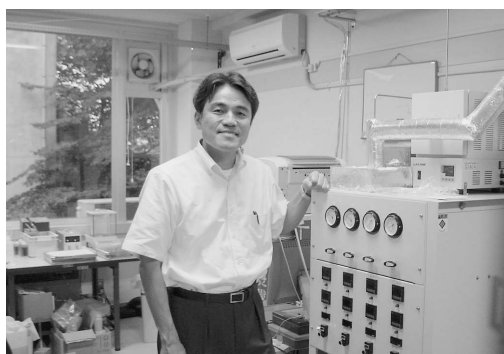


エネルギーの未来を見据えて

加藤 之貴 研究室～原子炉工学研究所



加藤 之貴 准教授

産業革命以来、我々人類が頼り続けてきたエネルギー源、化石燃料は有限のものである。近年、化石燃料の枯渇が危ぶまれ、新たなエネルギー源の模索が続けられている。このエネルギー問題はそれ単独の問題ではなく、その他の様々な問題とも絡みあった非常に複雑な問題である。

加藤先生は化学反応を利用する立場から、新たなエネルギーシステムの構築を目指し、様々なアプローチを試みている。今回は先生の研究成果であるヒートポンプの新たな可能性や、先生が提唱する独自のエネルギーシステムを紹介しよう。



エネルギー事情と化学反応への期待

環境問題や石油の枯渇問題、原油価格の高騰によるエネルギー供給の不安定化などを背景に、様々な自然エネルギーの普及が進みつつあり、近年のエネルギー供給源は多様化している。そして、自然エネルギーがエネルギー供給源全体に占める割合が増加するに従い、供給側には非定常化もおきている。自然エネルギーは天候の変化により供給量が大きく変動するからだ。

一方でエネルギーの需要側も非定常化している。オフィスや工場での電力需要が活発な日中と産業活動が停滞する夜間との昼夜間のエネルギー需要変動や、エアコンの利用が原因となる季節間のエネルギー需要変動が非常に大きいからだ。

このため、エネルギーを変動する需要と供給に応じて貯蔵し、利用する場所に輸送し、適切な形態に変換する必要がある。つまり今後のエネルギー利用においては「貯蔵」「輸送」「変換」がキーワードとなる。

加藤先生は「化学反応を用いたエネルギー変換」をテーマに、この問題を解決する高効率エネルギーシステムの実現を目指した研究に取り組んでいる。高効率エネルギーシステムに要求される

ことは、可逆性があることとエネルギー密度が高いことである。なぜなら可逆性がなければ、エネルギーを作り出すたびに廃棄物を生み出すことになり、エネルギー密度が低ければ、必要なエネルギーを得るためのシステムが巨大化してしまうからだ。従来のエネルギー生産には物理変化がよく利用されてきた。例えば火力発電所や原子力発電所では、水が蒸気になる相変化を利用してタービンを回し、電気を作り出している。これらに用いられる燃料は不可逆的であり、発電システムは大型である。

化学反応は概して、物理変化に比べエネルギー密度が高く、また反応条件を適切に選択することでエネルギー供給・需要に応じた幅広い反応操作が可能である。そのため、エネルギー利用の高効率化を考える上で、化学反応の利用が期待されるというわけだ。

加藤先生の研究内容を大別すると、熱利用に関する研究と水素利用に関する研究の2つである。熱も水素も今後のエネルギーシステムを考える上で非常に重要なものである。そしてこれらを利用するときに化学反応が重要な役割を果たすのだ。

広がるケミカルヒートポンプの可能性

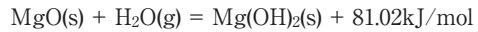
熱は我々の快適な生活を考える上で、欠かすことができないものだ。シャワーを浴びたり冬場に暖をとったりする場合には高温の熱源が必要となり、夏場を快適に過ごすには低温の熱源が必要となる。しかし、熱はエネルギーの墓場と言われることもあるほど、非常に利用するのが難しい。そのため、エネルギーを利用したり変換したりするさまざまな場面で熱が生じるにもかかわらず、それは利用できないものとして捨てられている。

