

## 新しいグリーン産業としてのリン資源リサイクル

### Phosphorus Recycling as a New Green Industry

大 竹 久 夫

HISAO OHTAKE

大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻

〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1

TEL: 06-6879-7435 FAX: 06-6879-7439

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

Department of Biotechnology, Graduate School of Engineering, Osaka University,  
Yamada-oka 2-1, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

キーワード: リン資源, リサイクル技術, グリーン産業

Key words: phosphorus resource, recycling technology, green industry

(原稿受付 2010年11月2日/原稿受理 2010年11月9日)

#### 1. はじめに

リン資源枯渇の危機が忍び寄っている。リン資源が枯渇すれば、食糧はもとよりバイオマスも、低炭素型社会実現への切り札として期待されているバイオ燃料も生産できなくなる。もともと、バイオマスが再生可能資源であるとの主張は、リンがいつでも豊富に手に入ることを前提としている。非可食バイオマスを使えば食糧問題には影響しないとの説明も、リンの資源問題から見ると説得力がない。例えば、アフリカ大陸はリン鉱石の最大産地であるにも関わらず、そこで採掘されたリン鉱石の殆どは大陸の外に持ち出され、わずか7%程度しか戻ってこない<sup>1)</sup>。豊かな国が非可食バイオマスを生産することで、資金に乏しい国で食糧生産用のリン肥料が不足するのであれば、非可食バイオマスを使う意味の大半は失われるだろう。

わが国はリン鉱石を全く産出せず、国内で消費するリンの全量を海外からの輸入に頼っている。しかし、リン鉱石の枯渇と産出国による資源の囲い込みは、わが国が海外でリン資源を確保することを年々難しくしている。もし十分なリン資源の確保ができなくなれば、農業はもとより電子部品製造、金属表面加工、化成品や食品製造など広範な産業分野においても、深刻な影響が及ぶことだろう。このような事態に対処するためには、国内の未利用リン資源からリンを回収し再利用する Phosphate Refinery 技術を早急に確立する必要がある。

米国の SF 作家であり生化学者でもあるアイザック・アシモフが、「Life's Bottleneck」と題するエッセイの中で、「リンがやがて地球の生物量を制限する」と予言したのは、今から約 50 年も前のことである。しかし、わが国においてリン資源枯渇の危機が広く認識され始めたの

は、ついこの 2, 3 年のことである。2008 年 5 月に中国四川省を襲った大地震は、リン資源輸出大国である中国のリン鉱石生産に甚大な被害を及ぼし、世界市場におけるリン製品の価格高騰と肥料争奪戦を激化させた。2009 年には、Nature や Scientific American などの著名な国際科学誌が、リン資源の枯渇を懸念する論文を相次いで掲載し、世界の注目を集めた<sup>2,3)</sup>。それでも、わが国において迫りくるリン資源枯渇の危機を知る人はまだ少なく、国も有効な手立てを講じきれていない。

一方、世界中では今、環境保全や資源保護と両立しうる新しい産業（グリーン産業）の登場が待たれている。わが国は資源小国ではあるが、世界をリードしうる技術力をもっている。これからわが国が、世界に先駆けてリン資源のリサイクル事業に取り組みれば、わが国発の新しいグリーン産業を生み出すことも可能かもしれない。本稿では、少し広い視野から迫り来るリン資源枯渇問題について概説するとともに、Phosphate Refinery 技術の開発を核とするわが国のリン資源リサイクル事業が、新しいグリーン産業へと発展しうる可能性について述べてみたい。なお、微生物によるリン酸代謝とリン回収等への応用については、筆者らの最近の総説<sup>4)</sup>をご覧頂くこととし、本稿で繰り返すことは避けたい。

#### 2. リンの資源問題とは

石油はなくても人間は生きて行ける。たしかに、石油は便利で快適な暮らしをもたらすが、石油は絶対になければならない資源ではない。一方、リンは総ての生物にとり欠くことのできない「いのちの元素」である。リンがなければ、人間を含めて地球上のあらゆる生物は、一日たりとも生命活動を維持することができない。にもか

かわらず、リン資源が枯渇しつつあることを知る人はまだ少ない。燃やせばなくなる石油と違って、リンが煮ても焼いても消えてなくなることはない元素であることが、少し理解を難しくしているのかもしれない。

天然資源としてのリン鉱石が米国のサウスカロライナで発見されたのは、今から約150年前の1868年のことである<sup>3)</sup>。その後の推移を見てみると、世界のリン鉱石の採掘量は1900年以降の100年間で約50倍も増加していることがわかる(図1)。また、米国のリン鉱石統計によれば<sup>6)</sup>、リン鉱石の価格も1973年には6米ドル/トン程度であったものが、2007年には50米ドル/トンまで8倍以上も上昇している。さらに、2008年には世界のリン鉱石の市場価格が高騰し、肥料争奪戦を激化させたことは前述の通りである。最近の予測によれば、世界のリン需要が2050年までに50-100%増加する一方で、リン鉱石の採掘量は2040年頃に頭打ちとなり、その後減少するようである<sup>1)</sup>。世界のリン鉱石の耐用年数(後述の経済埋蔵量/年間採掘量)も約50-100年程度と言われており、品質の良いリン鉱石は既に地球規模で枯渇を始めている。もちろん、こうした予測の精度には疑問もある。しかし、石油の枯渇を表す「peak oil」に続いて、「peak phosphate」という言葉が世界で使われ始めたことは、リン資源の枯渇が地球規模での資源問題になりつつあることを如実に物語っている<sup>1)</sup>。

