

# 柱上変圧器の塗装ライン

Coating line for pole-mounted transformers

井原 丈夫\*

Masuo Ihara

奥村 顕治\*

Kenji Okumura

加藤 雅彦\*

Masahiko Kato

## 1 まえがき

柱上変圧器ケースの塗装設備を更新するに当り、

- (1) 作業の合理化・省人化
- (2) 塗膜性能の向上
- (3) 公害防止、安全対策

を基本方針として、塗料、塗装方法、設備及びメンテナンスなどについて、テストピース、実器ケースによる各種テストを行い、多角的に検討した。

作業の合理化においては、被塗物の着脱のみを人手によるものとし、トローリーコンベアによる自動化ラインを設け、下塗りは電着塗装、上塗りは複雑で多種類のケースに応用できるよう工夫した自動塗装機（レシプロケータ）を採用した。

次に、品質向上策としては、前述の下塗電着塗装には耐食性に抜群の効果を有する水溶性電着厚膜塗料を用い、すべての面に均一な塗布を可能にし、上塗塗装には耐候性に優れたメラミン系塗料を採用している。この組合せによれば、従来の塗装に比べ、各種テストで3倍以上の性能が確認されている。

また、公害防止、安全対策の面では、従来の塗装作業では対応の難しい点を根本的に検討し、下塗りに水溶性塗料を採用、かつ効率的な全没方式により建浴塗料を最小限にとどめ、更に循環再利用により廃棄物を少なくし、飛躍的な向上を図っている。

以上の検討結果より、現時点において最も信頼度が高く、また将来を見通した新規塗装システムとして、下塗りにカチオン電着システム、上塗りに自動塗装機（レシ

プロケータ）を用いたエアスプレー、エア静電併用システムを導入することにした。

なお、本設備は昭和59年11月中旬に全ライン据付後、調整及び試行期間を経て、昭和60年2月各電力会社殿の実ライン審査、承認を得て、現在順調に稼動している。

以下、その概要を紹介する。

## 2 下塗塗装(カチオン電着塗装)

### 2.1 カチオン電着塗装の歴史

電着塗装は、主に自動車用下塗塗装として発展してきた。電着塗装の登場により、耐食性など塗膜性能が大幅に改善されるとともに、塗装ラインの自動化が進み、生産効率が飛躍的に向上した。

電着塗装の源は、20世紀初めに基礎理論としては発表されていたが、実用的塗装方法の研究は、1950年代後半より水性塗料の開発とともに進められた。1963年にフォード社が自動車ボデーの下塗塗装として電着塗装を採用したのを契機に、世界各国において急速に実用化されていった。1967年頃には、米国の一部を除いて、日本、ヨーロッパの自動車産業は、100%近くが電着塗装を採用した。しかし、2つの問題が残されていた。1つは、公害防止上必要となる電着後の水洗汚水の処理であり、他の1つは、塗料の損失が大きいことであった。

1969年には、電着塗装システムにUF(Ultra Filtration: 限外濾過)技術が応用され、上記の問題は一挙に解決された。これにより電着塗装法は、公害防止、経済性の両面でも優れた塗装方法となった。

ところが、自動車業界では1970年頃より錆に関するクレームと、車体防錆に対する要求が急激に強まり、より優れた塗装方法が必要とされ、種々のアニオン電着塗装技術の開発が行われた。その結果、マレイン化油系を中心とする電着塗料から、ポリブタジエン系、ポリエステル系などの合成樹脂系電着塗料へと移行していったが、なお十分満足できる段階には達していなかった。

このような背景から、高度の防錆力をもつ電着塗料の出現が待ち望まれていた時、1971年に米国のPPG社がカチオン電着塗装の工業化に初めて成功した。当初、高耐食性を要求される洗濯機、ドライヤーなどの電気製品の

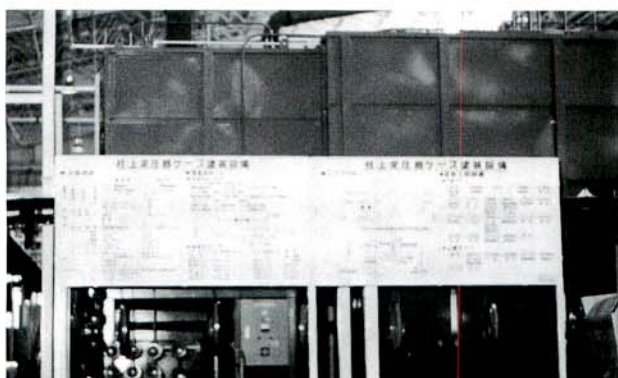


図1 / 塗装設備  
Fig. 1 / Coating equipment

下塗塗装として採用されていたが、つきまわり性が悪い、高温焼付を必要とするなどの問題があり、適用範囲が限定されていた。しかし、その後の品質改良により、つきまわり性も向上し、実用化が急速に進み、1976年に世界に先駆け米国において自動車部品塗装ラインが稼動し、1977年には自動車ボデー用下塗塗装として本格的に普及していった。一方、ヨーロッパでは1977年頃から本格的な検討が開始された。