この廃熱をどうにか利用しようと加藤先生が取り組んでいるのが、酸化マグネシウムを用いたケミカルヒートポンプの研究である。ヒートポンプは、エネルギー問題対策としてしばしば取り上げられる技術であり、その名の通り、熱をくみ上げ、必要に応じて熱を供給するシステムである。ケミカルヒートポンプは化学反応を用いてヒートポンプの機能を実現するシステムであり、加藤先生はこのシステムに用いる物質として酸化マグネシウム (MgO) に着目したのだ。

ケミカルヒートポンプでは用いる物質によって熱貯蔵できる温度域が異なり、MgOを用いた場合には300℃付近の熱を貯蔵できる。100℃以下の熱を貯蔵できる物質は多数あるのだが、300℃前後の熱を貯蔵できるものはこれまでなかった。現在のところ、MgOは300℃の熱を貯蔵できる唯一の物質なのである。このように利用できる温度域を増やすことは、ヒートポンプの応用分野を広げることにつながる。また、MgOを用いれば、従

来の水を媒体に用いたヒートポンプシステムに比べ、省スペースなシステムを実現できる。さらに、反応に利用するMgOは環境負荷が少ない物質である。

MgOは水と反応（水和反応）し、水酸化マグネシウム (Mg(OH)₂) を生成する。反応式は



となる。この反応は可逆であり、水和反応は発熱反応で、Mg(OH)₂からMgOとH₂Oを生成する反応（脱水反応）は吸熱反応である。この発熱と吸熱を利用して、図1左に示すような原理で、ヒートポンプシステムが構成されるのである。

しかしこれを実際に利用するとなるとなかなか難しいのだ。工業材料として用いられているMgOでは反応が起らないのである。

問題点は二つである。一つはMgOが海水中のMg(OH)₂よりつくられるため、塩素やナトリウムなどの不純物を含んでいることである。通常、工業用MgOの純度は97%程度である。このため、ヒートポンプで必須となる反応の繰り返し性が得られない。もう一つは生産過程で800℃の高温状態を経験することである。これにより、MgOの焼結（加熱によって固まり緻密な物体になる現象）が進行し、水和反応を起こさなくなる。同じMgOでも800℃を経験したものとそうでないものとは結晶構造が異なるのだ。

加藤先生は、99.9%という高純度のMgOを原料にMg(OH)₂を調製する手法、およびMg(OH)₂を

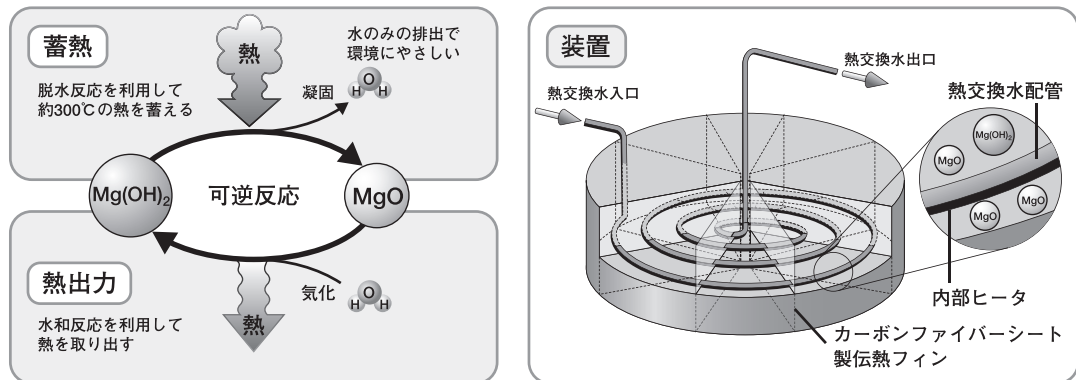


図1 ケミカルヒートポンプの原理と実証試験機の概要

400℃以下の比較的低温で脱水操作する手法によりMgOをヒートポンプに用いることを可能とした。先生はこのシステムに関連した特許を取得している。ただし、この高純度MgOは製造行程が複雑でコストが高い。現在はコストを下げるために、在来の工業用MgOを原料とし、簡易な製造プロセスを経て、安価で反応性の高いMgOを作り出す研究が進められている。

廃熱とは従来、利用価値がないために捨てられていたものであるから、それを利用する装置が高価であってはならない。いかに安価な廃熱利用装置を作れるかが、重要な課題となる。

