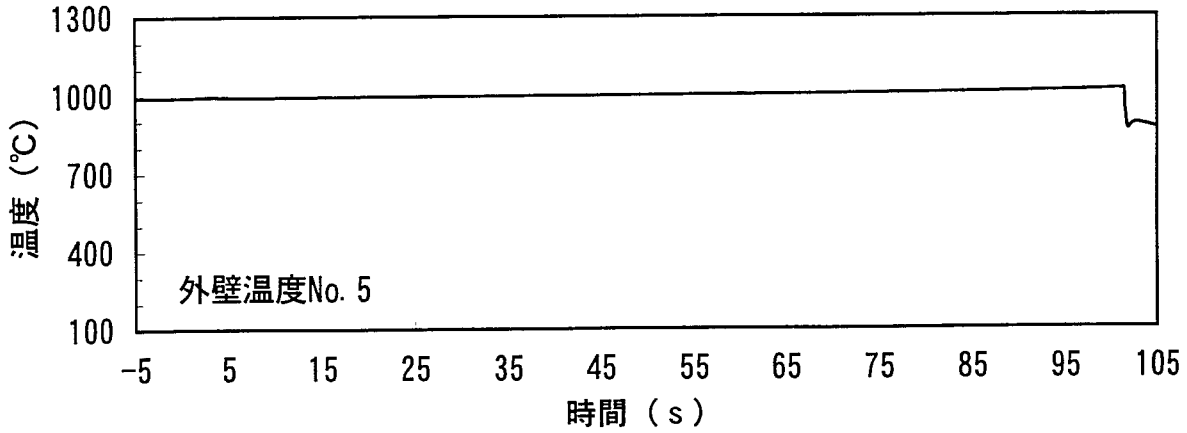


図5-12(b) Run12の試験データ(その2)

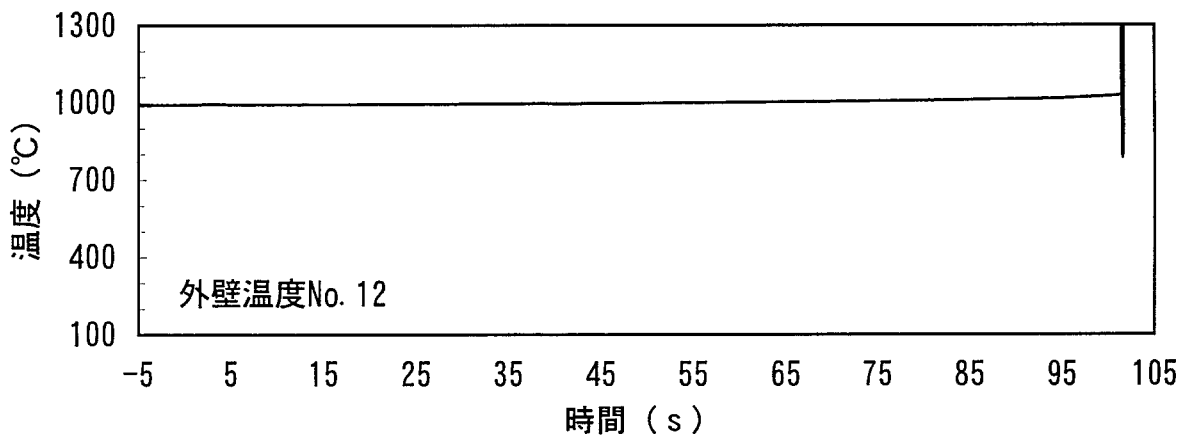
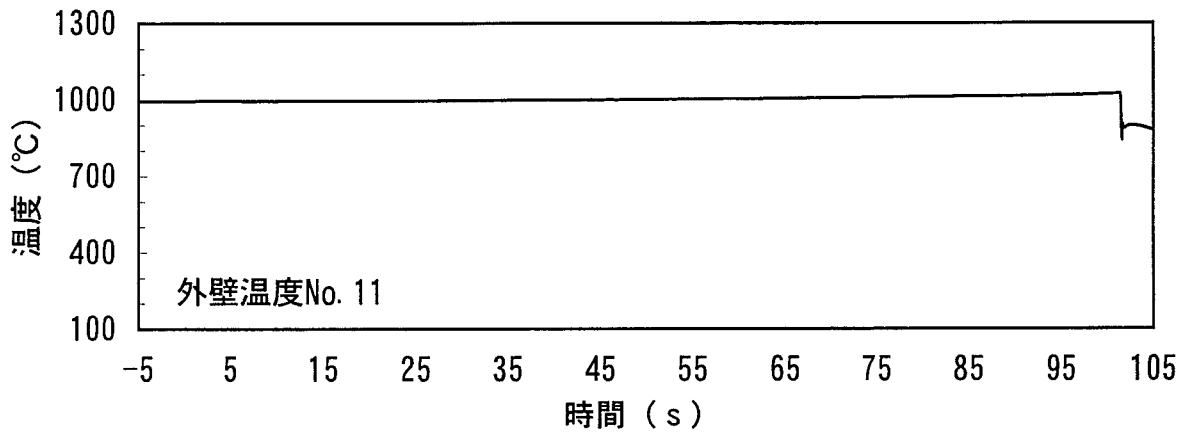
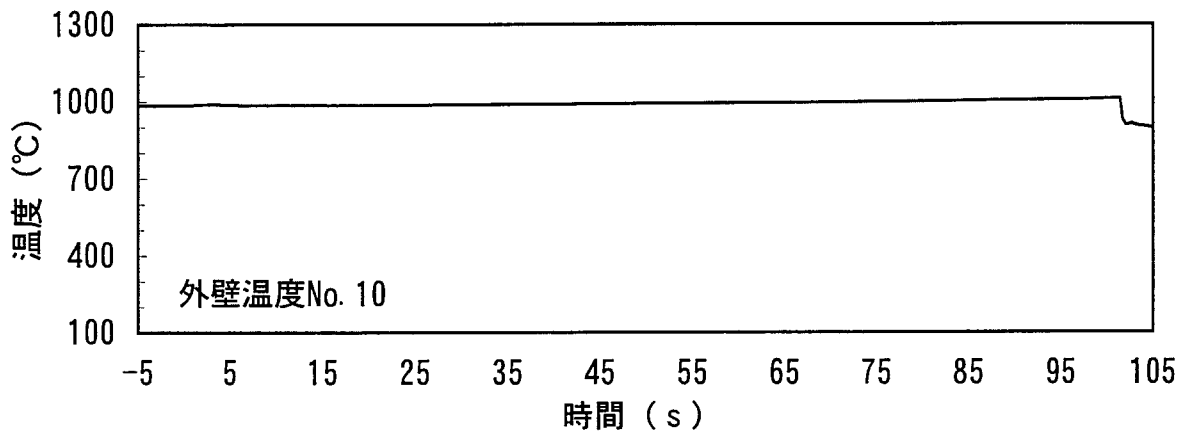
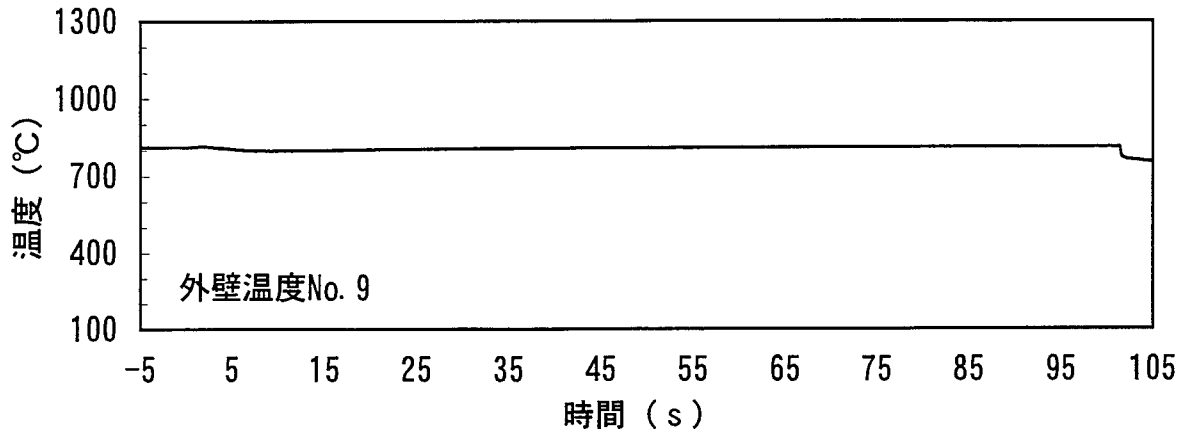


図5-12(b) Run12の試験データ(その3)

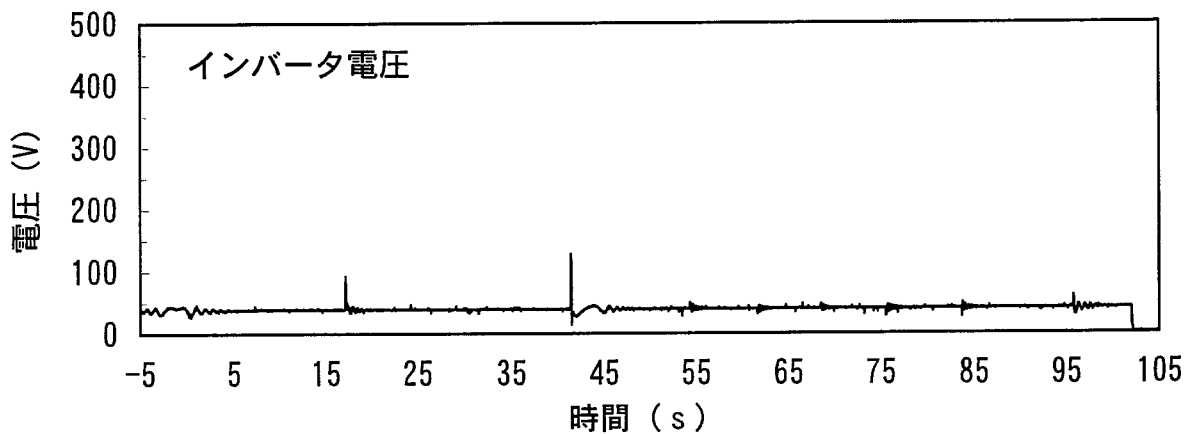
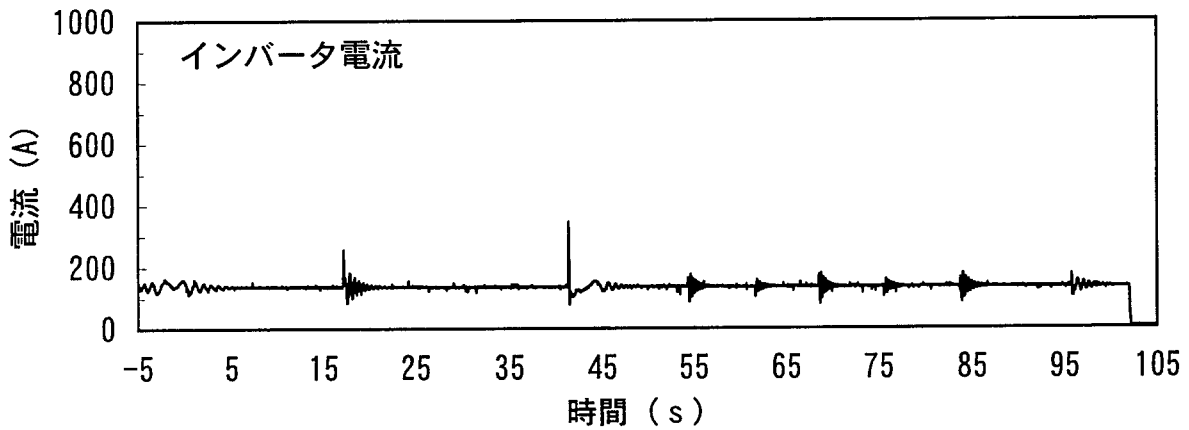
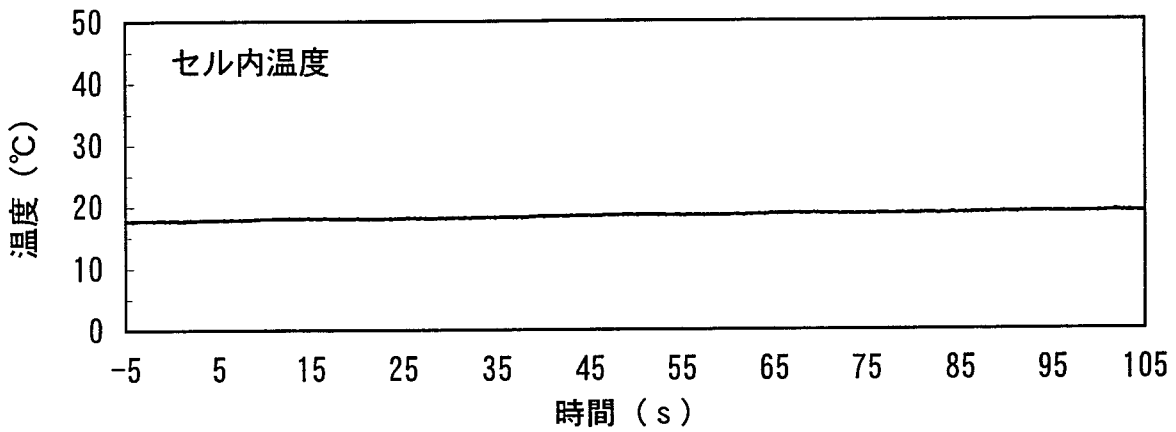
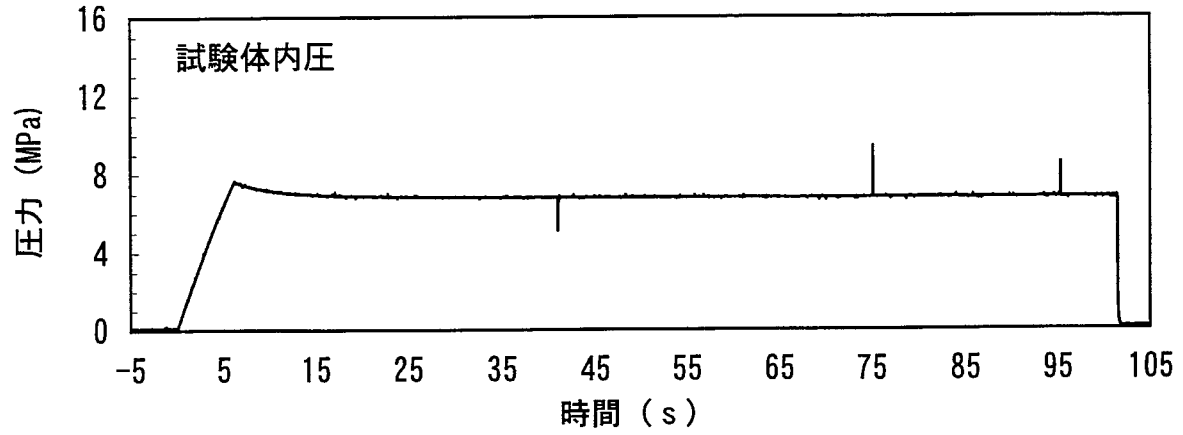


図5-12(b) Run12の試験データ(その4)

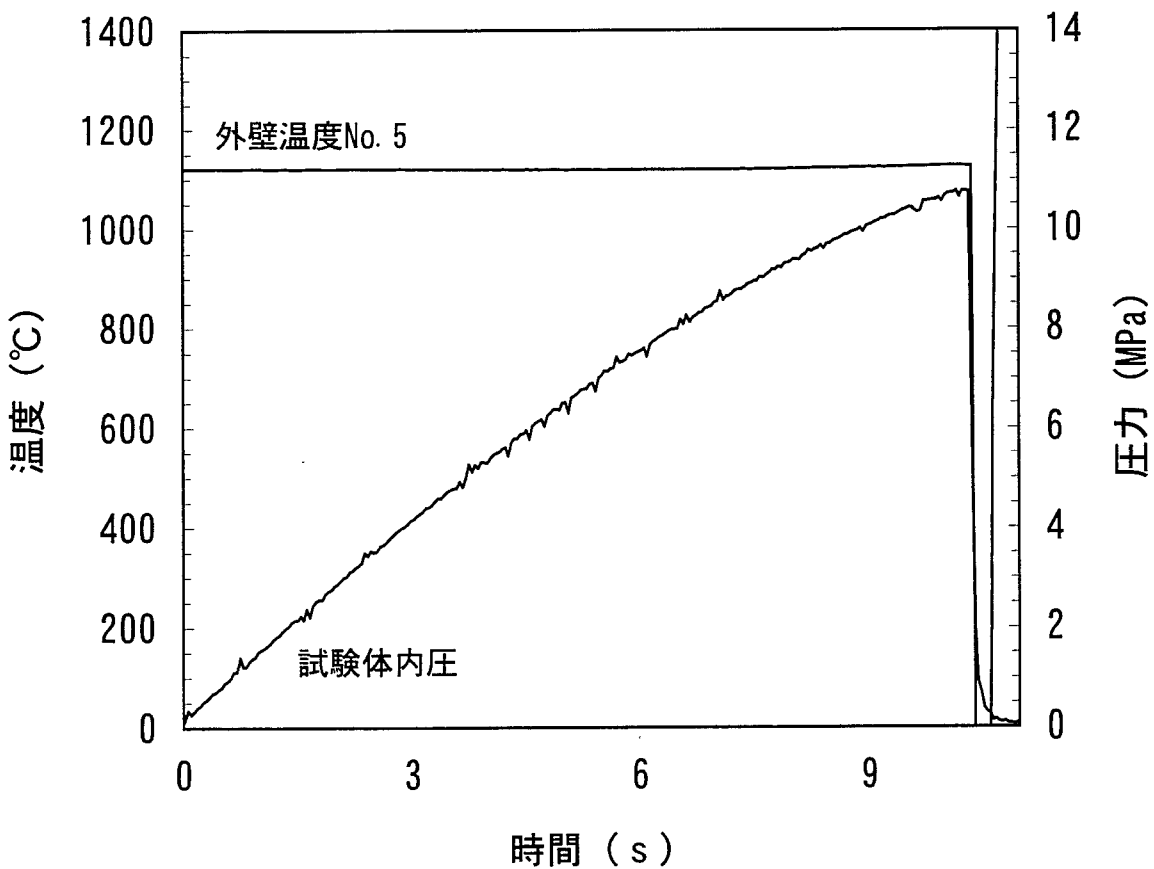
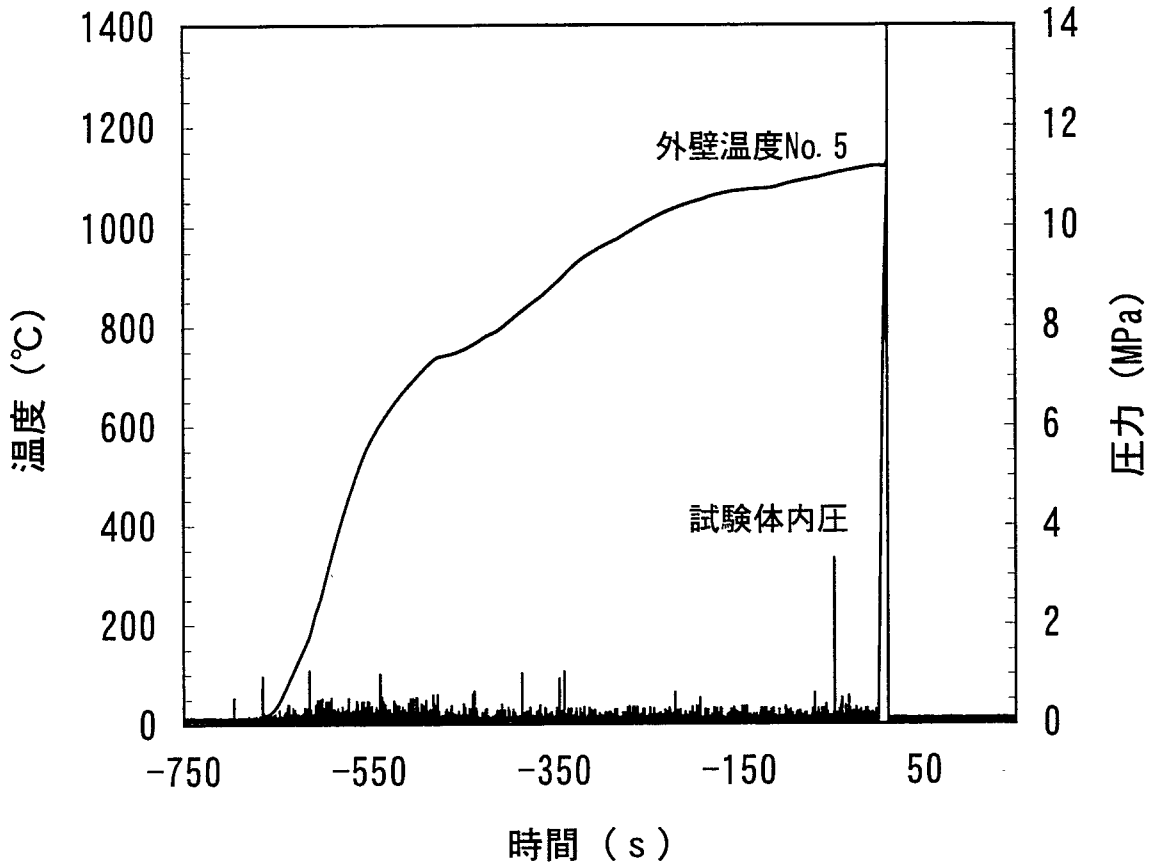


図5-13(a) Run13の試験結果(上:全体、下:試験時)

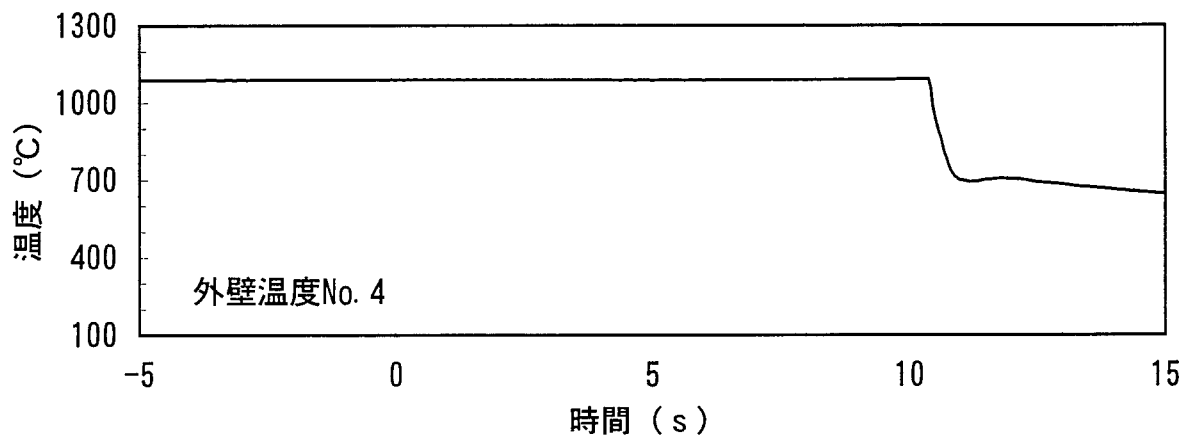
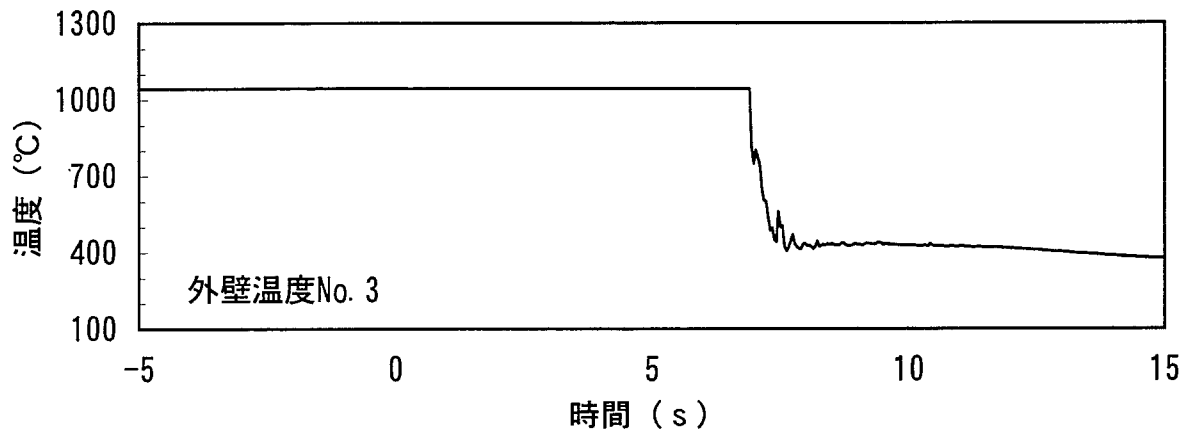
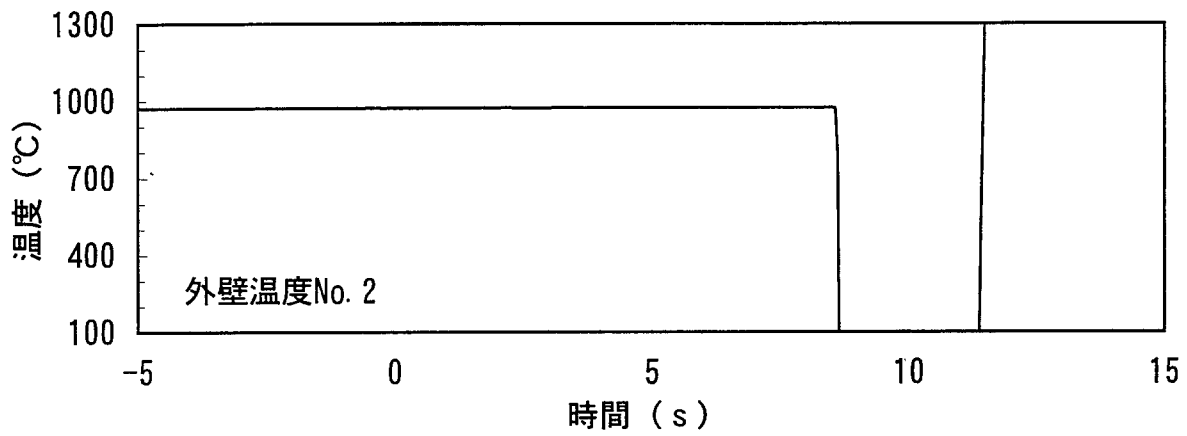
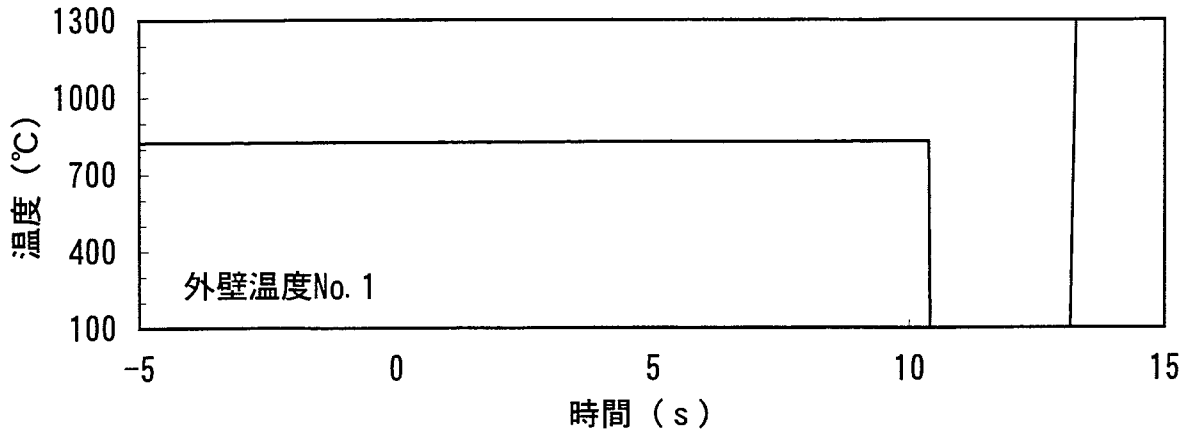


