

# 最新 腐食事例解析と腐食診断法

## 監修

石原 只雄 株式会社ベンチャー アカデミア 顧問 工学博士  
前 科学技術庁 金属材料技術研究所 第5研究グループ第2サブグループリーダー  
前 横浜国立大学 共同研究推進センター 客員教授

## 編集委員

石川 雄一 前 横浜国立大学 留学生センター 教授 PhD.  
川原 雄三 株式会社検査研究所 試験計測部 主管  
前 三菱重工業株式会社 横浜研究所 構造研究室  
主席研究員 工学博士 腐食防食専門士  
藤井 哲雄 有限会社コロージョンテック 代表取締役 工学博士  
梶山 文夫 東京ガス株式会社 導管ネットワーク本部 導管部  
幹線グループ 理事 工学博士  
中原 正大 旭化成ケミカルズ株式会社 生産技術 設備総括部  
担当部長 博士(工学) 腐食防食専門士

◆発行 2008年8月5日発行  
◆体裁 B5判 二段組上製本  
約1,000頁  
(カラー写真多数掲載)  
◆定価 本体48,000円(+税)  
(50,400円、送料込み)  
◆発行 株式会社 テクノシステム

## 執筆者一覧 (50音順 73名)

縣 邦雄 アクアス株式会社 所長	真田 徳雄 元 独)産業技術総合研究所 工学博士	原 信義 東北大学 工学博士 腐食防食専門士
赤嶺 健一 株式会社IH	沢田 正昭 国士館大学 教授 学術博士	半田 隆夫 日本電信電話株式会社 プロジェクト マネージャ 博士(工学)
朝倉 祝治 横浜国立大学 特任教授・名誉教授 工学博士	篠原 正 独)物質・材料研究機構 グループリーダー 工学博士	平野 秀朗 (財)電力中央研究所 スタッフ(部長) 上席研究員 博士(工学)
阿部 正美 株式会社ナカボーテック 技術顧問 工学博士	清水 宏明 株式会社クボタ	平本 抽 ソニー株式会社 Distinguished Engineer
荒牧 國次 慶應義塾大学 名誉教授 工学博士	菅原 克生 三菱マテリアル株式会社 主任研究員 工学博士	福田 祐治 パパコック日立株式会社 副所長
石川 雄一 前 横浜国立大学 教授 PhD.	高崎 新一 栗田工業株式会社 工学博士 腐食防食専門士	藤井 哲雄 有限会社コロージョンテック 代表取締役 工学博士
石原 只雄 株式会社ベンチャー・アカデミア 顧問 工学博士	高谷 松文 千葉工業大学 教授 工学博士	藤井 和美 株式会社日立製作所 主任研究員
井芹 一 栗田工業株式会社	田邊 弘往 大日本塗料株式会社 副部門長 フェロー 工学博士	藤田 和夫 住友化学株式会社 主席研究員
磯本 良則 広島大学 准教授 工学博士	谷口 滋次 北海道大学 客員教授 工学博士 PhD.	政友 弘明 住友化学株式会社 グループマネージャー
伊藤 聡 株式会社化学株式会社 取締役 シニアエグゼクティブオフィサー 工学博士	玉田 明宏 JFEエンジニアリング株式会社 部長代理 工学博士 腐食防食専門士	増山不二光 九州工業大学 教授 工学博士
殷 シュウ 東北大学 准教授 工学博士	津田 健 東京工業大学 特任教授 工学博士	松島 俊久 鹿島建設株式会社 担当部長
尾崎 敏範 尾崎事務所 代表 工学博士	中原 正大 旭化成ケミカルズ株式会社 担当部長 博士(工学) 腐食防食専門士	丸山 俊夫 東京工業大学 教授 工学博士
梶山 文夫 東京ガス株式会社 理事 工学博士	中村 勉 須賀工業株式会社 所長 技術士	宮坂 松南 株式会社在原総合研究所 代表取締役専務 工学博士 腐食防食専門士
加藤 謙治 新日本製鐵株式会社 主幹研究員 博士(工学)	中森 正治 株式会社高温腐食・防食テクノサーチ 代表取締役 工学博士 腐食防食専門士	望月 紀保 株式会社ナカボーテック 主席研究員 工学博士 技術士(金属部門)
川原 雄三 株式会社検査研究所 主管	西方 篤 東京工業大学 准教授 工学博士	守屋 進 独)土木研究所 総括主任研究員 博士(工学)
菊池 純 日本防蝕工業株式会社 部長	西山 佳孝 住友金属工業株式会社 グループ長 博士(工学)	山田 秀明 栗田工業株式会社
久保内昌敏 関西電力株式会社	蜂谷 実 有限会社蜂谷防錆研究所 所長 技術士	山田 豊 住友軽金属工業株式会社 主任研究員 博士(工学)
倉田 良明 元 独)産業技術総合研究所	花崎 昌幸 SSTサービス 代表	山手 利博 株式会社竹中工務店 博士(工学) 腐食防食専門士
黒川 一哉 北海道大学 教授 工学博士	塙 隆夫 東京医科歯科大学 教授 歯学博士 博士(工学)	横手 幸伸 清水建設株式会社 副部長
小泉 裕 独)物質・材料研究機構 主席研究員 工学博士	原 基 秋田大学 教授 工学博士	吉田 新一 新日本空調株式会社 担当部長
後藤 誠裕 東京工業大学 研究員 博士(工学)	原口 智 株式会社東芝 主務	吉葉 正行 首都大学東京 教授 工学博士
近藤 照夫 ものづくり大学 教授 博士(工学)	原田 広史 独)物質・材料研究機構 センター長 工学博士	米澤 敏男 株式会社竹中工務店 リサーチフェロ- (兼務)東京工業大学 客員教授 PhD.
酒井 哲也 日本大学 助教 博士(工学)	原田 良夫 トーカロ株式会社 技術顧問 工学博士	渡辺 正満 東日本電信電話株式会社 担当課長
榊 孝 東ソー株式会社 副理事 工学博士		
佐藤 次雄 東北大学 教授 工学博士		

## (申込方法)

本書籍は一般書店では取扱いをしておりません。下の申込用紙にご記入の上、FAXして下さい。書籍と共に納品書・請求書をご送付申し上げます。また試読をご希望の方は誌読希望欄にレ印をお付け下さい。

「最新 腐食事例解析と腐食診断法」(78593) 申込書		申し込み	冊	試読希望	年 月 日
住所 〒				TEL	
会社・団体名				FAX	
所属	役職名				
(フリガナ)	E-mail				
氏名(フルネーム)					



# 第1編 腐食の基礎

## 第1章 水溶液腐食の基礎

### 第1節 腐食熱力学 (朝倉 祝治)

1. 避けることのできない腐食・腐食熱力学
    - 1.1 宿命を示す熱力学
    - 1.2 腐食する金属としない金属・金属材料の安定性の熱力学的評価
  2. 金属の腐食機構のあらまし
    - 2.1 金属腐食機構の分類
  3. 気体中で起こる金属腐食・乾食
  4. 水を含まない溶液中の腐食反応
- ### 第2節 電気化学反応による腐食・湿食 (朝倉 祝治)
1. 水を含む環境におかれた金属の表面状態
  2. 不動態
  3. 湿食を理解するための電気化学反応の基礎・ボルタの電池を用いた電気化学反応の理解
  4. 湿食の反応機構
    - 4.1 短絡されたボルタの電池とガルバニブロック
    - 4.2 同一の金属板上に発生する腐食・鉄の腐食の例
    - 4.3 アノードとカソードの組み合わせ形態によって理解できる湿食現象
    - 4.4 代表的な腐食形態とその事例
      - (1) 全面腐食

- (2) 異種金属接触腐食
- (3) すきま腐食
- (4) 孔食
- (5) 粒界腐食
- (6) 選択腐食
- (7) エロージョン・コロージョン
- (8) 応力腐食割れ

### 第3節 ブルペダイアグラムとその利用 (朝倉 祝治)

1. ブルペダイアグラム
2. ブルペダイアグラムによる腐食・非腐食の判定
  - (1) 腐食抑制剤の防食効果判定
  - (2) 金属の不動態化の判定
  - (3) カソード防食の防食効果判定
  - (4) マクロ電池形成および迷走電流による腐食の判定
3. ブルペダイアグラムによる防食方法の原理的かつ統一的導出

### 第4節 腐食危険と腐食対策 (朝倉 祝治)

1. 腐食機構から理論的に導出される腐食危険性
2. 腐食機構から原理的に導かれる腐食対策

## 第2章 腐食形態

### 第1節 腐食損傷の分類 (石原 只雄)

### 第2節 全面腐食 (石原 只雄)

### 第3節 局部腐食 (石原 只雄)

1. 孔食 (pitting corrosion) (石原 只雄)
  2. すきま腐食 (crevice corrosion) (石原 只雄)
  3. 粒界腐食 (intergranular corrosion) (石原 只雄)
  4. 応力腐食割れ (stress corrosion cracking, SCC) (石原 只雄)
  5. 水素脆化 (hydrogen embrittlement) (石原 只雄)
  6. 腐食疲労 (石原 只雄)
  7. フレッシングコロージョン (fretting corrosion, 擦過腐食) (石原 只雄)
  8. 異種金属接触腐食 (梶山 文夫)
  9. 選択腐食 (脱亜鉛腐食, 黒鉛化腐食) (梶山 文夫)
  10. 電食と交流腐食 (梶山 文夫)
    1. 電食の定義
    2. 電食の現象
    3. 埋設パイプラインの電食の事例
    4. 交流腐食の定義
  11. 通気差腐食 (梶山 文夫)
  12. マクロセル腐食 (梶山 文夫)
  13. エロージョンコロージョンとFAC (磯本 良則)
  14. キャピテーション損傷 (磯本 良則)
  15. 糸状腐食 (磯本 良則)
  16. 溝状腐食 (磯本 良則)
  17. 微生物腐食 (梶山 文夫)
    1. 定義
    2. 微生物腐食研究史俯瞰
    3. 微生物の特質
    4. 微生物腐食の特異性
- (a) 従来マイルドとみなされる環境中の金属の短期腐食を誘起

