

## 持続可能な農業に向け、重要性が増す化学肥料の環境負荷低減

### —新たなビジネス創出に向けた動きも—

2022/10

三井物産戦略研究所  
技術・イノベーション情報部インダストリーイノベーション室  
野崎駿介

#### Summary

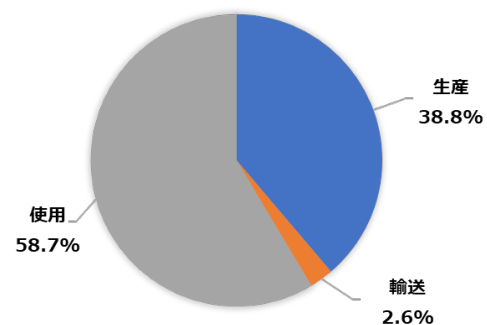
- 2050年に向けて100億人近くまで増加する人口に対応するために食料の増産は必須であり、化学肥料は欠かせない。しかし、化学肥料には環境負荷が大きい側面がある。化学肥料の環境負荷とは、生産時のGHG排出や使用時の環境流出による汚染であり、それらを低減させることが求められている。
- 化学肥料の環境負荷を低減するポイントには①肥料生産時の脱炭素化と②肥料使用時の環境流出の防止がある。①については、肥料の主原料となるアンモニア製造時の高エネルギー消費プロセスであるハーバー・ボッシュ法の脱炭素化があり、②については、肥料の使用を最小化するための土壌への施肥管理に加えて、土壌内で吸収されず農地外へ流出する肥料のモニタリング、肥料の高効率化技術などがある。本稿では、それぞれ現状の課題とそれに対する有望な技術を解説する。

#### 1. 化学肥料の低環境負荷化がなぜ必要か

化学肥料とは、鉱石などの天然物を原料にして化学的な処理を施した肥料のことである。工業的に製造され低価格かつ品質が安定しているといった特徴がある。

食料生産において窒素は非常に重要な元素である。化学肥料の多くは原料に窒素分を含んでおり、2050年に向けて約100億人となる人口増加に対応し、食料生産を支えるには欠かせない。一方、化学肥料が環境への負荷となっているという懸念がある。課題としては、脱炭素および窒素循環である。脱炭素の観点では、例えば窒素肥料の生産から使用において、GHG（温室効果ガス）排出量全体の2.1%を占める。そのうち、生産過程での排出割合が約39%、使用時における割合が約59%、残りが輸送となっており<sup>1</sup>、生産と使用に占める割合が大きい（図表1）。使用に関する部分では、窒素の循環についての問題点が指摘されている。窒素肥料の原料となるアンモニアは、作物の成長に寄与しているのはそのうちの半分程度であるといわれており、窒素ガスとして大気に戻る以外は、温室効果ガスや河川の富栄養化など環境汚染の原因となる。

図表1：窒素肥料排出割合



出所：Scientific reports 12, August 2022, 「Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilizers in agriculture」より三井物産戦略研究所作成

<sup>1</sup> Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture | Scientific Reports (nature.com)

上記のような背景をもとに、持続可能な農業を目指し、EUではFarm to Fork戦略における取り組みにおいて、2030年までに化学肥料の使用量を20%削減という野心的な目標を掲げている。日本においても化学肥料の使用量を2030年までに2016年での使用量に対し20%削減の目標を設定している。ただし、安易な肥料の使用量の削減は、生産量の低下につながる懸念もある<sup>2</sup>。

今後、化学肥料は食料増産を支える重要な役割を期待されており、どのように環境への負荷を減らしていくか注目すべきである。

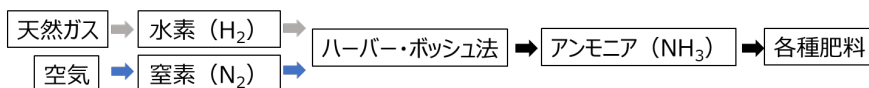
## 2. 化学肥料が与える環境への負荷

### 2-1. 生産における課題：化学肥料の主原料となるアンモニアの脱炭素化

化学肥料の原料となるアンモニアの製造には、天然ガスといった石化資源を原料として水素を取り出し、空気中の窒素反応させる、ハーバー・ボッシュ法が使われている（図表2）。窒素と水素を1:3の体積比で混合し鉄系触媒により500～600℃、

