

CAS Insights

サステナブルな 農業

肥料製造におけるイノベーション



CAS



A division of the
American Chemical Society

はじめに

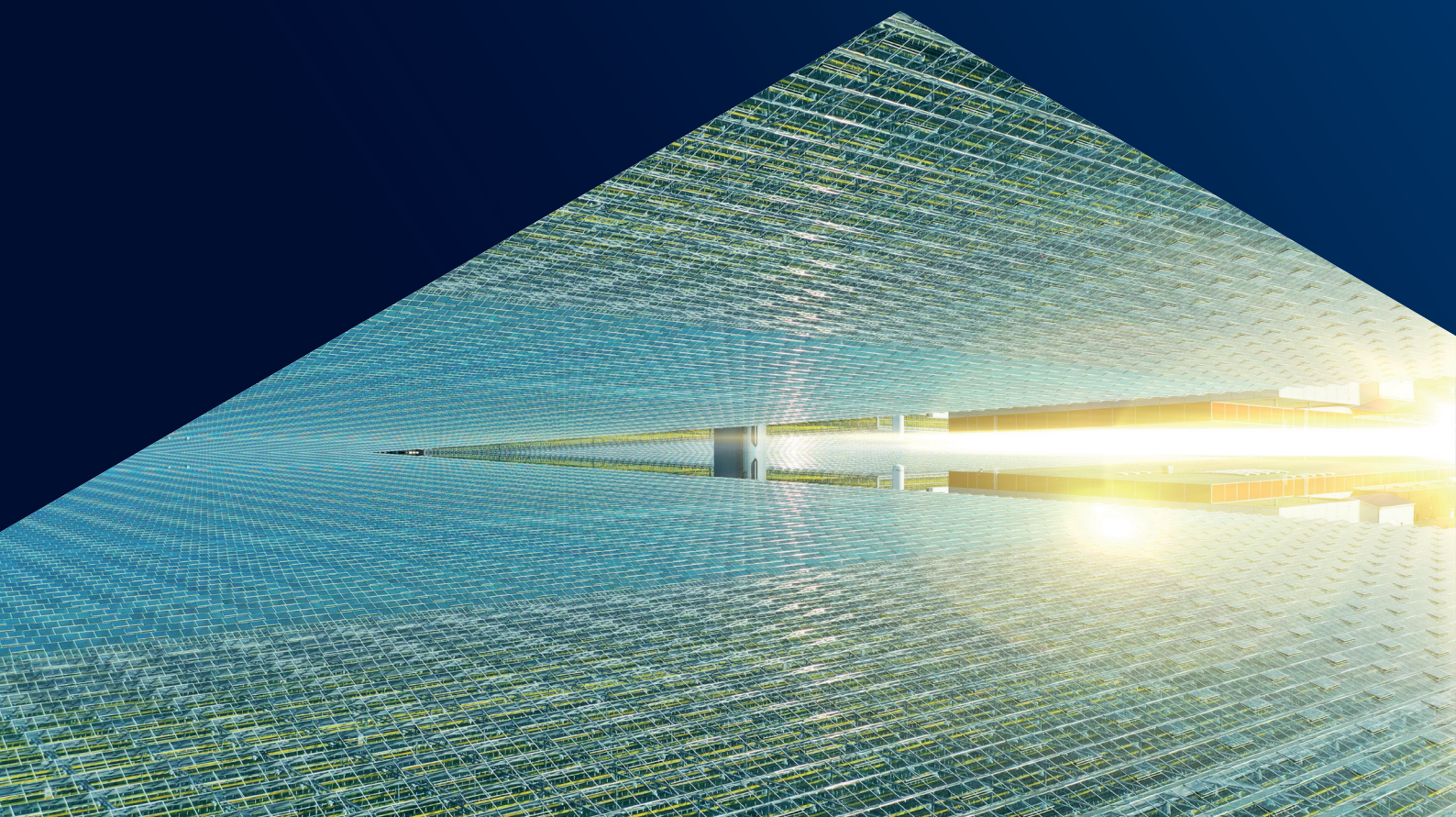
2030年には85億人、2050年には97億人に達するとされる世界人口の加速度的な増加によってもたらされる将来の食糧需要を満たすため、現代の農法は苦戦を強いられています¹。さらに、世界の食糧需要は2010年から2050年の間に35%から56%増加すると予測されています²。

プレッシャーが高まると、経済的な影響も出てきます。国連食糧農業機関および気候変動に関する政府間パネル「気候変動と土地に関する特別報告書」の報告によると、農業による排出量はCO₂換算で年間10.2～12.0ギガトン(GtCO₂e)と推定されています³。

肥料にとって最も重要な栄養素は窒素、リンそしてカリウムであり、カルシウム、マグネシウム、硫黄など他の栄養素はそれほど頻繁に使用されない傾向にあります⁴⁻⁷。合成肥料には、リン鉱石から採掘されるリン、カリ鉱石から採掘されるカリウム、そして大気窒素から作られるアンモニアが使用されます⁸。2020年にはアンモニアが1億4,700万トン、リン酸塩が2億1,900万トン、カリウムが4,400万トン生産されたと算定されています⁹⁻¹¹。これだけの量であるにもかかわらず、2015年の世界人口の半数近く(約35億人)は、

窒素肥料だけで生産された食料に依存していたと考えられています¹²。有機肥料には、さまざまな動物の糞尿、アルファルファ粉、血粉、魚粉、木灰などのほか、廃水や下水も含まれます¹³。糞尿やその他の農業廃棄物はかさばるため、その処理、輸送、処分には高いコストがかかります。世界の有機肥料市場は2029年までに198.8億ドルに達すると予測されています。これは、対象期間の2022～2029年の年平均成長率11.6%で計算したものです¹⁴。

中国は世界最大の肥料消費国で、2019年には4,500万トン以上の肥料を消費しました¹⁵。2位はインド、3位は米国で、それぞれ2,940万トン、2,040万トンの消費量でした¹⁵。これらの統計は、肥料の需要は供給をはるかに上回っていることを示唆しています。肥料コストの高騰が、世界の食糧安全保障のリスクをさらに高めています。2021年に肥料価格が80%上昇したのに続き、2022年に入ってから、生産コストの上昇、ロシア・ウクライナ戦争などの紛争による供給の混乱、制裁措置、そして中国からの輸出制限などが原因で、さらに30%上昇しています¹⁶。



肥料製造におけるカーボン・フットプリント

何百万トンもの肥料が生産・消費されている中、既存の肥料製造の方法は、長期的に見て持続可能ではありません。**リン鉱石**は有限で、再生不可能な資源であるため、次の世紀には枯渇する恐れがあります。その大部分(70%)はモロッコに集中しており、次いで中国(5%)、シリアとアルジェリア(3%)、ロシア、南アフリカ、米国、エジプトおよびヨルダン(各2%)の順になっています^{17,18}。ハーバーボッシュ法による窒素からの**アンモニア**合成(そのすべてが肥料に転換されるわけではありません)も、年間推定500トンのCO₂を排出するエネルギー集約的プロセスであり、世界の総エネルギー排出量の1.8%を占めています¹⁹。土壌にアンモニア系肥料を使用すると、強い温室効果ガスである亜酸化窒素が発生する可能性があります¹⁹。リン鉱石の採掘も窒素の固定も、石油や天然ガスなどの化石燃料に大きく依存しています。炭酸カリウムという形態で使われる**カリウム**は北半球上部で採掘される可溶性塩に由来しており、その供給量はまだ十分ではあるものの、埋蔵量の92%がわずか4カ国、つまりカナダ(世界の埋蔵量の53%)、ロシア、ベラルーシ、そしてドイツに集中しています²⁰。

