

虚構の環境技術 1：簡単な化学熱力学を用いて 電気自動車と水素エネルギーを説明する試み

川 村 邦 男

(受付 2021 年 5 月 26 日)

1. は じ め に

環境保全のために人類に求められていることは、究極的にいえば化石燃料消費や食糧生産などを含めたエネルギーと資源の消費削減である。使いやすくて低コストの石炭や石油などの化石燃料資源の開発・利用によって、巨大消費社会は実現し環境は破壊された。しかし現在は、大規模な化石燃料資源の発見は見込めず、その一方で資源消費量は増大し続けている。エネルギー資源も他の一部の資源も今のような使い方をすれば比較的近い将来に枯渇すると予測される¹⁻⁷⁾。しかし、いま世界が推進しつつある環境技術には、理学部や工学部で化学や物理の基礎を学んだものであれば簡単に気がつく嘘が含まれている。一方で、市民はそのような嘘に振り回されており、このような状況を見過ごすことはできない。このような状況を正し、自然科学的視点から見て適切な政策を推進することはできるだろうか。

第二次世界大戦以降の日本の化学工業では、環境問題が市民に広く認知されるよりも前から、様々な代替技術やリサイクル技術が開発・実用化されてきた。これらは、日本では資源が乏しいことや頻発した公害に対応したものと見ることができる。しかし現代の環境問題では、エネルギーと資源を使い過ぎるという文明のあり方を変えなければならない。従って地球規模の環境問題は、従来の思考法では対応できない問題のようにみえるのである。ところが専門家も市民も、小さな技術的改良の積み重ねや市民による消費削減の努力によって環境問題を解決できるものと、楽観的にみているだろうか。例えば、発光ダイオードの発明によって電球 1 個あたりのエネルギー効率は進歩したが、大量の LED を使う電飾イベントは盛んになってしまった。科学技術の研究者も、エネルギー消費量を下げるといった核心的課題に対して効果の高い技術開発かどうかを、十分に検証しているだろうか。実際、環境問題が認知されるようになってからも、エネルギーや資源の消費量の拡大はおさまらない⁸⁾。世界全体のエネルギー消費量が減らないという事実は、環境問題に対する長年の政策や技術開発は有効でなかったことを反映している。また、環境技術と言われるものには問題のあるものが目立つ。大学で教育に携わる研究者はこれらの開発に参加しており、これらの開発に費やした科学技術研究は再評価すべきものである。また教育者としても研究者としても、結果

として環境保全を阻害してきたことに対する一定の責任がある。

従って、これらの問題に対して自然科学的見地から科学者は積極的に発信するべきであり、大学においては教育に反映させることが一つの解決方法であろう。そこで本稿では、エネルギー関連の環境技術を導入するための目安として、「10倍則」を提案する。また電気自動車と水素エネルギーなどの大きな社会的混乱をまねく虚構・妄想に対して、なるべく簡単な物理化学的説明を用いて解説することを試みる。

2. 環境問題の熱力学的視点

2.1 地球環境を考えるための熱力学

ここでは環境技術の意義や効果について整理する前提として、エネルギー収支について考える。社会問題としての環境問題とは、地球表面の環境の変化に関する問題である。表面の範囲は人間が生活している場と考えてよい。熱力学的にみると、地球表面はエネルギーと物質が入り出す熱力学的開放系であり、非平衡状態にある（図1）。まずエネルギーの収支でみると、地球表面には太陽エネルギーおよび地球内部からのエネルギーが地球表面に流入し、地球表面からはその温度に対応する黒体放射（地球の場合には赤外線に相当する）としてエネルギーが宇宙空間に放出される。太陽が発する電磁波のエネルギーは、太陽の黒体放射に対応する主に可視光であり、その他にも紫外線・赤外線や電磁波や放射線がある。一方、地球中心部は6000°Cにおよぶ高温であり、これが宇宙空間へ逃げていく過程で、マントルと地殻を経由して地球表面に伝わる。物質の収支でみると、わずかであるが宇宙から隕石や宇宙塵などが入ってくることや、火山活動などによって地球内部から地球表面に物質が流入する。また、地球の外にはほとんど地球表面の物質は出ていかないと近似できる。

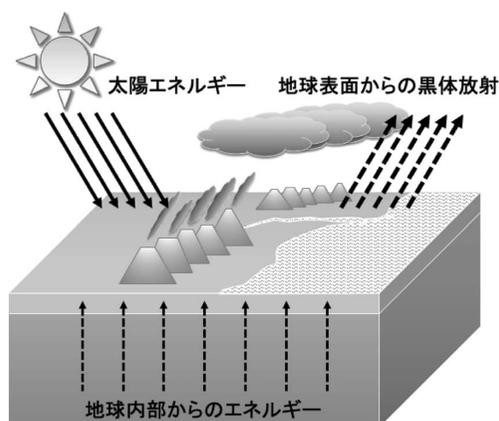


図1. 地球表面のエネルギー収支の概念図.

