

## 論文

# ボイラ管寄せ管台溶接部から採取した 使用材のクリープ余寿命評価

(Remaining Creep Life Evaluation of Stub Tube Weldment Served in Actual Boiler)

難波 一夫<sup>\*1</sup>・厚見 直哉<sup>\*2</sup>・仲庭 正義<sup>\*3</sup>  
(K. Namba) (N. Atsumi) (M. Nakaniwa)

高温機器部材のクリープ余寿命評価は、精度の面から破壊試験による評価が望ましいが、試験片の採取が困難な場合には、間接的な劣化指標に基づく方法により評価せざるを得ない。本調査では、形状が不連続で標準サイズのサンプル採取が困難な管寄せ管台溶接部の最弱点部位からミニチュアクリープ試験片を採取し、クリープ破断試験によるクリープ余寿命評価を試みた。当該余寿命評価結果をもとに、残置した管寄せ管台が一定期点検期間の運転を全うできる上限温度を設定し、プラントを運転管理した結果、当該期間の計画外停止を回避することができた。

Although it is desirable to evaluate the creep remaining life of high-temperature equipment components by destructive testing for accuracy, when it is difficult to collect test specimens, evaluation must be conducted by method based on indirect degradation indicators. In this study, miniature creep specimens were taken from the weakest point of the pipe nozzle weldment where the shape is discontinuous and it is difficult to take standard size samples, and remaining life was evaluated by creep rupture test. Based on the results, plant operation was managed by setting upper temperature limit at which the weldment could operate for one inspection period, and as a result, unplanned shutdown during this period was avoided.

## 1. はじめに

各種高温機器部材のクリープ余寿命評価は、一般に使用材のクリープ破断試験によっておこなう。具体的には、まず、対象部位から採取したサンプルを使用条件よりも高い温度・応力条件でクリープ破断試験を実施し、破断時間を求める。そして、このクリープ破断試験条件を Larson-Miller パラメータ（以下、「LMP」と略す）などの温度・応力・時間パラメータを用いて、実機使用温度・応力条件に換算して当該条件における破断時間、すなわち、余寿命を評価する。比較的大きな部材については、採取したサンプルから標準試験片<sup>(1)</sup>に加工することが容易であり、上記の評価が可能である。しかしながら、管寄せ管台溶接部のような形状が不連続な局所部位など、標準試験片を採取することが困難な場合には、ボイドの多寡などクリープ損傷の程度に連動する間接的な指

標をもとに余寿命を評価せざるを得ない。このような余寿命評価では、仮にマスターカーブ（検定曲線）が整備されていたとしても、高々、Factor of 2であり、破壊試験の評価精度に劣後する<sup>(2)</sup>。

また、管寄せ管台は、剛体である大径厚肉配管から製作される管寄せ（胴）に、複数の小径ボイラ管を溶接接合したものである。ボイラの起動・停止・負荷変化に伴う管寄せの熱伸び変形に付随して、管台溶接部には、内圧に加え、ボイラ管の熱伸びに伴い特定の円周方向に外力が作用するため、当該部のクリープ損傷が顕著となる。このような場合、蒸気リークが懸念される箇所、すなわち、最も大きな外力が作用するピンポイントの最弱点部位からサンプルを採取することが肝要であり、当該部から採取したサンプルを用いた破壊試験によるクリープ余寿命評価が求められる。

今回、超々臨界圧（USC）ボイラの実機使用材につ

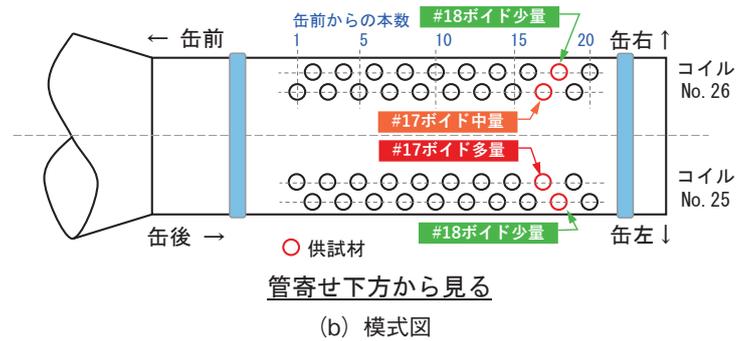
<sup>\*1</sup>電源開発株式会社  
(Electric Power Development Co., Ltd.)

