When results matter

A SUSTAINABLE ECONOMY
WHITE PAPER FROM
SPECTRO ANALYTICAL INSTRUMENTS



下水からのリン再生およびリサイクル：最新の分析ソリューション

はじめに

リンを含む物質を肥料として長年使用してきた結果、世界は「供給の有限性」と「汚染の拡大」という2つの問題に直面しています。この2つの問題は、持続可能な未来のために環境・社会・ガバナンス（ESG）の要素を重視する個人、企業、その他の組織にとっての懸念材料となっています。

本レポートでは、下水汚泥焼却施設などの管理者のために、リン問題の概要と解決策を紹介いたします。

下水やバイオガス発酵残渣などの廃水からリン酸塩を回収し、再利用するという重要なソリューションに焦点を当てます。さらに、*エネルギー分散型蛍光X線分析装置（ED-XRF）*や*誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES）*などの分析技術にも焦点を当てます。

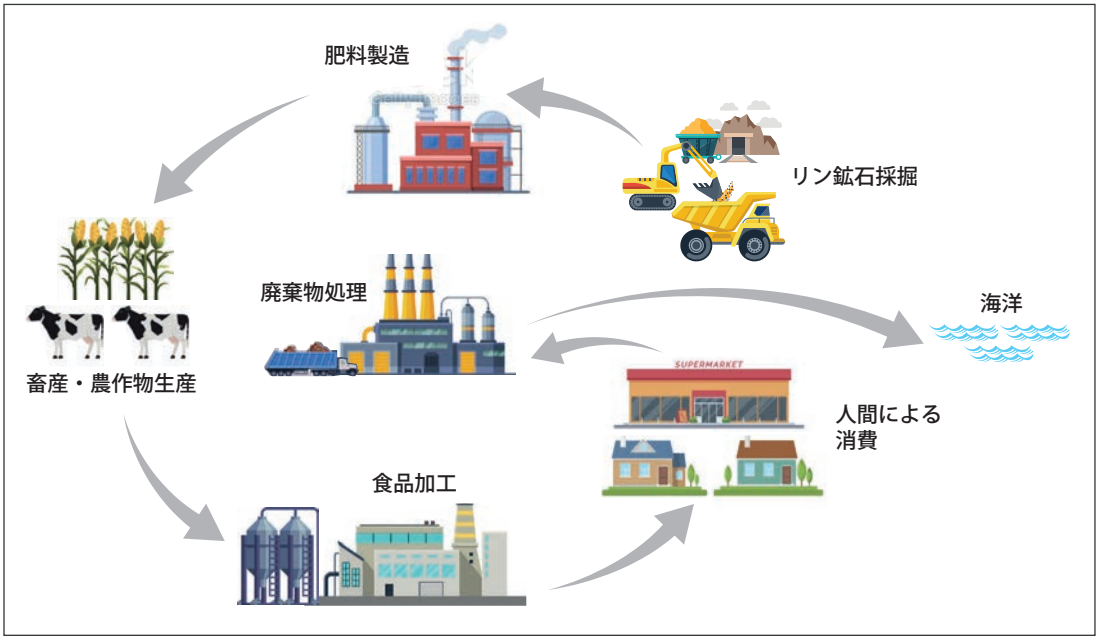
これらの技術を駆使した最先端のモデルでは、リンの回収／リサイクルプロセスの重要なポイントにおいて、リンや重金属などの濃度を簡単かつ効率的に測定することが可能です。



リンの問題

リン（P）は、植物や動物の健康、生命維持に欠かせない栄養素です。人間では、骨や歯、筋肉、細胞膜、RNA、DNAなどの発達、構造、機能に重要な役割を担っています。

リンの問題を把握するには、現在のリンの利用サイクルを理解することが重要です（図参照）。



リンの循環

リンはリン鉱石から採掘され、肥料の主成分として、人や家畜が食べる作物を育てるために使用されます。この貴重な資源は、農業排水や人畜排泄物、鉱山からの流出、自然浸食などにより、最終的に海へと流失してしまいます。

