

再処理工場 ガラス固化体貯蔵設備 収納管、通風管観察時の保修判断基準策定について（報告）

1. はじめに

2019年10月18日、ガラス固化体貯蔵設備の収納管および通風管観察における保修判断基準の検討状況について中間報告した。中間報告では、高線量下におけるノイズ除去方法、深さ方向の腐食の評価が課題となっていた。このたび、上記課題の検討を含め、収納管および通風管の保修判断基準の策定が完了したことから報告する。

2. 保修判断基準策定に関わる経緯

2017年6月30日に原子力規制委員会へ報告した、指示文書「日本原燃株式会社廃棄物管理施設ガラス固化体貯蔵建屋の下部プレナム等における変色部や錆の発生に係る調査について（指示）」（2015年9月2日 原規規発第1509026号）に基づく廃棄物管理施設（以下「E施設」という。）の下部プレナム調査最終報告書において、収納管、通風管に確認された変色部は、付着物によるもので、今後の長期的な健全性は維持されると報告している。また、ガラス固化体貯蔵設備の健全性が維持されていることを確認するために、計画的に収納管、通風管および円環流路を対象とした観察をすすめている。

一方、観察時に、どのような状態になっていれば、設備の健全性に影響があり、保修が必要となるかの基準を策定する必要があり、これまで検討を進めてきた。

3. 収納管、通風管観察結果に基づく保修要否判断方針

収納管、通風管をカメラにより観察した結果、アルミ溶射皮膜表面に変色が確認された場合、変色の状態を画像処理により定量化し、前回観察時と変色の濃さ、範囲の比較を行い、設備の健全性に影響を及ぼす腐食である場合に収納管、通風管の保修が必要と判断する方針である。観察画像の概要を（1）に、観察画像の評価方法、保修判断基準の検討結果を（2）～（3）に示す。

なお、円環流路については冷却空気の流れを阻害する塵埃の有無を観察する。

(1) 観察画像の概要

観察画像は、以下の撮影用自走台車の搭載カメラによって取得する。撮影用自走台車、撮影画像例を図1に示す。



図1 撮影用自走台車と撮影画像例

(2) 観察画像の評価方法

観察画像の評価は、「色空間法」および「射影変換法」により実施する。

色空間法：観察画像から得られるRGB（赤（Red）、緑（Green）、青（Blue）の三つの原色を混ぜて幅広い色を再現する色の表現法）カラー情報を色の識別に適した色空間（ $L^*a^*b^*$ ）に変換し変色部の色の違いを定量的に評価する手法である。 L^* は明度を表し、 a^*b^* は色度を表している。

射影変換法：既知である物体の寸法情報および角度情報を使って画像上の特定領域の面積を算出する手法である。

a. 色空間法による「外観（変色）」の評価について

(a) 「外観（変色）」評価の検証結果

検証試験では、撮影装置を用いてアルミ溶射試験片を撮影し、撮影した画像を色空間法にて解析し $L^*a^*b^*$ を算出することにより、外観の色と腐食状態の対応付けを行った。

検証試験の結果、相対L値によって母材のさび（全面腐食）とそれ以外の変色部（付着物（酸化鉄）等）の判別が可能であることを確認した。また、全面腐食中心部および全面腐食周辺の腐食部が判別できる相対L値0.55を閾値とした（図3参照）。相対L値による判別は光の当たり方、撮影位置が変わっても可能である。

