

# ボイラ用高 Cr 系伝熱管の非破壊検査・計測による クリープ寿命評価法の検討

梶ヶ谷一郎<sup>\*1</sup> 大黒 光喜<sup>\*2</sup> 田中丸天兵<sup>\*3</sup>  
*Kajigaya Ichiro Daikoku Kouki Tanakamaru Tempei*

高 Cr 系鋼を採用した火力発電プラントの高温長時間の使用においては、材料の所期の許容引張り応力に対して母材および溶接部のクリープ破断強度の低下が報告されている。特に火炉内など高温部に設置されている高 Cr 系鋼製伝熱管は過酷な条件下で使用されていることから、クリープ寿命評価法を検討し、プラントの健全性評価の一助とすることが要望されている。本稿では、現地などで有効な寿命評価法として「水蒸気酸化スケール厚さ計測」および「伝熱管の硬さ計測」に基づく評価法を挙げ、検査計測法を含めた具体的な寿命評価法（計算例）を平易に解説する。

キーワード：USC ボイラ、高 Cr 系鋼、クリープ破断強度、伝熱管、クリープ寿命評価、  
水蒸気酸化スケール、硬さ計測、ポータブル硬さ計、UCI 法

## 1. はじめに

我が国の大容量火力発電用プラントでは、環境負荷低減、熱効率の向上の観点から、蒸気条件を向上させた超々臨界圧（USC）貫流ボイラが数多く建設されている。この USC ボイラでは材料について適切な選定と建設費の低減が求められ、高価なステンレス鋼の使用量を大幅に減らした CSEF 鋼（Creep Strength Enhanced Ferritic）と称されるボイラ用高強度高 Cr 系鋼（以下高 Cr 系鋼と呼ぶ）が広範囲に採用されている。また、これらの USC ボイラの建設と相まって産業用・自家発電の火力発電ボイラにおいても、材料費低減の観点から高 Cr 系鋼を採用したボイラが多く建設されてきている。この産業用・自家発電ボイラにおいても USC ボイラと同様にすでに 10 万時間以上の長時間運用に

及んでいるユニットがある。しかし、高 Cr 系鋼の長時間の使用では、設計所期の材料の許容引張り応力に対して母材および溶接熱影響部（HAZ）の強度の低下が報告されており<sup>(1)(2)</sup>、ボイラの保守の面から主要耐圧部のクリープ寿命評価が重要な課題となっている。この課題への取り組みとして我が国では、経済産業省の所轄によるクリープ強度評価委員会（SHC、RHC 委員会）や、電気事業連合会の主導による「高クロム鋼クリープデータ評価検討会」が進められてきている。

特に火炉内や後部伝熱部などの高温加熱域に設置される過熱器、再熱器伝熱面は、高いメタル温度での使用や高温腐食の環境におかれるなど過酷な条件下で使用されている。また、伝熱面は多くの伝熱管で構成されることから、たとえ 1 本の伝熱管に損傷が生じた場合でもユニットの停止が避

\*1：フェロー 博士（工学）

\*2：検査事業部 技術部 NDE グループ 課長

\*3：計測事業部 材料試験部 福浦グループ

けられず経済的な負担も大きい。このため「9Crボイラ管余寿命評価研究会」（代表：元国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）八木晃一氏）が設立され、種々のプラントから長時間使用された伝熱管が採取され水蒸気酸化スケール挙動を含むボイラ伝熱管の寿命評価法に関する基礎研究が進めてられてきている<sup>(3)(4)</sup>。当社は研究会の設立の当初から活動に参加すると同時に実際に長時間使用された伝熱管の広範囲な調査を担当する機会を得た。また、研究会と並行して寿命評価の際の基礎となる材料面の検査計測法について研究開発を独自に進めてきている。本稿では高Cr系鋼の非破壊によるクリープ寿命評価法について代表的な2方法を挙げ、検査計測方法も含めた具体的な評価法を平易に解説する。

## 2. 伝熱管のクリープ寿命評価法と取り組み課題

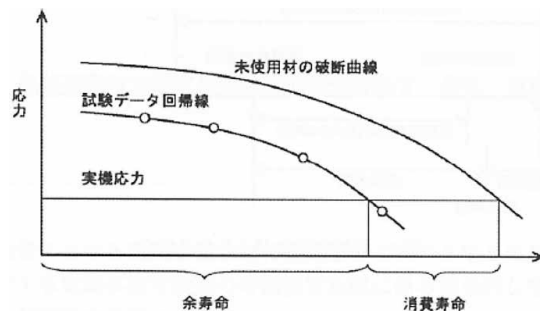
### 2.1 クリープ破断試験法（破壊法）によるクリープ寿命評価法

初めに従来から広く実施されているクリープ破断試験に基づく伝熱管の寿命評価方法の基礎について整理しておくこととする。クリープ破断試験法は、パラメータ法、アイソストレス法と呼ばれる破壊試験法で代表されている。一般に伝熱管抜管材から小径の単軸クリープ試験片を製作し、例えば数点以上のクリープ破断試験結果による寿命評価が行われている。この方法は「火力発電設備における電気事業法施工規則に規定する定期事業者検査の時期変更承認に係る標準的な審査基準例及び申請方法等について」<sup>(5)</sup>の中で、具体的な余寿命診断に関する指針が例示されている。