我が国においては、1975年に日本ペイント(株)によりカチオン電着が実用化され、自動車ボデーの下塗塗装に適用されたのが最初であった。その後、数多くの分野に採用され、その技術水準、普及度ともに世界のトップレベルにまで進み、今日に至っている。

前述のように、アニオン電着からカチオン電着へ移行したのは、その耐食性、耐薬品性が非常に優れているためであるが、カチオン電着がアニオン電着以上に高耐食性を有する理由は、化成処理皮膜を溶出させないこと、樹脂が塩基性であること、強い塗膜が得られることなどのためである。

## 2.2 カチオン電着塗料

当社において採用したカチオン電着塗料の主要展色剤は、エポキシ樹脂を骨格としたポリアミノ樹脂で、有機酸で中和することにより、水溶化または水分散化され、エマルジョン状態となり、正(+)に荷電している。アニオン電着では、塗料が負(-)に荷電し、被塗物が陽極であるのに対して、カチオン電着は、被塗物が陰極である。カチオン電着塗料の電着特性と塗膜性能を表1に示す。



図2 / アニオン電着塗料とカチオン電着塗料の比較  
Fig. 2 Comparison between anionic electrodeposition paint and cationic electrodeposition paint

### (1) 耐食性

カチオン電着塗料の最大の特長は、耐食性が非常に優れていることである。特に、複雑な構造物の陰影部などの化成処理が不完全で、かつ電着塗膜が薄い部分においても耐食性が向上する。

### (2) つきまわり性 (スローイングパワー)

塗膜の高耐食性能を最大限に発揮させるには、つきまわり性が優れていることが要求される。初期のカチオン電着塗料は、つきまわり性が十分でなかったが、樹脂に導入するアミノ基の種類、樹脂骨格、中和酸の種類などの改良により、つきまわり性は飛躍的に向上した。つきまわり性の向上は、塗装もれを少なくすることになり、より一層の高耐食性が得られるようになった。

表1 / カチオン電着塗料の電着特性と塗膜性能

Tab.1 / Electrodeposition characteristic and coating performance of cationic electrodeposition paint

項目	塗料	カチオン電着塗料	アニオン電着塗料	備考
電着特性	固型分	19~21%	12~14%	
	pH	6.2~6.8	8.6~9.0	
	比電導度	1000~1600 $\mu$ S/cm	1800~2000 $\mu$ S/cm	
	塗装電圧	250~350V	250V	
	通電時間	3分	3分	
	クーロン効率	35mg/C	23mg/C	
単独塗膜性能	つきまわり性	23cm	22cm	パイプ法
	焼付条件	175 $^{\circ}$ C $\times$ 20分	170 $^{\circ}$ C $\times$ 30分	被塗物温度
	標準膜厚	35 $\mu$	20 $\mu$	
	鉛筆硬度	2H	3H	
	ゴバン目付着性	100/100	100/100	1mm $\times$ クロスカット
	耐衝撃性	50cm合格	50cm合格	1/2 $\phi$ $\times$ 500g
耐食性	耐水性	800時間以上	500時間以上	40 $^{\circ}$ C温水試験
	耐アルカリ性	500時間以上	24時間以上	0.1NのNaOH水溶液
	耐酸性	72時間以上	48時間以上	0.2NのH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 水溶液
	耐チップング性	4.5以上	4以上	5点満点
	耐糸錆性	0.1mmF	2.5mmMD	40 $^{\circ}$ C、90%RH $\times$ 240時間
	耐食性	脱脂のみ	10 $\mu$ 20 $\mu$ 35 $\mu$	300時間以上 400時間以上 500時間以上
	リン酸 亜鉛 処理	10 $\mu$ 20 $\mu$ 35 $\mu$	900時間以上 1000時間以上 1500時間以上	200時間以上 400時間以上 —

