

石油資源、石炭資源の将来

- The Future of Oil and Coal Resources -

五十嵐 敏郎（博士（工学）金沢大学非常勤講師）

【abstract】

Energy is a very important resource in determining the form of civilization. This article describes the current status and future prospects of oil and coal resources that support the 19th century coal civilization and the 20th century oil civilization and are expected to have a major impact in the first half of the 21st century.

1. はじめに：様々な資源

人類の生存、文明の維持・発展や豊かな社会の形成に様々な「資源」が利用され、活用されている。各種の「資源」の重要性を認識し、独創的な新しい視点でそれら「資源」を活用することが重要である。

「資源」は大きく「有形資源」と「無形資源」に分けられる。「有形資源」は数量で計ることが可能な資源であり、「エネルギー資源」、「鉱物資源」、「食糧資源」、「水資源」、「海洋資源」などが含まれる。「無形資源」は数量で計り難い資源であり、「知的資源」、「芸術・文化資源」、「映像文化資源」、「電波資源」などが含まれる。有形資源は人類の生存や文明の維持・発展に不可欠な資源であり、無形資源は豊かな社会形成に必要な資源と言える。

それぞれの資源は固有の問題を抱えており、将来予測も様々である。有形資源の分類と内容・問題点について表 1 に、無形資源の分類と内容・問題点に

ついて表 2 にまとめる。

ここでは文明の興亡に深く関わってきたエネルギー資源に限定して述べる。

表 1：有形資源の分類と内容・問題点（筆者作成）

分類	内容・問題点
エネルギー資源	在来型化石エネルギー資源（石油、石炭、天然ガス、ウラン）、非在来型化石エネルギー資源（オイルサンド、シェールガス、シェールオイル、メタンハイドレードなど）、再生可能なエネルギー資源（太陽光、太陽熱、風力、地熱、水力、バイオマス、潮力など）に分けられる。人類が使用しているエネルギー資源の大半は在来型化石エネルギー資源で、非在来型化石エネルギー資源は最近になって開発が始まり、将来のエネルギー資源として期待されている。しかし、エネルギーの質の点で在来型化石エネルギー資源に比べて劣っていることに加え、水質汚染など環境面でのマイナス要因もある。再生可能エネルギー資源は潜在量が大きく将来の活用が期待されている。しかし、地域分散型で時間変動幅が大きく、在来型エネルギー資源に取って代わるだけのエネルギー源になるのか疑問とする考えもある。
鉱物資源	コモディティ金属、非コモディティ金属、希少金属、非金属に分類される。コモディティ金属の中で、銅、亜鉛などは可採年数が短く、将来の不足が懸念される。非コモディティ金属や希少金属は、ハイテク技術の進展により、使用量の変動が大きいことや資源の地域的な偏在が問題である。非金属の中では、食糧の生産に欠かせない肥料三要素の一つであるリン資源が差し

	<p>迫った問題であり、地域的な偏在や将来の絶対量不足が懸念される。</p>
食糧資源	<p>遺伝子資源、森林資源も含め生物資源とも言われる。人口の急増や生活レベルの向上に伴う畜産資源の消費量増加に加え、エネルギー資源や水資源の減少や土壌の劣化問題が加わり、将来の絶対量不足が懸念される。</p>
水資源	<p>地球は水の惑星と言われるぐらい水が豊富で 14 億 m³ あるが、97.5%は海水で淡水は残り 2.5%である。その内 1/3 は利用が困難な南極圏・北極圏の水であり、残りの大半も地下水で、利用が容易な表取水は全体の 0.01%にしかすぎない。農業用や工業用に利用する表取水の不足は地下水で補ってきた。しかし、地下水の多くは何万年にも渡って蓄えた化石水であり、過剰な取水による枯渇や塩分濃度の上昇問題が各地で起こっている。米国の穀倉地帯を潤すオガララ帯水層も近年地下水位の低下が激しく、枯渇問題が懸念される。</p>
海洋資源	<p>通常は水産資源として食糧資源に含まれる。日本の唯一と言って良い地理上の優位点が海岸線の長さや排他的水域の広さが世界第 6 位にあることから、周囲を海に囲まれた利点を生かしてもっと多面的な利用が必要である。</p>

表 2：無形資源の分類と内容・問題点（筆者作成）

分類	内容・問題点
知的資源	人的資源とも呼ばれる。人間の頭数より個々の人の質の高さが問われる日本では、知的資源（知力資源）のほうが相応しい。高等教育，研究開発，知的財産，独創性，発想能力などが含まれ，ICT も含まれる。
芸術・文化資源	伝統工芸，文化，芸術，デザイン，ファッション，おもてなし，里山・山並み・街並みなどの美しい風景などが含まれる。観光資源は，これら芸術・文化資源の活用の一形態である。
映像文化資源	芸術・文化資源の一種である。日本ではアニメなど新しいコンテンツの開発による起業の可能性が大きく重要である。
電波資源	情報の大容量化，高速化のためには，新しい波長の電送装置の開発が不可欠であり，今後の情報化時代の鍵となる。

2. エネルギー資源の成り立ちと特徴

エネルギー資源は大きく三つに分類される。エネルギー資源の95%を占める在来型化石エネルギー資源，今後の開発が待たれる非在来型化石エネルギー資源，枯渇が予想される化石エネルギー資源に取って代わって将来主役になることが期待される再生可能なエネルギー資源である。

ここでは，それぞれのエネルギー資源の成り立ちや特徴をまとめる。原子力発電に用いられるウランは化石エネルギー資源ではない。しかし，枯渇性資源の一種であるので便宜上在来型化石エネルギー資源として分類した。

1) 在来型化石エネルギー資源

現時点で主に利用されているエネルギー資源で，石炭，石油，天然ガス，ウ

ランが含まれる。地球表層環境変化の過程で、特殊な条件が重なって形成された資源であり、エネルギー源として利用されるまでに相当長期間を要し、数百万年～数億年後に同様な資源が得られる可能性は小さい。地球の長い歴史が生み出した貴重な宝物であり、わずかに数百年間で枯渇させることなど決して許されない。

石炭紀に北米大陸とヨーロッパで石炭層が形成されたのは、①樹皮を持った木本の出現、②リグニン（木質素）の進化、③海水面が低下した際に北米大陸とヨーロッパでは沼地・湿地など大森林が繁栄する場があった、④リグニンを分解するような生物がまだ進化していなかった、⑤現在よりもリグニン含有量の多い木本が多かったなどいろいろな説がある。いずれにせよ、いくつかの特殊な条件が重なった結果として石炭層が形成された。

一方、中国、インド、オーストラリアなどの地域で石炭が生成したのは、石炭紀よりも新しいペルム紀を中心に、三畳紀、ジュラ紀、白亜紀にかけてであり、その時期に優勢であった裸子植物に起源を持つ。

ジュラ紀から白亜紀、チューロニアン期にかけて石油埋蔵量の50%以上が形成された。その内75%以上がペルシャ湾、残りの大部分がメキシコ湾と南米沖である。1億年以上もの間に貝類やプランクトンなどの有機物が遠浅のテチス海の下に降り積もり、石油の根源岩であり有機炭素を数%以上、最大で35%も含む黒色頁岩が生成した。間隙率の高い貯留岩である石灰岩も貝類の蓄積と共に同時に堆積した。さらに遠浅の海岸に繰り返し打ち寄せる波と太陽の蒸発作用で有機層の上に岩塩層が形成された。これが何度も繰り返されて、根源岩、貯留岩、岩塩層が分厚く重なり、全体がゆっくり沈下し、深度2500m以上になると圧力と熱によって石油が生成した。約1500万年前に、アラビア半島とアジア大陸の衝突による地殻変動で、石油を含む堆積層が陸上に隆起し、岩塩ドームや背斜構造が形成され、ガワールなどの巨大油田が発見される

に至った。我々に巨大な便益をもたらす巨大油田は、油を豊富に含んだ厚い根源岩層の上に、間隙率の高い（穴だらけの）貯留岩層と石油が貫通しない岩塩層が絶妙に乗っていて、圧力と温度がちょうど良く保たれていなければならない。長い侵食作用で、蓋をしていた上部の岩石が崩壊して油田が地上に現れると、分子量が小さく蒸発しやすいガスや石油の軽質成分は気化してしまい、ヘドロのようなベトベトのタールが残された。カナダ・アルバータ州のタールサンドがその例である。

天然ガスの形成も白亜紀がピークである。石油を含む堆積層が地中深く沈み6000m以上になると圧力と温度が高くなり、石油はメタンや天然ガスといった石油より小さな分子に分解された。

