

## 討27 重油燃焼環境下の高温損傷事例

三菱重工業(株)高砂研究所 ○原田良夫  
中森正治

### 1. まえがき

高温部材に要求される基本特性として、高温強度、高温組織安定性及び高温耐食性の3つを挙げることができ、このうち高温強度は曝露環境の腐食性の影響を受け易く、諸種の事例が散見されているものの、材料側環境側双方による因子が複雑、多岐に亘るうえ、体系的な調査が困難なことから、十分検討されていない<sup>1)</sup>。特に高温の重油燃焼の実環境下では、各種の応力が負荷された状態で、S, V, Na ときにはCl化合物などの腐食成分が、加速酸化や硫化腐食を誘発して基材を損耗させるのみならず、腐食反応に伴って、脱Cr層、硫化物層、浸炭層などの脆弱な変質部を生成する。長時間使用後にはこれらの変質部が、亀裂発生の起点や急激な腐食促進の原因となっているなど、高温強度上留意すべき現象も見られる。又、昨今の発電プラントは、経済の低成長時代を反映して、長時間運転経歴を有するものが多く、プラントの保守管理及び部材の寿命予測精度向上の点からも、環境強度の問題は重要な研究課題の一つとなっている。

ここでは、討論テーマの話題提供に資するため、重油燃焼ボイラ及びガスタービンの高温部で発生する損傷事例を要約した。

### 2. ボイラにおける高温損傷事例

#### 2.1 損傷事故の全般的傾向

ボイラの構造は、高圧の給水が流れる節炭器から高温高圧の水蒸気をつくる過熱器出口に至る耐圧部、これらの耐圧部を包み支えているケーシング、バックスティ、さらに燃焼用空気をボイラに送り燃焼ガスを煙突へ導くダクトなどを総称した非耐圧部の他に、燃焼装置及びその他補機から構成されている。Table 1 は筆者らが取扱ったボイラ管の事故調査例を運転開始後の経過年数と事故の形態別に整理したものである。蒸発管では水側の腐食、クリープ破断、低サイクル疲れが主因であり、過熱器では損傷部が燃焼ガス側に移り、温度の低い節炭器では硫酸露点腐食が現われるなど、運転環境によって特徴ある損傷現象が発生する。又事故の形態を見ると、腐食やクリープ破断は運転年数に関係なく、低サイクル疲労は運転が長くなるほど発生頻度が多くこれらの和は全体の80%を占めるなど重要な損傷形態であることがうかがえる。

#### 2.2 損傷事例とその原因

##### (1)クリープ及びクリープ破断

火焔壁管、過熱器管、再熱器管などの熱負荷の高いところで発生する現象で、原因として①異物剝離スケールの堆積による内部流量の減少による過熱 ②上流側の漏洩による下流側の過熱 ③管内面スケールの成長による昇温 ④高温腐食による

Table 1 Corrosion and high temperature damages in oil fired boilers

Damage \ Tube	Eva.	S/H	R/H	Eco.	Operation year										Total
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10	
Water Corr.	38	2	1	9	2	2	6	7	5	5	3	5	3	16	50
H/T Creep Rup.	46	42	4	-	13	10	12	16	10	8	4	9	-	8	92
L/C Fatigue	67	30	18	6	1	3	4	4	11	14	13	15	15	39	121
H/T Corr.	5	26	17	-	-	3	7	6	9	7	5	4	4	5	48
L/T Corr.	11	-	-	15	-	-	2	3	6	1	1	4	1	6	26
Degradation	-	18	7	-	-	-	-	-	-	-	4	3	6	12	25
Other	31	18	6	5	10	4	6	10	6	6	5	2	1	10	60
<b>Total</b>	<b>198</b>	<b>136</b>	<b>53</b>	<b>35</b>	<b>26</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>41</b>	<b>35</b>	<b>42</b>	<b>30</b>	<b>96</b>	<b>422</b>

る必要肉厚以下への減肉などがある。Photo.1はその一例である。

(2)熱疲れ及び低サイクル疲れ。

切欠部、初期欠陥部、局部腐食部などの応力集中部に熱応力の繰返しが重複したものが大部分で、しかもクリープとの相互作用によるものが多い。①管寄管台に取付けられている管相互間の温度差に起因する熱応力の繰返し、②過熱器管タイウェルドスペーサなどで管相互間の温度差に起因する熱応力 ③異材溶接部の熱応力と継手境界での脱炭によるCr-Mo鋼の強度低下 ④高熱負荷に伴う熱応力の繰返しと腐食との相乗作用などがある。(Photo.2)

