

今後のエネルギーを考える

Energies of the Future

エネルギーの特性を評価するとき、経済性、安全性、安定性、環境性の4因子で考えるのが適当だろう。このうち、安定性はさらに3つの要素があり、それは資源安定性、供給安定性、出力変動性である。この条件で見たとき、資源有限で環境的にCO₂排出の問題を有する化石燃料は、次第に他のエネルギー、すなわち再生可能エネルギーと原子力に代替される必要があるが、この2つのエネルギーもそれぞれ問題を有する。

再生可能エネルギーはフロー型のエネルギーで資源問題がなく、環境的にもクリーンであるが、コストが高く出力変動が大きいという欠点を有する。いろいろ対応の努力が行われているが、後者の欠点はコスト換算するとかなり高く大きなハンディとなる。原子力は、福島第一原発事故のようになると大きな問題を引き起こす可能性があり、また放射性廃棄物が排出されるという問題点がある。しかし、これらの問題点をコスト換算しても、そのコストは化石燃料と同程度だし、CO₂を排出しないことは大きな利点である。現在原子力発電所がないとすれば、日本のCO₂排出量は20%近く増加する計算になり、その役割の重大性が分かる。原子力の安全性の向上に多大な努力をすべきことはたしかだが、原子力を一定程度確保することは日本にとってぜひ必要なことであろう。

そして長期に渡る将来を考えると、現在の再生可能エネルギーや原子力の問題点を補えるような新しいエネルギーの出現に期待したい。核融合、宇宙太陽光発電、太陽熱発電等はそうした可能性を秘めた新しい技術と言えよう。



When assessing the characteristics of energy sources, it is appropriate to consider four factors, namely economic efficiency, safety, stability, and environmental friendliness. Among them, stability involves the three aspects of resource stability, supply stability, and output stability. In this context, fossil fuel, which is limited in quantity and causes environmental problems such as CO₂ emission, needs to be gradually replaced by other types of energy sources, that is, renewable energy sources and nuclear power. However, there are also problems associated with these other types of energy sources.

Renewable energy sources, which are flow-type energy sources, involve few resource problems and are environmentally clean, but their disadvantages include high costs and high output variability. Converted into cost, the latter disadvantage is rather great, despite various efforts being made to curb it. Issues with nuclear power include the production of radioactive waste and the possibility of causing serious problems as seen in the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

After relevant problems are converted into cost, however, the cost of nuclear power generation is roughly the same as that of fossil-fuel-fired power generation. Moreover, the fact that nuclear power generation does not emit CO₂ is a great advantage. Currently, Japan's CO₂ emission would increase by 20% without the nuclear power plants, underlining the importance of their role. Clearly considerable efforts should be made to improve the safety of nuclear power generation because the country will need to maintain some level of nuclear power generation.

As for the long-term future, it is hoped that new energy sources will emerge that can solve the present problems associated with renewable energy sources and nuclear power. New technologies involving nuclear fusion, space solar power generation, and solar thermal power generation seem promising in that regard.

誰が考えても福島第一原発の事故は大変な事故であった。避難した人の数の多さ、その避難日数の長さ、除染すべき土量の膨大さ。そして福島第一原発の廃炉が完結するまでには30年以上はかかると言われている。放射能によって死亡した人が今のところひとりも現れていないのは救いだ、その被害の大きさを見ると原発の怖さを身にしみて感ずる。したがって、当然の反応は、こうしたことが起きる可能性があるのなら、原発はやめて他の発電所に転換したら、という発想だ。ギャラップ社の調査によると、日本での原発への一般人の反応は、この事故以前は6：3で賛成が大きく上回っていたのが、事故後には4：5で反対が上回る形に逆転したという。この事故の影響の大きさを考えると、無理のない反応かもしれない。

また、菅前首相などは7月に「将来は原発に頼らなくともやっていける社会を作る」と実質的に脱原発社会を実現すべきだとする発言までしている。それでは、われわれはそうした一般の人々の反応に対応して、本当に脱原発の方向に行くべきなのだろうか。

本文は、この疑問に対応するために書かれたものである。そのために、最初にエネルギーが満たすべき諸要件について述べ、エネルギーの選択を考えるための基本的スタンスを明確にする。そして資源有限な化石燃料に代わるものとして考えられている再生可能エネルギー、そして原子力が経済性、安全性、安定性、環境性という4つの条件に照らしたとき、どのように評価できるかを述べる。最後に、長期的に問題を解決する可能性のある革新的エネルギー技術についてふれてみたい。

1 | エネルギーの満たすべき諸条件

人間が生きていくのに必要な基本の要素は何か、と言えば多くの人は食べ物と住まい、と並んでエネルギーをあげるだろう。実際、人類の歴史をかえりみると人間は火によって体を温め、料理をすることを覚え、これをスタートに自分たちの文明を作り出していった。現在の人類は、このエネルギーを熱や電気、あるいは液体・気体

燃料等さまざまな形で利用して生活を豊かなものになっている。

では、このようなエネルギーはそれを利用するうえでどのような条件を持つことが重要なのだろうか。いろいろあろうが、多分次にあげるような4つ程度の条件で考えてよいのではないか。

第1はもちろん経済性のあることである。先進国では利用しているエネルギーはほとんど有価であり、そうとなれば自由主義経済社会ではできるだけ安いエネルギーであることがのぞましい。現在世界のエネルギーの85%を化石燃料が占めるが、ここまでシェアがのびたのは、その使い勝手のよさもあるが、値段の安さが大きな要因である。現在原油の値段は1960年代にくらべれば2ケタ近く高いが、それでも1リッターあたり数十円というオーダーで、その辺で売っているミネラルウォーターより明らかに安い。

