

インバイロワンで剥離除去した PCB、鉛などの有害物質含有塗膜処理の動向

—環境対応型塗膜剥離剤により剥離した塗膜処理の動向—

白井 明¹⁾

○宮崎 豪²⁾

1. はじめに

鋼道路橋はこれまで、重要な社会基盤として様々な手法で高耐久・高寿命化が検討されてきた。その中でも塗装による防食は大部分を占めており、塗替えコスト低減を目的とした鋼道路橋の長寿命化の手段として、旧塗膜の一般塗装系から厳しい腐食環境でも耐えられる重防食塗装系への塗替えが推奨されている。しかし、旧塗膜には有害物質である鉛・クロム・PCB などが混入されている場合があるため、有害物質の含有調査から塗膜除去時の作業環境・周辺環境への配慮が叫ばれている。鉛・クロムについては以前から周知されてきており、労働安全衛生法の鉛中毒予防規則や特定化学物質障害予防規則によって作業中や処理方法について定められているが、PCB については主にトランス・コンデンサなどに使用される油状の PCB に適用されるもので、塗膜に含まれるものや、PCB 汚染物と言った微量の PCB についての法整備は最近始まったばかりと言える。PCB 処理施設では油状の高濃度 PCB の処理を優先的に行っており、微量 PCB に当たる大量の廃塗膜の処理は行われておらず、現在は保管するしか方法がない。しかし、平成 24 年に環境省が認可した民間の無害化処理施設での焼却処分が可能となり、現在認可申請中の民間施設が出てきている。民間での焼却処分が可能となれば今後一層 PCB 塗膜の除去は加速していく。

本稿では、有害物質を含む塗膜の除去技術「インバイロワン工法」と今後の処理動向についてまとめた。

2. 有害物質を含有する塗膜除去の問題点

有害物質を含有する塗膜を除去して重防食塗装系を適用するのに必要な素地調整程度を得るための塗膜除去工法には、大きく分けて物理的方法と化学的方法がある。

(1) 物理的塗膜除去方法

一般塗装系から重防食塗装系へ塗り替える際に、防食性能を最大限発揮させるために旧塗膜を完全に除去する素地調整程度 1 種（ブラスト工法）、または 2 種（電動工具処理工法）の素地調整が必要となる。ともに物理的に塗膜を除去する工法で、ブラスト工法は研削材を塗膜にぶつけて粉砕し、電動工具処理工法はディスクサンダーなどで塗膜を

1) インバイロワンシステム株式会社 代表取締役

〒103-0013 東京都中央区日本橋人形町 3 丁目 3-13

2) 同営業

削って除去する。しかし、電動工具処理工法では広範囲での施工効率が極端に悪く、鋼道路橋のような大面積には向いていない。ブラスト工法は素地調整程度 1 種を得られるので重防食塗装系へ塗替えた場合の防食性能は高い。しかし、作業環境内では大量の粉じんが発生する。また、騒音も激しく、大型の機械の設置が必要になるため、施工箇所によっては選択できない場合がある。有害物質を含む塗膜の除去では完全な密封状態での防護が必要であり、その作業環境での大量の粉じんは、視界が悪だけでなく作業者への影響も懸念される。有害物質を含む塗膜の剥離に使用された研削材は、塗膜との分離が困難であるため、全て特別管理産業廃棄物としての処分となり、莫大な処分費や保管場所が必要である。



写真-1 ブラスト工法作業状況

(2) 化学的塗膜除去方法

化学的な塗膜除去方法として、剥離剤による塗膜除去工法がある。従来の剥離剤は、塩素系有機溶剤を主成分とし、塗膜を溶解させて剥離するものである。溶解性が高く、塗付から剥離までの時間が短い。しかし、溶解した除去塗膜の回収は困難で、有害物質を含む塗膜が周辺に再付着するという問題がある。また、塩素系剥離剤は皮膚刺激性が強く、溶剤臭も強い上に、主成分であるジクロロメタンは発がん性のある毒性を持っており、飛散防止対策を行った狭い防護内では作業者への影響が懸念されている。主成分の沸点が低く、乾燥しやすい従来型剥離剤では、塗膜に十分な浸透が出来ずに何度も施工する必要があるため、これらの問題が頻繁に起こる危険性を持っている。

