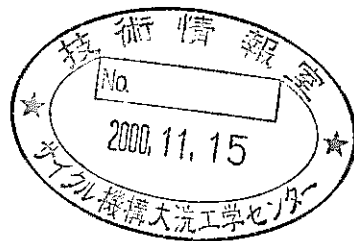


蒸気発生器伝熱管破損解析コードの開発 (研究報告)

2000年7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)
2000

蒸気発生器伝熱管破損解析コードの開発 (研究報告)

浜田広次*, 栗原成計*

要旨

高速増殖炉蒸気発生器での中規模水リーク時の高温ラプチャ型破損に対する伝熱管の構造健全性を評価するために、伝熱管の構造及び温度評価モデルに基づく高温ラプチャ解析コードTRUE(Tube Rupture Evaluation Code)を開発した。

解析コードの妥当性を確認する目的で、2.25Cr-1Mo鋼製伝熱管の内部を窒素加圧し、高周波誘導加熱により高温ラプチャ破損を模擬したTRUST-2(Tube Rupture Simulation Test -2)試験データを用い、検証解析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) いずれの試験ケースにおいても、解析コードは高温ラプチャ発生の有無及び発生時刻を10~50%程度早く計算しており、保守側に評価できる。
- (2) 管内圧力を設定した後急速に昇温する試験ケースは、管壁温度を設定した後急速に昇圧する試験ケースより、試験と解析で破損時刻の裕度が少なくなるが、それでも評価は発生時刻を10%程度早く、また破損温度を100℃程度低く計算しており保守側である。
- (3) クリープ破損の試験ケースでは、試験データと一致するのは時間係数 α_R を約1.5~2とした場合であり、 α_R を3とした場合には十分な裕度で評価が可能である。

*) 大洗工学センター 要素技術開発部 プラント安全工学グループ

July, 2000

Development of Tube Rupture Evaluation code
for FBR Steam Generators

H.Hamada*, A.Kurihara*

ABSTRACT

The Tube Rupture Evaluation Code (TRUE) was developed to analytically evaluate the overheating and the integrity of heat transfer tubes under an intermediate water leak in an FBR Steam Generator. TRUE was programmed based on the structural and temperature calculation models. To validate the code performance, an experimental analysis was carried out by using the Tube Rupture Simulation Test (TRUST-2) data. TRUST-2 simulated overheating rupture of the tubes made of the 2.25Cr-1Mo steel by the nitrogen gas pressurization and the quick induction heating.

The results of validation analysis are as follows:

- (1) It was confirmed that the code conservatively evaluated the occurrence of overheating rupture and its failure time (10 - 50% earlier) in all test cases.
- (2) In the test case of quick heating after the gas pressurization, the failure time with conservatism of 10% and the failure temperature with conservatism of 100°C were obtained between the test and analysis.
- (3) In the test case of creep rupture, it reveals that the time factor of 1.5 ~ 2 gives a good agreement and that of 3.0 gives an enough margin between the test and analysis.

*) Plant Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai
Engineering Center

目 次

	Page
要旨-----	I
Abstract-----	II
目次-----	III
図表リスト-----	IV
記号表-----	V
1. 緒言-----	1
2. 解析モデル-----	2
2.1 概要-----	2
2.2 温度算定方法-----	2
2.3 応力算定方法-----	5
2.4 延性破損の判定-----	6
2.5 クリープ破損の判定-----	6
3. 試験解析-----	7
3.1 装置概要-----	7
3.2 試験概要-----	8
3.3 解析条件-----	9
3.4 解析結果-----	11
3.5 考察-----	12
4. 結言-----	14
謝辞-----	15
参考文献-----	16
APPENDIX-A 非定常計算モデルの数値解法-----	43
APPENDIX-B TRUEコードマニュアル-----	48
APPENDIX-C データ変換プログラム(CONV)について-----	58

図表リスト

		Page
表 3.2-1	試験ケースと結果のまとめ	17
表 3.2-2	伝熱管材の仕様	18
図 3.1-1	試験装置構成図	19
図 3.1-2	加圧系統図	20
図 3.2-1	試験体構造図	21
図 3.2-2	熱電対取付図	21
図 3.4-1	RUN 1 の試験及び解析結果	22
図 3.4-2	RUN 2 の試験及び解析結果	23
図 3.4-3	RUN 3 の試験及び解析結果	24
図 3.4-4	RUN 4 の試験及び解析結果	25
図 3.4-5	RUN 5 の試験及び解析結果	26
図 3.4-6	RUN 6 の試験及び解析結果	27
図 3.4-7	RUN 7 の試験及び解析結果	28
図 3.4-8	RUN 8 の試験及び解析結果	29
図 3.4-9	RUN 9 の試験及び解析結果	30
図 3.4-10	RUN10の試験及び解析結果	31
図 3.4-11	RUN11の試験及び解析結果	32
図 3.4-12	RUN12の試験及び解析結果	33
図 3.4-13	RUN13の試験及び解析結果	34
図 3.4-14	RUN14の試験及び解析結果	35
図 3.4-15	RUN15の試験及び解析結果	36
図 3.4-16	試験結果と解析結果の比較	37
図 3.4-17	内部発熱を考慮したパラメータ解析結果	38
図 3.4-18	内部発熱を考慮したRUN 8 解析結果	39
図 3.5-1	高温ラプチャ発生時刻の相違の程度	40
図 3.5-2	高温ラプチャ発生温度の相違の程度 (RUN 8、RUN 9)	41
図 3.5-3	試験時の誘導加熱電流と電圧 (RUN 8)	42
図 3.5-4	最大値で規格化した電流×電圧 (RUN 8)	42

記号表

(記号)

C_p :	定圧比熱 (J/kgK)
D_i :	伝熱管の内径 (mm)
E :	ヤング率 (MPa)
h :	熱伝達率 (W/m^2K)
J :	熱発生率 (J/m^3)
p :	圧力 (MPa)
Q :	伝熱管の単位長さあたりを流れる熱量 (W/m)
r :	伝熱管の径座標 (m)
R :	変数変換後の伝熱管の径座標 ($=\log r$)
T :	温度 ($^{\circ}C$)
T_k :	絶対温度 (K)
t :	伝熱管の肉厚 (mm)、あるいは時間座標 (秒)
t_R :	クリープによる破損時間 (秒)
U :	熱コンダクタンス (W/mK)
α :	温度伝導率 (m^2/s)
α_R :	クリープ実験式に用いる時間係数 (—)
ε :	ひずみ (—)
λ :	熱伝導率 (W/mK)
ν :	ポアソン比 (—)
ρ :	比重量 (kg/m^3)
σ :	応力 ($MPa=N/mm^2$)

(添字)

a、in :	伝熱管の内側を表す
b、out :	伝熱管の外側を表す
r、 θ 、z :	径方向、周方向、軸方向を表す

1. 緒言

高速炉蒸気発生器（以下、SGと略す）の水リーク時には、高温・腐食性のナトリウム-水反応ジェットが形成されるため、この反応ジェットに曝された伝熱管の損耗（ウェステージ）挙動とともに、高温過熱時の機械的破損（高温ラプチャ）挙動の把握がSG伝熱管の破損伝播評価上重要である。

高温ラプチャは伝熱管の寸法・材質を始めとするSGの設計や運転条件に大きく影響される。従って、ナトリウムの高温化や水蒸気系の高温・高圧化が指向され、条件的に厳しくなると予想される実証炉SGを対象として、平成3年頃から改良9Cr-1Mo鋼伝熱管の高温強度データの整備^[1]及び高温ラプチャ評価手法の開発^[2, 3, 4]を進めてきた。当初は、高温ラプチャによる伝熱管の変形・破損挙動を含む詳細な破損伝播評価手法の開発を目指して、汎用非線形解析コードであるAUTODYNやFINASによる解析を進めていた。その後、平成9年の原型炉「もんじゅ」安全総点検作業の一環として、SG伝熱管の高温ラプチャ破損に対する安全裕度を定量的に評価する必要性が生じたことから、伝熱管の高温過熱時の破損強度を評価する簡易構造モデルに基づく応力算定法の検討及び2.25Cr-1Mo鋼の高温強度データの整備^[5]を得て、高温ラプチャ評価モデルをプログラム化した蒸気発生器伝熱管破損コードの開発及び実機評価^[6]を実施した。

本報では、蒸気発生器伝熱管破損解析コードの詳細報告としてその内容説明と、2.25Cr-1Mo鋼伝熱管の破損模擬試験（TRUST-2）データを用いた検証結果について報告する。以下では、第2章で解析モデルの説明、第3章でTRUST-2データを用いた検証及び検討結果を記載し、最後に第4章で結言を述べる。

2. 解析モデル

2.1 概要

伝熱管が高温ラプチャにより破損するか否かを判定するため、構造及び温度評価モデル^[6]に基づく解析コード：TRUE(Tube Rupture Evaluation Code)を作成した。以下では本解析コードで使用している評価モデルについて記載する。

2.2 温度算定方法

ナトリウム-水反応ジェットが伝熱管に当たると、管壁は反応ジェット側が温度が高く反対側が低くなるなど、周方向に温度差が生じる。ただし、水リーク率がkg/sオーダーと大きく、かつ水リーク部から十分離れた伝熱管においては、周方向の温度差は相対的に小さくなると考えられる。管壁の温度計算のモデル化においては、水リーク規模がkg/sオーダーと大きい状況を想定して、厳しい加熱条件を設定するため、伝熱管に高温側のナトリウム温度が周方向均一に与えられるモデルを採用する。また、管壁（径方向）の温度分布は、厚肉非定常の場合はリニアな温度分布とならないので、管壁の代表温度として、積分平均した温度を定義する。

上記モデルを採用すると、管壁温度は、管内（水蒸気）温度 T_{in} 、管内熱伝達率 h_{in} 、管外（ナトリウム）温度 T_{out} 、管外熱伝達率 h_{out} を境界条件として与えることで、簡単に計算できる。以下では、SG出力運転状態のような定常時の計算及び水ブロー状態のような非定常時の計算方法について各々記す。なお、温度計算においては、後述する伝熱管破損模擬試験（TRUST-2）での高周波誘導加熱の模擬も考慮して、内部発熱がある場合の評価も可能なように計算モデルを作成した。

2.2.1 定常計算

(1) 内部発熱がない場合

管壁の熱伝導率 λ (W/mK)、管内表面と管外表面の熱伝達率 h_{in} (W/m²K)、 h_{out} (W/m²K)、内径と外径 r_a (m)、 r_b (m)のとき、熱コンダクタンスを U (W/mK)とすると、全抵抗 $1/U$ は以下で表せる。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2\pi r_a h_{in}} + \frac{\ln(r_b/r_a)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{2\pi r_b h_{out}}$$

このとき、管内流体（水蒸気）温度 T_{in} (K)、管外流体（反応ジェット）温度 T_{out} (K) に関して、壁面を流れる円筒の単位長さあたりの熱量 Q (W/m) は、

$$Q = U(T_{in} - T_{out})$$

となる。定常状態での伝熱管の内外面では熱量 Q が等しいことから、内壁温度 T_a (°C)、外壁温度 T_b (°C)、及び任意の半径 r (m) での管壁の温度 T (°C) は以下の式で求められる。

$$T_a = T_{in} - \frac{Q}{2\pi r_a h_{in}}$$

$$T_b = \frac{Q}{2\pi r_b h_{out}} + T_{out}$$

$$T = (T_b - T_a) \times \frac{\ln(r/r_a)}{\ln(r_b/r_a)} + T_a$$

従って、平均温度 T_{mean} (°C) を計算すると以下となる。

$$T_{mean} = \frac{\int T r dr}{\int r dr}$$

$$= \frac{(T_b r_b^2 - T_a r_a^2)/2 - \{(r_b^2 - r_a^2)/4\} (T_b - T_a)/\ln(r_b/r_a)}{(r_b^2 - r_a^2)/2}$$

(2) 内部発熱がある場合

詳細な式の導出は割愛するが、定常熱伝導方程式で熱発生率 J (J/m^3) が与えられた場合に、外壁から入る全熱量が内壁から出るとして T_a 、 T_b 及び平均温度を計算すると、以下となる。

$$T_b = \left[h_{out} T_{out} \frac{r_b}{r_a} + h_{in} T_{in} + \left(\frac{1}{r_a} - \frac{h_{in}}{2\lambda} \right) \frac{(r_b^2 - r_a^2) J}{2} \right. \\ \left. + h_{in} \left(\frac{J r_b^2}{2\lambda} + \frac{r_b h_{out} T_{out}}{\lambda} \right) \log\left(\frac{r_b}{r_a}\right) \right] / \\ \left[h_{out} \frac{r_b}{r_a} + h_{in} + \frac{r_b h_{in} h_{out}}{\lambda} \log\left(\frac{r_b}{r_a}\right) \right]$$

$$A = \frac{J r_b^2}{2\lambda} + \frac{r_b h_{out} (T_{out} - T_b)}{\lambda}$$

$$B = T_b + \frac{J r_b^2}{4\lambda} - A \log r_b$$

$$T_a = -\frac{J r_a^2}{4\lambda} + A \log r_a + B$$

$$T_{mean} = \left\{ \left[-\frac{J r_b^4}{16\lambda} + \frac{A r_b^2}{2} \left(\log r_b - \frac{1}{2} \right) + \frac{B r_b^2}{2} \right] - \left[-\frac{J r_a^4}{16\lambda} + \frac{A r_a^2}{2} \left(\log r_a - \frac{1}{2} \right) + \frac{B r_a^2}{2} \right] \right\} \bigg/ \left[\frac{(r_b^2 - r_a^2)}{2} \right]$$

2.2.2 非定常計算

伝熱管の比重量 ρ (kg/m³)、熱伝導率 λ (W/mK)、比熱 C_p (J/kgK)、熱発生率 J (J/m³) とし、それらが一定である場合の非定常熱伝導方程式は、 $\lambda/\rho C_p$ を α (m²/s) とおいて、時間を t (s)、管壁内の任意の位置での温度を T (°C) とすると以下の式で表せる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{J}{\rho C_p}$$

上式を径方向 r 、周方向 θ 、軸方向 z の3次元円筒座標形で表し、 $R = \log r$ で定義される独立変数の変換を行うと、簡単に下式で表せる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(e^{-2R} \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + e^{-2R} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{J}{\rho C_p}$$

伝熱管に高温側のナトリウム温度が全方向均一に与えられる厳しい加熱条件を考えるため、 θ 及び z 方向の温度分布を無視すると、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha e^{-2R} \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{J}{\rho C_p}$$

と簡単になる。本式をCrank-Nicolsonの陰解法に基づき差分化し、数値的に解く。その際、境界条件としては、管内外熱伝達率 (h_{in} 、 h_{out}) から計算される半径 r_a 、 r_b

での熱流束をそれぞれ与える。なお、新しい時刻での温度を差分式から計算する際には、Gaussの消去法により連立方程式を解く。数値計算法の詳細については、APPENDIX-Aに記載する。

前述の計算により求まる温度分布 T の平均温度 $T_{mean} = \int T r dr / \int r dr$ も、数値的に計算する。数値積分には、Simpsonの1/3則（奇数個の区間）あるいは3/8則（偶数個の区間）の公式を適用する。

2.3 応力算定方法

伝熱管のような円筒容器の応力算定については幾つかの方法がある^[6]。大きく分けると、薄肉円筒モデルにより周方向応力を算定するか、厚肉円筒モデルにより求まる周方向応力と径方向応力から相当応力を算定するかの2通りとなる。本解析コードでは、以下の代表的な応力算定モデルを選択することが可能である。

2.3.1 薄肉円筒モデル

JIS圧力容器の設計式となっている等価径ベースの以下の式に基づき、管壁応力 σ を算定する。

$$\sigma = p [D_i + 2(1 - k)t] / 2t$$

ただし、 p ：圧力(MPa)、 D_i ：内径(mm)、 t ：板厚(mm)、
 $k = 0.4$ （等価径ベースの値）

2.3.2 厚肉円筒モデル

厚肉円筒モデルの場合には、内外面平均ベースでMisesあるいはTrescaの相当応力を計算する。具体的な計算式は以下の通りである。

内圧 p_a (MPa)、外圧 p_b (MPa)、ヤング率 E (MPa)、ポアソン比 ν (-)、及び軸方向ひずみ ε_z (-)とすると、一般的に、半径 r (m)の位置における半径、周、軸方向の応力 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z (MPa)は以下で記述できる。

$$\sigma_r = (r_a^2(1 - r_b^2/r^2)p_a - r_b^2(1 - r_a^2/r^2)p_b) / (r_b^2 - r_a^2)$$

$$\sigma_\theta = (r_a^2(1 + r_b^2/r^2)p_a - r_b^2(1 + r_a^2/r^2)p_b) / (r_b^2 - r_a^2)$$

$$\sigma_z = 2\nu(r_a^2 p_a - r_b^2 p_b) / (r_b^2 - r_a^2) + E\varepsilon_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) + E\varepsilon_z$$

このとき、Misesの相当応力 σ_{Mises} 及びTrescaの相当応力 σ_{Tresca} (MPa)は以下で表せる。

$$\sigma_{Meq} = [\{ (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \} / 2]^{0.5}$$

$$\sigma_{Teq} = \max(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z) - \min(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z)$$

解析コードでは、内圧で発生する半径 $r = r_a$ (m)、 $r = r_b$ (m) における上記相当応力の算術平均 ($= \{ \sigma_{eq}(r_a) + \sigma_{eq}(r_b) \} / 2$) を応力算定値として用いる。その際、保守側の応力評価のため内圧（水蒸気側圧力）のみを考慮して外圧（ナトリウム側圧力）は無視 ($p_b = 0$) できるものとする。また伝熱管は拘束されていないことから軸方向の熱膨張による発生応力はない（両端開放＝拘束なし条件： $\sigma_z = 0$ ）と考えられるが、この条件（開放条件）以外にも、解析コードでは、両端が拘束された条件（拘束条件）や両端が閉鎖されている条件（閉鎖条件）も選択できるように考慮している。

2.4 延性破損の判定

延性破損の判定は、前節 2.3 で計算される管壁の応力が、前節 2.2 で計算される管壁の平均温度に対応して定まる引張強さ（材料強度）を越えた時点とする。

2.5 クリープ破損の判定

T_k を絶対温度 (K)、 α_R を時間係数 (-)、 t_R を破損時間 (s)、 σ を応力 (MPa)、 C 、 A_0 、 A_1 を実験係数とすると、クリープ実験データは Larson-Miller 法により次式で整理できる。

$$T_k (\alpha_R t_R + C) = A_0 + A_1 \log \sigma$$

クリープ破損の判定は、前記 2.2 で計算される管壁の温度を T_k 、前節 2.3 で計算される管壁の応力を σ として与え、その応力・温度の作用時間 Δt と上式により計算される破損時間 t_R の比の総和 $\Sigma \Delta t / t_R$ 、すなわち時間分数和による累積損傷を計算し、それが 1 を越えた時点とする。

3. 試験解析

改良9Cr-1Mo鋼の伝熱管を用いた伝熱管破損模擬試験(TRUST-1)^[7, 8]に続いて、2.25Cr-1Mo鋼の伝熱管を用いた試験(TRUST-2)を実施した。TRUST-2の詳細は今後発行を予定している別報を参照することとし、ここでは、試験の概略とTRUEコードの検証及び検討結果について記す。

3.1 装置概要

3.1.1 試験装置

TRUST-2試験装置は、昇温・制御系統、加圧系統、計測系統、及び試験セルで構成される。図3.1-1に試験装置の構成を示す。

3.1.2 昇温・制御系統

昇温・制御系統は、ナトリウム-水反応ジェットに曝されている伝熱管の局所的な加熱を模擬するための系統である。加熱に使用する高周波誘導加熱装置（トランジスタインバータ）では、高周波電力を誘導加熱コイルに供給し、その内側に設置された試験体（伝熱管）の昇温・加熱を非接触により行う。誘導加熱コイル（内径100mm×長さ300mm）は、均熱部長さが約200mmである。

制御系統では、伝熱管外壁に取付けられたR型熱電対により温度を計測・監視し、目標となる昇温速度及び最高温度、保持時間などの制御を行う。

3.1.3 加圧系統

加圧系統は、伝熱管内の水蒸気圧力を模擬するための系統である。窒素ガスポンペから試験体へ直接配管で接続され、その経路上に安全弁及び圧力測定用のトランスデューサ、加圧操作用のバルブ等を設置している。図3.1-2に加圧系統を示す。

3.1.4 計測系統

計測系統は、試験データを計測及び収録するための系統である。対象となるデータは試験体の外壁温度及び管内圧力等である。外壁温度はR型熱電対（Pt-Pt-Rh13%、クラス2、0.5mmφ）の起電力を室温補正及び増幅し、また管内圧力は試験体上部に配置されたトランスデューサ出力を増幅しており、それらは全てデータレコーダによりデジタル収録される。