<sup>\*2</sup>株式会社神戸工業試験場  
(Kobe Material Testing Laboratory Co., Ltd.)

<sup>\*3</sup>日鉄テクノロジー株式会社  
(Nippon Steel Technology Co.Ltd.)



(a) 外観



(b) 模式図

図1 3次過熱器出口管寄せの外観と模式図

いて、標準試験片の採取が困難な管寄せ管台溶接部からミニチュアクリープ試験片を採取して破壊試験によりクリープ余寿命評価する機会を得たので、その結果について報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材

供試材は当社Tプラントの定期点検時に撤去された3次過熱器出口管寄せ ( $\phi 323.9 \times t60.0\text{mm}$ , 火STPA29, 最高使用温度 $585^\circ\text{C}$ , 最高使用圧力 $28.1\text{MPa}$ ) の溶接管台 ( $\phi 45.0 \times t7.0\text{mm}$ , 火STBA29) である。建設時から撤去までの累積運転時間 (試運転を含む) は $108,987$ 時間である。当該管寄せには図1に示すように40本の管台がセットイン溶接されている。本調査では、外表面溶接部 (上止端部) から採取したレプリカの観察により、定性的にボイド個数密度が高い管台4本 (コイルNo.25の17番管, 18番管およびコイルNo.26の17番管, 18番管) を供試材として選定した。

ここで、供試材の材質である火STBA29 (Grade 92) は、USC耐圧部材への採用を目的として開発された高クロム鋼である。基本成分は $9\text{Cr}-0.5\text{Mo}-1.8\text{W}$ であり、微量のNb, V, B, Nを含有する。代表的な高クロム鋼である改良 $9\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 (Grade 91) と比較して、Moの一部をWに置換し、高温域でのクリープ破断強度のさらなる向上を図っている<sup>(3),(4)</sup>。開発当初、 $600^\circ\text{C}$ でGrade 91の1.5倍以上の強度を有するだけでなく、 $100\sim 650^\circ\text{C}$ の実用温度範囲では、高強度ステンレス鋼を凌ぐ強度を有することから、管寄せ管台への採用により、管内圧力損失の抑制、フレキシビリティ向上のみならず、トータル重量減による材料コスト低減にも貢献し

た<sup>(5)</sup>。しかしながら、その後、高クロム鋼の長時間クリープ破断強度が非安全評価であったことが判明し、 $12\text{Cr}$ 鋼 (Grade 122) とともにGrade 92の許容引張応力も下方修正された<sup>(6)</sup>。

Grade 92は高温機器への採用実績が比較的少なく、長時間のクリープ強度データも乏しいうえ、今後、長時間クリープ強度がさらに低下することも懸念される。さらに、Tプラントでは、供試材を採取した管寄せを撤去した定期点検後においても、建設時からのクリープ損傷を受けた同仕様の管寄せが複数本残置されたまま運転されている。そこで、供試材のクリープ余寿命を評価することにより、残置された管寄せ管台溶接部が次回定期点検までのクリープ余寿命を有するか否かについて評価することとした。

### 2.2 ミニチュアクリープ試験片

ミニチュアクリープ試験片の形状を図2、標準試験片 ( $\phi 6\text{mm}$ ) と比較した外観を図3に示す。ミニチュアクリープ試験片の平行部直径は $\phi 1\text{mm}$ である。種々のサイズがある標準試験片のうち $\phi 6\text{mm}$ の試験片は比較的小型であるが、ミニチュアクリープ試験片は、この標準試験片の平行部からでも採取可能なほど小さいことがわかる。

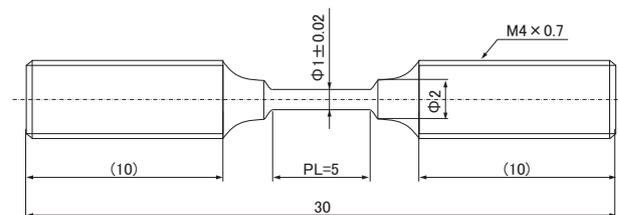


図2 ミニチュアクリープ試験片形状



図3 ミニチュアクリープ試験片の外観  
(上：標準試験片，下：ミニチュアクリープ試験片)

