

最新 腐食事例解析と腐食診断法

目次

第1編 腐食の基礎

第1章 水溶液腐食の基礎	3
第1節 腐食熱力学	(朝倉 祝治) 5
1. 避けることのできない腐食・腐食熱力学	5
1.1 宿命を示す熱力学	5
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	5
2. 金属の腐食機構のあらまし	7
2.1 金属腐食機構の分類	7
3. 気体中で起こる金属腐食・乾食	8
4. 水を含まない溶液中の腐食反応	9
第2節 電気化学反応による腐食・湿食	(朝倉 祝治) 10
1. 水を含む環境におかれた金属の表面状態	10
2. 不動態	10
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	11
4. 湿食の反応機構	12
4.1 短絡されたボルタの電池とガルバニブロック	12
4.2 同一の金属板上に発生する腐食・鉄の腐食の例	13
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	14
4.4 代表的な腐食形態とその事例	15
(1) 全面腐食	15
(2) 異種金属接触腐食	15
(3) すきま腐食	15
(4) 孔食	15
(5) 粒界腐食	16
(6) 選択腐食	17
(7) エロージョン・コロージョン	17
(8) 応力腐食割れ	17
第3節 プルベダイアグラムとその利用	(朝倉 祝治) 18
1. プルベダイアグラム	18
2. プルベダイアグラムによる腐食・非腐食の判定	18
(1) 腐食抑制剤の防食効果判定	20
(2) 金属の不動態化の判定	20
(3) カソード防食の防食効果判定	20
(4) マクロ電池形成および迷走電流による腐食の判定	20
3. プルベダイアグラムによる防食方法の原理的かつ統一的導出	20
第4節 腐食危険と腐食対策	(朝倉 祝治) 22
1. 腐食機構から理論的に導出される腐食危険性	22
2. 腐食機構から原理的に導かれる腐食対策	22
第2章 腐食形態	25
第1節 腐食損傷の分類	(石原 只雄) 27
第2節 全面腐食	(石原 只雄) 28

第3節 局部腐食		29
1. 孔食(pitting corrosion)	(石原 只雄)	29
2. すきま腐食(crevice corrosion)	(石原 只雄)	30
3. 粒界腐食(intergranular corrosion)	(石原 只雄)	31
4. 応力腐食割れ(stress corrosion cracking, SCC)	(石原 只雄)	32
5. 水素脆化(hydrogen embrittlement)	(石原 只雄)	33
6. 腐食疲労	(石原 只雄)	35
7. フレッシングコロージョン(fretting corrosion, 擦過腐食)	(石原 只雄)	37
8. 異種金属接触腐食	(梶山 文夫)	38
9. 選択腐食(脱亜鉛腐食, 黒鉛化腐食)	(梶山 文夫)	39
10. 電食と交流腐食	(梶山 文夫)	41
1. 電食の定義	41	
2. 電食の現象	41	
3. 埋設パイプラインの電食の事例	43	
4. 交流腐食の定義	43	
11. 通気差腐食	(梶山 文夫)	45
12. マクロセル腐食	(梶山 文夫)	47
13. エロージョン・コロージョンとFAC	(磯本 良則)	48
14. キャビテーション損傷	(磯本 良則)	51
15. 糸状腐食	(磯本 良則)	54
16. 溝状腐食	(磯本 良則)	55
17. 微生物腐食	(梶山 文夫)	56
1. 定義	56	
2. 微生物腐食研究史俯瞰	56	
3. 微生物の特質	56	
4. 微生物腐食の特異性	57	
(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	57	
(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	57	
(c) 選択腐食を誘起	57	
5. 土壌中の銻鉄の腐食	57	
5.1 土壌腐食に深く関与する微生物	58	
5.1.1 硫酸塩還元菌(SRB)	58	
5.1.2 メタン生成菌(MPB)	59	
5.1.3 鉄酸化細菌(IOB)	60	
5.1.4 硫黄酸化細菌(SOB)	60	
5.1.5 鉄細菌(IB)	61	
5.2 E_h とpHの関係および微生物の活性域	61	
5.3 微生物腐食速度	62	
5.4 微生物腐食機構	62	
5.4.1 硫酸塩還元菌(SRB)による腐食機構	62	
(1) von Wolzogen Kührとvan der Vlugtによって提出されたカソード復極説	62	
(2) カソード復極説に対する是非	62	
(3) フィールド調査結果による腐食機構研究	63	
(4) <i>D. desulfuricans</i> 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	64	
(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	67	
5.4.2 鉄酸化細菌(IOB)による腐食機構	71	
5.4.3 鉄細菌(IB)による腐食機構	72	
6. ステンレス鋼の微生物腐食	72	
6.1 ステンレス鋼の微生物腐食の特徴	72	
6.2 ステンレス鋼の微生物腐食機構	73	
7. 銅合金の微生物腐食	74	
8. アルミニウム合金の微生物腐食	74	
9. その他の金属の微生物腐食	75	
10. 高分子の生物劣化	75	

第3章 腐食環境		79
第1節 淡水		(藤井 哲雄) 81
1. 水源と水質	81	
1.1 雨水	81	
1.2 河川水	82	
1.3 湖沼水	82	
1.4 地下水	82	
2. 淡水腐食のメカニズム	83	
3. 水質と腐食の要因	84	
3.1 水処理技術の変遷	84	
3.2 pHの影響	85	
3.3 溶存酸素(DO)および水流速の影響	86	
3.4 水温の影響	86	
3.5 塩化物および残留塩素	86	
3.6 スケール	87	
3.7 水質汚染の影響	87	
3.8 淡水中の腐食試験	87	
4. 配管材料と耐食性	88	
第2節 海水		(石川 雄一) 89
第3節 大気腐食		(篠原 正) 93
はじめに	93	
1. 金属表面での水膜の生成	93	
1.1 大気状態の分類	93	
1.2 水膜の形成	93	
1.2.1 化学凝縮	93	
1.2.2 毛管凝縮	95	
2. 大気腐食挙動に及ぼす水膜の影響	95	
2.1 炭素鋼の腐食速度 CR に及ぼす水膜厚さ d の影響	95	
2.2 ステンレス鋼の発錆に及ぼす水膜の影響	96	
2.3 電気化学的検討	96	
3. 環境条件の影響	97	
3.1 降雨と結露	97	
3.2 温度の影響	97	
3.3 付着海塩量に及ぼす風の影響	97	
3.3.1 風による海塩の輸送と付着	97	
3.3.2 風が非常に強いときの海塩量	98	
まとめ	99	
第4節 土壌		(梶山 文夫) 101
1. 腐食環境としての土壌	101	
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	101	
3. 土壌の腐食性と土壌特性値	102	
4. 土壌の腐食性評価法	103	
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	106	
6. 土壌腐食モニタリング	107	
第5節 高温水		(原 信義) 110
はじめに	110	
1. 圧力-体積-温度($P-V-T$)関係	110	
2. 誘電率	111	
3. 水のイオン積とpH	111	
4. 導電率	112	
5. 輸送特性	112	
6. 気体の溶解度	112	
7. 無機化合物の溶解度	113	
8. 電解質の解離平衡	113	
9. 電解質溶液の臨界点	114	
10. 熱力学的推算法	114	
第6節 非水溶液		(荒牧 國次) 117
1. 非水溶媒と非水溶液	117	
2. 非水溶液中における金属の腐食	118	
3. 腐食事例	119	
第4章 各種材料の耐食性		127
第1節 鉄鋼材料		129
1. 炭素鋼, 低合金鋼	(伊藤 叡) 129	
1. 環境の影響	129	
2. 材料因子の影響	129	

