

〈解説〉

PFAライニング配管の寿命診断

基幹産業事業本部 基幹製品事業部 本 田 誠 一

1. はじめに

当社はふっ素樹脂ライニングの製造を始めて、約40年が経過し、幅広い分野で利用いただいている。

昨今、設備の予防保全に対する意識が高まり、ふっ素樹脂ライニング材の寿命に関する問い合わせが増えている。

本稿では、当社でのふっ素樹脂PFA（パーフルオロアルコキシアルカン）を使ったライニング配管（以降、PFAライニング配管）の寿命診断について紹介する。

2. PFA ライニング配管の特徴・用途

当社のふっ素樹脂ライニングはPFAを使用している。このPFAは炭素鎖の周りがふっ素化された分子構造をしており、耐熱性、耐薬品性、成形性に優れることから、ライニング用ふっ素樹脂として最も広く使われている。

PFAライニング配管は、主に以下の2つの用途に使われている。

- 耐薬品性・耐熱性が求められる石油化学プラントや化学プラントでの各種有機溶剤や塩酸・硫酸・ふっ酸・硝酸などの腐食性の強い薬液用配管
- 可塑剤や充填材を含まない純粋性が求められる半導体向の高純度薬液、医薬・中間体プラント用配管

PFAはFRP、汎用樹脂、ゴム、ガラスなどのライニング材と比較して、非粘着性および酸、

塩類、アルカリ、有機溶剤すべてに十分な耐食性能を持っている。しかし、PFAを含むふっ素樹脂は長期使用では薬液の透過があり、“ライニング材の寿命”に及ぼす影響について考慮が必要である。

3. PFA ライニング配管の劣化・損傷形態

ふっ素樹脂の劣化とは、熱分解や特定薬品での化学反応、放射線での分子鎖切断など、分子構造の変化により、高分子材料としての特性を失うことをいう。

PFAライニング配管の劣化・損傷形態の要因には“薬液の透過”，“使用条件”，“応力の存在”，“設置環境”の4つが挙げられる。このうち“薬液の透過・浸透”が事象全体の7割を超えるが、実際には複数要因が複雑に絡み合っただの劣化・損傷が発生する。

以下に交換寿命に至る主な劣化・損傷形態を紹介する。

3.1 クラック

クラックとは、図1に示すように“物理的破壊

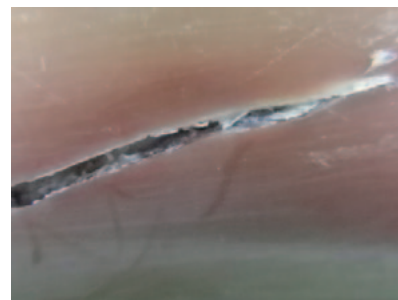


図1 クラック
(光学顕微鏡写真)

がある巨視的な亀裂のことで、目視でははっきり割れていると分かるものである。

クラックの中でも、マイクロクラックとは、正確な定義はないが“物理的破壊がある微視的な亀裂”のことで、図2に示すように表面上は亀裂が無くても、断面を顕微鏡レベルで確認すると微細なひび割れがある。

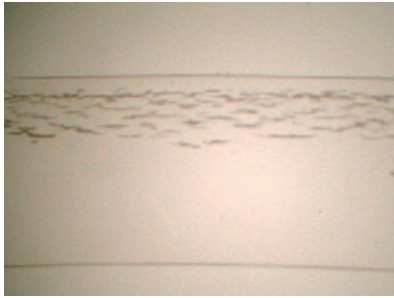


図2 マイクロクラック
(断面光学顕微鏡写真)

図3に示すように、クラックがさらに貫通クラックに成長すると薬液の漏れにつながるため、配管の交換が必要となる。

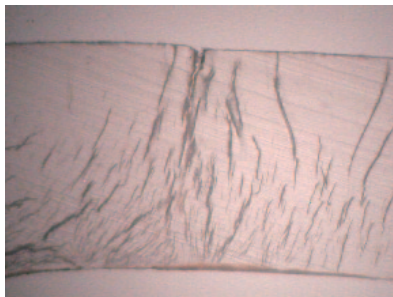


図3 貫通クラック
(断面光学顕微鏡写真)

