

ベストマテリア材料基礎講座

- すべての構造物の破損は、材料の破損によって起こる。
- 材料は、使用環境において経年的な劣化損傷が進展して破損に至る。
- 材料の劣化損傷機構は、147種類（表 1 参照）であり、それ以外はない。
- **これらの劣化損傷機構全てを予知予防することで構造物の破壊を防ぐことができる。**
- 147の劣化損傷機構は、以下の9機構に分類できる。

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

Matguide (<https://matguide.com>)
で閲覧できる
問い合わせ：

木原重光 （株）ベストマテリア
s-kihara@b-mat.co.jp

- 9機構の各論を以下に述べる。

9 機構については、技術者としての常識となることを期待しています。

表 1 金属材料の全劣化損傷機構(147) (中分類9機構)

中分類	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			
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	燃料灰腐食	淡水腐食	塩酸腐食	塩化アンモニウム腐食	炭酸腐食	酸素濃淡電池腐食	すきま腐食	硫化物応力腐食(水素誘起)割れ(SSC)	硝酸塩SCC	凝着摩耗	エロージョン・コロージョン	降下スラッグエロージョン	水素脆化	鋭敏化	SR割れ
	低サイクル疲労	クリープ破壊	凝縮腐食	水蒸気酸化	石炭灰腐食	海水腐食	湿潤塩素・次亜塩素酸腐食	水硫化アンモニウム腐食	酸性サワーウォーター腐食	溝状腐食	ガルバニック腐食、異種金属接触腐食	水素誘起割れ（水素ブリストア）	有機酸割れ	滑り摩耗	キャビテーションエロージョン	石炭粒子エロージョン	水素脆化-水素化物(チタン)	シグマ相脆化	クラッド剥離
	転動（接触）疲労	長時間クリープ破壊	外面応力腐食割れ	メタルダスティング	黒液スメルト腐食	汚染海水腐食	硫酸腐食	アンモニウムアタック	ほう酸腐食	粒界腐食	デポジット腐食、堆積物(付着物)下腐食	アルカリ（苛性ソーダ）割れ	高温水割れ	腐食摩耗	固体粒子衝撃エロージョン		脱炭	ガンマプライム（γ'相）脆化	クラッド下割れ
	振動疲労	短時間クリープ破壊	保温材下腐食	ハロゲン化腐食（高温ハロゲン腐食）	高温塩化物塩腐食	流れ加速型腐食（FAC）	リン酸腐食	CO ₂ 腐食	アルカリ腐食 苛性ガウジング	糸状腐食	停止時腐食（Down-Time Corrosion）	アミン割れ	変色皮膜破壊	フレッティングコロージョン（擦過腐食）	液滴衝撃エロージョン		侵炭（浸炭酸化）	歪時効	475℃脆化
	フレッティング疲労	クリープ脆化	保温材下応力腐食割れ	硫化	高温炭酸塩腐食	酸素濃淡電池（養鱈酸素）腐食	硝酸腐食	冷却水腐食	キレート腐食	蟻の巣状腐食	応力腐食	カーボネート(炭酸)割れ	シアンSCC	疲労摩耗	インレットアタック		窒化	焼戻し脆化	異材溶接脆化
	腐食疲労	クリープ疲労破壊		高温硫化	水素侵食	温度差電池腐食	リン酸塩腐食	ボイラ水凝縮腐食	ナフテン酸腐食	化学洗浄腐食	黒鉛化腐食	CO-CO ₂ -H ₂ O SCC	アンモニウムSCC	アブレシブ摩耗（ひっかき摩耗）	インピンジメントアタック		液体金属脆化	軟化（過時効）炭化物球状化	
	熱疲労	異材溶接割れ		高温硫化物(硫化水素)腐食	液体金属腐食	微生物腐食	フェノール腐食	孔食	水線腐食	大気圧タンク底板（内面）腐食	アルカリサワーウォーター腐食	ポリチオン酸SCC	照射誘起応力腐食割れ(IASCC)		スラリーエロージョン		黒鉛化	シグマ相とカイ相脆化	
	熱衝撃（ファイアクラッキング）	リラクゼーション		溶融塩腐食		土壌腐食	湿性硫化物腐食、湿潤硫化水素腐食	フッ酸腐食	ナイフラインアタック（腐食）	選択腐食（脱アロイ）脱成分腐食		塩化物SCC			フライアッシュエロージョン		等温時効脆化	照射脆化	
	ラチェッティング	Type IV クラッキング		バナジウムアタック		有機酸腐食	湿性塩化腐食、湿潤塩化水素腐食	アミン腐食	迷走電流腐食	層状（剥離）腐食		フッ酸応力腐食(水素誘起)割れ			スートフローエロージョン		キルド鋼の熱間脆化、熱間延性低下	体積膨張（スウェリング）	

