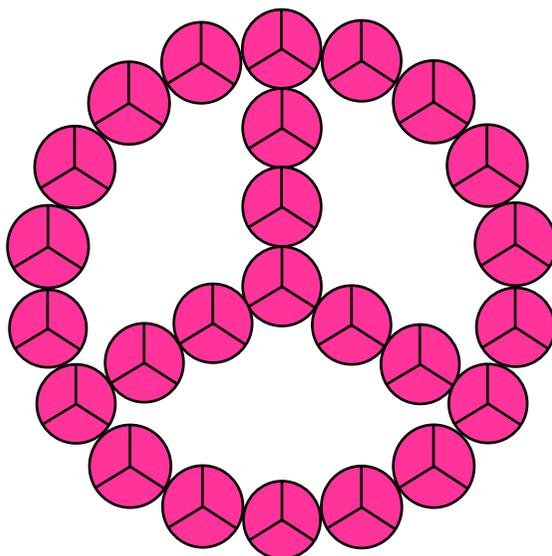


PHOSPHORUS LETTER

2021年10月 第102号



日本無機リン化学会

JAPANESE ASSOCIATION OF INORGANIC PHOSPHORUS CHEMISTRY

<http://www.jaipc.jp>

《解説 II》

鶏糞焼却灰と脱リンスラグから工業用リン資源の回収

Recovery of Industrial Phosphorus Resources from Incineration Ash of Chicken Manure and Dephosphorization Slag

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部

杉山 茂

Shigeru SUGIYAMA

1. はじめに

リン資源を回収する重要性や緊急性等については、すでに本誌においても何度も解説したので、ここでは、一般のリン回収と我々が目指すリン回収の差異を述べた後に、具体例の説明を行う¹⁻⁴⁾。

リン資源が枯渇する、つまりリン鉱石が枯渇すると、人類の食糧生産ができなくなるため人類は滅亡するしかない。このような状況を最初に経験したのが、窒素資源の枯渇の危機であった。窒素はリンとカリウムとともに、肥料の3大元素である。産業革命時にヨーロッパで人口の爆発的な増加があり、食糧生産を増産させる必要があった。その際に問題となったのが、当時の窒素肥料の原料となっていたチリ硝石が枯渇するという危機であった。この危機を背景に、空気中の窒素と化石燃料から得られる水素を原料としてアンモニアを合成するハーバー・ボッシュ法が開発され、窒素資源の枯渇は回避された。この開発は、当時の学会最高峰の研究者からも無謀な研究と批判を受けたが、現在の触媒科学、化学工学、水素社会の基盤となる様々な技術開発があり、完全に批判を覆す結果となっている。枯渇資源の問題を解決することは、直接的な問題解決となるとともに、その技術のお陰で現在の水素社会形成の基盤までも構築できたという、後に続く研究者は心しておかなければならない、

非常に貴重な前例である。

翻って、リン資源についてはどうであろう？チリ硝石が枯渇すると指摘された時点よりは、まだリン鉱石の枯渇はひっ迫していないのは事実である。しかし、将来的にはリン鉱石が枯渇することは間違いなく、そのことを見据えてリン資源が枯渇しないような技術開発を準備しておかなければならない。窒素資源と大きく異なることは、窒素資源は無尽蔵の空気中の窒素があれば枯渇することはないが、リン資源は有限であり、使用したものを回収再利用しなければいけないことである。環境汚染のリン、下水処理から得られるリンといった環境汚染物質の元凶としてリンを回収する技術開発において、我が国は最先端をいっている。しかし、環境汚染を解決するため、回収したリンの形態にはあまり注意は払われずに、回収リンは肥料として一部利用されるが、大部分は道路基盤材などとして利用され、せつかく回収しても土壤に廃棄されて、回収しても利益が出ないのが現状である。今のままでは枯渇資源リンの問題を解決できないであろう。現状のリン鉱石を基盤としたリン産業プロセスを見ると、リン酸カルシウム類からなるリン鉱石を硫酸で処理しリン酸を製造、さらにリン酸から黄リンを製造し、肥料とともに付加価値の高い工業製品の原料として使用されている。し

