

JAERI-Tech

98-010



Alloy800Hのクリープ特性

1998年3月

橋 勝美・西 宏・衛藤基邦・武藤 康

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

A 1 1 o y 8 0 0 H のクリープ特性

日本原子力研究所東海研究所材料研究部
橋 勝美・西 宏・衛藤 基邦・武藤 康

(1998年2月5日受理)

熱化学法による水素製造プロセスの材料として期待されている鉄基耐熱合金A 1 1 o y 8 0 0 Hについて、700°C、800°C、850°C、900°C及び950°Cの温度で、大気中、応力一定の条件下でのクリープ試験を行い、クリープ曲線、最小クリープひずみ速度、3次クリープ開始時間、クリープ破断時間等に関するデータを取得した。本合金については、金属材料技術研究所や米国においてクリープ破断試験が実施され、データが取得されているが、これらの試験はいずれも荷重一定の条件下で実施されたものである。強度設計において非弾性解析を行うにはクリープ構成式が必要になるが、この目的には荷重一定よりも応力一定のクリープ試験データが望まれる。それ故、応力一定の条件下でクリープデータを取得し、クリープ構成式作成の基礎資料とすることとした。

試験の結果、本試験に供した素材については、クリープ曲線が応力50 MPaを境として、より高応力では通常の1次+2次+3次クリープ特性を示すが、より低応力では、1次クリープの殆ど見られない特異な挙動を示すことが分った。したがって、クリープ構成式を作成する際には応力50 MPaを境として異なる方程式形式を採用する必要がある。クリープ曲線形状が特異であるにも拘わらず、適当な前提の下で算出した最小ひずみの値は非常に長時間の場合を除き、両対数グラフ上で良く直線に載っている。また、クリープ破断時間についても同様に良好な直線近似が可能であることが明らかにされた。800~900°Cで古典的なクリープ特性を示す場合についてGarofaloの式によりほぼ定式化可能であることを確認した。非古典的なクリープ領域については、指数関数が適切であると判断されたが、クリープデータそのもののばらつきが非常に大きいため、定式化は困難であった。

Creep Characteristics of Alloy 800H

Katsumi TACHIBANA, Hiroshi NISHI, Motokuni ETO and Yasushi MUTO

Department of Materials Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 5, 1998)

Creep tests of Alloy 800H have been carried out under the constant stress condition in the atmosphere, which is a leading candidate material for a thermochemical hydrogen production process. Test data of creep curve, minimum creep strain rate, onset of tertiary creep and time to creep rupture were obtained. Although many data of the alloy have been taken at the National Research Institute of Metals and in the United States, so far the tests were conducted under the constant load condition. When we try an inelastic analysis based structural design, the creep constitutive equation is mandatory. However, the data obtained under the constant load tests are not adequate for this objective. Therefore, the tests under the constant stress were implemented to obtain the basic data for the constitutive equation.

As results of tests, it has been observed that creep curves can be differentiated into the typical classical shape, that is, $1\gamma_t + 2\gamma_y + 3\gamma_r$ creep, above 50 MPa on one hand and into a non-classical shape below 50MPa on the other hand. Therefore different types of equations are needed above and below this stress. Though the creep curves showed different shapes, the relations between the minimum creep rates and stresses were fitted well by the straight lines on the logarithmic-logarithmic chart. Similarly, the same kind of characteristic was observed for the time to creep rupture. It was ascertained that creep curves could be represented by the Garofalo equation well in the classical creep regime at 800 to 900°C. As for the non-classical creep regime, an exponential function was revealed to be suitable, but the formulation was difficult due to the wide scattering of creep data themselves.

Keywords: Alloy 800H, Heat Resisting Alloy, Creep Characteristics, Creep Curve, Creep Strength, Minimum Strain Creep Rate, Creep Constitutive Equation, Microstructural Examination

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 供試材料	2
2.2 試験装置及び試験方法	2
3. 実験結果及び考察	6
3.1 クリープ破断	6
3.2 クリープ変形	6
3.3 破断面の金属組織検査	9
4. クリープ構成式	58
4.1 古典的クリープ曲線の場合	58
4.2 非古典的クリープ曲線の場合	59
5. まとめ	106
参考文献	107

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Method	2
2.1 Tested Material	2
2.2 Test Apparatus and Testing Method	2
3. Experimental Results and Discussions	6
3.1 Creep Rupture	6
3.2 Creep Deformation	6
3.3 Microstructure of Ruptured Specimens	9
4. Creep Constitutive Equation	58
4.1 A Case of Classical Creep Behavior	58
4.2 A Case of Non-classical Creep Behavior	59
5. Summary	106
References	107

This is a blank page.

L i s t o f T a b l e s

- Table 2.1 Chemical Composition of Tested Alloy 800H.
Table 2.2 Mechanical Properties of As-received Alloy 800H.
Table 3.1 Creep Test Results.
Table 3.2 Instantaneous Strain.
Table 3.1 Prediction of Minimum Creep Strain Rate.

L i s t o f F i g u r e s

- Fig. 2.1 Microstructure of as-received material.
- Fig. 2.2 Creep test specimen of ϕ 6 in diameter.
- Fig. 2.3 Creep test specimen of ϕ 10 in diameter.
- Fig. 2.4 Cutting plan of creep test specimens.
- Fig. 3.1 Temperature and stress dependence of creep rupture strength.
- Fig. 3.2 Temperature dependence of parameter A_R .
- Fig. 3.3 Creep-rupture elongation versus time to rupture.
- Fig. 3.4 Reduction in area versus time to rupture.
- Fig. 3.5 Creep curve and creep strain rate for 85 MPa at 700°C.
- Fig. 3.5 Creep curve and creep strain rate for 85 MPa at 700°C.
- Fig. 3.6 Creep curve and creep strain rate for 110 MPa at 700°C.
- Fig. 3.7 Creep curve and creep strain rate for 125 MPa at 700°C.
- Fig. 3.8 Creep curve and creep strain rate for 160 MPa at 700°C.
- Fig. 3.9 Creep curve and creep strain rate for 200 MPa at 700°C.
- Fig. 3.10 Creep curve and creep strain rate for 260 MPa at 700°C.
- Fig. 3.11 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 800°C.
- Fig. 3.12 Creep curve and creep strain rate for 60 MPa at 800°C.
- Fig. 3.13 Creep curve and creep strain rate for 70 MPa at 800°C.
- Fig. 3.14 Creep curve and creep strain rate for 70 MPa at 800°C.
- Fig. 3.15 Creep curve and creep strain rate for 88 MPa at 800°C.
- Fig. 3.16 Creep curve and creep strain rate for 100 MPa at 800°C.
- Fig. 3.17 Creep curve and creep strain rate for 120 MPa at 800°C.
- Fig. 3.18 Creep curve and creep strain rate for 150 MPa at 800°C.
- Fig. 3.19 Creep curve and creep strain rate for 38 MPa at 850°C.
- Fig. 3.20 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 850°C.
- Fig. 3.21 Creep curve and creep strain rate for 65 MPa at 850°C.
- Fig. 3.22 Creep curve and creep strain rate for 75 MPa at 850°C.
- Fig. 3.23 Creep curve and creep strain rate for 90 MPa at 850°C.
- Fig. 3.24 Creep curve and creep strain rate for 110 MPa at 850°C.
- Fig. 3.25 Creep curve and creep strain rate for 24 MPa at 900°C.
- Fig. 3.26 Creep curve and creep strain rate for 25 MPa at 900°C.
- Fig. 3.27 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 900°C.

- Fig. 4.10 Primary creep strain rate vs. time for 65MPa at 900°C.
- Fig. 4.11 Primary creep strain rate vs. time for 78MPa at 900°C.
- Fig. 4.12 Temperature and stress dependence of parameter ϵ_t .
- Fig. 4.13 Temperature and stress dependence of parameter r .
- Fig. 4.14 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 70MPa at 800°C.
- Fig. 4.15 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 88MPa at 800°C.
- Fig. 4.16 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 100MPa at 800°C.
- Fig. 4.17 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 120MPa at 800°C.
- Fig. 4.18 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 150MPa at 800°C.
- Fig. 4.19 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 65MPa at 850°C.
- Fig. 4.20 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 75MPa at 850°C.
- Fig. 4.21 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 90MPa at 850°C.
- Fig. 4.22 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 110MPa at 850°C.
- Fig. 4.23 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 65MPa at 900°C.
- Fig. 4.24 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 78MPa at 900°C.
- Fig. 4.25 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 800°C.
- Fig. 4.26 Creep strain rate vs. time for 38MPa at 850°C.
- Fig. 4.27 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 850°C.
- Fig. 4.28 Creep strain rate vs. time for 24MPa at 900°C.
- Fig. 4.29 Creep strain rate vs. time for 25MPa at 900°C.
- Fig. 4.30 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 900°C.
- Fig. 4.31 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 900°C.
- Fig. 4.32 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 900°C.

- Fig. 3.28 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 900°C.
Fig. 3.29 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 900°C.
Fig. 3.30 Creep curve and creep strain rate for 65 MPa at 900°C.
Fig. 3.31 Creep curve and creep strain rate for 78 MPa at 900°C.
Fig. 3.32 Creep curve and creep strain rate for 20 MPa at 950°C.
Fig. 3.33 Creep curve and creep strain rate for 24 MPa at 950°C.
Fig. 3.34 Creep curve and creep strain rate for 29 MPa at 950°C.
Fig. 3.35 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 950°C.
Fig. 3.36 Creep curve and creep strain rate for 45 MPa at 950°C.
Fig. 3.37 Creep curve and creep strain rate for 58 MPa at 950°C.
Fig. 3.38 Stress dependence of creep curve at 700°C.
Fig. 3.39 Stress dependence of creep curve at 800°C.
Fig. 3.40 Stress dependence of creep curve at 850°C.
Fig. 3.41 Stress dependence of creep curve at 900°C.
Fig. 3.42 Stress dependence of creep curve at 950°C.
Fig. 3.43 Temperature and stress dependence of the **minimum** creep rate.
Fig. 3.44 Temperature dependence of parameter A_E .
Fig. 3.45 Relationship between the time to rupture and the **minimum** creep rate.
Fig. 3.46 Temperature and stress dependence of the time to the onset of tertiary creep.
Fig. 3.47 Microstructure of ruptured specimens at 700°C.
Fig. 3.48 Microstructure of ruptured specimens at 800°C.
Fig. 3.49 Microstructure of ruptured specimens at 850°C.
Fig. 3.50 Microstructure of ruptured specimens at 900°C.
Fig. 3.51 Microstructure of ruptured specimens at 950°C.
Fig. 4. 1 Primary creep strain rate vs. time for 70MPa at 800°C.
Fig. 4. 2 Primary creep strain rate vs. time for 88MPa at 800°C.
Fig. 4. 3 Primary creep strain rate vs. time for 100MPa at 800°C.
Fig. 4. 4 Primary creep strain rate vs. time for 120MPa at 800°C.
Fig. 4. 5 Primary creep strain rate vs. time for 150MPa at 800°C.
Fig. 4. 6 Primary creep strain rate vs. time for 65MPa at 850°C.
Fig. 4. 7 Primary creep strain rate vs. time for 75MPa at 850°C.
Fig. 4. 8 Primary creep strain rate vs. time for 90MPa at 850°C.
Fig. 4. 9 Primary creep strain rate vs. time for 110MPa at 850°C.

- Fig. 4.33 Creep strain rate vs. time for 20MPa at 950°C.
- Fig. 4.34 Creep strain rate vs. time for 24MPa at 950°C.
- Fig. 4.35 Creep strain rate vs. time for 29MPa at 950°C.
- Fig. 4.36 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 950°C.
- Fig. 4.37 Creep strain rate vs. time for 45MPa at 950°C.
- Fig. 4.38 Temperature and stress dependence of a parameter C_E .
- Fig. 4.39 Temperature dependence of a parameter F.
- Fig. 4.40 Temperature and stress dependence of a parameter γ .
- Fig. 4.41 Temperature dependence of a parameter H.
- Fig. 4.42 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 800°C.
- Fig. 4.43 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 38MPa at 850°C.
- Fig. 4.44 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 850°C.
- Fig. 4.45 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 24MPa at 900°C.
- Fig. 4.46 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 25MPa at 900°C.
- Fig. 4.47 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 900°C.
- Fig. 4.48 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 900°C.
- Fig. 4.49 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 900°C.
- Fig. 4.50 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 20MPa at 950°C.
- Fig. 4.51 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 24MPa at 950°C.
- Fig. 4.52 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 29MPa at 950°C.
- Fig. 4.53 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 950°C.
- Fig. 4.54 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 45MPa at 950°C.

This is a blank page.

1. 緒 言

Alloy 800Hは米国での名称であり、我が国のJIS規格（JIS 4901～4904）ではニッケルクロム鉄合金と呼ばれているニッケル約30%、クロム約20%、鉄50%弱の組成の鉄基合金である。ステンレス鋼に比べると高温強度が高く、また、ハステロイXやインコネル617などのNi基耐熱合金と比較すると大型のインゴットを製造出来て、かつ遙かに安価であることから、蒸気発生器の伝熱管などの高温構造物に広く用いられている。現在、建設中の高温工学試験研究炉（HTTR）においても、50%以上のニッケルを含む通常の耐熱合金と比較するとニッケル含有量が少なく、したがって照射損傷を受けにくくことから制御棒被覆管材料として¹⁾使用されている。また、硫酸環境下で良好な耐食性を示すことから、IS法などの熱化学法による水素製造プロセスの基本材料として考えられている。

Alloy 800Hの高温強度に関しては、米国ASMEのCODE CASE N-47²⁾に1400F（=760°C）までの許容応力値が掲載されている。また、恐らくこのバックデータとなったと思われる資料としてORN研究所の報告³⁾がある。我が国では金属材料技術研究所の試験データ⁴⁾及びHTTRの制御棒被覆管の許容応力値を定めるために取得された試験データ^{5), 6)}がある。

しかし、高温構造物の強度設計を非弾性解析に基づいて行うためにはクリープ構成式が必要になるが、金属材料技術研究所や米国におけるクリープ試験データは荷重一定の条件下で取得されたものである。ボイラのような荷重制御型の構造物ではこの条件が適切であるが、主として熱応力のようなひずみ制御型の荷重を受ける構造物を考えると、クリープ変形により板厚が減少するわけではないので、応力一定の条件下で得られたデータに基づいてクリープ構成式を作成すべきであると考える。また、CODE CASE N-47の許容応力値は760°CまでであるがISプロセスでは950°Cまでの特性が必要である。更に、耐熱合金のクリープ特性は、製造メーカーや製品の種類によっても影響される。このような状況を踏まえて、我が国のメーカーの大型鍛造品から試験片を採取し、応力一定の条件下でクリープ試験を実施し、クリープ構成式作成の基礎データとすることとした。

試験は、温度700°C、800°C、850°C、900°C及び950°Cの大気中で実施した。以下に、試験材料、試験方法、クリープ曲線、最小クリープひずみ速度、3次クリープ開始時間、クリープ破断時間、光学顕微鏡による金属組織等の試験結果及び暫定的に作成したクリープ構成式について記す。

データ整理の結果、本試験に供した素材については、クリープ曲線が応力50MPaを境として、より高応力では通常の1次+2次+3次クリープ特性を示すが、より低応力では、1次クリープの殆ど見られない特異な挙動を示すことが分った。クリープ曲線形状が特異であるにも拘わらず、適当な前提の下で算出した最小ひずみ速度の値は非常に長時間の場合を除き、両対数グラフ上で良く直線に載っている。また、クリープ破断時間についても同様に良好な直線近似が可能であることが明らかにされた。破断試験片の近傍3カ所で光学顕微鏡による金属組織を行ったが、温度、応力による違いは認められなかった。クリープ構成式については、50MPa以上の高応力側で典型的なクリープ特性を示す800～950°CのケースについてはGarofaloの式で定式化できたが、700°Cや低応力側のケースについては定式化が困難であった。

2. 実験方法

2. 1 供試材料

供試材料のA11oy800Hは、日本ステンレス（株）製でヒート番号F0627、チャージ番号12CL063の $\phi 126\text{ mm} \times \text{長さ } 600\text{ mm}$ の円柱材である。Table 2. 1にその化学成分を示す。

製造方法はJIS G 4901「耐食耐熱超合金棒」のNCF800Hに基づいて実施された。熱処理条件は1170°Cで固溶化熱処理後、水冷却した。結晶粒度はASTM No. 3を目標として製造したが、供試材の平均結晶粒径は $150\text{ }\mu\text{m}$ (ASTM No. 2. 5) であった。素材購入時の室温下における機械特性試験結果をTable 2. 2に示す。Fig. 2. 1に受け入れ材の金属組織を示す。

クリープ試験片は、Fig. 2. 2に示す平行部の直径が6 mm、標点間距離が32 mmの丸棒試験片と、Fig. 2. 3に示す平行部の直径が10 mm、標点間距離が52 mmの丸棒試験片の2種類を使用した。これらの円柱素材からの採取位置をFig. 2. 4に示す。試験の結果、試験片寸法による相違は特に認められなかった。

2. 2 試験装置及び試験方法

クリープ試験は、電気抵抗加熱方式の電気炉を備えたレバー比10対1または2対1のレバーハンドクリープ試験機を用いて大気中で実施した。試験片のクリープ伸びは、試験片標点間の伸びを2対のエクステンションロッドで炉外に取り出し、精度 $1/1000\text{ mm}$ の差動トランス型変位計で測定し、2対の指示値の平均値を伸びの値とした。試験温度は、試験片の標点間の上部、中央、下部に取り付けた3本のR熱電対により測定した。上下間の温度の差は、最大 2°C 以下であった。

測定したクリープ変形量から、クリープ変形の際には体積が一定に保たれることを用い、かつ標点間の変形が一様であるとの仮定の下に断面積の変化を計算で求め、応力を一定にするような荷重の値を算出した。分銅の大きさを細かく分けて、最小単位を50 gとし、クリープ変形の進行に合わせて分銅を取り去る方法により、0.5%以内の精度で応力一定の条件を実現した。

Table 2.1 Chemical Composition of Tested Alloy 800H

Check Analysis (in%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Fe
0.07	0.39	0.98	0.011	0.002	19.95	31.12	0.25	0.20	0.50	Bal.

Table 2.2 Mechanical Properties of As-received Alloy 800H

Tests	Temperature °C	Mechanical Properties		
		0.2% Yield Stress MPa	Tensile Strength MPa	Elongation %
Tensile		189	515	54
		111	244	56
Hardness		HB		
		121		
Creep Rupture		Stress MPa	Time to Rupture h	
		113	110.3	

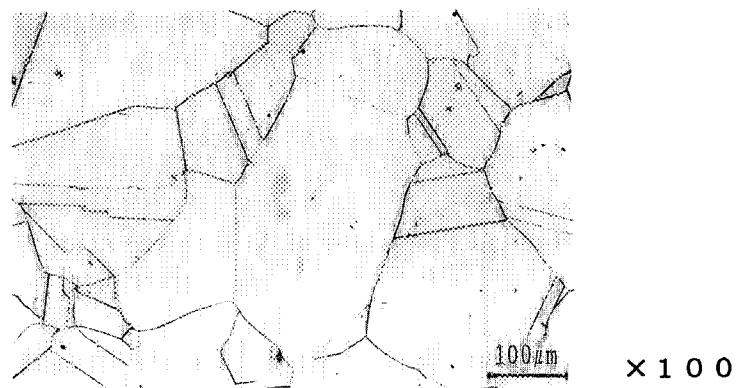


Fig. 2.1 Microstructure of as-received material.

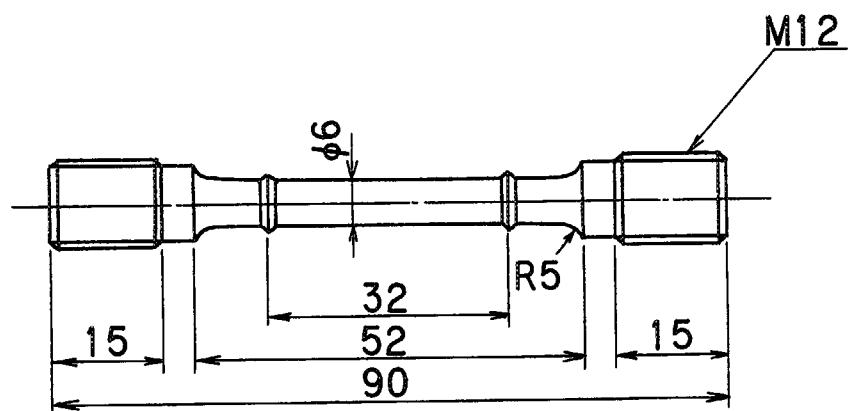


Fig. 2.2 Creep test specimen of $\phi 6$ in diameter.

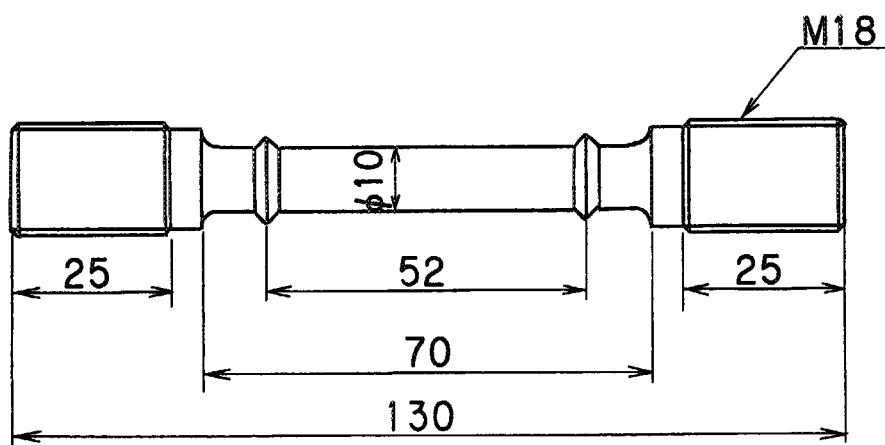


Fig. 2.3 Creep test specimen of $\phi 10$ in diameter.

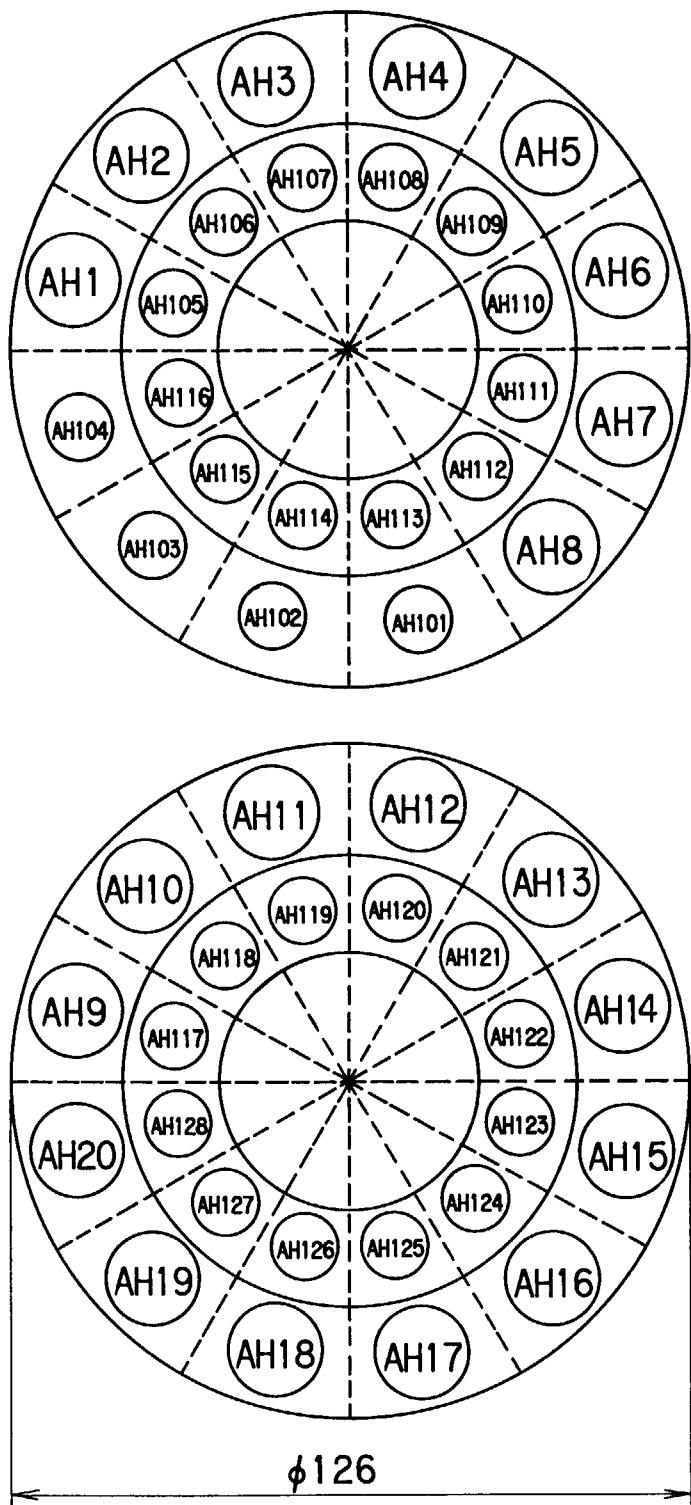


Fig. 2.4 Cutting plan of creep test specimens.

3. 実験結果及び考察

3. 1 クリープ破断

試験データの一覧をTable 3. 1に示す。ここで、800°Cの70MPa、900°Cの35MPaのケースについては、データの確認のため、再度試験を行ったものである。応力 σ (MPa) に対して破断時間 t_R (h) を両対数グラフ上にプロットするとFig. 3. 1のようになり、概ね良好に直線上に載る。最小自乗法により回帰線を引いて定式化すると以下の式を得る。

$$\begin{aligned} 700^{\circ}\text{C} \quad t_R &= 3.055 \times 10^{16} \sigma^{-6.506} \\ 800^{\circ}\text{C} \quad t_R &= 3.918 \times 10^{14} \sigma^{-6.461} \\ 850^{\circ}\text{C} \quad t_R &= 7.202 \times 10^{13} \sigma^{-6.480} \\ 900^{\circ}\text{C} \quad t_R &= 6.439 \times 10^{11} \sigma^{-5.792} \\ 950^{\circ}\text{C} \quad t_R &= 5.103 \times 10^{10} \sigma^{-5.622} \end{aligned}$$

応力 σ の指數の温度依存性を無視して定数であるものとし、これらの平均値をとって -6.2 とする。 $t_R = A_R \sigma^{-6.2}$ とおいて、再度 A_R の値を求めプロットするとFig. 3. 2のようになり、温度依存性はArrheniusの式で近似出来ることが分る。結局、破断時間の応力及び温度依存性は次式で表されることになる。

$$t_R = 7.78 \times 10^{-6} \exp(47200/T) \times \sigma^{-6.2} \quad (3.1)$$

ここで、 t_R : クリープ破断時間 (h)

T : 絶対温度 (K)

クリープ破断伸びと破断時間の関係をFig. 3. 3に示す。データにはばらつきはあるが、以下の傾向が読みとれる。

- i) 長時間側即ち、低応力になるにしたがいクリープ破断伸びが減少する。
- ii) 700°Cではクリープ破断伸びが比較的に小さく、温度が上昇するにしたがって増加するが、950°Cでは再び低下する。

長時間側でクリープ破断伸びが減少する傾向は耐熱合金で一般的に認められる傾向である。破断伸びの温度依存性については、HTTRで取得されたデータ⁵⁾でも温度依存性があることが報告されているが、傾向は逆に750°Cで最も大きく、850°C、950°Cと温度上昇に伴い減少している。

破断絞りと破断時間の関係をFig. 3. 4に示す。これについても全く同じ傾向が認められる。

3. 2 クリープ変形

試験で測定される伸びの値より、次式により真クリープひずみ $\epsilon_c(t)$ を計算して検討に使用した。

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_0 + \log_e \{ 1 + (\Delta L(t)/L_G) \} \quad (3.2)$$

ここで、

ΔL : 全伸び測定値

L_G : ゲージ長さ

ε_0 : 初期ひずみ

ここで、ゲージ長さ L_G としては、つば間の長さからつばの幅を差し引いた長さを使用した。初期ひずみ ε_0 の測定値を Table 3.2 に示す。これらの値は弾性ひずみに相当するものであるが、応力に対して図示すれば分るようにかなりばらついており、弾性ひずみ以外の誤差と考えるべきものも含まれている。また、誤差の他に、特に 700°C の高応力のケースでは塑性ひずみと考えられるものも含まれている。

次に、次式によりひずみ速度を計算した。この際、破断までの時間を 80~200 分割した時間 t に対する $\dot{\varepsilon}_c(t)$ 及び Δt の値を使用した。

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \{ \varepsilon_c(t + \Delta t) - \varepsilon_c(t) \} / \Delta t \quad (3.3)$$

以上のクリープひずみ $\varepsilon_c(t)$ 及びクリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_c(t)$ を試験時間に対しプロットした図を Fig. 3.5~Fig. 3.37 に示す。図は温度及び応力の小さい方から以下のように配列してある。

700°C	85 MPa (Fig. 3.5), 110 MPa (Fig. 3.6), 125 MPa (Fig. 3.7), 160 MPa (Fig. 3.8), 200 MPa (Fig. 3.9), 260 MPa (Fig. 3.10)
800°C	50 MPa (Fig. 3.11), 60 MPa (Fig. 3.12), 70 MPa (Fig. 3.13), 70 MPa (Fig. 3.14), 88 MPa (Fig. 3.15), 100 MPa (Fig. 3.16), 120 MPa (Fig. 3.17), 150 MPa (Fig. 3.18)
850°C	38 MPa (Fig. 3.19), 50 MPa (Fig. 3.20), 65 MPa (Fig. 3.21), 75 MPa (Fig. 3.22), 90 MPa (Fig. 3.23), 110 MPa (Fig. 3.24)
900°C	24 MPa (Fig. 3.25), 25 MPa (Fig. 3.26), 35 MPa (Fig. 3.27), 35 MPa (Fig. 3.28), 50 MPa (Fig. 3.29), 65 MPa (Fig. 3.30), 78 MPa (Fig. 3.31)
950°C	20 MPa (Fig. 3.32), 24 MPa (Fig. 3.33), 29 MPa (Fig. 3.34), 35 MPa (Fig. 3.35), 45 MPa (Fig. 3.36), 58 MPa (Fig. 3.37)

ここで、800°C、70 MPa 及び 900°C、35 MPa の条件では予測と異なる結果が得られたので再試験をして確認したものである。後者ではほぼ同じデータが得られたが、前者では全く異なるクリープ曲線が得られた。これから、試験片採取位置によるちょっとした組織の差によりクリープ挙動は大幅に変わることが知られる。これらの曲線を見ると、Fig. 3.14 のように典型的な 1 次 + 2 次 + 3 次クリープ曲線を示すものもあるが、Fig. 3.33 のように始めから 3 次クリープを思わせる曲線を示すもの、その他様々な形態のものがある。クリープ曲線の違いを観察し易くするために、時間 t を破断時間 t_R で規格化し、温度ごとにまとめて図示した。これらの図を Fig. 3.38~Fig. 3.42 に示す。

700°C : Fig. 3. 38
 800°C : Fig. 3. 39
 850°C : Fig. 3. 40
 900°C : Fig. 3. 41
 950°C : Fig. 3. 42

700°Cでは1次クリープ領域も3次クリープ領域も少なく定常クリープが大半の領域を占めている。800°Cでは高応力側では典型的な1次+2次+3次クリープ曲線を示しているが、低応力のケースでは時間と共にクリープ速度が増加する3次クリープ状の曲線が見られる。850°Cと900°Cでは高応力側と低応力側のクリープ曲線の差が顕著になる。950°Cでは程度の差こそあれ、全て3次クリープ状の曲線となっている。更に、曲線は応力の順序で並んでいるわけではなく、ばらつきが大きいことを示している。以上の観察から分るようにクリープ曲線の形状は様々であり、これらをまとめて定式化しようとすると非常な困難が予測される。

クリープ挙動を調べる場合、定常（最小）クリープひずみ速度のデータが重要である。典型的なクリープ曲線の場合にはこの値を容易にかつ十分な精度で求められる。その他の曲線の場合にはなかなか難しいが、3次クリープ状の時間軟化型の曲線を細かく観察すると、例えばFig. 3. 11を見ると、一端ひずみ速度が大きくなつた後、ひずみ速度の勾配が緩やかになりしばらくして再び急速に大きくなり破断に至っている。したがって、この曲線は2段階のクリープから構成されていると考えられる。本報告では、このような場合、常に2段目のひずみ速度の極小値を全体の最小ひずみ速度とすることにする。この場合、求めたひずみ速度の値は最小値にはならないが、ここでは通称にしたがい「最小クリープひずみ速度」の用語を用いた。このような求め方をすることにより、最小ひずみ速度=0というような事態を回避することができてクリープ変形挙動を考察する上で都合がよい。

この約束にしたがつて求めた最小ひずみ速度 ϵ_{\min} をTable 3. 3に示す。応力に対して両対数グラフ上にプロットするとFig. 3. 43を得る。ここで見かけ上、負荷直後から3次クリープ的な変形挙動を示す場合を塗りつぶした記号で表示した。これより以下の事項が明らかになる。

- i) 非常に低応力の場合を除き良好な直線関係が得られる。
- ii) 最小ひずみ速度の応力に対する勾配は800~900°Cで一定であり、700°Cではやや小さく、950°Cで再び小さくなる。
- iii) 負荷直後から3次クリープ的な変形挙動を示すのは応力50MPa以下の場合である。
- iv) 時間軟化型のクリープ曲線の場合には、細かく見ると、いずれの場合においても2段階のクリープが認められる。このような2段階クリープは金属材料技術研究所の試験結果⁴⁾でも観測されている。

$\log_e \epsilon_{\min} = \log_e A_E + B_E \log_e \sigma$ として定数 A_E 及び B_E を求める。 B_E の値は700°Cで5.87であり、800~900°Cでは一定で $B_E = 6.57$ である。 A_E の値を半対数グラフで絶対温度の逆数に対してプロットするとFig. 3. 44のようになり、温度依存性はArrheniusの式で良く表されることが分る。結局、最小ひずみ速度の応力及び温度依存性は次式で表されることになる

700°C:

$$\dot{\varepsilon}_{\min} = 1.66 \times 10^{-16} \sigma^{5.87} \quad (3.4)$$

800~950°C:

$$\dot{\varepsilon}_{\min} = 4.194 \times 10^4 \sigma^{6.57} \exp(-49300/T) \quad (3.5)$$

参考のため、クリープ破断時間と最小ひずみ速度の値を両対数グラフ上にプロットすると本材料の場合も Fig. 3. 45 に示すように直線関係が得られる (Monkman-Grant の関係)。

許容応力 S_t 値の決定に用いられる 3 次クリープ開始時間については、本報告の枠外であるが、クリープ曲線の多様性について考察する場合の参考になるとと考えデータ整理を試みた。クリープ曲線の図面上に示した点を両対数上に図示すると Fig. 46 のように時間軟化型の場合も含めてやはり直線近似が可能である。これらを式で表すと次のようになる。

$$700°C: t_3 = 2.246 \times 10^{15} \exp(-6.04\sigma) \quad (3.6)$$

$$800°C: t_3 = 1.751 \times 10^{14} \exp(-6.36\sigma) \quad (3.7)$$

$$850°C: t_3 = 3.553 \times 10^{13} \exp(-6.38\sigma) \quad (3.8)$$

$$900°C: t_3 = 1.376 \times 10^{12} \exp(-6.06\sigma) \quad (3.9)$$

$$950°C: t_3 = 1.045 \times 10^{11} \exp(-5.89\sigma) \quad (3.10)$$

3.3 破断面の金属組織検査

光学顕微鏡を用いて、各温度に対して低応力の場合と高応力の場合 1 ケースずつクリープ破断後の試験片の組織検査を行った。

Fig. 3.47~3.51 に破断部の縦断面組織を示す。写真は (a), (b) 及び (c) が低応力 (d), (e) 及び (f) が高応力である。観測位置は、破断部、約 5 mm 及び約 10 mm 内部に向けて入った位置の写真を (a), (b), (c) 及び (d), (e), (f) の順に並べてある。

一般的に見られるように、高温、低応力になるにしたがってボイドが多くなり、粒界破壊が顕著になる傾向が認められる。また、高応力側では結晶粒が大きく変形していることも分る。本材料の場合、クリープ変形挙動が多様であり、特に 50 MPa より低応力では時間とともにクリープ損傷速度が増加する損傷増加型のクリープ曲線が得られたが、これと金属組織との間には相関関係は認められない。例えば、低応力では内部までボイドが広がっているように見受けられるが、850°C, 38 MPa のケースでは内部には殆どボイドが認められない。

Table 3.1 Creep Test Results

Temperature °C	Stress MPa	Specimen		Time to Rupture h	Rupture Elongation %	Reduction in Area %	Rupture location
		No.	Size				
700	85	AH-117	φ6	3905.4	17.7	40.4	B
	110	AH-116	φ6	1538.9	21.1	37.0	B
	125	AH-114	φ6	561.1	19.4	39.9	B
	160	AH-120	φ6	258.8	28.8	33.6	B
	200	AH-115	φ6	40.2	29.3	43.2	B
	260	AH-119	φ6	6.02	30.8	38.6	A
800	50	AH-3	φ10	4354.5	22.1	46.7	B
	60	AH-125	φ6	1012.2	40.9	50.7	B
	70	AH-101	φ6	408.9	26.1	50.5	A
	70	AH-111	φ6	360.5	56.9	52.1	B
	88	AH-105	φ6	81.45	59.7	64.4	B
	100	AH-103	φ6	41.55	59.9	59.9	A ~ B
	120	AH-102	φ6	12.03	78.1	76.6	B
	150	AH-104	φ6	3.57	74.0	72.9	A ~ B
850	38	AH-4	φ10	4144.5	27.4	42.8	B
	50	AH-2	φ10	645.8	33.2	50.0	B
	65	AH-8	φ10	117.8	64.7	64.6	A
	75	AH-108	φ6	42.98	63.0	65.5	B
	90	AH-107	φ6	13.57	68.6	71.6	B
	110	AH-106	φ6	4.09	84.7	75.6	B
900	24	AH-124	φ6	9218.0	17.6	28.3	B
	25	AH-121	φ6	3531.8	25.0	29.1	B
	35	AH-112	φ6	654.1	56.3	60.2	B
	35	AH-109	φ6	630.5	44.6	50.6	A ~ B
	50	AH-6	φ10	89.58	35.8	64.8	B
	65	AH-113	φ6	19.17	66.3	66.1	B
	78	AH-110	φ6	6.68	81.3	69.1	A
950	20	AH-123	φ6	2153.3	32.0	35.4	B
	24	AH-13	φ10	852.5	20.5	29.9	B
	29	AH-12	φ10	342.8	17.9	39.3	B
	35	AH-9	φ10	136.9	30.1	43.6	B
	45	AH-10	φ10	25.93	58.3	56.2	B
	58	AH-11	φ10	5.00	55.4	69.5	B

Table 3.2 Instantaneous strain

Temperature °C	Specimen Number	Stress MPa	Instantaneous Strain %
700	AH-119	260	9.49
	AH-115	200	4.71
	AH-120	160	2.06
	AH-114	125	0.02
	AH-116	110	0.15
	AH-117	85	-0.19
800	AH-104	150	0.58
	AH-102	120	0.13
	AH-103	100	0.14
	AH-105	88	0.07
	AH-111	70	0.28
	AH-101	70	0.04
	AH-125	60	0.03
	AH-3	50	0.04
850	AH-106	110	0.17
	AH-107	90	-0.15
	AH-108	75	0.12
	AH-8	65	0.01
	AH-2	50	0.06
	AH-4	38	0.004
900	AH-110	78	0.21
	AH-113	65	0.79
	AH-6	50	0.05
	AH-112	35	0.67
	AH-109	35	-0.03
	AH-121	25	0.02
	AH-124	24	0.00
950	AH-11	58	0.08
	AH-10	45	0.05
	AH-9	35	0.04
	AH-12	29	0.02
	AH-13	24	-0.036
	AH-123	20	0.0

Table 3.3 Prediction of Minimum Creep Strain Rate

Temperature °C	Stress MPa	Specimen		Minimum Creep Strain Rate		Time to Rupture h
		No.	Size	$\dot{\epsilon}_{\min}$ %/h	Time h	
700	85	AH-117	φ 6	0.0030	1900	3905.4
	110	AH-116	φ 6	0.0097	1070	1538.9
	125	AH-114	φ 6	0.025	300	561.1
	160	AH-120	φ 6	0.054	100	258.8
	200	AH-115	φ 6	0.34	25.3	40.2
	260	AH-119	φ 6	2.4	3.25	6.02
800	50	AH-3	φ 6	0.0098	3900	4354.5
	60	AH-125	φ 6	0.027	620	1012.2
	70	AH-101	φ 6	0.068	190	408.9
	70	AH-111	φ 6	0.091	160	360.5
	88	AH-105	φ 6	0.38	45	81.45
	100	AH-103	φ 6	0.93	20.5	41.55
	120	AH-102	φ 6	3.1	7.8	12.03
	150	AH-104	φ 6	10.5	2.60	3.57
850	38	AH-4	φ 10	0.011	3660	4144.5
	50	AH-2	φ 10	0.055	425	645.8
	65	AH-8	φ 10	0.32	80	117.8
	75	AH-108	φ 6	0.82	30	42.98
	90	AH-107	φ 6	2.4	9.67	13.57
	110	AH-106	φ 6	9.7	3.00	4.09
900	24	AH-124	φ 6	0.0011	6800	9218.0
	25	AH-121	φ 6	0.0047	3150	3531.8
	35	AH-112	φ 6	0.0061	560	654.1
	35	AH-109	φ 6	0.0069	500	630.5
	50	AH-6	φ 10	0.0052	62	89.58
	65	AH-113	φ 6	1.85	13.0	19.17
	78	AH-110	φ 6	5.61	4.2	6.68
950	20	AH-123	φ 6	0.0058	2060	2153.5
	24	AH-13	φ 10	0.088	760	852.5
	29	AH-12	φ 10	0.151	310	342.8
	35	AH-9	φ 10	0.42	109	136.9
	45	AH-10	φ 10	1.62	17.7	25.93
	58	AH-11	φ 10	6.5	3.5	5.00

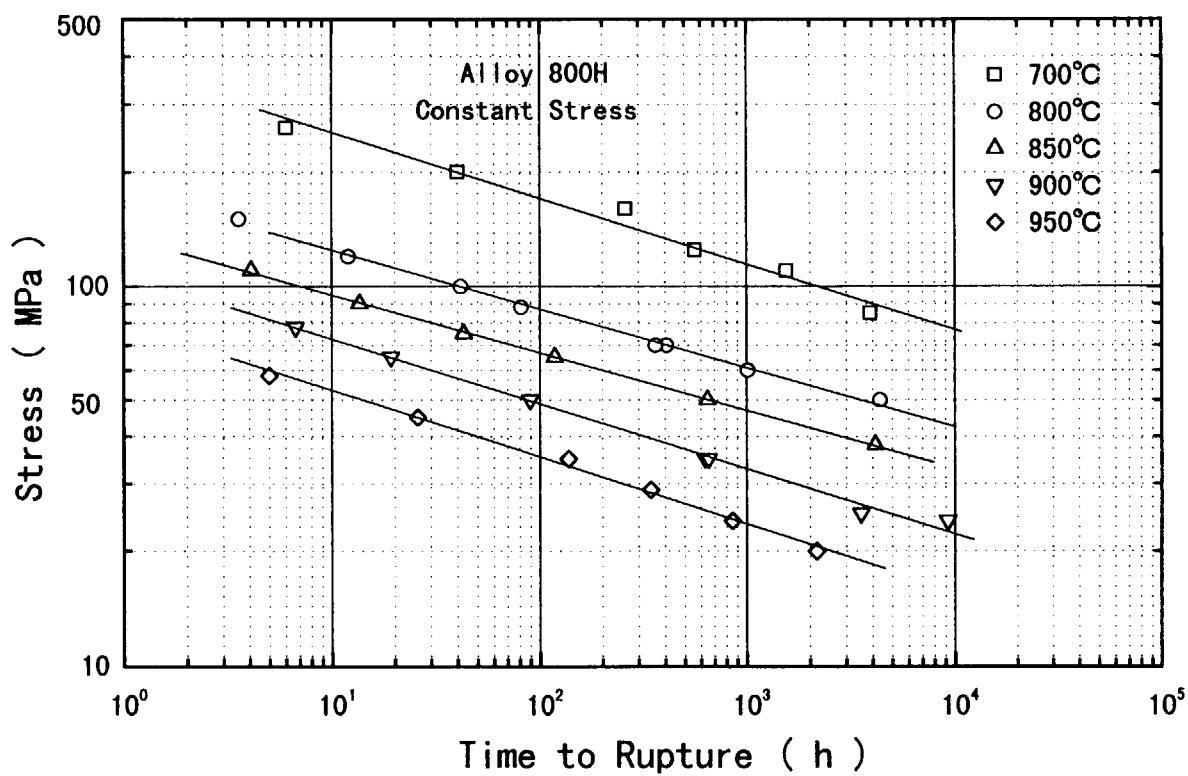
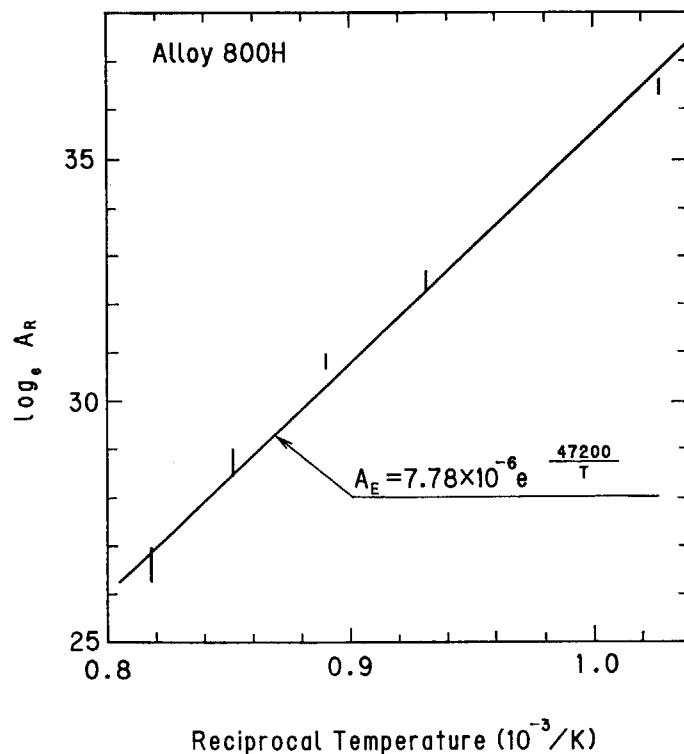


Fig. 3.1 Temperature and stress dependence of creep rupture strength.

Fig. 3.2 Temperature dependence of parameter A_R.

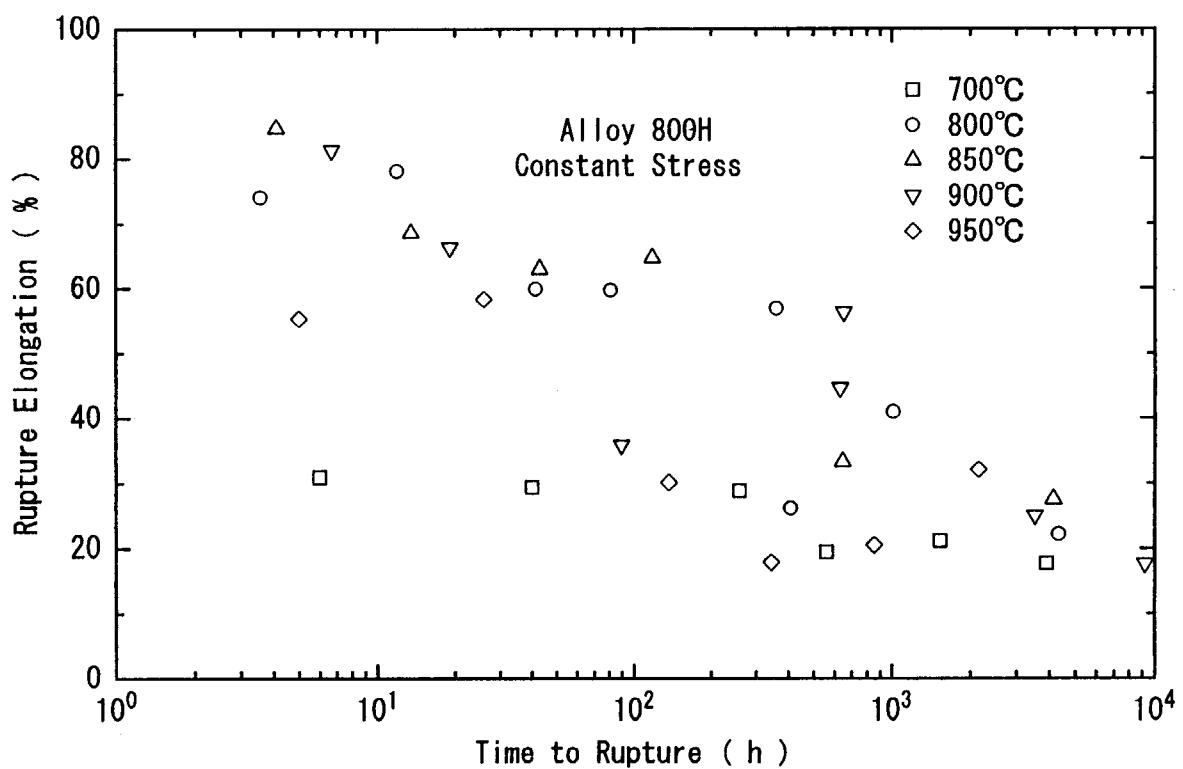


Fig. 3.3 Creep-rupture elongation versus time to rupture.

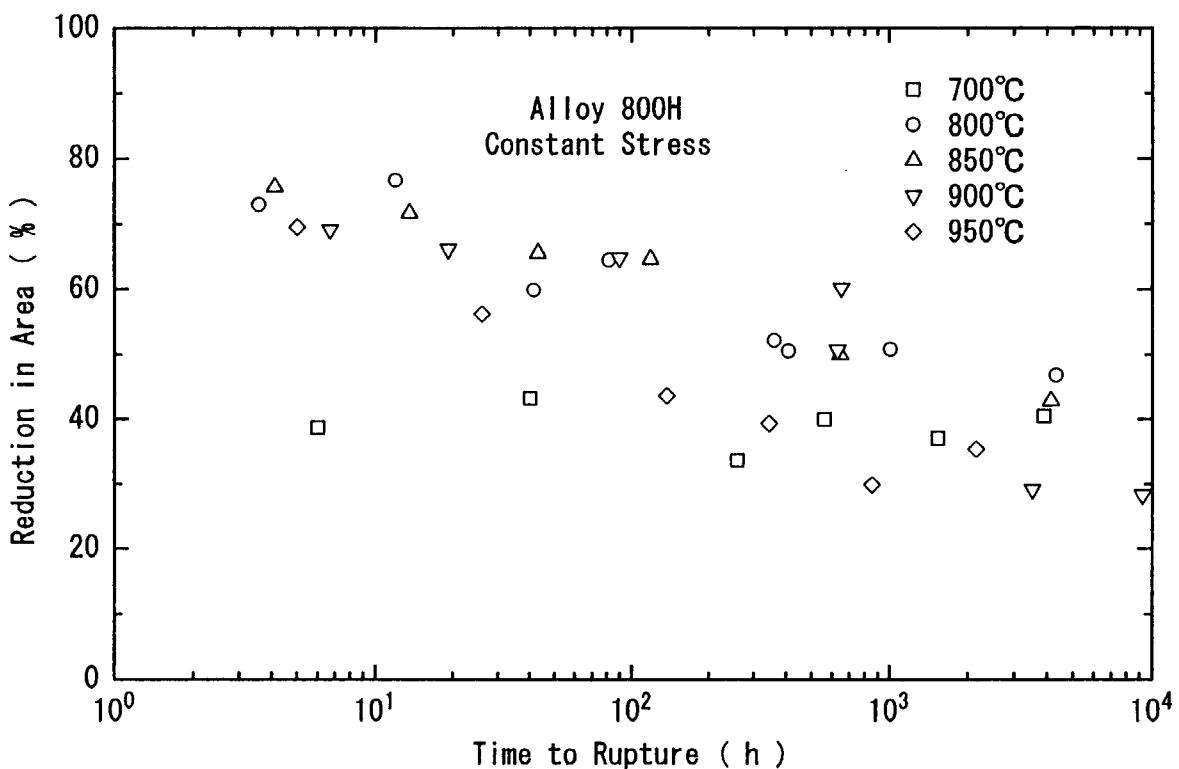


Fig. 3.4 Reduction in area versus time to rupture.

