

エネルギー資源供給と持続可能性との関係

武 石 礼 司

エネルギー資源供給と持続可能性との関係

武 石 礼 司

目 次

- はじめに
1. エネルギー資源供給の現状分析
 2. 供給国と需要国
 3. 歴史的考察と将来課題
 4. エネルギー資源選択
 5. 用途別の考察：産業用・建物用・運輸用・電力用
 6. エネルギー資源供給における持続可能性
おわりに

キーワード：エネルギー資源，持続可能性，供給国，需要国，資源選択

はじめに

本論文では、エネルギー資源供給における持続可能性の意味が、供給国であるか、あるいは消費国であるかのそれぞれの立場ごとに異なっており、また、エネルギー資源の種類ごとに異なっているとの前提を踏まえた上で、エネルギー資源の供給国、消費国、様々なエネルギー資源の種類ごとの差異につき検討を行い、その差異を明らかとするとともに、そうした差異が存在するからこそ、持続可能性を考えた際には、エネルギー資源の将来的な役割が異ならざるを得ないという点を確認することを目的としている。

需要と供給の観点からの考察は今までも、「需給見通し」といった形で世界各国、各機関で行われてきているが、エネルギー資源の供給における持続可能性を考える際に、それに加えて需要の持続可能性の動向も踏まえつつ考察を

行うことで、新たな要素が加わってくると考えられる。

現在、熱量（カロリー）換算で見て、世界の商業エネルギー供給量の86%は石油、石炭、天然ガスという化石燃料で占められている（BP統計2015年）。したがって、これら主要なエネルギー資源の供給状況を検討しながら、それら資源が持つ「枯渇性の資源であるという特徴」を踏まえつつ、それでは他のエネルギー資源の供給の持続可能性をどのように考えるかとの考察にも取り組むこととする。上記の化石燃料に加えて考察すべき「その他のエネルギー資源」としては、水力等の再生可能エネルギー、原子力等をあげることができる。これらの資源についても、その供給量を評価しながら検討を加えていくこととする。

1. エネルギー資源供給の現状分析

1.1 世界全体としてのエネルギー資源供給状況

世界全体を対象としたエネルギー資源供給の現状分析を行い、さらに、将来展望・予測にも取り組んでいる国際的な機関には、国際エネルギー機関（IEA）¹⁾がある。その他にも、石油会社のシェル、エクソンも現状分析に加えて、将来予測を発表している。また、米国のエネルギー省（DOE）のエネルギー情報機関（EIA）も、米国のみならず、世界全体のエネルギー資源の需給動向の検討と将来予測を行っている。石油のみに関しては、石油輸出国機構（OPEC）の事務局も発表をしている。

いずれの機関も、需給・価格・在庫変動などのデータをそろえながら、その分析を行い、将来の展望を得ようとの取り組みを行っている。

以上のような多様な分析がなされ、毎年、研究の成果が発表されている。本論文では、そうした検討の成果を踏まえつつ、それでは持続可能性という観点から見て、いかなる原理原則を踏まえていく必要があるかを検討してみる。需給動向の背後に存在する原理原則がどのように異なるかを踏まえておくことが、今後、世界のエネルギー資源需給の過不足、価格の値崩れや高騰、資源をめぐる紛争などを防ぐためにも有効であると考えられるからである。

周知のように、石油、石炭、天然ガスというエネルギー資源の種類ごとに、それぞれ主要な生産国があり、またそれぞれの資源の主要な輸出国も異なる。例えば、中国は石炭の生産量が世界第一位であるが、石炭の純輸入国であり、オーストラリア、インドネシア等から輸入をしている。

供給の持続可能性を考える際に重要なのは、供給量に見合った需要が将来的にも続いていくのかという点である。供給量の予測は、需要

(あるいは消費)の持続可能性との間で、切っても切れない関係となっており、需要があるから、供給も続くのであり、また、供給が続くとわかっているからこそ、需要も継続していく関係が存在している。

表1で示したように、エネルギー資源の供給量は、熱量(カロリー)ベースで換算することで、異なった種類のエネルギーでも同列に並べてその多寡を比較することができる。

中国の石炭の生産・消費量が世界のエネルギー供給量の中で群を抜いた存在であることがわかる。

生産量と消費量の両方で、満遍なく上位に位置するのは米国とロシア、それに中国である。生産量を見ると、石油、天然ガス、石炭のいずれにおいても上位の諸国が多量の生産を行っており、石油では上位6カ国で世界の生産量の半分以上を超えている。天然ガスにおいては、特に米国とロシアの上位2カ国で、世界全体の生産量の38%を占めている。天然ガスで世界の生産量の半分に達するのはカナダまでの上位5カ国の合計である。

石炭に関しては、中国一カ国で世界の生産量

表1 石油・石炭・天然ガスの世界の主要な生産国の生産量、国内消費量、輸出量の関係

(単位:石油換算百万トン)

石油				天然ガス				石炭			
	生産	消費	輸出量		生産	消費	輸出		生産	消費	輸出
1 Saudi Arabia	543.4	142.0	401.4	1 US	668.2	695.3	-27.1	1 China	1,844.6	1962.4	-117.7
2 Russian Federation	534.1	148.1	386.0	2 Russian Federation	520.9	368.3	152.6	2 US	507.8	453.4	54.5
3 US	519.9	836.1	-316.1	3 Qatar	159.5	40.3	119.2	3 Indonesia	281.7	60.8	220.9
4 China	211.4	520.3	-308.8	4 Iran	155.3	153.2	2.1	4 Australia	280.8	43.8	237.0
5 Canada	209.8	103.0	106.8	5 Canada	145.8	93.8	52.0	5 India	243.5	360.2	-116.7
6 Iran	169.2	93.2	76.0	6 China	121.0	166.9	-45.9	6 Russian Federation	170.9	85.2	85.7
7 United Arab Emirates	167.3	39.3	127.9	7 Norway	97.9	4.2	93.7	7 South Africa	147.7	89.4	58.2
8 Iraq	160.3	37.4	122.9	8 Saudi Arabia	97.4	97.4	0.0	8 Colombia	57.6	4.2	53.3
9 Kuwait	150.8	22.2	128.6	9 Algeria	75.0	33.7	41.3	9 Kazakhstan	55.3	34.5	20.8
10 Venezuela	139.5	38.5	100.9	10 Indonesia	66.1	34.5	31.5	10 Poland	55.0	52.9	2.1
11 Mexico	137.1	85.2	51.9	11 Turkmenistan	62.3	24.9	37.4	11 Germany	43.8	77.4	-33.5
12 Brazil	122.1	142.5	-20.4	12 Malaysia	59.8	36.9	22.9	12 Canada	36.7	21.2	15.5
13 Nigeria	113.5	15.0	98.5	13 Mexico	52.3	77.2	-24.9	13 Ukraine	31.5	33.0	-1.5
14 Norway	85.6	10.3	75.3	14 United Arab Emirates	52.0	62.4	-10.4	14 Vietnam	23.1	19.1	4.0
15 Qatar	83.5	10.1	73.4	15 Uzbekistan	51.6	43.9	7.7	15 Turkey	17.8	35.9	-18.1

(注) 石油、天然ガス、石炭ともに生産量の世界第15位までの国を示す。

(資料) BP 統計 2015年版データより筆者作成。

の47%を占め、また、生産量第一位の中国に第二位の米国を加えると、世界の生産量の6割占めている。

ただし、エネルギー資源の取り扱いが容易であるか（気体か液体か固体か）、あるいは天然ガスの場合、送付するパイプラインが備わっているか、さらに、石炭の場合のように環境負荷が大きく環境対策で費用がかかるかで供給コストに差が生じ、同じカロリー換算の量のエネルギーを使用する場合でも、どのエネルギー資源が選ばれるかが異なってくる。

しかも、現在は化石燃料は、燃焼させてそのまま熱として利用するだけでなく、いったん発電し電気として消費される場合も多くなっている。その際には1 kWhが何カロリーに当たるか、熱量としての定義を、各国が持つことが必要となる。この電力への換算数値は、どのような燃料による発電が行われているかに基づいて各国ごとに異なる数値となる。さらに、時間を経るに連れて、発電量の燃料別の構成比も異なってくるために、1 kWhが何カロリーに当たるかに関しては数値の見直しが行われている。ⁱⁱ⁾

エネルギー資源量が何年分あるかという点も重要である。R/P比（埋蔵量÷年間生産量：Reserve Production Ratio）として知られる「年数」を単位とする指標がどの位あるかに依存して、供給の安定性の確保が図られているかどうかを判明すると考えられている。

ただし、資源量の確定はたいへんに難しい作業となる。埋蔵量には多様な定義があり、最もよく用いられる確認可採埋蔵量は、経済的に見て採算がとれ、そして技術的にも生産可能であるというスクリーニングを経た後に計上される数値である。生産物の価格が上昇すれば、より多くのコストを生産にかけても採算がとれ、生産に移れるわけで、したがって、生産物の価格次第で埋蔵量は増えたり減ったりすることになる。

1.2 個別のプロジェクトごとの生産動向

2015年現在では、米国のシェールガス・オ

イルの生産高が、原油価格が大幅に低下するなかでコスト割れにより減退するのか、あるいは技術革新に基づく大幅な生産コストの低下が達成されて生産量が維持されるのかが注目されている。

