



## エネルギー新時代の夜明け

## 岡崎・伏信研究室～機械制御システム専攻



伏信 一慶 助教授(左) 岡崎 健 教授(右)

万物を統括するエネルギー。地球も人間も、そして分子や原子までもエネルギーに支配されて動いている。そう、エネルギーを知る者万物を知るといっても過言ではない。我が東工大にもエネルギーをキーワードに、地球規模の環境問題から分子・原子レベルの物質の挙動まで幅広く扱っている研究室がある。それが岡崎・伏信研究室である。未来に暗い影を落とす環境問題や、これからの人類の発展に欠かせない電子デバイスは、エネルギーという面からの研究が欠かせない。エネルギーの興味深い活用法を覗いてみよう。



## 水素エネルギーの大いなる可能性

産業革命以降、人類は化石燃料の燃焼に伴う熱エネルギーを多用してきた。そして現在もエネルギー源の多くを化石燃料に頼っている。しかし、化石燃料の燃焼で生じる二酸化炭素や窒素酸化物、硫黄酸化物といったガスは地球温暖化や酸性雨の原因になることが判明した。しかも、かつては無限にあると信じられていた化石燃料に限界が存在することも分かった。このまま何の対策も講じずにいれば、地球環境は悪化の一途を辿り、永い時をかけて発展してきた文明も滅びの道を歩むことになるかもしれない。

そこで待望されるのがクリーンな新エネルギー開発である。化石燃料の代わりとなり、地球環境への悪影響が少ないエネルギー源を開発すれば、エネルギー源枯渇・地球温暖化・酸性雨といった問題の解決策となりうるのだから、これは当然の成り行きと言える。この流れの中で岡崎・伏信研究室が研究している新エネルギーが「水素エネルギー」なのだ。

水素エネルギーはクリーンなエネルギー源として注目を浴びている。それを聞いて、「燃やしても二酸化炭素を出さないからだ」と思う方が必ず

いるだろう。だが事はそう単純ではない。なぜなら、水素は化石燃料のようにどこかを掘ってすぐに得られるわけではなく、エネルギーを使って生産しなければならないからだ。例えば水素を燃やし、そのエネルギーを使って自動車を走らせよう。この場合だと使用する全エネルギーのうち、3分の1は水素製造過程での損失となり、動力に使われる正味のエネルギー効率はガソリン自動車よりも低くなってしまふ。水素自体は燃やしても二酸化炭素を出さないことを考慮に入れても、製造過程を含めた全体を考えると環境に余計に悪影響を与えることになりかねないのだ。

では、水素はなぜクリーンだと言われるのだろうか。上の例では燃焼という形で水素を使ったが、実はそれでは水素の力を完全に引き出すことができない。水素が本領を發揮するのは電気エネルギーとして使ったときなのだ。例として最近脚光を浴びている水素燃料電池自動車を見てみよう。あとで詳しく述べるが、水素燃料電池は正式には「固体高分子型燃料電池(PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cells)」と呼ばれる。PEFCを使えば水素と酸素から直接電気エネルギーを生み出す

ことができる。それを動力とする燃料電池自動車はガソリン自動車の3倍近くのエネルギー効率を誇るのだ。これは水素生成のエネルギー損失分を差し引いても余りある。

PEFCはどうやって水素と酸素から電気エネルギーを生み出すのだろうか。原理的には一般の化学電池と同じで、負極での酸化・正極での還元という反応により（図1参照）、電気エネルギーを発生させる。このエネルギー発生原理は、水素エネルギーならではの長特であり、化石燃料と決定的に違う点である。なぜなら、この反応は燃焼と違って逆の反応が起こるからだ。すなわち、水の電気分解によって電気エネルギーから水素を生成することで、電気エネルギーを水素という形にして蓄えることが可能なのだ。それを利用した、PEFCの機能と電気エネルギーから水素を作り出す機能を併せ持つ「固体高分子型可逆セル」の研究が現在着実に進んでいる。この装置があれば、発電して余った電力で水素を生成し、後でまた発電に使うことができる。これを電力負荷平準化という。また、PEFCは小型でも高出力なので、小規模の発電に向いている。固体高分子型可逆セルを各施設・家庭に設置して無駄なく発電し、また、発電による廃熱を有効利用することも可能となる。

