微小サンプル採取が 9Cr 鋼配管のクリープ寿命に及ぼす影響の評価

屋口 正次^{*1}, 金井 雅之^{*2}, 駒崎 慎一^{*3}, 熊田 明裕^{*4}

Assessment of effect of miniature sample scoop on creep life of 9Cr steel piping

Masatsugu YAGUCHI^{*1}, Masayuki KANAI^{*2}, Shin-ichi KOMAZAKI^{*3} and Akihiro KUMADA^{*4}^{*1, *2} Central Research Institute of Electric Power Industry

2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196, Japan

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University

1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan

^{*4} Kobe Material Testing Laboratory

1270-60 Tome-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1231, Japan

Received: 30 September 2019; Revised: 21 November 2019; Accepted: 7 January 2020

Abstract

The effect of taking a miniature sample scoop on the creep life of ASME Grade 91 (9Cr steel) piping was experimentally assessed. Internal pressure tests were conducted at 650°C on tubular specimens of virgin and long-term used 9Cr steels having scoop on the outer surface, which simulate taking a sample scoop. When the ratio of scoop depth to wall thickness of the specimen was 8%, the creep life decreased to 85% of that of scoop-free specimen. On the other hand, no creep life reduction was observed in the materials with the depth ratio of 5%. Finite element analyses were conducted on the tubular specimens under the test conditions and actual-size piping under actual service conditions, where the ratio of the scoop depth was about 5% in both cases. The stress and strain concentration states near the scoop of the actual-size piping were almost the same as those of the tubular specimens, indicating that the test results were valid for the actual piping. Thus, it was concluded that taking a miniature sample to a scoop of up to 5% of the thickness of the steel has a negligible effect on the creep life of the piping.

Keywords : Miniature sample scoop, Creep life, Internal pressure test, Boiler piping, ASME grade 91

1. 緒 言

高温材料のクリープ寿命には、同じ試験条件下でも材料のヒートによって大きな差異、所謂、ヒート間差が存在する。設計段階では各機器で実際に使用される材料のヒートは不明であるため、実質的にはこのヒート間差は許容引張応力の設定における設計係数として考慮されている。一方、余寿命評価の段階では対象とする機器に使用されている材料のヒートは既知であることから、原理的には材料のヒート間差の考慮は可能と考えられる。高温機器に対する余寿命診断手法には破壊評価法、解析評価法、非破壊評価法の3種類があるが、対象とする材料の余寿命を直接評価する手法である破壊評価法が最も高い精度を有している(野中、磯部, 2009)。ただし、破壊評価法には以下に記すような制約があるため、ボイラチューブ抜管材やタービン動翼等、現場から撤去された材料への適用は有効であるものの、現場に据え付けられたままの機器への適用は一般的には困難である。

- A) 破壊試験用に試料を採取すると、補修溶接等をしない限り、当該箇所の肉厚は減少し、応力は増大する。そのため、破壊試験用に試料を採取することによって評価対象機器の余寿命が減少する可能性がある。
- B) 破壊試験として実施するクリープ試験は一般に最長でも数千時間程度であるため、実機の余寿命推定には大幅な外挿を伴う。材料によっては、この外挿を適切に実施できる方法論が確立されていない。

No.19-00362 [DOI:10.1299/transjsme.19-00362], J-STAGE Advance Publication date : 17 January, 2020

本論文は、第24回動力・エネルギー技術シンポジウム 講演論文集(2019), No.D234の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, 電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横浜須賀市長坂 2-6-1)

^{*2} 電力中央研究所

^{*3} 正員, 鹿児島大学 工学部 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

^{*4} 正員, 神戸工業試験場 (〒319-1231 茨城県日立市留町 1270-16)

E-mail of corresponding author: yaguchi@criepi.denken.or.jp

600℃級火力発電プラントの配管に広く適用されているASME Grade 91（以下，“9Cr鋼”と略す）の場合，ヒート間差が極めて顕著であるため破壊評価法の適用が望まれるが，上記の両方の制約が該当する．すなわち，A) に関しては，実機使用条件では9Cr鋼は（溶接継手のクリープ寿命特性）<<（母材のクリープ寿命特性）という傾向を示すため，余寿命評価の対象である溶接部から破壊試験用サンプルを採取する必要がある．サンプル採取に伴う肉厚減少を回復する手段として補修溶接が考えられるが，最近の研究により，9Cr溶接部への補修溶接は当該箇所のクリープ余寿命を著しく低下させることが明らかとなった（熊谷他，2016）．そのため，9Cr鋼溶接部からのサンプル採取が許容される可能性は極めて低いのが現実である．また，B) に関しては，9Cr鋼は，母材，溶接継手とも，短時間領域の試験データに基づき長時間領域のクリープ破断寿命を評価すると，実際よりも長めの寿命となる傾向のあることが多数報告されている（Strang et al., 2003）（Cipolla and Gabrel, 2005）（Tabuchi and Takahashi, 2006）．そのため，評価対象とする試験データを幾つかの領域に区分する手法（Maruyama et al., 2016）や（0.2%耐力）/2 により分割する手法（Kimura, 2006）等が提案されている．これらの手法は，長時間領域まで試験データが整備されている材料の場合には有効であるが，数千時間以下の数点のデータから長時間領域のクリープ特性を推定するケースに関する適用性は不明と思われる．ここで，600℃級火力発電プラントで長時間使用された9Cr鋼を対象として著者らが分析・試験を実施したところ，上記のB)の課題については解決できる見通しが得られた（屋口，金井，2019）．そこで，本論文では，課題A)に関して検討する．

著者らが長時間使用された様々な9Cr鋼を対象として系統的なクリープ試験を実施した結果，9Cr鋼溶接継手のクリープ寿命の長短はその継手のもとである母材のクリープ寿命の長短と定量的に相関のあることが分かった（Yaguchi, 2018）．すなわち，強い溶接継手はその母材も強く，弱い溶接継手はその母材も弱いという特徴が認められた．9Cr鋼に関する同様な結果がArisue et al. (2019) から最近発表された．この関係を逆算して考えてみると，母材の強弱を把握できれば，溶接継手の強弱を推定可能と言える．このことは，溶接部から採取したサンプルに対してではなく，母材部から採取したサンプルに対して破壊試験を実施しても合理的な評価が可能であることを意味している．9Cr鋼母材を対象とした場合，微小サンプルを用いたクリープ寿命評価に関する研究や解説がこれまでに幾つか報告されている（駒崎，2009）（Brennan et al., 2017）（金山他，2019）．しかし，これらの研究においては対象機器から微小サンプルを採取可能であることが暗黙の前提条件となっており，微小サンプル採取が対象機器のクリープ寿命に及ぼす影響は検討の対象外である．耐圧構造物である実機配管に微小サンプル破壊評価法を適用する上では，サンプル採取が配管のクリープ寿命へ及ぼす影響に関する定量的な評価が必要不可欠と思われる．