### (3) クーロン効率

アニオン電着塗料と比較して分子量が大きく、1クーロン当たりの塗着量を表わすクーロン効率が高い。したがって、電気量のロスが少なくなり経済的である。

### (4) 耐薬品性

従来の塗料と比較して、耐水性、耐酸性、耐アルカリ性、耐溶剤性は非常に優れている。特に、耐アルカリ性は優れており、高度の耐アルカリ性が要求される用途に最適である。

### (5) 焼付条件

カチオン電着塗料は樹脂の構造上、高温焼付が必要であるが、焼付時間は従来の塗料に比べて短縮される。

### (6) 塗料液の腐食性

カチオン電着塗料の開発当初は、塗料のpHが約4と非常に低く、電着塗装設備の腐食が大きな問題となっていたが、現在ではpH6~7という弱酸性の電着塗料が開発され、ステンレスなどの耐酸材料を用いる必要がなくなり、設備寿命も延び、経済的となった。

## 2.3 カチオン電着塗装の原理

以下にカチオン電着塗装の造膜機構について説明する。

(1) カチオン電着塗料中に、被塗物と極板を浸漬し、被塗物を陰極(-)、極板を陽極(+)として直流電圧をかけると、塗料中の正の電荷をもつポリアミノ樹脂は負の電荷をもつ被塗物に向かって移動する。この現象を電気泳動現象という。

(2) 前項の反応と並行して、陰極の被塗物表面では、水の電気分解が起こり、H<sub>2</sub>ガスとOH<sup>-</sup>イオンを放出し、

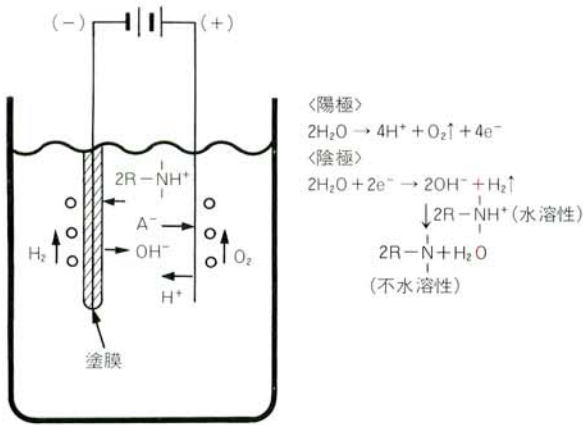


図3 / カチオン電着の各極における反応

Fig. 3 / Reaction in both electrodes of cationic electrodeposition

その表面上のpHが上昇し、アルカリ性となる。また、陽極の極板では $\text{O}_2$ ガスと $\text{H}^+$ イオンを放出し、酸性となる。

(3) 被塗物表面で放出された $\text{OH}^-$ イオンは、カチオン電着塗料を水溶化している酸を中和し、被塗物表面はアルカリ性となり、塗料の析出が始まる。

(4) 時間の経過とともに、電着塗膜中の水分が、塗膜外に押し出される。この現象を電気浸透現象という。この現象により、不揮発分90%以上で、かつ水に不溶の塗膜が凝固塗着する。

(5) 時間の経過とともに、電着された塗膜の厚さは増加するが、この膜厚に比例して塗膜の電気抵抗も増加し、

電流は減少する。その結果、電流は膜厚の薄い所へ集中し、膜厚は均一化していく。したがって、複雑な構造物の陰影部の塗装が可能になる。これが、電着塗装はつきまわり性が優れているという所以である。

(6) 塗膜を硬化させる方法としては、ブロック化したイソシアネート化合物を用い、加熱によりイソシアネートのブロックを解き、反応・硬化させるものである。

## 2.4 下塗塗装工程

下塗塗装の工程を図5に示す。下塗塗装工程は、前処理工程、電着工程に大別され、被塗物は1本の自動トローリーコンベアにより搬送される。人手を要する範囲は、前処理工程、電着工程における薬液と塗料の管理、処理及び被塗物の着脱である。

### 2.4.1 前処理工程

前処理工程は、電着塗装の仕上り、耐食性向上にとって極めて重要である。

#### (1) 予備脱脂、本脱脂

本工程は、苛性ソーダなどを含むアルカリ脱脂液を加熱しておき、シャワースプレーにより内外面に吹付ける。金属面に付着した油脂分は、水に溶解分散し、油分離槽で分離され除去される。

