

「脱温暖化に向けたエネルギー戦略」

講師：植屋 治紀氏（株式会社システム技術研究所所長）

日時：2008年7月10日（木） 18：30～20：30

会場：ノルドスペース セミナールーム（東京都中央区京橋 1-9-10 フォレストタワー）

はじめに

システム技術研究所の植屋です。この小さな研究所をもう30年近くやっていますが、大学卒業後、大きな企業に入りたいとなくして何か自分でできることをしたいと思い、大学院時代からやっていたコンピュータでプログラムを作る仕事を探していました。すると、1973年に石油ショックが起きました。それまでエネルギーの計算等はいろいろしていたのですが、将来エネルギーがどうなるのかということの本気で考えないといけないという危機感を持ちました。そのとき、日本経済新聞のシンクタンク「日本経済研究センター」から『21世紀の日本プロジェクト』というものをやるから参加しないかという声がかかったのです。「石油ショック後の日本をどうしたらいいか」というエネルギー戦略を考えるのが、私に与えられたテーマでした。2年ほど文献を読んだり調べ直したりした結果、日本が今後も長期にわたってやっていくためには、エネルギーの効率を大幅に上げることと、自然エネルギーを徹底的に利用する社会を作ることが必要だと考えました。私はそのことを、次のように非常に大げさに表現しました。「人類は昔、動物を捕まえて狩猟経済で食糧を得ていた。それをあるとき、地面の上で耕作するというところに転換した。それと同じことが、エネルギーでも起こるだろう。いつかなくなってしまう化石燃料を地下から掘ってくるのではなく、地面の上で太陽のエネルギーを捕まえるという方法となっていくだろう。50年かかるか100年かかるか分からないけれども、そういう社会に移るはずである」と。つまり、「エネルギー狩猟型文明」から「エネルギー耕作型文明」に転換するのだと考えたのです。そうしたことを『東洋経済』の編集者に話したら本にしないかと言われて、『エネルギー耕作型文明』を書きました。書いている途中で、「アメリカで同じようなことを言っている人がいるよ」ということを聞きました。エイモリー・ロビンズという人が書いた本「Soft Energy Paths」が、当時アメリカで非常に話題になりました。それは、「エネルギーの利用効率を上げる余地が、非常に大きく残されている。効率を大幅に上げればエネ



ギー需要は小さくできるから、小さくできればそれを自然エネルギーでまかなうことは不可能ではなくなってくる」というロジックでした。彼がそれを、アメリカが外交戦略を発表する雑誌“Foreign Affairs”にも書いたところ、非常にたくさんの人がそれを読んで評判になりました。当時のカーター大統領が官邸に彼を呼んで話を聞く、といったこともありました。私はその本を友人と翻訳しました。「日本でエネルギーの本が 5000 部以上売れたためしはない」と言われていたのですが、その本は 2 万 5000 部ほど売れ、多くの人に読んでもらいました。ロビンスはその後、コロラドに「ロッキー・マウンテン研究所」を作り、いろいろな活動をしています。去年 10 月には、日本の「旭硝子財団」が出している「ブループラネット賞」を受賞しました。以前は彼のような考えは「エネルギーの反体制論だ」などと言われていたのですが、そこでは福田首相が祝辞を送って経済産業省の次官が挨拶をし、アメリカの大使もコメントしていました。副賞の賞金は 5000 万円でした。私は自分の人生の中で、そうした時代の変化に立ち会えたのを非常に不思議に思うとともに、30 年くらいたって、当時考えていたような社会が実現しつつあり、その発想が間違っていなかったんだなということを感じています。今日の「脱温暖化に向けたエネルギー戦略」はまさしく、エネルギー利用効率をうんと上げることと、使うエネルギーも CO₂ を出さないようなものに転換するという事です。

1. 地球温暖化の顕在化とそのメカニズム

まず地球温暖化はどうして起こるか。地球に太陽の光が入ってくるとき、その熱は大気層にほとんど吸収されずに地球の表面に当たります。地球の表面は 15°C くらいの温度ですが、温度の 4 乗に比例した熱を輻射という形で宇宙に放射しています。入ってきたエネルギーと出ていくエネルギーのバランスが取れているんですね。バランスが取れていないと、どんどん暖まるかどんどん冷えるわけです。ところが、放射して出ていく赤外線は波長が長いので、大気中のいろいろな物質に吸収されます。まず水蒸気、それから CO₂。ここで、温室効果が起こるのです。もともと温室効果がなければ、地球の表面温度はマイナス 20°C 以下になると言われており、温室効果によって 15°C に保たれているのですが、これの割合が 1% くらい増えてきているんですね。増えると気温が上がっていくのですが、どの時点で安定化するのか分からないというのが現在の状態です。CO₂ の増加によってこうした事態が起こるとするのは、実は 100 年前すでにスウェーデンの科学者、アウレニウスという人が発表しています。石炭をたくさん使った産業革命が起きたときに、「このまま行ったらどうなるか」という計算をしたのです。でも誰もそんなことを気にも留めずに、煙をモクモク吐いて経済活動が盛んになるほうが重要だと考えていました。

しかしあるとき、米国スクリプス海洋研究所のチャールズ・キーリング博士が「実際に測ってみよう」と、CO₂ の測定を試みたんですね。それまでもいくつかの場所で断片的には測られていたのですが、CO₂ 濃度が本当に上がっているのかどうかはよく分かっていなかったのです。彼はハワイのマウナロアにタワーを建て、タワーの上で測定を始めました。

1958年から測定を開始し、76年に論文として発表したのですが、CO₂濃度はじわじわと上がっていることを物語っていました。植物は成長過程でCO₂を吸収し、秋になると逆に枯死して分解されCO₂が発生しますから、1年間に7~8ppmの幅があるのは不思議ではありません。また、南半球と北半球とでは、パターンが逆転します。産業革命以前のCO₂濃度は280ppmほどだったのですが、今は360~380ppm。およそ15%の増加となってしまっています。キーリング博士はこの測定をずっと続けていたのですが、2005年に心臓発作により77歳で亡くなりました。この測定は現在、世界中のあちこちや飛行機の上でも行われており、日本では南端と北端、北海道の落石岬と沖縄の波照間で行われています。結果的にどこにおいても濃度が上昇しているという傾向は間違いなくみられるので、明らかな事実でしょう。濃度の上昇分からCO₂の量を計算することができますが、化石燃料を燃やして排出されているCO₂のうち半分くらいが海か地面かによって吸収されています。残り半分は、大気中に滞留して残っていることが分かっています。

2. 「ソフトエネルギー・パス」

「ソフトエネルギー・パス」という考えをロビンズが発表したのは1976年ですが、1973年には私も石油ショックを経験し、これから日本はどうするべきか、ちょうど彼と同じようなことを模索していたところでした。彼はイギリスの“Friends Of Earth”の代表をしていましたので、私はロンドンまで出かけて行って彼に会い、友人とこの本を翻訳しました。彼は、「原子力や石炭を大量に使って拡大していく“Hard Energy Paths”は非常に危険が多い。利用効率を上げること、再生可能エネルギーを中心とすることが重要だ」と言っていました。ところで、「再生可能エネルギー」というのは、考えてみれば非常におかしな言葉ですね。“Renewable Energy”を訳す際にいい言葉がなかったためなのですが、周囲には「分かりにくい」と怒られました。敢えて言えば「更新性のエネルギー」、いつまでも繰り返し使えるエネルギーということですね。「自然エネルギー」と言うと、エネルギーの多くは自然から来るので、範囲が広がってしまいます。原子力も自然エネルギーだと言い出す人も出てくるかもしれませんので、訳語として適切ではないでしょう。