有限な供給：リンの枯渇？

世界には、実用的な抽出に十分な濃度でリン酸塩が埋蔵されていることが知られています。しかし、地域ごとのサプライチェーンの問題や地政学的な障壁により、その埋蔵量へのアクセスはその時々で様々な困難を伴う可能性があります。



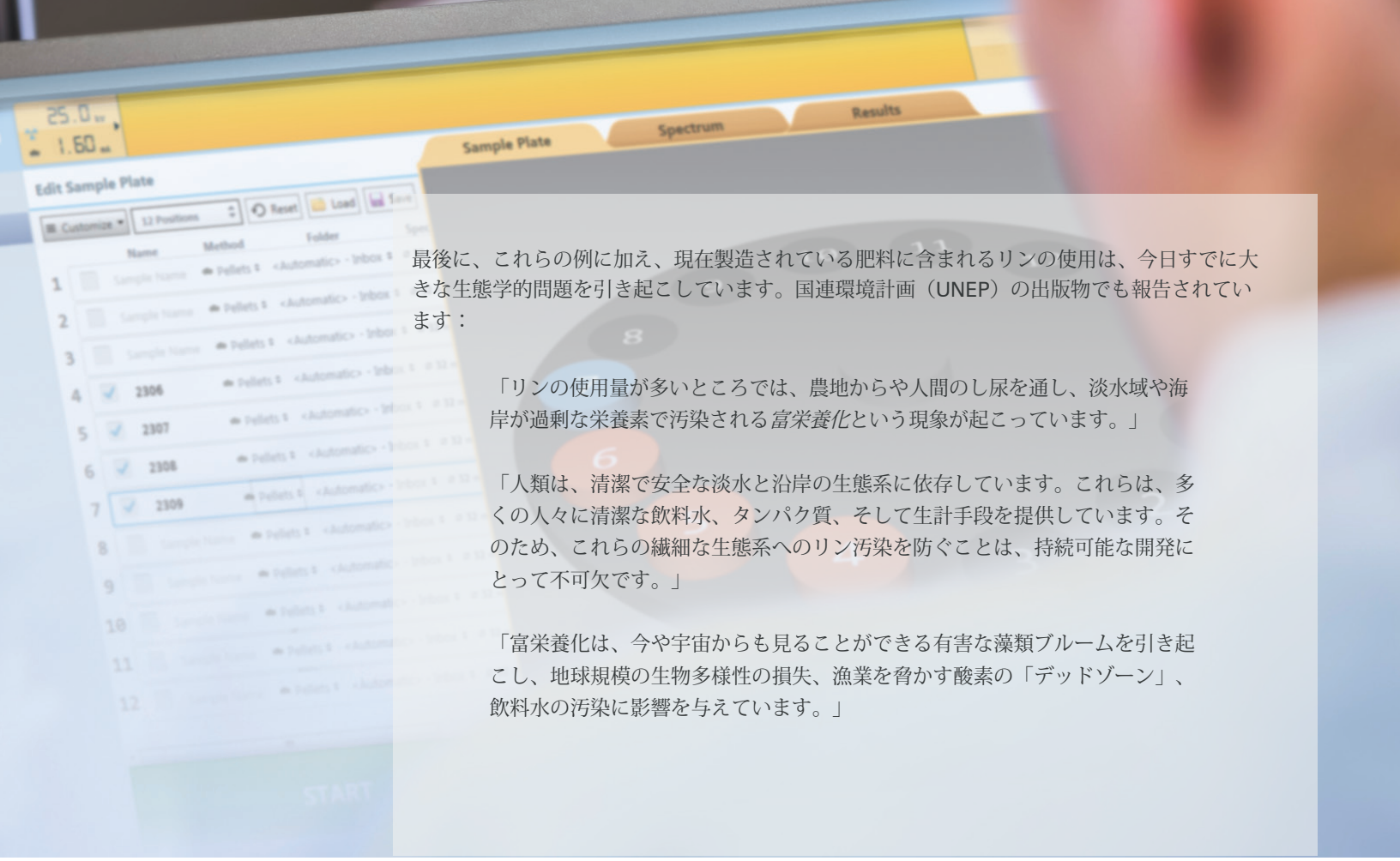
さらに、リンは石油など他の再生不可能な資源とは異なります。なぜなら、私たちの知る限り、リンは供給が減少しても他のものに置き換わることはないからです。リンは研究室や工場で生産したり合成したりすることはできません。つまり、リンがなければ私たちは食料を生産することができないのです。

