



飲料水用 PFAS選択的 シングルユース* イオン交換樹脂

飲料水からPerFluoroalkyl And PolyFluoroalkyl Substances (PFAS) を除去するためのPFAS 選択的シングルユース*・イオン交換樹脂 Purofine® PFA694Eを使用するシステムの設計 および運用ガイドラインを紹介します。

*) 薬液などによる再生を前提としない使い切りのこと

イントロダクション

Purofine PFA694E は、PFASに対する高い選択性を備えているため、長期間にわたってPFASを非検出レベルまたはppt (ng/L) レベルまで低減することができます。ただし、こうした効果を得るには適切な処理システムの設計と運用が不可欠です。一般的なアニオン交換樹脂はある程度PFASを除去することが可能ですが、選択性が低く、PFASのリーク量が多い傾向があるので推奨されません。以下に示すPFA694Eのガイドラインと推奨される要件を満たすことで、効果的かつ費用対効果の高い結果を得ることができます。

Purofine PFA694E は次の機能を提供します：

- 短鎖および長鎖PFAS除去に対する高い選択性
- 付帯設備の削減と小規模な機器の設置面積
- 水質に応じて数ヶ月から数年間PFASを吸着
- 使用済みPFAS樹脂が適切に焼却された場合、樹脂とPFASの両方が分解され、環境中で永遠の化学物質と言われているPFASのサイクルを止めることができる



Purofine PFA694E は、飲料水からポリフルオロアルキル物質（PFAS）を除去するための最適なイオン交換樹脂です。

前処理

全懸濁物質（TSS）

イオン交換樹脂は、高精度のフィルターとして機能します。総懸濁物質（Total Suspended Solids, TSS）の除去は、樹脂層の閉塞とそれによるチャネリングを防ぐために重要です。TSSは、シングルユースのイオン交換樹脂が使用できなくなる主な原因となるため、樹脂塔前段に位置するろ過システムの適切な設計と運用が必要となります。これは、Purofine PFA694E が通常、樹脂が交換されるまで数ヶ月から数年間使用され、また運転中の逆洗操作が不可となっているためです。逆洗操作は、樹脂層の上部にあるPFASを吸着した樹脂と、樹脂層の下部にある未使用の樹脂を混合し、PFASの早期破過を招く可能性があります。

粒度分布分析は、流入する固形物のサイズを把握することに役立ちます。もし井戸から砂が出る場合は、除砂装置の使用をお勧めします。全ての水源に対しての以下を推奨します。

- 樹脂に入る前にろ過精度5 µmのバッグまたはカートリッジフィルターを使用してください。もし、5 µmのフィルターがすぐに詰まるような高濃度の懸濁物質が予想される場合は、5 µmのフィルターの前により大きなろ過精度のフィルター（例：25 µm、次に10 µm、そして5 µm）を設置することを検討してください。これは、粒度分布分析に基づいて判断してください。

総溶解固形物（TDS）

Purofine™ PFA694Eの処理能力は、入口水中の競合アニオン成分に依存します。一般的に、入口水の TDS が上昇するにつれて処理量は少なくなります。特定の水質に基づく処理量のシミュレーションについては、営業担当者にお問い合わせください。

オイルとグリス

樹脂は油や脂質によって容易に汚染される可能性があるため、水が樹脂に接触する前にそれらを完全に水から除去してください。有機粘土、または油吸着バッグフィルターを単独で使用する、もしくは組み合わせて使用することを推奨します。これら製品を製造しているメーカーの協力を得て、条件に合ったものを選ぶようにしてください。

溶解性鉄・マンガン

一般的に、鉄濃度が0.5 ppmを超え、マンガンが20 ppbを超える場合、下流の媒体（例：樹脂、粒状活性炭（Granular Activated Carbon, GAC）、または膜）に沈殿する可能性があります。鉄やマンガンのどの程度沈殿するかを判断するためには、パイロット運転が必要となるかもしれません。この鉄とマンガンの除去には、前処理が必要となるかもしれません。

- 推奨：水が樹脂に接触する前に、沈殿性のグリーンサンドまたは Purolite MZ10Plus などの触媒タイプの媒体を使用して、鉄とマンガンを除去してください。