ミニチュアクリープ試験片は、最弱点部位からサンプルすべく、外力の最も高くなる円周方向位置を選定し、かつ、材料不連続部である溶接部（母材，熱影響部 [Heat affected zone ;以下，「HAZ」という]，溶接金属）を含むようにした。具体的には、図4に示すように管台円周方向において最大外力が作用する天側方向の管台溶接部（上止端側のHAZ）が平行部の中心となるように採取した。

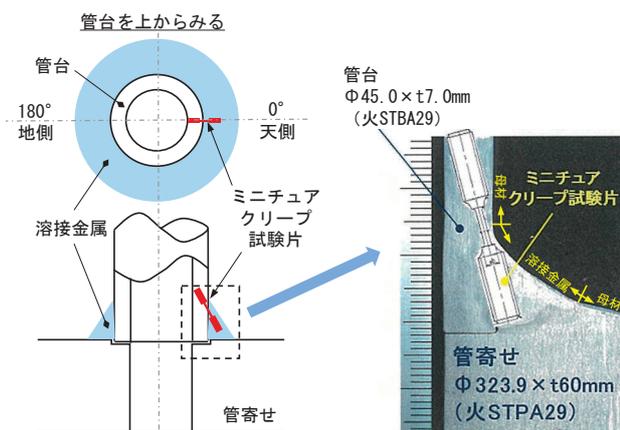


図4 管寄せ管台溶接部からのミニチュアクリープ試験片採取要領

### 2.3 ミニチュアクリープ破断試験

ミニチュアクリープ試験機の外観を図5に示す。原理は通常のクリープ試験機と同じシングル・レバー式であり、最大荷重は1.5kNである。通常、クリープ破断試験は大気中で実施するが、ミニチュアクリープ破断試験で



図5 ミニチュアクリープ試験機の外観

は、試験片の酸化減肉を防止するため、アルゴンガス気流中（純度99.99%、流量150cc/時間）で実施した。

クリープ破断試験条件を表1に示す。試験応力は100MPaとした。これは、実機での実績（当該管寄せ撤去時、磁粉探傷試験により指示模様検出 [発生割合0.1%]）を反映し、建設時から撤去までの累積運転時間（108,987時間）と運転温度（568℃）をもとに、火STPA29系鋼溶接接手の寿命評価式（99%信頼下限の回帰式）<sup>(6)</sup>により逆算して求めた応力値を採用したものである。試験温度は610℃および650℃の2条件で実施した。

### 2.4 クリープ余寿命評価法

#### 2.4.1 寿命比則の適用

破壊試験により寿命消費率を評価する手法には、パラメータ法およびアイソストレス (Iso-stress) 法がある<sup>(7)</sup>。いずれも試験データから得られた回帰線をもとに使用材の余寿命を精度よく求めることができ、余寿命診断法として確立された技術である。しかしながら、パラメータ法では4本以上、アイソストレス法では3本以上のクリープ破断試験が必要であり、結果が得られるまで比較的長時間を要する。

一方、寿命比則 (Life Fraction Rule)<sup>(8)</sup>は、式(1)のように、ある条件での使用時間を  $t_i$ 、当該条件での破断

表1 ミニチュアクリープ試験条件

試験片	試験応力 (MPa)	試験温度 (°C)	備考
コイル 17番管	100	650	ボイド多量
No.25 18番管	100	650	ボイド少量
コイル 17番管	100	610	ボイド中量
No.26 18番管	100	610	ボイド少量

時間を  $t_{ri}$  として、所定条件下での寿命消費率  $t_i/t_{ri}$  を求め、それらの累積が 1 (=100%) に達したときに最終破断すると仮定して寿命評価を行うものである。寿命比則は、評価対象である材料のクリーブ破断特性が既知であればクリーブ破断試験片 1 本でも余寿命評価が可能であり、パラメータ法等と比較して短時間で結果を得ることができる。

$$\sum \frac{t_i}{t_{ri}} = 1 \quad (1)$$

寿命比則の考え方<sup>(9)</sup>を図6のLMP線図をもとに示す。使用材は実機プラントでの使用（実機運転温度  $T_1$ 、実機運転時間  $t_1$  は既知、実機作用応力  $\sigma_1$  は未知）後、実験室において加速条件（試験温度  $T_2$ 、試験時間 [=破断時間]  $t_r$ 、試験応力  $\sigma_2$  のいずれも既知）でクリーブ破断試験を実施し、クリーブ破断させる。ここで、実機使用による寿命消費率（以下、「実機寿命消費率」という）を  $\phi_1$ 、クリーブ破断試験による寿命消費率（以下、「試験寿命消費率」という）を  $\phi_2$  とすると、式(2)に示すとおり、 $\phi_1$  と  $\phi_2$  の和である累積損傷率  $\phi$  が 1 (=100%) になるとき、すなわち、図6のLMP線図で特定の試験応力 ( $\sigma_2$ ) におけるLMP値が未使用材の主クリーブ破断曲線（平均線）と交わるときに最終破断するとしてクリーブ寿命を評価するものである。