200～500atmという高温、高圧の条件下でアンモニアを生成する。このようなエネルギー消費型のプロセス

図表2：ハーバー・ボッシュ法による肥料製造プロセス概略

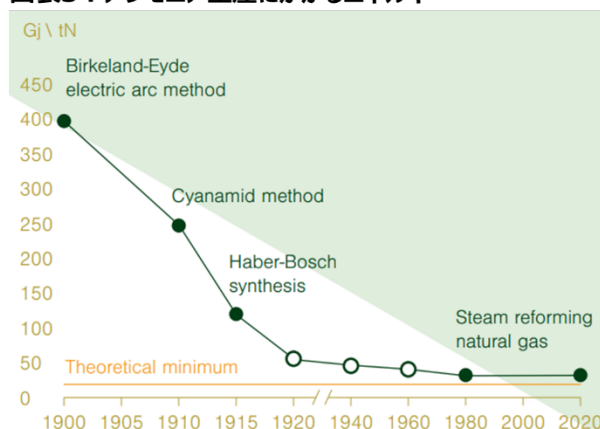


出所：各種資料より三井物産戦略研究所作成

は、大規模である方が効率は良い。ハーバー・ボッシュ法は、空気の成分の78%を占める窒素を、窒素肥料の原料であるアンモニアへ変換する技術である。この技術が無ければ全世界の人口のうち30億人は養うことができないといわれているほど、食料生産はハーバー・ボッシュ法に依存していると言っても過言ではない。

1906年に発明されて以来、ハーバー・ボッシュ法は、改良が重ねられ、省エネルギー化が進んでいるが、その最適化は理論上の限界に近い（図表3）。その一方、脱炭素化と食料増産を背景に、より環境にやさしいアンモニアの生産方法が必要となっている。

図表3：アンモニア生産にかかるエネルギー



Source: Fertilizers Europe

出所：Fertilizers Europe, 「Paving the way to green ammonia and low-carbon fertilizers」  
<https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2020/07/Paving-the-way-to-green-ammonia-and-low-carbon-fertilizers-digital.pdf>

<sup>2</sup> Impact assessment of EC 2030 Green Deal Targets for sustainable crop production – Research@WUR

## 2-2. 使用における課題：窒素循環の適正化

窒素肥料は、土壌中の微生物の作用により最終的には硝酸イオンとなる。半分程度は作物に栄養として吸収されるものの、吸収されなかった硝酸イオンは土壌に残る。一部は窒素ガスとして大気に還元されるが、大部分は雨水により河川へ流出する（図表4）。硝酸イオンが流出した河川などは富栄養化により、プランクトンが増殖し、水中の酸素が欠乏してしまう。その結果、水中の生物の生命を脅かす。

窒素肥料の増加量は、硝酸イオンを大気へ還元するという自然循環の量を超えている。その結果、環境中に硝酸イオンなどを蓄積し続け環境負荷を与え続けることになる。

さらに、GHGの一種である一酸化二窒素として大気へ放出されるなど環境へ悪影響を与えてしまう。仮に肥料の生産における脱炭素化が成功しても、過剰な量の肥料が使われていては環境に対する影響は変化しないだろう。

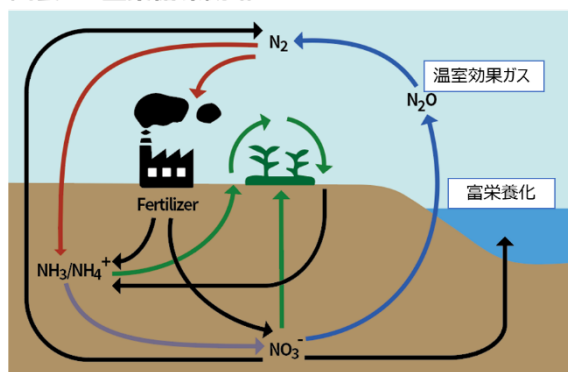
## 3. 化学肥料の環境負荷低下技術

### 3-1. 生産における環境負荷低下技術

アンモニア原料となる水素の脱炭素化が進んでいる。再生可能エネルギーを使い、水の電気分解により水素を作り出す。大手肥料会社（ノルウェー）Yaraが取り組んでおり、2023年にも商業生産を開始する計画で、同社の従来製品に対し二酸化炭素の排出量をおよそ80~90%削減できる<sup>3</sup>。ただし、肥料会社には、水蒸気改質器の電解槽への置き換えや、大規模な水素貯蔵プロセスの検討などプロセスの変更が伴う。