3.2 ブリスター

ブリスターとは、薬液やガスの浸透による水蒸気拡散現象により生じたライニング表面の“ふくれ現象”をいう。図4に示すように、丸く膨れ上がった箇所が複数個発生することがある。

大きいブリスターは図5に示すように肉厚内部から発生するケースが多く、小さいブリスターは図6に示すように表層付近に発生しやすい。

また、ブリスターはライニング内外の温度差が大きく、温度サイクルがかかる場合に発生しやすくなる。

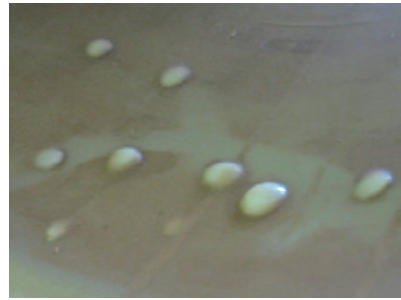


図4 ブリスター
(光学顕微鏡写真)

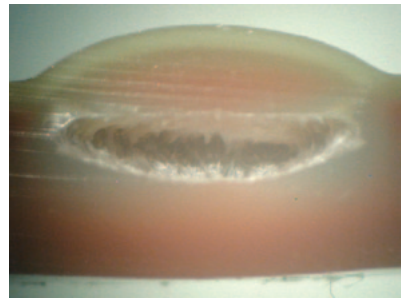


図5 ブリスター
(断面光学顕微鏡写真)

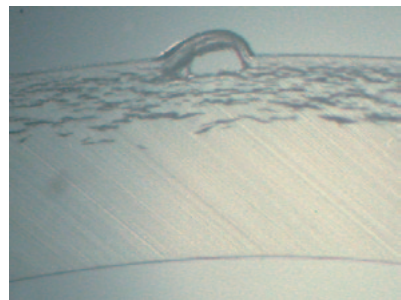


図6 ブリスター
(断面光学顕微鏡写真)

ただし、ブリスターが発生してもただちに使用不可となるわけではなく、ライニングとしての機能が保持されている間は使用上問題はない。

ブリスターの大きさや数などを定期的に管理し、膨れ部分に割れが発生した場合は、ライニングのクラックに成長する必要があるため配管の交換が必要となる。

3.3 クレーズ

クレーズは物理的破壊とは異なり、ライニング表面がスジ状に見える現象のことをいう。

光の屈折により図7のようにスジ状に見えるが、図8のSEM（走査型電子顕微鏡）写真に見られるようにクラックのように割れているわけではないので使用上問題はない。

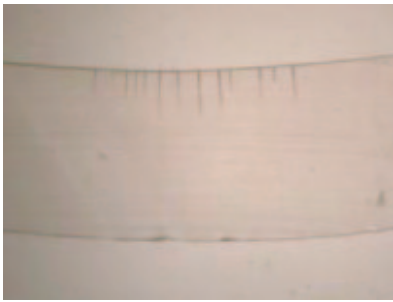


図7 クレーズ
(断面光学顕微鏡写真)

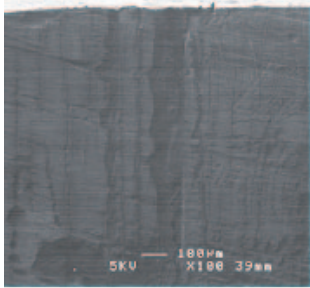


図8 クレーズ (断面SEM写真)

3.4 絶縁破壊, ピンホール

ふっ素樹脂は絶縁性が高いため、薬液と接触、摩擦、剥離、衝突した際には、ほとんどの場合、マイナス（負）の高い電位で帯電する。

特に、有機溶剤、燃料、粉体、蒸気などの帯電しやすい薬液に使用する場合、ライニング面と薬液との流動帯電により、その帯電量がふっ素樹脂の絶縁破壊強さ（絶縁耐力）以上になると絶縁破壊を起こしピンホールが発生する。

