

オイルピークと次世代エネルギー

日本原子力学会 フェロー
天野 治

ただいまご紹介いただきました天野です。私は原子力の専門家ですが 2005 年から原子力だけではなく東大の資源工学の現役と OB の方々によって、石油ピーク後の社会の在り方を議論する「もったいない学会」というものが設立され、そこで資源工学の専門家から石油についていろいろなお話をさせていただきました。さらにそれを発展させてエネルギー収支を調査してきました。それらの話をまとめたものを本日紹介させていただきます。

6 項目に分けてお話しします。最初にオイルピーク：石油の成り立ちと資源の質からはじめて、6 項目を順番に説明していきます。

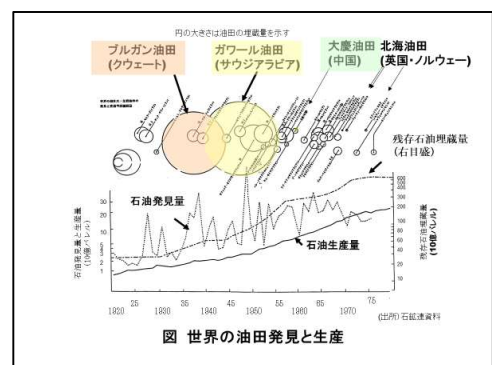
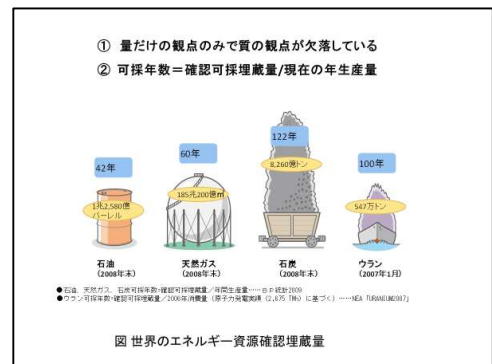
1. オイルピーク：石油の成り立ちと資源の質

地球は鉄のコアとマントル、これが 3000 km、その上に 30 km から 70 km くらいの厚みの地表があります。ちょうど 2 億年位前には PANGEA という一つの大陸になっていました。この時代は二酸化炭素濃度が非常に高く、且つ温度が 10 度くらい現在より高い状況でした。植物の生長にとっては非常に良好な時期であったと言えます。始まりは 225 百万年前の古生代ペルム紀です。それから古生代三疊紀になって遠浅の海ができました。遠浅の海では色々な生物が成長しては死んでいく、遠浅の海に川や地滑りで生物の死骸が堆積していきます。例えば 1 年間に堆積が 1mm でも 15 百万年間続くとすると十数キロになり、それが地表の何割かを占めることとなります。メキシコ湾やロシアの西部のガス田地帯になっている地域は、このような遠浅の海ができて色々なものが堆積していった場所だということです。地層の中に珊瑚など色々な生物が蓄えられ、これらが無酸素状態で油や揮発性のガスである有機化合物を生成していくこととなります。動物や植物の死骸が酸欠状態で堆積した砂岩、泥岩の中に、含まれ、そこから水、ガス、油が染み出してきました。油層というのはプールのように貯まっているのではなく、砂の層の空隙の中に油やガスがあるという状態です。

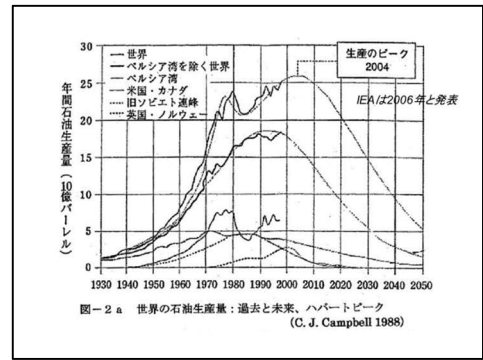
ガスは軽いので油層の上部に、水は重いので層の下の部分にあります。油層ができる典型的な条件としてキャップロックという凸状の岩があると油やガスはその下に貯まることとなります。全ての状況がこうではなく封止する層がなければ地表へ漏れ出てしまうこととなりますが、数 km の厚みの地層やキャップロックがあればそこに貯まったりします。或いは泥岩の中に閉じこめられるものもあります。このようなさまざまな状況で石油は地球の中に存在しているわけです。

資源の埋蔵量と可採年数を表したものです（右図）。石油 42 年、天然ガス 60 年、石炭 122 年、ウラン 100 年と言われているのですが、これが非常にわかりにくいです。40 年前にも石油はあと 40 年と言われていたわけで、狼少年みたいですが、これは何故かという量だけの観点で質の観点が欠落しているからなのです。もう一つは可採年数という言葉ですが、採ることが出来る量を年生産量で割った年数です。これらは共に適切でない表現です。

石油はいつから使われてきたのか、どのような油田が使われてきたのかをまとめると右図のようになります。1930 年頃にクウェートやサウジアラビア、中国の大きな油田で採掘が



開始されました。近年発見量が少なくなってきました。このように 80~90 年間石油を使ってきましたが、石油はいつまで使えるのだろうかということを考えておかなければなりません。この問いに対して Cambell という石油会社のプロがそれぞれの油田の寿命を足し合わせていくと世界の油田全体の生産ピークが分かるという考えで計算して 2004 年に生産ピークになるということを 1988 年に予測しました (右図)。国際エネルギー機関 (IEA) は世界の石油生産ピークは 2006 年であったということを 2010 年に発表しました。