2.2 化石燃料・原子力・再生可能エネルギーの熱力学的な位置づけ

人類は19世紀から現在にかけてこれらの化石燃料を使って文明を営んできた。熱力学的視点で化石燃料を位置づけると、「化石燃料は、過去に太陽および地球内部のエネルギーによって生産された生物がいわば化石化して、石炭や石油などの高エネルギー物質として蓄積した高エネルギー物質である」。化石燃料は文明を支えており、あまり加工せずにエネルギーとして利用できる点で本質的な一次エネルギーである。石炭は植物由来で、石油は動物由来だと考えられている。生物由来の有機物は酸素と接触すれば酸化されて、主に水と二酸化炭素になる。しかし地下に埋まった有機物は酸素と接触せずに、ゆっくりと変化して有機物中の酸素と水素は減っていく。私は1990年頃に Latrobe Valley 近郊にあるオーストラリアの石炭公社（当時 Coal Corporation Victoria）と共同研究したが、Latrobe Valley 一帯は世界的に有数の埋蔵量1000億 t におよぶ褐炭鉱山である。一方、石油の起源については諸説あるが、動物由来であるとおおむね考えられている。私は、学生時代にポルフィリンという物質を使って極微量の金属を分析する手法を開発する仕事をしたが⁹⁾、天然ではポルフィリンや類似物質はヘモグロビン、ヘモシアニン、クロロフィルなどの反応活性中心にある。石油中にはポルフィリンが多く、石油中のポルフィリンは石油が動物由来であることを表している。

次に、原子力エネルギーは熱力学的な視点からどのように位置づけられるだろうか。単に高エネルギー物質という観点でみれば、ウランも化石燃料も、地球を含めた広い意味での宇宙現象によって蓄積した高エネルギー物質である。一般的な原子炉燃料であるウランは、超新星爆発という珍しい宇宙現象によって生成する元素である。このためウランの存在量は化石燃料と比べて極めて小さい。しかも原子力に利用できる核分裂する同位体は ^{235}U であり、天然ウラン中の0.7%しか存在しない。高速増殖炉や地上核融合炉まで無理に含めれば化石燃料より資源量は大きいと算出できるが、これらは実現する見通しはまずない。実際、どちらも数10年以上も研究開発を続けているが、たいして進歩していない。高速増殖炉は高速中性子を減速させないために原子炉の冷却媒体として溶融した液体状の金属ナトリウムを使う。金属ナトリウムは空気や水に触れると爆発的に燃える危険な物質である。また中性子を減速させない条件を実現するために、制御理論上の不安定な条件で制御を行うことになる¹⁰⁾。これらの技術的な欠陥をもつため、電気を生産するための実用的な高速増殖炉は地球上では事実上不可能である。一方、核融合炉については世界各国で数10年間も研究されているが、実用化からは遠い。

最後に、熱力学的視点からみる再生可能エネルギーの位置づけは、太陽エネルギーまたは地球内部のエネルギーのいわばお裾分けである。太陽光発電は可視光のエネルギーを直接電気に変える。風力発電は太陽エネルギーによって発生した風力をタービン発電機によって電気に変える。地熱発電は火山帯などにある高温水蒸気の熱エネルギーを電気に変える。従っ

てこれらのエネルギーは、地球表面に流入するエネルギーのごく一部を人間が利用することに相当する。地球表面に降り注ぐ太陽エネルギーの総量は極めて大きく、地球に降り注ぐ1時間あたりの太陽エネルギーは、全人類が1年間に消費するエネルギー量に匹敵する。つまり地球に到達する太陽エネルギー量は、人類が使っているエネルギーよりも約1万倍大きい¹¹⁾。お裾分けでも人類のエネルギーをまかなえそうにみえるのは、このためである。一方で、太陽エネルギーのエネルギー密度は化石燃料と比べて非常に低く、これは太陽エネルギーを利用しにくい主な原因である。

