

## 持続的リン利用—生命と産業の栄養素の管理—

### Sustainable Use of Phosphorus—Management of Biological and Technical Nutrient—

大竹 久夫\*, 常田 聡  
HISAO OHTAKE\* and SATOSHI TSUNEDA

早稲田大学総合研究機構リンアトラス研究所 〒162-8480 東京都新宿区若松町2番2号

早稲田大学先端生命医科学センター内

\* TEL: 03-5369-7325 FAX: 03-5369-7325

\* E-mail: hohtake@bio.eng.osaka-u.ac.jp

Phosphorus Atlas Research Institute, Waseda University, Wakamatsu-cho 2-2, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8480, Japan

キーワード: リン, 黄リン, 食料生産, ハイテク産業, 持続的利用

Key words: phosphorus, yellow phosphorus, food production, high-tech industry, sustainable use

(原稿受付 2019年2月14日/原稿受理 2019年3月2日)

#### 1. はじめに

人体は、超微量元素(重量比率が0.0001%以下)も含めると、30あまりの元素からできている<sup>1)</sup>。多量元素(重量比率が1%を越える元素)には、多い順に酸素(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。この内、酸素、炭素、水素および窒素は、言わずと知れた空気と水の成分であり、カルシウムも石灰岩(CaCO<sub>3</sub>)が日本ならどこにでもある。しかし、リンだけは事情が違う。人体の多量元素の中で、リンだけが日本に資源がない。多量元素に次いで多い5つの微量元素(硫黄、カリウム、ナトリウム、塩素およびマグネシウム)を含めても、硫黄は日本の輸出品であり、残りの4元素も海水に豊富に含まれているから、やはりリンだけが日本に資源がない。

リンはDNA、細胞膜や骨などの成分として、また細胞のエネルギー代謝においても不可欠な「いのちの元素」である<sup>2)</sup>。今日、人間が使うほぼ総てのリンは、地下資源のリン鉱石から得られている(図1)。しかし、日本には資源と呼べるだけのリン鉱石は存在せず、ほぼ総てのリンを海外からの輸入に頼っている<sup>3)</sup>。厚生労働省による日本人の食事摂取基準<sup>4)</sup>によれば、国民の健康の保持と増進を図る上で摂取することが望ましいリンの量は、子供も含めて一人当たり約1g/日であるから、約1.25億人の日本人となると毎年約4.6万トン(おとな約77万人分の体重に相当)のリンが必要となる。したがって日本は、国民の生命を維持するためだけでも、毎年約4.6万トンのリンを海外から輸入し続けなければならない。

一方、日本は世界でも有数のリン消費大国であり<sup>5)</sup>、年間約50万トンものリンを国内に持ち込んで消費している。リンは電子部品、自動車、医薬品、食品や化学などの広範な製造業分野で使われており<sup>2)</sup>、経済的にもリ

ンがなければ、年間約80兆円にのぼる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広範な影響が避けられない。経済はともかくとしても、国民の生命を維持するためだけでも、少なくとも毎年約4.6万トンのリンを海外から輸入し続けなければならないという事実は、日本にとりリンの確保がいかに根本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。

にもかかわらず、はたしてどれだけ多くの日本人が、日本にリン資源がなくほぼ総てのリンを海外からの輸入に頼っていることを知っているだろうか? わが国では農業、肥料、下水道、浄化槽・し尿、食品や環境などの個別分野でリンが取扱われてはいるものの、分野を越えた取組みは弱く国には俯瞰的な立場で政策を調整している部署はない。一方、リンを専門とする研究者の数も非常に少なく、日本にはリンに関する「知の空白」と「政策



図1. 中国貴州省開磷市の鉱山から掘り出されたリン鉱石(中央の山)。

の空洞化」ができていと言わざるを得ない。このため、わが国におけるリン利用の実態はほとんど知られておらず、多くの日本人の認識はリン＝肥料といった短絡した見方にとどまっている。リンのことは誰でもよく知っていると思い込んでいるだけで、リンの重要性を正しく理解している日本人は驚くほど少ない。

