

生物的安定性肥料

生物的安定性肥料 (Biostable fertilizer) とは、土壤微生物による尿素や硫安、硝安の分解と脱窒を抑えることができる薬品を添加した窒素肥料である。この種の肥料は施用後土壤微生物の活動による尿素のアンモニア化成、アンモニアの硝化や硝酸性窒素の脱窒を抑え、長く土壤に留まるように肥料効果を発揮する。現在、主にウレアーゼ抑制材と硝化抑制材が使用されている。

水田や畑に施用された尿素は土壤微生物により加水分解され、アンモニア性窒素の炭酸アンモニウムに変化する。この過程はアンモニア化成と呼ばれる。反応式は、

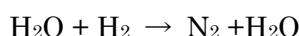
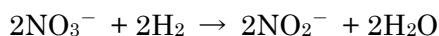


アンモニアが通気性の良い環境に於いて土壤微生物によりさらに亜硝酸を経由して硝酸に酸化される。この過程は硝化作用（硝酸化成）と呼ばれる。反応式は、



尿素はそのままの形では植物の根系に吸収されにくく、ほとんどアンモニア化成と硝化作用によりアンモニア性窒素と硝酸性窒素になってから植物に吸収利用される。なお、植物にとって硝酸性窒素が一番吸収利用されやすい形である。

しかし、陰イオンの硝酸性窒素が土壤粒子の持つマイナス電荷と互いに排斥するため、土壤に吸着せず、水と共に流失しやすい。また、硝酸性窒素が嫌気の環境に於いてさらに土壤中の脱窒菌により窒素分子にまで還元され、大気中に散逸してしまう。この過程は脱窒と呼ばれる。反応式は、



尿素が土壤中の微生物によりアンモニア性窒素になる過程、アンモニア性窒素が硝化作用を経て、最終的に脱窒で窒素ガスとなる過程は図 1 に示す。



図 1. 尿素の微生物によるアンモニア化成、硝化作用、脱窒の過程

統計では、施用された尿素、硫安などの窒素化学肥料はその利用率が 30~50% しかなく、50~70% の窒素が利用されないまま硝酸性窒素の形で流失するか脱窒により窒素ガスとなって散逸されてしまう。

尿素のアンモニア化成は土壤微生物の持つウレアーゼ、アンモニアから亜硝酸への酸化は亜硝酸菌、亜硝酸から硝酸への酸化は硝酸菌が担っている。従って、ウレアーゼや亜硝酸菌、硝酸菌の活性を抑えることにより、アンモニア化成と硝化作用を遅らせ、窒素肥料の肥効を長く持続させ、流失と散逸を減らし、窒素利用率を高めることができる。

現在、生物的安定性肥料は主に尿素や化成肥料にウレアーゼ抑制材と硝化抑制材を添加する形で実現している。

一、ウレアーゼ抑制材

ウレアーゼ抑制材 (urease inhibitors) は土壤微生物のウレアーゼ活性を抑制して、施用された尿素がアンモニアに加水分解される速度を低下させることによって、土壤中に長く滞留できる化学物質である。微生物のウレアーゼ活性を抑制する化学物質は多数あり、その構造により無機系と有機系に分けられる。

無機系は主に原子量が 50 を超える金属類無機化合物で、金属イオンで微生物の活動と増殖を制限することを通じてウレアーゼ活性を抑制する。概して、ウレアーゼ活性の抑制効果は $Hg^{2+} \approx Ag^+ > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Co^{2+} > Fe^{3+} > Pb^{2+} > Mn^{2+}$ 、特に Hg^{2+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} の抑制作用が強い。ただし、生体毒性、環境汚染の危険性があり、価格の面では劣るため、ほとんど実用されていない。

有機系は尿素誘導体、ヒドロキサム酸系化合物、スルファニルアミド、ジチオカルバミン酸塩、水酸化オキサミド酸塩、ホウ酸化合物、有機水銀化合物、フェノール類、キノン類、ホスファミドン系化合物など多数ある。但し、これらの有機系ウレアーゼ抑制材が毒性の強いものが多く、実用に耐えるのはキノン類のハイドロキノン (HQ)、ホスファミドン系の N-(n-ブチル) チオリン酸トリアミド (NBPT)、フェニルリン酸ジアミン (PPD)、シクロヘキシリリン酸トリアミド (CHPT) などである。コストの面では HQ が優れているが、ウレアーゼ抑制効果では NBPT、PPD、CHPT が高い。現在、HQ と NBPT、PPD が多用される。

