

工業文明の持続可能性について

SDGs が地球環境を破壊する

2023年2月19日

近藤 邦明

はじめに

私たちが環境問題について考えるのは、人間がどうすれば少しでも長期間にわたって生き延びていくことができるのかを探るためです。人間は生物であり、地球の表面環境の変化に対応して、その生き方は不断に変化しています。

人類の数万年～十数万年の歴史において、この 200 年間程度の期間続いている工業文明は極めて特殊で一過的な社会形態です。

この工業文明という特殊な文明は、人間が化石燃料という優れたエネルギー資源を得たことで、かつて経験したことのない物質的な豊かさを手に入れました。確かに、ものに溢れた豊かな暮らしがいつまでも続くのであれば、それは素晴らしいことなのかもしれません。

しかし、工業文明によって人間社会がいびつに肥大化することで、生物である人間の依って立つ根源的なシステムである大気水循環や地球生態系の物質循環が壊され、あるいは汚染され、環境問題という、言わば人類文明の自家中毒現象が起きました。

一方、工業文明が成立するための本質的な条件である優れたエネルギー資源の取得には限界があります。鉱物資源である化石燃料あるいはウラン鉱の確認埋蔵量に対する可採年数は僅か数十年～百数十年にすぎません。探鉱技術の進歩によって、可採年数はもう少し長くなると考えられますが、数百年先には確実に枯渇することになるでしょう。

有限のエネルギー資源に依存している工業文明という物質的に豊かな時代は永続することはありません。近い将来必ず終焉を迎えることは自然科学的な必然です。

しかし、工業文明の永続を願う大多数の人々はこの事実を認めようとしません。科学者や技術者は科学技術によって無限のエネルギー供給技術を生み出すという見果てぬ夢に憑りつかれることになりました。

人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論が蔓延し始めると、エネルギー資源の枯渇とは異なる文脈、つまり温暖化を防止するために CO₂ を放出しないエネルギー技術が必要であると言われるようになり、「脱炭素社会」を目指すことが世界的な共通の目標として掲げられました。

脱炭素社会の構想や、最近はやりの SDGs = Sustainable Development Goals: 持続的開発目標は、化石燃料に替わって工業文明を支え得るエネルギー供給技術が実現されることを前提としてまとめられた非科学的な願望であり、砂上の楼閣です。

このところ SDGs を取り上げたテレビ番組が盛んに放映されています。また学校・教育現場でも児童生徒に対して再生可能エネルギーや持続可能な社会について科学的な裏付けのない安直な教育が、いや洗脳が行われています。

昨年、大分合同新聞の投書欄にとっても気になる中学生の意見を見つけました。これは、中学校の国語の授業で「モアイは語る—地球の未来」という地理学者・環境考古学者である安田喜憲氏の文章が取り上げられ、これを基に環境問題を考える課題として生徒に与えられたレポートのようでした。

安田氏の文章は、イースター島の火口湖の湖底堆積物の花粉分析結果に基づいて、イースター島文明の5世紀～18世紀までの創成から滅亡までの歴史を解明した内容です。文明の限界を考える上で重要な指摘を含んでいるので、少し長くなりますが、以下に全文を紹介します。

モアイは語る—地球の未来

安田喜憲

君たちはモアイを知っているだろうか。それは、人間の顔を彫った巨大な石像であり、大きなものでは高さ二十メートル、重さ八十トンにも達する。モアイは、南太平洋の絶海の孤島イースター島にある。イースター島は、日本の種子島の半分にも満たない大きさの火山島だ。この小さな島で、これまでに千体近いモアイが発見されている。

いったいこの膨大な数の巨像を誰が作り、あれほど大きな像をどうやって運んだのか。また、あるときを境として、この巨像モアイは突然作られなくなる。いったい何があったのか。モアイを作った文明はどうなってしまったのだろうか。実は、この絶海の孤島で起きた出来事は、私たちの住む地球の未来を考えるうえで、とても大きな問題を投げかけているのである。これまでにわかってきたイースター島の歴史について述べながら、モアイの秘密に迫っていきたい。

絶海の孤島の巨像を作ったのは誰か。謎が謎を呼び、宇宙人がやって来て作ったのではないかという説まで飛び出した。しかし、最近になって、それは西方から島唄いにやって来たポリネシア人であることが判明した。墓の中の化石人骨の分析や、彼らが持ってきたヒョウタンなどの栽培作物の分析から明らかになったのだ。さらに、初期の遺跡から出土した炭化物を測定した結果、ポリネシア人が最初にこの島にやって来たのは、五世紀頃であることも明らかになった。

その頃、人々はポリネシアから運んできたバナナやタロイモを栽培し、豊かな海の資源を採って生活していた。そして、十一世紀頃、突然巨大なモアイの製造が始まる。同じ時期に、遺跡の数も急増しており、この島の人口が急激に増加を始めたことがわかる。人口は百年ごとに二倍ずつ増加し、十六世紀には一万五千から二万に達していたと推定されている。

大半のモアイは、島の東部にあるラノ・ララクとよばれる石切り場で作られた。このラノ・ララクには、モアイを作るのに適した軟らかい凝灰岩が露出していたからである。人々は硬い溶岩や黒曜石でできた石器を使って、モアイを削り出した。

削り出されたモアイは、海岸に運ばれ、アフとよばれる台座の上に立てられた。このとき初めて、モアイに目の玉が入れられた。アフの上のモアイは、大抵の場合、陸の方に向けて立てられた。それは、モアイがそれぞれの集落の祖先神であり、守り神だったからだと考えられる。人々はいつもモアイの目に見守られながら生活していたのであろう。

それにしても、ラノ・ララクの石切り場から、数十トンもあるモアイをどのようにして海岸のアフまで運んだのだろうか。石ころだらけの火山島を十キロも二十キロも運ぶには、木のころが必要不可欠である。モアイを台座のアフの上に立てるときでも、支柱は必要だ。

しかし、現在のイースター島には、オーストラリアから持ってきて最近植栽したユーカリの木以外には、森は全くなく、広大な草原が広がっているだけである。モアイが作られた時代、モアイの運搬に必要な木材は存在したのだろうか。

この謎を解決したのが、私たちの研究だった。私はニュージーランドのマセイ大学 J. フレンリー教授と共に、イースター島の火口湖にボーリングをして堆積物を採取し、堆積物の中に含まれている花粉の化石を

分析してみた。すると、イースター島にポリネシア人が移住した五世紀頃の土の中から、ヤシの花粉が大量に発見されたのだ。このことは、人間が移住する前のイースター島が、ヤシの森に覆われていたことを示している。

まっすぐに成長するヤシの木は、モアイを運ぶためのころには最適だ。島の人々はヤシの木をころとして使い、完成したモアイを海岸まで運んだのであろう。

私たちの花粉分析の結果から、もう一つの事実も浮かび上がってきた。ヤシの花粉の量は、七世紀頃から、徐々に減少していき、代わってイネ科やタデ科などの草の花粉と炭片が増えてくる。このことは、ヤシの森が消滅していったことを物語っている。人口が増加する中で家屋の材料や日々の薪、それに農耕地を作るために伐採されたのだろう。さらに、モアイの製造が始まると運搬用のころや支柱としても使われるようになり、森がよりいっそう破壊されていったのだと考えられる。

ラノ・ララクの石切り場からは、未完成のモアイ像が約二百六十体も発見された。なかには作りかけの二百トン近い巨像もあった。運ぶ途中で放棄されたモアイも残されている。おそらく森が消滅した結果、海岸までモアイを運ぶことができなくなったのであろう。

では、モアイを作った文明は、いったいどうなったのだろうか。

かつて島が豊かなヤシの森に覆われていた時代には、土地も肥え、バナナやタロイモなどの食料も豊富だった。しかし、森が消滅するとともに、豊かな表層土壌が雨によって浸食され、流失してしまった。火山島はただでさえ岩だらけだ。その島において、表層土壌が流失してしまうと、もう主食のバナナやタロイモを栽培することは困難となる。おまけに木がなくなったため船を造ることもままならなくなり、たんぱく源の魚を捕ることもできなくなった。

こうして、イースター島はしだいに食料危機に直面していくことになった。その過程で、イースター島の部族間の抗争も頻発した。そのときに倒され破壊されたモアイ像も多くあったと考えられている。そのような経過をたどり、イースター島の文明は崩壊してしまった。モアイも作られることはなくなった。文明を崩壊させた根本的原因は、森の消滅にあったのだ。千体以上のモアイの巨像を作り続けた文明は、十七世紀後半から十八世紀前半に崩壊したと推定されている。

イースター島のこのような運命は、私たちにも無縁なことではない。

日本列島において文明が長く繁栄してきた背景にも、国土の七十パーセント近くが森で覆われているということが深く関わっている。日本列島だけではない。地球そのものが、森によって支えられているという面もある。森林は、文明を守る生命線なのである。現代の私たちは、地球始まって以来の異常な人口爆発の中で生きている。一九五〇年代に二十五億足らずだった地球の人口は、半世紀もたたないうちに、その二倍の五十億を突破してしまった。イースター島の急激な人口の増加は、百年に二倍の割合であったから、いかに現代という時代が異常な時代であるかが理解できよう。

このまま人口の増加が続いていけば、二〇三〇年には八十億を軽く突破し、二〇五〇年には九十億を超えるだろうと予測される。しかし、地球の農耕地はどれほど耕しても二十一億ヘクタールが限界である。そして、二十一億ヘクタールの農耕地で生活できる地球の人口は、八十億がぎりぎりである。食料生産に関しての革命的な技術革新がないかぎり、地球の人口が八十億を超えたとき、食料不足や資源の不足が恒常化する危険性は大きい。

絶海の孤島のイースター島では、森林資源が枯渇し、島の住民が飢餓に直面したとき、どこからも食料を運んでくるができなかった。地球も同じである。広大な宇宙という漆黒の海にぼっかりと浮かぶ青い生命の島、地球。その森を破壊し尽くしたとき、その先に待っているのはイースター島と同じ飢餓地獄である。とするならば、私たちは、今あるこの有限の資源をできるだけ効率よく、長期にわたって利用する方策を考え

なければならない。それが、人類の生き延びる道なのである。

安田氏の文章は格調高く、私たち大人にとっても示唆に富んだ内容です。

安田氏の文章を教材とした中学校の教育現場で、教師によって一体どのような方向付けが行われたのでしょうか。新聞の投書欄に掲載された中学生の意見を紹介します。

地球の未来を考える

竹田市

食料対策に屋内農業

「モアイは語る―地球の未来―」(3年) 読み、今の世界がとても大変な事態におちいつていることが分かりました。これを打破するためにはどうすればいいか、食料の中心に考えてみました。

その食料ですが、地球上で農耕地となるのは21億畝が限界で、そこで生産される作物では80億人を支えるのがぎりぎりとのこと。世界の人口は、そろそろ80億人になってしまいそうな状況だということが分かりました。農耕地がたりないというのが問題です。

その対策として屋内農業があるのでは、と考えました。名前の通り屋内で行う農業です。これならば層を重ねることで栽培面積が増やせるので土地が少なくてすみ、どこでもできます。食料不足の問題は、どの国も対象となるでしょう。各国が協力して、こうした農業に取り組むことが大切だと思います。

蓄電活用しCO₂削減

日本は、発電の約8割を火力発電(3年)

に頼っている。発電量は安定しているが、二酸化炭素(CO₂)の排出量がとても多い。一方、再生可能エネルギーである太陽光や風力での発電は、CO₂の排出はほぼないが、安定して電気をつくることができない。では、どうすれば電気を効率よく安定的に、長期にわたって使うことができるか。

一つの策として蓄電という方法がある。各家庭の屋根に太陽光パネルを設置し、昼の間に発電した電気を蓄電池にためておく。夜はそれを使用し、足りない分だけ電気を買う。余剰電力を無駄なく使い切ることで節電でき、温室効果ガスであるCO₂の削減につながるとのこと。地球温暖化を防ぐのにも役立ち、持続可能な社会の実現に向けて一歩前進するのではないだろうか。

二酸化炭素活用して

国語の授業でイースター島の崩壊と、世界が今後どうなっていくのかなどを学びました。この学習を通して、地球温暖化が防止される効率のよい方策を考えました。(3年)

それは、二酸化炭素の活用です。具体的には、ドライアイスを作ったり、酸素と炭素に分解することなどです。二酸化炭素の削減はもちろん、資源を有効に使うという意識が生まれると思います。

これにより異常気象による災害なども少なくなっていくのではないのでしょうか。

農耕地を縦に増やす

地球の農耕地は、どれほど耕しても21億畝が限界で、それで生活できる人口は80億人がぎりぎりとのことだ。そこで私は、横に増やすのではなく、縦に増やせばいいと考えた。調べてみると、施設内で生育をコントロールして栽培を行う人工光型植物工場が実用化されていることが分かった。設置場所の確保が容易で、気候などに左右されずに安定した生産量を実現でき、多段栽培により省スペース化がはかれる。

莫大な資金がかかってしまうという課題もある。しかし、農耕地面積を増やして食料を確保するほうが重要なだろう。

大分合同新聞 2022年8月24日

中学生の投稿を読んだとき、安田氏の文章を読んで、どうしてこのような意見になるのか理解に苦しみました。安田氏もこのような反応は全く意図していなかったのではないのでしょうか？

安田氏の文章が指摘していることは、農耕文明を持続するためには森林を含む生態系を維持することが必要であり、人間社会による過大な収奪的な資源利用が農耕文明を崩壊させたというこ

とです。

私であれば、イースター島の教訓から、地球の森林環境を守り、あるいは復活させることに努力すること、森林を基礎とする地球生態系を安定的に持続できるような規模にまで人間社会を縮小することが真っ先に浮かびます。

ところが中学生の文章にはそのような主張を見ることができません。複数の生徒が言及しているのは、多層階の農産物工場の導入です。あるいはCO₂の削減のための再生可能エネルギーを用いた発電と蓄電池の導入や、CO₂の工業的再利用によるCO₂放出量の削減です。

これはおそらく彼ら自身の考えではなく、授業で教師による方向付けによってもたらされた知識の受け売りなのではないでしょうか。

ここに共通しているのは、工業文明の持続的発展を肯定するSDGsの発想です。中学生は、化石燃料を代替して工業文明を支えることのできる無尽蔵のエネルギー供給技術が獲得できるという前提で、工業的な技術による食糧問題や温暖化に対する解決策を提案しているのでしょう。

SDGsの特徴は、誰にでも受け容れられるように、工業的な技術による開発＝経済膨張によってすべての人が豊かで幸せになれるのだというバラ色の未来像を提示することです。これは、化石燃料の枯渇によって終焉を迎えることから目を逸らし、目の前の豊かさに固執する強欲な先進国の現代人の非科学的で無責任な願望です。