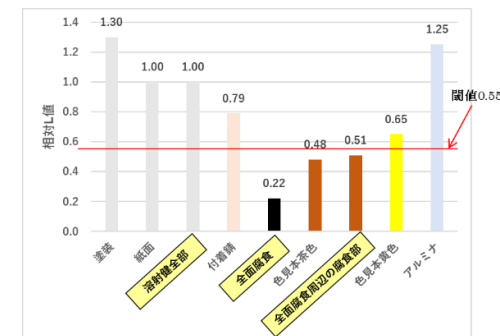


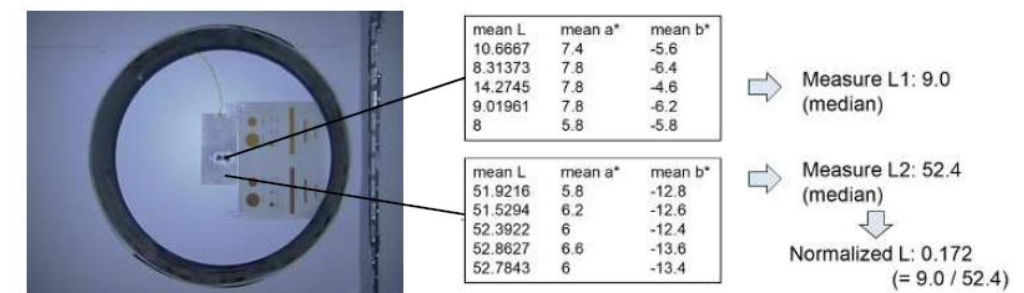
図3 相対L値による判別の検証結果

(b) 母材のさび（全面腐食）の「外観（変色）」による判断基準

「外観（変色）」による母材のさび（全面腐食）について、色空間法にて、変色部の色を定量化し、明度（L値）の比（相対L値）を判断基準とした。

- ・相対L値が0.55以上である場合：母材のさび（全面腐食）に該当しないと判断
 - ・相対L値が0.55未満である場合：母材のさび（全面腐食）の可能性があると判断
- 相対L値の計測手順を図2に示す。

- ① RGB 画像を $L^*a^*b^*$ に変換する。
- ② 変色部の領域内のL値の中央値を計測する。
- ③ アルミ溶射健全部のL値の中央値を計測する。
- ④ 変色部L値とアルミ溶射健全部L値の相対L値を算出する。



(RGB 画像) ⇒ ($L^*a^*b^*$ に変換) ⇒ (相対L値算出)

図2 相対L値の計測手順

b. 射影変換法による「面積」の評価について

(a) 母材のさび（全面腐食）の面積による判断基準の検討結果

面積による判断基準について、アルミ溶射皮膜の劣化モデルおよびアルミ溶射試験片に対する劣化加速試験の結果をもとに検討した。アルミ溶射皮膜の劣化モデルを表1に、劣化加速試験結果を表2に示す。

公益社団法人 日本道路協会が例示するアルミ溶射皮膜の劣化モデルでは、劣化レベルⅢから赤さびの範囲が広がり始め、劣化レベルⅣでは30%以上の面積で赤さびが発生し、溶射金属の電気化学的防食機能が消失する状態である。

劣化加速試験の結果、劣化レベルⅢから劣化レベルⅣに達するまで10年以上の尤度があることから、劣化レベルⅢの状態では経過観察とし、劣化レベルⅣに達した場合に保修が必要と判断する。劣化レベルⅣの状態については、連続した3000mm²（劣化加速試験片150mm×75mmの面積の30%相当）以上の赤さびまたは、JIS Z 2381「大気暴露試験方法通則」の付属書2「暴露試験用試験片の形状及び寸法」に示される「めっき」および「塗装関係」の試験片寸法を参考に、「辺の長さ100mmの正方形内に、合計面積3,000mm²（辺の長さ55mmの正方形の面積あるいは直径62mmの円に相当）以上の赤さび（全面腐食）が発生する状態」と定義する。通風管下端の変色部評価対象は通風管内面から100mmの範囲とする（図5参照）。

表1 アルミ溶射皮膜の劣化モデル

レベル	金属溶射皮膜の状況	劣化レベルの進行例
I	表面的な変化は見られない。ただし、施工の不均一な部分、局所的な原因による劣化部では、鋼素地からのさびの発生したものが見られる。狭あい部等における代替塗装施工部の膜厚不足箇所等に軽微な点さびの発生が始まる。	
II	皮膜表面及び皮膜内部が安定している時期で防食性を維持している。皮膜の薄くなりやすい部材端、傷つき部、エッジ部等や皮膜の薄い箇所に赤さびが出始める。	
III	皮膜内部の不働態化が進み、皮膜の電気化学的防食作用の低下が始まる時期である。皮膜の薄い箇所は環境遮断効果の低下が見られ、赤さびの範囲が広がり始め、周辺は皮膜の消耗が早くなる。	
IV	30%以上の面積で赤さびが発生する。溶射金属の消耗と相まって環境遮断効果及び電気化学的防食機能が消失する。外観的には概ね前面にわたって赤褐色に変色する。	