3. 環境対応型塗膜剥離剤「インバイロワン」

剥離剤による塗膜除去はこれらの問題点を克服することで、有害物質を含む塗膜の除去を効率的に行えるとされ、環境対応型塗膜剥離剤「インバイロワン」は開発された。インバイロワン工法とはインバイロワンを用いる塗膜除去工法で、独立行政法人土木研究所とインバイロワンシステム株式会社が共同で特許権を保有している技術である。旧塗膜に塗付されたインバイロワンは塗膜の分子間に徐々に浸透し、多層塗膜を軟化・可塑化して一気に除去する。インバイロワンの塗膜深部への浸透イメージを図-1 に示す。

化学的塗膜除去方法に分類されるインバイロワンは、従来型剥離剤とはまったく異なる

性質を持ち、従来型剥離剤が抱えていた問題点を解決した新しい化学的塗膜除去方法である。従来型剥離剤との比較表を表-1 に示す。

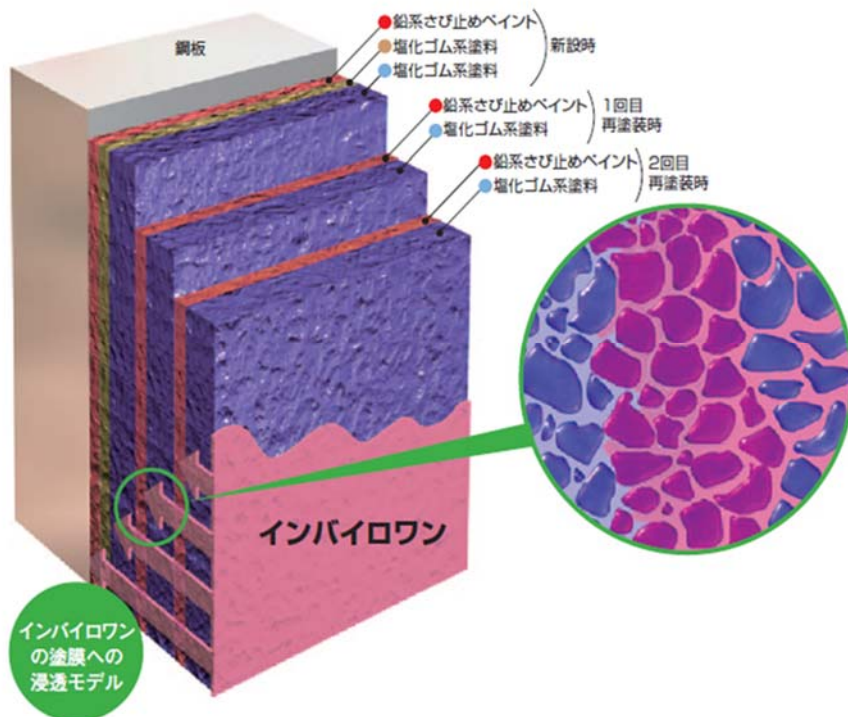


図-1 塗膜（多層構造）深部のイメージ

表-1 インバイロワンの性能比較表

| 比較性能項目 | インバイロワン | 塩素系剥離剤 |
|---------|----------------------|-------------|
| 主要な成分 | アルコール系有機溶剤 | 塩素系有機溶剤 |
| 生分解性 | 約 30 日 94.6%以上で分解 | 難分解性(データなし) |
| 皮膚刺激性 | ほとんどない ¹⁾ | 強い皮膚への刺激 |
| 塗膜はく離機構 | 浸透・軟化型 | 薄層の溶解型 |

注 1): 一定の間、皮膚に付着させた場合、体質によって異なるが皮膚に湿疹やはれなどを生じる場合がある。

(1) 主成分

インバイロワンの主成分はアルコール系有機溶剤で、高沸点のため乾燥が遅い。また、構成成分の沸点がほぼ同じなため、時間経過による性能低下が少ない。これにより、湿润状態を長く継続させ、塗膜の軟化・除去までの工程に幅を持たせることが出来る。また、塩素系有機溶剤を使用していないため、皮膚刺激性が低く、溶剤臭もごく僅かで、作業者に及ぼす影響がこれまでよりも格段に少ない。インバイロワンの標準的組成を表-2 に示す。

表-2 インバイロワンの標準的組成

| 成分名 | W t (%) |
|-------------|---------|
| アルコール系高沸点溶剤 | 60~70 |
| 複素環状系有機化合物 | 20~30 |
| 増粘剤 | 5~10 |
| 有機酸類 | 0.1~5 |
| 添加剤他 | 0.1~0.2 |
| 染料 | ≤0.1 |
| 合計 | 100% |

