

太陽エネルギー循環社会を目指そう

東京電機大学理工学部 小田 垣 孝¹

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災とそれによって引き起こされた福島第一原子力発電所の崩壊は、極度に電気エネルギーに依存する現代社会の脆弱性を世界に対して警告し、我々日本が、そして世界が新しい未来社会へと変改すべき時が来ていることを端的に示した。震災後1年が経つが、復興も遅々として進まず、また原子力発電所の事故に関しても、炉の中はどうなっているのか、再臨界は起こらないのか、メルトダウンの原因は津波なの地震なのかなど今なお不明なままである。1ベクレルたりとも放射性物質は漏らさないはずであった原子炉であるが、福島第一原子力発電所からは空中や地下に今なお大量の放射性物質が放出されている。最近の朝日新聞の世論調査では57%の人が原子炉の再起動に反対であるにも拘わらず、政府は産業界に押されて、停止中原子炉の再起動に躍起になっている。菅前首相による原子力政策の見直しの提言に対して、現在も賛否両論が入り乱れて議論が行われているところであるが、原子炉の安全性の向上や代替エネルギーをどうするかという議論が大半であり、「そもそも我々地球上の生命はどのように命を保っていくべきか」という根本に立ち返った議論はほとんど聞かれない。

本論考では、本誌の読者だけでなく、ネット上の一般市民に向けて、物理学的視点からエネルギーに関わる問題点を根本に立ち返って整理する。まず、エネルギーを利用すれば、再利用できない形なることを説明し、ついでエネルギー源の分類を行ったうえで、地球上の生命体である我々に利用が許されるエネルギー源の条件を考察する。ついで、これらのエネルギー源を持続性、安全性やコストの面から判断し、評価する。これらの考察に基づいて、未来の社会として、太陽エネルギー循環型社会を提言し、日本がエネルギー大国になることも夢ではないことを示す。

2. エネルギーは再利用できない

地球上で我々が利用しているエネルギーは、様々な形態で物質・物体(エネルギー媒体と呼ぶ)に蓄えられているものである。現在利用されているエネルギーの源は、(1)物質の化学反応によって放出される化学結合エネルギー、(2)物体のもつ位置エネルギー、(3)原子核内に蓄えられたエネルギー、(4)太陽内の核融合反応から放出される太陽光のエネルギーに限られる。我々が消費しているエネルギーは、すべてこのどれかを利用したものである。

人類が最初に利用したエネルギーは、位置エネルギーと化学エネルギーであり、狩猟における投石や可燃物を燃やしたときに出る熱エネルギーが調理、暖房や照明に用いられた。その後、

¹ E-mail: odagaki@mail.dendai.ac.jp

水の位置エネルギーの差による水流や大気圧の差から生じる風を水車や風車として用いて、製粉や紡織などに幅広く利用された。さらに内燃機関が発明されて化学結合エネルギーが大量に利用され、石炭や石油、さらに液体燃料や気体燃料が各家庭にも供給できるエネルギー源として広く開発されてきた。19世紀後半から20世紀にかけて、コイルの中で磁石を動かすことにより電流が発生することが発見され、位置エネルギーや化学結合エネルギーを利用して磁石を動かして電気エネルギーが作られるようになった。電気エネルギーは極めて汎用性が高く、また送電線を引けば各家庭に容易に送ることができることから20世紀の後半から今世紀に掛けて爆発的にその消費量が増えている。最近では、電気エネルギーを溜める蓄電器の小型・軽量化が進み、電気エネルギーが車の主要な動力源になる日もそう遠くはないであろう。

