

ボイラチューブ用耐熱鋼のクリープ損傷評価

Creep Damage Evaluation for Heat Resistant Boiler Tubes

榎木 義淳/Yoshiatsu Sawaragi・総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部 次長 工博

伊勢田敦朗/Atsuro Iseda・スミトモメタル USA 本社 担当課長 工博

要 約

STBA24 (2.25Cr-1Mo) および SUS321HTB (18Cr-8Ni) ボイラチューブの長期間経年変化特性および単軸、内圧下でのクリープ変形・損傷挙動を検討した。両鋼種とも、使用中の組織変化にともない機械的性質は変化するが、比較的短時間使用で飽和するため、損傷評価や寿命予測の点からは、変形やボイド、クラック等のクリープ損傷の定量評価が必要である。内圧クリープひずみ量は、両鋼種とも、単軸より大幅低下するが、両鋼種とも、寿命消費率が0.2から0.7程度の範囲では、内圧と単軸下でのクリープひずみ比がほぼ一定で、単軸クリープひずみからの内圧下でのクリープひずみ推定が可能である。

Synopsis

Changes in mechanical properties during long term service exposure and creep damage behavior under uniaxial and multiaxial stress conditions were investigated for typical boiler tubes of STBA24 and SUS321HTB steels. It is difficult to evaluate the creep damage directly from the changes in mechanical properties and structure. Although the creep strains under internally pressurized creep for both steels were smaller than those under uniaxial creep, the strain ratios to uniaxial creep for both steels were almost constant up until about 70% of their working life has elapsed.

1. 緒 言

近年、火力発電プラントは、電力の効率的運用のための負荷変動運転や、発電効率を高めるための高温高圧下設計など過酷な条件で使用される場合が増加し、これに伴い、部材に対する信頼性評価技術についても高い関心がよせられるようになった。一方、老朽化するプラントの使用寿命の延長が検討されるようになり、材料の損傷評価および余寿命予測法の研究が活発に行われるようになった^{1),2)}。耐熱鋼の中でも、熱交換器のボイラチューブは高温高圧下で長期間使用されることから、材質の経年変化に加えて、クリープ、熱疲労、高温腐食、水蒸気酸化等による損傷が複雑に絡み合って部材の余寿命に影響を及ぼすと考えられる。したがって、ボイラチューブの損傷評価と寿命予測を精度よく推定するためには、部材の使用環境と履歴を明確にするとともに、その材料固有の経年変化特性と部材の損傷度を把握した上で、これらを考慮した適切な余寿命予測法を適用しなければならない³⁾⁻⁶⁾。しかしながら、ボイラチューブに使用されている材料は、炭素鋼、低合金鋼からステンレス鋼、高合金まで多岐に渡っており、鋼種ごとの経年変化特性についても未だ不明確な点が多い。一方、実機使用条件での寿命に関わるクリープ損傷は、タービン材料のように組織変化とクリープ損傷が同時におこる場合と、ボイ

ラチューブのように比較的短時間で組織変化が飽和し、その後クリープ損傷が進行する場合がある⁷⁾。したがって、ボイラチューブ材料の寿命予測に当たっては、組織変化が飽和した後のクリープ損傷挙動を明確にし、かつ、それらを定量評価する必要があると考えられる。

そこで本研究では、ボイラチューブとして10 000h以上の長期間実機使用されたオーステナイトステンレス鋼としての SUS321HTB 鋼管およびフェライト系鋼としての STBA24 鋼管の経年変化特性について検討するとともに、これら両鋼種の新材および実機使用材を用いて、単軸および内圧下での長時間クリープ試験を行い、破断に至るまでの両者のクリープ損傷挙動につき検討した。

2. 実験方法

供試材はボイラチューブとして多用されている SUS321HTB および STBA24 鋼管で、過熱器管や再熱器管として長時間使用された材料である。これら供試材の化学成分、形状および実機での使用時間を第1表および第2表に示す。

経年変化特性の検討では、室温での引張試験（試験片：直径6mm、標点間距離：30mm）、硬さ測定、0℃でのシャルピー衝撃試験（5×10×55-2mmVノッチ）、単軸ク

リープ破断試験（試験片：直径6mm，標点間距離：30mm）および組織観察（光学顕微鏡組織，電子顕微鏡組織（抽出レプリカ，薄膜），抽出残渣の定量分析等）を行った。一方，単軸および内圧下での破断に至るまでのクリープ損傷挙動の検討では，第3表に示す条件でのクリープ試験を行った。内圧クリープ試験片はチューブを350mmの長さに切断し，両端部に SUS304H の端栓を溶接した。内圧クリープ試験では1000hごとに試験を中断し，外径測定と管外表面でのレプリカ組織観察を破断するまで繰り返し実施した。外径測定は，管外表面を脱スケールしマイクロメータを用いて行ったが，酸化と脱スケールによる管肉厚変化はほとんど無視できる量であった。

3. 結果

3-1 長期使用にともなう経年変化特性

3-1-1 SUS321HTB 鋼

長期使用にともなう機械的性質の変化を第1図に示す。今回用いた実機使用材は，いずれも変形やボイド，き裂等のクリープ損傷は生じていない材料であるが，使用時間の増加にともない，引張強さ，耐力および硬さが上昇し，伸び，衝撃値が低下している。しかし，これらの変化は比較的短時間使用材で認められ，その後50 000h以上の長期使用材では飽和する傾向を示す。

写真1には，使用材の管肉厚中央部における電子顕微鏡組織を示す。10 000h程度の使用では，粒内に微細な TiC がストリンカ状に析出し，粒界には $M_{23}C_6$ が粒状析出して

