

ヒートポンプ式真空蒸発濃縮装置の 金属表面処理分野への適用紹介

Application of the Vacuum Evaporator with a Heat Pump to Surface Treatment of Metals



SPE サービス部
吉川 信
Makoto Yoshikawa
技術開発本部 研究開発部
小林 俊幸
Toshiyuki Kobayashi
佐伯 一丸
Kazumaru Saeki

The vacuum evaporator is a wastewater treatment system to separate distilled water from waste containing pollutants concentrated by evaporation and condensation for reduction of disposal volume and costs. Evaporation is enhanced by the use of vacuum and heat pump technologies. The advantage of the system includes high treating performance, compact and inexpensive construction in addition to low running cost. This paper introduces the application to the field of surface treatment of metals, laying emphasis on quick recovery of the investment.

まえがき

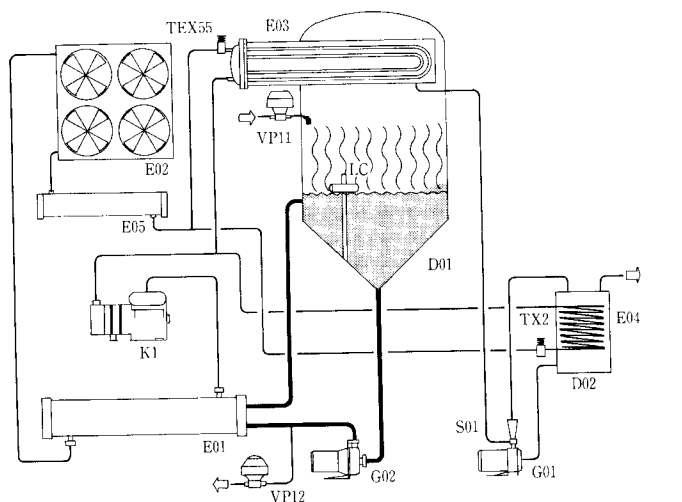
産業廃棄物は生産活動に伴って発生するものであり、環境保全の観点からその処理は、近年ますます困難となってきた。またロンドン条約の改正により、1996年年初から廃棄物の海洋投棄が原則的に禁止になり、産業廃棄物を取りまく環境は厳しさを増してきた。このような状況の中で、ここに紹介するヒートポンプ式真空蒸発濃縮装置「スーパーエボラトール」は、イタリアのLED ITALIA社が1989年に開発したもので、主に産業廃棄物等の廃液を低温で蒸発濃縮し、減容化する装置である。ヨーロッパでは写真分野、金属表面処理分野、機械加工分野を中心に200台以上の納入実績がある。

この装置で完全に廃液処理をすることは出来ないが、廃液等を濃縮/減容化することができ、処分費を削減することが出来る。本装置の優れた点はその機能とともに、コンパクトで低ランニングコストで運転でき、その上低コストで設備を設置出来るということである。当社は、本装置の優れた点を国内に適用すべく導入した。本稿では装置の概要と金属表面処理分野への適用の実績例を紹介する。

1. 装置概要

1.1 原理

本装置のフロー、写真をそれぞれ第1図、写真1に示す。機器の構成は、廃液の蒸発濃縮を行う蒸発缶、蒸発水を貯留する蒸発水タンク、廃液循環ポンプ、水循環ポンプ、圧



- | | | | |
|-----|-------------------------|-------|-----------------|
| D01 | Evaporation chamber | E04 | Cooler |
| D02 | Distillate storage tank | E05 | Heat-exchanger |
| G01 | Water circulation pump | S01 | Ejector |
| G02 | Waste circulation pump | TEX55 | Expansion valve |
| K1 | Compressor | TX2 | Expansion valve |
| E01 | Heat-exchanger | LC | Level control |
| E02 | Air cooler | VP11 | Feed valve |
| E03 | Condenser | VP12 | Discharge valve |

