

UDC 669.15'26'28-194 : 669.14.018.85-462 : 539.376 :
620.172.251.2 : 539.434.016.3

技術報告

ボイラ用 2.25Cr-1Mo 鋼管の外径ひずみによる
クリープ余命の推定*

浅川 幸一**・大友 暁**・雑賀 喜規***

Estimation of Remaining Creep Life by Use of Tangential Strain
on Outside Diameter of Boiler Tubes (2.25Cr-1Mo Steel)

Kohichi ASAKAWA, Akira OHTOMO, and Yoshinori SAIGA

Synopsis:

A remaining life estimation method for in-service boiler tubes (2.25Cr-1Mo steel) has been studied in terms of cumulative creep strains. With the life fraction rule presentation, values between 0.98 and 1.90 have been obtained by a number of creep rupture tests under variable temperature conditions.

The materials pre-crept to a same strain level at various strain rates between 0.002 and 2%/h showed the remaining life within a range of ± 0.2 of the value of the life fraction presentation. For a relatively conservative estimate, correlations between tangential strains on the outside diameter of tube and remaining life have been established for a number of stress levels corresponding to hoop stresses.

The present method enables to determine the remaining life nondestructively without operational histories.

1. 緒 言

供用期間中の火力発電ボイラ過熱器管に対して、そのクリープ余命（破断寿命）の推定を期待して、組織の変化、クリープ破断強度の変化、クリープひずみの変化を利用した方法が、しばしば採用される。クリープひずみ（外径接線方向ひずみ、以下、外径ひずみと略す）による方法は、前二者にくらべ、非破壊的な検査が可能であること、同一部材の経年変化の追跡、集積データの活用が比較的容易であること、試験や評価に要する時間が短いなどの利点があると思われる。しかし、外径ひずみによる余命推定法を実用使用管への適用を意図して検討した報文はほとんど見当たらない。本稿では、約 600°C までの温度範囲で使用される 2.25Cr-1Mo 鋼管についてクリープ余命推定への外径ひずみの適用性とクリープ余命におよぼすクリープ変形中の熱処理の影響を単軸引張クリープ特性にもとづき検討した結果を報告する。

2. 実験方法

供試管の化学成分を Table 1 に示した。供試管は等温焼なましに施された JIS STBA 24 で、その外径：45 mm 厚さ：9.5 mm である。この管より Fig. 1 に示した試験片を採取し、600~750°C、4~12kg/mm² の条件下でクリープ試験を行つた。クリープひずみはゲージ間（直径：6mm、長さ：30mm）の伸びを差動トランスを用いて測定して求めた。なお、クリープ中断後の再クリープ試験における試験応力は、その時点での断面積に応じ、荷重を再調整した場合の応力で示した。

Table 1. Chemical compositions of 2.25Cr-1Mo steel tube (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N
0.093	0.30	0.43	0.017	0.013	2.18	0.96	0.05	0.011	0.011	0.007

* 昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 10 月 16 日受付 (Received Oct. 16, 1978)

** 石川島播磨重工業(株)技術研究所 (Research Laboratory, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15 Toyosu Koto-ku 135)

*** 石川島播磨重工業(株)技術研究所 工博 (Research Laboratory, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

クリープ変形中の熱処理として採用した等温焼なまし条件は Fig. 2 に示したように 930°C×0.5h, 50°C/h で 720°C まで冷却, 720°C×2h, 空冷で行った. この

熱処理は受入れまま (等温焼なまし) のクリープ特性を変化させないことが, 同図のクリープ曲線からわかる.

3. 実験結果と考察

3.1 クリープ破断寿命と寿命消耗率則の関係

一定温度, 一定荷重でのクリープ破断試験結果を Fig.

