

持続可能な社会システムを探る

I. 工業文明を支えるエネルギー

2025年1月5日

©2025 近藤邦明

序

これまで、人為的 CO₂ 地球温暖化説についての検討を行ってきました。主な結論を列記すると以下の通りです。

- ①大気中の CO₂ 濃度変化に対して、産業革命以降においても、人為的に放出した CO₂ による影響は小さく、主因は海洋からの CO₂ 放出量が増加することによる自然変動である。
- ②したがって、産業革命以降の気温の上昇傾向に対して、気温変動の原因が大気中 CO₂ 濃度の上昇であるか否かにかかわらず、人為的に放出した CO₂ による影響は無視できる。「人為的 CO₂ 地球温暖化」は存在しない。
- ③人為的な CO₂ 放出量の削減＝産業の「脱炭素化」によって地球の気温を下げることは出来ない。温暖化対策としての脱炭素化は無意味。
- ④現在の地球の温度状態は、完新世の過去の温暖期に比較して著しく高いという事実はなく、IPCC が主張するように「産業革命以降の気温上昇量が 2°C を超えることが人間社会を含む地球の生態系に対して致命的な悪影響を与える」という主張に科学的根拠は存在しない。
- ⑤産業革命以降の気温の上昇傾向は、完新世の直近の過去 3000 年間に概ね 1000 年周期で発現する気温極大期が現れたものであり、自然変動である。
- ⑥大気中 CO₂ 濃度の変動は、産業革命以前と同様、地球の気温変動を原因として表面環境の炭素循環が増加することによって起こる。「CO₂ 地球温暖化説」は原因と結果を取り違えた誤りである。

以上の結果から、脱炭素化による温暖化対策、あるいは SDG's とは自然科学的に完全に間違った対応です。

現在提案されている工業化された社会の脱炭素化技術の中核とされている再生可能エネルギー発電は、化石燃料の消費なしに自立したエネルギー供給システムとして技術的に成立しません。

それどころか、現状では化石燃料による火力発電よりも化石燃料消費量を確実に削減できる技術的な根拠は存在しません。

人為的 CO₂ 地球温暖化の脅威が叫ばれ、その対策として脱炭素化・再生可能エネルギー利用によるクリーンで、持続可能な社会を目指すという SDG's は何の科学・技術的な保証もない妄想の産物です。

SDG's の目指すクリーンで持続可能な、誰もが快適で安全な生活を享受するというバラ色の社会像は、AI の普遍的な導入で、あらゆる場面でメカトロニクスの利用を前提とする、現在よりも遥かにエネルギー多消費型の社会システムです。その前提は、再生可能エネルギー発電で無限のエネルギーが供給可能であるという妄想にすぎません。

ここでは、まず工業生産システムの構造を示し、これを支えるエネルギー供給システムの条件を明らかにすることから始めることにします。

目次

1. 工業生産を支える基本エネルギーの条件	5
1-1 産業革命と蒸気機関	5
1-2 工業生産の構造	6
1-3 産業革命を支えた石炭.....	8
(1) 石炭の成因とCO ₂ 地球温暖化について.....	8
(2) 石炭のエネルギー産出比.....	10
1-4 工業化社会を駆動する化石燃料	14
(1) 外燃機関と内燃機関.....	14
(2) 石油のエネルギー産出比.....	15
(3) 液化天然ガスのエネルギー産出比	17
(4) 工業化社会とは化石燃料文明	18
(5) 化石燃料文明における発電の意味	20
2 原子力文明は成立しない	24
2-1 ウランという物質に対する技術・政治・軍事的視点から.....	24
2-2 プルトニウム製造のために開発された原子炉	27
2-3 フロントエンド～軽水炉用ウラン燃料製造過程.....	29
2-4 軽水炉原子力発電のエネルギー産出比	32
2-5 バックエンド～超長期間の廃棄物管理	35
2-6 高速増殖炉核燃料サイクルの破綻とMOX燃料	38
2-7 原子力発電は即時停止し、バックエンド処理に集中する	40
3 再生可能エネルギーによる工業文明は成立しない.....	43
3-1 自然エネルギーの特性と工業化社会との齟齬.....	43
3-2 太陽光発電の施設規模の検討.....	45
3-3 太陽光発電出力変動と電力需要変動の検討	48
3-4 太陽光発電のエネルギー産出比の検討.....	50
3-5 太陽光発電の総括.....	53
3-6 風力発電の一般的な特性	55
3-7 風力発電のエネルギー産出比.....	58
(1) 陸上風力発電	58
(2) 着床式洋上風力発電	59
(3) 浮体式洋上風力発電	60
【追補】 再生可能エネルギー発電の原価について	62
4 水素社会は非科学的な妄想の産物	64
4-1 電気分解水素製造と燃料電池.....	64
<参考>	65
4-2 電気分解水素とその派生的な利用技術	69

(1) 電解水素によるメタネーション、アンモニア合成	69
(2) 水素還元製鉄	70
(3) 水素エンジン車	70
5 総括	72
5-1 工業化社会を成立させるエネルギー供給技術の最低必要条件	72
5-2 化石燃料が工業化社会を成立させる唯一のエネルギー資源	72
(1) 鉱物資源	72
(2) 自然エネルギー	72
(3) 化学的な燃料製造	73
(4) 水素社会	73
5-3 一次エネルギーについての覚書	74
(1) 原子力	74
(2) 再生可能エネルギー	74
(3) 一次エネルギーに対する提案	75
5-4 結論	77

1. 工業生産を支える基本エネルギーの条件

1-1 産業革命と蒸気機関

人類の行う産業活動は、生態系から資源を得る農林水産業＝第一次産業と、製造業・建設業・鉱業を含む第二次産業、そして商業・医療・福祉・金融・通信などのサービスを提供する第三次産業に分類しすることが出来ます。工業生産とは第二次産業を指すと考えてよいでしょう。

近代工業は、人の生活において必要な道具を手仕事で自給的に作ることから始まったと考えられます。

次第に各種の道具を専門的に作ることを生業とする職人が生まれました。職人が自ら生産手段を持ち、個別に生産を行う形態を家内制手工業と呼びます。

流通・商業が発達すると、製造業を生業とする職人と消費者の間を仲介する問屋が発生しました。やがて問屋は職人を組織化し、職人に対して賃金を支払い、原材料と生産手段を貸与して製品を納入させるようになりました。この段階を問屋制手工業と呼びます。

さらに資本の集積が進み、18世紀ころになると問屋は自ら工場を作り、そこに生産手段とともに職人＝職を集めて組織化し、分業による協業によって更に複雑な製品を工場内で一貫製造するようになりました。これが工場制手工業の段階です。

一方、18世紀になると、自然科学、特に熱力学が草創期を迎えました。熱力学は手工業の発展に伴い、実用的な技術として急速に発展しました。

18世紀当時、石炭は製鉄における還元剤や熱源として利用されていました。

エネルギー資源＝石炭の生産において画期となったのは、炭鉱における坑道排水の技術としてトマス・ニューコメンの石炭を燃料とする蒸気揚水ポンプが導入されたことです(1712年)。ここに、石炭を採掘するために石炭を燃料とする装置の利用が開始されたのです。

もちろん当時は工夫の労働力が石炭掘削の重要な要素でしたが、蒸気揚水ポンプの導入により、生産性が飛躍的に大きくなりました。

その後、石炭を熱源とする蒸気機関(外燃機関)は急速に進歩し利用範囲を広げていきます。

一つは移動手段の動力としての利用であり、蒸気船(1783年)や蒸気機関車(1829年)が実用化されました。

産業分野では、工場制手工業が更に進化を続け、一部では水力を動力とする機械装置による生産段階にまで到達していました。蒸気機関の発達によって水力の代わりに蒸気機関の導入が工業生産規模を格段に大きくしました。こうして工場制機械工業が成立しました。

このように、18世紀に生産システムと石炭を燃料とする蒸気機関の結合によって工業生産が飛躍的な進化を開始し、大量生産に伴って社会構造の変革が起きたのが産業革命です。

1-2 工業生産の構造

18世紀の産業革命は、資本と生産手段と労働力の集中と、熱力学の実用的な応用技術である蒸気機関の結合によって工場制機械工業が成立したことによって起こりました。

工場制機械工業とそれ以前の手工業の本質的な違いは、製品製造の標準化による大量生産であり、それを可能にする工業的に供給されるエネルギーによって駆動される機械装置の導入です。

当初は複雑な作業において人手による労働も重要でしたが、製造工程の分化・標準化が進むと次第に人手による作業が減り、機械加工の割合が大きくなりました。

工業生産の本質とは、工業的なエネルギーによって駆動される機械装置による製品加工です。工業生産の概要を図1-1に示します。

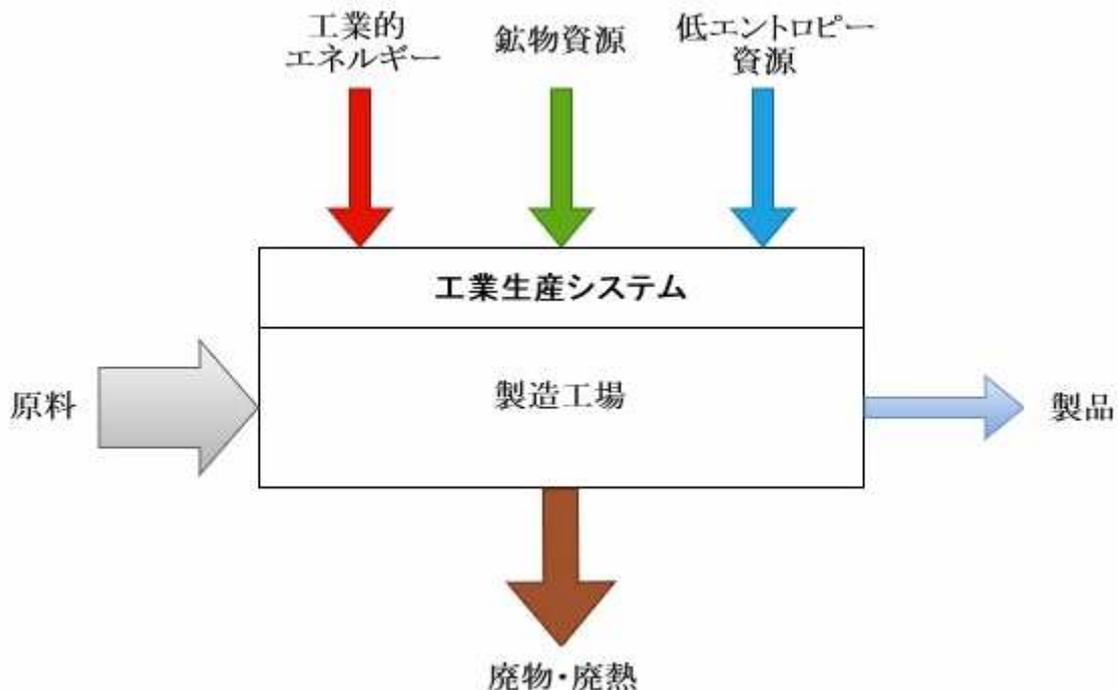


図1-1 工業生産システムの構造

横方向の流れは原料から製品への流れです。縦方向の流れは工場生産システムを建設し、運用・維持するために消費される製品原料以外の資源の流れです。

工業的エネルギーは工場における設備装置を製造・運用・維持するために消費されます。

鉱物資源とは、工場・設備を建設・製造するために消費された鉱物資源、あるいは維持・補修のために投入される鉱物資源です。

低エントロピー資源とは、冷却水、洗浄水など、作業工程から発生する排熱や廃物を取り除くために消費される資源です。

工業生産の本質とは、自由に利用できる工業的なエネルギーの供給が保証されることです。

工業的エネルギーとは次の条件を満たすものです。

- ①エネルギー(資源)自体が工業的に製造されたものであること。
- ②消費に対して必要十分な供給が可能なエネルギー(資源)であること。

工場制手工業から工場制機械工業の過渡的な段階では、水力などを機械装置の動力として用いる場合があります。勿論これも有用な製造装置ですが、水力は工業的エネルギーではありません。

1-3 産業革命を支えた石炭

人間の歴史の中において、文明が栄えると建築用材や燃料としての森林資源の消費の増加と、食糧生産のための開墾によって森林破壊が起こります。

例えば、地中海文明の栄えた地域では、今でも青い海と白い陸地のコントラストが観光の売り物の一つですが、これは文明による森林破壊の痕跡なのです。

近世に入り大航海時代を迎え、世界規模の物資の運搬が可能になり、次第に産業・商業が盛んになり資本の蓄積が進みました。エネルギー源としては薪炭の利用が中心でした。

産業が盛んになると建築用材や製鉄業における熱源・還元剤としての木炭の需要が急増した結果、ヨーロッパ大陸の森林破壊が進みました。

こうした状況を受けて、18世紀の初めに木炭に代わって石炭を乾留して製造したコークスを使用する製鉄技術が実用化されました。

つまり、燃料や還元剤としての石炭の利用によって、工業生産を維持しつつ、森林資源が守られているのです。

ここでは、産業革命を支え、工業生産の最初の基本エネルギーとしての石炭について少し詳しく見ておくことにします。

(1) 石炭の成因とCO₂地球温暖化について

地球の陸上に生態系が進出したのは原生代と顕生代カンブリア紀の境界、V/C境界の後、今から5億年ほど前のことだと考えられています。

この頃になると地球大気中に酸素O₂が増加して、太陽光を受けてオゾン層が形成され、陸地に到達する有害紫外線が減ったことによって生物が陸上に進出する条件が整ったのです。

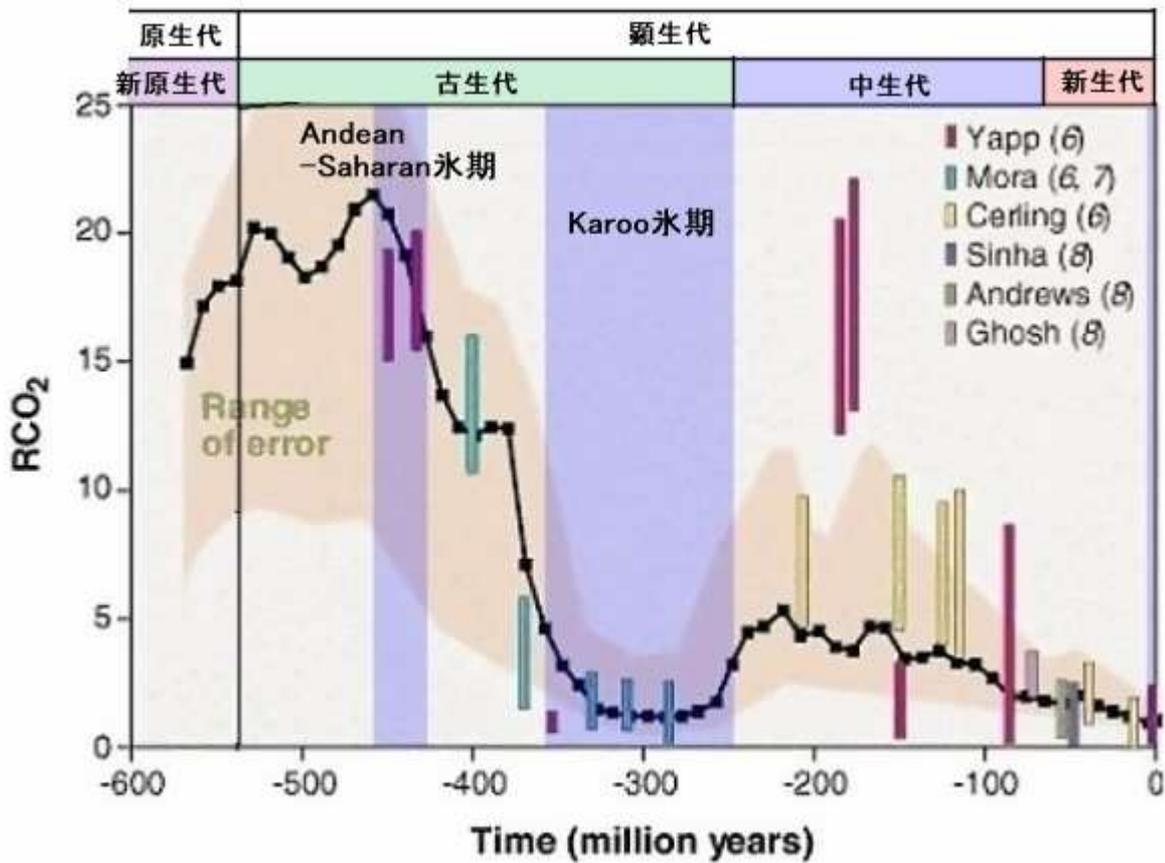
その後、陸上の生態系は急速に発展しました。

当時の地球大気のCO₂濃度は産業革命頃の大气中CO₂濃度である280ppmに対してその20倍の5600ppm程度であったと考えられています。

アンデスーサハラ氷期の後の高温期には高CO₂濃度と高温多湿の好条件によって光合成植物が急速に版図を広げたと考えられます。CO₂が急速に光合成植物に固定された結果、大气中CO₂濃度は急速に低下すると同時に大气中O₂濃度が上昇しました。このO₂濃度の上昇は昆虫の巨大化の一因であったと考えられています。

この頃の植生の中心であった高さ30mにも達する巨大なシダ類などの植物の死骸は、当時まだこれを分解する微生物が存在しなかったこと、あるいはその後の寒冷化によって分解されないまま沼地の底に沈むことになり、引き続く地殻変動によって大气から遮断され高温高压下で長時間にわたって炭化が進み、石炭層を形成することになりました。この時代(3億5920万年前から2億9900万年前までの時期)を石炭紀と呼んでいます。

図 1-2 に示すとおり、気温と大気中の CO₂ 濃度には直接的な関係は見られません。アンデスーサハラ氷期の大気中 CO₂ 濃度は 5000ppm を超えています。CO₂ 濃度 5000ppm の氷期は CO₂ 温暖化説では説明不可能です。



※RCO₂は280ppmを1とした場合の相対的なCO₂濃度を示す。

図 1-2 大気中 CO₂ 濃度の変動

また、人為的 CO₂ 地球温暖化脅威説では、産業革命当時から 2°C 程度の気温上昇で地球の生態系に破滅的な影響が出るとしています。しかし、アンデスーサハラ氷期の後のデボン紀から石炭紀の前半は現在よりも 10°C 程度高温であり高温多湿と高 CO₂ 濃度という植物にとって好条件であり、陸上生態系は極めて豊かであったと考えられます。高 CO₂、高温による生態系の破滅というシナリオは杞憂です。

石炭とは太古の地球大気中の CO₂ を固定した光合成植物の体組織つまりバイオマス(生物の体組織)の化石に外なりません。

現在、人為的 CO₂ 地球温暖化の危機を叫ぶ人は、温暖化防止のために石炭や石油に替えてバイオマスを利用すれば大気中の CO₂ 濃度は変化しないと主張しますが、そのような科学的な根拠は存在しません。

石炭は太古のバイオマスでありこれを燃焼させれば CO₂ が生じるのと同じように、現在においてもバイオマスを燃やせば含まれる C の量に比例して CO₂ を発生させるのは当然です。

仮に、現在の化石燃料消費量に匹敵するバイオマスを燃焼させれば、かつてのヨーロッパ大陸以上に森林破壊が急速に進行し陸上環境が破壊されることとなります。

(2) 石炭のエネルギー産出比

産業革命によって始まった工業化社会を支えた最初の基本的な工業的エネルギー(資源)は石炭でした。石炭が工業を支える工業的エネルギーになり得た幾つかの基本的な性質について挙げておきます。

- ①石炭は簡単な道具で熱源として利用できる。
- ②固体で安定していて取り扱いやすい。
- ③大量にある。

そして何より重要なのは、産業革命当時の科学技術で動力機関として石炭の燃焼熱を用いる蒸気機関が実用化されたことです。

既に述べたように、炭鉱において坑道内の排水のためにニューコメンによって石炭を熱源として水を動作物質とする排水ポンプが実用化されました。

ニューコメンの蒸気を用いた排水ポンプの熱効率について触れておきます。

熱機関において、投入された熱源の熱量を Q 、得られる仕事を W 、熱効率を η で表すと次の関係が成り立ちます。

$$W = \eta \cdot Q \quad (\text{仕事の単位: } J = N \cdot m)$$

熱損失のない理想的な熱機関であるカルノー・サイクルの熱効率は給熱側の高温熱の温度 T_1 と廃熱側の低温熱の温度 T_2 を使って次の様に表すことができます。

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

実際の熱機関では必ず熱損失 \equiv 熱エントロピーが発生し、カルノー・サイクルの効率よりも低くなります。熱機関で生じるエントロピーを $s > 0$ その温度を廃熱側の温度 T_2 とすると実際に取り出すことのできる仕事 w は次式のようになります。

$$w = W - s \cdot T_2$$

熱損失を考慮したエネルギー効率 η^* は次の様に表すことができます。

$$w = \eta^* \cdot Q \quad \text{より} \quad \eta^* = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) - s \cdot \frac{T_2}{Q}$$