第1表 経年変化特性検討用供試材の化学成分、履歴

Table 1 Details of test materials for evaluation of property changes

Steel	Size (mm)	Service time (h)	Chemical composition (mass%)									
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	N
SUS321 HTB (S/H)	φ60×t8	Virgin	0.08	0.61	1.52	0.023	0.007	11.72	18.07	—	0.47	0.010
	φ54×t7	10 000	0.06	0.56	1.66	0.024	0.005	10.59	18.30	—	0.47	0.008
		20 000	0.07	0.57	1.68	0.015	0.007	10.26	18.13	—	0.48	0.009
		30 000	0.08	0.61	1.73	0.022	0.007	10.97	18.18	—	0.41	0.010
		40 000	0.08	0.52	1.67	0.028	0.006	12.49	17.45	—	0.47	0.006
		50 000	0.06	0.66	1.80	0.028	0.006	12.21	17.39	—	0.56	0.006
		110 000	0.08	0.51	1.62	0.027	0.005	12.43	17.19	—	0.48	0.006
STBA24 (S/H)	φ60×t8	Virgin	0.11	0.44	0.43	0.012	0.007	—	2.10	0.98	—	0.012
	φ44.5×t9.5	110 000	0.11	0.33	0.39	0.015	0.011	—	2.19	0.92	—	0.010

S/H : Superheater tube

第2表 クリープ変形挙動検討用供試材の化学成分、履歴

Table 2 Details of test materials for evaluation of creep deformation behavior

Steel		Size (mm)	Serviced time (h)	Chemical composition (mass%)									
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	N
SUS321 HTB	Virgin	φ50.8×t7	—	0.09	0.54	1.82	0.025	0.003	10.65	17.35	—	0.50	0.013
	S/H	φ45 ×t7.6	96 000	0.077	0.64	1.87	0.022	0.006	10.99	17.79	—	0.43	0.012
STBA24	Virgin	φ45 ×t9.5	—	0.09	0.38	0.45	0.023	0.005	—	2.18	0.95	—	0.012
	S/H	φ44.5×t9.5	110 000	0.11	0.33	0.39	0.015	0.011	—	2.19	0.92	—	0.010

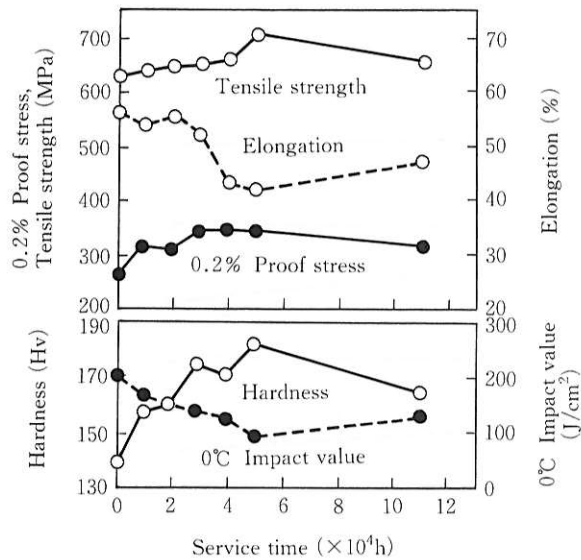
S/H : Superheater tube

第3表 単軸および内圧クリープ試験条件

Table 3 Internally pressurized and uniaxial creep testing condition

	Steel	Size (mm)	Internally pressurized and uniaxial creep		
			Test condition	Rupture*	Interrupted
Virgin	STBA24	φ45 ×t9.5	550°C×118MPa	14 955.2h	2 000~10 ⁴ h
	SUS321HTB	φ50.8×t7	650°C×152MPa	13 689.0h	〃
Serviced	STBA24	φ44.5×t9.5	550°C× 98MPa	2 310.0h	1 500, 2 000h
	SUS321HTB	φ45 ×t7.6	650°C×137MPa	7 369.5h	2 000~5 000h

*Internally pressurized creep rupture time



第1図 SUS321HTB 鋼の経年変化特性

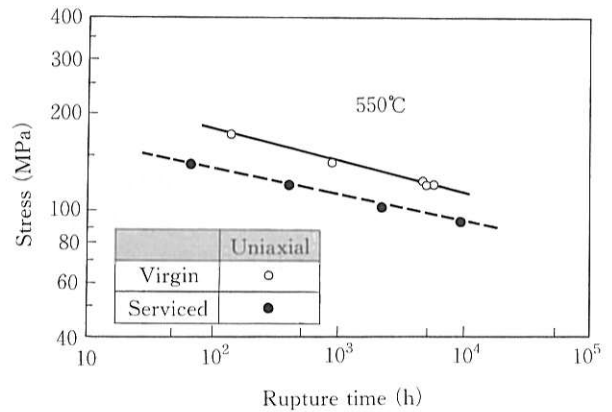
Fig.1 Mechanical properties for served SUS321HTB steel tube

いる。使用時間の増加にともない、粒内の微細な TiC は凝集粗大化し、その数も次第に減少している。一方、粒界の M_{23}C_6 は40 000h 以上の長期使用材にはほとんど認められず、代わって粒界には粗大な σ 相が析出している。

これらの組織観察結果および抽出残渣定量分析結果から、50 000h 使用までの機械的性質の変化は、 TiC 、 M_{23}C_6 炭化物および σ 相の析出量増加に起因していると判断される。

96 000h 長期使用した材料の650°Cでのクリープ破断強度は第2図に示すように、高応力側では新材に比較すると明らかに低下している。これはクリープ強度に寄与する微細 TiC の粗大化によるものである。しかし、低応力側にな

るにともない両者の強度差は小さくなる傾向が認められる。本研究ではさらに低応力長時間側の試験は行っていないが、これまでの研究例⁸⁾では、クリープ損傷が生じていなければ新材と使用材との強度差はなくなると報告されている。