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (2)$$

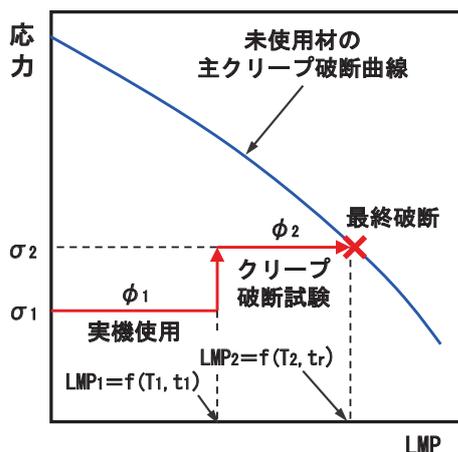


図6 寿命比則の考え方

#### 2.4.2 使用材の寿命消費率およびクリーブ余寿命の算出

未使用材を実機使用条件である応力  $\sigma_1$ 、温度  $T_1$  でクリーブ破断試験すると、その破断時間  $t_{v1}$  は、LMP式（平均式）から以下で与えられる。ここで、 $t_{v1}$  は実機使用条件におけるクリーブ破断時間である。

$$\text{LMP}(\sigma_1) = T_1 \cdot (\log t_{v1} + C) \quad (3)$$

$$t_{v1} = 10^{\{\text{LMP}(\sigma_1)/T_1 - C\}} \quad (4)$$

同様に、未使用材を応力  $\sigma_2$ 、温度  $T_2$  でクリーブ破断試験すると、その破断時間  $t_{v2}$  は、以下で与えられる。

$$t_{v2} = 10^{\{\text{LMP}(\sigma_2)/T_2 - C\}} \quad (5)$$

使用材を応力  $\sigma_2$ 、温度  $T_2$  でクリーブ破断試験すると破断時間  $t_r$  が求まることから、試験寿命消費率  $\phi_2$  は下式で表せる。

$$\phi_2 = t_r/t_{v2} \quad (6)$$

式(2)より、実機寿命消費率  $\phi_1$  は下式から求めることができる。

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 1 - \phi_2 \\ &= 1 - t_r/t_{v2} \end{aligned} \quad (7)$$

実機使用条件におけるクリーブ破断時間  $t_{v1}$  に試験寿命消費率  $\phi_2$  を乗ずることで余寿命  $L_R$  が求まる。

$$L_R = t_{v1} \times \phi_2 \quad (8)$$

余寿命  $L_R$  は、LMP平均式（破断確率50%）ベースの評価であることから、安全側評価として評価余寿命  $L_{RE}$  を下式のように定義する。

$$L_{RE} = L_R/2 \quad (9)$$

#### 2.4.3 アイソストレス法によるクリーブ余寿命評価

表1に示したとおり、ミニチュアクリーブ破断試験は応力100MPaの一条件で実施した。試験温度は2条件であるが、参考としてアイソストレス法による余寿命評価も試みた。ここで、アイソストレス法は、所定の応力下において余寿命評価したい温度よりも高い試験温度（3条件以上）でクリーブ破断試験を実施するものである。試験結果から求まる破断時間を温度との関係として直線回帰し、所定温度（実機運転温度）に外挿することで余寿命を評価することができる。

### 2.5 ポイド測定

管台溶接部のポイド量とクリープ損傷の関係を定量的に評価するため、供試管台4本の溶接部外表面（上止端部）からレプリカを採取し、ポイドの定量評価を実施した。ポイドの定量化は走査電子顕微鏡による27視野（合計1.232mm<sup>2</sup>）中のポイドの個数を単位面積当たりの指標（個数密度）として評価した。また、管台溶接部断面（上止端部）については、レーザ顕微鏡による直接観察により、一視野（258μm×258μm=6.67×10<sup>-2</sup>mm<sup>2</sup>）ごとにポイドの個数を測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 ミニチュアクリープ破断試験結果および寿命比によるクリープ余寿命評価結果

