化学装置用有機材料の使用状況と選定技術

青 木 茂

* 千代田化工建設株式会社

A Scope of Application and Selection of Organic Materials
for Chemical Equipment

Shigeru Aoki*

*Chiyoda Chemical Engineering and Construction Co., Ltd.

In some recent questionnaires on application and evaluation of organic materials for chemical equipment like as chemically resistant FRP, other plastics and their linings, it was shown that they were used for irreplaceable ones. Now they extend the markets for main equipment of FGD plants, bottom lining of large storage tanks, some pipelines and so on.

On the tests to select suitable organic materials, it is important to evaluate the effects of chemical environments and stress in long term service, and of temperature difference between both sides of organic film.

1. はじめに

塩化ビニル樹脂やポリエチレンあるいはエポキシ樹脂などは、新素材として注目されているエンジニアリングプラスチックなどに対比する意味で、最近「汎用」樹脂と呼ばれることもある。しかし、化学装置機器用の材料としては、それらが登場して来たときの期待に比べると、決して「広く全体にわたって用い」られてはいないようである。根本的な理由としては、クリープ強度を含む耐熱性の低い点をあげることができるが、難燃性の問題や、強度不足を補うためのライニングにおける剥離の問題なども重要な理由であろう。さらに、これは需要が少ないこととの悪循環によるところもあるが、材料規格が整備されていないこと、材料を使う上での特性データが不足していること、それらデータを得るための手法が不明確であること、施工の良否が材料の性能を大きく左右するのに施工者の技能検定制度がなく、かつ施工管理基準があいまいな場合が多いこと、検査や診断の手法や判定基準が確立されていないことなど多くの問題があるため、使用者側が有機材料に信頼感を持ちにくい状況にある。

しかし、有機材料には金属材料の欠点を補うような特

長も多々あるのであって、金属の単なる代用品ではなく、かけがえのない材料として使われている場合も多い。たとえば、還元性雰囲気や Cl^- に強いことなどは大きな利点である。本稿では、いくつかの学協会で行われた使用実績調査の結果などを中心に、有機材料の使用状況を説明した後、材料選定技術について概説することとする。

2. 構造用有機材料の分類

化学装置本体の構造材料として用いられている有機材料について、使用形態別に分類したものを表1に示した。この外に、ガasketや充填材、ノズルなどの部品として用いられている材料もあるが本稿では省略した。さて、この表の補足説明であるが、まず単体のFRPについて、薬液中で使用するいわゆる耐食FRPは、ポートやバスタブに用いられる汎用FRPとは異なる特徴があることに注意しなければならない。それは、図1に例を示すようにガラス含有量の少ない耐食層を接液面に形成させていることである。次に被覆としてはライニング・コーティングだけを示し、以下両者を中心に説明をして行くこととしたが、母材を被覆して使用するものにはこの外にもさまざまな種類の皮膜があると考えられている。たとえば塗装、重防食塗装、ハイビルド、コーティング、ライニング、マスチック、塗覆装、防食テープ、

* 〒210 川崎市川崎区池上新町 3-1-4 (1-4, Ikegami-shin-cho 3, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210 Japan)

表1 構造用有機材料の分類と主な使用形態

材 料 名	使用形態	単 体		被 覆			
		無 強 化	繊維強化	無 強 化		繊維強化	
			FRP	ライニング	コーティング	ライニング	ライニング
熱樹 可 塑 性 脂	R・PVC	○	○	○			
	PE・PP	○		○			
	F 系			○	○		
熱 硬 化 性 樹 脂	フェノール		○		○		○
	EP				○	○	○
	UP・VE		○		○	○	○
	フラン		○		○		○
ゴム	天然ゴム, 合成ゴム			○			

(注) R・PVC: 硬質塩化ビニル | EP: エポキシ樹脂
 PE : ポリエチレン | UP: 不飽和ポリエステル樹脂
 PP : ポリプロピレン | VE: ビニルエステル樹脂
 F 系 : 弗素樹脂系

