

第 5 章 内面保護コーティングの耐用年数

容量 1 万キロリットル以上の液体の危険物を貯蔵する屋外タンク貯蔵所に対する保安検査の最長の周期は現在、13 年であり、保安のための措置として内面コーティングが要件の 1 つとなっている。この内面コーティング塗膜の耐用年数については、20 年とされている（「コーティング指針」：平成 6 年 9 月 1 日付け消防危第 74 号）近年この年数を超えて使用され健全であるものの実績などデータも蓄積されてきており、安全性を低下させずに、コーティング塗膜の耐用年数を延長することが可能かの検討を行うこととなった。そのため、温度勾配浸漬試験、現地調査及びコーティング塗膜の補修履歴データの収集・分析を行い、耐用年数について見直しを行った。

検討はガラスフレックコーティング（以下、「GF コーティング」という。）について行った。これは、検討対象の新法タンクにおいて周期延長のためには GF コーティング又はガラス繊維強化プラスチックライニングが要件となっているが（危険物の規制に関する省令第 62 条の 2 の 2）、実態として新法タンクにおいて施されているコーティングとしては GF コーティングが非常に多いことからである。なお、コーティング指針においてガラス繊維強化プラスチックライニング（膜厚 1000 μ m）は GF コーティング（膜厚 400 μ m）と同等の耐久性が規定されていることから、GF コーティングの耐用年数が分かればガラス繊維強化プラスチックライニングも同等と判断できる可能性がある。なお、過去の GF コーティングの検討にあたっては、「エピビス系ビニルエステル樹脂」という用語が用いられているが、現在一般的にはこの用語の代わりに「ビスフェノール系ビニルエステル樹脂」が用いられていることから、この報告書では「ビスフェノール系ビニルエステル樹脂」を用いる。

5. 1 コーティングの耐用年数に係る過去の検討結果の整理と今年度の検討方法

タンクの内面コーティング塗膜の耐用年数に係る過去に行われた調査検討等で、今回の検討に関連する内容について概要を以下に示す。

5.1.1 平成 12 年度～14 年度に行われた検討^{1)、2)、3)}

実タンクにおける内面コーティング塗膜の劣化状況の調査及び資料収集と実験により、コーティング塗膜の耐用年数について検討が行われた。塗膜の劣化要因としては、水分の浸透による膨れ、溶剤成分による膨潤、酸成分による膨潤・分解劣化に整理された²⁾。内面コーティング塗膜の耐久性の評価については、6 種類の試験（水蒸気透過度測定、温度勾配浸漬試験、溶剤浸漬試験、酸液浸漬試験、溶剤＋酸液浸漬試験（希薄酢酸／BTX 溶剤）、溶剤＋酸液浸漬試験（酢酸／ベンゼン））を行い、結果として、「塗料の耐久性限界を推

定するには、温度勾配浸漬試験（40℃/20℃）を行い、膨れ発生までの日数を数式化した検量線に当てはめて耐久年数を算出することで対応可能であり、また今後、実タンクでのコーティングの耐久性についての実績データを蓄積することにより、より長期間の性能を検証することも可能である。」という結論が得られた³⁾。

平成 14 年度は、20 年程度の実績を有するタンク内面コーティングの塗料及び最新の技術で作成された塗料の耐久性試験を実施し、耐久性に係る試験方法の検証並びに検量線の適用性の確認を行っている。耐久性試験のうち温度勾配浸漬試験の概要を以下に示す。

（1）試験方法

①試料

ア 試験用ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料 調整品 3 種類

- ・ビスフェノール系ビニルエステル樹脂（以下、「BV樹脂」という。）を用いたもの
- ・ノボラック系ビニルエステル樹脂（以下、「NV樹脂」という。）を用いたもの
- ・BV樹脂とNV樹脂を併用したもの（以下、「BV樹脂/NV樹脂」と表記し、各樹脂の後ろに配合比率を%で表記する。）

イ 過去の実績既知ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料 1 種類

②試験方法

塗料 4 種類（試験用調整品 3 種類、過去の実績既知材料 1 種類）、膜厚 2 水準（400、700 μm）、浸漬液温度条件 2 種類（40℃/20℃、70℃/30℃）で試験された。

③測定・記録項目

試験条件（40℃/20℃）は全ての塗膜試験片に膨れが発生するまでの期間、試験条件（70℃/30℃）は 30 日間浸漬試験を継続した。付着性、塗膜の電気抵抗値・静電容量の測定と試験終了後の塗膜表面状態を観察している。

（2）試験結果

①試験条件（40℃/20℃）における試験結果

ア 膜厚 400 μm 試験片

(ア) 膨れ発生までの日数

4 試験片（BV樹脂GFコーティング塗料、BV樹脂/NV樹脂GFコーティング塗料、NV樹脂GFコーティング塗料、実績既知塗料）のいずれも 97 日目から膨れが発生した。97 日目以前の観察日が 92 日目なので、膨れは 93 日目から 97 日目までの間に発生したものと類推された。

(イ) 検量線*を用いた膨れ発生年数の推定

平成 13 年度の調査検討においては、実タンクにおける塗膜の膨れの発生年数と温度勾配浸漬試験における膨れの発生時間を検量線に適用して求めた膨れの発生年数は、概ね一致していることが認められた。

(ア)で推定された膨れ発生までの日数を最も短い93日とし、数式化した検量線の例に適用して膨れ発生までの年数を推定すると18～25年となることから、20年程度の耐久性を有していると考えられた。

* 検量線について

検量線は同一の条件で作成した試験片について温度勾配浸漬試験による膨れ発生までの時間と実環境における膨れ発生までの相関を示すものであり、本調査検討で用いた検量線は、過去に行われた試験データに基づき作成されたものである。

本調査検討で用いた検量線は、水門の塗膜を海水に暴露し、塗膜の膨れの発生した年数と温度勾配浸漬試験により得られた膨れ発生までの日数に基づき作成された。

イ 膜厚 700 μ m 試験片

(ア) 膨れ発生までの日数

NV樹脂GFコーティング塗料及び実績既知塗料については、膨れは98日目から110日目までの間に発生したものと類推された。BV樹脂GFコーティング塗料は、膨れは111日目から130日目の間に発生したものと類推された。BV樹脂/NV樹脂GFコーティング塗料については、151日を経過しても膨れは発生しなかった。

(イ) 検量線を用いた膨れ発生年数の推定

- NV樹脂GFコーティング塗料及び実績既知塗料については、前(ア)で推定された膨れ発生までの日数を最も短い98日とし、数式化した検量線の例に適用して膨れ発生までの年数を推定すると19～27年となることから、20年を超える耐久性を有していると考えられた。
- BV樹脂GFコーティング塗料については、前(ア)で推定された膨れ発生までの日数を最も短い111日とし、数式化した検量線の例に適用して膨れ発生までの年数を推定すると23～31年となることから、25年を超える耐久性を有していると考えられた。
- BV樹脂/NV樹脂GFコーティング塗料については、151日を経過しても膨れが発生していないことから、152日で膨れが発生したと仮定し、膨れ発生までの年数を推定すると33～46年となることから、30年を超える耐久性を有していると推定された。

5.1.2 平成21年度⁴⁾

樹脂組成の種類及び膜厚と耐用年数の関係を確認するために樹脂組成及び膜厚を変えた試験片による温度勾配浸漬試験を実施するとともに実タンクで25年以上使用したBV樹脂GFコーティング塗膜の劣化状態を調査し、これらの結果を用いて検量線作成のための検討をしている。

(1) 温度勾配浸漬試験

4種類の塗料及び膜厚4水準の合計16枚の試験片を作成し、温度勾配浸漬試験(40℃/20℃)を行っている。試験項目については、塗膜の外観観察(膨れ、割れ等の観察)を主として、浸漬前後に付着力測定、硬度測定、衝撃試験、インピーダンス測定、折り曲げ試験を行っている。浸漬開始後75日目から10日ごとに観察を行い、179日間実施している。浸漬試験の概要を以下に示す。

①試験方法

ア 試料及び試験方法

(ア)試験塗料の種類と膜厚

BV樹脂GFコーティング塗料及びBV樹脂/NV樹脂GFコーティング塗料を用い、樹脂組成と膜厚の異なる試験片を各1枚作成した。作成した試験片の種類は表5.1.1のとおり。

表 5.1.1 試験片の種類

膜厚(μm)	①BV樹脂	②BV樹脂 70% /NV樹脂 30%	③BV樹脂 30% /NV樹脂 70%	④BV樹脂 20% /NV樹脂 80%
400	A1	B1	C1	D1
700	A2	B2	C2	D2
1000	A3	B3	C3	D3
1500	A4	B4	C4	D4

(注1) A1～D4は試験片の記号を示す。

(注2) ガラスフレーク含有率は①～④の樹脂塗料中20%(Wt%)とした。

(イ)試験方法

- ・浸漬液：水
- ・温度 40℃/20℃

イ 測定・記録項目

浸漬期間は179日であり、浸漬試験75日目から10日ごとに塗膜外観目視検査を行い、膨れや割れ等の異常を肉眼で確認している。外観目視検査の他、浸漬試験前後に物性試験(付着力試験、硬度測定、衝撃試験、インピーダンス測定)を実施している。また、浸漬試験後には、折り曲げ試験を実施し、塗膜下の水分状況や腐食状況の確認を実施している。

②試験結果

ア 外観観察

75 日目の初回観察で A 1、A 2、C 1、D 1 試験片に膨れが発生していた。B 1 の試験片は 98 日目に膨れが発生した。膨れの発生が確認された日数を表 5.1.2 に示す。

表 5.1.2 温度勾配試験による各試験片の膨れ発生日数

試験片	浸漬日数	75日	80日	90日	98日	110日	119日	130日	140日	147日	159日	168日	179日
1500 μ m	D-4												
	C-4												
	B-4												
	A-4												
1000 μ m	D-3												×
	C-3												×
	B-3										×	×	×
	A-3									×	×	×	×
700 μ m	D-2									×	×	×	×
	C-2								×	×	×	×	×
	B-2								×	×	×	×	×
	A-2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
400 μ m	D-1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	C-1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	B-1				×	×	×	×	×	×	×	×	×
	A-1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	観察日	10/4	10/19	10/29	11/9	11/18	11/27	12/8	12/18	12/25	1/6	1/5	1/26

(注1) ×は試験片に膨れ発生が確認された日。なお、75 日目より前には観察を行っていない。

(2) 実タンクの塗膜劣化調査

膜厚と塗膜の劣化との関係を調べるため、26 年程度使用した実タンク（3基）のBV樹脂GFコーティング塗膜の劣化状態を調査している。

①調査方法

建設時からの塗膜を中心に目視検査及び膜厚測定を実施し、さび、はがれ、われ、膨れ等の発生箇所を抽出したのち、膨れ発生状況に応じて底部板を4区分に分類した。その4区分から各区分2箇所の観察範囲（0.5m×0.5m）を選定し、選定された範囲について膜厚測定、付着力試験、インピーダンス測定、硬度測定及び塗膜下の状態観察を実施した。

膨れの発生状況は、膨れの面積割合に応じて以下の4区分としている。

A：(0%)、B：(0~0.1%)、C：(0.1~0.3%)、D：(0.3%~)

②調査結果

ア 調査タンクでは膜厚が均一であったこともあり、膜厚と膨れの発生状況には明瞭な関係は見られなかった。（1基ではやや傾向が見られた。）

イ 膨れ発生数の多いC、Dは塗膜下に一部黒錆が観察されたが著しい鋼材の腐食には

至っていない。

ウ 建設時の塗膜の87%以上が健全な状態を26年程度維持していること、また膨れ現象は部分的にタンク底板の、ある方向に集中して発生している傾向があり全体に散在した状態では無いことを確認した。

以上のことから、26年程度使用された実タンク塗膜において、開放ごとに補修が適正になされており、平均膜厚800 μ m程度であれば、塗料側に起因して発生する膨れの問題は少ないことが分かった。部分的に発生した膨れについては施工時の環境と使用時の環境上の問題点を抽出することによって一定程度の発生要因については絞り込める可能性があると考えられた。

(3) 検量線の作成に関する検討結果

GFコーティング塗料の検量線を作成するための検討結果は以下のとおりであった。

- ①温度勾配浸漬試験については、400 μ m、700 μ m（BV樹脂GFコーティング塗膜）の試験片について、正確な膨れ発生日数を確定させる必要がある。実タンクのうち常温で使用されているものは、BV樹脂組成のものが多いため、この樹脂組成に注目して試験を実施することが提案された。
- ②実態調査では、調査したタンクは膜厚分布がおおよそ700 μ m～1,000 μ mの範囲であり、本データを使用して検量線を作成するためには、BV樹脂GFコーティング塗料で平均膜厚400 μ mで施工されているタンクの調査を行うことが提案された。

5.1.3 今年度の検討方法

今年度は、5.1.1、5.1.2の検討結果を受けて、課題とされた試験データを得るため、40°C/20°C温度勾配浸漬試験を実施することとした。また、実タンクにおける塗膜の耐用年数を評価するため、実膜厚400 μ m程度の底部コーティングの塗膜劣化状況を調査するとともに、実タンクのGFコーティングの補修実績データを収集分析した。

引用文献

- 1) 危険物保安技術協会：特定屋外タンク貯蔵所の開放周期の算定方法に係る性能規定化に関する調査検討報告書、平成13年3月
- 2) 総務省消防庁：特定屋外タンク貯蔵所の開放周期の算定方法に関する調査検討報告書、平成14年3月
- 3) 総務省消防庁：屋外貯蔵タンクの安全性評価に関する調査検討報告書、平成15年3月
- 4) 危険物保安技術協会：屋外貯蔵タンクのコーティングの耐用年数の評価に関する検討調査報告書、平成22年3月

5. 2 ガラスフレークコーティングを施した試験片の温度勾配浸漬試験

B V樹脂GFコーティング塗膜の耐用年数の検討に資するため、塗膜の膜厚及び樹脂組成を変えた温度勾配浸漬試験を行う。試験に当たっては、正確な膨れ発生日数を把握するため外観観察頻度を5日ごとに実施するとともに、試験片数を3とした。(温度勾配試験結果報告書(第3回WG資料3-2)を参考資料として別途添付する予定。)

5.2.1 温度勾配浸漬試験の方法

(1) 試験期間

平成22年6月2日～平成22年9月10日(100日間)

(2) 試験試料

①試験塗料の種類

A : B V樹脂GFコーティング塗料

B : B V樹脂70%/NV樹脂30%の配合によるGFコーティング塗料

②試験片の種類と記号

試験片の種類と記号を表5.2.1に示す。

表5.2.1 試験片の種類と記号

膜厚(μm)	B V樹脂100%	B V樹脂70%/NV樹脂30%
400	A1-1~3	B1-1~3
700	A2-1~3	—

(注1)表中のA1-1等の記号は試験片の名称。

(注2)ガラスフレーク含有率は「コーティングに関する指針」にあるガラスフレークの含有率(15~27%)の範囲内でメーカー各社の含有率を参考に20wt%とした。

(3) 試験片の作製

試験片の作成は平成21年度と同じ方法で行い、本年度は表面粗さを実測した。

①材 質 : SS400 サンドブラスト処理(処理グレード ; ISO 8501-1 Sa3、研削材 ; アルミナ46メッシュ、表面粗さ R_z : 20~22 μm)

②サイズ : 150×70×3.2 mm

③試験片の種類と枚数

ア 塗料2種類 : A、B

イ 膜厚2水準 : A : 400 μm 及び700 μm 、B : 400 μm

ウ 試験片n数 : 3 (計9枚)

④試験片の作製方法

ア 表面に試験塗料（下塗＋上塗）を乾燥塗膜が所定の膜厚となるように塗装した。その裏をエポキシ樹脂塗料で 300～350 μm になるように塗装した。表裏の塗膜に約 5 m m 重なるように板の周辺を塗り包み、常温で 7 日間放置乾燥させた。

なお、下塗は 2 % 希釈し刷毛塗りし、GF コーティングは 1 % 希釈しエアレススプレー（チップ 163-531、1 次圧 3.5kg/cm²、ポンプ比 60:1）にて塗装した。塗装は 1 日 1 層とし、温度 23℃、湿度 60%RH 以下で行った。

イ 膜厚と塗装回数

- ・ 400 μm : 3 回塗り
- ・ 700 μm : 4 回塗り

塗装後各試験片の 100 点で膜厚を測定した。

⑤ 試験片作製記録及び膜厚測定結果

試験片作製に関する記録を表 5.2.2、5.2.3 に示す。

表 5.2.2 塗装工程記録

試験片記号	樹脂組成	膜厚 (μm)	下塗	上塗一層目	上塗二層目	上塗三層目
A1	BV 樹脂 100%	400	5/7	5/10	5/11	-
A2		700	5/7	5/10	5/11	5/12
B1	BV 樹脂 70% / NV 樹脂 30%	400	5/7	5/10	5/11	-
温 度 (°C)			22	22	23	23
湿 度 (%)			50	50	60	55

(注) 裏面: エポキシ樹脂塗料(計 350 μm) 下塗 5/13、一層目 5/14、二層目 5/17、エッジ塗装 5/18

表 5.2.3 試験片膜厚測定結果 (1 枚あたりの測定点 100 カ所)

試験片記号	樹脂組成	膜厚 (μm)	平均 (μm)	最小 (μm)	最大 (μm)	標準偏差 (μm)
A1-1	BV 樹脂 100%	400	538	425	680	67.3
A1-2			535	411	687	69.0
A1-3			535	421	680	59.6
A2-1		700	837	703	954	65.9
A2-2			832	711	950	58.4
A2-3			829	710	946	49.2
B1-1	BV 樹脂 70%/ NV 樹脂 30%	400	538	412	728	69.7
B1-2			538	422	723	68.6
B1-3			534	408	684	66.9