資源問題について考える時、資源ピラミッドという概

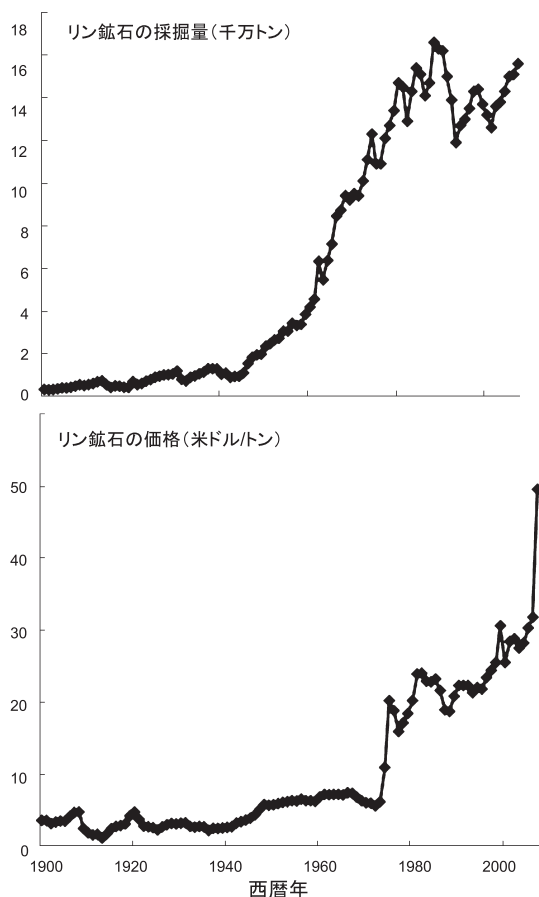


図1. 世界のリン鉱石年間採掘量およびリン鉱石価格の経年変化(文献6より)

念を使うと理解しやすい(図2)。リン資源ピラミッドの頂点には、品質が最も良く採掘コストが最も安いリン鉱石が位置している。品質の最も良いリン鉱石とは、リンの含有率が最も高くカドミウム、ヒ素や放射性物質などの不純物を含まないリン鉱石のことである。資源ピラミッドの頂点から下に向かうとリン鉱石の品質は低下するが、逆に採掘コストが増えるために、リン鉱石の市場価格は上昇する。リン鉱石の品質が低下すると、リン製品を製造する時に不純物を取り除くために余計な経費が掛かるようになるため、リン製品の販売価格はさらに上昇する。また、リン鉱石中のリン含有率が低下すると、現行の湿式法によるリン酸製造プロセスが使えなくなるという問題もある。

現在の技術レベルによる採掘で採算が取れるリン鉱石の埋蔵量(経済埋蔵量と呼ぶ)は、もともと世界で約250億トンあったと言われている。しかし、この100年間でその約30%に当たる70億トン(最近25年では約33億トン)が掘り出され、残りは約180億トンと推定されている。経済埋蔵量の範囲内でも、採掘レベルは年々資源ピラミッドの下方方向に移行している。例えば、リン鉱石の平均リン含有率を見ると、1970年代には約15%あったものが1996年には約13%にまで低下している。一方、現在の技術では採掘しても採算が取れないリン鉱石の埋蔵量(潜在埋蔵量と呼ぶ)は、世界で約540億トンあると言われている。しかし、今後余程の技術革新でもなければ、これらのリン鉱石が採掘されることはないかもしれない。

今のところ、工業用原料としてのリンの市場価格は、レアメタルのマンガン程度であり、それほど高いものではない。しかし、世界のリン需要の約85%が肥料用途であり、現在のリン鉱石の市場価格が、肥料用原料としては十分に高くなっていることに注意する必要がある。もし、リン鉱石の採掘に費用が掛かり過ぎると、リン鉱石の価格は上昇し肥料の価格に跳ね返る。しかし、農家が肥料価格へ転嫁できる金額にはおのずと限界があり、農家が買えないような高い値段の肥料は製造しても売れない。肥料価格の高騰は、食料品の値段に跳ね返る。食料品の値段が上がれば、食べ物があっても食べることのできない人が増えてしまうことになる。どの国の政府も国民を食べさせるためには、食料品の価格はできるだけ低く抑える必要がある。経済力のない国では、肥料価格が高騰すると肥料を購入することができなくなり、農業は危機にさらされ人々に飢餓の危険が迫ることだろう。リン資源の枯渇は、そのまま世界の食糧問題と繋がっている。リンの経済学は、高級自動車やハイテク家電などの製造原料となるレアメタルのそれとは、根本的に違っていることを理解すべきである。

リンは、土壌や水の中であればどこにでも存在する。しかし、土壌や水の中に低い濃度で分散したリンは資源とは言えず、潜在埋蔵量にも入らない。リンはある程度まで濃縮されていなければ、集めるために膨大なエネルギーとコストが掛かるからである。このことは、煮ても焼いてもなくならないリンが、なぜ資源として枯渇するのかを理解する上で、とても重要である。例えば、日本の年間リン消費量は約72万トンと言われているが、その約10%に当たる7万トンのリンを、土壌または水の

