

夏季、天井仕上げ材が結露してかびが発生した

現象は結露であり状況も十分に把握できているが、複数の対策案を立案し、モデル試験施工を行い、そこで得られるデータを検証・検討することとした。また、気流シミュレーションの結果も考察し、最終対策案を決定する。

状況

竣工直後の外廊下方式リゾート型のホテルで、約27%の客室の天井材（軽鉄下地+石膏ボードt=12.5ビニルクロス貼り）にかびが発生した（図1）。天井材表面が結露してかびが発生し、室内側表面に拡大したことが判明したので、かびた天井材を更新し、かつ対策として天井裏換気口を設けた。

しかし、翌年も、異常な高温多湿の気候も相まって、約75%の客室で同様の現象が発生した。2年続けてのクレームとなったので、根本的な対策が不可欠との認識で対応した。

結露
壁などの表面が、室内における露点温度以下となり、空気中の水蒸気が凝縮する現象のこと。たとえば、温度20℃、湿度50%の室内における露点温度は、9.6℃であるので、壁や窓などの表面が、9.6℃以下の場所で結露が発生する。

図1 天井材に発生したかび



予備調査

結露によるかびの発生は特定できていたので、現状を把握するために、壁付きルームエアコンの特性、使用勝手、リネン取替え時の作業手順、建築的なすき間風などを調査し、結露に至る過程を推測した。

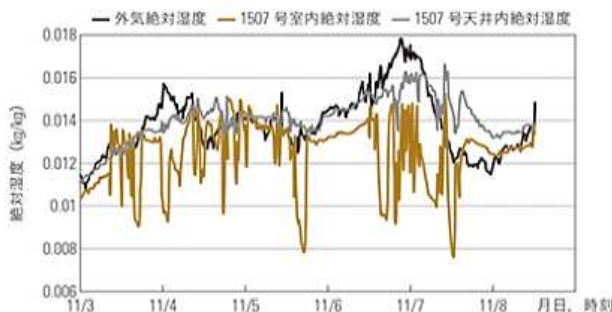
- かび発生状況**：全館にわたり約75%の客室の天井に何らかのかびが発生している（偏在していない）。
- 壁付きルームエアコンの特性**：
 - 吹出し温度は、5～10℃であり、吹出し温度の制御はなく、成り行きであった。
 - 吹出し口（フラップ）の角度は正常（水平よりやや下向き）である。無理やり上

かび
かびは、菌糸と呼ばれる糸状の細胞からなり、胞子によって増殖する。生活空間では梅雨、台風の季節など湿気の多い時期・場所に、たとえば食物、衣類、浴槽の壁などの表面に発生する。多くの場合、その発生物の劣化や腐敗を起こし、あるいは独特の臭気を醸成し、かび臭いなどといわれる。

に向けた場合、その位置をキープし、吹出し空気が天井をはって天井面付近温度が冷やされている状態である。

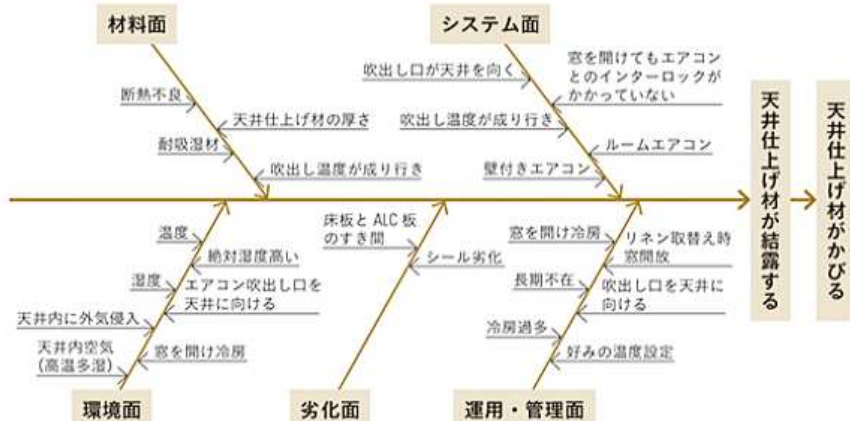
- 使用勝手**：一般に、高温多湿地域に立地するホテルは、窓を開放すると、冷房が切れる仕組みが定着しているが、当該ホテルは「窓を開けても冷房できる」ことを売りにしており、インターロックなどの制御をしていなかった。また、リネン取替え時も同様であった。
- 建築的なすき間風**：デッキプレート床板とALC壁板との納まりですき間があり、高温多湿の外気が天井裏に侵入している。外気温度が27～28℃の11月上旬にあって、図2からもわかるように、外気と天井内の絶対湿度に相関があり、外廊下のすき間から天井裏に外気が侵入していることがうかがえる。