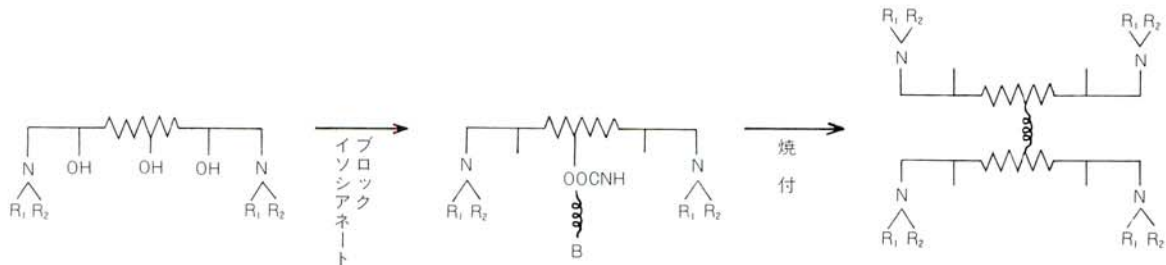


図4 / カチオン電着樹脂の硬化機構

Fig. 4 / Curing mechanism of cationic electrodeposition resin

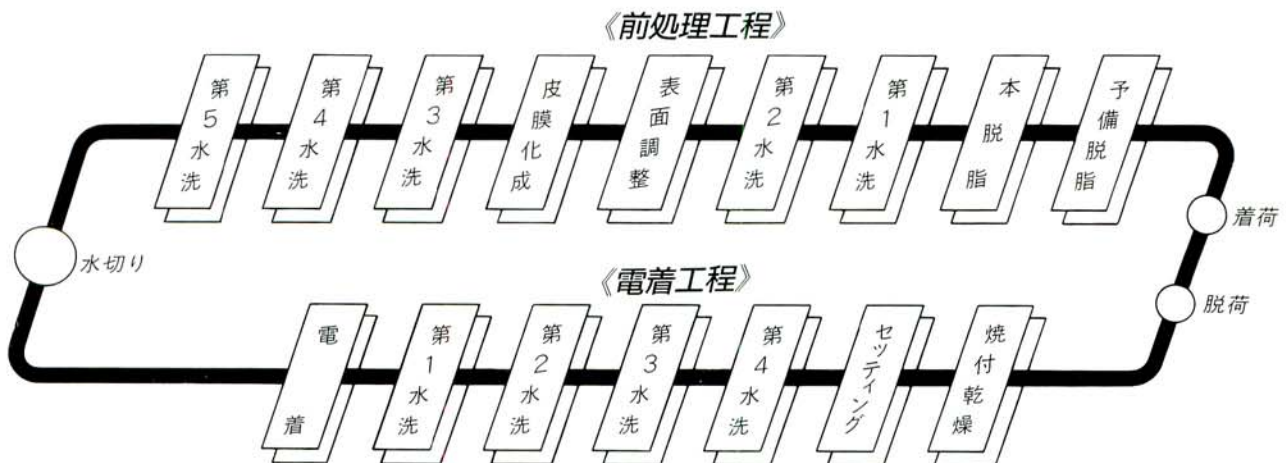


図5 / 下塗塗装工程図

Fig. 5 / Under-coating flow chart

**(2) 第1水洗、第2水洗**

前工程の脱脂液をシャワースプレーにより洗い流す。塗装に悪影響を及ぼすアルカリ塩を完全に除去するため、2段階の水洗工程を設けている。

**(3) 表面調整**

化成皮膜の結晶を緻密化し、皮膜化成処理の効果を上げる。本工程もシャワースプレー方式である。

**(4) 皮膜化成**

被塗物（鉄）を皮膜化成液（リン酸亜鉛処理液）に浸すと、次の反応が起こる。



リン酸 可溶性リン酸鉄



第1リン酸亜鉛 第2リン酸亜鉛 リン酸



第2リン酸亜鉛 第3リン酸亜鉛 リン酸

被塗物の表面では(1)式の反応により、リン酸が消費される。消費されたリン酸を補給するために、(2)式及び(3)式の反応が右の方向に進み、水に不溶の第2リン酸亜鉛と第3リン酸亜鉛が被塗物表面上に析出する。これがリン酸亜鉛皮膜であり、被塗物表面の防錆及び塗料の密着を良くするための処理である。

なお、皮膜化成処理に伴って、重金属リン酸塩のスラッジが生成する。このスラッジを処理液中から除去する方法として、フィルタによる汙過分離（自動装置）や、分離槽による沈降分離を行っている。