(3)高サイクル疲れ

この損傷は運転開始後比較的早期に発生する傾向がある。

(4)腐食 (Fig.1, Photo.3)

重油灰中のV, Na, S化合物に起因する加速酸化腐食で、燃焼環境、重油灰組成、管材質などによって腐食部の形態は幅広く変化する<sup>8)</sup>。すなわちステンレス鋼管では ①結晶粒界が侵食するもの ②硫化物層や浸炭層が存在するもの ③①及び②が共存するものがある。これらの変質部は管のクリープ特性にも大きな影響を与えることがあるため、余寿命評価時には考慮すべき要因とされている。さらに浸炭現象が見られる管表面に生成する酸化膜は、粗しうで耐食性に乏しいため腐食損耗速度が助長される傾向が強い。又昨今のボイラで実施されている排ガス中のNO<sub>x</sub>対策としての二段燃焼方式などでは、局部的に不完全燃焼雰囲気構成されている。このためV化合物に代ってS化合物による腐食反応が主役となり、従来経験されなかったところでの顕著な硫化腐食が散見されはじめた。

尚ボイラの腐食対策として常用されているMg系化合物の注入は、火焔壁の表面を白垂化して熱吸収率を低下させるため、燃焼ガス温度が設計値以上となり、炉内全体の熱吸収バランスが崩れる<sup>4)</sup>ことによって、各部の高温損傷が誘発される危険がある。



Photo 1 Creep rupture of super heater tube (SUS321)

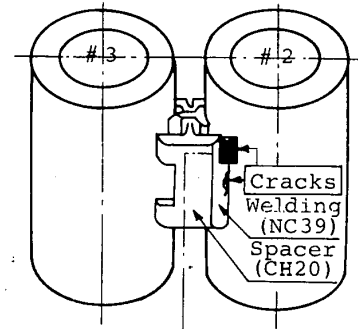


Photo 2 Thermal fatigue cracks of tube (STBA23)

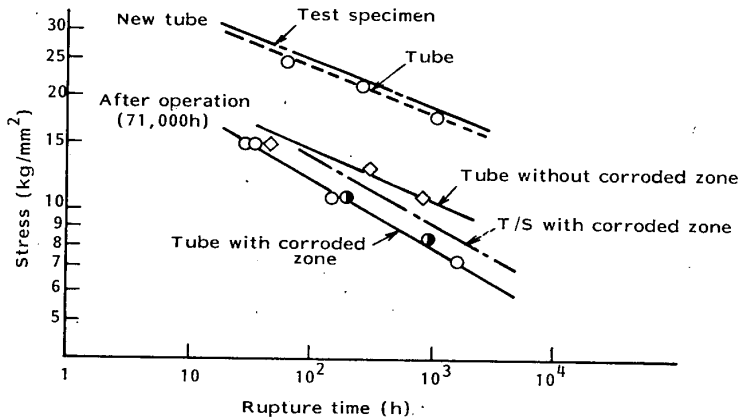


Fig.1 Creep rupture strength of boiler tubes (SUS321 at 650°C)

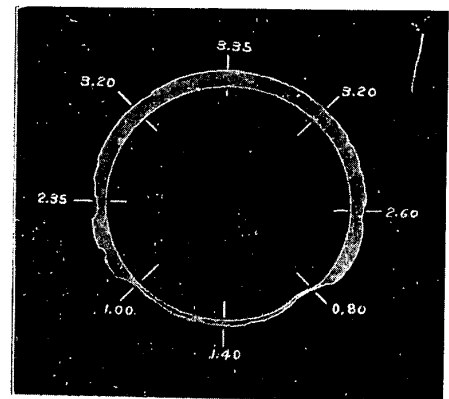


Photo 3 High temperature corrosion (SUS304)

3. ガスタービンにおける高温損傷事例

3.1 損傷事故の全般的傾向

ガスタービンの損傷実体を把握することは困難であるが、J. レオポルト<sup>6)</sup>による1970~1979年間の保険の対象となった240件の損傷統計をFig.2に示した。動翼とロータ部の事故が29%と最も多く、次いで静翼とその翼振の17%、軸受11%、燃焼室と高温ガス配管、圧縮機の回転羽根組と他のロータ部がそれぞれ8%を占め、これらの損傷部が全体の73%に達している。