#### (1) パラメータ法

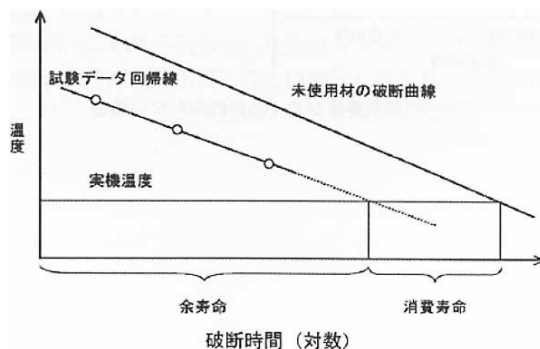
診断部位からサンプルを4本以上採取し、応力または温度を変えクリープ破断試験を行う。ここで得られたデータから応力とラーソンミラーパラメータ回帰線を作成し余寿命を求める方法であ

る。図1にパラメータ法の概念図<sup>(5)</sup>を示す。このパラメータ法による余寿命精度をより向上させる方法として新しい予測法なども提案されている<sup>(6)</sup>。



ラーソンミラーパラメータ

図1 パラメータ法の概念図<sup>(5)</sup>



破断時間（対数）

図2 アイソストレス法の概念図<sup>(5)</sup>

#### (2) アイソストレス法

診断部位からサンプルを3本以上採取し、実機応力で温度を変えクリープ破断試験を行う。ここで得られたデータから温度と破断時間との回帰線を作成し余寿命を求める方法である。本方法の概念を図2に示す<sup>(5)</sup>。

上記(1)、(2)のクリープ破断試験法は、比較的精度の高い評価が可能であることから、プラントの定期検査期間の延長に対する耐圧部の標準的な評価方法として広く採用されている。しかし何れの方法も、伝熱管の抜管や復旧に伴う工事費用の増加が避けられないこと、クリープ破断試験による評価期間が長くなることなどから、現地で

の短期間内の評価には適さないことがある。破壊試験に代わるクリープ寿命評価法の主なものとして次の2ケースの非破壊試験・計測結果を応用した寿命評価法が挙げられる。

## 2.2 伝熱管内面の水蒸気酸化スケールの厚さに基づくクリープ寿命評価法の概要と課題

伝熱管内面の水蒸気酸化スケールの厚さからメタル温度を予測して伝熱管のクリープ寿命を評価する方法(以下、「水蒸気酸化スケールによるクリープ寿命評価法」と略す)は早くから検討されてきている。この方法は、運用期間において内面スケール剥離・浮き上がりなどがなく、密着した内面スケールが生成されていることが評価に当たったの前提条件となる。よって本評価法を適用する際には、初めに内面スケールの剥離・浮き上がり有無の確認が不可欠と言える。本稿では超音波探傷試験(UT)による管内面のスケールの剥離・浮き上がりに対する確認方法とその後のクリープ寿命評価法について、計算例を含め3.1項に報告する。

## 2.3 伝熱管の硬さ計測結果に基づくクリープ寿命評価法の概要と課題

最近の、マルテンサイト微細組織のクリープ劣化過程に関する知見から、未使用時の硬さとクリープ破断試験時の硬さ計測結果を基本としたいわゆる「硬さ変化比率」を用いた寿命評価法<sup>(7)</sup>が提案されている。また、高Cr系鋼に対して7万時間にも及ぶ長時間クリープ破断試験が実施され、破断時間に応じた硬さの変化が報告されている<sup>(8)(9)</sup>。

これらの先行の研究データを活用することによりクリープ寿命評価法としての適用が期待できる。ただし、ここでの硬さ計測値は、伝熱管を抜管後、ビッカース硬さ試験機による実験室での計測結果を基本としていることに留意する必要がある。

。一般に現地での伝熱管硬さ計測は、小径管が対象であり、かつ剛性の低い構造物であることから計測精度の検討が重要と言える。今日では、光学法(くぼみ直視型)や超音波接触インピーダンス法(くぼみ深さ測定型)による現地用硬さ計などが開発され、特に前者は管寄や大径配管など剛性の高い構造物の計測において実用化されている。そこでこれらの硬さ計測法に着目し、実際に現地で伝熱管の硬さを計測する際の計測精度向上の検討を実施した。本稿では伝熱管の硬さ計測結果に基づくクリープ寿命評価法(以下、「硬さ計測によるクリープ寿命評価法」と略す)について3.2項に報告する。

## 3. 代表的なクリープ寿命評価法(非破壊法)

### 3.1 水蒸気酸化スケールによるクリープ寿命評価法

#### 3.1.1 UTによる内面スケールの剥離・浮き上がりの検討

実機で使用された発電ボイラー用合金鋼鋼管(火STBA28)の伝熱管内面に生成した水蒸気酸化スケールの断面マクロ観察結果を図3に示す。低合金鋼や高Cr系鋼の内面スケール厚さは、厚さのほぼ等しい内層スケールと外層スケールから