このため、リンの使用方法をより持続可能なものに変えていくことが急務となっています。

汚染の拡大：リンの流出

供給の問題は別として、リン鉱石の採掘作業は有害物質流出の原因となる可能性があります。例えば、リン鉱石からリンを分離するために硫酸を使用する工程では、リン酸石膏などの有毒な副産物が発生することがあり、これが地下水を汚染することが知られています。

また、下水を直接農作物に与える伝統的なやり方は、必然的に流出を引き起こし、水源に許容できないレベルの重金属や硝酸塩が含まれることになります。



最後に、これらの例に加え、現在製造されている肥料に含まれるリンの使用は、今日すでに大きな生態学的問題を引き起こしています。国連環境計画（UNEP）の出版物でも報告されています：

「リンの使用量が多いところでは、農地からや人間のし尿を通し、淡水域や海岸が過剰な栄養素で汚染される*富栄養化*という現象が起こっています。」

「人類は、清潔で安全な淡水と沿岸の生態系に依存しています。これらは、多くの人々に清潔な飲料水、タンパク質、そして生計手段を提供しています。そのため、これらの繊細な生態系へのリン汚染を防ぐことは、持続可能な開発にとって不可欠です。」

「富栄養化は、今や宇宙からも見ることができる有害な藻類ブルームを引き起こし、地球規模の生物多様性の損失、漁業を脅かす酸素の「デッドゾーン」、飲料水の汚染に影響を与えています。」

汚染の拡大：微量元素による汚染

リンの他にも、流出した肥料や下水はカドミウム（Cd）、ウラン（U）、鉛（Pb）、ヒ素（As）などの有害元素を微量に含むことがあり、重要な水源を汚染する可能性があります。これらの元素を検出し、その濃度を測定することは、汚染状況を改善するために重要な役割を果たします。

進化するサステナビリティへの取り組み

UNEPが述べているように、世界的なリンの課題を解決することは、食糧安全保障を実現し、汚染を減らすことになるのです。

UNEPおよびそのパートナーは、この複雑な問題に取り組むために重要な行動を数多く提案しています。これらには、より良い農業慣行、食品廃棄物の最小化、肉や乳製品などリンを多く含む食品の世界的な消費の削減が含まれます。本レポートでは、特に重要な2つの優先事項を追加しました。

「肥料と肥料の管理を改善し、土壌侵食、流出、水へのリンの溶出を最小限に抑える―農業および人間の排泄物からのリンのロスを減らすために集水域管理アプローチを開発し、明確な削減目標を持つ。」

「廃棄物からリンをリサイクルするためのインフラを整備し、リンのリサイクル製品の市場を開拓する。」

再生およびリサイクル

リンの問題がクローズアップされるにつれ、その対策はいくつかの力によって喚起されています。その一つが規制です。例えばドイツでは、12年間の移行期間を経て、2029年までにリン回収が義務化される予定です。他の国や地域もこれに追随する可能性は十分にあります[1]。

しかし、環境への配慮と経済的な動機が混在しているため、リンの回収／リサイクルが経済的に合理的であることを示す先駆的なプロジェクトとして、より大きな役割を果たす可能性があります。

最終的な目標は、使用・回収・リサイクル・再利用を永久に繰り返すクローズドループかもしれません。しかし、その一方で、廃棄物から回収されたリンは公害を軽減し、利益を増加させる可能性すらあります。

米国ミネソタ州のセントクラウドでは、複数の自治体が運営する廃水回収施設で、熱化学処理によりストルバイト（廃水から回収したリン、アンモニア、マグネシウム（Mg）からなる肥料成分）を生成しています。年間5,000エーカーの小麦を栽培するのに十分な量が生産され、地域の農家に販売されています。さらに、再生可能エネルギーの好例として、汚泥のバイオマス処理により発生する熱（ソーラーパネルによるもの然り）により、工場の運営に必要な電力を自家発電し、余剰電力は地域の電力網に売却しています。

