特集2・悪臭問題の実態と対策技術に関する最近の話題

球状活性炭による流動層式吸着脱臭法の概要と適用事例

松 岡 毅*

1. は じ め に

1971年6月に悪臭防止法が制定・公布されてから30年が経過しようとしている。この間、各種産業の多様化に対応して規制対象物質も順次追加され、現在では22物質が特定悪臭物質として指定されるに至り、各特定悪臭物質の濃度規制値が自治体ごとに定められている。しかし悪臭は、複数の特定物質の相乗作用によっても感知されるため、各々が濃度規制

値を下回ったからといって感じないというものでもない。また、個人差や環境によっても感じ方が変わり、こうした要因が悪臭対策をさらに難しくしている。

悪臭防止技術としては、活性炭吸着法が一般的であり、多くは複数の固定吸着部を切り換える固定層式装置が採用されているが、大風量では固定層内でのガスの均一分散が難しく、吸着効率が低下する、高濃度ガスの吸着では吸着熱の除去が困難になるな

表1 連続式吸脱着脱臭装置の適用例

溶剤名	対象設備	風量 (m ³ /min)	入口濃度 (ppm)	型式名
混合溶剤	半導体工場	520	* ¹ 80	HN
1,1,1-トリクロロエタン	金属洗浄	160	580	SA
α-ターピネオール臭	集積層	180		HS
パークロロエチレン	現像機	10	1730	SA
混合溶剤 (フェノール, ナフタリン)	半導体工場	80	100	HN
1,1,1-トリクロロエタン	金属洗浄	90	1850	SA
混合溶剤 (酢酸ブチル他)	フィルムラミネーター	160	2100	SN
混合溶剤 (n-酢酸ブチル, メトキシプロパノール)	半導体工場	420	52	HN
シェルモールド排ガス (アンモニア, フェノール)	鋳物工場	1000×2	4	HS
混合溶剤 (n-酢酸ブチル他)	溶剤製造工場	550	50	HN
有機肥料排ガス	肥料工場	600	* ¹ 3000	HS
混合溶剤 (トルエン, メチルエチルケトン, DMF)	ポリウレタンレザー工場	700×2	2987	SN + SSR
塩ビモノマー	塩ビ製造プラント	380	1450	SS
塩ビモノマー	塩ビ製造プラント	210	1244	SS
塩ビモノマー	塩ビ製造プラント	280	1260	SS
混合溶剤 (トルエン, 酢酸エチル, 酢酸ブチル)	セロファン加工	180	7000	SN + SSR
混合溶剤 (トルエン, 酢酸エチル)	コーター機	680	2177	SN + SSR
混合溶剤 (トルエン, 酢酸エチル)	テープ工場	600×2	2100	SN + SSR
塩化メチレン	製造工程排ガス	50	21140	OS

*¹臭気濃度

*呉羽テクノエンジニアリング商品開発部, Takeshi MATSUOKA

〈G-BAC〉

ヤシガラ活性炭

写真1 G-BACとヤシガラ活性炭の顕微鏡写真

表2 球状活性炭の一般特性

形 状	球 状
粒径範囲 (mm)	0.59 ~ 0.84
粒径平均 (mm)	0.7
嵩密度 (g/cc)	0.58 ~ 0.65
表面積 (m ² /g)	800 ~ 1200
吸着能	
ベンゼン (mg/g)	300 ~ 400
四塩化炭素 (mg/g)	550 ~ 700
強度 (%)	98 ~
灰分 (%)	~ 0.5

どの問題が生じていた。これらの問題点の解消には流動層式吸着装置が適切であることが指摘されていたが、活性炭の高強度化と高吸着能の両立が課題となっていた。

1966年に、この課題を克服した活性炭が呉羽化学工業株式会社によって開発され、流動層式吸着法を適用した連続式吸脱着装置（GASTAK）が実用化されるに至った。

本装置は1973年の上市以来、国内外合わせて500基を超える稼働実績を持ち、排ガス中の溶剤回収から脱臭まで、幅広く需要に対応してきた。本稿では、特に脱臭用途について言及する。