ウランは約57億年前に起こった超新星爆発に起源を持つ。ウランの中で0.72%含まれるウラン235が原子力発電の燃料になる。火成活動による貫入岩体そのもの及び火成活動に伴った交代作用や熱水作用などで鉱床が形成された。花崗岩類には3~4ppmのウランが含まれる。マグマが固化する最後の時期にウランを濃縮して鉱脈となったのが一次化成鉱床、地表水や地下水あるいは熱水に溶脱されたウランが再度沈殿・濃縮して鉱脈になったのが後生鉱床で、現在開発中の鉱床は後者が大部分である。

特に石油は、生成される過程、古代から現在に至るまでの過程、人類が発見可能な場所までの移動の過程を考えると、いくつかの奇跡が重なって人類にとって重要な資源となった。この石油資源を今後も制限なしに豊富に使用できるのか、疑問符が投げかけられている。石油は、大量の物資を安く輸送する必要があるグローバルゼーションに必須なエネルギー資源であり、潤沢な供給が不可能になったり価格が大幅に向上した時点で、グローバルゼーションに代わる新しい社会・産業構造への変革にせまられる。

2) 非在来型化石エネルギー資源

非在来型化石エネルギー資源は非在来型原油資源と非在来型天然ガス資源に分けられる。

非在来型原油資源には、重質油、超重質油および天然ピチューメン（タールサンドあるいはオイルサンド）、オイルシェールなどが含まれる。油田になるためには、油を豊富に含んだ厚い根源岩層を必須とし、間隙率の高い貯留岩層と石油が貫通しない岩塩層が絶妙に乗っていて、圧力と温度がちょうど良く保たれていなければならない。それらの条件の一つないし二つを欠いて軽質油成分が蒸発した油田である。

天然ピチューメンは粘性の高い超重質油で、北米、中・南米、旧ソ連邦に多量に埋蔵されており、カナダとベネズエラで採掘が行われている。カナダの鉱床は流動性がないため、露天掘り法と油層内回収法で採掘される。ベネズエラの鉱床（オリノコ原油）は地中 500～1200m にあり、温度が 40～70℃と高く流動性があるため、通常の油田の掘削法で採掘される。

オイルシェール（油母頁岩）は、ケロジェンを多量に含む堆積岩で、圧力と温度を長い時間かければ石油になるとされる。北米、ブラジル、中国などに多量に埋蔵されている。熱乾留すると合成石油が得られる。

非在来型天然ガス資源には、タイトサイドガス、シェールガス、コールベッドメタン、メタンハイドレートなどが含まれる。

タイトサイドガスは浸透性が悪い砂岩貯留層に存在するガスであり、米国などで多量に埋蔵されており、水圧破碎によるフラクチャリングによって浸透性を高めてガスを回収する。

シェールガスは油母頁岩中の油が熱分解されてガスとして存在する。浸透性が低いので、フラクチャリングによって浸透性を高めてガスを回収する。天然ガス用のパイプライン網が発達した米国で近年注目を浴び、活発な開発が行わ

れている。

コールベッドメタンは石炭層から産出するガスで、炭鉱爆発を起こし、石炭開発の障害になっていた。垂直ボーリングと水平ボーリングを組み合わせると石炭層からのガス回収が行われている。北米、中国、オーストラリアなどで多量に埋蔵されている。日本でも石炭から石油へのエネルギーシフトや深い炭層での爆発事故で、石炭層の開発が止まっている。しかし、日本にある貴重な自前のエネルギー資源であり、ガスとして回収するための技術開発も必要である。

メタンハイドレートは水分子で形成された三次元網状構造の内部にメタン分子が入り込み氷状になった結晶で、メタンの起源は生物発酵やケロジェンの熱分解が考えられる。低温、高圧下ではじめて安定に存在しており、ガスとして回収する方法は未確立である。凍土地帯や大陸縁辺部の深い海底の地中に存在し、日本でも南海トラフ、北海道周辺、新潟県沖、南西諸島沖などで存在が確認されている。

3) 再生可能なエネルギー資源

在来型化石エネルギー資源やウラン資源、非在来型化石エネルギー資源は、再生には極めて長期間を要し、その時期は様々であるが、いずれは利用できなくなる枯渇性資源である。それに対して、常時太陽や地球内部から供給されるエネルギーの一部を利用するのが再生可能なエネルギー資源であり、将来利用できなくなる恐れはない。

再生可能なエネルギー資源には、バイオマスエネルギー、太陽エネルギー、風力エネルギー、地熱エネルギー、潮力エネルギー、水力エネルギーなどが含まれる。

バイオマスエネルギーは、太陽エネルギーが生物によって形を変え、エネルギー密度が高くなったものであり、太陽エネルギーの0.27%が生物によって

固定される。森林面積は陸地面積の 27%であり、貯められるエネルギー量は 2.15×10^{11} toe(石油換算で 1 トンのエネルギー量 : ton of oil equivalent) に相当し、世界全体の一次エネルギー消費量の 10 倍である。利用方法としては、バイオマス発電(有機系廃棄物も含む)と液体燃料(バイオエタノールとバイオディーゼル)がある。バイオマス発電は 1970 年代から活発になり、2005 年には世界全体で 1.55×10^7 toe である。バイオエタノールは米国(トウモロコシ)とブラジル(サトウキビ)を主体に、米国では 2006 年で 2.3×10^3 toe がガソリンに 10%混合され(E10)自動車用に消費されている。また、バイオディーゼルは植物油や動物油の脂肪を化学処理して生産され、軽油に混合して自動車用燃料として使用される。2006 年ドイツ、イタリア、フランスを中心に 7.5×10^6 トン消費された。

太陽エネルギーは、巨大な核融合炉である太陽から地球表面に届く膨大なエネルギーの一部を利用しようとするものである。地球表面に届くエネルギー量は世界全体のエネルギー消費量の 7,500 倍で、当分の間枯渇の心配がない点で魅力的なエネルギー資源である。しかし、希薄な状態で存在し、時間変動も大きいので、効率的な濃縮法と貯蔵法の技術ブレークスルーが待たれる。利用方法としては、シリコン系、化合物系や有機物系の半導体を用いて電力に変換する方法と、熱エネルギーとして発電、給湯、暖房などに用いる方法がある。世界の累積太陽光発電設備容量は 21 世紀になって急増し、2007 年で 8.1×10^9 W になり、5 年前に比べて 6 倍弱と急増しているが、それでも総発電設備容量と比べると微々たる数値である。

風車が動力源として利用されるなど古い歴史があるが産業革命以降は蒸気機関に押されて衰退した風力エネルギーは、最近になって風力発電として脚光を浴びてきた。世界の 2007 年までの累積発電設備容量は 9.4×10^{10} W で、5 年前の 3 倍に急増している。建設費用が安いことと建設のリードタイムが

短いことが長所である。一方、時間的な変動が大きく何らかの平準化が必要ながことが短所である。大規模な発電設備から遠く送電網が整備されていない地域でのローカルな発電設備としては魅力的である。最近は、常に一定方向の風速が期待される洋上で、大型の風力発電設備を設けることが行われ、デンマークでは消費電力の20%をまかなっている。

地熱エネルギーは地球内部に発生する熱エネルギーで、潜在量は巨大である。現状では、利用可能な場所が限られることから、限られた使用に留まっている。地熱エネルギーの利用方法としては、地熱発電と地熱の直接利用がある。地熱発電は、深度2000mまでで温度200°C以上の熱水や蒸気を利用する浅部熱水発電、深度2000m以上の熱水や蒸気を利用する深部熱水発電、大量の低温熱水（150~200°C）を用い低沸点媒体と熱交換して発電するバイナリー発電、地熱地帯に多数存在する高温乾燥岩体に人工的に割れ目を作り、水を通して蒸気を発生させて発電する高温岩体発電がある。現在は浅部熱水発電がほとんどで、世界の2007年の発電容量は 1.0×10^{10} Wで、過去5年間の伸びは1.2倍である。地熱の直接利用は温泉卵などでお馴染みである。今後は地熱ヒートパイプや暖房用として60~90°Cの熱水利用が進む可能性がある。

潮力エネルギーは、月や太陽の万有引力によって引き起こされるエネルギーで、 1.75×10^{21} toeのエネルギー量を持ち、約10%が発電可能とされている。干満の高低差を利用する潮力発電と干満の差により起こる潮流を利用する潮力発電がある。

海洋にはエネルギー密度は低いが海水温度差に伴う膨大な量のエネルギーが存在する。数°Cの低温の深海水と20°Cを超える表面海水の温度差を利用して発電するのが海洋温度差発電であり、発電方法には開放系と閉鎖系が考えられている。

水力エネルギーは古くから利用されている再生可能なエネルギー資源で、太

陽エネルギーが水によって形を変え、エネルギー密度が高くなったものである。2005年の世界の水力発電量は 2.44×10^8 toe で、総エネルギー消費量の 2.4%であり、総発電量の 16%で原子力発電の 14%よりも大きい。巨大ダムに水を蓄え大きな高低差を利用して大水力発電を行う適地は、日本をはじめとする先進諸国では少なくなっているが、揚水発電による電力エネルギーの貯蔵システムとしての利用や、ミニダムあるいは比較的小さな流れを利用した小水力発電は、エネルギーの地産地消の点でもっと開発することが必要である。時間変動が少ない小水力発電は時間変動の大きい太陽光発電や風力発電を平準化する役割も期待される。