これらの媒体は、過マンガン酸塩または塩素などの酸化剤と共にしばしば使用されます。酸化剤は樹脂にダメージを与える可能性があるため、水が樹脂に触れる前に除去する必要があります。メーカーの指示に従い亜硫酸水素ナトリウム、チオ硫酸ナトリウム、GACのいずれかを使用し、酸化剤をすべて除去してください。

酸化剤

樹脂が塩素、クロラミン、次亜塩素酸塩、過マンガン酸塩、オゾンなどの酸化剤と長時間接触すると、樹脂のダメージとなります。また、排水中のニトロソアミン生成の可能性も高まります。

- 推奨：樹脂と接触する前に、メーカーの指示に従い亜硫酸水素ナトリウム、チオ硫酸ナトリウム、GACのいずれかを使用し、酸化剤をすべて除去してください。

スケーリング

水のランゲリア指数（LSI）が正である場合、炭酸カルシウムのスケーリングが発生する可能性があります。わずかに正のLSI（例：+0.2から+0.5）では、配水管内に有益な薄い炭酸カルシウム膜が形成され、腐食を防ぐことができます。水から二酸化炭素（CO₂）を除去するためにエアストリッパーを使用する場合、排出水のpHは一般的に上昇します。これにより、LSIが負から正の値に変わることがあります。LSIが過度に正になる（例：+1から+2）と、スケーリングが発生し、樹脂や塔内部にスケールが沈殿することでシステム全体の性能が低下します。

- 推奨：入口水のLSIを測定してください。LSIが過度に正であるか、前処理後に正となる可能性がある場合、スケーリングを防ぐために酸の投入を検討してください。

細菌・微生物

細菌は地下水中やシステムの構成機器から検出されることがあります。このため処理水のBAC-Tカウントを無くすことは困難です。井戸以外の細菌汚染源としては、配管内のデッドレグ（溜り）、ガスケット用潤滑剤の不適切な使用が考えられます。

- 井戸が発生源であると判断された場合、樹脂塔に流入する井戸水をUV殺菌装置で処理することを推奨します。その後、バイオマスを取り除くために、固形物のろ過をしてください。または、酸化剤を使用します。上記の酸化剤の項を参照してください。

全有機炭素

全有機炭素（Total Organic Carbon, TOC）は、樹脂を汚染し、性能を低下させます。汚染の程度は、TOCの分子量分布とアニオン組成によって異なります。地下水中のTOCは通常1～2 ppm以下です。これより高いレベルの場合、Purofine PFA694Eの処理量に悪影響があります（ただし、PFAS除去用のGACほどではありません）。

- 推奨：TOCが2 ppmを超える場合は、Purofine PFA694Eの前に、GACまたは食塩で再生可能な有機物除去用の樹脂（Purolite A502P, Purolite A860, or Purolite Tanex™ など）を使用することで、処理量を大幅に向上させることができます。

揮発性有機炭素

揮発性有機炭素（Volatile Organic Compounds, VOC）は一般的にPurofine PFA694Eの処理量に影響を与えません。もしVOCの除去が必要な場合は、GACを使用し、空筒接触時間：EBCT（Empty Bed Contact Time）を約5分に設定します（GACのサプライヤーに条件を確認してください）。

- 水中にPFASとVOCが共存する場合、GAC処理によりVOCを除去できます。樹脂塔の前段、後段どちらでも除去が可能です。VOCはPFA694の性能には影響しません。
- TOCが2 ppm以上存在する場合、樹脂の前処理としてGACを使用することで、潜在的なTOCのファウリングから樹脂を保護することができます。GACに長鎖PFASが付加するとき、より短鎖のPFASが置換もしくは脱離する可能性があることに注意してください。
- TOC除去用のGAC代替として、ピュロライトの強塩基性アニオン交換樹脂であるA502PをPFA694の前段に設置する方法があげられます。TOCの前処理を行わなければ、多くの場合PFA694の性能は低下しますが、GACほど極端な低下とはなりません。処理量を見極めるためには、パイロット試験の実施を推奨します。

