

技術報告

UDC 669.15'14'26'28-194.56 : 621.181.021 : 620.172.251.2 :
669.14.018.85 : 539.434

ボイラ用 18-8-Mo 鋼管のクリープ余命の推定*

大友 暁**・浅川 幸一**・雑賀 喜規***

Estimation of Creep Life of Boiler Tubes (18-8-Mo Stainless Steel) Remaining after Long Term Service

Akira OHTOMO, Kohichi ASAKAWA, and Yoshinori SAIGA

Synopsis:

For the failure analysis or in-service inspection of high temperature parts of power plants, the estimation of the creep life remaining after a given service period and evaluation of such estimates are very important, especially when the parts have been accidentally overheated.

It is the case, the life fraction rule is often applied. To lay a foundation for this practice, creep rupture tests and metallographic studies were conducted on type 18-8-Mo stainless steel that had been used as superheater tube at 590~615°C for 27 000 hours. It was found that a service temperature with $\pm 15^\circ\text{C}$, one of the indispensable conditions for reliable estimation of the remaining creep life is difficult to determine by means of metallographic observations and that for the estimation of remaining life by a comparison between the used tube and unused tube in creep rupture testing, both tubes must be heated equally. As a result, the estimation based on creep strain (tangential strain on outside periphery of the tube) was found to be the best method capable of non-destructive testing for a secular change of remaining life.

1. 緒 言

ボイラ過熱器管は、飽和蒸気を過熱するもので耐圧性、耐熱性が要求され 18-8 系ステンレス鋼は約 650°C までの温度範囲で使用される。管の破断寿命は 100 000 h をはるかに超えることが期待されているが、過熱運転などにより早期に破断することがしばしばある。余命推定は、一般に過熱が検知された場合や長期間使用された場合に管の更新時期を判定するために要請されるが高温運転中、管ごとの温度監視法の制約から管壁温度が不明であるのが特長である。管の破断モードはクリープと考えられ、クリープ破断、組織試験による余命推定法が考察されているが^{1)~4)}、それらの方法の推定精度、適用限界は必ずしも明確ではない。そのため、管壁温度のあきらかな管の余命推定や余命の経年的追跡データなどの集積が必要と思われるが、これらに関する報文はほとんどない。

本稿では、管壁温度のほぼあきらかな火力発電ボイラ過熱器管 (18-8-Mo 鋼) の組織、クリープ破断試験を

もとに、光顕組織による管壁温度の推定法、クリープ破断特性およびクリープひずみ (外径接線方向ひずみ、以下、外径ひずみと略す) による余命推定法の推定精度、適用限界を検討した。

2. 供 試 材

供試管の化学成分を Table 1 に示した。実用使用管と未使用管は、いずれも固溶化熱処理が施された JIS-SUS 316 HTB で外径 : 38.1 mm, 管厚 : 4.9 mm, 結晶粒度番号 : 6 であるがヒートは異なる。

使用管は重油専焼の発電用貫流ボイラ (蒸発量 : 495 t/h, 主蒸気温度 : 569°C, 蒸気圧力 : 174 kg/cm²) の吊下型最終過熱器蒸気出口側の直管部に設置され 27 000 h 使用されたものである。この期間における平均管壁温度 (以下、管壁温度と略す) を Fig. 1 に示した。過熱器管の蒸気温度は直接測定が困難であったため出口ヘッダー近傍の非加熱部の管外面に設置した熱電対による計測値とし、管壁温度は蒸気温度をもとに計算⁵⁾により求められた。フープ応力は平均径公式により計算すると

* 昭和 51 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.)

Table 1. Chemical compositions of tubes investigated (%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Used tube	0.063	0.53	1.65	0.020	0.009	13.41	16.31	2.20
Unused tube	0.07	0.51	1.65	0.021	0.011	13.41	16.24	2.67

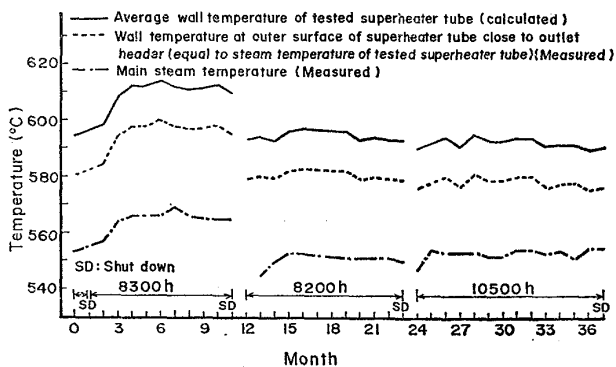


Fig. 1. Temperature distributions in service.