図7にミニチュアクリープ破断試験結果を示す。当初、ポイド量が多いサンプルほど破断時間が短くなると予想

したが、各温度条件とも破断時間に有意差は認められなかった。なお、温度加速条件により実機寿命消費率（ $\phi_1$ ）に若干の差異が認められるが、610℃、650℃のいずれの試験片とも90%を超過しており、クリープ寿命の末期段階にあることが確認できた。

破断した試験片（コイルNo.25 17番管）の断面マイクロ組織を図8に示す。破断位置が試験片製作時のHAZ位置に相当すること、破断部の組織が比較的微細なこと、また、後述のポイド観察結果で細粒HAZ部においてポイドの発生が顕著であったことから、細粒HAZ部で破断したものと判断される。

実機寿命消費率（ $\phi_1$ ）の最大値が94.0%であることから、最も安全側で評価するため、残存する寿命消費率（試験寿命消費率； $\phi_2$ ）を6.0%として余寿命を評価することとした。応力を一定（ $\sigma_2=100\text{MPa}$ ）とし、実機運転温度 $T_1$ をパラメータとして、残存する寿命消費

試験片	コイルNo.25 17番管 (ポイド多量)	コイルNo.25 18番管 (ポイド少量)	コイルNo.26 17番管 (ポイド中量)	コイルNo.26 18番管 (ポイド少量)
試験応力 (MPa)	100	100	100	100
試験温度 (°C)	650	650	610	610
破断時間 (h)	103.7	102.2	1461.0	1399.3
実機寿命消費率 (%)	93.9	94.0	91.4	91.8
試験片外観				

図7 ミニチュアクリープ破断試験結果

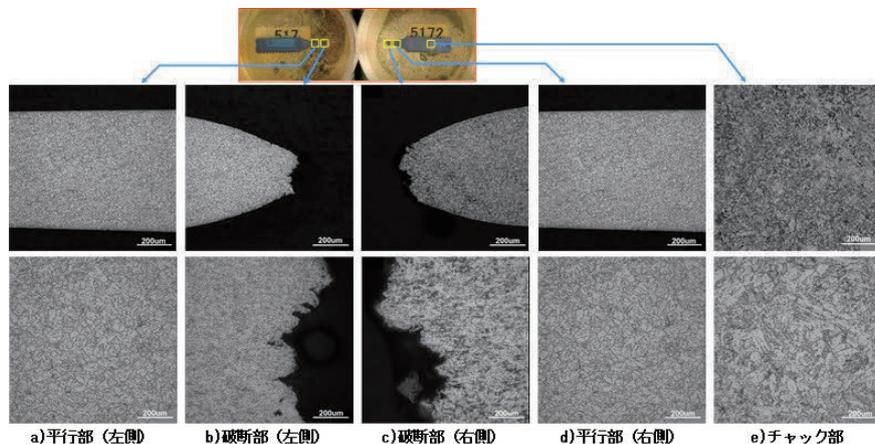


図8 破断した試験片（コイルNo.25 17番管）の断面マイクロ組織

率6.0%における評価余寿命 ( $L_{RE}$ ) を評価した結果が図9である。この図から、残置した管寄せにトラブルが発生することなく、一定期点検期間 (= 評価余寿命16,000時間) にわたりプラントを安定運転するためには、当該管寄せの運転温度上限を556°Cとして運転する必要があることがわかった。

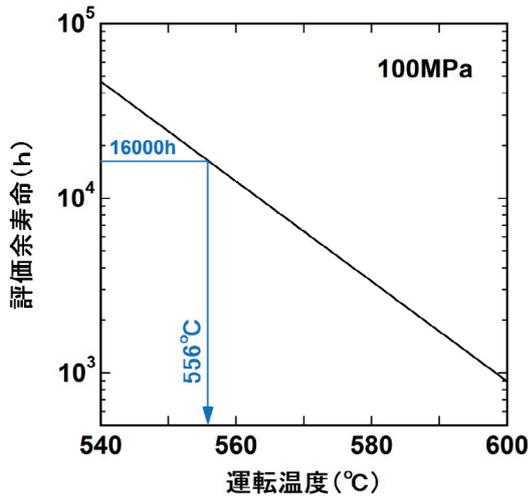


図9 寿命比則により求めた評価余寿命

3.2 アイソストレス法によるクリープ余寿命評価結果

図10に今回の試験結果に基づくアイソストレス法による余寿命評価結果を示す。本来、試験温度が3条件以上で評価すべき手法であるが、温度610°Cおよび650°Cにおける各2本のクリープ破断時間で評価を試みたものである。破断時間を常用対数で表示すると、各温度の破断時間のばらつきは極めて小さいことがわかる。これら