第2図 SUS321HTB 鋼(新材, 使用材)の単軸クリープ破断特性

Fig.2 Uniaxial creep rupture strength for virgin and served SUS321HTB steel tube

3-1-2 STBA24鋼

長期使用にともなう機械的性質の変化を第3図に示す。今回用いた110 000hの長期実機使用材では、SUS321HTB 鋼と同様、変形やボイド、き裂等のクリープ損傷は生じておらず、新材に比較して、耐力と硬さがやや低く、引張強さと靱性はほとんど変わらない。

組織的には、新材は焼きならし処理を施したフェライ

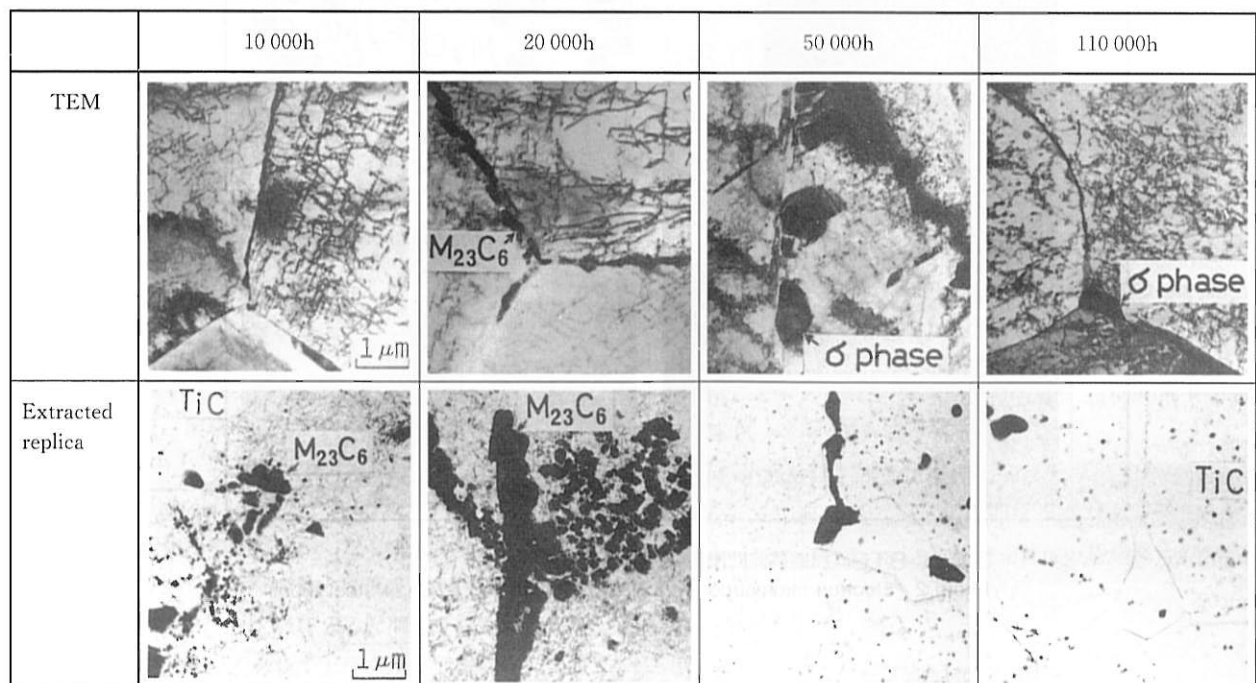


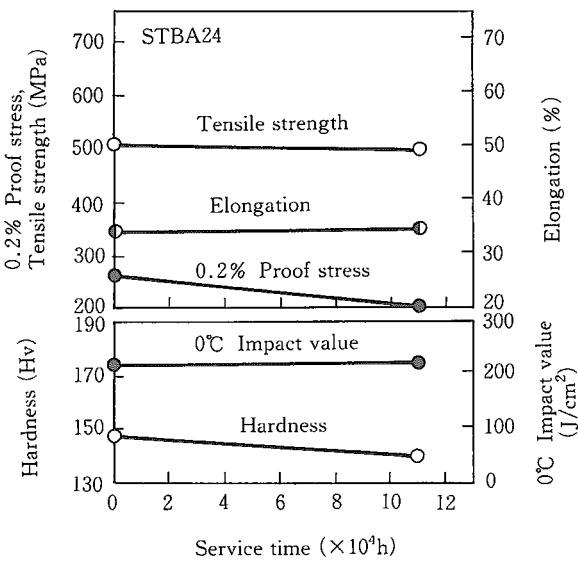
写真1 SUS321HTB 鋼長時間使用材の電子顕微鏡組織

Photo 1 Electron microstructure for long term served SUS321HTB steel tubes

技術報文

ト+パーライト組織であり、写真2に示すように粒界には、粒状のFeの多い $M_{23}C_6$ とCrの多い M_7C_3 が析出し、フェライト粒内には、微細な Mo_2C が均一分散析出している。一方、長期使用材では、パーライト中のラメラ状炭化物が粒状化し、粗大な $M_{23}C_6$ と M_6C に変化している。またフェライト中の微細な Mo_2C も明らかに凝集粗大化している。本研究では短時間使用材の検討は行っていないが、これらの析出物の変化は、比較的短時間使用でおこり、その後は飽和する傾向を示すと考えられる⁸⁾。

110 000h 使用材のクリープ破断強度は第4図に示すように、今回の試験条件の範囲では新材に比較すると低くなっているが、これは上述した新材との組織差によるものである。しかし、実際の設計応力はさらに低応力であり、そのような低応力側では新材との強度差はなくなるものと推測される⁸⁾。