たがって、比較的リンが多く含まれている未利用廃棄物から、リン酸カルシウムやリン酸としてリンを大量に回収すれば、現在のリン産業のプロセスをそのまま使用できる。つまり、付加価値の高いリン製品を製造するという視点でリンを回収しなければ、これまで発展してきたリン産業プロセスを無駄にするとともに、有効な枯渇資源リン資源の解決にもつながらないであろう。

ここでは、このような背景に基づき行ってきた処理に困るくらいの量がある鶏糞焼却灰や脱リンスラグという未利用資源から、リンをリン酸カルシウムやリン酸として回収する、容易で、安価で、短時間で行うことができる技術について概説する。



図1 鶏糞焼却灰



図2 脱リンスラグ

2. 鶏糞焼却灰からリン酸カルシウム類の回収⁵⁻⁷⁾

「鶏糞」、養鶏業者から聞くとその処理を行わないと養鶏場は鶏糞に覆われてしまうという厄介なものである。徳島県は、地鶏の生産量が国内最大であり、何かできないかと思いつつも、著者自身がバイオの研究者ではないため、鶏糞処理は縁遠いものと思っていた。しかし、枯渇資源リンの検討を進めるうちに、リン鉱石の成因の一つとして海鳥の糞由来のものが良質であることを認識した。海鳥の糞がリン鉱石の成因であれば、陸鳥の糞もリン資源として使えるのではと考えるに至った。そこで、徳島での鶏糞の状況を調査すると、徳島県では国のプロジェクトとして鶏糞発電を行っていたが、発電後の鶏糞焼却灰は肥料として使うだけ、つ

まり土壤に廃棄していることが分かった。鶏糞自体を専門家ではない私たちが利用することは危険であるが、一度焼却していれば私たちでも使用できる。世界的なリン資源の問題を解決するとともに、地元徳島県の未利用資源の未来を少しでも明るくしたいという思いで、鶏糞焼却灰から付加価値の高いリンを含んだ工業製品の原料となるリン酸カルシウムを取得する研究を行った。

本稿では、未利用資源を酸に溶解してリンとともに様々な含有元素を溶出させる溶出プロセスと、溶出プロセスで得られた溶液にアンモニア水を加えて沈殿と溶液に分ける沈殿プロセスの組合せが基本になる手法を紹介する。この場合は、沈殿=リン酸カルシウム=リン鉱石等価体となる。溶かして、再沈殿するだけの手法にこだわったのは、簡単で、短時間で実施できる手間のかからない手法だったためである。このような手法を検討した当初は、溶解させれば何とかかなというものが主流であった。また、アンモニアで沈殿を析出させようものなら、溶解させたのにまた沈殿させるのは何事かなど不評であった。当時は、溶解したものを、自然界と異なる手法で再沈殿させることは、鶏糞焼却灰が得られるプロセスと全くことなる固化プロセスとなり、容易に不要な物質を短時間で分離できることが理解してもらえなかったようである。リン回収は、日本無機リン化学会でも重要と思い、当初は *Phosphorus Research Bulletin* にのみ結果を公表していたが⁸⁻⁹⁾、査読者から「また、同じ手法で対象のみを変えた研究ですか」など言われ、リン回収に係わる主戦場を化学工学会にかえた著者にとっては思入れの多い、いわくつきの研究である。化学工学を主戦場としているために、同じプラントで、できるだけ同じ手法で様々な未利用資源を処理することが、回分式装置を用いた化学プラント

