



# エネルギー・環境問題の本質 を考える視点

## SCE・Net 氏名 松田臣平

R-48

発行日  
2016年10月5日

(本論文の初出：日本技術士会「月間技術士」2016/2月号、p.4-8)

**はじめに** 高度工業社会はエネルギーを大量消費して、GDP を増大させてきた。日本では「1 万円の付加価値を生むのに、1 次エネルギーを石油換算で 10kg 分を消費」する。この原理を踏まえて、新エネルギー機器（太陽電池、電気自動車、燃料電池など）の初期建設費とそこに使われるエネルギーを評価した。水素社会は高コスト社会であり、日本が目指すべきは低コストの「省エネルギー社会」と考える。

## 1 GDP とエネルギー消費

### 1.1 人類の歴史とエネルギー消費

人類誕生から高度工業化社会に至るまでにエネルギー消費がどのように増大していったかを NIRA<sup>1)</sup> が 1979 年に発表した図 1 に示す。

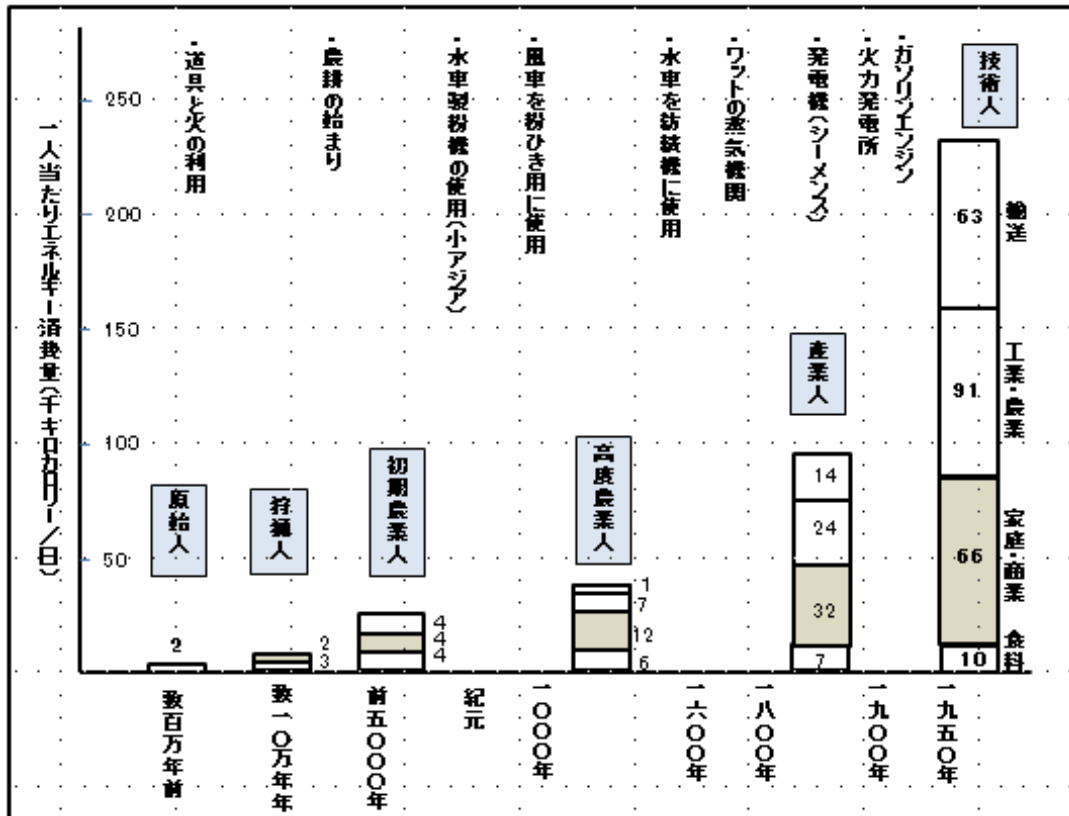


図 1. 人類のエネルギー消費量の変遷

図 1 では人間の一人当たり、1 日のエネルギー消費量を次の 6 段階で推定した。

- ① 原始人：数百万年前の東アフリカ、エネルギー源は食料のみ。2000kcal/日。
- ② 狩猟・採取人：数十万年前のヨーロッパ、暖房と料理に薪を燃やした。日本では縄文人。5000kcal/日。