このようにエネルギーは現代文明にはなくてはならない重要なものであるが、その概念が確立したのは300年ほど前のことに過ぎない。最初に導入されたのは、地球上で運動する物体のもつ運動エネルギーと位置エネルギーであるが、その重要さは力学の祖であるニュートンすらも気がついていなかったようである。その後、化学結合エネルギーや電気エネルギーなど様々な形でエネルギーが存在することが示され、「エネルギーは形を変えるが、その総量は不変である」というエネルギーの保存則が厳密に成り立つことが示された¹⁾。エネルギー保存則は、熱力学の第1法則と呼ばれ、物理学の最も重要な法則の一つとなっている。一方、熱機関の応用が発達し、エネルギーの大量消費が始まった19世紀には、エネルギーの総量は保存しても、一度利用されたエネルギーは、全部を再度利用することができないことが明らかにされた。例えば、水力発電で作られた電気エネルギーを全て使っても、水を元の状態に戻すことができないのである。一部のエネルギーが熱エネルギーなど利用できない形に変わるからである。この事実は、熱力学の第2法則すなわち「エントロピー増大の法則」として知られており、エネルギーの保存則とともに自然界の特徴を表す重要な法則であるが¹⁾、これまで日常生活や政策立案において考慮されることは少なかった。この法則によれば、過去に地球に蓄えられたエネルギーを消費すれば、いずれ利用できるエネルギーは枯渇し、そのエネルギーに依存する社会は存続できなくなることを意味している。

3. 様々なエネルギー源の評価

エネルギー源の長短は、1. 循環性 2. 安全性 3. 廃棄物 4. 利便性 5. コスト の五つの観点から論じる必要がある。循環性は、エネルギー媒体が地球環境の中で数年の間に再利用できる形になるかどうかの尺度となる。再利用可能性と呼んでもよいが、エネルギーそのものの再利用ではなく、エネルギー媒体が再利用できるかどうかとすることである。次に注目すべき点は、エネルギー発生装置の安全性である。過去の災害から想定される災害に耐えうように設計されているだけでなく、東日本大震災のように想定を越える災害が発生したときに、その被害の及ぶ規模と継続時間および災害後の対処可能性が基準となる。廃棄物に関しては、エネルギー取得後のエネルギー媒体が環境を変化させるかどうか、またそれらはどれ位の間管理しなければならないかが判断の材料となる。利便性は、エネルギー発生装置とそのエネルギーの利用場所との間のエネルギー移送の手間およびエネルギーを発生する物質とエネルギー発生装置との距離が重要な尺度となる。コストは言うまでもなく、単位量のエネルギーを作り出すのに必要な費用で

あるが、単にエネルギー発生装置の設置、エネルギー媒体とエネルギーの移送に必要な経費だけでなく、環境に対する負荷、災害の後処理に必要な経費及び廃棄物の処理に必要な経費を全て考慮すべきであり、現在行われている営利企業による商業ベースの試算では、災害や廃棄物に係わる費用が過小評価されている。

これらの観点からエネルギー源それぞれの長短を判断してみよう。化学結合エネルギーは、分子を構成する原子の結合が変化するときに取り出されるエネルギーであり、旧石器時代からすでに人類が薪などを燃やして調理や暖房に利用したものである。現在用いられている燃料は、石油由来のガソリンなど、石炭および都市ガス、天然ガス、植物由来のアルコールとガスであり、少量だが薪、炭、煉炭もなお使われている。将来メタンハイドレートや水素ガスの利用も考えられている。いずれもその燃焼時に生じる熱を直接利用するか、熱によって膨張させた気体によってピストンやタービンを動かしてエネルギーを取り出す。まず、循環性をもつエネルギー媒体は、薪、炭、植物由来のアルコール及びガスである。石油、石炭、天然ガスや現在注目されているメタンハイドレートは、過去に地球上に蓄えられたエネルギー媒体であり、利用すれば容易には再生されない。水素ガスは自然界に存在せず、何らかのエネルギーを用いて水から作られており、半循環的である。安全性の面においては、エネルギー源の貯蔵庫の爆発が大きな惨事を引き起こす可能性があり、また水素の場合には空気中の酸素と触れたときに大爆発を起こす危険性がある。どの燃料も排出されるものは、基本的には炭酸ガスと水である。しかし、化石燃料の場合、現在の大気の組成のバランスを壊すことになり、温暖化が危惧される。普通、エネルギー源は高温で燃焼するので、窒素酸化物が放出される。また、化石燃料の場合には不純物から亜硫酸ガスが発生し、固形微粒子が空気中に粉塵として放出される。液体あるいは気体物質は、搬送や移送が容易であり、車に積んでいくことも可能である。エネルギー源となる化石燃料を自然界から取り出す費用は、近年どんどんと増加する傾向にある。