ガラス 繊維の 種 類	積層構成の 名 称	肉厚 (mm)	樹 脂 含 量 (%)
SM	表 層	0.3~0.5	90
CM	中間層	2.0	70~80
CM	耐食層		
RC	外 層 強化層	設計に よる	50~70
CM			
RC			
CM			

(注) SM: サーフェシングマット
 CM: チョップドストランドマット
 RC: ロービングクロス

図1 耐食 FRP の断面構造の一例

ラギング、メンブレン、硬質・軟質の防錆油膜、等々であり、さらにそれらの細分類名称や、代表的な商品名だけで通用しているものも多い。しかし、これらのすべてが原理的にも、材質的にも異なった皮膜というわけでない。対象物の違いや、製造・施工業界の違いによって、またそれぞれの歴史的経緯によって呼び分けられているにすぎないものもある。あえていうならば、化学装置内面の流体に対する防食を主目的としたライニング（コーティング）、外面の大気中での防錆に対して水分や酸素の透過を前提として防錆顔料の效果に期待した塗装、比較的短期の屋内での防錆をインヒビター・油膜で行う防錆油、特異な施工法としての防食テープ、この4種を理解すれば充分と思われる。

3. 有機材料の使用状況

3.1 使用実績のアンケート調査

化学装置に使用される有機材料等に関する使用実績調査は、国内では表2に示したように過去8回実施されている。初期の化学工学協会の調査では、ステンレス鋼が金属・特殊材の中に入れられているのも面白い。

1978年の材料学会のアンケート結果は、表中に記した腐食防食部門委第12回研究集会資料に載せてあるが、同資料ではFRPライニングの損傷に関する考察(p. 38~46)や、単体FRPの問題点に関する考察(p. 47~54)もなされている。また1980年の化学工学協会の調査は、用途・施工条件・環境・選定・検査・損傷・評価について38項目に及ぶ質問を行ったもので、集計・考察と主要20項目に対する個別回答を列記しデータ集としてとりまとめている。

これらの結果を概括すると、有機材料が使用される機器としてはタンクが最も多く、上の二つの調査とも22~23%を占めている。次いで塔類や配管が多い。化学工学協会の調査では、多管式熱交が第5位で75件となっているが、これは樹脂コーティングされているものである。使用環境としては、酸・アルカリ・塩類・漂白剤・有機溶剤・排水・廃液・排ガス等多岐にわたっているが、一例として表3に、使用後の評価が性能面・経済性・保守管理上の3点とも良かった組合わせについて、材料・環境名・温度を示した。有機材料は、一般に耐熱温度が低く、よく筆者は金属並みに考えるには使用温度を10倍にして材料選定の心構えをすべきだ(60°Cで使う時には600°C用の耐熱鋼を選ぶようなつもりで対処する)と言っているが、100°C以上での使用例は確かに多くない(材料学会調査では13例3.7%)。フランや弗素樹脂系を別にすれば、煙道やダクトのように、ガス温度は高くとも壁温は低い場合が主である。この際、露点腐食の心配をしなくてよい(ただし被覆として使用するときには後述の水蒸気拡散を考慮しなくてはならない)ということ、金属材料に比べて大きなメリットである。

表2 耐食 FRP を含む有機材料等の使用実績調査記録

発 表 年 次	調 査 機 関	対 象 材 料							回 答 件 数	発 表 誌	
		単 体				被 覆					
		金 属		無 機	有 機	金 属		無 機			有 機
		通常材	特殊材	機材	機材	属	材	材			
1957	化学工学協会		○	○	○	○	○	○	687	化学工学, 21 (9) 77~95	
1961	石油学会 石油精製装置専門委員会						○	○	69	石油学会誌, 4 (3) 33~38	
1963	化学工学協会 特殊材料利用委員会		○	○	○	○	○	○	428	化学工学, 27 (10) 100~114	
1969	化学工学協会 化学装置材料委員会	○	○	○	○	○	○	○	530	化学工学, 33 (11) 125~145	
1973	日本材料学会 腐食防食部門委員会				FRPのみ			FRPのみ	87	腐食防食部門委員会資料, No.60, Vol.11, Part 2, p.1~16	
1975	石油学会 材料専門委員会					○	○	○	2,810*	石油学会誌, 19 (8) 63~70	
1978	日本材料学会 腐食防食部門委員会				FRPのみ			FRPのみ	353	腐食防食部門委員会第12回研究集会資料, p.1~37	
1980	化学工学協会 化学装置材料委員会			○	○		○	○	1,115	化学工学協会: 化学装置用耐食非金属材料と使用実績データ集	

