



2016 年度助成研究成果報告書概要版

廃棄物や副産物に含まれるリン資源の活用技術開発の現状、課題および解決の方策に関する調査

研究機関名：早稲田大学総合研究機構リニアトラス研究所

研究代表者：大竹久夫

1. はじめに

日本には資源と呼べるだけのリン鉱石は存在せず、日本人の体に含まれているリンのほとんどは海外から輸入されたものである。日本人の DNA や骨に含まれるリンはみな外国製の輸入品であると言ってもよい。昨今、農業の持続可能性、食の安全保障や農産物の輸出促進などが話題になることもあるが、もともと農業とは人間が自然界から生存に必要な元素を得るために行う極めて物質的な活動であり、物質による制約を忘れて農業を語ることは危うい。とくにリンは食料の生産に絶対的に必要な「生命の栄養素」であり、多少大げさな言い方をすれば「リンのない」日本で食料を生産することは砂漠で農業をするようなものである。

昨年度の研究では、日本国内に存在する未利用リン資源(以下二次リン資源と呼ぶ)の賦存量についての調査を行い、下水汚泥、家畜糞尿や製鋼スラグなどの二次リン資源を有効に活用すれば、わが国は食料の生産に必要なリン量を「自給」できる可能性があることを明らかにした。また、リンがわが国において驚くほど広範な製造業分野において使われており、まさに「産業の栄養素」とも呼ぶべき重要な役割を果たしていることも明らかにした(図 1)。本年度は、持続的リン利用の先進的な取組みが続く欧州を中心に海外の動向について調べるとともに、国内二次リン資源の賦存量および肥料利用の現状と課題についても追加調査を行った。

2. 持続的リン利用をめぐる海外動向

いま持続的リン利用への取組みは、欧州が世界をリードしている。欧州において持続的リン利用が政策課題となっていく過程を時系列的に読み解くことから、そこには二つの大きなターニングポイントがあったことが分かった。第一のターニングポイントは、直線型経済(Linear Economy)か循環型経済(Circular Economy)かの選択である。欧州は持続可能な成長を実現するために、直線型経済から循環型経済への転換を図ることでイノベーションを起こし、新たな産業と雇用を生み出すことを選択した。欧州の目指す循環型経済への変革はかなり根本的なものであり、エネルギー、資源および環境による制約を受けない産業を育成して経済を成長させる戦略と言ってもよい。

第二のターニングポイントは、循環型経済への転換を図る欧州にとって、持続的リン利用が政策課題に値するだけの意味をもつかどうかの判断にあった。結局のところ欧州が持続的リン利用へ取組むことを選択したのは、「リンのない」欧州にとりリンの長期的かつ安定的な確保が、持続可能な食料生産に絶対的に必要と判断したからにはほかならない。経済成長は必要であるが、そのために資源やエネルギーを大量に消費したり環境への不可逆的な影響を及ぼすことが避けられないとすれば、それは決して「賢明な成長」とは言えない。

現在、欧州では肥料法の大改正が行われており、そのねらいは家畜糞尿や食品廃棄物などの有機性廃棄物と二次リン資源から回収したリンを用いた肥料(欧州ではイノベーション肥料と呼ばれている)の欧州共同市場を開設することにある。枯渇する天然資源であるリン鉱石への過度な依存をやめ、欧州内の二次リン資源をより有効に活用することで、持続可能な農業を実現しようとしている。農業分野においては、必ずしもリンだけを取り出してリサイクルする必要はなく、結果的にリンが安く安全にリサイクルされればそれでよい。改正案は今、欧州理事会および欧州議会に付議されており、2017 年夏までには審議を終えて 2018 年 1 月から新たな法律として施行される運びである。これまでも欧州では、2013 年に持続的リン利用に取組む欧州協議会が設立され、2014 年にはリン鉱石が欧州の 20 の戦略物資のリストに加えられるなど重要な進展が見られていたが、いま EU レベルで欧州肥料法の大改正をはじめ持続的リン利用への政策支援が次々と打ち



図1 リンは「生命の栄養素」であり「産業の栄養素」でもある。

出され取組みはさらに活発化している。

一方、家畜糞尿、食品廃棄物とならぶ二次リン資源である下水汚泥の肥料利用については、欧州においても国により大きく意見が分かれている。例えばスウェーデンでは、下水処理場への重金属等の有害物質の流入を極力排除することにより、下水汚泥を有機肥料や堆肥として農業に有効利用する取組みが進められている。中でも、REVAQ と呼ばれる国の基準を満たす下水処理場を資源リサイクル施設として認証する制度をとっていることは注目される。他方、ドイツでは下水汚泥の農地還元を原則禁止して汚泥を焼却処分するとともに、汚泥に含まれるリンを分離回収して肥料利用することを義務付ける法律が施行されようとしている。欧州における下水汚泥の利用をめぐる動きについては、今後二次リン資源の有効利用の面から目が離せない。