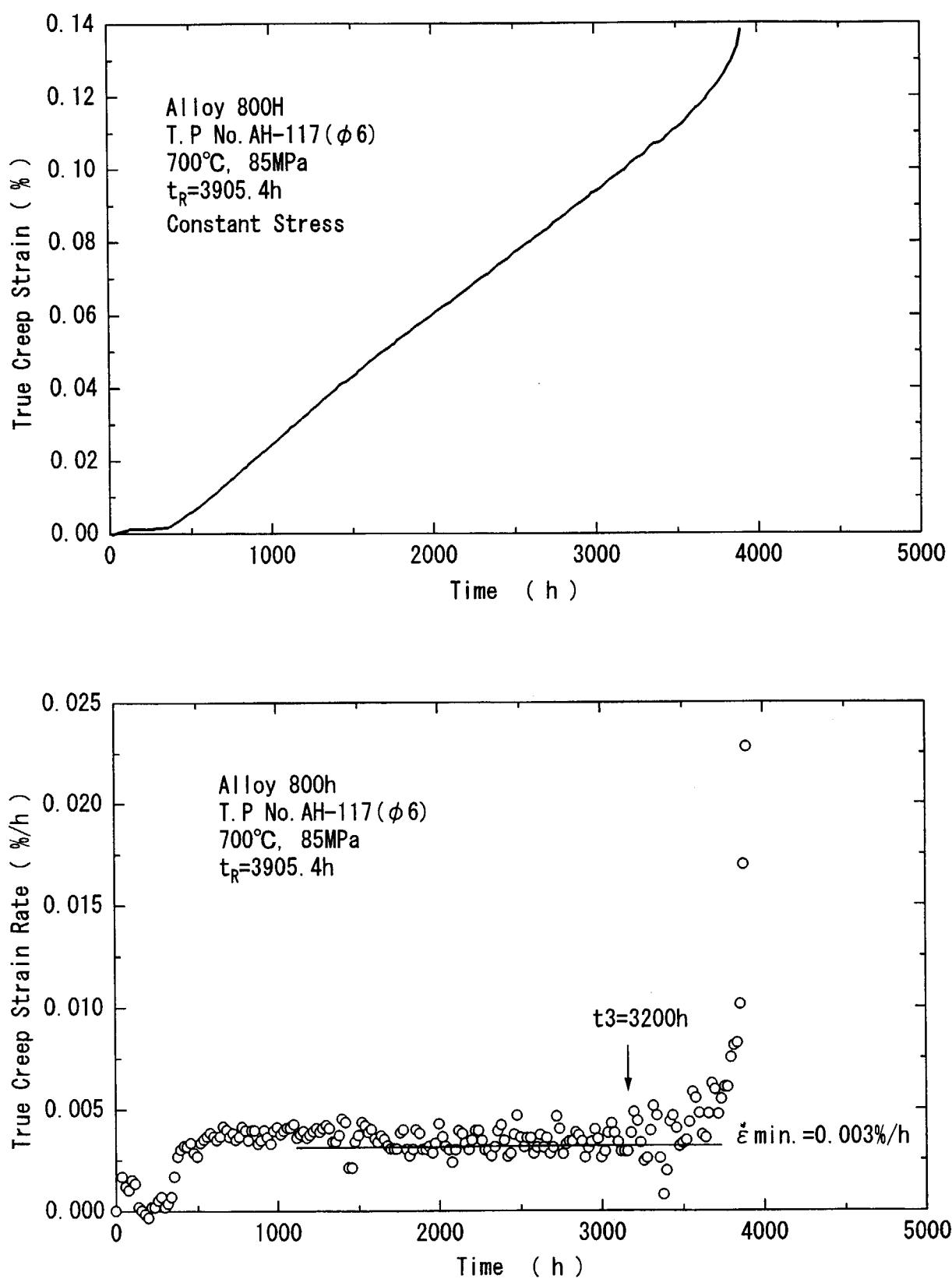


Fig. 3.5 Creep curve and creep strain rate for 85 MPa at 700°C.

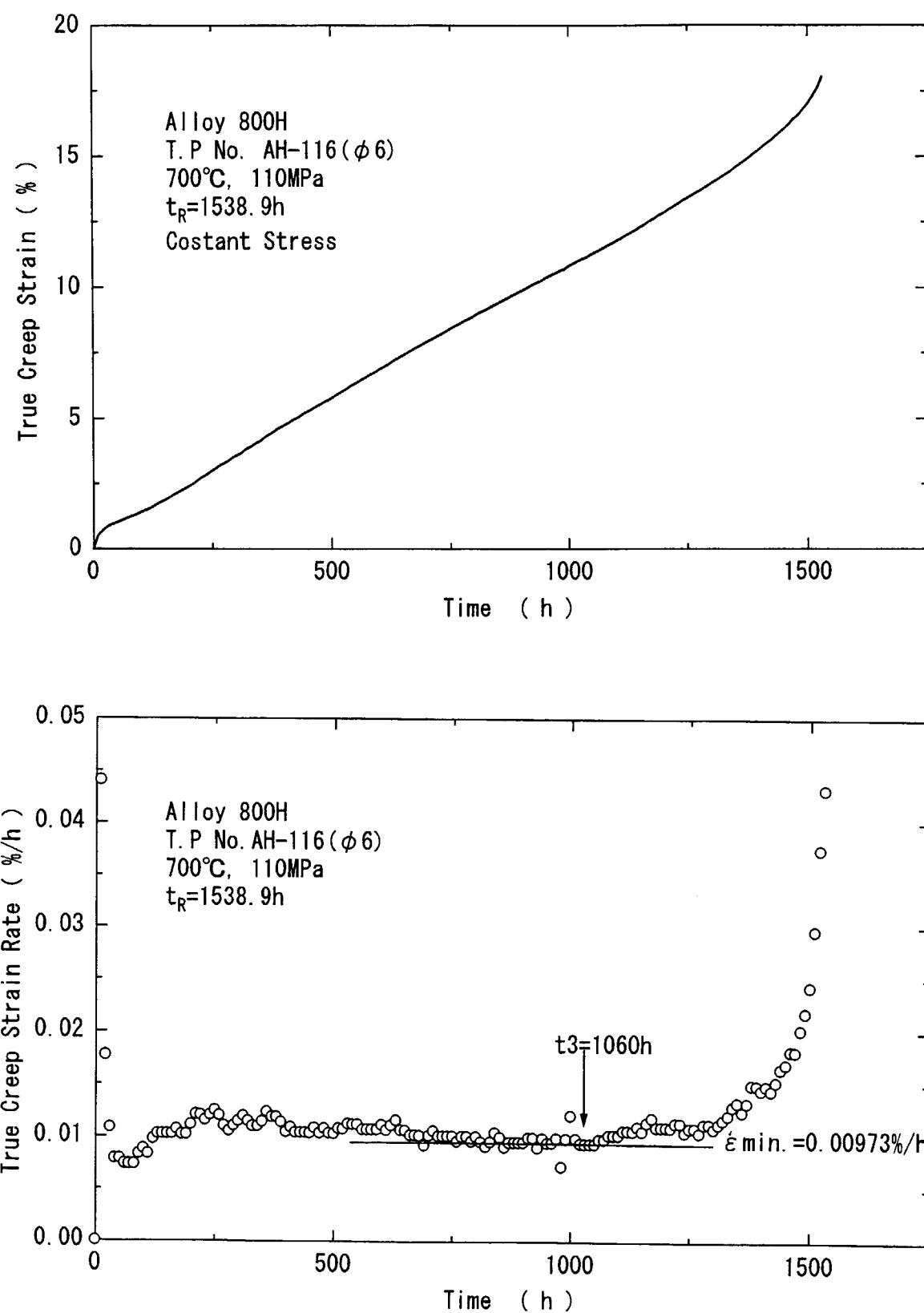


Fig. 3.6 Creep curve and creep strain rate for 110 MPa at 700°C.

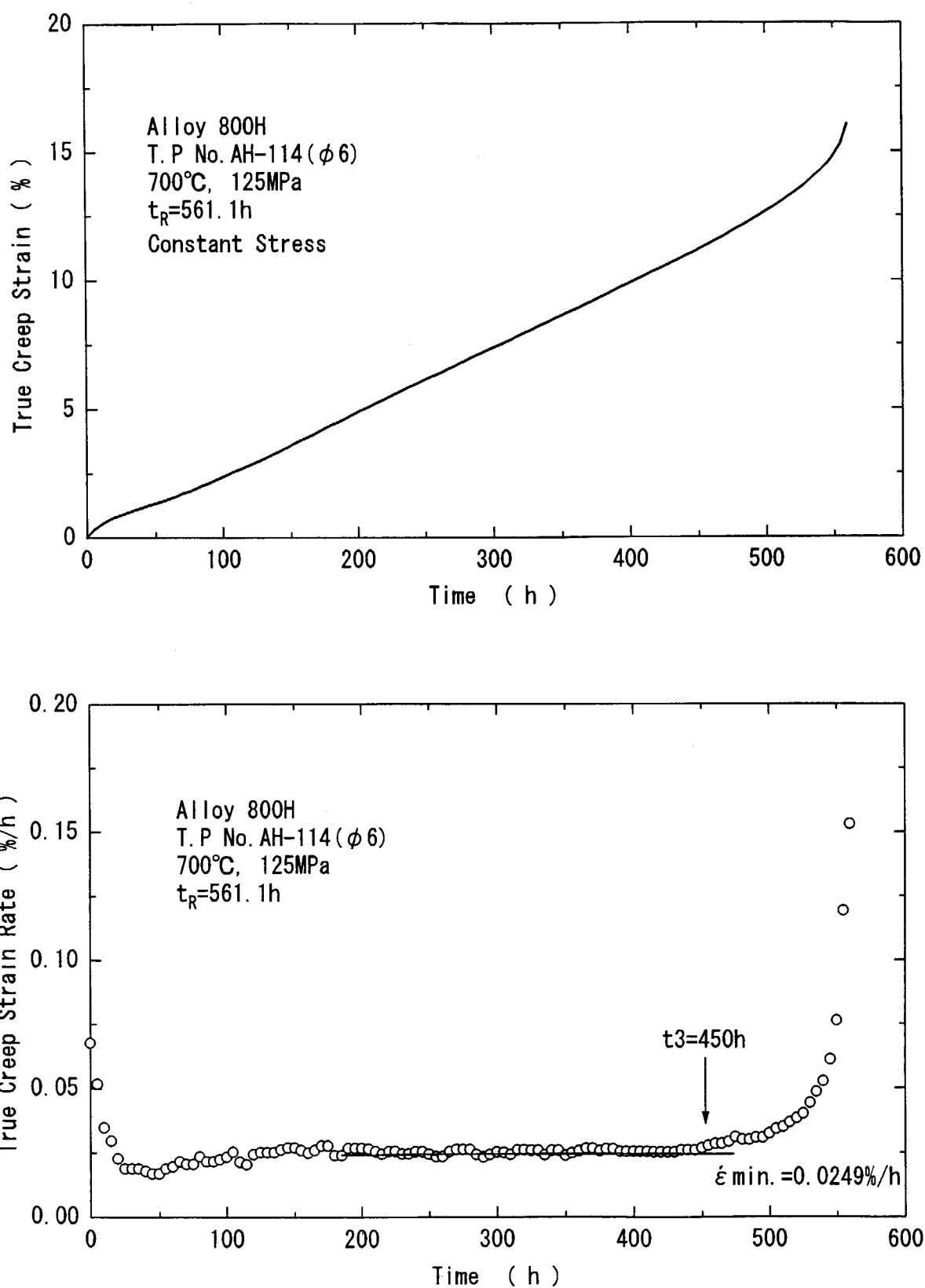


Fig. 3.7 Creep curve and creep strain rate for 125 MPa at 700°C.

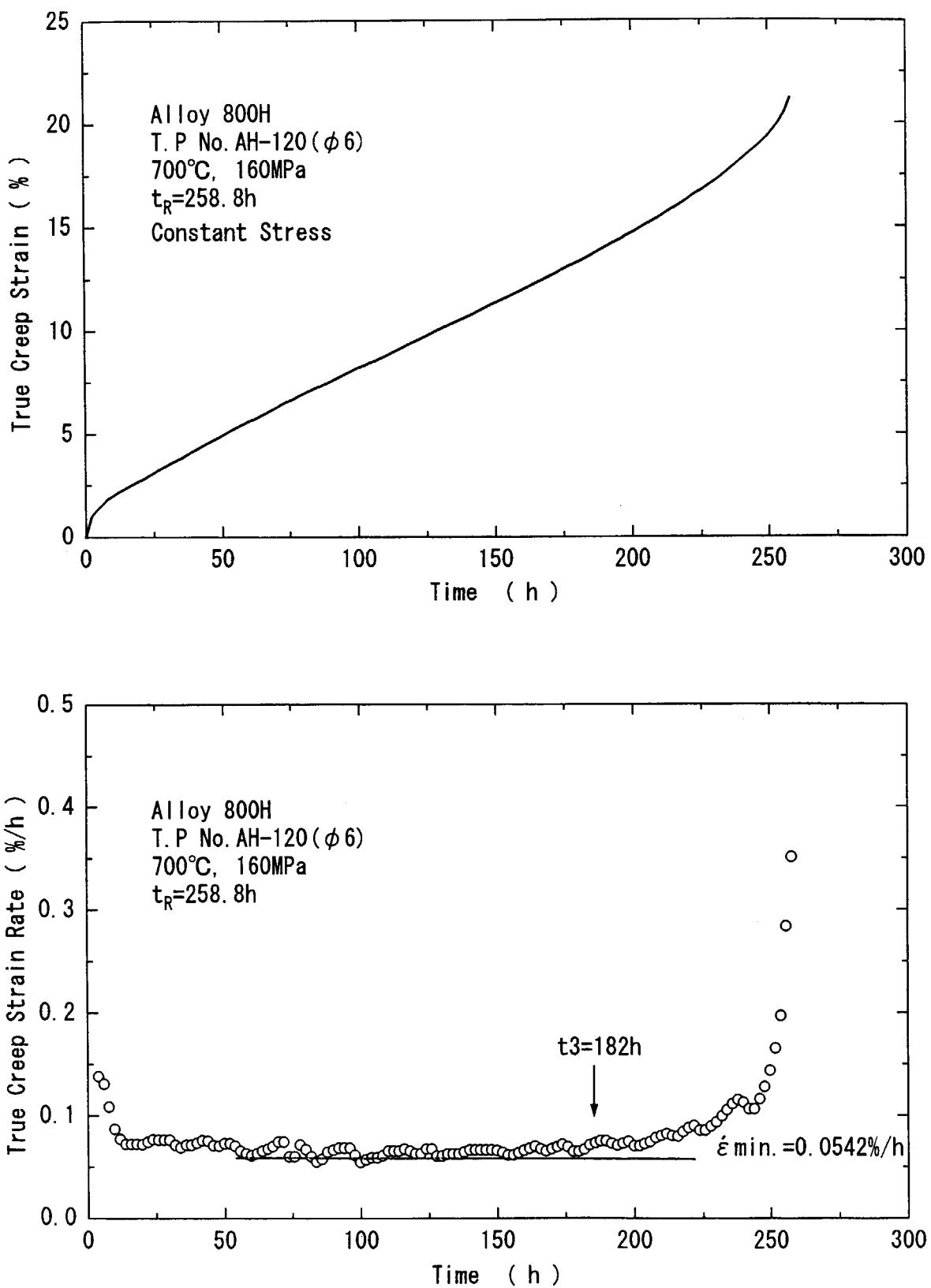


Fig. 3.8 Creep curve and creep strain rate for 160 MPa at 700°C.

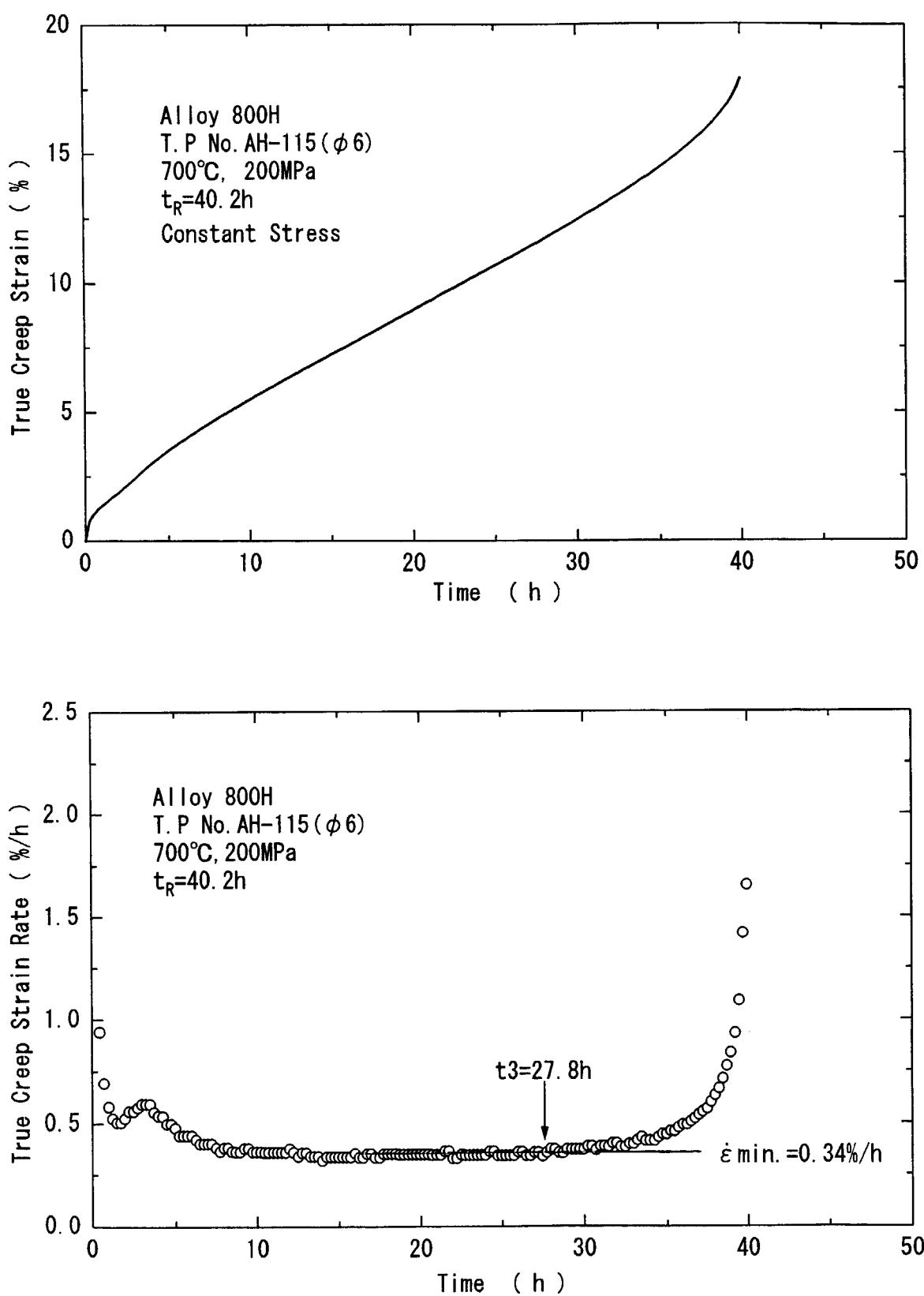


Fig. 3.9 Creep curve and creep strain rate for 200 MPa at 700°C.

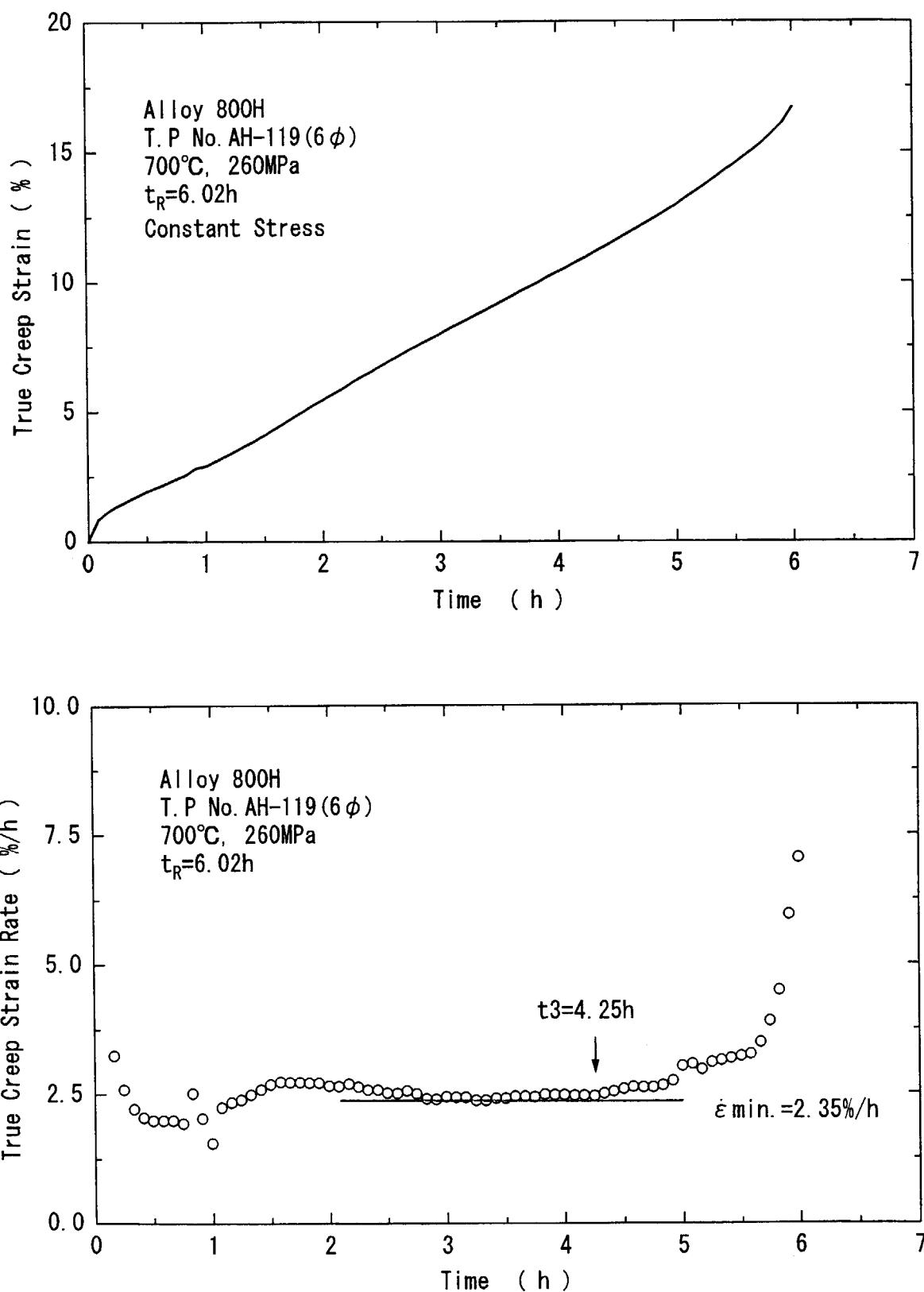


Fig. 3.10 Creep curve and creep strain rate for 260 MPa at 700°C.

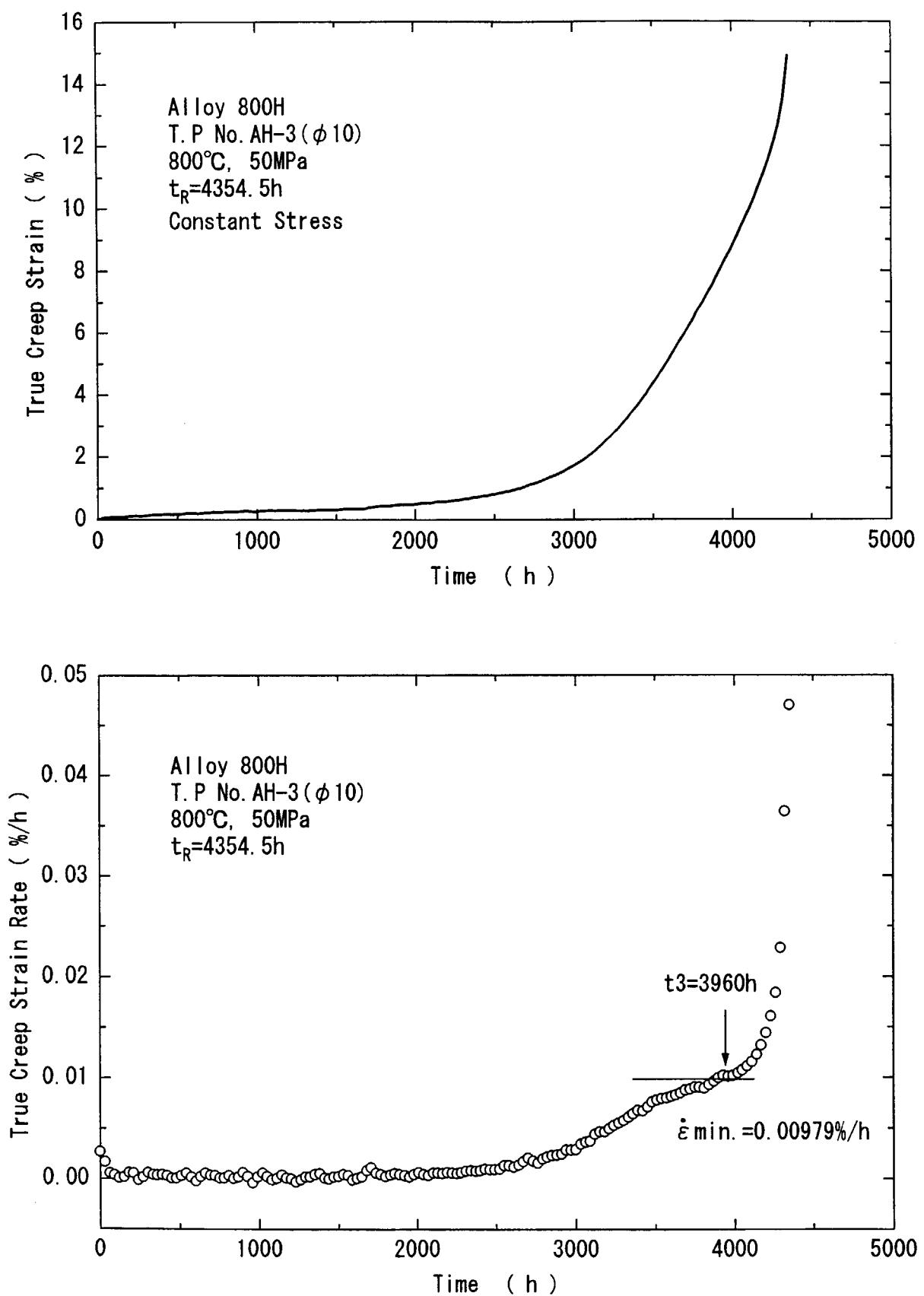


Fig. 3.11 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 800°C.

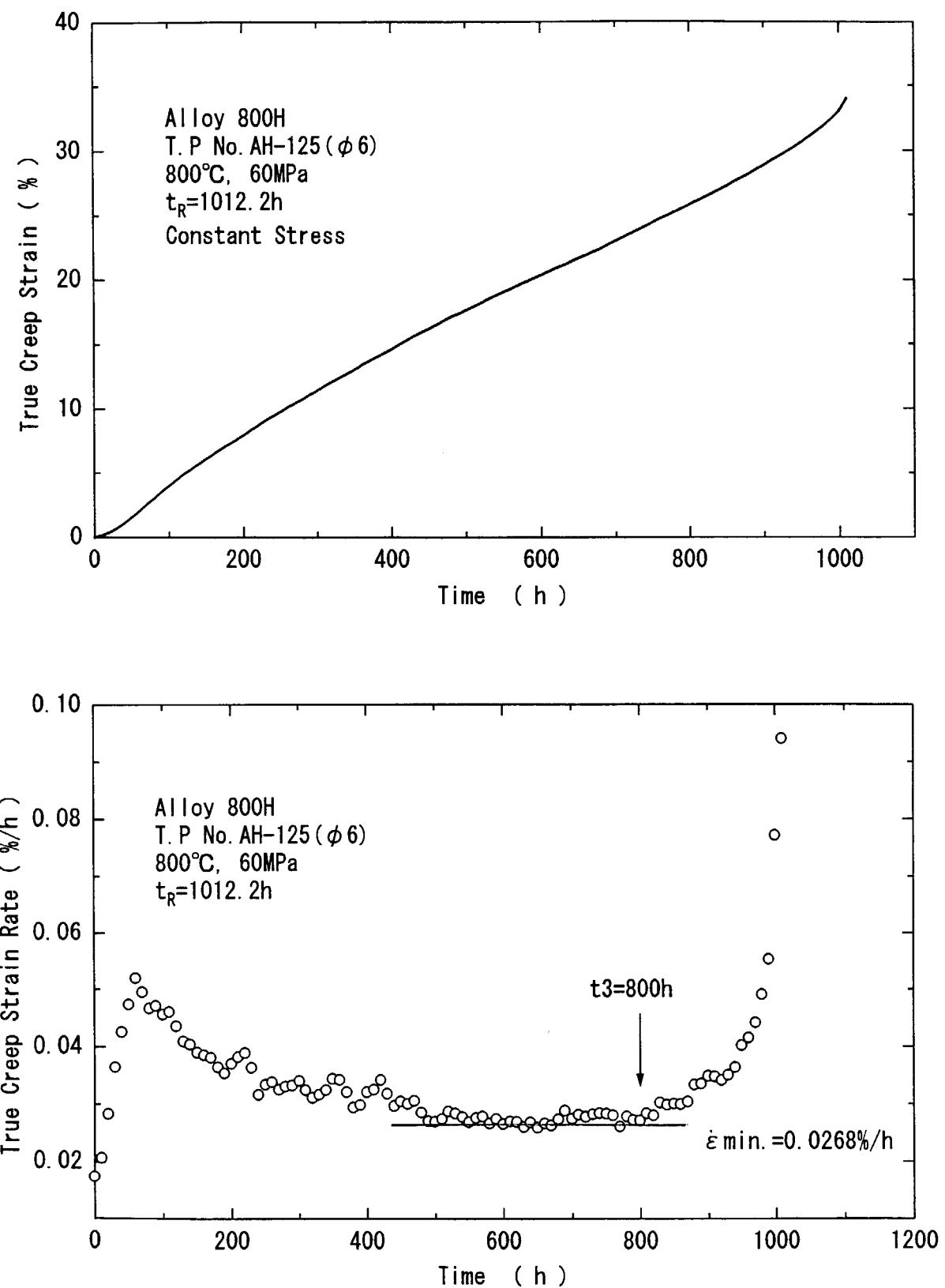


Fig. 3.12 Creep curve and creep strain rate for 60 MPa at 800°C.

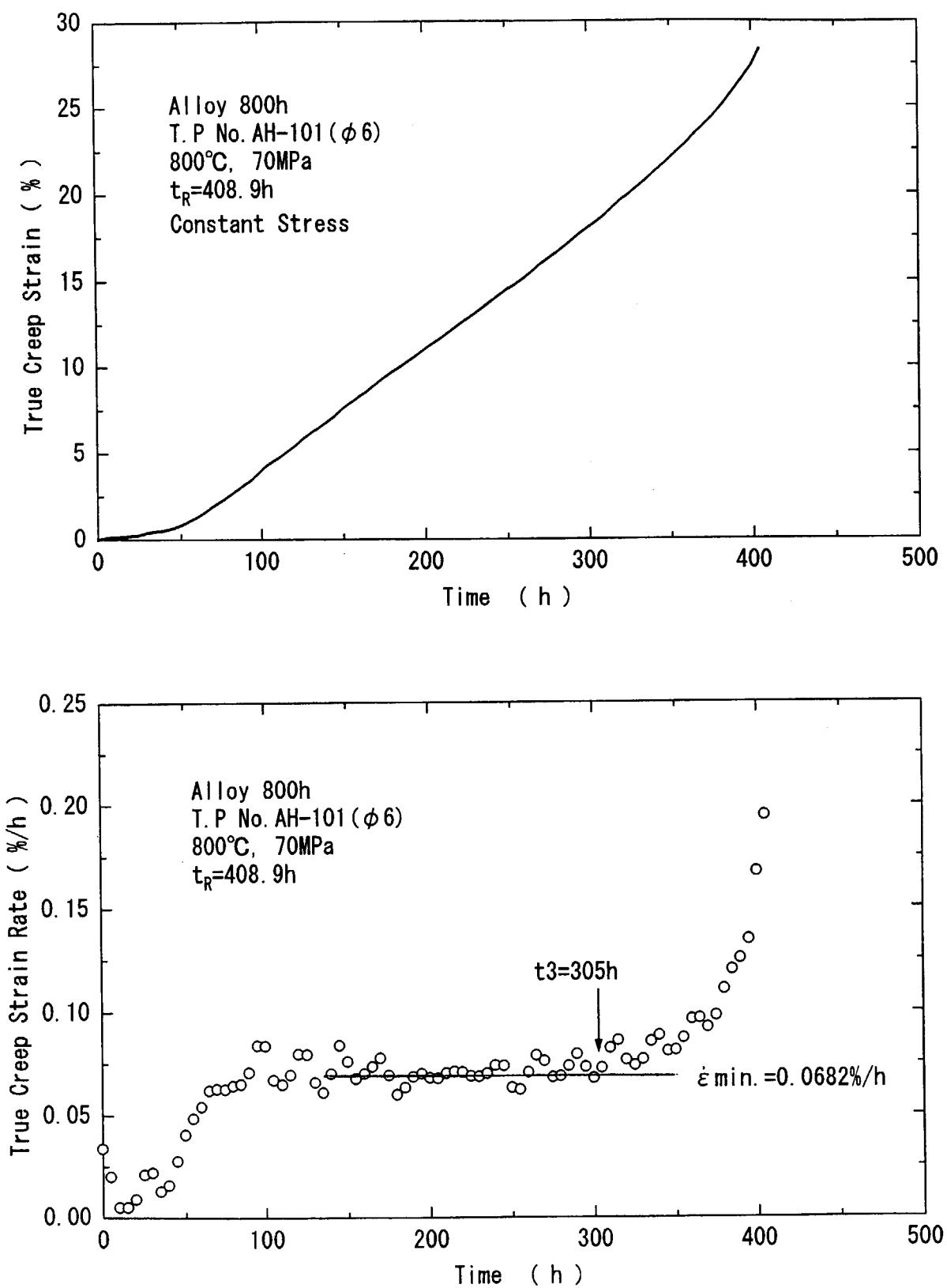


Fig. 3.13 Creep curve and creep strain rate for 70 MPa at 800°C.

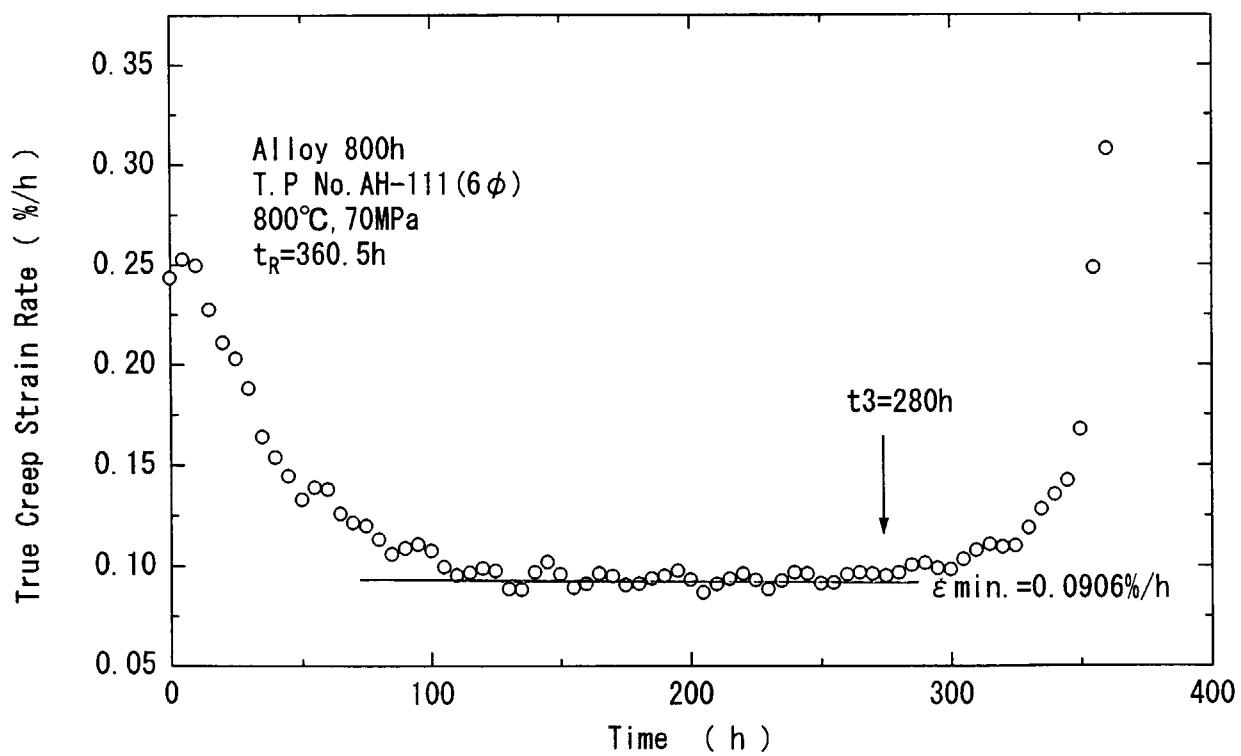
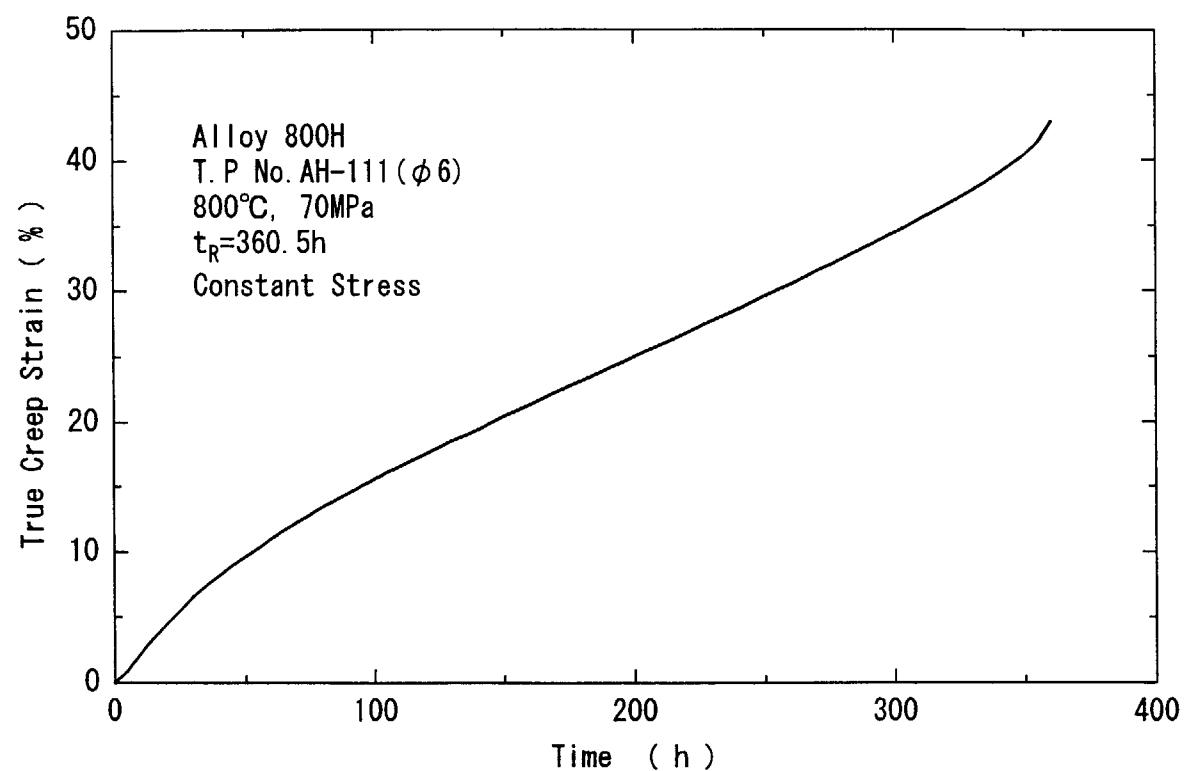


Fig. 3.14 Creep curve and creep strain rate for 70 MPa at 800°C.

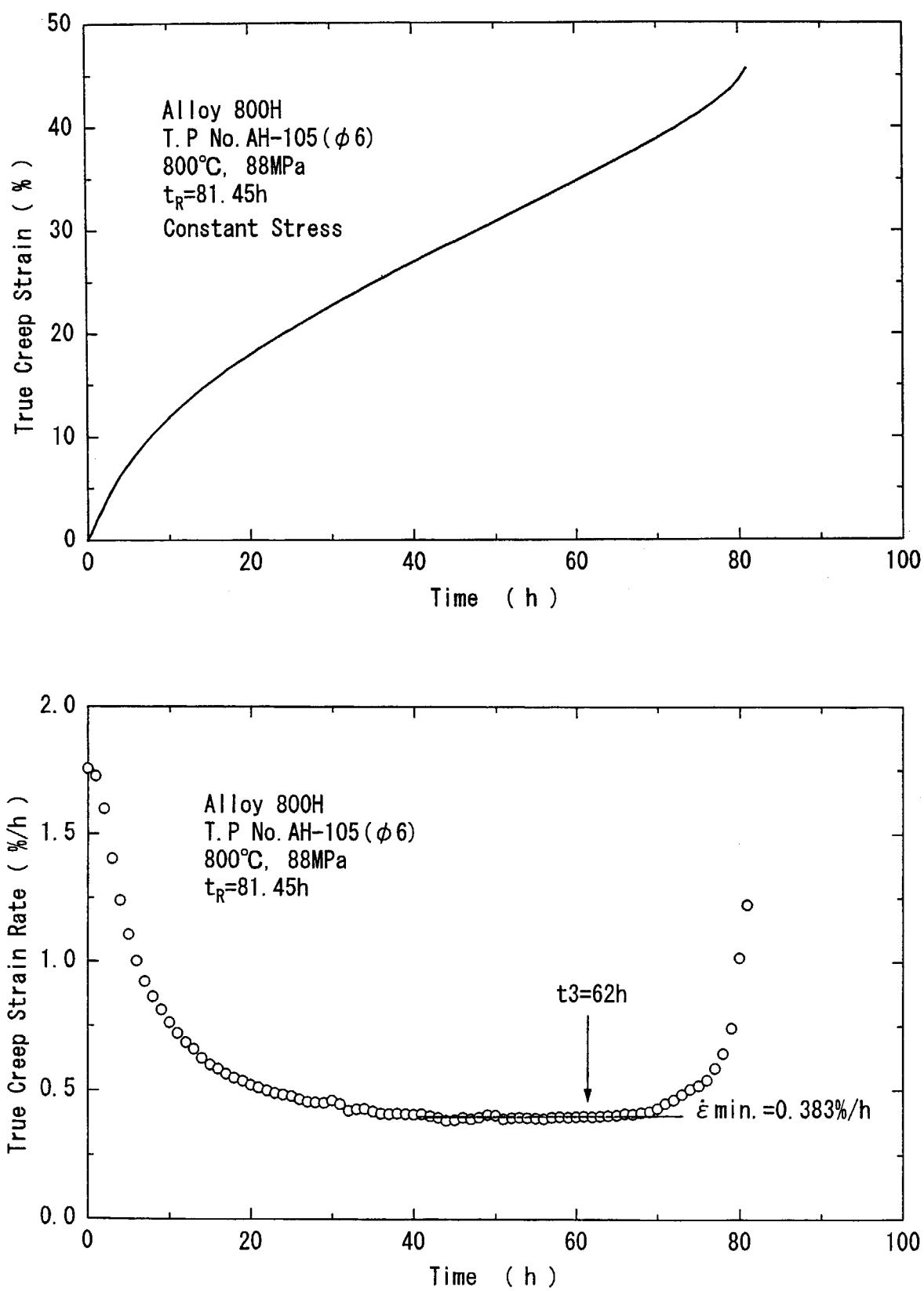


Fig. 3.15 Creep curve and creep strain rate for 88 MPa at 800°C.

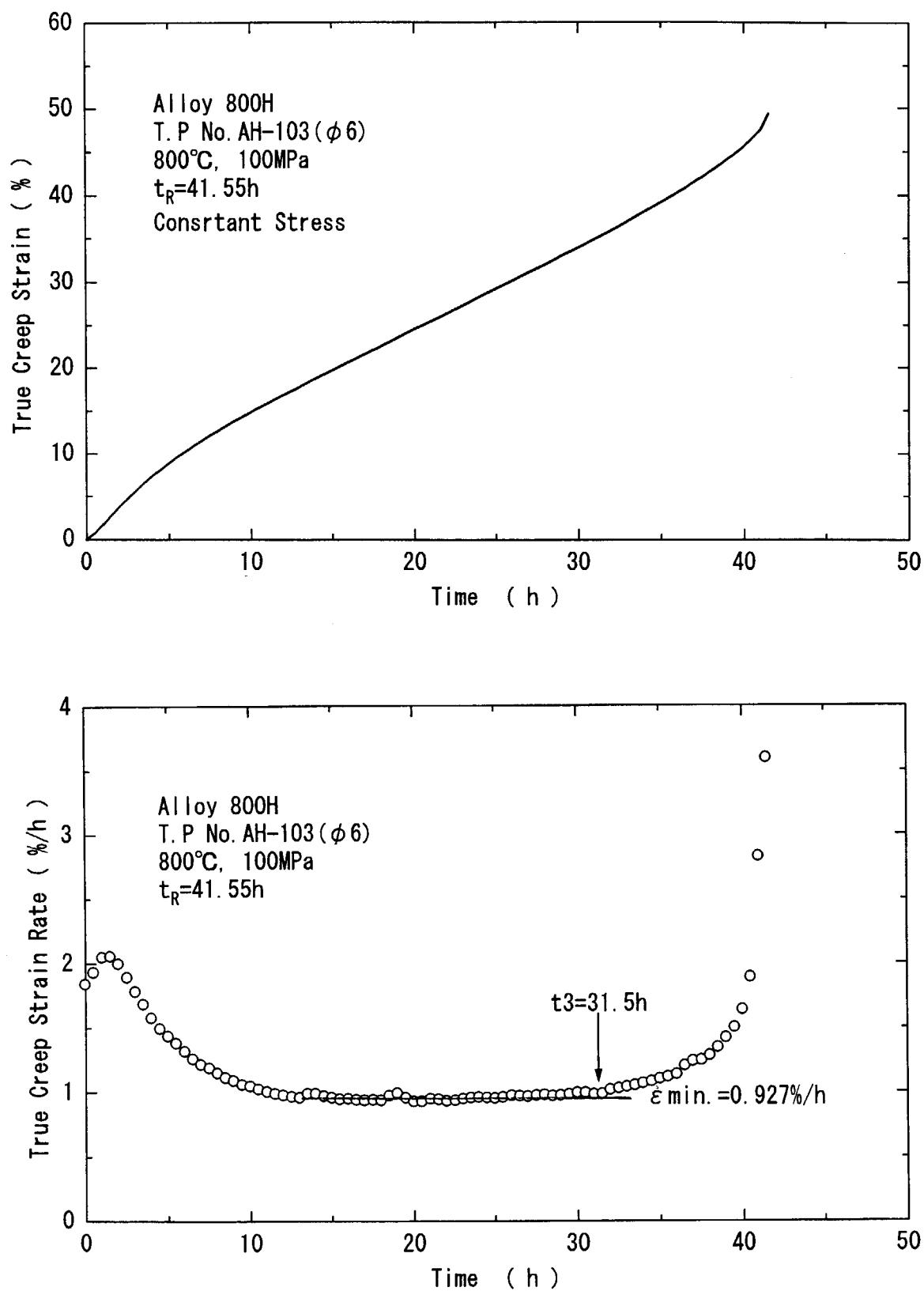


Fig. 3.16 Creep curve and creep strain rate for 100 MPa at 800°C.

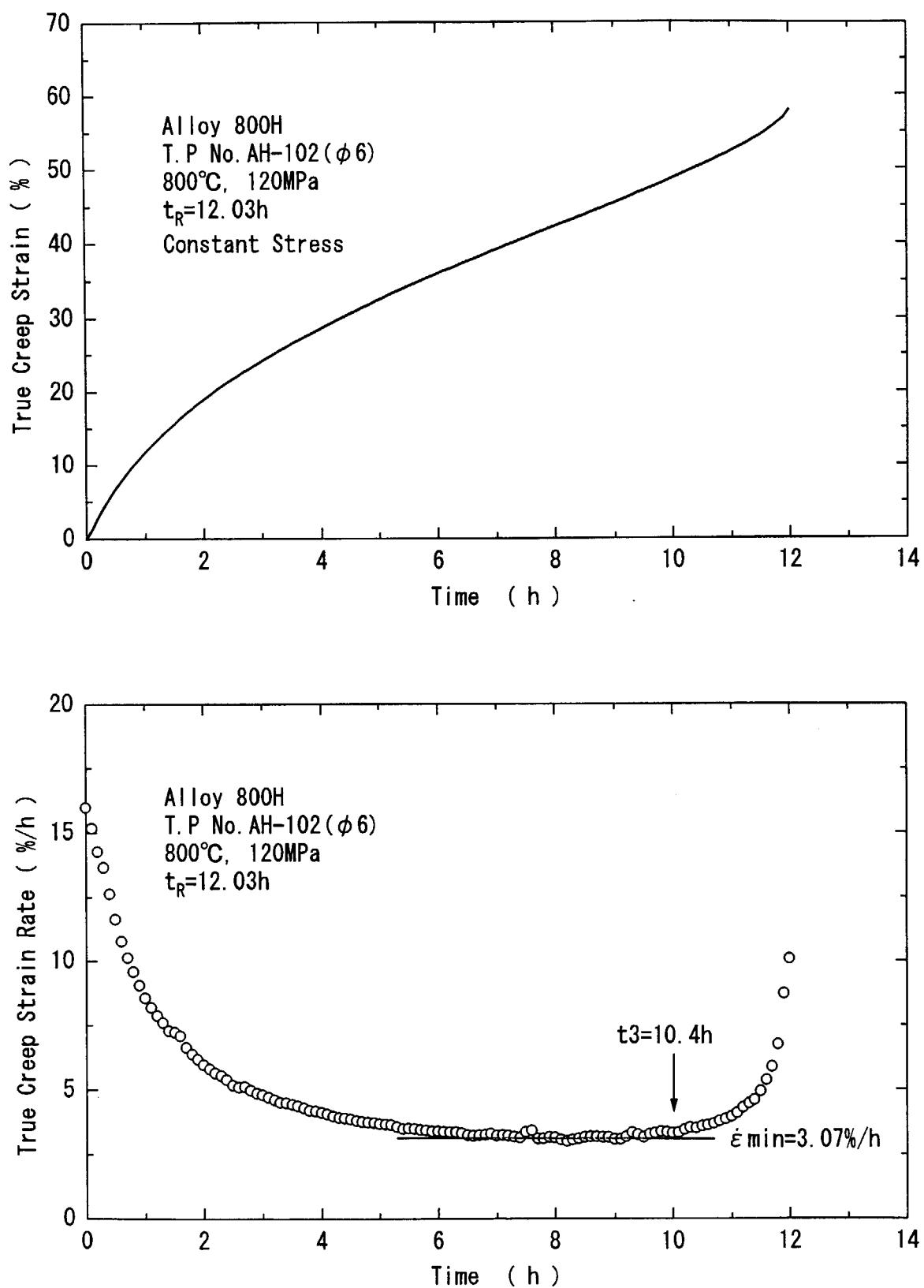


Fig. 3.17 Creep curve and creep strain rate for 120 MPa at 800°C.

