

# 多孔性配位高分子で 気体を吸着・分離して再資源化

多孔性配位高分子 (PCP) とは、気体を選択的に吸着・分離する機能を持つ新材料である。例えば、工場などから大量排出される一酸化炭素を選択的に分離し再資源化できる。この PCP を用いてさまざまな気体を回収して資源化する研究開発を、ACCEL 研究代表者で京都大学物質-細胞統合システム拠点長の北川進教授らが進めている。

## 特定の気体分子だけを吸着する 新材料 PCP

私たちの身の回りには多くの気体や液体が存在する。中には悪臭を放つものもあり、消臭や浄化のために、内部に多数の小さな孔が空いた「多孔性材料」が古くから用いられてきた。活性炭はその代表で、約 3500 年前の古代エジプト時代から水の浄化などに使われていた。約 260 年前には結晶中に一定サイズの空隙を持つゼオライト (沸石) が発見された。その後、さまざまな性質を持つゼオライトが人工的に作られ、分子の吸着や分離のほか、触媒などとしても用いられている。

北川さんは、東京都立大学の教授だった 1990 年代、金属イオンと有機分子が交互につながってできる「配位高分子 (一般には「金属錯体」という) の合成に取り組み、均一に孔の開いた構造を持つ配位高分子を自由に設計して作る技術を開発した。

ゼオライトの孔は大きさが不揃いなため、配位高分子の均一な孔を利用すれば、ゼオライトよりも優れた吸着材が作れるのではないかと北川さんは考えたが、1 つ大きな問題があった。配位高分子は、合成する過程で孔に入った溶媒 (合成に使った液体) を取り除くと、つぶれてしまう。約 2 年かけて、溶媒を取り除いても壊れない配位高分子の合成に成功し、「多孔性配位高分子 (Porous Coordination Polymer、PCP)」と名付けた。

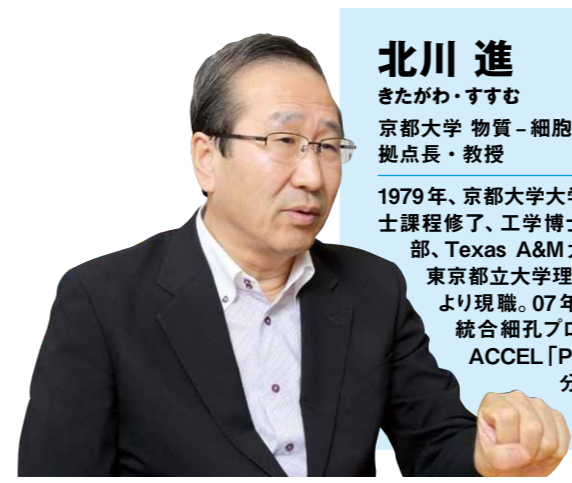
世界的に高い評価を得たこの研究成果は ERATO 北川統合細孔プロジェクトでさらに発展した。ERATO では配位高分子を構成する金属イオンや配位子を工夫して組み合わせることで、一酸化炭素 (CO) や酸素など、特定の気体分子だけを選択的に吸着する PCP を作ることに成功した。CO は窒素 (N<sub>2</sub>) と物理化学的性質が非常に良く似ているので、区別して吸着するのが難しい。N<sub>2</sub> が大気中に多量に含まれることも、

分離をさらに難しくする。こうした背景の中で CO を選択的に吸着できる能力は、世界の研究者を驚かせた。また、PCP は気体を吸着・放出する能力に優れており、従来の方法に比べてはるかに小さなエネルギーで吸着・放出できることも実験で確かめられた。

## 製鉄所から出る多量の CO を 取り出して資源化する

ERATO の成果は、実用化をめざす ACCEL へと受け継がれた。プログラムマネージャー (PM) に、研究成果の実用化に豊富な知識と経験を持つ山本高郁さんを迎え、2013 年から 5 年計画でスタートした。最終的には、産業用として需要の高い酸素、CO、水素、メタンなどの気体を、空気や天然ガスなどから安価に、高効率で分離・貯蔵する技術の確立が目標である。

「北川先生の研究によって PCP が非常に優れた気体の吸着・放出能力を持つことがわかりました。次の段階ではいかに採算



**北川 進**  
きたがわ・すすむ  
京都大学 物質-細胞統合システム拠点  
拠点長・教授  
1979 年、京都大学大学院石油化学専攻博士課程修了、工学博士。近畿大学理工学部、Texas A&M 大学 Cotton 研究室、東京都立大学理学部を経て、2013 年より現職。07 年より ERATO「北川統合細孔プロジェクト」。13 年より ACCEL「PCP ナノ空間による分子制御科学と応用展開」研究代表者。



**山本 高郁**  
やまもと・たかいく  
JST  
ACCEL プログラムマネージャー  
1977 年、住友金属工業株式会社入社。2004 年、東北大学大学院工学研究科金属工学専攻博士課程修了、博士 (工学)。07 年、大阪大学招聘教授。15 年、京都大学特任教授。14 年より ACCEL プログラムマネージャー。

性良く PCP を製造するか、また、気体を吸着・分離する装置に組み込めるような形状、強度の PCP にできるかが重要です。さまざまな企業と議論を重ねながら、製鉄所で鉄鋼を作るときに大量に出る CO を第一のターゲットにしました」と山本さんは言う。

「CO は毒性の強いガスなので、余剰な CO は燃焼させて二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) にして排出します。しかし、これでは地球温暖化の原因とされる物質を大量に排出することになります。また、工業的にも世界的にも『もったいない』ので、PCP を用いて低エネルギーで CO を分離する技術を実用化し、分離した CO をメタノールなどの原料として再利用するのです。研究開始から 2 年が経過して、実験室レベルでは見通しが立ってきました」。

