



In Laboratory Now

## 研究室訪問 2

# CO<sub>2</sub>削減への多角的挑戦

平井・末包 研究室 ~ 炭素循環エネルギー研究センター



平井 秀一郎 教授(中央)

津島 将司 助手(左)

末包 哲也 助教授(右)

2012年までにCO<sub>2</sub>排出量を6%減らす(90年比)というのが京都議定書で日本が批准した内容である。現在多くの研究室で様々な取り組みがなされている。しかし、CO<sub>2</sub>排出のない太陽光・水力発電などの導入を促進し、また機器の省エネルギー化を進めても目標を達成できないという現状を、皆さんはご存知だろうか？

平井先生・末包先生・津島先生が所属する炭素循環エネルギー研究センターは、CO<sub>2</sub>削減の技術開発をしている機関である。年に12億t排出されるCO<sub>2</sub>に立ち向かうために行われている研究を、今回紹介したいと思う。



## CO<sub>2</sub>削減への取り組み

現在、CO<sub>2</sub>は温暖化の原因である——と世界である程度合意が形成され、CO<sub>2</sub>の排出削減は優先課題の一つとなっている。様々な角度から研究開発がなされているが、CO<sub>2</sub>濃度増加の原因として考えられている化石燃料の使用は更に増えると予想されている。そこで、化石燃料の使用を前提とした技術開発が今求められている。

日本から排出されるCO<sub>2</sub>の内訳を見ると、自動車や住宅など個人生活から出るものと、発電所などの大型設備から出るものとで63.7%を占めている(図1)。これら二つはそれぞれ大きな特徴を持つ。前者はエネルギー効率が悪く、後者はCO<sub>2</sub>を集めやすいというものだ。

個人生活の中でエネルギー効率が悪いものに対しては多くの企業などで高効率化をはかる研究が行われている。その代表が自動車である。この効率は現在日本で最も普及しているガソリン車で10~15%といわれており改善の余地が十分にある。

しかしこれらの効率化を進め、また自然エネルギーの導入を促進しても、CO<sub>2</sub>削減が追いつかないというのが現状なのだ。

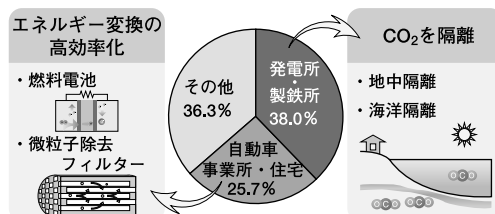


図1 日本におけるCO<sub>2</sub>排出の内訳

そこで今注目されているのが、大型設備から排出されたCO<sub>2</sub>を処理する方法だ。特に発電所が考えられている。発電所のエネルギー効率は良いところで50%あり、更なる高効率化は困難である。一方排出されるCO<sub>2</sub>の量は莫大であり、例えば火力発電所では一ヶ所につき毎秒約200kgも出す。

このような背景を踏まえ、平井・末包研究室は、まずCO<sub>2</sub>排出量を減らせるところはできる限り減らし、それでも間に合わないところはCO<sub>2</sub>自体を隔離する技術を開発するというスタンスで研究を進めている。それでは以下、行われている研究を個々に紹介していく。



## 高性能なフィルタを求めて

個人生活においてエネルギー効率の悪い代表である自動車。このCO<sub>2</sub>排出量を抑えるためにこの研究室で行われているものには、まずディーゼルエンジンのフィルタの開発がある。

ディーゼル車といえば、首都圏では規制の対象となっており環境に悪い印象があるかもしれない。しかし実は、ガソリン車よりもエンジンの熱効率は良い。問題は、NO<sub>x</sub>などの有害な微粒子を多く排出してしまうことだ。

ガソリンエンジンはピストンを動かす際、点火して爆発を起こしている。一方ディーゼルエンジンは高温の圧縮空気に燃料を噴射し自己着火させる。空気のみを圧縮していることでノッキングなどが少ないため圧縮比を高くでき、また燃料に対し空気の量が多く炎の周りの空気も仕事をするため熱効率が良い。しかし、同時に空気中の窒素により有害微粒子(NO<sub>x</sub>)が生じやすい。そこでこの短所を補うべく、ディーゼル車には微粒子を取り除くフィルタが搭載されているのだ。先生方はこれを高性能にし、ディーゼル車の効率を上げる研究を行っている。