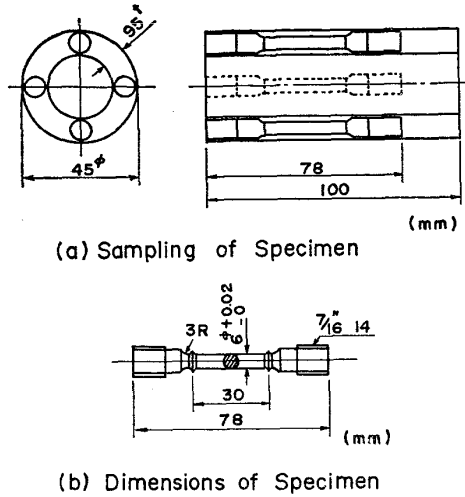


Fig. 1. Sampling and dimensions of creep specimen.

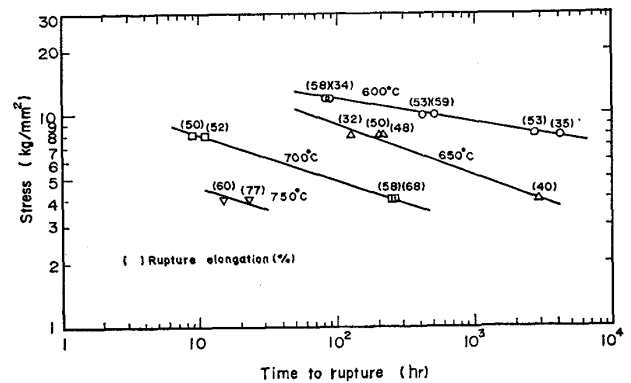


Fig. 3. Summary of creep rupture test results.

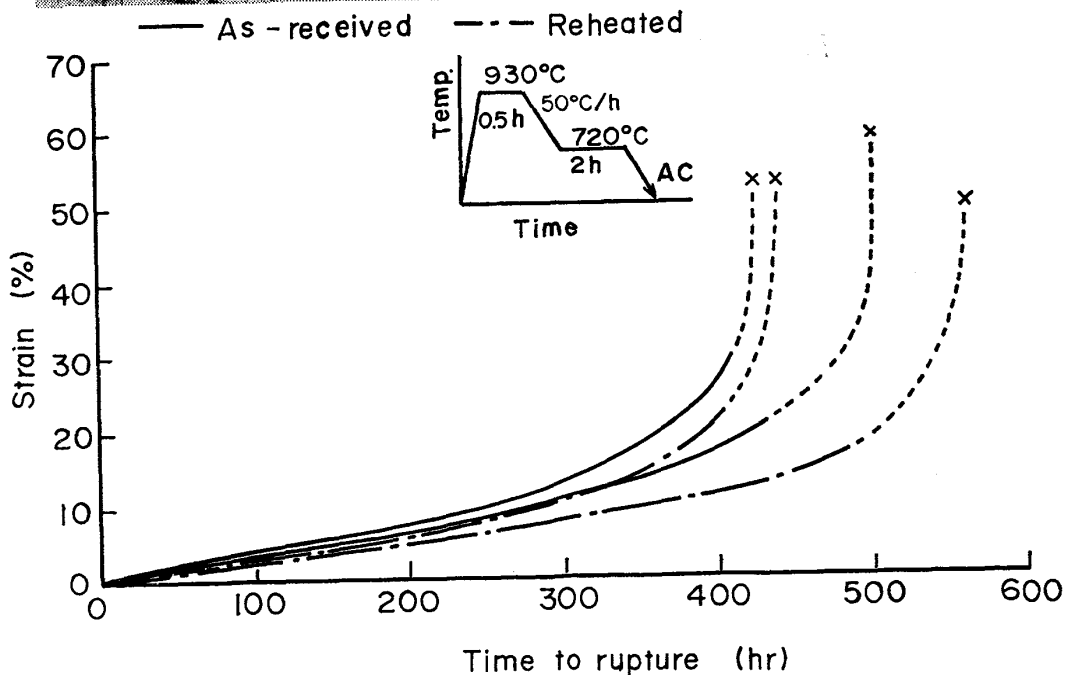
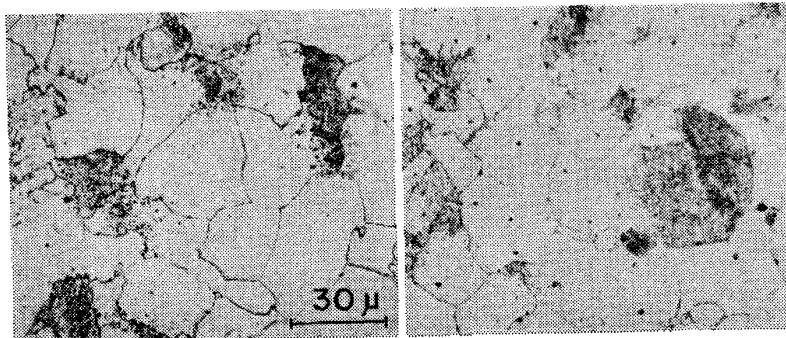
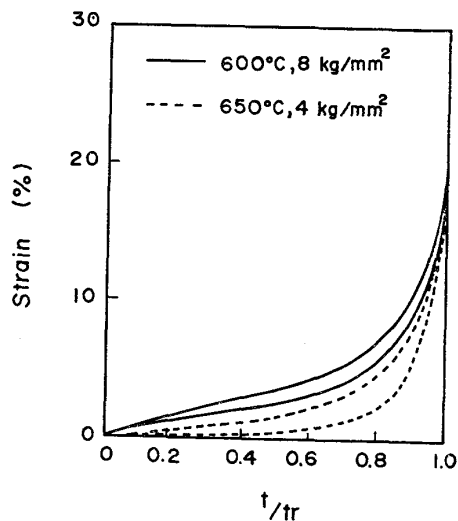


