

世界の一次エネルギーの未来予測  
A Forecast of World Primary Energy

Ichizo Aoki  
Greenwood Office  
E-mail:iaoki@gakushikai.jp

青木 一三  
グリーンウッド事務所

Abstract

Up to industrial revolution, we had used renewable energy such as wood for our daily use. Start of fossil fuel utilization brought us comfortable life style and rapid growth of our population, but with adverse effect of climate change. It seems that we have used almost half of recoverable oil reserves and a part of natural gas. Regardless of climate change, it is evident that we have to come back to renewable energy again in the next century.

In making forecast author has investigated possible alternative energy such as nuclear and renewable energy including biological fuel, hydraulics, wind, solar cell and Concentrating Solar Power (CSP). In utilizing fossil fuel, carbon capture and sequestration is considered as important option for avoiding climate change.

## 目 次

1. 緒言
2. 未来予測の方法論
3. 一次エネルギーの世代交代の根拠と世代交代図
  - 3.1 化石燃料
  - 3.2 核燃料
  - 3.3 再生可能エネルギー
  - 3.4 集中発電対分散発電と代替自動車燃料
  - 3.5 世代交代図
4. 世界のエネルギー総消費量予測
  - 4.1 資源に無関心でエネルギー消費抑制できない
  - 4.2 資源を大切に使うためにエネルギー消費抑制する
  - 4.3 可採埋蔵量の2倍使えるとしてエネルギー消費抑制しない
5. 究極のエネルギーの利用形態
6. 結言

## 1. 緒 言

人類は産業革命までは太陽の恵みに由来する薪などの再生可能エネルギーに依存しつつ、つましく暮らしてきた。しかし石炭、石油、天然ガスという化石燃料の利用が始めると、その優れた経済性と利便性にゆえに、伝統的な再生可能エネルギーの利用は放棄してしまった。結果としてエネルギーの種の世代交代が生じて、大気中の二酸化炭素の増加による気候変動が危惧されている。

1972 年、MIT のシステム・ダイナミクス研究グループのメドウズ教授らがイタリアの財界人 A・ベッチェイ氏が設立した民間組織ローマクラブの依頼にこたえて「成長の限界」という報告書を書いた。[1] 化石燃料の利用による産業の発展と人口増加が、資源の枯渇、食料不足、環境汚染を引き起こしている。何もしない政策は破局を導くのか、新しい資源が見つかり代替エネルギーが開発されれば限界は超えられる可能性があるのかどうか、突如人口が激減するという破局があるのかを解析した。解析手法は事象の時間的な変化を正と負のフィードバックの拮抗によって記述するものであった。正のフィードバックというのは、事象を幾何級数的に増加させるフィードバックである。指数的に増加する人口増加や資本と利子の関係がそれである。負のフィードバックとは、事象を抑制させるようなフィードバックである。例えば死亡率がこれにあたる。

1992 年、筆者はメドウズ教授とおなじように連立微分方程式を使った世界モデルを作って人口と炭酸ガス排出量のシミュレーションを行った。[2] 人口は誕生数と死亡数の差の積分で表現するダイナミックモデルである。誕生数は女性の妊娠回数と個人年収の相関図を使った。死亡数は平均寿命から計算した。経済成長モデルは GDP 成長率の複利計算。炭酸ガス排出量は経済の成長とともにエネルギー依存度が減少する関係を表示したエネルギーの GDP 弾性率をつかった。計算はステラという連立微分方程式を解くソフトを使った。結果は「成長の限界」と類似の結果になった。なにもしなければ人口は 2040 年頃 100 億人でピークを打ち減少に転ずる。化石燃料の消費は鈍化するも増加し続け、2070 年頃には確認可採埋蔵量を使い尽くす。炭素税を課して化石燃料消費を毎年 1%削減し、発展途上国へ GDP の 0.6%の資金援助すれば人口増加に抑制がかかり、経済成長は鈍化して 2030 年頃 80 億人でピークとなり、緩やかに減少に向かう。そして炭素排出量は 2070 年ピークを打ち減少に転じ、2140 年頃まで可採埋蔵量を使い尽くすという結論であった。

1992 年、国際応用システム解析研究所のナキシェノビッチは 1850 年から 1980 年までのエネルギーの種が全エネルギーに占めるシェアを分率 (fraction  $f$ ) で表示し、対数目盛りの縦軸に  $f/(1-f)$ 、横軸に時間をプロットすると、一つのエネルギー種の栄枯盛衰を一つの山形曲線 (シェア・カーブ) で表現できることを示した。そして種の世代交代は次々に押し寄せる波の波形の重なりによって表現できることを示した。[3] 実績によって決まる山形曲線の勾配は全てのエネルギーに関しほぼ等しい。これはどのエネルギー種に関しても社会的の技術革新や受容速度が時代によって変わるものではないことを示している。筆者はこれを便宜的にナキシェノビッチ・ダイヤグラムと呼ぶことにする。

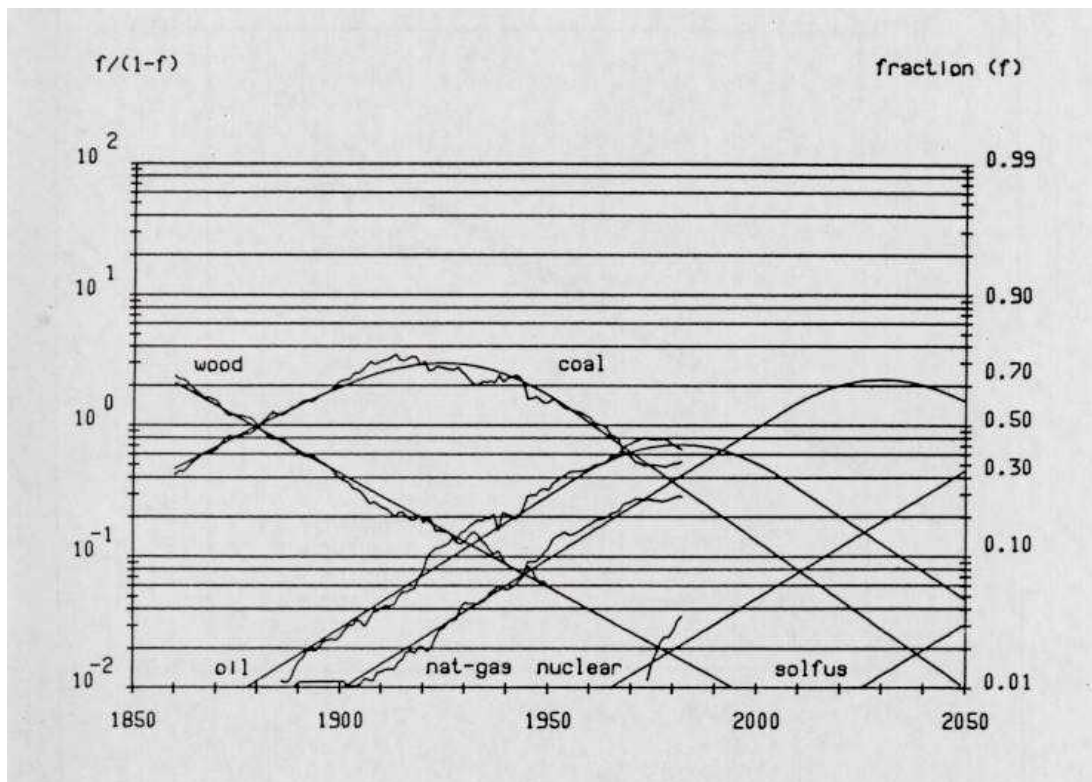


図-1 ナキシエノピッチ・ダイヤグラム

2009年、筆者はナキシエノピッチ・ダイヤグラムを1980年から2000年までの実績値で修正し、2,000年から2150年までの独自の予想を行った。その方法論とエネルギー種の世代交代予想の根拠を説明し、この交代図を使って、消費抑制策なしに現時点での在来型の化石燃料の究極可採埋蔵量を使い切ると何が起こるか、消費抑制すればどうなるか、非在来型の究極可採埋蔵量が在来型とほぼ同量あるとしてこれを使い切ることが可能ならどうなるかを予想した。これを説明するのが本報告書の目的である。