## 2. 人体とリン

リンは人間の体重の約1%を占めているから、体重約60 kgの成人であれば約600 gのリンが体内に存在する。体内のリンの約85%は骨と歯に存在し、残り約15%のほとんどが筋肉や内臓などの軟部組織に含まれる<sup>6)</sup>。子供も含めた日本人の平均体重を約55 kgとすると、体重の約1%がリンであるから、約1.25億人の日本人の体内に存在するリン量は約7万トンになる。人間は、生きていくために必要なリンのほとんどを食物から摂取する。健康な成人男性の場合、1日に約1.2 gのリンを食物から摂取するが、その約35%は利用されずに糞便となって腸から排泄される<sup>7)</sup>。残りの約65%のリンが体内で利用されるが、ほぼそれと等量のリンが尿に含まれて排泄されることで、体内のリン量はほぼ一定に保たれる。子供は骨の成長にリンを必要とするから体重の割にはリンの摂取量が多く、平均すると大人から子供まで日本人ひとりが毎日約1 gのリンを摂取していることになる。したがって前述のように、1.25億人の日本人が生きていくためには、1年間に約4.6万トンのリンが必要となる。日本人の体内には合計約7万トンのリンが存在すると考えられるから、体内のリンは約1年半から2年ほどで新しいものと入れ替わっているようである。

もし、日本人ひとりが平均寿命に近い80歳まで生きるとすれば、生涯を通して約29 kgのリンが必要になる。さらに、約1.25億人のすべての日本人が80歳まで生きるとすれば、約370万トンものリンが必要になる。約370万トンは、日本人約6,200万人分の体重に相当するから、日本の総人口の約半分の人の体重と同じぐらいである。約1.25億人の日本人の体の中にあるリンの量は約7万トンでほぼ一定であるから、約370万トンのリンを摂取しても残りの約363万トンは捨てられ、人体へ

の歩留まりはわずか約2%に過ぎない。したがって、リサイクルでもしない限り、1.25億人の日本人が80歳までに消費するリン約370万トンのほとんどは、一度使っただけで捨てられることとなる。この量は、世界の76億人が1年間に必要とするリン量約280万トンの1.3倍もある。日本にリン資源がないことや、世界のリン資源が枯渇する可能性を考えれば、なんともったいない話ではないだろうか。いずれにせよ、日本は国民の生命を維持するだけでも、毎年少なくとも約4.6万トンのリンを海外からもってこなければならぬ。国民が生きてするために必要な量のリンを、毎年海外から確保することは国の責務である。

国民に毎年約4.6万トンのリンを摂取させるためには、農作物の場合その約5倍のリンを肥料として必要とする。この量は、リン含有率14%のリン鉱石に換算すると、約165万トンにもなる。牛、豚や鶏などの畜産も含めて考えれば、さらに多くのリンが必要になる。例えば、じゃがいもなどの野菜1 kgの生産に必要なリンの量は約5 gだが、牛肉1 kgの生産にはその10倍以上の55 gものリンが必要となる<sup>8)</sup>。今後も日本が食料の半分(重量基準)を輸入に頼るとしても、残り半分の食料を国内で生産するためには、少なくとも毎年約12万トンのリン(リン鉱石換算で約82万トン)が必要になる。これまで日本人には、リンの輸入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。日本が食料や肥料原料を海外から輸入し始めたのは、日本が台湾を植民地にした19世紀末ごろである。19世紀までは、日本人の骨やDNAなどに含まれるリンはすべて国産のものであった。しかし、20世紀になって日本が食料とリン鉱石を輸入するようになると、いつしか日本人のDNAや骨や細胞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。

## 3. リンは産業の栄養素

リンは農業の他にも多くの製造業分野で使われており、「産業の栄養素」とも呼ぶべき重要な役割を担っている(図2)。例えば、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造分野で使用さ