Fig. 2. Effect of reheat treatment on creep strength at 600°C under 10 kg/mm².

Table 2. Creep life under varied conditions, evaluation of the life fraction rule.

Step I					Step II					$\sum t_i/tr_i$
Temp (°C)	Stress (kg/mm ²)	Time (h)	Strain (%)	t/tr	Temp (°C)	Stress (kg/mm ²)	Time (h)	Strain (%)	t/tr	
600	8	1000	2	0.29	600	8.2	2087	—	0.70	0.99
"	10	233	8	0.51	"	11.6	209	—	1.39	1.90
"	8	3800	10	1.09	"	8	1800	—	0.52	1.61
600	8	3800	10	1.09	"	11	98	—	0.49	1.58
650	8	121	10	0.66	"	8	1099	—	0.32	0.98
"	8	121	10	"	"	10.5	303	—	0.95	1.61
700	8	5	10	0.50	"	8	2993	—	0.86	1.36
"	8	5	10	"	"	9.4	894	—	0.89	1.39
600	12	48	15	0.55	"	10	297	—	0.64	1.19

3に示した。Table 2には、もつとも簡単な組合せの温度、応力変動クリープ破断試験を行い、一定温度、一定応力におけるクリープ破断試験結果との比較を寿命消耗率則¹⁾、 $\sum_{i=1}^n t_i/tr_i$ (ここで t_i は条件: i でのクリープ経過時間、 tr_i は条件: i でのクリープ破断時間、 n は条件: i の数) により整理した結果を示した。温度、応力変動下での破断は寿命消耗率: 0.98~1.90の範囲でおこつた。なお、一定温度、一定応力下における破断のばらつきは平均値: 1に対して 0.84~1.21の範囲であつた。

Fig. 4. Creep strain vs life fraction (t : time of creep, tr : rupture time).

3.2 クリープひずみと寿命消耗率の関係

Fig. 4に、600°C, 8 kg/mm²と650°C, 4 kg/mm²の場合のクリープひずみと寿命消耗率の関係(試験数: 2)を示したが、同じひずみを与える (t/tr) のばらつきは最大: ± 0.15 であることがわかる。同一試験条件におけ

