

## 破壊事故をなくすには

日々のニュースで目にしない日はないと言えるほど世界中で破壊事故は多発しています。

多くは、地震、水害、台風など自然災害あるいは人的ミスに起因する破壊ですが、全ての構造物、機械、設備などは通常の使い方をしていても、長期の使用によって**劣化損傷**が起き、破壊に至ることがあります。

**劣化損傷**について知って、世界の安心安全と構造物の寿命延伸によるSDGsへの貢献が可能になります。

破壊予知学習パックによって、破壊予知学を学んで、破壊事故を無くしましょう。

## 経年的破損と人間の死との対比

- 構造物、設備、機器における  
破損(破壊)は、人間に例えれば**死**です。  
劣化損傷は、人間に例えれば**病気**です
- 構造物、設備、機器は、構成材料の劣化損傷(病気)の進展によって破損(破壊)(死)に至ります。
- 材料(主に金属)の劣化損傷には163の機構(表1参照)がありますが、**疲労、クリープ、自然腐食、乾食、湿食、応力腐食割れ、摩耗、エロージョン、材質劣化**の9つの機構(病気の種類に相当)に分類できます。

# 破壊予知学

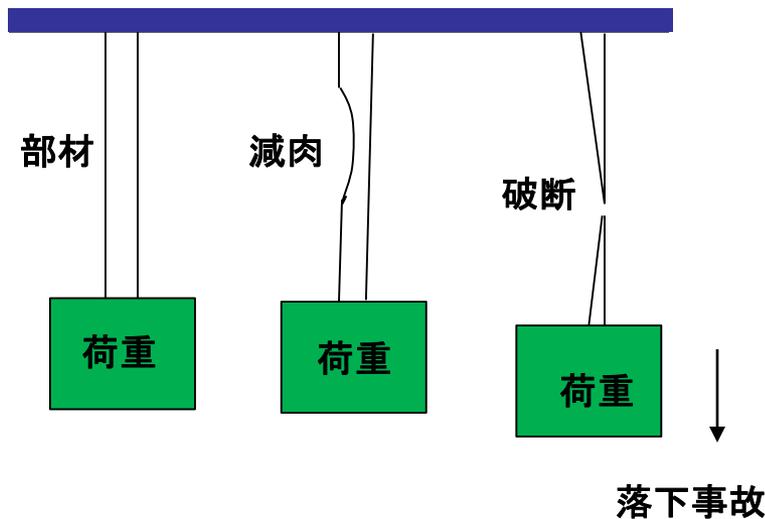
## 表1 金属材料の全劣化損傷機構(163)

