科学機器 No.866 2020・8

科学の峰々 105

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
所（ところ） 千晴（ちはる） 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 下

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㈱　安井久雄）

取材日：2020年6月18日
東京科学機器協会会議室

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

科学機器 No.866 2020・8

ピアニストを目指しながら そして資源循環工学の道へ

所先生は、幼い頃からピアニストを目指されて、大学院生の頃に大きなコンクールで優勝をされています。そうした芸術に強い興味を持ちながら、資源循環工学の道に進まれたというユニークな履歴をお持ちですね。

所　そうですよね、まず、いないですよね（笑）。優勝は、大学院生の時に記念と思い、アマチュアのコンクールに出てみたら良い結果になったという感じです。私にとってピアノは、私という人格形成に至った永遠のパートナーともいえる存在で、今でも時々演奏会を行って楽しんでいます。

余談ですが、ドイツの詩人ゲーテは石のコレクターだったらしく、芸術家で鉱物好きの人は結構いるようです。ゲータイトというゲーテにちなんだ名称の鉄の酸化物もあります。

前号で既にお話しましたが、私は別に石が好きだったわけではなく、社会に役立ちたいと思ったことで「環境」に興味を抱き、それを学ぶうちに鉱物や資源にたどり着きました。

実は、ピアノを弾くプロセスと研究のプロセスはとても似ていると思います。ピアニストは、過去の偉大な作曲家がどのような考えで曲を作ったのかを楽譜に残ったとても少ない情報から自分なりに解釈をして、聞いてくれる人に伝わるように表現をします。研究は、よく分からない現象を前にして、ある程度過去の人が考えたことを踏まえて自分なりに解釈をして、論文やプレゼンテーションで表現をします。そういった意味では、研究と演奏とはすごく似ていると思います。

ピアノの演奏レベルを上げるのは、本当に楽譜をパズルのように読み解く作業を重ねることです。読むほどにこういう伏線があるのだとか、作曲家が本当に色々なことを考えて楽曲を作っていることが分かります。研究で分析や考察を重ねることと通じることは多いと感じます。

演奏会でピアノを楽しむ所先生

日本の高いリサイクル意識

とても興味深いお話しですね。前号では、都市鉱山の活用や資源循環の技術面を中心にうかがいましたが、社会システムの面でさらなる活用のために必要なことを教えていただけますか。

所　日本で資源循環の動きが具体化してきたのは2000年代からです。それ以前にもリデュース、リユース、リサイクルの3Rの言葉は浸透していましたが、2000年に循環型社会形成推進基本法が制定され、翌2001年に環境庁が環境省に格上げされるなど、国としても動きを高めてきています。

もう少し詳しい背景を言うと、既に1950年代から1970年代には公害問題、その後、地球環境が問題視されてきたことがあり、更に20世紀後半からは資源貯蔵、資源の処分を含めたセキュリティ問題も顕在化していました。そうしたことを経て、21世紀が始まる頃には資源循環は世界的にも避けて通れない問題となっていたわけです。

日本は“もったいない文化”が世界で称賛されたように、ものを大切にする意識は総じて高いです。しかしながら「日本人はリサイクルに偏り過ぎている」とも言われてきました。リサイクルは不要なものを元素に戻して再利用することですが、それはコストもエネルギーもかかります。そうなると、循環されるのが金銭的な価値を持つ金属などに絞られてしまうのです。例えば、元素として価値が低いプラスチックの循環は、なかなか社会実装が進みません。

そして日本は残念ながらリサイクル業界が小規模で、ビジネス的な期待を抱く程の規模になっていません。その面では、ヨーロッパの方が大規模化を戦略的に進めています。

日本の資源循環の課題

日本の資源循環で直近の課題となっていることはありますか。

所　昨年、頭をもたげてきた大きな問題があります。これまで、プラ

スチック廃棄物のごく安易なリサイクル方法は、もっぱら輸出することでした。それまで有価で海外に引き取ってもらっていたのですが、輸出先だった中国やマレーシアなどが国内での循環がうまくいっていないと判断し、受け入れをストップしたのです。それはチャイナショックと言われ、ニュースにもなりました。その結果、日本に“ゴミ余り”の状況が生まれていますので、急いでリサイクルのサプライチェーンを構築し直さないといけないわけです。