そこで，本研究では，サンプル採取を模擬した加工痕を付与した9Cr鋼を用いて内圧クリープ試験を実施し，加工痕深さと内圧クリープ寿命の関係について調査した．さらに，加工痕を有する円筒に関する有限要素解析に基づき内圧クリープ試験結果の実機配管への適合性について検討するとともに，サンプル採取によって母材部の寿命が低下する場合の配管としてのクリープ寿命へ及ぼす影響について評価した．

2. 実験方法

2・1 供試材と試験片

本研究では9Cr鋼の新材および長期使用材の2つを供試材として用いた．新材は小径管焼ならし焼戻し材であり，外径が65mm，肉厚が15mmである．長期使用材は高温再熱蒸気管取替部材（温度600℃，圧力4.3MPa，運転時間 1.32×10^5 h）であり，外径が835mm，肉厚が73mmである．ここで，長期使用材（材質：火SCMV28鋼）について，上記の温度，平均径式から算出した応力，運転時間，および，9Cr鋼に関する最新の寿命評価式99%信頼下限特性（Kimura and Yaguchi, 2016）を用いて寿命消費率を計算すると4.4%である．新材および長期使用材の化学成分を表1に記す．

本研究では外径64mm，肉厚12mm，軸長300mmの円筒を内圧クリープ試験片として用いた．ここで，供試材が新材の場合は内径・外径を所定の値まで切削することにより試験片を製作した．供試材が長期使用材の場合，管肉厚73mmより直径64mmの丸棒を製作した後，棒中心部のくり貫き加工により所定の内径の試験片とした．本研究で用いた内圧クリープ試験片の場合，半径/肉厚の比は2.7であり，実際の主蒸気管相当の肉厚比である．

微小サンプル採取時の深さが配管のクリープ寿命に及ぼす影響を評価するため、新材についてはサンプル採取痕を模擬した深さ 0.64mm の加工痕を管外表面に有する試験片を、長期使用材についてはサンプル採取痕を模擬した深さ 0.64mm, 0.96mm, 1.29mm の加工痕を管外表面に有する 3 種類の試験片を製作した。ここで、各加工痕深さの試験片肉厚に対する比率（以下、“加工痕深さ比”と称す）は 5.3%, 8.0%, 10.8% である。加工痕の軸方向および周方向の寸法は加工痕深さ比によらず一定であり、軸方向が 7.7mm, 周方向が 3.8mm である。本研究では、各試験片で同一深さの加工痕を軸方向標点内に 3 ヶ所加工した。ここで、各加工痕の位置は互いに干渉しないように管軸方向には 75mm 間隔、管周方向には 120° 間隔とした。試験片における各加工痕の位置関係を図 1 に示す。実際の微小サンプル採取時には、サンプル採取痕の縁が滑かになるように、グラインダ仕上げを施す。そこで、本試験片においても加工痕の縁が鋭角にならないようにエッジ処理を施した。エッジ処理前、及び、エッジ処理後の試験片の外観例を図 2 に示す。エッジ処理によって、加工痕の軸方向および周方向の最大寸法は大きくなったが、加工痕の半径方向（深さ方向）の寸法はエッジ処理前と概ね同じである。エッジ処理前後の加工痕の最大箇所の寸法を表 2 に示す。

Table 1 Chemical composition of materials.

Table 1 Chemical composition of materials.												wt %
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	N
Virgin Mat.	0.09	0.26	0.41	0.013	0.000	8.24	0.09	0.89	0.19	0.06	0.00	0.043
Used Mat.	0.10	0.35	0.47	0.009	0.001	8.57	0.10	0.97	0.20	0.08	0.01	0.047

Fig.1 Example of scoop.

(a) Before surface treatment (b) After surface treatment

Fig.2 Example of scoop.

(Initial Size: Depth 0.64mm, Axial length 7.7mm, Circumferential length 3.8mm)

Table 2 Scoop size for each specimen.

Direction	Depth ratio 5.3%		Depth ratio 8.0%		Depth ratio 10.8%	
	Surface treatment		Surface treatment		Surface treatment	
	Before	After	Before	After	Before	After
Axial	7.7	14	7.7	15	7.7	18
Circumferential	3.8	9	3.8	10	3.8	12
Radial	0.64	≥0.64	0.96	≥0.96	1.29	≥1.29

Unit: mm

2・2 試験条件

試験温度は 650℃である。内圧は加工痕のない箇所（平滑部）の周方向応力が 70MPa～90MPa となるように設定した（圧力：32MPa～42MPa）。ここで、周方向応力は平均径式を用いて管の外径、肉厚と内圧より算出した。

何れの試験もき裂が肉厚方向に貫通するまで実施した。また、比較のために、新材、長期使用材とも加工痕なしの平滑材の円筒に関する内圧クリープ試験も実施した。

3. 実験結果

3・1 破断時間

内圧クリープ試験の結果を図 3 に示す。ここで、内圧のみが負荷される円筒の場合、周方向応力が最大主応力となるため、実験結果の整理には周方向応力を用いた。図中の実線は平滑材のデータを結んだものである。新材、長期使用材とも加工痕深さ比 5.3%の試験データにおいては、応力条件によらず平滑材と同等なクリープ寿命が得られた。一方、長期使用材で加工痕深さ比が 8.0%と 10.8%の試験データでは、平滑材と比べて短いクリープ寿命であった。

Fig. 3 Internal pressure creep test results of 9Cr steel with or without scoop. The internal pressure creep test results are shown in relationship between circumferential direction stress and creep life. When scoop depth ratio of test specimens was equal to 5.3%, the creep life of those was equal to that of smooth surface test specimens regardless of new or used materials. On the other hand, there were reductions of the creep life in comparison with that of smooth surface test specimens when scoop depth ratios of test specimens were equal to 8.0% and 10.8%.