5.9 kg/mm² となる。なお、起動停止回数は 5 回 (間隔: 1ヶ月~1年) であつた。

3. 実験結果と考察

3.1 寿命消耗率則の適用性

使用管と未使用管から Fig. 2 に示した弧状試験片を採取して単軸引張クリープ試験を行なつた。次の 2 つの結果は寿命消耗率則⁶⁾ の有用性を示すものと考えられる。

(1) 使用管の寿命消耗率は使用履歴 (管壁温度, フープ応力) をもとに推定すると約 0.01 (余命: 0.99) と

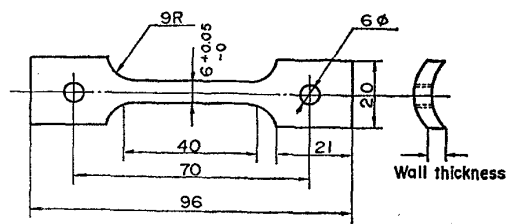


Fig. 2. Dimensions of creep test specimens (unit: mm).

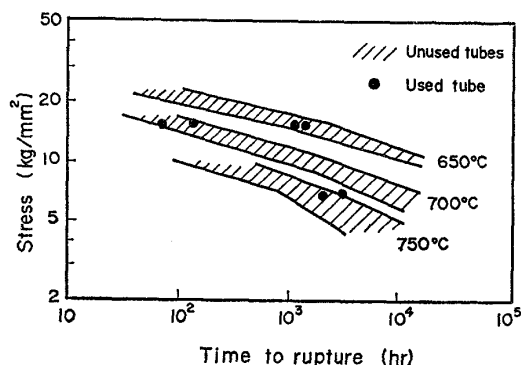


Fig. 3. Relationship between stress and rupture time.

なるが、Fig. 3 に示した 650~750°C における試験結果は未使用材の既存データ⁷⁾ の平均値をほぼ満足している。

(2) 未使用材についてもつとも簡単な組合せの温度変動クリープ破断試験を行ない一定温度における試験結果と比較した結果を Table 2 に示したが、温度変動下の寿命消耗率は 0.84~1.5 であつた (一定温度下の破断寿命: 1)。

Table 2. Relationship between temperature change test in creep of unused tube and the life fraction rule.

Test Condition	Temp (°C)	Stress (kg/mm ²)	Time (h)	Creep Rate (%/h)	Strain (%)	Rupture El (%)	Life Fraction	Cumulative Life Fraction
T: Const σ: "	650	15.5	1693	0.0063	—	37	1	1
	700	15.5	106	0.18	—	57	1	1
	750	7	2604	0.0073	—	44	1	1
T: Varied σ: Const	700	15.5	50	—	11	—	0.47	1.5
	650	15.5	1759	0.0065	—	60	1.03	
	700	15.5	50	—	4	—	0.47	1.5
650	15.5	1676	0.0040	—	40	0.99		
T: Varied σ: Const	750	7	1000	—	3	—	0.39	0.84
	650	15.5	758	0.031	—	65	0.45	
	750	7	1000	—	5	—	0.39	0.96
650	15.5	971	0.011	—	58	0.57		

