

高温機器部材におけるクリープ損傷と 残留応力（内部応力）の関係

中代 雅士 ^{*1}

Nakashiro Masashi

高温機器部材は、使用環境が常温から高温で使用されている。なかでも火力発電設備の耐圧部は、設備全体が約 30MPa の高圧容器と同等であり、過酷な状況下で使用されている。その結果、これら高温機器の部材には、溶接部などの製造過程で導入される残留応力以外に、運用中の温度変動で発生する熱応力（2 次応力）による残留応力が加算される場合がある。これらの応力が加算されることによって損傷が発生することがある。本稿では、これら残留応力の実機損傷事例を紹介しながら解析、評価法について紹介する。

キーワード：残留応力、熱応力、クリープ、疲労、クリープ疲労、応力緩和、内部応力、2 次応力、損傷評価、寿命評価

1. はじめに

高温機器部材の特徴は、使用環境が常温から火力発電設備で 650℃、化学プラント設備で 1,000℃、ガスタービンで 1,500℃前後の高温で使用されることである。特に火力発電設備の耐圧部では、設備全体が約 30MPa の高圧容器と同等であり、最も過酷な状況下で使用されている。これら高温機器では、一般機械に採用されている弾性変形領域内の設計ではなく、塑性変形を考慮した弾塑性変形領域内で設計されている。高温機器の損傷では、高温腐食、クリープ、疲労、クリープ疲労などが主な損傷形態である。これらの中で高温腐食以外は機械的損傷であり、作用している応力と環境温度が問題になる。環境温度は、計測可能であり、運用条件からもある程度正確に推定できる。問題は応力であるが、高温機器で問題になるのは、

1 次応力ではなく、熱膨張による熱応力、配管系応力などの 2 次応力の評価である。最近ではコンピュータの進歩で安価に解析精度の高い構造解析が採用されて、精度の高い応力解析結果が得られている。しかし、部材に蓄積された残留応力（内部応力とも言う）の評価は、製造時からの残留応力、運用過程で導入された熱応力と高温使用中での応力緩和、部材の材質変化による強度変化などが複合的に作用する。これらの挙動を全てコンピュータで評価することは難しい。最近では、残留応力計測装置も種々の方法が開発実用化され、現場計測も可能になっている⁽¹⁾⁽²⁾。本稿では、火力発電用設備の高温部材について応力評価と具体的な実機損傷評価事例による高温機器の解析・評価手法を紹介する。

*1：研究開発センター長 博士（工学） 技術士（金属部門・総合技術監理部門）

2. クリープ損傷における残留応力の評価

一般に金属材料は1/2融点(K)以上の温度域で使用すれば、クリープ損傷が問題になる。クリープ損傷には、変形、ポイドなど微視き裂の発生と破断、材質変化などがある。これらの材料データはNIMS(National Institute for Materials Science: 独立行政法人物質・材料研究機構)で系統的に実験、整備されており、国際的に最も信頼性のあるクリープデータシートとして発行されている⁽³⁾。さらに素材の製鋼メーカーのクリープデータ、機器装置メーカーのクリープ試験(溶接継手材のデータ含む)等のクリープデータが整備されており、有効活用されている。高温機器の設計には、これらクリープデータを基に、設計基準値が決められている。この設計基準には、残留応力の影響は考慮していない。しかし、実機では以下に示すような残留応力が部材に内在している。

(1) 製造時の残留応力

高温機器は溶接構造が主体であり、この溶接部には大きな残留応力が発生する。一般的に溶接部の残留応力は、高温使用中にSR(Stress Relief Heat Treatment: 応力除去熱処理)しているのと同じであり、高温使用中のクリープによる応力緩和により応力が下がり、通常は問題にならない。しかし、最近では高クロム鋼やオーステナイトステンレス鋼で高強度材が開発・実用化されており、これらの新高強度材は、常温強度も高く溶接時の残留応力も当然高くなる。この高応力からの応力緩和過程でクリープ損傷が蓄積される場合があり、寿命が短くなる場合がある。特にオーステナイト系ステンレス鋼の場合は、熱膨張率が大きく、高温強度も高く、応力緩和量も小さいので、応力緩和過程でクリープ損傷が発生する場合がある。

