

書面投票済議案の修正案リスト

添付（修正案を含むページのみ。ただし、附属書 4 のみ全文）

- 1 本文（4、8～12、18、21、22、26、29、38、44、47、51、
54 の各ページの変更点）
- 2 附属書 1（附属書 1 - 2 ページの変更点）
- 3 附属書 2（附属書 2 - 1 ページの変更点）
- 4 附属書 3（附属書 3 - 2、3 - 3、3 - 5～8 の各ページの変更点）
- 5 附属書 4（修正案を含む各ページの変更点）
- 6 附属書 6（附属書 6 - 8、6 - 10、6 - 16～18、6 - 24 の各ページの変更点）
- 7 附属書 7（附属書 7 - 5、7 - 6 の各ページの変更点）
- 8 附属書 10（附属書 10 - 6、10 - 7 の各ページの変更点）
- 9 附属書 14（附属書 14 - 22 ページの変更点）

以上

タ（設備の完成検査時の厚さ測定データを含めてもよい。）を有する設備に限る。

d) 設備の運転実績の条件

設備は、適切に運転管理されている設備であること。

備考 常用の圧力を用いて最小厚さを再計算し、許可基準としている場合は、この基準の適用にあたっては、“設計圧力”とあるのを“常用の圧力”と読み替える。この場合、安全弁等の安全装置の作動圧力についても見直すこと。

2.2.2 新設設備の類似又は同等の取扱い

新設設備の供用を開始する場合で、すでにこの基準を適用して耐圧性能及び強度に係る検査の次回検査時期を管理している設備（以下「管理設備」という。）があり、新設設備が次の a)～c) のいずれかに該当する場合には、新設設備を管理設備と類似又は同等な設備とみなし、2.2.1 c) の条件に係らず管理設備の供用適性評価に用いたデータを類似又は同等設備の供用適性評価に用いることができる。ただし、新設設備の対象は、管理設備のある場所と同一事業所で、かつ、同一系内に存在する場合に限るものとし、管理設備の存在が、新設設備の検査及び試験の実施を免除することにはならない。

なお、類似又は同等の取り扱いとなる新設設備であっても、初回の開放検査は使用開始後 4 年以内に行わなければならない。ただし、管理設備のデータ及び製作施工条件を考慮し、当該期間内の供用に支障のある損傷の発生する恐れのある場合には、必要に応じて初回の開放検査までの期間を短縮すること。

また、この規定により類似又は同等な設備とみなした判断根拠について、設備管理帳票類に明記しなければならない。

- a) 管理設備と同一形状、同一材料で製造された設備で、かつ、管理設備と同等の運転条件で使用される設備。
- b) 管理設備と同一形状を有し、かつ、同等の運転条件で使用される設備で、材料のみが損傷に対して管理設備の材料より明らかに優れている設備。ただし、その変更が新たな損傷の発生原因とならないことを条件とする。
- c) 管理設備と形状及び材料は異なるが同等の運転条件で使用される設備で、既存の他の管理設備の検査データより、管理設備に較べて損傷の発生及び進展が同等又は緩やかであることが明確な設備。

備考 1 同等の運転条件とは、設備に対して定められている使用流体、流量、運転圧力、運転温度などの運転条件が運転の管理変動範囲内にある運転をいう。

2 同一材料とは、次の 1)～3) の材料をいう。

- 1) 材料規格及び材料の種類の記事が同じ材料
- 2) 特定設備検査規則 例示基準 別添 1(特定設備の技術基準の解釈)第 4 条第 2 項及び別添 7(第二種特定設備の技術基準の解釈)第 4 条第 2 項に定める同等材料
- 3) 特定設備検査規則 例示基準 別添 1(特定設備の技術基準の解釈)第 4 条第 3 項及び別添 7(第二種特定設備の技術基準の解釈)第 4 条第 3 項に定める特定材料で、管理設備の JIS 規格材料と、化学的成分、機械的性質、試験方法及び試験片採取方法が極めて近似的な材料であって、性質が極めて類似した材料(管理設備の材料が特定材料の場合には、同様の判断を JIS 規格材料について行う。)

表 2.1 石油精製、石油化学プラントで発生する主な損傷の分類

損傷の原因による分類		損傷形態					この基準での供用適性評価の対象項目区分
		全面腐食		局部腐食			
		均一全面腐食	不均一全面腐食	孔食	隙間腐食	粒界腐食	
101	酸露点腐食						<p>3. 減肉の供用適性評価</p> <p>注) 孔食は、減肉には分類されないが、この基準では厚さの変化としてとらえ、減肉に区分する。</p>
102	エロージョン						
103+	流れ加速腐食(エロージョン・コージェン)						
103-2	流速差腐食						
104	脱成分腐食						
104-1	脱亜鉛						
104-2	脱アルミニウム						
104-3	脱ニッケル						
104-4	脱炭素						
201	異種金属接触腐食						
202	酸素濃淡電池腐食						
203	無機酸による腐食						
203-1	硫酸腐食						
203-2	塩酸腐食						
203-3	硝酸腐食						
203-4	炭酸腐食						
204	有機酸による腐食						
205	アルカリ腐食						
206	アミン腐食						
207	ハロゲン化物腐食						
208	湿潤塩素、次亜塩素酸腐食						
209	冷却水、工業用水腐食						
210	海水腐食						

この基準では経時的に厚さを管理できるものを適用対象とする。

表 2.1 石油精製、石油化学プラントで発生する主な損傷の分類（つづき）

損傷の原因による分類		損傷形態					この基準での供用適性評価の対象項目区分
		全面腐食		局部腐食			
		均一全面腐食	不均一全面腐食	孔食	隙間腐食	粒界腐食	
211	湿潤硫化物腐食	<p>この基準では経時的に厚さを管理できるものを適用対象とする。</p>					<p>3. 減肉の供用適性評価</p> <p>注) 孔食は、減肉には分類されないが、この基準では厚さの変化としてとらえ、減肉に区分する。</p>
212	水硫化アンモニウム腐食						
213	HCl-H ₂ S-H ₂ Oによる腐食						
214	迷走電流腐食、土壌腐食						
215	液体金属腐食						
216	微生物腐食						
217	外面腐食 ^{注)}						
218	高温酸化						
219	高温ハロゲン腐食						
220	水蒸気酸化						
221	高温硫化						
222	熔融塩腐食、バナジウムアタック						
223	浸炭、メタルダスティング						
224	窒化						
225	黒鉛化						

表 2.1 石油精製、石油化学プラントで発生する主な損傷の分類（つづき）

損傷の原因による分類		この基準での適用の可否	この基準での供用適性評価の対象 項目区分
【応力腐食割れ】			
300	ハロゲン化物応力腐食割れ		4.4 き裂状欠陥の供用適性評価割 れ
301	ポリチオン酸応力腐食割れ		
302	塩化物応力腐食割れ		
303	アルカリ応力腐食割れ（苛性脆化）		
304	アミン応力腐食割れ		
305	外面応力腐食割れ（ESCC）		
306	アンモニア応力腐食割れ		
307	カーボネイト応力腐食割れ		
308	水素助長割れ、オーバーレイ剥離		
309	水素誘起割れ（HIC）、水素膨れ		
310	SOHIC		
311	硫化物腐食割れ		
【クリープ】			
312	クリープ損傷		4.2 クリープ損傷の供用適性評価
313	クリープ脆化		
【疲労】			
314	高サイクル疲労		4.4 き裂状欠陥の供用適性評価割 れ
315	低サイクル疲労		
316	熱疲労		
317	腐食疲労		

表 2.1 石油精製、石油化学プラントで発生する主な損傷の分類（つづき）

損傷の原因による分類		この基準での適用の可否	この基準での区分
【その他】			
401	遅れ割れ		4.4 き裂状欠陥の供用適性評価割
402	脆性破壊		れ
403	水素侵食		4.3 水素侵食の供用適性評価
404	水素脆化	当該損傷に起因する脆性破壊を生じないように設備が運転管理される場合には、損傷とは見なさない。	
405	焼戻し脆化		
406	475 脆化		
407	シグマ相脆化		
408	等温時効脆化		
409	チタンの水素脆化		
501	製作時の検査では未検出の欠陥の検出		-

備考：表中の記号は、下記を表す。

○：この基準の適用対象とする損傷

△：この基準の適用対象外の損傷

□：欠陥の**特徴特性**、形状に応じて**表中の対象損傷（減肉又はき裂状欠陥）に区分されるのいずれかに該当する**場合には、この基準の適用対象とする。

注）： 217 外面腐食の取り扱いについては 2.3 b)を参照。

表 2.2 適用対象損傷の組合せ及び評価区分

損傷の区分の組合せ		評価区分	評価区分	備考
複数の損傷の混在	減肉 + 水素侵食	減肉を評価区分 で評価し、かつ、水素侵食を評価区分 で評価	-	-
	減肉 + クリーブ損傷	減肉を評価区分 で評価し、かつ、減肉を考慮したクリーブ損傷を評価区分 で評価	-	-
	減肉 + き裂状欠陥	き裂状欠陥の研削除去後の設備のリガメント厚さが最小厚さ以上で、かつ、供用中に最小厚さ未滿とならないことを前提とする評価で、減肉の評価区分 として評価	-	き裂状欠陥は研削等で除去し、かつ、き裂状欠陥再発の可能性が無いことを条件とする。

備考 適用対象の損傷で、表 2.2 に示す組合せ以外の損傷の区分の組合せ（例：減肉 + 水素侵食 + き裂状欠陥）は、基準の適用対象外とする。

案

3. 減肉の供用適性評価

この基準は、損傷が 2.3 に示す減肉の供用適性評価について規定する。

なお、熱交換器用伝熱管の減肉の供用適性評価については、本項の規定の対象外とし、適切な方法によることとする。熱交換器用伝熱管の減肉の評価区分の供用適性評価の方法の例を、**附属書 7**（参考）に示す。

3.1 適用対象設備

2.2.1 及び 2.2.2 の規定による。

3.2 減肉の検査点及び検査方法

3.2.1 検査点の設定

減肉管理のための検査点の設定は、次の a)～d) による。

- a) 検査点は、設備の運転条件、材料、形状、構造及び予測される減肉の形態と位置などに応じて定める。
- b) 目視検査、厚さ測定又は開放検査の結果、検査点以外の箇所が検査点の減肉速度よりも大きいと推定される場合には、その箇所を新たに検査点に追加する。

なお、従来設定している検査点及び新たな検査点の減肉速度のモニタリング等については、3.3.3 による。

- c) 検査点は位置が分かるように設備管理帳票類などに記録して管理し、検査点に変更が生じた場合には、記録書類の変更を行う。
- d) 検査点は、a)及び b)に定める他、次の 1) 及び 2) に示す部位を考慮し、**附属書 6** を参考に決定する。

1) 腐食による場合

1.1) 静機器の場合

- 1.1.1) 液相と気相の境界面（気液の界面）
- 1.1.2) 腐食性物質の濃縮部（機器底部、流れのないノズル等の滞留部）
- 1.1.3) 腐食の発生しやすい温度域に曝される部位
- 1.1.4) 流れの滞留部
- 1.1.5) 内容物の堆積部
- 1.1.6) 異材継手部

1.2) 配管系の場合

- 1.2.1) 流れの滞留部
- 1.2.2) 内容物の堆積部
- 1.2.3) 流体の蒸発する部位（気相中の腐食性物質の濃縮部）
- 1.2.4) 凝縮部
- 1.2.5) 異材継手部

2) エロージョン又は流れ加速腐食による場合

2.1) 静機器の場合

し適切な管理を行う。

~~備考 減肉速度を直線近似で表わすと非安全側であると認められる場合は、測定間隔を短くし適切な管理を行うこととする。~~

3.3.2 減肉速度の設定

減肉速度は、厚さ測定データを用い、**図 3.1** に示す直線近似として、次の a) ~ c) による。なお、減肉速度は、管理単位ごとに定点測定 of 各検査点に対して求めることとし、減肉速度の算定にあたっては測定誤差を考慮し、安全側に適切に定めることとする。

a) 直近 2 回の厚さ測定データから、次式により減肉速度を求める。

$$c = \frac{t_2 - t_1}{t_2 \text{ から } t_1 \text{ までの供用期間}}$$

ここに、 c : 減肉速度 (mm / 年)

t_1 : 最も直近の厚さ測定での検査データ (供用適性評価を行う際に厚さ測定も行う場合には、その測定厚さ) (mm)

t_2 : t_1 の厚さ測定の前回の厚さ測定での検査データ (mm)

b) 直近 3 回以上の厚さ測定データを用いて、最小二乗法による回帰直線の傾きから、減肉速度を求める。

~~備考 最小二乗法による回帰直線を求める場合、直近から連続して 3 回分より以前の測定データについては、損傷の原因、予測される傾向、考えられる現象の変化などを考慮し、適切に用いること。~~

c) a) と b) を比較し、いずれか大きい方の値を検査点の減肉速度とする。(**図 3.1** 参照)

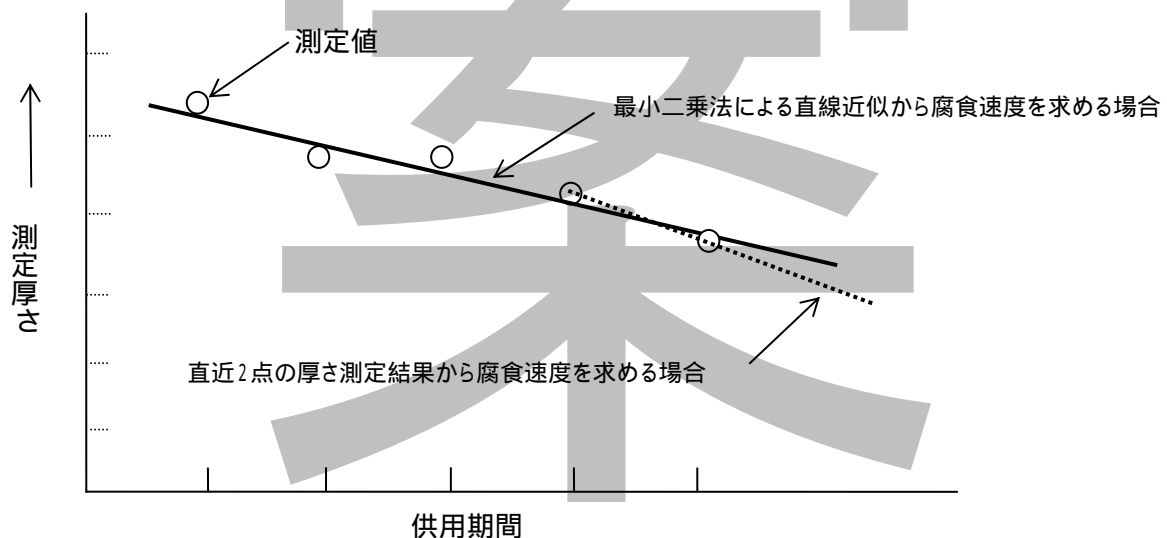


図 3.1 減肉速度算定のための直線近似

~~備考 直近 2 回の厚さ測定の結果から求めた腐食速度が選択された場合又は最小二乗法により求まる減肉~~

速度の傾向に変化が見られる場合には、その理由が測定誤差によるものなのか、その他の何らかの原因があるものなのかについて考察し、3.3.3 に定める減肉速度のモニタリング等を実施する他、必要に応じて、適切な措置を講ずること。

3.3.3 減肉速度のモニタリング等

次の a) 又は b) に該当する場合には、それぞれ a) 又は b) に定める検査点について、以後 2 年の間は 1 年間隔を標準とする厚さ測定検査を行い、当該 2 年間の厚さ測定の結果（計 3 回分）を用いて 2 年後に供用適性評価を実施し、次回検査時期について見直すこととする。

- a) 従来設定している検査点における厚さ測定検査の結果、減肉速度が直近 2 回のデータから決定された場合であって、既に設定されていた次回の厚さ測定検査時期又は開放検査時期に変更を必要とした場合：当該検査点
- b) 従来設定している検査点よりも減肉速度の大きい箇所が発見された場合：新たな検査点として追加する当該箇所

備考 ここでモニタリングとは、随時適切な頻度で厚さ測定を行うなどの措置を講ずることをいう。

3.4 減肉の供用適性評価

3.4.1 供用適性評価の評価区分

減肉の供用適性評価の区分は評価区分とし、供用適性評価は管理単位ごとに行う。減肉に対する供用適性評価フローを、[図 3.31](#)に示す。

3.4.2 評価区分の供用適性評価

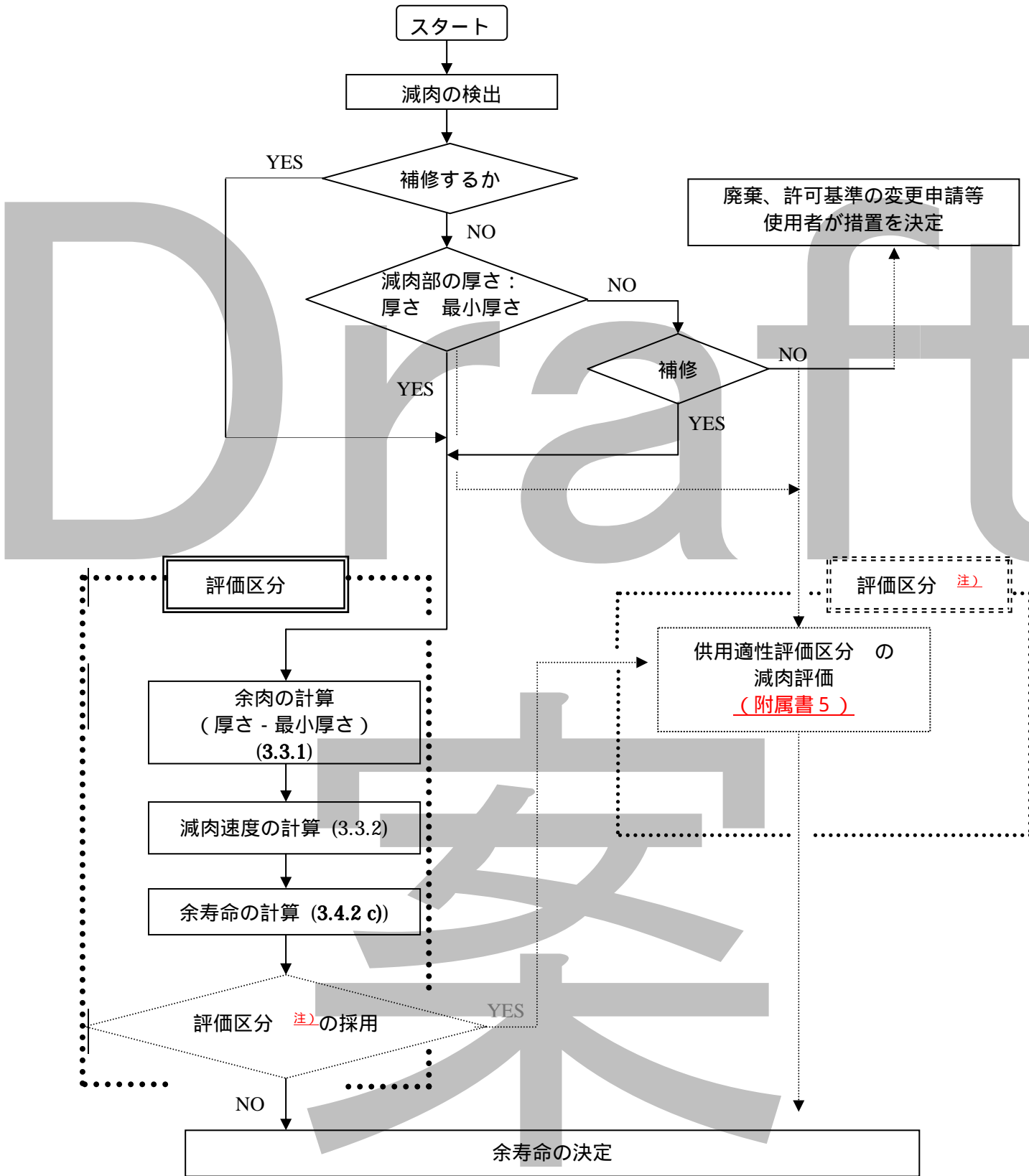
a) 評価に必要なデータ

評価区分には、次の 1)～3) のデータを用いる。

- 1) 管理単位に含まれる各検査点での減肉速度
- 2) 管理単位に含まれる各検査点の厚さ測定データ
- 3) 評価対象部材の最小厚さ

b) 最小厚さの算定

- 1) 設備の製造時の技術基準に従って評価対象部材の最小厚さを算出する。この場合、設備に設計地震動、風荷重が作用する場合には、これらの荷重も考慮して求めた最小厚さとする。なお、この時、地震動、風荷重の設計基準、許容応力等の規定は、設備の建設時に用いた技術基準によるものとする。
- 2) 次の 2.1)～2.3) に生じる減肉の供用適性評価を行う場合には、[附属書 3](#) により補強に対する影響についても評価する。
 - 2.1) ノズルの穴補強部
 - 2.2) 円筒胴と円すい胴の接続部に取り付ける強め材の有効範囲
 - 2.3) 外圧を受ける胴の強め輪による補強の有効範囲



注) 評価区分 については、この基準ではまだ詳細が定まっていない(詳細は附属書5として追加する予定である。)が、評価区分 を含む供用適性評価のフローを示す。

図 3.3 減肉に対する供用適性評価フロー

供用適性評価のための検査は、初回の供用適性評価時も含めて、全ての検査箇所について実施する。ただし、各検査箇所では明確な損傷の差異があると判断される場合には、評価は、損傷が最も厳しい検査箇所に対してのみ行ってもよい。

- b) 加熱炉管、反応管又はそれらに類する管であって、クリープ寿命評価への熱応力の影響を考慮する必要があると判断する場合（熱応力の影響が不明である場合を含む。）

1) 初回の供用適性評価の実施時期

初回の供用適性評価は、設計温度、設計圧力及び製作時の採用厚さ並びに材料のマスター線図を用いて、有限要素法等適切な方法により熱応力を考慮して寿命消費率を算定し、寿命消費率が50%となる時期に行う。ここで、評価しようとする検査箇所の金属温度及び運転圧力の履歴が利用可能な場合には、これらの値を用いて寿命消費率を計算してもよい。

- 2) 供用適性評価のための検査手法は、サンプリングした管を用いて行い、クリープ破断試験及び浸炭部などの非健全部を確認するための断面組織観察による。

3) 供用適性評価のための検査を実施する検査箇所

供用適性評価のための検査は、初回の供用適性評価時も含めて、全ての検査箇所について実施する。ただし、各検査箇所では明確な損傷の差異があると判断される場合には、評価は、損傷が最も厳しい検査箇所に対してのみ行ってもよい。

- c) ノズル取り付け部などの応力集中部を有する反応器など、a) 及び b) に掲げるもの以外の設備を評価する場合

1) 初回の供用適性評価の実施時期

初回の供用適性評価は、同一の設備の中で内圧による周方向の膜応力が最大となる検査箇所について、設計温度、設計圧力及び測定厚さ並びに材料のマスター線図（a) 1) に同じ。）を用いて寿命消費率を算定し、寿命消費率が50%となる時期に行う。