③ 初期農業人：BC5000年メソポタミア地方、穀物を栽培し、家畜を使用。日本では弥生人。12,000kcal/日。

④ 高度農業人：1400年の北西ヨーロッパ、暖房用石炭、水力、風力を使用。26,000kcal/日。

⑤ 産業人：1875年のイギリス、蒸気機関を利用。77,000kcal/日。

⑥ 技術人：1970年のアメリカ、自動車、電力を使用、食料は家畜用を含む。230,000kcal/日。

狩猟・採取(hunting-gathering)の時代は長く続き、紀元前5000年前にメソポタミア地方で穀物の生産が始まり、エネルギー消費・人口が急増した。産業革命では、石炭をエネルギー源として、蒸気機関で動力革命を起し、エネルギー消費はさらに急増している。

## 1.2 近代日本のエネルギー消費とGDPの相関

近代日本は、明治初期から急速に産業革命を進め、比較的短期間に工業化を成し遂げたので、「エネルギー消費量」と「国内総生産」(GDP)の関係が解かり易い。図2に近代日本のエネルギー消費と実質GDPの変遷を示す<sup>2),3),4)</sup>。

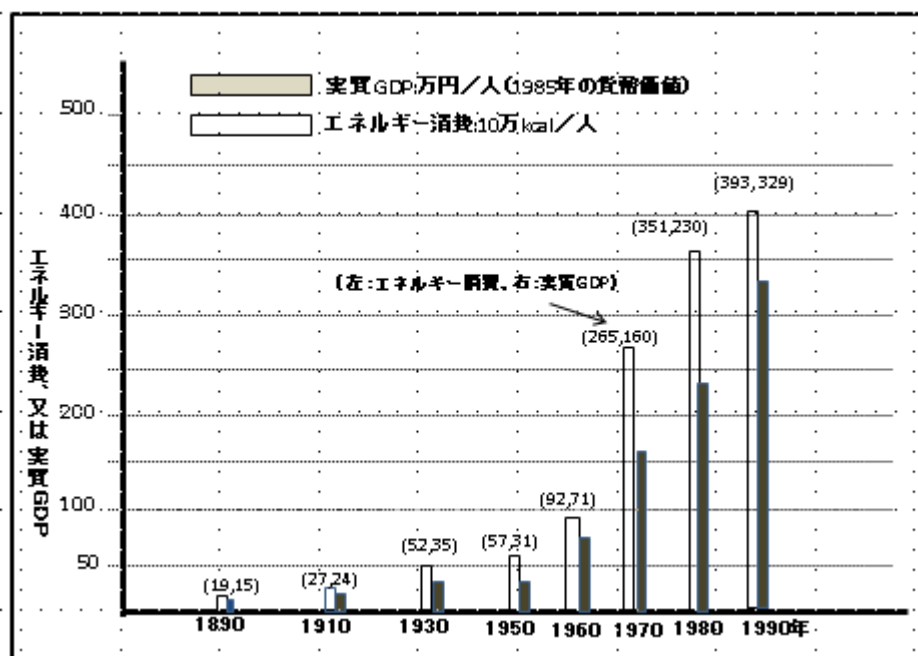


図2. 近代日本のエネルギー消費と実質GDPの変遷

エネルギー消費は10万kcal/年を単位とし、実質GDPは1985年の円の価値を基準にしてある。1890年から1990年まで、GDPとエネルギー消費が比例的に増加しているのが分かる。1960年代から1990年まではいわゆる「高度経済成長時代」で、安価な石油をエネルギー源及び化学原料としてGDPが急増した。1990年のバブル崩壊後の日本経済は「失われた20年」と言われ、国内の1次エネルギーの消費は石油換算で4.4億トンを(1990年)、5.1億トンを(2000年)、4.9億トンを(2010年)と比較的定常に推移した。その間のGDPは、452兆円(1990年)、504兆円(2000年)、480兆円(2010年)と停滞しており、エネルギーとGDPの比率はほとんど変化しない。概略で計算すると、500兆円の付加価値を付けるのに、石油5億トンを消費した。即ち、1万円の付加価値を付けるのに、石油を約10kg消費している<sup>3),4)</sup>

