

環境対策、環境負荷の無害化処理、発生源処理

4.1.5 揮発性有機化合物の発生抑制

揮発性有機化合物（VOC）は、大気中のオゾンとの光化学反応で光化学オキシダントに変わります。このため2002年から排出基準が設定されています。本稿ではVOCの発生源、排出基準、および発生抑制対策（インプラント対策）を概説します。発生したVOCは下流で燃焼するなど無害化処理が必要で、インプラント対策に対して（エンドオブパイプ対策）と称しています。

日本は1950年代から1960年代にかけて、厳しい大気汚染を経験しました。主要な汚染物質は浮遊粒子状物質と硫酸化物で、主な汚染源は石炭や石油を燃焼する煤煙発生施設でした。このため大気汚染防止法では、煤塵発生施設と硫酸化物発生施設が排出規制の対象になり、揮発性有機化合物の発生施設は対象になりませんでした。その後、揮発性有機化合物が大気中で光化学オキシダントに変わることが判明し、2002年の大気汚染防止法の改正から規制対象になりました。

1. 排出規制対象の揮発性有機化合物

揮発性有機化合物（VOC：Volatile Organic Compound）は揮発性があり、大気中でガス状となる有機化合物の総称で、具体的な物質を特定しているわけではありません。しかし、メタンとフロン類の特定8物質だけは、光化学反応性がないか低いという理由で、政令によりVOC規制の対象から除外されています。VOCを多く含む製品は、塗料、印刷インキ、接着剤、洗浄剤です。工場などで実際に使用されている代表的な物質は、トルエン、キシレン、酢酸エチル、メタノール、ジクロロ

メタンなど約200種類です。表1は関連業界25団体の自主行動計画に記載されている代表的なVOC物質です。なお、環境省は別に主なVOC100種を公表しています。表2はVOC規制対象から除外されている8物質です。

2. VOCの発生源

VOCの主要な発生源は下記の6設備で、6番目のVOC貯蔵設備は石油系の燃料を貯蔵するタンクです。有機溶剤というよりも燃料の貯蔵設備ですが、タンクの上部には有機溶剤と同じ成分の揮発性炭化水素が充満しています。このため燃料の入荷時にこのガスを回収しないと、VOCが大気中に放散されてしまうのです。

- (1) 化学製品製造工程の乾燥設備
- (2) 塗装設備と塗装後の乾燥・焼付設備
- (3) 接着剤使用設備の使用後の乾燥・焼付設備
- (4) 印刷設備と印刷後の乾燥設備
- (5) 工業用洗浄設備と洗浄後の乾燥設備
- (6) 石油燃料の貯蔵設備と出荷設備

化学製品は乾燥炉で乾燥しますが、炉内で溶剤が蒸発するのでVOC成分を放散します。自動車や家庭電化製品の塗装設備では、有機溶剤に溶かした塗料を吹き付け塗装、または電着塗装しますが、その際に溶剤のVOC成分を放散します。塗装後は赤外線を使った焼付け乾燥が行われますが、この際にも溶剤が蒸発してVOC成分を放散します。接着剤も多くが有機溶剤で希釈しているので、接着工程で溶剤が蒸発し、VOC成分を放散しています。印刷設備では、印刷インクの溶剤が蒸発してVOC成分を放散させています。有機溶剤は洗

表 1. 25 団体の自主行動計画に記載されている VOC 物質

石油系炭化水素混合物（低沸点）	クロロエチレン
トルエン	n-プロピルアルコール
酢酸エチル	クメン
メチルエチルケトン	クロロエタン
メチルアルコール	エチレングリコールモノエチル
イソプロピルアルコール	エーテル
アセトン	テトラヒドロフラン
ジクロロメタン	メチルイソブチルケトン
キシレン	1,3-ブタジエン
n-ヘキサン	クレゾール
シクロヘキサン	酢酸ブチル
クロロメタン	テトラクロロエチレン
二硫化炭素	ブチルセロソルブ
1-クロロ-1,1-ジフルオロエタン	エチルアルコール
酢酸ビニル	フェノール
N,N-ジメチルホルムアミド	イソブタノール
トリクロロエチレン	n-メチル-2-ピロリドン
スチレン	エチレングリコールモノエチル
ベンゼン	エーテルアセテート
エチルベンゼン	n-ブチルアルコール
1,2-ジクロロエタン	1,3,5-トリメチルベンゼン
	その他

