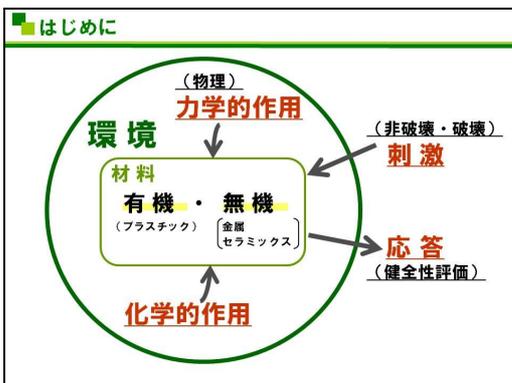


第4章 材料安全工学における教育コンテンツの一例

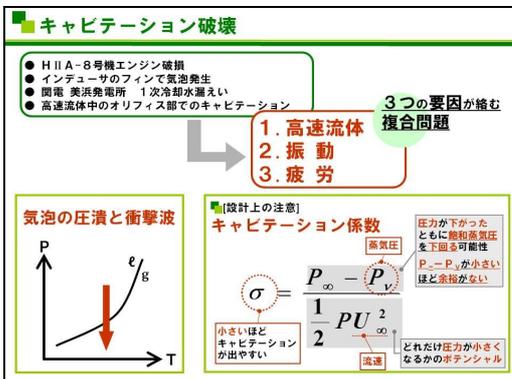
前年度に開発を行った教育プログラムに従って、材料安全工学に関する教育コンテンツを整備することができたので、その一部分を以下に示す。内容としては、まず材料の劣化をどのようにマネジメントするかという寿命の考え方を総括する。次に、材料ごとの物理的・化学的な劣化損傷モードの分類と基礎的事項をまとめた。

さらに、これらを防止するための技術(防食技術など)と検出するための技術(非破壊検査技術)などの劣化対策技術を示し、材料安全工学の基盤力を養成することを目的とした。

