

日本の「都市鉱山」は
有用な金属資源の宝庫

所先生は「都市鉱山」から有用金属を選び分ける研究などに取り組み、学内の研究活動に止まらず、20社以上の企業と産学連携活動、さらに日本学術会議など多くの場で活躍されています。まずは所先生の主な研究内容について教えていただけますか。

所 学問分野で言うと資源循環工学とよばれています。工学の中でも総合工学に位置し、資源循環型社会実現のための技術的、システムの学問を学ぶ分野です。今、お話にでた都市鉱山から有用金属を取り出すための研究や、廃水を浄化して環境に戻す技術の研究などがあります。

もともと専門は「選鉱学」と言うものでした。鉱石から有用元素を分離、濃縮する技術や、有害元素を分離して適切に処理する技術などです。選鉱の技術そのものは、人が天然鉱山から資源を取り出して活用するようになった時代—さかのぼると18世紀半ばからの産業革命、さらにさかのぼると先史時代の青銅器時代からあり、経験値の積み重ねで進化してきました。ただし、系統的に機構解明がされ始めたのはつい近年のことであり、都市鉱山を対象とした選鉱はノウハウの蓄積も少ないのです。

しかし、そうした選鉱技術も含めた資源循環工学の分野は、2015年国連サミットにおいて全会一致で採択されたSDGs（持続可能な開

発目標）を見ても、ますます重要性が高まっています。国際社会共通の目標であるSDGsの12番目には「資源循環実現」の目標が明記されていて、どの産業分野においても、どの国においても、資源循環は現在進行の大きなテーマとなっていくでしょう。

鉱物を研究する分野に進んだきっかけは、鉱石に興味があったのでしょうか。

所 いえいえ、石が好きだったわけではありません（笑）。もともと環境への興味があり、環境に役立つことをやりたいと思っていたら、石や鉱物のことを学ぶ必要性を感じ、資源循環工学の分野に進むようになったのです。

私は中学・高校生の頃から理系が好きでしたが、理系を学びたいというよりも、将来は勉強したことが社会に役立てられるような道に進みたいという想いがありました。すると高校生の時にリオ・デ・ジャネイロで地球サミットが開催され、環境のことが世界的に注目されるようになりました。それが私の興味とピッタリ合って、大学で現在につながる分野を学ぶようになったというわけです。

環境への興味が先にあったというわけですね。では、都市鉱山について改めて教えていただけますか。

所 廃棄物になったテレビやパソコンなどの家電、スマホ、ガラケー

の部品には、貴重な資源となる物質が数多く使用されています。そうした、再利用すれば資源となる物を含む廃棄物が都市鉱山と呼ばれています。

日本の都市鉱山に眠る資源の量は膨大です。例えば、金は6,800トン。これは世界の埋蔵量の16%にもなります。さらに銀は、世界の埋蔵量の約22%にあたる60,000トンです。この金、銀の埋蔵量は世界の年間消費量の3年分に相当します。それ以外にも、都市鉱山にはレアメタルと言われる価値のある物質が多数埋蔵しています。そう考えると、トータルの資源量だけを考えれば、今や日本は資源大国であると言えるのです。しかし天然鉱山と異なり、これらの都市鉱山は消費者に分散してしまっている点に大きな違いがあります。

また、都市鉱山の十分な活用のためには2つの問題があります。1つは分散している廃棄物をどのように収集するのかについて、法整備などを含めた社会システムの問題、もう1つは低コスト、低エネルギーで目的の物質を取り出すための技術の問題です。

固体廃棄物から有価物を
分離・選別・剥離・粉砕

剥離する粉砕技術の研究を行っているわけですね。具体的に教えていただけますか。

所 まとめて言うと「有用金属を分離・選別・濃縮する技術開発」なわけですが、目的とする有価物、

科学の
峰々 105

取材日：2020年6月18日
東京科学機器協会会議室

早稲田大学 理工学術院 創造理工学部環境資源工学科 教授
ところ ちはる

所 千晴 先生 に聞く
経済と資源循環型社会の
両立に向け、都市鉱山に眠る
有用資源を活用 上

聞き手：梅垣 喜通 日本科学機器協会 広報委員長
西岡 光利 “ 広報委員
岡田 康弘 “ 事務局長
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