第3図 STBA24鋼の経年変化特性
Fig.3 Mechanical properties for served STBA24 steel tube

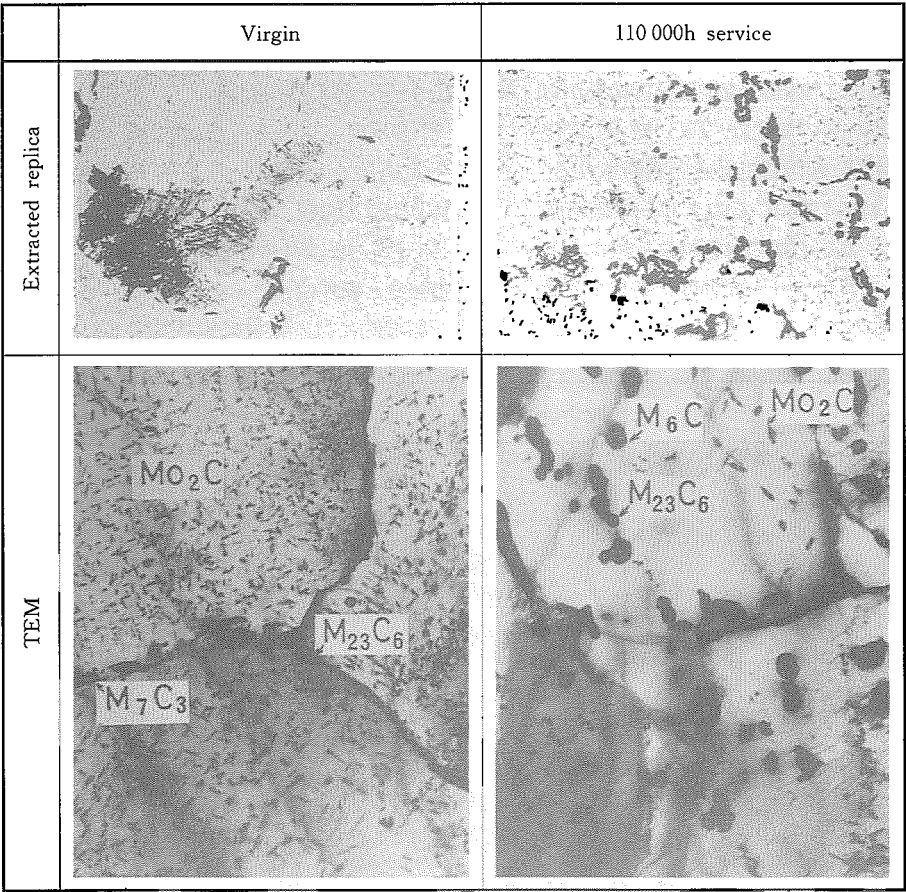
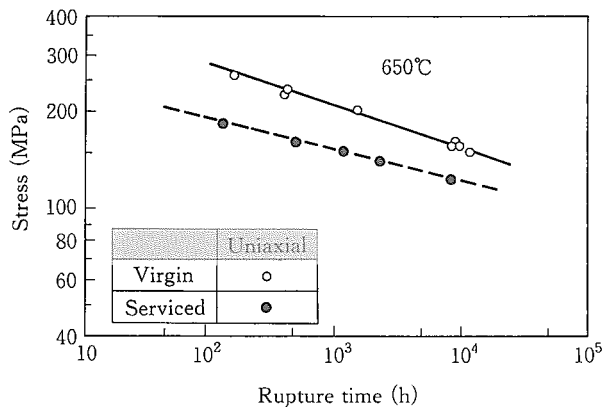


写真2 STBA24鋼長時間使用材の電子顕微鏡組織
Photo 2 Electron microstructure for long term served STBA24 steel tubes



第4図 STBA24鋼(新材, 使用材)の単軸クリープ破断特性
Fig.4 Uniaxial creep rupture strength for virgin and served STBA24 steel tube

3-2 単軸および内圧下でのクリープ損傷挙動

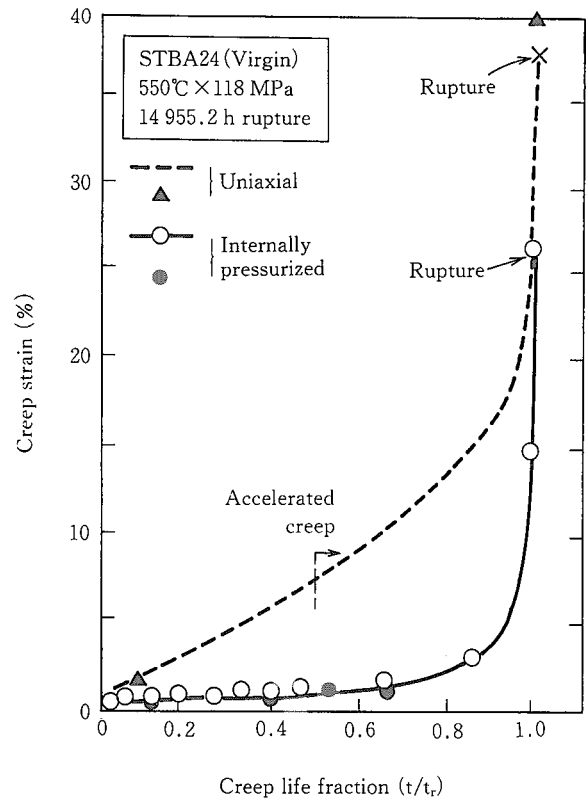
実際のボイラチューブは多軸応力下でのクリープ変形および損傷であるが, 系統的な研究例が少ないため^{9)~11)}, 長時間内圧クリープ試験を行い単軸クリープとの相関性について検討した。

3-2-1 SUS321HTB 鋼

新材の650°C, 152MPaにおける長時間内圧および単軸クリープ曲線を第5図に示す。時間軸は破断時間 t_r で正規化した寿命比 (t/t_r) で示した。内圧下での各寿命比におけるクリープひずみ量は, 単軸下に比較して少なく, 寿命比が0.8程度の加速クリープ域でも内圧クリープひずみ量は0.5%程度と極めて小さい。破断ひずみもわずか1.7%程度である。この傾向は長期使用材でも同様であり, 写真3に示すように, 破断部近傍の膨れ現象はほとんど見られない。