2) 供用適性評価のための検査手法

供用適性評価のための検査手法は、金属組織観察法とする。

3) 供用適性評価のための検査を実施する検査箇所

供用適性評価のための検査は、初回の供用適性評価時も含めて、**4.1.1で定めた**全ての検査箇所について実施する。ただし、各検査箇所では明確な損傷の差異があると判断される場合には、評価は、損傷が最も厳しい検査箇所に対してのみ行ってもよい。

4.2.3 供用適性評価の実施

a) クリープ寿命評価者

クリープ寿命評価は、評価対象設備のクリープ損傷及び適用しようとする評価方法について十分な知見を有する者が実施する。

b) 金属組織観察法による評価

- 1) 金属組織観察法による評価は、**図 4.1 (A)** の評価フローに従い、**表 4.1** に示す中から適切な評価方法を選択して実施する。

- 2) 金属組織観察法に用いるマスター線図、標準組織図等は、評価対象設備のクリープ損傷について十分な知見を有する者が定めたものを用いることとし、適切な設計マージンが考慮さ

4.4 き裂状欠陥の供用適性評価

~~この規定は、損傷がき裂（割れ）としての特徴を有するもの（例えば、付表 2.1 に示す遅れ割れ（No.401））製作時には未検出のき裂状欠陥（No.501）等をいう。）に適用する。~~

4.4.1 適用対象設備

この規定は、2.2.1 及び 2.2.2 の規定に加え、かつ、次の a) ~ f) をすべて満足する設備の供用適性評価に適用する。

- 設備の設計温度は、設備の材料のクリープ温度未満の温度であること。
- き裂状欠陥を有する部材の内半径 R と呼び厚さ t との比は、 $R/t \geq 5$ であること。
- き裂状欠陥を有する部材の呼び厚さ t が、150mm 以下であること。
- き裂状欠陥の位置は、応力集中箇所又は構造不連続部より $2.5\sqrt{Rt}$ (mm) 以上離れていること。
- 設備に負荷する荷重は内圧のみであること。耐震設計設備は適用対象外とする。
- き裂状欠陥の進展が内圧の繰返し以外では生じないことが明らかなこと。

4.4.2 き裂状欠陥を除去し、減肉として評価する場合の供用適性評価

4.4.1 の規定にかかわらず、次の a) ~ c) をすべて満足する場合には、き裂状欠陥をグラインダー、研削加工等により機械的に除去し、除去後の供用適性評価として 3.減肉の供用適性評価に従ってもよい。

- き裂状欠陥の発生原因を特定でき、再発防止されていること。
- 3.減肉の供用適性評価を適用するための条件を満足していること。
- き裂状欠陥を完全に除去すること。

4.4.3 供用適性評価のための検査

4.1.1 で定めなき裂状欠陥に対する各検査箇所に対し、附属書 6 の 3. に示す検査方法を参考にしてにより検査を行う。

4.4.4 供用適性評価

a) 評価区分 の供用適性評価

き裂状欠陥に対する評価区分 の供用適性評価は、次の 1) 又は 2) による。

- ~~き裂状欠陥の発生原因が次の 1.1) に該当し、かつ、1.2) の規定を満足してき裂状欠陥の進展評価が不要な場合には、下記の b) に示す手順による。~~
 - ~~き裂状欠陥の発生原因が、材料欠陥や溶接欠陥等の表 2.1 における製作時の検査では未検出の欠陥に起因する場合又は及び付表 2.1 の損傷の原因による分類の遅れ割れ（No.401）による場合であって、に起因する場合。~~
 - ~~評価対象である設備の使用者が、き裂進展についての評価は不要であると判断する場合は、下記の b) に示す手順による。~~
- き裂状欠陥の発生原因が上記 1.1) に該当し、かつ、評価対象である設備の使用者が、き裂進展についての評価は必要であると判断する場合は、下記の c) に示す手順による。

a) 検査時期設定係数

厚さ測定及び開放検査に対する検査時期設定係数は、0.5 とする。

b) 次回検査時期

- 1) 厚さ測定の次回検査は、余寿命に検査時期設定係数を乗じて得られる期間内に行う。ただし、次回厚さ測定検査までの最大間隔は、4年とする。
- 2) 開放検査の次回検査は、余寿命に検査時期設定係数を乗じて得られる期間内に行う。ただし、次回開放検査までの最大間隔は、12年とする。

5.3 損傷が複数存在する場合の次回検査時期の設定

この基準の適用対象損傷が、供用適性評価の管理単位に重複して存在する場合の次回検査時期は、次の手順 a)～e)により定める。

- a) 損傷ごとに厚さ測定及び開放検査の次回検査時期を求める。
- b) 厚さ測定及び開放検査について、それぞれ a) で求めた次回検査時期のうち最も直近の時期を次回検査時期とする。
- e) ~~減肉とクリープが混在して存在する場合、減肉を考慮したクリープ寿命消費率にて評価する。~~

5.4 厚さ測定又は開放検査に伴う次回検査時期の見直し

厚さ測定又は開放検査を行った場合には、損傷の種類に応じて 3.又は 4.の供用適性評価により新たに余寿命の算定を行い、次の a) 及び b) により厚さ測定及び開放検査の次回検査時期の見直しを行う。ただし、損傷の発生及び進展に関し、新たな検査データが前回の供用適性評価で用いたデータより緩やかな結果を示すデータであることが明らかな場合には、再評価は行わず、~~これ~~ **まで既定**の次回検査時期を適用してもよい。開放検査の検査時期の見直し例を、図 5.2 に示す。

a) 厚さ測定と開放検査の両方を行う時点での見直し

供用適性評価により求まる余寿命より、厚さ測定及び開放検査の次回検査時期を定める。

b) 厚さ測定のみを行う時点での見直し

- 1) 厚さ測定の次回検査時期は、供用適性評価により求まる余寿命より定める。
- 2) 開放検査の次回検査時期は、前回の開放検査の検査時期を定めた時点を中心として、起点から今回の見直しまでの経過期間に、今回新たに定めた開放検査の検査周期を加えた期間内に行う。ただし、いずれの場合にあっても、起点から開放検査までの期間は、12年以下とする。
- 3) また、見直しの結果、すでに次回検査時期を経過している場合には、速やかに開放検査を行う。

場合には、設備はこの基準の適用対象外とする。

- d) 損傷がき裂状欠陥の場合で、前回検査時の供用適性評価の結果として、き裂状欠陥をそのまま残して使用している場合には、新たな運転条件のデータを用いて、4.4の規定によりき裂状欠陥の供用適性評価を再度行う。なお、評価に際しては、前回評価から今回の再評価までのき裂状欠陥の進展による影響も考慮する。

6.2.3 次回検査時期の再設定

設備の次回検査時期は、供用適性評価の再評価により求めた設備の余寿命を用いて5の規定による。

6.3 設備に防食対策を行う場合の再評価

6.3.1 防食対策の種類

設備の供用中に減肉に対する防食対策を目的として、次の a)～c) の措置を講じる場合には、措置後に供用適性評価の再評価を実施する。防食対策の具体策については、**附属書 13** を参考にできる。

- a) 環境遮断：減肉部分を曝露環境から遮断する方法をいう。
- b) 電気防食：減肉部分の電位を制御することで、~~減肉量を低減する防食方法~~をいう。
- c) 環境改善：減肉部分の環境条件を制御することで、~~減肉速度を緩和する~~方法をいう。

6.3.2 適用条件

6.3.1 a)～c) に規定する防食対策は、措置を講ずる箇所以外への影響を含め、その措置に起因する新たな損傷（混在する場合を含む。）が生じることなく、かつ、次の a)～d) をすべて満足する場合にのみ、適用できる。

- a) 損傷が減肉のみで、かつ、減肉の原因が明確である。
- b) 原因に対して、適切な対策及び施工方法が選定される。
- c) 措置前に当該措置に係る事項を定めた施工要領書を作成し、要領書に従って施工を行い、かつ、要求された仕様を満足していることを検査で確認する。
- d) 措置後に、防食対策として要求される機能、性能、耐用期間などを定期的にモニタリングし、効果を確認する（6.3.7を参照。）。

6.3.3 再評価のための要件

防食対策に伴う供用適性評価の再評価は、講ずる措置の種類に応じて、次の a)～c) を満足する場合に、適用できる。

- a) 環境遮断の場合には、適用した被覆材の施工後からその被覆機能又は性能を喪失するまでの期間（以下「耐用期間」という。）が明らかな場合。
- b) 電気防食の場合には、適用仕様条件に対する防食材の有効寿命が明らかな場合。
- c) 環境改善の場合には、適用しようとする環境条件の制御方法が、減肉速度を緩和することに

短余寿命

6.4.5 次回検査時期の再設定

設備の次回検査時期は、新たに求めた設備の余寿命を用いて5.の規定による。

6.4.6 追加要求事項

補修が肉盛溶接補修又は当て板溶接補修の場合には、次のa)~e)を満足しなければならない。

- a) 溶接補修後には、原則耐圧試験を行う。なお、耐圧試験の基準は、**原則**コンビ則例示基準(「平成13・03・23 原院第3号(平成13年3月26日)コンビナート等保安規則の機能性基準の運用について」別添)4.耐圧試験及び気密試験の規定による。また、必要に応じて、溶接補修部について耐圧試験後に目視検査又は適切な非破壊検査を行い異常のないことを確認する。
- b) 補修後4年以内に開放検査を実施し、割れ等の異常のないことを確認する。
- c) b)の開放検査以降の次回開放検査の時期は、5.の規定による。
- d) a)の耐圧試験は、溶接補修を行った部位についての耐圧性能を確認できれば、設備全体について行わなくともよい。
- e) a)の耐圧試験の実施の要否の判断に際しては、保安検査基準 **KHKS 0850-3** の4.3項解説*1のなお書き(いわゆる6点法)を準用することができる。

案

a) 目視検査の検査員

目視検査の検査員は、設備に発生する損傷に対する知識を有し、かつ、検査に関する実務経験を3年以上有していなければならない。

b) 目視検査以外の非破壊試験[渦流探傷試験(ET),磁粉探傷試験(MT),浸透探傷試験(PT),放射線透過試験(RT),超音波探傷試験(UT)]の検査員

目視検査以外の非破壊試験の検査員は、非破壊試験の種類に応じて(社)日本非破壊検査協会などの第三者機関が認定する資格を有していなければならない。

c) a) 又は b) 以外の金属組織検査、引張試験等の検査員

行おうとする検査の実務経験を3年以上有していなければならない。

7.5 基準類の整備・活用

この基準を適用する事業者は、供用適性評価に係る業務を確実にを行うための必要な基準類を整備し、活用しなければならない。

この基準類は、少なくとも次の a) ~ h) **の事項を満足するよう**を定めるものでなければならない。

a) 検査計画の作成

- 1) 静機器ごと又は配管系の管理単位ごとに、検査結果を評価解析し、重要度、最近の運転実績及び保全履歴の確認等を分析及び評価し、その結果に基づいて検査計画が立案されること。
- 2) 設備等及び運転条件の変更が行われる時には、損傷の進展に対する影響を評価し、その都度検査計画の見直しを行うこと。
- 3) 検査記録、保全履歴が適切に管理され、検査計画の立案に際して活用されること。
- 4) 設備等の設計及び建設段階にて考慮された損傷の対策(薬液の注入、ライニング、電気防食、構造設計上の配慮等)の性能が維持されていることを確認し、運転条件の変更、改造などによる環境変化がある場合には、性能の低下及びその防止対策の必要性について、調査及び検討を行うこと。
- 5) 設備維持に関する新しい知見が得られた場合には、必要に応じて設計基準、保全基準及び運転基準などの関係基準にその内容が反映されること。

b) 損傷要因の把握及び評価

- 1) 高圧ガス設備の内外面に発生する可能性のある損傷が網羅的に抽出され、分類・整理し、管理単位を明確にすること。
- 2) 配管系について、ほぼ同一の腐食環境下において類似の腐食形態を受ける範囲(腐食系)ごとに適切に区分し管理単位を明確にすること。

c) 検査点又は検査箇所を選定

- 1) 損傷要因ごとの検査点又は検査箇所は、静機器ごと(配管系にあっては、腐食系単位ごと)に、材料と流体の腐食性、温度・流速等の運転条件、形状、構造、流れの状態を考慮した適切な検査点又は検査箇所が選定されること。
- 2) 厚さ測定に関して、測定する検査点の考え方、設定の方法を明確にすること。
- 3) 静機器においては、目視検査の結果を踏まえ、検査点又は検査箇所の選定の方法を明確

なお、常用の圧力を許可基準としている場合は、その旨わかるようにする（本文 2.2.2 d）備考を参照。）。

3.6 運転モード及び運転履歴

連続運転又はバッチ運転の区別、これまでの運転期間中におけるスタートアップ、シャットダウンの時期、及び供用適性評価に必要とされる圧力・温度等の変動量、運転履歴等を記載する。

3.7 使用流体

流体成分及び流体性状（ガス、液又は混相）が分るデータを記載する。

3.8 使用材料

一つの設備で部位によって使用材料が異なる場合には、その部位と使用材料との対応が分るデータを記載する。

3.9 損傷

供用適性評価を行う静機器又は配管系ごと（必要に応じて管理単位ごと）に、次の a）及び b）に示すデータを記載する。

- a) 生じる可能性がある損傷を網羅的に抽出
- b) a) でリストアップした損傷ごとに、供用適性評価のためのデータ及び結果など

3.10 検査方法

3.9 で抽出した損傷ごとに、次の a）及び b）に示すデータを記載する。

- a) 検査方法
- b) 検査結果及び評価

3.11 設備管理の詳細データ管理方法

供用適性評価のための設備管理の方法を示し、 次の a)～e) に示すデータを必要に応じて機器図面又は簡略図を用いて記載する。

- a) 設計計算書における最小厚さ（強度計算書より引用）
- b) 次回検査予定時期
- c) 損傷の生じやすい箇所
- d) 検査点
- e) 管理単位

3.12 検査履歴

検査より明らかになった損傷の発生状況、進行状況などを記載し、新たに検査を実施すること、検査記録及び評価結果を追加して記載する。

附属書 2 用語の定義（規定）

序文

この附属書は、基準における用語の定義について規定する。

1. 総則関係

1.1 開放検査

開放検査とは、本文 1.2 に定める高圧ガス設備の耐圧性能及び強度にかかる検査のうち、内部の目視検査及び厚さ測定以外の非破壊検査のための開放検査をいう。

1.2 次回検査時期

次回検査時期とは、本文 1.2 に定める高圧ガス設備の耐圧性能及び強度にかかる検査における目視検査（外面目視検査を除く。）及び非破壊検査のそれぞれに対しての次回検査を実施する時期をいい、設備ごと又は管理単位毎に決定される。

1.3 静機器

静機器とは、反応器、蒸留塔、熱交換器等（ポンプ、圧縮機などのいわゆる動機器以外の機器）をいい、架構やサポートなどは含まない。

1.4 耐圧性能及び強度に係る検査

耐圧性能及び強度に係る検査とは、本文 1.2 に定める高圧ガス設備の耐圧性能及び強度にかかる厚さ測定及び開放検査をいう。

1.5 配管系

配管系とは、直管部のみならず、エルボ部及び配管に附属する弁やノズル等が連結された部品を含めたものをいう。

1.6 導管系

導管系とは、導管の直管部、エルボ部及び導管付属品（弁、ノズル）等の連結された部品を含めたものをいい、地中に埋設された部分及び水中に設置された部分を除く。

1.7 損傷

損傷とは、腐食による減肉、材料劣化、き裂状欠陥など、材料の特性を損なう現象の総称をいう。

2. 適用範囲関係

る。

- 2) 補強板の外面に外面減肉が生じている場合には、必ず減肉の進行を防止する措置を施し、図面の指示厚さから減肉深さを減じた厚さを補強板の厚さとする。

なお、補強板に複数の減肉が認められる場合には、減肉深さはその最大深さとする。

- d) 穴補強計算で用いる胴、管台及び補強板の**板厚厚さ**の求め方の例を**附属書 3 図 1**に示す。

2.2 穴の補強計算

設備の建設時の技術基準に従って穴の補強計算を行い、その要求規定をすべて満足することを確認する。

3. 円筒胴と円すい胴の接続部に関する追加要求規定

円筒胴と円すい胴の接続部付近に減肉が生じた場合には、円筒胴及び円すい胴をそれぞれ単独で減肉の評価区分の供用適性評価を行うとともに、設備建設時の技術基準に定める円筒胴と円すい胴の接続部の補強の規定についても、満足しなければならない。

ここで、円筒胴と円すい胴の接続部の補強の検討は、次の要領で行う。

3.1 計算に用いる円筒胴、円すい胴等の厚さ

a) 円筒胴の厚さ

円筒胴の面に沿う方向の接続部の補強の有効範囲(建設時の技術基準による。)での円筒胴の減肉部の最小リガメント厚さを求め、最小リガメント厚さから今後の供用予定期間における減肉量を減じた値を、円筒胴の厚さとする。

ここで、今後の供用予定期間における減肉量は、円筒胴の減肉速度に供用予定期間を乗じて得られる値とする。

b) 円すい胴の厚さ

円すい胴の面に沿う方向の接続部の補強の有効範囲(建設時の技術基準による。)での円すい胴の減肉部の最小リガメント厚さを求め、最小リガメント厚さから今後の供用予定期間における減肉量を減じた値を、円すい胴の厚さとする。

ここで、今後の供用予定期間における減肉量は、円すい胴の減肉速度に供用予定期間を乗じて得られる値とする。

c) 強め材の厚さ

円筒胴と円すい胴の接続部に強め材が取り付けられている場合、強め材の厚さは、次の 1) 又は 2) による。

- 1) 強め材の外面に外面減肉が生じていない場合には、強め材の厚さは図面指示の厚さとする。
- 2) 強め材の外面に外面減肉が生じている場合には、必ず減肉の進行を防止する措置を施し、図面の指示厚さから減肉深さを減じた厚さを強め材の厚さとする。

なお、強め材に複数の減肉が認められる場合には、減肉深さはその最大深さとする。

- d) 円筒胴と円すい胴の接続部の補強計算で用いる円筒胴及び円すい胴の**板厚厚さ**の求め方の

例を**附属書 3 図 2**に示す。

3.2 接続部の補強の計算

設備の建設時の技術基準に従って円筒胴と円すい胴の接続部の補強の計算を行い、その要求規定をすべて満足することを確認する。

4. 外圧を受ける胴の強め輪による補強に関する追加要求規定

外圧を受ける胴に減肉が生じた場合には、胴の減肉の評価区分の供用適性評価に加えて、設備建設時の技術基準に定める強め輪の規定についても、満足しなければならない。

なお、強め輪の検討は、強め輪間をそれぞれ個別に行うものとする。

4.1 計算に用いる胴及び強め輪の厚さ

a) 胴の厚さ

強め輪間の胴の減肉部の最小リガメント厚さを求め、最小リガメント厚さから今後の供用予定期間における減肉量を減じた値を、胴の厚さとする。

ここで、今後の供用予定期間における減肉量は、胴の減肉速度に供用予定期間を乗じて得られる値とする。

b) 強め輪の厚さ

強め輪が取り付けられている場合、強め輪の厚さは、次の 1) 又は 2) による。

- 1) 強め輪の外面に外面減肉が生じていない場合には、強め輪の厚さは図面指示の厚さとする。
- 2) 強め輪の外面に外面減肉が生じている場合には、必ず減肉の進行を防止する措置を施し、図面の指示厚さから減肉深さを減じた厚さを強め輪の厚さとする。

なお、強め輪に複数の減肉が認められる場合には、減肉深さはその最大深さとする。

c) 外圧を受ける胴の強め輪の計算で用いる胴の**板厚厚さ**の求め方の例を**附属書 3 図 3**に示す。

4.2 外圧を受ける胴の強め輪の計算

設備の建設時の技術基準に従って外圧を受ける胴の強め輪の計算を行い、その要求規定をすべて満足することを確認する。

5. ベンド、エルボ、ティー等の管継手の最高使用許容圧力の算定に関する追加要求事項

管継手（JIS 又は ASME 規格品に限る。）の最高許容使用圧力は、次式により求める。

$$P_{allow} = \frac{P_o}{Xs} \frac{\sigma_a}{\sigma_o}$$

$$P_o = \frac{2S t_1^*}{D}$$

ここで、 P_{allow} 、 P_o 、 Xs 、 S 、 t_1^* 、 D 、 σ_a 及び σ_o は、それぞれ次の値を表す。

a) 手順 1

フランジに接続する円筒胴の t_{min} を求める。

b) 手順 2

次の 1) 及び 2) により、円筒胴の $(t_{mm})_s$ 及びフランジ部の減肉深さを求める。

1) 円筒胴の $(t_{mm})_s$

附属書 3 図 4 に示す L_S の範囲（フランジ内面に円筒胴を差込む形式のフランジにあっては L_T の範囲）について詳細厚さ測定法により厚さ測定を行い、 $(t_{mm})_s$ を求める。