第2は今回の福島第一原発の事故で問題となった安全性である。エネルギーである以上、どのような種類のエネルギーであっても、たとえばタンカー等のように集積すれば明らかに危険な存在になる。その意味ではエネルギーはどのような種類であれ、危険な存在であると言えるだろう。ただ、今回の原発事故での放射能放出は、再生可能エネルギーや化石燃料ではあり得ないリスクであり、やはり原発は他に類をみない問題を安全性の面で抱えている、と言ってよいだろう。

第3は供給の安定性である。これはひとつではなく、次に示す3つの面を持っている。ひとつは資源面からの供給制約、ひとつは世の中の流通システム上の不安定性、もうひとつは供給の時間的変動という不安定性である。第1の問題は明らかで、たとえば化石燃料は所詮有限の資源であり、中でも石油はその生産のピークが近い将来到来する、という見方が一般化している。第2の流通システム上の安定性制約は、たとえば石油の供給で象徴できる。石油は中東諸国にかなり集中しており、そのため過去においてしばしば供給の途絶ないし低下が生じている。わが国は、石油に限らず化石燃料を海外に依存して

おり、その意味で化石燃料に関しては供給に関連する海外事情をいつも気にしなくてはならない。戦争は供給途絶を招いた一番典型的な例だが、オイルショックのように値段を供給国が一方向的に急につり上げるのもその例である。化石燃料供給先の多様化、油田等の自主開発はいずれも、その供給安定性を改善する努力のあらわれだろう。

もうひとつの制約は供給の時間変動性からくる制約である。化石燃料は対応する需要に応じてその出力を自由に調整することができる。ところが、再生可能エネルギー、なかでも太陽光発電や風力発電の場合は、出力を自由に調整することが困難で、それは不規則に変動する（出力を常に低いレベルに保つ、という方法で一定化することは可能だが、これでは発電をする意味がない）。電力系統では、トータルの供給とトータルの需要が常に等しく、一方が変動すると他方もその大きさが対応する供給なり需要なりに等しくなるよう、系統の周波数と電圧が変動する。この変動は当然小さい方がのぞましく、変動がある程度以上になると電力系統が機能しなくなる。したがって、供給変動を抑制することは電力システムを運営するうえでの重要な要件となる。

エネルギーに要求される第4の条件は環境に与える影響が少ないこと、環境保全性である。エネルギーは、その供給源での開発、輸送、転換、そして消費の諸点で環境に何等かの影響を与える。たとえば石油、石炭の燃焼はSOXの排出につながり、それを防ぐための脱硫が環境特性改善の重要な手段になる。それに対して天然ガスは硫黄を含まないのでSOXは本来発生せず、その点で同じ化石燃料でも石油、石炭より有利である。この環境保全

を考えると現在もっとも重要な因子と考えられているのが二酸化炭素（CO₂）の排出である。今日、温暖化はきわめて重大な地球環境問題と考えられ、その抑制に世界的に力が入れているが、その原因とされる温室効果の主因は主として化石燃料の燃焼から排出されるCO₂であり、CO₂の排出抑制が世界の重要な行動目標となっている。

一方、原子力における放射性廃棄物の発生と今回の福島第一原発の事故で放出されたような放射能は環境面の別な因子である。ただ、後者の事故の問題は安全性問題ととらえることができるので、以下の議論では安全性に関する問題として扱う。

さて、われわれの現在使っている一次エネルギーは、大別すると化石燃料、再生可能エネルギー、原子力の3つになる。そこでこの3つについて上記4条件がどのようになっているかを表にしたのが図表1である。ここで注意しておきたいのは、3つのエネルギーといってもそれぞれの中身はいろいろの種類に分かれており、4つの条件での評価はその種類に応じてある程度違ってくることである。図表1はあくまでその細かい差を無視して大ざっぱに見た表であることを言っておきたい。それにしても、この表から3つのタイプのエネルギーがそれぞれ違う特性を持っていることがよく分かるであろう。

われわれ人類は従来エネルギーとしては化石燃料に大きく依存してきた。世界の1次エネルギーの85%以上が化石燃料である。しかし、先の説明で述べたように、化石燃料は資源的に有限でやがては枯渇するし、環境的にもその消費にともなって不可避的にCO₂を排出する。そのため、今後は化石燃料から次第に脱却して非化石燃料

図表1 日本の全発電電力量の推移

	経済性	安全性	供給安定性			環境性
			資源面	流通面	出力変動	
化石燃料	○	○	×	△	○	×
再生可能エネルギー	×	○	○	○	×	○
原子力	○	△～×	△～○	△	○	△～○

出所：筆者作成

に転換することが要請されている。その候補と言えば当然、再生可能エネルギー、そして原子力ということになるが、その原子力が今回の福島第一原発の事故でその推進の如何が問われている。そこで、以下では、この2つのエネルギーについて、上記の4条件を中心にあらためて評価をしてみよう。

2 | 再生可能エネルギーの利点と問題点

再生可能エネルギーの第1の利点は資源的有限性という制約のないことである。再生可能エネルギーは、太陽からくるフローのエネルギーの直接ないし間接の形態であり、太陽エネルギーが供給される間は資源枯渇は起こらない。これは化石燃料にくらべて大きな利点である。

第2の利点は、環境へのインパクトの少なさである。特に大きいのは、そのエネルギーの使用に際してCO₂が発生する心配のないことである。バイオマスの場合は植物なのでこれを燃焼するとCO₂が発生する。しかし、バイオマスは太陽光を利用して大気中のCO₂を吸収し自己の体を作っているの、この吸収するCO₂と燃焼で発生するCO₂とはちょうどバランスし、ネットCO₂の排出のないエネルギーということが出来る。