の理想であると信じてこの研究を行っている。概略は発表済みであるので⁷⁾、研究中に頂いた貴重な質問等に回答する形で解説する。

本手法の場合、鶏糞焼却灰 1.0 g を 25℃において所定の濃度の硝酸水溶液に加え、数分攪拌後、濾過を行う。濾液に、アンモニア水を加え pH を 6 から 7.5 にして、直ちに析出する沈殿 0.4 g 程度が、リン酸カルシウムの一類でありリン鉱石にも含まれるカルシウムヒドロキシアパタイトとなる^{5,7)}。つまり、簡単な操作で、時間をかけることなく鶏糞焼却灰からリン鉱石等価体を得ることができる。この際に、溶出プロセスにおいて酸を使用するのは危険という指摘や、何故硝酸ということ質問として受ける。前者については、リンの化学に携わっている研究者には自明なことであるが、これまでにリン鉱石をベースとして発展してきたリン産業プロセスでは、最初のステップとしてリン鉱石を硫酸で処理を行いリン酸にする。したがって、特にリン鉱石を使用している企業では通常の酸処理となり、技術も確立しているので、製造現場では危険という認識はない。

一方、後者については、鶏糞焼却灰からのリンの回収実験を行う前に、コンポスト化鶏糞を用いて、硝酸、塩酸、硫酸で処理を行った結果に基づいて、硝酸を選択したため、その結果について図 3 に示す。リン酸カルシウムとして最終的には沈殿を得る目的のため、ここではリンとカルシウムの溶出率を示した。リンに注目すると、酸素の種類によらず 0.1 時間という短時間で溶出が終了しており、酸による差異はない。一方、カルシウムの場合、硫酸を用いるとカルシウムの溶出率が抑えられているが、これは硫酸カルシウムとして新たに結晶を析出するためである。したがって、リン酸カルシウムをこの溶液から得る場合は、硝酸と塩酸が相

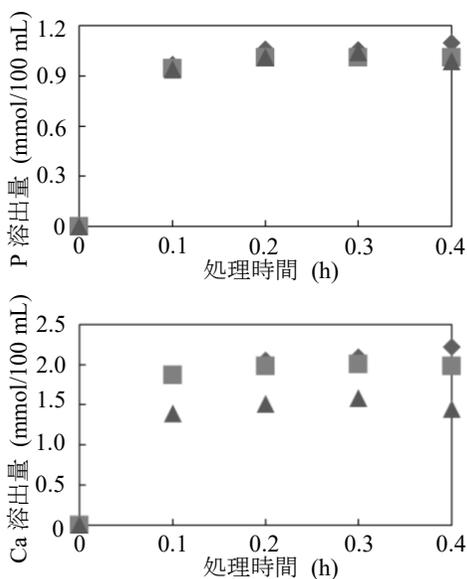


図 3 各種 0.1 mol/L の酸を用いたコンポスト化鶏糞からの P と Ca の溶出挙動

- ◆ : 0.1 mol/L HNO₃ ■ : 0.1 mol/L HCl
- ▲ : 0.1 mol/L H₂SO₄

応しいこととなる。

筆者は固体触媒に係わる研究をライフワークとしている。固体触媒の合成に、塩酸処理で得られた原料を用いると、痕跡量塩素が残っていれば触媒毒になりうるとともに、その触媒を 300~500℃で有機化学反応に使用するとダイオキシンが発生する可能性があるため、硝酸を利用することとした。硝酸を用いると最終的には燃焼除去できる NO_x となるため製品には残らない。ダイオキシンの発生についての可能性は、固体触媒の研究者にはすぐに理解いただけるが、他の研究者には理解されにくいことを感じている。資源回収の際には、その後の利用方法も考えて検討することが必要であろう。

次に質問を受ける点と言えば、沈殿プロセスで何故アンモニア水溶液を使用するのかという点である。これも、養鶏業者が糞尿に苦しんでいるため、鶏糞とともに鶏尿も利用できないかということと、