2) フランジ部の減肉深さ（フランジ内面に円筒胴を差込む形式のフランジを除く。）は、フランジ内面に存在する各減肉深さの中の最大の減肉深さとする。

c) 手順 3

円筒胴内面及びフランジ部内面でのそれぞれの FCA を定める。

1) $(FCA)_s$

2) $(FCA)_F$

d) 手順 4

フランジ計算に用いるフランジ内径、円筒胴の内径及び円筒胴の板厚厚さを、次の 1) 又は 2) により求める。

1) フランジ内面に円筒胴を差込む形式のフランジの場合

1.1) フランジ内径：図面指示寸法

1.2) 円筒胴の内径： $(t_{mm})_s$ の位置での内半径に $(FCA)_s$ を加えた値を 2 倍した値

1.3) 円筒胴の板厚厚さ： $(t_{mm})_s - (FCA)_s$

2) 一体形フランジのようにフランジ内面と円筒胴の内面とが面一となる形式のフランジの場合

2.1) フランジ内径：フランジ内面における最大減肉深さの位置での内半径に $(FCA)_F$ を加えた値を 2 倍した値

2.2) 円筒胴の内径： $(t_{mm})_s$ の位置での内半径に $(FCA)_s$ を加えた値を 2 倍した値

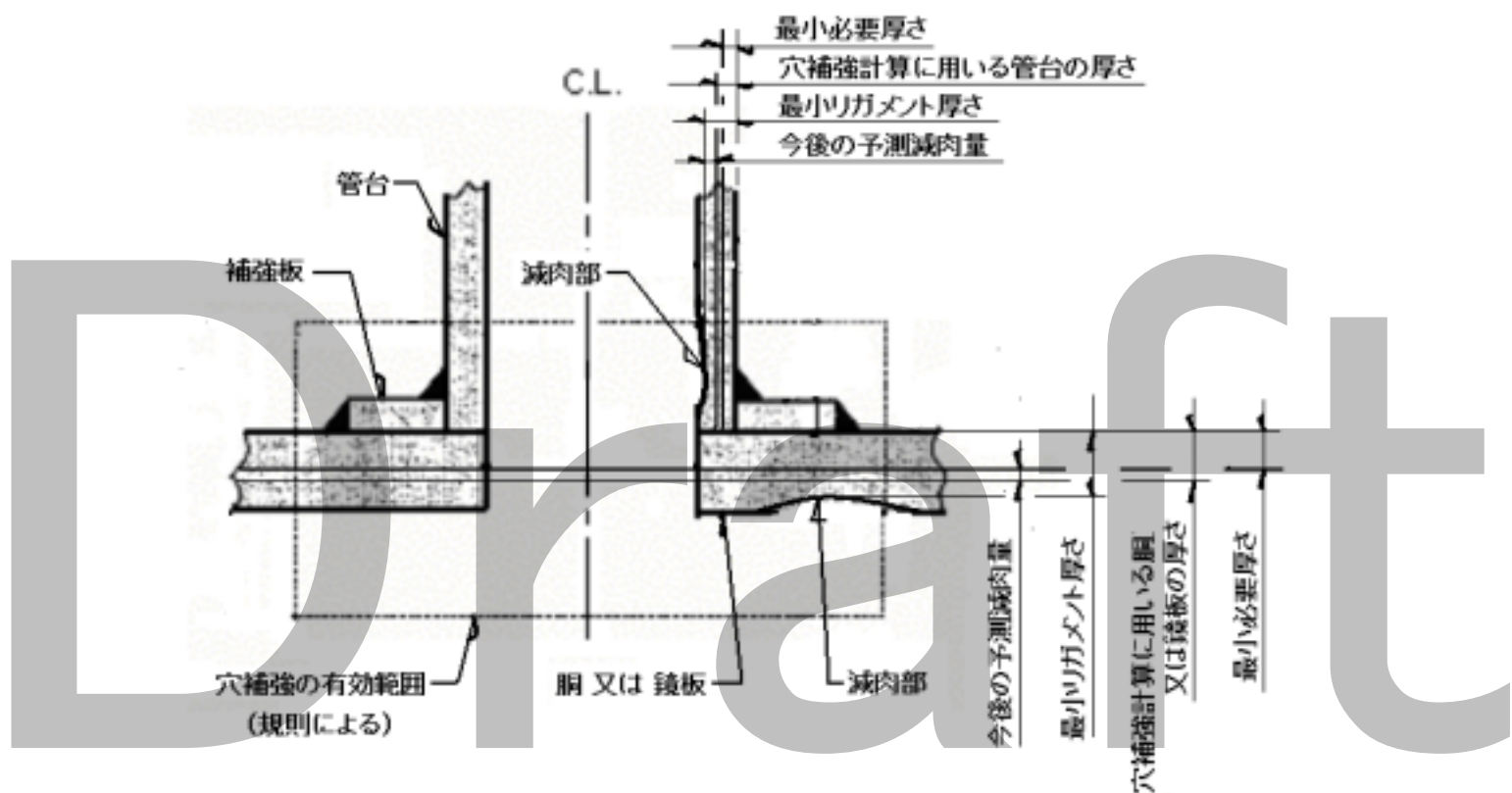
2.3) 円筒胴の板厚厚さ： $(t_{mm})_s - (FCA)_s$

ただし、2.1) より得られるフランジの内径と 2.2) より得られる円筒胴の内径とが異なる場合には、その大なる値をそれぞれの内径に置き換えるものとする。また、この場合においては、円筒胴の板厚厚さは置き換えた内径を用いて求められる厚さとする。

3) フランジ内径、円筒胴の内径及び円筒胴の板厚厚さの求め方の例を**附属書 3 図 4** に示す。

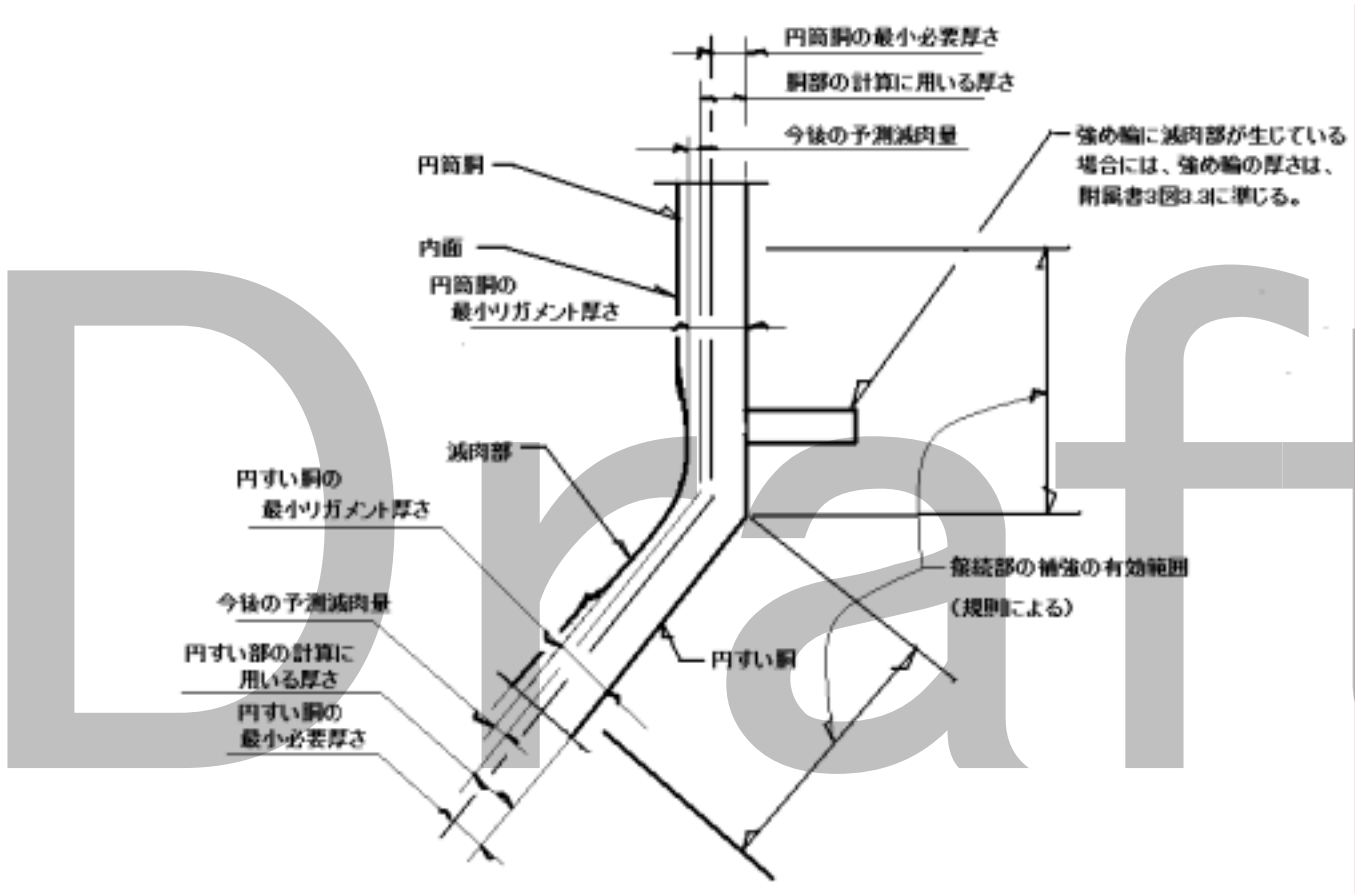
e) 手順 5：フランジの応力計算

手順 4 で定めた寸法を用い、設備の製造時の技術上の基準に定めるフランジ設計の規定に従ってフランジ部の発生応力の評価又はフランジ最小厚さの計算を行い、その要求規定をすべて満足すること。



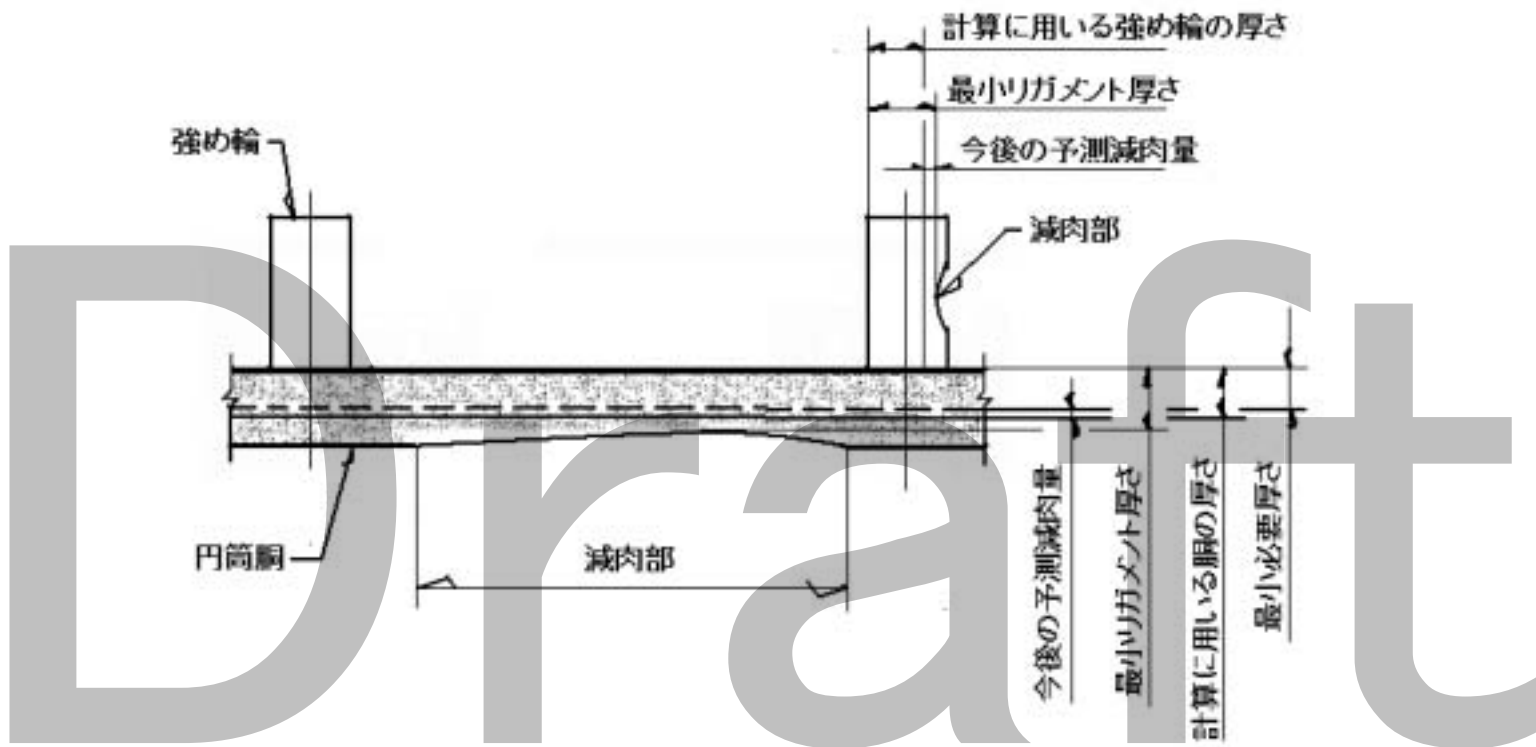
附属書 3 図 1 穴補強計算で用いる胴、管台及び補強板の板厚厚さの求め方の例

案



附属書 3 図 2 円筒胴と円すい胴の接続部の補強計算で用いる円筒胴及び円すい胴の板厚厚さの求め方の例

案



附属書 3 図 3 外圧を受ける胴の強め輪の計算で用いる胴の板厚厚さの求め方の例

案

附属書 4 損傷の種類と特徴（参考）

序文

この附属書は、損傷の種類と特徴について参考のために記載するものであって、規定の一部ではない。

この附属書は、損傷の種類と特徴についての一般的な事項について示したものである。本基準の適用に際して、個別の損傷の評価を行う場合には、以下に掲げる参考資料又はその他の文献、最新の技術動向等を踏まえて、設備の使用環境、経験データ等を考慮して行うこと。は、次の3部から構成される。

a) 個別の損傷についての参考資料

個別の損傷について詳細に示したのものとしては、次の1)～4)に示す図書、資料などがある。

- 1) 腐食防食ハンドブック（腐食防食協会編）
- 2) 防食技術便覧（腐食防食協会編）
- 3) JPI-8R-12-2006 劣化損傷の評価と対応（石油学会規格）
- 4) NACE（National Association of Corrosion Engineers）による各種資料

b) 石油精製装置、石油化学装置又は化学装置に関する参考資料

石油精製装置、石油化学装置又は化学装置に関する使用材料と腐食・損傷の特徴に関して示したのものとしては、次の1)～3)に示す図書、資料などがある。

- 1) JPI-8S-2-2006 設備維持規格（石油学会規格）
- 2) JPI-8S-1-2007 配管維持規格（石油学会規格）
- 3) JPI-8R-11-2006 防食管理（石油学会規格）
- 4) 石油精製装置の材料選定に関する資料(1998)（(社)石油学会）

なお、上記 a)及び b)の参考資料、文献等については最新版が発行された場合は最新版の内容も参照すること。

第1部—損傷の概要

- 損傷の形態
- 損傷の概要

第2部—石油精製装置での使用材料と腐食・損傷の特徴

- 1)—常圧蒸留装置
- 2)—減圧蒸留装置

- 3) 軽質油水素化脱硫装置
- 4) 接触改質装置
- 5) 連続再生式接触改質装置
- 6) 重質油水素化脱硫・水素化分解装置
- 7) 流動接触分解装置
- 8) 水素製造装置

第3部 石油化学及び化学装置での使用材料と腐食・損傷の特徴

- 1) エチレン製造装置

なお、第1部 損傷の概要の 損傷の形態及び 損傷の概要は、石油精製及び石油化学の装置に経験的に生じる損傷に関して、一般的な事項を取りまとめたものである。個別の損傷について詳細に示したものとしては、次の a)~d)に示す図書、資料などがある。

- a) 腐食防食ハンドブック (腐食防食協会編)
- b) 防食技術便覧 (腐食防食協会編)
- c) JPI-8R-12-2003 劣化損傷の評価と対応 (石油学会規格)
- d) NACE (National Association of Corrosion Engineers) による各種資料

案

第1部 損傷の概要

I. 損傷の形態

1 全面腐食

金属表面の全面に渡ってほとんど同一の速度で侵食が進む形態の腐食をいう。
全面腐食の典型例は、海水中での普通鋼にみられる。

2 局部腐食

全面腐食は、金属表面の全面に渡ってほとんど同一の速度で侵食が進む腐食であるのに対して、局部腐食は金属のある一部分のみ選択的に腐食が進む現象である。

3 孔食

孔食はステンレス鋼やアルミニウム、チタン、ジルコニウム、ニッケルとこれらの合金のように不働態性の金属材料に生じる。これら不働態化した金属表面にハロゲンイオン (Cl^- , Br^- , I^-) が吸着すると、この部分の不働態皮膜が壊れ、凹み状の腐食形態をとる。腐食形態から分かるように孔食内部では物質移動が困難となるため、腐食反応によって沖合いのハロゲンイオンを取り込み、金属ハロゲン化物を生成する。更に加水分解によって内部の pH が低下するため、孔食は成長し続けるようになる。

4 すき間腐食

自由表面で起こる孔食に対し、金属同士あるいは金属と非金属の間に存在するすき間で生ずる局部腐食をすき間腐食と呼ぶ。すき間内部の溶液は外部の溶液と容易に交換されないため通気差電池その他の濃淡電池が生成し、あるいはすき間内部で腐食性の腐食生成物が蓄積・濃縮することにより、すき間内部の pH が下がり腐食が進行する。実装置ではガスケットとの継手部、溶接不良によって形成された隙間、デポジット、酸化スケール、海洋生物の付着などが問題となる。

II. 損傷の概要

101 酸露点腐食

気体状の腐食性物質が温度の低下によって露点に達し、腐食性液体となって腐食を起こす現象である。代表的な例として、硫酸露点腐食がある。この腐食は重油などの燃料中に含まれる S 分が燃焼して SO_2 になり、その一部はさらに酸化して SO_3 となる。これに湿分が存在すると、ある温度以下で露点に達し、硫酸となってボイラや煙突などを腐食させる。

102 エロージョン

エロージョンとは、局部的、機械的、衝撃的な外力を受けて材料表面が徐々に脱離する現象をいい、化学的要因による脱離は含めない。そのような外力はキャビテーション、液滴あるいは固体粒子の衝突の際に発生する。

キャビテーション・エロージョンとは、キャビテーション（液中における蒸気またはガスを含む気泡の発生・消滅現象）が発生する、船舶のプロペラ、ポンプあるいは水車などの高速流体を取り扱う機器に見られる。金属材料にキャビテーション・エロージョンが発生する場合には、ある潜伏期間を過ぎた後に材料の小片が脱離し始め損傷が顕在化する。このような潜伏期間は、セラミックスや鋳鉄のような脆性材料には存在しない。

液滴衝突エロージョンは、液滴が高速で材料表面に衝突して発生する。雨中を飛行する飛行機や低圧の蒸気で駆動される蒸気タービンの回転羽根に見られる。

固体粒子衝突エロージョンは、スラリーを取り扱うポンプや配管、粉体の衝突する配管曲り部やサイクロンなどに生じる。損傷機構には、粒子の衝突角度、粒子の形状と大きさ、粒子の衝突速度、材料の硬さ等が複雑に影響する。

103-1—流れ加速腐食（エロージョン・コロージョン及び流速差腐食）

エロージョン・コロージョンは、流れ加速型腐食（Flow Accelerated Corrosion）とも呼ばれ、腐食性流体の流動により電気化学的腐食が加速される現象と、エロージョンとコロージョンが同時に発生する現象をさす。前者は、流動腐食と流速差腐食に分けられる。

流動腐食は、流動する環境液中で、静止液中に比べて全面腐食が加速されるエロージョン・コロージョン現象のことである。この全面腐食の加速は、流動により材料表面の境界層厚さが小さくなり、腐食のカソード反応を担っている酸素供給速度が大きくなることに起因する。また、高 TAN 値（0.5 以上）の原油を扱う場合、ナフテン酸を中心とする有機酸による厳しいエロージョン・コロージョンが生じる場合がある。

103-2—流速差腐食

流速差腐食はマクロセル腐食^{注)}とも呼ばれ、同一金属表面で場所により流体流速が異なる場合、流速の小さい場所がアノードそして大きい場所がカソードとなるマクロセルが形成され、流速の小さい場所に著しい減肉が発生するエロージョン・コロージョン現象である。高温水のオリフィ

スの下流部や海水輸送鑄鉄製遠心ポンプの低流速部分などに発生する。

エロージョンとコロージョンが同時に発生する系は、キャビテーション・エロージョン、液滴衝突エロージョンあるいは固体粒子衝突エロージョンが腐食性の流体（液体、気体を問わない）中で発生する際に見られる。

注)同一金属表面で場所により流体の流速が異なる場合や環境の差異などにより、電位差が生じ、巨大電池(マクロセル)が形成され発生する腐食をいう。前者は流速の小さい場所がアノード、大きい場所がカソードとなり、流速の小さい場所に著しい減肉が発生するエロージョン・コロージョンなどの現象がある。一方後者は、例えば鉄筋を有するコンクリート構造物を貫通して敷設される埋設鋼管において、主壤中の鋼管部がアノード、コンクリート構造物中の鋼管部がカソードとなり、主壤中の鋼管部が腐食発生する現象がある。

104 脱成分腐食（脱亜鉛、脱アルミニウム、脱ニッケル、脱炭素）

脱亜鉛腐食は、Cu-Zn 合金で亜鉛成分のみが選択的に溶出し、多孔質でもろい銅の相のみが残る現象である。15%以上の亜鉛を含む合金で発生する。環境としては、汚染された海水、淡水などで起こり温度が高いほど促進される。

脱アルミニウム腐食は Al を 12～17%含む Cu-Al 合金に海水中などの腐食性環境において発生し、また脱ニッケル腐食は Ni を 10～30%含む Cu-Ni 合金（いわゆるキュプロニッケル）を高温の海水中などで使用すると発生する。脱ニッケル腐食は、熱点腐食とも呼ばれる。

201 異種金属接触腐食

二つの異なった金属が電解質中で電氣的に接触しているとき、それぞれの金属の腐食電位の違いのために、より卑な金属の腐食が促進され、より貴な金属の腐食が抑制される現象をいう。一般的に海水は電導性が良好なため、特にこの腐食を受け易い。

202 酸素濃淡電池腐食

溶存酸素を含む水中において鉄は全面腐食形態をとって減肉する。しかし、鉄表面に異物が付着したり構造上のすき間があったりすると、その内部で激しい減肉が発生することがある。これが、酸素濃淡電池腐食である。この原因は、付着物下やすき間部では酸素の供給が不十分となるため、そこではアノード反応のみ進行し、一方外表面では十分な酸素が存在することよりカソード反応が進行しやすいことによる。

この腐食は、ステンレス鋼やニッケルなどのいわゆる不動態金属が、塩化物を含む環境に曝された際に生じる孔食やすき間腐食発生のきっかけともなる。

203 無機酸による腐食

金属の水溶液中における腐食は電位と水素イオン濃度に大きく支配される。水素イオン濃度の上昇は水素イオンの放電によるカソード反応速度を増大させ、更に腐食生成物や表面皮膜の溶解度を上昇させることにより腐食速度を増大させる。従って水素イオンを多量に含む酸水溶液は強い腐食性物質と言える。

一方、酸のアニオン側に着目すると物質により酸化性を有するものもある。酸化剤は自身の還

元反応によるカソード反応増大に起因して腐食を促進させる場合や、金属の不働態化に寄与する場合もある。

203-1 硫酸腐食

硫酸の金属材料に対する腐食性は濃度に大きく依存する。例えば炭素鋼の場合、常温では、約95%以上の濃硫酸にはよく耐えるが、これ以下の濃度では腐食速度が増大する。

一方、SUS304の場合、耐食性を有する濃度は約0.5%以下及び約95%以上となり、これ以外の濃度域では耐食性を有さない

203-2 塩酸腐食

塩酸は金属に対し最も腐食性の強い酸の一つで、実用金属材料による取り扱いが困難なことが多い。

203-3 硝酸腐食

硝酸は酸化性を有する強酸であり、全濃度にわたって酸化性を示す。従って不働態化型の金属に極めて好都合な性質であり、耐硝酸性材料のほとんど全てが不働態型金属である。しかし不働態金属であっても硝酸濃度に伴って酸化力は変化し、低濃度では酸の強度と比較して酸化力が弱いので、不働態化能の小さい金属ではその腐食挙動が濃度によって複雑に変化する。

例えば鉄の腐食速度に対する硝酸濃度の影響は、硝酸濃度の増大に伴って腐食速度は増大して30%付近で最大を示し、それ以上では腐食速度は減少し、50%以上では不働態化が達成されて腐食速度は非常に小さくなる。

一方、ステンレス鋼では共沸濃度（68%）以下の濃度であれば安定な不働態皮膜の形成により工業的にはSUS304L鋼が使用できるが、更に硝酸濃度や温度が上がると系の酸化力が増大して過不働態腐食を生じて腐食速度は増大する。

203-4 炭酸腐食

湿潤炭酸ガスを含む油井、ガス井では炭酸ガス腐食（Sweet Gas Corrosion）と呼ばれる、激しい腐食現象が知られている。炭酸腐食の特徴は、（1）弱酸性環境に関わらず、比較的大きな腐食速度を持ち（同一pHの強酸と比較した場合、CO₂含有水による腐食の方が激しいことも報告されている。）かつCO₂分圧依存性が高いこと、（2）腐食形態が虫喰い状（ringworm corrosion）あるいは台地状（mesa corrosion）になり、腐食で侵食される部分と腐食生成物によって保護される部分の対比が際立っていることである。

