有機材料による防食技術

青 木 茂*

* 千代田化工建設株式会社 分析・材料技術センター

Corrosion Prevention by Organic Materials

Shigeru Aoki*

* Analysis & Material Technology Center, Chiyoda Corporation

On plastics lining for internal surface of equipment to prevent its corrosion, this paper describes the outlines of their classification, examples of application, properties to be required, selection methods, fabrication procedures, quality control system, inspection methods and diagnosis methods.

Key words: plastics lining, application, selection, quality control, inspection, diagnosis

1. 防食用有機材料の種類

(金属)防食用の有機材料はいずれも母材である金属を使用環境の影響から守るための被覆として用いられている。なお材料 (materials) を「板・管状等の構造体を形成するもの」とやや狭義に解すると、有機化合物であってもインヒビターは本稿の対象外となろう。また、有機材料が主体となって (単体で) 機器を構成する場合のFRP (繊維強化プラスチック) 製品や熱可塑性樹脂の板・管材及び板と被覆との中間と言っても良い包装用フィルムなどは、それらの特性や試験・検査法など考え方の上で共通点も多い^{1),2)} が、防食用と言うよりはそれら自身が耐食材料と言うべきで本稿では触れない。

有機材料を用いた防食被覆は、防せい油・塗装・ライニングの三つに大分類されるが、その他に防食テープも一応の特徴を持ち別の分類を立てて良いかもしれない。これらは、かなり同一の要素を持つてはいるものの、いずれも大きな内容のある技術分野であり、本稿では有機ライニングを主に解説を行うので、防せい油や塗装³⁾ についての詳細は別書を参照されたい。一応、私見による三者の特徴を表1に示す。

なお、埋設管に対する塗覆装や、無機ライニングの漏れ対策用のメンブレンのように、上記分類のいずれかに入るはずなのに別の用語が定着している業界もある。さらに、例えばハイビルドやマスチックのように、本来は

表 1 主な防食用有機被覆の特徴

有機被覆の種類	関連業界	有機系主原料	添加・充填物	主な使用環境	期待耐用期間
防せい油	防せい油メーカー	油脂類	インヒビター	屋内包装の内部	月単位
塗 装	塗料メーカー + 塗装業者	高分子化合物	防せい顔料	大気中海洋環境	年単位
ライニング	ライニングメーカー (=施工業者)	高分子化合物	強化材	化学装置内面 化学工場床面	年単位

下位の分類に入るべき用語が説明不足のまま用いられて別種の材料であるかのような印象を受けたり、ラギングのように防音・防振など別の機能材料が防食も兼ね得るために用いられたりすることもある。したがって、ユーザーが各種材料の本質的特徴を理解し適材を使い分けるためには、用語の弁別から入らなければならない場合も多い。

この種の言葉の中で最も注意すべき用語は“コーティング”であろう。簡単な和英辞書で「塗装」を引くと最近刊のものでも painting としか出て来ないが、この言葉は、西洋画の伝統を汲む装飾用塗装分野は別として、少なくとも「さび止め」以上の防食性能を期待して塗装する分野ではあまり好まれないようで、coating の方が

* 〒221 横浜市神奈川区守屋町 3-13

最近では多用されている。そして、海風に曝される橋梁などで数年以上の塗膜寿命が望まれるような用途に対しては重防食コーティング—heavy duty coating—という言葉が使われている。一方、化学装置内面での防食を主対象とする有機ライニングの分野では、比較的膜厚の薄い被覆（500 μm 位以下⁴⁾）を、高温の酸性液中で耐え得るものも含めて単にコーティングと称している。両者の「コーティング」のいずれがより厳しい環境に用いられるか、言葉の上からだけでは区別し難い。

更に付言するならば、塗装分野においては、規定の年数が過ぎた時に全塗装面積中で素地金属にさびが発生していた面積がある比率以下であることを保証の内容としている。その比率がいかにか小さくとも、皮膜に生じる孔（微細欠陥）はかなりの数が許されることであろう。それに対し、有機ライニングの分野では、保証期間中は皮膜に一点の小孔も生じないことが（現実とは別として）期待されている。

このように、用語というものはそれぞれの業界で適当に（製品に重みを付けるために）使われることもあるので、言葉だけでなく実態を十分に把握して検討しなければならない。

2. 有機ライニングの種類と特徴

2.1 有機ライニングの分類

有機ライニング皮膜は、有機高分子である（合成）樹脂＝プラスチックが膜としての形態を維持し、その中に無機あるいは有機の繊維または無機の細粒・細片が皮膜性能を向上させるべく必要に応じ充填された構成となっている。それぞれに多くの種類があり、例えば同一系統の樹脂でも分子量や細部の分子構造、硬化剤の種類、施工性改良のために加えられる添加剤の種類などによって特徴が大きく異なることがある。