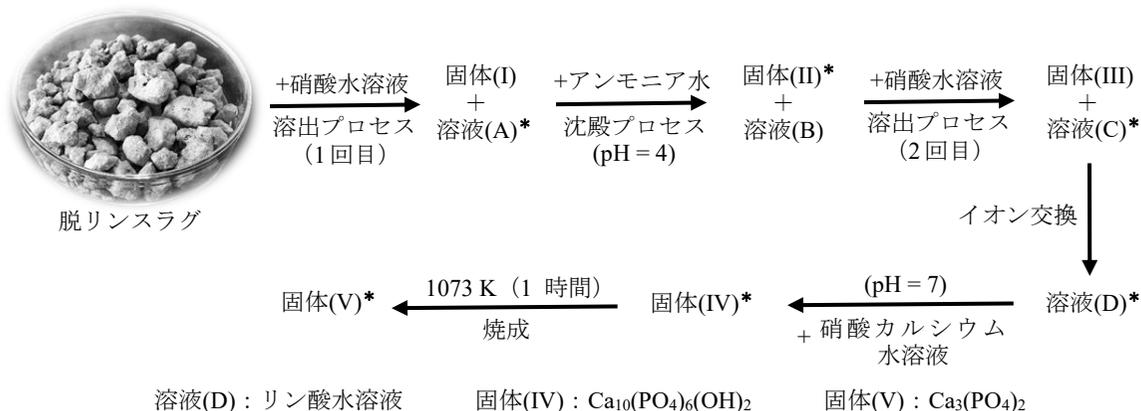


図4 脱リンスラグからリン酸およびリン酸カルシウム類の回収手法

著者の研究室で、水溶性アンモニウムの回収をリン酸水素マグネシウムで行うという技術を開発していたためである¹¹⁾。事実、アンモニア水を用いると、リンとカルシウムは選択的に沈殿する一方、カリウムやマグネシウムは溶液に残すことができ、全く想定していなかったが、分離が容易に行えた⁵⁻⁷⁾。しかし、研究を継続していくと、アンモニアを使い、穏やかに速度論的結晶成長が進んだ場合は、良好にリン酸カルシウムができる一方、水酸化ナトリウムのような強い塩基を使用すると熱力学的結晶成長が進み、たとえリン酸カルシウムが生成しても、純度が低下することが分かってきた⁶⁾。また、水酸化ナトリウムを使用すると、最終的にナトリウムが製品に残る可能性があるが、アンモニアを用いた場合、こちらも最終的にはNO_xとして燃焼除去できることも挙げられる。

概算であるが、我が国のすべての鶏糞を本処理によりリン酸カルシウム=リン鉱石等価体に変換できれば、我が国の年間使用量の14%に当たるリン資源が鶏糞から得られる可能性がある。リン鉱石を産出しない我が国では鶏糞は貴重なリン資源になりうると期待している。

3. 脱リンスラグからリン酸およびリン酸カルシウム類の回収¹²⁻¹³⁾

次に、脱リンスラグからリン酸水溶液やリン酸カルシウム類を回収する手法について概説する。脱リンスラグは、製鉄プロセスから排出される廃棄物である。リンの含有量は数パーセントながら、大量廃棄されるために、我が国で年間に排出される脱リンスラグ中のリンの含有量は国内に輸入されるリンの3倍もある¹⁴⁾、我が国最大の未利用リン資源である。この脱リンスラグから、リン酸およびリン酸カルシウム類を回収する手法も、基本的には鶏糞焼却灰からのリン酸カルシウム類回収の手法と同様である。図4に示すように、溶出プロセスと沈殿プロセスからなり、それに加えて再溶解プロセス、イオン交換プロセスを経てリン酸水溶液が得られる。このリン酸水溶液に硝酸カルシウムを加えることによりリン酸カルシウム類が取得できる。図4の固体や溶液の右肩に*をつけたところに、リンが濃縮される。各プロセスについて説明する。

今回用いた脱リンスラグのXRDを図5に、また組成を表1に示す。図5から明らかのように、酸化鉄をはじめ、ケイ素、カルシウム、マグネシウム

由来の化合物がリン酸カルシウムとともに検出された。XRD では検出されていないが、マンガンやチタンも含有されていることが分かる。

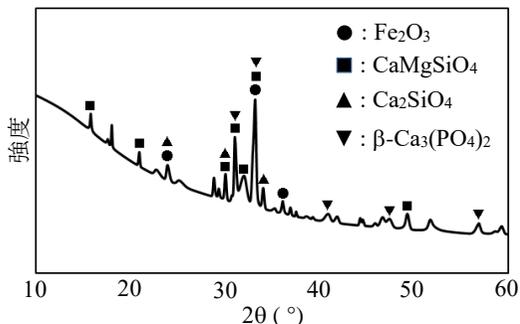


図5 脱リンスラグのXRD

表1 脱リンスラグの組成 (%)

Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe
1.7	1.4	15.8	2.7	49.5	2.4	7.9	18.6

この場合も、脱リンスラグ 1.0 g を 25°C において所定の濃度の硝酸水溶液に加え、所定時間攪拌後、濾過し、リンの分析を行った (図4における溶出プロセス (1回目))。

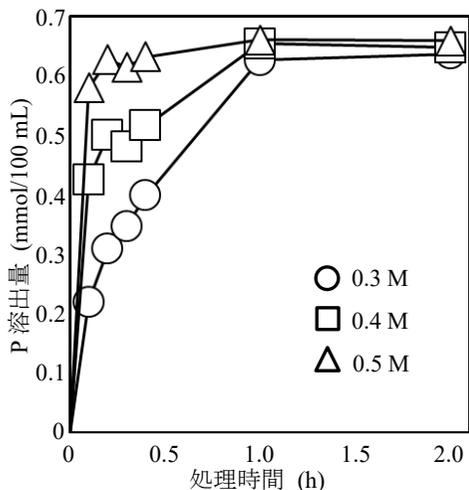


図6 リンの溶出挙動に対する硝酸濃度の影響

図6に示すように、0.5 M の硝酸で0.2時間処理

を行うと、ほぼこの処理で可能なリンの溶出が終わっていることが分かる。硝酸の濃度は、初期の溶出挙動に影響を与えているが、最終的にリンの溶出濃度はほぼ一致した。この1回目の溶出プロセスで、脱リンスラグ中の86%のリンが溶液(A)に溶出できた。

次に、鶏糞焼却灰の場合と同様に、上記最適条件で得られた溶液(A)にアンモニア水を加え、pH = 4とし0.5時間攪拌した(図4における沈殿プロセス)。この際に得られた固体(II)と溶液(B)を濾別した。表2には、溶液(A)と溶液(B)の組成を示した。

表2 溶液(A)と溶液(B)の各元素の濃度

溶液	濃度 (mmol/100 mL)					
	Mg	Al	P	Ca	Mn	Fe
(A)	0.46	0.19	0.58	6.04	0.42	1.00
(B)	0.39	0.02	0.00	5.83	0.41	0.00

溶液(A)には0.584 mmol/100 mLのリンが存在していたが、アンモニアを加えて生成した固体(II)を除いた溶液(B)にはリンがほとんど検出できず、ほぼ100%のリンが固体(II)として沈殿したことが分かる。リンが結晶として溶液から除去されるのに伴って、アルミニウムと鉄の大部分も固体(II)として溶液系から分離されている。一方、マグネシウム、カルシウム、マンガンの大部分は溶液(B)に残っており、溶出-沈殿プロセスを経て、固体(II)の中にリンの濃縮ができていていることが分かる。図7には固体(II)の焼成前後でのXRDを示した。焼成前には結晶化が進んでおらず、XRDから情報を得ることはできなかったが、焼成後には明確なXRDが検出された。図7の焼成後の図と図5を比較して分かるように、図5の脱リンスラグを、溶出-沈殿プロセスを経て再度固化することは、元の固体に戻す