表 2. VOC の排出規制除外物質

①メタン
②クロロジフルオロメタン (HCFC-22)
③2-クロロ-1,1,1,2-テトラフルオロエタン (HCFC-124)
④1,1-ジクロロ-1-フルオロエタン (HCFC141b)
⑤1-クロロ-1,1-ジフルオロエタン (HCFC-142b)
⑥3,3-ジクロロ-1,1,1,2,2-ペンタフルオロプロパン (HCFC-225ca)
⑦1,3-ジクロロ-1,1,2,2,3-ペンタフルオロプロパン (HCFC-225cb)
⑧1,1,1,2,3,4,4,5,5,5-デカフルオロペンタン (HFC-43-10mee)

浄工程で広範に使われており、通常は部材や製品を洗浄槽に漬けて洗浄しますが、洗浄槽からは絶えず有機溶剤の VOC 成分が放散されています。石油燃料の貯蔵設備、たとえば製油所の貯蔵タンク、油槽所のタンク、ガソリンスタンドのタンクからも、燃料の出し入れにともなって VOC 成分が排出されています。

3. VOC の排出基準

VOC については、主要な発生源である 6 設備が排出規制の対象になっており、規模は「裾きり基準」と称して一定以上の処理能力を有する設備に限定されています。日本では法規制だけでなく、自主的な取組による費用対効果の高い柔軟な対策との組み合わせによって、排出削減を図ることとなっています。このため法規制が中心の諸外国に比べると、法規制は排出量が相当多いと思われる設備に絞られています。なお、「裾切り基準」は表 3 に示すように設備の種類と外形的な規模だけで決まり、VOC の実排出量や取扱量は関係ありません。自主的な取組では、この 6 種類以外の設備も対

表3. 外形裾切り基準と排出基準値

施設類型	外形裾切り基準	排出基準値	
化学品製造	VOCを溶剤として使う化学製品の製造にともなう乾燥設備	送風機の送風能力： 3,000m ³ /h以上 送風機が設置されていない場合は排風機の排風能力（他施設も同様）。	600ppmC
塗装	吹付塗装 (吹付限定)	排風機の能力： 100,000m ³ /h以上	自動車製造の吹付塗装 400ppmC(新設)、 700ppmC(既設)
	塗装用の乾燥施設 (吹付と電着塗装を除く)	送風機の送風能力： 10,000m ³ /h以上	木材または木製品 1000ppmC 前項以外：600ppmC
接着	印刷回路用銅張積層板、粘着テープまたは粘着シート、はく離紙または包装材料（合成樹脂を積層するものに限る。）の製造に使用する接着にともなう乾燥設備	送風機の送風能力： 5,000m ³ /h以上	1,400ppmC
	接着にともなう乾燥設備（前項に掲げるものと、木材または木製品の製造にともなうものを除く。）	送風機の送風能力： 15,000m ³ /h以上	1,400ppmC
印刷	印刷の乾燥設備（オフセット輪転印刷に限る。）	送風機の送風能力： 7,000m ³ /h以上	400ppmC
	印刷の用の乾燥設備（グラビア印刷に係るものに限る。）	送風機の送風能力： 27,000m ³ /h以上	700ppmC
洗浄	工業用の揮発性有機化合物による洗浄設備（揮発性有機化合物を蒸発させる乾燥設備を含む。）	洗浄施設でVOCが空気に接する面積が5m ² 以上	400ppmC
貯蔵	ガソリン、原油、ナフサその他の、37.8℃で蒸気圧が20 KPaを超える揮発性有機化合物の貯蔵タンク（密閉式と浮屋根式を除く）	容量1,000kL以上のもの	60,000ppmC

象になります。表3の排出基準値「ppmC」は、炭素数1の揮発性有機化合物に換算した容量濃度で、単一成分の場合には ppm に炭素数を乗じたものになります。例えば、トルエン（C₆H₅-CH₃）の

炭素数は 7 ですから、トルエン 1ppm は、7ppmC になります。

「ppmC」という単位が使われるのは VOC の種類が多いからで、混合ガスの場合に複数成分の混合濃度を一括して1つの濃度値として表示するのに便利だからです。たとえばトルエン（炭素数 7）100ppm、キシレン（炭素数 8）200ppm の混合ガスは、それぞれ成分濃度に炭素数を掛けて足し合わせます。したがって混合ガスの ppmC 濃度は、 $100 \times 7 + 200 \times 8$ で 2,300 ppmC になります。