(4) 温度勾配浸漬試験器

①温度勾配浸漬試験器の概要

温度勾配浸漬試験器及び試験片の取付け位置を図 5.2.1 に示す。浸漬水は水道水を用いた。

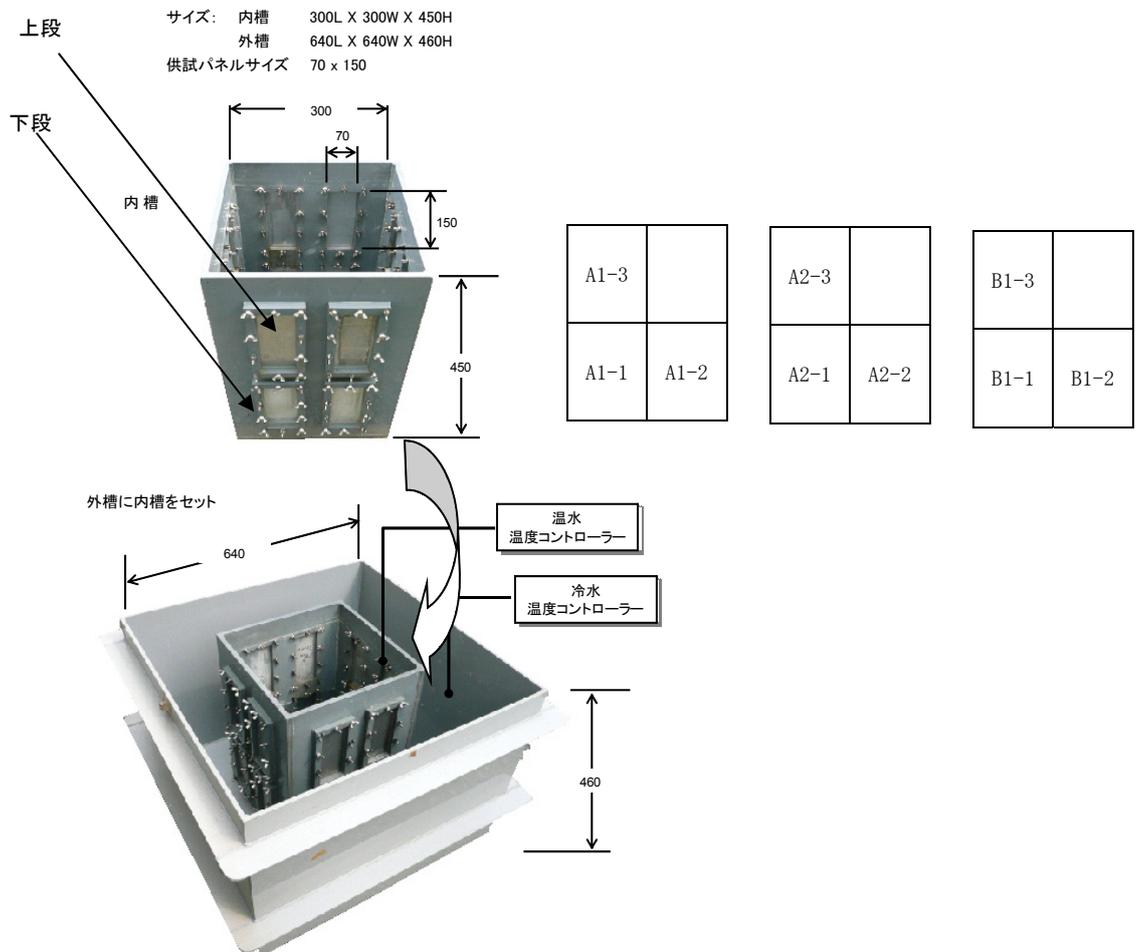


図 5.2.1 温度勾配浸漬試験器及び試験片取付け位置

②試験中の温度管理

温度条件は表面側 40℃、裏面側 20℃とした。100 日間の温度測定記録は±1.0℃であり、温度の変動は目標範囲内であった。また、取り付け位置による温度のばらつきや偏りも殆ど見られず、今回の試験は良好な管理状況下で行われたと判断される。

(5) 観察と評価

①観察頻度

5 日ごとに観察・評価を行い、WG 委員による観察も適宜実施した。

②膨れの評価と写真撮影

温度勾配試験器から水を抜いた直後に塗膜の膨れ(有無、膨れの大きさ)、割れ等を肉眼で観察・評価し、写真撮影を行った。

ア 膨れの定義

膨れとは母材面又は塗膜層間から塗膜の一部が浮きあがった現象をいう。

イ 評価基準

ASTM D714-02「塗料の水膨れができる程度を評価するための標準試験方法」に基づき、表 5.2.4 のとおり評価を行う。

表 5.2.4 膨れの評価

密度 大きさ	F	M	MD	D
8	○	○	×	×
6	○	×	×	×
4	×	×	×	×
2	×	×	×	×

○：小さい膨れのため確認できない範囲

×：膨れの確認ができる範囲

(6) 物性試験

温度勾配浸漬試験の外観観察及び温度勾配浸漬試験終了後の物性試験は、次の手順で行った。

①塗膜の外観観察

塗膜の膨れ(有無、膨れの大きさ、密度)、割れ等の異常を次の手順で肉眼観察した。

ア 温度勾配試験器内槽から水を抜き、取り付け枠を取り出す。

イ 直ちに試験片を取り外し、乾かないうちに40℃温水に浸す。

ウ 試験片を1枚ずつ取り出し、先ず濡れている状態で観察し、次に紙ウエスで水分を拭き取り、ライトを横から当てて膨れ等を観察する。

エ 観察中、膨れを確認したら、鉛筆で膨れの外周をマークする。

オ 観察中に膨れがへこみ、確認出来なくなることがあるので、ウとエの作業は連続して行う。

カ マークした膨れの大きさ、密度は、ASTM D714-02 標準写真を用いて評価し記録する。

②付着力測定(プルオフ法)

塗膜の付着力を測定するために、浸漬試験終了後に外観観察したのち、引張試験器(モデル 106-2)を使用し、垂直引張力のみによる付着性を評価した。

③硬度測定（バーコル硬度計）

塗膜の硬度を測定するために、浸漬試験終了後に外観観察したのち、バーコル硬度計（934-1型）により塗膜の硬さを評価した。

④衝撃試験（デュボン式衝撃試験）

塗膜の耐衝撃強度を評価するため浸漬試験終了後に一定の条件下で塗膜におもり（半径6.35mm×高さ300mm×質量500g）を落下させ変形させた後の剥がれ、割れを確認した。

⑤インピーダンス測定

塗膜の劣化度を定量的に評価するため、浸漬試験終了後にインピーダンス測定（交流抵抗値、電気容量値を測定し周波数に対する変化もしくは抵抗値の経時変化）を行った。

⑥折り曲げ試験

塗膜中へ浸透した水分や素地面に達した水分の影響を確認するため、浸漬試験終了後に試験片を折り曲げ、強制的に塗膜を剥がし、塗膜下の状態を肉眼で観察した。

なお、試験片は4個作成し、うち3個を浸漬試験に用い、残り1個を初期の塗膜物性値測定用として、浸漬試験を行わずに②～⑥の試験を行った。以下、この試験片の試験結果を各物性値の初期値と表現する。

5.2.2 温度勾配浸漬試験結果

（1）外観観察結果の概要

外観観察結果一覧を表5.2.5に示す

- ①試験開始後55日目の観察で、A1-1、A1-3（BV樹脂、膜厚400 μ m）と、A2-3（BV樹脂、膜厚700 μ m）に膨れがそれぞれ1個確認された。58日目にはA1-2、A2-2に膨れが確認され、65日目にはB1-3（BV樹脂70%/NV樹脂30%、膜厚400 μ m）に1個膨れが確認された。その後70日目にA2-1、B1-2に膨れが確認され、B1-1は85日目に膨れが確認され全試験片に膨れが認められた（試験片観察状況写真を参考資料に掲載。）。
- ②100日目の膨れ発生数はA1：9～17（平均12）個、A2：8（平均8）個、B1：5～7（平均6）個であり、A1が多く、A2及びB1は少ない傾向を示した。各試験片の膨れ発生個数と浸漬日数との関係は図5.2.2参照。
- ③100日目の膨れ面積は、A1：3.9～6.5（平均4.8）%、A2：3.6～4.6（平均4.2）%、B1：2.0～3.3（平均2.8）%の順に少ない傾向を示した。
- ④各試験片の膨れ面積と浸漬日数との関係を図5.2.3にまとめた。A1（400 μ m）の3枚の試験片の中でA1-1が最も膨れ発生個数及び面積が多く、同じ塗料・膜厚でも膨れ発生状況に明瞭な差が生じている。B1（400 μ m）は3枚の試験片の中でB1-1が最も膨れ発生が遅く、同じ塗料・膜厚で膨れ発生状況に差が生じている。A2（700 μ m）では3枚に殆ど差が認められない。

表5.2.5 温度勾配浸漬試験結果一覧

上段は膨れ発生個数

試験塗料	膜厚(μm)	記号	外観観察結果									
			5日	9日	15日	20日	23日	30日	35日	40日	44日	50日
			6/7(月)	6/11(金)	6/17(木)	6/22(火)	6/25(金)	7/2(金)	7/7(水)	7/12(月)	7/16(金)	7/22(木)
EB系 100%	400	A1-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A1-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A1-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	700	A2-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A2-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A2-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EB系/NV系 70%/30%	400	B1-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		B1-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		B1-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
試験塗料	膜厚(μm)	記号	外観観察結果									
			55日	58日	65日	70日	75日	79日	85日	90日	93日	100日
			7/27(火)	7/30(金)	8/6(金)	8/11(水)	8/16(月)	8/20(金)	8/26(木)	8/31(火)	9/3(金)	9/10(金)
EB系 100%	400	A1-1	13 2M	15 2M	16 2M	16 2M	16 2M	16 2M	16 2M	16 2M	17 2M	17 2M
		A1-2	○	2 2F	2 2F	2 2F	7 2F	9 2F	10 2F	10 2F	10 2F	10 2F
		A1-3	4 2F	5 2F	7 2F	7 2F	7 2F	8 2F	8 2F	9 2F	9 2F	9 2F
	700	A2-1	○	○	○	3 2F	4 2F	6 2F	6 2F	8 2F	8 2F	8 2F
		A2-2	○	5 2F	5 2F	6 2F	6 2F	6 2F	7 2F	8 2F	8 2F	8 2F
		A2-3	1 2F	3 2F	3 2F	6 2F	7 2F	7 2F	8 2F	8 2F	8 2F	8 2F
EB系/NV系 70%/30%	400	B1-1	○	○	○	○	○	○	3 2F	4 2F	4 2F	5 2F
		B1-2	○	○	○	2 2F	3 2F	4 2F	5 2F	6 2F	6 2F	6 2F
		B1-3	○	○	1 2F	3 2F	3 2F	4 2F	4 2F	7 2F	7 2F	7 2F

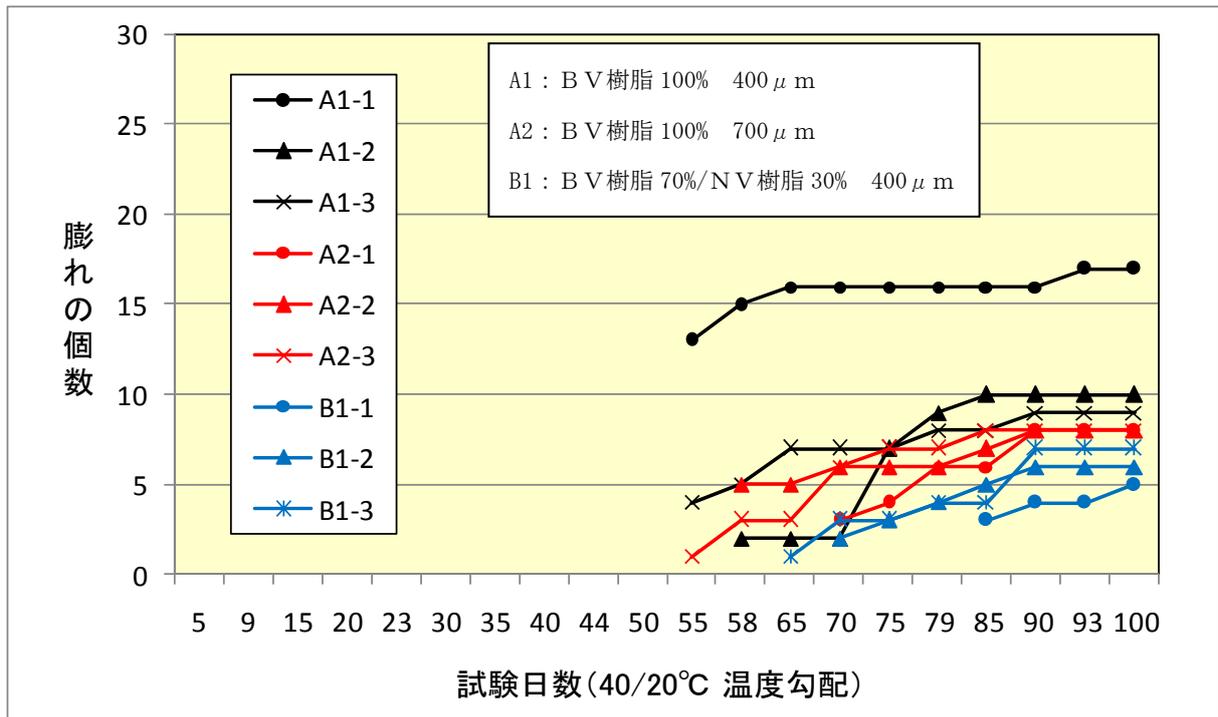


図 5.2.2 各試験片の膨れ発生個数と浸漬日数

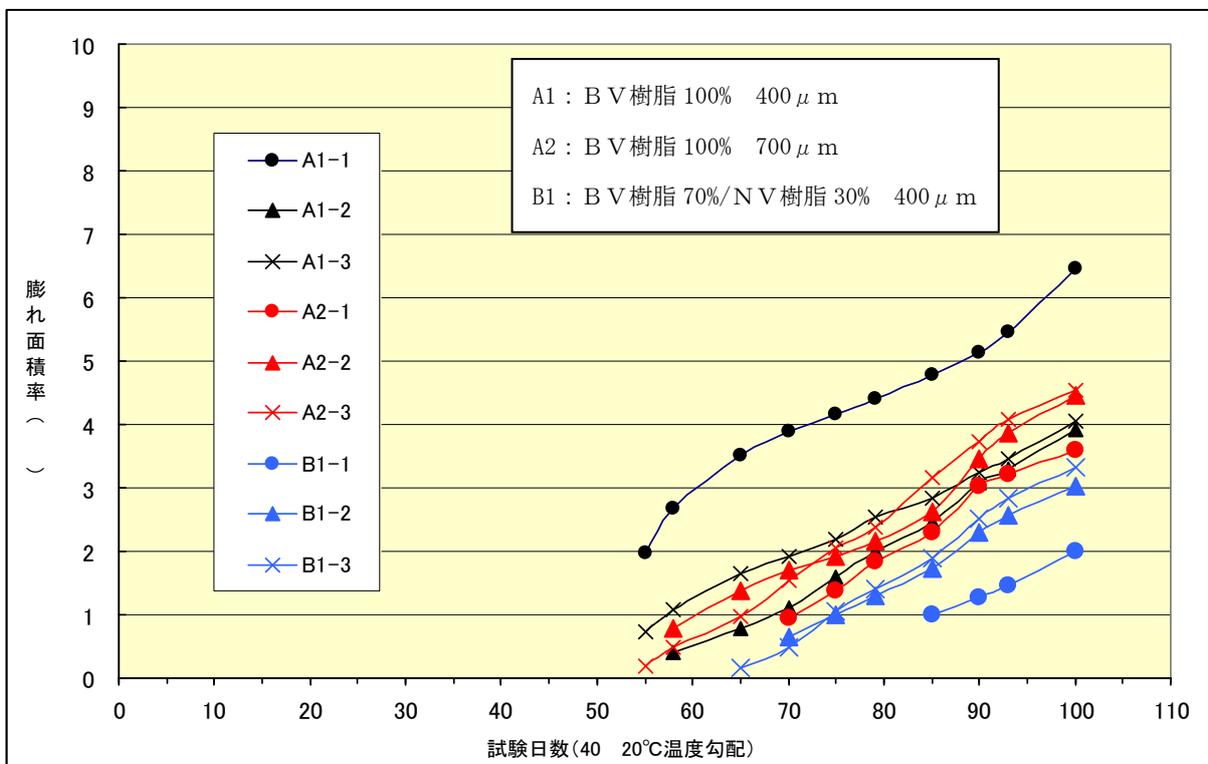


図 5.2.3 各試験片の膨れ面積率と浸漬日数

(2) 外観観察結果の考察

①膜厚の影響

平成 21 年度の実験では、初回観察日の 75 日目に B V 樹脂 G F コーティング塗料の膜厚 400 μ m と 700 μ m の塗膜に膨れが既に発生していた。今回、5 日ごとの観察を行った結果、B V 樹脂 G F コーティング塗料の膜厚 400 μ m と 700 μ m の塗膜の膨れ発生までの日数はそれぞれ 55~58 日目 (平均 56 日)、55~70 日目 (平均 61 日) であることを確認した。また、膜厚 400 μ m の塗膜では、同じ塗料・膜厚で膨れ発生状況に大きな差が生じているが、同じ塗料の膜厚 700 μ m の塗膜では膨れ発生状況に殆ど差がなく、膜厚 400 μ m の塗膜に比べ膜厚 700 μ m の塗膜の方が水分透過の抑制効果が高くかつ安定している。

②樹脂による影響

B V 樹脂 70%/N V 樹脂 30%の G F コーティング塗料の膜厚 400 μ m の塗膜の膨れ発生までの日数は 65~85 (平均 73 日) であり、B V 樹脂 G F コーティング塗料の膜厚 400 μ m の塗膜と比較すると、B V 樹脂/N V 樹脂の方が、膨れ発生までの日数が長く、膨れ発生個数も少ない。さらに、B V 樹脂 70%/N V 樹脂 30%塗料の膜厚 400 μ m の塗膜と B V 樹脂 G F コーティング塗料の膜厚 700 μ m の塗膜を比較すると、膜厚の差にもかかわらず、B V 樹脂/N V 樹脂の方が、膨れ発生までの日数が長い。以上のことから、樹脂組成により耐久性に有意な差があることが確認された。

(3) 物性試験結果

付着力測定、硬度測定、衝撃試験、インピーダンス測定及び折り曲げ試験の結果を表 5.2.6 にまとめた。

①物性試験結果の概要

- ア 浸漬試験後の付着力は 4 MPa 以上であり破断箇所は下塗の凝集破壊 (100%) であった。初期値と比較して強度保持率は 65%以上であり異常ない状態である。
 - イ バーコル硬度は、全ての試験片が 40 以上であり初期値と殆ど変わらない値であり、塗膜の軟化傾向は見られない。
 - ウ 衝撃試験は全ての試験片において、衝撃部に凹みは出来るがそこからの剥離や割れは無く異常ない状態であった。
 - エ 塗膜を強制的に剥がし、水分透過による膨れ部の素地面の状態を確認したところ、膨れ部には水分及び水分痕が認められた。錆は認められなかった。
 - オ インピーダンス測定による電気特性は薄膜の方が初期値に比べ若干低い抵抗値を示しているが、全て $10^7 \Omega$ 以上であり劣化傾向は殆ど見られなかった。
- 以上のことから、膨潤や分解という塗膜の化学的劣化は殆ど進行していないと言える。

表 5.2.6 物性試験結果一覧

物性試験結果（膜厚、付着性、硬度、衝撃）

試験板 記号	膜厚 (μm)				付着性				硬度		衝撃試験		
	平均	最小	最大	標準偏差 (μm)	初期値	破断箇所	試験後	破断箇所	初期値	試験後	初期値	試験後	
					(MPa)		(MPa)		(H ⁺ -コル)	(H ⁺ -コル)	(テ ⁺ コボ ⁺ ン式)	(テ ⁺ コボ ⁺ ン式)	
A 1-1	538	425	680	67.32	5.0	下塗100%凝集破壊	4.3	下塗100%凝集破壊	42	40	異常なし	異常なし	
A 1-2	535	411	687	68.98			4.7			40			異常なし
A 1-3	535	421	680	59.55			4.5			40			異常なし
A 2-1	837	703	954	65.88	7.0	下塗100%凝集破壊	4.5	下塗100%凝集破壊	42	40	異常なし	異常なし	
A 2-2	832	711	950	58.37			4.5			41			異常なし
A 2-3	829	710	946	49.19			4.7			40			異常なし
B 1-1	538	412	728	69.66	5.0	下塗100%凝集破壊	5.2	下塗100%凝集破壊	48	44	異常なし	異常なし	
B 1-2	538	422	723	68.60			5.0			45			異常なし
B 1-3	534	408	684	66.88			5.0			44			異常なし

