

講演 4

夢を現実にするナノ空間材料

物質－細胞統合システム拠点副拠点長／教授 北川 進



ただ今ご紹介いただきました北川でございます。私の話なんですが、私の分野は化学です。したがって、実際には目に見えない世界をやっていることになりまして、だから、なかなか想像しにくいと思いますので、あまり詳しいことは言わずに、どちらかというところ、こういうような構図を考えていただいたらいいと思います。ということでスタートさせていただきます。

さて、2400年前に中国には荘子がありました。ほぼ同じ時期に西洋ではアリストテレスがいます。非常に不思議なんですが、荘子は、どういうことを言ったか、いっぱい言っているんですが、「無用の用」ということを言っています。

これはいろんな逸話で説明しているんですが、要は、人はみんな役に立つというものは知っているんだけど、役に立たないというものも実は役に立つんだよという、そういう教えなんです。2400年前にそういうことを言っている。まさに我々の人類の大先輩が、こういうことを言っているんですが、それをちょっと考えてみましょう。

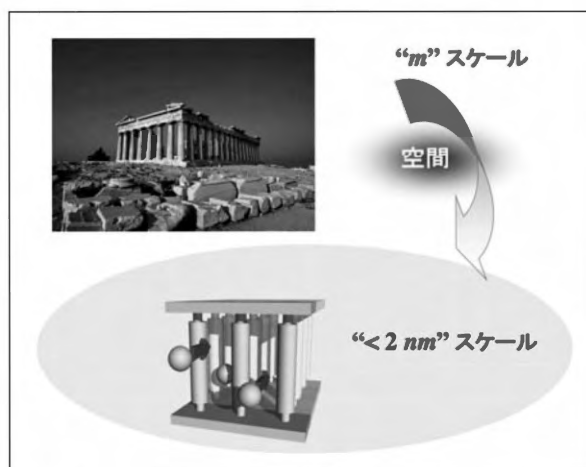
空間、すなわち何もないものというのは、それは役に立たないんですけども、それを何かする空間だと考えると実は非常に役に立つということに思いつきます。私は、そういう意味で空間というのは、単に何もない空隙ではなく機能の宝庫であると、そういうふうに考えています。

前世紀と言いますと何か古いようですが、実は20世紀の科学、分子をつくる化学というのは、まさに骨格をつくっていた化学です。空間にはあまり注意を払わなかった。いつも新しいものをつくれ、つくれとやってつくってきた、そういう化学なんです。それだけではなくて空間というのが非常に重要だということを強調したいと思います。その私がやる化学の中に空間というのを入れると、次のようになります。

ちょっとこれ、聞き慣れないかもしれませんが、配位、したがって、私のメッセージは配位ということと、それと空間というのが私のメッセージになります。

例えば、これはよくご存じのギリシャの建物です。これはメートルのスケールですが、これをナノメータースケールに持っていく、10億分の1に持っていったらどうなるかというところ、原子や分子がちょうど出入りできるような空間になります。そのとき一体何が起きるんだろうというのが非常に大きな興味のあるところなんです。(図1)

さて、その空間の化学を話す前に、ちょっといろいろな背景をお話しさせていただきたいと思います。どういうことかという、空間の化学、どのようなサイエンステクノロジーに持っていくのか、生み出のだろうかと考えたときに、実は、私たちは特別の資源を原料とせず、身の回りに多数存在するものを活用する科学技術というものに興味を持っています。



(図1)

これは、読まれた方もいるかもしれませんが、人の体というのは、炭素と酸素と水素というエレメント、元素が9割を占めています。もう一つ足りないものがある、それは何か、実は窒素です。ところが、窒素は空気中に80%あるんですが、私たちは一切利用できません。全く利用できない。ところが非常に重要です。たんぱく質の中の一つのエレメントです。

実は、窒素というのは人類にとってかけがえのないものになっているわけです。それは何かというと、食料にかかわるものです。食料を生産する意味で窒素肥料は不可欠です。そういう意味で、その窒素肥料、非常に重要なんですが、20世紀の初め、世界の人口は約10億人、そして2011年10月31日、70億人となりました。イギリスで1900年初頭に非常に有名な講演がありました。クルックスという人が講演しました。クルックス管（陰極線管で後にテレビやコンピュータに使われる）の発明者ですが、要は、もう人類は生きていけない。どういうことかということ、幾ら頑張っても最高の農業をやったとしても、当時ですね、40億人分の食料しか生産できない。それはなぜかということ、窒素肥料の源は鳥のふんや家畜のふん、人間の排出したもの、そういうものなんですが、その使える肥料の限界が幾ら頑張っても40億人分。ほかはもう餓死する。ところが、今や70億人、一部餓死しているところがありますが、70億人が生きられている。

なぜなのか、実は、この空気中にある我々の体ではどうしようもない窒素を使えるものに持っていくのには、最低でもアンモニアに持っていく必要があります。アンモニアに持っていくためにはどうするかということ、実は窒素原子は手を3つ持っていて相互につなが合う、いわば三重に手をつないで2つの原子が結合しています。だから、この結合を切るためにはエネルギー的にはこれだけかかるんです。一方、酸素はもうちょっと少なくてよい。だから、酸素というのは比較的使えるわけです。窒素は全く使えないということになるわけです。

ではどうしているのか。実は自然界では、例えば植物、クローバー、その根っこにバクテリアがいます。根粒バクテリア。この根粒バクテリアというのは、ニトロゲナーゼという窒素をアンモニアに持っていく、そういう機能を持っています。これ非常に面白いのは、