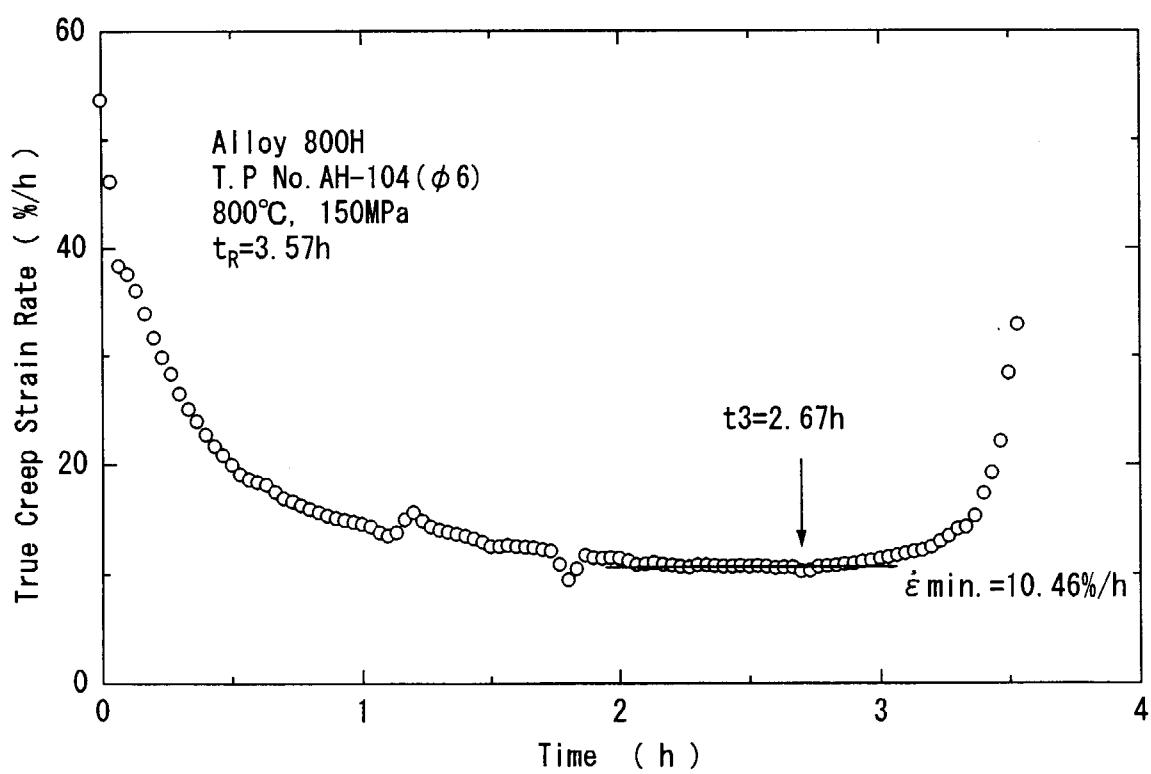
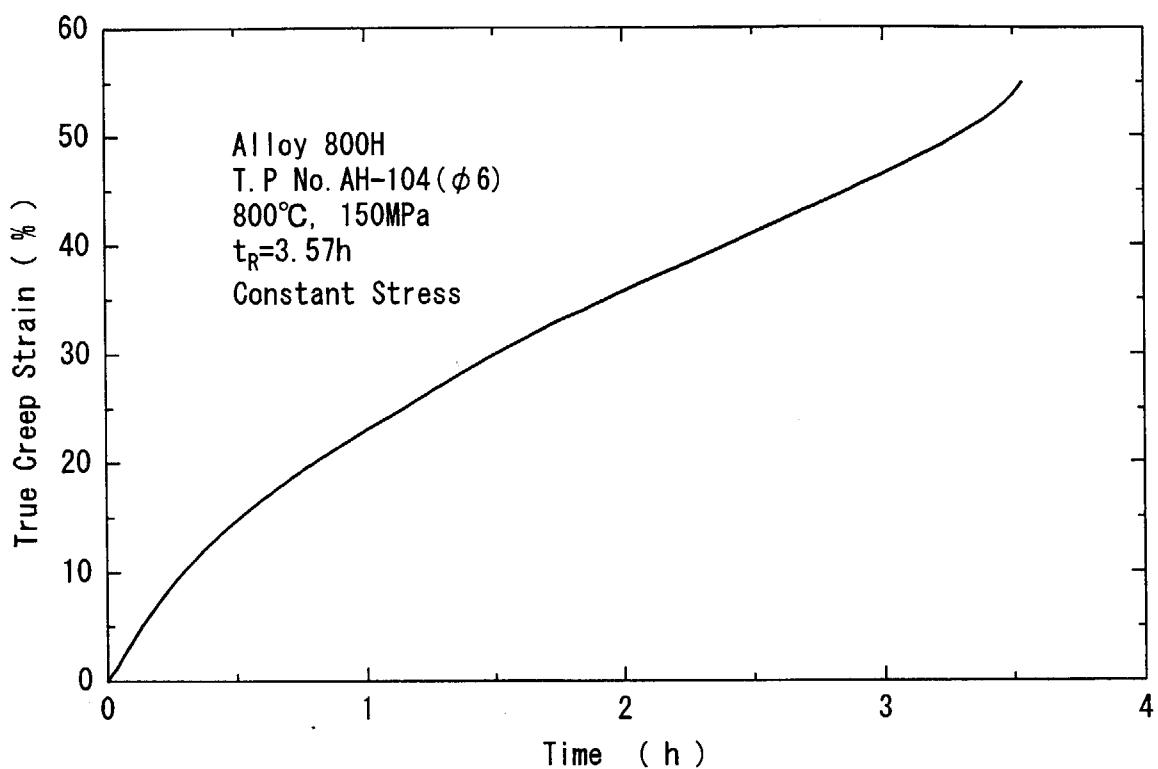


Fig. 3.18 Creep curve and creep strain rate for 150 MPa at 800°C.

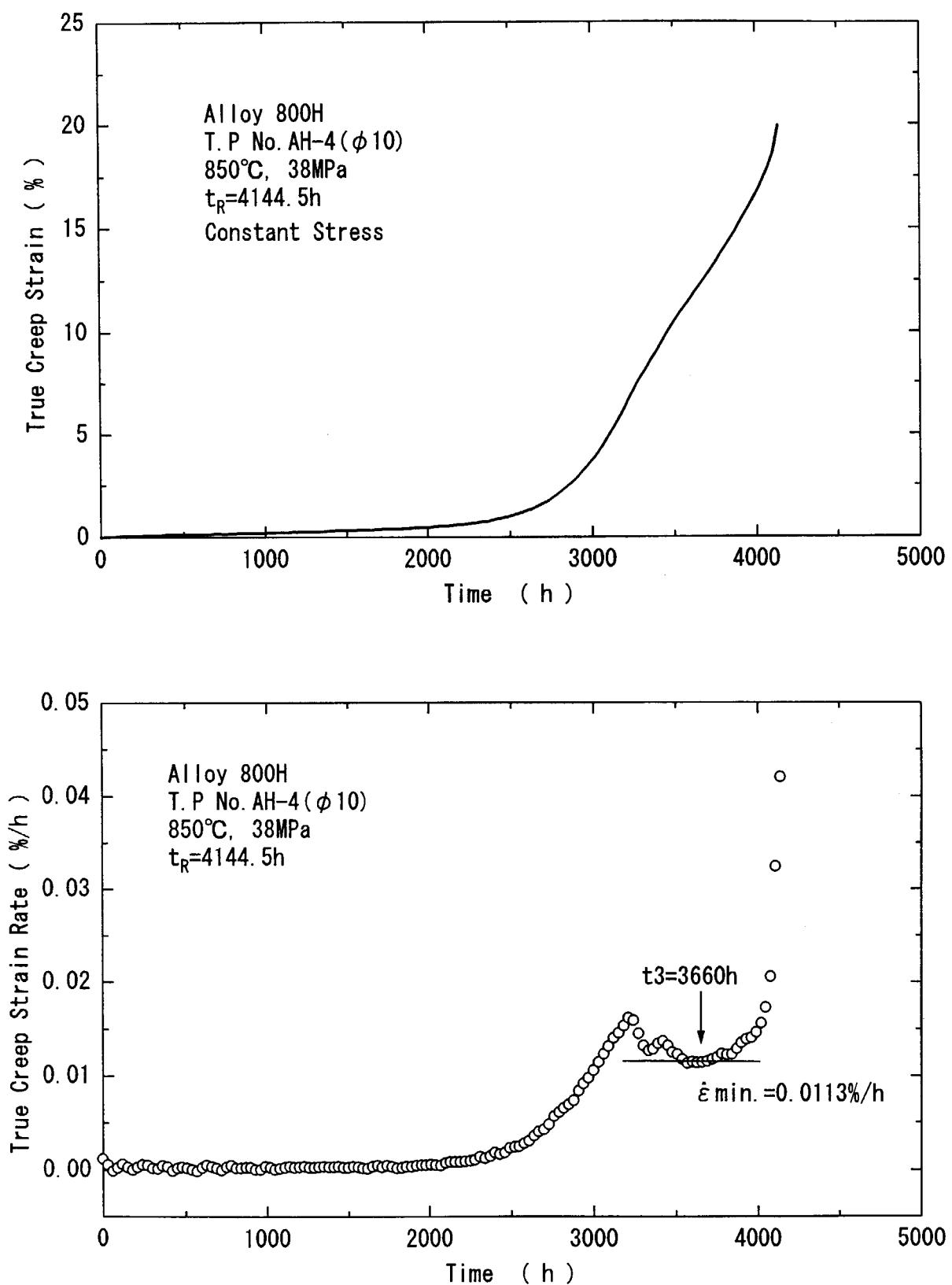


Fig. 3.19 Creep curve and creep strain rate for 38 MPa at 850°C.

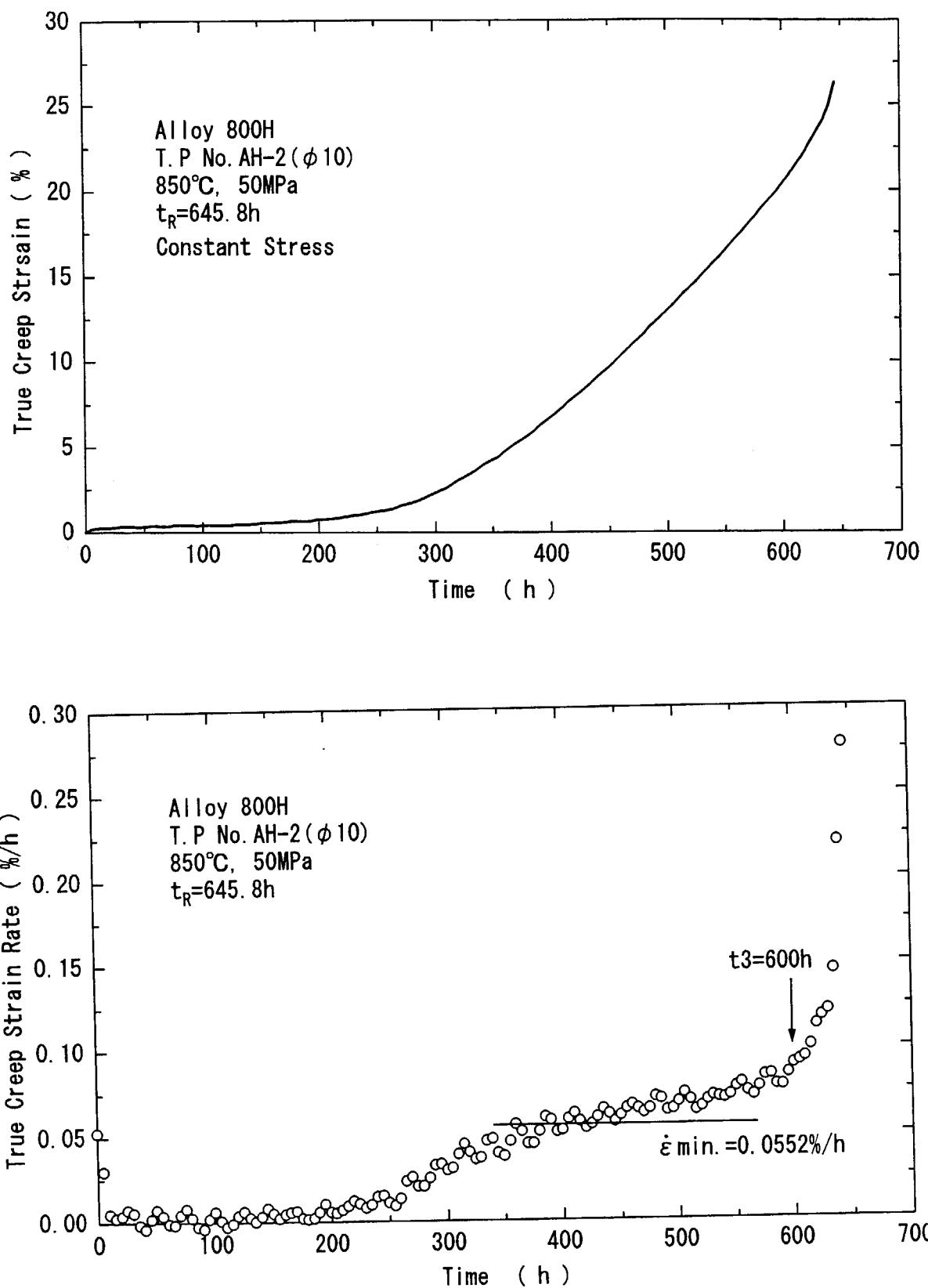


Fig. 3.20 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 850°C.

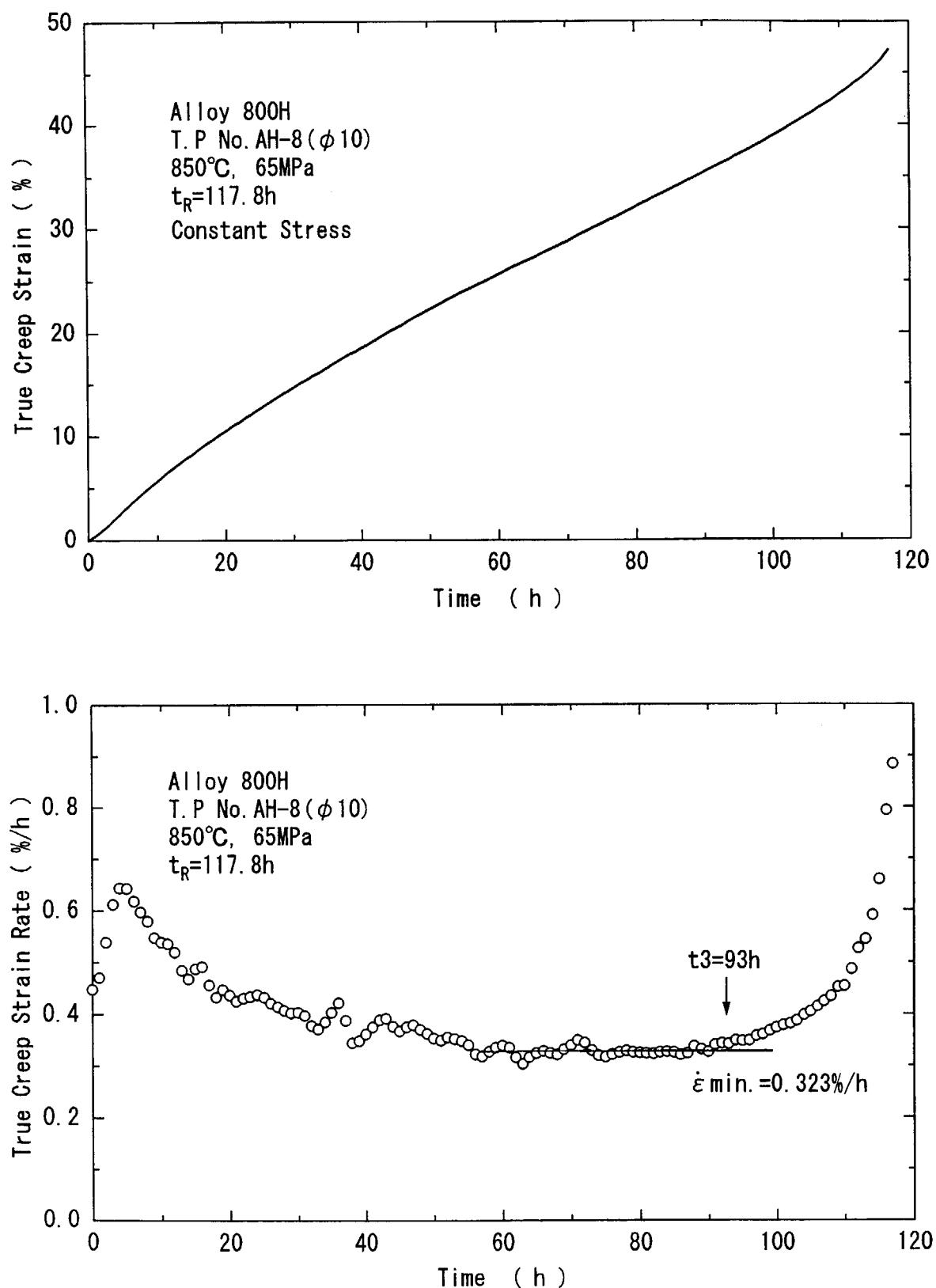


Fig. 3.21 Creep curve and creep strain rate for 65 MPa at 850°C.

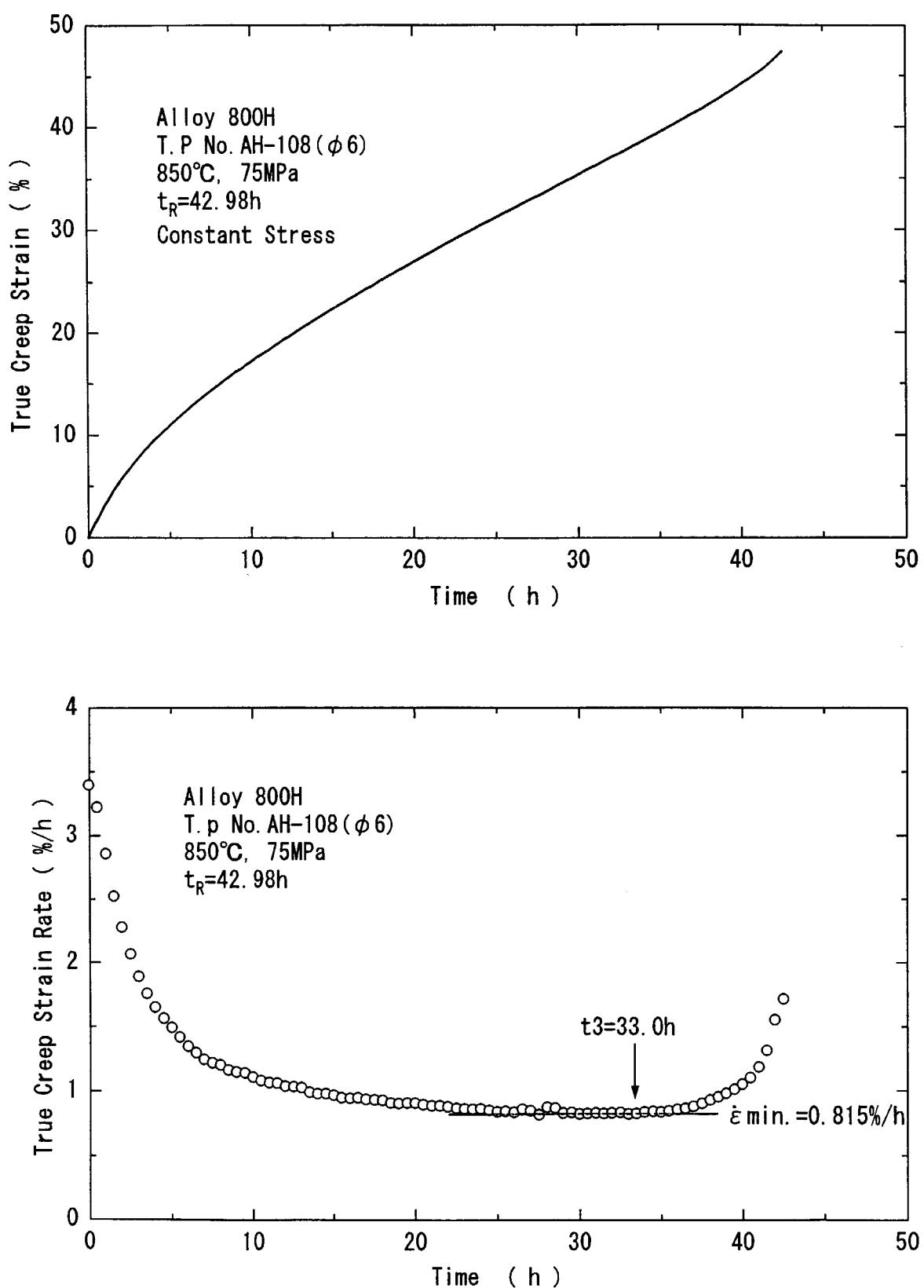


Fig. 3.22 Creep curve and creep strain rate for 75 MPa at 850°C.

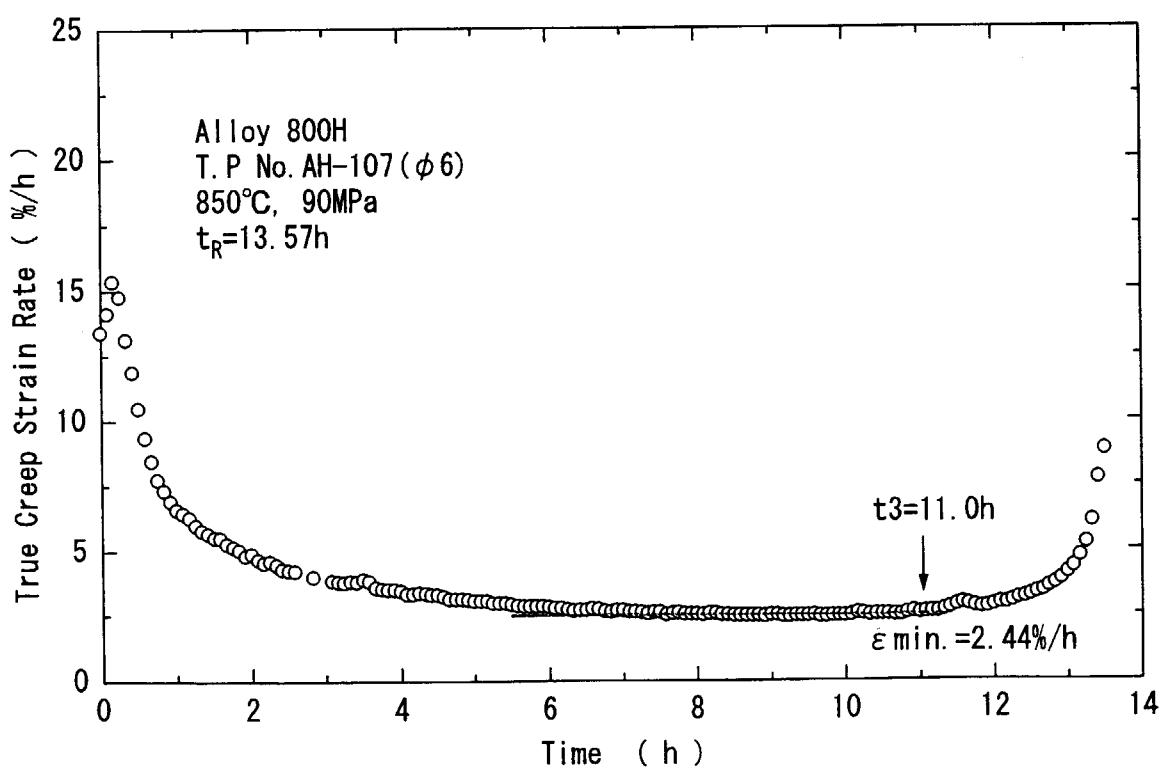
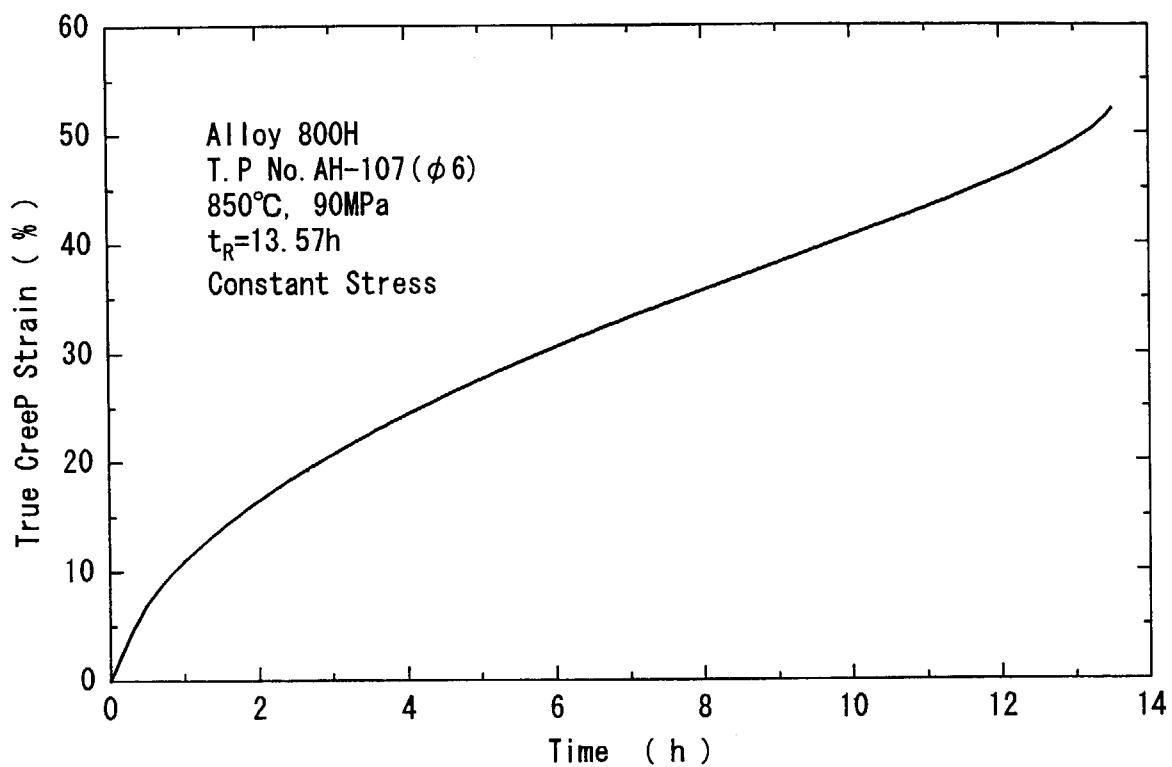


Fig. 3.23 Creep curve and creep strain rate for 90 MPa at 850°C.

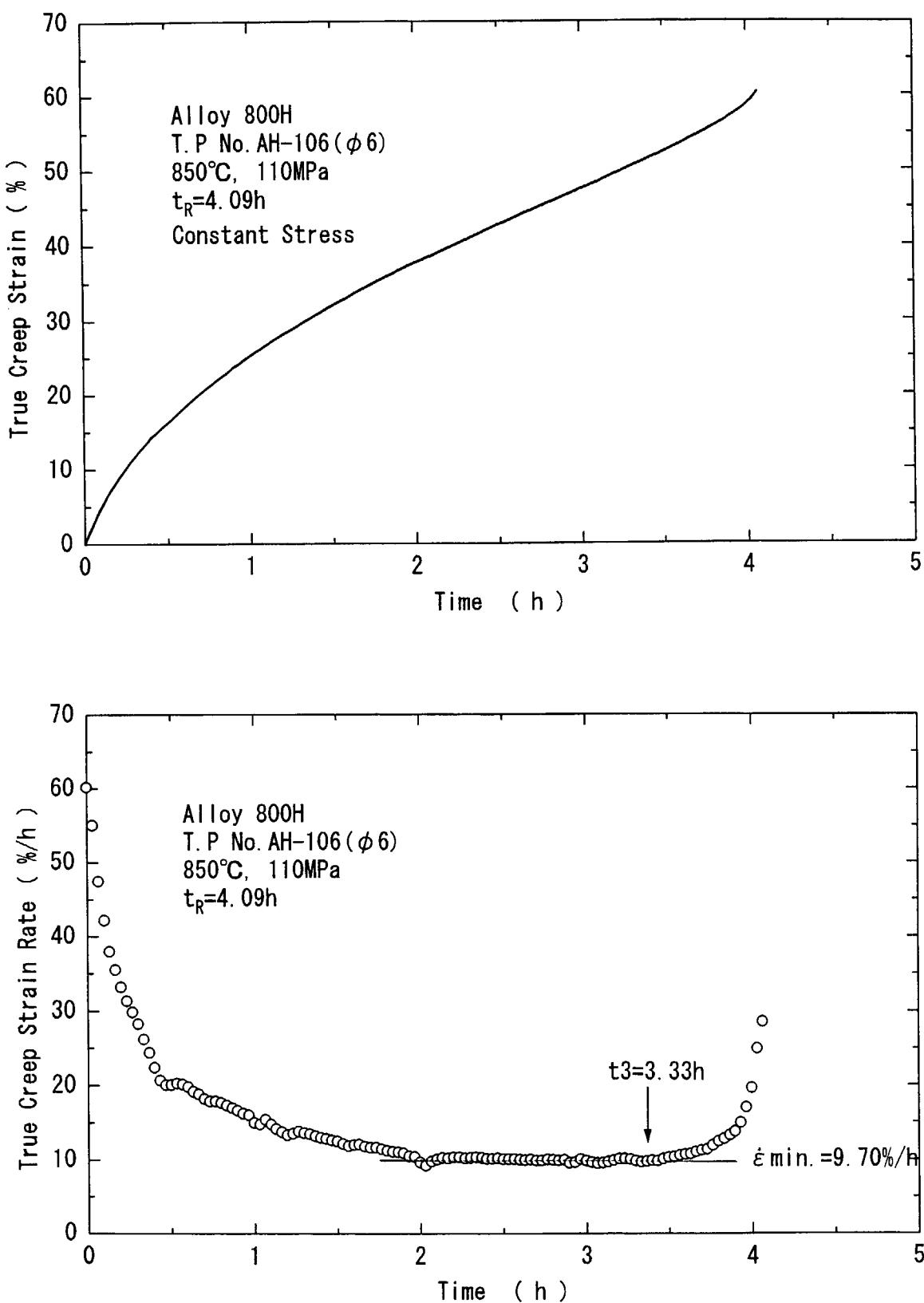


Fig. 3.24 Creep curve and creep strain rate for 110 MPa at 850°C.

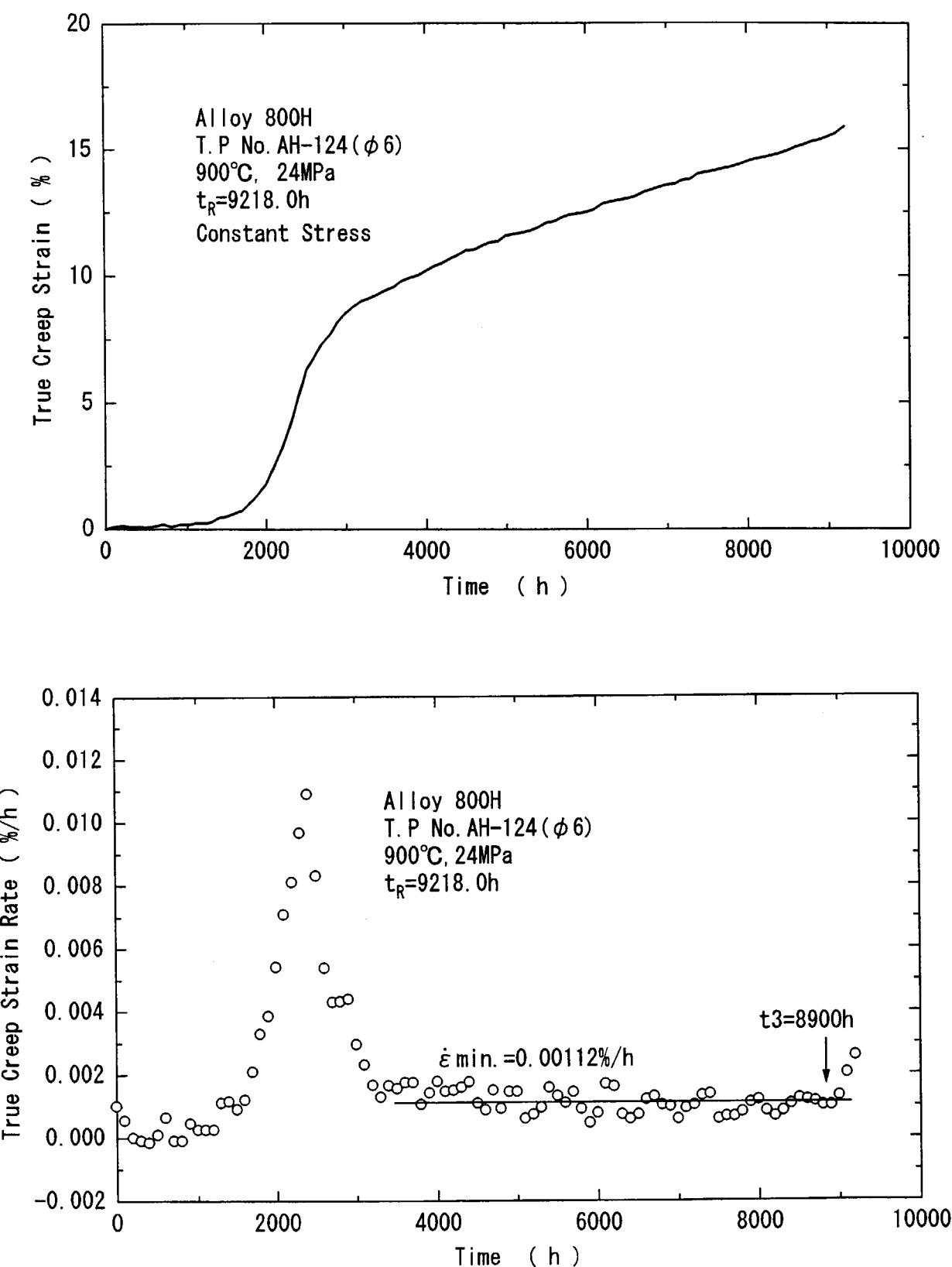


Fig. 3.25 Creep curve and creep strain rate for 24 MPa at 900°C.

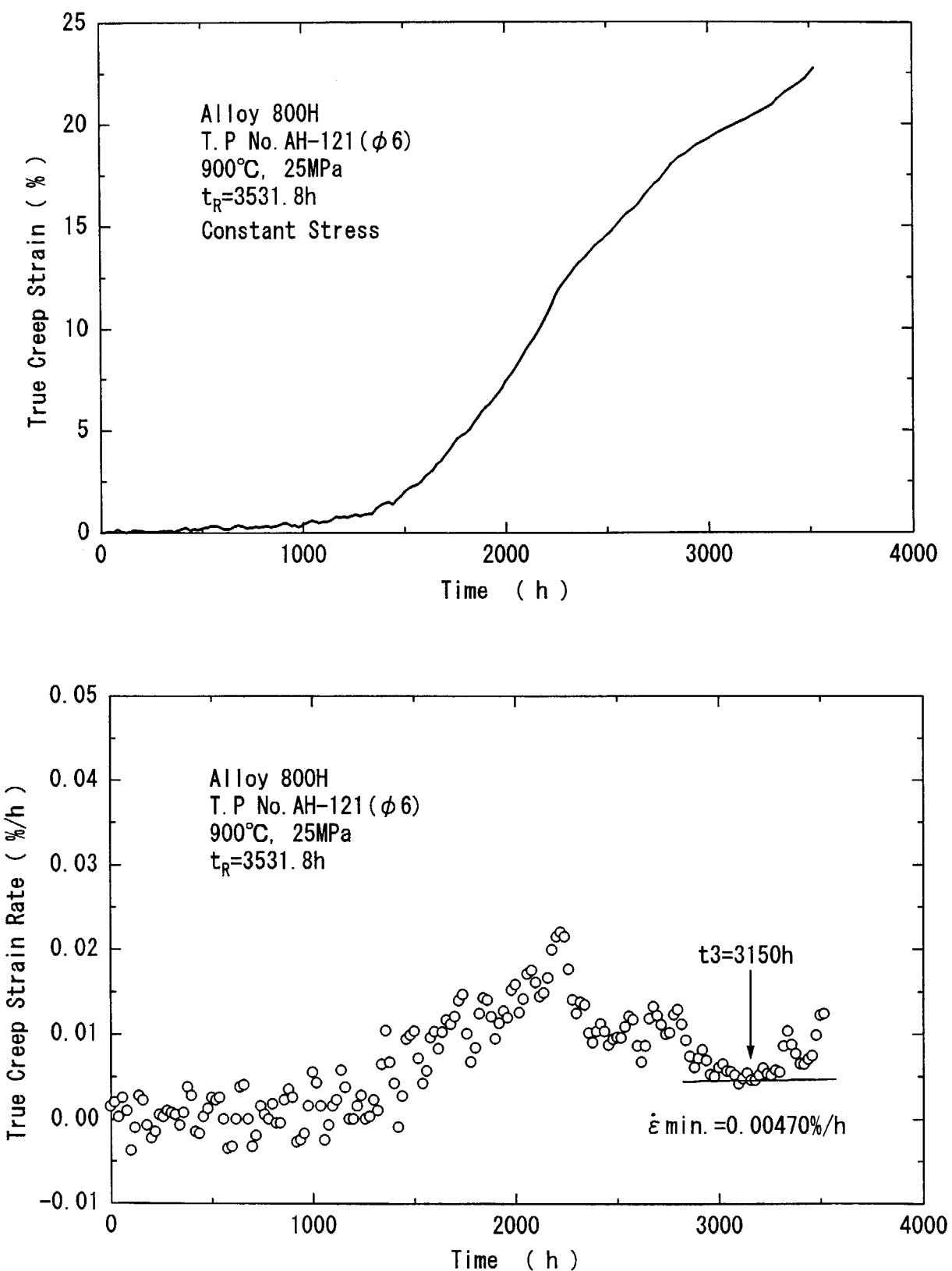


Fig. 3.26 Creep curve and creep strain rate for 25 MPa at 900°C.

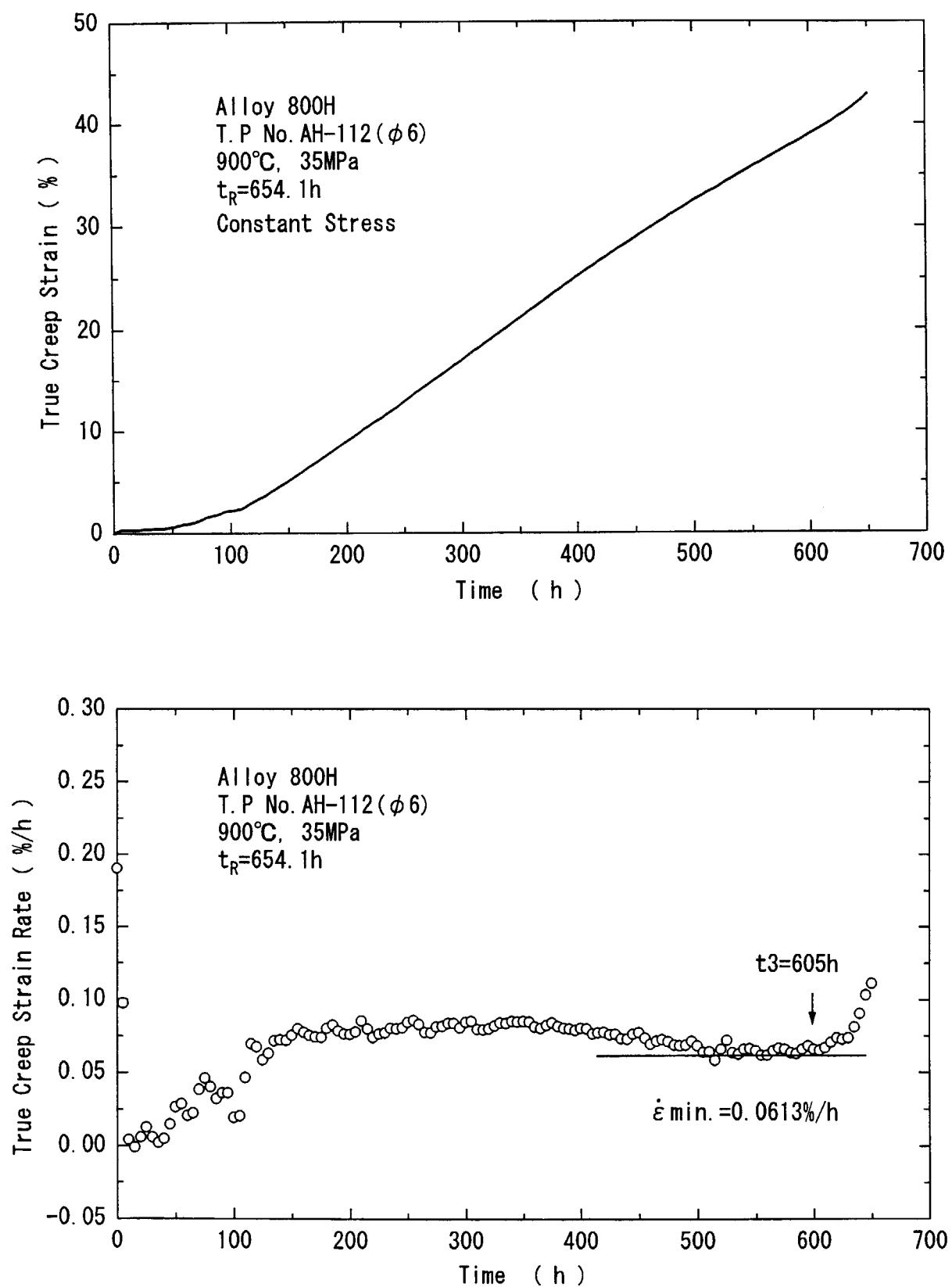


Fig. 3.27 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 900°C.

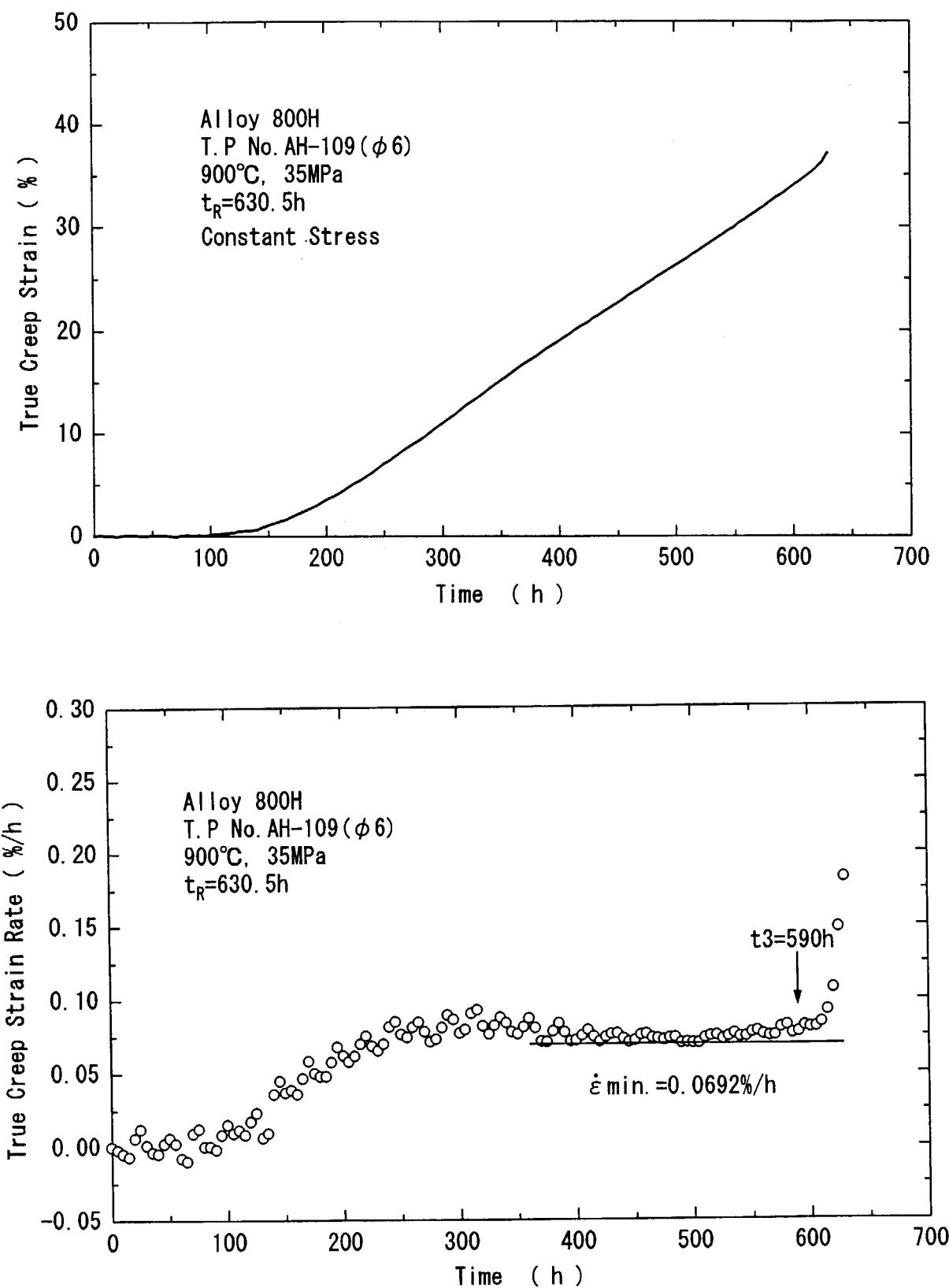


Fig. 3.28 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 900°C.

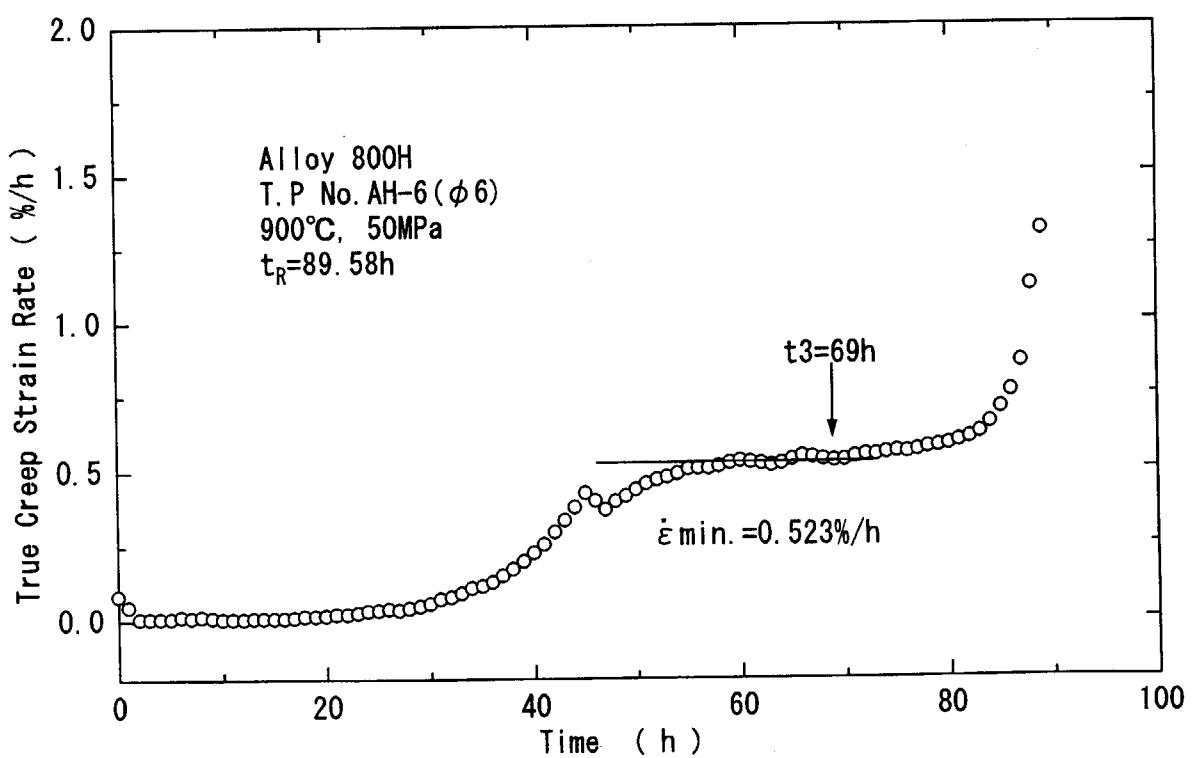
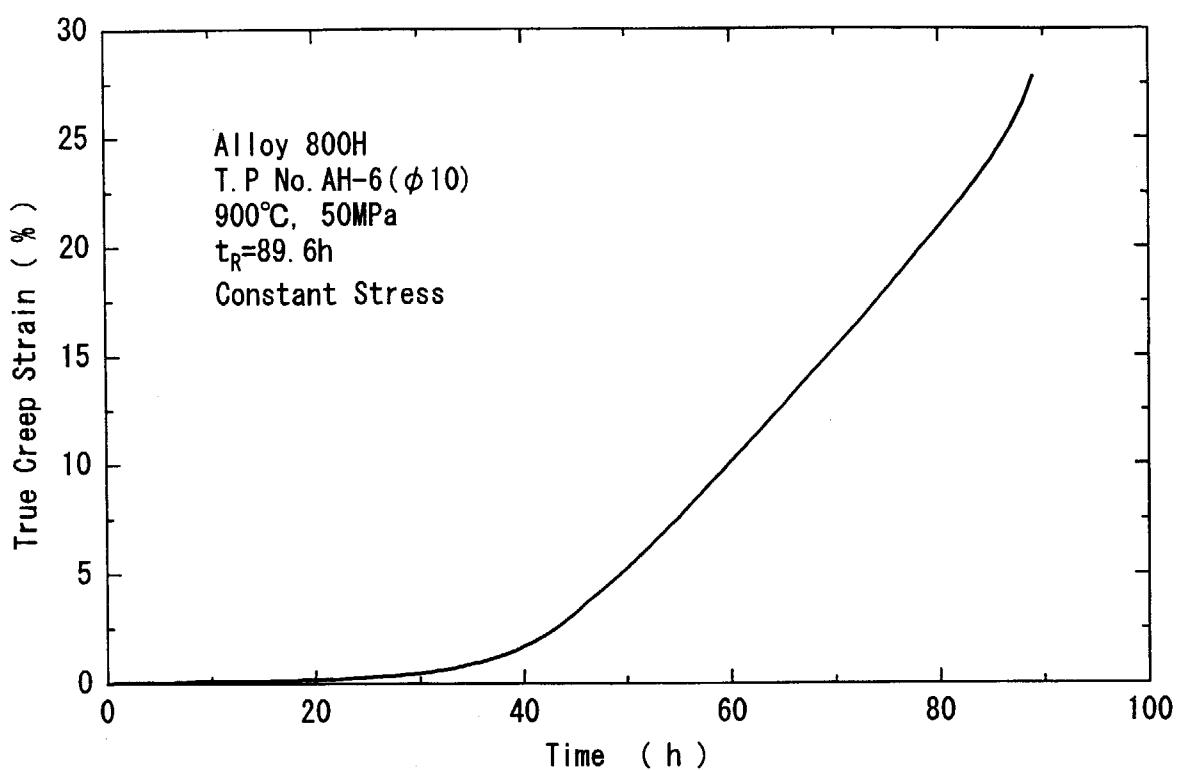


Fig. 3.29 Creep curve and creep strain rate for 50 MPa at 900°C.