- (b) 金属表面の生物皮膜による自然電位貴化とガルバニックセル形成により金属腐食を促進

- (c) 選択腐食を誘起

5. 土壌中の鉄の腐食
  - 5.1 土壌腐食に深く関与する微生物
    - 5.1.1 硫酸塩還元菌 (SRB)
    - 5.1.2 メタン生成菌 (MPB)
    - 5.1.3 鉄酸化細菌 (IOB)
    - 5.1.4 硫黄酸化細菌 (SOB)
    - 5.1.5 鉄細菌 (IB)
  - 5.2  $E_h$  と pH の関係および微生物の活性域
  - 5.3 微生物腐食速度
  - 5.4 微生物腐食機構
    - 5.4.1 硫酸塩還元菌 (SRB) による腐食機構
      - (1) von Wolzogen Kuhr と van der Vlugt によって提出されたカソード復極説
      - (2) カソード復極説に対する是非
      - (3) フィールド調査結果による腐食機構研究
      - (4) *D. desulfuricans* が棲息している液体培地を用いた実験室試験による腐食機構研究
      - (5) SRB が棲息している土壌を用いた実験室試験による腐食機構研究
    - 5.4.2 鉄酸化細菌 (IOB) による腐食機構
    - 5.4.3 鉄細菌 (IB) による腐食機構
  6. ステンレス鋼の微生物腐食
    - 6.1 ステンレス鋼の微生物腐食の特徴
    - 6.2 ステンレス鋼の微生物腐食機構
  7. 銅合金の微生物腐食
  8. アルミニウム合金の微生物腐食
  9. その他の金属の微生物腐食
  10. 高分子の生物劣化

## 第3章 腐食環境

### 第1節 淡水 (藤井 哲雄)

1. 水源と水質
  - 1.1 雨水
  - 1.2 河川水
  - 1.3 湖沼水
  - 1.4 地下水
2. 淡水腐食のメカニズム
3. 水質と腐食の要因
  - 3.1 水処理技術の変遷
  - 3.2 pH の影響
  - 3.3 溶存酸素(DO)および水流速の影響
  - 3.4 水温の影響
  - 3.5 塩化物および残留塩素
  - 3.6 スケール
  - 3.7 水質汚染の影響
  - 3.8 淡水中の腐食試験
4. 配管材料と耐食性

### 第2節 海水 (石川 雄一)

### 第3節 大気腐食 (篠原 正)

- はじめに
1. 金属表面での水膜の生成
    - 1.1 大気状態の分類
    - 1.2 水膜の形成
      - 1.2.1 化学凝縮
      - 1.2.2 毛管凝縮
  2. 大気腐食挙動に及ぼす水膜の影響
    - 2.1 炭素鋼の腐食度 CR に及ぼす水膜厚さ  $d$  の影響
    - 2.2 ステンレス鋼の発錆に及ぼす水膜の影響

- 2.3 電気化学的検討
3. 環境条件の影響
  - 3.1 降雨と結露
  - 3.2 温度の影響
  - 3.3 付着海塩量に及ぼす風の影響
    - 3.3.1 風による海塩の輸送と付着
    - 3.3.2 風が非常に強い時の海塩量

### まとめ (梶山 文夫)

1. 腐食環境としての土壌
2. 中性土壌中および水溶液中の材料に対する実際の腐食電池列
3. 土壌の腐食性と土壌特性値
4. 土壌の腐食性評価法
5. 腐食因子としての土壌抵抗率と腐食プロセスとの関係
6. 土壌腐食モニタリング

### 第5節 高温水 (原 信義)

- はじめに
1. 圧力 - 体積 - 温度 (P-V-T) 関係
  2. 誘電率
  3. 水のイオン積と pH
  4. 導電率
  5. 輸送特性
  6. 気体の溶解度
  7. 無機化合物の溶解度
  8. 電解質の解離平衡
  9. 電解質溶液の臨界点
  10. 熱力学的推算法
- ### 第6節 非水溶液 (荒牧 國次)

1. 非水溶媒と非水溶液
2. 非水溶液中における金属の腐食

## 第4章 各種材料の耐食性

### 第1節 鉄鋼材料

#### 1. 炭素鋼, 低合金鋼 (伊藤 勲)

1. 環境の影響
2. 材料因子の影響
  - 2.1 化学成分
  - 2.2 耐食性低合金鋼の位置づけ
3. 耐硫酸露点腐食鋼
4. 耐候性鋼
5. 耐海水鋼
6. 耐溝食性電鍍鋼管
7. 耐水素誘起割れ鋼
8. 耐硫化物応力腐食割れ鋼
9. その他の耐食性低合金鋼

#### 2. 鋳鉄 (宮坂 松甫)

1. 非合金鋳鉄
2. 高ケイ素鋳鉄
3. 高ニッケル鋳鉄

#### 3. ステンレス鋼 (石原 只雄)

##### はじめに

1. ステンレス鋼の腐食特性
    - 1.1 ステンレスとは
    - 1.2 ステンレス鋼の不動態皮膜
    - 1.3 ステンレス鋼の不動態特性と合金成分
    - 1.4 不動態皮膜の破壊
  2. ステンレス鋼の種類とその用途
    - 2.1 オーステナイト系ステンレス鋼
    - 2.2 フェライト系ステンレス鋼
    - 2.3 オーステナイト・フェライト二相ステンレス鋼
    - 2.4 マルテンサイト系ステンレス鋼
    - 2.5 析出硬化系ステンレス鋼
  3. ステンレス鋼使用上の問題点
    - 3.1 加熱脆化
      - 3.1.1 シグマ( )脆性
      - 3.1.2 475 脆性
    - 3.2 局部腐食現象
      - 3.2.1 孔食
      - 3.2.2 すきま腐食
      - 3.2.3 粒界腐食(intergranular corrosion)
      - 3.2.4 応力腐食割れ(stress corrosion cracking, SCC と略記)
  4. 各種環境下におけるステンレス鋼の耐食性
    - 4.1 酸およびアルカリによる腐食
    - 4.2 淡水および海水による腐食
    - 4.3 大気腐食
    - 4.4 高温水腐食
    - 4.5 高温腐食
  5. 局部腐食試験
    - 5.1 孔食試験
    - 5.2 ステンレス鋼の臨界孔食温度(CPT)
    - 5.3 すきま腐食試験
    - 5.4 粒界腐食試験
    - 5.5 応力腐食割れ試験
- おわりに

### 第2節 非鉄金属材料

#### 1. 銅および銅合金 (山田 豊)

1. 一般耐食性
2. 耐薬品性
3. 実用材料の腐食特性
  - 3.1 純銅
  - 3.2 銅合金
    - (1) Cu - Zn 系合金
    - (2) Cu - Ni 系合金
    - (3) Cu - Sn 系合金
    - (4) Cu - Al 系合金
    - (5) Cu - Si 系合金
    - (6) 導電性合金

#### 2. アルミニウムおよびアルミニウム合金 (山崎 昌幸)

##### はじめに

1. アルミニウム合金の一般的な腐食挙動について
  - 1.1 アルミニウムの腐食形態
    - 1.1.1 全面腐食
    - 1.1.2 孔食
    - 1.1.3 粒界腐食
    - 1.1.4 応力腐食
    - 1.1.5 異種金属接触腐食
    - 1.1.6 剥離腐食
  2. 大気中における各種アルミニウム合金の耐食性
    - 2.1 板, 形など展伸材の耐食性
    - 2.2 鋳物材の耐食性

### 3. 腐食事例

#### 2.3 異種金属接触腐食挙動

3. 淡水中における耐食性
  - 3.1 水道水中における耐食性
  - 3.2 湖水・河川水における耐食性
4. 海水中における耐食性
5. 土壌中における耐食性

##### まとめ

#### 3. ニッケルおよびニッケル合金 (菅原 克生)

##### はじめに

1. 各種 Ni 基耐食合金の分類
  - (1) Ni
  - (2) Ni - Cu
  - (3) Ni - Cr - Fe
  - (4) Ni - Mo
  - (5) Ni - Cr - Mo
  - (6) Ni - Cr - Fe - Mo - Cu
2. Ni 基耐食合金の略歴
3. Ni 基耐食合金の耐食性および基本的な諸特性
  - (1) Ni 基耐食合金中の各添加元素の耐食性への効果
  - (2) 全面腐食
  - (3) 局部腐食
    - 孔食, すきま腐食
    - 応力腐食割れ
  - (4) 熱的安定性
  - (5) 代表的な機械的性質と加工性
  - (6) 溶接性
4. 最近開発された Ni 基耐食合金
  - (1) Ni - Mo 系
  - (2) Ni - Cr - Mo 系