3.1.5 試験セル

試験セルは第1試験セルと第2試験セルで構成される。第2試験セルは鉄板により囲まれた箱型の構造で、その内部に加圧系統及び試験体を収納する第1試験セルを有する。第1試験セルは同様のステンレス製箱型構造で、内部に試験体を固定する架台及び放出ガス等を排気するダクト等を設けている。

試験体（伝熱管）は、軸が誘導加熱コイル内で鉛直となるよう架台に固定されるが、その際、熱膨張による軸方向の変位を拘束しない構造としている。

3.2 試験概要

本報の解析対象とした試験ケースと主な結果をまとめて表3.2-1に示す。その概要については、以下に記す。

3.2.1 試験体材料

試験体（伝熱管）の材質は2.25Cr-1Mo鋼であるが、JIS規格に基づいて製作した伝熱管（以下、JIS規格材）と、「もんじゅ」と同様の組成・製造方法により製作した伝熱管（以下、もんじゅ相当材）の2種類を使用した。伝熱管のミルシートを表3.2-2に示す。

3.2.2 試験体形状

試験体の構造を図3.2-1に示す。試験体は伝熱管とその両端に溶接される端栓及び接続部材（グレイロック）で構成され、接続部材を介して加圧系統と接続される。伝熱管は前項3.2.1の材料を切断して長さ約700mmとし、外壁温度の測定のために熱電対を図3.2-2に示すように設置した。

3.2.3 試験方法

(1) パラメータ

試験では、負荷方法（管壁の温度設定後に加圧[昇温後加圧]／管内の圧力設定後に昇温[加圧後昇温]）、設定温度（1000℃／1100℃／1200℃）、管内圧力（破損まで加圧／破損圧の約6割程度に加圧）、伝熱管材（JIS規格材／もんじゅ相当材）を主なパラメータとして、計15回（RUN1～15）実施した。伝熱管の肉厚は、実機SGの伝熱管加工後の最小肉厚である3.7mmまで外壁から減肉加工するケースをリファレンスとするが、破損状況を変えるためのパラメータである温度や圧力の設定条件により、このリファレンスより肉厚を増減したケースもある。ただし、何れも初期欠陥は設け

ていない。また、加圧後に昇温する試験ケースでは昇温速度を約100℃/sに設定した。

(2) 試験方法

試験体の加熱は、高周波誘導加熱装置の制御機器に昇温速度及び到達最高温度、最高温度での保持時間などの制御パラメータを与え、自動制御により実施した。試験体の加圧は、設定温度到達後に破損するまで試験体に窒素ガスを供給する（昇温後加圧）か、窒素ガスを試験体に初期充填・密閉しておいてから昇温（加圧後昇温）した。後者の初期圧力は、試験体の加熱に伴う圧力の上昇分を考慮して設定した。

試験の終了は、試験体が破損した時点とした。

3.2.4 試験結果

主な試験結果を表3.2-1に示す。外径及び肉厚は試験前の実測値で、破損口に最も近い測定点の値である。破損時の温度は、伝熱管の開口部に最も近い熱電対出力から読み取っているが、伝熱管が破損により開口して、窒素ガス圧が急減する直前の値を示している。従って、伝熱管が塑性を開始する前の温度よりは若干低い値になっているケースもある。破損時の圧力も前述の通りであるため、塑性を開始する前の圧力よりは若干低くなっているケースもある。また、伝熱管の塑性～破損に伴って熱電対に電氣的なノイズが発生し、起電力が大きく変化する場合もあることから、伝熱管の破損時間の同定には圧力信号を基準にした。破損時間は、昇温後加圧のケースでは圧力上昇開始時から圧力の急減時までの時間を示し、加圧後昇温のケースでは、温度上昇開始時から圧力の急減時までの時間を示している。なお、試験結果についてはデータを再評価して一部見直したため、必ずしも既報^[6]とは一致していない。

3.3 解析条件

解析には、TRUEコードを使用する。解析方法としては、測定された外壁温度を境界条件に与えて伝熱管の破損挙動を計算する試験解析Ⅰと高周波誘導加熱（内部発熱）の効果を確認する目的で、内部発熱量 J をパラメータにして伝熱管の破損挙動を計算する試験解析Ⅱを行った。主な解析条件を以下にまとめる。

3.3.1 試験解析Ⅰ

(1) 伝熱管構造条件

メッシュ分割数は12個とし、伝熱管の外径、肉厚は表3.2-1に示す実測値を入力した。

物性値としては、比重量 ρ を7670kg/m³、比熱 C_p を630J/kgKとし、熱伝導率 λ につい

ては高周波誘導加熱により肉厚は均一に加熱される設計であることから、管壁内外に生じる温度差が小さくなるように、 λ には数値的に充分大きい値を与えた。

(2)管内境界条件

管内には窒素ガスが封入されて強制対流が行われないことから、ほぼ断熱条件に近いと考えられるが、ここでは自然対流伝熱オーダの値として熱伝達率 $10\text{W/m}^2\text{K}$ と窒素ガス温度に室温(20°C)を与えた。管内の圧力は、実測データを入力した。

(3)管外境界条件

内部発熱 J を考慮しない代わりに、外壁は温度を与える境界条件とし、その温度には実測の外壁温度を入力した。

(4)破損の判定

管壁の応力計算には既報^[6]と同様に薄肉円筒モデル(JIS圧力容器設計式)を用い、クリープ破断曲線の時間係数 α_R は3とした。解析の破損時刻及びその時の温度・圧力の値は、延性破損は引張強さ(材料強度)を管壁応力が越える時点、クリープ破損は累積損傷が1に達した時点の値を読んだ。なお、材料データには既報^[6]の値を使用した。

(5)その他

時間メッシュは 0.01 秒とし、試験(昇温あるいは昇圧)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。

3.3.2 試験解析II

以下の点を除いて、解析条件は試験解析Iと同じである。

伝熱管の熱伝導率 λ には、 25.6W/mK を与える。外壁は熱伝達率を与える境界条件とし、そこでは空気に接していることから、自然対流伝熱オーダの熱伝達率 $10\text{W/m}^2\text{K}$ と室温(20°C)を与える。熱発生率 J はパラメータとし、高周波誘導加熱出力5%相当($J=7.55 \times 10^7\text{W/m}^3$)から100%相当($J=1.51 \times 10^9\text{W/m}^3$)まで変化させた。 J の設定根拠については以下の通りである。

本装置では、外径 31.8mm ×公称肉厚 3.9mm の伝熱管(改良9Cr-1Mo鋼)を誘導加熱コイルにより幅 300mm にわたって加熱する設計であることから、加熱部分の伝熱管容積は $0.3 \times (\pi/4)(0.0318^2 - 0.024^2) = 1.0255 \times 10^{-4}\text{m}^3$ となる。高周波誘導加熱装置は100%まで出力を変えられるが、100%出力時の効率を 0.31 (メーカー実測値^{[7])}とすると、熱発生

率は $500,000\text{W} \times 0.31 \div 1.0255 \times 10^{-4} = 1.51 \times 10^9 \text{W/m}^3$ となる。従って、5%出力時にはその5/100相当として $7.55 \times 10^7 \text{W/m}^3$ が得られる。

注) 加熱コイル内径を $\phi 100\text{mm}$ 、被加熱物外径を $\phi 32\text{mm}$ として、メーカーが社内で行った予備実験のデータ

3.4 解析結果

3.4.1 試験解析 I

表3.2-1のケースRUN1~15までの解析結果を図3.4-1~図3.4-15に示す。各図の一番上が試験で得られた外壁温度と管内圧力のデータで、真中はTRUEで算出した管壁の平均温度とそれに対する引張強さ(材料強度)、及び管壁の相当応力である。一番下は、累積損傷値を示している。

各ケースの真中の図では相当応力が引張強さを越えた時点で延性破損と見なされるが、例えば、ケースRUN1では、約6秒で解析上の破損が生じていることになる。RUN1の累積損傷については、9秒弱で損傷和が1を越えてクリープ破損すると見なせる。一方、RUN1の試験破損時間は表3.2-1に記したように9.34秒であった。

破損時間(伝熱管を加熱あるいは加圧を開始してから破損に至るまでの時間)に着目して、試験での破損時間と解析での破損時間(ただし、延性破損かクリープ破損の何れか早い方の時間と定義する)を比較したものを図3.4-16に示す。これより、全ての試験ケースについて解析は試験より破損時間を短く計算していることがわかる。なお、●で表した加圧後昇温のケース(RUN8とRUN9)については、その他のケースに比べ試験と解析とで裕度が少なくなるが、それでも試験より破損時間を短く計算している。裕度の少なくなる理由は以下の通りである。

試験で測定される破損時間 t_{exp} は、伝熱管が破損条件に達するまでの時間 t_{set} とその条件に達してから破損するまでの時間 t_{rup} の和に相当する。実際には両者を明確に分離できないが、簡略化して考えるならば、 t_{set} は、試験の方法(例えば昇温速度や昇圧速度)に依存するもので、物理的にさほど意味のない時間であり、 t_{rup} は破損の形態(延性破損、クリープ破損)と深く関係してくる時間であると言える。また一般的に、延性破損の場合 t_{rup} は非常に短い時間間隔(数秒以内)であり、クリープ破損の場合 t_{rup} は材料試験で得られるクリープ破断時間に相当する時間となる。RUN8とRUN9で実施した加圧後に昇温する条件では、昇温速度を最大約 $100^\circ\text{C}/\text{sec}$ としているため、伝熱管は瞬時に常温から延性破損の温度条件に達してしまい、クリープの効果が現れるよりも早く破損に至ったと考えられ、その破損時間は $t_{exp} = t_{set} + t_{rup}(\text{延性}) \approx t_{set}$ とみなせる。一方、他の昇温後に加圧する試験では、伝熱管は加圧開始時点で既に高温

条件に達していることから、管内を加圧する途中（破損条件に達する以前）にある程度クリープの影響が生じていたと考えられ、その破損時間は $t_{exp} = t_{set} + t_{rup}$ （クリープと延性）とみなせる。実際、図 3.4-8～9 に示すように RUN 8 と RUN 9 は損傷和が 1 に達するよりも十分早く延性破損の条件となり解析上の破損とみなされたケースであり、それ以外は全て損傷和がほとんど 1 に近いところで延性破損あるいはクリープ破損とみなされたケースであった。以上より、RUN 8 と RUN 9 で試験と解析の破損時間の裕度が少なくなる理由は、これらの破損時間がおおよそ伝熱管の破損条件に達するまでの時間を表しており、かつその時の昇温速度が非常に大きいことから、温度依存の引張強さ（材料強度）の裕度が破損時間の違いとして現れ得なかったためと考える。

3.4.2 試験解析Ⅱ

解析条件としては、管内を初期加圧した後、高周波誘導加熱で管壁を昇温して、その途中で管壁を破損させた試験であるケース RUN 8 を対象とした。解析結果を図 3.4-17 に示す。上の図は、高周波誘導加熱出力を 5～100% とパラメータ（ただし一定値）にした場合の管壁温度の変化（解析値）と試験での管壁温度の変化を示している。試験と解析の管壁温度の傾きを比較すると、加熱開始後から 1 秒までは 100% 出力、2.5 秒から 3.5 秒までは 50% 出力、5 秒から伝熱管破損までは 40～50% 出力相当で加熱されたものと考えられる。下の図は、加熱出力をパラメータ（一定値）とした場合の伝熱管の破損時間をプロットしたものである。加熱出力が 100% から小さくなるに従い、破損時刻も約 3 秒から次第に遅くなっていくが、管内の圧力に試験データを入力していることから、試験の破損時刻（10.88 秒）以降では内部ガス放出により圧力が急激に小さくなって、解析上の破損条件に達しない。RUN 8 の解析で、試験の破損時刻と一致が良いのは加熱出力を 30% としたケースであった。そのケースでの管壁温度、応力、累積損傷の時刻履歴を図 3.4-18 に示す。管壁温度は時間と共にリニアに上昇し、時刻 10.6 秒で引張強さと相当応力が等しくなり延性破損の条件に達する。その時の累積損傷値は 0.1 以下でありクリープ破損の条件には達していない。

3.5 考察

試験解析Ⅰの結果を用いて、高温ラプチャの発生時刻の裕度をみる観点から、試験及び解析の破損時刻の相違の程度を図 3.5-1 に整理^{7B)}した。図より、延性破損（○印）に対しては、解析は実際の破損時間を最大で約 40% 程度短く計算することがわかる。これは材料強度に有する裕度に起因した結果である。クリープ破損（△印）に対しては、解析は約 35～50% 程度短く破損時間を計算しており、これは時間係数 α_R に約 1.5～2^{7B)}を与えた場合の解析結果に相当するものである。なお、RUN 8 と RUN 9（●印）について

は、クリープ効果が生じることなく延性破損した試験ケースと考えられることから、試験と解析の破損温度を比較して図3.5-2に整理した。図に示すように、試験の破損温度は、解析の破損温度を約100℃上回っており、延性破損に対して十分な裕度があることを確認できる。以上より、TRUEの解析モデル、破損判断基準、及び解析条件の与え方を採用すれば、高温ラプチャ発生の有無及び発生時刻を保守側に評価できることが確認できた。

注) 時間係数を $\alpha_R=3$ として、時刻 t_a で解析上のクリープ破損条件に達したとする。その時刻での真の累積損傷 D_{c^*} は $D_{c^*}=1/\alpha_R$ となる。試験でのクリープ破損時間を t_e とした場合、時刻 t_a での累積損傷 D_{c^e} をリニアで近似すると $D_{c^e}=t_a/t_e$ となる。試験で予測される時間係数を α_{Re} とすると、時刻 t_a での累積損傷は $D_{c^e}=\alpha_{Re}\times D_{c^*}$ となる。以上より、試験で予測される時間係数は $\alpha_{Re}=D_{c^e}/D_{c^*}=(t_a/t_e)/(1/\alpha_R)=\alpha_R t_a/t_e=3 t_a/t_e$ として求められる。図3.5-1の右軸に示した α の値は、このようにして算出したものである。なお、図のクリープ破断のデータ(Δ)は、RUN 5、5、12に対応しており、それぞれの解析結果(図3.4-4、5、12)からは、累積損傷が概ねリニアであると仮定することができる。

試験解析Ⅱでは、ケースRUN 8のパラメータ解析により高周波誘導加熱出力が100%~40%の間で運転されたと推測した。この妥当性を検討するために、RUN 8の試験中に得られた高周波誘導加熱装置の電流と電圧のデータを図3.5-3に示す。これより、試験開始直後と約3秒後に出力のピークがあり、約6秒後から試験終了まで概ねフラットな出力であったことが確認できる。高周波誘導加熱出力は、電流と電圧の積(電力)に比例すると考えられることから、得られた電流と電圧の積を最大値で規格化した結果を図3.5-4に示す。試験開始から1秒後に最大のピーク(規格値1に相当)、その後3~3.5秒の間に約0.5のピークが見られる。また、6秒以降は概ね0.5~0.6の一定値を保っている。この結果は、熱発生率Jの予測誤差等を考慮すると試験解析Ⅱの推定と概ね一致していると言える。以上の結果は、電流と電圧の試験結果から高周波誘導加熱出力あるいは熱発生率Jを推定できることを示唆している。従って、今後さらに定量的な検討・評価を行うことで、高周波誘導加熱出力あるいは熱発生率Jを解析パラメータに使用して、より詳細な解析評価の実施を行うことが可能になると考える。

4. 結言

中規模なSG水リーク時の高温ラプチャ型破損に対する伝熱管の構造健全性を評価するために、伝熱管の構造・温度評価モデルに基づく高温ラプチャ解析コードTRUEを開発した。本解析コードに、引張強さ（材料強度）やクリープ破断曲線等の高温強度データ、別途実施するナトリウム側の反応ジェットの温度と熱伝達率の解析、及び水ブロー解析結果の境界条件を入力することで、実機SGでの定常運転から水ブロー時における高温ラプチャ評価が可能となる。

解析コードの妥当性を確認する目的で、2.25Cr-1Mo鋼製伝熱管の内部を窒素加圧し、中心部を局所的に高周波誘導加熱して高温ラプチャ型破損を模擬したTRUST-2試験データを用いて、解析コードの検証解析を実施した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 何れの試験ケースにおいても、解析コードは高温ラプチャ発生の有無及び発生時刻を10～50%程度早く計算しており、保守側に評価できることが確認できた。
- (2) 管内圧力を設定した後急速に昇温する試験ケースは、管壁温度を設定した後急速に昇圧する試験ケースより、試験と解析で延性破損時刻の裕度は少なくなるが、それでも評価は発生時刻を10%程度早く、破損温度を100℃程度低く計算しており保守側である。
- (3) クリープ破損の試験ケースで試験データと一致するのは、時間係数 α_R を約1.5～2とした場合であり、 α_R を3とした場合には十分な裕度で評価が可能である。

解析コードの計算精度や適用性を向上するための今後の課題として、以下が考えられる。

(1) 試験データの蓄積

今回は、最高温度と管内圧力を主な試験パラメータとしているため、今後は、管内の流動条件、加熱幅、伝熱管材質などをパラメータとして幅広いTRUST-2試験データの蓄積及び検証を行い、計算モデルの妥当性を確認する。

(2) 材料特性データの整備

解析コードを実用化SGへ適用することを考えると、高クロム系鋼伝熱管材の高温材料データベースの蓄積を行う必要がある。

(3) 解析の模擬性の向上

TRUST-2試験は高周波誘導加熱でナトリウム-水反応時の高温条件を模擬することから、高周波誘導加熱（あるいは熱発生率J）のモデル化を忠実にを行い、熱計算モデル部の妥当性を確認する必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、試験・解析等において常に有益な助言と共にご指導を頂いた要素技術開発部和田雄作部長、田辺裕美次長に深く感謝の意を表します。

本試験の実施については東興機械工業(株)殿、試験データ整理については原子カシステム(株)の小野功氏に作業を担当して頂き、ここに感謝の意を表します。

本報告書の作成にあたり、有益な助言とご指導を頂いたプラント安全工学グループ三宅収グループリーダー及び宮原信哉サブリーダーに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 和田雄作、青木昌典、「高温急速加熱バースト解析用弾塑性応力-ひずみ関係2直線近似法」、日本原子力学会1995年秋の大会予稿集F95(1995.10)
- [2] 浜田広次、栗原成計、「火薬トーチ模擬試験による蒸気発生器伝熱管破損評価法の検証」、日本原子力学会1996年春の年会予稿集F28(1996.3)
- [3] 浜田広次、田辺裕美、「蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ解析Ⅱ-英国PFR過熱器の大リーク事故解析-」、PNC TN9410 96-027(1995.12)
- [4] 浜田広次、田辺裕美、「PFR過熱器の伝熱管破損における水蒸気減圧系の効果の確認」、日本原子力学会1996年秋の大会予稿集G56(1996.10)
- [5] 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」、PNC TN9410 98-086(1998.8)
- [6] 田辺裕美、和田雄作ほか、「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」、PNC TN9410 98-029(1998.6)
- [7] 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」、PNC TN9410 97-002(1996.6)
- [8] 浜田広次、林田禎彦、田辺裕美、「蒸気発生器伝熱管破損模擬試験(TRUST-1)による破損応力の評価」、日本原子力学会1997年秋の大会予稿集H75(1997.10)