納入実績の一例を表1に示す。

2. 球状活性炭の特長

本装置は、呉羽化学工業株式会社が製造するクレハビーズ活性炭（以下、「球状活性炭」と略す）を吸着剤として使用している。球状活性炭は石油系ピッチを原料とし、真球状に造粒した後、水蒸気賦活して製造され、造粒炭やヤシガラ活性炭と比較して、高比表面積、高強度、耐摩耗性（低発塵性）、易流動性といった特長を備えている。球状活性炭とヤシガラ活性炭の顕微鏡写真を写真1に、一般的な性質を表2に示す。

球状活性炭は、他の吸着剤に比較して非常に大きな比表面積を持ち、かつその6割以上が細孔内に存在していることから、多くのVOCs（揮発性有機化合物）に対して高い吸着能力を有している。しかし、炭素表面の含酸素官能基が少ないため、疎水性化合物に対する吸着能力は高いが、アンモニアなどの5大悪臭物質に代表される親水性化合物に対する吸着能力が低いという欠点をもつ。このため、薬品添着などにより親水性を高め、適用範囲の拡大を図って

いる。

3. 本装置の概要

本装置の基本フローを図-1に示す。

本装置は、大きく分けて①吸着塔②脱着塔③凝縮器（コンデンサー）の3つで構成されている。球状活性炭はそれぞれ独立した吸着塔および脱着塔を循環し、連続的に吸着・脱着を繰り返しながら臭気成分を除去していく。

吸着塔は多段の有堰多孔板で構成されている。球状活性炭は各段で20～40mmの流動層を形成しながら原ガスと接触して臭気成分を吸着除去し、多孔板に配置されたダウンカマーを通じて下段多孔板に流下していく。臭気成分を十分に吸着した球状活性炭は、脱着塔上部に気流搬送される。脱着塔は移動層を形成しており、球状活性炭は加熱されながら脱着ガスと向流で接触し、臭気成分が脱着していく。臭気成分が脱着された球状活性炭は、吸着塔上部に気流搬送循環され、吸着・脱着の連続システムが構成される。

4. 本装置の特長

本装置は下記に示す特長をもっている。

(1) 装置がコンパクトである

吸着部の空塔ガス速度は、固定層式吸着装置で通常採用される速度の3～5倍に相当する1 m/sであり、設置面積を大幅に節減することができる。

(2) 安全性に優れている

反応性が高いケトン系溶剤を固定層式装置で吸着除去する場合、活性炭の熱伝導が低いためにガスの偏流によって生じる局部的吸着熱の蓄積（ローカルヒート現象）、活性炭を触媒とした酸化・分解による発熱あるいは過酸化物の生成が、活性炭の着火・

図-1 連続式吸脱着装置 (GASTAK) の基本フロー

爆発事故につながる事が問題視されている。

しかし、ガスの偏流が少ない流動層では、発生した吸着熱が速やかにガス側に移行するし、また個々の活性炭が流動状態にあるため活性炭の温度上昇が小さくなり、着火・爆発の危険が回避できる。

また、本装置は吸着部と脱着部が独立しており、脱着ガスとして窒素を使用した場合には高温脱着部への空気混入がない。さらに非定常時など空気が混入した場合は自動停止させる安全対策をとっている。

(3) ランニングコストが小さい

固定層式は通常2塔で構成され、交互に切り替えながら吸着と加熱脱着を繰り返すため、加熱・冷却に伴う消費熱量が大きくなる。本装置は、流動層吸着と移動層脱着を各々一定温度で連続運転することにより、消費熱量を最小限に抑えることができる。

また吸着部の圧力損失は、トレイ1段あたり150～200Pa、吸着塔全体としても1.5kPa程度であり、固定層式に比較して原ガスブロワーの電力消費量を小さくすることができる。

(4) メンテナンスフリーである

本装置は、原ガスブロワーと気流搬送用空気ブロワー以外の駆動部を持たないため、基本的にメカニカルなトラブルが少なく、無人運転が可能である。

起動・停止時の一連の作業はプログラム化されており、それぞれボタン一つで自動的に進行する。

(5) 活性炭をその場で再生できる

連続で吸脱着を繰り返すため活性炭はその場ですぐに再生され、使用済み活性炭を産業廃棄物として系外に出すことがない。

(6) マニフェスト管理が容易となる

脱着成分と凝縮水との混合液が排出される固定層式と違い、臭気物質は原液に近い状態で回収されるため、排出量管理が容易となる。回収の必要がない場合は凝縮回収せずに、小型燃焼器を付設して濃縮された脱着ガスを現位置で燃焼処理する。