根粒バクテリアは窒素をアンモニアにしています。

一方、このバクテリアを持つ植物の葉っぱは、この反応をさせるために、バクテリアにATPという化学エネルギーをつくってあげているわけです。こちらにアンモニアをあげて、そしてバクテリアはこの成長を助けている。すなわち共生が行われているわけです。素晴らしいことです。

じゃ、植物を使ったらアンモニアができるんだから、どんどんやったらいいと言いますが、まあ考えてみてください。こんな植物が、いつも育つ耕地って、どれだけあるかというと、ほとんど地球上にはありません。この植物をもってしても人類を支えることは不可能です。

例えば、これは実際、人工的にできたアンモニアを畑に直接撒いている。日本でやったら臭いといって怒られるんですが、アメリカだからできるんですけども、こういうふうにして肥料になっているわけです。

だから、どこにでも存在するものを使って進めるサイエンステクノロジーというのは、実は我々の周りだったら、まず今考えられるのは窒素。ある意味で言ったら、現在の錬金術、ガスを有用なものに変える錬金術です。

ところが、20世紀初頭にその先駆的な業績はあったんです。実はドイツのハーバーとボッシュという人が窒素をアンモニアにまで変えるプロセスを開発しました。ハーバーはサイエンスをやりました。要するに、ある触媒で高温高压にすればできるよと、ボッシュは、じゃそれを工業生産しようというので工業生産したわけです。素晴らしいことです。

ところが、まず1点問題がありまして、それは何かというと、500℃200気圧という非常に過酷な条件で反応を行います。普通これ誰も工業化しようと思えないんですが、このボッシュは、もう爆発を何回も繰り返して、最後実用化します。まさにこれはサイエンスで、そしてテクノロジーでイノベーションが起きているわけです。

これ見てください。アンモニアの生産量、これは1950年から現在に至るまでの生産量ですけど、今1億4000万トンぐらい生産されています。工業的に、このおかげです。まさにイノベーション。

それで、これは年代に対する国のパーセンテージですが、もう2010年では中国は32%、そしてインドというふうに、どんどん、どんどんこれを生産しているわけです。

じゃ、それでいいのかというわけですが、実際そのおかげで、これ横軸は年代で縦軸が人口です。この2000年、直近のところで急激に人口は増えています。産業革命以降ですが。ちょっとこれ拡大して見ると、アンモニアの開発ができて、このプロセスができて伸びてきています。すごく貢献しています。

だから、化学ってあまり我々に関係なく、貢献していないじゃないかと思われる方は多いかもしれませんが、非常に貢献しているんです。

さて、なぜ気体の錬金術が重要かということ、まだまだ必要なんです。それは何かとい

うと、ハーバー・ボッシュ法というのは完璧ではないんです。今示しましたように、エネルギーは高温高压反応、すごくエネルギーを食う反応です。それだけ窒素は安定した分子なんです。窒素を分解させるためにエネルギーが要るわけです。

もう一つ、水素のもととは何かというと石油からとっているんです。だから、この2点が問題です。だから、どうしたらいいのかというのは自明なんですね。

エネルギーを食うプロセスは、もうどうしようもない。なぜならば、これ人口の推移ですが、もう一度お見せします。この黄色いのが発展途上国、この紫色が先進国です。先進国の人口はほとんど伸びていませんが、発展途上国はガンガン伸びてきています。これ何を意味するかというと、資源、それからエネルギー、そういうものを今までは先進国が独占してきたのが、もうすべて地球上の各国が取り合いするという、要するにエネルギーが足りない、資源も足りないと、そういう時代になってきたんです。そういう時代に対して化学はどう貢献するのかというのが大きな設定なんです。

例えば、日本は資源がほとんどありません。特に石油資源なんて全くありません。どうしたらいいのか、じゃ、もし石油代替、代わるものがあればいいんじゃないか、それは何かというと、石油をつくっている元素は何か、炭素です。それから、酸素、水素、場合によったら窒素、それ、みんな空気及び身の回り、特に日本は周りが水に囲まれていますから、水と空気です。実はできるはずだということになります。

すなわち、地下資源依存から脱却への道というのは非常に重要になります。地下資源というのは動きません。必ず領土問題が発生します。一方、気体、特に空気や水は世界にあまねく平等に存在します。確かに、水は問題があるかもしれませんが、空気に関しては全く平等です。そういう意味で、平和な地球への貢献ができるんじゃないかと。だから、それだけのビジョンを持って我々サイエンティストもファンダメンタル、基礎的な研究をやりつつ応用、そして実用化へ進める、そういう研究をする必要があるんじゃないかというわけです。

それで、もう一度フォーカスしますと、身の回りにある非常に簡単な気体分子が実はいろんなところに役に立つ、先ほど示しましたエネルギー、当然ですね。水素もそうですし、メタン、それからアセチレンとか、こういうものがそうです。環境に関わる気体の問題。それから、人類が宇宙へ行っても CO_2 と酸素と水のコントロールが非常に重要です。

それから資源、そして、我々の体にまでそのガスというのが、今まだあまりはつきりしてないんですが、どういう役割をしているか。それでも、二酸化炭素だけではなくて、一酸化窒素というようなものは我々の体にいろんな意味で非常に役に立っているということはおわかってきています。一酸化炭素でさえも、ほんのわずかな重要なということも言われています。

そういう意味で、何をやる必要があるのかというと、実はガスをコントロールする、気体をコントロールする。どうしたらいいのか、ところが考えてください、この空気中、窒

素も酸素も混ざっています。ガスというのはすぐ混ざるんです。すなわち、分離という操作が絶対必要です。

その次、ガスというのは薄いわけです。いろいろ運んだり、ためたり反応させたりするにしても、あまりにも薄過ぎます。すなわち、濃縮、貯蔵が必要です。そして、それを有用なものに変換していくという、分離、貯蔵、変換という、この3つの非常に重要なプロセスを確実なものにできる、