2.3 二次エネルギーについて

ここで一次エネルギーと二次エネルギーの熱力学的な位置づけを確認する。一次エネルギーは化石燃料などの資源がもともと持っているエネルギーである。一方で二次エネルギーは、これらを別のエネルギーの形態に変換して使いやすくしたものである。これには電気やガソリンなどの液体燃料、さらには本稿で評価する水素エネルギーなどが含まれる。原子力エネルギーは核物質の資源のもつエネルギーが一次エネルギーであり、これを化石燃料などのエネルギーを利用して加工処理した原子力燃料が、原子炉で使われる。二次エネルギーはそもそもエネルギー資源でない。しかし、マスコミ報道などでは熱力学的にも区別しなければならない一次エネルギーと二次エネルギーを、ほとんど区別できていない。このために、例えば、水素は水に含まれており水素エネルギーは無尽蔵であるというような無知蒙昧な説明が行われる。また、原子力における一次エネルギーはウラン鉱石で二次エネルギーは最終的な燃料棒としての原子力燃料であるが、これらの区別や一次エネルギーから二次エネルギーを生産する過程の説明は、控えめである。エネルギーは様々な過程を経て色々な形態に相互変換できるが、その際に必ず損失があることは、熱力学の最初に学ぶことである。つまりこれらの見解や報道は、熱力学という自然科学の基本法則を無視したものである。

2.4 エネルギー収支比とエネルギーの自律性

エネルギー資源の良し悪しを議論する際に、そのエネルギー資源から得られるエネルギーに対してそのエネルギー資源を得るために投入したエネルギーの比(=エネルギー収支比)は、文明にとっての使いやすさ(エネルギーの良し悪し)の指標として役立つ^{6, 12-15)}。英語では、Energy Payback Ratio, Energy Profit Ratio, Energy Return on Investment, Energy Returned on Energy Invested など(略してEPR, EROI, EROEI)が用いられる。

例えば、1のエネルギーを投入して50のエネルギーが得られるならば、そのエネルギー収支比は50である。ある試算による主なエネルギー資源のEPRを表1に示す⁶⁾。EPRの計算値は研究者によって大きく異なる場合がある。おおむね初期の化石燃料資源と水力発電では

表 1. 主なエネルギーの EPR⁶⁾

化石燃料類	EPR	その他	EPR
石炭	80	水力発電	98
石油・天然ガス (1930年代)	93	風力発電	17
石油・天然ガス (1970年代)	30		
石油・天然ガス (最近)	8	地熱発電	7
シェールオイルガス	2~3	原子力発電	5
タールサンド	2~3	太陽光発電	3~4
		バイオマス燃料	1

文献データ⁶⁾をもとにして作成した。

EPR は高く、それら以外のエネルギーの ERR は概して低い。また、原子力や再生可能エネルギーは報告者によって大きく異なる傾向がある。ここでは、化石燃料資源の枯渇の危機を訴えるグループがまとめた値を例として示す。これによると、20世紀初頭の石油では EPR は100前後であったのが、現在は10ぐらいになった。水力発電は100前後で風力発電は10を超えるが、再生可能エネルギーの多くや原子力は10以下である。EPR はおよそ10以下になるとエネルギー源として成り立ちにくくなり、3程度が限界であると考えられている^{6, 13, 15)}。EPR の低いエネルギーはコストも高いのが一般的である¹³⁾。再生可能エネルギーや原子力が社会において成り立っているように見えるのは、様々な財政上の補助があるためであり、エネルギー源としては化石燃料に依存する。つまり、簡単には自律できないエネルギーである^{6, 13)}。

化石燃料以外のエネルギーの特徴を概観する。第1に、化石燃料の石油からは二次エネルギーであるガソリンやガス燃料を蒸留などによってあまりエネルギー損失なしに作れるが、再生可能エネルギーはほぼ電気にしか変換できないという大きな難点もある。電気エネルギーを使って液体燃料をつくるとなると一大事である。私が石炭の仕事に携わったとき、ちょうどオーストラリアに石炭液化の実証プラントが建設されていた。この当時（1990年）でも、石炭液化には石油価格が1バレル当たり38ドル程度に上がらないと採算がとれないと言われていた。これは、石炭から液体燃料を作るのはかなりコストもエネルギーロスも大きいためである。また電気エネルギーを直接使う方法では旅客機を飛ばすのはほぼ不可能である。第2に、バイオマスエネルギーでは1以下が多く、使えば使うほどエネルギーを失ってしまう。バイオマス廃棄物の利用は、いわばバイオマスという廃棄物を燃焼させて廃棄物量を削減し、生成した熱を多少なりとも回収するという事業に相当する。EPR は報告者によって異なるものの、バイオマスの EPR は低く、使うとエネルギーを損失することは多くの研究によって指摘されている^{6, 15, 16)}。第3に、原子力は一般的な世界の一次エネルギー消費量データにおいては、発電量に換算して評価されているが、原子力をエネルギー源として利用するためにはウランの採掘・製錬、同位体の濃縮、などの工程において莫大な化石燃料を消費するので、

石油や石炭などと同様に一次エネルギーとして位置づけることには疑問がある。そもそも電力は二次エネルギーであり発電量に換算するという評価方法自体に矛盾がある。また原子力設備の廃棄とその後の管理には莫大なエネルギーを要するが、これらを含めると二次エネルギーに変換するために必要なエネルギーは膨大になると推察できる。つまり、原子力の実際のEPRはさらに下がる。

