

事例で学ぶ 腐食損傷と解析技術

日本材料学会

腐食防食部門委員会編

- B5判・上製・558頁・本体25,000円+税
- CD-ROM(カラー)付 **特別価格 25,000(税込)**

日本材料学会腐食防食部門委員会が創立25周年記念事業の1つとして「腐食・損傷事例と解析技術」を出版して以来すでに20有余年を経たが、その間の激しい社会環境や経済活動の変化によって設備機器の腐食損傷に対する考え方や保全補修技術が変化し、進歩した。安心・安全を思考基準の筆頭におく現代社会にあっては、自然環境の保全と腐食事故の防止はその矢面に立たされている。

先の半世紀に腐食の科学が著しく進展したことは慶賀に堪えないが、実際の腐食現象とその起因するところは極めて複雑で不明な事柄が多い。したがって、創立25周年記念出版は事例の収集と考査、解析によって腐食損傷の範例を提供することを試みたが、そのスタンスはこの改訂・増補版においても一貫している。図表などをCDに収め利便性を高めるなど配慮したが、これらの写真や図表が実情の理解に有益であればと願っている。

さんえい出版

目次

第1章 材料の損傷と腐食解析技術

- 1.1 設備機器の防食管理と腐食の解析
- 1.2 現地での腐食損傷解析/現地での腐食損傷解析の手順/スンプ写真の撮り方
- 1.3 外観写真の撮影方法/現地での写真撮影/実験室での写真撮影
- 1.4 金属組織の観察と硬さ測定/金属組織観察の概要/観察用試料の切断手順/試料の埋込み手順/試料の研磨手順/試料のエッチング手順/金属組織写真撮影の手順/硬さと異常組織の観察
- 1.5 走査型電子顕微鏡による観察と各種機器分析/SEM-EDX による観察と分析/各種の機器分析方法/使用環境の分析法
- 1.6 割れの解析手順/機器に発生する割れの形態/主な割れの識別方法
- 1.7 腐食損傷と対策

第2章 材料別の腐食特性

- 2.1 炭素鋼, 低合金鋼, 鋳鉄, 亜鉛めっき鋼/種類と規格/特性/腐食損傷形態と対策/腐食と防食剤
- 2.2 ステンレス鋼, 高合金鋼/種類と規格/特性/使用環境と注意事項/腐食損傷形態と対策
- 2.3 アルミニウムとアルミニウム合金/種類と規格/特性/使用環境と注意事項/腐食損傷形態と対策
- 2.4 銅と銅合金/種類と規格/特性/使用環境と注意事項/腐食損傷形態と対策
- 2.5 ニッケルとニッケル合金/種類と規格/特性/使用環境と注意事項/腐食損傷形態と対策
- 2.6 チタン, ジルコニウム, タンタル/種類と規格/一般的特性/使用環境と注意事項/腐食損傷形態と対策
- 2.7 被覆鋼材(無機・有機材料のライニング), セラミックス, 炭素質材料(炭素, 黒鉛)/めっき/溶射/ステンレス鋼ライニングおよびクラッド鋼/塗装/有機(ゴムおよび樹脂)ライニング/耐火物被覆/ガラスライニング/セラミックス/炭素質材料

第3章 腐食損傷事例

- 3.1 炭素鋼, 低合金鋼, 鋳鉄, 亜鉛めっき鋼
- 3.2 ステンレス鋼, 高合金鋼
- 3.3 アルミニウム, アルミニウム合金, 亜鉛
- 3.4 銅, 銅合金
- 3.5 ニッケル, ニッケル合金
- 3.6 チタン, ジルコニウム, タンタル
- 3.7 被覆鋼材(無機・有機材料のライニング), セラミックス, 炭素質材料(炭素, 黒鉛)

1.1 設備機器の防食管理と腐食の解析

腐食は身の回りの水道水、海水、大気などによる軽度なものから、強酸や強アルカリによる設備の激しい損傷など多種多様で、その速度は環境、材質、設計、製作、操作条件などによって異なる。また、腐食に基づくプロセス流体の漏れなどによって環境汚染や人的被害を招きかねない。保守、点検技術の向上に伴って設備の寿命が延びた結果、皮肉にも設備機器の老朽化が進んで、腐食防食管理は工場の保安と生産維持の重要課題となっている。