図5-13(b) Run13の試験データ(その1)

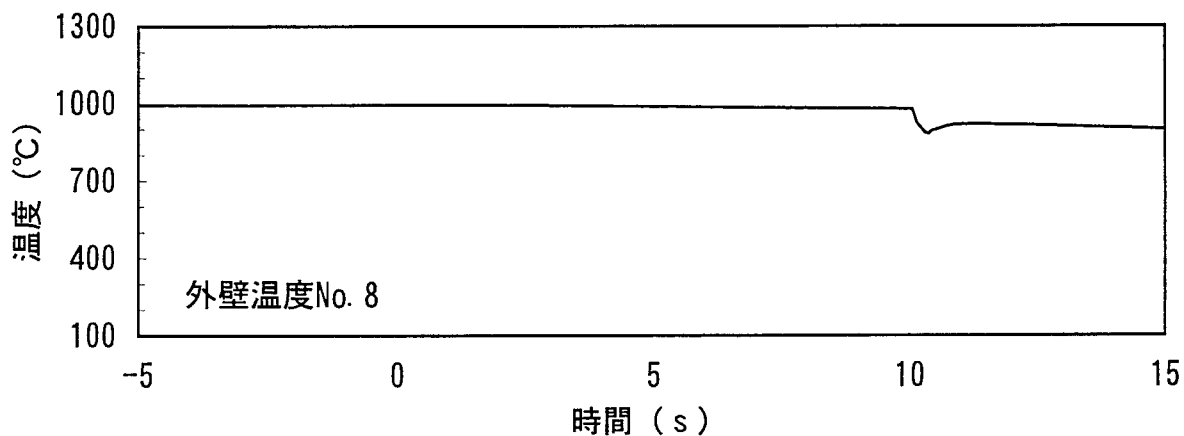
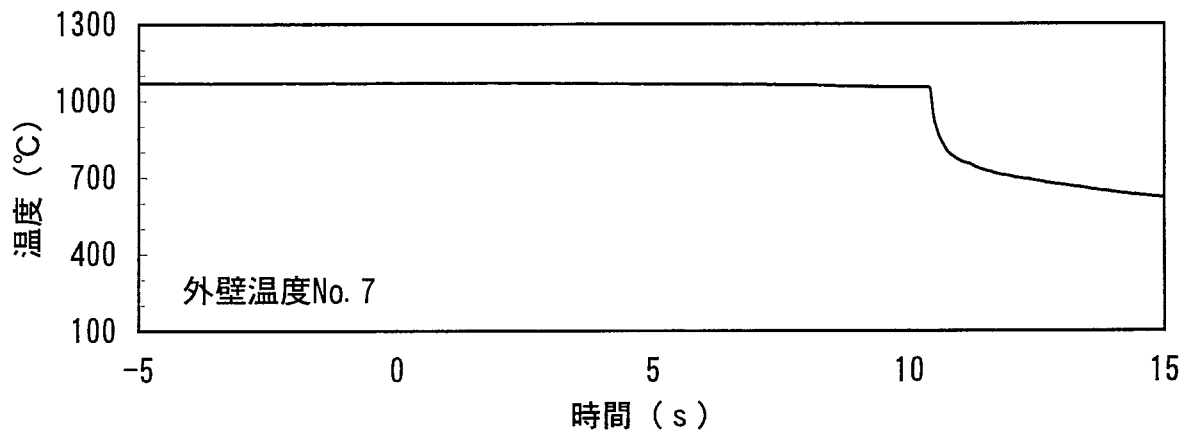
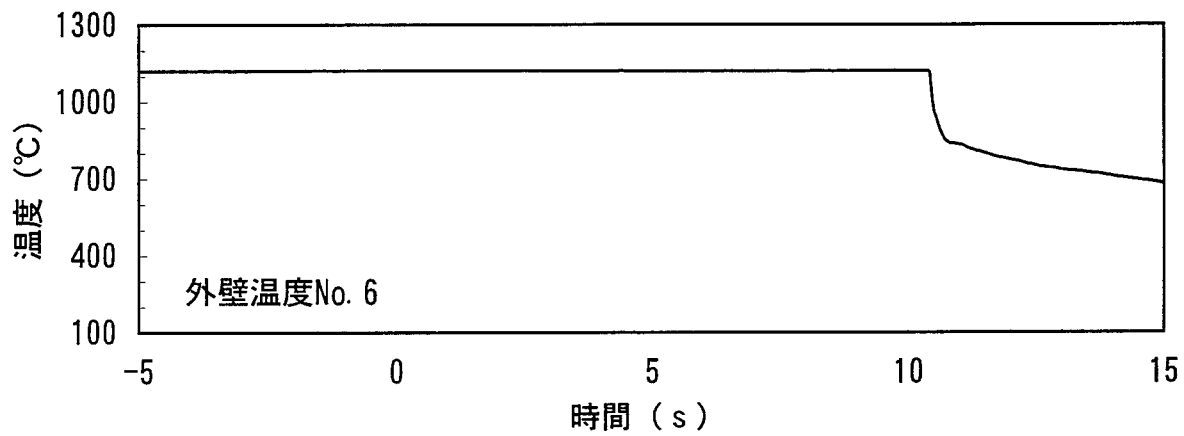
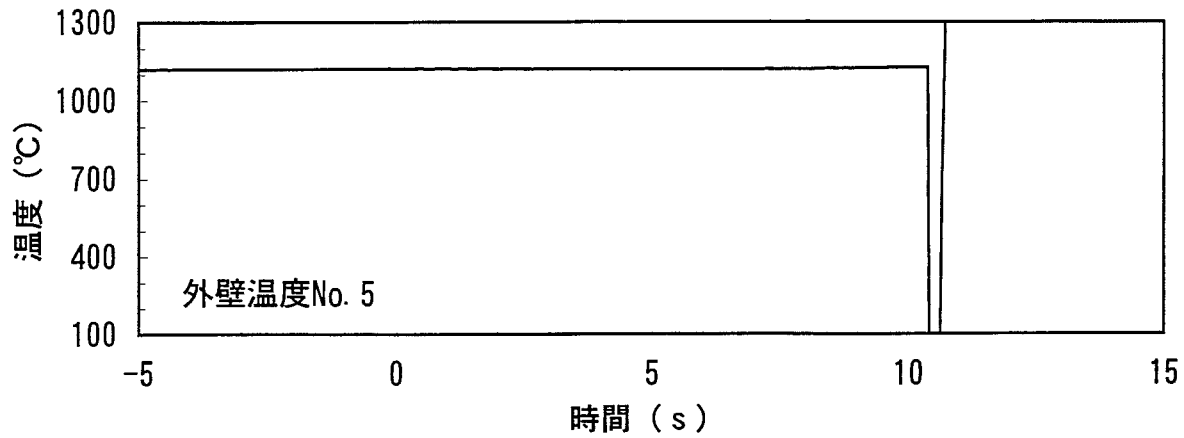


図5-13(b) Run13の試験データ(その2)

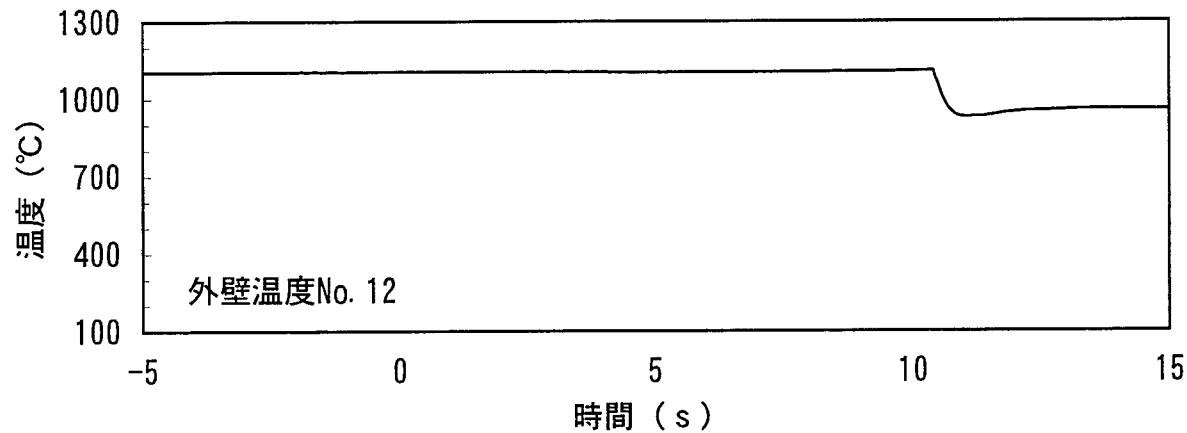
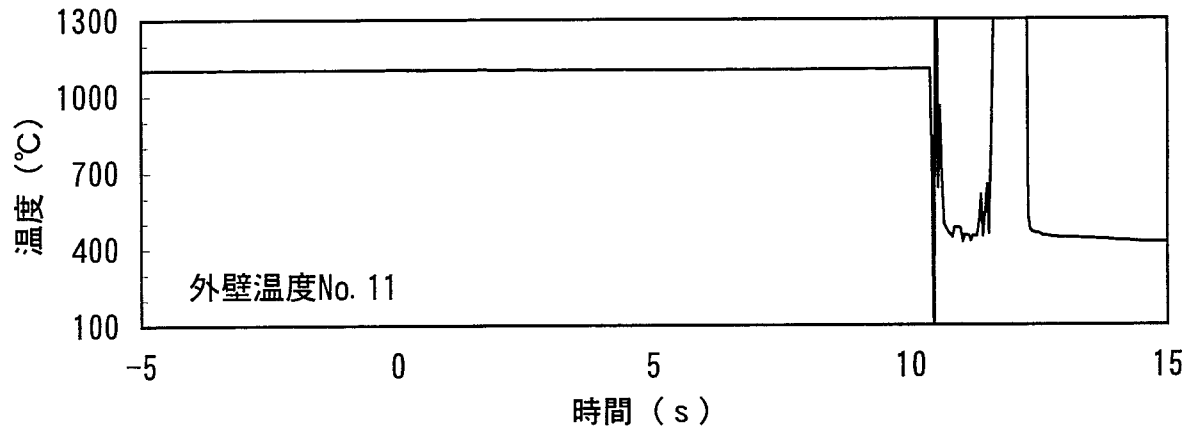
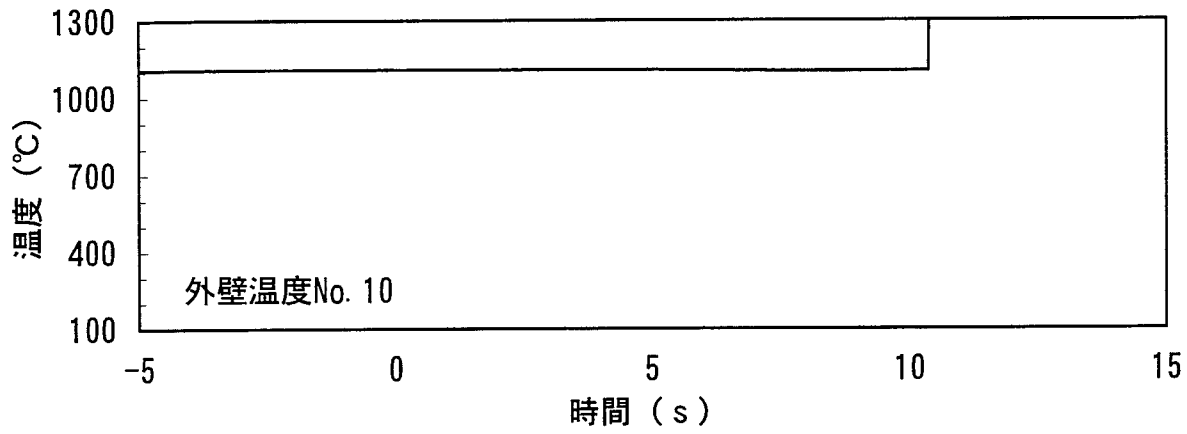
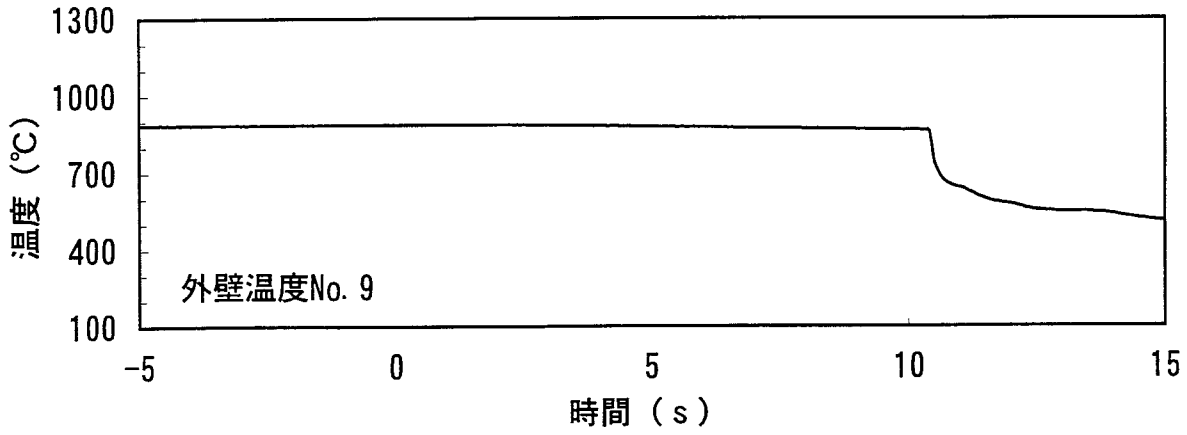


図5-13(b) Run13の試験データ(その3)



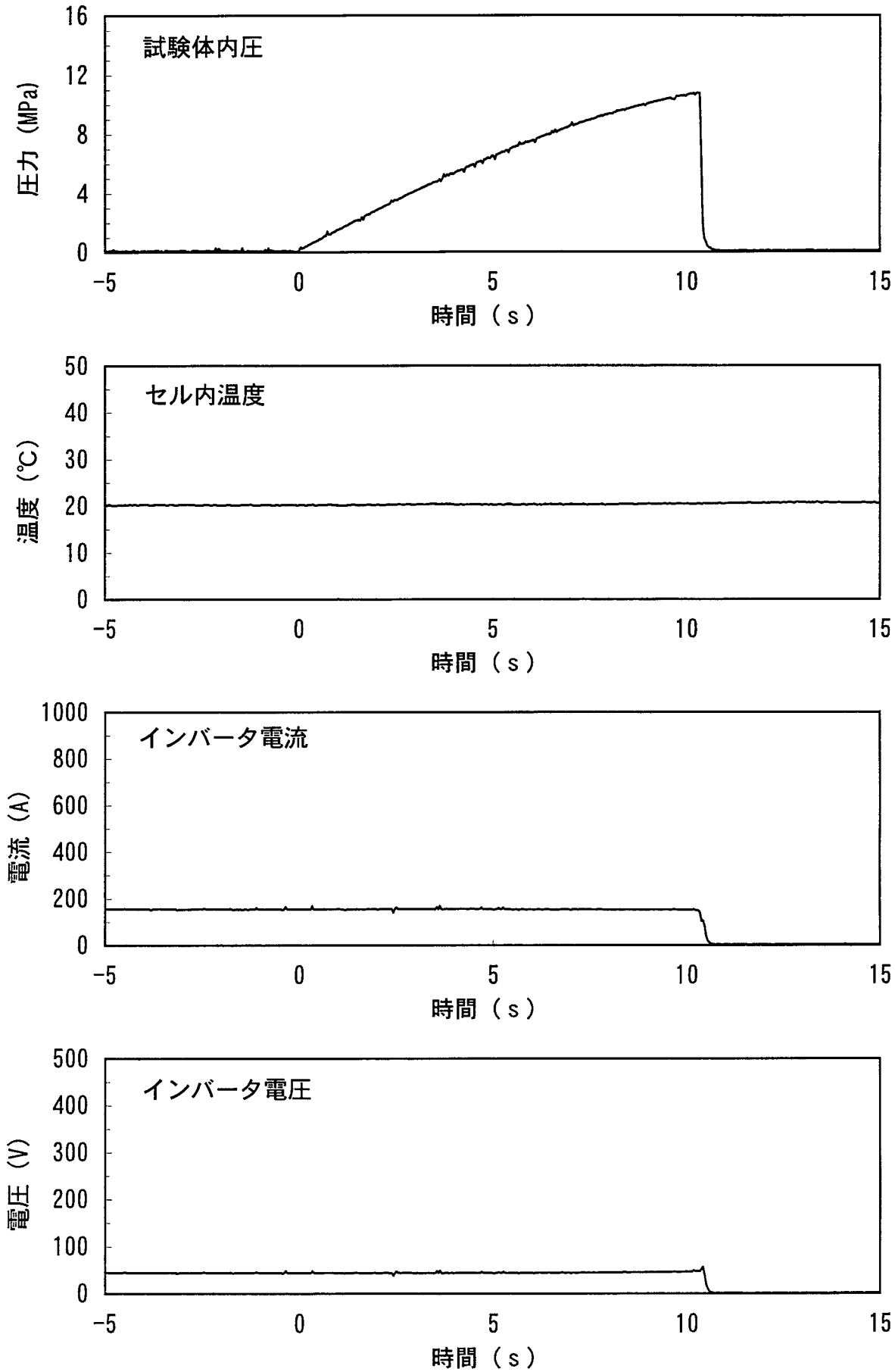


図5-13(b) Run13の試験データ(その4)

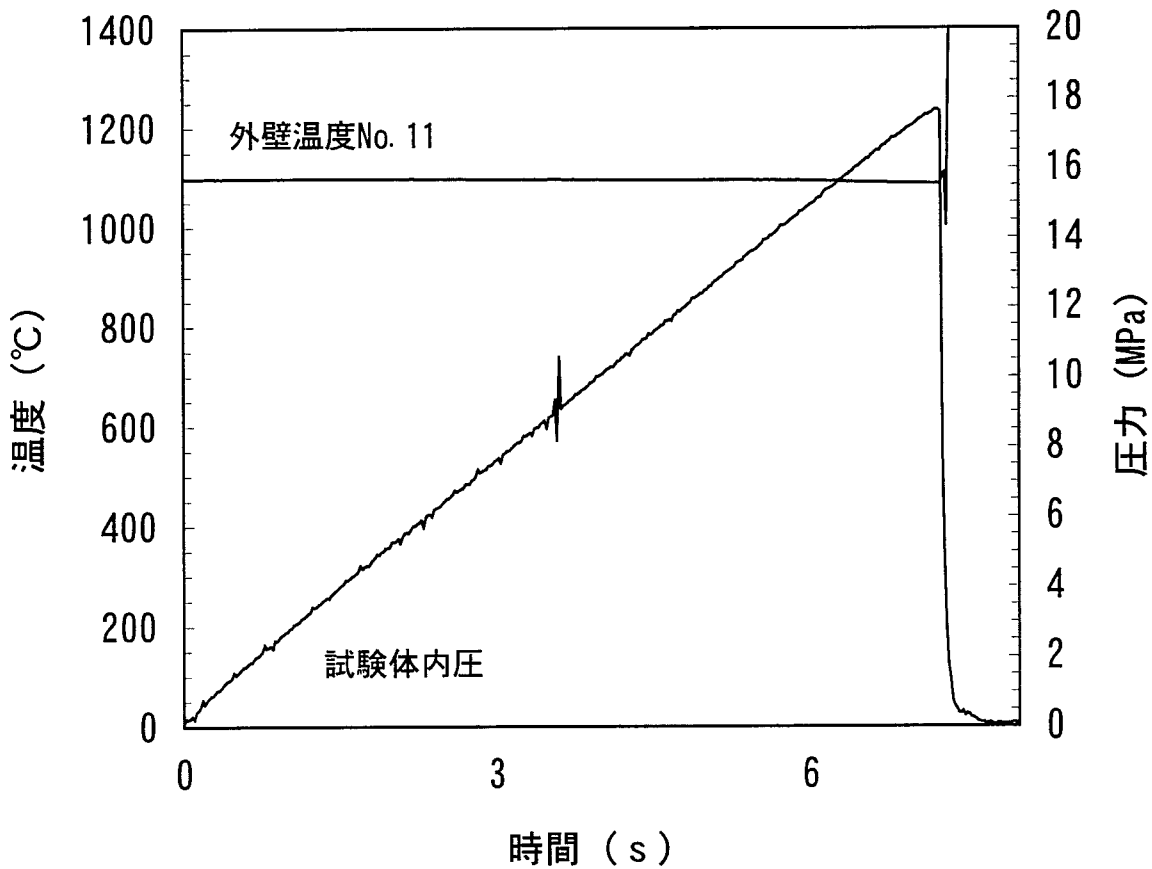
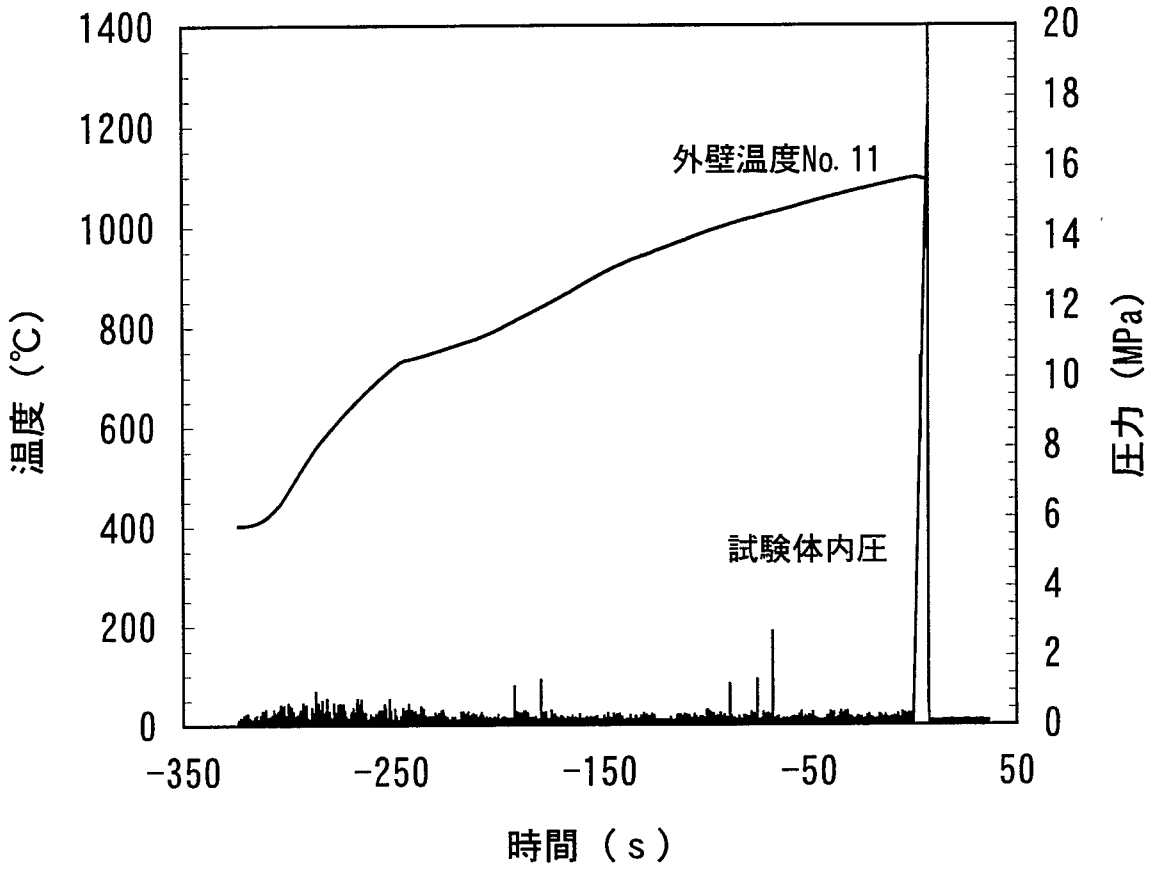


図5-14(a) Run14の試験結果(上:全体、下:試験時)

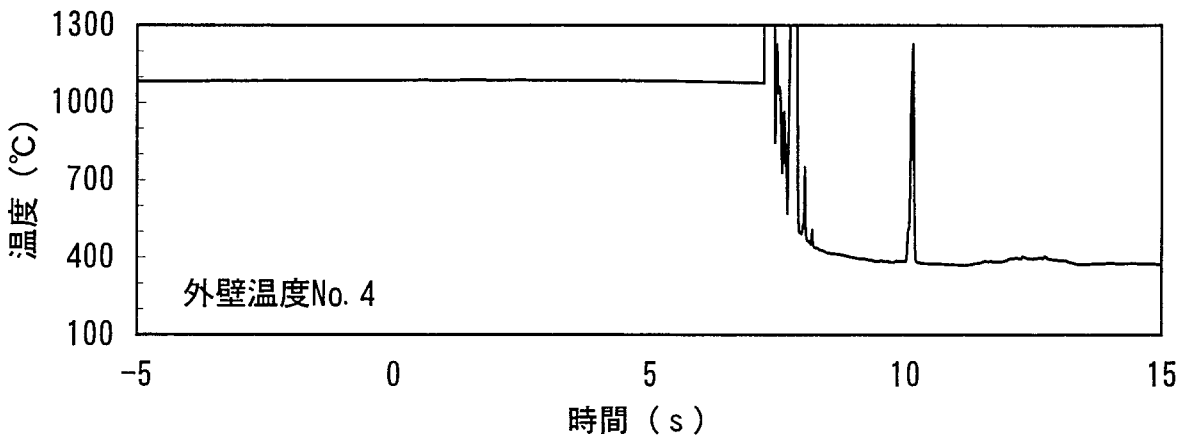
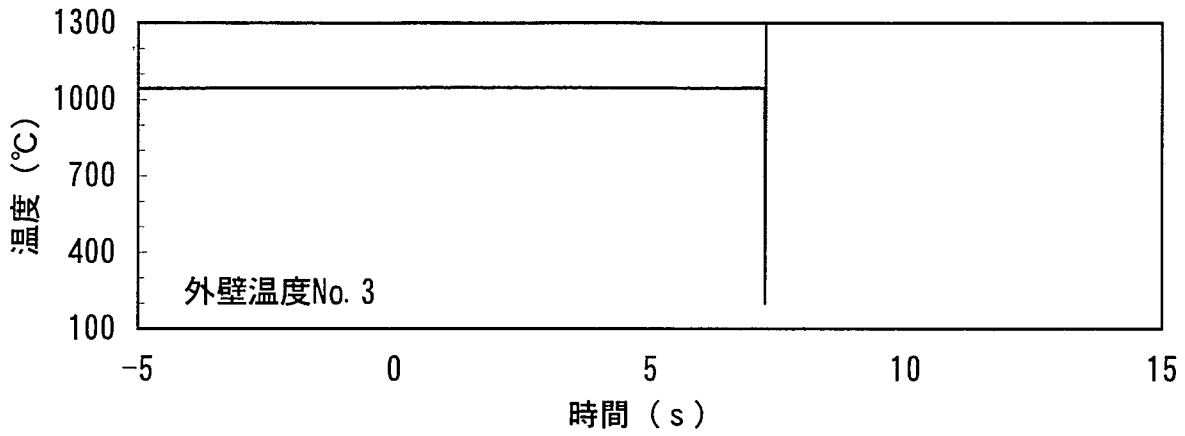
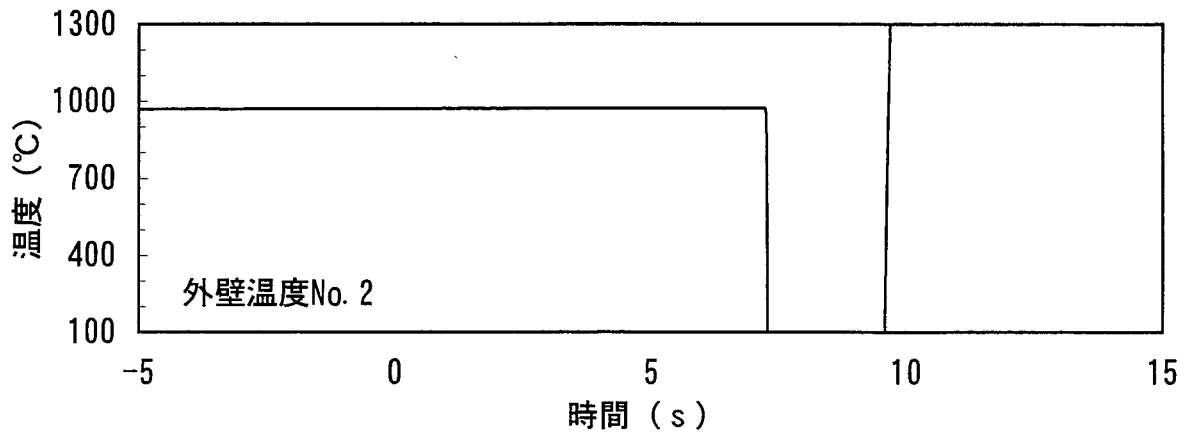
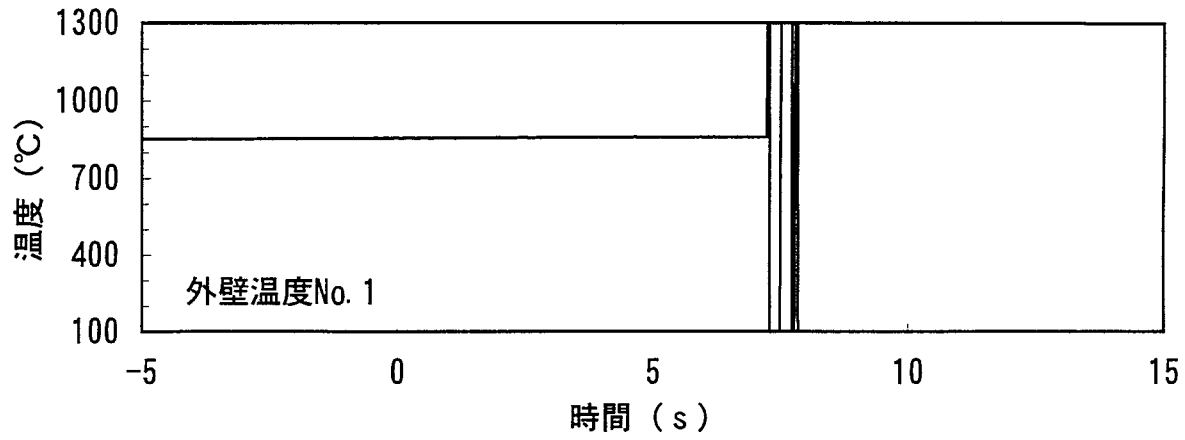