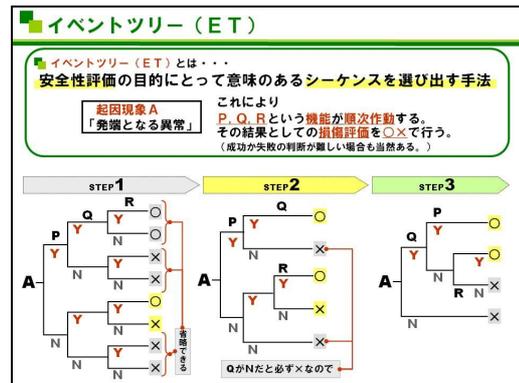
1



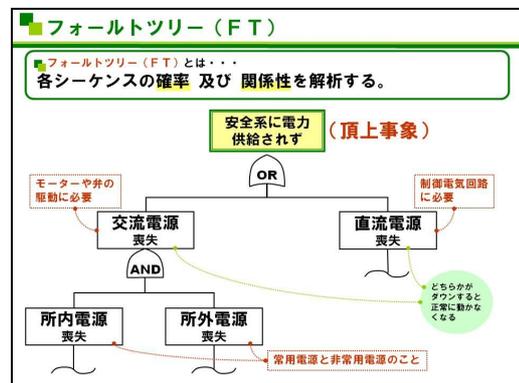
2



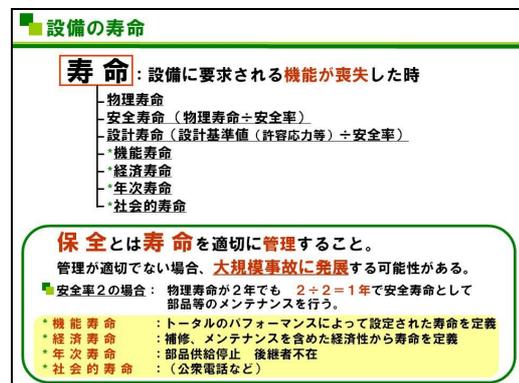
3



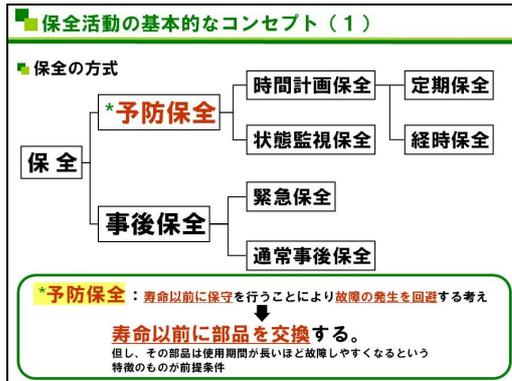
4



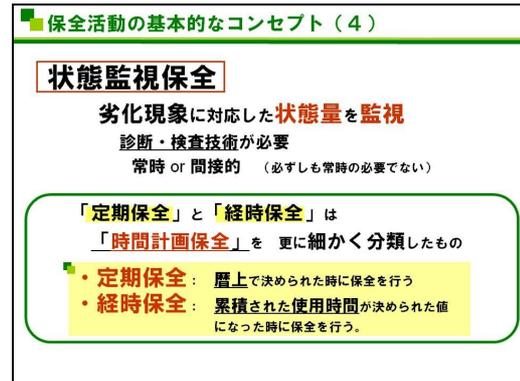
5



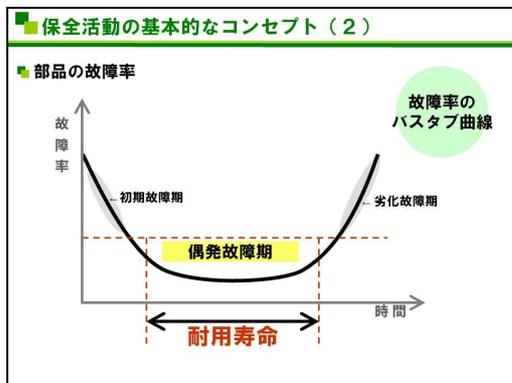
6



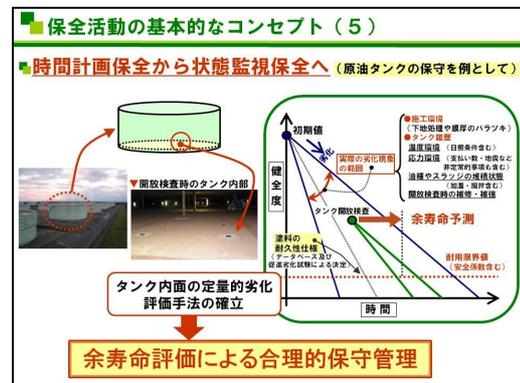
9



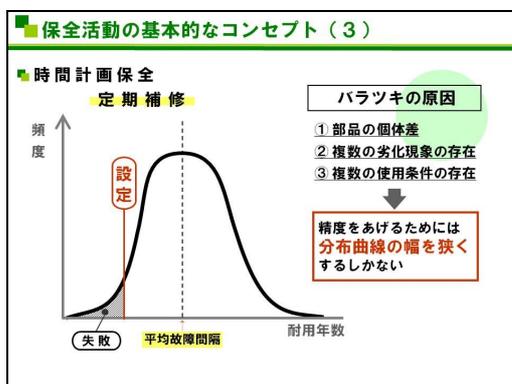
7



10



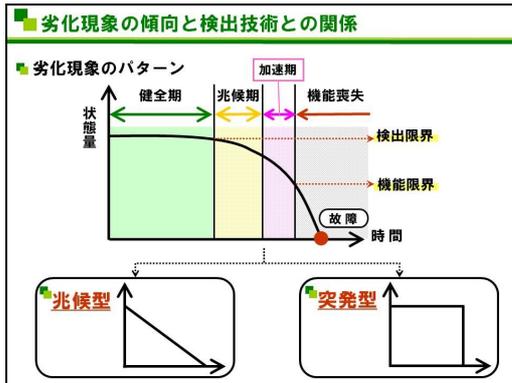
8



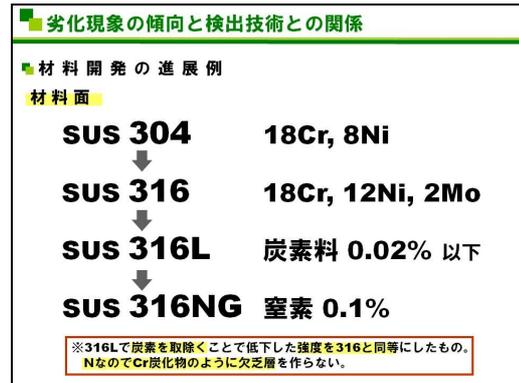
11

- ### ■ 劣化現象の傾向と検出技術との関係
- 材料の劣化現象が起因した大事故
- 1940 タコマ橋の崩壊
 - 1943 リバティ船の脆性破壊
 - 1954 ジェット旅客機コメットの空中分解
 - 1969 英国の原子力発電所低圧蒸気タービンのハースト
 - 1972 関西電力海南発電所3号機破損事故
 - 1974 フリックスフローの化学プラント爆発
 - 1980 水添硫磺装置反応塔の気密試験中の脆性破壊
 - 1984 インドホールルの化学工場の毒ガス漏洩
 - 1985 日航ジャンボ機墜落事故
 - 1991 関西電力美浜発電所2号機蒸気発生器蒸気発生細管破断
 - 1992 エルアル機のヒューズピン破断による墜落
 - 1995 阪神大震災における鋼構造物の破壊事故
 - 1995 高速増殖炉もんじゅのNa流出事故
 - 1999 H-1ロケット8号機の打ち上げ失敗
 - 1999 JR西日本新幹線トンネルにおける
 - 2004 関西電力美浜発電所3号機の配管破裂で蒸気進出
- ◆人命損失 (破壊・爆発事故)
 ◆環境破壊 (漏洩事故)
 ◆インフラ・装置設備・輸送機器の損害による経済損失
- 失敗知識データベース (科学技術振興機構) <http://shipoil.jst.go.jp/Rtd/Search>

