

## 2013年度 生物工学賞 受賞



# リンのバイオテクノロジーに関する 先導的研究

大竹 久夫



### Leading research on phosphorus biotechnology

Hisao Ohtake (*Department of Biotechnology, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871*) *Seibutsu-kogaku* **92**: 3-11, 2014.

#### はじめに

リンは、すべての生物にとって欠くことのできない「いのちの元素」である<sup>1)</sup>。米国の空想科学作家Isaac Asimovは「石炭火力を原子力に、木材をプラスチックに、肉を酵母に、孤立を友好に置き換えることはできても、リンを他のもので代替することはできない」と書いている<sup>2)</sup>。

リンがなければ、食糧はもとより再生可能資源と言われるバイオマスも、地球温暖化ガス排出量削減への貢献が期待されるバイオ燃料も生産することができない。言うまでもなく、バイオ産業はリンに絶対的に依存している。この産業は、リンがなければ原料すら手に入れることができない。にもかかわらず、人々はこれまでリンにはあまり関心をもたなかった。筆者の経験でも、研究のテーマを聞かれて「リン」と答えた時に、「え？」とげげんそうに聞き返されたことは何度もある。

筆者は20年以上前に、一分子でATPの数百倍ものエネルギーをもつポリリン酸に興味を持ち、微生物のポリリン酸代謝に関する研究を始めた。幸い、優れた共同研究者たちに恵まれ、多くの学術論文を共同で発表することができた<sup>3-36)</sup>。しかし、2008年に世界で勃発したリンの争奪戦が契機となり、筆者はその後リンの持続的利用という大きな問題に産官学で取り組むことになった。

持続的リン利用は、技術にとどまらず社会や経済の問題でもある。このため、国内外での取組みが進展するにつれて、筆者は次第にバイオの世界とは疎遠になった。

せっかく研究費が得られても、バイオの研究室ではスタッフや学生の手を借りにくい。海外から講演に招かれることはあっても、国内の学会では発表するところがない。生物工学会でシンポジウムを企画するのも躊躇されて、結局一度もリンについて講演する機会はなかった。

今回、光栄にも生物工学賞を賜ることとなり、受賞を記念して本稿を書かせていただける栄誉も得た。そこで、この機会を利用して、持続的リン利用がいかに重要なグローバル問題であるかを、会員の皆様にお伝えしたいと思う。過去を振り返ってポリリン酸の微生物学の総説を書くよりも、持続的リン利用のパラダイムについて今と未来を語るの方が、はるかに重要であると思うからである。

「Knowing is not enough, we must apply. Willing is not enough, we must do.」は、ドイツの詩人ゲーテの言葉(英訳)である。イタリアの天才芸術家レオナルド・ダ・ヴィンチの言葉であるとも言われている。心ならずもバイオからの距離感を感じる時、筆者はいつもこの言葉に励まされてきた。筆者は、工学者の大事な仕事はゴールへ球を蹴り込んで、試合に決着をつけることだと考えている。工学者は、いつまでも同じ所でパス回しばかりをしているわけにはいかない。

#### 持続的リン利用パラダイム

2008年、リン鉱石の価格高騰と産出国の輸出規制によって、世界中でリンの争奪戦が行われた<sup>1)</sup>。その苦い経験から、日本では産官学連携の全国組織リン資源リサ

著者紹介 大阪大学大学院工学研究科(教授) E-mail: hohtake@bio.eng.osaka-u.ac.jp

イクル推進協議会が発足し、欧州では「リンの持続的利用こそ、世界の食糧の安定供給に絶対的に必要である」とのパラダイムが登場した<sup>37)</sup>。リンの持続的利用とは「世界のすべての農民が、食糧を生産するために必要なリンを十分に入手でき、しかもリンの利用にともなう環境や社会への負の影響を最小限に抑えること」を意味している。

これまで、地球環境問題をめぐる議論は、地球温暖化ガスの問題に終始しがちであったが、この問題は地球の物質循環に生じた複雑な変化の一面に過ぎない。今、人間は食糧を生産するために、天然資源のリン鉱石を掘り続けている。自然界でリン鉱石が生成するには、一億年もの長い年月が必要になるから、人間にとってリン鉱石は事実上有限かつ非再生可能な資源である。人間はこのリン鉱石を地下から掘り出し、一度使っただけでリンを海へ捨て続けている。その結果、人間が食糧を生産し消費するという行為そのものが、地球の物質循環に見過ごすことのできない変化をもたらし始めている。

欧米や日本でリンが過剰に消費されて環境が汚染される一方で、アフリカや南米では食糧の生産に必要なリンが不足している<sup>38)</sup>。リンの無駄使いをやめ持続的な利用を目指すことは、リン鉱石資源の枯渇を遅らせるばかりか、歪められた地球のリン循環を矯正し、地球環境への汚染負荷を削減することにもつながる。人間による地球のリン循環の攪乱は、人類の新たなグローバル問題として見なければならぬ。国際的に連携した取組みにより、地球のリン循環を食糧やエネルギー生産のために最適化し、気候、生態系や人の健康などへの影響を最小化しようとする取組みが、今欧米と日本を中心に始まろうとしている。

### 人類のあらたなグローバル問題

**リン鉱石の偏在と資源ナショナリズム** 人間が使うリンのほとんどは、有限で非再生可能な天然資源であるリン鉱石から得られている。驚くことに、世界のリン鉱石の経済埋蔵量の約75%は、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いる(表1)<sup>39)</sup>。日本や欧州には、リン鉱石資源はほとんど存在していない。世界のおもなリン鉱石の産出国は、中国、米国、モロッコおよびロシアであり、この4か国で世界の総産出量の約75%を占めている。イラク、アルジェリア、シリアやヨルダンなどは、国内に政情不安を抱えており、埋蔵量の割に生産量は少ない。