言い換えると、中国との問題、グローバリゼーションの問題は、この分野でも顕在化しています。

中国が輸入をストップしたのは急でしたが、これほどの問題になってしまったのは日本がリサイクル産業の育成を怠ってきたからでもあります。2000年代の前半から国内でリサイクルするよりも輸出する方が簡単に儲けられるということで、長期的ビジョンはなおざりにして輸出に偏り、産業を育てなかったのです。一時期日本も育ててきていたものの、海外に人材が流出したり、有益な廃棄物を買い負けるなどして、成長が頓挫してしまったということもありました。

目先の利益で大きなツケを払わされている、と言えるかもしれないのですね。コロナ禍で資源循環の難しさは増すでしょうか。

所　そうなると思います。コロナ禍でプラスチックゴミは間違いなく増えて、8%から10%も増えたと言われています。食事のテイクアウトでプラスチック容器を大量に使っていますし、マスクをはじめ医療ゴミも増えました。今まで削減を進めていたのに10年後退したという言い方もされています。

そして、これまでは国際資源循環と言えば聞こえは良いですが、要は人件費が安いところで、あまり良くない労働条件のもとで廃棄物を資源化してもらうことに任せていました。しかしコロナ禍でこの物流が止まり、行き詰まりが生まれてしまっています。

このように、資源循環は技術面でイノベーティブなことをやらなくては進みませんし、同時に社会システムの枠組みに大変影響を受けやすいのです。

ですので、私は技術面の研究が専門ですが、プロジェクトは社会の仕組みを研究する社会システム工学の方とタッグを組んで行うことが多いのです。そうして俯瞰的に問題を見て解決を探る政策提言などを行い、レポートなどで報告しているのです。

世界と競争するために求められる資源循環の戦略

日本の産業界を資源循環の面から見た時の課題は、どんなことでしょうか。

所　製品を供給する動脈産業、それを回収して活用する静脈産業の連携が大切であることは、ずっと課題とされてきました。しかしそれが進んでいません。なぜかというと、そのひとつには動脈と静脈を循環させる円が、実は消費者で一回分断されることにあります。

そのように消費者を挟むため、製品がゴミとして出された時に、製品や使用した履歴などの情報が何もないまま、モノだけが静脈産業に流れてきます。これですと、リサイクラーは製品のそもそものコンセプトやどのように使われたのか分からないままなので、分離に大変な手間がかかってしまいます。そうした情報があると、今より簡単に分離出来て、格段に効率よく金属をはじめ有用元素が循環出来ると考えられます。

つまり、製造時からゴミになるまでの、資源循環のためのトレーサビリティが作れると良いのですが、今は全くありません。ここにはメーカーの機密の問題、消費者の個人情報の問題をどうするかなど、ハードルがたくさんあります。しかしヨーロッパはこれをやろうとしています。実は、ヨーロッパ発のスタンダードを作る話し合いは何度もされているのです。

ヨーロッパで協議が進む資源循環のトレーサビリティは、やがて世界的にも影響を与えるものになるのでしょうか。

所　そうなると思います。「サーキュラーエコノミー（循環型経済）」という名を掲げ、資源循環出来る産業を活性化し、新しい形で経済を発展させようという政策を打ち出しています。それは最近ではなく随分前から進められてきたことです。そのサーキュラーエコノミーの政策の一環で、資源循環のトレーサビリティをヨーロッパ発のスタンダードにしようという協議が行われています。

これは日本にとって非常にシビアに考えた方が良い事柄です。私が懸念しているのは、以前、ヨーロッパが有害物質のトレーサビリティをRoHS指令（ローズ指令）という形で定めた時に、日本のものづくり業界は、これに従うために莫大なコストをかけざるをえなくなったのです。まさにこの時と同じことを資源循環でもやろうとしているのです。