水素製造のリフォーマプラントの環境においては、CO/CO₂を含むガスが凝縮するラインに炭酸腐食が生じる恐れがあり、ステンレス鋼を採用するなど適切な対策が必要となる。

204 有機酸による腐食

ギ酸は有機酸の中で最も強い酸の一つで、腐食性も最強のものに属する。鉄及びアルミニウム

では常温においても激しく腐食される。ステンレス鋼に対する腐食性は常温ではそれほど大きくないが、高温になると激しい腐食性を示し、中間濃度域でその腐食性は極大を示す。

酢酸の腐食性は低温では小さく、多くのステンレス鋼やアルミニウムなどが良好な耐食性を示す。しかし温度の上昇と共に腐食性が急激に増大し、その傾向は濃度が大きくなるほど著しくなる。また酢酸の腐食性は共存する不純物により大きく変化し、ステンレス鋼では塩化物イオンが共存する時、孔食を生じやすくなる。

205 アルカリ腐食

一般的にアルカリ水溶液は、酸に比べて金属に対する腐食性が小さい。これは金属表面に生成する水酸化物あるいは酸化物がアルカリには溶け難いこと等による。

常温での炭素鋼の腐食に及ぼすアルカリ側の pH 影響としては、中性から pH10 付近までは、酸素消費型となり、比較的大きな全面腐食性を示すが、pH10 以上で不動態化が起こり、その後 48%NaOH 濃度まで使用可能な領域となる。ただし、高温では全面腐食性が増加すると共に、苛性割れ領域が存在するため注意を要する。炭素鋼製のボイラ蒸発管が水処理の不備や過負荷等の関係で、腐食や割れを起こすことがあるが、これは高温のアルカリ濃縮に起因した問題である。

ステンレス鋼は炭素鋼に比べ耐食性に優れているが、より高温、高濃度域では腐食及び苛性割れ領域に入るため使用に耐えない。ニッケル及びその合金の耐食性が最も優れており、使用温度及び濃度に見合った材料を使用する必要がある。

アンモニアは水に溶解して弱アルカリ性を示すが、その腐食性は銅への作用など特殊な例を除けば大きくはない。ただし応力腐食割れには注意を要する。

206 アミン腐食

モノエタノールアミン (MEA)、ジエタノールアミン (DEA) あるいはメチルジエタノールアミン (MDEA) は、石油精製プロセス、石化プロセスの酸性ガス (硫化水素ガスや炭酸ガス) の吸収液として用いられる。主として炭素鋼に腐食が発生し、その形態は全面腐食が一般的であるが、非常に大きい速度の局部腐食が発生することもある。

アミン腐食には以下の因子が影響をおよぼす。

a) 溶液負荷

溶液中の酸性ガスの量 (負荷) が大きいほど腐食は増加する。

b) 流速

流速が大きくなると保護皮膜となっている硫化鉄皮膜の破壊と再生が繰り返して発生し腐食が増加する。ただし、混在する不純物濃度や運転条件の影響もあり、単純な系の平均流速のみでの腐食速度の定量的な想定は難しい。

c) 不純物

アミン溶液中に混在する不純物は、一般的に腐食を加速する。不純物としては系外由来のもの (Cl⁻、CN⁻、COS、CS₂、CO₂、O₂、NH₃、有機酸等)、アミンと CO₂ との反応により生成するアミンの劣化生成物 (オキサゾリドン等) 及び通常の再生段階では分解しない熱安定アミン塩 (チオ硫酸アミン、チオシアン酸アミン等) がある。

207 ハロゲン化物腐食

ハロゲン化物溶液におけるステンレス鋼の腐食形態は塩化物溶液に代表されるように**局部腐食**（孔食、隙間腐食、応力腐食割れ）となることが多い（**応力腐食割れについては、300 ハロゲン化物応力腐食割れを併せて参照。**）。しかし、ハロゲンイオン（F⁻、Cl⁻、Br⁻、I⁻）の種類の違いによりその腐食挙動は異なり、ハロゲンイオンのイオン半径、電子親和力、金属表面への吸着順位などの違いが腐食性の違いの原因として推定されている。

孔食についてはCl⁻以外でステンレス鋼に孔食を発生させるハロゲンイオン種としてBr⁻、I⁻があり、一方F⁻は孔食を発生させず全面腐食を促進する傾向にある。また孔食を発生させるハロゲンイオン種で中性からアルカリ性の溶液において比較した場合、I環境はCl⁻、Br⁻環境と比較して孔食電位は高く、孔食が起こりにくい傾向にある。

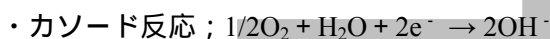
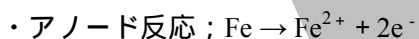
応力腐食割れについては何れのハロゲンイオン種においても応力腐食割れを起こす。F環境における応力腐食割れ事例としては、湿性H₂（酸性）環境においてNi基合金のモネル400、NCF600、NCF750が粒内及び粒界応力腐食割れを起こした事例、低濃度の中性NaF溶液にて鋭敏化熱処理したSUS304鋼が粒界応力腐食割れを起こす事例が挙げられる。

208 湿潤塩素、次亜塩素酸腐食

湿潤塩素や次亜塩素酸は非常に酸化性が強いいため、通常炭素鋼やステンレス鋼は使用できない。金属では、チタンやNi-Cr-Mo合金等が用いられる。

209 冷却水、工業用水腐食

各種工業で冷却水や保温水として水が使われている。特に清浄な水が必要な設備では純水が使われるが、一般には河川や湖水・井戸などの自然水が使われる。これらの水を用いた場合に生じる主な障害は、腐食とファウリング（汚れ）である。わが国の水は一般にCa²⁺イオンやHCO₃⁻イオン等の含有量が少ない軟水であり、このような水をそのまま用いると、水中に含まれる溶存酸素の影響により炭素鋼や低合金鋼の腐食は次式の通り、酸素消費型（腐食形態は全面腐食的）となり、設備を腐食させる。



一方、冷却塔を用いた冷却システムでは冷却水は濃縮され、水温も高くなるのでCaCO₃のスケールを生成する。腐食生成物や系内に持ち込まれた塵埃、微細な土砂等が壁面に付着したり、流速の遅い所でスラッジとなり堆積する。微生物も粘着性物質（スライム）を出して壁面に付着する。スケールやスラッジ、スライム等による系内の汚れをファウリングと呼んでいる。ファウリングは、**+**伝熱障害、**+**圧力損失、**+**二次的腐食、腐食抑制剤の作用の妨害などを引き起こす。これらの障害を防止するために、腐食抑制剤やスケール防止剤、殺菌剤等を用いた種々の水処理がなされている。ここでは、腐食抑制剤について述べる。

腐食抑制剤は次の三つの観点から分類することが出来る。まず、腐食抑制機構の観点から、腐食反応のアノード過程及びカソード過程の何れの過程の抑制程度が大きいかによってアノード抑

制型、カソード抑制型及び混合抑制型に分類される。アノード抑制型のうち、酸化力の強い亜硝酸塩やクロム酸塩は金属を不動態化して腐食を抑制するので、特に不動態化剤と呼ばれている。一方、化学成分の観点から、無機抑制剤と有機抑制剤に大別され、さらに一般に用いられている化合物の分類法に従って分類される。また、腐食抑制剤によって形成される皮膜に着目して、酸化皮膜型、沈殿皮膜型、吸着皮膜型にも分類される。**各種防食皮膜の模式図と対応する腐食抑制剤を下表に示す。**

一方、ステンレス鋼は水中では表面に不動態皮膜が形成されるため全面腐食を起こすことはなく、高流速域でも極めて安定である。しかし、塩化物が存在し、これが濃縮するような場合には、応力腐食割れや孔食、隙間腐食等を起こすことがあるため注意を要する。銅及び銅合金も中性の水中では良好な耐食性を示すが、pHが7を切ると腐食速度が増大する。また、高流速下ではエロージョン・コロージョンを生じるため流速制限をする必要がある。

210 海水腐食

海水の性状の特徴として、

- (1) 溶存酸素を含む中性水溶液である。
- (2) 塩化物イオンなどを多量に含む。
- (3) 高い塩濃度のため電気伝導度が高い

ことなどが挙げられる。

鋼や鋳鉄の腐食は溶存酸素の還元反応が主体となるため、その腐食速度は、溶存酸素が金属表面に拡散・到達する速さに支配される。従って、流速が増加すれば、材料表面への溶存酸素の拡散が促進されるため、腐食速度は増大する。銅系材料は表面に CuO_2 、 CuO などの腐食生成物を形成し、これらが保護皮膜として作用するため、低流速下では良好な耐食性を示す。しかし、この皮膜は比較的低い流速で破壊されるため、流速の上限数 m/s 以内に制限する必要がある。

塩化物イオンはステンレス鋼などの不動態金属に種々の形態の局部腐食をもたらす。ステンレス鋼及び一部のニッケル基合金は孔食及び隙間腐食を起こし易い。チタンも高温の海水中では隙間腐食を発生する。また、高温の海水中ではステンレス鋼は応力腐食割れを起こす危険性があるため注意を要する。

211 湿潤硫化物腐食

石油精製の分解工程等で硫黄や硫化水素を含む石油を処理した場合、処理後の流体に水と硫化物が混在する場合がある。

pHが低い場合は、炭素鋼や低合金鋼に割れや腐食を起こす。材料に応力が負荷されていたり残留応力が存在したりする条件下では、応力腐食割れを起こすが、割れが発生する条件に無い場合は、激しい全面腐食や局部腐食を起こす場合がある。

中性またはアルカリ性の場合は、炭素鋼や低合金鋼の表面に硫化鉄被膜を形成して保護するため、腐食は抑制される。しかし、pH6.6~8.8の範囲では、硫化鉄被膜はポーラスとなるため、防食効果は少ない。またシアンが存在すると、硫化鉄被膜を溶解除去するので、腐食を加速する。従って、シアンが含まれている場合にはその対策が必要である。

注) 硫化物腐食環境での材料については、NACE MR0175/ISO15156 (Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production) を参考にするとよい。

212 水硫化アンモニウム腐食

水素化脱硫装置の反応塔生成油中には水素化脱硫、脱窒素反応などにより生成した多量の硫化水素 (H₂S)、アンモニア (NH₃)、塩化水素 (HCl) が存在するが、冷却の途中にこれらが水硫化アンモニウム (NH₄HS)、塩化アンモニウム (NH₄Cl) として析出する。

脱硫装置、水素化分解装置何れにも共通して反応塔は高温高压の水素雰囲気さらされるので、その材料は高温強度と耐水素性から Cr-Mo 鋼が使用されており、内面は耐高温硫化腐食性を考慮して SUS347 ステンレス鋼オーバーレイが施工され使用されている。一方、エフルエントクーラー等の低温部では腐食性が緩やかと考えられて炭素鋼が使用されているが、流体の激突部、乱流部等の流動の影響を強く受けた部位で NH₄HS、NH₄Cl に起因したと思われる異常腐食が経験されている。

【腐食防止対策】

- 1) K_p 値 { (mol% H₂S) × (mol% NH₃) }^{注)} により推定される流体の腐食性に対応した適性流速の適用。

注) “Survey of Corrosion in Hydrocracker Effluent Air Coolers”, R.L. Piehl, Material protection, Jan.1976

- 2) 水注入によるドレン水中の NH₄HS 濃度管理 (NH₄HS 濃度 2 wt% 以下の場合には腐食が生じないといわれ、水注入による希釈の目安とされている。ただし、近年流速 3.5 m/s 以下では 10 wt% 以下、流速 3.5 m/s を超える場合には 4 wt% 以下でもよいといわれている。)
- 3) 注入水質管理 (脱気が望ましい)
- 4) 適正流速を維持する為の配管構造
- 5) スケール堆積防止

213 HCl-H₂S-H₂O による腐食

石油精製の主蒸留塔の塔頂部で発生する湿性腐食である。原油中に含まれる塩類のうち塩化マグネシウムや塩化カルシウムは加水分解により塩化水素を発生させる。これと原油中に含まれる硫化水素及びスチームの凝縮水とで pH が低下し激しい腐食が発生する。

対策としては、アンモニアにより中和処理、アミン系防食剤、ソーダの注入などが行われる。この際、塔内で生成する中和生成塩を系外に取り出すことが難しいため、チューブの閉塞や二次的な腐食を引き起こす可能性も有り、中和剤の選定には注意を要する。管理値としては、オーバーヘッドレシーバー凝縮水で管理され、pH は 6 ± 0.5 程度、塩化物イオンは 20ppm 以下が望ましいとされている。

装置材料には、チタン、フェライト系ステンレス鋼あるいはモネルなどが用いられる。

214 迷走電流腐食、土壌腐食

地中の金属体は、その規模、埋設深度にもよるが、地層の不均一性のほか異種金属・隣接施設などの影響を受けるので、水中に比べその腐食は複雑な様相を呈する。地中における自然腐食は土壌中に含まれる水分に起因するもので、本質的には水中の腐食と同じ電気化学的機構に支配される。従って、その腐食性は金属側因子による影響を受けるが、単一金属の場合、腐食性は環境因子である土質に多く支配される。土質としては、土壌の組成、含有ガス、バクテリアなどの化学的因子のほか、土壌の粒径分布、通気性、含水量などの物理的因子が重要である。特に土壌の抵抗率と復極性とが腐食速度を決定することが多い。土壌の電導性は含水量と溶解塩類により、また復極性は土壌の通気性及び微生物作用により左右される。

土壌腐食は鋼や鋳鉄などの埋設配管などで問題になることがあるが、この防食法として、流電陽極法、外部電源法などの電気防食と塗覆装（タールエポキシ塗装やポリエチレン被覆など）による防食を併用するケースが一般的である。また、電車などの迷走電流による腐食もあるので、対応策について考慮する必要がある。

215 液体金属腐食

溶融金属による材料の損傷主な腐食過程は、単純な溶解、質量移行、不純物の反応、液体金属脆化、液体金属による合金化、液体金属元素の粒界への侵入に分類される。ここで、単純な溶解及び質量移行が減肉に該当する。腐食生成物層の形成、合金化、粒内侵食、不純物の移動、及び熱勾配もしくは温度勾配に起因する質量移行現象などである。

溶融金属中への合金金属成分の溶解度が大きい場合に溶解が進むのは当然であるが、溶解度が ppm オーダーである場合でも溶解が進行する場合がある。溶融金属中に溶解した金属が飽和すれば溶解は停止する。が、しかし、同一系内に温度勾配があると高温部と低温部で溶解度に差があるために、生じる。その場合一般に高温部で溶解が進み、低温部では析出が生じて、その結果溶解は継続し、する。これが温度差質量移行現象により腐食が生じるである。このような質量移行現象は温度が一定の場合でも異種金属が使用されていると共通成分元素の活量差に起因して質量移行（等温質量移行現象）が生じる。これが等温質量移行現象である。

216 微生物腐食

微生物腐食は、バクテリア、菌類及び藻類が直接的あるいは間接的に関与して、腐食が加速される現象である。直接的関与とは、微生物がアノード反応やカソード反応を促進することを意味し、間接的関与とは、微生物の代謝物が腐食を加速することを意味する。

微生物には大きく分けて、嫌気性菌（代表的なものは硫化水素雰囲気中のバクテリア）と好気性菌（一般の細菌）があるが、いずれの場合にも微生物腐食を起こす可能性がある。

微生物腐食は、炭素鋼、低合金鋼、各種ステンレス鋼、アルミニウム、銅及びニッケル基合金等非常に多くの鋼種で発生する。

微生物腐食が発生するには水が必要であり、それが滞留した低流速の状態が微生物成長を加速させ腐食を発生させる。環境は概ね次のような所である。

- a) 底水の残った熱交換器

- b) 水の滞留した配管
- c) 未殺菌の井戸水等で水圧試験を行いその水が残存したタンク
- d) 消火システム（スプリンクラー）

対策としては、水を使用する系の殺菌、水の滞留部や低流速部を無くす設計、水圧試験後の完全脱水、設備の内面コーティングなどがある。

217 外面腐食

保温や保冷材下で起こる炭素鋼の外面腐食（Corrosion Under Insulation：CUI）は、その検出が非常に困難である点で設備管理上非常に大きな問題となっている。

炭素鋼の CUI の支配因子は以下のような事項が挙げられる。

- a) 運転温度
材料表面に水分が結露し得る温度（例えば -10 ～ 120 程度）で発生しやすい。
- b) 雰囲気の要因
沿岸部やクーリングタワーからの飛沫の影響を受ける場合には促進される。一方、乾燥条件では緩和される。
- c) 塗装の品質
外面の塗装の有無、また塗装があったとしてもその品質（例えば、下地処理の良否や重塗装の有無）で耐食性は大きく左右される。
- d) 断熱材の状態良否
断熱材の外装が不十分であったり、シールに不備があったりすると水分の浸入を許す。
- e) 配管サポート
配管が梁の上に直接乗ってサポートされていたりすると、CUI は加速しやすい。

218 高温酸化

金属が高温で酸化性の気体や熔融液体に触れて酸化される現象で、一般に高温の酸素または空気雰囲気下で金属が酸化される現象を指す場合が多い。高温酸化の範囲は明確ではないが、一般に酸化速度が放物線則に従う温度範囲（約 300 以上）からの酸化現象をいう。酸化反応を大別すると界面反応と拡散反応とに分類される。前者は金属原子が金属イオンと電子に分離して、酸化物皮膜内を移動する反応（ $Me \rightarrow Me^+ + e^-$ ）で、一方、酸化物と酸素ガスとの界面反応は金属表面に付着した酸素ガスが酸素イオンとなって、酸化物皮膜内を移動する反応（ $O + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ ）となる。後者は拡散する物質の大小が問題で、大きいものに比べ小さいものの方が拡散しやすい。

219 高温ハロゲン化腐食

ポリビニルモノマー分解炉、廃却炉、都市ゴミ焼却炉などでしばしば遭遇する高温腐食である。 Cl_2 、 HCl などのハロゲンガスは腐食性が強く、たいいていの金属、合金は激しく腐食される。腐食生成物である金属ハロゲン化物、例えば $FeCl_3$ 、 $CrCl_3$ は融点及び沸点が低く、そのうえ蒸気圧が高く揮発性に富み容易に昇華するため、遷移的存在で腐食を著しく促進させる。金属塩化物の融点、沸点を次表に示す。

附属書 4 表 219-1 塩化物の融点及び沸点

材 質	M.P. (°C)	B.P. (°C)
FeCl ₂	677	1012
FeCl ₃	308	315
CrCl ₂	815	1300
CrCl ₃	昇華	945
NiCl ₂	963	915
CoCl ₂	740	1053
MoCl ₄	317	410

<引用文献> 腐食防食ハンドブック 腐食防食協会編(丸善) : p.147

もう一つの特徴は、Crのような活性合金元素が容易にハロゲン化腐食を受けやすいことである。酸素と共存する場合は、更に低融点で揮発性の高いオキシ塩化物 (CrO₂Cl など) を生成する。また KCl や NaCl が共存しているとより蒸気圧の高い錯化合物 (例えば K₃CrCl₆、NaFeCl₄) を生成して腐食を促進する。HCl ガスも Cl₂ ガスと同様な挙動を示す。

220 水蒸気酸化

水蒸気中での鋼の高温酸化は事業用ボイラの過熱器管、再熱器管、主蒸気管等で見られ、水蒸気酸化として知られる。鋼種により酸化量に差はあるが、水蒸気酸化速度は大気酸化速度の 10 ~ 20 倍の速さである。その理由として LeMay は水蒸気酸化の場合生成する Cr₂O₃ 皮膜が水に溶解して運び去られる為に酸化が激しく進行すると考えた。

水蒸気酸化で形成されるスケールは 2 層構造になっており、外層側がヘマタイトとマグネタイトで、内層側が Fe、Cr、Ni を含むスピネル型酸化物である。ステンレス鋼が水蒸気と接すると表面に Cr 酸化物が生成し、その欠陥部を鉄が拡散して酸化鉄が生成する。一方酸素は内部に拡散して内層を形成すると考えられている。

水蒸気酸化に対する結晶粒度依存性は大きく、結晶粒度が小さい程酸化減量は小さくなっている。また合金元素については Cr の影響が大きく、Cr 含有量の増加に伴い酸化減量は減少し、Cr 含有量が 25% 以上になれば結晶粒度の影響を無視しうる程度になる。

水蒸気酸化防止対策としては、1) 材料選定、2) 表面仕上げ、3) 結晶粒度調整等が挙げられる。

221 高温硫化

S 蒸気や H₂S 等による硫化現象が知られている。一般的に硫化は酸化に比べて作用が著しいと言われている。その理由は硫化物が酸化物に比べて、1) 安定度が小さく、2) 容積比が大き過ぎ、3) 格子欠陥が多く、4) 融点・沸点が低く蒸気圧が高く、5) 金属あるいは酸化物との共晶点が低く (Ni-NiS 645 、 FeO-FeS 935 、 Fe-FeS 985)、6) 低原子価硫化物を作る等の性質がある、

からとされている。

一般的に耐酸化性の大きい耐熱鋼（高 Cr-Al 系等）は耐硫化性に優れているが、Ni や高 Ni 合金は融点（787）の低い NiS を生成するため硫化に耐えない。

222 溶融塩腐食、バナジウムアタック

溶融塩はイオン性融体であり、そのイオン自体が腐食反応の酸化剤となる場合と雰囲気中からの酸素等が酸化剤となる場合がある。溶融塩腐食は、これら酸化剤の作用で通常のカス腐食と比較すると大きな腐食反応を示し、加速酸化する現象である。

重油を燃焼するボイラでは、重油中に不純物として含まれる V、Na、S が低融点油灰の主成分となって高温部に付着堆積し、構成材料を加速酸化させる現象がある。特に、油灰中の V が顕著な腐食作用を及ぼす現象がバナジウムアタックであり、溶融塩腐食の一種である。

バナジウムアタック環境の腐食性を評価するには、対象部位の付着灰の化学成分に関する知見が必要である。ボイラの過熱器、再熱器などの高温伝熱部に付着した燃焼灰の融点を付着灰の化学成分との関係で整理した結果が報告されており、その報告では付着灰の溶融開始温度は付着灰の $(Na + S) / V$ （原子比）で整理でき、付着灰中に V が多いほど、Na、S が少ないほど灰の溶融開始温度は低くなり、ボイラ管の腐食が懸念されることを示している。

バナジウムアタック防止策として燃料に Mg 化合物などを添加し、付着灰の融点を上昇させる防食法の採用や、優れた耐食性を示す 50Cr-50Ni クラスの合金の使用などが挙げられるが、本材料は加工性に乏しい問題点がある。

223 浸炭、メタルダスティング

浸炭は、炭素鋼又は合金鋼が高温の CO/CO₂ 雰囲気又は炭化水素雰囲気に曝されたとき、次のメカニズムで生じ、引張強度、延性、靱性の低下が生じる。

- a) 熱解離による炭素の生成、
- b) 金属表面の酸化皮膜の局部的破壊、
- c) 酸化皮膜破壊部より金属中への炭素の侵入・拡散、M₂₃C₆、M₇C₃ などの炭化物の形成。