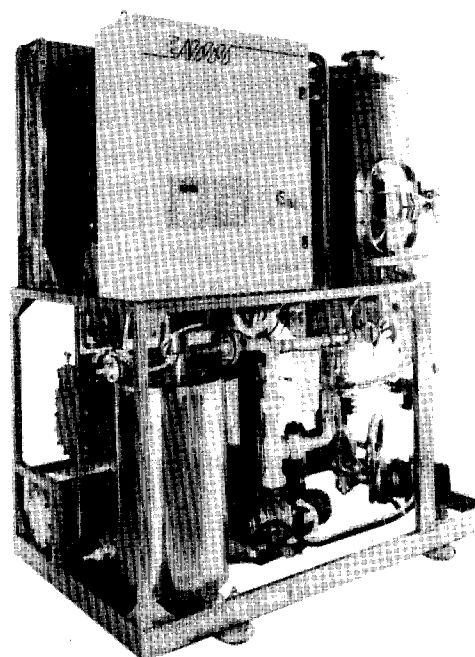


写真1 真空蒸発濃縮装置 (4000型)

Photo. 1 The vacuum evaporator (WTS E 4000)

第1図 真空蒸発濃縮装置のフロー (4000型)

Fig. 1 Process flow of the vacuum evaporator (WTS E 4000).

縮機、加熱器、エアクーラー、凝縮器、膨張弁及び自動弁から成っている。これらの機器が、スキッドマウントされ、コンパクト化が図られている。

この装置は、真空技術とヒートポンプを組み合わせることにより、低温で廃液を蒸発濃縮することを可能にしている。

蒸発缶内の真空5.3~6.7 kPa (40~50 Torr) は、蒸発水の水循環ポンプと水エゼクターにより生み出される。

一方、水ポンプが水を高い所に汲み上げる機械であるように、ヒートポンプは熱を温度の低い所から高い所に汲み上げ、その熱を利用するためのものである。本装置では、冷媒ガスの圧縮機がこれに相当する。具体的な働きは次に記述する。

冷媒（代替フロン R22）は、圧縮機で加圧されて高温になり（約50℃）、加熱器内で廃液に熱を与える。冷媒自体は熱を奪われ、凝縮して液体となった後、エアクーラーで余剰の熱が除かれる。この後、冷媒は蒸発缶内の凝縮器の手前で膨張弁により、断熱膨張して低圧、低温となり（約15℃）凝縮器で蒸発缶内の水蒸気（約40℃）を凝縮させる。この時、冷媒は水蒸気から凝縮潜熱を受け取って、ガスとなって圧縮機に戻ってくる。このサイクルを繰り返す。

エアクーラー出口の冷媒の一部は、蒸発水タンク内の冷却器に導かれ、冷却器手前で同様に膨張弁により低温になり、真空を生み出す蒸発水の冷却（約25℃に冷却）を行う。このことにより、蒸発缶内の真空度を5.3~6.7 kPa (40~50 Torr) に維持することが出来るのである。

本装置は熱のやり取りを冷媒を介して行うヒートポンプ方式を採用しているため、電熱ヒーターによる加熱方式のエネルギーと比較すると1/6で済み、効率的である。

廃液の供給は、蒸発缶内のレベルコントローラーの水位により、自動弁が開閉し真空吸引されることにより行われる。蒸発缶内の廃液（濃縮液）は、廃液循環ポンプにより加熱器と蒸発缶の間を循環して加熱器内で加熱され、蒸発缶内でフラッシュ蒸発する。濃縮液の排出と消泡剤（必要であれば）の供給は、自動弁のタイマー設定（あるいは、濃縮液についてはオプションの密度計）により間欠的に行われる。

1.2 装置の特長

1) 省エネルギータイプ

ヒートポンプ方式のため、電熱ヒーター加熱方式と比較して1/6のエネルギーで済む。ランニングコストが低い。

2) コンパクト

動力制御盤も含め、すべての機器がスキッドマウントされている。最大機種（蒸発水量8000ℓ/day）においても、2300mm^W×2900mm^Hの設置スペースで済む。