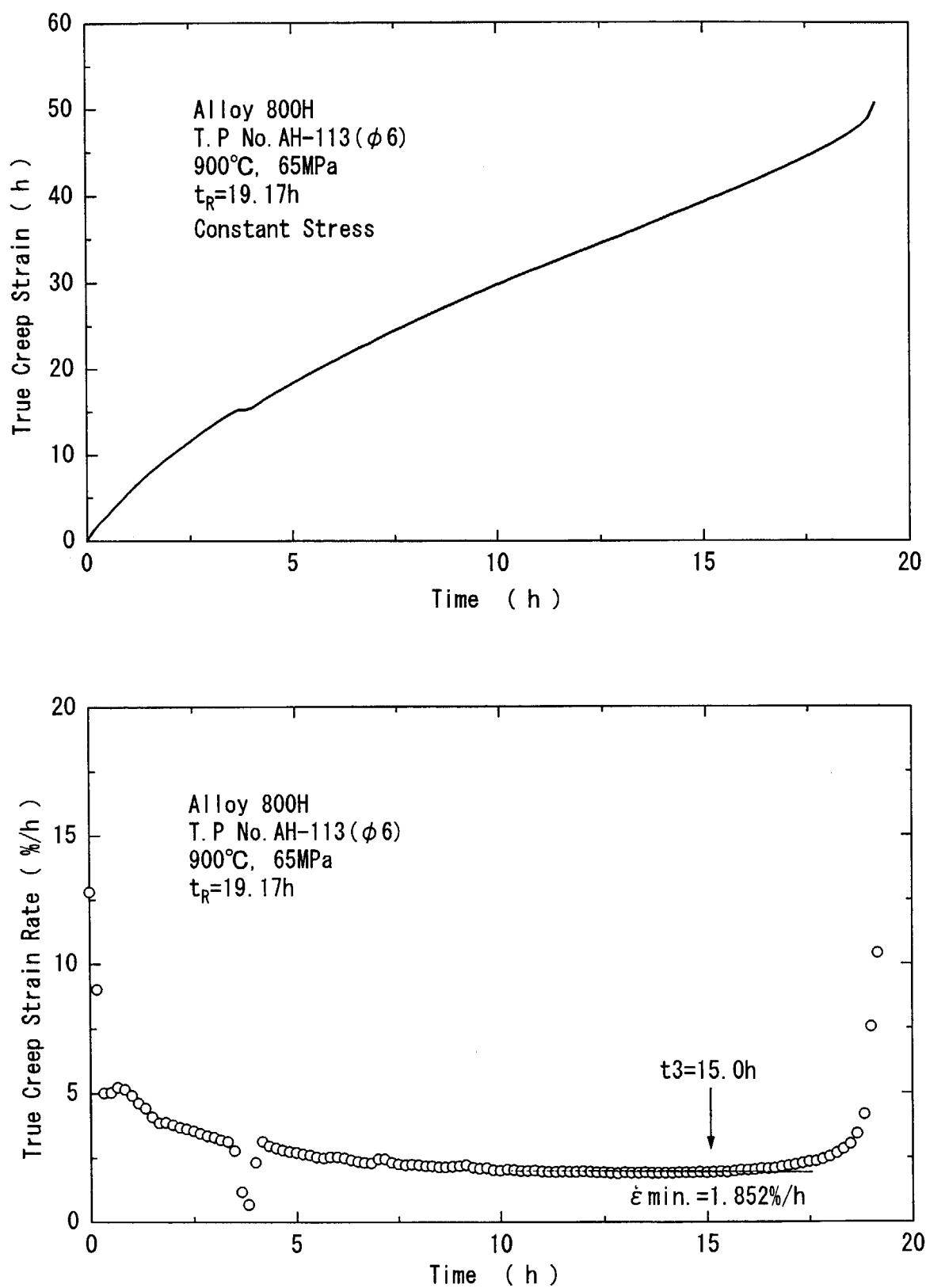


Fig. 3.30 Creep curve and creep strain rate for 65 MPa at 900°C.

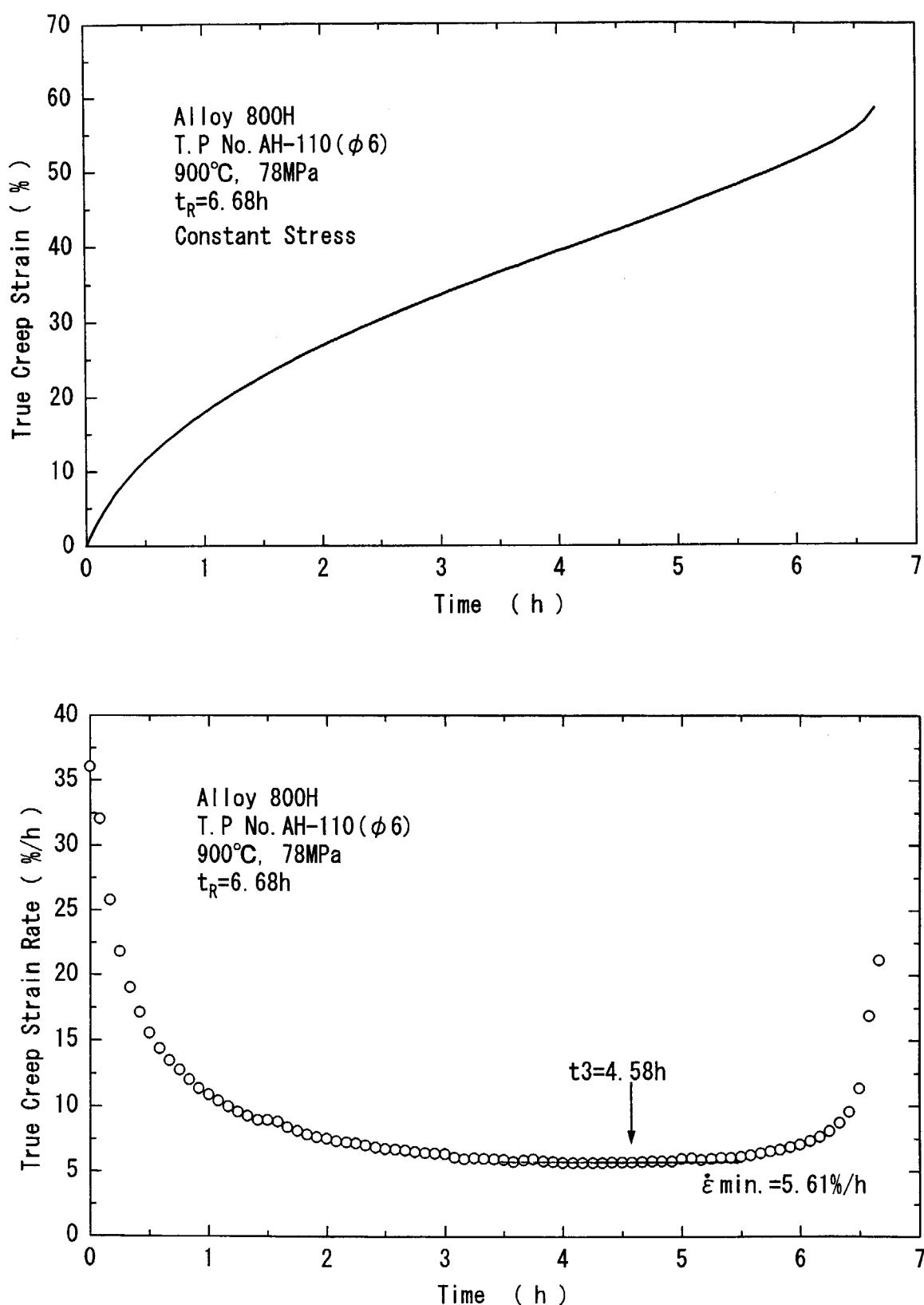


Fig. 3.31 Creep curve and creep strain rate for 78 MPa at 900°C.

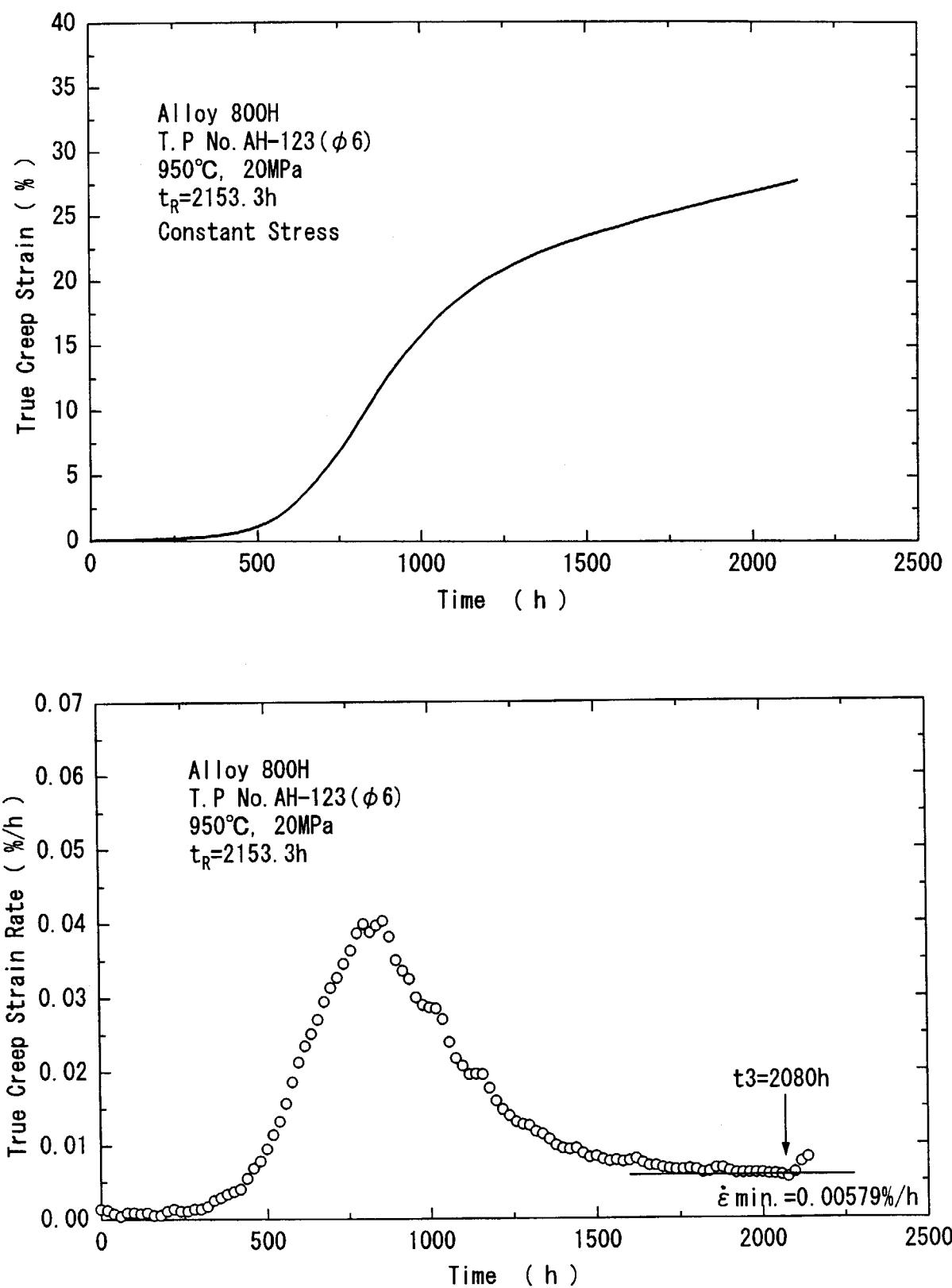


Fig. 3.32 Creep curve and creep strain rate for 20 MPa at 950°C.

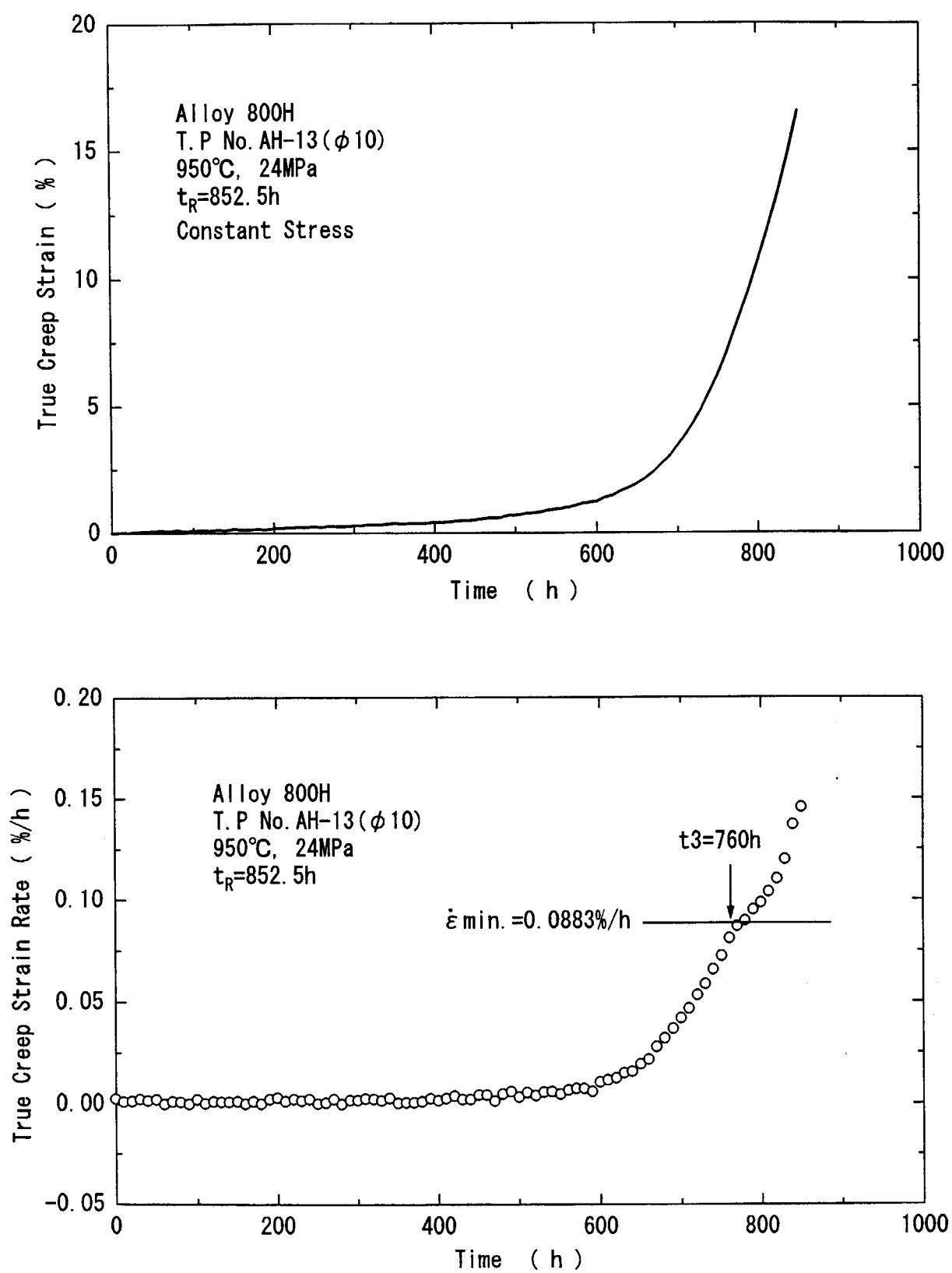


Fig. 3.33 Creep curve and creep strain rate for 24 MPa at 950°C.

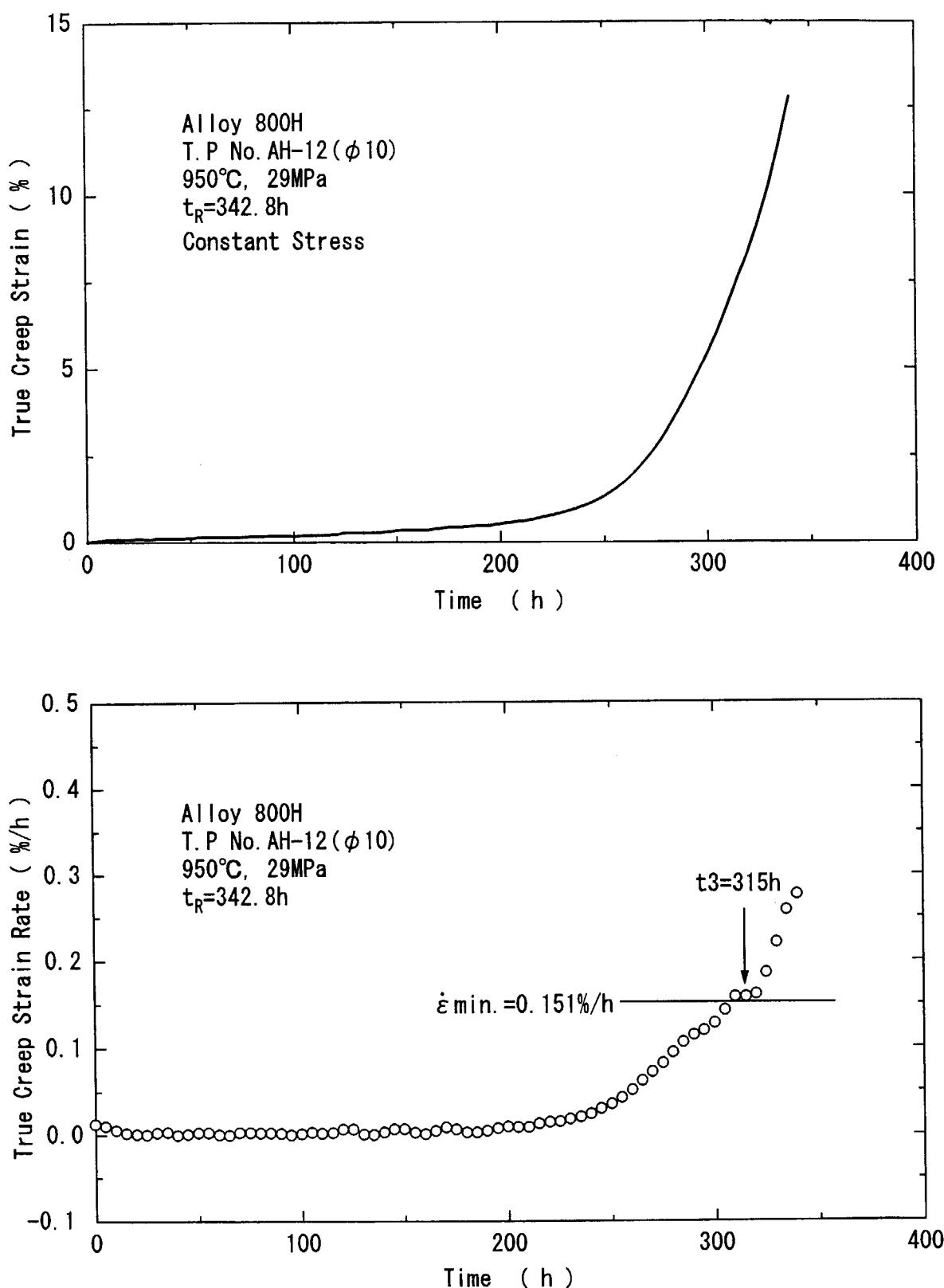


Fig. 3.34 Creep curve and creep strain rate for 29 MPa at 950°C.

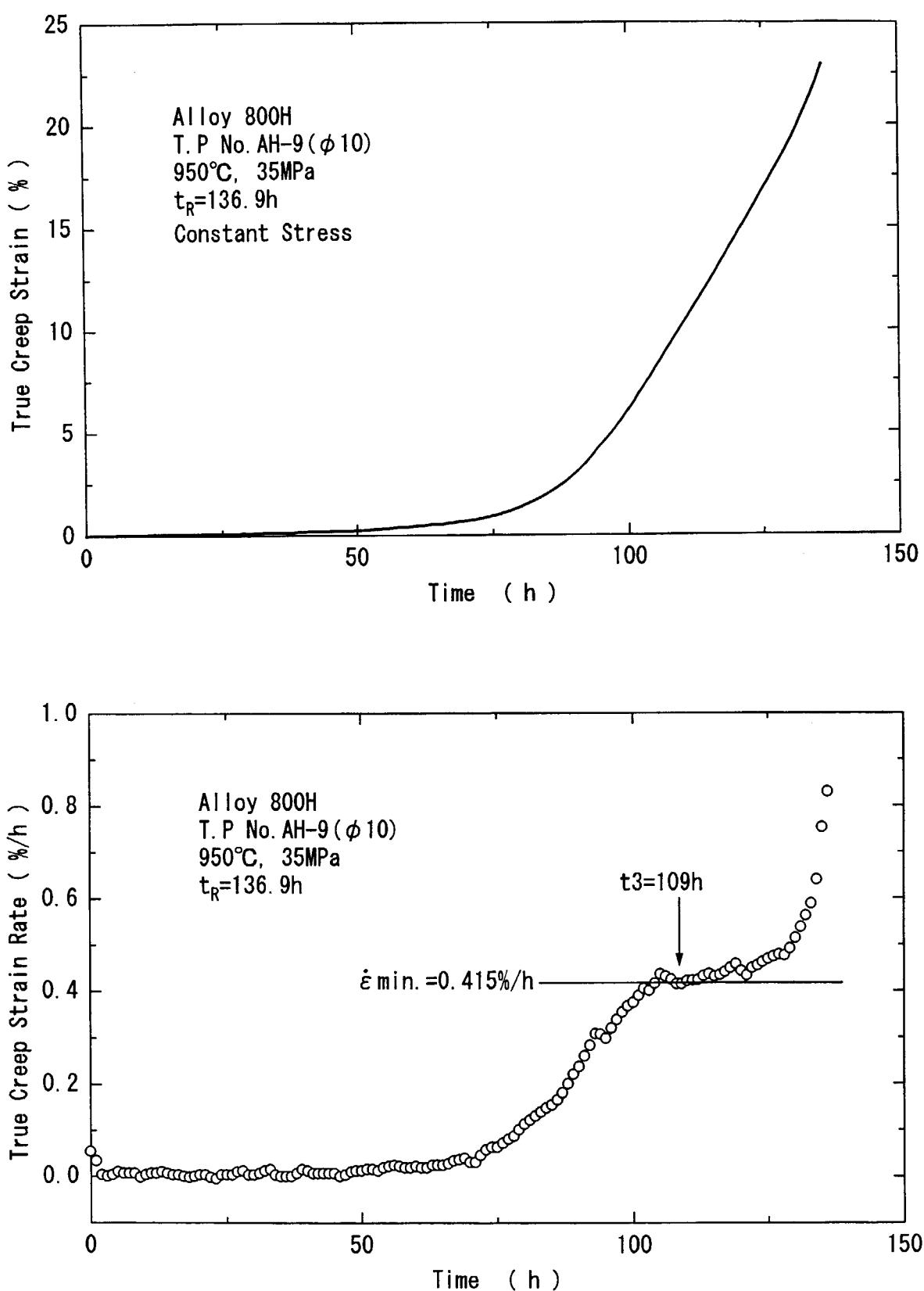


Fig. 3.35 Creep curve and creep strain rate for 35 MPa at 950°C.

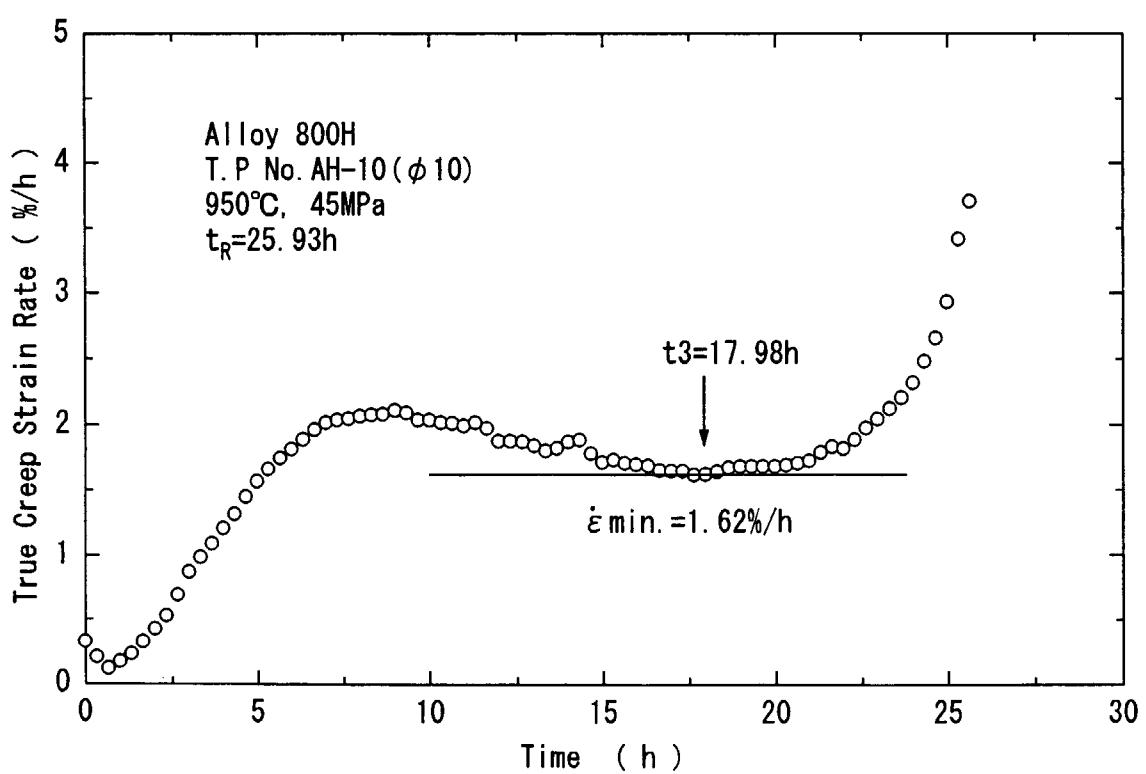
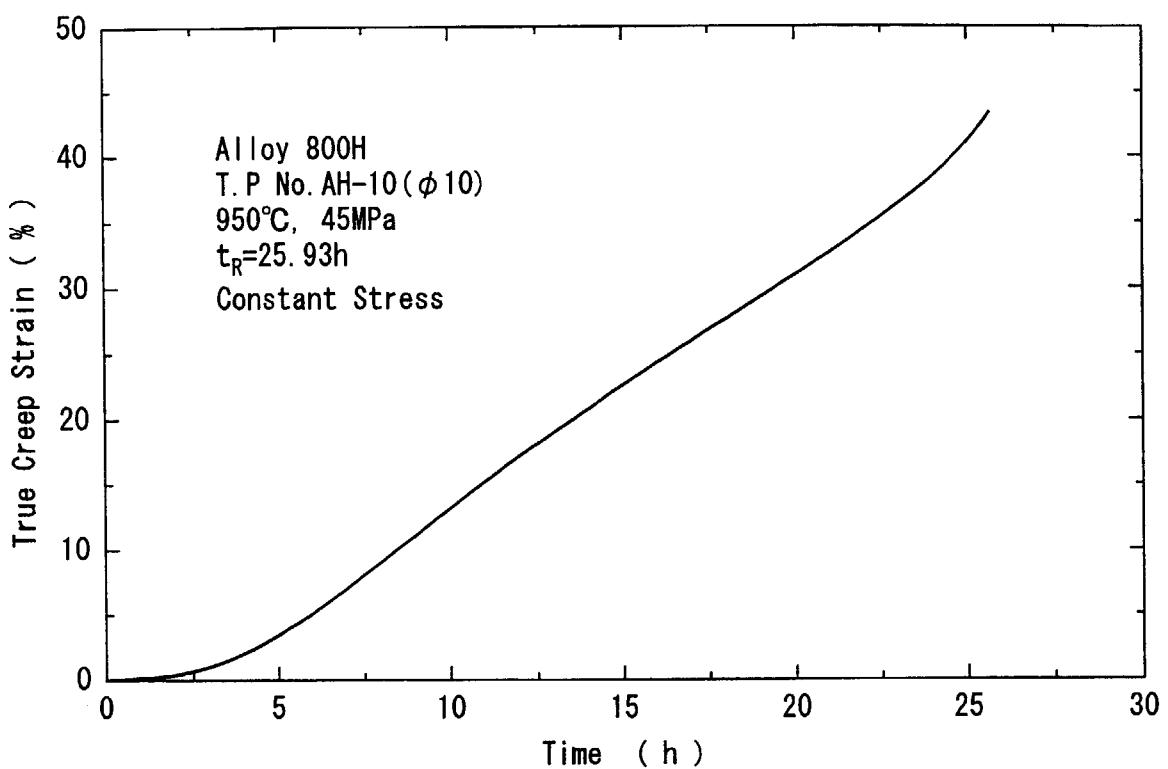


Fig. 3.36 Creep curve and creep strain rate for 45 MPa at 950°C.

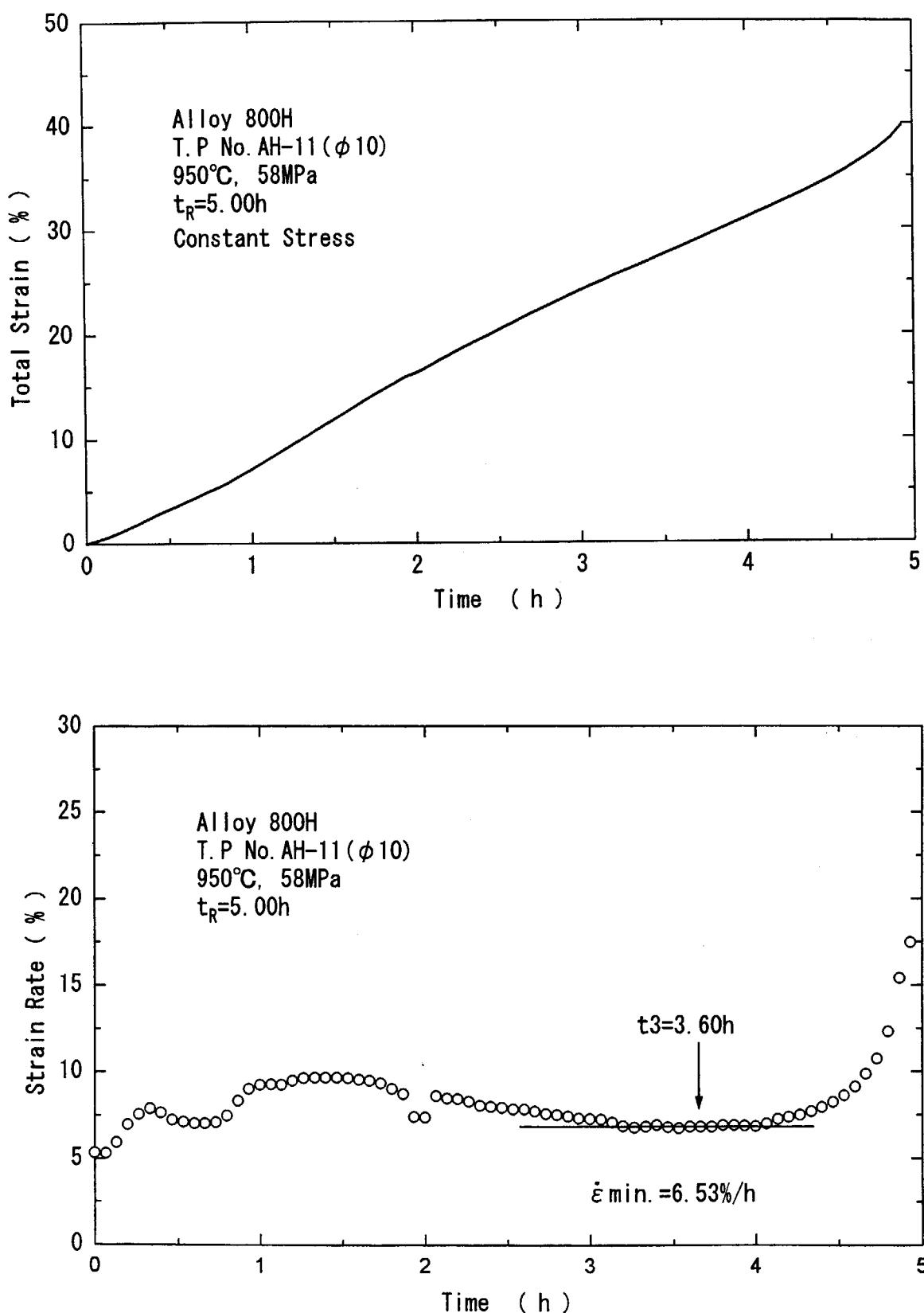


Fig. 3.37 Creep curve and creep strain rate for 58 MPa at 950°C.

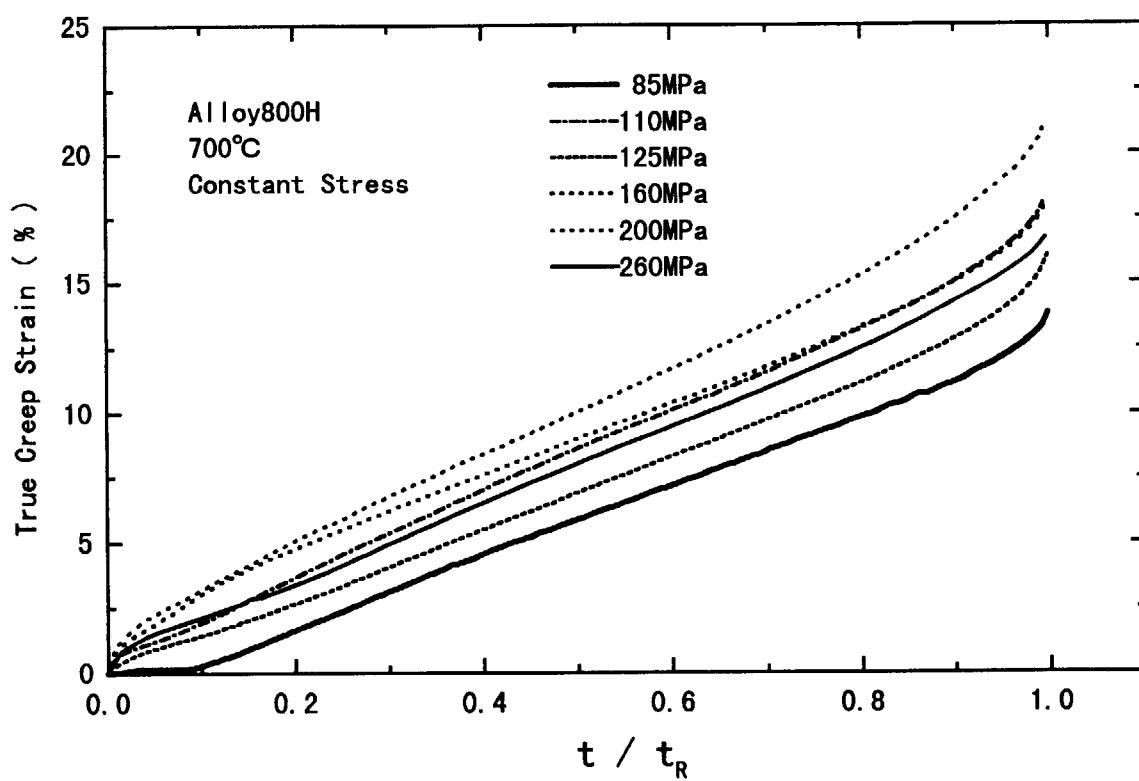


Fig. 3.38 Stress dependence of creep curve at 700°C.

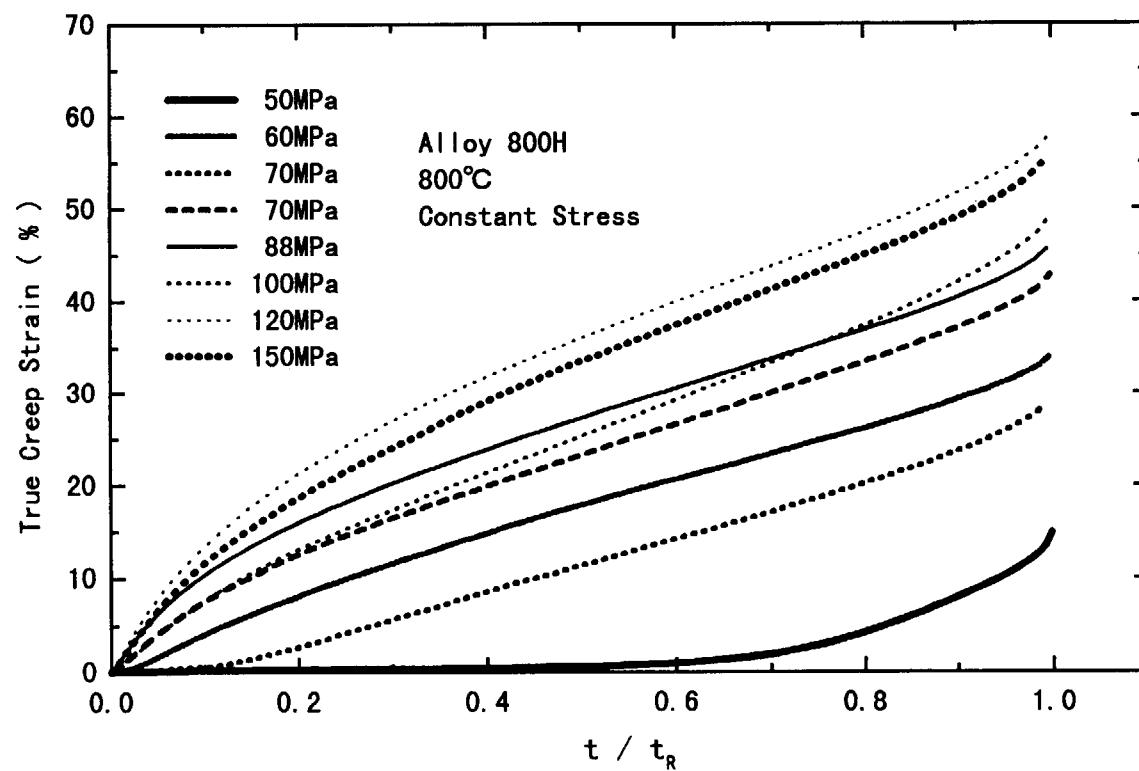


Fig. 3.39 Stress dependence of creep curve at 800°C.

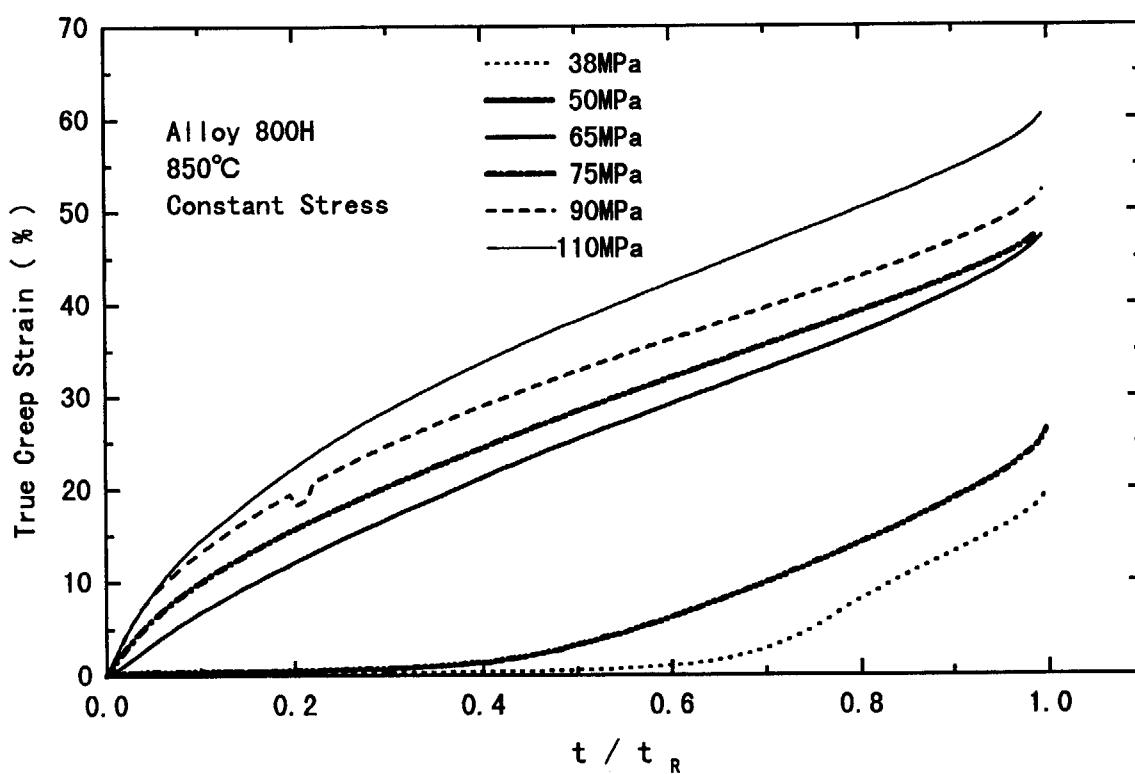


Fig. 3.40 Stress dependence of creep curve at 850°C.

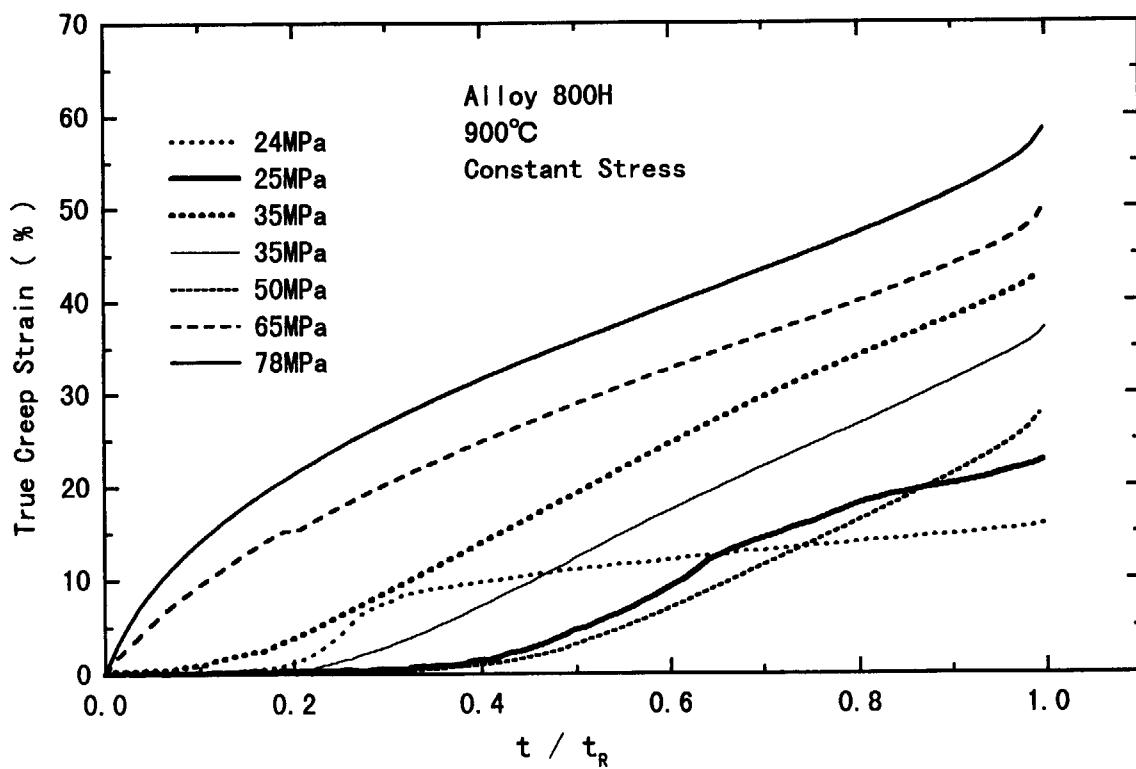


Fig. 3.41 Stress dependence of creep curve at 900°C.

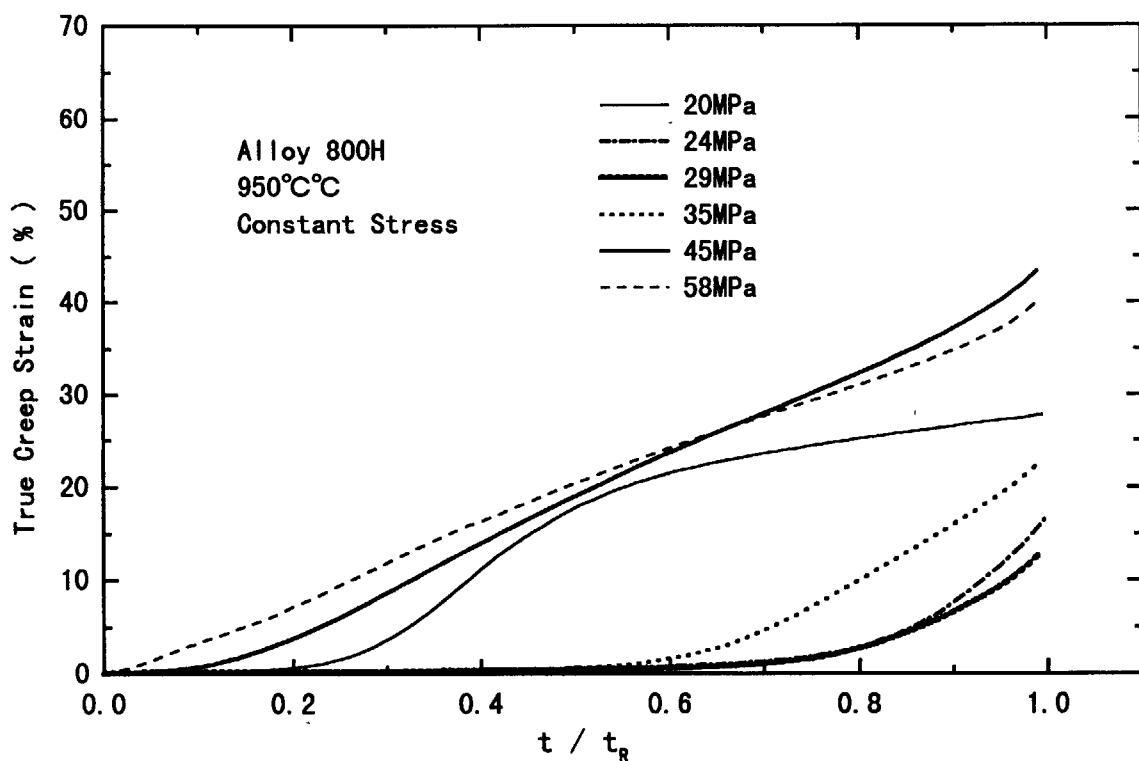


Fig. 3.42 Stress dependence of creep curve at 950°C.

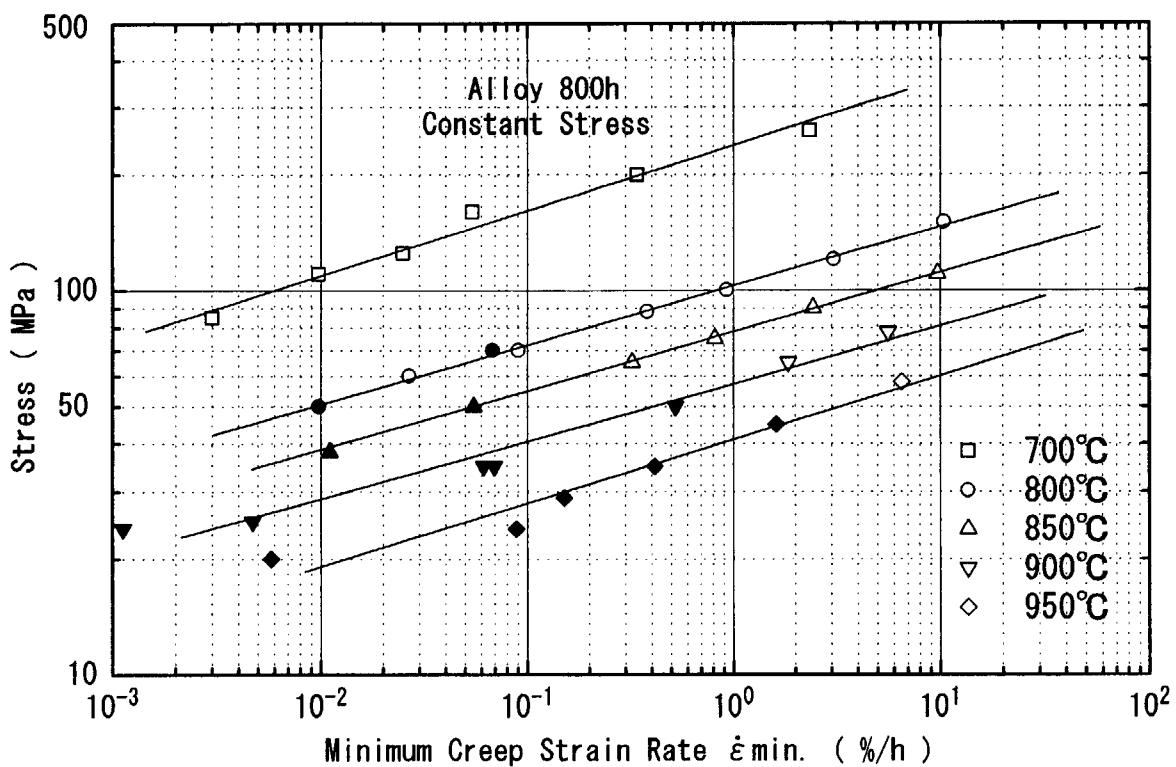
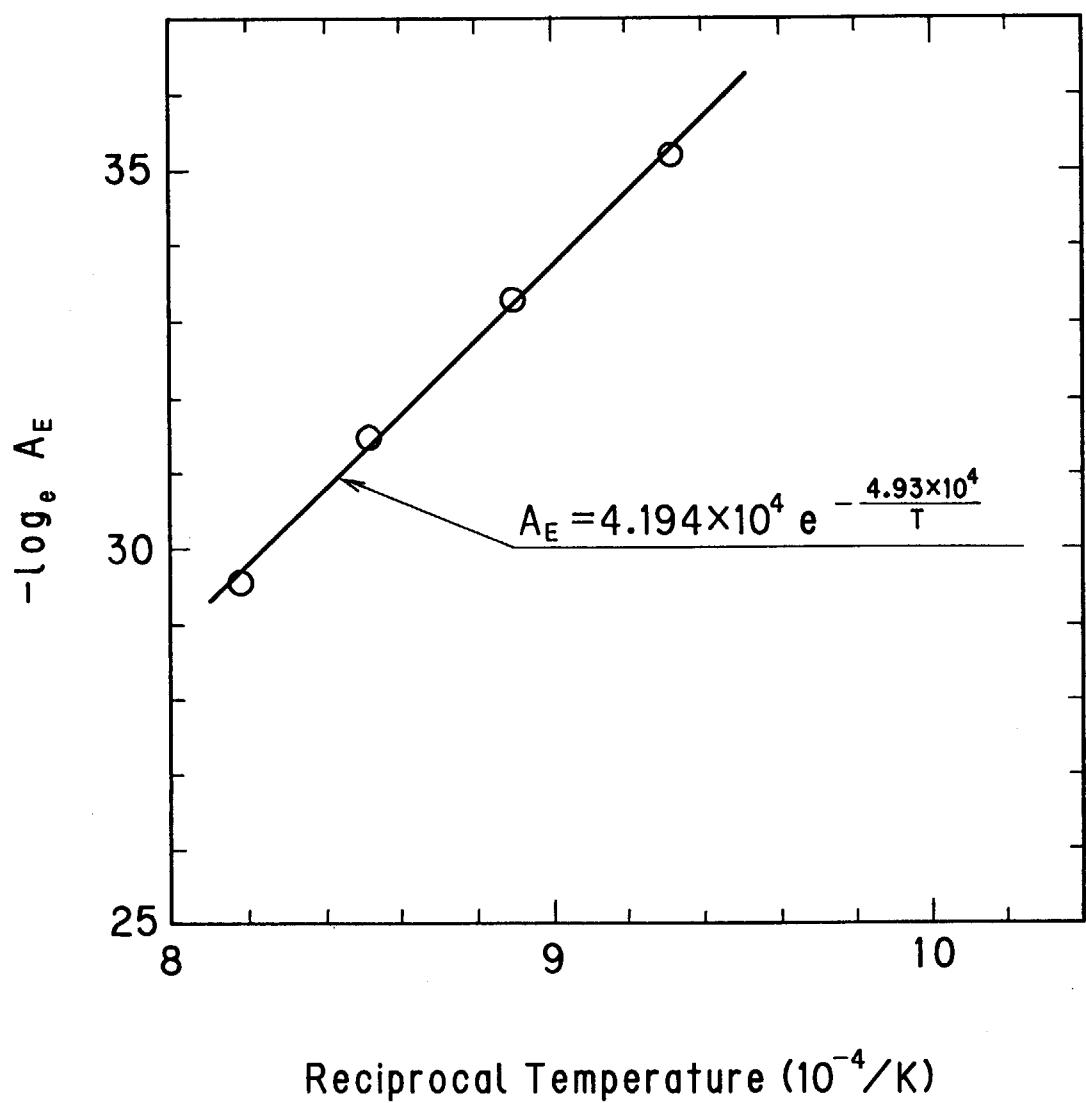


Fig. 3.43 Temperature and stress dependence of the minimum creep rate.