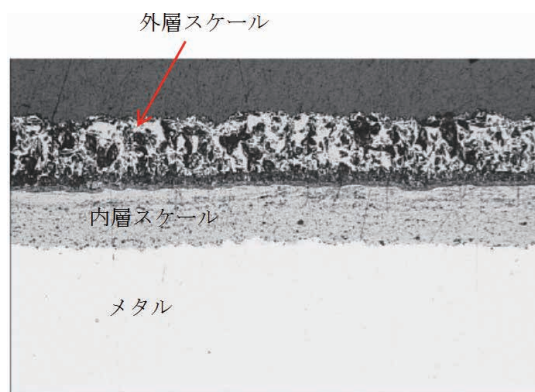


図3 実機で使用された火STBA28の伝熱管内面に生成した水蒸気酸化スケール

構成されていることが確認されている。このうち内層スケールはFe、Crを含むスピネル型酸化スケール、外層スケールはマグネタイトを主成分とする酸化スケールで構成されている。これまで従来の低合金鋼では内面スケールの剥離や浮き上がりは大きな問題となっていないが、高Cr系鋼のような高強度のフェライト鋼では数万時間以内の比較的短期間の運用においても、スケールの剥離や浮き上がりが生ずる場合があることが報告されている<sup>(10)(11)</sup>。このため初めにUTによる内面スケールの付着形態の確認試験を実施した。

剥離・浮き上がりを確認するために、人為的にスケール剥離部を加工した試験片を用いて実験室的にB-イメージ法により剥離の状況を検証した。計測要領および画像の例を図4に示す。ここでB-イメージ法とは波形の増幅強度をカラー諧調で変換し、探触子の移動ごとにカラーバーを積み重ねて作成した画像を示している。スケールの剥離と浮き上がり有無は、スケールが全体的に厚く付着している中で、断続的に薄い付着となっている画像から判断が可能である。

スケールの剥離と浮き上がりの区別は当該部を含む周方向、軸方向操作などにより総合的な見地からの判断が必要なことがわかった。

### 3.1.2 UTによるスケール厚さ計測と伝熱管のクリープ寿命評価法

スケール剥離・浮き上がりが生じていない場合は、図5に示すとおりUTにより界面エコーと底面エコーの時間差(Δt)に音速を乗ずることによりスケール厚さを精度よく計測することができる。(ただし、この計測値は、内層スケール(以下メタル厚さロスと呼ぶ)と外層スケールの双方を合わせた全層スケール厚さであることに留意する必要がある。)

次に、スケールの厚さ計測結果からのクリープ破断寿命評価方法の手順について具体例を挙げて以下に示す。

#### (1) ステップ1: 使用時間、高温酸化減肉量(スケール厚さ)からのメタル温度の推定

スケールの成長挙動は式(1)に示す放物曲線(parabolic rate row)に従うことがしばしば観察されている。伝熱管のメタル温度を一定とすると、スケール成長は放物線的成長挙動を示し次式で与えられる。

$$d^2 = K_p \cdot t \quad (1)$$

ここで d : メタル厚さロス (cm)

前述のように通常は全層スケール厚さの半分(1/2)とする。

K<sub>p</sub> : 放物線減肉速度定数 (cm<sup>2</sup>/s)

t : 使用時間 (s)

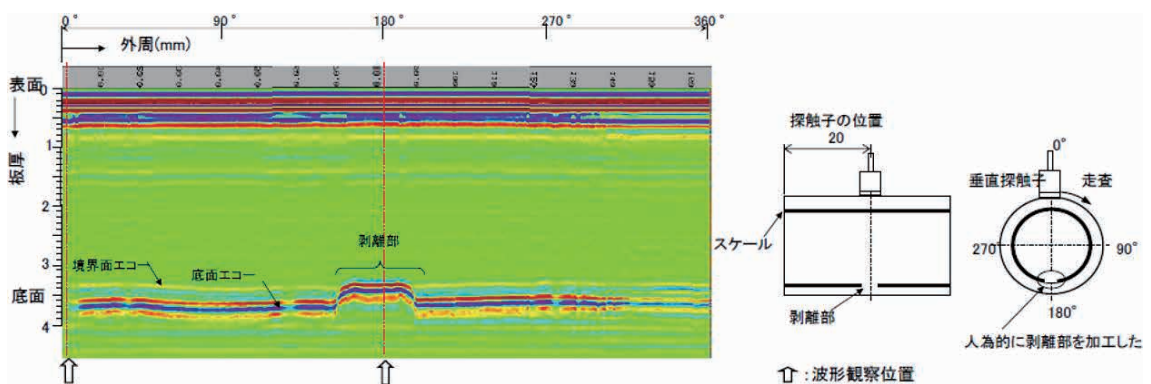
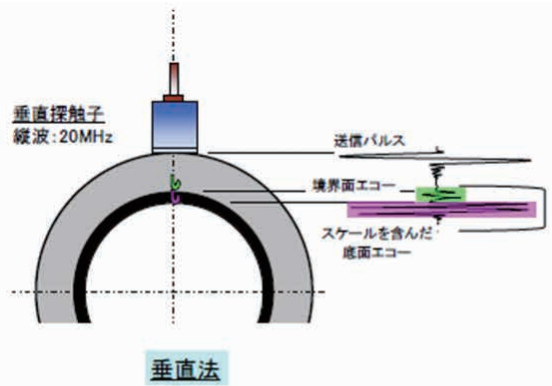


図4 内面スケール剥離・浮き上がりの検証試験結果





黄枠:境界面エコー



試験片No	時間(μ sec)		スケール厚さ(μ m)	
	界面エコー	底面エコー	UT法	マクロ結果
TP1	2.91	3.02	326	320~350
TP2	2.96	3.06	296	300~330
TP3	2.92	3.03	326	300~360