2.1 化学成分	129	6. 耐溝食性電鍍鋼管	134
2.2 耐食性低合金鋼の位置づけ	130	7. 耐水素誘起割れ鋼	134
3. 耐硫酸露点腐食鋼	130	8. 耐硫化物応力腐食割れ鋼	135
4. 耐候性鋼	131	9. その他の耐食性低合金鋼	135
5. 耐海水鋼	133		
2. 鋳鉄			(宮坂 松甫) 138
1. 非合金鋳鉄	138	3. 高ニッケル鋳鉄	140
2. 高ケイ素鋳鉄	139		
3. ステンレス鋼			(石原 只雄) 143
はじめに	143	3.2.2 すきま腐食	151
1. ステンレス鋼の腐食特性	143	3.2.3 粒界腐食(intergranular corrosion)	152
1.1 ステンレスとは	143	3.2.4 応力腐食割れ	
1.2 ステンレス鋼の不動態皮膜	143	(stress corrosion cracking, SCGと略記)	155
1.3 ステンレス鋼の不動態特性と合金成分	144	4. 各種環境下におけるステンレス鋼の耐食性	155
1.4 不動態皮膜の破壊	144	4.1 酸およびアルカリによる腐食	155
2. ステンレス鋼の種類とその用途	145	4.2 淡水および海水による腐食	157
2.1 オーステナイト系ステンレス鋼	146	4.3 大気腐食	158
2.2 フェライト系ステンレス鋼	147	4.4 高温水腐食	158
2.3 オーステナイト・フェライト二相ステンレス鋼	148	4.5 高温腐食	158
2.4 マルテンサイト系ステンレス鋼	148	5. 局部腐食試験	159
2.5 析出硬化系ステンレス鋼	149	5.1 孔食試験	159
3. ステンレス鋼使用上の問題点	149	5.2 ステンレス鋼の臨界孔食温度(CPT)	159
3.1 加熱脆化	149	5.3 すきま腐食試験	159
3.1.1 シグマ(σ)脆性	149	5.4 粒界腐食試験	160
3.1.2 475°C脆性	149	5.5 応力腐食割れ試験	160
3.2 局部腐食現象	149	おわりに	160
3.2.1 孔食	150		
第2節 非鉄金属材料	162		
1. 銅および銅合金			(山田 豊) 162
1. 一般耐食性	162	(2) Cu-Ni系合金	165
2. 耐薬品性	163	(3) Cu-Sn系合金	165
3. 実用材料の腐食特性	163	(4) Cu-Al系合金	165
3.1 純銅	163	(5) Cu-Si系合金	166
3.2 銅合金	165	(6) 導電性合金	166
(1) Cu-Zn系合金	165		
2. アルミニウムおよびアルミニウム合金			(花崎 昌幸) 167
はじめに	167	1.1.4 応力腐食	169
1. アルミニウム合金の一般的な腐食挙動について	167	1.1.5 異種金属接触腐食	169
1.1 アルミニウムの腐食形態	167	1.1.6 剥離腐食	170
1.1.1 全面腐食	167	2. 大気中における各種アルミニウム合金の耐食性	171
1.1.2 孔食	167	2.1 板, 形など展伸材の耐食性	171
1.1.3 粒界腐食	168	2.2 鋳物材の耐食性	171

2.3 異種金属接触腐食挙動	172	4. 海水中における耐食性	174
3. 淡水中における耐食性	173	5. 土壌中における耐食性	174
3.1 水道水中における耐食性	173	まとめ	175
3.2 湖水・河川水における耐食性	173		
3. ニッケルおよびニッケル合金			(菅原 克生) 177
はじめに	177	の効果	181
1. 各種Ni基耐食合金の分類	178	(2) 全面腐食	181
(1) Ni	178	(3) 局部腐食	182
(2) Ni-Cu	179	①孔食, すきま腐食	182
(3) Ni-Cr-Fe	179	②応力腐食割れ	182
(4) Ni-Mo	179	(4) 熱的安定性	182
(5) Ni-Cr-Mo	179	(5) 代表的な機械的性質と加工性	183
(6) Ni-Cr-Fe-Mo-Cu	180	(6) 溶接性	183
2. Ni基耐食合金の略歴	180	4. 最近開発されたNi基耐食合金	183
3. Ni基耐食合金の耐食性および基本的な諸特性	181	(1) Ni-Mo系	183
(1) Ni基耐食合金中の各添加元素の耐食性へ		(2) Ni-Cr-Mo系	184
4. チタン, タンタル, およびジルコニウム			(中原 正大) 186
1. 物理的な基本特性	186	3.2 応力腐食割れ	187
2. 耐食特性(全面腐食に対して)	186	3.3 水素吸収脆化	188
3. 局部腐食および特殊な現象	187	3.4 発火	188
3.1 すきま腐食	187	4. Ti, ZrおよびTaの使用にあたって	189
5. 亜鉛, マグネシウム(亜鉛の耐食性)			(高谷 松文) 190
1. 亜鉛の耐食性	190	2.2 耐食性に及ぼす合金の影響	193
1.1 亜鉛の腐食特性	190	(1) Mg-Al系合金	193
1.2 鋼に対する犠牲防食能	191	(2) Mg-X-Zr系合金	194
2. マグネシウムの耐食性	192	2.3 マグネシウムの純度による腐食	194
2.1 マグネシウムの腐食特性	192	おわりに	195
第3節 非金属材料	196		
1. 高分子材料			(後藤 誠裕, 津田 健) 196
1. ゴム	196	4. 腐食形態と腐食速度	200
2. 熱可塑性プラスチック	196	5. 高分子材料の耐食性	201
3. 熱硬化性プラスチック	197		
2. セラミックス材料			(殷 シュウ, 佐藤 次雄) 203
緒言	203	2.2 熔融塩による酸化腐食	206
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	203	2.3 高温高圧水による酸化腐食	208
2. 非酸化物セラミックスの腐食	204	3. 酸・アルカリ性水溶液による溶解腐食	208
2.1 高温空気・酸素・水蒸気による酸化腐食	204	3.1 アルカリ性水溶液腐食	208
おわりに	204	3.2 酸性水溶液腐食	209
		おわりに	211
3. コンクリート			(宮田 恵守) 213
1. コンクリートと劣化の概要	213	2.2 骨材	214
2. コンクリートを構成する材料	213	2.3 混和材料	214
2.1 セメント	213	2.4 練混ぜ水	215

3. 腐食防止法	322	(5) 無機系材料	325
3.1 環境面の腐食防止対策	322	4. 材料の耐食性の試験, 評価方法	325
(1) 燃料添加剤の使用	323	4.1 実験室腐食試験法	326
(2) 燃焼の制御	323	4.2 実機腐食試験	326
3.2 耐食材料	323	(1) 酸露点の計測	326
(1) 耐硫酸露点腐食鋼	324	(2) 腐食試験	327
(2) ステンレス鋼	324	(3) 腐食モニタリング	327
(3) 非鉄金属材料	324	まとめ	327
(4) 有機系材料	325		

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) 335

1. 診断のとらえ方	335	4. 診断の機会, 場および方法	336
2. 診断と保全方式	335	5. 診断の要素技術や情報・知識	336
3. 診断の対象となる機器の種類や現象	336	6. 腐食診断とは	337