**(5) 第3水洗、第4水洗、第5水洗**

前工程の皮膜化成液を洗い流す工程で、第3水洗、第4水洗はシャワースプレー方式であり、第5水洗は浸漬方式である。

**2.4.2 電着塗装工程**

当社では、自動化、省力化、量産化の面で優れている



図6 / 電着槽

Fig. 6 / Electrodeposition bath

スリッパードイップ方式を採用している。本方式では、図7のようにトロリーコンベアで搬送された被塗物を、舟形の電着槽に順次浸漬することにより、自動的に電着される。

電着終了後、被塗物に物理的に付着した塗料を、水洗工程にて洗い流し、セッティングを経て、焼付乾燥にて電着工程を終了する。なお、第1、第2、第4水洗はシャワースプレー方式であり、第3水洗は浸漬方式である。

均一な塗膜を得るために、適切な前処理を行うとともに、電着塗料の加熱残分（顔料と樹脂の濃度）、灰分（塗料の顔料濃度）、液温、pH、電導度などを管理値範囲内に維持しなければならない。

なお、カチオン電着塗料は弱酸性のため、電着設備の腐食の問題はないが、電着時の金属の溶出を防止するため、電着槽の内面は塩ビライニングにより、絶縁を施し

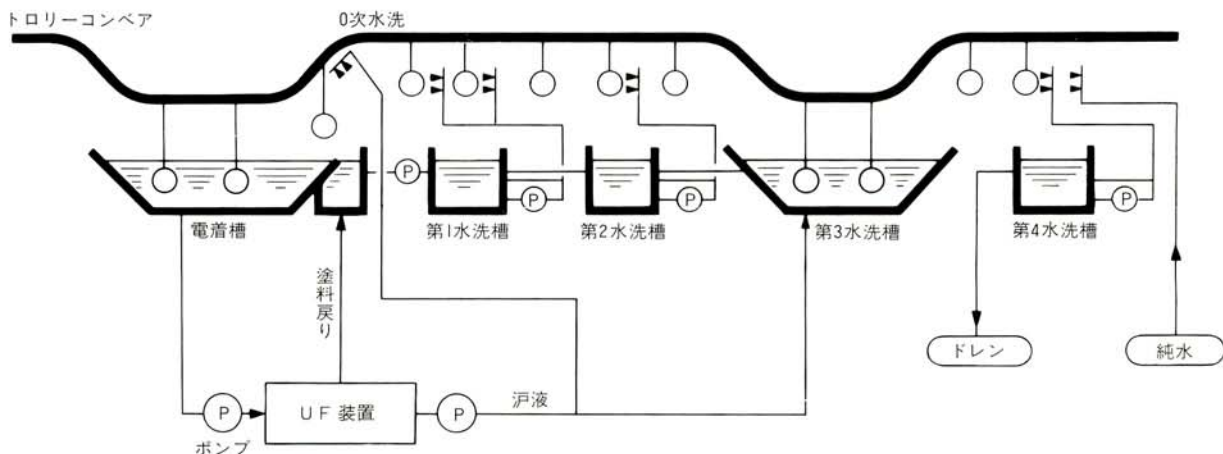


図7 / 電着塗装における塗料、汙液の流れ

Fig. 7 / Paint and filtrate flow in electrodeposition

ている。このように電着槽を絶縁するため、被塗物との対極として別に陽極が必要となる。陽極は隔膜を併用して隔膜室を構成し、次に述べる塗料組成を管理する。

### 2.4.3 電着槽塗料組成の管理

電着塗装すると、塗膜形成成分は被塗物とともに電着槽外に取り出されるが、残っている中和酸により、電着槽内の加熱残分が減少し、pHの低下（膜厚を減少させ仕上りを悪くする）を来すため、酸の濃度を調整する必要がある。当社では隔膜法を用いて、電着により電着槽外に取り出された塗膜形成成分に見合う中和酸が、隔膜を通して槽外に除去されることにより、酸の濃度は常に一定に維持される。その結果、連続的に電着を行ってもpHは管理値内に維持され、常に一定の品質が得られる。

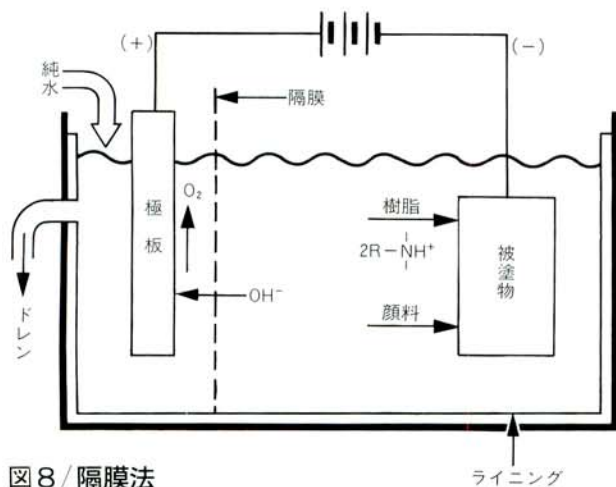


図8 / 隔膜法  
Fig. 8 / Diaphragm method

### 2.4.4 UFクローズドシステム

UF装置は、図9に示すように電着塗料に圧力をかけ、塗料中の高分子物質を半透膜によって阻止し、水、溶剤、雑イオン、有機低分子物質を、半透膜の膜面に無数に存在する微細な孔を通して、透過させ、汙過するものである。