位置エネルギーは、地球上で地表より高い位置にある物体が持つエネルギーであり、そのエネルギーは物体が地表に到達するときに取り出すことができる。実際、川の流れを利用した水車は、紀元前からギリシャなどで使われている。水力発電は、水の流れを利用して、位置エネルギーを電気エネルギーに変換する。風力や潮汐力の利用は、圧力差によって生じる大気流や海流を用いるものであり、広い意味で位置エネルギーの利用と考えることができる。大気圏における水の循環や気候変化で生じる風は、人間がコントロールできないが、利用した後にもまた生じるものであり、循環性の高いエネルギー源である。ただ、水力の大規模な利用は、人工的に作られたダムによって行われ、ダム建設による自然破壊は再生できない場合もあり得る。また、東日本大震災でもあったような災害によるダムの崩壊が起こった場合に、その安全性や廃棄物の問題が生じるが、エネルギー発生装置の設置された領域に限られる。エネルギーの直接利用は、風車や水車のように発生装置を設置できる場所が限られているが、一方電気エネルギーに直接変換できるので、その利便性はかなり高いものになる。コストに関しても、大規模なダムを造らない限り、比較的安く抑えられる。

原子エネルギーは、アインシュタインによって発見された質量とエネルギーの同等性により、原子が崩壊するときに失われる質量が、発生するアルファ線やベータ線の運動エネルギー或いは

ガンマ線のエネルギーとして取り出される。このエネルギーを直接使うのが原子爆弾であるが、原子の核反応を制御しつつ、これらの高速の粒子が持つエネルギーにより水を蒸気に変え、蒸気によってタービンを回して電気エネルギーとして取り出すのが原子力発電である。まず、循環性の尺度で言えば、地球の資源の一つであるウラン鉱石の一方的な利用であり、ウラン鉱石はいずれ枯渇する。原子炉で生じる放射性的超ウラン原子であるプルトニウムも使用され始めているが、資源は有限であり、循環性を持たないことに変わりはない。また、放射線の危険性から原子炉をエネルギーの消費される場所から遠く離れたところに建設せざるを得ず、エネルギーの移送には、高いコストがかかる。原子力発電は、1986年のチェルノブイリ原子力発電所4号炉の事故や、福島第一原子力発電所の事故で明確に示されたように、事故や災害に対して極めて脆弱なシステムであるだけでなく、事故後も放射性物質が継続して放出されるので、事故処理のできない状態が続き、さらに周辺の広大な地域を長期にわたり居住できなくする。空中や水中に放出される放射性物質は、地球全体に影響を与える。これは、他のエネルギー発生装置で起こりうる事故とは比較にならない欠陥である。安全性の問題にも増して重要な問題は、使用済み燃料をはじめ、放射性物質で汚染されたものが大量に生じ、再処理を何度か繰り返しても最低数100年間、それらを厳密に管理し続けなければならないことである。日本においては、2050年頃までにドラム缶でおよそ60万本の放射性廃棄物が発生すると試算されている。今回の事故でさらに大量の放射性廃棄物が出ており、今後も原子炉を使い続ける限りさらに増加し、それらの管理は未来の日本人の巨大な負債となる。原子力エネルギーは安全であり、費用が安いという話が電力会社で作られ、それを政府が追認して、日本だけで54基もの原子炉が建設されたが、これらの半永久的に続く廃棄物の管理費や国家予算ほどの莫大な事故処理費などを含めると、決して低コストであるとは言えない。もし我々が古代の人々が残した汚物を現在もなお管理し続けなければならないとしたら、我々は耐えられるであろうか。