皮膜性能が基本的には樹脂によって支配されることは当然であるが、充填材によっても大きな影響を受けるし、樹脂や充填材の種類によって適した施工方法があるので、有機ライニングの分類を考えるためには、表2のような多面的な見方が必要である。

この表の中で強い多用あるいは注目されているものを挙げるならば、熱可塑性樹脂ではフッ素樹脂のライニング・コーティング、熱硬化性樹脂では焼付けコーティング、同じくフレックライニング、シートによるゴムライニングなどがある。

2.2 樹脂の種類

樹脂の特徴を考える上での基本は、熱可塑性か熱硬化

表 2 施工方法別に見た有機ライニングの分類

施 工 方 法		原料の 状 態	強化材	加 熱	使用される合成樹脂の系 統			備 考
					熱可塑 性樹脂	熱硬化 性樹脂	ゴ ム	
シートライ ニング	主に はけ、 スプレー	シート	なし	加硫			○	あらかじめ硫黄を混練したシートを、缶体に接着剤で貼り付けた後、加熱して硬化させる。最近では常温加硫も行われる。
				—	○			シートやフィルムを接着剤やビス止めで貼り付けた後、継ぎ目を溶接する。
				加 熱	○			パイプの場合、加熱して広げたり、逆に収縮させて物理的に接合させる場合もある。
				焼付け		○		塗布後、加熱によって架橋硬化させる。重ね塗りをしても計100～300 μ m位の薄膜であり、樹脂コーティングの代表的方法である。
				—	○	○		常温で硬化するように触媒を入れ、架橋反応を促進させている。上記より厚くできるが、大体500 μ m以下である。また溶剤に可溶な熱可塑性樹脂もこの方法で施工できる。
				砂 粒	—	○		硬いけい砂などを入れ耐摩耗性や耐エロージョン性の向上をねらったもので、樹脂モルタルにも用いられる。
塗 布	主にロー ラー、 こて	溶液状	なし	ガラス などの フレーク	—		○	薄片状のフレークが皮膜中で平行層状に並び、薬液透過に対する物理的バリアーとなることをねらったもので、耐水蒸気拡散性ライニングとして利用されている。
				ガラス などの 繊維	—		○	厚塗りすると割れやすい熱硬化性樹脂を耐食FRPの手法で繊維強化し、厚く塗れるようにしたものである。ガラスのほかカーボンファイバーや有機繊維（ナイロン、ポリエステルなど）も用いられる。
粉 体 被 覆	パウダース プレー法、流動 浸漬法	粉 末	なし	母材予熱	○		○（エポキシのみ）	溶剤に難溶な熱可塑性樹脂を、いったん粉末状にして缶体に付けてから、熱的に溶融し、相互の融着と母材への接着を固めるのである。また熱硬化性樹脂でもエポキシ樹脂は、中間体の段階で粉末とし、加熱溶融しながら架橋硬化させられるので、無溶剤であるための安全、衛生上および高能率化のメリットから粉体被覆が行われている。流動浸漬法は、特に同一形状・寸法品の大量生産の自動化に適している。
				加熱溶融後吹付け	○		○（エポキシのみ）	
				塗布後加熱溶融	○			
	粉末ディ スパー ジョン法	懸濁液						

性かということである。前者は、糸状の高分子が絡み合い、あるいは部分的に整列（結晶）しているもので、絡み合いが緩いものは材料全体として容易に曲げることができる。更に加熱されると糸同志の結合が緩み流動するようになる、つまり軟化する。加熱によって自由に変形させ得る、塑性加工し得るということから熱可塑性樹脂という名前が付いている。ポリ塩化ビニル (PVC)、ポリエチレン (PE) や各種のフッ素樹脂等実用されている樹脂では、個々の糸が化学的に安定しており、材料自身は耐薬品性の高いものが多い。しかし、有機溶剤に溶かして施工することがあるように、糸と糸の間に溶剤が入り込んで糸がほぐれて（膨潤）軟化しやすいものもある。また、環境中の小さな分子（水分やガス）が糸の間を通り抜け、ライニング皮膜と母材金属との間に透過した物質がたまって皮膜の膨れや母材の腐食を引き起こすこともあるので、皮膜単独の耐薬品性だけでの評価はできない。

