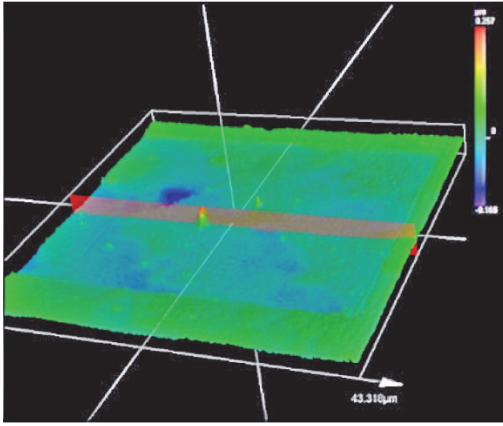


# 発電ボイラ用高強度ステンレス鋼のクリープ寿命評価技術

## Creep Life Evaluation Techniques for Creep Enhanced Stainless Steel for Power Generation Boilers



橋本 憩太\*<sup>1</sup>  
Keita Hashimoto

齋藤 伸彦\*<sup>2</sup>  
Nobuhiko Saito

有末 紘\*<sup>1</sup>  
Ko Arisue

中村 忠暉\*<sup>1</sup>  
Tadaaki Nakamura

駒井 伸好\*<sup>3</sup>  
Nobuyoshi Komai

富永 公彦\*<sup>4</sup>  
Kimihiro Tominaga

18～25%Cr を含有する高強度ステンレス鋼は、火力発電用の超々臨界圧ボイラなどの伝熱管材料として広く使用されており、クリープ寿命評価技術開発のニーズが高くなっている。三菱重工業株式会社では、微細組織に基づく加熱温度推定によるクリープ寿命評価技術を開発し、すでに実プラントへ適用している。この手法に加えて、より高精度の寿命評価を実現するために、温度推定を介さず、損傷を直接的に評価する方法として、極小サイズのクリープボイドの生成量評価による新しいクリープ寿命評価法の開発も行っている。本報では、これらの寿命評価技術の概要について述べる。

## 1. はじめに

18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼(火 SUS304J1HTB, ASME SA-213 S30432)<sup>(1)</sup>をはじめとする 18～25%Cr を含有する高強度ステンレス鋼は、高温環境下におけるクリープ破断強度及び耐腐食性に優れており、超々臨界圧(Ultra Super Critical, 以下 USC)ボイラなどにおける 600°Cを超える高温環境下の伝熱管材料として広く使用されている。高強度ステンレス鋼を伝熱管に適用した USC ボイラは、10 万時間を超えて運転しているものが多くなっており、近年、伝熱管のクリープ損傷によって蒸気漏洩した事例が複数報告されている。木村ら<sup>(2)</sup>は、18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼の長時間クリープ試験を実施し、そのクリープ破断強度が ASME(The American Society of Mechanical Engineers)の許容応力策定時に想定していた強度よりも低い可能性があることを報告している。USC ボイラの伝熱管では多数の高強度ステンレス鋼(千本以上/ユニット)が使用されているため、ひとたび漏洩が発生すると復旧に時間がかかるなど影響も大きい。電力の安定運用のためにも、漏洩を未然に防止する必要があり、クリープ余寿命を精度よく評価できる技術の開発ニーズが高まっている。

本報では、高強度ステンレス鋼を対象とした寿命評価技術として、三菱重工業株式会社(以下、当社)が開発した寿命評価手法パッケージ MLAS-EX (Mitsubishi Metallurgical Life Assessment System for EXchanger Tubes)のうち、微細組織に基づく加熱温度推定<sup>(3),(4)</sup>、及び極小サイズのクリープボイド生成量によるクリープ寿命評価技術<sup>(5)</sup>の概要を紹介する。

\*1 総合研究所 強度・構造研究部

\*2 総合研究所 強度・構造研究部 主席チーム統括 工博

\*3 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員 工博, 技術士(金属部門)