このように再生可能エネルギーは将来資源としてまことのぞましい条件を有しているのだが、実は2つの問題点を有している。

第1は経済性である。最近の政府のエネルギー・環境会議コスト等検証委員会報告書¹によると、各種エネルギーの発電単価は図表2のようになる。これまで世界で広く使われてきた水力を除くと、主な再生可能エネルギーといえは太陽光発電と風力発電の2つである。現状でのコストをみると、風力は幅がありコストの下限は従来電源と競合的であるが、全体的にはやはり50%から100%高いし、太陽光となると従来電源の3倍以上になる。2030年予測値は生産規模の増大による規模の経済、習熟効果を考えてコストの下限はほぼ他電源と近い値になっているが、これはあくまで期待値である。図表1で再生可能エネルギーの経済性の欄が×印としているのはこれらの状況を反映している。

そこで、従来から、特に太陽光発電の高価格を改善しようといういろいろな試みが行われている。もっとも明確なのは固定価格買取制度で、これは当該再生可能エネルギーを電力会社側が一定高価格でかなり長期間に渡って買い取る制度である。そのかわり、電力会社はそのコストを電力価格を通じて電力消費者に転嫁することが法的に認められている。これはドイツ、スペイン等ではすでに行われているが、わが国でも最近、国会を関係法案が通過し、平成24年夏からこの制度が実施されることになっている。当然このような方式が導入されれば、再生可能エネルギーの設備に投資し、そのエネルギーを電力会社

図表 2 諸電源の発電コスト（円/kWh）

電源種類	電源コスト(2010年)	推定電源コスト(2030年)
原子力	8.9～	8.9～
石炭火力	9.5	10.8
LNG火力	10.7	10.9
石油火力	22.1	25.1
地上風力	9.9～17.3	8.8～17.3
洋上風力	9.4～23.1	8.8～23.1
太陽光(住宅用)	33.4～38.3	9.9～20.0
地熱	9.2～11.6	9.2～11.6
小水力	19.1～22.0	19.1～22.0
バイオマス	17.4～32.2	17.4～32.2

出所：エネルギー環境会議、コスト等検証委員会報告書、平23.12.18

に売る投資家が増大するので再生可能エネルギーは普及するはずである。またそうするとその設備生産の増大により、規模の経済と習熟効果がもたらす作用によって再生可能エネルギーの設備コストが低下するので、再生可能エネルギーを導入するインセンティブが一層増す。この好循環で再生可能エネルギーの普及が進む、というのがこの制度の目論見である。

たしかにこの制度は、再生可能エネルギーの経済性の欠点を改善するひとつの有力な方策であるが、太陽光発電の場合は図表2にもあるように、まだ他のエネルギー価格よりかなり高いので、価格が他のエネルギーと競合できるオーダーになるには相当な時間がかかること、この制度を入れても実は設備費の投資回収年数は10年といった長期間で、一般投資家（これは需要家であるケースが多いが）がどこまで投資意欲をそえられるか疑問があること、等を考えると、依然としてこのコスト問題が再生可能エネルギーの普及のひとつの大きな障害となる恐れがあることは否定できない。

しかし、それと同時にもうひとつ問題なのが出力変動という問題である。太陽光発電も風力発電も、そのときの気象や時間によってその出力が不規則に変動する。これらの発生する電力を電力系統に連携すると、ここでは供給＝需要という条件が常に存在するので、供給変動のために系統の電圧と周波数が変化して需要を変え、この等号条件を満たすことになる。したがって、出力の変動が大きいと周波数と電圧の変化が激しくなり、系統の安定性そのものまでが失われる危険性が高い。また、より緩やかな出力変動（たとえば太陽光発電の昼と夜の出力変化）にしても、これは需要の変化とは無関係に発生するので、系統運用のためには供給が余っているときにこれを貯電して不足時にその電力を供給する、といった対応が必要になる。このため、日本の電力会社は、従来は自社系統で購入する風力発電の容量をその自社系統容量の5%程度に限定する政策を打ち出していた。だから今後こうした出力変動の大きい電源を大量に系統に連携すると、なんらかの調整電源を系統に設けて、それ

がこの変動を吸収してくれるようにする必要がある。

したがって、この出力変動の負担は、このような調整電源のコストという形で数量的に表現することもできる。そのような調整設備は、従来は一部の水力と火力発電が受け持っていたが、連結する太陽光ないし風力発電が大きくなると、蓄電池を利用するのが一般的な対応方法と考えられている。その蓄電池のコストがどの程度になるかについては、経済産業省の委員会で推定を行っているが、それによると2030年まで53GWの太陽光発電を日本の電力系統に連携する場合4.6～6.7兆円のコストが必要とされている²。この値の詳細は略するが、下記の注でおよそその値が妥当なことが理解できよう。

注：晴天日53GWの発電量の半分程度を10時間程度貯留して曇天の翌日に放電するとすると、約300GWhの電力の蓄電が必要になる。2020～2030年頃の二次電池のコストをNEDO*は2万円/kWhと予測しているので、必要な電池の総コストは2万円/kWh×300GWh=6兆円となる。

*NEDO、2030年に向けた太陽光発電ロードマップ検討会資料

このコストの値は、kWhベースの値に換算することができる。上記の例で、蓄電池の寿命を10年とすると（寿命は蓄電池の使いかたによって変わるが、この数値はかなり楽観的）、この間の太陽光発電の総発電電力量は

$$53\text{GW} \times 8760\text{h} \times 10 \times 0.12 = 557,000\text{GWh}$$

となる。これで上の4.6～6.7兆円を除すると8～13円/kWhという数字が出てくる。これを図表2の数字と比較すると分かるように、必要蓄電池のコストは通常の発電コストと同等となる。相当に大きな値である。そして、このコストは図表2の数値には含まれていない。