第2節 塗覆装の劣化診断 (田邊 弘往) 338

1. 劣化の形態	338	4.1 交流インピーダンス法による塗膜の防食性評価	339
2. 塗膜の劣化診断	338	4.2 カレントインタラプタ法による塗膜の劣化評価	340
3. 機器による劣化, 欠陥の解析	339		
4. 電気化学的診断法	339		

第3節 高温設備の腐食試験と診断法 342

1. 高温腐食試験法と評価法 (川原 雄三) 342

はじめに	342	1.2.5 応力負荷条件下の高温腐食試験	350
1. 実験室における腐食試験方法	342	2. 実機における腐食試験方法	350
1.1 高温酸化および高温ガス腐食試験	342	2.1 実機試験	350
1.2 高温腐食試験	344	2.2 腐食モニタリング	351
1.2.1 実験室簡易試験	345	3. 腐食環境と材料耐食性の評価法	351
(1) 灰塗布法	345	3.1 腐食量と腐食形態の評価	351
(2) 灰中埋没法(浸せき法)	345	3.2 腐食寿命予測	352
1.2.2 燃焼試験(バーナーリグ試験)	348	3.2.1 腐食速度則	352
1.2.3 伝熱条件試験	348	3.2.2 統計的手法	353
1.2.4 電気化学試験	348	おわりに	354

2. 電気化学的高温腐食試験法 (西方 篤) 356

1. 試験方法	356	2. 測定方法と耐食性の評価	357
1.1 電気化学セル	356	2.1 アノード分極法	357
1.2 熔融塩	356	2.2 電気化学インピーダンス法	357
1.3 ガス雰囲気	357		

第4節 有機材料の腐食・劣化診断 (酒井 哲也, 久保内 昌敏) 361

1. 有機材料の腐食および劣化の分析方法	361	1.1 物理的劣化の試験方法	361
----------------------	-----	----------------	-----

1.2 化学的劣化の試験方法	361	(5) 衝撃弾性波検査法	363
2. 有機系複合材料の非破壊試験方法	363	3. 超音波による有機材料の腐食評価	364
(1) 超音波探傷試験	363	(1) 表面反応型	366
(2) 放射線透過法	363	(2) 腐食層形成型	366
(3) 磁粉探傷試験, 浸透探傷試験法	363	(3) 全面浸入型	366
(4) アコースティックエミッション(AE)法	363	4. 有機系複合材料の腐食劣化モニタリング	368

第2章 腐食・劣化の診断事例(各論)

第1節 建築設備における腐食診断法 (横手 幸伸) 373

1. 建築設備における配管劣化診断の概要	373	①使用する機器類	387
1.1 配管診断の必要性	373	②調査時のポイント	388
1.2 配管劣化診断の内容	373	③調査結果	388
1.2.1 配管システムの概要把握	373	(3) 内視鏡調査	388
1.2.2 配管劣化診断対象の部位と診断の内容	374	①使用する機器類	388
1.2.3 水質分析	374	(i) ファイバースコープ	388
1.2.4 診断計画	374	(ii) CCDスコープ	388
1.2.5 配管の腐食と診断	379	(iii) 管用テレビカメラ	390
2. 腐食診断法	380	②調査時のポイント	390
2.1 設備配管診断の対象	380	③調査結果	390
2.2 配管内部の二次診断	380	(4) 配管採取(抜管)調査	391
2.2.1 二次診断の概要	380	①使用する機器類	391
2.2.2 二次診断調査箇所	381	②調査時のポイント	391
2.2.3 二次診断の評価方法	384	③調査結果	391
(1) 残存寿命の計算	384	2.3 埋設管の劣化診断	392
①配管の残存肉厚	384	2.3.1 診断の対象および手順	392
②配管の腐食量	384	2.3.2 埋設管の一次診断	392
③腐食速度の算出	384	(1) 一次診断の方法	392
④残存寿命の算出	384	①兆候調査	392
(2) 定性的な寿命評価	385	②埋設環境調査	392
2.2.4 二次診断での調査方法	385	(2) 一次診断の判定	393
(1) X線調査	385	2.3.3 埋設管の二次診断	393
①X線とX線フィルム	386	(1) 二次診断の方法	393
②X線調査の特徴	386	①土壌腐食性分析調査	393
③検査結果の判定	387	②マクロセル形成判定調査	393
(2) 超音波肉厚調査	387	(2) 二次診断の判断	394

第2節 鋼構造物の腐食・劣化診断 (守屋 進) 396

はじめに	396	2.3 金属溶射の劣化診断	399
1. 土木分野における鋼構造物	396	2.4 耐候性鋼材の劣化診断	399
2. 各種防食法の劣化診断	396	3. 鋼構造物の劣化診断	402
2.1 塗装の劣化診断	396	3.1 腐食診断	402
2.2 熔融亜鉛めっきの劣化診断	399	おわりに	403