内圧クリープ試験データを加工痕深さ比で整理した結果を図 4 に示す。ここで、縦軸は各加工痕材の内圧クリープ寿命を平滑材の内圧クリープ寿命で除した値（内圧クリープ寿命比）である。加工痕深さ比と内圧クリープ寿命比の関係は加工痕深さ比 5.3%を境として二つに分かれており、加工痕深さ比が 5.3%の場合は平滑材と比べてクリープ寿命の低下は認められない。一方、加工痕深さ比が 5.3%より大きい場合は長期使用材において内圧クリープ寿命比は加工痕深さ比が大きくなるほど小さい値であり、加工痕深さ比が 8.0%の場合は 85%，加工痕深さ比が 10.8%の場合は 80%の寿命であった。クリープ試験結果には若干の試験誤差が含まれることがあるが、加工痕深さ比 5.3%に関しては 4 つの異なる平滑材データに対する結果が狭いバンド内（クリープ寿命比が 100～110%）にあるため、“クリープ寿命の低下は認められない”という事象に関する信頼性は高いと考えられる。

Fig. 4 Relationship between creep life ratio of 9Cr steel and scoop depth ratio. Vertical axis means ratio of creep life of scoop specimen to that of smooth surface specimen, and horizontal axis stands for scoop depth ratio of specimens. When the scoop depth ratio was equal to 5.3%, the ratio of creep life was approximately 100%, whereas it was 85% and 80% for the scoop depth ratio of 8.03% and 10.8%, respectively.

3・2 破壊形態

試験終了後の試験片外観写真の例を図5に示す。加工痕深さ比5.3%の場合、貫通き裂は加工痕またはその近傍に生じていた。一方、加工痕深さ比8.0%以上の場合、貫通き裂は加工痕ではない箇所に生じていた。なお、加工痕深さ比5.3%の場合、貫通き裂以外には巨視き裂は認められなかったが、加工痕深さ比8.0%以上の場合、貫通き裂以外に複数の巨視き裂が認められた。

Fig. 5 Appearance of fractured specimen by internal pressure test. (Long-term used 9Cr steel, Temperature: 650°C, Circumferential stress: 90MP) The penetration crack occurred near scoop area when scoop depth ratio was equal to 5.3%. On the other hand, the penetration crack was not observed near the scoop area in case of the scoop depth ratio larger than 8.0%.

試験終了後の各試験片について肉厚方向のビッカース硬さ分布を測定した。ここで、測定に用いた試験力は2.94Nであり、硬さ計測の箇所は巨視き裂が発生していない加工痕部および平滑部である。全体的に硬さの顕著な低下が生じており、初期状態と比較して10%~25%程度低い値を示している。なお、加工痕部に関しては、図6に示すように、外表面から若干内側に入った箇所でビッカース硬さが極小値となっていた。

貫通き裂が生じていない平滑部および加工痕部で肉厚方向にボイド個数密度を測定した。図7に示すように、加工痕部の外表面側で僅かにボイドが確認されたが、それ以外の箇所では殆どボイドは認められなかった。

Fig.6 Hardness measurement results of specimen with scoop through thickness direction.
(Virgin 9Cr steel, Scoop depth ratio:5.3%, Temperature:650°C, Circumferential stress:90MPa)

Fig.7 Voids density measurement results of specimen with scoop through thickness direction.
(Virgin 9Cr steel, Scoop depth ratio:5.3%, Temperature:650°C, Circumferential stress:90MPa)

4. 考 察

以下では、前章に記した内圧クリープ試験の結果の実機配管への適合性について有限要素解析に基づき検討するとともに、サンプル採取によって母材部の寿命が低下する場合の配管としてのクリープ寿命へ及ぼす影響を評価する。

4・1 採取精度に基づく微小サンプル寸法の決定

実機配管への適合性について検討するには、実際に採取する微小サンプルの寸法を決定する必要がある。そこで、本節ではまず微小サンプルの採取精度について確認する。本研究では長澤ら(2009)が開発した放電サンプリング装置(EDM Sampling Equipment)を用いた。本装置はステッピングモータを装備し、その先端に放電電極を取付けており、放電電極のフレームは回転方向に直角な一定の幅を持つ形状である。サンプリングする試料の底部を制御するために回転部にならない機構を有しているのが本装置の特徴であり、この機構により薄板の採取が可能となっている。

本装置を用いて9Cr鋼長期使用材(外径864mm)から薄板状の微小サンプルを採取した。採取したサンプルおよび採取後の配管の外観の例を図8に示す。ここで、図中の外面側や内面側とは配管を基準とした記述であり、放電加工が施された面は(b),(c),(d)である。

Fig.8 Appearance of miniature sample and pipe.

各サンプルについて肉厚計測を行い、サンプリングの際に設定した肉厚の値と比較した結果を図 9 に示す。ここで、同図には各サンプル採取における配管側の減肉量の計測値もプロットした。調査対象としたサンプル肉厚 1mm～5mm の範囲において、設定値と計測値の差は $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であった。また、対象とする配管が水平管と鉛直管とでサンプル採取精度に差異は認められなかった。

図 9 に示した各サンプル採取における配管側の減肉量とサンプル肉厚の差をとることにより、サンプル採取時の切り代の値を算出した結果を図 10 に示す。調査対象としたサンプル肉厚 1mm～5mm の範囲において、切り代は最大で 1.1mm であった。

Fig.9 Relationship between target and measured values of sample thickness.

Fig.10 Relationship between sample thickness and decreased thickness due to EDM.

放電サンプリング装置で微小サンプルを採取する際は、放電箇所を純水により冷却しているものの局所的に温度が上昇するのは避けられないため、放電加工による影響層が形成される可能性が考えられる。そこで、サンプルおよび配管について、この影響層の厚さを組織観察および硬さ計測により調査した。サンプルおよび配管とも、放電加工面から $20\sim 30\mu\text{m}$ の範囲で組織変化層が確認された。放電加工面の垂直断面の金属組織を光学顕微鏡で撮影した例を図 11 に示す。加工面近傍には微細な割れも発生しており、放電による熱影響でオーステナイト化した後マルテンサイト変態した部分と推定される。放電加工面近傍についてマイクロビッカース硬さ計にて硬さ分布を計測した結果の例を図 12 に示す。ここで、計測に用いた試験力は 0.098N である。放電加工面の直下は顕著に硬化しており、硬さは 350HV 程度の高い値となっている。放電加工面から離れるにつれて硬さの値は急激に低下し、放電加工面から約 $30\mu\text{m}$ ほど離れた領域以降は約 215HV の一定値を示している。この硬さの高い領域は、図 11 における組織変化層に対応すると考えられる。

Fig.11 Microstructure observation in vicinity of EDM sampling by optical microscope. Degraded microstructure layer was observed in the range of $20\sim 30\mu\text{m}$ from EDM surface.