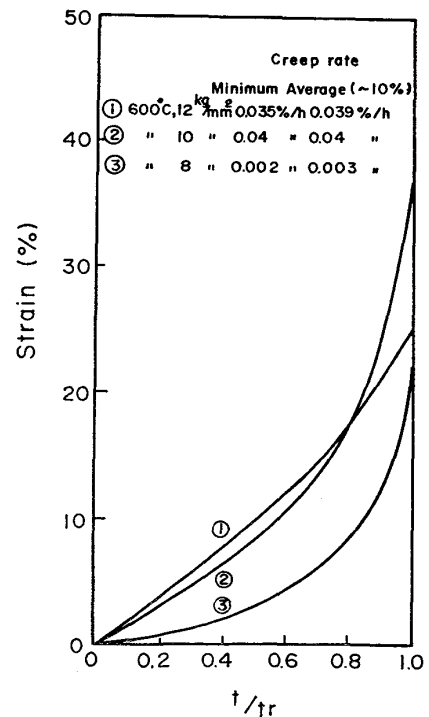


Fig. 5. Effect of stress on creep strain vs life fraction.

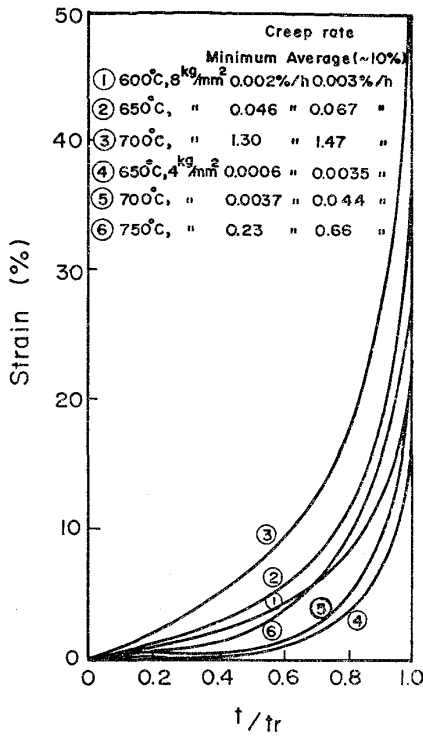


Fig. 6. Effect of temperature on creep strain vs life fraction.

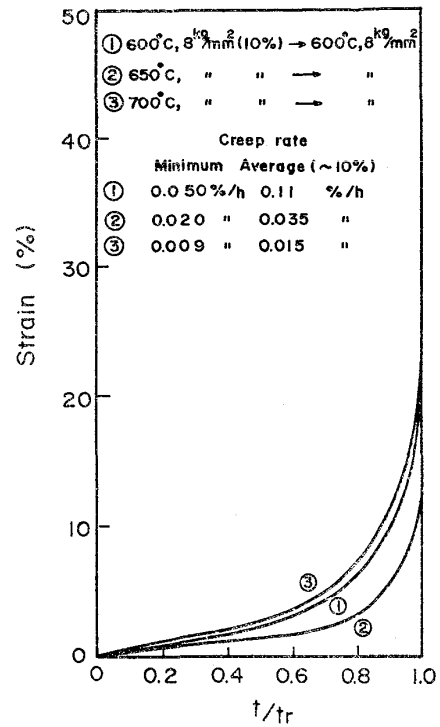


Fig. 8. Creep strain vs life fraction at 600°C, 8 kg/mm² for specimens pre-crept by 10%.

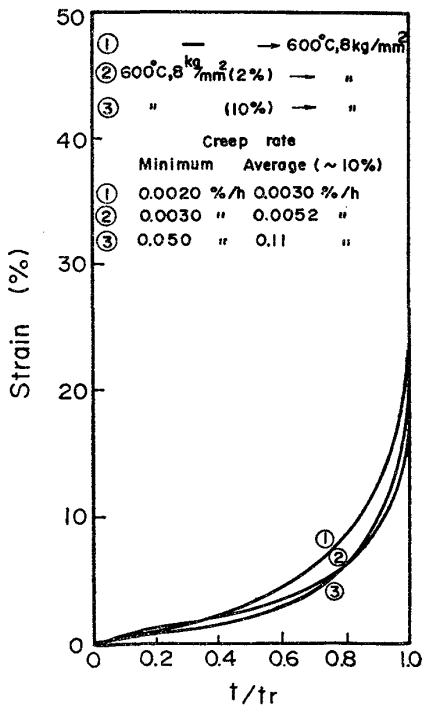


Fig. 7. Creep strain vs life fraction at 600°C, 8 kg/mm² for specimens pre-crept by 2 and 10%.