工業文明は何の科学・技術的な裏付けのないSDGsあるいは温暖化対策としての脱炭素化を進めることによって、安田氏がイースター島の研究で明らかにしたように、食糧や資源を奪い合う悲惨な戦争を含む、破局的な終焉を迎えることとなります。

本稿では、工業文明の限界を示すとともに、工業文明の終焉に向かう「後期工業文明」の在り方について考察することにします。

2023年2月19日

近藤 邦明

目 次

はじめに.....	3
1. 工業文明の限界.....	9
1-1 生産過程.....	9
1-2 工業生産図.....	10
1-3 ゴミ問題.....	11
1-4 工業生産の構成要素の特性.....	12
1-5 工業生産の限界とは化石燃料の枯渇.....	14
2. 再生可能エネルギー.....	15
2-1 自然エネルギーの賦存量.....	15
2-2 自然エネルギーの特性.....	15
2-3 再生可能エネルギー発電システムの規模.....	16
2-4 火力発電に対する施設規模.....	18
2-5 エネルギー供給技術の絶対的評価～エネルギー産出比.....	19
2-6 再生可能エネルギーの評価.....	22
3. 工業文明は化石燃料の枯渇で終焉を迎える.....	28
3-1 工業文明とは化石燃料文明.....	28
3-2 SDGs は非論理的な政策目標.....	29
3-3 SDGs の本質.....	29
3-4 SDGs は自然と社会を破壊する.....	31
【追補】電気エネルギーの利用について.....	35
おわりに.....	42

1. 工業文明の限界

1-1 生産過程

生産過程の例として植物の光合成について考えます。光合成とは、地球の大気水循環から二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O を「原料」として取り入れ、太陽光からの電磁波のエネルギーを利用して「生産物」であるブドウ糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ を合成する過程です。

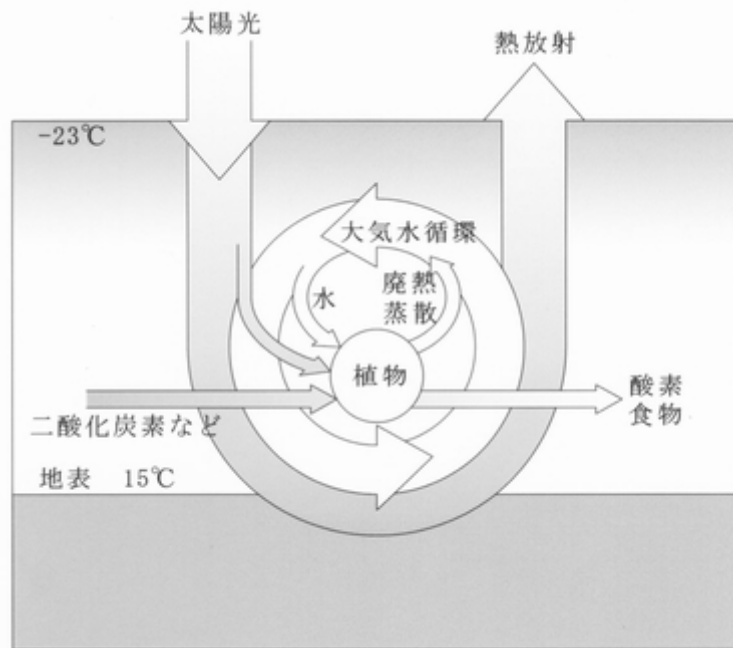
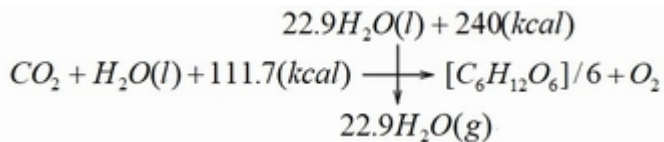


図 1-1 光合成植物の活動

この反応をエントロピー変化を含めた化学反応式で次のように表すことができます。



上式に示す横方向の変化は、左辺に示す光合成の「原料」が右辺に示す「生産物」であるブドウ糖になる過程を示しています。

左辺のエントロピー = $67.9(\text{cal/K}) >$ 右辺のエントロピー = $57.5(\text{cal/K})$

一般に複数の原材料資源を合成してより高度な構造を持つ生産物を作る場合、原材料資源のエントロピーに比較して生産物のエントロピーの方が小さくなります。

しかし、熱学的な世界の全ての現象はエントロピーが増大する方向にしか起こりません。したがって、光合成反応が起こるためには CO_2 と H_2O がブドウ糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ になる以外に、エントロピーを発生する何らかの現象が並行して起こっていることを示しています。光合成では水の蒸発です。液体の水 1mol が水蒸気になることで $28.4(\text{cal/K})$ だけエントロピーが増加します。22.9mol の水が蒸発することで、 $650.4(\text{cal/K})$ だけエントロピーが増加します。

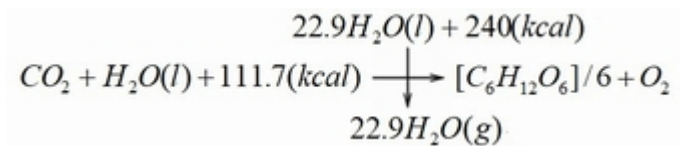
一般に何かを生産する場合、原料から製品への変化の外に、必ず並行して低エントロピー資源の拡散能力を「消費」する変化が進行しています。その意味で、すべての生産過程は低エントロピー資源の消費過程です。

物質	エントロピー(cal/K・mol)
CO ₂	51.2
H ₂ O(l)	16.7
H ₂ O(g)	45.1
O ₂	49.0
[C ₆ H ₁₂ O ₆]/6	8.5

表 1-1 エントロピーの値 (25°C、1 気圧)

1-2 工業生産図

光合成におけるエントロピー論的化学反応式



をもとに、模式的な光合成のブドウ糖生産図を示します。

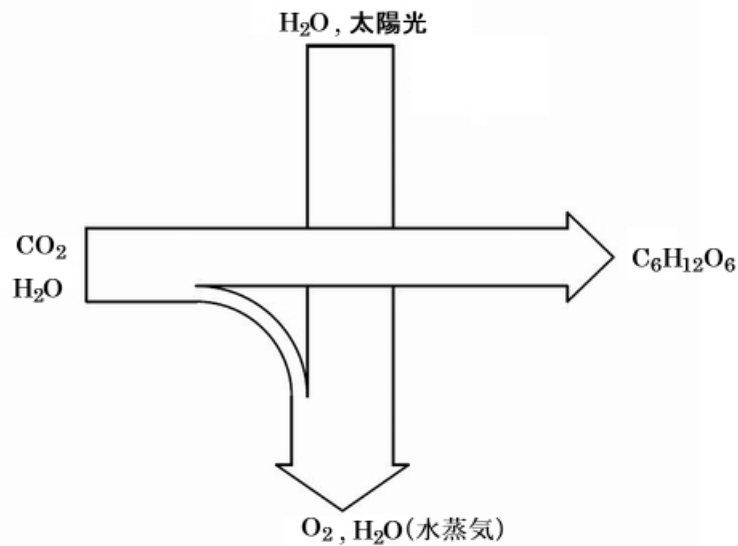


図 1-2 光合成のブドウ糖生産図

生産図では横方向の変化は原材料から生産物への流れを示します。一般的に、原材料資源と生産物のエントロピーを比較すると、生産物のエントロピーの方が小さくなります。生産図の横方向の変化はエントロピーの減少過程です。

生産図の縦方向の流れは、生産物とは直接関係のない生産過程で消費される低エントロピー資源やエネルギー資源の拡散＝エントロピーの増加過程です。

あらゆる変化の過程は全体としてエントロピーの増加過程です。したがって、生産図の横軸方向のエントロピーの減少量に比較して、縦軸方向のエントロピーの増加量の方が必ず大きくなります。

原材料の一部が横方向の流れから縦方向の流れに変化します。これは原材料資源に含まれる不純物の除去、ないし原材料資源の損失を示します。

光合成では大気中の二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O を原材料としてブドウ糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ を合成します。これが横方向の流れです。

その過程で、太陽光からエネルギーを受け取り、廃熱を処理するために大量の水が蒸発して水蒸気になります。また、ブドウ糖の合成には不要である余分な O_2 が大気中に廃棄されています。これらが縦方向の流れです。

この光合成の生産図に倣って、工業生産に対する標準的な生産図を以下に示します。

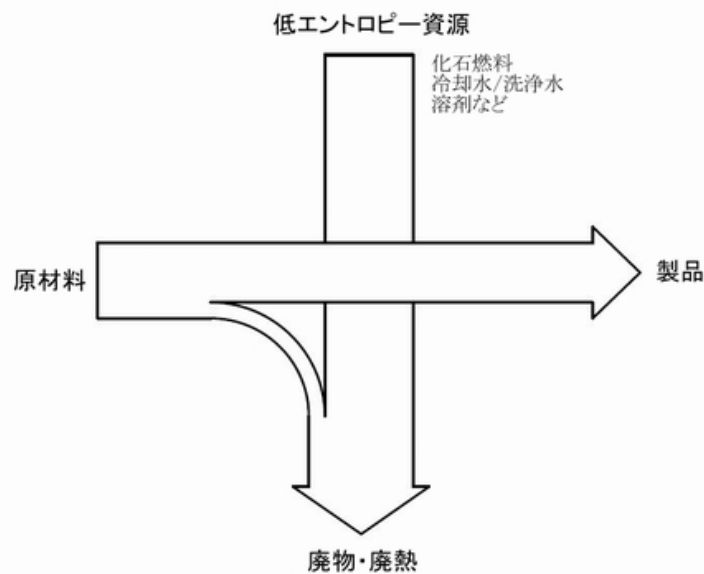


図 1-3 工業生産の生産図

この生産図では明示的に示していませんが、生産の「場」も重要な要素です。光合成であれば植物の体組織であり、工業生産では工場や製造設備がこれに当たります。植物の体組織や工場・生産設備もまた次第に劣化してゆきます。これも縦方向のエントロピーの増加過程の一部として適宜考慮することにします。

1-3 ゴミ問題

工業生産図から分かるように、一般的に工業生産では原材料資源の他に化石燃料に代表される何らかの工業的エネルギーや冷却水、洗浄水などが消費され廃熱・廃物となり、あるいは原材料資源から不純物が取り除かれます。したがって、「ゴミゼロ＝廃棄物ゼロ」の工業生産は理論的に実現不可能です。

「ゴミ問題」の本質はゴミが発生することではなく、「ゴミの質」の問題です。

光合成であれば廃物である酸素 O_2 は動物にとって有用な資源として生態系の中で吸収されます。しかし、工業生産からのゴミの中には生態系の中で処理できずに環境を汚染する物が少なくありません。例えば重金属や放射性物質、毒性を持つ化合物などです。

ゴミ問題の対処方法は明確です。ゴミを生態系の物質循環の中で無理なく処理できる状態にして廃棄することです。生態系の物質循環の中で処理できない重金属や放射性物質、有毒化合物を発生させる工業生産は極力行わないことを基本とし、どうしても必要な場合には環境中に拡散しないように安定化し、管理することです。

安定化して環境への拡散を防ぐことが保証できない危険なゴミ、例えば管理期間が数万年に及ぶ高レベル放射性廃物を生み出す原子力発電のような工業生産プロセスは禁止することが必要です。

近年、人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論の狂騒状態の中で、ゴミ問題は間違った方向に向かっていきます。人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論によって、CO₂ が現在における最大の危険物質・汚染物質として扱われています。

CO₂ は生態系の第一生産者である光合成生物にとって必要不可欠な原料資源です。現在の化石燃料消費による大気中 CO₂ 濃度の上昇は生態系を豊かにする好ましい変化です。

人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論の蔓延によって、例えば大気中 CO₂ 濃度を低減するためにプラスチックごみを焼却処分せずに処理しようとした結果、プラスチックごみの不法投棄によってマイクロプラスチックによる海洋生態系への悪影響が懸念されています。

問題解決の方法は、基本に戻ってプラスチックごみを生態系で処理できる形にして廃棄することです。主に炭素 C と水素 H の化合物であるプラスチックを生態系で処理できる形にする最も優れた処理方法は焼却処分です。CO₂ と H₂O はいずれも生態系にとって必要不可欠な資源です。ただし、プラスチックに含まれる C と H 以外の毒性のある物質については焼却の際に回収し安定化あるいは無毒化処理することが必要です。

プラスチックを焼却することによって得られる熱エネルギーは発電、給熱などで有効利用が可能であり、化石燃料の消費量を削減することが出来ます。

人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論は非科学的な主張です。工業生産によって放出された CO₂ によって大気中 CO₂ 濃度が顕著に上昇することはありません。近年観測されている気温上昇は自然変動です。氷河期の只中にある現在、そもそも数℃の気温上昇は生態系にとって好ましい変化であり、問題にする必要はありません。

人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論によって悪玉にされた CO₂ の排出量を削減するためとして、日本ではレジ袋の廃止ないし有料化が進められています。その一方では通信販売が激増した結果、梱包用資材が激増しています。

また、岸田政権下では、CO₂ が悪玉にされる一方で、脱炭素社会の実現のために「クリーン」= CO₂ を放出しない原子力発電を復活させようという愚かな政策が打ち出されました。

1-4 工業生産の構成要素の特性

工業生産とは原材料資源に対して生産過程で物理・化学的な処理を行い、製品を製造することです。

そのためには原材料資源が必要です。次に、原材料資源を加工するために必要な物理・化学的な知識とそれを具体的に実行する生産技術、製造機械が必要です。そして実際に製造機械を運用するために工業的なエネルギーと冷却・洗浄用の水などの低エントロピー資源が必要です。

鉱物資源

鉱物資源は地球という有限の環境中に存在している有限の資源であり、消費すればやがてなくなります。しかし、物質は質量保存の法則が示す通り、どのような物理・化学的な変化を受けてもその量は不変です(厳密には核種を変更するような場合は別です。)。ここで言う「資源の消費」とは物質の形態が変化すること、あるいは環境中に拡散するという意味であって、物理的に消滅することではありません。

したがって、鉱物資源は何らかの物理・化学的な操作を行うことによって回収し、再利用することが可能です。それが工業的エネルギーを投入して行う「リサイクル」の意味です。無限の工業的エネルギーの供給が可能であれば、鉱物資源サイクルが可能です。

生物資源

生物資源は、その生産量に限界がありますが、地球の生態系の中で絶えず更新されているので、適切な使用量を超えなければ繰り返し利用することが可能です。しかし、生態系の定常性を破壊するような収奪的な利用を行えば、イースター島文明が滅亡したように、生物資源は急速に枯渇します。

