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

(Creep Life Evaluation of Scrap Main Steam Pipes Served in Actual USC Boiler)

難波 一夫* (K.Namba)

実機ボイラから撤去された廃却材の経済的価値は低い。しかしながら、廃却材の調査から得られ る知見は、プラント保守・運用の合理化だけでなく、耐圧部材の設計・製作にも寄与するなど技術 的価値は極めて高い。本報では、寿命比則を適用した廃却材の定量的なクリープ寿命評価法および これを利用した寿命評価に資するデータの取得事例について紹介する。

Economic value of scrap component materials removed from actual boiler is low. However, technical value of knowledge provided from these materials investigation is extremely high, because those results contribute to not only rationalization of plant maintenance and operation, but also design and manufacture of pressure components. In this paper, we introduce quantitative creep life evaluation method applying life fraction rule and these acquisition examples of creep life evaluation data from scrap component materials.

1. はじめに

超々臨界圧(USC) 火力発電プラントでは、従来の 低合金鋼に代わり、クリープ強度を著しく向上させた高 Crフェライト系耐熱鋼(以下、「高クロム鋼」と略す) が主要耐圧部に採用される⁽¹⁾。高クロム鋼の採用によ り、プラント効率向上、発電コストおよび炭酸ガス排出 量低減が図れたものの、配管溶接部では、クリープ損傷 が在来プラントよりも顕著な傾向にあり、主蒸気管など の主配管においても劣化・損傷部位を取り替える事例が 認められる。

ここで、劣化・損傷により実機プラントから撤去され た耐圧部材(以下、「廃却材」という)は、スクラップ として廃却処分されるなど経済的価値は低い。しかしな がら、廃却材は実機環境下で一定期間の使用により損傷 を受けた技術的に貴重なサンプルである。廃却材を試験・ 調査することにより、未使用材(新材)を供試材とした 実験室試験では得られない下記のメリットを享受でき る。

① 実機損傷態様の把握

高クロム鋼のタイプIV損傷は,配管肉厚方向で 均一に進行せず,配管仕様,継手タイプ(周・長手 継手,開先形状等)により,肉厚内部あるいは配管 外表面など局所を起点として進行する⁽²⁾。局所が 判明すれば、これを検出するための最適な検査手法 を選択できる。

② 取替時期の妥当性評価

廃却材をクリープ試験に供することで,破壊試験 による比較的精度の高い寿命評価結果が得られ,取 替時期の妥当性を評価できる。また,取替時期の判 断に参照した非破壊検査等による余寿命評価結果と 比較すれば,当該非破壊検査等の精度やその採否を 検討できる。

③ 保守に資するデータの短期取得

ボイドなどの損傷指標をクリープ寿命消費率(以下,「寿命消費率」と略す)で整理できれば,これ を既設部材の余寿命評価に活用できる。これらの データは,未使用材を供試材としても取得可能であ るが,廃却材は実機で損傷を受けている分,より短 期間に取得できる。

以上のように廃却材の試験・調査から得られる知見は、 プラントの保守・運用合理化だけでなく、耐圧部材の設 計・製作にも寄与するなど技術的価値は極めて高いと思 われるが、研究事例は少ない⁽³⁾。今回、USCボイラで 使用した主蒸気管廃却材を破壊試験により調査する機会 を得たので、その結果について報告する。あわせて、廃

^{*}電源開発株式会社

⁽Electric Power Development Co., Ltd.)

却材のクリープ寿命を定量的に評価するために著者が試 みた寿命評価手法を紹介する。

2. 廃却材の寿命消費率評価

2.1 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、アイソストレス法がある⁽⁴⁾。いずれも試験 データから得られた回帰線をもとに廃却材等の余寿命を 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)は、下式のように、ある条件での使用時間をti,ある条件での破断時間をtriとして、所定条件下での寿命消費率ti/triを求め、 それらの累積が1(=100%)に達したときに破壊が生ずると仮定して寿命評価を行うものである。

$$\Sigma \frac{ti}{tri} = 1 \tag{(1)}$$

寿命比則は、評価対象となる材料のクリープ破断特性 が既知であればクリープ破断試験片1本でも寿命評価が 可能であり、パラメータ法等と比較して短時間で結果が 得られる。低合金鋼では、寿命比則が成立するとの報告 例⁽⁵⁾もあるが、鋼種の異なる材料では、累積寿命消費率 が1よりも大幅に異なった値で破壊が生ずることも予想 される⁽⁶⁾。そこで、高クロム鋼廃却材のクリープ寿命評 価を想定し、未使用の火SUS410J3TP(12Cr鋼)母材 を用いて、温度または応力を変動させたクリープ破断試 験条件下で寿命比則が成立するかについて検証を試みた。