## 2. 未来予測の方法論

エネルギー種の世代交代の予測をするためには、人口のダイナミクスをモデル化することも経済のダイナミックモデルを作って価格の変化をシミュレートすることも必要ない。ナキシエノピッチ・ダイヤグラムで近似的に予測可能である。

一次エネルギーの世代交代は資源が枯渇するから生じるのではない。価格と利便性を比較して社会が選択した結果として世代交代が生じるのである。資源の生産量がピークを過ぎると需要と供給のバランスから価格が高騰し、次第により安価な代替エネルギーにとって代わられるのである。資源の枯渇は間接的な影響を持つにすぎない。伝統的再生可能エネルギーであった薪が石炭に駆逐されたのは薪が枯渇したからではない。石炭採掘の技術が開発されて多量に安く手に入るようになったからである。薪は再生されていまでも昔のままにある。石炭が石油に駆逐されたのも同じ理由である。石油が油井を掘削することによって簡単に採掘でき、石炭より安かったからである。だから未利用石炭はいまだに多量に残っている。

価格と利便性が世代交代を決定するのだから価格が最も安くキャスティングボードを握る石油の盛衰は他のエネルギーの興亡に影響を与える。故に石油の生産量がどのような曲線を描いて変化するのをまず知らなければならない。

1838年にベルギーの数学者ピエール・ベルハルストによって考案されたロジスティック・モデルというのがある。ロジスティック・モデルはメドウズ教授らが使った事象を幾何級数的に増加させる正のフィードバックと環境収容力  $K$  との差を負のフィードバックとする項を一つの式に組み込んだものである。

1956年にキング・ハバートはテキサス原油の生産歴史を研究して、石油の生産曲線はロジスティック方程式の微分形であるベル型カーブを描くことを発見した。これをハバート曲線という。そして石油が生産開始から完全枯渇までの間に生産した総量を究極可採埋蔵量と定義した。究極可採埋蔵量とは既生産量と可採埋蔵量の和である。究極可採埋蔵量の半分を消費すると生産はピークを過ぎて減産へと向かう。これが代替エネルギーへの世代交代を触発させる。

このロジスティック・モデルとナキシエノビッチ・ダイヤグラムの相互関係は図-2に示した。

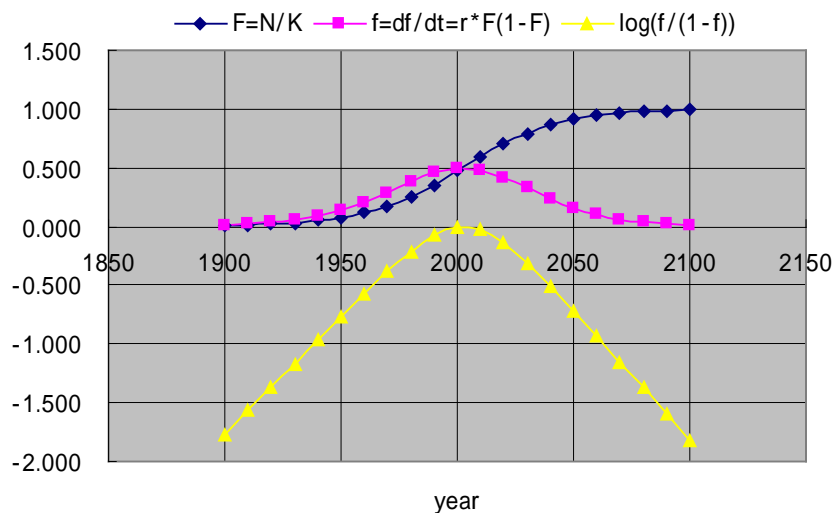


図-2 ロジスティック・モデルとナキシエノビッチ・ダイヤグラムの相互関係

ロジスティック・モデルはその時の年産量を  $N$  とし究極可採埋蔵量を  $K$  としたとき

$$F = N/K$$

が描く  $S$  カーブとなる。菱形のプロット（紺色）がそれである。ロジスティック・モデルの微分形

$$f = df/dt = rF(1-F)$$

はベル型カーブを描き矩形のプロット（ピンク色）となる。ナキシエノビッチ・ダイヤグラムは

$$f/(1-f)$$

を片対数目盛りにプロットしたもので三角のプロット（黄色）のような山形曲線（シェア・カーブ）になる。

2000年までは国際エネルギー機関（IEA; International Energy Agency）の World Energy Outlook にまとめられた実績値とし、石油の 2,000 年の世界の一次エネルギーのシェアに一致するようにファクターで位置決めする。天然ガスは石油に遅れた波として同様の波形でやってくるとする。

新規エネルギーが採用されるのは技術革新のおかげで代替エネルギーが安くなるからである。そのような技術革新の一つで最も重要だと思われるソーラーセルについては詳しく調査と評価をしてその確からしさを検証し、初期値を決める。成長の勾配は過去の他のエネルギーの成長速度と同じとした。

気候変動防止に有効とされる原発はコスト計算をして価格競争力を見定めて今後の世界への普及度を見定める。バイオ、水力などは資源の制約でこれ以上伸びないとする。残りはすべて未利用石炭で穴埋めするとするとした。石炭利用による気候変動防止は二酸化炭素の回収・隔離技術の技術革新により可能とした。

### 3. 一次エネルギーの世代交代の根拠と世代交代図

#### 3.1 化石燃料

世界の石油の究極可採埋蔵量 K はコリン・キャンベルとジャン・H・ラエールの予想値と米国の地質調査所の数値の範囲内にあるとした。天然ガスの究極可採埋蔵量はモールとエバンスの値を採用した。化石燃料の可採年数(R/P)は BP 統計(2005)を採用した。ウランウムは IAEA 2007 年レポートの可採埋蔵量を採用した。まとめると表-1 のようになる。

Fuel	Ultimate Recoverable Reserves	Zcal	Recoverable Reserves	Zcal	R/P Ratio
Coal	2trillion ton	12.4	1trillion ton	6.2	164
Oil	1.8-3trillion bbls	2.8-4.7	1.186trillion bbls	1.9	41
Natural Gas	346-527trillion m <sup>3</sup>	3.3-5	180trillion m <sup>3</sup>	1.7	67
Uranium	-	-	4.59million ton	-	85

表-1 世界の究極可採埋蔵量、可採埋蔵量、BP 統計可採年数

ここで Zcal=zetta cal=10<sup>21</sup>cal である。

#### (1) 石油

1998 年、テキサコ、アモコで探査部長として働いたコリン・キャンベルとトータル社で探査

を担当したジャン・H・ラエレルがスイスのペトロコンサルタンツ社のデータベースを基に石油の究極可採埋蔵量を 1.8 兆バーレルと見積もり、ハバート曲線から石油生産がピークを越える時期を 2005 年とし、ピーク年産は 22.5 億バーレルと予測した。図-3 の小さなハバート曲線（ピンク）がこれである。これをサイエンティフィック・アメリカン誌 3 月 1 日号に「安い石油の終わり」として発表した。これをピークオイル理論という。[4]

米国の地質調査所は究極可採埋蔵量はもっと多く 3 兆バーレルとして。図-3 の大きなハバート曲線（紺）がこれに相当する。2020 年にピークをむかえ、最大年産 340 億バーレルとなる。究極可採埋蔵量が 1.7 倍となっても消費が進み、ピーク時期は 15 年遅れるにすぎない。

油田の埋蔵量の度数分布が両対数で右下さがりになるスケールフリーのフラクタル分布（べき乗分布）となる。世界のあちこちに散在するマイナーな油田の開発をすれば究極可採埋蔵量 4 兆バーレル位までは増加させることができるだろうという説もあるが価格の暴騰を伴い、ソーラーセルなどの競合エネルギーに代替される運命にあるだろう。