ここまででPEFCの特長について見てきたが、実用化にあたってまだ乗り越えなければならない

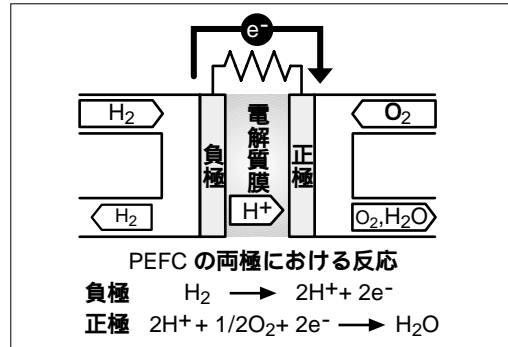


図1 PEFCの構造

壁がいくつかある。その中でも重大な問題の一つが寿命の短さだ。PEFCを主に構成するのは正極と負極、そしてその間の電解質膜（陽イオン交換膜）である。電解質膜を水素イオンが移動するのだが、ミクロの視点で見ると、電解質膜の分子に水素イオンが衝突して温度が上昇してしまう。しかも、この場合温度の上昇は均一ではなく、局部的に起こる。電解質膜は温度に敏感なため、温度の上昇した部分だけ劣化が早まり、使いものにならなくなってしまうのだ。PEFCのミクロの物質移動と熱に関する研究は実用化の一つのカギとなることは間違いのないだろう。更なる高効率化や大幅なコストダウンなど他にも課題は多いが、次世代エネルギーの開拓は着実に進んでいる。



## プラズマを利用して水素を作ろう！

PEFCを利用するためには水素を生産しなければならない。しかし、いつまでもそれを化石燃料に頼っているわけにはいかない。そこで、プラズマを水素の生産に利用しようという研究も進んでいる。プラズマというのは気体分子が非常に高いエネルギーを与えられて原子から電子が電離している状態を指す。電子が高いエネルギーを持った状態なので、特殊な装置で極端な高温にしないと発生しないと思うかもしれないが、その辺にある蛍光灯内でもプラズマは発生している。その秘密は、蛍光灯内の気圧の低さにある。蛍光灯の電極の両端に電圧をかけると電離した電子は加速される。周囲の気体の圧力が高い場合、気体分子の数が多いため加速された電子は気体分子に衝突しやすくなる。そのため電子のエネルギーは奪われ、



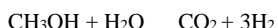
プラズマ発生装置

気体の温度が上昇してしまうのだ。蛍光灯内部のように周囲の気体の圧力が低ければ、電子の速度が上がってもぶつかる気体分子が少ないため、気

体の温度は上がらない。電子のエネルギーが気体分子に奪われないためプラズマになるのだ(図2)。このような、電子速度が大きく気体の温度は常温であるプラズマを非平衡プラズマという。

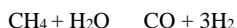
プラズマは特殊な状態である。そのためそこで起こる化学反応も特殊である。プラズマでは電離した電子が大きなエネルギーを持っているため、そのエネルギーが試料に与えられて普通なら起こり得ない反応が起こることさえある。しかし、プラズマを化学反応に利用する場合、高温や低圧環境下にしては手間や設備の面であまり実用的ではない。そこで、大気圧下で非平衡プラズマを発生させてしまおうという試みが岡崎・伏信研究室で進んでいる。もちろん普通の方法ではそんな都合の良い事は起こらない。そこで登場するのがパルス放電である。パルス放電とはごく短い時間(10<sup>-7</sup>秒程度)、非常に大きな電圧をかけるというものだ。電圧をかけると電子が電場からエネルギーを得て加速される。しかし、電圧をかける時間が大変短いため周囲の気体分子の温度は上がらないのだ。こうして非平衡プラズマが得られる。

