研究成果報告書 科学研究費助成事業



1版

今和 3 年 6月 6 日現在 機関番号: 17401 研究種目: 基盤研究(C)(一般) 研究期間: 2018~2020 課題番号: 18K03841 研究課題名(和文)火力発電所で使用されるTypelV損傷を受けた機器の余寿命推定法に関する研究 研究課題名(英文)The study on evaluation method of remaining life of component with type IV creep damage used in power plant 研究代表者 川島 扶美子 (Kawashima, Fumiko) 熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授 研究者番号:70506849 交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 900.000円

研究成果の概要(和文):改良9Cr-1Mo鋼FGHAZ再現材の切欠きつき丸棒試験片を用い650 において最大主応力 と応力多軸度がA)79MPa、2.9、B)73MPa、2.9、C)79MPa、3.3、の3条件でクリープ試験を行い TypelV損傷材を 作成し、クリープボイド半径分布の時間変化の観察からボイド発生速度f,ボイド半径の成長速度h,ボイド発生 開始時間は1を推定した。

その結果ABC全条件でt1はほぼゼロであった.TFが同じ場合、f , hはともに最大主応力が大きい方が大きかった.最大主応力が等しい場合 , TFによらずfはほぼ等しく、TFが小さい方がhが大きかった.

研究成果の学術的意義や社会的意義 改良9Cr-1Mo鋼は火力発電所の高温化・高効率化に寄与するが、TypelVクリープ損傷による破断により発電停止 CX CSOLF INDEMILIAC/J光電F/ICURIALIAC ・ 同XJ2+12LC 会与9 のか、IVPEIVクリーク損傷による破断により発電停止 したことがある。破断の予想は困難であった。その理由は、第一に発電中の温度応力の正確な把握が難しく、第 二に同じ温度応力条件であっても微小成分などが異なればクリープ寿命には10倍程度の差があり、第三にTypeIV 損傷と応力と応力多軸度の定量的関係の評価法がなかったためである。 本研究では評価対象の定期検査結果に基づき定量評価を行ため、上記の課題を解決できる。本研究は耐熱鋼の火 力発電所における安全な使用に寄与し、電力の安定供給、省エネルギー化、脱炭素化に役立つ。

研究成果の概要(英文): The creep tests with simulated FGHAZ of the Mod.9Cr-1Mo steel were conducted and samples with Type IV creep damage were gotten. Test specimens were notched bars. The test temperature was 650C. The maximum principal stress and stress triaxiality factors of the creep test were A)79MPa, 2.9, B) 73MPa, 21.9, and C)79MPa, 3.3. The change of distribution of voids' radius were observed and void's initiate rate, f, growth rate of void's radius, h, and start time of void's initiation, t1, were evaluated. The results were as follows; under the same TF of 2.9, the maximum principal stress of 79MPa gave larger f and h than that of 73MPa. Under the same stress of 79MPa, TF of 2.9 gave larger h than TF of 3.5, but f on both conditions were almost the same. All t1 on three conditions were almost zero.

研究分野:高温強度、材料力学

キーワード: クリープ TypeIV 改良9Cr-1Mo鋼 余寿命評価 ボイド

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1990年代に火力発電所低合金鋼製高温蒸気配管で TypeIII, TypeIV 損傷が発見されたため,検 査法が研究され,交換による対策が行われるようになった.その後,溶接継手の長時間クリープ 試験により,低合金鋼について TypeIV 損傷が原因のクリープ破断時間と温度・応力の関係が得 られた.しかし,同じ鋼種であってもクリープ破断時間は成分や熱処理の制御不可能な違いによ り約 10 倍の差が生じうる.また,火力発電所における温度や応力の正確な推定は困難である. よって,保守を効率的に行うためには,定期検査結果を基にその部材の TypeIII, TypeIV 損傷に よる破断時間を評価する余寿命評価が必要である.これまで多くの研究がなされているが,余寿 命評価法は確立されていない.