所 千晴 先生のプロフィール

1998年 3月 早稲田大学理工学部資源工学科卒業
2000年 3月 東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻修士課程修了
2003年 3月 同 博士課程修了 博士(工学)
2004年 4月 早稲田大学理工学部 助手
2007年 4月 早稲田大学理工学術院 専任講師
2009年 4月 早稲田大学理工学術院 准教授
2015年 4月 早稲田大学理工学術院 教授 ～現在

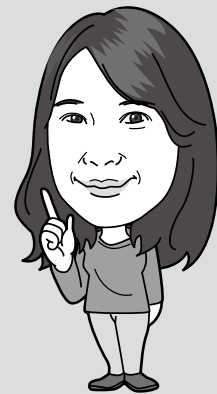
[兼務担当]

2014年 4月 大阪大学接合科学研究所共同研究員 ～現在
2015年 4月 産業技術総合研究所共同研究員 ～2018年3月
2016年 9月 早稲田大学創造理工学部教務主任 ～現在
2016年10月 日本学術会議第三部会員 ～現在
2016年11月 東京大学生産技術研究所特任教授 ～現在
2018年11月 早稲田大学ダイバーシティ推進室長 ～現在

[所属学協会]

資源・素材学会(元粉体精製工学部門委員会委員長／元理事)
環境資源工学会(理事)／粉体工学会(理事)
化学工学会(理事・男女共同参画推進委員長)
日本化学会／廃棄物資源循環学会／日本エネルギー学会
日本LCA学会／エコデザイン推進機構(理事)
日本粉体工業技術協会／日本工学アカデミー

委員歴：経済産業省中央鉱山保安協議会 委員
経済産業省産構審自動車リサイクルWG等 委員
環境省 各種委員／JOGMEC 各種委員
川崎市汚染土壌処理施設等 専門委員
Advanced powder technology, Minerals, editor 等



産学官との連携

つまり金属など回収したいものを高い純度で取り出すためには、様々な手法をミックスさせます。

例えば携帯電話の基板があったとすると、最初のステップはバリバリと破壊して、色んな部品と部品を分離させるところからスタートしなければいけません。そこから、ふるいにかけて大小の大きさに分けたり、磁力を通すものとそうでないもので選別したり、電気パルスで選別したり、イオンの特性で選別したりなど、物理的な分離技術と化学的な分離技術とをベストミックスして分離していくわけです。

そして、どの段階でも、省エネルギー、低コストで行うことが出来ないと、現実的に活用出来る技術にはなりえないわけです。

まず、バリバリと破壊する段階ですが、例えば携帯電話の基板にやみくもに力を与えても、樹脂部分とそこに接合されている銅線部分が解離するわけではありません。物と物がくっついている異相境界という境目に、どうエネルギーを集中させて破碎するかがカギになります。

物が壊れる時は、欠損や空隙などの弱い部分から壊れ、その応力が伝播して壊れていきます。その時は同時に元に戻ろうとする変形の力が働きます。その両者の兼ね合いを考えてコントロールすることが必要で、応力伝播の速度を変えたり、変形する前に衝撃波という早めに圧力をかけることで壊したり、逆に十分に変形させたうえで、じりじりと壊した方が良い場合など様々なあるわけです。

一般的に人工物は分かりやすい

界面を持っているので衝撃波によって速めの圧力をかけて割るのが良いとされています。一方、自然の鉱石は、やはり自然に出来たものなので定型パターンもないのですが、よく見ると細かい穴がたくさんあります。その空隙をゆっくりと押しつぶす、つまりゆっくりした応力をかけて圧縮粉碎することで効率的に分離できます。これはあくまで一般論なので、対象物ごとに様々な工夫が必要です。

そうして破碎してできた物の大きさは様々で、10mm程度の物もあるれば1μmと小さい物もあるわけですが、次の段階として、大きさごとにどんな物理選別技術を使った方が選別しやすいのかということをひとつひとつ検証し、ある程度の傾向を明らかにしています。選別の一部をお話すると磁性や比重での選別、渦電流選別、浮選、蛍光X線ソーティングなどで、大きさや対象物の特性によって使い分けます。

携帯電話や家電の基板からは、どんな元素が分離できるのでしょうか。

所 廃電子基板からは銅、金、さらに工夫すればレアメタルのタンタルやタングステンなどが回収できます。既に社会実装されているもので「ドラム型衝撃破碎機」というものを開発していて、この破碎機に入れることで製品からの基板脱離、部品剥離を達成できています。先程お話した、異相境界に効率よく力かける仕組みを活用した装置