リン鉱石の輸出量を地域別に見ると、アフリカと中東がそれぞれ世界のリン鉱石輸出量の約54および28%を占めており、両者を合わせると82%にも達する<sup>40)</sup>。国

表1. 世界のリン鉱石産出量と経済埋蔵量 (2011年)<sup>39)</sup>

国名	単位 (百万トン)	
	産出量	埋蔵量
米国	28	1,400
アルジェリア	2	2,200
豪州	3	250
ブラジル	6	310
カナダ	1	2
中国	72	3,700
エジプト	6	100
インド	1	6
イラク	—	5,800
イスラエル	3	180
ヨルダン	6	1,500
メキシコ	2	30
モロッコ	27	50,000
ペルー	2	240
ロシア	11	1,300
セネガル	1	180
南アフリカ	3	1,500
シリア	3	1,800
トーゴ	1	60
チュニジア	5	100
その他	7	500
合計	190	71,000

別では、モロッコが世界のリン鉱石輸出量の約30%を占めており、2030年までにはその占有率が80–90%まで増大すると言われている<sup>40)</sup>。輸入については、アジアが圧倒的に多く、世界のリン鉱石輸入量の約40%を占めている。世界のリン鉱石の約80%は、リン肥料の生産に使われているが、リン肥料の最大輸入国はインドであり、世界のリン肥料の約23%を輸入している。

リン鉱石資源の偏在と産出国における資源ナショナリズムは、世界のリン鉱石市場の脅威になりつつある。米国はかつて国内に大きな埋蔵量を持ち、世界市場にリン鉱石を供給してきた。しかし、国内リン鉱石資源の枯渇の進行とリン肥料の需要の増加により、すでに米国はリン鉱石の輸出国から輸入国に転換している。中国も食糧の安全保障を最優先課題としており、リン鉱石を食糧増産に欠くことのできない戦略資源に位置づけている<sup>40)</sup>。これまでも中国は、リン鉱石およびリン製品の輸出規制をたびたび実施しており、中国もリン鉱石の輸出国から輸入国へ転換する日が近づいてきている。

モロッコは、リン鉱石の国内生産量をあえて増やさず、他の生産国のリン鉱石資源が枯渇するのを待っているとされている<sup>40)</sup>。もし、モロッコの国営企業Office Chérifien des Phosphates (OCP) 社が、世界のリン鉱石市場を占有することになれば、リン鉱石の市場価格は

OCPの意のままになりかねない。厄介なことに、モロッコは旧スペイン領西サハラの領有問題を抱えており、欧州とは移民や漁業問題などでも係争を抱えている。こうしたリン鉱石産出国の政情不安と資源ナショナリズムの台頭は、世界のリン鉱石市場において、今、大きな不安材料となっている。

**リン資源の南北問題と非効率利用** 世界のリンの年間消費量は、約1800万トンに達している。世界最大のリン消費地は、日本や中国を含む東アジアと、インドやタイなどの南アジアである。とくに中国とインドは、世界のリン消費量のそれぞれ34および19%を占めており、両者で世界の半分以上のリンを消費している。しかも過去十年の間に、中国とインドのリン消費量は、それぞれ約20および80%も増加している<sup>40)</sup>。

成人一人あたりの年平均リン排泄量は、発展途上国では0.9 kg以下であるが、先進国では1.4 kgと多い。この差は先進国では肉類や卵などのリンを多く含む食材の消費量が多いためと考えられている<sup>41)</sup>。世界の穀物生産量の約30%は家畜用飼料であり、欧州ではこの割合は60%にも達する。欧米では、リン肥料の過剰使用とともにリンを含む畜産廃棄物の処理が問題となっている。

また、東アジアや北米の農地には、年間1 ha当たり10 kg以上のリンが使われている。その一方で、アフリカではわずか2 kg以下しか使われていない。アフリカでは、肥料の輸送や貯蔵のためのインフラが整備されおらず、これがコスト増につながって、リン肥料の価格が欧州よりも高くなる異常な事態も発生している。

欧米や日本などの先進国が、リンを過剰に消費する一方で、アフリカや南米では農業生産に必要なリン肥料が不足している。リン消費における南北格差は、地球のリン循環を著しく歪める原因になるとともに、地球全体でのリンの利用効率を低く押し下げている。

**リンの環境問題** もっとも深刻な環境問題は、リン鉱石に由来するカドミウムによる農地の汚染である<sup>41)</sup>。カドミウムは、人の健康に有害な重金属であるが、肥料製造時に取り除くことが難しく肥料に混入しやすい。世界の農耕地の土壤に含まれるカドミウムの約50%は、肥料の散布によるものと言われている。現在、肥料の生産に使われているリン鉱石には、高いものでは500 ppmものカドミウムが含まれている。モロッコ産のリン鉱石もカドミウムを多く含んでおり、その世界市場における占有率の高さを考えると、カドミウム汚染が今後さらに世界へ広がる懸念される。

リン鉱石の採掘現場では、排ガス、表土の攪乱や鉱山廃水による水質の汚濁などの環境問題が発生している(図1)。石油などと同様に、リン鉱石もまた品質がよく



図1. 中国四川省のリン鉱石採掘現場  
(© \*Ma Dong/Greenpeace)<sup>50)</sup>

採掘しやすいものから消費される。品質のよいリン鉱石はすでに枯渇を始めており、リン鉱山では品質の低下を選鉱により補っている。選鉱で排除された低品質のリン鉱石には、有害物質がより多く含まれる。これらの品質の悪いリン鉱石は採掘場付近に捨てられ、周辺環境を汚染する一因となっている。