一般に、高温ほど浸炭が促進されるが、雰囲気ガスの種類によって影響は異なる。CO ガスの場合は、CO が高温ほど安定となって炭素が生じにくくなることから 700 付近が最も浸炭速度が大きくなる。メタンなどの炭化水素の場合は温度が高くなるほど不安定となって炭素が生じやすくなることから、高温ほど浸炭が促進される。

下附属書 4 図 223-1 及び同図 223-2 図は、流動接触分解装置の内部部材（650～700 で約 16 年間使用された 2.25Cr-Mo 鋼）の浸炭事例であり、板厚方向の炭素量の変化と硬度の変化、及び衝撃吸収エネルギー値の試験温度による変化を示した。

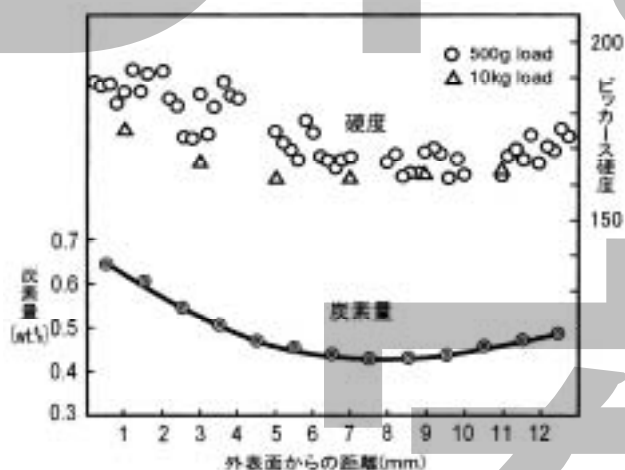
浸炭に対する主な対応を以下に示す。

- a) Cr、Ni、Si などの元素が耐浸炭性の改善に有効であり、特に高 Si 系 HK40 や HP 材が開発、使用されて以降、浸炭損傷が激減している。また、内表面の平滑仕上げが浸炭防止に有効であることが知られておりこれらの対応が望ましい。
- b) 硫黄分（S）の添加は浸炭防止に有効である。これは、S が金属表面に吸着し、炭素析

出、浸炭速度を遅らせるためと説明されている。

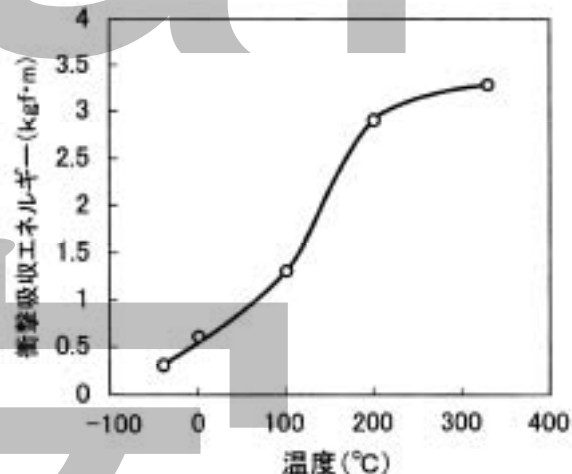
- c) 局部加熱が浸炭に影響することが知られており、コーキング防止、周期的なデコーキングなど運転管理面からの対応が望ましい。
- d) 浸炭は、まず鋼材表面から発生し、徐々に板厚方向に進展する。従って、浸炭が発生したからといって直ちにそれが問題となることはない。浸炭層の厚さを除いた健全層の厚さが、設備の強度上の必要厚さ以上に確保されていれば問題はなく、浸炭層の厚さを計測し、それから求められる健全層厚さの経時変化を直線回帰などを行い、余寿命を予測するのが一般的である。

メタルダスティングは、浸炭部がグラファイト、金属、炭化物、酸化物などの粉体となって離脱する現象である。この現象は、酸化物保護皮膜が不安定な 700 以下の環境で観察されることが多い。石油精製装置では、例えば、連続再生式接触改質装置における加熱炉管（2.25Cr-1Mo 鋼及び 9Cr-1Mo 鋼）のメタルダスティング事例があり、2.25Cr-1Mo 鋼の場合、625 くらいからメタルダスティングが起きはじめ、650 で最大の侵食度を示し、9Cr-1Mo 鋼の場合、650 以上になると浸炭が激しくなると報告されている。



附属書 4 図 223-1

浸炭部材の炭素量と硬度の変化



附属書 4 図 223-2

浸炭部材の常温及び高温における衝撃試験結果

<引用文献> 石油学会規格 劣化損傷の評価と対応 JPI-8R-12-2003

224 窒化

高温のアンモニアガスなどの活性な窒素化合物は、350 程度になると金属表面で金属の触媒作用により N、H などに解離する。窒化は、その解離した N 原子が金属内部へ侵入し、材料が硬化、脆化する現象である。窒化の過程は浸炭と同じく、次のメカニズムで生じると考えられる。a) 金属表面への物質移動と吸着、b) 金属表面での解離（触媒反応）、c) 金属中への N 原子の侵入・拡散、Fe₄N、Cr₂N、CrN などの窒化物の形成。

窒化速度に影響を及ぼす因子として、温度、アンモニア分圧、合金組成がある。温度は一般に

高温ほど顕著であるが、550～700 程度でピークを示す報告もある。アンモニア分圧に関しては低圧ほど穏やかである。合金組成については概して Ni が高いほど耐窒化性が高く、低合金鋼に比べてオーステナイト系ステンレス鋼の耐窒化性は格段に良い。Cr-Mo 鋼では、Cr 量の増加は窒化を抑える効果がある。

窒化を受けると材料が硬化や脆化を生じるが、窒化層は剥離しやすいので減肉も進む。ステンレス鋼の場合は、窒化とともに脆化と Cr 欠乏 (Cr が窒化物として固定されて母相中の Cr 量が低下する現象) が起る。そのため所要の Cr 量によって維持されている諸特性 (耐酸化性、耐水素侵食性) が低下する。

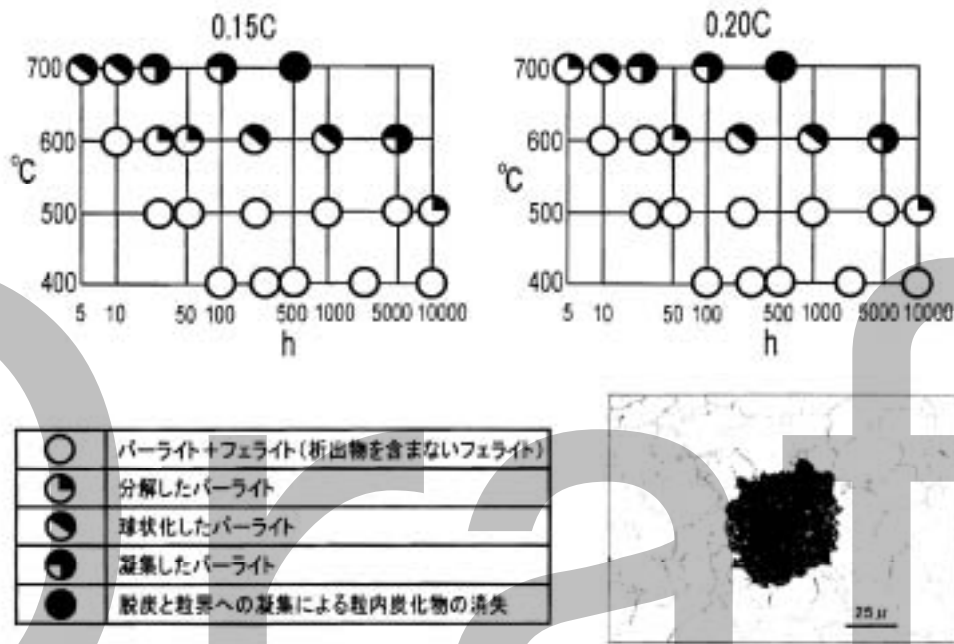
225 黒鉛化

黒鉛化は、炭素鋼や C-0.5Mo 鋼が 450 程度以上の高温に長期間曝されると、パーライト組織やベイナイト組織中の炭化物が分解し炭素が凝集析出し、強度低下を招く温度 - 時間依存型の劣化現象である。この現象で注意すべき点は、溶接熱影響部に鎖状に連なった黒鉛 (溶接融合線にほぼ平行な分布形態となる) であり、材料強度にも影響を与えることがある。

附属書 4 図 225-1 干図は炭素鋼 (0.15C 及び 0.20C) の長時間加熱による組織変化を示したものであり、いずれの場合も、600 ×5000hr で黒鉛 (グラファイト) が確認されている。黒鉛化に対する最高使用温度は国内外規格で規定されているが、その値は規格によりやや異なる。JIS 規格においては、圧力容器用鋼材 SB 材 (炭素鋼) は 450、SB-M 材 (C-0.5Mo 鋼) は 475 をそれぞれ超える温度で長時間使用する場合は、材料の黒鉛化に注意しなければならない。

黒鉛化に対する主な対応を以下に示す。

- a) 上記の最高使用温度を超える運転温度で炭素鋼又は C-0.5Mo 鋼が使用されている場合は、黒鉛化による劣化現象が現れる以前に金属組織中の炭化物の変化が生じることから、それらを確認することにより黒鉛化の兆候を知ることができる。
- b) 材料選定においては Cr や Mo は炭化物を安定化させて、耐黒鉛化性能を高めるので有効である。



附属書 4 図 225-1 炭素鋼の加熱による組織変化

<引用文献> 石油学会規格 劣化損傷の評価と対応 JPI-8R-12-2003

案

300 ハロゲン化物応力腐食割れ

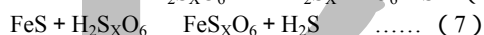
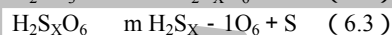
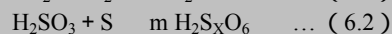
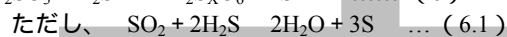
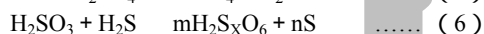
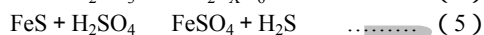
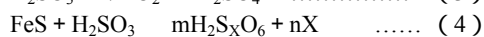
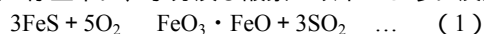
応力腐食割れについては何れのハロゲンイオン種においても応力腐食割れを起こす。F環境における応力腐食割れ事例としては、湿性 HF(酸性)環境において Ni 基合金のモネル 400、NCF600、NCF750 が粒内及び粒界応力腐食割れを起こした事例、低濃度の中性 NaF 溶液にて鋭敏化熱処理した SUS304 鋼が粒界応力腐食割れを起こす事例が挙げられる。(207 ハロゲン化物腐食を併せて参照。)

301 ポリチオン酸応力腐食割れ

ポリチオン酸^{注1)} 応力腐食割れ(以下、ポリチオン酸 SCC と略す。)は、オーステナイト系ステンレス鋼の鋭敏化^{注2)}、応力の存在及び環境の3因子が条件的にそろった場合に発生する。

材料が鋭敏化する可能性は、製作時と使用中とに大別できる。製作時の鋭敏化は鋼種、溶接入熱及び溶接後熱処理などによって異なり、使用中の鋭敏化は使用温度によるところが大きい。応力源としては加工又は溶接による残留応力が一般的である。ポリチオン酸は、装置の停止中など、硫化鉄が存在し、かつ水と酸素が存在する環境で発生する。鋭敏化した箇所はポリチオン酸により粒界型の割れを生じる可能性がある。

注1) $H_2S_XO_6$ ($X=3 \sim 6$) の分子式で表される無機酸。高温硫化物腐食によって生じた硫化鉄が装置の停止中に、水分及び酸素と以下のように反応して生成する。



注2) ステンレス鋼中のクロムがクロム炭化物として結晶粒界に析出することにより、結晶粒界近傍のクロム濃度の低下が生じ、その部分が選択的に腐食を受けやすい状態になること。ステンレス鋼が高温の一定範囲に保持されると生じ、オーステナイト系ステンレス鋼ではこの温度範囲はおおよそ600～800 の範囲にあり、650～750 の範囲では極めて短時間に鋭敏化する。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは材料の鋭敏化と応力の存在、ポリチオン酸の生成という3条件によって発生するため、3条件がそろわない下記の場合、ポリチオン酸 SCC は生じないものと評価できる。

- 1) オーステナイト系ステンレス鋼を使用していない設備
- 2) 硫化物がない環境で使用されている設備
- 3) 安定化ステンレス鋼を用い、安定化熱処理を実施するなど溶接部を含む耐圧部材が鋭敏化する恐れのない条件で製作され、若しくは安定化ステンレス鋼以外のステンレス鋼にあっては鋭敏化が認められないことが確認されたもので、430 以下の温度で使用される設備。

ここで、安定化ステンレス鋼とは、次のような成分調整によって割れ抵抗性を高めたものをいう。

鋼 種	Ti/C	鋼 種	Nb/C
SUS321	7	SUS347	10
SUS321 低 C	10	SUS347 低 C	15

備考 低 C とは、炭素含有量が 0.02 ~ 0.03%をいう。

4) ポリチオン酸 SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。 防 止 対 策の例としては、下記が挙げられる。

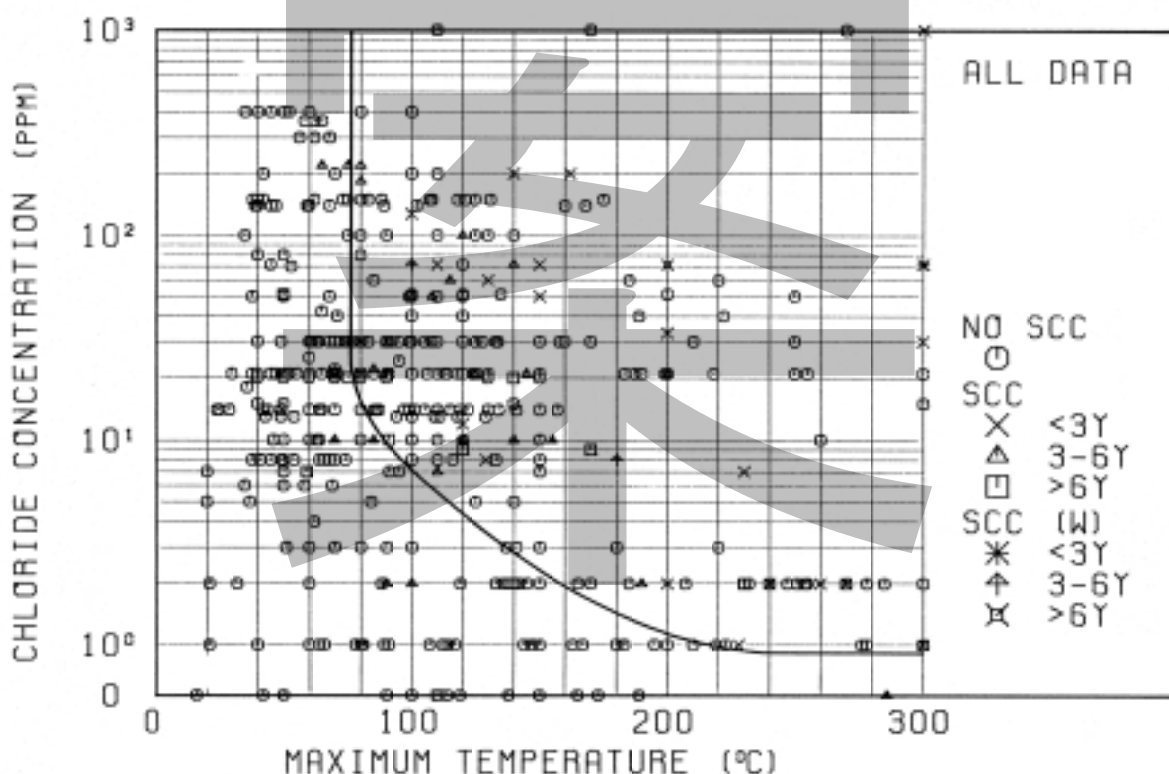
- 装置停止中の機器の保管又は開放時において、NACE RP 0170 (2004) 「Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During Shutdown of Refinery Equipment」などに基づき、酸素侵入の防止、水分侵入の防止などのポリチオン酸生成防止対策、中和洗浄などポリチオン酸 SCC の発生防止を行っている設備。

302 塩化物応力腐食割れ

塩化物応力腐食割れ（以下、塩化物 SCC と略す。）は工業用水、海水、その他塩化物（主に塩化物イオン）を含む水溶液または流体中に塩化物イオンを含むプロセス流体環境で使用されるオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部、冷間加工部など引張残留応力が存在する箇所に発生する。

オーステナイト系ステンレス鋼における割れ発生要因としては塩化物濃度、温度、溶存酸素、残留応力又は負荷応力が関係する。塩化物溶液中の割れ形態は主に粒内割れであるが、応力集中の程度又は溶接若しくは熱処理による鋭敏化により粒界割れを発生することもある。

塩化物 SCC の発生の有無の調査データ例として、[図 302-1](#) はステンレス鋼製熱交換器の応力腐食割れ使用実績調査結果を示す。



附属書 4 図 302-1 ステンレス鋼熱交換器の応力腐食割れ事例

【損傷を受けない事例】

塩化物 SCC は、使用環境、材料及び引張応力の有無の組み合わせにより発生するため、これらの要素の組み合わせにならない場合、塩化物 SCC は発生しないと評価できる。

- 1) 炭素鋼、フェライト系ステンレス鋼を使用している設備
- 2) 使用環境中に塩素イオンのない設備
- 3) 使用温度が 40 以下の設備
- 4) **SSSCC** 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。

防止対策の例としては、下記が挙げられる。

- プロセス溶液中の塩化物イオンと溶存酸素を低減させる措置を講じた設備
- 防食塗装、コーティング等環境遮断を行っている設備
- Ni、Si の添加、P を低減した塩化物 SCC の感受性を下げたオーステナイト系ステンレス鋼を使用している設備

303 アルカリ応力腐食割れ（苛性脆化）

アルカリ応力腐食割れ（以下、アルカリ SCC と略す。）は、アルカリ溶液（NaOH、KOH）環境下で、一定のアルカリ濃度及び温度以上で使用される炭素鋼、低合金鋼、オーステナイト系ステンレス鋼並びに高ニッケル鋼の溶接、冷間加工による残留応力又は負荷応力による引張応力が存在する箇所に発生する。大部分の割れは結晶粒界割れ（典型的な割れは粒界に沿った網目状割れ）で溶接金属、HAZ に隣接する母材に発生する。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは材料の種類、応力の存在及び使用環境（アルカリ溶液濃度と使用温度）の 3 条件によって発生するため、3 条件がそろわない以下の場合、アルカリ SCC は生じないものと評価できる。

- 1) 炭素鋼、低合金鋼、オーステナイト系ステンレス鋼並びにニッケル合金鋼を使用していない設備
- 2) 水酸化ナトリウム、水酸化カリウムを取り扱わない設備
- 3) 溶接後熱処理等により応力除去を行っている設備
- 4) 水酸化ナトリウムを下記の条件で使用している設備
 - 「Caustic Soda Chart」において、応力除去が必要のない領域（使用温度及びアルカリ濃度）で使用されている炭素鋼又は低合金鋼の設備。但し、スチーム等のトレースにより加温している設備、運転停止時もしくは設備開放時の残留ソーダを水洗等により除去せずにスチーミングを行っている設備を除く。
 - SCC が発生しない領域の使用温度、NaOH 濃度で使用されている SUS304、316 ステンレス鋼仕様の設備
 - SCC が発生しない領域の使用温度、NaOH 濃度で使用されているニッケル合金鋼。

- 5) アルカリ SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。例としては、下記が挙げられる。
- 樹脂コーティング、溶射など環境遮断による損傷防止対策を実施している設備

304 アミン応力腐食割れ

アミン応力腐食割れ(以下、アミン SCC と略す。)は、アミン水溶液^{注)}環境下で使用される炭素鋼または低合金鋼の溶接、冷間加工による残留応力又は負荷応力による引張応力が存在する箇所が発生する。割れ形態は粒界割れが中心で、H₂S 濃度の低いリーンアミン溶液中での SCC 発生事例が多く報告されている。

石油化学、石油精製装置で使用されるアミン類は、MEA (Monoethanolamine)、DEA (Diethanolamine)、DIPA(Disopropanolamine)、MDEA(Methyl-diethanolamine)、DGA(Diglycolamine)があり、アミン SCC はこのようなアミン環境下で、引張応力が存在する箇所に発生する。

注) LPG や生成ガス中の炭酸ガスや硫化水素などの酸性ガスを選択的に吸収除去して洗浄する工程で 사용되는吸収液。石油化学、石油精製では DEA 又は DIPA を使用するケースが多い。その他、MEA、MDEA、DGA などのアミンも使われている。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは材料の種類(炭素鋼又は低合金鋼)、応力の存在及び使用環境(アミン水溶液環境)の3条件によって発生するため、3条件がそろわない下記の場合、アミン SCC は生じないものと評価できる。

- 1) 炭素鋼又は低合金鋼を使用していない設備
- 2) アミン水溶液を取り扱わない設備
- 3) **溶接後熱処理応力除去焼鈍**を施工した炭素鋼又は低合金鋼の設備
- 4) リーンアミンに曝されない設備
- 5) MEA、DIPA 以外のアミン水溶液を 80 未満 (DEA のアミン水溶液の場合は 60 未満) で取り扱う設備。ただし、スチーム等のトレースにより加温している設備、運転停止時もしくは設備開放時に残留アミンを水洗等により除去せずにスチームングを行っている設備を除く。
- 6) アルカリ SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。
防止対策の例としては、下記が挙げられる。
 - 樹脂コーティング、溶射など環境遮断による損傷防止対策を実施している設備

305 外面応力腐食割れ (ESCC)

外面応力腐食割れ (ESCC) は設備外部に最も一般的に生じる損傷で、オーステナイト系ステンレス鋼に生じる割れである。割れの要因は大気中の Cl の鋼表面への付着、若しくは保温材中への吸収蓄積、保温材中の Cl の溶出による。

ESCC はスプリンクラーなどの噴霧、海水飛沫に直接曝される環境にある設備、Cl 含有量の高い保温材を使用する設備の溶接部、曲げ加工部等残留応力の大きい箇所できりやすい。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは材料の種類、応力の存在及び使用環境の 3 条件によって発生するため、3 条件がそろわない下記の場合、アミン SCC は生じないものと評価できる。

- 1) オーステナイト系ステンレス鋼を使用していない設備
- 2) 運転温度が 60 未満、150 以上の設備
- 3) 応力除去熱処理を実施している設備
- 4) SCC 防止対策として、防食塗装、コーティングなどの環境遮断を行っており、その有効性が確認されている設備

306 アンモニア応力腐食割れ

アンモニア応力腐食割れ（以下、アンモニア SCC と略す。）は、流体中に含まれるアンモニアイオンにより、引張応力の存在する部位で 10%Zn-Cu、8%Al ブロンズ、20%黄銅などの銅合金に発生する。また、アンモニア SCC の発生には水の存在と酸素が必要条件であり、運転中よりも停止中の短期間のうちに発生することが多い。緑青色の腐食生成物が存在することが多く、割れは応力レベルにより結晶粒界又は粒内に発生する。