設備の腐食防食管理は人の病気に例えられ、医師が病人を診断、治療するのに似ている。腐食の原因は材料側と環境側の双方にあり、腐食の部位と形態(外観)から、その設備の腐食がいつ頃発生し、どの程度の速度で進行したのか、また、どのように処置すべきかを診断しなければならない。

- ① いつ頃から腐食が激しくなったか(問診)
- ② 腐食の形態はどれに属するか(病名の予測)
- ③ どの範囲で腐食が起こっているか(合併症はないか)
- ④ 他の類似設備の腐食事例がないか(類例と伝染性)
- ⑤ 現在の損傷程度はどれほどか(検査による病状程度の確認)
- ⑥ 当面の腐食防止のための環境対策はどうすべきか(薬の投与と食事療法)
- ⑦ 当面の補修は必要か、またその方法は(手術の要・不要と方法)
- ⑧ このまま運転を継続すればいつまで耐えるか(余寿命の予測)
- ⑨ 設計・製作・操業への情報のフィードバック(予防のための情報提供)

このように腐食の診断は設備全体の安全性と信頼性を高めるための重要な総合技術である。これらの作業は表 1.1 に示す調査項目に従って進められる。

1.2 現地での腐食損傷解析

1.2.1 現地での腐食損傷解析の手順

1) 現地調査の心構え

腐食損傷の調査に際しては、まず現場に出向いて自分の目で確認することが重要である。他人の報告だけでは真の情報が得にくい。

2) 現地調査の準備

現地作業を落度なく効率的に進めるために、関係部署と綿密に連絡し、設計図面や機器の仕様書、過去の点検と改善、修理の実績、記録などを入手し、また、設備の過去と現在の設計や運転条件などを入念に聴き取る。

- ① 損傷機器の運転条件や構造を図面などと照合し、また、その後の改造や増設の有無を確認する。
- ② 使用材料の状況、溶接や曲げ加工、熱処理履歴、防錆塗料の種類や塗布状況、および組立て時の環境調査
- ③ 通常運転と別に運転休止時の保管状況や期間
- ④ 保全情報などで過去の類似事例などを調査

防食工学の概要

表 3.1 腐食損傷事例に見られる材料とその特性

(太字は汎用材)