3) 電源接続だけで運転可能

加熱用のスチームや冷却水が不要である。電源供給のみで運転出来る。

4) フェイルセーフシステム/自己診断機能を持つ

万一の故障、トラブルの際には、装置が自動停止するフェイルセーフシステムである。またトラブルの内容を

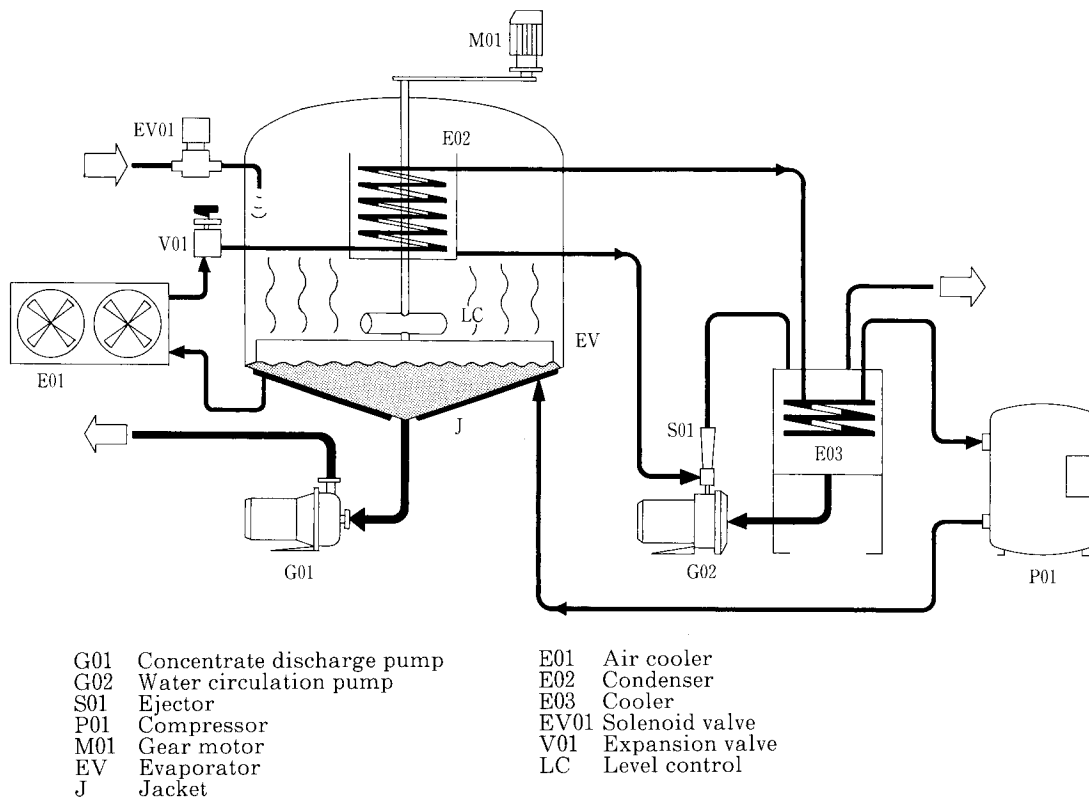
第1表 WTS E型番と標準仕様

Table 1 Types and Standard specifications of WTS E

Type	WTS E	150	500	700	2000	4000	5000	8000
Frequency	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Distillate production (with water)	ℓ/hr	7.5	22.5/23.5	31.5/31.8	91.5/102.3	158/175	230/248	330/360
Power consumption	kW	2.5/2.7	7/7.5	6.2/8.4	16.2/20	28/36	39/50	56/77
Voltage*)	V	220	400/220	400/220	400/440	400/440	400/440	400/440
Efficiency	kWh/ℓ	0.33/0.36	0.30/0.32	0.19/0.26	0.17/0.19	0.18/0.21	0.17/0.20	0.19/0.21
Discharged heat	kcal/hr	2150/2580	7740/9300	5600/6708	10200/12600	17000/20000	40000/56000	46500/55100
Air required	m ³ /hr	1000/1100	4500/5310	4500/5310	6700/8100	12000/14400	14000/20000	28000/33000
Refrigerant		R22	R22	R22	R22	R22	R22	R22
Empty weight	kg	160	640	380	1050	1200	2000	2050
Width	mm	670	1500	650	1150	2000	1800	2300
Length	mm	710	1100	1200	2000	2510	2400	2900
Height	mm	1350	2030	1940	2465	2510	2900	2930
Noise power level	dB(A)	80.6	80	79	80	< 80	81	80
Materials in contact with wastes		AISI 316L + PP						
Scraper		○	○	×	×	×	×	×
Automatic antifoam dosage		○	○	○	○	○	○	○
Automatic concentrate discharge (valve)		option	option	○	○	○	○	○
Automatic concentrate discharge (volute pump)		×	option	○	○	○	○	○