1. ハイドロキノン (HQ)

HQ (hydroquinone、ハイドロキノンまたはヒドロキノン) は分子式 $C_6H_6O_2$ 、分子量 110.11 の二価フェノールで、その構造は図 2 に示す。



図 2. ハイドロキノンの構造

白色結晶で、融点 172°C、沸点 287°、密度 1.3g/cm3、水に可溶。還元力が強く、容易に酸化されて *p*-ベンゾキノンとなる。

世界保健機関(WHO)の外部機関である国際がん研究機関(IARC)はグループ 3（ヒトに対する発がん性は分類できない）と評定したが、アメリカ食品医薬品局 (FDA) は発癌性へ

の懸念があるとして、アメリカ国内での一般用医薬品への店頭販売禁止を提案。現在は 2% 以下が店頭にて、4%以上は処方箋が必要。また、ヨーロッパ多くの国で人体への使用が禁止されている。日本では 2%までの配合が厚生労働省により許可されている。

微生物のウレアーゼ活性を抑制するには必要な添加量が少なく、人体への影響が無視できるため、規制されていない。

HQ は主にフェノールをケトンの存在下、ベータゼオライト (H-BEA) を触媒にして過酸化水素で酸化する方法で製造される。その反応式は、



この合成方法は生産工程が簡単で、生産コストも安いので、よく使われる。

また、アニリンを硫酸と重クロム酸ソーダで酸化して *p*-ベンゾキノンを得てから亜硫酸などの適当な還元剤により還元する方法やシクロヘキセンオノンを硫酸により酸化する方法によっても得られる。

2. N-(n-ブチル) チオリン酸トリアミド (NBPT)

NBPT (N-butyl thiophosphoric triamide、N-(n-ブチル)チオリン酸トリアミド) は分子式 C₄H₁₄N₃PS、分子量 167.21 のチオリン酸トリアミドで、その構造は図 3 に示す。

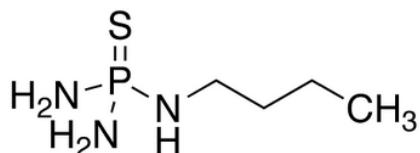


図 3. N-(n-ブチル)チオリン酸トリアミドの構造

常温常圧では高純度のものは白色微細結晶または粉末であるが、通常ワックス状を呈することが多い。融点 57~60°C、引火点 96°C、水溶解度 4.3g/L (25°C)。

EU およびアメリカ当局はウレアーゼ抑制材として肥料への添加を認める。

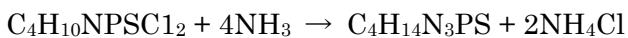
NBPT の合成は二段階法と連続法がある。

2-1. 二段階法

まず、塩化チオホスホリル (Cl₃PS) をクロロホルムとトリエチルアミンの混合液に溶けて、n-ブチルアミン (C₄H₁₁N) と反応して、反応中間体として N-(n-ブチル) チオリン酸ジクロロ (C₄H₁₀NPSCl₂) を合成する。反応式は、



次いで、N-(n-ブチル) チオリン酸ジクロロを精製してからアンモニア (NH₃) と反応させ、NBPT を合成する。反応式は、



反応物を精製して、NBPT 製品を得る。

二段階法は、反応工程が複雑で、反応時間が長く、エネルギー消費量が多く、生産コス

トが高い。特にトリエチルアミンと n-ブチルアミンの沸点が低く、反応中に揮散しやすく、環境汚染が酷いため、現在ほとんど淘汰された。

2-2. 連続法

塩化チオホスホリル (Cl_3PS) を塩化メチレンとトリエチルアミンの混合液に溶けて、n-ブチルアミン ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$) と反応して、N-(n-ブチル) チオリン酸ジクロロ ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{NPSCl}_2$) を合成する。合成した N-(n-ブチル) チオリン酸ジクロロを精製せず、過量のアンモニアガスを導入して加圧の状態で NBPT を合成する。合成した NBPT を精製して製品となる。反応式は二段階法と同じで、副産物が塩化アンモニウム (NH_4Cl) である。