3. エネルギーと文明史

どのようなエネルギーを使用するかで文明の形が決まる。人類は有史以来、人力・畜力・風力・水力を動力源に用い、木材・畜糞を熱エネルギーに使用してきた。

ここでは、西洋文明を四つの期に分け、それぞれどのようなエネルギーと動力を利用してきたかを手短かに述べる。

1) 古代西洋文明

メソポタミア文明、エジプト文明、地中海文明とも呼ばれ、エネルギー的には森林文明である。インダス文明、黄河文明と同時期の約 5000 年前に興り、他の文明とともに約 3500 年前にほろんだ。地球の乾燥化が進みはじめたために、まだ湿潤な気候が残っていた大河の流域に文明が集中し、乾燥化が進んだ周辺地域から流入する人々を奴隷として利用した。

レバノン杉で象徴される豊かな森林資源がエネルギー源であり、大量の奴隷

人力が主な動力源であった。

乾燥化がさらに進んだことに過剰伐採による森林資源の枯渇が加わり、古代西洋文明が活力を失っていくとともに、手つかずの豊かな森林資源が残されていたヨーロッパに文明の中心が移っていった。

2) 中世西洋文明（森林文明）

風力（風車）、水力（水車）、畜力が主な動力源であり、黒い森で象徴される豊かな森林資源がエネルギー源であった。

過剰伐採による森林資源の枯渇で、18世紀末には西洋文明は衰退するはずであったが、地下に大量に眠っていた化石燃料資源（石炭）を利用することで、近代西洋文明につながった。

3) 近代西洋文明（石炭文明）

石炭紀（360～300百万年前）に北米大陸とヨーロッパで大規模に形成された石炭という、エネルギー密度が森林資源よりはるかに高い化石燃料資源をエネルギー源として利用し、産業革命が起こった。

1710年にニューコメンが発明し、1764年にジェームス・ワットが改良した、水平の往復運動を回転運動に変換する蒸気機関（外燃機関）を動力源として利用することで、畜力（1馬力）の何倍、何十倍もパワーのある動力を得ることができた。

1800年までの蒸気機関車の発明や1807年の蒸気船の発明で輸送革命が起こり、グローバル化が勃発した。

4) 現代西洋文明（石油文明）

1859年にはペンシルバニア州で機械掘りによる石油生産が細々と始まっ

ていたが、1901年1月に至ってテキサス州で石油の大自噴が起こり、石炭よりエネルギー密度が高く、液状で利便性に優れた石油のエネルギー源としての利用が本格的に始まり、石油文明に突入して、現在に至っている。

1876年にN・オットーがガソリン内燃機関を発明し、外燃機関よりも効率が高い動力源としての利用が始まった。

1903年にライト兄弟がガソリンエンジンによる飛行機を開発し、1908年10月1日にはガソリンエンジン駆動のT型フォードの発売が開始され、現在まで続く自動車文明が始まった。1912年の船舶の内燃機関利用などで、大量輸送・運輸が可能になり、グローバリゼーションが加速した。

5) 21世紀の西洋文明（?文明）

現在は石油文明のただ中にあるが、そろそろ石油文明の終わりも見え始めており、エネルギーの視点で次にどのような文明が興るか、予測のつかない混沌とした時代に入った。

4. 石油文明の現状と今後の予測

1) ピークオイルについて

ピークオイルを初めて提唱したのはシェル社に勤めていたキング・ハバートで、1956年にアラスカを除く米国の石油生産量の推移をロジスティック曲線で近似し、1970年前後にピークに達すると推定した。発表当初、ほとんどの専門家は否定的だったが、図1に示すように、実際に米国の在来型の石油生産は1971年にピークに達し、それ以降減り続けている。アラスカの石油生産量を加えても、1971年のピークを上回ることはない。

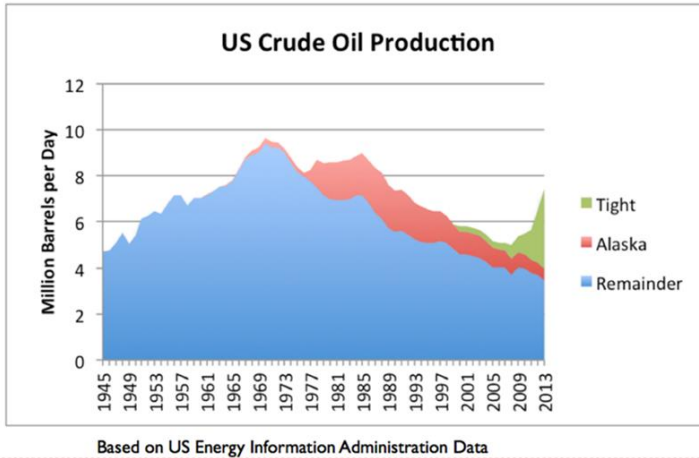


図 1：米国の石油生産量の推移

出典: www.eia.gov/dnav/pet_crd_crdpdn_adc_mbbldp_a.htm

なお、最近では Tight Oil として示されるシェールオイルの生産が急増し、ピークオイルなど起こらないといった報道や、アメリカがサウジアラビアを抜いて世界最大の石油生産国になるといった報道が目につく。シェールオイルは後に述べる EPR (Energy Profit Ratio) が在来型油田に比べ 1 桁低い石油であり、文明を維持するのに必要な EPR=10 には届かない石油で、現在のシェールオイルブームも終息すると予想される。

シェールオイルの代表的な産地の一つである Bakken 油田での一つの油井当たりの、ピーク到達後の生産量の推移を図 2 に示す。在来型の巨大油田の生産量推移をみると、生産ピーク後の減少率は 5~6 %程度である。それでも私たちの予想を超える大きな減少率であるが、シェールオイルではピークの 2 年後には 75~80 %減少し、5 年後にはピークの 10 %程度しか産出しなくなる。これも、スウィートスポットでの油井の例であり、条件の悪い油井で

は、さらに生産量の減少率が大きくなる。ちょうど、在来型の中小油田の生産減少率が巨大油田の生産減少率に比べて大きいように。

それに加えて、シェールオイルはオイルの流動性を増すために様々な化学薬品を加えた水を注入している。現在は、排出した水を深い地層に戻しているが、地下水脈への水質汚染とともに、図3に示さるよう地震を誘発するのではという恐れが言われ、現にこれまで地震がほとんど起こらなかった安定な地層で地震が起り始めている。

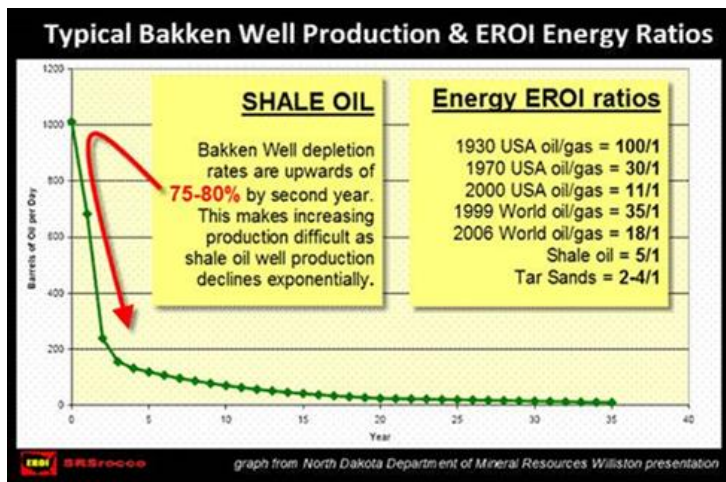


図2： Bakken 油田での一つの油井当たりの、ピーク到達後の生産量の推移

出典：North Dakota Department of Mineral Resources

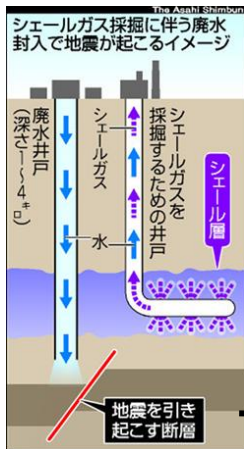


図 3：シェールガス・オイルの採掘に伴う排水の地層封入で地震が起こるイメージ

出典:朝日新聞（2012年4月26日）
 に加筆

米中部：M3以上の地震が10年前に比べて6倍に急増（米地質研究所）

ピークオイルは石油採掘の推移をグラフで表した時の石油生産量の頂点を指す産業用語である。石油生産量は Bell Curve を描くといわれており、生産量が上昇している場合に比べ下降している場合には生産コストが高くなる。単純には、安価な石油が得られなくなる年である。コリン・キャンベルはハーバートの理論を世界の石油生産に拡大して、2004年にピークに達すると予想した。