界面エコー:母材だけの底面エコー  
底面エコー:スケールを含んだ底面エコー

図5 UTによるスケール厚さの計測例

メタル厚さロスと、図6に示すKpから伝熱管の全使用時間における平均的なメタル温度を推定することができる。なお、Kpについて種々の実験値が報告<sup>(12)(13)</sup>されているが、ここでは米国 Electric Power Research Institute (EPRI) の研究報告書<sup>(13)</sup>記載の図を用いた計算例を示す。実機使用材の実験値がある場合は、これを使用することが推奨される。(図6には、各種材料のKpがメタル温度(絶対値)を関数としたアレニウスプロットで示されている。)

9Cr鋼伝熱管の余寿命計算の一例を以下に示す。

- ・伝熱管スケール厚さ計測時のユニット使用条件、管仕様は以下と仮定する。

管の計測時までの使用時間 t : 75,000h  
(=2.7×10<sup>8</sup>s)

管の仕様 : φ50.8×3.0 (火STBA28)

運用時の管の内圧 P : 5MPa

メタル厚さロス d : 400μm

9Cr1Mo鋼の場合

$$\text{Log}_{10}K_p = -10.19 \{10^3/T(K)\} - 0.115 \quad (2)$$

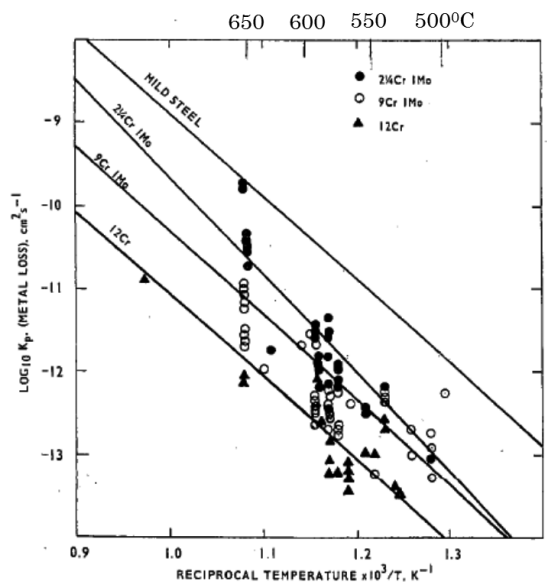


図6 放物線減肉速度定数とメタル温度の関係<sup>(13)</sup>

式(1)から $K_p$ を求め、さらに $K_p$ から伝熱管の平均的なメタル温度 $T_m$ を予測することができる。

メタル厚さロス0.04cm、使用時間75,000hとすると、

$K_p = d^2/t = 5.9259 \times 10^{-12}$  (cm<sup>2</sup>/s)となる。図6の式(2)から平均的なメタル温度 $T_m$ は637℃となる。

## (2) ステップ2: クリープ寿命評価法

次に管の内圧によるフープ応力は次式で求める。

$$\sigma = P(D/(2 \times t_{bt}) - \alpha) \quad (3)$$

ここで  $\sigma$  : フープ応力 (MPa)

$P$  : 内圧 (MPa)

$D$  : 管の外径 (mm)

$t_{bt}$  : 管の肉厚 (mm)

$\alpha$  : 係数 (ここでは平均径公式採用として $\alpha=0.5$ とする。)

よってフープ応力 $\sigma$ は式(3)から39.8MPaとなる。

材料のクリープ破断強度はクリープ破断曲線や強度評価式を用いて求めることができる。

例えばクリープ破断強度式が次式で与えられている場合について求める。

$$\begin{aligned} & (T_m + 273.15)(C + \text{Log}t_r) \\ & = a_0 + a_1 \cdot \text{Log}\sigma + a_2 \cdot (\text{Log}\sigma)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $T_m$  : メタル温度 (℃)

$t_r$  : クリープ破断時間 (h)

$a_0, a_1, a_2, C$  : 定数

$\sigma = 39.8, a_0 = 26,364.6, a_1 = -3,530.1,$

$a_2 = -65.1, C = 17.33$  とすると

材料の使用温度におけるクリープ破断強度として $t_r \doteq 177,000$ hが求まる。

調査時までの使用時間は既知であることからクリープ寿命消費率(Lc)は $75,000/177,000 \times 100 \doteq 42.4\%$ となる。

また、余寿命 $t_{\text{remain}}$ は $177,000 - 75,000 = 102,000$ hとなる。

## 3.2 硬さ計測によるクリープ寿命評価法

### 3.2.1 硬さ計測方法の検討

実験室におけるビッカース試験機などによる硬さ測定に比べ、現地等において伝熱管の硬さを計測する場合(ここでは抜管(破壊)せず外面から直接計測する場合を示す)、測定の精度について十分な検証が必要と言える。特にボイラ現地における硬さ計測は、計測環境、伝熱管の構造・配置などの要因により、実験室に比べてデータのばらつきが生じやすいという課題があった。さまざまな伝熱管の形状やサイズに対して信頼性の高い硬さデータを得ることができれば、この結果を応用することによりクリープ寿命評価法としての応用が期待できる。そこでクリープ寿命評価法の検討に先だって、ボイラ現地での適用が有望視されている2種類のポータブル硬さ計を用いて、従来から抜管材に対して実験室で実施されてきたビッカース試験機による計測値との精度比較を実施した。