彼の代表的な主張を表したのが図1です。上の図は、アメリカのエネルギー需要は75年から2025年にかけて幾何級数的に増大するという当時の予測を示しています。石油とガスはやがてなくなっていくため、石炭と原子力でこれをまかなっていけばいいというのが、エネルギーに携わる大方の人たちの考えです。彼はこれをハードエネルギー・パスと呼んでいます。しかしこの方法ではなく、もっと別のソフト技術、効率の改善と再生可能なエネルギーとを組み合わせることで、今までに全然行ったことのない道に行けるのだと彼は本の中で述べています。下の図に、2006年のエネルギー需要の実績値を示していますが、2000年も2006年も上の図と比較して大幅に少ない100クアド弱でした。

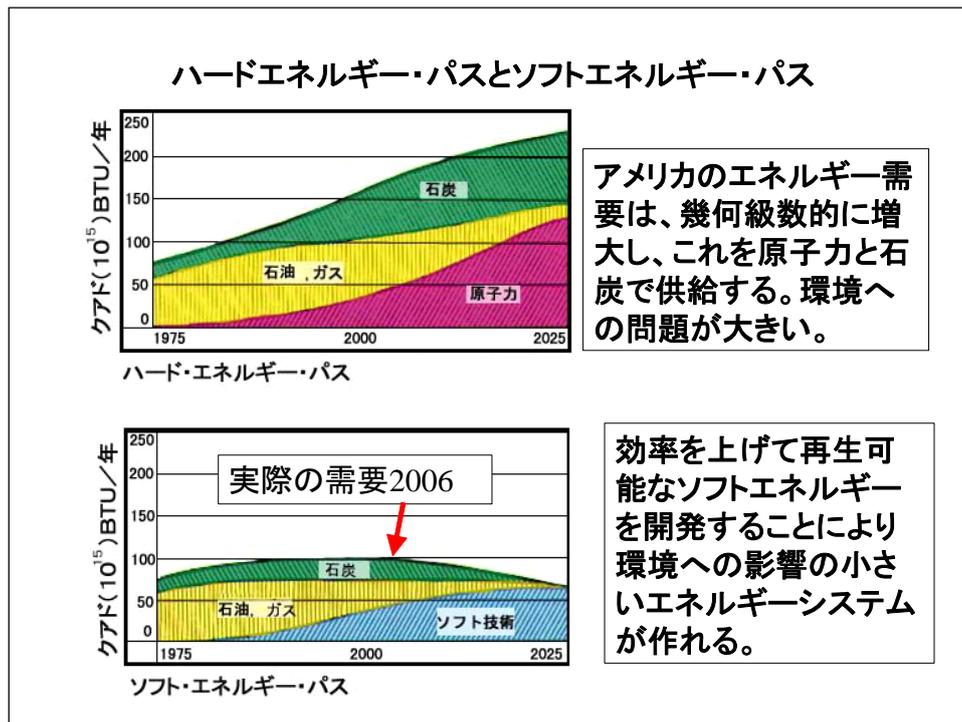


図 1. ハードエネルギー・パスとソフトエネルギー・パス

つまり彼が当時言っていた、エネルギー利用効率を上げることがどんなに大きな影響をもたらすかが、25年たって証明されたのです。そしてこれからどうなるかですが、ソフトエネルギー・パスによって需要を低下させていくことができるのではないかとというのが下の図です。私も（自分の本の中で）「エネルギー需要は、これだけ減ったほうがいい」と書きましたが、当時は「なぜ減らさないといけないんだ。これからみんな豊かな生活をするのだから、需要は幾何級数的に増えるはずだ」というのが、1980年ごろに経済や政治を動かしている主要な人たちの考えでした。一方最近では、サミットなどでも「CO₂を半減」との声が出ていますし、福田首相も「80%削減」との目標を打ち出し、多くの人がCO₂を減らそうと声高に言うようになりましたので、現在に至るまでにそれが大きく変わったということが言えると思います。

ロビンスは83年ごろから「ロッキー・マウンテン研究所」を立ち上げ、コロラドの山の中に壁の厚さが30cmもあるような重厚なパッシブ・ソーラーハウスを建て、そこでたくさん研究論文を書いています。2004年には「Winning the Oil End Game」という本を出しました。この本では、「アメリカは石油を確保せんがために中東に兵を出し、その出費がものすごい額になっている。そもそもその予算を自動車の効率を上げる研究に投じれば、そんな行為も必要なくなる」といったことを主張しています。効率の改善は実際に可能であるし、どんなに重要であるかと言っているわけです。

85年ごろにかけて再び石油の価格が下がり、エネルギー問題は下火になっていました。ところが88年、アメリカ上院のエネルギー委員会の公聴会で、NASAゴダード宇宙センターから呼ばれたJ・ハンセン博士が「私は99%の確率で地球温暖化が起きていると思う」

と証言したのです。この上院委員会を設営したのはアルバート・ゴアや、ティモシー・ワース上院議員といった、カーター大統領が『2000年の地球レポート』を発表したときのコミュニティの仲間でした。この証言がなされた公聴会は6月23日で、ワシントンで過去に最高気温が記録された日を選んで実施されたのですが、その日も本当に暑い日でした。午後2時ごろに開催された公聴会はテレビでも放映されましたが、博士が「地球が暑くなる」と言ったのが、そのときにもう暑くなっていると受け取られ、そのとき以来マスコミの多くも“Global Warming”という言葉を使うようになったのです。この上院委員会が、「地球温暖化」がたくさんの人に知られるようになったひとつのきっかけだと言われています。

3. CO₂削減をめぐる国際的な動きと日本

ちょうどこのとき国連と世界気象機関が IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) を設立し、京都議定書につながる活動を始めたわけですね。ところで、“Climate Change” は「気候変動」と訳されていますが、これは「気候変化」というべきだと思っています。気候は「変化」しており、上がったたり下がったりするという「変動」ではないんですね。気象庁かどこかの方が、人々のショックが少ないように訳されたのではないのでしょうか。ですから「気候変動条約」とあったら、それを「気候変化条約」と読み直して頂ければと思います。さて、IPCC は設立後、いろいろな活動を始めます。その1つである COP (Conference of Parties、締約国会議) は、毎年1回開催することに決められました。3回目の COP3 は京都で行われることになりましたが、そのときは「とにかく何でもいいから、『これだけ減らす』という目標数値を決めよう」とされたのです。京都に COP を誘致できたときには、「オリンピックがやって来る」というような受け取り方で、その会議でこうした CO₂ の削減目標が決められると知る人はほとんどいませんでした。当時は何ら削減義務が課されることのないとされていた開発途上国からは、150~160カ国の代表が訪れ、先進国の論議を気楽に聞いていったようです。この京都会議では、どの温室効果ガスを削減の対象とするかが議論されました。開催は12月1日から10日までとなっていたのですが、10日の真夜中を過ぎても決着がつかず、翌日の午後2時過ぎにやっと6種類のガス(二酸化炭素、メタン、N₂O、HFC、PFC、SF₆)の削減目標が決まりました。2010年为目标ですが、2008年から2012年まで前後5年間の平均値をとること、先進国全体で1990年比にして5%減らすこと、そして各国の削減割り当てを決めたのです。EUは8%、日本は6%、アメリカは7%となったのですが、アメリカでは議会でこれを締結するかしないかと議論している間にクリントン政権が終わってしまい、ブッシュ政権に代わると「この議定書は科学的根拠がないから離脱する」といって抜けてしまいました。この京都会議では、森林の吸収量を削減量として計算できるというルールができたため、日本はこれをうまく使って3.8%ほどを稼いでいます。それから、開発途上国において先進国が削減に寄与した分は、その先進国の削減量としてカウントされる Clean Development Mechanism (クリーン開発メカニズム、CDM) や、共同達成(先進国間の