図1右がヒートポンプシステムの実証試験機の概要である。反応材充填層には、渦状に巻いた熱交換水配管とヒータのまわりに、MgOとともに熱伝導特性に優れるカーボンファイバーのシートが入れられている。これにより、熱が伝わりやすくなる。余剰電力でヒータをあたため、その熱を蓄えておき、必要な時に放熱する仕組みだ。図は研究の第1段階のシステムである。現在研究は、カーボンファイバーを反応材充填層により密に分散させた構造の第2段階のシステムを経て、さらに新たな構造へと進んでいる。

この技術の応用分野として、例えば以下の二つの分野が挙げられる。一つ目は豪雪地帯の道路の融雪技術への応用である。通常、融雪には温水や電気ヒータを用いる。近隣に工場があり温排水を大量に出しているようなところでは、温水を用いた融雪が優れているのだが、それ以外のところでは電気ヒータを用いる必要がある。ところが、電気ヒータによる融雪は、特に昼間時は、電気代がかさむ。融雪装置は24時間稼働し続けることを要求されることが多い。そこで、ヒートポンプを用いれば、安価な夜間電力（北海道で昼間の約1/4）を熱としてためておき、昼間にはそのためておいた熱を使って融雪することができる。すると、24時間電気ヒータで電気を消費し続ける場合に比べ、運転コストが下げられ、経済的なメリットが生じる。この分野への応用では既にフィールド実証試験が行われている。

二つ目は自動車への応用である。自動車のエンジンは、実は非常に効率が悪い。投入された燃料エネルギーのうち実際に走行に利用されるのはわずか20%なのだ。残りの80%は廃熱として捨て

られてしまう。

しかし、エンジンの機械効率はすでに頭打ち状態であり、これ以上の高効率化は望めない。そこで、この損失のうち最も大きな割合を占める排気熱をヒートポンプでうまく利用することによって、自動車の燃費を向上させることができるのではないかと加藤先生は考えている。定常運転時の余剰廃熱をヒートポンプで貯蔵できるからだ。

例えば、自動車のエンジンは発車時の燃費が非常に悪い。このような効率の悪い条件でヒートポンプから温熱供給支援を行うことで、総合燃費効率を上げることが可能である。

また、自動車の冷房に利用することも可能である。現在の自動車の冷房にはコンプレッサーが用いられている。コンプレッサーを動かすためには電気が必要であり、その電気はエンジンの動力の一部を用いて発電機を回してつくっているため、冷房利用時にはエンジンの出力が下がってしまい、非常に効率が悪い。一方、ヒートポンプを用いれば廃熱を利用して冷熱をつくることができる。MgOを用いたケミカルヒートポンプでは、熱力学的に常温雰囲気操作で+7℃という低温の空気（冷熱）を作り出せる。これを車内に供給することで、快適な車内空間の冷房が行える。この方法ならば電気を利用しないので、エンジン出力を下げても発電する必要がなくなる。

この冷熱発生メカニズムを説明する。MgOが水和反応で水を吸収するため、水を貯蔵しているタンク内の圧力が下がり、水が蒸発する。例えば圧力が100分の1気圧程度になれば、水は約10℃で沸騰する。そして蒸発する際に周囲の熱を奪っていくため水自体の温度が下がり、ここに空気を流通させ、この空気が車内に流れるようにすれば冷房として作用する。

冷熱をつくれるということは、ケミカルヒートポンプの重要な性質である。近年の自動車は、エンジンの高効率化の追及が尽くされてきたため、今後、燃料効率の向上には廃熱利用に注目が集まるだろうと加藤先生は言う。

今まで不可能だった300℃という高温の熱を貯蔵できるシステムを開発した加藤先生の、熱貯蔵における次なる目標は、未だ空白となっている100℃と300℃の間を埋める、200℃付近の熱を貯蔵できるシステムを考えることだそう。



炭素循環型水素キャリアシステム

現在利用されているエネルギー形態の大部分は電気である。しかし、電気は貯蔵が困難であるという難点がある。そこで注目されているのが水素なのだ。水素は電気に比べ貯蔵が容易で、環境汚染の心配もないと言われている。そして、今注目されている燃料電池を用いることによって、水素は電気に変換することができる。そのため、化石燃料の代替として水素エネルギーへの期待が高まりつつあるのだ。