#### (1) 使用したポータブル硬さ計

図7、図8に各ポータブル硬さ計の構成を示す。

##### ・光学法(くぼみ直視型)による計測装置(以下「光学法」と呼ぶ)の計測原理

実験室のビッカース試験機を現地に持ち出せるように改良したものであり、従来のビッカース試験機と同様にダイヤモンド圧子によって形成されたくぼみを光学的に計測して硬さを算出する。プローブにはCCDカメラが搭載されており、ダイヤモンド圧子を通し、圧痕を直接観察することができる。

##### ・超音波接触インピーダンス法(くぼみ深さ測定型)による測定装置(以下「UCI法」(Ultrasonic Contact Impedance Method)と呼ぶ)の計測原理

従来のビッカース式硬さ計と異なり、圧痕の大きさを観察して硬さを算出するのではなく、共振周波数の変化により試験機が自動で圧痕の

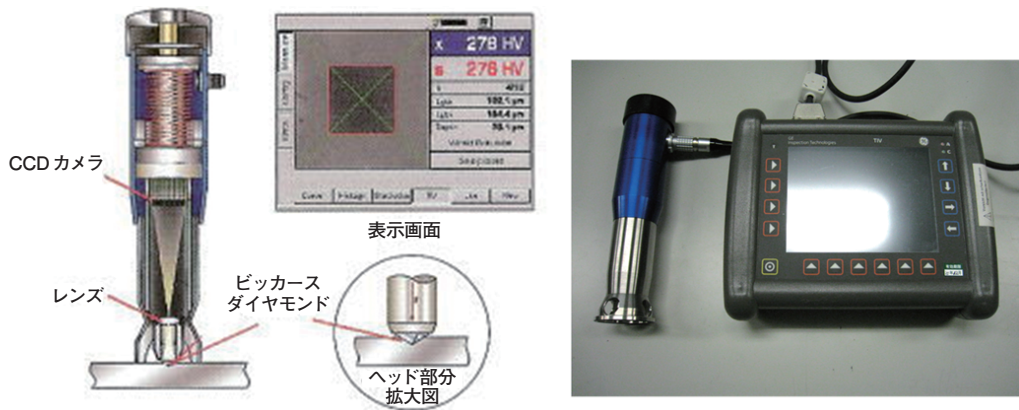


図7 光学法（くぼみ直視型）による計測装置の構造と外観

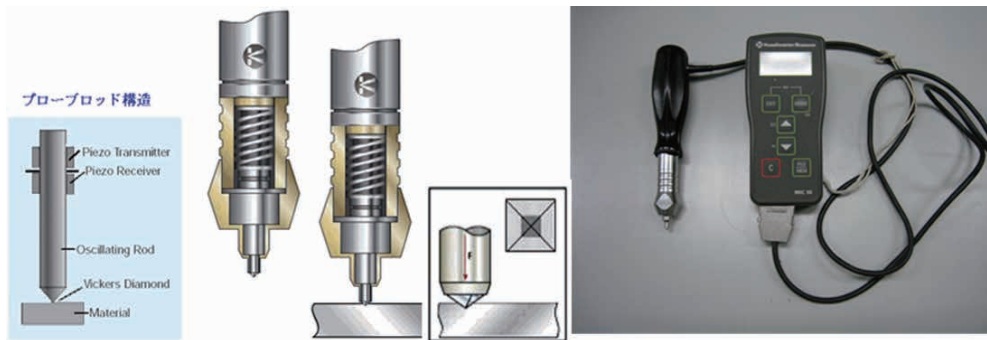


図8 超音波接触インピーダンス法（くぼみ深さ測定型）による測定装置の構造と外観

面積を求めて硬さを算出する。ビッカースダイヤモンド圧子はプローブの先端に取り付けられている。

## (2) 試験項目および試験材

各ポータブル硬さ計による計測は、あらかじめ各試料の断面表面近傍の硬さをビッカース試験機で計測しておき、それぞれの結果を比較することにより評価した。試験材の仕様を表1に示す。また、比較試験においては、配管表面仕上げ形状の

違いによる計測値のばらつきの比較、キャリブレーション方法および計測対象部の曲率が計測に与える影響比較（試験材形状の概略と曲率の関係を図9に示す）の3条件について広範囲な試験を実施した。ここでは、伝熱管の硬さ計測時に特に考慮すべき「計測対象部の曲率が計測に与える影響」について報告する。

表1 試験材の仕様

試験材	標準成分	外径 (mm)	標準硬さ (Hv)
基準片	鉄鋼材	-	200Hv
火STBA28	9Cr-1Mo-Nb-V	Φ50.8	200Hv
火STBA22	1.25Cr-0.5Mo	Φ32.0	130Hv

備考(1) 試験材に対しては実験室でビッカース試験機により予め測定して標準硬さとした。

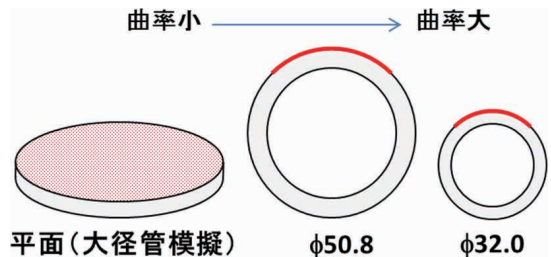


図9 各計測サンプルの曲率

### (3) 試験結果

各計測サンプルに対する硬さ計測結果を表2に示す。

光学法による計測値は曲率が大きいと平板のビッカース試験機の値より平均値が低い値となり、標準偏差が大きくなった。UCI法による平均値は、ビッカース試験機の値とほぼ同程度であったが、光学法による計測と同様に曲率が大きいと標準偏差は大きくなった。図10に光学法による硬さ計測値のヒストグラム、図11にUCI法による硬さ計測値のヒストグラムをそれぞれ示す。光学法の平面計測結果では計測ピークがビッカース試験機の硬さ値と重なっている。しかし、曲面の