低エントロピー資源

工業生産に利用される低エントロピー資源は主に冷却水と洗浄水です。水は地球環境の中で常に循環しているので、適切な使用を行えば永続的に利用可能です。また、地表面環境には海という巨大な水溜があるので、無限の工業的エネルギーの供給が可能であれば、高純度の純水を工業的に供給することが可能です。

エネルギー資源＝化石燃料

現在の工業生産を支えているのは、石油・石炭・天然ガスなどのいわゆる化石燃料の優秀性です。化石燃料は天然資源であり、多少精製するだけで燃料として使用することが出来ます。化石燃料は高い倍率(少なくとも 10 倍以上)で拡大再生産することが出来ます。

化石燃料を消費しても、前述の通り、質量保存の法則から化石燃料を構成する物質が消滅することはなく、環境中に拡散するだけです。したがって、最近はやりのメタネーションや水素製造のように、工業的に燃料を製造することは「技術的」に可能です。

しかし、私たちの住む物質世界は熱力学の第二法則であるエントロピー増大の法則による制約があります。拡散した燃料の構成物質から工業的に燃料を製造する過程で投入される工業的エネルギー量に比較して、製造した燃料から得られるエネルギー量は必ず少なくなります。

例えば、工業的に製造した水素やメタンの再生産の倍率＝エネルギー産出比は必ず 1.0 よりも小さくなります(「工業化社会システムの脱炭素化は不可能」⁶⁾参照)。水素製造やメタネーションは自然科学的に可能な技術であっても有効な工業的エネルギーの浪費であり、無意味です。

一般的に、物理・化学的な操作によって工業的に製造された燃料から得られるエネルギーは、製造過程で投入した工業的エネルギーよりも必ず小さくなるというのが熱力学の主張です。

したがって、化石燃料は有限の期間で資源として絶対的に枯渇します。ここで注意が必要なのは、資源としての枯渇とは、必ずしも化石燃料がまったくなくなることはありません。化石燃料を採掘し精製するためにも工業的エネルギー＝化石燃料が消費されています。採掘条件の悪化に

よって化石燃料製造に投入するエネルギーに対して、得られる化石燃料の持つエネルギーが下回った段階で化石燃料の採掘は無意味になります。

1-5 工業生産の限界とは化石燃料の枯渇

前節でみたように、工業生産を支える構成要素の中で鉱物資源や水資源は、無限の工業的エネルギーの供給が可能であれば、事実上、無尽蔵の資源といってよいでしょう。しかし、工業的エネルギーを供給している化石燃料は有限の期間で絶対的に枯渇します。したがって、化石燃料の枯渇が工業文明の終焉です。

化石燃料が工業生産を支えることができるのは、化石燃料が「天然資源」であって、ほとんど工業的に手を加えなくても化石燃料そのものの属性として高い熱エネルギー供給能力を持つからです。一方、工業的に製造した燃料のエネルギー産出比は 1.0 を超えることが出来ないため、工業生産を支えるエネルギー資源の必要条件を満たすことが出来ません。

それでは、化石燃料以外に工業的に手を加えることなく有用なエネルギーを供給する能力を持つ「資源」はないのでしょうか？

2. 再生可能エネルギー

2-1 自然エネルギーの賦存量

工業文明以前には、人は様々なエネルギーを利用してきました。薪炭、畜力、風力、水力、太陽光などです。薪炭、畜力、バイオマスは広義の太陽光に含めてよいでしょう。

突き詰めるとこうした様々なエネルギーは四つのエネルギー源に分類することが出来ます。太陽からの放射エネルギー、地球の重力エネルギー、地球の熱エネルギー、そして地球の天体としての運動エネルギーです。この四つのエネルギーの複合的な作用によって地球上の様々な物理・化学的変化、そして生態系の活動が駆動されています。これら四つのエネルギーをまとめて「自然エネルギー」と呼ぶことにします。自然エネルギーは工業的に手を加えていないという意味で天然のエネルギー資源と言ってよいでしょう。

自然エネルギーの賦存量は膨大です。一例として太陽放射について考えてみます。地球の位置の大気圏外に到達する太陽放射照度は 1366W/m^2 程度です。太陽放射から地球表面が受け取る平均的な太陽放射によるエネルギーは、地球の半径を r とすると次のように求めることが出来ます。

$$1366\text{W/m}^2 \times \pi \cdot r^2 \div (4\pi \cdot r^2) = 341.5\text{W/m}^2$$

世界の1年間の一次エネルギー消費量(=工業的エネルギー消費量)は概ね $6.0 \times 10^{20}\text{J}$ 程度です。地球の半径を $r=6,356,800\text{m}$ として地球の表面積で平均すると次の通りです。

$$6.0 \times 10^{20}(\text{J}/\text{年}) \div (4\pi \cdot r^2) = 1.181583 \times 10^6(\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})) = 0.0374678\text{W/m}^2$$

工業的なエネルギー消費量は、太陽放射に対して

$$0.0374678 \div 341.5 = 0.00011 = 0.011\%$$

程度です。このように、自然エネルギーは工業的に手を加えなくても莫大なエネルギーを絶えず地球環境に供給しています。しかし、自然エネルギーは地球という環境を維持するために消費されています。自然エネルギーの賦存量が莫大であることと、工業的に有効に利用できるかどうかは全く別問題です。

2-2 自然エネルギーの特性

自然エネルギーは絶えず変動しながら流れ続けています。私たち人間の住む地表面環境は自然エネルギーに駆動されている大気や水の絶え間ない物理・化学的な変化の中にあります。ダム式発電のダムに貯水された水の位置エネルギーのような例外を除けば、自然エネルギーの大部分は人間にとって都合よく蓄積しておくことが出来ず、利用可能なエネルギーの大きさは予測不能、制御不能です。

また、自然エネルギーの全体としての賦存量は莫大ですが、地球環境全体に不偏的に広く拡散して存在しているために、エネルギー密度は希薄です。

この自然エネルギーの二つの特性は、自然エネルギーを工業を駆動するエネルギー資源として利用することを困難にしています。

2-3 再生可能エネルギー発電システムの規模

人為的 CO₂ 地球温暖化に対する解決策として脱炭素化が注目されています。しかし、人為的 CO₂ 地球温暖化自体が実在しないので人為的な CO₂ 放出量を抑制したところで気温上昇を抑える実効性はありません。

人為的 CO₂ 地球温暖化説の当否については一旦棚上げしておくことにし、脱炭素化の根本的な解決技術とされる再生可能エネルギーについて自然科学的に評価することにします。

再生可能エネルギーとは自然エネルギーを利用した各種の発電方式を指していると考えられます。中でも中核的な技術として太陽光発電と風力発電が考えられています。

自然エネルギーは空間的な密度が小さく、その強さが不規則で予測不能な変化をします。したがって、自然エネルギーを工業的に利用する場合、例外なくエネルギーを補足するための施設規模は巨大になり、しかもその利用率は低くなります。さらに、出力を調整するために発電施設以外に巨大な蓄電・緩衝システムが必要になります。

(1) 太陽光発電

太陽光発電は、夜間には発電できません。また発電量は、快晴日であっても太陽高度の変化に伴って変化します。さらに、気象条件によっても大きく変化します。

太陽光発電に対する理想的な太陽放射は湿度の低い快晴日の南中時です。この時の地表面における放射照度を 1000W/m² 程度とします。快晴日の南中時には、太陽光発電パネルは高温になります。ここではパネル温度を 65°C = 338K と仮定します。太陽光発電パネル表面からの赤外線放射の強度はステファン・ボルツマンの法則から次のように計算することができます。

$$I = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 338^4 = 740 \text{ W/m}^2$$

太陽光発電パネル表面における反射などによる損失を 10% とすると、エネルギー保存則から、この時の理想的な発電能力の上限値は次式の通りです。

$$1000(1.0 - 0.1) - 740 = 160 \text{ W/m}^2$$

したがって快晴日の南中時の太陽放射に対する発電効率は 160/1000 = 16% です。これを太陽光発電パネルの定格出力とします。

一方、太陽光発電の日本における 1 年間あたりの発電実績は、120kWh/(m² 年) 程度です。これを平均的な出力に換算すると以下の通りです。

$$120 \times 10^3 \text{ Wh/(m}^2 \text{ 年)} \div 365 \text{ 日/年} \div 24 \text{ h/日} = 13.7 \text{ W/m}^2$$

160W/m² の定格出力に対して実効平均出力は 13.7W/m² であり、太陽光発電パネルの設備利用率は、13.7/160 = 8.6% という低い値です。

このように太陽光発電では、理想的な太陽放射照に対する発電効率は 16% 程度が理論的な上限であり、太陽放射の変動が大きいために、平均実効出力は更にその 10 分の 1 以下になります。

太陽光発電パネルユニットの重量は 15kg/m^2 程度です。これを設置するための架台構造の重量を 5kg/m^2 とすると、平均実効出力 1kW 当たりの重量は以下の通りです。

$$(15+5)\text{kg/m}^2 \div 0.0137\text{kW/m}^2 = 1460\text{kg/kW} = 1.46\text{t/kW}$$

(2) 風力発電

次に風力発電について考えます。標準的な風力発電装置として、定格出力 2MW の風力発電装置について横浜市のハマウイングの諸元を基に検討することとします。

メーカー	Vestas	
機種	V80-2.0MW	
風車仕様	ハブ高さ(m)	78m
	定格出力(kW)	1,980kW
	カットイン風速(m/s)	4m/s
	カットアウト風速(m/s)	25m/s
	定格風速(m/s)	15m/s
ローター・ブレード仕様	ローター直径	80m
	ブレード枚数	3枚
	ローター回転数(rpm)	9~19
	ブレード材質	GFRE
発電機仕様	発電機形式	巻線型誘導発電機
	発電電圧	690V
設計上の耐風速	70m/s (Class-I)	
タワー仕様	タワータイプ	モノポール
	タワー高さ(m)	78m
	タワーの材質	鋼製
	タワーの上部直径(m)	2.314m
	タワーの下部直径(m)	4.186m
重量	ブレード(t)	6.5t
	ナセル(t)	67.6t
	タワー(t)	163.8t

表 2-1 2MW 風力発電「ハマウイング」の構造諸元

風力発電は、ローターブレードの回転面を通過する空気の流れの運動エネルギーを捕捉して発電する装置です。ローターブレードの回転面の面積 A はローターブレード長を $r(\text{m})$ として次の通りです。

$$A = \pi r^2(\text{m}^2) = 3.1415 \times 40^2 = 5,027\text{m}^2$$

1 秒間に回転面を通過する空気の体積 V は、風速を $v(\text{m/s})$ とすると $V = Av(\text{m}^3/\text{s})$ です。

質量 m の流体の運動エネルギーは、流速を $v(\text{m/s})$ として $mv^2/2$ で表すことができます。したがって、回転面を 1 秒間に通過する空気の運動エネルギーは空気の密度を $\rho = 1.295(\text{kg}/\text{m}^3)$ とし、次式で求めることができます。

$$V \times \rho v^2 / 2 = A \rho v^3 / 2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3) = A \rho v^3 / 2 (\text{W})$$

ハマウイングの定格風速 $v=15(\text{m/s}^2)$ に対する運動エネルギーを求めると次の通りです。

$$5,027 \times 1.295 \times 15^3/2 = 10,984,579\text{W} \doteq 11\text{MW}$$

したがって、ローターブレード回転面を通過する風の運動エネルギーに対するハマウイングの発電効率は次の通りです。

$$1.980 \div 11 = 0.18 = 18\%$$

風力発電は、風速が大きく変動するため、定格出力に対する実際の設備利用率は 15%程度です。定格出力 2MW の風力発電装置の平均実効出力は次の通りです。

$$2\text{MW} \times 15\% = 0.3\text{MW} = 300\text{kW}$$

ハマウイングの地上部の構造物の重量は次の通りです。

$$6.5\text{t} + 67.6\text{t} + 163.8\text{t} = 237.9\text{t}$$

基礎部分の構造物の重量は地盤の状況で大きく変わることになりますが、ここでは仮に、地上部の構造の 50%として総重量を算定しておきます。

$$237.9 \times 1.5 \doteq 357\text{t}$$

風力発電の平均実効出力 1kW に対する重量は次の通りです。

$$357\text{t} \div 300\text{kW} = 1.19\text{t/kW}$$

2-4 火力発電に対する施設規模

比較のために内燃機関火力発電機として 300kW ディーゼル発電機を考えます。重量は 6t 程度、1kW 当たりの重量は 0.02t/kW 程度です。

ディーゼル発電機に対して同一の電力供給能力を得るためには重量比で、太陽光発電の設備規模は $1.46/0.02 = 73$ 倍、地上風力発電の設備規模は $1.19/0.02 = 59.5$ 倍です。

近年、洋上風力発電が取りざたされています。例えば福島洋上風力コンソーシアムの報告によると、2MW 浮体構造の風力発電装置の場合、風力発電設備の費用が 4.68 億円であるのに対して浮体構造部分の設備費用は 18.04 億円と 4 倍程度となっています。水深などの建設条件に大きく影響されますが、少なくとも海上風力発電は陸上風力発電の設備規模の 2 倍程度は必要と考えても過大な評価ではないでしょう。

以上から、太陽光発電や風力発電という不安定な自然エネルギーを利用する発電方式では、火力発電に比較して圧倒的に大きな装置システムが必要だということがわかります。更に、不規則変動する再生可能エネルギー発電電力を実際に運用するためには、巨大な蓄電装置ないし緩衝装置、全国を結ぶ高規格送電線網の整備などが不可欠です。

最近の大規模火力発電所では、100 万 kW 出力の火力発電所建設費用は 1000 億円程度です。定格出力 1kW 当たりに換算すると 10 万円/kW になります。

再生可能エネルギー発電である太陽光発電の場合、太陽光発電パネルの単価は定格出力1kW当たり30万円/kW程度とされています。しかし現在の太陽光発電パネルの製造は電力価格の安い東南アジア、中国、カナダで製造されたものがほとんどです。日本国内のエネルギー価格と比較するためにはこれを国内のエネルギーを用いて製造した場合に換算する必要があります。ここでは50万円/kWと仮定しておきます。

実際の発電量に対する施設規模を比較するためには、設備の利用率を考慮することが必要です。大型火力発電ではほとんど定常的な発電がおこなわれているので、設備利用率を80%と仮定します。太陽光発電については8.6%を用いることにします。平均実効出力1kW当たりの設備費用は次の通りです。