になります。

これまでに基板から部品剥離をしないで銅を取り出そうというステップはあったわけですが、このように部品剥離を行うことでより多くの種類の金属を非常に効率よく回収できるようになります。また、部品剥離をすることで、その後のステップとして行うソーティング・比重選別・渦電流選別・磁性による選別などの精度も良くなります。

基板以外の都市鉱山には、どのようなものがあるのでしょうか。

所 リチウムイオン電池や太陽光パネルも都市鉱山です。

まずはリチウムイオン電池についてお話しします。リチウムイオン電池からはコバルトやニッケル、銅などが回収できます。リチウムイオン電池は破碎の前に安全のために加熱処理をするのが一般的です。液系リチウムイオン電池は電解質が可燃性で爆発する危険性があるためです。そのため現在は固体のリチウムイオン電池も開発されています。

その加熱処理を、有用な元素を分離しやすくなる方法で行えないかと研究を進め、加熱の昇温速度を緩やかにすることで大変効率が高くなるという成果を得ました。従来の加熱時は毎分30℃上昇させていましたが、毎分2℃でゆっくり昇温させることで、回収したいコバルトの粒が大きく成長したのです。これがなぜ良いかというと、次のステップで磁性によって選別できるサイズにできたためです。具体的に言うと

産学官との連携

100μm程度の大きさに成長します。また、緩やかに昇温させることで、従来の加熱では脆くなりやすかったアルミニウムが脆化しにくくなり、ふるい分けのみの簡便な方法でコバルトからアルミニウムが分離できるということも分かりました。アルミニウムはコバルトやニッケルの分離回収の邪魔になりますので、それによってコバルトの回収率が大幅にアップできました。

太陽光パネルについても教えていただけますか。

所 太陽光パネルは、ガラスの表面に金属線や樹脂がくっついていて、これらを別々にしないとガラスもその他の金属についてもうまく循環できません。

そのため、機械的な剥離で、金属などガラス以外のものがくっついていて表面だけをうまく削り取るような粉碎モードを適用します。それによって高純度なガラスを約90%回収可能になりました。今後、廃棄が増加すると予想される太陽光パネルの処理法の1つとして期待しています。

この粉碎モードは表面粉碎と呼ばれますが、ほかにも表面が汚染された土壌洗浄などにも有効です。

ここまで、どのような応力モードを使い分けて機械的に分離するかをお話しましたが、リチウムイオン電池や太陽光パネルの資源分離には続きがあります。それは電気的な方法を用いることで、機械的な分離のみでは限界がある段階から、もう一歩進められるのです。

電気パルス波で絶縁体と導電体を効率よく分離

電気的な分離方法について教えてくださいませんか。

所 普通の電気でなく「パルス波」というものを使います。パルス波はエネルギーを貯めておいてナノ秒からマイクロ秒の短い時間に集中して作用させるものです。つまり同じ総エネルギーでも短時間に作用するので非常にパワーがあり、高い仕事量が得られます。

例えば水やプラスチックなどにパルス波を作用させると、絶縁破壊を起こし、電気が通らないところはプラズマ化します。プラズマが出るということは、すごい勢いで気化しているので衝撃波が出ます。この衝撃波を使って対象物を破碎するわけです。

この電気パルス法は、絶縁体と導電体が混在している物の分離するのに非常に優れています。絶縁体だけが壊れ、導電体は無傷で回収できるのです。

その一例がリチウムイオン電池の「正極材」です。ここにはコバルトやニッケルなど経済的に価値があるとされる元素がアルミ箔に塗布される形で使われています。しかし、アルミのような箔状の物は機械的な分離が非常に難しいのです。

そこで電気パルスを流すと、アルミ箔は導電性なので非常にエネルギーが高い大電流が流れ、界面に熱が発生します。すると、アルミに接着剤で塗布されていたコバルトとニッケルがものすごくきれいに剥が

れ、また、化学的な組成にもほぼ変質がありません。純粋な元素に戻すことなく、そのまま電池の材料に使えるかもしれない言うほどきれいに取り出せます。これは新しい資源循環のループを作るということで、今、非常に力をいれて取り組んでいる大きなプロジェクトの1つです。