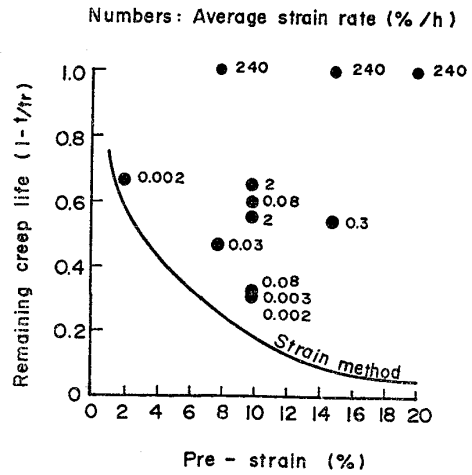


Fig. 9. Remaining creep life as a function of pre-strain.

る平均クリープひずみを求め、そのひずみと寿命消耗率の関係を Fig. 5 と Fig. 6 に示した。試験温度、試験応力の影響がわかるが、同一温度および同一応力の範囲に

において、それぞれ、クリープひずみ速度が小さいような試験条件の場合ほど、同一寿命消耗率に対するクリープひずみは小さくなる傾向が認められる。Fig. 7 と Fig. 8 はあらかじめ種々の条件でクリープ変形させたのちの再クリープ (600°C, 8kg/mm²) におけるクリープひずみと寿命消耗率の関係を示すが、あらかじめクリープをさせていない 600°C, 8 kg/mm² の場合と比較してみると、同一ひずみを与える寿命消耗率の相違は ±0.2 以内であることがわかる。

あらかじめ、種々の条件でクリープ変形させたのちのクリープ余命(実測値)を予ひずみ量との関係で示したのが Fig. 9 である。同図の黒丸印に付記した数字は予

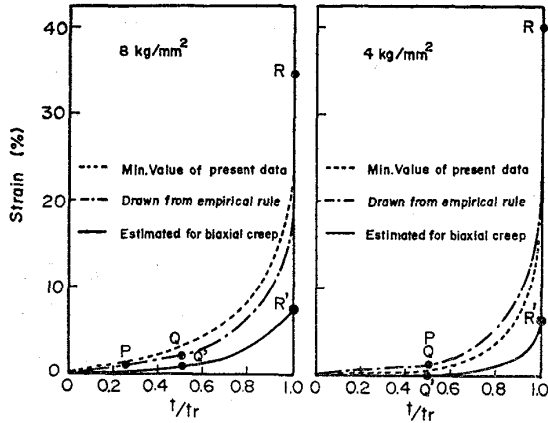


Fig. 10. Estimation of biaxial creep curves of tube from uniaxial creep curves.

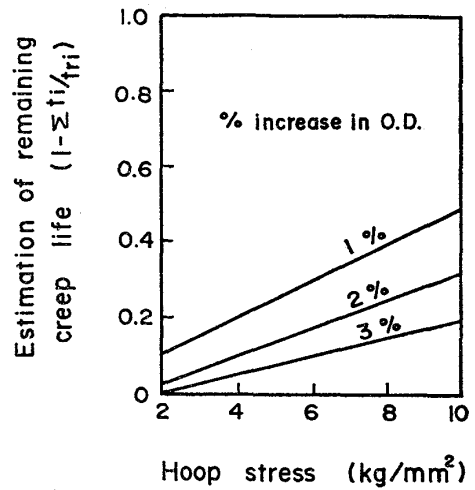


Fig. 11. Estimated remaining creep life of tube under internal pressure as a function of % increase in outside diameter.