5. 本装置の種類

表3に本装置の各種タイプ、写真2に本装置の外観を示す。

脱臭を目的とする場合は、処理ガス濃度を極力下げる必要があることから完全脱着に近い条件が要求され、電気ヒーターや熱媒油を使用して160～400℃といった高温で脱着する。

さらに、脱臭とともに溶剤回収を目的とする場合は、臭気物質の熱変質を極力抑えるために、加熱源として蒸気を使用し、150℃以下で脱着する。

脱着ガスは、溶剤成分の酸化分解を抑える目的で

表3 連続式吸脱着脱臭装置の各種タイプ

タイプ	加熱媒体	脱着ガス	主 用 途	特 長
SS	水蒸気	水蒸気	溶剤回収一般	基本タイプ
SA	水蒸気	空気	パークロロエチレン 1, 1, 1-トリクロロエタン フロンR-113	} 回収 運転費安価 低水分で回収 凝縮水処理問題なし
SN	水蒸気	窒素	一般溶剤 水溶性溶剤	
HN	燃焼ガス 熱媒油 電気ヒーター	窒素	一般溶剤 水溶性溶剤 (特に出口ガス濃度の規制が厳しい時または脱臭も必要な時)	} 回収 低水分で回収 凝縮水処理問題なし 処理ガス無臭化
HS	燃焼ガス 熱媒油 電気ヒーター	水蒸気	脱臭	
OS	水蒸気 (直接加熱法)	水蒸気	塩素系炭化水素回収	設備費が特に安い 高圧水蒸気不要

写真2 GASTAKの外観

窒素を選択するが多いが、高価なため循環使用している。なお、パークロロエチレンなど分解・爆発の危険性のない溶剤の場合は、安価な空気の使用も可能である。

以上のように、原ガスの種類と処理目的により、安全性、効率性を考慮した最適な機種を選択している。

6. 本装置の周辺機器

6.1 原ガスの除湿器

固定層式装置は活性炭と原ガスが長時間接触するため、高湿度雰囲気では水分の平衡吸着特性の影響を受け、活性炭の濡れなどによる性能低下という問題を内在している。これは、活性炭に対する水分の平衡吸着量が相対湿度約40%付近で急激に増加することに起因している。これに対し本装置では、活性炭が比較的短時間（約1時間）で吸着部から抜き出されるため、水分の吸着は平衡に達せず、飽和湿度でない限りは水分の競争吸着による性能の低下はない。

たとえば悪臭のある排水を曝気し、そのガスを本装置で脱臭するシステムに適用する場合、曝気ガスを相対湿度100%のままで本装置に供給すると、球状活性炭の吸着性能が低下する上に吸着部内結露によって球状活性炭の流動性が失われるなどの問題も併発し、連続的な装置運転が不可能となる。このため、本装置の前段にコンデンサーを設置し水分を除去した後、ヒーターで常温に戻すことにより相対湿度を下げる対策をとっている。

6.2 原ガス中高沸点成分のプレアドソーバー

原ガス中に含まれるシリコン油などの高沸点成分は、脱着部で十分に除去されないため球状活性炭劣化の原因となる。この場合、本装置の前段に安価なヤシガラ活性炭を充填したプレアドソーバー（予備吸着装置）を設置し、球状活性炭の長寿命化を図っている。

6.3 球状活性炭の再賦活器

球状活性炭表面には種々の官能基が存在するため、球状活性炭自身も触媒としての機能を持ち、球状活性炭に吸着された溶剤成分は脱着部で加熱された際に、微量ながら重質化し活性炭の細孔を閉塞させる。

特に最近の傾向として、対象となる溶剤ガスあるいは悪臭ガスが単一成成分系であることは希で、低沸点成分から高沸点成分までの多成分系となることがほとんどである。すべての成分に対して十分な除去性能を発揮させるためには、脱着部で高沸点成分を十分に脱着させる必要があり、必然的に脱着部は高温運転を強いられることになる。このため熱安定性の低い成分が含まれる場合は、重質化による球状活性炭劣化が予想以上に進行するケースも少なくない。

球状活性炭の劣化により吸着能力が低下し、処理ガス濃度が許容限度を超えた場合は、脱着部の温度を段階的に上げて対処することも可能である。しかし、装置的な温度限界を超えた時点で球状活性炭の

交換が必要となる.