(2) 起動停止時に発生する残留応力

設備の起動停止時に不十分な予熱で運用した場

合、起動時には部材内に大きな温度差が発生することにより熱応力が発生、それが残留応力となって残り、クリープ寿命を縮める場合がある。また、DSS(Daily Start Stop)運転のような頻繁な起動停止を行った場合には、応力繰り返し回数が多くなり疲労損傷が加算される場合がある。

(3) 配管系2次応力

火力発電用ボイラの主蒸気管などの大径管では、起動停止時に熱応力による配管系応力(2次応力)が発生する。設計ではこれらの応力は考慮した設計になっているが、長時間使用中には、溶接継手部に配管系応力が継続的に負荷される。2.25Cr1Mo鋼のような低合金鋼の場合、溶接継手部のHAZ(熱影響)部で強度低下部位が存在し、この箇所タイプIVクラックと呼ばれるクリープ損傷が発生する。配管ルートと配管固定点の設計は、起動停止時に発生する熱応力を下げる構造にすることが重要である。

3. SUS316鋼主蒸気管のクリープ損傷事例と解析結果

米国エディストーン発電所(ペンシルベニア州)は1960年に世界最高の蒸気条件(649℃、34.5MPa)で建設、運転開始された世界初の超々臨界圧プラントで、本ボイラにはSUS316鋼管が採用された。13万時間の運用後(1983年)に主蒸気管で図1に示すようなリーク事故が発生した⁽⁴⁾。損傷管はSUS316鋼の中でも、金属成分的に σ 相(FeとCr、Moの金属間化合物)が析出しやすい材料に限定された。図2に σ 相が析出する材料のクリープ強度を示すが、図より σ 相が析出すればクリープ強度が低下する。しかし、本供試材に対してクリープ破壊試験を含む余寿命診断結果で、運用主蒸気圧力によるフープ応力は40MPa(蒸気圧力、管外形と肉厚から平均径で計算した場合)となり、クリープデータによる余寿命は、20万時間以上の余寿命が期待できると判

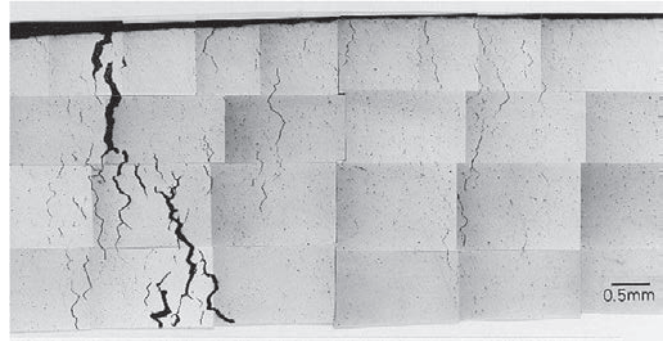
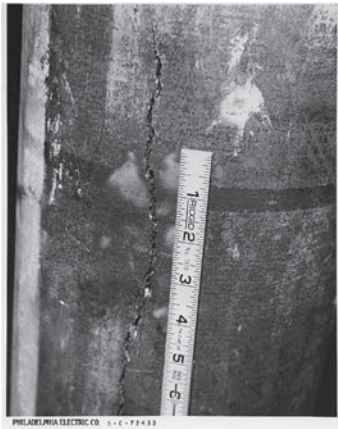