絶縁破壊は、図9および図10に示すように放電破壊現象（ツリー現象）となる。



図9 ツリー現象
(光学顕微鏡写真)

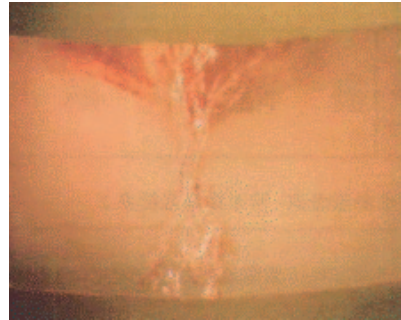


図10 ツリー現象
(断面光学顕微鏡写真)

ピンホールがライニング厚みを貫通した場合は漏れに至るため、配管の交換が必要となる。

ふっ素樹脂の帯電対策としては、溜まった静電気を逃がすためアースを取ったり、物質同士の摩擦による帯電を少なくするため流速を抑えることが有効である。

3.5 変形・座屈

ライニング層の変形・座屈は流量確保に影響を及ぼすほか、将来的にライニング層を貫通するクラックが発生する可能性もあり、状況により配管の交換が必要である。

ライニング層が変形・座屈に至るには2ケースがある。

一つは、図11に示すように、ライニング層を透過した薬液ガスにより外装管が腐食し、ライニング層との間に腐食生成物（鏽）が発生し、ライニング材が内面側に押し込まれるケースである。

ライニング材を剥がした状態を図12に示す。

対策としては、ライニング材に耐透過性グレードを用いたり、透過したガスを外部へ逃がすために施工されているベントホール機能のより積極的な活用がある。



図11 ライニング内面

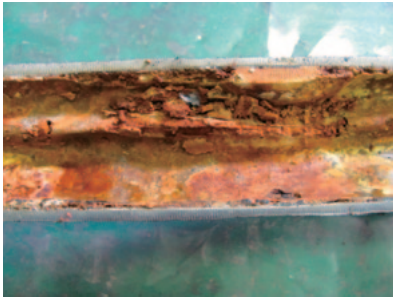


図12 外装管内面



図14 フランジ部の腐食

もう一つは、図13に示すように負圧がかかることでライニング層が内側へ座屈し変形するケースである。

座屈はライニング層の強度不足が原因のため、図13のように3方向からのつぶれる場合が多い。対策としては、ライニング層を厚くすることが最も有効的である。

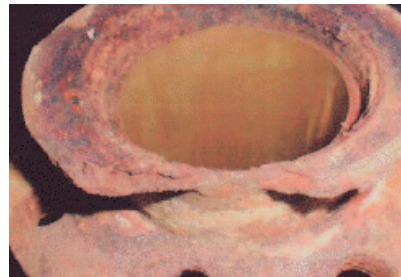


図15 パイプフレア部の腐食



図13 ライニング層の座屈

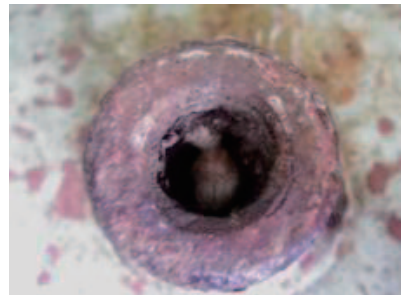


図16 ベントホール部の腐食

3.6 その他

3.6.1 外装管の腐食

外装腐食は雨水、湿気などの浸入口でライニング層を透過したガスが溜まり、液化しやすい次の3箇所が発生しやすい。

- ・フランジ部 (図14参照)
- ・パイプフレア部 (図15参照)
- ・ベントホール部付近^{注1)} (図16参照)