熱硬化性樹脂は、フェノール樹脂 (PF) やエポキシ樹脂 (EP)、不飽和ポリエステル樹脂 (UP)、ビニルエステル樹脂 (VE) などが広く実用されている。高分子の糸が硬化剤という短い分子で点々と結び合わされ（架橋）、全体として立体的な網状の構造となっているため、糸同志が動き難くなっている（つまり硬い）。加熱されると、硬化し終わった部分では分子運動が激しくなる分だけ少し軟らかくなるはずであるが、一般には未反応の硬化剤が更に架橋し硬化が進行する。加熱を続けると、溶けずに硬いまま最後まで最後には炭化・燃焼してしまう。したがって、原料に硬化剤が入りいったん反応が進み出すと変形させることは一般にはできない。立体構造であるため環境中の低分子体が透過し難い点ではライニング用に向いているとも言えるが、薬品や酸化剤によって架橋部分が壊される（分解）こともある。

ゴムは、硫黄を硬化剤とし（加硫剤という）立体的な網状の構造となっている点で熱硬化性樹脂と似ているが、個々の糸が多数の折れ曲がり点を持ち、そこを中心に回転し変形に耐えるため全体としてゴム弾性を持っている。しかし、硫黄を多量に入れ加硫を進めた硬質ゴムは、エポナイトとも呼ばれるように、エポキシ樹脂などに匹敵するほどの硬さがある。

3. 有機ライニングの使用事例

3.1 アンケート調査結果

化学装置などを対象とする有機・無機材料等の使用状況のアンケート調査は、これまで石油学会、日本材料学会、化学工学協会などで繰返し行われてきたが、目下最大・最新の調査は '82 年 12 月に発表された化学工学協会の使用実績調査集⁶⁾ である。また、これを補足するも

のとして、フッ素樹脂だけを対象に取り上げた使用実績調査集⁶⁾ が '85 年 9 月に発表されている。ここでは前者の概要を紹介しよう。調査は材料の仕様、使用環境、損傷の有無・程度、使用後の評価などかなり詳細にわたったが、ユーザー 67 社 90 事業所から 1,115 件の回答が得られている。これらの中で、使用期間が2年未満で損傷を生じていないもの（評価未定のもの）や主要項目の記入が不完全であった若干の回答を除き、解析に耐え得るものの合計 788 (内、有機 561) 件が調査集に表示されている。

有機材料の内、樹脂系では 403 件中 (単体以外の) 被覆が 234 件、ゴム系では 154 件中 149 件が被覆である。使用環境は酸、中性塩、有機溶剤、排ガス、純水など多岐にわたっているが、有機被覆で損傷を生じたとの回答は全部で 206 件であった。損傷理由の中で、施工不良とするものが 35.4% と最も多く、回答者がユーザーであることを差し引いても、この種の材料では施工が重要なことを示している。損傷を生じた比率は 53.8% と高率であったが、一方総合評価Aの回答——将来もし同一機器を作るとしたならばもう一度同じ材料を使用する——が樹脂系で 144 件 (61.5%)、ゴム系で 93 件 (62.4%) あり、たとえ損傷は生じて他に代替材料がない場合もあることを示している。

3.2 有機ライニングの実用例

アンケート調査から離れて、実用例のいくつかをトピックス的に挙げてみよう。

* 表 3 は、化学工学協会がフレックライニングの主なメーカーから聴取した適用実績の一覧⁷⁾ である。表中、排煙脱硫装置への適用については、希硫酸という環境において後述するフレックライニングの耐水蒸気拡散性を最大限に発揮した用途であり、この種装置の防食には欠かせない材料となっている。また、大型貯油タンク底板の内面・油側に対する防食にも多用されている。ただし、この場合には経済性の向上や底板の変形への追従性改善などの理由から、充填されているフレックガラスの大きさが排煙脱硫装置用よりも細かくなっているのが普通である。

* 多くの化学薬品用の機器や配管の防食にフッ素樹脂が広まりつつある。フッ素樹脂の中では4フッ化樹脂（商品名テフロンなど）が有名であるが、耐熱・耐薬品性には勝れているものの残念ながら施工性が悪く、諸特性を落とさず容易に施工しうるようにするため多種類のフッ素樹脂が開発されてきた。最近、このような樹脂の改良と施工技術の向上とが機器の長寿命化への要求と合致し用途が広がっている。