排出量取引)についてもここで決まりました。実は決まった当初、本当にこの議定書が締結できるのかどうか不明でした。参加各国の排出量のうち 55%以上にあたる国が批准すれば成立するとされたのですが、ロシアが入ったことで確定したわけです。

日本は今年の4月から実際に目標期間に入っています。6%の削減は日本に課せられた約束であり、京都会議の議長国として決めたことをきちんと守りきれぬかどうかという局面にあるわけです。「京都議定書目標達成計画(目達計画)」というものが2005年に閣議決定されていますが、「もたつく計画」とも揶揄されています。基準年総排出量は1990年の12.61億トン、その6%の削減を達成するためには2010年に12.31億トンとしなくてはならないのですが、2005年時点ですでに7.8%増加してしまっているため計13.8%の削減が必要となっています。この達成のために国内での排出削減と森林吸収、京都メカニズム(CDM及び排出量取引)によって何とかしようという方針になっています。しかし京都メカニズムを使うことで日本は予算をかなり投じることになります。代わりに、太陽光発電や自動車の効率改善のために国内に資金を回せばもっとうまく削減に結びつくはずなのですが、「あまり面倒くさいことをせずに、お金を払えばいいじゃないか」という人たちがかなりいるんですね。

アメリカではアル・ゴア元副大統領が、地球温暖化のもたらす危険性について映画や著作を発表し、IPCCと共同でノーベル平和賞を受賞しています。これはアメリカ民主党のエネルギー政策に、非常に大きな影響を与えていますね。ゴアは京都会議に来たのですが、大学の先生みたいな話をしてからすぐ帰ってしまって非常にひんしゆくを買っていました。「柔軟性措置(京都メカニズム)を入れればアメリカは批准する」と帰り際に言っていたのですが、ああいった提案をしたのはゴア本人だったと言われていました。先述のロビンスはオックスフォード大学でクリントン元大統領と同級生でしたから、ゴアとも行き来があったのではないかと訊いてみたところ “He shows problems” “I show solutions” というのが彼の答えでした。

IPCCは第1次から第4次までの報告書を出しました。第1次では「地球温暖化が人為的活動によるものかどうかは不確実である」と書いていたのですが、徐々に語調が変わり、2007年の第4次報告書では「人類起源の温室効果ガスが原因である」と、はっきり言うようになりました。CO₂は高濃度に達しており、洪水や熱波、感染症、農産物の生産性低下の危険性が高まる、と。世界がかなりの省資源型社会を作ったと仮定しても、今世紀末に1.8°Cの平均気温上昇は避けられず、もしこのままの高度経済成長社会を続ければ上昇幅は6.4°Cに達するとされています。平均気温というのはなかなか難しい概念ですが、例えばこれが東京で2~3°C上がると、鹿児島から沖縄に近いような状態になるそうです。2°Cというのはかなり大きな値なんですね。私は神奈川県「地球温暖化対策条例」づくりに参加していますが、丹沢などでも、今まで見たこともないような蝶や鳥、植物が見られるようになっていると聞いています。日本ではまだあまり地球温暖化の「被害」が目に見えないのですが、ヨーロッパの場合は平地に流れる様々な河川が洪水を起こしており、温暖化の結

果を目にしやすいついといわれています。

温暖化について多くの人が書いていますが、IPCC と並んで非常に説得力のあるレポートが 2006 年の 10 月に出されました。ブレア首相の依頼で、元世界銀行のチーフエコノミスト、ニコラス・スターン氏が『スターン・レビュー』を発表したのです。彼は「もし何もしなければ 2050 年までに世界の GDP は 5~20%減少し、被害は第 1 次、第 2 次世界大戦の規模に匹敵する」と、なかなかうまい言い方をしています。戦争の被害と比べて表現するというのは、私も思いつきませんでした。そしてこれを避けるには、「2050 年までに世界の GDP の 1%を使って、効率のよい技術を開発普及させ、排出権取引により地球規模で『低炭素経済 (Low Carbon Economy)』へ移行し、CO₂を減らさなければならない」と。その後この論文は様々な論争を引き起こしたのですが、今のところ、このレポートの内容が破綻をきたしているとは思われていません。イギリスはすでに気候変動税を導入しており、2050 年までに CO₂を 60%減少させると公式に発表しています。スターン・レビューの抄訳は、国立環境研究所のサイトからダウンロードできます。

低炭素社会 (Low Carbon Society) の研究はヨーロッパから始まっています。日本では西岡秀三氏を中心に国立環境研究所で「脱温暖化 2050」の研究を行っており、2050 年に温室効果ガスは 70%の削減が可能としています。その中では「A 高度成長技術志向社会」「B 分散型循環社会」と 2 つのシナリオを設定し、そのどちらもエネルギー需要を大幅に減らすことができるという内容になっています。

望ましいエネルギー政策について簡単に整理をすると、まずは効率の向上が最も経済性が高く、迅速に効果が現れる方法であるということをお願いしたいと思います。例えばガソリン車をハイブリッド車にする、白熱灯を蛍光灯にする、古い住宅を断熱強化する、タワー型パソコンをノートパソコンにする。より少ないエネルギーで、同じ機能を達成する方法がたくさんあることが分かっていますし、多くの方がすでに実践していると思います。

4. CO₂削減のための手法

CO₂ 排出削減の方法は大きく分けて、エネルギー効率の高い技術、社会システムの効率向上 (環境税、排出権取引、建築断熱基準など)、ライフスタイルの転換 (小型自動車の奨励、エコドライブ・ライセンス、待機電力の規制、カーシェアリングなど)、そして再生可能なエネルギー利用の増大に分けられると思います。まずエネルギー利用効率の向上ですが、その中でも 3 つの方策があります。1 つは燃焼効率やエンジンの動力変換効率などのエネルギー機器を改善することです。ハイブリッドカーはおよそ 2 倍の効率になりますね。2 つめは社会システムで、環境税や排出量取引によって人々は利用効率を上げるよう努力するでしょう。そして、ライフスタイルの転換による効率改善。価値観に関わることなのであまり強制はできませんけれども。仮に 3 つがそれぞれ 2 倍の向上を達成すれば、単純に 8 倍上げることができると言えるでしょう。これらを 1 つ 1 つ、見直してみたいと考えています。