反応はパイプ式の反応器を使って行い、全工程が密閉しているため、反応時間が短く、原料や反応物の漏洩が少なく、生産効率が高い。現在、この方式が主流である。

3. フェニルリン酸ジアミド (PPD)

PPD (phenyl phosphorodiamide、フェニルリン酸ジアミド) は分子式 $\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_2\text{O}_2\text{P}$ 、分子量 172.12 のりん酸ジアミドで、その構造は図 4 に示す。

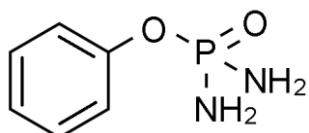
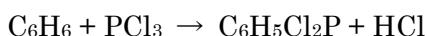


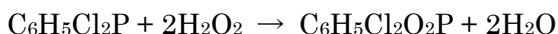
図 4. フェニルリン酸ジアミドの構造

白色微細結晶または粉末で、純度の低いものは灰色を帯びる白色粉末である。融点 183 ~185°C、水に可溶。

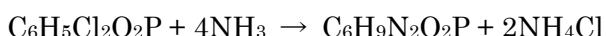
PPD の合成は 3 段階に分けて行う。まず、ベンゼン (C_6H_6) を原料として、三塩化リン (PCl_3) と反応して、ジクロロフェニルホスフィ ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}_2\text{P}$) を合成する。反応式は、



次いで、ジクロロフェニルホスフィを過酸化水素 (H_2O_2) で酸化させて、中間体のジクロロリン酸フェニル ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}_2\text{O}_2\text{P}$) を合成する。反応式は、



合成したジクロロリン酸フェニルを精製してからアンモニア (NH_3) と反応させ、PPD を合成する。反応式は、



反応物を精製して、PPD 製品を得る。

二、 硝化抑制材

硝化抑制材 (nitrification inhibitors) は土壤中の亜硝酸菌（主にニトロソモナス属、ニ

トロコッカス属の細菌) の増殖と活性を抑え、アンモニアから亜硝酸への酸化反応をブロックして、肥料中のアンモニア性窒素が硝酸性窒素になることを抑制し、土壤にそのまま長く存在することを目的とする化学物質である。

硝化抑制材はその構造により無機系と有機系に分けられる。

無機系は主に重金属の無機化合物で、金属イオンでの殺菌作用を通じて硝化作用を抑制する。概して、硝化作用の抑制効果は $Hg^{2+} \approx Ag^+ > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Co^{2+}$ で、特に Hg^{2+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} の抑制作用が強い。ただし、生体毒性、環境への汚染が問題となり、ほとんど実用されていない。

有機系はチオ尿素、ピリジン誘導体、ピリミジン誘導体、コハク酸アミド化合物、トリアジン誘導体など多数ある。但し、これらの有機系硝化抑制材がすべて殺菌剤であるため、毒性の強いものが多く、実用に耐えるのはチオ尿素、ジシアンジアミド、エチレンビスジチオカルバミン酸亜鉛(zineb)、ニトラピリン、3,4-ジメチルピラゾールりん酸塩(DMPP)、2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジン(AM)、2-メルカプトベンゾチアゾール(MBT)などである。コストと抑制効果からチオ尿素、ニトラピリン、ジシアンジアミドが多用される。硝化抑制剤の効果は通常、散布後3週間ないし1ヶ月程度とされる。

1. チオ尿素

チオ尿素(Thiourea)は、尿素の酸素原子を硫黄原子に置き換えた構造をもつ有機化合物。チオウレア、チオカルバミドとも呼ぶ。分子式 $SC(NH_2)_2$ 、分子量 76.12、その構造は図5に示す。

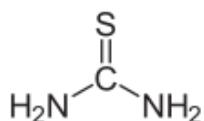
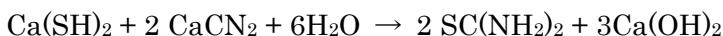


図5. チオ尿素の構造

白色の結晶で、融点182°C、水に易溶(136 g/L, 20°C)。強熱すると分解し、窒素酸化物、硫黄酸化物などを発生する。加水分解されにくく、環境中に排出されると特に藻類に対して高い毒性を示す。微生物が摂取すると、代謝されて生じたシアナミドによって殺菌効果が発揮する。