- 大規模火力発電 $10 \text{ 万円/kW} \div 80\% = 12.5 \text{ 万円/kW}$
- 太陽光発電 $50 \text{ 万円/kW} \div 8.6\% = 581.4 \text{ 万円/kW}$

平均実効出力当たりの太陽光発電の施設規模は火力発電に対して $581.4 \div 12.5 = 46.5$ 倍程度です。ディーゼル発電機との重量比較では73倍程度と推定しましたが、大規模火力発電所では発電所の建屋やその他の制御システムなどの周辺設備が必要になることを考えれば妥当な値だと考えます。

しかし、電力供給システムとしての優劣を評価するためには、更に発電施設の耐用年数を考慮した生涯発電電力量に対する施設規模を比較することが必要です。火力発電施設の耐用年数を40年、屋外で損耗の激しい太陽光発電の耐用年数を20年として比較することにします。

- 大規模火力発電
 $10 \text{ 万円/kW} \div (24\text{h/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 40 \text{ 年} \times 80\%) = 0.357 \text{ 円/kWh}$
- 太陽光発電
 $50 \text{ 万円/kW} \div (24\text{h/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 20 \text{ 年} \times 8.6\%) = 33.2 \text{ 円/kWh}$

単位生涯発電電力量当たりの太陽光発電の施設規模は火力発電に対して $33.2 \div 0.357 = 93$ 倍であることがわかります。

2-5 エネルギー供給技術の絶対的評価～エネルギー産出比

工業生産とは工業的に供給されるエネルギーを使って物を製造することです。一般に、製造工程で投入したエネルギー量と製品の使用価値を絶対的に比較することはできません。製造過程でいくら大量のエネルギーを投入したとしても、それに代えがたい製品の使用価値を得ることに意味があることもあります。

そのような中で工業的なエネルギーを投入することによって製品として工業的なエネルギーを供給するエネルギー産業は極めて特殊な産業です。この場合、製造段階で投入するエネルギー量に対して製品として供給するエネルギー量を比較することによって、絶対的な技術評価が可能です。その評価の指標として「エネルギー産出比」を以下のように定義します。

エネルギー産出比 = (産出工業的エネルギー量) / (投入工業的エネルギー量)

エネルギー量は J(ジュール) で評価します。

エネルギー産出比が大きいほど、優れたエネルギー供給技術であることを示します。

工業生産とは、工業的に供給されるエネルギーによって製造システムを駆動して製品を製造する生産方式です。工業生産を持続的に支えることのできるエネルギー供給システムの必要条件は、エネルギー供給システム自身を再生産した上で余剰のエネルギーを供給する能力があることです。これは次のように表すことができます。

エネルギー産出比 > 1.0

石油・石炭などの化石燃料はエネルギー産出比が少なくとも 10.0 以上であり、優れたエネルギー供給システムです。

「エネルギー産出比 < 1.0 」である場合、投入する工業的エネルギーよりも産出する工業的エネルギーの方が小さいことを示しています。エネルギー産出比 < 1.0 のエネルギー供給技術は全て無駄なのでしょうか？化石燃料によるエネルギー供給システムのサブシステムとしての火力発電について考えることにします。

火力発電とは、化石燃料の燃焼の熱エネルギーを熱機関に投入して得られる力学的な仕事を発電機で電気に変換する過程です。エントロピー増大の法則から必然的に投入した化石燃料の熱エネルギーよりも産出する電気エネルギーの方が少なくなります。優れた電力供給システムである火力発電でも投入された化石燃料の燃焼熱に対するエネルギー産出比 $= 0.35 \sim 0.4$ 程度です。利用可能なエネルギー量が半分以下に目減りすることを承知の上で化石燃料の一部を敢えて火力発電に投入するのは、エントロピーを持たない利便性の高い電力を得ることに高い使用価値があるからです。

火力発電電力の価格構成からエネルギー産出比を推定してみることにします。火力発電電力の 1kWh 当たりの電力原価を 10 円/kWh だとします。火力発電では原価の 60% を熱機関の燃料費、残りの 40% を発電設備などの償却費ないし運転・維持経費だとします。40% の中には設備建設費の償却分である 0.357 円/kWh を含んでいます。

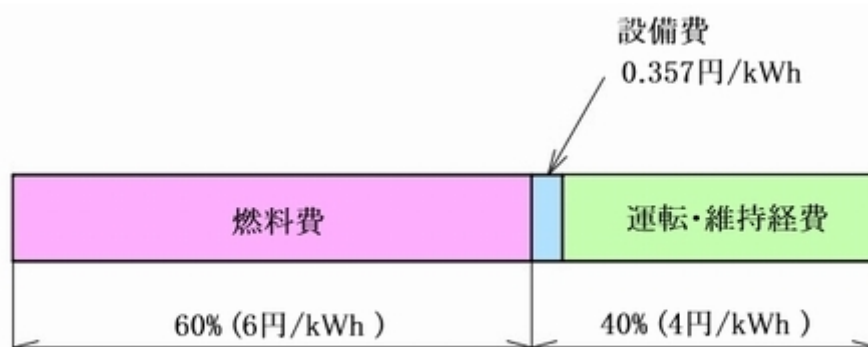


図 2-1 火力発電の原価構成

原価の 60% の 6 円/kWh は化石燃料に対する費用です。残りの 40% について、その内の 15% 程度をエネルギー費用だと仮定します。したがって、発電電力量 1kWh 当たりに投入される工業的なエネルギーの総費用は次の通りです。

$$\text{投入工業的エネルギー費用} = 10 \text{ 円/kWh} \times (60\% + 40\% \times 15\%) = 6.6 \text{ 円/kWh}$$

化石燃料価格として 1.37MJ/円(「温暖化の虚像」⁵⁾p.125 参照)を用いて、発電電力 1kWh 当たりに投入される工業的エネルギー量を推定すると以下の通りです。

$$1.37\text{MJ/円} \times 6.6 \text{ 円/kWh} = 9.042\text{MJ/kWh}$$

一方発電電力量は次の通りです。

$$1\text{kWh} = 1000(\text{J/秒}) \times 3600 \text{ 秒} = 3.6\text{MJ}$$

火力発電のエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{火力発電のエネルギー産出比} = 1/(9.042\text{MJ/kWh}) = 0.398$$

以上の関係をまとめた火力発電の電力生産図を示します。

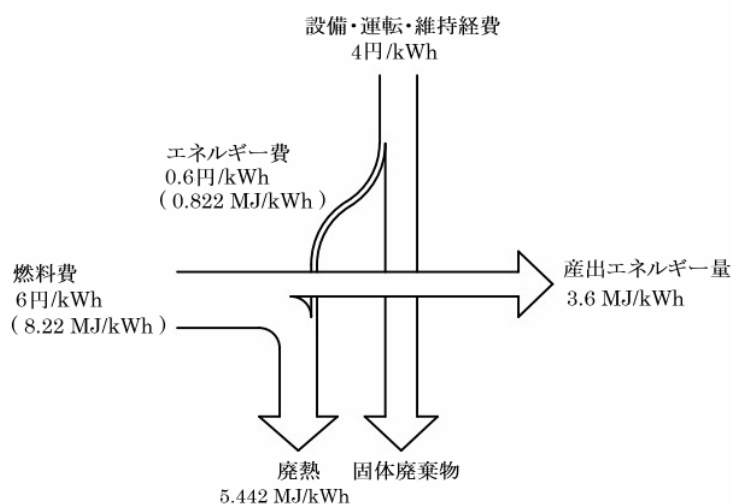


図 2-2 火力発電の電力生産図

火力発電の電力生産図では、熱機関からの排熱と発電所の建設、運転、維持管理に必要なエネルギー費に見合う投入エネルギーは廃熱になります。

設備・運転・維持経費からエネルギー費を差し引いた費用は主に固体設備費であり、縦方向の変化は劣化に伴うエントロピーの増加であり、耐用年数が過ぎれば固体廃棄物になります。

電気エネルギーには高い使用価値があります。ただし工業生産を行うためには、サブシステムとしての火力発電を含む化石燃料によるエネルギー供給システム全体のエネルギー産出比が 1.0 を大きく上回ることが必要であることに変わりはありません。

図 2-3 に示すように、化石燃料によるエネルギー産出比を 10、電力化率を 40%として化石燃料の 40%を火力発電(ここでは火力発電のエネルギー産出比を 0.35 として表示)に投入しても、

サブシステムとして火力発電を含む化石燃料によるエネルギー供給システム全体のエネルギー産出比は $7.4 > 1.0$ なので工業生産を維持することが可能です。

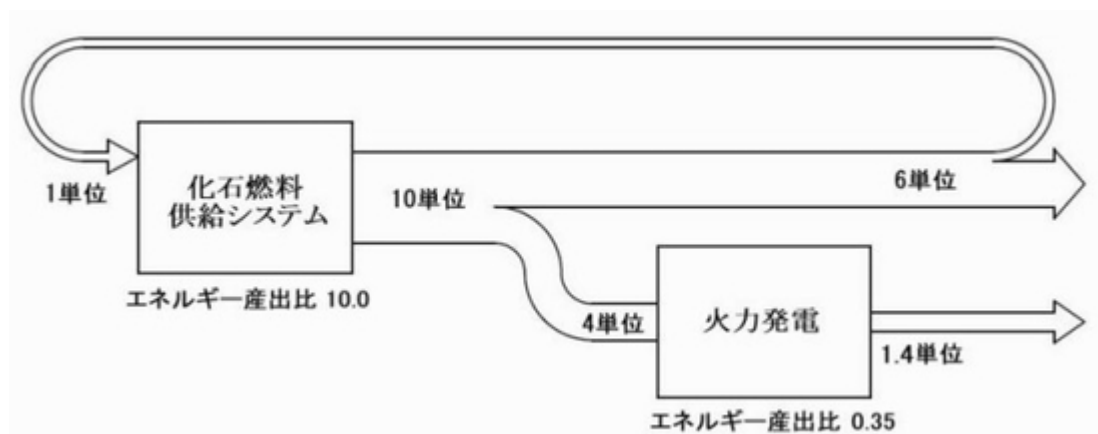


図 2-3 化石燃料によるエネルギー供給システムのエネルギー産出比

2-6 再生可能エネルギーの評価

自然エネルギーを変換して電気を得る発電方式である再生可能エネルギーについて検討します。既に見てきたように、自然エネルギーの賦存量は太陽放射だけに限っても世界の一次エネルギー消費量の 10,000 倍にも達します。ほとんど無尽蔵のエネルギーと言ってよいでしょう。再生可能エネルギーについては、

「(産出電力量)/(投入自然エネルギー量) $\ll 1.0$ であっても有効なのではないか？」

と考えている方が多いのではないのでしょうか。

「エネルギー産出比」とは熱力学的な効率を求めているわけではありません。あくまでもエネルギーを供給するシステムを運用するために投入する工業的エネルギー量と、その結果としてシステムが供給する工業的エネルギー量の比率を示した値です。

再生可能エネルギー＝「自然エネルギーを用いた発電システム」において、供給電力の「原料」である自然エネルギーは「自由財」であり、エネルギー産出比の対象外の物理量です。

自由財には経済的な価格がありません。これは、自然エネルギーがそのままでは工業的な使用価値がないことを反映しています。再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比は、火力発電で示したように、供給エネルギーの原価構造から推定することが出来ます。

(1) 太陽光発電

太陽光発電について、発電原価の価格構造を考えることにします。太陽光発電装置の生涯発電電力量 1kWh 当たりの償却費は 33.2 円/kWh でした。

実際に太陽光発電装置を耐用年数である 20 年間にわたって運用していくためには運転・維持経費が発生します。資源エネルギー庁によると、定格発電能力に対して年間 5000 円/(kW・年)程度だとされています。20 年間の総費用は

$$5000 \text{ 円}/(\text{kW}\cdot\text{年}) \times 20 \text{ 年} = 10 \text{ 万円}/\text{kW}$$

太陽光発電パネルの生涯発電電力量 1kWh 当たりの運転・維持費用は次の通りです。

$$10 \text{ 万円/kW} \div (24\text{h/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 20 \text{ 年} \times 8.6\%) = 6.6 \text{ 円/kWh}$$

太陽光発電電力 1kWh の発電原価は次の通りです。

$$(33.2 + 6.6) \text{ 円/kWh} = 39.8 \text{ 円/kWh}$$



図 2-4 太陽光発電の原価構成

工業製品原価に対してその 10%~20%が生産過程で投入された工業的エネルギーの対価です。太陽光発電施設は、エネルギー集約的な工業製品であることを考慮して設備費の 20%を投入されたエネルギー費用だとします。運転・維持経費については火力発電同様、15%とします。以上から、太陽光発電電力原価に占める投入エネルギー費用は次の通りです。

$$(33.2 \times 20\% + 6.64 \times 15\%) \text{ 円/kWh} = 7.6 \text{ 円/kWh}$$

これを熱量に換算すると

$$7.6 \text{ 円/kWh} \times 1.37 \text{ MJ/円} = 10.41 \text{ MJ/kWh}$$

$$\text{太陽光発電のエネルギー産出比} = 1 / (10.41 \text{ MJ/kWh}) = 3.6 \text{ MJ} / 10.41 \text{ MJ} = 0.35 < 0.398$$

太陽光発電の電力生産図を示します。

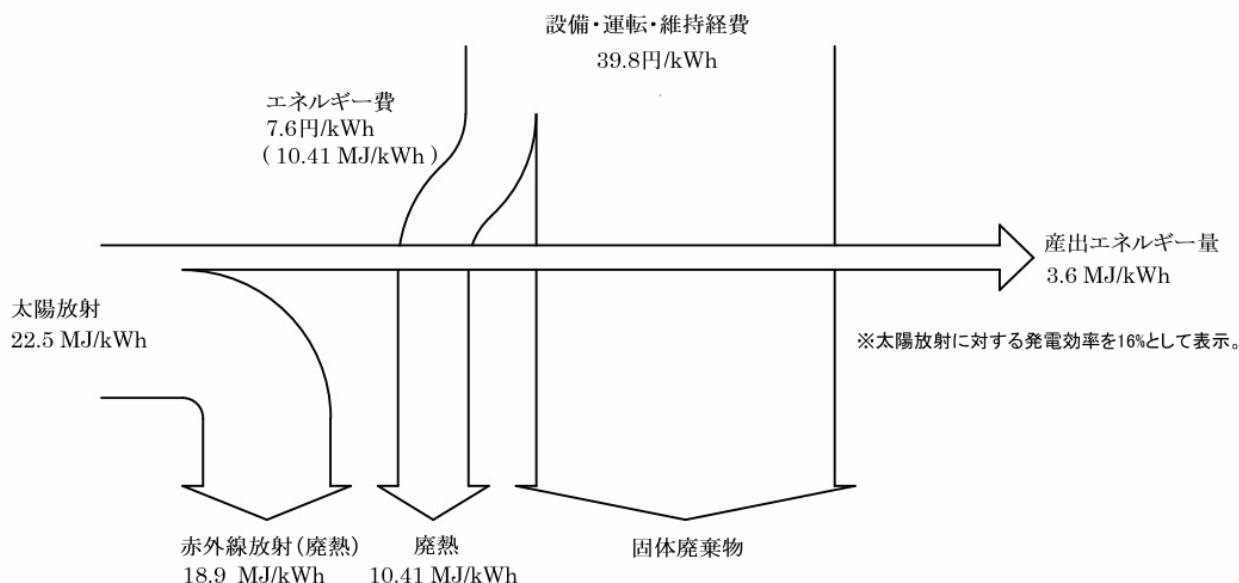


図 2-5 太陽光発電の電力生産図

太陽光発電の有効な太陽放射に対する発電効率を16%として、 $1\text{kWh}=3.6\text{MJ}$ を発電するために必要な放射エネルギーは $3.6\text{MJ}\div 16\%=22.5\text{MJ}$ です。発電に利用できなかった放射エネルギーは、太陽光発電パネル表面から赤外線として放射され、大気を暖めます。赤外線放射量は $(22.5-3.6)\text{MJ}=18.9\text{MJ}$ です。