大分類	疲労	クリープ	腐食							磨耗	エロージョン	特性劣化				
中分類	疲労	クリープ	自然腐食	乾食	湿食			応力腐食割れ		磨耗	エロージョン	特性劣化				
小分類	機械的疲労(高サイクル疲労)	クリープ変形	大気腐食(外面腐食)	高温酸化	高温炭酸塩腐食	淡水腐食	フェノール腐食	炭酸腐食	化学洗浄腐食	硫化物応力腐食割れ(SSC)	高温水割れ	凝着磨耗	エロージョン・コロージョン	水素脆化	シグマ相とカイ相脆化	
	低サイクル疲労	クリープ破壊	外面応力腐食割れ	水蒸気酸化	水素侵食	海水腐食	リン酸塩腐食	ほう酸腐食	大気圧タンク底板腐食	H <sub>2</sub> S中水素誘起割れ	粒界型応力腐食割れ(IGSCC)	滑り磨耗	キャビテーションエロージョン	水素脆化(チタン)	炭化物球状化	
	接触疲労	長時間クリープ破壊	保温材下腐食	浸炭酸化		汚染海水腐食	液体金属腐食	酸性サワーウォーター腐食	層状(剝離)腐食	水素誘起割れ(HIC)、水素助長割れ	粒内型応力腐食割れ(IGSCC)	腐食磨耗	固体粒子衝撃エロージョン	水素化物脆化	照射脆化	
	振動疲労	短時間クリープ破壊	保温材下応力腐食割れ	メタルダスティング		流れ加速型腐食(FAC)	湿性硫化物腐食、湿潤硫化水素腐食	サワーウォーター腐食	選択腐食(脱アロイ)脱成分腐食	応力方向性水素誘起われ(SOHIC)	照射誘起応力腐食割れ(IASCC)	インレットアタック	液滴衝撃エロージョン	脱炭	体積膨張(スウェリング)	
	フレットイング疲労	クリープ脆化		ハロゲン化腐食		溶存酸素腐食、酸素濃淡電池腐食(酸素腐食)	湿性塩化物腐食、湿潤塩化水素腐食	アルカリ腐食、苛性ガウジング	すきま腐食	アルカリ割れ	粒界腐食割れ	フレットイングコロージョン(擦過腐食)	フライアッシュエロージョン	侵炭(浸炭)	再熱割れ(SR割れ)	
	腐食疲労	クリープ疲労破壊		高温ハロゲン腐食		酸露点腐食(硫酸・塩酸露点腐食)	塩化アンモニウム腐食	キレート腐食	ガルバニック腐食、異種金属接触腐食	苛性ソーダ割れ	変色皮膜破壊	インピンジメントアタック	ストローエロージョン	窒化	クラッド剥離	
	熱疲労	異材溶接割れ(DMW)		硫化		微生物腐食	水酸化アンモニウム腐食	ナフテン酸腐食	デボジット腐食、堆積物(附着物)下腐食	アミン割れ	シアンSCC	疲労磨耗	降下スラグエロージョン	液体金属脆化	クラッド下割れ	
	熱衝撃(ファイアクラッキング)	リラクゼーション		高温硫化		土壌腐食	アンモニアアタック	水線腐食	凝縮腐食	カーボネート割れ	アンモニアSCC	アブレシブ摩耗(ひっかき摩耗)	石炭粒子エロージョン	黒鉛化	475°C脆化	
	転動疲労	Type IV クラッキング		高温硫化物腐食		無機酸腐食	HCl-H <sub>2</sub> S-H <sub>2</sub> Oによる腐食	ナイフラインアタック(腐食)	停止時腐食(Down-Time Corrosion)	炭酸SCC					等温時効脆化	軟化(過時効)
	ラチェッティング			熔融塩腐食		有機酸腐食	CO <sub>2</sub> 腐食	迷走電流腐食	応力腐食		CO-CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O SCC				硫化物脆化	
				バナジウムアタック		塩酸腐食	冷却水腐食	酸素濃淡電池腐食	黒鉛化腐食		ポリチオン酸SCC				鋭敏化	
				燃料灰腐食		湿潤塩素・次亜塩素酸腐食	ボイラ水凝縮腐食	溝状腐食			塩化物SCC				シグマ相脆化	
				石灰灰腐食		硫酸腐食	孔食	粒界腐食			フッ酸中水素誘起割れ				ガンマプライム(γ'相)脆化	
				黒液スメルト腐食		リン酸腐食	フッ酸腐食	糸状腐食			硝酸塩SCC				歪時効	
				高温塩化物腐食		硝酸腐食	アミン腐食	蟻の巣状腐食			鋭敏化割れ				焼戻し脆化	

## 劣化損傷と破壊事故の概念

構造物は負荷を構成材料の部材の厚さで支えています。劣化損傷によって肉厚が減少したり、き裂が生じたりして、負荷を支えられなくなり(例を下図に示します)、倒壊や破裂の結果、部材の飛散、危険な内容物の漏洩などによって人身災害、火災、爆発などの大事故をもたらします。

### 減肉による破損事故の概念図



減肉によって、部材の単位面積あたりに掛かる荷重(応力)が、部材の強度を上回って部材が耐えられなくなった結果、破断する。

## 劣化損傷による破壊事故を防ぐには

表2に示すように、劣化損傷は、目に見えないものもあるが、減肉、き裂生成などの形態(病気の症状に相当)となって現れます。

表2 劣化損傷機構(メカニズム)と損傷形態(モード)