4. VOC の発生抑制と無害化

VOC の環境への排出を少なくする方法には、大別して VOC の発生自体を抑制する工程内対策（インプラント対策）と、発生する VOC を下流で分解して無害化する工程外対策（エンドオブパイプ対策）があります。無害化する設備は除去効果が高く、一般的に 90～100%の除去率が得られます。しかし工程内対策に比べて大きな設備投資や運転経費が必要です。したがって工程内の発生抑制を優先し、抑制した発生量を対象に無害化設備を設置するのが費用対効果の優れた対策になります。

5. VOC の発生抑制 (低 VOC 剤への代替)

VOC を含む溶剤・塗料・接着剤・インクの使用

表4. 低VOC塗料の種類と特徴

種類	特徴
エマルジョン型塗料 (水分散性樹脂を使用)	水による希釈が可能。湿った素地への塗布が可能。臭気が少ない。塗装時に温湿度の調整が必要。
水溶性塗料 (水溶性樹脂を使用)	
粉体塗料：顔料、硬化剤、添加剤、樹脂などを粉末にした塗料	危険性がない。塗布効率が高い。厚膜塗装が可能。薄膜化は困難。高温焼付のエネルギーが必要。
紫外線／電子線硬化型塗料	短時間の乾燥が可能。厚膜硬化に制限あり。
多液型塗料	塗布量の低減が可能。乾燥が遅い。
プラスチック型塗料	塩化ビニル樹脂本来の優れた塗膜性能が得られる。素地との接着性が劣る。
ハイソリッド型塗料	ラインの大幅な変更を必要としない。樹脂を低分子量化するので塗膜性能が低下。

- ・水溶性塗料：水が塗料または希釈溶剤の中心となる塗料。
- ・無溶剤塗料：VOC 成分を含まない塗料、不飽和ポリエステル樹脂や 100%樹脂のエポキシ系、ウレタン系樹脂塗料および粉体塗料。
- ・ハイソリッド型塗料：塗料溶剤または希釈溶剤として VOC 成分を含むが、顔料など不揮発分の含有率が高い塗料。

量があまり多くない場合は、低 VOC か VOC 成分を含まない代替品への変更が、他の方法に比べて費用が少ない場合が多いです。代替品の具体例を以下に示します。

5.1 低VOC塗料への代替

低VOC塗料は、顔料などの不揮発成分以外に含まれる成分のうち、VOC成分が非常に少ないか含まない塗料です。低VOC塗料の種類と特徴を表4に示します。

5.2 低VOCインキへの代替

表5. 低VOCインキの種類

種類		適用可能な印刷機	備考
水性インキ	水性特殊グラビアインキ	グラビア印刷機	・水性インキ：水がインキ溶剤または希釈溶剤の中心となるインキ。 ・無溶剤インキ：インキ中のVOC成分が5%未満のインキ。
	水性フレキソ（ゴム凸版）インキ	フレキソ印刷機	
無溶剤インキ	紫外線（UV）硬化型インキ	スクリーン印刷機 オフセット印刷機	
	電子線（EB）硬化型インキ	印刷機全般	

低VOCインキは、顔料など不揮発分以外のVOC成分が非常に少ないか含まないインキです。低VOCインキの種類を表5に示します。

生量の変動が少なくなり均一化されて、連続的排出に近くなります。下流で連続的な無害化処理や回収が採用できると、費用対効果に優れた対策が可能になります。連続処理が困難でも排出源の統合は管理を容易にし、排出量の削減に寄与します。

5.3 低VOC洗浄剤への代替

洗浄剤で低VOC製品に該当するのは水系洗浄剤で、VOC成分を含まない洗浄剤です。水系洗浄剤の種類と特徴を表6に示します。

表6. 水系洗浄剤の種類と特徴

洗浄剤	特徴
水系洗浄剤 ・中性 ・アルカリ性	不燃性。毒性が少ない。ほとんどの樹脂類に影響を与えない。洗浄剤は比較的安価（水で希釈可能）。固形物汚れも除去可能。トリクロロエタンに比べて洗浄力が弱い。洗浄やリンス工程で細かい孔に浸透しない。金属に対する防錆対策が必要。洗浄と排水処理設備の更新が必要（BOD、COD、n-ヘキサン抽出分対応）。乾燥が遅く工程が長くなる（要スペース）。
温水・純水 （参考）	不燃性。毒性がない。ほとんどの樹脂を膨潤溶解しない。汚れ油の水分離性が良い。スプレーしても発泡しない。洗浄コストが安い洗浄力は低い。金属に対する防錆対策が必要。純水を使う場合は純水製造装置が必要（ランニングコストが必要）。
機能水 （参考）	常温で使用可能。危険な薬剤の使用が不要。有機物汚れに対する洗浄性が弱い。設備投資が必要。