検証試験は、実機使用後に実機条件よりも温度または 応力を高めた加速条件でクリーブ破断試験することを想 定して実施した。図1のLarson-Millerパラメータ(以 下、「LMP」と略す)線図により、応力を変動させるケー スで検証試験の内容を示す。条件1、条件2の各寿命消 費率をそれぞれφ1、φ2とすると、累積寿命消費率φ は、下式により与えられる。

 $\phi = \phi_1 + \phi_2 \tag{2}$

まず,条件1として,温度T1,応力σ1で寿命消費率 φ1=0.7となる時間t1calでクリープ試験を実施する。 引き続き,条件2として温度T1,応力σ2で試験片が最 終破断するまでクリープ破断試験を実施する。このとき,



条件2における寿命消費率φ2=0.3となる時間をt2cal とすると、寿命比則が成立すると仮定した場合に計算か ら求まる累積クリープ破断時間(以下,『予想破断時間』 という)trcalは以下となる。

trcal=t1cal+t2cal (3) ここで、時間t1cal、t2calは、試験応力および試験温 度を経済産業省の寿命評価式⁽⁷⁾(一般に所定条件でのク リープ破断時間が、平均値付近に集積するような確率分 布を示すことから火SUS410J3TP母材の平均線を採 用する)に代入することにより求めることができる。

また,条件2における試験時間,すなわち,条件2の 試験開始から最終破断に至るまでの時間をt2とすると, 条件1のクリープ試験開始から最終破断に至るまでの試 験時間(以下,『実破断時間』という)trは下式のよう に表せる。

$$tr=t_{1cal}+t_{2}$$
 (4)

表1に本検証試験で実施したクリープ破断試験条件を 示す。当該試験条件でクリープ破断試験を実施し、予想

表1 寿命比則の検証試験条件

試験片		条件1	条件2
符号		(φ1=0.7)	(φ2=0.3)
1	温度変動	135MPa × 640℃	135MPa×650°C
2	温度変動	135MPa×630℃	135MPa×640°C
3	温度変動	120MPa×640°C	120MPa×650°C
(4)	温度変動	130MPa×630°C	130MPa×640°C
(5)	応力変動	120MPa × 650°C	150MPa×650°C
6	応力変動	115MPa×650℃	125MPa × 650℃
\overline{O}	応力変動	135MPa × 630°C	140MPa × 630°C
8	応力変動	130MPa × 630°C	140MPa × 630°C

387

破断時間 trcal と実破断時間 trの関係として整理した結果 を図2に示す。応力変動の場合 tr > trcal, 温度変動の場 合は tr < trcal となる傾向が認められるが、両時間の差異 は10%未満であり、寿命比則が概ね成立しているもの と判断できる。





2.2 寿命比則により求めた寿命消費率の精度

本検証試験は、条件1の寿命消費率φ1=0.7と仮定 し、時間t1calを一定値として実施した。寿命比則によ る寿命消費率の精度を確認するため、以下に示すように、 クリープ破断試験から求まる条件2の試験寿命消費率 φ2aから条件1の実機寿命消費率φ1bcを求め、これ を仮定値(φ1=0.7)と比較した。

条件2の試験応力σ2, 試験温度T2, Cを定数とする と, 未使用材を条件2の試験条件で試験した場合, その 破断時間toは, LMP式から以下で与えられる。

$$LMP(\sigma_2) = T_2 \cdot (\log t_0 + C)$$
 (5)

to=10^{LMP(σ2)/T2-C} (6)
よって、条件2における試験寿命消費率φ2aは下式で

以上より,寿命比則が成立(φ = 1)する場合,式(2) より実機寿命消費率φ1bcは下式から求めることができ る。

 $\phi = \phi$ 1bc+ ϕ 2a

$$\phi$$
1bc $=$ 1 $-\phi$ 2a

$$=1-t_{2}/t_{0}$$
 (8)

本検証試験結果から求めた実機寿命消費率 ϕ_{1bc} を図 3に示す。仮定値からのずれは各試験条件でばらつきが あるものの-15~+30%程度であった。非破壊検査に よる寿命評価精度がfactor of 2⁽⁸⁾レベルであることを 考慮すると、この破壊試験による寿命評価精度が非破壊 検査より高いことを定量的に確認できた。



