

[論 文]

水素エネルギー循環社会構築への一考察

A Consideration for Constructing the Hydrogen Energy Cycloid type Society

生嶋 素久

Motohisa IKUSHIMA

Abstract

The environmental tolerance should not exceed the global self-purification capacity. The industrial revolution that began with the invention of the steam engine is the large scale of energy consumption industry, and creates out electricity and car civilized society.

When it tries to arrange the energy resource with firewood, coal, petroleum, natural gas, methane hydrate, the hydrogen of the energy efficiency is better than that of the carbon in the direction of the decarbonization element, decarbonization element will show the new industry society.

はじめに

地球環境危機は、「地球自浄能力」と人間経済活動による「環境負荷」とのバランスがとれなくなった現象である。つまり、世界経済規模が拡大した結果生じた危機である。具体的に表現すれば、次のようになる。

環境負荷の具体例は、温暖化現象、生態系破壊による森林減少、生物多様性の種減少、地球砂漠化の拡大など、地球上至る所で観察され測定することができる。世界経済規模の拡大をエネルギー使用量の増加傾向と捉え、化石エネルギー増大の中でも代表格の石油消費量を分析すると、20世紀が石油文明の時代といわれることが明らかとなる。21世紀は、石油文明を引きずりつつ、新たなエネルギー政策が必要となってくる。本稿では、石油の次に位置づけられる

Key Words : The environmental loading, The Kyoto protocol, Sustainable development, decarbonization element, Fuel cell

キーワード：環境負荷、京都議定書、持続可能な経済発展、脱炭素化、燃料電池

エネルギーについて考察をしていく。

I 世界経済の拡大

1. 化石燃料使用量

1999年、世界総生産（GNP）は30%増加し、40兆5,000ドル（1998年ドル変換）となった。経済成長のほとんどは、1997年に一時低迷したが回復の早かった東アジアで起こっている。アジアの諸国は、一時金融危機に襲われたが、2000年は回復基調に入った。しかし、2001年先進国を中心にそれまで経済の牽引役と見られた情報産業 IT の需要が低迷したため、世界的にデフレ傾向となっている。

一方、世界人口が急速に伸びつづけており、1人当たり経済生産額も伸びている。これは経済活動が年々大きくなり、エネルギー使用量が増大し、今や地球の自浄能力を超えている、と専門家が指摘してきた異常現象が地球上を掩っているのである。

1999年、世界の化石燃料使用量は0.1%増加したにとどまったが、化石燃料使用量は、この50年間で4倍に増加した（表1）。化石燃料使用については、固体から液体、気体へと変化しており、天然ガスは重要性を増している。最新の統計によると、天然ガスは1999年に石炭を上まわっている。

石炭使用量の減少は今後も進むと考えられている。イギリスでは現在の深部炭鉱の3分の2が、公的資金の援助を受けられずに閉鎖されるとみられている。

アメリカでは、酸性雨とスモッグに悩まされ、ニューヨーク州政府が電力事業を相手に訴訟を起こしている。ニューヨーク州当局は、電力会社が大気浄化法で定めたとおりに公害防止設備を設置せずに発電していると主張している。

中国も石炭から天然ガスに切り替える国策を進めており、天然ガスが化石エネルギーの主演になりそうな勢いである。

石油は1970年代に発掘された北海やアラスカのような大規模な石油開発がその後ないため、中東の石油埋蔵量が依然大きい。しかも、現在のまま使用し続けると44年しかもたないと

表1 主要国の一次エネルギー需要量
(1997年現在)

主要国	一次エネルギー消費量 (石油換算, 億トン)
アメリカ	21.44 (25.2%)
中国	9.05 (10.6%)
旧ソ連	8.92 (10.5%)
日本	5.06 (5.9%)
ドイツ	3.40 (4.0%)
インド	2.60 (3.1%)
フランス	2.44 (2.9%)
カナダ	2.27 (2.7%)
イギリス	2.25 (2.6%)
イタリア	1.58 (1.9%)
世界合計	85.09 (100%)