図2. リンは生命の栄養素であるばかりでなく産業の栄養素でもある。

れている<sup>2)</sup>。とくに、食品産業はわが国最大級のリン消費産業の一つであり、食品加工および食品添加剤として縮合リン酸塩などを大量に消費している。しかし、リンほど工業用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%は肥料や家畜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。

農業用に使われるリンと工業用に使われるリンとでは求められる品質が大きく異なり、両者は別ものといっても過言ではない。「生命の栄養素」としてのリンは、安全であれば他の栄養素と一緒に循環利用することが経済的であるが、「産業の栄養素」としてのリンは、たとえ値段が高くても純度の高いものでなければ使えない。リンは、広範な製造業分野で使われているものの、個々の製品に使われる量は比較的少なく、製造コストに占める割合も大きくない。そのことが、製造業分野において素材としてのリンの重要性が実感されにくかった理由かもしれない。しかし、リンが広範な工業製品の製造に使われているということは、ひとたび海外からの輸入に問題が生じれば、わが国の広範な産業が影響を受けることを意味している。とくに食品を含むバイオ関連産業ではリンを代替できる原料はなく、リンの供給が絶たれることがあれば産業そのものが成り立たなくなる恐れがある。

工業用の高純度リン素材の多くは、リンの単体である黄リンから製造される(図3)。黄リンを製造するには、リン鉱石を高温(1,300–1,400°C)の電気炉内で炭素により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<sup>2)</sup>。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することができず、毎年約1.8万トンの黄リンを海外から輸入している。世界の黄リンの生産は年間約112億 kWhもの電力を消費しており、これは電気自動車約650万台が1年間に消費する電力量に相当する。電気自動車の生命線であるリチウム二次電池の電解液である六フッ化リン酸リチウムは黄リンがなければ製造できず、将来の全固体電池の電解質の製造にも黄リンが必要である。へたをすれば、黄リン製造による大量の電力消費の問題は、電気自動車の普及の妨げにもなりかねない。黄リンの生産はまた、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にも悩まされており、いま黄リンを商業的に生産している国は、世界でも中国、米国、ベトナムおよびカザフスタンのわずか4ヶ国に過ぎない。中でも、中国と米国の黄リン生産量は世界の約84%を占めているが、その約96%は両国内で消費され海外の市場には出回らない。

わが国は第二次オイルショック(1980年ごろ)の後に、電力消費量の大きい黄リンの国内生産を断念し、米国および中国からの輸入に全面的に頼るようになった。しかし、米国は2002年ごろに黄リンの輸出を停止し、中国からの輸入も2006年ごろから減り始め、不足分をオランダおよびベトナムからの輸入により補っていた。しかし、リン製品の価格が高騰した2008–2009年を境に、中国からの黄リンの輸入量は激減し、2012年にオランダのThermphos International社が倒産してからは、日本はもっぱらベトナムからの黄リンの輸入に頼ってきた。しかし、ベトナムのリン鉱石の耐用年数は約10年余りとなっており、ベトナムからの黄リンの輸入もいつまで続けられるか懸念されている。

#### 4. 持続的開発目標の新視点

プラネタリーバウンダリー<sup>8)</sup>や国連の持続可能な開発目標(SDGs)<sup>9)</sup>が示すように、いま世界は持続可能な社会の実現に向けて動きを強めている。持続可能な社会の実現には、枯渇する地下資源への過度な依存を断ち切り、できるだけ多くの地下資源を未来の世代に引き継がなければならない。例えば、欧州はいま循環型経済(Circular Economy)への移行を目指しており、地下資源はできるだけ掘らずに未来の世代に残し、どうしても掘らざるをえない場合には、掘り出した資源を地上資源として何度も循環利用することで、資源を無駄にしない経済を実現しようとしている<sup>10)</sup>。かつて、美しい環境を未来に残すために「環境にやさしい」経済活動が求められたように、これからは地下資源を無駄にしない「資源にやさしい」生産活動が求められる。もはや「環境にやさしい」だけでは不十分であり、「資源にやさしい」ことが示されてはじめて「地球にやさしい」持続可能な開発となる。一方、世界の資源問題では、発展途上国での地下資源の採掘に伴う環境破壊に加えて、先進国による廃棄物の置き去りもまた問題になってきている(図4)。