いまのところ化石燃料の埋蔵量はまだまだ大きく、例えば石炭は1兆トンのレベルの埋蔵量が存在すると考えられている⁵⁾。しかし今後は、EPRが大きい=質の良い化石燃料の確保は難しくなり、質の悪い化石燃料しか得られないという傾向は続くだろう。現在は、質の悪い再生可能エネルギーを併用せざるを得ない時代に入りつつある。結論として、大量消費をよしとする社会の視点からみれば、再生可能エネルギーを利用することは明るい話題ではない。

付け加えて、技術的な改良などによって再生可能エネルギーのEPRを向上する可能性があるのかと言われれば、その見通しは明るくないだろう。例えば、太陽光発電の効率を高める研究は数10年間にわたって行われてきたが、実用レベルではあまり向上していない。また、その他の再生可能エネルギーについては、電気機械や熱機関などの古典的技術の寄せ集めであり、大幅な技術的改良は見込めない。

3. 電気自動車と水素エネルギーの評価

3.1 環境技術導入の目安としての10倍則の提案

以上の事例によってエネルギーに関連する環境技術について、問題の一端を説明した。次にこれらを土台として、環境技術を開発・導入する際の判断基準を考える。代替技術の導入の際には、様々な政策等によってコストは見かけ上は低いことがあるので、環境保全に対する効果があることを推定するためにはエネルギー収支が適している。しかしその見積もりは難しい。実際、上述したエネルギーに関するEPRにおいても報告者によってかなり異なる場合がある^{6, 12-15)}。また環境技術を導入する際には、エネルギー投入と財政面だけでなく大きな社会的コストを払わなければならない。そこで環境技術の導入にあたっては、なるべく簡単な見積りによって大きな効果があることが期待できるものに絞ることを提案する。複雑な計算に基づくことは、あまり効果のない技術も対象とすることを許容することになる。その結果、技術導入の効果は導入後でさえもはっきりとせず、導入効果について無益な論争に陥る可能性がある。また導入に伴う社会的な混乱を招くことも考えなければならない。そこで私は、数値でいえば、全体のエネルギー効率がまずは10倍ぐらい良いと予想される技術（桁の違う技術）を、優先して検討すべきであることを提案する（ここでは10倍則とよぶ）。この考え方からみて問題のある環境技術の事例をみよう。

3.2 バイオエタノールのエネルギー効率

世の中には様々な環境技術が存在する。しかしそれらには問題がある場合もある。そこで問題のある技術としてバイオエタノールについて考えよう。バイオエタノールは再生可能エネルギーの一種として位置づけられている。上述したように、EPR からみれば再生可能エネルギーは化石燃料と比べて非効率なエネルギー資源である。実際、バイオエタノールの生産は再生可能でもエネルギー生産技術のどちらでもなく、化石燃料を余剰に消費するエネルギー消費事業である¹⁶⁾。

名目上は、バイオエタノールの製造には木材チップなどの廃棄物を原料とすることも想定されるので、環境によいとして生産量は伸び、研究も一時期には盛んになった¹⁷⁻²⁰⁾。バイオエタノールの生成は、まずトウモロコシなどのデンプンを含む原料では、お酒の醸造と同様に糖化・発酵させると10~20%のエタノールを含む水溶液が得られる。木材などのセルロースをグルコースの原料とする場合には、加水分解処理してグルコースを生成した後に、アルコール発酵させる。さらにエタノールを液体燃料とするためには、水を取り除いて純度の高いエタノールを取り出さなければならない。一般には、蒸留酒製造と同じ蒸留が用いられる。しかし蒸留ではエタノールと水は共沸混合物となりエタノールの純度は96%までしか高まらない²¹⁾。ガソリンに混ぜるためなど、純度を上げるためには脱水剤を用いるなどの方法を必要とする²²⁾。化学技術者であれば、蒸留操作から始まる水分を取り除く工程が、いかにエネルギーを大きく消費するプロセスであるかを知っているはずである。作物の栽培まで遡ってエネルギー収支を考えなくとも、エタノールの精製工程だけでも大きなエネルギーを消費するので、バイオエタノールでエネルギー生産できるのかどうかを疑わなければならない。しかしバイオエタノールの研究は、エネルギー収支を検証することもなく日本でも流行り、大学等でも行われた。