熱効率の式から熱機関の効率を高めるための方法は明らかです。第一に給熱側の温度 T_1 を出来るだけ高くすると同時に、廃熱側の温度 T_2 を出来るだけ低くすることです。

第二に動力装置からの熱損失を小さくして発生エントロピーを小さくすることです。

蒸気機関において給熱側の温度を高くすることは水蒸気温度と同時に圧力を高くすることです。発生エントロピーを小さくすることは熱機関からの放熱を小さくすることです。

初期の蒸気機関では、技術的な限界から高温側の水蒸気温度を高めると容器の破壊の危険性があり、あまり高温にすることが出来ませんでした。また機関からの放熱を小さくする技術も十分ではありませんでした。

ニューコメンの蒸気排水ポンプの熱効率はずかには 0.33%程度であったと考えられています。更に実際に排水できた水の量から、得られた有効な仕事の熱効率を求めると 0.03%程度であったのではないかと推定されています。

現在の石炭火力発電の熱効率は恐らく 40%以上です。技術改良によって蒸気機関の熱効率は飛躍的に向上しています。

初期の蒸気機関は石炭生産において必要な仕事の一部を担ったにすぎません。その後の技術の進歩によって次第に人的な労働力は工業的エネルギーに駆動される機械装置に置き換えられていきました。

産業革命当時は工業的エネルギー(資源)は石炭でした。化石燃料である石炭の工業的供給システムの模式図を示します。

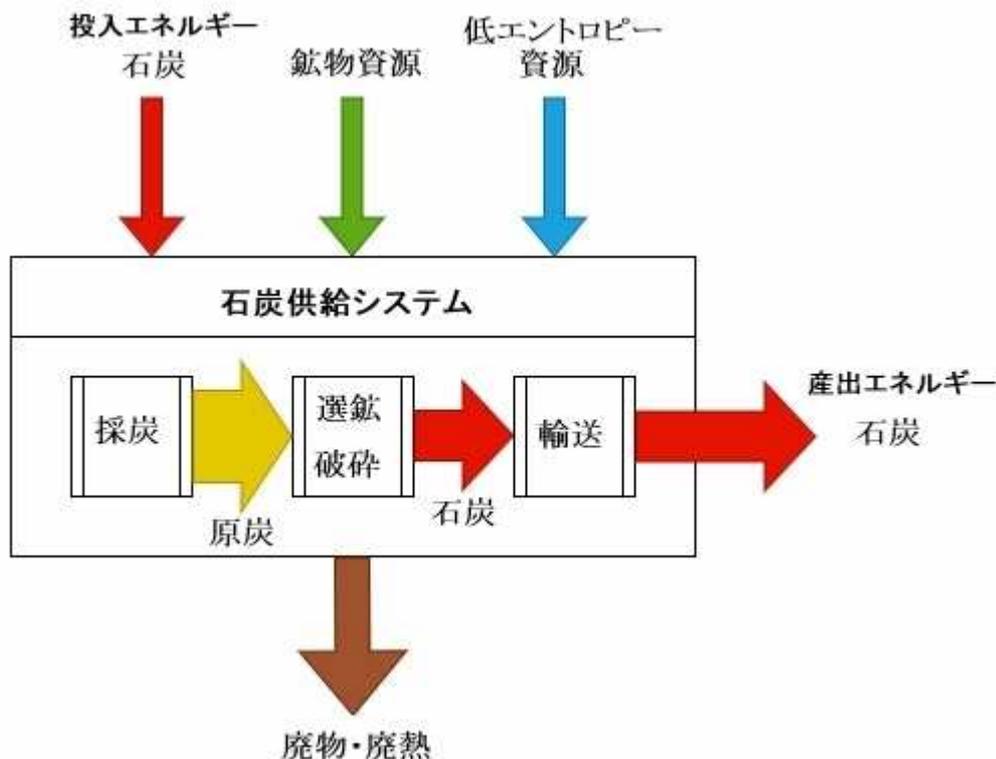


図 1-3 石炭供給システムの構造

石炭は鉱脈から採掘すれば不純物を取り除き、用途によって適度の大きさに破碎することで燃料として使用できるようになります。生産地と消費地が遠い場合には輸送を考慮することが必要に

なります。

この採炭から石炭の供給までのシステムに対して投入される石炭ないしそれによって供給されるエネルギーを石炭供給システムへの「投入エネルギー」と定義します。

石炭供給システムによって製品として供給される石炭ないしそれによって供給できるエネルギーを「産出エネルギー」と定義します。

工業生産を支える工業的エネルギー(資源)は、石炭供給システム以外の一般の工業生産に対して利用可能な石炭を供給することが必要です。その条件を表す指標の一つとして、産出エネルギー量と投入エネルギー量の差である「エネルギー収支」があります。エネルギー供給システムが工業生産を支えるための条件は次の様に表すことができます。

$$\text{エネルギー収支} = \text{産出エネルギー量} - \text{投入エネルギー量} > 0$$

投入エネルギー量が産出エネルギー量を上回りエネルギー収支が負の値であれば、そのエネルギー供給システムは一般の工業生産に対してエネルギーを一切供給できない、つまり工業生産を維持できないことを示します。

エネルギー収支という指標は一般的な工業生産システムに対して供給可能なエネルギーの量を表すことができますが、エネルギー供給システムの技術的な優劣を表す指標ではありません。

そこで、別の指標として投入エネルギー量に対する産出エネルギー量の比率である「エネルギー産出比」を導入します。エネルギー産出比によってエネルギー供給システムが工業生産を支えるための条件は次の様に表すことができます。

$$\text{エネルギー産出比} = \text{産出エネルギー量} / \text{投入エネルギー量} > 1.0$$

エネルギー産出比が大きいほど優れたエネルギー資源であることを示すことができます。

産業革命の当時、工業を支える基本エネルギーであった石炭生産において、ニューコメンの蒸気排水ポンプは、製品である石炭量を1単位とした場合、その30%~40%を消費したと言われています。エネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{石炭製造のエネルギー産出比} = \frac{1}{30\% \sim 40\%} = 3.3 \sim 2.5 > 1.0$$

したがって、石炭製造に投入した石炭を1とした時、産出する石炭(3.3~2.5)から再生産に必要な1単位を差し引いた、2.3~1.5の石炭を石炭製造以外の工業生産に対して供給することが出来たのです。

産業革命の後、石油を利用する内燃機関が実用化されると、小型軽量化が可能な内燃機関が急速に普及し、石炭を使用する蒸気機関は定置動力や大型移動手段を除いて使用範囲が限定されることになりました。

その結果、石炭の製造も石油の消費によって行われるようになりました。こうして石炭は工業生産を支える基本エネルギー資源の座を石油に明け渡すことになりました。しかし、これは石炭が燃

料資源として有効ではなくなったということではなく、現在でも重要なエネルギー資源です。

最近の石油を使った石炭生産では、条件の良い炭鉱では、投入石油に対する産出石炭のエネルギー産出比は熱量ベースで 40 以上という数値も見られます。

$$\text{石油による石炭生産のエネルギー産出比} = \frac{\text{産出石炭量}(J)}{\text{投入石油量}(J)} \geq 40$$

このように、燃料資源が異なっても熱量によってエネルギー産出比を定義することができます。

1-4 工業化社会を駆動する化石燃料

石炭による工業的エネルギー供給によって産業革命が起こったのち、自然科学とその応用技術の進歩によって、あらゆる産業において工業化が進みました。

エネルギーという視点から見た産業革命は、それ以前の自然エネルギーや木炭などのバイオマスの利用から、鉱物資源である石炭とそれによって駆動される蒸気機関という動力装置の利用という画期的な変化がありました。これを第一次エネルギー革命と呼びます。

石炭を利用する蒸気機関＝外燃機関は改良が重ねられ、エネルギー効率が飛躍的に改善されました。工場の定置動力だけではなく、船や機関車を駆動することで運輸部門にも大きな変革をもたらしました。

しかし、内燃機関の実用化によって、汎用性に劣る蒸気機関は動力装置の主役の座を明け渡すこととなります。

これに伴って、工業生産を支える基本エネルギー資源の座は固体の石炭から液体の石油にとってかわられました。この石炭から石油への移行を第二次エネルギー革命といいます。

(1) 外燃機関と内燃機関

外燃機関とは、代表的な装置である蒸気機関で分かるように、動力を取り出す装置、例えばシリンダーとピストンで往復運動を取り出す装置と、これを駆動する高圧水蒸気を生成する装置が分離されています。

その結果、どうしても装置全体が大きく、重くなってしまいます。そのため、定置用の動力や大型の移動手段である船や機関車の動力として用いられました。

内燃機関は動力を取り出す装置の内部で燃料を燃焼させます。そのため外燃機関に比較して小型化・軽量化が可能であり、小型の移動手段である自動車の普及にとって不可欠でした。

しかし、動力装置として一概に内燃機関の方が外燃機関よりも優れているわけではありません。熱効率で評価すれば、外燃機関の方が優れているとも言えるのです。

現在でも外燃機関はエネルギー供給の第一線で利用され続けています。それは、定置用動力装置であれば重量や大きさがさほど問題にならないからです。

更に、熱を供給することが出来ればどのような燃料を用いるかは任意であり、燃料に対する自由度が大きいことが挙げられます。

石油火力発電所では石油を燃料とした蒸気タービン、つまり外燃機関で動力を取り出して発電機を駆動して発電を行っています。これは外燃機関の熱効率が高いことを示しています。

燃料に固体の石炭を用いれば石炭火力発電です。石油火力や石炭火力など、蒸気タービンを用いる発電方式を汽力発電と呼びます。

さらに、熱源としてウランの核分裂反応の熱を利用した汽力発電が軽水炉原子力発電です。

天然ガスを使用するコンバインドサイクル火力発電に触れておきます。これは天然ガスを燃料とする発電方式ですが、いわゆる汽力発電ではありません。

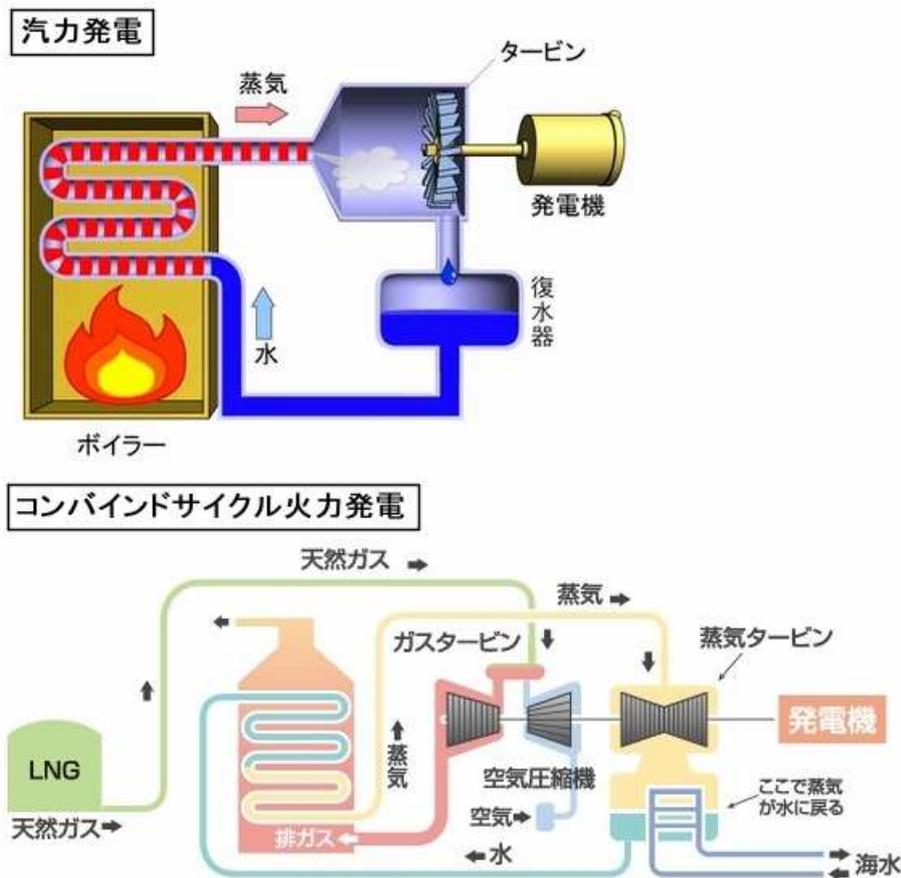


図 1-4 火力発電とコンバインドサイクル火力発電

図 1-4 に示すように、第一段階としては天然ガスを内燃機関の一種であるガスタービンエンジンを駆動するために使用します。

ガスタービンからの廃熱はかなり高温であるため、これを利用して蒸気を発生させ、第二段階として蒸気タービンを駆動します。このガスタービンと蒸気タービンで取り出した動力で発電機を駆動するのです。

その結果、コンバインドサイクル火力発電は 50% 程度の高い熱効率を実現しています。

燃料の特性や用途に応じて、あるいは技術水準によって、最も効率的な熱機関が用いられているのです。

(2) 石油のエネルギー産出比

石炭に替わって石油が工業生産を支える基本エネルギーになった理由を整理しておきます。

- ①石油は常温で液体で取り扱いやすく、エネルギー密度が大きく、簡単に燃やすことが出来る。
- ②小型から大型まで広範囲に対応できる動力装置である内燃機関の燃料である。
- ③石炭ほどではないが大量にある。

内燃機関を駆動するためには、燃料とする物質は流体でなければなりません。逆に、外燃機関を駆動する熱源は固体の石炭に限らず液体の石油を使うことも出来ます。

石油は外燃機関と内燃機関の双方で利用可能であり、内燃機関は小型から大型までの広範囲の動力装置として利用可能です。

こうして汎用性の高い燃料として石油が石炭にとってかわったことは合理的です。特に、現在の工業化社会では不可欠の小型輸送手段である自動車の普及にとって石油はかけがえのない資源です。

石油供給システムの構造を図 1-5 を示します。

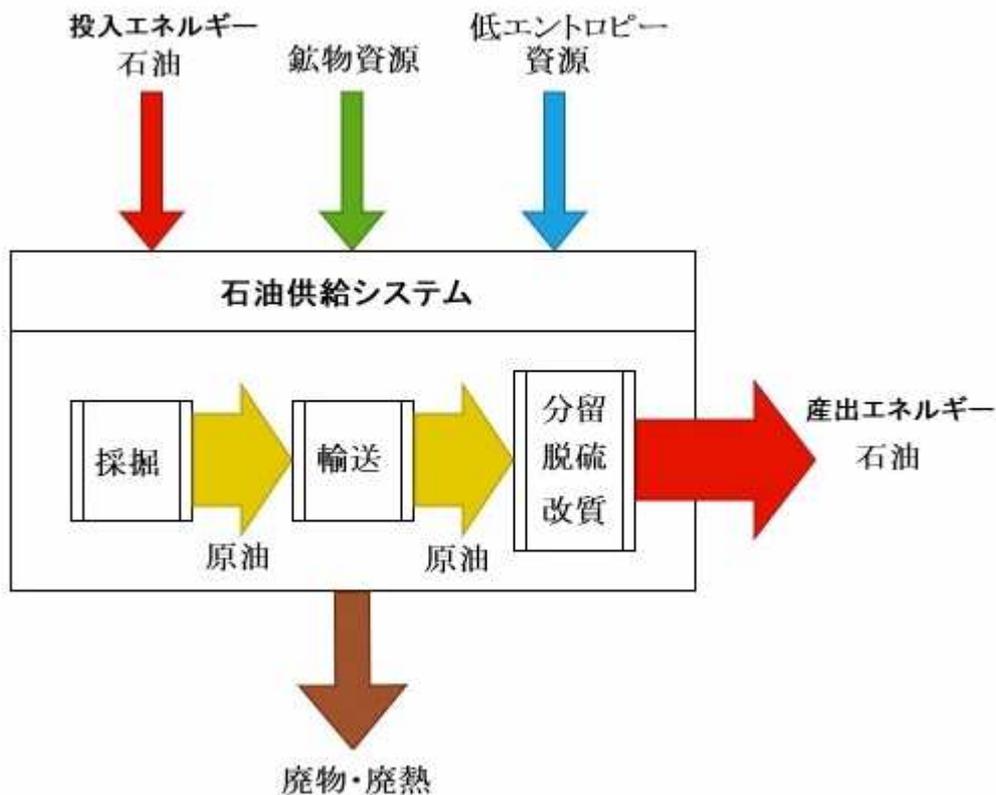


図 1-5 石油供給システムの構造

油田で採掘された原油は多くの炭化水素化合物の混合物です。一部はそのまま燃料とされる(原油生だき)こともありますが、ほとんどの場合、気化温度の違いを使って分留することでより使いやすい石油燃料に加工されます。

代表的なものは、液化石油ガス(LPG)、ガソリン、ナフサ、灯油、軽油、重油などです。図ではこれらの総称として石油としておきます。

さらに必要な場合は脱硫処理や水素添加による改質などが行われます。原油の品質、あるいは採掘条件、産油地と消費地の距離は様々ですが、

$$\text{石油生産のエネルギー産出比} = \frac{\text{産出石油量}}{\text{投入石油量}} > 10$$

程度だと考えられます。

(3) 液化天然ガスのエネルギー産出比

現在の工業化社会を駆動している主要なエネルギー資源は石炭、石油そして液化天然ガスです。

天然ガスは、メタン CH_4 を中心(90%以上)とする空気よりも軽い飽和炭化水素です。

天然ガスの利点は、石炭や石油の様に硫黄などの不純物を含まないため、燃焼ガスは二酸化炭素 CO_2 と水蒸気 H_2O であり、環境を汚染する物質をほとんど含みません(燃やし方によっては窒素酸化物 NO_x はある程度発生する。)

一方、天然ガスは常温常圧で空気よりも軽い気体なので、気体のままでは体積当たりのエネルギー量が小さく、また保管するためには密閉された容器が必要です。

実用上は低温(-162°C 以下)で液化させた状態で取り扱うこととなります。液化することで気体の天然ガスの 1/600 程度の体積にすることが出来ます。

液化天然ガス(LNG:Liquefied Natural Gas)を世界規模で流通させるためには LNG 専用タンクが必要となります。したがって石油や石炭に比べて流通のためのコスト=LNG 専用の設備装置及び投入エネルギー量が格段に大きくなるという欠点があります。

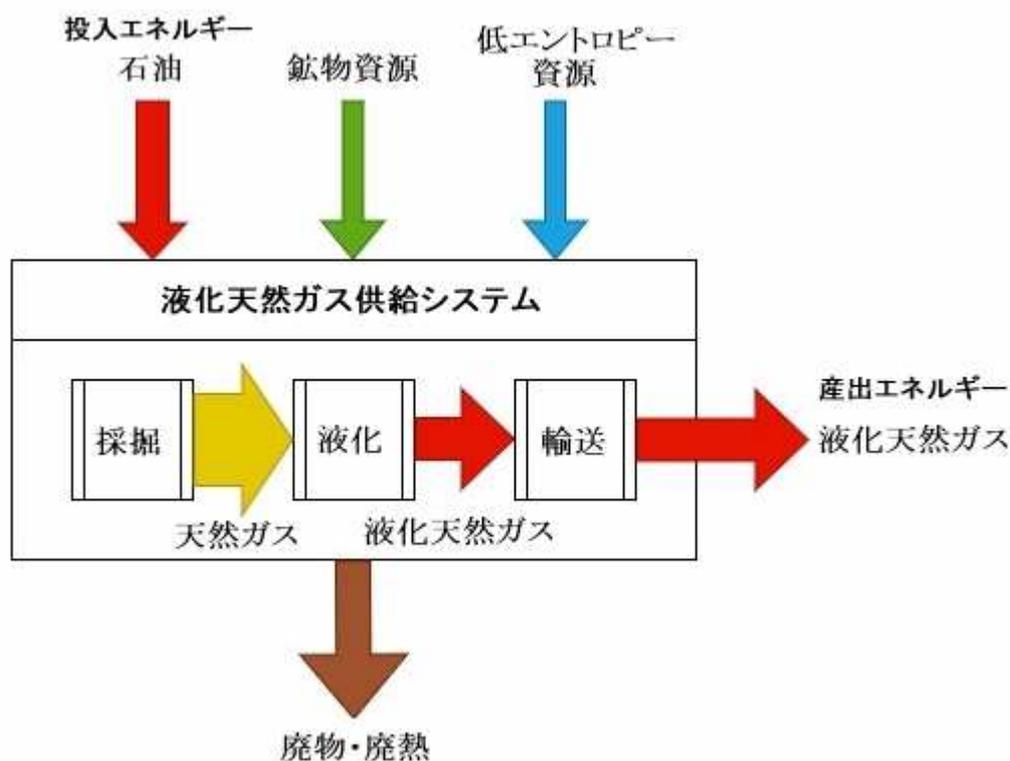


図 1-6 液化天然ガス供給システムの構造

天然ガスを液化するためには、製品として流通する LNG のエネルギー量の 10%~15% 程度の投入が必要です。更に LNG を輸送するための専用タンカーや専用の車両、備蓄施設などが必要です。