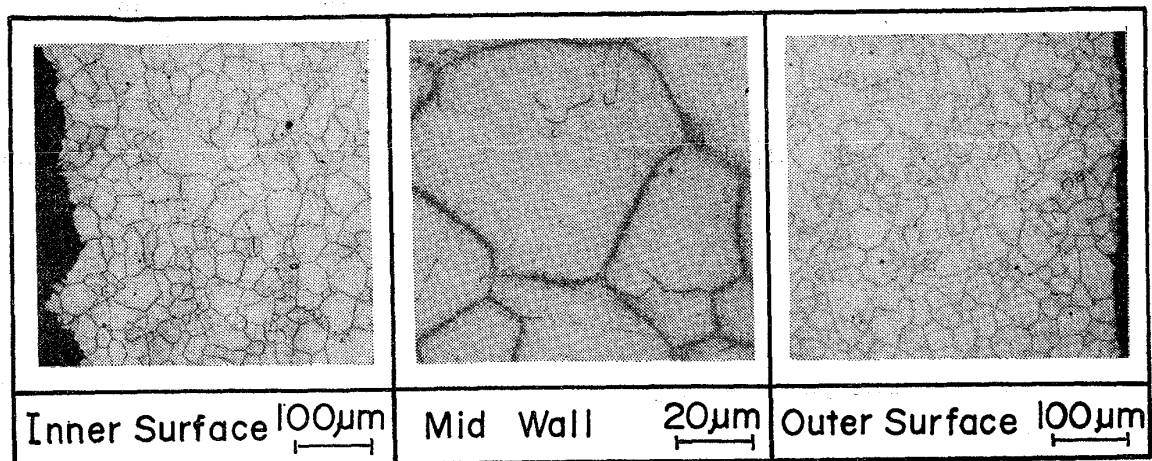


Photo. 1. Optical microstructure of used tube after 3 years' service.

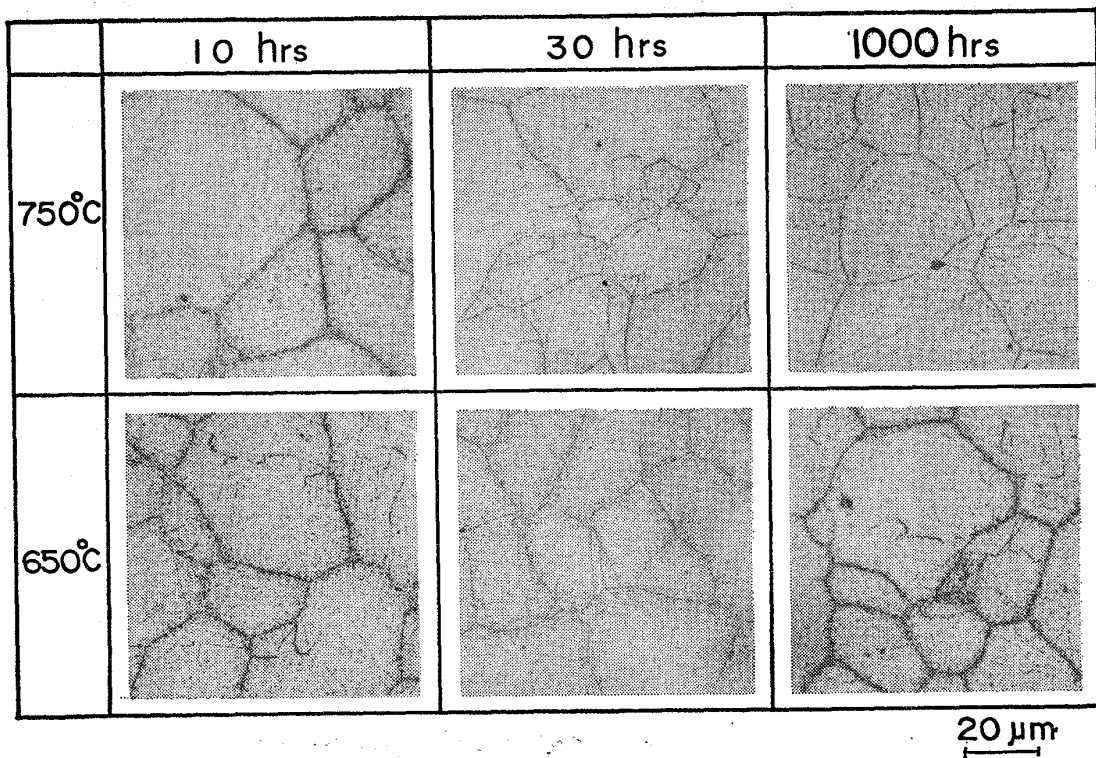


Photo. 2. Reheating influences on optical microstructure of used tube.