（公益社団法人 日本道路協会編「鋼道路橋防食便覧」丸善出版株式会社 2017 頁V-51より引用）

表2 アルミ溶射試験片に対する劣化加速試験の結果

（溶射皮膜160μm、封孔処理なし、人工傷付与）

初期状態		30年経過相当	
10年経過相当		40年経過相当	
20年経過相当		50年経過相当	

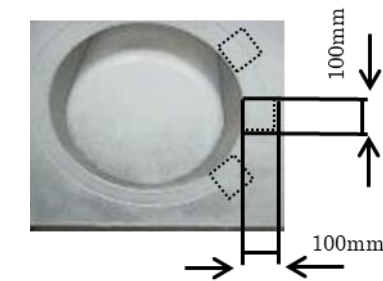


図5 通風管下端の変色部評価対象の範囲

(b) 母材のさび（全面腐食）の面積による判断基準

射影変換法により、観察画像から実寸面積を算出し、連続した3000mm²（劣化加速試験片150mm×75mmの面積の30%相当）以上の赤さびまたは、辺の長さ100mmの正方形内において30% (3000mm²) 以上の赤さびの有無を「面積」の判断基準とした。

面積の計測手順を図4に示す。

- ① 既知の構造物の寸法（円筒直径）を指定する。
- ② 変色部を含む測定範囲を指定する。
- ③ 変色領域が自動で検出され、面積が計算される。

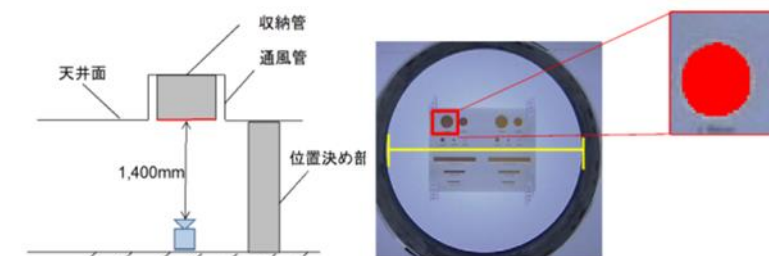


図4 面積の計測手順

c. 放射線ノイズ除去の検討結果

「フレーム間処理法」により取得画像のノイズ低減処理を行う。本手法は同一アングルの静止画を数枚撮影し、ノイズの影響のない状態での輝度値から一つ採用することでノイズが除去された画像を作成する手法である。ノイズ除去の検証試験の結果、色、面積の定量化に十分な放射線ノイズ除去が可能であることを確認した。フレーム間処理法の概要を図6に示す。