(2) 適用条件

インバイロワンは鋼構造物の塗膜を除去する工法で、主に鋼道路橋や水門、鉄塔、タンクなどに適用される。塗装系によって効果が違うが、特に A,a 塗装系、B,b 塗装系に高い浸透性を持っており、500 μ m以下の膜厚であれば 24 時間で一度に除去できる。

インバイロワンの反応には温度が必要で、気温が 10℃以上の場合には良く反応する。初冬や春頃の夜間に 5℃~10℃になる場合は、1 時間毎の平均気温を積算して 240℃以上になるまで浸透させることで適用が可能である。冬季に平均気温が 5℃以下になるような地域では、加温養生することで適用が可能である。

(3) 浸透時間

一般に高沸点の有機溶剤は、塗膜の分子間への浸透が遅い。インバイロワンは数種類のアルコール系溶剤を配合し、沸点と浸透性の調整を行っている。標準的な浸透時間は 24 時間で、塗膜構成によっては 72 時間以上必要な場合もある。しかし、高沸点溶剤を使用しているため、浸透から除去までは常に湿潤しており、長い時間をかけて徐々に浸透させることで、複数の層状で構成されている塗膜を一度の塗付で剥離することが可能となる。また、平均気温が高ければインバイロワンの反応が進み、必要な浸透時間が短くなる。塗装系別の温度と軟化の関係を図-2 に示す。

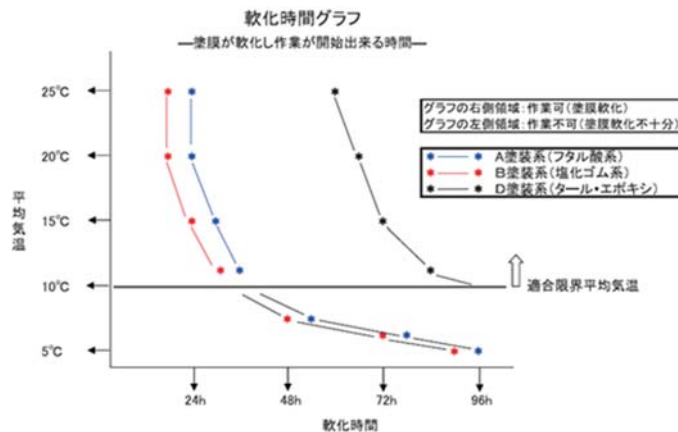


図-2 温度と軟化の関係

(4) 塗膜の軟化

インバイロワンは塗膜を徐々に軟化・可塑化し、スクレーパーなどの手工具で除去する。インバイロワンが浸透した塗膜は長時間湿潤状態を保持するので、塗膜除去時に粉じんがほとんど発生しない。また、塗膜がまとまって剥離するので有害物質を含んだ塗膜の回収も容易である。塗膜除去のイメージを図-3 に示す。

塗膜を軟化させ、手工具で除去するこの方法は騒音の発生も小さいレベルで、ブラスト工法が 79dB なのに対し、インバイロワン工法は 68dB 程度である。これにより近隣の状況に左右されることなく選択できる。塗膜除去方法別発生粉じん量と騒音レベルを表-3 に示す。

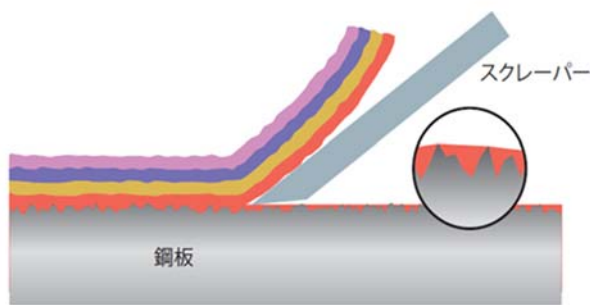


図-3 塗膜除去のイメージ図

表-3 塗膜除去方法別発生粉じん量と騒音レベル

| 素地調整別 | 使用材料 | 全粉じん濃度 幾何平均値 (g/m ³) | 騒音レベル (dB) | 塗膜粉じん中 鉛化合物量 (mg/m ³) |
|------------------|----------|--|---------------|---|
| 動力工具 | カップワイヤー | 28.0 | 87[67] | 1.4 |
| | ディスクペーパー | 100 | 89[67] | 4.0 |
| オープン ブラスト | ビーナスサンド | 638 | 116[79] | 2.9 |
| バキューム ブラスト | スチールグリッド | 35.4 | 104[79] | 0.52 |
| インバイロワン 塗膜除去工 | インバイロワン | 0.268 | 79[68] | 0.006 |