低エネルギーで効率よくできるということができて初めて、先ほど設定している問題点が解決していくわけです。(図2)

そのために何が重要か、実は私たちは空間だと思っています。そういう意味で、気体を自在に操るガスサイエンステクノロジー、分離、貯蔵、変換というのをターゲットにして空間を持つ材料をつくる化学というのを進めてきています。

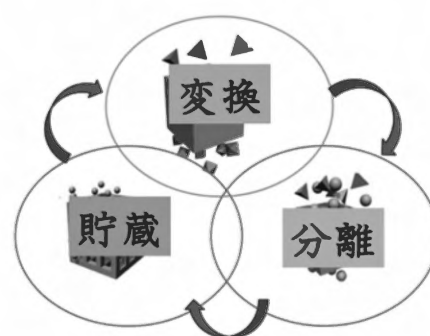
先ほど言いましたように、このような空間をこんなサイズに持っていくのにどうするかということになりますね。まず、こんな小さな空間はどういうものか？ちょっとイメージしてみます。

これサイコロ、1立方センチ、三方の辺が1センチのサイコロ、こんなふうに穴を開けたときに、この内面の表面積は、パネル1枚1平方センチですから、これぐらいです。メートル単位でいうと。これを 0.8×0.8 ナノメートルという非常に小さな、実はこのメタンが0.4ですから、この断面に4つだけメタンが入るようなサイズでつくると、この内面の表面積は2200平方メートルです。サッカー場の半分ぐらいの表面積になります。こんなに均一につくると非常に大きな表面積を持ちます。

ここに、こういうメタン分子を張りつけたら、このパネルに張りつけたときの個数に比べて100万倍、ここに張りつくことになります。すなわち、こういう材料をつくって、こういう気体分子を入れると100万倍濃縮できることになります。まだピンとこないと思うんですが、それちょっと言いますと、例えば、こういうふうに面が2つあるところに分子を入れます。両方の面が引っ張るとした場合、これで見ますと、これだけ離れていると、この分子を引っ張れるのは片面です。穴が小さくなってくると両面、または前後があれば4面、引っ張ることになります。すなわち、穴が小さいということは、分子を取り込むのに非常に有利だということになります。

そういう意味で小さなものをつくっていこうというわけですが、これ、どうやってつくる、どうするというわけです。例えば、こんなおもちゃがあります。これマグネットです。金属に対して、これつくっていきます。これをにらんで、ずうっとつくっていくと、延々

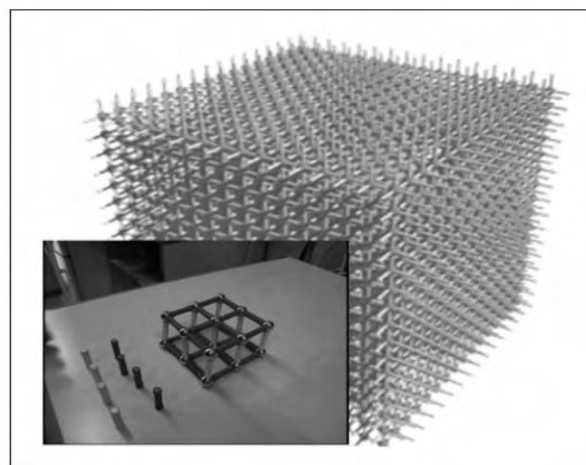
第二期 Alchemy of gases



(図2)

とかかりますね。途中壊れそうになったりして、もたもたとしたりして、なかなかできない。そういうことですね。

ところが、もしこんなことができれば、何もしないんだけど、パッとばらまくと自然にこれが出来上がる。実はこれがナノサイズの化学の世界にあるわけです。これは我々が生活している条件で出来上がると一番安定な構造です。だからそのまま使えるという、これ自己集合と呼んでいます。(図3)



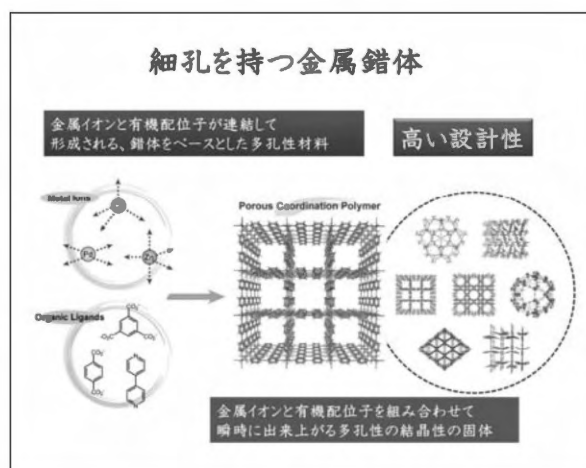
(図3)

そのために一つだけ用意するものがあります。それは何かというと、実は配位結合と呼ばれているものです。これが冒頭、私がお話ししたキーワード「配位」という言葉です。配位結合というのは、例えば水に、このプロトンと呼ばれているものがこれにつく、電子が足りないプロトンが電子の多い水のこの位置につくというのが配位結合と呼ばれています。

実は、金属イオン、Mと書きましたが、これに、こういう有機分子がつながっていくというの、これ配位結合なんです。こういう結合をうまく使おうというわけです。この結合を使うと、こういう有機分子と金属イオンをA液とB液ということでフラスコに混ぜるだけで、自動的に組み上がります。分子は既に、ここここ結合しなさいよという情報を与えられています。それは化学者が与えます。後は、そのシナリオどおり組み上がります。こういうものができる。

