

## File No. 84

## 化学肥料の生産と環境

化学肥料は、鉱物や天然ガスなどを原料に、化学的工程を経て作られた肥料である。植物の成長に不可欠な窒素・りん酸・加里の三要素を主成分とし、成分が確実でその含有量の調整が容易、速効性、扱いやすく、低コストなどが特徴である。

しかし、化学肥料には原料中の有害物質や製造工程に生成された有害成分が残されることがある。施用後、作物は肥料成分と一緒に有害物質も吸収することにより、生育が阻害され、収穫物も汚染される恐れがあると指摘される。本邦の肥料関係法令「肥料の品質の確保等に関する法律に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件」に定めた規制すべき化学肥料中の有害成分は、硫青酸化物、スルファミン酸、ピウレット、亜硝酸、ヒ素、カドミウム、ニッケル、クロム、チタン、水銀、鉛の計 11 種類である。

一方、化学肥料はその生産工程に二酸化炭素などの温室効果ガス、尾鉱などの残渣、排水が必ず発生し、環境に悪影響を与えることが避けられない。化学肥料需要量と生産量が増えつつある現在、化学肥料の生産が環境に及ぼす影響を最小限に抑えることが重要な課題である。

以下は化学肥料の生産工程に排出される有害物質と環境への悪影響について解説する。

### 1. 窒素肥料

窒素系化学肥料はすべてアンモニアをベースに作られたものである。アンモニアの工業合成法はハーバー・ボッシュ法で、窒素と水素を原料にして合成されたものである。

空気の約 78%は窒素である。空気を $-196^{\circ}\text{C}$ に冷却し、空気中の窒素を液体化して分離することで簡単に得られる。しかし、自然界には単体の水素が存在せず、水素を得るには水の電気分解のほか、天然ガスの改質や石炭のガス化を利用するしかない。

天然ガスや石炭の化石燃料から水素を得る工程には多量の二酸化炭素が排出される。理論上、天然ガスの改質を利用して水素を製造するには、1kgの水素を得るために2kgの天然ガスと31.5MJの熱エネルギーが必要となり、約5.5kgの二酸化炭素を放出するという計算である。実際に反応に必要な熱エネルギーなども消費されるので、天然ガスから水素1kgを製造するには二酸化炭素が約11.4kg放出される。

石炭のガス化法を利用して水素を製造するにはさらに多くの二酸化炭素が排出される。原料石炭の種類と発熱量によって、理論上水素1kgを製造するには3.5~5kgの石炭と31.5MJのエネルギーが必要となり、8~10kgの二酸化炭素を放出するという計算である。実際に反応に必要な熱エネルギーなども消費されるので、石炭から水素1kgを製造するには二酸化炭素が約23~26kg放出される。

空気から窒素の液化分離及びアンモニア合成時にも多くのエネルギーが消費され、一定量の二酸化炭素が発生する。水素製造時に排出された二酸化炭素を別にして、1kgアンモニアを合成するにはさらに400~500gの二酸化炭素が排出される。

1kg 水素から 5.66kg アンモニアが合成されるので、天然ガスを原料とする場合は、1kg アンモニアを合成するには約 1.9~2.1kg 二酸化炭素が排出される。石炭を原料とする場合はさらに多く、1kg アンモニアを合成するには 4~5kg 二酸化炭素が排出される。図 1 はアンモニア合成工程に排出される二酸化炭素の模式図である。

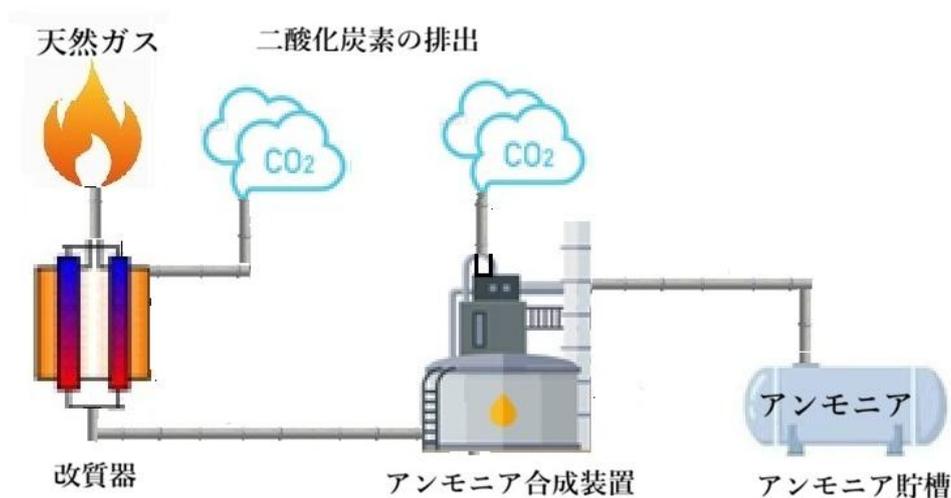


図 1. アンモニア合成工程に二酸化炭素の排出模式図

2024 年現在の世界年間アンモニア生産量が約 1 億 5000 万トン、約 4 億 5000 万トンの二酸化炭素などの温室効果ガスが排出される計算である。そのうち 3/4 以上が水素の製造工程に排出されたもので、残りは窒素の液化分離及びアンモニア合成工程の高圧と高温を維持するために消費されたエネルギーによるものである。