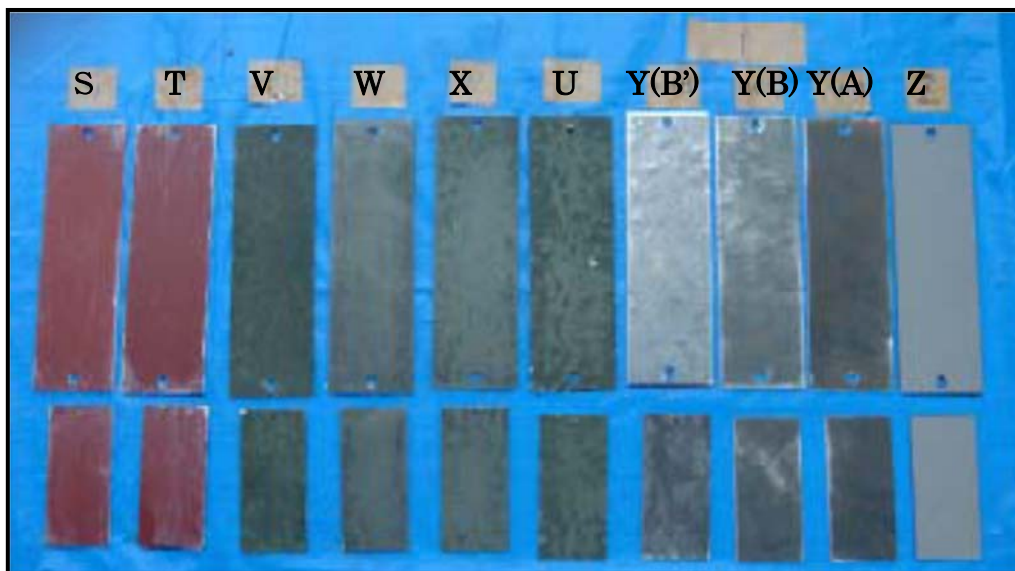
資料提供： NPO法人鋼構造物塗膜処理等研究会技術資料

(5) 安全性

インバイロワン自体は先にも述べた通り、皮膚刺激性が少なく溶剤臭もほとんどないので、作業者への影響が非常に少ない。また、BOD 法による生分解度試験では 28 日目で 94.6%以上が炭酸ガスと水に分解される。魚毒性の試験ではわずかに有るに該当するが、一か月ほどで大部分が分解するためその影響はほとんどない。湿潤状態で塗膜を回収するため塗膜に含まれる有害物質の拡散も最小限に抑えることが出来るので、環境に対する負荷は極めて小さい。

(6) 再塗装性

これまで剥離剤による塗膜除去後に再塗装を行い、塗膜に及ぼす影響がどのようなものになるのか具体的な試験データがなかった。インバイロワンは独立行政法人土木研究所と塗料会社 5 社の協力を得て、厳しい腐食環境とされる沖縄の暴露試験場にて再塗装性の試験を行っており、7 年目までの試験データを既に収集済みである。第 35 回鉄構塗装技術討論会で「環境にやさしい塗膜剥離工法による塗り替え塗装適正評価 ―沖縄暴露試験 7 年後の結果―」として既に発表されており、インバイロワンで A 塗装系、B 塗装系の塗膜を除去後にウエス拭きや、ペーパー処理といった 4 種類の素地調整を行った試験片を暴露し、機械的塗膜除去方法と比較した長期耐食性などの試験を行った。いずれも素地調整程度 2 種と同等以上の結果が得られており、再塗装時の防食性に問題無いことがわかっている。



| | |
|----------------------------|------------------------|
| Z : ブラスト処理 | V : はく離剤後ウエス拭き+カップワイヤー |
| Y : サンダー処理 (A、B、B(B-2)塗装系) | (U X W VはAおよびB塗装系) |
| W : はく離剤後ウエス拭き+ペーパー | T : はく離剤後ウエス拭き |
| U : はく離剤後無処理 | S : はく離剤後ウエス拭き+ペーパー |
| X : はく離剤後ウエス拭き | (T SはB(B-2)塗装系) |