山本さんは、さまざまな気体を貯蔵・排出する能力がある PCP の第一のターゲットを CO に絞ったのである。しかし、実験室レベルではうまくいっても、すぐに実際のプラントに応用できるわけではない。

「当初、私から北川先生への要求はかなり厳しいものでした。当時の PCP は粉状で、摂氏マイナス約 140 度という低温でしか機能しませんでした。まずは常温付近で機能しないと、経済的にも環境を作る上でも実用になりません。また、実用化のためには構造体化したり、強度を確保する必要があります」と語る山本さんに、北川さんは「試験管レベルでうまくいっても、実用化レベルでうまくいとは限りません。山本さんの要求に何とか応えようがんばって、やっと乗り越えるめどが立ってきたところで」と言って笑った。

## 目標は混合気体から自由に エネルギーや材料を取り出す技術

最終的には、実際に使うシステムの設計・試作を行うことになるが、山本さんはこの設計・試作のベースとなる小型評価試験を開始することを計画している。試験機では、実際のプラントに使うために不可欠な耐久性や耐用性 (要求される性能を維

持する能力) を確かめ、スケールアップに必要なデータを取るのだと言う。

「最初はボンベに詰められた市販の CO などのガスを使いますが、続いて、実際に工場の排ガスを使って事前処理の方法なども検討します。製鉄所の排ガスをいきなり PCP に通すことはできないので、事前処理である程度不純物を取り除く必要があるのです。その試験結果を元に、ACCEL の最終年度には実証実験をしようと考えています」と山本さんは語った。

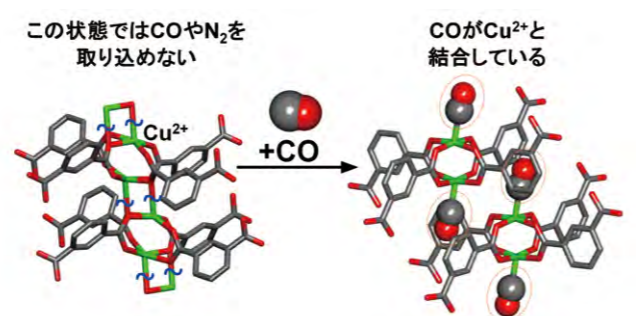
北川さんらは、PCP を使って低エネルギー・低コストで空気から酸素を分離する研究を進めている。北川さんの究極の目標は、どこにでもある気体を使うために、エネルギーをかけずに効率よく分離して、燃料や化学原料として使う技術の開発である。

PCP の将来には、限りなく大きな夢が広がっている。研究を推進する北川さんと、実用化をめざす山本さんは、二人三脚で夢につながる大きな一歩を踏み出したと言えるだろう。

PCP の模型。金属イオン (銀色の玉) と有機分子 (玉をつなぐ棒) からできている。性質の違う有機分子 (棒の色の違いで表している) を組み合わせることで、さまざまな気体分子を立方体の隙間に入れ込むことができる。

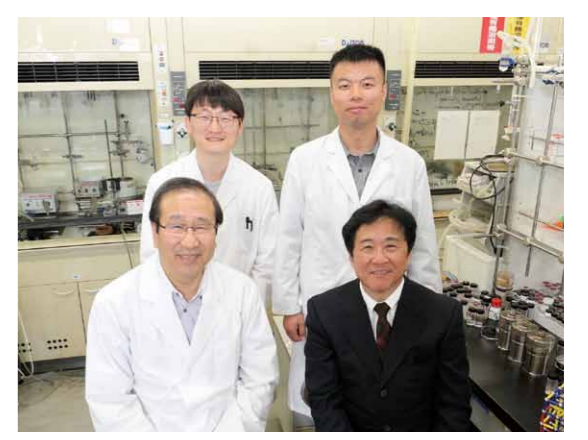
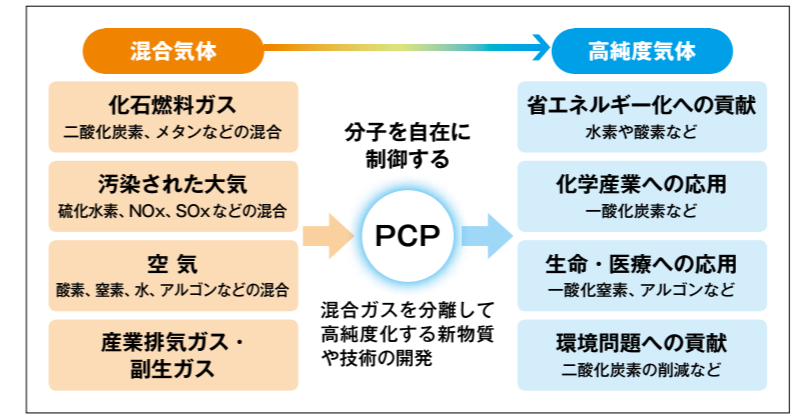


◀ CO だけを選択的に吸着する PCP。粉末では使いにくい板状にするなどの加工を施してから試験機に装着する。青い色は、使われている銅イオンに由来する。



CO を選択的に吸着する PCP では、CO を取り込む前 (左図) は銅イオン (緑棒) と酸素分子 (赤棒) が結合しているが、取り込んだ後はこの結合が切れて銅イオンが CO と結合していることがわかる (右図)。窒素分子は銅イオンとほとんど相互作用しないために PCP には取り込まれない。

## 全体ビジョン



実験室にて北川さん、山本さんと研究員。