資源循環のトレーサビリティは、言わば世界的な義務が現実化すると思っていた方がよいわけでしょうか。

所　何と言いますか、それがヨーロッパのやり方と言うか戦略なわけです。自分達で世界のスタンダードを作る、それに合致しないものは認めない、買わないということです。

つまり日本は資源循環に戦略を持たないと、ものづくりをはじめ、産業界全体が弱くなるかもしれないのです。道義的な問題の範疇ではなく、そうでないと物は売れない時代に向かっていくということです。

これに対処するためには、1つには、製造現場の考え方の転換が必要になります。

これまで、ものづくりの「開発」と「循環」は相反することに捉えられていました。先端のよく売れる物を生み出す事と、資源の循環まで考えて物を生み出すことは同時に出来ない、売れるものを作るのに循環のことまで考えてられない、ということが多かったのです。

しかし今後「循環のことに配慮している製品だから売れる」、それがものづくりの強みになる社会が近いうちに来るということです。今のヨーロッパの動きを見ていると、私はその可能性はとても大きいと思います。

製造と循環の産業動脈と静脈をつなぐ役割が必要

所　実はリチウムイオン電池を生んだ研究で2019年にノーベル化学賞を受賞された吉野彰先生に今年の初めにお会いする貴重な機会がありました。吉野先生がヨーロッパで受賞講演をした後には、日本はリチウムイオン電池や太陽光パネルの使用後の循環をどのくらい行おうとしているのか、どう考えているのかを、必ず聞かれたとおっしゃっていました。吉野先生も電池のリサイクルセンターを作るといったような策の必要性に触れています。

また、日本の動脈側の製造業界にも、循環のことを考えないのはリスクになるという認識が徐々に広まってきていますが、実際にその取り組みに乗り出している例はまだ多くありません。

一方、静脈側の業界は、このような問題全体を考えられるほどの規模ではありません。つまり、動脈側と静脈側をつなぐことを誰がやるのか、という場所に空白が生まれているのです。

実は、資源循環の最後の段階で“再利用されて出来たもの”を扱う非鉄産業は、大規模で大手企業もあります。その前段階の廃棄物から分離して取り出すリサイクラーが明らかに少なく、規模が小さいのです。

そもそもレアメタルがなくては、メーカーは製品を作れなくなりますね。より取り組みが活発になる期待はあるものでしょうか。

所　レアメタルは、2010年に中国が対日輸出を停止したインパクトがとても大きくて、国もそこから備蓄を強化しました。危機意識も高まったのですが、また最近「喉元過ぎれば…」という感じにもなっています。例えば電池だったらコバルトやニッケル、超硬工具だったらタングステン、あとは磁石を作るのに必要なレアメタルなど、戦略物質として捉えて国内で循環することが非常に大切なのです。

海にもレアメタルがあることが分かってきましたが、海から採るコストは非常にコスト高です。その面から考えても、まずは国内でレアメタルを循環利用する仕組みを発展させていくことの意義は大変高いものです。皆が大切と分かっているのに、現実はなかなか進まないのです（苦笑）。

法整備が追い付いていないのはどんなところでしょうか。

所　日本は“廃棄物処理法”という

法律で、県をまたいで廃棄物を動かすことが禁じられていて、保管も出来なくなっています。

例えば不要な太陽光パネルを家から外した時でも、どこかで荷下ろしするのは違法で、一気に工場や処理場に運び込まなければならないこととなっています。1円でも価値がついている有価物ならばそうはなりませんが、廃棄物になったら法の制限を受けるのです。これは不法投棄を防ぐために素晴らしい法律となっているのですが、その一方で1ヶ所に大規模に廃棄物を集めて循環処理をするようなことは出来ません。

例えばフランスのリサイクラーは、大規模に電池を集めて処理する仕組みをうまく作っていますが、同じ試みを日本でやろうと思ってもこの法律の壁があります。

非常に良い効果を生んできた法律ですが、資源循環の概念がない頃に作られたものと思われるので、その見直しが時代と共に必要になったと言えるでしょう。

産官学一体での資源循環確立のために多様な活動

まさに産学官一体で戦略を持って取り組まないと、製造業の競争力に直結する問題ですね。所先生は日本学術会議で最年少の会員でもあり、その他、大学外でも数多く活動されて、色々な働きかけも行われていますね。