ほとんどの有機肥料はかさばるため、長距離輸送は現実的ではなく、またコストもかかります。そのため、有機肥料の生産は近場に限られ、それがさらに生産規模の拡大における壁となっています。廃水や下水は、医薬品や病原体、そして重金属によって汚染されていることがあるため²¹、農地や作物に汚染物質が移ることを防ぐには、検査および軽減措置が必要です²²。また、有機肥料と化学合成肥料の使用に伴うCO₂排出量の真の規模に関しては、大きな不確実性があります^{3,23}。

人類は転換点を迎えています。食糧不足に対抗し、気候変動と戦うには、抜本的な変革が必要です。農業界は、水、エネルギー、栄養資源を効率的に利用し、環境影響を抑え、経済的な強みを維持し、そして枯渇する有限資源への依存を最小限に抑えることで、サステナブルなシステムを構築し、現在および将来の世代の食糧を支えられるよう努力する必要があります(図1)²⁴。

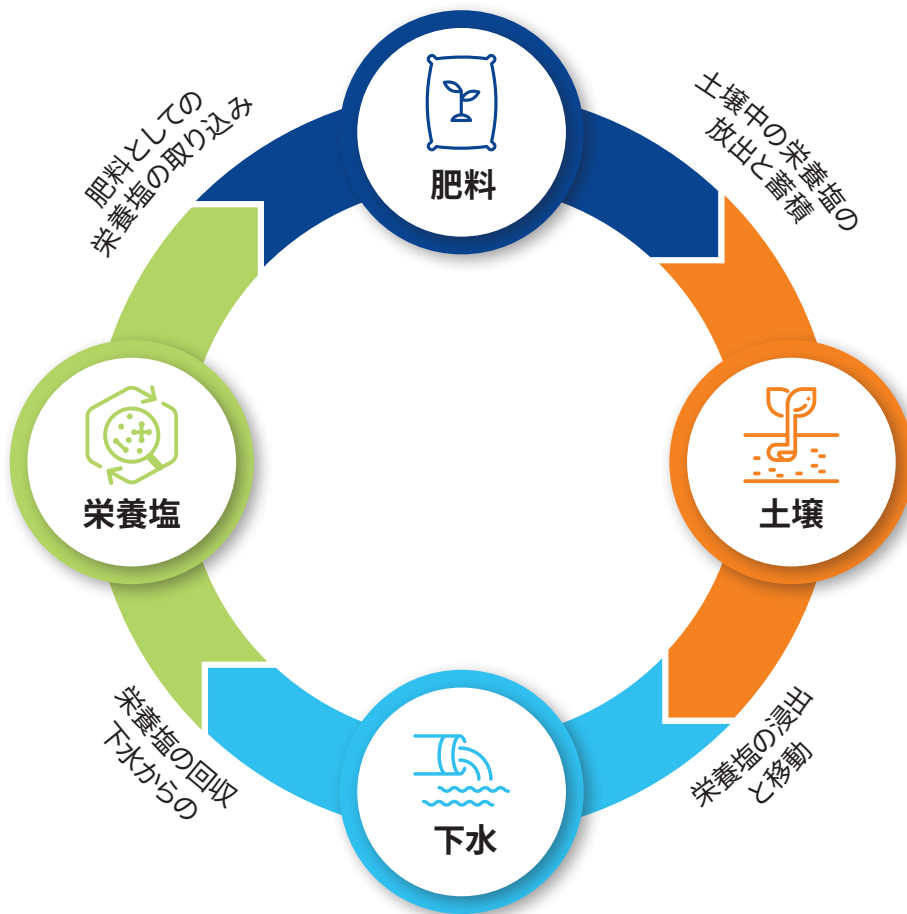


図1. サステナブルな農業における栄養塩の循環

廃棄物を無駄にしない - 栄養塩回収のチャンス

循環型バイオエコノミーという用語は、自然と調和するサステナブルなウェルビーイングの達成を目標に、生物資源(植物、動物、微生物、有機廃棄物を含む派生バイオマス)の管理を通じて、私たちの土地、食料、健康、産業システムを変革し、管理する手法として、最近人気を博しています^{25,26}。

従来、固形廃棄物や下水汚泥廃棄物は埋め立て地や海洋に投棄されるか、陸地に散布されてきました。下水汚泥廃棄物は焼却されることもあり、廃棄物の量は減りますが、灰は残ってしまいます²⁷⁻²⁹。

し尿や処理済み下水汚泥を土地に過剰施用すると、窒素やリンなどの栄養塩が蓄積し、その結果、表流水が富栄養化し、水生生態系にダメージを与える可能性があります³⁰⁻³²。このような問題に対処するため、廃棄物の新たな用途を提供する一方で、汚染を減らし、ひいては人間や環境の健康への害を軽減する、代替となるシステムやプロセスが開発されています。

廃水処理で発生する下水汚泥は、その種類にもよりますが、さまざまなプロセスを通じて再利用できる大きな可能性を秘めています。下水汚泥は、熱分解することでバイオ炭、ハイドロ炭、または灰にでき、これらはエネルギーと栄養塩を豊富に含んでいるため、肥料製造に適しています^{21,33-35}。

糞尿や農業廃棄物を有機肥料の配合に利用したり、農業廃棄物や多くの種類の廃水から化学栄養素を抽出したりすることで、利用可能な化学栄養塩の供給を補いながら、輸送や処分のコストを削減することができます。

表 1. 一般的に使用されている廃棄物からの栄養塩回収プロセスの概要

方法	説明
生物学的	
嫌気性消化	<ul style="list-style-type: none">- 空気(または酸素)のない密閉空間で微生物が有機物を分解する自然のプロセスである⁴⁰- 農業廃棄物、産業廃棄物、都市廃棄物の有機画分の処理における推奨方法になっている- 方法:加水分解(ポリマー分解)、酸生成(揮発性脂肪酸の生成)、酢酸生成、メタン生成⁴⁰- 生成物は発酵消化液(バイオガス製造時の副産物)⁴⁰
堆肥化	<ul style="list-style-type: none">- 好気性、好熱性、微生物を介した有機物の腐植質(フミン質)への生物化学的変換⁴¹- 生成物は堆肥
ミミズ堆肥	<ul style="list-style-type: none">- 微生物に加えミミズも用いて固体有機廃棄物を有用な有機肥料に分解する生物化学的変換技術- 食品や植物、動物、医薬品、そして下水からの廃棄物の変換に使用可能⁴²⁻⁴⁴- 生成物はミミズ堆肥

廃棄物から栄養塩を回収するその他の一般的な方法を表1にまとめます。

潜在的にサステナブルな方法には、以下のようなものがあります

- **環境に配慮した技術** - 堆肥、ミミズ堆肥、バイオ炭による堆肥、嫌気性消化、グリーンエネルギーを利用した熱分解
- **新たに登場した技術** - 電気分解と正浸透
- **スマートナノ肥料** - ナノテクノロジーと、分解可能な送達システムにより制御された栄養素放出との組み合わせ³⁶
- **バイオリファイナリー** - サステナブルなエネルギー、バイオ燃料、食料、化学物質、そして再生可能なバイオマスを原料とした栄養豊富な肥料の複合生産。³⁷ 他のシステム(例:作物と家畜の混合システム)と統合することで、環境面で付加的な利益をもたらす³⁸
- **ストルバイト** - ストルバイト(MgNH₄PO₄)は、マグネシウム、アンモニウム、リン酸塩からなる結晶鉱物で、十分な栄養源であり、廃水からリンを回収するための持続可能な手段と考えられている。配合肥料や緩効性肥料としても使用できる³⁹