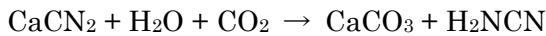
チオ尿素は石灰窒素と硫化水素を原料として、次の方法で合成される。

石灰スラリーに硫化水素(H_2S)を通して、吸収させることにより水硫化カルシウム($Ca(SH)_2$)を生成する。水硫化カルシウム溶液にゆっくり石灰窒素($CaCN_2$)を添加して、80°Cで3時間反応してチオ尿素を合成する。反応液をろ過して、副産物の水酸化カルシウムを沈殿分離して、ろ液を濃縮乾燥してチオ尿素製品とする。反応式は、



もう一つの合成方法は、まず、石灰窒素($CaCN_2$)と水と反応させ、酸性の環境で二酸

化炭素を溶液に通してシアナミド (H_2NCN) と炭酸カルシウムを生成する。硫酸で反応液を中和して炭酸カルシウムを沈殿させ、シアナミド溶液を得る。シアナミド溶液に硫化水素を通して、吸収反応させることによりチオ尿素を合成する。反応液をろ過し、濃縮乾燥を経てチオ尿素製品とする。反応式は、



2. ニトラピリン

ニトラピリン (Nitrapyrin) は、ピリジン誘導体の 1 種、N-サープとも呼ぶ。分子式 $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_4\text{N}$ 、分子量 230.9、その構造は図 6 に示す。

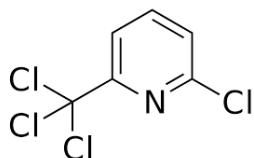


図 6. ニトラピリンの構造

ニトラピリンは芳香臭を有する白色の結晶で、融点 62.5°C、沸点 136°C、引火点 93°C、水に難溶 (54 mg/L, 25°C)。アメリカ等は殺菌剤（硝化抑制材）としての使用が承認されているが、本邦はまだ承認されていない。ニトラピリンは硝化抑制効果が高いが、水に難溶性であり、固体の窒素肥料に添加することが困難であるうえに揮発性が高く、地温が 20°C 以上の条件ではほとんど効果がないため、北米の冬季作等限られた環境でのみ使用可能である。

ニトラピリンは 2-ピコリン ($\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$) を原料として、不活性ガスの環境下に触媒により塩素ガス (Cl) と反応させることで合成する。反応式は、



合成方法は、2-ピコリンをトリエタノールアミンと過酸化ベンゾイルの 1 : 1 混合液に溶かして、塩化鉄または塩化亜鉛を触媒にして、窒素ガスの環境で塩素ガスを導入して、180 ~ 190°C の温度で合成を行う。反応した液を 7mmHg の真空条件で分留して、145~170°C の留出分を濃縮乾燥してニトラピリン製品とする。

3. ジシアンジアミド (DICY)

ジシアンジアミド (Dicyandiamide または cyanoguanidine) はシアナミドの重合物である。分子式 $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$ 、分子量 84.08、その構造は図 7 に示す。

ジシアンジアミドは無色斜方状晶または板状晶であり、融点 208~211°C、融点以上に加熱するとアンモニアを発生してメラミン、メラムなどを生じる。主な用途はエポキシ樹脂の硬化剤、農薬の殺菌剤、シアナミド誘導体の原料などである。本邦とアメリカ、EU は殺

菌剤（硝化抑制材）としての使用が承認されている。

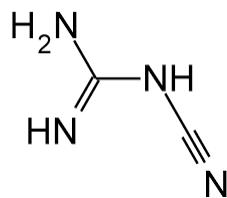
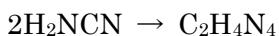
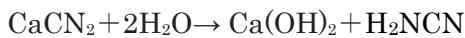


図 7. ジシアンジアミドの構造

硝化抑制材としてのジシアンジアミドは、ニトラビリンに比較して高い温度でも有効であるが、必要な使用濃度が高く、かつ、高価であることから使用量が次第に減っている。

ジシアンジアミドは石灰窒素 (CaCN_2) を原料として酸性の環境で水と反応させ、シアナミド (H_2NCN) を合成して、これを加熱重合させることで合成する。反応式は、