では、これをどう水素生産に応用するのだろうか。100~200 程度の比較的低温で水素を効率的に生成することのできる化学反応の一つに、メタノールの吸熱改質反応



がある。

一般的なメタノール生成法はメタン・水から一酸化炭素と水素の合成ガスを経由する間接合成法



## 地球に優しい石炭の燃やし方

水素エネルギーは大きな可能性を秘めている。しかし、「水素エネルギーが実用化されれば未来は安泰」と思うのはまだ早い。水素エネルギーが社会に浸透するには長い時間を要する。それまでの間は化石燃料に依存しなければならない。しかも、石油や天然ガスの可採年数は45年、65年と、石炭の230年よりかなり短い。そのため50年もすれば石炭に頼らざるを得なくなる。こうなると問題になってくるのが地球温暖化への影響である。石炭は石油や天然ガスに比べて炭素の含有率が高いため、石炭のみに頼ると地球温暖化が一気に進

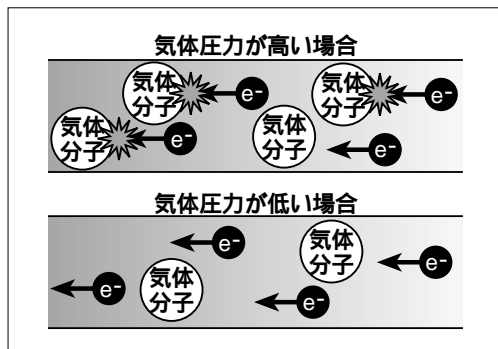
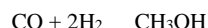


図2 気体圧力による電子の衝突度合いの違い



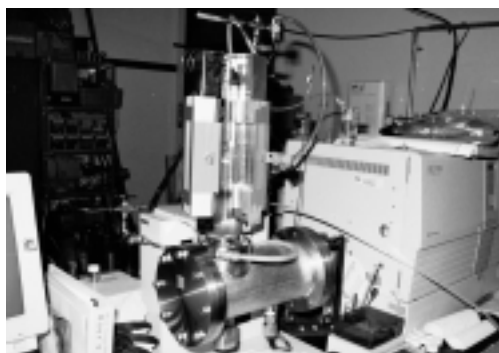
であるが、この方法だと中間物質を経るため効率が悪くなってしまふ。

とは言うものの、メタノールをメタンと水から直接生成する反応は普通では起こり得なかった。そこでプラズマの出番である。プラズマ中の電子のエネルギーをメタンに与えれば直接メタノールに変えることができるのだ。中間物質を経由しない分、効率が格段に向上するのである。



この方法でメタノールを生成した上で吸熱改質反応で水素を生成するのだ。

プラズマの発生方法は様々なものが考えられているが、プラズマ反応場の伝熱やエネルギー輸送についてはまだ分からないことも多い。将来その可能性に期待が集まっているため、プラズマの詳しい性質の解明も進められている。水素の生産やそれ以外の用途にも期待は高まるばかりだ。



石炭燃焼の実験装置

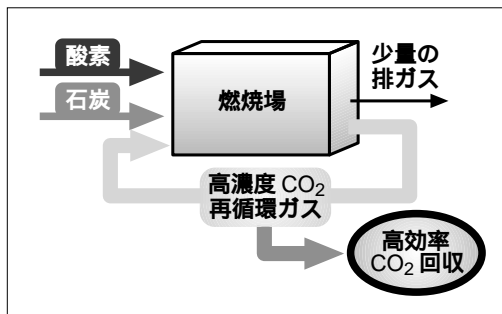


図3 CO<sub>2</sub>循環石炭燃焼法

行する恐れがあるのだ。そこで二酸化炭素を大気中に出さない処理が必要となってくる。石炭を燃やしても、排ガス中の二酸化炭素を分離・隔離すれば、地球温暖化の進行をある程度食い止めることができる。だが、空気中で石炭を燃焼させた場合、その排ガス中の二酸化炭素濃度は16%程度しかない。これを分離するには大変な手間とエネルギーが必要になってしまうのだ。