また、液体アンモニアを取扱う炭素鋼、低合金鋼の貯蔵及び輸送設備において応力腐食割れが発生する。

【損傷を受けない事例】

a) 銅合金の応力腐食割れ

応力腐食割れは材料の種類（銅合金）、応力の存在及び使用環境（アンモニア、水、酸素）の 3 条件によって発生するため、3 条件がそろわない下記の場合、アンモニア SCC は生じないものと評価できる。

- 1) 銅合金を使用していない設備
- 2) 70Cu-30Ni 系合金などの Cu-Ni 系銅合金を使用している設備
Cu-Ni 系銅合金は、耐 SCC 性を有しアンモニア SCC が発生しないことが確認されている。
- 3) アンモニア、水及び酸素に曝されない設備
- 4) アンモニア SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。

防止対策の例としては、下記が挙げられる。

- 運転中は SCC を発生する条件のない設備であって、開放前又は開放後直ちに大量の水でアンモニアの洗浄を行っている設備。

アンモニア SCC の発生には、水の存在と酸素が必要条件であり、運転中よりも停止中の短期間のうちに発生することが多い。

b) 液体アンモニアを取扱う設備の応力腐食割れ

SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。防止対策の例としては、下記が挙げられる。

- 樹脂コーティングなど環境遮断による損傷防止対策を実施している設備

307 カーボネイト応力腐食割れ（以下、カーボネイト SCC と略す。）

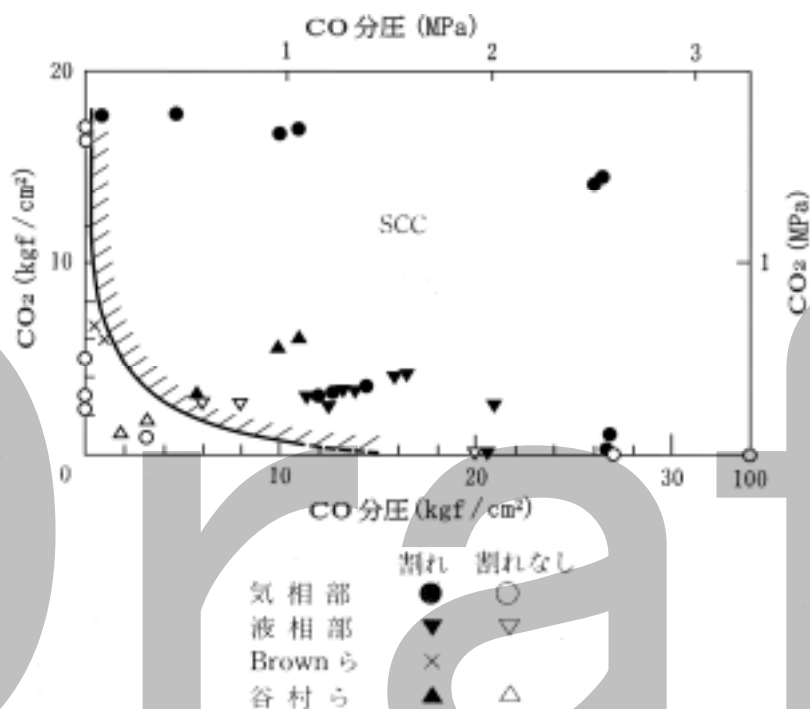
カーボネイト SCC は、 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 $(NH_4)_2CO_3$ などの炭酸塩を含むアルカリ溶液環境若しくは CO 、 CO_2 ガスを含む湿潤環境（水分が存在する環境）において、炭素鋼、低合金鋼の溶接又は曲げ加工による残留応力の存在する箇所が発生する。**附属書 4 図 307-1** に示すように CO 、 CO_2 を含む湿潤環境における割れ発生は、 CO 分圧と CO_2 分圧に支配される。

割れ形態は粒界型で、割れ先端のスケールからは、 Fe_3O_4 及び $FeCO_3$ が検出されている。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは材料の種類（炭素鋼、低合金鋼）、応力の存在及び使用環境（炭酸塩を含むアルカリ溶液若しくは CO 、 CO_2 ガスを含む湿潤環境）の 3 条件によって発生するため、3 条件がそろわない下記の場合には、カーボネイト SCC は生じないものと評価できる。

- 1) 炭素鋼又は低合金鋼を使用していない設備
- 2) 応力除去焼鈍を施工した炭素鋼または低合金鋼の設備
カーボネイト環境下で使用される炭素鋼については、損傷防止対策として溶接部の応力除去焼鈍の有効性が確認されている。
- 3) 炭酸塩を含むアルカリ溶液、 CO 、 CO_2 ガスを含む湿潤環境に曝されていない設備
- 4) 遊離水（炭酸塩を含むアルカリ溶液）の pH が 7.5 以下の環境で使用される設備
- 5) 遊離水（炭酸塩を含むアルカリ溶液）の硫化水素濃度が 50ppm 以下の環境で使用される設備
- 6) カーボネイト SCC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。
防止対策の例としては、樹脂コーティング、溶射など環境遮断による損傷防止対策の施工が挙げられる。



附属書 4 図 307-1 炭素鋼及び低合金鋼の応力腐食割れに及ぼす CO、CO₂ 分圧の影響

308 水素助長割れ、オーバーレイ剥離

1) 水素助長割れ

ステンレス鋼オーバーレイ側に割れが存在する場合、装置停止ごとの水素吸蔵により助長される割れで、Cr-Mo 鋼母材側に進展する場合に問題となる。従って、水素吸蔵した場合の母材の靱性評価が重要である。特に、2.25Cr-1Mo 鋼又は 3Cr-1Mo 鋼については、焼戻し脆化との重畳作用についての評価も必要である。溶接金属には、通常高温割れ防止の目的で 5~10%程度のデルタフェライトを含んでおり、製作時の後熱処理によりこのデルタフェライトがシグマ化して、水素脆化による割れ感受性を高める。

2) オーバーレイ剥離

ステンレス鋼オーバーレイと母材との境界層の遷移領域における割れで、境界層への水素の集積（水素脆化）により発生する。割れ（剥離）は、オーバーレイの Cr 炭化物の析出した粗大晶粒界に沿って進展する場合が多い。オーバーレイ剥離には、環境要因の影響が大きく、水素分圧及び運転温度が高いほど発生しやすく、また、高温・高圧水素に曝露した後の冷却速度が大きいほど発生しやすい。

【損傷を受けない事例】

- 1) オーステナイト系ステンレス鋼のオーバーレイを使用していない設備
- 2) ステンレス鋼オーバーレイ剥離の発生域で使用されていない設備
- 3) 水素助長割れの発生域で使用されていない設備

309 水素誘起割れ (HIC), 水素膨れ

水素誘起割れ（以下、HIC：Hydrogen Induced Cracking と略す。）は、炭素鋼及び低合金鋼が硫化水素を含む湿潤環境に曝された場合、腐食により発生した水素が鋼中に侵入し、鋼に内在する非金属介在物などに局部的に凝集し、鋼材の圧延方向に平行な割れを発生する現象である。侵入した水素が捕捉されやすい場所は、板厚内部のフェライト組織に存在する延伸された介在物（例えば、MnS など）又は板厚中心部の中心偏析組織に形成される高硬度の低温変態組織である。鋼の表面に膨れとして観察される場合は、プリスター（blistering）又は水素ふくれ（hydrogen blistering）と呼ばれる。

HIC の特徴は、外部応力が存在しなくても発生することである。また、板厚に平行な割れの場合は層成胴^{注)}と同構造になると考えられ、材料強度に与える影響が殆どないことが知られている。よって、HIC を受けている材料の健全性はリガメントの厚さ、若しくは HIC 面積率で評価されている。ただし、板厚方向に高密度で発生しステップ状の割れとなった場合には材料強度に悪影響を及ぼす可能性があることから、評価する際には留意する必要がある。

注) 板を同心円状あるいはうず巻状に重ね合わせて積層し、円筒を形成して作った胴

炭素鋼がフッ化水素水溶液若しくは無水フッ化水素環境に曝された場合、フッ化水素による腐食反応で発生した水素により HIC/SOHIC を引き起こす場合がある。

【損傷を受けない事例】

HIC の形成過程は次の 4 つに分けられる。1)～6)に示すように、各過程における形成要因のないもの若しくは形成要因に対する対策がとられている場合、HIC は発生する恐れはないと評価できる。

水素の発生及び鋼表面への吸着
 水素の鋼中への浸入と拡散
 非金属介在物または偏析部の低温変態組織による水素の捕捉と割れの発生
 割れの進展と合体によるステップ状の割れの進展

- 1) 炭素鋼、低合金鋼を使用していない設備
- 2) 耐 HIC 鋼を使用している設備
 耐 HIC 鋼は MnS などの非金属介在物を減らし鋼の静浄度を高め、更に Cu 添加による鋼中水素濃度の低減、Ca 添加による板状介在物の球状化による HIC 発生臨界水素濃度を高めるなどにより の過程への治金的対策を施している。
- 3) 使用環境に硫化水素、フッ酸が存在しない設備（ の過程が生じない。）
- 4) 使用環境に水分が存在しない設備（ の過程で鋼の湿性の腐食反応により発生する原子状の H が存在しない。）
- 5) 硫化水素は存在するが 150 以上で使用している設備（温度の上昇とともに流体中の H₂S 濃度の低下、硫化鉄皮膜の形成による防食効果、生成皮膜の状況などにより の過程の鋼中への水素の吸収量が抑制される。）
- 6) HIC 防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。
 防止対策の例としては、下記が挙げられる。

- ステンレス鋼クラッド、ステンレス鋼ライニング、耐酸モルタルライニング、樹脂コーティング等環境遮断を行っている設備（ の過程で湿性の腐食反応が生じない。）
- 運転条件またはインヒビターの添加により PH 管理をおこなっている設備（ の過程で原子状水素の鋼中への侵入を抑制する。）

310 SOHIC

HIC の特殊なケースとして、SOHIC (Stress-Oriented HIC) が知られており、NACE RP 0296-2000 「Guidelines for Detection, Repair, and Mitigation of Cracking of Existing Petroleum Refinery Pressure Vessels in Wet H₂S Environments」では、小さな HIC が応力にほぼ直角方向に連結したもので、溶接熱影響部近傍などの高引張応力が作用する箇所に、その例が見られるとしている。SOHIC の場合、HIC と異なり、応力（溶接の残留応力、内部圧力による作用応力など）が割れの進展機構に関与するので、溶接後熱処理による残留応力低減が SOHIC の感受性を下げる有効な方法である。

311 硫化物腐食割れ

硫化物応力割れ（以下、SSC : Sulfide Stress Cracking と略す。）は、硫化水素を含む湿潤環境下で炭素鋼、低合金鋼、高張力鋼、フェライト・マルテンサイト系ステンレス鋼を使用している設備に発生する。

- ・ 材料要因では、硬度が増すほど割れ感受性は高くなる。特に、硫化水素飽和溶液中では硬度 H_{RC}22 以上で割れが発生する可能性があるため、NACE ではこの硬度を限界硬度として規定している。
- ・ 環境要因では、遊離水中での硫化水素濃度が高いほど、硫化物応力割れは発生しやすい。また、pH が酸性側ほど割れは発生しやすく、pH6 以下で特に発生しやすい。一方、アルカリ性環境においても CN⁻などが存在すると、透過水素量が増加し割れを発生しやすい環境となる場合がある。

NACE Standard MR0103-2005 「Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments」では SSC の発生する環境として、下記を挙げている。

- ・ 液相に遊離水が存在し、かつ、
 - 遊離水中の溶存硫化水素が 50 wt. ppm を越える環境、又は
 - 遊離水の PH が 4 未満で硫化水素が溶存している環境、又は
 - 遊離水の PH が 7.6 を越え、水中に 20 wt. ppm の HCN (hydrogen cyanide) と硫化水素が - 溶存している環境、又は
 - プロセスガス中の硫化水素分圧が 0.0003 MPa (abs.) を越える環境

また、温度は、室温近傍で最も割れやすく温度上昇と共に割れにくくなる。

SSC は作用応力、金属組織変化、残留応力の働きにより応力に直角方向に生じる割れで、ほとんどが結晶粒界割れであるが、粒内割れで擬へき開破面を示すことがある。この割れは鋼の腐食反応により生じた水素原子が鋼中に侵入し、その結果生じた水素脆化といわれている。

【損傷を受けない事例】

応力腐食割れは、材料の種類、応力の存在及び使用環境（硫化水素を含む環境）の3条件によって発生するため、3条件がそろわない下記の場合、SSCは生じないものと評価できる。

- 1) 炭素鋼、低合金鋼、フェライト・マルテンサイト系ステンレス鋼を使用していない設備
 - 2) 溶接部のPWHTを実施している設備で、次に該当するもの。
 - 溶着金属の硬度がHB200以下のもの
 - 溶接部の硬度がHB237以下のもので水相中にシアンがなく、水中の硫化水素濃度が10,000ppm未満でpHが5.5以上9.0未満で使用されている設備
 - 使用環境の水相にシアンがなく、水中の硫化水素濃度が50ppm未満で使用されている設備
 - 3) PWHTを実施していない設備で、次に該当するもの。
 - 溶着金属の硬度がHB200以下で、HAZの硬度がHB248以下であることが確認されているもの。
 但し、溶接施工試験のWPQで硬度が確認されており、溶接時の母材の化学成分、予熱管理、入熱管理が行われている場合は、HAZの硬度確認は要しない。
 - 4) 使用環境に水分が存在しない設備
 - 5) 使用環境に硫化水素が存在しない設備
 - 6) 使用環境の硫化水素濃度を割れ発生領域外に管理している設備
 - 7) SSC防止対策を実施し、その効果が確認されている設備。
- 防止対策の例としては、樹脂コーティング等環境遮断が挙げられる。

312 クリープ損傷

クリープ損傷は、高温域（低合金鋼の場合約450℃以上）において金属材料に一定の荷重が加わった状態が続くとき、時間の経過とともに変形が進行し、結晶粒界でポイドが発生、結晶粒界割れへ進展、最終的に破断に至る現象である。通常、マイクロ割れが発生する以前に次のような微視的な変化を伴う。

- 金属組織の変化
- 結晶粒の変形
- ポイドの発生・成長

これらの変化は、使用材料、供用温度などによって異なり、また、必ずしも同調して起るものではないが、変化自身は、各鋼種ともほぼ似た経過をたどる。

【損傷を受けない事例】

- 1) クリープ温度領域で使用されていない設備
- 2) Larson-Millerなどのパラメータで整理されたクリープ破断応力マスターカーブを用い、実機の使用温度、負荷応力から計算された消費寿命に十分な余裕がある設備

313 クリープ脆化

クリープ脆化は、クリープ温度域において時間の経過とともにクリープ中の相変化、析出、転位組織の変化などにより材料が脆くなる現象である。代表的事例としては、接触改質装置の反応塔など 500 前後のクリープ温度域で運転される、主として 1.25Cr-0.5Mo 鋼製機器のマンホール取付け溶接部の溶接熱影響部に発生する割れがある。割れ形態は溶接熱影響部の結晶粒界に沿った明瞭な粒界割れを呈する。鋼種によって割れの起りやすいものとそうでないものがあり、低合金鋼では、1Cr-0.5Mo 鋼及び 1.25Cr-0.5Mo 鋼が比較的感受性が高いといわれている。

クリープ脆化割れに影響する要因として、下記が挙げられる。

- ・ Cr 量の違いによる炭化物携帯の違い
- ・ 不純物元素の溶接熱影響部粒界への偏析（偏析が大きいと脆化が加速）
- ・ 溶接後熱処理温度（温度が低いと延性が低下）
- ・ 応力集中部の存在（割れ発生の加速）

314 高サイクル疲労 及び 315 低サイクル疲労

疲労は、使用材料に変動する荷重が負荷され続けた場合、静的に負荷されれば問題ない材料の降伏点以下の応力で材料の損傷（き裂の発生・進展）が生じる現象であり、主に構造不連続部などの応力集中部を起点とし、その多くは材料表面に優先的に発生する。疲労破損に至るには、先ず、材料が繰返し応力を受けて、内部に疲労損傷が蓄積される段階があり、さらに繰返し応力を受けて、微小き裂の発生、進展する段階を経る。

一般に、繰返し応力が降伏点未満で破断までの負荷回数が多いのが高サイクル疲労、降伏点以上の繰返し応力により比較的少ない繰返し回数で破断に至る現象を低サイクル疲労という。

疲労は材料表面に優先的に発生・進展し、主に構造不連続部等の応力集中部を起点とする。応力振幅が高い場合、き裂の起点は外表面の溶接止端部であるが、応力振幅の低下に伴い、その起点は管内面のルート部となる場合が多い。割れはフェライト系、オーステナイト系合金とも粒内割れが多く、割れの破面にストライエーションが認められる。

繰返変動応力としては、圧力変動等の荷重に加えて、流動変動（脈動、カルマン渦列などを含む）及び機械的振動、さらには温度変動（熱応力）がある。疲労による損傷に及ぼす因子としては、材料、部材の形状、繰返し応力（応力振幅と平均応力）等があり、設計・製作時に考慮する必要がある。

316 熱疲労

熱疲労は、熱応力の繰返しにより発生する損傷であり、損傷の基本的な特徴は一般的な疲労と同じである。熱的過渡による低サイクル熱疲労に加えて、高温と低温の流体が共存する設備では、熱成層化、間欠流、混合流、熱的衝突による高サイクル熱疲労が問題となる。また熱サイクルの過程において、高温域での保持時間は熱疲労寿命に大きく影響し、高温で一定時間保持される場合にはクリープ効果を考慮に入れる必要がある。設備の部材、圧力容器の支持部、ノズル部などの構造不連続部などが起動・停止に伴って温度変動を受ける場合、熱疲労が発生することがある。また、線膨張係数の異なる材料による異材溶接部なども、負荷変動を受けやすい。

さらに、温度差のある流体の合流部で温度が変動する（揺らぎ）場合に、高サイクル疲労が発生する例がある。

割れはフェライト系、オーステナイト系合金とも粒内割れが多く、割れの破面にストライエーションが認められる。オーステナイト系合金の熱疲労破壊部近傍では、著しい硬化を生じるが、フェライト系合金では、硬化が殆ど認められない。

317 腐食疲労

腐食環境下で生じる疲労現象で、材料の疲労特性（疲労強度、疲労寿命）は環境の影響を受ける。大気中で明らかに疲労限が現れる材料でも、腐食環境下では疲労限が消失し S-N 曲線が低下する。大気中で明確に疲労限が出現しないアルミニウムなどの材料では、S-N 曲線における時間強度が低下する。時間強度の低下は疲労寿命（破壊までの繰返し数）の低下を意味する。この特徴は一般に腐食性が強いほど、低速低サイクル疲労の方が著しいとされている。

大気中における疲労き裂の進展機構は繰返し応力による材料表面でのすべり帯の発生とその成長による。これに対して、腐食疲労の場合は繰返し応力負荷状態において、腐食により材料表面に発生した腐食ピットが成長するとされている。

401 遅れ割れ

鋼材、溶接材料、施工条件などが不適当な場合に溶接部に割れ、融合不良、溶け込み不足、ブローホール、アンダーカットなど種々の欠陥が発生する。施工時の欠陥のうち割れについて3種類に分類し記載する。溶接部の割れの発生例を**附属書4図401-1**に示す。

a) 低温割れ（遅れ割れ）

200～300 以下の温度域で発生する割れで、拡散性水素の作用によるものは溶接後しばらく時間が経過（溶接後数時間から数日後）してから発生することが多く溶接遅れ割れとも呼ばれる。**附属書4図401-1**の熱影響部のルート割れ、止端部割れ、ビード下割れ、溶接金属のラメラテア、ヒールクラックは低温割れに分類される。

遅れ割れは、炭素当量 C_{eq} （または割れ感受性組成 P_{CM} ）が高く継手の拘束度（または板厚）が大きく溶接時の冷却速度が大きく水素量が多い場合に起こり易い。一般に、 $C_{eq} \ 0.4$ （％）、 $P_{CM} \ 0.25$ （％）、板厚 25mm のとき起こり易く、この場合、 C_{eq} 、 P_{CM} 及び板厚に応じて予熱や低水素系の溶接棒を用いることが必要となる。また、 P_{CM} 値に溶接金属中の拡散性水素量（ $H \ \text{ml}/100\text{g}$ ）と板厚（ $t \ \text{mm}$ ）の影響も考慮した P_c 値で遅れ割れ評価も行われている。

特に、低合金鋼（Cr-Mo 鋼）は焼き入れ性が高く、予熱・パス間温度を適切に管理しないと低温割れ（遅れ割れ）が生じ易い。

b) 高温割れ

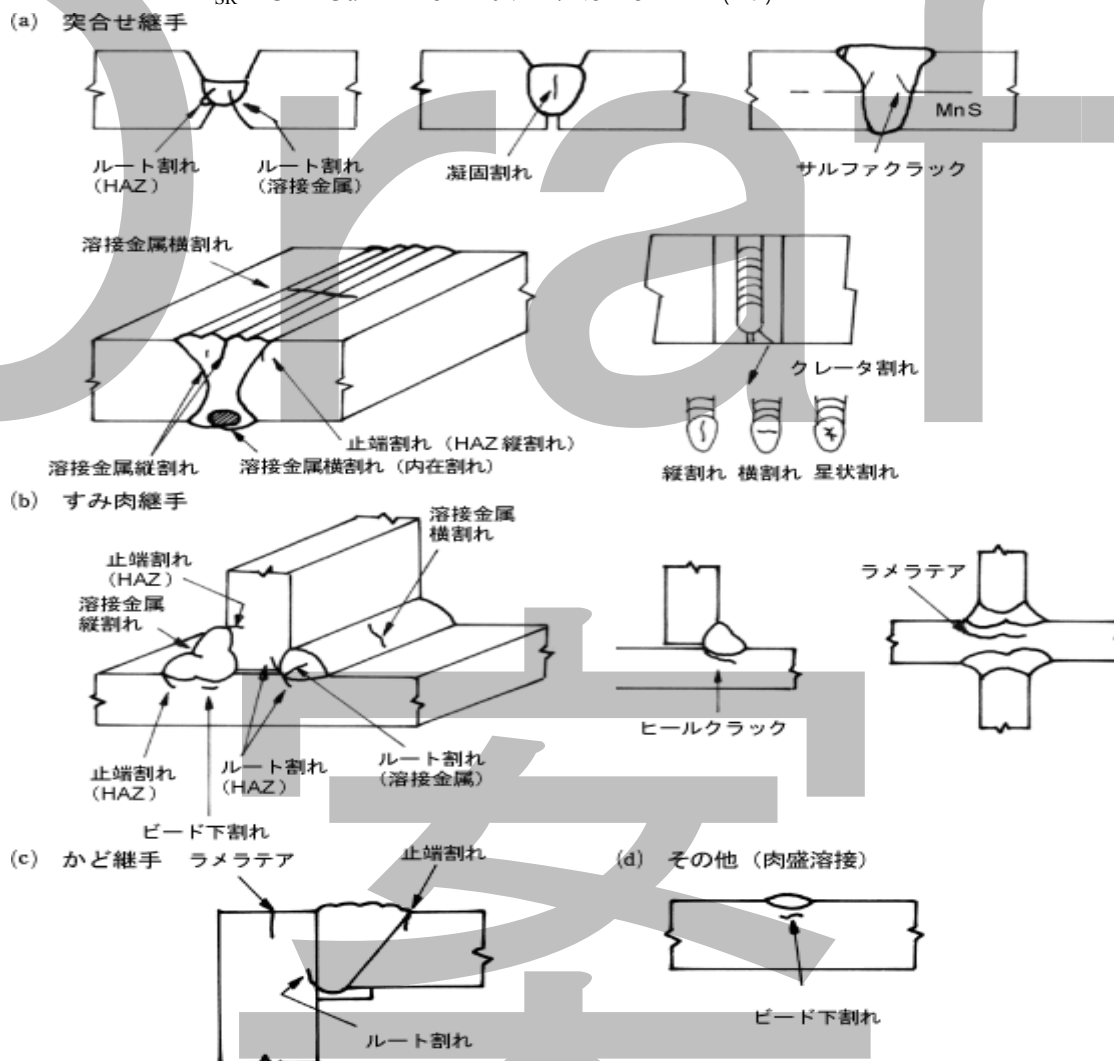
溶接中及び冷却中の高温度域（一般に 300 以上）で発生する割れで、凝固割れ、HAZ の液化割れは高温割れに分類される。

c) 再熱割れ

応力除去や脱水素処理などの溶接後熱処理（PWHT）中に生じる割れであり、一般に溶接割れに含められる。発生位置は止端の HAZ 粗粒域であり、完全な粒界割れである。再熱割れが生じるおそれのある材料には、HT780、Cr-Mo-V 系低合金鋼や一部オーステナイト系ステンレス鋼及び Ni 基合金がある。材料の割れ感受性を評価するのに、次式に示す指数が提案されており、ともに値が 0 の場合に割れ発生のおそれがあるとされている。

$$\Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2(\%)$$

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2(\%)$$



附属書 4 図 401-1 発生位置、形状より分類した代表的な溶接割れの種類

402 脆性破壊

ほとんど変形を伴わない脆い破壊の総称で、鋼構造物の製作中、完成時あるいは供用中の耐圧試験時などに起こる急速破壊に限定して呼ぶこともある。一般的な特徴として以下の諸点があげられる。