2.3 実機作用応力の推定

寿命評価式は応力と温度・時間のパラメータ(LMP) で構成されるので、応力、温度、時間のうち2つの値が 既知であれば、残る1つの値を求めることができる。こ こで、主蒸気管等の主配管は、炉外に敷設される非加熱 部材である。運転温度は、一定値で運転・制御されてい るため、実機運転温度は既知といえる⁽³⁾。よって、未使 用材を実機使用条件で使用した場合の破断時間(以下、 「実機破断時間」という)taが既知であれば、実機作用 応力を求めることができる。そこで、前節の寿命比則検 証で示したように、条件1を実機使用条件、条件2をそ の後に実施するクリープ破断試験条件にあてはめ(実機 作用応力をσ1、実機運転温度をT1、実機運転時間をt1 とする)、条件2のクリープ破断試験結果から、条件1 の実機使用応力を推定する方法を検討した。

条件1の実機運転時間(運転開始から廃却材の採取ま での運転時間)t1と条件2の試験から求めた実機寿命消 費率φ1bcから実機破断時間taは下式により求まる。

 $ta = t1/\phi \, 1bc \tag{9}$

したがって,実機作用応力σ1は,式(5)をもとに 下式により与えられる。

$$LMP(\sigma_1) = T_1 \cdot (\log t_a + C)$$
(10)

LMPによる寿命評価式を使用した応力推定では、破 断時間を対数とした応力破断線図において、未使用材と 廃却材の主クリープ破断曲線が平行になる場合に最も精 度が高い⁽⁹⁾。両曲線が必ずしも平行になるとは限らないが、試験応力と実機応力との差が小さい場合、一定レベルの評価精度が期待できるため、応力概算値を導出する推定法として示した。

2.4 実機廃却材の余寿命評価

余寿命L_Rは、前節で求めた実機破断時間taから実機 運転時間t1を差し引くことにより求めることができる。

$$L_{\rm B} = ta - t1 \tag{11}$$

余寿命L_Rは、LMP式平均線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LREを下式のように 定義する。

$$L_{\rm BF} = L_{\rm B} / 2 \tag{12}$$

なお,式(7)で得られる試験寿命消費率φ2aをもと に,実機作用応力や実機運転温度をパラメータとした余 寿命評価も可能である。

3. 実機廃却材のクリープ寿命評価

前章で示した寿命比則に基づくクリープ寿命評価法を 活用して,実機廃却材のクリープ寿命評価を試みた。以 下にその結果を述べる。

3.1 試験片採取に関する予備試験

高クロム鋼のクリープ損傷は、肉厚方向で均一に進行 せず、局所を起点として進行する場合がある。このため、 クリープ損傷が顕著な部分から試験片を採取すると、比 較的短時間で破断する一方、損傷が少ない部分から採取 した試験片は、比較的長時間で破断するなど、試験片の 採取位置およびサイズが破断時間に影響を及ぼすことが 予想される。そこで、予備試験として当社Gプラント で使用した長手継手を有する高温再熱蒸気管エルボ(*φ* 1016.0×t66.0mm[(\SCMV28])、累積運転時間: 62,353時間、実機運転温度:610℃)を供試材として、 この影響を確認した。

試験片採取要領を図4に示す。供試エルボ腹部中央か ら長手継手を中心に挟むよう、円弧状の断面から平行部 肉厚50mm×幅30mmの大型試験片、クリープ損傷が最 も顕著な会合部からφ6mmの小型試験片を各1本採取 した。これらを同一条件でクリープ破断試験(650℃ ×55MPa)した結果を図5に示す。小型試験片の破断 時間は1164.3hであり、大型試験片の破断時間 (1439.1h)と比較して19%短時間で破断し、試験片採 取位置,サイズによる破断時間への影響が認められた。 以上より,高クロム鋼廃却材の寿命評価では,可能な 限り厚肉の試験片を使用することで,実機条件に近い評 価結果が得られるものと判断される。







3.2 供試材および試験条件

供試材は、当社Gプラントでクリープ劣化した大型 溶接管台の取替えに付随して撤去した周継手を含む 12Cr鋼製主蒸気管(*φ*609.6×t97.0,89.0 [火 SUS410J3TP],累積運転時間;62,353時間,実機 運転温度;600℃)である。12Cr鋼は、開発当初、9 Cr鋼と比較して、高温強度が高く、かつ、耐水蒸気酸 化特性に優れる⁽¹⁰⁾とされ、より蒸気条件の厳しい 600℃超級の新鋭USCプラントの主配管に採用された 材料である。**図6**に示すように、蒸気流れ方向の上流側 から見て、円周方向0°(天側),45°,90°,180°(地側), 225°,270°,300°の位置から、中心部に周溶接継手を 含むよう計7本の試験片を採取した(以下、各試験片を それぞれMS0、MS45、MS90、MS180、MS225、 MS270、MS300と表記する)。