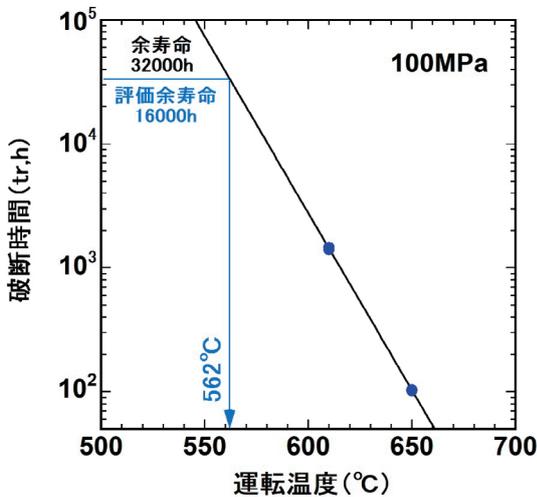


図10 アイソストレス法により求めた評価余寿命

合計4点のデータを直線近似により低温側に外挿した結果、一定期点検期間 (= 評価余寿命16,000時間) 運転するためには、当該管寄せについて562°C以下で運転する必要があると判断された。これは前節の寿命比則による評価結果と概ね整合する。本法よりも寿命比則による温度が低いため、556°Cを運転上限温度として設定することとした。

3.3 ボイド測定結果

ミニチュアクリープ試験片を採取した管台溶接部外表面のボイド評価結果を図11に示す。図7の寿命消費率の評価結果から、各試験片の実機寿命消費率 ( $\phi_1$ ) は、いずれも90~94%程度のみばらつきで評価された。一方、ボイド個数密度は65~670個/mm<sup>2</sup>であり、その最小値と最大値で1オーダーの幅があることから、必ずしもボイドの量とクリープ寿命消費率が関連しているとはいえないことがわかる。

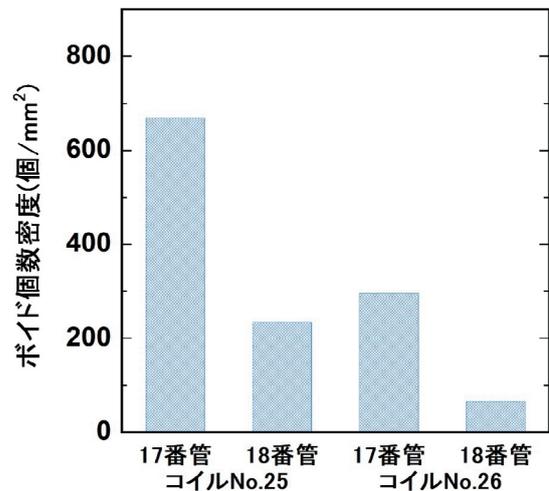


図11 管台溶接部外表面のボイド評価結果

図12にコイルNo.25 17番管およびコイルNo.25 18番管の断面ボイド分布を示す。いずれの管もボイドはHAZ細粒域 (母材近傍側のHAZ) での発生が顕著であり、深さ方向でみると外表面よりも肉厚内部で個数が多い傾向を示した。

これらのボイド定量評価結果を鑑みると、本管台の事例については、外表面のボイド量を指標とした定量的な余寿命評価が困難であると思われる。よって、定性的な評価として、外表面にボイドが発生した段階で、寿命末期相当のクリープ損傷 (残寿命10%未満) が進行していると解すべきものと判断する。