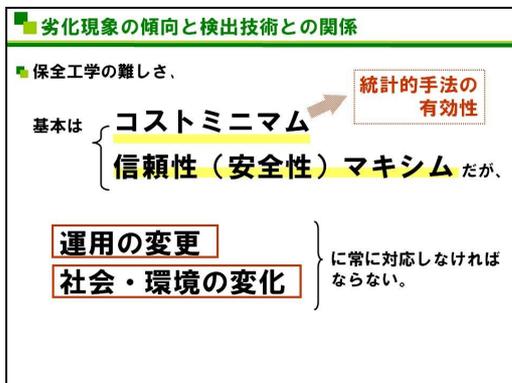
12



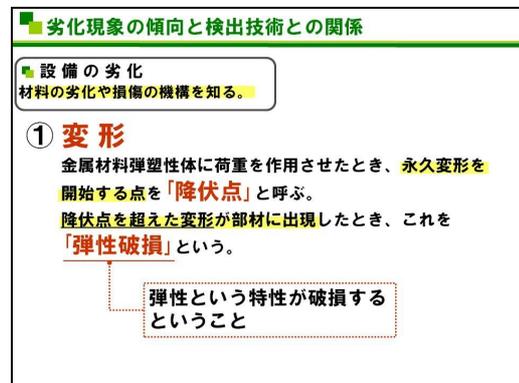
15



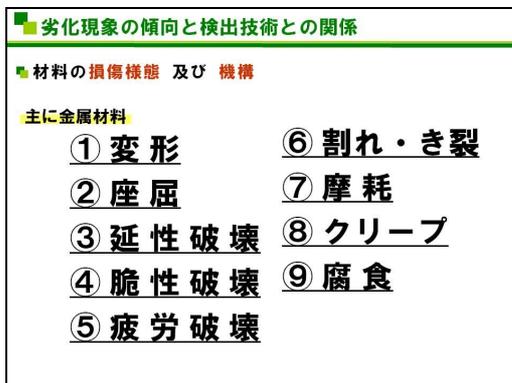
13



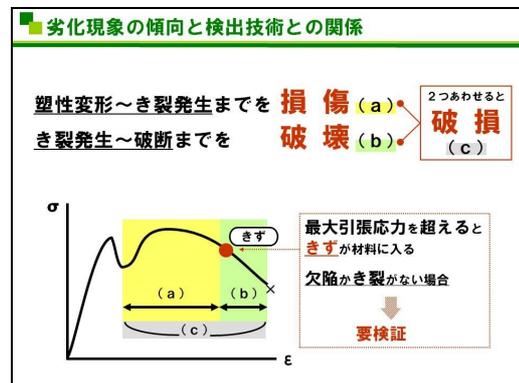
16



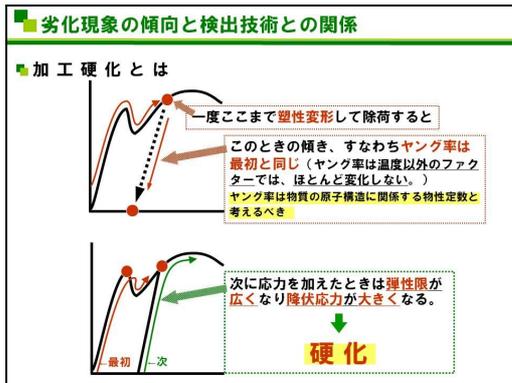
14



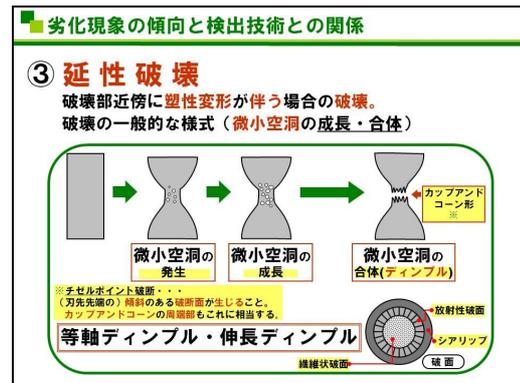
17



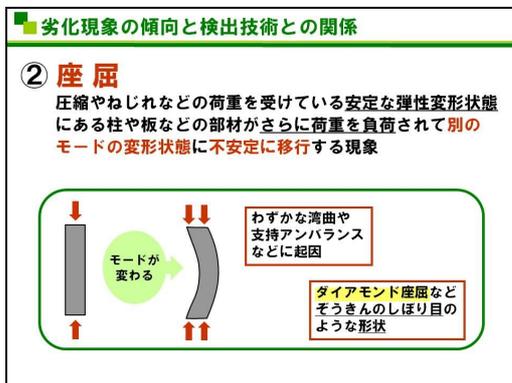
18



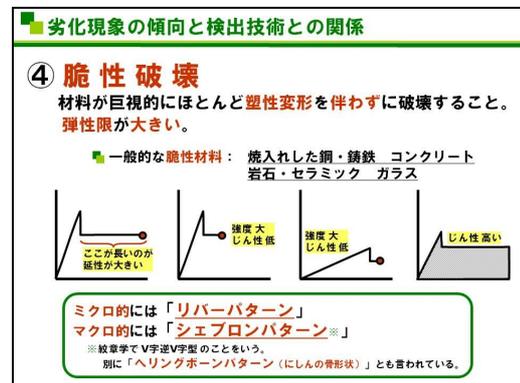
21



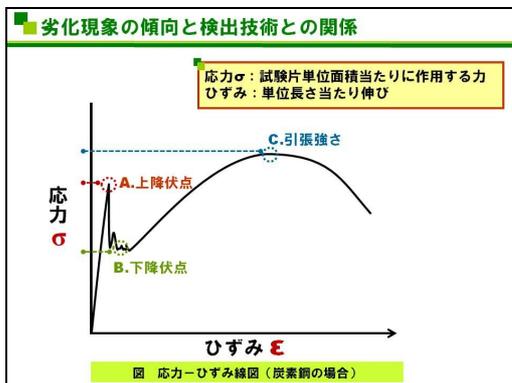
19



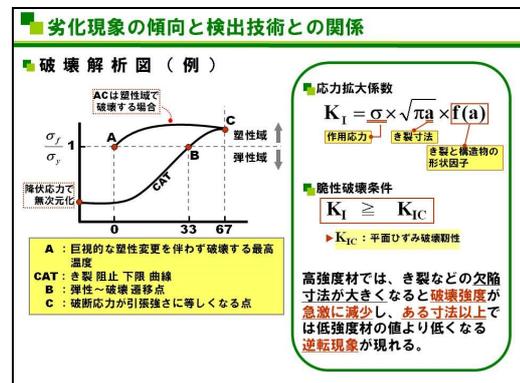
22



20



23



24

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■脆性破壊と延性破壊の違い

垂直破断
脆性破壊

カップアンドコーン型破断
延性破壊

27

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■引っぱり試験と疲労試験

引っぱり試験での加える応力と試験材の歪みの関係

疲労試験、静的な応力を加える引っぱり試験で現れる降伏強さより小さな応力で疲労破壊する。

25

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■靱性評価

ハンマ

切欠きを持った試験片

シャルピー衝撃試験機

28

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■疲労破壊問題

どちらが壊れやすいか

A B

26

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

⑤ 疲労破壊

実用構造物は次のような応力の繰返しを受ける。

- ① 運転中の負荷変動
- ② 温度変動
- ③ 内部流体や駆動装置の回転・振動
- ④ 装置の起動・停止の繰返し
- ⑤ 風・地震などの外力の変化

変動する応力の振幅が材料の静的な引張強さや降伏点以下であっても損傷や破壊が生じる。この現象を**疲労**という。

S-N曲線

ピーチマーク (貝殻模様)

ピーチマークはマクロ的なもので、変動荷重を断続的に受ける場合に目で見える傷として現れる。変動荷重を一定に受ける場合はピーチマークは現れないが、ミクロに見ればストライエーションが必ずみられる。