こうした個々の油田・ガス田、あるいは炭鉱ごとの生産量の推移の合計が、一つの地域あるいは国の生産量の方向を決定していく。

したがって、個々のプロジェクトにおける採算計算の結果がどう出るかは極めて重要な課題となる。こうした採算計算に用いられる基本的な考え方は現在価値法（NPV：Net Present Value）である。資金の現在価値は将来の価格よりも高いとすればその分を割り引いて、現在に近いところでの収入が十分に得られるかが重要となる。プロジェクト費用に関しても、資本コストと運転（操業）コストに分けた場合に、エネルギー資源価格が低下していても、資本コストの回収が可能な価格で生産物が売れる場合には、プロジェクトの実施者は、生産を続ける場合が多くなっており、価格低下への下値抵抗線を形成する場合がみられる。

さらに現在では、金融手法の進歩により、固定価格と変動価格のやり取りを行うことで、エネルギー資源の生産者はコスト回収をした上で、さらに一定の利益を上積みした価格で生産物である石油・ガス等を売ることが可能となっている。このように採算を確保する手段が発達してきたために、個別プロジェクトごとにおける採算性確保の手段は、北米などでは従来と比べると飛躍的に向上していると言える。

ただし、国営石油会社が生産を担う中東等の産油国においては、金融手法を積極的に用いることには躊躇する面があり、変動する石油価格に翻弄されて、国家収入が大幅に増減する事態がしばしば生じてきている。例えば、サウジアラビアにおいては、コーデスマン（2012, p. 410以下）が述べるように、より即断即決が可能となるようにトップダウンの委員会（石油・鉱物資源最高評議会：SCPM）が設立されてきているが、その成果は着実に出たとは言えるもの

の、欧米企業のような足の速い対応を可能にするものではなかった。

もともとイスラーム圏の諸国においては、金利を嫌い（あるいは否定し）、先物市場の利用に関しても否定的な国が、サウジアラビアのように存在している。先物市場を利用しないと、将来の収入の固定（ヘッジング）は難しく、そのため石油価格の動向次第で産油国の収入は容易に変動してしまうことになる。

1.3 枯渇性資源であることの影響

化石燃料である石油・天然ガス・石炭は、生産すればするだけ既存の（あるいは発見済みの）埋蔵量が減少する枯渇性の資源である。追加で資金を投下して技術的に生産量の減退を食い止める手法が用いられているが、そうした増進回収法（EOR：Enhanced Oil Recovery）は減退の進行を若干だけ少なくする役割を持つのみである。

枯渇性があるエネルギー資源が資産として企業の財務上、大きな役割を果たしている国がある。それは米国で、米国では“Depletion Allowance”と呼ばれる税額控除制度があり、生産減耗部分に対して経費としての支出が可能となる。経費、償却費に、さらにこの「枯渇部分」が加わり、所得から控除され、その残額に課税されることになる。

例えば、シェールガスの生産に成功した「シェールの父」と呼ばれるジョージ・ミッチェルは、この制度があったおかげで、何年もの間、株主からもシェールガス狙いの掘削の継続を止めるよう促され、非難されながらも技術の向上に努め、最終的には商業規模での生産に成功する（ヤーギン、2012）。

枯渇性の資源であることが、短期的に見ると次の投資を催促（あるいは促進）する意味を持つことになる。

次に、エネルギー資源の価格の動向の影響を考える。

Hanjalic (2008) が指摘しているように、エネルギー資源の価格が上昇することは、世界的

にエネルギー問題への関心を政治の面で高めるとともに、一般の人々にもエネルギー問題を意識するように仕向けることになる（同上、p. xvii）。

特に2000年代以降に生じた石油価格の高騰は、多くの人々に、エネルギー供給をどのように考え、将来の供給は可能なのかという課題を与えるものとなった。石油価格が高いままなのだとすれば、それでは持続可能で再生可能なエネルギーはどこまで供給可能なかが、特に先進国で議論された。地球環境問題への対応としてというよりも、むしろ国家安全保障上の問題として関心が持たれ、エネルギーの輸入依存度を引き下げることができるのか、在来型の化石燃料資源と新たに導入される再生可能エネルギーとのバランスをどのように考えるのか、そしてエネルギー転換（気体あるいは固体のエネルギー資源を液体として使う、あるいは電気に変換して使う等）の技術的メリットとデメリット、技術進歩の予測が、たいへん重要であると再認識されることとなった。エネルギーの貯蔵技術も、余剰のエネルギーを最大限利用するために重視されるようになった。

2. 供給国と需要国

2.1 石油供給の動向

石油の供給に関しては、埋蔵量（特に確認可採）と可採年数（R/P ratio）が注目され、石油価格の動向にも影響を与えてきた。表2を見ると明らかなように、毎年生産を続けている分だけ既存の埋蔵量は減少するはずであるが、多くの国では埋蔵量が1994年に比べて2014年には増大している。減少しているのは、世界の埋蔵量15位までの国のうち、順位6番目のロシア、8番目のUAEのみで、他の諸国の埋蔵量は増大している。

石油の埋蔵量の数値が増大した理由は、埋蔵量の定義の見直しが行われ、埋蔵量に含めてよい範囲の拡大が行われ、³⁾ 従来、重質で、在来型の石油とは異なると分類されたベネズエラの

表 2 石油埋蔵量の推移と可採年数

(単位：10 億バレル，年)

		1994	2004	2014	R/P ratio
1	Venezuela	64.9	79.7	298.3	*
2	Saudi Arabia	261.4	264.3	267.0	63.6
3	Canada	48.1	179.6	172.9	*
4	Iran	94.3	132.7	157.8	*
5	Iraq	100.0	115.0	150.0	*
6	Russian Federation	115.1	105.5	103.2	26.1
7	Kuwait	96.5	101.5	101.5	89.0
8	United Arab Emirates	98.1	97.8	97.8	72.2
9	US	29.6	29.3	48.5	11.4
10	Libya	22.8	39.1	48.4	*
11	Nigeria	21.0	35.9	37.1	43.0
12	Kazakhstan	5.3	9.0	30.0	48.3
13	Qatar	3.5	26.9	25.7	35.5
14	China	16.3	15.5	18.5	11.9
15	Brazil	5.4	11.2	16.2	18.9
	Total World	1,118.0	1,366.2	1,700.1	52.5

(注) * は百年を超える可採年数があることを示す。
(資料) BP 統計 2015 年版データより筆者作成。

オリノコータル，あるいはカナダのオイルサンドが石油埋蔵量に加えられるなどしたことで，多量の埋蔵量が増えた国が出現している。

石油の資源量に関しては，シェールからの生産が上積みできれば，今後も石油を使い続けることは可能で，さらに，天然ガスの利用を図ることで運輸用を含めて化石燃料の利用は続いていくと考えられている。中長期の見通しにおける OECD IEA, US DOE EIA, OPEC, シェル，エクソン等の見通しにおいても，運輸用の内燃機関の自動車での石油利用は，今後も続くとの見通しとなっている。既存の車づくりのシステムを利用しつつ，ハイブリッドカー，電気自動車，水素自動車等が競う状況が続くと考えられており，その場合でも，ハイブリッドカーでは石油消費量は個々の自動車ではおよそ半減するが，世界全体として自動車台数が大幅に増えるのであれば，石油消費量はむしろ増大に向かうことを意味している。

上記のような埋蔵量の定義の見直しが行われ，しかもシェール層からの生産が世界各地で可能となっていくと予測される状況下では，可採年数 (R/P ratio) の多寡を議論して一喜一憂していても，世界全体の動向を把握したことにはならない状況がある。

埋蔵量に関しては，ホテリング・ルール (Hotelling, 1931) が以前から重視されてきており，枯渇性資源に対しては，利子率と同じ程度で価格が上昇することが適切な価格付けであるとホテリングは述べる。しかし，2000年代に生じた石油価格の急上昇により1バレル160ドルを付けた状況などを見ると，利子率云々による説明を超えた要因が価格を乱高下させていると言わざるを得ない。ホテリングの理論に対しては，Laherrere (1995) が述べるように，利子率よりもあまりにも大きく上昇あるいは下降した価格は，その後，価格変動の趨勢トレンドが急激に変化し，推移の線が折れるようにして

変動せざるを得ないとの研究も行われている。

また、次のような事実も考慮しておく必要がある。それは、油田・ガス田の生産においては、ピーク生産量を設定し、その設定した生産量を維持できるように生産設備が設計され、建設されるという点である。埋蔵量を見つづ、同一の生産量をできれば何年にもわたり維持できる規模で生産設備を建設し、その設備を高い稼働率で動かすことが目指される。とすると個々の油田を考えた場合には、生産量は本来フラットで一定量が毎日、毎月、そして毎年生産できることが望ましいことがわかる。このように見てくると、枯渇性資源である石油の生産の減退のトレンドは、一定量の生産を数年から10年以上維持したあと、大きな減退に見舞われるというほうが、生産設備の稼働状況とは合致していることになる。

2.2 ガス供給の動向

天然ガスは気体であり、そのため輸送にはパイプラインを用いるか、あるいは海上で運ぶためにはマイナス162度まで冷やし液化したLNG（液化天然ガス）として専用船での輸送が行われている。石油と異なり、利用できるようにするまでの設備投資が多くかかる点が特徴である。