リン鉱石からリン酸を製造する際には、大量の石膏が副産物として出る。リン酸1トン当たり5トンの石膏が発生するため、世界で年間約1億3千万トンもの石膏がでる。品質の良くないリン鉱石を使用すると、副産物の石膏にも有害物質が多く含まれることになる。石膏中に含まれる有害物質には、カドミウムの他にウランやその崩壊産物であるラジウム226などがある。このため、中国などのリン肥料工場の周辺では、山積みされた石膏による地下水の汚染が問題になっている。

リンの不適切な管理による湖沼や内湾などの富栄養化も深刻な問題である。とくに、農業分野での非効率なリン肥料の使用と畜産廃棄物の不適切な管理は、リンを無駄にするばかりか富栄養化による水域の環境破壊を引き起こしている。リン鉱石の採掘や非効率な利用にともなう環境問題は、世界のリン市場にも影響を及ぼしつつある。たとえば、米国フロリダ州のリン鉱石採掘場の閉鎖の背景には、リン鉱石の枯渇とともに採掘にともなう自然破壊への懸念があると言われている<sup>41)</sup>。

## リンのバイオテクノロジー

**リンリファイナリー技術** 「Use less, Recycle more, and Cooperate smart」は、リンの持続的利用における世界の合言葉になりつつある<sup>42)</sup>。石油は燃やすとなくなるが、リンは回収すれば何度でも使えるから、リサイクルはとくに重要である。日本のようなリン消費大国にとって、リンの利用効率を改善し再利用を促進することは、リンの海外への依存度を減らすことにつながる。逆に、日本のように食料や飼料を大量に輸入している国が、リ



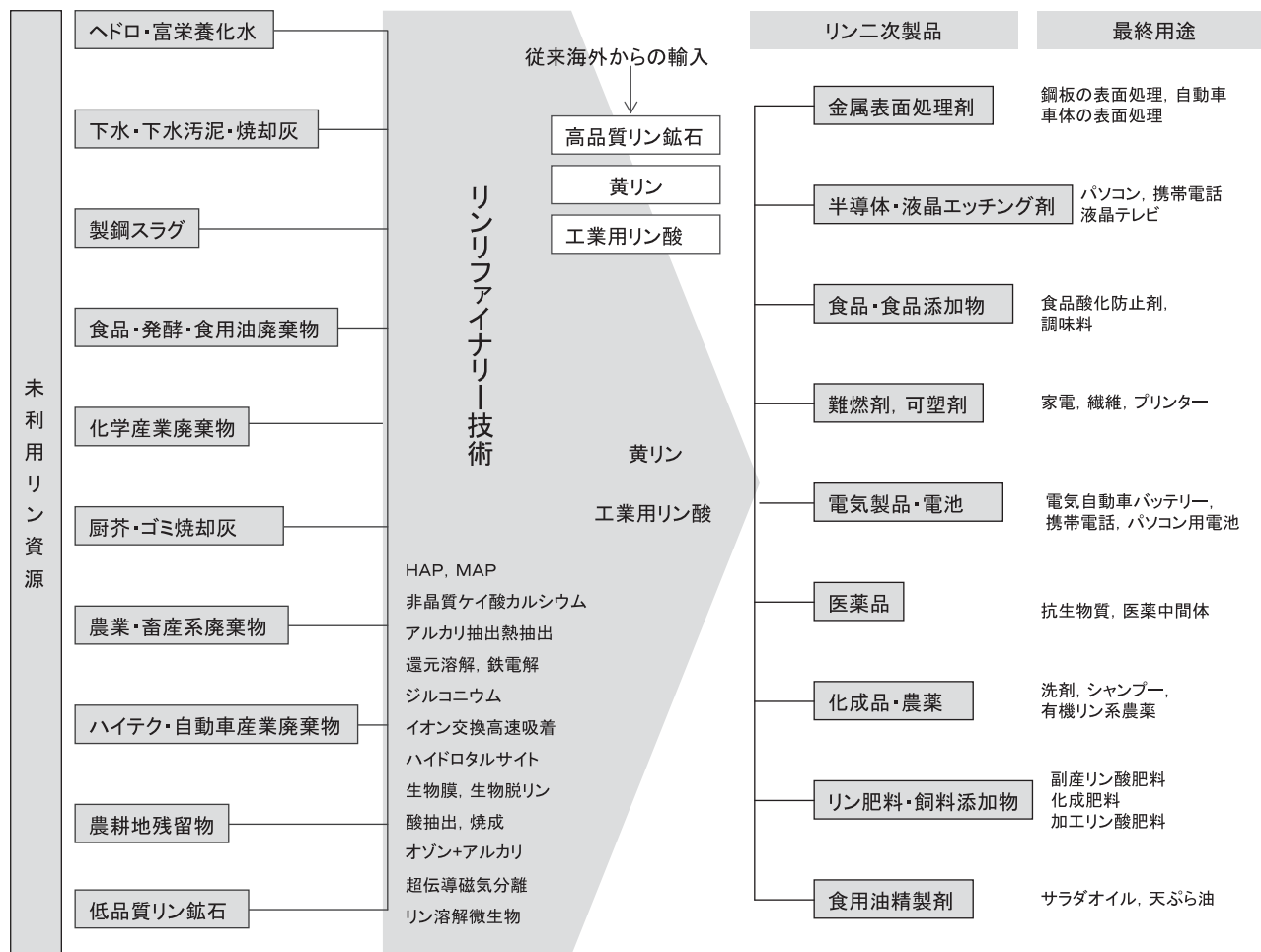


図2. リンリファイナリー技術<sup>1)</sup>

ンを回収して再利用しなければ、世界のリンを吸い込む巨大なブラックホールになりかねない。

リンの回収と再利用を行うには、食品廃棄物、下水汚泥やバイオマス焼却灰など、多様なリン含有未利用資源からリンを回収し再利用する技術（リンリファイナリー技術）を開発しなければならない（図2）<sup>1)</sup>。筆者らは20年以上も前に、微生物を活用してリンを回収し再利用する技術の開発に取り組んだ経験がある。当時、多くの微生物がポリリン酸を蓄積することは知られていたが、その分子機構についてはほとんど知られていなかった。もっとも、筆者は必ずしもリンの生物学そのものに関心があったわけではない。工学者には、木を見ることよりも、森に利用価値があるかどうかを、正しく見極めることの方が重要である。