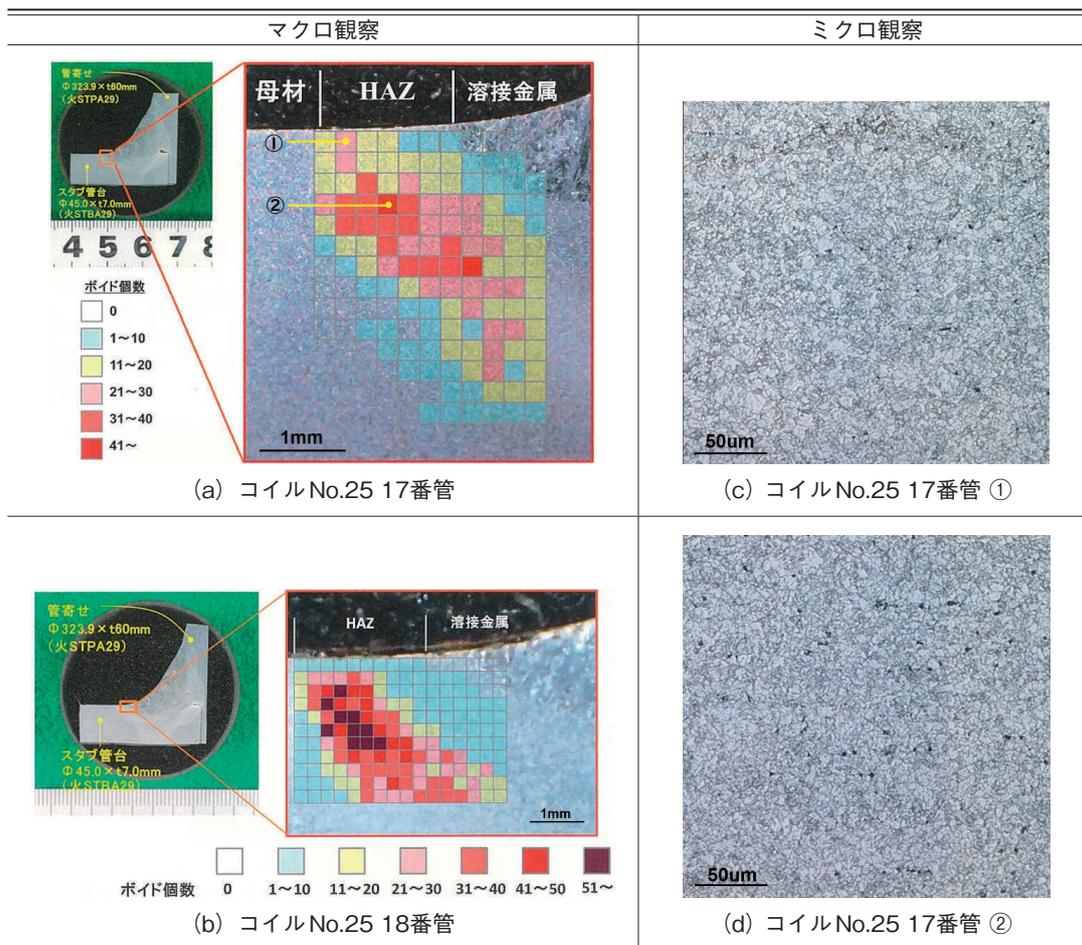


図12 管台溶接部のポイド分布

### 3.4 ミニチュアクリープ破断試験の妥当性

ミニチュアクリープ試験片の形状は、標準試験片とほぼ相似しており、これを小型化した形状である。また、単軸方向に引張応力を作用させるため、破壊モードは同一である。ただし、ミニチュアクリープ試験片のサイズが標準試験片よりも小さいため、標準試験片よりも酸化減肉による影響が大きくなることが懸念される。これは、酸化減肉による平行部の断面積減少により、当該部に作用する応力が増加するため、減肉がない場合と比較して短時間で破断することにより、余寿命を過小評価するおそれがあるためである。

ここで、図7の破断後の各試験片の外観を観察すると、いずれも変色しているものの、酸化スケールは非常に薄いと思われる。図8の断面ミクロ観察結果からも、明確な酸化スケールの形成が認められないことから、酸化減肉の影響は軽微と判断される。

アルゴン雰囲気において、同一の温度・応力条件で試

験した結果、ミニチュアクリープ試験片、標準試験片とも同等の破断時間が得られたとの報告がある<sup>(10)</sup>。また、大気中で試験した標準試験片とアルゴン雰囲気中で試験したミニチュアクリープ試験の破断時間を比較したところ、前者の破断時間の方が短いとの報告があり<sup>(10)~(12)</sup>、標準試験片であっても大気中では酸化スケールによる影響は無視できないことが示唆される。今回の試験では、サイズの標準試験片の採取が困難であったため、比較することができない。しかしながら、アルゴン雰囲気(純度99.99%)での試験であること、断面ミクロ観察で酸化スケールの形成が認められないこと、また、試験片材質が、酸化の影響を受けやすい炭素鋼・低合金鋼と比較して耐酸化性が高い高クロム鋼であることから、酸化減肉の影響が局限された試験結果を得て、適正に余寿命を評価できたものと判断する。