ガスに関してはOPECのような一定の存在感を持った輸出国の組織は出来上がっていない。これは、パイプラインで送るということは、そのパイプラインが繋がった相手に売ることを意味しており、売り買いの相手が固定され、したがって売り手と買い手はお互いに利害は異なる（より高く売りたい、より安く買いたい）ものの、売り買いを継続させないと、お互いに損するという関係があるため、最後には妥協せざるを得ない関係があるためである。天然ガスの売買においては、自己への供給者、自己からの購買者との特別な関係こそが重要となる。自分と直接関係のないガスの購買事例は、参考にはするものの、その取引結果が直接の利害を生じさせるわけではない。

したがって、パイプラインで繋がらない他者との関係は、ガスの取引価格に関しては参考となっても、直接的に重要なのはパイプラインを経由して供給・受領する両者間の関係のみである。

しかも、供給設備の建設にコストがかかるために、ガスの供給者側は、その投下した資本コストを回収するために、需要者側に必ず一定数量を引き取り、引取らない場合でもその分のコストを支払うようにとの契約「テイクオアペイ（Take or Pay）」の締結を求めるのが一般的である。

LNGによるガスの輸出入量を見た場合、20年さらには30年という長期契約に含まれずに、スポットものとして短期の契約（LNG船1杯分等）で供給されるガスの量は、LNGとして世界で輸出入されるガス量のおよそ1割程度に止まっている。

天然ガスの埋蔵量の国別の世界ランキングを15位まで見ると、2014年末の順位では、イランが第一位であり、続いて、ロシア、カタール、トルクメニスタン、米国、サウジアラビア、アラブ首長国連邦、ベネズエラ、ナイジェリア、アルジェリア、イラク、中国、インドネシア、カナダの順となっている。

上位の3カ国が世界計に占める比率は49%に達しており、上位国に多量のガスが埋蔵されている傾向がある。石油と比べて、天然ガスにおいて、世界の埋蔵量の上位国が占める寡占度はむしろ高いと言える。ただし、石油と比べると、ガスは多くの国に広く分布していることも確かで、しかも重要な点は、表3を見ても明らかのように、多くの国で埋蔵量が年々増大する傾向が見られる点である。この埋蔵量の増大は、技術の進歩、シェールガスのような新たな層からの生産が可能となったこと、深海、砂漠地、極地のような今まで探査が行われてこなかったところにおいても埋蔵量が次第に確定されるようになってきたことが影響している。

エネルギー消費において、天然ガスが極めて大きな役割を果たしている国がある。まず、米

表3 天然ガス埋蔵量の推移と可採年数

(単位：兆立方メートル，年)

		1994	2004	2014	R/P ratio
1	Iran	20.8	27.5	34.0	*
2	Russian Federation	n/a	31.1	32.6	56.4
3	Qatar	7.1	25.4	24.5	*
4	Turkmenistan	n/a	2.3	17.5	*
5	US	4.6	5.5	9.8	13.4
6	Saudi Arabia	5.3	6.8	8.2	75.4
7	United Arab Emirates	6.8	6.1	6.1	*
8	Venezuela	4.0	4.3	5.6	*
9	Nigeria	3.5	5.2	5.1	*
10	Algeria	3.0	4.5	4.5	54.1
11	Australia	1.3	2.3	3.7	67.6
12	Iraq	3.1	3.2	3.6	*
13	China	1.7	1.5	3.5	25.7
14	Indonesia	1.8	2.8	2.9	39.2
15	Canada	1.9	1.6	2.0	12.5
	Total World	119.1	156.5	187.1	54.1

(注) * は百年を超える可採年数があることを示す。

(資料) BP 統計 2015 年版データより筆者作成。

国においては、天然ガス消費量が、石油および石炭消費量を上回っている。

先に表1で示したように、米国のエネルギー生産量は天然ガスが668.2百万トン（石油換算、以下同じ）、石油が519.9百万トン、石炭が507.8百万トンとなっている（2014年実績データ、BP統計2015より）。

天然ガスの消費量が、石油あるいは石炭を上回る国は、ロシア、カタール、ノルウェー、アルジェリアといった天然ガス資源が豊富に埋蔵された限られた諸国に止まっており、米国のような国内のエネルギー消費量が極めて多い国で天然ガスの生産量がカロリー等価で、石油および石炭を上回っているという状況は、極めて特徴的（あるいは特異）な状況であると言わざるを得ない。こうした状況は、米国内の天然ガスパイプラインの敷設の長さが世界中で抜きん出て長く、そのために天然ガスが本土48州内、あるいはメキシコ湾岸のガルフ地域で発見され

た場合には、比較的容易に近くを走っている既存のパイプラインに繋ぎ込み、ガスを売ることができ、ガス開発がビジネスとして身近であることも影響していると考えられる。

2.3 石炭供給の動向

世界の石炭埋蔵量の多い上位3カ国である米国、ロシア、中国の石炭埋蔵量の合計は、世界全体の57%を占める。このように石炭の埋蔵量を比率として見ると、石油および天然ガスを上回って多量の石炭が上位3カ国に集中している。

ただし、石炭の埋蔵分布の状態についてOECD諸国の側から見ると、石油の場合のようにOPECに埋蔵量が集中している状況とは異なっており、石炭は、米国に世界の埋蔵量合計の26.6%が存在しており、その他、オーストラリア、ドイツ、カナダ等の西側先進国にも多く埋蔵されている点が異なっている。

確かに石炭は環境面でCO₂排出量が、石油および天然ガスに比べてカロリー当りで多いといった使い難い面はあり、環境対策費も多くかかるものの、エネルギー安全保障の観点から見て、一定の量は使えるようにしておくことが望ましいエネルギー資源であることは間違いない。特にこうした石炭利用の維持という観点において、日本における石炭利用が継続してきた歴史を見ればわかるように石炭を使い続ける意義は確実に存在すると考えられている。^{iv)}

一方、ドイツのように表4で世界第6位という多量の埋蔵量を持つ国では、石炭火力発電に従来から大きく依存してきた状態から、自国の有望炭田が次第に枯渇してくるのに合わせて、石炭火力発電への将来の依存度を引き下げるプランを作成すれば、CO₂排出量が次第に減少していく絵を容易に描くことが可能となる。

次に、日本の石炭の利用状況を確認する。

日本にとって石炭の2大供給国はインドネシアとオーストラリアであるが、オーストラリアの埋蔵量の世界でのシェアは8.6%であり、インドネシアは世界第10位の3.1%に過ぎない。それでも多量の石炭輸出を日本向けに行っており、世界の3%ほどの埋蔵量を保有する国で

も、多量の輸出が可能なほど石炭資源は豊富に地球に存在していることになる。

先に表2および表3で見たように、石油と天然ガスにおいては100年分を超える埋蔵量を保有する国の数は限られていたが、石炭に関しては、表4の注で示すように、100年超の埋蔵量の保有はそれほど珍しくない。なお、500年分を超える石炭埋蔵量を保有する国はさすがに少ないが、それでも、表4で示す埋蔵量15位までの国のうちでは、ウクライナとブラジルの2カ国が500年超となっている。

石炭の炭種によってカロリー数が大きく異なる点も注意が必要である。日本の現在の輸入炭のカロリー数は、1kg当りで、原料炭で6,877 kcal、一般炭で6,203 kcal、無煙炭で6,642 kcalとなっている（省エネルギーセンター、2015, p. 369）。低品位炭においては、水分含有量が多くなる傾向がある。

石炭の輸出量を見ると、先に表1で示したように、オーストラリアとインドネシアが世界の2大供給国で、それぞれ石油換算2億トンを超えている（2014年実績データ、以下同じ）。その他の輸出国としては、ロシアが8千万トン台であり、南アフリカ、米国、コロンビアが5

表4 石炭埋蔵量と可採年数

(単位：百万トン)

	無煙炭、瀝青炭	亜瀝青炭、褐炭	合計	世界シェア	R/P ratio
1 US	108,501	128,794	237,295	26.6%	262
2 Russian Federation	49,088	107,922	157,010	17.6%	441
3 China	62,200	52,300	114,500	12.8%	30
4 Australia	37,100	39,300	76,400	8.6%	155
5 India	56,100	4,500	60,600	6.8%	94
6 Germany	48	40,500	40,548	4.5%	218
7 Ukraine	15,351	18,522	33,873	3.8%	*
8 Kazakhstan	21,500	12,100	33,600	3.8%	309
9 South Africa	30,156	-	30,156	3.4%	116
10 Indonesia	-	28,017	28,017	3.1%	61
11 Turkey	322	8,380	8,702	1.0%	125
12 Colombia	6,746	-	6,746	0.8%	76
13 Brazil	-	6,630	6,630	0.7%	*
14 Canada	3,474	3,108	6,582	0.7%	96
15 Poland	4,178	1,287	5,465	0.6%	40
Total World	403,199	488,332	891,531	100.0%	110

(注) * は5百年を超える可採年数があることを示す。

(資料) BP 統計 2015年版データより筆者作成。

千万トン台となっている。日本の2大輸入先のオーストラリアとインドネシアが、世界の石炭輸出入量の2位と1位であることから、石炭は、基本的に輸出入量は、世界全体の消費量に比べると小さくなく、自国で生産した石炭は自国内で消費するのが基本となっている。世界の石炭の輸出入量は、全体の生産量のうちの1割程度で推移してきている。