電着槽内不揮発成分塗料の濃度は、約20%であるのに

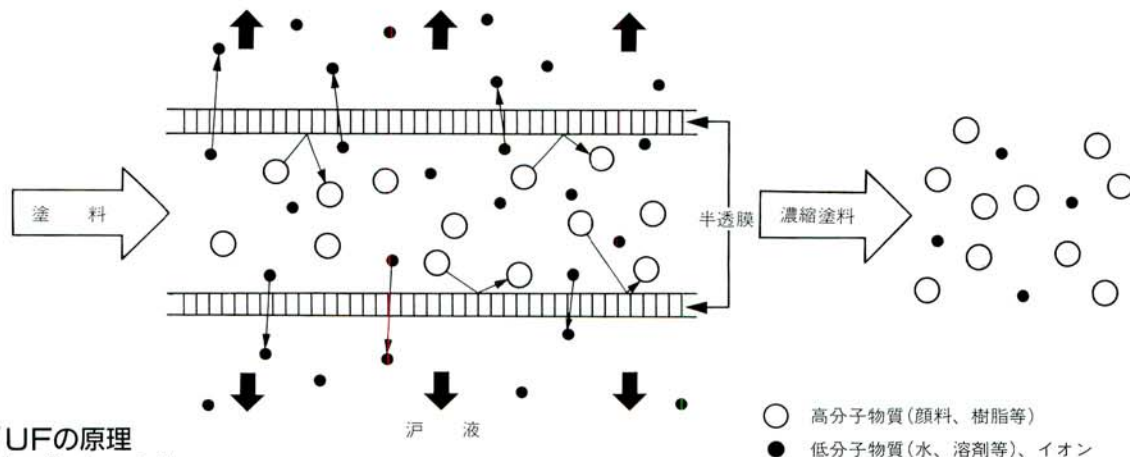


図9 / UFの原理  
Fig. 9 / Ultra filtration principle

対して、UF汙液の濃度は0.5%前後である。このUF汙液を第3水洗槽に送り、被塗物を水洗しながら順次オーバーフローさせ、第2水洗槽、第1水洗槽、電着槽へ戻すと、被塗物に付着して持ち出された槽内塗料の濃度は、UF汙液で順次稀釈され、被塗物とともに持ち出される塗料の量は、極めてわずかとなる。このようなシステムをUFクローズドシステムという。ただし、第4水洗は、このシステム内に含まれず、一定量の純水が供給され、供給された量だけオーバーフローし排出される（図7参照）。

UFクローズドシステムが導入される以前は、被塗物に付着して持ち出された塗料は、水洗後の排水により系外に捨てられていた。したがって、従来70~80%と推定されていた塗着効率は、このシステムの導入により95%にアップした。その結果、塗料の使用量が低減され、排水中の塗料量の減少により、排水処理負荷が軽減するなど経済的になった。

## 2.5 電着塗装の特徴

### 2.5.1 電着塗装の長所

(1) カチオン電着はアニオン電着に比べ、化成処理皮膜の溶出が100分の1以下と極めて少ないため、化成処理の効果を十分に発揮させることができ、耐食性が向上する。

(2) 電着塗料は、水性で不燃性のため、爆発、火災の危険性がなく、また、有機溶剤中毒などの問題も少なく塗装作業環境が改善される。

(3) 電圧、コンベアスピード（電着時間）などの調節により、膜厚を一定にコントロールできる。したがって、品質の安定した塗装ができる。

(4) 前述のように、塗膜表面に物理的に付着した塗料は、水洗工程で洗い流され、電着によって得られた塗膜は、含水率が低く、流動性がないため、焼付乾燥時に、流れ、たれ、たまり、溶け落ち、泡跡などの欠陥が生じにくい。また、焼付乾燥工程前のセッティング時間が著