**微生物のリン獲得戦略** 細菌には、リン飢餓に対処するためのさまざまな分子機構が存在している。細菌はリン飢餓に晒されると、リン酸に親和性の高いリン酸特異的輸送系（Pst系）を発現して、周囲にわずかでも残存するリン酸をかき集めようとする<sup>24,28)</sup>。かき集めよう

としても周囲にリン酸がなければ、比較的分解しやすい有機リン酸エステルの加水分解酵素を誘導し、有機リン酸エステルからリン酸を切り離して利用する。

有機リン酸エステルも利用できない状況では、切断が難しいC-P結合をもつ有機ホスホン酸を分解し、生成する亜リン酸を酸化してリン酸を得ようとする<sup>25)</sup>。また、運動性をもつ細菌の中には、周囲にリン酸がなくなればリン酸を高感度に感知できるセンサータンパク質を発現して、リン酸が存在する場所を探り出そうとする「リン酸走化性」と呼ばれる探索機能を発揮するものもいる<sup>5,29)</sup>。

一方、リン飢餓に備えるために細菌は、リン酸がまだ利用できる間に余分のリン酸をポリリン酸として細胞内に貯えることができる<sup>10)</sup>。リン飢餓に陥った時には、ポリリン酸を加水分解すればリン酸を得ることができる。多くの細菌にはポリリン酸合成酵素（PPK）が存在し、ATPからリン酸基が転移してポリリン酸の鎖長が伸びる。しかし、ポリリン酸合成の開始反応についてはいまだによくわかっていない。

**過剰摂取と補償摂取** 当然ながら、ポリリン酸の蓄積は、合成速度が分解速度を上回るときに生じる。ポリリン酸蓄積の様式には、大きく分けて二つあり、それぞれ過剰摂取 (luxury uptake) および補償摂取 (overplus) と呼ばれている。過剰摂取は、リン酸以外の栄養物の枯渇により細菌の増殖が抑えられた場合に起こり、補償摂取はリン酸欠乏に晒された細胞に突然リン酸が与えられた場合に起こる。大腸菌は、補償摂取は示さないものの、アミノ酸飢餓に晒されると過剰摂取を示す<sup>7)</sup>。

アミノ酸飢餓に晒された大腸菌は、緊縮応答と呼ばれるストレス応答を示すが、その際に応答の引き金となる (p)ppGpp が合成されることが知られている。(p)ppGpp は、ポリリン酸合成酵素の活性とは無関係に分解酵素の活性を阻害するため、結果的にポリリン酸が細胞内に蓄積する<sup>7)</sup>。緊縮応答により細胞内に蓄積したポリリン酸が Lon プロテアーゼと結合すると、そのタンパク質分解酵素活性が上昇して、細胞内に存在する不要なタンパク質の分解を促進する<sup>8)</sup>。この機構によりアミノ酸が供給されて、大腸菌はアミノ酸飢餓から脱出することができる。

*Klebsiella aerogenes* などの細菌においては、ポリリン酸合成酵素遺伝子 *ppk* はポリリン酸分解酵素遺伝子 *ppx* とオペロンを構成している<sup>10)</sup>。*ppk-ppx* オペロンのプロモーター領域には *pho* ボックスが存在し、二成分制御系である PhoBR により発現調節を受ける。*K. aerogenes* は、リン酸欠乏に晒された後にリン酸が添加されると、急速にリン酸を取り込み、ポリリン酸を蓄積する。この場合、リン酸欠乏下で Pst 系とポリリン酸合成酵素の活性が誘導されて、リン酸が与えられるとポリリン酸が蓄積する。これが補償摂取の分子機構であった<sup>10)</sup>。

そこで、大腸菌の *ppk* 遺伝子をリン酸特異的輸送系 *pst* オペロン遺伝子とともに多コピーベクターに組み入れ大腸菌を形質転換すると、細胞内に多量のポリリン酸が蓄積した。この組換え大腸菌のリン酸含有率は乾燥細胞重量の約 48% にも達し、良質のリン鉱石のリン酸含有率を凌ぐ値であった<sup>3)</sup>。さらに、ポリリン酸を蓄積した微生物を 70°C で短時間加熱したところ、ポリリン酸を効率よく細胞から取り出すことができることもわかった<sup>21)</sup>。

この方法を下水余剰汚泥に適用したところ、活性汚泥中のポリリン酸のほぼ全量が水中に放出された<sup>15)</sup>。このアイデアを活かしたリン回収 Heatphos プロセスの実証試験が、1999 年に神戸市の下水処理場で実施された<sup>16)</sup>。2003 年には、広島県福山市にある下水処理場内に実規模のテストプラントを建設し、1日当たり約 70 kg の人工リン鉱石 (バイオリン鉱石) が生産できた。しかし、技術的な実証試験には成功したものの、経済的に採算の

とれるビジネスモデルを構築できず、本技術を社会実装するには至らなかった。今考えれば、社会や経済の問題を抜きに、知識と技術だけで社会に貢献できると、簡単に考えていたことがそもそもの間違いであった。

## 持続的リン利用をめぐる世界の動き

**利害関係者間の議論** 欧米では「リンの持続的利用は技術よりも社会や経済の問題」との認識が強く、技術はあっても使われない現状を打破するため、社会や経済のシステムから変えようとする議論が行われている。言い換えれば、リンの持続的利用を実現するための事業が、新たなビジネスとして成り立つための環境をまず整備しようという考えである。欧米では今、持続的リン利用に関わる広範な利害関係者が集まり、政治、経済、行政、産業と社会にまたがるシームレスな議論が行われている。