ストライエーションの1条が1負荷サイクルに相当する

ストライエーションの数を調べれば破壊に至ったサイクル数を予測できる。

29

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■疲労による破壊

疲労による破壊が 90% }
応力集中部の破壊が 90% }

➡ 応力集中部の疲労破壊が破壊の要因として最も多い

■破壊対策

- ① 応力集中を低減化する ➡ 設計・機械的対策
- ② 抵抗を大きくする ➡ 材料選定・材料的対策

費用対効果

■設計のアプローチ

Safe life Design ➡ 損傷を許容しない。

Fail safe Design ➡ 損傷は許容するがメンテナンスで安全性確保。

30

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

⑥ **割れ・亀裂**
 設備そのものの寿命を支配する**重要管理項目**

理由：▶ **設備の構造的破壊**
 ▶ **内部流体の漏洩**

脆化
 温度・環境（化学的）・材料の
 3因子が複雑に関係

33

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■**焼戻し脆化**

遷移温度

試験温度

●未劣化材
 ●脆化材

●**焼戻し脆化による遷移温度の上昇概念図**

31

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■**主な脆化現象**

◎**475°C脆化** ◎**σ相脆化**
 ◎**焼戻し脆化** ◎**黒鉛化**
 ◎**水素脆化** ◎**浸炭**
 ◎**水素侵食**

34

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■**主な脆化現象**

■**水素脆化**
 鋼中に侵入した水素が鋼材の機械的性質を低下させる現象。
 鋼中で水素化物（硬い）を形成したり、空孔・介在物境界で分子状水素を再生成する。
 炭化物を安定化させ、Fe₃Cの分解を抑制するためCrやMoは効果的とされている。

■**水素侵食（水素アタック）**
 ネルソン反応 $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$

■**σ（シグマ）相脆化**
 Crを15%以上含む鋼材において、540～815℃の温度範囲加熱されると硬くて脆いσ相と呼ばれる相の析出が起こる。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部におけるフェライトの母材溶接後熱処理における析出または使用時の高温における析出が起因となる。

32

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■**主な脆化現象**

■**475°C脆化**
 (375～540℃)にさらされた高Crステンレス鋼における現象。鋼中のクロム炭化物のスピノーダル分解(※4)と呼ばれる炭化物の形態変化が起こり常温で硬くなり伸びが減少する。
 溶接時の熱をおさえる急速冷却、高温処理による再固溶。
 スピノーダル分解(※4) → 全体に細かく分散した相分離が生じる。 → 高クロムの硬い層が現れる。
 (※4)スピノーダル分解：分解によって組成に濃淡が生じる現象。熱的平衡組成に起因する。(=相分離) 金属、セラミックス、ガラス等で起こる様々なもの。

■**焼戻し脆化**
 低合金鋼が焼戻し温度近傍の温度(325～575℃)に加熱された際に鋼中の不純物(P, S, Pb, Sn, As)等が鋼材中を拡散して結晶境界に偏析、鋼材の機械的性質を低下させる現象。
 マンガンは主要元素であり、タイタニウムは電化マンガン。
 良い効果しかない。
 焼戻しは、硬いマルテンサイト組織の状態でじん性を与えるために行われる。

35

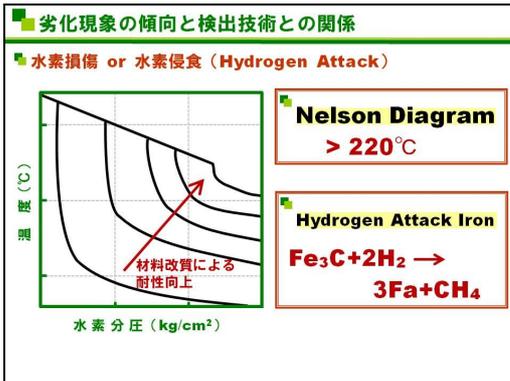
■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■**水素損傷 or 水素侵食（Hydrogen Attack）**

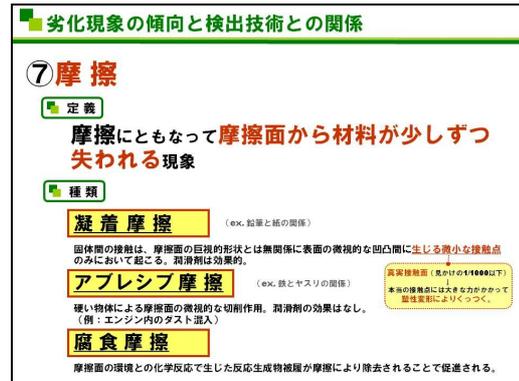
◎ **金属中にHが侵入しCH₄を形成、ふくれ、粒界割れ等を起こす。**
 ◎ **Cの多い鋼中で発生、脱炭も伴う。**