このように、太陽光発電、風力発電の出力変動は、通常の発電コストと匹敵するオーダーのコストと考えられる。これは、これら再生可能エネルギーの設備コストと異なって、設備の量産や習熟効果とは一切関係のない値であり、基本的に変わりようのないコストである。結果として、再生可能エネルギーのコストは、常に従来の化

石燃料等のエネルギーコストにくらべて高いものにならざるを得ない。その意味でこの出力変動コストは、再生可能エネルギーの最大の問題点と言えるだろう。

3 | 原子力の問題点と利点

次に原子力について考えよう。ここではこの一文の経緯上、再生可能エネルギーの場合とは逆に、まず問題点から述べる。原子力の第1の問題点は、すでにふれているように、安全性にある。福島第一原発のような事故は2度と起こしてはならないし、そのための努力をすべての原子力発電所が行わなくてはならない。菅前首相は、原発の運転を再開するときの条件として、ストレステストによる評価をあげたが、たしかにこれはひとつの方法である。ただ、現段階では、このストレステストが具体的にどの程度までの内容を持つのが明確に定まっている。その意味で原発に関しての安全に関する条件を明確に規定することがまず必要である。一部には、原発の稼働期間をたとえば40年と制限する考えもあるが、それだけでは安全性の保証にならないし、また各機器の高経年化対策が進んでいることを考えると、単に年限を機械的に定めることはあまり得策ではなからう。いずれにしても、この安全性をなんらかの形で一定のフォーマットに定義し、それを満たすよう原発を整備していくことが今後の重要課題である。

原発の第2の問題は環境面で、放射性廃棄物の貯留をいかに進めるかである。核分裂をベースにする以上、現在の原発は否応なしに放射性廃棄物を作り出すので、これをどこかに永久処分しなくてはならない。スウェーデン、フィンランド等ではそのような永久処分場が定まったが、世界の他の多くの国では永久処分場を定めることがなかなかできず今日に至っている。日本もその例外ではない。物理的に見れば、世界の中にはたとえばオーストラリア大陸の中央部のように地層も安定し、何万年あるいはそれ以上安定に放射性廃棄物を貯留できる場所が存在する。ただ、現在は世界的に放射性廃棄物を自国で処理する原則が一般化しており、そのために問題の解決

が困難となっている。筆者はこの原則を変えることが問題解決の鍵と考えているが、いずれにせよこの問題は今後も原子力を考える場合常につきまとう大きな問題だろう。

原子力については、コストも問題、とする意見もある。これについて図表2のベースとなるコスト等検証委員会報告書を参照して考えてみよう。図表2に示した原発コストでは、下限は他電源コストと競合できる数字だが、上限が示されていない。これは事故リスク対応費用が明確に決められないから、とのことである。しかし、今回の福島第一事故で議論されている事故コストが数兆円であることを考慮し、仮にそれよりかなり大きい20兆円という大きな額の事故被害を想定したとしても、報告書によればその場合の事故リスク対応費用は1.8円となっている。これを表の下限値に足しても原発コストは11円程度で、他電源コストとほとんど同程度である。したがって、コストの高さが今後の原子力の発展の主な壁となることはまずないとみてよからう。

原子力の問題点としてもうひとつ挙げるべきなのは、資源制約の問題であろう。現在の軽水炉ではU235のみが利用されているが、これはウラン鉱石のわずか0.7%で、現在の世界の原発の容量からすると、その資源量は70～80年、という見方が一般的で、これでは化石燃料とあまり変わらない。その意味では、原子力は資源制約を持っていると言えるが、高速増殖炉を用いると、ウラン鉱石の残りの99.3%を占めるU238が利用できることで、資源制約はほとんどなくなる。ただ現在、高速増殖炉に関心を持つ国はロシア、インド等、少数で大部分の国は軽水炉に限られており、果たして原子力の資源問題がどうなるかは今後の高速炉の動き次第と言えよう。

以上原子力の持つ問題点をあげたが、その利点となると第1は供給安定性である。現在の原発では一度燃料を装荷すると1年は燃料交換を必要としないので、短期の国際紛争等で燃料供給が脅かされることはほとんどない。そのため、世界的に原子力は準国産エネルギーと見る向きが多い。わが国のように資源に乏しい国にとっては、

このような供給安定性のあるエネルギーは、国の基幹エネルギーとして有効な存在である。

そして原子力の別の大きな利点として近年特に強く意識されるようになったのが、非炭素燃料としての有効性である。1997年の京都議定書の調印以来、世界的にCO₂を中心とする温室効果ガスの削減目標をたてることが一般化したが、2020年目標については2010年末のメキシコでの第16回気候変動枠組条約加盟国会議(COP16)で、同年1月末までに各国から同会議事務局に提出された自国の削減目標(発展途上国の場合は行動目標)を自主的な目標とすることで合意されている。それに従うと、日本は鳩山内閣時代に政府が提唱した温室効果ガスの2020年25%削減(1990年比、2005年比では30%削減)目標が国際的に認知された目標ということになる。しかし、これは諸種の検討の結果を見てもきわめてきびしい目標で、容易に達成できる目標ではない。

そこでこの目標の達成にあたって、原子力の果たすべき役割がどの程度かを評価してみよう。そのためには、まず現在の原子力がCO₂削減にどの程度役立っているかを計量的に調べてみる必要がある。