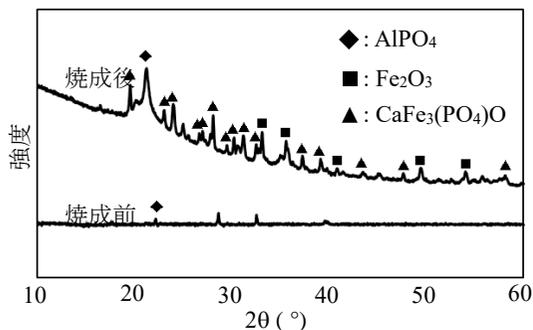


図7 固体(II)のXRD

のではなく、リンが濃縮された固体を得るために行っていることが理解できよう。

鶏糞焼却灰からリン鉱石等価体を回収する際には、ここまでのプロセスで終了である。鶏糞焼却灰にはリンとともにカルシウムが大量に含まれるために、固体側にもカルシウムがリンとともに濃縮され、リン鉱石等価体であるリン酸カルシウム類が取得できる。一方、鉄、アルミニウム、マンガンやここでは示していないケイ素が大量に含まれている脱リンスラグの場合、ここから様々なカチオンを取り除いていく必要がある。ここで用いた溶出-沈殿プロセスを再度行っても効果がないことは、以前の研究から明らかになっている¹²⁾。あまり、プロセス数を増やすことは現実的でないことと、様々なカチオンを一挙に取り除くということから、リンが濃縮された固体(II)を再度溶解させ、溶出したリンと各元素のカチオンをイオン交換樹脂により分離することを考えるようになった。

リンは通常 PO_4^{3-} のアニオンの形で存在するはずなので、カチオンの除去性能が強い強酸性陽イオン交換樹脂により、 PO_4^{3-} というアニオンの形態をとるリン以外の様々なカチオンの除去をできると判断した。廃棄物処理に、このような手法を取りたくなかったが、水が貴重な中東では海水をイオン交換樹脂に通じて真水にする技術は当たり前のよ

うに行われている。リン資源も、枯渇すると水と同等以上に貴重な資源になるので、ここで用いても問題ないと判断した。当初は、陽イオン交換樹脂の選定に時間がかかると予想されたが、専門の企業技術者に相談することにより、三菱ケミカル製強酸性陽イオン交換樹脂 (PK216H) を用いると良好な結果が得られたので、以下に紹介する。

前述までに得られたリンが濃縮された固体(II)を、0.5 M HNO_3 水溶液 100 mL に加え、1時間攪拌し再度リンを溶出させた (図4における溶出プロセス (2回目))。その後、濾過を行い、固体(III)とイオン交換の対象となる溶液(C)を得た。表3では、溶液(C)の組成を溶液(A)の組成と比較した。1回目の溶出プロセスで溶液中にあったリンが、2回目の溶出プロセスでも同程度溶出しているため、この間のリンのロスはない。この間に、マグネシウム、カルシウム、マンガンは除去され、リンとともにアルミニウムと鉄が共存しており、これらの除去が課題となる。

表3 溶液(A)と溶液(C)の各元素の濃度

溶液	濃度 (mmol/100 mL)					
	Mg	Al	P	Ca	Mn	Fe
(A)	0.46	0.19	0.58	6.04	0.42	1.00
(C)	0.00	0.15	0.57	0.18	0.01	0.92

興味深いのは、溶液(C)を取得する際に、溶解できなかった固体(III)がアモルファスシリカであったことである。固体(III)のXRDは、アモルファスシリカ特有のブロードなシグナルしか検出できず、この固体(III)の組成分析を行うと、表4に示すように、リンは全く検出されず、カチオンはほぼケイ素のみであった。脱リンスラグ中にはケイ素がかなり含まれるが、このように溶出-沈殿-溶出を繰り返

返すことにより、SiO₂として除去しやすい形態に変化できていることを示している。この過程で、76%のケイ素が固体として回収され、溶液(C)から除去され、リン液体中に存在しないような分離ができた。

表 4 固体(III)の組成 (%)

Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe
0.1	0.2	98.4	0.0	0.2	0.4	0.0	0.8

上記で得られた溶液(C)を強酸性陽イオン交換樹脂に通じて得られた溶液(D)には、表 5 に示したように、ほぼリンしか存在していないことが分かる。

表 5 溶液(D)の各元素の濃度

溶液	濃度 (mmol/100 mL)					
	Mg	Al	P	Ca	Mn	Fe
(D)	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.01