ところで、植物の光合成によるCO₂の吸収と植物を燃料として利用することによるCO₂の排出とにより、炭素が循環し大気中のCO₂収支がプラスマイナスゼロになるというカーボンニュートラルと呼ばれる概念がある。化石燃料が使用される以前は人間の営みも含めて、地球上でこのカーボンニュートラルが成り立っていたと考えられる。しかし、化石燃料を大量に消費する現代においては、CO₂の排出量が植物吸収量を上回ってしまっている。将来、炭素が大気中にあふれ、利用できる炭素がなくなってしまう恐れがある。そこで加藤先生は水素を利用する社会を想定し、その社会の中で炭素が循環するシステムを提案している。

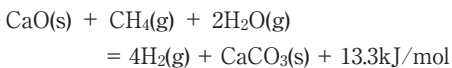
水素は自然界に単体では存在していない物質であり、他の物質から生成する必要がある。そこで、先生が採用しているのがメタンの改質による水素生成である。メタンを水と反応させると

$CH_4(g) + H_2O(g) = 3H_2(g) + CO(g) + 205.6kJ/mol$
という反応により水素が生成される。このとき水素とともに生成されるCOと水を反応させると

$CO(g) + H_2O(g) = H_2(g) + CO_2(g) - 41.1kJ/mol$
という反応が起こり、水素とCO₂が生成される。このままでは水素ガス中にCO₂が混入しているので、酸化カルシウムCaOを入れることにより、

$CaO(s) + CO_2(g) = CaCO_3(s) + 178.3kJ/mol$
という反応（炭酸化反応）を起こさせる。

以上一連のプロセスをまとめると、



という反応になる。副生成物である気体のCO₂を固体の炭酸カルシウムCaCO₃で回収・固定化できる。これが、この反応の特徴である。さらに、ど

のような化学反応でも反応平衡が存在し、それ以上は反応が進まなくなるが、反応気体中の生成物、CO₂が取り除かれることで、系が非平衡状態となり、さらに生成反応が進行し水素が生成されるので、通常の平衡状態以上に水素生成が促進されるという利点もある。このメカニズムを図2に示す。一定の容積の中に含まれる反応物と生成物の割合（濃度積）は反応平衡値で決まっており、この割合に達した状態が平衡状態である。しかし、ここから生成物の一部（CO₂）を取り除いてやると、また濃度積が平衡値に戻るよう反応が進む。これを繰り返せば、通常の平衡状態で得られるよりも多くの生成物（H₂）を得られるのだ。

ただし、ここまでは以前から知られていたことである。この反応にさらに工夫を凝らすことにより、図3に示すような、CO₂を全く排出しない炭素循環型水素キャリアシステムを構築しようというのが、加藤先生のアイデアだ。ここで再び登場するのが熱エネルギーである。

具体的には、上記プロセスを燃料電池自動車やモバイル機器など燃料電池を利用する移動体で行う。移動体は炭化水素、水およびCaOを搭載し、反応で得られた水素を用いて、燃料電池より電力を得る。生成された炭酸カルシウムは生成ステーションに回収され、熱エネルギーを加えると、炭酸化反応の逆反応が起こり、CaOとCO₂が再生する。CaOは再び移動体上での水素生成反応に用いられ、CO₂は貯蔵される。一方、再生ステーションでは水の電気分解を行い、ここで得られる水素と貯蔵していたCO₂を反応させることで、メタン