言うまでもなく、原子エネルギーの兵器への利用はあってはならなかったものであるが、そもそもエネルギー源としても利用されるべきではなかったのであり、原子エネルギーを用いたことは未来に対する現代文明の恥ずべき汚点であろう。

太陽光エネルギーは、植物の光合成を通して地球上のほとんどの生命の源となっており、現在太陽光発電により電気エネルギーとしても利用され始めている。太陽エネルギーのエネルギー媒体の循環性、安全性は問題なく、また廃棄物も劣化した太陽電池だけであり、再利用は容易である。現在のところ、太陽電池そのものはかなり高価であるが、一戸の家に設置すれば、その家で使用する電気量程度の発電が可能であるので、その利便性は極めて高い。太陽光は、水力の利用に必要な水の循環をもたらし、また気圧の高低を作り出すので、水力や風力を通して利用される位置エネルギーは、もとは太陽エネルギーであるといってもよい。

最後に電気エネルギーにも触れておこう。電気エネルギーは、現在最も利便性が高く交通、調理、照明、食糧の貯蔵、冷暖房とあらゆるところで利用され、更に現代の情報化社会は電気エネルギーによって成り立っている。自然界には、雷放電のように電気エネルギーの関わる現象はあるが、今のところ直接それを取り出すことは不可能であり、我々が利用している電気エネルギーは、これまでに見てきた様々な形のエネルギーを変換して作られている。したがって、循環性、

安全性などの特徴は、元となったエネルギー源を対象にして述べなければならない。電気エネルギーは、現在のところ大量に蓄えることはできていないが、送電線を使ったエネルギーの移送の利便性や汎用性は最も高く、将来もエネルギーの利用形態としては最も重要なものとなる。

現在利用できるエネルギー源の特徴を表 1 にまとめておく。

エネルギー源		循環性	安全性	廃棄物	利便性	コスト
化学結合エネルギー	石炭・石油・天然ガス	×		×		
	バイオマス					
	植物由来アルコール					
位置エネルギー	水力					
	風力					
原子エネルギー		×	×	×		×
太陽エネルギー	シリコン太陽電池					
	色素太陽電池					

表 1 エネルギー源の比較。安全性は、災害による事故の影響の大きさによる。

4 . 太陽エネルギー循環社会

我々は、かけがえのない地球環境の中で育まれた生命であり、太陽系の続く限りは地球上の人類を含む全ての生命を継続させる義務を負っている。決して、未来の人々に環境の破壊や廃棄物の管理という負の財産を残してはならない。

エネルギー源を利用する上で最も重要な尺度は、エネルギー媒体の循環性或いは再生可能性と安全性及び廃棄物の有無である。植物は、動物が排出する炭酸ガスと水を取り込み、クロロフィルによって太陽エネルギーを利用して生きている。このとき、動物が食することができるデンプンやセルロースを作っており、生態系として閉じた循環系を形成している。つまり、植物を効率よく利用することが可能であれば、我々の社会は太陽エネルギーの下で一年をサイクルとする完全な循環社会となる。循環性のある社会において我々が唯一依存できるのは太陽エネルギーである。ただ注意しておかなければならないのは、地球が太陽から受けているエネルギーは、太陽光に垂直な面で 1 平方メートル当たり 1400 ワットであり²⁾、それによって全ての生態系が活かされているので、人間が独占することはできないことである。

地球上の生命は、全て太陽が発する光（電磁波）のエネルギーによって育まれている。太陽光のエネルギーを利用して、光合成物質がデンプンやセルロースを作る。一方、光の持つ熱作用によって、水が海水中や大気中を循環し、水や風、海水の流れを作り出しており、さらにその一部は雷のように電気エネルギーも生み出している。これらの太陽光エネルギーを蓄えた地球上のエネルギー媒体のみを利用した、一年（或いは数年）をサイクルとした太陽光エネルギー循環社会こそが我々が今後目指すべき社会である。図 1 にその概念図を示す。