図5-14(b) Run14の試験データ(その1)

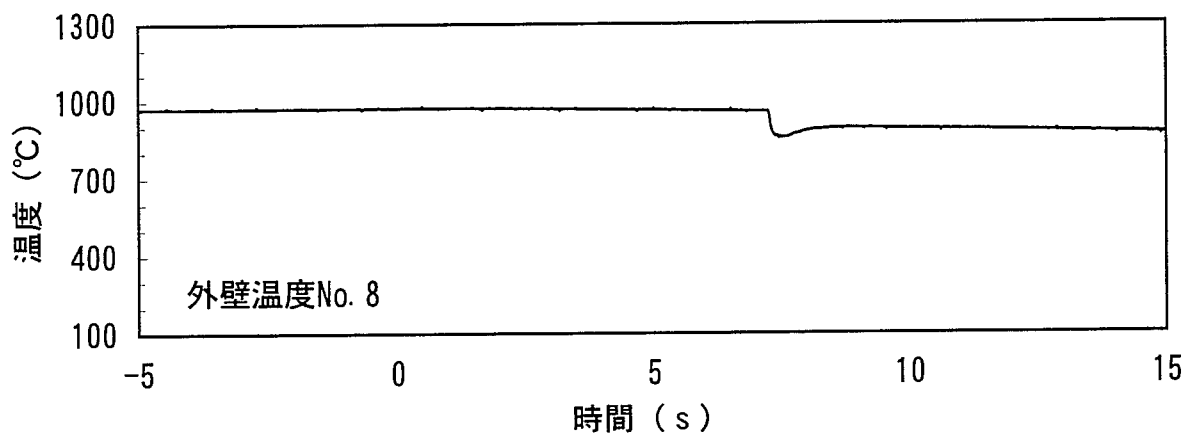
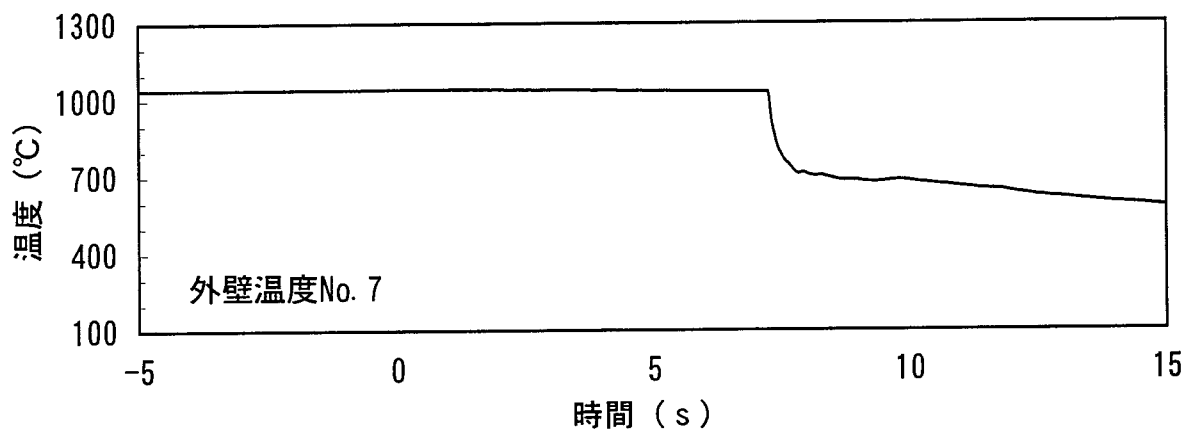
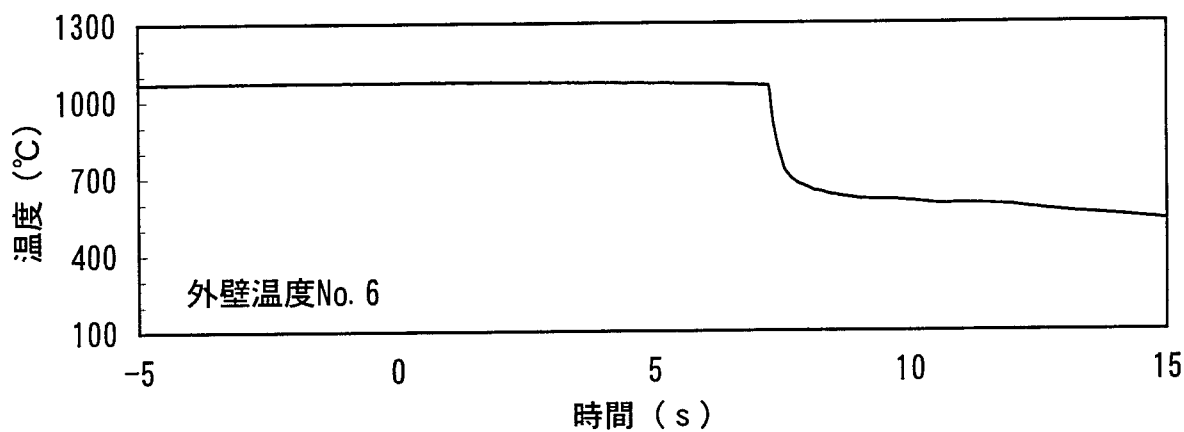
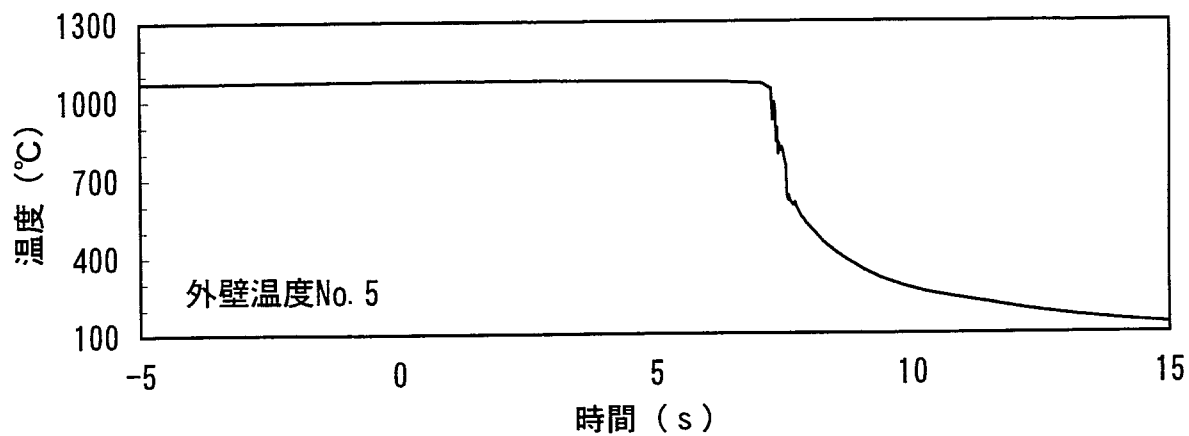


図5-14(b) Run14の試験データ(その2)

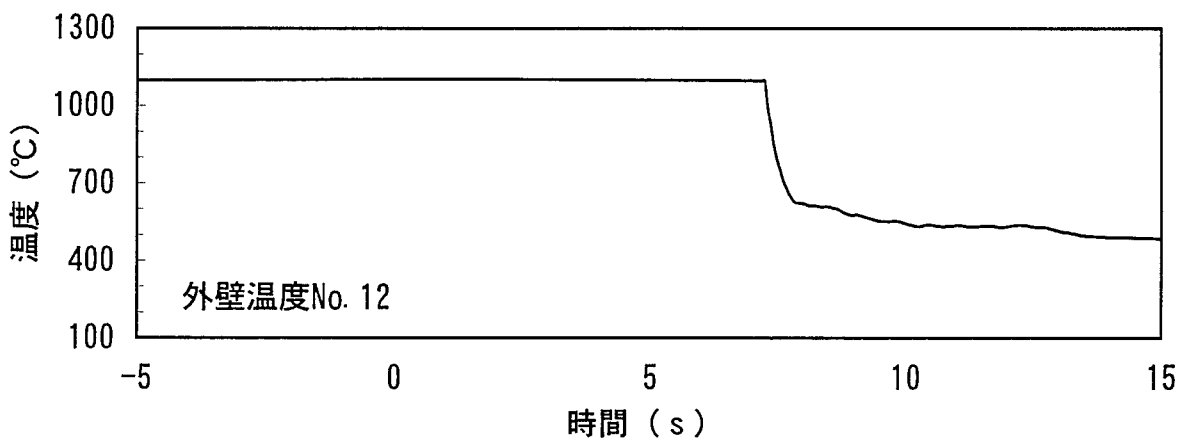
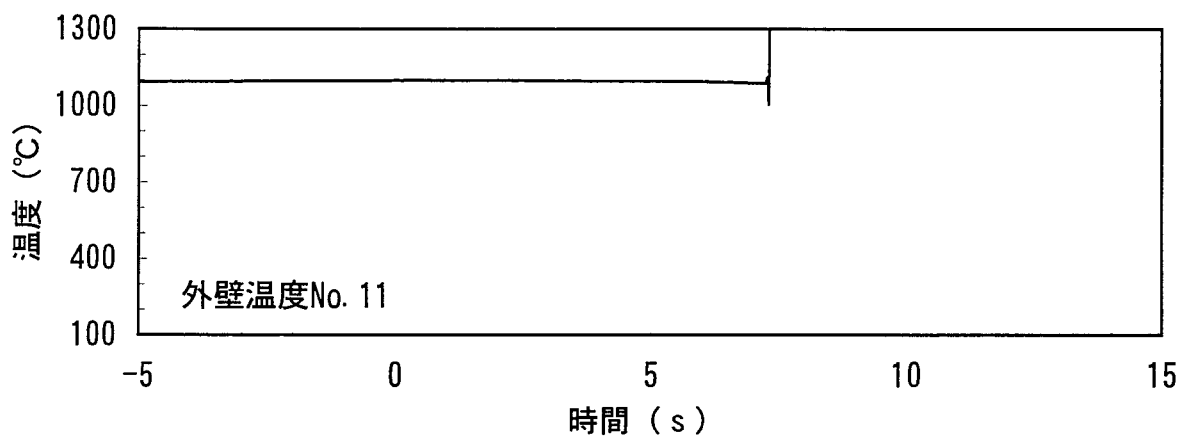
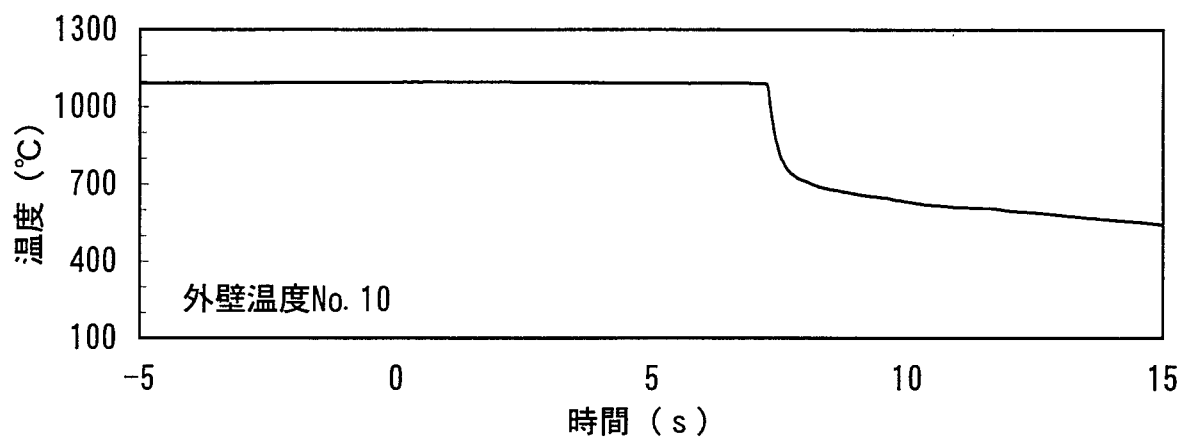
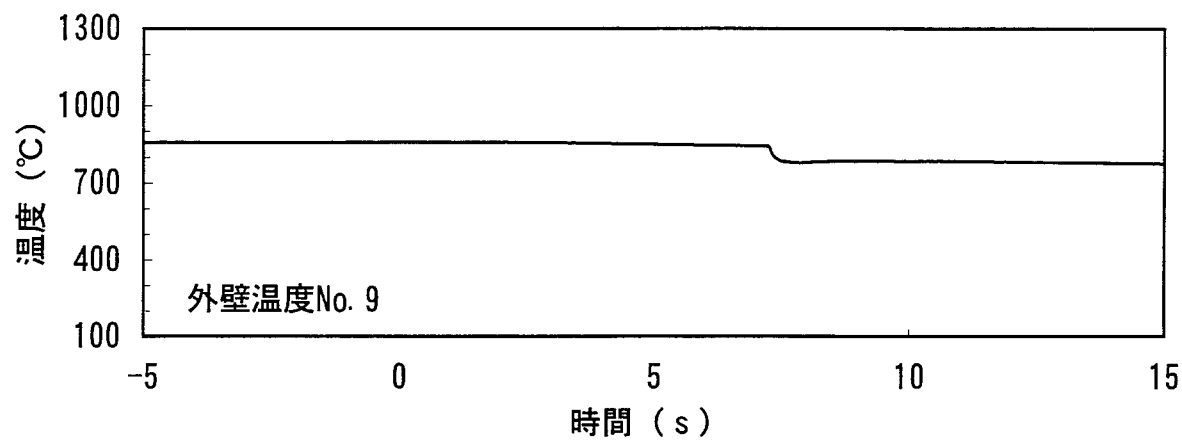


図5-14(b) Run14の試験データ(その3)

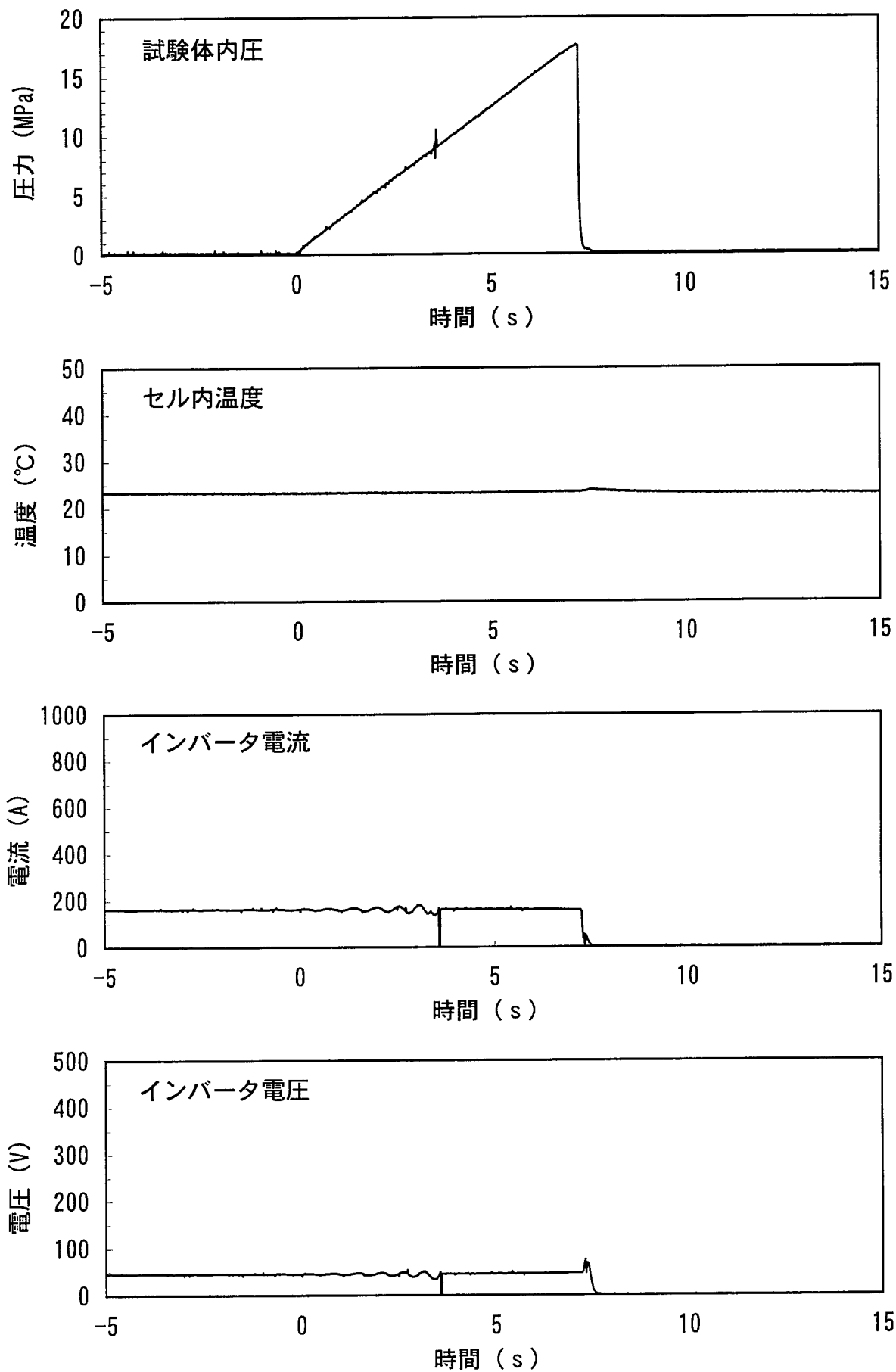


図5-14(b) Run14の試験データ(その4)

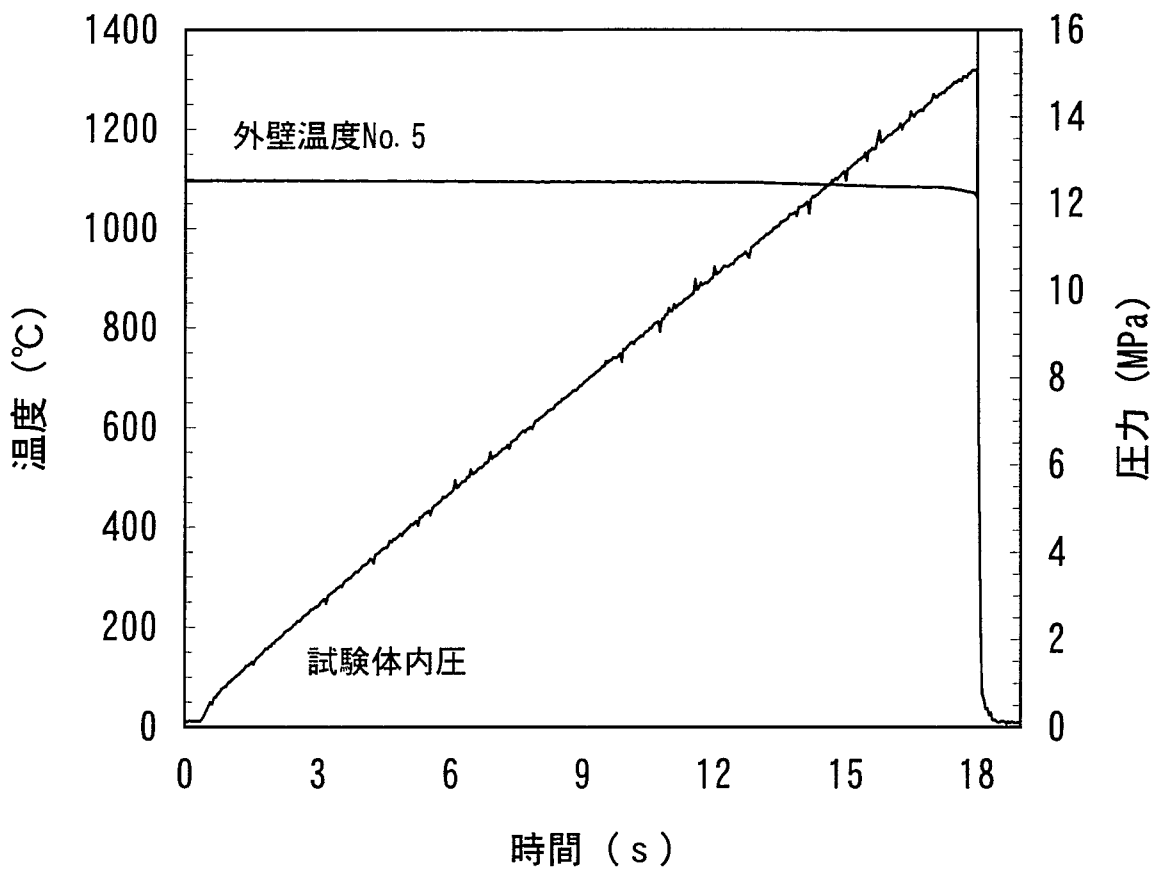
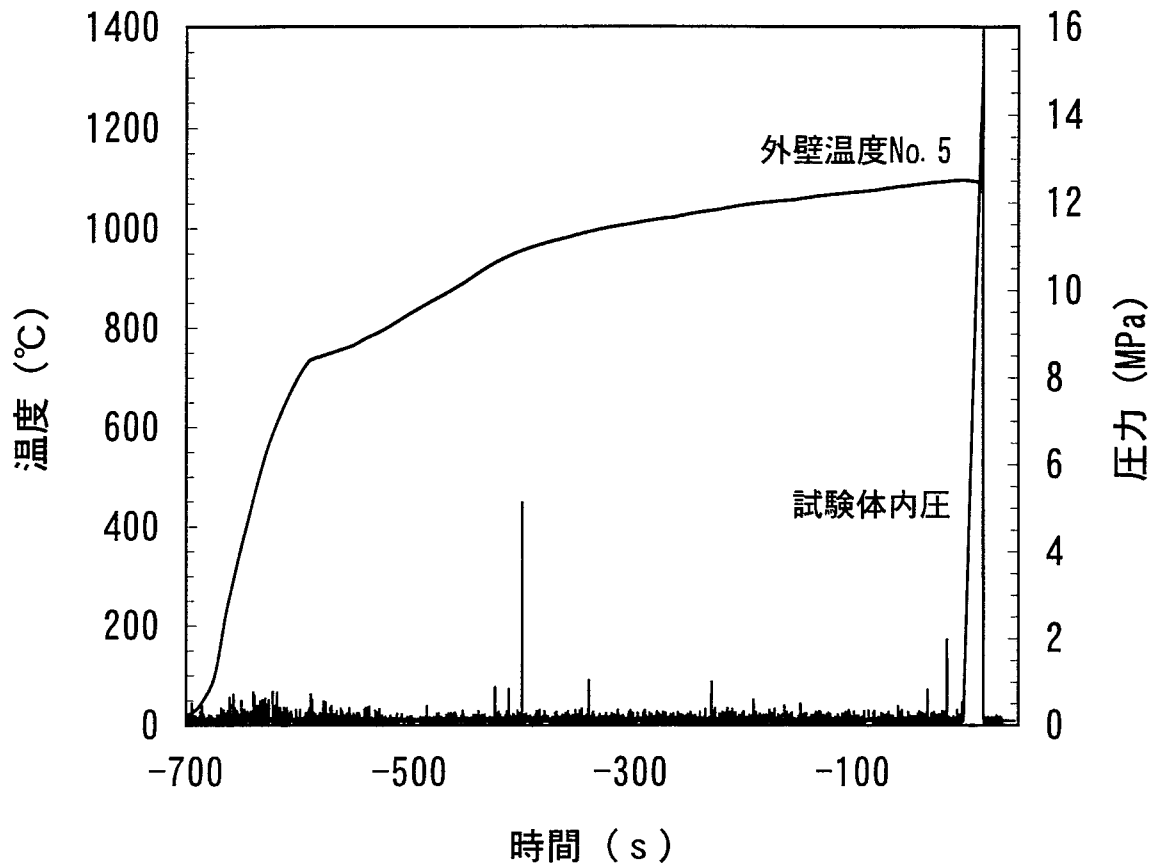


図5-15(a) Run15の試験結果(上:全体、下:試験時)