現在研究対象となっているフィルタはセラミック素材のものだ。円柱形のセラミックに蜂の巣状の穴が空いていて、入口と出口が交互に目封じされている(図2)。排気ガスの微粒子は壁を通過する際に捕集されるという仕組みだ。

このフィルタは排気ガスの通り道につける必要があるのだ、エンジンに負荷を与えてしまう。また、一般にフィルタはスポンジのようにランダム

な構造をしており、粒子を捕集できない無駄な空間が生じてしまうことが多い。そのため、フィルタには微粒子の捕集能力だけでなく、できるだけ空気の通りを良くすることや無駄な空間を減らすことが求められている。

従来のフィルタ開発では、試作品の中から良いものを選ぶという手法が一般的にとられていた。それに対して平井・末包研究室では、シミュレーション計算によってまず理想的な構造を突き止めることにより、フィルタの性能を向上させることを考えている。

ここで用いられているシミュレーション法は格子ボルツマン法とよばれる。この名は気体運動に関する方程式であるボルツマン方程式に由来する。先生方はこれを改良し、入り組んだ構造の中の流体、微粒子の流れを再現することができるようにした。この格子ボルツマン法を用いて、微粒子の大きさなどを変えながら、最適なセラミック粒子の大きさやガスの温度を算出している。そして実際にこの理想的なフィルタを再現するために、セラミックの構造制御を行っている。数ミクロン単位でのミクロな構造を探って、空間的に無駄のない形へと近づこうとしているのだ。

ディーゼル車の普及率は、西ヨーロッパでは約40%である。一方日本では6%、と6倍以上も異なる。高性能フィルタの出現によって欠点が克服されれば、この車の省燃費性が見直される日が来るであろう。

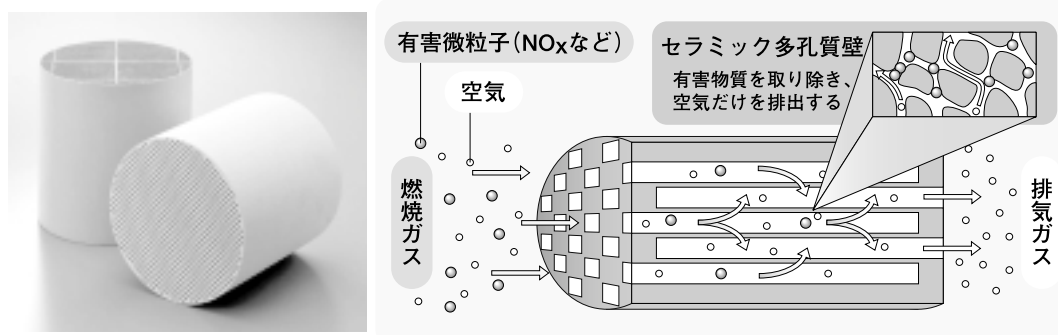


図2 ディーゼルエンジンのフィルタ



## 燃料電池の高効率化を目指して

平井・末包研究室では、燃料電池も研究している。燃料電池はよく知られている通り、水の分解と逆の反応を行って直接電気を取り出す装置である。現在CO<sub>2</sub>を出さないクリーンなエネルギーとして注目されているが、燃料電池の特長はそれだけではない。熱エネルギーを経ることがないため発電効率が良いのだ（約50%）。先生方は燃料電池の中でも、電解質に高分子膜を用いる固体高分子型燃料電池（以下PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）を扱っている。このPEFCは比較的室温に近い温度で使用する上に小型化が可能であるため、自動車などへの応用に向けて研究が進められている。