〈出典〉BP統計 (British Petroleum, 1998年)
より作成

計算されている。このため10年後以降、石油の価格高騰が予想され、価格面からも天然ガスに切り替わる必要が指摘されている。

2. 京都議定書

地球温暖化は20世紀に引き続き、21世紀の深刻な地球環境問題である。地球温暖化の進行は、二酸化炭素ガスが地球の表面をおおって布団のような役目をしてしまい、地球に降り注いだ太陽光線の地表からの熱放射を妨げて起こす現象ということは、周知の事実である。

二酸化炭素ガスが増加するのは、経済活動の結果であり、経済成長を続けるかぎり、この現象は避けられない。1972年ローマクラブによって「成長の限界」が報告書として発表され、世界中で注目されてから30年経つが、世界経済は人口爆発もあり、大気中に二酸化炭素ガス増加をつづけている。

1992年リオデジャネイロで開催された地球サミットにおいて、「経済発展と環境保全」の両立が検討され、京都議定書へとつながっていくこととなった。これは、二酸化炭素ガスを1990年代にまでさかのぼって削減するというもので、2001年に日本が批准したものの、二酸化炭素ガスを大排出するエネルギー大使用国アメリカが批准を拒否しているため、実効性の困難が予想されている。

しかしながら、アメリカも含めて地球温暖化を防止せねばならないことに異論はない。生態系に混乱が生じ、自然の生命維持システムが破壊される危険があるからである。生態系を維持するためには、人間の経済活動が大きくなりすぎたのである。生態系を維持するためには、二酸化炭素排出を抑制せねばならない。これはエネルギー政策、つまり化石エネルギー消費を抑制することである。

経済発展を遂げつつ温暖化を防止し環境を保全しつづけるのは至難の技である。

20世紀の化石エネルギー活用とそれに伴う経済発展には瞳目に値するものがあつた。19世紀後半、日本は産業革命に入り、蒸気機関、石油、ガス発動機、電動機を装備した工場が設立され、20世紀、ことにその後半から日本の化石エネルギーは、経済の急速な発展と共に重要性を増していった。こうした発展は、東アジア各地に広がり、世界中で開発は進行している。このまま化石エネルギー使用量が大きくなると、二酸化炭素排出量も多くなり、20世紀後半から注目を浴びている温暖化現象は、21世紀に益々強まり、温暖化を伴う地球環境破壊が進むものと危惧されるに至っている。

3. 持続可能な経済発展の意味

繁栄、豊かさへの憧憬が「経済成長」の信仰を生み出した。

経済成長を繁栄の象徴として神話化する考え方が、豊かな先進国にも、発展途上国にも共通

して存在するということである。発展途上国は先進国並みの工業化を目ざして、豊かな国の消費水準の高さに近づこうとする。豊かな国は、さらなる経済的繁栄を求めて経済成長率を高めようとする。

世界中で経済成長信仰は終わることはない。この経済的繁栄を求めつづける人間の欲望を前に、地球の生態系エコシステム、つまり生命維持システムが破壊されようとしているのである。生命体で満ちあふれた地球のエコシステムが崩壊すると、最終的に人間の生命存続も危惧されることとなる。

かくして「持続する経済発展」Sustainable Development は、エコシステム、環境保全を前提としないと考えられないテーマになった。持続する経済成長という概念自体を再検討する時期にきている。問題は成長か、成長の限界かという議論ではない。経済成長の中味を検討し、これまでと違った産業社会を再構築することである。どのように成長するかという議論である。エコシステム、(生命維持)に則しつつ成長する方法を考慮する必要がある。