所　日本学術会議は内閣府の諮問機関でもありますので、お話してきたような事についても政策提言などを行ったりしています。最年少会員ということで入れていただいていますが、正直なところ、かなり年齢が上の先輩方の中に混ざって活動させていただいています。日本学術会議は色々な活動をしていますが、ひとつに毎月出している「学術の動向」という雑誌があり、なるべく市民にわかりやすい発信をするように心がけています。

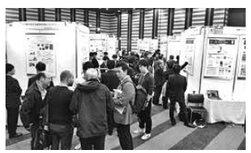
また科学技術振興機構でもレポートを報告したりなど、色々な提言をその他の各所でも行っております。

所先生は、早稲田大学オープンイノベーション戦略機構での研究もされています。こちらについて教えていただけますか。

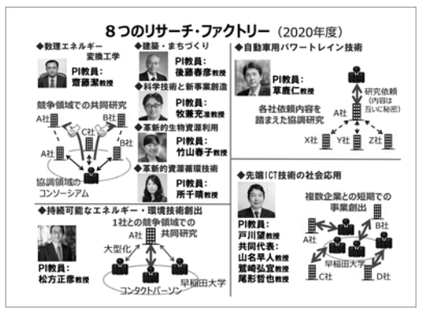
所　同機構はまさに産学連携を図るために設立されたものです。社会実装の専門家を企業から招くなどして、産学共同研究を一手に引き受けるファクトリーになります。

産学共同研究の仕組み作りは、実はこれまで各教員が手弁当で数多くやってきたようなことです。それが機構によって、大学として様々にバックアップしてくれるようになりました。交渉事なども大学のスタッフが行ってくれて、研究者は研究に専念できるように配慮されているので大変助っています。8つほどのファクトリーがあり、バイオや街づくりなどあるのですが、私は2020年度から同機構内に「革新的資源循環技術研究所」ファクトリーを立ち上げました。また大学内では光栄にも“次代の中核研究者”に選んでいただきました。

大学で資源循環の研究を重要に思ってもらえているのは非常に嬉しいことです。そこには早稲田大学の歴史的な背景もあるのかもしれません。創設者の大隈重信氏の思いが反映されていて、私立の大学では珍しく創立当初から理工系の学部があります。私は入学後に聞いて知りましたが、大隈氏は義足で、当時は義足を外国のエンジニアに頼んで作ってもらっていたそうなのですが、そういった自身の体験もあり、日本が発展するために理工系は非常に重要な学問でした。そして私に関係してくる鉱山や資源のことも、創立当初から重要な分野に位置づけていたそうです。



早稲田大学オープンイノベーションフォーラム2019会場風景



2020年度 オープンイノベーション機構内の8つのファクトリー

産学官との連携

小・中・高校生向けの理科実験教室は大人気!

所先生は、東京大学でも特任教授として活動されていますが、どのような活動をされているのでしょうか。

所　本所属は早稲田大学ですが、週1で東京大学の生産技術研究所の特任教授として、JX金属の寄付講座でアウトリーチ活動をしています。つまり資源循環工学のことを外部の方々に広く伝えていくのが私の役割です。シンポジウムや講演会などを大人から中高生などまで幅広い方々を対象に行っています。この分野の重要性を外に伝えていくことは、私自身も非常に勉強になっています。

また、今年はコロナ禍で開催出来ないのですが、早稲田大学では夏休みに小中学生向けの科学実験教室である「ユニラブ」を開催しています。1988年の第1回から30年以上続いていて、当初は近隣の小中学生対象でしたが、今は日本全国から参加者が集まり、いつも予約がすぐに満員になるほどの人気イベントになっています。ユニラブは2年前に文部科学大臣賞をいただきました。またJX金属の寄付講座でのアウトリーチ活動でも同賞をいただき、とても光栄に思っています。