### 1.3 世界各国の GDP とエネルギー消費

世界の主要国の一人当たり名目 GDP とエネルギー消費 (ENE) を表 1 にまとめた<sup>3)</sup>。

表 1. 各国の消費エネルギーあたりの GDP (2010 年)

	国名	一人当たり名目 GDP (USD 表示)	一人当たりエネルギー 消費 (石油換算 kg)	エネルギー消費当り の名目 GDP (USD/kg)
1	日本	43,038	3,177	13.5
2	アメリカ	47,905	6,866	6.98
3	イギリス	36,985	3,143	11.8
4	ドイツ	39,804	3,260	12.2
5	フランス	39,362	2,820	14.0
6	韓国	20,947	3,809	5.49
7	中国	4,375	1,534	2.85
8	ロシア	10,618	4,732	2.24
9	南アフリカ	7,060	2,452	2.88

注)「世界の統計 2014」、総務省統計局(2014/3)より、松田作成

一人あたりの名目 GDP は USD 表示してあり、一人あたりのエネルギー消費は石油換算の kg で示している。石油 1kg は約 10,000kcal に相当する。

表 1 を見ると、先進工業国と言われる日本、イギリス、ドイツ、フランスでは GDP/ENE が 11~14 の狭い数値の中に入っている。アメリカは国土が広く、また省エネルギーが進んでいないので GDP/ENE の値が低い。韓国、中国、ロシアなどの GDP/ENE は低い、USD 表示でなく購買力平価基準で表示すると数値は先進工業国並みになる。

### 1.4 GDP の成長とエネルギー消費の関係

経済産業省のホームページでは、「GDP (国内総生産) とは、日本国内で、1 年間に生み出された生産物やサービスの金額の総和のことである」と述べられている。

消費者に渡る前の最終製品・サービス (例えば、自動車、パソコン、太陽電池、家電品、旅館の宿泊費、レストランでの食事など) の金額が付加価値の総和になっている。サービス業ではエネルギー消費が少なく、工業製品では多いという議論があるが、サービス業でも働く人の使うエネルギーを考えると案外に多いのに気が付く。LCA(Life Cycle Assessment) で、一つの製品のエネルギー原単位を計算する方法もあるが、原材料のエネルギー使用量はある程度計算できるが、一般管理費、研究開発費ブランド価値など人の働きにより消費されるエネルギーの計算が困難である<sup>5)</sup>。

図 2 及び表 1 の GDP/ENE の考察から、新エネルギー及び機器の経済性・環境性を考える時には、

**「日本では、1 万円の付加価値を生むのに石油 10kg を消費する」**

を原点に置くのが正しいと思われる。この原理を新エネルギー機器の初期コストの経済性、水素エネルギー社会の実現性などの評価に適用する。

## 2 新エネルギー機器の経済性について

### 2.1 太陽電池発電の経済性について

太陽電池（以下、PV と略す）は、発電時には投入エネルギーが太陽光のみであるが、PV の製造時に多量の資源とエネルギーが消費されている。家庭用及びメガソーラは「固定価格買取制度」(Feed-in Tariff) の導入により大きく進んだ。日本では、当初買取価格が 43 円/kWh と設定された。この買取価格 43 円/kWh は電力会社の電灯料金約 23 円/kWh の 2 倍近くであり、火力発電の発電コスト（12～13 円/kWh）の 3 倍以上である。この価格差を一般国民が払うのが問題である。

PV の省エネルギー・省資源効果はどのくらいか試算してみる。PV は現在 30 万円/kW で市販されている。この PV が 1 年間に発電できる電気量は、1 日 24 時間のうち 8 時間、1 年間で晴れた日は 1/2 とすると、稼働率は 16.7 %となる。1kW の PV が 1 年間に発電する電力量は、

$$1 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \times (8/24 \times 1/2) = 528 \text{ kWh}$$

この電力量の買取価格は、約 23,000 円である。購入した PV の初期性能が 13 年間維持・稼働すれば、初期コストを回収できる可能性がある。

PV の初期建設費にどれくらいのエネルギーを消費しているかを“エネルギー原単位”「日本では 1 万円の付加価値を付けるのに 10kg の石油を使う」に基づいて、評価してみる。30 万円の付加価値を付けるには、300kg のエネルギー（石油換算）を消費している。石油火力発電所の発電効率を 40%とすれば、この量の石油で発電できる電気量は、

$$3,000,000 \text{ kcal} / 860 \text{ (kWh/kg)} \times 0.40 = 1395 \text{ kWh}$$

[1 kWh = 860 kcal ジュール熱への換算率]