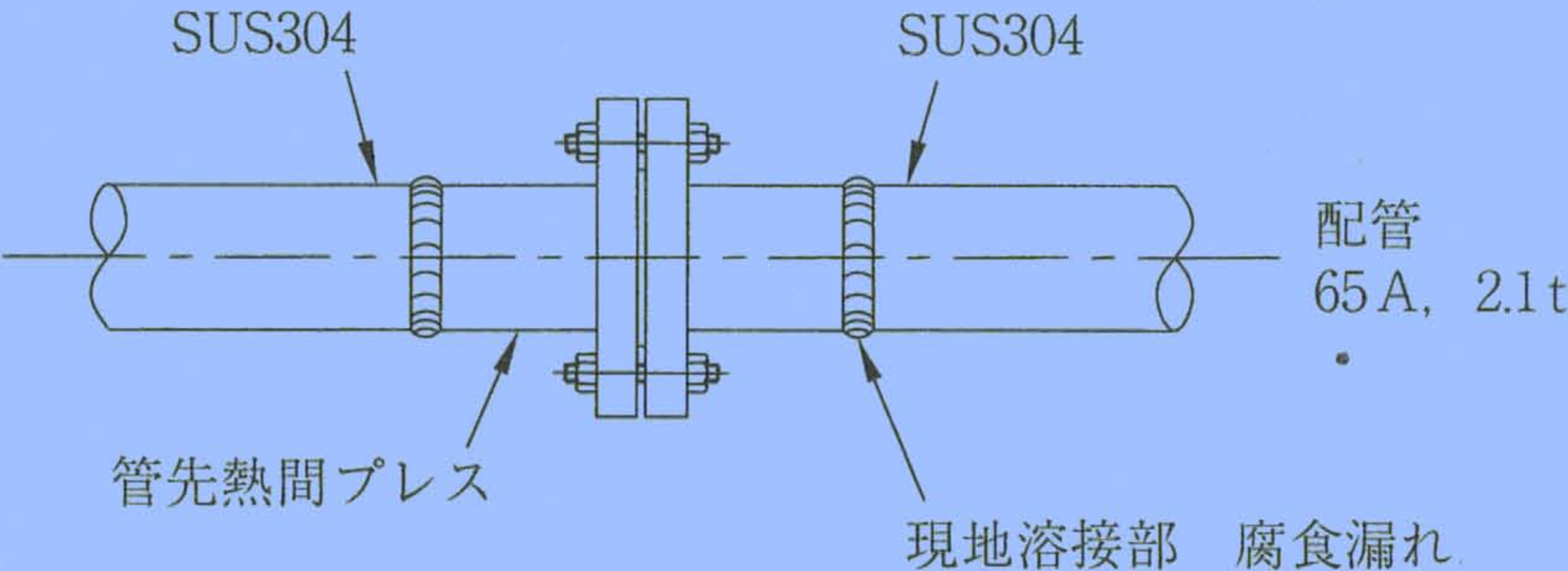
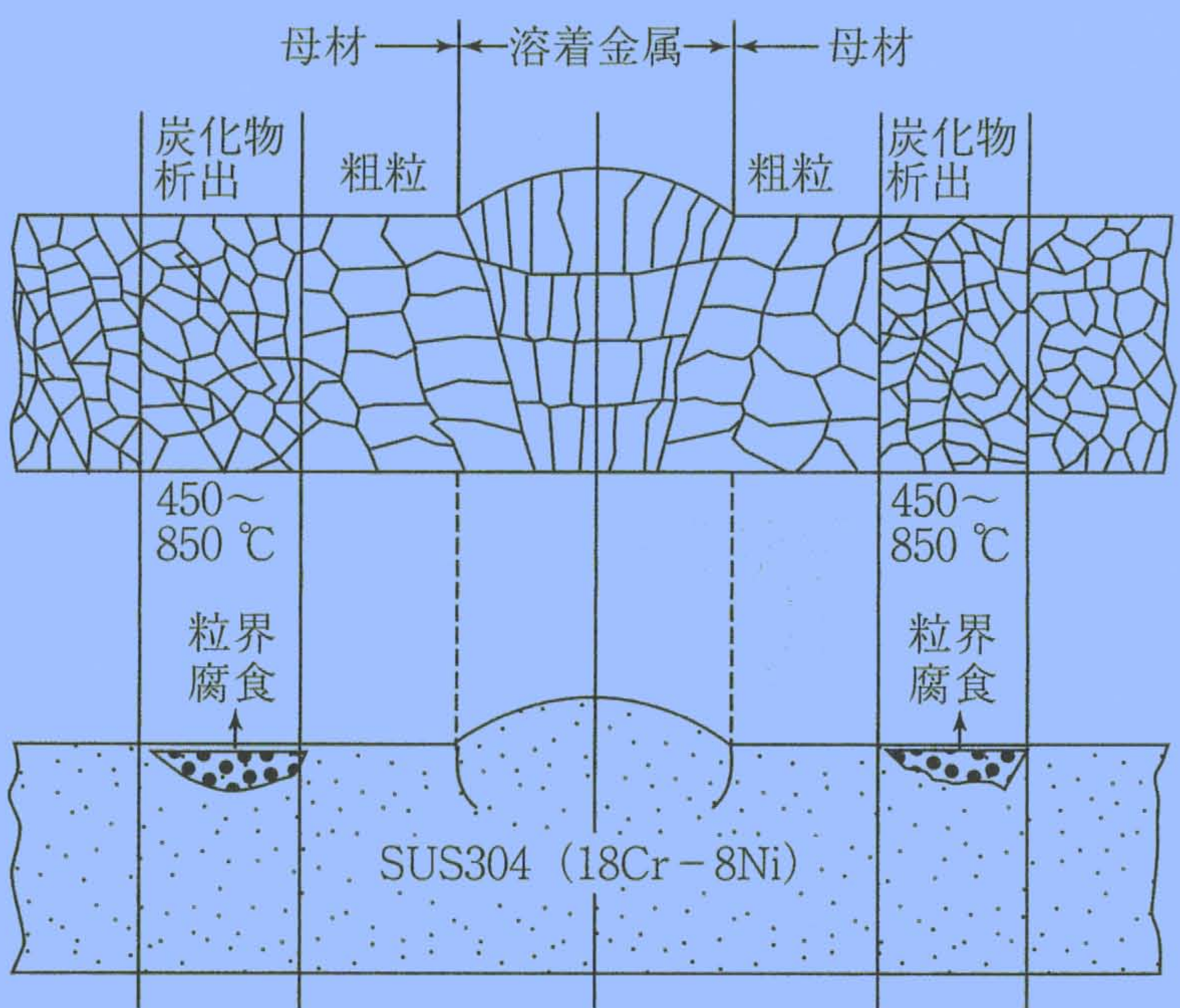
大区分	中区分	材 料 と 特 性		
A 炭素鋼, 鋳鉄系	炭素鋼	安価で、加工性に優れ、構造物に多用		
	低合金鋼, 高張力鋼	低温・中温の環境下で高強度の要求される構造物に使用		
	鋳鉄, 鋳鋼製品	弁類に多く使われ、多くの種類がある。		
B ステンレス 鋼系	フェライト系ステンレス鋼 (400番台)	中程度の耐食性が要求される環境、耐応力腐食割れ用に採用		
	マルテンサイト系ステンレス鋼 (400番台)	熱処理で硬化し、高強度、耐摩耗用材料として主に機械部品に使われる。		
	オーステナイト系ステンレス鋼 (300番台)	加工性、耐食性に優れ、化学装置材料として多く使われている。		
	二相ステンレス鋼 (329J番台)	海水、耐応力腐食割れ用に使用されている。溶接部の脆化に注意を要する。		
C アルミニウム, アルミニウム合金	アルミニウム(1000番台)	軽くて加工性に優れ、タンクなどに使われ、耐食性の向上に表面の化成処理が行われている。		
	合金系	Al-Cu(2000)	熱処理による強度材で、構造材に使われている。	
		Al-Mn(3000)	建築材や容器に使われている。	
		Al-Mg(5000)	耐食性溶接性良好で、容器、船舶、車両用	
		Al-Mg-Si(6000)	耐食性に優れ、船舶、車両、陸上構造物に適用	
		Al-Zn-Mg(7000)	高強度材で耐食性もよく、車両、航空機材に適用	
		Al-Fe(8000)	展延性・溶接性に富み、包装、電気通信用に適用	