3.2 組織観察の適用性

過熱器管の使用履歴がわかれば寿命消耗率則と既存クリープ・データをもとに余命を推定できるが、一般に応力、時間はあきらかであつても管壁温度が不明であることが多い。そのため管壁温度の推定が重要となるが、ここでは2つの方法により温度推定を試みた。

(1) 使用管の光顕組織を Photo. 1 に示した。倍率：500 の観察では約 30°C の温度差（計算値）がある管内外面の相違および火炉側とその反対側との相違は識別できなかつた。Photo. 1 に示した使用材の組織は、未

使用材を $600^{\circ}\text{C} \times 1000\text{h}$ 、 $650^{\circ}\text{C} \times 300 \sim 500\text{h}$ 加熱した場合に再現できたが、これらの加熱条件からラーソン・ミラーパラメータ⁸⁾を用いて使用材の等価管壁温度を推定すると $550 \sim 585^{\circ}\text{C}$ となつた。Fig. 1 に示した運転履歴によれば、管壁温度は $590 \sim 615^{\circ}\text{C}$ である。

(2) つぎに、使用材の組織とそれを再加熱 ($600 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5 \sim 1000\text{h}$) したのちの組織とを比較して温度推定を試みた。その場合、組織変化の有無は光顕組織（倍率：500）における析出物の形態を目視により評価した。650、 750°C で再加熱したのちの組織を Photo. 2

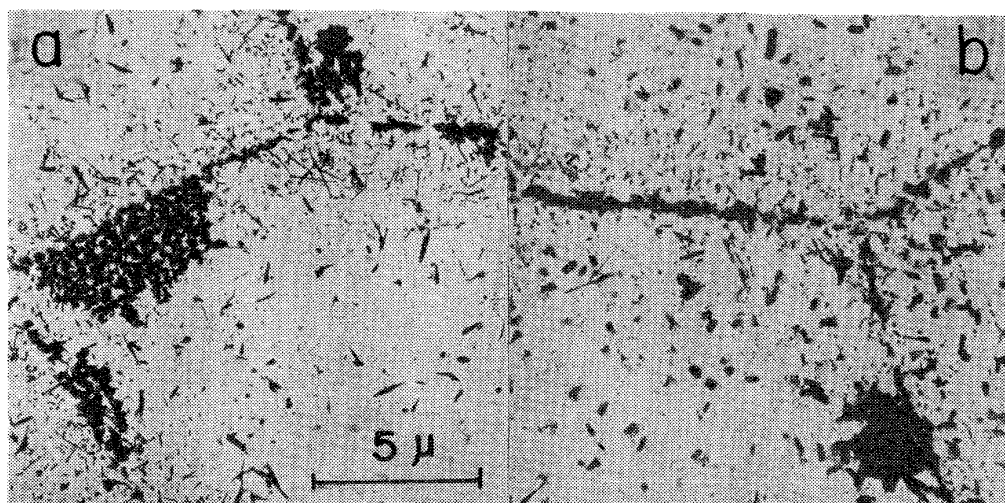


Photo. 3. Electron microstructure of used tube after reheating at 650°C for 3 hours (a) and 1000 hours (b).

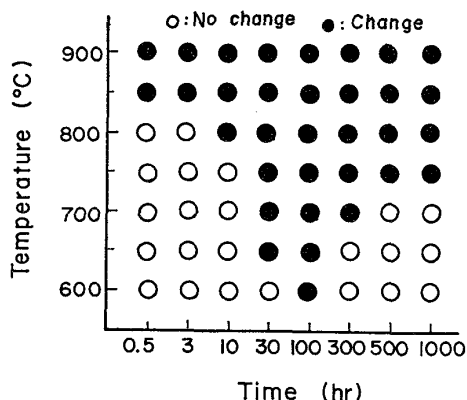


Fig. 4. Microstructural variation of used tube with reheating.