物性試験結果（インピーダンス測定）

試験板	インピーダンス測定																	
	抵抗値 (×10 ⁶ Ω)						容量 (×10 ⁻³ μF)						tan δ					
	200Hz		500Hz		1000Hz		200Hz		500Hz		1000Hz		200Hz		500Hz		1000Hz	
初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	初期値	試験後	
A 1-1		133		44		27		0.073		0.071		0.068		0.096		0.095		0.094
A 1-2	667	200	250	77	133	42	0.045	0.068	0.044	0.068	0.043	0.068	0.014	0.062	0.012	0.060	0.031	0.062
A 1-3		200		75		40		0.065		0.065		0.063		0.064		0.066		0.069
A 2-1		267		153		80		0.040		0.042		0.041		0.051		0.048		0.050
A 2-2	667	400	267	200	143	86	0.039	0.040	0.039	0.041	0.038	0.040	0.012	0.050	0.010	0.047	0.006	0.050
A 2-3		400		133		67		0.050		0.050		0.048		0.052		0.051		0.050
B 1-1		400		100		57		0.070		0.070		0.068		0.052		0.049		0.050
B 1-2	667	400	250	133	133	57	0.049	0.065	0.049	0.064	0.048	0.062	0.013	0.052	0.012	0.049	0.007	0.050
B 1-3		400		100		50		0.068		0.067		0.065		0.052		0.050		0.051

5.2.3 まとめ

- (1) 温度勾配浸漬試験による塗膜の膨れ発生日数はB V樹脂G Fコーティングの膜厚 400 μ mの塗膜で 55~58(平均 56)日、700 μ mで 55~70(平均 61)日であり、膜厚により耐久性に差があることが認められた。
- (2) 膜厚 400 μ mの塗膜では同じ塗料・膜厚で膨れ発生状況に大きな差が生じた。一方、膜厚 700 μ mの塗膜では膨れ発生状況に殆ど差がなく、膜厚 400 μ mの塗膜に比べ水分の透過を抑制する効果が高くかつ安定した耐久性を有している。
- (3) B V樹脂 70%/N V樹脂 30%のG Fコーティングの膜厚 400 μ mの塗膜はB V樹脂 G Fコーティングの膜厚 400 μ mの塗膜より優れた耐久性を示した。

5. 3 実タンクにおける塗膜劣化状況の調査

実タンクにおける塗膜の耐用年数について検討するためのデータを得ることを目的として、実タンクにおける平均膜厚 400 μ m 程度のコーティング塗膜の劣化状況を現地調査した。

平成 14 年度に行われた検討では、実タンクでのコーティングの耐用年数についての実績データを蓄積することにより、より長期間の性能を検証することも可能であるとされている。また、検量線作成のためには実タンクにおける実際の膨れ発生年数のデータ収集が必要であり、平成 21 年度の検討では平均膜厚 700 μ m のもの以外の膜厚の膨れ発生年数のデータが必要であるとされた。現在国内で使用されている塗膜の厚さの実態に鑑み、今年開放予定のタンクで 20 年程度使用した平均膜厚約 400 μ m の B V 樹脂 G F コーティングの塗膜劣化状況の調査を行った。

5.3.1 現地調査を実施するタンクの選定

今年開放予定のタンクで 20 年程度使用した平均膜厚約 400 μ m の B V 樹脂 G F コーティング塗膜について、現地調査可能なタンクがどの程度あるか調査を実施した。対象タンクの条件は以下のとおりとした。

- ・特定屋外タンク貯蔵所
- ・タンク底部に G F コーティングを施工して 20 年以上経過するもの
- ・コーティングの材質に N V 樹脂による塗料が混合されていないもの
- ・コーティングの実膜厚が 400 μ m 前後のもの
- ・コーティングの補修のデータを保存しているもの（開放時にコーティングを補修（溶接部を除く）した割合（全体の面積に対する割合）が分かること。）
- ・加温タンクでないもの

以上の条件から、20 基の候補タンクがあがったが、タンク容量、内容物、調査スケジュールを勘案し、次の 3 基を対象タンクとして選定した。

表 5.3.1 調査対象タンクの概要（膜厚及びコーティング経過年数は選定時の聞き取り値）

タンク名	油種	概略容量 (kl)	コーティング経過年数	推定膜厚 (μ m)
A タンク	原油	67,000	30	255~390
B タンク	原油	23,000	30	270~336
C タンク	軽油	13,800	24	280~690

5.3.2 現地調査項目

実タンクにおける塗膜劣化状況の実態調査を行うにあたり、調査項目は平成 21 年度の調査方法を踏襲し、以下のとおりとした。

(1) 目視調査

さび、はがれ、われ、ふくれ、その他塗膜の劣化について外観観察を行い、発生場所をタンク板割図に記録した。ふくれの発生部位については詳細に観察・記録し、ふくれの発生面積を4区分に分類した。分類に当たっては、0.5m四方を抽出し、その範囲内の膨れ発生状況をASTM-D6102/SSPC Vis2 錆判定標準図を参照して下記A～Dの4区分に分類した。抽出する箇所は現地にて目視調査の上協議して選定した。

() 内の数値は評価対象面積に対するふくれ発生面積の割合

A (0%)、B (0～0.1%)、C (0.1～0.3%)、D (0.3%以上)

(2) 膜厚測定

塗膜の劣化状態と膜厚の関係を検討するため、電磁式膜厚計を用いて底部板1枚につき10点膜厚を測定した。また、(1)で4区分ごとに抽出された0.5m四方の部位(各区分2箇所を抽出)で100点で膜厚を測定した。

(3) 塗膜下の状態観察

(2)で抽出された評価対象部位の周辺塗膜を10cm×10cmの範囲ではぎ取り、塗膜下の状態(黒錆痕等)を確認した。

(4) 塗膜断面の膜厚測定

(3)ではぎ取った塗膜の断面から各層の膜厚を測定し、塗膜片断面の顕微鏡写真撮影を行った。

(5) 物性試験

評価対象部位と抽出された箇所について、付着力測定、インピーダンス測定、硬度試験を行った。

①付着力測定

塗膜の付着性を確認するためにアドヒージョン試験にて付着力、破断箇所を測定した。接着剤を用いて塗膜にアルミ製の治具を取り付け、周囲の塗膜をカットした後、引張試験器を用いて引っ張り、破壊時の強度を測定した。

②インピーダンス測定

塗膜劣化傾向を確認するために抵抗値、容量値を測定した。測定箇所の膜厚を電磁式膜厚計にて1箇所につき10点測定し、平均膜厚、最大膜厚、最小膜厚を求めた。塗膜の表面に10cm×10cmのアルミ箔の電極板を導電性の接着剤によって貼り付け、1時間後に塗膜の交流インピーダンス(抵抗値、容量値)を測定した。

③硬度測定

塗膜の硬度を確認するためにバーコル硬度計にて3点で測定した。

5.3.3 実タンクにおける塗膜劣化状況の調査結果

実タンクの現地結果報告書（第3回WG資料3-3）を参考資料として添付予定。）

(1) Aタンク

①調査日：平成22年8月11, 12日

- ②タンク諸元
- ・屋根型式：浮き屋根式
 - ・容量：67,147 キロリットル、内径：67m
 - ・油種：原油
 - ・タンク完成年：昭和41年
 - ・加熱コイル無し

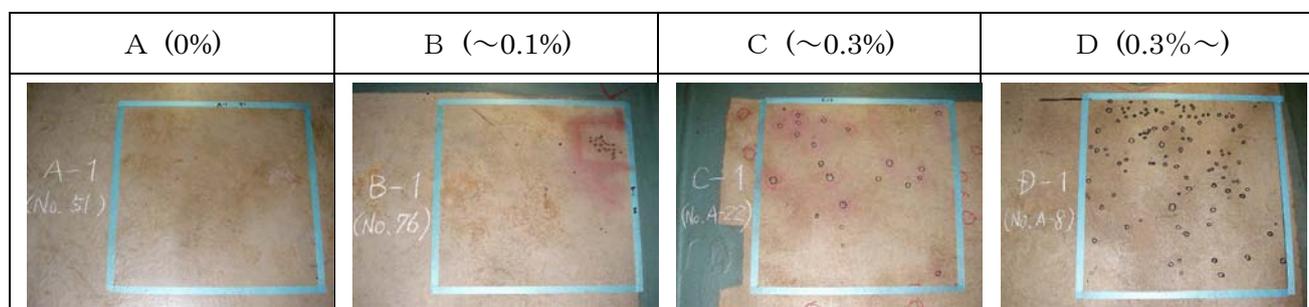
③塗装履歴、仕様を以下に示す。

経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項	
第1回開放	1971年10月	素地調整	不明	なし	
	第1層	不明	不明		
	第2層	不明	不明		
	第3層	不明	不明		
	樹脂：不明		不明		
経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項	
第2回開放	1980年6月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	底板 全体の1/5取替 アニュウ板 全面取替
	第1層	(不飽和ポリエステル樹脂下塗塗料)	不明		
	第2層	(不飽和ポリエステル樹脂 ガラスフレーク塗料マカ含有)	不明		
	第3層	(不飽和ポリエステル樹脂 ガラスフレーク塗料マカ含有)	不明		
	樹脂：不飽和ポリエステル系		不明		
経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項	
第3回開放	1988年6月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	底板 肉盛、当板補修 アニュウ板 肉盛補修
	第1層	(不飽和ポリエステル樹脂下塗塗料)	不明		
	第2層	(不飽和ポリエステル樹脂 ガラスフレーク塗料マカ含有)	不明		
	第3層	(不飽和ポリエステル樹脂 ガラスフレーク塗料マカ含有)	不明		
	樹脂：不飽和ポリエステル系		不明		

	経 歴	工 程	塗 料 名	標準膜厚(μm)	特記事項
第4回開放	1996年 2月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	底板 全面取替 アニュラ板 肉盛補修 (補強塗装)
		第 1 層	(B V樹脂下塗塗料)	不明	
		第 2 層	(B V樹脂GF塗料)	不明	
		第 3 層	(B V樹脂GF塗料)	不明	
		樹脂 : B V樹脂		平均:466 最小:370 最大:680	
	経 歴	工 程	塗 料 名	標準膜厚(μm)	特記事項
第5回開放	2003年 6月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	底板・アニュラ板 膨れ(5~25mm ϕ)が点在 局部的に剥離
		第 1 層	(B V樹脂下塗塗料)	不明	
		第 2 層	(B V樹脂GF塗料)	不明	
		第 3 層	(B V樹脂GF塗料)	不明	
		樹脂 : B V樹脂		250以上	

④調査位置

評価に抽出された箇所の写真を以下に示す。



⑤調査結果

ア 外観目視

底板は、第4回開放時に全面取り替えられ、B V樹脂GFコーティングが施されている。アニュラ板は、第2回開放時に全面取り替えが行われた際に施工された塗膜の上から第4回開放時に底板と同じ塗料で補強塗装が施されている。今回の調査では、底板部は施工から14年が経過しているが、膨れはほとんど無く良好な塗膜状態を維持していた。しかし、アニュラ板部は、膨れが全体に発生しており、膨れの形態は素地からの膨れであった。なお、抽出箇所のうちA-1及びB-1は底板部、それ以外はアニュラ板部である。

イ 膜厚測定

底板 183 枚、アニュラ板 36 枚の合計 219 枚で第 4 回開放時に施工された塗膜のうち未補修部分の膜厚は、タンク全面についてみると平均値 $574\mu\text{m}$ 、最大値 $1162\mu\text{m}$ 、最小値 $393\mu\text{m}$ であった。底板とアニュラ板を分けると、底板部は平均値 $517\mu\text{m}$ 、最大値 $661\mu\text{m}$ 、最小値 $393\mu\text{m}$ 、アニュラ板部は平均値 $866\mu\text{m}$ 、最大値 $1162\mu\text{m}$ 、最小値 $626\mu\text{m}$ であった。膨れ発生 4 区分 (A~D) の膜厚について、各 0.25m^2 について 100 点測定した結果、平均値は、底板部で $390\mu\text{m}$ 、アニュラ板部で $828\mu\text{m}$ であった。

ウ 付着力測定

膨れ発生程度の異なる区分 A~D についての付着力を測定した結果、底板の健全部 A-1 は 4.0MPa で、破断面の状況は接着剤からの破壊であり高い付着性が確認された。また、B-1 の底板部も 5.2MPa で、破断面の状況は上塗の凝集破壊であり、第 4 回開放時に施工された底板部塗膜では高い付着性が認められた。一方、補強塗膜下に第 2 回開放時に施工された塗膜が残っているアニュラ板部では、第 2 回開放時施工塗膜の凝集破壊や鉄素地に近い箇所からの破壊であり、付着力も $1.0\sim 4.2\text{MPa}$ と低い箇所が認められた。

エ インピーダンス測定

区分 A は抵抗値、容量値共に健全な値であった。区分 B、C については健全な値を示す箇所と劣化傾向を示す箇所が見られた。区分 D は抵抗値、容量値ともに劣化傾向を示していた。

オ 硬度試験

バーコル硬度の 3 点平均値は、底板部の A-1 及び B-1 は 58、57 と高い値を示していたが、アニュラ板部では 30~40 であり、低い傾向にあった。

カ 塗膜下観察

A-1 及び A-2 の健全部塗膜下については、水分透過等がほとんど無く異常のない状況であった。また、B-2 の膨れ部については、塗膜下に水分の浸透が無い状態であり、素地に達しない層間膨れであった。C、D についても塗膜下に水分の浸透がほとんど無い状態であり、素地に達しない膨れであった。

キ 塗膜断面測定

区分 A の健全部は、膜厚 $442\mu\text{m}$ であり、A-1 は鋼板側にわずかに黒錆が確認された。区分 B は膜厚 $415\mu\text{m}$ であり、B-1 の鋼板側には黒錆が確認された。区分 C は補強塗装されており、膜厚は $788\mu\text{m}$ 、 $819\mu\text{m}$ であり、鋼板側は黒錆が確認された。区分 D も補強塗装されており、膜厚は $748\mu\text{m}$ 、 $623\mu\text{m}$ であり、鋼板側は黒錆が確認された。

⑥まとめ

Aタンクは、建設から約44年経過しているが、底板については1996年（第4回開放）に全面取り替えられ、BV樹脂GFコーティングが行われたため、今回調査時点では塗膜は約14年経過している。アニュラ板については、1980年（第2回開放）に全面取り替えられGFコーティングが施工されているが、使用している塗料はその塗料名からマイカを含有した塗料が使用されているようであり、塗膜断面測定の結果、その塗膜の上に新しい塗膜が形成されており、かつ底板と同じ塗料が使用されているため、1996年（第4回開放）において補強塗装がなされたものと推測される。

今回の調査では、BV樹脂GFコーティングが施工され、膜厚が約400 μ mのものについて塗膜調査を行い、その耐久性を評価することを目的としているため、結果として底板部の塗膜についてのみ評価を行った。その結果は次のとおり。

- ア 施工後約14年経過している底板部の塗膜には膨れがほとんど見受けられず、膨れが存在しても劣化区分Bレベル（～0.1%）までの状態であり、それより劣化した部分は認められなかった。
- イ 底板部の膜厚は平均で517 μ mであり、14年間異常のない状態を維持していることが確認された。塗膜下の状態は ϕ 0.5mm以下の僅かな水分浸透跡が見られたものの、一般に塗膜の膨れの下に見られるような、明瞭な水分浸透跡ではなかった。
- ウ 底板健全部については、付着力測定、インピーダンス測定、硬度試験の各項目において、劣化傾向が見られない状態であった。
- エ 以上の結果より、本調査タンク底板部のBV樹脂GFコーティング塗膜は、平均膜厚500 μ m程度で約14年以上の耐久性を有していると判断できる。

（2）Bタンク

①調査日：平成22年9月27, 28日

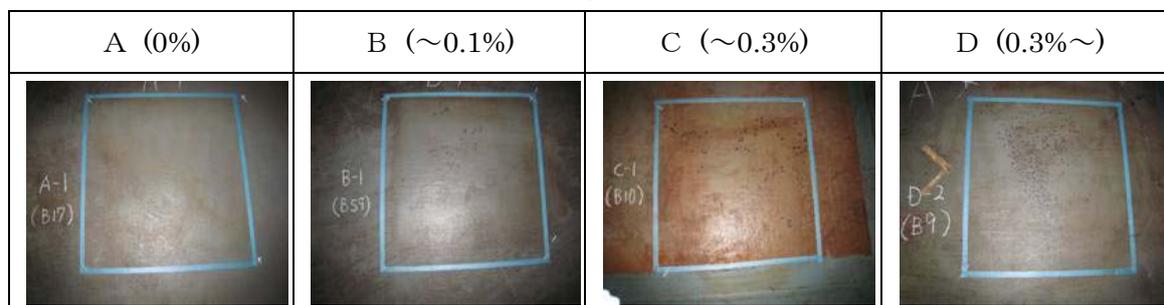
- ②タンク諸元
- ・屋根型式：浮き屋根式
 - ・容量：22,927キロリットル、内径：38.74m
 - ・油種：原油
 - ・タンク完成年：昭和55年
 - ・加熱コイル有り（使用期間は不明であるが現在は使用されていない。）

③ 塗装履歴、仕様を以下に示す。

経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項
建設時 1980年11月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	—	なし
	第1層	(不飽和ポリエステル樹脂下塗)	50	
	第2層	(不飽和ポリエステル樹脂ガラスフレーク)	150	
	第3層	(不飽和ポリエステル樹脂ガラスフレーク)	100	
	樹脂：不飽和ポリエステル系		Min300	
経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項
第1回開放 1988年5月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	なし
	第1層	(ビニルエステル樹脂下塗塗料)	不明	
	第2層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク)	不明	
	第3層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク)	不明	
	樹脂：BV樹脂		不明	
経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項
第2回開放 1995年8月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	
	第1層	(ビニルエステル樹脂下塗塗料)	不明	
	第2層	(ノック型 ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	不明	
	第3層	(ノック型 ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	不明	
	樹脂：NB樹脂		不明	
経歴	工程	塗料名	標準膜厚(μm)	特記事項
第3回開放 2003年3月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	不明	底板：当板 補修
	第1層	(ビニルエステル樹脂下塗塗料)	不明	
	第2層	(ノック型 ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	不明	
	第3層	(ノック型 ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	不明	
	樹脂：NB樹脂		Min250	

④調査位置

評価に抽出された箇所の写真を以下に示す。



⑤調査結果

ア 外観目視

目視検査では、底板部の広範囲に膨れが発生している。膨れの発生は補強塗装と思われる上塗の薄い塗膜（ $100\mu\text{m}$ 程度）である。殆どの膨れ発生部は旧塗膜と上塗（グリーン色）間で発生している。補強塗膜を除去すると、健全な旧塗膜が現われ、膨れは下地まで達していないことを確認した。

既存塗膜は建設時の塗膜で、第1回、第2回開放時は溶接部の補修塗装が行われ、第3回開放時に補強塗装が行われている。建設時に施工したGFコーティング塗膜は、約23年は補強塗装のない状態で経過したことになる。しかし、使用された塗料は不飽和ポリエステル系樹脂を用いたものであった。

イ 膜厚測定

底板65枚、アニュラ板33枚の合計98枚で、建設時に施工され第3回開放時に補強された未補修部分の膜厚は、タンク全面の平均値 $909\mu\text{m}$ 、最大値 $1111\mu\text{m}$ 、最小値 $656\mu\text{m}$ であった。また、底板部の平均値 $890\mu\text{m}$ 、最大値 $1073\mu\text{m}$ 、最小値 $681\mu\text{m}$ であり、アニュラ板部の平均値 $946\mu\text{m}$ 、最大値 $1111\mu\text{m}$ 、最小値 $656\mu\text{m}$ であった。