これらすべてを考慮すると、LNGを最終消費施設に供給するためには、LNGの供給するエネルギー量の30%以上を投入することが必要になります。LNGのエネルギー産出比は次の様に表すことができます。

$$\text{LNGのエネルギー産出比} \leq \frac{1.0}{30\%} = 3.3$$

このように、LNGのエネルギー産出比は1.0よりも大きいものの、石炭や石油に比較して非常に小さいことが分かります。

現在の工業化社会におけるLNGの用途は発電用が70%程度、残りは都市ガスとしての利用がほとんどです。燃焼ガスが清浄であるという利点はあるものの、その用途は限られています。

これらの理由から、液化天然ガスは現在の石油に替わって工業化社会を駆動する基本エネルギー資源にはなり得ません。

(4) 工業化社会とは化石燃料文明

これまで見てきたように、18世紀の産業革命に始まる「工業化社会＝工業文明」とは、化石燃料である石炭による蒸気機関の導入による第一次エネルギー革命によって始まり、現在は石炭に加えて石油、液化天然ガスという「化石燃料」の消費によって駆動されています。工業文明を「化石燃料文明」と言い換えてもよいでしょう。

現在の工業文明を支える一次エネルギー資源の消費量の推移を図1-7に示します。

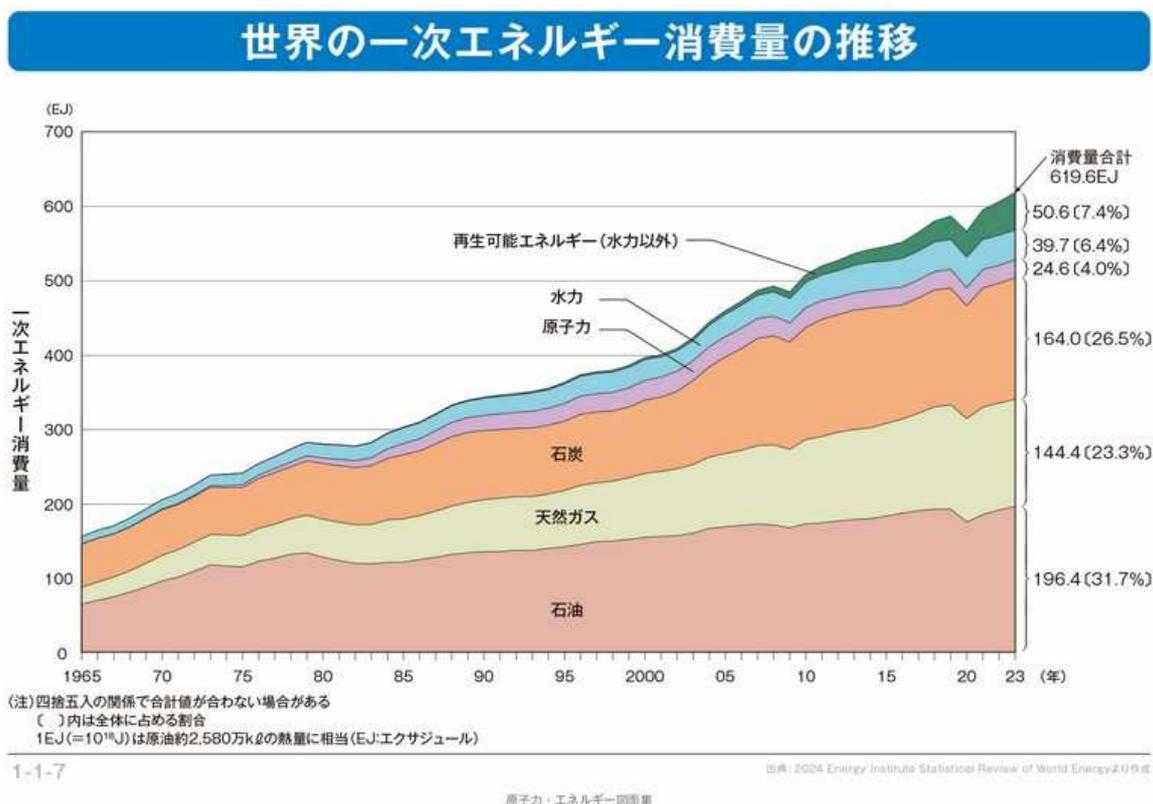


図1-7 一次エネルギー消費量の経年変化

図には一次エネルギーとして化石燃料に加えて水力、原子力、水力以外の「再生可能エネルギー」が計上されています。しかし、実際には原子力と再生可能エネルギーは二次エネルギーであって、有効なエネルギーを一切供給していません(これについては後に詳述。)

水力については地理的な条件による偏りがあるため、実質的には現在の工業化社会は化石燃料によって駆動されていることが分かります。

単純にエネルギー産出比から考えると、石炭が最も優れた一次エネルギー資源です。しかし、工業化社会を動かしている主要な動力装置が内燃機関になった現在では、石油が工業化社会を動かす基本エネルギー資源です。

液化天然ガスは、エネルギー産出比が小さく、特殊な保管インフラが必要なため、普遍的なエネルギー資源にはなり得ません。

したがって、現在の工業化社会は石油を基本エネルギー資源とする化石燃料文明、あるいは石油文明と呼ぶのがふさわしいでしょう。石炭、石油、液化天然ガスの特性を生かして、低コストのエネルギー供給システムを構築することが合理的です。

工業化社会を駆動する化石燃料に替わるエネルギー資源が存在しない場合の持続可能性について考えます。その指標として化石燃料の確認埋蔵量に対する可採年数について考えます。可採年数は、現在の消費レベルが継続すると仮定した場合、現在の確認埋蔵量で何年間採掘可能かという数字です。各化石燃料の可採年数は次の通りです。

- 石油 53.5 年
- 石炭 133 年
- 天然ガス 50 年

図に示す最新の一次エネルギー消費量から、各化石燃料の確認埋蔵量が供給可能なエネルギー量を算定すると以下の通りです。

- 石油 $53.5 \text{ 年} \times 196.4 \text{ (EJ/年)} = 10507.4 \text{ EJ}$
- 石炭 $133 \text{ 年} \times 164.0 \text{ (EJ/年)} = 21812.0 \text{ EJ}$
- 天然ガス $50 \text{ 年} \times 144.4 \text{ (EJ/年)} = 7220.0 \text{ EJ}$

※EJ(エクサジュール) = $\times 10^{18} \text{ J} = \times 10^{12} \text{ MJ}$

以上から、工業化社会が現在の消費バランスで化石燃料を使用した場合、石油と天然ガスは50年間程で枯渇することになります。その後は、石炭による第二次石炭文明の時代が30年間程続いた後に工業文明は終焉を迎えることになります。

これは新たな埋蔵資源が発見されなかった場合の単純な推定です。実際には現在でも新たな埋蔵資源が発見されていますから、もう少し工業化社会は継続することになるでしょう。

しかし、有限の地下資源である化石燃料は、恐らく数百年の後には採掘不能になり、実質的に枯渇することになります。工業化社会とは、人類史的にはごく短命な社会システムであることが分かります。

資源が枯渇に近づくと採掘条件が悪化し生産コストが上昇するため、大衆が化石燃料による工業的なエネルギーを気軽に利用することが難しくなるでしょう。日常的な煮炊きについて、薪や木炭などのバイオマスの使用が中心になるでしょう。しかし、無計画にバイオマスの消費が拡大すれば、大規模な自然環境の破壊につながる可能性があります。工業化社会の終焉に向けて、自然環境との持続可能な共存を可能にする社会システムへの移行を、時間をかけて行うことが必要になるでしょう。

(5) 化石燃料文明における発電の意味

18世紀の産業革命に始まる工業化社会は石炭、石油、天然ガスという化石燃料によって駆動される化石燃料文明であることが分かりました。

工業化社会における電気の使用について見ておくことにします。1831年にファラデーによって「電磁誘導」が理論化されました。これに前後して電気を使った動力装置である電動モーターが開発されました。

次第に工業製品の機能の集積が進むにつれて微細な加工技術が必要になりました。そこでは小型の動力装置が不可欠でした。発熱、振動が小さく小型化が可能であり、さらには微細加工のための電子制御が容易な電動モーターは今日の工業化社会では不可欠の要素です。

電気はエネルギーを電線によって簡単に運ぶことが出来るとも便利な形態です。電気によって駆動されるのはモーターだけではなく、簡単な装置で照明、熱源などに利用することが可能です。現在の社会基盤となりつつある電子機器の運用には必要不可欠です。

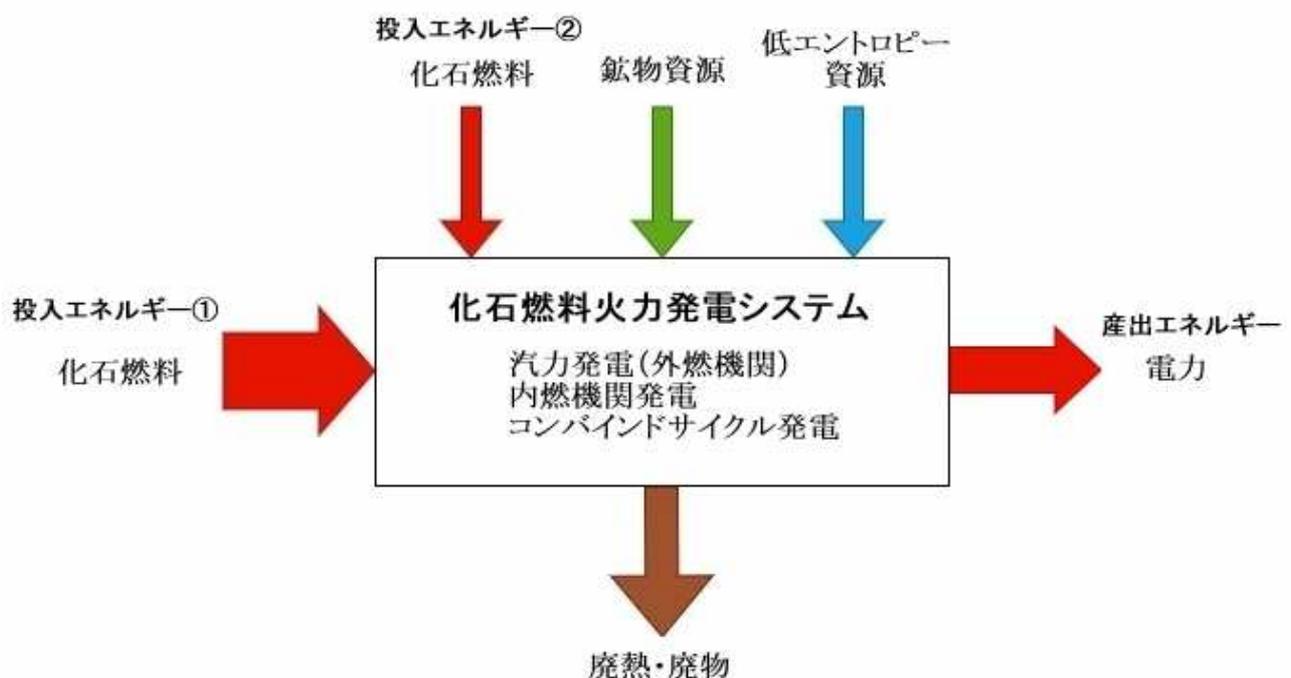


図 1-8 化石燃料火力発電システムの構造

電気とは、工業的に制御可能なエネルギー(=化石燃料)を使って動力装置(外燃機関、内燃機関=熱機関)を駆動して得た運動エネルギーを発電機を介して電気エネルギーに変換したものです。電気のように、何らかのエネルギーを加工あるいは変換して得られるエネルギーを総称して二次エネルギーと呼びます。

化石燃料の持っている熱エネルギーから熱機関を介して動力に変換するためには多くの熱損失が発生します。

従来の火力発電では、投入した化石燃料の熱エネルギー量に対して得られる電気エネルギー量の比である発電の熱効率=0.35~0.4程度、最新のコンバインドサイクル火力発電でも熱効率は0.5を少し超えるくらいでしょう。

図1-8に示す工業生産システムとしての化石燃料火力発電の概念図の表記を使うと発電の熱効率は次の様に表すことができます。

$$\text{火力発電の熱効率} = \frac{\text{産出エネルギー}}{\text{投入エネルギー①}} = 0.35 \sim 0.5 < 1.0$$

発電所で燃料として投入した熱エネルギーの50%あるいはそれ以上が発電というエネルギー変換過程において廃熱として環境中に散逸してしまいます。

化石燃料火力発電という工業生産システムは、原料として投入エネルギー①で示す化石燃料を投入し、その熱エネルギーを一旦力学的なエネルギーに変換し、力学的エネルギーで発電機を駆動して更に産出エネルギーである電気という工業製品に変換する過程です。

我々の住む熱学的な世界では、あらゆる変化に対してエントロピー(>0)が不断に生成されます。エントロピーの単位はエネルギーないし熱量(単位はジュール:J)をその発生する環境の絶対温度(ケルビン:K)で除した値です。エントロピーの発生量に比例して散逸するエネルギーが多くなります。

したがって、エネルギー技術は出来るだけ単純であることが望ましいのです。エネルギー変換を繰り返すことによって最終的に利用できるエネルギー量は指数関数的に減少するからです。

力学的なエネルギーはエントロピーを持ちません。したがって、化石燃料火力発電システムに投入した化石燃料の燃焼熱を熱機関で力学的なエネルギーに変換する段階で大量の熱エントロピーが生じます。

電気エネルギーもエントロピーを持ちません。物質が介在する運動では例外なく摩擦が生じます。力学的エネルギーを発電機に作用させることによって摩擦による発熱、装置の摩耗による物質の拡散が生じるためにエントロピーが発生し、その結果として発電機に作用した力学的エネルギーよりも産出される電気エネルギーの方が必ず小さくなります。

エネルギー供給技術において工業的に重要なことは、熱効率ではなく「エネルギー産出比」です。これは、あるエネルギー供給システムの生産過程に投入したすべての工業的エネルギー量に対して、その生産過程から産出される工業的エネルギー量の比率です。

見方を変えれば、エネルギー産出比とは、**エネルギー供給システムを「工業的に単純再生産す**

るために必要な工業的エネルギー量を1」として、その何倍のエネルギーを産出できるのかを示す値です。

工業化社会を駆動することのできるエネルギー供給システムの必要条件がエネルギー産出比>1.0 であることは既に述べた通りです。化石燃料火力発電システムのエネルギー産出比を図の表記で表すと次の通りです。

$$\text{火力発電のエネルギー産出比} = \frac{\text{産出エネルギー}}{\text{投入エネルギー①} + \text{投入エネルギー②}} < 1.0$$

熱効率に比較して、分母の値が「投入エネルギー②」の分だけ大きな値になります。したがって、化石燃料火力発電システムのエネルギー産出比は発電の熱効率よりも小さくなります(<1.0)。

投入エネルギー②は、化石燃料火力発電システムを運用するために必要な燃料以外の化石燃料エネルギーの量です。具体的には発電装置システムの製造、建設、運用、維持等に投入するエネルギー量です。

現在の化石燃料火力発電システムの平均的なエネルギー産出比は 0.35 程度<1.0 であると考えられます。つまり、熱量ベースで見れば、発電に投入された化石燃料の持つ熱量に対して電気エネルギーは 1/3 程度に目減りするのです。

発電とは、電気の持つ利便性を得るために敢えて化石燃料の持つ熱エネルギーの一部を犠牲にしているのです。したがって、電気エネルギーの使用は出来る限り化石燃料の使用では実現できない作業にのみ使用するように注意することが必要です。

その意味で最も愚かな電気エネルギーの使用方法は熱源として使用することです。例えば、夜間の電力需要が少ないからといって、夜間電力のダンピング販売で電気温水器を普及させるなどというのは全く愚かな選択というしかありません。

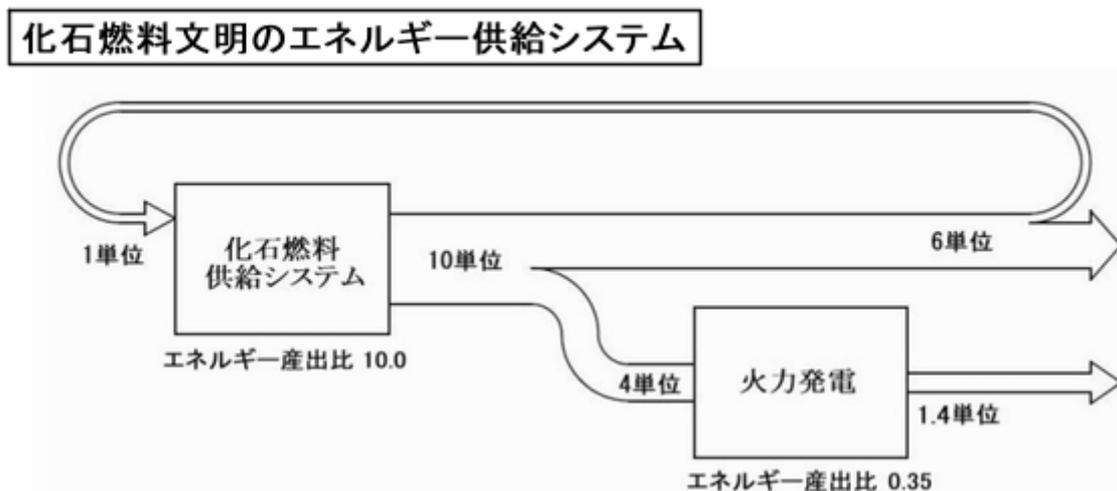


図 1-9 化石燃料文明のエネルギー供給システム

最後に、現在の工業化社会、化石燃料文明のエネルギー供給システムの概要を図 1-9 に示します。

化石燃料(石炭、石油、液化天然ガス)供給システムの平均的なエネルギー産出比を 10.0 とします。また、火力発電システムのエネルギー産出比を 0.35 とします。

例えば現在の日本の電力化率は 40%程度なので、化石燃料供給システムから産出された化石燃料 10 単位の内、4 単位が火力発電システムに投入されます。

化石燃料 6 単位はそのまま最終消費され、4 単位は電力に変換されて 1.4 単位が最終消費されます。

化石燃料供給システムに 1 単位が消費され、残りの化石燃料 5 単位と電力 1.4 単位が工業化社会を駆動するためのエネルギーとして消費されます。

したがって、

電力を含む化石燃料供給システムのエネルギー産出比 = $1.0 + 5.0 + 1.4 = 7.4 > 1.0$

であり、工業化社会が成立しているのです。

2 原子力文明は成立しない

1章の議論において、今日の工業化社会を本質的に支えているのはメカトロニクス・情報通信技術・AI などではなく、エネルギー産出比の大きな＝優れた化石燃料の存在であることを示しました。化石燃料が枯渇すれば工業化社会はたちどころに崩壊します。

1970年代の二度の石油危機によって、化石燃料が有限の地下資源であることが認識され、工業化社会の永続を夢見る技術者によって、盛んにポスト石油文明を成立させるエネルギー技術の研究が行われました。

石油代替エネルギー開発の一つは原子力発電から核融合発電に繋がる「ハードエネルギーパス」であり、もう一つは自然エネルギーの工業的な利用を目指す「ソフトエネルギーパス」でした。

本節ではハードエネルギーパスについて検討することにします。

2-1 ウランという物質に対する技術・政治・軍事的視点から

ウランは海水中に広く存在しています。海水中の総量は45億トンともいわれています。しかし海水中の濃度は3.3ppb (parts per billion: $\times 10^{-9}$ 、10億分の1)程度と希薄です。その結果、海水中からウランを取り出すために投入が必要なエネルギー量がウランから得られるエネルギー量を上回るために海水中からウランを採取する工業的な意味はありません。

現在原子力の利用のために採掘されているウラン鉱(U_3O_8)の品位は0.1~0.3%程度です。

天然ウランの同位体比率は概ね、原子量238の ^{238}U が99.3%、原子量235の ^{235}U が0.7%程度です。

天然ウランの内、核燃料として利用できるのは、核分裂の連鎖反応を起こす性質を持つ ^{235}U です。したがって、ウランを核燃料として利用できるようにするためには膨大なエネルギーを投入する長大な工程を要することが容易に想像できます。