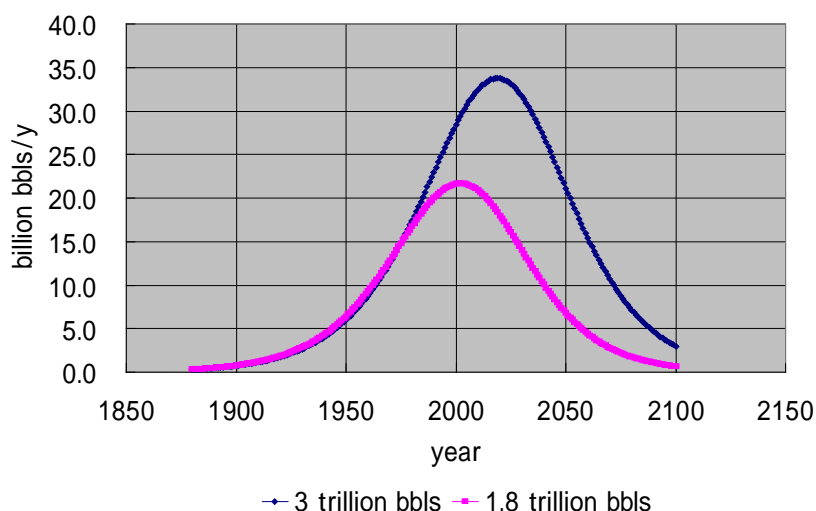


図-3 石油の究極可採埋蔵量を 1.8 と 3 兆バーレルとした場合のベル型曲線

石油火力の発電原価は燃料価格上昇により表-2 のようにグリッド・パリティー（ソーラーセル発電原価が電力料金と同程度になる）達成時期と予想される 2014 年には 15.5 円/kWh となり、ソーラーセルの発電原価の 15.3 から 25.4 円/kWh より少し安い程度である。

便宜的に究極可採埋蔵量 1.8 兆バーレル場合のハバート曲線をテンプレートとして IEA のワールド・エネルギー・アウトルックの 2000 年の石油の分率  $f=0.35$  であるから石油のハバート曲線に乗数を掛けて 2000 年の  $f=0.35$  となるように調節して石油のシェア・カーブとした。

## (2) 天然ガス

2007 年、モールとエバンスは在来型天然ガスの究極可採埋蔵量を 346 兆立方メートル、非在来型天然ガスについての究極可採埋蔵量を 181 兆立方メートルと推算してロジスティック曲線の微分形よりピークガスは 2043 年とした。2000 年の生産量は 2.3 兆  $m^3/y$ 、ピーク時 6.5 兆  $m^3/y$

である。これは 2000 年の 2.8 倍となる。[5]

IEA のワールド・エネルギー・アウトルックの 2000 年の天然ガスの分率  $f$  は 0.21 である。世界のエネルギーの総消費量は 40 年間で 1.8 倍成長するため、ピーク時のシェア  $f$  は 2000 年の  $2.8/1.8 = 1.5$  倍となる。従ってピーク・シェア  $f = 0.21 \times 1.5 = 0.3$  となる。他の競合エネルギーの影響を受けてシェアのピークは数年早まるため、ピーク・シェアは 2040 年とした。

2014 年には熱効率 59%というガスタービン入り口温度 1,500°C の LNG コンバインドサイクルの発電原価は表-2 のように 9.3 円/kWh となり、原発の 11.5 円/kWh より安くなるため、天然ガスは今後ますます石油代替として普及するだろう。

### (3) 石炭

石油が残り少なくなれば価格は高騰する。そうなれば天然ガス、そして石炭が使われることになる。2014 年には石炭火力の発電原価は表-2 のように 6.9 円/kWh と最も安い電源となる。

気候変動防止には二酸化炭素回収・隔離 (CCS; Carbon Capture and Sequestration) が行われるであろう。回収には燃焼前に二酸化炭素を回収するプレ・コンバッション法と燃焼後に回収するポスト・コンバッション法がある。プレ・コンバッション法は資源国で採用され、ポスト・コンバッション法は消費国向きである。隔離法には地中隔離、海域地中隔離、石灰石中和海洋隔離法など提案されているが、筆者はその規模からいって石灰石中和海洋隔離法が本命ではないかと考えている。表-2 のようにポストコンバッション CCS を行う石炭火力の発電原価は 2014 年で 14.9 円/kWh となる。

天然ガスや石炭産地でメタノール、DME などの合成液体燃料を製造して自動車燃料として使うことにもなるであろう。プレコンバッション CCS を併用すれば、少なくとも液体燃料への変換過程で発生する二酸化炭素の大気放出は防止できる。プレコンバッション CCS を併用しながらアンモニアを合成し、これをハイブリッド車の燃料にすればゼロエミッション車として使える。これらのクリーン燃料を環境保全のために無税にすれば表-3 のように税負担の大きなガソリンより安価な燃料となる。電池自動車に関心が集まっているが、表-3 のように仮にリチウムイオン電池の価格が下がっても寿命が短いためにこれを含めると動力コストはガソリン・ハイブリッド車の 2.3 から 3.2 倍となる。

水素燃料が提唱されているが化石燃料から水素への変換時のエネルギー・シュリンクが約 30%、液化で 23%失い、残りは 46%しかない。従って液化水素燃料の普及はありえない。水素を燃料とする燃料電池も変換効率が 38%程度でコンバインドサイクルに敗退した。

石炭の究極可採埋蔵量は化石燃料中で最大であるため、石炭が他のエネルギーの不足を埋める立場にある。以上のような理由で全てのエネルギーの合計  $\sum f_i = 1$  となるように石炭のシェア・カーブを決めた。



## 3.2 核燃料

### (1) ウラン

気候変動防止に有効と喧伝されている原子力は核分裂して熱を出してくれるウラン 235 が天然ウラン中にたった 0.72%含まれるだけである。国際原子力機関 (IAEA; International Atomic Energy Agency) によれば可採年数は 85 年となる。世界のウラン原始資源量は在来型 (通常の鉱石) だけで可採年数 270 年分、燐鉱石に含まれているウランを加えると 675 年分あるという主張もあるが、原始資源量を持ち出すなら化石燃料の原始資源量も膨大である。いずれも採掘コストが膨大となり、世代交代の要素となりえないプロパガンダ的数値だろう。

### (2) 高速増殖炉

高速増殖炉でウラン 235 をプルトニウム 239 に変換すれば理論的には 60 倍になってエネルギーは心配いらぬということを主張する人々がいる。しかしウラン 235 やプルトニウム 239 を核兵器に転用させず、核ジャックさせず、平和的に、安全に世界にあまねく普及させて利用するなどということはドイツの脱原発の理論的指導者トラオベ博士[6]の指摘の通り、常識的な人間ならすぐ不可能と分かる。イランや北朝鮮の例をあげるまでもなく、抑止の軍事費が膨大になってしまい、高い視点からみれば核は採算に乗らないことが分かる。報道されることはないが日本海側の原発は核ジャックされないようには自衛艦で警護せざるをえなくなっている。ところが日本ではなぜか原発の増設と高速増殖炉開発がいまだ国策となっているのである。もはや米国の軍事費にただ乗りすることは期待できない。相応の責任が生じるであろう。軍事費を考えなくとも高速増殖炉の発電原価は表-2 のようにグリッド・パリティーの達成時期の 2014 年には 27.1 円/kWh となり、ソーラーセルの発電原価 15.3 から 25.4 円/kWh に負けるのである。したがって、世界的規模での普及は無いと判断した。

### (3) 核融合・トリウム炉

核融合は技術的にもコスト的にも幻想である。トリウム炉は核拡散がないメリットはあるが放射能汚染を生じる可能性は同じである。したがって、世界的規模での普及は無いと判断した。

### (4) 軽水炉

軽水炉はヨーロッパ、米国、日本で普及しているが、燃料再処理・バックエンドコストと廃炉コストがかさみ、2014 年には図-2 のように軍事費を別にしても 11.5 円/kWh となり、これより高価なのは石油火力 15.5 円/kWh だけという電源となっているだろう。原発が安いという公表情報には廃炉費が未算入であるとか、再処理・バックエンドコストに全ての費用を含めてないなどの情報操作がうかがえる。ちなみに浜岡原発 1,2 号炉の廃炉で判明した費用が想定値の 2 倍であった。加えて人口密集地を大規模放出現象で居住不能にして失う損失は確率は低いとはいえ、もし発生すれば 300 兆円にもなる甚大な被害となる。