測定結果では山形の分布幅が広がっており、硬さのピークがビッカース試験機の硬さ値より低い方にシフトしている。UCI法は平面、曲面ともに山形分布ピークを示し、ピークがビッカース試験機の硬さ値と重なっている。

表2 各計測サンプルの曲率

硬さ計	単位	試験材 (HV5の数値)		
		基準片 (200HV)	φ50.8 (200HV)	φ32 (130HV)
光学法	HV (平均値)	198.8	183.9	118.2
	標準偏差	3.9	14.5	9.1
UCI法	HV (平均値)	199.7	198.1	127.8
	標準偏差	5.7	13.5	9.5

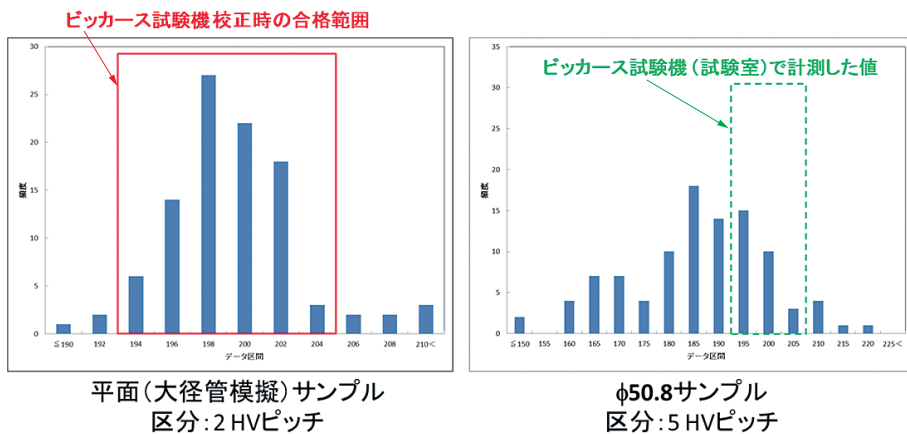


図10 光学法(くぼみ直視型)による計測装置の硬さ計測値の分布

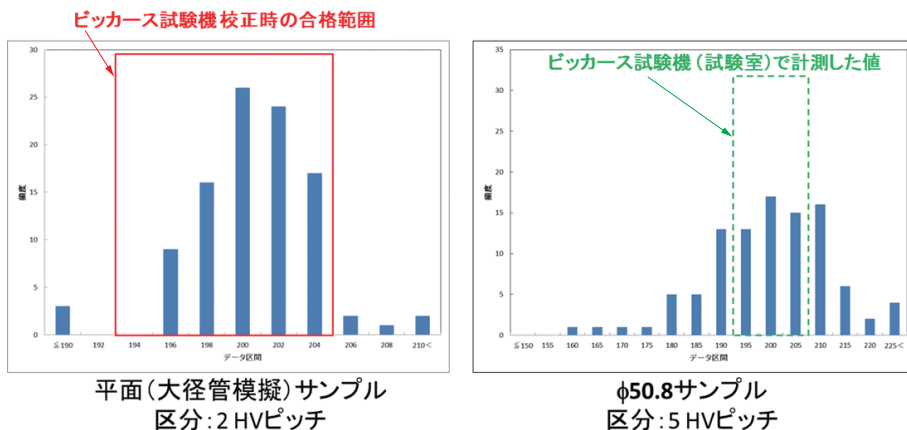


図11 超音波接触インピーダンス法(くぼみ深さ測定型)による硬さ計測値の分布



#### (4) 光学法と UCI 法の試験結果のまとめと考察

光学法による計測装置は曲率が大きい試験材で硬さ値が低くなる（圧痕が大きくなる）傾向が認められた。曲率の大きなサンプルはプローブ軸が安定しにくいいため、試験荷重時の圧痕画像の記録においてばらつきが生じ、硬さが低く計測されたと考えられる。

UCI 法は曲率の影響が光学法に比べ小さく、ビッカース試験機の硬さ値とヒストグラムのピークが一致している。また、光学法による計測装置に比べ圧痕の大きさが安定しているため、硬さ平均値がビッカース試験機とよく一致したものと考えられる。

以上の比較試験結果から光学法は、曲率の大きな配管（小径管）表面では硬さが低く計測されるため、小径管の硬さ計測には安定して荷重を負荷できる治具の開発・作製が必要と考えられる。一方、UCI 法は平面と小径管表面の両方でビッカース硬さ試験機と同等の計測値が得られたことから、狭隘部などにおける計測に適すると言える。ただし、計測者自身により圧痕深さを確認できないことから、事前に管の曲率の影響について比較検証試験を実施しておくことが必要である。

ボイラ現地での適用が有望視されている 2 種類のポータブル硬さ計を挙げビッカース試験機による計測結果と比較した。この結果、光学法と UCI 法では、構造上・機能上の相違があるが、これらの特徴を考慮して計測することにより、実験室で