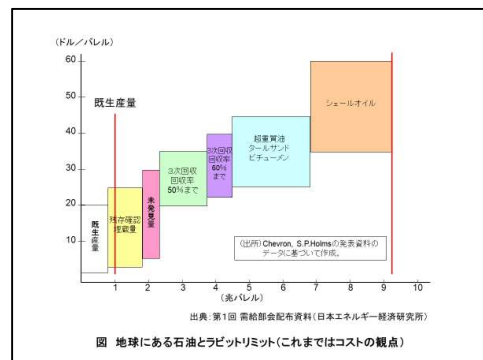


生産ピークも含めて、可採年数をもう一度考えてみると、分かり易い考えがこの「ラビット・リミット」というものです (右図)。これはウサギをつかまえるためのエネルギーがつかまえたウサギのエネルギーより大きければ、いくらウサギがいてもインディアンは生きていけないという考え方です。この「ラビット・リミット」がエネルギーの質、資源の質を表す非常に分かり易い言葉だと思えます。これはノルウェーの方の発案ですが以前に私が電話でこれを使わせてもらう承諾を得て紹介しています。



石油の取り出しですが、石油は従来の採掘方式では井戸を掘れば地中の圧力で自噴します。これは一次回収と呼ばれています。40 年前に可採年数が 40 年と言われていたのは自噴で取り出せる量のみが対象でした。自噴では 1/4 位を採掘するともう出てこなくなってしまう。その後工夫されたのが、川とか海の水を圧入して油層に圧力をかけて取り出す二次回収です。この二次回収ができるようになって 40 年後も可採年数 40 年と言われるようになったということなのです。現在大半の油田が二次回収になっていますが、二次回収では粘性の高いものは取り出せないため、粘性を下げるため高温水で温めたり、液化 CO2 を使って溶かして取り出す三次回収も行われています。このような回収方法が「ラビット・リミット」の考え方ではどのようになるのかという事が重要です。一次回収、二次回収、三次回収となるに従って取り出すのにかかるエネルギーが増大するのでエネルギーの質が悪くなってきます。

地球の中に 2 億年前から石油が生成されてきたと言われていますが、地球の中にどれくらい石油があるのでしょうか。少し古いですが右図はそれを表したものです。Chevron 社の Holms という方発表した資料ですが、地球には 9 兆バーレルの石油があり、我々が使った分が 1 兆バーレルでまだ 8 兆バーレルあるということになっています。この図にある三次回収以降、タールサンドやビチューメン、シェールオイルが「ラビット・リミット」の考え方に沿って取り出していけるかどうかということになるわけです。



もう一つの考え方として石井吉徳東大名誉教授の考え方を引用して資源について説明します。資源とはという観点で見ると、例えば海水中にあるウランは資源だといっても、海水中のウランは非常に希薄なので濃縮して固体にしなければならず、そうすることにエネルギーがかかってしまいます。それでウランは鉱石が利用されるわけで、資源とは濃縮した状態でなければなりません。また少量分散していると取り出し効率が悪いことから、ある程度大量に局在していることも必要です。そして取り出しや輸送に関して経済的な位置にある事も資源の要件です。この 3 要素が基本的に必要です。資源には天然ガスや原子力、石炭、オイルサンド、太陽光や風力、メタンハイドレートなどいろいろあるわけですが、エネルギーとしての質ということを考えなければなりません。

「ラビット・リミット」を端的に表したのが EPR (Energy Profit Ratio) です。Richard Heinberg

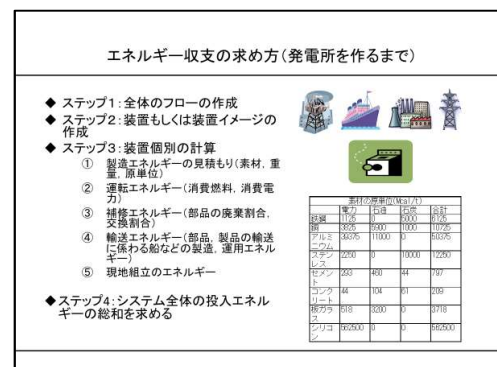
の **The Parties over** = 石油に支えられた文明が終わるといふ考えを基に石油ピークの話がアメリカでも話題になり、その中に **EPR** という言葉が出てきました。原子力発電を見てみると 4.0 或いは 4.5 になっています。一方、石油の一次回収は 100、石炭でも 80 ですから比較するときわめて低い値です。この原子力発電の **EPR** 値は米国の数値ですので日本ではどうなっているのかを調べようということになりました。

2. EPR : エネルギーの質と評価方法

EPR (Energy Profit Ratio) はエネルギーを質から考える指標で、エネルギー利益率とかエネルギー収支比と呼ばれています。分子が得られるエネルギーで「ラビット・リミット」のウサギにあたります。分母はインディアンがウサギを追いかけるのにかかるエネルギーです。取り出し設備の寿命 = ライフサイクルとして大体 30 年と仮定します。エネルギー収支分析というのは、現在行われている地球温暖化に関する二酸化炭素の **LCA (Life Cycle Assessment)** と同じです。LCA の計算では単位は二酸化炭素量、**EPR** ではエネルギー単位として **J (ジュール)** や **kcal** を使用します。また、私は **EPR** を扱っていますが、差をとる **Net** や **Net EPR** なども指標としてありますがここでは **EPR** で説明していきます。

もったいない学会で石油について議論したとき、石油というものはもの凄く便利だということが改めてクローズアップされました。石油は液体なのでそのまま車や暖房器具の燃料になる。けれども天然ガスは気体なので持ち運びや輸送が大変、石炭では量が嵩むし灰も出るということで石油というものは非常に便利なものなのです。石油は発電だけではなく車の燃料になっているのですが、石油ピーク後の車の燃料はどうなるのかという議論からこれらのことが再認識されたのです。2005 年頃に議論したときにはエンジン車からハイブリッド車へ、或いはプラグインハイブリッド車へ、更に電気自動車、燃料電池車へと考えていくと、水素燃料の燃料電池車は除外して電気自動車を本命とすれば今後の生活は電気で成り立つことになる。それで私達は電気を基本に考えることにしました。私は電力中央研究所におりました。電力中央研究所というのは九電力会社が出資して電力会社共通の課題について研究するところ。そのなかで発電プラントのエネルギー収支分析というものが 1991 年に提出されましたが、それよりも地球温暖化の方が重要視されて **LCA** で **CO2** 収支の研究に入っていったという経緯があります。更に、原子力発電新技術でのライフサイクル分析で最新型の原子力発電所の二酸化炭素排出量はどのようになっているかといった研究を経て、発電システムのライフサイクル分析の関係データを 2002 年に **Up to Date** したという流れになっています。これらの研究の流れをベースに **EPR** について調べていこうということになりました。