Fig. 3.44 Temperature dependence of parameter A_E .

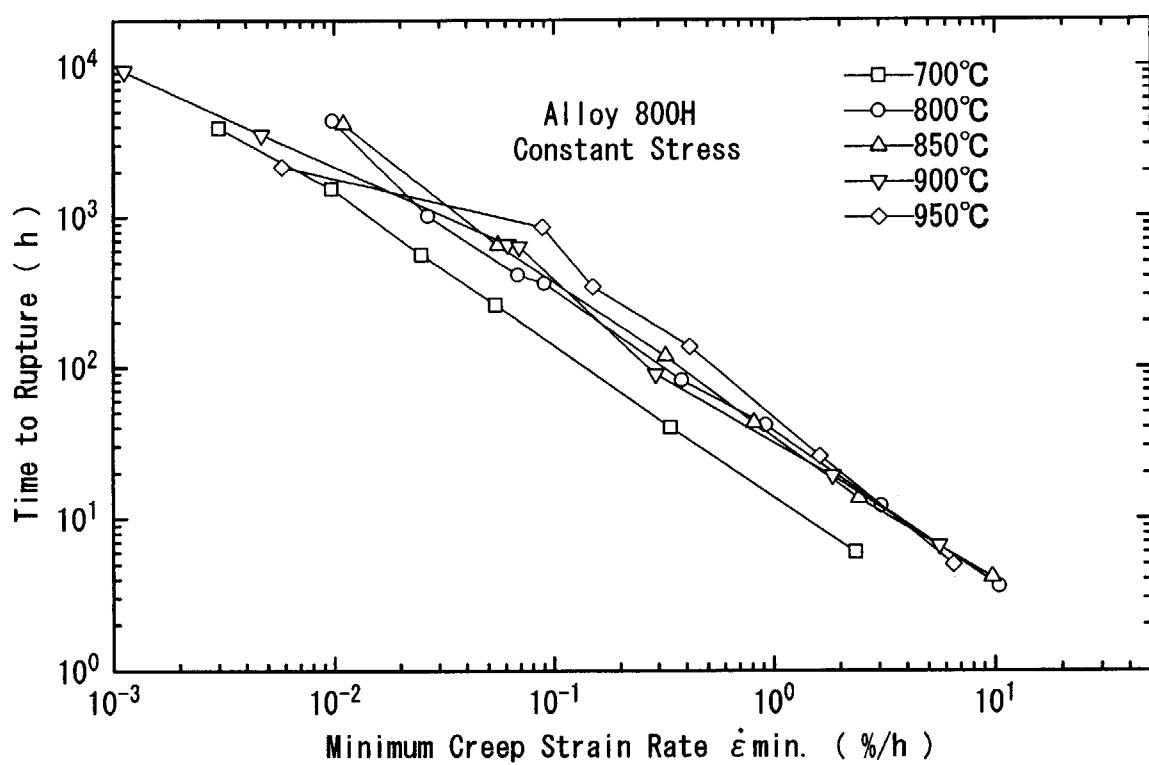


Fig. 3.45 Relationship between the time to rupture and the minimum creep rate.

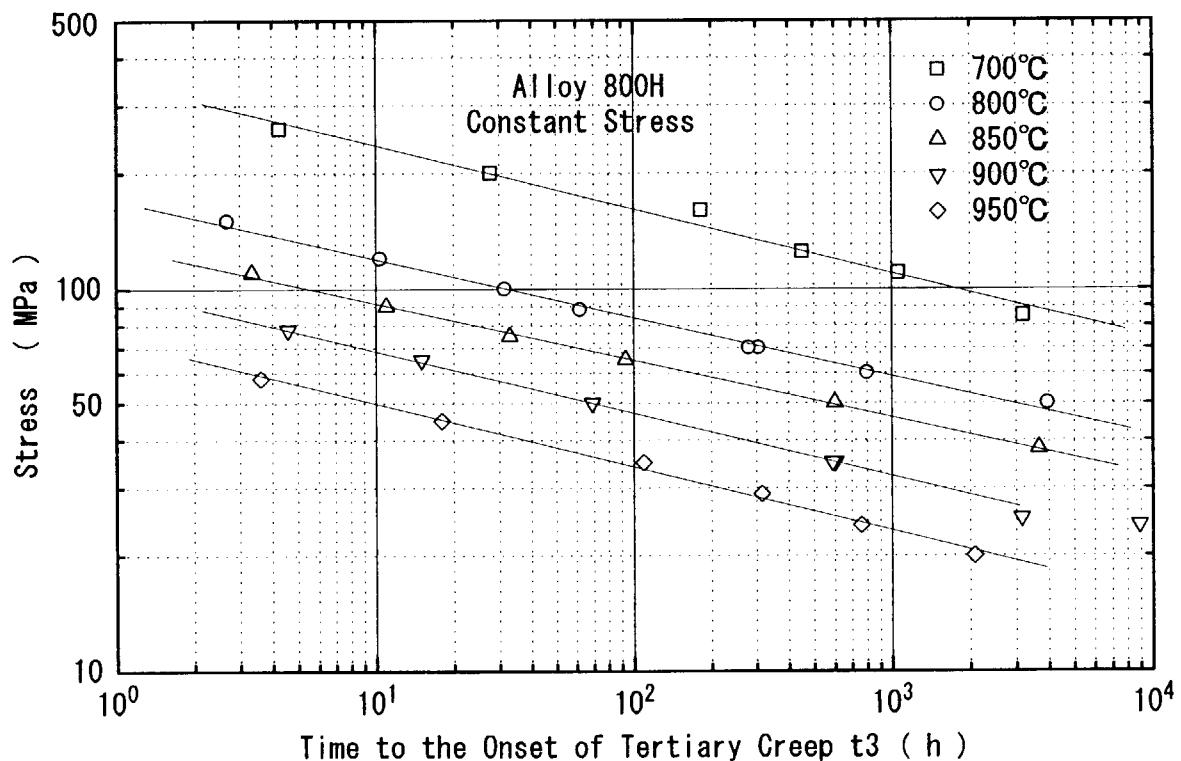
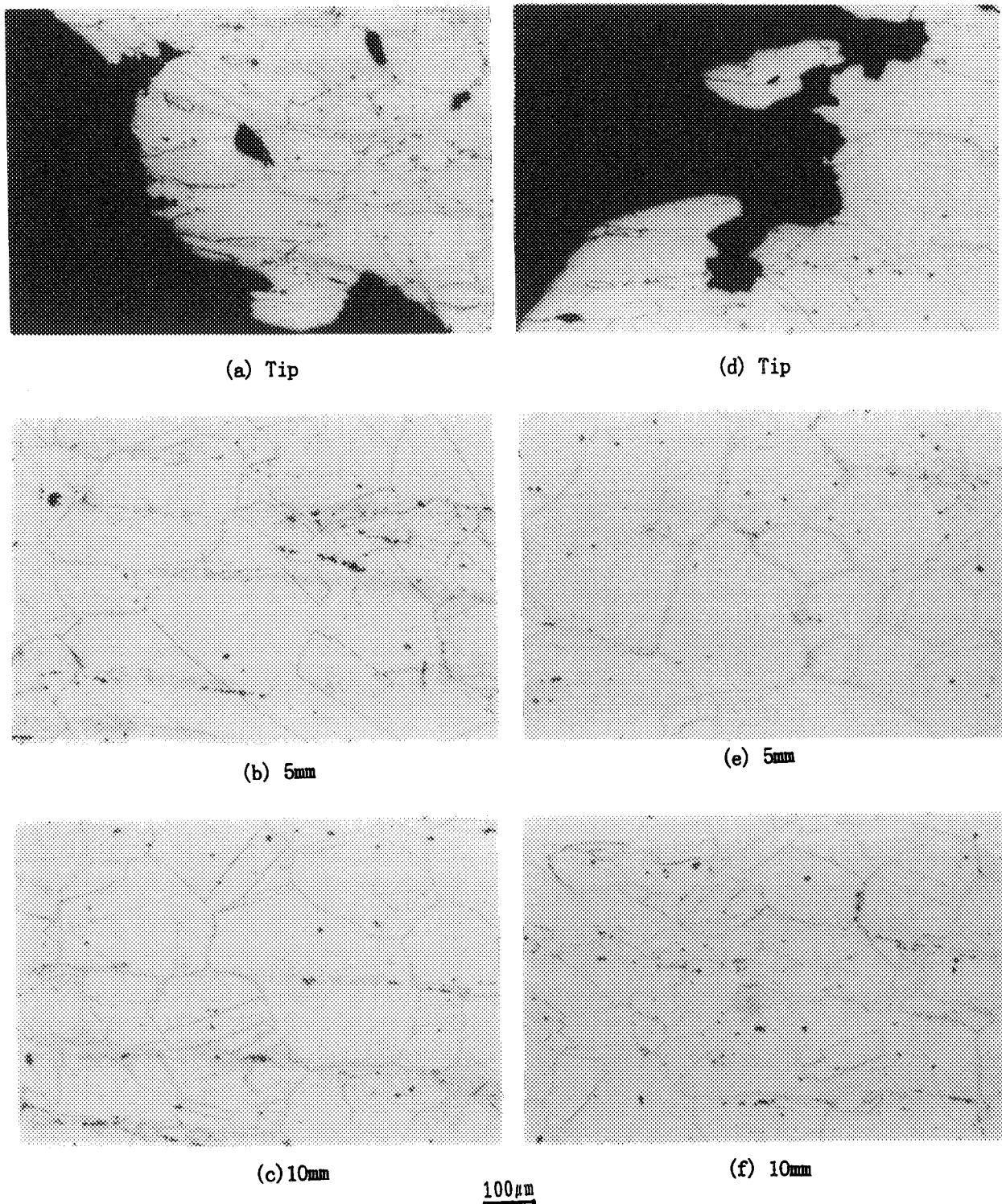


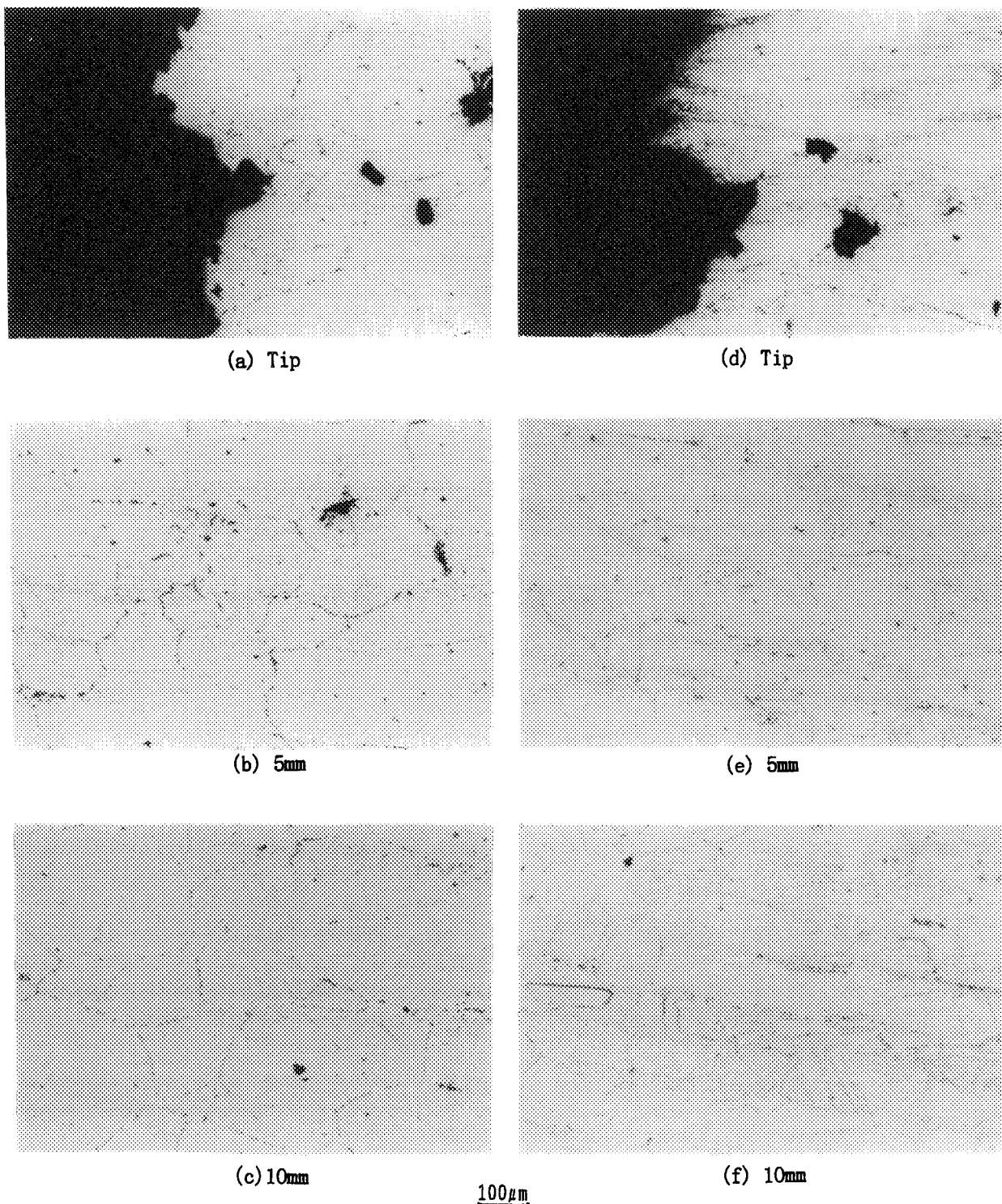
Fig. 3.46 Temperature and stress dependence of the time to the onset of tertiary creep.



$T=700^{\circ}\text{C}$, $\sigma=85\text{ MPa}$, $t_{\text{R}}=3905.4\text{ h}$,

$T=700^{\circ}\text{C}$, $\sigma=160\text{ MPa}$, $t_{\text{R}}=258.8\text{ h}$,

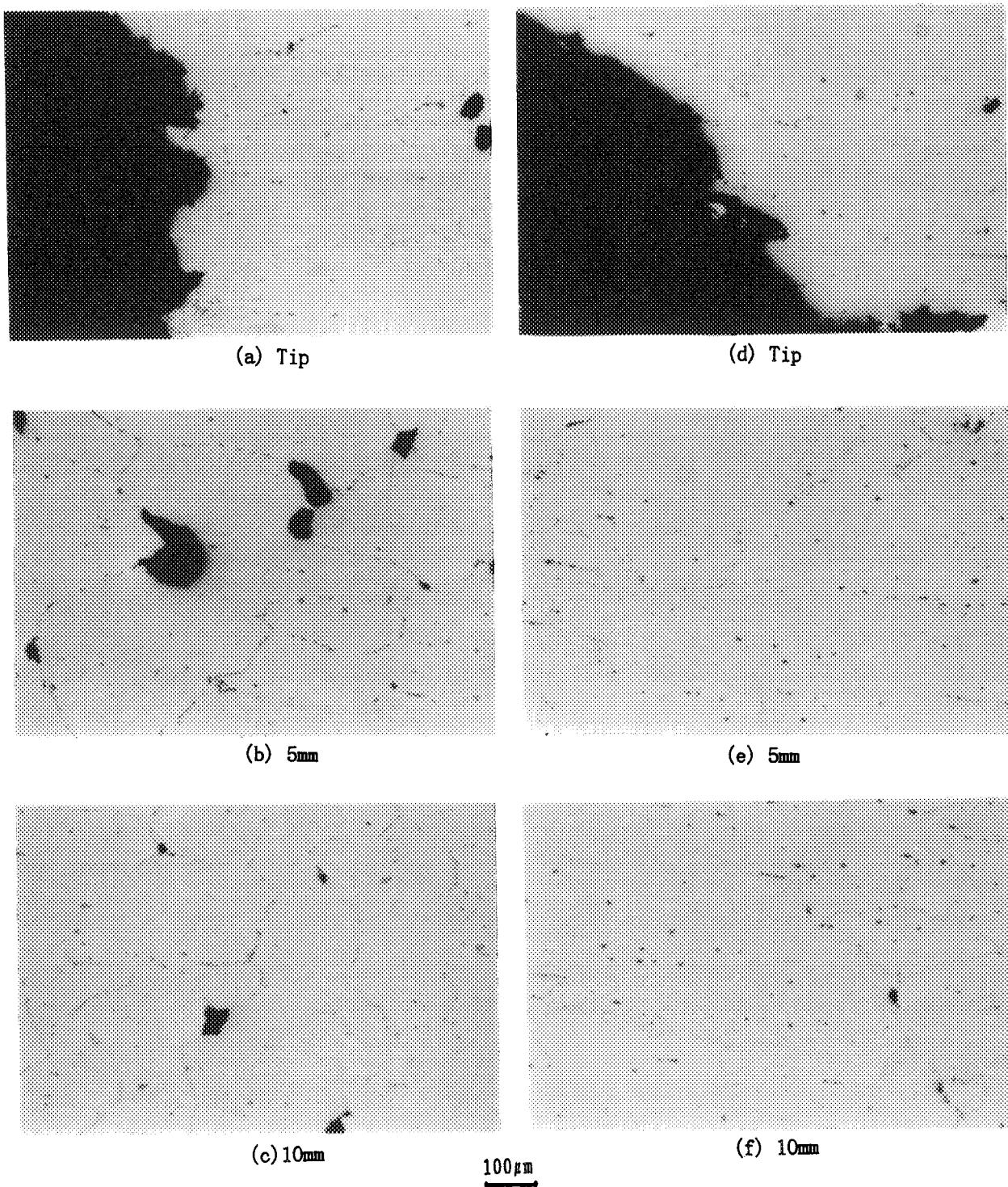
Fig. 3.47 Microstructure of ruptured specimens at 700°C .



$T=800^{\circ}\text{C}$, $\sigma=50\text{ MPa}$, $t_{\text{R}}=4354.5\text{ h}$,

$T=800^{\circ}\text{C}$, $\sigma=70\text{ MPa}$, $t_{\text{R}}=360.5\text{ h}$,

Fig. 3.48 Microstructure of ruptured specimens at 800°C .



$T=850^\circ\text{C}$, $\sigma=38\text{ MPa}$, $t_R=4144.5\text{ h}$,

$T=850^\circ\text{C}$, $\sigma=65\text{ MPa}$, $t_R=117.8\text{ h}$,

Fig. 3.49 Microstructure of ruptured specimens at 850°C .

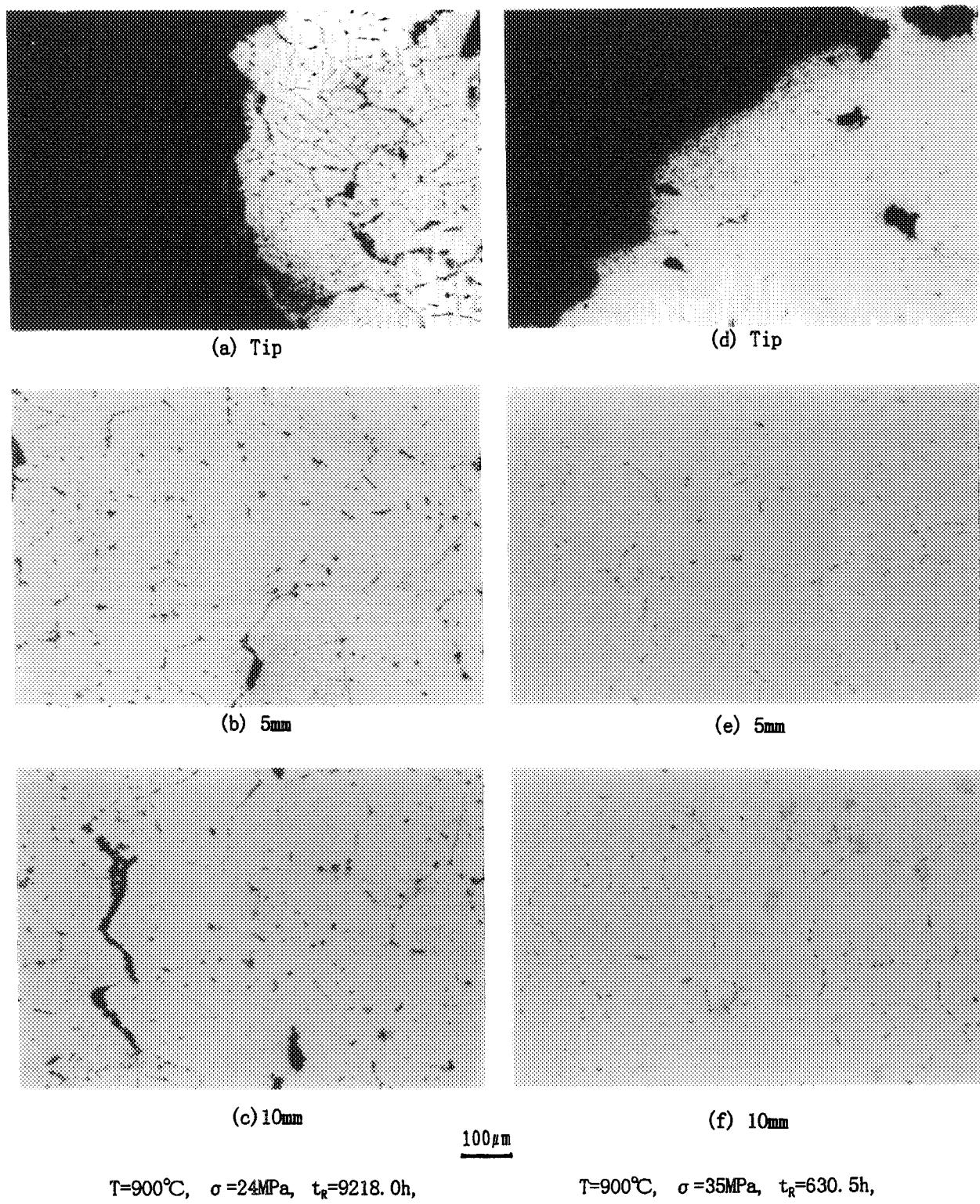
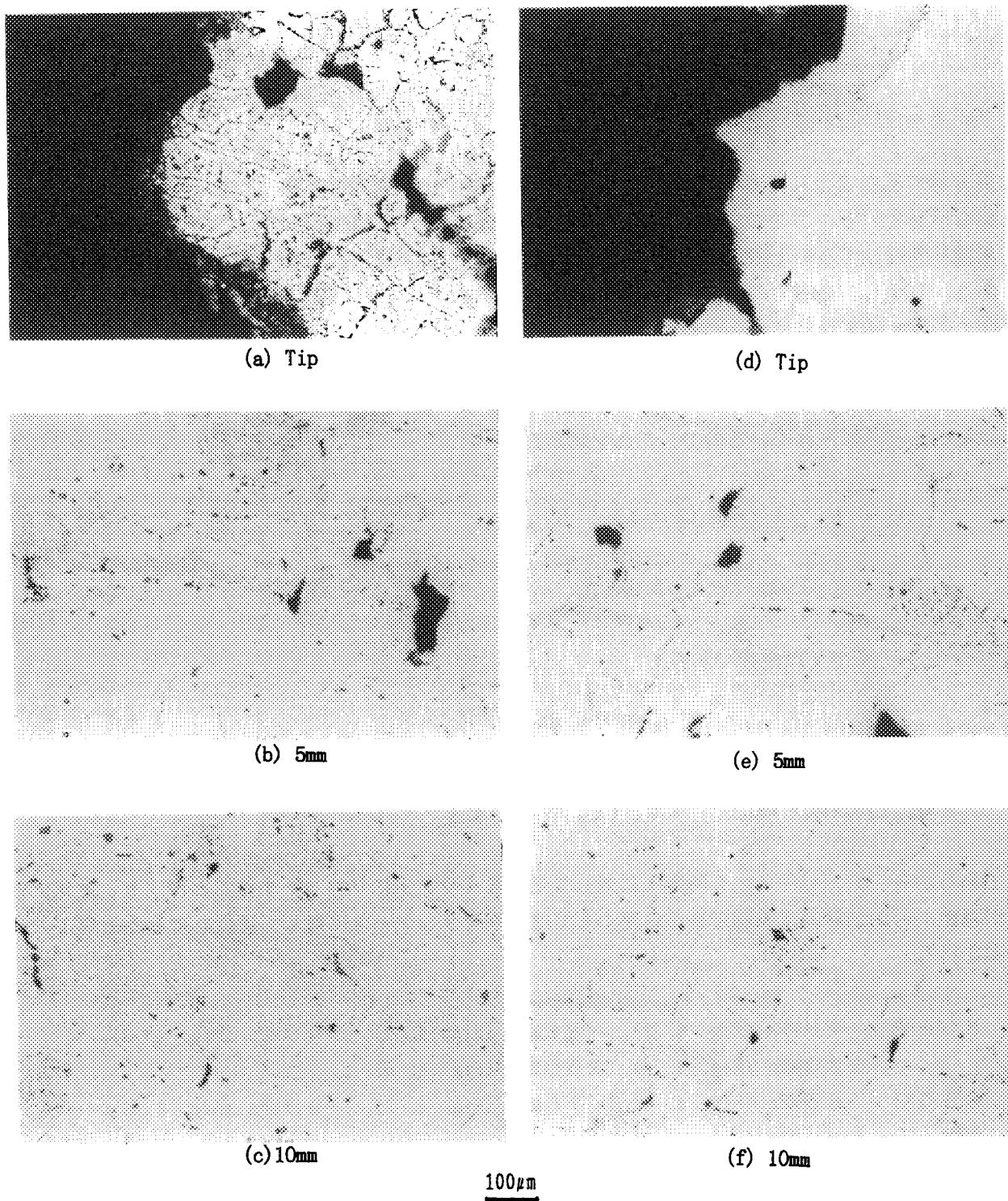


Fig. 3.50 Microstructure of ruptured specimens at 900°C.



$T=950^\circ\text{C}, \sigma=20\text{ MPa}, t_R=2153.3\text{ h},$

$T=950^\circ\text{C}, \sigma=29\text{ MPa}, t_R=342.8\text{ h},$

Fig. 3.51 Microstructure of ruptured specimens at 950°C.

4. クリープ構成式

4. 1 古典的クリープ曲線の場合

第3章で見たように800°C~900°Cの高応力側では典型的な1次+2次+3次クリープ曲線を示している。ここでクリープ構成式作成に用いるデータの範囲としては、構造設計基準上で累積非弾性ひずみの上限が5%と定められているので、この範囲のデータに基づくのが理想的である。しかし、高応力の場合、この範囲は遷移クリープの初期段階に属し、素材の初期の金属組織の影響を強く受けてばらつきが大きい。これに対して定常ひずみ速度の値は比較的良好なデータ整理が可能である。それ故、ここでは定常クリープにかかるまでの全遷移クリープ期間を対象にして定式化を行うことにした。このような場合、次のGarofalo型のクリープ構成式が良くあてはまることが知られているので、これを試みる。

$$\dot{\epsilon}_c(t) = \dot{\epsilon}_t \{ 1 - \exp(-r t) \} + \dot{\epsilon}_{\min} t \quad (4. 1)$$

$$\dot{\epsilon}_c(t) = \dot{\epsilon}_t r \exp(-r t) + \dot{\epsilon}_{\min} \quad (4. 2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_t$ 及び r は定数である。

上式を変形すると、

$$\ln_e \{ \dot{\epsilon}_c(t) - \dot{\epsilon}_{\min} \} = \ln_e (\dot{\epsilon}_t r) - r t \quad (4. 3)$$

であるから、 $\dot{\epsilon}_c(t) - \dot{\epsilon}_{\min}$ を時間 t に対して半対数グラフ上にプロットすることにより、定式化が可能か否かが容易に確認できる。良くあてはまりそうなケースに対して実行してみると以下の図を得る。

800°C	70 MPa (Fig. 4. 1),	88 MPa (Fig. 4. 2),	100 MPa (Fig. 4. 3),
	120 MPa (Fig. 4. 4),	150 MPa (Fig. 4. 5)	
850°C	65 MPa (Fig. 4. 6),	75 MPa (Fig. 4. 7),	90 MPa (Fig. 4. 8),
	110 MPa (Fig. 4. 9)		
900°C	65 MPa (Fig. 4. 10),	78 MPa (Fig. 4. 11)	

ハステロイX Rの場合に比べるとやや劣るが、直線近似が可能であることが分る。パラメータ $\dot{\epsilon}_t$ 及び r の値を決定して図示するとFig. 4. 12及びFig. 4. 13を得る。 r の値はかなりまとまっているが、 $\dot{\epsilon}_t$ の値はばらついている。複雑な関数を用いて温度も含めて1つの式にまとめることは不可能ではないが、あまり意味がないので温度ごとに定式化することにする。

簡単のため、 r 及び ε_t 共に直線で近似すると、次式を得る。

$$800^\circ\text{C}: \quad \varepsilon_t = 0.0204 \exp(0.0159\sigma) \quad (4.4)$$

$$r = 0.00105 \exp(0.052\sigma) \quad (4.5)$$

$$850^\circ\text{C}: \quad \varepsilon_t = 0.0186 \exp(0.0205\sigma) \quad (4.6)$$

$$r = 4.22 \times 10^{-4} \exp(0.0775\sigma) \quad (4.7)$$

$$900^\circ\text{C}: \quad \varepsilon_t = 0.04 \exp(0.0165\sigma) \quad (4.8)$$

$$r = 0.00143 \exp(0.0862\sigma) \quad (4.9)$$

この温度範囲で最小ひずみ速度は次式で与えられる：

$$\dot{\varepsilon}_{\min} = 4.194 \times 10^4 \sigma^{6.57} \exp(-4.93 \times 10^4/T) \quad (4.10)$$

本式を用いてクリープひずみを計算し、実測値と比較すると下図のとおりである。

800°C 70 MPa (Fig. 4.14), 88 MPa (Fig. 4.15), 100 MPa (Fig. 4.16),

120 MPa (Fig. 4.17), 150 MPa (Fig. 4.18)

850°C 65 MPa (Fig. 4.19), 75 MPa (Fig. 4.20), 90 MPa (Fig. 4.21),

110 MPa (Fig. 4.22)

900°C 65 MPa (Fig. 4.23), 78 MPa (Fig. 4.24)

800°Cでは近似の具合が悪いが、これは最小ひずみ速度の温度依存性をArrheniusの式で表した際、800°Cでは低めに近似する結果になったことと、 ε_t のデータがばらついていることによる。また、800°Cに限らず、 r を直線近似するのは無理があり、2次曲線で近似すれば構成式は複雑になるがもっと良く合うようになる。

4. 2 非古典的クリープ曲線の場合

ここでは応力50 MPa以下で見られた時間軟化型のクリープ曲線の場合について定式化を検討する。

このような曲線の場合、次式で与えられるKachanovの式⁷⁾が著名であり、合金によっては良く当てはまると報告⁸⁾されている。

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = C_K \sigma^n (1 - \omega)^{-p} \quad (4.11)$$

$$\dot{\omega}(t) = D_K (1 - \omega)^{-q} \quad (4.12)$$

(4.12) 式を積分した後 (4.11) に代入して $t = 0$ で $\omega = 0$ 、 $t = t_R$ で $\omega = 1$ と仮定することにより、

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = C_K \sigma^n (1 - t/t_R)^{-p/(q+1)} \quad (4.13)$$

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \lambda t_R C_K \sigma^n \{1 - (1 - t/t_R)^{1/\lambda}\} \quad (4.14)$$

ここで

$$\begin{aligned} t_R &= \text{クリープ破断時間 (h)} \\ \lambda &= (q+1)/(q-p+1) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$\dot{\varepsilon}_c(t)$ と $\varepsilon_c(t)$ の比をとると、

$$\dot{\varepsilon}_c(t)/\varepsilon_c(t) = \lambda^{-1} t_R^{-1} (1 - t/t_R)^{(1-\lambda)/\lambda} / \{1 - (1 - t/t_R)^{1/\lambda}\} \quad (4.16)$$

となり、この関数は $t/t_R = 1 - [(\lambda-1)/\lambda]^\lambda$ で極小値をとる。

試験データの $\dot{\varepsilon}_c(t)/\varepsilon_c(t)$ を調べてみるとこのようにはならない。即ち、本材料の場合においては Kachanov の式はあてはまらない。

クリープ曲線の図から別の関数形式として指数関数が当てはまる可能性があることが想像できる。

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = C_E \exp(\gamma t) \quad (4.17)$$

これを検証するために、あてはまりそうなケースについて、 $\dot{\varepsilon}_c(t)$ の値を半対数グラフ上にプロットすると下記の図を得る。

800°C : 50 MPa (Fig. 4.25)

850°C : 38 MPa (Fig. 4.26), 50 MPa (Fig. 4.27)

900°C : 24 MPa (Fig. 4.28), 25 MPa (Fig. 4.29), 35 MPa (Fig. 4.30),
35 MPa (Fig. 4.31), 50 MPa (Fig. 4.32)

950°C : 20 MPa (Fig. 4.33), 24 MPa (Fig. 4.34), 29 MPa (Fig. 4.35),
35 MPa (Fig. 4.36), 45 MPa (Fig. 4.37)

これより C_E 及び γ はつぎのように定式化される。

先ず、 C_E の対数を温度ごとに応力に対してプロットすると Fig. 4.38 のようになる。かなりばらついているが強引に直線で近似すると次式を得る。

$$\ln C_E = -1 \ln F + 0.39 \sigma \quad (4.18)$$

ここで 800°C : $\ln F = 36.30$

850°C : $\ln F = 32.37$

900°C : $\ln F = 27.39$

950°C: $\ln F = 24.35$

$\ln F$ の値を絶対温度の逆数に対してプロットすると Fig. 4. 39 を得る。
直線近似して、

$$F = 2.65 \times 10^{-29} \exp(1.10 \times 10^5/T) \quad (4.19)$$

したがって、 C_E は次式で表される。

$$C_E = 3.77 \times 10^{28} \exp(0.39\sigma - 1.10 \times 10^5/T) \quad (4.20)$$

次に γ の値を半対数グラフ上にプロットすると、Fig. 4. 40 を得る。直線近似すると次式を得る。

$$\ln \gamma = \ln H + 0.174\sigma \quad (4.21)$$

ここで
 800°C: $H = 3.57 \times 10^{-7}$
 850°C: $H = 3.15 \times 10^{-6}$
 900°C: $H = 3.47 \times 10^{-5}$
 950°C: $H = 2.02 \times 10^{-4}$

H の値を絶対温度の逆数に対して半対数グラフ上にプロットすると Fig. 4. 41 を得る。
直線近似して、

$$H = 5.17 \times 10^{16} \exp(-5.73 \times 10^4/T) \quad (4.22)$$

したがって、 γ は次式で表される。

$$\gamma = 5.17 \times 10^{16} \exp(0.174\sigma - 5.73 \times 10^4/T) \quad (4.23)$$

式 (4.17) から $t=0$ で $\varepsilon_c=0$ となるように $\varepsilon_c(t)$ を求め、式 (4.20)、式 (4.23) とまとめて書くと、

$$\varepsilon_c(t) = C_E \gamma \{ \exp(\gamma t) - 1 \} \quad (4.24)$$

$$C_E = 3.77 \times 10^{28} \exp(0.39\sigma - 1.10 \times 10^5/T) \quad (4.25)$$

$$\gamma = 5.17 \times 10^{16} \exp(0.174\sigma - 5.73 \times 10^4/T) \quad (4.26)$$

を得る。

得られた式を用いてクリープ曲線を計算し、実験値と比較すると下図のようになる。

800°C : 50 MPa (Fig. 4.42)

850°C : 38 MPa (Fig. 4.43), 50 MPa (Fig. 4.44)

900°C : 24 MPa (Fig. 4.45), 25 MPa (Fig. 4.46), 35 MPa (Fig. 4.47),
35 MPa (Fig. 4.48), 50 MPa (Fig. 4.49)

950°C : 20 MPa (Fig. 4.50), 24 MPa (Fig. 4.51), 29 MPa (Fig. 4.52),
35 MPa (Fig. 4.53), 45 MPa (Fig. 4.54)

計算値が実験値と大幅に異なるケースがかなり見受けられる。この最大の原因は指数関数の係数であるパラメータ C_E の値 (Fig. 4.38) がばらついているためである。例えば 900°C の場合、Fig. 4.38 で 50 MPa の値は他の 4 個のデータと比べて格段に大きい。したがって、回帰線は 50 MPa に対しては大きすぎ、その他の 24 MPa, 25 MPa, 35 MPa (AH-112), 35 MPa (AH-109) のデータに対しては小さすぎる推定値となっている。計算値が実験値が良く一致している、例えば 950°C, 45 MPa (Fig. 4.54) の場合で見るとかなり良い推定となっており、指数関数で推定すること自体は妥当であるといえよう。

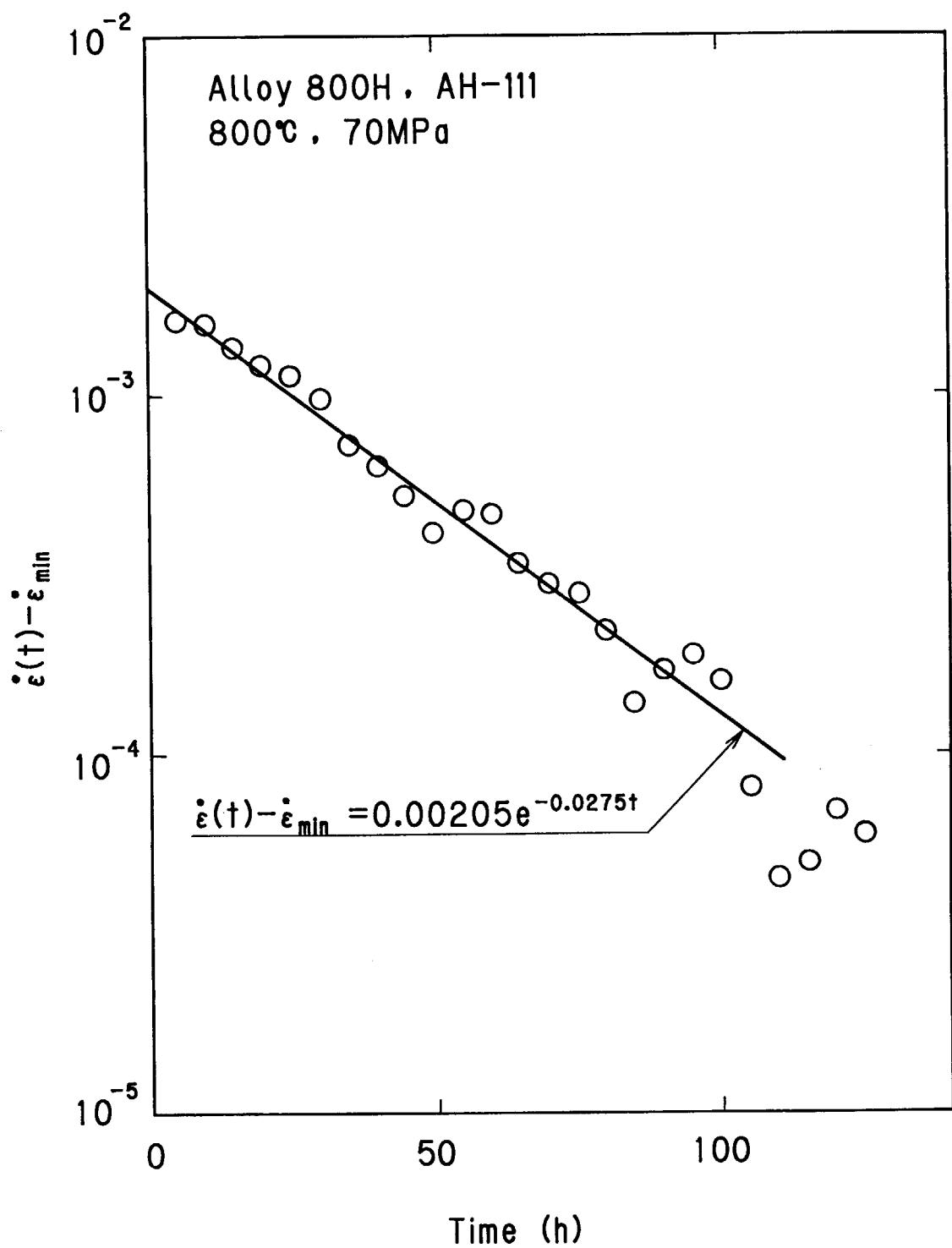


Fig. 4. 1 Primary creep strain rate vs. time for 70MPa at 800°C.

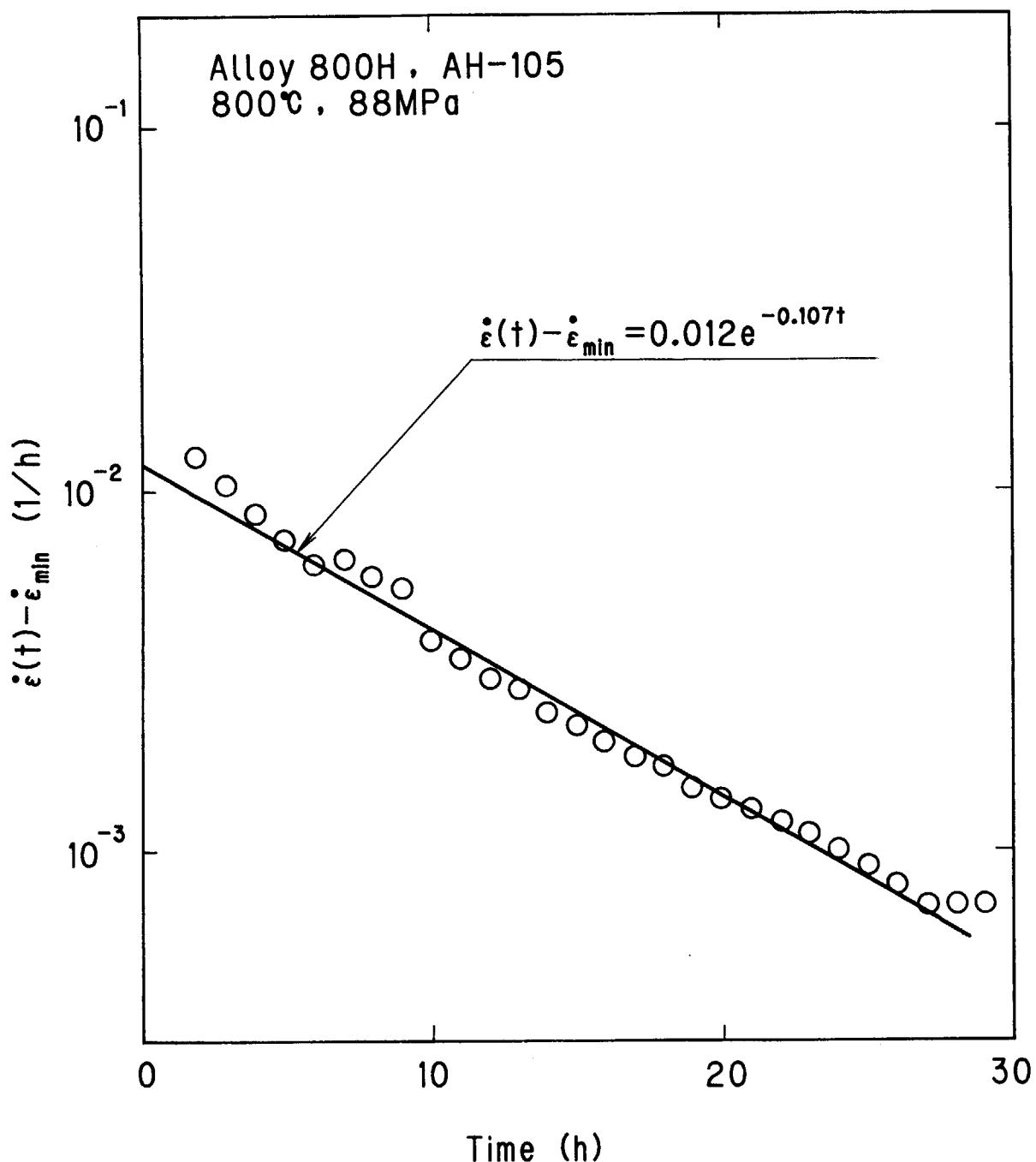


Fig. 4. 2 Primary creep strain rate vs. time for 88MPa at 800°C.

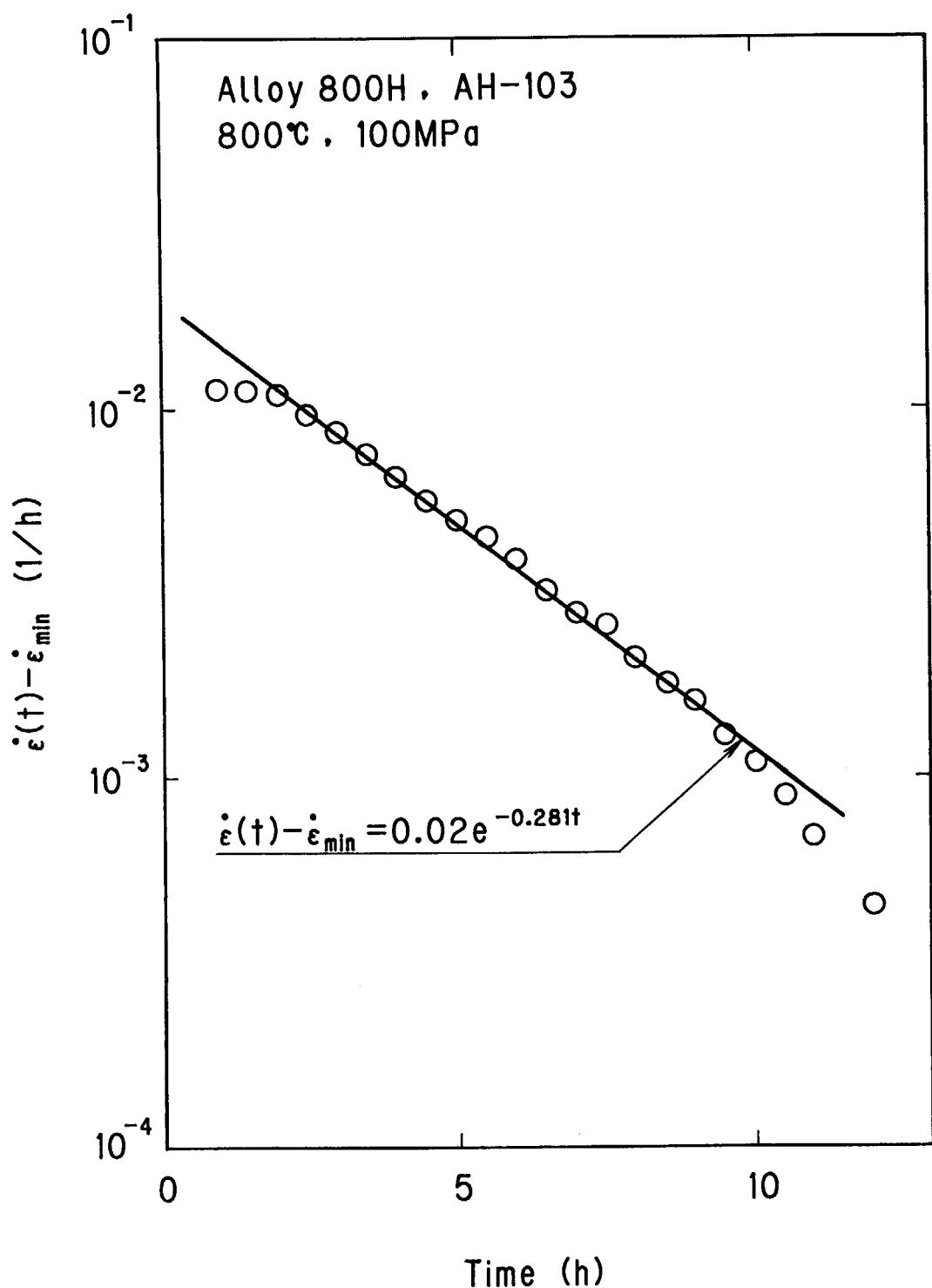


Fig. 4. 3 Primary creep strain rate vs. time for 100MPa at 800°C.