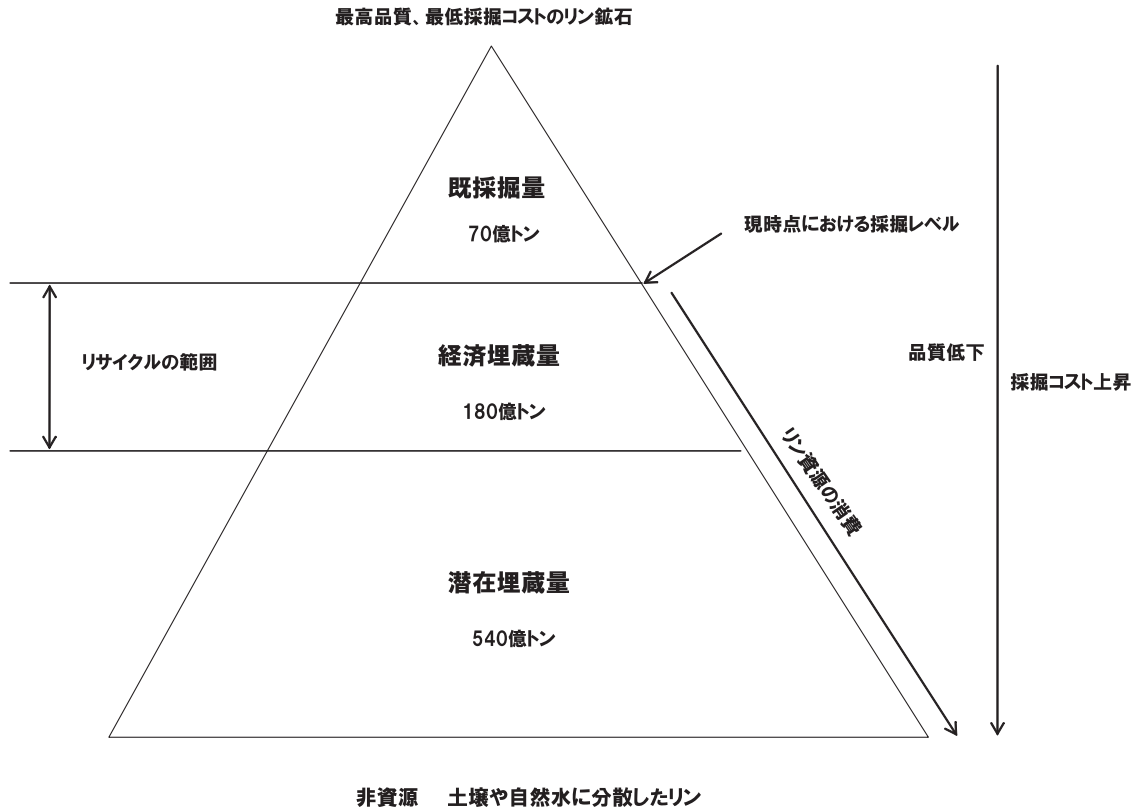


図2. リン資源ピラミッド

中から集めることを考えてみよう。比較的リンを多く含むと考えられる農地の表土（表面から深さ 30 cm までの土壌）の重量を 2,000 トン / ha, リン含有率を多めに 0.2% と見積っても、表土に含まれるリン量は 4 トン / ha にしかならない。農地の表土から年間 7 万トンのリンを得るためには、約 1.8 万 ha もの面積が必要となる。大阪市の面積が約 2.2 万 ha であるから、年間わずかに 7 万トンのリンを得るために、毎年大阪市の約 80% に相当する農地から表土を集めなければならない。もちろん、これだけ大量の土壌からリンを抽出するには、膨大な量の薬品が必要となる。農地に広がってしまったリンは、もう資源として当てにすることはできない。

霞ヶ浦や諏訪湖など富栄養化した湖水には、比較的多くのリンが含まれている。湖水のリン濃度を多めに 0.1 ppm と仮定すると、年間 7 万トンのリンを得るためには、毎年 7000 億トン（琵琶湖の水量の約 25 倍）もの湖水を処理しなければならない。リンの回収のためだけに、これほど多くの湖水を処理することなどあり得ようか。一方、東京湾や霞ヶ浦などの富栄養化した閉鎖性の強い水域の底泥には、乾燥重量比で 0.1 から 0.3% 程度のリンが存在する。このヘドロに含まれたリンも、とても資源にはならない。リン含有率が 0.1 から 0.3% であれば、前に述べた農地の場合とほぼ同じレベルである。毎年、大阪市の面積と同じくらいの広さの水域からヘドロを汲み上げても、せいぜい数万トンのリンしか得られない。もちろん、リン鉱石の数十分の一程度しかリンを含まない不純物だらけのヘドロからリンを分離することは、技術的に難しいばかりかコストが余りにも掛かり過ぎる。

リン資源の消費とは、自然が 1 億数千万年もの長い年月を掛けてリン鉱石にまで濃縮したリンを、人間が土壌や水の中に分散させる行為である。分散したリンを再びリン鉱石にまで濃縮しようとする、膨大なエネルギーとお金が必要となる。熱力学的に言えば、リン資源の消費とはエントロピーを増大させる行為であり、エントロピーの増大と引き換えに、その経済価値を消費しているのである。「リンは水や土の中どこにでもあるから、いざとなれば東京湾のヘドロからでも回収すればよい」と考えているとしたら、それは実現することのない幻想に過ぎないと言わざるを得ない。リンの資源問題を考える時、コストを抜きにした議論は意味をなさない。

### 3. リン資源リサイクルの全体像

既に述べた様に、富栄養化した湖水、農地の土壌、海底のヘドロなどにもリンは含まれてはいるが、リサイクルのコスト等を考えれば、これらはとても資源と言えるものではない。わが国は、年間約 72 万トン（720 キロトン）のリンを消費している（図 3）<sup>7)</sup>。この内、人間が食物を通して消費するリン量が約 11 万トンあり、都市下水等へ年間約 5.5 万トンが排出されている。意外なことに、鉄鋼分野には年間約 10 万トンのリンが流入している<sup>7)</sup>。これは、輸入される鉄鉱石や石炭に 0.05% 程度のリンが含まれているためであるが、そのほとんどが製鋼工程で発生するスラグに濃縮される。製鋼工程で徹底的に脱リンが行われないと、鉄鋼が低温で脆くなる。スラグ中ではリンと鉄は異なる相に存在しており、リンに富んだ相はリン鉱石とほぼ同等の結晶相になっている。