#### 4. チタン, タンタル, およびジルコニウム (中原 正大)

1. 物理的な基本特性
2. 耐食特性(全面腐食に対して)
3. 局部腐食および特殊な現象
  - 3.1 すきま腐食
  - 3.2 応力腐食割れ
  - 3.3 水素吸収脆化
  - 3.4 発火
4. Ti, Zr および Ta の使用にあたって

### 第3節 非金属材料

#### 1. 高分子材料 (後藤 誠裕, 津田 健)

1. ゴム
2. 熱可塑性プラスチック
3. 熱硬化性プラスチック
4. 腐食形態と腐食度
5. 高分子材料の耐食性

#### 2. セラミックス材料 (殷 シュウ, 佐藤 次雄)

##### 緒言

1. ジルコニアセラミックスの低温アニールによる強度劣化
2. 非酸化セラミックスの腐食
  - 2.1 高温空気・酸素・水蒸気による酸化腐食
  - 2.2 溶融塩による酸化腐食
  - 2.3 高温高圧水による酸化腐食
3. 酸・アルカリ性水溶液による溶解腐食
  - 3.1 アルカリ性水溶液腐食
  - 3.2 酸性水溶液腐食

##### おわりに

#### 3. コンクリート (宮田 恵守)

1. コンクリートと劣化の概要
2. コンクリートを構成する材料
  - 2.1 セメント
  - 2.2 骨材
  - 2.3 混和材料
  - 2.4 練混ぜ水
  - 2.5 鋼材
3. 様々な劣化
  - 3.1 化学的侵食
  - 3.2 中性化(炭酸化)
  - 3.3 アルカリ骨材反応

- 3.4 塩害
- 3.5 凍害
- 第4節 耐熱材料
  - 1. フェライト系耐熱鋼 (増山 不二光)
  - 2. オーステナイト系耐熱鋼 (増山 不二光)
  - 3. 超合金 (小泉 裕, 原田 広史)
  - 4. 金属間化合物とセラミックス (黒川 一哉)

- はじめに
- 1. アルミナ皮膜形成材料
  - 1.1 Ni - Al系
  - 1.2 Ti - Al系
  - 1.3 Nb - Al系
- 2. シリカ皮膜形成材料
  - 2.1 SiC
    - 2.1.1 酸化皮膜の成長機構
    - 2.1.2 SiO<sub>2</sub> / SiC界面反応
    - 2.1.3 アクティブ酸化とパッシブ酸化
  - 2.2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

## 第5章 高温腐食の基礎

- 第1節 高温腐食 (谷口 滋次)
  - 1. 高温酸化
    - 1. 高温酸化と高温構造材料
    - 2. 保護酸化皮膜の形成
    - 3. 酸化物の熱力学的安定性
    - 4. 高温酸化の速度論
      - 4.1 酸化物の格子欠陥と移動過程
      - 4.2 Wagnerの放物線酸化理論の概略
      - 4.3 原子価制御の原理
      - 4.4 放物線速度定数
  - 5. 酸化物の形態
    - 5.1 酸化皮膜の構造
    - 5.2 内部酸化
  - 6. 酸化皮膜の機械的性質
    - 6.1 酸化皮膜の損傷
    - 6.2 酸化物成長応力
      - (1) Pilling - Bedworth(体積比)モデル
      - (2) 酸素の金属への固溶
      - (3) エピタキシー関係
      - (4) 酸化物の組成変化
      - (5) 空孔の凝集
      - (6) 組織の不均一性
      - (7) 酸化皮膜中での酸化物の形成
      - (8) 多層酸化物の形成
      - (9) 相変態
      - (10) 内部酸化物の形成
  - 6.3 熱応力
  - 6.4 酸化皮膜の塑性変形能
  - 6.5 酸化皮膜の密着性
  - 7. 活性元素効果
    - (1) 釘付け機構
    - (2) 空孔吸収機構
    - (3) 皮膜の成長機構の変化
    - (4) 皮膜の塑性変形能の向上
    - (5) 硫黄偏析抑制効果
    - (6) 中間層機構
    - (7) 化学結合の向上

- 2. 硫化腐食 (黒川 一哉)
  - はじめに
  - 1. 硫化物の特性
  - 2. 金属・合金の硫化
  - 3. 金属・合金の酸化 / 硫化
    - 3.1 金属における酸化/硫化
    - 3.2 合金における酸化 / 硫化
    - 3.3 実環境での酸化 / 硫化

- おわりに
- 3. ハロゲンによる高温腐食 (丸山 俊夫)
  - はじめに
  - 1. ハロゲン腐食の速度
    - 1.1 皮膜の成長速度と質量変化
    - 1.2 金属ハロゲン化物中におけるイオンの拡散
    - 1.3 金属ハロゲン化物の蒸発速度
  - 2. 熱力学的基礎
    - 2.1 金属ハロゲン化物の標準生成ギブズエネルギー
    - 2.2 金属ハロゲン化物の平衡蒸気圧
    - 2.3 金属 - ハロゲン - 酸素系の相安定図
  - 3. 塩素および塩化水素雰囲気における高温腐食
- おわりに
- 4. 溶融塩腐食 (原 基)

- 2.2.1 酸化皮膜の成長機構
- 2.2.2 酸化挙動に及ぼす助剤成分の影響
- 2.3 シリサイド
  - 2.3.1 酸化挙動と耐用温度
  - 2.3.2 金属酸化物の蒸発によるSiO<sub>2</sub>皮膜形成
- おわりに
- 5. 高温耐食コーティング (原田 良夫)
  - まえがき
  - 1. 高温機器の腐食環境とコーティングの適用状況
    - 1.1 高温機器の腐食環境
    - 1.2 高温耐食コーティング用金属の選択とMnCrAlX合金
  - 2. 高温耐食コーティング法
    - 2.1 金属拡散浸透法
    - 2.2 物理蒸着法
    - 2.3 溶射法
    - 2.4 複合コーティング法
- あとがき

- 1. ガスタービン翼における溶融塩腐食(硫酸塩腐食)
  - 1.1 腐食事例
  - 1.2 腐食機構
    - (1) 硫化モデル
    - (2) 酸性 - 塩基性フラクシングモデル
    - (3) 局部電池モデル
- 2. 重油焚きボイラー管における溶融塩腐食(バナジウムアタック)
  - 2.1 腐食事例
  - 2.2 バナジウムアタックの機構
- 3. ごみ焼却プラントのボイラー管における溶融塩腐食(塩化物・硫酸塩腐食)
  - 3.1 腐食事例
  - 3.2 腐食機構
- 4. 腐食試験と解析法
  - 4.1 溶融塩腐食試験
    - (1) 実験室簡易試験
      - (a) 灰塗布試験
      - (b) 灰中埋没試験
    - (2) 電気化学試験
    - (3) バーナーリグ試験
    - (4) 実機試験
  - 4.2 耐食性評価法
    - (1) 腐食減量法
    - (2) 組織学的評価法
    - (3) 腐食寿命予測

- おわりに
- 5. メタルダスティング (西山 佳孝)
  - 概略
  - 1. 腐食機構
  - 2. 金属材料の腐食挙動と防食
- 6. 浸炭および水素侵食 (榊 孝)
  - 1. 浸炭
  - 2. 水素侵食

- 第2節 燃焼ガスによる酸露点腐食 (川原 雄三)
  - はじめに
  - 1. 酸露点腐食の発生要因
    - 1.1 硫酸露点腐食
    - 1.2 塩酸露点腐食
    - 1.3 硫酸/塩酸露点腐食
  - 2. 燃焼ガス環境の変動と腐食の発生
    - 2.1 装置の起動, 停止
    - 2.2 燃焼ガスの諸条件の変動
    - 2.3 燃焼ガスの付着障害と中温腐食の発生
  - 3. 腐食防止法
    - 3.1 環境面の腐食防止対策
      - (1) 燃料添加剤の使用
      - (2) 燃焼の制御
    - 3.2 耐食材料
      - (1) 耐硫酸露点腐食鋼
      - (2) ステンレス鋼
      - (3) 非鉄金属材料
      - (4) 有機系材料
      - (5) 無機系材料
  - 4. 材料の耐食性の試験, 評価方法
    - 4.1 実験室腐食試験法
    - 4.2 実機腐食試験
      - (1) 酸露点の計測
      - (2) 腐食試験
      - (3) 腐食モニタリング
- まとめ