* 延基数

表3 性能・経済性・保守管理上で良かった材料・環境名・温度

材 料	対象件数	常 用 温 度		
		R T ~ 70℃		90~100℃
フェノール	2	硫酸バンド液, 土中		
UP系	10	HCl, H ₂ SO ₄ ×3, NaOH×2, NaCl×2, NaClO×2, 産廃燃焼排ガス, 酸洗洗滌水, 合成ゴム		HCl
エポキシ	3	HCl, NaCl, Na ₂ SO ₄ , アルカリ液, カーボンブラック		
フラン	2	HCl, H ₃ PO ₄ , EDC 他		
硬質PVC	19	HCl×12, HClO, NaOH, MgCl ₂ , NaCl, NaClO, 酸性排水, アルカリ性排水, 水, 純水, N ₂ , Cl ₂ , 薬剤水溶液		
ポリエチレン	5	HCl, アルミ溶解液(H ₂ SO ₃ 22%), NaClO, 蟻酸, 廃混酸		
ポリプロピレン	1	HCl		
弗素樹脂系	11	HCl, H ₂ SO ₄ ×3, NaClO, ガソリン×2, 廃ソーダ, パウダー		H ₂ SO ₄ , クメン, サイメン, ベンゼン
天然ゴム	4	HCl, H ₂ SO ₄ , H ₂ SO ₃ , ソリッド, Cl ₂		
合成ゴム	5	HCl×3, NaOH, 水		
PP+UP	1	HCl		
計	62			

(注) 樹脂略号は表1の注記参照

一口に樹脂材料とは言っても、その使われ方や損傷例はさまざまであるが、図2、3はエポキシ樹脂と硬質塩化ビニルについて、使用後の損傷程度をpH値と使用温度とで整理してみたものである(化工協調査)。エポキシ樹脂はpHが高い方から低い方まで使われているが、

とくに中性付近に事例が多く、硬質塩化ビニルは中性よりもむしろ酸性の強いところでよく使われている。ところで、いずれも使用頻度の高い範囲は、損傷の軽微な事例と重い事例とが重なり合っている。これは損傷が環境以外の要素にも左右されているためで、損傷の直接的

図2 エポキシ樹脂: pH—温度—損傷程度

図3 硬質塩化ビニル: pH—温度—損傷程度

表4 損傷の有無別の評価の良否

グ ル ー プ		損 傷 な し	損 傷 あ り	計
何れの評価も良いもの (耐食優又は良; 経済安又は 適; 管理易)		113	36	149
何評 れ価 かの 悪い もの	耐 食 不 良	0	5	5
	経 済 高	5	6	11
	管理要注意又は難	10	14	24

原因(劣化・浸透・疲労等)を引き起こした責任ともいうべき損傷の理由について質問したところ、損傷事例の38%が設計・施工・組立て上の不良によるとの回答(化工協会調査)であった。

有機材料は比較的損傷が多いであろうことは、予想しうることであるが、たとえ損傷は起こしていても、他の想定代替材料に比べて良い評価を得ている場合も多い。

表4は、材料学会調査において3種の評価がいずれも良かったものと、いずれかの評価が悪かったものとを損傷の有無別に集計した結果であるが、前者が後者の合計の4倍近くになっている。また化工協会調査でも、総合評価として「もし同じ機器を将来作るとして、同材料を選ぶかどうか」質問したが、別材料を選ぶとした回答の10倍近くが同材料を選ぶと回答している。材料学会同様、損傷を生じていても同材料を選ぶとしたものも多く、有機材料が他にかげがえのない材料として使われていることを示している。