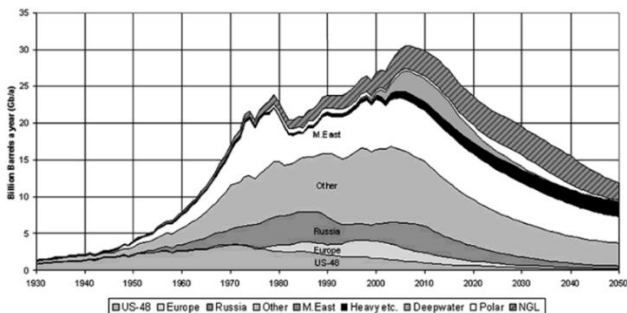


図 4：コリン・キャンベルのピークオイルモデル

出典: K.Deffeyes, Hubberts Peak-The Impending World Oil

Shortage, Univ.Press,NJ (2001)

実際、2010年10月に公表されたWEO (World Energy Outlook) 2010で、IEA (International Energy Agency) は、すでに採掘を行っている在来型石油資源に限定してではあるが2005年が生産量のピークであったことを公表した。ピークに達しても、生産量は高原状態をしばらく維持したあと、年率5%で減ると言われる。

私たちが利用できるエネルギー資源量を議論するときには、エネルギーの総量ではなく、エネルギー総量から採掘・輸送・精製などで消費したエネルギーを差し引いた、ネットエネルギー量で議論する必要がある。極端なことを言えば、1単位のエネルギーを得るのに1単位のエネルギーが必要であれば、ネットエネルギーはゼロである。図5と図6を見比べてほしい。図5は、IEAが公表している図であり、縦軸はエネルギー総量の年度変化の予測図である。図6は、IEAが公表している図を元に、縦軸をネットエネルギーで示した図である。図5に比べると図6の方がより現実的なことが分かる。

図5は、2015年以降に現在生産している在来型油田は顕著に減少し始めるが、それを埋める形で、現在生産している油田の二次回収や三次回収技術の向上による生産量増加とこれから発見される油田の生産量が見込まれ、在来型油田の総量は2035年まで若干の減少にとどまると予想している。それに、天然ガス由来のGNLの若干の増加と非在来型油田やシェールオイルの顕著な増加が加わり、全体として2035年までは徐々にではあるが生産量が増加傾向を維持すると予測している（予測Ⅰ）。

これをネットエネルギーで示した図6では、2015年以降に減少し始め、2035年まで減少傾向が続くという予測になる（予測Ⅱ）。

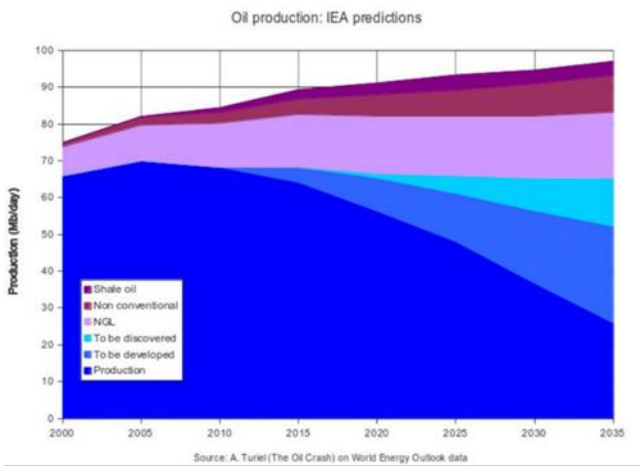


図 5 : IEA の石油・天然ガス生産量予測 (予測 I)

図 5, 6, 7 の出典:A.Turiel,World Energy Outlook Data

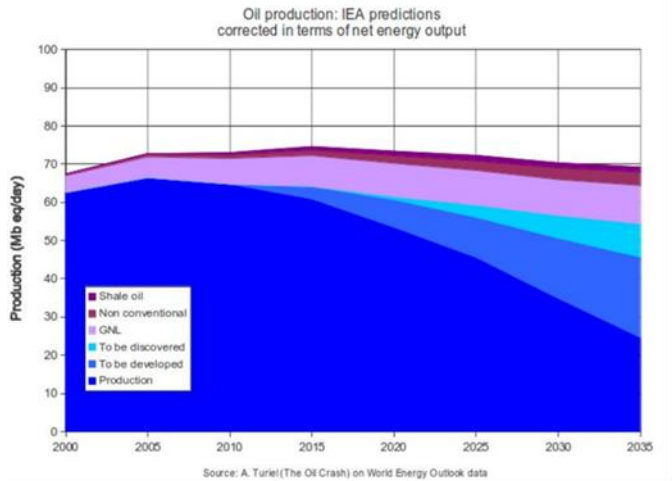


図 6 : ネットエネルギーで修正した IEA の石油・天然ガス
生産量予測 (予測 II)

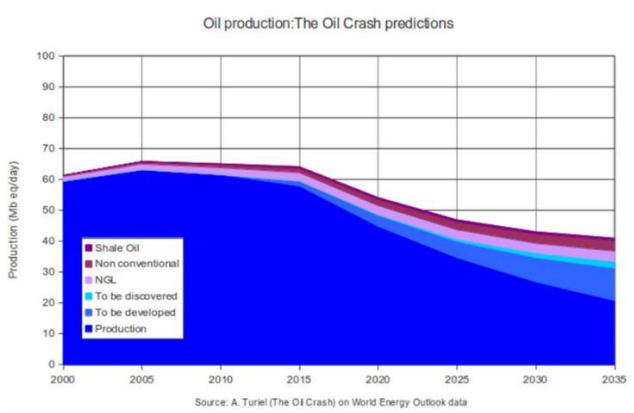


図 7：もう一つの石油・天然ガスの生産量予測（予測Ⅲ）

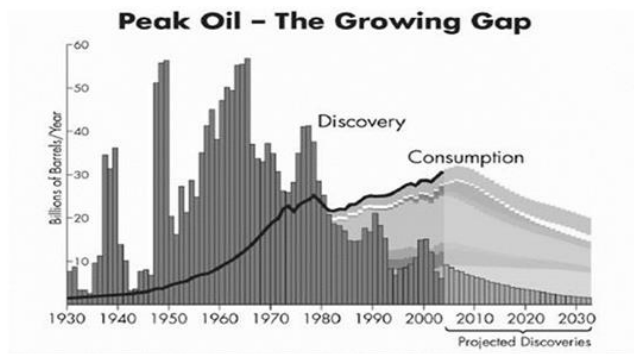


図 8：新しく発見される世界の油田

発見量に比べ、消費量が上回っている

出典: ASPO(The Association for the Study of Peak Oil & Gas)

もう一つの石油生産量の将来予測（予測Ⅲ）を図 7 に示す。これは、ドイツを中心とするヨーロッパで石油生産の予測を行っている EWG（Energy

Watch Group) が示した図である。図 5 や図 6 に比べて、現在生産している油田の二次回収や三次回収技術の向上による生産量増加とこれから発見される油田の生産量増加がほとんど見込まれていない。また、天然ガス由来の GNL の寄与も小さくて将来の増加もない。さらに、非在来型石油の増加も小さく、シェールオイルに至ってはほとんどゼロカウントである。これから発見される油田がほとんど期待されないのは、図 8 に示される新発見油田量の過去の推移から、十分に予測される。新油田発見は 1948 年頃と 1965 年頃の 2 つのピークで示され、1980 年以降、新油田を発見する技術が著しく向上しているにも関わらず、新油田発見量が年々低下している。これからも、この減少傾向が続くと予測するのは妥当と思われる。

図 5～図 7 を比べると、最も厳しい予測をしているのが図 7 であり、石油文明の終わりが間もなく始まることを示す。もちろん、このような予測は当たってほしくないが、当たった時には最も影響が大きい。将来の備えは最悪のケースを元にするべきであろう。

2) EPR について

もう一つエネルギー資源を語るときに大切な指標は、エネルギー収支比 (EPR: Energy Profit Ratio または Energy Payback Ratio) であり、1 単位のエネルギーを投入して何単位のエネルギーが得られるかを示している。同様な指標には、投下したエネルギーに対して収穫できるエネルギーを示すエネルギー純益 (EROEI: Energy Returned on Energy Invested) や EROI (Energy Return on Investment) がある。

$EPR = \frac{\text{【出力エネルギー】}}{\text{【入力エネルギー】}}$ で、EPR が高いほど質の良いエネルギーである。EPR が 1 以下では、投入したエネルギーより低いエネルギーしか得られない訳で、くたびれもうけである。通常、文明を維持する