二酸化炭素の排出量を減らすために、現在 2 つの方法が利用されている。一つは水素製造工程から排出された二酸化炭素を回収して、地下に貯留することである。もう一つは古典的な水素の取得手段とする水の電気分解を使用する。

ただし、化石燃料から水素およびアンモニアの製造工程に放出された二酸化炭素を全量回収することが不可能である。現在の技術では最大でも二酸化炭素の回収率が約 70%に留まる。従って、天然ガス原料のブルーアンモニアでも 1kg アンモニアを合成するには約 0.6~1.0kg 二酸化炭素が排出される。

水の電気分解には二酸化炭素を排出しないが、太陽光パネルや風車の製造と設置などに消費されたエネルギーを別にして、窒素の液化分離とアンモニア合成時に消費されるエネルギーにより、1kg グリーンアンモニアを合成するには 400~500g の二酸化炭素が排出される。

現時点では太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーを利用するグリーンアンモニアが一番環境にやさしいとされるが、太陽は常に輝いているわけではなく、風も常に吹いているわけでもない。大きく変動する電力は電解槽の効率を低下させ、電極などに損傷を与え

る可能性がある。再生可能エネルギーに固有の不安定と変動を平滑化するには、多くの研究が必要である。

一方、尿素の生産には原料として多量の二酸化炭素が必要である。理論上、アンモニアから尿素を合成するには、1kg 尿素を製造するために 0.567kg アンモニアと 0.733kg 二酸化炭素が必要となる。尿素工場はアンモニア合成時に排出された二酸化炭素の一部を再利用している。すなわち、天然ガスを原料とする場合の尿素生産には二酸化炭素をほとんど排出せず、再生可能エネルギーを利用する場合は、逆に外部から二酸化炭素を調達しなければならない。従って、グリーンアンモニアの用途は尿素が除外され、脱炭素化に期待される一部の火力発電や輸送用燃料に限られる。

## 2. リン酸肥料

リン酸肥料の原料はリン鉱石である。リン鉱石の採掘は露天採掘が多い。採掘に伴う地面植生の除去や地表改変のほか、膨大な廃土が発生する。また、採掘された鉱石の選鉱工程にも多量の尾鉱が発生する。大体系リン鉱石 1 トンを採掘するたびに約 1~1.5 トンの廃土と尾鉱が発生する。2024 年世界のリン鉱石採掘量が 2.4 億トンに達し、発生した廃土と尾鉱量が 3 億トンを超えたと推定される。

また、硫酸を使ってリン鉱石からリン酸を取り出す際にもリン石膏という副産物が大量に発生する。リン鉱石の品位により、リン酸生産量の 4.5~5 倍のリン石膏が生成される。2024 年の世界リン酸生産量（ $P_2O_5$  換算）が約 5,500 万トンで、リン石膏の発生量が約 2 億トンに達すると推定される。図 2 はリン鉱石採掘と選鉱・精鉱工程に廃土・尾鉱、リン酸抽出工程にリン石膏の発生模式図。

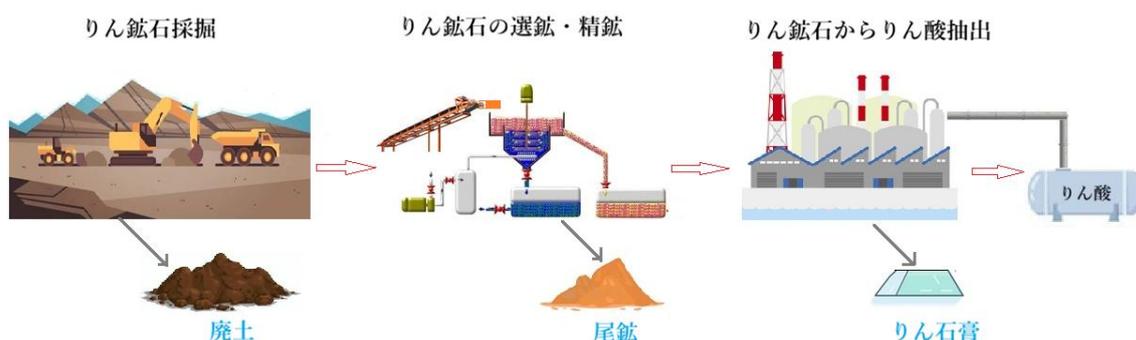


図 2. リン酸肥料生産時に廃土、尾鉱・リン石膏の発生模式図

採掘時に発生した廃土は採掘跡に戻して、埋立で対応することができるが、水分と薬品を多く含む尾鉱はその処理に手間がかかる。通常、尾鉱は尾鉱ダムに貯留・堆積させる。閉山後または尾鉱ダムが満杯後、それを緑化するなど、生態系回復（リハビリテーション）を行う。ただし、開発から閉山まで数十年を要し、その間に定期的な巡視や点検を行い、維持保全工事を行う必要がある。