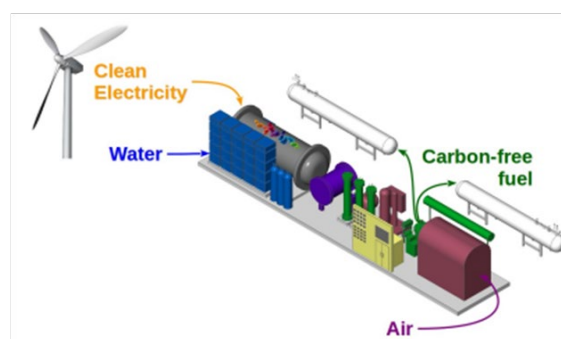
ハーバー・ボッシュ法の改良に関しては、近年は触媒の改良に注目が集まっている。例えば、（米）Starfire Energyは、触媒を改良し、分散型グリーンアンモニア製造モジュール「Rapid Ramp NH<sub>3</sub>」（図表5）を開発している<sup>4</sup>。同社の技術では、プロセスをより低圧化できたうえ、出力が変動しやすい再生可能エネルギー由来の電力にも対応可能である。従来のハーバー・ボッシュ法では

図表4：窒素循環概略



出所：各種資料より三井物産戦略研究所作成

図表5：Rapid Ramp NH<sub>3</sub>



出所：Starfire Energy, 「Modular, carbon-free NH<sub>3</sub> fuel production & use」  
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-08/7-modular-carbonfee-nh3.pdf>

<sup>3</sup> <https://www.yara.com/crop-nutrition/products-and-solutions/green-fertilizers/what-you-need-to-know-about-green-fertilizers/>

<sup>4</sup> <https://www.mhi.com/jp/news/210409.html>

プラントの規模が大きくプロセスを安定化させるため連続的な生産が必要である。そのため、定常運転を行うために、原料である水素を大規模なタンクに貯蔵するなどの対策が必要となる。他方、同社のような分散型のプロセスでは、大型のタンクが無くとも水素の量の変動に対応し柔軟に稼働できる。類似のプロセスは、(デンマーク) Haldor Topsoeによっても検討されており、2023年にはデンマークで稼働予定となっている<sup>5</sup>。その他(日) つばめ BHBや(米) ReMO energyなども取り組んでいる。

ハーバー・ボッシュ法の代替となる方法も研究されている。(アイスランド) Atmoniaは空気と水と電気を使い、直接アンモニアを合成することに取り組んでいる。アンモニアは水中で生成され、液体肥料として使用することができる<sup>6</sup>。ただし、まだ研究段階であり商業化には時間がかかるとみられている。

### 3-2. 使用における環境負荷低下技術

化学肥料使用における取り組みとしては、4R施肥推進運動(4R Nutrient Stewardship)がある。科学的な原理に基づき、作物に合った肥料(Right Source)を適切なタイミング(Right Time)で、適切な量(Right rate)を、適切な位置(Right place)に使うことを奨励する運動である。この取り組みにより、肥料使用によるGHG排出量を15~25%削減できると考えられている<sup>7</sup>。

4R施肥推進運動においては、デジタル技術による土壌管理が重要になる。センシング技術やAI、ロボットにより生産を効率化するスマート農業の技術は、環境負荷低下技術という観点からも注目だ。例えば、センシング技術の向上には土壌中の栄養素のリアルタイム監視を可能にし、過剰な施肥の防止につながる。実際に(ノルウェー) Yaraでは、スマート農業による施肥の最適化で窒素肥料の使用量を12%削減しつつ収量を6%増加させている<sup>8</sup>。同社が提供するN-Testorというハンディ型のセンサーにより作物の葉から窒素の含有量を測定、衛星画像により得られた作物の生育データと合わせてAtFarmアプリ上で適切な施肥量が推奨される(図表6)。さらに、同社はこれらのサービスの提供を2022年から無料とし農家にとってはより使いやすくなった。