中国は世界第三位のリン資源保有国であり、リン資源への関心は「リンのない」欧州や日本とはかなり異なっている。例えば、雲南省昆明市にある中国最大のリン企業雲天化集団有限責任公司是、リン鉱石の採掘から黄リン、リン酸やリン肥料を含む多様なリン製品を製造しており、将来的には世界最大の無機化学品メーカーになることをめざしている。しかし、中国最大のリン鉱床をもつ雲南省のリン鉱石は品質が比較的悪く、原料として使用する前に浮遊選鉱による選別作業が必要である。中国では高品位リン鉱石は埋蔵量全体の一割程度しかないとされており、①低品位リン鉱石の有効利用、②副産物であるリン石膏の管理と有効利用、③採掘を終えた鉱山跡地の環境修復および④付加価値の高い高純度リン化合物の製造技術の開発などが今後の課題となっている。一方、農業分野ではリン肥料の過剰使用と家畜糞尿による環境汚染が深刻な問題になっている。中国は水資源にはあまり恵まれておらず、いずれ下水道の整備と窒素やリンの除去を含めた高度な水処理が必要になってくると思われる。2015年には河北省天津市の下水処理場に、中国で最初のリン回収プラントが欧州より導入されており、今後中国の都市部において下水汚泥からのリン回収が広く行われる可能性は十分に考えられる。

世界最大のリン資源保有国であるモロッコの懸念は、欧州の肥料法改正に見られるカドミウムを多く含むリン鉱石排斥の動きであり、この動きが先進国に広く波及すれば世界最大を誇るリン資源も宝の持ち腐れとなりかねない。モロッコのリン鉱石埋蔵量は世界全体の約75%も占めているが、そのリン鉱石にはカドミウムや天然放射性物質が比較的多く含まれる。今後モロッコにおいて、少なくともリン鉱石の脱カドミウム技術が実用化される可能性は十分にある。モロッコは、中国や米国とは異なり黄リンの製造は行っていない。黄リン製造は大量の電力を消費するばかりか、リン鉱石に含まれる天然放射性物質による環境汚染の防除もまたやっかいな問題である。電力供給の問題と安全操業を可能とする技術を持たないことが、モロッコで黄リ

ンの生産が行われてこなかった主な理由と言われている。

米国は今、中国に次ぐ世界第二位のリン鉱石の年間採掘量を誇っているが、国内のリン鉱石の耐用年数(経済埋蔵量÷年間採掘量)はすでに 40 年を切っている。リン鉱石の露天掘りは環境の修復に膨大な経費がかかるため、リン鉱石の価格がよほど高騰しない限り、米国内で新たなリン鉱山の開発が行われることはないだろう。事実、フロリダのリン鉱石の採掘場では、リン鉱石を硫酸処理した際にできる副産物(リン石膏)に天然放射性物質が蓄積しており、これが地下水に混入して訴訟になっている。一方、2005 年にカナダで設立された Ostara Nutrient Recovery Technologies 社(以降 Ostara 社)は、下水汚泥の嫌気性消化脱離液などからリン酸をリン酸マグネシウムアンモニウム(MAP)として回収する Pearl®プロセスを実用化し、2009 年以降北米を中心に急速に業績を伸ばしている。Ostara 社の Pearl®プロセスは、2016 年までに北米 11 および欧州 3 の合計 14 の下水処理場に導入されている。しかも、その半数が 2015 年および 2016 年に導入されており、とくに 2016 年 5 月に米国シカゴ市の Stickney 水再生プラントに導入された Pearl®プロセスは、年間約 10,000-15,000 トンの MAP(商品名 Crystal Green®)を回収できる世界最大の規模を誇っている(図 2)。

Ostara 社のビジネスモデルには、①Ostara 社が自費で下水処理場内にリン回収プラントを建設して運転管理費を自治体から受け取る場合と、②Ostara 社から技術提供を受けた自治体がプラントの建設と運転管理をともにする場合の 2 通りがある。いずれの場合も、Ostara 社と自治体は Crystal Green®の販売による収益を分配する。北米における Ostara 社のリン回収ビジネスが急速に拡大している背景には、①マグネシウムを多く含む地下水による下水処理場内での配管等の閉塞障害、②深刻化する富栄養化問題に対処するための厳しいリン規制、③リンを多く含む下水汚泥の肥料利用による農地へのリンの過剰負荷、④世界的なリン資源枯渇問題への危機意識の高まりと⑤下水処理場における資源回収への期待などがある。

3. 国内二次リン資源賦存量と肥料利用に関する追加調査

わが国の下水道に負荷されるリン量は 2002 年以降約 5.6 万トン/年で推移しており、生活系によるリン負荷量の増加を産業系のリン負荷量の減少が相殺しているようである。この間、日本人 1 人当たりのリンの負荷量(原単位)は、1.2-1.8g/人・日のレベルで推移している。1970 年代、家庭からのリン負荷量はリンを含む洗濯用の合成洗剤の普及とその後の無リン化で大きく変化した。当時の合成洗剤の生産量から洗剤起源のリン量を推定したところ、約 3 万トン/年に達するリンが家庭からの排水に含まれていたことがわかった。当時は、下水道の普及がまだ十分でなかったため、リン含有洗剤は水域の富栄養化の元凶として問題視されたが、1979 年(昭和 54 年)に滋賀県で「琵琶湖富栄養化防止条例」が制定されたことを契機に、洗剤の無リン化が急速に普及し家庭排水によるリン負荷も減少した。現在、家庭排水によるリン負荷量の原単位は、し尿起源が 0.9g/