4. 2-メルカプトベンゾチアゾール (MBT)

MBT (2-Mercaptobenzothiazole, 2-メルカプトベンゾチアゾール) はチアゾール誘導体の 1 種で、分子式 $\text{C}_7\text{H}_5\text{NS}_2$ 、分子量 167.24、その構造は図 8 に示す。

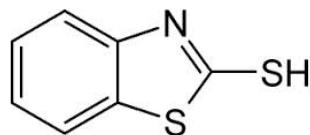
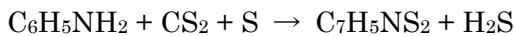


図 8. 2-メルカプトベンゾチアゾールの構造

MBT は薄黄色粉末で、融点 177~181°C、引火点 243°C、水に難溶 (<1g/L、20°C)。主な用途は殺菌剤、防かび剤のほか、ゴム用加硫促進剤としてもよく使われる。

MBT は、アニリン ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$)、二硫化炭素 (CS_2) 及び硫黄 (S) から直接、高温高压により合成される。アニリン、硫黄、二硫化炭素を加圧反応缶に投入して、220~300°C、6~11.1MPa の条件で反応させ、粗 MBT 混合物を合成する。反応後、反応液を 200°C に冷却してから窒素ガスによりページして、揮発性画分を除去する。揮発性画分を除去した反応液を熱アニリンに溶解して、冷却により MBT を結晶として析出させ、ろ過分離して製品とする。反応式は、



5. 2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジン (AM)

AM (2-Amino-4-chloro-6-methylpyrimidine、2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジン) はピリミジン誘導体の 1 種で、分子式 $\text{C}_5\text{H}_6\text{ClN}_3$ 、分子量 143.57、その構造は図 9 に示す。

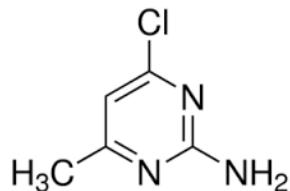


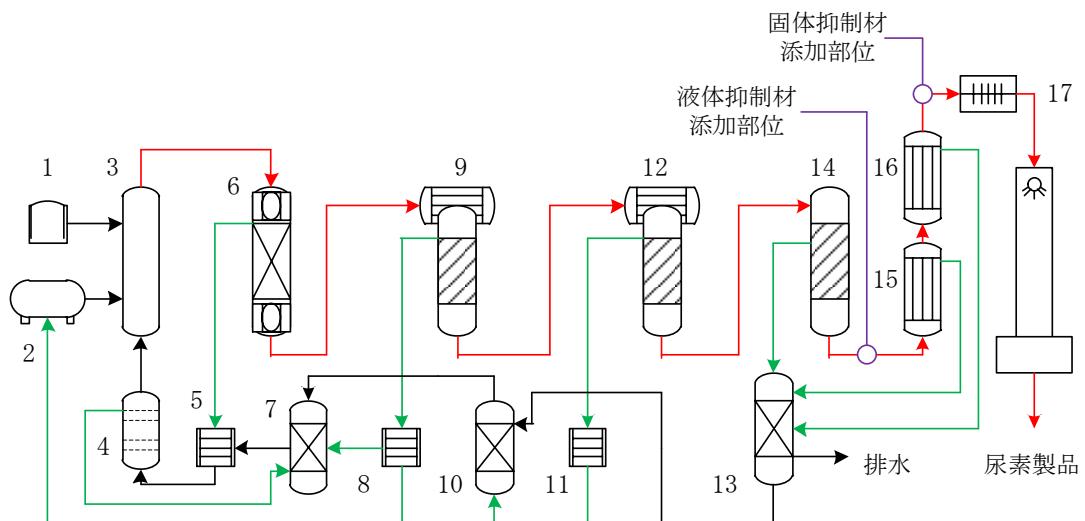
図 9. 2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジンの構造

AM は白色微細結晶で、融点 183~186°C、水に難溶。

AM は、硝化の抑制効果が高く、土壤の微生物相に対する影響が小さく、取り扱いが容易であるので、硝化抑制材として通常使用されているニトラピリンとジシアソニアミドの代替品として有望である。