カチオンが存在しない状態ではリンはリン酸の形でしか存在しえないが、そのことを確認するために、³¹P NMR を測定した。同定を試みるために、市販のリン酸も合わせて測定した。結果を図 8 に示した。溶液(D)と市販のリン酸から得られるピークが同じ位置に検出されている。リン酸基とカチオンが結合すると、このピークはシフトするために、このような一致は見られない。したがって、溶液(D)はカチオンフリーのリン酸であることが分かる。今回のプロセスで、リンが主として回収される溶液(A)、溶液(C)および溶液(D)のリン濃度の変化について表 6 にまとめた。溶液(A)には、脱リンスラグ中の 86%のリンが溶出している。この溶液(A)100 mL をベースに、回収できた各溶液の体積におけるリンの物質質量と回収率も合わせて図 6 に示

しているが、78%以上のリンが回収されており、脱リンスラグから、リン酸が良好に取得できることが明らかになった。お気づきのように、溶液(D)のリン酸の濃度は低い。しかし、濃度を上げるために水を蒸発させることは、エネルギーの過剰浪費につながる。この溶液を、そのまま使用頻度の落ちた鉄鋼プラントの高炉に導入して黄リンを得ることを著者らは提案している¹⁵⁾。また、粗リン酸水溶液から従来に比べて格段に電気エネルギーが不要な手法で黄リンを得る手法も提案されており¹⁶⁾、今回得られたリン酸水溶液の工業製品への応用展開の可能性は非常に高い。

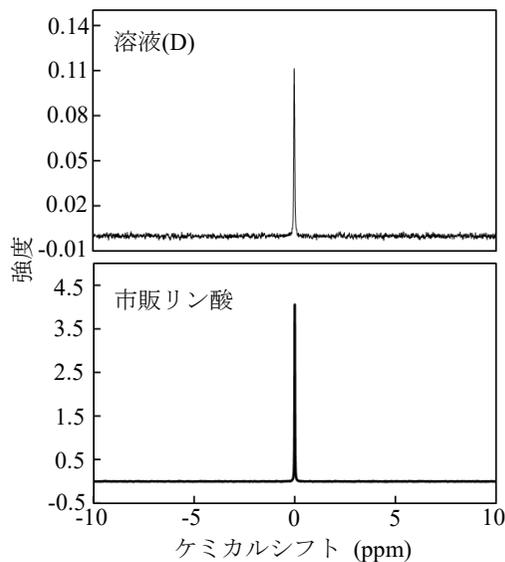


図 8 溶液(D)と市販の H₃PO₄ の ³¹P NMR

表 6 各溶液のリン回収率と関連データ

	濃度*	体積 (mL)	リン (mmol)	回収率 (%)
溶液(A)	0.58	100	0.58	-
溶液(C)	0.57	98	0.56	96
溶液(D)	0.48	95	0.45	78

*: mmol/100 mL

溶液(D)から、産業界でも利用可能な固体リン資源としてリン酸カルシウム類を取得するため、溶液(D)に硝酸カルシウム水溶液を加え、アンモニア水で pH = 7 として室温で 0.5 時間攪拌を行った。得られた固体(IV)とその 800°C、5 時間焼成体（固体(V)）の XRD を図 9 に示した。焼成前の固体(IV)からは、明確なピークは検出されなかったが、カルシウムヒドロキシアパタイトと思われるわずかなピークが確認された。一方、焼成後の固体(V)からは、純度の高い β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ が検出された。固体(IV)から固体(V)への変換は、鶏糞焼却灰と場合を同じであるが、実際に利用する際は、焼成する必要はなく、焼成前の固体(IV)で十分である。

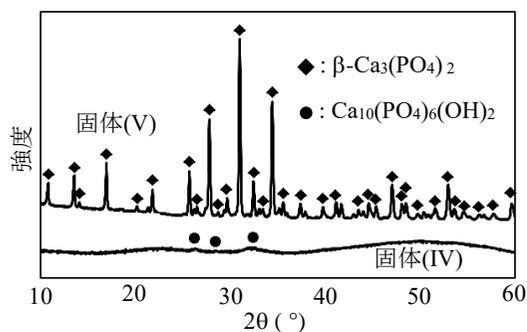


図 9 固体(IV)および(V)の XRD

4. 最後に

回収後のリンを工業用資源として再利用することを意識した未利用資源からのリン回収技術に関する著者の研究室の最近の成果を概説した。現状ではリン資源の枯渇は実感しがたいが、子供の孫の頃には、リンの資源問題はひっ迫する状況になるであろう。リンの資源回収という大きな課題に対して、「少しでも爪の跡を残す」という意気込みで、子孫の繁栄につながる研究をつづけていきたいと思っている。