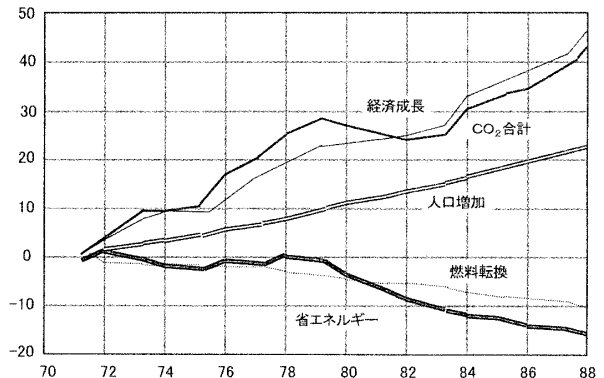
経済成長を維持しつつ、生態系を保持できる産業は、新産業を含め幾つも考えられる。

環境に負荷を与えないエネルギー開発。つまり二酸化炭素を排出しない発電とか、ゼロミッションのエンジンを搭載したクルマとか、資源のリサイクル化とか、幾つでも考えることができる。

II エネルギーの脱炭素化

エネルギー源構成の長期変化をみると、イギリスが1880年、アメリカが1920年にエネルギー源単位が使用量としてピークを打ち高い山を作り、続いてなだらかに低下して現在に至っていることが判明している。これに対し、日本は1970年をピークとしているが、イギリスやアメリカに比して高い山を作っていない。今後、発展途上国が工業発展するとき、イギリス、アメリカ型のようにエネルギー使用量の急激な増大の山を作るか、日本型のように高いピークを作らずなだらかに工業化社会に入ることになるかは、地球環境負荷との関係で注意深く見守る必要がある。当然ながら後発の発展工業国は日本型のようにエネルギー消費量を上手に使用して工業化社会になることが期待される。

図1 過去のCO₂排出の要因変化
(1971世界CO₂ = 100)
(世界全体)



<出典>

IEA : "Energy Statistics and Balances of Non OECD Countries". "Energy Balances of OECD Countries".
国連"Energy Statistics Yearbook"などより作成

図1 (図1 過去のCO₂排出の要因変化)は、二酸化炭素の排出原因の変化をグラフ化したものである。

世界人口が増加とともに二酸化炭素排出量は増え続けているが、エネルギー資源の転換、つまり、石炭から石油、そして天然ガスへと炭素の少ない資源をエネルギーとして使用する効果が表示されている。そして、省エネルギー効果、つまり、技術、テクノロジーの進歩とエネルギーの節約がいかに二酸化ガス排出削減に効果があるか。

図2 (図2 二酸化炭素発生量(炭化水素の単位発熱量当たり)は炭化水素の単位発熱量当りの二酸化炭素排出量をグラフ化したものである。

炭化水素の水素/炭素比(H/C)を横軸にとると、炭化水素であるベンゼン、トルエン、ガソリン、オクタン、プロパン、エタノール、メタンなどのH/C比では、炭素に比べて水素の割合が順にどんどん多くなっていくことが計算上分かり、それを分析してグラフ化したものである。

エネルギーの化石燃料の使用量は、歴史的経過を見るなら、次のような流れとなっている。

薪→石炭→石油→天然ガス→
メタンハイドレート

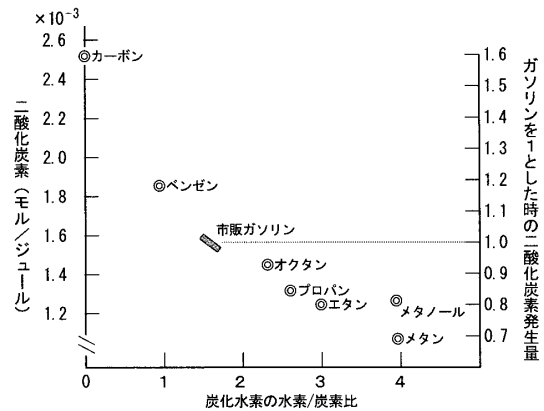
石炭と石油を比べると、炭素の割合が水素の割合より多くなっている。

石油と天然ガス、メタノールを比較すると、水素の割合が炭素より多量に含有されている。これは図2に示すとおりである。

これらの比較からエネルギーとして、炭素含有量がより少ない方向、つまり水素の含有量がより大きなエネルギー資源へと化石エネルギー使用量が移っている。このことは二酸化炭素ガス排出がより少ないエネルギー資源へと移行していることを示している。