図2 1507号室の外気と天井内絶対湿度の関係



- 結露に至る過程**：夏季のシーズン、建築的なすき間より、客室天井裏に高温多湿の湿った空気が侵入している環境で、エアコンの冷風が直接体に当たることを避けるため、お客様などがフラップを天井面に向け冷房をすることにより、天井材が冷え、天井材の裏面が露点温度以下となり結露する。天井裏換気口を設けた当初の対策案は効果なく、逆に助長させるおそれもある。天井仕上げ材が結露する特性要因図を図3に示す。

図3 天井仕上げ材が結露する特性要因図



調査計画

次に示す3案を対策案として、気流シミュレーションの解析および対策案をモデル施工して環境データを実測し、対策案を決定することとした。

A案：各部屋換気タイプ

常時運転の強制換気ファン（パイプファン）を客室天井各スパンに設置し、エアコンの冷気を強制的に天井裏に押し込み既設の天井裏換気口から排出する。

B案：天井締切りタイプ

既設の天井裏換気口を撤去し、天井材を断熱ボードに張り替え、天井裏への外気侵入を防止する。ただし、天井裏への外気侵入防止策は、建築的に非常に困難である。

C案：中央ダクト換気タイプ

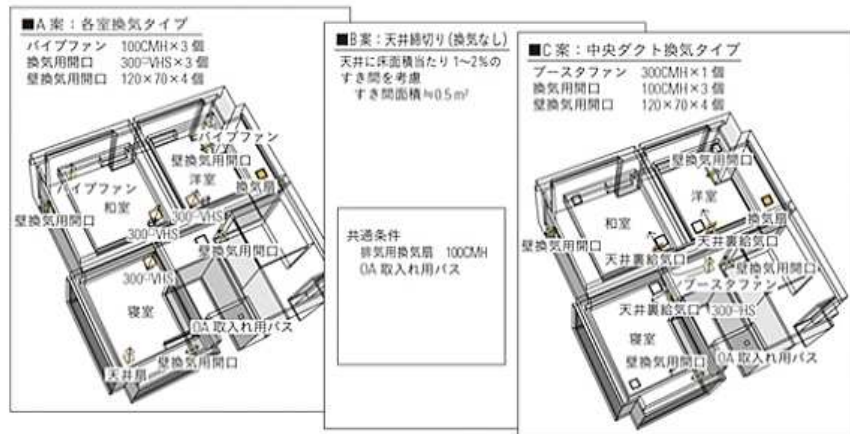
常時運転の1台のブースタファンにてエアコンの冷気を強制的に天井裏に押し込み、4か所の天井裏換気口から排出する。

絶対湿度
水蒸気を含む空気を湿り空気といい、湿り空気から水蒸気を除いた空気を乾燥空気という。乾燥空気の質量 (kg (DA)) に対して湿り空気中に含まれる水蒸気の質量 (kg) の比を質量絶対湿度といい、単位を (kg/kg (DA)) で表す。