に示した。Fig. 4 に組織の変化の有無を示したが、同図より管壁温度は 600°C 以下と推定される。

なお、再加熱したのも組織変化が目視できなかつた 650°C×3h, 650°C×1000h の場合について抽出レプリカによる電顕組織 (倍率: 4000) で粒界析出物の最大幅 (0.6~0.7μ), 粒界近傍の過多析出層の幅 (3~4μ), 長さが 2μ 以上の粒内析出物の数 (5~7×10⁷/cm²) を比較したが相違は認められなかつた (Photo. 3)。これらの析出物は電子線回折により炭化物: M₂₃C₆ と同定された。

クリープ余命をファクター: 2 の精度 (推定時間の 0.5~2 倍の範囲) で推定するため等価管壁温度は、クリープ・データのばらつきを考慮すると ±15°C の精度で推定する必要があるが、以上の結果は組織による方法での困難さを示している。

3.3 クリープ破断試験の適用性

ファクター: 2 の余命推定精度を期待するためには、同一ヒートの未使用管についてあらかじめクリープ破断試験を実施するか、または同一ヒートの未使用管を保管

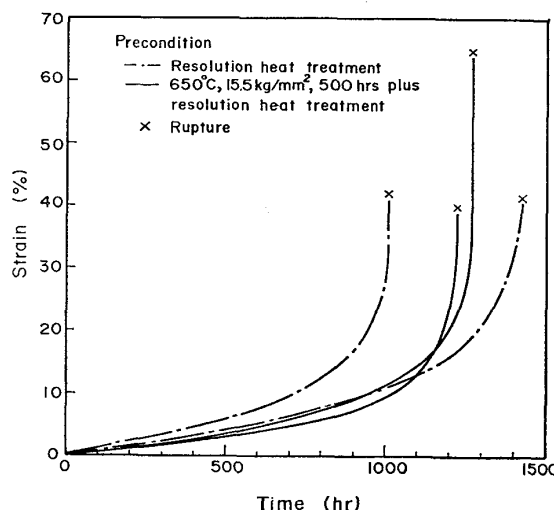


Fig. 5. Influences of resolution heat treatment during creep test at 650°C under 15.5 kg/mm² for unused tube.

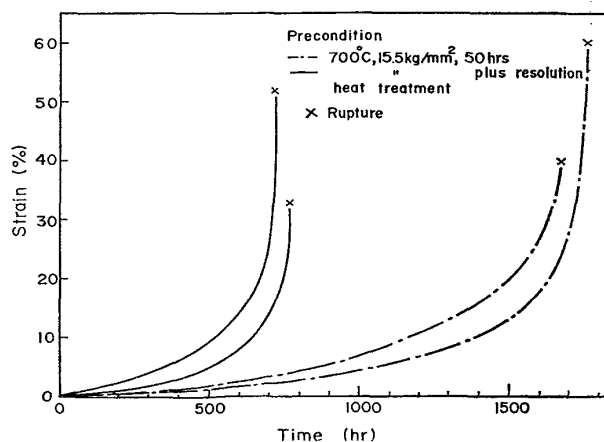


Fig. 6. Influences of resolution heat treatment during creep test at 650°C under 15.5 kg/mm² for unused tube.

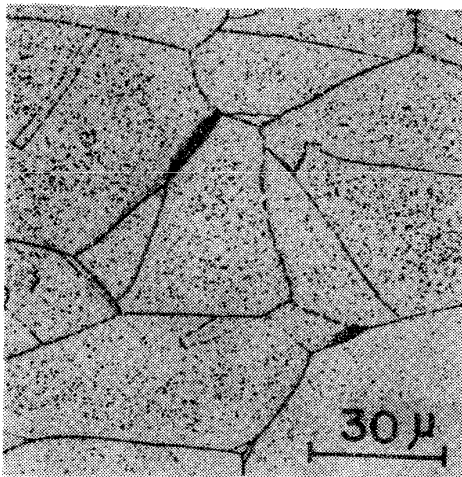


Photo. 4. Typical appearance of creep fissures at pre-crept unused tube (700°C, 15.5kg/mm², 50h, $t/tr : 0.47$).