従来は、焼いたり溶かしたりなど様々なことが試行錯誤されてきましたが、この電気パルスによる分離は取扱が簡単で、省エネ効果があります。

素晴らしいですね。太陽光パネルの続きも気になります。

所 太陽光パネルは、先ほど機械的な破碎でガラスを取り出せることを話しましたが、その残りは樹脂に金属線が埋まっている物になります。銅、さらには少量ながら銀などがあるのですが、実はここから分離するのは、かなりやかいでした。なぜかと言うと、機械的な破碎を行おうとしても非常に硬い樹脂の中に金属があるので刃が負けてしまします。また、金属を取り出すために大部分を占めている樹脂を燃やそうとするとフッ素を微量に含んだ大量のCO₂が出てしまうのです。

そうした問題点を解消出来たのが、金属線だけに電気パルスを与えることでした。電気パルスが金属だけを溶かし、それらを粒子として回収できたのです。それは「細線爆発法」と言い、樹脂はそのまま金属だけを溶かす方法です。従来、樹脂を溶かそうとしていたア

産学官との連携

プローチとは逆の発想ということです。これにより銅線の銅や銀を粒子として単体分離させて回収することに成功しました。

この手法は個人的にも色んな可能性を持っているように思います。私は面白いと感じてJSTの未来社会創造事業にも採択してもらい、5年間のプロジェクトとして現在進行中です。

また、電気パルス波による分離は自然の鉱物にも有効で、例えば石炭は絶縁体と導電体が混在しています。石炭の黒い部分、つまり使いたいと思う部分は導電性で、他の不要な箇所は石英などで絶縁性ですので、パルス波でうまく分離できます。

叩くと化学反応が起きる
メカノケミカル反応

都市鉱山に使う分離の技術は、天然の鉱石にも共通して活用できますね。

所 おっしゃる通り、選鉱の技術の大元の考え方は天然鉱石も都市鉱山も共通するものです。資源の安定供給には、やはり鉱山からの1次資源と、都市鉱山という2次資源とのベストミックスが必要です。

天然鉱石からの分離濃縮も色々と研究していますが、面白いものにメカノケミカル反応という現象を応用した分離技術があります。「メカノ」というのは機械のことです。機械的な作用力をかけていくと、ただ粉砕するだけでなく、化学反応を起こすことができるというちょっと面

白い現象です。これが良いのは、機械的な力をかけながら破碎しているので、結晶が歪んで反応しやすくなっているところで化学反応を起こさせるので、効率が良いのです。これが難処理化している鉱石から高効率に有用元素を分離濃縮するのに役立つのです。

例えば、レアアースのひとつであるセリウムやイットリウムは、アフリカなどにたくさん埋蔵しているのですが、難処理すぎるためにあまり利用されていません。そのままの鉱石に対して酸をかけてもセリウムやイットリウムが溶けてこず、その後の分離精製がしづらいのです。

しかし、セリウムの鉱石にメカノケミカル反応を起こさせるために叩きます。そうするとセリウムの原子の格子が歪んで欠損ができ、電子が動きやすくなってセリウムに還元反応が起こります。すると還元したセリウムは酸に溶けるようになるので、純度の高いセリウムだけを回収できるようになります。セリウムを取り出せる浸出率は通常17.1%だったのがメカノケミカル処理後は100%になります。イットリウムも同様に、苛性ソーダ粒と一緒に叩くとメカノケミカル反応を起こし、溶けやすくなります。こうした反応が粉砕をしているだけで選択的に起きてくれるわけです。

また、メカノケミカルは銅鉱物にも有効です。銅藍どうらんと呼ばれる見た目にも美しい鉱石がありますが、これは硫化銅です。これが強い粉砕によって結晶構造が破壊されて非晶質の硫化銅になります。そうすると表面が活性化して取り出しやすく

なるのです。

さらに、プラスチックのリサイクルにも役立ちます。プラスチックにはシュウ素などの添加物が入っていることで、リサイクルの効率を高める妨げになっているのですが、プラスチックを叩いているだけでメカノケミカル反応が起きて、シュウ素を取り出すことができます。

実に色々なアプローチがあるので
すね。

所 固体のものを固体のまま分離するというのが省エネの面からも重要であり、またそれが私の研究で追求しているところでもあります。こうした分離の技術を高度化するためには固体分析の高度化も大事で、分析面の研究も色々行っています。