方法	説明
化学的	
化学的沈殿と結晶化	<ul style="list-style-type: none"> - 都市下水からリン酸塩を回収するための最も一般的な化学技術 - ストラバイトの生成は、廃水汚泥の脱水からリンとアンモニアを回収する処理プロセスとして実用化されている*。⁴⁵ - リン酸塩の回収には、方解石を種結晶としてリン酸カルシウムの結晶化が行われてきた⁴⁶ - 生成物は $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ (ヒドロキシアパタイト)、$\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ストラバイト)
イオン交換膜電解 (ED)	<ul style="list-style-type: none"> - 廃水からの栄養塩の抽出は、イオン交換膜を利用して行われる⁴⁷ - 選択的 ED やアニオン/カチオン同時選択的 ED のような高度な方法は、さらに効率的である^{48,49} - 生成物は $(\text{NH}_4)^+$、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、$(\text{PO}_4)^{3-}$
物理的	
焼却、ガス化、熱分解灰による栄養塩回収	<ul style="list-style-type: none"> - 焼却灰にはリンなどの栄養分が豊富に含まれており、肥料原料の一部として利用可能である - 熱分解では、限られた酸素供給下で廃棄物を加熱する。これは、家畜排泄物の管理において非常に重要なプロセスである⁵⁰。熱分解によって、バイオオイルとバイオ炭、または木炭が産生される - ガス化は、より高温で行われる熱分解の一形態で、これにより主にガスと少量のバイオ炭が生成される⁵¹ - 生成物は 灰およびバイオオイル、バイオ炭または炭 (熱分解)
正浸透 (FO)	<ul style="list-style-type: none"> - FO は、浸透圧勾配と半透膜を利用して溶質と水が分離する現象である^{52,53} - 選択的浸透膜を使うことで、リン酸とアンモニウム栄養塩を廃水から回収しやすくなる^{52,53} - 生成物はリン酸塩とアンモニウムの栄養塩
吸着、吸収、ソルベント	<ul style="list-style-type: none"> - 栄養塩の回収のために、ゼオライトや粘土、バイオポリマー、バイオ灰などの天然吸着剤が研究されてきた⁵⁴⁻⁵⁶ - バイオ炭を使用し、豚舎の排水から 96% のアンモニウムとリン酸塩を回収した⁵⁴ - ポビエライトまたはストラバイトを安定させるために、MgO と共に Na-ゼオライトと K-ゼオライトを使ってアンモニウムとリンの回収を行った⁵⁵。一方、Ca-ゼオライトは Ca-リン酸塩を形成することで、廃水からのリン酸塩を回収を容易にした⁵⁶ - 生成物はストラバイトとリン酸カルシウム
膜ろ過	<ul style="list-style-type: none"> - 嫌気性消化スラリー (泥漿) から栄養素を回収するのに有用 - 精密ろ過、限外ろ過、ナノろ過膜を組み合わせることにより、発酵残渣から 94% 以上の窒素を回収することができる⁵⁷ - アンモニア (30 ~ 36%) とリン酸塩 (83 ~ 95%) の回収も、ナノろ過によって実証されている⁵⁸ - 生成物はリン酸塩とアンモニウムの栄養素

*ストラバイト沈殿は、栄養塩回収における生物学的・物理的方法として分類できる。

栄養塩回収のハイライトとトレンド

CAS コンテンツコレクション™ は、専門家によって精選された情報源です。これを活用し、栄養塩の各種回収方法や、どんなコンセプトが循環型経済をもたらすためのイノベーションを推進しているのかを調査しました。

出版物とトピックス

肥料を対象に広範囲にわたって検索した結果、2001年から2021年の間に、121,213 件の特許と 125,228 件の学術論文がヒットしました。学術論文と特許の公開数は、年々着実に増加していましたが、2017 年をピークに減少に転じています（図 2）。この期間における特許公開の動向は、この分野で相当数の特許を公開している中国の影響を反映しているようです。

学術論文で取り上げられているトピックスは、肥料が作物の成長や生物学的反応、そして土壌肥沃度に及ぼす影響に関するものでした。その中には（潜在的な汚染物質としての）栄養塩の除去や、肥料利用のための栄養塩の回収に焦点を当てているものもありました。特許関連するトピックでは、肥料の栄養素回収や配合に関連する有機物質とプロセスに主に焦点が当てられており、そこには糞尿や灰、そして発酵など、バイオ廃棄物関連の主題も含まれています。

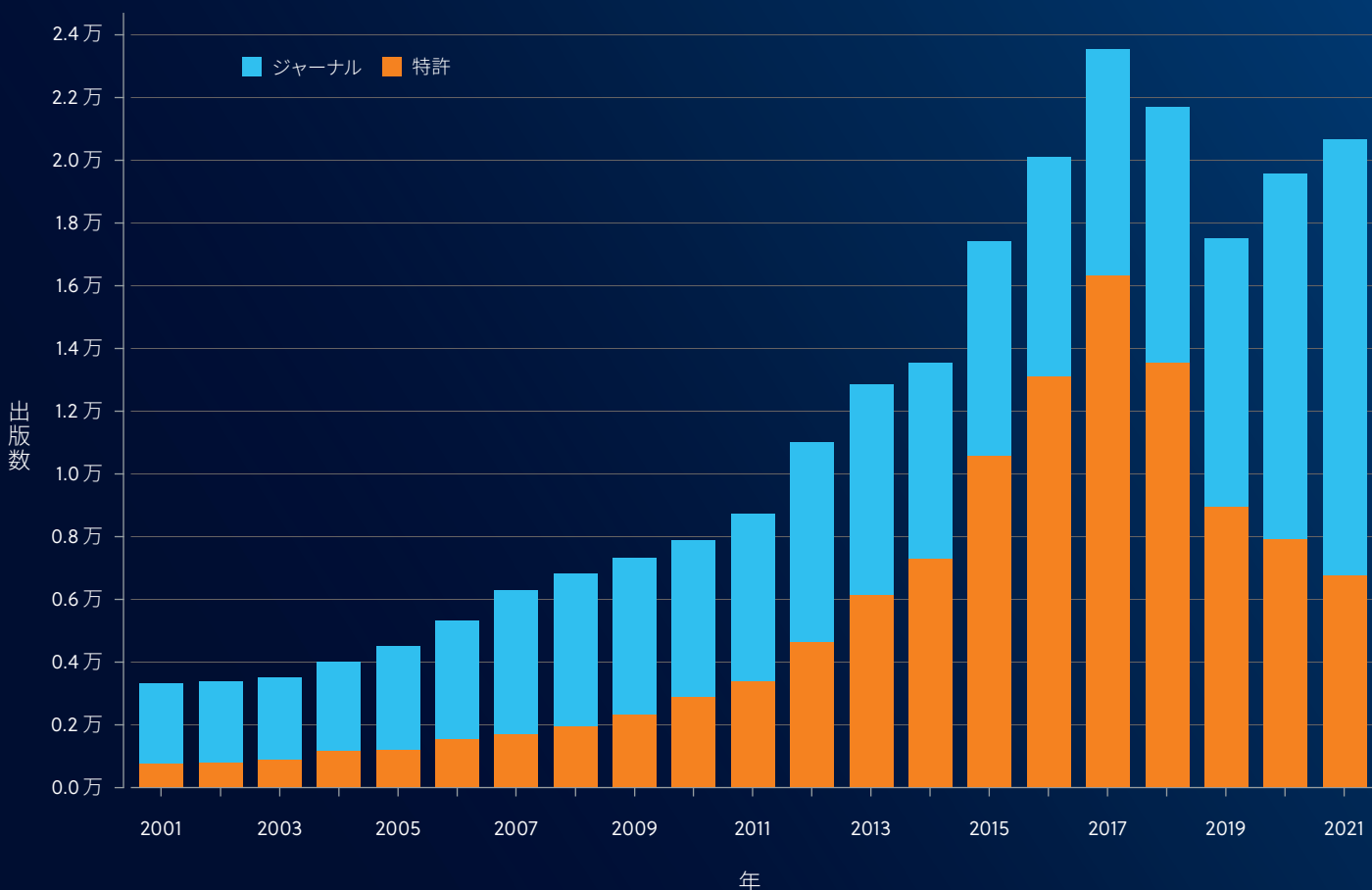


図 2 肥料、持続可能性、リサイクル、回収といったトピックを対象に広範囲な検索で得られた学術論文件数および特許件数 (2001 年～ 2021 年)



