

資源・エネルギー問題と持続社会への展望



特集 1

京都大学大学院 エネルギー科学研究科
教授 塩路 昌宏氏

●はじめに

私の専門は熱工学、内燃機関で、主にやっているのはエンジンの燃焼、代替燃料の有効利用、それを含めたシステムの改善などです。私が所属するエネルギー科学研究科は、十数年前に京都大学で工学研究科を中心に、農学研究科、理学研究科、経済学研究科などを融合してエネルギー問題を解決・改善する手段を提案できないかと設立された研究科で、世界でも初めてのことだったと思います。それが出来た頃に私もエネルギー変換の問題に強くかかわっていたことから、参加させていただくことになりました。今日は、専門とは少し違うのですが、資源とエネルギーの問題、今後の持続社会をどう考えていくかについてお話をしたいと思います。

●エネルギー資源とその利用

まずは世界の総エネルギーと消費量の推移を見てみます。大昔は熱利用で、薪を燃やすことから始まり、大航海時代では風力の利用がありましたが、それほどエネルギーの消費は多くありませんでした。大きく変わるのは産業革命の時で、熱エネルギーを仕事に変えるという発見があり、そのお陰で熱エネルギーの重要性が増しました。そのために石炭、石油、天然ガスというような化石エネルギーが急速に拡大して利用されるようになったわけです。総エネルギー消費量のグラフを見るとあらためてすごいと感じます。エネルギーの爆発的な利用のほとんどは動力、機械エネルギーをつくるということです。機械エネルギーが我々の生活で使われる様々な物を生産したり、使ったり、運んだりするために利用されています。

歴史をもう少し振り返ってみると、昔から使われてきた自然エネルギーは、エネルギーの密度は低い。主たる自然エネルギーは常温で使われるわけですが、産業革命以降は石炭、石油、ガスといった燃焼による熱エネルギーであり、1,000 - 3,000 オーダーで使うことになります。それだけエネルギー密度が高くなります。これは1 kgあたりの発熱量というか、

発生するエネルギー量です。歴史的にはごく最近であります。核分裂を利用した原子力利用が開始されました。本来これはものすごいエネルギー密度です。風力や太陽光を含めた自然エネルギーの8桁ぐらいの違いがエネルギー密度としてあります。我々の持っている技術が数千度以上の熱に耐えられる材料を持っていないので、このエネルギー密度を十分に利用できていませんが、数万以上で有効な材料が出来れば、もっともっと利用できるかもしれません。

歴史的に見て、様々なエネルギーに転換してきているわけですが、枯渇が原因としてシフトしたわけではありません。むしろ低密度より使いやすい、たくさんのエネルギーを得られるものに変わっています。今後はどうなるのか。化石エネルギーを使うと枯渇の問題があります。これほどまでに発展してきたのは、まさに科学技術によるところが大きいです。機械工学でもまだ100年程度の歴史しかなく、それは産業革命の後のことで、機械を開発し、ハイテク化していくためのニーズに伴って生まれた学問であり、工学がこのシフトに沿っているのです。これまでの延長として科学技術をもっと高めていって、核融合



講師 塩路 昌宏氏



かもしれないし、あるいは別の量子力学的な転換過程かもしれません。そうした高密度化するために発展していく方向か、そのためにどれだけ環境を悪化させたかを反省して再生可能なエネルギーを広めていく方向もあるでしょう。再生可能エネルギーはエネルギー密度が低いわけですから、普及の拡大には集積技術を高めていく必要があると思います。

● 1 次エネルギー

このグラフは1970年から2008年までの日本の1次エネルギー総供給量ですが、石炭・石油が多くを占めています。石炭は多くなっていますが、石油は減少気味、天然ガスが少し上向き、原子力は1990年あたりからそれほど増えているわけではありません。この円グラフは、1次エネルギーの日本と世界の状況です。内側が1987年、外側が2007年の状況です。日本は世界に比べて石油依存がかなり大きい。原子力も世界と比べて大きい。再生可能エネルギー等とあるのは、新エネルギーだけでなくバイオマス利用も含んでいます。