D 銅, 銅合金	無酸素銅, タフピッチ銅, りん脱酸銅	C1000, C1200番	給水・給湯用配管に多く使われ、電気用、化学装置にも使われる。	
	丹銅(Cu-10~15%Zn)	C2100~2400番	建築用部品, 装身具	
	黄銅(Cu-20~40%Zn)	C2600~2800番	電気配線器具用	
	快削黄銅(Cu-Zn-Pb)	C3500~3700番	打抜き部品用	
	すず入り黄銅(Sn2%)	C4250番	ばね, 耐摩耗性部品	
	アドミラルティ黄銅	C4430番	(Cu-Zn-Sn-As), 化学工業, 船舶用	
	ネーバル黄銅(Cu-Zn-Sn)	C4600番	台, 熱交換器管板, 船舶用品	
	アルミニウム青銅	C6100~6300番	(Cu-Zn-10%Al), その他弁栓類	
	りん青銅(Cu-5%Sn)	C5000番	ばね, 電気部品	
	E ニッケル, ニッケル合金	純ニッケル		高温・高濃度のアルカリ環境用
白銅, 洋白(Cu-10Ni, Cu-30%Ni)		C7000番台	使用実績は少ない。	
Ni-Cu30%合金(モネル)			装置での使用は少なく、海水用の部品などに使用	
Ni-Cr-Fe(インコロイ)			高温での耐酸化性に優れ、高温用の材料として使用	
Ni-Cr-Mo(インコネル)				
Ni-Mo-Cr(ハステロイ B, C)		塩酸や硫酸など強酸環境下で多く使われているが、液中不純物の影響を受けやすい。		
F チタン, ジルコニウム, タンタル	チタン		主として有機酸, 酸化性の酸, 海水環境, 耐熱 450℃	
	チタン合金		0.2%Pd入りの合金が耐すき間腐食に用いられる。	
	ジルコニウム		主として高温の塩酸環境で使われる。	
	タンタル		主として高温の塩酸・硫酸環境で使われる。	