栄養塩回収という主題で登場する物質クラスとして、「元素」、「酸化物」、「水酸化物」、「金属塩」、「鉱物」、「ポリマー」などがありました。炭素が最も頻繁に登場する元素で、約 14,000 の出版物に掲載されています。言及が多かった酸化物はケイ素 (1,214 件)、カルシウム (917 件)、マグネシウム

(882 件) の酸化物などで、水酸化物ではカルシウム、マグネシウム、アルミニウムの水酸化物が最も多く引用されていました。化合物では炭酸カルシウム (1,820 件) が最も多く言及されており、沈殿剤と吸着剤の両方で使用されていました。

廃棄物と廃水からの栄養塩回収

調査の結果、廃水からの栄養素回収で最も顕著な方法は生物学的プロセスで、これは 2001 年から 2018 年の間に 40% 増加しています。それに対し物理的方法と化学的方法は、2002 年から 2012 年の間にそれぞれ 20% と 27% 文献数が増加しています。

特許では、物理的方法に関する公開出版物の 53% という大きな割合を占めています。なお化学的方法に関する出版物では 49.5%、生物学的方法に関する出版物では 37% を占めています。

排水処理後の汚泥、バイオ灰、そして灰からの栄養塩回収に関する文献数は調査対象期間で増加した一方、下水汚泥による肥料に関する文献数は少ないままでした。**炭/バイオ炭**に関しては、特許とジャーナル両方で明確な増加傾向が見られ、特にジャーナルは 2019 年にやや減少したものの、継続的な増加を示しています。特許公開数は、特に 2013 年以降は増加しています。ただし、前年比の数字では多少変動が見られます (図 3)。

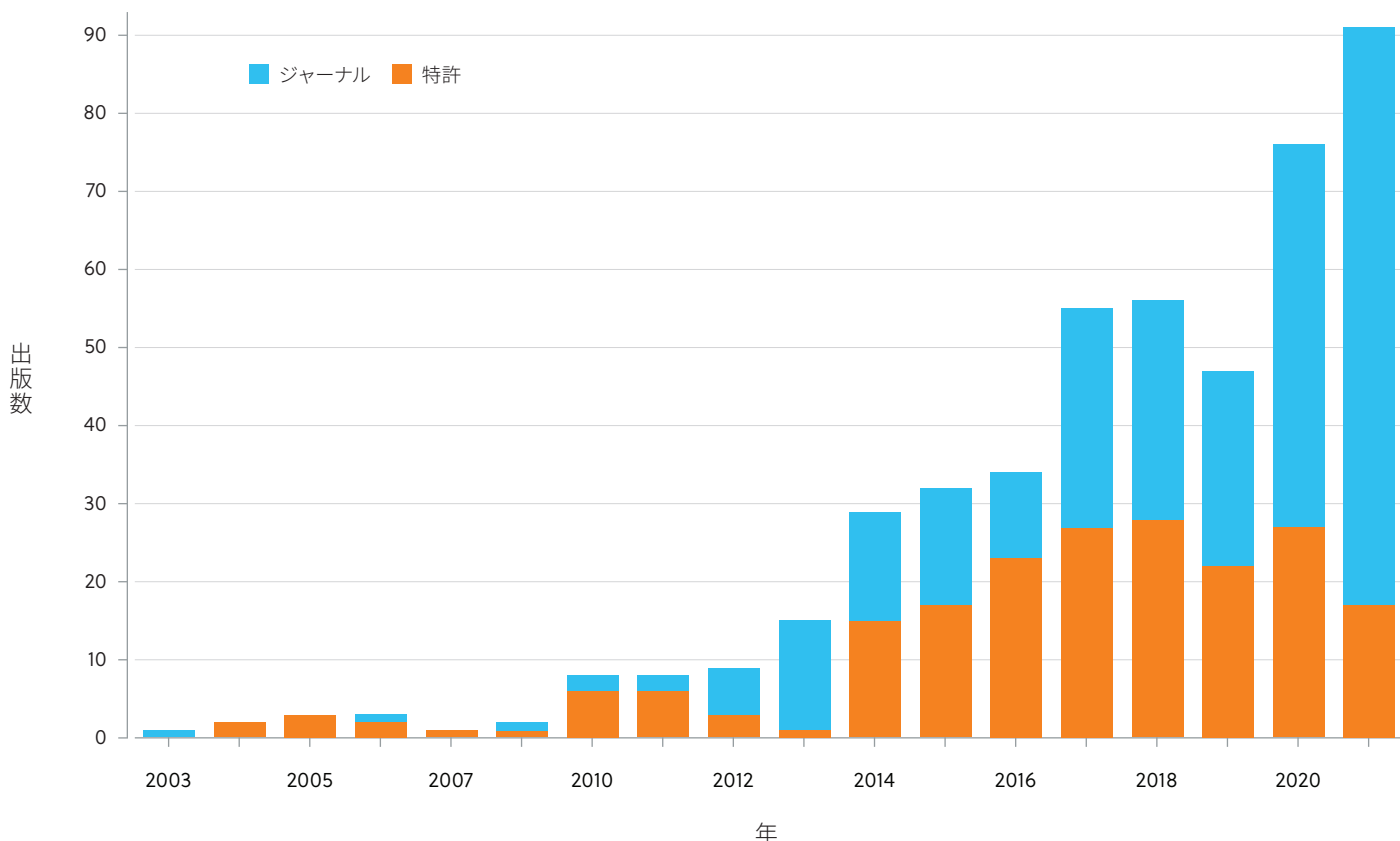


図 3 廃棄物と廃水に関連して、肥料やサステナビリティ、リサイクル、そして回収などのトピックを対象に絞り込んだ検索から得られた、バイオ灰の CAS 用語を含む特許件数と文献数 (2000 年～ 2021 年)。2001 年、2002 年、2008 年の値はゼロ (図では省略)。

ストルバイトの文献数は大幅に増加し、そのうち六水和物 $[(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ の研究が主流でした。ストルバイトカリウム $(\text{MgK}(\text{PO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ についてはほとんど発表されていません。ストルバイト生成に関しては、主要コンセプト

は「沈殿廃水処理」で、コンセプト全体の90%以上を占めており、次いで「結晶化による廃水処理」となっています。どちらのコンセプトもストルバイトの回収に直接関係しています(図4)。