リンの回収とリサイクルにはさまざまな方法があります。下水汚泥から直接リンを抽出するセントクラウドのような施設のほか、下水汚泥やその他の廃液からリンを多く含む灰を生成する新世代の特殊焼却プラントが開発中です。この焼却プラントの灰製品は、再生リンを含む肥料成分の需要の増加に対応するもので、有害金属も無視できるレベルです。ヨーロッパでは、このような施設の建設ブームが起きており、現在、およそ50の新プラントが計画段階に入っています。

リサイクルプラントでは、ストルバイトや灰のほかに、リン酸が生産されることもあります。これらの最終製品は、肥料の主原料として利用される可能性があります。

1) ドイツUBA：「ドイツ連邦共和国における下水汚泥処理、ISSN（オンライン）2363-832X」：…リン回収義務は、条例発効から約12年後の2029年1月1日に、認可された拡張規模が10万人相当（PE）以上の廃水処理施設に適用されます。50,000PE以上の処理能力を持つシステムも、発効から約15年後、例えば2032年1月1日に新規則に準拠しなければなりません。50,000PE未満の下水処理場は、技術的なリン回収対策を自主的に行うことができます。2023年以降は、下水汚泥のリン含有量を検査することが義務付けられています。また、事業者はKrWG（循環経済法）に基づき、土壌利用やその他の下水汚泥処分のためにリンを確実に回収するための計画および実施した措置に関する報告書を提出することが義務付けられています。



回収プロセスの例
施設は、廃水をクリーンで使用可能、持続可能で環境に優しく、そして経済的に利益のある製品に変換するために、さまざまな技術的アプローチを使用することができます。

例えば、欧州で最近開発された処理プロセスとして、EuPhoReとMePHRecがあります。EuPhoReはリンを含むバイオマスを熱分解する処理プロセス。MePHRecは下水汚泥からリン酸塩を回収するもう一つのタイプの熱処理プロセスです（詳細は以下のリンクにてご覧ください）。

https://www.euphore.de/prozess-steps.htm
https://bmbf.nawam-erwas.de/en/project/krn-mephrec
https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/pilotanlage-stuttgarter-verfahren/

主流の処理法または灰化オペレーションに加え、肥料成分の最終製品の重金属含有量を減らすための補助的な手順がしばしば使用されます。

下水汚泥と下水汚泥焼却灰の処理には、*熱化学法*が用いられています。塩化マグネシウム（MgCl）などの塩を添加し、約1000℃の温度で重金属を塩化物として気相に移行させ、有機汚染物質を破壊します。
*冶金プロセス*でも化学結合リンを回収することができます。乾燥させた下水汚泥や下水汚泥灰を製錬炉に入れ、1500℃以上の高温で加熱します。スラグに含まれる重金属は蒸発するか、液体金属相に移行します。