図1 SUS316 鋼主蒸気管のクリープ損傷事例

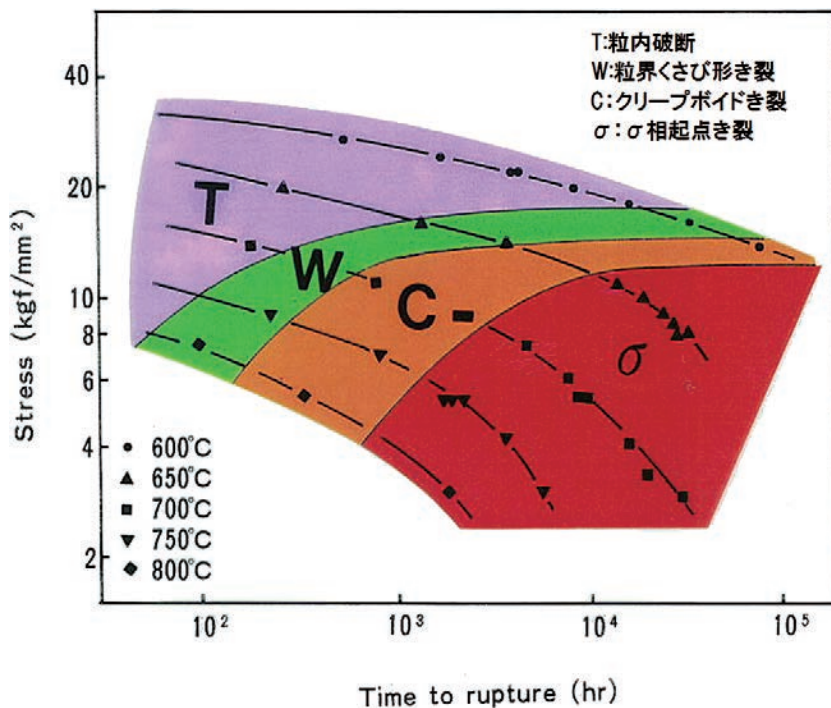


図2 SUS316 鋼でσ層析出材のクリープ強度破壊様式図

断された。しかし、実際にはサンプリング時点から約1年間運用後に図1の損傷が発生した。そして、結果的には余寿命が8,000時間、合計で約13万時間のクリープ破断寿命となった。この余寿命予想との大きな差異は、フープ応力以外の応力が作用していると考え、損傷部材の残留応力を切断

法で計測した。その結果、管の外周部で、健全部で37MPa (3.8kgf/mm²)、損傷部で9MPa (0.9kgf/mm²)の引張残留応力が計測された。本ボイラの運用上の特徴として、トラブルによる緊急停止時には、メンテナンスに早期着手するために、主蒸気管が急速冷却された。温度変化記録を図3に示

すが、この急冷によって最高 159℃ の温度差が管内外面で発生した。この温度記録を元に FEM による応力解析で、管外周部に最大 154MPa (15.7kgf/mm²) の引張応力が発生し、簡易応力緩和計算から 1 万時間後には約 37MPa まで低下する結果が得られた。これらの検討結果から、主蒸気管が早期に損傷した原因は運用過程で発生した熱応力の加算が原因であることを明らかにした。この引張残

留応力が発生するような運用は、運転開始から約 3 万時間後の時点からであり、それ以後の運用中のクリープ損傷を計算した。運転中の内圧による応力と平均残留応力を加算してクリープ損傷を計算した結果を表 1 に示す。累計損傷比が 0.987 となり、残留応力の応力加算で損傷が発生したとする評価が妥当であることが確認された。

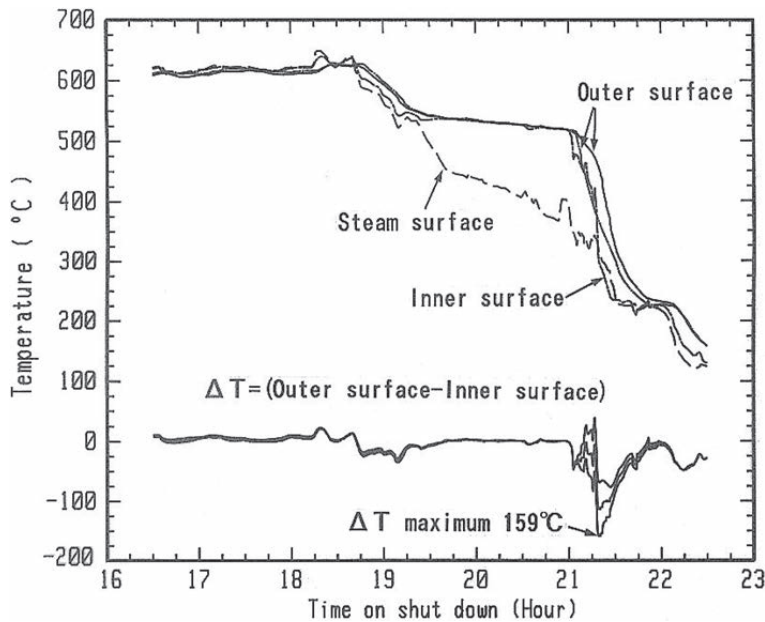


図 3 主蒸気管の緊急停止時の温度変化記録と熱応力解析結果

表 1 主蒸気管の運転記録によるクリープ損傷評価結果

運転モード	運転温度 (°C)	主蒸気圧力 (kgf/mm ²)	運用時間 (h)	主蒸気管平均応力 ¹⁾ (MPa)	クリープ破断時間 (h)	寿命比 (t/tr)
1	650	350	20,000	74	30,000	0.667
2	635	350	10,000	74	170,000	0.051
3	625	350	8,600	74	60,000	0.017
4	610	350	30,000	74	320,000	0.094
5	607	315	25,000	69	400,000	0.063
6	610	259	4,000	59	600,000	0.007
損傷比合計						0.987