エネルギー収支をどのように算出するかということを示したのが右図です。発電方式だけではなく、色々なエネルギー収支分析を踏まえた観点から考え方をまとめています。燃料を採掘する、建造した船で燃料を運搬する、発電所を建築して運転する、送配電設備を構築する。これらに関わる製造エネルギーと運転エネルギー、補修エネルギー、輸送エネルギー、現地での組立エネルギーなどを考慮して算出します。また、それぞれの素材製造について日本全体として代表的にどれくらいどのようなエネルギーを使用しているのかもこの図に示してあります。入力エネルギーはこれらのデータを使ってそれぞれの素材のエネルギー原単位に素材重量を掛けて求めます。これらのデータを基に全部のエネルギーを計算で求めていくこととなります。



3. EPR の評価例 : 原子力発電では

先ほど米国で **EPR = 4.0 ~ 4.5** と低い数値が出された原子力発電を再検証してみます。1GW クラスの原子力発電所でどのくらいの素材が使われてエネルギーに換算するとどれくらいになるか見てみる

と、比率上位70%は右図のようになります。圧力容器は大きいですが厚みが限られているので2%程度です。この図から原子力発電所は殆ど鉄筋とコンクリートできているということが分かります。

素材だけではなく工場で製造する、輸送する、建設するエネルギーがあり、これ以外にも発電所の補修、運転のエネルギー、燃料調達のエネルギーなどがかかります。一方、1GWクラスの原子力発電所を1年間稼働するのに必要なウラン量を考えると25.4トンの燃料で済みます。この1年間に必要なウランの製造方法は、まず58000トンの鉱石を採掘して99%以上の純度に精鉱します。その後フッ化水素と反応させてUF6の形にします。これは気体でありこの中のウラン238とウラン235の割合はウラン235が0.7%ですが、それを3.5~4.0%になるまで濃縮します。171トンのUF6は5~6倍に濃縮されるので33トン程度になり、成形などを経て25.4トンになります。先ほどのウサギの部分である得られるエネルギーを計算すると264.4GWDとなりました。

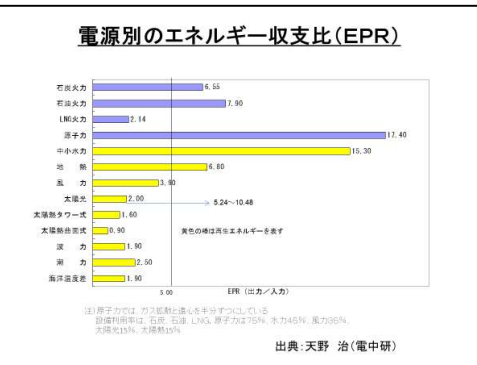
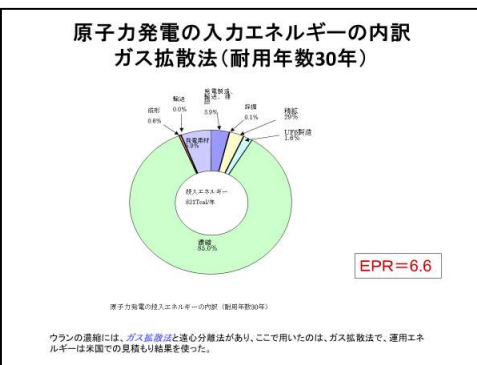
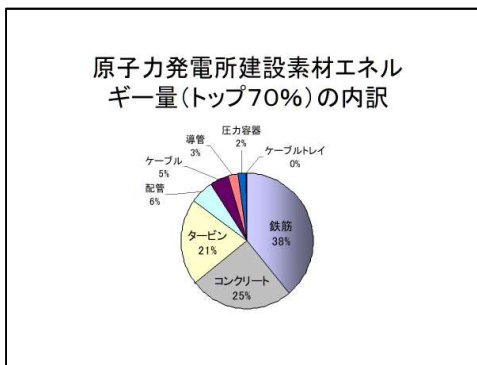
耐用年数を30年として設備エネルギーや年間の運用エネルギー、燃料調達エネルギーを考慮してEPRを求めるとEPR=6.6になります。驚いたことに入力エネルギーの大半が濃縮にかかっていることが分かりました(右図)。発電所を建設するなどのエネルギーは濃縮に比べると遙かに小さいのです。EPR=6.6というのは先ほど述べた米国での評価EPR=4.0~4.5と極めて近い数値で、一次回収の石油の100と比べて非常に小さい数値です。それで、このように小さい数値になる理由はガス拡散法による濃縮が原因だということが分かったわけです。

ウランの濃縮法にはガス拡散法と遠心分離法があります。ガス拡散法は米国が原爆を製造するために採算を度外視して実施した初期の濃縮法です。それが現在は世界中で新しい濃縮法である遠心分離法に変わりました。遠心分離法では消費電力がガス拡散法の2400kWh/SWUから100kWh/SWUと24分の1になることが分かっています。この遠心分離法の数値を用いると、最も入力エネルギーがかかるのはウランの精鉱過程(72%)で、濃縮については6%程度になり、EPR=28.2となることが分かりました。日本は国外の安いところに濃縮をお願いしているので、ガス拡散法と遠心分離法の設備容量の世界の割合がおおよそ50:50ということを考えて、ガス拡散法で計算したEPR=6.6と遠心分離法で計算したEPR=28.2の平均に近い数値であるEPR=17.4になるということになります。右図は電源別のEPRを表したものです。

太陽光発電は現在5.24~10.48と見積もられています。10.48は発電寿命を最長の30年とした場合ですが、太陽光発電については普及途上で寿命がどれくらいなのか分からない面もあり5.24~10.48と幅を持たせています。