その結果、標準的な肥料成分に比べて、カドミウム含有量を1/12、ウラン含有量を1/26に削減することができます。

その他の供給源

リンを得るための他の有望なプロセスとして、バイオガス発電があります。

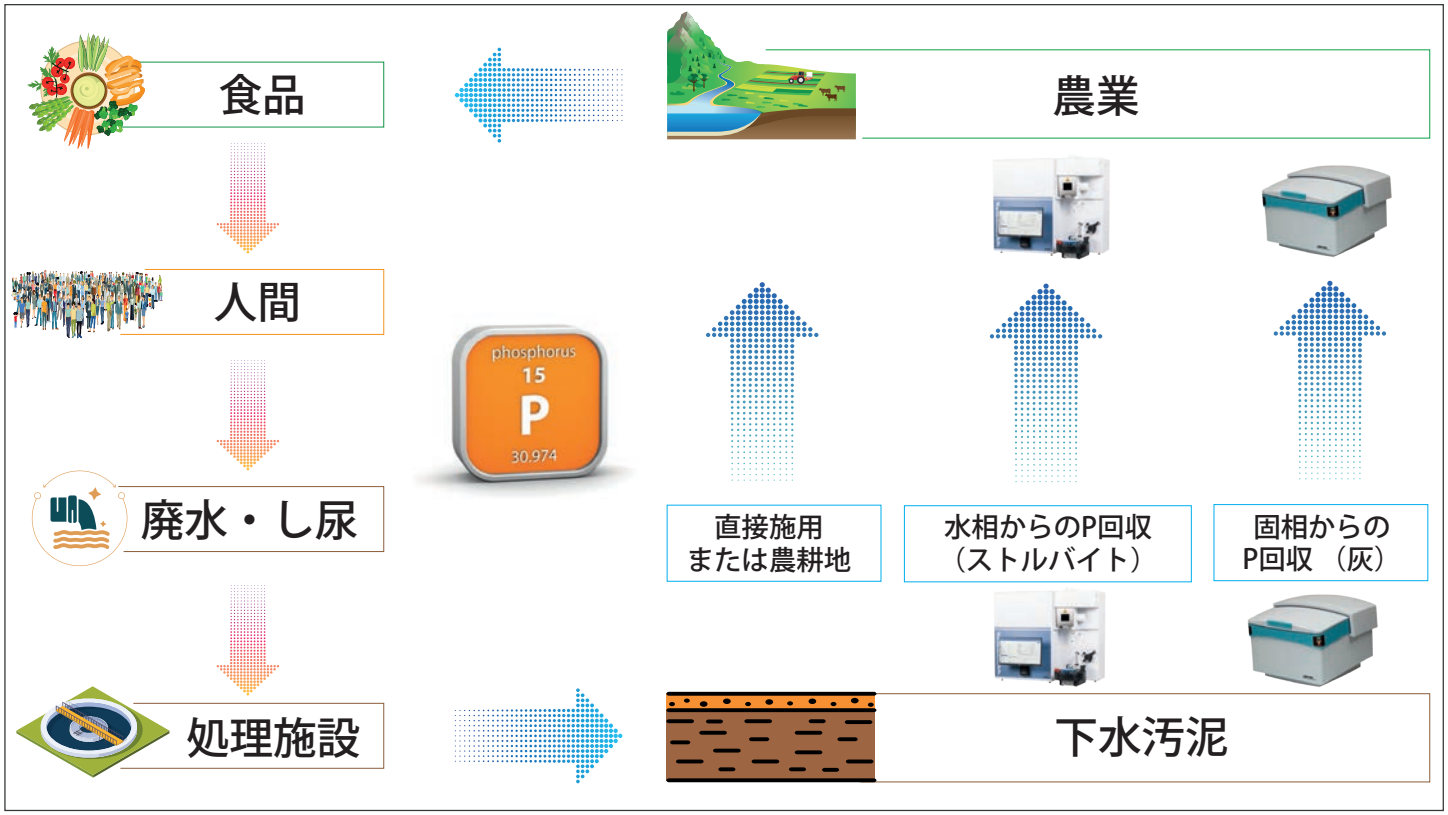
バイオガス処理で廃棄される原料（下水、サイレージ、有機廃棄物など）には、発酵後もリンが多く含まれています。ドイツだけでも年間1億トンが発生していると言われています。この作業はまだ産業規模では一般的ではありませんが、肥料のバリューチェーンに関わるプランナーは、この廃棄物を焼却してリンを含む灰を作り、肥料にすることを確立しています。

リン酸塩の測定は、すでに述べた下水回収・リサイクルと同様に、プロセスの重要なポイントで実施されることとなるでしょう。

分析ポイント

リンを含む廃棄物の回収・リサイクルには、そのプロセスや対象物にかかわらず、リンや金属などの元素を正確に測定することが重要です。

ED-XRFとICP-OESを採用した分析装置により、受入検査から工程内または出荷製品の品質管理まで、どのような作業が可能になるかを示したのが次の図です。



分析ソリューション

本レポートでは、リンの回収・リサイクルプロセスの様々な段階における下水汚泥や灰、リン酸、ビールやワインの副産物などの元素含有量の分析に最適な結果を提供できる、2つの推奨される分光分析技術に焦点を当てています。その技術とは、ICP-OESとED-XRFです。