こういう考え方でいくと、その分子、もともとの分子に情報を与えておく、こういう方向につながりなさい、そして、それをつなぐものが金属イオンとこれの配位結合ということで、多種多様なものができるわけです。

もう一度お見せします。これは実際に私たちが合成したものです。これ一つが有機分子で、これは金属イオンです。こんなふうなことができます。非常に面白いのは、1ミクロン、1ミリの1000分の1の小さなかけらをつくったとしても、1つの穴のサイズが大体1ナノぐらいですから、ここに1000個、こんな穴があります。こっちも1000個。1000×1000は100万です。ほんの1ミリの1000分

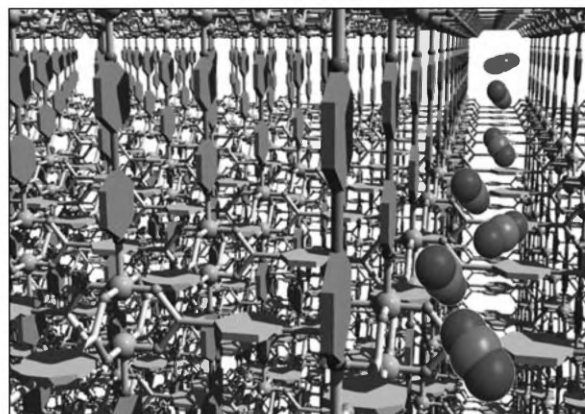


(図4)

の1の結晶を持ってきても、100万個穴を持つものが、ほんの数分で出来上がります。これが私が話している化学です。(図4)

これが有機分子です。まさに工事現場のようですが、規則正しく並んでいます。ここにいろんな、例えば、CO₂分子が取り込まれるわけです。こういうものが穴の開いた材料というふうに呼んでいます。(図5)

さて、2400年前に荘子と同じ時期に西洋にいたアリストテレス、アリストテレスは何と言っていたかという、「自然は真空を嫌う」ということを言っています。これは直感的にわかります。例えば、段ボール箱に本をいっぱい詰めて座っても壊れません。その本を全部取り出して段ボール箱に座ったらペシャッといきます。すなわち、



(図5)

要は密に詰まっているというのが非常に安定な構造なんだということです。

それでおわかりのように、私たちの構造をこれで作っても、実はつくったときは、いろんなものが入っている、それを抜いて使おうとしたらつぶれる。これは当たり前と思える。アリストテレス的には正しい、これへの挑戦が私の過去の化学のポイントでした。これはチャレンジです。

実は、幸いなことに十数年前に、こういうものを使って、コバルトというものと、こういう細長い分子を使って、こんな骨格をつくりました。これがガチガチにかみ合っています。このおかげで、実は壊れないんです。ガスを入れても、圧力をかけてガスを入れていても壊れないんです。何回でも出し入れできるということがわかったわけです。そういう意味で有機分子、何かふにゃふにゃとしたような有機分子を使っても壊れないものができるんだということを証明できたわけです。

これは、ちょっと長いんですが、多孔性というのは穴が開いているということです。配位高分子と呼ばれています。英語ではポーラス・コーディネーション・ポリマーズ(PCP)と呼んでいますが、または金属と有機でできるから金属有機骨格体、メタル・オーガニック・フレームワークス(MOF)と呼ばれています。

非常に面白いのは、この配位高分子という言葉は、実は日本人が初めて使った。これは東大の無機化学を創始した柴田雄次という先生ですが、どういうわけかフランス語で書かれているんですが、コーディネーションポリマーという言葉を使っています。それは、もう我々が使っているやつと同じではないんですが、金属イオンが幾つかつながっている。そういうものをコーディネーションポリマーと呼ぶんだという、日本人が、こういう用語でもかかわってきたというのは非常に興味深いことです。

さて、こういう穴の開いたもの、じゃ、私たちだけで初めてなのかというと、違うんです。

これちょっと、この年代に対して言いますと、古代エジプト文明、要はパピルスに活性炭、活性炭ってご存じですね。炭のようなものです。活性炭を実は医療応用、例えば、傷口のにおいを消すとか、そういうようなのに使ったとパピルスに書いてあります。

一方、無機物ではゼオライトといわれている、これは特に福島で放射性セシウムが出たときに、どういうふうにするかというので、天然のゼオライトを持ってきて、そこに吸着させるというので有名になったと思うんですが、こういう天然のゼオライトが1756年に発見されています。

人工のものは1900年代になって合成されているんですが、そういう意味でいうと、活性炭は3600歳、一方、ゼオライトでさえも250歳、我々のものはただか15歳、まだ本当にこれから人生を謳歌しようという、そういう材料です。どういうふうに実用化されるかというのは、まだわからないんですが、こういうような材料もある。

ただし、非常に活発に研究されていて、これは研究されているその報告数です。こっちが2010年です。ずうっと増えてきて、2010年には1年間にもうほぼ2500から3000報に、毎年3000報ぐらいの論文が出ているぐらいの勢いで進んできています。

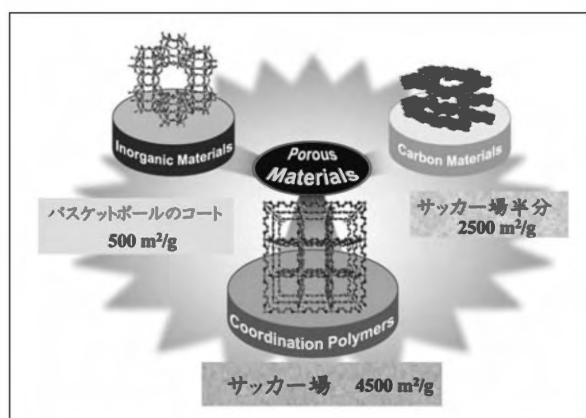
もう一度言います、この材料の特徴。ゼオライトというのは無機物でできているんですが、大体この中の表面積を足すとバスケットボールのコート程度。活性炭というのは理想的な面積とした場合にでも2500 m^2/g 。この材料は非常に軽くて、もう4500 m^2/g なんか軽くつくれるという、こういう材料です。(図6)