組織的にも、2008年にわが国ではじめてリン資源リサイクル推進協議会が設立されて以降、2011年にオランダで Dutch Nutrient Platform<sup>43)</sup> が、そして2013年3月には European Phosphorus Platform の設立が宣言され、すでに150を越える団体が参加を表明している<sup>42)</sup>。これらの組織は今、広範な利害関係者を束ねつつあり、リンの回収と再資源化についても、政治、経済、行政、産業と社会にまたがるシームレスな議論が行われている。

**第一回欧州会議** 2013年3月にベルギーのブリュッセルで開催された第一回欧州会議 (ESPC2013) には、筆者も日本の取組みを紹介するために招かれた。EU では、2010年に「資源効率の高い欧州」を目指す戦略 Europe2020 が立てられ、2011年にはその工程表が示されて、リンの持続的利用は重要な課題の一つとなっていた。この会議の目的は、欧州におけるリンの持続的利用にかかわる利害関係者を一堂に集め、政治、経済、行政、産業と社会にまたがるシームレスな議論を行って、欧州にリンの持続的利用に取り組む新たな組織 European Phosphorus Platform を構築することであった (図3)。

この会議で、Europe2020の戦略立案にかかわった G. J. Gerbrandy 氏は、「新たなグローバル問題が理解されるには時間がかかる。地球温暖化には50年、生物多様性では100年かかった」と述べ、リンの持続的利用の必要性を国民にわかりやすく伝えることの重要性を強調した。また、EU環境委員会の J. Ptotocnik 氏は、「リンの非効率な利用は、資源を汚染物質に変え金を浪費させてきた。今日の取組みが、明日の経済を助ける」と述べ、リンの持続的利用への取組みを宣言する EU Green Paper の早期承認を促した。EU Green Paper が承認されれば、EU加盟各国はこれを自国の政策に反映させることが求められる。リンの持続的利用に関する EU Green Paper



図3. リンの持続的利用に関する第1回欧州会議でのTable session (太平洋セメント岩川博章氏撮影)

については、南欧と東欧の加盟国が経済的理由で承認を渋っており、EU Green Paperの行方は参加者の最大の関心事であった。

**欧州と米国のプロジェクト** 「資源効率の高い欧州」への取組みの中で、ドイツ、スイス、オーストリア、フランス、フィンランド、チェコおよびスペインの7か国によるP-REXプロジェクトが、2012年から実施されている。本事業の目的は、EU各国で取り組まれたリン回収・資源化実証試験の成果を共有して、社会実装に向けて共同して取り組むことである<sup>45)</sup>。欧州にはフルスケールのリン回収・資源化実証プラントが20余りある。その内、余剰汚泥からリン回収する実証プラントが12、汚泥消化脱離液などの濃縮液および汚泥焼却灰からリンを回収するものが、それぞれ4プラントずつある<sup>46)</sup>。問題は、実証プラントはあってもビジネスにつながっていない点である。国費を投入して実証プラントを建設しても、ビジネスモデルがなければ、ただの粗大ごみが再生産されるだけである。

米国では、国立科学財団の資金による「持続的な食糧供給のためのリン共同研究」プロジェクトが、2013年5月に開始した。このプロジェクトでは、リンの持続的利用を実現するためのグローバル戦略を、国際的かつ学際的な議論を経て構築することを目的としている。リンの持続的利用に関わる広範な利害関係者を集め、優先的に取り組むべき課題を抽出して、5年以内に戦略を提案するとしている<sup>47)</sup>。筆者は、2006年にシカゴで開かれた国際会議で前述のHeatphosプロセスについて講演したことがある。講演後、会場にいた米国人から「リンを回収しなくても、汚泥をそのまま使えばよいではないか」と言われたことを今でも憶えている。米人も、リンの問題がそれほど簡単な話ではないことに、今ようやく気づいたのかもしれない。

同様の取組みは、スイスETHのR. Scholz教授が主宰するGlobal TraPsプロジェクトでも行われており、日本からも東大の城山英明教授、鎗目雅准教授、東北大学の松八重一代准教授や筆者らが参加している<sup>48)</sup>。本プロジェクトでは、2013年6月に中国の北京で持続的リン利用に関する国際会議を開催した。こうした学際的な取組みについては、欧州と米国で似たようなプロジェクトが別々に行われることの非効率性や、「産」の役割がまだはっきりしていないことなど、多くの課題が残されている。

**アジアの取組み** リンの持続的利用への取組みを開始している国はいずれも、湖沼や内湾などの富栄養化防止を目的として、リンおよび窒素の環境負荷の削減に取り組んできた経験をもっている。富栄養化防止への取組みを経ずして、リンの持続的利用に着手することは経済的理由から難しい。

アジアを見ると、中国はいま下水道の普及が緊急の課題となっており、これから富栄養化防止対策にも本腰を入れることになる。この国は、世界最大のリン鉱石産出国であるが、リンの国内消費量が年々増大しており、下水などからのリンの回収と再資源化に関心をもっている。

韓国と台湾は目下、富栄養化防止の対策に力を注いでおり、両国ともリン資源を海外に全面的に依存していることからみて、いずれリンの回収と再資源化に取り組むものと思われる。タイ、フィリピン、インドネシアなど東南アジア諸国は、農業が盛んでリン肥料を多く消費しているが、まだ富栄養化防止対策も進んでいない。世界のリン鉱石市場が混乱すれば、これらの国々はもっとも大きな打撃を被る可能性があるにもかかわらず、まったく危機意識が感じられない。ベトナムは、国内にリン鉱山を有するもののすでに枯渇を懸念しており、リン肥料の利用効率を高めることに力を入れ始めている。