一方, 破断に至るまでの内圧クリープ損傷形態を明らかにするために, 新材の10 000h内圧クリープ中断材(寿命比 t/t_r : 0.78, ひずみ量: 0.7%)を用いて, 管の横断面組織を光学顕微鏡およびSEM観察により行った。写真4に示すように, 管外表面近傍の粒界に多くのクラックが生じている。これらのクラックは, 粒界に発生したボイドの連結によるクラックと判断される。しかし, これらのボイドやクラックはいずれも管外表面から1mm以内の範囲にだけ発生しており, 肉厚中央部や内面側にはまったく認められない。

第6図はSUS321HTB鋼50 000h使用材の単軸クリープ曲線と密度変化との関係を示したものである。試験片中にボイドやクラックが存在すると密度変化が生じるが, この結果では, 加速クリープ域に入ると明らかに密度変化が生じており, 組織観察でもボイドやクラックが均一に発生していることが確認されている。すなわち, 内圧下でのボイドやクラックの発生形態は均一損傷を受ける単軸クリー



第5図 SUS321HTB 鋼(新材)の単軸, 内圧クリープ曲線
Fig.5 Uniaxial and internally pressurized creep curves for SUS321HTB steel tube

(a) STBA24 (Virgin), 550°C x 118MPa, 14 955.2h Rupture

(b) STBA24 (Served), 550°C x 98MPa, 2 310.0h Rupture

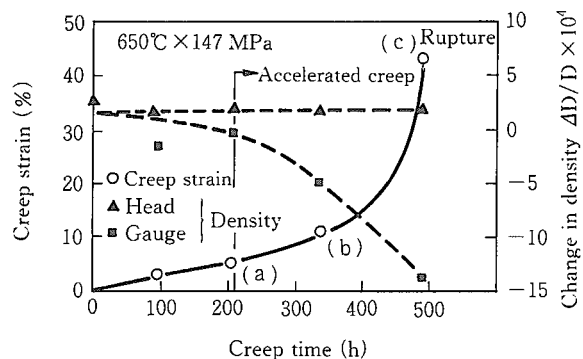
(c) SUS321HTB (Virgin), 650°C x 152MPa, 13 689.0h Rupture

(d) SUS321HTB (Served), 650°C x 137MPa, 7 369.5h Rupture

50 mm

写真3 内圧クリープ破断材の外観状況

Photo 3 Appearance of internally pressurized crept tubes



第6図 SUS321HTB 鋼(50 000h 使用材)の
単軸クリープ曲線と密度変化

Fig.6 Uniaxial creep curve and change in density
for 50 000h served SUS321HTB steel tube

プとは大きく異なっていると言える。

内圧クリープにおいて、外表面からボイドが生成することは力学モデルによる応力分布の解析結果から理解できる。すなわち、一般に円筒管多軸クリープの応力分布は外面より内面接線応力が高いものの、その後応力緩和しながら応力分布が変化し、外面接線応力が高くなると報告されている¹²⁾。そこで、寿命比の異なる内圧クリープ中断材について、外表面からレプリカを採取し、ボイドやクラックの存在形態を詳細検討した。写真5に示すように、単軸下と同様に、定常クリープ域の寿命比が0.47においてもすでに粒界ボイドが認められた。したがって、SUS321HTB 鋼管の実機におけるクリープ損傷量の非破壊的評価手法としては、レプリカ法の活用が有効と考えられ、外径測定等によるクリープひずみ量の定量化は精度の上でも好ましくない。