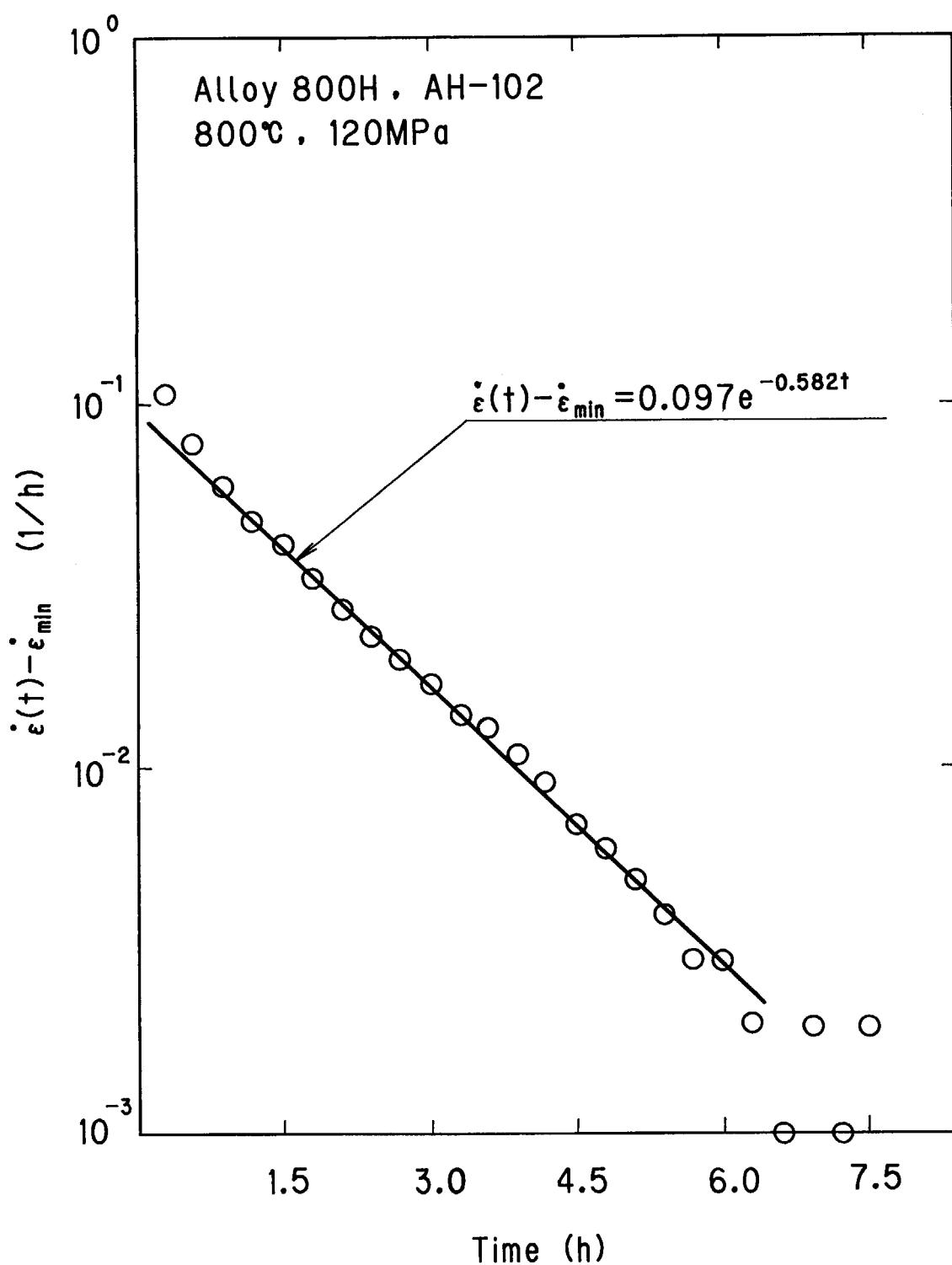


Fig. 4. 4 Primary creep strain rate vs. time for 120MPa at 800°C.

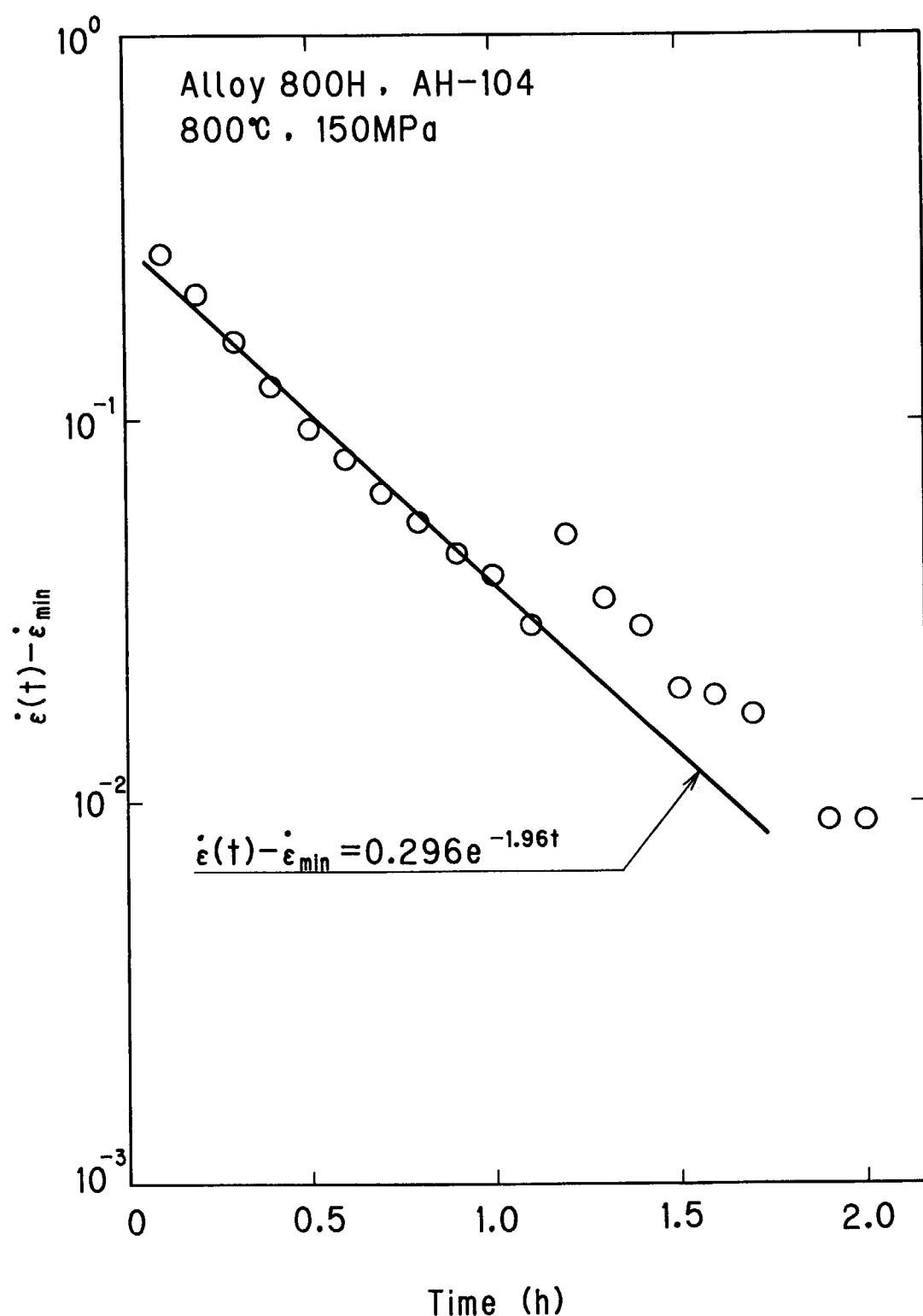


Fig. 4. 5 Primary creep strain rate vs. time for 150MPa at 800°C.

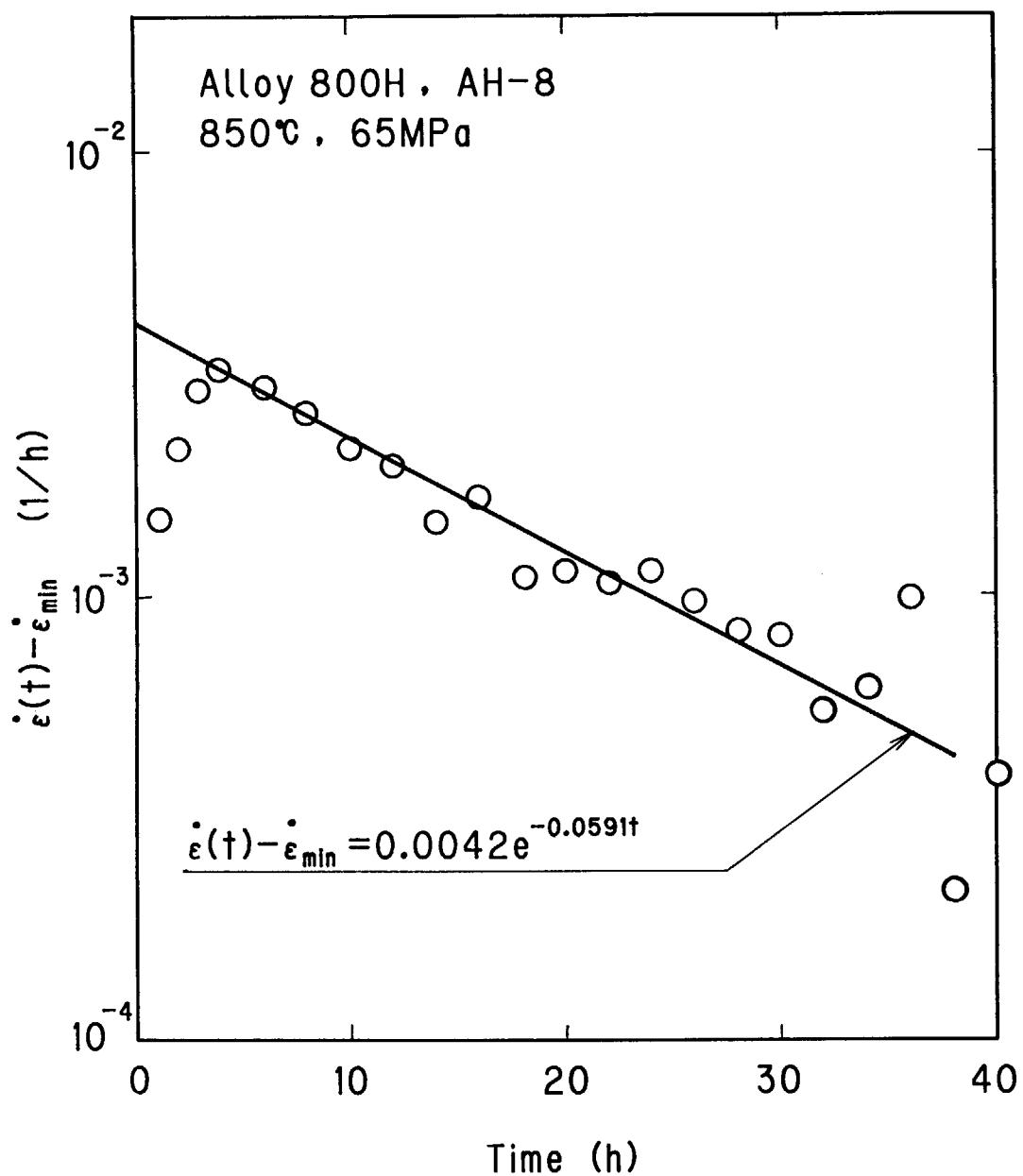


Fig. 4. 6 Primary creep strain rate vs. time for 65MPa at 850°C.

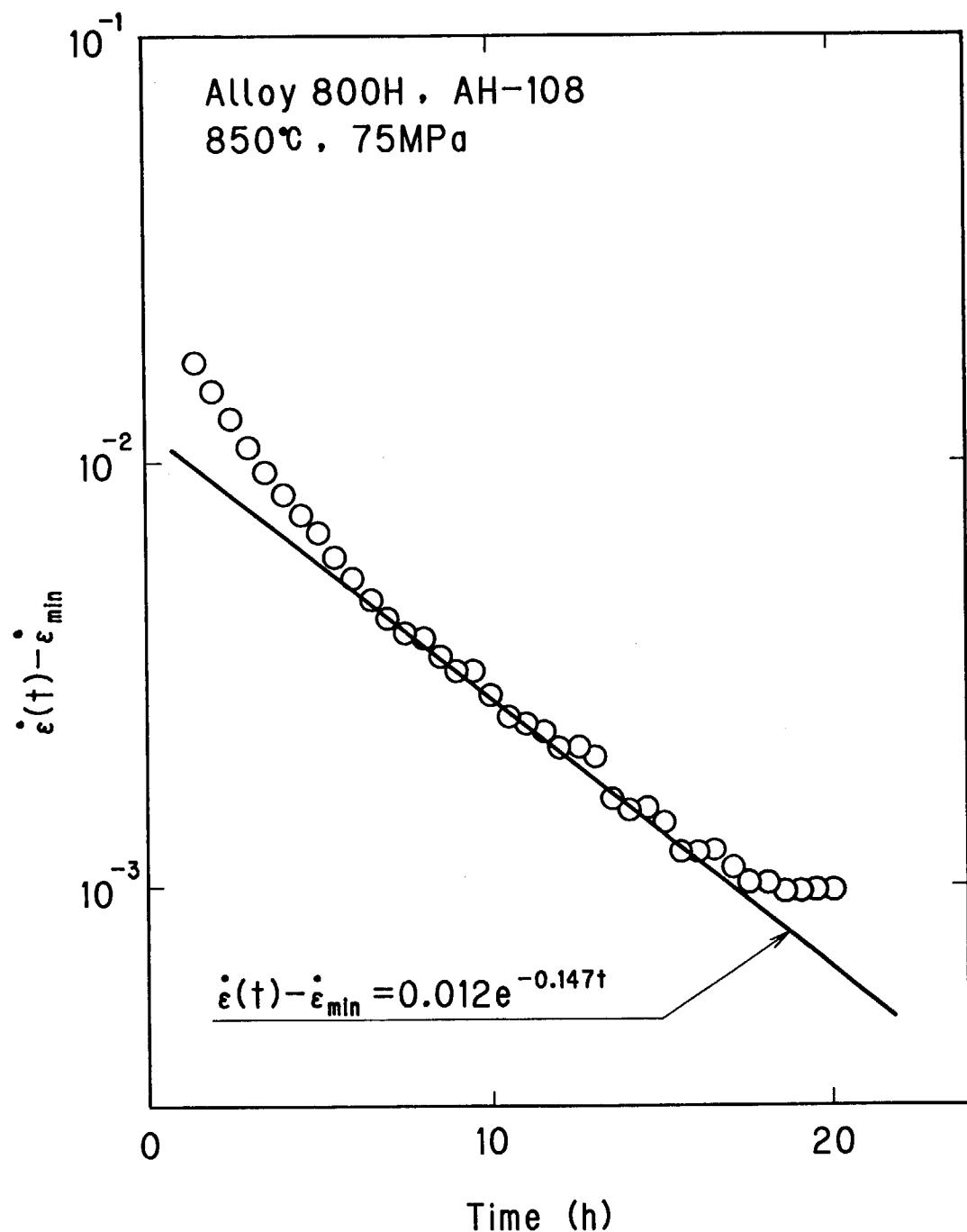


Fig. 4. 7 Primary creep strain rate vs. time for 75MPa at 850°C.

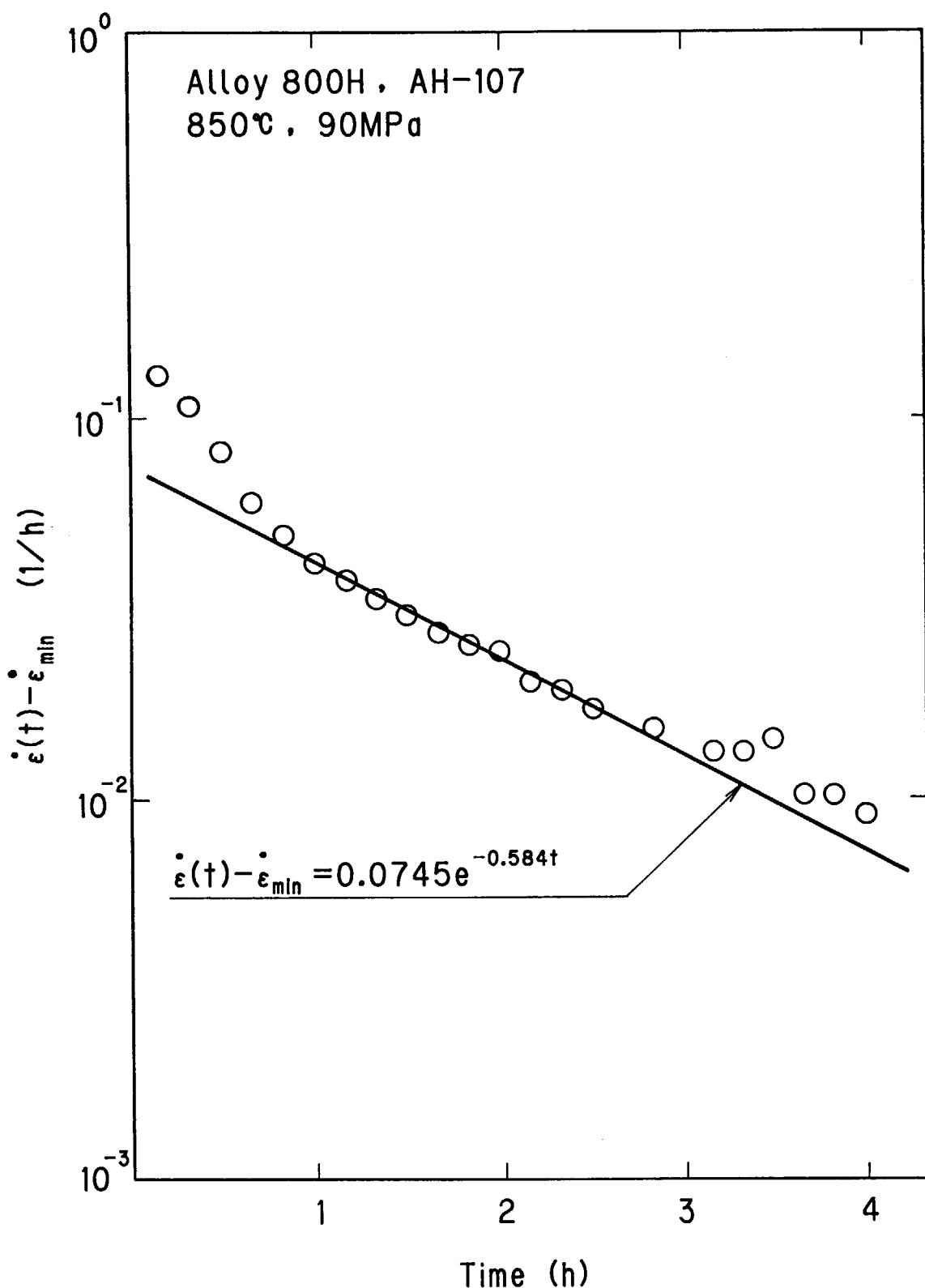


Fig. 4. 8 Primary creep strain rate vs. time for 90MPa at 850°C.

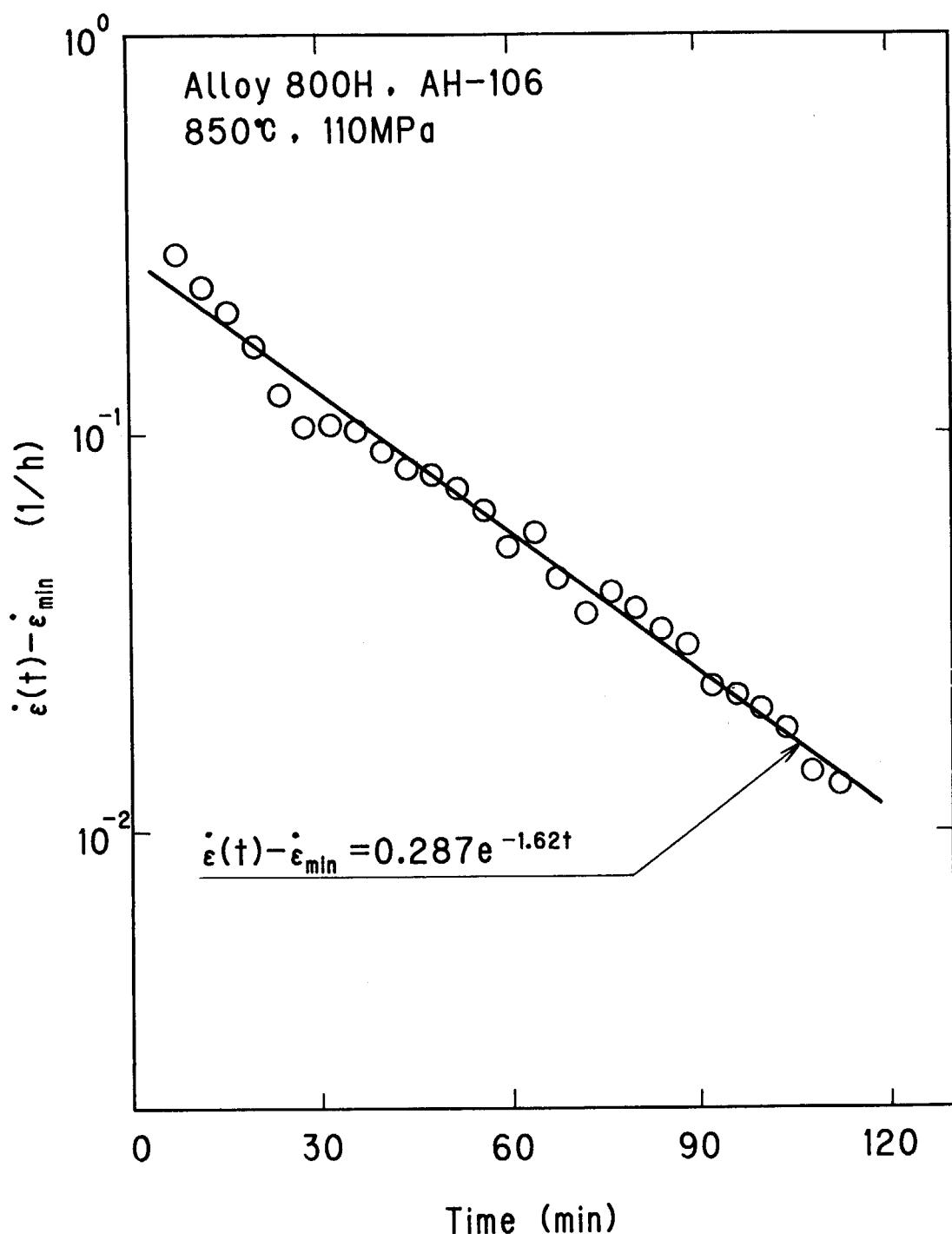


Fig. 4. 9 Primary creep strain rate vs. time for 110MPa at 850°C.

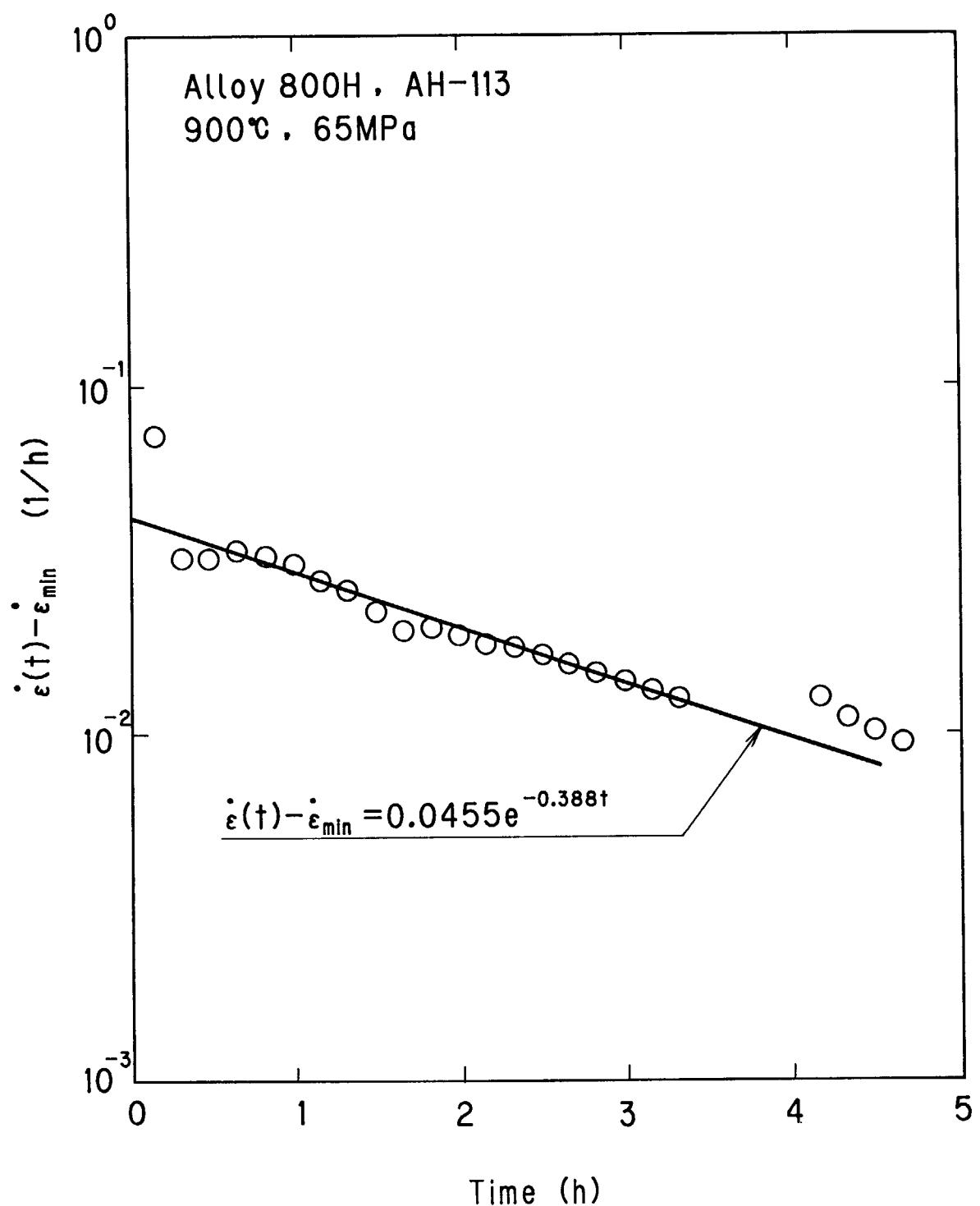


Fig. 4.10 Primary creep strain rate vs. time for 65MPa at 900°C.

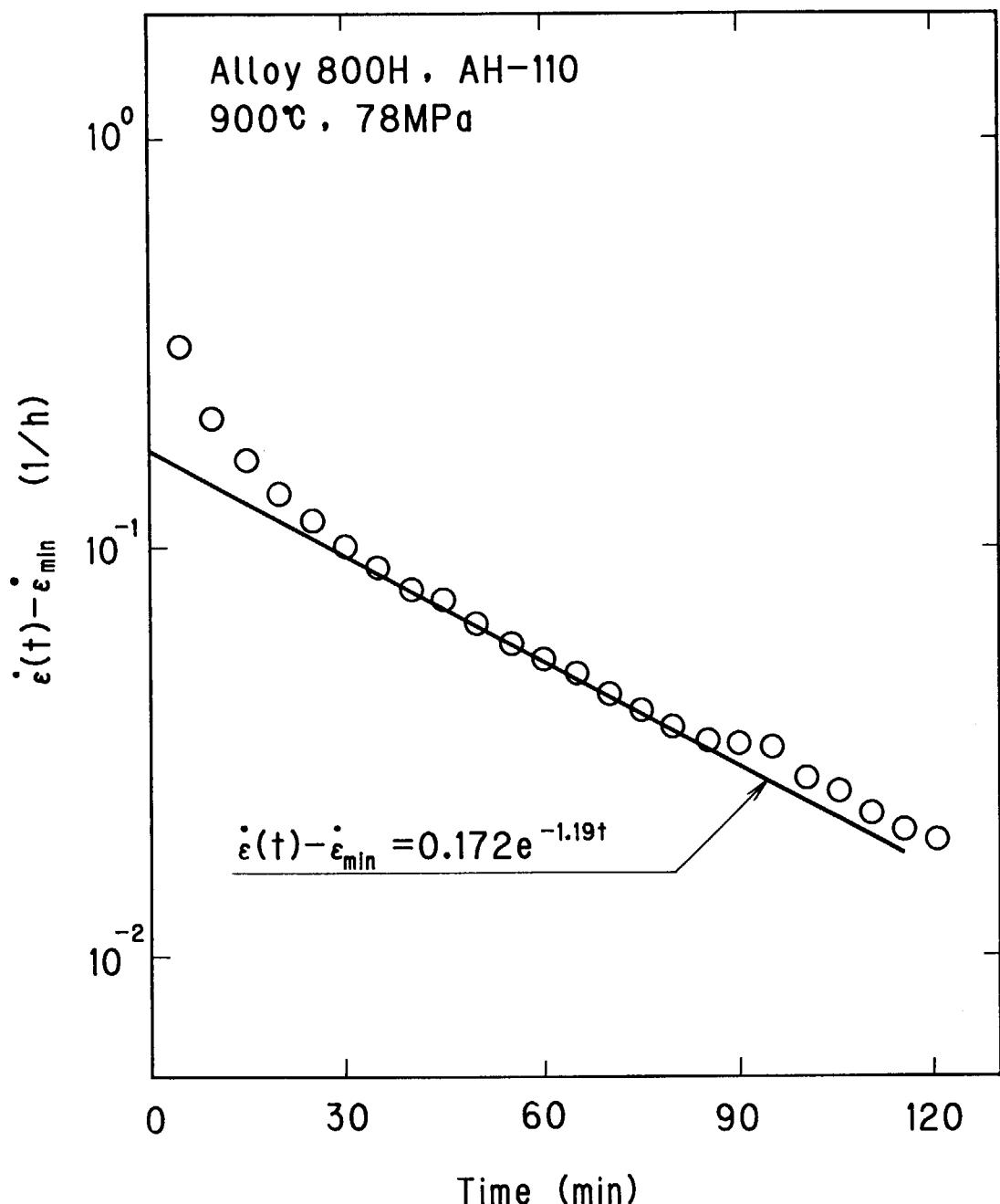
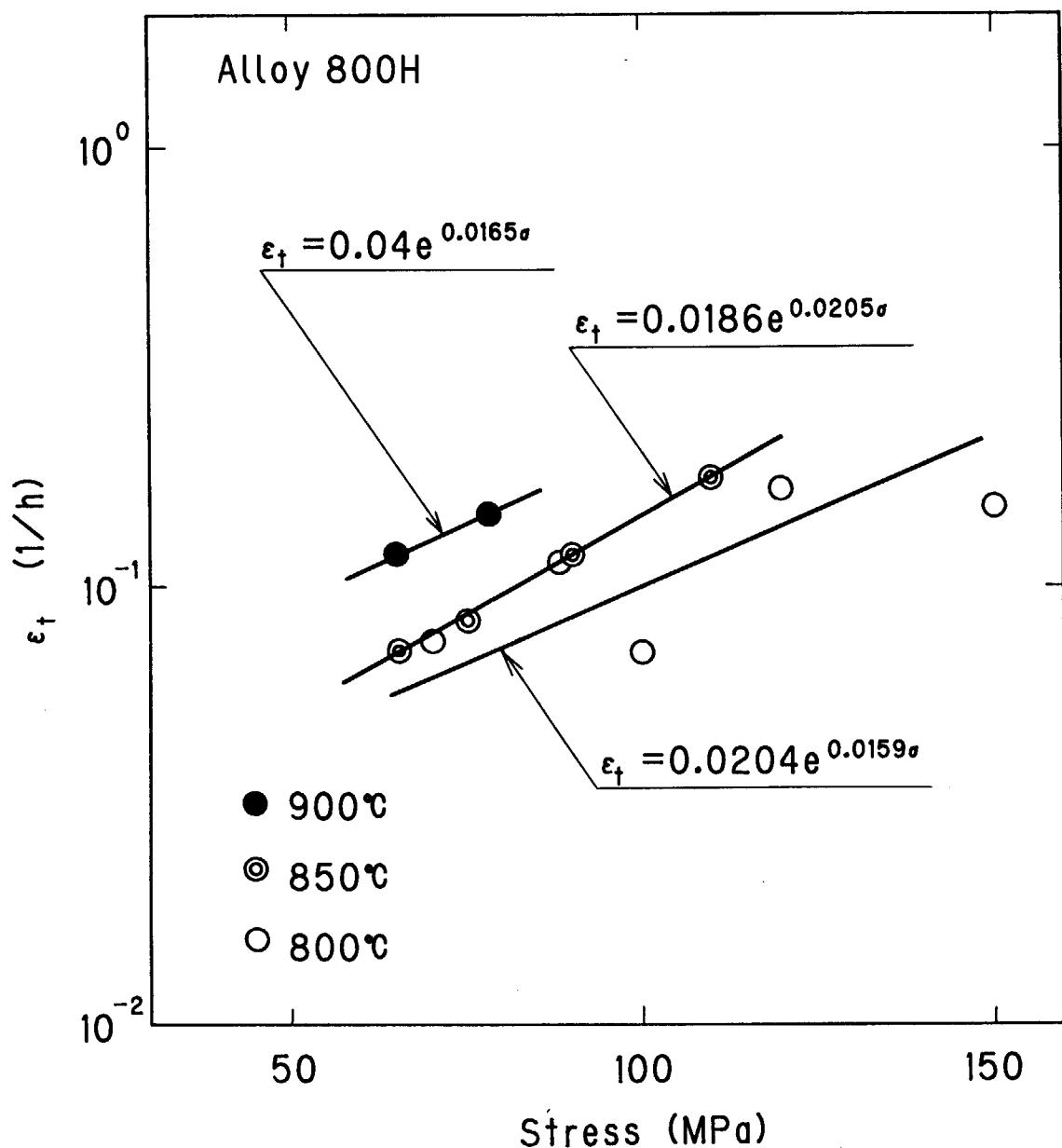
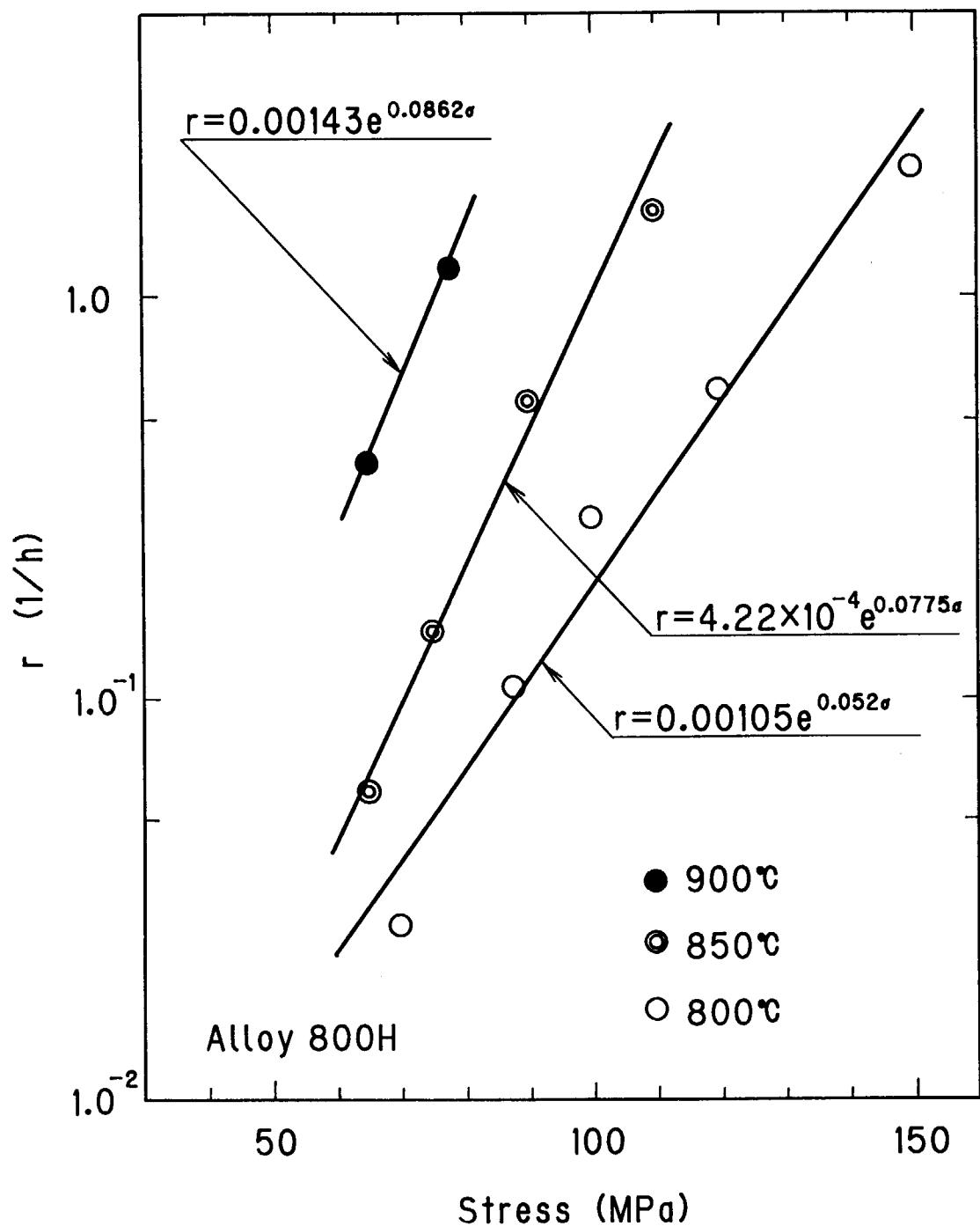


Fig. 4.11 Primary creep strain rate vs. time for 78MPa at 900°C.

Fig. 4.12 Temperature and stress dependence of parameter ϵ_t .

Fig. 4.13 Temperature and stress dependence of parameter r .

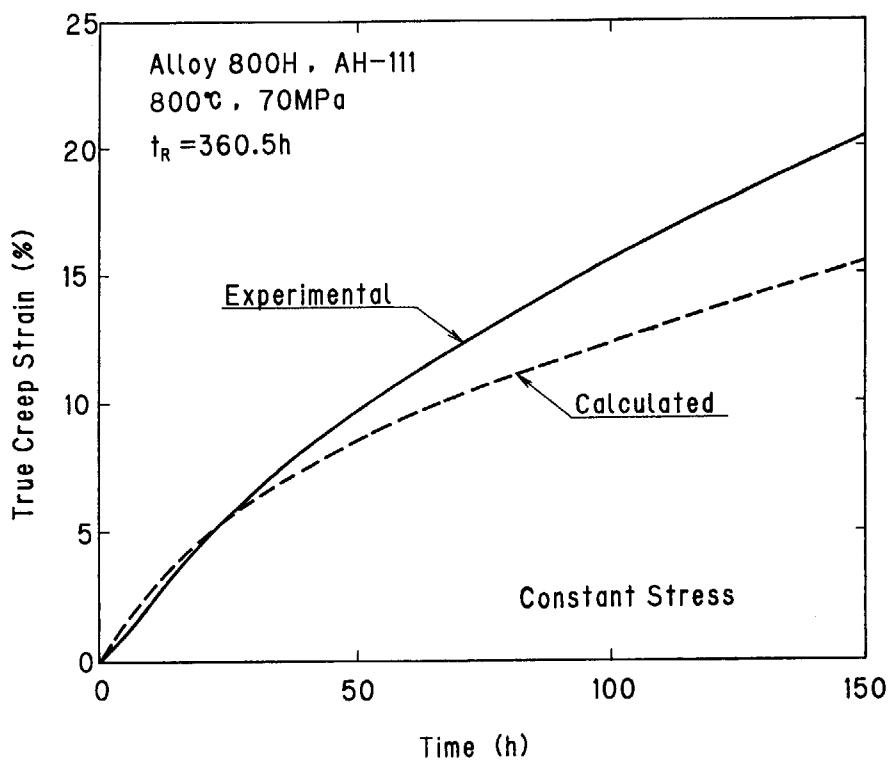


Fig. 4.14 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 70MPa at 800°C.

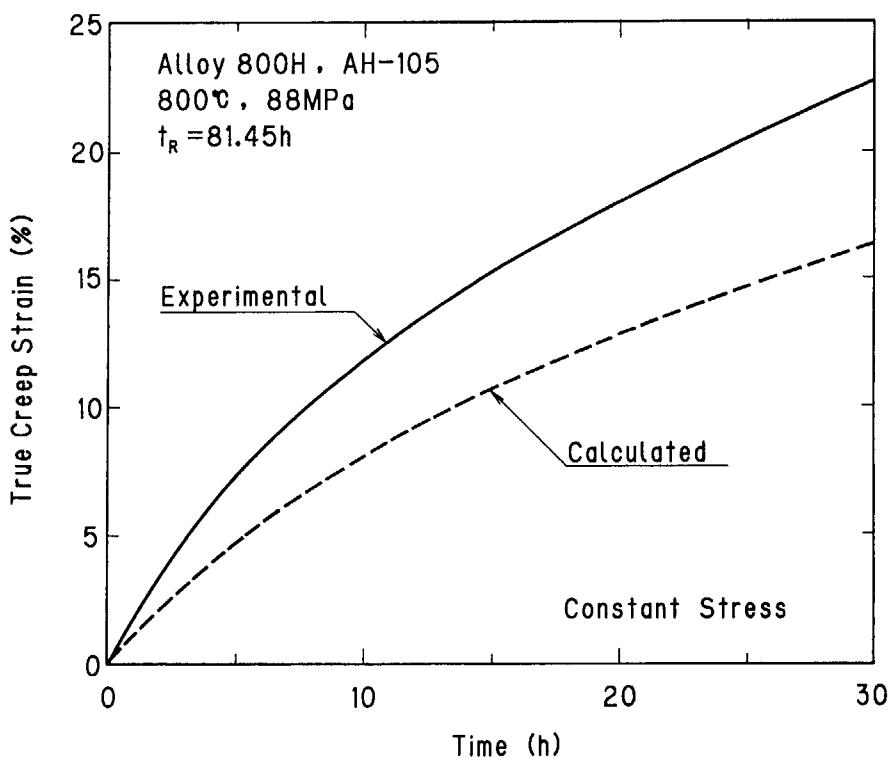


Fig. 4.15 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 88MPa at 800°C.

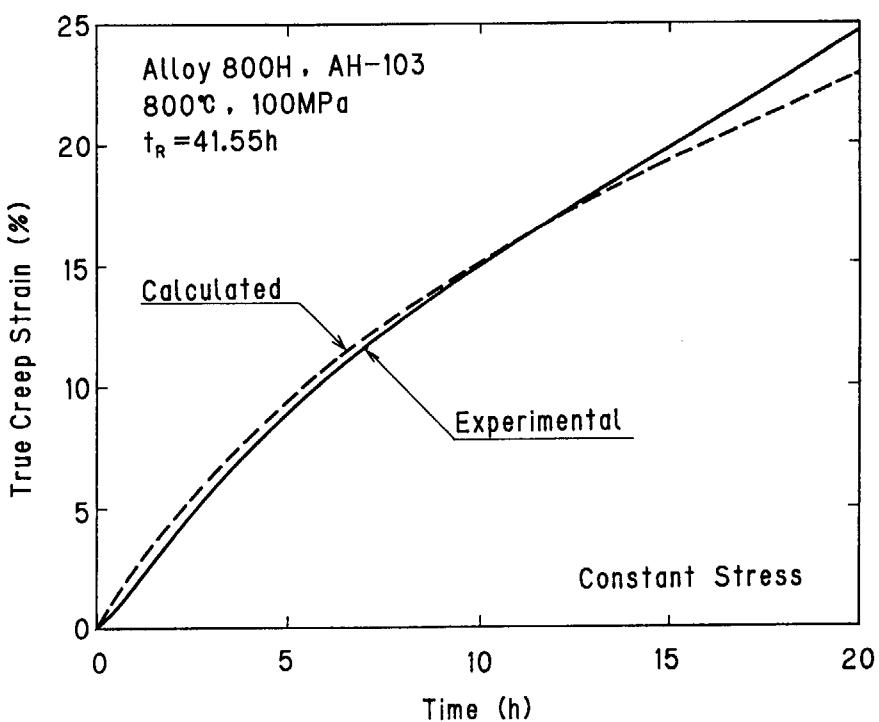


Fig. 4.16 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 100MPa at 800°C.

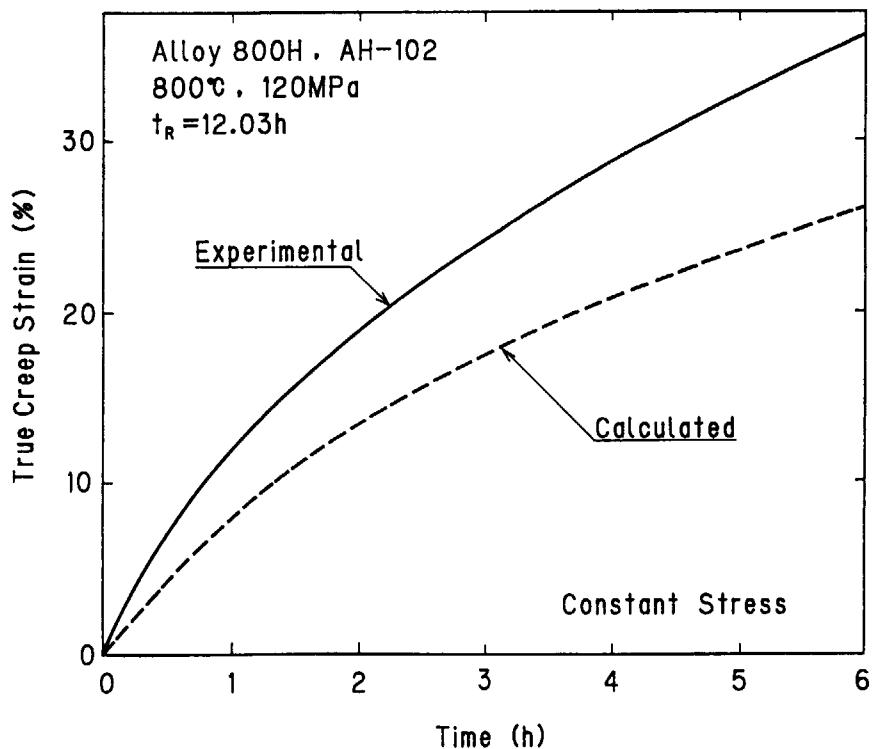


Fig. 4.17 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 120MPa at 800°C.

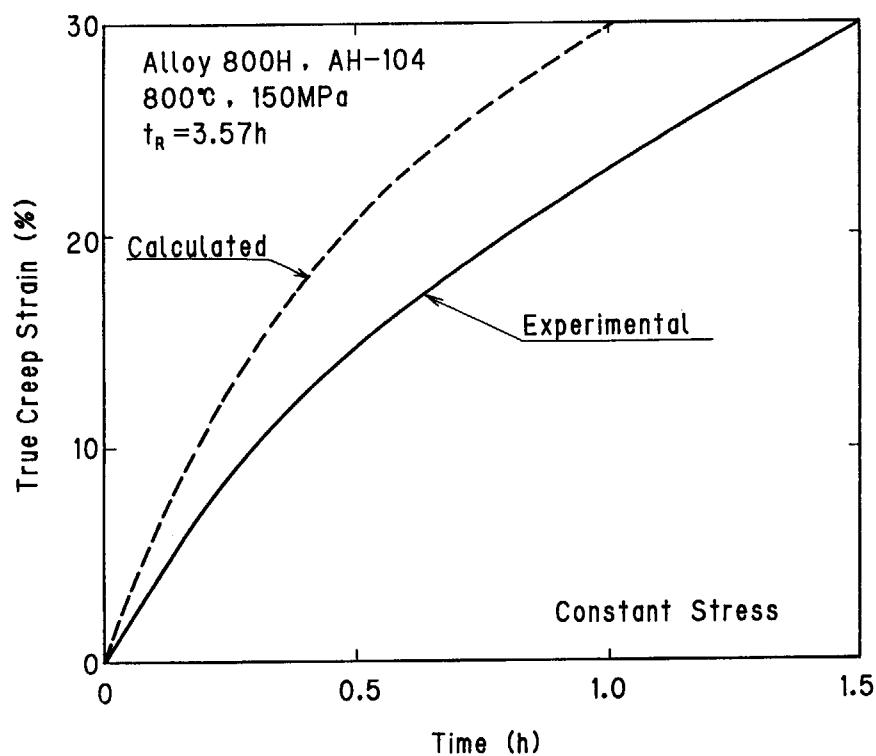


Fig. 4.18 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 150MPa at 800°C.

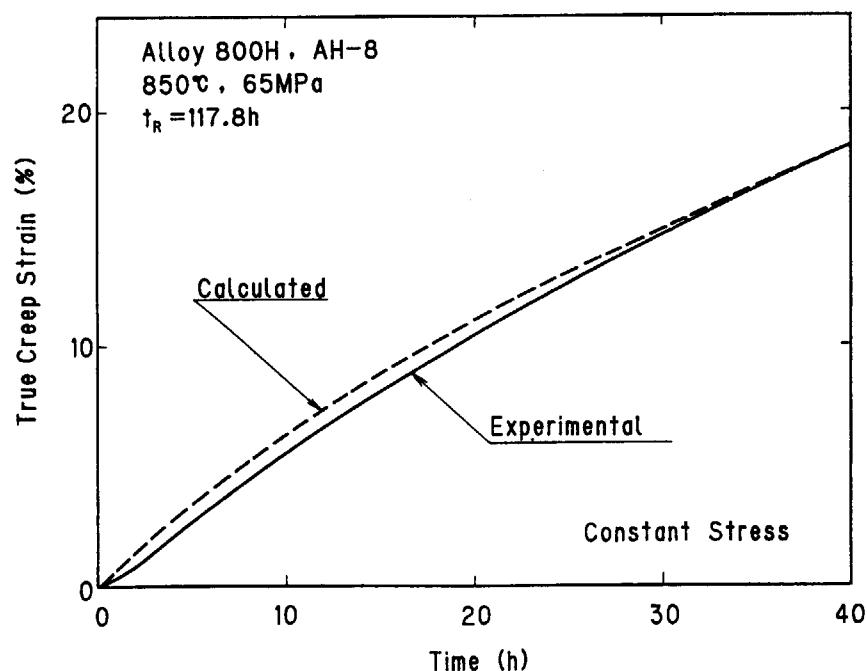


Fig. 4.19 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 65MPa at 850°C.

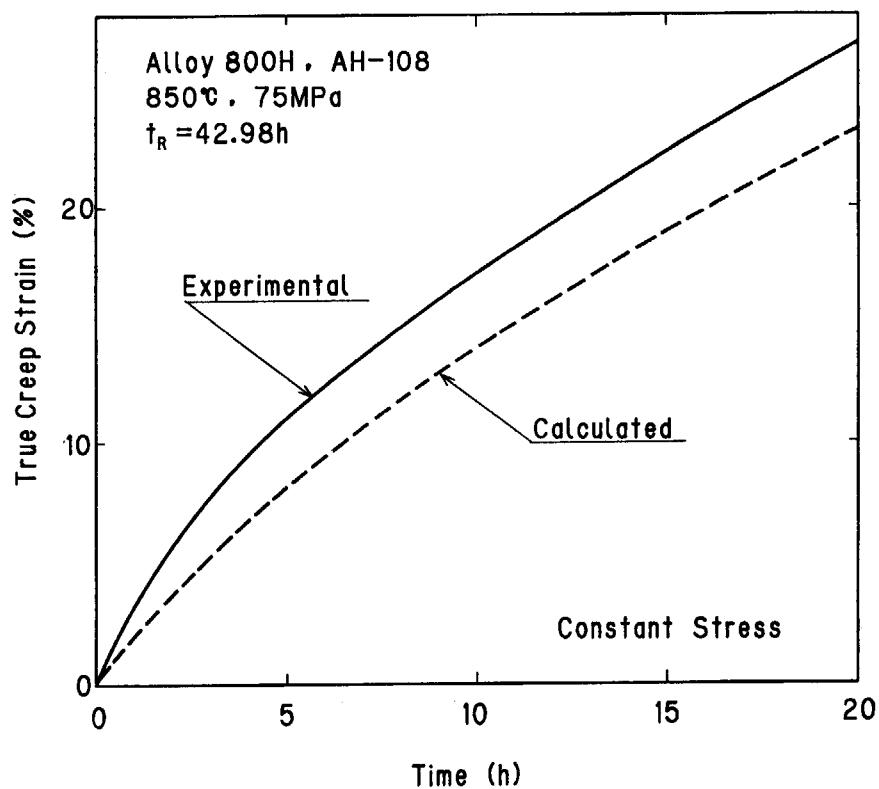


Fig. 4.20 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 75MPa at 850°C.