日本は機器の効率については非常に大きく改善していますが、あとの2つについてはまだずいぶん遅れています。例えばドイツでは太陽光発電による電力を普通の料金の3倍で買い上げ、普及を促しています。ライフスタイルの効率にしても、たくさんの人に「この問題は重要だ」と気づかせるような活動をすればいいと思うのですが、なかなか大きな動きにはなっていません。例えば、音楽はどうでしょう。私は学生時代、モダンジャズにやみつきだったのですが、今でも好きで、先日 Sonny Rollins というテナーサクソ奏者の演奏を聴きに行きました。77歳なのにとっても元気で2時間半も吹いているんですね。何か彼のCDを買おうとしたところ、98年に“Global Warming”というCDを出していることが分かりました。それには“Global Warming”の他にも“Mother Nature’s Blues”といったエコロジー的なタイトルの曲が入っていて、彼はそれまでほとんど政治的な主張などしたことのないアーティストでしたけれども、ジャズの世界にもこうした動きが起こっているのかと思いました。こんな風に、音楽のようなものをきっかけとして人々のライフスタイルが変わっていくようなことを、私は期待しています。

社会システム効率の中でも議論になっているのは環境税で、要するに環境に悪いものに税をかけるわけです。エネルギー消費に課税すればエネルギー価格が上昇して、大切に利用ようになる。価格が上がれば需要が減ります。これを経済学では「価格弾力性」と呼んでいます。その割合を示す「価格弾力性値」を私の研究所でも計算していますが、つくづく思うのは、ガソリンの値段が180円/リットルにもなると、環境税の話なんてふっ飛んでしまいます。日本で小池元環境大臣が提案していた環境税というのは1.52円/リットルだったのですが、それでも周囲に「やめろ」と言われて実現しませんでした。その当時およそ120円/リットルだったのですが、今はもうそんなレベルではありません。案の定、価格弾性が効いて道路がすき始め、車に乗る人が少なくなってきたという話を聞いています。ヨーロッパではかなりの国で環境税の導入が進んでいるにも関わらず、日本ではなかなかこういうことは決まりません。低率でも税制を一度始めれば、「そういうことなのか」とみんなが頭を切り替えるきっかけになると思うのですが。

ただし、環境税を課税すれば当然税収ができるのですが、実際にエネルギー消費がどのくらい減るかは分からないという欠点があります。そこでもう1つ、“Cap and Trade”=排出権取引という方法があります。国あるいは企業ごとに排出削減のコストは異なっていますから、それを共同で行い、削減コストが最も低いところに削減義務を集中させようという発想です。より多く削減できる国あるいは企業は、余剰削減分を販売でき、削減できないところはそれを「排出権」として購入するということですね。総排出量を目標として毎年定めれば、それに向かって全主体が行動しますから、必ず減らせるんです。ただ、それにいくら費用がかかるかについては、毎年の調整が必要です。それに最大の問題は、当初の目標を決めてから各主体に課す削減量を決めるのが非常に難しいことです。分配しようとすると、元から多く出していた企業には「ゆるい削減量でもいいや」となりかねない。従って環境税も排出量取引も、試行錯誤しながらやっていくことが必要なのです。しかし

これらは社会全体をぎすぎすしたものにせずに、自由主義社会における企業の活動を認め進めていけるいい方法だと、僕は思っています。もしこの実施ができなければ、頭から「何%減らせ。減らさないと罰金を取るぞ」みたいなことになります。柔軟な活動を促すのは、やはり環境税や排出権取引だと言えるでしょう。

5. 効率の改善と再生可能エネルギーの活用

技術的な話をしたいと思います。まず、効率の高い照明技術です。白熱灯に代わりつつあるのが、電球型蛍光灯ですね。白熱灯が 1000 時間くらいしかもたないのに対して、電球型蛍光灯は 6000 時間。最近のものは 12000 時間といった寿命になっています。電力消費の差が 5 分の 1 として初期投資と電気代を計算し、縦軸に費用を取ってみると、1000 時間使用しないうちに電球型蛍光灯のほうが経済的に有利になります。ですから皆さんの家で使っている電球の多くは電球型蛍光灯に切り替えたほうがいいことになります。これは最近まで、スイッチを入れてから 30 秒くらいは明るくならないのが難点でした。特に冬などは周りの温度が低いので遅く、トイレでこれを使用している私の家でも、用を足し終わって出ていくところに明るくなるといった具合でした。しかし最近の製品ではかなり改善され、どの部屋の照明にも問題なく使えるようになっていました。もしセールなどで大変安く売られている電球型蛍光灯があっても、以前のタイプのものでしょうから買わないことをお勧めします。最近のものを買ってください。先ほど話しました、神奈川県地球温暖化対策条例で「白熱灯の製造販売を禁止する」という項目を入れようと提案していたのですが、すでに経済産業省も同じことを言い始めたところでしたし、東芝やパナソニックなどのメーカーも 2010 年には生産を終了すると宣言しています。オーストラリアでも大方が切り替わっていますから、エジソンの発明した白熱灯は、近いうちに使われなくなっていくでしょう。問題は蛍光灯の中に入っている水銀ですが、これをきちんとリサイクルする必要があります。

さらにもっと進めていきたいのは、発光ダイオード (Light Emitting Diode, LED) への切り替えです。これは 1 つが小指の先くらいの小さな電球ですが、高輝度で長寿命、電力消費が少ないので、80w の白熱灯を使用していた交通信号を 20w の LED で代用することが可能です。信号機は日本中に 100 万個近くありますから、LED への切り替えは非常に重要ですね。まだ高価ですが、信号機の場合は効果があります。なぜなら信号機の電球は突然切れると大変なので毎年取り換えており、そのコストがばかになりません。LED はまず切れないと言っても過言ではないので、そのメンテナンス費用がほとんど不要になるからです。LED は今では自動車のブレーキ・ライトにも使われるようになっていました。自動車に使われるようになれば量産効果で価格がぐっと下がりますから、近いうちに家庭の照明にも普及していくのは確実でしょう。

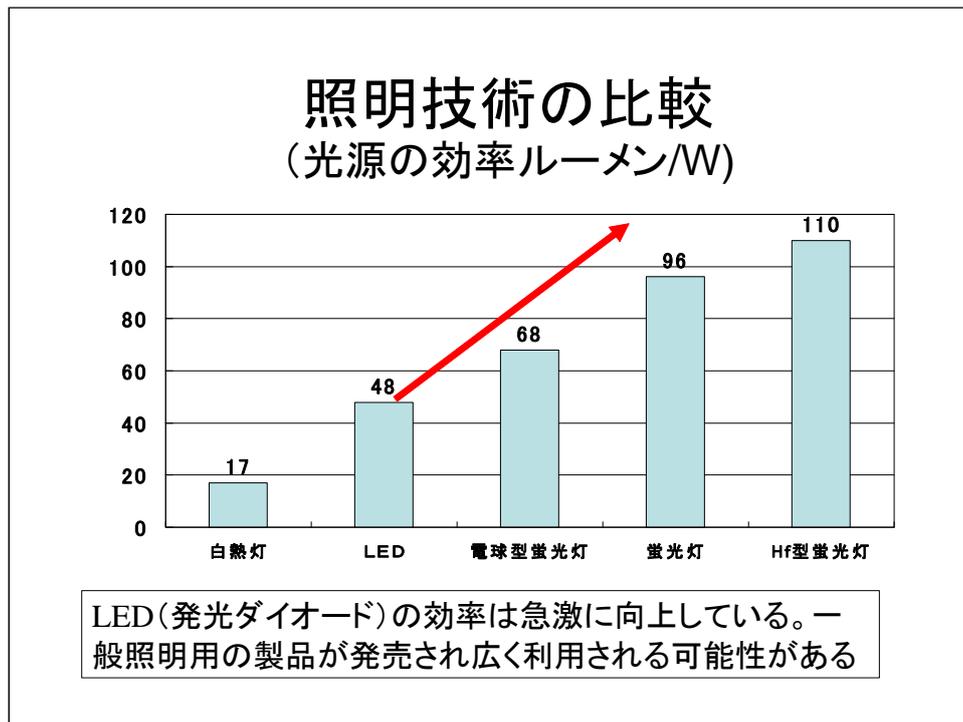


図 2.照明技術の比較

図 2 は縦軸に投入エネルギーあたりの明るさ (ルーメン/w) を示したグラフです。LED の効率はこれまで白熱灯 (17) と電球型蛍光灯 (68) の間くらいでしたが、最近急激に向上しており、効率のよい HF 型の蛍光灯 (110) をさらに上回る可能性があります。ちなみに、ランプや焚き火を同じグラフに並べると 1 か 2 です。現在、このように照明技術が変化しており、エネルギー消費を大幅に減らす可能性がありますから、皆さんの家でできることはまず白熱灯からの切り替えです。短い時間しか使わない場合でも電球型蛍光灯にしたほうが経済的になるくらい、効率の改善が進んでいます。