劣化損傷機構		劣化損傷形態(目に見える様子)
疲労		<b>割れ</b> (き裂発生→伝播→破断)
クリープ		変形、 <b>割れ</b> (ボイド形成→き裂発生伝播→破断)
腐食	自然腐食	<b>減肉</b> (全面的)
	乾食	<b>減肉</b> (全面および局所的)、侵食(膨れ、変形、割れ、減肉)
	湿食	<b>減肉</b> (全面、局所的及びピット状)
	応力腐食割れ(SCC)	<b>割れ</b> (き裂発生→伝播→破断)
エロージョン		<b>減肉</b> (全面的)
磨耗		<b>減肉</b> (全面的)
材質劣化 (材料特性低下)		材質低下(脆化、耐食性低下)は、目に見えない。 脆化は脆性破壊( <b>割れ</b> )、耐食性劣化は腐食( <b>減肉</b> 、 <b>割れ</b> )として出現する。

## 劣化損傷による破壊事故を防ぐには

- 損傷形態に着目した検査、対策（予知・予防）（人間に例えれば定期健康診断）が必要です。
- 人間は、生まれたら必ず死ぬが、構造物・設備・機器は破損の前に補修、更新することで、破壊（死）による被害を回避できます。
- どの劣化損傷機構が発生するかを予知して、機構に適したメンテナンス（検査、補修、更新）をすることで破壊を防ぐことができます。
- 破壊予知学の基礎として、次ページ以降で、9つの劣化損傷機構の概要を述べます。

## 疲労(Fatigue)

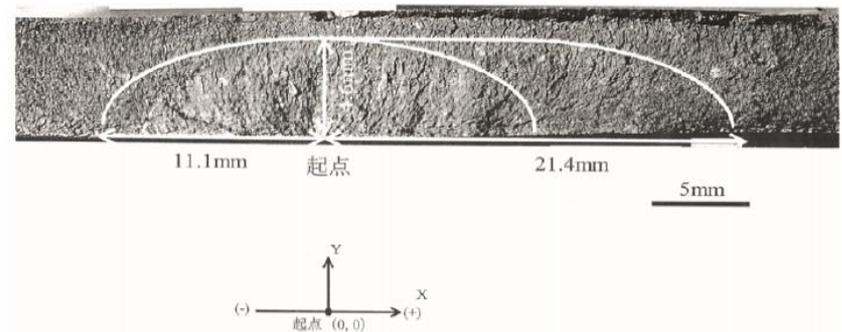
全ての材料は、静的負荷では破損しないレベルの応力でも、繰返し応力が負荷されると破断する。これを疲労と呼ぶ

## 疲労破壊例



インデューサー羽根破壊

H-II ロケット第1段エンジンL-7 液体水素ターボポンプ  
インデューサー羽根(チタン合金)  
の疲労破壊(ロケットは墜落)



破面観察(き裂の起点と進展)