一方、ガスタービン構成部材の高温損傷を現象面から分類すると、次のようになる。

(1)クリープ及びクリープ破断, (2)熱疲れ及び低サイクル疲れ,

(3)高サイクル疲れ, (4)腐食, (5)焼損, (6)経年材質変化, (7)異物飛来による損傷, (8)材質欠陥, 溶接欠陥, 施工不良による欠陥など(1)~(7)はガスタービン運転中の損傷であり, (8)は製作段階で見落されたものが顕在化したものである。

Table 2に主要高温部品と損傷形態と概略の関係を示したが、単純な原因は少なく、高温環境下における酸化、各種の腐食作用が重複していることが多い。

3.2 損傷事例とその原因

(1)クリープ及びクリープ破断

この原因のみで損傷した例は経験していないが、その合金として通常のクリープ特性を有していない場合や腐食が甚しく、いわゆる腐食クリープによる破損例がある。Photo.4はディスクのセレーション部の亀裂発生状況を示したもので、運転中のセレーション部は、遠心力、翼材との温度差、熱膨張差による歯当り部分や面積の変化、翼の高速ガス抵抗に伴う応力など大きな応力が負荷されている。亀裂部にV, S化合物の侵入が認められることから、腐食環境下におけるクリープ破断と考えられる。その他動翼トップセレーション谷底部の腐食によるクリープ破断も発生している。

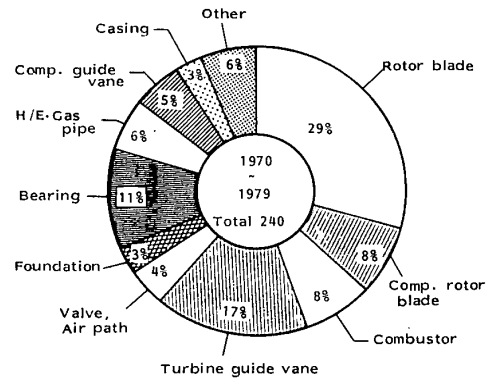
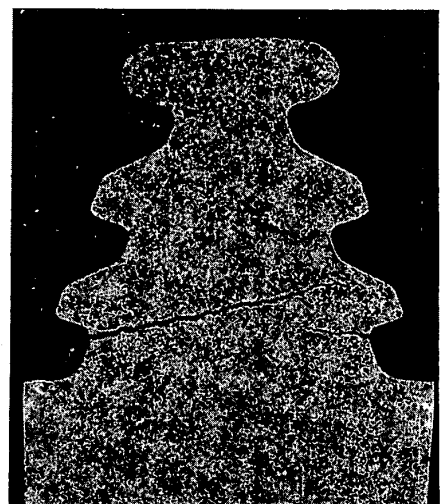
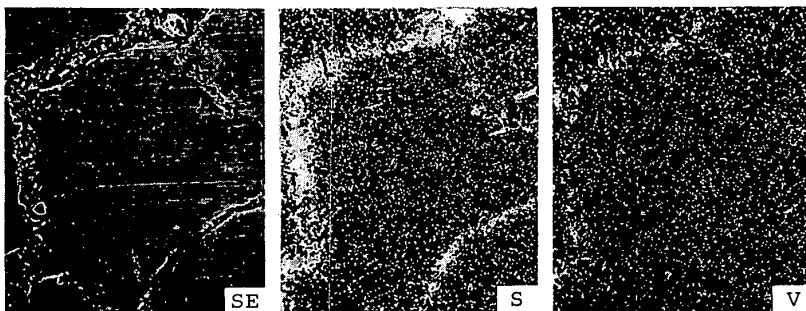


Fig.2 Distribution of Damages in gas turbines

Table 2 High temperature damages in gas turbines

Damage \ Component	Turbine			Combustor	
	Blade	Vane	Disc	Liner	Tail
Creep.	○	○	○	-	-
Creep. Rupture	○	○	○	○	○
Thermal Fatigue	○	-	-	○	○
L/C Fatigue	○	-	-	○	○
H/C Fatigue	○	○	○	○	○
Corrosion	○	○	○	○	○
Burn out	○	○	-	○	○
Degradation	○	-	-	-	-
Material defect	○	○	-	○	○

Disk: Discaloy



Cracks on disc

X-ray images of S and V at cracks

Photo 4. Corrosion fatigue cracks on disc (Discaloy 341920h)