\*4 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主幹技師

## 2. 微細組織に基づく加熱温度推定による寿命評価技術

高強度ステンレス鋼伝熱管のクリープ寿命(破断時間)は、材質グレードと温度及び作用応力に依存する。材質グレード別のクリープ破断特性(温度、作用応力及び破断時間の関係)は既知であり、作用応力は内圧と管寸法から求めることができ、また、当該伝熱管の累計運転時間も把握できている。したがって、運転中の伝熱管の温度がわかれば、計算によってクリープ余寿命の算出が可能であるが、ボイラ炉内では燃焼ガス流れや輻射熱の影響もあり、伝熱管の局所的な温度を計算により精度よく推定することは困難である。また、1000℃以上の燃焼ガスの中、伝熱管温度を熱電対などで常時計測することも難しいため、非破壊的な方法で、ボイラ運転中の当該伝熱管の温度を推定できるようになることが望ましい。

18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼は、実用温度域(約 650℃)において加熱時間とともに図 1 に示すような微細組織の変化が生じる<sup>(2),(6)~(10)</sup>。加熱初期の約 1000 時間では、Cu 相や Nb(C, N)が結晶粒内に、 $M_{23}C_6$ が結晶粒界上に生成する。その後、10000 時間前後で Nb(C, N)が徐々に NbCrN に変化し、結晶粒界上に比較的粗大な  $\sigma$  相や NbCrN が析出する。数万時間以上では、結晶粒界上の  $\sigma$  相(主に Fe と Cr で構成される金属間化合物)や NbCrN が顕著に粗大化すると共に、結晶粒界近傍に析出物が存在しない Precipitate-Free Zone (PFZ)が生じる。また、実用温度域の範囲内であれば、伝熱管の場所により加熱温度が違っていても組織変化の進展傾向は概ね同等であるが、 $\sigma$  相については高温、又は長時間加熱されるほど、粗大化が顕著であることが報告されている<sup>(6)</sup>。そこで、加熱に伴う  $\sigma$  相のサイズ変化に着目し、 $\sigma$  相の粒径(円相当径)と温度及び時間との関係を求めることで、 $\sigma$  相粒径から加熱温度を推定する技術を開発した。

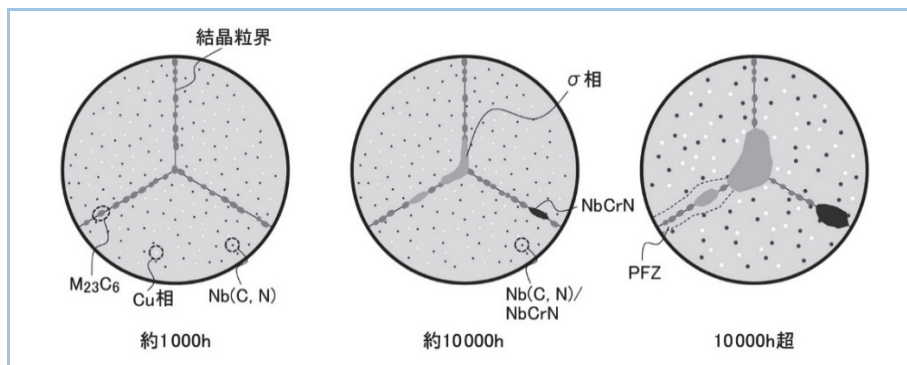


図1 約 650℃における 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼の微細組織変化

図 2 に 650℃及び 700℃で最長 120000h の時効熱処理を実施した 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼の SEM 観察組織の例を示す。グレーのコントラストで観察される比較的粗大な析出物が  $\sigma$  相であり、高温、長時間加熱された材料の方がより  $\sigma$  相が粗大化していることがわかる。但し、 $\sigma$  相の粒径は同じ組織像の中でも均一ではない。これは加熱中の様々なタイミングで  $\sigma$  相の核生成が生じるためであると考えられる。すなわち、粒径の小さな  $\sigma$  相は、加熱後半で核生成し、十分に成長していないものと考えられる。この小さい  $\sigma$  相を評価に含めると、加熱時間に対して短い時間で成長した粒子まで含めてしまうため、予測精度の低下につながる懸念される。そこで、図 3 に示すように粒径が大きい  $\sigma$  相のみを抽出して平均粒径を算出することで、上述した問題を回避することを考えた。長時間時効熱処理材を対象に、温度と加熱時間のパラメータである HJP (Hollomon-Jaffe Parameter)と粗大な  $\sigma$  相のみを抽出して求めた平均粒径の関係から作成したマスターカーブを図 4 に示す。実プラントへの適用に際しては、運転時間は既知であるため、計測した  $\sigma$  相の平均粒径から、加熱温度を推定することができる。