この問題を解決するために研究されているのが「O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>微粉炭燃焼」という石炭燃焼法である。CO<sub>2</sub>循環石炭燃焼とも呼ばれるこの燃焼法(図3)は、燃焼場から排出される二酸化炭素を主としたガスの大部分を循環させ、追加した酸素とともに燃焼場に再び入れるというものだ。こうすると、循環するガス中の二酸化炭素濃度は次第に高まり、最終的に95%程度まで上がる。ここまで濃度が高いと分離しなくても圧縮するだけで簡単に二酸化炭素を液化回収することができるため、濃度16%の二酸化炭素を分離するよりも圧倒的に効率が良いのである。

それでは、回収した二酸化炭素はどうするのだろうか。岡崎・伏信研究室は、岡崎教授が以前所属されていた炭素循環素材研究センターと共同で、二酸化炭素の海洋隔離についても取り組んでいる。海洋隔離については2種類の方法があり、1つは液化した二酸化炭素を海洋の中層に溶解させる中層溶解法、もう1つは液体の二酸化炭素が海水よりも重くなる3000mより深い深海底の窪地に長期間貯留する深海底貯留法と呼ばれる。だがここで一つの疑問が生じる。液体二酸化炭素を海中に隔離してもすぐに海水に溶けて再び大気中に出てくるのではないか。ところが、液体の二酸化炭素と、海水との界面には、クラスレートハイド

レートという結晶状の膜が自然と形成され二酸化炭素を溶解しにくくするのだ。具体的には深海底貯留の場合、100万kW級の石炭火力発電所から排出される二酸化炭素の10年分の量を、1km×1km程度で深さ100mの窪地に貯留することができると試算されている。しかも、クラスレートハイドレート膜により海水への溶解が抑制され、200年以上の長期にわたって貯留することができるという。さらに、海水に溶解した二酸化炭素が海洋循環により大気中に出るにはさらに1000年近くかかると言われていた。海洋に隔離すると約2割ほど余計にエネルギーがかかり、「くさい物にふた」的な感じも否定できない。しかし、二酸化炭素を大量に処理する具体的な方法が今のところ他にないため、有効な一手段とされているのだ。ただし、この技術が実用化されるには、海洋の生態系へ影響を及ぼさないことが確認される必要があり、現在それについても研究されている。

話を石炭燃焼に戻そう。CO<sub>2</sub>循環石炭燃焼には他にも大きなメリットがある。なんと、排ガス中の窒素酸化物や硫酸酸化物さえも大幅に減少されるのだ。窒素酸化物の場合は、循環することによって濃度の高められた窒素酸化物と、窒素・酸素との平衡が窒素・酸素よりに傾き、窒素酸化物が効果的に還元される事が最大の要因であると研究から判明している(図4)。

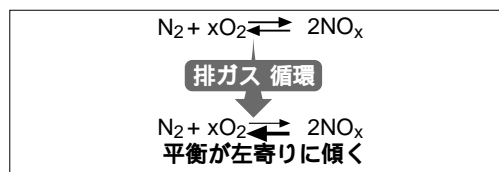


図4 窒素酸化物の効果的な還元

これにより燃焼システム全体として、石炭中の窒素成分から窒素酸化物への転換率は通常の空気燃焼の場合の1/4から1/6にまで低下する。また、硫酸酸化物を減らすためには脱硫剤という物質を用いるのだが、高い硫酸酸化物の濃度が脱硫剤の効果をも最大限に引き出すため、硫酸酸化物も大幅に減少される。CO<sub>2</sub>循環石炭燃焼は酸性雨対策としても優れていると言える。まさに、環境保護を徹底的に追及した未来の石炭の使い方と呼ぶに相応しい。