さて、じゃ、ということで私の化学に入っていきます。

これ、柱状の層構造です。要するに、建築物としてはいろいろあります。これどうやってつくるかというと、我々の材料は、要するに、接着材の銅有機分子とで板をつくって、この板に別の有機分子を用いて柱を立てると、この構造が出来上がるというので、こんな感じです。もう詳しいことは言いませんから、図だけ見てください。板があって、そして、ここの間にチャンネルが走っていて柱があるという。

どうやってつくるか、上から銅イオンを垂らします。下に今あった有機物が入っています。サッと混ぜるだけ。これ誰でもできます。ちょっとこれ、ほかのところで転用しているので言葉は入っていますが、こういうようなものです。

これを、こういう微結晶ですが、取り出すとこういう青い小さなパウダー、しかしながら、これは1ミクロンのサイズでも100万個穴が開いた材料です。つくろうと思えば、こんなふうにバケツの中でやろうと思ったらできます。誰でもできます。そういうような材料



(図6)

です。

さて、分離、貯蔵、変換の中の、じゃ貯蔵についてちょっと見てみよう、これは1997年に朝日新聞の1面に載った大気中のメタンの分布です。赤いほどメタンが多いわけです。これ中東、それから北米、日本はあまりなかったんですが、それから海の上、メタンハイドレートからの漏れかもしれませんが、メタンの分布、メタンというのはCO₂の40倍以上の地球温暖化物質でもあるし、燃料でもあるわけです。

こういうものを貯蔵するやり方は3つあります。一つは、液体にします。すなわち、マイナス162℃にします。圧縮は大体200気圧圧縮します。もう一つが吸着



(図7)

法といって、私たちが言うような多孔性材料に入れるわけです。これは大体30気圧です。これ見ていただいたらわかりますように、液化法にはエネルギーが要ります。冷やす必要があります。運搬は難しい。これは運搬できるけれども、鋼鉄板が要りますから、50キロ運んできたなら25キロは鉄板、25キロはそのガスだということになります。吸着剤では30気圧ですから、アルミの容器で運べます。こっちがいいのに決まっています。

どうするかというわけですが、実際、吸着剤であつたら本当にいいのかというのをちょっとお見せします。これ同じサイズで、吸着剤なしのシリンダー、吸着剤を入れたシリンダー、今からこの女性が外から7気圧のメタンを入れます。こちらが吸着剤なし、吸着剤あります。

これ、ちょっとメーターは見えないんですが、ここにずうっと入っていつています。等しく入っているということです、これは。等しく入っていきまして、じゃ、ここに入れた後どうするかというと、これを放出させてみましょう。放出量を見るために、ここに風船があります。この同じサイズの風船に出してみます。

これですね。一方、こっちは、どうなるかというわけですが、この吸着剤のところからずうっとここへ入っていきます。これは吸着剤の性能に当然よるんですが、吸着剤を入れたことによって圧倒的に入るわけです。だから、こういう車においてもできるわけですし、これは私たちの材料ではないんですが、これはドイツのBSFという会社が車にその材料を積んでメタンを入れて、そして出し入れしても全く材料が壊れない。それから、これはベルリンからバンコクまで走ったという話です。こういうふうにしてできるんです。

じゃ、次、CO₂はどうか、この材料は0.1気圧で1グラムの材料を持ってきたら、その中に2割はCO₂が入る材料。これは5気圧の場合は6割以上入る材料。これは50気圧ですけど、7割以上その中にCO₂が入る材料というのができています。もう圧倒的に

CO₂がたくさん入る材料というのは、世界的にできているわけです。だから、貯蔵に関しては、まずこの材料は、あとはいろいろなコストとか、その安全性とかいうところに行くステージになっていると思います。

じゃ、次、分離、これが大変なことです。どうするのかということになります。

それで、私たちは例えば、こういう材料、先ほどのこの材料で何をやったかといいますと、実はアセチレンとCO₂というのがあります。これ本当によく似ています。分子のサイズが一緒、沸点もほとんど一緒。だから活性炭を用いたら、これ入った量ですが、ほとんどアセチレンもCO₂も変わらない。

ところで、我々の材料をこれ見ていただきますと、低圧からCO₂はほとんど入らないのに、アセチレンはスーッと入ります。なぜかということで、これを調べてみたら、実はここに水素結合という結合を使ったんですが、ぴしっと設計してアセチレント相互作用ができるようにつくりますと、もうきちっと入るというわけです。

これ、アセチレンというのは危険なガスで、室温でたった2気圧加圧すると爆発します。じゃ、何であの工事現場にあるアセチレンは爆発しないかというと、あれはアセトンという溶媒に溶かしてあるんです。純粋なアセチレンというのは爆発します。ところが我々の材料は、このアセチレンが暴れないように相互作用ができるような位置にきちっとつくることができますので、これ見ていただいたらわかりますように、非常に密度が高く、爆発限界の200倍濃縮しても爆発しないというものが、これでできるし、こういう貯蔵剤ができるわけです。

ということで、これいろいろ発展させることができて、分離や触媒、いろいろできます。特に、この分離については非常に重要な問題で、なぜかということ、日本の全産業が使っているエネルギーの中で34%は化学に使っています。その化学が使っているエネルギーの中で、4割が分離という操作を使っています。すなわち、日本の産業の全部使っているエネルギーの12%は分離に使っています。それだけ分離というのは非常に重要なわけです。

