



2017 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ンアトラス研究所

研究代表者：大竹久夫

1. はじめに

リンはすべての生命に不可欠の元素であり、約 1.27 億人の日本人が生命を維持し健康な生活を送るためには、毎年約 4.6 万トンものリンを必要とする。リン資源をもたない日本は、国民の生命を維持するためだけでも、少なくとも約 4.6 万トンのリンを毎年海外から輸入し続けなければならない。経済的にみても、海外から持ち込まれるリンがなければ、年間約 80 兆円の飲食料の最終消費が成り立たないばかりか、300 兆円近いわが国の工業生産にも影響を及ぼす。経済はともかく国民の生命を維持するために、少なくとも毎年約 4.6 万トンのリンを海外から入手し続けなければならないという事実は、日本にとってリンの確保がいかに根源的で避けて通れない重要な問題であるかを物語っている。

国の政策担当者がリン問題について正しい情報を持ち有効な政策を立案できるためには、世界と日本におけるリンのフロー、ニーズ、コストやマーケットなど「リンの実態」についてよく理解しておかなければならない。しかし、世界と日本における「リンの実態」については、まだ驚くほどよくわかっていない。本年度は、2015 年度から 3 年間にわたり助成を頂いた調査研究成果の取り纏めとして、過去 3 年間の調査から見えてきた世界と日本における「リンの実態」について述べるとともに、わが国がリンの過度な輸入依存から脱却するための「Pイノベーション」構想およびリン循環産業ビジョンによるリン「自給」体制構築への道筋を示したい。なお概要版では紙面の都合上、本年度行った国内二次リン資源の賦存量および活用の現状と課題に関する追加調査の結果については割愛せざるを得なかった。これらの追加調査の結果については、本年度の研究成果報告書を御覧頂きたい。

2. 世界と日本における「リンの実態」

人体は約 35 の元素からできており、体重の 1%を越える多量元素には、酸素(65%)、炭素(18%)、水素(10%)、窒素(3%)、カルシウム(1.6%)およびリン(1%)の 6 つがある。人の体重の約 99%を占めるこれら多量元素の内、酸素、炭素、水素および窒素は空気と水の成分であり、カルシウムも日本ならどこにでもある。しかし、リンだけは事情が違い日本に資源がない。人体中のリンの約 85%は骨に存在し、残り約 15%のほとんどが筋肉や内蔵などの軟部組織に DNA や細胞膜の成分として含まれる。子供も含めた日本人の平均体重は約 55 kg であるから、簡単な計算から約 1.27 億人の日本人の体内には合計約 7 万トンのリンが存在することが分かる。この約 7 万トンのリンは、人体の中で新陳代謝により日々新しいものと入れ替わっている。

人間は、必要なリンのほとんどを食物から摂取する。平均すると子供も含めて日本人一人当たり毎日約 1g のリンを摂取しほぼ等量のリンを排泄するから、1.27 億人の日本人が生きていくためには、毎年約 4.6 万トンのリンが必要となる。また、日本人ひとりが 80 歳まで生きるには、生涯で約 30 kg のリンを必要とする。この様に、リンは日本が国民の生命を維持するために、毎年海外から大量に持ち込まなければならない唯一の元素である。これまで日本では、リンを海外から輸入することが食料の輸入と同じぐらいに重要であるという認識はなかった。日本がまだ食料や肥料原料を自給していた 19 世紀末までは、日本人の骨や DNA はすべて国産のリンでできていた。しかし、20 世紀になり日本が食料と肥料原料を海外から輸入するようになると、やがて日本人の骨や DNA に含まれるリンはみな外国製の輸入品になってしまった。

リンは食料生産に限らず、広範な人間活動の分野においても重要な元素である。これまでに 120 近く発見されている元素の中でも、食料生産、製造業、資源利用および環境保全のいずれにおいても重要とされる元素はリンの他にはないだろう。リンは窒素およびカリとともに肥料の三大要素と呼ばれ、食料の生産に最も

重要な元素の一つである。窒素は大気中に無限にあり、カリについては鉱物資源も豊富でこれまで枯渇が懸念されたことはない。カリはまた海水中に約 0.3%含まれており、リンの濃度に較べて約 1 万倍も高い。食料生産を考えても、やはりリンだけが日本にない。米国地質調査所(USGS)によれば、2017 年の世界のリン鉱石の経済埋蔵量は約 700 億トンある。同年の世界のリン鉱石の年間採掘量は約 2.63 億トンであるから、リン鉱石の耐用年数(経済埋蔵量÷年間採掘量)を計算すると約 270 年になり、少なくとも今世紀中にリン鉱石の経済埋蔵量が枯渇することはないと思われる。しかし、世界のリン鉱石経済埋蔵量の約 75%が旧スペイン領西サハラを含むモロッコ王国一国に集中しており、日本を含め世界の 90%の国には資源と言えだけのリン鉱石は存在しない。さらに注意しなければならないことは、耐用年数の計算にはリン鉱石の品質の低下が考慮されていない点である。他の鉱物資源と同様に、リン鉱石も品質が良く採掘が容易なものから掘り出される。国際肥料工業協会(IFA)は、世界市場で取引されるリン鉱石の品質低下が著しいと報じており、とくにモロッコなど経済埋蔵量の多い国のリン鉱石が、カドミウムなどの有害重金属とウランなどの天然放射性物質を多く含むことが懸念されている。

