

## 長期使用された高クロム鋼配管溶接継手のクリープ損傷評価

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 中村 拓弥  
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 杉本 健二  
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 安藤 秀彰

キーワード : 高クロム鋼  
溶接継手  
経年材  
クリープ損傷  
余寿命

Key Words : High chromium steel  
Weld joint  
Used material  
Creep damage  
Remaining life

### Evaluation of creep damage of long-term used high chromium steel piping weld joint

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department  
Takuya Nakamura, Kenji Sugimoto and Hideaki Ando

#### Abstract

In high chromium steel (9Cr steel) used for the steam piping in the ultra super critical pressure thermal power plants, there are concerns about the decrease in strength of weld joint due to long-term use and the occurrence of steam leak. Therefore, the sample was collected from the steam piping that has been used for about 120,000 hours, and the state of creep damage was evaluated.

As a result of the creep rupture tests, the creep strength of the used material was close to the average creep strength of the virgin material and it was evaluated that it has a remaining life of about 160,000 hours. Furthermore, creep interrupted tests were carried out and the process of creep damage was investigated by measuring the hardness and the voids of the test pieces.

## 1. はじめに

超々臨界圧(蒸気圧力 24.1MPa 以上、蒸気温度 593℃以上)火力発電プラントの蒸気配管に使用されている高クロム鋼(9Cr 鋼)においては、溶接継手を起点とした損傷事例が報告されており、長時間領域のクリープ強度が当初の想定よりも低いことが明らかになっている<sup>1)</sup>。現状の高クロム鋼溶接継手のクリープ損傷評価は、クリープ破断試験データをもとに作成された寿命評価式<sup>2)</sup>による安全側の評価を基本としている。しかし、試験データは、バラツキが大きく、最長 5 万時間程度と実機での使用時間に比べて短いことから、寿命評価式による評価と実機配管の損傷状態の乖離が大きい事例も確認されている。また、溶接継手外面を対象にレプリカ法によるボイド観察も実施されるが、高クロム鋼の場合は肉厚内部からクリープ損傷が進行することが多いため、最大損傷部位を評価できない問題がある。

一方、実機で長期使用された使用材を対象としたクリープ試験により直接的にクリープ損傷を評価できるが、その調査報告事例はごく限られている。

そこで本研究では、超々臨界圧火力発電プラントにて約 12 万時間使用された高温再熱蒸気管からサンプルを採取し、クリープ破断試験を実施して余寿命を評価するとともに、クリープ試験によりクリープ損傷過程を調査した。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材および試験片

供試材は、超々臨界圧火力発電プラント(定格出力 70 万 kW)にて約 12 万時間使用された改良 9Cr 鋼製の高温再熱蒸気管直管長手溶接継手から採取した。高温再熱蒸気管の仕様および蒸気条件を表1に、供試材(母材部)の化学成分および熱処理条件を表2に示す。供試材の化学成分および熱処理条件は規格<sup>3)</sup>の範囲を満足していた。

試験片は、上記供試材の肉厚中央部から、溶接金属を中心として左右の HAZ(Heat Affected Zone: 熱影響部)を含むように標点間直径 10mm、標点間長さ 50mm の寸法で採取した。試験片の採取位置および寸法を図1に示す。

### 2.2 クリープ破断試験

クリープ破断試験は試験応力または試験温度を実機使用条件より高めた加速クリープ条件で行われるが、このうち使用材について応力加速試験を行うと試験応力が高いほど未使用材の破断時間に対する使用材の破断時間低下割合が大きくなることが多くの材料で認められている<sup>4)</sup>。このため、本研究では、試験応力は、実機の使用応力とし、試験温度を加速させるアインストレス法を採用した。表3にクリープ破断試験条件を示す。試験応力は次に示す周応力の平均径式を用いて算出した。

$$\sigma = p \left( \frac{D}{2t} - 0.5 \right) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$  は周応力[MPa]、 $p$  は蒸気圧力[MPa]、 $D$  は外径[mm]、 $t$  は肉厚[mm]である。試験温度は試験期間(1年以内)を考慮して 670℃、680℃、690℃、700℃の 4 条件を設定した。なお、クリープ破断試験は JIS Z 2271-2010 に基づいて実施した。

