

エネルギー・環境問題における科学と科学者の責任

平田文男 総合研究大学院大学教授 機能分子科学専攻／自然科学研究機構 分子科学研究所教授

地球規模での温暖化、エネルギー資源の枯渇、食料価格の高騰という人類の存亡に関わる問題が噴出している。昨年、北海道で開催された環境サミットを契機に、こうした問題に対する全世界の関心はかつてなく高まり、問題解決への提案や試みが賑やかに報じられた。しかし、問題の本質的解決、すなわち化石燃料から脱却して、持続的な社会を実現する見通しが得られたという報道がいまだ聞かれないのは、それらが「病巣」の一面だけに対する対症療法的な処方箋だったり、単に利潤追求のためにこの問題を利用しては過ぎないからである。

現在進行している危機の歴史的、社会的背景を洞察するとき、その病巣はあまりにも深く、対症療法的な解決策や政治的決着などで問題が解決するほど甘くはないことに気づかざるを得ない。我々が直面している問題は、化石燃料を前提として生み出され、それを駆動力として発展してきた現代社会の技術的・経済的基盤そのものに深く根ざしており、それを否定することなくして本質的解決はあり得ないのである。

化石燃料の二面性と「否定の否定」

産業革命以前、人類が利用したエネルギーは薪・木炭、水力、風力、畜力など、元はといえばすべて太陽エネルギーであった。それは「素朴な農耕型エネルギー」であり、完全に再生可能なエネルギーであった。しかし、産業革命以降、主なエネルギー源は化石燃料に代わった。これは「素朴な農耕型エネルギー」の否定であり、「狩猟型エネルギー」への転換を意味する。

化石燃料の利用は、単にエネルギーとしての側面（動力や照明、暖房など）だけでなく、建築材料や衣類などの高分子素材、医薬品、肥料など、「物質」としての側面をもつ。この二つの側面を統一的に捉えなくては、問題は本質的に解決しない。「産業革命以前のエネルギーに戻ればよい」と唱える論者がいるが、現在の生産力は産業革命以前とは全く異なるレベルに達しており、「素朴な農耕型エネルギー」ではこれを支えることはできない。

化石燃料からの脱却を目指す道のひとつに、「原子力エネルギー」の開発がある。しかし、その安全性、放射性廃棄物の問題、国際平和への脅威など、すでにさまざまな問題点が指摘されている。また、化石燃料のもつ物質的側面を無視しているため、物質の原料となるものを他に求めなければならず、化石燃料の本質的代替にはならない。さらに問題なのは、

化石燃料に置き換えるほどの規模で原子力エネルギーを使いつづけると、温暖化を加速する可能性があるということである。原子力エネルギーの大量消費は最終的に熱エネルギーに変わり、新たな熱源をつけ加えることになるからである。

化石燃料からの脱却を目指すもうひとつの道は、地球上に降り注ぐ太陽エネルギーをできるだけ広汎に利用すること、すなわち「農耕型エネルギー」の利用にあると考える。ただ、それは化石燃料によって否定された「素朴な農耕型エネルギー」ではなく、科学・技術の成果を結集したものでなければならぬ（その意味で、化石燃料の否定はヘーゲル哲学における「否定の否定」、あるいは「止揚」に相当する）。

この新しい「農耕型エネルギー」においては、化石燃料の欠陥は否定され、長所は継承されなくてはならない。欠陥とは自然の循環系を超えた二酸化炭素の大気中への放出であり、長所は高分子などを作り出す化学変換の原料物質としての側面である。

化石燃料克服への最有力候補：アルコール

化石燃料の二つの側面を統一的に具現する化合物のひとつに、アルコール（メタノールやエタノール）がある。輸送や発電の燃料として使うことができる一方、化学物質創製の出発物質としても有効である。もし、太陽エネルギーを使って空気中の二酸化炭素と水からアルコールを大量に生成できれば、化石燃料に置き換えられる道理である。しかも、持続可能なエネルギー源であり、自然の循環系を超えて二酸化炭素を大気中に放出することもない。

アルコールを効率よく、大量に生産する方法としては、化学触媒を使って空気中の二酸化炭素と水から、直接メタノールを合成する方法がある。しかし、それは生物が数十億年の進化の過程で獲得した能力を実験室で作りに匹敵し、現代科学の粋をもってしても極めて挑戦的な課題である。

もうひとつは、植物の光合成を利用する方法である。植物は太陽エネルギーを炭素化合物として固定している。植物が蓄えた炭素化合物を利用するのは、最も効率のよい「農耕型エネルギー」であろう。

トウモロコシやサトウキビなどの植物の食べられる部分から、発酵によってアルコールを作る技術は有史以前からある。しかし、そのような方法は食料問題と競合し、別の矛盾を引き起こすことが最近のバイオマスの事例からも明らかである。だが、トウモロコシの茎や稲藁、あるいは雑草や竹な

ど、食べることができない部分、つまり植物のセルロースやリグニンからアルコールを作り出せれば、状況は一変するに違いない。

セルロースは砂糖の分子が重合してできた高分子だから、これを加水分解して砂糖に変え、その砂糖から酵素（酵母）を使ってアルコールを作り出すのがおそらく最も可能性の高い方法である。ところがセルロースは水に溶けにくく、その構造が極めて多様なため、これを効率よく加水分解する方法は未解決の問題になっている。