樹脂塔の設計

以下は、Purofine PFA694Eを使用する樹脂塔の設計において重要な要素です：

- 樹脂層高：0.9 m以上（線速度30 m/hまで）または1.1 m以上（線速度30 m/h以上）
- 線速度（LV）：設計目標 = 15 – 45 m/h
- 樹脂体積当たりの流量（SV）：設計目標 = 8 – 40 BV/h
- 空床接触時間（EBCT）：設計目標 = リード塔の接触時1.5 – 2.5分間

Purofine PFA694E はGACと比較して反応速度が非常に速い特長を有します。通常のGACはリード塔で8 – 13分を要します。GACのサプライヤーに確認してください。

樹脂塔については、上記で示した高速の水力学に対応できるよう適切に設計されている必要があります。新しいシステムの設計または他容器を樹脂の使用に改造する場合は、以下の点に注意してください：

- 最大流量を許容するために、新しい配管サイズを設定するか、または既存の配管を評価する。
- 入口水のディストリビューターが適切に設計されていることを確認してください。樹脂層全体に均等に水流が分配されるピストンフローを実現することで、PFASのチャネリングや早期破過を防ぐことができます。
- 処理水コレクターのスロットサイズで樹脂が保持できることを確認してください。一般的に、250 µmのスロットサイズは、ガウシアン及び均一なサイズの樹脂（典型的な粒径は300～1200 µm）の充填に適しています。
- 樹脂塔がNSF（National Sanitation Foundation）認可の材料でライニングされており、他のすべての構成部品もNSF準拠であることを確認してください。
- 樹脂層高の25%、50%、および75%の位置にサンプリング用のノズルを設置することをお勧めします。これらのノズルは、PFAS吸着帯のモニタリングを可能にし、特にトラブル対応に寄与します。

可能な限り、樹脂塔にはサイドマンホールと上部マンホールの両方を設置することを推奨します。それらにより、塔本体と樹脂の点検が容易になります。

図1

典型的なリード／ラグ塔構成



樹脂塔の構成

PFASの処理目標は、単一の樹脂塔でも達成可能ですが、以下の理由からリード・ラグの二つの樹脂塔の組み合わせを推奨します：

- リード・ラグ設計では、ラグ塔出口が非検出あるいは一桁pptである間、リード塔の運転が可能です。より長い運転時間とすることで、樹脂を効率的に使用することが可能となる、つまりランニングコストを低減できます。
- 出口サンプルの分析結果が到着するまでの間、ラグ塔はPFASレベルが目標値以下である処理水を供給します。

樹脂塔出口の設計

樹脂塔出口にウィッチハットタイプ（コーン形）のストレーナーやバスケットストレーナーをライン内に設置することで、処理水コレクターの異常によってリークした樹脂を捕捉することができます。

逆止弁を設けることで、樹脂塔への逆流による吸着帯の乱れを防ぐことができます。

運転上の注意点

運転開始時

樹脂を充填する前に、すべての容器（樹脂塔）と配管を「AWWA C653-20 Disinfection of Water Treatment Plants.」に従って消毒してください。樹脂の酸化劣化を避けるため、機器をすべて洗浄して塩素の残留物を取り除いてください。

スラリー輸送車を使用する場合は、機器とホースに対して食品用の洗浄を行う必要があります。

飲料水用途では、Purofine PFA694E NSF/ANSI-61 のガイドラインに従って、少なくとも20 BVの水（1 m³の樹脂あたり20 m³）で洗浄してください。現場での洗浄を最低限にしたい場合、業者に依頼することがオプションです。

樹脂塔を水で部分的に満たします（例：容量の1/3程度）。これは樹脂がスラリーで充填される際、「水のクッション」となります。また、樹脂層表面を水平にすることもできます。

バクテリアによる汚染を防ぐために、Purofine PFA694Eをスラリー状態で充填してください。

新しい樹脂塔の稼働時に、規制当局からニトロソアミンのサンプリングを奨励されることがあります。ニトロソアミンは樹脂中には存在しませんが、その前駆物質が塩素や他の酸化剤と接触すると生成される可能性があります。一般的には樹脂を洗浄するだけでこの課題は解消できます。