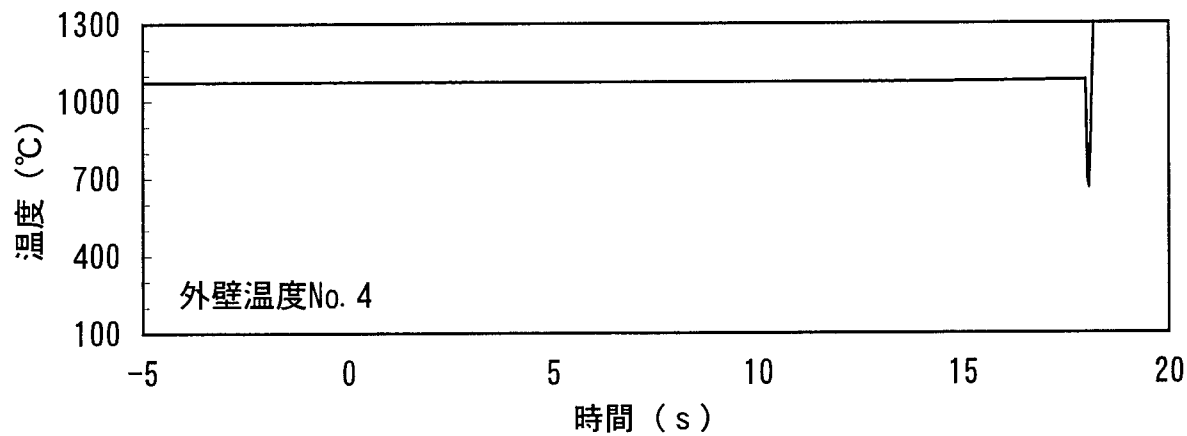
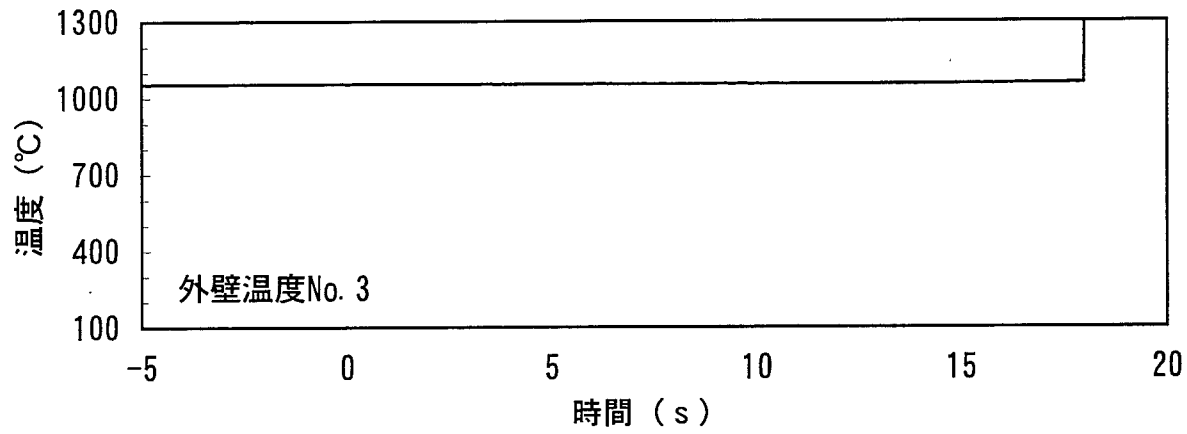
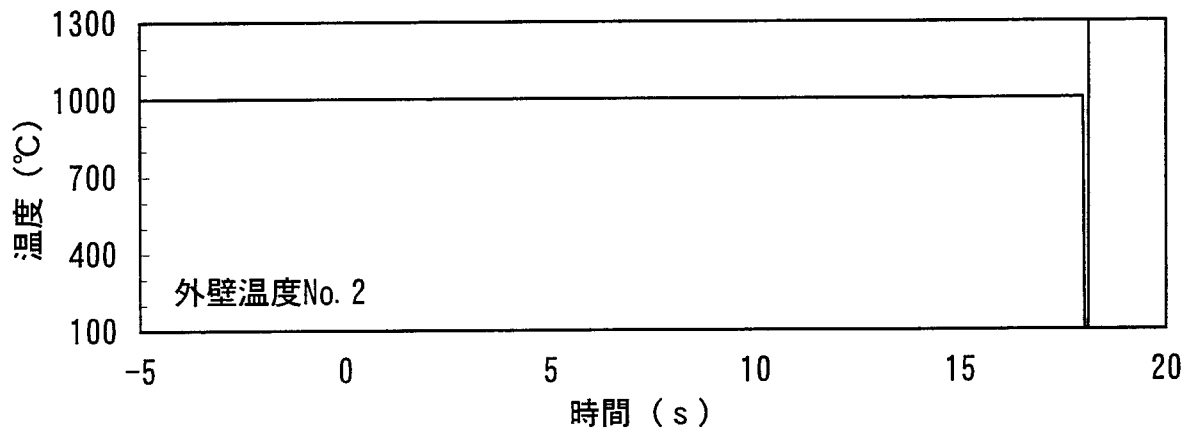
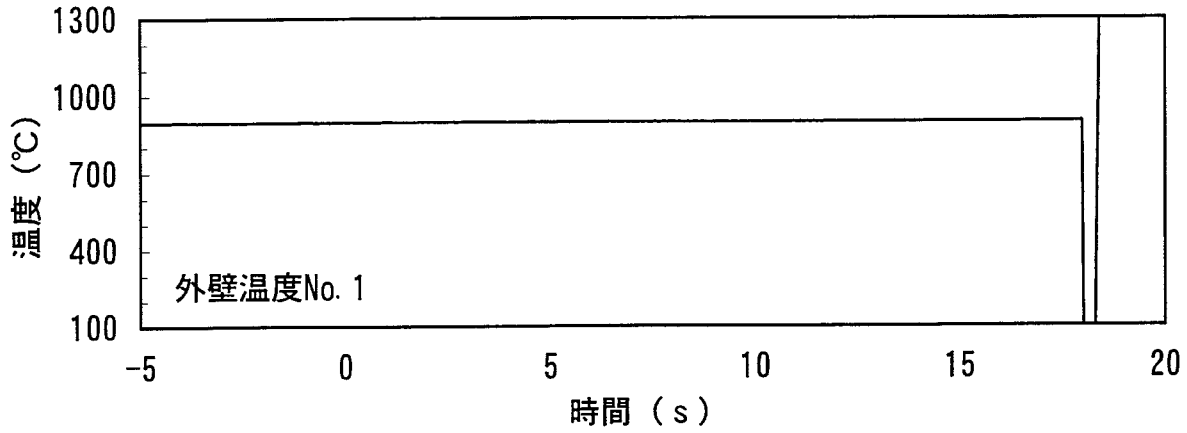


図5-15(b) Run15の試験データ(その1)



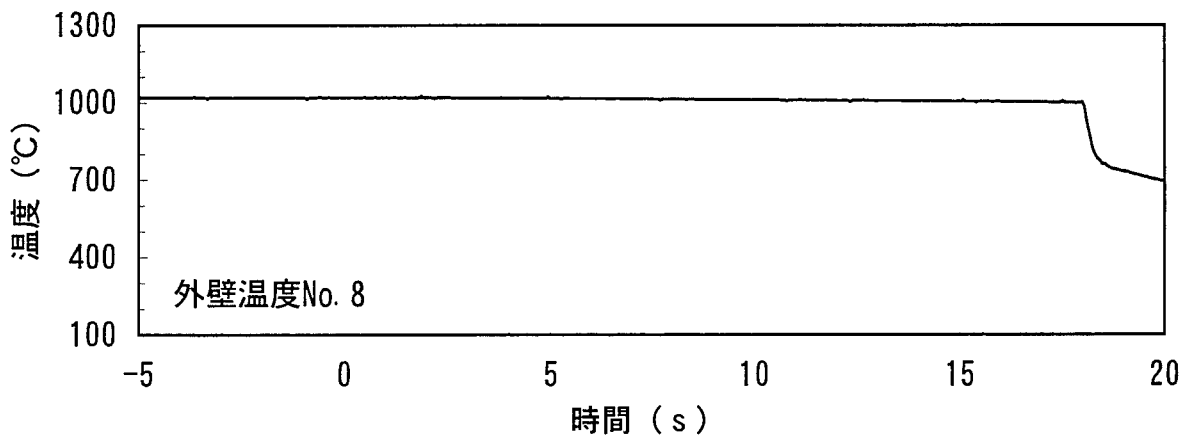
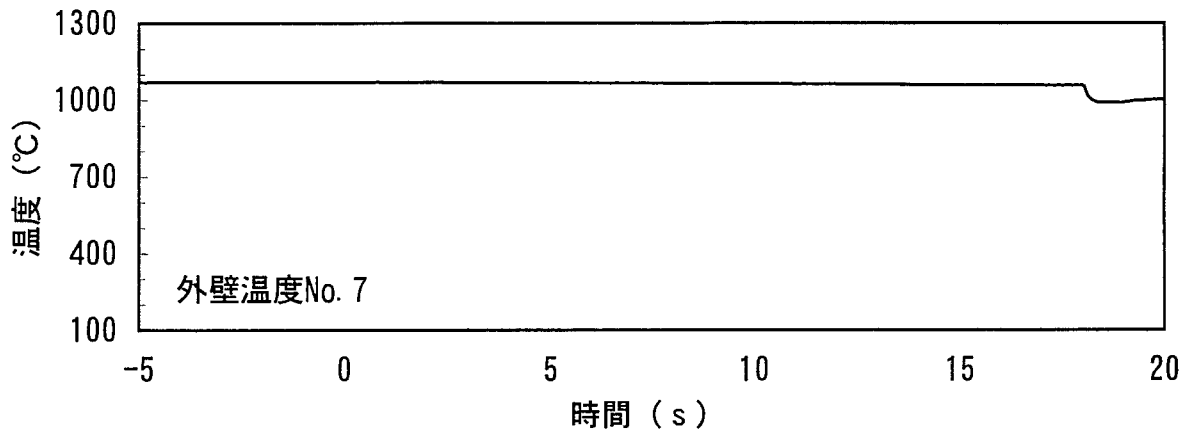
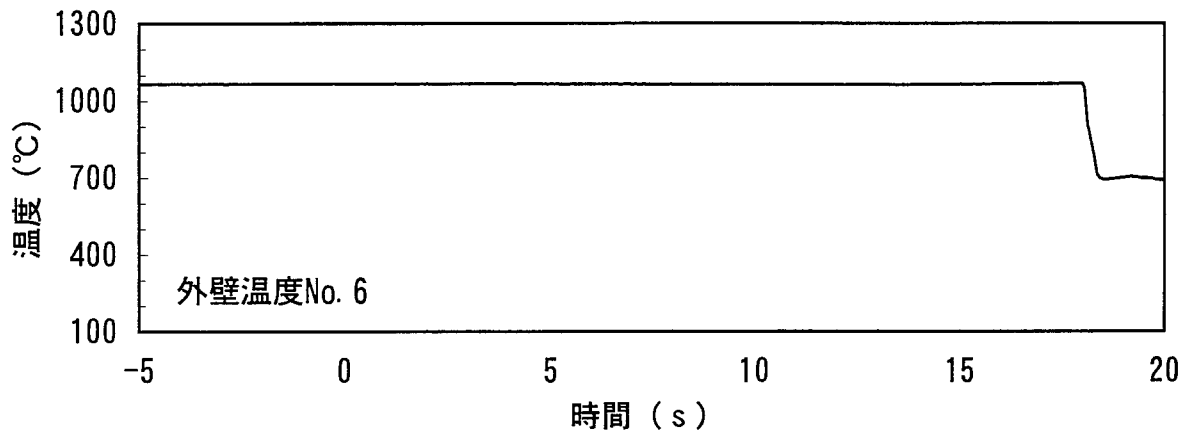
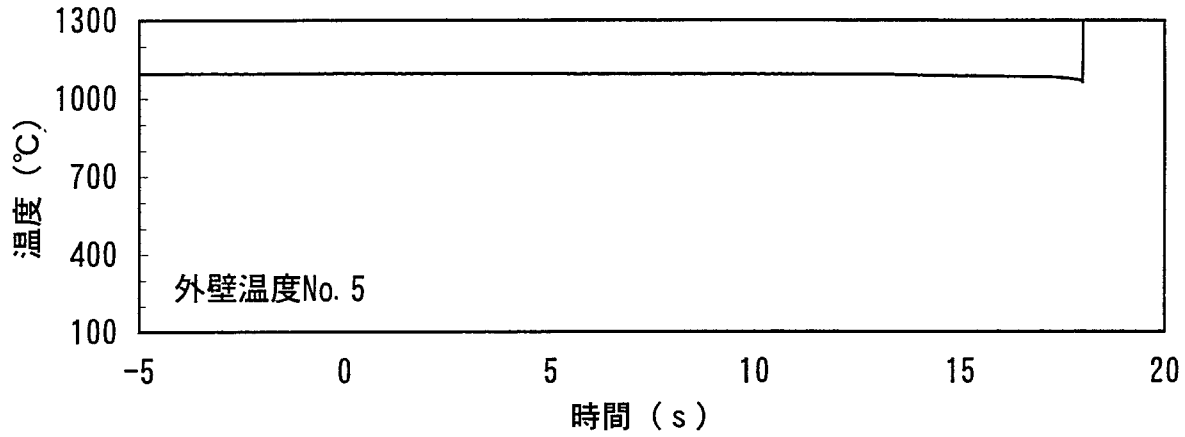


図5-15(b) Run15の試験データ(その2)

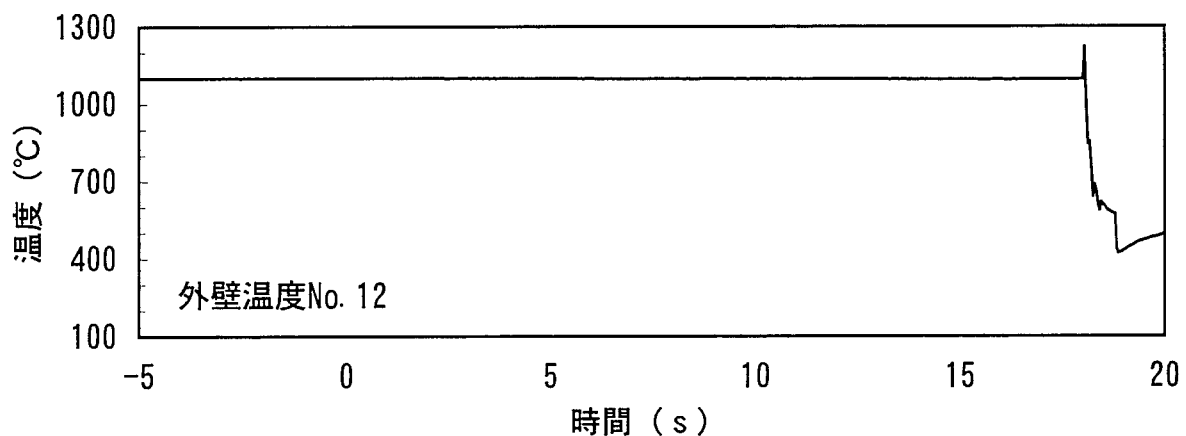
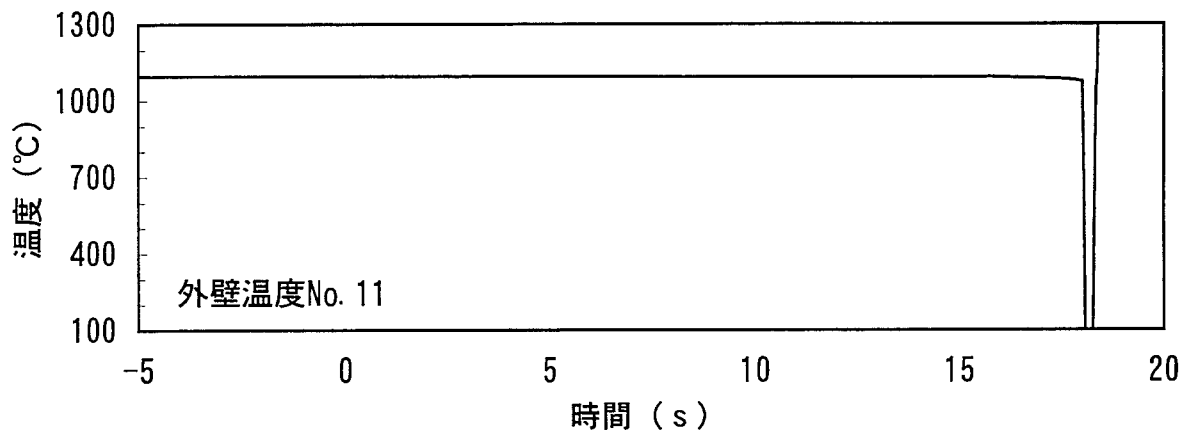
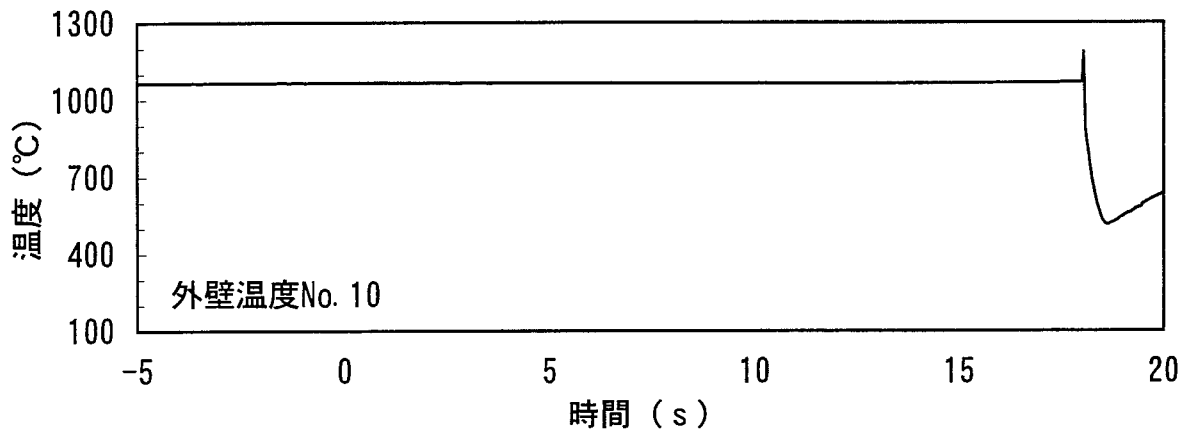
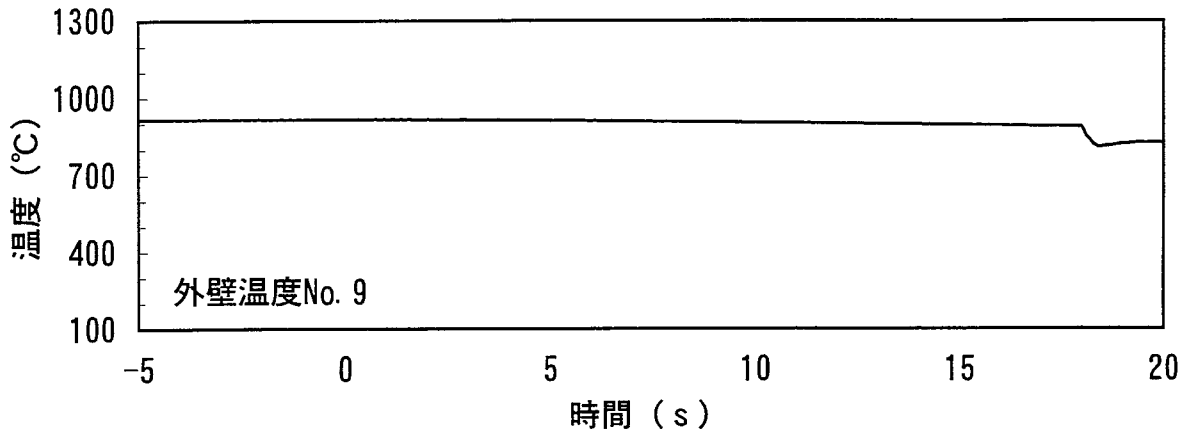


図5-15(b) Run15の試験データ(その3)

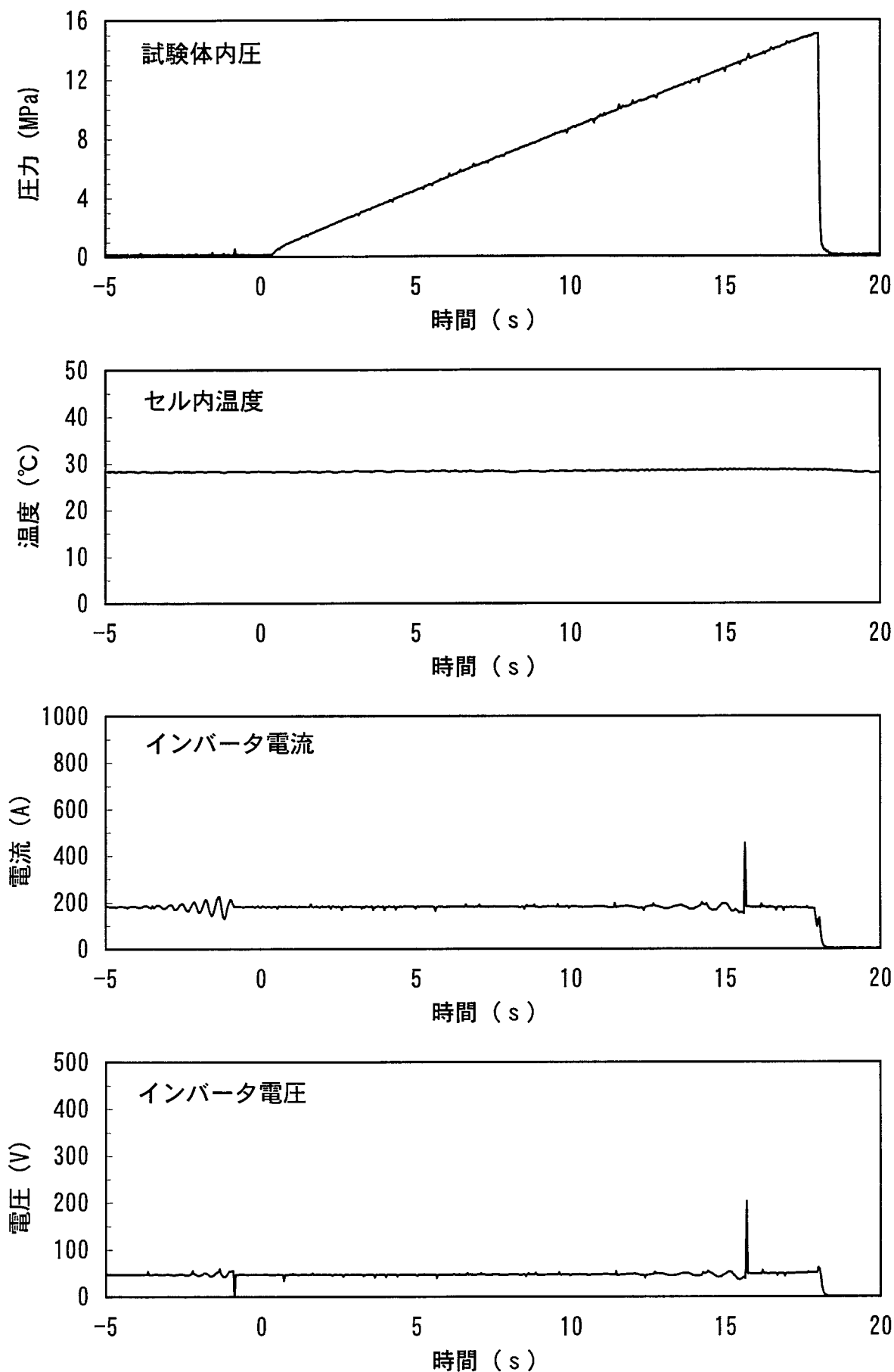


図5-15(b) Run15の試験データ(その4)

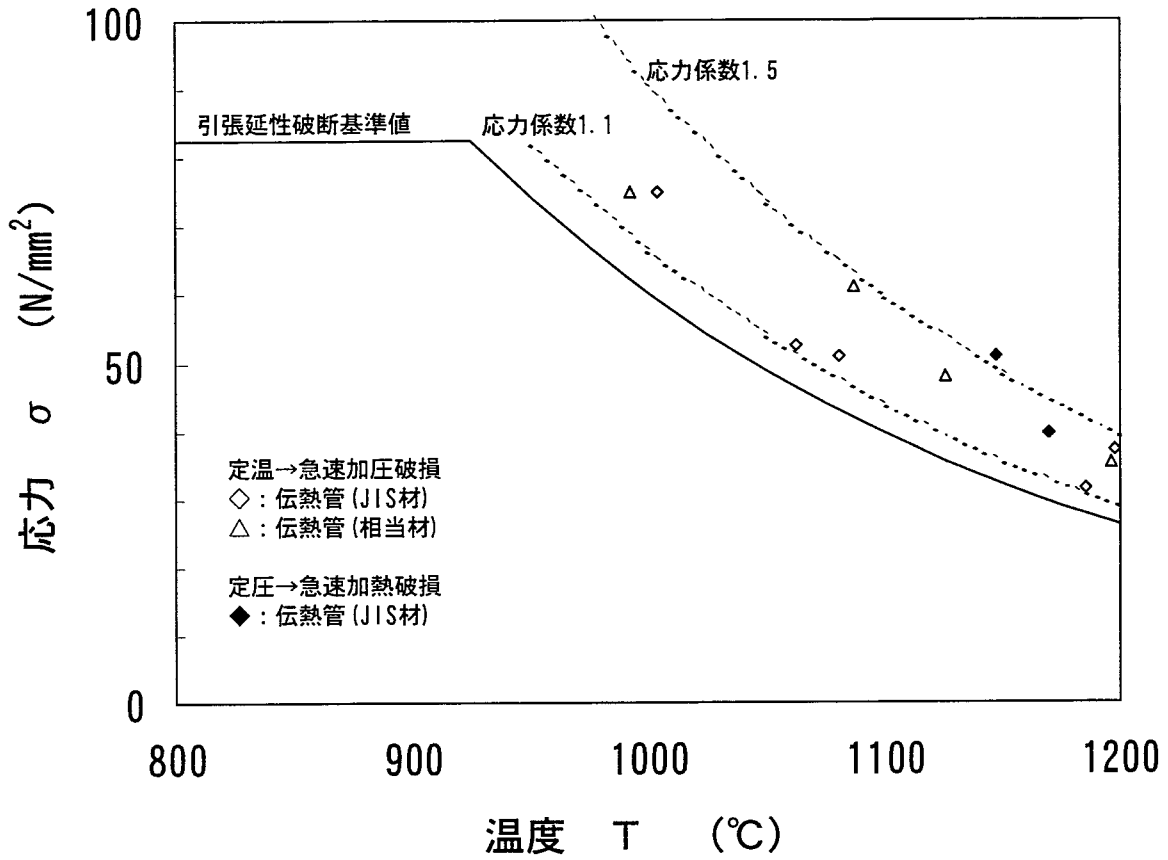


図 6.1-1 材料強度基準と延性破損試験結果

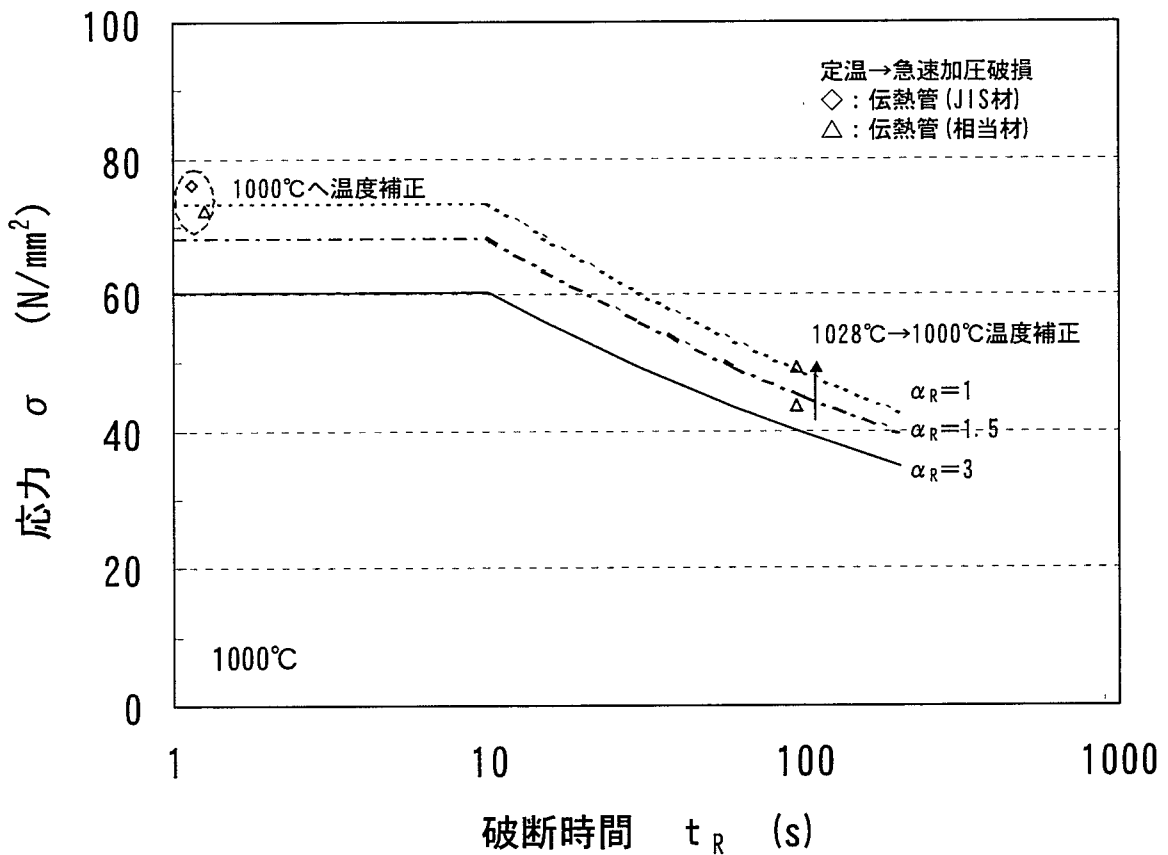


図 6.2-1 材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1000°C)