1. 気流シミュレーション

室内と天井裏を循環換気させるファンの設置状況を変えて、上記の3案を解析する（図4）。
解析対象：客室および天井裏、解析ソフト：STREAM for Windows V5

図4 気流シミュレーションの条件設定



2. モデル施工での実測

A. 準備

- ① 検証時期が中間期であったので、冷房を入れる前の環境として、電気ストーブ、加湿器にて客室を模擬的に高温多湿の環境状態とした。
- ② 絶対湿度を約 0.019 kg/kg (28°C 80%~30°C 70%) の状態まで加湿器で加湿する。
- ③ 電気ストーブにより暖房する。
- ④ 成り行きとなるが、実験中は客室の温度・湿度を維持する（電気ストーブ、加湿器を継続運転する）。

- ⑤ A案およびC案のファンは、試験に先立ち作動させておく。

B. 計測

① 温度・湿度計測（データロガー）

測定場所：客室内5か所、客室天井裏4か所、PS内1か所 計10か所

② エアコンの気流が当たる天井面の表面温度計測（レーザ式温度計）

測定場所：6点ポイントを定時に測定する。

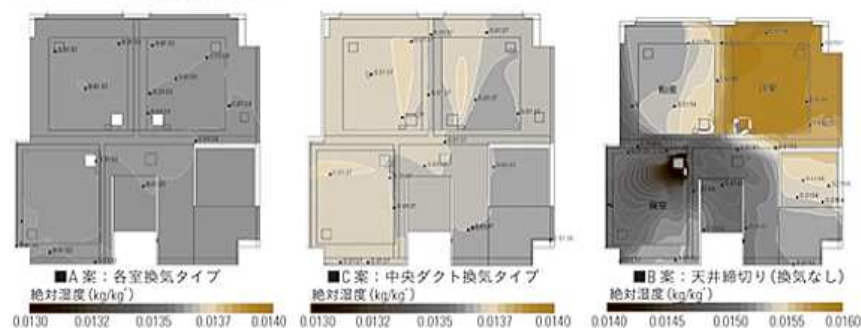
調査結果

1. 気流シミュレーション

図5に天井裏の絶対湿度の解析結果を示す、次のことがわかった。

天井内湿度に関して、A案が最も低湿度となった。C案は、OA取込み空気の影響を受ける踏込み部の空気を天井裏に取り込んでいるため、A案より高湿度となった。B案は、天井換気をしていないため3案の中では最も高湿度となった。

図5 天井裏の絶対湿度の解析結果



2. モデル施工での実測

A. 温湿度計測

図6、図7に温湿度計測の結果を示す。空気線図上（図9）にプロットするとよりわかりやすくなる。

天井裏の絶対湿度は、A案の場合 0.013 kg/kg (0.017 kg/kg が▼0.004 kg/kg)、B案の場合 0.014 kg/kg (0.015 kg/kg が▼0.001 kg/kg)、C案の場合 0.009 kg/kg (0.016 kg/kg が▼0.007 kg/kg) となった。A案およびC案では、天井裏の換気ファンの稼働により、室内の絶対湿度よりも若干高め (0.002~0.003 kg/kg) ではあるが十分に除湿されていた。天井裏を密閉したB案は、室内の湿度上昇の影響は受けにくい、冷房による除湿もされにくく、かつ天井裏の気流がないため、表面熱伝達率が小さくなるため、天井裏に多湿空気が侵入した場合はより結露の発生が懸念される。