しく短縮できる。したがって、品質向上及び生産効率の向上につながる。

(5) 従来の塗装では塗装不足だった部分、例えばエッジ部や隅部、溶接の合わせ目のような所にまで、塗料が行きわたり、複雑な形状をした構造物に対しても、均一な膜厚が得られる。

### 2.5.2 電着塗装の短所

- (1) 初期の設備費が、他の塗装法と比較して高くなる。
- (2) 一度電着塗装をすると、その塗料自身により絶縁されるため、再度電着塗装することはできない。
- (3) 電着設備の構造上、色彩変更が難しい。
- (4) ターンオーバー（一定期間で塗料が入れ替わること）を維持する必要があるため、少量生産には適さない。

## 3 上塗塗装

上塗塗装工程は、塗装工程、セッティング工程及び焼付乾燥工程より構成され、塗装工程は自動塗装機（レシプロケータ）及び底塗り専用塗装機を使用し、エアスプレー方式及びエア静電方式により塗装する。

### 3.1 レシプロケータ

レシプロケータによる塗装方法を以下に説明する。

- (1) 図10のように塗装ブース直前に設置された光電スイッチにより、被塗物の先頭に吊り下げられたフラッグの種類を検出する。
- (2) そのフラッグにより、被塗物の形状（カバー、丸型ケース、角型ケース及び放熱リブの有無）を識別し、使用するレシプロケータ、各スプレーガンの入切、静電ガンへの電圧供給の有無、吐出量の設定を行う。
- (3) 被塗物の高さ、横幅及び奥行きを検出して上下方向のスプレー幅の設定とレシプロケータの前後進制御を行う。
- (4) 被塗物の塗装は次の通り行われる。

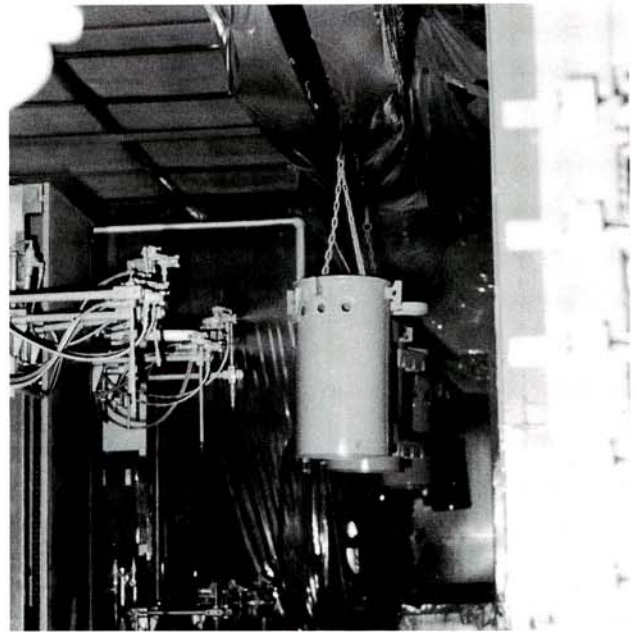


図11/レシプロケータ

Fig. 11/Reciprocator

〈丸型ケース〉

常時、自転運動を伴いながら、レシプロケータNo.1により自動塗装される。

〈角型ケース及びカバー〉

図10のように、90°及び180°の回転運動を伴いながら、レシプロケータNo.1及びレシプロケータNo.2により四面すべて自動塗装される。

### 3.2 静電塗装

静電塗装は、エア霧化方式、エアレス方式などがあり、高い塗着効率とつきまわり性を有するという特長から、今日では種々の分野に広く普及している。

当社の静電塗装機は、エア霧化方式であり、圧縮エアによりノズルから塗料を噴出し、霧化する。ノズルは、負極性の高電圧が印加されており、霧化された塗料粒子は負の電荷を持つ。したがって、塗料粒子は、正の電荷を持つ被塗物にクーロン力とエアの圧力によって到達し、塗膜が形成される。