IEA のワールド・エネルギー・アウトルックの 2000 年の原発の分率  $f$  は 0.067 である。現在運転中の軽水炉は 436 基、建設・計画中の原発は 150 基前後、経済協力開発機構 (OECD) 原子力機関は 2050 年にピークの 1,500 基と 3.4 倍になると予想している。世界のエネルギー総

消費量は 50 年間で 2.4 倍と成長するため、原発のピークシェア分率  $f$  は 2000 年の 1.4 倍となり 0.1 程度と見積もった。ただシェア・ピーク時は他のエネルギーの影響を受け 10 年早まって 2040 年頃とした。化石燃料とウランがピークを過ぎれば人類は再生可能エネルギーに依存することになる。

### 3.3 再生可能エネルギー

産業革命以前使われた薪は再生可能エネルギーの一つである。産業革命によってこの薪から化石燃料である石炭への世代交代が生じた。気候変動問題があろうとなかろうと有限な化石燃料やウランを使い尽くせば、人類は新しい技術に支えられた再生可能エネルギーへの依存に再度切り替えざるを得ないだろう。だが技術革新によりこれら新再生可能エネルギーは昔の薪に比べて利便性を約束している。

バイオ、水力、風力、ソーラーセル、集光型太陽熱発電 (CSP; Concentrated Solar Power) などの再生可能エネルギーは地球表面上に薄く分布している。しかしその量は膨大である。地球が太陽より受け取る輻射エネルギー(太陽定数)は  $1.37\text{kW}/\text{m}^2$  である。地球の断面積  $127,400,000\text{km}^2$  をかけると地球全体が受け取っているエネルギーは  $1.740 \times 10^{17}\text{W}$  となり、現在人類が消費しているエネルギーの 1 万倍もある。ほぼ無限のエネルギーとっていい。

日本の年間総発電量 10,362 億 kWh を発電するには  $6,685\text{km}^2$  (山手線の 106 倍) に変換率 14% のソーラーセルか集光型太陽熱発電を設置すればよいことになる。日本の国土は 38 万  $\text{km}^2$  であるからこれは国土の 1.8% に相当する。国土の 66% は山林・原野であるから 100% の国産エネルギー達成は容易である。もし転換効率 1% 以下の農業バイオしかないとすれば 25% の山林・原野を農地化しなければならないことになり、環境破壊は壊滅的になるだろう。変換率 14% のソーラーセルのおがげで人類の未来に希望が持てると言っても過言ではないだろう。農業と違って水も肥料もいらないので砂漠が資源となるのだ。

#### (1) バイオ

IEA のワールド・エネルギー・アウトックでは 2000 年のバイオの分率  $f=0.1$  である。これは主として農業によるバイオである。産業革命前まで人類がつかってきた薪は伝統的な使い方なので農業によるバイオとは区別した。

農業によるバイオはすでにその地球上におけるポテンシャルは利用しつくされているし、世界人口はまだ増加しつつあるので農業によるバイオはエネルギーよりもまず食料に使われるべきであろう。ということはピークを過ぎているわけである。ピークを過ぎれば他のエネルギーに余地を与えるために分率は緩やかに減少するとした。

太陽エネルギーの農作物によるエネルギー転換率は 1% 以下である。微細緑藻類ではエネルギー転換効率が 5-15% となり、ソーラーセルに匹敵する転換率のものがみついているようだが、まだコスト上の問題を抱えているので予想には加えなかった。

## (2) 水力

IEA のワールド・エネルギー・アウトルックの 2000 年の水力の分率  $f=0.023$  である。水力は降雨と地形の限界のため、ポテンシャルは利用しつくされているのでピークを過ぎたとし分率は他のエネルギーへ譲り、すこしづつ減少するとした。小規模開発は可能だろうが分率  $f$  に影響を与えるものではないだろう。2014 年には図-2 のように利用率 80%のダム式水力の発電原価は 10.2 円/kWh となって原発より安いものとなっているだろう。

## (3) 風力

2008 年の風力が世界の電力に占めるシェアは 1.14%である。従って一次エネルギーに関しては 0.44%となる。今後の個別の予測は困難のため、以後本予測では風力とソーラーセルをまとめて扱うことにした。2014 年には図-2 のように風力の発電原価は 9.6 円/kWh となって原発より安く、LNG コンバインドサイクルの 9.3 円/kWh とほぼ同じレベルとなっているだろう。

## (4) ソーラーセル

結晶型シリコン製のソーラーセルの転換率は 14%程度と効率が高いため、仮に日本の国土の 1.8%にソーラーセルを設置すれば日本の総電力の全てをまかなえる。

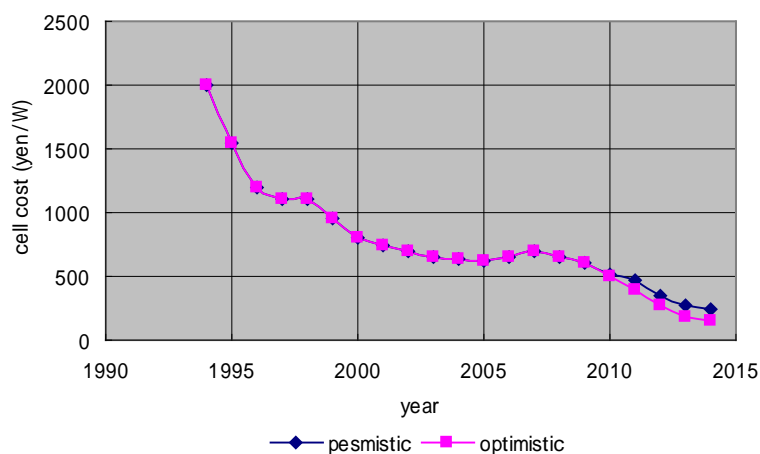


図-4 ソーラーセルのコスト・トレンド

ソーラーセルの価格は図-4 のように 2005 年頃までは多量生産によって着実に下がってきたが、2006 年から資源価格の高騰でシリコンコストが上昇するとこれが下げ止まった。この困難を解決するためにシリコンの使用量が 1/100 で済む薄膜型シリコンのセルが開発された。この薄膜型が多量生産に入れば 100 から 150 円/W の価格が数年以内実現できそうだという。ただまだ転換効率は 7%程度で家屋の屋根に設置するには能力不足である。目下、薄膜多接合にして効率を 12%程度に高める開発競争が行われている。

米国のファーストソーラー社は 2009 年にカドミウム-テルル金属化合物半導体を使った転換効率 16%のソーラーセルを 1 ドル/W で製造できると発表。昭和シェルは銅-インジウム-ガリウム-セレン (CIGS) 金属化合物半導体の薄膜を開発し、製造工場を 2011 年に完成させる予定で

ある。

以上を総合するとソーラーセル発電原価が 2014 年には表-2 のように 15.3 から 25.4 円/kWh となって高速増殖炉より安いものとなっているだろうと想定できる。

石炭やウランが残り少なくなり価格が高騰する事態になればソーラーセルによる発電が一般的になると考えられる。このように技術の進歩のおかげで再生可能エネルギーに再び依存するようになっても産業革命前に逆戻りせずに快適な生活が維持できる予感がする。

欧州太陽光発電産業協会の 2013 年のソーラーセルの世界の累積出力予想は 40,000MW である。年間発電量は 412 億 kWh/y となり、世界電力の 0.067%となる。一次エネルギー換算で 0.026%となる。

日本政府はソーラーセルの発電容量を 2020 年までに 2,800 万 kWh (年間発電量にして電力の 2.8%、一次エネルギーの 1.1%)、2030 年までに 5,300 万 kWh(年間発電量にして電力の 5.2%、一次エネルギーの 2%) にする目標をたてた。世界のソーラーセルの普及速度を日本と同じとすれば風力、ソーラーセル、集光型太陽熱発電 (Concentrating Solar Thermal Power, CSP) を全て含めて 2030 年で  $f=0.03$  としてもおかしくはない。これを 2000 年にバックキャストすれば  $f=0.007$  となる。