ためにはRPRが10以上必要とされている。アラスカを除く米国の石油について見ると、1930年代の自噴している時はEPRが100以上であったけれども、ピークオイルを迎えた1970年には30に低下し、2005年には11～18にまで低下している。また、最近発見された深海油田はEPRが10以下と言われ、文明を維持できるエネルギーとしては評価されない。

これまで、エネルギー資源は【量】の多さだけで評価されたが、今後は【量】と【質】の両方を勘案して評価すべきである。【量】が多くても【質】が低ければ、有効なエネルギー資源ではない。逆に【質】が高くても【量】が少なければ、長期間利用できるエネルギー資源ではない。様々なエネルギー資源の【質】を評価する指標としてEPRが有効である。特に、これから開発が進む非在来型化石エネルギー資源や再生可能なエネルギー資源について、開発に必要な研究投資を行ったり開発費用を投入したりする前に、真に開発が必要な資源であるかを判断する上で、単に量の多寡を議論するだけでなく、この指標を基にエネルギーの質についても議論を進める必要がある。

様々なエネルギー資源のEPRの推定値を表3に示す。

表3：様々なエネルギー資源のEPRの推定値

エネルギー源(化石燃料)	EPR	エネルギー源(持続型)	EPR
石炭	80	水力発電	98
石油・ガス 1930年代発見	93	風力発電	17
石油・ガス 1970年代発見	30	地熱発電	7
石油・ガス 2000年代発見	8	原子力発電	5
シェールオイル・ガス	2～3	太陽光発電	3～4
タールサンド	2～3	バイオ燃料	1

出典: Perfect Storm (2013.1)

石油・ガス田は発見させる年代によってEPR値が変化し、2000年代に発

見された石油・ガス田では文明を維持可能な 10 を切るまでに低下した。多くの非在来型石油・ガス資源や持続型で再生可能なエネルギー資源は、水力発電や風力発電を除いて文明の維持可能な 10 に届かない。

様々なエネルギー源の EPR (EROEI) を図 9 に示す。

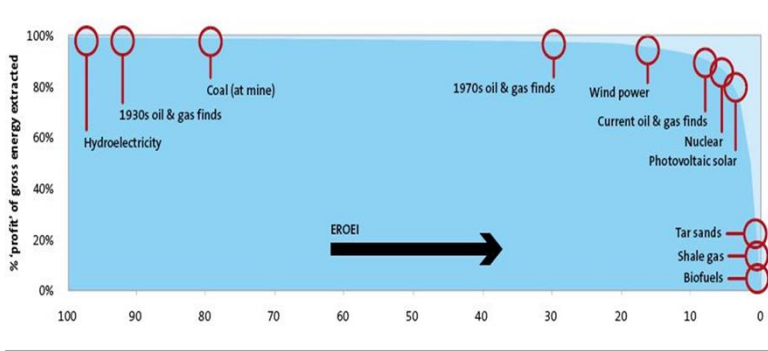


図 9：様々なエネルギー源の EPR (EROEI)

出典: K.Cobb, The net energy cliff, Energy Bulletin (2008)

3) 石油文明の将来予測

石油文明は早晚その終わりの時を迎える。私は 2020 年半ばには石油文明の終わりを迎えるという説であった。その理由は二つある。

- 理由 1 : 石油・天然ガスの生産量予測で、予測皿の可能性はある
- 理由 2 : EPR が年々低下し、間もなく危険ラインの 10 を切ろうとしている

石油文明の終わりの時に備えるのには以下の 4 つの対策があげられる。これらエネルギー資源に関連して、新しい起業の可能性の有無も含めて以下に私の考えを述べる。

- 対策 1 : 在来型化石エネルギー資源を確保する

対策 2 : 非在来型化石エネルギー資源を開発し、確保する

対策 3 : 再生可能なエネルギー資源を研究開発する

対策 4 : 一人当たりのエネルギー消費量を減らしても豊かな生活を送れる社会に変革し、そのために必要な製品・システムを研究開発する

対策 1 は、米国や中国が現在取っている政策である。早くから準備し対策をとっておれば可能性はあるけれども、生産量がピークを迎えてから対策に乗り出したのであれば、激しい争奪戦に巻き込まれ、資源の主な生産地から遠い日本は不利な立場にある。国家の役割が重要で、新しく起業できる余地はない。

対策 2 は、採掘技術が十分に確立されてはいないので、日本も技術開発面で寄与して確保できる可能性が残されている。しかし、日本近海にあるとされているメタンハイドレートを除いて日本は資源の主な埋蔵地から遠く、確保の点では不利である。メタンハイドレートは、これから巨額の開発資金を投入しても EPR が 1 を上回るとは限らないため、現時点では資源とは言えない。また、開発には巨額の投資が必要で、起業できる余地は少ない。

対策 3 は、小規模なエネルギー資源の積み重ねが必要なことや地産地消のエネルギー源であることから、技術開発の余地は大きく、様々な点で新しい起業が可能で新しい産業が生まれる可能性が高い。再生可能なエネルギー源の状況は地域ごとに異なるため、それらのベストミックスを計画立案したり、一定期間実施後にベストな組み合わせであるか検証したりするコンサルティング業が各地に必要な可能性がある。また、正常な運転を保証するための保守・点検企業も地域ごとに必要である。腐食に強い材料や繰り返し加わる振動で疲労破壊しない材料等、新しい材料開発も必要であり、地域によって必要な物性の優先順位が異なる可能性が高く、地域で新しく起業できる余地がある。同様な理由で、機器に組み込む部品も地域ごとに異なる可能性があり、地域で

新しく起業できる余地がある。3.11の巨大地震災害が与えた教訓は、これまでの東京一極を頂点とする中央集権的な社会構造から、地方に独立した行政が行えるいくつかの拠点を作り、それらが有機的に連携可能なネットワーク型の社会構造が必要であることを教える。地域主義とか地産地消とか、主に農業部門を視野に入れて様々に表現されている。地域で完結型の社会を作るためには、基礎となるエネルギーの地産地消が必要で、化石エネルギー資源を大規模に消費する従来型のエネルギー発生源ではなく、小規模なエネルギー発生源を地域独自に積み上げていくことが必要であり、地域で新しい雇用を生み出す産業の創出につながる可能性が高い。

4つの対策の中で、新しい起業や産業が生まれる可能性が一番高いのは対策4の「一人当たりのエネルギー消費量を減らしても豊かな生活を送れる社会に変革する」である。

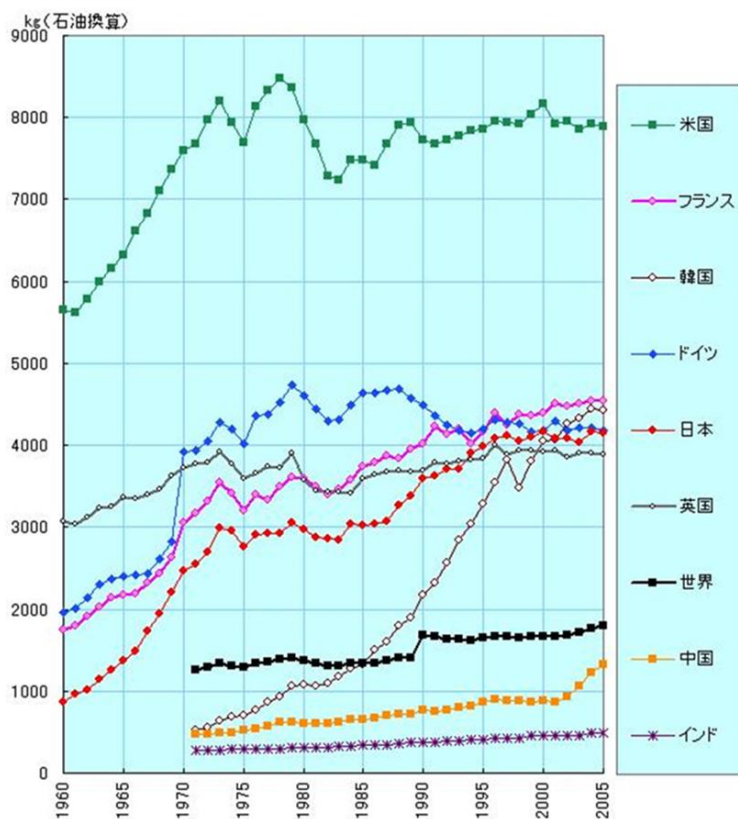
図10に、主要国の一人当たり年間エネルギー消費量の推移を示す。一人当たりの年間エネルギー消費量が一番多いのが米国で、石油換算で年間8,000kgのエネルギーを消費している。Suburbiaで象徴されるように、郊外のセントラルヒーティングで年間を通して一定の温度に保たれた大きな住宅に住み、ダウンタウンの勤務先にハリヤーのような大型車で通勤し、週末になると広大な駐車場を備えた郊外のスーパーマーケットに大型車で買い物に行き、一週間分をまとめ買いして大型の冷蔵庫や冷凍庫にストックするような生活である。かつてはアメリカンドリームとして憧れた、エネルギー危機の足音が聞こえる今となっては、身動きのとれない不都合な生活様式と言わざるを得ない。ヨーロッパの主要国や日本・韓国は、ほぼ同じ水準で、石油換算で一人当たり年間約4,000kgのエネルギー消費である。中国は最近になって急増し、現在は石油換算で一人当たり年間2,000kgを超えていると予想される。韓国のように短期間で急増し、4,000kgの水準に達するとエネルギー問題が