5枚撮影した場合の例

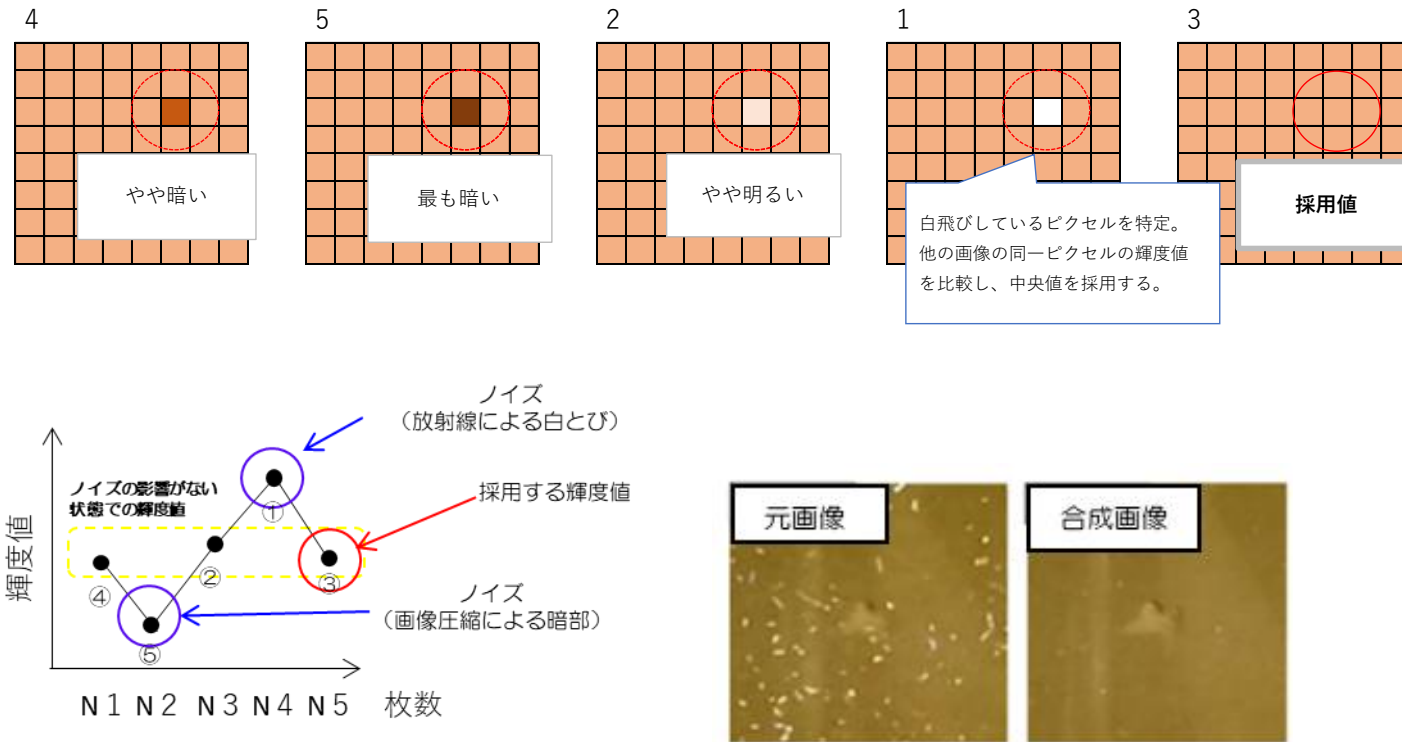


図6 フレーム間処理法の概要

(3) 保修要否の判断基準

保修要否の判断基準は、変色部とアルミ溶射健全部との相対L値（明度の比）が0.55未満、かつ、変色部の劣化状態が劣化レベルIVの場合、保修が必要とする。

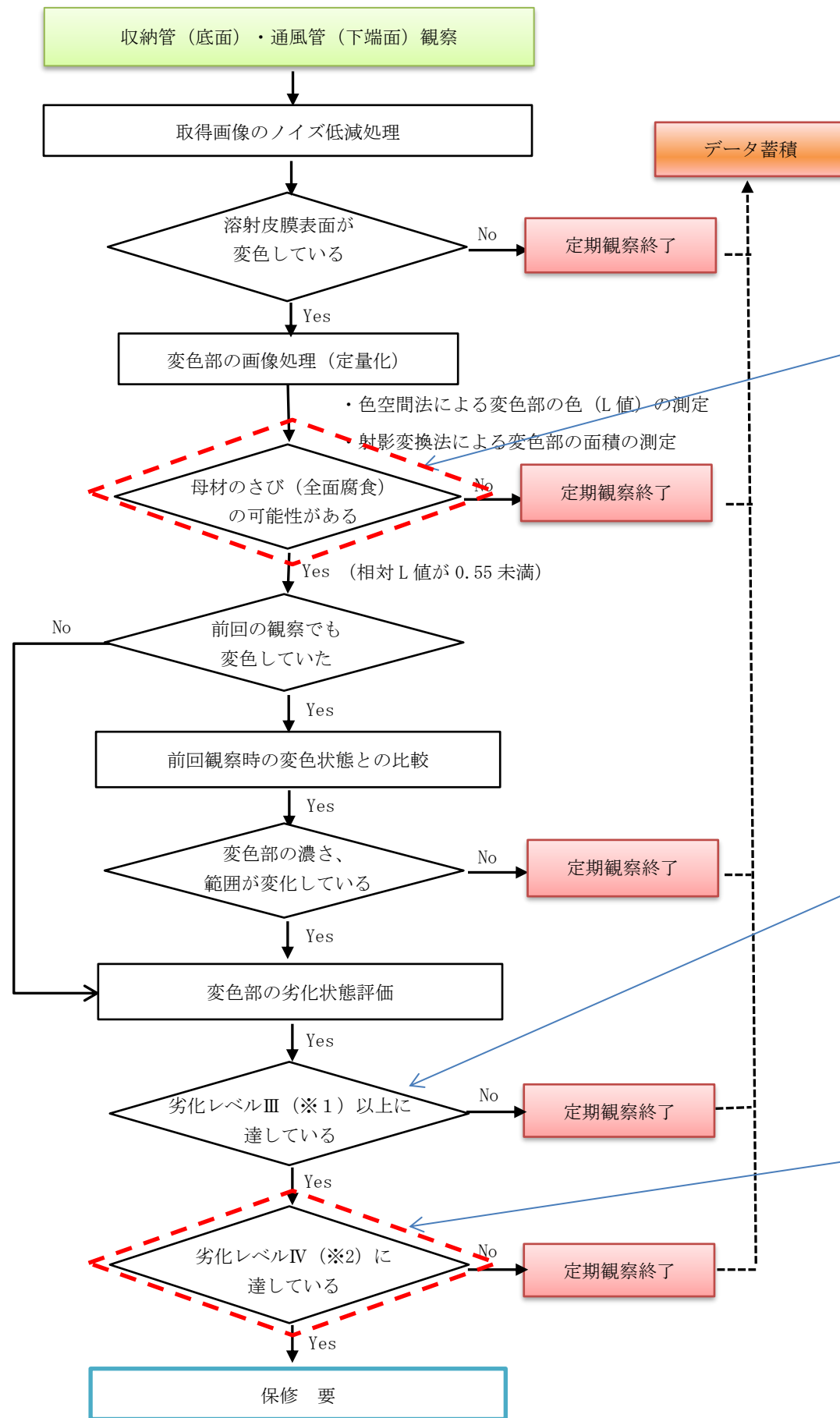
劣化レベルIV：連続した面積3000mm²以上の赤さび発生または、任意の100mm×100mmの範囲内に存在するレベルIIIの赤さびの合計面積が3000mm²以上