#### (5) 集光型太陽熱発電(CSP)

石油がバレル 40 ドルに高騰した 1970 年代に新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が集光器を使って高温を作り、水蒸気を発生させて発電する CSP という発電方式を研究したことがある。パワー・タワー型のプロトタイプを建設して実証したが石油が 10 ドルに暴落したためこのプランは忘れられた。

しかし 2008 年の原油価格の高騰をうけて CSP は米国、ヨーロッパで見直されてすでに、アリゾナ、スペインで実用化に入っている。米国では溶融炭酸塩の蓄熱器を装備し、16 時間発電も可能となっている。ドイツを代表する 20 の大企業がコンソーシアムを組み、サハラで CSP 事業への投資がきまった。電力は地中海を越えてドイツに送電するスキームである。米国の砂漠では発電原価は天然ガス発電程度であるが、日本では空気中の水分のため効率は低くなり、発電原価は表-2 のように 24.3 円/kWh 程度となる。

#### (6) その他

地熱発電は地球深部におけるウラニウムの放射性崩壊熱の間接利用で発電原価は 16 円/kWh 程度である。日本の地熱資源量は世界第 3 位で、原発 13 基分はすぐにでも開発できるというのに、原発で行こうという考えで固まってしまった政府が推進策をださないため、いまだに手つかずで眠っている。このエネルギーは再生可能ではなし、世界規模ではマイナーなため予測では無視した。海洋温度差発電、波力発電、潮汐発電、人口台風発電などは再生可能エネルギーであるが変換効率が低いため、予想には入れなかった。

### 3.4 集中発電対分散発電と代替自動車燃料

#### (1) 発電原価と送電コスト

電力料金の構造を解析するために独自の発電別原価計算を行った。資本費と運転維持費は均等化経費率と最新の建設単価から計算した。燃料費は2002年の実績値と2014年の予想価格に石炭・石油税を加えたものから計算した。2014年の予想値は石油が70\$/bbl、石炭が50\$/t、LNGが9.9\$/MMbtu、ウラン鉱石が18\$/lbUとした。

表-2の原発の原価は電気事業連合会の試算と大きく違っている。それは電事連の数値には最新の廃炉コストと最新の燃料の再処理・バックエンド・コストが反映されていないためである。利用率は比較のため一律80%としている。

表-2の電源別の発電原価と日本の電源構成から複合発電原価を計算すると11.27円/kWhとなる。単相電力料金23円/kWhからこの複合発電原価と原発促進のための電源開発促進税0.38円/kWhを差し引くと単相電力の送電コストは11.4円/kWhであることが分かる。ちなみに三相電力の送電コストは3.4円/kWhになる。

Source	Construction cost	Capital cost	Fuel cost in 2002	Fuel cost in 2014	Power cost in 2002	Power cost in 2014
unit	yen/W	yen/kWh	yen/kWh	yen/kWh	yen/kWh	yen/kWh
Coal	272	4.86	1.77	2.01	6.63	6.87
Pump storage	238	3.32	3.26	3.61	6.58	6.93
LNG combined cycle 1,500°C	197	3.37	3.34	5.96	6.73	9.33
Wind mill	200	9.57	0	0	9.57	9.57
LNG boiler turbine	164	2.81	4.07	7.26	6.88	10.07
Flowing hydraulic	737	10.2	0	0	10.2	10.2
Dam hydraulic	732	10.21	0	0	10.21	10.21
Existing nuclear in 2002	279	6.71	3.41	3.54	10.12	10.25
Reinforced nuclear in 2014	350	7.94	3.41	3.54	11.35	11.48
Coal fired with CCS	516	9.23	2.48	5.65	11.71	14.88
Thin film solarcell (optimistic)	150	15.25	0	0	-	<b>15.25</b>
Oil fired	269	4.72	5.38	10.74	10.1	15.46
CSP w/storage	316	24.31	0	0	24.31	24.31
Thin film solarcell (pessimistic)	250	25.44	0	0	-	<b>25.44</b>
Fast breeder reactor	1,266	23.86	3.14	2.27	27	27.13
Crystal type solarcell	600	61.05	0	0	61.05	61.05
Fuel cell@2008	4,810	191.8	-	31.34	-	223.14

表-2 電源別発電原価のトレンド

#### (2) 集中発電対分散発電

水力発電、火力発電、原発いずれも発電原価を下げるために発電装置を大型化して達成した。

いわば集中化によってコストダウンした安い電力をニコラ・テスラが提唱した交流で消費者に配電するというのが電力会社のビジネスモデルである。

ソーラーセルは大型化によってコストダウンは出来ず、多量生産でコストダウンするタイプの技術である。したがって電力会社がこれを採用してもコストダウンできるどころか設置する土地に金がかかるし、夜間電力確保のための系統連携費や蓄電費を余計にもたなければならない。そして蓄電装置がバッテリーの場合、これも大型化ではなく多量生産でコストダウンするタイプの技術であるため、電力会社にアドバンテージがなくなる。消費者が自前で持つ分散蓄電とコストは同じとなる。消費者は電力会社に依存せずに自前で行う分散発電、分散蓄電で送電コスト 11.3 円/kWh を節約できることになる。こうして化石燃料、ウラン枯渇後電力会社の役割は水力、風力に加え大型化によるコストダウンが可能な CSP 発電を手がけて電力網をする維持ということになるのだろう。

### (3) 代替自動車燃料

石油の生産がピークを過ぎると天然ガスや石炭からメタノールなどの代替燃料を資源国で合成することになる。このとき先に説明したように気候変動防止として燃焼前に二酸化炭素を回収するプレ・コンバッション CCS 採用される。そして隔離は石灰石中和海洋隔離法が採用されるであろう。

一般にまだ認知されてはいないがアンモニアを合成してハイブリッド車の燃料にすれば炭素フリーの自動車となる。炭素フリーだから炭素税はゼロとなる。表-3 のように電池電気自動車よりローコストとなる。電力料金は炭素税導入で上がる一方だからこの差は拡大傾向にある。石油販売会社はメタノールや DME に加えアンモニアも給油スタンドで売ることになる。

	Market Price	Heating value	Fuel cost per heating value	Power cycle Eff.	Cost per power
	-	kcal/g	yen/kWh	%	yen/kWh
Gasoline hybrid	164,000yen/ton (120yen/l)	10.6	9	34	26.5
CNG hybrid	40,000yen/ton CIF	13.3	2.59	34	7.6+7=14.6
LPG hybrid	100000yen/ton	12	7.16	34	21
DME diesel hybrid	240\$/ton CIF	8.8	2.35	34	6.9+7=13.9
Methanol hybrid	200\$/ton CIF	5.6	3.07	34	9+7=16
Ammonia hybrid	200\$/ton CIF	5.37	3.2	34	9.4+7=16.4
Electric vehicle	-	-	battery: 35 to 59 + grid power 23	battery 85, motor 98	35 to 59+23/0.83=62 to 86

表-3 代替自動車燃料の動力費比較

### 3.5 世代交代図

以上の考察を総合してナキシエノビッチ・ダイヤグラムを更新した。

1970年までの薪、石炭、天然ガス、原子力、水力、バイオなどの分率  $f$  はナキシェノビッチ・ダイアグラムの数値を使った。1980年から2000年までの実績値で修正し、2000年の石油の分率  $f = 0.35$ 、天然ガスは 0.21、原子力は 0.067、水力は 0.023、バイオは 0.1、風力/太陽光は 0.007、残りは石炭とした。

2,000年から2150年までは石油のシェア・ピークが2005年で  $f=0.3$ 、天然ガスのシェア・ピークは2040年で  $f=0.3$ 、原発のシェア・ピークは2040年で  $f=0.1$  とし、ソーラーセルの2000年の初期値を 0.07 と決めれば全てのエネルギーに関し勾配はほぼ同じであるからあとは簡単である。水力とバイオはピークに達した後、次章で説明する総エネルギー消費量が一定になるように試行錯誤で減少傾向に調整した。