今使っている1次エネルギーの80 - 90%が、ここに示された石油、石炭、天然ガス、ウラン（原子力）といった資源に頼っているのが事実だということを、まず認識してほしいと思います。この図は世界のエネルギー資源の埋蔵量の分布を円グラフで示しています。可採年数は石油47年、天然ガス64年、石炭251年、ウラン100年。これは2010年時点の新しいデータですが、年によって変動します。埋蔵量に関連して問題が2つあります。1つは資源量が有限であること。それは枯渇するという意味ではなく、同じような供給は続けられないということです。使うためにはコストがかかる、あるいは探して生産するのにエネルギーが多くかかる。そのようなこと

が含まれているということです。もう1つの大きな問題は、資源が偏在していること。それをめぐって紛争、戦争が起こることにもなります。昨今のクウェート、イラン、イラク、アフリカでの問題等は主に石油資源への思惑がからんでいます。

● 可採年数

可採年数のことに少し触れたいと思います。石油の可採年数は、確認埋蔵量（R）を年間生産量（P）で割った値です。マスコミで可採年数が47年になってしまったと表現することがありますが、 R/P ですから昔は20年くらいでした。ローマクラブが警鐘を鳴らしたのは可採年数が20 - 30年の時代だったのです。確認埋蔵量も商業ベースで、産油国の申告に基づいていますから胡散臭い部分もあります。オイルショックがあると生産量は減少します。そうしたことをトータルとして割り算で算定されます。資源量が減ってくると価格が上昇します。そうすると商業ベースで採掘できる確認埋蔵量は増えてきます（Rの増加）。同時に省エネが進みます（Pの減少）。だから R/P は必ず増えます。資源量が減ると可採年数は増加するのです。石油の可採年数47年というのは、もちろん資源がどれくらい使えるかを把握するには大事な指標ですが、資源量が減ると、可採年数は増加することを認識していただきたいと思います。実際はそんな簡単なことではなく、ファンダが動くし、国際間の思惑がありますが。

石油は汎用性が高く、メンテナンスが簡単、資源量が多い、エネルギー密度が高い、輸送・貯蔵が容易、比較的安全、多様な用途に使えるという様々な特徴を持ちます。ここでは燃料的なことを話していますが、それ以外にプラスチック、薬品、塗料、いろんな原材料として利用され、食料も石油があればつくれます。既にいろんな用途に使っているわけです。最後に残るアスファルトも、道路舗装や建材に使われています。だからかなり有効に使い回されているわけです。したがって、有限であるとは言え、石油の重要性の認識はしておかなければならないと思います。

オイルピークがいつになるかが議論になっています。生産量の推移からすれば既にピークは過ぎているのですが、いろんな思惑が働いているので、もう少し長い目で見ないと、はっきりは分かりません。しかし、我々の次の世代の方々が生きている時代に

は真のオイルピークを経験されると思います。本当のオイルピークの影響度は、以前のオイルショックの比ではないと思われます。もっと大きな油田が探し出されるのではないかと安易に考える人もいますが、油田の大きさと発見された年度を示します。これ(世界の巨大油田発見と埋蔵量に推移)は東京大学の石井先生がまとめたものですが、いちばん大きな丸が世界最大の油田といわれるサウジアラビアのガワール油田で、他の油田と規模が違います。次がクウェートのブルガン油田で、これがクウェート紛争の原因になりました。こういった油田が1940年代に発見されました。少し大きいのはサウジアラビア、イラン、イラクなど中近東ばかりです。アメリカ、中国、ロシアにも油田がありますが、中近東とは大きな差があります。

いま言ったものは原油なのですが、究極の可採年数は60年程度とされます。岩に溜まっている以外に、砂に染み込んでいるものがいっぱいあるわけです。砂に染み込んでいるもの(オイルサンド)が約50年分、そして岩に染み込んでいるもの(オイルシェール・約130年分)があります。その他にオリノコ重油約40年分などを含めると量的にはかなりあります。しかし、昔は掘ったら自噴という感じですがすぐに出てきたのですが、今はそうではありません。ガワール油田では今も1日450万バレルの生産量ですが、自噴圧力を維持するために700万バレルの海水を圧入している状況です。水をそれだけポンピングしなければならないので、相応のエネルギーを導入しなければならない。その辺りも考える必要が