日本では電気冷蔵庫の効率が非常に高いと言われてきましたが、それはウソでした。2006 年の話ですが、多くの方が「省エネ」と言われる冷蔵庫を購入したにも関わらず電力の消費量が減らないので、経済産業省に問い合わせをしました。調べてみると、冷蔵庫の効率測定法が 30 年前の古いままだったのです。今は製氷装置や脱臭装置などのいろいろな機器がついているのですが、以前の測定法では単に冷蔵機能だけの動作を対象としていました。それに、壁から 30cm も離して測定することになっていたのです。壁と冷蔵庫の間に熱がこもって庫内の温度を上げるためにこの基準があったのですが、実際にはどこの家でもせいぜい 5cm くらいしか空けていないことが実態調査で明らかになりました。2006 年 3 月のカタログでは 400 リットルの冷蔵庫で電力消費量がおおよそ 200kWh /h と書いてありましたが、5 月にもう一度調べると、同じ型番の機種がすべてその 4 倍くらいの値になっていました。朝日新聞の論説委員にこの話をするとすぐ記事に書いてくれたのですが、その後電機メーカーは、電気冷蔵庫が省エネだと言わなくなりました。現在は新しい測定法に適用した形で技術開発を進めているところだと思います。同じようなことが、実はたくさんあるんで

すね。自動車の燃費でも、実際に走ってみて測定した燃費は、メーカーの言う数値と 3 割くらい違うわけです。本当に効率のいい製品を作るには、測定方法そのものにも注意しなくてはなりません。

さて、今日はもう少し先の話、燃料電池車についてもお話したいと思います。

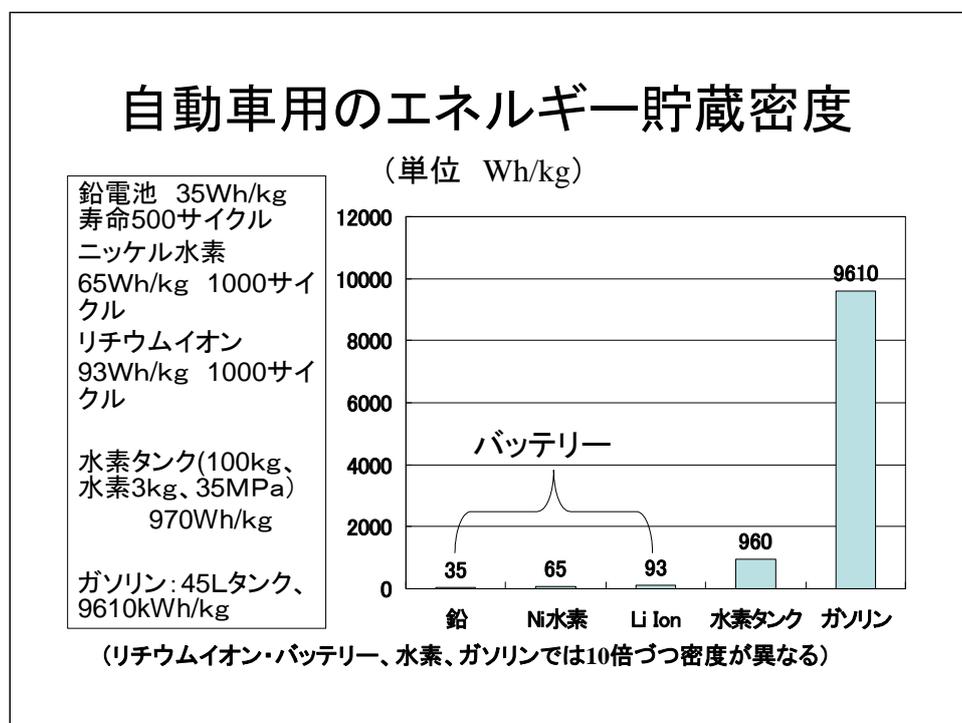


図 3. 自動車用のエネルギー貯蔵密度

自動車の効率改善で一番重要なのは、そこに積むエネルギーが軽いかどうかです。図 3 は、1kg あたりどれくらいのエネルギーを貯蔵しているかの比較です。燃料電池は非常に低く、リチウムイオンで 93、水素タンク (300 気圧) はその 10 倍、ガソリンはさらにその 10 倍も重量当たりのエネルギー密度が違います。このことを頭に入れて頂くと、ガソリン車に対抗した自動車を作るのがいかに難しいかが分かります。グラフではガソリンとバッテリーの間に水素タンクがあるということから、水素を使った燃料電池で走る自動車が浮かび上がってきます。既存のガソリン・エンジンの効率が 13~16%、電気自動車は 25%、燃料電池だと 35~40%くらいになるだろうと予想されます。また、ブレーキを踏んだときにそのエネルギーを回収しようとする必要で、バッテリーとモーターを組み合わせるハイブリッドカーのような形にすると効率が上がります。このように、ガソリン・エンジンに代わる新しいタイプの自動車が登場しつつあると言えます。

さらに固体高分子型燃料電池というものが開発されており、薄い透明の膜の両側に水素と空気を流してやるとその間に 0.6 ボルトくらいの電圧が発生します。ちょうど電気ウナギの原理と同じですね。層状の物質を体内に持っていて、何か衝撃を与えると体全体で電圧が発生するわけです。0.6 ボルトの層が直列に連なっているので数百ボルトになるそうです。

が、要するに燃料電池車というのは電気ウナギを搭載しているようなものです。この技術は1960年代に一度、人工衛星に載せられテストされたのですが、なかなか安定して動かなかったんです。ところがカナダのバラードパワーシステムズ社というたった25人の会社が政府の資金を受け、非常に高密度のエネルギーを発生させる技術を研究開発しました。1989年には1リットルの体積で100wしか出なかったエンジンが、1996年には1,100w、11倍のエネルギー密度を達成できたのです。このくらいになれば自動車に載せられるため、1990年ごろからこの「騒ぎ」が世界中に広がりました。エネルギー技術というのは非常に基本的な物理・化学現象を使いますから、革命的発明はそう滅多に出ないのですが、これはこの20年間に起きたエネルギー技術の「大発明」です。