* 一時、石油掘削用ドリリングパイプの内面や天然ガ

表 3 数社におけるフレークライニングの適用実績

適用分野	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社	備考
化学装置一般	薬液貯槽（硫酸、硝酸等）	廃液タンク	塔槽類、脱臭塔	反応槽、薬液貯槽		水性ソーダタンク、フラスコタンク	適用例多数
製紙工場	漂白塔、黒液ビッド等						
製鉄工場メッキライン	メッキ液タンク、エパボレータ、ミストサイクロン	酸タンク外面、同カバー、クーラー水室					
原発廃液処理装置	濃廃液タンク	洗滌廃液タンク、冷却水タンク					
LNG タンク		外板バリア					
財油タンク		各種貯油タンク	各種貯油タンク	各種貯油タンク	各種貯油タンク	各種貯油タンク、コンクリート水路、水圧鉄管、農業用水埋設管	適用例多数
純・上・淡水		水・温水タンク、配水池	受水槽、プール、ダクト水門	水タンク、高架水槽	ボイラ用水タンク		
下水、排水		下水処理槽、同管		水処理用吸収塔	排水タンク		
海水			取水管				
床		耐酸ポンプ床					
排煙脱硫装置	除塵塔、脱硫塔、ダクト等	脱硫塔、循環槽、シンクナー、ダクト等	ダクト	ダクト			適用例多数
清掃工場塵芥焼却装置	冷却塔、吸収塔						
集塵装置	湿式コットレル		集塵装置				
煙突	煙突		煙突				
石油掘削			リグ			リグ	
石炭輸送						バケット	
船舶		ケミカルタンカー、水海船外板、デッキシーバース杭、浮体構造物、防舷材取付鋼	船舶			船舶キール部、同舵部	
海洋構造物			海洋構造物			棧橋、鉄管杭、海洋試験台	
橋梁		ロープボックス、地覆プレート	橋梁			橋梁	
鉄骨			建家鉄骨、架橋				

ス用ラインパイプの内面へのエポキシ（フェノール）樹脂のコーティングが日本でもかなり行われていたことがあるが、最近は少し下火のようである。

- * 先のアンケート調査の中でも、実はコンクリート槽に施工した例が 10 件含まれていたのであるが、最近ではコンクリートク ラ イ シ ス に端を発して、土木・建築分野における鉄筋コンクリートへの樹脂ライニングが注目され、業界でも研究会が持たれている。
- * また土木・建築分野では、特殊なライニング技術の一種というべきであろうが、屋外やビル内の各種配管内面の補修用にプラスチックパイプの挿入やエポキシコーティングが現場で施工されるようになって来ている。ただし、小口径の屈曲した配管への現場施工は、まだ全面無欠陥で施工するところまでは至っていないように見受けられる。

4. 有機ライニング選定の考え方

4.1 選定上考慮すべき外的条件

樹脂ライニング工業会では、最近「樹脂ライニングの工事費積算指針 PLA-R-301-88」を発表したが、その中で樹脂ライニング工事の見積仕様書作成に必要な項目を表示している。列記された諸項目の前半が、ライニングの仕様（と価格）を決定する条件となるわけであるから、その部分のみを抜粋して表 4 に示した。

表 4 樹脂ライニング見積時に必要とされる項目

項 目	適 用		コストとの関係
1.概 要	施工の目的		
2.施工対象物件	2－1. 機器の名称 2－2. 躯体の材質、形状、寸法 2－3. 部材の明細 2－4. マンホール、ノズル類の明細 2－5. 新設または旧設。 （旧設の場合、その状態）		工事原価全般 全 々 全 々 全 々
3.使用条件	提示項目	提 示 内 容	
	使用液体 ガ ス	組成（名称）・濃度・比重・PH・粘度 ・混合物の場合は、微量成分についても 可能な限り明示する。混合する場合は混 合順序	保証コスト
	温 度	常用、最高、最低、温度変化・及び加熱 方法（自己発熱、ジャケット、直火、湯 または油浴、蒸気吹き込み、水、ダウサ ム、ブライン・等の区別）	
	圧 力	加圧・減圧の度合いと使用時の変化及び その頻度	
	固形物の 有 無	固形物の種類、粒径	
	流 動 かきまぜ	流動する場合の流速、かきまぜ方法	
	特記事項	運転上の特記事項	
4 施工場所	地理的環境条件 作業場環境条件		工事原価全般
5 納 期	工事期間（工程表別途作成） 月期、気温		工事原価全般

沢山の項目があるように見えるが、これでもむしろ足りない位であり、筆者は後述する水蒸気拡散の観点から機器外面の保温の有無、設置場所が屋内か屋外か（雨が

かかるかどうか) 等も重要な事項と考えている。また、通常の材料選定においては第3項の使用条件のみが取り上げられがちであるが、施工の目的(防食のほか、内容物の付着防止など)や機器の形状・状態、施工場所、工事時期なども勘案しなければならない点を注意されたい。これら条件によって、材質と密接な関係を持つライニングの施工方法が制限されることもあるわけである。