実験室で時効熱処理を行った供試材を用い、実際の加熱温度と作成したマスターカーブによる推定温度の比較を図 5 に示す。本マスターカーブによる加熱温度の推定誤差は、実際の加熱温度に対し概ね  $\pm 10$ ℃以内であり、微細組織に基づいて高精度で加熱温度を推定できることを

確認した。また、レプリカ法との組合せにより、フィルムに転写した微細組織の光学顕微鏡観察でも同等の精度で加熱温度の推定が可能であるため、実プラント内で短時間での多点評価を行うことができる。本手法による加熱温度推定結果は、実プラントでの熱電対による温度計測結果とも整合していることを確認しており、既に複数の USC ボイラ伝熱管の寿命評価へ適用している。

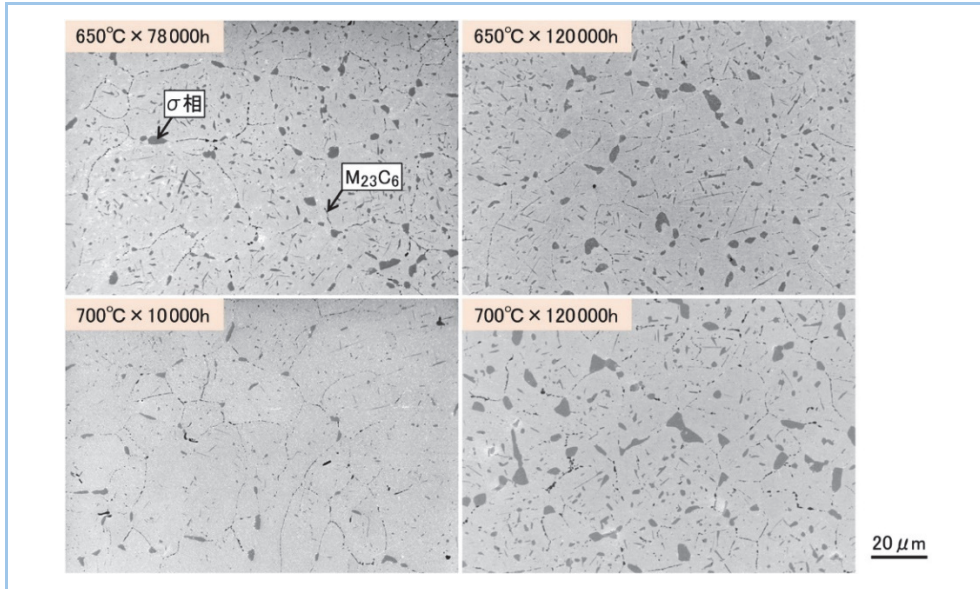


図2 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼の時効熱処理後の SEM 像

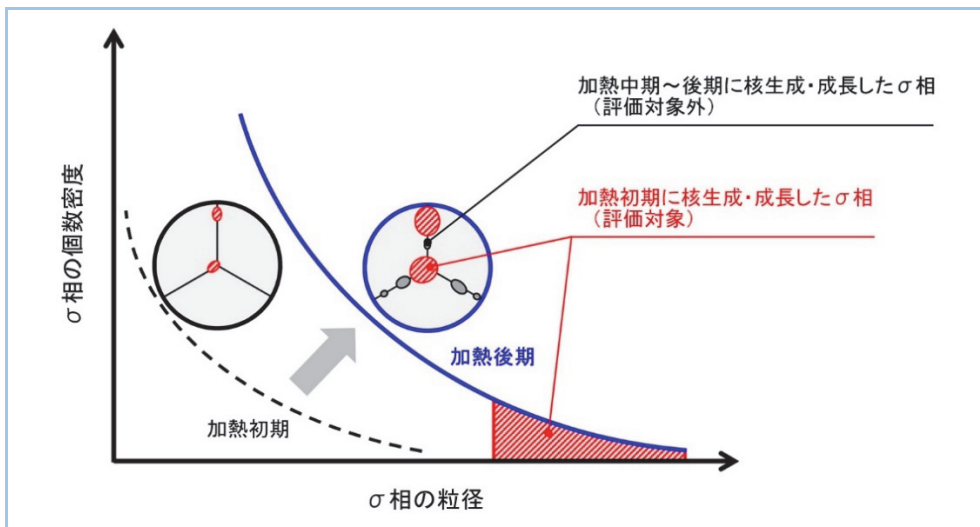


図3 粒径に基づく評価対象のσ相選別のイメージ