表 3.2-1 試験ケースと結果のまとめ

RUN	伝熱管材	外径	肉厚	負荷方法	設定温度 設定/破損時 (°C)	熱電対番号	管内圧力 設定/破損時 (MPa)	昇温速度 (°C/sec)	破損時間 試験/解析 (sec)
(-)	(-)	(mm)	(mm)	(-)	(°C)	(-)	(MPa)	(°C/sec)	(sec)
1	J I S 規格材	30.60	3.65	昇温後加圧	1200/1198	1 0	破損まで/9.90	-	9.34/5.97
2	J I S 規格材	30.70	3.70	昇温後加圧	1100/1074	1 1	破損まで/11.87	-	18.72/14.26
3	J I S 規格材	30.90	3.80	昇温後加圧	1200/1176	5	破損まで/8.63	-	12.24/7.06
4	J I S 規格材	30.80	3.73	昇温後加圧	1100/1061	1 1	8.34/8.34	-	77.34/38.10 ^{Creep}
5	J I S 規格材	30.70	3.74	昇温後加圧	1200/1193	1 2	4.90/5.30	-	80.82/48.78 ^{Creep}
6	J I S 規格材	31.40	3.20	昇温後加圧	1100/1081	1 0	破損まで/11.38	-	12.58/8.62
7	もんじゅ相当材	31.70	4.10	昇温後加圧	1200/1197	1 2	破損まで/10.40	-	9.9/6.81
8	J I S 規格材	30.80	3.70	加圧後昇温	1200/1178	1 0	破損まで/10.59	100	10.88/10.07
9	J I S 規格材	31.60	3.17	加圧後昇温	1100/1148	6	破損まで/11.18	100	9.78/8.90
1 0	J I S 規格材	27.15	1.90	昇温後加圧	1000/1004	5	破損まで/11.28	-	12.54/8.31
1 1	もんじゅ相当材	27.65	2.00	昇温後加圧	1000/992	1 1	破損まで/11.57	-	13.28/9.31
1 2	もんじゅ相当材	27.65	2.00	昇温後加圧	1000/1028	1 2	6.37/6.77	-	101.52/65.95 ^{Creep}
1 3	もんじゅ相当材	29.50	3.00	昇温後加圧	1100/1126	5	破損まで/10.79	-	10.42/6.65
1 4	もんじゅ相当材	31.75	4.08	昇温後加圧	1100/1087	1 1	破損まで/17.55	-	7.26/4.66
1 5	もんじゅ相当材	31.75	4.04	昇温後加圧	1100/1063	5	破損まで/15.10	-	18.04/13.82

表 3.2-2 伝熱管材の仕様

(a) J I S規格材 (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℃×AC)

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 ²	412 N/mm ²	30 %
測定値	308 N/mm ²	498 N/mm ²	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AC - 740℃×30分AC)

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 ²	412 N/mm ²	30 %
測定値	333 N/mm ²	490 N/mm ²	48 %

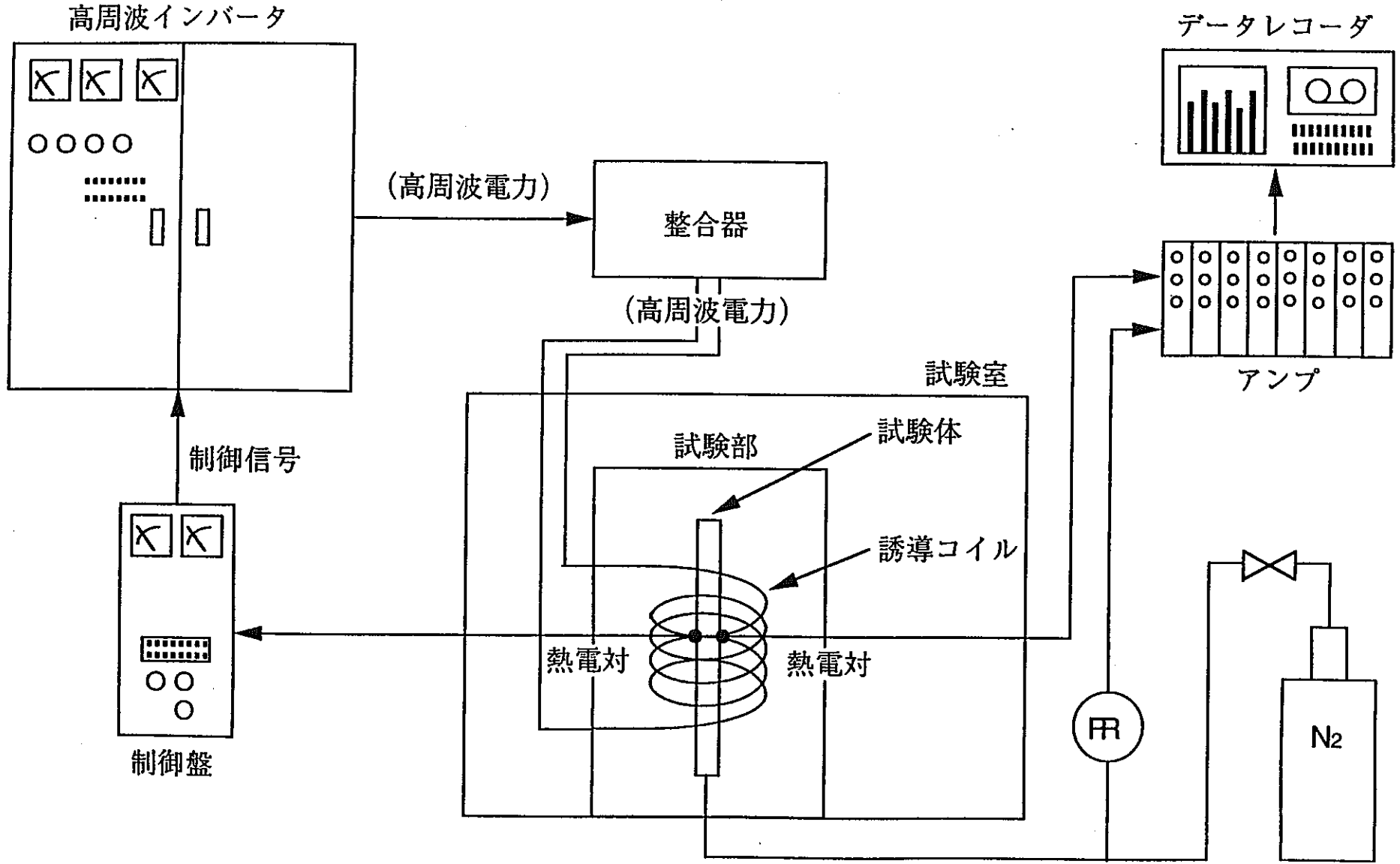


図 3.1-1 試験装置構成図

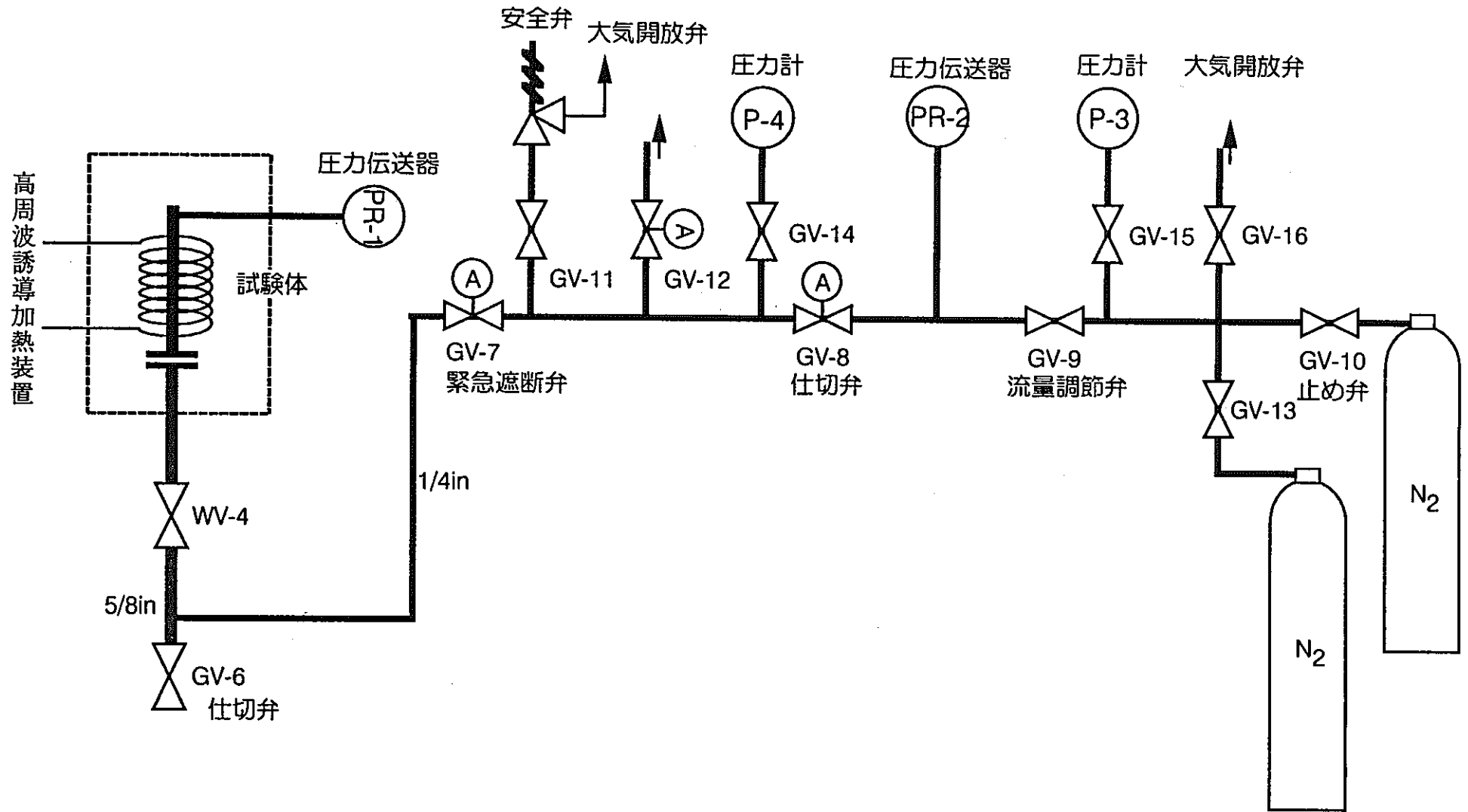


图 3.1-2 加压系統圖

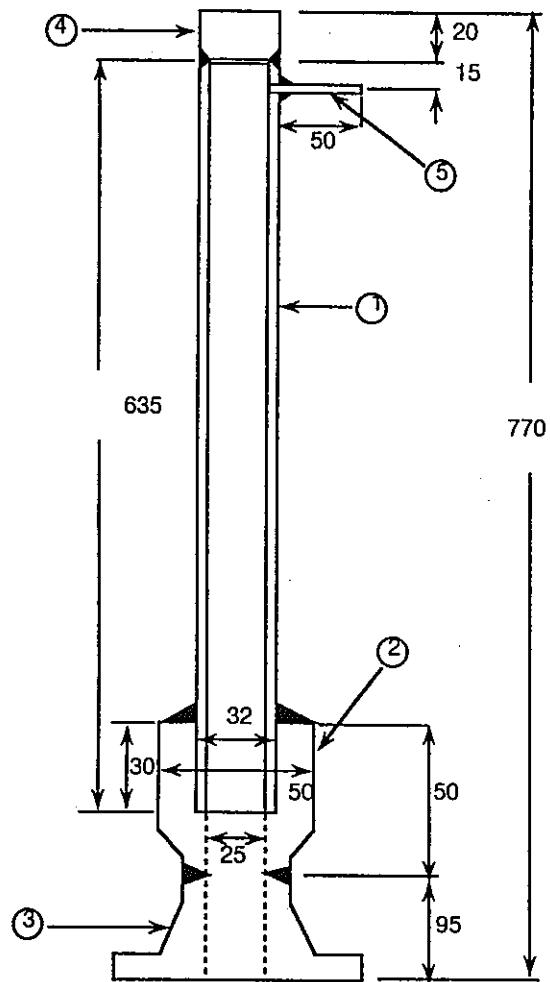


図 3.2-1 試験体構造図

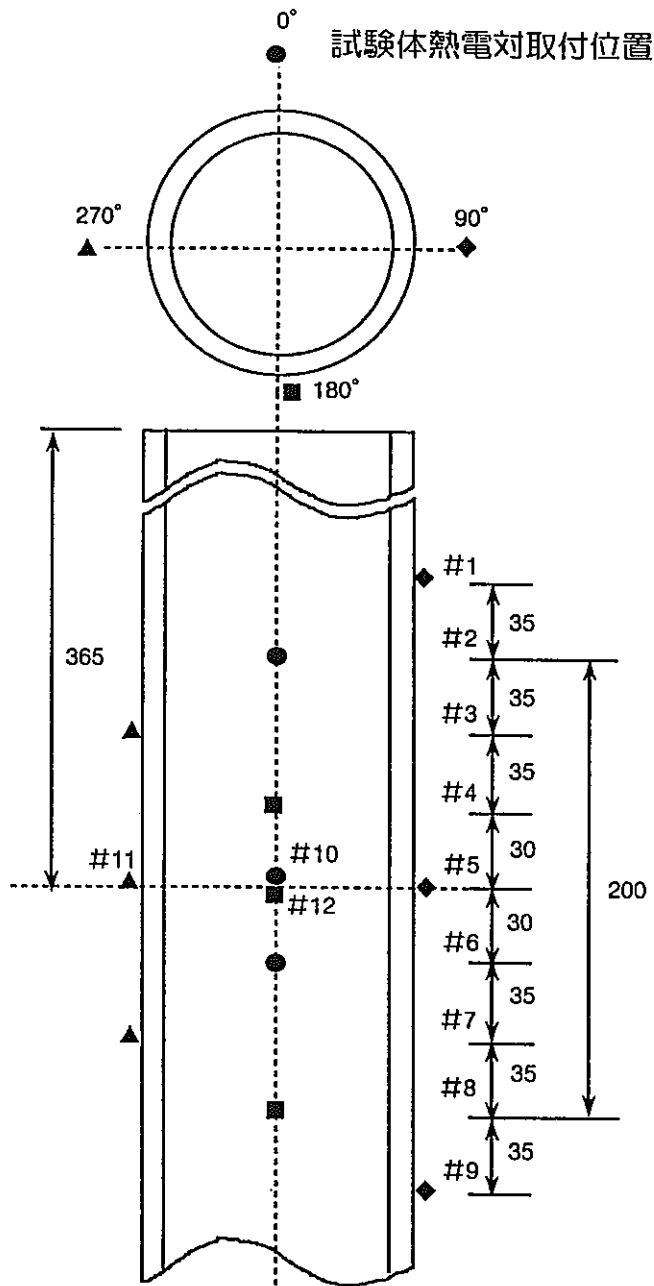


図 3.2-2 熱電対取付図

5	圧力計接続ライン1/4 inch
4	メクラプラグ SUS304 φ32
3	ハブ 11/2GR13
2	接続ソケットSUS304 φ50×φ32× 50
1	伝熱管2.25cr-1MO φ31.8×3.9 t