BAC-Tサンプリングは、配水前に行うことが推奨されています。

Purofine PFA694E のシステムを始動する際には、最初の処理であれ、始動／停止時であれ、井戸ポンプにインバータ（VFD）を使用するか、あるいは廃水から処理水へゆっくりと切り替えるコントロールバルブを使用して、徐々に流量を増やしてください。ウォーターハンマー、すなわち瞬間的な流量の変化は、樹脂の移動や吸着帯の乱れの原因となります。経験則として、スタートから最大流量まで、立ち上がりに要する時間は約5分とすべきです。

水質変化を最小限に抑えるPurofine PFA694EBF

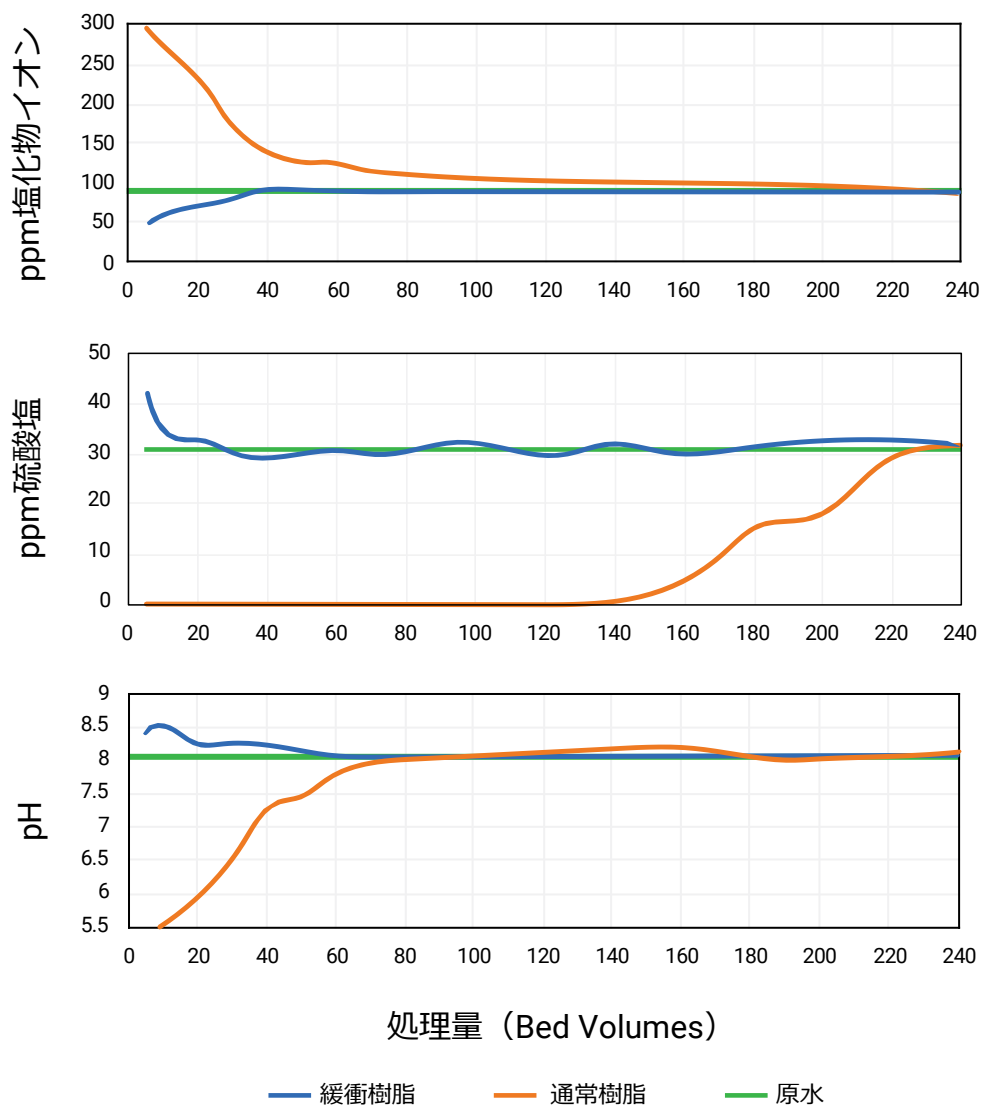
運転開始時におけるアニオン交換樹脂の難点は、塩化物イオンと引き換えにアルカリ、硫酸塩、その他のアニオンを交換してしまうことです。緩衝樹脂であるPFA694EBFは、スタートアップ時の水質変化の影響を以下のようにして軽減することができます：

