

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560071

研究課題名（和文） 高速炉蒸気発生器管板のクリープ疲労寿命予測法の開発

研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF LIFE PREDICTION OF CREEP-FATIGUE

STRENGTH OF TUBE SHEET IN STREAM GENERATOR OF FAST BREEDER REACTOR

研究代表者

渡部 修 (WATANABE OSAMU)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80111368

研究成果の概要（和文）：高速炉の想定運転温度は 550℃程度であるため、構造健全性評価においてはクリープ疲労の高温特有の破壊現象の評価が必要になる。また高速炉では原子炉本体の炉心支持板、蒸気発生器の管板など、円孔を有する構造が使用されている。円孔周辺では、応力・ひずみの集中が生じ、通常、この部分から破損が生じるため、この不連続部の強度を正確に評価することが重要となっている。SUS304 ステンレス鋼の試験片を用いて、550℃での疲労実験を行い、円孔板から生じるき裂発生と進展に関する知見、また、き裂と荷重との関係についても検討した。

研究成果の概要（英文）： Operating temperature of fast breeder reactor is 550 degree Centigrade, so that the evaluation for creep-fatigue strength is indispensable from the viewpoint of structural integrity. The structures having circular holes are seen in ,for instance , supporting circular plate or tube sheet. In plate having circular holes, crack initiates at hole sides, so that the accurate evaluation of creep-fatigue strength is necessary in such structures. Plate made of SUS 304 stainless steel with one circular hole is machined, and fatigue and creep-fatigue tests were conducted at 550 degree centigrade to observe initiation and propagation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：高温強度、クリープ疲労強度、応力集中

1. 研究開始当初の背景

(1)高速炉の想定運転温度は 550℃程度であ

るため、構造健全性評価においてはクリープ疲労などの高温特有の破壊現象の評価が必

要になる。また実機では円孔などの構造不連続部が多数存在し、不連続部の応力・ひずみ集中を正確に評価することが重要である。

集中部が塑性域を形成する場合の応力・ひずみを得る簡易手法として Neuber 則が用いられてきた。しかし Neuber 則は応力・ひずみを過大に評価し、過度に安全側に損傷を評価することが知られている。より経済的な強度設計を行うためには、Neuber 則よりも正確で簡便な評価法が必要である。

(2)これらの解決策として、次のことが行われている。過度に安全側評価をする Neuber 則に対し、より正確な集中部評価を可能にするために近年研究が進められているのが応力再配分軌跡法(SRL法) [Shimakawa, T., Watanabe, O. et al., "Creep-Fatigue Life Evaluation Based on Stress Redistribution Locus (SRL) Method", JPVRC Symposium 2002, Tokyo, Japan, pp. 87-95, (2002)]である。この SRL 法を集中部に適用することで、より正確な応力・ひずみを得ることが可能である。損傷評価に用いる最適疲労曲線は平滑板を用いて得られたものである。そのため破断繰返し数ではなく、き裂発生繰返し数を用いて損傷評価を行う。変位制御型試験から得られた低サイクル試験の S-N 曲線は、従来からの試験により十分な質と量が確保されている。荷重制御型試験の損傷評価に対しても変位制御型試験の結果を用いて損傷評価を行う。

## 2. 研究の目的

(1)応力集中部を有する構造物として、円孔を有する平板を用いる。多数の円孔を有する円板は燃料棒を支持する管板があり、実機では冷却水の通過のために厳しい熱応力が発生し、この部分からクリープき裂が発生する可能性がある。

(2)本研究では、クリープ疲労強度に関する知見を得るために、構成するそれぞれの円孔板の疲労強度とクリープ強度について明らかにする。その上で両者が重畳するクリープ疲労強度およびき裂進展に関する知見を実験的に求める。また、構造物の破損評価法として、これまで中程度の応力集中の構造物のクリープ疲労強度の評価に適用された事例はほとんどない。本研究の3年間の研究期間中に、実験の他、解析手法を開発することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) 高温疲労き裂発生・進展実験