#### 4. まとめ

3次過熱器出口管寄せ管台溶接部の最弱点部位からミニチュアクリープ試験片を採取し、破壊試験による定量的なクリープ余寿命評価を実施した事例を紹介した。寿命評価では定期点検周期内に損傷が発生しないことをはっきりさせることが最も重要である。本調査では、使用材の余寿命評価結果をもとに、運転温度上限を設定・管理することにより、当該期間における残置管寄せのクリープ損傷を回避できることを示した。発電所では当該上限温度を管理値とすることで、次回定期点検まで恙なく運転し続け、結果としてTプラントの計画外停止を未然に回避できた。本稿がプラントの安定運転確保の一助になれば望外の喜びである。

- (1) 標準試験片のサンプリングが困難な形状・材料不連続部位である管寄せ管台溶接部から、ミニチュアクリープ試験片を採取し、クリープ破断試験に供した。
- (2) 実機作用応力を100MPaと仮定して実施したミニチュアクリープ破断試験結果をもとに、寿命比則による最安全側評価を実施したところ、実機寿命消費率は94.0%と評価された。当該結果から、残置した管寄せについて、一定期点検期間の余寿命を確保するためには、当該管寄せ温度を556℃以下で運転すべきとの指針が得られた。
- (3) アイソストレス法により、余寿命評価を試みた結果、一定期点検期間の評価余寿命を満たす運転温度は、562℃以下であり、寿命比則での評価結果とほぼ整合した。
- (4) 本調査では、外表面のポイド量とクリープ寿命消費率との相関は認められなかった。また、ポイドの発生は、外表面よりも肉厚内部で顕著であることが確認された。
- (5) 上記の余寿命評価結果をもとに、当該管寄せの運転上限温度を設定・管理した結果、残置した管寄せについて、次回定期点検までトラブルが発生することなく運転することができた。

#### 謝辞

ボイラ使用材の損傷調査および寿命比則の適用についてご指導いただきました元IHIの梶ヶ谷一郎氏に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- (1) 日本産業規格 金属材料のクリープおよびクリープ破断試験方法 JIS Z 2271 (2019)
- (2) 火力原子力発電技術協会編 発電設備の予防保全と余寿命診断 (平成13年6月)
- (3) 榊原瑞夫ら：ボイラ用高強度9Cr-0.5Mo-1.8W (NF616)鋼管 火力原子力発電 Vol 38 No.8(1987)
- (4) 保田英洋ら：フェライト系ボイラチューブNF616の開発 火力原子力発電 Vol 39 No.5 (1988)
- (5) 宮下克彦ら：橋湾火力発電所第1号ボイラ(1050MW)の計画概要 火力原子力発電 Vol.48 No.4 pp. 430-436 (1997)
- (6) 橋本正徳ら：最新データの基づく寿命評価式、許容引張応力および長手接手の溶接接手低減係数 火力原子力発電 Vol.63 No.12 pp. 1027-1031 (2012)
- (7) 電気事業法第46条の定期自主検査および同法第54条の定期検査等の運用について 通産省資源エネルギー庁資公部第81条 平成11年3月19日
- (8) R.Viswanathan 著, 増山不二光ら訳：高温機器部品の損傷メカニズムと寿命評価 日刊工業新聞社 pp. 93-96 (1993)
- (9) 難波一夫：USCボイラで使用された主蒸気管廃却材のクリープ寿命評価 火力原子力発電 Vol.67 No.6 pp. 385-392 (2016)
- (10) Kadoya et.al : Assessment of Remaining Life of Fossil Power Plant Parts by means of a Miniature Creep Rupture Test, ISIJ International Vol 30 No.10 pp. 854-861 (1990)
- (11) 金谷章宏ら：ミニチュア試験片による12Cr鋼と2.25Cr鋼のクリープ特性 日本機械学会論文集 (B編) 79巻 799号 pp. 1373-1379 (2013-3)
- (12) GarZillo et.al : A TECHNIQUE FOR THE RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF HIGH TEMPERATURE COMPONENTS BASED ON CREEP-RUPTURE TESTING ON WELDED MINIATURE SPECIMENS, Int. J. Press Ves. & Piping 66 pp. 223-232 (1996)