深刻化する。インドは石油換算一人当たり年間 600kg で、まだ急増する傾向が見えない。しかし、カースト制度をなくし、高い潜在能力を発揮する時代を迎えると、急増すると予想される。

一人当たり年間エネルギー消費量を減らしてもそれなりに豊かな生活を送れる可能性は、日本の年間一人当たりエネルギー消費量の推移を見れば予想できる。現在は約 4,000kg である。バブル前で日本の経済が強かった 1980 年代は現在より 25%少ない 3,000kg であった。さらに遡ると、ピートルズが来日した 1960 年代後半は現在より 50%も少ない 2,000kg であった。1962 年は現在より 75%少ない年間 1,000 kg であった。1960 年代前半は、今ほど物が溢れていなかった。それでも、人々の生活が極めて貧しかったという印象はない。物質的な豊かさという点では、現在よりも劣るかもしれないけれど、精神的な豊かさを含めると、どちらが豊かな時代であったか一概に判断できない。

今後は、対策 4 を積極的に進め、必要なエネルギーはできるだけ対策 3 で対応し、不足分を対策 1 と対策 2 で対応することが必要になると考えられる。

人口1人当たりエネルギー消費量の推移(主要国)



(注)消費量は1次エネルギー供給量のこと。原資料はInternational Energy Agency(IEA)
 (資料)世銀, WDI Online 2008.4.17

図 10：主要国の一人当たりエネルギー消費量の推移

出典: 世界銀行 WDI Online (2008.4.17)

5. 石炭文明の現状と将来予測

エネルギーと文明史で、近代西洋文明が石炭文明であり、20世紀になって石油文明である現代西洋文明が始まったように記したが、厳密に言えばこの表現は正しくない。より正確には、現代西洋文明は石炭文明に石油文明が上乗せされている。以下に、石油文明に隠された石炭文明現状と将来予測を行う。

1) 石炭の生成時期

北米やヨーロッパの石炭が石炭紀で生成し、中国、インド、オーストラリアなどの地域では石炭紀より新しいペルム紀を中心に、三畳紀、ジュラ紀、白亜紀にかけて生成した。石油がジュラ紀から白亜紀、チューロニアン期にかけて生成し、天然ガスが白亜紀に生成したのと比べ、石炭は古い時期から長い期間にかけて生成した。このことを図 11 に示す。

石炭も石油も天然ガスも、現在より世界の平均気温が高く、気中の炭酸ガス濃度が高い時期に生成した。本題とはずれるが、地球温暖化説と炭酸ガス主犯説について、少し考えてみる。地球史的に見ると、平均気温が 14.55℃の現在は氷河期の中の間氷期であり、決して温暖期ではない。本来の氷河期（平均気温が 12℃程度）に戻るのか、このまま気温が上昇を続け温暖期（平均気温が 22℃程度）になるのか、太陽の活動次第と思われる。気中炭酸ガス濃度は地球史的に見るとずっと下がり続けている。炭酸ガスが植物や貝類に固定化されることから納得できる。固定化された炭酸ガスのごく一部を石炭、石油、天然ガスの燃焼で放出するだけで大騒ぎしている。それより、このまま気中炭酸ガス濃度が下がり続けた時の影響を心配すべきなのかもしれない。

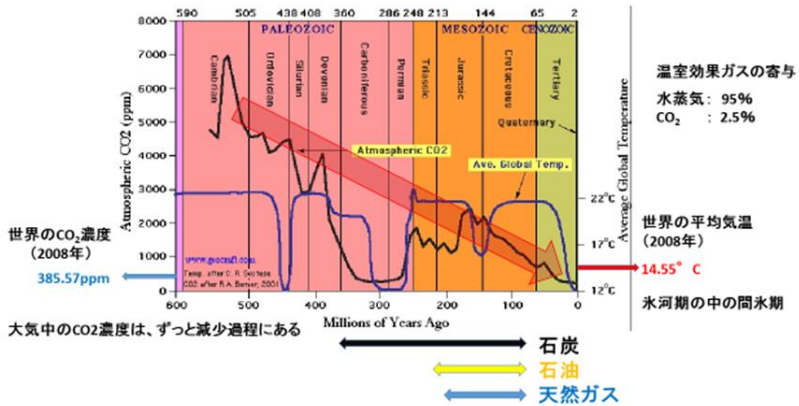


図 11：世界の平均気温と炭酸ガス濃度の推移
(6 億年前から現在まで)

出典: <http://c3headlines.typepad.com> に加筆

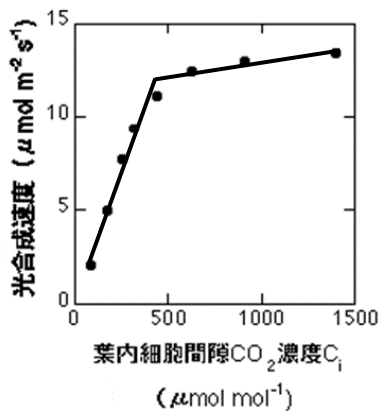


図 12：葉内細胞間隔
炭酸ガス濃度と光合成速度の
関係

出典；www.biology.tohoku.ac.jp

気中炭酸ガス濃度と葉内細胞間隔炭酸ガス濃度は連動しており、ある濃度から低下すると植物の光合成速度が急減する。気中炭酸ガス濃度がどの程度まで下がれば、光合成速度が急減し始めるかは不明だが、オランダではハウス内に

炭酸ガスを吹き込んでトマトの収穫を大幅に上げていることを考えると気になるデータではある。

石炭、石油、天然ガスの生成時期をまとめると、

北米、ヨーロッパの石炭層

石炭紀：3億5920万年前～2億9900万年前

中国、インド、オーストラリアの石炭層

ペルム紀：2億9900万年前～2億5100万年前

三畳紀：2億5100万年前～1億9900万年前

ジュラ紀：1億9900万年前～1億4550万年前

白亜紀：1億4550万年前～6600万年前

石油、天然ガスの生成

ジュラ紀：1億9900万年前～1億4550万年前

白亜紀：1億4550万年前～6600万年前

表4に在来型化石エネルギー資源の確認埋蔵量、年間消費量、可採年数を示す。可採年数は、確認埋蔵量を年間消費量で割った数字であり、他の資源の動向で大きく変動する。

表4：在来型化石エネルギー資源、ウラン資源の生産量、埋蔵量

	確認埋蔵量	年間消費量	可採年数	比率
石油	2,382	41.8	57年	32.8%
天然ガス	1,640	30.2	54年	23.7%
石炭	4,386	38.3	115年*	30.1%
ウラン	479	5.6	85年	4.4%
以上の合計	8,887	115.9	77年	91.6%
世界全体		127.3		100%

* 石油、天然ガスの年間消費量をすべて石炭でまかなうとすれば、
可採年数は34年に短縮される 単位：石油換算億トン

2) 中国の石炭資源の将来予測

表5に示すように、中国は世界最大の石炭生産国であり、4割近くのシェアを占め、第2位の米国の倍以上である。

表5：世界の石炭生産量の分布
(2006年のトップ6か国のデータ：単位100万トン)

国名	生産量	シェア
中国	2380	38.4 %
米国	1054	17.1 %
インド	447	7.2 %
オーストラリア	374	6.0 %
ロシア	309	4.9 %
南アフリカ	257	4.1 %

一方で、世界の石炭資源埋蔵量では、第1位が米国27.1%、第2位がロシアで17.3%、ようやく第3位が中国で12.6%である。以下、インドが10.2%、オーストラリアが8.6%、南アフリカが5.4%と続く。このように、埋蔵量に比べて生産量が突出して高いため、石炭資源問題は中国が先行する。

中国社会がどのような一次エネルギー資源で構成されているかを図13に示す。

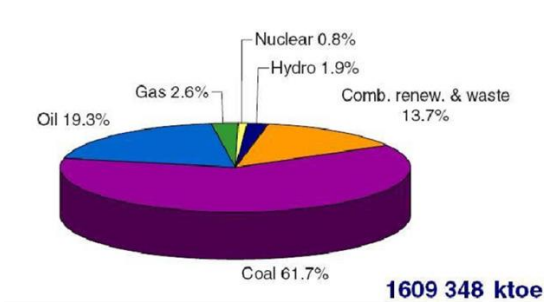


図 13：中国の一次エネルギー

出典: Michael Hook 他, Uppsala University

石炭資源の占める割合が圧倒的に高く、一次エネルギー全体の 60 %以上を占める。世界を揺るがしている中国経済の今後を予測するときには、石炭資源問題を考慮に入れなければいけない。図 14 に示す中国の石炭生産量の推移と、図 15 に示す中国のGDPの推移が共に Exponential Curve を描いて成長していることは、中国経済の急拡大は石炭生産量の急激な増加が支えてきたことを物語っている。