先生が日本の理科教育について、感じていることがありましたら、お聞かせください。

所　あまり批判的なことを言うべきではないと思うのですが、高校生に工学教育をしていないのがもったいないと思います。理科教育はしているけれど工学教育をしていないので、勉強していることがどのように世の中に役に立つのかを想像しにくいように思います。

大学の学部を決めるにも、理学部と工学部での学びがどう社会実装につながるのかをイメージ出来た方が勉強も楽しくなるだろうと思います。

また、アンケートをとると、小学生までは理科好きな子供がものすごく多いのです。しかし中学生頃から少し雲行きが怪しくなり、数学や理科が嫌いになる子が増えます。さらにその傾向は女子に強いのです、小学生までは男女差はないのですが…。

その理由のひとつに、外の大人が既に持っているイメージで雑音を与えていることもあるのではないかなとも思っています。冗談のような冗談でもない話ですが「理系は稼げないよ」というような…。

世の中は変わっているのですけれど、子に進路の情報を与える親や先生は、自分たちが育った時代のイメージを持っているからだと思います。

今、理工学部全体で女性は2割か3割です。これでも少し前に比べると大変増えました。

私が研究する資源工学の分野は、理科も好きだけど社会にも興味があって、役に立ちたいと思っている人には向いていると思います。「とにかく役に立ちたくて、そのためには何でも勉強する気がある」という責任のある人は、誰でももってこいでしょう！

小中学生が現役大学生といっしょに科学実験を体験できる「ユニラブ」風景

科学機器 No.866 2020・8

コロナ禍でのリモートはメリットがいっぱい!

コロナ禍で研究や大学での活動、授業、その他でもリモートの形態が増えたことと思います。どのようなメリットやデメリットを感じていますか。

所　私は比較的良い面も感じています。これほどに子供や家族と一緒に過ごす時間を持てたのは初めてではないかと。朝ちゃんと送ってあげて、帰ってくる時に“おかえり”と言える生活があったのだなと、気づかされました。

リモートは慣れてしまうと案外出来るということを皆さんも感じたと思います。最大のメリットは、やはり移動の時間を他のクリエイティビティに使えることと、集中できることだと思いました。会議も発言も集中するので、会議時間は短くなったと思います。

そしてリモートでのミーティングは序列がなくなったことも良い方向に作用していると思います。座る位置や顔色をうかがうこともなく、ビデオ会議上では学部長も総長もフラットです。ビデオ会議になって発言が増えた方々もとても増えました。学生でもそれは同じです。これまであまり発言することがなかった若手や地位的に下だった人が、思ったよりもイキイキと建設的な発言をされることが多くありました。

一方でデメリットは、初対面の方との会話や新しい出会いを生みにくいことだと感じました。顔を見知ったメンバーとの会議はリモートが非常に有用ですが、何か偶発的な新しい出会いや新しい発見は生みにくいと思います。コロナ禍で閉じこもる時間の中で、偶発的に起こっていた何かを逃していた可能性はあるのかなと思います。

結論としては、やはりうまく組み合わせていくことだと思います。私の場合、研究室のメンバーとの定期的なミーティングなどは、このままリモートで良いかなと思っています。

所先生がこれから取り組みたい研究や今後の構想についてお聞かせください。

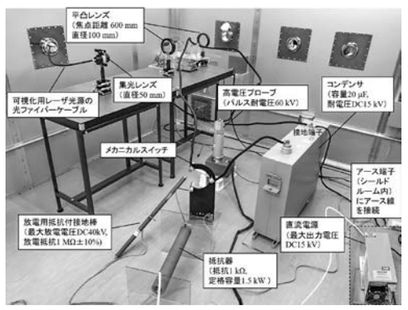
所　私は都市鉱山はじめ、固体の状態で元素と元素を分離していく、そのために異なった物質同士の界面に沿って、いかに割るか、壊すかという研究ですが、その手法は機械的なものから電気的なもの、それを速度制御したものなどバラエティが増えてきました。