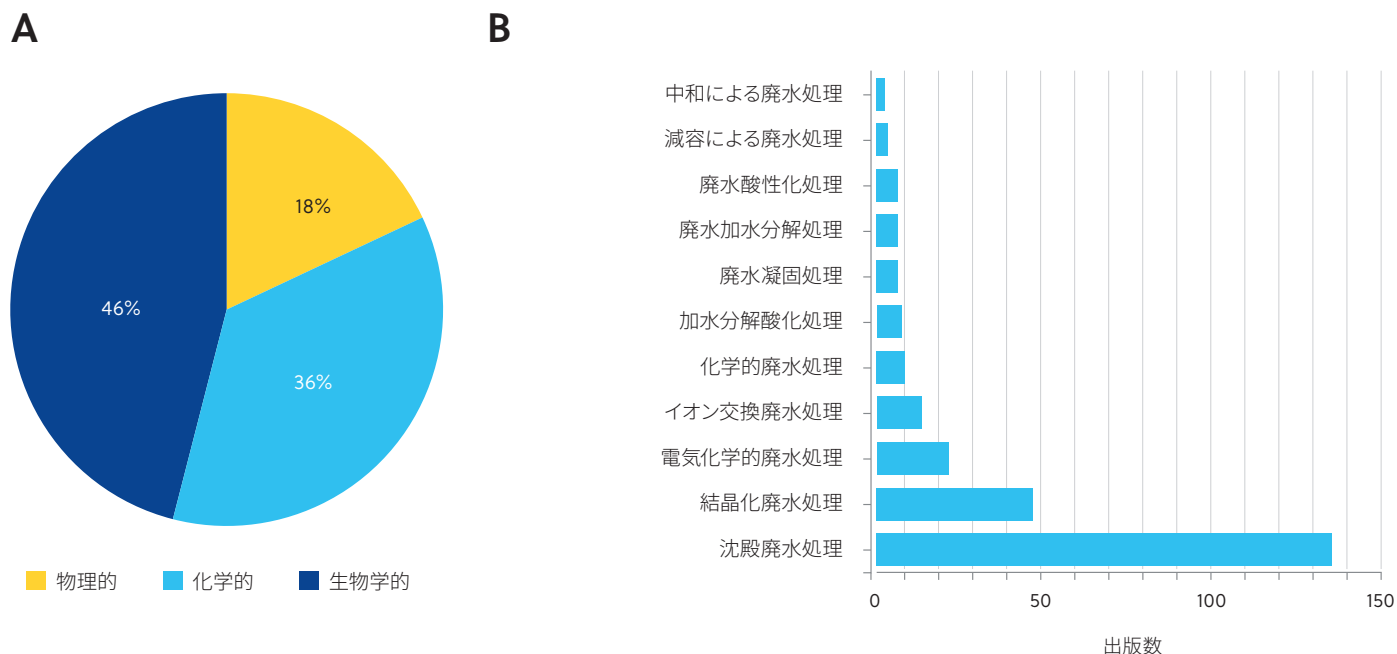


図4 A) ストルバイト沈殿の廃水処理に関する生物学的、化学的、物理的方法に関する出版物および B) ストルバイト生成の化学的処理のコンセプト

グリーンアンモニアの合成

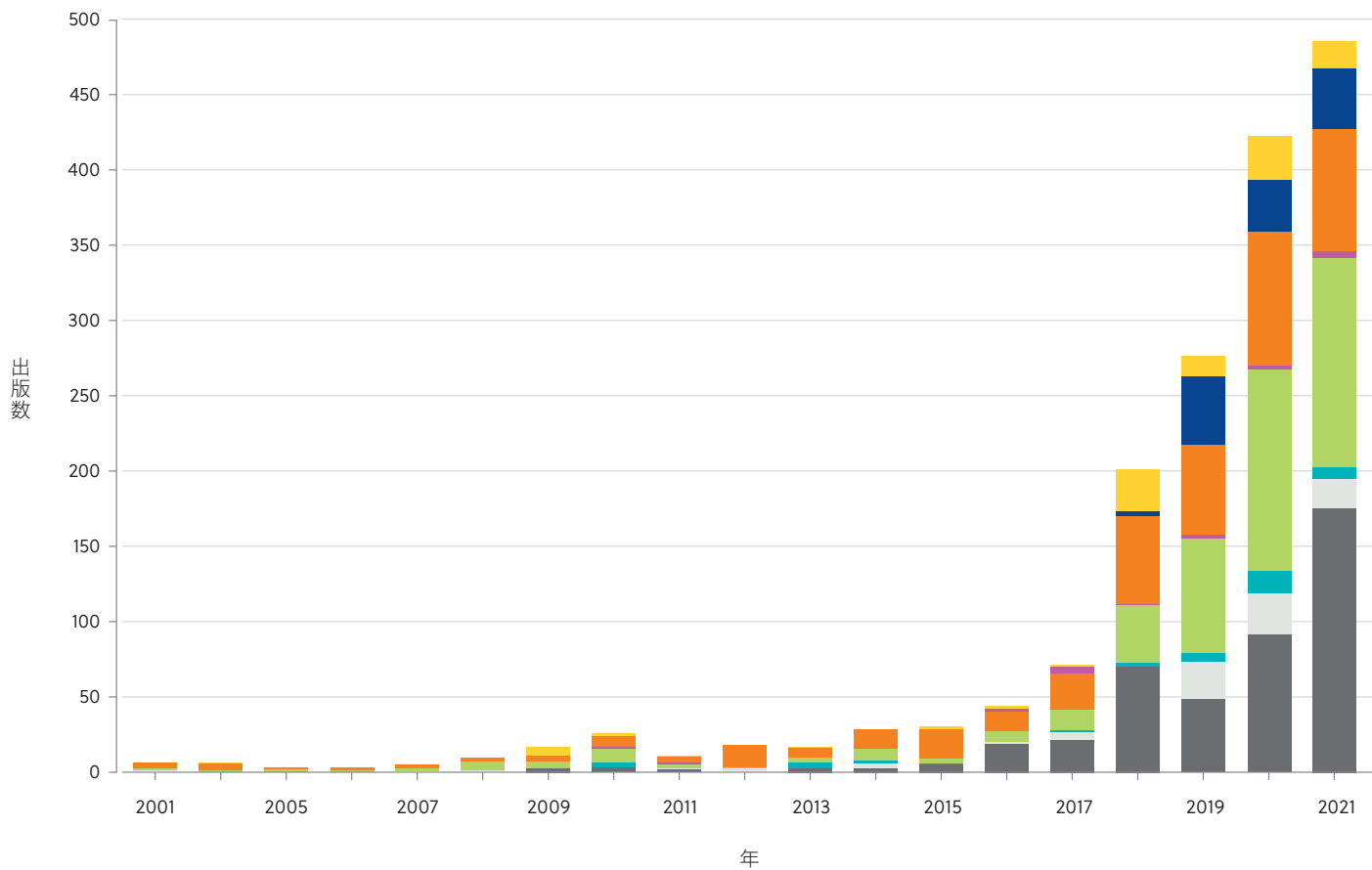
再生可能エネルギー、窒素、水を使用してアンモニアを100%再生可能でカーボンフリーにするプロセスは、主に論文にて扱われ、2020年には特許文書が出版物総量の20%に達しました。2017年から2021年にかけては、グリーンアンモニアの触媒合成に関与する物質で大幅な増加が見られました。2017年には100種類未満だった物質が、2021年には500種類近くまで増加しています。

物質クラスの特定のサブセット、例えば無機素材、有機/無機低分子、元素、および配位化合物などが、グリーンアンモニア合成に使用される新触媒の多くを構成しています(図5)。

グリーンアンモニアおよび窒素還元反応において最も頻出するコンセプトは、「電気化学的還元」とその関連コンセプトでした。対して、「光触媒」は頻度が低くなっています。光触媒または電極触媒による窒素削減を主題にした論文の割合は、2001年の1%から2021年には25%に増加しています。