あります。オイルサンドにいたっては、水蒸気を入れる。パイプで蒸気を圧入することによって吸い上げることになります。岩に染み込んでいるものは岩を砕いてから電気で処理することになり、いずれも採掘にもすごいエネルギーが必要となります。そこから採掘したもので電気をつくったとして、導入したエネルギーをどれだけペイできるかの問題も考えなければなりません。これはエネルギー・プロフィット・レシオ(EPR)という考え方で、入力したエネルギーに対して、どれだけの出力のエネルギーが得られるかということです。これによってエネルギーの質を評価する必要があります。時代や技術の進歩、周辺の社会状況、統計のとり方などを考えると、この評価もなかなか難しい面もあります。例えばここで示した少し古いデータでは太陽光発電は0.98で、1を下回っているということはつくればつくほど損をするわけです。今は違って、1.8程度と聞いています。石油は昔40程度もあったそうです。こうした指標を考えてエネルギーの質を捉えようとする考え方が重要です。

エネルギーにはどんな種類があるかについてまとめてみます。1次エネルギーの化石燃料としては石油、天然ガス、石炭ですが、それ以外にオイルシェールやタールサンド。天然ガスでもメタンハイドレートやシェールガス、これは化石燃料だとは正確にはいえませんが、化石燃料以外ではバイオマス、自然エネルギー(太陽熱、太陽光、風力、地熱、波力、潮力)、そして核燃料。これら1次エネルギーを使いやすい形にしたのが2次エネルギーと呼びます。そ





れは電気であり、合成燃料、バイオエタノール、水素などであり、こうしたものをいかに組み合わせ使用していくかが大事なことです。

これらエネルギーの世界における供給量予測ですが、これはエネルギー経済研究所(IEEJ)が出している資料で、石油がいつかピークを迎え、それがいつ非石油に置き換わるのかどうかは明確でないとしても、全体に伸びていくことは確実です。日本は世界の潮流に対してどう賄っていくかといえば、再生可能エネルギーを2020年頃からかなりのペースで導入していかないとだめです。どう賄っていくかの解答はなかなか難しいことだと思います。

●電力の供給確保

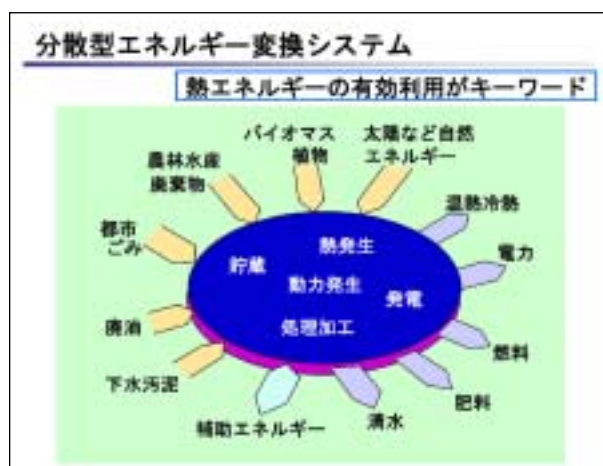
電気に変える際に発電の方式がいろいろあり、今回の原発事故以来、電力をどう確保するかという問題がクローズアップされています。石炭火力、石油火力、LNG火力、原子力発電、水力発電、太陽光発電、風力発電というようにいろいろあって、それぞれに特長と課題があり、これをやれば絶対というのがないのです。良い点と悪い点のバランスで成り立っているところがあります。日本における発電電力量のシェアですが、2007年時点では石油等13%、石炭25%、天然ガス27%、原子力26%。後は再生可能エネルギーとなります。これは発電方式別の発電原価の試算データです。震災前の少し古いデータですので、これが今後どのように変化するのか興味が持たれるところです。1ヵ月ほど前に出たエネルギー学会会報・年鑑の中で、今回は原子力について項目だけ載っていて内容が記載されていませんでした。それだけ触れるのが難しいことなのかと思いました。また、発電単価と設備利用率に注意すべきで、太陽光の場合は設備利用率が12%。エンジンなど