ICP-OES：SPECTROGREEN

ICP-OESは、下水汚泥やリン酸の分析などですでに広く使われており、事実、標準機として受け入れられています。

ICP-OES分析装置では、少量の下水汚泥を湿式分解した試料を超高温のアルゴンプラズマに導入します。試料は気化し、原子は部分的にイオン化します。高温により、原子やイオンはより高いエネルギー状態に励起され、つづけて試料に含まれる元素（リン、カドミウムなど）固有の波長を持つ光が放出されます。放出された光は光学系に送られ、回折格子などを用い波長ごとに分光されます。最終的に、光は、これら波長の光の強度を定量化する検出器アレイに導かれます。このような原理で試料中の各元素を同定し測定します。

リン回収／リサイクルアプリケーションに推奨される装置：スペクトロ社の誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES）SPECTROGREENは、独自のラジアル型*デュアル・サイドオン・インターフェース（DSOI）技術*により、最新の垂直トーチ型デュアル・ビューシステムに匹敵する感度を持ちながら、そのシステムが持つ複雑さや不安材料を回避することができます。



SPECTROGREENのDSOI技術は、極微量元素の同定や、廃水やスラッジなど難しいマトリックスの試料を扱う際に大きな利点をもたらします。ユーザーは、1回の分析で必要となる全波長領域のデータを得ることができ、付属のSPECTRO ICP Analyzer Proソフトウェアは比較的シンプルな操作で分析を実行することが可能です。これらの利点は、高い生産性が求められる焼却プラントにとって非常に重要なポイントとなってきます。

SPECTROGREENは、コンパクトながら耐久性および信頼性に優れた装置で、下水汚泥中の元素や回収中の水和物（ストルバイト）の分析を含む、さまざまなポイントでのリンおよび重金属の重要な測定を行うことができます。

品質管理のための使用としては次のタスクが挙げられます：肥料用汚泥（過リン酸塩を含む）の受入分析。肥料生産用リン酸中の不純物検査。肥料製品中のリン化合物およびその他元素の出荷前検査。

ED-XRF：SPECTRO XEPOS

ICP-OESは、下水汚泥の分析において、すでに様々な産業や政府の規格に採用されています。しかし、多くの場合、焼却施設の計画者や管理者にとっては、代替技術がより好ましいものと考えられる可能性があります。ED-XRF分析装置は、大抵のICP装置と比較し、よりシンプルで操作が簡単、かつ迅速であり、試料の前処理をほとんど、あるいはまったく必要としません。

こういった理由から、さまざまな企業や規格団体では、今や、下水汚泥などの廃水分析のためのED-XRF採用が検討されてきています。

ED-XRFは、ICP-OESのように高温のプラズマを試料に導入するのではなく、X線管球を使用し試料中の原子を励起させます。X線が試料中の原子に当たると、その原子から蛍光X線が発生します。発生した蛍光X線のエネルギーは元素に固有であるため、分析装置はそのエネルギーを処理／解析することで、試料中の各元素を同定します。

優れた例：SPECTRO　　XEPOSは、スペクトロ社のエネルギー分散型蛍光X線分析装置（ED-XRF）フラッグシップモデルです。XEPOSは、リンのリサイクルおよび回収バリューチェーンのための分析ソリューションとしてその中核を担っています。

スペクトロとその親会社であるアメテックは、循環型社会の実現に向け、持続可能な社会の構築に取り組んでいます。このコンパクトなED-XRF分析装置はその理想的な例です。



本装置は、環境分析のためのルーチン検査に、革新的で効率的、かつ手頃な価格での購入をサポートします。

SPECTRO　XEPOSは、主要元素、微量・極微量元素の多元素分析を高速、簡便、高精度に行うことができる装置です。励起源と検出器の改良により、同クラスの蛍光X線分析装置に比べ高感度、低検出下限を実現しています。