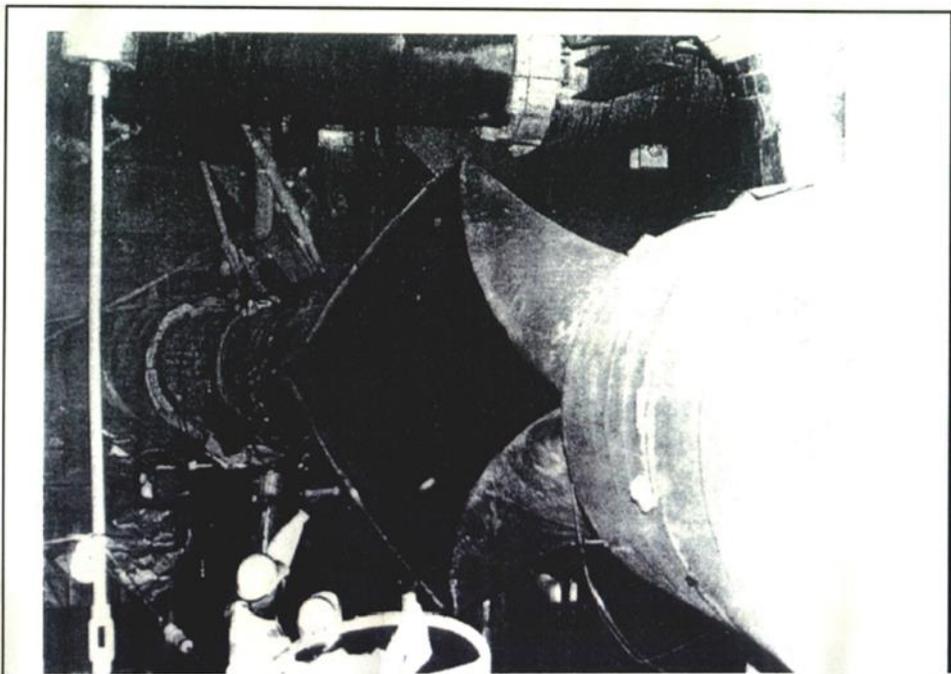
小林英男編著 破壊事故 共立出版

その後、エンジンが改良されたH-II Aロケットは、20年間で56回中55回の打ち上げに成功している。

## クリープ(Creep)

材料は、常温(材料ごとに決まる一定温度以下)では半永久的に変形・破断しない応力でも、高温では徐々に変形が進み、一定時間後に破断する。この現象をクリープと呼ぶ。

### クリープ破壊事例



米国発電所の再熱蒸気管(低合金鋼)溶接継手部のクリープ破壊

米国発電所における板巻溶接再熱蒸気配管でのクリープ破壊

20年使用後に破壊、高温蒸気噴出により8人死亡

## 自然腐食 (Natural corrosion)

金属は、地球上に化合物(酸化物、硫化物など)として存在し、還元(精錬など)されて、工業的に利用されている。従って酸素が存在する自然界においては、酸化物に戻ろうとして酸化する。この現象を自然腐食と呼ぶ。

### 自然腐食事例

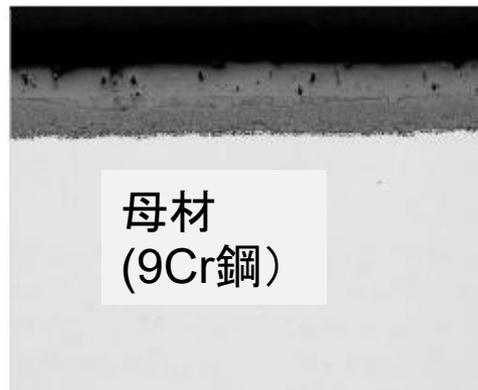


鉄さび(酸化鉄)の生成

## 乾食 (Dry corrosion)

金属が酸素、水蒸気(気体状態)、炭酸ガスなどの反応性気体または熔融塩などとの接触で直接反応し、金属表面に反応生成物(主に酸化物)の固体被膜を生成しながら金属が消耗する現象である。

## 乾食事例

ボイラ鋼管燃焼  
ガス中腐食 $Fe_3O_4$  (外層) $(Fe, Cr)O$  (内層)

二層酸化物構造

表面酸化物の管壁断面顕微鏡観察

## 湿食 (Wet corrosion)

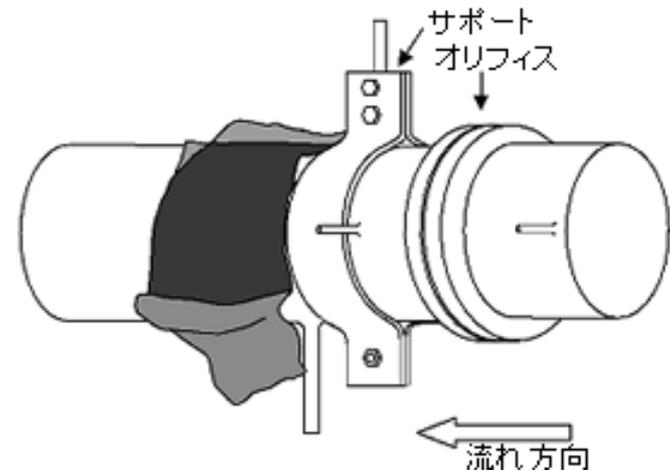
気体中で材料が溶出する乾食に対して、液体中で材料が溶出するのを湿食と呼ぶ。液体成分と材料(コーティングなど防食対策を含む)の組み合わせで、腐食の度合いが異なる。