Distillate pH control		option	option	option	option	option	option	option
Boiling point	℃	35~40	35~40	35~40	35~40	35~40	35~40	35~40
Vacuum	Torr	40~50	40~50	40~50	40~50	40~50	40~50	40~50

*) Voltage 220: Single phase
400: Three phases + Neutral
440: Three phases

○: with
×: without



第2図 真空蒸発濃縮装置のフロー (150, 500型)
 Fig. 2 Process flow of the vacuum evaporator (WTS E 150, 500).

ディスプレイ上に表示する自己診断機能も備えている。通常、無人自動運転が可能である。

5) 低い蒸発温度

蒸発缶内の真空度は5.3~6.7 kPa (40~50 Torr) のため、沸点は約40℃となる。低温で蒸発するため廃液中の分解ガスの発生が抑えられ、蒸発缶や加熱器の腐食が抑制される利点がある。

6) 低コスト

良い品物を安く手に入れるために、ヨーロッパ各国等から部品を調達して低コストを実現している。

1. 3 装置の型式と標準仕様

第1表に型式と標準仕様を示す。型式は、蒸発水量の能力別に7機種ある。(蒸発水量150 l/day~8000 l/day)

標準材質は、AISI 316L (SUS 316L相当) をメインにし、一部ポリプロピレンを使用している。

150型及び500型は外套加熱方式で、スクレーパー付攪拌機を備えている。装置フローを第2図に示す。

700型以上は外部強制循環加熱方式で、外部加熱器を設置している。(第1図参照)

1. 4 適用分野

本装置のLED社の納入実績は、写真分野(35%)、金属表面処理分野(35%)及び化学分野(20%)で大部分を占める。

写真分野の対象廃液は、現像廃液、定着廃液及び洗浄水である。化学分野の対象廃液は、各種生産工程からのプロセス廃液や洗浄水である。これらの廃液からの蒸発水は放流基準を満たさない場合、後処理装置で処理を行い、

濃縮液を外部委託等にて処分する。

一方、金属表面処理分野の対象廃液は、主にメッキ廃液である。蒸発水は洗浄水としてリサイクルでき、濃縮液はメッキ浴液として再利用することが出来る。適用例は後述する。

濃縮度は廃液の性状(比重、粘度及びSS濃度)により異なるが、比重1.3~1.4、粘度100 cP程度、SS濃度3~4%までの濃縮が可能である。

2. WTS E 4000型の紹介

シアン含有メッキ廃液の蒸発濃縮に納入したWTS E 4000型を例に装置及び運転概要を次に紹介する。

2. 1 装置概要

装置仕様を第1表に示す。水蒸発能力は4 m³/dayである。据付スペースは、2.4 m²で済む。運転に際しての準備は、電源、圧縮空気、廃液、蒸発水及び濃縮液の配線・配管の接続だけで良い。