最も問題となるのはりん石膏である。りん鉱石にはフッ素やカドミウムなど有害元素や不純物が多く含まれ、りん酸の抽出工程にこれらの有害物質がりん石膏に濃縮される。有害物質の関係で、用途は建築用の石膏ボードに向けず、セメントの凝結遅延剤などに限られるので、産業廃棄物としての適切な処理が求められている。

一例を挙げる。中国は年間約 1.5 億トンのりん鉱石を採掘して、約 3,000 万トンのりん安（DAP と MAP）を生産している。りん安を作るにはりん酸が必要で、年間約 7,500 万トンのりん石膏が生成され、累計堆積量が 6 億トン以上と報告されている。別の資料では世界全体で 60 億トンを超えるりん石膏堆積量のうち、中国がその大部分を占めるとされている。図 3 は中国のりん石膏堆積場の写真である。

りん石膏堆積場から流出された汚染水と飛散した粉塵などによる環境汚染、特に水質汚染が酷いため、2020 年に中国政府は「揚子江保護法律」を制定し、揚子江およびその主要支流兩岸 1km 以内にあるりん酸肥料工場を含むすべての汚染工場を移転・退去させる。

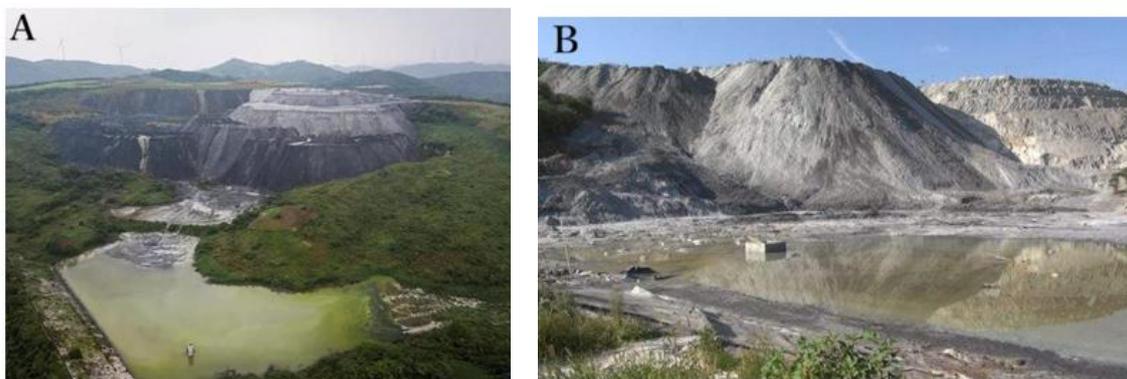


図 3. 中国にあるりん石膏堆積場（A：湖北省、B：貴州省）

りん石膏による環境汚染を減らすために、りん石膏が排出しないまたは排出の少ない過りん酸石灰、重過りん酸石灰、熔りんなどのりん酸肥料が見直される可能性がある。

### 3. 加里肥料

加里肥料はほとんど地下から採掘された可溶性加里鉱物（加里岩塩、カーナイト、ラングバイナイトなど）または塩湖鹹水を原料に生産されたものである。加里鉱山の開発は地面植生の除去や地表の改変を伴うほか、採掘坑道などに廃土が多く発生する。また、選鉱・精製工程にも多量の尾鉱と鉱滓が発生し、生態系に悪影響を及ぼす。図 4 は加里生産工程に各種廃棄物の発生模式図である。

加里鉱物から 1 トン塩化加里を生産するたびに、約 3 トンの廃棄物が発生する。このうちの加里鉱滓は塩化ナトリウムや塩化マグネシウムの可溶性塩類が多く含まれている。ロシア、ベラルーシ、カナダ、ドイツなどの主要加里産地にすでに数十億トンの加里鉱滓が存在し、毎年 1 億トン以上が追加されている。加里鉱滓は水溶性が高いので、主に地下水に浸