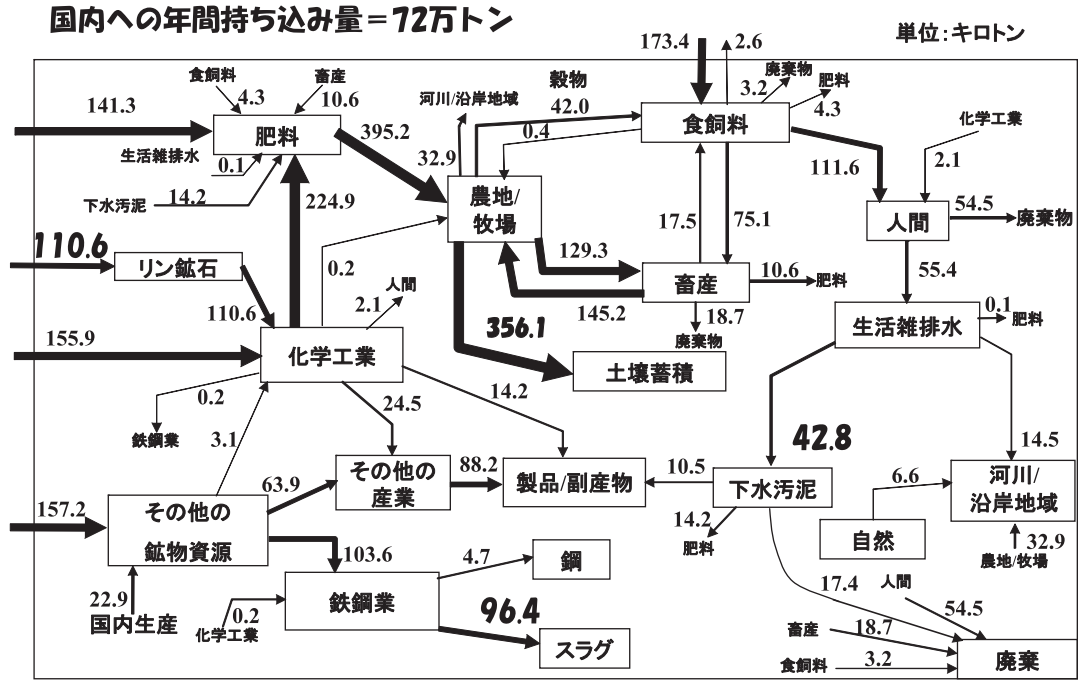


図3. リンのマテリアルフロー (文献7より)

したがって、強磁場を利用することにより、冷却後に細かく破碎したスラグから両者を磁気的に分離して、リンを資源として回収できる可能性がある<sup>7)</sup>。製鋼スラグとして出てくるリン量は、年間約10万トンにも達している。

畜産廃棄物中のリンの多くは、堆肥等への利用がなされていると言われているが、鶏糞焼却灰は未利用リン資源として注目されている。とくに水分含有率の低い鶏糞は自然可能であり、ボイラー燃料の一部として利用できるばかりか、焼却灰にはリン、カリや石灰などが豊富に含まれ良質な肥料原料になる。重金属類も殆ど含まれていないので、リンを不純物が少ない状態で回収することも可能である。宮崎大学の土手によれば<sup>8)</sup>、わが国における鶏糞焼却灰の発生量は年間約14万トンあり、リン量としては約1万1千トンになるようである。その他、液晶や半導体工場の基板処理廃液やアミノ酸製造工場などの発酵廃液もリンを多く含んでおり、そこからリンを回収する試みもなされている。食用油の精製工程では、多量のリン酸が原料油から不純物を取り除くために使われている。食用油の精製工程から出る排水は、有害物質を含まないので、回収したリンは高品質の肥料原料になる。化成品製造工場ではリン触媒が使われており、廃液に凝集剤を添加するなどしてリンの除去がなされている。廃油などにリンが含まれる場合は、焼却後に焼却灰からリンを回収し再利用することができる。なお、リン肥料へ向かうものを除いて年間約8万トンのリンが、化成品および副産物として流通している様であるが、その内どの程度のリンが廃棄物として出ているかは明らかになっていない。

わが国の農耕地土壌には、比較的高い濃度のリンが蓄積している。とくに園芸用ハウスや樹園地などではリンの蓄積が進んでおり、リン肥料の施用量を減らすための省リン技術の開発も奨励されている。リンが過剰に存在

する土壌から、リン溶解性微生物を用いて不活性リンを溶解し、植物が利用しやすくする研究も数多くなされている。筆者らも不溶性のリン酸アルミニウムを溶解する微生物を土壌から分離したが、リン溶解性微生物を農地で実際に利用するには多くの困難があり、基礎研究の成果が実用化に至った例はまだ殆どない。なお、わが国の農耕地土壌がリンを蓄積しているのは長い年月にわたる土壌改良の成果であり、わが国の酸性火山灰土壌に吸着されたリンを回収しても、土壌のリン吸着能力を再生することになりかねないので注意が必要である。