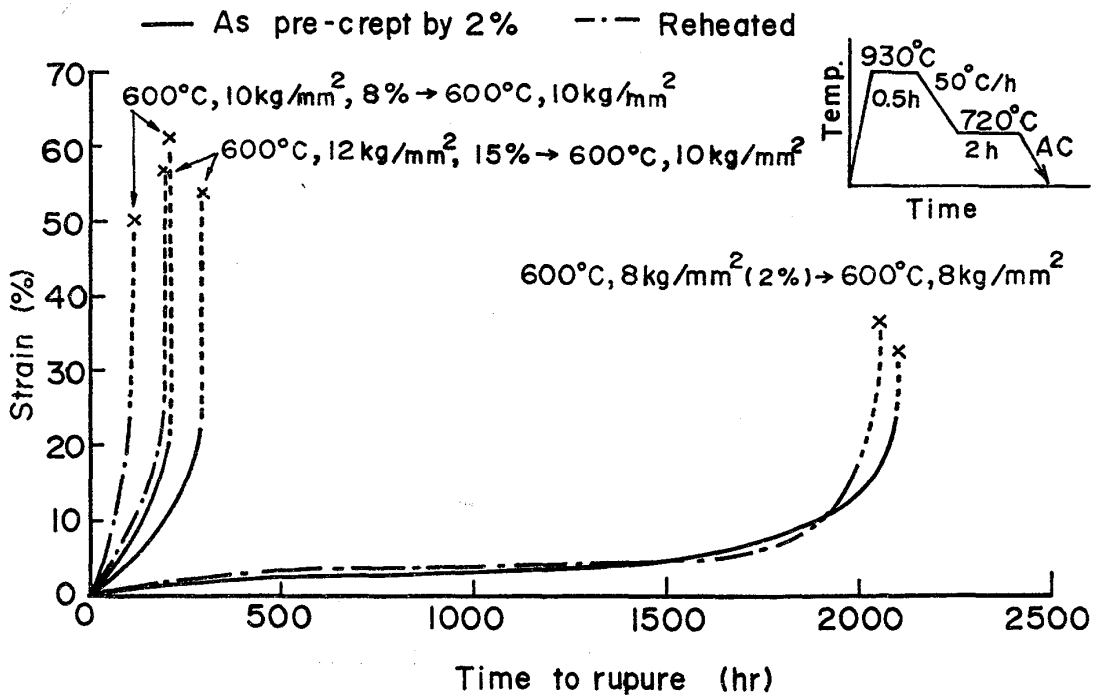
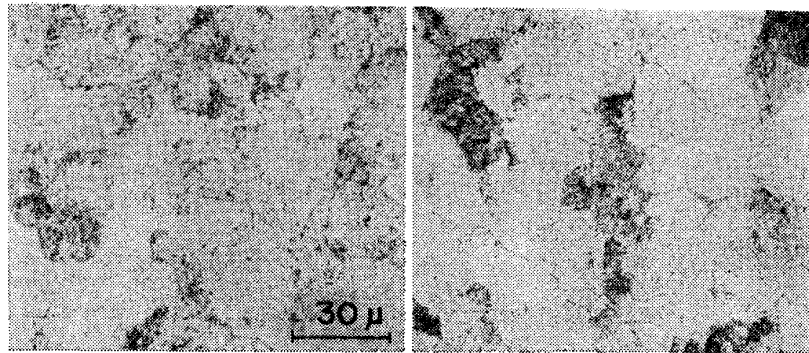


Fig. 12. Effect of reheat treatment on remaining creep life at 600°C, 8~10 kg/mm² for specimens pre-crept at 600°C, 8~12 kg/mm² (pre-strained: 2~15%).

ひずみ時の平均ひずみ速度であり、240%/h の場合は 600 °C における短時間引張試験で与えたひずみであり、そのほかはクリープによつた。予ひずみ：10% の場合のクリープ余命は寿命消耗率：0.3~1 であるように大きな幅のあることがわかる。このことは、予ひずみ量から、精度よくクリープ余命を推定することの困難さを示唆するものである。一方、同図の Strain method は応力：8 kg/mm² のクリープ試験におけるクリープひずみと寿命消耗率の関係から求められたものであるが、実測値（同図の黒丸印）に対し、すべて安全側のクリープ余命を与えていることがわかる。ここで、実測値が試験応力：8~12 kg/mm² の結果であるので 8 kg/mm² のクリープ特性と比較したが、この場合、試験温度に関係なく、同一寿命消耗率に対してもつとも小さいひずみを与える試験応力 8 kg/mm² のデータ（ひずみと t/tr の関係図で下側の曲線）を用いた。予ひずみ量をこのような