- 排水中の塩化物濃度が地域の排出基準に近づく、または超過することを防ぎます。
- 配管システムにおける鉛溶出のリスクを生じさせる塩化物と硫酸塩の質量比（CMSR）が高くなることを防ぎます。
- pHを安定化し、地域の排出基準を満たします。

特定の条件下では、緩衝剤（例えば Purofine PFA694EBF）を使用することで、運転と排水の大幅な節約を実現します。

図2

Purofine PFA694EBFの
典型的な溶出プロファイル
と通常樹脂との比較



サンプリング

PFAS のサンプリング実施要項は、分析機関から入手します。サンプリング計画を立てる前に、必ずその機関に確認してください。

Purofine PFA694E の処理能力は、入口水中に存在するイオン組成によって大きく左右されます。

入口水の検査

毎月サンプルを採取し、水質に著しい変化（例：5%以上）があるかどうか、及びすべてのアニオン組成について調査してください。少なくとも以下の項目をチェックすることを推奨します：

- PFAS
- 硫酸塩
- 硝酸塩
- アルカリ度
- 塩化物
- TOC
- TDS

中間点と処理水のサンプリング

- 適切な処理が行われていることを確認するため、PFAS分析用のサンプルを週に1回採取してください。
- 中間点のサンプリングポイントはリード塔の出口です。その分析データから、樹脂の寿命を最長にする交換時期を当社が提案できます。
- 処理目標が達成されていることを確認するために、処理水をサンプリングしてください。

監視

樹脂塔が適切にリード・ラグ構成で設計されていれば、樹脂を交換するまでバルブ操作の必要はありませんが、週に3回は、点検・測定をお勧めします。

その際、以下の重要なパラメータを監視してください：

- 流量
- 計器類値
- 圧力計値（圧力損失）
- 日常的にチェックすべきその他の運転項目：
 - ・ バルブ開度（一部の事業者は、開度調整できないようロックしている）
 - 安全弁（開閉が繰り返されると時折リークすることがある）

樹脂交換

使用済み樹脂が入っていた樹脂塔に新品樹脂を充填する前に、必ず使用済み樹脂をすべて取り除き、残存していないことを目視点検してください。次のサイクルにおける処理能力に影響を及ぼす可能性があります。つぎに樹脂塔本体と内装品の点検をしてください。ディストリビューター及びコレクターのスロットに樹脂またはその破片が挟まっていないことを確認する必要があります。このような不具合がある場合は、運転を再開する前に復旧する必要があります。pptレベルのから非検出レベルまで低減するには、精密な運用が不可欠です。樹脂塔の検査結果については、検査が適切に行われたことの証拠として、写真を撮影・保管することを強く推奨します。

飲料水用途では、樹脂塔および関連する配管およびバルブについて、顧客が承認した手順に従って運用再開前に消毒してください。

上記作業を完了した後、顧客が承認した手順に従って新しい樹脂を空の樹脂塔に充填します。この際、ハンドリング時のコンタミ、及び油、グリス、汗、土などへの暴露を防ぐため、あらゆる予防措置を講じてください。新しい樹脂が充填された塔は、ラグ（またはポリッシング）塔とし、元のラグ塔は適切なバルブ操作によってリード塔として配置されます（物理的にではありません）。新しい樹脂の沈降後、樹脂層を推奨される手順に従って洗浄します。

システムの起動と停止

前述しましたように、樹脂の移動を防ぐためには、ウォーターハンマーを避ける必要があります。

運転停止時には流量を徐々に低下させ、再開時には徐々に増加させてください。暖かい気象条件は、バクテリアの繁殖を助長します。バクテリアの繁殖を防ぐために、以下のガイドラインを参考にしてください：