世界的に見ても、北米、欧州、ロシアでは石炭消費量は減少傾向にあるものの、アジア地域では、中国、インドを始めその他諸国においても石炭消費量の増大傾向が顕著となっている。その他、アフリカ、中南米においても石炭消費量は増大する傾向が見られる。

石炭消費に伴う硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)の排出量の抑制については、脱硫、脱硝、電気集塵機等の設置により排出の大幅抑制(90%から95%を取り除く)が可能となっている。課題となるのはCO₂排出量の抑制であるが、石油、天然ガス、その他の発電用エネルギー源と比べても常にはほぼ一貫して安価な発電源である石炭の魅力は大きい(Banks, 2000, p. 113)。

地球環境問題に関して、世界的な合意に達することはたいへん難しいという動向が存在している点も、石炭消費を考えるに際して踏まえておく必要がある。石炭価格は安く、石炭火力を導入すると電力価格を安価に設定することができ、産業の競争力の育成・維持に有力な政策となる。このため、これから発展しようという途上国においては、広く石炭火力の導入が計画されている。多数の石炭火力の稼働開始は、明らかにCO₂排出量の増大に結びつく。CO₂排出量の削減義務を負ってこなかった発展途上国においては、自国だけが削減義務を負うことは政策選択として有り得ず、何らかの補償(あるいは援助)がない限り、CO₂削減に取り組むインセンティブを持たない。こうして、自国だけでも出来るだけ早期に石炭火力を導入したいと各国のプロジェクトが目白押しで、それぞれが成立を急ぐという状況が、2015年現在、生じてい

る。石炭火力の導入を抑制するためには、途上国が要求する資金的な援助、補償ができるかという問題にたどり着いてしまう。

3. 歴史的考察と将来課題

3.1 石油市場の構造変化

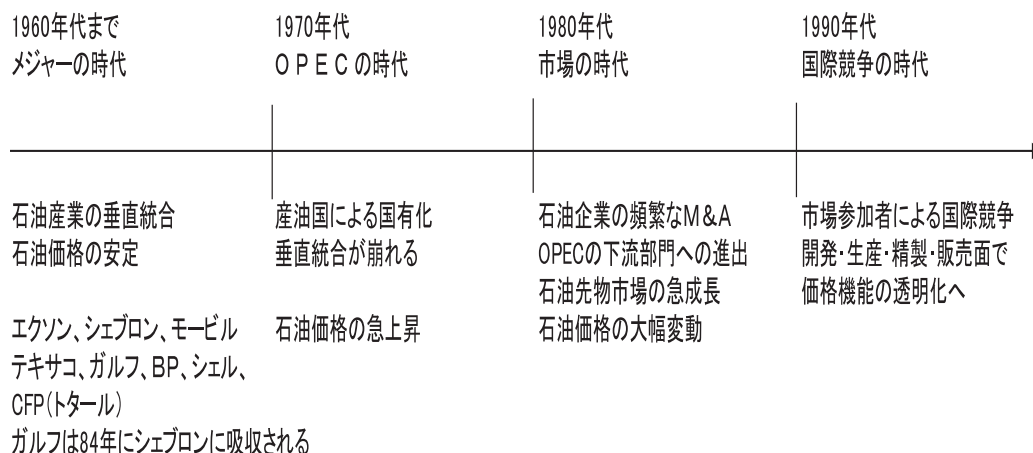
エネルギー資源の供給に関する歴史的な考察を、本章では行ってみる。図1で示すように、世界の石油市場は1960年代から、およそ10年ごとに市場の構造を大きく変えてきていると言える。

1960年代までは欧米の石油メジャーが世界の石油産業を牛耳った時代であり、世界の石油需給および価格を、ともに決定する力をこれら石油メジャーが保持した。

石油資源の価値に目覚めた産油国がOPECを結成するのが1960年であり、当初はサウジアラビア等の5カ国により設立されたが、次第に加盟国も増え、1970年代には産油国による自国石油産業の国有化も実施されるようになる。1973年、1979年と二度にわたり発生した石油危機(産油国にとってはオイルブーム)により、OPEC諸国は結束して石油価格の上昇を成功させることができ、1960年代までのメジャーの時代を終焉させ、OPECが石油価格の決定において卓越した力を持つ時代が1970年代に訪れた。

続いて、1980年代には、市場の時代と呼ばれるように、石油市場が発達を遂げ、特に先物市場が開設されたニューヨークとロンドンで、石油の取引高が増大した。世界で石油が取引される際の価格は、これら先物市場の期近先物価格に従うようになっていった。OPECが公示価格を設定して価格決定権を持った1970年代は過去のものとなってしまった。

さらに1990年代に入ると国際競争の時代と呼べる市場参加者による競争が、ITと通信技術の発達に伴い生じることとなった。こうした1990年代から始まったグローバル化の動きは、2000年代に入ってもさらに続いていると見な



(資料) 武石 (2015) 『やさしく石油経済』 p. 70.

図1 世界の石油市場の構造変化

すことができる。

こうして発達してきているのが先物市場の利用である。先物市場では、期近ものから毎月、さらに3年程度までの価格の推移が、先高、先安として示され、石油現物の引取りも希望すれば可能なほか、現物取引を行わないで手仕舞いすることも可能となっている。こうした手段が存在するために、石油会社、ガス会社、運輸会社等の実需筋である現物取引を求める先物市場参加者に加えて、投機家である金融機関、ブローカー等も市場への参加が可能となり、市場取引の厚みが増すことで、売りと買いの取引高が増大し、先物市場での取引の信頼性の向上にも役立つ効果が得られている。

3.2 天然ガス価格の動向

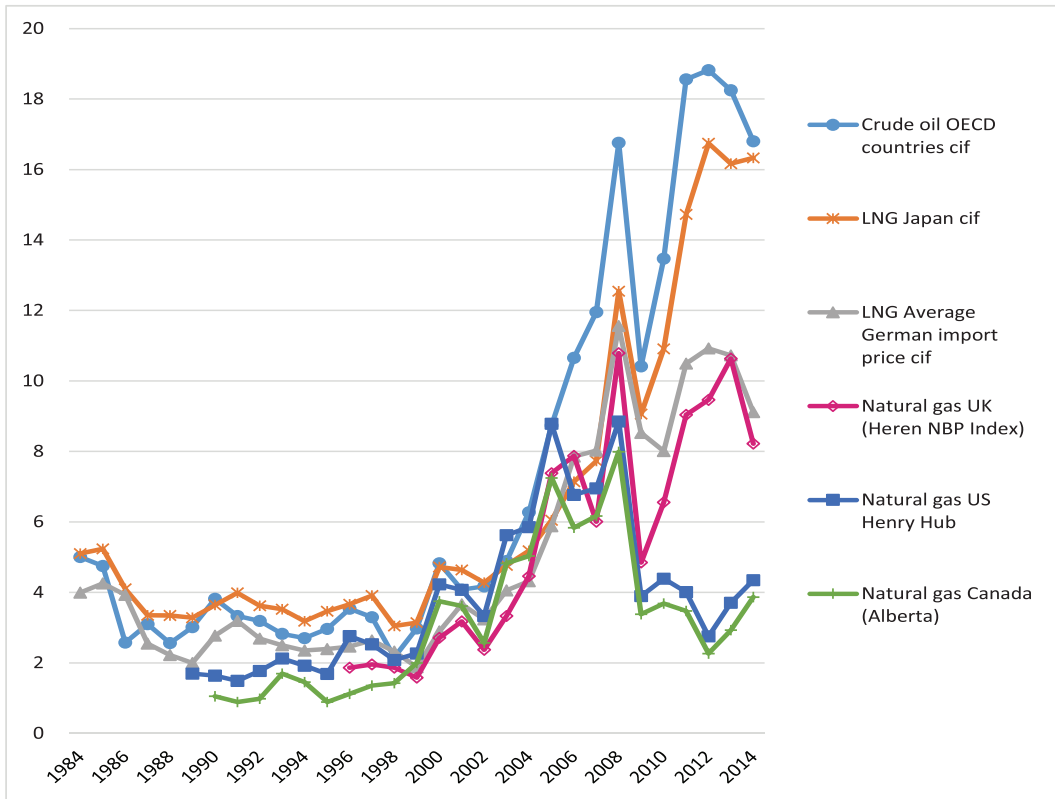
図1で示したように、1980年代から石油取引は市場の時代に入ると分類できる。1970年代に高騰した原油価格は、消費国における需要抑制を生じさせ、価格の決定権が次第にOPEC側から欧米の取引市場に移り、世界の石油需給の状況を反映しつつ決定していく方向に変化していった。

天然ガス価格について見ると、図2で示すように、原油価格が急上昇を遂げる2004年頃ま

での間は、LNG、パイプラインガスともに価格にそれほど大きな差異は生じていない。大きな差異が生じるのは原油価格が高騰する2004年以降で、原油価格にスライドする形で日本向けのLNG価格が高騰している。一方、欧州向けのLNG価格は日本と比べると半分程度の価格に止まっている。価格が安いのは米国とカナダのガス価格で、2006年、2007年頃までいったん上昇した後、百万BTU当たり4ドル程度の価格で推移している。日本向けLNG価格と比べると4分の1、欧州向けの比べても半額という価格に止まっている。