化石燃料は、簡単な道具で手軽に個人レベルで使うことが可能です。

しかし、ウランを燃料として利用するということは、ウランの核分裂の連鎖反応を制御することが必要です。更に、核分裂反応から放射される人体に有害な放射線が環境に漏洩しないように厳重に管理する必要があります。そのためには大きな装置システムが必要であり、個人レベルの生活環境で使うことは不可能です。

したがって、ウランの工業的な利用とは、原子力発電所において電力に変換するしかありません。

ウラン核燃料は大量の化石燃料の投入を必要とする長大な工業生産過程から産出される工業製品なので、ウラン核燃料の核分裂反応によって供給されるエネルギーを一次エネルギーに分類することは適切ではありませんが、現在のエネルギー統計では一次エネルギーとして計上されています。

1-4(4)で紹介した一次エネルギー消費量の推移を見ると、2023年度に原子力として消費され

たエネルギーは 24.6EJ でした。ウラン鉱の確認埋蔵量に対する可採年数は 70 年と見積もられています。したがって、原子力として供給可能なエネルギーの総量は次の通りです。

$$\text{原子力の供給可能エネルギー} = 24.6\text{EJ} / \text{年} \times 70\text{年} = 1722\text{EJ}$$

これに対して既に紹介したように化石燃料の確認埋蔵量で供給可能なエネルギー量は石油は 10507.4EJ、石炭は 21812.0EJ、LNG は 7720.0EJ でした。

したがって、原子力は石油の 16.3%、石炭の 7.9%、LNG の 22.3% 程度のエネルギーしか供給できないのです。

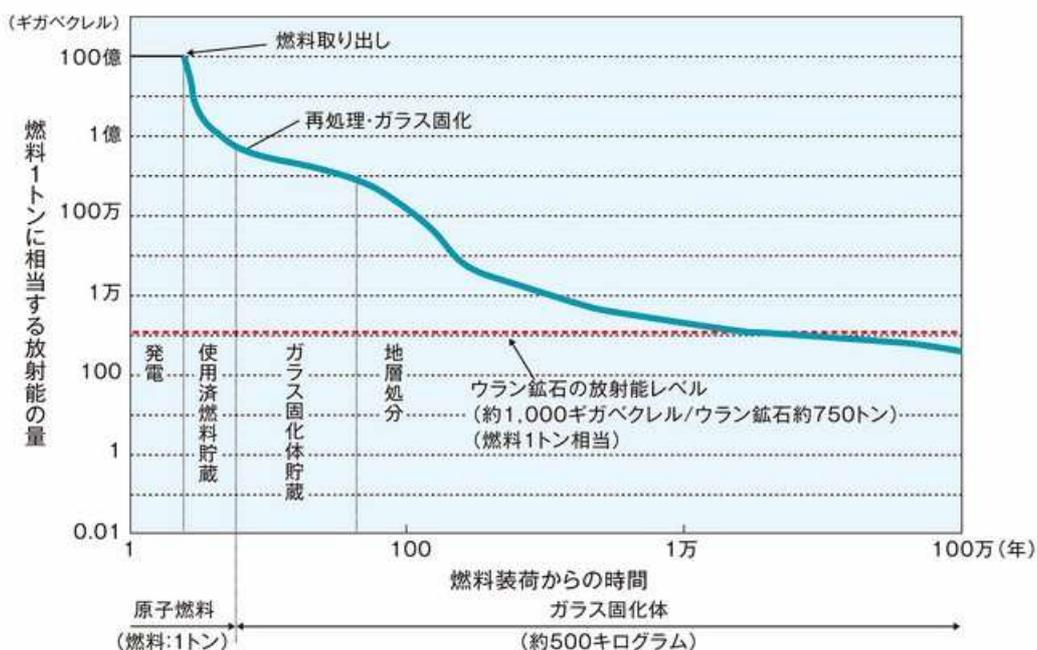
また、2023 年度の一次エネルギー消費量の合計は 619.6 (EJ/年) なので、原子力は工業化社会を僅か $1722\text{EJ} / 619.6(\text{EJ}/\text{年}) = 2.77(\text{年})$ しか維持できないことが分かります。

現在、原子力発電を利用している国は、核兵器保有国を除けば日本、韓国、カナダ、スウェーデンなどを含めて 20 か国に満たないのです。それどころか、原子力発電の技術的な問題を完全に解決している国は地球上に存在しません。したがって、工業を支える普遍的なエネルギー供給システムとして原子力が世界中に普及することはありません。

蛇足ですが、政治・軍事的に核兵器保有国は出来るだけ原子力技術の拡散をむしろ阻害しようとしていますから、その点からもエネルギー技術として利用拡大することはないでしょう。

原子力発電の最大の問題は、福島第一原発の事故処理が困難を極めていること、高レベル放射性廃棄物の最終処分場の建設地が全く決まらないことから分かるように、原子力発電のいわゆるバックエンドの処理技術、方法が確立できないことです。

高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰



8-3-9 出典：燃料サイクル開発機構（旧日本原子力研究開発機構）「我が国における高レベル放射性廃棄物最終処分場の技術的信頼性」より作成

図 2-1 高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰時間

図2-1に示すように、高レベル放射性廃棄物の放射能レベルがウラン鉱石と同レベルにまでに減衰するには、発電終了後、数万年～十数万年という途方もない時間が必要なのです。

人間の科学技術では、高レベル放射性廃棄物の保管場所の放射能に対する遮蔽の安全性を数万年にわたって保証することは検証不可能であり、実質的には不可能です。しかも、化石燃料に支えられた工業化社会は数百年ないし千年程度の期間で終焉を迎えることが避けられません。工業的な技術無しの「素手」で高レベル放射性廃棄物を取り扱うことを将来世代に委ねるなど、あまりにも過酷な要求というしかありません。

現在の工業化社会の継続期間をわずか3年足らずしか維持できない原子力発電を利用するために、数万年～十数万年にも及ぶ高レベル放射性廃棄物という危険物質の保管を必要とする技術を利用することに、合理性はありません。一刻も早く脱原発を敢行することこそ理性的・科学的判断だと考えます。

2-2 プルトニウム製造のために開発された原子炉

核分裂反応は、1938年に、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンらが天然ウランに低速中性子を照射し、反応生成物にバリウムの同位体を発見したことによって確認されました。

そして、アメリカで1942年12月2日に最初の原子炉「シカゴ・パイル1号」が作られ、エンリコ・フェルミ率いるシカゴ大学のチームが核分裂の連鎖反応を初めて成功させました。

実用としての原子炉は、米国における核分裂反応を用いた核兵器開発計画、通称「マンハッタン計画」の中でハンフォード・サイトに1943年に建設が開始され、1944年に稼働を開始した「B原子炉」で、これは大規模なプルトニウム生産用原子炉でした。ハンフォードB原子炉は黒鉛を減速材に用い、天然ウランを使用する形式の黒鉛炉でした。

B原子炉で生産されたプルトニウムは、ご存じの通り、翌1945年8月9日に長崎に投下されたプルトニウム爆弾「ファットマン」の材料となりました。

このように、そもそも原子炉は核兵器用のプルトニウムを生産するために開発された技術でした。原子炉運用時に発生する熱エネルギーは廃熱として捨てられていました。

第二次世界大戦が終結した後、核兵器開発競争が行われたことはご承知の通りです。

このように、原子炉技術は兵器開発という金に糸目をつけない軍事技術として出発したものであり、現在でも軍事機密に関する情報は開示されていません。

アメリカのドワイト・D・アイゼンハワー大統領が1953年12月8日に国際連合総会で「アトムズ・フオー・ピース(Atoms for Peace)」を提唱しました。これは額面通り受け止めることは出来ず、むしろ平時において核技術を温存するための方策という意味合いが強いと考えられます。

技術的には、原子炉の核分裂反応に伴って、膨大な熱エネルギーが生じるため、これを回収して発電を行うことが出来ると考えられたのです。

最初の商業用原子炉は、1956年10月17日に運転を開始したイギリスのコールダーホール原子力発電所です。この原子炉は黒鉛減速炭酸ガス炉(GCR)という形式で、出力は6万キロワットでした。

日本の原子力利用は、アイゼンハワーの国連演説のわずか2年後1955年に成立した原子力基本法によって始まります。これを主導したのは自民党のタカ派のリーダーであった中曽根康弘であり、原子力発電導入には将来的な日本の核武装が念頭にあったことは明らかです。自民党のみならず、現在の日本の保守系議員の中には根強い核武装論を肯定する人々がいることは周知の通りです。

2011年の福島第一原発事故後に成立した「原子力規制委員会設置法」においても原子力発電の利用が「我が国の安全保障に資することを目的とする」ことが明記されています。

日本は国際連合憲章の「第二次世界大戦中に連合国の敵国であった国」に関する「敵国条項」に該当するため、旧連合国＝核兵器保有国からの監視下にありました。そこで、日本の原子炉の形式は、プルトニウム生産に向かない軽水(通常の水素:¹H)を減速材に使用する軽水炉が半ば強制されることになりました。

それでも日本は、軽水炉使用済み核燃料の再処理で既に 46 トンのプルトニウムを保有し、さらに高速増殖炉の実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」の運転で兵器級プルトニウムを数 100kg 製造しています。

日本だけにとどまらず、原子力発電を行う国の思惑は核兵器の保有と表裏一体であり、核兵器製造につながる技術が含まれるウラン燃料の製造過程の多くは軍事機密の壁に阻まれ、外からの検証が難しく、また日本の様に軽水炉用核燃料の加工の大半を英仏という海外に依存している状況では、詳細なデータも分かりません。

その結果として、原子力発電という電力供給システムがエネルギー供給技術として本当に有効であるかという重大な検討がおろそかにされているのが実情です。

2-3 フロントエンド～軽水炉用ウラン燃料製造過程

原子力発電において、発電所で実際に発電を行う前段階の過程をフロントエンド、発電後の使用済み核燃料や発電施設の廃棄処分などをバックエンドと呼んでいます。ここではフロントエンド、軽水炉用のウラン燃料製造過程について検討することになります。

図 2-2 に示すように、軽水炉用のウラン燃料製造は長大な工業的な加工過程によって構成されています。まず、大まかに 6 つの作業工程に分けて簡単に説明しておきます。

① 採鉱

ウラン鉱山からウラン鉱石を掘り出す作業です。ウラン燃料を製造するためウラン鉱の品位は、すでに触れたように U_3O_8 (8 酸化 3 ウラン) の含有率が 0.1～0.3% 程度です。化石燃料に比較して掘り出した鉱石に含まれる有用部分が圧倒的に少ないことが分かります。

蛇足ですが、かつてウラン鉱山では核物質についての知識のない未熟練労働が横行しており、米国では先住民の居留地に開発された鉱山で多数の先住民が働き、劣悪な労働環境の下で肺がんの罹患者が続出したことが知られています。

採鉱に限らず、核分裂性の放射性物質を取り扱う作業工程では被曝労働が避けられません。日本においても末端労働者は使い捨ての未熟練工が多数使われており、被ばく管理が十分行われず、事故が繰り返されています。

つい先日行われた福島第一原発事故処理の燃料デブリの取り出し実験作業の失敗も、末端の作業員が知識を十分持たない下請け孫請けの未熟練工に任されていたことを如実に示しました。現在でも原子力発電は電力会社の無責任体制の下で被曝労働を下請けや孫請け、日雇い労働者に押し付けることによって動いているのです。

② 製錬

まずウラン鉱石を破碎した後に熱水を加えて更に粉碎して細かくし、スラリー状にします。更に多段階の化学工程を経て、最終的にウラン精鉱 (通称イエローケーキ) に加工します。

乾燥したウラン精鉱は、 U_3O_8 を重量比で 70～90% 含んでいます。

ここでは簡単に触れましたが、実際の作業工程は多段階の複雑な化学工程です。

③ 転換

ウラン精鉱を多段階の化学工程を経て、最終的に UF_6 (6 フッ化ウラン) にする工程。 UF_6 は常温では固体ですが、 $56.5^{\circ}C$ で昇華して気体になります。

④ 濃縮

既に述べた通り、天然ウランは非核分裂性の ^{238}U を 99.3%、核分裂性の ^{235}U を 0.7% 含んでいます。軽水炉原子炉で燃料として使用するために核分裂性の ^{235}U の割合を 3～5% に濃縮します。

^{235}U の濃縮は、 ^{238}U との原子量の違いを使ってガス拡散法や遠心分離法が使われています。

⑤ 再転換

低温で昇華する UF₆を再び安定した固体である UO₂(2 酸化ウラン)にする工程。

⑥ 成型・加工

UO₂をプレス機でペレット状にしたのちに 1700℃で焼結してペレットを製造し、これをジルコニウム合金製の燃料被覆管に装填して燃料棒にします。更にこれをまとめて燃料集合体にします。

以上がウラン鉱の採鉱からウラン燃料を製造する過程の概要です。化石燃料資源を採掘して最終的な燃料に加工するのに比較して圧倒的に複雑で長大な加工過程が必要であることが分かります。したがって、その加工過程で投入されるエネルギー量も圧倒的に多くなります。ウラン燃料のエネルギー産出比は化石燃料に比較して大幅に小さくなることが予想できます。

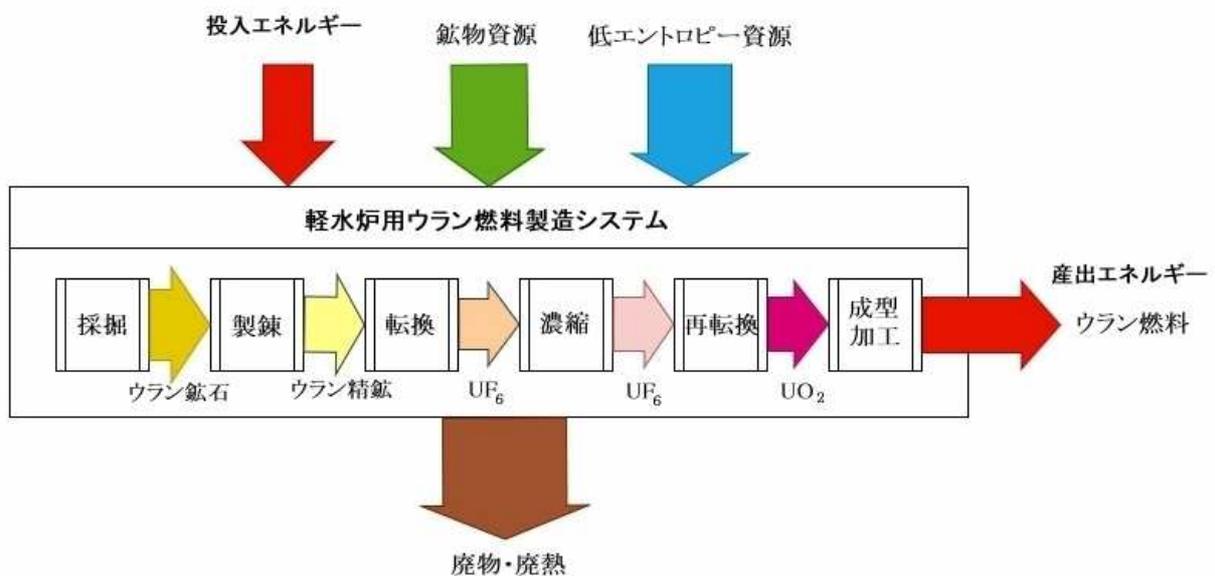


図 2-2 軽水炉用ウラン燃料製造システムの概要

しかし、ウラン燃料の加工工程は軍事機密に関わることもあり、具体的な投入エネルギー量を見積もることは難しい状況です。

参考になると思われるのが広島に投下されたウラン爆弾「リトルボーイ」に使用されたウランの製造工程のデータです。元京都大学原子炉実験所の小出裕章さんによると、「リトルボーイの爆発力は TNT 火薬に換算して 1 万 5000 トン分でした。高度な軍事機密のため正確な値は分かりませんが、そのリトルボーイは約 30kg の高濃縮ウランを材料に使っていたと思われます。それを得るために「濃縮」作業で使ったエネルギーは、TNT 火薬 5 万トン分に相当します。」

と述べられています。これを参考にすると、リトルボーイのウラン濃縮のエネルギー産出比は次の通りです(実際に濃縮作業で使った投入エネルギーとは化石燃料と考えてよいでしょう。)

$$\text{ウラン爆弾用濃縮ウランのエネルギー産出比} = \frac{\text{爆発力}}{\text{投入エネルギー量}} = \frac{1.5\text{万トン}}{5\text{万トン}} = 0.3 < 1.0$$

エネルギー的に見ればリトルボーイのエネルギー産出比は 1.0 未満でありエネルギーを浪費しているだけで無意味ですが、この場合、巨大な破壊力を得ることが目的であったために、巨額の費用とエネルギーが投入されたのです。

リトルボーイで使用されたウラン燃料は ^{235}U の濃度を 90% 以上に高めているため、軽水炉ウラン燃料の 5% 程度と直接比較することは出来ません。

リトルボーイは天然ウランの ^{235}U 含有率である 0.7% を 90% に約 130 倍に濃縮しています。一方、軽水炉燃料は 0.7% を 5% に 7 倍程度に濃縮しています。

ウラン濃縮工程の投入エネルギー量が濃縮率の対数に比例するものと仮定すると、軽水炉核燃料はリトルボーイで使用したウラン燃料に比較して、

$$\text{投入エネルギー比率} = \frac{\log 7}{\log 130} = 0.4 \text{ 倍}$$

のエネルギーを投入することになります。この場合、

$$\text{軽水炉ウラン濃縮のエネルギー産出比} = \frac{0.3}{0.4} = 0.75 < 1.0$$

になります。これは、あくまでもウラン濃縮に投入したエネルギー量なので、実際には他に採鉱、精錬、転換、再転換、成型・加工の各工程において消費されたエネルギー量も考慮する必要があります。これらを考慮すれば、軽水炉用ウラン燃料のエネルギー産出比は 1.0 を大きく下回ると推測されます。

以上から、軽水炉用ウラン燃料はエネルギー産出比が 1.0 に満たないため、有効なエネルギーを一切供給できないことが分かります。したがって、化石燃料が枯渇した後に、原子力だけで工業化社会を維持することは不可能だということが分かります。原子力文明は成立しないのです。

エネルギー産出比が 1.0 未満ということは、熱量ベースで比較して、製造過程で投入されるエネルギーよりも「製品」である軽水炉用ウラン燃料から得られる熱エネルギーの方が小さいことを示しています。

したがって、現在の一次エネルギー統計に計上されている原子力という項目に対応する一次エネルギーは実在しません。原子力は、化石燃料で供給されるエネルギーの消費によって生産されている電力と同様、二次エネルギーなのです。

2-4 軽水炉原子力発電のエネルギー産出比

軽水炉原子力発電は、核分裂によって生じる高速の中性子を、核分裂反応が起きやすくするために減速するための減速材として軽水(原子量1の通常の水素 ^1H で構成される水)を用いる形式の原子炉です。

原子炉とは、ウラン燃料に含まれる主に ^{235}U の核分裂反応に伴う反応熱を取り出す装置です。この反応熱を外燃機関の熱源として運動エネルギーで発電機を駆動して発電するのが原子力発電です。