## 第2編 腐食診断法

### 第1章 腐食診断概論

第1節 腐食診断とは	(中原 正大)	3. 腐食環境と材料耐食性の評価法	
1. 診断のとらえ方		3.1 腐食量と腐食形態の評価	
2. 診断と保全方式		3.2 腐食寿命予測	
3. 診断の対象となる機器の種類や現象		3.2.1 腐食速度則	
4. 診断の機会、場および方法		3.2.2 統計的手法	
5. 診断の要素技術や情報・知識		おわりに	
6. 腐食診断とは		2. 電気化学的高温腐食試験法	(西方 篤)
第2節 塗覆装の劣化診断	(田邊 弘往)	1. 試験方法	
1. 劣化の形態		1.1 電気化学セル	
2. 塗膜の劣化診断		1.2 熔融塩	
3. 機器による劣化、欠陥の解析		1.3 ガス雰囲気	
4. 電気化学的診断法		2. 測定方法と耐食性の評価	
4.1 交流インピーダンス法による塗膜の防食性評価		2.1 アノード分極法	
4.2 カレントインタラプタ法による塗膜の劣化評価		2.2 電気化学インピーダンス法	
第3節 高温設備の腐食試験と診断法		第4節 有機材料の腐食・劣化診断	(酒井 哲也, 久保内 昌敏)
1. 高温腐食試験法と評価法	(川原 雄三)	1. 有機材料の腐食および劣化の分析方法	
はじめに		1.1 物理的劣化の試験方法	
1. 実験室における腐食試験方法		1.2 化学的劣化の試験方法	
1.1 高温酸化および高温ガス腐食試験		2. 有機系複合材料の非破壊試験方法	
1.2 高温腐食試験		(1) 超音波探傷試験	
1.2.1 実験室簡易試験		(2) 放射線透過法	
(1) 灰塗布法		(3) 磁粉探傷試験, 浸透探傷試験法	
(2) 灰中埋没法(浸せき法)		(4) アコースティックエミッション(AE)法	
1.2.2 燃焼試験(バーナーリグ試験)		(5) 衝撃弾性波検査法	
1.2.3 伝熱条件試験		3. 超音波による有機材料の腐食評価	
1.2.4 電気化学試験		(1) 表面反応型	
1.2.5 応力負荷条件下の高温腐食試験		(2) 腐食層形成型	
2. 実機における腐食試験方法		(3) 全面浸入型	
2.1 実機試験		4. 有機系複合材料の腐食劣化モニタリング	
2.2 腐食モニタリング			
<b>第2章 腐食・劣化の診断事例 (各論)</b>			
第1節 建築設備における腐食診断法	(横手 幸伸)	マクロセル形成判定調査	
1. 建築設備における配管劣化診断の概要		(2) 二次診断の判断	
1.1 配管診断の必要性		第2節 鋼構造物の腐食・劣化診断	(守屋 進)
1.2 配管劣化診断の内容		はじめに	
1.2.1 配管システムの概要把握		1. 土木分野における鋼構造物	
1.2.2 配管劣化診断対象の部位と診断の内容		2. 各種防食法の劣化診断	
1.2.3 水質分析		2.1 塗装の劣化診断	
1.2.4 診断計画		2.2 熔融亜鉛めっきの劣化診断	
1.2.5 配管の腐食と診断		2.3 金属溶射の劣化診断	
2. 腐食診断法		2.4 耐候性鋼材の劣化診断	
2.1 設備配管診断の対象		3. 鋼構造物の劣化診断	
2.2 配管内部の二次診断		3.1 腐食診断	
2.2.1 二次診断の概要		おわりに	
2.2.2 二次診断調査箇所		第3節 港湾設備の腐食診断法	(玉田 明宏)
2.2.3 二次診断の評価方法		はじめに	
(1) 残存寿命の計算		1. 腐食診断から見た港湾の腐食環境の特徴	
配管の残存肉厚		2. 腐食調査診断方法の分類とフロー	
配管の腐食量		3. 腐食調査の具体的手順と方法	
腐食速度の算出		(1) 目視調査	
残存寿命の算出		(2) 肉厚測定	
(2) 定性的な寿命評価		(3) 孔食測定	
2.2.4 二次診断での調査方法		4. 鋼材の腐食評価データとその解析	
(1) X線調査		(1) 平均肉厚減少量	
X線とX線フィルム		(2) 局部腐食	
X線調査の特徴		5. 施設の構造強度に基づく健全度評価	
検査結果の判定		6. 補修対策調査	
(2) 超音波肉厚調査		第4節 コンクリート構造物における鉄筋の腐食診断	(望月 紀保)
使用する機器類		はじめに	
調査時のポイント		1. 自然電位法	
調査結果		1.1 原理および測定法	
(3) 内視鏡調査		1.2 評価基準と課題	
使用する機器類		2. 分極抵抗法	
( ) ファイバースコープ		2.1 原理および測定法	
( ) CCDスコープ		2.2 評価基準と課題	
( ) 管用テレビカメラ		3. コンクリート抵抗率	
調査時のポイント		3.1 原理および測定法	
調査結果		3.1.1 4電極法	
(4) 配管採取(抜管)調査		3.1.2 極間抵抗法	
使用する機器類		3.2 評価基準と課題	
調査時のポイント		4. 塩化物イオン濃度	
調査結果		4.1 原理および測定方法	
2.3 埋設管の劣化診断		4.2 評価基準	
2.3.1 診断の対象および手順		4.3 経時変化予測	
2.3.2 埋設管の一次診断		5. 今後の腐食評価について	
(1) 一次診断の方法		第5節 化学装置の腐食・劣化診断	(中原 正大)
兆候調査		第6節 火力発電ボイラーにおける腐食寿命予測と非破壊検査法	(福田 祐治)
埋設環境調査		はじめに	
(2) 一次診断の判定		1. 腐食損傷の分類	
2.3.3 埋設管の二次診断		2. 火炉水壁管	
(1) 二次診断の方法		(1) 高温腐食	

- (2) 腐食疲労
- 3. 高温過熱器・再熱器
  - (1) 石炭焚ボイラーにおける高温腐食
  - (2) 廃棄物発電ボイラーにおける高温腐食

### 第3章 腐食防食への情報活用

- 第1節 腐食防食データベース (藤田 和夫)
  - 1. 文献データベース
  - 2. ファイリングしたデータベース
  - 3. コンピュータを利用したデータベース
- 第2節 寿命予測 (篠原 正)
  - 1. 「寿命予測」の意味
  - 2. 統計学的手法
    - 2.1 確率分布と確率紙

- (3) 水蒸気酸化
- 4. 実際のプラントにおける非破壊検査方法  
おわりに

- 2.2 極値統計の利用
- 第3節 リスク・ベース・インスペクション (政友 弘明)
  - 1. リスク・ベース・インスペクションとは
  - 2. リスクの評価方法
  - 3. 劣化損傷情報の破損確率への反映
  - 4. 劣化損傷した材料の余寿命と破損確率
  - 5. リスクベースの保全計画

## 第3編 実装置における腐食事例と対策

### 第1章 給排水設備における腐食事例と対策

- 第1節 給水・給湯配管および機器の腐食事例と対策 (山手 利博)

- 1. 給水管および機器
  - (1) 亜鉛めっき鋼管の全面腐食
  - (2) 亜鉛めっき鋼管の異種金属接触腐食
  - (3) 硬質塩化ビニルライニング鋼管の赤水
  - (4) 硬質塩化ビニルライニング鋼管の異種金属接触腐食
  - (5) 銅管のマウンドレス型孔食
  - (6) 銅管の青水現象
  - (7) 黄銅製バルブの脱亜鉛腐食
  - (8) ステンレス鋼製水槽の発錆
- 2. 給湯管および給湯機器の腐食事例
  - (1) 亜鉛めっき鋼管の赤水
  - (2) 亜鉛めっき鋼管の極性逆転による腐食
  - (3) 銅管の型孔食
  - (4) 銅管の潰食
  - (5) 銅管の青水現象
  - (6) ステンレス鋼管継手のすきま腐食
  - (7) ステンレス鋼管溶接部の孔食と応力腐食割れ
  - (8) ストレージタンク(貯湯槽)の応力腐食割れ
- 3. 対策
  - (1) 脱気
    - 赤水防止と鋼の腐食抑制効果
    - 給湯銅管の孔食防止
    - 砲金/鋼の異種金属接触腐食防止
  - (2) 腐食抑制剤
  - (3) 絶縁
- 第2節 冷却水系で生じる障害(腐食・ファウリング)と対策 (井芹 一)
  - 1. 冷却水系の概要
  - 2. 代表的な冷却水系の形式と特徴
    - (1) 開放循環式冷却水系
    - (2) 密閉循環式冷却水系
  - 3. 冷却水系における障害の発生原因
    - 3.1 腐食
      - (1) 炭素鋼の腐食
      - (2) 銅および銅合金の腐食
      - (3) ステンレス鋼の腐食
    - 3.2 ファウリング
      - (1) スケール
      - (2) スライムおよびスラッジ
  - 4. 冷却水系における障害の防止
    - 4.1 腐食の防止
      - (1) リン酸塩処理
      - (2) ホスホン酸処理
      - (3) 皮膜形成亜鉛処理
      - (4) 非リン・非金属処理
      - (5) 耐食材料に対する処理
    - 4.2 スケールの防止
      - (1) スケール成分濃度の管理法
      - (2) 酸添加法
      - (3) スケール防止剤添加法
    - 4.3 スライムやスラッジの防止
      - (1) スライムコントロール剤による処理
      - (2) 機器による処理

- まとめ
- 第3節 冷温水配管および空調機器の腐食事例と対策 (吉田 新一)

- 1. 密閉式冷温水配管の赤錆
  - (1) 事象
  - (2) 原因
  - (3) 対策
  - (4) 解説
- 2. 腐食性生物が堆積し冷暖房が不良
  - (1) 事象
  - (2) 原因
  - (3) 対策
  - (4) 解説
- 3. 配管耐用調査において、漏水事故の事前発見

- (1) 事象
- (2) 解説
- 4. 空気調和機の冷水コイルの蟻の巣状腐食
  - (1) 事象
  - (2) 原因
  - (3) 解説
  - (4) 再発防止
- 5. ファンコイル接続用フレキシブル継手の応力腐食割れ
  - (1) 事象
  - (2) 対策
  - (3) 解説
- 6. 保温材の湿潤による外面腐食
  - (1) 事象
  - (2) 原因
  - (3) 対策
  - (4) 解説
- 7. バルブと配管の接触による漏水
  - (1) 事象
  - (2) 原因
- 8. エアコンの熱交換器銅管の孔食による冷媒漏れ
  - (1) 事象
  - (2) 対策
  - (3) 解説