第3節 港湾設備の腐食診断法 (玉田 明宏) 404

はじめに 404

1. 腐食診断から見た港湾の腐食環境の特徴 404

2. 腐食調査診断方法の分類とフロー 405

3. 腐食調査の具体的手順と方法 405

(1) 目視調査 406

(2) 肉厚測定 407

(3) 孔食測定 407

4. 鋼材の腐食評価データとその解析 408

(1) 平均肉厚減少量 408

(2) 局部腐食 408

5. 施設の構造強度に基づく健全度評価 409

6. 補修対策調査 411

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) 412

はじめに 412

1. 自然電位法 412

1.1 原理および測定法 412

1.2 評価基準と課題 413

2. 分極抵抗法 414

2.1 原理および測定法 414

2.2 評価基準と課題 416

3. コンクリート抵抗率 417

3.1 原理および測定法 417

3.1.1 4電極法 417

3.1.2 極間抵抗法 418

3.2 評価基準と課題 418

4. 塩化物イオン濃度 419

4.1 原理および測定方法 419

4.2 評価基準 419

4.3 経時変化予測 420

5. 今後の腐食評価について 421

第5節 化学装置の腐食・劣化診断 (中原 正大) 423

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) 427

はじめに 427

1. 腐食損傷の分類 427

2. 火炉水壁管 428

(1) 高温腐食 428

(2) 腐食疲労 428

3. 高温過熱器・再熱器 429

(1) 石炭焚ボイラーにおける高温腐食 429

(2) 廃棄物発電ボイラーにおける高温腐食 429

(3) 水蒸気酸化 429

4. 実際のプラントにおける非破壊検査方法 430

おわりに 430

第3章 腐食防食への情報活用 433

第1節 腐食防食データベース (藤田 和夫) 435

1. 文献データベース 435

2. ファイリングしたデータベース 435

3. コンピュータを利用したデータベース 436

第2節 寿命予測 (篠原 正) 438

1. 「寿命予測」の意味 438

2. 統計学的手法 438

2.1 確率分布と確率紙 438

2.2 極値統計の利用 439

第3節 リスク・ベース・インスペクション (政友 弘明) 441

1. リスク・ベース・インスペクションとは 441

2. リスクの評価方法 441

3. 劣化損傷情報の破損確率への反映 443

4. 劣化損傷した材料の余寿命と破損確率 446

5. リスクベースの保全計画 449

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 453

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) 455

1. 給水管および機器 455

(1) 亜鉛めっき鋼管の全面腐食 455

(2) 亜鉛めっき鋼管の異種金属接触腐食 455

(3) 硬質塩化ビニルライニング鋼管の赤水 455

(4) 硬質塩化ビニルライニング鋼管の異種金属接触腐食 455

(5) 銅管のマウンドレス型孔食 456

(6) 銅管の青水現象 457

(7) 黄銅製バルブの脱亜鉛腐食 458

(8) ステンレス鋼製水槽の発錆 458

(4) 銅管の潰食 460

(5) 銅管の青水現象 462

(6) ステンレス鋼管継手のすきま腐食 462

(7) ステンレス鋼管溶接部の孔食と応力腐食割れ 463

(8) ストレージタンク(貯湯槽)の応力腐食割れ 463

2. 給湯管および給湯機器の腐食事例 459

(1) 亜鉛めっき鋼管の赤水 459

(2) 亜鉛めっき鋼管の極性逆転による腐食 459

(3) 銅管のII型孔食 460

3. 対策 464

(1) 脱気 465

①赤水防止と鋼の腐食抑制効果 465

②給湯銅管の孔食防止 465

③砲金/鋼の異種金属接触腐食防止 465

(2) 腐食抑制剤 466

(3) 絶縁 466

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) 469

1. 冷却水系の概要 469

2. 代表的な冷却水系の形式と特徴 469

(1) 開放循環式冷却水系 469

(2) 密閉循環式冷却水系 470

3. 冷却水系における障害の発生原因 470

3.1 腐食 470

(1) 炭素鋼の腐食 470

(2) 銅および銅合金の腐食 471

(3) ステンレス鋼の腐食 471

3.2 ファウリング 472

(1) スケール 472

(2) スライムおよびスラッジ 473

4. 冷却水系における障害の防止 474

4.1 腐食の防止 474

(1) リン酸塩処理 474

(2) ホスホン酸処理 474

(3) 皮膜形成亜鉛処理 475

(4) 非リン・非金属処理 476

(5) 耐食材料に対する処理 476

4.2 スケールの防止 476

(1) スケール成分濃度の管理法 477

(2) 酸添加法 476

(3) スケール防止剤添加法 476

4.3 スライムやスラッジの防止 477

(1) スライムコントロール剤による処理 477

(2) 機器による処理 478

まとめ 479

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) 481

1. 密閉式冷温水配管の赤錆 481

(1) 事象 481

(2) 原因 481

(3) 対策 481

(4) 解説 481

(3) 対策 483

(4) 解説 483

2. 腐食性生物が堆積し冷暖房が不良 482

(1) 事象 482

(2) 原因 482

3. 配管耐用調査において、漏水事故の事前発見 483

(1) 事象 483

(2) 解説 483

4. 空気調和機の冷水コイルの蟻の巣状腐食 484

(1) 事例 484

(2) 原因	484	(3) 対策	486
(3) 解説	484	(4) 解説	486
(4) 再発防止	485	7. バルブと配管の接触による漏水	486
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	485	(1) 事象	486
(1) 事象	485	(2) 原因	486
(2) 対策	485	8. エアコンの熱交換器銅管の孔食による冷媒漏れ	487
(3) 解説	485	(1) 事象	487
6. 保温材の湿潤による外面腐食	485	(2) 対策	487
(1) 事象	485	(3) 解説	487
(2) 原因	485		
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	488		
(山田 秀明)			
1. 給水系および復水系の構成概要	488	2.2 ボイラー復水系の腐食と対策	491
(1) 給水系の概要	488	(1) ボイラー復水系の腐食	491
(2) 復水系の概要	488	(2) 復水系腐食の因子とメカニズム	491
2. 給水系および復水系の腐食と対策	489	(a) 二酸化炭素の発生原因	491
2.1 ボイラー給水系の腐食と対策	489	(b) 銅系材質の腐食について	492
(1) ボイラー給水系の腐食	489	2.3 復水系の腐食対策	492
(2) 給水系の炭素鋼腐食の因子とメカニズム	489	まとめ	493
(3) 給水系の腐食対策	490	おわりに	493
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	495		
(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	495	3. 消火系統の腐食事例：	
1.1 劣化事例	495	消火ポンプサクシオン管の吸上げ不良	496
1.2 推定要因	495	3.1 劣化事例	496
1.3 対策案	495	3.2 推定要因	496
2. 排水系統の腐食事例：		3.3 対策案	496
再処理水使用の大便器洗浄管き裂発生	496	4. 消火系統の腐食事例：	
2.1 劣化事例	496	スプリンクラー配管の漏水	497
2.2 推定要因	496	4.1 劣化事例	497
2.3 対策案	496	4.2 推定要因	497
第6節 水質基準および水質に係わる障害と対策	499	4.3 対策案	497
(高崎 新一)			
1. 淡水の水質	499	2.10 濁度, その他	503
2. 各水質因子の特徴	500	3. 水質基準	503
2.1 pH	500	3.1 水道水の水質基準および関連する水質基準	503
2.2 アルカリ度(酸消費量)	500	3.2 冷却水	504
2.3 硬度	501	3.3 蓄熱水	504
2.4 遊離炭酸	501	4. 代表的な水質指標	506
2.5 塩化物イオン, 硫酸イオン	501	4.1 飽和度および飽和pH	506
2.6 溶性シリカ	502	4.2 ランゲリア指数	506
2.7 電気伝導率, 蒸発残留物	502	4.3 リズナー指数	506
2.8 溶存酸素(DO)	502	4.4 ラーソン比	507
2.9 残留塩素	503		

4.5 マットソン比	507		
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	509		
(縣 邦雄)			
1. 各種水系における微生物による障害	509	3.1.2 非酸化性バイオサイド(有機物)	516
1.1 スライム障害	509	3.1.3 その他の殺菌処理法	516
1.2 微生物腐食(MIC)	510	3.2 バイオサイドの添加方法	516
1.2.1 冷却水系の嫌気性細菌による腐食	511	3.2.1 酸化性バイオサイドの添加方法	516
1.2.2 冷却水系のバイオフィーム下の銅管の腐食	511	3.2.2 非酸化性バイオサイドの添加方法	517
1.2.3 使用済み燃料貯蔵プールのステンレス腐食	511	3.3 バイオフィームの除去	517
1.3 レジオネラ属菌問題	512	3.3.1 過酸化水素による除去	517
2. 微生物障害の防止対策	513	3.3.2 塩素剤や有機系バイオサイドによる除去	517
2.1 スライム障害の防止対策	513	3.4 バイオサイドの効果の検証方法	518
2.2 微生物腐食の防止対策	514	3.4.1 微生物の評価方法	518
2.3 レジオネラ属菌の防除対策	514	(1) 微生物数の測定	518
3. バイオサイド	515	(2) 付着性微生物の測定	518
3.1 バイオサイドの種類	515	3.4.2 腐食評価方法	518
3.1.1 酸化性バイオサイド	515	(1) テストピース浸せき	518
(1) 塩素	515	(2) 分極抵抗法	518
(2) 臭素	515	(3) 腐食電位測定法	518
(3) 二酸化塩素	515	3.4.3 評価結果のフィードバック	518
(4) 過酸化水素	516	まとめ	518
第8節 廃水処理, 下水管路施設における腐食事例と対策	520		
(清水 宏明)			
1. 下水道	520	4. 腐食防止対策	524
1.1 下水道の概要	520	4.1 硫化水素生成の制御	524
1.2 下水道管路の腐食	520	4.1.1 酸素の供給	524
1.2.1 下水の特徴	520	4.1.2 薬品添加	524
1.2.2 腐食メカニズム	520	4.1.3 管内清掃	524
1.2.3 硫化水素の生成しやすい条件	521	4.2 硫化水素生成後の対応	525
2. 腐食事例	521	4.2.1 耐食性材料の採用	525
2.1 事例 A	521	(1) 管材	525
2.2 事例 B	521	(2) 被覆	525
2.3 事例 C	521	4.2.2 換気	525
3. 診断事例	522		
第9節 建物周囲の埋設配管のマクロセル腐食と対策	526		
(蜂谷 実)			
まえがき	526	(4) 腐食原因	528
1. 腐食事例	526	1.2 事例-2	529
1.1 事例-1	526	(1) 腐食状況	529
(1) 配管諸元	526	(2) 腐食調査	529
(2) 腐食状況	526	①電位測定結果	529
(3) 腐食性調査	527	②掘削調査状況	529
1) 管地对電位の測定結果	527	2. 腐食のメカニズム	530
2) 建屋壁近傍の電位状況と関連調査	527	2.1 C/Sマクロセルによる腐食現象	530
3) 漏水箇所の耐用年数検証	528	2.2 土壌マクロセル腐食現象	530