組み込み型電気炉を組み込んだ動的荷重試験機(サーボパルサ)を用いて高温疲労実験を行う。試験片に生じるき裂の画像をビデオマイクロスコープにより取得し、き裂進展速度を求める。負荷は、荷重制御とひずみ制

御の2種類で実施する。高温クリープ実験と同様に、変形・荷重・き裂長さの同時計測を行う。き裂進展速度の評価に、実験データから求められるJ積分を用いる。

### (2) 高温クリープ疲労き裂発生・進展実験

負荷は引き張り時に荷重保持のクリープ効果を加える。荷重制御とひずみ制御の2種類の実験を行う。高温クリープ・高温疲労実験と同様に、変形・荷重・き裂長さの同時計測を行う。き裂進展速度の評価に、実験データから求められるJ積分を用いる。特に、疲労成分とクリープ成分の分離を行い、相互作用の影響を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1)高速炉の想定運転温度は550°C程度であるため、構造健全性評価においてはクリープ疲労の高温特有の破壊現象の評価が必要になる。また高速炉では原子炉本体の炉心支持板、蒸気発生器の管板など、円孔を有する構造が使用されている。円孔周辺では、応力・ひずみの集中が生じ、通常、この部分から破損が生じるため、この不連続部の強度を正確に評価することが重要となっている。多数の円孔を有する円板の例として燃料棒を支持する管板があるが、実機では冷却水の通過のため厳しい熱応力が発生し、この部分からクリープき裂が発生することを明らかにした。

(2)管板を模擬した円孔板を用いて、SUS 304 ステンレス鋼の試験片を用いて、550°Cでの疲労実験を行い、円孔板から生じるき裂発生と進展に関する知見、また、き裂と荷重との関係についても検討した。

(3)管板のように複数の円孔がある場合の検討を開始した。中央部の円孔まわりに60度ずつ周囲に円孔を6個配置した場合の疲労強度を検討している。2種類のケースが考えられるが、この配置によるき裂発生と進展の実験的解析を行っている。また、2つの円孔を有する円孔板の実験と解析を行った。二つの円孔のなす角度が0、30°、60°の3通りの場合について検討した。

(4)また、き裂進展の整理のためにJ積分が有効であるが、J積分の解析を開始した。中央にき裂がある場合について、経路積分から求めた。一方、J積分は簡易式からも算出できるが、厳密な経路積分との比較も行った。