のビッカース試験機による計測結果と同等の計測精度を維持できるとの見通しが得られた。

#### 3.2.2 硬さ計測結果によるクリープ寿命評価法

次に伝熱管の硬さ計測結果を用いた伝熱管の寿命評価方法について一例を以下に示す。

ここでは、文献<sup>(8)</sup>に与えられている硬さ変化比を基本とした寿命評価法について示す。すでに実機での任意（中間）期間における硬さデータを取得している場合や、クリープ破断試験結果との相関が事前に取得されている場合は、これらのデータを用いて解析することにより、さらに精度の高い寿命評価が可能と考えられる。

- ・ 寿命評価時のユニット使用条件、管仕様は以下と仮定する。

管の計測時までの使用時間  $t$  : 73,000 (h)

管の仕様 :  $\phi 50.8 \times 3.8$  (火 STBA28)

運用時の管の内圧  $P$  : 5.5 (MPa)

ビッカース硬さ計測結果（評価時点） $H$  : 188Hv

表 3 および図 12 に文献<sup>(8)</sup>に報告されているクリープ破断試験結果とゲージ部における材料のビッカース硬さ計測結果から作成したクリープ寿命比と硬さ変化比率の関係を示す（ここでは初期の硬さ  $H_0$  を 210Hv としている）。初期硬さとの比  $H/H_0$  は  $188/210=0.895$  となる。

$H/H_0=0.895$  として図 12 からクリープ寿命比  $L_c (=t/t_p \times 100)$  は 61% となる。

使用時間  $t$  は 73,000h であるから、管の全寿命は  $73000/0.61 \approx 120,000h$  となる。

表 3 Gr91 のクリープ寿命比と硬さ変化比率の関係<sup>(8)</sup>

TP. No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
観察時間経過(h)	0	400	1000	3000	10000	20000	30000	50000	70000
クリープ寿命比( $t/t_r$ )	0.00	0.01	0.01	0.04	0.14	0.29	0.43	0.71	1.00
硬さ(Hv)	235	235	235	235	232	232	227	200	185
硬さ変化比率 (対初期値) $H/H_0$	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.85	0.79

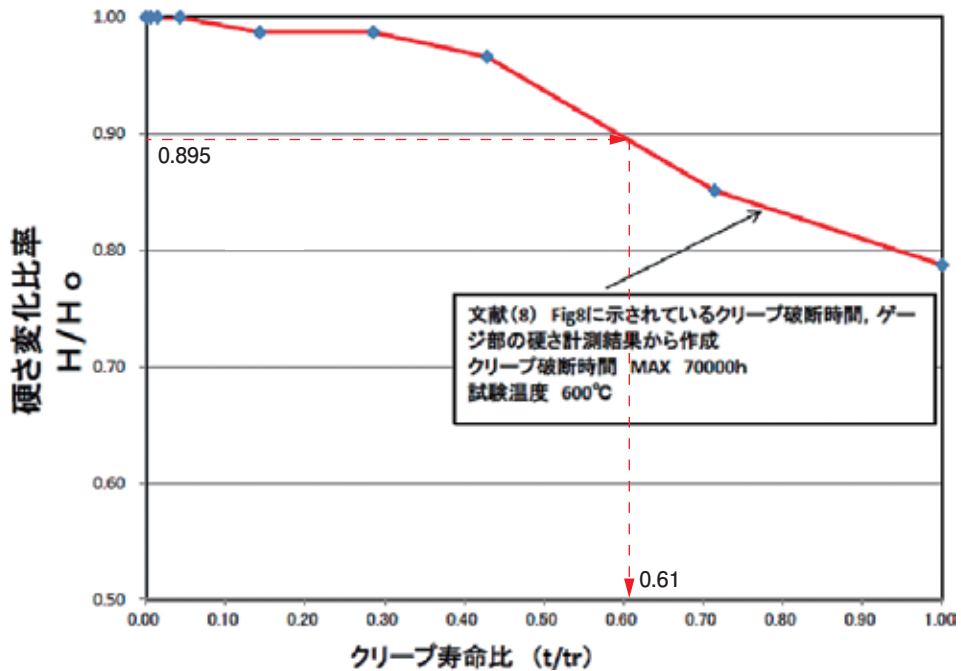


図 12 Gr91 のクリープ寿命比と硬さ変化比率の関係<sup>(8)</sup>

次に、伝熱管の破断応力  $\sigma$  は 3.1.2 項のスケール厚さによる寿命評価と同様に式 (3) から

$$\sigma = P \times (D/2/t_{br} - 0.5) = 34.0 \text{MPa} \text{ となる。}$$

また、式 (4) の強度式に  $\sigma$  および  $t_f$  を代入してメタル温度  $T_m$  を予測することができる。

結果として平均的なメタル温度  $T_m$  は  $655^\circ\text{C}$ 、この時のクリープ寿命比  $L_c$  は 61%、余寿命  $t_{\text{remain}}$  は  $120,000 - 73,000 = 47,000$  となる。

#### 4. まとめ

ボイラ伝熱管は過酷な環境で使用されることから、従来から広く実施されてきたクリープ破断試験法に加え、非破壊試験や計測結果に基づく現地での寿命評価が、定検時などの短期間における評価手段として有効であり今後の適用が期待される。クリープ寿命評価法として検討した水蒸気酸化スケールによる評価法、硬さ計測による評価法について、実際に適用する際の特筆事項を以下にまとめる。