写真-2 塗装前 (素地調整後も含む) 下地処理グレード

| 実施現場工法 試験種別 | 試験種別 | 試験種別 | 劣化曝露試験 2年経過後 | | | 劣化曝露試験 5年経過後 | | | 劣化曝露試験 7年経過後 | | | 劣化劣化部評価 経過年 評価 | |
|--|------|-------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | | 試験種全体写真 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 試験種全体写真 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 試験種全体写真 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | | |
| 黒皮鋼板 サンドブラ スト(sZ,S) | O社 | C-Z-1 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | | | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | D社 | D-Z-1 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | | | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | K社 | K-Z-1 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | | | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | N社 | N-Z-1 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | | | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | S社 | S-Z-1 | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| | | | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) | 劣化劣化部(拡大写真) |
| <small>【劣化劣化部の凡例】劣化劣化部(拡大写真) O:劣化劣化部(拡大写真) A:劣化劣化部(拡大写真) △:劣化劣化部(拡大写真) 【劣化劣化部の評価】劣化劣化部(拡大写真) 3mm以下劣化、3mm~10mm以下劣化、10mm~20mm以下劣化、20mm~30mm以下劣化、30mm以上劣化</small> | | | | | | | | | | | | | |

写真-3 2年、5年、7年暴露板データシート例(素地調整1種(Z)及び2種(YA))

4. インバイロワン工法の実績

インバイロワンで塗膜を除去するインバイロワン工法は、環境対応型剥離剤での塗膜除去工法の先駆けとして、これまで全国様々な鋼構造物で用いられてきた。施工実績は平成25年度でおよそ8万㎡、総施工実績は約43万㎡に達している。ここでは実際にインバイロワン工法の施工状況を紹介する。

(1) インバイロワン塗付作業

インバイロワンはハンドスプレーやエアレススプレーによる塗付が可能なので、鋼構造物の塗膜除去現場ではスプレーによる塗付が主流である。しかし、インバイロワンは塗膜に浸透するまで塗付した面に残っていなければならないので、ある程度の粘性を確保している。そのため写真-4のようにエアレススプレーによる塗付を行う場合はタールが吹ける程度のものを使用すると良い。また、構造物の端部や狭隙部に塗付する場合や、膜厚の厚い部分に先行して塗付する場合はハケやローラーなどを用いて塗付すると良い。



写真-4 エアレススプレーによる塗付

(2) 塗膜除去

インバイロワンで軟化した塗膜を除去する際には、スクレーパーなどの手工具で剥離する。添接部や狭隘部などの構造が複雑な箇所は小型スクレーパーや鉋かきを使用すると良い。



写真-5 塗膜除去状況

(3) オプション処理

インバイロワンによる塗膜除去では、さびや黒皮、一部のプライマーなどは除去できない。重防食塗装系には素地調整程度 2 種以上の素地が必要なため、これらが残存する場合はオプション処理による素地調整を行う。バキュームブラストや電動工具処理による物理的方法になるが、既に有害物質を含む塗膜のほとんどをインバイロワンで除去しており、最初から物理的方法で塗膜を除去するよりも塗膜ダストの飛散は少ない。

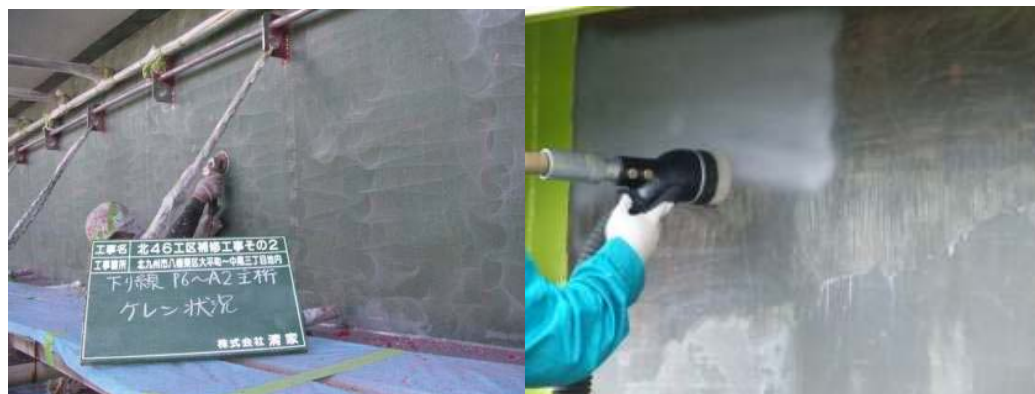


写真-6 オプション処理

5. その他の留意事項

インバイロワン工法は塗膜を軟化させる技術なので、旧塗膜を塗付した時に使用され、封入されていたトルエンやキシレンなどが塗膜軟化時に空気中に発散する場合がある。インバイロワンは安全性を考慮し、開発段階で塩素系溶剤（メチレンクロライド）と芳香族系溶剤（ベンゼン・トルエン・キシレンなど）を一切含まないように研究されてきたが、ある現場の作業環境内でトルエンやキシレンが検出されたという報告があった。調査の結果、塗膜の中に封入された塗装時の有機溶剤（トルエンやキシレンなど）が気化したものであることが判明した。このような場合は換気、その他作業環境に十分留意することが必要である。