3.2 有機材料の実用例

次にアンケート調査から離れて、最近注目されている有機材料の実用例についてトピック的に上げてみよう。まず排煙脱硫装置は、硫酸酸性で金属材料にとっては厳しい腐食環境と言えるが、有機材料としては操業温度が高くなく、しかも可燃性流体を扱わないこと、更に比較的装置が大型であることから、絶好のマーケットとなっている。単体FRPも用いられているが、とくにフレクライニングが多用されている。このフレクライニングは、貯油タンク底板の内面油側からのドレン水に対する防食用としても広く用いられるようになっている。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クガラスのサイズが、排脱装置用よりも細かいのが普通である。

配管用途として注目されるのは、単体FRPの大径管であり、大型海水淡水化装置の海水取水管に直径2.5m、短管長さ12mのものが現地で二次接合され使われている。また、耐熱・耐薬品性に優れながら加工性に難点のあった弗素樹脂の改良が進み、内面を弗素樹脂ライニングした配管の用途が広がつつある。

先に有機材料の問題点として難燃性を上げたが、実はFRPに関してはかなり改善が進んでおり、JIS A 1321の難燃3級に入るものも多い。そして、地下埋設少量危険物用タンクとして容量3,000lまでのものを単体FRPで作ることが認められた例がある。

更に圧力容器に関しては、欧米ではASME Section Xにも規定されているように単体FRP製ボンベが実用化されている。我が国では、特認申請で認められた例もあるが、まだ一般的には使用を許されていない。

4. 選定技術

4.1 耐食表の問題点

前項で紹介した化工協アンケートにおいて、材料選定時に参考にした資料は何かを質問したところ、自社または他社の実績とする回答が過半を占めた。しかし新しい用途の場合に実績をまつことはできないし、類似とは言

っても全く同じ環境が再現されるとは限らないので過去の実績を評価する上でも材料選定に対する知識が必要となる。

材料選定は、まず各種材料の強度特性などを一応理解した上で、いわゆる耐食表をあたることから始まる。温度と薬液濃度について最も幅広く載っているものとしては、NACE “Corrosion Data Survey—Nonmetals Section”がある。他にも何種かのものがあるが、いずれも①環境剤の組成が単純であること、②詳細な試験条件や評価基準が明確でないこと、③たとえば単にエポキシ樹脂というのではステンレス鋼というのと同じような幅があり、耐食表上の材料と実際に施工される材料とでは大きな差異のある場合が珍しくないこと、などの点から選定上の一応の目安と考えるべきである。次の段階は、メーカーの資料を取り寄せることとなるが、有機材料の場合、メーカーとは施工業者を指すことが多い。施工業者は樹脂メーカーの作った原料樹脂に独自の立場で添加剤や充填剤・強化材を加え、場合によっては樹脂そのものの変性を行っている。ユーザーとしては、樹脂や添加剤等、それぞれの原料メーカーの資料までさかのぼって検討した方がよいことは確かだが、現実的には難しい。施工業者の資料では、前記③についてはほぼ解決される（ただし注意しないとブレンド前の樹脂メーカーの資料で間に合わされていることもある）が、①・②に関しては充分でないことが多い。

4.2 耐食試験上の注意事項

そこで耐食試験を行うこととなるが、金属材料では起こりにくい問題点として、耐食有機材料に関する材料規格がほとんど出ていないというネックがある。樹脂の変性や添加物等の微調整がメーカーで比較的簡単に行えるため、試験結果が思わしくないとき々とモディファイした新材をメーカーが持込みエンドレスとなる場合があったり、長時間試験の結果が出たころには実際の品質が変わっているケースがあったりすることもある。従って供試材料の絞り込みにあたっては、このような面からの打合わせをメーカーとしておく必要がある。

耐食試験を大別すると、実験室的な静的試験、同じく実験室内であるが付加応力や液の流動、皮膜内外面の温度勾配などを考慮した動的条件下での試験、実装置への装着試験の3種となる。方式上は金属材料と同様の考え方や注意事項が多いので、有機材料特有の問題点を中心に話を進めることとしたい。試験実施に際しての共通の注意は次のとおりである。①試験法の規定の中には、材料の適用可否を調べるためよりはメーカーとしての品質管理のための基準を定めたにすぎないものがあるので、試験方法の原則を尊重し試験条件の統一を図るためにそれらを利用するのは良いが、細目まで無批判に準用