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亀裂が発生し、進展して破断する。これを疲労と呼ぶ。

小分類として9機構がある。

過去の疲労破壊重大事故例

- ・世界初のジェット旅客機「コメット」の機体疲労破壊による空中分解
- ・日航ジャンボ機の隔壁疲労破棄による墜落
- ・高速増殖原型炉(もんじゅ)の配管温度計保護管の疲労破棄によるナトリウム漏れ
- ・H-II ロケット8号機の第1段エンジン LE-7の液体水素ターボポンプのインデューサー羽根 (チタン合金) の疲労破壊による墜落。

疲労破壊部分

破断面の模様から疲労
を確認できる



海底から回収されたインデューサー

小林英男編著 破壊事故 共立出版

クリープ (Creep)

材料は、常温では半永久的に変形・破断しない応力下でも、高温（材料ごとに決まる一定温度以上）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。

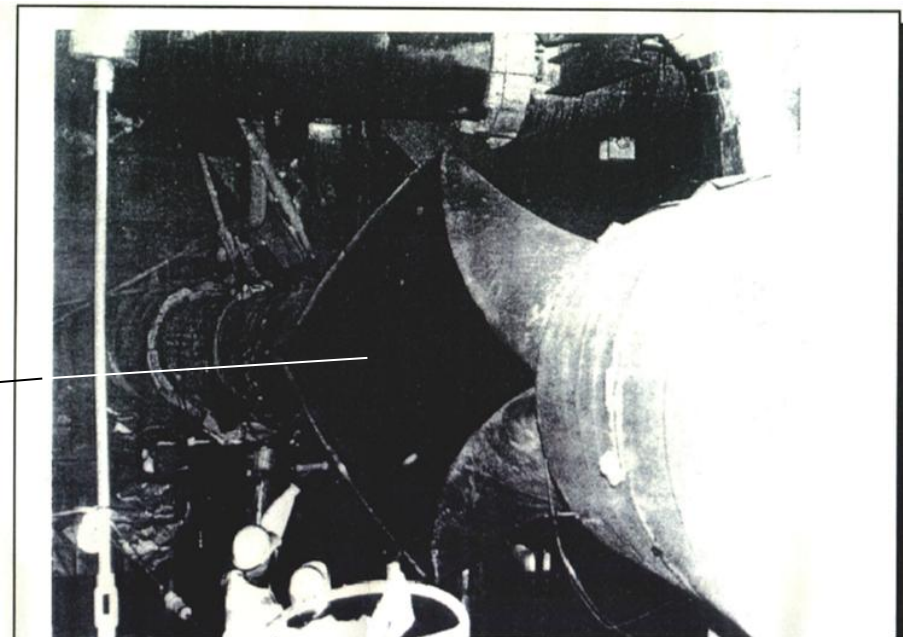
小分類として9機構がある。

クリープ破壊事例

米国発電所における20年使用の板巻溶接再熱蒸気配管での溶接部のクリープ破壊

開口部

高温蒸気噴出により8人死亡



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

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（さびの発生）。この現象を自然腐食と呼ぶ。

小分類として5機構がある。

自然腐食事例



鉄さび（酸化鉄）の生成

美観上もあり、通常塗装によって鉄さび発生を防止しているが、塗装も劣化する。橋梁、送電鉄塔などは、塗装の更新周期を管理して、自然腐食を管理している。

乾食 (Dry corrosion)

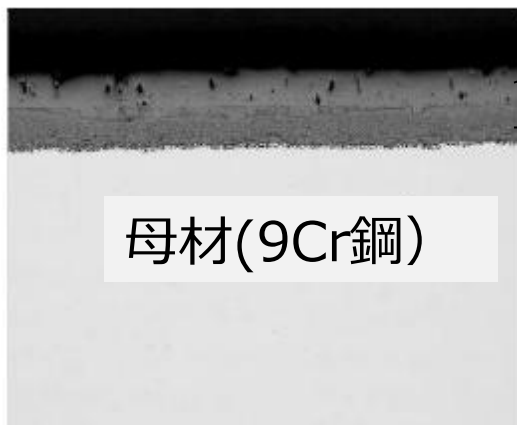
金属が酸素, 水蒸気 (気体状態), 炭酸ガスなどの反応性気体または溶融塩などとの接触で直接反応し, 金属表面に反応生成物 (主に酸化物) の固体被膜を生成しながら金属が消耗する現象である。