Fig.12 Hardness distribution in vicinity of EDM sampling. Vickers hardness drastically decreased in vicinity of EDM surface and changed to be constant in an area of $25\mu\text{m}$ from EDM surface.

実機配管からの微小サンプル採取においては、サンプル採取痕の縁が滑かになるように、グラインダ仕上げを施す。このグラインダ仕上げの際に深さ方向に数百 μm ほど切削されるため、上記の組織変化層はグラインダ仕上げ時に除去されることが考えられる。しかし、今度はグラインダ仕上げによって組織変化層が形成される可能性もある。そこで、微小サンプル採取後に実施するグラインダ仕上げによる影響について調査した。グラインダ仕上げ後の表層近傍の組織を光学顕微鏡で撮影した写真の例を図 13 に示す。図 11 に示した EDM サンプリング後とは異なり、表面直下においても組織変化は認められない。加工面近傍についてマイクロビッカース硬さ計にて硬さ分布を計測した結果の例を図 14 に示す。ここで、計測に用いた試験力は 0.098N である。硬さに関しても、表層近傍での明瞭な硬化は認められなかった。すなわち、放電加工による組織変化層は除去されており、かつ、グラインダ仕上げによる有意な組織変化層は形成されていないと推測される。

Fig.13 Microstructure observation in vicinity of grinder smoothing surface by optical microscope.

Fig.14 Hardness distribution in vicinity of grinder smoothing surface.

以上の結果より、放電サンプリング装置による微小サンプル採取の精度は以下のように要約される。

- ・サンプル肉厚に関して、採取時の誤差は約 $\pm 0.2\text{mm}$ の範囲内である。
- ・サンプリングに伴う切り代は最大で約 1.1mm である。
- ・サンプル採取により、放電加工面から約 $30\mu\text{m}$ 以内の領域に組織変化層が形成される。
- ・グラインダ仕上げにより上記の組織変化層は除去される。また、グラインダ仕上げによる有意な組織変化層の形成は認められない。

微小サンプル採取精度に関する上記の知見、微小サンプルから製作するスモールパンチクリープ試験片（外径 8mm 、肉厚 0.5mm の円盤）と TEM ディスク（外径 3mm 、肉厚 0.15mm の円盤）の採取枚数、および、実機での長期使用に伴い表層で形成される変質層の厚さ（Yaguchi et al., 2018）等に基づき、本研究では実機配管から採取するサンプルの具体的な寸法を以下の値にすることとした。

- ・管軸方向： 45mm 、管周方向： 20mm 、管半径方向： 1.5mm

4・2 内圧クリープ試験結果の実機配管への適合性

以下では3章に記した内圧クリープ試験の結果が、実機配管に対する微小サンプル採取のケースに適合性があるか否かを判断するために、有限要素法によるクリープ解析を実施した。

4・2・1 内圧クリープ試験片採取痕付近の応力ひずみ状態

本節では基準となる内圧クリープ試験片に関するクリープ解析の方法と結果を述べる。

(1) 解析方法

解析対象は加工痕深さ比 5.3% の内圧クリープ試験片とした。ここで、加工痕はエッジ処理されており、試験片軸方向の中央にのみ存在するとした。軸方向および周方向の対称性を考慮して、全体の $1/4$ についてメッシュを作成した。要素には20節点2次要素を用いた。

材料特性は吉田ら（2015）の文献に記載された改良 9Cr-1Mo 鋼の 650°C の値を用いた。すなわち、ヤング率は 150GPa 、ポアソン比は 0.3 、ノートン則の係数は 3.21×10^{-18} 、ノートン則の指数は 6.59 である。ここで、応力の単位は MPa 、ひずみの単位は mm/mm 、時間の単位は h である。

荷重条件は、平均径式による周方向応力が 80MPa となる圧力（ 37MPa ）を試験片端部を含む管内表面に分布荷重として与えた。

クリープ解析時間 t は新材加工痕深さ比 5.3% の破断時間に相当する 2000h とした。なお、比較のために、平滑材の内圧クリープ試験片についても同様な解析を実施した。

(2) 解析結果

解析で得られた加工痕部近傍の周方向応力の分布をコンター表示にて図 15 に示す。ここで、図中の x は管軸方向、 r は管半径方向、 θ は管周方向を意味する。まず、全体を見ると、負荷開始直後 ($t=0h$) と $t=2000h$ とでは肉厚方向の応力分布が逆転しており、 $t=0h$ は内面側の方が、 $t=2000h$ では外面側の方が周方向応力は高くなっている。この応力分布の変化はクリープ変形に伴う応力の再配分である。加工痕近傍は、 $t=0h$ および $t=2000h$ とともに局所的に応力集中が生じている。なお、応力が高くなっているのは、加工痕の縁よりも加工痕の底部中央付近である。

Fig.15 Finite element (FE) analysis results: Circumferential stress of internal pressure specimen with scoop depth ratio 5.3%.