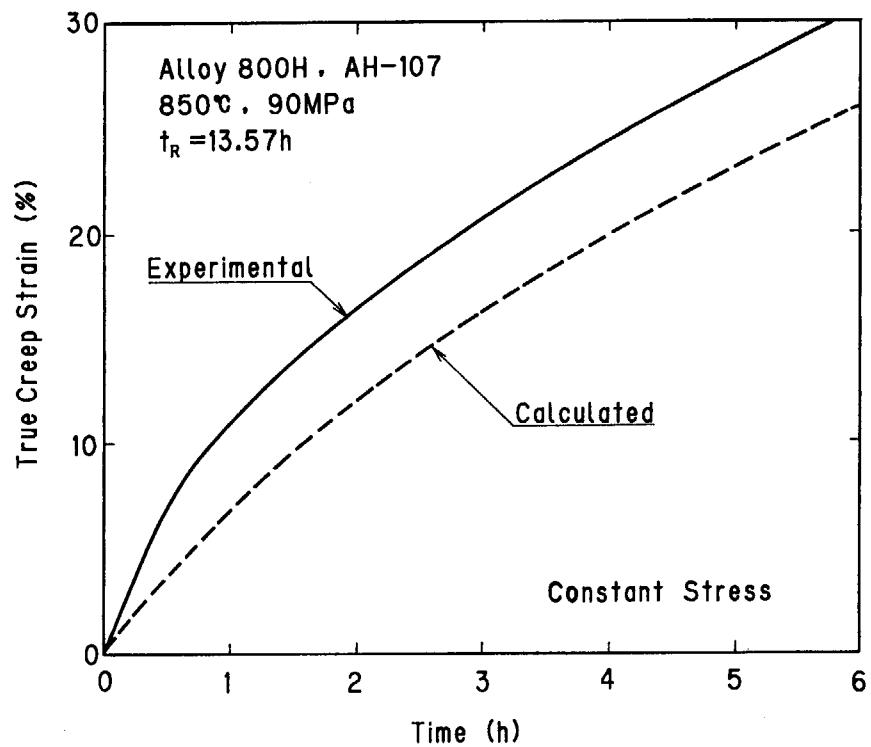


Fig. 4.21 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 90MPa at 850°C.

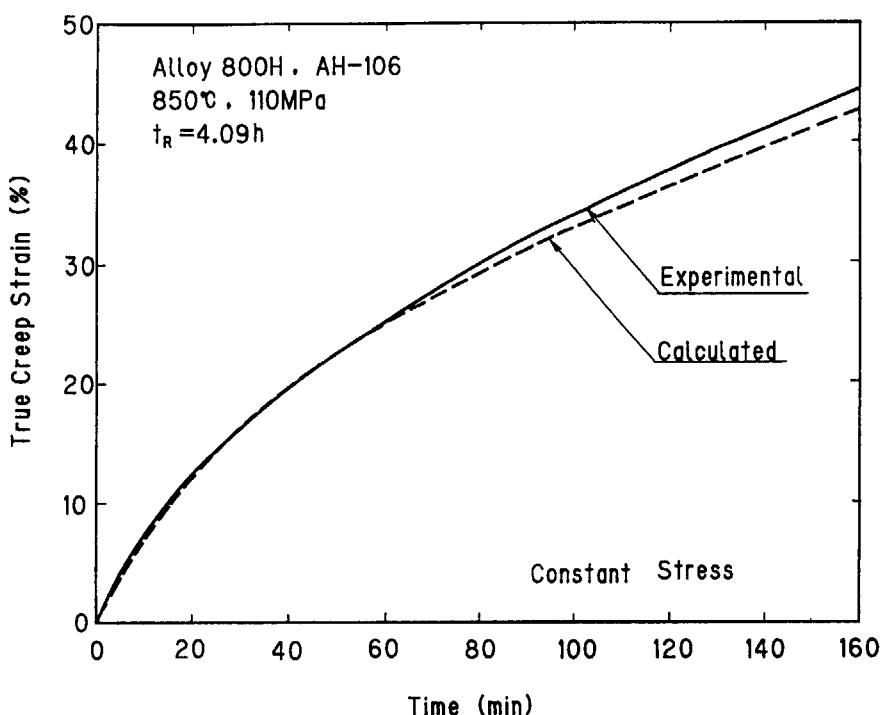


Fig. 4.22 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 110MPa at 850°C.

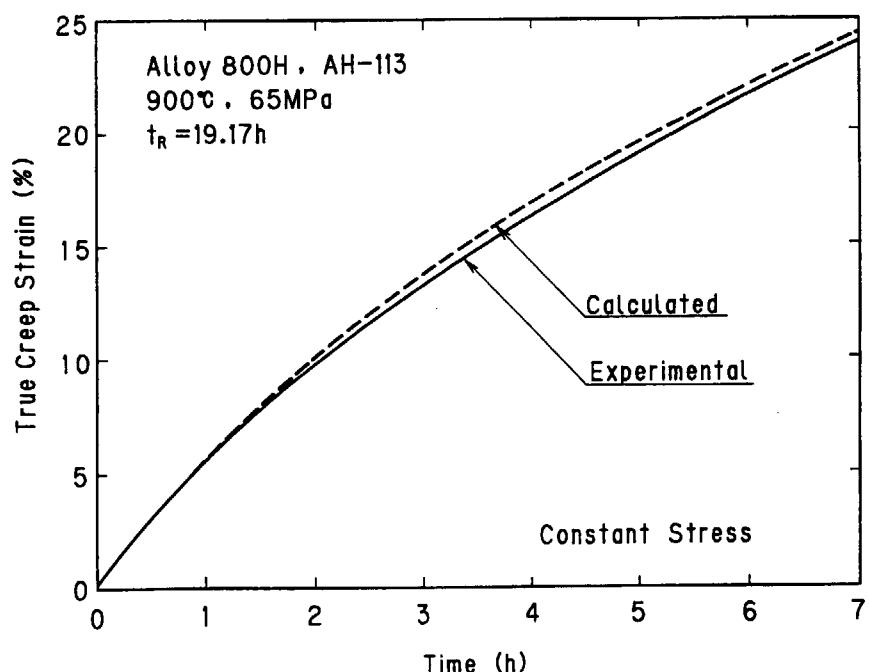


Fig. 4.23 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 65MPa at 900°C.

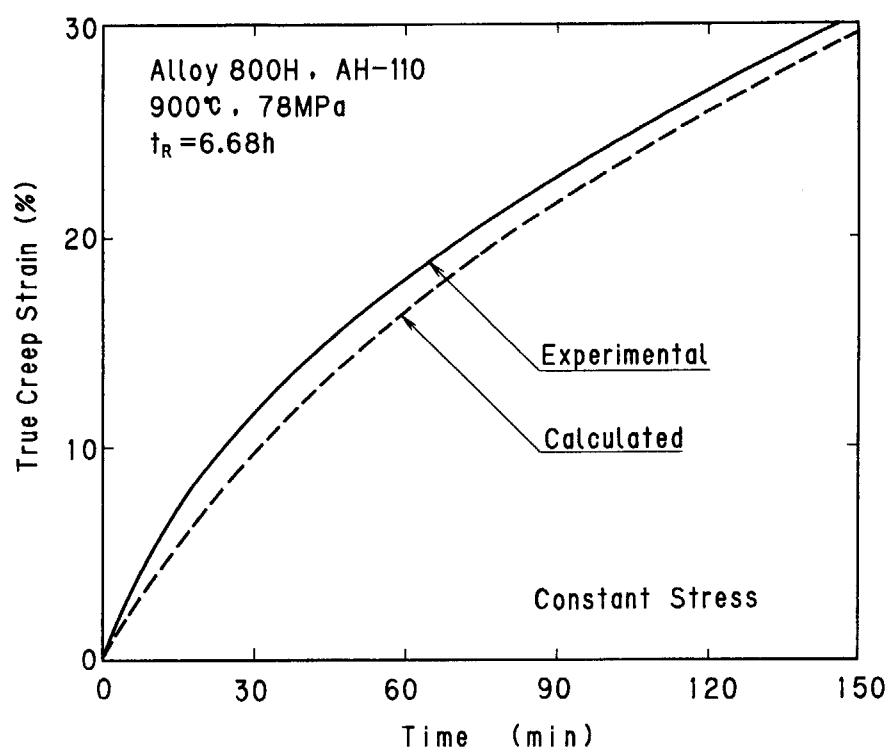


Fig. 4.24 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 78MPa at 900°C.

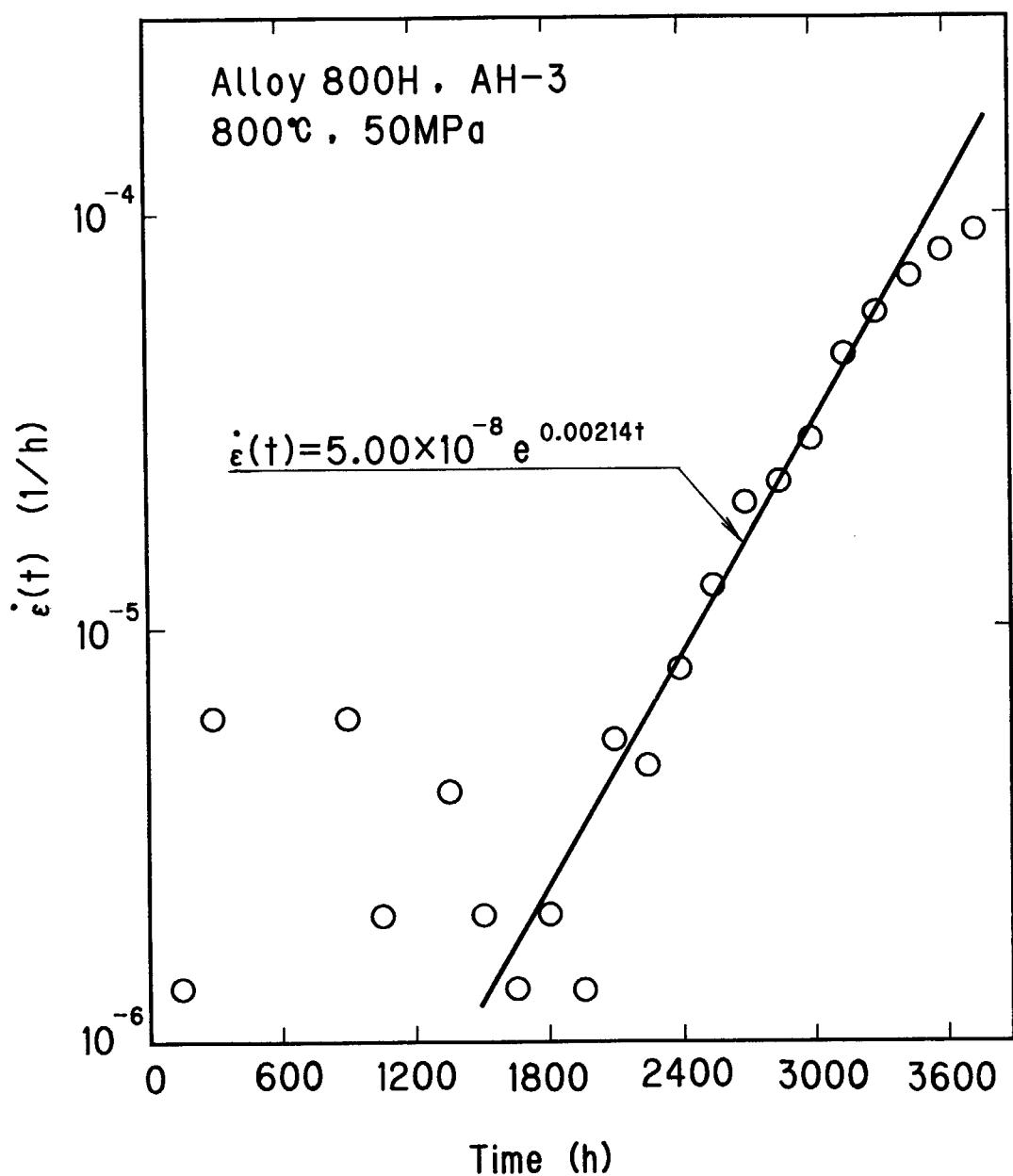
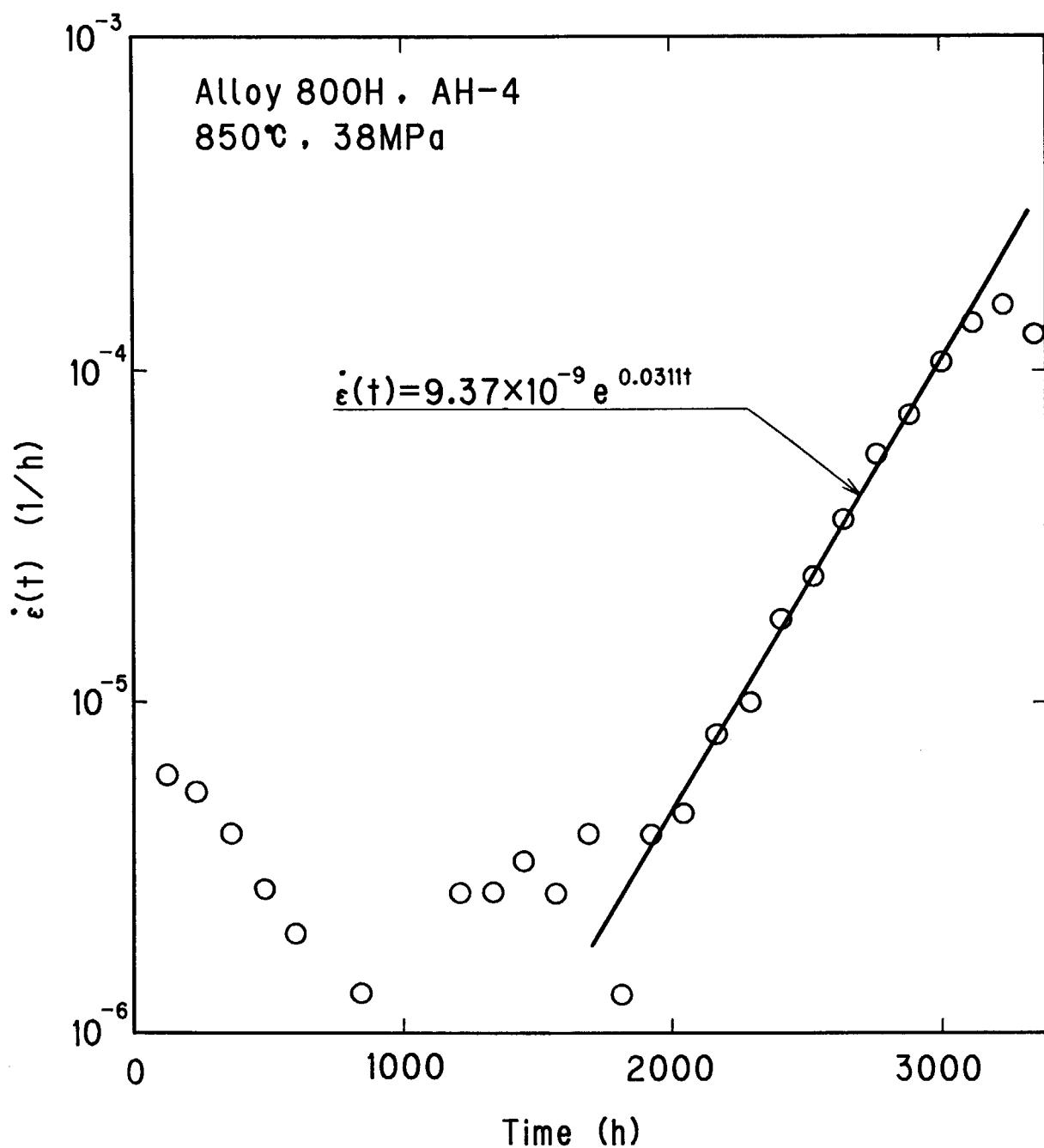


Fig. 4.25 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 800°C.



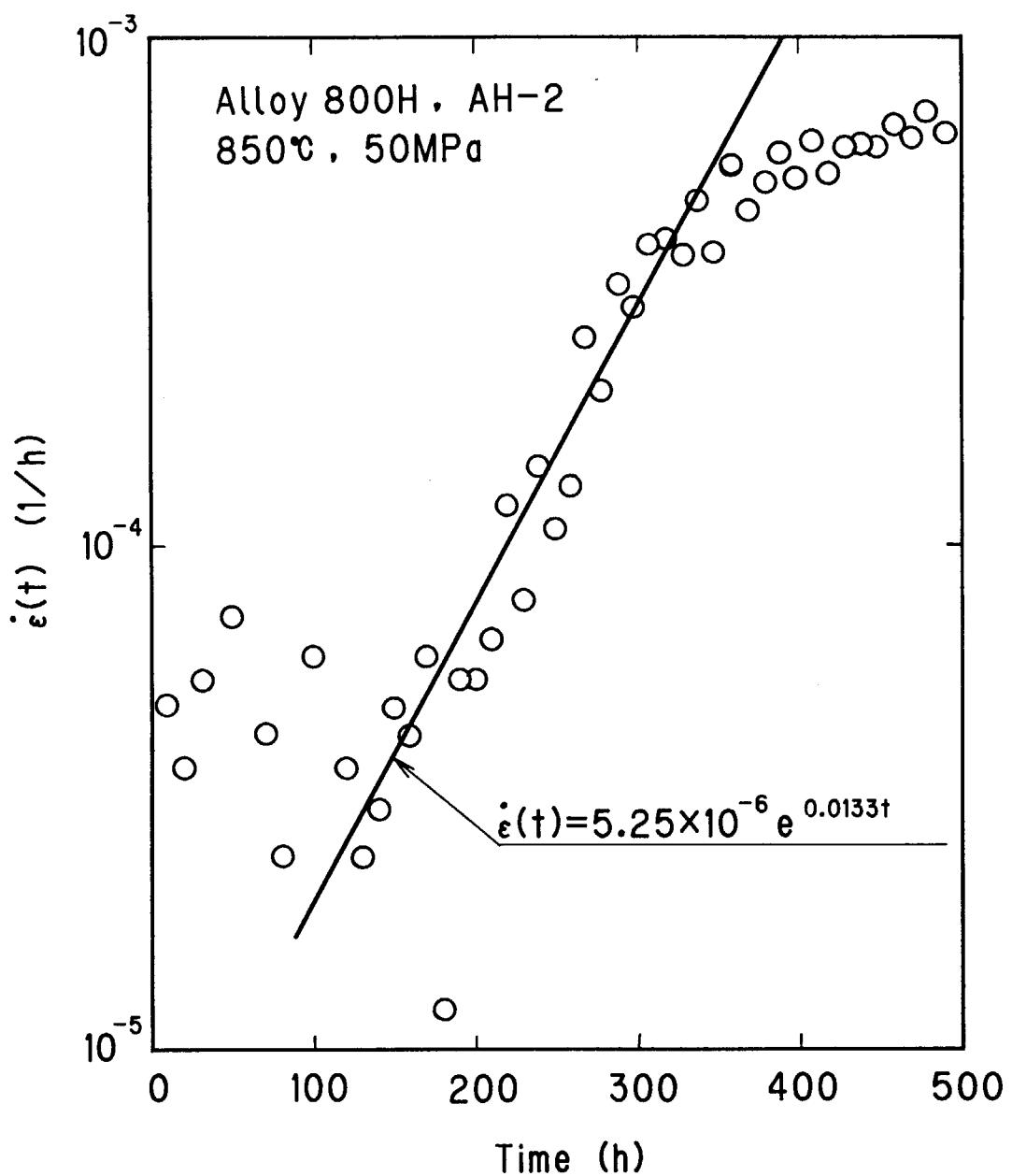


Fig. 4.27 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 850°C.

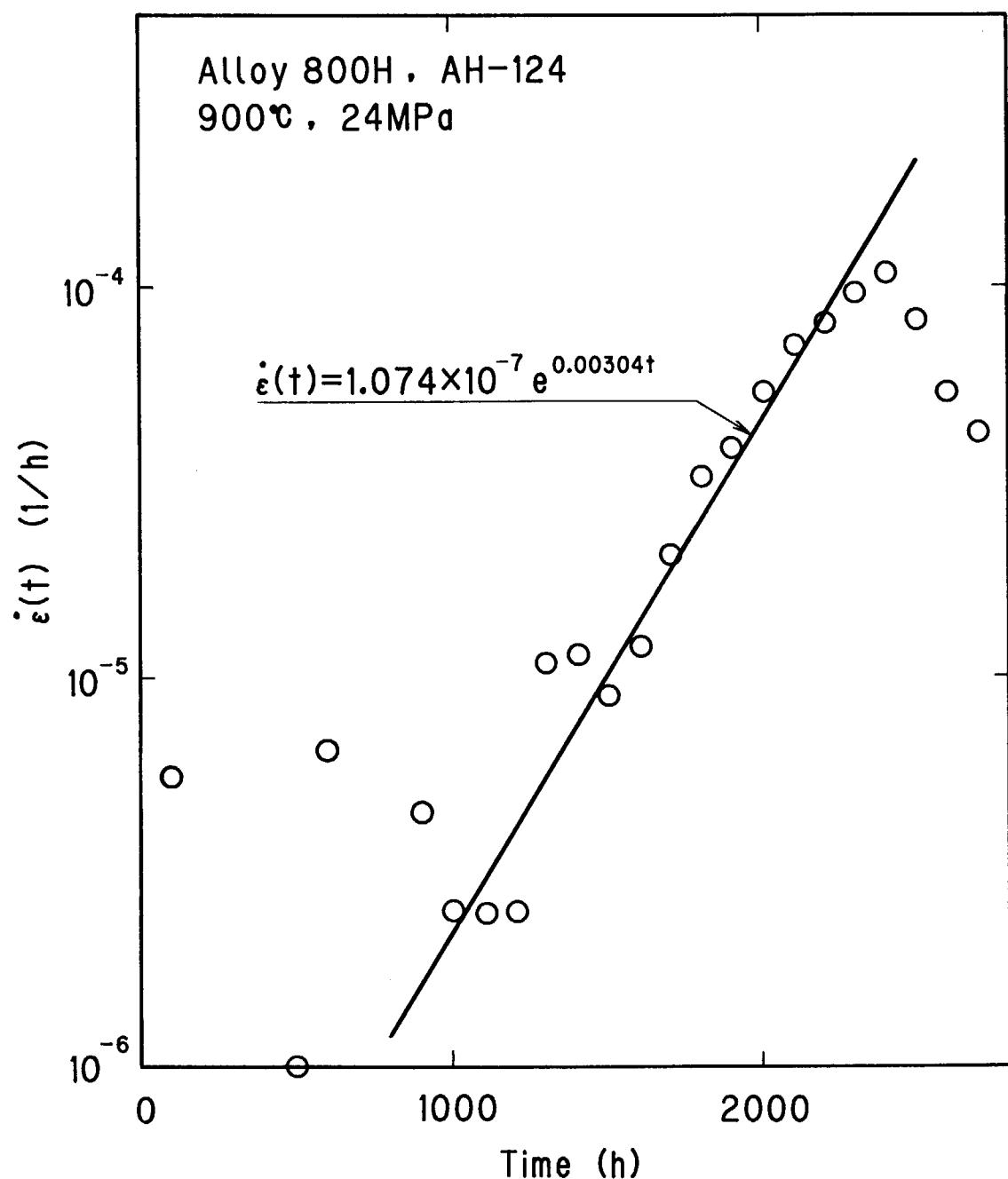


Fig. 4.28 Creep strain rate vs. time for 24MPa at 900°C.

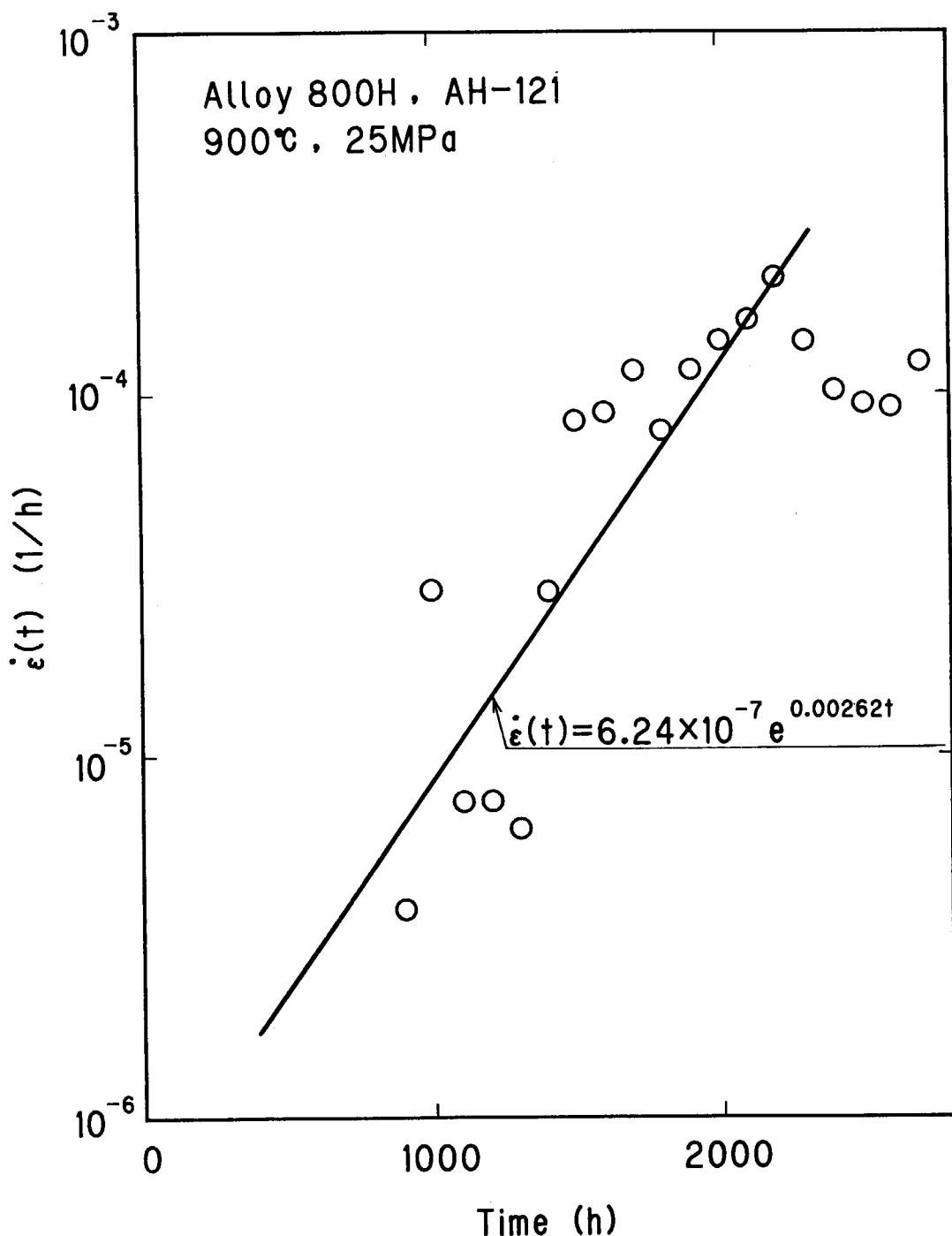


Fig. 4.29 Creep strain rate vs. time for 25MPa at 900°C.

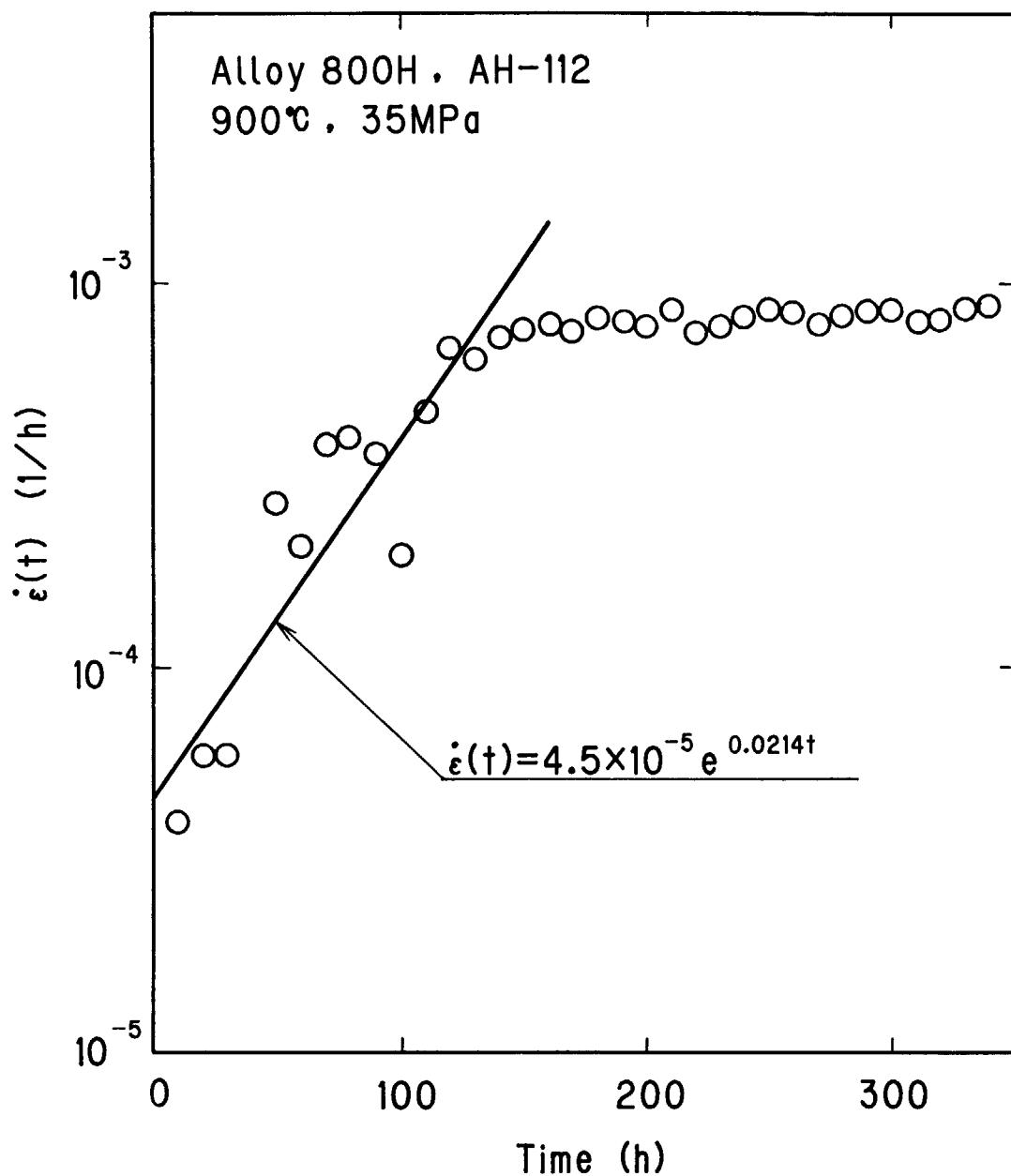


Fig. 4.30 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 900°C.

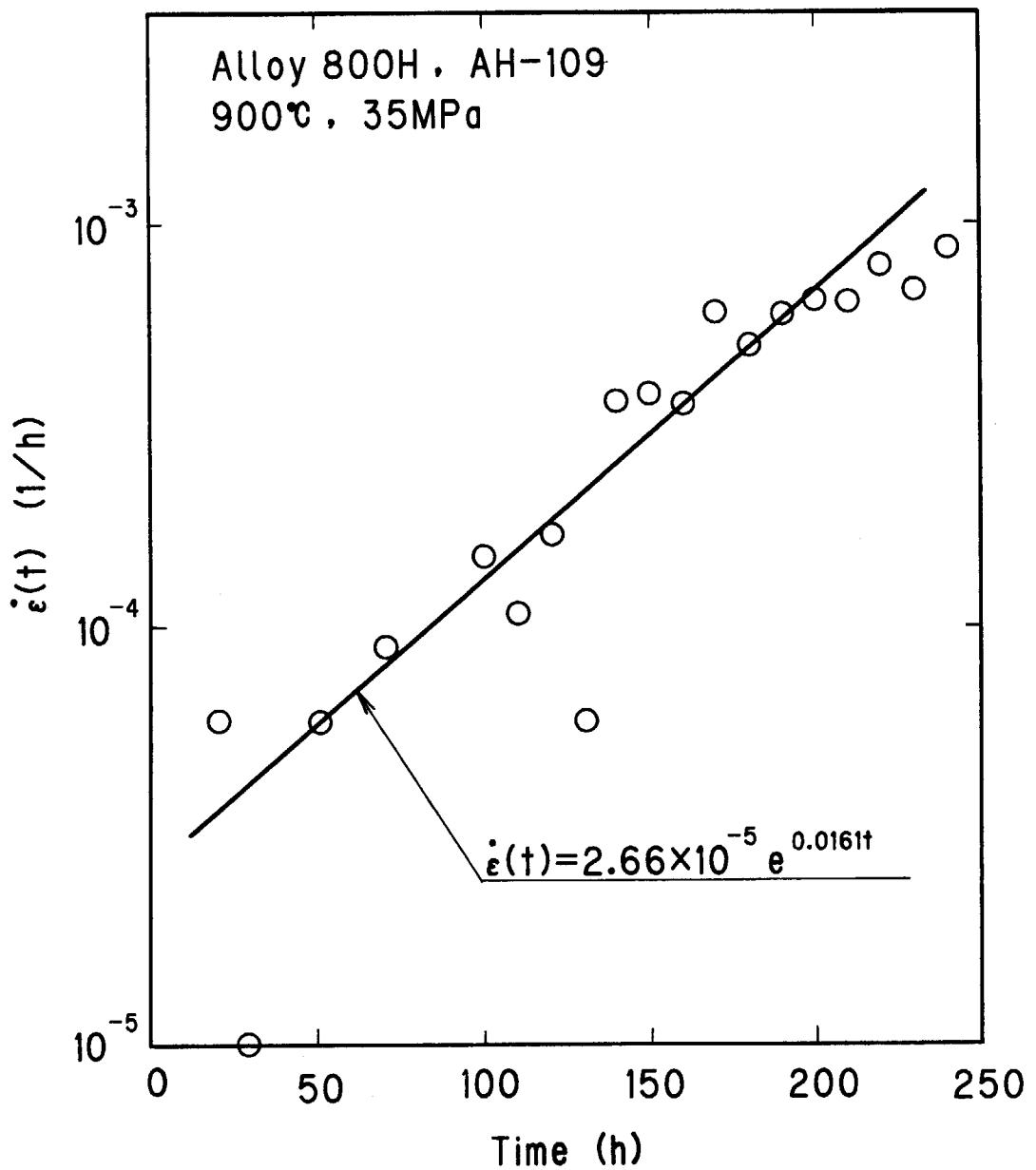


Fig. 4.31 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 900°C.

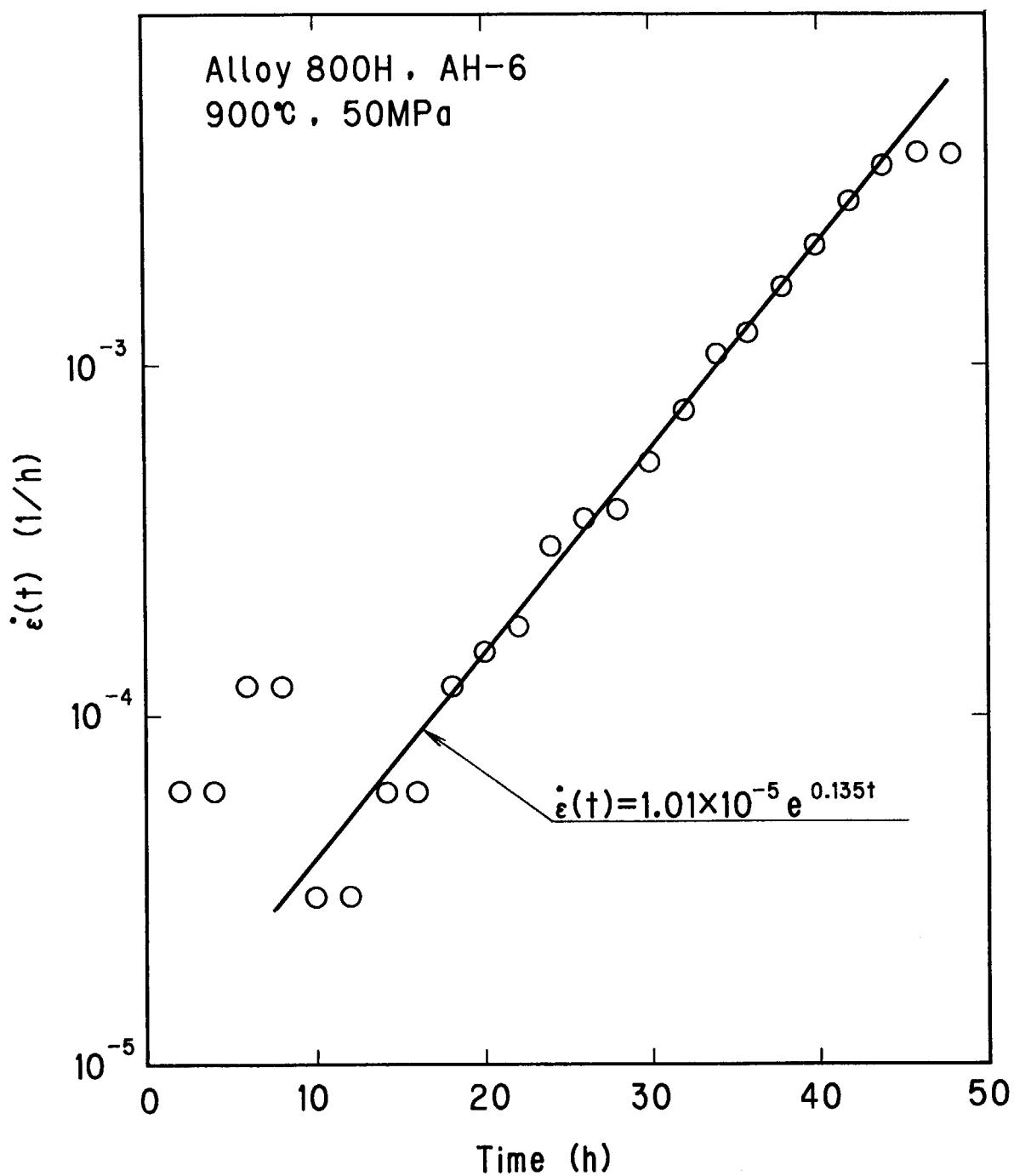


Fig. 4.32 Creep strain rate vs. time for 50MPa at 900°C.

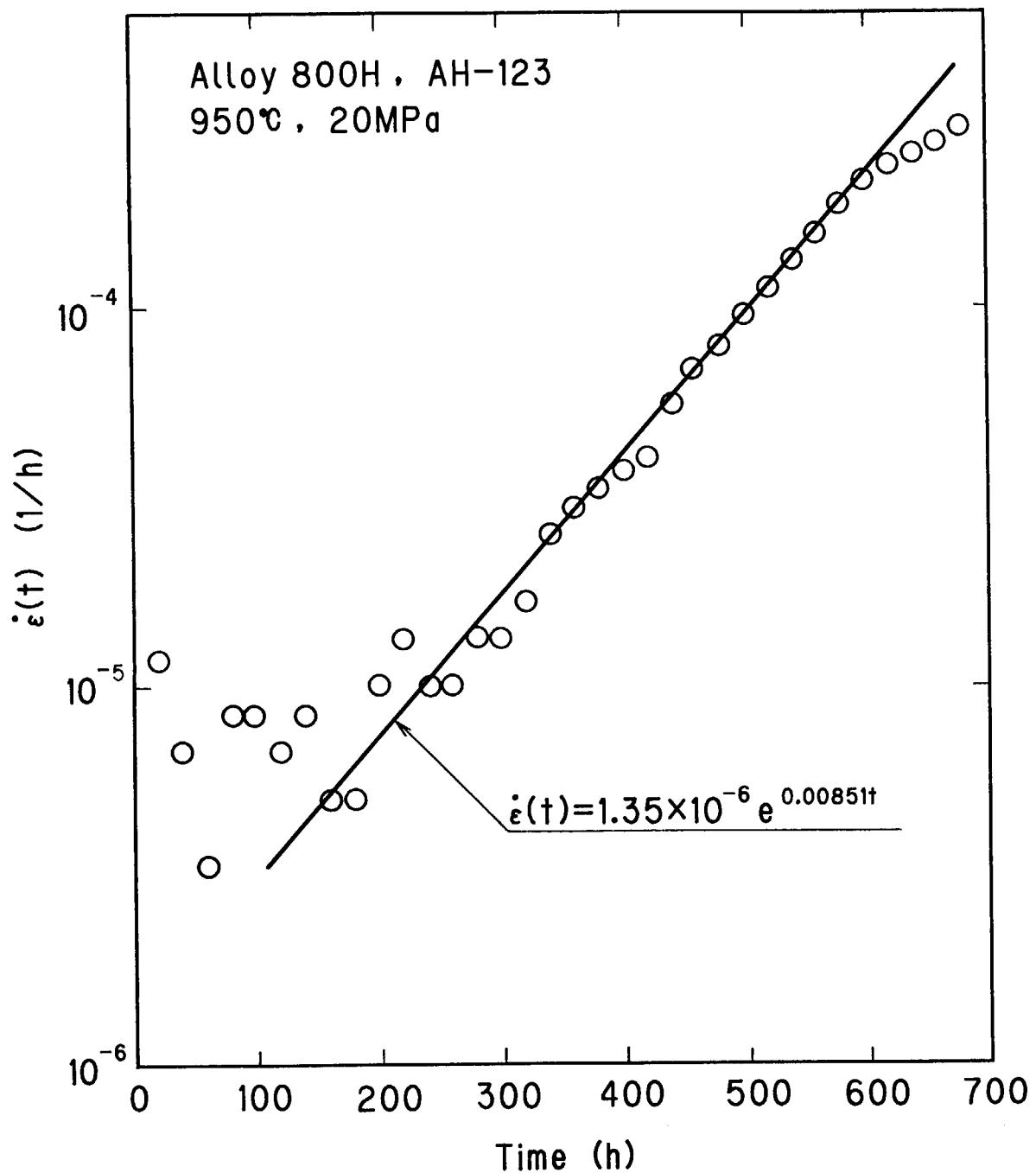


Fig. 4.33 Creep strain rate vs. time for 20MPa at 950°C.

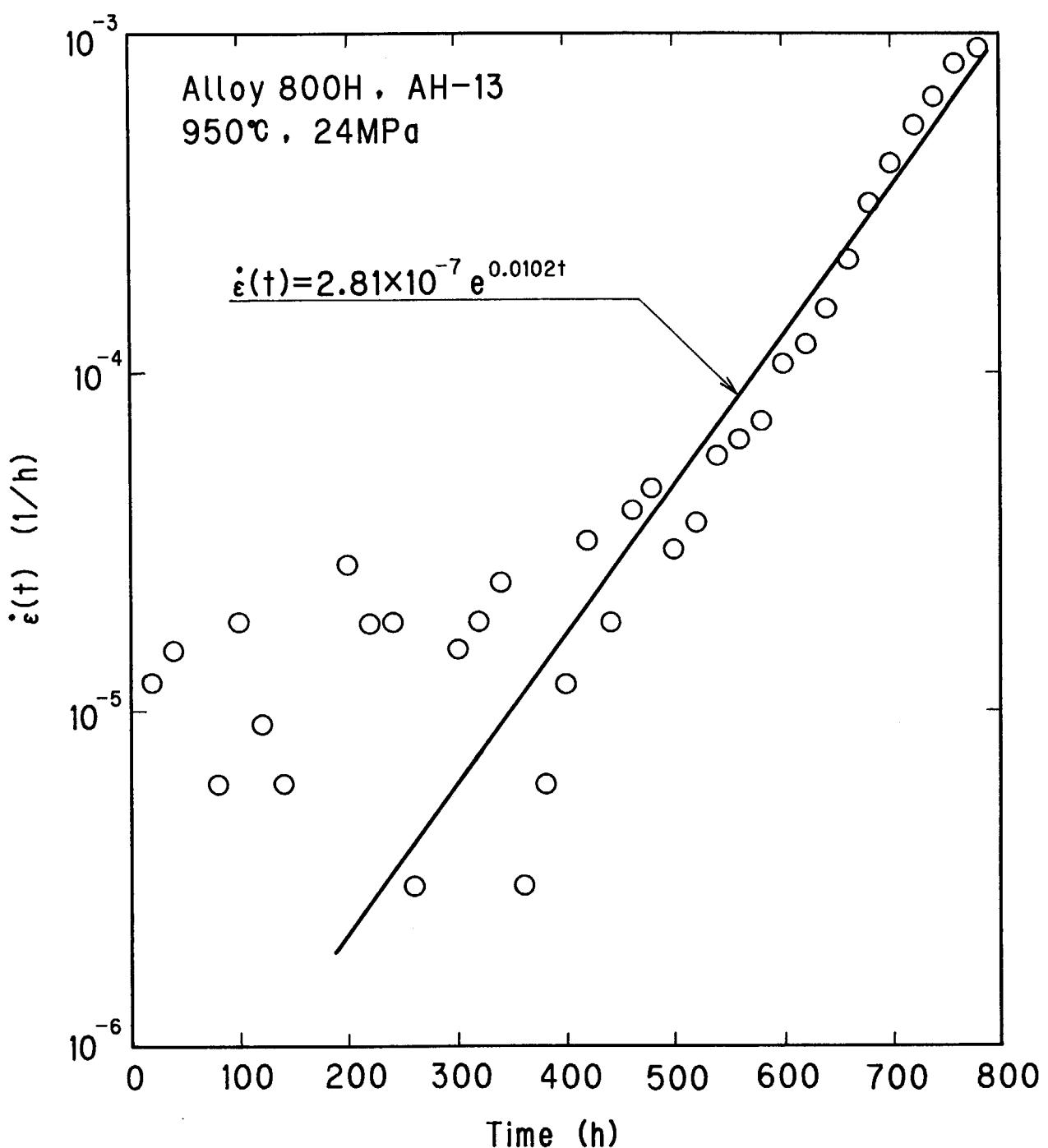


Fig. 4.34 Creep strain rate vs. time for 24MPa at 950°C.

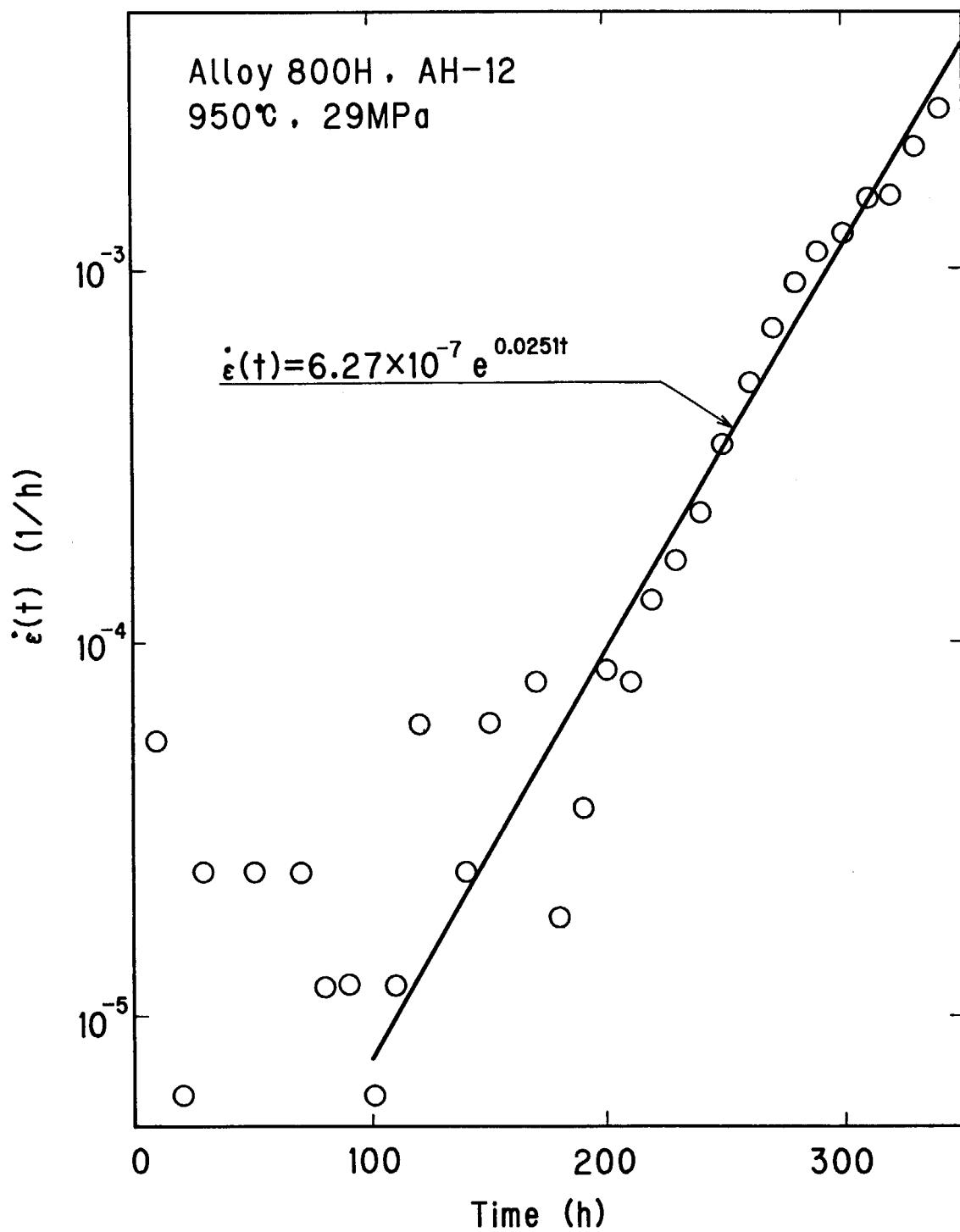


Fig. 4.35 Creep strain rate vs. time for 29MPa at 950°C.