クリープ破断試験片の外観を図7に示す。予備試験結 果を反映し、配管の実肉厚(平行部の肉厚89mm×幅 15mm)を維持した大型試験片に加工した。クリープ破



断試験条件は、試験温度を650℃とし、試験応力は、 MS O, MS90, MS180, MS270で58MPa, その他 は50MPaとした。なお、クリープ破断試験は、所定の 時間で途中止めを行い、レプリカ採取によるボイド測定 を行うとともに、MS O, MS300については硬さ測定 も実施した。

3.3 クリープ破断試験結果および寿命消費率等の評価

上記の廃却材について,前章の条件2として実施した クリープ破断試験結果および当該結果をもとに評価した 実機寿命消費率φ1bc,実機作用応力σ1,余寿命L_R, 評価余寿命L_{RE}を表2に示す。各試験条件について,各 採取位置間の破断時間のばらつきは比較的小さかった。



図8 クリープ破断後の断面マクロ組織(MS45)

また、実機寿命消費率φ1bc、実機作用応力σ1は、 50MPaよりも58MPaのほうが高い結果となった。これは、未使用材と廃却材の応力破断時間曲線が平行でないためと考えられる。内圧ベースでの実機作用応力(軸方向)が40MPa程度であることを考慮すると、評価精度は、実機作用応力に近い50MPaのほうが高いと予想される。寿命消費率および実機作用応力の評価については、未使用材と廃却材の破断曲線における位置関係の影響をなくすため、試験応力を実機条件に合わせ、温度のみを加速条件とする方が評価精度の面で好ましいものと 推察される。

図8にクリープ破断後の断面マクロ組織を示す。全て の試験片は、溶接金属で破断しており、き裂は溶接熱影

符号	試験温度 (T2;℃)	試験応力 (<i>σ</i> 2;MPa)	廃却材の 破断時間 (t2; h)	試験寿命 消費率 (φ 2a;%)	実機寿命 消費率 (φ 1bc;%)	実機作用応力 (<i>σ</i> 1;MPa)	余寿命 (L _R ;h)	評価 余寿命 (L _{RE} ; h)
MS0	650	58	1461.2	26.0	74.0	55.2	21,954	10,977
MS90	650	58	1227.0	21.5	78.5	56.5	17,451	8,726
MS180	650	58	1434.3	25.4	74.6	55.4	21,211	10,706
MS270	650	58	1315.4	23.4	76.6	56.0	19,093	9,546
MS45	650	50	2730.8	34.4	65.6	52.6	32,713	16,357
MS225	650	50	3003.3	37.8	62.2	51.5	37,965	18,982
MS300	650	50	2669.5	33.6	66.4	52.9	31,607	15,804

表2 寿命比則の検証試験条件

響部(Heat Affected Zone:以下「HAZ」という)や 母材まで進展していなかった。

3.4 ボイド評価結果

図9にクリープ破断試験前に測定したMS300端材 (寿命消費率66.4%)の肉厚断面におけるHAZ細粒域 のボイド分布を示す。本測定は、試験片断面をレーザー 顕微鏡により直接観察して測定した。いずれの試験片も 溶接金属で破断したが、HAZ細粒域でも比較的多数の ボイドが発生していた。また、ボイドの肉厚断面分布が、 外表面近傍で最大値を示すことから、実機配管ではレプ リカ採取(ボイド測定)による寿命評価が期待できる。

寿命消費率とボイド面積率の関係を図10に示す。寿 命消費率は、第2章の寿命比則により評価した。また、 ボイド測定は、実機検査を想定して試験片外表面(原配 管の外表面相当)からレプリカを採取して測定した。



図 9 廃却材の肉厚方向における HAZ 細粒域のボイド分布 (MS300端材、クリープ破断試験前)



図10 ボイド面積率と寿命消費率の関係

HAZ細粒域のボイド量はばらつきがあるものの,寿命 消費率との相関が認められ,配管外表面に発生するボイ ドを指標とした非破壊検査による寿命評価の可能性が示 唆された。一方,溶接金属のボイドは極めて少なく, HAZ細粒域の1/10以下であった。