それには、最初に電力の中の火力のCO₂排出原単位を求め、そのうえで現在あるいは将来想定される再生可能エネルギーおよび原子力がどれだけの電力量を供給し、その電力量と同等の供給量を持つ火力がどれだけのCO₂排出をするかを求めるのが筋である。

そこで、最初に現在の火力のCO₂排出原単位を求めよう。基礎データは以下の通りである³。

事業者火力の発電電力量 568,399×10⁹kWh

排出CO₂量 412×10⁶ton CO₂

したがって、CO₂排出原単位はこの2つの比で、725g CO₂/kWhとなる(なお、上記の値は2009年の値であるが、ここではこれで求めた原単位は2005年の原単位と同じと仮定する。これは%のオーダーで正しいと見られる)。

それでは、現在(2005年)の原子力発電所は、どれだけの発電電力量と電力シェアを持つのか。それも上記

と同様のデータソース³から次のデータを得る。

発電電力量 304×10⁹kWh(シェア:27.3%)

これに上で求めたCO₂原単位を乗ずれば原子力が代替したCO₂量が求められる。その結果は、

220×10⁶ton CO₂

これは2005年の日本のCO₂総排出量の18.3%にあたる。すなわち、2005年時点では、原子力が日本の排出CO₂を18.3%減する役割を果たしていたわけである。

先に2020年目標を述べたが、今仮に2020年までに原子力発電所をすべて停止することにしたとすると、その場合はわが国は2020年目標25%にこの18%分を上乗せした目標を達成しなければならないことになる。これはきわめて大きな量である。

しばしばこのような原子力に代わって再生可能エネルギーを拡大したらどうか、という意見が出てくる。そこで、再生可能エネルギーが上記の原子力の果たす役割をどこまで実現できるか、これも簡単な計算から調べてみよう。

将来の電力におけるCO₂削減の方法とすれば、再生可能エネルギー(太陽光発電と風力発電)の利用の増大、節電(すなわち電力需要の削減)の2つが考えられる。

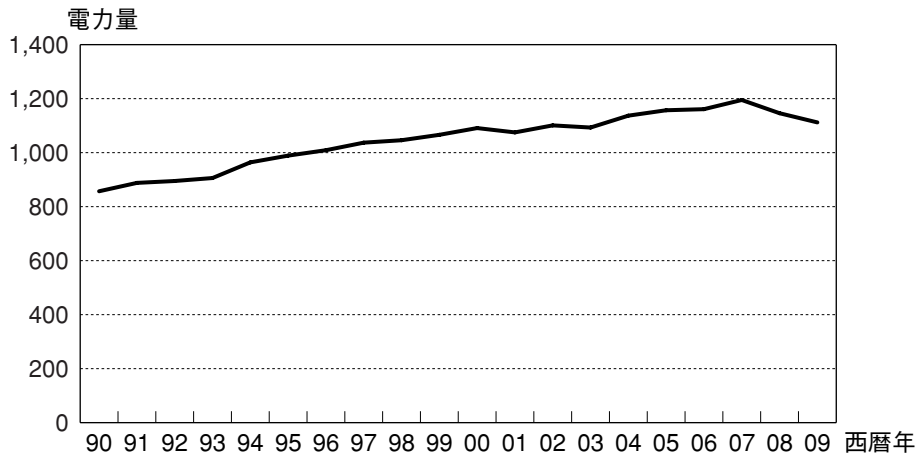
まず、再生可能エネルギーとしてもっとも期待されている太陽光発電を取り上げてみる。2005年の原子力発電電力量304×10⁹kWhを仮に太陽光発電で発電しようとする、どの程度の容量が必要になるだろうか。日本での太陽光発電の年間平均稼働率が12%なので、1kWの年間総発電量は0.12×8760kWh=1,050kWhである。したがって、求める容量は、

304×10⁹/1,050kW=290×10⁶kW

すなわち、現在の原子力の役割を太陽光発電で代替しようとする、何と290GW、日本の総電力容量を上回る容量が必要となる。これはとてつもない量である。そのことを理解するために、次のような仮定をしよう。

「毎年約100万戸の戸建て住宅が建設されるが、現在以後すべての住宅に3kWの太陽光発電ユニットが設置される。」

図表3 日本の全発電電力量の推移



出所：日本エネルギー経済研究所編、エネルギー経済統計要覧'11

これは相当思い切った仮定で、実現するためには住宅建設に太陽光発電設置を義務付けることになる。しかし、それだけの処置をしても、2020年までの約10年間で設置できる太陽光発電の容量は30GWで、上記原子力代替に必要な容量の約10分の1強に過ぎない。だから、太陽光発電のみで原子力代替を行うのは不可能、と言ってよいだろう。

次に節電を考えてみよう。今回の東日本大震災の影響で、各方面で節電の呼びかけがあり、かなりの節電がなされた、ときいている。しかし、一時的な対応はともかく、長期に渡る節電は相当にむずかしい。わが国の統計を見ても過去から電化率（エネルギー需要中の電力比率）は単調に増加しており、そのために電力需要は図表3にあるように、ほぼ単調に増加してきている。

最後の2008年と2009年に需要が低下しているが、これはリーマンショックで経済がマイナス成長した結果である。図表3の中で他にわずか電力需要がマイナス成長になっている部分も、実はその年がマイナス成長になったため、経済が成長している限り電力需要が増える、というのが過去のわが国の状況である。

政府は今後も平均年2%程度の経済成長を計画しており、そのような中で電力需要が低減する、というのはかなり非現実的である。それでも、日本の人口の減少を主原因として日本の経済が今後次第に縮小する、という予