し、必要時に試験ができることが必要であるが、必ずしも実用的な方法でない。そのため使用材に再固溶化熱処理を施すことにより使用前の状態を模擬させる方法が試みられているが⁹⁾、Fig. 5 はクリープ損傷 (寿命消耗率: 0.29) が再固溶化熱処理: 1100°C × 15min. 空冷により回復し、クリープ前の状態が模擬できた例である。しかし、Fig. 6 に示したように再固溶化熱処理によりクリープ損傷 (寿命消耗率: 0.47) が回復しない場合があるので一般的に適用できるものではないと思われる。Photo. 4 は、再固溶化熱処理を施す前のクリープ損傷材 (寿命消耗率: 0.47) の組織であるが、クリープによる

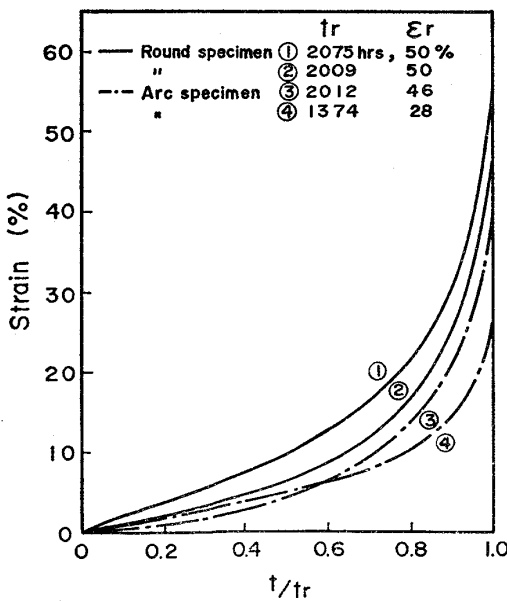


Fig. 7. Comparison of creep curves at 650°C under 15.5 kg/mm² between arc test specimen and round test specimen (t_r : rupture time, t : time of creep).

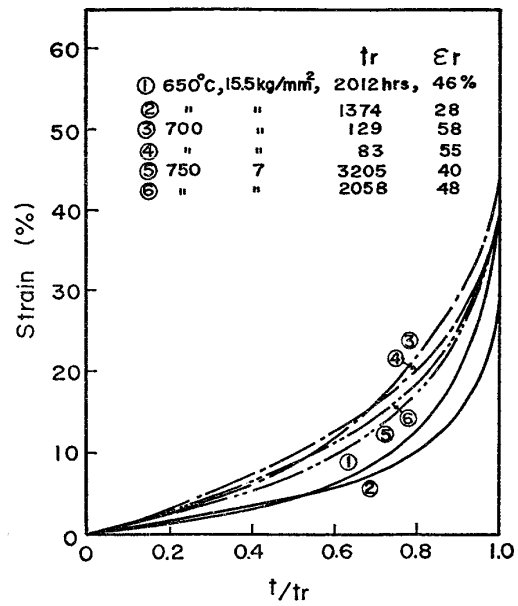


Fig. 8. Relationship between creep strain and life fraction of unused tube (t_r : rupture time, t : time of creep).

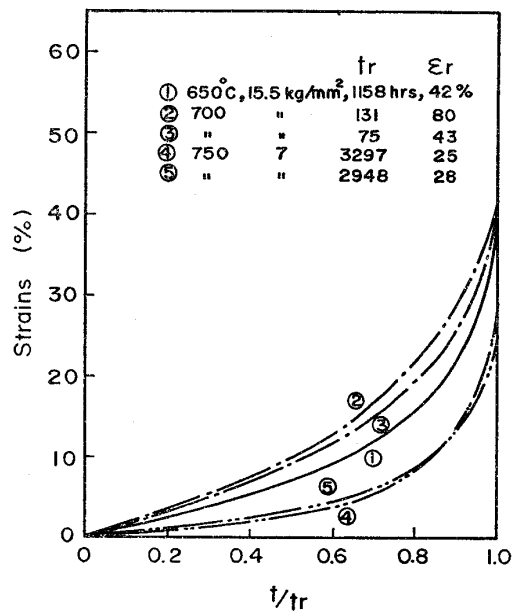


Fig. 9. Relationship between creep strain and life fraction of used tube (t_r : rupture time, t : time of creep).