火力発電の電力生産図に比較して、縦方向の流れが極端に大きいことが再生可能エネルギー発電の特徴です。これは、火力発電に比較して単位発電電力量当たりの発電設備規模が圧倒的に大きいことを反映しています。

別の見方をすれば、再生可能エネルギー発電は単位発電電力量当たりの廃棄物の量が圧倒的に大きく、環境負荷の大きな発電方式です。再生可能エネルギー発電に対して「クリーン」で「環境にやさしい」というイメージが作られていますが、実態は全く逆です。

以上から、太陽光発電では、電力の原料として工業的エネルギー資源≒化石燃料を一切使用していないにもかかわらず、発電設備があまりにも巨大なために、単位供給電力量当たりに投入される工業的エネルギー量は火力発電と同程度あるいはそれ以上であることがわかります。

ここで対象とした太陽光発電電力は、太陽光発電から供給される「生の電力」であり、予測不能な不規則変動する「クズ電力」です。実際に工業生産システムの中で太陽光発電を利用するためには出力制御を行うために蓄電装置や発電不能時のバックアップ発電システムや広域流通のための大規模高規格送電線網の建設などの付帯設備が必要です。これらを考慮すれば太陽光発電電力のエネルギー産出比はさらに大幅に低下します。付帯設備まで含めた太陽光発電電力のエネルギー産出比が火力発電を上回ることは、将来的にも技術的に実現不可能です。

このように、化石燃料による工業生産を前提として、火力発電を再生可能エネルギー発電で置き換えることによって化石燃料消費量は大幅に増加します。しかしこれは、現在の生産設備能力で再生可能エネルギー発電施設の製造・建設が可能だと仮定して、単に現在のエネルギー需要の下で火力発電を再生可能エネルギー発電で置き換えることだけを考えた結果です。

実際には、巨大な再生可能エネルギー発電施設の製造・建設を行うために新たな工場生産設備の増強が必要であり、更に電力需要は大幅に増加します。

再生可能エネルギーを導入することによって、化石燃料消費量だけではなくすべての鉱物資源消費量、工業生産量が爆発的に肥大化するだけではなく、鉱物資源価格・エネルギー価格の高騰を通して、工業製品だけでなくすべてのサービス価格が暴騰することになり、社会生活が破壊され、自然環境が破壊されることとなります。

(2) 風力発電

風力発電は、陸上風力発電から洋上風力発電に移行しようとしています。この点についても検討することにします。まず陸上風力発電について検討します。

陸上風力発電の設備建設費は定格出力に対して30万円/kW程度です。2MW風力発電では6億円です。風力発電では、太陽光発電に比較して運転・維持経費が大きくなります。自然エネルギー財団によると定格出力に対して1.3万円/(kW・年)です。耐用年数を20年とすると、

$$1.3 \text{ 万円}/(\text{kW}\cdot\text{年})\times 20 \text{ 年}=26 \text{ 万円}/\text{kW}$$

風力発電は形状的に太陽光発電に比較して自然災害リスクが大きく、長期間の発電停止を含む事故の発生確率が高い発電方式です。これを考慮して生涯施設利用率を10%として生涯発電電力量に対する費用を求めると次の通りです。

$$(30+26)\text{万円/kW} \div (24\text{h/日} \times 365\text{日/年} \times 20\text{年} \times 10\%) \\ = (17.1+14.8)\text{円/kWh} = 31.9\text{円/kWh}$$



図 2-6 風力発電の原価構成

太陽光発電同様、設備費の20%、運転・維持経費の15%を投入工業エネルギーの費用として生涯発電電力1kWh当たりの投入工業的エネルギーの費用を計算すると次の通りです。

$$(17.1 \times 20\% + 14.8 \times 15\%)\text{円/kWh} = 5.64\text{円/kWh}$$

これを熱量に換算すると

$$5.64\text{円/kWh} \times 1.37\text{MJ/円} = 7.73\text{MJ/kWh}$$

$$\text{エネルギー産出比} = 1/(7.73\text{MJ/kWh}) = 3.6\text{MJ}/7.73\text{MJ} = 0.47$$

太陽光発電に比較してエネルギー産出比が高いことがわかります。

風力発電の電力生産図を示します。

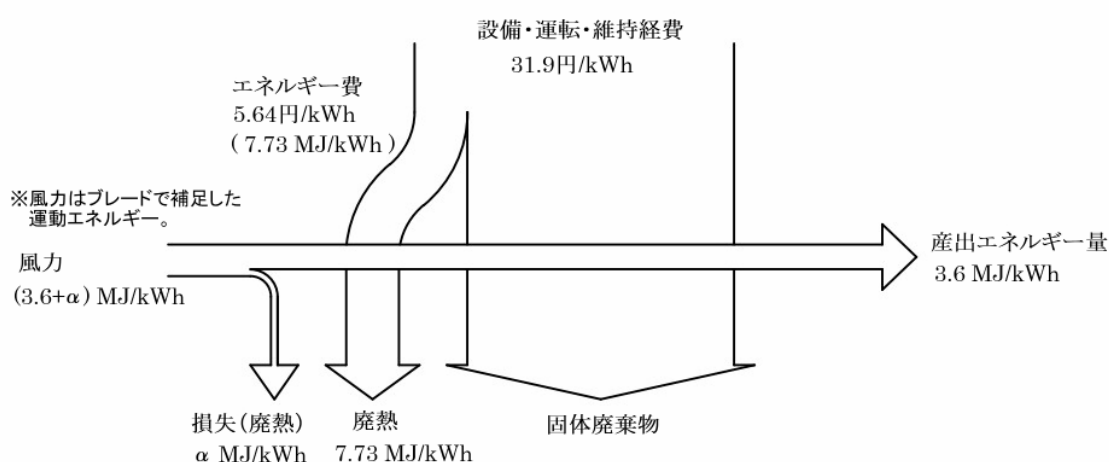


図 2-7 風力発電の電力生産図

風力という力学的なエネルギーはエントロピーを持たないエネルギーです。しかし、発電装置を駆動することによる摩擦損失が避けられないため、ブレードで補足した力学的なエネルギーの一部(生産図ではこれをαと表示)は電力に変換されずに環境に廃棄されます。摩擦損失は太陽光

発電の赤外線放射による廃熱に比較すると極めて小さな値であり、熱汚染は軽微です。

投入される工業的エネルギー費用は発電施設規模に比例すると考えられるので、陸上風力発電は太陽光発電よりも名目上のエネルギー産出比が高くなります。

しかし、風力発電電力は、自然風の特徴から太陽光発電電力以上に短周期の激しい変動を伴います。風力発電を実際に工業生産システムの中で運用するためには、太陽光発電以上に大きな付帯設備が必要でしょう。これを考慮すれば太陽光発電同様、化石燃料によるエネルギー供給システムのサブシステムとしての火力発電を風力発電で置き換えることは化石燃料を含むすべての鉱物資源の消費を加速することになります。

近年、日本では陸上風力発電にかわって洋上風力発電に主軸をシフトしようとしています。これは、地形の影響を受けない海洋上の風を利用することで安定した高い設備利用率を実現しようという発想です。



2MW 風力発電風車「ふくしま未来」

2MW 風車	
開発・製造業者	日立製作所
風車の位置づけ	量産商用機
増倍速方式	固定ギア式
ローター位置	ダウンウインド
ローター直径	80m
ハブ高	66.2m
運転開始	平成 25 年 11 月
運転期間 (平成 30 年 6 月時点)	4 年 8 ヶ月

風力発電装置の概要

表 2-2 洋上風力発電「ふくしま未来」

しかし、洋上に風力発電施設を建設するためのコストは、水深や海底地形によって変化しますが、陸上風力発電に比較して大幅に増加します。また、常時潮風に晒される厳しい環境では発電施設の劣化・損傷が激しく、運転・維持コストも飛躍的に大きくなります。

これらを考慮すれば、洋上風力発電は多少設備利用率が稼げたとしても、エネルギー産出比が改善することはありません。ここでは、福島洋上風力コンソーシアム事業から最も施設利用率の高かった 2MW システムの実績を紹介します。

「ふくしま未来」という 2MW 発電システムは運転期間 4 年 8 か月、設備利用率は 32.9%と報告されています。建設費用は本体工事費で 45 億円余り、付帯設備を含めて 56 億円余りです。

この 2MW 洋上風力発電について、運転・維持経費を除いた建設費に基づいて、20 年間の生涯設備利用率を 25%として生涯発電電力量当たりの建設費を求めると次の通りです。

$$56 \times 10^8 \text{ 円} \div (2\text{MW} \times 24\text{h/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 20 \text{ 年} \times 25\%) = 63.9 \text{ 円/kWh}$$

投入工業的エネルギー費用は建設費用の 20%として次のように算定されます。

63.9 円/kWh×20%=12.8 円/kWh

エネルギー産出比=1/(1.37MJ/円×12.8 円/kWh)=0.21

運転・維持経費を考慮すればエネルギー産出比は 0.1 台前半になることは間違いありません。福島洋上風力コンソーシアムではこの他に 5MW システムと 7MW システムを建設して試験を行いました。設備利用率はそれぞれ 14.8%、3.7%と低率でした。洋上風力発電は太陽光発電よりも更にエネルギー産出比の低い劣悪な発電システムだということです。

風車・浮体・ケーブル

項目	2MW(百万円)
風力発電機	468
風車(設計含)	468
発電機基礎部	1,804
設計費	271
浮体設備	842
係留系	691
工事	2,232
風車搭載工事*1	43
曳航作業	303
チェーン敷設・係留作業	940
把駐力試験	418
工事その他*2	528
小計	4,504
単価(万円/kW)	225
ケーブル(浮体間)	1,116
設計費	68
ケーブル材料費	138
その他材料費	225
工事費	685
合計	5,620

表 2-3 「ふくしま未来」の建設費の内訳

3. 工業文明は化石燃料の枯渇で終焉を迎える

3-1 工業文明とは化石燃料文明

自然エネルギーを工業的に利用しようという再生可能エネルギーの中核的な技術である太陽光発電と風力発電について検討した結果、不安定電力を安定化させるための付帯設備を含めたエネルギー産出比は、

再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比 \ll 火力発電のエネルギー産出比 ≈ 0.4

であり、いずれの発電方式も単位供給電力量当たりの投入工業的エネルギー量 \approx 化石燃料の消費量は火力発電よりもはるかに多くなると推定されます。

また、再生可能エネルギーの電力供給施設の規模は火力発電に対して少なくとも100倍以上になり、工業生産量を爆発的に増大させます。これは工業的なエネルギーに対する需要を更に増加させることを意味します。

したがって、現在の工業文明の化石燃料による主要なエネルギー供給システムを前提として、化石燃料の消費量を削減する目的で火力発電に替えて再生可能エネルギーを導入するという主張に科学・技術的な合理性はありません。CO₂放出量削減ないし「脱炭素化」のために再生可能エネルギー発電を導入するという政策は自然科学的に誤りです。

化石燃料を消費しない工業文明を検討する場合、再生可能エネルギーによる工業的エネルギー供給システムを運用するために投入する工業的エネルギーは、化石燃料ではなく、再生可能エネルギー発電によって供給される電力、あるいは、その電力を使用して工業的に製造された水素やメタンなどの燃料です。したがって、化石燃料を使用して運用する場合のエネルギー産出比とは異なります。

工業的に製造された水素やメタンから得られるエネルギーは、製造段階で投入したエネルギーよりも必ず少なくなります。水素やメタンを燃料として実用的に運用するためには、体積を小さくするために高压タンクに充填することが必要です。製造過程で投入するエネルギーに加えて充填のための仕事が増加するため、エネルギー産出比はさらに大幅に低くなります。

したがって、再生可能エネルギーによるエネルギー供給システムを運用するために投入する工業的エネルギーを化石燃料から再生可能エネルギーによるエネルギー供給システムからのエネルギーに替えることによってエネルギー産出比は更に低下するため、

再生可能エネルギー発電によるエネルギー供給システムのエネルギー産出比 $\ll 0.4$

であり、工業生産を維持するための必要条件である「エネルギー産出比 > 1.0 」を満足することはできません。

以上から、再生可能エネルギーによるエネルギー供給システムは工業文明を維持することが出来ないことが結論されます。化石燃料の枯渇後の工業文明の持続の可能性について検討してきましたが、再生可能エネルギーは化石燃料を代替できるエネルギー供給システムになり得ないことがわかりました。工業文明とは化石燃料文明であり、化石燃料の枯渇によって終焉を迎えることになります。

3-2 SDGs は非論理的な政策目標

いま世界中が人為的 CO₂ 地球温暖化に対する「対策」として脱化石燃料化ないしこれを含む SDGs (Sustainable Development Goals) を実現しようとして暴走を続けています。

そもそも、SDGs という目標設定そのものが非論理的です。

Sustainable = 持続可能な

持続とは、「ある状態を長く保ち続けること、長く続いていること」という意味です。

Development = 開発

開発とは、「新しいものを作り出すこと。また、対象に働きかけて機能や能力を獲得・発展させたり、人間の役に立つ状態に作り変えたりすること。」という意味です。

地球生態系のような代謝を含む系の状態を状態量 X で表すことが出来るとします。**Sustainable** とは、 X という状態を長く保ち続けることができること、定常的であることです。数学的に表現すれば、 X の時間 t に対する変化率がゼロであることです。つまり、