4. その他の発電：化石燃料、再生可能等

原子力以外の発電方式で入力エネルギーが多くかかっているのはどの辺りなのでしょう。まず、石炭火力発電所です。入力エネルギーの概略は右図の通りです。石炭火力発電の入



石炭火力発電所

- 年間石炭消費量(1GW、稼働率75%)、2、336、000トン、大半がオーストラリアから輸入(輸送距離7200km→5万トン輸送船(設備)と輸送エネルギー(運用))
- 石炭の採掘は地下掘りと露天掘り、不純物を取り除く選炭(破碎、水洗浄、空気洗浄)→設備と運用エネルギー
- 発電所の設備(素材、製造、建設、輸送)と運用エネルギー

力エネルギーで特徴的なのは採掘・選炭に手間がかかることと、膨大な量を輸送するためのエネルギーが大きいということです。発電所を作るエネルギーは **EPR** にあまり影響しません。

天然ガス (LNG) の特徴は右図になります。最も特徴的なことは、ガスを -162°C に冷却・液化して輸送しなければならないためにこのエネルギーが非常に大きいということです。天然ガスの **EPR=2.14** で採掘・液化と輸送のエネルギーが殆どであり、発電設備などには相対的にエネルギーがかからないという結果になりました。主成分であるメタンを液化するために -162°C に冷却することには相当のエネルギーが必要ですし、輸送中も液化温度以下に保たなければならないことから、世界の天然ガスの $3/4$ は地産地消で使用されています。残りの多くはパイプラインでの輸送であり、ごく一部のみが船で輸送されているということです。

次は中小水力発電で、概要を右図に示します。日本は山国なので山間部の有効落差が大きいという特徴がありますが、夏に水量が減るので設備利用率は **45%**で計算しています。入力エネルギーで最も大きいのは建設エネルギーで、次いで素材エネルギーが $1/4$ ほどです。残り大きいのは運用エネルギーでダムに流入した土砂の除去などが主なものです。燃料がかからないので **EPR=15.3** と高い数値になります。日本の中ではダムを作れるところが限られているので、**EPR** は高いですが増設には限界があります。

風力発電の特徴が右図です。風力では、入力エネルギーのうち運用補修エネルギーはまだデータが少ないので、素材と運用エネルギーの **2%**年かかると仮定しています。**EPR=3.90** になりますが、海外に比べて低い数値になっています。日本で風力発電に適している風が吹くのは北海道と東北地方の日本海側で、あまり風が強いところがありません。冬はそこそこ吹きます (**60%**程度) が、夏になると風の状態 (**20%**以下) になります。これが風力発電の低 **EPR** の原因です。また、日本では台風があり、山岳の影響で水平方向だけでなく垂直方向の風にもなるために両方の効率を上げるような風車の設計が難しいということも一因です。さらに高さ **100m** 以上になると、日本海側では雷の影響も受けますが風車が雷の直撃に弱いという面もあります。風力では発電できなくなるとその分を他の電源でカバーする必要があるという課題もあります。

太陽光発電についての特徴と入力エネルギーの内訳を右図に示します。太陽光発電では素材エネルギー、製造エネルギーが大きく、運用エネルギーはそれらの **1%**の **30** 年分として計算しています。太陽光発電の **EPR** が低いのは日照時間が原因で、稼働率が **24~27%**しかとれないからです。素材エネルギーの改革が行われ最初は効率アップのために製造に大きな電力を要する単結晶シリコンが使用されましたが、キャストで製造できる多結晶シリコンが使用され、さらにアモルファスシリコンが使用されることになりました。このような素材革命によって **EPR** は上がってきています。後は寿命だけです。

天然ガス(LNG火力発電)

- ・天然ガス採掘の素材量は石油掘削の素材量から推定できる
- ・1GW、75%の設備利用率で運転すると、年間消費量は1,114,500トン
- ・LNGは産地で液化が必要
- ・産地は、インドネシア、マレーシア、ブルネイ、アブダビ、アラスカで、半分以上がインドネシア、輸送距離約3,000km
- ・発電所の素材、製造、輸送、建設エネルギーと運転・補修の運用エネルギー

中小水力発電

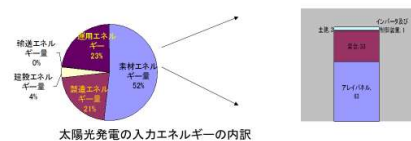
- ・モデルは、有効落差250m、最大使用水量4.8m³/s、出力10MW(0.01GW)、我が国の包蔵水力から考えて代表的
- ・設備利用率は45%
- ・ダム貯水式でコンクリート重力式
- ・土木設備はダム、貯水池、導水路、水圧鉄管、電気設備は水車、発電機、主変圧器、所内変圧器などで、素材エネルギー、製造エネルギー、輸送エネルギー、建設エネルギー、補修エネルギー

風力発電

- ・年平均風速6m/s(起動5m/s、定格10m/s、停止風速17m/s) 出力100kW
- ・プロペラ2枚、直径30m
- ・建設資材として、セメント、異形丸鋼、電気・機械設備として、ブレード、ナセル装置、鉄塔、発電設備
- ・素材エネルギー、製造エネルギー、輸送エネルギー、建設エネルギー
- ・耐用年数は30年

太陽光発電

EPRの低い理由
年間日照時間が最小1538時間(1998年)、最大2357時間(1979年)、最近2123時間(2005年)で、稼働率にすると、それぞれ18%、27%、24%となる。
すなわち出力が低い。日照時間:日照エネルギーが120W/m²を超える時間