測もある⁴。しかし、その予測でも現在から2020年までのトータルの経済成長はマイナス5%程度であり、対応する電力需要の減少がこれを上回することは考えにくい。

一方、電力需要がマイナス5%となったときのCO₂削減はどうか。詳細は略するが、現在の電力より発生するCO₂は日本全体の排出CO₂の約45%である。したがって、電力需要5%低減のCO₂削減効果は両者の積でほぼ2%となる。これは現在の原子力の持つCO₂削減効果18%のほとんど10分の1に過ぎない。

以上述べたように、原子力のCO₂削減効果はきわめて大きく、再生可能エネルギーや通常の程度の節電では到底賄えない。それと、もうひとつ忘れてはならないのは当面の日本の経済に対する影響である。現状においては原子力発電所の停止はそのまま火力の稼働の増大につながり、それが燃料費の増大となる。新聞報道によれば、経済産業省は、11月21日に国家戦略会議に提出したリスクシナリオで、原発再稼働の凍結がこのまま続けば、2012年には日本の貿易収支が赤字となる恐れがあることを警告している。これは過去において長らく日本が経験しなかった深刻な事態である。

このように、原子力は問題点もあるが、環境的にも経済的にもその存在が大きな意味を持つことを十分理解すべきである。

4 | 今後のエネルギー政策に関する提言

前2節の説明で、再生可能エネルギーがコスト面でかなりの問題を抱えていること、一方、原子力は経済の低炭素化の面で大きな効果を発揮してきたことが分かった。このことは、今後のエネルギー政策を考えるうえで大きな示唆を与える。すなわち、これは下のようにまとめられるのではなかろうか。

- 1) 太陽光発電と風力発電は資源環境的にはできるだけ拡大することがのぞましいが、設備コストと出力調整コストの負担を如何に小さくするかが対策のポイントとなる。前者は固定価格買取制度の運用で電力価格への上乗せの形で全電力消費者に負担を背負わせる方式が採用されたが、後者については現状ではなんら対応がとられていない。これでは電力事業者に過大な負担がかかり再生可能エネルギーの拡大が進まなくなる恐れがあるので、後者の出力調整コストについても電力価格転嫁を認める等、今後具体的対応の方策をとるべきである。
- 2) 原子力発電は福島第一原発の事故を重要な参考として、その安全性の向上に大きな努力を払うべきである。しかし同時に、原子力発電所の停止は日本のCO₂の削減努力を大きく阻害するものであり、また現状では火力発電燃料費の大幅増大を引き起こして日本の貿易収支を大きく悪化させることになりかねない。したがって、原子力の削減は行うとしても最小限にとどめる努力をすべきである。

5 | 長期の革新的エネルギー技術開発

人類はこれまで化石燃料を中心とし、それに再生可能エネルギー、原子力を加えて現在のエネルギー供給を構成してきた。化石燃料が資源有限性と温暖化促進の2つの面から問題がある一方、それらの問題の少ない再生可能エネルギーはコストと出力変動、原子力は巨大事故の可能性と高レベル放射性廃棄物という問題点を持っている。これらの問題点を少しでも和らげようとする努力が

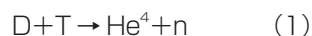
現在続けられているが、正直のところ問題の解決は容易ではない。

それではこれらの問題に対して、従来とは違った、抜本的な対応策はないものか。たとえば、再生可能エネルギーについては大規模で出力変動の少ない方式はないのだろうか。また、原子力では、炉の安全性や放射性物質の放出に関して、現在の軽水炉による核分裂より抜本的に有利な方式はないものか。

このような疑問は、当然のことながら短期間でとくことはできず、解決に長時間を要することになる。そこで、ここでは、このような要請にあるいは応え得るかもしれない長期的な対応方策のアイデアについて説明してみたい。

(1) 核融合発電

核エネルギーの利用法は大きく分けると2つある。本来元素は鉄等の中位の質量の元素が一番安定しており、そのために原子量の大きい元素が核分裂によって中位の元素に転換されるか、逆に原子力の小さい元素がいくつか融合してより重い元素に変わるか、この2つの方法のいずれでも質量が減少し、その減少分がエネルギーに変わる。原子力として、現在人類が利用しているのは上記前者の核分裂の方法であるが、後者の核融合の方法も考えられる。たとえば二重水素Dと三重水素Tを用いた下の反応である。



ここで「n」は中性子を意味する。Dの質量とTの質量の和より、融合後のヘリウムと中性子の質量の和は小さく、その質量差がエネルギーとして放出されるわけである。この方式でも、燃料の三重水素が放射性物質であり、また反応で放出される中性子で反応装置が放射化することは避けられない。ただ、超長期の半減期の放射性物質が発生しないのは核分裂とは異なっているし、燃料そのものから放射性廃棄物が発生することもない。また、上記反応を起こすのに2億度という大変な高温を必要とするので、装置になんらかの欠陥を生ずれば反応はただちに停止し、核融合による爆発は生じ得ない、という安全

上の利点もある。世界的にもこの核融合を発電源に利用したいとの考えは共通しており、そのための基礎研究が進められている。

今、述べたように、この核反応を進めるには非常な高温が必要で、そのためもあってこの核反応を実現した炉はまだ作られていない。これについては国際協力が進んでおり、最初の段階としてイータ（ITER）計画が知られている。これは核融合反応が一定時間以上（現在の計画では400秒）継続することを実証するために考えられたもので、フランスにそのための試験炉が建設されつつある。

上記のように、この核融合は現在の核分裂炉にくらべて安全性・環境性の両面で有利となる。ただ核融合を実現する超高温状態を作るのは相当に大変で、現段階ではまだ試験段階である。実際に電力を供給できる商業炉が作られるのは、おそらく今世紀の中葉以降と考えられる。