- 樹脂塔が24時間以上待機状態である場合、毎日または二日ごとに少なくとも2 BVの水でリンスしてください
- システムの休止期間が長い場合、または定期的なリンスが実施できない場合は、水を完全に樹脂塔から排出してください。再稼働する際には、最大流量で24時間、樹脂を洗浄してください。これにより、細菌が洗い出すことができます。その後、BAC-Tサンプルを採取して確認してください。

避けるべき状況

適切な運転とメンテナンスが実施されていればトラブルの心配はありません。ただし、トラブルを未然に防ぐために、次のような点に注意してください：

- 塩素をはじめとした酸化剤の存在は、樹脂にダメージを与えるだけでなく、ニトロソアミンを生成します。したがって、入口水には酸化剤が含まれていないことを確認してください。
- ウォーターハンマーを避けてください。適切な運転開始および停止の手順を設けてください。
- 入口水に空気が混入していると、気泡が形成され、樹脂が移動する可能性があります。
- 前処理の項で述べたように、樹脂の前に固形物を除去する必要があります。固形物には、懸濁物質、沈殿した固形物（例えば鉄）、あるいは生物の増殖が含まれます。
- 入口水に含まれる汚染物質には、例えば油、溶剤、グリス、界面活性剤などがあります。これらはそれぞれ樹脂を分解し、または活性部位を無効にする等、樹脂性能に悪影響を与える可能性があります。
- 樹脂の損耗は、明確に性能を低下させます。
 - ・ 運用を開始する前に、マニホールドバルブを適切に設置してください。
 - ・ 過度の逆洗操作は樹脂を塔外に排出する可能性があります。
 - ・ 故障したスクリーンは樹脂を損失する原因となります。二次的なスクリーン（バスケットストレーナーまたはウィッチハット）の設置を推奨します。
- 運転開始後に樹脂を逆洗することは推奨されません（始動前にも必要ありません）。意図的に、またはバルブが漏れて逆洗された場合、PFASの吸着帯が混合され、早期破過につながる可能性があります。

トラブルシューティング

適切な記録を残すことは、どこに問題があるのかを理解するための第一歩です。前述のサンプリングと監視のガイドラインをご参照ください。

早期破過

良好な結果を得るためには、早期破過に至る前に運転上の問題を診断することが重要です。適切な監視とサンプリングの手順を設定、遵守してください。入口水の性状や前処理装置の突然の変化、樹脂の汚染や損失、監視の項で前述したパラメーターに注意が必要です。

樹脂塔内の固形物蓄積：

- 樹脂塔内に固形物が蓄積すると、入口水は最も抵抗の少ない経路を通るようになります。つまり、チャネリングが起こり早期破過につながります。
- 目視検査は、固形物の蓄積を確認する最も簡便な方法です。また、樹脂層のさまざまな箇所からサンプルを採取し、汚染物質の蓄積を確認することもできます。
- リード塔の圧力損失（dP）も汚染物質の蓄積を示すもう一つの指標です。dPが過度に上昇する場合は、樹脂塔の検査を推奨します。特に、圧力の上昇とその後の急激な降下に注意してください。樹脂層が動いた可能性があります。
- 樹脂にまだ十分なキャパシティが残っている場合、上部の汚染された樹脂層を取り除き、表面を平滑化することで再び運転することができます。この作業は、適切な機器と消毒方法が用いられるよう、業者の協力を得て実施してください。また、再稼働前には樹脂塔のBAC-T試験を行ってください。
- プレフィルターに、破れや不適切な取り付けがないか点検してください。通常、圧力損失が0.7kgf/cm²で交換のタイミングです。
- プレフィルターに問題がない場合、水中の粒子がフィルターのろ過精度より小さい可能性がある入口水の粒度分布分析を行うことで、必要なる過精度を見出すことができます。
- 固形物の蓄積は、入口水中の鉄やマンガンのような溶存金属によっても起こります。これらの金属は沈殿し、樹脂を汚染します。これは、樹脂のサンプリングと分析で診断が可能です。
- 固形物の蓄積は、細菌が増殖している場合にも起こります。バクテリアの発生源を特定するために、樹脂塔の上流を分析する必要があります。前述した前処理の項を参照してください。