膨れ発生4区分（A～D）の膜厚を各 0.25m^2 につき100点測定した結果、Aの平均値 $766\mu\text{m}$ 、 $871\mu\text{m}$ 、Bの平均値 $986\mu\text{m}$ 、 $705\mu\text{m}$ 、Cの平均値 $930\mu\text{m}$ 、 $700\mu\text{m}$ 、Dの平均値 $834\mu\text{m}$ 、 $996\mu\text{m}$ であった。

ウ 付着力測定

膨れ発生程度の異なる区分A～Dについての付着力を測定した結果、底板の健全部Aは 2.5MPa 、 4.0MPa で旧塗膜と補強塗膜からの破壊であった。また、B-1の底板部は 6.2MPa で、40%が旧塗膜の凝集破壊であり、旧塗膜の付着性は高い値を示している。区分C、Dについても補強塗膜と旧塗膜間の破断であった。

エ インピーダンス測定

区分A～Dのすべてで抵抗値、容量値は健全な値であった。

オ 硬度試験

区分A～Dの全てでバーコル硬度は、30～38と若干低い値であるが、健全部と膨れ

部の差は殆どない。

カ 塗膜下観察

B-2を除き、塗膜下に水分透過等は殆どなく異常ない状況である。膨れは補強塗膜で発生し、素地までの水分の透過は見られない状態であった。B-2の膨れ部は塗膜下に水分の浸透が認められ、φ20mm程度の黒錆が認められた。

キ 塗膜断面測定

いずれの区分にも補強塗膜があり、補強塗膜厚は67~173μmで旧塗膜は504~1152μmであった。また、区分Aの鋼板側には微細な黒さびが見られ、区分B~Dでは黒さびが見られた。

⑥まとめ

ア 本タンクの塗膜は、建設時に施工されたもので約30年が経過している。塗膜断面から判断すると、第1回、第2回開放時は溶接部の剥離・復旧のみが行われ、第3回開放(2003年)時に補強塗装が行われたと思われる。底板の塗膜は補強塗装前に約23年間使用されたことになる。使用塗料は不飽和ポリエステル樹脂の塗料であることが判明した。

イ 底板の膜厚は平均で約900μmであるが、補修塗膜厚が約100~200μm程度あり、旧塗膜の膜厚は700~800μmである。

ウ 底板健全部については、インピーダンス測定、付着性、硬度測定においても劣化傾向は見られない状態である。

(3) Cタンク

①調査日：平成22年9月14, 15日

②タンク諸元

- ・屋根型式：固定屋根式
- ・容量：13,771キロリットル、内径：34.85m
- ・油種：軽油
- ・タンク完成年：昭和45年
- ・加熱コイル無し(コーティング施工後8年間は加温タンクとして使用)

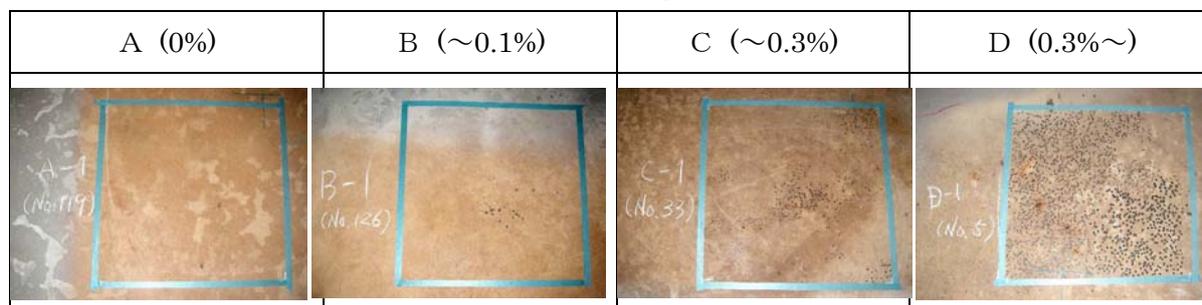
③塗装履歴、仕様を以下に示す。

建設当時はコーティング無し。第1回開放(1979年)時にコーティングは施工していない。

経 歴		工 程	塗 料 名	標準膜厚(μ m)	特記事項
第2回開放	1986年10月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	—	内面腐食が多く発生していたのでコーティング施工 底板:当板、肉盛り補修(2,105個) 補修面積:1009㎡
		第1層	(ビニルエステル樹脂下塗塗料)	20	
		第2層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	300	
		第3層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)		
		樹脂:BV樹脂		Min320	
経 歴		工 程	塗 料 名	標準膜厚(μ m)	特記事項
第3回開放	1994年 1月	素地調整	不明	—	加熱コイル撤去
		第1層	不明	不明	
		第2層	不明	不明	
		第3層	不明	不明	
		樹脂:不明		不明	
経 歴		工 程	塗 料 名	標準膜厚(μ m)	特記事項
第4回開放	2001年 5月	素地調整	不明	—	底板肉盛り補修(6個)
		第1層	不明	不明	
		第2層	不明	不明	
		第3層	不明	不明	
		樹脂:不明		不明	
経 歴		工 程	塗 料 名	標準膜厚(μ m)	特記事項
第5回開放	2008年 7月	素地調整	ブラスト(ISO Sa2.5)	—	底板:肉盛り補修(55個)
		第1層	(ビニルエステル樹脂下塗塗料)	50	
		第2層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	175	
		第3層	(ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗料)	175	
		樹脂:BV樹脂		Min400	

④調査位置

評価に抽出された箇所の写真を以下に示す。



⑤調査結果

ア 外観目視

本タンクの履歴から判断して既存塗膜は 1986 年に施工された塗膜であり、24 年が経過している。塗膜状態は底板、アニュラ板に 5 mm 程度の膨れが多数発生している。既に膨れが破壊して赤錆が発生している箇所もあり、そのような箇所には塗膜下の鋼板に孔食があり孔食部から錆が発生していた。

イ 膜厚測定

底板 127 枚、アニュラ板 12 枚の合計 139 枚で 1986 年に施工され、その後補修されていない部分の膜厚は、タンク全面の平均値 $531 \mu\text{m}$ 、最大値 $1312 \mu\text{m}$ 、最小値 $336 \mu\text{m}$ であった。

ウ 付着力測定

膨れ発生程度の区分 A~D についての付着力を測定した結果、底板の健全部 A-1 は 7.0MPa で鋼素地からの破壊であり高い付着性が確認された。その他の部位は 2.5MPa 以下で、膨れの発生が多い区分 C、D は 2MPa 以下であった。また破断箇所は区分 B、C、D は素地に近い箇所から破断し、区分 D には膨れ状の黒錆が確認された。

エ インピーダンス測定

区分 A は抵抗値、容量値共に健全な値である。区分 B、C、D は抵抗値、容量値共に劣化傾向を示した。特に区分 D は測定値が異常であった。

オ 硬度試験

全ての測定位置でバーコル硬度の 3 点平均値は、硬度 40 以上を示し、硬度について殆ど低下傾向は見られない。

カ 塗膜下観察

区分 A は異常ないが、区分 B は膨れと同程度の黒錆が点在している。区分 C、D の膨れ部は水分の透過が顕著に見られ、多数の黒錆が確認された。

キ 塗膜断面測定

区分 A の健全部は膜厚 $500 \mu\text{m}$ 程度であり、鋼板側に僅かに黒錆が確認された。区分

Bは膜厚 400 μ mであり、鋼板側には黒錆が確認された。区分C及びDは膜厚 300 μ mであり、鋼板側には黒錆が確認された。

⑥まとめ

ア 本タンクは建設からの 17 年間はコーティングが無く、17 年目にB V樹脂GFコーティングが施された。その後、溶接線以外は塗膜の補修は無かったと見られる。最近では 2008 年に開放されて溶接部について剥離・復旧を行っている。この開放時の塗膜の点検結果は無く塗膜劣化状況は不明であるが、今回の調査で見られる膨れや錆の程度から推測すると、それ以前に塗膜膨れが発生していたものと考えられる。

イ 膜厚を比較すると、区分A (500 μ m)、B (400 μ m) に比べ区分C、D (300 μ m) は膜厚が小さく、薄い部分ほど膨れが著しい。

ウ 膜厚の薄いC、Dでは鋼板に黒錆が多数発生しており、膜厚が 300 μ m程度では耐久性に影響を及ぼすと評価できる。

エ 本タンクのコーティングの施工条件などが不明であるが、30 年以上の長期耐久性を期待するには、膜厚は 500 μ m以上が必要であることが本タンクの塗膜状態から推測される。

オ B、C、Dではインピーダンス及び付着性のいずれもが低く、破断した素地面に黒錆が認められ、塗膜の腐食防止機能は殆ど機能していない状態である。

謝辞

本調査に当たっては、石油連盟と石油連盟加盟企業に格別のご協力を頂いた。記して感謝します。

5. 4 実タンクにおけるコーティング経過年数と補修履歴の分析

実タンクにおける塗膜の劣化状況について、底部コーティングに係る開放ごとの補修履歴等のデータを収集し、塗膜の経年劣化と膜厚の関係性を分析した。

5.4.1 データの収集

以下の条件のタンクのコーティングの開放ごとの補修履歴データを収集し、これらのデータから開放ごとのタンク底部面積に対するコーティングの補修割合を求め、コーティングの経過年数と補修面積割合との関係を調査した。

- ・ 特定屋外タンク貯蔵所（1万キロリットル以上）
- ・ タンク底部にB V樹脂GFコーティングを施工しているもの
- ・ 加温タンクでないもの
- ・ コーティング施工後20年以上経過したもの

(2) データの分析

開放ごとの補修割合が収集できたタンク基数は39基であった。また、直近の開放時の補修割合が把握できたものは7基であった。コーティングの経過年数と開放時のコーティングの補修割合との関係を図5.3.2、開放ごとのコーティングの補修割合を累積したものを図5.3.3に示す。

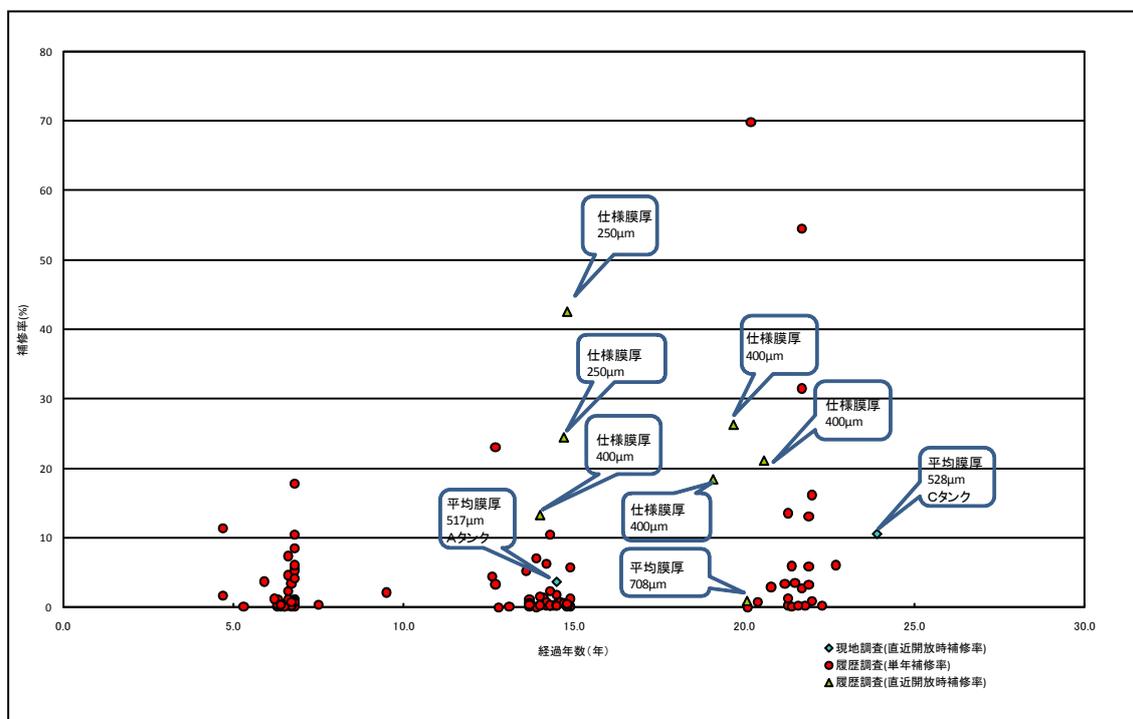


図 5.3.2 タンクの経過年数と開放時のビスフェノール系ビニルエステル樹脂ガラスフレックコーティングの補修割合

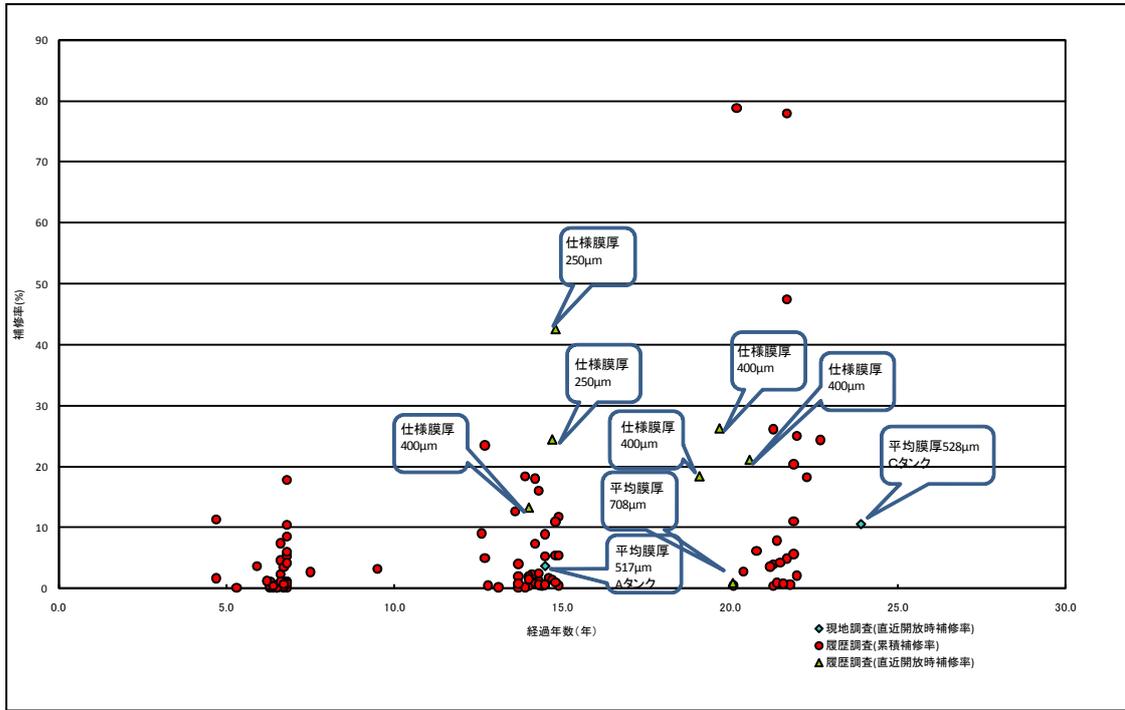


図 5.3.3 タンクの経過年数と開放時のビスフェノール系ビニルエステル樹脂ガラスフレークコーティングの補修割合

図 5.3.2 及び図 5.3.3 の赤のプロットは最小膜厚 $250 \mu\text{m}$ という仕様で施工された BV 樹脂 GF コーティングであり (実際の膜厚データは不明)、施工条件も不明であるが、図 5.3.2 では、20 年を越えると 10% 以上の面積で補修を要しているものが多く見られるようになる。

謝辞

本調査に当たっては、石油連盟と石油連盟加盟企業に格別のご協力を頂いた。記して感謝します。

5. 5 コーティングが施工されていたタンクの内面腐食

本節では、2. 4 で述べたタンク底部の内面腐食のうち、タンク底部にコーティングが施工してあるにもかかわらず腐食速度が大きく出ていることは、コーティングの品質や耐久性に関係すると考えられたため、コーティングが施工してあるにもかかわらず、内面腐食が進行した事例や、事故に至った事例の内面腐食が進行する要因を分析し、それを防ぐための方法について検討を行った。

5.5.1 タンクの内面腐食に関するデータ分析

図 5.5.1 は、GF コーティングが施工されているタンクについて、内面腐食による最小板厚の変化をタンクの設置からの経過年で整理したものである。これらのグラフは 2.4.1 「内面腐食速度の実態調査」で述べた考え方で作成したものである。

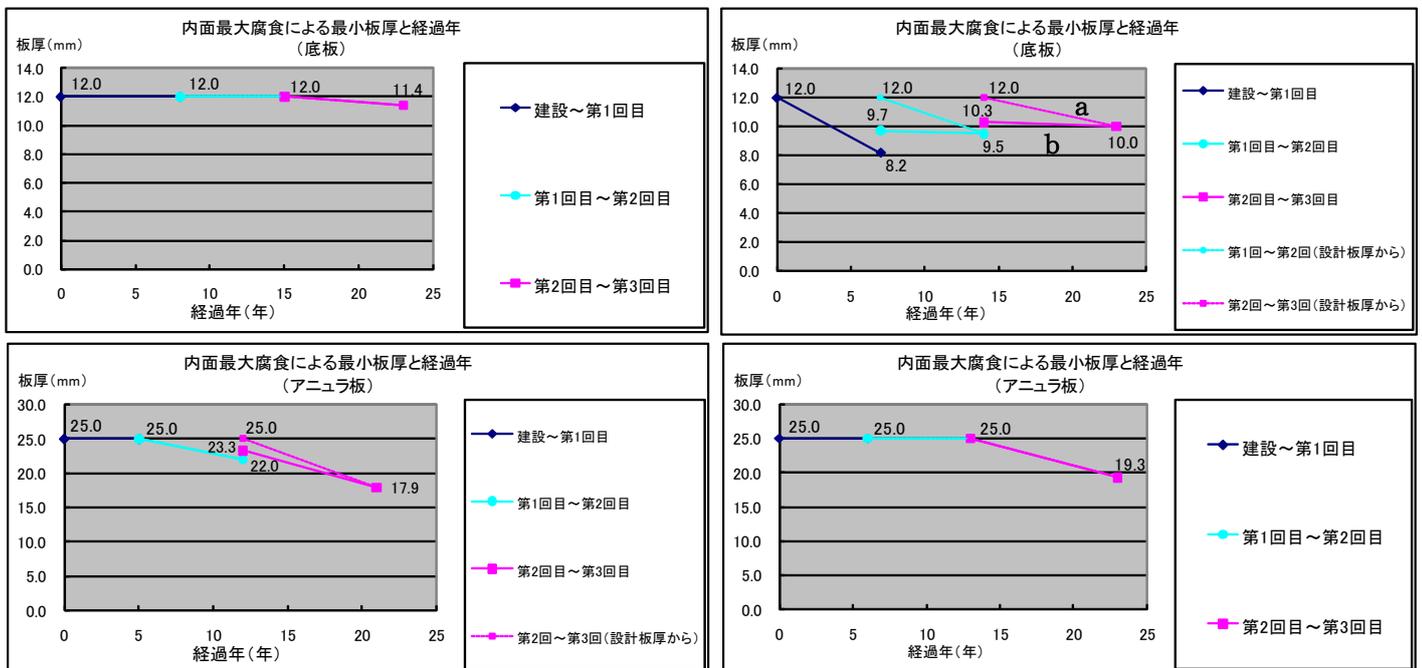


図 5.5.1 GF コーティングが施工されているタンクの内面腐食履歴の例

図 5.5.1 から GF コーティングが施工されているタンクの内面腐食防止効果には次のとおり大きなばらつきがあることが分かる。

- ・左上のタンクは、3回目まで内面腐食がほとんど進行していない。
- ・左下のタンクは、1回目の開放時まで内面腐食防止効果があったが2回目の開放以降に内面腐食が進行した。
- ・右上のタンクは、1回目の開放時にGFコーティングを施工し、それ以降内面腐食が進行していない。
- ・右下のタンクは、2回目の開放時まで内面腐食防止効果があったが3回目の開放以降に内面腐食が進行した。