図6 A案の温湿度計測結果

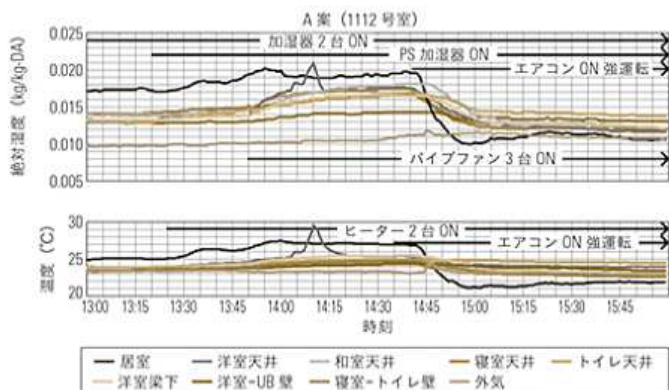


図7 C案の温湿度計測結果

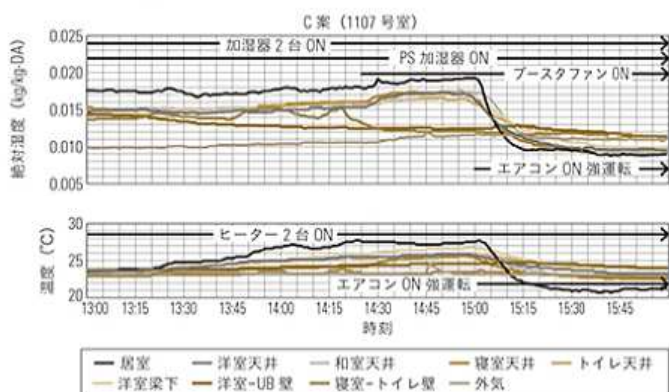
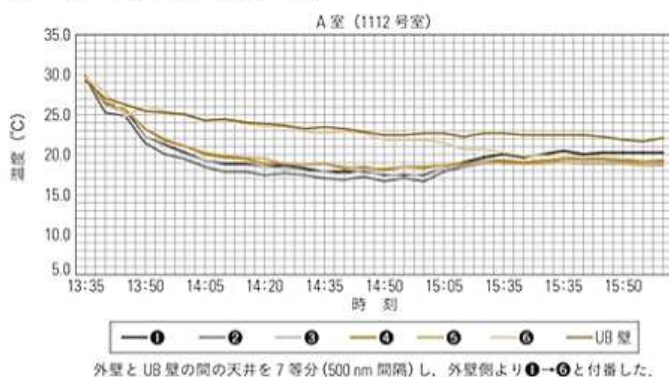