触媒に対する評価に関しては、52%(2,256件中1,167件)の文献が反応の「速度」、「収率」、そして「機構」について論じています。電極触媒に焦点を当てた1,500件の文書の40%以上がファラデー効率を論じており、これはアンモニア生産の潜在的効率に重点を置いていることと一致しています。2,256件の文献のうち、 ^{15}N またはその他の同位体標識試薬の使用について論じているのはわずか4.1%でした。これらの試薬を使用することは、ある方法で生成されたアンモニアの生成源とその再現性を判断する上で重要であり、対照実験をより一貫して実施する必要性を示唆しています。

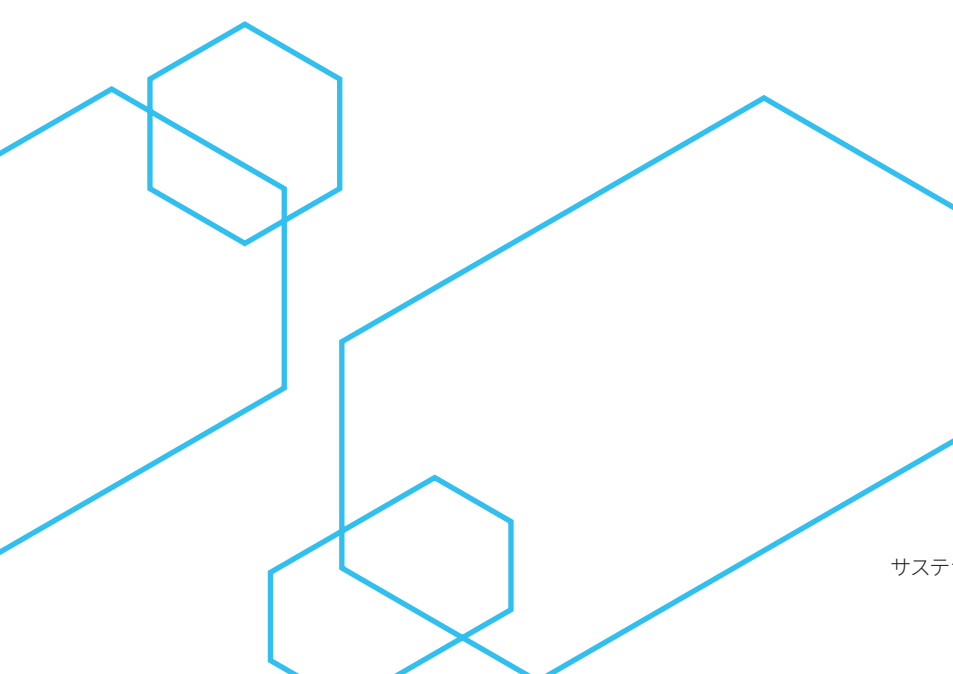




物質分類

- 合金
- 元素
- 有機/無機低分子
- 塩/塩化合物
- 配位化合物
- 鉍物
- ポリマー
- 表形式無機化合物

図5. グリーンアンモニア合成研究における年別の論文発表動向と触媒に使用されている物質 (2001-2021年)。2003年～2004年のデータは利用できません。



未来への展望

CAS コンテンツコレクションを用いたこの分析を通して、食品や畜産、そして工業生産において人間社会から排出されるさまざまな廃棄物と廃水から肥料の栄養素を回収・リサイクル・再利用する一般的な方法や、台頭している技術などを理解することができます。

廃棄物から肥料用の主要栄養塩を積極的に回収することで、エネルギー消費を削減し、有限な世界の埋蔵量に対する将来的な懸念を払拭できるでしょう。肥料製造の「グリーン」な代替プロセスには、グリーンアンモニアの合成に加え、リンを含んでいる廃棄物から肥料栄養塩を回収することも含まれます。統合されたシステムなら、複数のプロセスを併用することでさまざまな生成物を生産でき、しかも廃棄物も最小で済みます。その実現可能性は実証されています。例えば、「バイオ燃料作物」としての藻類の工業生産では、バイオ燃料生産用のバイオリファイナリーシステムで使用するバイオマスを生産するには、培養地に微細藻類の成長に必要な栄養塩が必要になります⁵⁹。そこで、動物由来の廃水や嫌氣的に消化された糞尿を栄養分に提供するため、システムに供給します。脂質が豊富な豚の排泄物を供給することで、バイオディーゼルの生産に利用可能な脂質蓄積性の藻類バイオマスを増殖させることが一例です⁶⁰。さらに水産養殖の廃水を水耕栽培またはアクアポニックスの植物生育システムに組み込むというのも、そのシステムの一例です。これにより、植物バイオ燃料や食品の複合的生産が可能になります⁶¹。

リンや窒素の回収を含むいくつかのプロセスが商業化されています。

これには以下が含まれます。

- AirPrex® 特許取得済の汚泥最適化プロセス (CNP Cycle GmBH 社)。バイオソリッドからストルバイトを除去する⁶²
- Ostara 社独自の Pearl® および WASSTRIP® 技術。リンと窒素を回収し、環境に責任を持つ肥料 (Crystal Green®) を作る設計となっている⁶³
- Metso Outotec 社 の AshDec® Thermochemical P-Recovery システム。下水汚泥灰からリンを回収する⁶⁴
- RecoPhos 社は熱還元性 RecoPhos-Process を開発。下水汚泥および下水汚泥灰からリンを回収する⁶⁵

上記の廃棄物回収イノベーションの例は、エネルギー消費を最小限に抑え、そして世界の有限なリンと窒素とカリウム の埋蔵量を保護することで、サステナブルな農業は循環型バイオエコノミーに大きく貢献することを証明しています。

専門家により精選された情報源である CAS コンテンツコレクションを用いて、肥料や廃棄物の回収プロセスを定量分析しました。分析にあたっては、経時的な分析に加え、国や地域、特定の研究分野、そして物質を横断的に調査しました。これらの栄養廃棄物回収の動向を明らかにすることで、関連業界の研究者の方々が、廃棄物管理の効率および持続可能性を向上させながら、同時に肥料を代替栄養資源で補強できるようになることが期待されます。