初期建設コストで使うエネルギー（石油）だけで、それをもし火力発電所で燃せば、2.5 年分の発電量を確保できることになる。

### 2.2 電気自動車の環境性と経済性について

電気自動車（EV）の経済性を論ずる前に、火力発電所の建設コスト及び発電効率の概略に言及しておく。ガスタービン発電（効率：25～35%）の建設コストは 5 万円/kW と割安であるが、微粉炭ボイラー（43%）、LNG コンバインドサイクル（55%）では建設費が 10～15 万円/kW のオーダーである。

電気自動車（EV）は、走行中には炭酸ガスを排出せず、NO<sub>x</sub>, CO, HC も排出しない。EV は、走行中に化石燃料は消費しないが、電気を作る段階（及び製造段階）で化石燃料を消費する。

化石燃料 → 火力発電所で発電 → 送電 →

電池の充電・放電 → 駆動

化石燃料から充・放電までの効率を掛合わせると、

$$0.40 \text{ (発電)} \times 0.8 \text{ (送電)} \times 0.8 \text{ (充・放電)} \times 0.9 \text{ (駆動)} = 23\%$$

くらいと見積もることができる。ガソリンエンジン

の自動車は、走行中の熱効率が 10%～20%と言われているから、EV の方がエネルギー効率は多少高い。しかし、EV の製造時のエネルギー消費も勘案しなければならない。

量産されている EV には、日産リーフと三菱 i-Miev がある。日産リーフは、24kWh の電池を積載し、値段は 290 万～370 万円、三菱 i-Miev は 16kWh の電池を積載し、値段は 230～280 万円である。両者とも 2 次電池にはエネルギー密度が高いリチウムイオン電池（エネルギー密度：～100Wh/kg）を使用している。EV はガソリン車に比べて価格が 2～3 倍と高いが、主な要因は積載する電池のコストが高いか

らである。日産リーフを例にとり、電池のコストを見積もると、ガソリン車との差額 200～250 万円が電池コストと見積もられる。これは EV の電池部分の製造に 2000～2500kg の石油を使用していることになる。これに相当するガソリンで走行すれば 15 km/ℓとして、30,000 kmは走行できる。EV がガソリン車と同等の経済性を持つためには、電池部分の大きなコストダウンが必要である。

## 2.3 電気自動車のエネルギー密度の向上の可能性

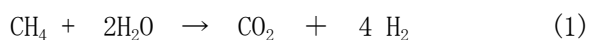
ガソリン車は、還元剤（電池の負極材に相当）にガソリンを用いて、酸化剤（電池の正極材に相当）に空気を使用する。即ち、ガソリン車は酸化剤を自らは持っていないのである。もし酸化剤も自ら持っているとする、その重さはガソリン 50kg に対して 700kg にもなる（空燃比を 14 として計算）。一方、リチウムイオン二次電池では、負極（ $C_6Li$ ）と正極（例： $NiOOH$ ）の両方を備えていなければならない。従って、二次電池はもともとガソリンエンジンに対して大きなハンディキャップを背負っており、将来的にも走行距離はガソリン車の 1/2 以下に留まるであろう。

## 3 水素エネルギー社会の実現性

### 3.1 水素製造プロセス

地球温暖化対策として、「低炭素社会」の実現が叫ばれ、その具体的な案として「水素エネルギー社会」が取り上げられている。化学プラントを少しでも勉強したことがある人ならば、直感的に “水素エネルギー社会は高コスト社会である” と気付くであろう。理由は単純で、水素の製造コスト（あるいは供給コスト）は、燃焼熱当り天然ガス、石油、石炭より 2～4 倍も高いからである。

現在、工業的に使用される水素は天然ガスのスチームリフォーミングで製造されている。



スチームリフォーミングは熱効率の良い反応であり、メタンの持っている燃焼熱の 90%以上が生成する水素の燃焼熱に変換される。

### 3.2 燃料電池について

燃料電池（FC）は、熱電併給（コージェネ）機器として、日本で実用化が始まっている。都市ガスを利用したコージェネシステムは、「エネファーム」として、年間数万台が販売されている。標準的なエネファームは、電気出力 0.75kW、給湯出力 1.25kW、総出力 2kW の機種が約 200 万円で販売されている（補助金が 3 割程度出る）。