図 2 アムステルダム市に導入された欧州最大のリン回収プラント(左)と Ostara 社 Pearl®プロセスが導入された下水処理場

人・日で雑排水起源が 0.5g/人・日とされている。し尿起源の数値は 1960 年代に設定された数値が現在もそのまま使用されているようであるが、わが国の食生活はその後大きく変わり肉類の摂取量も増えたことから、し尿起源の数値は現在ではもう少し高い値となっていると考えられる。リンの負荷量原単位は、下水の高度処理や汚泥の有効利用を考えるうえで重要であり、今後より正確な値を把握することが必要となろう。

わが国には 770 万もの浄化槽と 968 のし尿処理施設が存在し、下水道の集約型排水処理方式が経済的に成り立ちにくい地域の生活排水を分散型方式で処理している。浄化槽汚泥とし尿はし尿処理施設に集められて処理されるが、リンはほとんどがし尿処理汚泥に移行する。今のところ、し尿処理汚泥の農業利用率は約 10% に過ぎず、その多くも堆肥として利用されている。一方、し尿処理汚泥の約 45% は施設内で焼却され、焼却灰は埋立処分されている。し尿処理汚泥に含まれるリンの賦存量は年間約 2,600 トンあり、今後し尿汚泥を二次リン資源として有効利用することが求められる。平成 27 年におけるわが国の有機性廃棄物の総排出量は、約 2 億 5 千万トンと推計される。これらの有機性廃棄物は肥料や飼料、エネルギー資源としてすでにリサイクルされているものも多いが、まだかなりの量が焼却や埋立処分されている。農業および食品分野で発生する二次リン資源の賦存量は約 17 万トンにも達すると考えられ、有効利用するための技術開発とともに政策支援にも力を入れて、貴重な二次リン資源として有効に活用する事業を推し進める必要がある。

国内で発生する水産加工残渣や食品産業で副生する有機物は、従来から有機質肥料の原料として活用されてきた。また下水道、し尿分野および製造業分野で発生する汚泥を原料とする汚泥肥料は、従来の特殊肥料から肥料登録が必要な普通肥料に移行させることで、より厳しい安全管理のもとで施用の促進が図られている。複合肥料においても制限付ながらも家畜排せつ物の焼却灰や堆肥が化成肥料原料として認められ、「混合動物排せつ物複合肥料」や「混合堆肥複合肥料」などの新しい公定規格も設定されるようになった。現在、有機質肥料 47 種類の中で、リン酸の含有量が公定規格で定められているのは 32 種類あり、輸入品を除くと 27 種類の有機質肥料が製造され年間約 1.6 万トンのリンが使用されている。汚泥肥料にはリン酸の最小含有量の規格はなく表示義務のみのため文献値を参考に推定した結果、年間約 2.0 万トンのリンが汚泥肥料に含まれ出荷されていることがわかった。複合肥料については、原料としての二次リン資源の利用は少なく、リン鉱石及び輸入化成によるところが大きい。また、銘柄数が 1 万件以上と多く、原料の詳細も不明なため、保証成分の平均値からリン利用量を推定すると年間約 7.7 万トンあった。まとめると、有機質肥料、汚泥肥料および複合肥料として年間約 11 万トンのリンが使われていると推定される。なお昨年度の調査から、リン酸質肥料として年間約 3 万トンのリンが使われていると推定されており、これも含めると合計約 14 万トンのリンが普通肥料(堆肥などの特殊肥料を除いた肥料)に使われていると考えられる。

4. おわりに

一般に、わが国において政策の窓は、欧米の動きに乗り遅れることへの不安(例えば、バイオ燃料など)、新たな国際的取り決めへの否応のない対応(地球温暖化や生物多様性問題など)や国内で社会問題となり対策が喫緊に求められる場合(公害問題など)に開かれやすい。欧州の先進的な持続的リン利用への取組みを伝えることで、欧州と同様に「リンのない」日本も何かをしなければならないと感じる日本人が増えることを期待したい。持続的リン利用をめぐる欧州の主張には説得力があり、ロジックもしっかりしているので、日本人にとっても理解しやすい。持続的リン利用へ取組むことが、資源、食料や環境などの問題の解決に貢献するという欧州のロジックは、日本にもほぼそのまま当てはまる。しかし、地球温暖化や生物多様性のように欧州のロジックを日本にほぼそのまま持ち込むだけでは、ローカル性がより強い持続的リン利用への取組みを日本において政策課題化することは容易ではないだろう。わが国が持続的リン利用に取組むことの必要性により強い説得力をもたせるには、わが国の実情にあったロジックをさらに付け加える必要があり、その理論構築は今後最も重要な研究課題になるものと考えられる。

謝 辞

本研究の実施に当たりご支援を賜りました一般財団法人環境対策推進財団に、心から御礼を申し上げます。