最新の化石燃料を用いる火力発電では、熱機関に投入する高温側の水蒸気は約 600°C 、 24.5MPa 程度です。廃熱側の温度を 100°C だと仮定すると理想的な熱効率 η は次の通りです。

$$\eta = 1.0 - \frac{100 + 273}{600 + 273} = 0.57$$

実際には熱損失があるため、熱効率 $\eta = 0.43$ 程度とされています。エネルギー産出比では $0.35 \sim 0.40$ 程度でしょうか。

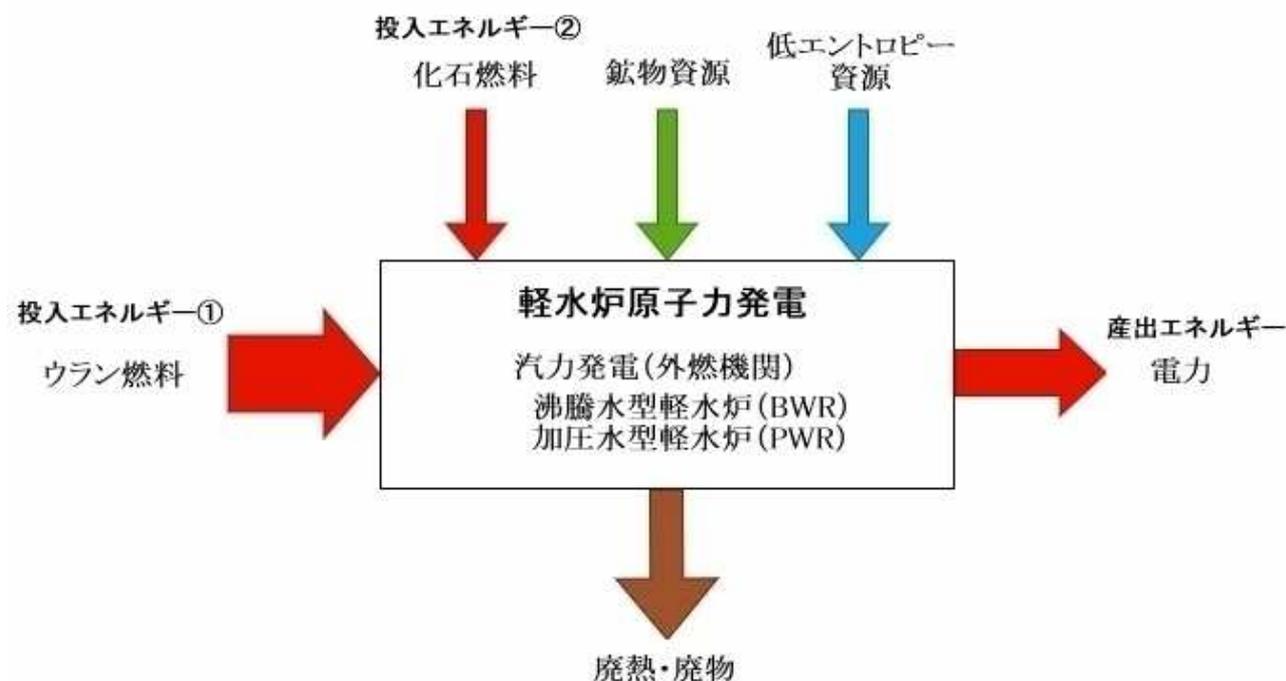


図 2-3 軽水炉原子力発電の構造

日本で稼働している軽水炉原子力発電は2種類あります。一つは単純な構造の沸騰水型軽水炉(BWR)であり、もう一つは冷却系が二次になっている加圧水型軽水炉(PWR)です。

沸騰水型軽水炉が発生する蒸気は 280°C 、 7MPa 程度です。火力発電に対して随分低温であることが分かります。これは、原子炉や冷却水の配管系の破損による放射能漏れの危険性があるため、高温側の水蒸気の圧力を高くすることが出来ないからです。

沸騰水型軽水炉の理想的な熱効率 η は、廃熱温度を 100°C と仮定すると、次の通りです。

$$\eta = 1.0 - \frac{100 + 273}{280 + 273} = 0.325$$

実際には熱損失があるため、 $\eta = 0.25$ 程度とされています。

加圧水型軽水炉が発生する蒸気は 320°C 、 15MPa 程度です。理想的な熱効率 η は次の通りです。

$$\eta = 1.0 - \frac{100 + 273}{320 + 273} = 0.371$$

実際には熱損失があるため、 $\eta = 0.33$ 程度とされています。図 2-3 の表記を使うと次の通りです。

$$\eta = \frac{\text{電力}}{\text{ウラン燃料}} = 0.33$$

ウラン燃料は二次エネルギーであり、ウラン濃縮に投入した化石燃料に対する熱効率 η は、ウラン濃縮のエネルギー産出比を 0.75 とし、次の通りです。

$$\eta = \frac{\text{電力}}{\text{ウラン燃料製造に投入した化石燃料}} = 0.33 \times 0.75 = 0.2475$$

ウラン濃縮～軽水炉原子力発電のエネルギー産出比を熱効率の 85% 程度と仮定すると以下の通りです。

$$\begin{aligned} \text{ウラン濃縮～軽水原子力発電のエネルギー産出比} &= 0.85 \cdot \eta = 0.85 \times 0.2475 = 0.21 \\ &= \frac{\text{電力}}{\frac{\text{ウラン燃料}}{0.75} + \text{投入エネルギー} \textcircled{2}} < 1.0 \end{aligned}$$

以上から、原子力発電は工業化社会を支えることは出来ません。

ここで求めたエネルギー産出比は、軽水炉原子力発電のフロントエンドの濃縮と発電に関するエネルギー投入量だけから算定したものです。実際には更に、採掘、精錬、転換、再転換、成型などに投入した化石燃料を考慮する必要があります。これらすべてを含めると、軽水炉原子力発電のフロントエンドのエネルギー産出比は 0.2 を下回ることは確実です。

発電施設について少し触れておきます。現在の出力 100 万 kW 級の火力発電所の建設費用は概ね 1000 億円とされています。これに対して 100 万 kW 級の原子力発電所の建設費用は 2700 億円とされています。

放射性物質を扱う原子力発電所では環境中に放射能を帯びた物質が漏れださないように厳重な遮蔽設備を備えることが必要であるために、どうしても設備費が高くなります。これは、運転費用

の増加、したがって、発電所を操業するために必要な燃料以外のエネルギー消費の増加につながります。

このように、原子力発電はもともと低エネルギー効率の汽力発電であるにもかかわらず、設備・操業費用が火力発電よりも高くなります。さらに定期的に運転を中止した大規模な点検が必要です。総合的に極めて効率の悪い発電システムであることが明かです。「安全保障に資する」、即ち、核兵器開発能力を担保する以外に原子力発電の存在意義を見出すことは出来ません。

2-5 バックエンド～超長期間の廃棄物管理

ウランの採掘～原子力発電のエネルギー産出比は1.0を大幅に下回るため、有効なエネルギーを一切供給できないため、当然、工業化社会を支えるエネルギーにはなり得ません。

それだけではありません。化石燃料火力発電よりもエネルギー産出比が低く化石燃料を浪費するだけであり、現在の化石燃料文明下における発電システムとしても全く使用価値がありません。

しかし原子力発電の問題の本質は、あまり関心を持たれていない発電終了後のバックエンドの処理にあります。

通常運転している原子炉からの放射性廃棄物の処理でも、通常の産業廃棄物処理とはけた違いに難しく、それ故多額の費用と同時に莫大なエネルギーの投入が必要となります。バックエンド処理が非常に高コストになることは電気事業者も認めているところです。

現在の電気料金体系では、バックエンド処理工程に含まれる原子力発電からの廃棄物の処理費用、処理に投入されるエネルギーは算入されていません。一体幾らかかるか予想すらできない廃炉や使用済核燃料の再処理、放射性廃棄物の保管管理のために発生するバックエンド処理費用を予算化することは困難であり、原子力発電電力はバックエンド処理費用を無視してダンピング販売されているのです。今後廃炉が本格化すると恐らく電気料金の値上げでは対応しきれず、莫大な国家予算を投入することが必要になるでしょう。

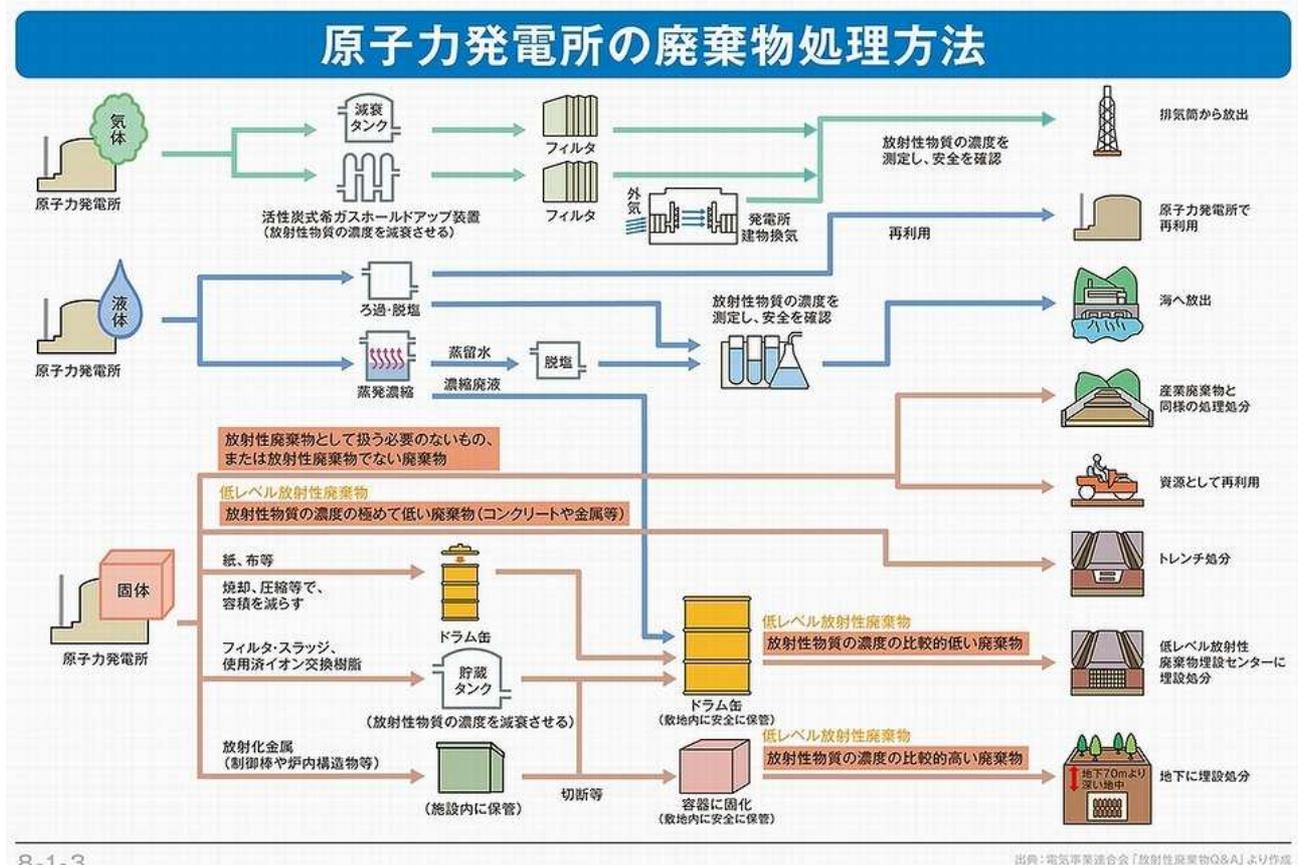
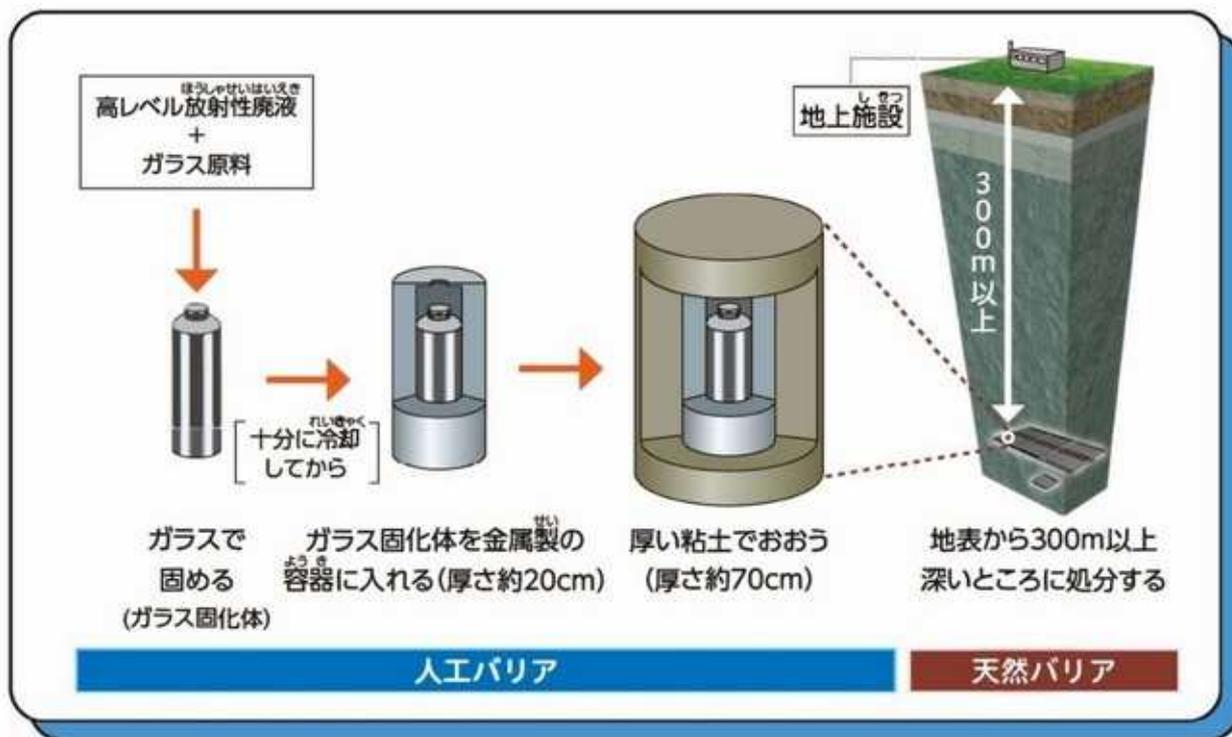


図 2-4 低レベル放射性廃棄物の処理方法

図 2-4 はいわゆる低レベル放射性廃棄物の種別とその処理方法を示しています。

しかし、実際には商業運転をした原子炉について廃炉処理を行った経験はなく、ここに示された処理が適切であるのか、また廃炉作業が問題なく出来るのかの保証は全くありません。現状では放射性廃棄物処理は画餅にすぎません。

特に問題なのが、軽水炉使用済み核燃料の再処理から発生する高レベル放射性廃棄物処理です。



資料提供：原子力発電環境整備機 (NUMO)

図 2-5 高レベル放射性廃棄物の処理方法

図 2-5 は使用済み核燃料の再処理に伴う高レベル放射性廃棄物の処理方法を示します。現在、日本の原子力発電で使用する大部分の核燃料はイギリスとフランスで製造されており、使用済み核燃料の再処理もイギリスとフランスに依存しています。

再処理によって生じた液体の高レベル放射性廃棄物はイギリスあるいはフランスでガラス固化体に加工され、その後海路で日本に送り返されてきます。取り敢えず青森県六ヶ所村に建設中の使用済み核燃料再処理施設内で冷却保管することになります。

蛇足ですが、青森県六ヶ所村に「建設中」の日本の核燃料再処理施設は事故続きで既に 30 回近くも完成工期が延長されるという無様な状態です。

ガラス固化体はまだ放射崩壊レベルが高く高温になるため、50 年間程度の期間は中間保管施設で冷却しながら保管される予定です。

その後ガラス固化体は、最終処分施設で超長期間にわたって環境に放射性物質が漏洩しない

ように更に金属容器に収め、粘土で固めた上で、地下 300m よりも深い安定した地層に建設するという最終貯蔵施設で厳重管理するという計画が立てられています。保管期間の目途を高レベル放射性廃棄物の放射線レベルが天然ウランと同程度にまで減衰することとすれば、数万年～十万年が必要です。

このように、高レベル放射性廃棄物の保管・管理は、化石燃料文明が終焉を迎えた遙か後まで数万年にわたって安全性を確保する必要があります。

化石燃料に替わって原子力文明が成立するためには、当然こうした原子力のバックエンドに必要なすべてのエネルギーも原子力発電によって供給される電力によって賄うことになります。

したがって、原子力発電のエネルギー産出比を算定するためには投入エネルギーとしてバックエンド処理に必要なエネルギーを含めなければなりません。現状では数万年間にも及ぶ管理期間中に一体どの程度のエネルギーの投入が必要なのか、精度の高い見積もりを出すことは不可能ですが、これを含めれば原子力発電のエネルギー産出比は限りなく小さくなることは論を俟ちません。

原子力発電がエネルギー供給システムとして全く使い物にならないだけではなく、化石燃料による工業文明が終焉を迎えた後のはるか未来の将来世代にまで放射性廃棄物の保管管理を、工業的な手段無しに強要することになるのです。「原子力平和利用」とは全く愚かな選択というほかありません。

しかしながら、既に日本中に 60 基ほどの商業用原子炉が存在し、使用済み核燃料も膨大な量に上り、各原子力発電所内での保管も限界になりつつあります。

まず一刻も早くすべての原子炉の運転を停止することが必要です。そして化石燃料がまだ十分使えるうちにバックエンド処理に出来る限りの投資を行い、将来世代の負担を出来る限り軽減する努力をする以外に、原子力発電という愚かな選択をし、あるいはそれを許してしまった現在世代の責任の取り方はないと考えます。

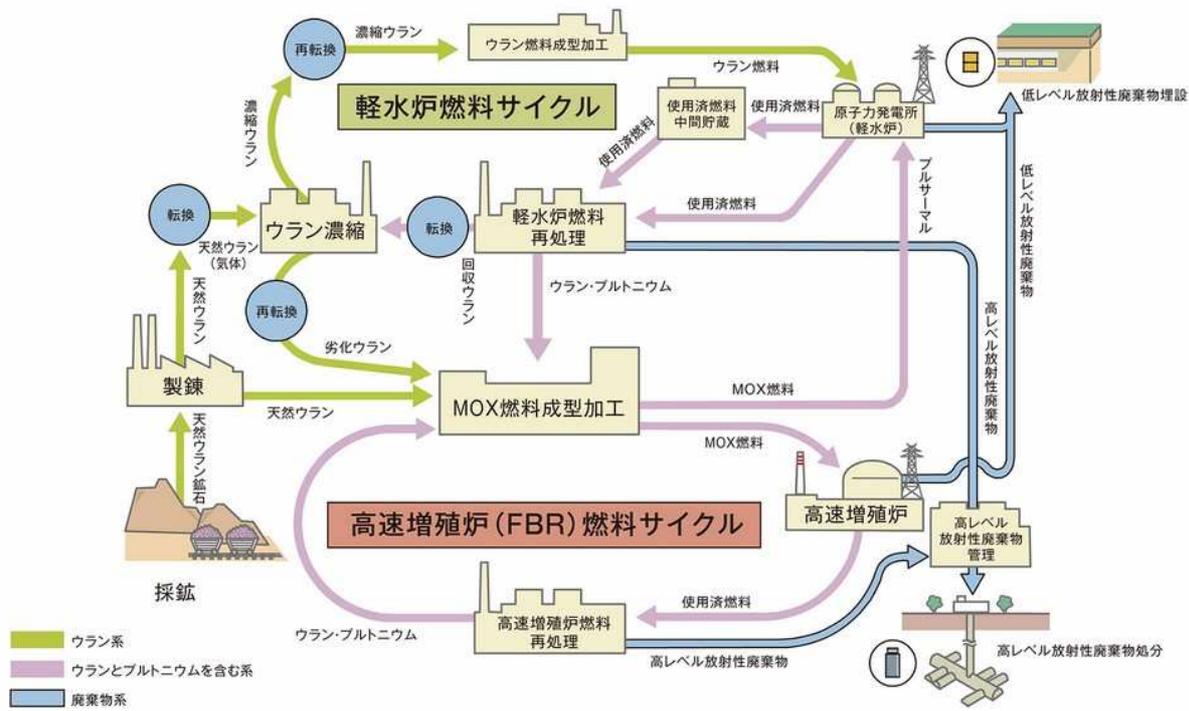
2-6 高速増殖炉核燃料サイクルの破綻と MOX 燃料

日本の原子力発電計画のロードマップでは、当初は軽水炉原子力発電を行い、これに引き続いて高速増殖炉 (FBR: Fast Breeder Reactor) を実現することが予定されていました。その中で、原子力によって海外に依存する石油エネルギーから脱却して自前のエネルギー資源を得るともいわれていました。なぜか？

核分裂性の ^{235}U は天然ウランの 0.7% であり、残りの 99.3% は非核分裂性の ^{238}U です。高速増殖炉で非核分裂性の ^{238}U に高速中性子を吸収させて核分裂性の ^{239}Pu を新たに生成する (厳密には、中性子を吸収した ^{239}U が更に 2 回 β 崩壊することによる。) ことが出来ると考えたのです。

高速「増殖」炉を運転することで、消費される核分裂物質よりも新たに炉内で生成する ^{239}Pu を多くすることが出来る、つまり国内で核分裂物質＝核燃料を生み出すことが出来るため、日本の自前のエネルギー資源を得ることが出来るというのです。

原子燃料サイクル (FBRを含む)



7-2-2

原子力・エネルギー図面集

図 2-6 高速増殖炉核燃料サイクル

日本の原子力計画では、軽水炉使用済み燃料を再処理して、燃え残った ^{235}U と軽水炉運転中に生成した ^{239}Pu を取り出し、高速増殖炉用の核燃料である MOX 燃料 (Mixed Oxide: UO_2 と PuO_2 の混合燃料) を製造する計画でした。

本来ならば、六ヶ所村の核燃料再処理施設で軽水炉使用済み燃料の再処理を行う予定でしたが、ご承知の通り、未だこの施設は完成していません。そのため、日本は軽水炉用ウラン燃料の製造だけでなく、MOX 燃料の製造もイギリスとフランスに依存しているのが現状です。