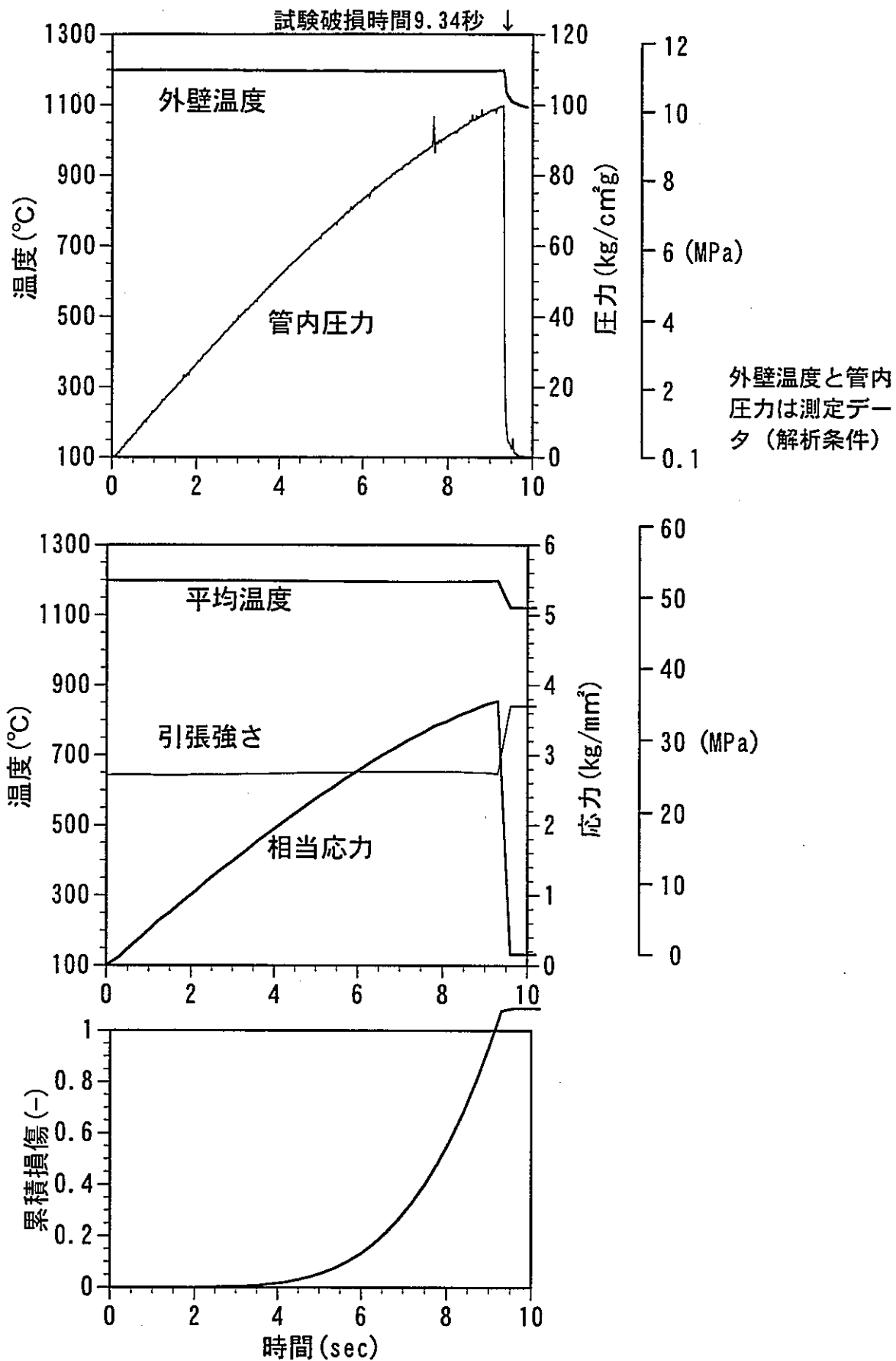


図3.4-1 RUN1の試験及び解析結果

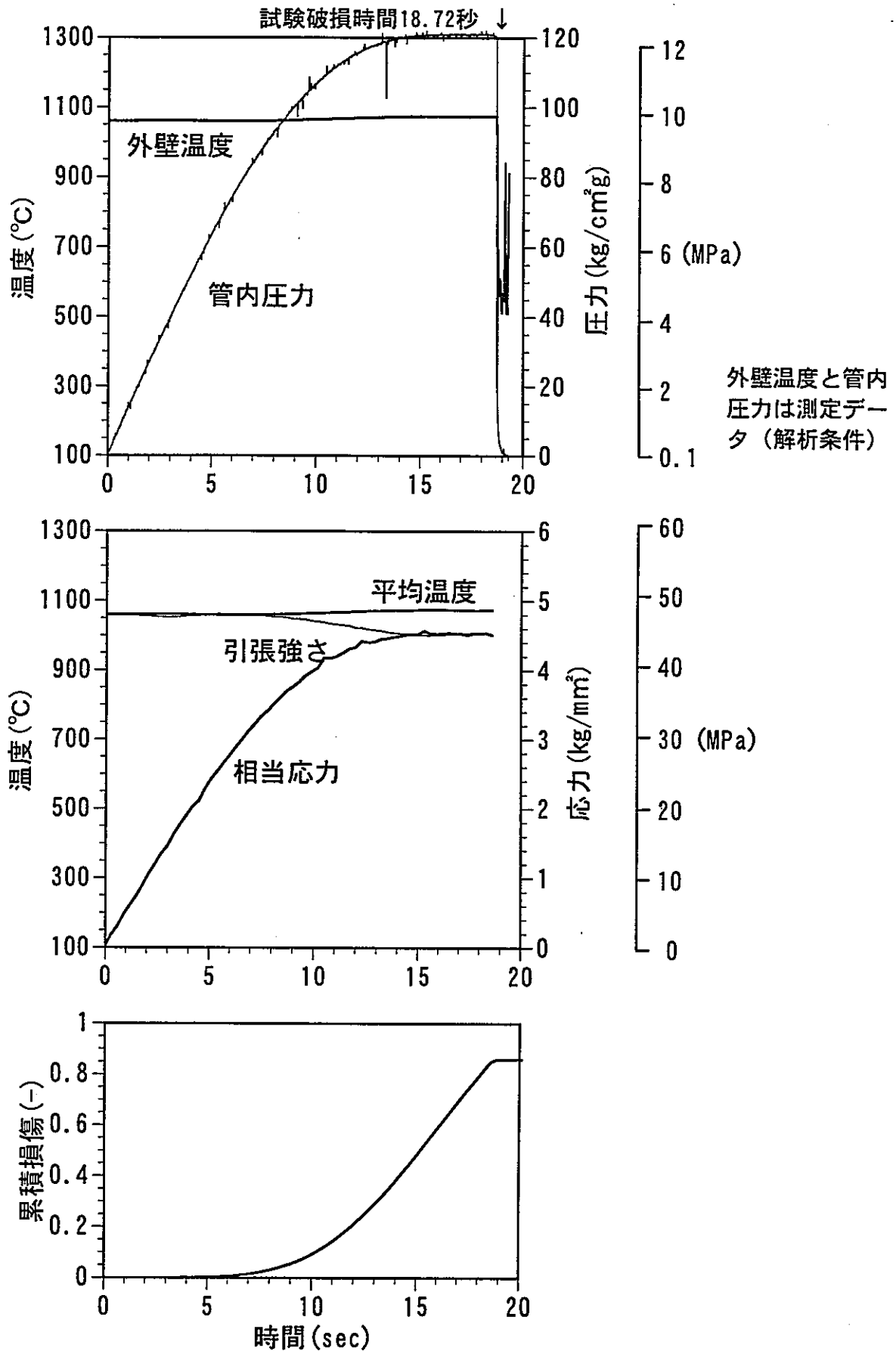


図3.4-2 RUN2の試験及び解析結果

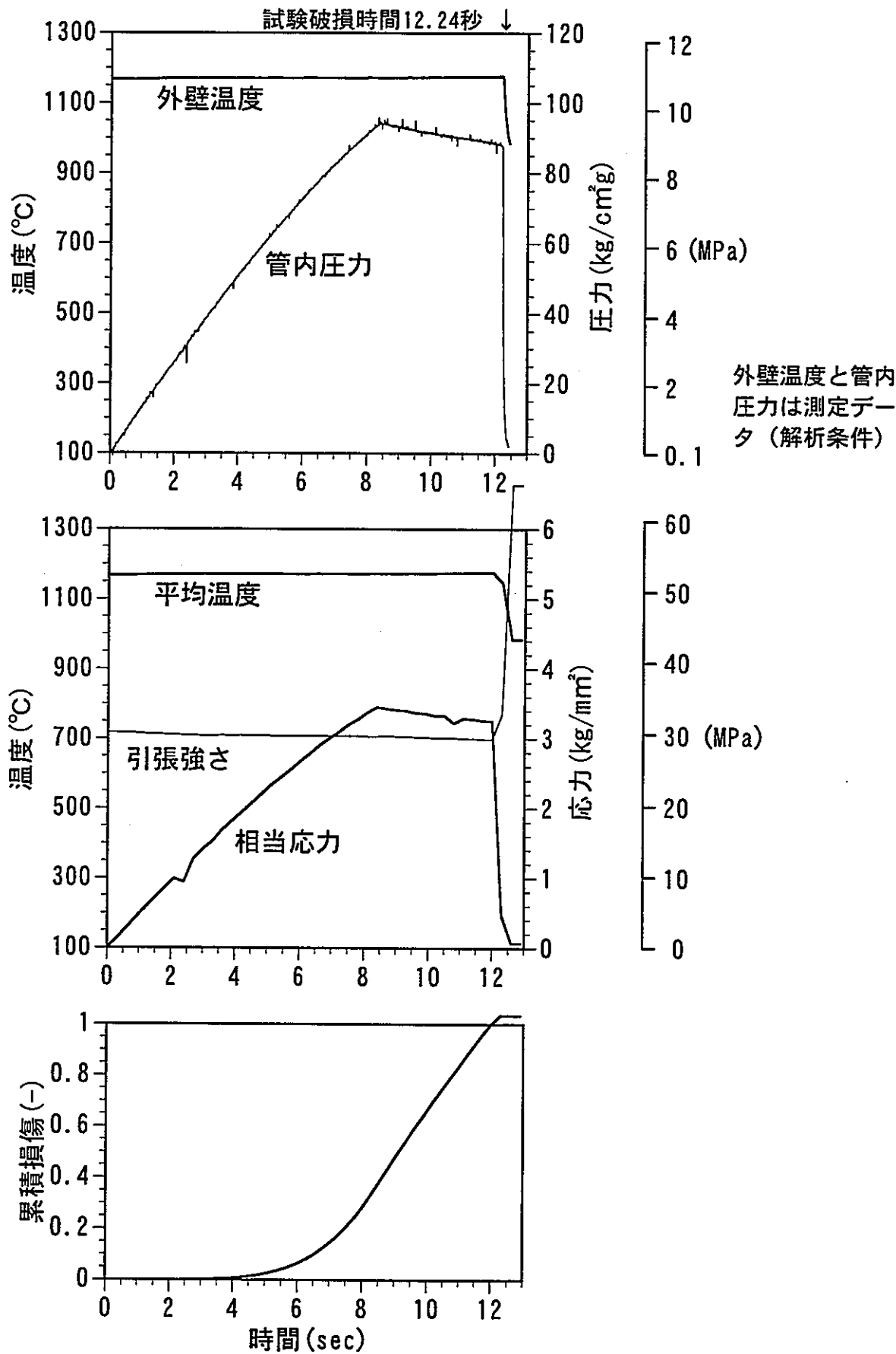


図 3.4 - 3 RUN3の試験及び解析結果

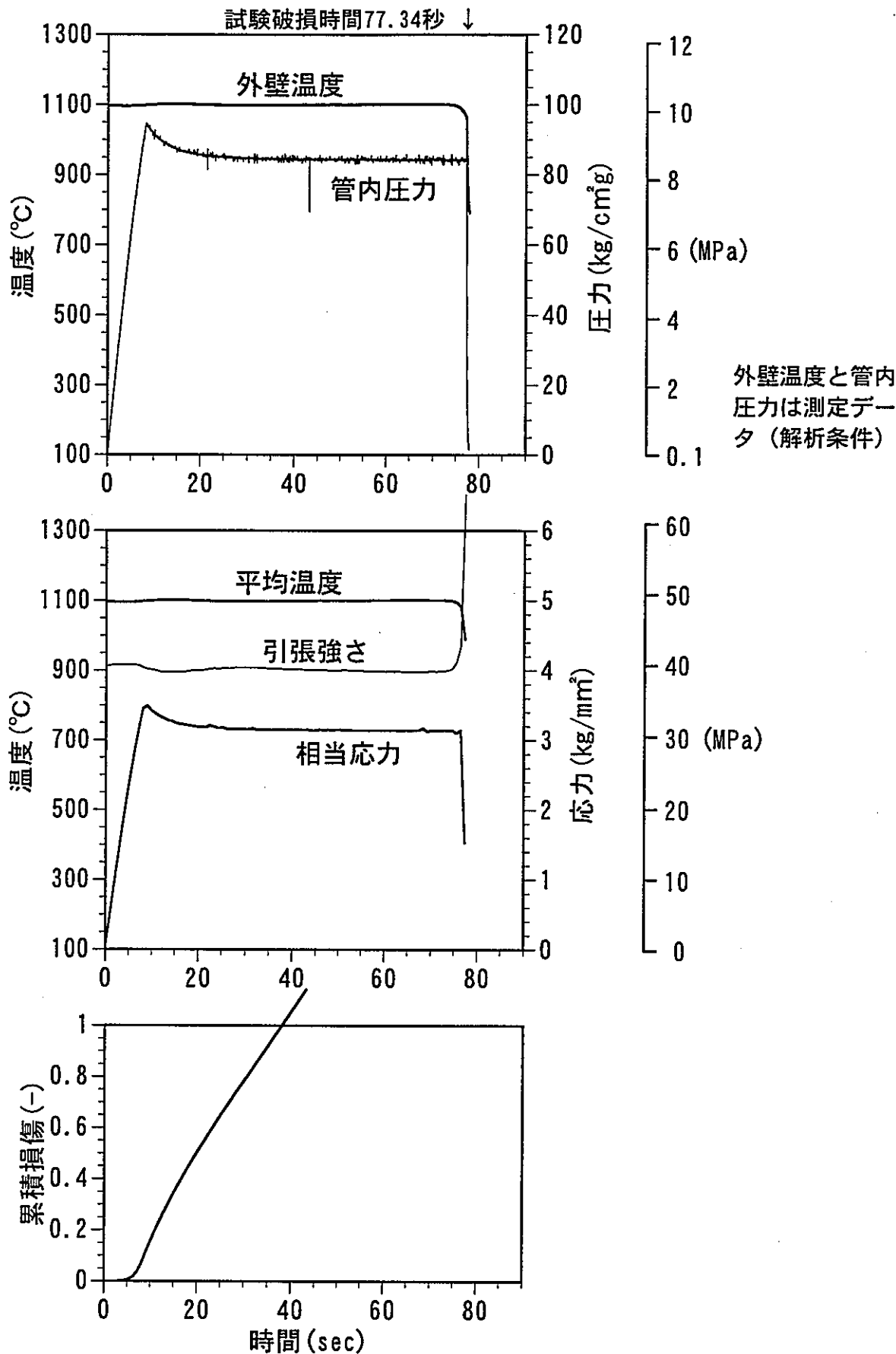


図 3.4 - 4 RUN4の試験及び解析結果

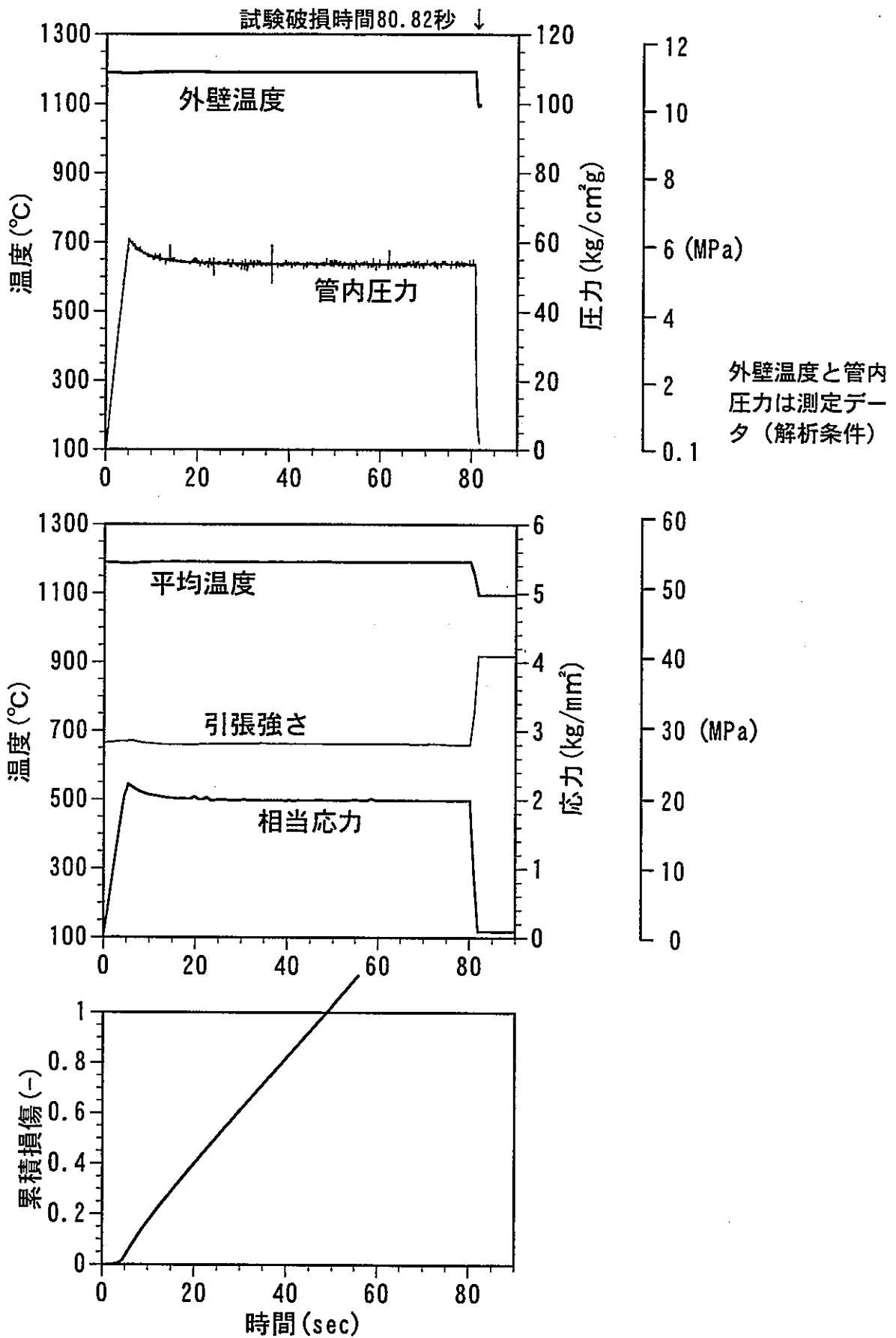


図3.4-5 RUN5の試験及び解析結果

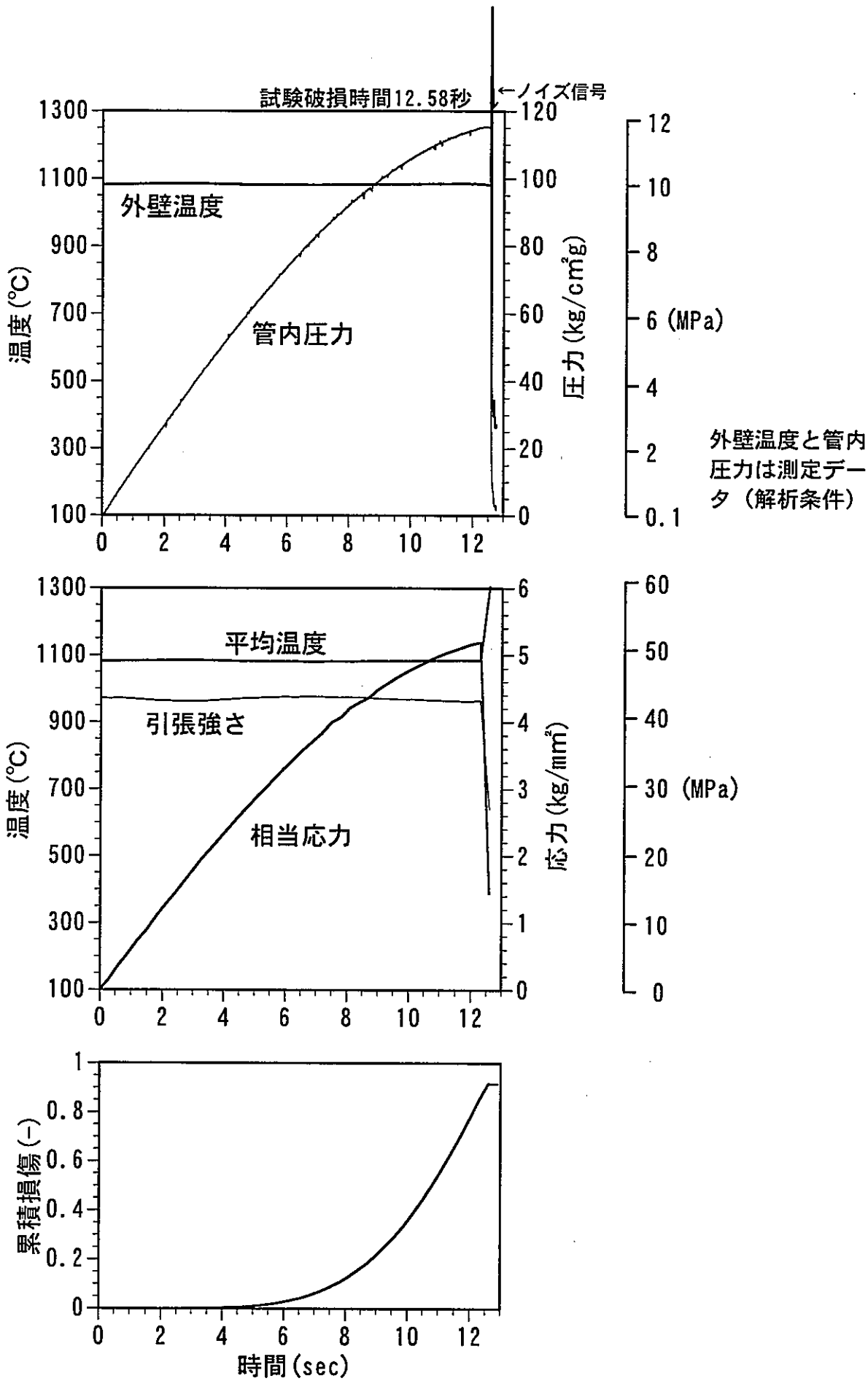


図 3.4 - 6 RUN6の試験及び解析結果