分析研究の1つで、MLA (Mineral Liberation Analyzer) 分析というものでは、反射電子像と特性X線解析を組み合わせで分析します。これにより、天然鉱石の中でどのような元素がどのような状態で存在していたり、くっついていたりのがμmの単位で分かり、分離するにはどうすれば良いのかという考察ができ、分離を行った後での成果も正確に把握することが出来るわけです。

また、XAFS分析というX線吸収微細構造分析というものもあります。これは輝度が揃ったいわゆる質の高いX線を照射することで、どのような元素が、どういう位置に、どう配置しているか、原子レベルで固体分析できるというものです。

産学官との連携

残り物である「スラグ」が
将来の宝庫になる可能性

高度に分析できるからこそ、分離技術もより高度化が進められるということですね。

所 実は、こうした都市鉱山からどこまで元素を分離して回収するかという問題もあります。今までお話したような技術で、非鉄精錬して金など有用な元素を取った後に、やはり残渣はあります。これを「スラグ」と言いますが、スラグは圧倒的に供給過多なのです。スラグにも金属などまだあるのですが、取り出すのが困難でコストが見合わないのです。廃棄物から金や銀などを取り出すほど、その残り物であるスラグもどんどん増えてしまします。

そこで、スラグからさらにマグネタイトという鉄の材料を取り出す研究も行っています。簡単に言うと、ゆっくりとした冷却である徐冷処理を施すことで、スラグ内のマグネタイトをより大きな結晶に成長させ、磁選によって選択的な回収を可能にできます。その他、スラグを使ってCO₂を資源化するというプロジェクトも走り始めています。

今までCO₂を地下貯留という試みが言われていたのですが、その一歩先に踏み出して資源にするというものです。これはNEDO*も目標として掲げているものです。CO₂から炭酸塩を取り出し、コンクリートやアスファルトを作る時に用いる骨材にしようといった試みです。

*NEDO：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

これまでゴミだったものが資源になる、つまり宝になる、そして地球環境にも貢献するということですね。

所 そういうことになります。また、話してきた破碎や分離を行う時、物がどのような挙動をとるのかという粉体シミュレーションをコンピュータで行っています。色々な角度からシミュレーションしていて、例えば衝突の時にどんな挙動をとっているのか、その時に各粒子と壁面との間の衝突による作用力はどうなっているのか、あるいは比重選別を行おうとした時に軽粒子と重粒子はどのような挙動をとるのか、磁選の際はどうなるのかなどをコンピュータ上でシミュレーションします。

最初に基板をバリバリと破碎することからスタートするということを話しましたが、破碎はドラム型の装置内で行うので内部の様子を実際には見られませんが、シミュレーションで分かるわけです。

その結果をもって装置の最適化なども行えて、より精度の高い分離ができるように応用するということです。

少し話が変わりますが、粉碎の逆の造粒も大切な粉体の操作の1つで、それもシミュレーションで再現しています。鉄鉱の操作で、炉を使う時などは必ず造粒が必要になります。

コンピュータでのシミュレーションにより、実際に機械を動かして試行を重ねるよりも大変な省エネになりますね。

廃水の中にも資源あり！

先生は固体分離に加えて、廃水処理も研究されています。排水についてお聞かせいただけますか。

所 廃水にはそのまま環境に戻すと有害となるものが色々含まれていることはご存知の通りです。私は鉱山廃水や工業廃水を対象としてきました。そこにはヒ素、セレン、クロム、ホウ素、フッ素、カドミウム、亜鉛といった無機有害元素が含まれているので、これらを高効率に処理する技術を研究してきました。

ここでも固体分析を非常に重要視しています。固体というのは汚泥です。水自体の分析は行っている方が多いので、廃水処理をした後の残渣である汚泥を観察することによって、処理による除去の効率化を改善するアプローチに力を入れてきました。

具体的に言うと、固体側に有害イオンがどうくっついているかを分子、原子レベルで調べることで、よりくつきやすい環境材料の開発につなげることです。

例えば、グリーンラストという環境材料は、二価と三価の鉄が両方入っていて還元力を持っています。六価クロムや六価セレンのように、還元して除去をしなければならない物に対して非常に高い除去能を示します。さらに鉄というごくありふれた物でできているので非常に安価でもあります。

また、廃水から回収できる有用資源もあります。そのひとつがフッ素です。フッ素はリチウムイオン電