図3. 工業用の高純度リン素材の出発原料として重要な黄リン(中国雲南市)。



図4. リン鉱石からリン酸を製造する過程で出るリン酸石膏の廃棄物でできた山(中国貴州省開磷市)。

日本の国内企業が原料から製品までの工程でゼロエミッションをいくら謳っても、海外で原料を得る際に環境を破壊したり現地に廃棄物を置き去りにしていれば、「地球にやさしい」持続的開発とは言えない。「資源は金で買えばよい」と言えた時代がすでに過去のものになろうとしていることに、日本人も早く気がつく必要がある。

これまで資源問題は、主に経済成長や国際競争力と言った観点から語られてきた。たしかに石油やレアメタルなどは、人間が快適で便利な暮らしをする上で重要ではあるが、これらは人類の生存に絶対になければならない資源ではない。資源問題を、経済効率や利便性といった観点からばかり議論していると、「資源にやさしい」持続可能な社会の実現とは、いずれどこかで矛盾をきたす恐れがある。リンの資源問題は、生命の存在そのものに絶対的に必要な元素の資源問題という点で、他の資源問題とはかなり性質が異なる。生命の存在に絶対的に必要なリンの資源問題では、経済効率や利便性といった観点からの議論はあまり意味をもたないと思われる。

ところで、米国地質調査所 (USGS) によれば、世界のリン鉱石の経済埋蔵量 (現時点で採掘して採算の取れる資源量) は約 700 億トンある<sup>11)</sup>。もっとも、USGS は資源国が公表したデータを集計しているだけで、データの信頼性には以前から疑問が投げかけられている。USGS はまた、2017 年の世界のリン鉱石の年間採掘量を約 2.6 億トンとしており、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 年になる。耐

用年数を見る限り、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、世界の国々が資源を平等に分かちあえるのであれば、耐用年数という数値も意味をもつかもされないが、残念ながら現実の世界はそうではない。モロッコ王国一国に世界のリン鉱石の経済埋蔵量の約 75% が集中しているように<sup>11)</sup>、リン鉱石は地球上でひどく偏って存在しているから、どうしても資源の保有国と非保有国ができてしまう。保有国が資源を囲い込んでこれを戦略的に使おうとするのはごく当然のことであるから、非保有国はいかにして自国にない資源を安定的に確保するかを考えなければならない。リン鉱石の資源量が有限で価格と品質に違いがある限り、品質が良く値段も安いリン鉱石に需要が集中し、安くて安全なリン鉱石から資源が枯渇するのは避けられない。また、保有国がいつ生産調整や輸出規制をするかは誰にも予測できない。欧米を見ても、リン鉱石の経済埋蔵量や耐用年数といった曖昧な数値で、国の資源戦略を立てている国はどこにもない<sup>12,13)</sup>。

### 5. 日本のリンフロー

現在、わが国には年間約 52 万トンのリンが持ち込まれている (図 5)。この内、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の量が約 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。年間約 12 万トンのリンが輸入食飼料に含