SPECTRO　XEPOSは、測定対象元素の種類に応じた様々なバージョンを用意しています。先進のX線管球および独自の適応性に優れた励起テクノロジーにより、対象元素に最適化された最高感度での分析を可能とします。本機器独自のTurboQuant　IIソフトウェアパッケージは、未知の液体、粉体、固体試料を迅速かつ正確に分析し、リン処理で注目されるすべての元素を分析します。このように、SPECTRO　XEPOSは、迅速なスクリーニング分析から精密な品質管理まで、さまざまなアプリケーションに対応したアットライン・プロセスを提供します。

SPECTRO　XEPOSの得意分野の一つ：環境試料です。下水汚泥やその他廃液の分析では、焼却プラントにおけるリンの回収／リサイクルプロセスの最も重要なポイントにおいて、迅速かつ正確なスクリーニングと測定を提供することができます。

はじめに、プロセスは下水汚泥の灰の受入検査から始まるため、パーセントレベルのリン濃度の測定を提供します。加えて、カドミウムやウランなどの重金属の極微量成分測定を可能とします。

本装置は、プロセスの中間および最終段階にも適用できます。SPECTRO　XEPOSは、灰の生成から肥料成分として最終製品になるまで、リンの含有量を迅速、簡便、正確に測定し、品質管理に役立てます。

SPECTRO　XEPOSは、使いやすさを第一に考えて設計されています。試料調製はほとんど必要なく、ソフトウェアも使いやすいため、焼却プラントのオペレーターは簡単に使いこなすことができます。

おわりに

リン問題の概要が明らかになるにつれ、焼却プラントが回収とリサイクルにおいて重要な役割を担っていることがわかります。工場管理者は、プロセスの要所要所でリンと重金属の濃度を正確かつ確実に測定する必要があります。こういった用途には、最先端のED-XRFとICP-OESを搭載した元素分析装置が最適です。使いやすく、効率的な分析ソリューションを提供します。

お問合せ

装置の見積りを依頼

装置のデモを依頼

リソースライブリ

www.spectro.com

GERMANY
SPECTRO Analytical Instruments GmbH
Boschstrasse 10
D-47533 Kleve
Tel: +49.2821.892.0
Fax: +49.2821.892.2202
spectro.sales@ametek.com

U.S.A.
SPECTRO Analytical Instruments Inc.
91 McKee Drive
Mahwah, NJ 07430
Tel: +1.800.548.5809
+1.201.642.3000
Fax: +1.201.642.3091
spectro-usa.sales@ametek.com

JAPAN
アメテック株式会社
スペクトロ事業部
105-0012
東京都港区芝大門1-1-30
電話: 03-4400-2390
ファックス: 03-4400-2301
spectro-japan.info@ametek.com

Subsidiaries: ▶**FRANCE:** Tel +33.1.3068.8970, Fax +33.1.3068.8999, spectro-france.sales@ametek.com, ▶**GREAT BRITAIN:** Tel +44.1162.462.950, Fax +44.1162.740.160, spectro-uk.sales@ametek.com, ▶**INDIA:** Tel +91.22.6196 8200, Fax +91.22.2836 3613, sales.spectroindia@ametek.com, ▶**ITALY:** Tel +39.02.94693.1, Fax +39.02.94693.650, spectro-italy.sales@ametek.com, ▶**JAPAN:** Tel +81.3.6809.2405, Fax +81.3.6809.2410, spectro-japan.info@ametek.co.jp, ▶**SOUTH AFRICA:** Tel +27.11.979.4241, Fax +27.11.979.3564, spectro-za.sales@ametek.com,

SPECTRO operates worldwide and is present in more than 50 countries. For SPECTRO near you, please visit www.spectro.com/worldwide

© 2021 AMETEK Inc., all rights reserved, subject to technical modifications • H-21, Rev. 0 • Photos: SPECTRO, Adobe Stock
Registered trademarks of SPECTRO Analytical Instruments GmbH • SPECTRO: USA (3,645,267); EU (005673694); “SPECTRO”: EU (009693763); “SPECTRO XEPOS”: Germany (39851192), USA (2,415,185); SPECTROGREEN: EU (017931732)