一方、入力に素材にエネルギーの大半がとられ、その63%がアレイパネルである。このエネルギーをどれだけ減らせるかがEPRをあげるかき

5. 資源の現状と技術革新：石油、ガス、石炭等

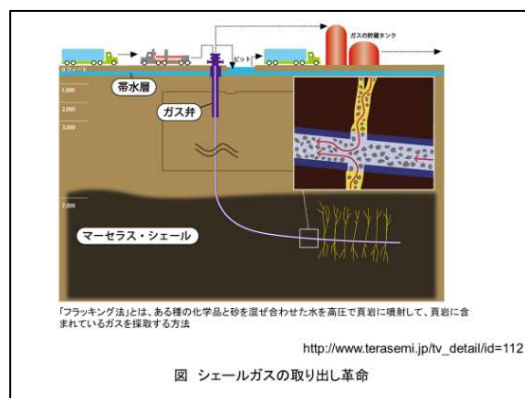
9兆バーレルのうち1兆バーレルを使って残りの既存確認埋蔵量が1兆バーレル、残りの7兆バーレルについて考えていきたいと思えます。2010年にはメキシコ湾で石油掘削事故がありました。ライザー管のバルブに不具合が起きて、石油が漏れだしメキシコ湾に深刻な汚染が発生したのです。問題はその深さで、ライザー管は水面下1500m、油層はそこからさらに5000mの深さにあって、相当深いところまで掘らなければならないということです。在来型石油では、このような深いところまで掘らなければならない状況になっているわけです。非在来型の一つはオイルサンドのような高粘度の油が浸み込んだ砂からどのように油を分離回収するかという問題です。2005年頃、シェールオイルというのは緻密な岩に油が浸み込んでいるので、露天掘りしかできないのではないかと考えていました。ガスについても石油の上に貯まったガス、石油が抜けた後のガス、水に溶けたガスなど、在来型のガスを対象にして研究をしていました。それ以外にシェールガスやタイトガスのような非在来型のガス、今まで使っていなかったガスというのがあるわけです。当時はこのようなガスは使えないだろうと考えていました。

この時期、日本は石油の枯渇の心配やガスの方が環境に良いということもあって、天然ガスの使用に軸足を移しつつあったのですが、中国やロシア、米国なども使用を拡大していたので、可採年数はかなり短縮するのではという心配をしていました。ところがシェールガスの取り出し革命というのが2005年くらいから始まったのです(右図)。シェール層というのは図にあるように横方向に広がっています。横広がり油層に対して縦掘りは現実的ではありません。緻密な頁岩にガスや石油が閉じこめられているので、そこにどのようにヒビを入れていくか、ヒビを入れて取り出してもすぐに詰まってしまう等々の問題がありました。これを解決したのがシェールガスの取り出し革命だったのです。また、シェール層にはオイルとガスの両方が入っているのですが、ガスは輸送が大変だということでオイルの利用にシフトしていきました。シェールオイルの主な産地は一番盛んな米国の他、ロシア、中国、アルゼンチン、リビア、メキシコになります。

シェールガスとオイルの取り出し革命の3つの要素は、①水平掘り②水圧破砕③マイクロサイズミックです。まず、水平の油層に対して井戸を途中から水平に掘り、次に水圧破砕でヒビを入れて且つそのヒビを保持、そして水圧破砕の際にマイクロサイズミックでどこにどれくらいシェールオイルがあるかを探る、という3つの技術を組み合わせて掘削して経済的にガスやオイルを取り出すというものです。一つ目の技術、水平掘り(右図)というのはマシンを使って縦に掘った後横向きにして地層に沿って掘削するというものです。横方向に1000m~2000mも掘っていくので、縦に井戸を何本も掘るのに比べて遙かに効率的です。

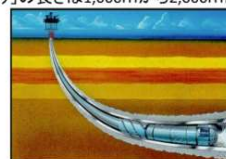
二つ目の技術、水圧破砕(右図)では高圧水を注入しますが、50mから100mの間で水圧を掛ける箇所を調整することで最適な長さの割れ目を作ります。そして、圧入する水にプロパントという物質を入れてヒビを固定するという手法をとります。

三つ目の技術がマイクロサイズミックです。ヒビを作



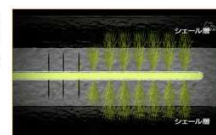
①水平掘り

- 水平掘りは、井戸の効率を格段に高めたものである。
- シェールガス層までドリルで垂直に地下2,000mから3,000m掘っていく。シェールガス層に到達したら、ドリルを横向きにしてシェールガス層に沿って水平に直径2mから3mの横穴を掘っていく。その「水平掘り」の長さは1,000mから2,000mに及ぶ場合がある。



②水圧破砕

1. シェールガスは泥岩のシェール岩に閉じ込められたガスである。シェールガス層にヒビを入れ、割れ目を保持しながらガスを取り出す。
2. 縦穴と横穴に500気圧から1,000気圧の水を注入し岩石に人工的に割れ目を作る。この「水圧破砕」によってシェールガスの主成分であるメタン分子が、閉じ込められていた岩石から流れ出てくる。
3. 水圧をかける箇所の間隔を50メートルから100メートルの間で調節することで、最適な長さの割れ目が作られる。
4. シェール層にできた微妙な隙間を支えるため、水90%にプロパントという砂粒状の物質9.5%に数百種類の化学物質が0.5%入っている。



るときに音波を出し、その音波を他のボーリング坑に取り付けたセンサーで検知することで、シェールオイルやシェールガスの3次元的なマップを作ります。これによって、どこにどれくらいあるかを知ることができるわけです(右図)。アメリカではビッグデータも絡めて開発が進められています。

これらの技術が実現したことによって、2004年から2006年に来ると言われていた在来型の石油のピークが、少なくとも2030年までは延びるだろうと言われています。但し、それなりにコストがかかるのでエネルギーの質は悪くなって価格は上昇します。シェールガスでは24~36米ドル/バーレル、シェールオイルでは50米ドル/バーレルが採算のとれる価格ゾーンになります。一方、シェール革命によってこれまでの産油国の稼ぎが減ってこれらの国々が不安定になるということも予想されています。2005年からシェールオイルが参入して、バーレル当たりで50ドル程度まで価格が下がり、2030年くらいまではこの程度までしか価格としては上がらないのではといわれています。我々が2005年の取り出し革命前に活動したとき、オイルシェールのEPR=1を超える割合は数%だとみていましたが、取り出し革命によってEPRに関する量的なデータを見直さなければならなくなりました。量的なデータとしては在来型の石油が6500兆立方フィートに対して、シェールガスは2~3倍の16280兆立方フィートとかなりの量があります。