- 1) 温度が低いほど生じやすい。

- 2) 破面は板表面にほぼ垂直かつ平坦で板厚の減少がなく、特徴的な山形模様がみられる。
- 3) 構造、形状、材質などの不連続部から発生する。
- 4) 降伏点以下の低応力でも発生する。

403 水素侵食

水素侵食は、高温高压水素環境で使用される炭素鋼、低合金鋼製の圧力容器、配管、加熱炉管などに発生するおそれがある。この損傷は、鋼材に侵入した水素と鋼中の炭素との反応によりメタンが生成し、鋼材は脱炭するとともに、生成したメタンが結晶粒界、炭化物又は非金属介在物の界面に集積し粒界割れを生じさせる現象である。潜伏期間を経て設備内面側に発生し、徐々に板厚方向に損傷が進行し、寿命に達することが知られている。

損傷として、水素分圧が高い条件では内部脱炭とマイクロフィッシュが、水素分圧が低く使用温度が高い条件ではマイクロフィッシュを伴わない表面脱炭が認められる。

水素侵食の発生限界は API RP 941 のネルソン線図(水素分圧と使用温度を関数にして水素侵食が起こるかどうかを判定する線図)に示されている。なお、C-0.5Mo 鋼の材料に関しては 1990 年にネルソン線図より削除されたため、評価としてこの基準の本文 4.3 及び附属書 10 に示される Pv 値又は Pw 値が採用されている。

【損傷を受けない事例】

以下の場合、水素侵食は発生しないものと評価できる。

- 1) 炭素鋼、低合金鋼を使用していない設備
- 2) ネルソンカーブの安全域で使用されている設備
- 3) 本規格により、潜伏期間を評価し、水素侵食の発生に至らないと判断された C - 0.5Mo 鋼を使用している設備。

404 水素脆化

水素脆化は、金属中に固溶した原子状水素による脆化であって、引張強度や硬さには目立った変化はないが、常温付近での材料の伸び・絞り低下する現象である。高温高压で水素を扱う設備は、運転中に水素を吸収するが、吸収した水素は運転停止工程で容器外に散逸していく。

しかし、オーステナイト系ステンレス鋼がオーバーレイ^{注)}として使用されている場合、オーステナイト系ステンレス鋼は水素の拡散速度が小さく、母材部 (Cr-Mo 鋼) は厚肉のため、境界層の水素が放出されにくくなる。水素の拡散速度は 300 以下では遅くなるため、運転停止後も過飽和に水素が残留した場合に水素助長割れ、オーバーレイ剥離などの問題生じることがある(308 水素助長割れ、オーバーレイ剥離を参照。)

注) 母材を単体でそれぞれの形状に加工した後に、母材の保護を目的として、母材表面に耐食あるいは耐磨耗性材料を溶接により肉盛すること。

【損傷を受けない事例】

- 1) ~~オーステナイト系ステンレス鋼のオーバーレイを使用していない設備~~

- 2) —ステンレス鋼オーバーレイ剥離の発生域で使用されていない設備
- 3) —水素助長割れの発生域で使用されていない設備
- 4) 運転停止操作時の冷却過程で、運転中に吸収された水素を圧力容器外に散逸させ鋼材中に水素が残留しないようなシャットダウン操作（脱水素操作）をおこなっている設備

405 焼戻し脆化

焼戻し脆化は、Cr-Mo 鋼などの低合金鋼を約 360～575 の温度範囲に徐冷又は長時間保持した時に生じる脆化で、常温での靱性が低下し粒界破壊を伴う脆性破壊^{注)}が生じやすくなる現象である。この脆化は旧オーステナイト粒界に P、Sn、As、Sb などの微量不純物元素が拡散偏析し、粒界強度を減少させるためと一般的に考えられている。クロムモリブデン鋼、特に 2.25Cr-1Mo 鋼及び 3Cr-1Mo 鋼でその傾向が顕著であり、1.25Cr-0.5Mo 鋼にもその傾向が認められるが、炭素鋼には焼戻し脆化感受性がないことが知られている。

注) 殆ど変形を伴わないもろい破壊の総称。鋼構造物の製作中、完成検査時あるいは使用後の耐圧試験時などに起こる急速破壊に限定してこのように呼ぶこともある。

鋼材の脆化感受性は下記に示す J-Factor、 \bar{X} などの焼戻し脆化パラメータをもとに評価されている。

$$\text{主に 2.25Cr-1Mo 鋼} \quad : \quad \text{J-Factor} = (\text{Si} + \text{Mn}) \cdot (\text{P} + \text{Sn}) \times 10^4 \quad [\text{wt}\%]$$

$$\text{主に 1.25Cr-0.5Mo 鋼} \quad : \quad \bar{X} = (10\text{P} + 5\text{Sb} + 4\text{Sn} + \text{As}) / 100 \quad [\text{ppm}]$$

焼戻し脆化は、設備の使用期間中のある時期以降、脆化の進行が停止する飽和型の劣化であり、余寿命を予測する性格の劣化ではない。また、焼戻し脆化による靱性値の低下が問題となるのは常温時であることから、溶接補修時の常温下での耐圧試験時、装置のスタートアップ、シャットダウン時の操作手順などに十分な配慮が必要である。そのため、焼き戻し脆化のおそれのある設備においては、昇圧時の脆性破壊防止対策が一般的となっている。

【損傷を受けない事例】

- 1) 360～575 の温度範囲で使用されていない設備
- 2) 1.25Cr-0.5Mo 鋼、2.25Cr-1Mo 鋼、3Cr-1Mo 鋼、が使用されていない設備

406 475 脆化

475 脆化は、Cr 量が約 12%以上のフェライト系、マルテンサイト系及びオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼を約 320～540 の範囲で長時間加熱又はこれより高い温度に加熱後この温度域で徐冷したときに、常温での硬度、強度が上昇し、延性、靱性が低下する現象である。

475 付近での脆化速度が最も大きいために 475 脆化と呼ばれる。

この現象は、Cr リッチなフェライト相 (α' 相) が Fe リッチなフェライト (α 相) から分離析出することにより引き起されると考えられているが、600 以上の短時間加熱を行い空冷すること

により、靱性が回復する可逆的な脆化である。

475 脆化の検査方法は、硬度測定が一般的であり、脆化を受けると硬度が高くなることから、硬度を測定することにより脆化の度合いを評価することが可能である。脆化した材料でも、温度の上昇とともに、衝撃吸収エネルギーが上昇し 475 脆化の発生温度域では、衝撃吸収エネルギーが安全な領域まで回復する。よって、475 脆化は装置停止時の検査や補修工事など常温下で衝撃荷重がかからないように注意すれば問題となることはない脆化現象である。

【損傷を受けない事例】

- 1) 12%以上のフェライト系、マルテンサイト系及びオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼を使用していない設備
- 2) 320～520 の温度範囲で使用されていない設備

407 シグマ相脆化

シグマ脆化の原因となるシグマ相は、フェライト系ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼が 500 ～ 900 の温度に長時間曝されることにより発生する。シグマ相の発生温度、発生面積比などは鋼種、加熱時間などにより左右される。

フェライト系ステンレス鋼は一般的にシグマ相が析出しやすいとされているが、その析出速度は、クロム量によって異なる。シグマ相の組成に近い Cr 量に近づくと析出速度が速くなるが、Cr 量の低いフェライト系ステンレス鋼（例えば、13Cr 鋼）では、析出速度が緩慢である。オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼のフェライト相は、シグマ相が析出しやすい組成であるが、この材料をシグマ相の析出温度域で使用することはほとんどない。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部は、通常高温割れ防止の目的で 5～10 %のデルタフェライト^{注)}を含んでおり、このデルタフェライトからシグマ相が生成しやすい。オーステナイト系ステンレス鋼の高温加熱によるシグマ相の析出は、溶接部に限定されるわけではないが、実用上、母材に比べ溶接部が問題となることが多い。

シグマ相は Fe-Cr が 1：1 の極めて硬く、もろい金属間化合物であり、この析出により延性及び靱性が低下する。ただし、シグマ相が析出したものでも 930 ～ 980 に加熱急冷すれば消失する。また、シグマ相は、常温における延性低下の原因となるが、環境温度の上昇とともに、延性が回復するので、これが析出するような高温においては、比較的延性があり、運転中にシグマ相の析出のみで問題となることはない。

シグマ相の析出状況は硬度測定検査、金属組織検査又はこれらの組み合わせにより検査されている。また、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部に対してはフェライトメーターなどの磁気検査が適用できる。金属組織検査において、特にシグマ相と炭化物とを区別して観察する場合には、村上試薬（赤血塩 + 苛性カリ + 水）等による浸漬エッチングを行い着色して観察する。

この脆化現象を評価するためには、シグマ相の生成量が延性低下に及ぼす影響及びシグマ脆化した材料が使用温度でどの程度回復するかについて定量的に把握する必要がある。また、他の劣化現象との重畳作用についても評価することが重要である。

注) 1392 から融点までの温度範囲で純鉄は安定な状態にあり、デルタ鉄と呼ばれる。デルタ鉄の固溶体をデルタフェライトと呼ぶ。

【損傷を受けない事例】

- 1) フェライト系ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼を使用していない設備
- 2) 500～900 の温度範囲で使用されていない設備
- 3) 溶接材料のデルタフェライトの低減対策、インターナル取り付け部の最終溶接部の応力除去焼鈍の廃止などシグマ相の生成への対策を採用しているオーステナイト系ステンレス鋼の設備

408 等温時効脆化

等温時効脆化は、低合金鋼が 400 を超えて長時間使用された場合、機械的性質、特に延性、靱性の低下を示す現象である。現象的には焼戻し脆化と類似しているが、焼戻し脆化が P や Sn などの不純物元素が粒界に偏析して脆化するのに対し、等温時効脆化は層状炭化物が分解、球状化、凝集し粒界に集まることにより起るものであり、発生メカニズムが異なる。通常、焼戻し脆化の問題がないか、又はその傾向が少ない 0.5Mo 鋼、1Cr-0.5Mo 鋼及び 1.25Cr-0.5Mo 鋼が等温時効脆化の対象となる。

等温時効脆化は、焼戻し脆化及びクリープなどと同じような運転条件で発生することから、各々の発生メカニズムを理解した上で管理する。

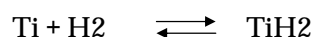
高温長時間使用後の組織変化及び機械的性質の変化は、材料ごとに詳細な調査結果が報告されており、これらの調査結果を参考に Larson-Miller パラメータと硬度、室温衝撃値、破断応力などとの関係から長時間使用後の各々の機械的性質が推定できる。等温時効脆化は、発生メカニズムは異なるものの現象的には焼戻し脆化と同現象であり、常温時の靱性低下が問題となる損傷であり、余寿命を予測する性格の劣化ではないといえる。

【損傷を受けない事例】

- 1) 低合金鋼を使用していない設備
- 2) 400 の温度範囲で使用されていない設備

409 チタンの水素脆化

チタンの水素脆化は腐食に伴う発生期の水素などを吸収しチタンの水素化物を析出、延性が著しく低下する現象であり、外的衝撃が加わると破損に至る場合がある。常温におけるチタン中の水素固溶度は 20～50ppm 程度であり、これ以上の水素を吸収すると、次の反応により水素化物を析出し、脆化するとされている。



チタン中の水素の拡散速度は、水素脆化に関して重要な因子であるが、温度及び鉄量に支配さ

れ、80 以上で急速に大きくなる。チタン表面層の鉄汚染は、チタンの水素吸収を促進しやすく、これは鉄が水素の吸収サイトとなるためと説明されている。また、硫化水素もチタンの水素吸収を促進する環境因子とされている。

チタン材料が水素化物を形成し脆化した部分は、金属組織的には針状組織となるため、組織観察で容易に観察できる。また、脆化部分は硬さの変化として現れるが、チタン材は薄肉で使用されることが多く硬度測定が困難なため、硬度の経時変化は捉えづらい。ただし、チタン材は水素化物を形成することにより電気抵抗が増加することが判明しており、この現象を利用して精密渦流探傷法などにより水素吸収量の測定が可能である。

【損傷を受けない事例】

- 1) チタンを使用していない設備
- 2) 使用環境温度 70 以下及び硫化水素濃度 1 wt%未満で使用されるチタン材料を使用した設備
- 3) 水素脆化防止対策を実施し、その効果が確認されている設備
防止対策の例としては、下記が挙げられる。
 - 純チタンにパラジウム処理、大気酸化処理などの表面処理を行い耐チタン水素脆化性を向上させた材料の使用。
 - 電気防食などによる腐食に伴う発生期の水素の抑制

501 製作時の検査では未検出の欠陥の検出

設備建設時の検査では、その位置、検査方法、検査範囲の規定等により検出されなかった欠陥で、供用開始後に発見又は具現化した欠陥をいう。

例として、下記が挙げられる。

- ・材料内部のラミネーションの検出
- ・運転（温度負荷）による未検出欠陥の開口
- ・溶接部のアンダーカット、クレータ等の検出
- ・溶接部の放射線透過試験による新たな割れ、ブローホール等の検出

通常運転時に、他端が閉止状態にある枝管やクーラー出入口ヘッダー両端のキャップ部等で流動がない滞留範囲には、スケール等の堆積が生じやすく、堆積物下で腐食が生じることが多い。滞留部と流動部との境界付近は、特異な流れ状態となっている事が多く、一様な腐食とはならない。さらに、流れの遅い配管系では、立ち上がり部や、分岐部近傍の配管下部にスケールが堆積しやすく、スケール堆積部位では、**水分が凝縮液がして溜まり**、腐食しやすい傾向がある。

b) 流体の蒸発する部位（気相中の腐食性物質の濃縮部）

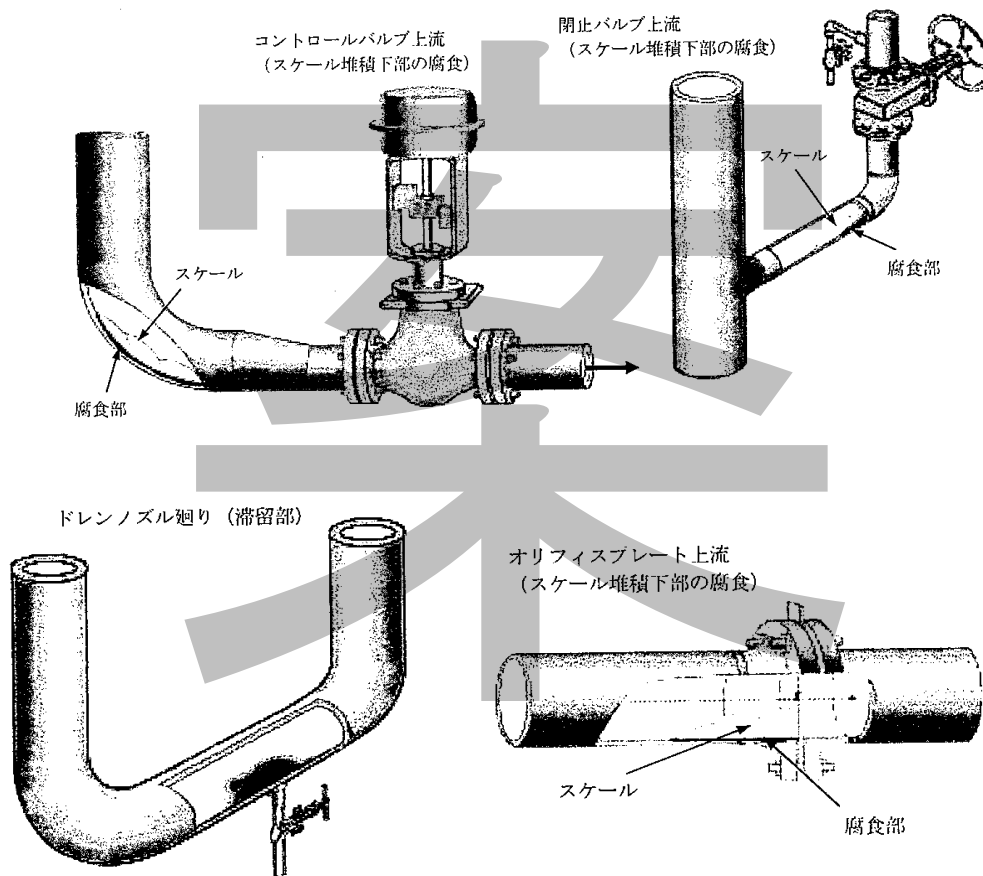
ホットバイパスが混入する箇所、減圧箇所、本管の流れが停滞している場合のジャケット配管、トレース付き配管などで配管系内の液体が蒸発することがある。このとき気相中に腐食性物質が濃縮され、配管が腐食される。またスチームコンデンサートの部分フラッシュにより調節弁下流では、エロージョンが発生することがある。

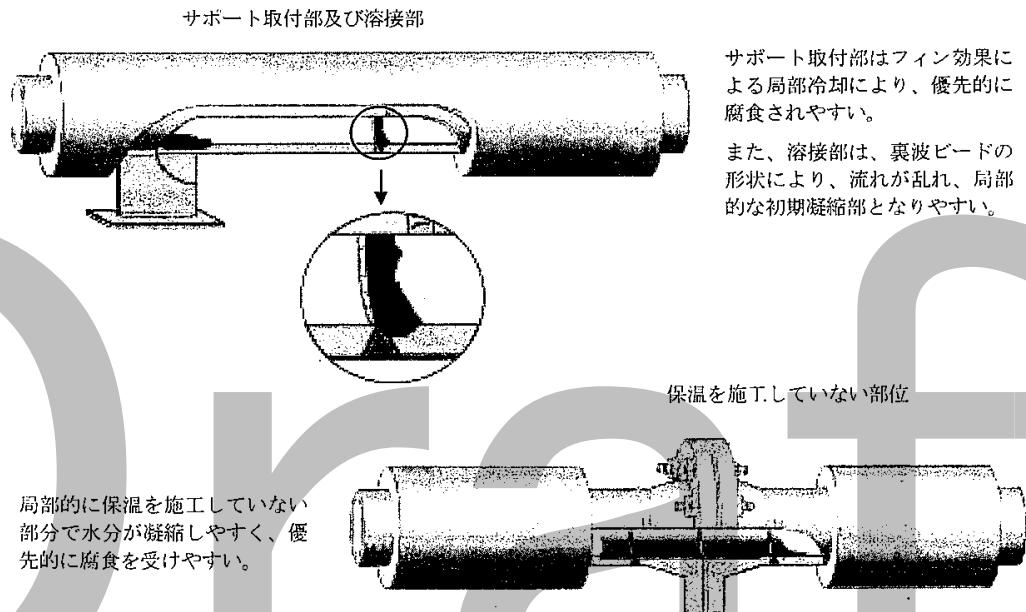
c) 凝縮部

蒸留装置の塔頂系、リアクター下流の反応生成物系及び排ガス回収系統などでベーパーが部分的に凝縮する際、凝縮液（特に凝縮水）中に腐食性物質が濃縮し、配管系が腐食されることがある。特に初期の凝縮液は、腐食性物質で飽和され、高濃度となるので腐食が激しくなる。初期凝縮の起る位置は、運転条件、局部的冷却（フィン効果による）の有無等にも影響される。

上記の留意点の具体例を下記に図示する。

< 流れの滞留部 >





1.5.2 エロージョン又は流れ加速腐食による場合

a) 管路の曲がり部

エルボやバンドなどの流れの方向が急激に変化する箇所では、流速の増大、偏流及び旋回流が発生し、局所的に大きい腐食、エロージョンを生ずる。

b) 流れの分流又は合流部

分流、合流及びそれに伴う偏流によって流れの状態が変化する箇所及び流体が管壁に衝突する箇所では、エロージョン及び流れ加速腐食（FAC）が発生する。

c) 流れが絞られるなど、管路の断面積が急変する部位

オリフィスの挿入箇所、管径や流路が急変する箇所では、流れの状態が変化する。オリフィスの例では、オリフィス口での流速の上昇、オリフィス下流における渦流の発生が挙げられ、静圧回復点近傍までの箇所に腐食の発生事例が多い。

d) 管路への注入部

水や薬品を注入する箇所では、注入される流体の物性と運転条件によって、局部腐食が生じる。注入流体の拡散が十分でない場合は、偏流が生じ、この影響は上下流に及ぶ。直管部の主流が乱流の場合の腐食範囲は、注入点より上流方向へはおおよそ管径の3倍、下流方向へはおおよそ管径の20倍までである。またインナーノズルがない場合では注入された流体は本管内壁に沿って流れた事例やたり、注入流体水が直接衝突する部位が、注入頻度の変化等の影響により激しく腐食した事例があるので、注意を要する。

e) 固体又は液滴、気泡を含む流速のある流体の配管系

スラリーなどの固体を含む流体や、スチームコンデンセートなどの液滴を含む気体が、流れの方向を変える部位でエロージョンが発生する。調節弁下流では、気体のフラッシュが生じ、配管々壁にエロージョンが発生することがある。また、圧力の変動によって、液体中で気泡が

の画像を電子的記録媒体に取込み、画像処理装置を介して配管の厚さを測定する方法とする。

注) 試験の種類と他の規格の適用または準用について

本試験の種類は a) 2) に示した通りであるが、従来から広く認識、実施されている放射線透過試験を活用し、近年の電子機器類の発達に伴う画像デジタル化技術を用いて透過画像を電子的記録媒体に取込み、この画像に対して拡大、コントラスト強調等の有効な画像処理を施す方法を加味して、厚さ測定を可能とするよう応用されたものである。