事例に基づいた
金属材料の耐食性

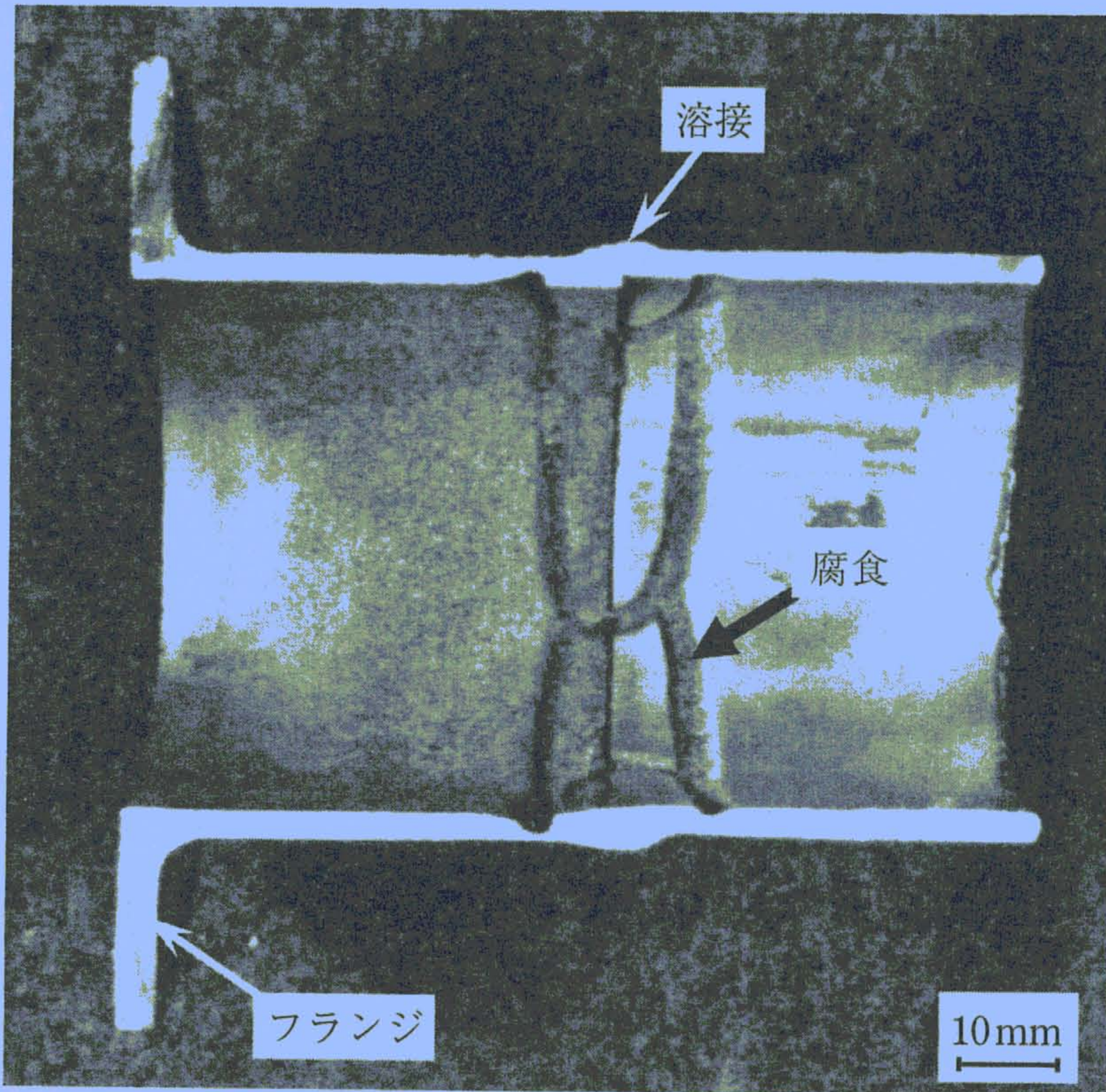
表 3.2 事例に見られる腐食用語の分類

区 分		腐 食 形 態	
全 面 腐 食	1) 全面腐食 general corrosion	①均一腐食：uniform corrosion, ②不均一腐食：uneven corrosion	
	環境別	①水・淡水腐食：fresh water corrosion, ②海水腐食：sea water corrosion ③大気腐食：atmospheric corrosion, ④土壌腐食：soil corrosion ⑤酸腐食：acid corrosion, ⑥アルカリ腐食：alkali corrosion	
	2) 高温腐食(乾食) high-temperature corrosion (無水環境) dry corrosion	①酸化：oxidation, ②窒化：nitriding ③浸炭：carburization, CO ₂ 脆化, ④硫化：sulfidation ⑤熔融塩腐食：molten salt corrosion ⑥バナジウムアタック：vanadium attack ⑦液体金属腐食：liquid metal corrosion	
局 部 腐 食	3) 孔食 pitting	①孔食：pitting	
	4) すき間腐食・ crevice corrosion	①すき間腐食：crevice corrosion ②糸状腐食：filiform corrosion	
	5) 電池作用腐食 galvanic corrosion	①濃度差電池腐食(酸素・イオン濃度差電池)：concentration cell corrosion ②異種金属接触腐食：galvanic corrosion ③マクロセル腐食(埋設管の腐食, 塗膜下腐食)：macro cell corrosion	
	6) 選択腐食 selective leaching	現象別	①脱亜鉛腐食：dezincification, ②黒鉛化腐食：graphitization ③伝熱面腐食：corrosion with heat transfer, ④熱点腐食：hot spot corrosion ⑤露点腐食：dew point corrosion, ⑥堆積物下腐食：deposit attack ⑦アンモニアアタック(復水器)：ammonia attack