しかし、本稿でこれらの全般を説明する余裕はないので、樹脂ライニングを使用する上で必要な特性についての概要のみを以下に述べることにする。

4.2 選定上考慮すべきライニングの特性

(1) 耐薬品性

防食を目的とするライニング皮膜が環境剤によって劣化するかどうかを示す特性である。劣化は、表面の接液部から徐々に内部に向かって進行することもあるが、皮膜内部への環境成分の浸透が早く層全体が劣化する場合もある。損傷の形態としては、変色、軟化・膨潤、硬化・脆化、ふくれ、割れなどがある。また、金属で見られる現象と表面的に似たものとして、応力と特定の環境剤との相互作用により皮膜に割れ(その前兆で細かなひび状に見えるものをクレーズという)の入る ESC(環境応力き裂)や、塩素環境中で使用した際表面に強固な劣化層ができて以後の環境剤の浸透から皮膜を守る一種の保護皮膜が形成されるといった現象も見られる。

(2) 耐熱性

カタログなどの資料に示されている耐熱温度とは、単に空気中で熱だけが加わっている場合のものであって、薬液にさらされたり長時間にわたって応力がかかっていたり(クリープ)すれば使用温度は当然低下する。また、急激な加熱・冷却(サーマルショック)の繰返しによって、より低温でも剝離や割れを起こすことがある。

(3) 耐水蒸気拡散性

水蒸気拡散⁸⁾とは、有機質の皮膜の両側に温度差(温度勾配)がある場合、皮膜中での水分の拡散速度が、高温側から低温側に向かって加速される現象である。内容物が高温で外面が冷えている機器の内面側に被覆されることが多く、しかも透過してきた水分が母材金属に遮られて接着界面にたまりざるをえないため、有機ライニングにとっては大きな問題である。水溶液の濃度が薄いほど顕著であり、また、高温側の温度が高く、かつ両面の温度差が大きいほど拡散が起こりやすい。ライニング皮膜と母材との接着力が大きければ、また、皮膜の膜厚が厚ければ水蒸気拡散に対する抵抗性は高い。

表2の中に、薄片状のフレークを充填したライニングを掲げておいたが、これは図1に示した原理によって耐水蒸気拡散性を向上させているものであり、この種の皮膜構成を持ったものをフレークライニングという。フレ

図1 レフーク混入による効果の概念図

表5 ガラスフレークライニングの性能に影響する主な因子

因子	影響される性能	皮膜表面からの劣化特性	耐水蒸気拡散性	皮膜の脆さ	備考
樹脂の種類	耐薬品性		○	○	
フレークの大きさ			○	○	
フレークの配合量			○	○	重量比で示される
フレークの表面処理			○	○	樹脂とガラスとの接着に影響
フレークの配向性			○	○	施工法によるところ大
皮膜の厚さ			○	○	厚すぎると割れることがある
プライマー(下塗り)			○	○	母材との接着力に影響する
トップコート(上塗り)	耐摩耗性等				有機繊維等を入れることもある

ークの材質にはガラスが最も多用されているが、カーボン、ステンレス鋼、雲母等も利用されている。銀ペンと呼ばれたアルミニウムペイントや自動車のメタリック塗装、防錆用の MIO 塗料なども考え方の上では共通と言っても良い。ガラスフレークを用いたライニングの性能に影響する因子を表5に示したように、単にフレークライニングと言っても、多様なグレードのものが有り得るので、環境の苛酷さと経済性に応じた適正な選定を行う助けとなるよう、化学工学協会化学装置材料委員会により「フレークライニングの品質表示に関する指針」が制定され、解説と共に発表⁷⁾されている。

(4) 接着性

通常のライニングは、母材と接着していることが前提であり、剝離していると熱歪みなどによる変形が機器のコーナーやフランジなどの拘束部に集中し、皮膜の割れを起こしやすい。接着力を高めるには、皮膜形成時の第一層(プライマー、下塗り)には、表面張力が小さく母材の表面をよく濡らす液を用いることが基本である。また母材表面は、鉄さびや油などの汚れを充分除去し(清浄度・除錆率を高め)、表面に凹凸を付けること(粗面化)が有効とされている。そのために、ライニング施工時の素地調整としては、研削材(硬い粒子)を高速で表面にぶつけるブラスト処理を行うことが一般的である。ブラストした鋼板の断面の一例を図2に示した。

接着力は、水蒸気拡散やその他の皮膜の劣化によって低下する。一方、接着力に対抗する皮膜内部の力(筆者

図2 プラストした鋼板の断面の例 (10×)

