ミニチュア試験片の温度加速試験手法による ボイラの余寿命評価法[†]

園 家 啓 嗣* 北 川 正 樹** 村 田 正 治***
田 中 秀 雄**** 八 木 晃 一****

Remaining Life Assessment on Actual Boiler by Temperature- Accelerated Testing of Miniature Specimens

by

Keiji SONOYA*, Masaki KITAGAWA**, Masaharu MURATA***
Hideo TANAKA**** and Koichi YAGI*

Temperature-accelerated creep rupture tests were performed by using miniature specimens of 2.25Cr-1Mo steel and 18Cr-8Ni steel, and an iso-stress method was examined to predict the long term creep rupture time by extrapolation from short time data. The results obtained are as follows.

(1) For 2.25Cr-1Mo steel, the accuracy of remaining life prediction in the long duration side becomes better by correcting it on the basis of rupture ductility.

(2) For 18Cr-8Ni steel, the remaining life in the long duration side can be predicted accurately, when the change of microstructure does not influence creep rupture life.

(3) When the above method was applied to an actual boiler, an accurate life assessment was possible. This method is confirmed to be effective.

Key words: Rupture ductility, Iso-stress method, Miniature specimen, Remaining life assessment, 2.25Cr-1Mo steel, 18Cr-8Ni steel

1 緒 言

国内の火力発電のボイラ等は、累積運転時間が10万時間以上のものが全体の60%を超えている。また、電力事情から、これらの経年設備は頻繁に起動、停止を伴う厳しい条件で使用されつつある。このような設備について安全性の高い保守管理を維持していくためには、経年劣化した設備の寿命診断の開発が重要な課題である。一般に、管寄およびTピースなどの厚肉部位の寿命評価には現状の破壊試験法の適用が難しいことから、精度の面で破壊試験法に比べてやや劣るが、応力解析法および非破壊的手法が適用されている¹⁾。

しかし、これらの部位について、部位全体の機能を損なわない程度のミニチュアサンプルを採取し、これを用いて破壊試験を行い、クリーブ破断特性の劣化を直接把握することができれば、寿命評価の精度をより向上させることが可能である。そこで、これまでに、主にボイラチューブの厚肉部材からミニチュアサンプルを採取する方法、そのサンプルからミニチュア試験片を作製する方法およびミニチュア試験片によるクリ

ーブ破断試験法を開発した²⁾。

余寿命予測のために、実機から切り出した試験片についてクリーブ破断強度を評価する場合、実機の使用応力より高い応力を試験片に負荷したり、試験温度を実機使用温度より高めたりする加速クリーブ試験が行われる。損傷材について応力を高める加速クリーブ試験を行うと、試験応力が高いほど未使用材の破断時間に対する損傷材の破断時間低下の割合が大きくなると言われている^{3),4)}。このため、余寿命評価には、実機の使用応力を試験応力として温度を上昇させる温度加速クリーブ試験の方が有効であると報告されている⁵⁾。この等応力、温度加速試験法、すなわち Iso-stress 法は各種の時間-温度パラメータによる外挿法に基づくものであり、温度と対数破断時間との間に直線関係が成り立つことを仮定して寿命予測する簡便法である。しかし、Iso-stress 法については、研究データの蓄積が少ない⁵⁾。

そこで、ここでは、厚肉部材を対象にしたミニチュアサンプルによる余寿命評価技術の開発を目的として、

† 原稿受理 平成5年4月30日 Received Apr. 30, 1993

* 石川島播磨重工業(株) 〒135 東京都江東区豊洲, Ishikawajima-Harima Heavy Indust. Co. Ltd., Koto-ku, Tokyo, 135

** 正 会 員 石川島播磨重工業(株) 〒135 東京都江東区豊洲, Ishikawajima-Harima Heavy Indust. Co. Ltd., Koto-ku, Tokyo, 135

*** 正 会 員 金属材料技術研究所 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

**** 金属材料技術研究所 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

Table I. Chemical composition of materials used.