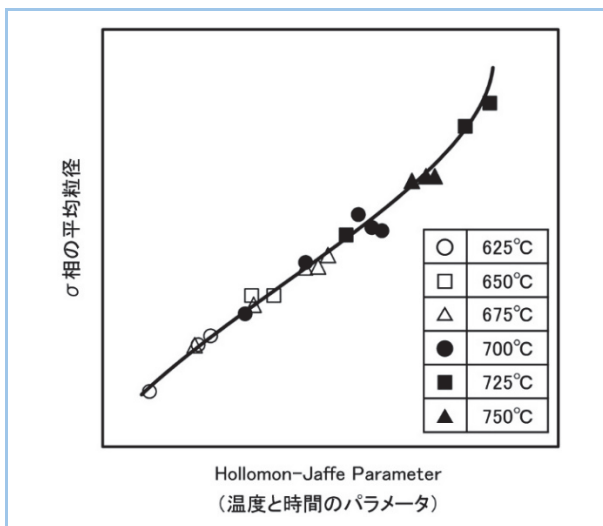


図4 加熱温度推定マスターカーブ

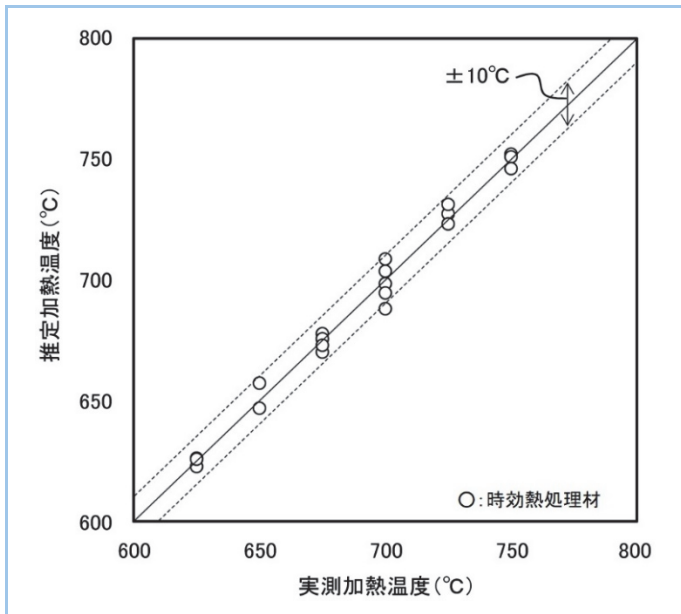


図5 実際の加熱温度と推定した加熱温度の比較

### 3. サブミクロンボイド生成量による寿命評価技術

より精度良く診断するためには、上述した温度推定などを介さず、使用された当該材料そのもののクリープ劣化状況を直接把握し、クリープ余寿命を評価できることが望ましい。しかしながら、高強度ステンレス鋼は、一般的なフェライト系耐熱鋼と比較してクリープ変形抵抗が高いため、噴破までのクリープ損傷に伴う伝熱管の膨出量(クリープ変形量)が小さく、また、クリープ損傷末期までのクリープボイド生成量も少ないことから、それらを指標にしたクリープ損傷評価は困難であるとされてきた。当社は、図6に示すように高強度ステンレス鋼のクリープ寿命中期に析出物に隣接して生じるサブミクロンサイズのクリープボイド(サブミクロンボイド)が存在することを発見したことから、これに着目した寿命評価技術(サブミクロンボイド法)を開発した。