次に石炭について説明します。石炭は海ではなく湖に堆積した有機物の泥地が無酸素状態で分解されて石炭化したものです。石炭は、地熱と圧力で水分が抜けていきます。無煙炭は殆ど水分がありません。瀝青炭ですと水分が10%くらい、亜瀝青炭で20%、亜炭で30%くらいの水分を含みます。これらの石炭を燃やすと多くの煙が発生して当然PM2.5に対する影響が出ます。2009年のBP統計によれば中国では半分程度が亜瀝青炭や褐炭で、6~7割の発電を石炭で行っているのです。車の影響もあってPM2.5が多量に発生することになるわけです。日本の場合は微粉化し水分を除去しているのです。PM2.5は発生しません。中国でも同様にすればいいのですが微粉化にはエネルギーがかかるだけでなく粉体の取り扱いが難しいということもあって簡単にできません。

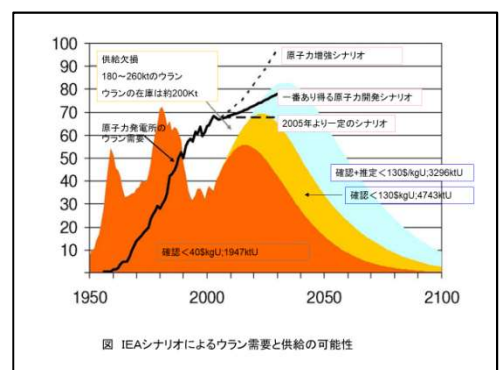
次にウランについて説明します。宇宙で最も多いのは水素とヘリウムです。水素とヘリウムが集まり太陽ができて、ここで核融合反応が起こって水素とヘリウムからリチウムができる。さらに酸素や炭素などができていき鉄ができるようになります。核融合反応では鉄までしかできません。現在太陽でどんどんできていくのは鉄です。地球のコアに鉄が多いのはこういったことが理由で、安定的に鉄が製造されるわけです。重力がさらに高まって超新星爆発が起こると凄いエネルギーで核融合反応が起こり、このときにはじめて鉄より重いウランなどの金属ができます。超新星爆発後にできた塵が集まって太陽系が生成しウランを含んだ地球も生まれました。3000℃のマントルから表面に近づくと冷却されウランも凝固して閃ウラン鉱になります。また、これが風化して礫岩型ウランになります。ウランは酸化性の地下水に溶けるので、地下水に溶けたウランが有機物で還元されるとこれが蓄積して砂岩型ウラン鉱床が生まれます。これらは石油のように偏在せず地球全体に分散しています。発電に必要なウラン量は右図のようになります。ウランについては一時取り出しすぎたので、一旦生産量が減少し、また増加したという経緯があります。ウランについても100年とかではなくもう少し長い期間使えるといえます。

③ マイクロサイスミック

- ・ マイクロサイスミックはシェールガス量を正確に測定する技術である。
- ・ シェールガス掘削をコントロールするのが、「マイクロサイスミック」の技術で、「水圧破砕」の時に起こる振動を捉えてシェールガス量の分布を分析し、横穴の割れ目の形状を解析する。



"Microseismic Monitoring"は地下で小規模な爆発を起こし、微細な振動を地下に設置した複数のセンサーでとらえて、トモグラフィックによる地震(破砕層)の分布を未知数として膨大な連立方程式を解き3次元の地震分布図をつくる技術である。当然、破壊技術とIT技術の両方、そして資源探査のソフト開発が必要になる。



6. 次世代エネルギー：考慮のポイントと課題

まず世界のエネルギーについてです。世界の総人口が75億人、そのうち1/5が中国とインド、アメリカ、ブラジル、インドネシアと続きますが、大国ロシアは人口ではかなり下位になります。世界のエネルギー需要においては、中国、インド、アメリカが支配的になるということです。

資源の大半を発電に使うと考えて一人当たりのエネルギー消費量で見ると、2002年のデータではカナダ、アメリカ、日本、フランス、ドイツ、韓国という順です。世界平均が2373kWh/人・年に対して中国は約半分の1208 kWh/人・年でした。インドはもっと少なく世界平均の1/5程度でした。しかし、この2国は人口が多いので、国の総量で見ると中国は2番目、インドは8番目でした。ところが2016年には、中国の一人当たりの消費量は4倍になり、国の総消費量では1位になっています。中国は今後も増えていくでしょうし、インドも増えてくることを考慮するとエネルギー需要は厳しくなると言えます。中国、インドの動向を注視する必要があります。

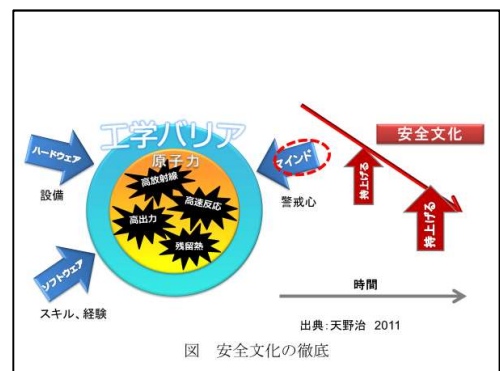
ラビット・リミットの観点を考慮した石油や天然ガス、石炭の今後の供給予想は、取り出し革命を考慮しないと石油・天然ガスは減少、原子力、水力、風力、太陽光も限度があるので石炭が主力になると考えられました。取り出し革命によって石油・天然ガスがもっと使えるということになると供給ピークは延びてくるだろうと思われまますので、取り出し革命を考慮したデータに作り換えなければなりません。