天然ガス価格は、原油価格の影響を受けて変動しており、アジア向けのLNGは、原油価格の変動次第で上下する契約フォーミュラを用いている。

世界の他地域の価格よりもあまりにも高い値段でガスを買って続けた日本の消費者・輸入事業者（ガス会社、電力会社）は必ずや何らかの調整（あるいは構造改革）を迫られることは必然であると、こうした価格差を示す図を見ると予測することができる。輸入ガス価格が高いということは、国内の電気代が高く、また産業用・家庭用のガス価格も高くなりすぎるを得ないことを意味する。



(単位：ドル／百万 BTU)

(資料) BP 統計 2015 年版データより筆者作成。

図 2 天然ガス価格および原油価格 (OECD 輸入平均) 推移の比較

世界のガス価格の形成について確認しておくことにする。

LNG 価格はアジア向けの価格は、原油価格の上下に従いながら変動してきており、S 字を描いて、原油が高騰しすぎた場合にはガス価格は上がるものの、上がり幅を押さえ、また原油価格が暴落しても、下がり幅を抑える契約が従来から採用されてきた。2015 年現在では、原油価格が 40 ドル／バレル程度まで大幅に下落しており、LNG の輸入価格も欧州並みの 10 ドルを下回る程度まで下落している。将来の価格予想を行いながら、価格フォーミュラの適正化を図っていく必要性が特に消費国側に強く存在している。

一方、北米のガス価格は、先物市場の価格次

第で変動しているが、米国から始まったシェールガス革命の効果でガス生産量が豊富にあるために、ガス価格は 2015 年現在でも 4 ドル／百万 BTU を下回る程度で推移している。

欧州では、ガス供給源の多様化が図られてきており、ロシアへの依存度を 3 割以下にするべく、LNG 輸入、パイプライン輸入、それにノルウェー等の北海からの欧州域内からの生産を組み合わせ、安定供給かつ価格も抑制することが目指されてきた。

このようにガス取引において、世界的に市場の役割は確かに拡大してきているが、エネルギー資源の存在そのものが、大きな意味を持つことがある。例としては、オランダの北部にフローニンゲンガス田という大型のガス田が存在

するが、このガス田があることで、欧州諸国においては、オランダが、ガスのスイング・サプライヤー役を果たしてきており、ガス価格が高騰したときには、その価格沈静化を図る効果を持つと指摘されている (Banks, 2000, pp. 92-93)。

3.3 将来展望と課題

2000年代初め、特に2004年の米国ほかによるイラクへの侵攻開始とともに上昇した原油価格の高騰が、その後、2000年代後半から2010年代半ばまでの1バレル100ドルを超える原油価格の高止まりを招くこととなった。エネルギー価格が将来的にどうなるか、エネルギー源として何に依存すべきかに、世界の関心が集まることとなった。

エネルギー価格の高騰は、世界政治の動向が大きく影響しており、高止まりが続くかどうかは、世界経済の将来展望とも密接に結びつく。各国の政治の動向とエネルギー供給の動向との関係、紛争、戦争等の状況に関しても関心が高まることとなった。

しかも、安全保障上、高騰するエネルギー価格への対抗策は有り得るのか、輸入量の増大と対外依存度が高止まりする状況を軽減する方策はないのか、対抗策となる技術的ブレークスルーは存在するかが大きな課題とされた。既存のエネルギーである化石燃料の石油、天然ガス、石炭において技術革新が可能かどうか、新たに導入すべき技術・制度・システムはどのようなもので、その導入のインパクトはどの程度かが問題となった。さらに、再生可能エネルギーに関しても、いかなるブレークスルーが生じ得るのか、将来の技術進歩の予測が重要となった。

エネルギー価格の高騰により、エネルギーの輸入国においては対外的に支払うエネルギーコストが膨大なことから、そうしたコストを減らすために社会システムを変える必要があるならば、そうした変更をしてでも新たに組み直すべき社会システムはどのような形で、そうした社

会システムを支える社会構造の変化も求められるものなのかが話題となった。エネルギー輸入コストは金額として大きく、その一部を振り向けるだけで資金が捻出できるため、制度のあり方、社会構造そのものまでも変更することが必要であるならば、その変更も検討課題となってきたのである。

こうした検討を開始するにあたって、そもそも必要となるのは、中長期の将来予測が一定程度の確度で見積もることが可能かという点である。

4. エネルギー資源選択

4.1 長期エネルギー需給見通し

日本では2015年7月に、「2030年を見通した長期エネルギー需給見通し」が決定・公表された。本来は3年ごとの見直しにより2013年には第3回目の需給見通しの見直しが策定されるはずであったが、2011年3月11日の東日本大震災の発生を受けて、原子力発電の全面停止が生じ、電源構成に大きな変化が生じたため、2年遅れの策定となった。

今回は特に、望ましい電源構成のあり方をめぐって様々な意見が出された。発表された2030年の総発電電力量の数値としては、液化天然ガス (LNG) が27%程度、石炭が26%程度、再生可能エネルギーが22～24%程度、原子力が22～20%程度との予測となっている。水力、太陽光、風力などの再生可能エネルギーの合計が、若干原子力を上回るという数値が設定されている。

総エネルギーの供給量に関しては、2030年で石油が30%程度、石炭が25%程度、天然ガスが18%程度、その他再生可能エネルギーと原子力の合計が24%程度と見積もられている。

総エネルギーの供給量は、石油が43.9%、石炭が25.8%、天然ガスが24.1%、水力を含めた再生可能エネルギーが6.1%を占めている (2013年データ)。2030年に向けて、石油の比率は減少し、石炭は横ばいとの設定となっている。今

後、原子力が一部再稼働することでガス火力の比率は減少し、その他再生可能エネルギーの比率は次第に増大するとの内容が政府の長期エネルギー需給見通しとなっている。

上記が、政府が設定した需給見通しであるが、日本が使用するエネルギーの内訳（ベストミックス）として、どのような構成となることが望ましいかに関しては、様々な主張があり得る。この議論を行うに際して、エネルギー価格がどう推移するかも大きな要素となる。2015年8月現在生じたように、米国での石油取引での指標原油であるWTI（ウェストテキサス・インターメディアート）の価格が1バレル40ドルを下回るというように低下した状況では、石油価格が安いために石油に競争力が出て、世界的にも石油の消費量は従前の予測よりも増大すると予測されるようになる。

エネルギー資源の価格は日々変動しており、ある時期に有利だからと導入した燃料設備・発電設備が将来に向けて競争力を持続けることができるかは、エネルギー価格次第の面があり、将来価格に関しては、予測は極めて難しいという状況がある。

しかも、エネルギーをめぐる世界の市場動向は、エネルギーの種類ごとに異なっており、あるとき安価で競争力があるエネルギー資源が将来的にも利用可能かどうか、選択される資源であるかどうかは不確かである。個々の国・産業分野・企業ごとに千差万別となっていて、選ぶべきエネルギーは異ならざるを得ない。

4.2 固定価格買取制度（FIT）と新エネ導入

上記の長期エネルギー需給見通しの議論に加えて、2012年7月より、日本では新エネルギーの固定価格買取制度（FIT）が導入されている。FIT制度対象の新エネルギーの既導入量は、2015年4月で2千万kWを超え、発電量は年間で400億kWhを超え、日本の全電力需要量1兆kWhの4%に当たる量となる。さらに同じく4月現在の認定済み量を加えると新エネルギー合計の設備容量は8千万kWを上回るに至ってい

る。FIT制度の開始により、特に太陽光発電の導入が急速に進んでいるが、今後もさらに増大して、太陽光の単独で日本の全発電量の1割を超えるると予測されている。しかも、日中の一定時間に過大な発電を太陽光が行ってしまうことも懸念される状況となっており、蓄電、あるいは遮断も重要となると考えられる。

このFIT制度のように政府が一定の優遇・促進制度を導入することで、新エネルギーの導入量が大幅に増大する効果が生み出されることがわかる。

優遇制度の導入により、当然、課題も同時に生じることになる。2015年4月現在、太陽光発電のみでFIT認定量の90%を占めてしまっており、風力、中小水力、地熱、バイオマスを合わせた比率は10%に過ぎない。様々な新エネルギーを導入しようとの目論見は成功していない。今後、太陽光発電で見られたような飛躍的な新エネルギーの増大は、太陽光発電以外では短期間では難しい状況がある。

これはまず第一に、電力の購入価格面で新エネルギーを優遇すると、その価格が割高であることにより、電力価格の上昇を不可避にもたらしためである。大量に導入しようとするのであれば、電力の買い取り価格を高いままにすれば、飛躍的増大が達成できるが、それでは電力価格が5割増し、さらには2倍にも高騰し、日本の産業が、電力の高コストにより競争力を急速に失うことになる。太陽光発電の一時的なブームに浮かれることなく、エネルギー供給の全体のバランスを考慮しつつ、新エネルギーの導入を一歩一歩進めることが重要となると考える。

例えば風力発電について見ると、導入量を増やすためには送電線の着実な効果的な増強を毎年進めることが重要である。ただし、短期間では難しく、20年あるいは30年をかけた、毎年の増強を進める粘り強い努力が必要となる。

燃料についても、徐々に、植物起源のエタノール（ETBE）を、例えば3%までガソリンに混ぜる等、ゆっくりとした取り組みを進め

て、化石燃料への依存度を抑制する努力が続けられているが、これも数パーセント入れるだけで多くの年月を費やす大作業である。

熱需要への過大な期待も禁物である。多量のまとまった熱需要を持つ、工場、病院、大規模ショッピングセンター、オフィスビル等の施設では、大方のところすでにコージェネ設備は導入済みである。新規の多量の熱需要を満たすためにコージェネ施設等が果たす役割は実はそれほど大きくない。新規の地域開発など、新たな計画の立案とともに導入する需要の創出を待つ必要がある。