参考文献

1. United Nations. *World Population Prospects 2022*. United Nations, 2022. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (アクセス日 2022-11-22)
2. van Dijk, M.; Morley, T.; Rau, M. L.; Saghai, Y. A Meta-analysis of Projected Global Food Demand and Population at Risk of Hunger for the Period 2010–2050. *Nat. Food*. **2021**, *2*, 494–501. DOI: 10.1038/s43016-021-00322-9.
3. Menegat, S.; Ledo, A.; Tirado, R. Greenhouse Gas Emissions from Global Production and Use of Nitrogen Synthetic Fertilisers in Agriculture. *Scientific Reports*. **2022**, *12* (1), 14490. DOI: 10.1038/s41598-022-18773-w.
4. Fertilizer 101: Micronutrients. <https://www.tfi.org/the-feed/fertilizer-101-micronutrients> (アクセス日 2022-11-22)
5. The Fertilizer Institute. *Nitrogen*. <https://www.tfi.org/sites/default/files/tfi-nitrogen.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
6. The Fertilizer Institute. *Phosphorus*. <https://www.tfi.org/sites/default/files/tfi-phosphorus.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
7. The Fertilizer Institute. *Potassium*. <https://www.tfi.org/sites/default/files/tfi-potassium.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
8. *How fertilizers are made*. <https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made/> (アクセス日 2022-11-22)
9. Apodaca, L. E. *Nitrogen (fixed)-ammonia*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nitrogen.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
10. Jasinski, S. M. *Phosphate rock*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-phosphate.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
11. Jasinski, S. M. *Potash*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-potash.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
12. Our World in Data. *How many people does synthetic fertilizer feed?* <https://ourworldindata.org/how-many-people-does-synthetic-fertilizer-feed#:~:text=estimate%20it%20has%20supported%2042,to%2048%20percent%20in%202008> (アクセス日 2022-11-22)
13. McLaurin, W.; Reeves, W.; Gaskin, J. W.; Harris, G. H.; Kissel, D. E.; Boyhan, G. E. *How to Convert an Inorganic Fertilizer Recommendation to an Organic One*. University of Georgia, 2014. <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C853&title=How%20to%20Convert%20an%20Inorganic%20Fertilizer%20Recommendation%20to%20an%20Organic%20One> (アクセス日 2022-11-22)
14. GlobeNewswire. *Organic Fertilizers Market Worth \$19.88 Billion by 2029 – Exclusive Report by Meticulous Research®*. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/06/02/2455459/0/en/Organic-Fertilizers-Market-Worth-19-88-Billion-by-2029-Exclusive-Report-by-Meticulous-Research.html> (アクセス日 2022-11-22)
15. Statista. *Consumption of Fertilizers Worldwide in 2019, by Country*. <https://www.statista.com/statistics/1287852/global-consumption-fertilizer-by-country/> (アクセス日 2022-11-22)
16. World Bank.org. *Fertilizer Prices Expected to Remain Higher for Longer*. <https://blogs.worldbank.org/opendata/fertilizer-prices-expected-remain-higher-longer> (アクセス日 2022-11-22)
17. Cordell, D.; Drangert, J. O.; White, S. The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought. *Global Environmental Change*. **2009**, *19* (2), 292–305. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
18. *Approaching Peak Phosphorus*. *Nature Plants*. **2022**, *8*, 979. DOI: 10.1038/s41477-022-01247-2.
19. The Royal Society. *Ammonia: Zero-carbon Fertiliser, Fuel and Energy Store*. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
20. Institute of Environmental Management & Assessment. *Special K: Potassium Production*. <https://www.iema.net/articles/special-k-potassium-production> (アクセス日 2022-11-22)
21. Fijalkowski, K.; Rorat, A.; Grobelak, A.; Kacprzak, M. J. The Presence of Contaminations in Sewage Sludge - the Current Situation. *J. Environ. Manage.* **2017**, *203* (Pt 3), 1126–1136. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.068.

22. Kowalska, A.; Grobelak, A.; Almås, Å. R.; Singh, B. R. Effect of Biowastes on Soil Remediation, Plant Productivity and Soil Organic Carbon Sequestration: A Review. *Energies*. **2020**, *13* (21), 5813. DOI: 10.3390/en13215813.
23. Walling, E.; Vaneeckhaute, C. Greenhouse Gas Emissions from Inorganic and Organic Fertilizer Production and Use: A Review of Emission Factors and their Variability. *J. Environ. Manage.* **2020**, *276*, 111211. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111211.
24. Urso, J. H.; Gilbertson, L. M. Atom conversion efficiency: A New Sustainability Metric Applied to Nitrogen and Phosphorus use in Agriculture. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2018**, *6* (4), 4453–4463. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b03600.
25. World Economic Forum. *Why the World Needs a 'Circular Bioeconomy' - for Jobs, Biodiversity and Prosperity*. <https://www.weforum.org/agenda/2020/10/circular-bioeconomy-nature-reset/> (アクセス日 2022-11-22)
26. The Circular Bioeconomy Alliance. *The Circular Bioeconomy Alliance*. https://efi.int/sites/default/files/files/cba/Circular_Bioeconomy_Alliance_leaflet_final.pdf (アクセス日 2022-11-22)
27. United States Environmental Protection Agency. *Fact Sheet: Use of Incineration for Biosolids Management*. <https://www.epa.gov/biosolids/fact-sheet-use-incineration-biosolids-management> (アクセス日 2022-11-22)
28. United States Environmental Protection Agency. *Biosolids Technology Fact Sheet: Use of Landfilling for Biosolids Management*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/biosolids-technology-factsheet.pdf> (アクセス日 2022-11-22)
29. United States Environmental Protection Agency. *Learn about Ocean Dumping*. <https://www.epa.gov/ocean-dumping/learn-about-ocean-dumping> (アクセス日 2022-11-22)
30. National Ocean Service. *What is Eutrophication?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/eutrophication.html> (アクセス日 2022-11-22)
31. United States Environmental Protection Agency. *Indicators: Nitrogen*. <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-nitrogen> (アクセス日 2022-11-22)
32. United States Environmental Protection Agency. *Indicators: Phosphorus*. <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-phosphorus> (アクセス日 2022-11-22)
33. Yuan, H.; Lu, T.; Wang, Y.; Chen, Y.; Lei, T. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma*. **2016**, *267*, 17–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.020>.
34. Liu, H.; Basar, I. A.; Nzihou, A.; Eskicioglu, C. Hydrochar derived from municipal sludge through hydrothermal processing: A critical review on its formation, characterization, and valorization. *Water Res.* **2021**, *199*, 117186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117186>.
35. Liu, H.; Hu, G.; Basar, I. A.; Li, J.; Lyczko, N.; Nzihou, A.; Eskicioglu, C. Phosphorus recovery from municipal sludge-derived ash and hydrochar through wet-chemical technology: A review towards sustainable waste management. *Chem. Eng. J.* **2021**, *417*, 129300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129300>.
36. Mejias, J.H.; Salazar, F.; Pérez Amaro, L.; Hube, S.; Rodriguez, M.; and Alfaro, M. Nanofertilizers: A Cutting-Edge Approach to Increase Nitrogen Use Efficiency in Grasslands. *Front. Environ. Sci.* **2021**, *9*, 635114. DOI: 10.3389/fenvs.2021.635114.
37. De Buck, V.; Polanska, M.; and Van Impe, J. Modeling Biowaste Biorefineries: A Review. *Front. Sustain. Food Syst.* **2020**, *4*, 11. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00011.
38. Parajuli, R.; Dalgaard, T.; Birkved, M. Can Farmers Mitigate Environmental Impacts Through Combined Production of Food, Fuel and Feed? A Consequential Life Cycle Assessment of Integrated Mixed Crop-Livestock System with a Green Biorefinery. *Sci. Total Environ.* **2018**, *619–620*, 127–143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.082.