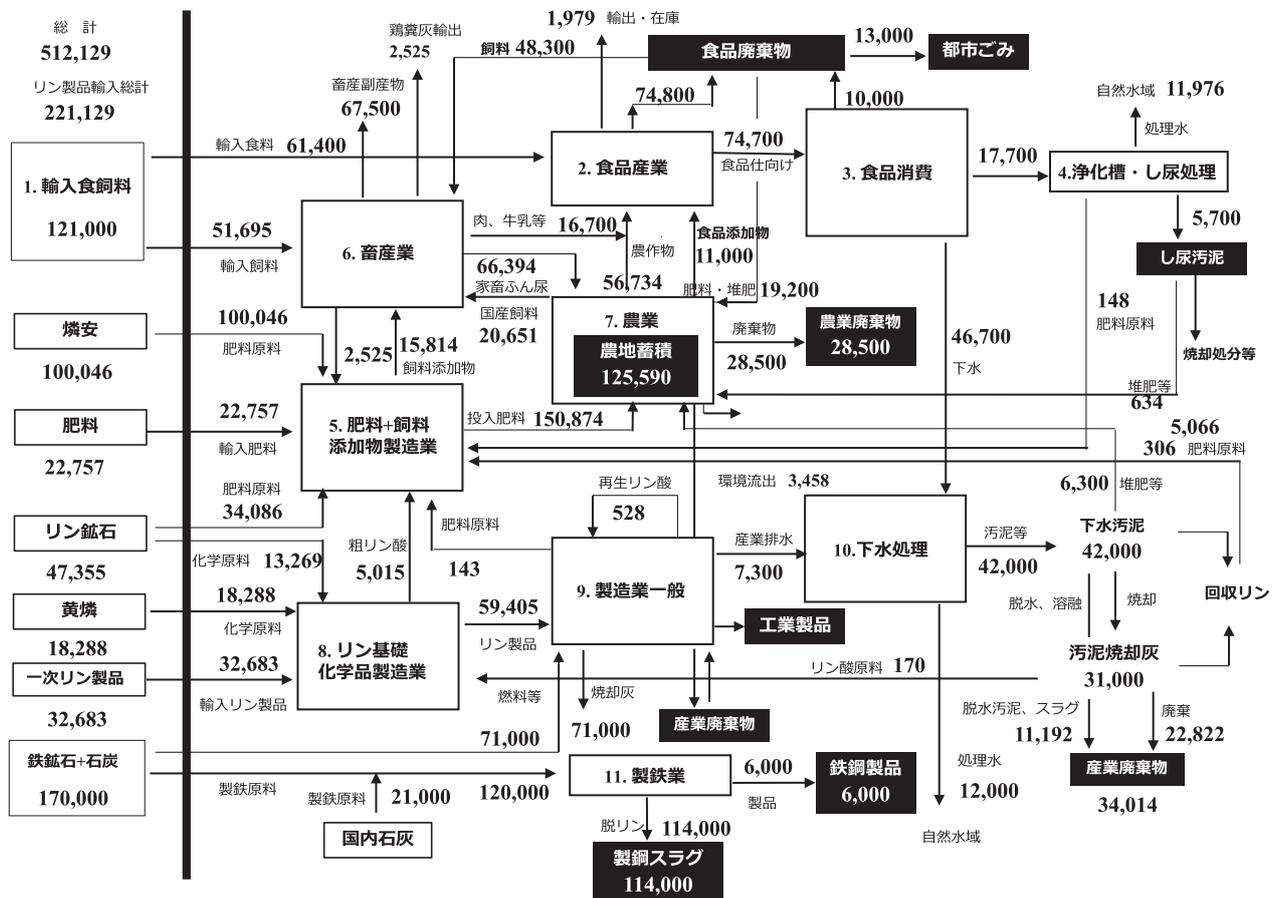


図 5. 日本のリン資源のフロー (2016年)。

まれて国内に持ち込まれる一方で、約 15.7 万トンのリン（燐安 10 万トン＋肥料 2.3 万トン＋リン鉱石の 2/3 の 3.4 万トン）が農業利用（肥料および飼料添加物）のために輸入されている。両者の合計約 28 万トンのリンの内、1.25 億人の日本人が消費する食料に向かうリンは約 7.5 万トン（約 27%）に過ぎない。残りのリンは、農地への蓄積（年間約 12.5 万トン）、麦わらなどの農業廃棄物（約 2.9 万トン）、家畜の肉や骨などの畜産副産物（約 6.8 万トン）や食品産業廃棄物（約 7.5 万トン）などに移行している。なお、家畜ふん尿に含まれるリン量は年間約 6.6 万トンと推測されるが、そのほとんどは農地に肥料や堆肥として還元されていると言われている。国民が消費した食品中のリンは、下水道へ年間約 4.7 万トン、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 1 万トン）として排出される。下水道には産業分野からの約 0.7 万トンのリンも負荷される。し尿処理場および下水処理場で発生する汚泥には、それぞれ約 0.6 万トンおよび約 4.2 万トンのリンが含まれている。