核融合炉が現在の核分裂炉にくらべ、どの程度の経済性を持つことになるかについてはまだ十分な検討は行われておらず、今後の大きな課題であろう。しかし、福島第一原発の事故ではからずも示された核分裂の持つ本質的危険性を考えると、その危険性が少ない核融合炉を長期のエネルギー源候補として検討していくことは意義があると考えられる。

（2）宇宙太陽光発電⁵

再生可能エネルギーはフローのエネルギーであるから化石燃料のような資源枯渇の心配がなく、また環境的にもCO₂の排出がないという大きな利点を持っている。ただ、前章で述べたように、将来の電源として期待されている太陽光発電や風力発電はその出力が天候等に依存して時間的に不規則に変動するので、その変動の調整にバッテリーを連系システムに導入する必要があるが、そのコストが大きな問題になる。また、両者とも大きな出力を得ようとする大きな面積を必要とし、国土狭小なわが国では大規模な設置は用地選定が大きな制約になる可能性が高い。

このような通常の太陽光発電の欠点を補うひとつの有力な候補が宇宙太陽光発電（Solar Power Sattelite,

SPS）である。これは1968年に米国のP.Graserによって提案されたもので、地球より約3万6千キロ離れた静止軌道に太陽電池を打ち上げ、そこから得られる直流電力をマイクロ波に転換して地上に送り、地上でこれを商用周波に変換して電力として使用しようというアイデアである。

静止軌道で常時太陽の直接光を太陽電池が受け、しかもその太陽電池はいつでも地上の一点と正対した形に置くことができるので、得られる電力は24時間365日ほとんど同一であり、稼働率も100%に近くなる。また、宇宙空間なので材料を運べる限り、SPSの大きさには制約がなく、大規模の発電も可能である。

このように、SPSは設置され運転できれば、きわめて高い稼働率で大規模で一定の電力を供給することができる。これは地上の太陽光発電にくらべ大変大きな利点で、実現すれば電力供給の基幹電源となり得る性質を持っている。

ただ問題は、現段階では経済的にも技術的にもすぐに実現できるシステムではないことである。宇宙空間にSPSの資材を打ち上げることになるが、現段階では打ち上げだけでもそのコストは大きい。現在、衛星のロケットによる打ち上げコストは、俗にトンあたり10億円と言われている。仮にSPSの出力を現在の電力の基幹電源規模である100万kWとすると、その重量は1万トンを超えると考えられるが、その打ち上げコストだけで10兆円となる。現在のわが国の100万kW規模の原発のコストが3～5千億円と言われるから、それより1けた以上高い。したがって、その将来コストがどの程度下がってくるのかが実現へのひとつの鍵になる。

また、技術的にも考えなければならない点がいくつかある。3万6千キロの彼方から地球の特定の地域にマイクロ波を打ち込むのは、4キロ先からホールインワンをする程度のきびしい方向設定がされると言われるが、その具体的方策はあるか。また、太陽電池パネル、それからマイクロ波の変換装置、アンテナ等の宇宙空間でのシステム構築をどのようにして行うか。ロボット技術はこれを

実現するほど進歩しているだろうか。これらクリアしなければならぬ課題は山ほどある。

現在、わが国ではSPSについては宇宙開発機構（JAXA）を中心に基礎的な研究が行われている程度で、国際的にも本格的な研究はまだない。しかし、システムの規模、必要な予算の大きさ、問題のグローバル性等を考えると、これはイータ計画と同様に国際協力を進めるべき研究で、日本政府がその方向へのかじ取りをすることを大いに期待したい。

（３）太陽熱発電

最近ヨーロッパで注目を浴びているのが太陽熱発電（Concentrated Solar Power, CSP）である。これは、地上で太陽光を集光し熔融塩等を熱してこれより蒸気を作り蒸気タービンを回して発電するもので、わが国でも政府がサンシャイン計画の一環として今から30年近く前、四国仁尾町に実証システムを建設、1MWの発電をしたことがある。しかし、当時はCSPよりも太陽電池を用いた太陽光発電の方が現実的、という見方が強く、その後日本ではCSPはほとんど忘れられてしまった。

しかし、海外ではその後、このCSPを利用しようとする試みが後を絶たず、2009年時点で世界でCSPが運転中604MW、建設中761MWという調査がある⁶。そして、CSPの大規模利用については環境団体のGreenpeaceが注目して調査を行い、将来の発展シナリオを作っている⁷。また、ドイツ政府、EU本部もCSPの大規模利用に着目し、調査プロジェクトを行っている。このようにCSPに大きな関心が集まっている理由は、このシナリオとその中のCSPが次のような特徴を持つからである。

- 1) 乾燥地帯に立地するため、日中はほぼ常時直射光が得られ、CSPの稼働率はきわめて高い。
- 2) 人口がほとんどない北アフリカの乾燥地帯に立地するため、大規模化が可能である。
- 3) 太陽光を集光して熔融塩を熱するが、熔融塩が大きな熱貯留能力を持つため、その調整能力によって、CSPが昼夜を通じて安定的な出力を供給することが期待できる。

- 4) 直流高圧送電線によってヨーロッパ電力網に電力を供給できる。

このように、このシステムは通常の太陽光発電の持つ出力の不規則変動性や大規模化の困難性という問題点を持っていない。そしてシナリオでは、2050年までに100～1,000GWという巨大な発電システムをアフリカに建設することになっているので、もしこれが実現すれば、このCSPはヨーロッパの基幹電源になることは疑いない。