肥料の使用をより効率化する仕組みとしては、肥料の周囲をポリマーなどでコーティングした被覆肥料がある。被覆膜の中に水分が浸透し、中の肥料を溶解さ

図表6：N-Testorによる施肥量の提示



出所：atfarm(<https://www.at.farm/gb/n-testor/>)

<sup>5</sup> [https://blog.topsoe.com/danish-partnership-receives-support-from-the-danish-energy-technology-development-and-demonstration-program-eudp-for-worlds-first-industrial-dynamic-green-ammonia-1624599909696?utm\\_content=170812783&utm\\_medium=social&utm\\_source=linkedin&hss\\_channel=lcp-164107](https://blog.topsoe.com/danish-partnership-receives-support-from-the-danish-energy-technology-development-and-demonstration-program-eudp-for-worlds-first-industrial-dynamic-green-ammonia-1624599909696?utm_content=170812783&utm_medium=social&utm_source=linkedin&hss_channel=lcp-164107)

<sup>6</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=toxrl0YtUi4>

<sup>7</sup> [https://unfccc.int/files/documentation/submissions\\_from\\_non-party\\_stakeholders/application/pdf/598.pdf](https://unfccc.int/files/documentation/submissions_from_non-party_stakeholders/application/pdf/598.pdf)

<sup>8</sup> <https://www.yara.com/crop-nutrition/why-fertilizer/environment/fertilizer-life-cycle/>

---

せ少しずつ外部に染み出していく。成分が溶出するパターンや期間などが異なり作物により使い分けられることができる。最終的にコーティングされていたポリマーが土壌中に残存してしまうため、生分解性のポリマーの使用が進められている。

また新たな動きとして、土壌中の微生物に着目した栄養吸収の効率化がある。例えば、農業スタートアップの(米) Sound Agricultureは「SOURCE」という製品を販売している。SOURCEを葉面散布することで、有効成分が作物から土壌に送られ作物の根の近くにいる土壌中の窒素固定菌を活性化させる。これにより作物は大気中の窒素をより有効的に栄養素として使うことができ、化学肥料の使用量を最大約30%削減できる。同製品は主にトウモロコシや大豆を対象に2020年より米国で販売されている。

#### 4. まとめと今後の展望

化学肥料に関連する環境負荷低下技術についての動向をまとめた。化学肥料に関しては、生産と使用がGHG排出量の大部分を占め、適正な窒素循環という観点からも懸念がある。生産においては、原料水素の脱炭素化やハーバー・ボッシュ法の改良や代替方法の検討が行われており、使用においては、4R施肥推進運動やスマート農業技術の活用、被覆肥料や土壌中の微生物の活用など肥料自体の効率化が進められている。また、これらに関連して新たな取り組みが起きている。例えば、2022年に大手肥料会社(加) Nutrienは、同社のAgribileというデジタルプラットフォームを通じ、土壌中の窒素の削減量に応じた対価を農家に支払うプログラムを発表した。このプログラムを通して自社の高効率肥料を売り込んでいる。実際に2021年に米国で行われた試験では、農家は施肥量の最適化や高効率肥料の使用、カバークロップ<sup>9</sup>などを行うことにより収入が14万ドル増加し、同社は自社の製品およびサービスから20万ドルの利益を得た<sup>10</sup>。化学肥料の削減は、肥料メーカーの売上げを減らすように見えるが、このようなwin-winの関係を築くことができれば肥料メーカーにとっても新たなビジネス機会になるだろう。今後は、技術の進展とともに、このようなビジネスの仕組みを通して化学肥料の環境負荷の低減に対する取り組みが進むことを期待したい。

---

<sup>9</sup> 主にマメ科の作物を栽培し収穫せずにそのまま土壌へすき込み養分とする農法のこと、緑肥とも呼ばれる。

<sup>10</sup> Nutrien 2022 Virtual Investor Update

---

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。