## 湿食破損事故例

## FAC (流動加速腐食)



関西電力美浜発電所3号機復水配管オリフィス下流部からの蒸気噴出 2004年



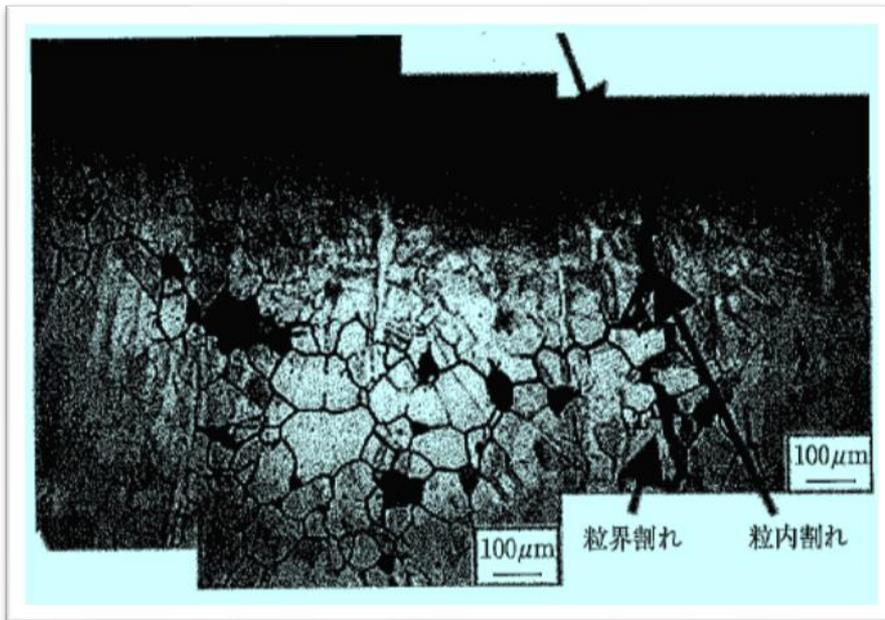
エルボ、オリフィス、レデューサー下流など乱流部にのみ発生するので、それらの部位での肉厚計測を徹底することで防げる

## 応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking (SCC))

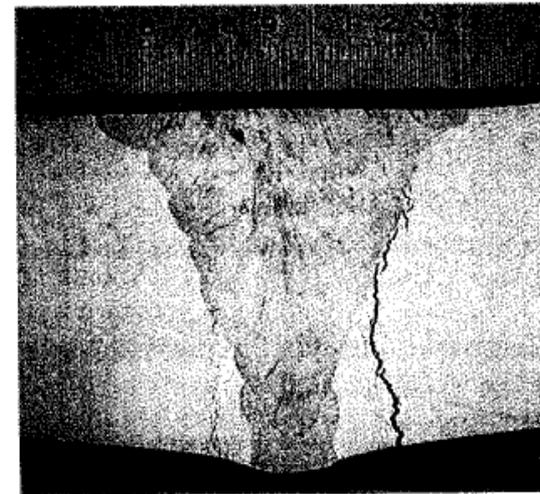
腐食は、材料が環境中に溶出する現象である。通常の腐食は、全面的あるいは局部的に材料が溶出して肉厚が減少するが、一定の応力下で、非常に狭い領域で、き裂状に腐食が進行する現象を応力腐食割れと呼ぶ。環境、材質、応力の3条件が揃った条件で発生する。