図8 エアコンによる天井面温度の低下状況



B. 天井表面温度

エアコンの吹出し温度がそれぞれ異なるため単純には比較できないが、代表的な天井面温度として、A案18℃前後(吹出し7℃前後)であった(図8)。

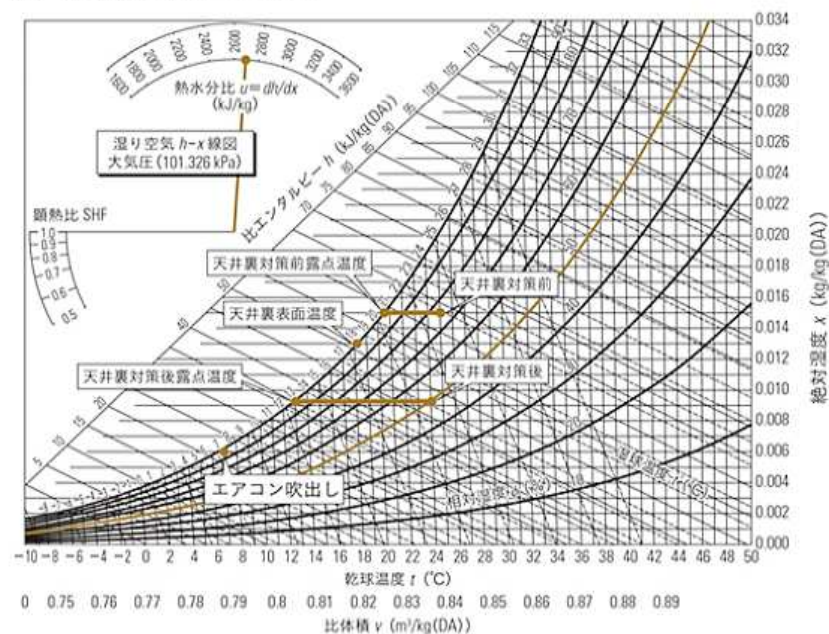
考察

天井裏換気を行うA案、C案では大きな差は見られず、天井裏の環境は室内より若干高温多湿になると予想される。ただし、気流解析結果からは、C案では、ドアなどからの侵入外気の影響を受けやすいため、総合的にはA案またはC案の改良型(吸込み口を寝室などへ移動)が効果が大きいと考えられる。密閉方式のB案については、天井裏は、室内環境の影響を受けにくく、天井裏表面温度も高くなるので結露の発生は防止できると考えられるが、外気が侵入した場合は危険性が大きい。

対策措置

A案は改善のコスト面で困難さがあることから、C案の改良型(吸込み口を寝室などへ移動)に関して、気流シミュレーションを実施し、効果が十分確認できたので、この案で改善を実施した。その後10年間結露によるかびは発生していない。

図9 計測結果の空気線図へのプロット例



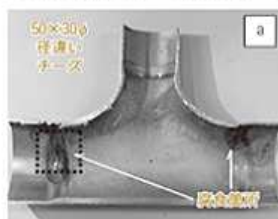
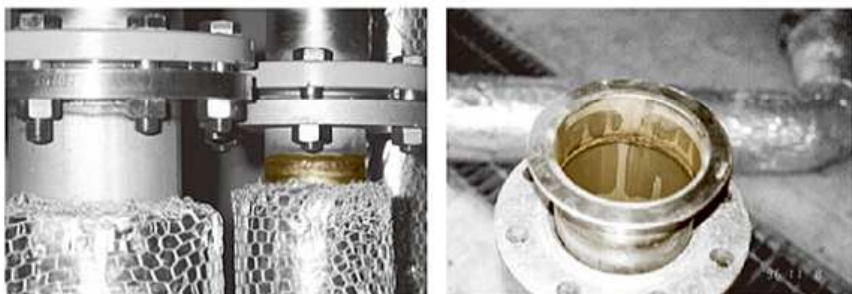
ステンレス鋼鋼管溶接部から漏水した

給湯配管に用いた一般配管用ステンレス鋼管 (JIS G 3448) の溶接部に発生した腐食事例を参考に、ステンレス鋼管の溶接施工はバックシールだけでなく、熱の管理も重要であることを記す。

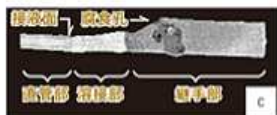
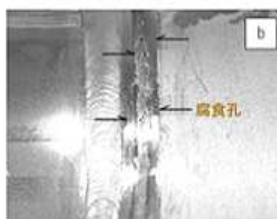
状況

中央式循環給湯配管システムにステンレス鋼管 (SUS304) を使用したところ、竣工後約1年で漏水トラブルが発生した。漏水は溶接部の近傍で確認された。給湯温度は60℃で、補給水には水道水を使用していた。腐食孔は管継手側部のみを確認されており、直管部にはなかった (図1)。

図1 給湯用ステンレス鋼管 (SUS304) の腐食事例



a. 配管内面の腐食状況
b. 洗浄後写真 a の点線部を拡大 (直径 1mm 以下の腐食孔が点在)
c. 腐食孔近傍の配管断面 (材料内部で激しく腐食)