注 1) 平均応力は、主蒸気内圧による応力に残留熱応力 34MPa を加算した値である。

この解析結果から、部材の正確なクリープデータ（SUS316 鋼でも σ 相が析出した材料データ）を採用し、内部応力の発生と時間変化による応力緩和による低下量の評価と運用中の内圧応力の合計応力で、クリープ損傷を評価すれば、妥当な結果が得られることを確認できた。構造解析の解析精度を上げるよりも、評価する長時間側の材料データ、使用環境下の残留応力変化を考慮した部材に荷重される応力を正しく評価することが重要である。

4. 繰返応力負荷の場合

繰返負荷が問題になる振動などの高サイクル疲労では、応力振幅と繰返数の SN 曲線で評価する。一般に高温になるほど疲労強度評価を表す応力振幅と破断繰返数の関係図（SN 線図）で応力振幅は小さくなり、疲労強度は低下する。ボイラ部材でも振動による疲労が問題となる場合には、短時間で破断する。一方、起動停止時の熱応力が問題となるような低サイクル疲労の場合には、ひずみ拘束型であり、ひずみ範囲一定の疲労試験データが採用される。低合金鋼の高温低サイクル疲労試験で問題になるのは、試験中の表面に酸化スケールが成長、割れによる初期き裂の早期発生と寿命低下

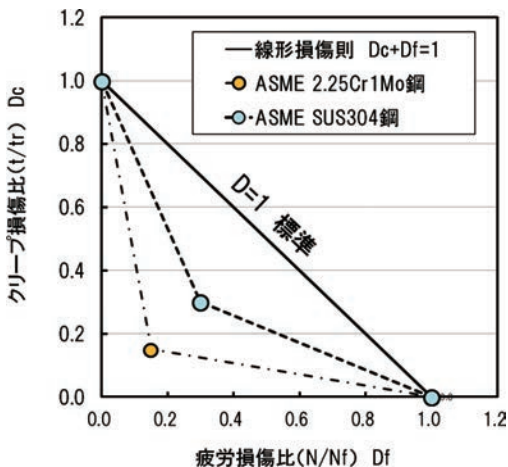


図4 クリープ・疲労損傷の評価式（線形損傷則 $D=1$ ）

である。特に、ひずみ速度を遅くした場合や、保持時間付きのクリープ疲労試験で大きな問題になる。図4はASMEで採用されているクリープ疲労の評価線図である。前述の疲労試験中の酸化膜の影響を含めば、クリープ疲労強度は大幅に低下する。しかし、日本では本件に関しては多くの研究論文が報告されており、SUS304、2.25Cr1Mo 鋼に関して図に示す実線の線形損傷則の損傷比 $D=1$ で評価して問題ないことが報告されている。その1例として図5に2.25Cr1Mo 鋼の低サイクル疲労試験結果を示す。本試験は、大気中、弱真空中での疲労試験結果であり、高温酸化の影響をなくした場合に疲労寿命は大幅に伸びること、保持時間が増加すれば保持中のクリープ損傷が増加し、差異が少なくなることを示している⁽⁵⁾。図4の評価線図では、この大気中の疲労強度を採用しており、酸化の影響を同時に評価していることになる。純粹の疲労損傷だけであれば、疲労破断回数 N_f 値は10倍以上改善されるので、疲労寿命をこの酸化の影響がない数値に修正すれば、図中の実線部の領域になり、単純な線形損傷則が成立する。図6にボイラにおけるクリープ・疲労損傷評価フローチャートを示す。T ピースなどの大径管に作用する起動から保