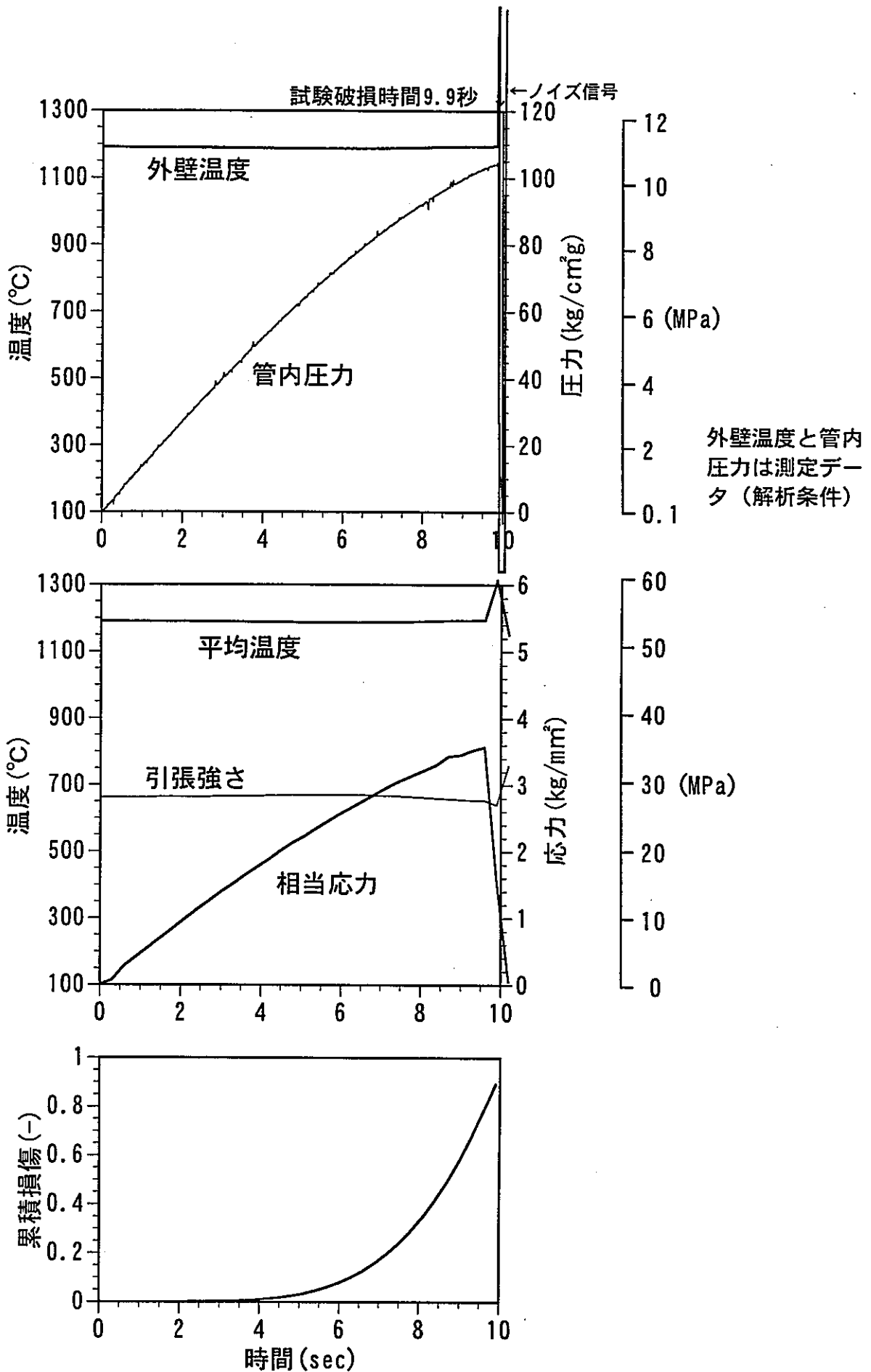


図 3.4 - 7 RUN7の試験及び解析結果

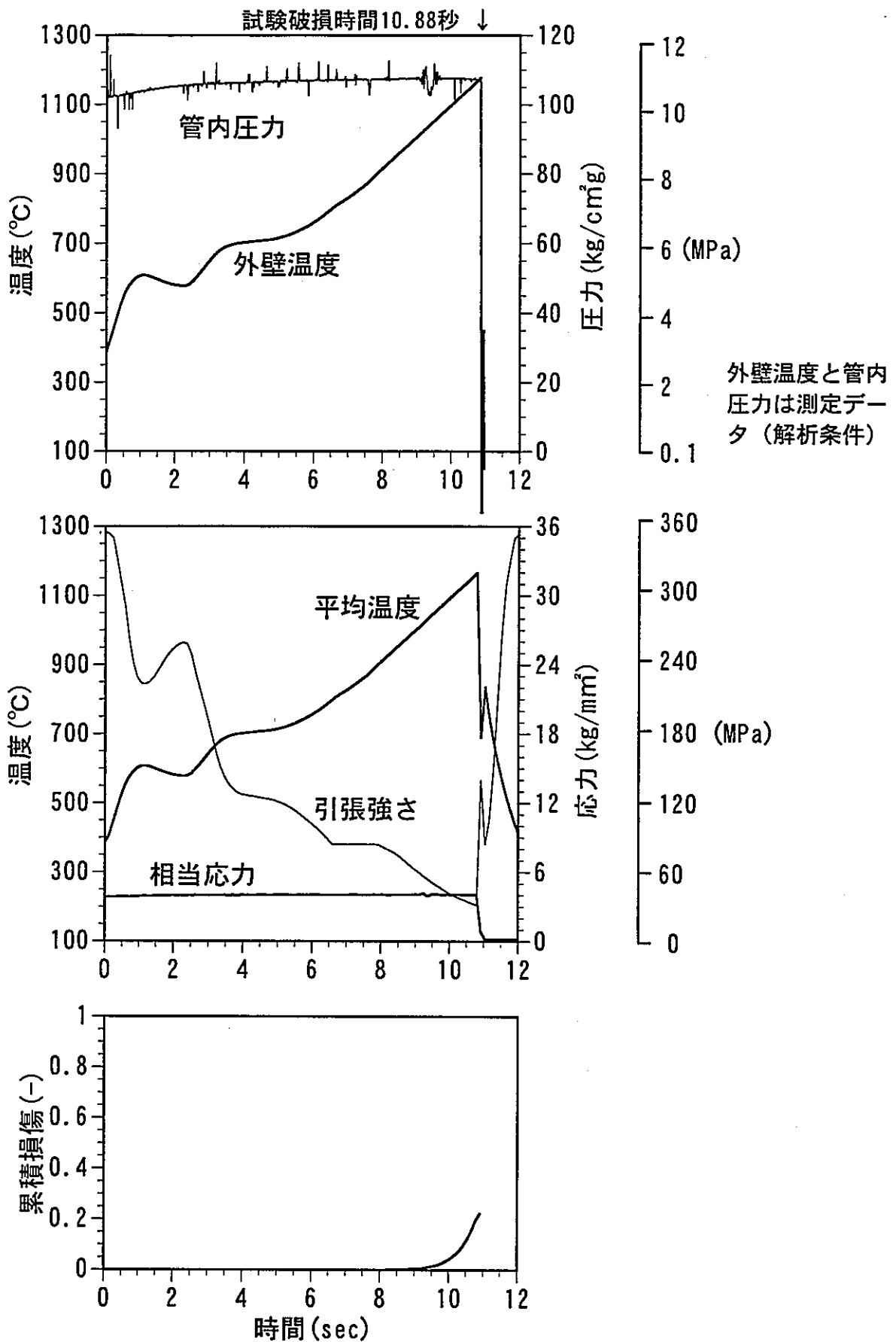


図 3.4 - 8 RUN8の試験及び解析結果

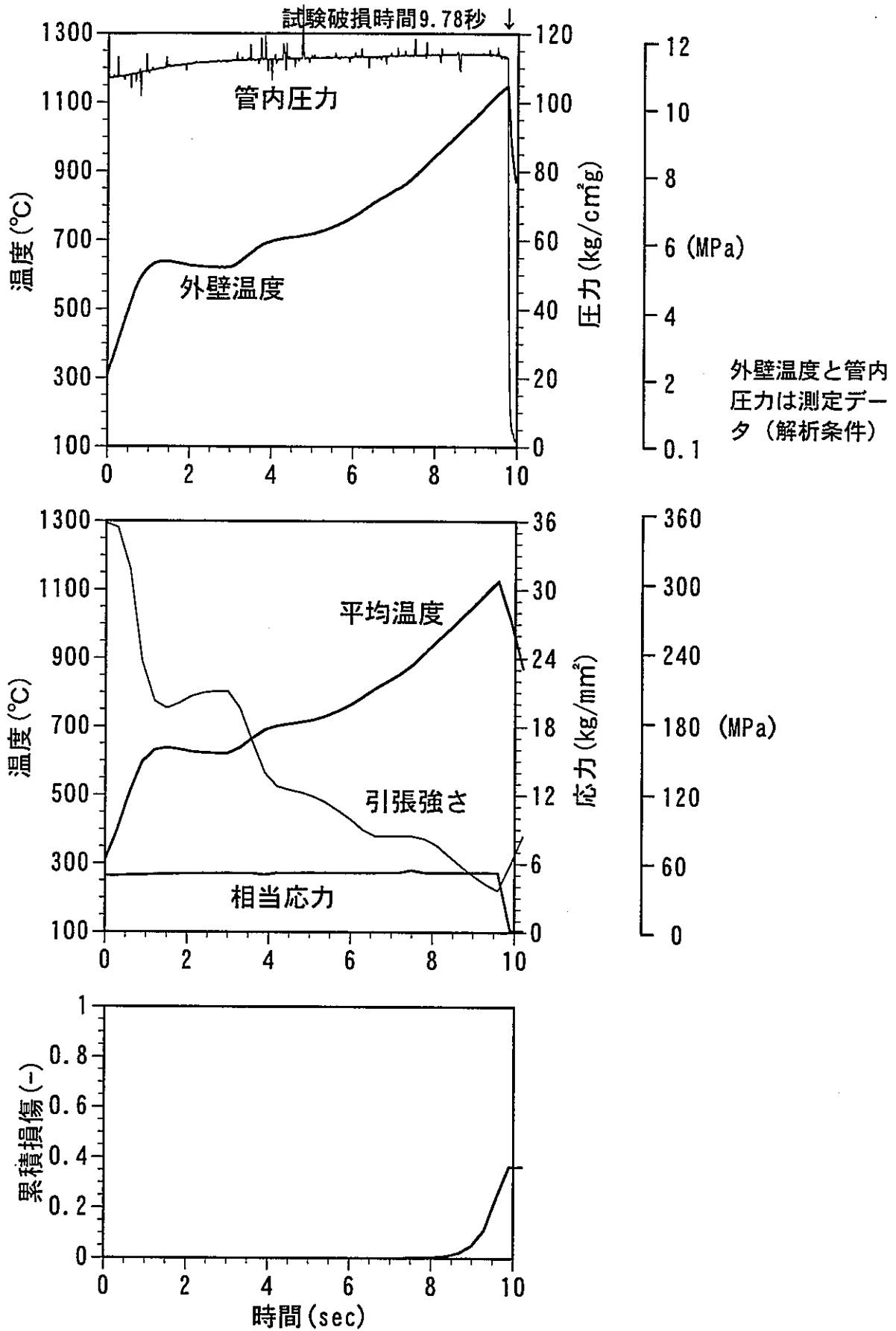


図3.4-9 RUN9の試験及び解析結果

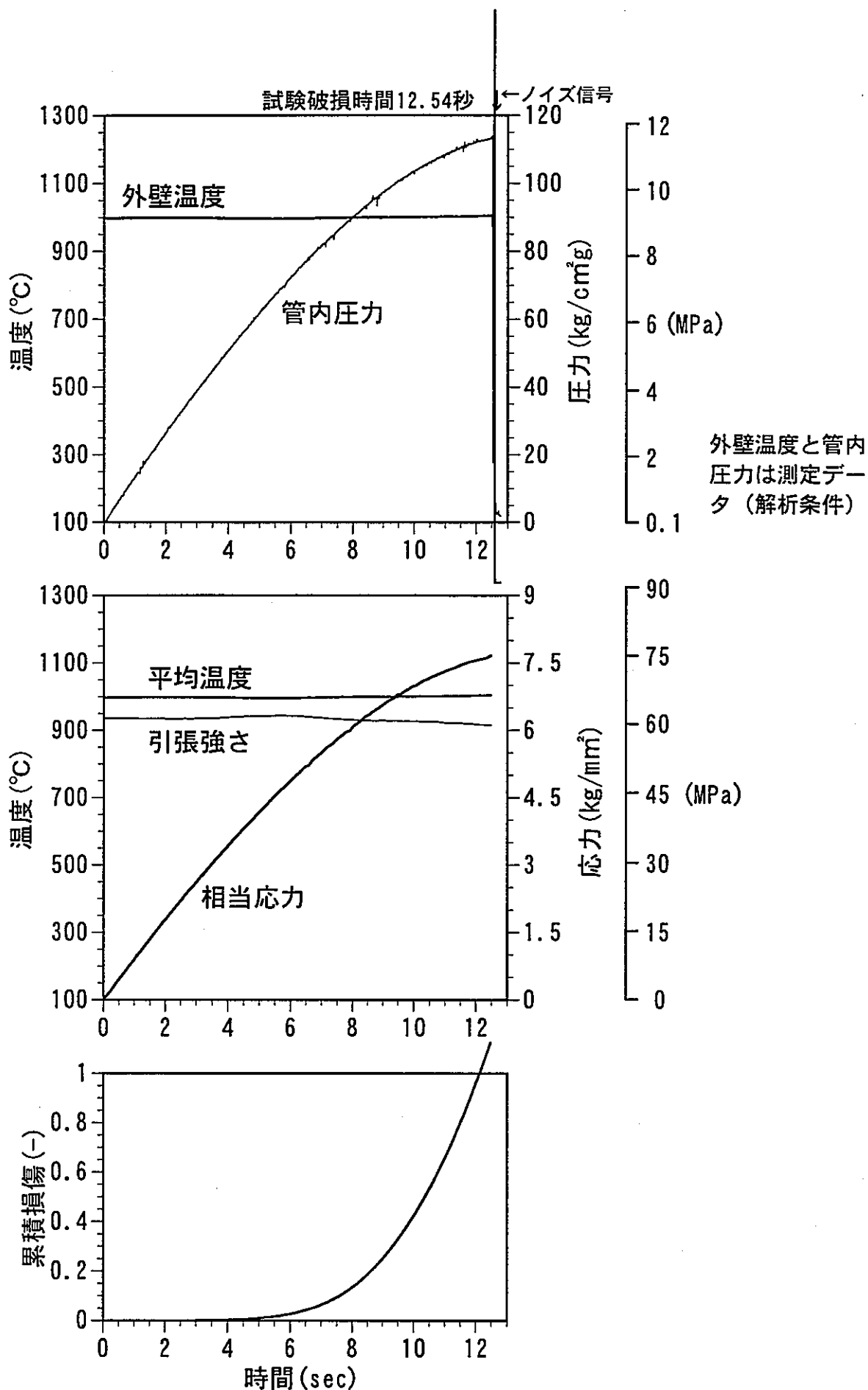


図3.4-10 RUN10の試験及び解析結果

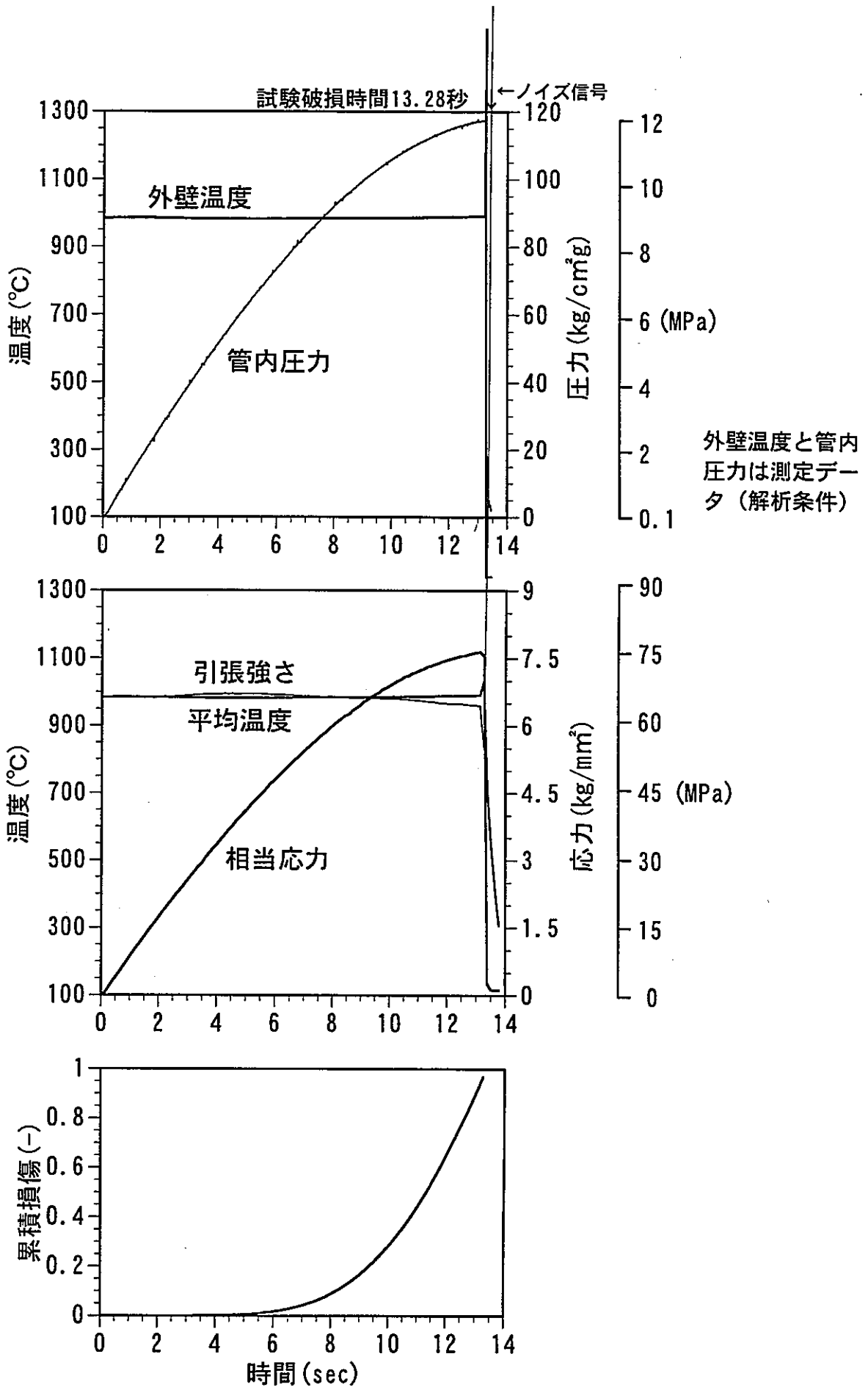


図 3.4 - 1 1 RUN11の試験及び解析結果

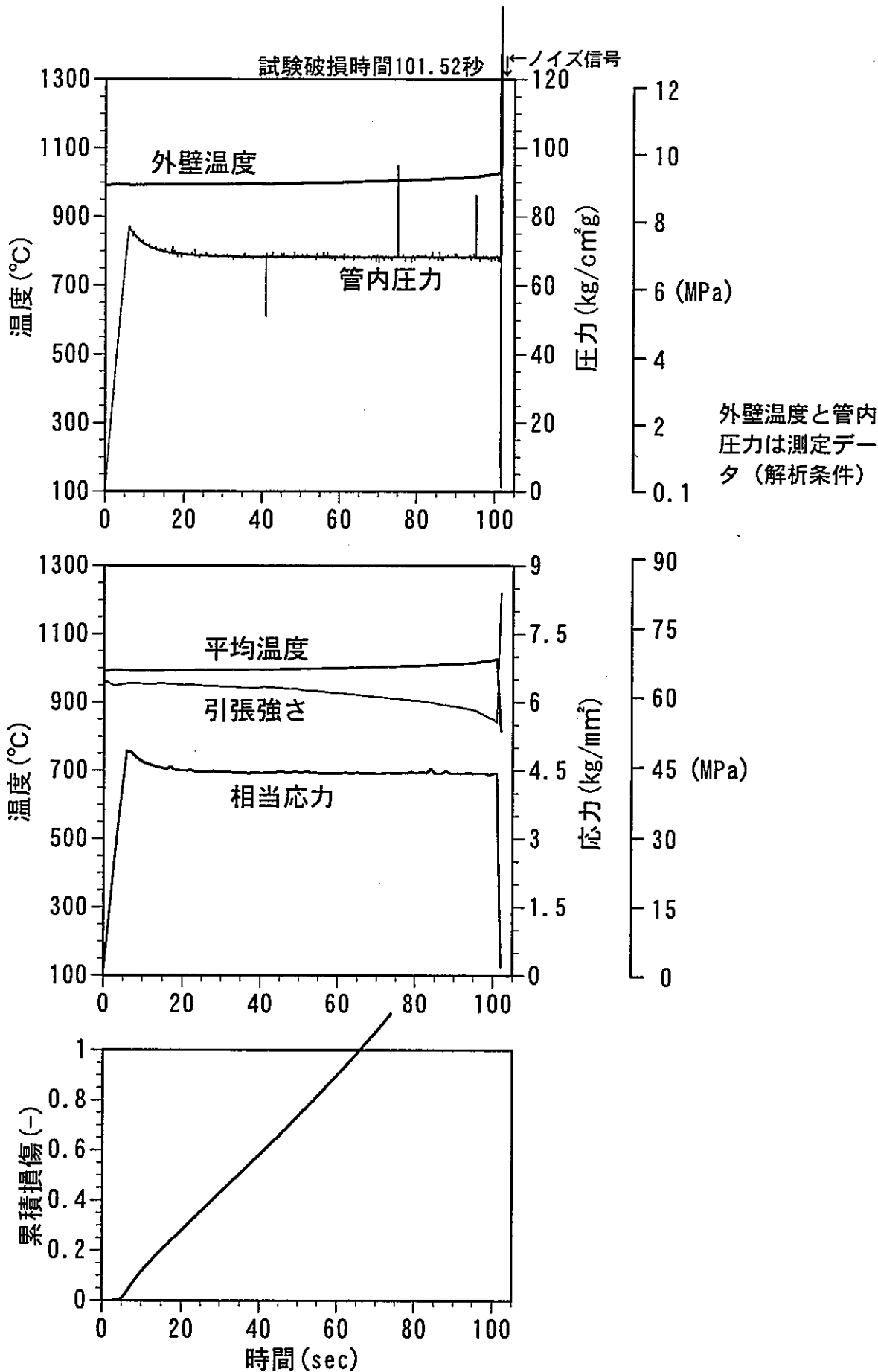