また、EIAによる2009年の世界の液体燃料の需要と供給予想では2012年に供給を需要が上回り、不足分はどうなるのか心配されましたが、現状ではシェールオイルによって何とか埋められそうだということになっています。アメリカのシェールオイルの実力は主要7地区の生産実績が2017年のデータではイラン、イラクを既に抜いている状況です。最近のデータでは2023年にはアメリカのgross exportはロシアを抜いてサウジアラビアに迫ると予想されています。アメリカでの石油生産量がこのように増加していることが、アメリカがイランに対して強気である背景になっています。ガスについてもシェールガスが開発されたので中国での需要拡大を見込んでも2030年くらいまでは供給不足にはならない見込みです。今後も、エネルギー資源は石油、石炭、天然ガスが主流で推移していくと思われまます。

日本の深海にはメタンハイドレートがあります。ガス等のエネルギー資源は地産地消が原則なのでこれを使った方が良いのですが、メタンが氷の中に入っている状況に取り出し革命の技術をどのように使うのが問題です。メタンガス層に影響を与えると南海トラフ地震の引き金になる可能性があり、これを起こさないように地層を安定化しながら取り出さなければなりません。データをしっかりととりながらの開発なのでもう少し時間がかかります。

次にコストの安い原子力の利用についてです。2008年当時は日本の電気料金は原子力比率が高かったため欧米諸国並のレベルでした。そして2011年に福島原発でメルトダウン事故を起こしてエネルギー比率が変化し電気料金もアップする結果になりました。

この福島原発事故の原因は以下のように考えられます。我々が戦争に敗けたとき復興の電源として石炭火力発電所を多く使っていました。石炭では限界があるということで、当時米国で開発された原子力発電所を日本にそのまま導入しました。米国から導入された原子力発電所は米国東海岸の発電所がベースでした。ここは地震や津波が殆どない地域で、どちらかといえば心配される災害はトルネードだったのです。トルネードに対して大切なものは地下に設置するという発想でした。このデザインを日本は50年間変えずにやってきました。このため、福島では非常用のバッテリーやモーター、配電盤などが全て地下に設置されていて、それが津波でやられてしまったということなのです。もっと根本的な原因は我々日本人に特有なもので安全文化に関することです(右図)。原子力というのは高放射線で出力密度が高く反応も早い。スイッチをオフにしても残留熱(崩壊熱)で発熱が継続するので冷却しなければならない。このような危険性に対するハードウェア対応、運転員のスキル・経験、警戒心などが充分備えられなければならないわけですが、危険な事象に対応する安全文化が劣化していたのだと思われまます。2011年から8年経った今はまだ記憶に残っていますが、海の近くに家を建てると危険だということを忘れ10年20年30年経つとまた家を建て始めるということになるのです。原子力発電が、50年安全だったからこれ



からもずっと安全だと思ふことは避けなければならない、安全文化の劣化は避けなければならないということです。

2006年時点の発電電力量は全量で大体1万億kWhで、そのうち原子力が1/3、石炭・天然ガスが1/4、その他を石油、水力、地熱、太陽光、風力が占めています。2006年と2015年を比較するとその変化は、原子力が91億kWhまで減り、その分を石炭と天然ガスで補い、太陽光もかなり増えています(右図)。

一方、非在来型の石油、ガスの増量に伴い産油国の収入が減り、産油国周辺で紛争が増加しています。これも、次世代エネルギーに関連する問題の一つです。さらに地球温暖化の問題もあります。CO2排出量は国際的に達成しなければならない課題です。石炭、石油、LNGはある程度発生するが、再生エネルギーや原子力での発生量は少ないので、これらのバランスを考えなければなりません。このエネルギーバランスのコントロールが日本の2050年ビジョンに入ってくるわけです。

まとめの前に、原子力に関して廃炉や使用済み燃料の処分を含めてEPRがどうなるかお話しします。原子力発電所の建設の入力エネルギーは大半が鉄鋼とコンクリートです。鉄鋼とコンクリートは再利用ができます。鉄筋やコンクリートの表層に付着した放射性物質のみを削り取れば再利用が可能です。福島原発は除いて、事故を起こしていない原発の廃炉では、使用済み燃料を取り出した後の圧力容器は中レベル廃棄物になりますが、圧力容器は全体の5%程です。タービンはBWRでは低レベル廃棄物ですが、PWRでは非汚染。汚染されているものと汚染されていないものを分ければ、汚染されているものはそれほど多くないので廃炉にそれほどのエネルギーはかかりません。使用済み燃料や高レベル廃棄物は地中300m~700mに埋めます。埋めるときには垂直ではなくスパイラル坑にして運び込みます。この掘削と運搬のエネルギーが必要です。また、使用済み燃料に関してはガラス固化して容器に入れ、オーバーパックして粘土質の物質で固めるエネルギーが必要です。あとは300年程度監視しなければなりませんがこのエネルギーはそれほど多くはありません。これらのエネルギーを全て加えてもエネルギー収支上それほど大きな数値にはなりません。ガラス固化後30年間冷却する必要がありますが、こちらの方がむしろ大きい結果になることが分かりました。EPRとしては17.4だった数値が廃炉を入れると15くらいになると試算しています。

最後にまとめますと、右図のようになります。採掘技術の革新に関してはシェールガスやシェールオイル以外の非在来型資源の利用の可能性も出てきています。また、非在来型資源の本格利用については上がり続けるわけではなくシェールガスで30ドル/バーレル、シェールオイルで50ドル/バーレルで落ち着くと見込まれます。そう考えればガソリン価格もそう簡単にはアップしないでしょうから、あわてて電気自動車にシフトする必要はないかも知れません。資源、エネルギーはコストや持続性など多面的に且つ合理的に使用することが重要で、この点は国の2030年、2050年の方針にも取り入れられています。