また、バイオマス利用に関しては、森林保有者の多くが、伐採適期を迎えた森林に関して用材（例えば柱材）としての販売を期待しているが、用材需要の急増は難しく、合板等の用途として切り出すとともにバイオマス発電しようとしても、急造の新規プロジェクトでは市場参入は容易でない。

次に例えば、洋上風力の導入を考えた場合も、風況を踏まえた導入予測を行い、港湾の整備、領海内での設置ゾーンの区分け、用地リースの入札、洋上風力の設置事業者へ義務付けと監視・情報の公表等の様々な業務が、政府が大きな役割を持つ中で行われていく必要があると思われる。

4.3 電力制度改革と今後のエネルギー政策

上記したように、新エネルギーの導入が図られる一方で、日本では電力制度改革が進められている。FIT制度、電力制度改革、エネルギー・ベストミックスの議論は、一つずつ順に進めることができることができればよかったのであるが、スケジュールとして、これらの議論を同時に進めざるを得ない状況にあった。

FIT制度は、欧州諸国などと比べて今や見劣りした新エネルギーの導入比率を一気に引き上げる効果は明らかにあった。ただし、太陽光発電という、設置期間が短期間で、環境アセスメントも不要な規模での導入ばかりに集中してしまう結果が生じてしまった。

風力発電では、FIT導入に合わせるように、環境アセスメント制度の強化が行われた。詳細なデータの提出（バードストライク等）を求められるために、いったん設置申請がゼロとなるという大きな影響が出た。地熱発電は、実施場所の了解をとるために20年といった長期間を要しており、FIT制度が開始されたからといって急に立ち上げはできなかった。

バイオマス発電に関しても、FIT制度の導入が検討される前から、製材工場、合板（プライウッド）工場が稼働しているところで、すでにバイオマス発電が計画されていた地点で、FIT制度が開始となったために、FIT制度の恩恵により収入が向上した所で、数カ所が立ち上がったのが最初であった。森林があるからと、ゼロから開始してもバイオマス発電の立ち上げは難しかった。元々、山から木を切り出すサプライチェーンが存在しないところで、FIT制度が出来たためにバイオマス発電を始めようとしても、そもそも人材が全く不足していることを痛感させられることとなった。

このように事前に遊休地の利用に関する交渉を進めていたところ、あるいは森林の利用に取り組んでいたところでは、FIT制度導入の恩恵を受けることが出来たが、FIT制度があるから何か取り組みをしたいと考えた地域では、準備不足でプロジェクトの成立には間に合わない事例が頻出することとなった。

今後は、エネルギー・ベストミックスの目標値を一度設定したとしても、原子力も含む様々な技術進歩の動向、あるいは世界のエネルギー市場の動向次第で、適宜、柔軟な見直しを行っていくことが必要となるのは間違いない。技術的ブレークスルーがあれば、予測されなかった部分で急速に新技術の導入、コスト急減、コスト競争力の増大が生じる可能性があり、一度出した政府見通しがそうした技術進歩を受けて目標数値が変わっていくことを、柔軟に受け止めることが重要となる。

5. 用途別の考察：産業用・建物用・ 運輸用・電力用

5.1 産業用エネルギー消費

エネルギーの対GDP比の消費効率（エネルギー原単位）は、今後も世界の各国で向上していくことは間違いない。同じだけのGDPを得るために必要となるエネルギー消費量は、今後も多くの国で減少傾向をたどると予測できる。モノ作りをしている産業分野では、厳しいコスト競争を今や世界的規模で行っており、環境面に配慮するとともに、消費エネルギー量の削減に凌ぎを削っている。世界の勝ち組企業のエネルギー利用効率は、間違いなく最高レベルにあると言える。

製品のライフサイクルアセスメントの向上が今後も図られていき、設備設計のコンセプトがよりスマート、グリーンといった言葉に見合うように変更されていくことで、排熱の有効活用、熱電併給（コージェネ）、配管の設置に対する工夫、小型化を試みること、リサイクリングを進めるというように、様々な試みを進めることが産業用のエネルギー消費のいっそうの高効率化という効果を生むと考えられる。

5.2 建物用エネルギー消費

ここでは主として建物のエネルギー消費量の削減の可能性を検討する。エネルギー消費量を飛躍的に削減できる可能性が高いのは、新規に設計・建設される建物で、全体を見つつ統合された設計デザインを導入することで、多くの場合、エネルギー効率が大幅に（例えば2倍等に）向上する効果が米国ではあるとされる（ロビンズ、2012、p. 178）

米国には1億2千万の建物があり、これらの建物が米国のエネルギーの42%、電力の72%を消費している（同上、p. 182）。これらの建物に最新のエネルギー効率向上、環境負荷軽減を目指した設備を導入すると、エネルギー効率は3割から4割も向上すると見られている。こ

うした省エネ投資は、建物の価値を高め、省エネ投資と思ったものが、投資回収が可能な、積極的に利益を生み出す投資活動となる状況がみられるとされる（同上、p. 182）。

商業用・事務用ビルでは、一人当たりの床面積は日本においても増大する傾向があり、しかもパソコン等の電子機器は一人一台が当たり前の世界となってきており、電子機器からの発熱も必然的に生じていて、空調の役割は以前にも増して重要である。

ドイツ人のボルフガング・ファイストがパッシブハウス運動を始めているが、ドイツでは2万軒を超える学校、商用ビル、集合住宅、住宅への普及が進んできている（同上、p. 215）。冬季に寒冷なドイツにおいても暖房用の炉を不要とするなど、冷暖房システムの規模とコストの圧縮を図るライトサイジング手法が達成されているとの報告がある（同上、p. 215）。

建物のエネルギー効率を引き上げるためには、政府が率先して建物の基準の強化に取り組む必要があると言える。建設業界は、断熱を含めた規制の強化には、コスト増を招くとして反発するケースが多いが、ただし、中長期的に見ると、規制が強化された方が建設業界の競争力も強化されて、結局は自社の利益に結び付く可能性が高いと考えられる。上記の、パッシブハウスの事例に関しても、当初はコストが高くつく場合があっても、次第にコストは低下して、標準装備となるまで普及することが十分に予想できると見られている（同上、p. 251）。

5.3 運輸用エネルギー消費

石油消費量は、運輸用の消費量が伸びると考えられるために、世界的に見ても、今後も増大していくと予測されている。一方、発電用に石油専焼の発電所を新設することはOECD加盟諸国では避ける（あるいは禁止）との取り決めがなされている。

運輸用のエネルギーとして石油以外のものが選択されるかどうかで、石油消費量の将来予測は全く異なってくる。先進国では、次第にハイ

ブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車の導入台数が増えつつあるが、未だガソリン車を皆代替するまでには至っていない。ハイブリッド車はガソリンの消費量をほぼ半減できる効果を持つが、それでも石油消費への依存があると言う点では変わりはない。既存の石油供給インフラが存在するからこそ、ハイブリッド車の普及が進んでいると言える。自動車は、今後も炭素繊維なども用いながら軽量化が進み、燃費の向上が図られていくと予測される。

トラック、航空機に関しても、石油以外の燃料（液体としてのLNG、気体としての天然ガス、水素、バイオマス燃料等）の利用がどこまでできるかが試行されていくと見られる。

5.4 電力用エネルギー消費

日本では電力制度改革が進行中で、第1段階として、電力会社の“送電網の広域運営機関”が2015年度に設置され、さらに、2016年に第2段階としての“電力小売の全面自由化”、2020年で第3段階としての“発送電分離”が行われるスケジュールとなっている。

電力供給は、通信・運輸システムとともに、国の基盤となるインフラであり、ICT化が進んだ現在、一瞬でも電力供給が停止することは大きな損害を生じさせてしまう。

電力供給においても、実際の電力の搬送と並んで、あるにはそれにも増して、電力情報の通信系の役割が重要となってきている。

また、分散型の発電の果たす役割が次第に増大する点も、従来の電力供給システムへの更なる変更を迫ることとなる。従来型は、大規模発電所から送電し、次第に電圧を下げるステップダウンを経ながら電力消費者に電力供給を行うという形態をとってきた。しかし、分散型電源のシェアが全体の1割、さらに2割と増大していくに従って、太陽光のように出力が変動する電源の占める割合が増え、そのため、供給側のみでは需給の調整が難しくなっていく。需要側においても電力消費量を調整するようにシステムを変更していく必要が出てくる。

再生可能エネルギーの導入量が増大することは、燃料費がかからず、CO₂排出量も抑制できるという点でたいへん望ましい。ただし、再生可能エネルギーのほとんどは、発電・売電を目指して導入されており、既存の発電設備とのコスト競争の中で導入が促進されるためには、導入コストの低下が必要となる。

しかも、再生可能エネルギーのうち、水力であれば大規模な発電が可能な場合があるが、そのほかの再生可能エネルギーでは、バイオマスで1基5千kW程度の発電が出来るものがあり、また風力のウインドファーム、太陽光のメガソーラーでは、バイオマスと同じくメガワット(MW = 千kW単位)規模のものは存在する。ただし、ガス火力、石炭火力、原子力発電の一基100万kWといった規模と比べると、再生可能エネルギー1基では、化石燃料を用いる火力発電の1%にも達しないという規模に止まっており、多数の再生可能エネルギー設備を設置できる土地が存在しているかが課題となる。^{v)}