方法で評価すれば、余命の平均値ではなく最小値を与えることができる。

Fig. 10 は内圧 2 軸クリープにおける外径ひずみを単軸引張クリープ特性から推定した説明図である。同図において、単軸クリープの実測曲線は、試験応力：8 kg/mm² (4kg/mm²) の場合で、同一寿命消耗率に対してもつとも小さいひずみを与える曲線とし、経験的曲線は長時間クリープでの変形特性を与えるため、次のような方法で既存データ^{2)~4)}から推定して求めた。すなわち、破断ひずみ： R は試験応力：約 8 kg/mm² (4kg/mm²) の場合のクリープ破断試験における破断ひずみの平均値²⁾、第 3 期クリープ開始点： Q は $0.5tr$ (tr は破断寿命)、1% ひずみの発生点： P は、8 kg/mm² の場合は $0.25tr$ 、4 kg/mm² の場合は $0.5tr$ と仮定し、第 1 期のクリープひずみを無視して、 OP 直線を Q までのばし、 QR 間は任意な曲線として作図した。2 軸クリープにおけるひ

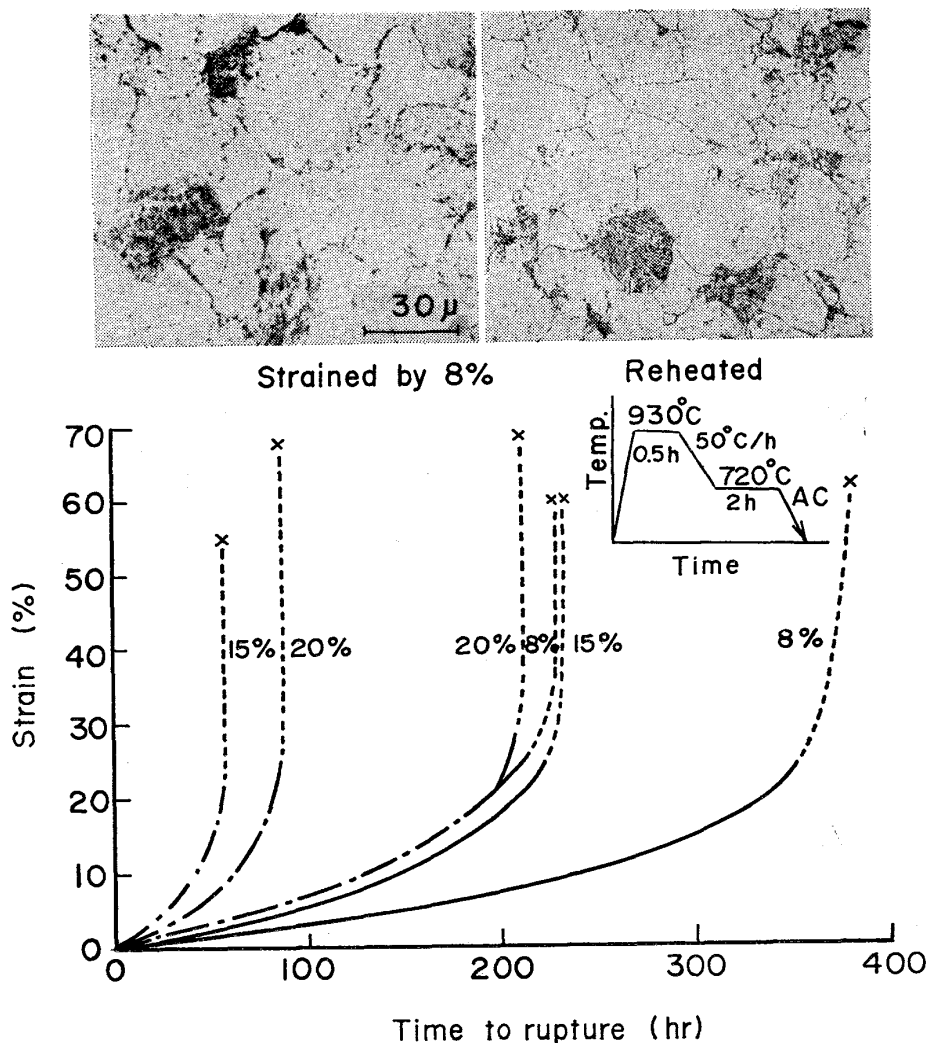


Fig. 13. Effect of reheat treatment on creep life at 600°C, 10 kg/mm² for specimens pre-strained between 8 and 20% (strain rate: 240%/h) at 600°C. (—: Strained, ---: Reheated).

ずみは、応力ごと、単軸クリープにおける実測曲線と経験的曲線を比較し、同一寿命消耗率に対して小さいひずみを与える曲線（下側の曲線）をもとに、次の方法により推定した⁵⁾⁶⁾。すなわち、破断ひずみ： R' は R の0.2倍、第3期クリープ開始点のひずみ： Q は単軸クリープの場合の0.33倍、 $Q'R'$ 間のひずみは単軸クリープの場合の0.2~0.33倍とし、 OQ' 間は直線、 $Q'R'$ 間は曲線により作図した。Fig. 11に、これらの2軸クリープ曲線から求めた応力（hoop stress）ごとの外径ひずみとクリープ余命の関係を示した。

実缶においては、外径ひずみが全周にわたり均一でなく、また管内外の腐食により厚さの変化がともなり場合があるので、相応に補正して評価する必要がある。

3.3 クリープ変形中の熱処理