2.3 管対地電位測定による腐食診断について	530	3.2 電気防食による防食対策	532
3. 腐食対策について	531	3.3 近接陽極法	532
3.1 絶縁対策	532	4. 結論と考察	533

第2章 海洋構造物・海水機器における腐食事例と対策 535

第1節 海水中での材料の腐食挙動 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 537

1. 腐食損傷事例	538	3. 損傷防止策	541
2. 腐食機構	539		

第2節 ステンレス鋼製海水機器の局部腐食事例と対策 543

1. 孔食損傷 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 543

はじめに	543	2. 孔食損傷機構	545
1. 孔食損傷事例	544	3. 損傷防止策	546

2. すきま腐食損傷 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 549

はじめに	549	腐食損傷	551
1. 損傷事例	549	1.6 事例VI 海洋微生物付着下のすきま腐食損傷	551

1.1 事例I 構造物すきま内のすきま腐食損傷	549	1.7 事例VII 铸造欠陥内部のすきま腐食損傷	552
1.2 事例II 海洋生物付着下のすきま腐食損傷-1	549	2. すきま腐食機構	553

1.3 事例III 海洋生物付着下のすきま腐食損傷-2	550	3. すきま腐食損傷防止策	553
1.4 事例IV 付着ゴミ下のすきま腐食損傷	551	3.1 材料選択	553

1.5 事例V マーカーペイント塗膜下のすきま	551	3.2 部品構造変更	554
3. 選択腐食損傷	556	1.3 事例III 铸造欠陥・濃度偏析に沿った選択腐食損傷	560

はじめに	556	1.4 事例IV ステンレス鋼の浸炭に基づく選択腐食損傷	561
1. 選択腐食損傷事例	556	2. 選択腐食機構	561

1.1 事例I 非金属介在物 MnS に沿った選択腐食損傷	556	3. 損傷防止策	561
1.2 事例II 切削加工変質層に沿った選択腐食損傷	557		

4. 粒界腐食 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 563

はじめに	563	2.1 鋼中のC含有量およびMo含有量の影響	566
1. 粒界腐食損傷事例	563	2.2 ステンレス鋼における金属組織の影響	566

1.1 ステンレス圧延鋼, 溶接部の粒界腐食損傷	563	2.3 溶接条件, 部品形状などの影響	567
1.2 高級ステンレス圧延鋼部品の粒界腐食損傷	564	2.4 突合せ溶接部品の拘束状態, 多層盛の影響	567

1.3 ステンレス鋼部品の粒界腐食損傷	565	2.5 溶着金属組成の影響	568
2. 腐食機構	566	3. 腐食損傷対策	569

第3節 ステンレス鋼製海水機器の腐食割れ事例と対策 570

1. 応力腐食割れ (尾崎 敏範, 石川 雄一) 570

はじめに	570	1. 損傷事例	570
---------------	-----	------------------	-----

1.1 事例I 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	570	1.3 事例III オーステナイトNi鉄, ニレジストの応力腐食割れ	572
---	-----	---	-----

1.2 事例II 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	571	2. 腐食機構	572
2. 水素脆化割れ	(尾崎 敏範, 石川 雄一) 575	3. 損傷防止策	573

はじめに	575	2. 損傷機構	576
1. 損傷事例	575	3. 損傷防止対策	578

3. 腐食疲労 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 579

はじめに	579	3.1 腐食疲労強度算出法	583
1. 腐食損傷事例	579	3.2 一般的腐食疲労損傷防止策	585

1.1 事例I SUS 304鋼製部品	579	3.2.1 対策I 材料条件の変更	585
1.2 事例II 炭素鋼製軸材	579	3.2.2 対策II 応力条件の変更	585

2. 損傷機構	580	3.2.3 対策III 環境条件の変更	585
3. 損傷防止策	583		

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) 587

4. 損傷事例IV 青銅製流体機械インペラの腐食疲労損傷 591

1. 損傷事例I 黄銅製弁体の脱亜鉛腐食損傷	587	4.1 損傷状況	591
1.1 損傷状況	587	4.2 損傷機構	591

1.2 損傷機構	587	4.3 損傷防止策	592
1.3 損傷防止策	588	5. 損傷事例V 異種金属接触腐食損傷	592

2. 損傷事例II 純銅管の孔明き腐食損傷	588	5.1 損傷状況	592
2.1 損傷状況	588	5.2 損傷機構	592

2.2 損傷機構	589	5.3 損傷防止策	593
2.3 損傷防止策	589	6. 損傷事例VI 海洋生物の付着	594

3. 損傷事例III 汚染海水中における7/3キューロニッケルの腐食侵食	589	6.1 損傷状況	594
3.1 損傷状況	589	6.2 損傷機構	594

3.2 損傷機構	590	6.3 損傷防止策	594
3.3 損傷防止策	590	まとめ	595

第5節 ガルバニック腐食と電気防食 596

1. ガルバニック腐食 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 596

はじめに	596	1.3 事例III 重防食塗膜部品における塗膜欠陥の腐食損傷	598
1. 腐食損傷事例	596	2. 腐食機構	598

1.1 事例I 海水ポンプの部品材料構成	596	3. 損傷防止策	604
1.2 事例II ゴムライニング炭素鋼軸材の腐食損傷	597	まとめ	604

2. 電気防食 (尾崎 敏範, 石川 雄一) 606

はじめに	606	鋼品の腐食損傷	608
1. 腐食損傷事例	607	2. 損傷防止策	609

1.1 事例I 流電防食法におけるZn板の過剰消耗	607	2.1 異種金属接触腐食の抑制	609
1.2 事例II 外部電源方式におけるステンレス	607	2.2 最適な電気防食法	610

まとめ	611		
--------------	-----	--	--

第3章 電子機器・電気製品における腐食事例と対策 613

第1節 電子材料・部品の腐食挙動の特徴 (石川 雄一) 615

- 1. 電子部品の腐食の特徴 616
- 2. 腐食のメカニズム 616
- 3. 主要電子材料の腐食挙動 617
 - 3.1 電子部品における腐食の問題点 617
 - 3.2 電子材料に起こる腐食形態の概要 619
- 3.3 腐食環境による電子材料の腐食挙動の变化 619
- 3.4 銅・銅合金の腐食挙動 621
- 3.5 銀の腐食挙動 623
- 3.6 ニッケル, すず, 金めっきの腐食挙動 624