#### 4.1 水蒸気酸化スケールによるクリープ寿命評価法

実機では、内面スケールの剥離・あるいは浮き上がりが生じた伝熱管も観察された。よってスケールによる評価法適用においては、評価時点までの運用期間において水蒸気酸化が徐々に進み、密着した内面スケールが生成していることを事前に確認しておくことが必要となる。

スケールの剥離、浮き上がりの確認の方法としては、B-イメージ法など UT によるスケール密着状態の画像処理が有効な方法として示唆される。スケール剥離・浮き上がりが生じていない場合は、UT によるスケール厚さ計測結果からメタル温度予測が、材料のクリープ破断強度曲線あるいは評価式から、余寿命の予測が可能である。

#### 4.2 硬さ計測結果によるクリープ寿命評価法

建設時からの伝熱管の硬さの変化比を基にクリープ寿命を評価する方法がすでに提唱されている。ただし、管寄や大径配管に比較し伝熱管は径

が小さく計測面の曲率が大きいこと、剛性が低い構造物であることから本評価法を現地等において実施する場合には、抜管材を使用した実験室ビッカース試験機による計測値と同等以上の硬さ計測精度を維持する必要がある。

現地用ポータブル硬さ計として開発されている光学法やUCI法を選定し計測値に対する比較試験を実施した。この結果、これらの計測機では構造上・機能上の特徴を考慮した計測が必要であることがわかった。前者では治具の使用による伝熱管の固定化、さらに後者では硬さの計算が自動で行われることから管の曲率の影響を検討するなど事前検証を進めておくことにより、実験室ビッカース硬さ計測結果と同等の精度を維持可能なことが確認された。この硬さ計測結果を基に、先行して研究されたクリープ寿命と硬さ変化比率から、当該時点におけるクリープ寿命を予測することができる。

### 謝辞

研究会は内視鏡による実機でのスケール付着形態の確認試験から始まり、抜管材の採取と長時間のクリープ破断試験の実施、さらに広範囲な材料調査、各種評価法の検討比較など5年を超える多くの年月を要した。この間、木原重光氏を代表とする株式会社ベストマテリアの方々、研究会参加会社の関係者により寿命評価の在り方について熱心な討議が進められた。また、九州工業大学増山不二光教授、元NIMS八木晃一氏、NIMS木村一弘氏から検討会のおりに貴重なアドバイスをいただいた。ここに研究会全関係者の皆様のご支援とご協力に対して心からお礼申し上げたい。

### 参考文献

- (1) K. Kimura, Y. Takahashi : Evaluation of Long-Term Creep Strength of ASME Grades 91, 92 and 122 Type Steels. PVP2012-78323, 2012
- (2) M. Yaguchi, T. Matsumura, K.Hoshino : Evaluation of Long-Term Creep Strength of Weld Joints of ASME Grades 91, 92 and 122 Type Steels. PVP 2012-78393, 2012
- (3) 腐食防食部門委員会資料 No.60、第 60 回 研究集会「9Cr 鋼耐熱鋼 -9Cr ボイラ鋼管研究グループの活動報告 -」、2014、pp.1-40
- (4) 鈴木哲平:ボイラ9Cr鋼管の水蒸気酸化スケール成長挙動とクリープ損傷、化学工業会第79年会、高温設備の診断と寿命延長、2014
- (5) 電気事業法令集、火力設備における電気事業法施工規則第九十四条の二第二項第一号に規定する定期事業者検査の時期変更承認に係る標準的な審査基準例及び申請方法等について(別紙三)、2013、p.129
- (6) 野中勇、鳥畑政二、梶ヶ谷一郎、馬木秀夫、藤森徹：ボイラ伝熱管の破壊試験によるクリープ余寿命予測法の提案、石川島播磨技報、第36巻、第4号、1996、pp.269-274
- (7) F. Masuyama, M. Prager : Creep Damage Strain and Hardness in High-Strength Martensitic Steels, Creep 2012, Kyoto Japan, 2012
- (8) K. Kimura, K. Sawada, H. Kushima, Y. Toda : Microstructural Stability and Long Term Creep Strength of Grade 91 Steels, Energy Materials, Vol.4, No.4, 2012
- (9) K. Kimura, K. Sawada, H. Kushima : Long-Term Creep Strength and Rupture Ductility of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels, Welding and Fabrication Technology for New Power Plants, First International EPRI Conference, 2009

- (10) I.G.Wright and R.B.Dooley : A Review of Oxidation Behavior of Structural Alloys in Steam, International Material Reviews, Vol.55, No.3, 2010, p.129
- (11) N. Nishimura, N. Komai, Y. Hirayama, and F. Masuyama : Japanese Experience with Steam Oxidation of Advanced Heat-resistan Steel Tubes in Power Boilers, Material at High Temperatures 22, 2005 Science Reviews, 2005, p.3
- (12) FP-686 : The Spalling of Steam-Grown Oxide From Superheater and Reheater Tube Steels, Technical Planning Study 76-655, 1978, pp.2-11
- (13) 清水大、仲尾元六、福田祐治 : ボイラ伝熱管の材料損傷と診断法、火力原子力発電、Vol.62、No.7、2011、p.19



フェロー  
博士 (工学)  
梶ヶ谷 一郎  
TEL. 045-759-2553  
FAX. 045-759-2146



検査事業部  
技術部 NDE グループ  
課長  
大黒 光喜  
TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547



計測事業部  
材料試験部  
福浦グループ  
田中丸天兵  
TEL. 045-791-3519  
FAX. 045-791-3542