どうやって分離するかと、いろんな方法があるんですが、これちょっと省略しておきますが、じゃ、これの材料でどうするか、そのためには既存材料では駄目だったんです。何とか新しい方法が要るということで、私たちは新しい発想でいこうと。そのときに、東洋の精神性、考え方が非常に重要になってきます。アリストテレスに反駁してやることになるんですが、どういうことかということ、西洋というのはガチッとして不変のもの、壊れないもの、これが重要だという考え方です。まさに、これは穴が開いた材料であれば当然そうだと思うかもしれません。

ところが、私たちは要するに世の中、普遍的なものってないんだ、変わるというのがいいんだという立場です。すなわち、穴が開いていても形が変わる、そういうものもあるはずだという、そういうスタンスで研究を進めました。それで発見することができました。それは何かというと、今言ったように壊れない硬い材料に対して動き、そして形を変えて

相手を認識するという、そういう材料を見つけることができました。

例えば、こんなおもちゃがあるのをご存じですか、これ押してみると、こんなになります。これ、だけど、動きを見ますと、それぞれのコンポーネントは壊れていません。アングルが変わっているだけです。じゃ、これを分子の世界でやればいいんじゃないということになります。いろんなアイデアがあります。

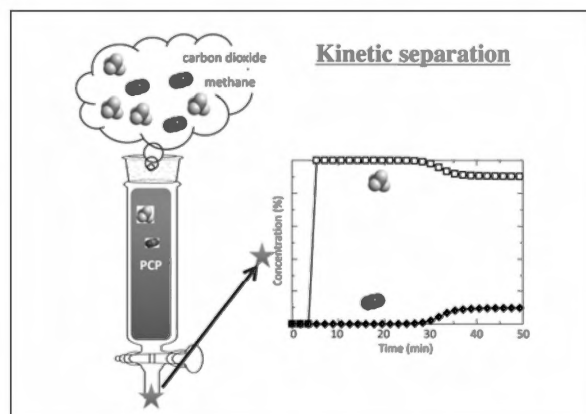
例えば、お互いに、ずれ合うような運動を使う。ちょうどここに穴が開きました。チャンネルができます。それとか、こういうようなちょうつがいがあるようなもの。今お見せしたように、幾ら硬くても、お互いがかみ合っていたら、ずれてこういうことができます。

ということで、そういうものは、いわゆる CO_2 の分離、天然ガスや排ガスからの CO_2 分離に使えるはずだということで、実際に進めたのがこれです。板状のものが、あたかも呼吸するかのごとく膨らんだり縮んだりするという、こういう材料をつくることができました。それはこの銅と、こういう分子を使ってつくるんですが、詳しく言いませんが、先ほどのような骨格になります。

実際に、これ何も入っていないときは縮んでいるんですが、窒素をずうっと加圧していくと、あるところで、わあっと開いて、また閉じるというものです。こちらを見ていただきます。加圧すると膨らんでいきます。こういう材料です。どんなになっているのか、多分こうなっているんだろうというのが、このビデオなんです。要は閉じているところに、ある圧力で突然開きます。開けごまなんですね。そして、減圧するとまた閉じるという。こういうことによって常に密着できる関係が出来上がって、わずかの差でも認識できるような材料ができた。

ということで、 CO_2 、メタン、酸素、窒素、みんなゲートを開く圧力が変わっていくということになります。これも材料です。言ってみたら、従来のクラシカルなチャンネルは、サイズと形だけで認識しています。サイズが合わなければ駄目というものです。もうちょっとましなのは、ちょっとお互い形が変わっていて認識できると思うんですが、私たちのものは、どっちかという、こういうような、まさに腸のぜん動運動のように相手を取り込んで、形を変えて、そして認識していくという、こういう材料であるんだろうというふうに思います。

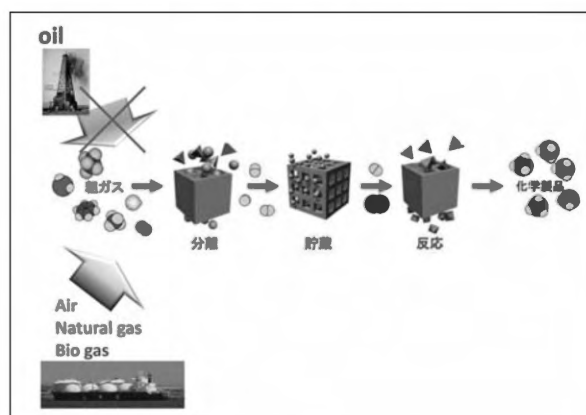
そういう意味で、排ガス、バイオガス、天然ガスの中から分離する、特にメタンだけを分離するという場合に、我々の材料を入れて、そして混合ガスをこう入れていくと、これは外へ出てきたものを見ています。最初から例えば、あるものは、30分まで全く CO_2 は出てこない。だから、 CO_2 が全部ここにトラップされている。つかまっ



(図8)

ている。メタンだけ出てくる。何ができたかという、完全に分離できたわけです。こういうようなものができるようになってきた。まさに気体を自在に操るガスサイエンステクノロジーです。(図8)

さて、石油というのは冒頭でも言いましたように、世界全体でもないし、日本は全くないわけです。日本が輸入している石油の使い道、もちろん燃料というのは非常に重要なんです、そのうちの2割が化学用原料、化学製品に使われています。服であるとかプラスチックであるとか、いろんなものに使われています。せめて、これだけでも全く違うルートはできないのかと、すなわち、オイルをやめて身の回りにあるもの、それを使って分離し、そして貯蔵し、変換していくということができれば、化学製品は元は石油でなくなるわけです。これが重要ではないか。(図9)