## 応力腐食割れ事例

材料: SUS304 (ステンレス鋼)、環境: 高温純水



原子炉シュラウドの応力腐食割れ断面顕微鏡観察結果



原子力発電再循環系配管溶接接手部の応力腐食割れ断面顕微鏡観察結果

## 摩耗 (Wear)

固体材料同士が、擦れ合う状態で使用されている場合、どちらか(または両方)が損耗し、肉厚が減少していく現象を摩耗と呼ぶ。

## 磨耗事例



シャフトのベアリング部摩耗例

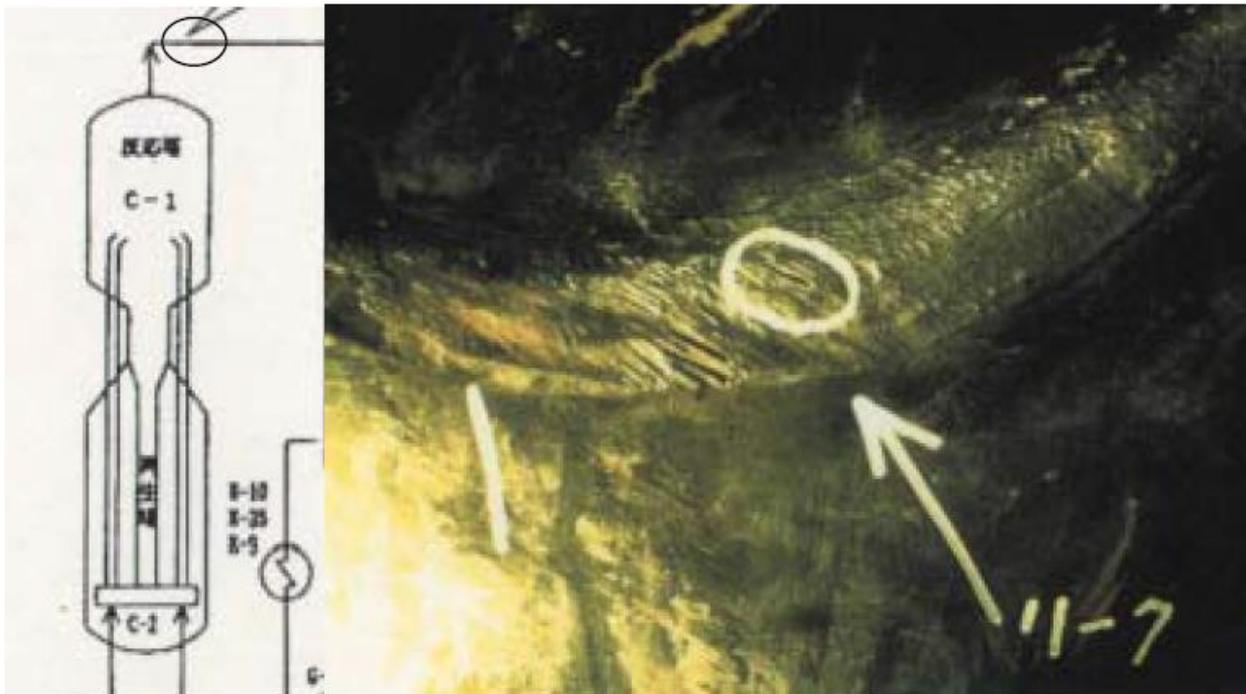


歯車摩耗例

## エロージョン(Erosion)

流体の繰り返し衝突(または衝撃)により材料が機械的に損耗を受け、その一部が脱離していく現象をエロージョンと呼ぶ。

## エロージョン事例



エロージョンによる減肉、漏洩、小火災

流体:LPG、ガソリン、分解ガスの混合ガス。

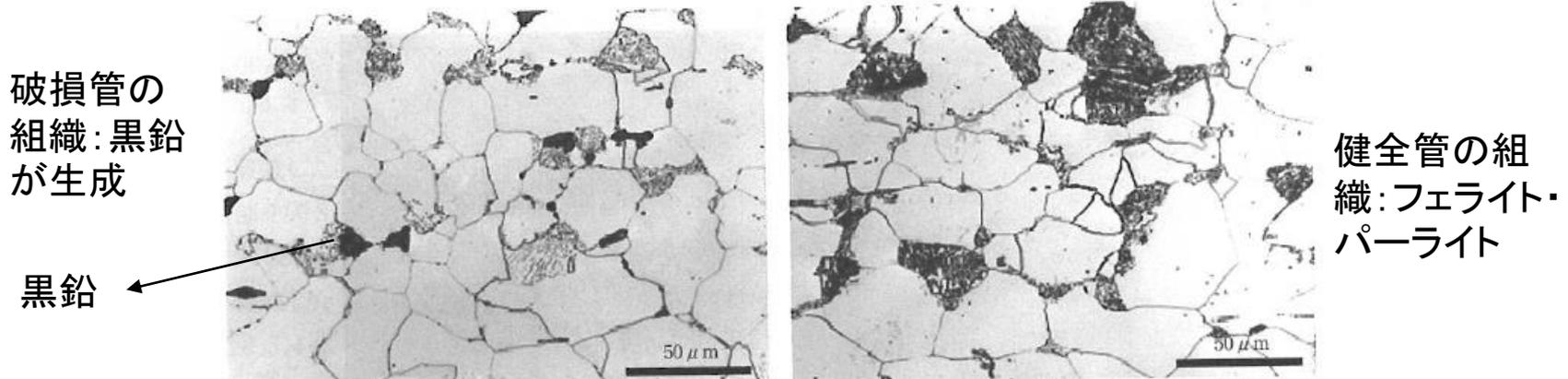
圧力: 0.113MPa

温度: 474°C

## 材質劣化 (Property deterioration)

金属は、使用開始時に最適の特性を示すように調整(熱処理などによって)されて使用されている。常温では、原子の移動が起きないため特性の変化は起きないが、高温では、原子がエネルギー的に安定な状態に移行するために特性の変化が起きる。この変化は使用上不都合なもの(例えば材料強度、延性、耐食性の低下)が多く、長期の使用後に事故の原因となる。この特性低下を冶金的劣化と呼ぶ。

## 冶金的劣化事例 (黒鉛化) 顕微鏡組織観察で比較



ボイラ鋼管(0.5Mo鋼)を476°Cで30年間使用して炭化物が黒鉛となり、材料が脆くなり、脆性的な破壊が発生した。

## 貴方の設備で発生が懸念される劣化損傷機構の確認方法

それぞれの劣化損傷機構が発生するための必須条件を表3に示します。対象とする設備における必須条件の有無を確認することで、どの劣化損傷機構の発生が懸念されるかを判断できます。複数の機構が懸念される場合もあります。

環境と温度は、材料によって依存度が異なります。

表3 各劣化損傷機構が発生する必須条件

劣化損傷機構		必須条件		
		応力	環境	温度
疲労		繰返し応力		
クリープ		引張応力		100°C以上
腐食	自然腐食		大気	
	乾食		腐食性ガス、熔融塩	
	湿食		腐食性液体	
	応力腐食割れ(SCC)	引張応力	腐食性液体	
エロージョン			雰囲気の流れ	
磨耗			固体接触	
材質劣化				100°C以上