また、薬剤を添加したり、熱を加えたりすることで、さらに有効性が上がる組み合わせも増えてきました。そのようなことでいかに効率よく壊していくかをこれからも進めていきたいですし、プロジェクトにしたいと思います。

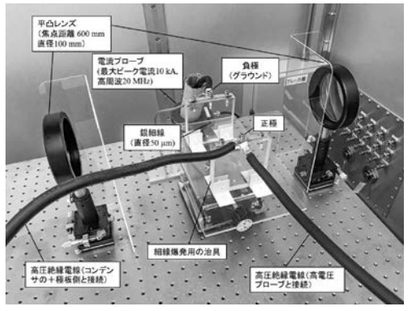
そのために体系化することがすごく大事だとも思っています。実は壊すサイエンスは、物を作るサイエンスに比べると体系化されていません。理由は、壊す現象はとても応用性が強いからということでもあるのですが、そこにはきちんとしたサイエンスがあります。それを体系化するには、作る方の側の方々と強く連携していかなければいけないと思います。技術面の研究では、こうしたことに尽きます。

そしてもう一方で、より社会実装を進めていきたいです。「製品の開発時から使用後までの環境循環配慮がされている世の中に変えていきたい」と考えています。製品を作ること、循環のこと、2つを両立していくことを日本のものづくり産業の今後の強みとしてほしい、ここを体系化することがすごく大事だと思います。

パルス電源(LIB・PV用)と可視化実験装置



銀細線爆発の治具と
光学系(シャドウグラフ法)の観測部



「製品の開発時から使用後までの環境循環配慮」がものづくりの強みになる時代が来ています

新規事業創出・共同研究のご相談は、
早稲田大学オープンイノベーション戦略機構　https://www.waseda.jp/inst/oi/

所先生の「つくる技術と同時に、利用後の仕組みについても考えることが重要」というお考えは、伊藤忠商事の元会長で、過去に中国大使も務められた丹羽宇一郎氏も著書で引用されています。今後、日本が競争力を持つための大きなテーマのひとつになると感じました。

所　ものづくりの材料は、今後ますます複雑化していくと思いますが、それと同時に、私は経済的に価値の高い元素を使わない方向にいくのではないかと予想しています。そうなると、今のように元素の価値だけで循環を捉えているのでは立ち行かなくなる懸念があります。プラスチックは元素としての価値が低いのでゴミとして溢れているのですが、同じことが全部の材料に起こり得るわけです。

ですので、私としては界面を割った時に、元素レベルだけではなく「その材料の機能を保持した状態」で分離が出来て、循環出来る分離技術を実現したいと考えています。そうなれば、プラスチックゴミのようなことが避けられますし、価値のある金などだけが循環されて他が放置されるようなことが、なくなるのではないかと思います。

最後に、私ども科学機器協会や科学機器のビジネスに関わる読者の方に、ご意見やご提案などいただけますか。

所　良い研究は、まず良い分析が出来ることがあります。良質の分析データを持っている研究室から、良質の研究や強い研究は生まれます。それはデータを得ることを可能にした機器があるからにほかなりません。汎用的な機器だけでなく、研究者がお願いすることに対してのカスタマイズが非常に素晴らしく施された機器が、良い分析データを生み出しています。

分析から得られた知見からアイディアが生まれ、そのアイディアを実現するために科学機器が必要です。その時その時に応じてカスタマイズ出来た機器が手元にあることが研究を非常に強いものにします。実は過去のノーベル賞受賞者を見ても、ほぼ必ず自分のための機器を持っていらっしゃいます。

例えば、私たちの研究室は電気パルスの実験で非常に苦労していて、色々なところに相談しながら、手作りで試行錯誤しています。そのような機器はとても大事なのです。ですので、丁寧に作り込まれた科学機器の良い開発が、良い研究の成果を生み出すことは間違いないことです。これからも様々な面でご協力をいただけたらと良いと思います。

経済と資源循環型社会の両立に向けて、ますますのご活躍を期待しております。

次号「科学の峰々」では、
東京農工大学 工学部 化学物理工学科
山下善之先生にお話を伺います。

所研究室のメンバーと所先生(前列中央)