太陽エネルギーの利用における技術的課題

水力発電の場合、エネルギー源はダムの水に蓄えられた重力のポテンシャルエネルギー（力学的ポテンシャル）であり、太陽エネルギーはこれを蓄えるために使われる。風力発電では、風力を生じさせる大気の密度揺らぎ（圧力差）（熱力学ポテンシャル）を作り出すために消費される。こうした形態のエネルギーは、地球上に降り注ぐ太陽エネルギーのごく一部であり、しかも天候や地形に依存する極めて不安定なエネルギーである。

これらとは全く異なるのが、太陽光エネルギーを電子の「化学ポテンシャル」として蓄える方法である。たとえば、水素分子と酸素分子が混じった系と、それらが反応して水になった系の電子1個あたりの化学ポテンシャルを比較すると、前者の方がより高い化学ポテンシャルをもつ。したがって、この系は自発的に反応して化学ポテンシャルの低い水になり、この時消費した化学ポテンシャルは光と熱のそれになる（燃料電池の場合は「電気」を作り出す）。もし、この反応を逆行に行わせることができれば、太陽光エネルギーを使って水素と酸素を作り出すことが原理的にはできるはずであり、そのエネルギーは水素分子と酸素分子中の電子の化学ポテンシャルとして蓄えられる。

そのような反応は実際に知られている。「光触媒」を使った水素発生装置の原理は、陽極として酸化チタン（半導体）を、陰極として白金を水に浸した電気化学系であり、酸化チタンに光を当てて価電子帯の電子を伝導体に引き上げる。これは太陽光エネルギーを電子の化学ポテンシャルに変えることを意味する。このプロセスで、酸素分子と水素分子が発生する（本田―藤島効果）。

しかし、このような装置は未だ実用化されていない。理由のひとつは、触媒（ここでは酸化チタンと白金）のエネルギー変換効率がまだ非常に低いこと。その主な原因は、光のアンテナとして使われる触媒（ここでは酸化チタン）が収集する光の波長帯が非常に限定されていることによる。また、これらの触媒の価格が非常に高いという問題もある。現在、世界中の研究者がこれらに代わる触媒を見つけようと努力しているが、実用化に足るほどには成功していない。光アンテナの素材として、百数十もの元素からどういう元素を選び出し、どう組み合わせるのか。それを探るのは宝くじを当てるよりも難しい。

この状況を打破するためには、理論・計算科学の寄与が不可欠だろう。量子力学、統計力学、分子シミュレーションなど、現代物理と化学の理論的方法論を積極的に利用して、少数の候補を選択すれば、実験によって最も効率の良い素材を選びだすことはそれほど困難ではないだろう。

太陽光エネルギーを電子の化学ポテンシャルとして蓄えるという意味では、植物による光合成も同様の原理で行われる。現在、研究者が最も努力を傾注しているのは「酵素（セルラーゼ）」を使う反応である。課題は効率のよいセルロース分解酵素を開発することだが、簡単ではない。セルロースは水に解けにくい高分子で、しかも植物中に単独で存在するのではなく、他のタンパク質や糖類などで被服されているからである。さらに、セルロースの種類はあまりにも多く、それらを分解する酵素も仕組みも非常に異なっている。この場合も、遺伝子工学などの実験的手法のみで解決することは不可能に近く、現代の物理、化学、生物の理論的成果を結集した計算科学的方法論の発展が期待される。

科学と科学者は何をなし得るか？

「農耕型太陽エネルギー」利用の実現が人類史に与えるインパクトは、産業革命に匹敵する、あるいはそれ以上のものになるだろう。そのためには、学際的ないしは総合的な科学・技術システムの構築が不可欠であり、多くの異なる学問分野の協力した取り組みが必要である。科学と科学者は、この変革を主導する歴史的責務を社会から課せられていると考えるのは気負い過ぎだろうか？

人類は過去に少なくとも一度、科学者がイニシアチブを取って政治を動かし、人類未知の技術的課題を解決した歴史をもっている。第二次世界大戦末期の「マンハッタン計画^{*1}」である。その成果に対する評価は大きく異なるところだが、このプロジェクトが残した最大の教訓は、科学者・研究者の英知を結集すれば、人類未知の科学・技術を短期間に創出できることを実証したことである。それは当時の米国の為政者と科学者がナチスの脅威を取り除くためには「一刻の猶予もゆるされない」という認識を共有したからに他ならない。

現在、科学および科学者は、そのような危機意識を社会や政治と共有しているだろうか？ もし、この人類史的危機に対して何ら有効なイニシアチブをとることができなければ、科学と科学者に対する社会の信用は失墜するだろう。

環境・エネルギー問題の解決は、科学・技術、政治・経済・文化を含む社会の総合的な取り組みを通じてしかなし得ない。その意味では、これらの学術分野を包括し、学術領域トップレベルの研究所を基盤機関として擁する総研大の位置づけは、国際的にもユニークである。化石燃料から脱却し、持続的な社会を実現するための人類史的取り組みに対する総研大のイニシアチブを期待して止まない。

*1 マンハッタン計画
「ナチスドイツより早く核兵器を開発すべし」という至上命題の下に、アインシュタインが米国大統領に送った書簡に端を発した米国のプロジェクト。物理、化学分野の研究者が総力を結集し、原子力爆弾を作り出すことに成功した。