図3.4-12 RUN12の試験及び解析結果

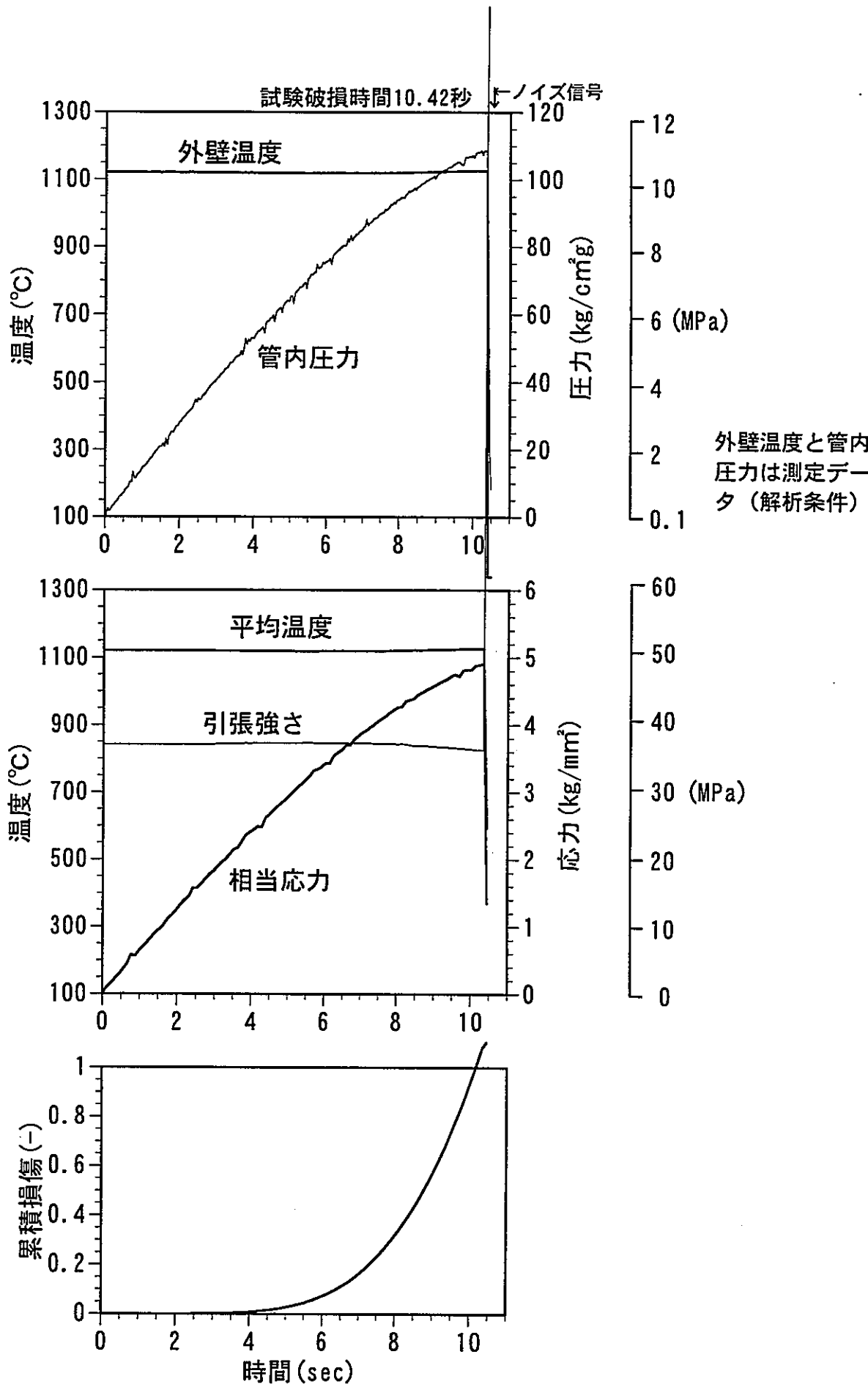


図 3.4 - 1 3 RUN13の試験及び解析結果

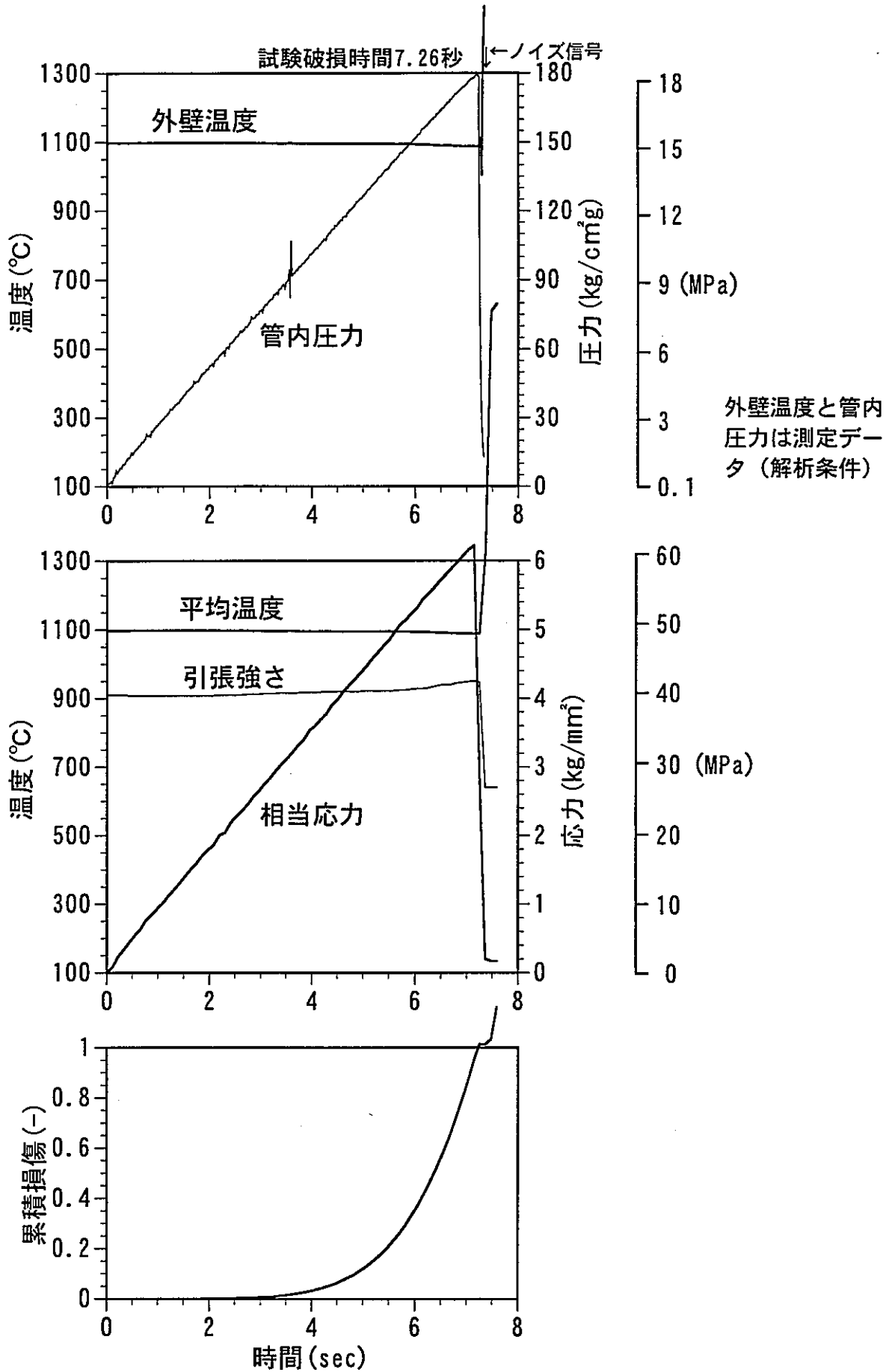


図3.4-14 RUN14の試験及び解析結果

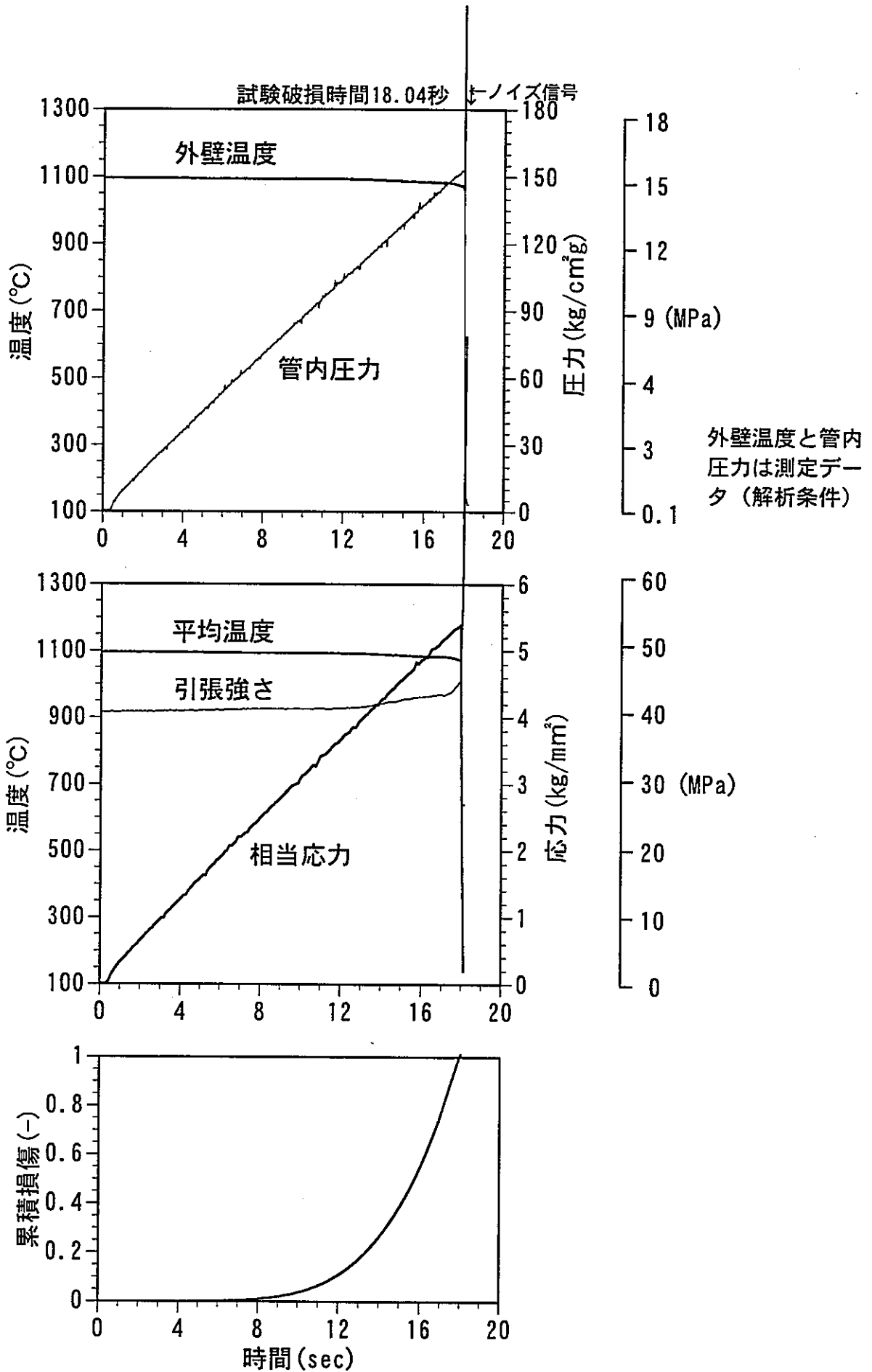


図 3.4 - 15 RUN15の試験及び解析結果

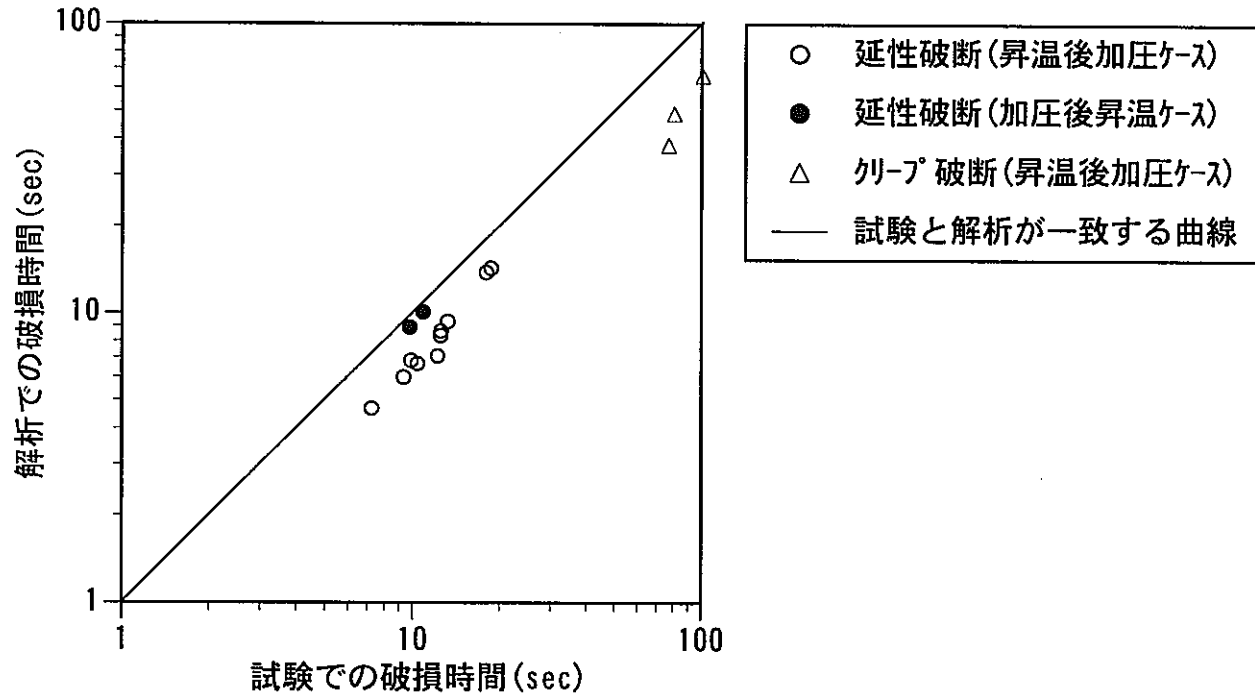


図 3.4 - 1 6 試験結果と解析結果の比較

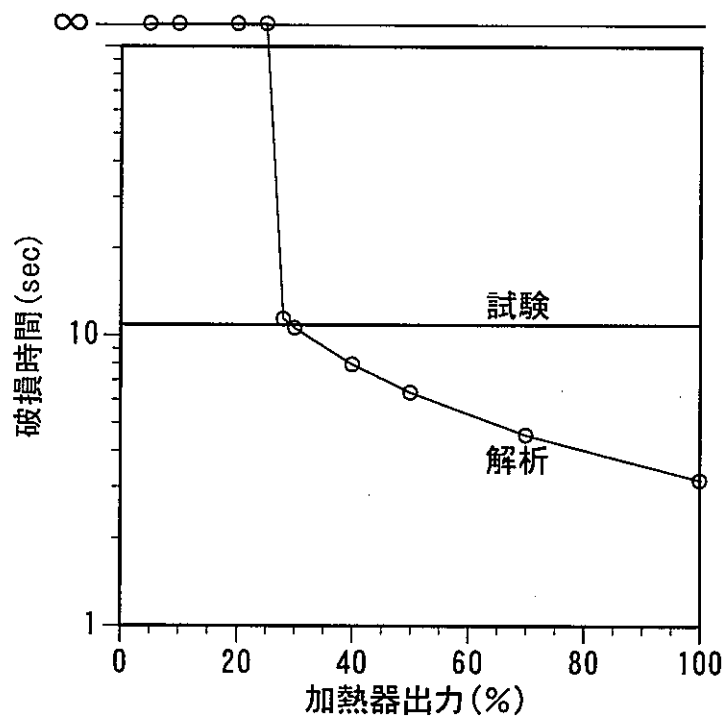
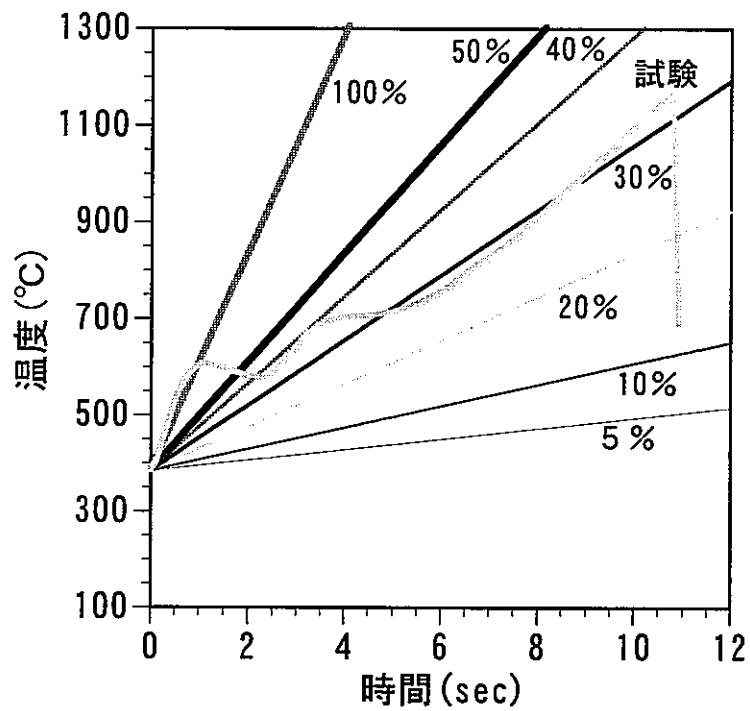