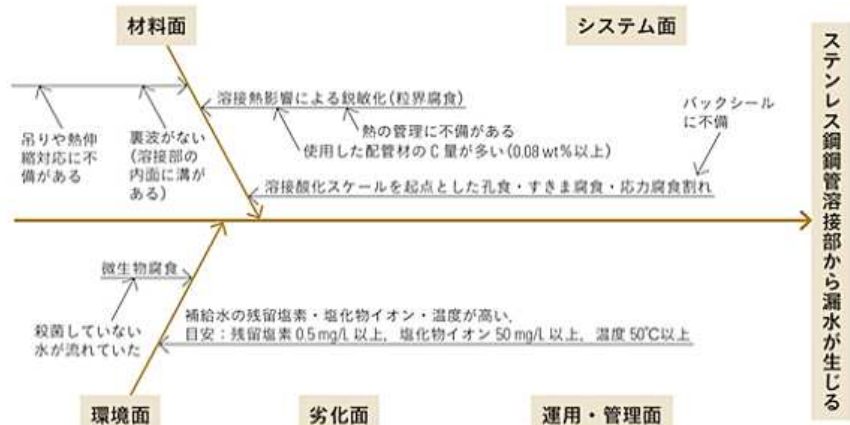


調査計画①

ステンレス鋼管の溶接部から漏水が生じる原因について、図2をもとに以下の調査を行った。

- ①溶接施工状態の確認
- ②補給水の水質調査

図2 ステンレス鋼管の溶接部より漏水が生じるときの特性要因図



調査結果①

- ①溶接部近傍には、溶接酸化スケールが生成していた。裏波はあり、溶接金属の溶込み状態は良好だった。突合せ溶接部にすき間は見当たらなかった。
 - ②補給水の残留塩素濃度は 0.3 mg/L で、殺菌された水を使用していることがわかった。
- 上記の調査結果より、溶接熱影響による鋭敏化と溶接酸化スケールを起点とした孔食が疑われた。腐食が厚肉の管継手側でのみ発生していることから、溶接熱影響による鋭敏化に関する調査を行った。

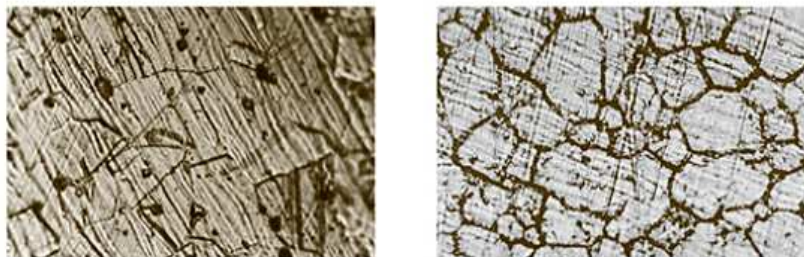
調査計画②

JIS G 0571「ステンレス鋼の10%しゅう酸エッチング試験方法」により、漏水が生じた配管の断面組織観察を行った。

調査結果②

溶接部近傍の管継手側に溶接熱影響による鋭敏化が生じていることを示す溝状組織が観察された (図3 (b))。このことから、上述のトラブルは、肉厚の厚い溶接部管継手側で溶接熱影響による鋭敏化が生じ、その部分が選択的に腐食して貫通・漏水に至ったものと推察した。管継手側だけが鋭敏化していた理由については、未だ明確になっていない。

図3 10%しゅう酸エッチング (JIS G 0571) による SUS304 の組織観察結果 (光学顕微鏡 100 倍で観察)



(a) 通常の組織 (段状組織)

(b) 鋭敏化している組織 (溝状組織)

対策

ステンレス鋼の耐食性を十分に発揮させるためには、溶接加工は安定した電流が確保でき、バックシールについても十分な管理ができる**工場内で行うことが基本中の基本**である。ステンレス鋼は「さびない」のではなく、「さびにくい」材料であることを考慮し、品質管理を徹底しなければならない。