5.5 再生可能エネルギーによる電力供給

電力供給に関しては、グリッドパリティという言葉があり、電力コストと競争できる価格まで、例えば太陽光発電のコストが低下した場合には、グリッドパリティが実現できたと言う。現在、太陽光発電においては、発電コストが他の電源の発電コストにかなり近付いてきており、日照時間に恵まれた地域では、日中の時間帯など、一定の時間帯ではグリッドパリティが実現できたケースも出てきている。

日本では固定価格買取制度(FIT)が2012年より導入されて、一般の買電価格よりも高い価格で10年、あるいは20年という固定された価格での売電が可能となっている。

太陽光発電のコストは、発電パネルの値段が大幅に下がり、さらに、パネルを載せる架台の値段を安くすることができると大幅に低下する。しかも、日中の電力需要が多く、電力価格が自由化され、しかも電力取引市場が開設されて電力の価格が毎時毎分変動している国では、

価格が高い時間帯に多く発電できるという太陽光の特性から見て、太陽光の設置による売電が有利となる可能性が、時間帯にもよるが、生じている。

日本では、電力制度改革が進行中であり、2016年からの小売りの全面自由化、その後の発送電分離が行われる中で、再生可能エネルギーのうちの発電コストが低下できたものは、導入が着実に進むことが予測できる。

しかも一定量の再生可能エネルギーの導入が進むと、燃料費がただの電力であるために優先して消費され、その分だけ化石燃料を用いた発電の稼働率が低下し、化石燃料発電の採算性が悪化することを意味してしまう。

太陽光発電の技術革新は、今後もさらに進むことは間違いない。そうだとすると新築家屋にはすべて太陽光パネルをということ、家庭用の電力需要の抑制が期待されることになる。ただし、既存の家屋に対してパネルが設置できるかという点では、古い民家は耐震性が弱く（そもそも地震対応の規制が存在しない時代に建てられた家屋も多い）、このため重さに耐えられず、したがって、日本の家屋の約半数までにしか、屋根に太陽光パネルを設置することはできないと見積もられる。

しかも、現状ではFIT制度に則り、高い値段で売電できるために導入が進んでいるが、FITによる売電価格が今後低下していくと、グリッドパリティが成り立っていても、新築家屋の屋根には標準装備として導入される場合が多いとしても、初期費用（固定費）が高むために、導入を躊躇う家庭も多いと予測できる。

現状のFIT制度の下での太陽光の導入状況から見て、高値での固定価格買取という持続可能でない制度により急速に導入が進んだ太陽光発電は、国の再生可能エネルギー導入量比率を大幅に引き上げるといった効果はあった。ただし、今後は、電気料金の大幅な上昇を避けるためにFITによる買入価格が大幅に引き下げられるとともに、より中長期的な導入を目指した電力供給網全体の仕組みの中で、導入・整備が進んで

いく必要が生じている。

ランダース（2012, p. 340）では「太陽光エネルギーが競争力をつけるには40年かかるが、まずスタートさせるのにこれから20年かかりそうだ」という話が紹介されている。

エネルギー供給、特に電力供給には長い年月をかけた膨大な投資が必要であり、インフラが整備されるまでの投資額は巨大である。

しかも、再生可能エネルギーは電力供給の一部補填とはなっても、主力のエネルギー源となることは難しいと考えられている（Hanjalic, 2008, p. xviii）。分散型であり、一カ所ごとの電力供給量は限られているためである。

したがって、新しく出てきた再生可能エネルギーのような新規の電力供給の設備は、既存の設備を利用しつつ、その中で競争力をつけることができれば供給量は伸びていくことになる。石炭、天然ガス、石油のいずれを見ても、世界大での供給網がグローバルな最適化を目指して整備されてきており、価格競争を行っているだけに、企業としてカバーできる範囲で可能な限りの強化が図られてきており、そうした分野の中で再生可能エネルギーが一定の役割を果たせるようになるまでには、多くの年月が必要となると考えられる。

6. エネルギー資源供給における持続可能性

6.1 持続可能性の考え方

ランダース（2012）は、地球の人類の物質的発展は、当初は農業の面での革命的な技術革新が引っ張って担い、次いで、産業革命が引っ張って担ったと述べる（同書, p. 35）。

ただし、「かつての農業革命と同じくこの産業革命は、豊かな国では2052年までに完了するだろう。」（同上, p. 35）と述べて、「工業化への関心が薄れ」、「産業革命の次には、持続可能性革命がやってくる」と主張する。そして「化石燃料による経済成長」ではなく、「持続可能な幸福」へと世界の先進的な国が率先して向かうようになると述べる（同上, p. 36）。「幸福度」

を計算するための試論は、例えばすでにスティグリッツほか（2012）等で提示されており、その後も様々な幸福論ブームと言えるほど多くの研究が蓄積されつつある。

持続可能性という考え方を尊重すると、もちろん「持続不可能な状態は持続できない」（アラン・ナイトの言葉）（同上、p. 36）と考えられる以上、無制限、あるいは無期限に化石燃料に依存し続けた経済成長には限界が来るに違いないと考えられる。そうである以上、指標そのものを変更して、「主としてGDPで計測する経済成長」を重視する観点から変更して、「幸福度」を問う時代へ次第に移っていくべきだと述べるのは、一つの意味のある考え方であると言える。

エネルギー資源供給における持続可能性について考察する際、本論文でも最初に取り上げたように、埋蔵量と供給可能性が常に問題となる。とりわけ、石油の供給量が不足するのではないかとの議論が2000年代の前半に行われた（武石、2004）。しかし、こうした石油資源量の不足の懸念に対しては、既述したように、石油資源の定義の見直しが行われて、広く炭化水素資源が石油類として含まれるようになり、タールサンド、オイルサンド、オリノコタル、タイトオイル、シェールオイルも経済性があり、技術的に採掘可能であれば埋蔵量に含まれるようになった。こうして石油埋蔵量は嵩上げされており、供給不測の不安をとりあえず取り除くことができている。

また、トウモロコシあるいはサトウキビから製造されるエタノール、あるいは菜種等から製造可能なディーゼルオイルも、バイオマスエネルギーとして化石燃料の消費量の削減に一定の効果を持っている。特に、ブラジルと米国では生産量が多くなっている。

しかも、シェールガス革命が米国で生じたために、米国の天然ガス生産量は、大幅な輸入増大との予測が覆っており、2050年、2100年に向けて増大していくと予測されるに至っている。米国で開発された新たな技術は、今後、世

界の石油生産国、ガス生産国に適用されていき、コストの増大傾向を抑制しながら、生産量の拡大・維持に貢献していくと予測できる。

将来的に液体の資源である石油類の生産量が増えなくなった場合には、天然ガスの生産量が今後世界的に増大するに違いないと、埋蔵量予測から見て予測できるので、どうしても液体燃料が必要であれば、天然ガスを液化することも可能であり、様々な技術選択が可能となっている。

さらに次の指摘もたいへん示唆に富む。Combarousほか（2008）は、消費量を時間単位、あるいは年単位で平均値で述べることの危険性を指摘している。単位換算においても各国ごと、時間とともに換算数値は変わってきている（同書、p. 4）。また、化石燃料の埋蔵量が限られる以上、特に、石油およびガスについて経済原則が働くように促すことが重要であると指摘している（同書、p. 22）。

次に、Afgan（2008）は、エネルギーシステムに関する様々な要素からなる持続可能性の評価のためには、技術的効率、経済的効率、生態上の効率、社会上の効率の4つを指標とすべきと説く（同書、pp. 40-48）。さらに研究が積み重ねられる必要がある重要な視点である。

そのほか、Hersh（2006）の議論は重要である。持続可能でない発展を遂げた結果、世界では多くの問題が発生しており、環境問題に止まらず、石油資源などを巡る争い、貧困、飢餓なども持続可能性の課題であると述べる（同上、v）。

また、次のようにも述べる。一人当たりで見ると実に多量のエネルギー消費を行っているのは、世界の人口の中では一部に過ぎない先進国の人々である。世界の一次エネルギー供給量の半分はOECD諸国が使っており、電力消費量は途上国で飛躍的に伸びているが、それでも工業化した先進国と比べると発展途上国の電力消費量は、10分の1というレベルに止まる（同上、p. 54）。

上記のHersh（2006）の主張の要点は次のような点にもあると考えられる。エネルギー資源

の持続可能性に関する危惧を人々が感じるに違いないのは、数学とは全く何の関係もない（社会的現象による）と多くの人は思っているが、持続可能性を理解するためには、数値を用いた分析（数学）が必要であり、人々が意識しないで過ごしている現象が、実は生じており、数値を分析することで明らかとなる場合もあると述べている（同上、v）。

6.2 環境配慮と持続可能性

地球環境問題に配慮すると、エネルギー供給には様々な制約を設けることを意味する。化石燃料である石油、ガス、石炭というエネルギー資源を燃焼させ、CO₂を排出させることは、地球環境問題上の課題としてのCO₂削減という観点から見ると、求められていることとまさしく逆の作業を行っていることを意味する。