図 4.4-17 内部発熱を考慮したパラメータ解析結果

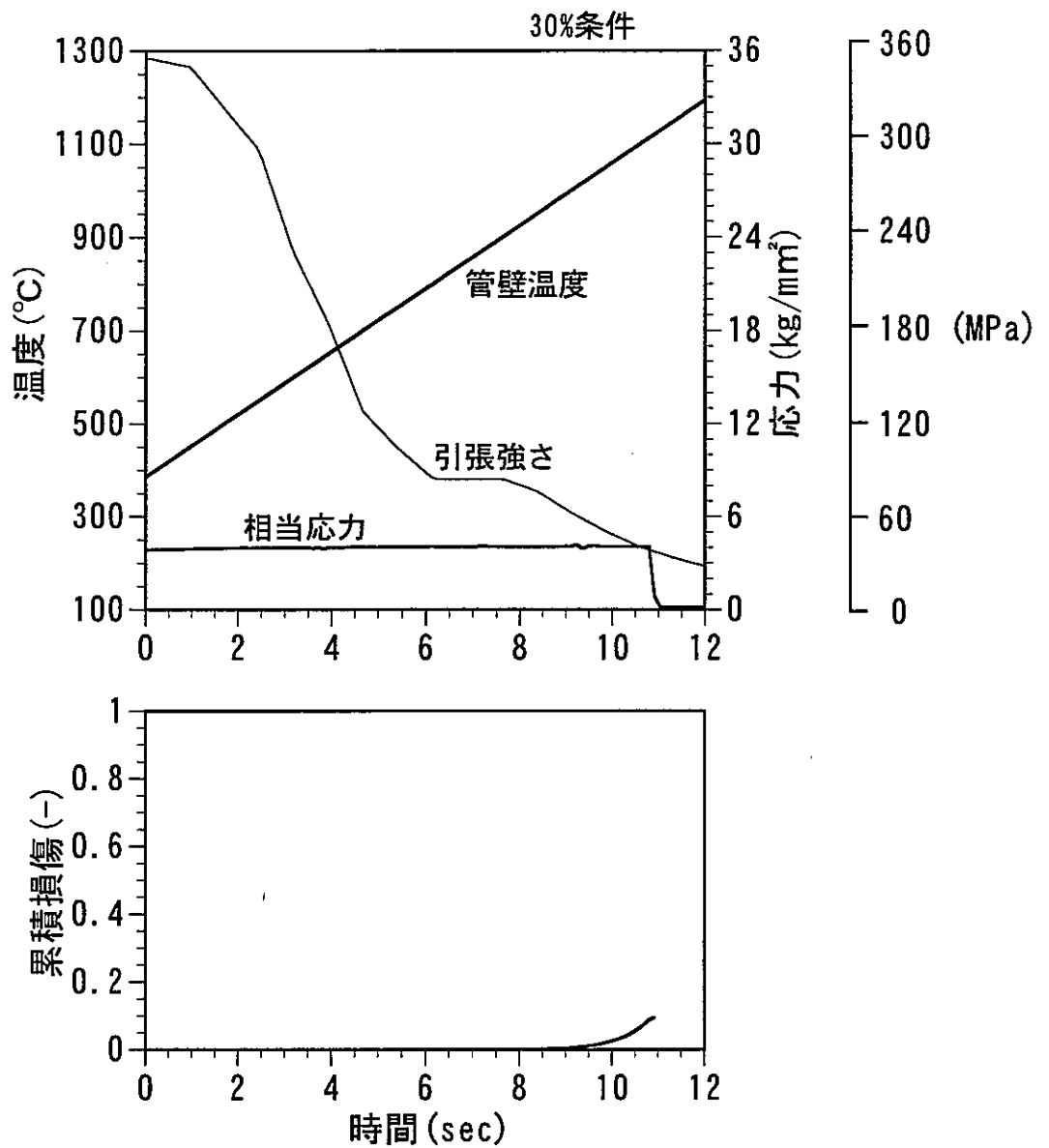


図 3.4 - 1 8 内部発熱を考慮したRUN 8 解析結果

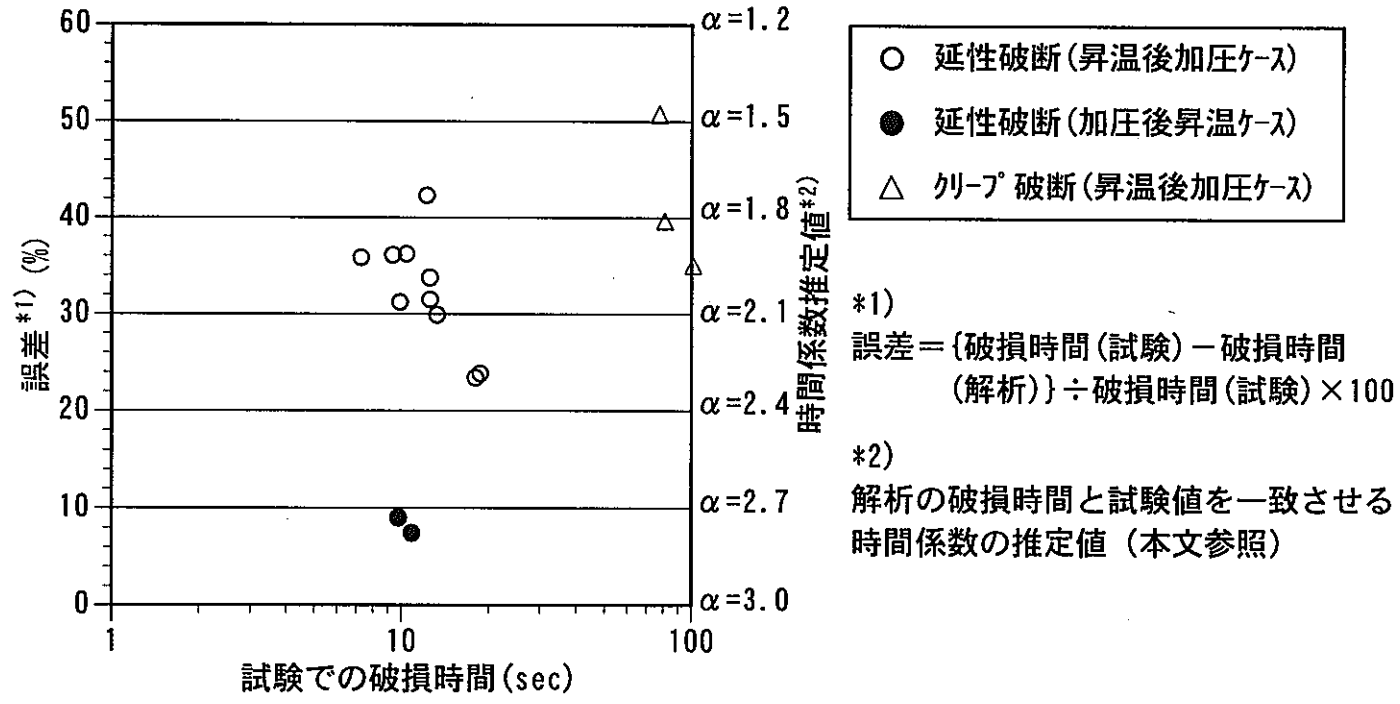


図 3.5-1 高温ラプチャ発生時刻の相違の程度

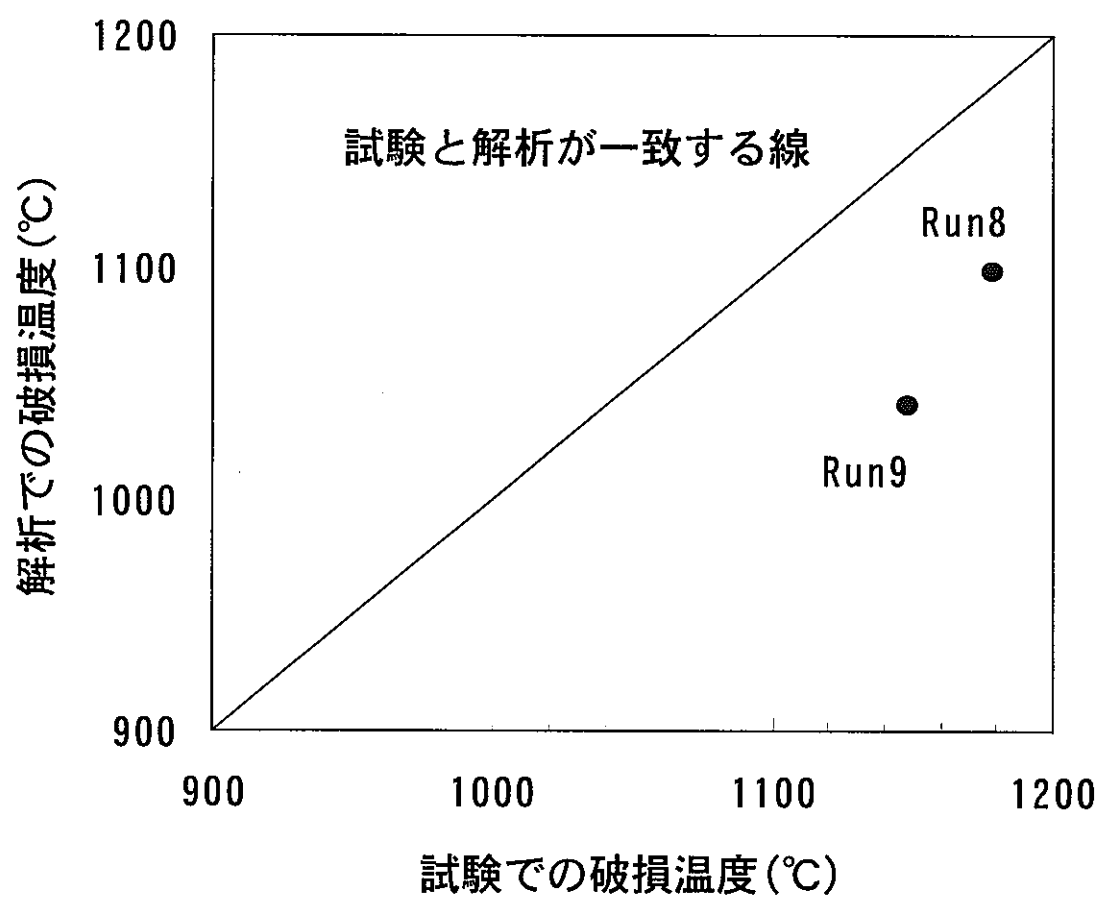


図 3.5-2 高温ラプチャ発生温度の相違の程度 (RUN 8、RUN 9)

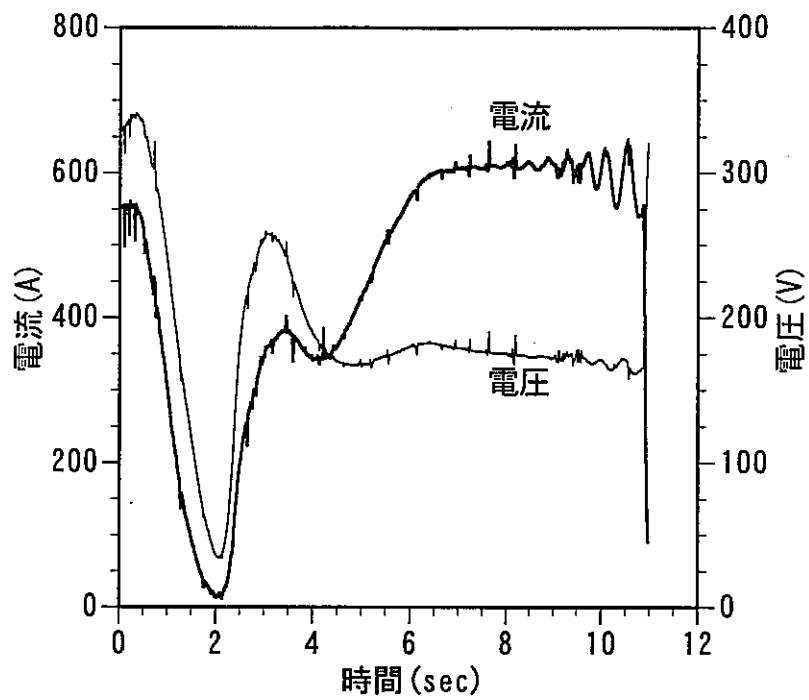


図 3.5 - 3 試験時の誘導加熱電流と電圧 (RUN 8)

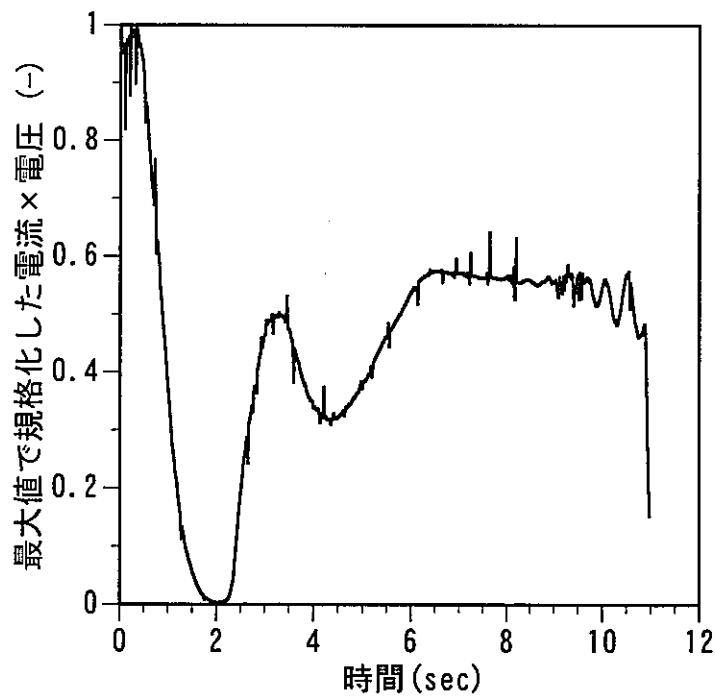


図 3.5 - 4 最大値で規格化した電流×電圧 (RUN 8)

APPENDIX-A

非定常計算モデルの数値解法

伝熱管の比重量 ρ 、熱伝導率 λ 、比熱 C_p 、熱発生率 J とし、それらが一定である場合のエネルギー保存式は、 $\lambda/\rho C_p$ を温度伝導率 α とおいて、時間を t 、その時の管壁内温度を T とすると、以下の式で表せる。

$$\partial T / \partial t = \alpha \nabla^2 T + J / \rho C_p \quad (1)$$

上式を径 (r) 方向に 1 次元化し、 $R = \log r$ で変数変換して表すと、次式となる。

$$\partial T / \partial t = \alpha e^{-2R} \partial^2 T / \partial R^2 + J / \rho C \quad (2)$$

上式を差分化し数値的に解析する。差分化にはCrank-Nicolsonの陰解法を採用した。図 1 に示すように空間を i 、時間を j の添字で表した場合、管壁の内点において以下の差分式が得られる。

$$\partial T / \partial t = (T_{i,j+1} - T_{i,j}) / \Delta t \quad (3a)$$

$$\partial^2 T / \partial R^2 = \{ \theta (T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}) + (1-\theta)(T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}) \} / \Delta R^2 \quad (3b)$$

ここで θ は 0 ~ 1 の値をとる。0 の場合は前進公式 (陽解法)、0.5 はCrank-Nicolsonの陰解法、1 の場合は完全陽型後退時間差分法 (陰解法) を与える。上式を (2) 式に代入して整理すれば次式となる。

$$-a_i T_{i-1,j+1} + b_i T_{i,j+1} - c_i T_{i+1,j+1} = d_i \quad (4)$$

係数 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i は、 $A_i = \alpha e^{-2R_i} \Delta t / \Delta R^2$ とおくと、以下のようになる。

$$a_i = \theta A_i \quad (5a)$$

$$b_i = 1 + 2\theta A_i \quad (5b)$$

$$c_i = \theta A_i \quad (5c)$$

$$d_i = (1-\theta) A_i T_{i-1,j} + \{ 1 - 2(1-\theta) A_i \} T_{i,j} + (1-\theta) A_i T_{i+1,j} + \Delta t J / \rho C_p \quad (5d)$$

(2) 式の初期条件としては、時刻ゼロでの温度分布を与える。すなわち、 R_a 、 R_b を伝熱管の内径、外径に相当する座標点とすると、

$$T(R, t) = T_0(R); \quad t = 0, \quad R_a < R \leq R_b \quad (6)$$

である。ここで、空間座標を図Aに示すようにN個のメッシュに分割し、 $i = 0$ とNの点をそれぞれ左と右の境界点とする。また左の境界点 $i = 0 : R = R_a$ の左側に仮想の点： $i = -1$ を、右の境界点 $i = N : R = R_b$ の右側に仮想の点： $i = N + 1$ を設ける。(2)式の境界条件としては、 $i = 0$ 及び $i = N$ での熱流束を与える。熱流束の定義は、

$$q_r = -\lambda \sigma T / \sigma r = -\lambda e^{-R \sigma} T / \sigma R \quad (7)$$

であるから、この差分式を新しい時刻 $j + 1$ で表すと、以下となる。ただし、時間指標 $j + 1$ はこれ以降省略する。

$$q_{r,i} = -\lambda e^{-R^a} (T_{i+1} - T_{i-1}) / 2 \Delta R \quad (8a)$$

$$T_{i+1} - T_{i-1} = -2 e^{R^b} \Delta R q_{r,i} / \lambda \quad (8b)$$

$i = 0, N$ での熱流束を、それぞれ $q_{r,in}$ 、 $q_{r,out}$ とすると、

$$T_1 - T_{-1} = -2 e^{R^a} \Delta R q_{r,in} / \lambda = -Q_{in} \quad (9a)$$

$$T_{N+1} - T_{N-1} = -2 e^{R^b} \Delta R q_{r,out} / \lambda = -Q_{out} \quad (9b)$$

(4)式に $i = 0$ を代入すると、(9a)式より、

$$-a_0 T_{-1} + b_0 T_0 - c_0 T_1 = d_0 \quad (10a)$$

$$b_0 T_0 - (a_0 + c_0) T_1 = d_0 + a_0 Q_{in} \quad (10b)$$

(4)式に $i = N$ を代入すると、(9b)式より、

$$-a_N T_{N-1} + b_N T_N - c_N T_{N+1} = d_N \quad (11a)$$

$$-(a_N + c_N) T_{N-1} + b_N T_N = d_N - c_N Q_{out} \quad (11b)$$

(4)式に $i = 1 \sim N - 1$ を代入すると、(10b)式、(11b)式を用いて、以下の連立方程式が導ける。

$$\begin{aligned}
 b_0 T_0 - (a_0 + c_0) T_1 &= d_0 + a_0 Q_{in} \\
 -a_1 T_0 + b_1 T_1 - c_1 T_2 &= d_1 \\
 -a_2 T_1 + b_2 T_2 - c_3 T_3 &= d_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 -a_{N-2} T_{N-3} + b_{N-2} T_{N-2} - c_{N-2} T_{N-1} &= d_{N-2} \\
 -a_{N-1} T_{N-2} + b_{N-1} T_{N-1} - c_{N-1} T_N &= d_{N-1} \\
 -(a_N + c_N) T_{N-1} + b_N T_N &= d_N - c_N Q_{out}
 \end{aligned} \tag{12}$$

この連立方程式を、Gaussの消去法により解く。すなわち、 $\alpha_i T_i - \beta_i T_{i+1} = S_i$ の漸化式を定義すると、 $i=0$ で $\alpha_0 = b_0$ 、 $\beta_0 = a_0 + c_0$ 、 $S_0 = d_0 + a_0 Q_{in}$ となるから、(12)式中の連続する2式：

$$\alpha_{i-1} T_{i-1} - \beta_{i-1} T_i = S_{i-1} \tag{13a}$$

$$-a_i T_{i-1} + b_i T_i - c_i T_{i+1} = d_i \tag{13b}$$

より T_{i-1} を消去することで、 α 、 β 、 S に関する以下の漸化式が得られる。

$$\alpha_i = b_i - a_i \beta_{i-1} / \alpha_{i-1} \tag{14a}$$

$$\beta_i = c_i \tag{14b}$$

$$S_i = d_i + a_i S_{i-1} / \alpha_{i-1} \tag{14c}$$

$$\alpha_i T_i - \beta_i T_{i+1} = S_i \tag{14d}$$

ただし、 $i = 1 \sim N-1$ とする。(12)式の最後の1対は、

$$\alpha_{N-1} T_{N-1} - \beta_{N-1} T_N = S_{N-1} \tag{15a}$$

$$-(a_N + c_N) T_{N-1} + b_N T_N = d_N - c_N Q_{out} \tag{15b}$$

となるので、上式を連立して解くと、

$$T_N = S_N / \alpha_N \tag{16a}$$

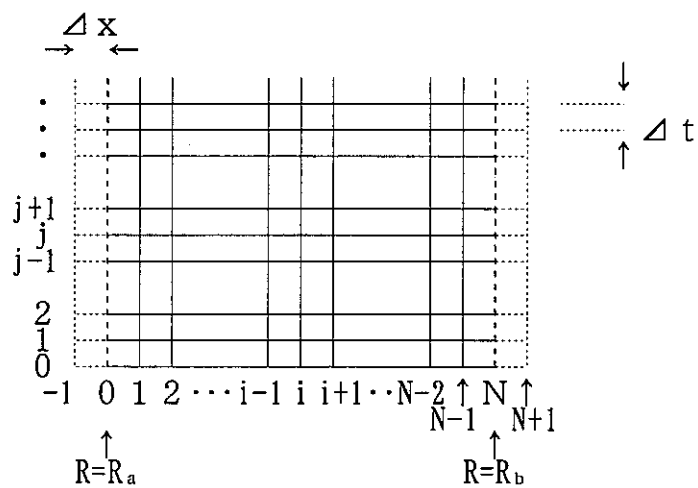
$$\text{ただし、} \alpha_N = b_N - (a_N + c_N) \beta_{N-1} / \alpha_{N-1} \tag{16b}$$

$$S_N = d_N - c_N Q_{out} + (a_N + c_N) S_{N-1} / \alpha_{N-1} \tag{16c}$$

となる。従って、(14d)式を変形した以下の式

$$T_i = \beta_i T_{i+1} / \alpha_i + S_i / \alpha_i \quad (17)$$

により、新しい時刻での温度Tが計算できる。ただし、 $i = N - 1 \sim 0$ である。



図A 計算メッシュ

APPENDIX-B

TRUEコードマニュアル

B.1 コードの概要

解析コードの主な計算の流れを図B.1に、プログラム構成を図B.2に示す。ここで記載するコードはWINDOWSパーソナルコンピュータあるいはUNIXワークステーション上で起動できるように作成している。

B.2 入力マニュアル

B.2.1 データフォーマット

データのうち、1つの計算ケース（1ブロック）は以下のフォーマットで構成され、これが必要ケース分繰り返される。データの1行は72文字（バイト）以下とする。

- (1) タイトル：1行
- (2) 整数データ：必要な数だけ
- (3) 区切りデータ"0"：1行
- (4) 実数データ：必要な数だけ
- (5) 区切りデータ"0"：1行

(2)と(4)のデータは、1行に記載するデータについての先頭アドレス、末尾アドレスに続いて、その数だけのデータを記入する。アドレスやデータの区切りとして1文字以上の空白を必要とするが、数値はフリーフォーマットで入力する。上記(1)以外には"/*"を開始記号、"*/"を終了記号とするコメントをその間に入れられるが、コメントが2行に渡ることはできない。

B.2.1 入力データの説明

以下の各アドレスのデータを指定する。順番は任意であるが、同一アドレスにデータを指定した場合には、最後に指定したデータが有効になる。なお、データを指定しない場合には、通常デフォルトでゼロが入力される。

以下では、整数データと実数データのアドレス及びその説明を記す。

(整数データ)

1： 計算の制御

-1=TRUEプログラム終了

0=当該ブロックをスキップする(指定データはメモリに保存される)

1=当該ブロックをスキップする(指定データはゼロクリアされる)

2=当該ブロック条件で実行する(実行後のデータはメモリに保存される)

- 3=当該ブロック条件で実行する（実行後のデータはゼロクリアされる）
- 2： リスタートファイルの作成
 0=作成しない。
 1=作成する。ユニット番号"02"でファイルを指定すること
- 3： 内壁の温度に関する境界条件の与え方
 0=熱流束を与える。
 1=熱伝達率と内部流体温度を与える。
 2=内壁表面温度を与える。
- 4： 外壁の境界条件の与え方
 0=熱流束を与える。
 1=熱伝達率と外部流体温度を与える。
 2=外壁表面温度を与える。
- 5： 管壁の肉厚方向の分割数
- 6： 初期（計算開始時）の伝熱管温度分布
 0=一定温度（実数#15の値）を与える。
 1=温度分布（実数#20以降）を与える。
- 7： 伝熱管の破損判断基準
 3=降伏応力を使用する。
 4=引張強さを使用する。
 5=クリープ強度（累積損傷モデル、整数#8が2 or 3で有効）を使用する。
 注）通常はこのモデル(=5)で計算する。
- 8： 伝熱管の材料
 1=改良9Cr-1Mo鋼（鋼板のデータに基づく）
 2=2.25CR-1MO鋼（伝熱管材のデータに基づく）
 3=SUS321鋼（伝熱管材のデータに基づく）
- 9： 応力の計算方法 1
 0=圧力容器設計式： $\sigma = P(D_i + 1.2t) / 2t = P(D_o - 0.8t) / 2t$ に基づく。
 1=薄肉円筒モデル、Misesの内外面平均相当応力に基づく。
 -1=薄肉円筒モデル、Trescaの内外面平均相当応力に基づく。
 2=厚肉円筒モデル、Misesの内外面平均相当応力に基づく。
 -2=厚肉円筒モデル、Trescaの内外面平均相当応力に基づく。
- 10： 応力の計算方法 2（整数#9が2 or -2で有効）
 1=拘束条件
 2=開放条件