微小割れ目が認められる。微小割れ目の有無と再固溶化熱処理によるクリープ損傷の回復との相関はあきらかでない。

3.4 外径ひずみの適用性

外径ひずみによる余命推定法が石油化学プラント用 21Cr-32Ni 合金管について提案されている⁹⁾。外径ひずみは非破壊的に測定でき、同一部材について経年的な追跡調査が可能である。ここでは 18-8-Mo 鋼の単軸引張

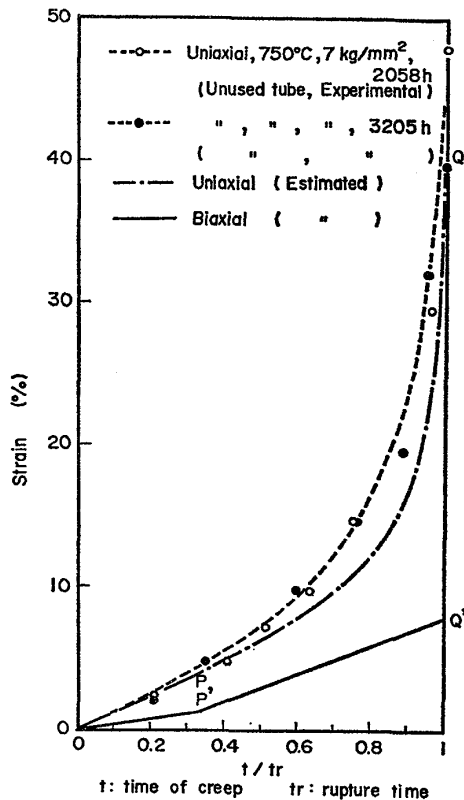


Fig. 10. Estimation of biaxial creep curve of tube from uniaxial creep curves.

クリープ特性をもとに過熱器管の余命推定法を検討した。

クリープひずみにおよぼす試験片形状および使用履歴の影響を Fig. 7~9 に示した。Fig. 7 は未使用管について、Fig. 2 に示した弧状試験片と直径：3 mm，平行部：20 mm の丸棒試験片による 650°C，15.5 kg/mm² でのクリープ特性を比較したものであるが、破断時間に相違がなく、同じ寿命消耗率に対するクリープひずみは弧状試験片のほうが小さいことがわかる。弧状試験片を用いて求めた未使用管、使用管のクリープ特性をそれぞれ Fig. 8, 9 に示した。同じ寿命消耗率に対するクリープひずみは、試験応力が 15.5 kg/mm² の場合、未使用材のほうが小さく、7 kg/mm² の場合、使用材のほうが小さい値を示した。

Fig. 10 は管の内圧 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より推定した説明図である。同図において、引張クリープの実測曲線は使用管のフープ応力に近い 7 kg/mm² の場合の平均値であり、一方、推定曲線は長時間クリープの変形特性を与えるため次のような方法で既存データから推定したものである。すなわち、破断ひずみ：Q は試験応力が数 kg/mm² のクリープ試験における破断ひずみの平均値：40%¹⁰⁾とした。第

Table 3. Estimation of remaining creep life by the use of tangential strain on the outside diameter of tube.

Strain (%)	Life fraction	
	Consumed	Remaining
1	0.25	0.75
2	0.4	0.6
3	0.5	0.5
4	0.7	0.3
5	1	0

3 期クリープ開始点：P は、第 3 期クリープが全寿命の 0.5~0.67 倍¹¹⁾を占めるといわれているので 0.33 とした。また、P でのひずみは、全寿命の 0.1~0.33 倍¹²⁾で 1% ひずみを発生することが報告されているが、ここでは破断ひずみの 0.1 倍¹³⁾ (4%) と仮定した。このように Q, P 点をプロットし、第 1 期クリープひずみを無視して OP 間は直線、PQ 間は任意な曲線により作図した。実測曲線にくらべ推定曲線のほうが同じ寿命消耗率に対し小さいひずみとなつているが、2 軸クリープ曲線は、この推定曲線をもとに次の方法により推定した。