(図9)

例えば、これもそうなんです、ある操作によってプロピレンというものをつくれば、プロピレンをスタートにした化学工業というのは現在あるわけです。すべての化学工業の構造を変えなくても、この蒸留部分の原料を違うところから導入するだけで、既存の産業を維持することができるわけです。だから、こういうことも可能だということで、まさにこの新しい触媒開発が大きな挑戦課題ということに今なっています。

だから今日の話は「できました」じゃない、まだまだスパンの広い話なんです、こういう空間材料が、その物質変換材料に使われる可能性があるというふうに思っていて、現在は進めています。

さて、その配位空間の化学が進める化学技術は一体何だったか、成果の科学技術的意義、知的な発見というのは、要は人類が活性炭を発見して3000年、18世紀に当時の新しい多孔性材料として天然鉱石からゼオライトができたわけです。20世紀に人工合成ができた、ましてや石油産業に、この多孔性材料って非常に役に立っているわけです。

じゃ、我々とは何かというと、既存の多孔性材料が担ってきた機能にない全く新しい多孔性機能を有する材料の発明、これによって新しい視点でサイエンスが深められる。要するに、我々の文化が深まるわけです。すなわち、ナノの世界、ナノからちょっと大きいところの世界ってこんなものだったんだと、私たちの認識が深まるわけです。それに加えて、新たな人類の生活への貢献ということがあるんじゃないかというふうに思っています。

じゃ、この材料、ガスだけかというわけですので、ちょっとだけ紹介して閉じていきたいと思います。

例えば、私のお話を聞いていただいて、こういうチャンネルがあるなら、ここにイオン

とか、いろんなものを輸送していく、そういう材料に使えるんじゃないかと思われたとしたら、これはまさに、ある意味でデバイスへの発展だということになります。

特に今注目されているのは、こういうような燃料電池、燃料電池というのは空気中の酸素と水素を要は化学的に燃やすことによって、ここからエネルギーを取り出して、そしてエネルギーは電気なんですが、そういう材料ですね。

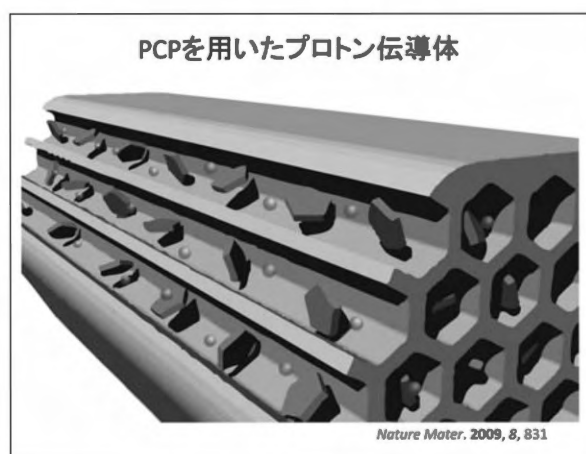
そのときに一番ポイントになるのは、ここで水素をスプリットさせて分離させてプロトンを出します。このプロトンが、この電極間を走ることによって、これが機能するんですが、このプロトンを走らせる。要はさっき言ったイオン輸送のチャンネルをつくること、この場合ではプロトンを輸送する材料で、そのプロトンを供給もしくは運ぶ分子として水が考えられます。水はプロトンを持っています。Hを持っています。ところが、すぐおわりになると思うんですが、水は100℃で沸騰します。そのため、チャンネルに詰めても100℃で出ていきます。ということは、100℃以上では使えない。燃料電池は、ちょうど100~300℃ぐらいまでの中温域が非常に有効に使えるものが多いです。ところが、この有効なプロトン輸送をする担体はありません。なぜなら、水を多く使うからです。

じゃ、水を使わないものは何かないのかというので私たち考えたのが、このイミダゾールです。こういう5員環の分子でこの両端にプロトンは結合できるようになっています。この分子を並べて、まさにバケツリレーのようにプロトンを運んでやればいいんじゃないかというアイデアが出てきます。単にこのイミダゾールを固めただけでは駄目です。ランダム過ぎます。どうするんだと、そこで、チャンネルを使うわけです。(図10)

我々は、そういうことでイミダゾールをこのチャンネルの中に詰め込んだ材料を開発したわけです。詳しい話はもう時間がないのでしませんが、このムービーで示します。こういうふうにイミダゾールを入れます。これが、ある程度動ける状況は残しておきながら、ある程度整列させると、ちょうどバケツリレーのごとく、この白いプロトンをお互い運動によって、ちょっと近づいたらポンポンポンと渡していく、そういうホッピングという現象なんですが、それによってプロトンを運べるということがわかってきました。

だから、ナノのチャンネルを使うことによって、こういうような水を使わない、沸騰しても100℃に持っていっても大丈夫な、そういうプロトン伝導体というのを考えることができるわけです。

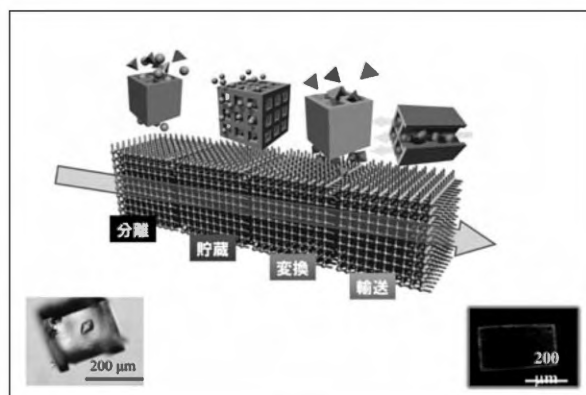
これは一つのデバイスなんですが、先ほど言いましたように、これは設計してつくるこ



(図10)