Fe₃C + 2H₂ → 3Fe + CH₄

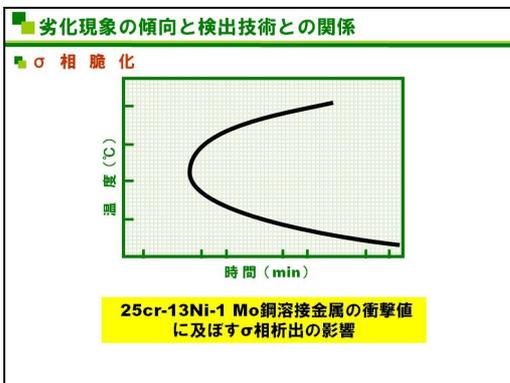
36



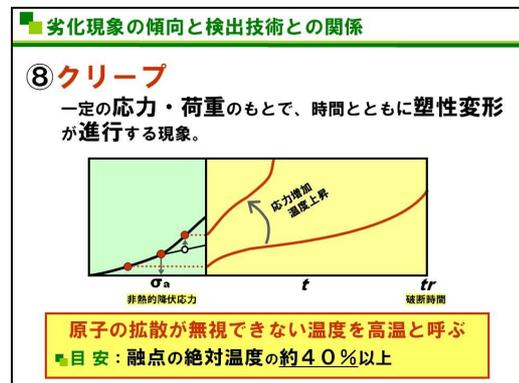
39



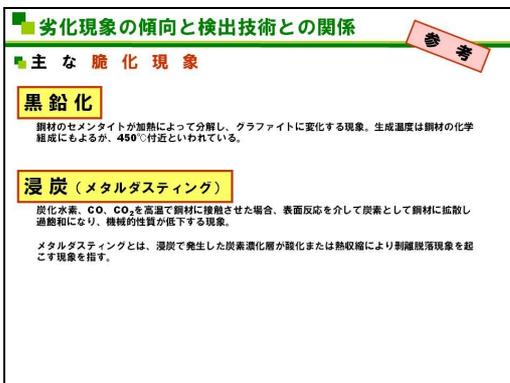
37



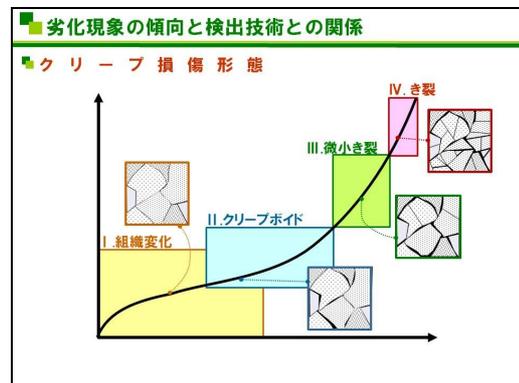
40



38



41



42

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

9 腐食

■定義

腐食とは、**金属**とそれがおかれた**環境中の化学成分**とが反応して**化合物**に変わることによって**消耗**し、**金属製品**の性質が低下し、ついに**使用に耐えなくなる現象**。

■腐食が引き起こす経済損失

直接損失：GDP 2~3%

間接損失：GDP 5~7%以上

45

■劣化現象の傾向と検出技術との関係 参考

■主な特徴的な面 **高分子材料の破壊・劣化**

膨潤・溶解

ポリマーと溶剤の分子極性が一致 → 溶剤はポリマー中に浸透して、溶媒和が形成され、その結合の強さが分子間相互の凝集力より勝ると分子間を引き離して溶剤分子が侵入する。 → さらに進むと溶解

*膨潤・溶解はともに形態上の変化で、分子量は変化せず材質の変化ではない。

き裂（ソルベントクラック）

溶剤が浸透拡散されることによって分子鎖間に存在するファンデルワール力が失われ、分子間の凝集が生じクラックに至る。

+内部応力・残留応力

環境応力破壊：
ソルベントクラックと似かよっているが、結晶性ポリマーに表われ、非晶性ポリマーには表れない。

43

■劣化現象の傾向と検出技術との関係 参考

■損失のとらえ方

直接損失

- 腐食により破損した装置の**部品交換修繕費**
- 装置の**稼働率の低下**
- 過大設計による**浪費**（過剰な腐れしろ）

間接損失

- 装置停止で**得られるはずの利益**が得られなくなる
- 腐食部分からの流出による**製品逸失**
- 腐食部分からの**異物混入**による製品の汚染
- 腐食が原因となり**事故が発生し第三者に損害**を与えることによる損失