注1) ベントホールの役割：ライニング層を透過したガスの逃がし穴、漏れの知らせ穴

図14はパイプフレア部の腐食によりフレア面がシールできないくらい腐食した例である。

対策としては、ベントホールの腐食による閉塞がないようにすることや、配管に断熱材を巻

くことで透過したガスを液化させずにそのまま空气中に放出する方法がある。

また外装管をSUSに変更することも選択肢といえる。

3.6.2 ライニングフレア面のキズ・変形・亀裂

接続部であるPFAライニングフレア面は、配管施工時の当てキズや締付け過剰で変形・亀裂が発生しシールができなくなる。

図17は、金属ガスケットを使用したことによりフレア面の締付け過剰で変形が発生したケースである。

対策としては、配管接続直前までライニングフレア部についている保護板は外さず、かつガスケットはメーカー指定のものを使用することが必要である。



図17 フレア面の変形

3.6.3 異物堆積

図18に示すように、重合反応する薬液(モノマー)を使用した場合、透過によりライニング層内部で重合し、ライニング層を破壊して漏れに至る。

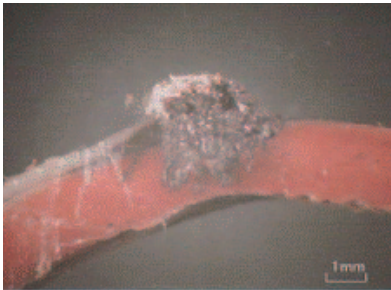


図18 異物堆積
(光学顕微鏡写真)

本用途での使用は推奨できないが、やむを得ず使用しなければならない場合は、ライニング層を厚くして延命効果を図りながら、定期交換することが必要である。

3.6.4 磨耗減肉 (エロージョン)

図19に示すように、内部流体がスラリーや粉体で微細な固形物を含んでいる場合、ライニング層の磨耗によって肉厚が減少する。

本用途での使用は推奨できないが、やむを得ず使用しなければならない場合は、ライニング層を厚くして延命効果を図りながら、定期交換することが必要である。



図19 エロージョン

4. 寿命診断の取り組み

当社は“PFAライニング配管の寿命診断”を予防保全の観点から、納入後にアフターサービスとして提供している。

PFAライニング配管の寿命を診断するための調査手順と診断内容について、当社における過去の“劣化・損傷”，“寿命・交換”の経験をもとに、以下に説明する。

4.1 寿命診断の調査手順

寿命診断の頻度は、PFAライニング層配管設置後プラント定修時にあわせて年1回または2年に1回程度を推奨する。

ユーザーにおいてはライン全体を見渡していただき、配管の外観状態を確認の上、最も損傷があるもの（腐食・液漏れなど）を調査対象配管として1～2本選択いただく。

過去から不具合が生じやすい場所が特定されていればそこを選定するが、そうでない場合は外観状態をメインに、次いで温度・圧力が高いなど使用条件がより厳しい箇所を選定いただきたい。

また、厳しい使用条件の箇所とそうではない箇所を比較調査することもひとつの確認手法である。

4.2 診断内容

4.2.1 外観観察

外観確認は、今後の調査の方向性を決めるために非常に重要な作業であり、どの部分を重点的に観るかを図20に示す。

外観確認	観察項目
① ライニング配管 内面	変形・座屈、プリスターの有無、 キズ・亀裂の有無、堆積物・変色、減肉
② ライニング配管 フレア面	コーナー亀裂、面圧による変形、キズ・亀裂の有無 ※必要であればガスケットの調査
③ 外装管	ベントホール液漏れ、ベントホールのつまり、 外装管腐食、フランジ腐食

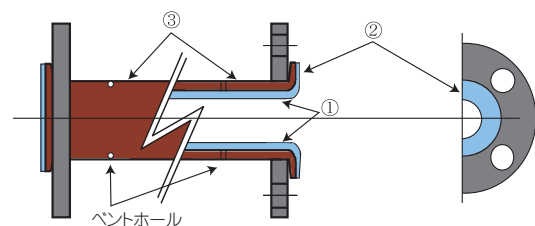


図20 外観観察箇所と観察項目

ライニング配管内面、フレア面、外装管（特にベントホールやフランジ部分）を観察する。

ライニング配管についてはフレアコーナー部は加工時の残留応力が存在し、かつ使用中の熱応力により応力が集中しやすく、クレーズやクラックが発生しやすい箇所のため、注意深く観察する。