6. PCB 含有塗膜の処理動向

(1) 概要

PCB（ポリ塩化ビフェニル）は 1880 年頃ドイツで発明され 1930 年頃からアメリカで量産された。電気絶縁性、不燃性、非水溶性・親油性などの特徴から、毒性の認識がないまま、様々な分野に使用された。その後、1960 年以降欧米で魚の大量死、日本ではカネミ油症事件（食用油製造時の加熱工程で、加熱パイの腐食により熱媒体として使われた PCB が食用油に混入したため起きた、史上最大の食品公害）など PCB の毒性が原因である事象が発生した。そのため、1970 年代に各国で規制が始まり、日本では化審法が制定され、製造・流通など全てが禁止された。しかし、1930 年以降 1970 年代に規制されるまで、様々な分野で使用されたものが、現在も広範囲に供用され、回収・処分がスピーディーに進まないことが PCB 問題の核心である。

(2) 行政の対応

環境省は 2001 年に PCB 特別措置法を制定し、日本環境安全事業株式会社を設立し処理を開始したが、微量 PCB 汚染物は別に処理する必要性から、2012 年 8 月 10 日付で「無害化処理に係る特例の対象となる一般廃棄物及び産業廃棄物」等の一部を改正する告示が公布した。これにより、含有量（5,000mg/kg）以下のものは、民間施設で実証実験により安全性を確認後、焼却処理が可能となった。また、同年 12 月「ポリ塩化ビフェニール廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法施行令の一部を改正する政令」が閣議決定し、事業者によるポリ塩化ビフェニール廃棄物の処理の期間が平成 39 年 3 月 31 日まで延長された。

(3) 微量 PCB を含有する防食塗膜の現状

1960 年後半から 1970 年前半に製造された一部の塩化ゴム塗料の可塑剤として PCB を使用したとされ、また、塩化ゴム塗料の製造設備が他の塗料製造に使用されたことから、塩化ゴム塗料以外の塗料による塗装膜も PCB に汚染されている可能性がある。更に一部の顔料は非意図的に PCB を含有するとされ、少なくとも、1960 年後半から 1970 年前半に塗り替え、または新規に塗装された防食塗装膜は PCB に汚染されている可能性がある。

塗膜除去工事計画にあたり、対象塗膜に PCB、鉛、クロムなどの含有を確認する必要性から、インバイロワン工法では、都度、発注者から分析依頼を受けているが、そのデータからも、PCB が意図的に混入されたと推定される塩化ゴム系塗膜、非意図的に混入してしまったと推定されるフタル酸系が確認されている。

(4) 微量 PCB を含有する防食塗膜の処理動向

PCB を微量含有する防食塗膜も処理の対象とし、インバイロワン工法で除去した塗膜廃棄物は「廃プラスチック類の塗膜くず」として分類される。また、分析方法については、従来は PCB の抽出方法が規定されていなかったが、この度、確立したとの情報があり、今後、分析方法が変更される（詳細はガイドラインを参照）。処理施設の稼働見通しについては、環境省のモデル事業として実証実験を終え、近々、認可を得た民間施設が商業運転を開始する予定である。

(5) 鉛など重金属の再資源化

防食塗装膜には PCB の他に防錆顔料として鉛、クロムなどを多く含有している。鉛・クロムなどは廃棄物として扱うと危険だが、高機能で価値ある重金属であり、回収、再資源化が求められる。すでに、PCB を熱分解処理する施設で回収実証実験の結果、資源として回収できることを確認している。

以上の通り、インバイロワン工法で安全に除去した塗膜くずを無害化した後、鉛などの重金属を資源として回収できる見通しがたった。

7. まとめ

インバイロワン工法は、有害物質を含有する塗膜の除去を安全かつ確実に行うことができ、周辺環境の保全と作業者の健康を維持することができる現場での環境対応型塗膜除去工法であり、鋼橋の長寿命化のための重防食塗装系の普及に有効である。

今後、この工法を素地調整前の塗膜除去工として普及を図ることで、代表的な 3K（きつい、きたない、危険）産業である塗装業の労働環境が大きく改善され、若年労働力確保にも大変有効だと考えている。