小分類として16機構がある。

乾食事例



ボイラ鋼管燃焼ガス
中腐食



→ Fe_3O_4 (外層)

→ $(\text{Fe}, \text{Cr})\text{O}$ (内層)

二層酸化物構造

母材(9Cr鋼)

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。

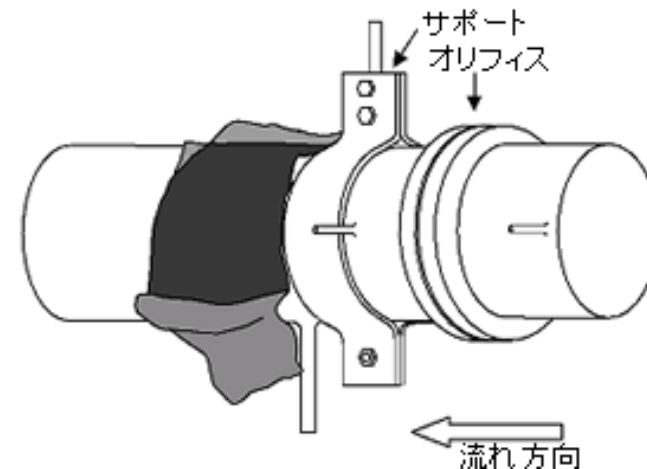
酸、アルカリなど各種腐食性液体中での腐食があり、多くの損傷機構がある。
小分類として52機構がある。

湿食破損事故例

関西電力美浜発電所3号機復水配管19年間使用にオリフィス下流部における流動加速腐食(FAC) *¹ による蒸気噴出（2004年）、保守作業員4人死亡



小林英男編著 破壊事故 共立出版



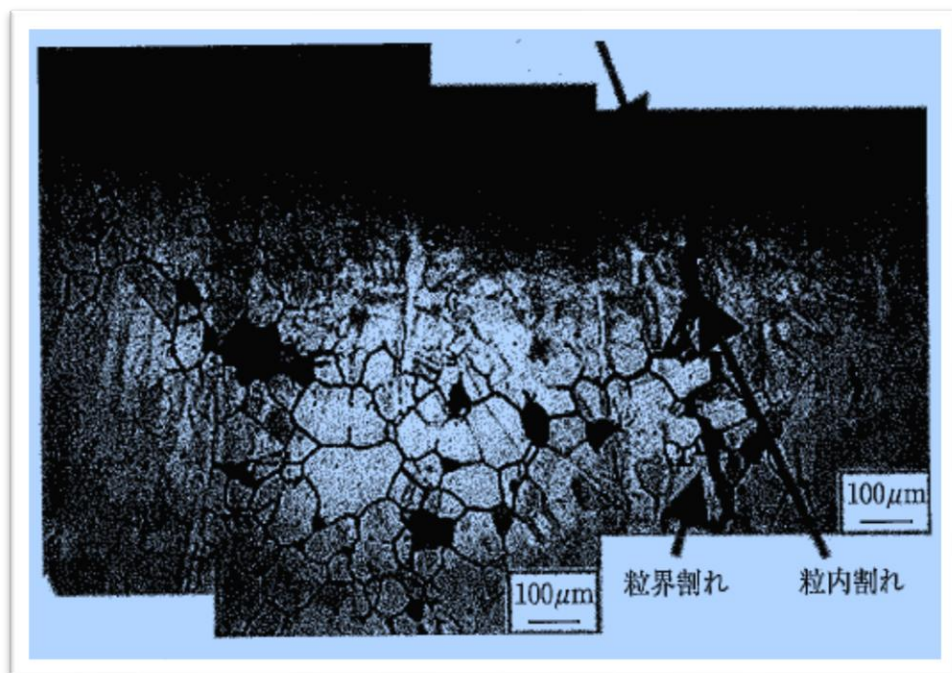
*1 乱流部で腐食減肉が加速される。エルボ、オリフィス、レデューサー下流など乱流部にのみ発生する