周方向応力、ミーゼス相当応力、応力 3 軸度係数 TF に関する加工痕底部中央での肉厚方向の分布を平滑試験片に関する解析結果とともに図 16, 図 17, 図 18 に示す。ここで、TF は主応力の線形和をミーゼス相当応力で除した値である。負荷開始時から応力再配分後まで、外表面側の約 1/3 の領域は加工痕があると周方向応力、ミーゼス相当応力、TF とも高い値となっているが、それ以外の領域は加工痕の有無による差異は認められない。周方向応力とミーゼス相当応力は加工痕の有無によらず負荷開始時は内表面側が高い。応力再配分後は、加工痕がある場合、周方向応力は外表面から僅かに内面側の箇所まで最大となっているが、ミーゼス相当応力は肉厚方向で概ね一定である。一方、TF は、加工痕があると、負荷開始時、応力再配分後とも、外表面から僅かに内面側の箇所でも最も高い値となっている。なお、円筒が高温下で内圧を受ける場合の応力の再配分はクリープ寿命の初期に生じその後概ね一定となるが、本解析結果における採取痕近傍の応力の再配分も同じ傾向であった。例として、外表面におけるミーゼス相当応力の時間変化を図 19 に示す。採取痕の有無によらず、ミーゼス相当応力は負荷開始直後に上昇するが時間の経過とともにその変化は緩やかになり、約 100h 経過後はほぼ一定値を保っている。

加工痕底部中央の肉厚方向における相当クリープひずみを図 20 に示す。外表面側の約 1/4 の領域は加工痕があるとクリープひずみは高い値となっているが、それ以外の領域は加工痕の存在によるひずみの顕著な差異は認められない。なお、肉厚方向でクリープひずみが最も大きいのは、加工痕の有無によらず内表面である。

加工痕深さ比 5.3%の内圧クリープ試験片の場合、図 7 に示したように、加工痕近傍ではボイドが外表面近傍で相対的に多く観察された。この実験結果に基づき肉厚方向の分布に関して考えると、周方向応力および応力 3 軸度係数は全般的な傾向として相関が認められる。一方、ミーゼス相当応力および相当クリープひずみは、加工痕の存在によって外表面側の値が高くなっているものの、肉厚方向全体で見ると内表面側の方が高い値となっており、ボイド分布との相関は認められない。

加工痕深さ比 5.3%のクリープ寿命が平滑材のクリープ寿命と同じだった理由としては、上記の解析結果から以下のように解釈することも可能と考えられる。クリープ条件下において 9Cr 鋼は切欠き強化材であり、荷重に垂直な断面における公称応力が同じ場合、応力 3 軸度係数が高い方が長寿命側となることが報告されている(高橋, 2011)。このことから、加工痕深さ比 5.3%の場合、応力ひずみの有意な変化は加工痕近傍に限定され、加工痕近傍では周方向応力増大による寿命の低下と応力 3 軸度係数上昇による寿命の増大が釣り合ったため、平滑材と同じクリープ寿

命を示した。一方、加工痕深さ比が 8.0%以上の場合、応力ひずみの変化する領域が加工痕近傍以外にまで及び、加工痕部以外の箇所での周方向応力の増大に起因して平滑材よりも短い時間で破断した。加工痕が導入されたことによって、加工痕ではない箇所で早期破壊が生じるというこの試験結果は、高温材料のクリープ損傷に関する研究という観点では興味深い事象と思われる。ただし、検討を進める際には下記にも留意する必要があると思われる。

- ・配管の場合、最小許容肉厚を満足する必要があるため、寿命評価の対象となる箇所では肉厚が 8%程度減少した場合は肉盛溶接等を行うのが一般的であり、減肉したままの状態で使用される可能性は低い。

- ・最小許容肉厚を満足する加工痕深さであるため減肉のままの状態で使用されるとして、当該材料が図 4 のような特性である場合は寿命低下率は最大でも 20%程度である。そのため、配管系統全体で考えると、寿命低下した箇所（母材）ではなく初めから存在する溶接部が最弱箇所である可能性も考えられる。

Fig.16 FE analysis results: Circumferential stress distribution in thickness direction of internal pressure specimen. The specimen with scoop revealed larger circumferential stress than that without scoop within area from outer surface to 1/3 of the outer surface at 2000h as well as initial state.

Fig.17 FE analysis results: Equivalent stress distribution in thickness direction of internal pressure specimen. The specimen with scoop revealed larger Mises equivalent stress than that without scoop within area from outer surface to 1/5 of the outer surface at 2000h as well as initial state.

Fig.18 FE analysis results: Stress triaxial factor distribution in thickness direction of internal pressure specimen. The specimen with scoop revealed larger stress triaxial factor than that without scoop within area from outer surface to 1/2 of the outer surface, especially, at 1/5 of the outer surface at 2000h as well as initial state.

Fig.19 FE analysis results: Variation of Mises equivalent stress at outer surface of internal pressure specimen with time. Mises equivalent stress drastically increased at start of creep loading, however, it changed to be constant at 100h.

Fig.20 FE analysis results: Equivalent creep strain distribution in thickness direction of internal pressure specimen. The specimen with scoop revealed larger equivalent creep stain than that without scoop within area from outer surface to 1/4 of the outer surface.

4・2・2 実機配管への適用性

本節では、微小サンプルを採取した実機配管を長時間運転した場合の応力ひずみ状態を有限要素解析により評価し、前項に記した内圧クリープ試験片の応力ひずみ状態との比較を行う。

(1) 解析方法

解析対象は出力 60 万 kW 級 USC 火力発電プラントの典型的な主蒸気管 (MSP) とした。管の外径は 381mm, 肉厚は 72mm であり, 蒸気温度は 600°C, 蒸気圧力 25.2MPa である。採取する微小サンプルの寸法の目標値は, 前節に記したように, 管軸方向が 45mm, 管周方向が 20mm, 管半径方向が 1.5mm と想定した。この目標値に対して, 採取時の誤差, 切り代, グラインダ仕上げによって配管側が切削される寸法は, 最大で管軸方向が 58mm, 管周方向が 36mm, 管半径方向が 2.9mm と仮定した。この場合, 管半径方向の切削量/肉厚の比は 4.0% である。

管の軸方向および周方向の対称性を考慮して, 全体の 1/4 についてメッシュを作成した。ここで, 要素には 20 節点 2 次要素を用いた。

材料特性はヤング率は 160GPa, ポアソン比は 0.3, ノートン則の係数は 8.70×10^{-21} , ノートン則の指数は 6.59 の値を用いた。ここで, 応力の単位は MPa, ひずみの単位は mm/mm, 時間の単位は h である。この値は, 9Cr 鋼 (火 SCM28 鋼, 火 STPA28 鋼) に関する文献 (Kimura and Yaguchi, 2016) を参考として決定した値であり, 前項に記した 650°C の値と比較して, ノートン則の係数を約 1/370 とした特性である。

荷重条件は圧力 25.2MPa を管内面に分布荷重として与えた。なお, 管の内径部分の断面積に作用する圧力によって生じる管軸力方向の荷重は, 管端部に管軸方向分布荷重として設定した。

クリープ解析時間 t はプラント使用の上限の目安である 3×10^5 h とした。なお, 比較用に, サンプル採取による切削が無い場合の配管についても同様な解析を実施した。