		形態別	①溝状腐食：groovy corrosion ②ナイフラインアタック：knife line attack(SUS321 材など) ③エンドグレインアタック：end grain attack ④保温材下腐食：corrosion under insulation
	7) 粒界腐食 intergranular corrosion	①粒界腐食：intergranular corrosion ②ウェルドディケイ(溶接部腐食損傷)：weld decay	
	8) 電食 stray-current corrosion	①迷走電流腐食：stray-current corrosion	
	9) 微生物腐食	①微生物腐食：microbially influenced corrosion	
	10) 摩耗腐食 erosion corrosion	①エロージョン(潰食)：erosion corrosion ②キャビテーション：cavitation damage ③衝撃腐食：impingement attack ④インレットアタック：inlet attack ⑤擦過腐食：fretting corrosion	
	脆 化 と 割 れ	11) 脆化 embrittlement	①水素吸蔵割れ：hydrogen embrittlement ②水素誘起割れ：hydrogen induced cracking ③水素侵食：hydrogen attack, ④水素膨れ：hydrogen blistering ⑤遅れ破壊：delayed fracture
12) 応力腐食割れ stress corrosion cracking(SCC)		①活性経路腐食：active path corrosion(APC) ②外面(外気)応力腐食割れ：external stress corrosion cracking ③硫化物応力腐食割れ：sulfide-SCC ④アルカリ脆化割れ：caustic embrittlement	
13) 割れ cracking		①液体金属脆化割れ：liquid metal embrittlement ②疲労割れ：fatigue ③腐食疲労割れ：corrosion fatigue	