石炭は再評価されて2ピークを描く。薪、バイオ、風力、ソーラーセル、CSPなどの合計の再生可能エネルギーは薪の放棄で急速に沈み込み、化石燃料がピークを過ぎるとバスタブ曲線を描いて緩やかに再上昇し、産業革命前の状態に復した。逆にこの曲線は産業革命後のエネルギーの使い方が地球の生理に合っていなかったことを象徴的に示している。

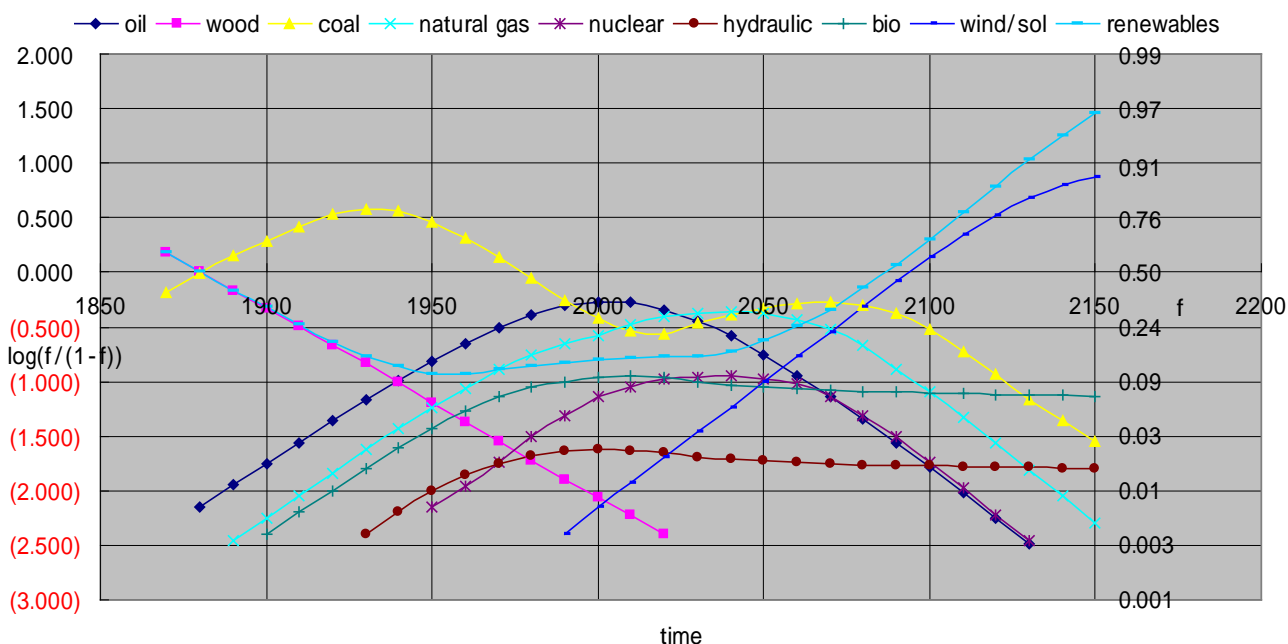


図-5 一次エネルギー世代交代図

#### 4. 世界のエネルギー総消費量予測

2000年までの世界の一次エネルギーの総消費量はIEA等の資料を参考に描き、それ以後は3つのシナリオで描いてみた。すなわち

- (1) 資源量に無関心でエネルギー消費抑制できない
- (2) 資源を大切に使うためにエネルギー消費抑制する

(3) 可採埋蔵量の2倍使えるとしてエネルギー消費抑制しない

である。世界のエネルギー総消費量に図-5の一次エネルギー世代交代図のフラクション  $f$  を乗ずるとエネルギー種それぞれの消費曲線が描ける。ここで可採埋蔵量とは表-1.1に表示した可採年数と2000年の消費量で作る矩形の面積に等しいものとする。また消費量は相対値とした。

4.1 資源量に無関心でエネルギー消費抑制できない

世界は可採埋蔵量に無関心でエネルギー消費抑制できないとし、2000年時点のペースで総エネルギー消費が増加するとすると、化石燃料とウランは2040年には早くもピークを過ぎる。もし再生可能エネルギーの普及速度が遅いと、有限資源の価格が急騰して消費が抑制され、エネルギー消費は急速に減少に向かい、経済はダメージをこうむることになる。世界はこの路線をひた走っているように見える。

全エネルギー消費量は2040年のピーク値を100とする相対値(index)で表示した。

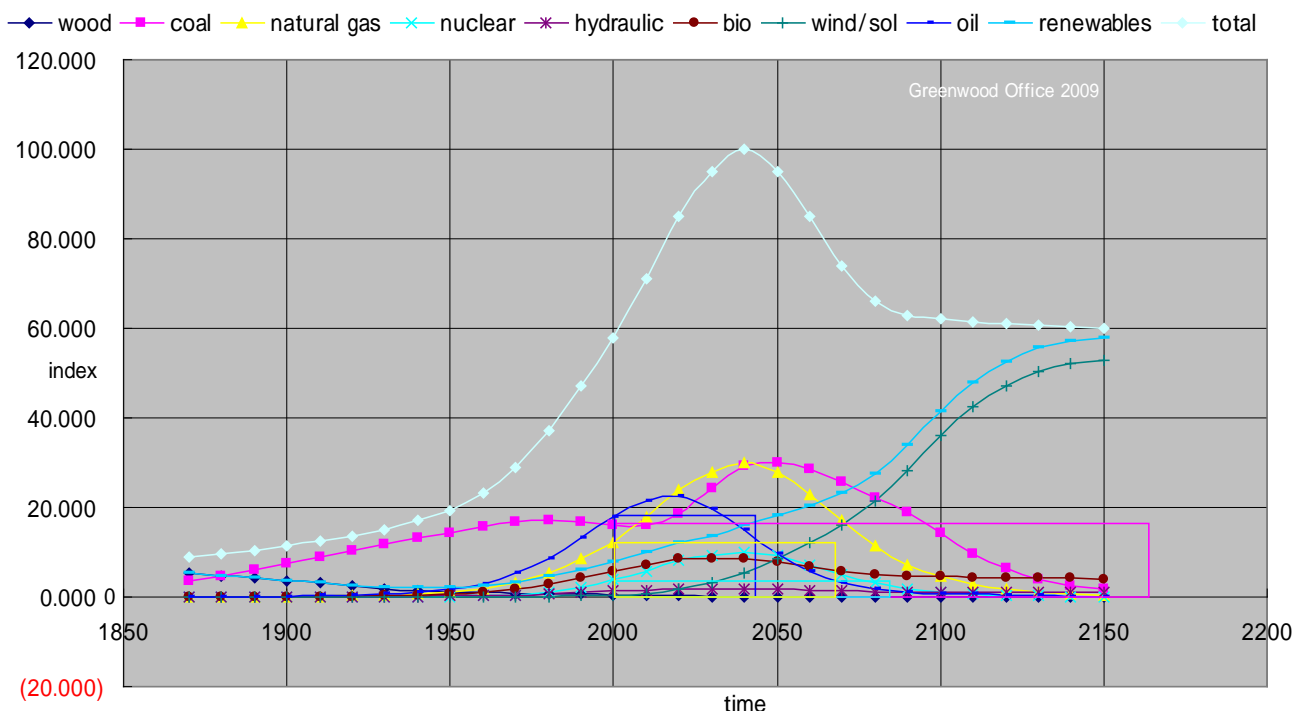


図-6 資源量に無関心でエネルギー消費抑制できない

消費抑制してもBP統計の石油の可採埋蔵量の1.5倍は必要となる。米国の地質調査所は究極可採埋蔵量は3兆バーレルあるとし、キャンベルの1.8兆バーレルの1.7倍あるのだからとかなるのだろう。天然ガスはBPの可採埋蔵量の2.5倍以上必要となる。しかしモールとエバンスは非在来型天然ガスも加えれば究極埋蔵量は3倍あるとしている。ウランもIAEAの可採埋蔵量の2倍は必要となる。石炭はBP可採埋蔵量とほぼトントンとなる。石炭はCSSしてでも資源を目一杯に使いきることになるのだろう。