しかも、表2(表2 燃料物質の発熱量)

図2 二酸化炭素発生量(炭化水素の単位発熱量当たり)



(出典)『メタンハイドレート』松本良他、日経サイエンス刊 PP225より作成

表2 燃料物質の発熱量

物質名	総発熱量 [kJ/g]
水素 H ₂	141.8
プロパン C ₃ H ₈	50.4
メタノール(液) CH ₃ OH	22.7
無煙炭	27.2 ~ 35.5
コークス	23.0 ~ 29.7
石炭ガス	20.9 [MJ/Nm ³]
都市ガス	46.05

(出典) 1) 日本機械学会：技術資料 流体の熱物性値集、第3部、日本機械学会(1983)
2) 化学工学協会編：化学工学便覧 改訂5版、24.2節、丸善(1988)より作成。25℃での生成水が液体の場合に相当するものを総発熱量と呼ぶ。

に示すとおり、総発熱量 (kJ/g) は、水素ガスが炭素よりはるかに大きい。

以上、図 2 と表 2 を比較検討すると、炭酸ガスが減少して大きな発熱量を保有する水素含有量の多いエネルギーへとエネルギー物質が移行しているのである。

エネルギー資源の埋蔵量も 21 世紀エネルギー資源の行方を考察する上で重要である。石炭はかなりの量残存しているため、これを活用しつつける道はあるが、二酸化炭素の排出量が急増するため、石炭の水溶化、石油化の innovation が必要である。

石油は 2015 年頃には減産される方向とされており (埋蔵量は 44 年)、天然ガスは 2035 年頃にピークになり、やはり減産が予想されている。天然ガスに代替するエネルギーとしてメタンハイドレートの探査技術が進み、石油、天然ガスにつづく有望なエネルギー資源として注目されている。今後 10 年つまり 2015 年頃までは、現在の石油中心のエネルギー資源活用がつづき、2015 年以降は、天然ガス、メタンハイドレートが中心となる傾向をとらざるをえない。地球上の化石エネルギーが石炭以外、枯渇してしまう恐れがあるのである。

水力は自然エネルギーの中で経済性、供給量ともに実績があるが、供給量には限界がある。したがって、50 年先の 2050 年のエネルギー事情を考察するなら、太陽光、風力、バイオマスといった自然エネルギーに頼る外なくなる。

今後はライフスタイルの変化と省エネルギーのイノベーションが期待されることとなる。つまり再生可能なエネルギーの活用である。

III 水素エネルギー

人間は古くから薪の燃焼がもっとも普通のエネルギー使用源であった。イギリスでは木材から石炭に次第に移行し、産業革命、蒸気機関が発明された。

石炭は薪に比べて単位エネルギー当りの炭素が少なく、水素量が多かった。水素分子 1 個に対して炭素が 1 ~ 2 個の割合である。薪は水素分子 1 個に対し、炭素分子は 10 個であった。石油は水素分子 2 個に対し、炭素分子 1 個しかもたない。

天然ガスはさらに炭素含有量が減り、水素 4 個に対し炭素 1 個という割合である。

このように分子レベルからエネルギー経済を見る見方は現在のところ一般的ではない。一般的にはエネルギーの動向を政治や価格、資源や埋蔵量から論じる専門家が多いが、脱炭素化の流れ (単位エネルギー当りの炭素排出量が少しずつ減少する傾向) は、ロックフェラー大学のジェシー・オズベルの指摘するとおりである。これは、脱炭素化の重要な理論を提示したものと考えられる。

脱炭素化の究極の姿は水素エネルギーということとなる。石油使用量の半分がクルマのエンジンを動かすエネルギーとして使用されている現在、水素エネルギーによる燃料電池の開発は大きな意味を持っている。水素エネルギーの実用化は、太陽エネルギーとともに循環型産業社