Material	Chemical composition (wt. %)													
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Al	B	N	Nb+Ta
2.25Cr-1Mo Steel (STBA24) ^{(*)1}	0.10	0.23	0.43	0.011	0.009	0.043	2.46	0.94	0.07	—	0.005	—	0.008	—
18Cr-8Ni Steel (SUS 304H TB) ^{(*)2}	0.07	0.55	1.46	0.023	0.006	9.57	18.95	0.04	0.07	0.062	0.014	0.0018	0.0278	<0.01

(*)1 JIS G 3462-1978 "Alloy Steel Boiler and Heat Exchanger Tubes".

(*)2 JIS G 3463-1978 "Stainless Steel Boiler and Heat Exchanger Tubes".

代表的な高温用材料として知られているフェライト系耐熱鋼とオーステナイト系ステンレス鋼について、温度加速クリープ試験を行い、その短時間データから長時間破断寿命を推定する場合の Iso-stress 法の適用性について考察した。

2 試験方法

材料はフェライト系耐熱鋼の一種でボイラ材として広く使用される 2.25Cr-1Mo 鋼 (JIS STBA24) およびオーステナイト系ステンレス鋼の中で代表的な材料である 18Cr-8Ni 鋼 (SUS304HTB) を用いた。化学成分を Table I に示す。試験片は Fig. 1 に示すよ

Fig. 1. Dimension of miniature specimen.

うな平行部が 2 mm で全長が 27 mm のミニチュア試験片を用いた。試験は、開発した Ar 雰囲気中のクリープ試験機⁽²⁾を使って各種温度でクリープ破断試験を行った。ミニチュア試験片 (φ2 mm) と従来型試験片 (φ6 mm) を用いて応力一定で短時間温度加速試験を行った。なお、従来型試験片は大気中で試験した。その結果を同一チャージの金材技研 (NRIM) の長時間破断データ (試験片寸法: φ6)^(6),7) へ外挿し、ミニチュア試験片による温度加速法の有効性を検討した。

3 試験結果および考察

3.1 温度加速試験の有効性

一定応力下で高温短時間試験を行うことにより、実機使用温度での長時間余寿命を推定する温度加速法 (Iso-stress 法) の有効性を、同一チャージの大気中の長時間クリープ破断データを用いて検討した。

(1) 2.25Cr-1Mo 鋼の場合

2.25Cr-1Mo 鋼では、応力が 22 MPa の場合、温度とクリープ破断時間の間には Fig. 2 の関係がある。ミニチュア試験片と従来型試験片の試験結果はよく一致

している。しかし、高温短時間試験結果の外挿からでは、ミニチュア試験片、従来型試験片とも 600°C のクリープ破断時間 (113445 時間) を長時間側に推定する傾向にある。また、硬さおよび破断伸びと試験温度の関係を Fig. 3 に示す。温度による硬さの変化がほとんど認められず Hv: 110~120 程度の値であった。破断伸びは温度によって変化し、高温になるほど破断伸びが大きくなる。また、750°C までの温度範囲では Fig. 4 に示すように炭化物の析出は認められるが、試験温度による組織的な変化は特に認められない。なお、破壊形態は主に粒内破壊であり、破断部はよく絞れている。

長時間のクリープ破断寿命の予測精度を向上させるためには、温度が変わるとクリープ曲線形状も変化し、高温になるほどクリープひずみ速度 (定常域) が大きくなることから、破断寿命をクリープひずみ速度で補正する考え方がある。クリープひずみ速度と破断伸び⁽⁸⁾は比例的相関性があるといわれているので、式 (1) の

Fig. 2. Temperature vs. log tr in iso-stress testing for 2.25Cr-1Mo steel.

Fig. 3. Temperature vs. hardness and elongation for 2.25Cr-1Mo steel.