- 第4節 低圧ボイラーの給水系および復水系の腐食事例と対策 (山田 秀明)

- 1. 給水系および復水系の構成概要
  - (1) 給水系の概要
  - (2) 復水系の概要
- 2. 給水系および復水系の腐食と対策
  - 2.1 ボイラー給水系の腐食と対策
    - (1) ボイラー給水系の腐食
    - (2) 給水系の炭素鋼腐食の因子とメカニズム
    - (3) 給水系の腐食対策
  - 2.2 ボイラー復水系の腐食と対策
    - (1) ボイラー復水系の腐食
    - (2) 復水系腐食の因子とメカニズム
      - (a) 二酸化炭素の発生原因
      - (b) 銅系材質の腐食について
  - 2.3 復水系の腐食対策

まとめ

おわりに

- 第5節 消火配管・再処理水(中水)配管・排水管の腐食事例と対策 (中村 勉)

- 1. 排水系統の腐食事例：  
業務用ディスポーザーを利用した厨房処理システム配管の漏水
    - 1.1 劣化事例
    - 1.2 推定要因
    - 1.3 対策案
  - 2. 排水系統の腐食事例：再処理水使用の大便器洗浄管き裂発生
    - 2.1 劣化事例
    - 2.2 推定要因
    - 2.3 対策案
  - 3. 消火系統の腐食事例：消火ポンプサクシオン管の吸上げ不良
    - 3.1 劣化事例
    - 3.2 推定要因
    - 3.3 対策案
  - 4. 消火系統の腐食事例：スプリンクラー配管の漏水
    - 4.1 劣化事例
    - 4.2 推定要因
    - 4.3 対策案
- 第6節 水質基準および水質に係わる障害と対策 (高崎 新一)
    - 1. 淡水の水質
    - 2. 各水質因子の特徴
      - 2.1 pH
      - 2.2 アルカリ度(酸消費量)
      - 2.3 硬度

- 2.4 遊離炭酸
- 2.5 塩化物イオン, 硫酸イオン
- 2.6 溶性シリカ
- 2.7 電気伝導率, 蒸発残留物
- 2.8 溶存酸素(DO)
- 2.9 残留塩素
- 2.10 濁度, その他
- 3. 水質基準
  - 3.1 水道水の水質基準および関連する水質基準
  - 3.2 冷却水
  - 3.3 蓄熱水
- 4. 代表的な水質指標
  - 4.1 飽和度および飽和pH
  - 4.2 ランゲリア指数
  - 4.3 リズナー指数
  - 4.4 ラーソン比
  - 4.5 マットソン比
- 第7節 微生物腐食およびスライム・レジオネラ問題と対策 (縣 邦雄)
  - 1. 各種水系における微生物による障害
    - 1.1 スライム障害
    - 1.2 微生物腐食(MIC)
      - 1.2.1 冷却水系の嫌気性細菌による腐食
      - 1.2.2 冷却水系のバイオフィルム下の銅管の腐食
      - 1.2.3 使用済み燃料貯蔵プールのステンレス腐食
    - 1.3 レジオネラ属菌問題
  - 2. 微生物障害の防止対策
    - 2.1 スライム障害の防止対策
    - 2.2 微生物腐食の防止対策
    - 2.3 レジオネラ属菌の防除対策
  - 3. バイオサイド
    - 3.1 バイオサイドの種類
      - 3.1.1 酸化性バイオサイド
        - (1) 塩素
        - (2) 臭素
        - (3) 二酸化塩素
        - (4) 過酸化水素
      - 3.1.2 非酸化性バイオサイド(有機物)
      - 3.1.3 その他の殺菌処理法
    - 3.2 バイオサイドの添加方法
      - 3.2.1 酸化性バイオサイドの添加方法
      - 3.2.2 非酸化性バイオサイドの添加方法
    - 3.3 バイオフィルムの除去
      - 3.3.1 過酸化水素による除去
      - 3.3.2 塩素剤や有機系バイオサイドによる除去
    - 3.4 バイオサイドの効果の検証方法
      - 3.4.1 微生物の評価方法
        - (1) 微生物数の測定
        - (2) 付着性微生物の測定
      - 3.4.2 腐食評価方法
        - (1) テストピース浸せき
        - (2) 分極抵抗法

## 第2章 海洋構造物・海水機器における腐食事例と対策

- 第1節 海水中での材料の腐食挙動 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
  - 1. 腐食損傷事例
  - 2. 腐食機構
  - 3. 損傷防止策
- 第2節 ステンレス鋼製海水機器の局部腐食事例と対策 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
  - 1. 孔食損傷 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
    - はじめに
    - 1. 孔食損傷事例
    - 2. 孔食損傷機構
    - 3. 損傷防止策
  - 2. すきま腐食損傷 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
    - はじめに
    - 1. 損傷事例
      - 1.1 事例 構造物すきま内のすきま腐食損傷
      - 1.2 事例 海洋生物付着下のすきま腐食損傷 - 1
      - 1.3 事例 海洋生物付着下のすきま腐食損傷 - 2
      - 1.4 事例 付着ゴミ下のすきま腐食損傷
      - 1.5 事例 マーカーペイント塗膜下のすきま腐食損傷
      - 1.6 事例 海洋微生物付着下のすきま腐食損傷
      - 1.7 事例 鋳造欠陥内部のすきま腐食損傷
    - 2. すきま腐食機構
    - 3. すきま腐食損傷防止策
      - 3.1 材料選択
      - 3.2 部品構造変更
  - 3. 選択腐食損傷 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
    - はじめに
    - 1. 選択腐食損傷事例
      - 1.1 事例 非金属介在物 MnS に沿った選択腐食損傷
      - 1.2 事例 切削加工変質層に沿った選択腐食損傷
      - 1.3 事例 鋳造欠陥・濃度偏析に沿った選択腐食損傷

- (3) 腐食電位測定法
    - 3.4.3 評価結果のフィードバック
  - まとめ
  - 第8節 廃水処理, 下水管路施設における腐食事例と対策 (清水 宏明)
    - 1. 下水道
      - 1.1 下水道の概要
      - 1.2 下水道管路の腐食
        - 1.2.1 下水の特徴
        - 1.2.2 腐食メカニズム
        - 1.2.3 硫化水素の生成しやすい条件
    - 2. 腐食事例
      - 2.1 事例 A
      - 2.2 事例 B
      - 2.3 事例 C
    - 3. 診断事例
    - 4. 腐食防止対策
      - 4.1 硫化水素生成の制御
        - 4.1.1 酸素の供給
        - 4.1.2 薬品添加
        - 4.1.3 管内清掃
      - 4.2 硫化水素生成後の対応
        - 4.2.1 耐食性材料の採用
          - (1) 管材
          - (2) 被覆
        - 4.2.2 換気
- 第9節 建物周囲の埋設配管のマクロセル腐食と対策 (蜂谷 実)
  - まえがき
  - 1. 腐食事例
    - 1.1 事例 - 1
      - (1) 配管諸元
      - (2) 腐食状況
      - (3) 腐食性調査
        - 1) 管地対電位の測定結果
        - 2) 建屋壁近傍の電位状況と関連調査
        - 3) 漏水箇所の耐用年数検証
      - (4) 腐食原因
    - 1.2 事例 - 2
      - (1) 腐食状況
      - (2) 腐食調査
        - 電位測定結果
        - 掘削調査状況
  - 2. 腐食のメカニズム
    - 2.1 C/S マクロセルによる腐食現象
    - 2.2 土壌マクロセル腐食現象
    - 2.3 管対地電位測定による腐食診断について
  - 3. 腐食対策について
    - 3.1 絶縁対策
    - 3.2 電気防食による防食対策
    - 3.3 近接陽極法
  - 4. 結論と考察

- 1.4 事例 ステンレス鋳鋼の浸炭に基づく選択腐食損傷
- 2. 選択腐食機構
- 3. 損傷防止策
- 4. 粒界腐食 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
  - はじめに
  - 1. 粒界腐食損傷事例
    - 1.1 ステンレス圧延鋼, 溶接部の粒界腐食損傷
    - 1.2 高級ステンレス圧延鋼部品の粒界腐食損傷
    - 1.3 ステンレス鋳鋼部品の粒界腐食損傷
  - 2. 腐食機構
    - 2.1 鋼中の C 含有量および Mo 含有量の影響
    - 2.2 ステンレス鋳鋼における金属組織の影響
    - 2.3 溶接条件, 部品形状などの影響
    - 2.4 突合せ溶接部品の拘束状態, 多層盛の影響
    - 2.5 溶着金属組成の影響
  - 3. 腐食損傷対策
- 第3節 ステンレス鋼製海水機器の腐食割れ事例と対策 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
  - 1. 応力腐食割れ (尾崎 敏範, 石川 雄一)
    - はじめに
    - 1. 損傷事例
      - 1.1 事例 Mn 含有鋼オーステナイ系ステンレス鋼, SUS 201 の応力腐食割れ
      - 1.2 事例 海洋雰囲気における鋭敏化 304 ステンレス鋼の応力腐食割れ
      - 1.3 事例 オーステナイト Ni 鋳鉄, ニレジストの応力腐食割れ
    - 2. 腐食機構
    - 3. 損傷防止策
  - 2. 水素脆化割れ (尾崎 敏範, 石川 雄一)
    - はじめに
    - 1. 損傷事例