表1 高温再熱蒸気管の仕様および蒸気条件

管仕様	材質	火SCMV28NT SR (改良9Cr鋼)
	外径	711.2mm
	肉厚	39mm
蒸気条件	圧力	4.52MPa
	温度	596℃
使用時間		約12万時間

表2 供試材(母材部)の化学成分および熱処理条件<sup>3)</sup>

	化学成分(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Nb
供試材	0.09	0.35	0.44	0.006	0.001	0.14	0.2	0.08
規格値	0.08~0.12	0.20~0.50	0.30~0.60	≤0.020	≤0.010	≤0.40	0.18~0.25	0.06~0.10
	化学成分(wt%)				熱処理条件			
	Cr	Mo	N	Al	焼ならし		焼き戻し	
供試材	8.44	0.98	0.047	0.01	1050℃×30min		780℃×30min	
規格値	8.00~9.50	0.85~1.05	0.030~0.070	≤0.04	1040℃~1095℃		730℃以上	

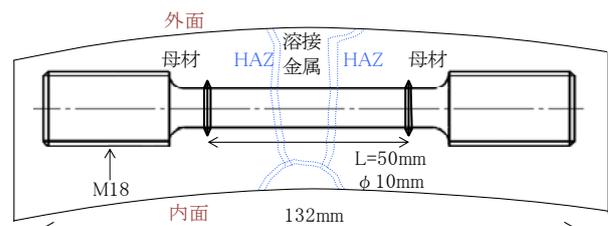


図1 試験片採取位置および寸法

### 2.3 クリープ中断試験

クリープ損傷過程を調査するため、クリープ破断試験のうち、最も実機に近い 670℃条件の破断時間をもとに 20%、40%、60%、80%のクリープ時間で中断させるクリープ中断試験を JIS Z 2271-2010 に基づいて実施した(表3)。

### 2.4 金属組織観察およびボイド個数密度計測

各試験片断面観察用のサンプルは、試験片中心軸を含む面で半裁し、観察面を耐水研磨紙にて #800 まで研磨した後、ダイヤモンド研磨、アルミナ研磨にて鏡面に仕上げ、塩酸・ピクリン酸混合液によりエッチングして作製した。SEM 観察前には断面を白金蒸着した。各試験片断面の金属組織を日本電子(株)製の SEM(JSM-6010LA)を用いて観察し、光学倍率 500 倍の 16 視野(0.711mm<sup>2</sup>)の中で観察されたボイド数からボイド個数密度を算出した。

### 2.5 硬さ計測

硬さ計測は、各試験片断面の中心線上をミットヨ(株)製マイクロビッカース硬さ計(HM-200)を用い、試験力 HV0.3(2.942N)、押込み時間 10 秒、計測間隔 0.25mm で JIS Z 2244-2009 に基づいて計測した。各試験片の端部 10mm の母材領域は計測間隔 0.5mm で計測した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 クリープ破断試験

クリープ破断試験結果を新材の平均的なクリープ強度(寿命評価式平均線)とともに図2に示す。各試験片の破断時間は、寿命評価式の平均線に概ね近い結果が得られており、供試材のクリープ強度は新材の平均的なクリープ強度と同程度と推測された。破断試験片の外観写真を図3に示す。破断位置は全て HAZ 破断であった。クリープ破断絞りを図4に示す。破断絞りは 30%前後であり、破断時間が短いほど延性的になる傾向がみられた。

### 3.2 余寿命評価

アイソストレス法にもとづき、各試験片の破断時間と温度の間に回帰線を作成して求めた余寿命評価結果を図5に示す。評価温度 596℃における余寿命は約 16 万時間と評価された。