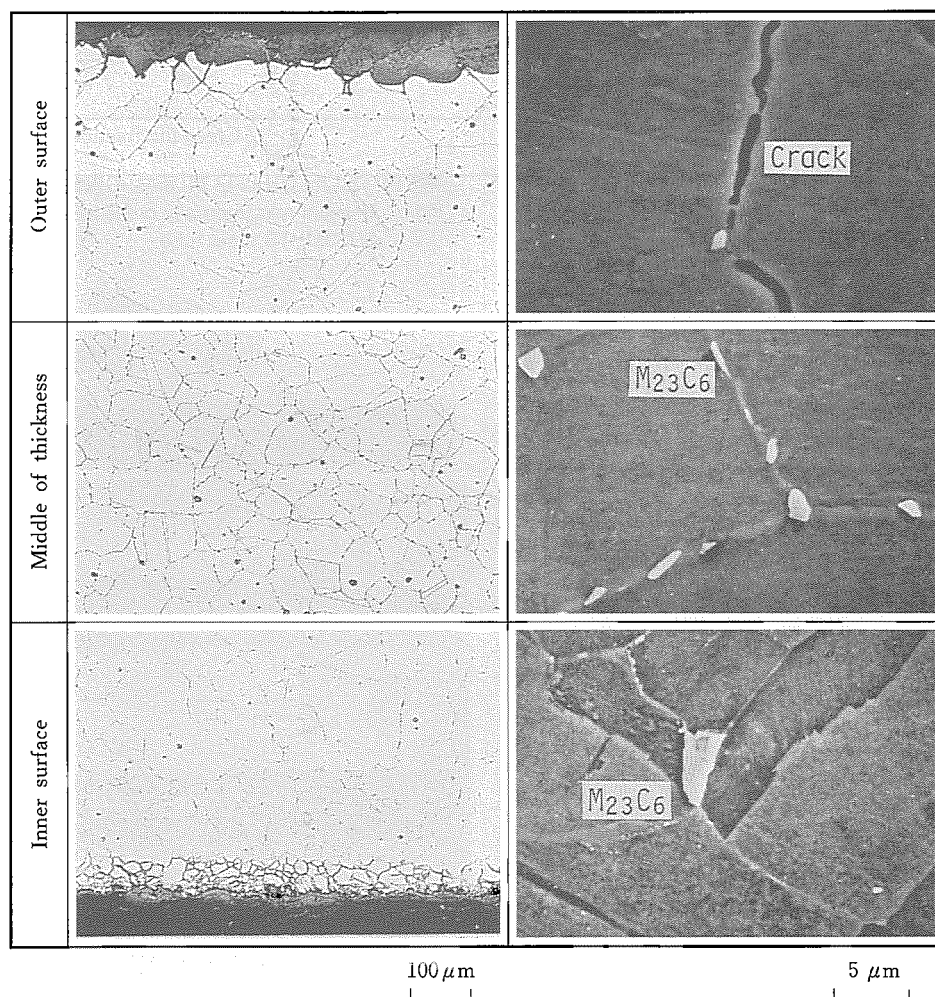


写真4 SUS321HTB 鋼管新材の内圧クリープ中断材の光学顕微鏡組織
および SEM 組織 (650°C×152MPa, 10 000h 中断材)

Photo 4 Optical and electron microstructure of cross section of SUS321
HTB steel tube interrupted at 650°C and 152MPa after 10 000h

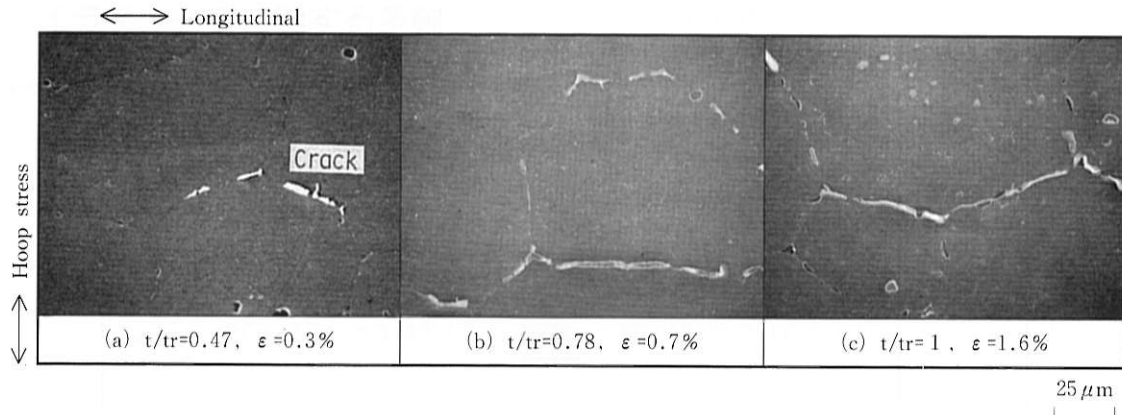
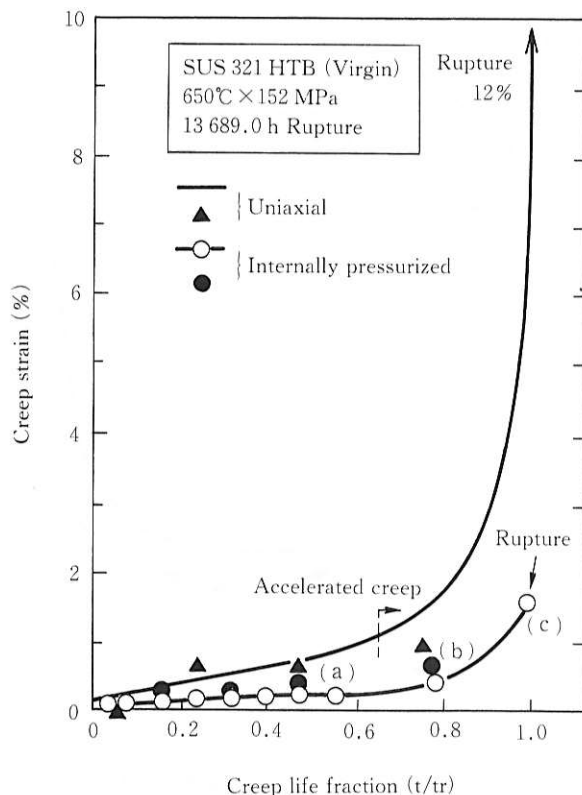


写真5 SUS321HTB 鋼管新材の内圧クリープ中断後の管外面レプリカ組織
(650°C×152MPa, 13 689h 破断)

Photo 5 Microstructure of replicas on surface of SUS321HTB steel tubes
after internally pressurized creep test
at 650°C and 152MPa (13 689h ruptured)

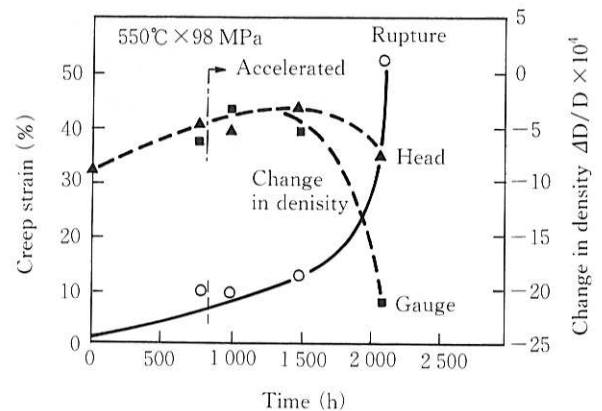
3-2-2 STBA24鋼

新材の550°C, 118MPaにおける長時間内圧および単軸クリープ曲線を第7図に示す。内圧下での各寿命比におけるクリープひずみ量は、SUS321HTBと同様、単軸下と比較して明らかに少ないが、寿命比が0.7程度の加速クリープ域での内圧クリープひずみ量は1%以上であり、



第7図 STBA24鋼(新材)の単軸、内圧クリープ曲線
Fig.7 Uniaxial and internally pressurized creep curves
for STBA24 steel tube