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%  $P_2O_5$ ）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ているようである。とくに食品産業分野で使われているリンの量は多く、食品添加物（加工用も含む）だけでも年間約 1.1 万ものリンが消費されているようである。製造業分野には燃料用石炭に含まれる年間約 7 万トンのリンが流入するが、そのほとんどは焼却灰に移行し産業廃棄物になっていると思われる。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異なるため、まだその流れはほとんど把握できていない。しかし、コストに厳しい製造業分野において廃棄物に移行するリンの割合は、農業分野に比べると遥かに少ないことは明らかである。また、製鉄産業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 万トンが副産物である製鋼スラグに含まれて排出されている。

わが国における主な未利用リン資源（地上リン資源と呼ぶ）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 8.5 万トン）、農業廃棄物（約 3 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、肥料や堆肥などとしてリサイクルされているリン量は、まだ年間約 5.7 万トン（食品廃棄物約 4.8 万トン＋し尿処理汚泥約 0.08 万トン＋下水汚泥約 0.7 万トン＋製造業約 0.07 万トン）に過ぎない。なお、家畜ふん尿のリン 6.6 万トンには、食品廃棄物のリンの約 4.8 万トンが含まれている可能性があり、リサイクルリン量の計算では二重にカウントされることを避けるため家畜ふん尿は除外している。今後は、賦存量の大きさと回収のしやすさから、製鋼スラグ、食品廃棄物、下水汚泥およびし尿汚泥などが、重要な地上リン資源になるものと思われる。

## 6. P イノベーション

「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。日本にないのは地下リン資源であって、地上リン資源（廃棄物や未利用の副産物）は十分にある。日本が食飼料の輸入（重量基準約 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、リン鉱石やリン製品をわざわざ海外から輸入しなくても、毎年約 29 万トンのリンは国内に入り続ける。上で「自給」と括弧つきで書いたのは、このリンの流入量があることを前提としているからである。製鋼スラグ（リンとして年間約 11.4 万トン）、食品廃棄物（約 8.5 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）を地上資源として活用すれば、年間約 28 万トンのリンが国内で供給できる可能性がある。このリン量は、日本が海外から輸入しているリン鉱石およびリン製品のリン量の 22.8 万トンよりも大きい。しかし、有望な地上リン資源があると言っても、それらはもともと廃棄物や用途の限られた副産物であるから、リン鉱石やリン製品の輸入価格がよほど高騰でもしない限り、そのまま利用しても採算が取れないのは当たり前である。それでも、採算が取れないことに愚痴をこぼしていても何も始まらない。地上リン資源を有効に活用するためには、リンを回収再資源化する事業をビジネスとして成り立たせるための工夫（シナジー効果）と仕掛け（政策支援）が必要である。

前にも述べたように、日本の輸入リン（リン鉱石およびリン製品）の約 25% は、工業用のリン素材であり、自動車、電子製品、医薬品などのハイテク産業分野で広く使われている。日本のリン「自給」体制を構築するには、農業分野へのリン肥料の供給に加えて、工業分野における高純度リン素材の供給を考える必要がある。回収リンを肥料よりも付加価値の高い工業製品に利用できれば、地上リン資源利用の経済採算性の改善につながる可能性がある<sup>19)</sup>。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、持続可能なリンのバリューチェーンが構築されていない。日本がリンの「自給」体制の構築に取り組むためには、①国内の地上リン資源（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回収リンから得た粗リン酸から省電力で黄リンを製造し、③黄リンを出発原料に高機能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。P イノベーションにより、わが国のリン循環産業が創出できれば、地上リン資源からのリン回収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リサイクル事業の活性化につながる事が期待される（図 6）。