腐食形態の分類

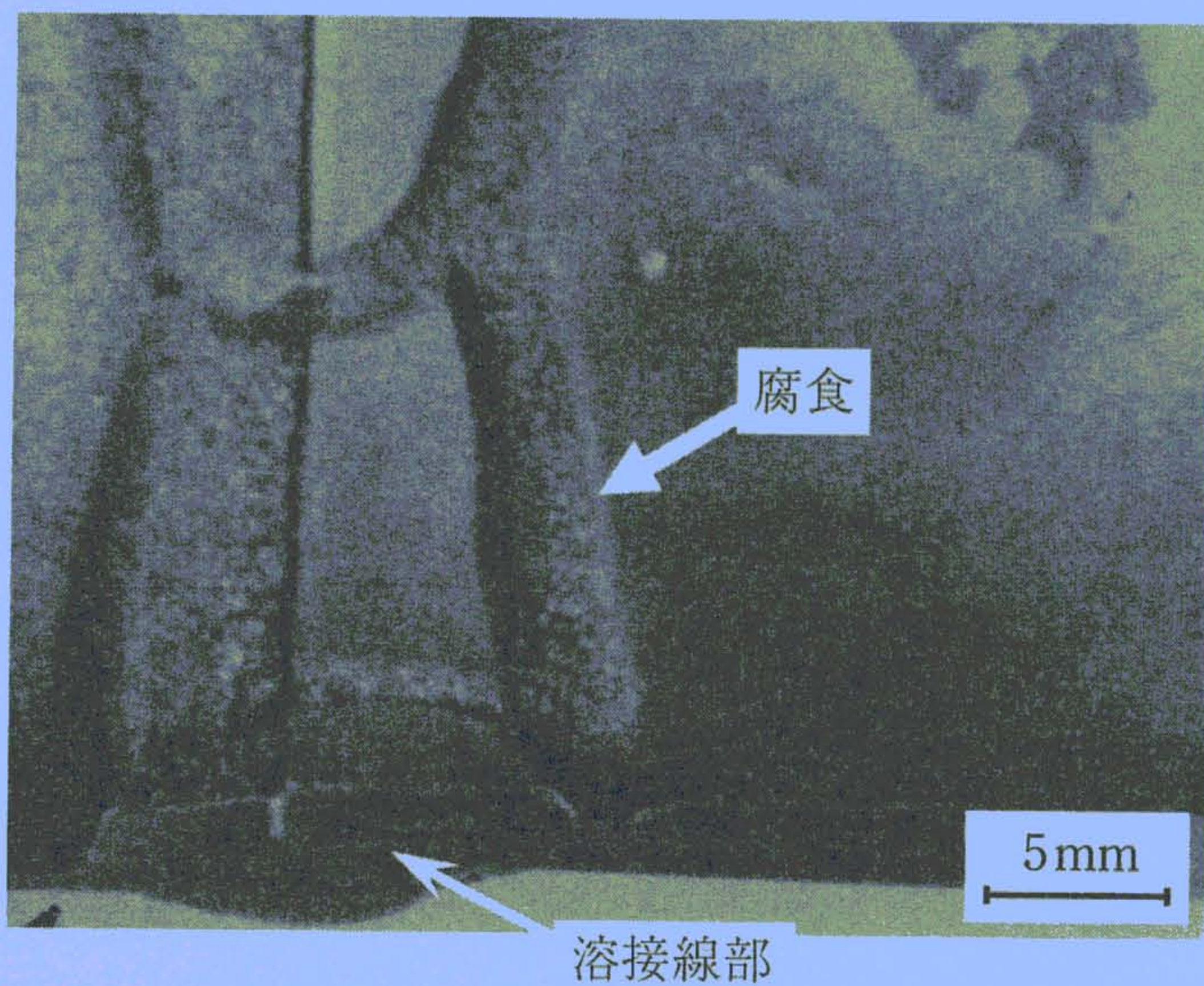
B27 ステンレス鋼	配管突合せ溶接部の粒界腐食(ウェルドディケイ)		
材料名	ステンレス鋼	機器名	配管, 管径: 65A
JIS 規格	SUS304TP	寸法	(外径 76.3mm, 厚さ 2.1mm)
損傷形態	粒界腐食, ウェルドディケイ	使用期間	5年
使用環境	アルカリ液: 140℃		
構造と経過 損傷の状態	<p>SUS304 の配管に連続して高温アルカリ液を流し, 運転5年で漏れが発生した.</p> 		
調査指針	高温アルカリによる腐食で, アルカリの温度と濃度が高くなるほどステンレス鋼は腐食されやすくなる. まず溶接部が先に侵されることに注目し, その他の部位の腐食状況も観察する(事例 B20 参照).		
原因と対策	溶接時の熱影響部で炭化物が析出し, 耐食性が低下して優先的に腐食されたものである. 対策: 低炭素系のステンレス鋼材料を使用する.		
解説	<p>直管に比べて管先の腐食が大きいのは二次加工時の熱間加工時の熱影響(650±200℃に加熱)によるものである.</p> <p>溶接部の腐食は環境や条件によって現れるから, 実績に従うことが重要.</p>  <p style="text-align: center;">溶接付近の金属組織の模式図</p>		
文献	腐食防食技術便覧, pp.57, 934(1986).		