46

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■高分子の**化学劣化**

- ◎ **熱酸化劣化**
- ◎ **熱劣化** （不活性雰囲気）
- ◎ **光劣化** （主にUV）
- ◎ **オゾン劣化**
- ◎ **水劣化** （酸・アルカリは触媒作用）

44

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■高分子材料の破壊・劣化

- ・脆性破壊 ◎ **膨潤・溶解**
- ・延性破壊 ◎ **き裂**
- ・疲労破壊 ◎ **化学劣化**

47

■劣化現象の傾向と検出技術との関係 参考

■主な**化学劣化**

熱酸化劣化
熱による分子運動の活性化 + 酸素（酸化剤） → 主鎖切断、ランダム切断、解重合、架橋、側鎖脱離

熱劣化
熱及び外部から加わるストレス（せん断力）によってラジカルが生成し劣化が進行する。 → ラジカルの生成により自動酸化が生じ、材料の軟化現象が現れる。

光劣化
主にエネルギーの大きな低波長の光が影響する（**紫外線劣化**）。油や金属イオンの存在でさらに加速されることもある。熱によっても加速される。

オゾン劣化
ゴムの低分子化、オゾンクラック

水劣化
加水分解反応。 エステル基、カルボニル基など親水基が存在する場合、酸・アルカリは添加剤がそのような触媒となる。性質を有する場合は注意を要する。

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■コンクリートの破壊・劣化（1）

- ◎アルカリ骨材反応
- ◎炭酸化（中性化） CO₂による。
- ◎凍害 水による。凍結による体積変化約9%
- ◎塩害 Cl⁻による。既にひび割れがある海に近い場所ではきわめて深刻。

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■センサの概要

外部情報 → 五官に相当する部位とそこから得られる情報を数値化する部位からなる機器（情報変換） → コンピューター等（信号処理）

外部情報 → センサ → 電気信号

センサ：計測の心臓部（信号変換の要）

◎センサとは「ある測定しようとする量を主に電気信号のような数値化できる量に変換する素子」

■センサ（Sensor）の語源
ラテン語の "Senus" → 英語の "Sense" → トランスジューサー（Transducer）
Sensor：感知装置
Sense organ（感覚器官）

■同義語
・ピックアップ（Pick-up）
・ディテクタ（Detector）

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■コンクリートの破壊・劣化（2）

アルカリ骨材反応

$$\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$$

ナトリウムシリケート（膨潤性）

炭酸化（中性化）

$$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaCl}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$$

ひび割れ 不具合の補修

- ★エポキシ樹脂等による埋込
- ★表面コーティング
- ★脱塩・再アルカリ化工法

遊離（塩害の原因）

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■センサ機能

外部情報 入力 → センサ → 出力 → 電気信号

- ◎物理量（変位、力、速度、温度、圧力、光）
- ◎化学量（濃度 pH, DO, ...）

測定量 X → 情報変換器 → 中間媒介量 Y=f(X) → 電気信号発生器 → 電気信号 Z=F₁(Y)=F₂(X)

センサ機能的成り立ち

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■コンクリートの破壊・劣化（3）

アルカリ骨材反応

コンクリート中のセメントが水取ると、それに含まれるNa、Kなどのアルカリ金属元素が組織内の毛細管空隙やゲル空隙に溶出し、骨材の硬石を構成する低結晶性可溶性シリカやシリケート鉱物のSiO₂分と水を介して反応して、カリウムシリケート、ナトリウムシリケートとなる。

$$\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$$

このゲルの膨張性がコンクリート組織内の各所にひび割れを生じさせる。

炭酸化（中性化）

コンクリート中毛細管空隙に侵入したCO₂ガスの関与する中和反応。コンクリートが薄粉やCl⁻を含む水和剤等を利用している場合、塩化物イオンはフリーデル氏塩、硫酸イオンはエトリンガイトとして固定化されているが、CO₂との反応で分解すると塩化物イオン、硫酸イオンを遊離するため塩害の原因となる。

- ◎フリーデル氏塩：3CaO・Al₂O₃・CaCl₂・10H₂O + 3CO₂ → 3CaCO₃ + 2Al₂O₃ + CaCl₂ + 7H₂O
- ◎エトリンガイト：3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O + 3CO₂ → 3CaCO₃ + 2Al₂O₃ + 3CaSO₄ + 29H₂O