せぬよう注意すること。②促進試験のために安易に液の温度や濃度を変えぬよう、とくに注意すること。③試験片の断面方向からの浸透の早い材料があるので、端面処理に気を付けること。④金属の場合は拡散性の水素や高温での時効の問題を除いて多くの腐食試験は表面現象が問題となるだけであるが、有機材料は表面だけでなく材料内部への薬液成分の拡散浸透が起こることがむしろ普通なので、試験片の厚さ、表面状態、硬化度を実用の場合となるべく合わせるようにすること。⑤ライニング用材料の場合、母材にライニングした試験片とライニング材だけの成型品とどちらが適当か、試験目的によって選ぶこと。⑥試験液から取出し後、内部に浸透していた薬液成分は逆に放出されるので、重量測定等の評価までの時間が一定となるよう注意すること。

4.3 静的浸漬試験の評価

静的浸漬試験結果の評価法としては、まず外観・体積・重量変化の各々にグレードを付けて点数化し、その合計点をもって総合評価する方法が1949年Adamsらによって提案¹⁾されている。また主としてゴムライニングなどの結果から100時間後の重量変化が3 mg/cm²（試験片表面積）以下ならば実用に供しようとの見解が1963年大野・松永によって発表²⁾されている。しかしこれらの考え方の実証は未だ充分とは言えない。時間-重量変化曲線から飽和吸放量や拡散係数を求める方法を、以前から奥田が提唱³⁾している。これは薬液成分の皮膜中への浸透深さを推定する基本的な方法である。この浸透深さを知る上では、浸透による変質層が変色や極端な脆化を伴う場合に試験片の断面観察を行うことも出来るし、またあらかじめ発色剤を入れておく試みもなされている。表層から徐々に切削して蛍光X線にかけたり⁴⁾、断面をEPMAで調べる⁵⁾ことも有効な場合がある。しかし次の問題は、薬液中の例えばSO₄²⁻やCl⁻よりも水の方が早く皮膜中に拡散することが一般的なのに、その水の浸透深さを知ることが難しいことと、浸透して来た成分によって皮膜がどれだけ劣化したかを知ることである。前者については、ライニングにおいて母材との接着界面が水（と酸素）によって腐食し、皮膜の接着力が低下するためとくに問題である。後者に対しては、浸漬試験後取り出した試験片の強度を測定し評価することがよく行われている。たとえばFRPにおいて時間-曲げ強度保持率の変化を測定し、1・4・16ヵ月後の曲げ強度が初期値のそれぞれ80、70、60%以上ならば良しとするMallinson⁶⁾の見解がある。寿命予測まで踏み込んだ考え方としては、やはりFRPに関してであるが、強度低下は樹脂と強化ガラス繊維との結合点の減少によるものと仮定し、反応速度論的に低下速度を予測しようとするHeitmanらの方法が発表⁷⁾されており、更に平橋らは、

その方法による結果とワイブル分布を用いて劣化の平均日数を求めた結果とを対比した報告⁸⁾を行っている。

4.4 動的条件下の試験

静的浸漬では実装置での環境における重要な因子が欠けているとして、最近とくに注目されているのが動的条件下での諸試験である。まず応力の影響であるが、有機材料は常温から既にクリープ領域にあると考えた方がよい。また金属の応力腐食割れ (SCC) と外見上類似した現象として、熱可塑性樹脂が界面活性剤中でよく起こし高分子そのものには化学的变化を生じない ESC (環境応力割れあるいはその前段階的な環境応力 クレージング) や、熱硬化性樹脂も含めて化学的劣化を伴いつつ生ずる環境応力破壊がある⁹⁾。これらをテストするために、有名な Bent Strip 法 (ASTM: D 1963) や最近 ISO で検討されているボール押込法のような定歪式浸漬法や、引張りクリープ型の定応力式浸漬法¹⁰⁾が行われている。また外径 8 mm 位の小径管に内圧をかけて液中に浸漬する方式で大量の長期試験を行っている例も紹介¹¹⁾されている。更に奥田はリラクゼーション式浸漬試験によって短時間に材料の使用可否を判定する方法を発表¹²⁾している。単調な応力でなく繰返し応力下での浸漬試験¹³⁾も行われている。これらはいずれも時間 (または応力繰返し数)-応力曲線における急激な応力低下現象を知ることによって、材質劣化の有無を判定している。