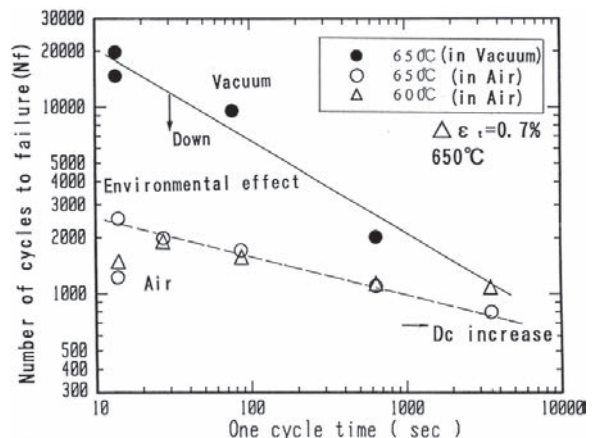


図5 クリープ疲労試験での1サイクル当たりの試験時間と破断繰返数の関係（ $N_f/25$ 、2.25Cr1Mo 鋼）

止までの応力変化を1サイクルとして、各運転モード別に応力-時間変化を解析する。応力変動に関しては応力変動幅に相当する破断繰返数 N_f との疲労損傷比、保持時間に関しては、1サイクル中の温度-保持応力でのクリープ破断時間 t_r と保持時間 t とのクリープ損傷比を個別に評価し、個別の損傷値に個々のサイクル数を乗じた合計値で評価する。本フローチャートは簡易法であるが、実用的であり、評価するための基礎データも容易に収集できる。

5. タービン弁の損傷調査と解析評価事例

3章で紹介した米国エディストーン発電所のタービンバルブの損傷事例と解析評価結果を紹介する⁽⁶⁾。図7にタービン弁の半分割による弁室内面の損傷状況を示す。図の左が主蒸気止弁（止弁）で

右側が蒸気加減弁（制御弁）である。写真で分かるように、制御弁内面に亀甲状の割れが発生している。ボイラの起動時の運転過程で、止弁までは暖気蒸気を流しており、所定の温度圧力になった時点で、止弁が開けられて高温高压蒸気が制御弁に流れ込み、急速に加熱される。この起動時に発生した繰返熱応力でき裂が発生進展した。この損傷プロセスを詳細に解析、損傷評価を実施した。図8にき裂発生部位の断面マイクロ観察結果を示す。き裂がないと考えられた止弁でも内面に微小き裂が観察され、損傷初期と判断された。また、損傷部位はバルブ内表面に限定されており、部材中央部は健全であった。従って、損傷はこの内表面に限定された。図9に示すようにバルブの断面をモデル化し、FEMによる弾性クリープ解析を実施して応力ひずみ線図が