外装管については腐食が最も先に発生するベントホール、フランジ（パイプフレア部）が観察ポイントとなる。

また、ベントホールは腐食だけでなく、詰まりや液漏れ痕も確認する。

4.2.2 気密試験・ピンホール検査

気密試験は、ライニング配管の内部にエアールや窒素ガスを入れて、フレアシール面の漏れや、ベントホールからの漏れの有無を確認する。

ピンホール検査は、ピンホールディテクターを用いてライニング表面に高電圧を掛けて、放電箇所がないかを確認する。

気密試験で漏れが確認されても場所を特定するのが困難なため、ピンホール試験で場所を特定する。

この2つの試験で問題なければ、気密性は保持できており最低限のライニング機能は維持していることになる。

気密性が保持できていなければ、PFAライニング配管としては寿命であり、交換という判断になる。

4.2.3 解体・観察

ライニング層断面のクレーズ、マイクロクラック、クラック、ブリスターを観察する。

これらは断面観察でなければどの程度の深さまで進展しているのかが分からないため、ライニング材の状態を確認する上では欠かせない作業となる。

また、偏光顕微鏡を用いて歪や残留応力がどこに残っているのかを確認するケースもある。

図21はPFAライニング配管フレアコーナー部の偏光顕微鏡写真であるが、コーナーの内側／外側にフレア加工時の残留応力が集中しているのが分かる。

成形品のどこに応力が集中しやすいか、またその部分で異常がないかの確認をすることも重要であり、さらに付着異物・薬液の物質同定やSEM観察も必要に応じて行う。

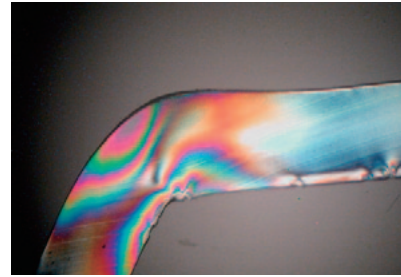


図21 PFAライニング配管フレアコーナー部（偏光顕微鏡写真）

4.2.4 物性評価

表1の測定項目について、使用前の健全な状態の数値と比較し、樹脂の劣化が起きているかを調べる。

表1 物性評価項目

測定項目	目的	劣化評価
機械強度	引張り強度・伸びを測定し強度低下の確認	ライニング配管に薬液浸透や過度の応力が負荷された状態や、ふっ素樹脂の融合不良などの異常がある場合は、値が低下する。
MFR (マルチフロー)	樹脂の熔融時の流動性を測定し樹脂劣化の確認	薬液の浸透によってふっ素樹脂が劣化し、分子鎖が切断した場合に値が上昇する。
比重	比重を測定し樹脂の劣化やクラックによる影響の確認	薬液の浸透透過によりライニング層にクラックが発生した場合、値が小さくなる。
加熱重量減	薬液浸透量の確認(目安)	薬液が浸透し残っている場合は、浸透した分だけ値が大きくなる。透過して揮散した場合は変化しないため、参考値として捉える。

ただし過去の経験上、ふっ素樹脂は耐薬品性に優れているため物性が低下していることはほとんどない。

最終的に各ステップの評価結果に使用条件や使用年数を加味した上で寿命判定を行い、ライニング配管の健全性と交換時期の推定をする。

なお、評価結果はラインの評価をするための指針とするものであり、ライン全体を保証するものではない。

5. おわりに

ふっ素樹脂ライニング配管を使用する場合は、採用時に使用条件（流体、温度、圧力、ヒートサイクルの有無など）と期待寿命を明確にし、事前打ち合わせの上でライニング仕様を決定する必要がある。

また、ライニング配管は寿命があると認識した上で採用後も定期的な点検・交換が必要である。(製品施工やメンテナンス方法に関しては、別途、取扱い説明書を用意しています)

昨今、損傷が発生してから対応する対症療法型管理から、損傷の推移を適切に予測し事故の発生を未然に防ぐ予防保全型管理にシフトしており、当社のふっ素樹脂ライニング配管の寿命診断をお役に立てていただければ幸いです。

筆者紹介



本田誠一

基幹産業事業本部 基幹製品事業部