第2節 電子機器・部品における腐食環境の形成 (石川 雄一) 628

- 1. 温度・温度差と湿度 628
- 2. 毛管凝縮: すきまと塵埃粒子・エアロゾル 630
- 3. 海塩粒子: 臨界湿度と潮解(化学凝縮) 634
- 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 635
- 5. アウトガスと製造プロセスに基づく腐食要因 638
- 6. 電圧 640
- 7. 腐食性指標: 実環境の腐食性評価 640
- 8. 腐食対策 642

第3節 電子機器・電気製品の腐食形態 (渡辺 正満, 半田 隆夫) 647

- はじめに 647
- 1. 電子機器・部品に見られる主な腐食/劣化形態 647
 - 1.1 イオンマイグレーション 648
 - 1.2 クリープ 649
 - 1.3 ウィスカー 650
- 2. 主要電子材料の銀および銅の腐食形態の特徴 651
- 2.1 銀の腐食生成物の表面形態 651
- 2.2 銅の腐食生成物の表面形態 652
- 2.3 三宅島雄山噴火による銅および銀の初期腐食挙動 654

第4節 電子材料・部品の腐食事例と対策 (平本 抽) 657

- はじめに 657
- 1. 銀の硫化と対策 657
- 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 659
- 3. 金めっきの腐食と対策 662
- 4. プラスチックのソルベントクラックと対策 663

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) 667

- はじめに 667
- 1. 損傷事例 669
 - 1.1 Agめっき膜剥離処理工程における腐食・変色 670
 - 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 671
 - 1.3 水洗・乾燥工程における腐食・変色 673
 - 1.4 下地金属のAgめっき膜上への拡散浮上 675
 - 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 677
- 1.6 めっき膜自身の変質(共析した光沢剤)による腐食 679
- 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 680
- <分類1, 湿度条件に伴う腐食・変色事例> 680
- <分類2, 2~3の腐食性成分による腐食・変色事例> 681
- <分類3, ダスト付着による腐食・変色事例> 683

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) 686

- はじめに 686
- 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 686
 - 1.1 交換設備など 686
 - 1.2 MDF(Main Distribute Flame)周り 687

- 1.3 装置回路基板 688
 - (1) 概要: オンボード電源銀導体パターンの硫化 688
 - (2) 腐食の発生状況 688
 - (3) 腐食生成物 688
 - (4) 大気腐食環境 688
 - (5) 腐食速度の合金組成依存性と腐食対策 689
- 1.4 硫黄ガスにおける事例のまとめ 690
- 2. 塩害(海塩粒子が飛来し付着)環境での腐食事例 690
- 2.1 回路基板における腐食故障 690
- 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) 690
- 2.3 海塩粒子付着に及ぼす遮蔽の効果 691
- 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 691
- 2.5 塩害環境における事例のまとめ 691

- 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ながら, 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 692
- 3.1 電話機など 693
- 3.2 モジュラージャック(MJ)の腐食 694
- 3.3 コネクタ部接点金めっき不良 694
- 3.4 宅内装置類の付着したゴミによる故障 696

- 4. 一般大気環境での腐食事例: 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 697
- おわりに 697

第7節 家庭用電気製品の腐食事例 (藤井 和美) 699

- 1. 家庭用電気製品の使用環境 699
- 2. 家電製品用鋼板の大気使用環境中における腐食とその評価法 700
- 3. 水に接触する家電製品における腐食 704

第8節 環境試験と解析法 (原口 智) 708

- 1. 環境試験の重要性 708
 - 1.1 加速性 708
 - 1.2 環境模擬性 708
- 2. 環境試験の実例 708
 - 2.1 耐湿性試験 708
 - 2.2 腐食性ガス試験 710
 - 2.2.1 単独ガス試験 710
 - 2.2.2 混合ガス試験 710
- 2.3 電子部品特有の現象の再現試験 713
 - 2.3.1 イオンマイグレーション 713
 - ①簡易試験法 713
 - ②環境試験法 713
 - ③評価方法 713
 - 2.3.2 ウィスカー 713
- 3. 解析法 715

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) 718

- はじめに 718
- 2. 環境の腐食性分類に関する国際規格 718
 - 1. 腐食試験法に関する国際規格・日本規格 718

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) 724

- 1. 環境規制に伴う電子電気機器の腐食問題 724
 - (1) オゾン層の保護のための洗浄技術の変化 725
 - (2) 有害物質使用制限 725
 - (3) リサイクル対策 725
 - (4) 地球温暖化対策 726
- 2. 機器の高信頼性・安全性問題と腐食 726

第4章 社会基盤施設等構造物における腐食事例と対策 729

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) 731

- はじめに 731
- 1. 埋設された塗覆装パイプラインの交流腐食理論 731
- 2. 埋設パイプラインの交流腐食に対する認識 732
- 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 734
- 4. 交流腐食に及ぼす各因子の影響 737
 - 4.1 腐食速度に及ぼす交流電圧の影響 737

4.2 腐食速度に及ぼす交流電流密度の影響	738	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	742
4.3 腐食速度に及ぼすカソード電流密度の影響	739	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	743
4.4 腐食速度に及ぼす塗覆装欠陥部の面積の影響	739	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	743
4.5 腐食速度に及ぼす周波数の影響	740	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	745
4.6 腐食速度に及ぼす土質の影響	740	10. 交流腐食の兆候の把握	747
4.7 腐食速度に及ぼす温度の影響	740	おわりに	748
4.8 腐食速度に及ぼす時間の影響	741		
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	741		
第2節 橋梁の腐食事例と対策		(守屋 進)	751
1. 塗装橋梁の腐食事例と対策	751	1.3 塗装橋梁の腐食対策	752
1.1 一般塗装系を適用した塗装橋梁の腐食事例	751	2. 耐候性橋梁の腐食事例と対策	754
1.2 重防食塗装系を適用した塗装橋梁の腐食事例	752	3. 溶融亜鉛めっき橋梁の腐食事例と対策	756
		4. 金属溶射橋梁の腐食事例と対策	756
第3節 港湾施設の腐食事例と対策		(阿部 正美)	758
1. 港湾鋼構造物の腐食の実態	758	(3) 電気防食の適用範囲	766
1.1 腐食環境と腐食の実態	758	(4) 防食に必要な電流密度	766
(1) 海上大気中	758	(5) 電気防食と被覆防食の併用効果	767
(2) 飛沫帯	758	(6) サンドエロージョンに対する防食効果	767
(3) 干満帯	758	2.2 被覆防食法	768
(4) 海水中および海底土中部	760	(1) 塗装	768
1.2 集中腐食の被害	760	(2) 有機ライニング	769
1.3 集中腐食の被害事例	761	(3) 無機ライニング	769
(1) セル式構造物の被害事例 (直江津港西埠頭セル岸壁)	761	1) セメントおよびコンクリートライニング	769
(2) 鋼矢板式構造物の被害事例 (A 港 a 地区-2 m 物揚場)	761	2) 電着工法	770
(3) 鋼管杭式構造物の被害事例 (横浜港山下埠頭)	762	3) 金属ライニング	770
1.4 サンドエロージョン	763	(イ) チタンクラッドライニング	770
2. 港湾鋼構造物の防食対策	764	(ロ) ステンレス鋼	771
2.1 電気防食法	765	(4) ペโตรラタムライニング	771
(1) 電気防食法の原理	765	3. 防食工法の適用法	771
(2) 防食電位と防食効果の判定	765	(1) A の方法	772
		(2) B の方法	772
		(3) C の方法	772
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)	774
1. バラストタンクの腐食環境	774	<事例3: 上甲板裏面>	775
2. 腐食事例	774	<事例4: 燃料タンク隔壁>	775
<事例1: 溶接継手部>	774	3. 対策	776
<事例2: エッジ部>	774		