このPEFCで今課題となっていることに、発電を安定させることがある。発電が安定しない原因はその構造にある。PEFCの構造はシンプルで、中心に高分子膜である陽イオン交換膜があり、その外側に触媒である白金が塗ってある。更にその両側をカーボンでできた電極ではさみ、この2枚を銅線でつないだ形になっている（図3上）。片側から水素を供給すると、水素は電子を1個外に出し、触媒上で水素イオンになる。反対側の電極から酸素を供給すると電子、酸素、そして陽イオン交換膜を通ってきた水素イオンが反応して水となる。問題はこの膜の水素イオンの通りやすさだ。膜が水を含んでいればいるほど水素イオンは通りやすくなり、膜が乾いてくると電導度が下がり抵抗が上がってしまう（図3下）。これによりエネルギーロスが生じ発電が安定しないのである。

この問題に対して今のPEFCは、水素や酸素の供給と同時に水蒸気を送る形をとっている。しかしあまり水蒸気を水素や酸素に加えてしまうと、今度は水によって酸素の反応進行が阻害されてしまう。つまり酸素ガスが触媒まで行かなくなり発電が止まってしまうのだ。

そこで一番良い水蒸気の送り方を調べるためのシミュレーションが必要とされた。そのためにまず膜中の様子を調べなくてはならなかった。平井・末包研究室ではMRI（Magnetic Resonance Imaging）という装置を使って、膜中水素ならびに水の動きを観察するための実験を行った。

MRIは電磁波によって水素イオンを検知するものである。先生方はまず、PEFCを通常通り水素と酸素で動かした。次に、ある程度時間が経ったところで水素を重水素に切り替えた。重水素はMRIに映らないため、どういう風に膜の中にイオンが入っていくかが分かるのだ。この実験によって、水素イオンは単体で膜の中を通過するのではなく、高分子を伝って移動することが判明した。

この研究は、電池内部を見るのにMRIを用いているところに特徴がある。MRIは磁場を歪める金属製のものの観測には使えないといわれてきた。しかし先生方は磁場の向きに沿った金属配置にしたり、一部に非金属のものを使用したりと工夫を重ね、誰も見ることはできなかった電池内部の可視化に成功したのだ。

研究の成果は、シミュレーションの作成だけでなく、水素イオンをよく通すような膜の構造を突き止めることにも生かされた。

また先生方はこのMRIを用いて通電している状態で水がどう消えていくかを観測することにも成功した。世界初の試みに成功したこの研究は、Fuel Cell Review 2-5 (2005) で取り上げられ、その画像は表紙を飾った。

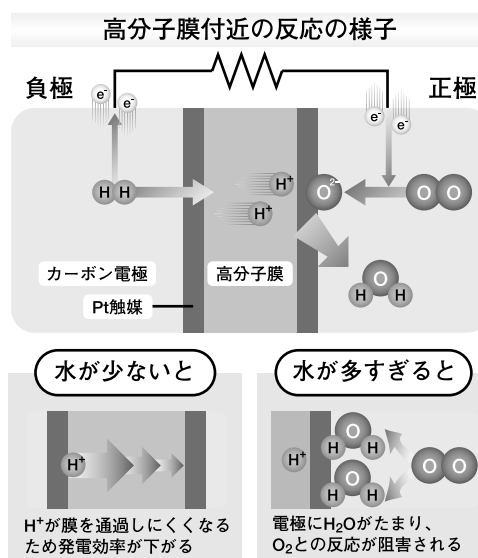


図3 PEFCの仕組み



## CO<sub>2</sub>を隔離する

発電所などの大型設備から出るCO<sub>2</sub>に対しては、施設の更なる高効率化が困難なため、CO<sub>2</sub>自体を隔離する研究を行っている。ただしここで隔離したCO<sub>2</sub>の量は莫大であるため、置いておく場所には容量が必要だ。そこで考えられている場所は二つある。一つは地中、もう一つは海中だ。

### 地中隔離

地中隔離とは、地面に穴を開けて井戸を掘り、そこから地中へCO<sub>2</sub>を送るというものである。打ち込まれたCO<sub>2</sub>の上にはキャップロックとよばれる固い地層があり、CO<sub>2</sub>の浮き上がりを阻止している。しかし、上蓋で押さえられていても井戸の周りの隙間から漏れてしまう可能性がある。そのため、既に地中隔離が行われている欧米ではCO<sub>2</sub>が浮かんできていないかモニターしている。今その方法が問題となっている。