3.3 簡単な計算による電気自動車とガソリン車のエネルギー収支と評価

電気自動車はガソリン車の代替技術であるが、ガソリン車と比べて桁違いに効率が良いわけではない。そのことを理解するために、それぞれの自動車が1 km あたり走行するのに必要なエネルギーをなるべく簡単に計算してみよう。ここでは、EPA 電費の最も高いレベルの電気自動車 (6.4 km/kWh) と^{23,24)}、比較的燃費の良い小型ガソリン車に相当する WTLC モード 20 km/L の場合とを比較する。EPA 電費は、送電線の末端の電力を基準とする電気自動車が単位電力あたりどのくらい走るかという指標である。電気自動車の電力生産には火力発電 (発電効率40%・送電ロス5%) を使うものとする。また、ガソリン 1 L あたりの発生エネルギーは 33.4×10^6 J であり、石油からガソリンを精製する際のエネルギーロスは5%とする。また 1 kWh は 3.6×10^6 J である。これらをもとにして 1 km あたりの消費エネルギーは以下のように計算される。

- ・ 最高性能レベルの電気自動車 1 km 走行に必要なエネルギー：
(単位電力当たりのエネルギーのジュール換算) ÷ (EPA 電費) ÷ (発電と送電の効率)
 $(3.6 \times 10^6 \text{ J/kWh}) \div (6.4 \text{ km/kWh}) \div (0.40 \times 0.95) = 1.48 \times 10^6 \text{ J/km}$
- ・ 燃費 20 km/L のガソリン車の 1 km 走行に必要なエネルギー：
(単位体積当たりのガソリンの燃焼エネルギーのジュール換算) ÷ (ガソリン車の燃費) ÷
(ガソリンの製造効率)
 $(33.4 \times 10^6 \text{ J/L}) \div (20 \text{ km/L}) \div (0.95) = 1.76 \times 10^6 \text{ J/km}$

この計算では、電気自動車の性能を 6.4 km/kWh としたが、効率が約20%下がれば燃費が 20 km/L のガソリン車と同じとなる。電気自動車は使い方によっては都市内での大気汚染を減らすなどのメリットが期待される面もある。しかしこの簡単な計算では、電気自動車のエネルギー消費効率はガソリン車と大して変わらず、前提となる数値が少し変わるとエネルギーの削減効果があるかどうかは不明確となる。このため電気自動車導入に実際に必要となる以下の①～③の課題を解決するとなると、上の計算で得られた小さな差はすぐに消える可能性がある。そして計算を細かく評価するという議論を始めると、電気自動車とガソリン車のどちらを選ぶかという果てしない論争に陥る。しかしこの種の推算はそもそも正確にはできないという前提があるので、結局は論争自体が無駄である。

実際にいまあるガソリン車を電気自動車に置き換えるとなると、①電気自動車を大量生産するための工場設備や関連する広範な技術フローを再構築しなければならずこのためのエネルギーと物資が必要である、②大量の発電所を建設しなければならない、③リチウム電池を電気自動車に使うならば資源はすぐに枯渇し得るうえに、リチウム電池の代替技術はまだない²⁵⁾、などの難題がある。電気自動車とガソリン車の差は小さいので、①と②には莫大なエネルギーや物資が必要であり投じたエネルギーを回収できるかどうかさえ分らない。また自動車産業は先進国の多くでは基幹産業であり、①と②を行えば大きな産業構造の変化を伴い社会的・経済的に大混乱を招く。③の課題については、地球上に大量に存在するナトリウムでリチウムを置き換えることができればリチウム枯渇の問題は解決できるので、長期にわたって多くの機関で研究されてきた。しかし、実用化にはまだ時間がかかりそうであり、実用化できる保証もない²⁶⁾。結論として、ガソリン車の代替技術として電気自動車を大規模に導入すると、エネルギー消費を大きく削減することは期待できないにも関わらず、一方で様々な社会混乱を引き起こし得る。すでにその兆候は見え始めている。このように、電気自動車を代替技術とするこの事例は、効率を精査しなければ良くなるのかどうか分らない典型的な例であり、環境技術として駄目な例である。

3.4 水素エネルギーの謎を簡単な化学熱力学で説明する

次に水素エネルギーをみよう。水素エネルギーとは、「二酸化炭素を出さない次世代エネルギー」という、全く科学的根拠のない理屈によって推進する、「疑惑の次世代エネルギー」である。電気自動車と同様に水素エネルギーも自動車産業が中心にあり、水素を燃料とする燃料電池車の大量消費が想定される。水素エネルギーは二次エネルギーなので、そもそもエネルギー資源ではない。つまり、水素をエネルギー資源と称する時点ですでに嘘が含まれている。現在の水素製造方法はメタンなど化石燃料資源を原料とする方法である。化石燃料資源と再生可能エネルギーの熱力学的な位置づけは、ここまで説明したとおりである。水素は二次エネルギーなので、比較するならば電力やガソリンなどの液体燃料が対象となるが、二次エネルギーとしては電力やガソリンが汎用性や安全性の点で水素より遙かに優れている。また気体燃料が必要ならば天然ガスで足り、気体燃料としての水素は特殊な用途にしか適していない。さらに、すでに電気や液体燃料を中心とする比較的には効率的な現代文明が成立しており、何も改善できない水素で置き換えようという主張は荒唐無稽である。