5.4 低VOC接着剤への代替

低VOC接着剤は、VOC成分が非常に少ないか、または主成分として含まれる樹脂成分が自己崩壊して排出されない、または未反応の樹脂成分が排出されない接着剤です。低VOC接着剤の種類と特徴は表7に示します。

6. VOCの発生抑制

（工程・設備・管理の変更）

6.1 排出源の削減と統合

ガスの排出口を1カ所に統合すると、排ガス発

6.2 蓋の設置によるVOC蒸発量の低減

風呂蓋で水蒸気の蒸発を防ぐのと同じで、この

表7. 低VOC接着剤の種類と特徴

種類		特徴	備考
水性形 接着剤	酢酸ビニル樹脂系 エマルジョン形	幅広い用途に使用可能。耐久性に優れる。 耐熱性・耐水性・耐溶剤性が劣る。	<ul style="list-style-type: none"> 水性系接着剤：高分子微粒子の分散媒が水である接着剤。 ホットメルト型接着剤：熱可塑性樹脂や熱可塑性エラストマーが主成分で、VOC成分を含まない接着剤。 反応型接着剤：モノマー、オリゴマーを接着剤とし、重合や架橋により硬化させる。VOC成分を含まない。 感圧型接着剤：圧力を加え、流動させて貼り合わせる接着剤。
	EVA樹脂系 エマルジョン形	プラスチック系材料への接着性がよい。 耐久性と耐アルカリ性に優れる。 乾燥皮膜が粘着性（ブロッキング）。 接着強さが低い。	
	アクリル樹脂系 エマルジョン形	柔軟性と耐候性に優れる。各種材料への接着性が良い。分散安定性と耐水性に劣る。	
	合成ゴム系 ラテックス形	柔軟性と弾力性に優れる。極性物質との接着性が弱い。安定性に劣る。変色しやすく耐油と耐溶剤性に劣る。	
ホットメ ルト形 接着剤	EVA樹脂系 ホットメルト形	流動性に優れ接着速度が速い。接着性と柔軟性に優れる。耐熱性と耐寒性に劣る。	
	合成ゴム系 ホットメルト形	各種被着体の選択性がある。低温特性に優れる。耐候性に劣る。	
反応型 接着剤	エポキシ樹脂系	金属とコンクリートの接着性がよい。 耐久性、耐熱性、耐溶剤性がよい。せん断接着強さが高い。はく離接着強さが低い。	
	ポリウレタン樹脂系	極性を持った材質との接着性に優れる。 低温特性、耐衝撃性に優れる。加水分解による劣化を起こしやすい。耐候性に劣る。	
	変成シリコーン樹脂	各種材料への接着性が優れる。耐久性、耐衝撃性に優れる。せん断接着強さが低い。 価格が高い。	
感圧型 接着剤	アクリル樹脂系 水性感圧型接着剤	被着体の選択性が広い。各種性能のバランスがよい。アクリルの臭気が少ない。乾燥と塗工速度が遅い。塗工時にはじきを生じやすい。	

方法による改善事例は非常に多いのが実情です。これまでが VOC 規制を意識せず、放置されていた傾向があったからです。注意すべき点は引火性と可燃性への配慮です。VOC 濃度が高い場合は爆

発範囲に入る状況もあり得るので、安全面へ影響を考慮する必要があります。一方、蓋をすることができない場合は、樹脂製のボールを液面上に浮かせて蒸発する面積を減らすことができます。樹

脂製のフィルムで覆う方法もあります。

装ブースには乾式ブースと湿式ブースがあり、前者は塗装部位が比較的少ない被塗物、後者は塗装部位が多い被塗物の場合に使用します。塗装ブースの種類と需要分野を表8に示します。

6.3 施設構造と管理の改善

設備構造や運営管理の改善には、工程プロセスの密閉化と、プロセス設備の改善があります。密

表8. 塗装ブースの種類と適用分野

塗装ブース種類		ミスト除去率	適用分野
乾式	バップル板式	90%	(小規模) : 家具、制御盤、鋼材、製品の補修塗装、マーキング (大規模) : 大型建設機械、車輛、船体ブロック、大型鉄骨等
	フィルター式	65%	
湿式	水洗式 (スプレー式、うず流式)	85%	(小規模) 家具製品、自動車部品、樹脂製品 (大規模) 乗用車、トラック、特殊車両、鉄道車両
	高速洗浄式 (ポンプレス式、ベンチュリー式)	99%	
	オイル循環式	不明	