放射線透過試験に関する既存の JIS の規定は材料または溶接部の内部欠陥の検出が目的であるが、本試験では厚さ測定を目的としており、従って JIS の内容は、本試験の全てに対して適用されるべきものではない。配管厚さを測定するためには、透過画像の配管管壁が識別可能であることが必要条件となるが、JIS で規定されている透過写真の濃度ではエッジが散乱線等の影響により識別不可能となる可能性がある。エッジを識別するには、やや薄い程度の画像濃度が適しているといわれている。すなわち、JIS による透過写真の撮影方法の規定については本試験に適用または準用可能であるが、透過写真の必要条件・透過写真の具備すべき条件については本試験では画像処理を行うため異なり、適用はできない。

なお、後者の透過写真の判定条件に関しては、NDIS 1403 (デジタルラジオグラフィックシステムによる放射線透過試験方法) の規定は適用、準用し得るものである。

b) 試験

1) 試験方法

1.1) 本試験に伴い実施する放射線透過写真またはデジタル画像の撮影方法、必要条件、撮影の配置、機器および検定等、また本試験による測定結果の評価については、以下の規格を適用または準用するものとする。

- ・ JIS Z 3104-1995 「鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」
- ・ JIS Z 3106-2001 「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」
- ・ JIS G 0581-1984 「鋳鋼品の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」
- ・ JIS Z 4560-1991 「工業用 γ 線装置」
- ・ JIS Z 4606-1995 「工業用 X 線装置」
- ・ JIS Z 2306-1991 「放射線透過試験用透過度計」
- ・ NDIS 1403-1999 「デジタルラジオグラフィックシステムによる放射線透過試験方法」

1.2) 放射線源

放射線源は、配管条件（実透過厚さ）に応じて適切に選択すること。放射線源の種類は、一般には X 線、 ^{192}Ir 、 ^{60}Co などがある。放射線源の使用に当たっては、以下の法令に定められた手続き、取扱い並びに管理（撮影場所での遮へい、管理区域の設定及び一般の人の立入の制限等）を遵守すること。

- ・ 放射線同位元素等による放射線障害防止に関する法律（文部科学省）
- ・ 電離放射線障害防止規則（厚生労働省）
- ・ 許可使用に係わる使用場所の一時変更届け(ガンマ線)（文部科学省）

- ・ガンマ線透過写真撮影作業届け（所轄労働基準監督署）
- ・消火活動に重大な障害を生ずるおそれのある物質貯蔵・取扱届書（所轄消防署）
また線源の使用、取扱いを行う者は、その種類に応じ以下に示す有資格者とするこ
と。
- ・エックス線作業主任者
- ・ガンマ線透過写真撮影作業主任者

1.3) 試験方法の種類

放射線透過画像（フィルムまたはデジタル画像）を用いて配管の厚さを調査する方法としては、次の2種類がある。

配管管壁の内面・外面の接線方向に向けて照射した撮影による透過画像を用いて、厚さの境界面をその近傍の濃度差から濃度の不連続部（エッジ）として読取り、その内・外面2点間の距離を配管の外径または同時撮影していた既知の基準寸法試験片と比較することにより、厚さを直接求める方法（以下、エッジ法という。撮影配置を**附属書6 図8**に示す。）

配管管壁に対して配管面に向けて照射した撮影による透過画像を用いて、厚さの面的な減肉を濃度差から読取り、同時撮影していた階調計と透過画像濃度との関係（検定線）を用いて、測定部の濃度を検定線と比較することにより厚さを求める方法（以下、濃度差法という。撮影配置を**附属書6 図9**に示す。）

本試験において厚さを測定する方法は、**エッジ法**とする。

なお、**濃度差法**は、エッジ法による測定（撮影）条件を検討するために若しくは修正・追加するために補助的手段として用いることができる。ただし、この濃度差法による結果を厚さの測定結果（数値）として用いてはならない。（濃度差法は、現状の技術においては検定線の作成が難しく精度も十分ではないことから、厚さを測定値として求めるには適していない。しかしながら、配管管壁に減肉傾向のある範囲を濃度差から面的に探索することに対しては有効である。）

注）試験の種類と他の規格の適用または準用について

~~本試験の種類は a) 2) に示した通りであるが、従来から広く認識、実施されている放射線透過試験を活用し、近年の電子機器類の発達に伴う画像デジタル化技術を用いて透過画像を電子的記録媒体に取込み、この画像に対して拡大、コントラスト強調等の有効な画像処理を施す方法を加味して、厚さ測定を可能とするよう応用されたものである。~~

~~放射線透過試験に関する既存の JIS の規定は材料または溶接部の内部欠陥の検出が目的であるが、本試験では厚さ測定を目的としており、従って JIS の内容は、本試験の全てに対して適用されるべきものではない。配管厚さを測定するためには、透過画像の配管管壁が識別可能であることが必要条件となるが、JIS で規定されている透過写真の濃度ではエッジが散乱線等の影響により識別不可能となる可能性がある。エッジを識別するには、やや薄い程度の画像濃度が適しているといわれている。すなわち、JIS による透過写真の撮影方法の規定~~

~~については本試験に適用または準用可能であるが、透過写真の必要条件・透過写真の具備すべき条件については本試験では画像処理を行うため異なり、適用はできない。~~

~~なお、後者の透過写真の判定条件に関しては、NDIS-1403（デジタルラジオグラフィックシステムによる放射線透過試験方法）の規定は適用、準用し得るものである。~~

1.4) 測定条件に対する試験適用可能範囲の明確化

本試験の適用にあたっては、事前に行う予備試験等を通じて以下の測定条件の組合せに対する試験の可否を確認し、適用可能範囲を明確化しておくこと。この事前に明確化されている適用可能範囲を超えて、測定しようとする試験対象を選んではならない。

測定条件：

配管仕様による口径（呼び径）厚さ（スケジュール番号）、材質、放射線源の種類、撮影の方法、保温板金の装着の有無、並びに配管内部への媒体の有無 等

このような各測定条件の組合せに対する適用可能範囲を検討した例を**附属書 6 表 1**に示す。

1.5) 試験における測定値算出方法の適切化

本試験測定においては、撮影方法（撮影の位置関係）、測定基準（校正方法）等に応じて厚さの実寸法と撮影された透過画像上での像の寸法の対応関係が異なる。これを考慮して透過画像から求められる厚さの値の算出方法を適切に定めること。

1.6) 透過画像（フィルムまたはデジタル画像）の撮影条件の明確化

本試験測定においては、2)で述べる測定範囲に対して減肉の検出を可能とするために、その透過画像に関する以下の撮影条件は、撮影しようとする試験対象毎に予め明確化しておくことを必要とする。

撮影条件：

試験対象に対する撮影の位置、方向、角度、撮影枚数（周方向の分割数）、撮影の位置については、配管仕様（口径、厚さ）に応じて、**附属書 6 図 8** 並びに **附属書 6 図 10** に示す配管両壁撮影または **附属書 6 図 11** に示す配管片壁撮影のいずれかの撮影方法とすること。撮影の方向、角度は、周方向に分割し撮影する場合に、内部流れの偏流等を参考として減肉傾向が記録されるような撮影方法とすること。

1.7) 試験要領（エッジ法による試験）

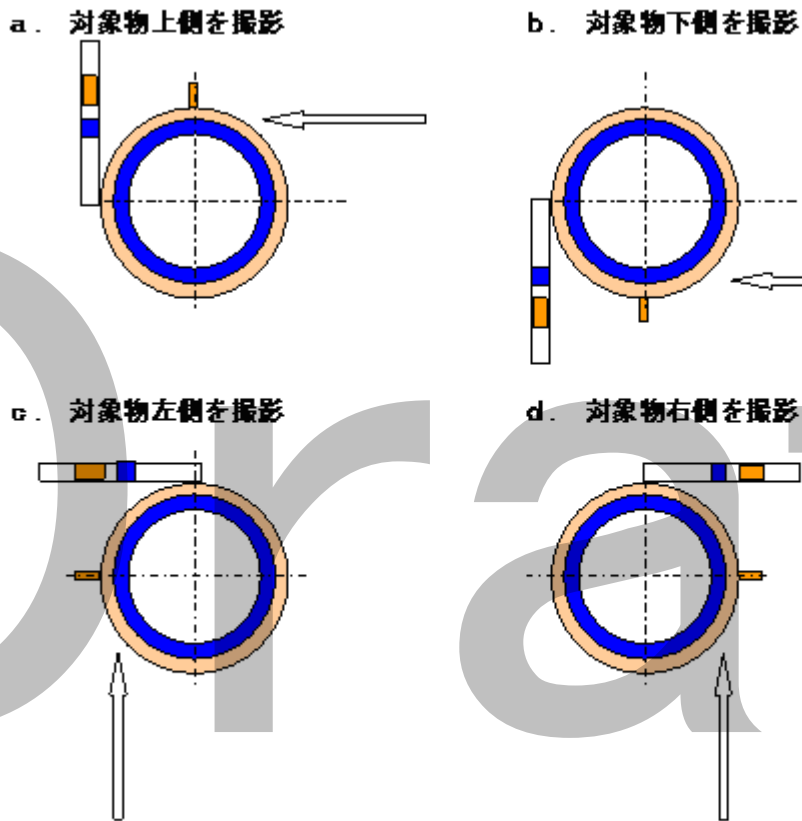
試験対象に対する撮影配置

1.4) 及び 1.6) の規定に従って選定された方法により試験対象への撮影装置（線源）、記録媒体等の配置を行うこと。

試験の測定基準（校正方法）

厚さの値を測定するため、以下に示す方法を例とした校正方法を行うものとする。

- ）既知の基準となる寸法試験片を同時撮影する方法（試験片は、JIS 規格で規定された階調計を使用しその寸法を利用するかまたは寸法精度が明確である試験片を使用するものとする）
- ）配管外径を用いる方法



附属書 6 図 14 配管片壁撮影配置による 4 等分撮影 (4 回撮影) の例

案

する。

$$\text{初回検査時期} = \text{伝熱管の全寿命} \times \text{検査時期設定係数}$$

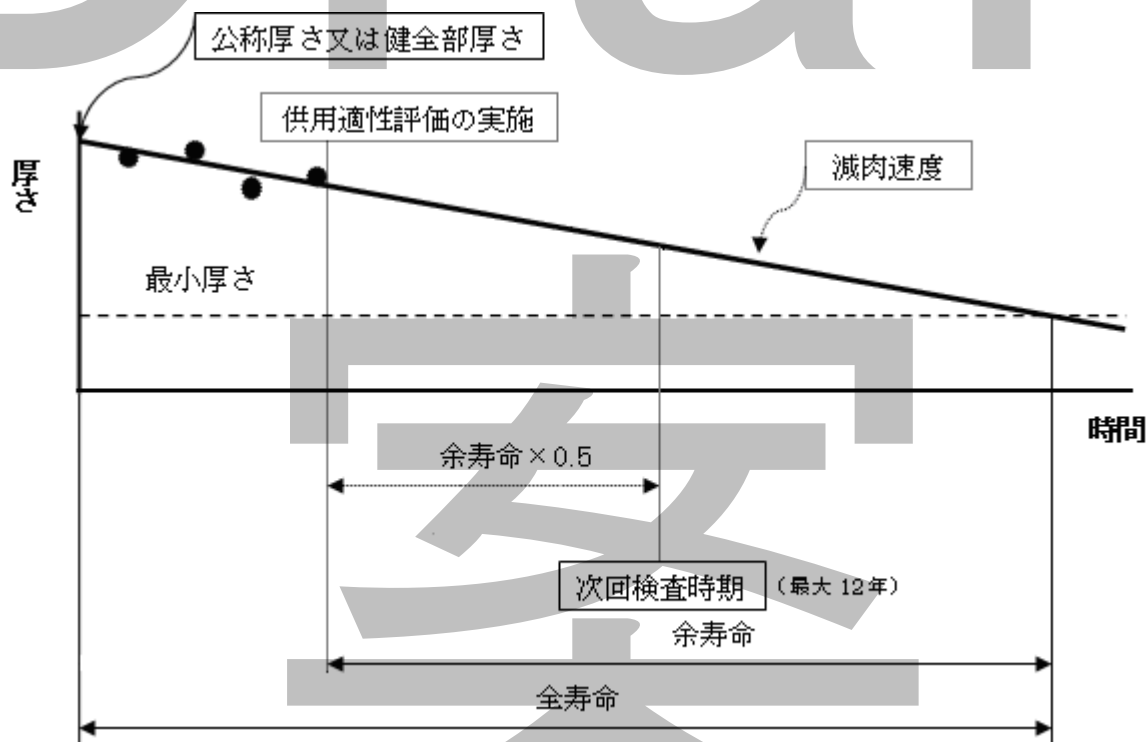
b) その後の検査時期は、 $\text{検査時期} = \text{余寿命} \times \text{検査時期設定係数}$ とする。ただし、最大 12 年とする。

2.5.2 検査時期設定係数

熱交換器伝熱管の検査時期設定係数は、次の a) ~ c) により決定する。

なお、期設定係数は、伝熱管の減肉の進展速度のバラツキと検査精度のバラツキの両方を考慮して設定する。検査時期設定係数を 0.5 とする場合の次回検査時期の決め方の例を、**附属書 7 図 1** に示す。

- 当該熱交換器伝熱管の全寿命を把握している場合又は本文 2.2.2 の類似又は同等の設備の条件を満足し、かつ、伝熱管の全寿命を把握している場合、検査時期設定係数を最大 0.8 とすることができる。
- 減肉要因がない場合は、検査時期設定係数を最大 0.8 とすることができる。
- a)又は b) 以外の場合、検査時期設定係数は、最大 0.5 とする。



附属書 7 図 1 減肉における次回検査時期 (検査時期設定係数 = 0.5 の場合)

3. 供用適性評価の再評価

設備の供用中に、次の a) ~ c) のいずれかに該当する事象が生じた場合には、設備管理帳票類の変更も含め、供用適性評価の再評価を行う。

- 新たに厚さ測定データが得られた場合
- 運転条件の変更を行う場合

c) 伝熱管に防食対策を行う場合

3.1 新たに厚さ測定データが得られた場合の再評価

a) 再評価の条件

新たな厚さ測定データが得られた場合には、余寿命の再評価を実施する。ただし、新たな厚さ測定データがこれまでの余寿命の算定で用いたデータより緩やかな結果を示すデータであることが明らかな場合には、再評価は行わず、前回検査時のデータより得られた余寿命をから、前回検査から今回検査までの期間を引いた残りの期間を新たな余寿命としてもよい。

b) 再評価の方法

1) 減肉速度

2 回以上の厚さ測定データが得られた場合は、次式により得られる減肉速度 c_i ($i=1 \sim$ 測定回数)の最大値を減肉速度とする。ただし、同一又は類似の使用環境と考えられる熱交換器における減肉速度の経時変化がデータで明らかな場合には、ここで求まる減肉速度と、本文 3.3 項の規定に従って直近 2 回の測定データから求まる減肉速度及び最小二乗法による回帰直線近似から求まる減肉速度それぞれを求めて、減肉速度の経時変化のデータと比較して、測定データから求めたもののうち最も適切と考えられる減肉速度を用いてもよい。

$$c_1 = \frac{(\Delta t)_1}{L_1}, \quad c_2 = \frac{(\Delta t)_2}{L_2}, \quad \dots, \quad c_i = \frac{(\Delta t)_i}{L_i}$$

ここに、

c_i : i 回目の測定データより求まる減肉速度 (mm / 年)

(t_i) : i 回目の検査での最大減肉量 (mm)

L_i : i 回目の測定までの伝熱管の使用期間 (年)

最大減肉量は、初期厚さまたは健全部の厚さ、若しくは公称厚さに管厚さのプラス側許容差を加えた厚さからの減肉量とする

2) 余寿命の再評価

伝熱管の余寿命の再評価方法は、2.4 の規定による。

c) 次回検査時期の再設定

伝熱管の次回検査時期は、b) により求めた余寿命を用いて 2.5 の規定による。

3.2 運転条件の変更を行う場合の再評価

a) 再評価の条件

運転条件の変更を行う場合の再評価の条件は、本文 6.2.1 の規定による。

b) 再評価の方法

再評価の方法は、次の 1) 及び 2) による。

1) 次回検査時期の設定後に運転条件を変更した場合、変更後 3 年以内に厚さ測定を行う。この場合の減肉速度の算定および余寿命の算定は次の手順による。

1.1) 運転条件の変更までは、既知の減肉速度を用いて減肉量を推定する。

附属書 10 表 5 各種検査方法と検査箇所との組合せ

	検査手法	検査箇所
水素侵食発生までの潜伏期間評価のための検査	組織観察 (SUMP 法) 炭化物同定 (レプリカ法) 硬度測定 (Hv)	母材 母材 溶接熱影響部

材料の組織は製作された状況により異なるため、組織・炭化物同定試験は、部品毎に行う必要がある。製作ロット毎に組織検査を行い、パーライト組織を呈しているものについては炭化物同定試験を行い、もっとも厳しい評価となる部位を決定する。設備毎に、そのようにして決定された P_v^{cr} または P_w^{cr} を余寿命の限界値とする。

4.2 適用検査技術

金属組織検査法は C-0.5Mo 鋼の水素侵食に対する脆化感受性が、金属組織又は炭化物の種類・形態により判定されていることから、採用されている検査方法である。金属組織の判定法、炭化物の同定法は、附属書 6 の 5.2.6 金属組織検査法 (レプリカ法) の例による。

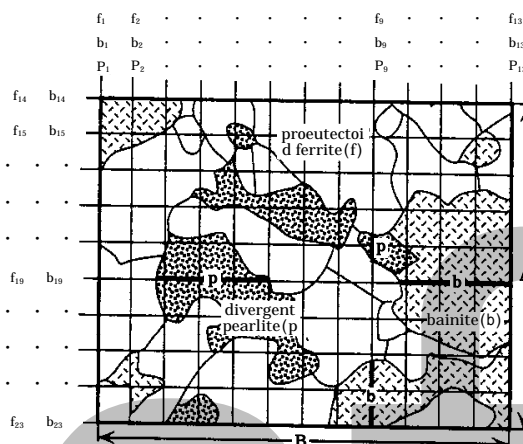
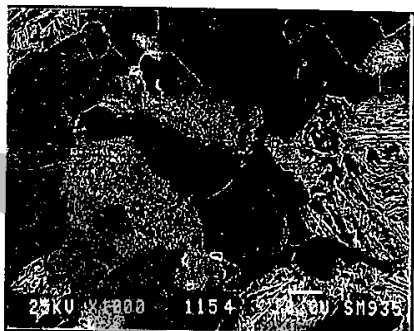
a) 金属組織の判定

~~フェライト量とパーライト量を定量化するため、光学顕微鏡、又はレプリカに金蒸着処理を行い走査型電子顕微鏡により、観察することが行われている。実際の計測について、ASTM E-112 に準拠した線分法の例を附属書 10 図 6 示す。測定するスンプ組織写真を縦横のメッシュに切り、パーライト、ベーナイト及びフェライトの各組織にかかる縦横の長さの総和をメッシュ長さの総和で割ることにより定量化するものである。~~

b) 炭化物の同定方法

~~炭化物の同定は、X線回折法により、 $M_{23}C_6$ 型炭化物と Fe_3C 型炭化物に対する定量分析を行う。このとき、サンプルは、評価対象部位について、鏡面研磨後エッチング処理を行い、レプリカフィルムを貼り、その後、採取されたレプリカについて、超音波によって炭化物の分離及び抽出を行う。~~

Microstructure



- ・ Proeutectoid Ferrite = $(f_1 + f_2 + \dots + f_{23}) / (13A + 10B) \times 100$
= 63%
- ・ Bainite = $(b_1 + b_2 + \dots + b_{23}) / (13A + 10B) \times 100$
= 23%
- ・ Divergent Pearlite = $(P_1 + P_2 + \dots + P_{23}) / (13A + 10B) \times 100$
= 14%

附属書 10 図 6 線分法による組織面積率の測定例^{f6)}

4.3 C - 0.5Mo 鋼の Pv 値による水素侵食暴露下の余寿命評価事例

a) 評価データ

機種名	槽	稼動開始年	1980 年
検査年	2001 年	稼動時間	136,000 hr
材料名	A204GrB	焼鈍有無	有
使用温度	420	使用圧力	1.785MPaG
水素分圧	0.745MPaA		
検査方法	SUMP, UT	検査結果	M ₂₃ C ₆ 炭化物比率：60% 損傷きず認めず

b) Pv 値評価

$$P_v = \log(10.2PH_2) + 3.09 \times 10^{-4} T (\log(t) + 14) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_v = \log(7.6) + 3.09 \times 10^{-4} \times (420 + 273) \times (\log(136000) + 14)$$

$$= 4.978$$

評価 : 5.48 以下のため、OK

なお、限界値 5.48 は、附属書 10 図 2 より読み取った。

c) Pv 値評価による余寿命評価

附属書 14 表 7 13Cr 系ステンレスクラッド鋼の補修溶接推奨例

検討項目		フェライト系 (D430 + D410 系 ⁽¹⁾)	オーステナイト系 (D309 系)	インコネル系 (DNiCrFe-2 又は 3)
施	溶接割れ	遅れ割れ (横割れ)		
		高温割れ		
工 時	予・直後熱、PWHT ⁽²⁾	要	不要	不要
	非破壊検査	PT/MT	要	要
		UT	要 ⁽³⁾	不用
運 転 時	ガルバニック腐食			
	熱応力(熱伸び差)			
	割れの母材への進展 ⁽⁴⁾			
施工性及びコスト				

注⁽¹⁾ Nb 含有材。

⁽²⁾ 母材側から要求される場合を除く。

⁽³⁾ 初層の横割れ検査(ビード上操作、余盛除去)が望ましい。

⁽⁴⁾ 肉盛溶接部に割れが存在する場合の母材への進展性。

備考 問題なし/優れている、 良好、 やや問題あり/やや劣る

12.4.2 オーステナイト系ステンレスクラッド鋼の溶接における希釈率

オーステナイト系ステンレスクラッド(オーバーレイ)鋼製機器の補修溶接を実施するときには、ステンレス鋼部分の溶接性を良好にするためには、材料の成分条件から、希釈率を推定する必要がある。

異材溶接では溶接金属は母材からの希釈の影響で、化学成分組成が変化し、溶接金属の金属組織が大幅に変化する。母材 A に異種溶接材料 B で溶接した場合の希釈状況を**附属書 14 図 9**に示す。

希釈率(α)は $A / (A+B)$ (%) で計算でき、溶接金属の化学組成は $\alpha A + (1 - \alpha) B$ で得られる。ステンレス鋼の異材溶接では、図に示すようにシェフラー組織図を用いて溶接金属の化学組成とミクロ組織変化を予測することができる。炭素鋼上に D309 ビードを置いた場合の溶接金属組織を検討するには、シェフラー組織図上に、D309 と炭素鋼の位置をそれぞれの化学成分(Ni 当量、Cr 当量)からプロットする。

溶接金属の化学成分と組織は炭素鋼と D309 の点を結ぶ線上にあり、母材(炭素鋼)からの希釈率に応じて、左側に移行する。すなわち、希釈率が大きくなるに従って溶接金属中のデルタフェライト量が低下し、約 40% でデルタフェライト量が 0 になり、マルテンサイトが生成される領域となる。高温割れ防止には 4% 以上のデルタフェライト量が必要であるため、