低炭素化、あるいはグリーン経済と、政府から掛け声がかけられても、実際にどれほどの効果が出ているかを見ると、あまり大きな効果は見られないという状況が多く、多くの国で生じている。

価格が安ければそちらのほうで買い、環境配慮の品物を高くても買う人は、全購買者数から見れば少数に止まるのが現状である。こうした消費者の特徴を、ランダース（2012, p. 62）は「消費者の無気力」と呼んでいる。

次にOECDが掲げて推進している「グリーン成長（Green Growth）」（OECD, 2011）という概念については、どのように評価できるだろうか。

経済成長は続けながら、CO₂排出量の低減、環境被害もなくしていくことができるかという点については、エネルギー消費効率を年々上昇させることは可能であり、特に、環境配慮がなされてこなかった発展途上国においては、多くの点で高効率化を図る余地が多くなっていることは確かである。

2015年のパリにおけるCOP21に向けて、各国がそれぞれ自国の温室効果ガスの削減目標を設定し、宣言することになっているが、各国ま

ちまちな目標がそれぞれ出されており、温室効果ガスを削減するという点から見ると、削減効果は限定的なものに止まることは明らかとなっている。

しかも、発展途上国では、エネルギー消費量が伸びており、CO₂排出量も増大中である。発展途上国においては市場メカニズムに基づく効率性の向上・維持は出来ておらず、そもそも政治システム・制度にも問題が多いことから、経済成長を目指しつつ環境配慮も働かせるグリーン成長を目指せと言われても、幾多の問題を抱えたままのはるか遠くの目標とならざるを得ない。

こうして、世界全体でのCO₂排出量の目標値を持つことは実は限りなく難しい状況が2015年現在、出現している。

おわりに

世界は現状では、化石燃料である石油、天然ガス、石炭を多量に消費しており、再生可能エネルギーへの依存度は低いままである。エネルギー供給国は、石油、天然ガス、石炭ともにそれぞれ異なった分布となっていた。石油はOPEC、ロシア、カナダ、ノルウェー等から多くの量が輸出されていた。天然ガスにおいては、生産量が飛び抜けて国として米国とロシアがあり、その他輸出国数はロシア、OPEC以外にもいくつも存在していた。石炭は中国の生産量が飛び抜けて大きく世界の半分近くを占めているが、さらに足りない分を輸入している。

エネルギー資源供給の持続可能性を考えた場合に、資源の賦存状況を確認しておく作業は極めて重要で、この埋蔵量の数値に基づきつつ、将来的なエネルギー選択の議論に入っていく必要がある。資源量が不足するのではないかとの懸念が持たれた場合には、資源量に含まれる範囲を見直して変更する（石油の事例）、さらに技術進歩により埋蔵量と生産量が増大する（シェール革命による米国での事例）など、資源枯渇が議論される際には、何らかの対応策が

打たれ、また技術的ブレークスルーが生じる場合があることが本論文での検討から確認できた。

供給国はどこで、需要国としてはどのような国があるかが確認できると、次いで、取引はどのように行われているか、その取引市場の成り立ちと特性の把握が必要となる。

ここまでの準備をしたところで、それでは各国内においていかなるエネルギー資源の選択が行われるべきか、可能性を探っていく必要が生じるが、ただし、再生可能エネルギーの導入に関しては、着実な導入量の増大を図るとしても、各国においてそれぞれ地域特性、気候上の制約が存在する場合も多くあり、また電力網上

の制約、電力価格の大幅な引き上げにならないための導入策の必要性などもあり、着実な将来像を描きつつ進める必要があると指摘できる。

以上のように、エネルギー資源の持続可能性を巡る議論は、国ごと、地域ごとに異なった特性を持つことになる。供給国と需要国の双方における持続可能性の持つ意味を大きく異なる。そもそも持続可能性をどのようにして測るのかについても模索が続いている。持続可能性を巡る指標はAfgan (2008) が指摘するように、未だ開発途上にあるが、今後研究成果が蓄積されていく間に、次第により有用な指標として有効な活用がされていくと予測される状況にある。

注

i) 国際エネルギー機関 (IEA, International Energy Association) はOECDの一部門であり、パリに事務所を置き石油、石炭、天然ガスの化石燃料に加え、電力、再生可能エネルギー、環境、さらに途上国での電化、経済発展とエネルギーの関係等についても積極的に発言している。IEAの構成国は、先進国が占めており、2015年現在29か国である。EU、北米、オセアニアの国々に加え、日本、韓国、トルコがIEAに参加している。

OECD加盟国は34か国であるが、アイスランド、メキシコ、チリ、スロベニア、イスラエルの5か国はIEAには参加していない。IEAに参加するには、備蓄基準 (前年の1日当たり石油純輸入量の90日分) を満たすことが必要である。

毎年発表される年報 (Annual Energy Outlook) は毎年異なったトピックを取り上げて発言す

るとともに、世界全体のエネルギー需給動向の分析、さらに20年程度先も踏まえた予測シナリオを掲載している。

ii) 日本の1953年における1 kWhの平均発熱量は4,150 kcalで熱効率は20.7%であった。その後、1 kWh当たりの平均発熱量は低下を続け、2013年においては2,074 kcal、熱効率は大幅に向上して41.46%となっている。

iii) 埋蔵量の定義の見直しについては武石 (2015) において詳細が紹介されている。

iv) 資源エネルギー庁 (2014) 「エネルギー基本計画」p. 49では、世界に向けて日本の先端的な高効率石炭火力発電の輸出を促進していくとの方針を打ち出している。

v) 実際にバイオマス発電所を見学に行っても、燃焼設備が大きい割には、発電機が小規模であるとの感想を持つことが多い (武石、2013年における岩手県宮古市の設備の見学による)。

参考文献

コーデスマン、アンソニー・H (2012) 『21世紀のサウジアラビア』明石書店。

省エネルギーセンター (2015) 『EDMCエネルギー・経済統計要覧』一般財団法人・省エネルギーセンター。

資源エネルギー庁 (2014) 「エネルギー基本計画」。
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

スティグリッツ、ジョセフ・E., ジャンポール

フィットウシ、アマティア セン (2012) 『暮らしの質を測る——経済成長率を超える幸福度指標の提案』金融財政事情研究会。

武石礼司 (2015) 『やさしく石油経済』メディアランド。

武石礼司 (2004) 「中東産油国の石油埋蔵量評価と生産増大への課題」『現代の中東』No. 36 (2004年1月号) 所収、日本貿易振興会アジア経済研究所。 <http://d-arch.ide.go.jp/idedp/ZME/>

- ZME200401_005.pdf
- ヤーギン, ダニエル (2012) 『探求——エネルギーの世紀 (上) (下)』日本経済新聞出版社.
- ランダース, ヨルゲン (2013) 『2052 今後40年のグローバル予測』日経BP社.
- ロビンス, エイモリー・B, (2012) 『新しい火の創造』ダイヤモンド社.
- Afgan, Naim Hamdia, 2008, Sustainability Concept for Energy, Water and Environment Systems, Chapter 2, Hanjalic K., R. van de Krol, A. Lekic, ed., *Sustainable Energy Technologies, Options and Prospects* Springer.
- Banks, Ferdinand E. 2000 “Energy Economics: A Modern Introduction” Kluwer Academic Publishers.
- Combarous, Michel, Jean-Francois Bonnet, 2008, World for Energy: How to Face the Challenge, Chapter 1, Hanjalic K., R. van de Krol, A. Lekic, ed., *Sustainable Energy Technologies, Options and Prospects* Springer.
- Hanjalic K., R. van de Krol, A. Lekic, ed., 2008, *Sustainable Energy Technologies, Options and Prospects* Springer.
- Hersh, Marion, 2006 “Mathematical Modelling for Sustainable Development” Springer.
- Hotelling, Harold 1931, ‘The economics of Exhaustible resources’, *Journal of Political Economy*, 39: 137-75.
- Laherrere, 1995 ‘World Oil Reserves’ *OPEC Bulletin* 14: 9-13.
- OECD, 2011, ‘Towards Green Growth: Green Growth Strategy Synthesis Report,’ OECD.
- Shenk, Tanya M., Alan B. Franklin, ed. 2001 “Modeling in Natural Resource Management” Island Press, Washington, Covelo, London.

統計資料

- 電気事業連合会統計委員会編 (2014) 『電気事業便覧 平成26年版』日本電気協会.
- 日本エネルギー経済研究所 (2015) 『EDMC エネルギー・経済統計要覧 2015』省エネルギーセンター.

English Summary**Energy Resource Supply and Relation
with the Concept of Sustainability****Reiji Takeishi**

In this report, differences of the concept of sustainability are analyzed depending on the categories which the countries belong: supplying country or consuming country. The differences are also analyzed depending on the kind of energy where the discrepancy of meanings of sustainability is defined.

First, the amount of fossil fuel's reserve on oil, gas and coal in the world are evaluated, and the characteristics of depletion on each energy are considered. Then the existence of different depletion trend of energy is analyzed. Next, the historical trend and shift of the role of oil market and the transformation of gas trade are studied. After that, the discussions of optimal balance of energy introduction are compared, considering Japan's future energy plan which has been announced in 2015. This paper provides analysis of energy usage. Finally, the concept of sustainability in relation to the supply of energy resources is re-considered. Evaluation index on sustainable energy supply and consumption are still under development, but it must be emphasized that flexibility and re-evaluation of future prospects and expected figures of supply and consumption are essentially important.