2016 年の一年間に、鉄鉱石や石炭などに含まれて日本に持ち込まれるリンを除いて、約 35 万トンのリンが様々な輸入品の形で海外から持ち込まれている。日本に持ち込まれる約 35 万トンのリンを、国際市場で最も多く取引されるリン含有率 14%のリン鉱石に換算すると、約 250 万トンにもなる。2016 年のリン鉱石の輸入量は約 24 万トンであるから、世界のどこかで差引き約 225 万トンのリン鉱石からリンを取り出し、有害物質を含んだ大量の廃棄物を海外に置き去りにしていることを意味する。リン鉱石の採掘現場では、環境の破壊が深刻となりリン鉱石の供給にも影響が出始めている。例えば、米国フロリダ州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(燐酸石膏)に天然放射性物質が蓄積し、これが地下水に混入して訴訟になっている。また、リン鉱石採掘終了後の環境修復には膨大な経費が掛かるため、米国や中国などでは新たなリン鉱山の開発が困難になってきている。一方、日本の様なリン輸入国でも、捨てられたリンが湖沼や内湾に流れ込むと水域の富栄養化を引き起こし、アオコや赤潮が発生して水利用や栽培漁業等に甚大な被害を与えることが知られている。非効率なリンの利用は、貴重なリン資源を無駄にするばかりか、閉鎖性水域の富栄養化により大きな経済的損失を招きかねない。例えば、米国の富栄養化による経済損失は年間 22 億ドル(約 2,300 億円)と言われており、日本においても下水からの窒素およびリンを除去するために、年間 200-400 億円もの経費が掛かっているようである

一方、リンは多くの製造業分野でも使われており、「産業の栄養素」とも呼ぶべき重要な役割をになっている。リンは電子部品、自動車、医薬品、食品やプラスチックなどの広範な製品の製造のために使用されているが、リンほど工業素材としての重要性が理解されてこなかった元素はないだろう。日本の場合、海外から輸入されるリンの約 75%は、肥料や飼料添加物など農業用に使われているが、残りの約 25%は工業用のリン素材として使われている。少なくとも日本においては、「リン=肥料」といった短絡的な見方は妥当ではない。工業用リンの多くは、リン元素の単体である黄リンから製造される。黄リンを製造するには、リン鉱石を高温(1,300-1,400℃)の電気炉内で炭素熱還元する必要があるが、1 トンの黄リンを得るのに約 14,000 kWh もの電力が必要となる。わが国はリン鉱石をもたず電力問題もかかえているため、黄リンを国内で生産できず毎年約 1.8 万トンの黄リンを海外から輸入している。しかし、世界の黄リン生産は、年間約 120 億 kWh もの電力(EV 約 650 万台の年間電力消費量に相当)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のダスト濃縮や有害重金属を含むスラグの大量発生などの環境問題にも悩まされている。このため 2014 年に世界で約 85.6 万トンの黄リンが製造されているが、黄リンを商業生産している国は中国(世界シェア約 70%)、米国(約 14%)、ベトナム(約 9%)およびカザフスタン(約 7%)のわずか 4 ヶ国に過ぎない。現在、わが国にとって最大の黄リン輸入相手国はベトナムであるが、ベトナムのリン鉱石資源はあと 10 年余りで枯渇することが懸念されており、わが国がいつまで黄リンを輸出し続けることができるか危ぶまれている

3. Pイノベーションとリン循環産業ビジョン

2016 年現在、わが国には食飼料や鉄鉱石などに含まれて国内に持ち込まれるリンが約 29 万トンあり、肥

料を含むリン製品として輸入されているリンは約 23 万トンある。食品中のリンは、下水道へ年間約 4.7 万トン、浄化槽・し尿処理へ約 1.8 万トン、そして残りの多くは家庭からの食品廃棄物(約 0.7 万トン)として排出される。一方、製造業分野では、リン基礎化学品製造業の分野に原料として投入される年間約 6.5 万トンのリンの内、約 0.5 万トンは粗リン酸(約 35%P₂O₅)として肥料用途になり、残りの約 6 万トンが広範な製造業分野で使われる。製造業分野におけるリンの用途は多様であり、使用されたリンが製品へ移行する割合も製造業の分野ごとに大きく異なるため、まだその流れはほとんど把握できていない。また、製鉄業分野では原料となる鉄鉱石、石炭および石灰にリンが含まれており、年間約 12 万トンのリンが流入する。この内、製品に約 0.6 万トンのリンが移行し、残りの約 11.4 万トンのリンが製鋼スラグに含まれて排出されているようである。