流動条件下の試験も行われているが、エロージョン現象¹⁴⁾だけでなく、液成分の樹脂中への拡散や樹脂中の成分の液中への溶出が多くなることが認められている¹⁵⁾。

4.5 水蒸気拡散現象とその試験法

有機皮膜の内外面に温度差がある場合に、高温側から低温側に向かって環境成分、とくに水分の拡散が促進される、いわゆる水蒸気拡散現象¹⁶⁾は、単体で使用される材料にも若干の物性変化をもたらすが、それよりもライニングの場合に皮膜中を拡散して来た水分が母材金属との接着界面に溜まって皮膜の膨れや剝離を引き起こすために、極めて重要な問題である。しかも化学装置の多くは内面のライニング皮膜が高温の流体に接し、外面側の母材が冷えているといった使い方であるため、この現象は有機ライニングにとって致命的とさえ言え、その対策としてガラス薄片などの充填材を皮膜中に平行に並べ、浸透を物理的に阻止しようとするフレックライニングが開発されて来たのである。

この現象は、水蒸気状態での水が拡散すると考えられているため前述のような名称で呼ばれているが、環境流体中の水溶液の溶質濃度が低いほど透過が早い。この場合、溶質として溶けている量が問題なのであって、たとえばナフサ中に微量の水分が存在する場合など、懸濁している水滴そのものは水分の濃度が高く危険であるし、

あるいは 50% 硫酸水溶液に耐えるライニングが、1% 硫酸水溶液中では使えないと言ったことも起こりうる。温度面からいうと、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しやすい。しかし温度差は、どんなに小さくとも差のある限り水が拡散するとも言われ、しかもいったん透過した水分が温度差を逆転したところ再び液中に戻ったとの報告¹⁷⁾もある。ライニング皮膜が厚ければ透過が遅くなることは、拡散式からも予想されることであり、また実験的にも確かめられている¹⁸⁾。また皮膜と母材との接着力を向上させることも有効である¹⁹⁾。

水蒸気拡散現象の一例を紹介してみよう。厚さ 200 μm のあるエポキシコーティングにおいて、皮膜面に 60°C の温水を流し、裏面の鋼板側を 20°C の水で冷やすと、数十時間で直径 1~2 mm の皮膜の膨れ (プリスター) を生ずる。プリスター発生直後に試験片を取出して調べると、その部分は皮膜の全層位が、ほぼ原厚さのままで接着面から膨れ上がっており、その内部は水で満たされ、しかも母材の表面はコーティング前に処理した金属光沢を保っていることが分かる。拡散する水分が、ミクロ的に皮膜の分子構造のどこを通るのか、そのメカニズムは明らかではないが、プリスターの発生密度は、たとえば上記コーティングの例では 1 cm^2 あたり 2~3 個、5 mm 厚の硬質ゴムライニングで直径 20~30 mm 位のものが 100 cm^2 あたり 5~6 個位で、面積比からいうと、プリスターの生じていない部分の方が多い。この点から、水蒸気拡散は樹脂の分子構造レベルよりもっとマクロな、何らかの潜在欠陥的な原因によるのではないかとの考えもある。しかし、現実には少なくとも工業的施工で得られた有機皮膜には、必ず水蒸気拡散数が生ずるとされている。