三、生物的安定性肥料の生産工程

生物的安定性肥料は添加した抑制材により、① ウレアーゼ抑制材を単独添加したもの、② 硝化抑制材を単独添加したもの、③ ウレアーゼと硝化抑制材添加の両方を添加したものに分けられる。通常、尿素の場合はウレアーゼ抑制材と硝化抑制材を共に添加し、化成肥料の場合は硝化抑制材を単独添加することが多い。



1. 液体二酸化炭素貯槽、2. アンモニア貯槽、3. 反応塔、4. 気液分離器、5. 高圧コンデンサー、6. アンモニアリフト塔、7. 中圧吸収塔、8. アンモニウム冷却凝結器、9. 中圧分離塔、10. 低圧吸収塔、11. 低圧コンデンサー、12. 低圧分離塔、13. 排ガス吸収塔、14. 真空フラッシュ蒸発器、15. 一段目濃縮器、16. 二段目濃縮器、17. 溶融槽、18. ノズル、19. 造粒塔、

→ : 合成尿素溶液の流れ、→ : カルバミン酸アンモニウムの流れ、→ : 回収アンモニア・二酸化炭素の流れ

図 10. 尿素生産工程および抑制材の添加部位

抑制材の添加方法は、① 尿素生産工程に添加、② 化成肥料の造粒工程に添加、③ 尿素の表面塗布の3つがある。以下は、それぞれの添加方法と工程を紹介する。

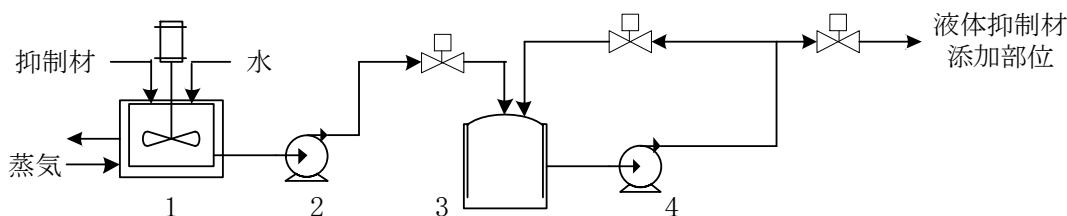
1. 尿素の生産工程に抑制材を添加する方法

尿素の生産工程に抑制材を直接添加する方法である。抑制材の水溶性により液体添加法と固体添加法に分けられる。液体添加法は合成された尿素液のフラッシュ蒸発器と一段目濃縮器の間に添加して、固体添加法は尿素液の濃縮を終えて、溶融造粒の前に添加する。それぞれの添加部位は図10に示す。この方法では尿素生産工程に変更がなく、専用の添加設備を増設するだけで済む。抑制材の添加が必要のない場合は、添加設備の弁を止めることで対応する。なお、尿素の製造工程の詳細は本書の姉妹編「肥料製造学」の「尿素」をご参考ください。