2. 2 フェイルセーフシステムと自己診断機能

装置は自動運転され、原廃液槽が空になった時、また蒸発水貯留槽か濃縮液貯留槽が満水になった時に装置は自動停止する。また何かトラブルが発生すればソフトウェアが装置を停止し、ディスプレイ上に警報状況を表示する自己診断機能を備えている。安全のため、運転に支障のある要因を一つ一つクリアしなければ再起動出来ないシステムとなっている。クリアする毎に警報の数は減少し、全てクリアして初めて再起動出来る状態になる。

各々の警報に対し、可能性のあるトラブルの原因は取扱説明書に記載されており、これに基づいて対策をとる。

2.3 コントロールパネル

コントロールパネルを写真2に示す。コントロールパネルは入力キーボードとディスプレイ、コントロールキーボードから構成されている。ディスプレイは運転に関するパラメーター、情報を順々に表示する。シーケンスは5つあり、各々のキーを押すことによって選択表示出来る。5つのシーケンスは各々次の項目に関する情報を表示する。

- 蒸発缶内の圧力、圧縮機の圧力と電流値、密度（密度計はオプション）及び原廃液槽等の外部レベルの情報
- 運転パラメーター設定値の入力、濃縮液拔出し間隔時間、消泡剤注入の間隔時間
- 圧縮機の自動運転機能に関するタイマーの確認と設定
- 警報設定値の入力（圧縮機出口圧力の最大値、圧縮機入口圧力の最小値等）
- 付帯項目に関する入力（時刻設定、ブザー設定、運転積算時間）

またコントロールパネルは、次の信号の取り込みや中央制御盤からの遠隔操作が出来るようになっている。

- 外部水槽のレベル信号の取り込み
外部の原廃液槽、蒸発水槽及び濃縮液槽の液面計の信号を取り込むことができ、その信号により本装置を停止することが出来る。
- 中央制御盤からの起動/停止
本装置が排水処理設備の一部である場合等において、中央のパネル（またはコンピューター）からの信号で起動/停止を行うことが出来る。

2.4 運転

運転に支障のある要因を排除し、コントロールキーボードのNo.1キーを押すと廃液循環ポンプ、水循環ポンプが運転を開始する。蒸発缶内の絶対圧力が200 mbarに達すると、圧縮機起動シーケンスが作動する。数分後に装置はほぼ定常運転になり、蒸発濃縮を行うようになる。

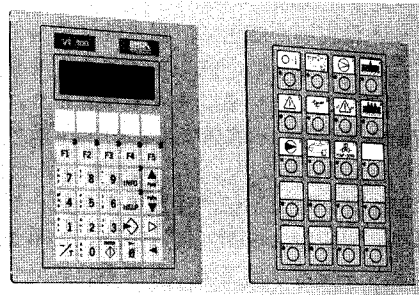


写真2 コントロールパネル
Photo. 2 Control panel

2.5 オプション

WTS E 4000型にはオプションとして次の計器が用意されている。

- 濃縮液の密度計
濃縮液の密度コントロールが正確に行うことが出来る。
- 蒸発水のpH調節計
蒸発水のpHコントロールを行うため、新たなpH調整槽の設置が不要で、そのまま放流することが出来る。
- 蒸発水の導電率計
蒸発水の導電率をチェックすることにより、蒸発水の性状がチェック出来るばかりでなく、蒸発濃縮操作が順調に行われているかどうかチェックすることが出来る。

3. 金属表面処理廃液への適用

金属表面処理後のメッキ廃液の蒸発水は、蒸留水水質並となり、メッキ洗浄水としてリサイクルすることが出来る。また濃縮液はメッキ浴液として再利用出来る。したがって、メッキ廃液は本装置の性能を十二分に発揮出来る処理対象廃液で、蒸発水、濃縮液の両方とも再利用することが出来る。

第2表 無電解ニッケルメッキ廃液の蒸発濃縮テストの分析結果

Table 2 Analysis on vacuum evaporation of waste liquid from non-electrolysis nickel plating process.