ごとく、推定したい温度での破断伸びをもとに、破断伸びでクリープ破断寿命を補正する簡易的手法を採用すると Fig. 5 のようになり、寿命推定の精度がかなり向上することが分かる。なお、実機使用温度での破断伸びは、高温短時間試験データの外挿で求める。

$$t_{\text{corr}} = (\epsilon_{r0} / \epsilon_{r1}) \cdot t_r \tag{1}$$

ここで

ϵ_{r0} : 実機使用温度での破断伸び (%)

ϵ_{r1} : 試験温度での破断伸び (%)

(a) Temp. 750 °C

(b) Temp. 700 °C

(c) Temp. 675 °C

Fig. 4. Microstructures of creep ruptured specimens of 2.25Cr-1Mo steel (stress : 22 MPa).

t_r : 試験温度での破断時間 (h)

t_{corr} : 試験温度での補正破断時間 (h)

(2) 18Cr-8Ni 鋼の場合

18Cr-8Ni 鋼については、温度と破断時間の間には Fig. 6 の結果が得られる。同図にはクリープ破断の破壊様式も表示した。粒内クリープ破壊を T タイプの破壊、粒界三重点に生じたくさび形のき裂による破壊を W タイプの破壊と呼ぶ。ミニチュア試験片と従来型試験片の試験結果は 2.25Cr-1Mo 鋼の場合と同様よく一致している。18Cr-8Ni 鋼の場合は高温短時間試験結果 (応力 : 118 MPa) からの外挿で 600 °C の長

Fig. 5. Temperature vs. log tr in iso-stress testing for 2.25Cr-1Mo steel.

Fig. 6. Temperature vs. log tr in iso-stress testing for 18Cr-8Ni steel.

Fig. 7. Temperature vs. hardness and elongation for 18Cr-8Ni steel.

(a) Temp. 750 °C

(b) Temp. 725 °C

(c) Temp. 700 °C

Fig. 8. Microstructures of creep ruptured specimens of 18Cr-8Ni steel (stress: 118 MPa).

時間クリープ破断データ（45330 時間）を精度よく推定できる。この時の硬さおよび破断伸びと試験温度の関係を Fig. 7 に示す。硬さは、ミニチュア試験片と従来型試験片ともに Hv: 170~180 程度で温度による変化はない。しかし、600°C の長時間クリープ破断の試料の硬さは Hv: 210 程度と高い。これは σ 相が析出したためであろう⁹⁾。破断伸びは、ミニチュア試験片では温度による変化があまりないが、従来型試験片の破

Fig. 9. Creep fracture mechanism map for 18Cr-8Ni steel.

Fig. 10. Microstructure of creep ruptured specimen of 18Cr-8Ni steel (600°C, 118 MPa, 45330 hrs).

断伸びは温度に依存している傾向を示す。また、高温短時間試験での温度による組織的な変化は Fig. 8 に示すように特に認められなかった。クリープ破断の破壊様式については、破断時間と温度の関係で詳細に調査されており、Fig. 9 に示すようにクリープ破壊機構領域図としてまとめられている⁹⁾。本加速試験を行った 118 MPa においては、700°C 以上の温度範囲では T タイプの破壊となり、それ以下の温度域は W タイプの破壊となる。T タイプの破壊および W タイプの破壊とも同様にクリープ速度に依存する破壊であり、そのため高精度な推定を可能にしたと考えられる。なお、600°C でのクリープ破断時間が 45330 時間と長い試料の顕微鏡組織は Fig. 10 に示すように σ 相が粒界に析出しており、硬さを増加させる原因となっているが、この σ 相の析出は寿命後期に起きるので、クリープ破断寿命にはそれ程影響を与えていないと考えられる。

3・2 ミニチュア試験片による余寿命予測法

温度加速試験結果を考察した結果、ミニチュア試験片を用いて Ar 雰囲気中で温度加速のクリープ破断試験を実施することにより、寿命予測できることが分

Fig. 11. Remaining life assessment by creep rupture testing with miniature test piece.