## レーザーが導く電子デバイスの発展

前章までの環境問題に関連する研究は岡崎健教授が主に研究されている。しかし、岡崎・伏信研究室では他にも興味深い研究に取り組んでいる。伏信助教授は、半導体・電子デバイスに関するエネルギーや熱の問題を研究されている。半導体や電子デバイスは、電圧がかかるため、自然と発熱する。半導体技術は素子を小さくする方向に進んでいるが、小さいものに電圧をかけると単位体積あたりの発熱量が高くなってしまいうため、半導体が小さくなるほど温度が上がってしまうのだ。さらに、小さければ小さい物体ほど表面の温度よりも内部の温度の方が高いという性質がある。繊細な電子部品が熱により性能を大きく左右されることは想像に難くないだろう。電子デバイスの更なる飛躍には小型化が必要不可欠であり、熱の発生も避けられないことである。だが、熱の発生についてのしっかりした予測が立てられていないと不意の故障や性能低下に見舞われてしまう。小型化が進むとますます熱の発生の予測は立てにくくなるだけに、熱現象の解明が電子デバイスの発展にとって非常に重要なのだ。岡崎・伏信研究室のこういった研究は、環境問題とは別の角度から人類の更なる発展に貢献するものだと考えよう。

伏信助教授の研究内容はこれだけではない。普通の電子デバイスの他に現在、マイクロマシンと呼ばれる、微細なセンサーなどの機械要素とその周辺の電子回路を集積したシステムが注目されていて、その研究もされているのだ。マイクロマシンはMEMS(MicroElectroMechanical Systems)とも呼ばれ、新たな産業分野の創出につながると期待されている。ところが、マイクロマシンに使うセ

岡崎・伏信研究室を取材して驚かされたのはその研究内容の幅広さである。岡崎教授は環境に関することについて、伏信助教授は電子デバイスを、そして助手の方は、本文では触れられなかったが、生体内の熱・物質移動を研究されていた。これらの研究は、熱やエネルギーに関するだけでなく、これから先の人類の発展に必要な不可欠であるという点で共通する。私はそう感じると

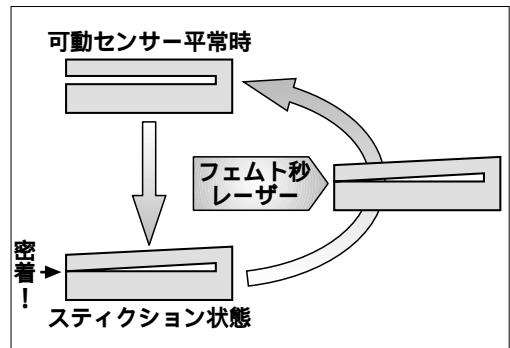


図5 スティクション状態からの復元

ンサーなどのデバイスに致命的な問題が起こることがある。センサーなどに不可欠である可動部分とその下のシリコン基板に付着して機能しなくなってしまうのだ。この状態はスティクションと呼ばれ(図5) 製造行程で使われる水や、凝縮した大気中の水分が接着剤のような役割をして起こる。従来は付着した可動部分を元に戻す方法はなかったが、現在その復元方法が研究されている。フェムト秒レーザー照射というこの方法は、レーザーをごく短時間(10<sup>-15</sup> ~ 10<sup>-12</sup>秒)照射することにより結合部の原子周辺の電子にエネルギーを与えて励起状態とする。水分とシリコンの間の電子状態の変化が結合状態を変え、付着した可動部分を再び動くようにするのである。この方法が実用化されればMEMSの成長に大きく貢献することだろう。電子産業にも新しい風が吹き込むに違いない。

共に、未来に対して明るい希望を抱かずにはいらなかった。

最後になりましたが、大変お忙しい中快く取材に応じて下さり、様々な資料を提供して下さった岡崎・伏信両先生をはじめとする研究室の皆様

に厚く御礼を申し上げます。

(伊藤 晃)