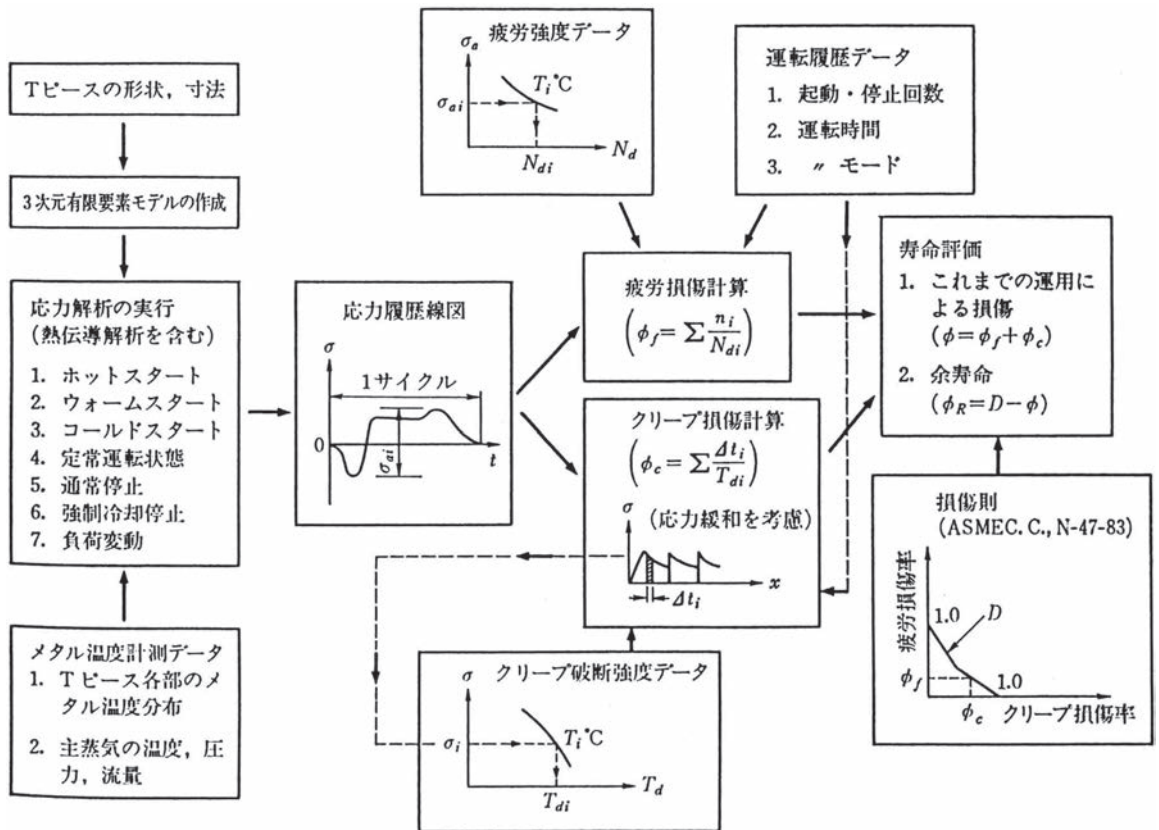


図6 ボイラ部材のクリープ・疲労損傷評価フローチャート図

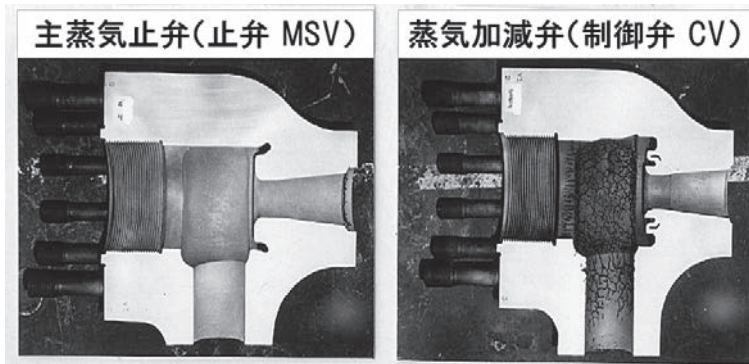


図7 SUS316鋼タービン弁室のクリープ・疲労損傷事例

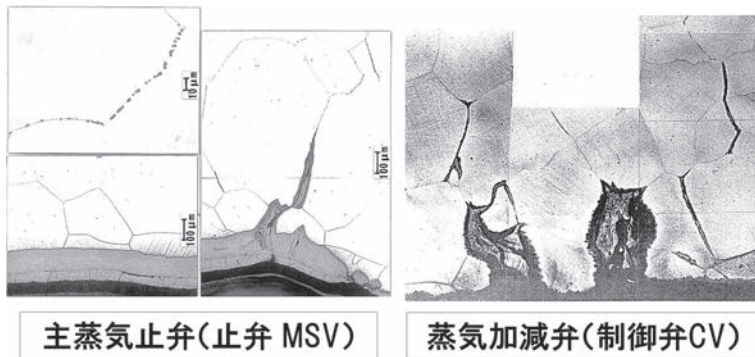


図8 タービン弁室損傷部位のマイクロ観察結果

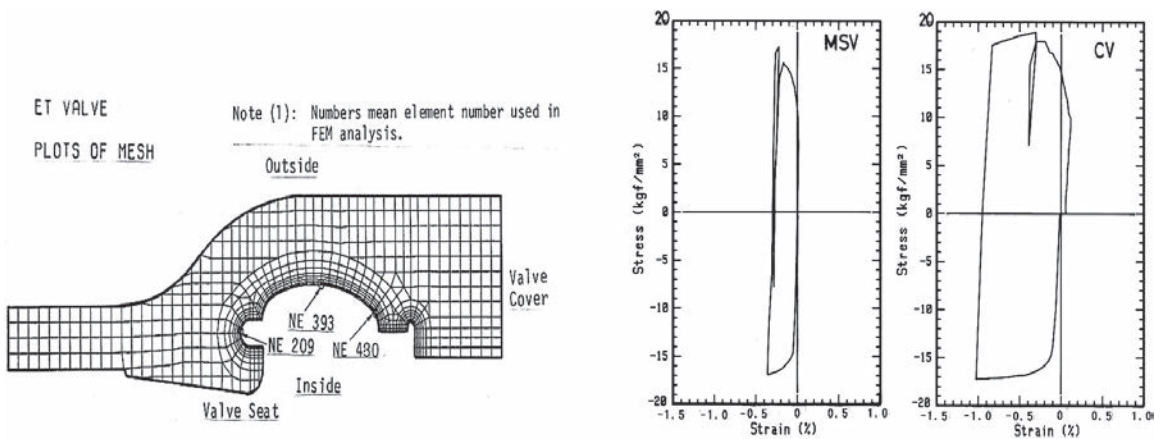


図9 タービン弁のFEMモデルと応力・ひずみ解析結果

得られた。止弁は塑性変形量が少なく、制御弁では塑性変形量が約1%となり、それに伴い大きな引張残留応力が発生した。弁部材の材料強度試験を実施し、図6のクリープ・疲労損傷評価フローチャートに従って損傷評価を実施した結果、表2に示すよ

うに止弁で損傷比1.27～1.29、制御弁で損傷比1.08が得られ、線形損傷則による評価の妥当性が確認できた。実機部材の評価では、繰返過程で発生する熱応力（内部応力）の評価と、その応力を時間で緩和する応力変化を正確に評価することが重要で

表2 タービン弁の線形損傷則によるクリープ・疲労損傷評価結果

項目		止弁(MSV)	制御弁(CV)
応力-ひずみ ヒステリシス ループ	全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_t$	0.40%	1.12%
	非弾性ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_p$	0.30%	1.00%
	最大負荷応力 σ_0	143MPa	167MPa
き裂発生時の起動停止回数		311	121
クリープ損傷 Dc		1.25	0.99
疲労損傷 Df	全ひずみ範囲による評価	0.02	0.09
	塑性ひずみ範囲による評価	0.04	0.09
合計損傷 D	Dc+Df (全ひずみ範囲)	1.27	1.08
	Dc+Df (塑性ひずみ範囲)	1.29	1.08

ある。疲労損傷自体は実機では非常に小さく、クリープ損傷評価が重要であることが明らかになった。