この水蒸気拡散現象を再現し、検討するために提案された最も有名な装置が図 4 に示したものである。これは Du Pont 社と Atlas Chemical 社とで開発されたため Du Pont 式と呼ばれていたが、現在は NACE TM-01-74 として制式化されている。ガラス円筒を太鼓の胴に見立てると、試験片が皮に相当する。比較的簡便で多用されているが、温度勾配を大きく付けようとすると伝熱面が広すぎて加熱源などで難点がある。そこで管や扁平箱の外面にライニングし、内部に冷却水を通したものを薬液中に浸漬する方式¹⁸⁾もある。これらの試験は通常ライニング膜の膨れの発生時間で評価するが、厚膜のライニングの場合、母材の代りにアルミ箔を貼りアルミの膨れを見る方法¹⁰⁾や、皮膜の接着強度を測定¹⁶⁾したり、接着面の腐食程度を調べる方法¹⁰⁾もある。また皮膜中に電極を埋め込んでおき水分の到達による絶縁抵抗の低下を知る試み¹⁰⁾もなされている。耐水蒸気拡散性の良い材料

図4 NACE TM-01-74 方式の水蒸気拡散試験器

図5 FRPの曲げ強さの低下に及ぼす応力の影響 (80°C, 蒸留水片面浸漬)

は当然試験時間が長くなるので、試験片の膜厚を何段階か変えてテストすることもある¹⁸⁾。

温度勾配下での水蒸気拡散は、ライニングの接着界面だけででき、FRPそのものの強度にも若干の影響を与える。筆者らは、FRPを引張りつつ片面に温水をかけ流し、最長1年後の物性を測定²⁰⁾してみたが、静的試験の結

果よりも強度が早目に低下し、定常化してからの強度も若干低いことが分かった。ただしこの時の強度保持率: 50% は、FRPの安全率10の構成要素(明確なものはないが、一説によると)中の長期荷重1.4と化学劣化1.4とを乗じたものに等しかったので、在来設計でよいことを確認した。試験結果の一部を図5に示す。

4.6 実装置への装着試験

最後に実装置への装着試験であるが、水蒸気拡散を考慮すると、単に試験片を装入したのでは不十分である。マンホールや配管の一部またはバイパス配管などを試験材で作ることが望ましいが、これらはもし結果が悪ければ漏洩の危険もあるし、また数も限られることとなるから、検討の最終段階、本格使用一歩前における材料の確認試験ともいべき方法である。

(1984年1月13日受理)

文 献

- 1) W. H. Adams & H. H. Lebach: *Chem. Eng.*, July, 98 (1949).
- 2) 大野政雄, 松永孝雄: 化学工学, **27**, 709 (1963).
- 3) 奥田 聡: *Plastics Age* (和文), **13** (5) 49 (1967).
- 4) R. F. Regester: *Corrosion*, **25**, 157 (1969).
- 5) 青木 茂: 材料学会腐食防食部門委資料, No. 85, 45 (1978).
- 6) J. H. Mallinson: "Chemical Plant Design with Reinforced Plastics", McGraw-Hill (1969).
- 7) H. E. Heitman, R. S. Lindstrom: 19th Ann. Tech. Conf., RP/C, SPI (1964).
- 8) 平橋 卓, 鈴木善文, 島根義憲: 強化プラスチック, **21**, 168 (1975).
- 9) 高圧ガス保安協会: "耐食FRPハンドブック", p. 198 (1983).
- 10) 北條英光, 津田 健, 桑原諸彰: 日本複合材料学会誌, **2**, 72 (1976).
- 11) 奥田 聡: *Plastics Age* (和文), **23**, [8], 109 (1977).
- 12) 奥田 聡: 材料, **17**, 697 (1968).
- 13) 増田雄市郎: 強化プラスチック, **18**, 481 (1972).
- 14) 北條英光, 津田 健, 堀 圭吾, 三島健司: 化学工学協会第47年会予稿集 (1982).
- 15) 奥田 聡, 福田秀次, 上岡 満: 化学工学協会第7回秋季大会予稿集 (1973).
- 16) 井口高行, 奥田 聡: 金属表面技術, **24**, 522 (1973).
- 17) 鈴木 一, 高島憲一: 金属表面技術, **32**, 474 (1981).
- 18) 青木 茂: '73 化学プラント技術会議 Session 7 資料.
- 19) 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).
- 20) S. Aoki, M. Tomikawa & K. Kudoh: 36th Ann. Tech. Conf., RP/C, SPI (1981).