なお、次段落から内面腐食速度の「推定上限値」、「推定下限値」という表現をするが、推定上限値とは、前回開放時の補修後には設計板厚であった箇所では今回開放時の最大内面腐食箇所が生じたとして求めた内面腐食速度（図 5.5.1 右上のタンクで線分 a の傾き）であり、推定下限値とは、前回開放時の補修後推定最小残板厚の箇所では今回開放時の最大内面腐食箇所が生じたとして求めた内面腐食速度（図 5.5.1 右上のタンクで線分 b の傾き）である。

コーティングの経年劣化による内面腐食防止効果について、過去の内面腐食履歴データから分析を実施した。図 5.5.2（内面腐食速度の推定下限値；図 2.4.6 再掲）、図 5.5.3（内面腐食速度の推定上限値；図 2.4.7 再掲）は、GF コーティングが施工されているタンクについて、各開放時に求められたタンクごとの最大内面腐食速度の度数分布を示したものであり、表 5.5.1、表 5.5.2（表 2.4.5、表 2.4.6 再掲）に平均値及び最大値をまとめた。

GF コーティングが施工されているタンクには、建設当初から施工されているものと、建設当初はコーティングが施工されておらず、開放検査時から施工されたものがある。コーティングの経年劣化を精度よく分析するため、分析するタンクは建設当初から GF コーティングが施工されており、過去 3 回以上の開放実績があり、かつ塗り替えが行われていないものを抽出した。これらの図から、内面腐食速度は平均値で見ても経年的に増加していること、また 3 回目においては顕著なピークが見られず、多くのタンクで内面腐食が発見されている。コーティングがされているタンクにおいて発見される内面腐食箇所は、コーティングが検査時に剥離され（その後復旧され）る溶接線近傍やコーティングに膨れ等異常を生じて補修のために剥離した部分に生じているものである。内面腐食の発生位置についての記録がないため確定的な議論は難しいが、3 回目には、何らかの要因によりコーティングが剥離される部分が多くなったために内面腐食が多く発見されているという可能性も考えられる。なお、これらのタンクの中にはコーティング指針により施工されたものと施工されていないものが含まれている。

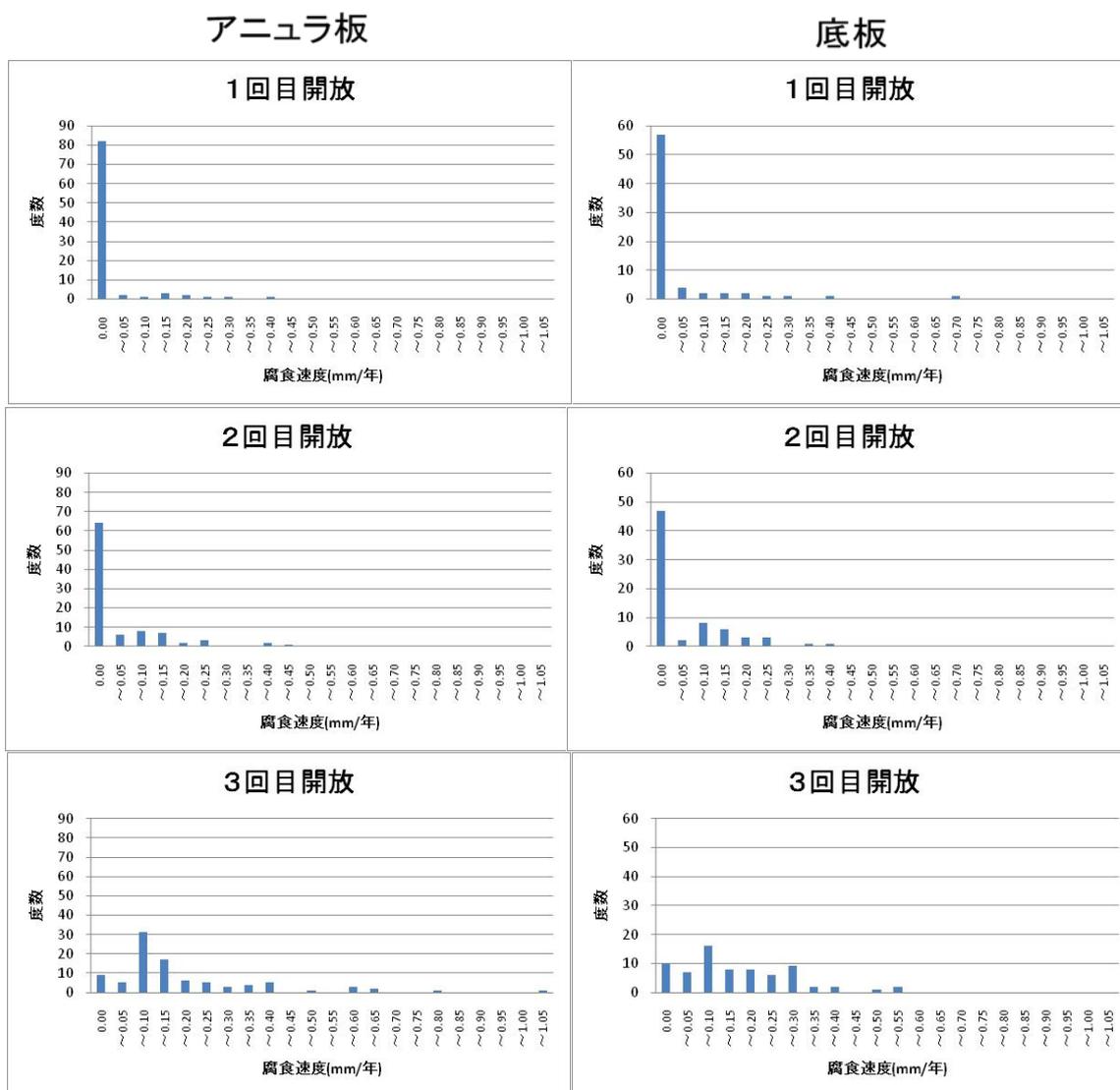


図 5.5.2 建設当初からGFコーティングが施工されているタンクの開放ごとの内面腐食速度の推定下限値

表 5.5.1 内面腐食速度の推定下限値の平均値、最大値の開放ごとの変化及び対象タンク数

部位		第1回開放	第2回開放	第3回開放
アニュラ板	腐食速度の平均値 (mm/年)	0.019	0.041	0.174
	腐食速度の最大値 (mm/年)	0.357	0.429	1.01
	タンク基数	93	93	93
底板	腐食速度の平均値 (mm/年)	0.033	0.047	0.154
	腐食速度の最大値 (mm/年)	0.657	0.367	0.544
	タンク基数	71	71	71

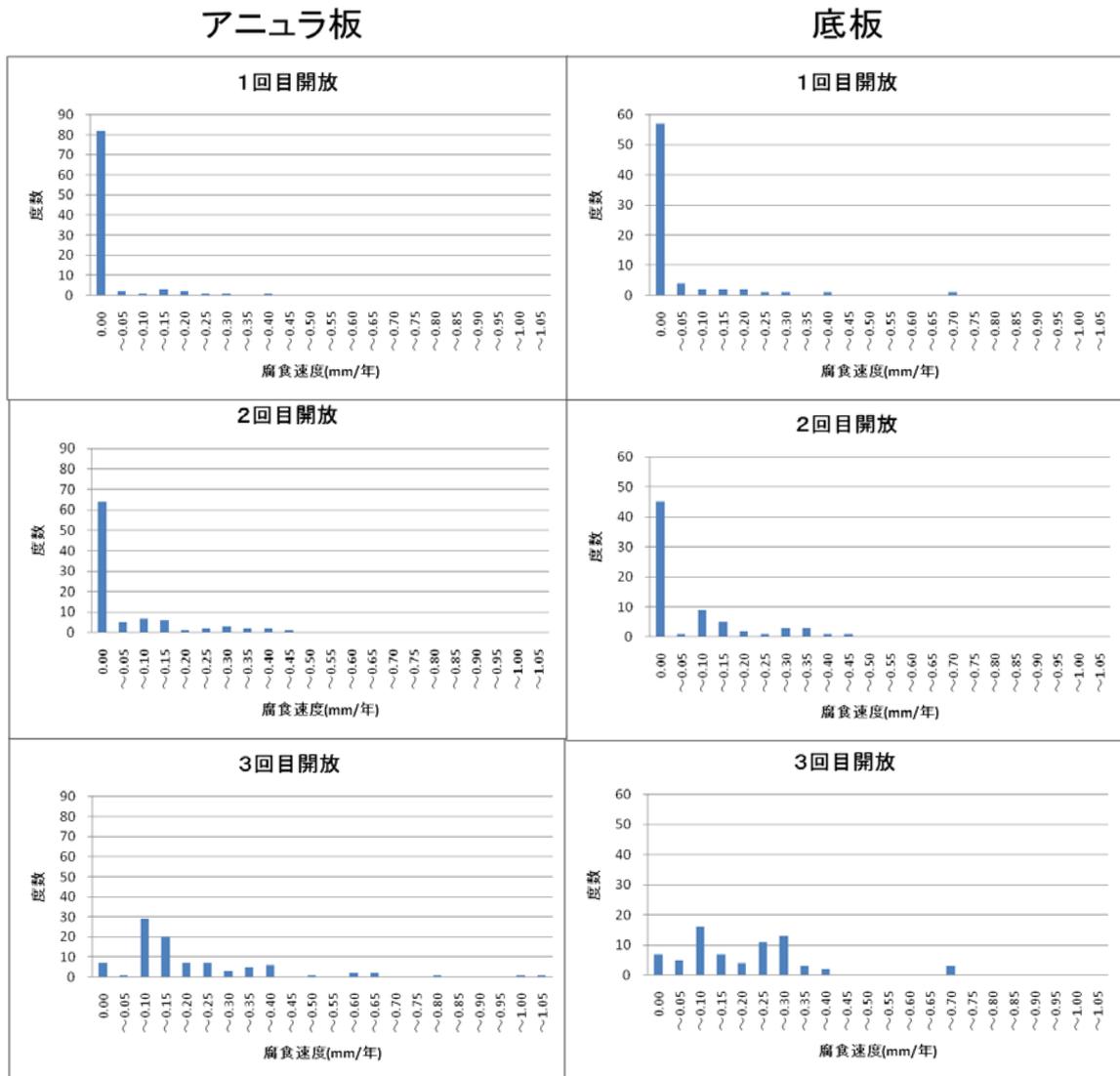


図 5.5.3 建設当初からGFコーティングが施工されているタンクの開放ごとの内面腐食速度の推定上限値

表 5.5.2 内面腐食速度の推定上限値の平均値、最大値の開放ごとの変化及び対象タンク数

部位		第1回開放	第2回開放	第3回開放
アニュラ板	腐食速度の平均値 (mm/年)	0.019	0.049	0.198
	腐食速度の最大値 (mm/年)	0.357	0.429	1.2
	タンク基数	93	93	93
底板	腐食速度の平均値 (mm/年)	0.033	0.063	0.185
	腐食速度の最大値 (mm/年)	0.657	0.479	0.7
	タンク基数	71	71	71

5.5.2 コーティングが施工されているタンクの不具合事例の収集と分析

コーティングが施工されているタンクは、コーティングの耐用年数の間は腐食速度が0となることが期待されるものの、コーティングがあるにもかかわらず内面腐食が生じているタンクが報告されている。内面腐食防止効果が発揮されていない要因について検討するために、コーティングが施工されていたにもかかわらず内面腐食があったもの等不具合を生じた事例について、調査報告等の収集・分析を行った^{1)~4)}。なお、このような不具合があっても原因の調査分析などが実施されていないものが数多く存在する。各事例中下線が引かれている部分については、(5)で言及する。本項では、2.4.2で述べた事例の分析結果について補足している。

(1) 事故事例

① 事故事例 90

- ・ 内容物：原油
- ・ アニュラ板：エポキシ樹脂（事故の15年前）及びタールエポキシ樹脂（事故の9年前に重ね塗り）コーティング、底板：タールエポキシ樹脂（事故9年前）コーティング。
- ・ 設計膜厚：200 μm、実膜厚：120 μm～1500 μm
- ・ 開口部の形状（右上写真）
- ・ 開口場所：3箇所（南方向2、南西1）。側板からおおむね10mの底板（9mm）。
- ・ ドーナツ状沈下が大きく、腐食部周辺は低い位置にあった。
- ・ 2種ケレンで素地調整された部分でコーティング剥離が見られた（事故タンク及び隣接タンク）。硫化水素がコーティングの劣化と剥離を助長したことも考えられる。
- ・ 硫化物が存在していた。
- ・ 高い腐食速度となった要因は、嫌気性の硫酸塩還元細菌の存在があったものと考えられる。
- ・ コーティングの一部剥離が生じたことによる腐食速度を増加させたことのみが孔食を助長した要因とは考えにくい。
- ・ 表5.5.3に事故タンクのドレン水及びスラッジの分析結果を示す。



表 5.5.3 事故タンクボトムドレン及びスラッジ分析結果

	No. 47 TANK	No. 43 TANK
ボトムドレン	(I.L系)	(M.SULFUR系)
PH	3.2	6.9
NACL	4476 PPM	31942 PPM
CL	2716 PPM	19381 PPM
SO4	413 PPM	10 PPM
CO3	同定困難	同定困難
H2S	Ni 1	Ni 1
RSH	3 PPM	3 PPM
	以下	以下
ボトムスラッジ		
R, PH	4.2	7.9
NACL	70 PPM	3086 PPM
CL	43 PPM	1872 PPM

※No. 47 は事故タンク、
No. 43 は事故タンクと類似したタンク

②事件事例 106

- ・内容物：原油
- ・タールエポキシ樹脂コーティング(事故の12年前に施工)。
- ・設計膜厚 $200\mu\text{m}$ 、実膜厚 $120\mu\text{m}\sim 1500\mu\text{m}$ 。
- ・ピンホール及び夾雑物が多数見つかっている。
- ・開口部の形状(右写真)
- ・開口場所：ドレインノズル直下のアニュラ板(12mm)
- ・ドレインノズル直下であったことから施工性やその後の検査ができなかったのではないか。
- ・ 60°C を超える油に直接さらされた可能性がある。
- ・受け入れ時の流速とスラッジ巻き込みによる摩耗の可能性はある。
- ・高い腐食率の発生要因としては、スラッジ堆積状況による酸素濃淡電池による腐食、コーティング剥離部のマクロセルによる腐食、酸による腐食の複合作用と推定される。
- ・タンク底板のサンプル及びスラッジ、ドレン水のイオンクロマトグラフィー分析結果、滴定分析結果、PH測定結果を表5.5.4に示す。

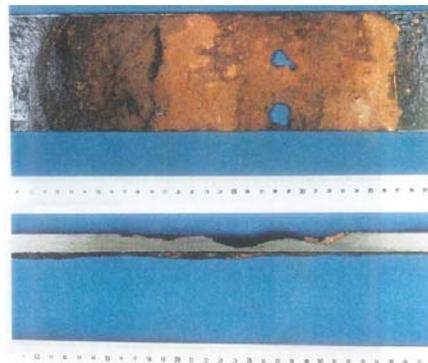


表 5.5.4 底板のサンプル、スラッジ、ドレン水の分析結果

試料	F	Cl	NO ₂	NO ₃	NH ₄	SO ₄	PO ₄	Na	Ca	*SiO ₂	**CO ₂	***HCO ₃	***pH	
腐食面スケール	① 水切り部 1 (北 穴明け)	3	37	<1	<1	4	1,700	<1	99	890	190	-(注)	-(注)	7.4
	② 水切り部 2 (南東)	<1	5,500	<1	<1	41	2,900	<1	27	2,700	240	-(注)	-(注)	5.3
	③ 水切り部 3 (南西)	13	6,600	<1	<1	42	2,400	<1	470	2,400	230	-(注)	-(注)	5.1
	④ レゾリットパネプレート	4	1,600	<1	15	4	720	<1	44	1,300	100	-(注)	-(注)	6.9
	⑤ 腐食部	<1	3,800	<1	<1	41	630	<1	540	1,200	31	-(注)	-(注)	5.5
スラッジ	2-2 洗浄前 原油へドロ状	1	830	7	51	11	430	<1	480	300	43	<10	140	6.6
	1A 水切り1の裏り	2	220	11	54	7	430	<1	260	200	36	<10	160	6.9
	1B 水切り1の内部	3	150	14	60	15	740	<1	310	270	46	<10	140	6.9
	2A 水切り2の裏り	4	280	7	55	13	1,400	<1	310	660	63	<10	330	7.1
	3A 水切り3の裏り	2	250	9	49	8	430	<1	290	230	44	<10	200	6.9
	7 レゾリット下	<1	8,800	8	47	110	440	<1	580	1,300	27	<10	<10	4.4
	ドレン	<1	4,800	<1	<1	20	26	<1	2,200	460	12	40	99	7.9

*; ICP発光分光分析法
 **; 滴定法
 ***; ガラス電極法にて1%溶液を測定
 (注); 前処理による加温で大きく変動(減少)するため実施せず。

③事件事例 117

- ・内容物：原油
- ・事故の24年前にFRPライニング施工、18年前にフレークコーティングによる補修。
- ・実膜厚： $100\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 。
- ・ピンホール多数。一部で、プライマーの欠落あり。一部で、塗膜下に塩分が存在した可能性は高い。

- ・開口部の形状（右写真）
- ・開口場所：ドレインノズル直下のアニュラ板（12mm）
- ・ドレインノズル直下であったことから施工性やその後の検査ができなかったのではないかと。
- ・60°Cを超える油に直接さらされた可能性がある。
- ・受け入れ時の流速とスラッジ巻き込みによる摩擦の可能性はある。
- ・プライマーなしで施工されていた箇所が、その後の使用により塗膜下で腐食が発生し、スロップ油受入など塗膜の劣化剥離を助長させる因子が重なり、部分的に塗膜が剥離。
- ・高い腐食速度の発生要因としては塩素イオンや硫酸イオンの存在が考えられる。
- ・タンク底板のサンプル及びスラッジ、ドレン水のイオンクロマトグラフィー分析結果、滴定分析結果、PH測定結果を表 5.5.5 に示す。