食飼料および鉄鉱石や石炭に含まれてわが国に持ち込まれる年間約32万トンのリンは、日本の食糧輸入と鉄鋼業が続く限り、今後も国内に持ち込まれ続けるものと考えられる。今後もわが国のリン消費量に大きな変化がないと仮定すれば、リン鉱石またはリン製品として直接輸入する必要があるリン量は、年間約40万トン(72万トン-32万トン)と推定される。一方、リサイクルの対象となるリン量は、化学原料として工業分野で使われている約8万トン、下水等に排出される約5万トン、鉄鋼スラグとして製鉄プロセスから出てくる約10万トンの合計約23万トンである。したがって、海外から国内に持ち込まれるリン全量に対するリサイクル可能率は約32%(23万トン/72万トン)と推算されるが、リン鉱石またはリン製品として直接輸入されるリン量に対しては、約58%(23万トン/40万トン)になる。

肥料として農地に散布されるリン量は年間約40万トンあるが、その内約10%に相当する4万トン程度しか農作物として回収されていない。わが国の農地には酸性の火山灰土壌が多く、リンが吸着されて固定化されやすいため、リン肥料は多めに投入されてきた。農林水産省では、肥料価格の高騰に対処する目的もあって、農地へのリン投入量を今後20%削減する政策を発表している。

もし今後、リン肥料の使用量が約20%削減されれば、肥料として農地に投入されるリン量は、年間約32万トンで済むことになる。その大半はリサイクル不能であるが、産業廃棄物、製鋼スラグおよび下水からリンのリサイクルが進めば、リン鉱石またはリン製品として輸入されるリン量に対して、最大72% (23万トン/32万トン) ものリンがリサイクルされることになる。

わが国において考えられるリン資源リサイクルの全体スキームを図4に示す。わが国にある1,500を越える下水処理場では、毎年100億トンを越える都市下水を処理している。下水処理場では待ってれば、リンが向こうからやってくる。下水から除去されたリンは、活性汚泥微生物を主体とする余剰汚泥の中に集められて水処理工程から取り出される。もし、余剰汚泥から効率的にリンを取り出すことができれば、回収したリンを肥料製造工場へ送るか、工業用リン酸の原料としてリン酸製造工場へ送ることができる。肥料製造工場で生産されたリン肥料は、農地に撒かれ再び農作物の生産に利用される。農作物の一部は食品となり人間に消費されて、再び都市下水となってリサイクルの流れに入ってくる。

一方、余剰汚泥の焼却灰は、適度にリンとケイ酸を含んでいて黄リン製造のためのよい原料になる。黄リンは高品質の工業用リン酸の原料として重要である。黄リンから製造されたリン酸は、自動車産業、電子部品産業や化学産業などにおいて、工業用原料として広く利用される。これらの工業プロセスから出る含リン廃棄物は、黄リン製造の原料として再利用するべきである。残念ながら、わが国には黄リン製造プラントが、一つも存在し

ない。少なくとも、半導体や液晶製造などのハイテク産業においては、黄リン製造による回収リンリサイクルシステムを早期に確立すべきである。一方、リンがセメント原料に多く含まれると、セメントが固まりにくくなりコンクリート建造物の強度に問題が生じる。リンを取り除かれた余剰汚泥やその焼却灰は、セメントの原料としてセメント工場へ送りリサイクルすることが可能である。また、製鉄所で副産物として生産される製鋼スラグにはリンが濃縮されている。製鋼スラグは細かく砕かれ、リンを多く含む部分はリン肥料の原料として肥料製造工場へ送られる。リンを含まない部分は、製鉄原料として再び製鋼工程へ戻すことができる。その他、上にも述べた化学、食品、発酵、食用油製造などの各産業分野からも、リンを含んだ排水または廃棄物が出ている。これらのリン含有廃棄物からリンを抽出し再利用する技術体系を Phosphorus Refinery と呼び、その概要を図5に示す。

#### 4. 下水からのリン資源回収

今のところ、リンのリサイクル事業が最も早く確立されそうなのは、下水からのリン資源回収であろう。平成22年4月岐阜市において、下水汚泥焼却灰からのリン資源回収プラントが完成し、稼働を開始している。岐阜市によるこの取り組みは、わが国におけるリン資源リサイクル事業の推進において画期的な出来事であり、世界が注目していると言っても過言ではない。下水処理場においては、活性汚泥微生物により有機性排水の処理が行われ、同時にリンも除去されて余剰汚泥中に濃縮されて