世界中で高速増殖炉を積極的に進めようとしている国は日本とフランスくらいでした。高速増殖炉では、核分裂で発生する高速中性子を減速せずに ^{238}U に効率的に吸収させるため、一次冷却系に溶融した金属ナトリウムを使います。反応性の高い危険な金属ナトリウムを使用するなど、軽水炉よりもはるかに技術的な困難さがあります。

高速増殖炉の実現を目指していたフランスのスーパーフェニックスは 1998 年 2 月に閉鎖を正式決定し、同年 12 月に運転を終了しました。フランスは後継のスーパーフェニックス II 計画を凍結し、新たに高速増殖炉 ASTRID の開発を進めたものの、2019 年 9 月に計画の放棄を発表しました。

日本では高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」が 1995 年に冷却材の金属ナトリウム漏洩と、それによる火災事故を起こしました。その後、運転再開のための本体工事が 2007 年に完了し、2010 年 5 月 6 日に 2012 年の本格運転を目指して運転を再開しましたが、2010 年 8 月の炉内中継装置落下事故により、再び稼働できなくなり、2012 年の再稼働は実現せず、2016 年 12 月 21 日に廃炉が正式決定されました。

こうして、高速増殖炉はすでに実質的に技術破綻しています。したがって、図 2-6 に示す軽水炉使用済み燃料の再処理を含めた高速増殖炉を中核とした日本の核燃料サイクル計画は破綻したのです。

さらに言えば、高速増殖炉が実現しなければ「自前のエネルギー資源を得る」という日本の原子力政策は全て破綻したことになり、化石燃料火力発電よりも低発電効率で化石燃料を浪費するだけの軽水炉の運転はこの段階で停止するのが合理的な対応です。

本来ならば、高速増殖炉が破綻した段階で、技術的困難さと、それ故の事故の危険の伴う軽水炉使用済み燃料の再処理は無意味です。しかし日本では再処理を停止するのではなく、無理やり軽水炉で本来は規格外の MOX 燃料を使うプルサーマル発電 (Plutonium utilization in thermal reactor: thermal reactor = 軽水炉) を開始しました。これを「軽水炉核燃料サイクル」と呼んでいます。

日本政府や電力会社は、MOX 燃料・再処理について、高速増殖炉の破綻によって無意味になった核燃料サイクルを正当化するために、資源の有効利用や、高レベル放射性廃棄物の削減などという苦し紛れの説明を行っています。

しかし、使用済み核燃料を化学的に溶解して核分裂物質を不安定化する工程には技術的な困難さや事故の危険性が指摘されています。高速増殖炉が実現できないのであれば、使用済み核燃料は固体のまま廃棄処分すべきです。

再処理の技術的な困難さは、莫大な処理費用とともに大量の工業的なエネルギーの投入を必要とします。再処理は Pu という核兵器材料を抽出するという意味において軍事的な機密に関わるため、処理費用や投入エネルギー量の詳細は把握できません。

しかし、軽水炉用ウラン燃料よりも再処理～プルサーマル発電用 MOX 燃料の方が高価であるという点から、恐らく MOX 燃料のエネルギー産出比はバージン・ウランから製造される軽水炉用ウラン燃料よりも小さいと推定されます。

高速増殖炉の夢が潰えた今、軽水炉使用済み燃料の再処理、軽水炉用 MOX 燃料の製造は全く無意味であり、化石燃料の浪費を拡大するだけです。

2-7 原子力発電は即時停止し、バックエンド処理に集中する

以上、エネルギー供給システムとしての原子力発電について検討してきました。概要を図 2-7 に示します。

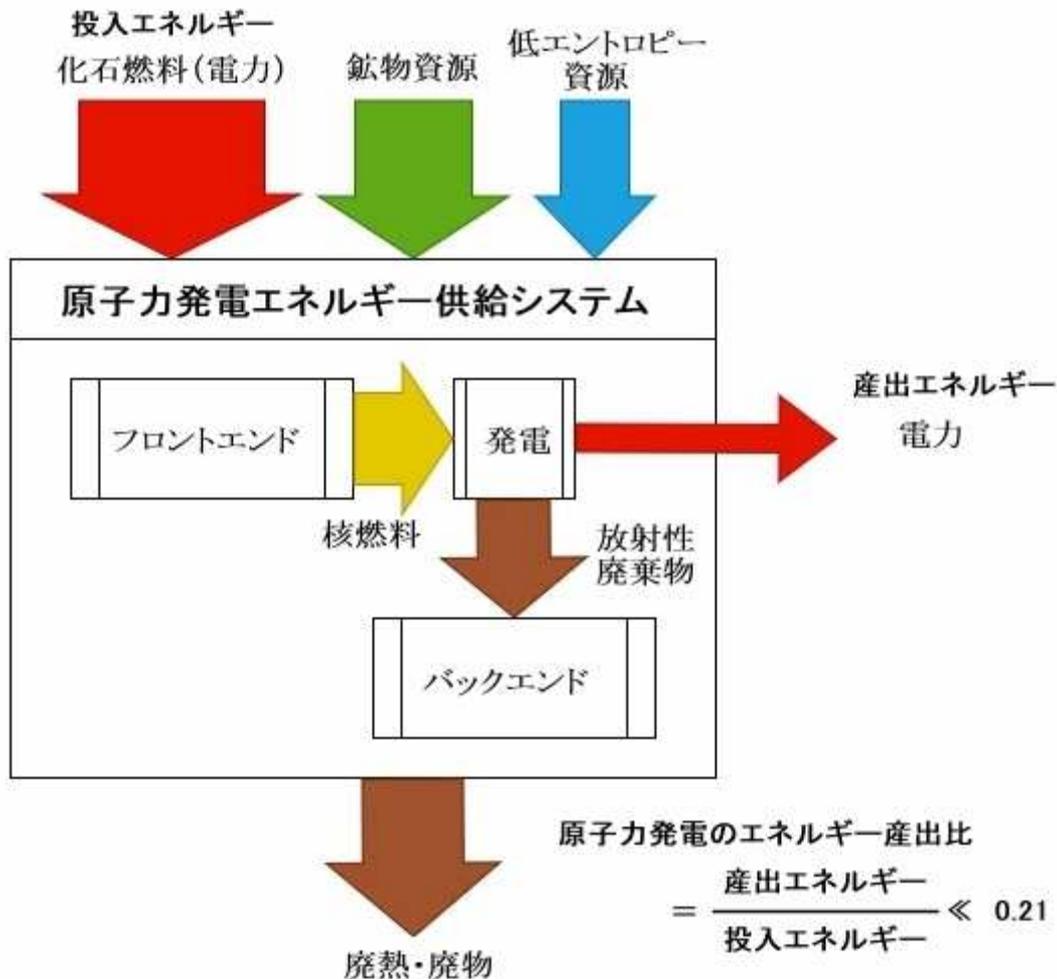


図 2-7 原子力発電エネルギー供給システムの構造

図中に書き込んでいるように、バックエンドまでを含む原子力発電システムのエネルギー産出比は 0.21 よりも遥かに小さくなります。したがって、エネルギーを浪費するだけであり、当然、原子力発電以外の工業システムに対して利用可能なエネルギーを一切供給することが出来ません。そればかりではなく、人間にとって有害な大量の放射性廃棄物を作り出すのです。

このような劣悪な発電システムは即刻運転を停止し、後処理にあらゆる資材を投入する以外に合理的な対応はありません。

近年、非科学的な人為的 CO₂ 地球温暖化説を鵜呑みにして、温暖化対策として人為的に放出する CO₂ を削減するという愚かな政策が世界中に蔓延しています。その中で、「発電時に CO₂ を放出しない」発電システムはクリーンな発電システムだとして原子力発電の利用を促進する動きがあります。ここには二つの誤りがあります。

まず、「発電時に CO₂を放出しない」ことは、そのシステムを運用するための全工程が CO₂を出さないこととは全く違います。原子力発電システムは、発電を除くフロントエンド、バックエンドの処理において莫大な化石燃料の投入によって成り立っています。また、発電段階においても原子力発電設備の運用に化石燃料ないし火力発電による電力を消費しています。

次に、原子力発電システムのエネルギー産出比は、フロントエンド～発電に限っても 0.21 よりも小さいことを示しました。これは、火力発電のエネルギー産出比よりも低いので、火力発電よりも大量の化石燃料を消費していることを示しています。つまり原子力発電は CO₂ 放出量を増大させているのです。

人為的な CO₂ 放出量の増加そのものは、地球生態系の豊かさを保証している第一生産者である光合成生物にとって有用であり、好ましいことです。

しかし、人間にとって極めて有用な化石燃料を無為に消費する原子力発電の存在は極めて有害です。

現在のエネルギー統計において一次エネルギーとして「原子力」が計上されています。今回の検討から、原子力の投入化石燃料に対する供給電力のエネルギー産出比を 0.2 と仮定して簡単な思考実験を行います。

原子力発電を即時停止することで、一次エネルギー統計から「原子力」を取り除きます(エネルギー統計の一次エネルギーは供給熱量ベースで示されている)。これによって、原子力発電の維持に投入された化石燃料の消費も必要なくなります。その量は、次式で表すことができます。

$$\text{原子力停止で削減される化石燃料} = \frac{\text{原子力}}{0.75} = 1.33 \times \text{原子力}$$

原子力発電の停止で減少する電力量は次の通りです。

$$\text{原子力発電電力量} = 0.2 \times \text{原子力}$$

この電力を化石燃料火力発電で補填することが必要になります。電力補填に必要な化石燃料の増加量は

$$\text{電力補填化石燃料増加量} = \frac{0.2}{0.35} \times \text{原子力} = 0.57 \times \text{原子力}$$

原子力発電を止めた上で現在と同じ最終エネルギーを供給するために必要な化石燃料の増加量は次の通りです。

$$\text{化石燃料増加量} = 0.57 \times \text{原子力} - 1.33 \times \text{原子力} = -0.76 \times \text{原子力}$$

以上から、原子力を廃止した上で現在の最終エネルギー消費を賄うことによって、化石燃料消費量は現在原子力が供給している熱量の 0.76 倍だけ減らすことができます。

人間にとって極めて有用な化石燃料の消費量を削減する上でも原子力発電は即刻停止する以外に自然科学的に合理的な選択肢はありません。

最後に、原子力発電に対する反対運動について少しか私見を述べておきます。

現在の反原発運動は、放射性物質を扱う危険性という観点から、主に自然災害による放射能の漏洩の可能性を論点として法廷闘争が行われています。

確かにバックエンドまで含めた超長期間にわたる放射性物質の閉じ込めについては自然災害も含めて自然科学的に安全性を完全に保証することは困難です。しかしこれは諸刃の剣であって、必ず重大な放射能漏洩が起こることを自然科学的に示すこともまた不可能です。

このような自然科学的に立証不可能な二つの対立する意見を法廷という自然科学の素人に判断させることには無理があります。

原子力発電は、自然科学的に見てエネルギー供給システムとして無意味であることを示すことこそ必要です。エネルギー供給システムとして有効なエネルギーを供給できないのであれば、その存在は絶対的に無意味であり、原子力発電の停止に異論を差し挟む余地はありません。

一方、原子力発電のエネルギー供給システムとしての有効性の議論を行わずに、原発の存在の正当性の判断基準を専らシステム運用上の安全性に求める場合、出来る限りの安全対策を行った上で利用するという判断、そして危険性があるのならば利用を止めるという判断のいずれも可能な判断です。これは自然科学的に結論の出ない議論であり、最終的には政治・経済的に力のある者の意向に沿う判断が下されることとなります。

私は、原子力発電を残すべきか否かの判断は原子力発電のエネルギー供給システムとしての有効性の議論に基づくべきだと考えます。それは優れて自然科学的な議論であり、司法判断にはなじまない事柄だと考えます。

反原発運動は、自然科学的議論を基に国家政策として政治の場で議論し、結論を得るように運動を展開すべきだと考えます。

3 再生可能エネルギーによる工業文明は成立しない

1970年代に二度の石油危機を経験し、化石燃料が有限の資源であるということが認識されました。例えばローマクラブは1972年に「成長の限界」を著し、エネルギー多消費型の工業生産システムには化石燃料の枯渇という限界が存在すること、工業的なエネルギー消費を削減して自然環境との調和を目指す社会を構想することを主張しました。

こうした時代背景はありましたが、工業化社会の利便性を手放すことが出来ない経済成長に固執する国家や大資本は、1980年代には「化石燃料の大量消費」から脱却し、ポスト石油文明を担い得るエネルギー供給システムの研究開発を盛んにおこないました。その中の一つの路線が2章で検討した原子力利用を中心とするハードエネルギーパスでした。

2章の検討から原子力の利用は化石燃料を消費することではじめて成立する技術であることが分かりました。原子力は化石燃料の消費による二次エネルギーであり、有効な一次エネルギーを一切供給していないだけでなく、化石燃料を浪費していることが分かりました。ハードエネルギーパスでは化石燃料の枯渇を克服することは出来ないのです。

その一方で、自然環境から得られる太陽光や風という無尽蔵のエネルギーの利用に活路を見出そうとしたのがソフトエネルギーパスでした。

当初、ソフトエネルギーパスでは小規模・分散型のエネルギー供給システムの利用と自然環境と調和する社会構造への変革という理念が含まれていましたが、実際には全く違った方向に向かってます。

私は、化石燃料消費で肥大化した工業化社会を巨大な再生可能エネルギーシステムによってそのまま維持するという現在の方向性は、自然エネルギーを利用するものの、肥大化した工業生産システム、AIや情報通信網を前提とする高度な工業技術に依存するハードエネルギーパスであると考えます。

3章では、再生可能エネルギーについての技術的な限界について検討することにします。

3-1 自然エネルギーの特性と工業化社会との齟齬

現在、再生可能エネルギーと呼ばれているものは、主に自然エネルギーを利用した発電技術です。中でも主要なものは太陽光発電と風力発電です。

自然エネルギー利用の歴史は古く、工業化以前の産業では人力、畜力と並んで地域に合った無理のない形で利用されてきました。

例えば運送手段としての帆船は大航海時代には世界的な物資の流通の主役でした。また、風車や水車は穀物の脱穀や製粉、更には製材などの動力として使われてきました。

この時代には自然エネルギーを利用するための装置システムは手工業によって製造されていました。したがって、自然条件による不安定さはあるものの、自然エネルギーは枯渇することのないエネルギー源でした。

以下に、自然エネルギーの特性をまとめておきます。

- ①普遍的に存在するがエネルギー密度が小さい
- ②制御できない不規則変動

自然エネルギーの源は、太陽放射エネルギーと惑星としての地球の運動に起因しています。太陽活動や地球の運動はある程度推測することが出来ます。

しかし、地球には大気が存在し、地球の表面環境の温度範囲で気体・液体・固体に相変化する水が大量に存在し、生態系があるため、予測不能な気象現象が起こります。この影響で太陽放射の強さや風の強さには、人間には制御できない、短い周期の激しい変動が生じます。

現在の工業化された社会では、あらゆる物事が、工業的なエネルギーが必要に応じて必要な量だけ使用出来ることを前提として成り立っています。

自然エネルギーは絶えず大きな振幅の不規則変動しています。この特性は工業化された社会が求める「完全に制御されたエネルギーをいつでも必要なだけ供給する」という条件と真っ向から対立します。

不規則変動する自然エネルギーを工業化社会を支えるエネルギー源として使用するためには、エネルギーを捕捉する装置以外に巨大な蓄電システムや高規格の送配電システムなどが必ず必要になります。

また、自然エネルギーはエネルギー密度が小さいために、現在の高度に工業化された社会を前提とする莫大なエネルギー量を賄うためには自然エネルギーを捕捉する装置システムは巨大なものになります。

更に、自然エネルギーが不規則変動するため、自然エネルギーを捕捉する装置システムの利用率が著しく低くなるため、ますますエネルギー捕捉装置システムは巨大化することになります。

自然エネルギーを利用するのだから、化石燃料が枯渇しても無尽蔵のエネルギー源を得ることが出来ると考えるのは短慮による幻想です。

工業化以前とは異なり、自然エネルギー捕捉装置、蓄電システム、送電システムなどは全て工業製品です。工業製品を製造するために莫大な化石燃料が消費されているのです。

3-2 太陽光発電の施設規模の検討

前節において、定性的に自然エネルギー発電の施設規模が大きくなることに触れました。ここでは太陽光発電が実際にどの程度の規模になるのかを検討します。

比較対象は、火力発電として、300kW 出力のディーゼル発電装置とします。平均的なサイズは4m×2m×2m 程度、重量は乾燥重量で 3t程度です。

ディーゼル機関の熱効率は 30～35%程度であり、火力発電の主流である蒸気機関の熱効率 40%やコンバインドサイクルの 50%よりも低い値です。

このディーゼル発電機では、発電出力 1kW 当たりの発電機重量は、 $3000\text{kg} \div 300\text{kW} = 10\text{kg/kW}$ です。周辺設備を含めて 20kg/kW とします。

標準的な太陽光発電パネルとして、価格が公開されている Panasonic の VBM410FJ03N を参考にします。公開されている仕様は次の通りです。

- サイズ: H1.722×W1.134×D35 (mm)
- 重量 : 21.5 kg
- 出力 : 410 W (1000W/m²、AM1.5、25℃)
- 価格 : 35,1780 円

このデータを基に単位面積(1m²)当たりの標準仕様を以下の通りとします。

- 重量 : 11 kg/m²
- 出力 : 210 W/m²
- 価格 : 180000 円/m²

NEDO による太陽光発電の設置架台の設計例から、太陽光発電パネル 1m² 当たりの架台の鋼材重量は次の通りです。

- 架台重量 : 20kg/m²

ここで示した出力は、大気層の厚さの 1.5 倍の長さを通じた放射強度 1000W/m² の太陽放射を受けた時に、太陽光発電パネル温度 25℃とした場合の出力で示されています。これだけの放射を受けて表面温度が 25℃というのは実際には起こりえない低温の状態です。したがって、この出力自体は多少過大な見積もりです。

実際の運用実績としては詳細なデータは見つかりませんが、150～200 kWh/(年・m²)程度と推定されます。ここではとりあえず、180 kWh/(年・m²)という値を使うことにします。この値から、太陽光発電パネルの平均的な実効出力は次の通りです。

$$180 \frac{\text{kWh}}{\text{年} \cdot \text{m}^2} = \frac{180\text{kWh}}{365 \times 24\text{h} \cdot \text{m}^2} \doteq 0.021\text{kW} / \text{m}^2 = 21\text{W} / \text{m}^2$$

この平均的な実効出力は、標準仕様で示した 210 W/m^2 の 10% です。したがって、太陽光発電の設備利用率は 10%という低い値になります。

太陽光発電は夜間は発電できないためそれだけで設備利用率は 50%に減少します。昼間でも太陽高度が変化します。太陽高度をサイン関数の半波長で近似できると仮定すると、 $2/\pi = 0.63 = 63\%$ になります。快晴日が一年中続いた場合の設備利用率は、 $50\% \times 63\% = 31.5\%$ になります。

実際には、晴天率は 50%程度なので設備利用率は更に半分になるので 15.8%程度になります。その他、大気の状態の影響、太陽光発電パネルの表面状態などによる設備利用率の低下を考慮すると、発電実績から求めた設備利用率 10%に近い値になると考えられます。以下、実績から推定した 10%の設備利用率で検討を進めます。

太陽光発電システムの単位面積当たりの重量は、パネル本体重量と架台重量を加えた値となるので、1kW 出力を得るための太陽光発電パネルの総重量は以下の通りです。

$$\frac{(11+20)\text{kg}/\text{m}^2}{0.021\text{kW}/\text{m}^2} = 1475.6\text{kg}/\text{kW}$$

したがって、太陽光発電はディーゼル発電機に対して重量比で、 $1475.6 \div 20 \doteq 74$ 倍の装置が必要だということになります。

ここで比較対象としたディーゼル発電機は火力発電の主流ではありません。蒸気機関を用いる火力発電との比較をコスト面から検討することにします。

現在の 100 万 kW 級の火力発電所の建設費用は 1000 億円程度とされています。したがって、出力 1kW 当たりの発電装置費用は次の通りです。

$$\frac{1000 \times 10^8 \text{円}}{1 \times 10^6 \text{kW}} = 10 \text{万円}/\text{kW}$$

これに対して太陽光発電パネルの費用は次の通りです。

$$\frac{18 \text{万円}/\text{m}^2}{0.021 \text{kW}/\text{m}^2} = 857 \text{万円}/\text{kW}$$

太陽光発電の出力 1kW 当たりの設備費用を大規模火力発電所と比較すると、85.7 倍の費用が掛かることになります。

以上、重量と経済コストの二つの尺度で比較しましたが、概ね良好な推定値であろうと考えます。ここでの検討から、単位出力当たりで火力発電に対して太陽光発電装置は 80 倍程度の施設規模になることが分かりました。