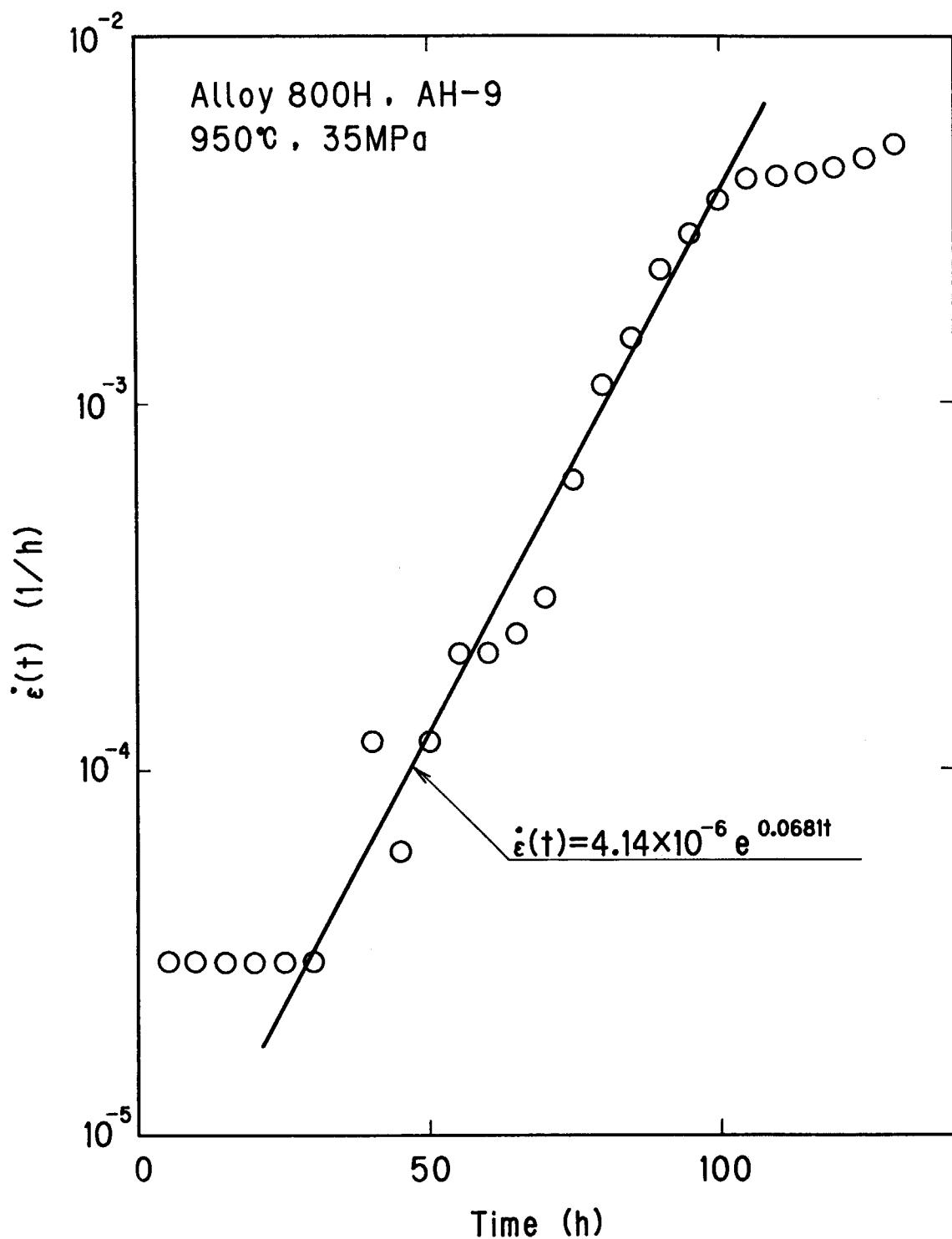


Fig. 4.36 Creep strain rate vs. time for 35MPa at 950°C.

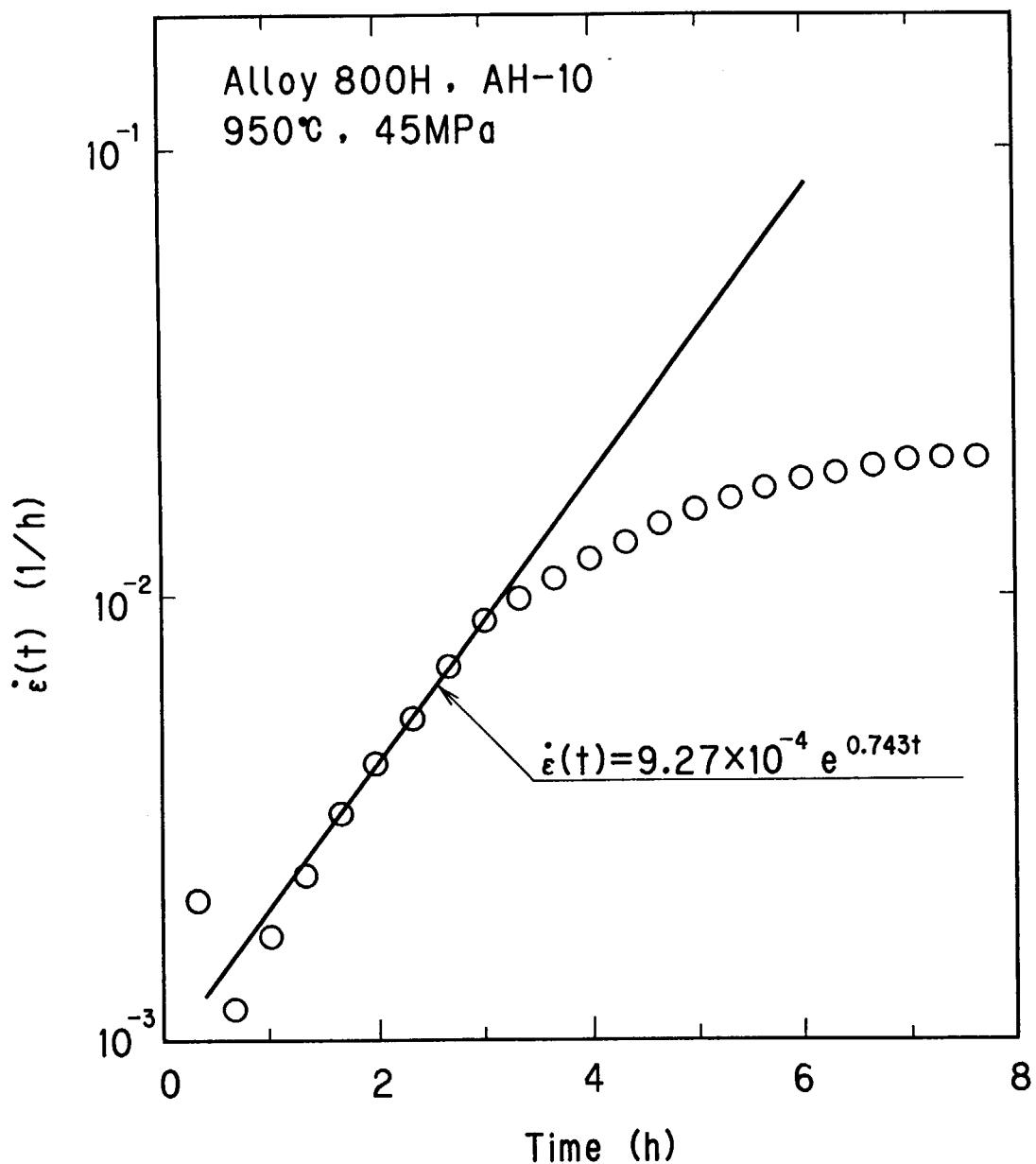
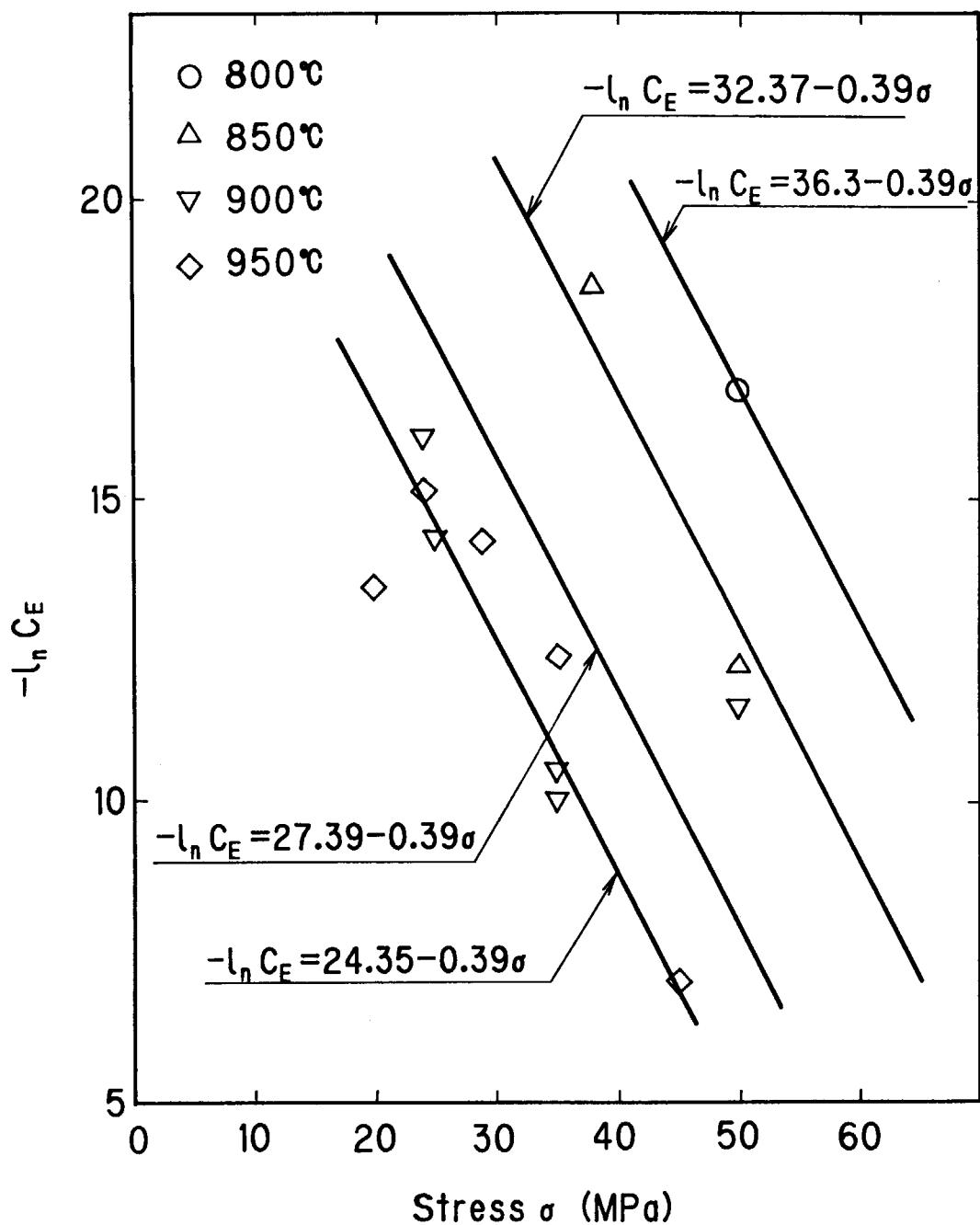
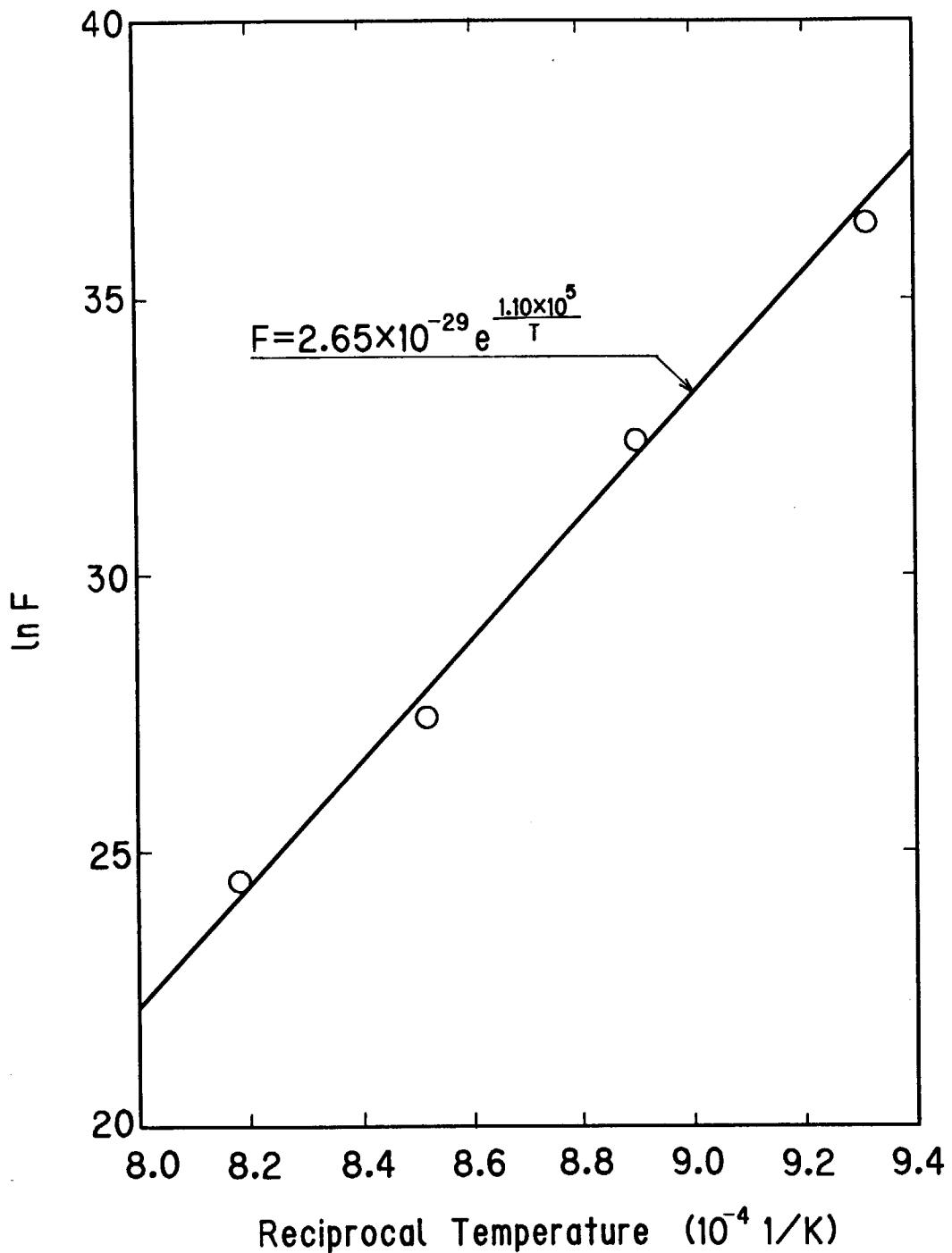
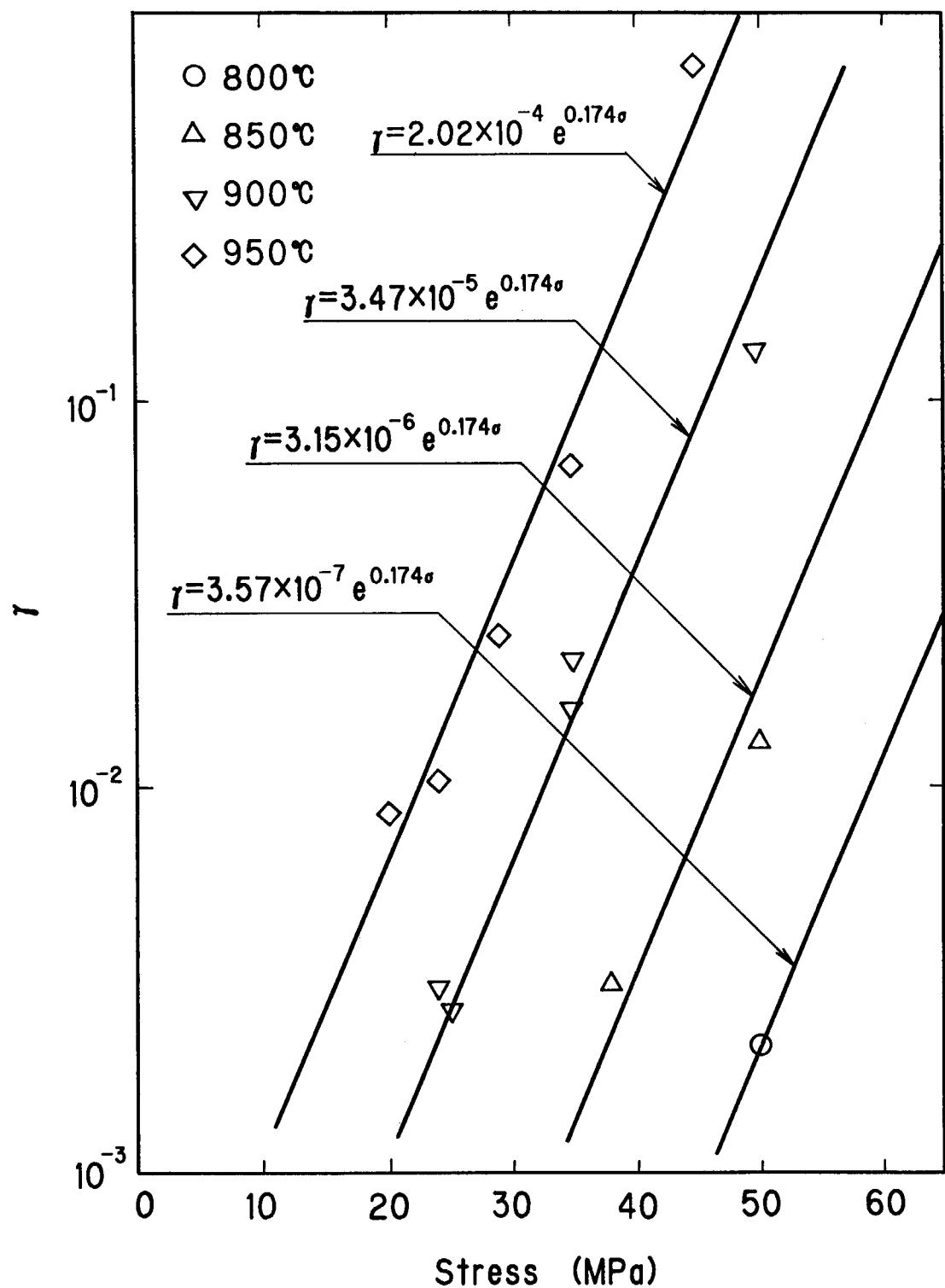
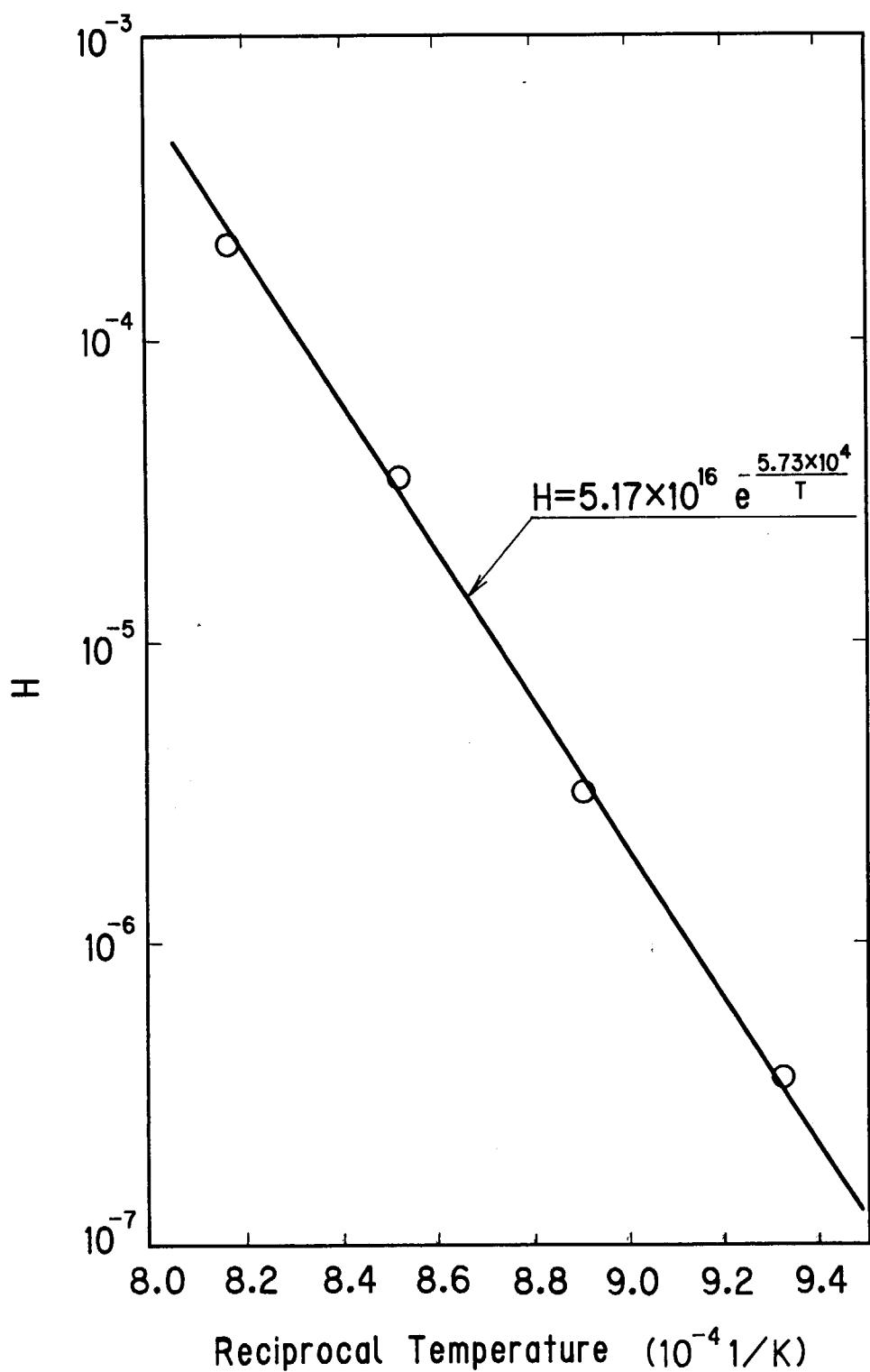


Fig. 4.37 Creep strain rate vs. time for 45MPa at 950°C.

Fig. 4.38 Temperature and stress dependence of a parameter C_E .

Fig. 4.39 Temperature dependence of a parameter F .

Fig. 4.40 Temperature and stress dependence of a parameter γ .

Fig. 4.41 Temperature dependence of a parameter H .

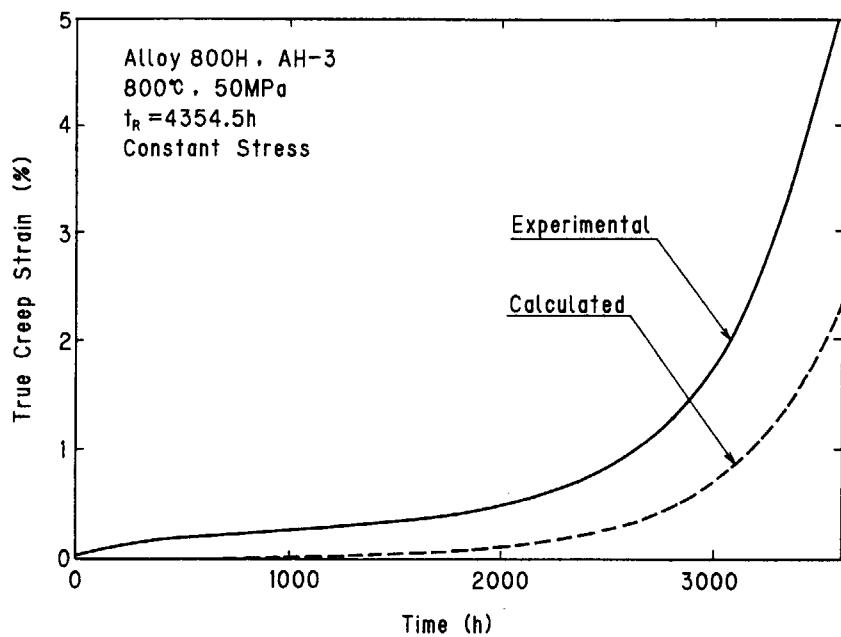


Fig. 4.42 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 800°C.

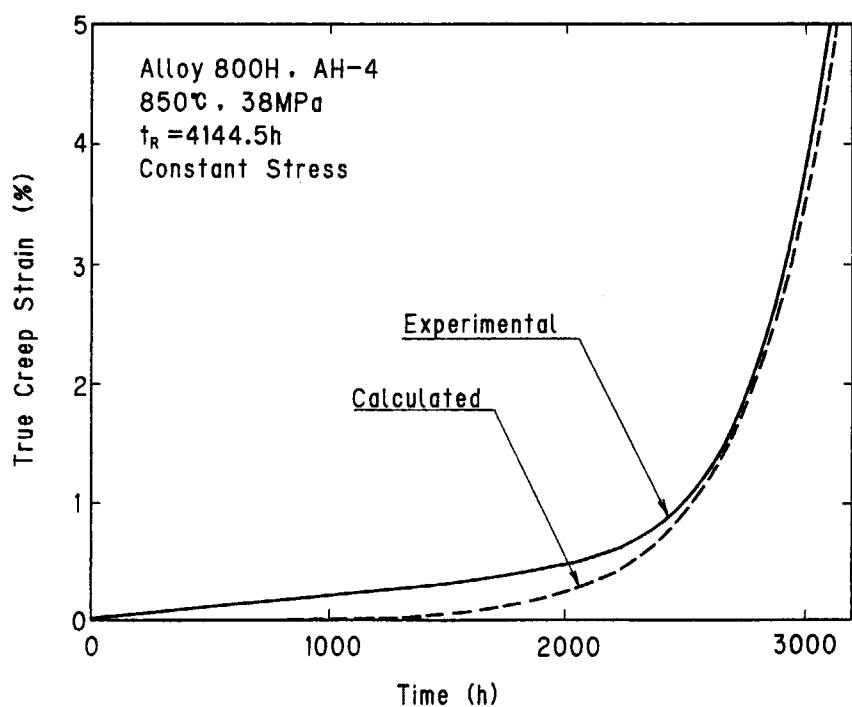


Fig. 4.43 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 38MPa at 850°C.

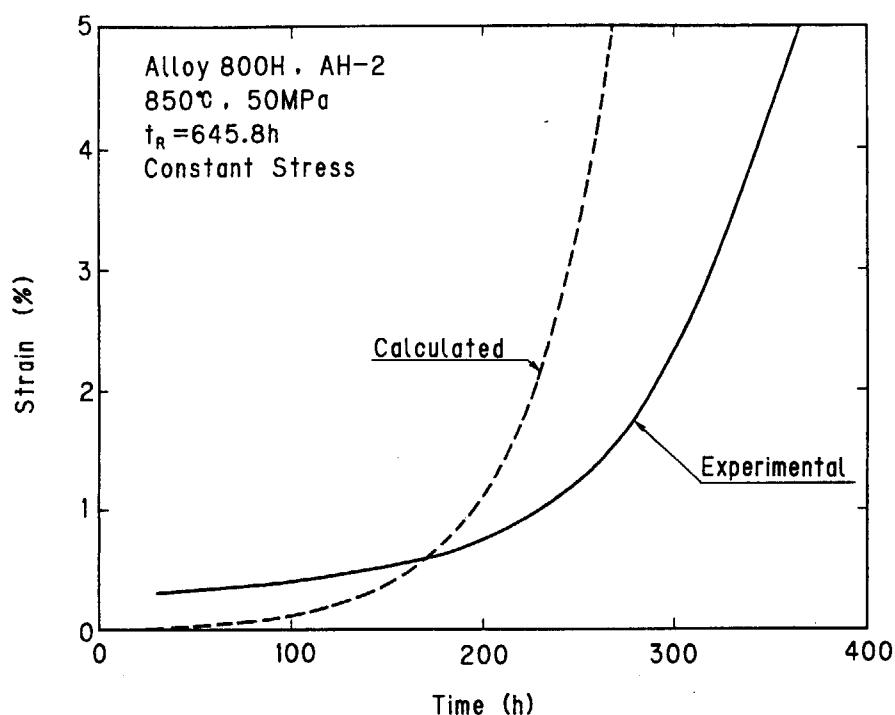


Fig. 4.44 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 850°C.

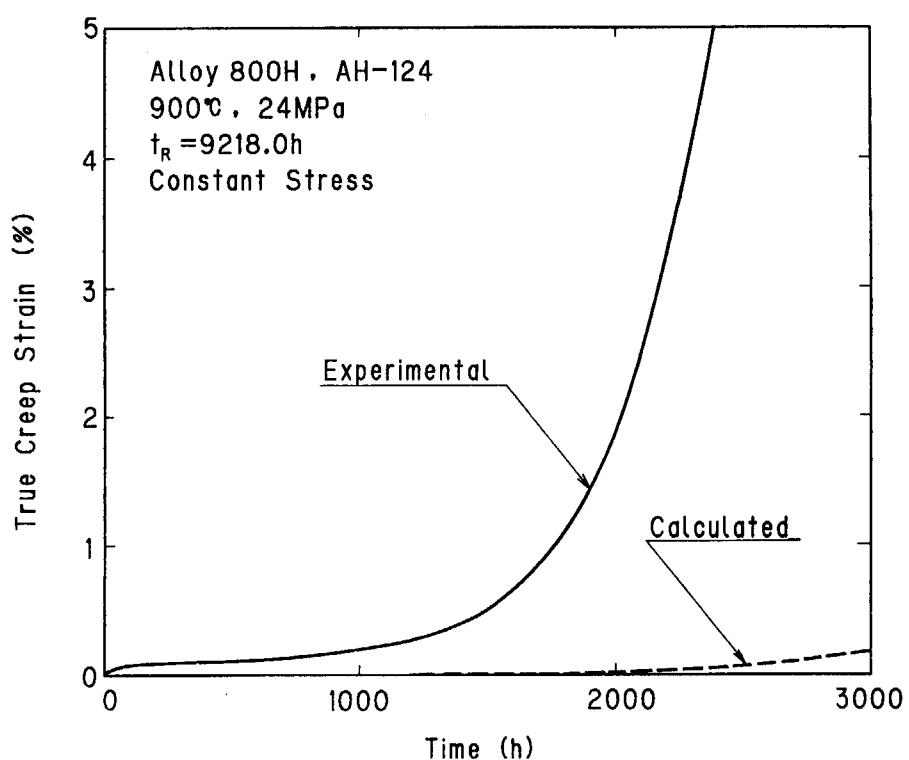


Fig. 4.45 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 24MPa at 900°C.

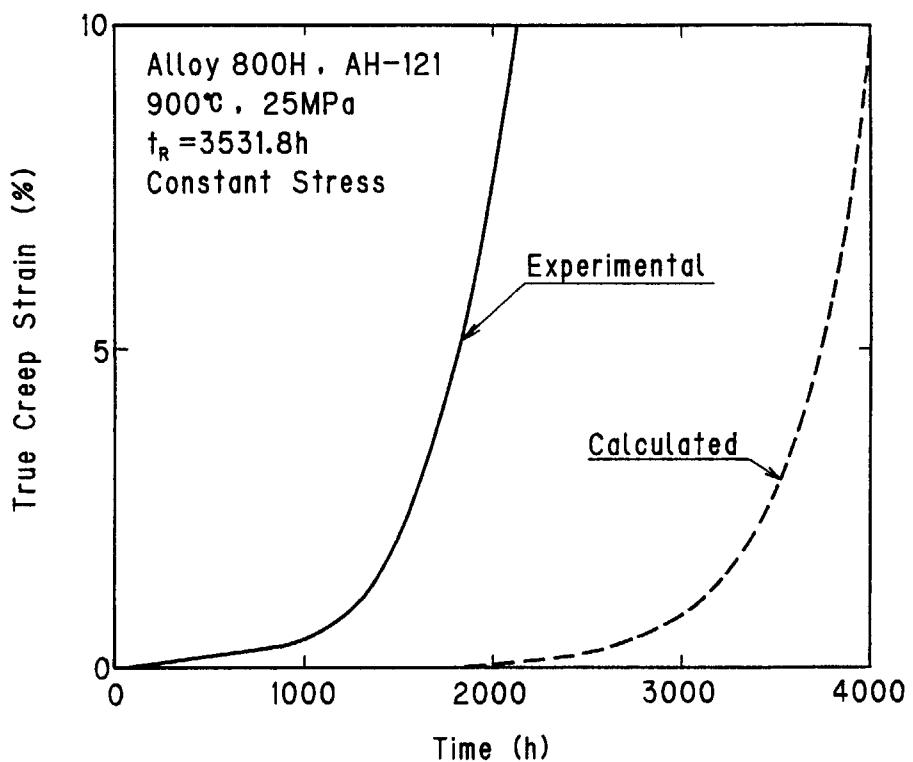


Fig. 4.46 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 25MPa at 900°C.

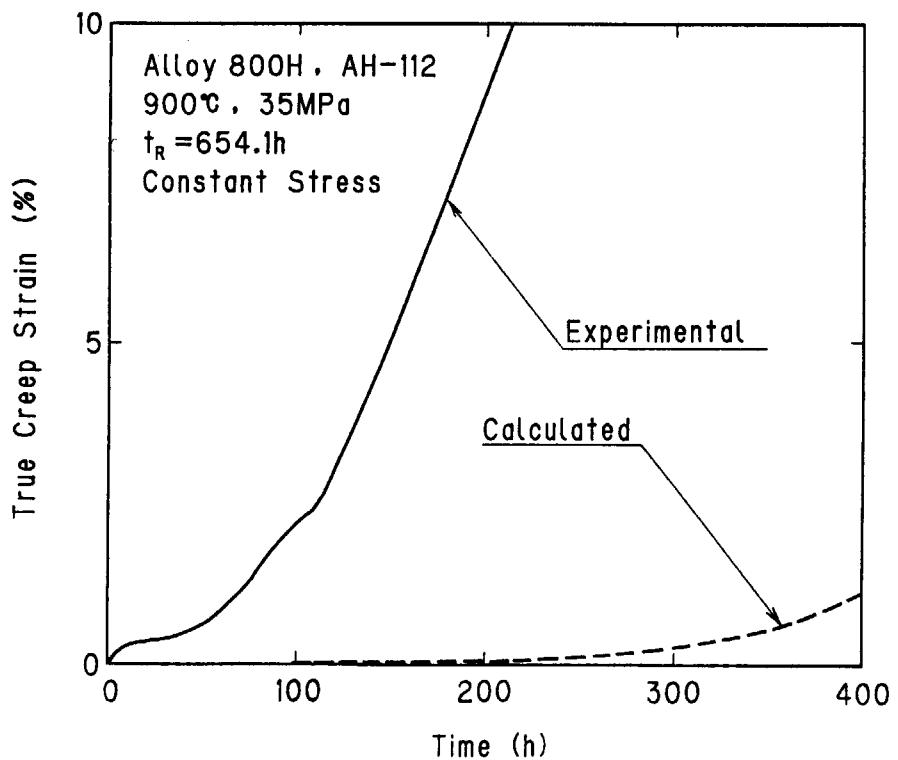


Fig. 4.47 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 900°C.

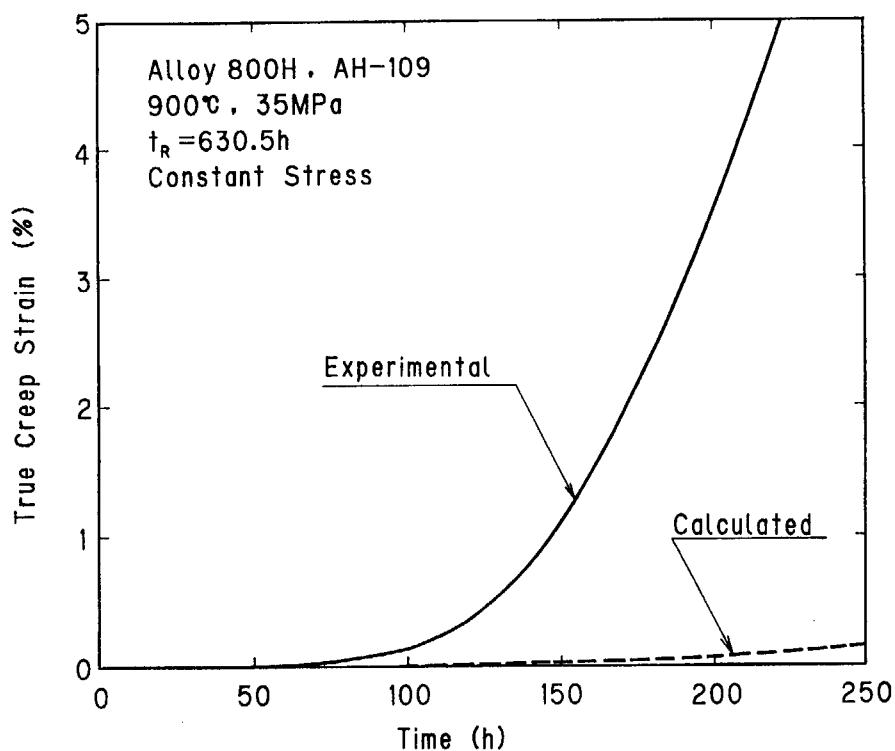


Fig. 4.48 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 900°C.

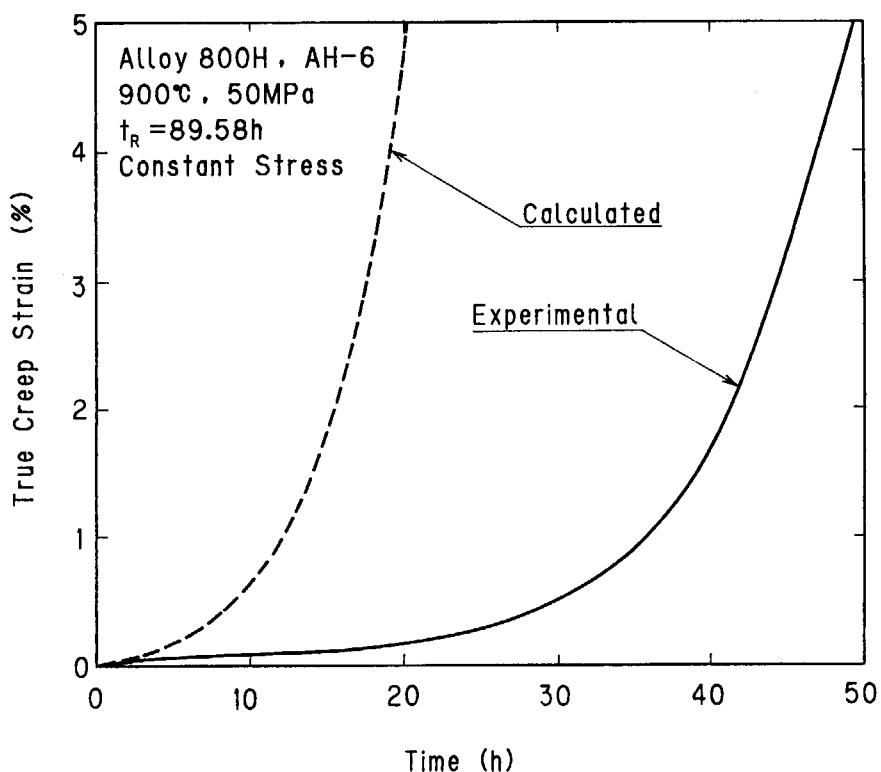


Fig. 4.49 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 50MPa at 900°C.

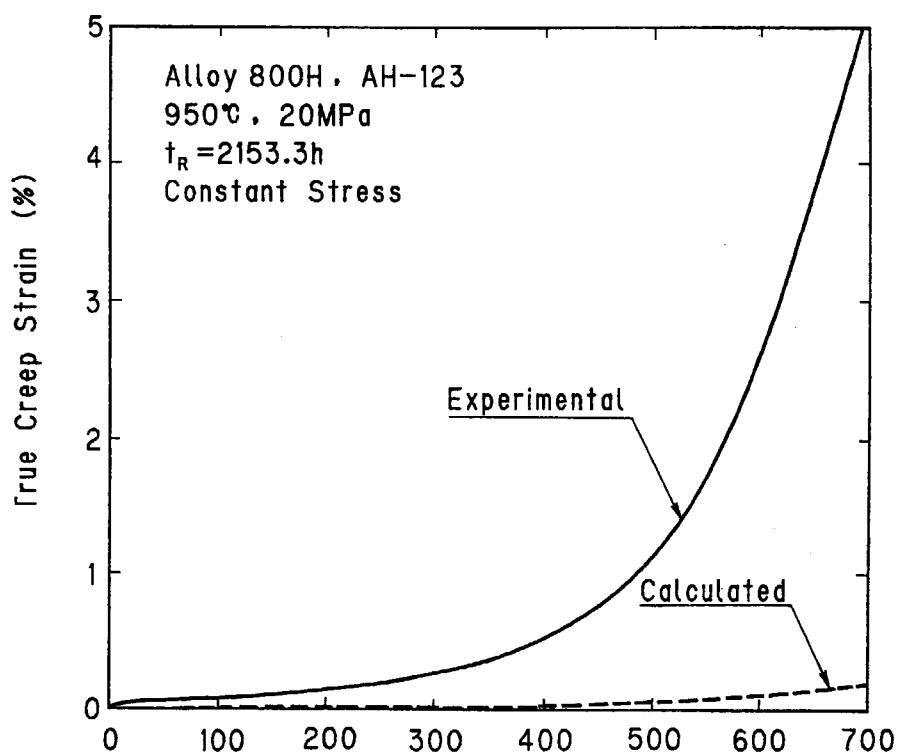


Fig. 4.50 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 20MPa at 950°C.

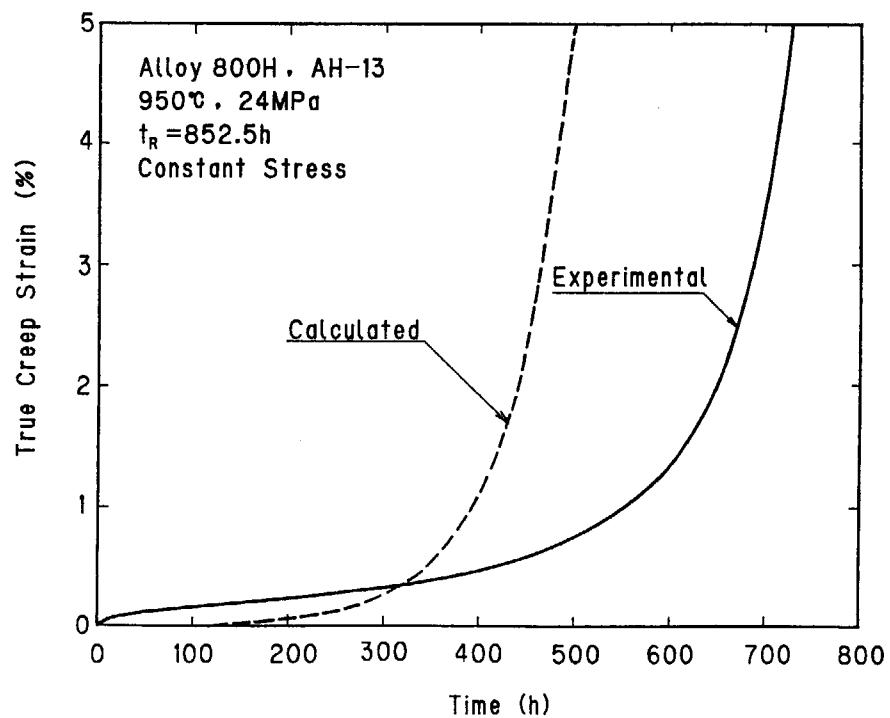


Fig. 4.51 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 24MPa at 950°C.

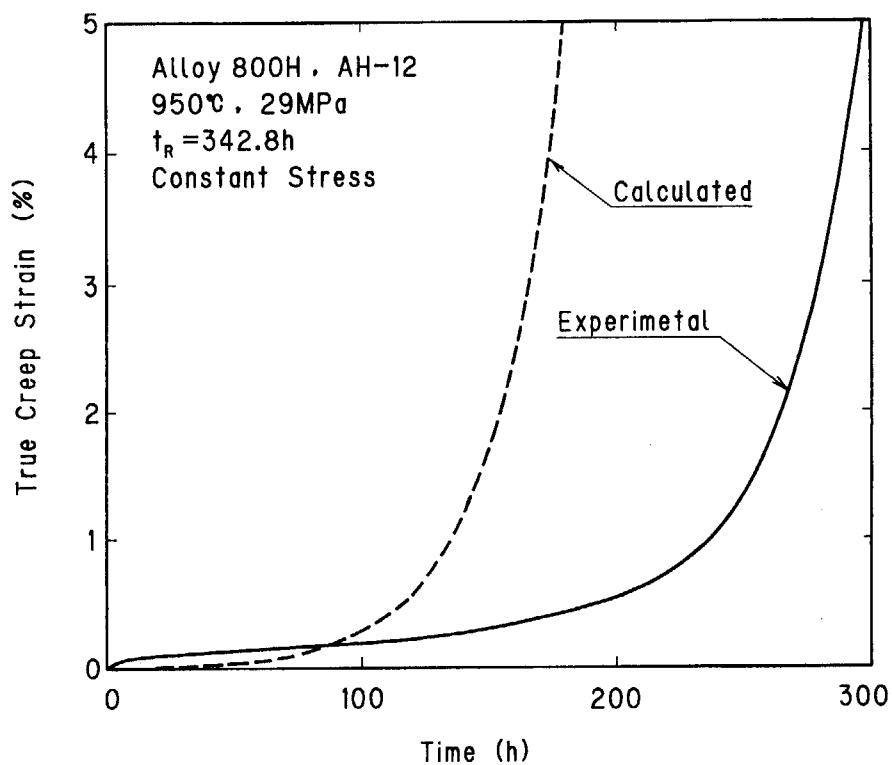


Fig. 4.52 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 29MPa at 950°C.

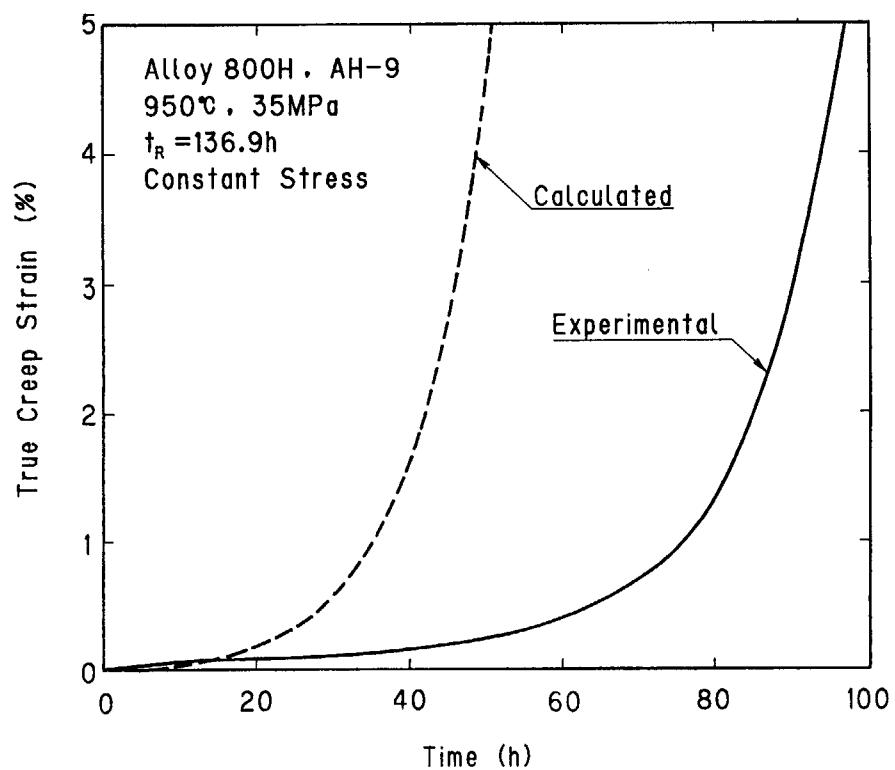


Fig. 4.53 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 35MPa at 950°C.

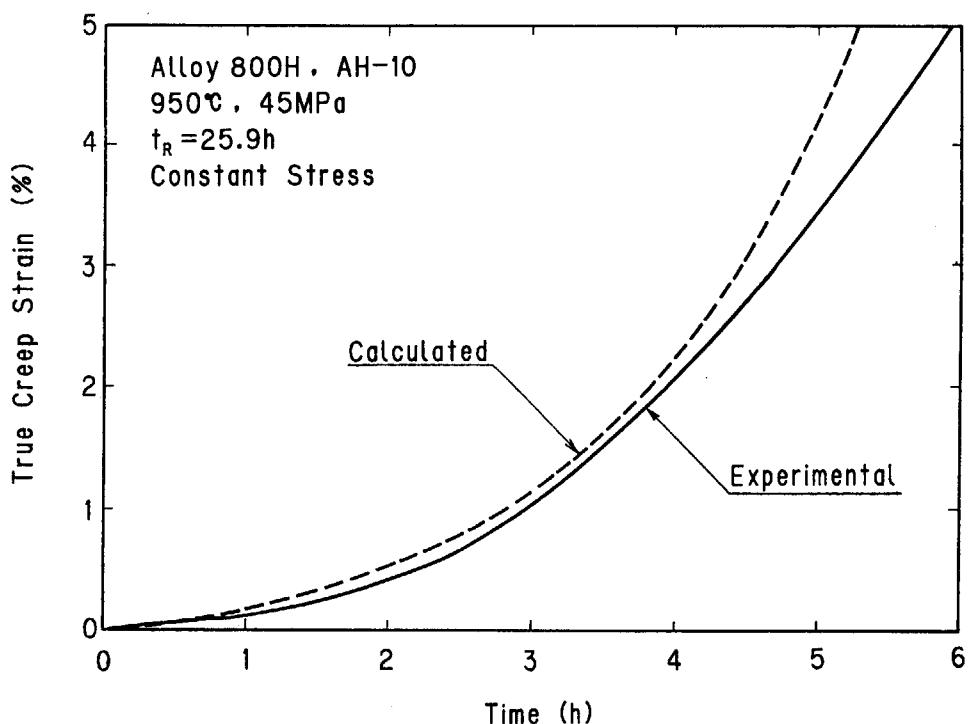


Fig. 4.54 Comparison of calculated creep curve with the experimental one for 45 MPa at 950°C.

5. ま と め

温度700°C、800°C、850°C、900°C及び950°Cで、Alloy800Hの大気中、一定応力下でクリープ試験を行い以下の結論を得た。

- (1) 応力と破断時間の関係は、両対数グラフ上ではほぼ直線関係にある。
- (2) 破断延性（破断伸び及び絞り）については、応力が低くなるにしたがって、破断延性の低下が認められた。温度に関しては、700°C、950°Cで小さく、中間の800～900°Cでは比較的大きい。
- (3) クリープ曲線は温度、応力により多様な形態を示す。50MPa以下の応力では温度に無関係に3次クリープ状の、即ち、時間と共にひずみ速度が増加する（時間軟化型の）曲線となる。
- (4) 時間軟化型のクリープ曲線の場合も含め、適当な規則を決めて最小クリープひずみ速度を求めるとき、応力との間に両対数グラフ上ではほぼ直線の関係が得られる。
- (5) 金属組織については、クリープ曲線の相違に対応した差は特に認められなかった。
- (6) 典型的なクリープ曲線を示す800°C～900°Cの高応力の場合については、Garofalo型の式により定式化が可能である。
- (7) 応力50MPa以下で見られる時間軟化型のクリープ曲線については、指數関数による定式化を試みた。同程度のクリープひずみの推定を行った場合で見ると曲線の一一致は良好であり、指數関数による定式化は妥当と考えらる。しかし、実験で得られたクリープ曲線そのものが温度及び応力に関して非常にばらついているので定式化は困難であった。

参考文献

- 1) Tachibana, Y., et al., "Integrity assessment of the high temperature engineering test reactor (HTTR) control rod at very high temperatures", Nuclear Engineering and Design, 172, pp. 93-102 (1997).
- 2) ASME CODE CASE N-47
- 3) M. K. Booker, et al., "Survey of Available Creep and Tensile Data for Alloy 800H", ORNL/TM-6029 (January 1978).
- 4) Y. Monma, et al., "Assessment of Elevated-Temperature Property Data for Alloy 800H", Transactions of National Research Institute for Metals, Vol. 26, No. 3, pp. 215-229 (1984).
- 5) 橘 幸男, 他4名, (私信)
- 6) 橘 幸男, 他6名, (私信)
- 7) Yu. N. Rabotnov, "Creep Problems in Structural Members", North-Holland Publishing Co., pp. 379-382 (1969).
- 8) R. K. Penny, "The Usefulness of Engineering Damage Parameters during Creep", Metals and materials, Vol. 8, No. 5, pp. 278-283 (1974).

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力					
1	10.1972	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

エネルギー	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855 J(15 °C)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仮馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 735.499 W
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100	
3.7 × 10 ⁻¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

A—000001-01-00000A-A

1