2 軸クリープにおける破断ひずみ：Q' は単軸クリープの場合の 0.2~0.33 倍³⁾¹¹⁾¹⁴⁾であるので、ここでは 0.2 倍とし、Q' をプロットした。第 3 期クリープ開始点：P' は単軸クリープの場合と同様に全寿命の 0.33 倍とした。P' でのひずみは、2 軸クリープにおける第 2 期クリープひずみ速度が単軸クリープの場合の約 0.33 倍¹¹⁾であるので、ここでは P のひずみの 0.33 倍 (1.3%) とした。O と P', P' と Q' はそれぞれ直線により作図した。この 2 軸クリープ曲線から外径ひずみ 1% ごとの余命を求めた結果を Table 3 に示した。なお、18-8-Mo 鋼の内圧 2 軸クリープにおいて、約 5% の外径ひずみで破断した実験例¹⁴⁾があるので外径ひずみが 5% 以上の場合の余命は零と評価した。

今回の使用管のクリープ余命は、運転履歴より約 0.99 と推定され、使用前後において外径、厚さの変化は全然認められなかつたが、一般にひずみが全周にわたり均一でないこと、管外腐食などにより厚さが変化することがあるので、この方法を実管に応用する場合、2 方向以上の外径測定、超音波法などによる厚さ測定を行ない、相応に補正して評価する必要がある。また、この方法は平均余命を高精度で推定するものではなく、比較的安全側の余命を推定するものであるが、なお、推定精度に難点

があるので、経年的な追跡調査などが必要となる。

4. 結 言

管壁温度のほぼあきらかな発電ボイラ過熱器管 (18-8-Mo 鋼) の組織, クリープ特性をもとに, クリープ余命の推定法を検討した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 使用管のクリープ余命をファクター: 2 の精度で推定するには, 等価管壁温度を $\pm 15^{\circ}\text{C}$ の精度で推定する必要があるが, 組織による方法では困難である。

(2) クリープ破断試験を利用して余命を推定する場合, 使用管と同一ヒートの未使用管のデータとの比較が不可欠である。この場合, ファクター: 2 の精度を期待することができる。

(3) 外径ひずみを利用する方法は, 平均余命を精度よく推定するものでなく, 比較的安全側の余命を推定するものであるが, 非破壊的に測定ができ, 経年的な追跡調査が可能であり, 管壁温度と無関係に, しかも迅速に推定できる利点がある。もつとも有望な余命推定法であると思われる。

文 献

- 1) Literature Survey on Creep Damage in Metals, ASTM STP No. 391 (1965)
- 2) D. A. WOODFORD: International Conference on Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications Philadelphia Sept. 1973 and

Sheffield UK Apr. 1974, Paper C180/73, (1973)

- 3) 行俊照夫, 吉川州彦: 耐熱金属材料委員会研究報告, 15(1974), p. 125, [学振第 123 委員会]
- 4) 桑原和夫, 新田明夫: 火力原子力発電, 29 (1978), p. 175
- 5) 山中秀男: ボイラの設計, (1959), pp. 129~136 [産業図書]
- 6) E. L. ROBINSON: Trans. ASME, 74 (1952), p. 777
- 7) 日本鉄鋼協会クリープ委員会: 金属材料高温強度データ集, 第 2 編(1975), [日本鉄鋼協会]
- 8) F. A. LARSON and J. MILLER: Trans. ASME, 74 (1952), p. 765
- 9) D. B. ROACH and F. A. SIMONEN: Private Communication, (1973)
- 10) NRIM Creep Data Sheet No. 6, (1972) [National Reserch Institute for Metals]
- 11) G. H. ROWE, et al.: Trans. ASME, 85, Ser. D (1963), p. 71
- 12) R. J. TRUMAN, et al: Proceeding of the Joint Conference on High-Temperature Properties of Steels Organized by BISRA and ISI, Eastbourne, Paper 14, (1966)
- 13) M. KITAGAWA, et al.: 1976 Elevated Temperature Design Symposium, International Joint Petroleum Mechanical Engineering and Pressure Vessels and Piping Conference, Mexico City, 1976, p. 33, [ASME]
- 14) J. T. TUCKER, et al.: Trans. ASME, 82, Ser. D (1960), p. 465