- 2. 損傷機構
- 3. 損傷防止対策
- 3. 腐食疲労 (尾崎 敏範, 石川 雄一)
- はじめに
- 1. 腐食損傷事例
- 1.1 事例 SUS 304 鋼製部品
- 1.2 事例 炭素鋼製軸材
- 2. 損傷機構
- 3. 損傷防止策
- 3.1 腐食疲労強度算出法
- 3.2 一般的腐食疲労損傷防止策
- 3.2.1 対策 材料条件の変更
- 3.2.2 対策 応力条件の変更
- 3.2.3 対策 環境条件の変更

#### 第4節 銅合金製海水機器の事例と対策 (尾崎 敏範, 石川 雄一)

- はじめに
- 1. 損傷事例 黄銅製弁体の脱亜鉛腐食損傷
- 1.1 損傷状況
- 1.2 損傷機構
- 1.3 損傷防止策
- 2. 損傷事例 純銅管の孔明き腐食損傷
- 2.1 損傷状況
- 2.2 損傷機構
- 2.3 損傷防止策
- 3. 損傷事例 汚染海水中における7/3キュプロニッケルの腐食侵食
- 3.1 損傷状況
- 3.2 損傷機構
- 3.3 損傷防止策
- 4. 損傷事例 青銅製流体機械インペラの腐食疲労損傷
- 4.1 損傷状況

### 第3章 電子機器・電気製品における腐食事例と対策

#### 第1節 電子材料・部品の腐食挙動の特徴 (石川 雄一)

- 1. 電子部品の腐食の特徴
- 2. 腐食のメカニズム
- 3. 主要電子材料の腐食挙動
- 3.1 電子部品における腐食の問題点
- 3.2 電子材料に起こる腐食形態の概要
- 3.3 腐食環境による電子材料の腐食挙動の変化
- 3.4 銅・銅合金の腐食挙動
- 3.5 銀の腐食挙動
- 3.6 ニッケル、すず、金めっきの腐食挙動

#### 第2節 電子機器・部品における腐食環境の形成 (石川 雄一)

- 1. 温度・温度差と湿度
- 2. 毛管凝縮：すきまと塵埃粒子・エアロゾル
- 3. 海塩粒子：臨界湿度と潮解(化学凝縮)
- 4. 腐食性ガス：許容濃度と硫黄ガスの腐食メカニズムの理解
- 5. アウトガスと製造プロセスに基づく腐食要因
- 6. 電圧
- 7. 腐食性指標；実環境の腐食性評価
- 8. 腐食対策

#### 第3節 電子機器・電気製品の腐食形態 (渡辺 正満, 半田 隆夫)

- はじめに
- 1. 電子機器・部品に見られる主な腐食/劣化形態
- 1.1 イオンマイグレーション
- 1.2 クリープ
- 1.3 ウィスカー
- 2. 主要電子材料銀および銅の腐食形態の特徴
- 2.1 銀の腐食生成物の表面形態
- 2.2 銅の腐食生成物の表面形態
- 2.3 三宅島雄山噴火による銅および銀の初期腐食挙動

#### 第4節 電子材料・部品の腐食事例と対策 (平本 抽)

- はじめに
- 1. 銀の硫化と対策
- 2. ゴムから放出される硫黄含有ガスによる金属の硫化と対策
- 3. 金めっきの腐食と対策
- 4. プラスチックのソルベントクラックと対策

#### 第5節 めっき電子部品の腐食事例と対策 (尾崎 敏範, 石川 雄一)

- はじめに
- 1. 損傷事例
- 1.1 Agめっき膜剥離処理工程における腐食・変色
- 1.2 CN洗浄工程(KCN溶液中、陰極電解洗浄)における腐食・変色
- 1.3 水洗・乾燥工程における腐食・変色
- 1.4 下地金属のAgめっき膜上への拡散浮上
- 1.5 Agめっき膜を通過した腐食性成分による下地めっき膜の腐食
- 1.6 めっき膜自身の変質(共析した光沢剤)による腐食
- 1.7 電子部品として使用中(S, Cl, 水分, 埃など)における腐食
- <分類 1, 湿度条件に伴う腐食・変色事例>
- <分類 2, 2~3の腐食性成分による腐食・変色事例>
- <分類 3, ダスト付着による腐食・変色事例>
- おわりに

- 4.2 損傷機構
- 4.3 損傷防止策
- 5. 損傷事例 異種金属接触腐食損傷
- 5.1 損傷状況
- 5.2 損傷機構
- 5.3 損傷防止策
- 6. 損傷事例 海洋生物の付着
- 6.1 損傷状況
- 6.2 損傷機構
- 6.3 損傷防止策

#### 第5節 ガルバニック腐食と電気防食

#### 1. ガルバニック腐食 (尾崎 敏範, 石川 雄一)

- はじめに
- 1. 腐食損傷事例
- 1.1 事例 海水ポンプの部品材料構成
- 1.2 事例 ゴムライニング炭素鋼軸材の腐食損傷
- 1.3 事例 重防食塗膜部品における塗膜欠陥の腐食損傷
- 2. 腐食機構
- 3. 損傷防止策

#### 2. 電気防食 (尾崎 敏範, 石川 雄一)

- はじめに
- 1. 腐食損傷事例
- 1.1 事例 流電防食法におけるZn板の過剰消耗
- 1.2 事例 外部電源方式におけるステンレス鋼品の腐食損傷
- 2. 損傷防止策
- 2.1 異種金属接触腐食の抑制
- 2.2 最適な電気防食法
- まとめ

#### 第6節 通信用電子機器・部品の腐食事例と対策(渡辺 正満, 半田 隆夫)

- はじめに
- 1. 硫黄ガスによる腐食事例：電子部品・装置が集中的に設置されている通信機械室を一例として説明する
- 1.1 交換設備など
- 1.2 MDF(Main Distribute Frame)周り
- 1.3 装置回路基板
- (1) 概要：オンボード電源銀導体パターンの硫化
- (2) 腐食の発生状況
- (3) 腐食生成物
- (4) 大気腐食環境
- (5) 腐食速度の合金組成依存性と腐食対策
- 1.4 硫黄ガスにおける事例のまとめ
- 2. 塩害(海塩粒子が飛沫付着)環境での腐食事例
- 2.1 回路基板における腐食故障
- 2.2 屋外設置型通信装置の例(光回線終端装置(ONUと略)暴露試験体)
- 2.3 海塩粒子付着に及ぼす遮蔽の効果
- 2.4 海岸からの距離の違いによる海塩粒子付着への影響
- 2.5 塩害環境における事例のまとめ
- 3. 生活環境での腐食事例：生活環境において身近に使われているが、あまり注意が払われていないと思われるものを取り上げる
- 3.1 電話機など
- 3.2 モジュージャック(MJ)の腐食
- 3.3 コネクタ部接点金めっき不良
- 3.4 宅内装置類の付着したゴミによる故障
- 4. 一般大気環境での腐食例：ここでは銅製ケーブル心線の絶縁不良とその対策事例について説明する

#### 第7節 家庭用電気製品の腐食事例 (藤井 和美)

- 1. 家庭用電気製品の使用環境
- 2. 家電製品用鋼板の大気使用環境における腐食とその評価法
- 3. 水に接触する家電製品における腐食

#### 第8節 環境試験と解析法 (原口 智)

- 1. 環境試験の重要性
- 1.1 加速性
- 1.2 環境模擬性
- 2. 環境試験の実例
- 2.1 耐湿性試験
- 2.2 腐食性ガス試験
- 2.2.1 単独ガス試験
- 2.2.2 混合ガス試験
- 2.3 電子部品特有の現象の再現試験
- 2.3.1 イオンマイグレーション簡易試験法
- 環境試験法評価方法
- 2.3.2 ウィスカー
- 3. 解析法
- 第9節 電子機器・部品の腐食に関する国際規格・日本規格 (石川 雄一)
- はじめに
- 1. 腐食試験法に関する国際規格・日本規格

2. 環境の腐食性分類に関する国際規格  
第10節 地球環境問題と機器の高信頼性・安全性の問題 電子電気機器の腐食対策の現状と今後の課題 (石川 雄一, 尾崎 敏範)

1. 環境規制に伴う電子電気機器の腐食問題  
(1) オゾン層の保護のための洗浄技術の変化

## 第4章 社会基盤施設等構造物における腐食事例と対策

- 第1節 電気防食された塗覆装パイプラインにおける交流腐食事例と対策 (梶山 文夫)

はじめに

1. 埋設された塗覆装パイプラインの交流腐食理論
2. 埋設パイプラインの交流腐食に対する認識
3. 海外の電気防食された塗覆装パイプラインの交流腐食事例とその解析
4. 交流腐食に及ぼす各因子の影響
  - 4.1 腐食速度に及ぼす交流電圧の影響
  - 4.2 腐食速度に及ぼす交流電流密度の影響
  - 4.3 腐食速度に及ぼすカソード電流密度の影響
  - 4.4 腐食速度に及ぼす塗覆装欠陥部の面積の影響
  - 4.5 腐食速度に及ぼす周波数の影響
  - 4.6 腐食速度に及ぼす土質の影響
  - 4.7 腐食速度に及ぼす温度の影響
  - 4.8 腐食速度に及ぼす時間の影響
5. 電気防食された塗覆装パイプラインの交流腐食リスク増加の背景
6. 埋設された塗覆装パイプラインの交流腐食防止を考慮した電気防食基準
7. クーボン直流電流密度とクーボン交流電流密度の計測方法
8. 交流腐食リスク評価に対する分極電位とクーボン流入直流電流密度の限界
9. 電気防食された塗覆装パイプラインの交流腐食対策としての交流誘導低減