(2) 解析結果

解析時間 3×10^5 h 経過時の周方向応力, ミーゼス相当応力, 応力 3 軸度係数 TF, 相当クリープひずみに関するサンプル採取 (≒加工痕) 底部中央での肉厚方向の分布を図 21, 図 22, 図 23, 図 24 に示す。ここで, 比較のために, 各図には, 前項に記した内圧クリープ試験片に関する 2000h の解析結果も併記した。なお, 解析対象とした主蒸気管と内圧クリープ試験片とでは管肉厚が異なるため, 横軸は管肉厚に対する相対的な位置で表した。主蒸気管と内圧クリープ試験片を比較すると, 周方向応力, ミーゼス相当応力, 相当クリープひずみは, 絶対値は異なるものの, 加工痕の存在による変化の形状は類似である。すなわち, 周方向応力の場合, 加工痕の存在によって外表面から約 40% までの領域で応力が高くなっており, 特に, 外表面から約 20% までの領域がその影響が大

きい。ミーゼス相当応力の場合、加工痕の存在によって外表面から約 20%~30%までの領域で高い値を示し、それ以降は外表面から約 50%の領域にかけて加工痕の存在によって僅かに低い値を示している。相当クリープひずみにおける加工痕の影響は、相当応力における影響と同様である。なお、相当クリープひずみの場合、主蒸気管と内圧クリープ試験片とで絶対値の違いが顕著であり、1 桁以上異なる。これは内圧クリープ試験片の場合、新材で実際に破断が生じた時間での値をプロットしているのに対して、主蒸気管の場合、解析条件が実機の温度、圧力、想定使用時間であるため、クリープひずみの値が小さかったと思われる。一方、応力 3 軸度係数は、主蒸気管と内圧クリープ試験片とで、定性的な傾向だけでなく、定量的にも比較的近い値となっている。

Fig.21 FE analysis results: Circumferential stress distribution in thickness direction of MSP and internal pressure specimen.

Fig.22 FE analysis results: Equivalent stress distribution in thickness direction of MSP and internal pressure specimen.

Fig.23 FE analysis results: Stress triaxial factor distribution in thickness direction of MSP and internal pressure specimen.

Fig.24 FE analysis results: Equivalent creep strain distribution in thickness direction of MSP and internal pressure specimen.

以上の結果より、解析対象とした主蒸気管と内圧クリープ試験片に関する限り、サンプル採取がその付近の応力ひずみ状態に及ぼす影響は定性的には同様であると言える。したがって、サンプル採取付近の応力ひずみ状態の変化が配管母材の寿命に及ぼす影響が温度および応力レベルに非依存である場合は、内圧クリープ試験片によって得られた結果は実機配管母材に対しても適合する可能性が高いと考えられる。

4・3 サンプル採取による断面積減少が配管のクリープ寿命に及ぼす影響

以下では、前節の最後に記載した“サンプル採取痕付近の応力ひずみ状態の変化が配管母材の寿命に及ぼす影響が温度および応力レベルに非依存である”との仮定が成立しない場合について検討する。すなわち、3章に記したように、本研究で実施した内圧クリープ試験においてはサンプル採取による加工痕深さ比が5%以下であれば、そのクリープ寿命は平滑材と同等であったが、温度または応力レベルによってはこの挙動が異なる可能性も否定できない。以下では、実機配管の寿命が低下する主要な原因の一つである断面積減少による応力増加の観点から、加工痕深さ比5%が配管のクリープ寿命に及ぼす影響について検討する。

本研究では、実用性な観点から、加工痕深さによる応力増加は局所的な値ではなく、断面平均の巨視的な値で取り扱うこととする。平均径式においては応力は圧力と平均半径の積を肉厚で除したものであることから、加工痕深さを考慮するとは、応力を算出する際に加工痕深さの分だけ減少させた肉厚の値を用いることである。したがって、加工痕深さ比が5%の場合、応力は5.3%だけ大きな値となる。仮に、式(1)に示すように、クリープ寿命 t_r が応力 σ のべき乗の逆数とすると、5.3%増加した応力に対するクリープ寿命 t_r' は式(2)により与えられる。ここで、式(1)と式(2)における B, n は定数（応力指数）であり、同一の値である。

$$t_r = B/\sigma^n \quad (1)$$

$$t_r' = B/(1.053\sigma)^n \quad (2)$$

したがって、応力増加に起因したクリープ寿命比 t_r'/t_r は以下の式より算出できる。

$$\frac{t_r'}{t_r} = \frac{B/(1.053\sigma)^n}{B/\sigma^n} = \frac{1}{1.053^n} \quad (3)$$

上記の式に関する計算結果を図25に示す。クリープ寿命比は定数 n に強く依存しており、 n が増大するにつれてクリープ寿命比は単調に減少している。例えば、 n が5の場合、クリープ寿命比は77%であり、 n が10の場合、クリープ寿命比は60%である。

実際の材料のクリープ寿命は式(1)よりも複雑であり、温度や応力によって n に相当する値は変化する。そこで、以下に示す火力発電用9Cr鋼母材（火STPA28鋼）に関するクリープ寿命式（Kimura and Yaguchi, 2016）を用いて、600℃、50MPaの基準条件で応力が5.3%増加した場合のクリープ寿命比を算出したところ、70%であった。すなわち、微小サンプル採取によって配管母材のクリープ寿命は最大で30%短くなる可能性があると考えられる。

$$\log t_r = 35063.7/T + 2366.9 (\log \sigma)/T - 2423.4 (\log \sigma)^2/T - 29.8839 \quad (4)$$