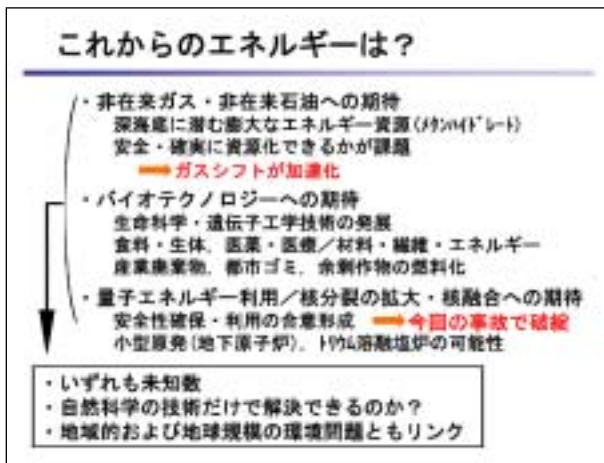
を使った発電の8分の1程度ですので、8kWで普通の発電の1kW相当になります。その辺りも考えて設備を考えるのが大事なことだと思います。2011年版資料に紹介されているのですが、レバライズドキャピタルコスト(均等化コスト)としてまとめられています。

●エネルギーの有効利用

フローを認識すべきだということで、2008年時点での日本のエネルギーフローの状況を最近つくってみました。この図は1次エネルギーがどのくらいの割合で導入され、それが発電と発電以外にどれくらいの割合で使われているかを示しています。ここで輸出その他をあわせると100%になるということです。発電、および発電以外と合わさって、民生、運輸、産業にこのように使われているわけです。もう1つ大事なのは、そこで変換する時に損失が出てくることです。全体としての有効エネルギーは41%くらいになります。1998年時点では34-35%でした。損失をいかに減らすか、あるいは損失を含めた中でエネルギーの有効利用を図っていかねばなりません。それを考える上で、有効なデータになるのではないかと思います。

有効エネルギーを高めるという面から、分散型エネルギー変換システムに触れたいと思います。これは今に始まったことではないのですが、分散型は熱エネルギーの有効利用がキーワードになります。多様なインプットがあり、都市ゴミ、廃油、下水汚泥なども含まれます。電力や動力を発生することがメインなのですが、そこで随伴してくる熱の損失をどう緩和するか、あるいは使っていくかが大事だと思います。いずれにしても、発生する熱をいかにうまく





く利用して発電をするのか、熱の有効な使用が分散型エネルギーシステムの考え方の基礎だと言えます。そのための種々の方法は配布資料をご覧ください。

熱エネルギーは、80%くらいは燃焼システムによって作られ、燃焼のニーズとシーズを考え合わせながら、システムを構築する必要があると思います。とくに21世紀にどういったことが起こるのか、起こったかを考えておくべきで、それは人口爆発であり、資源需要の拡大であり、高密度型→低密度型の流れが出てきました。あるいは社会的な価値観の変化など。今までは背景を重点に話してきて、我々を取り巻く状況を見ながら、これからのエネルギーはということになるわけですが、実は解を持ち合わせていません。逃げた言い方かもしれませんが、みんな必要かと思えます。近未来的には何とかかなと思います。問題は100年先、200年先のことで、今のところ解がありません。もっと先のことを考えるとバイオテクノロジーや量子エネルギーの何か新たなもの、小型原発の地下設置型は安全だといわれており、原子力空母で使っている規模のものをつく

る。しかし、今の原子力発電のやり方はかなり大きな熱交換器が要りますから、このところがやはり難しいかと思えます。トリウム溶融塩炉は世界的にはインドなどが注目し、実用化しています。その辺りを考える必要性もあるかと思えます。原発事故の後にそれを言うのはどうかと思えますし、やはり合意が第一ですから。それを含めて未知数というほかありません。