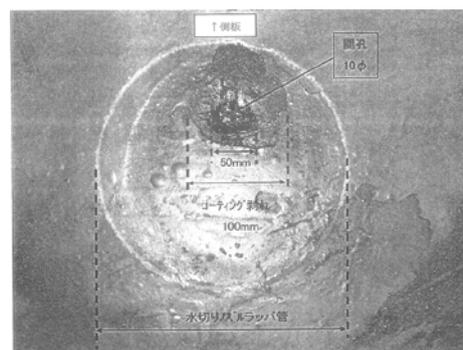


表 5.5.5 底板のサンプル、スラッジ、ドレン水の分析結果

【試料調整方法】

スケール：試料に純水を加え 1 w/o とし、熱板上で約 80°C にて沸騰しないように加温、液量が約 1/2 になるまで濃縮する

→放冷後、ろ過し、純水を用いて残滓のスケールとろ紙を十分洗浄する。

→純水で希釈し 1 w/o 溶液とする。この溶液を用いて分析する。

下記結果は元試料濃度に換算。

スラッジ：試料に純水を加え 1 w/o とし、常温にて 6 Hr 振とう溶出。この溶液を用いて分析する。

下記結果は元試料濃度に換算。

ドレン：混入している油を除去後、直接分析する。

試料		F	Cl	NO ₂	NO ₃	NH ₄	SO ₄	PO ₄	Na	Ca	*SiO ₂	**CO ₂	**HCO ₃	***pH
スケール	SA1 水切り部1 (南 六あき)	7.4	2,960	< 0.01	<	14.7 10.8	1,150 < 0.01	< 0.01	61.4 1,900	396	396	—(注)	—(注)	4.5
	SA2 水切り部2 (南東)	2.2	5,600	< 0.01	< 0.01	34.9	419 < 0.01	< 0.01	396 2,620	88.3	88.3	—(注)	—(注)	4.7
スラッジ 1A	原油ヘドロ状	< 0.01	1,400	< 0.01	< 0.01	0.66 0.01	2 < 0.01	< 0.01	7.01 1.50	0.17	0.17	<0.001	6.45	6.4
ドレン	ドレン	0.74	22,600	< 0.01	< 0.01	0.25	48 < 0.01	< 0.01	9.65 2.38	21.0	21.0	0.31	216	7.5

*：ICP 発光分光分析法

**：滴定法

***：ガラス電極法にて 1% 溶液を測定

(注)：前処理による加温で大きく変動（減少）するため実施せず。

④ 事故事例 133

- ・内容物：ヘビーナフサ
- ・ビニルエステル樹脂コーティング（事故の 9 年前施工）。
- ・設計膜厚：500 μm
- ・開口部の他にコーティング剥離箇所 1（孔食発生）。
- ・開口部の形状（右写真）
- ・開口場所：電気防食用陽極下の底板（6mm）。
- ・陽極の下部と底板の隙間は 30mm しかなく、下地処理が十分にできなかった。施工不良があったことは明らかである。



- ・ドレン水には塩化物イオン、硫化物イオン及び有機酸が高濃度で検出された。
- ・コーティングの施工不良箇所においてコーティングが剥離した。
- ・コーティング剥離箇所の鋼板表面のドレン水において、溶存酸素、有機酸等による局部電池が形成され、電気化学的な腐食が引き起こされた。
- ・ドレン水中の塩化物、硫化物等により腐食の進行が促進された。
- ・ドレン水の物性分析データを表 5.5.6 に示す。

表 5.5.6 ドレン水の分析結果

	10/10 15:00	10/16 9:15	10/21 9:15	
PH	6.81	6.66	6.53	
電気伝導率	22.5	22.5	23.6	
鉄	0.6	0.6	0.8	
溶解性鉄	1	2.8	1	
塩化物イオン	11	14	9	
硫酸イオン	8	2	1	
硫化物	29	23	18	
炭酸	16未満	16未満	16未満	
亜硝酸イオン	1未満	2	1未満	
全酸	168	176	229	186
ギ酸	1未満	10未満	10未満	
プロピオン酸	1未満	10未満	10未満	
酢酸	17	14	19	
MEA	5未満	5未満	5未満	
MIPA	140	140	160	
DMEA	10未満	10未満	10未満	
アンモニア	0.9	1.4	0.8	

(2) GFコーティングが施工されたタンクの内面腐食が激しかった事例

①内面腐食発生事例1

- ・タンク容量：14,505 キロリットル 浮き屋根式
- ・タンク完成年：昭和 54 年
- ・内容物：原油
- ・加熱設備無し（平成 13 年に撤去）
- ・開放履歴：昭和 61 年、平成 5 年、平成 13 年、平成 22 年
- ・コーティング履歴：昭和 61 年施工、平成 5 年全面塗り直し
- ・設計膜厚：350 μ m
- ・平成 22 年開放時に、コーティングの剥離と内面腐食が発見された。図 5.5.4 は、タンク開放時のコーティング目視検査記録であるが、コーティングの剥離箇所が多数存在している。写真は剥離状況を示したものである。
- ・図 5.5.5 は、底部板の内面腐食点検記録である。アニュラ板に 3.5mm、底板に最大 6.9mm の内面腐食が発生している。平成 13 年開放時には、1.8mm 以上の内面腐食は補修されている。
- ・本タンクは、開放ごとに肉盛り補修が実施されており、コーティングの腐食防止効果

が低かったと考えられる。

- ・耐熱性能が低い塗料が使われた。
- ・内容物の影響（高いアロマ、温度）により腐食環境が厳しい。

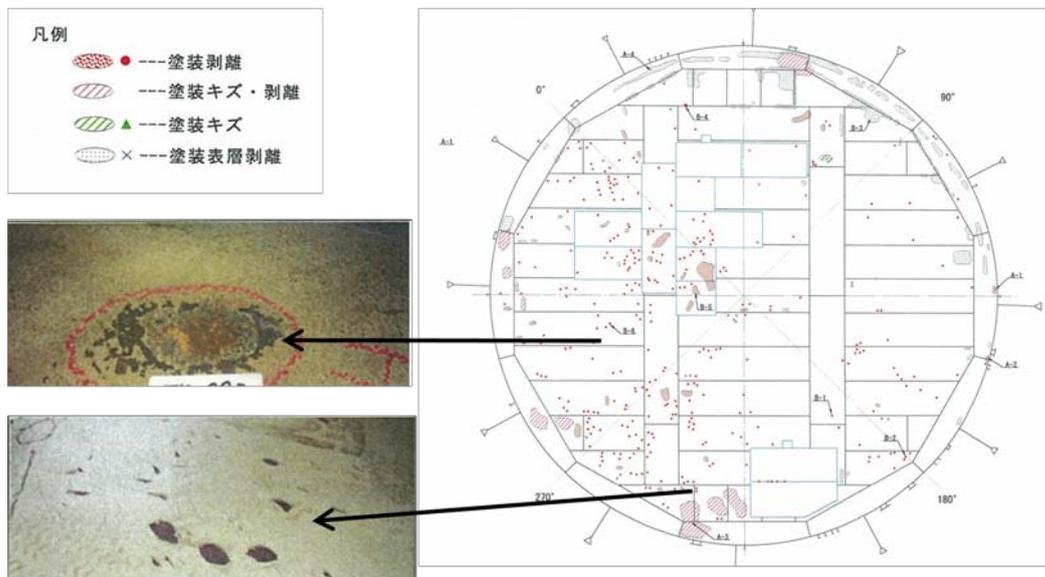


図 5.5.4 コーティング目視検査記録

No	欠陥種別	発生部位	Depth (mm)
1	ピッチング	アニュラプレート	3.5
2	ピッチング	底板	3.0
3	ピッチング	底板	3.1
4	ピッチング	底板	5.7
5	ピッチング	底板	3.9
6	ピッチング	底板	6.9
7	ピッチング	底板	3.5
8	ピッチング	底板	4.8
9	ピッチング	底板	3.7
10	ピッチング	底板	3.2
11	ピッチング	底板	2.6
12	ピッチング	底板	2.4
13	ピッチング	底板	2.8
14	ピッチング	底板	2.5
15	ピッチング	底板	3.9
16	ピッチング	底板	2.8
17	ピッチング	底板	6.0
18	ピッチング	底板	3.0
19	ピッチング	底板	2.6

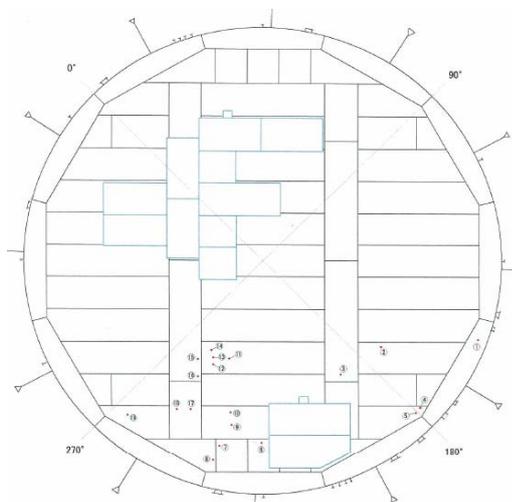


図 5.5.5 底部内面腐食目視検査記録

②内面腐食発生事例 2

- ・タンク容量：38,858 キロリットル 浮き屋根式
- ・タンク完成年：平成 3 年
- ・内容物：ナフサ
- ・加熱設備無し
- ・開放履歴：(平成 10 年、平成 19 年)
- ・コーティング履歴：平成 3 年 (設置時) (16 年使用)
- ・設計膜厚：350 μm
- ・平成 10 年の開放時 (コーティングは 7 年使用) にアニュラ板の一部に膨れ、剥離が見られたが、内面腐食は発生していなかった。
- ・平成 19 年の開放時には、アニュラ板、底板に部分的な膨れ、剥離、キズが確認され、アニュラ板に 4.8mm、底板に 6.3mm の内面腐食が見つかった。
- ・設計膜厚 350 μm に対して、実測値で 190 μm の箇所が確認された。
- ・オイルイン前のコーティングの品質確認において、ピンホールテストが実施されていない。(コーティングにキズがないことが確認されていなかった。)

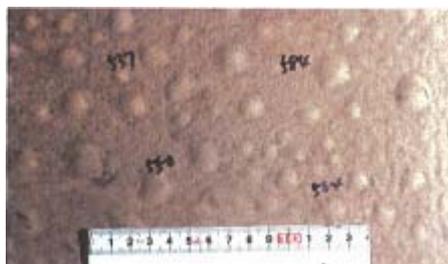
③内面腐食発生事例 3

- ・タンク容量：65,700 キロリットル 浮き屋根式
- ・タンク完成年：昭和 54 年
- ・内容物：原油
- ・加熱設備有り
- ・開放履歴 (昭和 60 年、平成 3 年、平成 11 年、平成 20 年)
- ・コーティング履歴：昭和 60 年施工 (23 年使用)
- ・設計膜厚：350 μm
- ・平成 20 年の開放時に底板に 5.3mm の内面腐食が発生していた。
- ・建設時にはコーティングを施工していなかったため、第 1 回目の開放時には内面腐食が発生しており、その際に 3.5mm 未満のものは肉盛り補修を実施せずにコーティングが施工された。肉盛り補修が実施されなかった箇所の下地処理不足やコーティング施工後も凹みが存在することから水分が集積しやすい状態となり膨れが発生したと考えられる。
- ・耐溶剤性の低い塗料が使用されている。

(3) GFコーティングの膨れの下の鋼板腐食状況

①調査事例1

- ・タンク容量：59,600 キロリットル 浮き屋根式
- ・タンク完成年：平成 15 年
- ・内容物：原油
- ・管理温度：70℃
- ・開放履歴：(平成 21 年)
- ・コーティング履歴：平成 15 年 (完成時) (6 年使用)
- ・設計膜厚：560 μm
- ・平成 21 年の開放時にアニュラ板・底板ともに全面にわたって膨れが発生しており一部で剥離が見つかった。膨れのサイズは $\phi 10\sim 100\text{mm}$ のものと $\phi 10\text{mm}$ 未満のものに分けられ、前者は素地とプライマー間で、後者は中塗りの層内で発生している。(膨れの発生状況は左下写真参照)
- ・膜厚は規定値以上であった。膨れた塗膜下から塩分が検出されており、素地/プライマー間の膨れは鋼板面に残留していた塩分の影響と見られる。電気特性も劣化しており、中塗り層内の膨れは塗膜中のポリスチレンが膨潤・透過した溶剤分 (アロマ) により溶解して膨れに至ったものであり温度によってこれが加速された。
- ・剥離は、開放時の塗膜の急激な冷却によるものと推定されている。
- ・塗膜の膨れ部の下の鋼板には黒さびが見られたものの、明瞭な減肉までは至っていなかった (膨れの下鋼板の状況は右下写真参照)。



アニュラ部のふくれ集中箇所
ふくれの大きさは $\phi 5\sim 20\text{mm}$ 、周囲
の膜厚は 550 μm 程度



ふくれの下鋼板には黒さびが
発生しているが激しい減肉はな
い。

②調査事例2

- ・タンク容量：35,000 キロリットル 浮き屋根式
- ・タンク完成年：昭和 54 年
- ・内容物：重油及び原油
- ・管理温度：55℃ (耐熱性コーティングを施工)
- ・開放履歴：(平成 21 年)
- ・コーティング履歴：平成 10 年 (10 年使用)

- ・設計膜厚：700 μm
 - ・平成 20 年の開放時に底板の約 3 分の 2 に膨れが発生していた（膨れの状況は右写真参照）。膨れのサイズは $\Phi 10\sim 25\text{mm}$ で中塗層内で発生していた。図 5.5.6 は膨れ発生範囲を示したものである（黒に着色した範囲が膨れ発生部）。
- ・鋼板に腐食は生じていなかった。
- ・膜厚は規定値以上であった。付着力に異常はなかった。
- ・膨れの発生原因は、中塗り塗装時の換気不足及び加熱コイルの周囲の水分が温められ、高温の水溜まりが発生したことによるものとして推定された。

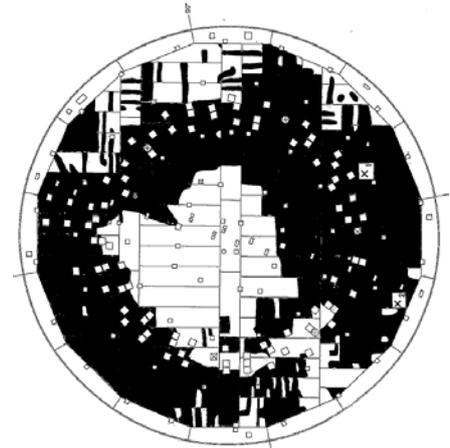


図 5.5.6 コーティングの膨れ発生範囲

(4) GF コーティングを施工していたタンクの補修履歴

図 5.5.7 は、国家備蓄基地の備蓄タンクにおける GF コーティングの開放ごとの底部面積に対する補修率を開放ごとに累積したものである⁵⁾。補修は膨れを生じた部分を対象としているので、膨れが発生した面積の底部面積に対する割合と見ることができる。緑のデータ（塗装仕様：平均膜厚 650 μm 、最小膜厚 430 μm ）はコーティング指針が示される約 10 年前に建設された基地のタンクで、オレンジのデータ（塗装仕様：平均膜厚 560 μm 、最小膜厚 400 μm ）はコーティング指針が示される約 2 年前に建設された基地のタンクである。いずれの基地のタンクもコーティング指針に規定された GF 塗料と膜厚で施工されている。

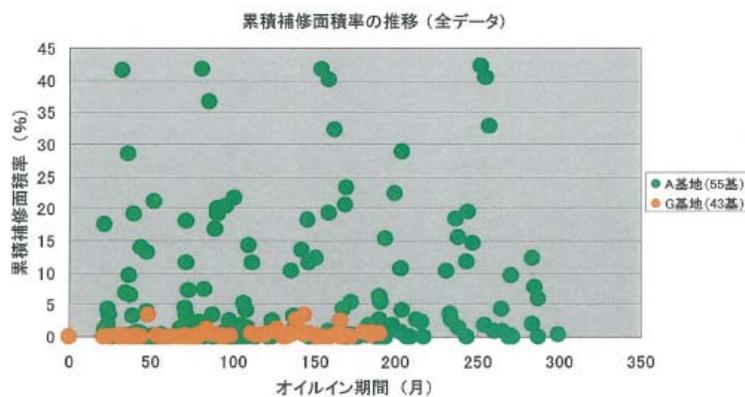


図 5.5.7 タンク経過年と GF コーティングの累積補修率

図 5.5.7 は全てのタンクについてみたものであるが、かなり早い時期から大きな面積割合で膨れが発生しているものがある（18基）。これらについて原因を調べたところ、無機ジンクショッププライマーの除去不足と施工不良（結露）によるとされている。前者については14基で確認されているが、これらのコーティング施工時には無機ジンクショッププライマーがコーティング品質に与える影響が明確ではなかったため除去不足が生じたものと考えられる。その後影響があることが明らかになったため、コーティング指針では除せいで度や素地調整確認でこのような不良が生じないようにになっている。4基で施工不良（結露）が疑われているが、施工当日の天候等から類推されたもので、施工記録（温湿度記録）上は確認がされていない。

図 5.5.8 は図 5.5.7 から無機ジンクショッププライマー除去不足による施工不良のタンクを除いたものの補修率である。△のデータは確認されていないが施工不良（結露）が疑われるタンクである。施工不良を除けば、多くのタンクで膨れがほとんど発生していないことが分かる。特にコーティング指針と同等の施工内容であった基地のデータ（オレンジ）は補修履歴が小さい。

ほとんど膨れが発生していないコーティングでは塗膜下の母材にはほとんど腐食は生じない。以上のことから、コーティング指針に則ったGFコーティングは内面防食効果が高いことが分かる。

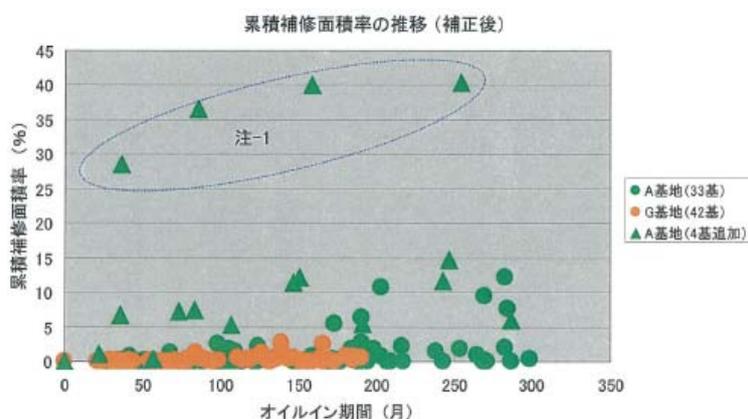
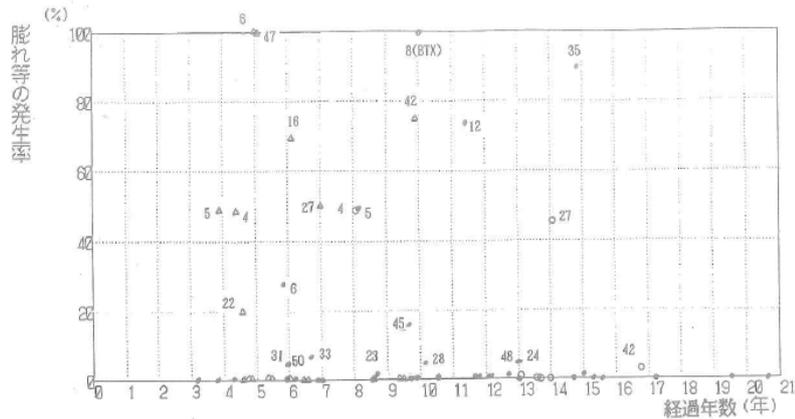


図 5.5.8 タンク経過年とGFコーティングの累積補修率（施工不良タンク除く）

（参考）図 5.5.9 は平成8年に同様の調査が行われた結果である⁶⁾。膨れが発生したものが多いが、ほとんど膨れが発生していないものもあり、施工年代の古いコーティングには塗膜の防食効果にばらつきが大きいことが分かる。対象タンクは民間のものが主で、塗料はGFコーティング以外も含まれている。



(注1)・：初期塗膜、○：補強塗膜、△：溶接線の補修塗膜
(注2)補強塗膜の年数は、塗り重ね塗膜下の旧塗膜の経過年数
図4-1 膨れ等の発生率と塗膜の経過年数との関係