10. 交流腐食の兆候の把握

おわりに

- 第2節 橋梁の腐食事例と対策 (守屋 進)

1. 塗装橋梁の腐食事例と対策
  - 1.1 一般塗装系を適用した塗装橋梁の腐食事例
  - 1.2 重防食塗装系を適用した塗装橋梁の腐食事例
  - 1.3 塗装橋梁の腐食対策
2. 耐候性橋梁の腐食事例と対策
3. 溶融亜鉛めっき橋梁の腐食事例と対策
4. 金属溶射橋梁の腐食事例と対策

- 第3節 港湾施設の腐食事例と対策 (阿部 正美)

1. 港湾鋼構造物の腐食の実態
  - 1.1 腐食環境と腐食の実態
    - (1) 海上大気中
    - (2) 飛沫帯
    - (3) 干満帯
    - (4) 海水中および海底土中部
  - 1.2 集中腐食の被害
  - 1.3 集中腐食の被害事例
    - (1) セル式構造物の被害事例 (直江津港西埠頭セル岸壁)
    - (2) 鋼矢板式構造物の被害事例 (A港 a地区 - 2m物揚場)
    - (3) 鋼管杭式構造物の被害事例 (横浜港山下埠頭)
  - 1.4 サンドエロ - ジョン
2. 港湾鋼構造物の防食対策
  - 2.1 電気防食法
    - (1) 電気防食法の原理
    - (2) 防食電位と防食効果の判定
    - (3) 電気防食の適用範囲
    - (4) 防食に必要な電流密度
    - (5) 電気防食と被覆防食の併用効果
    - (6) サンドエロ - ジョンに対する防食効果
  - 2.2 被覆防食法
    - (1) 塗装
    - (2) 有機ライニング
    - (3) 無機ライニング
      - 1) セメントおよびコンクリ - トライニング
      - 2) 電着工法

## 第5章 高温設備における腐食事例と対策

- 第1節 ガスタービン (中森 正治)

はじめに

1. 腐食損傷原因とその機構
  - 1.1 ガスタービン損傷原因
  - 1.2 ガスタービンにおける腐食損傷
    - 1.2.1 タイプ (高温硫化腐食)
    - 1.2.2 タイプ (低温硫化腐食)
2. 腐食事例
  - 2.1 A重油燃焼ガスタービン
  - 2.2 LNG燃焼ガスタービンにおける応力腐食割れ
3. 腐食損傷防止対策
  - 3.1 耐食合金の選定
  - 3.2 燃料の脱塩と防食添加剤の注入
  - 3.3 空気フィルター
  - 3.4 耐食・耐酸化コーティング法

- (2) 有害物質使用制限
  - (3) リサイクル対策
  - (4) 地球温暖化対策
2. 機器の高信頼性・安全性問題と腐食

- 3) 金属ライニング
  - イ) チタンクラッドライニング
  - ロ) ステンレス鋼
- (4) ペトロラタムライニング

3. 防食工法の適用法

- (1) Aの方法
- (2) Bの方法
- (3) Cの方法

- 第4節 船舶バラストタンク内の腐食事例と対策 (赤嶺 健一)

1. バラストタンクの腐食環境

2. 腐食事例

- <事例 1: 溶接継手部>
- <事例 2: エッジ部>
- <事例 3: 上甲板裏面>
- <事例 4: 燃料タンク隔壁>

3. 対策

- 第5節 鉄筋コンクリート構造物の腐食事例と対策 (近藤 照夫)

1. 建築構造用鉄骨と建築用金属材料の腐食・防食

1. 建築構造用鉄骨の腐食・防食

- 1.1 鉄骨造建築物における鉄骨の腐食
  - (1) 既存建築物における鉄骨の腐食実態
  - (2) 竣工前後の建築物における鋼材の腐食
  - (3) 被覆材の種類や湿度条件が異なる場合の鋼材腐食
  - (4) 鉄骨工事における鋼材腐食防止への配慮
  - (5) 屋外における露出鉄骨の腐食傾向
  - (6) 過酷な環境における鉄骨の腐食
- 1.2 鉄骨造建築物における鉄骨に対する防錆技術
  - (1) 防錆塗装
  - (2) 亜鉛めっき
  - (3) 常温金属溶射

2. 建築外装用金属材料の腐食・防食

- 2.1 建築用金属材料の種類と表面仕上げ
- 2.2 建築外装用金属材料に生じる腐食現象とその対策
  - (1) アルミニウム合金
  - (2) 着色亜鉛鋼板
  - (3) ステンレス鋼
  - (4) 銅および銅合金
- 2.3 建築的な防錆・防食

2. 建築のコンクリート構造物における鉄筋腐食と防食 (米澤 敏男)

1. 鉄筋の腐食による構造物の劣化損傷

2. コンクリートの組織と防食作用

3. 中性化による鉄筋の腐食

- 3.1 中性化

- 3.2 鉄筋の腐食

4. 塩化物イオンによる鉄筋の腐食

- 4.1 塩化物イオンの浸入

- 4.2 腐食が始まる限界塩化物量

- 4.3 コンクリートが損傷する限界腐食量

5. 防食対策

- 5.1 コンクリートによる防食

- 5.2 コンクリートのコーティング

- 5.3 エポキシ樹脂塗装鉄筋

- 5.4 電気防食

6. 耐久性設計

- 第6節 海洋鋼構造物の ISO規格と日本規格 (梶山 文夫)

1. 防食工法の比較

2. 設計電流密度の比較

3. 防食電位の比較

まとめ

おわりに

- 第2節 石油化学プラント (中原 正大)

1. 水素侵食事例

- 1.1 概要

- 1.2 使用条件

- 1.3 検討結果

- 1.4 水素侵食事例まとめ

2. 局在化した黒鉛化事例

- 2.1 概要

- 2.2 使用条件

- 2.3 損傷サンプルの解析結果

- 2.4 局在化した黒鉛化事例まとめ

- 第3節 廃棄物発電プラント (川原 雄三)

はじめに

1. 廃棄物発電プラントの腐食環境と環境低減法

- 1.1 プラントの腐食環境の変遷
- 1.2 腐食環境の低減法
  - (1) 燃焼改善
  - (2) 灰の付着防止と灰除去法
- 2. 高温耐食材料の発展
  - 2.1 蒸発管用高温耐食コーティング
    - (1) 金属溶射
    - (2) 溶接肉盛
    - (3) 二重管
    - (4) 耐火材
  - 2.2 過熱器用耐食耐熱合金管
    - (1) 高 Cr 高 Ni・Fe 基合金
    - (2) 高 Cr 高 Mo・Ni 基合金
    - (3) 高 Si 高 Cr 高 Ni 合金
    - (4) 耐熱鋳鋼
- 3. 合金元素の添加効果と腐食メカニズム
  - 3.1 耐食性有効元素の添加効果
    - (1) Cr
    - (2) Ni
    - (3) Mo, W
    - (4) Si, Al
    - (5) Nb
  - 3.2 腐食メカニズム

## 第6章 エネルギー関連プラントにおける腐食事例と対策

### 第1節 火力発電プラント

(京 将司)

- 1. 火力発電プラントにおける腐食と対策
- 2. ボイラーの腐食事例と対策
  - 2.1 水側腐食
    - 2.1.1 火炉蒸発管の酸素腐食とアルカリ腐食
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.1.2 火炉蒸発管・節炭器管の腐食疲労
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.1.3 過熱器管の過熱噴破
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
  - 2.2 ガス側腐食
    - 2.2.1 火炉蒸発管の溝状腐食(エレファントスキン)
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.2.2 過熱器管・再熱器管の高温腐食
      - 2.2.2.1 重原油焚きボイラー
        - (a) 事例
        - (b) 原因
        - (c) 対策
      - 2.2.2.2 石炭焚きボイラー
        - (a) 事例
        - (b) 原因
        - (c) 対策
    - 2.2.3 エアヒーターエレメントの硫酸露点腐食
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.2.4 スーツブロー蒸気によるスチームカット
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.2.5 高温高圧バルブのエロージョン損傷
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
    - 2.2.6 高温高圧配管のエロージョン・コロージョン
      - (a) 事例
      - (b) 原因
      - (c) 対策
- 3. 蒸気タービンの腐食事例と対策
  - 3.1 低圧タービン翼溝腐食疲労, 応力腐食割れ(SCC)および繰返しひずみ腐食疲労
    - (a) 事例
    - (b) 原因
    - (c) 対策
  - 3.2 復水器管のアンモニアアタック
    - (a) 事例
    - (b) 原因
    - (c) 対策
  - 3.3 給水加熱器管のインレットアタック
    - (a) 事例