乾式：塗料ミストをフィルターに吸着させる。湿式：塗料ミストをスクラバーによる水洗で除去する。

閉化には換気や排気対策が必要で、下流に VOC 無害化処理装置を設置する例もあります。下記の具体例が多く報告されています。

6.3.1 塗装・接着ブースの設置

ブースは塗装によって発生する塗装ミストと溶剤の VOC 蒸気を強制的に排気する装置です。塗

6.3.2 乾燥炉にエアースीलを設置

エアースीलは風向を調整するとか、温度差を利用して乾燥炉の排ガスが乾燥炉外に出ないようにする装置です。装置出入口の開口部にエアーカーテンを設けるエアーカーテン付きトンネル炉が一般的です。トラックキャブ、フレーム、住宅建

表9. プレコート塗装の種類と特徴

塗装方式	特徴	適用分野
ロールコーター塗装	ピックアップロールが塗料を巻き上げ、接触しているドクターロールが塗布量をコントロール。転写された塗料がコイルに塗装する方式。	着色亜鉛鉄板（カラータタン）、プレコート鋼板（PCM鋼板）、家電製品
カーテンフローコーター塗装	塗料をカーテン状に落下させて、その下をコンベアに平板を乗せて流し、塗膜を作る方式。	冷蔵庫の前扉など、家電製品

材、農機具、スチール家具、建材パネル、車輛の足回り部品などの塗装後の乾燥に採用されています。

6.3.3 プレコート塗装への変更

プレコート塗装とは、金属板やプラスチック板を成形する前の段階で塗装することをいいます。プレコート塗装は塗装速度が速く、平滑な塗膜が得られます。焼付炉の容積が小さく高濃度でVOCを回収できるので、ポストコート塗装よりもVOCの排出量が少なくなります。プレコート塗装の種類と特徴を表9に示します。

6.3.4 フリーボード比の確保と洗浄剤の冷却

フリーボード比は洗浄槽の短い方の開口寸法に対する洗浄槽の上端までの高さの比です。洗浄は液体洗浄と蒸気洗浄がありますが、通常は洗浄槽の上部に冷却コイルを設置し、蒸発した洗浄剤を冷却凝縮させて循環使用します。フリーボード比が大きいくほど冷却コイルを多く設置できるので、凝縮できずに損失になる洗浄剤の発生量を少なくで

きます。蒸気洗浄では温度の低い被洗浄物に、加熱して蒸気にした洗剤を接触させ、被洗浄物の表面で凝縮させ洗浄します。このため、蒸発した洗浄剤の冷却による凝縮回収が特に重要で、十分な冷却コイルの設置スペースが必要です。

6.3.5 ベーパーリターン装置の設置

ベーパーリターン装置（蒸気返還装置）は、ガソリンなどの石油製品を他の施設などに移し替える際に、受入側のタンクに残存しているVOC成分を含む蒸発ガスを搬入側に戻す装置です。ベーパーリターンの種類と方法を表10に示します。

(おわり)

- 参考：①VOC排出抑制の手引き第3版(2010年)：
経産省・産業環境管理協会
②VOC排出抑制の手引き—参考資料—
(第2版)：産業環境管理協会
③国立環境研究所資料

表10. ベーパーリターンの種類と方法

ベーパーリターンの種類	方法
貯蔵施設のベーパーリターン	貯蔵タンクの上部に滞留しているVOC成分混入ガスを、貯蔵タンクの液層に戻す。回収配管と送風機および安全装置が必要。
油槽所のベーパーリターン	油槽所の出荷設備から配送タンクローリーへの積み出し時に、ローリーから排出されるVOC成分混入ガスを、貯蔵タンクの気相部分に戻す。
給油所のベーパーリターン	タンクローリーから給油所の地下タンクへの搬入にともなって押し出されるVOC成分混入ガスをローリーに戻す。
輸送車両のベーパーリターン	給油所が自動車などの輸送車両に給油する際に、輸送車両の燃料タンクから押し出されるVOC成分混入ガスを地下タンクに戻す。給油ホースを二重管にして、内管で燃料を供給すると同時に外管でガスを回収する。セルフスタンドの一部で採用。車輛に活性炭吸着装置を載せ、給油時に押し出されるVOC成分混入ガスを吸着させる。アメリカでは一部で義務化。日本では普及していない。