図 5.5.9 民間タンクのタンク経過年とコーティングの膨れ発生率

(5) コーティングの不具合事例のまとめ

(1) ～ (4) の結果をまとめると次のことが言える。

①コーティングが施工されたタンクでコーティングが剥離すると腐食速度が大きくなることがある。

②コーティングが剥離する要因としては次のものが挙げられる。

- ・耐溶剤性の低い塗料の使用
- ・塗装表面の結露や戻りさびによる付着力不足
- ・高温による塗膜劣化
- ・下地処理不良（塩分やゴミの残留、表面粗さ不足）による付着力不足や腐食進行
- ・施工不良による膜厚不足、硬化不足

③剥離後に鋼板が激しい腐食を受ける要因は次の通りである。

- ・マクロセルの形成
- ・酸素濃淡電池の形成
- ・硫酸塩還元バクテリアの作用や酸などによる腐食

④膨れの下にわずかに黒さびなど腐食が見つかることはあるが、明瞭に減肉したものは見つかっていない。このことから、コーティングが剥離にまで至らなければ激しい内面腐食は発生しないことがわかる。

昭和50年代に施工されたコーティングにおいて塗膜の剥離などの問題が生じたことを受けて昭和60年代にコーティングの素材品質や施工条件について検討が行われ、上記分析とおおよそ同様の結論が得られている。その検討の結果、剥離しにくいコーティングの要件がまとめられ、「コーティング指針（平成6年消防危第74号）」が作成された。コーティング指針に則って施工されれば、これらの既知の要因による不具合は生じないものと考えられる。なお、(1)の事故事例における下線部は、コーティング

指針に則って施工されていれば排除できる要因である。

5.5.3 コーティング指針

コーティング指針には、剥離しにくいコーティングとするために、次の事項について必要な要件及び試験方法が定められている。

- ・貯蔵物、貯蔵温度に適したコーティングの選定：内容物や貯蔵温度に適した塗装材料を使用しないと塗膜が劣化しやすいため、耐油性のあるコーティング材料について規定。
- ・材料の品質：耐溶剤性や耐衝撃性などを材料試験などで確認。
- ・コーティングの施工範囲：水分等がたまる部分（底部と側板下部）は全て塗装しないと非塗装部が腐食されやすいため、施工範囲について規定。目視検査によって確認。
- ・コーティングの厚さ：塗膜の厚さによって水分の透過しやすさなどが変わり、十分な厚さがないと腐食の防止機能が果たせないことから規定。膜厚試験、ピンホール試験によって確認。
- ・施工環境（温度、湿度等）：結露等があると硬化不足を生じ塗膜の付着力が不足することから施工環境について規定。塗装面の温度と湿度を観測し記録。
- ・下地処理方法（除せい度、表面粗さ）：付着力を確保するために適正な下地処理が必要であることから規定。規格との比較を行って確認。
- ・下地処理後の清掃程度：異物があると付着力が不足するために清掃が必要であることから規定。ピンホール試験で確認。
- ・材料の調合及び管理：適切な調合及び管理がなされないと塗膜の強度不足を生じるため規定。
- ・プライマーの塗布時期：表面処理後に表面の酸化があると付着力が不足することから規定。
- ・溶接部の処理方法：溶接部の塗膜厚さ不足などを防ぐために規定。
- ・塗装中の換気、塗料の乾燥時間：塗膜の強度を確保するために規定。ピンホール試験で確認。

図 2.4.10 より、現時点では母数は少ないものの、コーティング指針に則って施工された GF コーティングは内面腐食に対する防止効果が高いという実績がある。コーティングは経年劣化に伴い内面腐食防止効果が低下するため、当該効果を維持するには点検管理が必要である。開放時にコーティングに膨れが見つかった場合、次の供用期間中にその部位が破れたり剥離するおそれがあることから、補修することが必要である。また、塗膜の耐用年数を過ぎると広い範囲が劣化し剥離部分が増加すること及び剥離した部分では激しい腐食が発生するおそれが生じることから、塗膜の耐用年数に対する注意が必要である。現時点の知見と照らしてもコーティング指針の内容は必要十分なものであり、変更すべき点は特に見あたらない。なお、管理記録上は指針に則っているが換気不足によって広範囲に膨れを生じた事例があったことから、教育などを通じて施工管理の実効性

を向上させることも重要であると考えられる。

引用文献

- 1) 危険物保安技術協会：コーティングタンクの底部腐食に関する調査研究会報告書、平成9年11月
- 2) 危険物保安技術協会：屋外タンク貯蔵所からの原油漏洩事故の原因に関する調査検討委員会報告書、平成13年11月
- 3) S株式会社O製油所事故対策特別委員会：O製油所#003原油タンク分離水漏洩事故報告書、平成15年6月17日
- 4) T株式会社K製油所：No.19タンク油漏洩事故原因調査報告書、平成18年9月
- 5) 日本高圧力技術協会：平成21年度陸上タンクのタンク底部コーティングの耐久性調査（コーティングの実績調査）報告書、平成22年1月
- 6) 危険物保安技術協会：屋外貯蔵タンク内面のコーティングに関する調査検討報告書、平成9年3月

5. 6 温度勾配浸漬試験及び実タンクの塗膜調査のまとめ

5.6.1 温度勾配浸漬試験と実タンクにおける塗膜劣化の相関

平成 14 年度報告書では、40/20℃温度勾配浸漬試験による試験片塗膜の耐久性の寿命欠陥が発生する日数と、その試験片と同等な塗膜である実タンクの耐久性の寿命欠陥が発生する年数との相関を表すものとして検量線を用いて耐久性限界について検討され、その結果、温度勾配浸漬試験結果から、実タンクでの使用実績がない塗膜であっても長期間の耐久性限界を予測する有効な手段であると考えられた。今年度は過去の検討結果等を活用し、かつ実験等によりデータを補足することでGFコーティング塗膜の常温使用での検量線を作成することを目的として、40/20℃温度勾配浸漬試験、実タンクの塗膜調査等を行った。

塗膜の耐久性限界を判断する欠陥の種類として、膨れ、膨潤、分解があるが、実態としてタンクの塗膜の経年劣化として膨れがもっとも多く現れ、膨れの原因として最も多く影響を与えているものは、水分要素と考えられたので、水分要素が塗膜の膨れに及ぼす影響と膜厚の関係を主にして検討した。

なお、塗膜に膨れが発生しても、直ちにタンク底部板に腐食による減肉が進行するものではないことは今年度の現地調査や過去の検討結果より明らかであるが、一方で、膨れが破れた場合には、周辺塗膜の劣化状況など環境条件によっては腐食速度が大きくなることがある。現在の知見では膨れが発生した後、どの程度の時間で膨れが破れたり剥離するか明らかでないため、膨れの発生に着目して検討した。

5.6.2 タンクの塗膜に発生する膨れ

タンクの塗膜に発生する膨れの発生状況は図 5.6.1 のような故障発生曲線でモデル化できると考えられる。コーティング施工後早い時期には、施工不良や塗料材質の選定ミス等による初期欠陥による膨れが現れると考えられる（図 5.6.1 の①）。このような例としては、5. 5で調査した不具合事例が相当すると考えられる。次に現れるのは偶発欠陥（合理的な施工管理によっても排除が困難な要因による欠陥）による膨れであり、一定の施工管理がなされたにもかかわらず、図 5.6.1 の②に相当する期間で発生する。平成 21 年度に現地調査された 3 基のタンクに発生していたふくれがこの例に相当すると考えられる。これらのタンクでは開放ごとに膨れが発生しているものの、開放ごとの塗膜の補修率は小さく、第 4 回目の開放時（経過年数約 26 年）においても補修率の小さなものが多かった（表 5.6.1）。最後に、塗膜の耐久性限界を越えることによる膨れの発生（図 5.6.1 の③）がある。このような例として、今年度の現地調査Cタンクは、膨れ等の欠陥が今回の開放時に約 11%発生しており、塗膜の剥離等により底部の腐食が発生していたことから、当該塗膜は、内面腐食防止機能を維持しているとは言えず、塗膜の耐久性限界により膨れが発生したと考えられる。

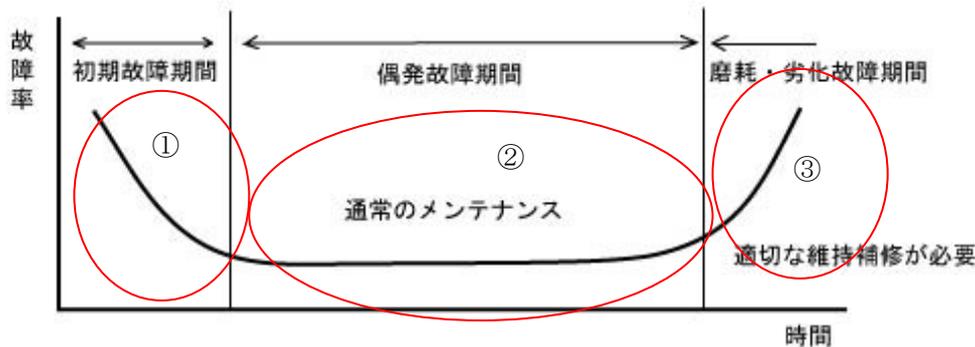


図 5.6.1 塗膜の膨れ等の欠陥発生率と経過年のイメージ図

表 5.6.1 平均膜厚 700 μ m 程度のタンクの経過年と補修率の関係※4

新規塗装	タンク No.	A-4	A-8	A-9	A-10	A-13	A-14	A-15	A-16	A-17
	初期膜厚 (Min) μ m	440	450	470	480	500	500	450	450	450
初期膜厚 (Ave) μ m	825	789	781	731	821	756	853	785	791	
初期塗装完了	82/11/18	83/05/20	82/12/09	83/05/19	83/10/17	83/10/17	83/10/20	83/10/20	83/10/29	
1回目開放	第1回オイルイン 年月	83/09/22	83/09/23	83/10/17	83/10/17	83/11/01	83/11/10	83/11/09	83/11/08	84/02/02
	第1回目開放 年月	86/08/29	86/09/23	85/08/06	85/07/09	86/05/18	86/11/24	88/07/18	87/07/18	88/05/06
	膨れ・剥離面積 (m ²)	0	0.25	50	0	1	0.5	1.5	1.2	5
	補修面積 (m ²)	5	0.25	50	0	1	0.5	1.5	1.2	5
補修率 (%)	0.11	0.01	1.06	0.00	0.02	0.01	0.03	0.03	0.11	
2回目開放	第2回目開放 年月	91/09/16	91/10/03	91/08/29	90/05/10	90/09/22	92/09/21	93/06/30	92/11/04	93/07/13
	2回目開放時の経過年数	8.0	8.0	7.9	6.6	6.9	8.9	9.6	9.0	9.4
	膨れ面積 (m ²)	0.7	12	242	4	1	0	6	0	13
	補修面積 (m ²)	0.7	12	294	4	1	0	6	0	13
補修率 (%)	0.01	0.26	6.26	0.09	0.02	0.00	0.13	0.00	0.28	
3回目開放	第3回目開放 年月	1998/5/19	98/07/31	1998/6/23	96/07/06	97/06/27	99/08/18	00/07/28	1999/10/25	00/09/26
	3回目開放時の経過年数	15	15	15	13	14	16	17	16	17
	膨れ面積 (m ²)	2.2	26	196	82	0.04	0	77	1.3	54
	補修面積 (m ²)	2.2	26	196	98	0.04	0	77	1.3	54
補修率 (%)	0.05	0.55	4.17	2.09	0.00	0.00	1.64	0.03	1.15	
4回目開放	第4回目開放 年月	2006/9/1	2007/7/5	2006/10/1	2004/12/1	2005/4/1	2008/4/1	2009/5/1	2008/6/1	2009/5/1
	4回目開放時の経過年数	23.0	23.8	23.0	21.1	21.4	24.4	25.5	24.6	25.3
	膨れ面積 (m ²)	74	6	10	4.7	0.5	0.5	277.96	2.85	21.3
	補修面積 (m ²)	74	6	10	4.7	0.5	0.5	277.96	2.85	21.3
補修率 (%)	1.57	0.13	0.21	0.10	0.01	0.01	5.91	0.06	0.45	
累積補修率 (%)	1.74	0.94	11.70	2.27	0.05	0.02	7.71	0.11	1.99	

新規塗装	タンク No.	A-20	A-21	A-26	A-27	A-39	A-47	A-56	A-57	A-58
	初期膜厚 (Min) μ m	520	550	450	450	560	480	480	450	500
初期膜厚 (Ave) μ m	781	803	715	717	770	789	850	738	779	
初期塗装完了	83/10/17	83/10/17	83/10/17	83/10/19	84/08/11	84/09/10	83/07/22	83/07/18	83/06/08	
1回目開放	第1回オイルイン 年月	83/11/26	83/11/09	83/11/30	83/12/08	85/07/06	85/03/27	83/09/01	83/09/01	83/09/01
	第1回目開放 年月	86/06/06	87/08/01	87/05/11	88/09/01	88/09/19	88/06/24	86/07/31	87/06/27	87/05/18
	膨れ・剥離面積 (m ²)	0	0	3	15	0	140	0	0	
	補修面積 (m ²)	0	0	27	15	0	150	0	0	
補修率 (%)	0.00	0.00	0.57	0.32	0.00	3.19	0.00	0.00		
2回目開放	第2回目開放 年月	90/10/13	92/08/07	92/07/16	93/09/30	93/09/09	93/05/06	91/05/20	93/06/04	92/06/24
	2回目開放時の経過年数	6.9	8.8	8.6	9.8	8.2	8.1	7.7	9.8	8.8
	膨れ面積 (m ²)	0	2.5	90	235	2	10	0	0	
	補修面積 (m ²)	0	2.5	90	235	2	10	0	0	
補修率 (%)	0.00	0.05	1.91	5.00	0.04	0.21	0.00	0.00		
3回目開放	第3回目開放 年月	97/06/30	2000/11/22	99/07/20	2001/6/20	2001/5/23	00/05/18	1999/6/14	2001/8/1	2000/8/1
	3回目開放時の経過年数	14	17	16	18	16	15	16	18	17
	膨れ面積 (m ²)	0.09	295	119	5.0	5.5	42	0	0.2	0.4
	補修面積 (m ²)	0.09	295	142	5.3	15.7	42	0	0.5	0.4
補修率 (%)	0.00	6.28	3.02	0.11	0.33	0.89	0.00	0.01	0.01	
4回目開放	第4回目開放 年月	2005/10/1	2009/9/1	2007/12/1	2009/10/1	2009/11/1	2008/8/1	2007/7/1	2009/8/1	2008/10/1
	4回目開放時の経過年数	21.9	25.8	24.0	25.8	24.3	23.4	23.8	25.9	25.1
	膨れ面積 (m ²)	72	278.8	190	23.1	1.06	0.33	1	3.86	0.2
	補修面積 (m ²)	72	280	190	24	1.1	0.33	1	3.86	1.0
補修率 (%)	1.53	5.96	4.04	0.51	0.02	0.01	0.02	0.08	0.02	
累積補修率 (%)	1.53	12.29	9.56	5.94	0.40	4.30	0.02	0.09	0.03	

5.6.3 検量線の作成

(1) 塗膜への水分の透過性に着目した耐久性限界による膨れ発生日数

今年度と過去に実施した 40/20°C 温度勾配浸漬試験結果を表 5.6.2 にまとめた。

表 5.6.2 40/20 温度勾配浸漬試験結果一覧 (BV 樹脂塗料)

	BV 樹脂 400 μ m	BV 樹脂 700 μ m	BV 樹脂 1000 μ m	(参考) BV 樹脂/NV 樹脂 400 μ m	外観観察 頻度
平成 13 年度 試験片 2 ピース 浸漬期間 100 日	93 日以降 (以降 の観察未実施)	93 日以降 (以降 の観察未実施)	—	93 日以降 (以降の観 察未実施) 樹脂配合率不明	7 日目か ら 7 日ご と
平成 14 年度 試験片 2 ピース 浸漬期間 151 日	75 日～97 日の 間 2 ピース膨れ発生	111～130 の間 2 ピース膨れ発生	—	75 日～97 日の間 樹脂配合率不明 2 ピース膨れ発生	7 日目か ら 7 日ご と
平成 21 年度 試験片 1 ピース 浸漬期間 179 日	75 日目の初回観 察日には既にふ くれていた。	75 日目の初回観 察日には既にふ くれていた。	141～147 日 の間	91～97 日の間 BV 樹脂 70%/NV 樹 脂 30%	75 日目か ら 10 日ご と
平成 22 年度 試験片 3 ピース 浸漬期間	51～55 日の間 56～58 日の間 51～55 日の間 平均 52～56 日	66～70 日の間 56～58 日の間 51～55 日の間 平均 58～61 日	—	80～85 日の間 66～70 日の間 59～65 日の間 平均 68～73 日 配合率は上と同じ	5 日目か ら 5 日ご と

40/20°C 温度勾配浸漬試験の結果からは、以下のことが考察できる。

- ①年度ごとに浸漬試験結果にばらつきがあることがわかる。平成 14、15 年度と平成 21、22 年度を比較した場合、試験の条件 (浸漬時の温度管理、表面粗さ、塗料の詳細な配合) が同一でない可能性があり、膜厚、樹脂組成が同じでも膨れの発生日数を単純に比較することはできない。また、平成 21 年度と 22 年度を比較した場合、外観観察の日数の間隔、試験片の表面粗さの違いから再現性が得られなかった可能性がある。
- ②試験片は施工環境が整った中で製作されたにもかかわらず、試験片ごとに違う日数で膨れが発生しているが、膨れが発生した後は、膨れの面積が単調に増加している (図 5.2.3)。この状態は、図 5.6.1 の③に相当する状態に至ったと考えられ、GF コーティングには一定の耐久性限界が存在することが分かる。
- ③試験片の膜厚の違いにより膨れ発生日数が異なることから、塗膜の耐久性限界は膜厚が厚いものほど長く、また本年度の試験結果から、膜厚が厚い方が耐久性に関する性能が安定している。
- ④本年度の結果では、BV 樹脂/NV 樹脂 GF コーティング塗料の膜厚 400 μ m の塗膜のほうが、BV 樹脂 GF コーティング塗料の同じ膜厚のものよりも高い耐久性を示したが、平成 14 年度、平成 21 年度の結果では、樹脂の差による耐久性の差は、膜厚 700 μ m の塗膜では確認されているが、膜厚 400 μ m の塗膜では確認されていない。このことから、膜厚 400 μ m の塗膜では、樹脂の違いによる耐久性の差が安定的に現れるとは言えないと考えられる。

検量線を作成する 40/20°C 温度勾配浸漬試験 (実タンクで多く使用されている BV 樹脂塗料) の膜厚ごとのふくれ発生日数は今年度の試験結果より表 5.6.3 にまとめられる (3 試験片の平均値)。

表 5.6.3 40/20℃温度勾配浸漬試験の膜厚ごとのふくれ発生日数 (B V樹脂塗料)