薄い膜の両側に水素と空気を流すと水素が空気の側に移り、水が発生して出てきます。ところが当初の電池では、水がたまのまま反応の邪魔をしていると分かったんですね。そこでバラードパワーシステムズ社の人たちは蛇状の溝を作り、空気に少し高い圧力を加えて、もし水が発生したらその圧力で吹き飛ばすということを試みました。すごく簡単な発明なのですが、これが基本特許になったんですね。1990年ごろにこの特許が出てから、そろそろ20年がたちます。どんな特許もだいたい寿命が20年と決められていまして、20年たってからたくさんの人が実用化し始めるということが多く、この燃料電池も2010年を過ぎるとバラード社の特許が切れ、たくさんメーカーが自由に製品を作るようになるでしょう。

燃料電池の例としては、幅3フィートで奥行きと高さが各1フィート、端から端まで188枚のセルがあって、全体で150ボルトの電圧を発生します。最近ではもっと小型になっています。これで自動車が動かせます。ところが、エネルギーの源となる水素が安全かどうかという問題があります。多くの方は、1937年にニューヨークで大爆発を起こした飛行船ヒンデンブルグ号のことをご存知かと思います。当時は水素の軽さを利用して、飛行船を浮かせていたわけですね。この事故は水素の危険性を象徴するものとなりました。ところが1990年代末には、「実はヒンデンブルグ号の事故の原因は水素ではない」という論文が出たこともありました。機体に使われていた素材が非常に燃えやすく、機体そのものが燃えたのだというんですね。現在も多くの方が爆発実験などの実証試験をしています。結果がまとまってくれば、危険性はおそらく都市ガスとそう変わらない度合いになると予想されます。

現在、実際にすぐ我々が利用できる自動車としては、ハイブリッドカーがあります。プリウスがモデルチェンジした2003年以降でみると、既存の自動車の2倍の効率を達成しています。カタログを見ると、およそ10分の間にスピードを上げたり下げたりして走る「10-15モード」の公称燃費は35.5km/リットルと書いてありますが、どんなにうまく走らせてもこの数値には達しません。普通の方が運転すれば、おそらく20km/リットルくらいでしょう。それでも、同じくらい大きさであるセダンだったら10km/リットルが関の山でしょうから、ほぼ2倍です。45リットルのタンクを満タンにしますと、900km走れます。

回生ブレーキがついていて、ブレーキをかけるとそのエネルギーを吸収し、その吸収量が表示されます。水素スタンドのようなインフラも不要ですから、これは輸送部門のエネルギー消費を小さくする切り札となりそうです。トヨタは2007年3月までにプリウスを67万台、いろいろなハイブリッドカーを計100万台販売したとしています。97年の京都会議のとき、WWF Japan（世界自然保護基金日本委員会）が私に「2020年までにどのくらいCO₂を減らせるか」というシナリオを書いてくれと言ってきました。ちょうどトヨタがハイブリッドカーを発表したので、私はこれが2010年くらいまでに全自動車の半数を占めるようになると仮定して計算し、書いたのですが、それをトヨタ自動車の環境部長に見せたら「榎屋さん、こんなのは無理です。そんなに売れませんから」と言われてしまったのですが、実際にはその予想は覆りました。トヨタの中でもいろいろな人に話を聞きましたが、誰1人としてあの車が売れると思っていた人はいなかったようです。マーケティングの専門家も「そんなもの、作っても売れない」と言っていました。それを「売れ」と言ったのは会長の豊田章一郎さん1人で、しかたなく設計したのだといいます。大きな企業になると、失敗したら名前に傷がつきますから、なかなか新しいことができない面がありますよね。ホンダのCVCCの開発も本田宗一郎の一声によるものだったようですが、やはりトップが「やれ」と言ったらそれは即時、やるべき仕事になるわけです。ですから、トップの頭を切り替えることが必須だということを、このプリウスの例は示しています。

そのハイブリッドカーをもっと進化させるアイデアが続々と出ています。1つは、バッテリーを大きくして電気自動車に近づけようというタイプですね。家庭のコンセントから充電するので「プラグイン・ハイブリッド」と呼ばれています。トヨタの開発計画ではバッテリーを2倍にして、それだけで13km走行が可能だと計算しています。つまり自動車燃料の使用量が削減できるわけですね。このアイデアはハイブリッド車だけではなく、バッテリーを積んだ自動車すべてに使えますから、燃料電池車にも適用が可能です。

さらにもう1つ、進化の可能性として「ソーラーアシスト・カー」があります。自動車の屋根はおよそ3㎡の面積が取れますから、そこに太陽光発電の装置をつけるのです。600wほどの太陽電池によって、年間の燃料消費のうち20~30%を太陽エネルギーに依存させることができるというのが私の計算です。車庫に入れたら、その屋根が太陽光を遮断してしまうのが問題点ですが。例えばシンガポールのような小さな国なら太陽エネルギーは豊かですし、端から端まで走ってもさほどの距離ではありませんから、こうした自動車は活用の可能性が十分あると思っています。

ところで、自動車の最大の問題は車体の重量で、重くなるほどリットルあたりの走れる距離が短くなってしまいます。小型化、軽量化が重要なのです。カーボンファイバーなどさまざまな新しい材料を用いた軽量化の取り組みが盛んに進められています。何よりも、自動車の平均乗車人員は1.2~1.3人なので、4人~5人が乗る大きな車も本当にそれだけの人を乗せている機会は少ないという実態があります。ですから、自動車を保有する際も小型車で電気自動車にして、あまり遠くまで走らないというスタイルにしていけば望ましい

わけです。「脱温暖化 2050」で描いているシナリオでは、こうした自動車の利用が主流になるという前提で計算しています。

また、もちろん人間が使う道具ですから、運転する方法でも違ってきます。皆さんも、慎重に運転するだけで燃費が 5~10%は違ってくることを頭に入れておいて下さい。加速や減速はスムーズに行う、「エンジンプレーキ」を上手に使う、アイドリングをしない。トランクに、例えばゴルフバッグを積んだままにしない。「エンジンプレーキ」ですが、エンジンはピストンで動いているのでアクセルを踏まなければそれがちょうどブレーキになる、つまり惰行運転のことです。大林組の環境報告書を見ると、運転方法の改善でトラックの燃費が 30%向上したと書いてあります。本当かと思って室長に詳しく聞いてみると、「一番簡単な方法は、赤い信号が見えた時点でその後は絶対に加速しない」という方針で走るのだそうです。後ろの人に迷惑がかからない程度に、惰行運転するんですね。スイスではこうしたエコドライブの講習会が頻繁に実施され、平均して燃費が 8~10%上がったということです。日本でもいろいろなところでエコドライブ行われ、特に輸送業での改善は経済性が大きくありますから導入が進んでいます。私は、免許の更新時に講習を行って、エコドライブのライセンスを発行すればいいと思っています。ライセンスを持っている人には駐車場料金を何%か割り引く、公共駐車場の料金を安くするといった優遇措置も考えられます。最もいいのは、ライセンスを持っていてハイブリッドカーに乗っている人はどこでも駐車できるとすることで、非常に効果があるのではないのでしょうか。行政の人に言うと呆れられますが、こうした何らかのアイデアが必要だと思っています。

他にもいくつか、エネルギーに関する話題をお話しします。1つは、エネルギー消費量を自分で測ることで削減したくなることです。例えば家庭内の待機電力を計測する、都市ガスや LPG の消費量をメーターから読み取ることです。また、自動車の燃費は「満タン法」で追跡できます。スタンドで給油するたびに給油量と走行距離を記録していけば、その都度燃費を算出できるわけです。私の乗っているプリウスでは、リットルあたり 19~21km という結果が出ています。