表3 クリープ試験条件

	応力	温度	試験時間
クリープ破断試験	39MPa (周応力)	670℃	破断まで
		680℃	
		690℃	
		700℃	
クリープ中断試験	39MPa (周応力)	670℃	破断時間×20%
			破断時間×40%
			破断時間×60%
			破断時間×80%

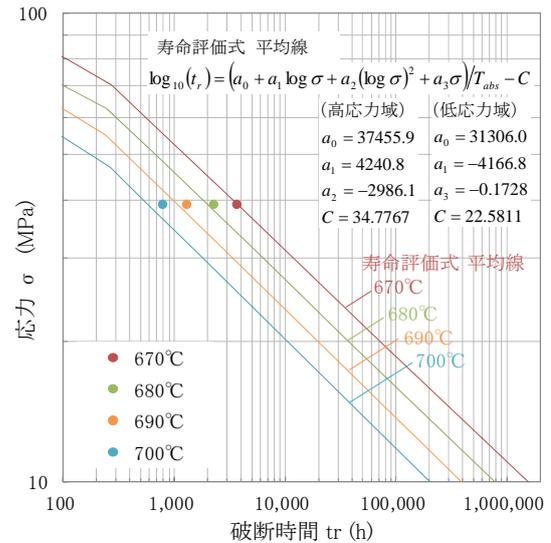


図2 破断時間と寿命評価式(平均線)の比較

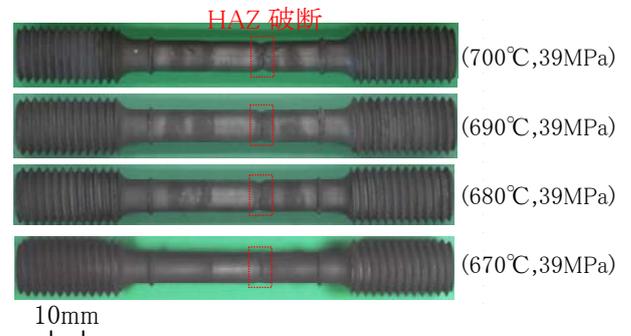


図3 破断試験片の外観写真

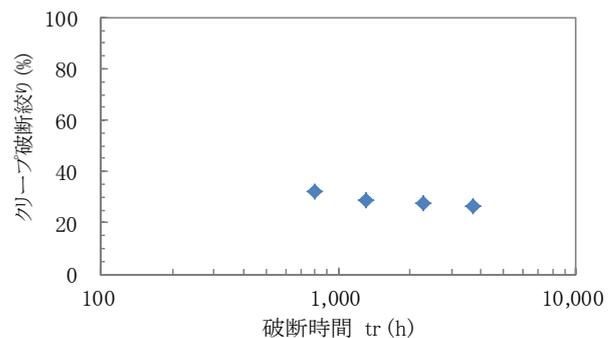


図4 クリープ破断絞り

### 3.3 金属組織観察およびボイド個数密度計測

中断試験片(中断時間 80%)断面金属組織のSEM写真を図6に示す。母材や溶接金属に比べて、HAZに多くのボイドが認められた。各試験片 HAZ の最大ボイド個数密度とクリープ損傷率との関係を図7に示す。ここで、供試材のクリープ損傷率  $D_c$  を実機使用時間と寿命評価式平均線の比から求めたうえで、各中断時間のクリープ損傷率を設定した。HAZ におけるボイド個数密度はクリープ損傷の進行とともに11個/mm<sup>2</sup>( $D_c$ 18.6%)、34個/mm<sup>2</sup>( $D_c$ 34.9%)、180個/mm<sup>2</sup>( $D_c$ 51.2%)、200個/mm<sup>2</sup>( $D_c$ 67.4%)、755個/mm<sup>2</sup>( $D_c$ 81.6%)と計測され、クリープ前半に比べて後半において、より増大していた。