以上です。ご静聴ありがとうございました。

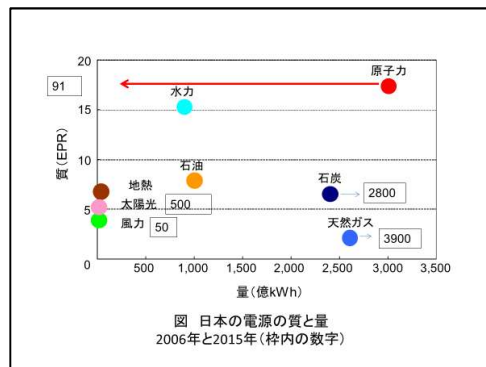


図 日本の電源の質と量
2006年と2015年(枠内の数字)

最後にまとめますと、右図のようになります。採掘技術の革新に関してはシェールガスやシェールオイル以外の非在来型資源の利用の可能性も出てきています。また、非在来型資源の本格利用については上がり続けるわけではなくシェールガスで30ドル/バーレル、シェールオイルで50ドル/バーレルで落ち着くと見込まれます。そう考えればガソリン価格もそう簡単にはアップしないでしょうから、あわてて電気自動車にシフトする必要はないかも知れません。資源、エネルギーはコストや持続性など多面的に且つ合理的に使用することが重要で、この点は国の2030年、2050年の方針にも取り入れられています。

以上です。ご静聴ありがとうございました。

まとめ

1. 資源、エネルギーは質から考える
2. 在来型の資源の生産はピークを過ぎた
3. 非在来型の資源は採掘の技術革新により利用が現実となった
4. 在来型資源の質の低下および非在来型資源の本格利用はコストが上昇する
5. 資源は世界共通であり、資源の質の変化が世界の紛争を誘発する
6. コスト、持続性、環境負荷などの観点から全てを合理的に使うことが大切である

【質疑】

Q: 化石燃料は座礁資産と呼ばれることがあります、このような考えは将来のエネルギー使用に影響を与えますか?

A: 化石燃料は使いたくはないのでもう少し減らすべきだとの考えもあるものの、再生エネルギーの利用の限界もある中で我々が現在の生活レベルを落とせるか、と考えると使用を大幅に減らすのはなかなか難しいと思います。

Q：福島原発のデブリの取り出しが非常に困難で、また取り出したデブリの処理についても見通せない現在の状況を考慮した EPR はどうなりますか？

A：一つは事故号機の 1～3 号機のデブリの取り出し、もう一つは再稼働に対する安全文化の問題があると思います。後者はここまで説明した中で要素として入っていない津波やテロの問題であり、事故を起こさないようにするデザインは決まっているので EPR の算出はできます。一方、デブリは金属として安定化していますから散逸する心配がないので取り出す必要がないものの、福島原発を更地にすると言った以上、取り出して処理しなければならない。しかし、科学者としては埃などの散逸対策を取って閉じ込めればいいのではないかと思います。スリーマイルではデブリの形状がまだ良かったのである程度取り出せましたが、福島の場合はかなり難しいと思われるのでデブリの取り出しについては EPR とは別に考えざるを得ないと思います。事故に対する補償も含めた費用なども、同様にリスクとして EPR とは別の概念で議論すべきだと思います。

Q：例えば今後の自動車は全てガソリン車ではなく水素自動車などになるとすれば世界の産業が変わってしまうことにもなると思いますが、そういった研究もされているのでしょうか？

A：2030 年はかなりの確率で石油の利用は問題ないというのは確実です。2050 年や 2070 年でも多分大丈夫ですがその確認がとれていないという状況です。水素自動車については余り可能性がありません。インドネシアから日本に天然ガスを運搬して、これを改質して日本で水素を作ります。できた水素の貯蔵は -263°C に冷却して液化する必要があります。天然ガスの液化温度である -162°C でも相当なエネルギーが必要なのに -263°C に冷却するということは大変なことです。さらに水素を自動車に注入する際には 70 気圧程度の高圧が必要になります。これらの問題を解決する相当な技術革新がないと水素自動車は成立しないと思います。

Q：原子力の使用済み核燃料をどのように考えればよいか教えてください。

A：原子力発電所は作ったときにサイクルを考えておかなければいけません。稼働をすればその時点から核のゴミが出るわけですから。世界的にこの問題は議論されています。ガラス固化体にした後問題なくなるまで 1 万年くらい待たなければなりません。1 万年間状態が変わらない、また我々の生活に影響を及ぼさないところに保管しようということで考えられた方法が、容器に入れられたガラス固化体を 300m 以上の地下に埋めようというものです。これを掘削などで取り出されるのが心配なので、石油やメタンハイドレートがないような場所を選ばねばなりません。目印を付けるにしても、1000 年も経ったら誰にも分からなくなってしまうというようなことが問題になっているのです。方策はできているけれども、その安全性を 100% 証明できるかということです。

Q：現在の大学に於ける原子力工学分野の若い学生さん達はどのような状況でしょうか。

A：福島原発のある福島の浜通りの福島高専などの学生さん達は、率先して廃炉関係などの仕事をしています。また、学会活動としてシニアと学生の対話というのをやっていますが、やる気のある学生さんは結構います。ですから、原子力工学の学生さん皆さんが落ち込んでいるという状況ではないと思います。

天野 治 (あまの・おさむ) 先生のプロフィールと著書

1977 年 東北大学大学院原子核専攻 (修士課程) 卒業

2004 年 埼玉大学大学院理工学研究科 (博士後期課程)

1977 年から東京電力で原子力発電所の建設、補修や安全設備、材料、再処理、高レベル廃棄物の研究に取り組む。2005 年より電力中央研究所で、エネルギー収支分析に取り組む。また、資源工学の専門家が集まるもったいない学会で農業、バイオマスの活用とエネルギー収支分析にかかわる。北大、東大、京大、九州大でエネルギー収支分析とエネルギーの質の講義を定期的に行う。

主な著書

『石油ピーク後のエネルギー』、愛智出版 2008

『石油ピーク後をどう生きるか』、愛智出版 2010

『石油ピーク後をどう生きるか』、北海道、フォーラム 2050