は剥離力と称している)は、皮膜形成時の樹脂の硬化収縮や皮膜と母材との熱膨張の差によって生じるが、その力は皮膜の弾性率が高い場合は膜厚にほぼ比例するため、硬い皮膜を厚く施工し過ぎると剥離や割れを生じやすくなる。膜厚が薄いと耐薬品性上不安があるとして最小膜厚の規定は良く行われるのであるが、このような皮膜では最大膜厚の管理も重要である。

(5) 機械的性質

ライニング皮膜は強度部材ではないが、機器の輸送・据付時や液の流動などの外力に耐えるためには、ある程度の強度が必要である。摩擦に対しては、皮膜中に砂などの硬い粒を入れ抵抗させる場合が多いが、逆に軟質ゴムを厚くライニングし、流体中の粒子の衝突エネルギーを吸収させる方が有効なこともある。硬くとも脆い皮膜は、母材の局所的な変形に追従し切れず割れてしまいやすいので、注意しなければならない。

4.3 有機ライニングの選定法

ライニング皮膜を構成している樹脂そのものの選定の第一歩は、たとえば NACE (National Association of Corrosion Engineers 米国腐食技術者協会) で刊行した Corrosion Data Survey—Nonmetals Section などの耐食性で行うが、これらは樹脂の配合や充填物の入り方などまで細かく規定はされていない。ライニングメーカーの耐食表は、その点、自社のブレンドでテストをしているはずなので、やや現実に近いと言えよう。しかし一般的にこれらは、ビーカーテストのような単純な試験での結果が多く、もちろんそれは選定の基本として必須なのではあるが、それらは液の組成・温度変化・温度勾配・流動など、試験条件が実装置に比べて単純に過ぎるので、耐食表だけで材料を決定することは危険である。

そのため、類似装置や環境下での実績例——前述のアンケート調査結果など——を調べて候補材料を絞り、メーカーと打ち合わせの上、必要に応じて浸漬試験を行う。その際は、温度勾配や液の流動・更新など実機の状態にできるだけ近付けた試験方法を考案する。例えば、試験板に温度勾配を与えるための装置として良く知られているのは、図3に示したようなもので、これは NACE

図3 NACE TM-01-74 方式の水蒸気拡散試験器

で指針 TM-01-74 として定められている。ただし、この方式では、温度差を大きく与えようとして試験板の外表面を水冷するとヒーターの熱容量が足りず、また1装置で2枚の試験しかできないので、各実験者によって様々な装置が工夫され^{9),10)}利用されている。なお、これらを踏まえて樹脂ライニング工業会では、一昨年「樹脂ライニング皮膜への環境剤の浸透性試験方法に関する基準 PLA-R-106-86」を制定している。

更に実装置の内部に試験片を装着すれば、より信頼できるデータが得られることとなるが、ここまで進むと一般には多種類の材料を供試材とするわけに行かず、試験回数も限定されるので試験片をより一層慎重に選ばなくてはならない。なお、単に機器内部に試験片を入れただけでは実機の壁面と同様の温度勾配や液の流動を与えることは実際には困難である。また、機器の内部でも局所的な環境条件の差の大きいことが多いので注意しなければならない。対象材料にかなり自信が持てる段階となったならば、マンホールカバーや配管の一部に試験施工して最終確認を行う場合もある。

これらの過程を通じて実際に気を付けねばならないことは、対象とする供試材が、品種・品番だけでなく、試験片の作り方（素地調整の程度、膜厚、乾燥・加熱条件等）まで含めて、それを採用して施工する時の諸条件とどの程度合致しているかということである。合致するのは当たり前だと簡単に言いきれれば良いのであるが、ライニングの種類によってはかなり難しい場合もある。

5. 有機ライニングの施工管理と検査

5.1 有機ライニングの作業工程

金属材料による機器製作が精練・圧延・製缶・溶接の諸工程に分化しているのに比べて、シートライニング以外の有機ライニングでは、液状の未反応樹脂から皮膜形成・硬化までの全工程が施工業者の手だけによって作業されるため、施工の良否がその性能に極めて大きく影響する。この点は前記の使用実績の項でも紹介した通りである。ライニングの施工がどのように行われるかを理解する一助として、フレックライニングの作業工程¹¹⁾のフローの一例を図4に示した。他の諸工事とはかなり異なった作業が多いので、ユーザー側担当者として種々の問題はあろうが、施工管理と検査とはできるだけ十分に行うよう努めるべきである。