計測して特に面白いのは待機電力ですね。何もしなくても 1 年中、8760 時間ついたままの電気機器の消費電力は、1 家庭の電力消費の 10~15%を占めると言われています。当たり前のように 1 年中ずっと使ってくれるわけですから、電力会社にとって実はこれが一番おいしいマーケットなんですね。逆に、朝の 8 時ごろだけ集中して使われる IH クッキングヒーターのように、ある時刻だけ急に電力消費が大きくなるようなことはしてほしくないわけです。そのピークに対応して設備を用意しなくてはなりません、その稼働率は非常に僅かですから経済的に見合いません。そうではなくて、エアコンやオーディオ機器など、アラジンの不思議なランプのように主人がリモコンで指示するのを待っている電気機器が家庭にはたくさんあるのです。そうした無駄を 1 つ 1 つ減らしていくための動きもあり、Sony などは待機電力を抑えた製品の開発に努力しているようです。これには外出時に主電源を切ることが、最も簡単で有効な対処方法でしょう。年間の電気料金が 10 万円とすると、

待機電力の占める割合が 10%としても 1 万円が戻ってくる計算になります。

なお、実際に待機電力を測る方法ですが、家庭に備えられている積算電力計を使います。アルミニウムの円板についている黒い印が 1 分間に何回転するかを数えることで、その時間の電力消費量が分かります。計器定数（回転/kWh）が書いてありますから、その数値を使えば計算できるわけです。これについては、システム技術研究所のホームページでも説明しています。日曜日の朝のような比較的電力消費の少ない時間帯を選び、電気冷蔵庫や保温洗浄便座などのコンセントを抜いてから、測ります。円盤が止まっていれば、皆さんの家の待機電力はゼロです。ぐんぐん回っていたら、知らないどこかで電気が消費されているということですから、どこなのか探してみてください。

私の研究所の 5 人に各家庭で測ってもらったところ、平均して 14%が待機電力でした。例えばエアコンのスイッチのように、知らないところで待機状態になっている機器がたくさんあります。電子レンジも待機状態で、時計が表示されている。小中学生に、夏休みの間これを計測して報告を作る宿題を出せば、それをきっかけに興味を持ってもらえると思います。

次は自然エネルギー、**Renewable Energy** ですが、太陽電池の生産が始まったのは 1979 年で、価格が下がっていくと同時に生産量が増えていきました。現在は、家庭用 3kw の太陽電池で一世帯の電力消費の 6~7 割を供給できると言われています。平均して 20 m²の装置、効率 15%として計算しています。kW あたりの価格がおよそ 60 万円ですので、この設備には 180 万円かかるわけですね。日本の気象条件だと年間およそ 1000 時間稼働しますので、3000kWh の発電量となります。基本料金を含めると電気料金は 30 円/kWh ですから、この年間発電量は 90,000 円くらいの価値ですね。180 万円を 9 万円/年で割ると、維持費や金利を考慮しなければ 20 年で元が取れるという計算になります。20 年間何の故障もなく稼働するとは限らないので、この現状では投資に二の足を踏んでしまいますね。コストをどれだけ下げているかが課題です。

そこで太陽電池の累積生産量を横軸に、kW あたりの発電コストを縦軸に取って 20 年間で回帰分析をしたところ、累積生産量が 2 倍になる度にコストは 82%ほどに下がる結果となりました。これに関して欧米の技術者の方々と情報交換をしたのですが、いくつかの国においてこうした分析（学習曲線）で新しい技術を評価し、様々なシナリオに入れていているようです。このグラフに基づけば、累積生産量があと 2~4 倍になれば太陽電池は既存の電力と競合するようになると言えるでしょう。すると利用できる範囲も広がり、先ほどのように自動車の屋根に設置することも十分に可能となります。

また、日本で太陽光発電がどれだけ可能かを計算してみました。現在日本には 1 億 5000 万 kW ほどの発電設備があるのですが、太陽電池の年間定格稼働時間は 1000 時間、稼働率で 12%ほどですので、発電容量そのものはその何倍かにしなくてはなりません。住宅や工場、ビルや空き地、自動車の屋根など設置のできる面積から計算してみますと、合計で 7 億 kW 規模の設置が可能で、すると現在供給している電力のおよそ 70%をまかなうこと

ができます。さらに風力発電が数 1000 万 kW 設置できると思います。太陽電池は音も出しませんが、屋根であろうが畑であろうが太陽の当たる場所であればどこにでも設置できます。将来は 70%をさらに上回ることも可能であり、もし余剰が出ればその電気で水を分解して水素を作るのに充て、その水素を燃料電池車に渡してやればよい。そうした世界がやがて生まれてくると思います。

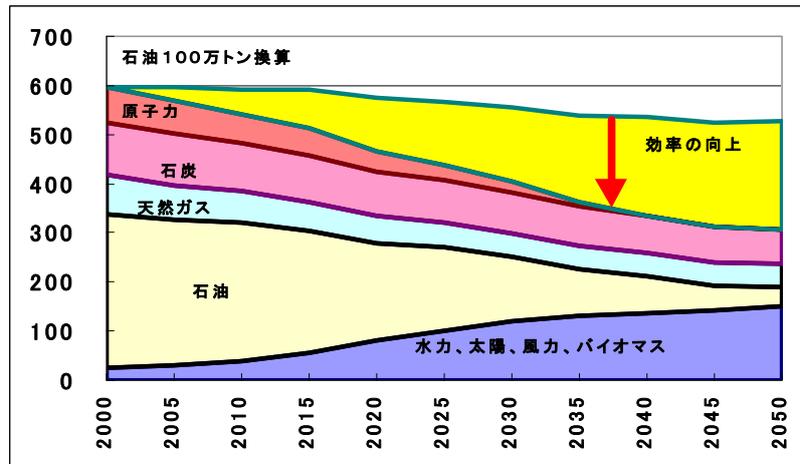
日本の風力発電は現在、約 150 万 kW の設備容量を備えています。群馬県布引高原で 2007 年に動き出した風力発電所では、2000kW の風車が 33 基並んで稼働しています。ドイツではおよそ 2000 万 kW、日本の 13 倍に及ぶ規模の風力発電が行われています。日本でも 90 年代から急増し始め爆発的に増えていたのですが、今年は建築基準法の制約を受けて足踏み状態のようです。

こうした自然エネルギーを普及させる支援策がいろいろとあります。1 つは、電力会社の行っているグリーン電力基金。個人が毎月 500 円を拠出して、自然エネルギーを助成する基金です。もうひとつは発電した電力についてグリーン電力証書を発行します。Sony では 1kWh あたり 4 円のプレミアムを払ってグリーン電力の証書を買っています。すると Sony は「このビルでは電気をすべてグリーン電力で供給しています」といったアピールができるわけですね。北海道や青森では「自然エネルギーファンド」があり、個人出資を募って自然エネルギーのプロジェクトを進めています。政府の取り組みとしては、一定の割合で再生可能な電力を供給することを電力会社に課した RPS (Renewable Portfolio Standard) 法がありますが、割合が小さいためあまり効果がないとの批判を受けています。

また、世界自然保護基金 (WWF) では世界の先進企業に対し、温室効果ガスの絶対量を削減するよう呼びかけ、宣言させるという行動に出ています。日本でも宣言している企業はあるのですが、売上高に対する相対量である「原単位」での削減目標がほとんどです。しかし WWF の Climate Savers Program は絶対量での宣言を求めており、例えば Sony は 2000 年レベルから 7%削減することを掲げています。私の会社では、この宣言の内容を技術的にチェックする仕事をしました。