とくに、粗リン酸の還元による黄リンの製造は、世界にないイノベーション技術であり、わが国がリンの「自給」体制を構築するためには、どうしても必要となる中核技術である。この技術の開発に成功すれば、世界で黄リン製造に使われている年間約 112 億 kWh の電力消費が大幅に削減され（当然 CO<sub>2</sub> 発生量も減る）、環境に放射性物質や有害重金属を出さない画期的な黄リン製造システムが実現すると考えられる。国内で黄リンを生産することの経済採算性については、「リンのない」日本で

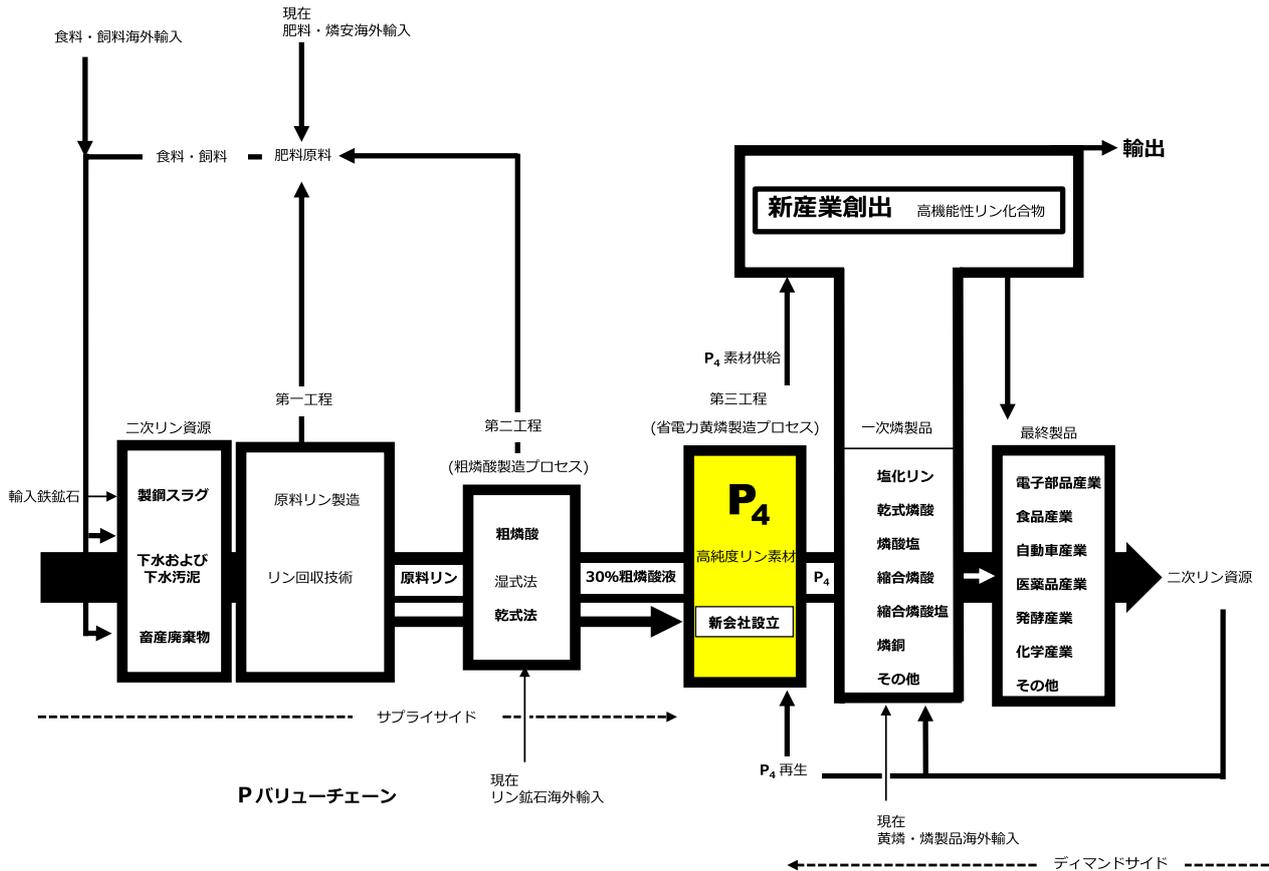


図6. リン循環産業ビジョンとリンのバリューチェーン。

リンの「自給」体制を構築するという文脈の中で、リン循環産業という運命共同体をつくり、付加価値の高いリン製品の海外輸出を促進するなどして、運命共同体全体で経済収支のバランスをとる発想が必要である。もちろん、必要となればいつでも黄リンを国内生産することができる技術を開発しておくだけでも、高純度リン素材の国際取引において、海外のサプライヤーの言いなりにならずにすむメリットもある。破壊的な技術イノベーションは、実現までに時間と経費がかかる。黄リンが日本に入らなくなってから開発するのではとても間に合わない。

## 7. おわりに

リン資源問題がいつ発生するかは誰にもわからない。深刻なリン資源問題が突如発生した時には、国にもなすすべがないことは、2008年のリンショック<sup>2)</sup>における国の対応を見ても明らかであろう。リン資源問題では未来への備えが重要である。有効な対策を準備するためには時間も経費もかかる。まだ余裕のあるうちに、日本における「リンの実態」をよく調べ、どのような対策が有効であるかよく知っておくことが必要であろう。そのためには、国民と政策担当者、日本におけるリン「自給」体制構築の必要性を十分に理解させ、一日も早くリンに関する「政策の空洞化」を克服しなければならない。

わが国では、2008年に世界に先駆けて、行政の縦割りや民間企業間の壁を越え、日本におけるリン資源リサ

イクルの実現に取り組むことを目的として、リン資源リサイクル推進協議会が設立された<sup>3)</sup>。2018年には、リン資源リサイクル推進協議会は発展的な組織変更を行い、新たに一般社団法人リン循環産業振興機構が設立された。一般社団法人リン循環産業振興機構では、地下リン資源への過度な依存を断ち切り、新たなリンのバリューチェーンを構築して、わが国にリン循環産業を創出することをそのミッションとしている。ご関心をお持ちの方はぜひ機構のホームページを御覧ください<sup>15)</sup>。