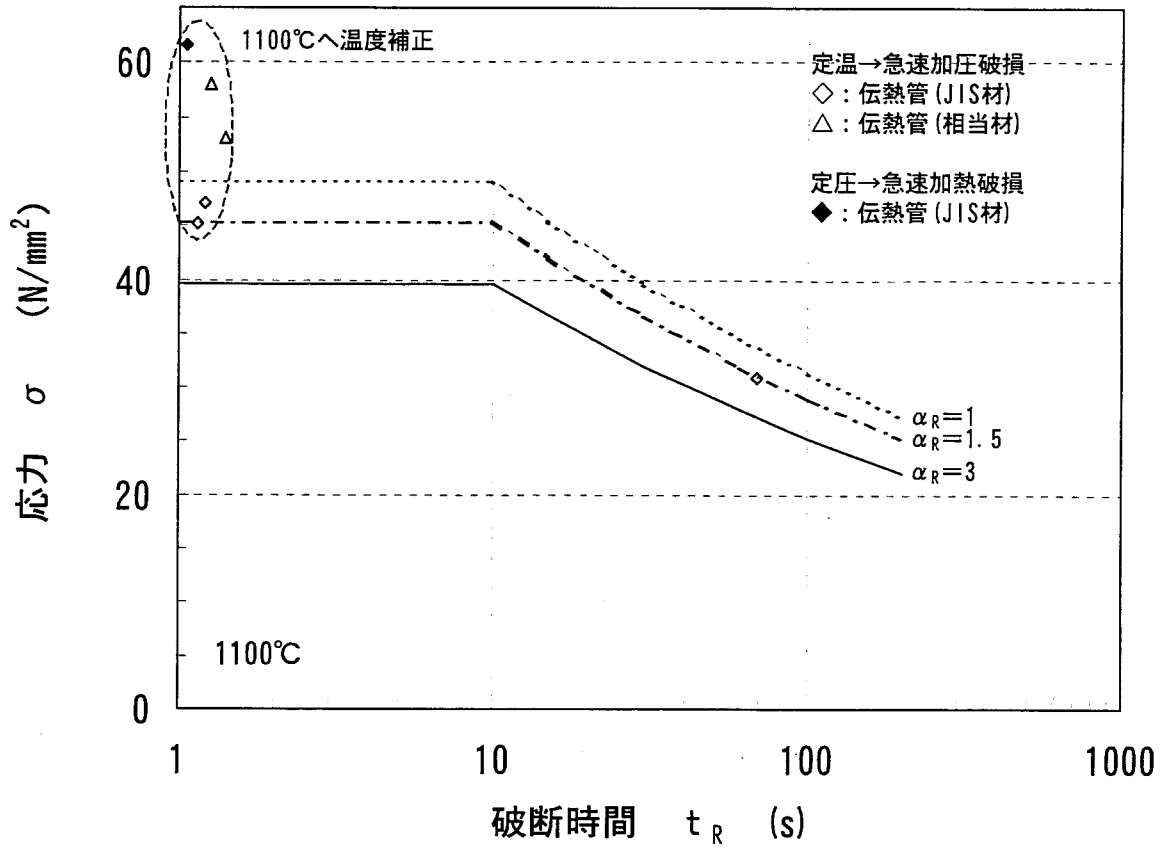


図 6.2-2 材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1100°C)

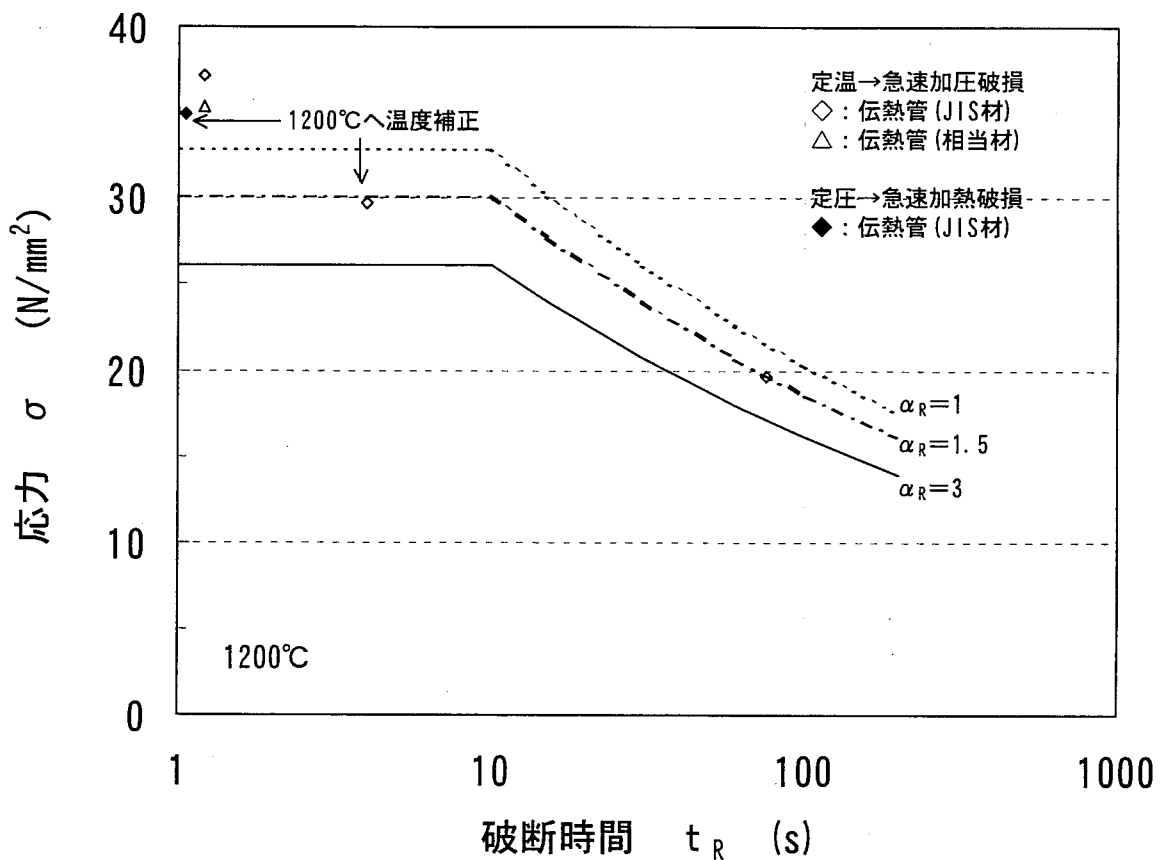


図 6.2-3 材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1200°C)

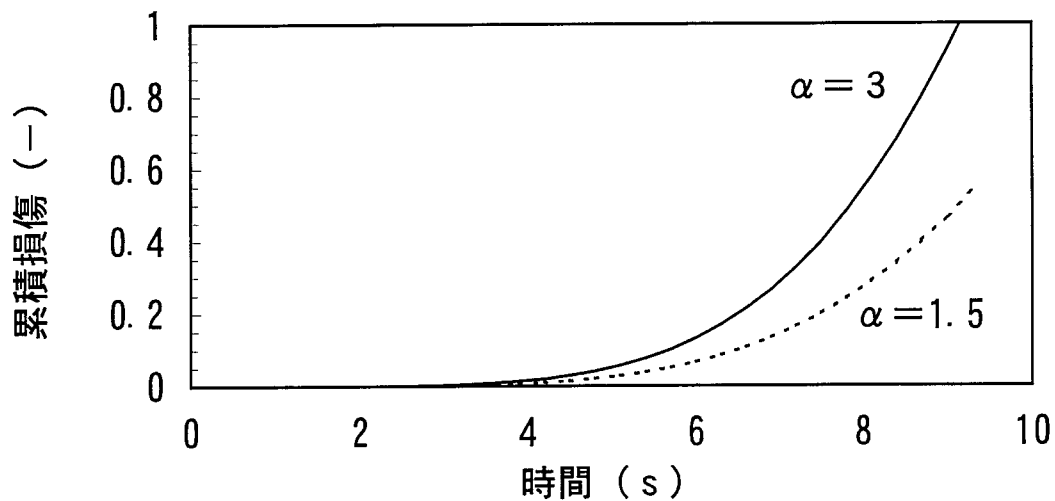
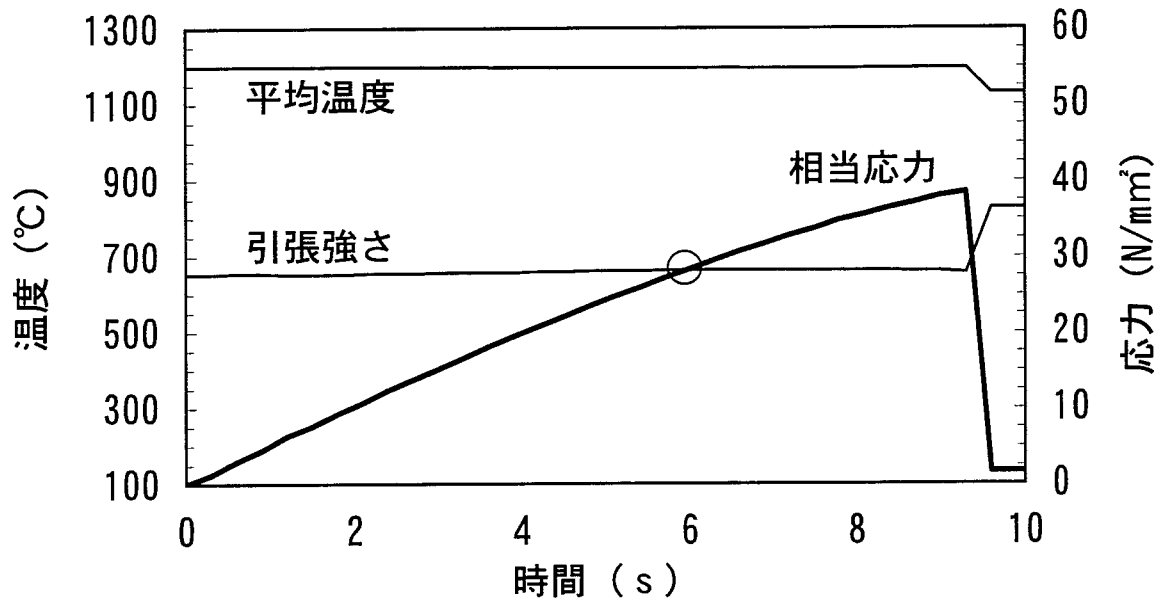
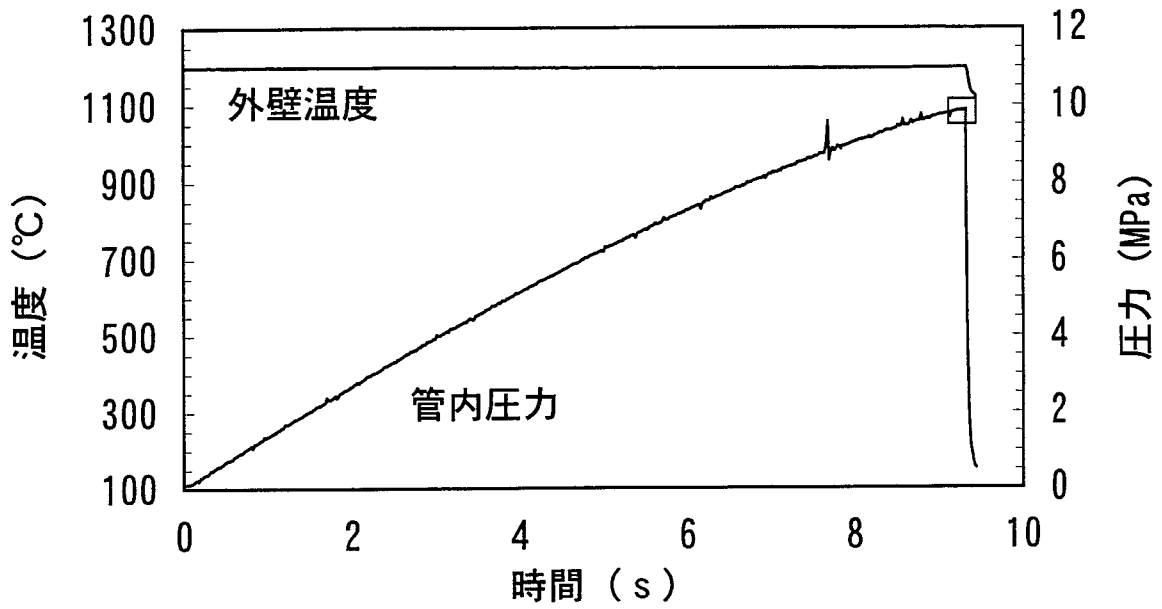


図6.3-1 Run1の解析結果

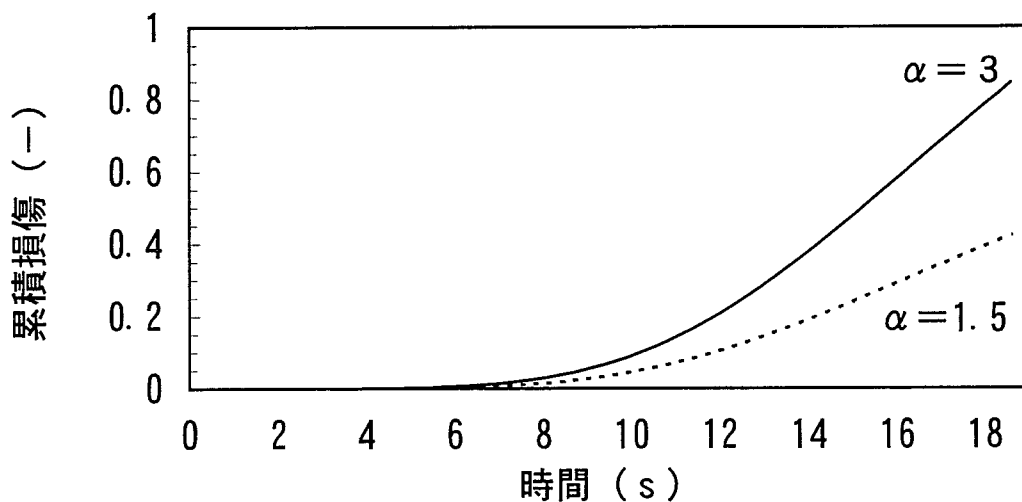
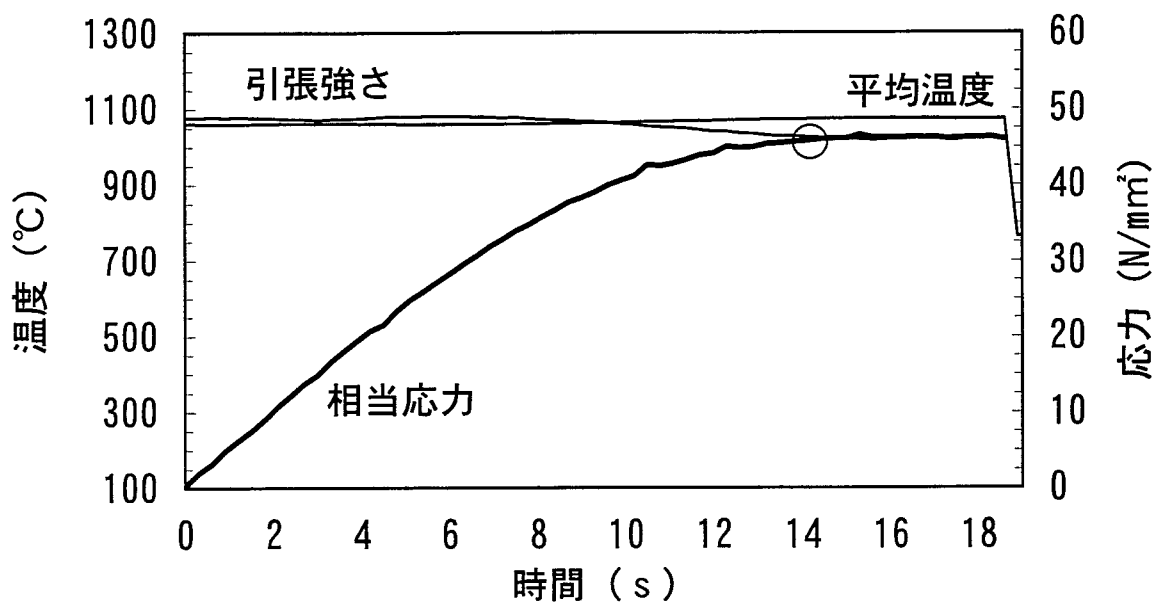
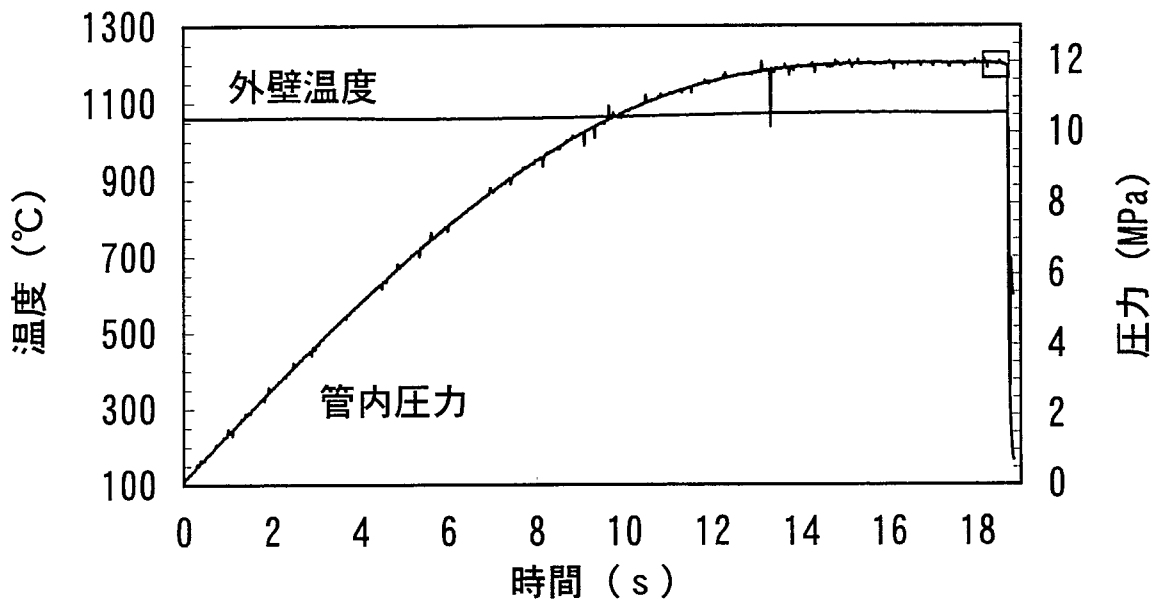


図6.3-2 Run2の解析結果

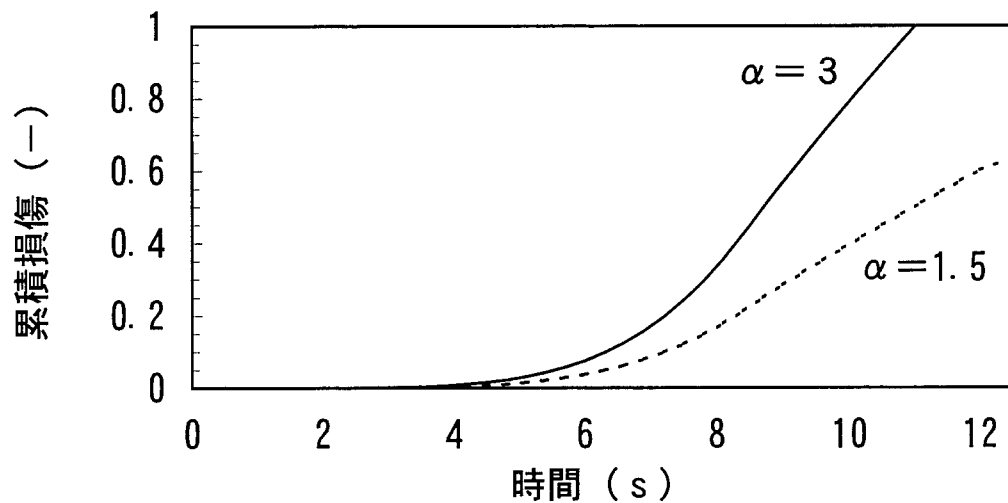
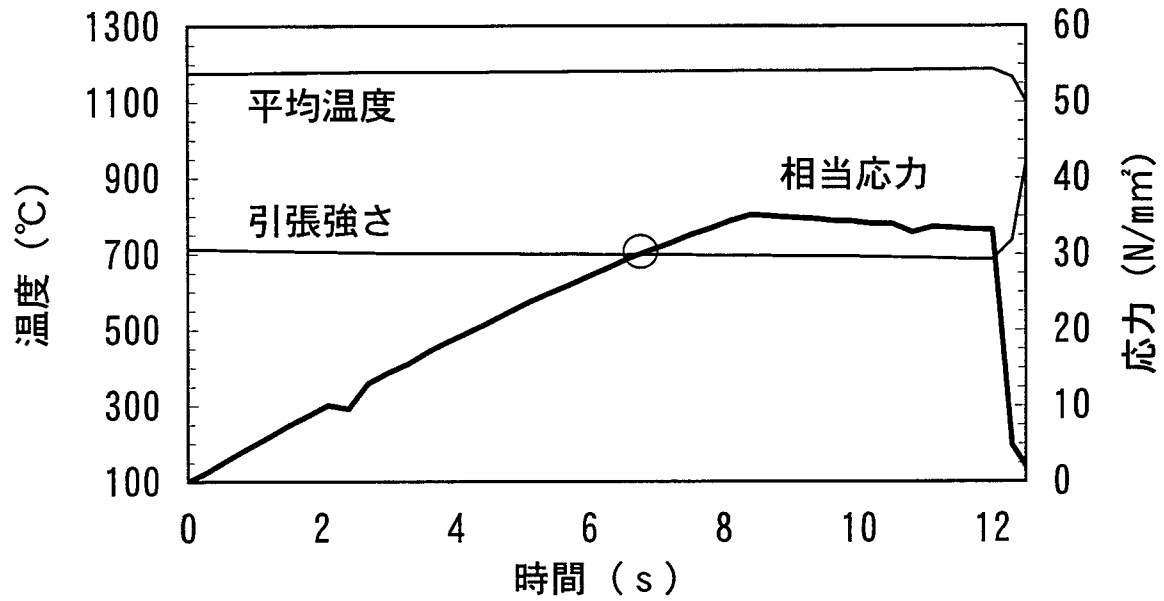
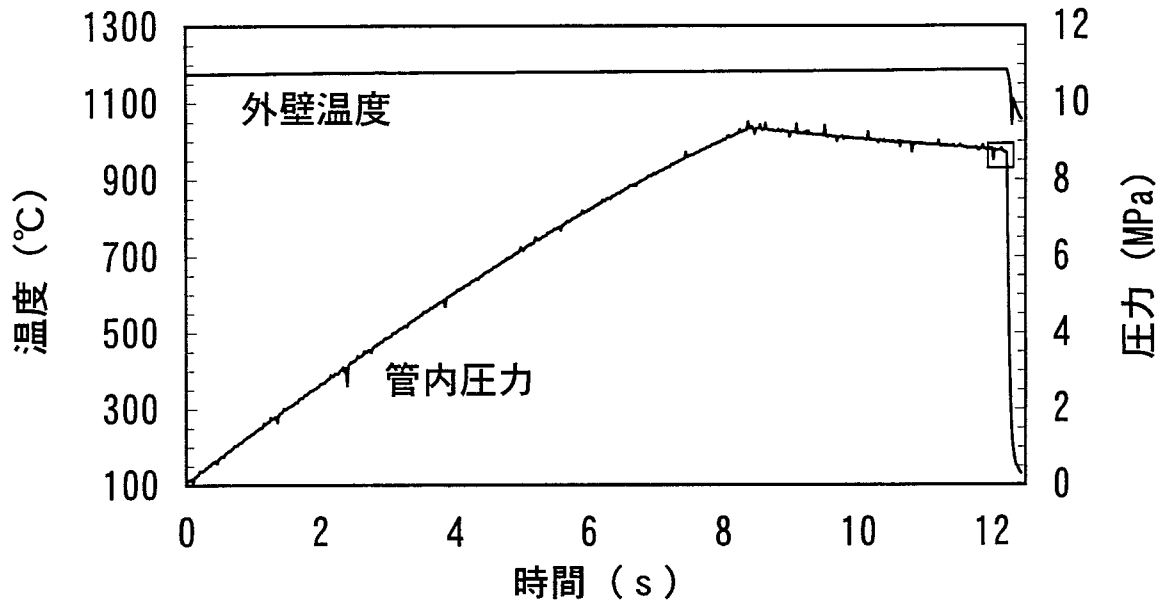


図6.3-3 Run3の解析結果



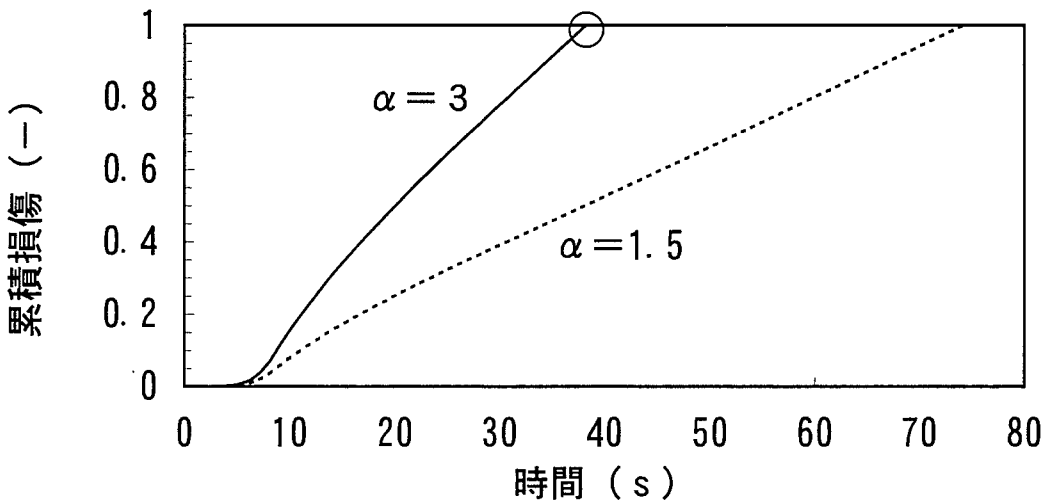
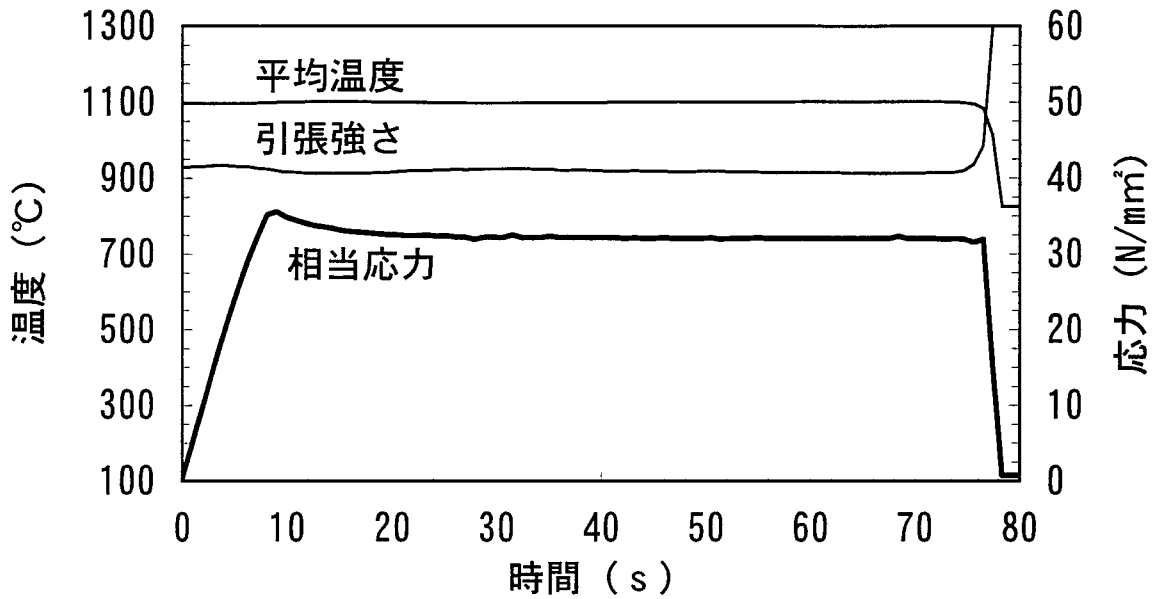
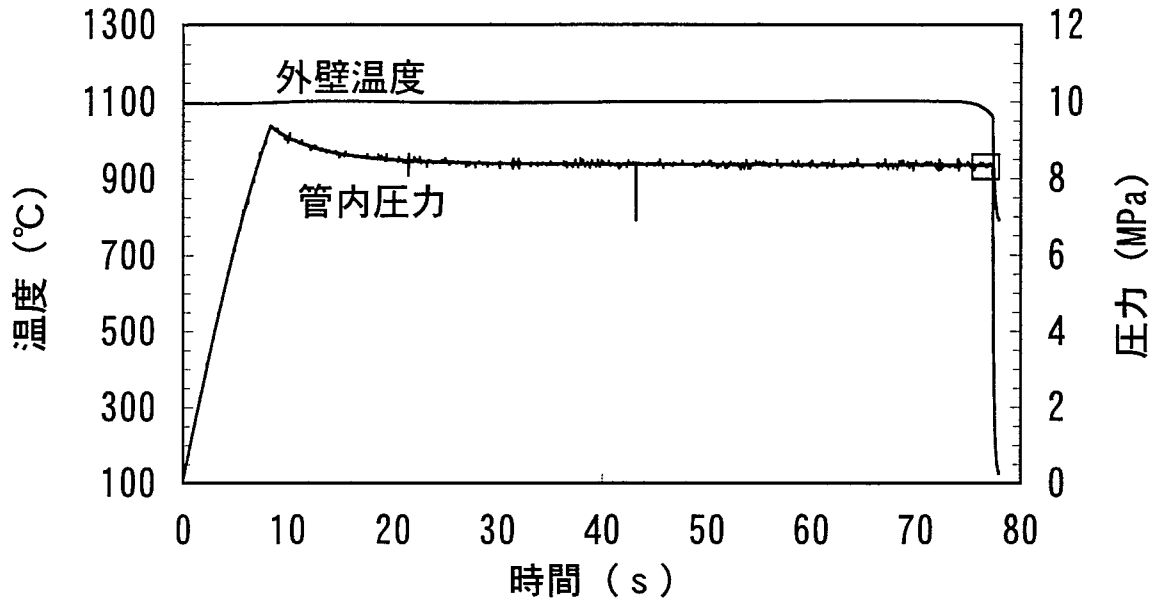