恒久的な対策として、機側設置型連続高温再生装置（以下「SSR」と略す）を付設することにより、本装置を停止することなしに連続的に球状活性炭の再生を行うことも可能である。

図-2にSSRの概略図を示す。循環使用される球状活性炭の一部はSSR上部に気流搬送され、下部から供給された水蒸気と800℃以上の温度で接触する。球状活性炭表面に付着した重質化物は以下の水性ガス化反応より分解除去される。

トルエン脱臭時にSSRを導入した効果を図-3に示す。

7 本装置の経済性評価

先述したように、本装置はランニングコストが小さい省エネルギー型の装置であり、劣化した吸着剤を産業廃棄物として排出するというある種の吸着法がもつ欠点も SSR の使用により解消されることから、排ガス処理装置としては環境負荷の小さい理想的なシステムといえる。

再生機能を持った固定層式吸着法とランニングコストを比較した結果を表4に示す。

固定層式装置では、通常水蒸気による脱着が行われるため、多量の水に溶剤が含まれた廃液が排出され、高額の廃液処理費がかかる。

8. 今後の本装置の方向

多成分系溶剤ガスに対応する場合，競争吸着の影響により全成分について十分な処理効率を得ることは困難となる。

一方で、化学反応を利用した脱臭装置には、

图-2 SSR概要图

図-3 SSRの導入効果

表 4 剥離溶剤回収装置ランニングコスト比較表

条件		ランニングコスト			
稼動条件 (24時間×30日)	720h/月	球状活性炭窒素脱着方式		活性炭繊維蒸気脱着方式	
処理風量	50 m³/min	894 千円		4,866 千円	
ユーティリティ単価	水蒸気	5 円/kg			
	冷却水 (補給水)	15 円/m³			
	電力	15 円/kw			
	窒素	30 円/m³			
	ドライエアー	10 円/m³			
吸着剤単価	球状活性炭 (再生炭)	1,000 円/kg			
	活性炭繊維 (寿命 1 年と仮定)	30,000 円/kg			
廃液処理費	100 円/kg				
内 訳	使用量		金額 (千円)	使用量	金額 (千円)
	水蒸気	5 kg/h	18	60 kg/h	216
	冷却水	0.5 m³/h	6	10.4 m³/h	112
	電力	30kW	324	11kW	119
	窒素	6 m³/h	130	—	0
	ドライエアー	—	0	0.6 m³/h	4
	吸着剤	200 kg	200	38 kg	95
	廃液処理	(最大) 3 kg/h	216	60 kg/h	4,320

※廃液の比重は 1 とする

回収装置の主な相違点	
球状活性炭窒素脱着方式	活性炭繊維蒸気脱着方式
1. 流動層循環吸着・脱着	1. 固定層自動交互吸着・脱着
2. 間接ヒーター加熱脱着	2. 直接水蒸気加熱脱着
3. キャリアガスに窒素使用	3. エアー切替バルブ使用
上記のように廃液処理費 (直材費) だけで月間4,000 千円の経費節減となる。	
※活性炭交換頻度の実績は、1 ～ 2 ヶ月。	

反応速度，処理時間（滞留時間）の違いもあるが，処理ガス出口濃度をほぼゼロに低減できるものがある。オゾンや紫外線を利用した促進酸化装置は，クリーンな処理装置として注目されているが，乾式での工業化適用例は極めて少なく，通常は排ガス中溶剤成分を水などの溶媒に吸収させた後に反応を行う湿式処理がほとんどである。

湿式処理によるオゾン＋紫外線処理での脱臭装置と本装置のランニングコストを比較した結果を表 5 に示す。

表 5 GASTAK ランニングコスト比較表

〔単位 千円/年〕				
	GASTAK	オゾン＋紫外線	GASTAK＋ハニカムフィルタ	GASTAK＋オゾン＋紫外線
出口濃度	≒ 10ppm	≒ 0 ppm	数ppm	≒ 0 ppm
ランニングコスト合計	82,325	989,250	84,783	194,367
内 訳	水蒸気			
	冷却水	1	1,836	1
	電力	64,788	920,714	66,593
	窒素	1,659		1,659
	空 気			
訳	ヤシガラ炭	8,000	66,700	8,000
	吸着剤	1,833		2,486
	燃料費	6,044		6,044