収納管、通風管の観察フローを添付資料-1に示す。

4. 深さ方向の腐食について

収納管外面および通風管内面の炭素鋼母材の設計腐食代は3.5mmであるが、アルミ溶射試験片に対する劣化加速試験の結果、試験片の炭素鋼母材の腐食深さは50年相当経過しても最大1mm程度であった。

以上から、劣化レベルIVに達したとしても、機能上必要とされる厚さを下回ることではないと判断する。



観察フロー図

変色部 L 値 (A)

健全部 L 値 (B)

相対 L 値 = (A) / (B)

検証試験によりアルミ溶射試験片(変色部サンプル)を用いて変色部の色と腐食状態の対応付けを行った結果、変色部の色の判断基準は、変色部とその近傍のアルミ溶射健全部の色の明度(L値)の比(相対L値)0.55」を閾値とした。

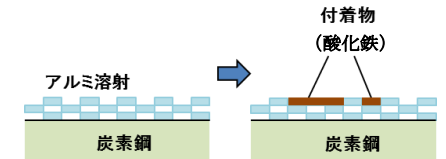

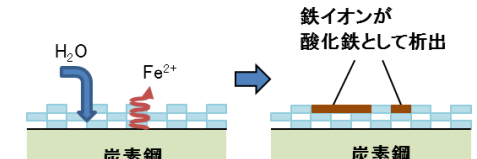
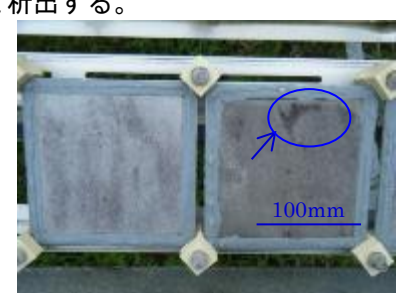
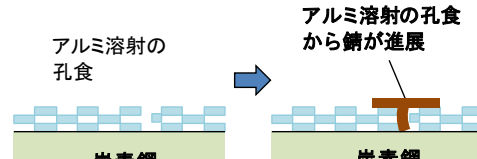
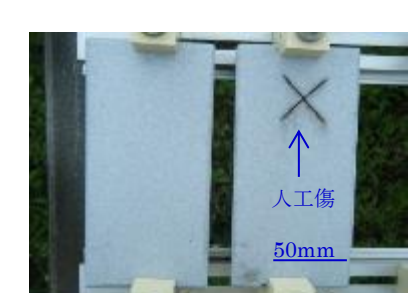
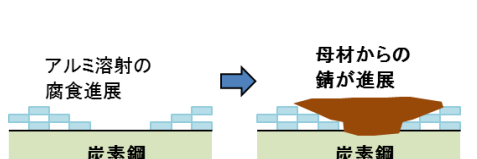