図6.3-4 Run4の解析結果

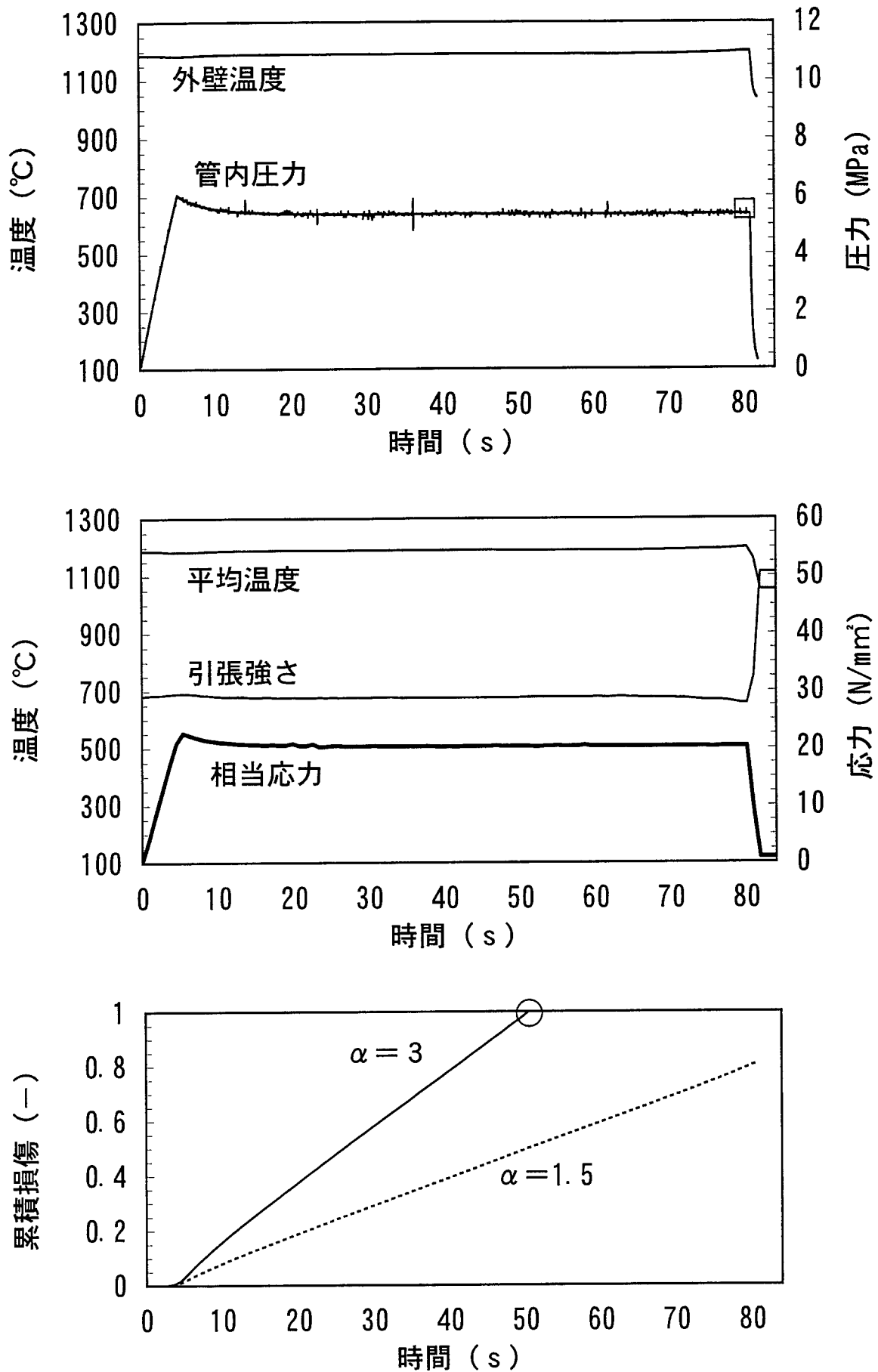


図6.3-5 Run5の解析結果

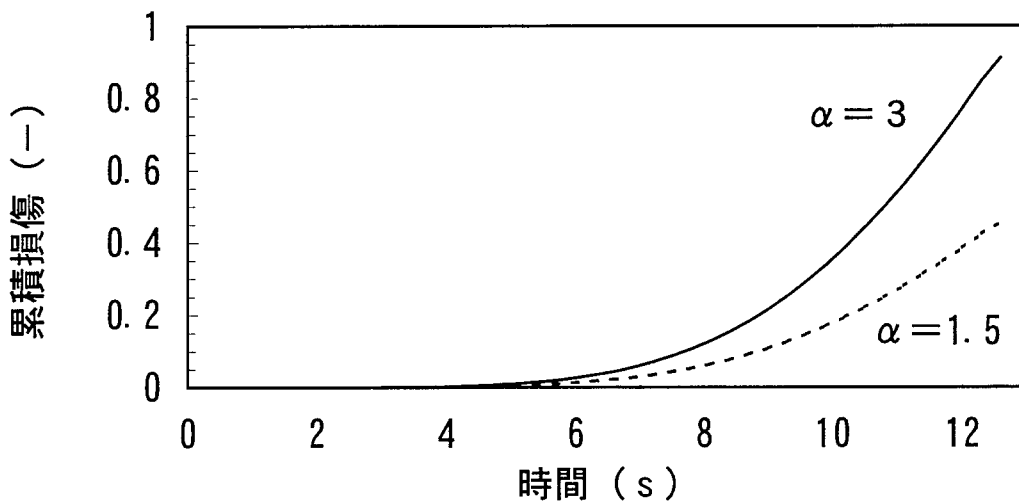
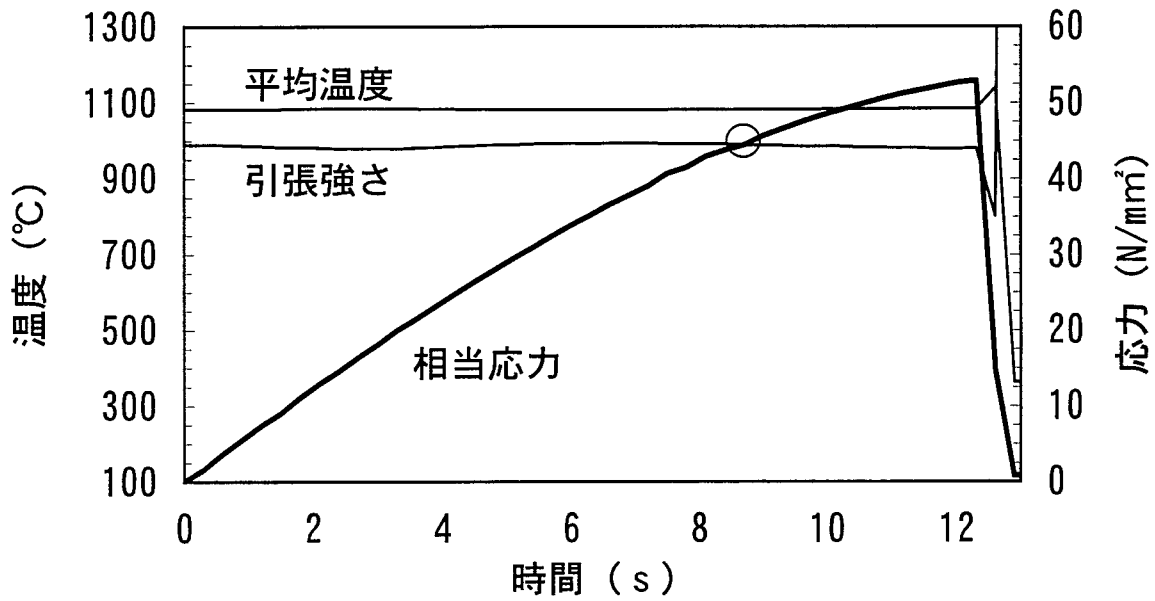
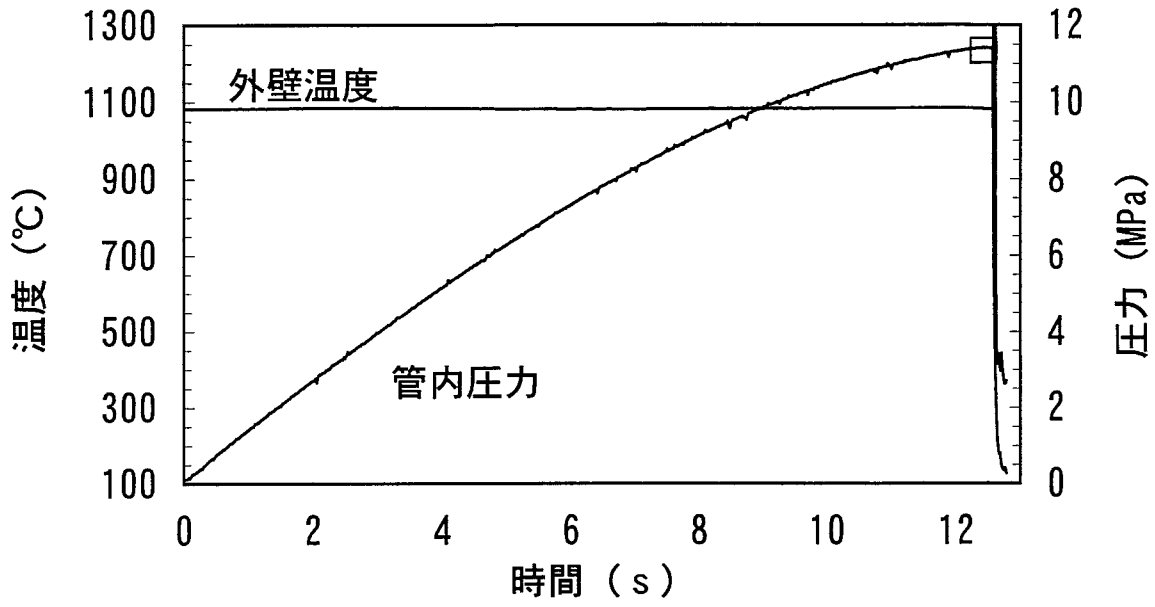


図6.3-6 Run6の解析結果

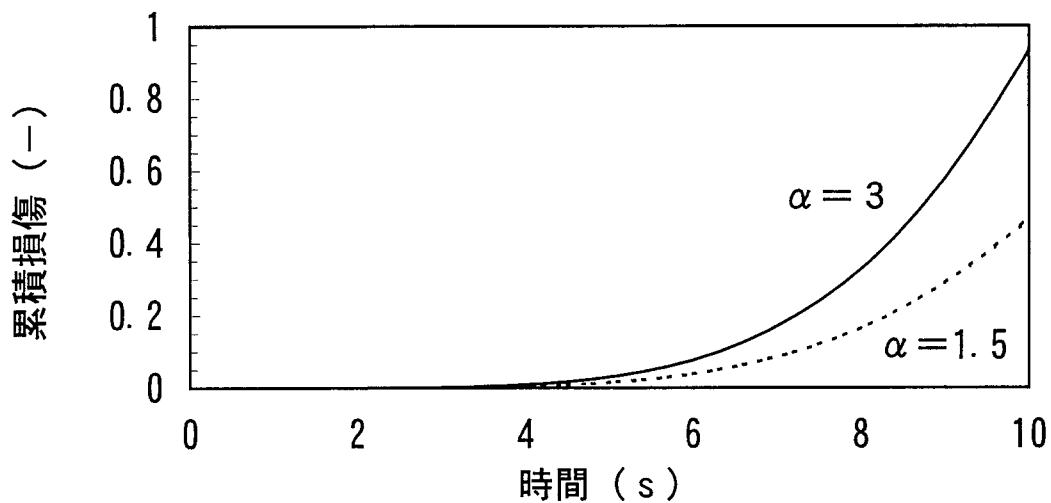
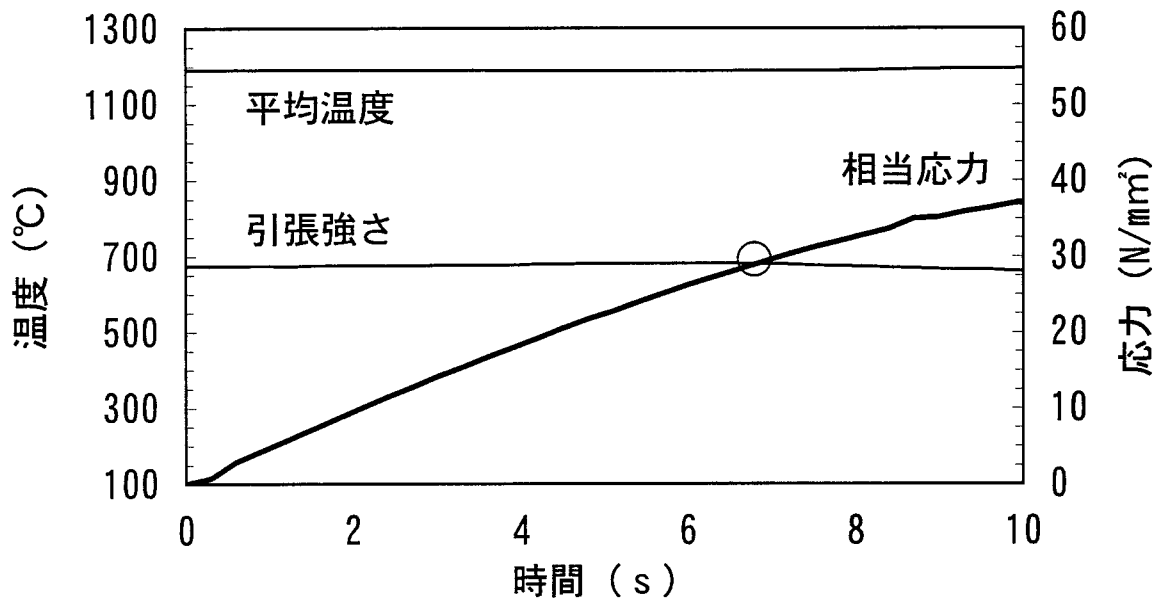
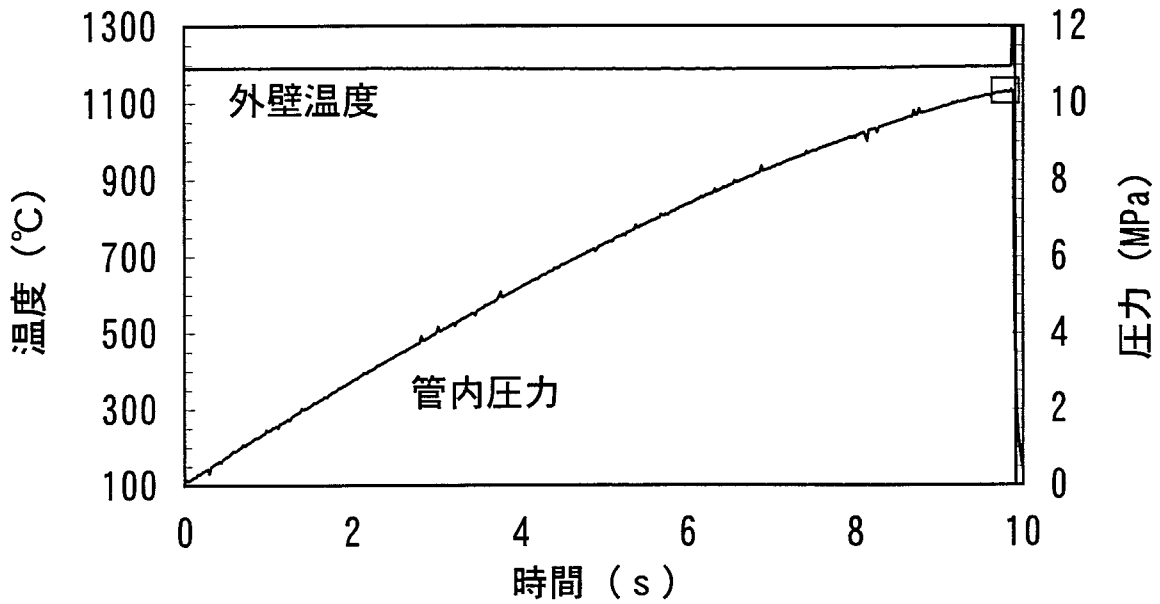