SUS321HTBに比較すると、内圧下でのクリープひずみ量は明らかに大きく、写真3の外観状況からもわかるように、破断部近傍は膨れ現象が明瞭に認められる。第8図は550°C, 98MPaにおける110 000h使用材の単軸クリープ曲線と密度変化との関係を示したものである。本鋼の場合にはSUS321HTB鋼とは異なり、写真6に示すように、破断材ではボイドが観察されるものの、加速クリープ域では、ひずみが12.7%も発生しているにもかかわらず、ボイドやクラックはまったく認められず、結晶粒が変形した組織を呈している。一方、内圧クリープ破断部近傍の組織観察においても大きな粒変形は生じているが、粒界、粒内ともボイドはほとんど認められない。したがって、STBA24鋼の場合、内圧下と単軸下でのクリープひずみ量は異なるが、両者のクリープ損傷形態は同じであると結論される。



第8図 STBA24鋼(110 000h 使用材)の単軸クリープ曲線
と密度変化
Fig.8 Uniaxial creep curve and change in density for
110 000h served STBA24 steel tube

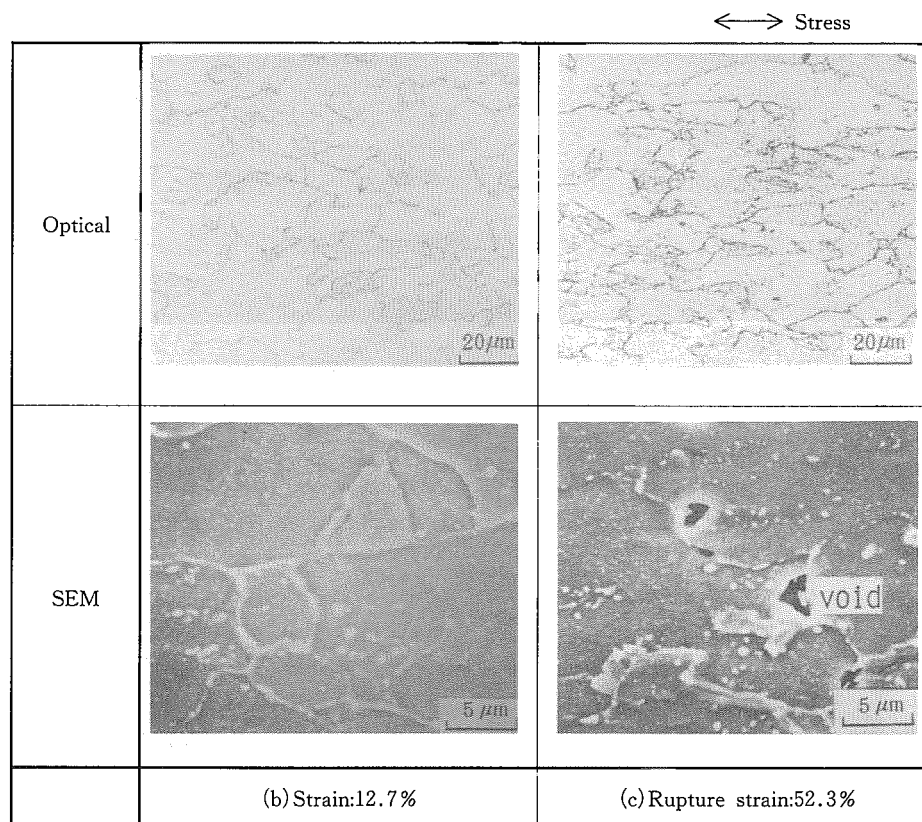


写真6 STBA24鋼管110 000h 使用材の単軸クリープ中断後の光学顕微鏡組織および SEM 組織 (550°C×98MPa, 2 310h 破断)

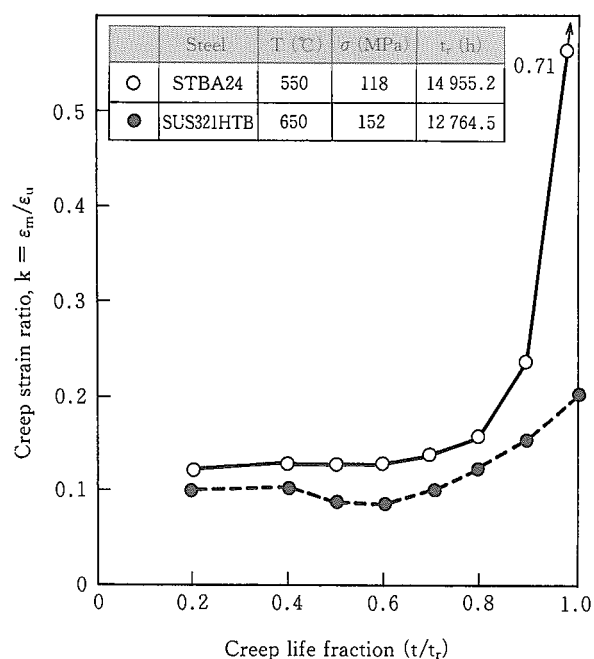
Photo 6 Optical and SEM of cross section of 110 000h served STBA24 steel tube after uniaxial interrupted creep test at 550°C and 98MPa (2 310h ruptured)

3-2-3 内圧および単軸クリープひずみの関係

本研究において、10 000h を超える長時間試験を行った結果、両鋼種とも内圧下でのクリープひずみ (ϵ_m) は単軸下でのクリープひずみ (ϵ_u) に比べて著しく小さくなることがわかった。

内圧下と単軸下でのクリープひずみの相関については、これまでもいくつかの研究が行われている。平ら⁸⁾は STBA24 鋼のクリープ変形力学モデルの計算を行い、 ϵ_m/ϵ_u 比が $1/2$ – $1/3$ になると報告している。また、浅川ら¹⁰⁾および大友ら¹¹⁾は SUS316HTB 鋼と STBA24 鋼につき比較的短時間のクリープ試験を行い、定常クリープ域の ϵ_m/ϵ_u 比が $1/3$ 程度になると報告している。