第5節 建築構造用鉄骨と建築用金属材料の腐食・防食		(近藤 照夫)	780
1. 建築構造用鉄骨の腐食・防食	780	(1) 防錆塗装	783
1.1 鉄骨造建築物における鉄骨の腐食	780	(2) 亜鉛めっき	785
(1) 既存建築物における鉄骨の腐食実態	780	(3) 常温金属溶射	785
(2) 竣工前後の建築物における鋼材の腐食	780	2. 建築外装用金属材料の腐食・防食	785
(3) 被覆材の種類や湿度条件が異なる場合の鋼材腐食	781	2.1 建築用金属材料の種類と表面仕上げ	785
(4) 鉄骨工事における鋼材腐食防止への配慮	782	2.2 建築外装用金属材料に生じる腐食現象とその対策	786
(5) 屋外における露出鉄骨の腐食傾向	783	(1) アルミニウム合金	786
(6) 過酷な環境における鉄骨の腐食	783	(2) 着色亜鉛鋼板	787
1.2 鉄骨造建築物における鉄骨に対する防錆技術	783	(3) ステンレス鋼	788
		(4) 銅および銅合金	789
		2.3 建築的な防錆・防食	789
第6節 建築のコンクリート構造体における鉄筋腐食と防食		(米澤 敏男)	791
1. 鉄筋の腐食による構造体の劣化損傷	791	4.3 コンクリートが損傷する限界腐食量	795
2. コンクリートの組織と防食作用	792	5. 防食対策	796
3. 中性化による鉄筋の腐食	793	5.1 コンクリートによる防食	797
3.1 中性化	793	5.2 コンクリートのコーティング	797
3.2 鉄筋の腐食	793	5.3 エポキシ樹脂塗装鉄筋	798
4. 塩化物イオンによる鉄筋の腐食	794	5.4 電気防食	798
4.1 塩化物イオンの侵入	794	6. 耐久性設計	799
4.2 腐食が始まる限界塩化物量	795		
第7節 海洋鋼構造物の ISO 規格と日本規格		(梶山 文夫)	803
1. 防食工法の比較	803	3. 防食電位の比較	806
2. 設計電流密度の比較	804	まとめ	808
第5章 高温設備機器における腐食事例と対策			809
第1節 ガスタービン		(中森 正治)	811
はじめに	811	2.2 LNG 燃焼ガスタービンにおける応力腐食割れ	814
1. 腐食損傷原因とその機構	811	3. 腐食損傷防止対策	815
1.1 ガスタービン損傷原因	811	3.1 耐食合金の選定	815
1.2 ガスタービンにおける腐食損傷	812	3.2 燃料の脱塩と防食添加剤の注入	815
1.2.1 タイプ I (高温硫化腐食)	813	3.3 空気フィルター	816
1.2.2 タイプ II (低温硫化腐食)	813	3.4 耐食・耐酸化コーティング法	816
2. 腐食事例	813	おわりに	816
2.1 A 重油燃焼ガスタービン	813		
第2節 石油化学プラント		(中原 正大)	818
1. 水素侵食事例	818	2. 局在化した黒鉛化事例	820
1.1 概要	818	2.1 概要	820
1.2 使用条件	818	2.2 使用条件	820
1.3 検討結果	818	2.3 損傷サンプルの解析結果	820
1.4 水素侵食事例まとめ	819	2.4 局在化した黒鉛化事例まとめ	822