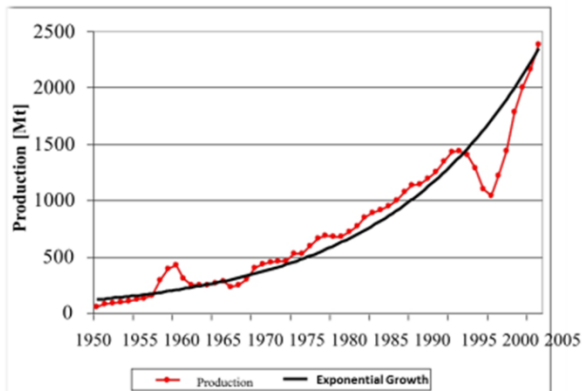


図 14：中国の石炭生産量の推移

図 14, 図 15 の出典: Michael Hook 他, Uppsala University

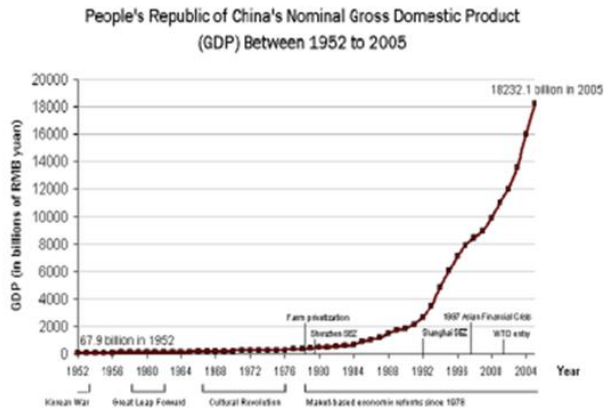


図 15: 中国のGDPの推移



図 16: 中国の石炭生産地の分布

出典: Michael Hook 他, Uppsala University

図 16 から中国では一部の空白地域を除いて、ほぼ全国にわたって石炭が生産されている。このことも、石炭が中国社会、中国経済で重要な地位を占めている理由の一つである。

エネルギー資源の中で石炭資源を中心に用いたことが中国経済にもたらした利点として、価格が石油の $1/4$ （石油価格は乱高下しており、40 ドル/バレルとすると $1/2$ 、100 ドル/バレルとすると $1/5$ と幅が大きい）、天然ガスの $1/2$ と割安である石炭を主要なエネルギー源として利用してきたことがあげられる。短期間で中国を世界の工場の地位に引き上げた原動力は三つあり、安価なエネルギー資源の利用、安価な労働力の利用、巨大な潜在需要の存在があげられる。

- ① 1 バレル (=159 リットル) の石油は、6.12GJ のエネルギーを持ち、現在の価格は 80 ドル (40~100 ドル)
- ② 1 バレルの石油は、25000 時間の肉体労働量と等価で、約 12 人の 1 年間の労働量に相当する
- ③ 156 m^3 の天然ガスは 1 バレルの石油と同じエネルギーを持ち、価格は約 40 ドル
- ④ 300 kg の石炭は 1 バレルの石油と同じエネルギーを持ち、価格は約 18 ドル

中国における石炭資源は生産量と資源量のアンバランスに加え現在三つの大きな問題を抱えている。

- ① 中国は長い間、石炭の輸出国だったが、最近になって輸入国に転落した。元々、中国から輸出される石炭は瀝青炭が中心で、鉄鋼に使う最高品位の無煙炭はベトナム等から輸入していたが、瀝青炭も輸入ポジションにかわった。

(参考) 石炭資源の質

(良) 無煙炭—瀝青炭—亜瀝青炭—褐炭 (劣)

- ② 中国の石炭資源量は長くバールに包まれており、正確な資源量が公表されていない。このため、さらに悪い実態にあるという予測もされる。例えば、無煙炭の資源量は 1992 年以降更新されておらず、褐炭の資源量も無煙炭と同様に更新されていない。石炭資源量の約 30% がすでに掘り出されているという事実が無視されている。
- ③ 元々、中国では 150m より浅い炭層にある石炭資源は少なく、大半の石炭が 150~300m にある炭層で生産されている。残された石炭資源は 300m より深い炭層に存在する。300m より深い炭層からの採炭はコストがかかり、複雑な採炭技術と多くのエネルギーが必要で、安全性も大幅に低下する。将来は、石油や天然ガスに比べて安価なエネルギー資源という利点が失われていく。

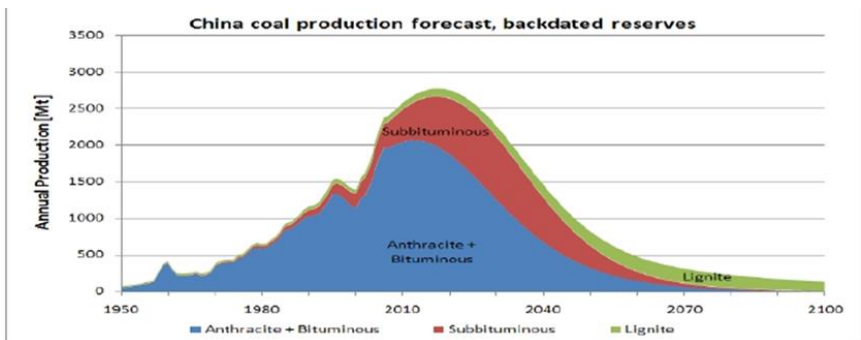


図 17：中国の石炭資源の将来予測

出典: Michael Hook 他, Uppsala University

石炭資源の将来予測を図 17 に示す。統計データの出所の違いで少し異なるが、いずれにせよ、2020 年ごろに石炭生産のピークを迎え、2030 年ごろ

には急減期に入る。

3) 世界の石炭資源の将来予測

中国の石炭資源に対して行ったのと同様の議論と解析は全世界に展開できる。石炭資源は、価格が上がったり新技術が開発されても、長期間にわたり一貫してエネルギーの質（EPR）が低下し続ける。石炭資源は、その大規模性、有用性、普遍性の点で他のエネルギー資源に置き変われない。唯一の例外は石油資源の有用性だけであるが、石油資源も石炭資源に先行して質（EPR）が低下し続けており、生産量のピークも2005年に迎えている。

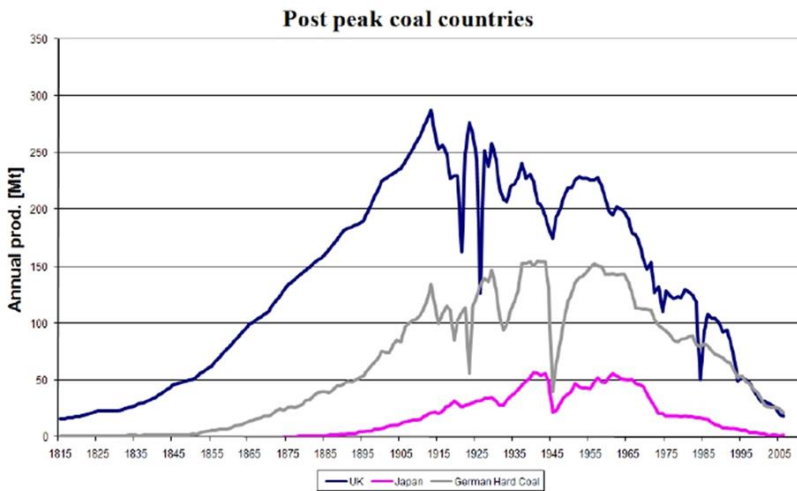


図 18：歴史から学ぶこと

出典: Michael Hook 他, Uppsala University

図 18 は、過去に石炭ピークを迎えた英国、ドイツおよび日本の石炭生産量の推移を示す。石炭資源より利便が高い石油資源へのシフトも一因であるが、ピークが過ぎた後の生産量の減少傾向が示されている。

世界全体での石炭資源の将来予測を行う上で、次の諸点を考慮する必要がある。

- ① 私たちは数百年もの石炭資源は持っていない
- ② 前節で述べたように、中国は間もなく 2020 年ごろに Peak Coal に達する
- ③ 石炭は Peak Oil の解決策にはならない
- ④ 過去の歴史を振り返っても、価格の上昇や新技術の開発は、石炭資源量の増加に結びつかなかった