このように、エネルギー資源としての水素エネルギーは10倍則に基づく議論の対象にすらならない虚構である。繰り返しになるが水素はエネルギー資源ではない。ここでは、二次エネルギーである水素エネルギーはエネルギーを生み出さず、二酸化炭素の排出量も減らさないことを簡単な化学熱力学の考え方で確認していこう。まず水素のエネルギー収支についてみよう。メタンと石炭の場合の水素生成反応（式 (1-1) および (2-1)）、水素の燃焼反応（式 (1-2) および (2-2)）、および対応するメタンおよび石炭の燃焼反応（式 (1-3) および (2-4)）を以下に示す。また、石炭からの水素生成では一酸化炭素が生成するので、一酸化炭素の燃焼（式 (2-3)）を示す。石炭は単純化して炭素とする。これらの水素合成過程を化学式で書くと、メタンを原料とする場合には式 (1-1) および (1-2) で表され、石炭の場合には式 (2-1)～(2-3) で表される。水素製造は鉄鋼生産などとともに発展し、初期には石炭の水蒸気改質によって水素は製造された（反応式 (2-1) 参照）。石炭を原料とする水素ガスは、20世紀初期に発明されたアンモニア合成法に利用され、20世紀の人口爆発を促した²⁷⁻²⁹⁾。現在では水素ガスは主に天然ガスを原料として製造されており（反応式 (1-1)）、これは天然ガスから電気を作る家庭用設備で用いる水素の製造法でもある。

〈メタンの場合〉



〈石炭の場合〉



上の反応式をみると、メタンから水素を生成する反応式 (1-1) と水素の燃焼反応式 (1-2) を両論的に足し合わせるとメタンの燃焼の反応式 (1-3) と同じになる。つまりエネルギーの出入りも同じである。石炭では、水素生成する反応式 (2-1)、水素の燃焼反応式 (2-2)、一酸化炭素の燃焼反応式 (2-3) を両論的に足し合わせると石炭の燃焼反応式 (2-4) と同じになる。従って、熱力学的にいえば、水素を作っても作らなくても最初の状態と最後の状態は同じなので、反応に伴う自由エネルギー変化の総量は標準状態では同じである。つまり、水素を経由してもしなくても、化石燃料を利用する際の自由エネルギー変化は同じである。これは、ジェットコースターは動力を用いないで最初の出発点より高いところには到達し得ないことと、同様である。同様にして、石炭の場合は一酸化炭素ができるので一酸化炭素の燃焼 (式 (2-3)) が加わるが、水素を作っても作らなくてもやはり同じである。

次に、水素エネルギーは二酸化炭素を出さないという主張があるが、これも化学反応のイロハを知らない妄想である。上述の反応式で示されるとおり、熱力学的にいえばトータルで生成する二酸化炭素量に変化はない。つまり、メタンの場合には反応式 ((2-1) と (2-2) を足したもの) と反応式 (2-3) は同じであり、石炭の場合も同様に計算できる。ここまでの内容は大学の工業化学科などの大学生が2～3年次に習う内容である。これを知ってのことであろうか、二酸化炭素を出さない理屈として、水素生成過程 (式 (1-1) および (2-1)) で発生する二酸化炭素を地下に埋めるという主張を持ち出してることがある。それができるのなら、化石燃料を燃焼する際に発生する二酸化炭素 (式 (1-3) および (2-4)) を地下に埋めればよい。水素エネルギーは二酸化炭素を放出しない次世代エネルギーであるという主張は、化学と熱力学を無視するまやかしである。しかもこのまやかしは、様々なマスメディアでは科学的真理であるかのように説明されている。

さらに、水素は燃えやすく極めて危険であるという技術的問題がある。化学工業では水素を化学原料などの目的で使うことはあるが、研究室などでは水素は真っ赤なガスボンベに入れて保管・使用する。この危険性を知っているため、水素吸蔵合金を利用する技術が長いこと研究されてきた^{30,31)}。しかし今のところ、水素燃料電池車の実現に足る水素吸蔵合金は完成していない³²⁾。燃料電池車に搭載することを想定し水素吸蔵合金の開発が多く大学のなどで延々と続けられてきたが、無駄であった。これらの研究によって利益を得た研究者が少な