1-1. 液体添加法

ハイドロキノン (HQ)、フェニルリン酸ジアミド (PPD)、ジシアンジアミドなど水溶性の高い抑制材は水に溶けてから尿素に添加することが多用される。

液体状の抑制材を添加する場合に必要な設備と添加工程は図11に示す。



1. 搅拌溶解槽、 2. ポンプ、 3. 液体抑制材貯槽、 4. 計量ポンプ

図11. 尿素生産工程に液体状抑制材を添加するには必要な設備と添加工程

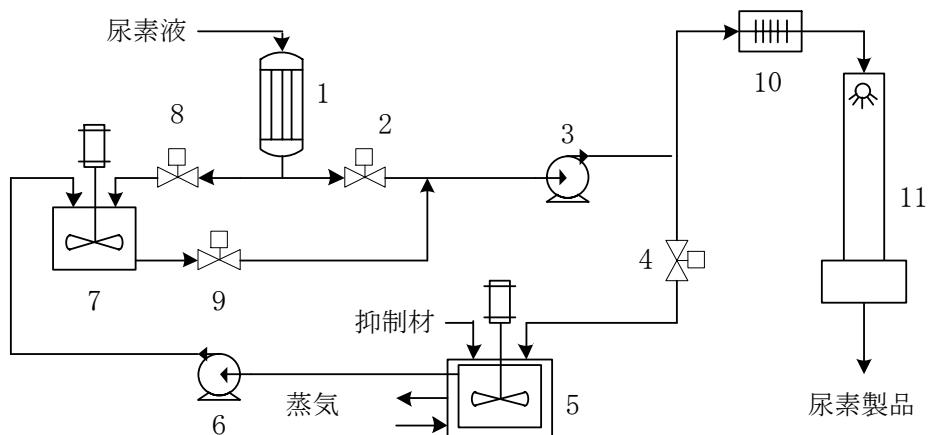
抑制材を溶解槽（1）に投入して、水を入れて、搅拌溶解させ、所要の濃度（8～25%）に調製する。液温を80～90°Cに保つように溶解槽には蒸気パイプを通っている。調製した抑制材をポンプ（2）で計量タンク（3）に移し、計量ポンプ（4）で尿素合成工程のフラッシュ蒸発器と一段目濃縮器の間に位置する液体抑制材添加部位に送り、尿素液に混合してから蒸発濃縮、造粒等の工程を経て生物的安定性尿素肥料製品とする。

1-2. 固体添加法

水に難溶性の抑制材を使用する場合は固体添加法を利用する。その必要な設備と工程は図12に示す。

抑制材を添加する場合は、バルブA（2）を閉じ、バルブB、C、Dを開け、二段目濃縮器（1）から出た濃縮した熔融尿素液は混合器（7）を経由して、熔融尿素液ポンプ（3）で溶融槽（10）に送る途中、熔融尿素の一部を抜き出し、抑制材混合槽（5）に移し、粉末状

の抑制材と混合する。混合槽は蒸気で133～135°Cに加温して、尿素を溶融状態に保つ。抑制材と混合した熔融尿素液は抑制材ポンプ（6）で混合器（7）に送り、二段濃縮器（1）からバルブC（8）を通って来た熔融尿素液と混合してから、バルブD（9）を通って熔融尿素液ポンプ（3）で溶融槽（10）に送り、温度を調節した後、造粒塔（11）で造粒する。抑制材を添加しない時は、バルブAだけを開けて、バルブB、C、Dを閉じることで、熔融尿素液はバルブA（2）を通って直接溶融槽（10）に送り、造粒塔（11）で造粒する。



1. 二段目濃縮器、 2. バルブA、 3. 熔融尿素液ポンプ、 4. バルブB、 5. 抑制材混合槽、 6. 抑制材ポンプ、 7. 混合器、 8. バルブC、 9. バルブD、 10. 熔融槽、 11. 尿素造粒塔

図 12. 尿素生産工程に固体抑制材の添加工程

2. 化成肥料の生産工程に抑制材を添加する方法

化成肥料の生産工程に抑制材を添加する方法は非常に簡単である。肥料原料を配合する際に所定量の抑制材も添加し、混合してから通常の造粒、乾燥、篩別を経て製品とする（図13）。新規設備投資と生産工程の変更が不要である。本邦ではこの方法を利用して生産された硝化抑制材入り化成肥料が主流である。