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

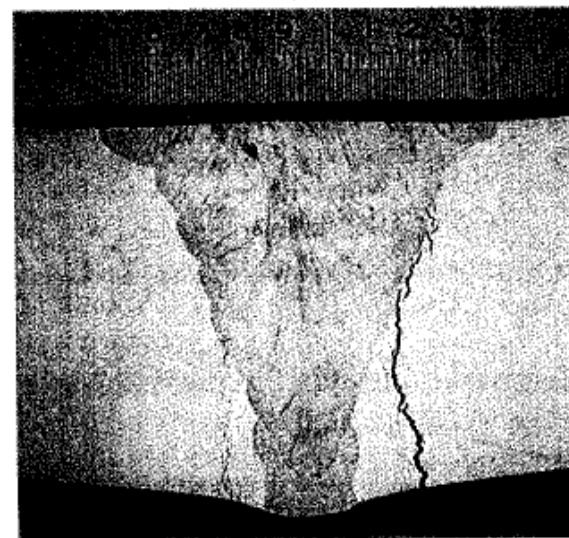
腐食は、材料が環境中に溶出する現象である。通常の腐食は、全面的あるいは局所的に材料が溶出して肉厚が減少するが、一定の応力下で、非常に狭い領域で、き裂状に腐食が進行する現象を応力腐食割れと呼ぶ。環境、材質、応力の3条件が揃った条件で発生する。

小分類として16機構がある。

応力腐食割れ事例 材料：SUS304（ステンレス鋼）、環境：高温純水



原子力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)

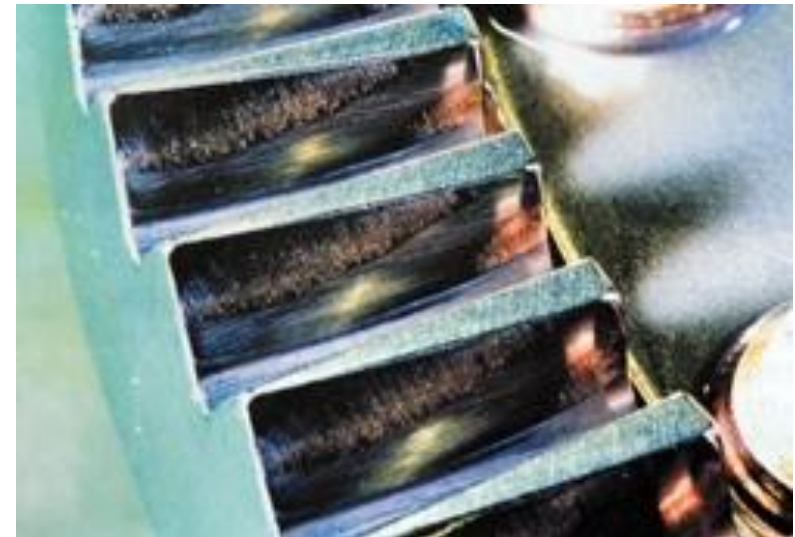
固体材料同士が、擦れ合う状態で使用されている場合、どちらか（または両方）が損耗し、肉厚が減少していく現象を摩耗と呼ぶ。