わが国における主な未利用リン資源(二次リン資源と呼ばれる)には、製鋼スラグ(リンとして年間約 11.4 万トン)、食品廃棄物(約 3.2 万トン)、農業廃棄物(約 2.9 万トン)、下水汚泥(約 4.2 万トン)、およびし尿汚泥(0.6 万トン)などがある。この内、肥料や堆肥などにリサイクルされているリン量はまだ年間約 2.4 万トンに過ぎない。しかし、家畜ふん尿がほぼ全量農業に利用されていると仮定すると、リサイクルされているリン量は合計約 11.8 万トンになり、国内に持ち込まれるリンの総量約 52 万トンに対するリサイクル率は約 23%になる。賦存量の大きさと回収のしやすさから今後、製鋼スラグ、食品廃棄物、下水汚泥およびし尿汚泥が、家畜ふん尿に続く有望な未利用リン資源になるものと思われる。

「リンのない」日本でも、リンの「自給」体制を構築できる可能性はある。日本にないのは、一次リン資源(天然リン鉱石)であって二次リン資源(リン含有廃棄物や副産物)は十分にある。しかも、日本が食飼料の輸入(重量ベースで約 50%)を続け、国の基幹産業の一つである製鉄をやめない限り、たとえリン鉱石やリン製品を輸入しなくても、毎年約 29 万トンのリンが国内に入り続ける。一方、家畜ふん尿(リサイクル率 90%)を除いても、製鋼スラグ(リンとして年間約 11.4 万トン)、食品廃棄物(約 3.2 万トン)、農業廃棄物(約 2.9 万トン)、下水汚泥(約 4.2 万トン)やし尿汚泥(0.6 万トン)を二次リン資源として活用できれば、年間約 22.3 万トンのリンが国内で供給できる。このリン量は、日本が海外から輸入しているリン(リン鉱石およびリン製品)量の 22.8 万トンにほぼ匹敵する。

わが国は世界有数のリン消費大国でありながら、ほぼ全てのリンを海外からの輸入に頼ってきたため、持続可能なリンバリューチェーンが構築されていない。日本がリン「自給」体制の構築に取り組むためには、製造業分野への高純度リン素材の安定供給も含めて考えれば、①国内二次リン資源(下水汚泥、畜産廃棄物や製鋼スラグなど)から効率よくリンを回収し、②回収リンから製造した粗リン酸液から省電力で黄リンを製造して、③黄リンを出発原料に高機能性リン化合物を製造できる技術イノベーション(Pイノベーションと呼ぶ)が必要である(図 1)。Pイノベーションは、二次リン資源からのリン回収事業にも経済的なインセンティブを与え、わが国におけるリン循環産業の振興に貢献することが期待されている。

4. リン「自給」体制構築へむけて

過去 3 年間の調査から見えてきた世界と日本における「リンの実態」に関する知見から、わが国においてリン「自給体制」を構築するためには、今後次のような課題に取り組むことが重要である。

(1) 「日本にリンがない」ことを日本人の常識にする。

リンの確保が日本にとり根源的で避けて通れない重要問題であることを、国民の常識にする必要がある。そのためには、食の安全保障や社会の持続可能性などの問題を、元素の利用可能性のレベルまで遡って議論し、国民の目をもっと根本的な問題に向けさせる必要がある。

(2) 日本における「リンの実態」を明らかにする。

国民がリンの確保が日本にとり根源的で避けて通れない重要な問題であることを理解し、国の政策担当者が正しい情報のもとで有効な政策の立案ができるためには、日本における「リンの実態」をよく知らなければならない。しかし、日本における「リンの実態」はまだ驚くほどわかっていない。日本における「リンの実態」を徹底的に究明する必要がある。

(3) 世界を先導する「Pイノベーション」に投資する。

粗リン酸の炭素熱還元による黄リン製造は、世界にない技術イノベーションであり、わが国がリンの「自給」体制を構築するためには、なくてはならない中核技術である。この技術開発が成功すれば、世界で年間約 120 億 kWh の電力消費が節約され、環境へ放射性物質や有害重金属を放出しない画期的な黄リン製造が実現する。また、国内で安定供給される黄リンを出発原料、多様な高機能性リン化合物が製造できるようになれば、リン循環産業はわが国の経済にも大きな波及効果をもたらすものと期待できる。