原料

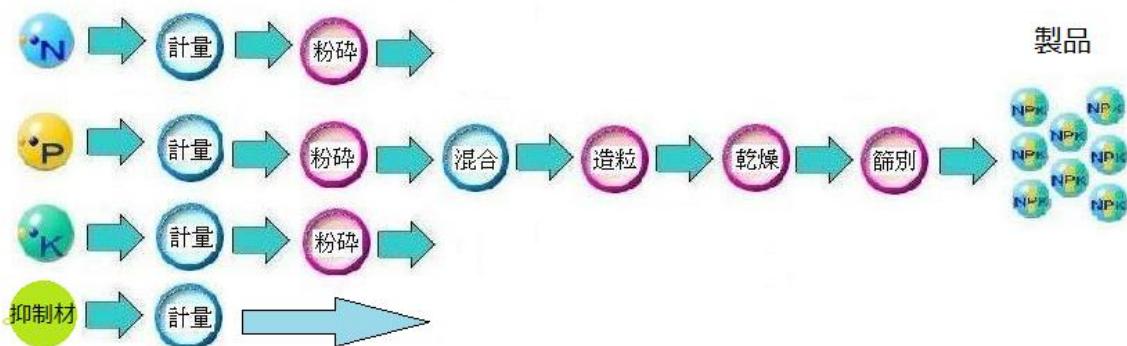


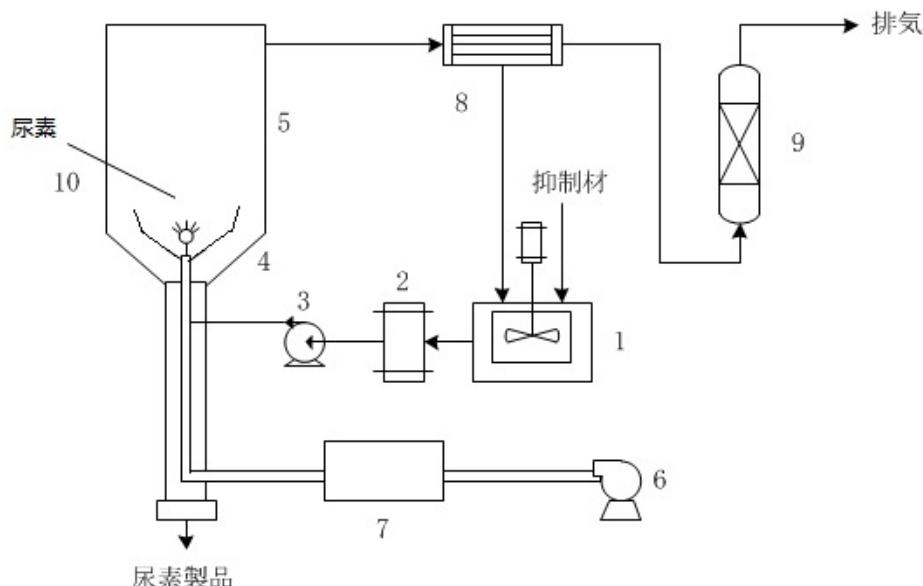
図 13. 化成肥料の生産工程に抑制材の添加方法

3. 抑制材の尿素表面塗布方法

尿素は溶融造粒法（プリリングタワー造粒法）または流動床造粒法で造粒した球形粒子で、粒子表面が滑らかで、一定の硬度を有する。従って、抑制材の液体を尿素粒子に噴霧して、その表面に均一に付着させることで生物的安定性肥料に加工することは容易である。

抑制材の尿素表面塗布方法は初期投資が少なく、操作簡単で、生産コストが安いため、アメリカ、中国ではよく利用される。中国にはこの方法で加工された尿素は「長効尿素」と呼ばれる。工程上、尿素の溶解と再結晶を防ぐため、抑制材の溶媒は水ではなく、エタノール等の有機溶媒を使う。また、尿素表面への抑制材の付着性をよくするため、付着材を合わせて使用することが多い。

抑制材の尿素表面塗布工程は図 14 に示す。



1. 抑制材溶解槽、 2. 抑制材貯槽、 3. 高圧ポンプ、 4. ノズル、 5. 塗布塔、
6. ブロワ、 7. 熱風発生器、 8. コンデンサー、 9. 排ガス処理塔、 10. 尿素投入口

図 14. 抑制材の尿素表面塗布工程

ウレアーゼ抑制材と硝化抑制材、付着材を溶解槽（1）に投入して有機溶媒に溶かし、抑制材液を調合する。調合された抑制材液を貯槽（2）に移す。抑制材液は高圧ポンプ（3）を使って、塗布塔（5）に送り、ノズル（4）を通じて塗布塔（5）に投入された尿素粒子に向けてスプレーする。一方、ブロワ（6）を使って、熱風発生器（7）が発生した 60~80°C の熱風を塗布塔（5）の下部から導入して、尿素粒子を流動させながらその表面にスプレーされた抑制材液滴を乾燥する。乾燥した尿素粒子が塗布塔の底部から排出され、包装して出荷する。蒸発された有機溶媒が排気口から排出され、コンデンサー（8）を通して、冷却凝集して回収して循環利用する。排気は排ガス処理塔（9）で処理してから大気に排出する。

通常、ウレアーゼ抑制材は NBPT、HQ、硝化抑制材はジアンジアミド、ニトラピリン、

付着材はエチルセルロース、有機溶媒はエタノールを使用する。尿素と抑制材の重量比が
100 : 1.0~1.5 である。