## 劣化損傷機構確認ツール

前述のように、劣化損傷機構は、構成材料に負荷されている応力、使われている温度および環境によって発生が決まるので、それらの条件から、発生の有無を確認するツールが用意されています。

1) ”破壊予知AI CLASS 1” (<https://failure-prediction.info/構造物・機械・設備における劣化損傷>)で、あなたが気になっている構造物名を入力して、その構造物で、9つの劣化損傷機構の内、どの劣化損傷機構の「発生が懸念される」か「発生しない」かを確認できます。(将来の希望就職先会社の保有設備を想定すると実感が湧くかもしれません)

2) 構造物を特定しないで、材質および使用条件から 9つの劣化損傷機構について、「発生が懸念される」か「発生しない」かを確認したい場合は、”破壊予知AI CLASS 2“ (<https://failure-prediction.info/材料と使用条件による劣化損傷の予知/>)を使用ください。

FPAIに関するお問い合わせは以下へ

(株)ベストマテリア 木原重光 ([s-kihara@b-mat.co.jp](mailto:s-kihara@b-mat.co.jp))

破壊予知学習パックでは、

- ・163劣化損傷機構の詳細解説を提供します。
- ・プラント材料損傷事例集で、典型的な450の損傷事例を提供します。

さらに、一般的破壊事故に興味のある方は、失敗知識データベース (<https://www.shippai.org/fkd/index.php>) を利用して下さい。

科学技術分野の事故や失敗の事例を分析し、それに至る脈絡 (=「シナリオ」) や、得られる教訓をまとめたデータベースです。

また、

- 破損予知AI Class 3では、小分類163の劣化損傷機構について、どの機構が発生するかを確認できます。
- Class 4では、懸念される劣化損傷がどの程度進んでいるかを確認できます。
- Class 5では、保有されている劣化損傷に関するデータをより高度なAI手法によって、精度よく予知する方法を提供します。

下記の保全ツールに興味のある方は、以下にアクセス願います。

RBM(リスクベースメンテナンス)  
<https://b-mat.co.jp/>または  
<https://ai-rbm.com/>

FFS(供用適正評価基準)  
[https://www.jmuc.co.jp/imc/services/itsystem\\_uni.html](https://www.jmuc.co.jp/imc/services/itsystem_uni.html)