Sustainable な状態 = $dX/dt = 0$ あるいは $X = \text{const}$

一方 **Sustainable Development** というのは一定の変化が継続することです。したがって、

Sustainable Development = $dX/dt \neq 0 = \text{const}$ あるいは $\lim(t \rightarrow \infty) |X| = \infty$

つまり、**Sustainable** と **Sustainable Development** は排他的な対立概念です。工業文明が一定の発展を長期間継続すれば無限大に発散することになります。しかし、地球は物質的に閉ざされた有限の系ですから、いずれどこかで工業文明を含む地球生態系は崩壊することになります。有限の系では **Sustainable Development** は物理的に実現不可能です。

地球という物質的に閉ざされた有限の系において、持続的な発展、具体的には工業生産規模の拡大を継続し続けることは理論的に不可能です。この点については既に検討したように、化石燃料の枯渇によって工業生産は終焉を迎えるのです。

したがって **SDGs** という持続的な工業生産の増大によって好ましい社会を実現するというのは、実現不可能な目標なのです。

3-3 SDGs の本質

SDGs として挙げられている 17 の政策目標は、総花的な「望ましいバラ色の未来像」を羅列したものです。しかし現実の政策目標として冷静に見れば、その実効性はかなり怪しいと言わざるを得ません。

人間社会の持続可能性が危機感をもって注目されるようになった原因は、人口増加・工業生産の肥大化を含む人間社会の急激な膨張が地球の生態系に悪影響を与え始めているからです。根本的な原因である、人口や工業生産規模の抑制について一切言及がないことに **SDGs** の欺瞞性が現れています。

1. 貧困をなくそう
2. 飢餓をゼロに
3. すべての人に健康と福祉を
4. 質の高い教育をみんなに
5. ジェンダー平等を実現しよう
6. 安全な水とトイレを世界中に
8. 働きがいも経済成長も
10. 人や国の不平等をなくそう
11. 住み続けられるまちづくりを
12. つくる責任つかう責任
14. 海の豊かさを守ろう
15. 陸の豊かさも守ろう
16. 平和と公正をすべての人に
17. パートナリーシップで目標を達成しよう

以上の 14 項目については、西欧キリスト教的な「善意(偽善?)」の宗教的価値観による一方的な精神論であり、ほとんど実効性のない無意味な努力目標です。個別に検討は行いませんが、全てを満足しようとするれば支離滅裂な事態になることは必定です。

例えば「10. 人や国の不平等をなくそう」を考えてみましょう。西欧先進国の平均的な物質的に豊かな生活を世界中の辺境の地にまで不偏的に拡大しようとするれば、工業生産規模を爆発的に拡大することが必要です。それは自然環境に対して大きな負担を与えることになり、限界的な環境に住む人々の生活を破壊することになります。

また、生活レベルの格差・不平等は、西欧先進国の価値観による一方的な自由貿易の強制などによる暴力的な世界経済の運営によって、旧植民地・旧東欧諸国などから富を収奪することによって生じています。同時にこれによって環境が酷使され破壊されているのです。

現在のウクライナ戦争の背景にあるのは、米国ネオコンに典型的に見られる西欧先進国キリスト教的価値観を絶対視する選民思想です。西欧先進国は自らの優位性を守るために、ロシアないしその同盟国、アジア文化圏、アフリカ文化圏、イスラム文化圏を徹底的に敵視し、あるいは利用し、同等の立場で遇する意思は毛頭ありません。

ここに挙げた 14 項目の目標の実現を毀損しているのは、西欧先進国が普遍的な価値と呼ぶ自由主義、自由貿易、グローバリズムという、西欧先進国中心主義であり、西欧先進国によってまとめられた SDGs は西欧中心主義の放棄を想定していません。ここに挙げられた 14 項目の目標はエクスキューズのための画餅にすぎません。

SDGs の実質的な具体性のある行動目標は以下の 3 項目です。

7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに
9. 産業と技術革新の基盤を作ろう
13. 気候変動に具体的な対策を

3項目が上がっていますが、その本質は、化石燃料を使用しない無限のエネルギー供給システムを構築すること、そして人間社会の隅々にまで情報技術を徹底的に導入し、機械化することです。つまり、流行のGX(Green Transformation)とDX(Digital Transformation)による経済成長がSDGsの本質なのです。

3-4 SDGsは自然と社会を破壊する

SDGsは、地球生態系の定常性を毀損している現在の人間社会の構造的な問題である人口爆発や工業生産量の増大という本質的な問題を放置したまま、DXないしGXと呼ばれる更なる人間社会の工業化＝工業生産規模の拡大によって人間社会の「幸福」を実現するという内容であり、本質的に矛盾を内包しています。

DX(Digital Transformations)とは、単純化すると人間社会のあらゆる活動に対してセンサーや情報処理システムを導入し、機械装置と組み合わせることで自動化することです。これを実現するためには更なる工業生産量と工業的エネルギー消費量の増大を伴います。

SDGsでは、これを世界中のあらゆる階層・地域のあらゆる人に対して「平等に」提供するとしています。人口抑制を行わずにSDGsを実現しようとするれば工業生産規模は際限なく肥大化することになります。これによって、鉱物資源・エネルギー資源の枯渇が早まり、工業文明の終焉を早めるだけでなく、自然環境を徹底的に破壊することになります。

SDGsのもう一つの柱は、化石燃料消費を伴わない、無尽蔵のクリーンエネルギー供給システムを実現するというGX(Green Transformations)です。これは、DXを実現するための前提条件です。

しかし、既に見てきたように、工業文明とはエネルギー産出比が大きな化石燃料による優れたエネルギー供給システムによって成り立っています。

再生可能エネルギー発電は、化石燃料の大量消費によってのみ実現可能な技術であって、単独のエネルギー産出比は1.0を大きく下回るために有効な工業的エネルギーを一切供給することが出来ません。加えて、火力発電を再生可能エネルギー発電システムに置き換えるだけで、工業生産規模が爆発的に大きくなり、自然環境を直接的に破壊することになります。近年メガソーラー発電所の建設によって里山の自然環境が次々と破壊されており、その惨状は目を覆いたくなるほどです。

再生可能エネルギー発電の導入量が増えるにしたがって、不安定性を含めた効率の悪さが広く認識されるようになりました。

岸田政権は、2050年にCO₂排出をゼロにするという実現不可能な政策目標の達成を目指すとして、福島原発事故を受けて国民的合意を得た脱原発の目標をいとも簡単に破棄して原子力発電の拡大にシフトしました。これは国民の意思を無視したとんでもない選択であるばかりでなく、非科学的な選択です。ここで原子力について少し触れておくことにします。

原子力発電は再生可能エネルギー発電同様、エネルギー産出比<1.0なので、化石燃料の消費なしに発電することは不可能であり、有効な電力を一切供給することはできません。また、仮に原子力発電が有用だとしても、ウランの可採年数は化石燃料よりもはるかに短く、SDGsの求める持続可能性を満たすことはできません。

原子力発電の電力原価は、福島原発事故以前で20円/kWh程度であり、火力発電よりもはるかに高価でした。原発事故後には安全設備費の増加、対テロ対策(ほとんど無意味ですが・・・)などの追加施設が必要となった結果、30円/kWh程度になっているのではないのでしょうか。

現在の原子力発電電力原価は、原子力発電のフロントエンド(ウラン鉱の採掘～発電までの全工程)費用の内の、電力会社が負担する費用から算定されています。しかし、軍事的戦略物資である濃縮ウランの製造には膨大な国庫からの税金がつぎ込まれていることを考えれば、実際にはもっと高額です。

原子力発電では、従来、使用済み核燃料は再処理して高速増殖炉用の燃料として使用するという前提で高い資産価値を見込んで経済的にプラスの評価がされていました。しかし現実には「もんじゅ」が廃炉となり、高速増殖炉は実現不可能なため、単なる高レベル放射性廃棄物という不良資産になりました。

更に原子力発電特有の問題としてバックエンド(発電後の廃炉から放射性廃棄物の保管処理までの数万年に及ぶ全工程)の費用が膨大な額に上ることになります。廃炉に加えて高レベル放射性廃棄物の冷却貯蔵、更にガラス固化体にして数万年に及ぶ地下処分施設による管理が必要とされています。これは見方を変えれば、発電後の後処理に膨大な工業的エネルギーの消費が伴うことを示しています。

しかし福島原発の事故原子炉の廃炉作業の遅れでも分かるように、バックエンドの工程は人類がまだ経験したことのない作業ばかりで試行錯誤の連続です。現段階では技術的な問題がクリアされておらず、果たしてどれだけの費用と工業的エネルギーが必要なのか全くわかりません。本来ならばバックエンドに関わる費用も原子力発電原価に含めなければなりません。現在は一切考慮されていません。

フロントエンド費用を正當に電力原価に反映させ、更にバックエンド費用を考慮すれば、原子力発電電力原価は途方もなく高価なものになります。したがって、エネルギー産出比は限りなく小さくなります。

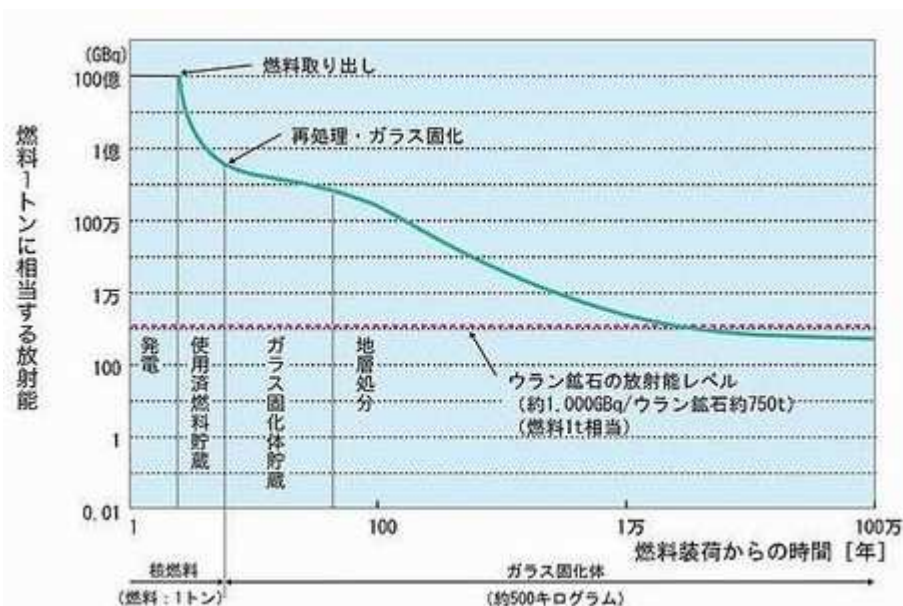


図 3-1 高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰

原子力発電システムは、僅か数十年から百年程度の運用期間に電力需要のごく一部を供給することで、高レベル放射性廃棄物という強い毒性を持つ危険物質を大量に産み出し、発電終了後にこれを数千年～数万年にわたって環境から隔離して保管することを必要とするものであり、狂気の発電技術としか言いようがありません。

いくら注意しても、千年を超える超長期間に及ぶ危険物の管理など人間にはかつて経験のない事業であり、自然災害や戦争などの不確定要素を含めて、安全を確保できる保証は一切ありません。保管に失敗すれば甚大な環境汚染を引き起こすこととなります。しかも、その保管期間の大部分において化石燃料は既に枯渇しており、工業的な技術は利用できません。

一刻も早く原子力発電の稼働を停止して、廃炉ならびに、これまでの原子力発電の運用によって作り出してしまった放射性廃棄物の処理に専念し、考えられる出来る限りの安全性の確保に努めるべきです。

原子力発電は、たとえ正常に運転されたとしても、ウラン鉱の採掘・精錬から原子力発電施設の整備・点検、更に廃炉作業に至るまで、主に非正規雇用の被曝労働という非人間的な労働を前提として成り立っています。建前として人間の幸福を目指すという SDGs の実現のために原子力発電の使用を拡大することは、将来的な負担をさらに増加させる無責任極まりない馬鹿げた選択であるばかりでなく、倫理的にも許されない行為です。

以上検討してきたとおり、SDGs 実現のための基幹的な工業技術である無尽蔵のエネルギー供給技術＝GXは物理的に実現不可能であり、GXの実現を前提とするSDGsないし社会構造の脱炭素化は実現不可能です。

しかし、大企業や金融機関は SDGs や脱炭素化技術の開発に極めて前向きな姿勢を示しています。それはどうしてでしょうか？

利益最優先の大企業や金融機関が俄かに環境保護活動に積極的になることはありません。彼らが熱心なのは、脱炭素化あるいは SDGs の実現のためと言われる工業技術が市場を際限なく肥大化させることで莫大な経済的利益に結び付くからにほかなりません。

例えば再生可能エネルギー発電による脱炭素化について考えてみます。

現在の日本の年間最終エネルギー消費量は 13,000PJ/年程度です (PJ=1×10¹⁵J)。1秒当たりの平均的な最終エネルギー消費量は次の通りです。

$$13,000 \times 10^{15} \text{J/年} \div (365 \text{ 日/年} \times 24 \text{ 時間/日} \times 3600 \text{ 秒/時間}) = 4.122 \times 10^{11} \text{W}$$

この最終消費エネルギーをすべて太陽光発電電力で賄うと仮定します。必要な太陽光発電パネルの面積は次のように求めることができます。

$$4.122 \times 10^{11} \text{W} \div 13.7 \text{W/m}^2 = 3.009 \times 10^{10} \text{m}^2 = 30,090 \text{ km}^2$$

太陽光発電所の面積を太陽光発電パネル面積の 2 倍とすると約 60,000km²が必要になります。日本の国土面積は約 370,000km²なので、実に国土面積の 16%以上を太陽光発電所が埋め尽くすことになります。これは日本の総農地面積 43,500km²よりも広い面積です。

実際には国土の 3 割程度の平地は、住居や商工業用地、農地として使用されるため、これを除くと太陽光発電所の建設対象国土面積は 260,000km²程度になります。しかし傾斜地の北側斜

面では太陽光を十分に受けることはできないので、対象となるのは南向き斜面であり、これで建設対象国土面積は更に約半分になります。また、日本の急峻な山岳地帯に太陽光発電所を作るとは維持管理が難しくなるため現実的ではありません。建設対象国土面積は更に半分程度になります。これで建設対象国土面積は $65,000\text{km}^2$ になります。ほぼ全ての里山の南斜面を太陽光発電所で埋め尽くしてしまうことが必要です。