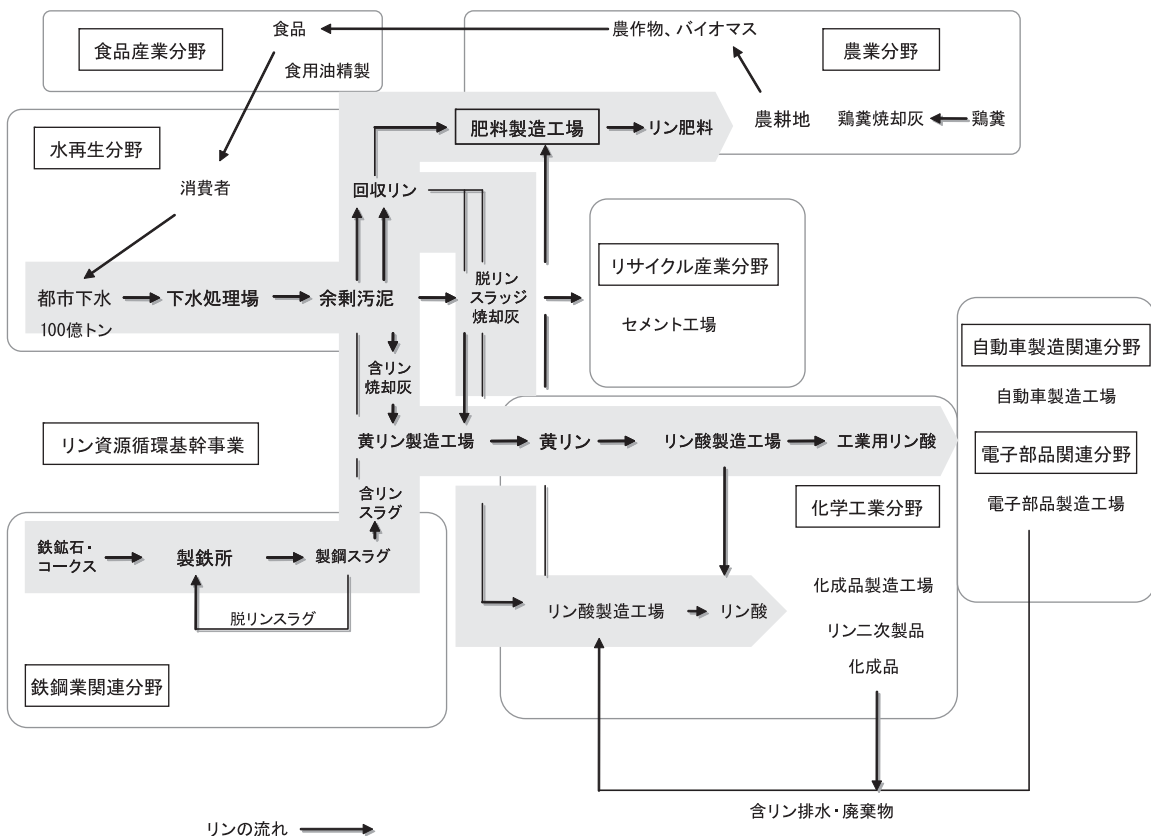


図4. リン資源リサイクル事業の全体構想図

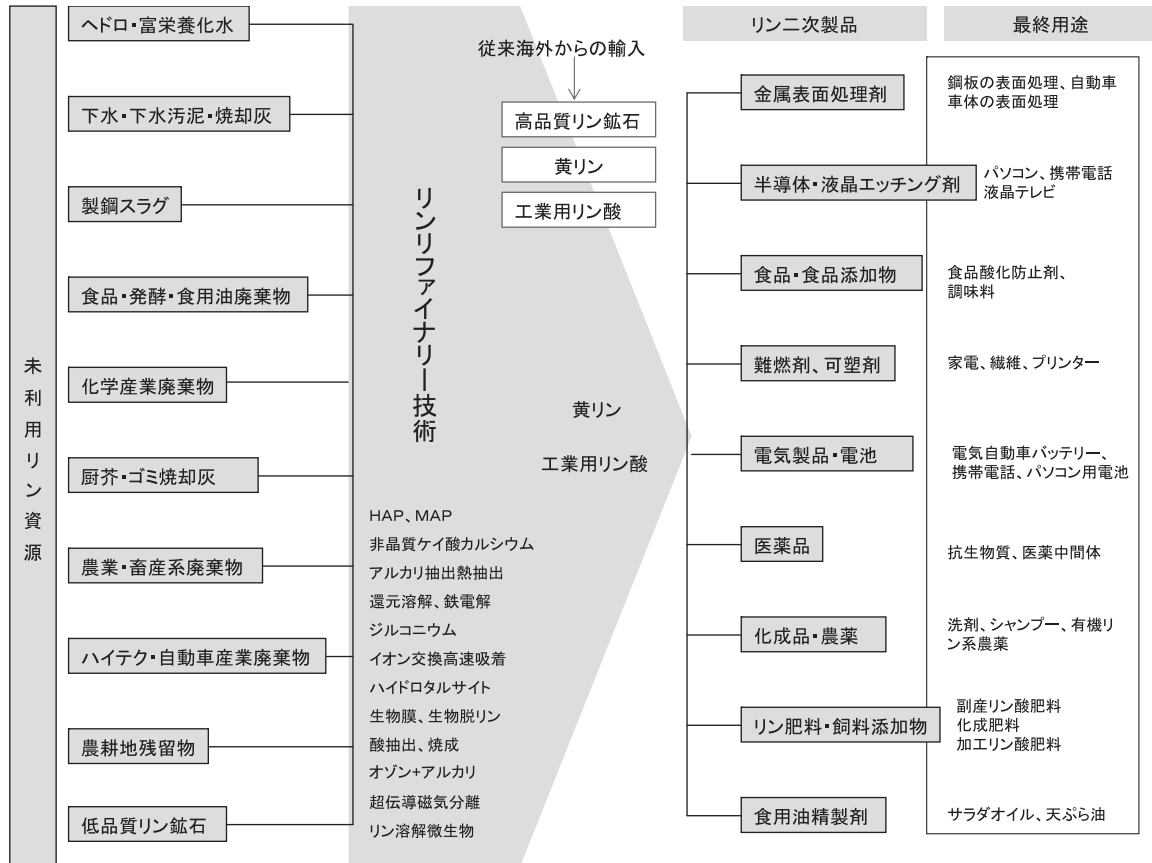


図 5. Phosphate Refinery の体系

いる。大きな処理場ともなると、活性汚泥微生物を働かせるために必要な電気代だけでも、年に億単位の経費が掛かっている。下水処理場がある限り、下水からのリン回収には新たな施設の建設を必要としない。下水処理場の余剰汚泥にはリンが乾燥重量当たり約 2-3% 含まれており、しかも纏まって毎日得られることも重要である。しかし、下水汚泥そのままでは商品価値のある肥料にはなり得ず、発酵処理するなどしてコンポスト化しても、リン含有率の低い土壌改良材程度にしかならない。やはりリンは分離回収して、天然リン鉱石の代替物として肥料等の原料に利用すべきである。下水処理場にはリン回収に適した工程が幾つもあり、各工程に対応したリン回収技術が開発されている (図 6)。下水処理場の汚泥処理プロセスは多様であるから、対象となる処理施設や運転方法に適した技術を選定することができる。