小分類として6 機構がある。

摩耗事例



シャフトのベアリング部摩耗例



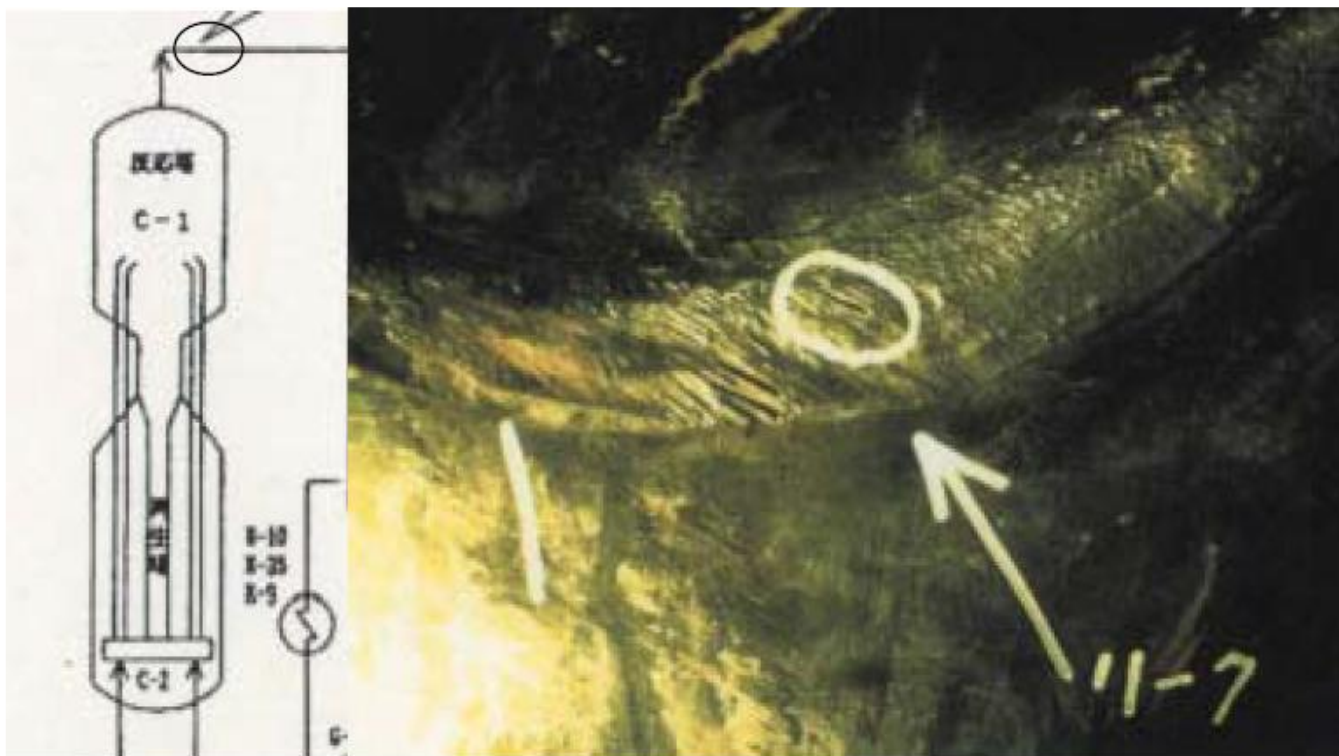
歯車摩耗例

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。

小分類として11機構がある。

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℃

高圧ガス事故概要報告 整理番号2003-213

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。この特性低下を材質劣化(冶金的劣化)と呼ぶ。

小分類として23機構がある。

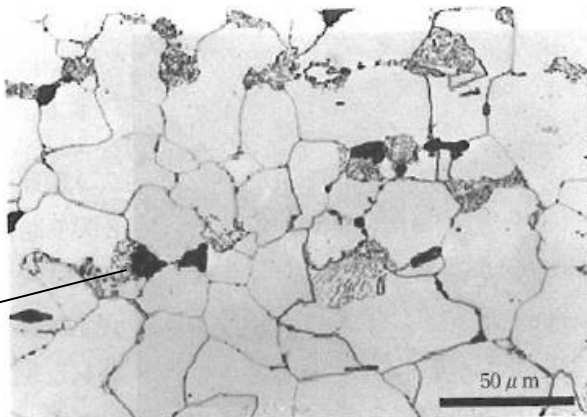
材質劣化事例

ボイラ鋼管を476℃で30年間使用後、脆性的な破壊が発生した。

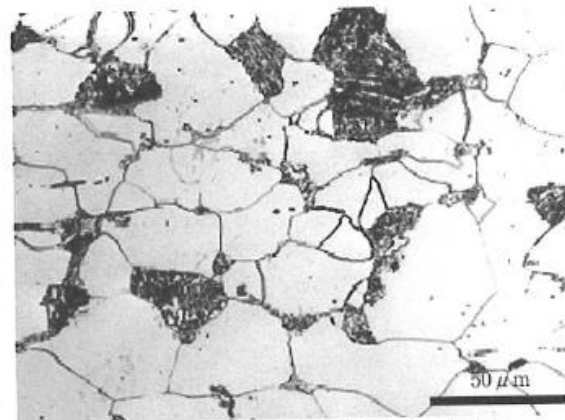
顕微鏡組織観察の結果、炭化物が黒鉛に変化する黒鉛化による脆性破壊と断定された。

破損管の組織：
黒鉛が生成

黒鉛



(a) 破壊した管（黒い部分は黒鉛化部、縞状と点状の部分はパーライト）



(b) 健全管（黒い縞状の部分はパーライト）

健全管の組織：
フェライト・パーライト