3.5 硬さ測定結果

MS 0 溶接継手部におけるクリープ破断試験前後の硬 さ測定結果を図11に示す。クリープ破断試験前(寿命 消費率74.0%)と比較すると破断後は母材, HAZ, 溶 接金属の全ての部位で軟化傾向が認められ, とりわけ溶 接金属では50~60HV程度の顕著な軟化が認められた。 この傾向は,実機で使用された12Cr鋼配管周継手の硬 さに関する調査事例⁽¹¹⁾と一致する。また,外表面近傍 と肉厚中心の硬さの差異は最大10HV程度と比較的小さ いことから,実機では配管外表面の硬さを測定すれば, 部材全体の硬さとして評価可能と判断される。





図12 溶接金属の平均硬さと寿命消費率の関係

391

		С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо	W	Nb	V	Sol.Al	Ν	В
母材		0.125	0.31	0.61	0.014	0.002	0.89	0.35	10.52	0.36	1.88	0.053	0.19	0.015	0.0557	0.0028
溶接金属		0.087	0.20	0.93	0.007	0.001	1.49	1.01	10.00	0.21	1.50	0.032	0.17	0.003	0.0555	0.0008
母材	Min	0.07	_	-	-	—	0.30	-	10.00	0.25	1.50	0.04	0.15	—	0.040	0.0005
規格値	Max	0.14	0.50	0.70	0.020	0.010	1.70	0.50	11.50	0.60	2.50	0.10	0.30	0.040	0.100	0.005

表3 母材および溶接金属部の成分分析結果 (wt%)

溶接金属の硬さと寿命消費率の関係を図12に示す。 寿命消費率は、前章の寿命比則により評価した。また、 未使用材のデータは、廃却材の溶接材料、熱処理を模擬 して別途製作した試験材から測定した。溶接金属の硬さ は寿命消費率の増加とともに単調に低下することから、 非破壊検査による溶接金属の硬さを指標とした寿命評価 の可能性を見出せた。

3.6 成分分析結果

MSO端材を使用した母材および溶接金属部の成分分 析結果を表3に示す。母材は、いずれの成分も規格値を 満足していた。また、共金系溶接材料を用いて溶接施工 された溶接金属も、母材規格値と近似する成分であるこ とが確認できた。ただし、Cuは、母材規格値の上限レ ベルであり、Ni、Mnは母材規格値を超過しているなど、 母材成分との明確な差異が認められた。

4. 考察

4.1 クリープ破断試験での溶接金属破断

本研究に供した12Cr 鋼廃却材は, 共金系溶接材料に より溶接施工されているが, 表3の成分分析結果から明 らかなように, 溶接金属の成分は母材と同一ではない。 これは, 母材が熱間加工と熱処理により, 組織を十分に 改善できるのに対し, 溶接金属は, 焼き戻し温度よりも 低い溶接後熱処理だけでその急冷凝固組織を改善する特 別な成分設計が求められるためである。

継手性能確保の観点から、共金系溶接材料では、とり わけるフェライトの残留による靱性低下を抑制するこ とが重要となる^(12,13)。靱性確保には、オーステナイト 形成元素であるCu, Niの添加が有効であるが、これら の元素はそれぞれクリープ延性、クリープ強度を低下さ せる背反効果も併せ持つ⁽¹³⁾。よって、12Cr鋼の共金系 溶接材料は、両特性をバランスさせC<0.12%、Cu< 1.8%、Ni≦1.2%を上限と規定し、Cu、Niを積極添加 する結果、母材と比較してクリープ強度の低下が避けら れない。さらに、母材に添加された約1%程度のCuが HAZ細粒域の軟化を抑制するとの報告⁽¹⁴⁾もあり、これ が溶接金属破断を助長していることも考えられる。

以上より,共金系溶接材料が母材と異なる成分調整が なされていること考慮すると,12Cr鋼継手試験片が溶 接金属で破断することは稀有な事象ではないと判断され る。

4.2 HAZ細粒域のボイドによる寿命評価

本試験では、全ての試験片が溶接金属で破断した一方 で、配管外表面のHAZ細粒域では比較的多量のボイド が観察された。以下に破断位置ではないHAZ細粒域の ボイド量を指標とした寿命評価の妥当性について考察す る。