ここで、 t_r はクリープ寿命 (h)、 σ は応力 (MPa)、 T は温度 (K) である。

構造体として考えた場合は、溶接継手のクリープ寿命と上記の減少した母材のクリープ寿命の大小関係が重要となる。そこで、公称応力を5.3%増加した応力を用いた火力発電用9Cr鋼母材（火STPA28鋼）の600℃のクリープ破断曲線を公称応力ままの火力発電用9Cr鋼溶接継手（火STPA28系鋼）の600℃のクリープ破断曲線と比較した結果を図26に示す。ここで、図中の実線は99%信頼下限線、破線は99%信頼上限線であり、母材（Kimura and Yaguchi, 2016）、溶接継手（Yaguchi et al., 2016）とも、それぞれ、以下の式中の±の箇所のマイナスにより99%信頼下限線が、プラスにより99%信頼上限線が算出される。9Cr鋼の場合、母材と溶接継手のクリープ寿命の間には正の相関のあることが報告されている（Yaguchi, 2018）（Arisue et al., 2019）ことから、図26の99%信頼下限線同士を比較すると、600℃、50MPaの基準条件において、母材の寿命は溶接継手の寿命の35倍である。また、極端な想定の一つとして、母材の99%信頼下限線による寿命と溶接継手の99%信頼上限線による寿命を比較した場合でも前者は後者の約2倍の値となっている。すなわち、応力増加が5.3%の場合、母材および溶接継手

におけるヒート間差（試験データのバラツキ）の幅を考慮しても、母材のクリープ寿命が溶接継手のクリープ寿命を下回ることはないと考えられる。したがって、仮に3章に記した内圧クリープ試験の結果が実機使用条件に適合しない場合でも、構造体としてはサンプル採取が配管のクリープ寿命へ影響を及ぼすことはないと推測される。

9Cr 鋼母材

$$\log t_r = 35063.7/T + 2366.9 \{\log(1.053\sigma)\}/T - 2423.4 \{\log(1.053\sigma)\}^2/T - 29.8839 \pm 2.33 \times 0.2545 \quad (5)$$

9Cr 鋼溶接継手

$$\log t_r = 31306.0/T - 4166.8 (\log \sigma)/T - 0.1728 \sigma /T - 22.5811 \pm 2.33 \times 0.2522 \quad (6)$$

Fig.25 Effect of stress exponent n on creep life ratio due to stress increase 5.3%.

Fig.26 Comparison of creep life of 9Cr steel base metal with 5.3% increased stress and that of 9Cr steel welded joint.

5. 結 言

本研究では、母材部からの微小サンプル採取が ASME Grade 91 (9Cr 鋼) 配管のクリープ寿命に及ぼす影響について、採取痕を模擬した加工痕を有する円筒の内圧クリープ試験により調査した。さらに、採取痕を有する円筒に関する有限要素解析に基づき内圧クリープ試験結果の実機配管への適合性について検討するとともに、サンプル採取によって母材部の寿命が低下した場合の配管としてのクリープ寿命へ及ぼす影響についても検討した。以下に得られた結果を記す。

- (1) 本研究で取得した試験結果（温度 650℃、応力 70～90MPa）の範囲内においては、採取痕模擬加工痕深さが肉厚の 5% の場合、9Cr 鋼新材および長期使用材とも加工痕による寿命低下は認められなかった。加工痕深さが肉厚の 8% 以上の場合には加工痕深さ比が大きくなるほどクリープ寿命は短くなり、加工痕深さが 8% の場合は平滑材の 85%、加工痕深さが 11% の場合は平滑材の 80% の寿命であった。
- (2) 採取痕模擬加工痕深さが 5% の場合、貫通き裂は採取痕またはその近傍に生じていた。一方、加工痕深さが 8.0% 以上の場合、貫通き裂は加工痕ではない箇所が生じていた。
- (3) 切り代や加工影響層等も含めてサンプル採取精度について調査した結果に基づき、配管から採取する微小サンプルは管軸方向 45mm、管周方向 20mm、管半径方向 1.5mm の薄板とした。
- (4) サンプル採取痕がその周辺の応力ひずみ状態に及ぼす影響を有限要素解析により評価した結果、9Cr 鋼実機主蒸気管と内圧クリープ試験片とで定性的に同じ傾向が認められた。このことから、採取痕付近の応力ひず

み状態の変化と配管母材寿命の関係が温度や応力レベルに依存しない場合、内圧クリープ試験において得られた結果は実機配管に対しても適合する可能性が高いと考えられた。

- (5) 温度や応力レベルの影響により内圧クリープ試験結果が実機配管に対して適合しない場合を想定し、採取痕深さが5%の場合の配管のクリープ寿命について検討した。9Cr鋼母材および溶接継手のクリープ寿命評価式に基づく、サンプル採取により母材部の寿命が低下した場合でも、実機使用条件下では母材のクリープ寿命は溶接継手のクリープ寿命より長いとの計算結果が得られた。
- (6) 以上の結果より、母材部の微小サンプル採取痕の深さが配管肉厚の5%以内であれば、サンプル採取が配管としてのクリープ寿命に有意な影響を及ぼすことはないと推測される。