最後に、人々のライフスタイルの問題です。エネルギー消費を調べたレポートの中でも面白いものが、プリンストン大学から出ています。同じ建物に住む、同じ家族構成の住人のエネルギー消費が 2 倍も異なっていたという研究です。ライフスタイルの違いによって、そのくらいのことは十分に起こりうるのです。ミネソタ大学の教授が行った行動科学調査で「あなたは何のためにエネルギーを使うのか」と人々に聞いたところ、ほとんどが同じような回答だったそうです。「忙しいから、時間を節約するためにエネルギーを使うんだ」と。人間は短い時間しか生きられないので、その時間を節約することについて他人がなにかを言うのは簡単ではありません。個人の価値観であるライフスタイルに関わろうとするのは非常に難しいので、環境税や適切な規制、優遇策、排出権取引など、マイルドな方法で働きかけることで個人のエネルギー消費を減らしていくことが重要であるし、それを上手に行う社会であってほしいと思っています。

2050年エネルギーシナリオ：日本の可能性



2050年までに、効率の向上によりエネルギー需要を半減させ、その半分を再生可能エネルギーで供給すればCO₂排出は1/4にできる。

図 4. 2050 年エネルギーシナリオ：日本の可能性

先ほど、横軸に時間、縦軸にエネルギー消費をとったロビンスの図がありましたが、日本の可能性として同じように図を描き、シンプルに計算してみました（図 4）。効率を向上させることによって、消費量を半分程度にする。そして残りの多くは再生可能エネルギーで供給していく。石油は 2020 年か 2030 年には採掘のピークを迎え、値段も上がって利用が困難になってきます。天然ガスも、少しずつ高価なエネルギーとなるでしょう。石炭は、鉄鋼業など一部の企業は「どうしても必要だ」と主張するでしょうから一定の幅での需要が続きます。すると需要の半分を再生エネルギーでまかなうことになり、結果として CO₂ 排出は現状の 4 分の 1 程度となります。

人間が様々な資源をどのくらい使っているかを計算した「資源バランス・テーブル」という論文を書いたことがあります。人間が燃やしている化石燃料は年間 80 億トンで、240 億トンの CO₂ が排出されます。人口衛星の中の閉鎖生態系における実験レポートによれば、皆さんも 1 日約 1kg の CO₂ を出しています。年間 365kg、世界の人口 65 億をかけると、人間が吐き出す CO₂ が年間 24 億トン。呼吸による CO₂ のちょうど 10 倍を、化石燃料の消費によって排出しているわけですね。人間の使う便利な道具が人間の 10 倍の CO₂ を出している、つまり世界で平均すると、1 人あたり 10 人の奴隷をもって生活しているということになります。これは世界平均であり、日本人には 25 人、アメリカ人には 55 人の便利な奴隷がいると計算できます。デンマークの学会の最後にこの話をしたところ、「俺はこれから、呼吸の量を少なくする」と冗談を言った人がいました。しかし人間の食べている食料は植物や自然に循環するものであり、行われているのは耕作型の文明ですから問題ないわけで

す。エネルギーのほうも、耕作型にしていけばいいのです。

これらの発想は Sustainable Development（持続可能な発展）という考え方に基づいています。我々の世代と未来の世代が、地球の環境を維持できるような方法で生きていくということですね。これについて、世界銀行の経済学者、ハーマン・デリーは面白い不等式を書いています。

1. 再生可能な資源の消費速度（森林伐採） < 再生可能な資源の再生速度（植林）
 2. 枯渇性資源の消費速度（石油消費） < 再生可能な資源開発速度（太陽光発電）
 3. 廃棄物の放出速度（CO₂排出） < 自然界が安全に吸収する速度（排出量の半分）
- （括弧内は筆者が事例を挙げたもの）

こうした不等式で考えると、Sustainable Development には物理的にどのような条件が必要なのかイメージできると思います。

燃料の効率改善や再生可能エネルギーへの転換を促す要素としては、石油の枯渇と価格の上昇が挙げられます。これらは、現実に起こりつつあります。石油技師キング・ホバートは 1964 年に、世界中の石油生産量が将来、釣鐘型の曲線を描くだろうという予測をしています。

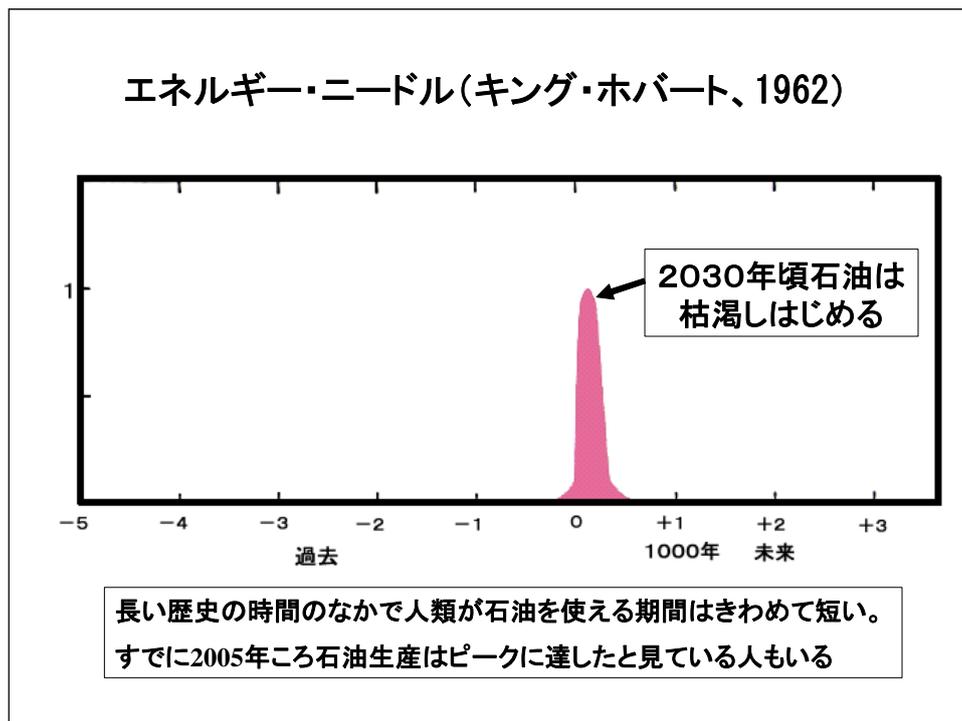


図 5. キング・ホバートによるエネルギー・ニードル

金属資源などでも、大抵は同じ形になります。世界の石油確認埋蔵量が 1.8 兆バレルか 2.1 兆バレルかによって違ってきますが、石油生産はすでにピークに入っており、2005 年にはもう迎えていたという人もいます。いずれにしろ、ピークであったかどうかは後で分

かることでしょう。さらにキング氏が、横軸に 1000 年単位で時間を取って図示したのが、人間が化石燃料を使っている期間は僅か一瞬に過ぎないという「エネルギー・ニードル」(図 5) であり、非常に印象的です。彼がこれを描いたのは 1964 年、まだ石油生産がぐんぐん伸びているころでしたが、現在はいよいよこのピーク (針の先) に達したと言えるようになったかもしれません。

(この記録は、真木彩子氏が作成し、槌屋先生にご加筆・ご訂正いただいたものです。)