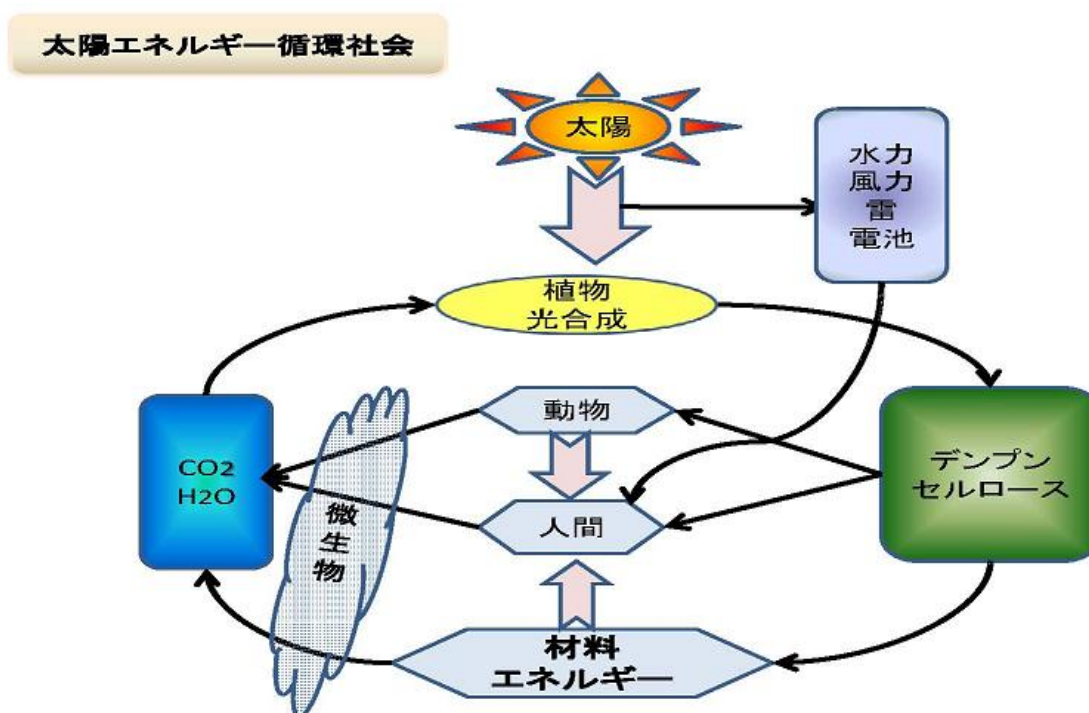


図1 植物に基づく太陽光エネルギー循環社会

まず、光合成で作られるデンプンは、それが朽ちる前に食料として利用されており、今後は技術開発によってセルロースを材料やアルコールに変換し、エネルギー媒体としなければならない。現在、すでに植物から一部のプラスチックが作られ、デンプンからアルコール燃料が作られている。望まれるのは、食料として使われるべきデンプンではなく、現在ほとんど利用されていないセルロースから燃料を得ることである。つまり、デンプンだけでなくセルロースを、それが朽ちて、炭酸ガスと水に戻る前に、エネルギー媒体として利用するのである。

太陽光から直接電気エネルギーを取り出す努力はさらに促進すべきである。太陽電池は現在シリコンから作られており、その効率20%前後が主流であるが、将来的には40%の効率が目指されている。注意すべきは、太陽電池の設置は、ビルの屋上や壁、屋根の上、不毛の地に限るべきであり、休耕田といえども植物を育てることが可能な場所を太陽電池で覆うことはやってはならないことである。

光合成の化学反応の中では、すでに電子の移動が起こっており、それを直接電気として取り出すデバイスの開発研究が進められている。実際、クロロフィルなどの植物由来の色素を使って、太陽電池を作れることが示され^{3,4,5)}、またコストもシリコンベースの太陽電池の10分の1と試算されている。クロロフィルによる光合成の効率は、光の強さによって異なるがシリコン太陽電池よりかなり高いことは知られており、効率的にエネルギーが変換される。このエネルギー変換が実用化されれば、「ほうれん草で車が走る」社会が実現することになる。