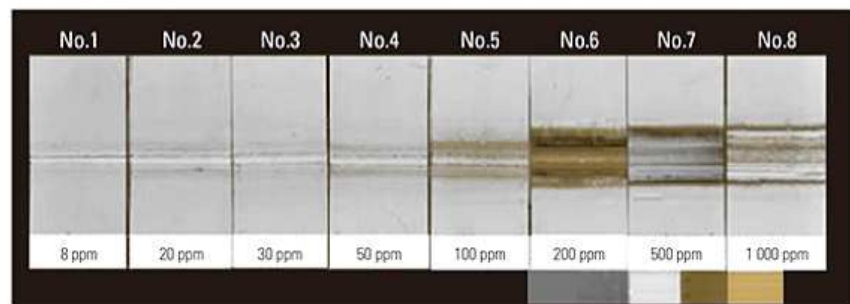
以下に、ステンレス鋼鋼管の溶接施工について、特に管理すべき点を記す。

1. バックシールの管理

- シールドガスの流量：8～20 L/min
- シールドガスの濃度：濃度むらができないように管理する。
- 管内酸素濃度：50 ppm 以下 (図4の溶接 (TIG 溶接) 時の管内酸素濃度とテンパーカラーの関係を参照)
- シールドガスを開放するタイミング：配管が冷却した後で開放。200℃ 以下が目安。

バックシール
ステンレス鋼鋼管の溶接には、管内にシールドガスを流し、酸素を遮断して、内部の酸化を防止する必要がある。溶接は TIG であり、表面に生成した、酸化スケールは、酸洗浄電解研磨などで除去する必要がある。シールドガスには、アルゴンが適しているが、建築設備配管で使われるオーステナイト系ステンレス鋼では、窒素 (N) も有効である。バックシールの解除は、溶接鋼管が十分に冷めてから行わないと酸化スケールが付いてしまう。

図4 ステンレス鋼鋼管 (100Su) の溶接部内面観察結果。シールドガス中の酸素濃度と酸化スケールの関係



[出典：坂上恭助、ステンレス協会、(社)日本バルブ工業会、ニッケル協会、平成 21 年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業 (国土交通省住宅局住宅生産課)：超高耐久オールステンレス共用部配管システムガイドライン (2010)]

2. 鋭敏化対策の実施

- 適切な電流値、溶接速度の下で溶接を行う。
- 低炭素ステンレス鋼鋼管の使用 (SUS 304L など)

なお、溶接熱影響を受けているかどうか (鋭敏化しているかどうか) は、以下の方法で確認することができる。

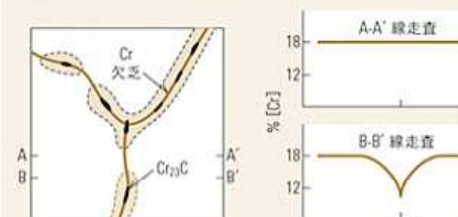
JIS G 0571「ステンレス鋼の 10%しゅう酸エッチング試験方法」

JIS G 0580「ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法」

COLUMN 鋭敏化について

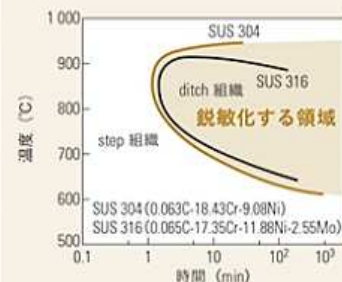
溶接時の入熱条件の影響でステンレス鋼の素地に固溶しているクロムの一部が、同じく固溶している炭素と結合してクロム炭化物を生成する場合がある。このクロム炭化物は、結晶粒界に沿って形成されるので、その近傍のクロム含有率が低下し、結晶粒界近傍にクロム欠乏層が形成される (図5、図6)。この結果、結晶粒界近傍にステンレス鋼の耐食性の所以である不働態皮膜 (クロム酸化物の皮膜) が形成されなくなり、その部分が選択的に劣化しやすくなる。この現象を鋭敏化と呼ぶ。

図5 鋭敏化によって結晶粒界に Cr 欠乏層が形成されたときの模式図



[出典：腐食防食協会編：材料環境学入門、p.87、丸善 (1993)]

図6 SUS 304 と 316 鋼に SUS 鋭敏化が生じる温度と時間の関係



[出典：ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧第 3 版、p.1491、日刊工業新聞社 (1995)]