くないのが、大学などでの環境技術開発の実態である。化石燃料を水素の原料とする限り水素エネルギーは幻想であり、現状では化石燃料よりも EPR の高いエネルギーは存在しないので、太陽光発電のような他のルートで水素を製造することも想定されない。私は学生のときに大学講義の試験で、水素をどのように調達すべきかという設問に対して、木星から持ってくると良いという答えを書いたことがある。もし、EPR の問題を解決して木星から効率的に水素を調達できるなら、その主張はエネルギーの観点からは正しいであろう。最近ではアンモニアを燃料とする方法が報道されているが、これも水素エネルギーと同様にエネルギー収支においても二酸化炭素の排出においても、全く無意味である。アンモニアは化石燃料から作る水素と空気中の窒素を原料とするので、化石燃料からの水素生成よりもう一段ステップが多く、ステップ数が多い点でさらに悪い。しかもアンモニアは激臭を放つ物質であるし、燃焼すると窒素酸化物を生じる。この種の提案をする研究者は、大学の基礎学習を十分に行ってきたのだろうかという疑問さえ感じる。以上の様に、水素エネルギーを導入しようという政策は、物理法則・化学法則や技術の実際を無視する馬鹿げたものである^{6,33,34)}。

結論として、10倍則にあてはまらないレベルの技術開発は、環境問題を解決するための方策として優先すべきではない。10倍則にあてはまらない技術体系の導入を検討する場合には、その研究開発からその技術の終了までの全ライフスパンについて、小規模の研究チームで細々とエネルギー収支の計算にまずは取りかかるのがよい。将来には化石燃料の EPR がさらに下がり再生可能エネルギーに依存しなければならない時代がくるので、そのときには10倍則も修正すれば良い。電気自動車や水素燃料電池自動車について言えば、本来はガソリン車を無駄に使う社会から、徒歩・自転車・電車などの桁違いにエネルギー効率が良い交通手段^{6,7)}や、街中でゆっくりと走るのに適した自動車の普及・開発などに向かうべきであろう。ヨーロッパでは都市内の交通機関として自転車利用が早くから整備されてきたが^{35,36)}、日本ではそうした政策はみえない^{36,37)}。

4. まとめと展望

本稿ではいま行われつつある環境技術には課題や矛盾があり、環境保全に対する実質的な効果ではなく、その他の理由によって進められているという実態を説明した。良質なエネルギー資源が入りにくくなる時代は、すでに始まっていると推測される。電気自動車などを過度に推進する理由はこの兆候であろう。従ってこの事実をよく理解し、現代における環境技術の開発は、既存の技術ネットワークを未来にあるべきネットワークに置き換えていく過程として位置づけなければならない。しかし現状のエネルギー消費量の増大はとどまるところを知らず、将来に必要な一連の技術体系と社会制度を完備するまでの道のりは遠いようにみ

える。環境という言葉を利用して様々な政策を浄化して進めてきた道を、さらに突き進めようとしているのが現状である。従って、科学技術者はそのような状況で研究を行っていることを自問自答し、環境問題の本質にせまる研究を行うべきである。また市民は、このような環境技術の実態をもっと知ることには注意を払う必要がある。このためには、一般市民に分かりやすい方法で環境を考えるための自然科学的な教育や説明を進めることが必要であろう。最後に、この種の最大の問題としての地球温暖化問題については触れなかったもので、改めて考察したい。

5. 謝 辞

本研究の一部は、2009年度マツダ財団研究助成、平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業、(独)科学技術振興機構(平成21年度シーズ発掘試験B発展型)、NPO 広島循環型社会推進機構による研究開発事業(2013年度および2014年度)の支援によって行われた研究から着想を得たものであり、謝意を表します。また、ここに引用した私を含むグループの研究に共同研究者として参加いただいた方々に心より謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) M. Höök, X. Tang (2013) Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change — A review, *Energy Policy* 52, 797–809.
- 2) F. Fizaine, V. Court (2016) Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society, *Energy Policy* 95, 172–186.
- 3) T. Prior, D. Giurco, G. Mudd, L. Mason, J. Behrisch (2011) Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management, *Global Env. Change* 22, 577–587.
- 4) M. Klinglmair, S. Sala, M. Brandão (2014) Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues, *Int. J. Life Cycle. Assess.* 19, 580–592.
- 5) R. Heinberg, D. Fridley (2010) The end of cheap coal, *Nature* 486, 367–369.
- 6) 田村八洲夫 (2014) 石油文明はなぜ終わるか, 東洋出版.
- 7) 久保田宏, 平田賢太郎, 松田 智 (2016) 化石燃料の枯渇がもたらす経済成長の終焉, 新日本印刷株式会社.
- 8) BP (2020) *Statistical Review of World Energy 2020 – 69th edition.*
- 9) K. Kawamura, S. Igarashi, T. Yotsuyanagi (1987) Porphyrin as reagent of new indicator reaction for the catalytic determination of ultra trace amounts of ruthenium (III), *Chem. Lett.* 16, 2217–2220.
- 10) 武谷三男編 (1976) 原子力発電, 岩波新書.
- 11) 荒川裕則 (2017) 21世紀の太陽光発電—テラワット・チャレンジ—, コロナ社.
- 12) C. W. King, C. A. S. Hall (2011) Relating financial and energy return on investment, *Sustainability* 3, 1810–1832.
- 13) Tullett Prebon Group Ltd. (2013) *Perfect Storm.*
- 14) L. C. King, J. C. J. M. van den Bergh (2018) Implications of net energy-return-on-investment for a low-carbon energy transition, *Nature Energy* 3, 334–340.
- 15) 鎗谷浩明, 松島 潤 (2012) エネルギー収支分析による社会の持続性評価, もったいない学会 WEB 学