かった。このことから、この方法は損傷材の余寿命予測に適用できると考えられる。その余寿命評価法を Fig. 11 に提案した。この場合は、2.25Cr-1Mo 鋼と 18Cr-8Ni 鋼に分けて、前者については寿命と破断伸びで補正し、後者については補正せずに、外挿によって実機使用温度の余寿命を予測する方法である。

3・3 実機ボイラへの適用

ボイラの T ピースおよび管寄スタブなどの部位は、応力集中などにより肉厚方向の応力分布が急激に変化する。このため、部位の損傷は局部的であり、従来型試験片を用いた破壊試験法では精度のよい余寿命評価を行うことはできなかった。今回、2.25Cr-1Mo 鋼製管寄スタブ溶接部の損傷評価をする機会を得たので、本手法 (Fig. 11) を実機に適用しその有効性を検討した。母材部および溶接熱影響部 (HAZ) 表面から放電加工で微小サンプルを採取したが、その時の装置および採取状況を Fig. 12 に示す。採取部の加工溝はグラインダーで滑らかに仕上げられる。採取したサンプルは Fig. 13 に示すように 4t×2×30 mm 程度のミニチュアサンプルである。採取サンプルからミニチュア試験片を作製し、このボイラ管寄の設計応力が 32 MPa なので、同応力で温度加速試験を行った。1000 時間以内の試験温度のデータから、実機使用温度の 550°C の寿命を伸びで補正する簡易的手法を用いて最小二乗法で外挿した。なお、その時用いた 550°C のクリープ破断伸びは短時間試験データからの外挿で求めた。余寿命予測結果を Fig. 14 に示す。それによ

(a) Groove process

(b) Cutting process

Fig. 12. Miniature specimen sampling method.

Fig. 13. Miniature sample extracted from actual boiler.

ば、母材の余寿命は 1.05×10^6 時間、HAZ の余寿命は 3.96×10^5 時間になると予想された。したがって、実機の現在までの稼働時間が約 1.5×10^6 時間であるとする、現在のクリープ寿命消費率は以下のごとくなる。

$$\text{母材: } \frac{1.5 \times 10^5}{(1.5 + 10.5) \times 10^5} = 0.12 \quad (12\%)$$

$$\text{HAZ: } \frac{1.5 \times 10^5}{(1.5 + 3.96) \times 10^5} = 0.27 \quad (27\%)$$

Fig. 14. Life assessment by miniature creep testing method for 2.25Cr-1Mo steel.

この推定結果は同時に実施した非破壊的手法によってその妥当性が確かめられた。本手法と非破壊的手法を有効に組み合わせることで、一層の寿命評価精度向上が計られるものと考えられる。

4 結 言

2.25Cr-1Mo 鋼および 18Cr-8Ni 鋼について、ミニチュア試験片によって温度加速クリープ破断試験を行い、その短時間データから長時間破断寿命を推定する Iso-stress 法について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 2.25Cr-1Mo 鋼は、破断伸びで寿命を補正することにより、長時間側の余寿命精度が向上する。

(2) 18Cr-8Ni 鋼は、組織変化が寿命に影響しない場合には、補正なくとも長時間側の余寿命を精度良く予測できる。

(3) 上記手法を実機ボイラ材に適用した結果、妥当な寿命推定ができ、本手法が有効であることが確認できた。

(平成 3 年 4 月 鉄鋼協会春季講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 馬木秀雄, 配管技術, **32**, 3, p.76 (1990).
- 2) 園家啓嗣, 酒井良彦, 北川正樹, 石川島播磨技報, **32**, 1, p.29 (1992).
- 3) Y. Monma, K. Kanazawa and S. Nishijima, Computational Models for Creep and Fatigue Data Analysis, VAMAS Technical Report No. 7, p. 1 (1990) NRIM, Tokyo
- 4) 門馬義雄, 芳須 弘, 坂本正雄, 日本学術振興会第123委員会報告, **32**, p.177 (1991).
- 5) R. Viswanathan, R. B. Dooley and A. Saxena, Trans. ASME J. Press. Vess. Technol., **110**, p.283 (1988).
- 6) NRIM Creep Data Sheet No. 3B (1986).
- 7) NRIM Creep Data Sheet No. 4B (1986).
- 8) J. M. Brear and P. McCarthy, "RESIDUAL LIFE ASSESSMENT METHODS". ERA Final Report 89-0230.
- 9) 新谷紀雄, 京野純郎, 田中秀雄, 村田正治, 横井 信, 鉄と鋼, 第14号, 1668 (1983).