5.2 有機ライニングの施工管理

施工管理のポイントは、施工される機器（缶体）の仕上げ、原料の品質と保管法、素地調整としてのプラストの作業条件（研削材の種類・使用量・衝突エネルギー）、原料の調合法と使用量、皮膜形成作業法、硬化条件維持法のそれぞれが適切かどうかということである。いずれも重要な事項であるが、中でもプラストの良否^{12),13)}はライニングの寿命を大きく左右すると言われている。汚

れ作業であり、また次に続く塗布作業との間に時間を置くことが出来ないのが難しい点が多いが、最重点項目として組むべき項目である。このプラストの作業及び検査方法について、現在 ISO で国際規格作り¹⁴⁾が進んでいる。また全作業を通じて、気温・湿度・母材の表面温度を測定し、結露条件下での作業を避けるようにしなけ

図4 フレックライニングの作業工程の例

表6 有機ライニング施工時の検査項目

検査事項	検査項目	
	非破壊的検査	破壊的検査
缶体仕上げ	寸法(とくに開口部・死角部の確認)、表面疵、角・隅部のR、溶接ビードの平滑さ・ブローホール	
下地処理	面粗さ、除錆率、残留物	残留物の分析、切断断面
原樹脂・硬化剤	ラベル(名称、製造番号・年月日)、分離・沈澱・懸濁状況、比重、粘度	硬化試験(時間、硬さ、色)、分子量等の分析
料強化材	ラベル、梱包状態、寸法、単位重量、汚れ、織り方、塊・しわ等の欠陥	
皮膜形成作業	気温、湿度、汚染、原材料使用状況、標準作業(混合・含浸・脱泡等)の監視	
外観	色、つや、だれ、割れ、気泡、含浸不良	
完厚さ	磁気式厚さ計、渦電流式厚さ計	切断断面
成硬さ		押込式硬さ計
皮剥離程度	打診、超音波厚さ計	接着力、接着面の状態
膜ピンホール	湿式(電気抵抗法等)、乾式(放電式)	欠陥部切出し
別製試験片		強度、積層状態、重合度
輸送・据付け、組立て作業	割れ、凹み	

表 7 樹脂ライニング工業会制定の検査関係基準書リスト

No.	基準書名
PLA-R-101-74	樹脂ライニング用機器設計基準書
PLA-R-102-76	ピンホールテスト及びピンホールテストー基準書
PLA-R-103-78	樹脂ライニング皮膜の厚さ測定に関する基準
PLA-R-104-80	樹脂ライニング皮膜の硬度測定に関する基準
PLA-R-105-85	樹脂ライニング皮膜の接着強さ測定に関する基準
PLA-R-201、202	樹脂ライニングの現地施工における安全基準、安全チェックリスト

ればならない。更にライニング用原料は、可燃物・有機溶剤を含んでいるものが多いので、安全衛生上も十分な配慮が必要である。

5.3 有機ライニングの検査

各工程における検査については、その一覧を表6に示したが、これらをより詳細に説明した指針が化学工学協会化学装置材料委員会より発表されている⁹⁾ので参照されたい。なお、これらの中で重要ないくつかの項目については、表7のごとく樹脂ライニング工業会により基準書が制定されているので、それに従うと良い。

表6中の完成検査について若干補足説明しておきたいことがある。まず、硬さの測定は、針の先端を皮膜中に押し込んだ時の抵抗の大小で測定されるものなので、ライニングのように薄い皮膜の場合は破壊検査になってし

まうということである。したがって、肝心の接液面を避け、ガスケット当たり面の外側や別の試験片で測定せざるを得ない。

ピンホールテストについては言うべきことが特に多いが¹⁰⁾、ここではピンホールテスターにも沢山の種類があることを表8として掲げると共に、これらのいずれを用いても残念ながら「有機ライニングにとって使用上有害となり得る皮膜の微小開口部のすべてを検出することは不可能である」ということを述べておきたい。したがって、有機ライニングの品質は、このような特定の検査だけによって保証されるものではなく、適切なライニング仕様を前提として、全般的施工管理や一連の検査を総合することによってはじめて良いものになるということを経験しておかなくてはならない。

6. 使用開始後の診断

機器の運転中に有機ライニングの劣化を診断する方法は、まだほとんど実用化されていない。皮膜中への薬液の浸透を電気特性の変化としてとらえる方法¹⁰⁾や、皮膜に割れ・ふくれが生じると壁温が変化するのであることを利用し外部から機器の壁の温度分布や変化を測る方法などが考えられている。

運転停止時には、外観検査を中心に表6の一連の手法が適用される。外観検査は、変色・ふくれ・割れなどを調べるものであり、新品のサンプル板との比較や30倍程度の拡大鏡での観察を含めれば、有益な様々の情報を得ることができるので、決して軽視すべきではない。