なお，本装置単独では処理ガス出口濃度をゼロにすることができないという前提で同じ処理効率で比較するため，本装置で処理した排ガスの 2 次処理システムとして，促進酸化装置およびハニカムローター式吸着装置を付設して検討した。検討の前提条件を以下に示す。

〔前提条件〕

年間稼働時間	7900時間
処理風量	1000 m³/min
入口濃度	500ppm
ヤシガラ活性炭交換頻度	3 年に 1 回
球状活性炭交換頻度	3 年に 1 回
ユーティリティ単価	蒸 気 3 円/kg 冷却水 20 円/ t 電 力 10 円/kWh 窒 素 30 円/m³ 空 気 10 円/m³ 灯 油 45 円/ ℓ

廃液は灯油バーナーにて燃焼処理
オゾン発生器は紫外線照射法を採用
ブレードソーバーとしてヤシガラ活性炭固定層
表 5 に示すように，本装置で 1 次処理を行うことにより促進酸化装置のランニングコストが大幅に削減されることがわかる。

薬品添着などで球状活性炭の特性を変えることによって，処理能力を増強することは可能であるが，多成分系であっても確実にゼロ・エミッションを達成するには，本装置単独では困難な場合が多い。PRTR に代表される大気放出ガスに対する関心の高まりを背景に，ユーザー

からの高度処理の要求に答えていくには、本装置のようなコスト・パフォーマンスの高い装置を1次処理装置としてシステムに組み込んでいくことが、有効な選択肢となると考える。

9. お わ り に

本年4月1日から排出水に係る臭気指数規制基準が施行されるに伴い、現在物質濃度規制を行っている各自治体も、今後は臭気指数規制を導入していくことが予想され、複合臭への対策は急務となっている。

一方で、すべての臭気物質に対して有効な単一の消臭剤、吸着剤あるいは単一の脱臭装置はなく、複合臭対策にはそれらのハイブリット化が必要になっ

てくる。比較的広範囲に有効な燃焼装置でさえ、低濃度大風量では濃縮装置との組み合わせが検討されている。吸着脱臭装置も、複合臭には活性炭以外の吸着剤の併用を検討することが必要となる。

今後も本装置を軸として、高度な脱臭の要求に確実に対応していけるよう、システムの改善に積極的に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- 1) 西村, 小沼: ケミカルエンジニアリング, 21 (9), 802 (1976)
- 2) 水野: 環境創造, 7, 1 (1981)
- 3) 松岡: 第13回におい環境学会講演要旨集, 110 (2000)
- 4) 松岡, 小野, 伊藤: 化学装置, 42 (7), 59 (2000)

●私の環境教育●

川北裕之

千葉県立小金高等学校生物担当
〒270-0023 千葉県松戸市新松戸北2-14-1
TEL 047-341-4155/FAX 047-349-2030
HP <http://asahi-net.or.jp/sv5h-kwkt/>

生徒が課題をみつけ探求する総合学習「環境学」

千葉県立小金高校では、5年前に中庭をビオトープにした。これは、都市化の波で失われる自然を復元し、生徒たちに自然の大切さを体験的に学ぶ場として提供するためである。ビオトープができて、地域の自然や環境を学習していくなかで、人とのネットワークの大切さや、地域の現実の問題を扱う学習の必要性を実感した。

そんな折、政治経済の先生が長期研修で総合学習を研究するという。総合学習は、従来のように教師が一方向的に教えるのではなく、生徒自身が課題を設

定して探究していく学習である。二人を中心に生物Ⅱの課題研究(3年2単位)で、校内の先生方との協力を得て始めた。ディベートやフィールドワークを行い、体験学習を通じて問題意識を喚起させた。生徒たちを数人

の班にして探求テーマを設定させた。テーマは生徒自身が興味を持ち、生活に根ざしたものを目指した。ペットボトルのリサイクルやファーストフード店のごみ対策、ゴルフ場の農薬問題、幼児期の教育環境などに取り組んだ。相談会を数回行い、プレゼンテーションの方法も教えた。発表会は外部に公開し、最後にレポートにまとめた。

この学習を通じて、生徒たちは環境問題に関心を持っただけでなく、何かしらの活動をしていきたいと思うようになった。