CSPの技術自体は、核融合やSPSと異なってすでに現在かなり確立し、実際にも利用されている技術なので、ここであげたシステムは技術的にはかなり実現性の高いシステムと言える。

ただ問題は、このシナリオで描かれているような大規模で国境を超えたシステムを誰が作るか、である。これは一会社はおろかヨーロッパの一国だけでは到底実行できず、EU諸国が合意協力し、北アフリカ諸国（特にアルジェリア）と協調して進めない限り実行できない大きな国際的計画である。その意味で大規模CSPの実現は、このような単なるシナリオ分析だけでなく、EUの中の資金調達も含めた具体的な実行の必要性和可能性についての議論が前提だろう。

それではわが国ではどうか。日本の場合、EUと異なってCSPの立地点となり得る乾燥地帯は自国周辺にはなく、ゴビ砂漠とその西～西南の地域になる。日本との距離は3,000キロのオーダーとなり、しかもいくつかの国と海を越えなければならないので、ヨーロッパにくらべると現段階では実現可能性はかなり低いと思わざるを得ない。ただ、中国をはじめとするこの周辺各国がこの技術の利用に関心を持ち、国際協力でその可能性を検討し、それ次第では実現に手を貸そう、という姿勢を示してくれば話は別なのだが。

（４）CCS

CCS（CO₂ Capture and Storage）は、上記の3つの例と異なって、現在でもある程度実行されているし、技術的にも実現性の高い技術である。しかし、この技術は

現在から短中期にかけての将来においても、また超長期の将来においても必要性の高い技術と考えられるのであえてここでふれることとした。

CCSは、化石燃料等のCO₂の排出源からCO₂を化学吸収、物理吸着、あるいは膜分離等の方法で回収し、帯水層、廃ガス田等、地下のなんらかの場所にそのCO₂を貯留（永久的なのでCO₂廃棄と言ってよい）する方策である。すでに世界では、天然ガスに随伴して出てくるCO₂を分離回収して貯留することがいくつかの場所で行われている。もっとも有名なのはノルウェー北海のSleipner天然ガス田で、1996年から年間約100万トンのCO₂の貯留を行っている。

このCCSは、第一義的には、化石燃料がその消費に際して不可避免的にCO₂を排出し、しかもその化石燃料が世界のエネルギーの85%以上を占めるという現状の中で、CO₂排出の削減を図るための緊急的手段、と考えられる。事実、そのような認識は割と普遍的で、CCSに関するIPCCの特別レポートでは、2100年までの人類のCO₂削減手段の15～55%がCCSである、という記述がなされている⁸。しかし、実はCCSはもっと長期的にも必要な技術である。それは次のような理由による。

長期の温暖化対策として、人類はCO₂排出を最終的にその自然の吸収量以下にし、大気中のCO₂濃度の上昇をゼロ以下にして温暖化がそれ以上進行しないようにすることが要請されている。しかし、自然の吸収量は、IPCCによるときわめて小さく、0.1Gton以下とされ、これは現在のCO₂排出量30Gtonに比べればほとんど無視できる量になる。つまり、長期的に要請されているのは、CO₂の排出を実質的にゼロにすることであるが、これは

相当な難題である。たとえば製鉄ひとつをとってみても、そこでは銑鉄を作るプロセスは酸化鉄を炭素を使って還元するプロセスであり、そのために否応なしにCO₂が発生する。還元剤を水素に変える、という試みもなされているが、少なくとも現状では炭素を全く使用しない製鉄プロセスはそう簡単にできそうにない。となると、CO₂を出さないためにはCCSの採用しかないことになる。

そこでこのCCS技術だが、技術的にもっとも問題な点はCO₂の回収—化学的吸収、物理吸着、あるいは膜分離—にかなりのエネルギー、したがってコストを必要とする点である。現在、コストとしてはCO₂トンあたり数千円ないしそれ以上となる。もっとも、現在これを切り下げるために技術的にさまざまな努力が行われているので、将来はこの値はかなり下がることが期待できる。

もうひとつの問題点は、技術的ではなく社会、ないし住民のCCSのアクセプタンスである。CO₂は放射性廃棄物等と異なり、本来無害の化合物なので、貯留地域からたとえ少々漏洩しても問題は少ないのだが、やはりこのCO₂が廃棄物であることは事実で、ない方が安心、というのは当然の感覚かもしれない。その意味で、今後はCCSの重要性和CO₂貯留の安全性を社会に理解してもらう地道な努力が必要である。

以上、本章では将来の革新的なエネルギー技術候補について紹介した。エネルギーが社会で持続可能な形で使われ続けていくためには、現在の技術だけに頼るのではなく、より新しい、よい特性を備えた技術を追求する姿勢が常に必要である。人類のその方向への努力を怠りやまない。

【注】

¹ エネルギー環境会議、コスト等検証委員会報告書、平23.12.19

² 経済産業省、低炭素電力供給システムに関する研究会報告、低炭素電力供給システムの構築に向けて、p.20、2009.7

³ 日本エネルギー経済研究所、エネルギー・経済統計便覧、省エネルギーセンタ、2011

⁴ 日本電力調査委員会、人口減少下における地域経済の展望、第34回研究会、資料6、2011.4

⁵ 松本、宇宙太陽光発電所、デイスカパートウエンティワン、2011

⁶ Viebahn, P. et al: The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe, Energy Policy, vol.39, pp.4420-4430, 2011

⁷ Greenpeace, EREC. 2010, Energy evolution. A sustainable global energy outlook, Amsterdam, <http://www.energy.blueprint.inf>.

⁸ IPCC special report on CCS, Cambridge Univ. Press, 2005