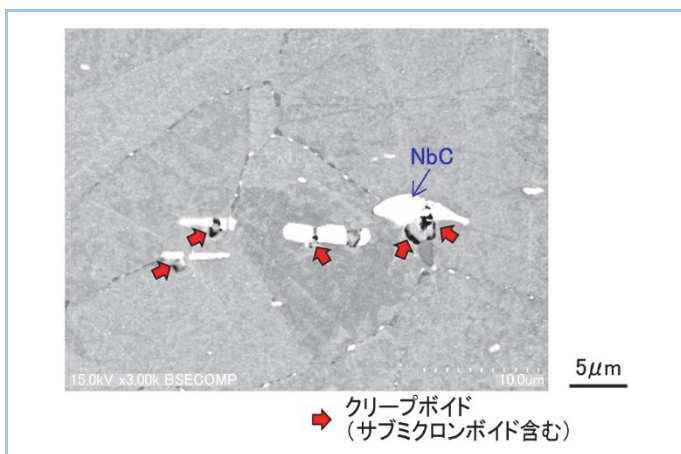


図6 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼のクリープボイド近傍のSEM像

サブミクロンボイドの観察において、一般的な組織観察前の表面処理プロセスである鏡面研磨及び腐食液によるエッチングを行った場合、析出物の脱落が多数生じ、サブミクロンボイドの観察は困難となるため、最適な研磨方法を開発してこれを適用した。観察に際しては、従来の光学顕微鏡では観察時の空間分解能が不足するため、より空間分解能が高いSEM(走査型電子顕微鏡)やレーザー顕微鏡を適用することで、サブミクロンボイドの観察を可能とした。また、レプリカ法との組合せにより、伝熱管表面からフィルムに転写した微細組織の観察でも同等の精度で非破壊的にサブミクロンボイドの評価が可能であることを確認した。レプリカ法でサブミクロンボイドをSEM



及びレーザー顕微鏡で観察した結果を図7に示す。

サブミクロンボイド個数密度及びクリープ寿命消費率の関係から作成したマスターカーブと、USC ボイラで約 10 万時間使用後に抜管した 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N 鋼にサブミクロンボイド法を試適用して推定したクリープ寿命消費率を破壊試験のそれと併せて図8に示す。サブミクロンボイド法と破壊試験のそれぞれで推定したクリープ寿命消費率の差は 3~5%と僅かであり、実プラントにおいてもサブミクロンボイド法でクリープ寿命消費率を高精度に推定できることを確認した。