### わが国の立ち位置と課題

**日本は不思議の国** 驚くことに、リンを回収し再資源化する実機プラントがいくつも稼働している国は、世界でも日本だけである。バイオ燃料と違い国の特別の支援もない中で、一部とはいえリンの回収と再資源化が行われている日本は、欧米からみてまさに不思議の国である。欧米では今、日本のリン回収と再資源化への取組みに社会実装を促進するメカニズムを見いだそうとする「Look Japan」が注目を集めている<sup>49)</sup>。

欧米がわが国の取組みに熱い視線を送る一方で、わが国ではいまだに持続的なリン利用への長期的な政策支援も、回収リンの市場確立に向けた戦略的な議論もなされていない。国が世界の動きをよく把握していないことや、



新しいパラダイムがまだ国民に浸透していないところに問題がある。わが国では、リンの持続的利用はまだ国の政策課題にはなっておらず、リン資源の安定的確保のための長期的な戦略も存在していない。

リンの回収と再資源化が事業として成り立ちにくいのは、日本だけの問題ではない。経済性を成り立たせるために、社会や経済のシステムまで変えようとするのが欧米の考え方である。日本は与えられた条件のもとでできることを、こつこつと努力して実績を積み上げてきた。しかし、経済や社会の仕組みが今のままでは、これから大きな進展を期待することは難しいかもしれない。欧米からの熱いまなごしにもかかわらず、わが国ではまだ持続的リン利用に取り組む国家プロジェクトは始まっていない。

**欧米と日本の比較** リンの回収と再資源化において、日本が欧米の先を進んでいるのは、関係者の努力の賜物であることに違いはない。しかし、いくつかの幸運にも恵まれていたようである。まず、リンの回収と再資源化が成り立つには、回収リンが肥料などに地産地消されることが望ましい。欧州ではドイツ、オランダおよびスイスなどがリンの回収と再資源化に熱心であるが、肥料の製造販売が少数の大企業に握られており、下水処理場などでリンの回収を行っても、回収量が少なく品質も一定ではないから、肥料会社が引き取らない。一方、日本には数十に及ぶ中小の肥料会社が全国各地に存在し、回収リンの地産地消が可能である。

2013年4月、岐阜市に続き鳥取市で下水汚泥焼却灰からのリン回収・再資源化プラントが稼働を始めた。日本では汚泥焼却灰からのリン回収には、重金属類の溶出が少ないアルカリ抽出法が用いられているが、欧州では焼却灰にカルシウムが多く含まれるため酸抽出法を用いる必要がある。しかし、酸抽出法を用いると溶出する重金属類の分離にコストが掛かる。このため、すべての下水汚泥を焼却処分しているスイスでも、いまだにリンの回収と再資源化には着手できていない。スイスでは、下水汚泥焼却灰を将来のリン資源として一時貯蔵しているが、リンの再利用の視点から見ると埋立て処分とあまり違いはない。

わが国の排水基準の厳しさも、リン回収と再資源化にプラスに作用している。国土が狭く食の安全への関心が高いわが国では、下水汚泥や焼却灰の埋立て処分と農地還元は難しい。一方、欧米の多くの国では、下水汚泥を「Biosolid」と呼んで農地還元を行っている。たとえば、英国とフランスでは、下水汚泥の70および60%が農地に還元されている。食の安全上、直接口に入る野菜を栽培する畑には散布せず、一度散布した農地にも10年間

は散布しないなどの制限を設けてはいるが、これをリサイクルと呼ぶかどうかについては欧米でも議論がある。

また、EUに東欧の加盟国が増えたことで、廃棄物が西から東に移動するようになり、ドイツなどでは廃棄物の処理費が低減し、リサイクルの動機づけが難しくなっている。これに比べ、わが国の汚泥処理はコスト高であり、リン回収と再資源化による汚泥処理費の低減は、実施者に多くの経済的メリットを与えている。

**わが国の課題** わが国のリン回収と再資源化にもまだ多くの課題がある。量的にみると、わが国におけるリン回収の最大のターゲットは、製鉄工場で発生する製鋼スラグである。もし、製鋼スラグからのリン回収ができれば、わが国のリン鉱石輸入量を大幅に削減することが可能である。製鋼スラグからのリン回収と再資源化には技術的な開発要素も多いが、わが国の技術力をもってすれば、世界が注目する成果を生み出すことは間違いないだろう。仮に、世界の鉄鉱石年間産出量を約25億トン、リン含有率を0.03%とすると、世界で年間75万トンものリンが回収され再資源化される可能性がある。この量は、リン肥料を除く世界の工業分野でのリン年間消費量の約4分の1にもなる。

東京、大阪、神戸のような巨大都市でのリン回収と再資源化事業は、まだ世界でも行われていない。その点では、2012年度に実証試験を終えた旭化成ケミカルズ社による高速リン吸着剤を用いる下水二次処理水からのリン除去や、現在神戸市で行われている水ing社によるMAP回収プロセスの事業化に期待したい。

肥料取締法についても、回収リンを用いた肥料に、より魅力的な名称を付与するなど、持続的リン利用の時代に見合う見直しは必要であろう。EUでも肥料管理に関する法制度の見直しを求める声は上がっており、この問題はわが国が一国で取り組むよりも、欧米と連携して戦略的に取り組んだ方が効果的かもしれない。この他、リン回収および再資源化のコストを低減する技術の開発も必要である。太平洋セメント、小野田化学工業や三國製薬工業などによる非晶質ケイ酸カルシウムを用いる方法も、コスト削減につながる可能性を秘めており期待したい<sup>23)</sup>。