以上の検討では、あくまでも現在の最終エネルギー消費量の総量を賄うことを考えました。しかし、国土面積の 16% を埋め尽くす太陽光発電所を、その耐用年数である 20 年ごとに更新するためには、工業生産規模が爆発的に大きくなります。これに伴って最終エネルギー消費量も爆発的に増加します。その増加分まですべて太陽光発電電力で供給することを考えれば、たとえ全国土を太陽光発電所にしても賄うことはできません。これが、エネルギー産出比が 1.0 を超えることのできない再生可能エネルギー発電の実像です。

このように、SDGs を実現するために再生可能エネルギー発電によって社会に必要なエネルギーを電力で賄おうとすると、工業生産量が際限なく増大することが分かります。これは短期的には電力供給関連の製造業に無限の市場を提供することになり、一時的に製造業は活況を呈すことになるでしょう。

直接的には重電メーカー、重工メーカーだけでなく、電子機器メーカー、建設業、等々の製造業に対して無限の需要を作り出します。さらに、あらゆる装置を電力で駆動できるものに代替するために自動車メーカーをはじめとするあらゆる装置メーカーに対しても需要を提供します。

しかし、この工業的エネルギーの総電力化によって、末端の消費者の受け取る便益は一切増加しません。これまで化石燃料ないし火力発電で賄われていたエネルギーが再生可能エネルギー発電電力に替わるだけです。そのために工業生産量は爆発的に肥大化し、増加する費用は商品・サービス価格の上昇や「環境税」を通して全て消費者が負担することになります。

エネルギー価格の際限のない上昇は庶民生活を破壊するばかりでなく、やがて製造業にも跳ね返ってきます。エネルギー産出比が 1.0 未満の再生可能エネルギー発電では、再生可能エネルギー発電システムを単純再生産することさえできず、当然その他の部門に対してエネルギーを供給することはできません。再生可能エネルギー発電が増えるにしたがって、裏腹に供給可能なエネルギー量が減少し、やがてエネルギー不足で工業生産は破綻します。再生可能エネルギー発電の導入量を増加させつつ、同時にエネルギー需要を満足させようとするれば、脱炭素どころか逆に化石燃料消費量が爆発的に増加します。

こうした再生可能エネルギー発電導入による工業生産量の増加によって、例えば太陽光発電所の建設で里山の自然環境が直接的に破壊されるだけではなく、太陽光発電パネルや蓄電システムの製造に必要なレアアースの需要が爆発的に拡大し、レアアースの製造工程で放射能汚染を含む環境汚染が激甚化し、鉱山周辺の自然環境も悪化します。

更に耐用年数を経過した莫大なボリュームの再生可能エネルギー発電施設の廃棄処分自体が環境汚染・破壊を引き起こします。

SDGs の実現を目指すほどに、SDGs に描かれたバラ色の未来像とは似ても似つかない環境破壊と市民生活の劣化が蔓延するのです。

【追補】電気エネルギーの利用について

脱炭素社会の実現、あるいはSDGsにおいて中心的な役割を担うと考えられているのが、非火力発電電気エネルギーないし水素エネルギーです。しかし、これが全く実用にならないことが分かりました。

ここでは、火力発電を前提として、電気エネルギーの特性とその適切な利用方法について留意すべき点をまとめておきます。

エネルギーの形態には色々なものがあります。私たちが利用しているエネルギーとして、熱エネルギー、力学的エネルギー、電気エネルギー、光(電磁波)エネルギーなどがあります。エネルギーの形態は相互に変換することが出来ます。

電気エネルギーは利便性が高く、簡単な装置を用いて熱エネルギー、力学的エネルギー、光エネルギーに変換することが出来ます。電気エネルギーは他のエネルギーでは実現できないことに使用する、あるいは電気をを用いるのが最も効率的な場合に利用することが原則です。

電気を熱に変換することは化石燃料の浪費

高温の熱エネルギー Q_1 (温度: T_1)を熱機関に投入し、熱機関を駆動した結果、低温の排熱のエネルギー Q_2 (温度: T_2)を環境に廃棄し、力学的エネルギー W を取り出す熱機関には次の関係が成り立ちます。

$$W=Q_1(1.0-T_2/T_1)-T_2 \cdot S \quad \text{ここに、} S \text{ は熱機関で発生するエントロピー} (S>0)$$

この等式から、熱機関の効率を高くするためには、高温熱 T_1 と廃熱 T_2 の温度差をできるだけ大きくすること、熱機関の発生エントロピー S を出来るだけ小さくすることだということが分かります。

実際には T_1 、 T_2 の限界、熱機関を構成する物質の物性による限界、更に発生エントロピーによる損失から、熱機関の効率 η は、

$$\eta = W/Q_1 = (1.0 - T_2/T_1) - T_2 \cdot S/Q_1 = 0.5 \text{ 程度}$$

であり、熱機関に投入した熱エネルギー Q_1 の内、半分程度は環境中に散逸してしまいます。

力学的エネルギーは更に発電機を介して電気エネルギーに変換することが出来ます。熱学的な空間では力学的な運動には必ず摩擦が発生し、力学的エネルギーの一部は熱となって環境中に散逸します。

発電機に投入される力学的エネルギーを W 、発電機で生み出される電力量を W_e 、発生エントロピーを S_e 、発電機の温度を T_e とすると形式的に次のように表すことが出来ます。

$$W_e = W - T_e \cdot S_e, \quad S_e > 0$$

したがって、熱機関に投入した熱量 Q_1 に対する発電効率 η_e は、

$$\eta_e = W_e/Q_1 = 0.4 \sim 0.45 \text{ 程度} < 0.5$$

火力発電の発電効率 η_e は投入したエネルギーの半分以下になります。火力発電のエネルギー産出比は、更に発電設備の建設・運用・維持などに投入された工業的エネルギーに対する償却分を考慮する必要があるため、

火力発電のエネルギー産出比=0.35 程度<0.4~0.45

このように、火力発電電力は、投入する化石燃料の持つ熱エネルギーの半分以上を散逸することで得られています。得られた電気エネルギーはエントロピーを持たない利便性の高いエネルギーです。

現在は、火力発電による豊富な電力供給が可能なので、多方面で電気が利用されています。しかし、火力発電電力は、電気を得るために投入した化石燃料の熱エネルギーの6割以上を環境に散逸しています。電気を再び熱に変換して利用するのであれば、化石燃料の燃焼熱をそのまま使用すれば、2倍以上の便益を得ることが出来ます。電気を熱として利用する調理、暖房用の電気器具はエネルギー効率から見て愚かな使用法です。

移動体駆動に蓄電池を利用することは不合理

電気はエネルギーの一形態であり、化石燃料の様に長期間保管し、あるいは持ち運ぶことが困難です。したがって、従来は送電線網で発電所から電力を消費する装置までを直接接続することで、発電すると同時に装置で消費していました。

これは移動体も例外ではありませんでした。従来は電動の移動体とは送電線網が建設可能な陸上を平面的に移動する電車などに限られていました。

電気エネルギーを貯蔵して持ち運ぶ装置が蓄電池です。従来、蓄電池は出力あるいは貯めることのできるエネルギー量に対して重量が重すぎるため、小型電子機器などの比較的電気エネルギー消費量の小さな装置にのみ利用されてきました。

人為的 CO₂ 地球温暖化脅威論の狂騒状態の中で、送電線網から独立した移動体である自動車を駆動するために蓄電池を利用することが始まりました。リチウムイオン電池の実用化で蓄電池の能力は飛躍的に向上しました。しかし、移動体を駆動するためのエネルギー貯蔵装置としてリチウムイオン電池を利用することに合理性があるかどうかは冷静に判断すべきです。

少し古いデータですが、図3-2に示すように4サイクルガソリンエンジン車では、燃料の持つ熱エネルギーに対して、動力として取り出すことのできる力学的エネルギーの熱効率は0.2~0.35程度です。

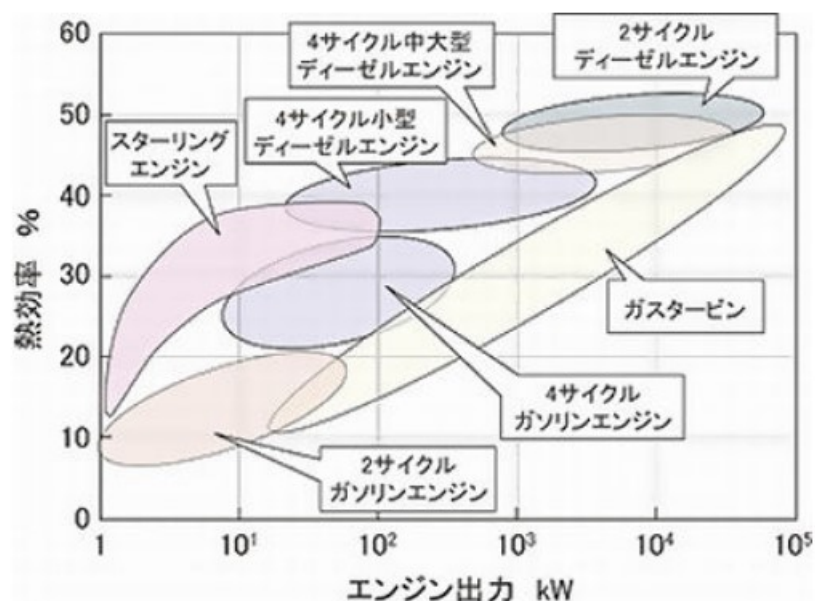


図3-2 内燃機関の熱効率特性

電気自動車に火力発電電力を充電して使用する場合を考えます。火力発電のエネルギー産出比を 0.35、送電による損失を 5%、車載リチウムイオン電池に対する充電・放電損失をそれぞれ 5%、モーターの効率を 90%と仮定します。火力発電所における化石燃料の燃焼エネルギーに対する電気自動車の駆動に有効に利用できる力学的エネルギーの効率は、

$$0.35 \times (1.0 - 5\%) \times (1.0 - 5\%) \times (1.0 - 5\%) \times 90\% = 0.27$$

です。これはほとんどガソリンエンジン車の効率 0.2~0.35 と同程度であることが分かります。しかし、これはガソリンエンジン車と電気自動車と同じ重量の場合です。

ガソリン	12,000wh/kg
リチウム・イオン電池	100wh/kg (先端開発段階で200wh/kg)
ニッケル水素電池	70wh/kg
鉛蓄電池	35wh/kg
高圧 (200気圧) 水素	165wh/kg

(多摩大学名誉教授 那野比古)

表 3-1 重量エネルギー密度

移動体の性能に対して、移動体の自重が大きく影響します。内燃機関自動車と電気自動車について、その構成要素であるガソリンとリチウムイオン電池の重量エネルギー密度について検討することにします。

表 3-1 に示すように、ガソリンに対してリチウムイオン電池の重量エネルギー密度は 1/120 程度だということが分かります。

ガソリンエンジン車の熱効率 0.2~0.35 を考慮すると、ガソリンエンジン車の積載燃料の内、駆動力として有効に利用できるガソリンの熱エネルギーの重量エネルギー密度は、

$$12,000\text{Wh/kg} \times (0.2 \sim 0.35) = 2,400 \sim 4,200\text{Wh/kg}$$

程度です。これに対してリチウムイオン電池の充電、放電の効率を 95%、モーターの効率を 90% とすると、リチウムイオン電池の充電に投入された電力量に対して、駆動力として有効に利用できる電力量の重量エネルギー密度は、

$$100\text{Wh/kg} \times 95\% \times 95\% \times 90\% = 81.2\text{Wh/kg}$$

程度です。ガソリンエンジン車と電気自動車と同じ力学的エネルギーを得るためには、電気自動車はガソリン重量の 29.5~51.7 倍の重量のリチウムイオン電池が必要になります。このように、電気自動車は巨大なリチウムイオン電池の影響で自重が大きくなります。

例えば日産の電気自動車 Leaf では、同クラスのガソリンエンジン車に比較して 300kg 以上(車重の 30%程度)、人に換算して 6 人分ほど重くなっています。電気自動車の重量がガソリンエンジ

ン車よりも 30%程度重いため、同等の便益を得るために必要な火力発電所で投入する化石燃料は 30%程度多くなります。

更に、リチウムイオン電池の性能は経年劣化で低下すること、蓄電エネルギー量が減ってもリチウムイオン電池の重量は軽くないこと、リチウムイオン電池の製造には大量の電力が必要なことから車両製造段階でガソリンエンジン車よりも大量のエネルギーを必要とすることなどを総合的に判断すると、ガソリンエンジン車よりも電気自動車の方が CO₂ 放出量は多くなります。

ディーゼルエンジン車やハイブリッド車はガソリンエンジン車よりも更に高いエネルギー利用効率なので、CO₂ 放出量削減のために電気自動車を導入することに合理性はありません。

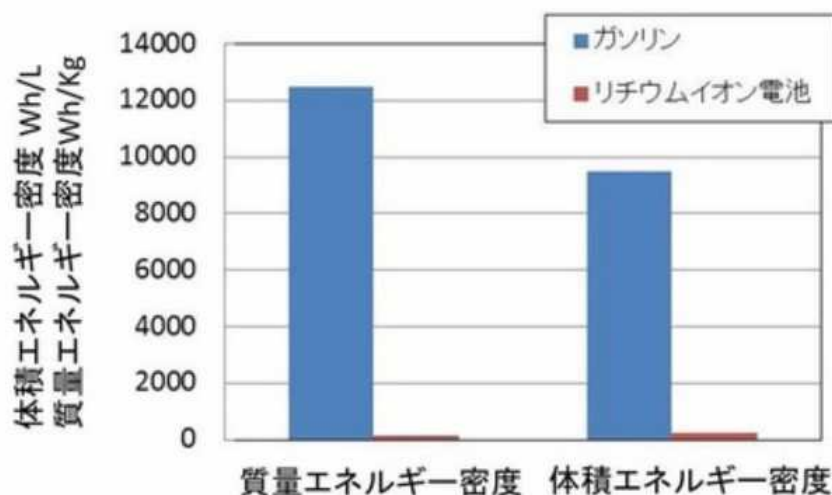


図 3-3 ガソリンとリチウムイオン電池のエネルギー密度の比較

ここでは移動体として自動車について検討しましたが、移動体一般にエネルギー供給システムとして蓄電池を使用することに合理性はありません。出力対重量比が大きな要素となる移動体である航空機では、実用的な飛行を行うことは不可能です。

水素 H₂ の利用について

脱炭素社会の主要なエネルギーとして再生可能エネルギー発電と共に水素の利用が注目されています。不安定な再生可能エネルギー発電電力を水の電気分解に利用して水素を製造し、これを貯蔵可能な燃料として利用するものです。