予クリープ材の余命が熱処理により大幅に回復するのであれば、材料強化法として、また使用前の材料強度を模擬させる方法として有用であるが、Fig. 12に示したように、600°C、8~12 kg/mm²の条件で2~15%のクリープひずみ（ t/tr で0.29~0.55）を与えたのち等温焼なましを施し、600°C、8~10 kg/mm²の条件でクリープ試験を行なつたが、クリープ余命はまったく回復しなかつた。Fig. 13は650°Cにおいて引張試験機により8~20%（ひずみ速度：240%/h）のひずみを与えたのち、等温焼なましを施し、その影響を調べたものであるが、クリープ破断寿命は等温焼なましにより大幅に低下することがわかつた。

4. 結 言

火力発電ボイラ過熱器管として約600°C以下の温度

で使用される2.25Cr-1Mo鋼管を対象として、単軸引張クリープ特性にもとづき、外径ひずみによるクリープ余命の推定法を検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 温度と応力の簡単な組合せ変動下でのクリープ破断寿命は寿命消耗率で表わすと0.98~1.90であつた。

(2) 予クリープ材（寿命消耗率：0.29~0.55）の余命は等温焼なましを施しても、全然回復しなかつた。

(3) 外径ひずみによるクリープ余命推定法を試案した。この方法では、フープ応力ごとに外径ひずみとクリープ余命の関係を示したものであり、平均余命ではなく、比較的安全側の余命を与えることができる。ただし、この方法はクリープひずみと寿命消耗率の関係を適正化し、実缶におけるデータの集積により検証される必要があると思われる。

文 献

- 1) E. L. ROBINSON: Trans. ASME, 74 (1952), p. 777
- 2) NRIM Creep Data Sheet No. 3A (1976), [National Research Institute for Metals]
- 3) R. L. KLUEH: Proceedings of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials (ICM II), (1976) p. 16
- 4) R. F. JOHNSON, et al.: Joint Conference on High-temperature Properties of Steels by BISRA and ISI, Eastbourne, Paper 13 (1966)
- 5) 平 修二, 大谷隆一: 日本機械学会誌, 70(1970), p. 1737.
- 6) I. FINNIE and W. R. HELLER (鈴木房幸訳): 工業材料のクリープ (1965), [コロナ社]