樹脂の移動

- ピストンフローを確保するために、樹脂層は水平にしてください。
- 前述したように、固形物の蓄積が樹脂の移動の主な原因です。
- ウォーターハンマーは樹脂の移動を引き起こす可能性があります。装置立ち上げと停止の手順を遵守してください。
- 入口水中の気泡または過剰な溶存ガスは、樹脂の移動を引き起こします。水が樹脂層に到達すると圧力降下により空気が発生します。樹脂上に気泡が形成されると、その気泡は樹脂層の上部に浮上することで吸着帯が乱れます。
- 入口水のディストリビューターが適切に設計されていない、またはそれが何らかの損傷を受けた場合、入口水の圧力が樹脂を移動させる可能性があります。
- 過度の背圧は、特に立ち上げ時や停止時に水を逆流させ、吸着帯を乱す原因となります。
- 水が逆流しないように、樹脂塔出口に逆止弁を設置してください。
- 逆洗操作は、吸着帯の乱れを引き起こし、早期破過につながります。

水質の変化

アニオンのいずれかが急増すると、樹脂のPFAS吸着容量が低下します。その結果、期待された処理量を下回ります。

樹脂の汚染

異物や溶存金属に加えて、樹脂は水中の有機物によって汚れることがあります。オイル、グリス、界面活性剤は樹脂の活性表面を不活化します。溶剤、油脂、界面活性剤は、樹脂を損傷し、性能低下を引き起こします。樹脂のサンプリングと分析により、これらの問題を診断することができます。

樹脂の損失

Purofine PFA694Eが樹脂塔に充填されていなければ、PFAS を除去することはできません。樹脂の損失は、目視検査で確認することができます。樹脂は塩化物イオンと水中の他のアニオンを交換する際に収縮することに注意してください。運転初期から最大30%の収縮が見込まれます。樹脂損失の原因には、不適切なバルブ操作、スクリーンの破損、過度の逆洗などがあります。

チャネリング

チャネリングは、低すぎる線速のために発生する可能性があります。設計LVは15 – 45 m/hとしてください。15 m/h未満ではチャネリングが発生し、早期破過となる恐れがあります。

使用済み樹脂の不十分な除去

樹脂交換時、すべての使用済み樹脂が樹脂塔から完全に除去されなければ、早期破過の原因になります。

高い圧力損失

- 樹脂塔の高い dP は、異物の蓄積によって発生します。前述の「樹脂塔内の固形物蓄積」の項を参照してください。
- 破碎樹脂がスクリーンに詰まることでも、樹脂塔の dP は高くなります。点検時にスクリーンが正常であることを確認してください。
- バスケットストレーナーまたはウィッチハットにおける高い dP は、樹脂塔下部スクリーンの破損、または破碎樹脂が多く存在することを示します。ストレーナーを取り外し、捕集物をチェックすることで、原因を推定できます。

Learn More

Visit www.puroliteresins.com/pfas to discover how Ecolab can support your PFAS treatment needs.