エネファームの給湯器のみとしての価値は 20～40 万円だと考えられるので、発電機としての価格だけを考えるならば、0.75kW で 150 万円、即ち kW あたり、200 万円となる。200 万円の付加価値を付けるのには、機器製造段階で石油 2000kg を消費していることに注意しなければならない。

### 3.3 燃料電池自動車について

燃料電池自動車（FCV）としては、トヨタ自動車から「ミライ」が商用車として 2015 年に発売された。販売価格は 723 万円とされ、補助金を利用すると、購買者の負担は 500 万円である。燃料電池（FC）の出力は 114kW（155 馬力）であり、ガソリン車の 1500 cc エンジンあたりに相当する。ここで問題とされるのは 114kW の燃料電池をどのくらいのコストで製造できるかである。ミライの燃料電池は、エネファームに用いられている固体高分子型燃料電池（PEFC）と同じものである。エネファームは準商業ベースで数万台/年製造されているから、FCV 用の燃料電池の価格もそれらに相応のコストで生産されているであろう。エネファームの FC の価格、100～200 万円/kW を適用すると、FCV の FC だけで 1 億円を超える

計算になる。今仮に、エネファームの FC 価格の“1/10”の 20 万円/kW を仮定して、議論を進める。FCV の FC の価格は、

$$20 \text{ (万円/kW)} \times 114 \text{ (kW)} = 2280 \text{ 万円}$$

となる。これは、将来の製造のコストダウンを考慮して、FC の価格を極めて低く仮定した場合の値である。トヨタ自動車は、低く見積もっても FCV「ミライ」1 台売る毎に 2000 万円の持ち出しをしていることになる。この持ち出しは、1000 台程度はトヨタの利益で宣伝費として賄える。しかし、1 万台～10 万台販売となると無理であろう。

さて、FCV を通常のガソリン車に比べて 2000 万円高く購入した人の場合をかんがえてみよう。2000 万円の付加価値を付けるには、20,000kg の石油換算のエネルギーを消費している。20,000kg のガソリンがあれば、燃費を 10 km/kg としても、200,000 km は走行できることになる。エネルギー的には、FCV を購入しても、環境に貢献したとは言えないだろう。

#### 4. 持続可能な社会に向けて

持続可能な社会 (Sustainable) の実現に向けた様々な取組がなされている。現在はエネルギー源として化石燃料を使用し、資源としては石油、鉱物、動植物などを利用している。石炭 (褐炭を含む)、天然ガス、シェールガス・オイルなどの賦存量を考えると、今後 200 年は化石燃料に依存する社会であろう。「時間軸を考えて、環境・エネルギー問題を考えなければならない」とは、御園生誠 (東大名誉教授) が良く言う言葉である<sup>5)、6)</sup>。世界の人口増がこのままスピードで進めば、資源の獲得競争が始まるのも間もなくであろう。日本が世界で生抜いてゆくためには、他の諸国よりも相対的に少しだけ優位な「省エネルギー」社会を作ればよい。

日本には古来より「勿体ない」という精神がある。これは自分も含めた環境のすべてを有効に利用しようという心である。日本は天然資源には恵まれないが、自然環境には恵まれている。太陽光と地中熱を利用した「ゼロエネルギー住宅」、「最も効率の良い集合住宅」など、まだまだ工夫を凝らせば、さらなる省エネルギー社会を作れるだろう。

#### <参考文献>

- 1). 総合研究開発機構編、「未来への選択 エネルギーを考える」、研究パンフレット (1979)
- 2). 「日本国勢図絵長期統計版 ー数字で見る 日本の 100 年」、矢野恒太記念会編、(第 3～6 版 1991～2013 年)、
- 3). 「日本の統計 2015」、総務省統計局、(H27/3)「世界の統計 2014」、総務省統計局 (H26/3)
- 4). 「エネルギー・環境技術と経済学」、松田臣平著、山口大学 (1999 年 10 月初版)、p. 20。
- 5). 「化学環境学」、御園生誠、裳華房 (2007)
- 6). 「将来の化学技術を考えるための 5 つの基準」論説、御園生誠、「化学と工業」 Vol. 60-1 (2007)、p. 5、日本化学会