B27 配管突合せ溶接部の粒界腐食(ウェルドディケイ)



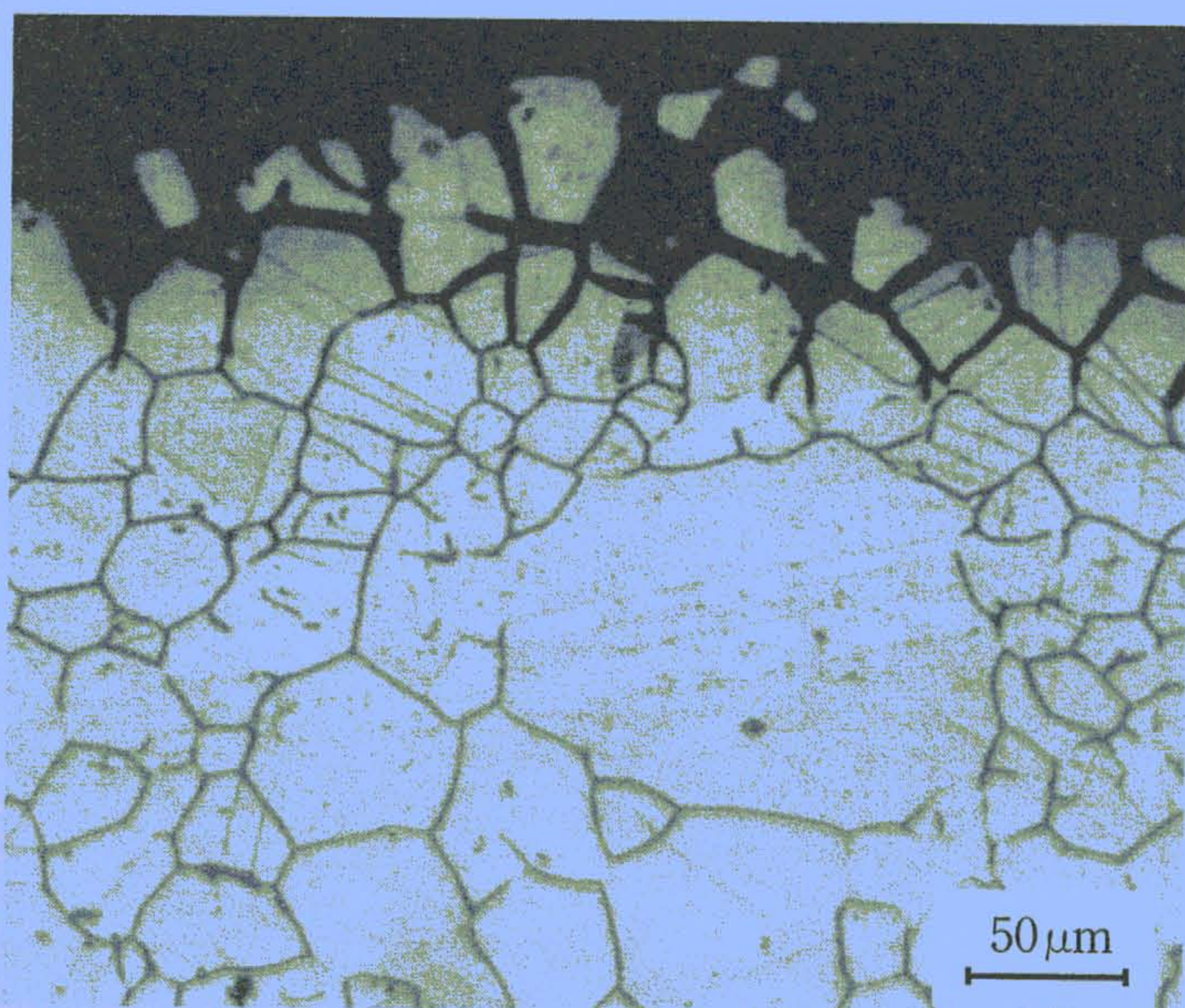
B27-01

漏れ配管の内面の様子。
突合せ溶接部の周囲が溝状に腐食されている(矢印)。
この部位は溶接時に 650 ± 200 °C に加熱されたために炭化物を析出し、耐食性が低下した(ウェルドディケイ)。
溶接線の位置と溝状腐食の位置に注目する。



B27-02

損傷部の拡大。
腐食溝の表面はざらざらしている。また、左の管先側も表面がざらざらし、腐食を受けている。これは溶接施工の加熱による炭化物析出の影響と考えられる。



B27-03

内表面断面の光学顕微鏡組織。
金属組織は鋭敏化しており、内表面から結晶粒界が侵されて結晶粒子が脱落し始めた典型的な粒界腐食。

腐食損傷事例の解析