会をつくっていく重要な研究課題である。

IV 燃料電池

燃料電池は、水素と酸素を化学反応させて電気と水を生成する装置で、最初、アメリカのNASAが宇宙開発計画で利用し、1965年、宇宙船ジェミニ5号で初めて使用された。その後燃料電池は潜水艦など軍用に使われてきた。この時代の燃料電池は容量も大きくコストが高いものであったが、技術の進歩とともに小型化、低コスト化が進み、内燃機関や家庭用発電機として注目されるに至っている。

水素は、今、工業として天然ガスから作られている。1999年米国ヒューストンで開催された世界エネルギー会議での発表では、1995年水準で天然ガスを水素エネルギー取得用に使用したとして247年埋蔵量があるとのことである。

水素ガスはガソリンスタンドのような社会的インフラがまだ整備されていない。そこでガソリンやメタノールといった液体燃料をFCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) に搭載し、車体内で水素を抽出し、燃料電池に使用する方式である。

実用化に向けてガソリンから水素を取り出す方式と、メタノールから水素を取り出す方式の2通りが進行中である。

水素を取り出すのにガソリン改質方式、メタノール改質方式、どちらも実用化技術は解決しているが、コストをいかに下げられるかの問題がある。

石油、メタノール、天然ガスをクルマに搭載して水素を取り出す場合、炭酸ガスや若干の有害排出物が出る。

理想を言うなら、太陽エネルギーを利用した発電によって水の電気分解を行ない、水素ガスを手に入れれば、完全循環型エネルギーシステムになる。炭酸ガスは増加することがないため、究極のFCEVは、太陽発電で水素を取り出す方式となると考えられる。

水素を直接搭載となれば、クルマに改質器を搭載する必要がなくなる。この場合、水素をどのような形で補給するかが問題となる。現在のところ、水素吸蔵合金が実験段階で用いられているが、ナノカーボンが発明され、ナノカーボンが10% (重量比) 以上も水素を吸着するという実験結果が発表されて脚光を浴びている。これはニッケル、マグネシウム合金などの水素吸蔵合金の貯蔵量の約5倍に当たる。

ナノカーボンのメリットは、軽くて搭載性に優れていることである。これは合金類と比較にならないことである。ナノカーボンの中でカーボンナノチューブに注目が集まっている。

世界の自動車産業界では、燃料電池車を実用に供し始めている。水素補給としては改質型ではなく「直接水素型」を業界標準になる動きである。

直接水素型の燃料電池車が走行できる地域は、当分の間限定される。燃料水素を補給する水素ステーションが必要だからである。

結 び

水素エネルギーを動力源として発電して走行する電気自動車が、2002年12月に登場した。1台1億円という高価なため月80万～120万円でリースされることが決まった。

水素エネルギーの供給としてガソリンスタンドに代わって水素ステーションが東京都に3ヶ所整備され、これからもインフラの整備は進んでいく予定である。

燃料電池の小型化と低コスト化が進めば、クルマに搭載するばかりか、各家庭に配備するのは、意外と早く進む可能性が高い。現在、都市ガスのインフラが出来ている所には、水素ガスを配送すればよいからである。

水素ガスは、石油、メタノール、天然ガスから触媒を用いて改質し取り出して、各水素ステーション、各家庭に配分する方法が効率よく行われるだろう。水を電気分解するなら水素ガスは無限にあり、水しか発生させない無公害なエネルギーである。

20世紀が石油の時代とするなら、21世紀は循環型産業社会を構築していく上で、水素エネルギーが重要な役割を担うこととなる。

〈参考文献〉

- (1) C. Zandonelk ; “Is it all just a pipe dream?” Nature. Vol. 410, 2001
- (2) 御堀直嗣著『エコ フレンドリーカー』山海堂, 2000年
- (3) 村田克之, 大森工, 金子克美 ; “水素時代を支える 主役になれるか”,
日経サイエンス 8月号 2002年
- (4) 松本 良他, 『メタンハイドレート21世紀の巨大天然ガス資源』
日経サイエンス刊, PP225, 1996年