図 変色部の色の判断基準

※1 劣化レベルIII：皮膜の防食作用が低下し、赤さびの範囲が広がり始める状態(劣化加速試験30年経過相当の状態)

※2 劣化レベルIV：連続した面積3000mm²以上の赤さび発生または、任意の□100mmの範囲内に存在するレベルIIIの赤さびの合計面積が3000mm²以上(劣化加速試験50年経過相当でも劣化レベルIVに至っていない)

3000mm²の根拠：公益社団法人日本道路協会が例示するアルミ溶射皮膜の劣化モデルの劣化レベルIV以上である30%以上の面積を参考に、劣化加速試験片面積の30%とした。

「変色（腐食）メカニズム」と「想定される変色部の特徴」の比較

		想定される変色部の特徴			
		付着物（酸化鉄）	鉄イオン浸み出し	母材の錆（孔食）	母材の錆（全面腐食）
メカニズム		 <p>アルミ溶射皮膜の上に外部から飛来した酸化鉄が付着する。</p>  <p>付着物（曝露試験片の例）</p>	 <p>アルミ溶射内に水分が浸み込み、母材（炭素鋼）から鉄イオンが溶け出し、アルミ溶射皮膜表面で酸化鉄として析出する。</p>  <p>鉄イオン浸み出し（曝露試験片の例）</p>	 <p>アルミ溶射皮膜の孔食により母材が露出し、母材の腐食生成物である錆が露出する。</p>  <p>孔食（曝露試験片の例、人工傷）</p>	 <p>アルミ溶射皮膜の腐食の進展により母材が露出し、母材の腐食生成物である錆が露出する。</p>  <p>全面腐食の例（位置決め部材） ※あくまでも評価対象は収納管、通風管であり、位置決め部材は腐食しても設備の健全性への影響はない。</p>
変色（腐食）の発生の可能性（収納管、通風管）		○：外観、化学組成、表面の凹凸、アルミ溶射皮膜、洗浄処理の効果の観点から、付着物である可能性が高い。	△：アルミ溶射膜が施工時の管理値以上あることを踏まえると本メカニズムによる発生の可能性が低い、否定できない。	×：洗浄によって変色部が除去されたこと、15年間の曝露試験結果を踏まえると本メカニズムによる発生は考え難い。	×：変色部においてもアルミ溶射が確認されていること、洗浄によって変色部が除去されたことを踏まえると本メカニズムによる発生は考え難い。
変色（腐食）の発生の可能性（位置決め部材）		×	×	×	○：変色部の下地の鉄が露出して、軽微な腐食に至った部分が確認された。
【外観】	色	茶褐色	茶褐色	茶褐色	濃い茶褐色
	模様	一定のエリア内に点在（周囲は変色が認められない）	一定のエリア内が変色（変色部が連続的）	点在（写真はX型の人工傷を付与）	全面
【面積】		—	—	—	前回（数十 cm² 程度の変色域）からの比較で面積が急激に広がる
【表面凹凸（体積膨張）】		酸化鉄が表面に薄く付着しており、表面の凹凸はほとんどない	酸化鉄が表面に薄く付着しており、表面の凹凸はほとんどない	母材上の錆が薄い場合はアルミ溶射表面より凹み、腐食が進展するとアルミ皮膜表面より盛り上がる 但し、孔食のため、目視では判断できない可能性がある （個々の点状・孔食の寸法、周囲とのコントラスト・解像度の観点から）	母材上の錆が薄い場合はアルミ溶射表面より凹み、 腐食が進展するとアルミ皮膜表面より盛り上がる

記号説明

- ：変色部の発生メカニズムとなる可能性が高い。
- △：変色部の発生メカニズムとなる可能性が低い。
- ×：変色部の発生メカニズムとなる可能性は考え難い。

← 設備の健全性への影響：小
経過観察とする

→ 設備の健全性への影響：大
修理 要とする