(4) リン自給体制を構築する。

わが国は、枯渇する天然リン鉱石への過度な依存を克服し、環境にもやさしいリン自給体制を構築する必要がある。リン回収再資源化事業の採算性を損益分岐点まで引き上げるためには、①技術イノベーションによるコスト削減に加えて、リン循環産業全体を運命共同体としたシナジーの最大化と、国による補助金などのインセンティブの供与や関連法制度の改正などの政策支援が求められる。

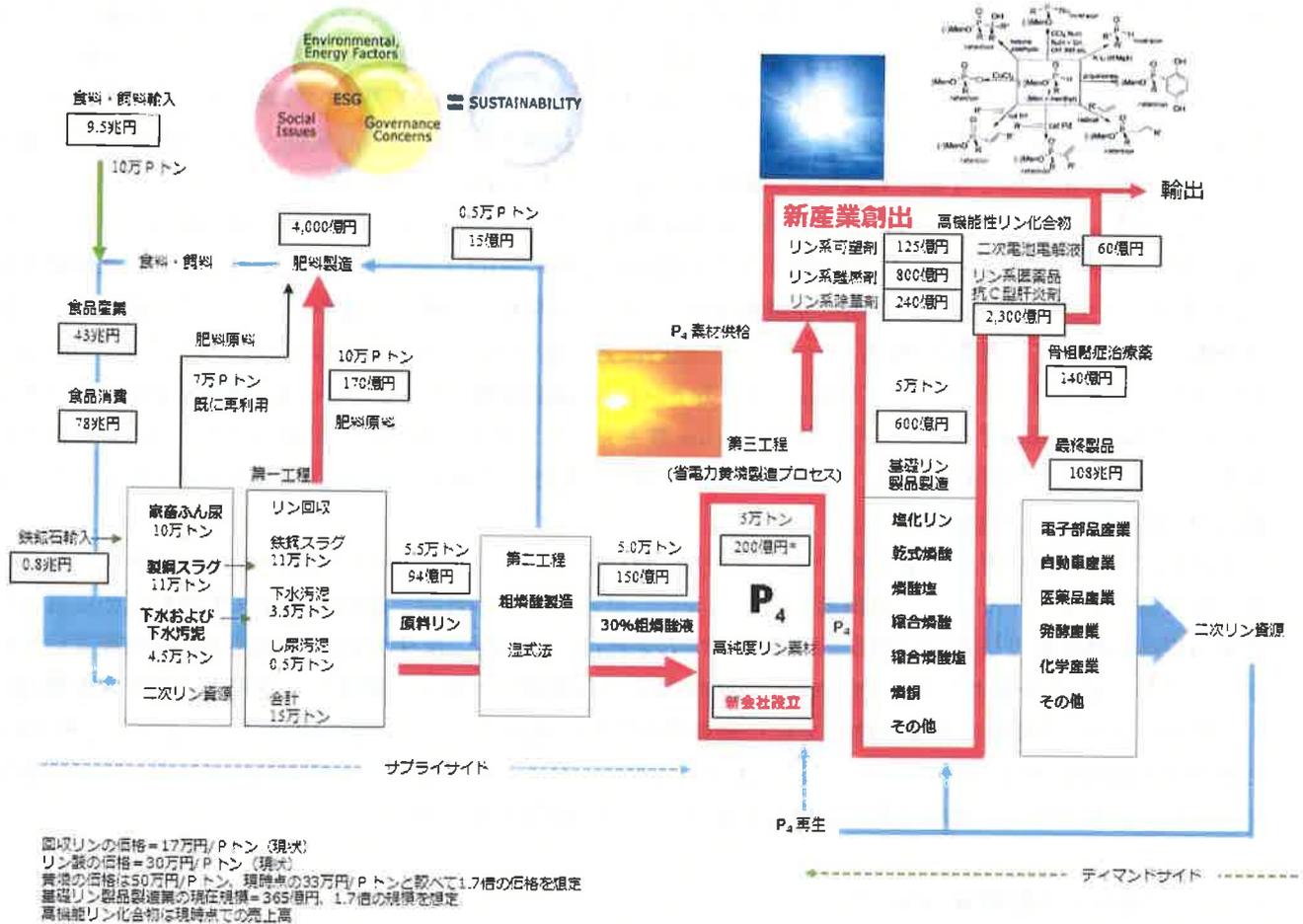


図1 Pイノベーションとリン循環産業ビジョン

5. おわりに

資源問題はいつ発生するか誰にも予測できない。今のままで深刻なリン問題が突如発生した時には、国になすすべがないことは、2008年のリンショックを見れば明らかである。資源問題には未来への備えが重要であり、資源対策は一朝一夕にはできず、有効な対策を準備するには時間も経費もかかる。リン問題ではまだ余裕のあるうちに、日本における「リンの実態」調査をしっかりと行い、持続可能なリンバリューチェーンを実現しておくことが必要である。

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。