透して塩化を通じて環境への脅威となる。

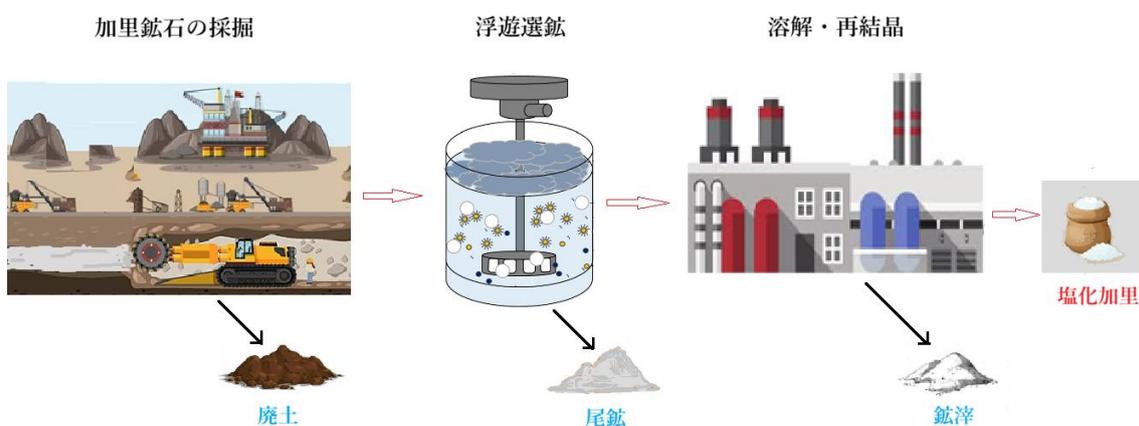


図 4. 加里肥料生産時に廃土、尾鉍、鉍滓の発生模式図

一例を挙げると、ドイツのヘーリングゲン（Heringen）にある世界最大級の加里鉍滓堆積場「Monte Kali」は、1976年以降、何百万トンもの塩化ナトリウムが積み上げられており、200m以上の高さに達する山となっている。ほかに同じヘッセン州のノイホーフ（Neuhof）やニーダーザクセン州の Bokeloh、Friedrichshall などにも大型の加里鉍滓堆積場が点在している（図5）。

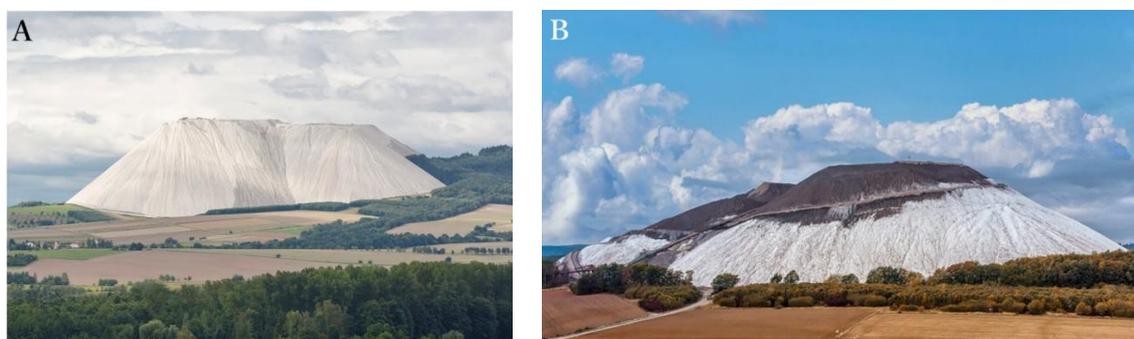


図 5. ドイツの加里鉍滓堆積場

(A : ヘーリングゲンの Monte Kali、B : ノイホーフの Monte Kali)

これらの堆積場は環境への影響が懸念されており、主に建設廃棄物や土壌で覆い、植生を生育させるなどで対応している。

また、地下の加里鉍石を掘り出して、地面に選鉍と溶解再結晶の坑内採掘法ではなく、鉍床に水を注入して、加里などを溶解してから塩水を地面上に汲み上げて再結晶させる溶解採鉍法を採用することで、廃土と尾鉍を80%以上減らすことができる。加里鉍滓からマグネシウムなどを回収することで鉍滓を約20%減少することがある。

例えば、ドイツの加里会社 K+S 社は、1世紀以上にわたって地下鉍山が操業しているハ

ットルフに 5 億ユーロ以上を投資して、鉍滓から塩化マグネシウムを回収するためのプラントを建設する。このプラントは加里を精製したカイナイトの鉍滓からマグネシウムを回収し、鉍滓量を 20%削減できる。カナダでは、サスカチュワン大学が古い加里鉍滓池にポリマーハイドロゲルを添加することにより、塩分の浸出が減少し、植生再生が促進されることを試みた。

現代の農業生産に化学肥料が欠かせないものである。化学肥料の生産工程に有害物質の発生が最少にすること、発生した有害物質を適切に処分することを通じて、環境への悪影響を最小限に抑えることは肥料メーカーの重要な責任でもある。