単純に考えると、火力発電を太陽光発電に置き換えることによって工業生産規模が 80 倍程度に増加します。

例えば、日本の 2022 年度の最終エネルギー消費量は、

$$11897 \times 10^{15} J / \text{年} = 3.3 \times 10^{15} Wh / \text{年} = 3.77 \times 10^8 kW$$

でした。これを太陽光発電で賄う場合必要な面積は次の通りです。

$$\frac{3.77 \times 10^8 kW}{0.21 kW / m^2} = 1.796 \times 10^{10} m^2 = 1.796 \text{ 万 km}^2$$

日本の国土面積は 37.8 万 km² 程度なので、必要な太陽光発電パネルの面積は国土面積の 1.796/37.8=4.75%に及びます。太陽光発電施設面積はパネル面積の 1.5~2.0 倍程度必要なので、実に国土の 10%近くが太陽光発電施設で覆われるほどになります。

巨大な太陽光発電施設の建設で既に日本の里山の自然環境は破壊されつつあります。

写真は、私の住んでいる別府市の隣町である日出町に建設されているカナディアン・ソーラーによる大規模太陽光発電施設です。太陽光発電施設の建設によって緩やかな里山の丘陵の植生が大規模に剥ぎ取られて無残な姿になりました。



図 3-1 メガソーラー発電による大規模環境破壊

3-3 太陽光発電出力変動と電力需要変動の検討

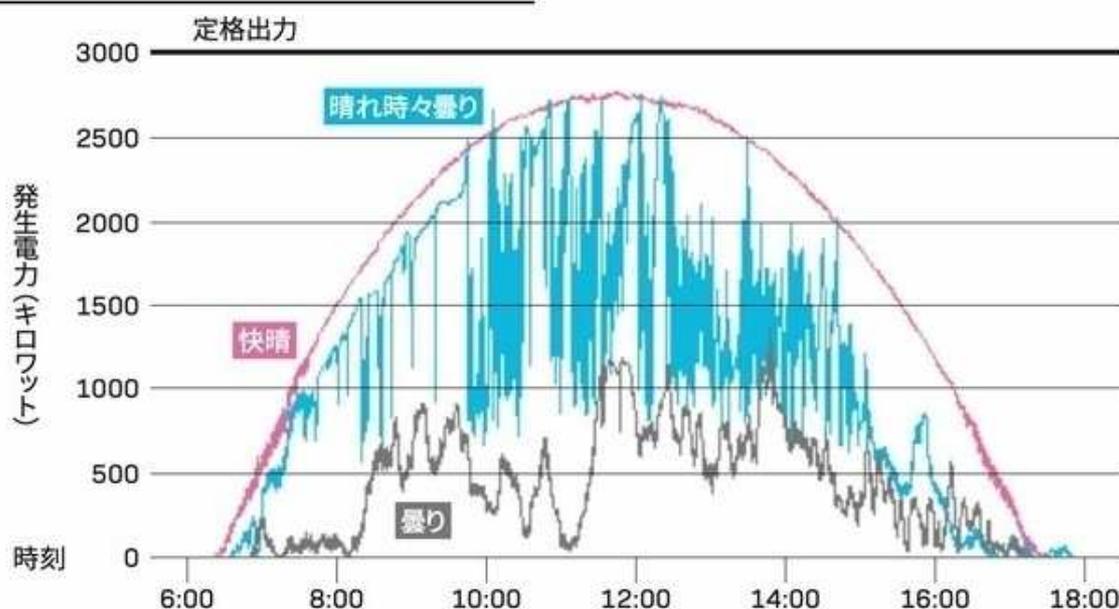
前節では単純に、太陽光発電の平均的な実効出力で最終エネルギー需要を賄う場合の施設規模を推定しました。

自然エネルギーを工業的に利用する場合に、技術的に最も困難な問題は、制御不能な出力変動です。太陽光発電の発電量は太陽高度や気温、天候、地域環境によって様々なタイムスケールの大きな変動があります。

電力需要には1日周期の変動、1週間周期の変動、季節変動などの様々なタイムスケールの変動、地域による需要特性の変化があります。

この太陽光発電電力の供給と電力需要の変動とのギャップをどのように調整するのか、非常に困難な問題です。

太陽光発電 天候と時間帯による発電量の変動状況



「太陽光発電の天候による電力変動。快晴時と曇天時の日中でも約25倍の電力量の変化がある。太陽光は無限のエネルギーである反面、発電量のコントロールが難しい（出典：九州電力）。

図 3-2 太陽光発電の出力変動

図 3-2 に太陽光発電の1日の出力変動の例を示します。短時間で激しく変動することが分かります。このままでは電源として使えないため、電力系統に接続する以前に蓄電池・平滑回路を組み込み時間に対する変動を小さくすることが必要です。

現在は、主要な電力供給システムである火力発電の運転制御やバックアップによって、供給電力のごく一部を担っているに過ぎない太陽光発電電力の変動を吸収して電力需要を賄っています。

しかし、火力発電を全て再生可能エネルギーで置き換えて工業化社会を運用するためには、出力制御もすべて再生可能エネルギー供給システムの中で完結しなければなりません。

太陽光発電の平均的な実効出力によって平均的な電力需要を賄うことを前提に求めた発電能力では、ピーク電力需要を全く賄えません。太陽光発電に対して、平均的な電力需要に対してどれだけの余裕をとった発電装置規模を確保するのか、それによってエネルギー貯留システムに対して要求されるエネルギー備蓄容量は大きく変動します。

更に、様々な時間スケールの電力需要変動があり、その変動に対して蓄電池を含めてどのようなエネルギー貯留システムを組み合わせるのかも大きな問題です。

リチウムイオン電池のような蓄電システムは比較的短いタイムスケールの変動に対する緩衝システムとしては有効です。

しかし、大容量・長期間のエネルギー貯留システムには不向きです。需要の季節変動を吸収するために長期間大容量の電力を蓄積することは技術的に困難です。この場合は揚水発電のような位置エネルギーなどの物理的なエネルギーとして溜めておくことが現実的です。

不安定な太陽光発電電力を運用するには、単に太陽光発電を導入するだけではなく、非常に難しい出力制御技術の確立と同時に、莫大なエネルギー貯留システム、更には地域間の発電量較差の緩和のための高規格の送配電システムなどの付帯システムが必須です。

例えば、短期間のエネルギー貯留システムとしてリチウム電池を使用する場合を考えます。蓄電容量 1kWh 当たりの単価は数 10～数 100 万円だといわれます。ここでは 100 万円/kWh だと仮定します。

太陽光発電装置の実効発電能力 1kW 当たり、24 時間分の蓄電容量である 24kWh を確保するために必要なコストは次の通りです。

$$100 \text{ 万円/kWh} \times 24\text{h} = 2400 \text{ 万円/kW}$$

したがって、リチウム蓄電池を含めた 1kW 太陽光発電システムの費用は次の通りです。

$$857 \text{ 万円/kW} + 2400 \text{ 万円/kW} = 3257 \text{ 万円/kW}$$

蓄電池の容量を太陽光発電の平均実効出力の 1 日分とすることが十分とは言えないかもしれません。制御できない不規則変動を伴う太陽光発電電力を工業的に利用するためには、出力を調整するために莫大な付帯装置設備が必要になるのです。

太陽光発電装置は、エネルギー貯留システムや調整システム、送配電システムを含む太陽光発電システムの一部であり、むしろ不安定電力を調整する付帯装置設備の方が巨大になるのです。

発電パネルの変換効率の改善や曲面に貼付できる太陽光発電シート開発は些細な技術改良であり、太陽光発電システムの本質的な問題解決にはつながりません。

以上を考慮すると、火力発電を太陽光発電システムで代替するために必要な工業生産規模は数 100 倍になると推定されます。果たして再生可能エネルギーに工業化社会を担うことが技術的に可能なのでしょうか？

3-4 太陽光発電のエネルギー産出比の検討

前節まで、化石燃料火力発電に比較した「太陽光発電システム」の導入による工業生産規模の数 100 倍という爆発的な拡大について紹介しました。企業にとってエネルギー供給市場のパイが数 100 倍になるのですから、彼らがこれを歓迎しないはずはありません。企業は温暖化対策や環境問題の改善に熱心なわけではなく、ただ単純に儲かるから脱炭素政策に熱心なのです。

逆に、温暖化対策に熱心な自称「環境保護団体」や若者たちの、「多額の費用が掛かっても環境に優しい再生可能エネルギーを導入すべきだ」という主張は自然科学的に間違いであり、金儲けをたくらむ企業にとっては正に渡りに船で、大衆がエネルギーに対して「再生可能エネルギー導入賦課金」のような必要以上の対価の支払いに対して反対しにくい雰囲気醸成するのに一役買っています。

前節までの検討で、火力発電を太陽光発電システムで代替することによって、単位電力供給量当たりの工業生産規模が数 100 倍になることを示しました。既に紹介したように、巨大な太陽光発電施設の建設で日本各地の里山の自然環境が蚕食され破壊され始めています。

工業製品は現在の化石燃料を基本としたエネルギー供給システムの下で製造されています。したがって、「1-2 工業生産の構造」で示したように、太陽光発電システムを製造するためには莫大な化石燃料が投入されています。一般的に、工業製品原価の内、10~20%が工業生産プロセスで投入されたエネルギー＝化石燃料に対する対価です。特に太陽光発電パネル本体は「エネルギー集約的」、もっと言えば「電力集約的」な工業生産プロセスであり、沢山の電力を使用しています。

これを如実に示しているのが現在の主要な太陽光発電パネルメーカーのシェアです。太陽光発電パネルのメーカーの大部分は電力価格の安い中国や NIES 諸国、あるいは水力の安価な電力が使用できるカナダに集中しています。

エネルギー産出比を算出するためには、本来ならば生産プロセスで投入されている工業的エネルギー量を積算することが必要ですが、詳細なデータが入手困難なので、ここではエネルギー・コストから推定を試みることにします。

「3-2 太陽光発電の施設規模の検討」から、太陽光発電パネル単体のエネルギー産出比を検討します。太陽光発電パネルの価格は 857 万円/kW でした。耐用年数を 20 年としての生涯発電電力量は次の通りです。

$$1\text{kW} \times 24\text{h/日} \times 365 \text{日/年} \times 20 \text{年} = 175200\text{kWh}$$

大規模太陽光発電では、公称発電能力 1kW 当たり、年間 5000 円程度の維持費が必要です。実効出力 1kW 当たりに換算すると以下の通りです。

$$\frac{5000\text{円/公称kW} \times 0.21\text{公称kW/m}^2}{0.021\text{kW/m}^2} = 50000\text{円/kW}$$

したがって、実効出力 1kW のパネルの 20 年間の維持費は 100 万円です。以上から、実効出力 1kW のパネルが 20 年間で供給する 175200kWh の電力の原価は、パネル費用と維持費の合計なので 957 万円です。太陽光発電によって供給された電力の

1kWh 当たりの原価は次の通りです。

$$\frac{9570000\text{円}}{175200\text{kWh}} = 54.6\text{円/kWh}$$

原価に占めるエネルギー費用は次の通りです。

$$54.6\text{円/kWh} \times 0.2 = 10.9\text{円/kWh}$$

化石燃料の価格はこのところ乱高下していますが、7ドル/百万 Btu という値を使うことにします。1ドル=110円、1Btu=1.054kJ とすると以下の通りです。

$$\frac{7\text{ドル}}{\text{百万Btu}} = \frac{7 \times 110\text{円}}{1000000 \times 1.054\text{kJ}} = \frac{770\text{円}}{1054\text{MJ}} \quad \therefore 1.369\text{MJ/円}$$

1kWh=3.6MJ、火力発電のエネルギー産出比を 0.35 とすると、火力発電で電力 1kWh を生産するために必要な化石燃料は、

$$\frac{1\text{kWh}}{0.35} = 2.857\text{kWh} = 10.286\text{MJ}$$

です。そのエネルギー費用は次の通りです。

$$\frac{10.286\text{MJ}}{1.369\text{MJ/円}} = 7.5\text{円}$$

火力発電電力の原価は 12 円/kWh 程度なので合理的な数値だと考えます。

以上から、太陽光発電パネル単体について供給電力 1kWh 当たりに消費された 10.9 円/kWh は、燃料として化石燃料を燃やしている火力発電の 7.5 円/kWh よりも多くの化石燃料を消費していることが分かります。太陽光発電のエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{太陽光発電のエネルギー産出比} = \frac{7.5\text{円/kWh} \times 0.35}{10.9\text{円/kWh}} = 0.24 < 1.0$$

太陽光発電のエネルギー産出比は火力発電よりも低く、1.0 には到底届きません。

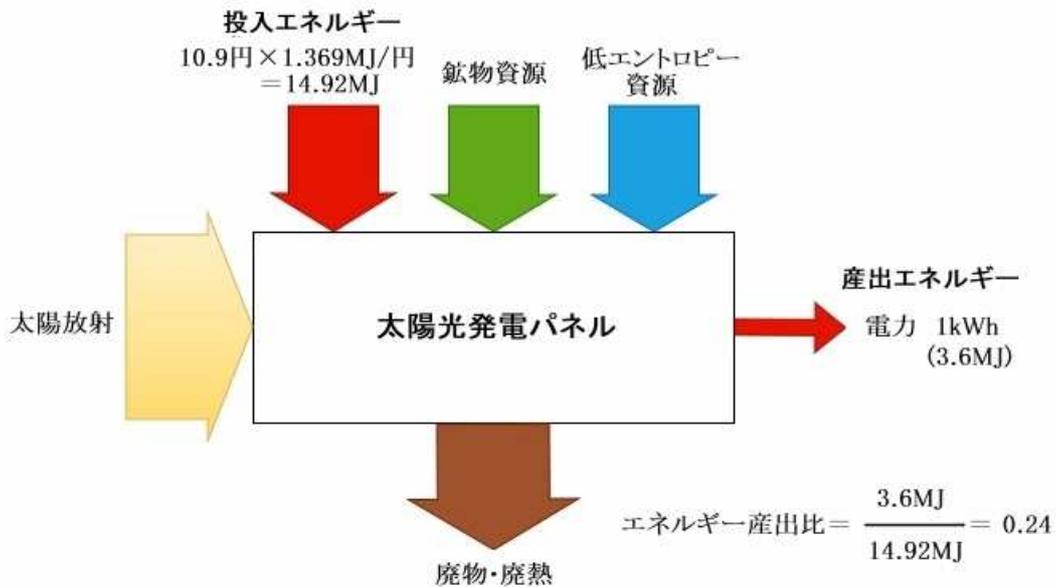


図 3-3 太陽光発電のエネルギー産出比

以上から、化石燃料を基本的なエネルギーとする現在の工業化社会において、化石燃料火力発電による出力調整に依存しているにもかかわらず、太陽光発電パネルによる電力生産は化石燃料を燃料とする火力発電よりも多くの化石燃料を「浪費」しています。したがって、化石燃料文明下においても使用価値はありません。

当然、出力変動を太陽光発電で供給する電力だけで行うことになれば、さらにエネルギー産出比が低下することになります。したがって、太陽光発電システムのエネルギー産出比は 1.0 を大きく下回るために、工業生産を維持することは不可能です。

エネルギー産出比が 1.0 に満たない太陽光発電の導入量を増やせば増やすほど、化石燃料消費が拡大し続けることになります。例え日本の国土すべてを太陽光発電で覆ったとしても、有効に利用できる電力は一切供給できないのです。

3-5 太陽光発電の総括

太陽光発電パネル単体のエネルギー産出比は 0.24 程度でした。勿論投入エネルギー量は推定値であり、また生産プロセスの多少の改良があるかもしれませんが、エネルギー産出比が 1.0 を上回ることはないでしょう。更に、出力変動の調整のための巨大な付帯装置設備を含めれば「太陽光発電システム」のエネルギー産出比が 1.0 を上回ることは不可能です。太陽光発電システムは工業化社会を維持できません。

「現在運用されている太陽光発電は電力を供給しているではないか」と主張される方がいるかもしれませんが。

太陽光発電パネル

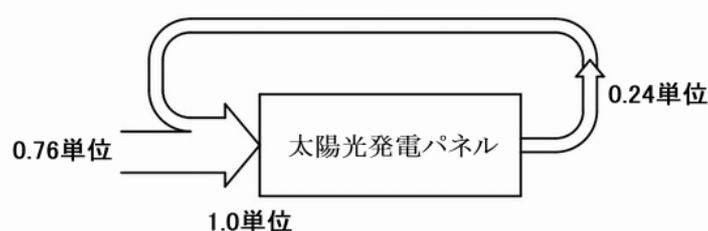


図 3-4 自立できない太陽光発電

図 3-4 に太陽光発電パネルのエネルギー・フローを示します。太陽光発電パネルは工業的エネルギーを 1 単位投入することによって電力を 0.24 単位産出します。これがエネルギー産出比が 0.24 であるという意味です。

太陽光発電パネルがエネルギー供給装置として有効である条件は、産出した電力だけで太陽光発電パネルを再生産した上で、更に余剰の電力を供給できることです。現状では太陽光発電パネルの製造・維持に投入する全てのエネルギーを化石燃料エネルギー供給システムに依存しているため、見かけ上 0.24 単位の電力を供給しているように見えるのです。

実際は、太陽光発電パネルで 0.24 単位の電力を供給するために工業的なエネルギーを 1 単位消費するため、差し引き 0.76 単位の工業的エネルギーを外部から補填しているのです。

思考実験として、図 1-9 に示す化石燃料エネルギー供給システムの下で火力発電を太陽光発電パネルで置き換えることを考えます。化石燃料 4 単位を太陽光発電パネルに投入することで生産される電力は以下の通りです。

$$4 \text{ 単位} \times 0.24 = 0.96 \text{ 単位}$$

火力発電を太陽光発電パネルで置き換えることによって、電力で供給するエネルギーが 1.4 単位から 0.96 単位に減少します。太陽光発電パネルを使って最終エネルギー消費に必要な 1.4 単位の電力を維持するために必要な化石燃料は次の通りです。

$$\frac{1.4 \text{ 単位}}{0.24} = 5.83 \text{ 単位}$$

火力発電を太陽光発電パネルに置き換えることによって化石燃料消費量が

5.83単位－4単位＝1.83単位

だけ増加します。化石燃料エネルギー供給システムの下でも太陽光発電パネルを導入する必然性はなく、化石燃料を余計に浪費するだけです。

したがって、原子力同様、太陽光を一次エネルギーに計上することは不合理です。一般にエネルギー産出比が1.0未満のエネルギー源は有効な一次エネルギーを一切供給できないのです。

将来的に可能性として、明らかに太陽光発電パネルのエネルギー産出比が最新の火力発電のエネルギー産出比を上回ることがあれば、化石燃料エネルギー供給システム下において電力供給システムとして利用することに合理性が生まれます。しかし、それと引き換えに有用な鉱物資源が大量に消費され、自然環境が大規模に破壊されることを考慮して判断しなければなりません。

太陽光発電パネルは、例えば腕時計や電卓など、小容量の精密機器、あるいは送電線を建設できないような僻地などにおいて利用することは有効です。しかし、工業化社会の基幹エネルギー供給システムとして利用することには合理性は存在しません。

太陽光発電パネルの検討において、電力の原料であるはずの太陽放射について直接触れていません。それは間接的に太陽光発電パネルの規模に反映されています。

また、太陽光発電技術あるいは再生可能エネルギー発電技術の本質は、エネルギー捕捉装置技術であって、不偏的・普遍的に存在する自由財である再生可能エネルギーそのものではありません。

エネルギー産出比は、太陽光発電パネルの工業的な再生産の指標であり、電力の原料である太陽放射については考慮する必要がありません。太陽光発電パネルを工業的に製造・運用するために必要な工業的に供給される投入エネルギーに対する産出エネルギーだけに着目すればよいのです。

3-6 風力発電の一般的な特性

これまで見てきたように、太陽光発電は火力発電よりも大量の化石燃料を消費するため、化石燃料による工業化社会の下においても利用価値はありません。このような状況から、再生可能エネルギーの本命は風力発電だという認識が強まっています。

風力発電は風の運動エネルギーそのものを発電機を駆動する力として利用します。エネルギーの変換過程が太陽光発電よりも単純なため、エネルギー産出比が大きくなることが期待されます。また、太陽光発電とは異なり、風が吹いていれば昼夜に関わりなく発電できるため、高い設備利用率が期待されます。

その一方で、自然風は常に変動しており、風力発電は太陽光発電以上に短周期の予測不能な激しい出力変動を生じます。風力発電の出力はブレードの回転面を通過する風の運動エネルギーに比例します。風力発電のブレードの回転面の面積をA、風速をv、空気の密度をρとした場合、比例定数をCとすると、発電力は次式で表すことができます。

$$\text{風力 h 発電の発電能力} = C \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} (W)$$