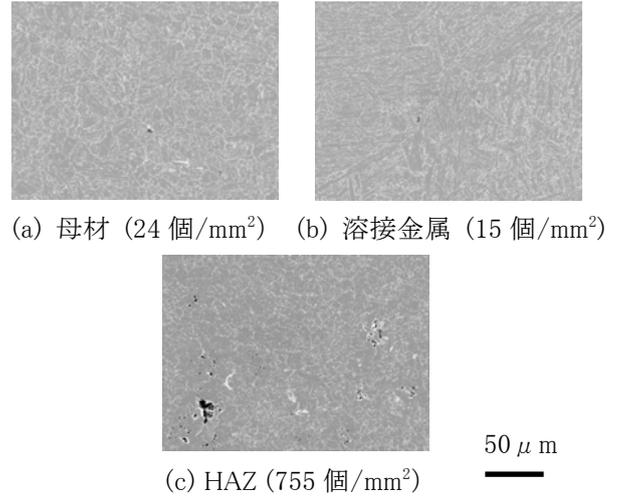


図6 金属組織観察写真(中断時間 80%)

### 3.4 硬さ計測

各試験片中心線上の硬さ分布計測結果を図8に示す。クリープ損傷の進行とともに HAZ の軟化は著しく、HAZ 最軟化部の硬さは約 130HV であった。また、母材部および溶接金属部においても 30HV 程度の軟化が進行していた。硬さとクリープ損傷率の関係を図9に示す。母材および溶接金属はクリープ前半で軟化が進行し、後半の軟化は緩やかであった。一方、HAZ はクリープ後半においても軟化が進行しており、軟化進行はボイドの増大との関連が強いと推測された。