工業的には、黄リンの安定供給を確保する必要がある。回収リンを自動車、半導体、エレクトロニクス、バイオ産業などの分野で再利用するには、黄リンまたは高純度のリン酸まで再生する必要がある。黄リンは白リンに赤リンが混ざったもので、白リンは焼夷弾の原料でもある。兵器製造を産業としないわが国が黄リン製造工場をもつことは難しい。ハイテク産業などに必要な黄リンを確保するには、黄リン原料に適した下水汚泥焼却灰などから人工リン鉱石をつくり、タンカーで海上輸送して海外で

黄リンを製造するなど、国際的な解決策を考える必要がある。あるいは、高温のキルンを使い下水汚泥焼却灰などからリン酸をガスとして回収する技術の実用化に取り組むべきであろう。この技術は、黄リン製造とは異なり電気炉を使用する必要がなく、電力の供給に問題をかかえるわが国にとり、救世主となるかもしれない。

欧米での取組みに見るように、リンの持続的利用の必要性を国民にわかりやすく伝える努力も必要である。そのためには、ブリュッセルで開催された欧州会議のように、一般市民やジャーナリストなども含めた公開シンポジウムを日本でも開催する必要がある。また、わが国でリンの持続的利用をめぐる国際シンポジウムを開催するなどして、海外との意見交換を積極的に行っていくことも重要である。

国際的取組みの中で、日本の立ち位置はやはり技術である。また、日本での取組みにおいては、産官学の中でもとくに「産」の役割が重要である。そのためには、「産」に利益をもたらすビジネスモデルの構築が必要であり、国の戦略的な政策支援と回収リン市場の確立が、長い目で見てきわめて重要である。「技術よりも社会や経済の問題」として、システムから変えて行こうとする欧米の取組みと同じことは、日本一国ではとてもできない。むしろ、欧米の取組みと連携し、その成果を外圧として活用しながら、学ぶべきところは学んで、日本の政策にも反映させてゆくことが利口であろう。なぜなら日本では「欧米より進んでいる」ことよりも、「欧米が取り組んでいる」ことの方が、いまだに説得力を持っているからである。

### おわりに

リンの持続的利用を実現するためには、リンの利用効率を高めて無駄を減らし、リンを再利用することを考えなければならない。すべての人間に、リン資源にアクセスする権利があり、未来の世代にも同様にアクセスする権利がある。「リンは値段が安いからすぐ手に入る」と安心してはいけな。水と食料品は、誰にでも手に入るほど値段が安くなければならない。市民が買えないほど値段の高い水や食料品は、いくら沢山あっても意味がない。当然、食料品よりも値段の高いリン肥料などはありえない。リンは安く手に入らなければ意味がないことを、すべての議論の大前提としてよく理解しておかなければならない。

バイオテクノロジーは、農業、畜産、食品、発酵や医薬品などの産業から廃棄物の処理まで、リンのライフサイクルに深く関わっている。バイオテクノロジーだけでは何もできないが、他の分野と連携すれば持続的リン利

用に貢献できる機会は多くある。「リンは重要だがバイオではないので」と敬遠する向きもあるかもしれない。しかし、国費を投入した割には社会実装が進まないバイオ燃料にみるように、今のバイオにリンほどのスケールで人類に貢献する新たなテーマが本当にあるのだろうか。

2007年に亡くなられた米国のノーベル賞受賞者 Arthur Kornberg 博士は、晩年ポリリン酸の研究に取り組んでおられた。筆者は若いころに、Kornberg 博士に「なぜポリリン酸に興味をもたれたのか」と聞いたことがある。その返事は「サイエンティストである前にジェネラリストだから」であった。「問題を解くのに人間による仕分けなどなんの役にも立たない」私にはそう聞こえたと、今でも私の頭に残っている。

### 文 献

- 1) 大竹久夫編著：リン資源枯渇危機とはなにか、大阪大学出版社 (2011)。
- 2) Schroeder, J. J., Cordell, D., Smit, A. L., and Rosemarin, A.: Sustainable Use of Phosphorus (2009), [http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/sustainable\\_use\\_phosphorus.pdf](http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/sustainable_use_phosphorus.pdf)
- 3) Kato, J., Yamada, K., Muramatsu, A., Hardoyo, and Ohtake, H.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 3744–3749 (1993)。
- 4) Ohtake, H., Takahashi, K., Tsuzuki, Y., and Toda, K.: *Water Res.*, **19**, 1587–1594 (1985)。
- 5) Kato, J., Ito, A., Nikata, T., and Ohtake, H.: *J. Bacteriol.*, **174**, 5149–5151 (1992)。
- 6) Kato, J., Kim, H., Takiguchi, N., Kuroda, A., and Ohtake, H.: *J. Biosci. Bioeng.*, **106**, 1–7 (2008)。
- 7) Kuroda, A., Tanaka, S., Ikeda, T., Kato, J., Takiguchi, N., and Ohtake, H.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**, 14264–14269 (1999)。
- 8) Kuroda, A., Nomura, K., Ohtomo, R., Kato, J., Ikeda, T., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kornberg, A.: *Science*, **293**, 705–708 (2001)。
- 9) Nomura, K., Kato, J., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *J. Biol. Chem.*, **279**, 34406–34410 (2004)。
- 10) Kato, J., Yamamoto, T., Yamada, K., and Ohtake, H.: *Gene*, **137**, 237–242 (1993)。
- 11) Hardoyo, Yamada, K., Shinjo, H., Kato, J., and Ohtake, H.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**, 3485–3490 (1994)。
- 12) Morohoshi, T., Maruo, T., Shirai, Y., Kato, J., Ikeda, T., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**, 4107–4110 (2002)。
- 13) Morohoshi, T., Yamashita, T., Kato, J., Ikeda, T., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *J. Biosci. Bioeng.*, **95**, 637–640 (2003)。
- 14) Motomura, K., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *J. Environ. Biotechnol.*, **6**, 41–46 (2006)。
- 15) Kuroda, A., Takiguchi, N., Gotanda, T., Nomura, K., Kato, J., Ikeda, T., and Ohtake, H.: *Biotechnol. Bioeng.*, **78**, 333–338 (2002)。
- 16) Takiguchi, N., Kuroda, A., Kato, J., Nukanobu, K., and