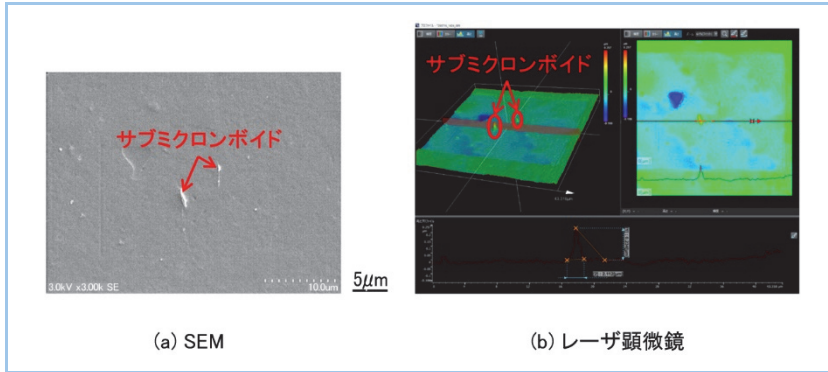


図7 レプリカ法によるサブミクロンボイドの観察像

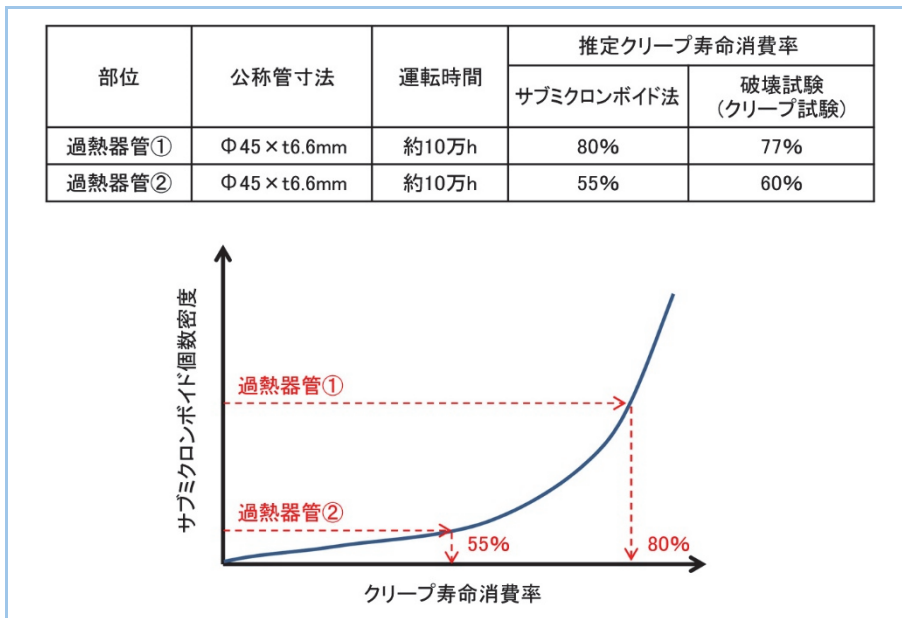


図8 サブミクロンボイド個数密度とクリープ寿命消費率の関係と実プラント使用材のクリープ寿命消費率推定結果

#### 4. まとめ

余寿命診断のニーズが高まっている高強度ステンレス鋼について、2 種類のクリープ寿命評価技術を開発した。微細組織からクリープ寿命の評価に必要な伝熱管の加熱温度を±10℃以内の精度で推定できる技術を開発し、実プラントへ適用している。クリープ寿命中期以降に析出物に隣接して生じるサブミクロンサイズのボイド生成量に着目した新たな手法(サブミクロンボイド法)は、直接的なクリープ損傷状況に基づいて寿命を評価できることが特徴である。本手法においても、微細組織に基づく加熱温度推定による寿命評価法と同様に、レプリカ法との組合せにより実プラント内での多点評価が可能である。なお、当社では高強度ステンレス鋼の寿命評価手法として、この他にも外径計測による手法、サンプル抜管による破壊試験などのラインナップをそろえており、実機の状況、お客様のニーズに基づき最適なソリューションを提供し、プラントの安定運用、稼働率向上に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 榎木義淳他, ボイラ用高強度 18-8 系新ステンレス鋼管 (ST3Cu) の開発, 住友金属 Vol. 43, No. 6 (1991), p. 34-43
- (2) Kimura, K. et al., "Microstructural Evolution During Long-term Creep and Creep Rupture Strength of Super 304H Austenitic Stainless Steel" 11th International NIMS-MPA-IfW Workshop on Advances in Materials for Future Power Engineering, Germany, October 2016
- (3) 有末紘他, 特許第 6853212 号
- (4) Hashimoto, K. et al., Metal Temperature Estimation in High-Strength Austenitic Stainless Steels through Precipitation Analysis, Proc. of 10th int. conf. Advances in Materials, Manufacturing, and Repair for Power Plants (2024-10), p.335
- (5) 齋藤伸彦他, 特願 2022-055622
- (6) Kimura, K. et al., "Creep Deformation Property and Creep Life Evaluation of Super304H" Pressure Vessel Technology, 144, 2(2022), 021507
- (7) Kobayashi, S. et al., "THE DEGRADATION OF LONG-TERM CREEP STRENGTH AND MICROSTRUCTURE EVOLUTION IN SUPER304H" Proc. 3rd International ECCO Conf. Rome, Italy, May. 2014
- (8) Kimura, K. et al., "Creep strength property and microstructural evolution during long-term creep of 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N (KA-SUS304J1HTB) austenitic steel" Proc. APCFS2016, Toyama, Japan, September 2016
- (9) Sawada, K. et al., "Precipitation behavior during aging and creep in 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N steel" Materials Characterization, 141(2018), pp. 279-285
- (10) Sawada, K. et al., "Microstructural changes and creep-strength degradation in 18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N steel" Materials Characterization, 178(2021), 111286