Parameter	Waste	Distillate	Concentrate
pH	4.3	4.5	4.5
SS	mg/l < 1.0	< 1.0	10 600
COD _{Mn}	mg/l 15 000	12.8	81 000
BOD	mg/l 1 410	47.9	55 000
TOC	mg/l 8 500	23.6	44 900
Na	mg/l 11 500	0.88	63 100
Ni	mg/l 6 720	< 0.1	38 300
Fe	mg/l 16.7	< 0.1	85.2
Cr	mg/l 0.14	0.1	0.87
Pb	mg/l 0.26	< 0.2	0.89
Cu	mg/l < 0.1	< 0.1	< 0.1
SO ₄ ²⁻	mg/l 14 900	< 0.3	89 000
PO ₄ ³⁻	mg/l 32.1	< 0.1	181
T-P	mg/l 36.4	0.52	272
Cl ⁻	mg/l < 60.0	< 0.3	< 90
TS	mg/l 68 700	38.0	473 000

3.1 無電解ニッケルメッキ廃液への適用

無電解ニッケルメッキは皮膜が緻密で、耐食性に優れているとともに安定した光沢が得られ、鉄、銅、アルミニウム及びそれらの合金に適用されている。またセラミック、ガラス、ABS樹脂、PP樹脂等の不導体上にも適用可能である。

当社の化工機事業部においては、伝熱係数の低下防止を目的に、反応機の外套に無電解ニッケルメッキ施工を手がけている。これまでメッキ薬液は施工後、外部委託処分してきたが、メッキ廃液処理に本装置を適用することにより、濃縮した薬液を再利用出来る可能性（コストダウンにつながる）があるため、本装置の700型を用いて蒸発濃縮処理試験を実施した。

無電解ニッケルメッキ廃液、真空蒸発濃縮装置の蒸発水及び濃縮液の水質分析結果を第2表に示す。これから蒸発水は、廃液中の一部の有機物を含むものの無機化合物の含有は皆無であった。蒸発水中の有機物は、錯化剤中の低沸点物質と考えられる。蒸発水は他の廃水とともに廃水処理設備で処理するか、もしくは希釈で放流することが出来る。廃液は約6倍の濃縮が可能であった。この結果から廃液処分としても費用は1/6となり、濃縮した薬液を再利用した場合にはさらにコスト削減が可能である。

3.2 電気メッキ工程廃水への適用

1) クロムメッキ

メッキ処理ラインには、240~300 g/lの無水クロム酸、約1%の硫酸及び少量の触媒を含むメッキ浴が使用されている。この浴槽の後で使われる洗浄水は、六価クロムを回収するために、特殊な耐食材料でつくられた本装置によって処理することが出来る。

蒸発水は洗浄水としてリサイクルでき、イオン交換処理した濃縮液は、メッキ浴槽に返すことが出来る。

2) シアン化合物の除去

次亜塩素酸ナトリウムや、過酸化水素水のような酸化剤を使うシアン化合物の従来の処理法には、次のような欠点がある。

- 特にニッケルや銅が存在する場合、反応速度が遅い
- 30分という遅い反応速度のため大きな反応タンクが必要
- 反応速度を上げるためにpHを10にする必要がある。
- pH調整のための水酸化ナトリウムが必要である。