リン回収において重要なことは、回収リンの品質、回収コストおよび回収リンの市場である。リンを効率良く回収できても、品質が再利用に適さなければ、引き取り手が見つからないまま廃棄物になりかねない。また、回収リンの製造コストが天然リン鉱石の輸入コストを上回る様であれば、リン回収ビジネスがなりたたない。現在のところ、最もコストが掛からないリンの回収技術は、嫌気性汚泥消化脱離液に非晶質ケイ酸カルシウムを投入し、そのまま副産リン酸肥料として回収利用することであろう<sup>9)</sup>。本技術は、非晶質ケイ酸カルシウムをリン吸着材として使用する点で、従来のケイ酸カルシウムを種晶とするヒドロキシアパタイト (HAP) 晶析法やリン

酸マグネシウムアンモニウム (MAP) 晶析法とは異なっており、結晶を成長させるための装置と操作が不要である。また、非晶質ケイ酸カルシウムに吸着したリンを脱着する必要がなく脱水性も良いから、そのまま乾燥して副産リン酸質肥料とすることができる。リン資源の回収コストをさらに低減するためには、リン回収がもたらす副次的効果をうまく利用する必要がある。例えば、リン回収を行えば湖沼や内湾の富栄養化の防止に貢献できる。下水処理場では、リン回収により配管の閉塞障害や汚泥焼却炉の損傷などを低減できる効果も期待できる。中でも、静脈産業への波及効果は最も重要であろう。セメント製造プロセスでは、可燃性廃棄物である有機汚泥をセメント原料の一部として受け入れている。また、下水処理場で余剰汚泥を焼却処分した後の焼却灰や火力発電所などから出る石炭灰なども、セメント原料の一部として受け入れている。セメント製造はわが国における重要な静脈産業の一つであるが、セメント製造においてリンは最も有害な不純物の一つである。リンを多く含んだセメントは固まりにくく、コンクリート建造物の強度を低下させる。公共事業削減のあおりを受けセメントの需要が減る一方で、可燃性廃棄物の受け入れ量は減っておらず、結果としてセメント原料に占める可燃性廃棄物の割合が増加している。可燃性有機物の中でも量の多い下水汚泥はリンを多く含んでおり、そのまま受け入れるとセメントのリン含有率が上がってしまう。セメント業界が、リンを含んだ下水汚泥の受け入れをストップしてしまうと、静脈産業が回らなくなる。同様に、炭化汚泥な

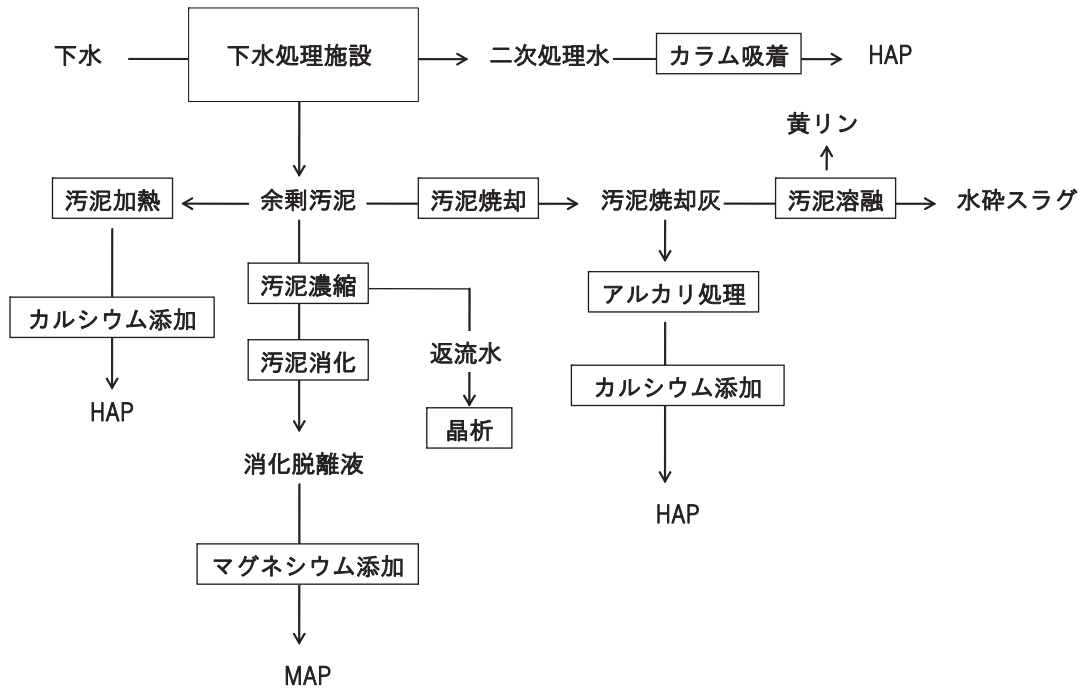


図6. 下水余剰汚泥と二次処理水からリンを回収することのできる工程と回収技術  
 HAP：カルシウムアパタイト，MAP：リン酸マグネシウムアンモニウム

どのバイオマス燃料を火力発電所等で使用した場合にも、焼却灰にリンが多く含まれるとセメント原料として引き取ってもらえず、焼却灰の行き場がなくなる。下水汚泥からリンを引き抜くことは、セメント製造の様な静脈産業においても、大きなメリットが期待できる。