図6.3-7 Run7の解析結果

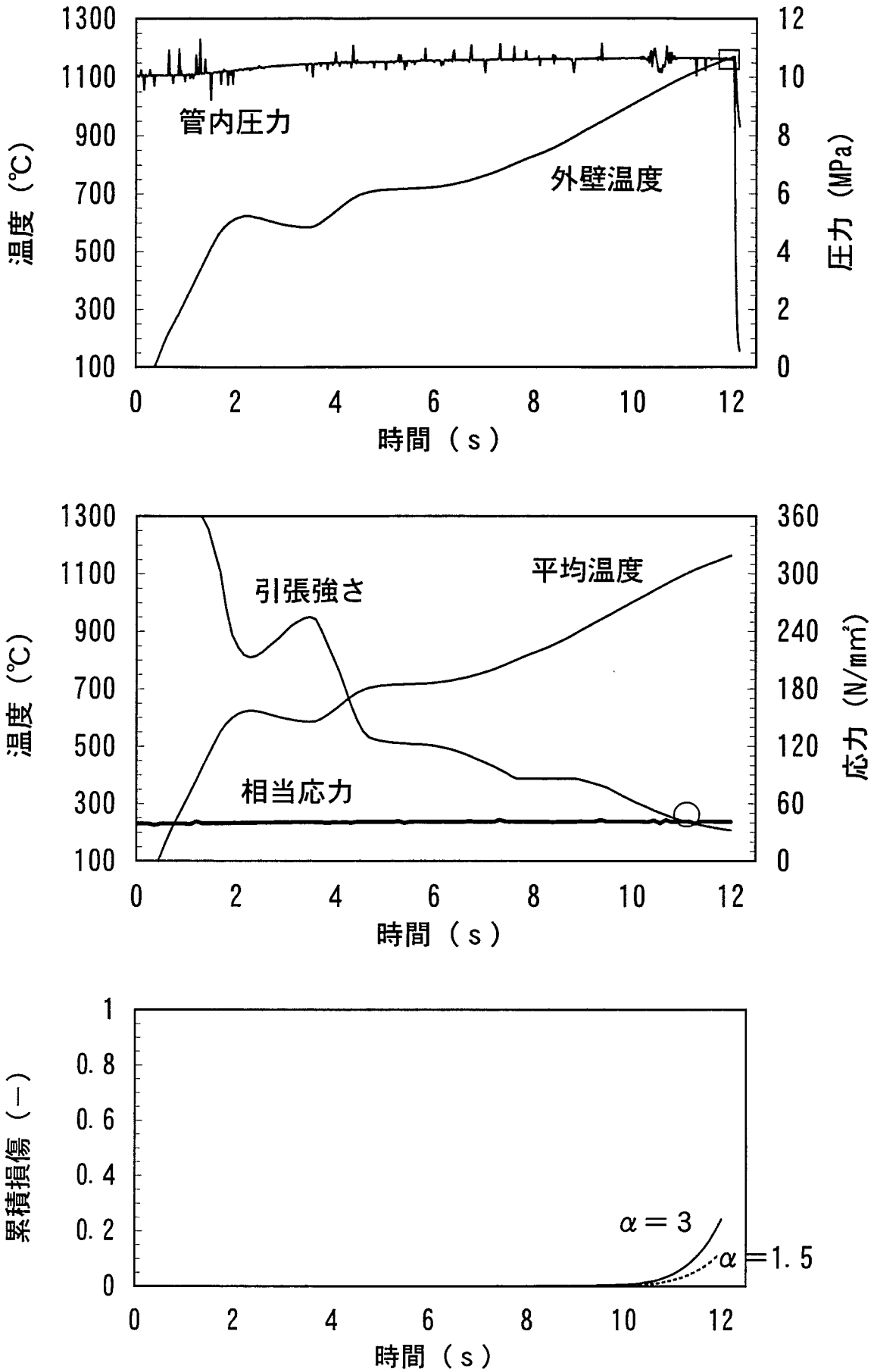


図6.3-8 Run8の解析結果

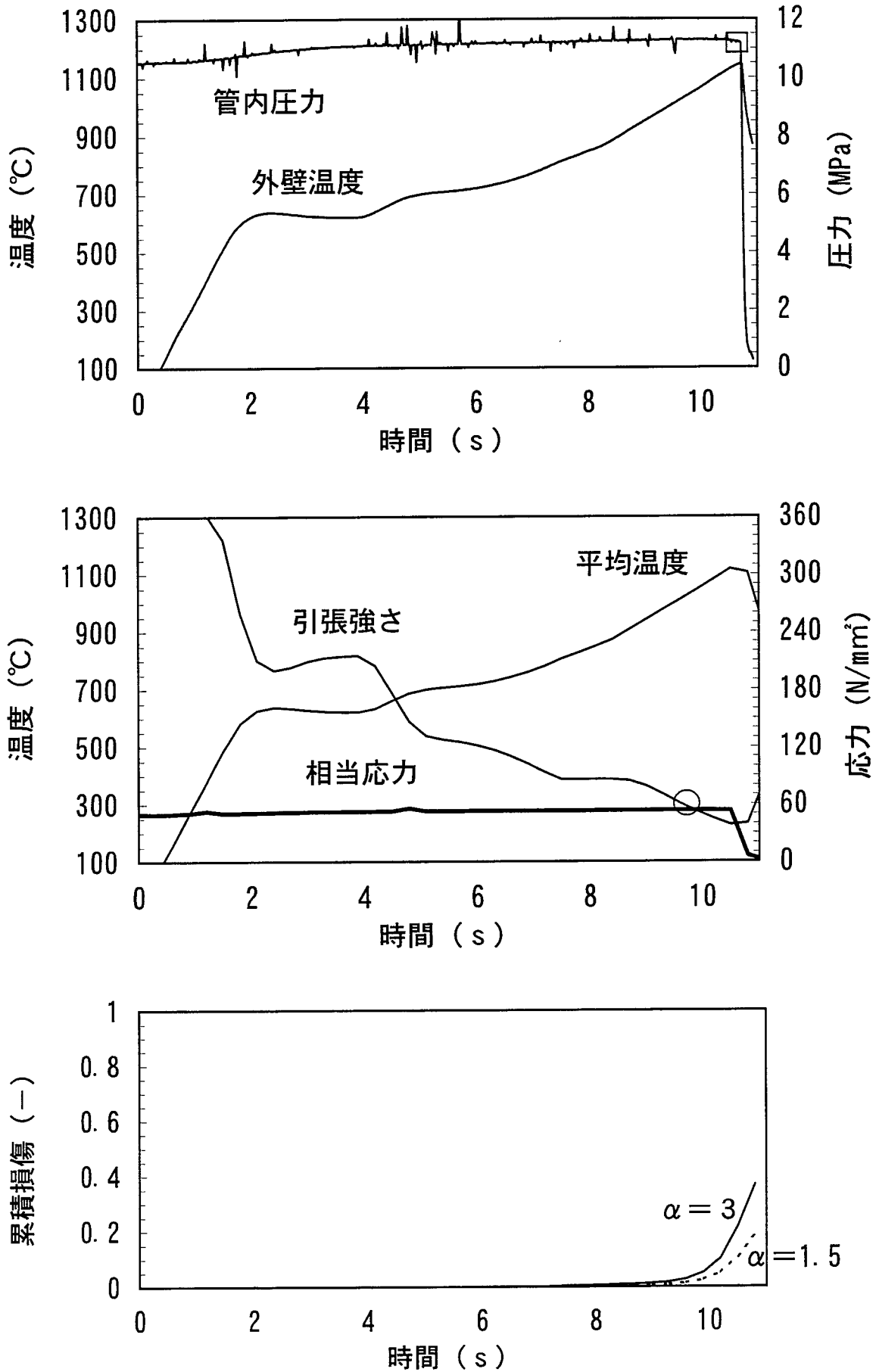


図6.3-9 Run9の解析結果

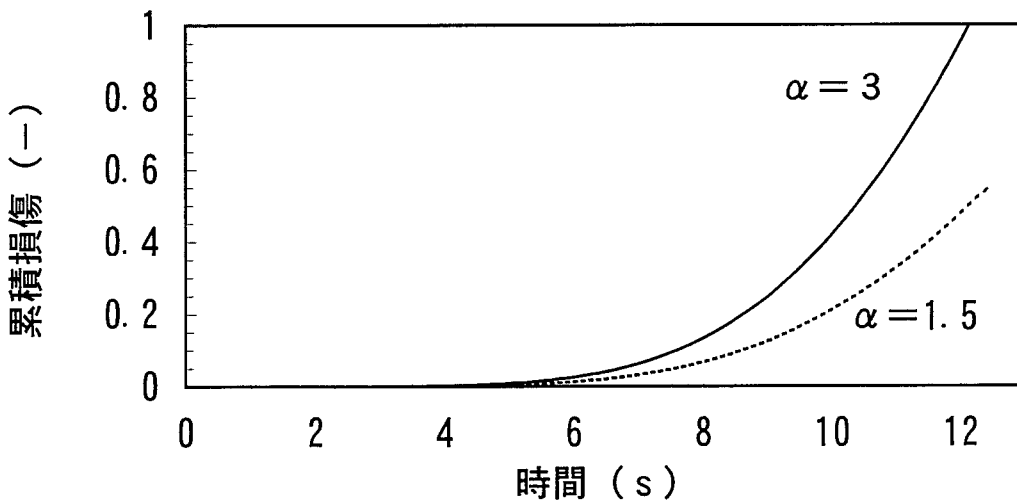
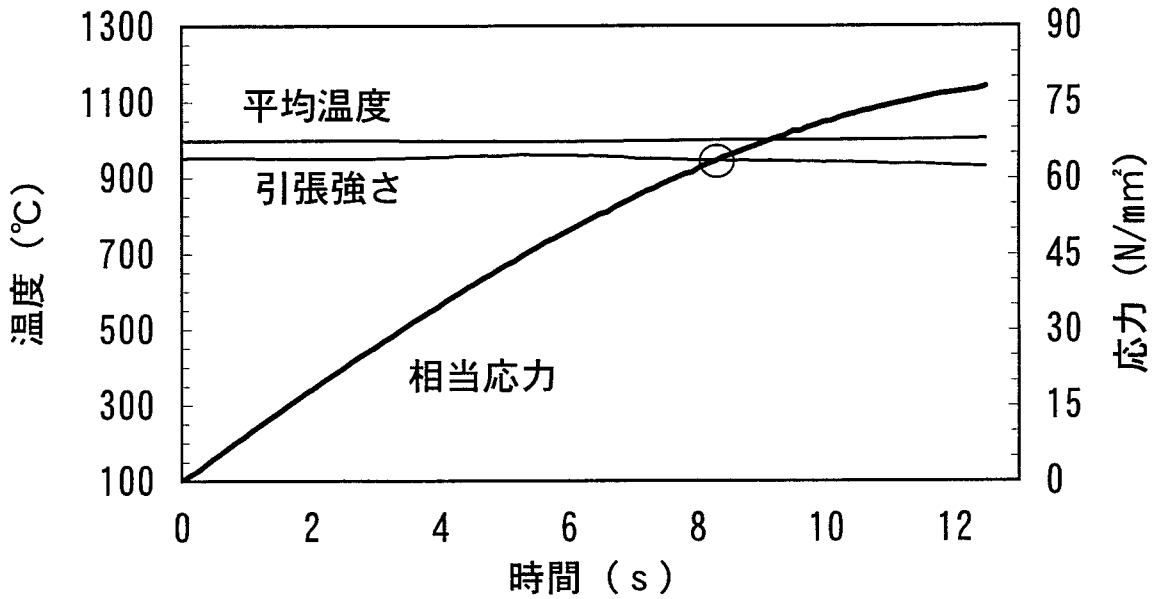
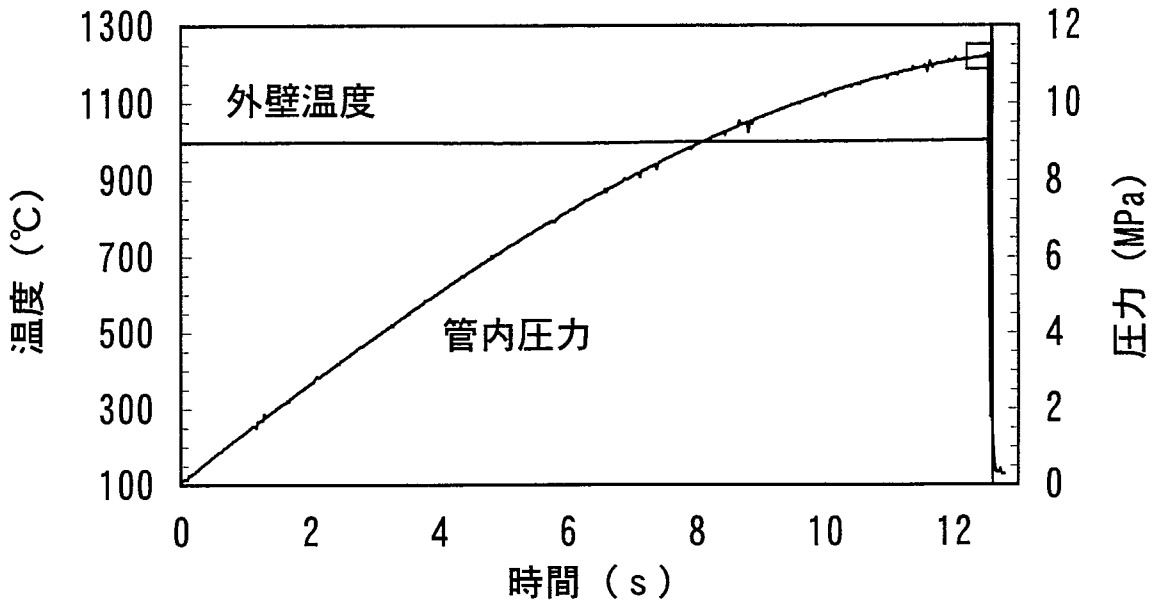


図6.3-10 Run10の解析結果

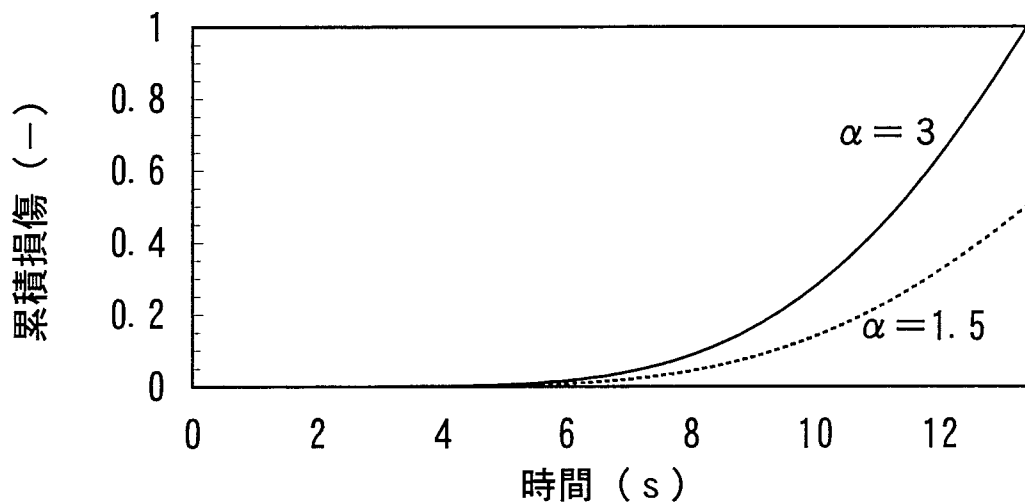
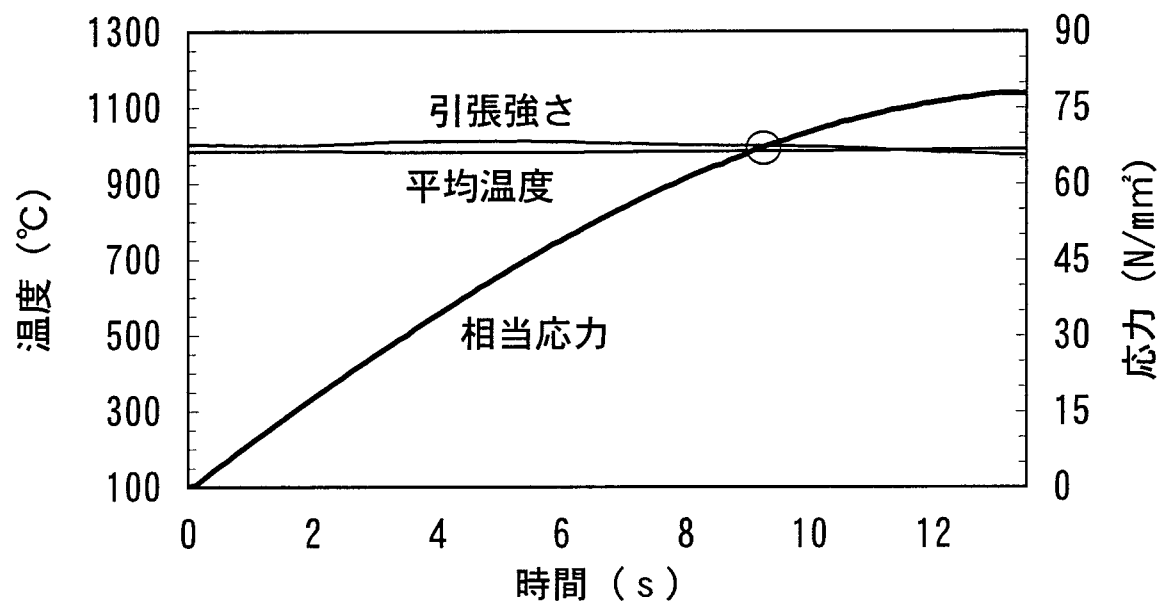
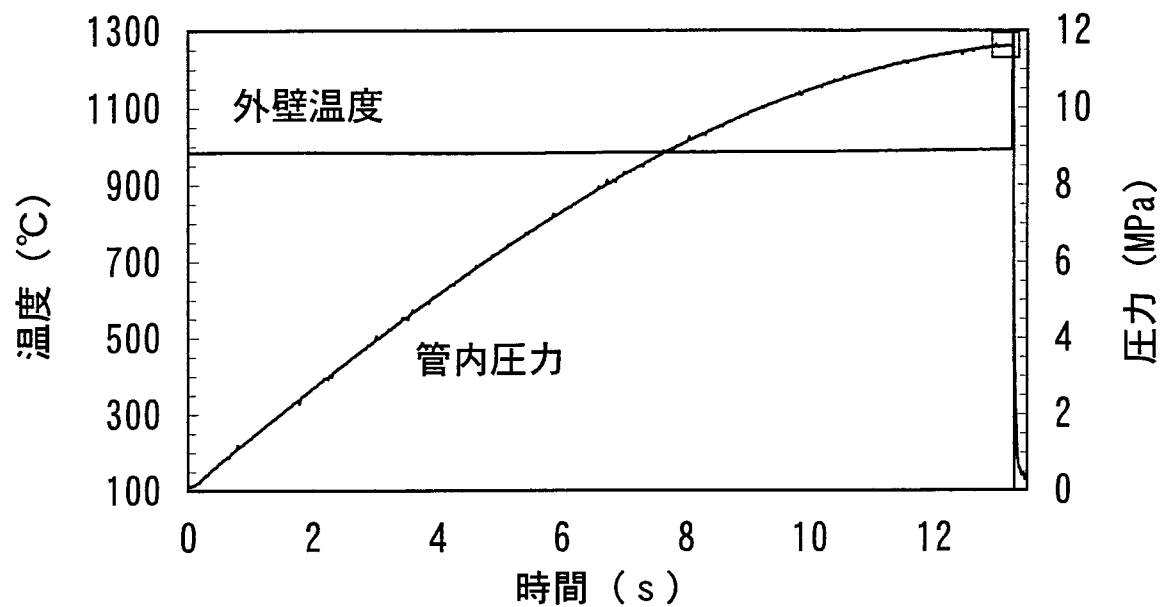


図6.3-11 Run11の解析結果



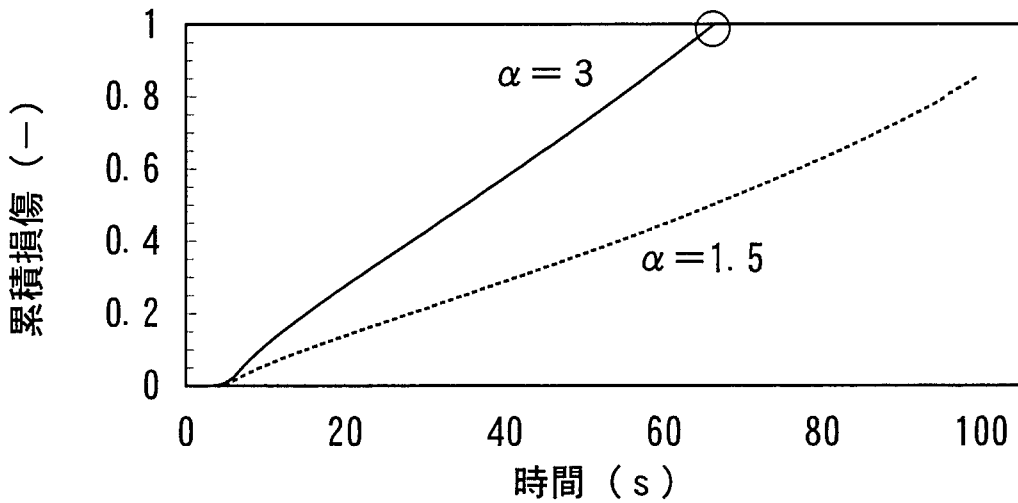
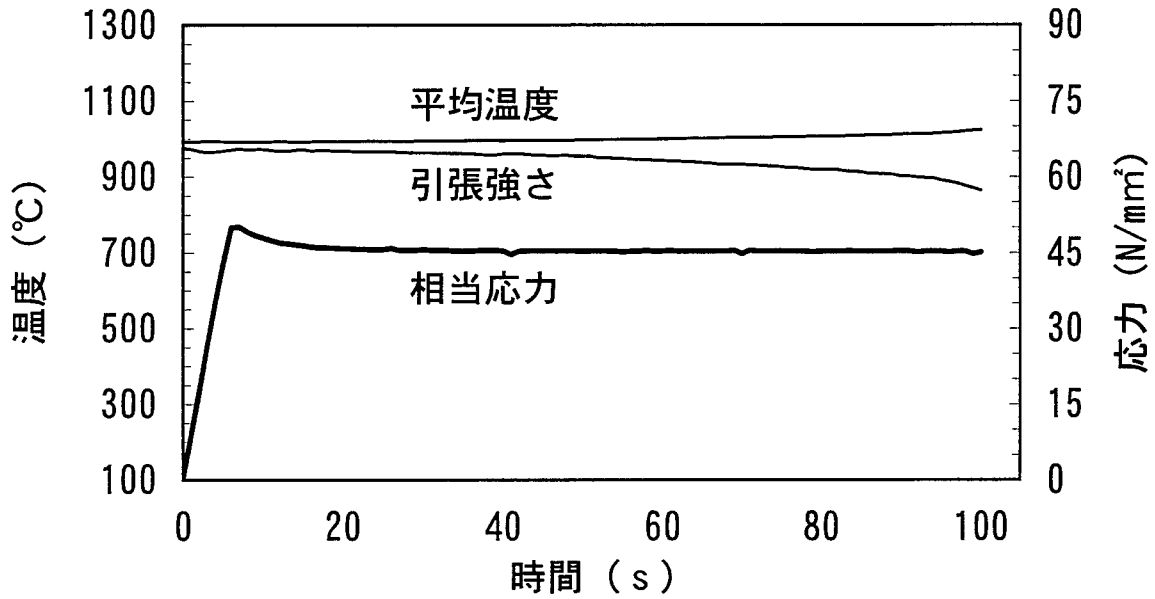
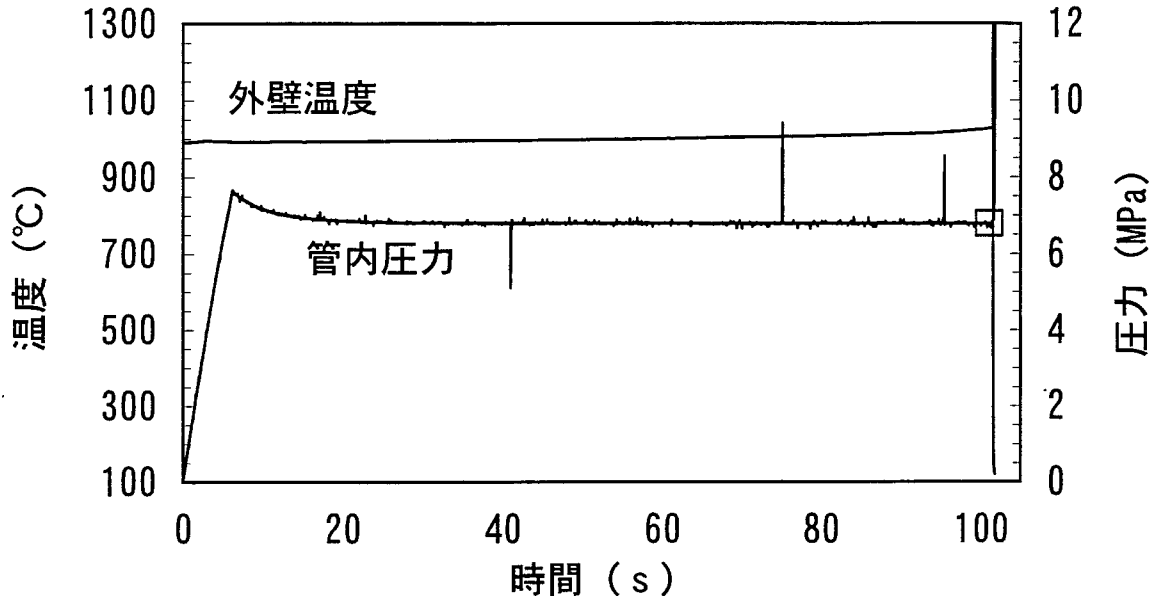


図6.3-12 Run12の解析結果

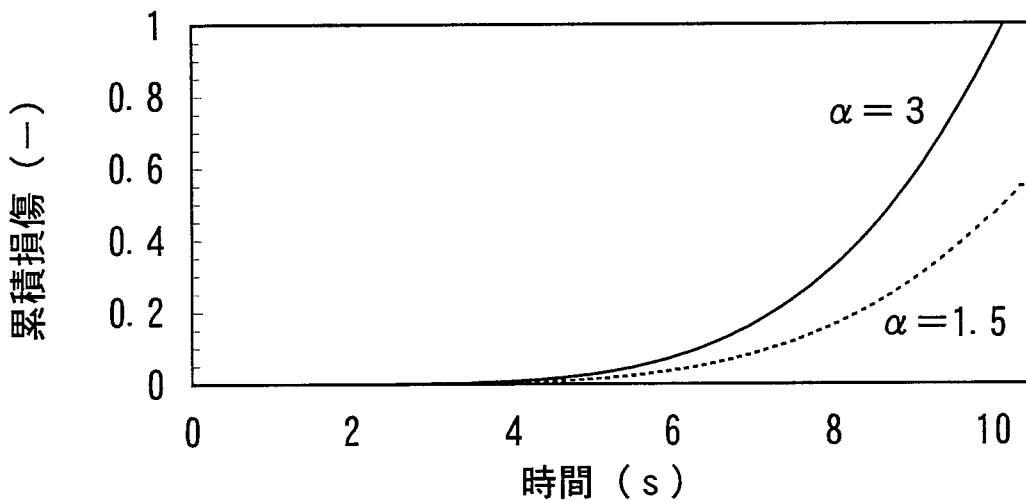
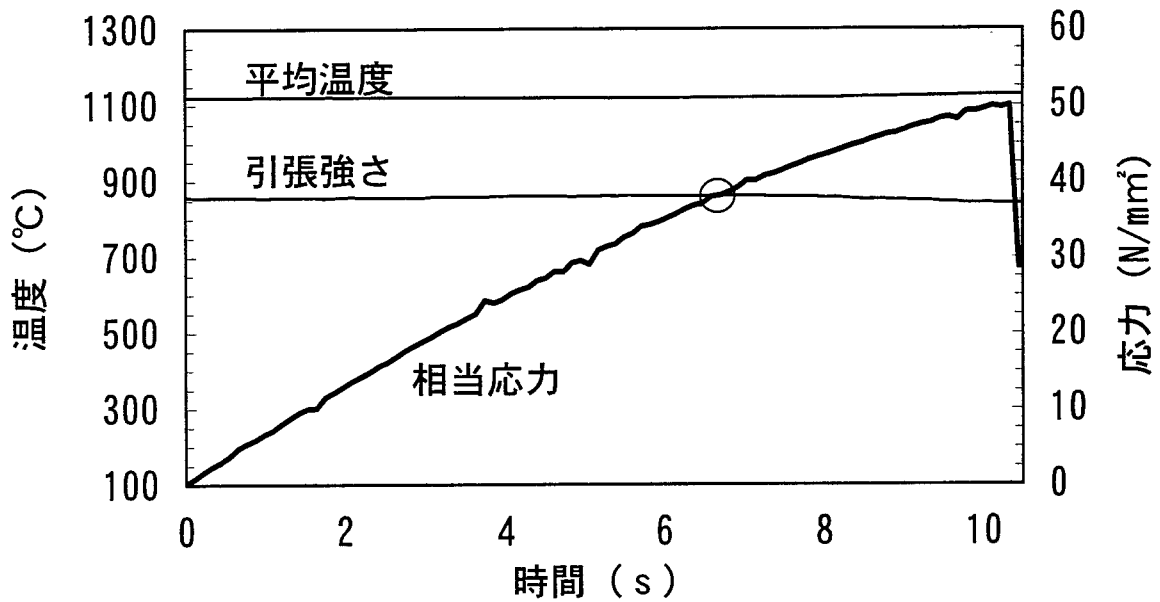
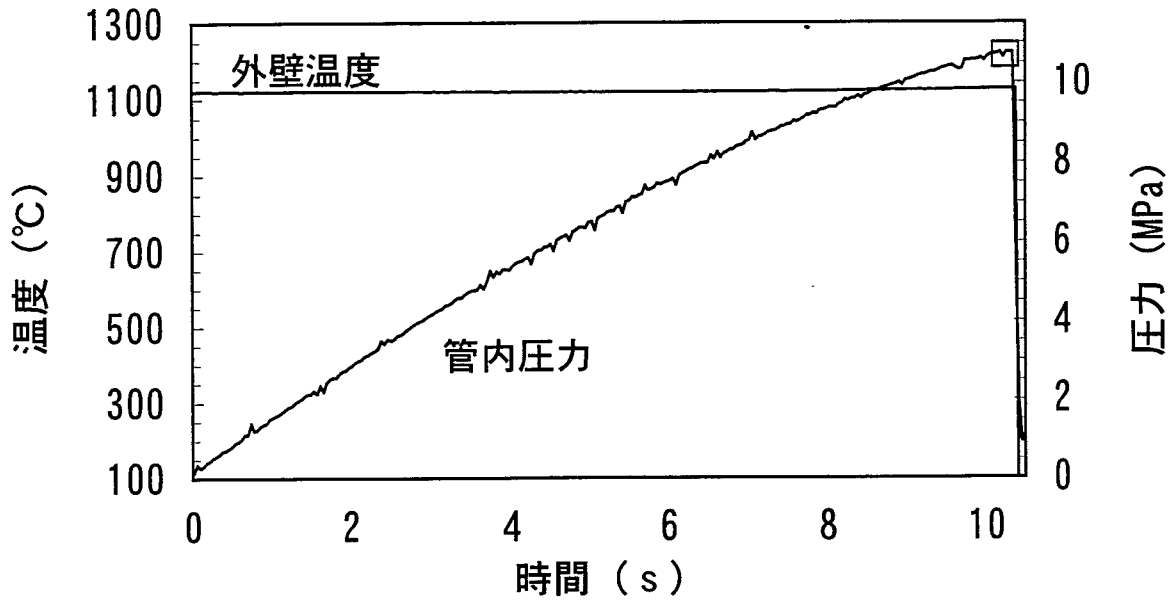


図6.3-13 Run13の解析結果

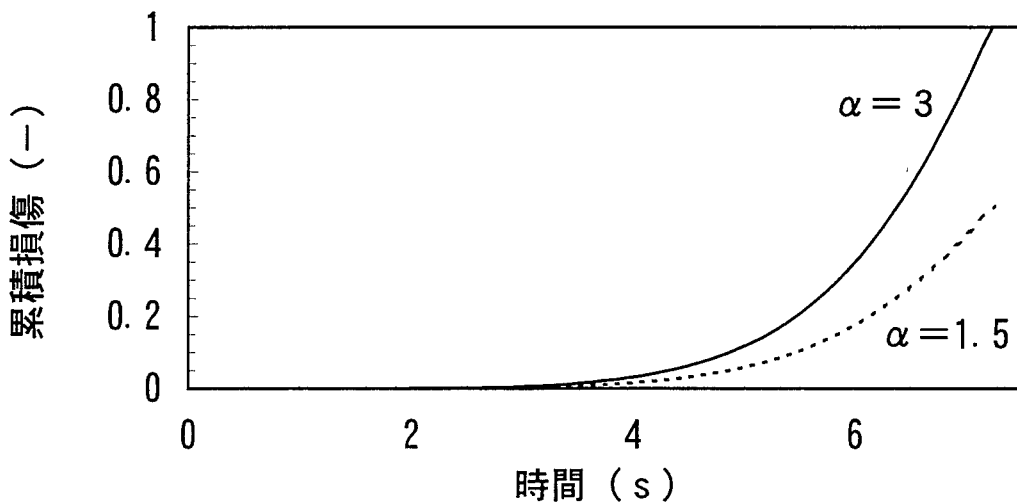
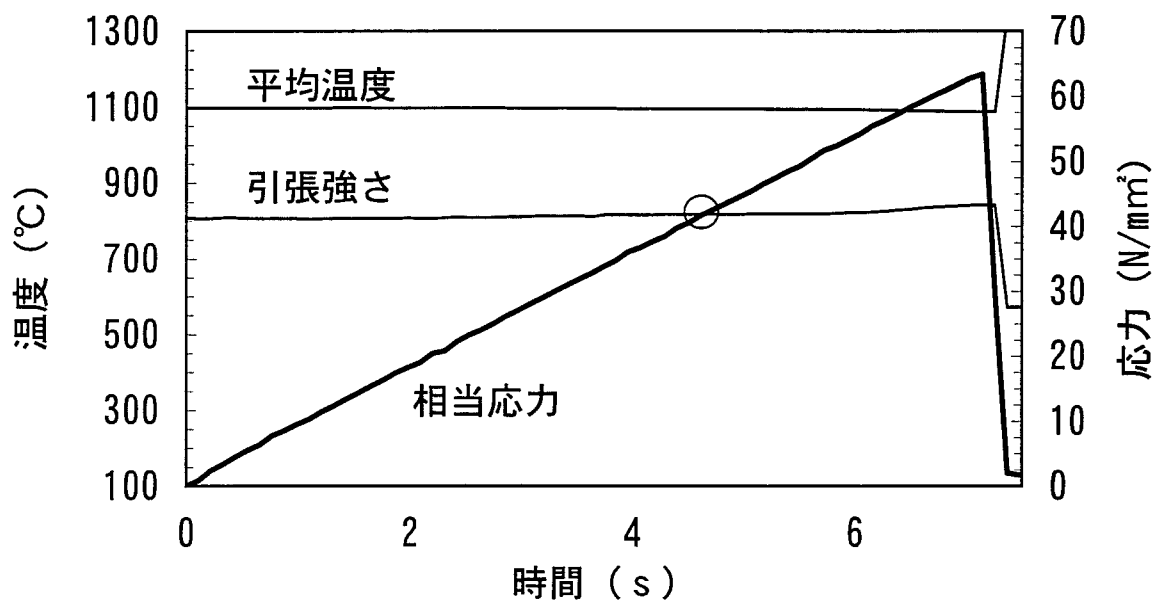
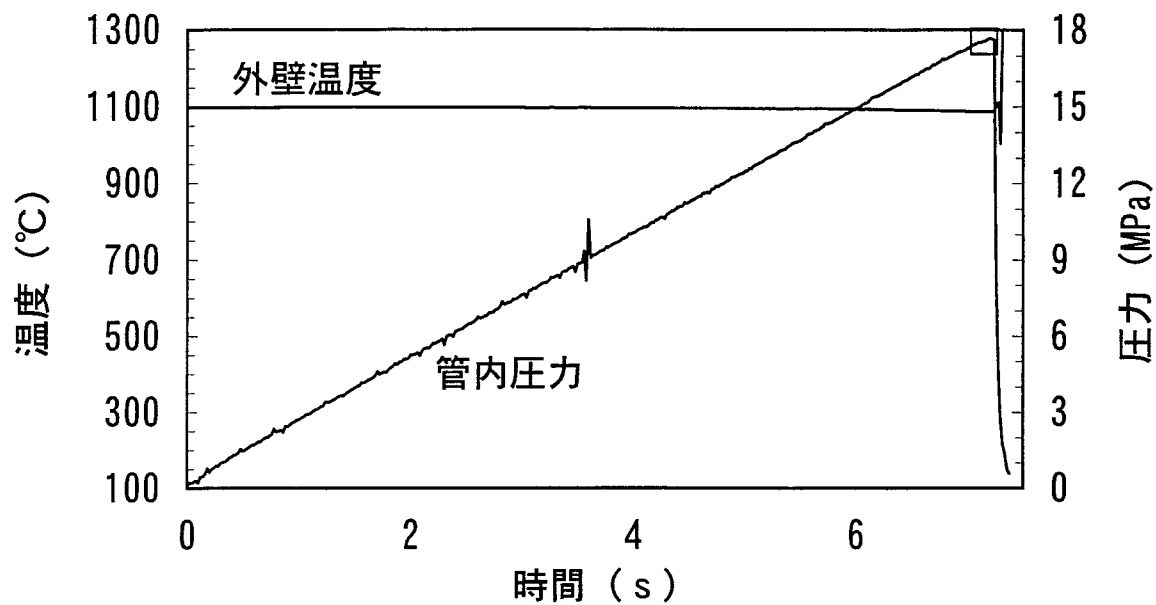