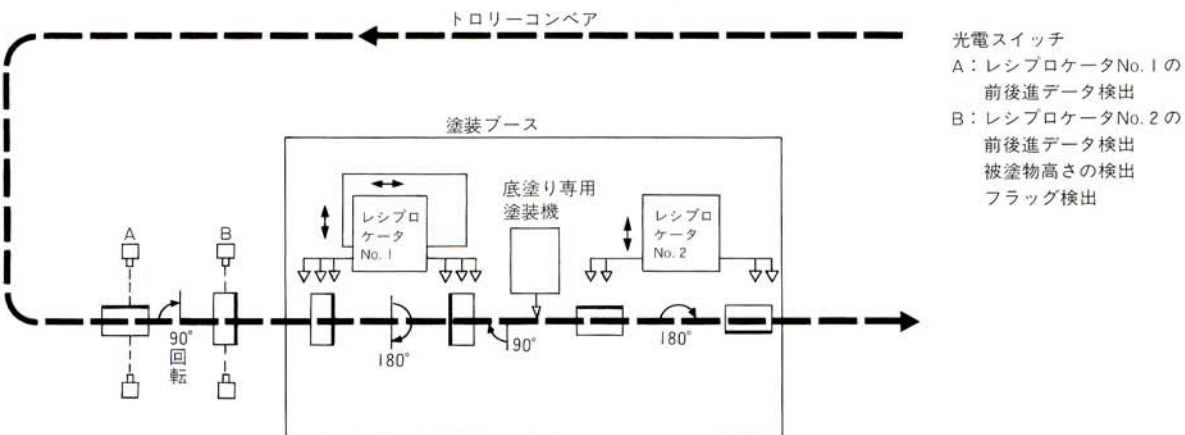


図10/自動塗装システム

Fig. 10/Automatic coating system

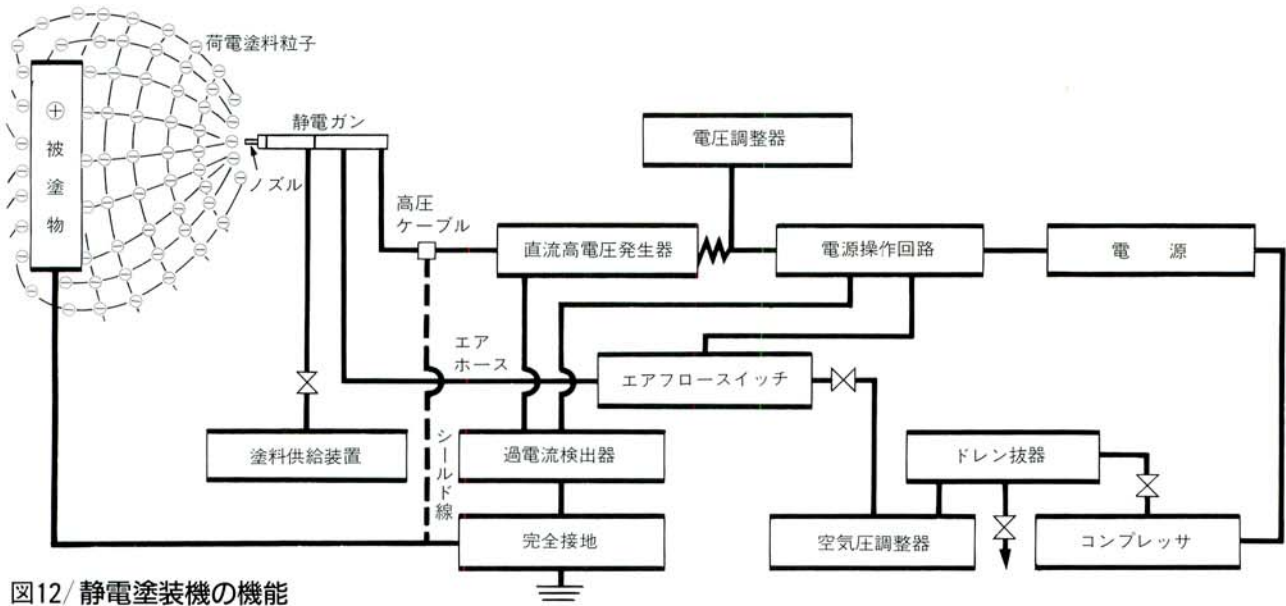


図12/ 静電塗装機の機能  
Fig. 12/Function of electrostatic coating machine

## 4あとかき

今回、変圧器業界としては初めての採用であるカチオン電着の導入に当っては、柱上変圧器ケースの種類が多く、しかもその形状が極めて複雑であるため、生産技術及び設備の両面において、予想以上の検討時間を費やした。しかし、自動化による合理化、品質の向上、公害防止、安全上の適切な対応など当初の期待効果を得ることができたと確信する。

今後は、より一層の生産性の向上、品質の安定を図り、高効率生産体制の確立に努力する所存である。

## 参考文献

- (1) 美川信、脚光をあびるカチオン型電着塗装について、実務表面技術、P.23～28、1978年4月号
- (2) 宮崎竜平、自動車におけるカチオン型電着塗装の適用実例、工業材料、第27巻、第4号、P.85～89、1979年4月