風力発電もさらに効率化が求められる。小型軽量化により、小さなコミュニティーごとに発電施設を作ることが望まれる。

植物に基づく太陽エネルギー循環社会では、一人の人間が使えるエネルギーは自ずと制限される。例えば日本では、一人当たりの面積はおよそ 3000 平方メートルであり、そこに降り注ぐ太陽エネルギーはおよそ 4000 キロワットほどである。このエネルギーを他の生態系と共有し、さらに食料生産、工業生産や交通に必要なエネルギーもまかなわれなければならない。個人が使えるエネルギー量は制限されなければならない。この社会では、大規模な発電装置の必要性はコミュニティーや公共交通機関などに限られる。各家庭で太陽光、風力、火力発電を行い、軽量で大容量の蓄電装置が開発されれば、安定的な利用が可能となる。さらに、大規模発電所を含めたネットワークにより電気エネルギーの融通システムを形成することにより効率的なエネルギー利用が可能となる。

日本の森林率は、国連食糧農業機関によれば 68.5%、フィンランド、スウェーデンに次いで世界第 3 位である。世界平均は 31% であるから、地球上において、日本ほど緑の豊かな国はないといつてよい。国土面積が小さいので、森林面積は 2510 万ヘクタールであり、その半分は原生林である。多くの緑は山奥で春に炭酸ガスと水から生まれ、秋には地に落ちて朽ち、炭酸ガスと水に戻る。高級な材木となる木や食料となるデンプンではなく、落ち葉、雑草、芝生、竹などこれまで見向きもされなかったものやゴミとして捨てられていた部分を材料やエネルギー源として利用した後に炭酸ガスと水として空気中に戻して、植物に再生させるのである。そのためには、まずセルロースからアルコール燃料を取り出す技術の開発、クロロフィル電池の実用化、および大容量の蓄電装置の開発が必要である。さらに、植物中で行われている光化学反応から直接電気を得る技術を開発し、地上の植物だけでなく光合成を行う海草や光合成細菌に応用することが考えられる。光合成海草による発電が実現できれば、海岸の多い日本は、大きなエネルギー源を得ることになる。また、日本は雷大国である。雷放電をコントロールする技術を開発し、大容量の蓄電装置に誘雷できれば、大きなエネルギー源とすることができる。次の 50 年の間に、これらの技術を完成させ、化石燃料と原子力エネルギーから脱却すれば、日本はエネルギー大国になることも夢ではない。

太陽系惑星の一員である地球上で多くの生命が育かれたのは、太陽が作り出しているエネルギーの流れを有効的に利用しているからであり、太陽系とともに豊かな生命系を維持していくためには、過去に地球に蓄積されたエネルギーではなく、太陽の恵みにのみ依存する社会に変らねばならない。産業革命以後、科学の力で自然をコントロールできるという傲慢な考えが我々の間で支配的となっていた。今こそそれを改め、自然との共生を基本にした社会の形成のために科学を生かさなければならない。

1972 年に打ち上げられたパイオニア 10 号は、太陽系を脱出し、宇宙を航行中である。この宇宙船が地球外生命と遭遇したとき、その宇宙船を送り出した地球が愚かな行為によってすでに滅びていたということにならないようにすべきであろう。

参考文献

- 1) H.B.キャレン「熱力学および統計力学入門」(小田垣孝訳:吉岡書店)。
- 2) 白鳥紀一、中山正敏「熱物理学」(朝倉書店)。

- 3) R. Das et al, Nano Letters **4** (2004) 1079-1083.
- 4) W. M. Campbell et al, J. Phys. Chem. C **111** (2007) 11760-11762.
- 5) A. Hagfeldt et al, Chem. Rev. **110** (2010) 6595-6663.