第2章の検証試験における条件2のクリーブ破断試験 について、その破断時間toから評価した試験寿命消費 率 ϕ_{2a} は、表2に示すとおり0.215~0.378(21.5~ 37.8%)であった。条件2のクリープ破断試験の妥当 性を検証するため、 $\phi_{2a}=0.2$ (t2=0.2to)、0.4(t2 =0.4to)での99%信頼区間(±2.33 σ)に条件2の試 験データをプロットした結果を図13に示す。全ての試 験データは、 $\phi_{2a}=0.2,0.4$ の99%信頼区間内にあり、 過度に短時間あるいは長時間で破断していないと解され



図13 条件2の試験結果からみた試験の妥当性確認

る。以上より,溶接金属とHAZ細粒域のクリープ強度 は拮抗しているものと予想され,図10をマスターカー ブとした非破壊検査(レプリカ検査等)による寿命評価 が可能と判断される。

5. まとめ

12Cr 鋼廃却材について寿命比則を適用した寿命評価 法を紹介するとともに、これを活用した高クロム鋼廃却 材の調査結果を報告した。本評価法は、配管溶接部等の 大型部材だけでなく、管寄せスタブ管溶接部のミニチュ アサンプルによる余寿命評価など広範囲に活用できる。 本稿がプラントの保守合理化および安定運転確保の一助 になれば望外の喜びである。

- (1) 12Cr 鋼母材のクリープ破断試験により、概ね寿命 比則が成立することを確認した。また、使用履歴が明 らかな廃却材では、クリープ破断試験を実施すること により、寿命比則に従って、比較的高精度かつ短時間 に寿命評価が可能である。
- (2) 高クロム鋼廃却材のクリープ破断試験では、試験片の採取位置およびサイズの影響が大きい。寿命評価の 精度を確保するため、大型試験片を採用することが望ましいと判断される。
- (3) 12Cr鋼廃却材のクリープ破断試験において、全て の試験片は溶接金属で破断した。溶接金属の成分につ いて、クリープ特性を低下させるCu、Ni含有量が母 材よりも高いことが原因として考えられる。
- (4)寿命比則の適用により、配管外表面のHAZ細粒域 に発生するボイド量と寿命消費率の関係を整理でき た。当該関係をもとに非破壊検査による実機配管の寿 命評価が可能と判断される。
- (5) 寿命比則の適用により,溶接金属の硬さを寿命消費 率との相関関係を確認できた。当該関係をもとに実機 配管の非破壊検査による寿命評価が期待できる。

謝辞

廃却材調査の重要性および寿命比則の適用についてご 助言いただきました株式会社IHI検査計測の梶ヶ谷一郎 氏、クリープ破断試験の実施についてご助言・ご協力い ただきました日鉄住金テクノロジー株式会社の仲庭正義 氏、椹木義淳氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 難波一夫: IPEJ Journal Vol.26 No.6 pp.4-7
 (2014-6)
- (2)難波一夫:高クロム鋼溶接部のサブグレインサイズ
 測定による非破壊的クリープ損傷評価法 火力原子力
 発電 Vol.66 No.8 pp.461-468 (2015)
- (3)藤田明吾ら:火力発電プラントで使用された高温再
 熱蒸気管用改良9 Cr-1 Mo鋼エルボ管の損傷評価
 材料 Vol.59 No.6 pp.447-454 (2010)
- (4) 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
- (5) 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)
- (6) 吉川州彦:余命いくばく 金属 Vol.49 No.3 pp.29-33 (1979)
- (7)経済産業省 20140526商局第1号 発電用火力設備における高クロム鋼に対する寿命評価式について 平成26年5月30日
- (8) 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)
- (9) 桑原和夫,新田明人:高温長期使用の過熱器管の
 クリープ強度と耐用寿命予測 火力原子力発電
 Vol.29 No.2 pp.175-184 (1978)
- (10) 椹木義淳ら:12% Cr系高強度ボイラ用鋼管
 (HCM12A)の開発(第1報) 住友金属 Vol.47
 No.4 pp.29-37 (1995)
- (11)田淵豊ら:オンサイト型ポータブル硬さ計を用い たボイラ高Cr鋼クリープ余寿命評価 平成24年度火 力原子力発電大会論文集
- (12) 小川和博ら:12% Cr系高強度ボイラ用鋼管 (HCM12A)の開発(第2報) 住友金属 Vol.47 No.4 pp.39-46(1995)
- (13)山下賢ら:火力発電ボイラ用高クロムフェライト 鋼溶接材料 神戸製鋼技報 Vol.53 No.2 pp.79-84 (2003)
- (14)伊勢田敦朗ら:ボイラ用高強度高耐食性12Cr系鋼管(HCM12A)の開発 火力原子力発電 Vol.45No.8 pp.900-909(1994)