(2)熱疲れ及び低サイクル疲れ

動翼の前縁部、背腹部に①起動発停止時の熱応力による熱疲れ亀裂、②静翼の温度分布のバランスを欠いたための熱疲れ ③熱応力とクリープの重複と推定される動翼シュラウド部の亀裂などが経験されている。Photo.5 にその一例を示す。

(8)高サイクル疲れ(機械疲れ)

①動翼の固有振動数及びバラツキが予想以上に大きく、又腐食による減肉のため振動数が低下したと考えられる動翼、ディスクトップセレーション部の亀裂 ②燃焼器内筒スポット溶接部の破損 ③同尾筒吊下部の欠損などがある。

(4)腐食

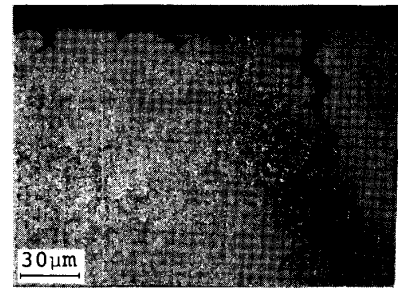
Ni基, Co基合金製動静翼では、ガス中のS化合物によって甚しい高温腐食が発生する。特に高温化している現在、燃料中の微量S分はもとより空気中の海塩粒子などによっても腐食が発生する。腐食部には硫化物が生成したり、脱Cr層が形成されるがこれらの層は強度が弱く、クリープ破断、熱疲れ発生の起点をつくり易い、Photo.6及びFig.3にその一例を示した。

4. あとがき

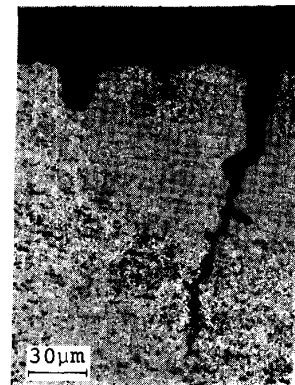
ボイラの高温化はガスタービンほど顕著でないが、650℃級の実用化に向けて地道な努力が払われている。一方ガスタービンの高温化は冷却構造技術の進歩に負うところが大きい。冷却翼では起動停止時よりも、運転状態の方が翼内の温度勾配が大きく、高い熱歪が保持され、クリープを生じたり熱疲労との重複下での寿命が重要となっている。さらに重油燃焼環境下では冷却面に腐食成分が凝縮付着して強い腐食性環境を構成するため、環境強度の評価技術は今後益々重要な課題となるものと考えられる。

文 献

- 1) 例えば宮川大海, 第102回西山記念技術講座(1985)p169
- 2) 原田良夫, 配管技術 26(1984)p71
- 3) 例えば原田良夫, 防食技術 26(1977)p471
- 4) 深堀和実, 豊田隆治, 原田良夫, 火力原子力発電 36(1985)p125
- 5) J. レオポルト, 機械の損害 第1号(1981)p1
- 6) 原田良夫, 第102回西山記念技術講座(1985)p91



(U-710, 2,200h)



(Inco. 700, 27,900h)

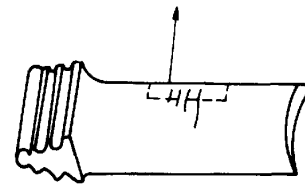
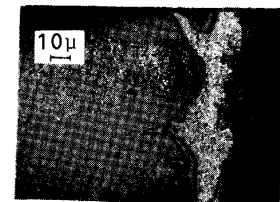


Photo.5 Thermal fatigue cracks



Base metal → Depleted zone → Oxide

Photo 6 Cr depleted zone on blade

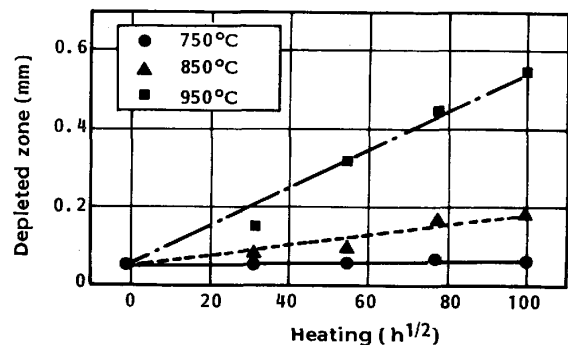


Fig.3 Growth of Cr-depleted zone of U-710