### 5. リン資源リサイクルの課題

リン資源のリサイクルは技術的に実現性が高く、大きな社会的貢献が期待できる事業分野である。しかし、リン資源のリサイクルには様々な産業・社会分野が関係しており、産学官が一体となって取り組むことが求められている。とくに次のような課題については、戦略的かつ総合的に取り組むことが必要である。

①都市下水等に年間約5.5万トンのリンが排出されている。都市下水やし尿などに含まれるリンを資源として回収する事業を、全国的規模で推進する必要がある。そのためには経済的動機付けもさることながら、国がリン資源回収事業の社会的意義を喧伝するとともに、リン回収に取り組む自治体や事業者を積極的に支援する必要がある。

②回収されたリンは再利用されて初めて価値を生む。しかし、品質によってはせっかく回収しても、再利用できないことがある。事業者間でよく意見交換をして、再利用の目的に適う回収技術と回収リンの品質に合わせた利用技術を開発する必要がある。

③リン資源を無駄なく利用するため、省リン技術の開発に取り組む必要がある。農業分野においては、肥料リンの利用効率を高めるとともに、過剰なリン肥料の施用を避ける必要がある。工業分野においても、原料リンの利用効率を高めるとともに、代替物利用の可能性について

も検討する必要がある。

④年間約9万トンのリンが製鋼スラグとして排出されている。製鋼スラグからリンを分離し回収する技術を開発する必要がある。製鋼スラグからリンを除去できれば、脱リンした製鋼スラグを製鋼工程に戻すことも期待できる。

⑤化学工業分野に流れ込むリン量は年間約30万トンある。その大半はリン肥料の原料として使われるが、約5万トンは工業用原料として使われている。化学工業プロセス等で排出される含リン廃棄物から、リンを資源として回収できる技術を開発する必要がある。これらの廃棄物は、比較的高濃度のリンを含み収集もしやすいと考えられるが、詳しいことは殆ど明らかにされていない。

⑥画期的な工業用リン酸および黄リン製造技術を開発する必要がある。湿式法による工業用リン酸製造プロセスは、高品質のリン鉱石が豊富に入手できた時代に開発されて以降、余り大きな改良がなされていない。このため、品質が低下したリン鉱石や代替原料として回収リンを使用することに、うまく対応できない。また、工業用に需要が多い黄リンについては、国内での生産が全く行われておらず、工業用原料としての重要性を考えれば、少なくとも国内に一つ黄リン製造プラントを建設する必要がある。

### 6. おわりに

リン資源のリサイクルが技術的に実現性が高く、大きな社会的貢献が期待できる事業分野であることは、この2、3年で産学官における共通認識になりつつある。本稿で述べた様に、先端産業分野における黄リン製造プロセスを介した高品質リン酸の再生、製鋼スラグからのリ

ン回収と脱リンスラグの製鋼工程への再利用, 下水汚泥や汚泥焼却灰からのリン回収事業とセメント産業分野との連携など, わが国において様々なビジネスモデルも構築されつつある。わが国におけるリン資源リサイクル事業は今, 事業開始の合図を待ちながら夜明け前の時を刻んでいるかの状況にある。平成22年4月に岐阜市において下水汚泥焼却灰からのリン回収プラントが稼働し始めたことは, わが国におけるリン資源リサイクル事業の本格的な開始を告げる嚆矢となるかもしれない。

今後の最大の課題は言うまでもなく, リン資源回収およびリサイクルコストの低減であろう。その点においても, 汚泥消化液に非晶質ケイ酸カルシウムを投入し, 副産リン酸質肥料を直接生産する技術の登場など, コストを大幅に削減することが期待できる技術も現れてきている。これからは, リン資源リサイクル事業を新しいグリーン産業として発展させるとともに, リン回収・再利用技術を新たに **Phosphate Refinery** 技術として体系化することが重要であろう。

筆者が会長を務めているリン資源リサイクル推進協議会は, 世界に先駆けてわが国にリン資源リサイクル事業を確立するために, 長期的かつ全面的な戦略のもとに粘り強い取り組みを続けている。本協議会では, リン資源枯渇の危機を喧伝することを重要と考え, 啓蒙的なリン資源リサイクルシンポジウムを, 毎年2回開催している。

ご関心をお持ちの方は, 協議会のホームページ (<http://www.jora.jp/rinji/rinsigen/index.html>) を, 一度ご覧ください。貴重なリン資源が枯渇しつつあることを知る人が増えれば, リン資源のリサイクルを求める声はもっと大きくなる。本稿が, リン資源枯渇の問題とリサイクルの重要性について, より多くの人々に知って頂くための一助となれば幸いである。

## 文 献

- 1) Cordell, D., J. Drangert, and S. White. 2009. *Global Environ. Change* 19: 292.
- 2) Gilbert, N. 2009. *Nature* 461: 716.
- 3) Vaccari, D.A. 2009. *日経サイエンス*, 9月号, 88.
- 4) Hirota, R., A. Kuroda, J. Kato, and H. Ohtake. 2010. *J. Biosci. Bioeng.* 109: 423–432.
- 5) 高橋英一. 2004. 肥料になった鉱物の物語. 研成社.
- 6) Buckingham, D.A., and S.W. Jasinski. 1900–2008. *Phosphate rock statistics*, <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/phosphate.pdf>
- 7) 松八重一代, 久保裕也, 大竹久夫, 長坂徹也. 2008. *社会技術研究論文集*. 5: 106.
- 8) 土手 裕. 2009. 鶏糞焼却灰からのリン酸の回収と有効利用. 大竹久夫監修, リン資源の回収と有効利用. サイエンス&テクノロジー.
- 9) 小野田化学工業株式会社, 特開 2009-285635.