2000 年代には電力自由化に伴い火力発電の低コスト化・高効率化が進み,高温高圧に耐えう る高クロム鋼が開発され火力発電所で実用に供された.しかし約 2 年の運転後,平成 16 年に TypeIV 損傷によるクリープ破断が発生し,これを受けた検査により火力発電所で高クロム鋼製 高温蒸気配管の TypeIV 損傷が多く発見された.その後の研究で高クロム鋼の TypeIV 損傷に対 するクリープ強度は設計時の予想より低く,低合金鋼と同程度であることが明らかになった.既 に実機に供されている高クロム鋼製高温蒸気配管の保守のため,また,新たに改良された高クロ ム鋼の発電所投入のため,現在,高クロム鋼の TypeIV 損傷に対する余寿命評価が必要とされて いる.

TypeIV損傷とは、溶接熱影響部細粒域に数μmの微小欠陥(以後、ボイドと表記する)が多数発生 し、発生と合体をくり返しき裂となり破壊に至る損傷である.これまでの研究では、応力多軸度(TF) が大きい場合は多数のボイドが発生するTypeIVクリープ損傷となり、TFが小さい場合は単一のき裂 が進展する破壊形態となること、また、応力が大きいほどTypeIV損傷の進展が早いこと、が知られ ている.応力およびTFはボイド発生速度、ボイド成長速度に影響すると考えられる.

そこで川島らは既報¹において,ボイド半径分布の時間変化を追うことにより,ボイド発生速度f, ボイド成長速度h,および,ボイド発生開始時間hを推定する手法を提案した.fは単位面積中に単位 時間当たりに発生するボイドの数,hはボイド半径が単位時間中に増加する長さ,hはクリープ開始 からボイドが発生を開始するまでの時間である.

2. 研究の目的

高クロム鋼の1つである改良 9Cr-1Mo 鋼の TypeIV 損傷について,最大主応力 σ_1 および TF がボイド発生速度 f,ボイド成長速度 h およびボイド発生開始時間 t_1 に与える影響を定量化することが本研究の目的である.

3. 研究の方法

1)試験片形状の決定

試験片の観察面は、TypeIV 損傷を生じさせ るために、 $TF \ge 2$ である必要がある. σ_1 およ び TF の影響を確認するためには、これらが 一様に分布する必要があり、かつ適切な標準 偏差でボイド半径の分布を得るために、一様 分布する部分の面積は 0.3mm² 以上である必 要がある.また、観察面以外で破断すること を防ぐため、試験片全体の中で観察面のクリ ープ損傷が最大である必要がある.

種々の形状の試験片について FEM 弾塑性 クリ-プ解析を行い,これらの条件を満たす 観察面を有する試験片形状を決定した.な お TF は試験片形状に依存するため、2 種類 の TF を得るために試験片形状も 2 種類を用 いた.解析に使用したソフトは ANSYS Academic Teaching である.解析に用いたヤ ング率,ポアソン比,降伏応力および加工 硬化係数はそれぞれ 157 GPa, 0.314, 148.5 MPa および 38.9 GPa である.クリープ 解析には Norton 則 $\hat{\epsilon}_c = A\sigma^n$ を用いた. $\hat{\epsilon}_c$ は



定常クリープ速度[hr⁻¹], σ は応力[MPa]である. *A*, *n*は定数であり *A*=9.2×10⁻¹⁶, *n*=5.818 である. 図1に試験片形状を示す. 観察面は切欠き底面の半径 *r*≦1mm の範囲である. 図2に切欠 き底面の *TF* の分布を示す. *r*≦1mm ではほぼ一様に分布している.

2) クリープ試験による TypeIV 損傷材の作成

観察面の σ_1 および *TF* が表 1 に示す値になる 3 つの条件 ABC でクリープ中断試験(破断前に試験を止めるクリープ 試験)を行い,各条件でクリープ時間が異なる複数の TypeIV 損傷材を得た.なお *TF* = $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_{mises}$ であり, σ_2 およ び σ_3 は中間主応力および最小主応力である. TF は 1)で述 べた FEM 解析により求めた.