文 献

- Arisue, K., Komai, N., Tominaga, K. and Fujita, M., Relationship of long-term creep rupture strength between base metal and weldment in mod. 9Cr-1Mo steels, Joint EPRI – 123HiMAT International Conference on Advances in High Temperature Materials (2019), pp.80-89.
- Brennan, K., Brett, S. J. and Eaton-Mckay, J., Impression creep testing of aberrant grade 91 material removed from piping in service, 4th International ECCC conference (2017).
- Cipolla, L. and Gabrel, J., New Creep Rupture Assessment of Grade 91, Proc. 1st International Conference Super High Strength Steels (2005), pp.1-11.
- 金山英幸, 旭吉雅健, 小川文男, 川畑美絵, 伊藤隆基, 若井隆純, 薄板試験片を用いたサンプリングクリープ試験による改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ損傷評価法の検討, 材料, Vol.68, No.5 (2019), pp.421-428.
- Kimura, K., Creep strength assessment and review of allowable tensile stress of creep strength enhanced ferritic steels in Japan, Proc. ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference, PVP2006-ICPVT-11-93294 (2006).
- Kimura, K. and Yaguchi, M., Re-evaluation of long-term creep strength of base metal of ASME grade 91 type steel, PVP2016-63355 (2016).
- 駒崎慎一, 高温機器における劣化・損傷の検出と寿命診断, 5. 最新の劣化・損傷検出技術と寿命診断, 材料, Vol.58, No.9 (2009), pp.793-800.
- 熊谷知久, 屋口正次, 田村広治, 改良 9Cr-1Mo 鋼補修溶接部クリープ寿命予測法の開発, 第 54 回高温強度シンポジウム (2016), pp.6-10.
- Maruyama, K., Nakamura, J. and Yoshimi, K., Assessment of long-term creep rupture strength of T91 steel by multiregion rupture data analysis, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.138 (2016), 031407.
- 長澤裕之, 金谷章宏, 楠元淳一, 小林十思美, 放電サンプリング装置の開発 プラント設備の余寿命・強度評価を目的とした試料採取用装置, 検査技術, Vol.14 (2009), pp.74-77.
- 野中勇, 磯部展宏, 高温機器における劣化・損傷の検出と寿命診断, 2. ボイラ・蒸気タービンにおける劣化・損傷の検出と寿命診断, 材料, Vol.58, No.6 (2009), pp.533-539.
- Strang, A., Foldyna, V., Lenert, J., Vodarek, V. and Mayer, K. H., Prediction of the long-term creep rupture properties of 9-12%Cr power plant steels, Proc. 6th International Charles Parsons Turbine Conference, Engineering Issues in Turbine Machinery, Power Plant and Renewables, The Institute of Materials, Minerals and Mining, London (2003), pp.427-441.
- Tabuchi, M. and Takahashi, Y., Evaluation of creep strength reduction factors for welded joints of modified 9Cr-1Mo steel (P91), Proc. ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference, PVP2006-ICPVT-11-93350 (2006).
- 高橋由紀夫, 環状切欠き試験片による耐熱鋼の多軸クリープ破壊挙動の評価, 電力中央研究所研究報告, Q10027 (2011).
- Yaguchi, M., Creep life assessment method for welded joint of grade 91 steel considering heat-to-heat variations, MPA-Seminar (2018).
- 屋口正次, 金井雅之, 短時間クリープ試験データに基づく改良 9Cr 鋼クリープ余寿命の推定, 第 57 回高温強度シンポジウム前刷集 (2019), 発表予定.
- Yaguchi, M., Nakamura, K. and Nakahashi, S., Re-evaluation of long-term creep strength of welded joint of ASME grade 91 type steel, Proc. ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63316 (2016).
- Yaguchi, M., Tomobe, M., Komazaki, S. and Kumada, A., Effective portion of sample taken from USC boiler pipes to consider heat-to-heat variation of creep, Proc. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84173 (2018).

吉田公亮, 鶴田秀樹, 田淵正明, 小林謙一, 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷評価法, 第 53 回高温強度シンポジウム前刷集 (2015), pp.59-63.

References

- Arisue, K., Komai, N., Tominaga, K. and Fujita, M., Relationship of long-term creep rupture strength between base metal and weldment in mod. 9Cr-1Mo steels, Joint EPRI – 123HiMAT International Conference on Advances in High Temperature Materials (2019), pp.80-89.
- Brennan, K., Brett, S. J. and Eaton-Mckay, J., Impression creep testing of aberrant grade 91 material removed from piping in service, 4th International ECCC conference (2017).
- Cipolla, L. and Gabrel, J., New Creep Rupture Assessment of Grade 91, Proc. 1st International Conference Super High Strength Steels (2005), pp.1-11.
- Kanayama, H., Hiyoshi, N., Ogawa, F., Kawabata, M., Itoh, T. and Wakai, T., Study on creep damage assessment method for modified 9Cr-1Mo steel by sampling creep testing with thin plate specimen, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.68, No.5 (2019), pp.421-428 (in Japanese).
- Kimura, K., Creep strength assessment and review of allowable tensile stress of creep strength enhanced ferritic steels in Japan, Proc. ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference, PVP2006-ICPVT-11-93294 (2006).
- Kimura, K. and Yaguchi, M., Re-evaluation of long-term creep strength of base metal of ASME grade 91 type steel, PVP2016-63355 (2016).
- Komazaki, S., Degradation / damage measurement and life assessment of high-temperature components, V: Recent degradation/damage inspection techniques and life assessment, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.9 (2009), pp.793-800 (in Japanese).
- Kumagai, T., Yaguchi, M. and Tamura, K., A development for a prediction method of time to creep rupture of repaired weld joints of modified 9Cr-1Mo steel, 54th High Temperature Strength Symposium (2016), pp.6-10 (in Japanese).
- Maruyama, K., Nakamura, J. and Yoshimi, K., Assessment of long-term creep rupture strength of T91 steel by multiregion rupture data analysis, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.138 (2016), 031407.
- Nagasawa, H., Kanaya, A., Kusumoto, J. and Kobayashi, T., Development of electric discharge sampling equipment / Sampling equipment for the purpose of evaluating the residual life and strength of plant equipment, Inspection Engineering, Vol.14 (2009), pp.74-77 (in Japanese).
- Nonaka, I. and Isobe, A., Degradation / damage measurement and life assessment of high-temperature components, II : Boiler and steam turbine, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.6 (2009), pp.533-539 (in Japanese).
- Strang, A., Foldyna, V., Lenert, J., Vodarek, V. and Mayer, K. H., Prediction of the long-term creep rupture properties of 9-12%Cr power plant steels, Proc. 6th International Charles Parsons Turbine Conference, Engineering Issues in Turbine Machinery, Power Plant and Renewables, The Institute of Materials, Minerals and Mining, London (2003), pp.427-441.
- Tabuchi, M. and Takahashi, Y., Evaluation of creep strength reduction factors for welded joints of modified 9Cr-1Mo steel (P91), Proc. ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference, PVP2006-ICPVT-11-93350 (2006).
- Takahashi, Y., Evaluation of multiaxial creep rupture behavior of heat-resistant steels by notched bar specimens, CRIEPI report, Q10027 (2011) (in Japanese).
- Yaguchi, M., Creep life assessment method for welded joint of grade 91 steel considering heat-to-heat variations, MPA-Seminar (2018).
- Yaguchi, M. and Kanai, M., An estimation of creep remaining life of modified 9Cr steel on basis of short-term creep test data, 57th High Temperature Strength Symposium (2019), to be presented (in Japanese).
- Yaguchi, M., Nakamura, K. and Nakahashi, S., Re-evaluation of long-term creep strength of welded joint of ASME grade 91 type steel, Proc. ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63316 (2016).
- Yaguchi, M., Tomobe, M., Komazaki, S. and Kumada, A., Effective portion of sample taken from USC boiler pipes to consider heat-to-heat variation of creep, Proc. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84173 (2018).
- Yoshida, K., Tsuruta, H., Tabuchi, M. and Kobayashi, K., Creep damage evaluation method for welded joint of modified 9Cr-1Mo steel, 53rd High Temperature Strength Symposium (2015), pp.59-63 (in Japanese).