本装置を適用した場合、前述の欠点はなくなりシアン化合物の濃縮廃液量を最小にすることが出来る。蒸発水はメッキ浴槽に返送し再利用することが出来る。

3) 銅

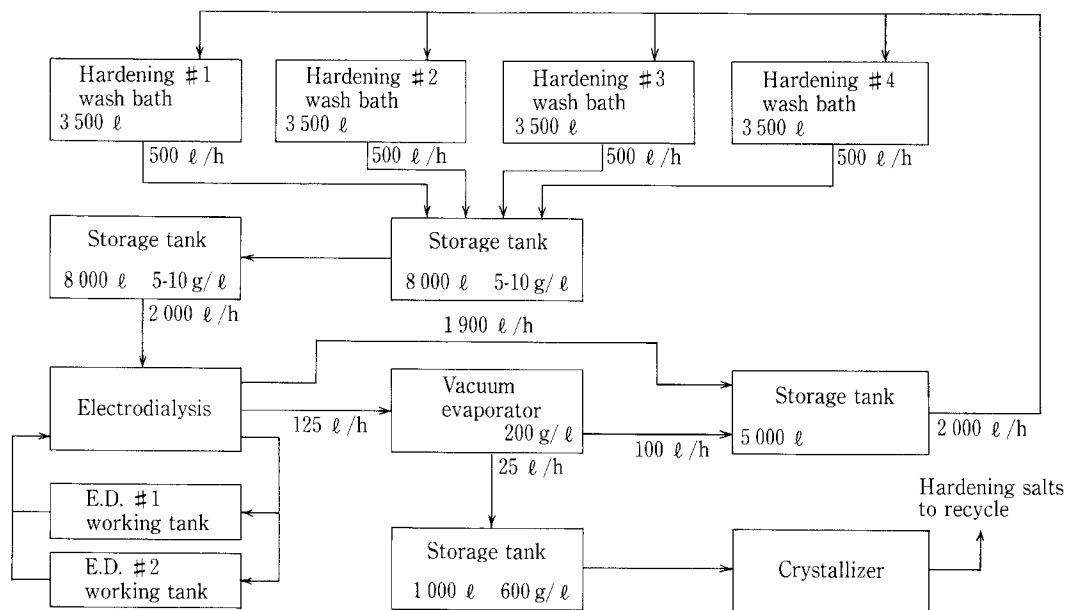
銅はメッキ工業や、酸洗いた後の銅メッキ作業からの廃液に含まれている。銅は凝集沈殿法で処理されているが、その沈殿物は廃棄処分されるのみでリサイクル出来ない。本装置であれば銅を多量に含んだ濃縮液をリサイクルすることが出来る。

4) 鉛

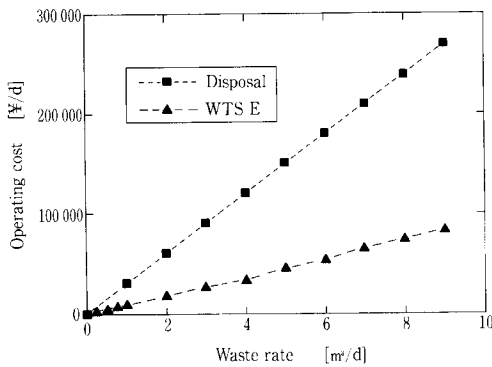
鉛は染色工業、鉛電池工業、鉛冶金、セラミックス、フォトセラミックス、釉薬そしてレリーフプリント等の各工業からの廃水に含まれている。鉛は生物の体内に蓄積し人間に脳障害を引き起こす非常に有毒な物質である。廃水処理に本装置を適用すると、鉛をほぼ完全に除去することが出来る。

5) 亜鉛

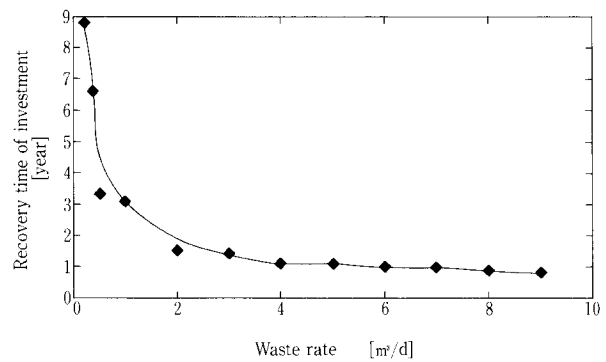
亜鉛はメッキ工業からの廃水に含まれている。毒性は低いと考えられているが、ニッケルや銅のような他の化合物が存在すると、その毒性は著しく上昇する。廃水処理に本装置を適用すると、亜鉛塩を回収することが出来る。



第3図 釘の焼き入れ工程廃水のリサイクルシステム
Fig. 3 Washing solution recycling system for nail hardening.