天然ガスのピーク量対 2000 年比はモールとエバンスの 2.8 以内に収まり、核燃料の同比も 3.4 以内に収まっている。

#### 4.2 資源を大切に使うためにエネルギー消費抑制する

ローマクラブの成長の限界を書いたメドウズ教授が 2030 年頃が人類の最も苦しい時期であると言明したように、化石燃料の可採埋蔵量に限界があると認識し、エネルギー総消費量を 2010 年ころから減速させソフトランディングさせるとどうなるかシミュレートした。図-7 のようにいかに節約しても石油の BP の可採埋蔵量の 1.5 倍、天然ガスは BP の可採埋蔵量の 2 倍、

石炭は BP 可採埋蔵量より少し多い程度。ウランは IAEA の可採埋蔵量の 1.5 倍必要となる。米国の地質調査所は石油の究極可採埋蔵量は 3 兆バレルあるとし、キャンベルの 1.8 兆バレルの究極可採埋蔵量の 1.7 倍あるからなんとかなるのであろう。モールとエバンスは非在来型天然ガスも加えれば天然ガスの究極埋蔵量は 3 倍あるとしている。

天然ガスのピーク量対 2000 年比はモールとエバンスの 2.8 以内に収まり、核燃料の同比も 3.4 以内に収まっている。

エネルギー総消費量を減速したとはいえ、その後も増加傾向を維持するためには再生可能エネルギー普及速度を加速しなければならないことになる。2,100 年以降は 風力、ソーラーセルならびに集光型太陽熱発電を家屋、ビル、空き地、道路、鉄路、休耕地、農耕放棄地、原野、砂漠、海洋など設置可能な場所に設置することになるだろう。あるいは人も工場も都市をすてて、安価な土地のある地方へと分散展開することになるのだろうか？

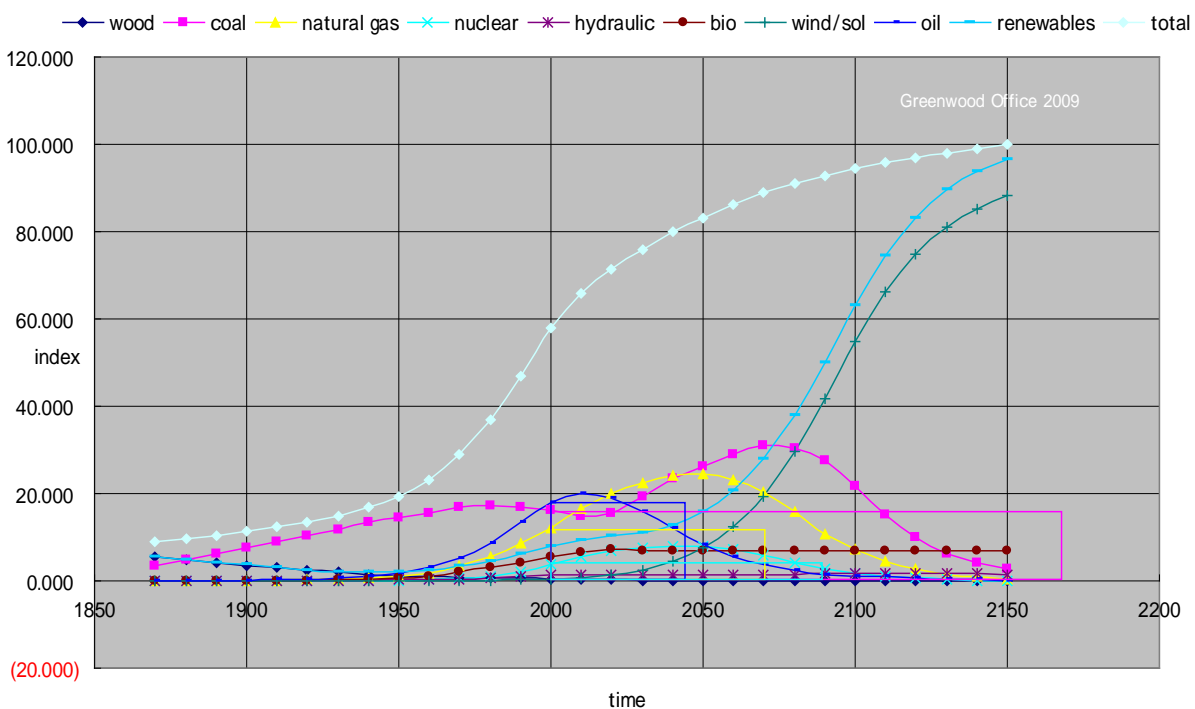


図-7 可採埋蔵量を大切に使うためにエネルギー消費抑制する

### 4.3 可採埋蔵量の2倍使えるとしてエネルギー消費抑制しない

石油でも天然ガスでも価格が上がれば回収率を上げ、三次元地震探鉱をして背斜構造以外の向斜構造にもミクロな油脈をみつけて可採埋蔵量は増える。BP の可採埋蔵量以上使えるとすると図-8 のように 2050 年ころまで現在の成長速度を継続できることがわかる。

たしかに石油は BP の可採埋蔵量の 2 倍、天然ガスは BP の可採埋蔵量の 3 倍、石炭は BP の可採埋蔵量の 1.5 倍、ウランは IAEA 埋蔵量の 2 倍程度必要となる。ちょうどモールとエバンスは非在来型天然ガスも加えれば究極埋蔵量は 3 倍あるとしている。これからは天然ガスに依存する時代が来るのだろうか？

ここでも天然ガスのピーク量対 2000 年比はモールとエバンスの 2.8 以内に収まり、核燃料の同比も 3.4 以内に収まっている。

長い目でみればしかし 2,100 年以降はほとんど 風力、ソーラーセルならびに集光型太陽熱発電などの再生可能エネルギーに切り替えなければ人類の未来はないように見える。そしてその普及速度は歴史上例のない速度が必要となる。世界は送電網で結ばれ、昼の国から夜の国に送電することになるのかもしれない。