- Ohtake, H.: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **36**, 1143–1146 (2003).
- 17) Tanaka, S., Lee, S. O., Hamaoka, K., Kato, J., Takiguchi, N., Nakamura, K., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *J. Bacteriol.*, **185**, 5654–5656 (2003).
  - 18) Tanaka, S., Kuroda, S., Kato, J., Ikeda, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H.: *Biochem. Eng. J.*, **9**, 193–197 (2001).
  - 19) Iwamoto, S., Motomura, K., Shinoda, Y., Urata, M., Kato, J., Takiguchi, N., Ohtake, H., Hirota, R., and Kuroda, A.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **73**, 5676–5678 (2007).
  - 20) Hirota, R., Kuroda, A., Kato, J., and Ohtake, H.: *J. Biosci. Bioeng.*, **109**, 423–432 (2010).
  - 21) Kashiwara, H., Kang, B., Omasa, T., Honda, K., Sameshima, Y., Kuroda, A., and Ohtake, H.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **74**, 865–868 (2010).
  - 22) Restiawaty, E., Iwasa, Y., Maya, S., Honda, K., Omasa, T., Hirota, R., Kuroda, A., and Ohtake, H.: *Process Biochem.*, **46**, 1747–1752 (2011).
  - 23) Okano, K., Uemoto, M., Kagami, J., Miura, K., Aketo, T., Toda, M., Honda, K., and Ohtake, H.: *Water Res.*, **47**, 2251–2259 (2013).
  - 24) Nikata, T., Sakai, Y., Shibata, K., Kato, J., Kuroda, A., and Ohtake, H.: *Mol. Gen. Genet.*, **250**, 692–698 (1996).
  - 25) Imazu, K., Tanaka, S., Kuroda, A., Anbe, Y., Kato, J., and Ohtake, H.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, 3754–3758 (1998).
  - 26) Kusaka, K., Shibata, K., Kuroda, A., Kato, J., and Ohtake, H.: *J. Bacteriol.*, **179**, 6192–6195 (1997).
  - 27) Kato, J., Sakai, Y., Nikata, T., and Ohtake, H.: *J. Bacteriol.*, **176**, 5874–5877 (1994).
  - 28) Wu, H., Kosaka, H., Kato, J., Kuroda, A., Ikeda, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H.: *J. Biosci. Bioeng.*, **87**, 273–279 (1999).
  - 29) Wu, H., Kato, J., Kuroda, A., Ikeda, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H.: *J. Bacteriol.*, **182**, 3400–3404 (2000).
  - 30) Kuroda, A., Kunitomo, H., Morohoshi, T., Ikeda, T., Kato, J., Takiguchi, N., Miya, A., and Ohtake, H.: *J. Biosci. Bioeng.*, **90**, 688–690 (2000).
  - 31) Kato, J., Nagata, C., Yang, L., Kuroda, A., Ikeda, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **65**, 456–458 (2001).
  - 32) Yang, L., Kuroda, A., Ikeda, T., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kato, J.: *Microbes Environ.*, **19**, 45–52 (2004).
  - 33) Takiguchi, N., Kishino, M., Kuroda, A., Kato, J., and Ohtake, H.: *J. Biosci. Bioeng.*, **97**, 365–368 (2004).
  - 34) Sato, T., Kato, J., Takiguchi, N., Ohtake, H., and Kuroda, A.: *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **68**, 1216–1220 (2004).
  - 35) Takiguchi, N., Kishino, M., Kuroda, A., Kato, J., and Ohtake, H.: *Bioresour. Technol.*, **98**, 2533–2537 (2007).
  - 36) Motomura, K., Hirota, R., Ohnaka, N., Okada, M., Ikeda, T., Morohoshi, M., Ohtake, H., and Kuroda, K.: *FEMS Microbiol. Lett.*, **320**, 25–32 (2011).
  - 37) Cordell, D.: The Story of Phosphorus, Doctor Thesis (2010).
  - 38) UNEP: Our Nutrient World (2013).
  - 39) USGS: Phosphate Rock (2013).
  - 40) The Hague Center for Strategic Studies: Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market (2012).
  - 41) Tirado, R.: Phosphorus in agriculture – Problems and solutions (2012).
  - 42) European Phosphorus Platform: <http://www.phosphorusplatform.org/>
  - 43) Dutch Nutrient Platform: <http://www.nutrientplatform.org/>
  - 44) Joint Declaration for the Launch of a European Phosphorus Platform (2013). [http://www.phosphorusplatform.org/images/download/Joint\\_declaration.pdf](http://www.phosphorusplatform.org/images/download/Joint_declaration.pdf)
  - 45) P-REX Phosphorus Recovery and Energy Efficiency, <http://www.kompetenz-wasser.de/P-REX.553.0.html?&L=1>
  - 46) Kabbe, C.: Sustainable sewage sludge management, *Bluefacts*, 36–41 (2013).
  - 47) ASU: <http://sustainability.asu.edu/research/project.php?id=704>
  - 48) Global TraPs: [http://mlsds.globaltraps.ch/Global\\_TraPs.html](http://mlsds.globaltraps.ch/Global_TraPs.html)
  - 49) Wemyss, D.: Master Thesis, ETH, Switzerland (2012).
  - 50) Greenpeace East Asia: <http://www.greenpeace.org/eastasia/multimedia/slideshows/>