参考

■劣化現象の傾向と検出技術との関係

■各種センサにおける情報変換の仕組み

ほとんど全ての物理効果、化学効果が利用可能

- ◎電力発生（電流・電圧を発生する発電型センサ）
- ◎L, C, Rの変化

測定量 X → 情報変換器 → 中間媒介量 Y=f(X) → 電気信号発生器 → 電気信号 Z=F₁(Y)=F₂(X)

【上記を単独プロセスとして情報変換できる物理効果】
ピエゾ抵抗効果、圧電効果、ゼーベック効果、ホール効果、光起電力効果、光導電効果・・・

劣化現象の傾向と検出技術との関係

腐食プローブ (Corrosometer)

$R = \rho L / \pi r^2$
 $\Delta r < r$ の場合
 $\Delta R = (\rho L / \pi r^2) (2\Delta r / r)$
 $(\Delta R / R) = 2 \cdot (\Delta r / r)$

腐食性溶液を貯蔵している金属容器と全く同じ材質の金属線
 X: 検知素子
 Y: 温度補償素子
 シール管
 腐食性液体
 半径: r
 長さ: L
 Δr (浸食深さ)
 ⇒ 0.2μmまで検知可能

劣化現象の傾向と検出技術との関係 ~材料の欠陥検出技術

非破壊検査の使い方と目的

- ・ 機器・構造物 (もの) が健全かどうか? を診断する
- ・ きずの進展や劣化の状態を監視する
- ・ 適切な維持管理や強度・防食対策を講じる

目的
 きずを見つけることそのものが目的ではなく、
機器・構造物・施設の安全性・強度信頼性の担保
“有害きず”を確実に見つける

劣化現象の傾向と検出技術との関係

センシング技術の保全分野への応用

目的
 劣化と直接あるいは間接的に結びついた量を計測することで劣化現象を連続的にモニタリングできれば**保全活動において極めて有効**

例えば漏れ検知で考えると...

画像センサ	蒸気漏れ	} 気密試験
赤外線センサ	ガス漏れ、漏洩部の温度変化	
超音波・音波センサ	漏れ音	
圧力センサ	漏れによる圧力低下	
ガスセンサ	ガス漏れ	
電気抵抗検知電極	液体漏れ	
光センサ	水中浸漬した容器からの気泡漏れ	
熱伝導度センサ	ヘリウム充填容器からのヘリウム漏れ	

劣化現象の傾向と検出技術との関係 ~材料の欠陥検出技術

きず・ひび割れ等の破損検知

放射線透過法	磁粉探傷
超音波探傷	漏洩磁束探傷
渦流探傷法	熱的現象の利用 (赤外線サーモグラフィ含む)
PAS (光音響)、音響センサ、AEセンサ	浸透探傷
AP (音パルス)、振動センサ	レプリカ法
	電位差法

劣化現象の傾向と検出技術との関係 ~材料の欠陥検出技術

非破壊検査

- Non-destructive testing (NDT)
- Non-destructive Inspection (NDI)

内容 物を壊さないうえ見えないところのきずの有無やその場所およびその形状・大きさを調べる技術
 人間では健康診断検査に相当する。

参考

● 非破壊試験	● 破壊試験
● 状態監視 (オンラインモニタリング)	● 定時監視

劣化現象の傾向と検出技術との関係 ~材料の欠陥検出技術

きず検出非破壊検査技術

物理現象	試験法	対象きず
放射線	X線およびγ線透過試験 (X線やγ線を試験体に透過し、きず像をフィルム上に影絵として写す)	内面きず
音響振動	超音波探傷試験 (試験体に超音波パルスを投入し、きず面からの反射ハルスを検出する) アコースティックエミッション法 (AE法) (試験体中の割れの開口および伝播時に発生する弾性波を検知する)	きず 割れの開裂と広域
電磁気	磁粉探傷法 (試験体を磁化し、きず近傍空間に生じた漏れ磁界に磁粉を付着させ、きずを磁粉模様として検知する) 渦流探傷法 (電磁誘導法) (交流を流したコイルによってつくられる渦電流場のきずによる“乱れ”をコイルのインピーダンス変化としてとらえ、きずを検知する) 漏えい磁束探傷法 (きずによる漏えい磁場をホール素子、磁気テープなどで検出する) 電気抵抗測定法 (試験体に電流を流し、きずによる抵抗変化を調べ検知する)	表面きず 表面きず 表面きず 表面きず
光	目視 光学的検査	表面開口 きず
浸透	浸透探傷法 (試験体表面に開口したきずに浸透液を浸み込ませ、それを現象液で吸いだし、きず指示模様を観察する)	表面開口 きず