39. Vasa, T.N.; Pothanamkandathil Chacko, S. Recovery of Struvite from Wastewaters as an Eco-Friendly Fertilizer: Review of the Art and Perspective for a Sustainable Agriculture Practice in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. **2021**, *48*, 101573. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101573.
40. Logan, M.; Visvanathan, C. Management Strategies for Anaerobic Digestate of Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Current Status and Future Prospects. *Waste Manage. Res.* **2019**, *37* (1_suppl), 27–39. DOI: 10.1177/0734242x18816793.
41. Füleky, G.; Benedek, S. Composting to Recycle Biowaste. In *Sociology, organic farming, climate change and soil science*, Lichtfouse, E. Ed.; Springer Netherlands, 2010; pp 319–346.
42. Liu, M. D.; Cong, N.; Zhang, W.; Wang, Y. J. Vermicomposting of Chinese Medicine Residue with Earthworms. *Advanced Materials Research*. **2012**, *518–523*, 3577–3584. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.3577.
43. Srivastava, V.; Vaish, B.; Singh, R. P.; Singh, P. An Insight to Municipal Solid Waste Management of Varanasi City, India, and Appraisal of Vermicomposting as its Efficient Management Approach. *Environ. Monit. Assess.* **2020**, *192* (3), 191. DOI: 10.1007/s10661-020-8135-3.
44. Hill, G. B.; Baldwin, S. A. Vermicomposting Toilets, an Alternative to Latrine Style Microbial Composting Toilets, Prove Far Superior in Mass Reduction, Pathogen Destruction, Compost Quality, and Operational Cost. *Waste Management*. **2012**, *32* (10), 1811–1820. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.04.023.
45. Cullen, N.; Baur, R.; Schauer, P. Three Years of Operation of North America's First Nutrient Recovery Facility. *Water Sci. Technol.* **2013**, *68* (4), 763–768. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2013.260>.
46. Song, Y.; Weidler, P. G.; Berg, U.; Nüesch, R.; Donnert, D. Calcite-Seeded Crystallization of Calcium Phosphate for Phosphorus Recovery. *Chemosphere*. **2006**, *63* (2), 236–243. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.08.021.
47. Ward, A. J.; Arola, K.; Thompson Brewster, E.; Mehta, C. M.; Batstone, D. J. Nutrient Recovery from Wastewater Through Pilot Scale Electrodialysis. *Water Res.* **2018**, *135*, 57–65. DOI: 10.1016/j.watres.2018.02.021.
48. Liu, R.; Wang, Y.; Wu, G.; Luo, J.; Wang, S. Development of a Selective Electrodialysis for Nutrient Recovery and Desalination During Secondary Effluent Treatment. *Chem. Eng. J.* **2017**, *322*, 224–233. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.149.
49. Ye, Z.-L.; Ghyselbrecht, K.; Monballiu, A.; Pinoy, L.; Meesschaert, B. Fractionating Various Nutrient Ions for Resource Recovery from Swine Wastewater Using Simultaneous Anionic and Cationic Selective-Electrodialysis. *Water Res.* **2019**, *160*, 424–434. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.085.
50. Cantrell, K.; Ro, K.; Mahajan, D.; Anjom, M.; Hunt, P. G. Role of Thermochemical Conversion in Livestock Waste-to-Energy Treatments: Obstacles and Opportunities. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2007**, *46* (26), 8918–8927. DOI: 10.1021/ie0616895.
51. Brewer, C. E.; Schmidt-Rohr, K.; Satrio, J. A.; Brown, R. C. Characterization of Biochar from Fast Pyrolysis and Gasification Systems. *Environ. Prog. Sustainable Energy*. **2009**, *28* (3), 386–396. DOI: 10.1002/ep.10378.
52. Jafarinejad, S. Forward Osmosis Membrane Technology for Nutrient Removal/Recovery from Wastewater: Recent Advances, Proposed Designs, and Future Directions. *Chemosphere*. **2021**, *263*, 128116. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128116.
53. Xie, M.; Shon, H. K.; Gray, S. R.; Elimelech, M. Membrane-Based Processes for Wastewater Nutrient Recovery: Technology, Challenges, and Future Direction. *Water Res.* **2016**, *89*, 210–221. DOI: 10.1016/j.watres.2015.11.045.
54. Yu, J.; Hu, H.; Wu, X.; Zhou, T.; Liu, Y.; Ruan, R.; Zheng, H. Coupling of Biochar-Mediated Absorption and Algal-Bacterial System to Enhance Nutrients Recovery from Swine Wastewater. *Sci. Total Environ.* **2020**, *701*, 134935. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134935.

55. Hermassi, M.; Dosta, J.; Valderrama, C.; Licon, E.; Moreno, N.; Querol, X.; Batis, N. H.; Cortina, J. L. Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery and Stabilization from Urban Sewage Sludge Anaerobic Digestates using Reactive Sorbents. *Sci. Total Environ.* **2018**, *630*, 781–789. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.243.
56. Hermassi, M.; Valderrama, C.; Gibert, O.; Moreno, N.; Querol, X.; Batis, N. H.; Cortina, J. L. Recovery of Nutrients (N-P-K) from Potassium-Rich Sludge Anaerobic Digestion Side-Streams by Integration of a Hybrid Sorption-Membrane Ultrafiltration Process: Use of Powder Reactive Sorbents as Nutrient Carriers. *Sci. Total Environ.* **2017**, *599–600*, 422–430. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.140.
57. Fernandes, F.; Silkina, A.; Fuentes-Grünewald, C.; Wood, E. E.; Ndovela, V. L. S.; Oatley-Radcliffe, D. L.; Lovitt, R. W.; Llewellyn, C. A. Valorising Nutrient-Rich Digestate: Dilution, Settlement and Membrane Filtration Processing for Optimisation as a Waste-Based Media for Microalgal Cultivation. *Waste Management.* **2020**, *118*, 197–208. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.08.037.
58. Gerardo, M. L.; Aljohani, N. H. M.; Oatley-Radcliffe, D. L.; Lovitt, R. W. Moving Towards Sustainable Resources: Recovery and Fractionation of Nutrients from Dairy Manure Digestate using Membranes. *Water Res.* **2015**, *80*, 80–89. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.016.
59. Barbera, E.; Bertuccio, A.; Kumar, S. Nutrients Recovery and Recycling in Algae Processing for Biofuels Production. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2018**, *90*, 28–42. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.004.
60. Olguín, E. J.; Castillo, O. S.; Mendoza, A.; Tapia, K.; González-Portela, R. E.; Hernández-Landa, V. J. Dual Purpose System that Treats Anaerobic Effluents from Pig Waste and Produce *Neochloris oleoabundans* as Lipid Rich Biomass. *New Biotechnol.* **2015**, *32* (3), 387–395. DOI: 10.1016/j.nbt.2014.12.004.
61. Chiquito-Contreras, R.G.; Hernandez-Adame, L.; Alvarado-Castillo, G.; Martínez-Hernández, M.d.J.; Sánchez-Viveros, G.; Chiquito-Contreras, C.J.; Hernandez-Montiel, L.G. Aquaculture—Production System and Waste Management for Agriculture Fertilization—A Review. *Sustainability.* **2022**, *14*, 7257. DOI: 10.3390/su14127257.
62. CNP Cycles. *AirPrex® Patented Sludge Optimization Process*. <https://cnp-cycles.de/en/processes/airprexr-p-recovery-process> (アクセス日 2022-11-22)
63. Ostara. *Sustainable Water Treatment and Nutrient Recovery Solutions*. <https://ostara.com/nutrient-management-solutions/> (アクセス日 2022-11-22)
64. Metso:Outotec. *AshDec® Thermochemical P-Recovery from Sewage Sludge Ash*. https://nutriman.net/sites/default/files/2020-12/AshDec_Nutriman_1.pdf (アクセス日 2022-11-22)
65. RecoPhos. *RecoPhos - Recovery of Phosphorus*. <http://www.recophos.org/> (アクセス日 2022-11-22)



サステナブルな肥料の
現在の課題や研究状況に
関する詳細については、
cas.org/sustainable-agに
掲載されている CAS の
出版物をご覧ください。



CAS は、世界中のイノベーターと提携し科学の進歩を加速する科学情報ソリューションのリーダーです。CASでは、未知との関連性を明らかにするために、1400人の専門家が科学的知識を精選、連結、分析しています。100年以上にわたって、科学者や特許専門家、そしてビジネスリーダーは、hindsight（過去分析）、insight（洞察）、そして foresight（先見の明）を獲得し、過去の知識を基盤としたより良い未来を発見するために、CASのソリューションと専門知識を活用しています。CASは、米国化学会の情報部門です。

詳細は cas.org をご覧ください。

CAS

A division of the
American Chemical Society