3)*f*, *h*, *t*₁の推定

クリープ損傷材観察面を研磨・エッチング し、光学顕微鏡とデジタルカメラを用いて金 属組織写真を倍率およそ 1000 倍で撮影し、 写真を貼り合わせて観察面を再現した. 図 3 に金属組織写真の例を示す.写真上のボイド に、直径rの円を描いた透明プラスチックシ ートを重ね、円孔からはみ出すボイドを直径 r以上と判断した.その結果をもとにf,h,tiの 推定した.

時刻ゼロからクリープが開始し,時刻 t_1 からボイドが発生を開始し,時刻 t_2 にボイド個数密度を観察する場合を考える.

発生時のボイド半径はゼロとする. $t_1 < t_0 < t_2$ である時刻 t_0 に発生したボイドの半径 r は, 時刻 t_2 には $r=h(t_2-t_0)$ となる. 時刻 t_2 において 半径がこの値より大きいボイドの個数密度 $i[r, t_2]$ は,時刻 t_1 から時刻 t_0 までの間に発生 したボイドの個数密度であるから, $i[r, t_2]$ = $f(t_0-t_1)$ である.

これらの式から to を消去すると *i*[*r*, t₂]=*fr*/*h*+*f*(*t*₂-*t*₁)となる.未知数は*f*, *h*, *t*₁の3つ であるので, *t*₂および*r*が異なる観察結果が 3つ以上あれば最小二乗法により未知数を推 定できる.

同じ応力,温度,TF条件ではf,h,tnが等しいと仮定すると、応力,温度,TFが等しい条件で2時刻のクリープ時間におけるクリープ損傷材を,2種類以上のrについて半径r以上のボイドを計数すれば,f,h,tを求めることができる.

 4)最大主応力および *TF* と *f*,*h*,*t*₁の関係の検討 条件 A と条件 B の結果を比較することで、

表1 観察面の条件

	А	В	С
σ_1 [MPa]	79	73	79
TF[-]	2.7~2.9		3.3~3.6





図3 金属組織写真とボイド

TF が等しい条件における σ₁ と *f*, *h* の関係を求めた.また条件 A と条件 C を比較することで, σ₁ が等しい条件における *TF* と *f*, *h* の関係を求めた.また条件 ABC における *t*₁=0 を比較した.

4. 研究成果

図4-図6に各条件で観察された $i[r, t_2]$ とrおよび t_2 の関係を示す. $i[r, t_2]$ とrは一次式の関係にあり、また t_2 が異なるi-r直線同士ははほぼ平行になることから、仮定した式 $i[r, t_2]$ =fr/h+ $f(t_2$ - t_1)が妥当であることが判断できる.表2および図7、図8に求めた3変数の値を示す.この結果から、TF=2.7~2.9の条件ではf=2.47×10⁻⁶ $\sigma_1^{2.51}$ [f: mm⁻²hr⁻¹, σ_1 : MPa], h=3.30×10⁻¹⁴ $\sigma_1^{4.28}$ [h: mm/hr, σ_1 : MPa]の式を得た. σ_1 =79MPaの条件ではTFによらずf(t_1 :44×10⁻¹[mm⁻²hr⁻¹]でほぼ一定であり、h=4.72×10⁻⁵TF^{-2.18} [h:

mm/hr]の式を得た. t_1 は3条件ともほぼゼロであり、ボイドはクリープ開始直後から発生すると推定 された. これらは暫定式であり、今後、異なる応力やTFでデータを取得し式の精度向上を図る.

参考文献

 F. Kawashima, T. Masumitsu, K. Negi, K. Watanabe, T. Nishimura, K. Hamasaki, K. Tsumemaru, H. Miyahara and K. Fujiwara, "Study on the influence of stress and stress triaxiality factor on TypeIV creep damage of Mod. 9Cr-1Mo steel", Journal of Japan Boiler Association, No.41, pp.24-29 (2018).