第4図 廃液処理コストの比較(外部委託処分と蒸発濃縮処理)
Fig. 4 Comparison of operating cost between WTS E process and waste disposal.



第5図 廃液量と投資回収年数の関係
Fig. 5 Recovery time of investment related to waste rate.

6) カドミウム

カドミウムは宝石の溶着、カドミウム化合物が不溶性の染料として使われるセラミック工業、またカドミウムメッキ工業で使用される。また他の金属中や、酸洗い工程後の洗浄水中にも不純物として含まれている。カドミウムは腎臓の機能を悪化させる非常に有毒な物質である。廃水処理に本装置を適用すると、カドミウム塩を回収することが出来る。

7) スズ

スズはラジエーター工場やメッキ工業からの廃水に含まれる。廃水処理に本装置を適用するとスズを濃縮することが出来る。

3.3 焼き入れ処理プロセスでのリサイクル

釘の焼き入れ処理浴槽からの廃水は、硝酸ナトリウム、亜硝酸ナトリウムを含んでおり、電気透析装置と本装置を組み合わせると蒸発水、濃縮液ともリサイクルしている例を紹介する。処理フローを第3図に示す。廃水は焼き入れラインの4つの洗浄浴槽から集められる。廃水の塩濃度は5~10 g/lである。廃水は電気透析装置にかけられ、電気透析処理水90%と塩濃度200 g/lの濃縮液10%に分離される。処理水はリサイクル使用され、濃縮液はさらに濃縮するために本装置にかける。本装置からの蒸発水は、電気透析処理水とともにリサイクル使用され、濃縮液の塩濃度は600 g/lになる。濃縮液は晶析器で結晶となり、焼き入れ浴槽にリサイクルされる。

4. 投資回収年数の試算

本装置の優れた点はヒートポンプ方式による低ランニングコスト、各国からの部品調達による低コストであることは前述した。このことは現在、外部委託処分している廃液を本装置による蒸発濃縮を行えば、早期に投資回収出来ることを意味している。具体的に投資回収年数がいくらかになるか、次に試算する。

前提条件として

- 1) 本装置による蒸発濃縮が可能な廃液とする
- 2) 濃縮液は外部委託処分とし、蒸発水は後処理が不要で放流可能とする

3) 現状の廃液は全量、外部委託処分とする

4) 濃縮倍率は5倍とする(1/5に減容化)

5) 廃液の蒸発量は、水の蒸発量の90%とする

6) 1日の運転時間は24時間以内とする

7) 1年の運転日数は200日とする

8) 処理量は、9 m³/day以内とする

9) ランニングコストの内容は、電力費+外部委託処分費とし、現状については外部委託処分費のみとする。人件費、償却費は含まない

10) 電力費¥18/kWh、廃液、濃縮液の外部委託処分費は¥30,000/m³とする。

投資回収年数の計算は、イニシャルコスト(本体価格+予備品価格)をランニングコストの年間差額で除したものである。

全量外部委託処分する場合とのランニングコスト比較を第4図に、廃液量に対する投資回収年数を第5図に示す。これから処理量1 m³/day未満では3年以上要するものの、1 m³/dayから5 m³/day未満においては1~2年、5 m³/dayから9 m³/dayまでは1年以内に投資額を回収出来ることになる。

むすび

本稿では、ヒートポンプ式真空蒸発濃縮装置(LED社製)の概要、金属表面処理廃液への適用及び投資回収年数の試算を紹介した。金属表面処理廃液への適用は、本装置の機能を十分に生かしたものであり、今後この分野への適用が期待される場所である。

本装置は1995年10月から販売しているが、販売、メンテナンス及び部品の供給等については、神鋼パンテック環境管理(株)が担当しており、万全のサービス体制を持って顧客のニーズに応える所存である。

[参考文献]

- 1) LED ITALIA 社、技術レポート
- 2) 小林俊幸、佐伯一丸: 神鋼パンテック技報 Vol. 39, No. 2, 1996