まとめ

### 第4節 航空機用ガスタービン(ジェットエンジン) (吉葉 正行)

- はじめに
  - 1. 航空機用ガスタービン用耐熱コーティング技術の進歩
  - 2. 耐熱コーティングにおける要求特性と損傷様式
    - 2.1 要求特性
    - 2.2 各種損傷様式
  - 3. 高温損傷事例
    - 3.1 ジェットエンジン燃焼器用 TBC システムにおける内部酸化誘起異常変形問題
    - 3.2 Al 拡散コーティング動翼における異常酸化
    - 3.3 Al 拡散コーティング静翼における熱機械的損傷劣化
    - 3.4 EB - PVD TBC システム静翼における損傷
- おわりに 高性能耐熱コーティングの合理的システム設計に向けて

### 第5節 製鉄プラント

(加藤 謙治)

- 1. プロセスに関わる腐食事例
  - 1.1 焼結設備
  - 1.2 熱風炉鉄皮の応力腐食割れ
- 2. 貯蔵・搬送にかかわる設備
  - 2.1 エネルギーガスに関わる腐食と対策
  - 2.2 原料・副生物の貯蔵・搬送設備
- 3. 製鉄プロセス設備の腐食と管理
  - (b) 原因
  - (c) 対策

### 第2節 地熱発電プラント

(真田 徳雄, 倉田 良明)

- 1. 発電設備と関連設備
- 2. 地熱環境と材料
- 3. 腐食事例
  - 3.1 [事例 1] 坑井ケーシング管の応力腐食割れ
    - 3.1.1 概要
    - 3.1.2 流体性状と材料
    - 3.1.3 損傷状況
    - 3.1.4 検討
    - 3.1.5 結論
  - 3.2 [事例 2] 流送管のエロージョン・コロージョン
    - 3.2.1 概要
    - 3.2.2 流体性状と材料
    - 3.2.3 損傷状況
    - 3.2.4 検討
    - 3.2.5 結論
  - 3.3 [事例 3] 検層ケーブルの応力腐食割れ
    - 3.3.1 概要
    - 3.3.2 環境と材料
    - 3.3.3 損傷状況
    - 3.3.4 検討
    - 3.3.5 結論
  - 3.4 [事例 4] 薬液注入管と保護管の腐食
    - 3.4.1 概要
    - 3.4.2 環境と材料
    - 3.4.3 損傷状況
    - 3.4.4 検討
    - 3.4.5 結論

おわりに

### 第3節 原子力プラント

(平野 秀朗)

- 1. BWR
  - 1.1 被ばく低減化対策
    - (1) 酸素注入
    - (2) Ni / Fe 比コントロール
    - (3) 亜鉛注入
  - 1.2 SCC 発生と SCC 防止対策技術
    - 1.2.1 再循環系における鋭敏化ステンレス鋼配管の SCC
      - (1) SCC の発生
      - (2) SCC の発生原因
      - (3) SCC 対策
        - 材料面からの対策
        - 溶接施工面からの対策
        - 水質面からの対策
    - 1.2.2 シュラウドおよび再循環系における加工硬化低炭素ステンレス鋼配管の SCC
    - 1.2.3 最近の水処理面からの SCC 対策
      - 水素注入
      - 貴金属注入
      - 代替 SCC 抑制法の開発
  - 1.3 BWR エロージョン・コロージョンの防止対策
- 2. PWR
  - 2.1 被ばく低減対策
    - (1) 高 pH 運転
    - (2) 亜鉛注入
  - 2.2 腐食対策技術
    - (1) SG 伝熱管材料の選定の経緯

- (2) 減肉
- (3) デンティング防止対策
- (4) PWSCC(primary water stress corrosion cracking)防止対策
- (5) IGA/SCC防止対策

IGA/SCCの発生原因と対策  
SG交換

2.3 PWRのエロージョン・コロージョンの防止対策

**第7章 インプラントおよび歯科修復材料における腐食事例**

(埜 隆夫)

はじめに

- 1. 生体医療用金属材料
- 2. 人体中での腐食損傷事例
  - 2.1 SUS 316Lステンレス鋼
  - 2.2 Co - Cr合金
  - 2.3 純Ti
- 3. その他の腐食事例
  - 3.1 動物埋入による金属溶出
  - 3.2 擬似体液浸せき
  - 3.3 摩耗・フレッティングによる溶出

- 3.4 分極
- 3.5 表面酸化物の組成変化
- 4. 人体内での腐食に関する因子
  - 4.1 pH
  - 4.2 溶存酸素濃度
  - 4.3 塩化物イオン
  - 4.4 生体分子
  - 4.5 細胞
  - 4.6 フッ化物

おわりに

(沢田 正昭)

**第8章 金属製遺物の腐食事例と保存処理**

はじめに

- 1. 埋蔵環境とさび
  - 1.1 考古遺物の腐食
    - 1.1.1 さびとかたち
    - 1.1.2 良いさび悪いさび
  - 1.2 さびの解析
- 2. 腐食遺物の整形
  - 2.1 腐食診断

- 2.2 考古学とさび取り
- 2.3 金銅装遺物のさび
- 3. 腐食進行の抑止
  - 3.1 脱塩処理
  - 3.2 応急処置
  - 3.3 防錆処理と合成樹脂

おわりに

**第4編 防食技術**

**第1章 電気防食 (梶山 文夫, 菊池 純)**

はじめに

- 1. 電気防食の原理
  - 1.1 カソード防食の原理
  - 1.2 アノード防食の原理
  - 1.3 カソード防食とアノード防食との比較
- 2. カソード防食基準
  - 2.1 構造物(クーボン)対電解質電位またはカソード分極量(復極量)を指標としたカソード防食基準
    - 2.1.1 草案を含むカソード防食国際基準
    - 2.1.2 国内外のカソード防食基準の代表例
    - 2.1.3 照合電極
  - 2.2 クーボン電流密度を指標としたカソード防食基準
- 3. カソード防食法
  - 3.1 流電陽極方式
  - 3.2 外部電源方式
  - 3.3 ハイブリッド方式
- 4. 電食防止法
  - 4.1 選択排流法
  - 4.2 強制排流法
- 5. カソード防食状況の計測方法

- 5.1 オン電位法
- 5.2 インスタントオフ(分極)電位法
- 5.3 クーボンインスタントオフ電位
- 5.4 最小100mV法
- 5.5 クーボン電流密度法
- 6. カソード防食による腐食防止機構
  - 6.1 鋼の腐食に及ぼす印加電位の影響
    - 6.1.1 SRBが棲息する粘土中の鋼の腐食に及ぼす印加電位の影響
    - 6.1.2 IBが棲息する砂質土壌中の鋼の腐食に及ぼす印加電位の影響
  - 6.2 カソード電流密度
    - 6.2.1 SRBが棲息する粘土中の鋼の種々の印加分極電位におけるカソード電流密度の経時変化
    - 6.2.2 IBが棲息する砂質土壌中の鋼の種々の印加分極電位におけるカソード電流密度の経時変化
  - 6.3 カソード防食による微生物腐食防止機構
    - 6.3.1 SRBが棲息する粘土中の鋼
    - 6.3.2 IBが棲息する砂質土壌中の鋼
  - 6.4 まとめ
- 7. 定期点検

おわりに

**第2章 塗覆装 (田邊 弘往)**

- 1. 塗装による防食
- 2. 防食塗装の意義と塗装系の選択
- 3. 環境と塗装系
- 4. 塗装前表面処理方法

- (1) 水,有機溶剤,化学的方法によるクリーニング
- (2) 物理的 surface 処理
- (3) プラストクリーニング
- 5. 防食塗装系の選択

**第3章 インヒビター (荒牧 國次)**

- 1. インヒビターの分類
  - 1.1 吸着型インヒビター
  - 1.2 酸化型インヒビター
  - 1.3 沈澱型インヒビター
- 2. 金属の腐食とインヒビターの作用
- 3. 吸着型インヒビターの作用
  - 3.1 静電吸着する吸着型インヒビター
  - 3.2 化学吸着をする吸着型インヒビター
  - 3.3 非極性基の作用
- 4. インヒビターの作用と硬いおよび軟らかい酸塩基の法則
- 5. 酸化型インヒビター

- 6. 沈澱型インヒビター
  - 6.1 酸性水溶液中で有効な沈澱型インヒビター
  - 6.2 中性水溶液中で有効な沈澱型インヒビター
- 7. 局部腐食を抑制するインヒビター
- 8. インヒビターの適用
  - 8.1 酸素を含む中性水溶液中
  - 8.2 酸性水溶液中
  - 8.3 塩基性水溶液中
  - 8.4 石油が存在するとき
  - 8.5 非水溶液中
  - 8.6 大気中

**第4章 防食設計 (中原 正大)**

- 1. 防食設計とは
- 2. 機器の仕様の検討段階
  - 2.1 想定される耐用年数
  - 2.2 機器に腐食による損傷が生じた場合の結果影響
  - 2.3 想定される使用環境条件
  - 2.4 想定される運転や保守管理状況
  - 2.5 機器製作のコスト範囲
  - 2.6 適用法規
- 3. 設計段階
  - 3.1 材料選定
  - 3.2 環境制御
    - (1) 腐食性成分の除去

- (2) 耐食性を向上させる成分の添加
- (3) 電気防食
- 3.3 防食構造設計
- 4. 製作段階
  - 4.1 材料
  - 4.2 施工要領
  - 4.3 検査
- 5. 運転段階
  - 5.1 想定される劣化や損傷現象
  - 5.2 適正運転範囲
  - 5.3 製作, 検査の記録