図 19 に石炭生産の将来予測を示す。中国は 2020 年頃、世界全体でも 2030 年ごろに Peak Coal を迎え、それから約 10 年で石炭文明の終焉期が始まると予想される。石油文明の終焉期の始まりに引き続き石炭文明の終焉期もはじまり、産業革命以降人類に多くの富と豊かさをもたらし、科学技術の進歩を支え、人口の爆発的な増加を可能にしてきた、化石燃料資源をベースとする文明の終焉期を迎える。残された時間は長くない。

石油ピークに引き続く石炭ピークを迎えた時には、その対応の仕方、勝者と敗者に分かれるであろう。

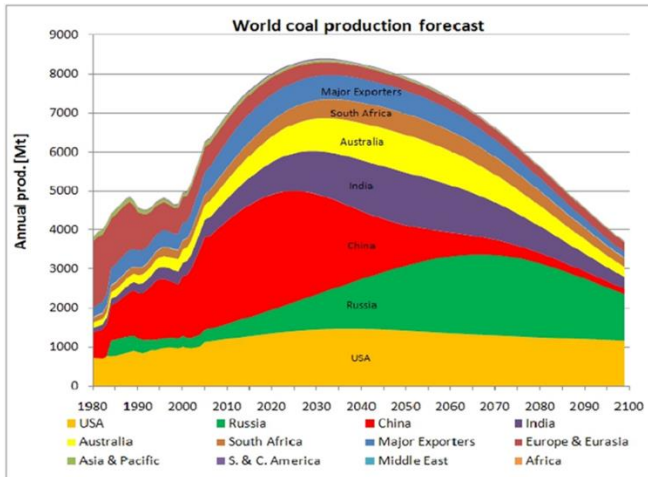


図 19：石炭生産の将来予測（全世界）

出典: Michael Hook 他, Uppsala University

- ① Peak Coal に達した後も石炭資源に依存し続けると、悲惨な経済的結果をもたらすであろう
- ② 将来、石炭資源の供給不足に陥れば、投資の多くは最悪な結末となるだろう
- ③ Peak Coal への対応が遅れた者が敗者になり、いち早く対応した者が勝者になる

4) まとめ

- ・ 石炭資源は化石燃料資源の一種であり、いずれ枯渇に向かう
- ・ 世界の石炭資源量は、石炭価格の上昇にも関わらず着実に減少してきた。その結果、新古典主義経済の神話が不可能であることが明らかになってきている
- ・ 資源の90%は上位9か国に偏在しており、世界の石炭に影響する

- 中国はそれら9か国の中でも、もっとも大きな影響を与えてきた
- 中国は近い将来、石炭生産で大きな問題を抱える
- 石炭の世界生産は短期/ 中期的にピークに達するであろう
- 我々は石炭資源を今後数百年にわたって利用することはできない！

【参考文献】

若林宏明；「安価な石油に依存する文明の終焉 ―蘇る文明と社会―」，流通経済大学，2007年10月。

山下真一；「オイル・シレンマ」，日本経済新聞社，2007年6月。

飯田哲也；「エネルギー進化論」，筑摩書房，2011年12月。

大久保泰邦；「エネルギーとコストのからくり」，平凡社（新書），2014年4月。

日本エネルギー経済研究所編；「エネルギー・経済統計要覧2015」，（財）省エネルギーセンター，2015年2月。

宮田律；「イスラム石油戦争」，NTT出版，2006年10月。

中村太和；「環境・自然エネルギー革命 ―食料・エネルギー・水の地域自給」，日本経済評論社，2010年1月。

上原修；「枯渇性資源の安定調達戦略」，日刊工業新聞社，2011年2月。

山本達也；「革命と騒乱のエジプト ―ソーシャルメディアとピークオイルの政治学」，慶応義塾大学出版会，2014年7月。

久保田宏；「科学技術の視座から原発に依存しないエネルギー政策を創る」，日刊工業新聞社，2012年2月。

久保田宏ら；「化石燃料の枯渇がもたらす経済成長の終焉 ―科学技術の視点から」，自

主出版，2016年6月。

中堂幸政；「石油と戦争—エネルギー地政学から読む国際政治」，現代書館，2006年1月。

ポール・ロバーツ；「石油の終焉—生活が変わる，社会が変わる，国際関係が変わる—」，光文社，2005年5月。

ジャン＝マリー・シュヴァリエ；「世界エネルギー市場」，作品社，2007年8月。

ピーター・テルザキアン；「石油 最後の1バレル A Thousand Barrels a Second」，英治出版，2006年12月。

エリック・ローラン；「石油の隠された貌」，緑風出版，2007年6月。

ソニア・シャー；「『石油の呪縛』と人類」，集英社，2007年1月。

ヘルマン・シェーア；「ソーラー地球経済」，岩波書店，2001年12月。

長谷川栄一；「石油をめぐる国々の角逐—通貨、安全保障、エネルギー—」，ミネルヴァ書房，2009年2月。

2007 第一回基礎研究報告会講演議事録；「次世代エネルギー研究最前線—環境低負荷社会の創設に向けて」，科学技術振興機構，2008年11月。

日本科学者会議 科学・技術政策委員会編；「3.11 後の産業、エネルギー政策と学術・科学技術政策」，八潮社，2012年6月。

石井吉徳；「石油ピークが来た—崩壊を回避する『日本のプランB』」，B&Tブックス，2007年10月。

市川勝；「水素エネルギーがわかる本—水素社会と水素ビジネス」，オーム社，2007年2月。

デニス・L・メドウズ 他；「成長の限界—ローマ・クラブ『人類の危機』レポート」，ダイヤモンド社，1972年5月。

石井吉徳；「石油ピークで食糧危機が訪れる」，日刊工業新聞社，2009年9月。

内藤春雄；「事例に学ぶ 地中熱利用ヒートポンプシステム」，オーム社，2014年12

月.

ビル・ダンス他；「ZED Book ーゼロエネルギー建築、縮減社会の処方箋」，鹿島出版会，2010年9月.

田村八州夫；「石油文明はなぜ終わるか ー低エネルギー社会への構造変換」，東洋出版，2014年4月.

田村八州夫；「シェアリングエコノミー」，幻冬舎ルネッサンス新書，2018年3月.

デイビッド・ストローン；「地球最後のオイルショック」，新潮社，2008年5月.

田村八州夫；「21世紀 文明の岐路とエネルギー選択」，金融ブックス，2015年9月.

マシュー・R・シモンズ；「投資銀行家が見たサウジ石油の真実」，日経BP社，2007年3月.

西山孝ら；「統計データからみる地球環境・資源エネルギー論」，丸善出版，2011年4月.

坪郷實；「脱原発とエネルギー政策の転換 ードイツの事例から」，明石書店，2013年10月.

今泉みね子；「脱原発から、その先へ ードイツの市民エネルギー革命」，岩波書店，2013年3月.

山家公雄；「ドイツ エネルギー変革の真実」，エネルギーフォーラム，2015年12月.

環境・エネルギー・農林業ネットワーク編；「峠を越えて ー環境・エネルギー・農林問題を考える」，自主出版，2012年4月.

吉田文和；「脱原発と再生可能エネルギー ー同時代への発言」，北海道大学出版会，2015年2月.

村上敦ら；「ドイツの市民エネルギー企業」，学芸出版社，2014年6月.

ジェレミー・レグット；「ピーク・オイル・パニック」，作品社，2006年9月.

リンダ・マクウェイク；「ピーク・オイル 石油争乱と21世紀経済の行方」，作品社，2005年9月.

木谷収；「バイオマスは地球環境を救えるか」，岩波書店，2007年11月。

小泉達治；「バイオエタノールと世界の食料需給」，筑波書房，2007年9月。

内藤牧男ら；「粉体技術が挑む究極のエネルギーと環境調和 ―粉が支える豊かな未来」，日刊工業社，2010年2月。

山本達也；「暮らしと世界のリデザイン」，花伝社，2017年4月。

石山俊ら；「ポスト石油時代の人づくり・モノづくり ―日本と産油国の未来像を求めて」，昭和堂，2013年3月。

デビッド・ホルムグレン；「未来のシナリオ ―ピークオイル・温暖化の時代とパーマカルチャー」，農文協，2010年12月。

大久保泰邦；「みんなではじめる低エネルギー社会のつくり方」，合同出版，2013年5月。

大竹久夫；「リン資源枯渇危機とはなにか」，大阪大学出版会，2011年7月。

西山孝；「レアメタル・資源 ―38元素の統計と展望」，丸善，2009年11月。

Australian Government； "Transport energy futures: Long-term oil supply trends and projection"，Commonwealth，2009年3月。

Dr. Werner Zittel et.al； "Fossil and Nuclear Fuels - The Supply Outlook"，Energy Watch Group，2013年3月。

Tim Morgan； "Perfect storm ―energy, finance and the end of growth"，Tullett prebon，2013年1月。

John Gever et.al； "Beyond Oil"，Ballinger Publishing，1986年。