とができますから、それぞれが持っている機能、例えば分離機能、例えば貯蔵していく機能、そして変換していく機能、輸送していく機能、こういうものを実はお仕着せのごとく順番につくっていく、こういう技術も現在開発しつつあります。(図11)

例えば、これは2つの機能なんですが、貯蔵とこのゲート、要は分離する機能をつけた結晶です。この両端は違う機能を持っています。それとか、これは周りが全部ジャケットを着ているように違う機能を持っているものです。こっち側は2面だけですが、こっち側は全面持っているものもでき



(図11)

てきている。だから、私たちの化学は一つだけの機能を進めるだけではなくて、こういうふう集積させていくという、それができる可能性があるということを示しつつあります。

これはやはり有機分子と金属イオンを一から用いて、そして自動的にお互いつながり合うという、私たちが強制的につながっているわけではなくて、自動的につながるという自己集合という現象を使っているから、できると思っているわけです。

まさに、こういう形ですね、実際に表面に分子を乗せていって、そしてこういうふうにつくっていく、その世界というのはナノではなくて、どっちかというとな数十から数百ナノメートルの世界です。ミクロンまでいくとマクロになります。ワークにすれば、我々の目で見えるわけです。顕微鏡を使えば見られます。

しかしながら、このまさに数十から数百ナノというのは顕微鏡を使っても見えません。そして、科学者が昔からやってきた1分子の世界とも違います。非常に適当な数だけそろっていながら機能をしているという、そういう世界が、これからのターゲットだろうというので、私たちは化学のターゲットとしてメゾスコピックケミストリーと呼んでいます。メゾスコピックな領域をやっていくということです。

ということで、私の話はもうこれで終わるんですが、最後に、私が所属している京都大学の研究拠点の紹介をさせていただきます。

私たちの拠点は、物質－細胞統合システム拠点とされています。何かと言いますと、材料と細胞科学を統合した新しい領域をつくりなさいという国のサポートのもとに進めている、そういう研究を進める組織です。そういう意味で、我々化学者・ケミスト、それから物理学者、それから細胞生物学者が集まって新しい領域をつくろうということで進めています。

そして、目指すところは幹細胞のサイエンスとテクノロジー。応用ではありません。生命とはどうなっているのかというところに踏み込む意味でも、サイエンスとテクノロジー、それと、さっき言いましたメゾスコピック、我々の目には見えない、だけど非常に有

用な機能をなしているという、そういう領域の中を研究していくという、そういう分野です。

私の役割は、そういう中でコーディネーションスペース、配位空間の化学というものをメゾスコピックケミストリー、ひいては、その細胞生物学への貢献をなしていくということをやっています。

もう一度言いますと、これは非常に面白い問題なんですが、我々化学者は分子をつくってきましたし、分子を見てきました。この世界というのは既にある量子力学という確立された学問体系のもとで理解できます。

一方、マクロの世界というのは、まさにこのミクロンオーダーから大きなオーダーですので、これはいわゆる古典力学、ニュートンの古典力学的な世界です。

ところが、その中間にある、さっき言いました100ナノメートル前後のこの世界というのは、分子が適当に集まっているわけです。幾つかの分子が、これは何を意味するかというと、時間的に揺らいでいます。決して、がちっとしたものではないわけです。時間的揺らぎがあります。ということは、我々がすぐ思いつくのは、ミスはいっぱいあるだろうと、熱で揺るがされているんで、ミスはいっぱいあるんだろうと思いますが、ところが生物は、こういう室温の揺らぎの激しい世界でも、きちっと機能をしています。

それぞれのこの分子集合のこの領域、これはきちっとした機能があるわけです。どんな理屈があるのか、どうすればいいのかというところから踏み込んでやるというところですよ。

私たちの化学も、そういう多孔性材料をもっと小さくして行って、これぐらいの世界に持っていったときに、どういう機能が生まれるのかということも含めて、ここの接点で研究している。まさに時間がかかわる、要するにストカスチックなフィジックスと言われていて、そういう分野を物でもって研究しようという、そういう分野です。

だから、ひょっとしてアウトプットはすぐに役に立たないかもしれませんが。しかしながら、我々が認識していない、理解できていない世界が見えてくるというのは、まさに知財でもあるわけです。知的な財産です。ましてや日本発信であれば、日本が世界の人に教える、または伝える、そういう知が生まれるというふうに思っています。できれば、それが医療用や、いろんな応用にできればいいんじゃないかというように思っているんですが、そういうところですよ。

私たちの材料もどうなのかというのを一言だけ述べてみますと、冒頭、ガスのお話をしました。一酸化窒素やCO、硫化水素、こういうものも実は役に立っているんだよというお話をしましたが、それを我々の多孔性材料を使ってオンタイムで欲しいときに出す。そして、この細胞の必要なところで出すということをするのに、ちょうどぴったりの材料でもあるわけです。

そういう意味で、この材料をこういうところへの応用にまで進めて現在行っているというのが私たちの現状です。まだまだこれからなんですけども、あまり詳しいこともまだ言

えない状況ですので、こういうような方向性ということでお話ししておきます。

ということで、こういう我々の細孔というものが、ガスをターゲットにしていますが、当然、環境問題、宇宙や、それからエネルギーの問題、すべてにかかわってくる。そして生命にまでかかわるような、そういうガスを自在にコントロールできる、そういう化学としての多孔性材料、空間というものがあるということを私のメッセージとして、今日はこの話を終えさせていただきたいと思います。ご清聴ありがとうございました。(拍手)