謝辞

本研究を進めるにあたって、2020 年度鉄鋼環境基金研究助成および 2021 年度平和中島財団アジア地域重点学術研究助成の支援を頂いたことに対し深く感謝する。

引用文献

- (1) Sugiyama, S.; *Phosphorus Lett.*, No. 68, 19-26 (2010).
- (2) Sugiyama, S.; *Phosphorus Lett.*, No. 83, 12-18 (2015).
- (3) Sugiyama, S.; *Phosphorus Lett.*, No. 86, 24-30 (2016).
- (4) Sugiyama, S.; *Phosphorus Lett.*, No. 91, 3-5 (2018).
- (5) Sugiyama, S.; Wakisaka, K.; Imanishi, K.; Kurashina, M.; Shimoda, N.; Katoh, M.; Liu, J.-C.; *J. Chem. Eng. Jpn.*, 52, 778-782 (2019).
- (6) Sugiyama, S.; Liu, E.-H.; Imanishi, K.; Shimoda, N.; Katoh, M.; Liu, J.-C.; *J. Chem. Eng. Jpn.*, 53, 667-674 (2020).
- (7) 杉山茂; 劉志成; 佐藤英俊; *セラミックス*, 56, 160-163 (2021).
- (8) Sugiyama, S.; Ioka, D.; Hayashi, T.; Noguchi, M.; Nakagawa, K.; Sotowa, K.-I.; Takashima, K.; *Phosphorus Res. Bull.*, 25, 18-22 (2011).
- (9) Sugiyama, S.; Hayashi, T.; Shinomiya, I.; Nakagawa, K.; Sotowa, K.-I.; *Phosphorus Res. Bull.*, 27, 23-27 (2012).
- (10) Sugiyama, S.; Kitora, R.; Kinoshita, H.; Nakagawa, K.; Katoh, M.; Nakasaki, K.; *J. Chem. Eng. Jpn.*, 49, 224-228 (2016).
- (11) Sugiyama, S.; Yokoyama, M.; Ishizuka, H.; Sotowa K.-I.; Tomida, T.; Shigemoto, N.; *J. Colloid Interface Sci.*, 292, 133-138 (2005).

- (12) Sugiyama, S.; Shinomiya, I.; Kitora, R.; Nakagawa, K.; Katoh, M.; *J. Chem. Eng. Jpn.*, 47, 483-487 (2014).
- (13) Sugiyama, S.; Imanishi, K.; Shimoda, N.; Liu, J.-C.; Satou, H.; Yamamoto, T.; *J. Chem. Eng. Jpn.*, in press.
- (14) 大竹久夫; 用山徳美; 橋本光史; 一般社団法人リン循環産業振興機構 2020 年度報告書, 19-25 (2021).
- (15) 杉山茂; 山本高郁; 特許出願 2021-53328.
- (16) 長坂徹也; 三木貴博; 松八重一代; 務川高志; 梶野正博; 西 清司; 特許公開 2019-19029.

著者紹介

杉山 茂 (すぎやま しげる) 工学博士

徳島大学大学院社会産業理工学研究部理工学域応用化学系

【略歴】 1981 年 3 月 徳島大学大学院工学研究科化学工学専攻修士課程修了

1982 年 8 月 九州大学生産科学研究所教務員

1987 年 10 月 工学博士 (九州大学)

1988 年 4 月 徳島大学助手, 同大講師, 助教授を経て

2005 年 4 月 徳島大学教授

【専門分野】 化学反応工学

【現在の研究分野】 固体触媒の開発, リン資源の回収

【趣味】 阪神タイガースの応援

【連絡先】 sugiyama@tokushima-u.ac.jp