第3節 廃棄物発電プラント (川原 雄三) 823

はじめに 823

1. 廃棄物発電プラントの腐食環境と環境低減法 823

1.1 プラントの腐食環境の変遷 823

1.2 腐食環境の低減法 826

(1) 燃焼改善 826

(2) 灰の付着防止と灰除去法 826

2. 高温耐食材料の発展 827

2.1 蒸発管高温耐食コーティング 827

(1) 金属溶射 827

(2) 溶接肉盛 830

(3) 二重管 830

(4) 耐火材 830

2.2 過熱器用耐食耐熱合金管 830

第4節 航空機用ガスタービン(ジェットエンジン) (吉業 正行) 840

はじめに 840

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 840

2. 耐熱コーティングにおける要求特性と損傷様式 843

2.1 要求特性 843

2.2 各種損傷様式 844

3. 高温損傷事例 846

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 846

3.2 Al 拡散コーティング動翼における異常酸化 847

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 848

3.4 EB-PVD TBCシステム静翼における損傷 849

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— 850

第5節 製鉄プラント (加藤 謙治) 852

1. プロセスに関わる腐食事例 854

1.1 焼結設備 854

1.2 熱風炉鉄皮の応力腐食割れ 855

2. 貯蔵・搬送にかかわる設備 856

2.1 エネルギーガスに関わる腐食と対策 856

2.2 原料・副生物の貯蔵・搬送設備 857

3. 製鉄プロセス設備の腐食と管理 859

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 863

第1節 火力発電プラント (京 将司) 865

1. 火力発電プラントにおける腐食と対策 865

2. ボイラーの腐食事例と対策 866

2.1 水側腐食 866

2.1.1 火炉蒸発管の酸素腐食とアルカリ腐食 866

(a) 事例 866

(b) 原因 866

(c) 対策 866

2.1.2 火炉蒸発管・節炭器管の腐食疲労 866

(a) 事例 866

(b) 原因 867

(c) 対策 868

2.1.3 過熱器管の過熱噴破 868

(a) 事例 868

(b) 原因 868

(c) 対策 868

2.2 ガス側腐食 868

2.2.1 火炉蒸発管の溝状腐食(エレファントスキン) 868

(a) 事例 868

(b) 原因 869

(c) 対策 870

2.2.2 過熱器管・再熱器管の高温腐食 870

(1) 重原油焚きボイラー 870

(a) 事例 870

(b) 原因 871

(c) 対策 871

(2) 石炭焚きボイラー 871

(a) 事例 871

(b) 原因 871

(c) 対策 872

2.2.3 エアヒーターエレメントの硫酸露点腐食 872

(a) 事例 872

(b) 原因 873

(c) 対策 873

2.2.4 スーツプロ蒸気によるスチームカット 873

(a) 事例 873

(b) 原因 873

(c) 対策 873

2.2.5 高温高圧バルブのエロージョン損傷 875

(a) 事例 875

(b) 原因 875

(c) 対策 875

2.2.6 高温高圧配管のエロージョン・コロージョン 875

(a) 事例 875

(b) 原因 876

(c) 対策 876

3. 蒸気タービンの腐食事例と対策 876

3.1 低圧タービン翼溝腐食疲労, 応力腐食割れ(SCC)および繰り返しひずみ腐食疲労 876

(a) 事例 876

(b) 原因 876

(c) 対策 876

3.2 復水器管のアンモニアアタック 877

(a) 事例 877

(b) 原因 877

(c) 対策 877

3.3 給水加熱器管のインレットアタック 877

(a) 事例 877

(b) 原因 877

(c) 対策 878

第2節 地熱発電プラント (真田 徳雄, 倉田 良明) 880

1. 発電設備と関連設備 880

2. 地熱環境と材料 880

3. 腐食事例 881

3.1 [事例1] 坑井ケーシング管の応力腐食割れ 881

3.1.1 概要 881

3.1.2 流体性状と材料 882

3.1.3 損傷状況 882

3.1.4 検討 882

3.1.5 結論 882

3.2 [事例2] 流送管のエロージョン・コロージョン 883

3.2.1 概要 883

3.2.2 流体性状と材料 883

3.2.3 損傷状況 883

3.2.4 検討 884

3.2.5 結論 885

3.3 [事例3] 検層ケーブルの応力腐食割れ 885

3.3.1 概要 885

3.3.2 環境と材料 885

3.3.3 損傷状況 885

3.3.4 検討 887

3.3.5 結論 887

3.4 [事例4] 薬液注入管と保護管の腐食 887

3.4.1 概要 887

3.4.2 環境と材料 887

3.4.3 損傷状況 888

3.4.4 検討 889

3.4.5 結論 889

おわりに 889

第3節 原子力プラント (平野 秀朗) 891

1. BWR 891

1.1 被ばく低減化対策 891

(1) 酸素注入 891

(2) Ni/Fe 比コントローラ 891

(3) 垂鉛注入 892

1.2 SCC発生とSCC防止対策技術 894

1.2.1 再循環系における鋭敏化ステンレス鋼のSCC 894

(1) SCCの発生	894	2. PWR	901
(2) SCCの発生原因	895	2.1 被ばく低減対策	902
(3) SCC対策	895	(1) 高pH運転	902
①材料面からの対策	895	(2) 垂鉛注入	902
②溶接施工面からの対策	895	2.2 腐食対策技術	903
③水質面からの対策	896	(1) SG伝熱管材料の選定の経緯	903
1.2.2 シュラウドおよび再循環系における加工		(2) 減肉	904
硬化低炭素ステンレス鋼のSCC	896	(3) デンティング防止対策	904
1.2.3 最近の水処理面からのSCC対策	897	(4) PWSCC(primary water stress corrosion cracking)防止対策	905
(1)水素注入	897	(5) IGA/SCC防止対策	905
(2)貴金属注入	899	①IGA/SCCの発生原因と対策	905
(3)代替SCC抑制法の開発	899	②SG交換	906
1.3 BWRエロージョン・コロージョンの防止対策	899	2.3 PWRのエロージョン・コロージョンの防止対策	906

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 (埴 隆夫) 911

はじめに	913	3.4 分極	920
1. 生体医療用金属材料	913	3.5 表面酸化物の組成変化	920
2. 人体中での腐食損傷事例	913	4. 人体内での腐食に関する因子	920
2.1 SUS 316Lステンレス鋼	913	4.1 pH	920
2.2 Co-Cr合金	914	4.2 溶存酸素濃度	920
2.3 純Ti	916	4.3 塩化物イオン	920
3. その他の腐食事例	917	4.4 生体分子	921
3.1 動物埋入による金属溶出	917	4.5 細胞	921
3.2 擬似体液浸せき	917	4.6 フッ化物	921
3.3 摩耗・フレッチングによる溶出	918	おわりに	922

第8章 金属製遺物の腐食事例と保存処理 (沢田 正昭) 925

はじめに	927	2.2 考古学とさび取り	932
1. 埋蔵環境とさび	927	2.3 金銅装遺物のさび	932
1.1 考古遺物の腐食	927	3. 腐食進行の抑止	933
1.1.1 さびとかたち	927	3.1 脱塩処理	934
1.1.2 良いさび悪いさび	929	3.2 応急処置	935
1.2 さびの解析	930	3.3 防錆処理と合成樹脂	936
2. 腐食遺物の整形	931	おわりに	936
2.1 腐食診断	931		

第4編 防食技術

第1章 電気防食 (梶山 文夫, 菊池 純) 941

はじめに	943	5.2 インスタントオフ(分極)電位法	954
1. 電気防食の原理	943	5.3 クーポンインスタントオフ電位法	954
1.1 カソード防食の原理	943	5.4 最小100mV法	956
1.2 アノード防食の原理	944	5.5 クーポン電流密度法	956
1.3 カソード防食とアノード防食との比較	944	6. カソード防食による腐食防止機構	956
2. カソード防食基準	945	6.1 鋼の腐食に及ぼす印加電位の影響	956
2.1 構造物(クーポン)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	945	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	956
2.1.1 草案を含むカソード防食国際基準	946	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	957
2.1.2 国内外のカソード防食基準の代表例	946	6.2 カソード電流密度	958
2.1.3 照合電極	946	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	958
2.2 クーポン電流密度を指標としたカソード防食基準	949	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	958
3. カソード防食法	950	6.3 カソード防食による微生物腐食防止機構	958
3.1 流電陽極方式	950	6.3.1 SRBが棲息する粘土中の鋼	958
3.2 外部電源方式	950	6.3.2 IBが棲息する砂質土壌中の鋼	959
3.3 ハイブリッド方式	952	6.4 まとめ	959
4. 電食防止法	953	7. 定期点検	960
4.1 選択排流法	953	おわりに	960
4.2 強制排流法	953		
5. カソード防食状況の計測方法	954		
5.1 オン電位法	954		

第2章 塗覆装 (田邊 弘往) 963

1. 塗装による防食	965	クリーニング	966
2. 防食塗装の意義と塗装系の選択	965	(2) 物理的表面処理	966
3. 環境と塗装系	965	(3) ブラストクリーニング	966
4. 塗装前表面処理方法	966	5. 防食塗装系の選択	967
(1) 水, 有機溶剤, 化学的方法によるクリー			

第3章 インヒビター (荒牧 國次) 969

1. インヒビターの分類	971	2. 金属の腐食とインヒビターの作用	972
1.1 吸着型インヒビター	971	3. 吸着型インヒビターの作用	973
1.2 酸化型インヒビター	971	3.1 静電吸着する吸着型インヒビター	973
1.3 沈澱型インヒビター	971	3.2 化学吸着をする吸着型インヒビター	974

3.3 非極性基の作用	975	7. 局部腐食を抑制するインヒビター	978
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	975	8. インヒビターの適用	980
5. 酸化型インヒビター	976	8.1 酸素を含む中性水溶液中	981
6. 沈澱型インヒビター	977	8.2 酸性水溶液中	982
6.1 酸性水溶液中で有効な沈澱型インヒビ ター	977	8.3 塩基性水溶液中	982
6.2 中性水溶液中で有効な沈澱型インヒビ ター	977	8.4 石油が存在するとき	982
		8.5 非水溶液中	982
		8.6 大気中	983

第4章 防食設計 (中原 正大) 985

1. 防食設計とは	987	(1) 腐食性成分の除去	991
2. 機器の仕様の検討段階	987	(2) 耐食性を向上させる成分の添加	992
2.1 想定される耐用年数	987	(3) 電気防食	992
2.2 機器に腐食による損傷が生じた場合の結 果影響	987	3.3 防食構造設計	993
2.3 想定される使用環境条件	988	4. 製作段階	993
2.4 想定される運転や保守管理状況	988	4.1 材料	993
2.5 機器製作のコスト範囲	988	4.2 施工要領	993
2.6 適用法規	988	4.3 検査	997
3. 設計段階	988	5. 運転段階	997
3.1 材料選定	988	5.1 想定される劣化や損傷現象	997
3.2 環境制御	991	5.2 適正運転範囲	997
		5.3 製作, 検査の記録	997

索引 999