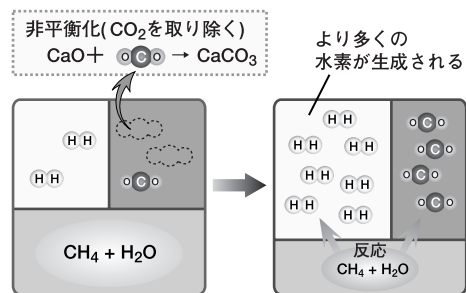


図2 水素生成促進のメカニズム

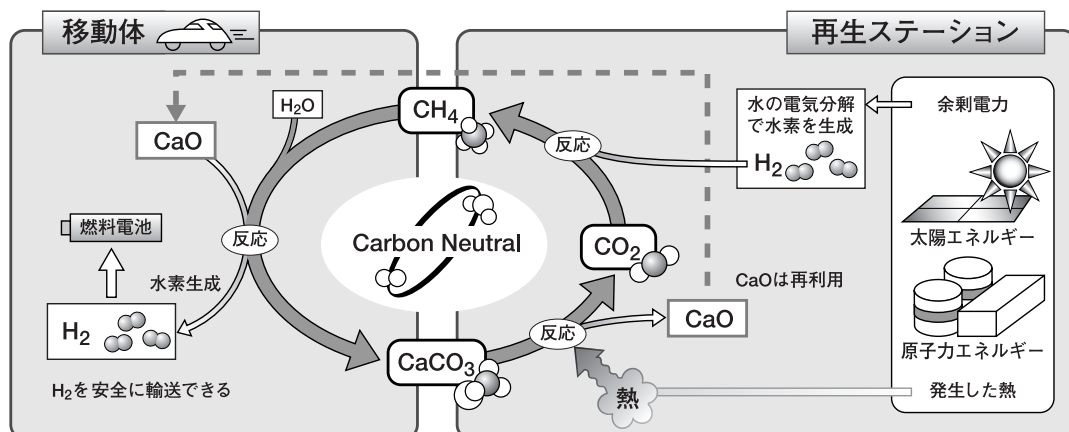


図3 炭素循環型水素キャリアシステムの概要

を再生する。そして、このメタンを再び移動体の水素生成反応に利用するのだ。

このようなサイクルにより炭素は水素のキャリアとしてシステム内を循環し、外部にはCO₂が一切排出されない水素キャリアシステムになるといわれる。しかも、水素は爆発性を有しており圧縮してタンクに詰めるには少なからずリスクがあるのだが、このシステムでは水素を利用する移動体上で生成するため、このリスクを回避できる。

なお、先ほど述べた水の電気分解にはピーク時以外の余剰電力を用い、炭酸化反応の逆反応を起こすための熱エネルギーには発電所や工場が発生する廃熱を利用することが想定される。つまり、このシステムは廃熱を利用することによってエネルギーを貯蔵し、かつ安全に輸送できる、今後のエネルギー利用における重要課題を見事に果たす可能性をもったシステムなのだ。

加藤先生は、このシステムを原子力発電と組み合わせることで最も効果的に活用できると考えている。もちろん自然エネルギーの利用も可能である。太陽エネルギーのように不安定なものでも、このシステムでは化学反応を利用して物質として貯蔵しておけるので、有効なのだ。しかし、現代の莫大なエネルギー消費は、自然エネルギーだけでは賄いきれない。化石燃料への依存は減らす必

要がある。しかし自然エネルギーだけでは量足りない。現実的に考えれば、原子力発電しかないのではないかというのが加藤先生の考えだ。

炭素循環型水素キャリアシステムでは、繰り返し利用におけるCaOの耐久性や安定なCO₂からメタンを作るための触媒の開発など、まだまだ課題が多い。しかし炭素を大気中に放出せず、利用可能な環境下で循環できる、つまり炭素のリサイクルが可能である。これが重要なことなのだという。化石燃料の枯渇が進むと、いずれ日本では炭素が足りなくなると加藤先生は言う。このシステムを用いて従来のカーボンニュートラルシステムに原子力を組み込み、炭素を循環させて活用し、エネルギーを大量消費する現代に対応したサイクルを構築しようというわけだ。

近年の社会問題は複雑だ。エネルギー問題や環境問題、食糧問題などは複雑に絡み合っており、さらに経済発展も考慮すると、一方を立てれば他方が立たずといったジレンマに陥ってしまう。このような問題にただ一つの技術での解決を期待するのは難しい。また、どのような技術を用いて今後の社会を形成していくかを決めるのは、現代を生きる我々である。加藤先生は様々な手法からアプローチを試み、科学者として導き出したありのままの事実を社会に提示し続けている。

エネルギー問題の本質を考えて研究を進めておられる加藤先生のお話は興味深いものばかりでし

た。快く取材に応じていただいた加藤先生に厚くお礼申し上げます。(鈴木 崇弘)