(5)また、微視的な結晶レベルから、クリープが存在するとき、粒界にクリープひずみが集中することを数値計算から明らかにした

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Osamu WATANABE, Kexin CHANG, Akihiro MATSUDA, Nobuyoshi YANAGIDA, Oblique Effects on J Integral of Cracked Plate under Plastic Fatigue Loading Based on Inelastic FE Analysis, to be published in International Journal of Pressure Vessel and Piping. (2013),DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.04.009,査読有
- ② Osamu WATANABE, Kexin CHANG, Akihiro MATSUDA, Increment of J Integral for Oblique Crack in a Plate with a Hole under Plastic Fatigue Loading Based on Inelastic FE Analysis, to be published in International Journal of Pressure Vessel and Piping (2013), DOI:10.1016/j.ijpvp. 013.04.005,査読有
- ③ Osamu WATANABE, Bopit BUBPHACHOT, Akihiro MATSUDA, Taisuke AKIYAMA Stress and Strain Locus of Perforated Plate in Inelastic Deformation –Strain-Controlled Loading Case –, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 134, No.3, No.031207, (June, 2012). DOI: 10.1115/1.4005937,査読有
- ④ Osamu WATANABE, Statistical Evaluation of Local Stress and Strain by Three - Dimensional Polycrystalline Material at Elevated Temperature, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.134, No.1, 011208 (16 pages), (Feb., 2012) DOI: 10.1115/1.4005937,査読有
- ⑤ Bopit BUBPHACHOT, Osamu WATANABE, Nobuchika KAWASAKI, Naoto KASAHARA, Crack Initiation Process for Semi-Circular Notched Plate in Fatigue Test at Elevated Temperature, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.133, No.3, 031403 (8 pages) (2011). DOI: 10.1115/1.4002539,査読有
- ③ Keisuke KINOSHITA, Yoshitaka SUZUKI, Takuya KUMAGAI, Osamu WATANABE, Akihiro MATSUDA, Multiple Crack Extension and Temperature Effect of Perforated Plate in Elevated Temperature Fatigue Test., to be presented at ASME PVP2013-97871, Paris, France.(July 17, 2013)
- ④ Masakazu KOJIMA, Madoka FUNAI, Takashi DOZAKI, Osamu WATANABE, Akihiro MATSUDA, Effect of Strain Rate and Hold Time in Creep-Fatigue Test, to be presented at ASME PVP2013-97873, Paris, France.(July 18, 2013)
- ⑥ Osamu WATANABE, Taisuke AKIYAMA, Akihiro MATSUDA, Crack Initiation/Propagation of Perforated Plate under Displacement-Controlled Creep-Fatigue Test at Elevated Temperature, ASME PVP2012-78123, Tronto, Canada, (July 19, 2012)
- ⑦ Osamu WATANABE, Marina KIKUCHI, Akihiro MATSUDA, Fractography of Fatigue and Creep-Fatigue Test of Perforated Plate using Scanning Electron Microscope, ASME PVP2012-78125, Tronto, Canada, (July 18, 2012)
- ⑧ Keisuke KINOSHITA, Osamu WATANABE, Fatigue Test for Two-Holes Diagonally-Placed Plate at Elevated Temperature, ASME PVP2012-78200, Tronto, Canada, (July 16, 2012)
- ⑨ Osamu WATANABE, Kexin CHANG, Akihiro MATSUDA, Nobuyoshi YANAGIDA, Oblique Effects on J Integral of Cracked Plate under Plastic Fatigue Loading Based on Inelastic FE Analysis, Proceeding of ICPVT-13, London, UK (May 22, 2012).
- ⑩ Osamu WATANABE, Kexin CHANG, Akihiro MATSUDA, Increment of J Integral for Oblique Crack in a Plate with a Hole under Plastic Fatigue Loading Based on Inelastic FE Analysis, Proceedings of ICPVT-13, London, UK (May 22, 2012).
- ⑪ Osamu WATANABE, Determination of Material Constants of Internal Time Theory of Plasticity and Creep for Fatigue Analysis and Creep-Fatigue Analysis, ASME PVP2011-57477, Baltimore, Maryland, USA,(July 18, 2011).
- ⑫ Osamu WATANABE, Taisuke AKIYAMA, Akihiro MATSUDA, Crack Initiation/Propagation of Perforated Plate Under Displacement-Controlled Fatigue Test at Elevated Temperature, ASME

[学会発表] (計 13 件)

- ① Shin-ichi WATANABE, Koh-ichi IMAMURA, Osamu WATANABE, Akihiro MATSUDA, Effect of Strain Amplitudes and Mean Strain Values on Fatigue Life at Elevated Temperature, to be presented at ASME PVP2013-97867, Paris, France.(July 18, 2013)
- ② Kexin CHANG, Yuki OHMURA, Osamu WATANABE, Akihiro MATSUDA, J Integral in Elasto-Plasticity by Path Integral Method and Virtual Crack Extension Method in 2-Dimensional Problem, to be presented at ASME PVP2013-97870, Paris, France .(July 18, 2013)

PVP2011-57478, Baltimore, Maryland, USA,  
(July 19, 2011).

- ⑬ Osamu WATANABE, Akihiro MATSUDA,  
Stress Redistribution Locus of Perforated  
Plate Under Displacement-Controlled  
Loading, Force-Controlled Loading, and  
Thermal Loading, ASME PVP2011-57916,  
Baltimore, Maryland, USA, (July 18, 2011).

[その他]

ホームページ等

<http://mises.kz.tsukuba.ac.jp/labo/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡部 修 (WATANABE OSAMU)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80111368

### (2) 研究分担者

松田 昭博 (MATSUDA AKIHIRO)

筑波大学・システム情報系・講師

研究者番号：20371437