6. まとめ

火力発電用設備の高温機器で運用中に発生した残留応力がクリープ・疲労損傷に影響を与える事例を紹介した。高温機器の残留応力は、時間と共に応力緩和が進行するので、この残留応力の評価は難しいが、高度な解析によらない簡易解析でもある程度計算・評価できる。最近、種々の残留応力計測法が開発され、現場での応力計測も可能になっているので、現状の状況が把握できる。一方、材料のクリープ強度はデータのばらつきも大きいので、解析精度は評価に採用した材料データに大きく依存する。特に、金属組織変化、溶接継手部の強度評価などは時間依存で特性が大きく変化するので、これらの挙動を把握した上で評価すれば、比較的簡単に評価ができる。実機使用部材の材料データの収集と評価が重要である。

参考文献

- (1) 三上隆男、松田昌悟、「穿孔法による残留応力測定について (その2)」、IIC REVIEW No. 49、pp. 39-45
- (2) 中代雅士、三谷幸寛、阿部徹、鈴木健次、「炭素鋼の負荷応力値とX線応力計測値の関係」、IIC REVIEW No. 49、pp. 61-70
- (3) NRIM (現 NIMS) CREEP DATA SHEET NO.3B 1986「ボイラ・熱交換器用合金鋼管 STBA24 (2.25Cr1Mo) のクリープデータシート」
- (4) J. F. Delong、木原重光、中代雅士、石本礼二、梶ヶ谷一郎、火力原子力発電、Vol. 35 No. 227 (1984)
- (5) 中代雅士、「高温機器のクリープ・疲労損傷評価と余寿命評価法」、IIC REVIEW No. 32、pp. 21-31
- (6) J. F. Delong、石本礼二、梶ヶ谷一郎、中代雅士、吉川州彦、時政勝行、渡辺修、大友篤、本田聖、「超高温プラントにおけるタービン止め弁/制御弁の損傷解析及び材料評価」、火力原子力、Vol. 35 No. 11、pp. 1249-1269 (1984-11)



研究開発センター長
博士(工学)
技術士(金属部門・総合技術監理部門)
中代 雅士
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547