	400 μ m	700 μ m
膨れ発生日数	52 日～56 日	58 日～61 日

(2) 実タンクにおいて膨れが広範囲に発生した塗膜の経過年数

- ①昨年度の実タンクの塗膜現地調査結果から、700 μ m 程度の平均膜厚が確保されていれば、膨れは多少発生しているものの、膨れの破れ、破損等は認められず底部板の腐食減肉も発生していなかったことから、塗膜全体として耐久性限界を完全に超えた状態に至っているとは考えられない。B V樹脂GFコーティング塗料(平均膜厚 700 μ m)を常温で使用した場合、26年(以上)の耐久性があることは実績として確認できる。
- ②但し、26年目の開放時に発生していた膨れが図 5.6.1 の②における偶発欠陥によるものであるが、同図の③に入りかかっているために生じたものであるかの判断はできない。
- ③今年度の現地調査によるCタンクでは、平均膜厚 528 μ m で24年使用されているが、現地調査の状況から見て塗膜の耐久性限界を超えている。
- ④今年度の現地調査によるAタンクでは、平均膜厚 517 μ m で14年使用しても耐久性限界は越えていない。
- ⑤③及び④のタンクの塗膜がコーティング指針に適合した施工が行われたか否かは明らかではないが、施工年代としてはAタンクは1996年(平成8年)、Cタンクは1986年(昭和61年)であり、コーティングの施工方法に対して一定の知見があった時期である。
- ⑥補修履歴の調査結果からは、仕様最低膜厚 250 μ m のB V樹脂GFコーティングでは、20年を越えると10%以上の面積で補修を要しているものが多く見られるようになる。
- ⑦③～⑥から現在のコーティング指針の膜厚 400 μ m に対する耐用年数としての20年という値は、現時点の知見では合理的な値であると考えられる。

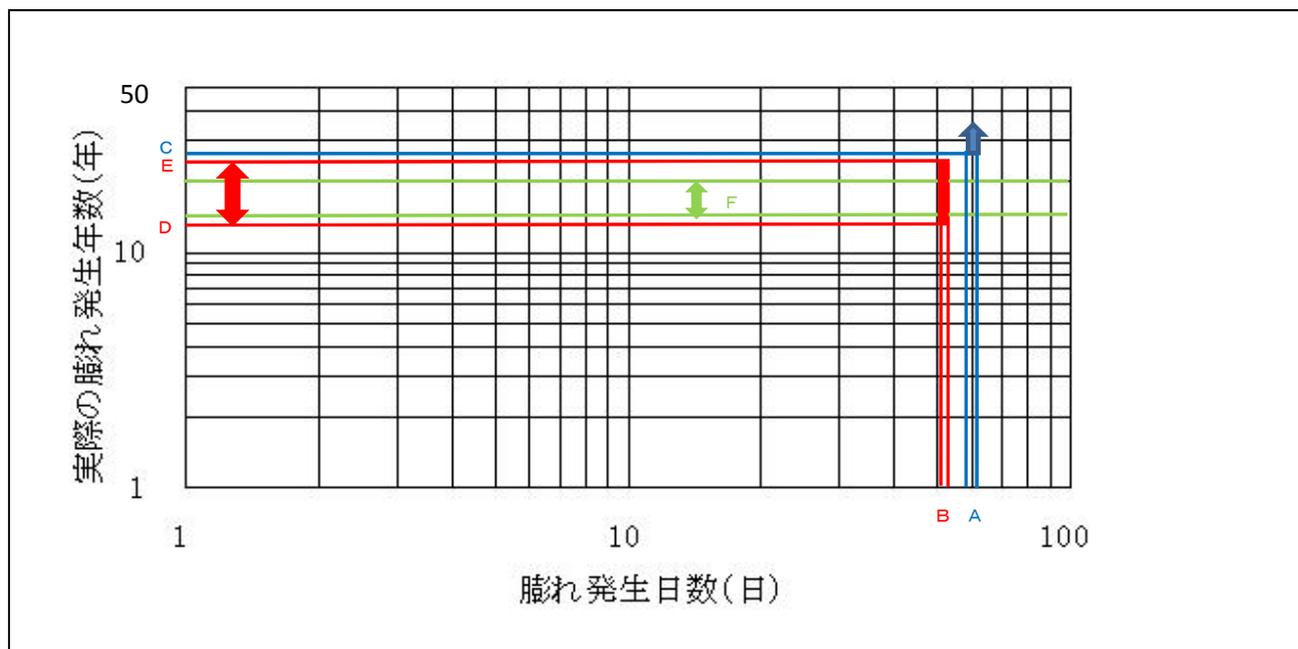
検量線を作成する実タンクによる塗膜の調査結果からの膜厚ごとのふくれ発生年は平成 21、22年度の結果から表 5.6.4 にまとめられる。

表 5.6.4 実タンクにおける塗膜の膨れ発生推定年数 (B V樹脂GFコーティング)

	400 μ m	700 μ m
膨れ発生推定年数	14年以上24年未満	26年以上の可能性

(3) 検量線の作成

(1)、(2)の結果を用いて、BV樹脂GFコーティング塗膜について検量線を作成すると図5.6.2のようになる。



- A：平成 22 年度 700 μm の温度勾配浸漬試験結果より膨れ発生時期を 3 試験の平均値を採用した場合 (58~61 日)
- B：平成 22 年度 400 μm の温度勾配浸漬試験結果より膨れ発生時期を 3 試験の平均値を採用した場合 (52~56 日)
- C：平成 21 年度 700 μm の 3 基の現地調査結果 (最低膜厚の平均 485 μm 、底板の平均膜厚、852 μm 、アニュラ板平均膜厚、912 μm 、仕様膜厚：最低、430 μm 、平均 650 μm) の膨れを偶発欠陥による膨れとみなし、700 μm 程度の GF コーティングは 26 年以上の耐用年数が期待されると考えた場合
- D：平成 22 年度の現地調査タンク A (最低膜厚、393 μm 、平均膜厚 517 μm) の結果より、400 μm 程度の GF コーティングは 14 年以上の耐用年数は期待できると考えた場合 (ただし、当該塗膜がコーティング指針に則った施工がされたかは不明)
- E：平成 22 年度の現地調査タンク C (最低膜厚、336 μm 、平均膜厚 536 μm 、経過年数 24 年) の結果より 400 μm 程度の GF コーティングは 24 年の耐用年数はないと考えた場合 (ただし、当該塗膜がコーティング指針に則った施工がされたかは不明)
- F：平成 22 年度の民間タンクの塗膜の補修履歴分析結果から、仕様最小膜厚 250 μm (膜厚記録無し) で施工された GF の耐用年数は 15 年から 20 年の間と考えた場合 (ただし、当該塗膜がコーティング指針に則った施工がされたかは不明)

図 5.6.2 ビスフェノール系ビニルエステル樹脂ガラスフレーク塗膜の検量線

5.6.4 考察

- ①今年度作成を試みた検量線（図 5.6.2）は幅を持っており、確定的な検量線の作成には至らなかった。これは、精度の高い検量線を作成するためには、促進試験の塗膜の材質及び施工条件がほぼ同一である実タンクの塗膜の耐久性限界に対するデータを得る必要があるが、実タンクの塗膜の施工条件と耐久性限界に関して十分なデータが得られなかったことが一つの要因である。
- ②コーティング指針と同等な施工管理が実施され、平均膜厚が 700 μm のBV樹脂GFコーティング塗膜が 26 年程度は健全であることは確認できた。また、浸漬試験の結果、膜厚 700 μm の塗膜は、膜厚 400 μm の塗膜に比べ水分の透過を抑制する効果が高くかつ安定した耐久性を有していることが明らかになったことから、平均膜厚が 700 μm の塗膜は 26 年程度の耐用年数を安定的に有していると評価できる。
- ③26 年経過した時点で発生している膨れが偶発欠陥によるものであるか、耐久性限界を迎えているために発生し始めたものであるかの判断はできなかった。すなわち、耐用年数は 26 年以上であると考えられるが、それ以上何年まであるかという情報は得られていない。
- ④膨れが破れた場合には、周辺塗膜の劣化状況など環境条件によっては腐食速度が大きくなることが明らかになった。
- ⑤浸漬試験において膨れが発生した後にくれの面積が単調に増加したことから、塗膜は耐久性限界を越えると劣化が急速に進行することが考えられた。
- ⑥②～⑤から、平均膜厚 700 μm 程度のBV樹脂GFコーティング塗膜の耐用年数は、現時点までの実績で明らかな 26 年と判断することが適切であると考えられる。
- ⑦樹脂の違いによる耐久性の差については、膜厚 700 μm の塗膜では樹脂の違いによる耐久性の差が確認されるが、膜厚 400 μm の塗膜では、樹脂の違いによる耐久性の差が安定的に現れるとは言えない。

5. 7 屋外貯蔵タンクの内面コーティングの耐用年数に関する検討

内面コーティングの劣化要因としては、水分の浸透による膨れ、溶剤成分による膨潤、酸成分による膨潤・分解が考えられるが、実際に発生している代表的なものは膨れであり、膨れが破れると環境条件によっては腐食速度が大きくなることが明らかになったことから、膨れの発生に着目して検討を行った。結果を次にまとめる。

5.7.1 実績から見た塗膜の耐用年数

コーティング指針に則ったコーティングではないものの、BV樹脂GFコーティングがされたタンクの内面の腐食速度に関する統計から見て、3回目(施工から平均22.8年経過)の検査時には多くのタンクで内面腐食が発見されていることが明らかになった。また、コーティング指針に適合した施工が行われたか否かは不明であるが、BV樹脂GFコーティングがされたタンクの調査の結果、平均膜厚528 μm で24年使用(昭和61年施工)されている塗膜は、劣化状況から見て耐久性限界を超えていると評価され、平均膜厚517 μm で14年使用(平成8年施工)している塗膜は劣化状況から見て耐久性限界は越えていないと評価された。以上のことから、「最小膜厚400 μm 」という基準の塗膜に対する現在の耐用年数(20年)は変更しない。なお、コーティング指針は平成6年9月1日に出されたものであり16年しか経過しておらず、当該指針に適合したコーティングを20年以上使用した場合の劣化状況についてはデータがない。

5.7.2 20年を越える耐用性を有する塗膜

前節までの検討から、平均膜厚700 μm 程度の塗膜であれば、26年程度の耐用年数があることが明らかになった。スラッジや水分の分布、温度などのタンク内の環境の不均質性を考慮すれば、塗膜の耐用年数は、巨視的に見て平均膜厚に影響されると考えられるが、耐久性を超過したタンクの調査結果からは、劣化状況は膜厚の影響を受けていることも明らかになった。このことから、20年を越えるような長期の耐用年数を規定するためには、膜厚の分布にも注意を払う必要がある。26年程度の耐用年数を持つ塗膜の膜厚分布の例を図5.7.1に示す。これらは、「最小膜厚430 μm 以上、平均膜厚650 μm 以上」という仕様で施工されたものである。一方、平均膜厚を規定せず、「最小膜厚400 μm 以上」という仕様で施工された塗膜の膜厚の例を図5.7.2に示す。

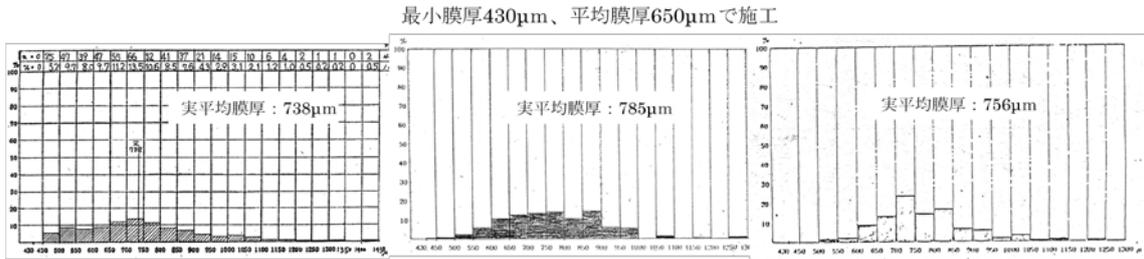


図 5.7.1 25 年以上の実績があるタンクのコーティングの膜厚分布の例（3 基）

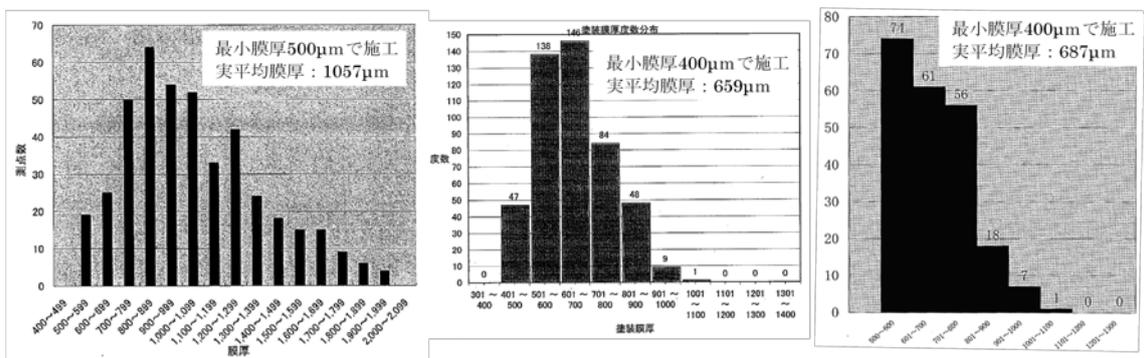


図 5.7.2 最低膜厚が 400 μ m 以上となるよう施工されたタンクのコーティングの膜厚分布の例（3 基）

図 5.7.2 の最も右の例のように偏った膜厚分布を持っている場合、塗膜の耐用年数は、分布の大きな膜厚（すなわち平均よりも薄い部分）に影響されることが考えられる。図 5.7.3 に膜厚の分布のイメージを示す。26 年程度の耐用年数が確認できた塗膜（図 5.7.1）は、図の左側のような膜厚分布を有しているが、図 5.7.2 のタンクの中には仕様として示された最小膜厚のみを意識して施工されていることから、偏った分布を持つものもある。極端な場合を想定して図 5.7.3 の右側のような膜厚分布の場合、平均膜厚は図の左のものと同じであったとしても、膜厚の薄い部分が多く存在することから、左の膜厚分布を持つ塗膜とは耐用年数が異なるはずである。

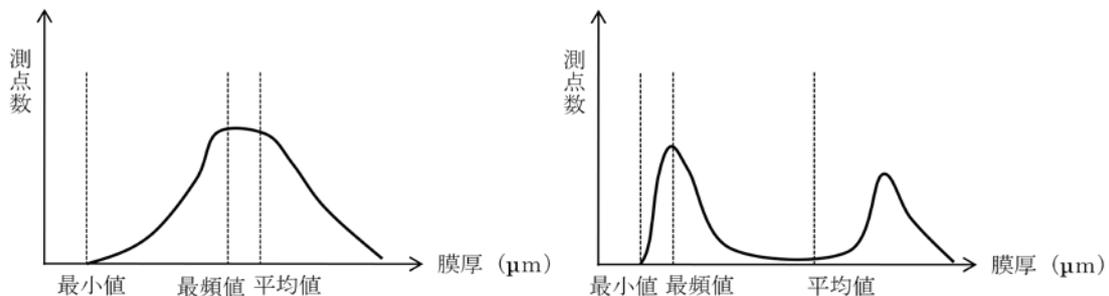


図 5.7.3 膜厚の分布のイメージ

図 5.7.1 の塗膜は、最小膜厚 430 μm 、平均膜厚 650 μm を指定して作成されており、実際の平均値は 700~800 μm 程度であるが、600 μm 以上の膜厚の頻度が高い。このことを鑑み、図 5.7.3 の一番右のような塗膜を排除するため、26 年の耐用年数がある塗膜に対応する条件を「最小膜厚 400 μm 以上かつ平均膜厚 700 μm 以上であって、膜厚分布が適正であること」とし、膜厚分布の適正さの判定としては、「最頻値が平均膜厚の $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内又は最頻値及び平均膜厚がいずれも 700 μm 以上」と規定すれば、実績のある塗膜と同等以上の耐用性が期待できる。なお、膜厚の測定箇所は、現在のコーティング指針で示されている、板一枚当たり 3 点とする。

5.7.3 樹脂及び温度

5.6 で明らかになったように、樹脂の違いによる耐久性の差については、膜厚 700 μm の塗膜では当該耐久性の差が確認されるが、膜厚 400 μm の塗膜では、当該耐久性の差が安定的に現れるとは言えない。そのため、平均膜厚 400 μm では、BV 樹脂 GF コーティング塗料と NV 樹脂 GF コーティング塗料の耐用年数は同じと規定する。BV 樹脂 70%/NV 樹脂 30% GF コーティング塗膜で平均膜厚が 700 μm であれば、同じ膜厚の BV 樹脂のものと同様以上の耐用年数を持つ可能性があるが、この樹脂の GF コーティングの実タンクでの耐用年数に対するデータがなく実績が確認できないことから、BV 樹脂塗料と同じ耐用年数とする。同様に、ガラス繊維強化プラスチックライニングについては、同じ膜厚の GF コーティングと同様以上の耐久性をもつと考えられ、ここでは、GF コーティングと同じ耐用年数とする。

本年度の検討では、実績が豊富な常温タンクに用いられる BV 樹脂 GF コーティング塗膜について評価を行った。加温タンクについては、塗膜に与える熱の影響を考慮しなければならないが、加熱コイルの周りで膨れが多いことなど、10 年の開放周期においても塗膜劣化機構が水分要因だけではないことがうかがわれる一方、加温タンクにおけるコーティングの劣化に関する実績データが少ないため、検討ができなかった。今後、事例及び知見の蓄積が進めば、加温タンクにおける塗膜をより長期に用いるための要件などの検討が可能となると考えられる。

5.7.4 まとめ

常温タンクにおける BV 樹脂 GF コーティング塗膜、NV 樹脂 GF コーティング塗膜、ガラス繊維強化プラスチックライニング塗膜の耐用年数は次のとおりとする。

表 5.7.1 コーティングの耐用年数

B V樹脂GFコーティング塗膜及びNV樹脂GFコーティング塗膜	最小膜厚 400 μ m以上	20 年
	最小膜厚 400 μ m以上かつ平均膜厚 700 μ m以上であって、膜厚分布が適正であること	26 年
ガラス繊維強化プラスチックライニング	最小膜厚 1000 μ m以上	26 年

5.7.5 今後の課題

今回の検討において、施工から 26 年経過したBV樹脂GFコーティング塗膜に発生している膨れが、偶発欠陥により発生したものであるか、耐久性限界を迎えているために発生し始めたものであるかの判断はできなかった。また、浸漬試験における膨れ発生日や実タンクにおける補修率などにばらつきがあることから、精度の高い検量線が得られなかったことから、実績に基づき耐用年数を検討した。20 年を越えるコーティングの耐久性限界については十分な知見が蓄積されているとは言い難く、塗膜を長期間用いるためには、タンク内における塗膜の劣化に対する知見が必要である。そのために、実タンクにおける塗膜の劣化状況の調査結果を蓄積するとともに、新しい知見や技術を活用したコーティングの余寿命の評価など新たな管理方法についても検討を進めることが考えられる。

今回、コーティングの劣化状況を調査したデータの収集を行ったが、十分な量及び精度のデータを集めることは困難であった。万一塗膜に剥離箇所を生じると、周辺の劣化状況等の条件によっては腐食速度が大きくなる事例があることが明らかになったことから、コーティングは、周期延長とは別に基本的な事故防止という観点からも、適切に管理されなければならない。5.6.4 で述べたように施工条件が明らかでないコーティングもあり、施工記録の保存及び開放時（コーティングの劣化状況は数年に 1 回の開放時にしか知ることができない）に劣化状況を調査し記録しておくことが重要である。このようなデータの蓄積を基としてコーティングの耐用年数の長期化の検討を進めることが可能となると考えられる。具体的な取り組みとして、塗膜の調査方法や記載方法など共通的なデータ基盤を構築することが考えられる。また、塗膜の劣化については、純粋な塗膜劣化の他に、開放時の作業により塗膜を傷つけるなどの健全性低下要因も考えられることから、オイルイン前に適切な点検及び補修を行うことが重要である。