- 会誌 6, 1–15.
- 16) 久保田宏, 松田 智 (2009) 幻想のバイオ燃料—科学技術の見地から地球環境保全対策を斬る, B&T ブックス, 日刊工業新聞社.
 - 17) D. Lorne, A. Bouter (2020) Economic outlook — Biofuel dashboard 2020, IFP Energies Nouvelles, 16.09.2020. <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/biofuels-dashboard-2020>
 - 18) F. O. Licht (2020) World ethanol production to rebound in 2021, Informa Connect, 27.06.2020. <https://informaconnect.com/world-ethanol-production-to-rebound-in-2021/>
 - 19) N. Sarkar, S. K. Ghosh, S. Bannerjee, K. Aikat (2012) Bioethanol production from agricultural wastes: An overview, *Renew. Energy* 37, 19–27.
 - 20) A. Arumugam, V. V. Malolan, V. Ponnusami (2021) Contemporary pretreatment strategies for bioethanol production from corncobs: a comprehensive review, *Waste Biomass Val.* 12, 577–612.
 - 21) 日本化学会編 (2021) 化学便覧—基礎編一, 丸善.
 - 22) 岩崎 博, 野中 寛, 松村幸彦, 山田興一 (2005) バイオエタノール精製プロセスの合理化, *J. Jpn. Inst. Energy* 84, 852–860.
 - 23) EVsmart テスラ モデル 3 —グレードと機能比較—, <https://evsmart.net/carMaker/Tesla/Model3/>
 - 24) 中谷隆之 (2020) 2020年版エコカー (HV/PHV/EV/FCV) の市場/技術動向, 第434回群馬大学アナログ集積回路研究会, 講演スライド.
 - 25) 澤田 明 (2012) 世界のリチウム資源開発の動向, *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.* 66, 2–7.
 - 26) N. Yabuuchi, K. Kubota, M. Dahbi, S. Komaba (2014) Research development on sodium-ion batteries, *Chem. Rev.* 114, 11636–11682.
 - 27) 岡部泰二郎 (1981) 無機プロセス化学, 丸善.
 - 28) V. Smil (2004) *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production*, MIT Press, Cambridge.
 - 29) 川村邦男 (2015) 文明の生命システム論からみる地球環境保全—エネルギー・資源・情報の流入・流出に関する考察—, *人間環境学研究* 13, 53–69.
 - 30) 秋葉悦男 (2006) 水素吸蔵合金の現状, *水素エネルギーシステム* 31, 14–19.
 - 31) K.-H. Young, J. Nei (2013) The current status of hydrogen storage alloy development for electrochemical applications, *Materials* 6, 4574–4608.
 - 32) 松下政裕, 飯野光政, 田嶋一公, 阿部真丈, 徳山榮基 (2020) 水素吸蔵合金による水素貯蔵タンクの温度変化の解析に関する研究, *日本機械学会論文集* 86, 1–14.
 - 33) 小澤祥司 (2015) 「水素社会」はなぜ問題か 究極のエネルギーの現実, 岩波ブックレット No. 931, 岩波書店.
 - 34) 久保田宏, 平田賢太郎, 松田 智 (2016) 化石燃料の枯渇がもたらす経済成長の終焉, 新日本印刷.
 - 35) 鈴木美緒, 屋井鉄雄 (2010) 欧州の都心部における自転車走行空間の設計基準とその運用に関する研究—ドイツの交差点を例として—, *土木計画学研究・論文集* 27, 811–822.
 - 36) 早川洋平 (2019) 世界の潮流から外れる日本の自転車政策 —ドグマ化した車道通行原則と非科学的な政策形成—, *交通権* No. 36, 43–59.
 - 37) 馬場直子 (2014) 自転車に冷たい国, ニッポン 安心して走れる街へ, 岩波ブックレット No. 909, 岩波新書.