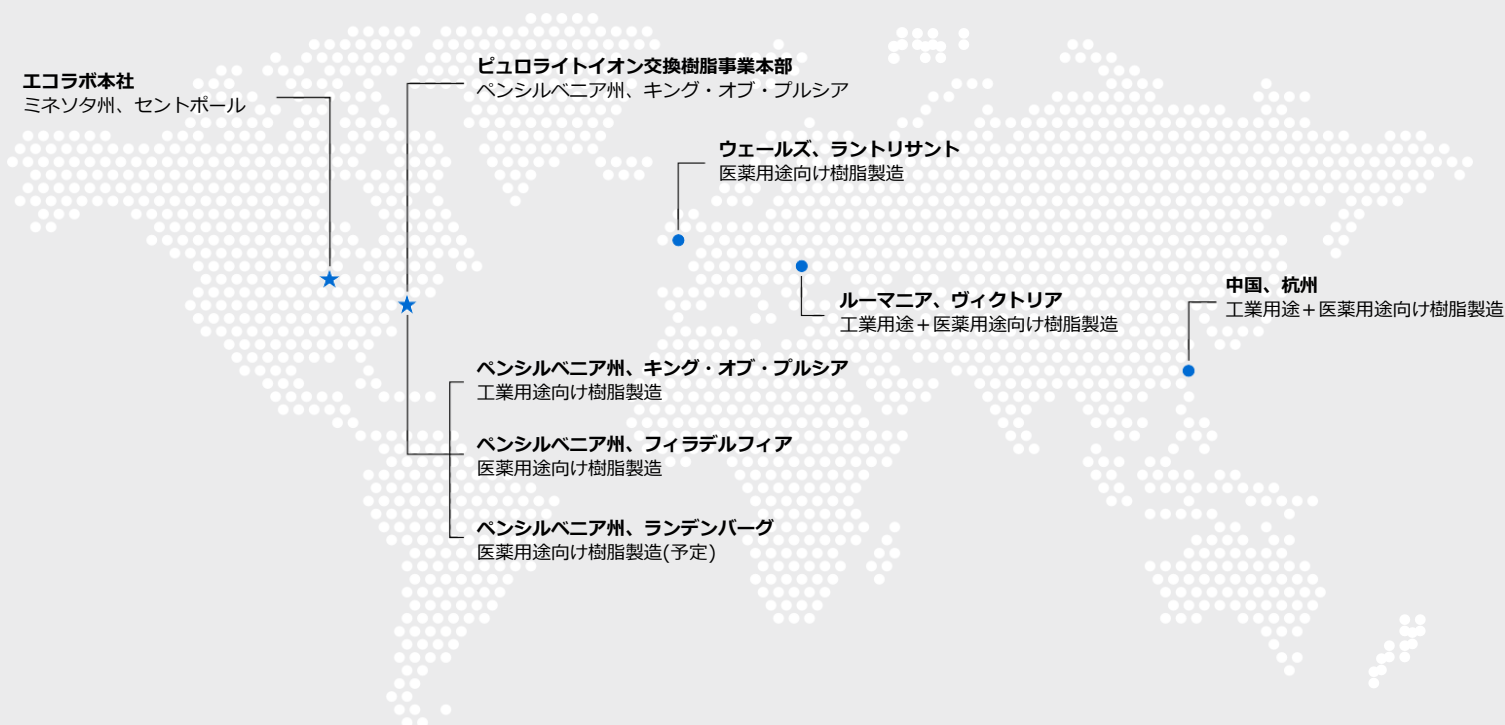
References

1. Civardi, John. "Section 10.6 Design Guidelines for PFAS." Ion Exchange for Drinking Water Treatment, American Water Works Association, Denver, CO, 2021, pp. 171–172.

エコラボ社は世界をより清潔に、より健康的にするために、イオン交換樹脂、触媒樹脂、合成吸着剤やその他の高性能樹脂製品を含むピュロライトイオン交換樹脂製品の開発、製造および供給を世界規模で実施しています。



www.puroliteresins.com



お客様のプロセス課題の解決をサポートします。

製品やサービスの詳細に関しましては、www.puroliteresins.comもしくは下記の各営業所へお問い合わせください。

アメリカ

americas@ecolab.com

アジア太平洋

asiapacific@ecolab.com

ヨーロッパ・中東・アフリカ

emea@ecolab.com

本カタログに含まれる記述、技術情報、および推奨事項は、現時点において可能な限り入手できる情報に基づいて作成されています。製品の使用条件および使用方法是当社の管理の及ぶ範囲外であるため、当社は製品の使用から得られた結果に関する責任を負いません。本カタログにおける記載の有無に関わらず、使用される目的への適合性の保証、またはその他の保証に関して本カタログに記載されている製品および情報に関しては保証するものではありません。なお本書に記載されている内容は、いかなる特許の実施許諾を意味するものではなく、またいかなる特許の侵害を誘発するものでもありません。



©2024 Purolite
無断転載禁止

P-000202-NPOLD-1024-R11-ENG-PCO