## 文 献

- 1) 玉尾皓平, 桜井 弘. 2010. 完全図解元素と周期表. Newton別冊. ニュートンプレス.
- 2) 大竹久夫ほか. 2017. リンの事典. 朝倉書店.
- 3) 大竹久夫, 長坂徹也, 松八重一代, 黒田章夫, 橋本光史. 2011. リン資源枯渇危機とはなにか. 大阪大学出版会.
- 4) 厚生労働省. 2015. 日本人の食事摂取基準.
- 5) 中島謙一. 2012. リン資源およびリン含有製品の国際サプライチェーン分析. 平成23年度環境研究総合推進費補助金研究報告書.
- 6) 鈴木継美, 和田 攻 編. 1998. ミネラル—微量元素の栄養学. 第一出版.
- 7) 日本栄養・食糧学会. 2014. ミネラル摂取と老化制御—リン研究の最新線—, 建帛社.
- 8) Rockström, J. et al. 2009. A safe operating space for humanity. Nature. 461: 472–475.
- 9) 国際連合. 2015. 持続可能な開発目標 (SDGs).
- 10) European Commission. 2015. Closing the loop – An EU ac-

- tion plan for the circular economy.
- 11) U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries, January 2015.
  - 12) European Commission. 2017. The 2017 list of critical raw materials for the EU.
  - 13) The National Science and Technology Council of the United States. 2016. Assessment of critical minerals: Screening methodology and initial application.
  - 14) Ohtake, H. and S. Tsuneda, Eds. 2018. Phosphorus Recovery and Recycling, Springer Nature.
  - 15) 一般社団法人リン循環産業振興機構ホームページ <http://www.pido.or.jp/>.