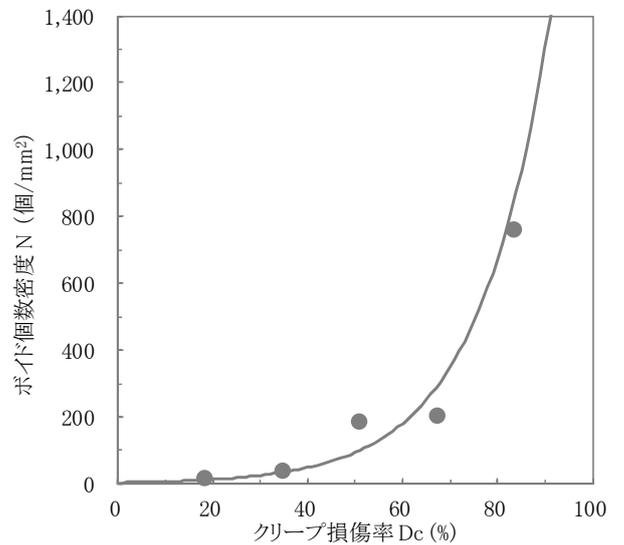


図7 ボイド個数密度とクリープ損傷率の関係

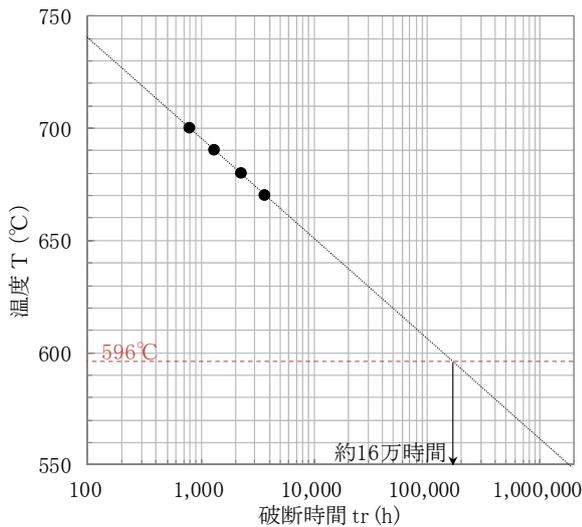


図5 クリープ破断試験に基づく余寿命評価

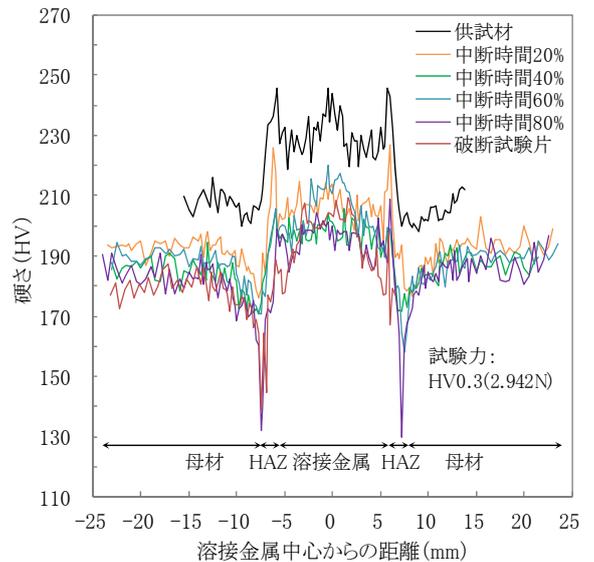


図8 硬さ計測結果

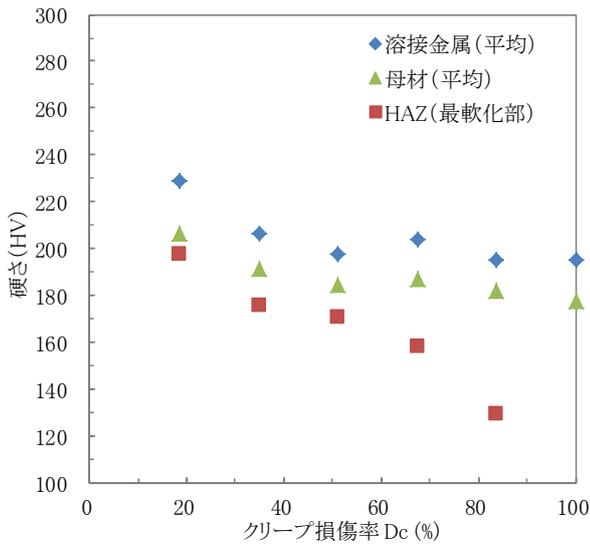


図9 硬さとクリープ損傷率の関係

#### 4. まとめ

超々臨界圧火力発電プラントにおいて長期(約 12 万時間)使用された高クロム鋼配管直管長手溶接継手から採取した試験片を対象にクリープ破断試験を実施した。試験の結果、供試材のクリープ強度は新材の平均的なクリープ強度に近く、約 16 万時間の余寿命を有すると評価した。さらに、クリープ中断試験を実施して、クリープ損傷過程を調査した結果、HAZ に多くのボイドが確認され、それらはクリープ損傷の進行とともに増大していた。HAZ においてはクリープ後半においても軟化が進行しており、軟化進行はボイドの増大との関連が強いと推測した。

#### 【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

#### 【参考文献】

- 1) 長井誠示, 山崎壮一, 屋口正次, 実機高クロム鋼溶接部の損傷状態および余寿命評価に関するデータベース構築-第 1 報, 電力中央研究所報告 Q14002, (2014.8)
- 2) M. Yaguchi, K. Nakamura, S. Nakahashi, “Re-Evaluation of Long-Term Creep Strength of Welded Joint of ASME Grade 91 Type Steel” Proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63316, 2016
- 3) 経済産業省, 「発電用火力設備の技術基準の解釈」, p129, (2013.5)
- 4) 金丸修, 清水勝, 大場敏夫, 八木晃一, 加藤雄平, 服部健司, 長期使用ボイラ配管の内圧クリープ破断強度と Iso-stress 法による寿命予測, 火力原子力発電, (1990.3)