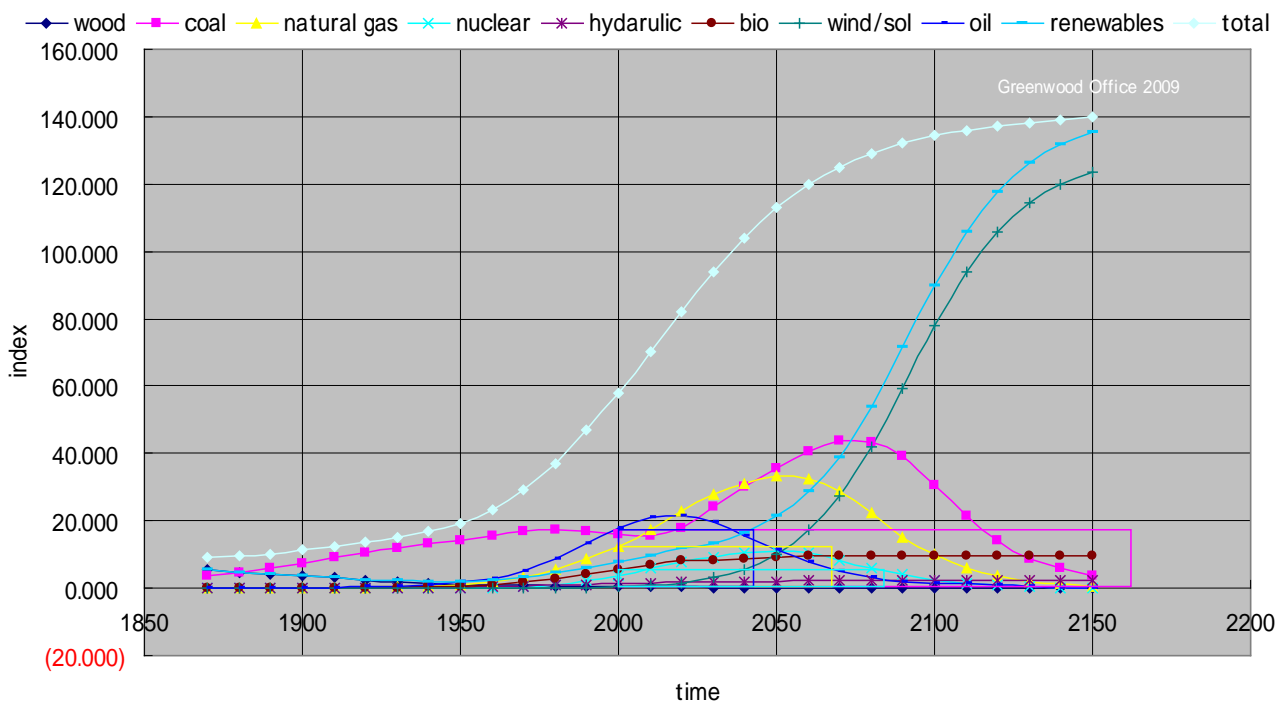


図-8 可採埋蔵量の2倍使えるとしてエネルギー消費抑制ない場合

### 5. 究極のエネルギーの利用形態

人類のこれからの生き方として4つの選択肢がある。

- (1) 世界中の人々が化石燃料を使うのをやめて昔の自給自足の生活にもどる。
- (2) 化石燃料をあるだけ使い切るのは人類のサガだ、現在のライフスタイルを維持するために、気候変動はやむをえないと甘受し、化石燃料がなくなったら経済のクラッシュは受け入れる
- (3) 化石燃料をあるだけ使い切るのは人類のサガだ、でも化石燃料の枯渇も困る。高速増殖炉を開発し、核拡散のリスクを犯しても世界に普及させ、気候変動を防止しつつ快適なライフスタイルをまもりたい。万が一の放射能の大規模放出現象が発生したらやむをえない。たとえそれが首都圏でも汚染地帯を放棄して移住する
- (4)化石燃料をあるだけ使い切るのは人類のサガだ、しかし万が一の放射能の大規模放出現象はさけない、二酸化炭素は地中ないし海洋に隔離し、全ての建物と周辺の空き地、山地、砂漠にソーラーセル、集光型太陽熱発電、風車を設置して、安全な核融合エネルギーである太陽光を捕獲して分散発電を行い、エネルギーを自給しつつ、気候変動を防止し、現在のライフスタイルを維持する。

である。

私は図-9のようにルート（4）を採用せざるをえないのではないかと思うものである。

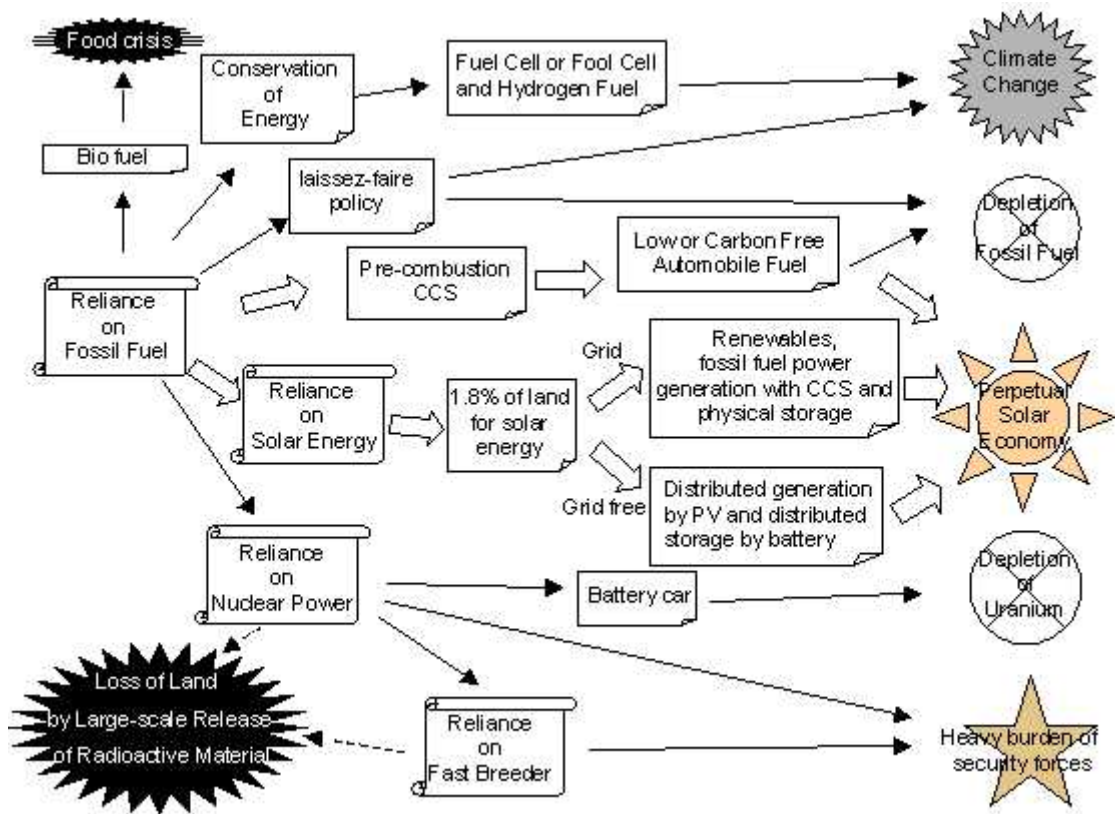


図-9 究極のエネルギーの利用形態

## 6. 結 言

二酸化炭素による気候変動防止が緊急の課題としてクローズアップされているが、この陰に隠されている真の問題は実は化石燃料やウランなど有限の資源問題であり、両者は表と裏の関係にあることをご理解いただければ幸いである。

いずれにせよ既存のエネルギー産業構造を温存することは我々人類の未来にとって益はなく、むしろエネルギーの世代交代が柔軟に出来る社会を築くことが我々が子孫に負っている義務であると思う者である。

さてここで踏みとどまってよく考えてみれば再生可能エネルギーとは太陽の核融合エネルギーそのものであり、進化論的な時間軸より十分長い時間かけて反応を持続させることができるというだけでこれも有限であることには変わりない。それよりこのエネルギーの受光面積が地球表面積という有限なものであることのほうがより深刻である。いわば有限な炭化水素化合物である化石燃料やウランという金属を地球表面積という別な有限なものに置き換えるだけともいえる。所詮人類は無制限に増え、無制限にエネルギーを使うことは許されていないのである。

本稿をとりまとめるにあたり、中村宗和鳥取大学名誉教授と森永晴彦氏元ミュンヘン工科大学正教授、元通産省で IEA、NEDO に関係された横堀恵一氏、元通産省電総研所長富山朔太郎氏、ECO 会のリーダーの原子力に造詣の深い石井陽一郎氏、ドイツの事情を教えてくださいケルン在住の望月浩二氏、かつての職場の上司小松昭英氏、風力にくわしい藤代繁氏と土屋敬一氏、LNG ビジネスに明るい原卓氏、ソーラーセル製造ラインメーカーULVAC の林主税氏、諏訪秀則氏、砂賀芳雄氏ら、そしてプロセスシミュレータ開発会社インベンシス・プロセスの稲生誠氏と広浜誠也氏に教を賜ったことに感謝する。

詳細な裏付け資料は著者のサイト「Seven Mile Beach File」<http://www.asahi-net.or.jp/~pu4i-aok/>の論文集に掲載の「グローバル・ヒーティングの黙示録」にある。

## 参考文献

- [1] Donella Meadows, Dennis Meadow, Jorgen Randers, William W. Behrens . "The Limits to Growth", A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, (1972)
- [2] 青木一三、炭酸ガス排出量削減策のパラドックス 化学工学誌 1992 年 5 月号論壇
- [3] Nebojsa Nakicenovic, "Energy Strategies for Mitigating Global Change" IIASA Jan. (1992)
- [4] Colin Cambell, Jean Laherrère, "End of Cheap Oil", Scientific American March 1<sup>st</sup>., (1998)
- [5] Mohr, SH and Evans, GM, "Model Proposed for World Conventional, Unconventional Gas", Oil and Gas Journal, vol. 105, no. 47, 17 December (2007), p. 46
- [6] Klaus Traub, Atomenergie – unverantwortliche Bedrohung, marginale Potenziale, クラウス・トラオベ “原子力 - 無責任な威嚇、取るに足らない可能性”