そこで、本研究で行った両鋼種のクリープ試験結果を用いて ϵ_m/ϵ_u 比と寿命比 (t/t_r) との関係につき検討を加えた結果、第 9 図に示すように、両鋼種とも寿命比が 0.2 から 0.7 程度の範囲においては、 ϵ_m/ϵ_u 比がほぼ一定で、内圧下と単軸下でのクリープひずみの間には相似関係があることを明らかにした。



第 9 図 SUS321HTB, STBA24 鋼新材の単軸/内圧クリープひずみ比と寿命比との関係

Fig.9 Relationship between uniaxial and internally pressurized creep strains for virgin SUS321HTB and STBA24 steel tubes

4. ボイラチューブに関する多軸クリープ曲線の推定

本研究結果から、クリープ損傷が変形であれ、ボイド、クラックであれ、クリープひずみに対応していることがわかった。したがって、クリープ損傷評価および寿命予測の点からは、実機使用条件における多軸クリープ曲線を推定できれば、損傷量と寿命比のマスター線図を作成することができると考えられる。しかし、実際には多軸応力下でのクリープ曲線を作成することは容易ではないため、これまでのデータベースは極めて少ない。単軸についても実機使用条件下でのクリープ曲線を得るためには長時間を要する。しかし、単軸クリープ曲線については、近年、丸山ら¹³⁾が修正 θ 投影法を提案し、下記のクリープ構成方程式を活用することにより、比較的短時間のクリープひずみデータから 10^5 h を超えるような長時間のクリープ曲線がある程度精度良く推定できることを報告している。

$$\epsilon u = \epsilon_0 + A(1 - \exp(-\alpha t)) + B(\exp(-\alpha t) - 1)$$

ここで、 ϵu は単軸クリープひずみ、 ϵ_0 、 A 、 B 、 α は材料定数であるが、クリープ条件により変化する。

したがって、この修正 θ 投影法を用いて、実機使用条件下での長時間クリープ曲線が比較的精度良く求めることができると、以下の手順に基いて実機使用条件下での多軸クリープ曲線が推定できると考えられる。すなわち、第7図の知見から、SUS321HTB 鋼および STBA24 鋼とも、単軸と内圧とのクリープ曲線には広い範囲において相似性が成り立つと仮定すると、次式により単軸クリープひずみ (ϵu) から内圧クリープひずみ (ϵm) を推定することが可能となる。

$$\epsilon m = k \epsilon u$$

ここで、 k は変換定数

例えば、本研究で行った STBA24 鋼の 550°C 、 118MPa における変換定数 (k) は寿命比 (t/tr) が 0.7 程度までは 0.13 の値となる。

また、本研究の結果では、 k 値は寿命比が 0.2 程度ですでに一定となっていることから、複数の試験条件において、比較的短時間の内圧および単軸クリープ曲線を求めること

により、寿命比が 0.2 から 0.7 程度までの範囲の各寿命比における内圧下でのクリープひずみ量が推定できると考えられる。

5. 結 言

STBA24 (2.25Cr-1Mo) 鋼および SUS321HTB (18Cr-8Ni) 鋼ボイラチューブの長期間経年変化特性および単軸、内圧下でのクリープ変形・損傷挙動を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 今回の経年変化特性調査対象チューブは、いずれも変形やボイド、クラック等のクリープ損傷は生じていなかった。
- (2) 両鋼種とも、長期実用使用後では、微細炭窒化物の分散析出強化効果が消失しているため、今回の試験条件ではクリープ破断強度は低下したが、実機の使用条件に相当するさらなる低応力側では、新材との強度差は小さくなると推測された。
- (3) 内圧下でのクリープひずみ量は、両鋼種とも、単軸に比較して大幅に低下したが、クリープ損傷形態は同じであった。すなわち、STBA24 鋼では、寿命末期までボイドやクラックの発生は認められないが、クリープ変形は比較的大きいのに対し、SUS321HTB 鋼では、クリープ変形は破断に至るまで極めて小さいのに対し、ボイドやクラックは寿命中期からすでに発生していた。
- (4) 両鋼種とも、寿命消費率が 0.2 から 0.7 程度の範囲において、内圧下と単軸下でのクリープひずみ比がほぼ一定の値であった。このことは、単軸クリープひずみ量から内圧下でのクリープひずみ量推定の可能性を示唆している。



榎木義淳 / Yoshiatsu Sawaragi

総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部
次長 工博

(問合せ先: 06(489)5727)

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会・材料計測評価委員会: 「構造材料の寿命・余寿命予測のための計測評価手法の確立に関する調査」 (1985)
- 2) 科学技術庁・研究開発局: 「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究、第1期成果報告書」 (1987)
- 3) 桑原和夫他: 火力原子力発電 29 (1978) p.63
- 4) 桑原和夫他: 火力原子力発電 31 (1980) p.27
- 5) 吉川州彦他: 日本機械学会講演論文集 No.850-1 (1985) p.87
- 6) K. Yoshikawa et al: Int. Conf. on Creep, Pannel Discussion, Apr. 16, Tokyo (1985), No.11, p.30
- 7) C. J. Bolton et al: Material Sci. Eng., 46 (1980) p.231
- 8) 行俊照夫他: 学振123委研究報告 15 (1973), p.125
- 9) 平 修二他: 機械学会誌 70 (1967) p.27
- 10) 浅川幸一他: 鉄と鋼 65 (1979) p.869
- 11) 大友 暁他: 鉄と鋼 65 (1979) p.933
- 12) 藤田 譲他: 圧力技術 22 (1983) p.68
- 13) 例えば丸山公一他: 鉄と鋼 73 (1987) p.26