3=閉鎖条件

- 11： 水側データのユニット番号
 水側条件（熱伝達率、温度、圧力）をテーブルで与える場合には、ユニット番号を指定する（1, 2, 6, 10以外で、整数#13や#15と重ならないこと）。ゼロなら実数データ指定の固定値となる。
- 12： 熱伝導計算方法の指定
 0=非定常計算を行う。
 1=定常計算（現在のところ、#3と#4が1の場合のみ有効）を行う。
- 13： プロットファイルのユニット番号
 プロットファイルを作成する場合にはユニット番号を指定する（1, 2, 6, 10以外で、整数#11や#15と重ならないこと）。ゼロならプロットファイルを作成しない。非定常計算（整数#12が0）でのみ有効。
- 14： プロット間隔の指定（=0の場合は全てプロット）
- 15： ナトリウム側データのユニット番号
 ナトリウム側条件（熱伝達率、温度）をテーブルで与える場合にはユニット番号を指定する（1, 2, 6, 10以外で、整数#11や#13と重ならないこと）。ゼロなら実数データ指定の固定値となる。
- 16： 累積損傷の初期値の与え方
 0=ゼロを初期値として与える
 1=前ブロックの計算結果を初期値として与える
 （定常運転状態から水ブロー時の運転状態を連続して計算する場合に使用）

（実数データ）

- 1： 計算開始時刻（秒）
- 2： 計算ステップ（秒）
- 3： 計算回数（回）、計算ステップ×計算回数まで計算する。（32767回以下のこと）
- 4： 伝熱管の外径（mm）
- 5： 伝熱管の肉厚（mm）
- 6： 伝熱管の熱伝導率（W/mK）
- 7： 伝熱管の比重量（kg/m³）
- 8： 伝熱管の比熱（J/kgK）
- 9： 伝熱管内壁の熱流束（W/m²）、境界条件とする場合のみ有効
- 10： 伝熱管外壁の熱流束（W/m²）、境界条件とする場合のみ有効
- 11： 伝熱管内壁の熱伝達率（W/m²K）、境界条件とする場合のみ有効

- 12: 伝熱管外壁の熱伝達率 (W/m^2K)、境界条件とする場合のみ有効
 13: 水蒸気側温度 ($^{\circ}C$)
 14: ナトリウム側温度 ($^{\circ}C$)
 15: 伝熱管温度 1 ($^{\circ}C$)、整数 # 6 が 0 の場合のみ有効
 16: 内部発熱量 (W/m^3)
 17: 水蒸気側圧力 (kg/cm^2g)、整数 # 11 が 0 の場合のみ有効
 18: ポアソン比 (-)、整数 # 9 が 2 でかつ # 10 が 1 の場合のみ有効
 19: 引張強さの補正係数 (-)、整数 # 7 が 3, 4 で有効 (通常 1.00 を与える)
 クリープ強度式の時間係数 (-)、整数 # 7 が 5 で有効 (通常 3.00 を与える)
 20~: 伝熱管温度 2 ($^{\circ}C$)、整数 # 6 が 1 の場合のみ有効
 温度分布を与える場合、# 20 から分割数 (整数 # 5) + 1 個分を与える。
 最大は # 50 まで。本データは、1 ブロックの計算後に温度が自動更新される。

B. 2. 2 ナトリウム側条件のテーブル

ナトリウム側条件をテーブルデータで与える (整数 # 15 で指定する) 場合には、以下に示すように、1 行毎に時間 (秒)、温度 ($^{\circ}C$)、熱伝達率 (W/m^2K) を入力する。ただし、先頭の 1 行のみはコメント行となる。本データの数は 800 行以下とすること。

Time	Temp.	HTC
0.0	1000.	10000.
1.0	1062.5	7000.
:	:	:
29.	1250.	4000.
30.	1000.	10000.

B. 2. 3 水蒸気側条件のテーブル

水蒸気側条件のテーブルは通常は、データ変換プログラム (CONV) により作成するが、データの数は、800 行以下とすること。データ変換プログラムについては、APPENDIX-C に記載する。

B. 3 出力マニュアル

B. 3. 1 材料強度評価モデル：整数 # 7 が 3, 4 の場合

ユニット番号 6 では、制御用データに続いて以下のような計算結果 (サンプル) を出力する。

計算結果は、1 ケース毎に、タイトルに続いて、非定常計算で破損する場合は破損時刻での状態と計算最終時刻の状態を出力する。定常計算では定常状態を出力する。

以下のサンプルの3行目は、「TIME=.00」が出力時刻、「BTEMP=300.0」が管壁の平均温度(°C)、「SIGMF=35.85」がその温度での引張強さ=破損判断基準値(kg/mm²)、「SIGMP=5.42(6.42 4.42)」が相当応力(kg/mm²)で、初めが内外面平均値、次が内壁面、次が外壁面の値である。「IRUP=0」はその時刻で延性による破損をしているか否かを示し、「0」が破損無し、「***」が破損有りとなる。4行目は、「SIGMU= 35.85」が補正等を加えない引張強さ(kg/mm²)である。5~6行目は伝熱管の半径(mm)とそこでの温度(°C)を示す。

Steady State Condition -present design-

```

TIME= .00 BTEMP= 300.0 SIGMF= 35.85 SIGMP= 5.42 ( 6.42 4.42) IRUP= 0
          SIGMU= 35.85
12.20 12.43 12.67 12.91 13.16 13.41 13.67 13.93 14.20 14.47 14.74 15.02 15.31
300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0

```

B. 3.2 クリープ強度評価モデル：整数#7が5の場合

前記と同様の出力に加え、4行目において出力時点における累積損傷：SDTTR(ー)とクリープ破断時間：TR(秒)、クリープによる破損の有無：IRUPC(ー)について以下のように出力される。

Steady State Condition -present design-

```

TIME= .00 BTEMP= 300.0 SIGMF= 35.85 SIGMP= 5.42 ( 6.42 4.42) IRUP= 0
          SDTTR= .000 TR= 1.333E+25          IRUPC= 0
12.20 12.43 12.67 12.91 13.16 13.41 13.67 13.93 14.20 14.47 14.74 15.02 15.31
300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 300.0

```

B. 4 プロット出力

B. 4.1 引張強度評価モデル：整数#7が3、4の場合

このモデルでプロットファイルの作成を指定した場合には、以下に示すように、1行毎に時間(秒)、伝熱管の平均温度(°C)、平均温度に対応する補正後の伝熱管強度：Su1(kg/mm²)、補正前の伝熱管強度：Su2(kg/mm²)、管壁応力：Seq(kg/mm²)、内

壁温度 T_{in} (°C)、内壁熱流束 Q_{in} (W/m²) がベタ打ちされて出力される。本データを汎用の表計算プログラム等で図形処理する。

Time	Temp.	Su1	Su0	Seq	Tin	Qin
.00	732.8	13.36	13.36	5.47	:	:
.30	739.1	12.64	12.64	5.47	:	:
:	:	:	:	:	:	:
29.70	1000.1	5.16	4.30	1.45	:	:
30.00	999.3	5.18	4.32	1.41	:	:

B.4.2 クリープ強度評価モデル：整数#7が5の場合

このモデルでプロットファイルの作成を指定した場合には、以下に示すように、1行毎に時間(秒)、伝熱管の平均温度(°C)、平均温度に対応する伝熱管強度： S_u (kg/m²)、管壁応力： S_{eq} (kg/mm²)、累積損傷和： S_{dt}/tR (-)、クリープ破断時間： tR (秒)、内壁温度 T_{in} (°C)、内壁熱流束 Q_{in} (W/m²) がベタ打ちされて出力される。本データを汎用の表計算プログラム等で図形処理する。

Time	Temp.	Su	Seq	Sdt/tR	tR	Tin	Qin
.00	732.8	13.36	5.47	.000	7.370E+06	:	:
.30	739.1	12.64	5.47	.000	5.306E+06	:	:
29.70	1000.1	5.16	1.45	.075	5.871E+05	:	:
30.00	999.3	5.18	1.41	.075	7.276E+05	:	:

B.5 コードの起動方法

例えば「TRUE ft01pnc.dat ft03wrt.txt ft04plt.txt ft06out.txt」とタイプすることで、高温ラプチャ計算が行われる。ここで、pnc.datは制御データファイル、wrt.txtは水蒸気側条件のテーブルファイル、plt.txtは計算結果のプロット出力ファイル、out.txtはリスト出力ファイルである。このように、起動パラメータではファイルのユニット番号とファイル名を指定する。“ft”の後に続く2桁の整数がユニット番号でそれにファイル名が続く。ユニット番号“01”は制御用データ(ファイル名“pnc.dat”)、“06”は出力リスト(ファイル保存したければファイル名“out.txt”、標準出力(モニター画面)したければ“con”あるいは“user”、ただし“user”はウィンドウズのみで有効)、プリントアウトしたければ“prn”)、“02”はリスタートファイル、“10”はテンポラリファイルに割り当てられており、何れも記載以外の用途では使えない番号である。ファイル出力を指定

する場合、同名のファイルが存在するとプログラムの実行とともに既存のファイルは消される（上書きされる）ので注意のこと。また、ファイル名に"/","-","=",";",".",の5文字は使えない。コードの実行例を以下に示す。">"以降がタイプ入力である。

```
>TRUE ft01pnc.dat ft03wtr.txt ft04plt.txt ft06out.txt
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 1 TO 'pnc.dat' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 3 TO 'wtr.txt' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 4 TO 'plt.txt' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 6 TO 'out.txt' <<<
```

```
Stop - Program terminated.
```

する場合、同名のファイルが存在するとプログラムの実行とともに既存のファイルは消される（上書きされる）ので注意のこと。また、ファイル名に"/","-","=",";",".",の5文字は使えない。コードの実行例を以下に示す。">"以降がタイプ入力である。

```
>TRUE ft01pnc.dat ft03wtr.txt ft04plt.txt ft06out.txt
```

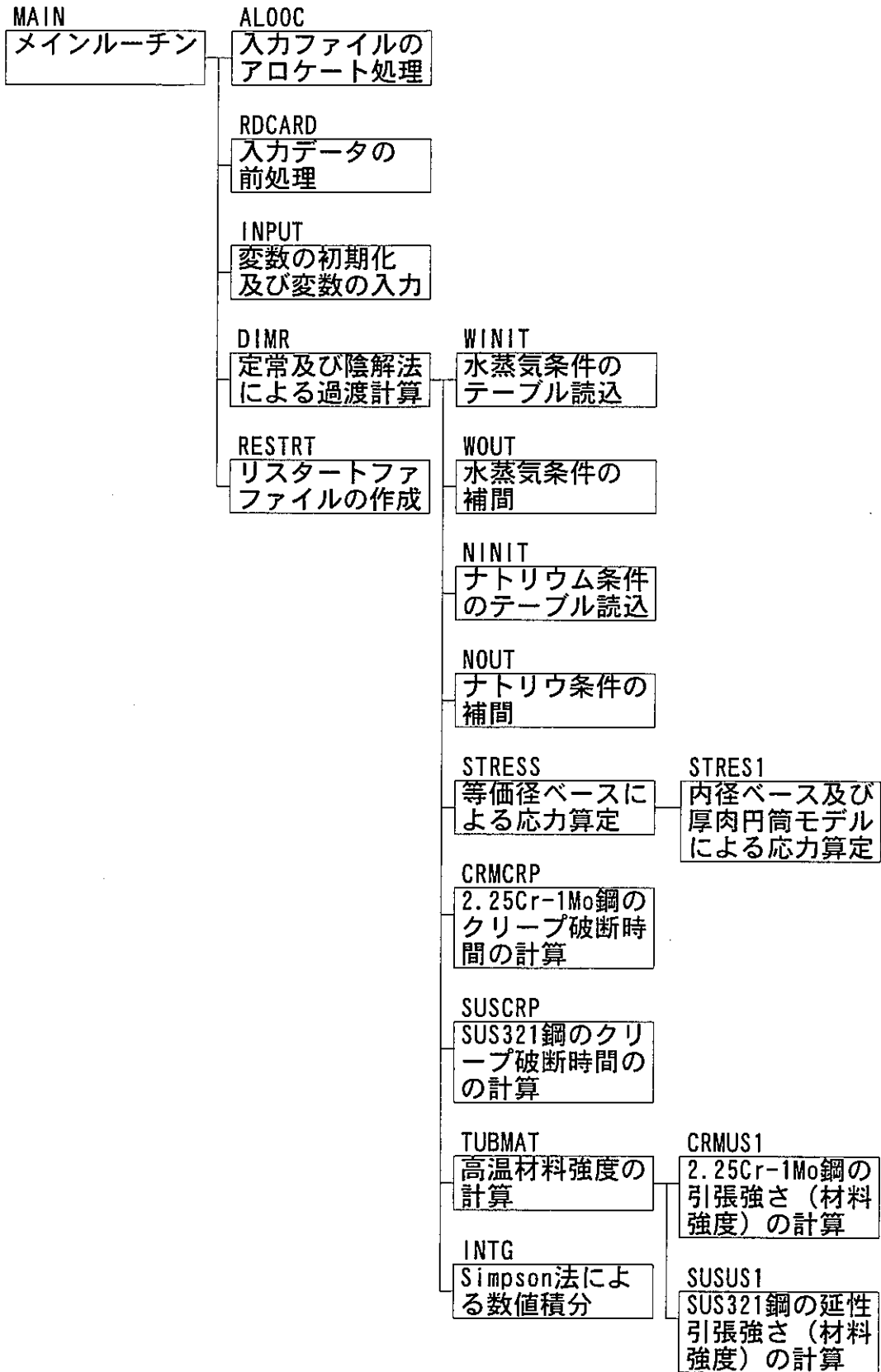
```
>>> ALLOCATE UNIT 1 TO 'pnc.dat' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 3 TO 'wtr.txt' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 4 TO 'plt.txt' <<<
```

```
>>> ALLOCATE UNIT 6 TO 'out.txt' <<<
```

```
Stop - Program terminated.
```



図B.2 プログラム構成

A P P E N D I X - C

データ変換プログラム (CONV) について

C.1 はじめに

実機SG評価では、定常運転及び水ブロー時の水蒸気系の圧力、温度等はブローダウン解析コードBLOOPHを用いて計算される。その解析結果に対して、ナトリウム-水反応での発生熱による水蒸気側への熱移行（全体補正）や局所的に反応ジェットに曝された箇所での熱移行（局所補正）がRUPINコードにより計算され、高温ラプチャ解析（TRUE解析）での境界条件となる水蒸気側の温度、圧力、熱伝達率が得られる。このデータをTRUEコードで使用できるようにデータ変換するプログラムがCONVである。

C.2 プログラム

CONVのプログラムリストをリストC.1に示す。このプログラムは、WINDOWSパソコン用に作成している。なお、CONVは汎用非線形構造解析コードFINAS用のデータ変換プログラムとして作成したので、変換後の単位はFINASの入力データと整合されている。また、BLOOPHで出力されている圧力は絶対圧となっているので、注意のこと。

C.3 起動方法

例えば「CONV blooph.out wtr.txt」とタイプすることで、blooph.outのデータがwtr.txtに変換される。変換後のファイル名(wtr.txt等)は、最大10個まで同時に指定可能である。その後「Input: (IALFW, LINK) -- max.10」と出力して変換対象となるIALFW（熱伝達率の計算方法のフラグ）とLINK（リンク番号）の値が要求されるので、整数のペア（入力した変換後ファイルの数だけ）を入力する。最後に数値以外の文字（例えば“end”等）を入力すると変換が開始される。整数のペアは“1”（=IALFW）と“リンク番号”か、“2”（=IALFW）と“リンク番号”である。“1”は設計式に基づく水側熱伝達率を出力し、“2”はLOCA式による水側熱伝達率を出力する。実機SG評価では、“2”のLOCA式による水側熱伝達率がリファレンスとなっているので、通常は“2”を指定する。出力されているリンク番号は解析ケースにより異なるので、BLOOPH/RUPINの出力データ内容の確認が必要である。

C.4 実行例

以下のように“>”以降をタイプする。

```
>CONV blooph.out wtr1.txt wtr2.txt wtr3.txt
```

```
Input: (IALFW, LINK) -- max.10
```

```
>2, 7, 2, 8, 2, 15, end
```

IALFW= 2, LINK= 7

IA	L	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)
2	7	.0	328.3	1.283E+00	1.489E-06	.0	328.3	1.283E+00	1.489E-06
:									
2	7	30.0	345.8	3.299E-01	2.783E-07	30.0	1.9	-1.500E-02	-2.000E-08

IALFW= 2, LINK= 8

IA	L	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)
2	8	.0	328.2	1.282E+00	1.533E-06	.0	328.2	1.282E+00	1.533E-06
:									
2	8	30.0	352.6	3.283E-01	2.858E-07	30.0	1.9	-1.470E-02	-1.861E-08

IALFW= 2, LINK= 15

IA	L	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)	TIM(s)	T(C)	P(kg/mm ²)	H(kc/mm ² sC)
2	15	.0	328.0	1.279E+00	1.594E-06	.0	328.0	1.279E+00	1.594E-06
:									
2	15	30.0	349.9	3.120E-01	3.333E-07	30.0	2.7	-1.290E-02	-2.306E-08

Input: (IALFW, LINK)

>end

Stop - Program terminated.

リスト C. 1 BLOOPHポスト処理データの変換プログラム

```

c-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7--
parameter (imax=4, rmax=16, lmax=10)
dimension idata(imax), rdata(rmax)
dimension ialw(lmax), lin(lmax)
data XP, XH/1.E+6, 3600.E+6 /

c
do 100 i=1, lmax
ialw(i) = 0
100 lin(i) = 0
open (1, file=' ')
write(*,*) ' Input: (IALFW, LINK) -- max.10'
read (*,*,err=5,end=5) (ialw(i), lin(i), i=1, lmax)
5 iloop = 0
1 iloop=iloop+1
if ( iloop.gt.lmax ) goto 7
IALFW=ialw(iloop)
LINK=lin(iloop)
if ( IALFW*LINK.ne.0 ) goto 6
7 write(*,*) ' Input: (IALFW, LINK)'
read (*,*,err=999) IALFW, LINK
6 write(*, ' (1h ,6hIALFW=, i3, 7h, LINK=, i3)') IALFW, LINK
open (2, file=' ')
2 read (1,*,end=3,err=2) (idata(i), i=1, imax), (rdata(i), i=1, rmax)
+
, idummy
if ( (idata(1).ne. IALFW).or. (idata(3).ne.LINK) ) goto 2
c tm(s), t(C), p(kg/m2->kg/mm2), h(kcal/m2hC-kcal/mmsC))
tm = rdata(1)
t = rdata(8)
p = rdata(4)/XP
h = rdata(9)/XH
if ( idata(2).ne.0 ) goto 4
reft = t

```

```

      refp = p
      refh = h
      write(*,5000)
      write(2,6200)
      write(*,6000) idata(1), idata(3), tm, t, p, h, tm, t, p, h
      write(2,6100) tm, t, p, h, tm, t, p, h
      goto 2
4     write(*,6000) idata(1), idata(3), tm, t, p, h,
+    tm, t-reft, p-refp, h-refh
      write(2,6100) tm, t, p, h, tm, t-reft, p-refp, h-refh
      reft = t
      refp = p
      refh = h
      goto 2
3     rewind (1)
      close (2)
      goto 1
c
999  stop
5000 format(1h , ' IA', ' L ',
+ 2(' TIM(s)', ' T(C)', ' P(kg/mm2) ', 'H(kc/mm2sC)'))
6000 format(1h , i3, i3, 2(0pf7.1, 0pf7.1, 1pe11.3, 1pe11.3))
6100 format(2(0pf7.1, 0pf7.1, 1pe11.3, 1pe11.3))
6200 format('  TIME', '  TEMP', '    PRES', '    HTC',
+          '  TIME', '  DTEMP', '    DPRES', '    DHTC')
      end
c---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7--

```