現在行われているモニター方法は地震波を用いている(図4左)。これは、発信した地震波が反射して戻ってくる際の時間差から地下の様子を探るものである。この手法は広範囲を計測できる反面、大掛かりな装置が必要であり高コストになってしまう。よって継続的な計測に向いていない。

そこで先生方は、井戸周りに注目した。全体を計測しなくても、CO<sub>2</sub>の一番漏れやすいところのみを重点的に見ることで、低コストで継続的な計測が実現できる。現在開発しているのは流動電位を用いた計測法とNMRロギングを用いたものの二つである(図4右)。

流動電位とは多孔体の中に流れがあったときに

生じる電位である。岩は多孔体であるため、中でCO<sub>2</sub>が上に向かって動くとき電位が生じる。これよりCO<sub>2</sub>が動いているかどうか観測できるのだ。

NMR (Nuclear Magnetic Resonance) は核磁気共鳴の略であり、ロギング(logging) は、穴を掘ることである。地中にある水分子に電磁波を照射すると、水素の原子核から信号が返ってくる。この際、その信号には原子核が置かれている状態やCO<sub>2</sub>が周りにあるかないかといった情報が含まれている。これはCO<sub>2</sub>が持つ核磁気水素周りの磁場に影響を与えるからだ。ここからCO<sub>2</sub>の挙動を知ろうというのがNMRロギング法である。

これらモニタリング法が実用化されたとき、CO<sub>2</sub>が動いた際すぐに対処することが可能になるのだ。

ところで、日本では地中隔離が行われていない。その理由は、地震による断層が多く、キャップロックによるCO<sub>2</sub>貯留に適した構造が日本にあまり存在しないからである。そのため、地中に埋めた後CO<sub>2</sub>がどのように振舞うかが分かなければ安心して埋められないのだ。

そこで先生方は、前述のMRIを用いてCO<sub>2</sub>の挙動を解析している。水の入った岩石にCO<sub>2</sub>を打ち込み、内部の様子を調べるのだ。

CO<sub>2</sub>は低温高圧の地下において超臨界という状態になることが知られている。これは気体の動きやすさを持ち、密度は液体というものである。周囲の水よりも軽いため、浮力を受けて上がっていく可能性が懸念されていた。しかしMRIによる挙動解析の結果、岩石の隙間をCO<sub>2</sub>が浮上しない場

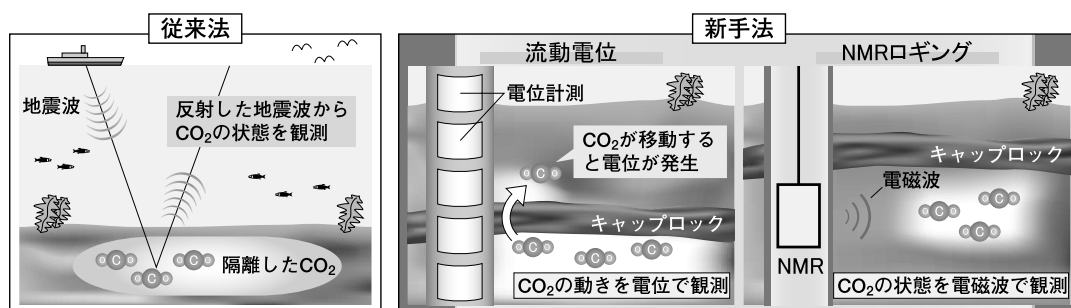


図4 CO<sub>2</sub>モニタリング法

合があることが判明した。

岩石の間を通るにはCO<sub>2</sub>は一旦細長くならなくては行けない。しかしCO<sub>2</sub>には界面張力が働いているため、表面積が小さくなるよう丸くなっているのだ。結果CO<sub>2</sub>は岩石をすり抜けられなくなって止まる。このメカニズムは残留ガストラップと呼ばれる。これを利用したら、キャップロックのない日本でも安心して地中隔離ができるかもしれない。CO<sub>2</sub>の挙動の詳しい部分はまだ研究中であり、未知なる部分の解明が期待されている。