図4 クリープ時間 t₂における 半径 r 以上のボイドの個数密度 *i*[*r*, t₂] (条件 A)



	f	h	t_1
	[/mm ² /hr]	[mm/hr]	[hr]
А	1.48×10 ⁻¹	4.47×10 ⁻⁶	2.27×10 ⁻¹
В	1.19×10 ⁻¹	3.09×10 ⁻⁶	-1.51
С	1.39×10 ⁻¹	3.49×10 ⁻⁶	-1.49



図 5 クリープ時間 t₂における 半径 r 以上のボイドの個数密度 *i*[*r*, t₂] (条件 B)



図 6 クリープ時間 t₂における 半径 r 以上のボイドの個数密度 *i*[r, t₂] (条件 C)



図 7 最大主応力 σ₁ とボイド 発生速度 *f*,ボイド成長速度 *h* の 関係



図 8 応力多軸度 *TF* とボイド 発生速度 *f*, ボイド成長速度 *h* の 関係

5.主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件(うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件)

	4. 奁
川島扶美子、益満敦士、大戸克起、渡邉佳、西村竜哉、濱崎和樹、爪丸公太、宮原宏美、藤原和人	411
2.論文標題	5 . 発行年
改良9Cr-1Mo鋼TypelV損傷に関する応力と応力多軸度の影響の検討	2018年
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
ボイラ研究	24-29
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
	右
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている(また、その予定である)	-
	4 券

	4.奁
KAWASHIMA Fumiko, HAMASAKI Kazuki, NISHIMURA Tatsuya, OKADO Ryotaro, TABU Kanta, TOKUNAGA	70
Takahiro, HAYASHI Yusuke, FUJIWARA Kazuhito	
2.論文標題	5 . 発行年
Study on Influence of the Maximum Principal Stress and Stress Triaxiality Factor on Initiation	2021年
Rate and on Growth Rate of the Voids of TypeIV Creep Damage in Mod.9 Cr-1Mo Steel	
3. 雑誌名	6.最初と最後の頁
Journal of the Society of Materials Science, Japan	162 ~ 168
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	査読の有無
10.2472/jsms.70.162	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている(また、その予定である)	-

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名

Kazuki Hamasaki

2.発表標題

Study on Quantitative Relation between Initiation Rate, Growth Rate and Initiation Start Time of Voids and Stress and Stress Multiaxiality in Type IV Creep Damage of Modified 9Cr-1Mo Steel

3 . 学会等名

Joint EPRI-123HiMAT Conference(国際学会)

4.発表年 2019年

1.発表者名

Tatsuya Nishimura

2.発表標題

Study on fractal dimension of grain boundary as creep damage index of Modified 9Cr-1Mo Steel

3.学会等名

Joint EPRI-123HiMAT Conference (国際学会)

4.発表年 2019年

1.発表者名

Fumiko Kawashima

2.発表標題

The Change of Fractal Dimension of Grain Boundary of Mod. 9Cr-1Mo Steel Driven by Creep and Rlation between Other Creep Damage Indication

3 . 学会等名

10th Japan-China Bilateral Sympsium on High Temperature strenrth of Materials(国際学会)

4.発表年

2019年

1.発表者名 Kei Watanabe

2.発表標題

Estimation Method of Initiation Rate and Growth Rate of Voids of TypeIV Creep Damage of Mod. 9Cr-1Mo Steel

3 . 学会等名

Annual Conference on Engineering and Applied Science(国際学会)

4.発表年 2018年

1.発表者名

濱崎和樹

2.発表標題

改良9Cr-1Mo鋼のType 損傷におけるボイドの発生成長と応力の検討

3 . 学会等名

材料学会 九州支部第5回学術講演会・総会 / 第31回信頼性シンポジウム (合同講演会)

4.発表年

2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8.本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況