最近、非破壊検査の有力な手法として、超音波によっ

表 8 ピンホールテスト方式（及びテスター）の分類

方式	原理	特徴
浸漬式	ライニング面全面を電解質液中に浸漬し、缶体と液との間の電気抵抗を測定する。	実際の使用状態に近いテストだが、導通部（欠陥）を見つけて補修するのが困難。
湿式	化学式 ろ紙などに母材金属と反応し、呈色する液を含ませてライニング面を覆い、発色部を欠陥とする。	現実に腐食反応を起こさせる点では実用に近いとも言えるが、非能率的で実験室向。
	電気抵抗式 スポンジやフェルトに電解質液を含ませたものを⊕電極とし、母材を⊖電極としたライニング面上を走査し、欠陥内への液の浸透を電気伝導により調べる。	個々の欠陥の抵抗値から、慣れれば欠陥の性状も予想できるメリットがあるが、厚膜で液の浸透に時間がかかる場合などは適用できない。
乾式	電極と母材との間に高電圧をかけ、欠陥部が健全部よりも放電しやすいであろうことを利用。	放電特性が機種・電極形状で異なる。前3方式では電極先端がライニング面に触れた方が放電しやすい。
直流放電式	直流に整流し印加している。	電圧が設定しやすい。装置が大型となる。テスト中皮膜面に静電気が帯電しやすい。
交流放電式	交流電源からインダクションコイルで昇圧、印加する。	高圧、大電流が得やすく厚膜のライニングに用いられるが、放電の再現性が悪く、人体への危険性も大きい。
パルス式	間欠的にパルス電圧を印加する。	放電時に皮膜へ与えるエネルギーが少なく、静電気の帯電も少ない。母材がアースされていなくても放電しうる。電圧調整が容易。高価である。
火花発振式	テスラーコイルにより 常時コロナ放電しており、欠陥があるとそこにコロナが集中する。	簡便。発生電圧が不明。コロナにより皮膜が劣化の恐れあり。先端注視のみで判定するため第3者の立会いチェックが難しい。

て、剥離の有無だけでなく、残存している接着力そのものを測定し得る方法¹⁷⁾が発表された。従来のように周波数を固定して測るのではなく、周波数を連続変化させつつ接着界面での共振が最大となるような周波数の値を求め評価するものである。個々のライニングについてのバックデータ（検量線）が必要であるが、それを作れば極めて強力な武器になるものと期待されている。

非破壊検査で異状が認められたならば、その部分を剥離もしくは母材ごと切断し、破壊検査を行うことが望ましい。皮膜の硬さ・強度・接着力の測定や、断面の顕微鏡・SEM（走査型電子顕微鏡）・EPMA（電子プローブマイクロアナライザー）等による観察・分析などを行うことによって、劣化・損傷の原因追及や対策立案が可能となる¹⁸⁾場合が多い。（1988年5月23日受理）

文 献

- 1) 青木 茂：防食技術，**33**, 284 (1984).
- 2) 青木 茂：防食技術，**33**, 520 (1984).

- 3) 青木 茂：Petrotech., **5**, 1042 (1982).
- 4) 青木 茂：防錆管理，**26**, 21 (1982).
- 5) 化学工学協会化学装置材料委員会編：化学装置用非金属材料と使用実績データ集 (1982).
- 6) 化学工学協会化学装置材料委員会編：製作・施工時の検査指針と弗素樹脂使用実績データ集(1985).
- 7) 青木 茂：化学工学，**48**, 692 (1984).
- 8) 井口高行，奥田 聡：金属表面技術，**24**, 522 (1973).
- 9) 青木 茂：配管技術，**21**, [10] 110 (1979).
- 10) 富川水門，戸河里脩：防錆管理，**32**, 4 (1988).
- 11) 青木 茂：配管技術，**29**, [15] 176 (1987).
- 12) 青木 茂：塗装技術，**21**, [2] 69 (1982).
- 13) 青木 茂：塗装技術，**21**, [11] 195 (1982).
- 14) 青木 茂：防錆管理，**31**, 89 (1987).
- 15) 青木 茂：金属表面技術協会ライニング評価技術専門部会第3回例会資料，(1987).
- 16) 富川水門，工藤喜代孝：材料学会腐食防食部門委資料，No. 113, Part 2, 41 (1983).
- 17) 川崎博信：化学工学協会第53年会予稿集 (1988).
- 18) 青木 茂：材料学会腐食防食部門委資料，No. 85, 45 (1978).