### 海洋隔離

大気中にあるCO<sub>2</sub>は、千年ほどで海中に溶け込むということはご存知だろうか。それならこの千年を待たずに直接溶かし込んでしまおう、というロジックで行っているのが海洋隔離の研究だ。

この研究は、日本のナショナルプロジェクトとして複数の研究室で共同開発されている。タンカーにCO<sub>2</sub>を積み、吊り下げたパイプの先からCO<sub>2</sub>を海中に吹き込むというものだ(図5左)。そしてCO<sub>2</sub>が浮かんでいく間に溶かし込むのだが、ここで一カ所があまり濃くなると炭酸水になり、生態系に影響を及ぼす恐れがある。そこでパイプから出たばかりのCO<sub>2</sub>を攪拌するために、パイプを引っ張ったときに生じる乱流を使おうと考えている。しかしそれには、どのような乱流が生じるか知る必要がある。

そのため先生方は水の流れを再現する大きな装置を作り出した(図5右)。パイプに見立てた円柱に対し、垂直に大量の水をあてるのだ。その量は2.5t、これを3秒間で流しきる。水の中にはパウダーのようなものが混ざっている。水を流している間にレーザー光をあてパウダーを映す。そしてこれを高速カメラ(1000コマ/sec)で連続写真を撮る。この写真をつなげると水の挙動が分かるのだ。この実験によって、CO<sub>2</sub>がどれくらいの範囲にどれくらいの濃さで溶けるのかを推測できるようになった。また、タンカーの速度がCO<sub>2</sub>の溶解度に影響を及ぼすことが分かった。

水流実験によって分かったのはそれだけではない。CO<sub>2</sub>を出すパイプがどのように揺れるかも予測できるようになったのだ。太いパイプではあっても、長さ1000mになるとCO<sub>2</sub>放出時に揺れが大きくなり折れてしまう。パイプの振動があらかじめ想定できれば、力がかかる場所を補強するなどの対策をとることができるのだ。

以上様々な研究を紹介したが、これらには共通点がある。それは、先生方の専門である熱工学・流体力学が使われているということだ。MRIを用いた解析にも、シミュレーション計算にもこれらは生かされている。化石燃料の使用を認める、という現実的な見地から専門を生かしてなされる先生方の研究は、地球温暖化の解決に重要な役割を果たしていくだろう。

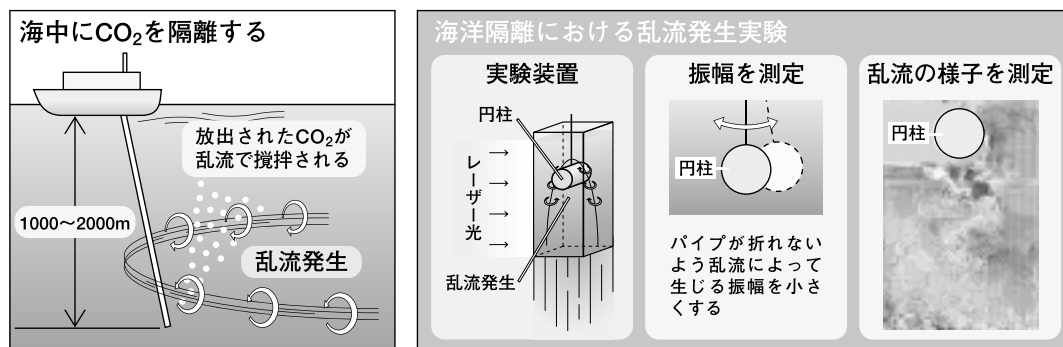


図5 海洋隔離と乱流観測装置

CO<sub>2</sub>削減に様々な角度から切り込む先生方の研究はどれも興味深いものでした。また実験装置を実際に見せていただいたときは研究の現場を肌で

感じました。お忙しい中、度重なる取材と質問に快く応じて下さった先生方に心よりお礼申し上げます。ありがとうございました。(白濱 仁深)