● 持続可能社会への展望

最後に、持続可能社会の展望としては、やはり言い切れるものがなかなかありません。デンマークなど人口がそれほど多くなく、風況がよい所では風力発電がよいと思います。アイスランドなどでは地熱が豊富であるし、そういった国、地域にあわせたエネルギーの適正な方法があると思います。それをいかにうまく導入していくか、保有する資源、気候風土、人口、面積、経済規模を勘案し、どのスケールで考えていくかということです。他所の成功例は参考にすべきですが、適材適所での運用が必要だということです。とくに熱エネルギーのスマート化は、カスケード利用、コゼネの排熱パイプライン、ヒートポンプを利用した蓄エネ、蓄熱 (コプロ改質) が必要だと思います。まちづくりと一体化した分散型ネットワークは当然必要となります。熱エネルギー利用のスマート化として、まとめて言えばシステムインテグレーションがポイントかと思えます。また、エネルギー問題は国際問題でもあります。地球温暖化防止や危機管理ノウハウ等もあるのですが、国同士の問題が別にあって、エネルギー問題は紛争に直結するため、安全保障についても考える必要があると思います。グローバルの問題の中で、日本の場合は資源争奪や権利闘争を何とか回避していくこ



持続可能社会への展望

- ・ 国・地域に合わせたエネルギー利用
資源/気候・風土 (日照、風況)/人口・面積・経済規模
→ **他所の成功例は参考、適材適所での運用が必要**
- ・ 熱エネルギー利用のスマート化
カスケード利用/コゼネの排熱パイプライン (ループ)
ヒートポンプを利用した蓄エネ、蓄熱 (コプロ改質)
まちづくりと一体化/分散型ネットワークを構築
→ **システムインテグレーションがポイント**
- ・ エネルギー問題は国際問題
地球温暖化防止や地域環境保全、危機管理ノウハウ等の
共通課題の協力で、互いの理解を図る
安全保障についても配慮する必要
→ **資源争奪 (燃料、レアメタル) や権利闘争を回避**

とだと思います。

資料の欄外に少しだけ書かせていただいた項目があります。自然エネルギー利用は、蓄エネルギーとセットです。その中で、各種電池の開発、2次エネルギーとしての水素、合成燃料を活用するということです。熱はエネルギーの墓場とも言われていますが、やはり熱をうまく利用する必要があります。それとCO₂問題の考え方として、国際問題として捉えて臨まなければならないと思います。日本の考え方は共存共栄ですが、そうした日本の主張が通用する世界ばかりではないということです。そうしたことを念頭においた上でエネルギー問題を考えていくことだろうと思います。

< 質疑応答 >

Q) : 福島での原発事故は欠陥炉での大事故であり、あれが日本の原発の現状ではない。100年、200年先を見据えると原子力でないといけなと思う。公平な目で見てほしい。

A) : 私は事故以前に原発反対派、事故後に賛成派のようになってしまっているが、立ち位置は全く変わっていない。やはり必要なものは必要。ただ核廃棄物の最終処分の問題は非常に欠点だ。その課題をどうしていくかで先につながっていくと思う。

Q) : 原発の費用は補償費も含めてどの程度なのか。

A) : 合意形成の費用を発電のコストに入れるのは、科学的な側から見ると違う問題だと思う。社会として受け入れることを、どうコストとして見るかは難しい問題だろう。

Q) : 予備的なもの、廃炉までに至るまでを含めると高いのではないのか。

A) : 現在定期点検で止めているが、原発は止めてそれですむわけではなく、その間の安全性を管理するためにエネルギーやコストを消費する。その問題



を原発は持っている。他のエネルギーはやめればそこで済む。非常に難しい問題である。

Q) : 原発事故後、各電力会社は火力へと移行。それでCO₂増加へとってきたが、一方で電力消費は節電によって減っている。京都議定書関係はうまく進んでいない。日本だけを見ると、CO₂排出問題はどうなっているのか。経産省などはデータを出しているのかどうか。

A) : データは出しており、現状維持の状況のようで、今から減らそうとしている。一般にはCO₂問題は地球温暖化問題と結び付けて議論されているが、私はCO₂問題をエネルギー問題として考えている。エネルギーの有効利用を図ることが最重要だと思う。

Q) : メタンハイドレートは商業化していないのか。

A) : 日本の周辺に莫大な量があることは確認されているが、商業化は出来ていない。今回のシェールガス革命でも、シェールガスは以前は商業的になかなか成り立たなかった。うまく採取する技術が獲得できたので、今はたいへん注目されている。メタンハイドレートも無理してやれば採れないことはないが、少なくとも現時点では、日本としてはそのまま持っていたほうがよいと思う。