図6.3-14 Run14の解析結果

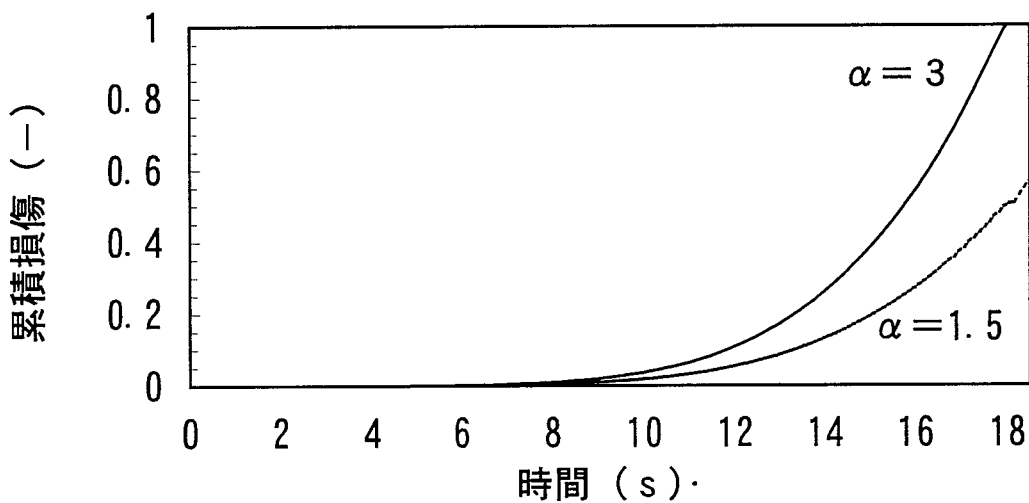
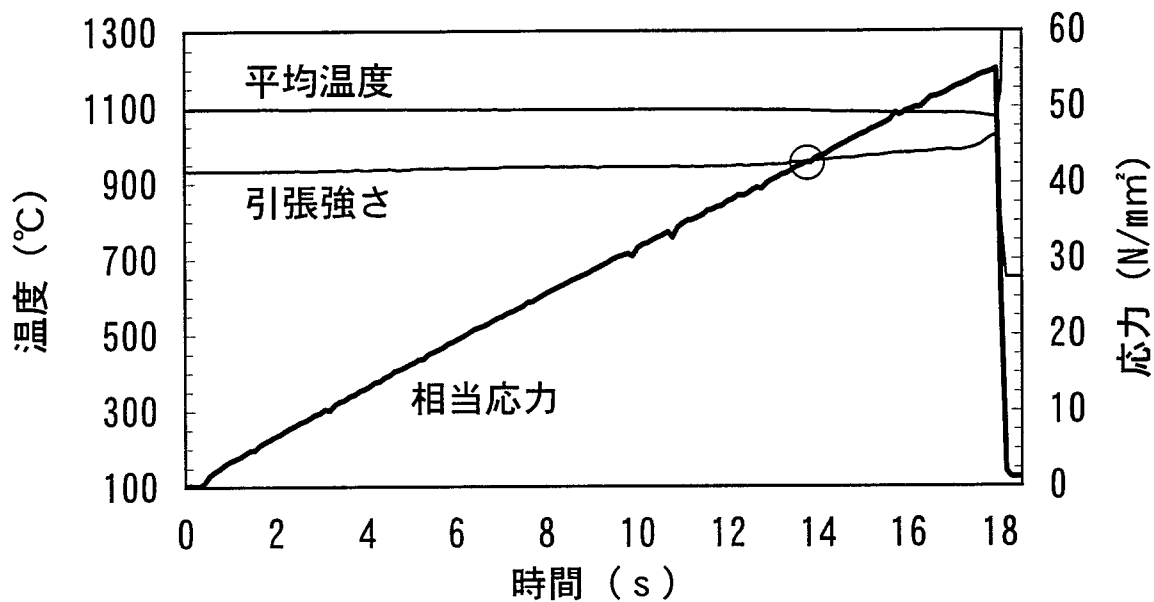
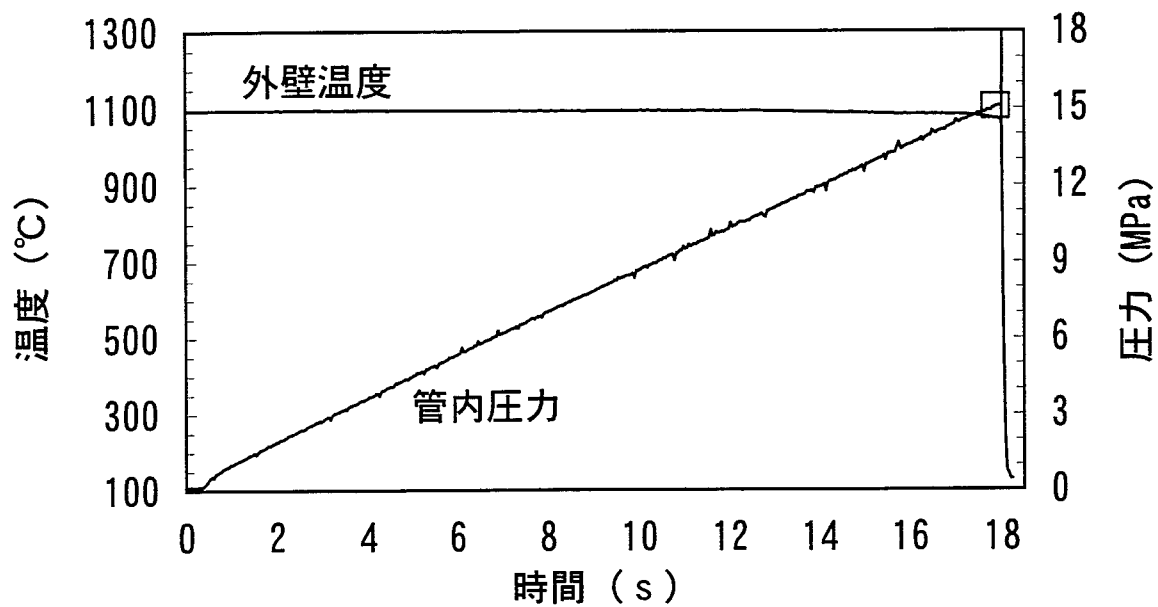


図6.3-15 Run15の解析結果

誤差 = (試験の破損時間 - 解析の破損時間) ÷ 試験の破損時間 × 100  
 破損時間の推定値 = 解析と試験の破損時間を一致させる時間係数

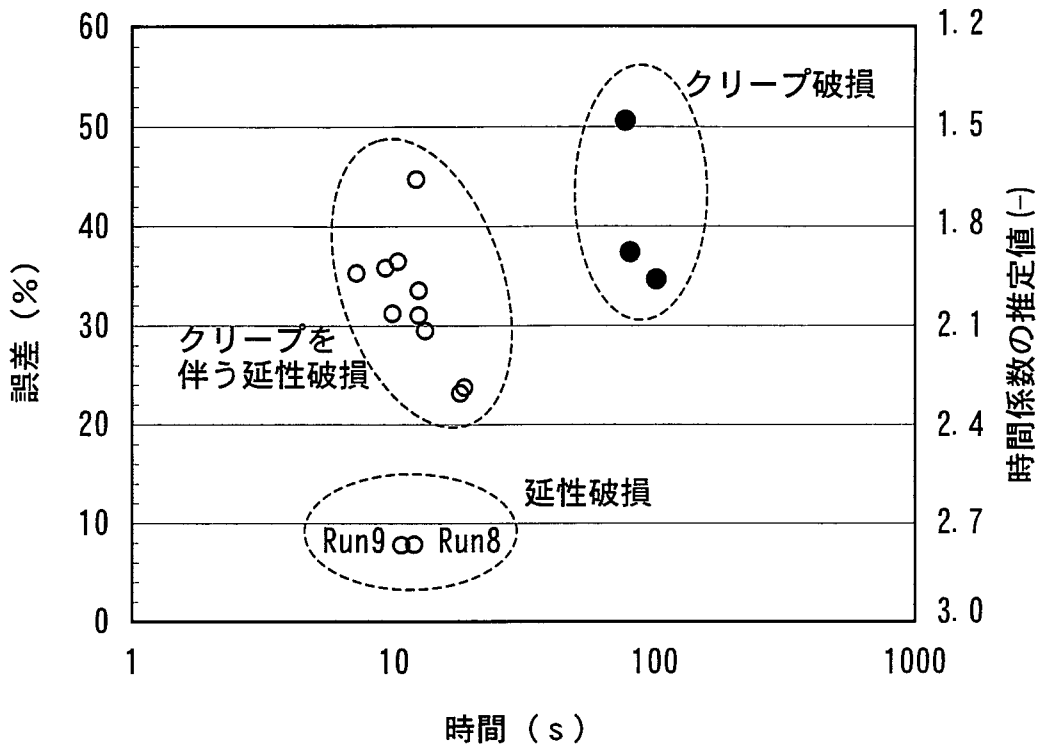


図6.3-16 破損時間の試験結果と解析結果

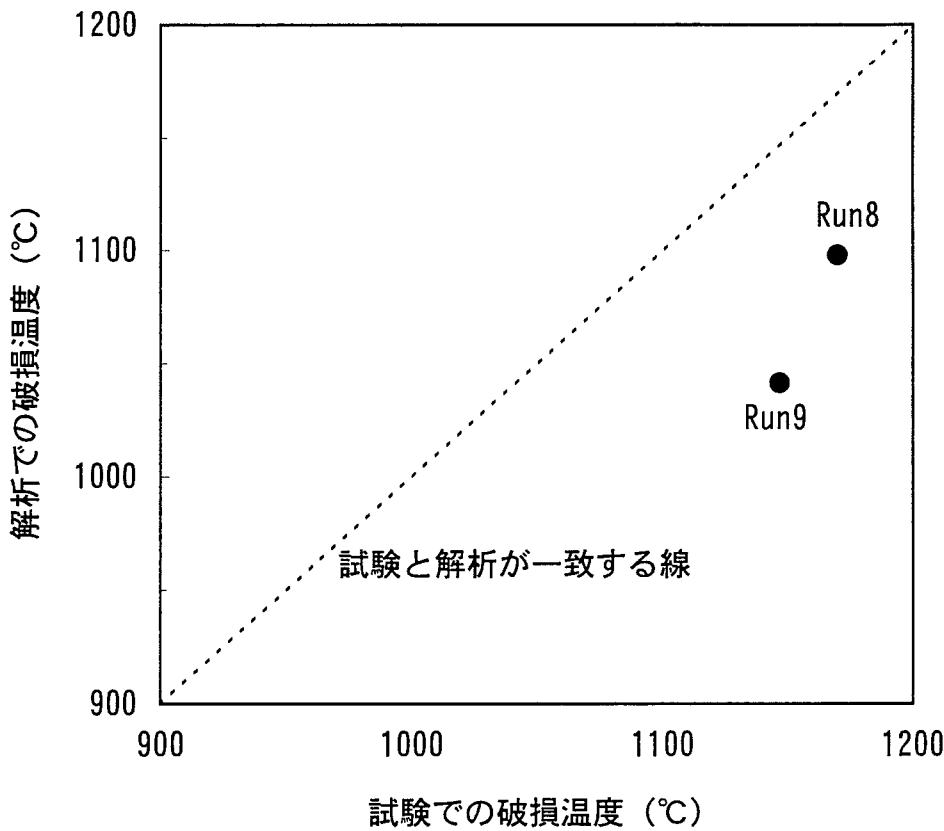


図6.3-17 破損温度の試験結果と解析結果

## 付録 1 従来結果との比較

本報のデータ整理においては、既報<sup>[6], [8]</sup>と比べて破損温度及び破損圧力が若干異なる結果となった。具体的には、Run1 の破損温度が 1200→1198℃、破損圧力が 10→9.9MPa、Run4 の破損圧力が 8.7→8.4MPa、Run15 の破損温度が 1107→1063℃と変更された。これらの変更に伴う影響は以下に示すように軽微なものであり、見直し後の結果は従来<sup>[6], [8]</sup>の結果と基本的に異なることを確認した。

### 1.1 延性破損試験

付図-1 に延性破損試験結果を示す。特に今回変更される前の試験データのプロットは破線内の×で表した。従来<sup>[6], [8]</sup>の結果と同様に、試験データは材料強度基準値（実線で示す時間係数 3 の曲線）に対して、応力係数 1.1~1.5 の範囲に留まっている。

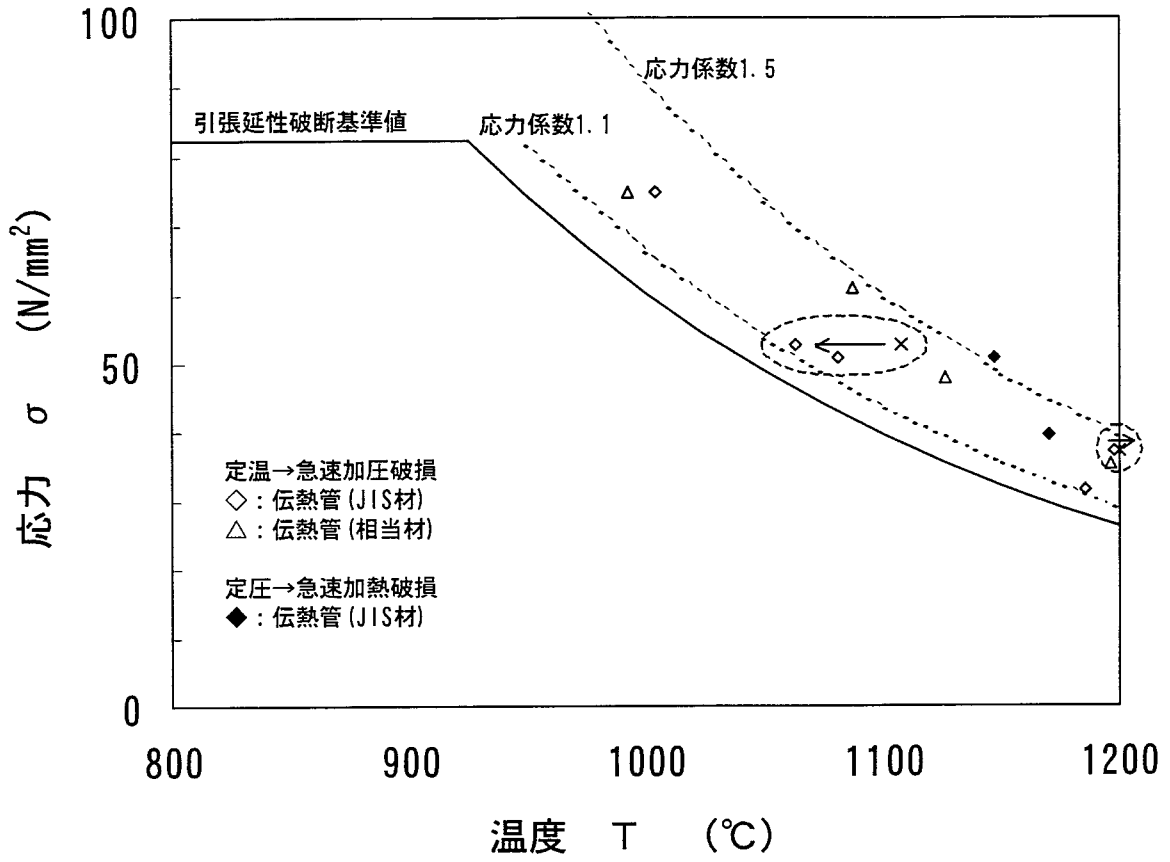
### 1.2 クリープ破損試験

付図-2 と付図-3 に、それぞれ 1100℃ 及び 1200℃ におけるクリープ破損試験結果を示す。今回変更される前の試験データのプロットは破線内の×で表した。図に示すように、変更後のクリープ試験結果は従来<sup>[6], [8]</sup>と比べて大きく相違することはない。

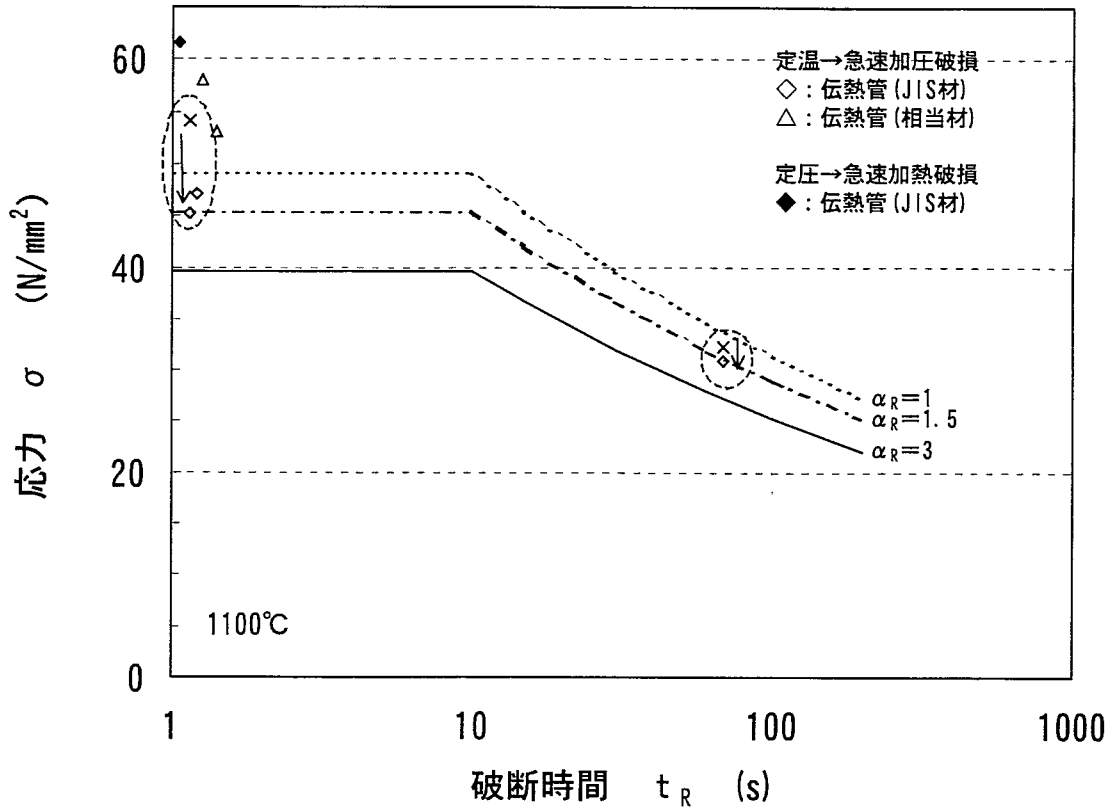
### 1.3 解析との比較

付図-4 には、破損時間について試験と解析を比較した結果を示す。今回変更される前の試験データのプロットは×で表した。既報と同様にクリープ破損、延性破損、クリープを伴う延性破損に分類でき、破損時間の誤差及び時間係数の推定値について、既報と有意な違いは見られない。

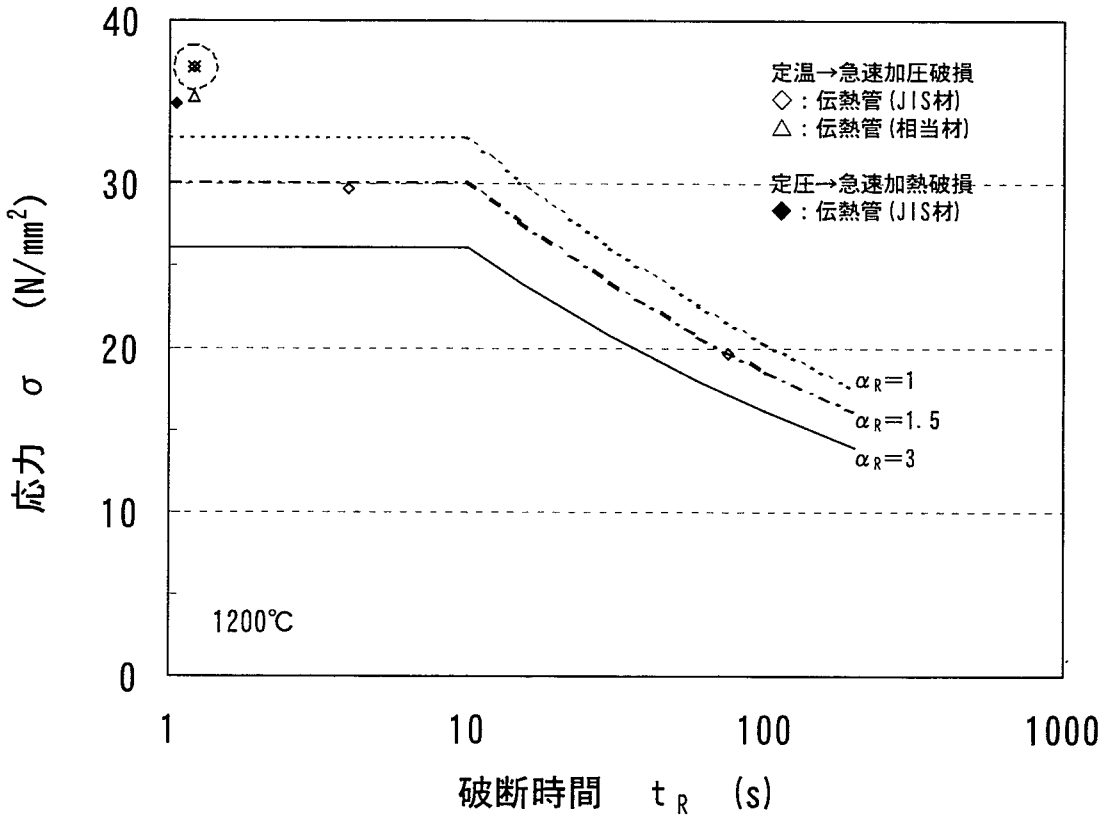
付図-5 では、特に延性破損の Run 8 と Run 9 のケースについて試験と解析の破損温度を比較した。今回変更される前の試験データのプロットは×で表した。この図に関しても、既報に比べて有意な違いは見られない。



付図-1 材料強度基準と延性破損試験結果



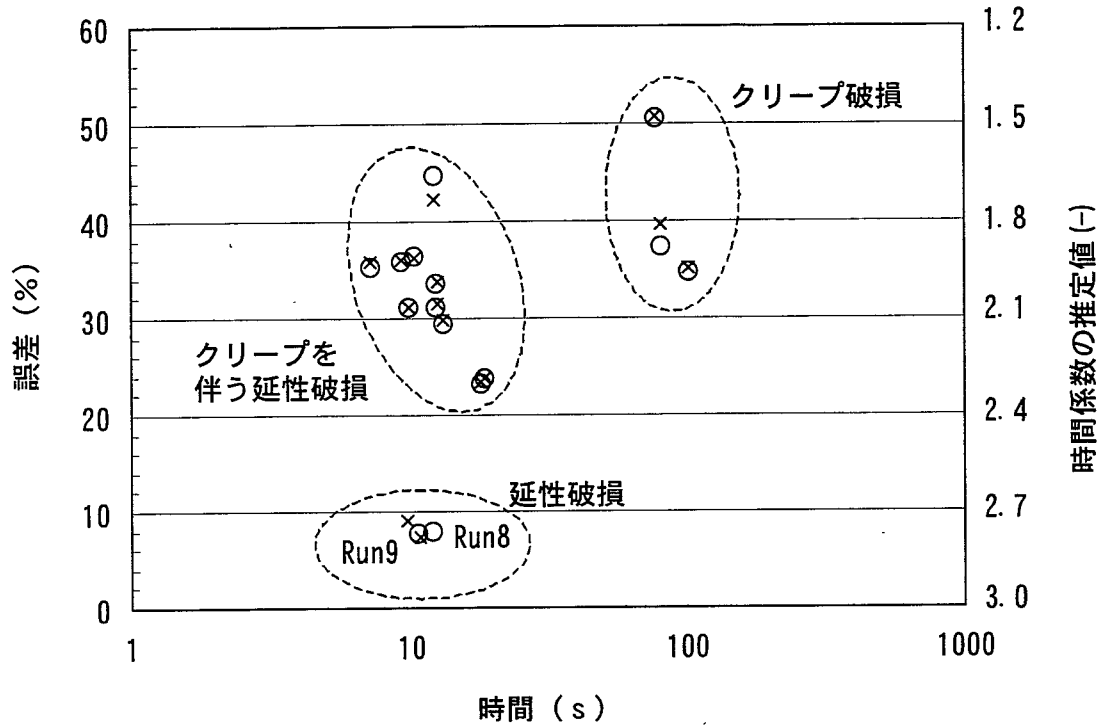
付図-2 材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1100°C)



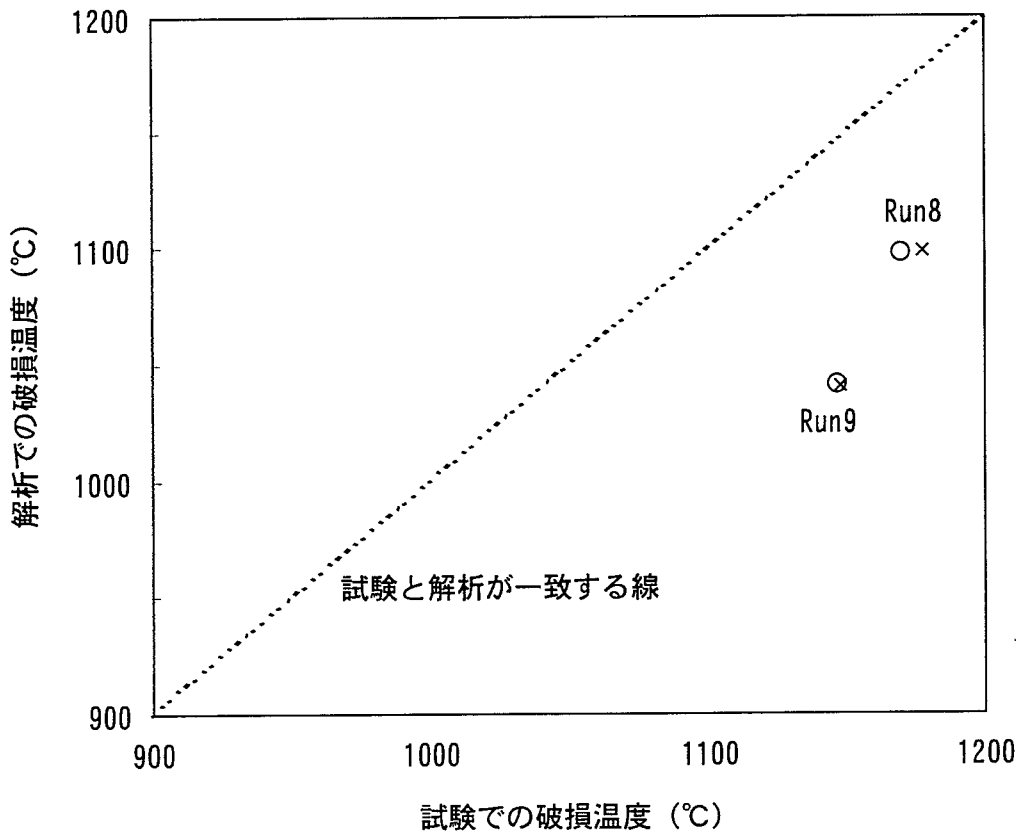
付図-3 材料強度基準とクリープ破損試験結果 (1200°C)



誤差 = (試験の破損時間 - 解析の破損時間) ÷ 試験の破損時間 × 100  
 破損時間の推定値 = 解析と試験の破損時間を一致させる時間係数



付図-4 破損時間の試験結果と解析結果



付図-5 破損温度の試験結果と解析結果