高圧水素は主に燃料電池によって再び電気に戻して利用することが考えられています。水素を一種の蓄電装置として利用しようというものです。

しかし、再生可能エネルギー発電電力はエネルギー産出比が 1.0 よりもはるかに小さいため、有効なエネルギーを一切供給することが出来ません。したがって、再生可能エネルギー発電電力で水を電気分解して水素を製造することは不可能(無意味)です。

工業的な水素の製造は、製造過程で投入した電気エネルギーよりも得られるエネルギーが減少するため無意味です。水素を燃料電池で電気に戻す場合、発熱する(=熱エネルギーの散逸)ことからわかるように、更に得られるエネルギーは減少します。水素を高圧タンクに詰めて利用するためには高圧で充填することが必要であり、そのエネルギーを差し引くと更に損失が大きくなります。

以上から、わざわざ高品質のエネルギーである電気を投入して水を電気分解して水素を燃料として用いることは途方もないエネルギーの浪費であることが分かります。燃料としての水素の利用は全く無意味です。

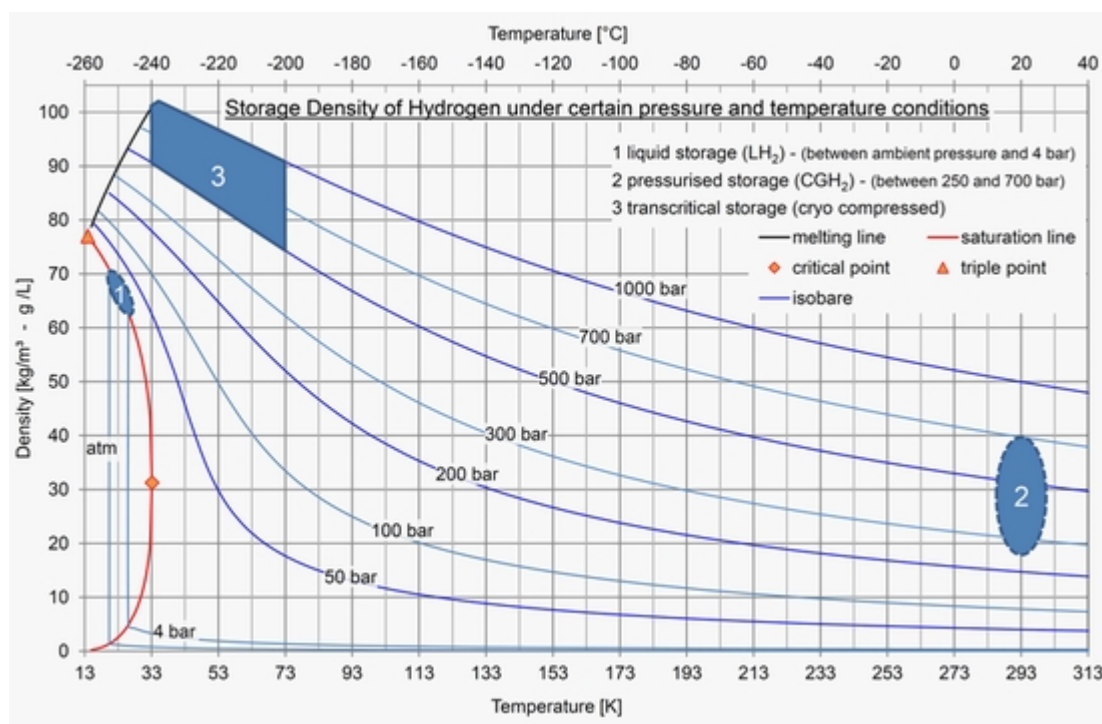


図 3-4 高圧水素の圧力・温度による密度変化

工業的に製造した水素を燃料として用いることが無意味であることは分かりました。以下、水素製造工程のエネルギー利用効率の問題から離れて、単純に燃料としての水素の特性について、特に移動体を駆動する燃料として利用することについて検討することにします。

水素の重量当たりのエネルギー密度は 142MJ/kg です。これはガソリンの 49MJ/kg よりもはるかに大きな値です。しかし、水素 H_2 は常温・常圧で気体です。分子量は 2 なので、 $1\text{kg}=1000\text{g}$ で 500mol に相当します。標準状態の体積は 22.4l/mol なので、 500mol は $11,200\text{l}$ です。水素を理想気体と仮定すると、これを 350 気圧まで圧縮した場合の体積は、 $11,200\text{l}/350=32\text{l}$ です。したがって、350 気圧に圧縮したときの比重は、 $1/32\text{kg/l} = 0.031\text{kg/l}$ です。体積エネルギー密度は次の通りです。

$$142\text{MJ/kg} \times 0.031\text{kg/l} = 4.44\text{MJ/l} = 1,233\text{wh/l}$$

同様に、700 気圧まで圧縮した場合は $2,465\text{wh/l}$ になります。

これに対してガソリンの比重は 0.75kg/l です。体積エネルギー密度は、

$$49\text{MJ/kg} \times 0.75\text{kg/l} = 36.8\text{MJ/l} = 10,222\text{wh/l}$$

このように、水素を 700 気圧で耐圧タンクに充填したとしても、単位体積当たりのエネルギー量はガソリンの 1/4 以下です。700 気圧の高圧水素では、同じエネルギー量を供給するためにガソリン

の 4 倍以上の容積の耐圧タンクが必要になります。しかも 700 気圧の高圧に耐える容器はかなり肉厚で重たいものになります。

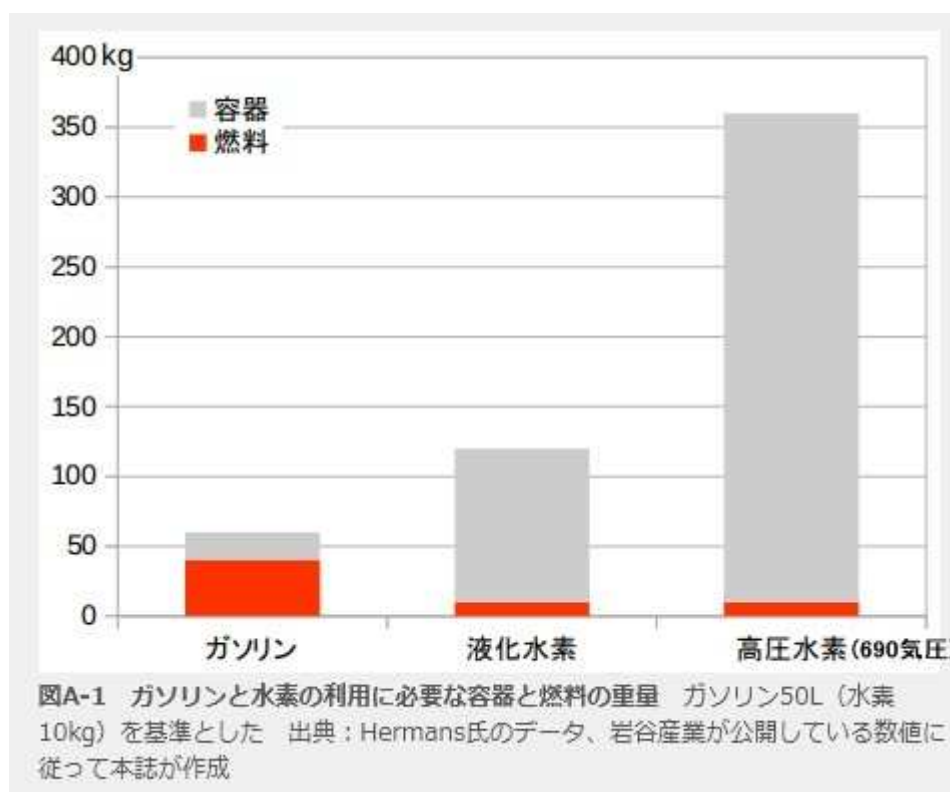


図 3-5 ガソリンと水素の容器重量を考慮した重量エネルギー密度の比較

図 3-5 は、ガソリン 50ℓ と水素 10kg のエネルギー量を等価とした場合の燃料と容器の合計重量の一例を示しています。このデータによると水素を 690 気圧まで圧縮した場合、ガソリンに対して約 6 倍の重量です。重量エネルギー密度は次の通りです。

$$(142\text{MJ/kg} \times 10\text{kg}) \div 360\text{kg} = 3.94\text{MJ/kg} = 1,096\text{Wh/kg}$$

トヨタの新型MIRAIでは、70MPa(約690気圧)の圧縮水素5.6kgを収める容器重量は110kg程度です。重量エネルギー密度はかなり改善されて次の通りです。

$$(142\text{MJ/kg} \times 5.6\text{kg}) \div (110 + 5.6)\text{kg} = 6.88\text{MJ/kg} = 1,911\text{Wh/kg}$$

図 3-5 を参考に、容器重量を含むガソリンの重量エネルギー密度を求めると次の通りです。

$$49\text{MJ/kg} \times (50\ell \times 0.75\text{kg}/\ell) \div 60\text{kg} = 30.63\text{MJ/kg} = 8,507\text{Wh/kg}$$

このように、ガソリンと高圧水素について容器を含めて比較した場合、体積エネルギー密度、重量エネルギー密度のいずれもガソリンの方が圧倒的に優れています。

水素を燃料電池車の燃料とする場合の発電効率は 0.35 程度なので、ガソリンエンジン車の熱効率 0.2~0.35 より多少優れていますが、この程度では移動体の燃料として高圧水素を利用する合理性はありません。しかも高圧タンクを含めた燃料電池車はとてつもなく高額であり、一般に普及することはありません。

2021年5月、トヨタは富士スピードウェイで行われた耐久レースに水素エンジン車を参加させました。これについてレース前に豊田章男は「カーボンニュートラルの実現に向けた選択肢の一つとして水素エンジンの開発を進めたい。」と語ったそうです。

しかし、大量の電気エネルギーを投入して作った水素をわざわざ熱効率の低い内燃機関の燃料として使うことに合理性はありません。レースでは、水素のエネルギー密度の低さを反映して、水素充填のために走行距離50km毎に一回という頻繁なピットインを余儀なくされ、散々な結果だったようです。

水素エンジン車の開発は、水素という物質の物性についての考察を怠った愚かな技術者集団の無能を露呈したものです。

おわりに

これまでの検討から、工業文明を本質的に成立させているものは、天然資源である化石燃料という優れたエネルギー資源による工業的なエネルギー供給システムであることが分かりました。また、化石燃料に替わって工業生産を維持することのできる工業的なエネルギー供給システムは存在しないことが分かりました。

一方、世界人口は既に 80 億人を突破し、国連の推計では今世紀中には 100 億人を突破するとされています。現在の食糧生産は、地球の生態系を酷使しながら、それでも工業的なエネルギーを大量に投入した工業的な技術によって辛うじて食糧需要を賄っています。

化石燃料という極めて優れたエネルギー資源を得たことによる工業文明という物質的に豊かな文明は、人類の 10 万年余りの歴史における束の間の僥倖にすぎません。その陰で、工業的な豊かさの追求が生物としての人類が生きるための最も根源的な基盤である地球生態系の豊かさを蝕んでいることを認識することが必要です。

化石燃料が枯渇した後も人類文明は継続していきます。イースター島の教訓に学び、ポスト工業文明を生きる子孫に出来るだけ良い状態で地球生態系を引き継ぐことが工業文明という特殊な時代に生きる私たちの責任です。

人間社会が工業的な生産を続ける限り、否応なく数百年先には化石燃料が枯渇し、地球生態系の更新性資源に依拠した社会システムに移行することになります。この更新性資源に依拠した新たな社会＝ポスト工業文明への移行がどのような形で行われるか、それは工業文明の下で暮らす私たちの選択によって大きく変わります。

現在に生きる人類は、化石燃料の枯渇によって工業文明が終焉を迎えることを事実として受け容れることが必要です。

その上で、ポスト工業文明に向けて、人口を緩やかに減少させ、同時に異常に肥大化した工業生産物に過剰に依存した社会システムを縮小していくことが必要です。化石燃料が枯渇する以前に、十分余裕をもって、主要な社会構造を地球生態系の物質循環から定常的に得られる更新性資源に基づき、非工業的な生産手段によって運用する自給的な社会システムに置き換えることが理想です。

SDGs とは全く逆に、ポスト工業文明の阻害要因となる、例えば巨大都市構造をはじめとする工業的的巨大インフラに代表される工業文明の残滓を取り除くことに工業的な手段を傾注することを後期工業文明の目的とすべきです。同時に、産業革命以前の優れた手工業的な生産技術が失われる前に、最新の科学的な知見を用いて発展的に復活させることが必要です。

こうして、工業文明から化石燃料の枯渇したポスト工業文明への移行が無理なく進むようにすることこそ人類の英知だと考えます。

しかし現実の世界は、米国・西欧諸国を中心に更なる工業的な発展を貪欲に追及する国々によって暴走し続けています。こうした国々によってまとめられた DX と GX に依拠する SDGs に基づいて、爆発的な人口増加を放置したまま、更なる工業生産の拡大によって豊かさを求め続けていけば、化石燃料が枯渇する以前に地球生態系を徹底的に痛めつけて、冒頭に紹介したイースター島の文明崩壊と同じ道を歩むこととなります。

既に人口増加に対して食糧供給が絶対的に需要を賄えない時が近づいています。工業的な技術による無理な食糧増産によって、農地の酷使で生態系が破壊され、急速に飢餓状態が拡大する可能性が高いと考えられます。

最も危惧することは、ウクライナ紛争を見ればわかる通り、米国・西欧諸国は、自らの豊かさの追求を正義と見なし、そのためには武力による侵略をも厭わないという価値観を植民地支配以後、今日まで持ち続けていることです。更に付け加えれば、寒冷化による可耕作地の減少です。

このまま工業的な膨張を続ければ、イースター島文明崩壊の時と同様に、工業文明の末期には食糧や化石燃料を争奪する熾烈な世界戦争が勃発する蓋然性が極めて高いと考えます。高度に工業化された戦争による地球生態系の破壊と寒冷化はポスト工業文明の苦難に直結することになるでしょう。

果たして人類はいずれの道を選択するのでしょうか。

【参考文献】

- 1) 槌田敦 熱学外論 朝倉書店 2001
- 2) 槌田敦 新石油文明論 農文協 2002
- 3) 室田武 新版原子力の経済学 日本評論社 1986
- 4) 室田武 マイナス成長の経済学 農文協 1987
- 5) 近藤邦明 温暖化の虚像 2020 <https://www.env01.net/ondanka.pdf>
- 6) 近藤邦明 工業化社会システムの脱炭素化は不可能 2021
https://www.env01.net/main_subjects/energy/contents/20210319e.pdf