風力発電の発電力は風速の3乗に比例します。自然風は短時間で激しく変動します。発電力は風速の3乗に比例するため更に大きな振幅で変動することになります。

風力発電の風速による変動状況

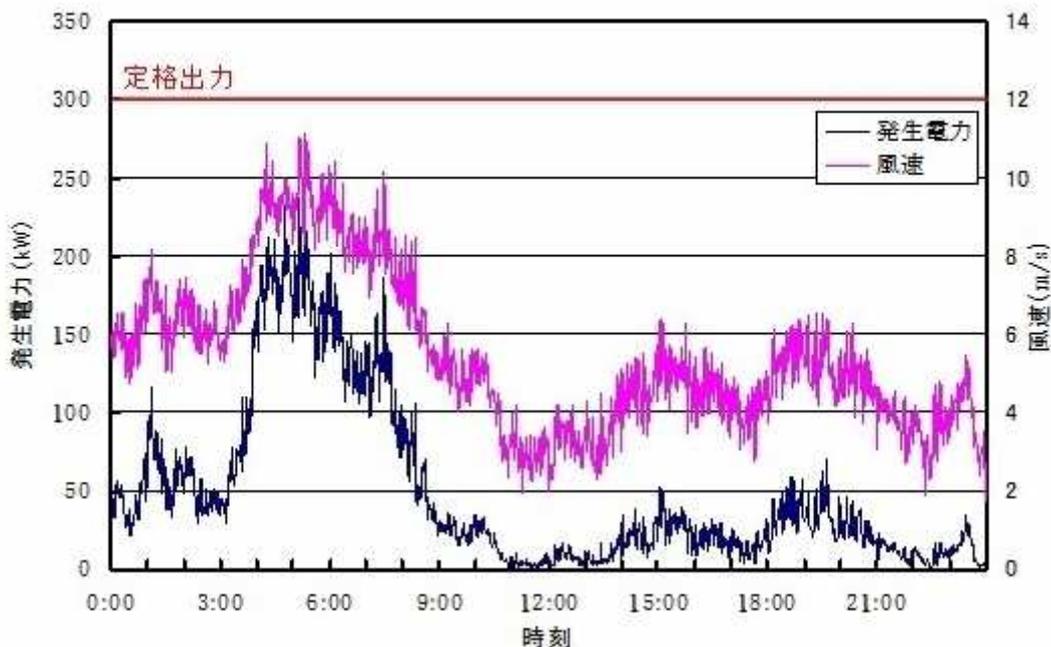


図 3-5 風力発電の出力変動

図 3-5 に一日の風速と発電力の変動の例を示します。風力発電の短時間の大きな出力変動は電力系統に過大な負担をかける可能性が強いため、太陽光発電以上に出力制御が重要になり

ます。

風力発電を構成する技術は既に完成された「枯れた」技術です。発電装置側の改良によって飛躍的に発電能力を改善する可能性はありません。風力発電の発電量を増やすことは、いかに風力発電に適した安定した風の吹く場所に風車を設置するか、に尽きます。

日本の様に平野部が狭く、急峻な山岳地帯の多い国では、風力発電の設置に適した場所を探すことは容易ではありません。人口の密集する平野部では建設は難しく、風力発電に適した安定した風の吹く比較的勾配の緩やかな里山の稜線など、建設可能な場所は限定されます。現在、陸上風力発電に替わって比較的安定した風況が期待できる洋上風力発電へ移行しようとしています。

しかし、洋上風力発電にはいくつかの回避できない問題があります。

風力発電の形式

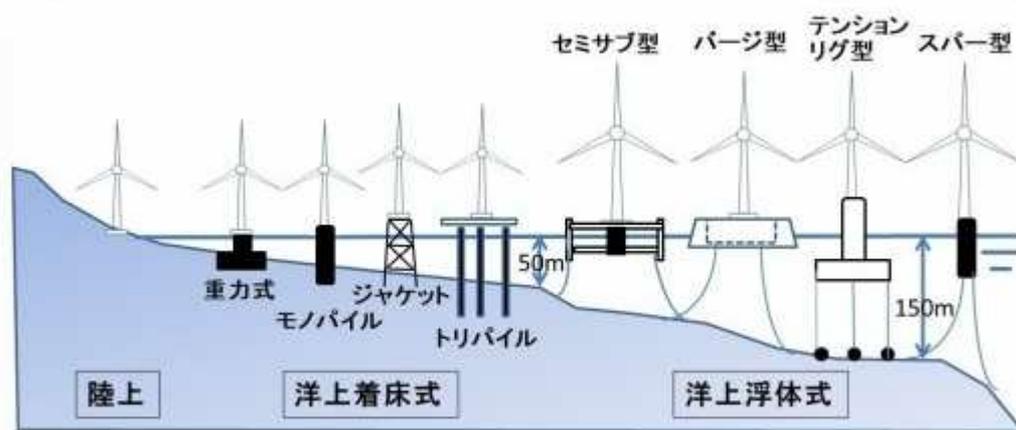


図10 洋上風力発電システムの種類

図 3-6 風力発電の構造形式

洋上風力発電は、発電装置を搭載する塔構造の基礎構造部分が陸上風力発電よりも大きくなります。構造が大規模化することは風力発電設備に対する工業的なエネルギー投入量の増加に直結するため、エネルギー産出比を低下させる要因になります。

洋上風力発電は、比較的水深の浅い場所に建設される海底に風力発電鉄塔を固定する着床式と、水深の大きな場所に設置される浮体構造上に風力発電鉄塔を建設する浮体式の二つに大別されます。

着床式では水深の増加にともなって基礎構造は急激に大きくなります。風力発電施設の建設位置の水深の増加とエネルギー産出比は相反することになります。

水深がある程度大きくなると着床式よりも浮体式の方が建設コストが小さくなります。しかし、浮体式の風力発電はあまりにも巨大な構造になるため、浮体式が選択されるような水深では、洋上風力発電はエネルギー産出比が低く実用的に無意味です。

風力発電は、太陽光発電と異なり可動部分が多いため、機械的な補修・維持管理費用が大きくなります。特に洋上風力発電では常時潮風に曝されるため、表面に塩分が付着することで劣化が

激しく、陸上以上に補修・維持管理費用が大きくなります。海中部分の腐食に対する補修・維持管理も大きな問題です。その結果、風力発電装置の耐用年数は陸上よりも短くなります。

3-7 風力発電のエネルギー産出比

風力発電電力は、太陽光発電以上に激しい出力変動が生じます。実際に運用するためには、風力発電施設に加えて出力変動調整システム、広域送電のための高規格送電線網などの巨大な付帯設備を含めた「風力発電システム」として導入しなければなりません。

ここでは陸上風力発電と洋上風力発電について、単体のエネルギー産出比を推定します。

(1) 陸上風力発電

算定条件は諸元が公開されている横浜市の臨海部に建設された 2MW の陸上風力発電施設「ハマウイング」を参考にしました。

算定条件

- 定格出力 2MW
- 設備建設費用 30 万円/kW
- 年間維持費用 1.3 万円/(kW・年)
- 設備利用率 15%
- 上部工重量 250t
- 耐用年数 20 年

まず、陸上風力発電の火力発電に対する重量比による規模を比較しておきます。火力発電は太陽光発電の場合と同様 20kg/kW とします。

風力発電の実効出力は次の通りです。

$$2\text{MW} \times 15\% = 2000\text{kW} \times 0.15 = 300\text{kW}$$

実効出力 1kW 当たりの重量は次の通りです。

$$\frac{250\text{t}}{300\text{kW}} = 0.833\text{t} / \text{kW} = 833\text{kg} / \text{kW}$$

陸上風力発電は重量比で火力発電に対して

$$\frac{833\text{kg} / \text{kW}}{20\text{kg} / \text{kW}} \div 42\text{倍}$$

の工業製品が必要だということです。

耐用年数を 20 年とした場合のこの風力発電設備の定格出力 1kW 当たりの生涯発電量は次の通りです。

$$1\text{kW} \times 24\text{h} / \text{日} \times 365\text{日} / \text{年} \times 20\text{年} \times 15\% = 26280\text{kWh}$$

この風力発電による電力原価は次の通りです。

$$\frac{300000\text{円}/kW + 13000\text{円}/(kW \cdot \text{年}) \times 20\text{年}}{26280kWh/kW} = 21.3\text{円}/kWh$$

電力原価の 20%を化石燃料費用とすると以下の通りです。

$$\text{化石燃料費用} = 21.3 \text{円}/kWh \times 20\% = 4.26 \text{円}/kWh$$

化石燃料価格を 1.369MJ/円とすると、エネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{陸上風力発電のエネルギー産出比} = \frac{3.6MJ}{4.26\text{円} \times 1.369MJ/\text{円}} = 0.62 < 1.0$$

太陽光発電に比較して高いエネルギー産出比であることが分かります。しかし、この程度のエネルギー産出比では出力変動を調整するために必須の付帯設備を考慮すれば、化石燃料による工業化社会の下においても利用価値はありません。勿論、エネルギー産出比が 1.0 を大きく下回るため、化石燃料消費に頼らずに工業化社会を維持することは不可能です。

(2) 着床式洋上風力発電

算定条件

- 設備建設費用 50 万円/kW
- 年間維持費用 2 万円/(kW・年)
- 設備利用率 20%
- 耐用年数 20 年

耐用年数を 20 年とした場合のこの風力発電設備の定格出力 1kW 当たりの生涯発電量は次の通りです。

$$1kW \times 24h/\text{日} \times 365\text{日}/\text{年} \times 20\text{年} \times 20\% = 35040kWh$$

この風力発電による電力原価は次の通りです。

$$\frac{500000\text{円}/kW + 20000\text{円}/(kW \cdot \text{年}) \times 20\text{年}}{35040kWh} = 25.7\text{円}/kWh$$

電力原価の 20%を化石燃料費用とすると以下の通りです。

$$\text{化石燃料費用} = 25.7 \text{円}/kWh \times 20\% = 5.14 \text{円}/kWh$$

化石燃料価格を 1.369MJ/円とすると、エネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{着床式洋上風力発電のエネルギー産出比} = \frac{3.6MJ}{5.14\text{円} \times 1.369MJ/\text{円}} = 0.50 < 1.0$$

この計算例では着床式洋上風力発電は陸上風力発電に比較して低いエネルギー産出比となりました。着床式洋上風力発電は水深が深くなるほど急激に下部構造が大きくなるため、エネルギー産出比が低下します(写真右の着床式洋上風力発電の下部構造のジャケットの巨大さが分かる。)



図 3-7 巨大な洋上風力発電の構造

一般的に着床式洋上風力発電は陸上風力発電よりもエネルギー産出比が低くなると考えて差し支えありません。着床式洋上風力発電にも導入の合理性はありません。

(3) 浮体式洋上風力発電

算定条件は福島洋上風力コンソーシアム事業で最も成績の良かった「ふくしま未来」2MW 浮体式洋上風力発電のデータを参考にしました(写真左)。4年8ヶ月の運転実績の設備利用率は33%程度と報告されています。モデル設備利用率を30%としました。

算定条件

- 設備建設費用 56.2 億円/2000kW=281 万円/kW
- 年間維持費用 2.5 万円/(kW・年)
- 設備利用率 30%
- 耐用年数 20 年

耐用年数を20年とした場合のこの風力発電設備の定格出力1kW当たりの生涯発電量は次の通りです。

$$1kW \times 24h/\text{日} \times 365\text{日}/\text{年} \times 20\text{年} \times 30\% = 52560kWh$$

この風力発電による電力原価は次の通りです。

$$\frac{2810000\text{円}/kW + 25000\text{円}/(kW \cdot \text{年}) \times 20\text{年}}{52560kWh} = 63.0\text{円}/kWh$$

電力原価の 20%を化石燃料費用とすると以下の通りです。

$$\text{化石燃料費用} = 63.0 \text{円}/kWh \times 20\% = 12.6 \text{円}/kWh$$

化石燃料価格を 1.369MJ/円とすると、エネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{浮体式洋上風力発電のエネルギー産出比} = \frac{3.6MJ}{12.6\text{円} \times 1.369MJ/\text{円}} = 0.21 < 1.0$$

浮体式の洋上風力発電は設備規模が巨大であり、エネルギー産出比が小さく全く使い物にはならないことが分かります。

以上の検討から、陸上風力発電、洋上風力発電のいずれも、付帯設備を含めた「風力発電システム」は化石燃料による工業化社会の下で化石燃料消費量を削減する目的で導入することは無意味です。また、エネルギー産出比が 1.0 を大きく下回るため、化石燃料に依存せず、風力発電によって工業化社会を維持することは不可能です。

その反面、風力発電、とりわけ洋上風力発電施設はエネルギー産出比が低いことの反映として巨大構造物になるため、重工メーカーにとって魅力的な市場を創出することになります。

【追補】 再生可能エネルギー発電の原価について

図 3-8 に資源エネルギー庁によって公開されている事業用太陽光発電と陸上風力発電の発電コストの実績と見通しを示します。これはとても奇怪なデータです。

このデータによると、2019 年の実績値として、事業用太陽光発電電力のコストは 13.1 円/kWh であり、陸上風力発電電力のコストは 11.1 円/kWh です。同じく、2023 年の見通しでは、事業用太陽光発電電力のコストは 9.8 円/kWh であり、陸上風力発電電力のコストは 8.8 円/kWh です。読者諸兄はどう思われますか？

火力発電の発電原価は化石燃料の市場価格によって変化しますが、概ね以下の通りです。

- LNG 火力 10～14 円/kWh
- 石炭火力 9～12 円/kWh
- 石油火力 15～20 円/kWh

現在、発電コストの高い再生可能エネルギーを普及させるために再生可能エネルギー発電促進賦課金が徴収されています。これは、火力発電よりも割高な再生可能エネルギー発電電力の購入のために差額を補填するために電気料金に上乗せして徴収されています。

ところが、資源エネルギー庁のデータでは既に事業用太陽光発電や陸上風力発電電力の発電コスト≒原価は火力発電よりも安くなっています。これが事実であれば、再エネ賦課金の徴収は不合理です。



資源エネルギー庁:「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」

図 3-8 資源エネルギー庁による再生可能エネルギー発電原価

別の角度からこの値を検討します。

仮に、再生可能エネルギー発電電力の原価を 10 円/kWh 程度だとすると、その 20%をエネルギー

ギー費用(化石燃料費用)とすると、2円/kWhになります。化石燃料価格の1円当たりの熱量を1.369MJ/円とすると、再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比} = \frac{3.6MJ}{1.369MJ/\text{円} \times 2\text{円}} = 1.31 > 1.0$$

再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比は1.0未満であるとした私の主張は全て誤りということになります。

ただし、この程度であっても、蓄電システムや調整システムを加えた再生可能エネルギー発電システムのエネルギー産出比が1.0を超えることはありませんから、化石燃料に替わって工業化社会を支えることは出来ません。しかし、化石燃料による工業化社会の下で化石燃料を節約する可能性が出てくることになります。

もう一つ別の角度から考えてみます。

2023年度の再生可能エネルギー発電の実績は概ね次の通りとされています(ChatGPTによる)。

- 太陽光発電 95.5TWh
- 風力発電 11.6TWh
- バイオマス発電 57.0TWh

合計 約 164TWh

ただし、1TWh = 1×10^{12} Wh = 1×10^9 kWh

164TWhの内、何%が固定価格買取制度の対象に当たるのか、明確な数値は不明です。ここでは70%に当たる115TWh = 115×10^9 kWhが買取りの対象であると仮定しておきます。

2023年度の買取額はおよそ4.7兆円でした。したがって、再生可能エネルギー発電電力1kWh当たりの平均買取価格 ≒ 発電コストは次の通りです。

$$\frac{4700 \times 10^9 \text{円}}{115 \times 10^9 \text{kWh}} \doteq 41 \text{円/kWh}$$

概ねこれまでの推計値は妥当な値ではないかと考えます。この値を参考に、2023年度の再生可能エネルギー発電の平均的なエネルギー産出比を推定してみます。これまで通り、原価の20%をエネルギー費用とすると、41円/kWh \times 20% = 8.2円/kWhです。エネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{再生可能エネルギー発電のエネルギー産出比} = \frac{3.6MJ}{1.369MJ/\text{円} \times 8.2\text{円}} = 0.32 < 1.0$$

この値は平均的な火力発電のエネルギー産出比よりも低い値なので、再生可能エネルギー発電は化石燃料による工業化社会の下において火力発電に替わって化石燃料消費量を削減することは出来ないということです。再生可能エネルギー発電は即刻止めるべきです。

4 水素社会は非科学的な妄想の産物

風力発電単体では、条件が良ければ、「名目」のエネルギー産出比が火力発電よりも大きくなる可能性があります。

しかし、風力発電電力は制御不能・予測不能な激しい出力変動を伴います。風力発電電力を使って工業的な電力需要を賄うためには巨大なバッファシステムと出力制御システムや高規格の送電線網などが必須です。これらを含めた「風力発電システム」が火力発電のエネルギー産出比を上回る可能性はありません。

近視眼的な科学・技術者たちは、何とか風力発電を使用するための大義名分を見つけようとしています。そのような思惑から提案されたのが、風力発電の変動する電力を「有効利用」するために水 H_2O の電気分解によって水素 H_2 を製造して電気エネルギーを水素 H_2 という燃料に変換して利用しようという考えです。

最近ではこの電気分解水素を用いて、更に二酸化炭素 CO_2 を還元してメタン CH_4 を合成して燃料として再利用する「メタン～二酸化炭素サイクル」を実現して CO_2 発生を無くすという、最早マッド・サイエンスとしか呼びようのない愚かなアイデアが実行に移されています。これまで蓄積されてきた自然科学の成果が無視される恐ろしい時代です。

私たちの住む熱学的な世界では、あらゆる変化に対してエントロピー ($S > 0$) が発生します。エントロピーとは環境中に散逸する熱エネルギー $Q(\text{J})$ を環境の絶対温度 $T(\text{K})$ で除した値です。エネルギー変換を繰り返すたびに有効に利用できるエネルギー量は指数関数的に目減りします。

たださえエネルギー産出比の小さい風力発電電力を何らかの物理化学的な変化を伴うプロセスに投入すれば、得られるエネルギー量 e は投入した電気エネルギーの持つエネルギー量 E よりも更に減少するというのが熱学の基本法則であるエネルギー保存則とエントロピー増大側からの結論です。

$$E = e + S \cdot T \quad \therefore e = E - S \cdot T, \quad S, T > 0 \quad \text{したがって、} e < E$$

しかも H_2 や CH_4 は常温で気体であり、そのままではエネルギー密度が小さすぎます。体積を小さくするために高圧水素、あるいは液化メタンにするためには大量のエネルギーが投入されます。ますますエネルギー産出比は小さくなります。

物理化学的なプロセスの例として、水の電気分解のエネルギー産出比について少し詳しく検討することにします。

4-1 電気分解水素製造と燃料電池

風力発電電力を用いて工業的に H_2 を製造することが考えられたのは、燃料電池の燃料として電気を得ることが一つの目的でした。 H_2 を不規則変動する風力発電電力の分子レベルの蓄電装置として利用しようと考えたのです。

水素の電気分解は単純化して表現すると次の様に書くことができます。



水素イオン H^+ 2 個と電子 e^- 2 個から水素分子 H_2 が作られます。水素分子 H_2 を 1mol 作るためには電子 e^- が 2mol 必要です。

電子 1 個の電荷は

$$\text{e}^- = 1.602176565 \times 10^{-19} (\text{C}) \quad (\text{C}: \text{クーロン} = \text{A} \cdot \text{s}: \text{アンペア} \cdot \text{秒})$$

電子 1mol 分の電荷 1Fd (ファラデー)は、

$$1\text{Fd} = 1.602176565 \times 10^{-19} \text{C}/\text{個} \times 6.02214 \times 10^{23} \text{個}/\text{mol} = 96,485 \text{C}/\text{mol}$$

H_2 を 1mol 作るために必要な電子の電荷は 2Fd です。アルカリ水電解槽における電気分解では、電解電圧は 1.7~2.2V で操業しているようです。電解電圧を 2V とした場合、 H_2 を 1mol 製造するために必要な仕事量は次の通りです。

$$2\text{Fd} \times 2\text{V} = 2 \times 96,485 \text{C}/\text{mol} \times 2\text{V} = 385,940 \text{C} \cdot \text{V}/\text{mol} = 385.9 \text{kJ}/\text{mol}$$

<参考>

電気分解水素製造の実績を見ると、(株)神戸製鋼ソリューションのホームページでは、5.5~6.5kWh/m³、東京ガスのホームページでは 4.8kWh/m³ 報告しています。1 m³ = 44.6mol とした場合、それぞれ次の通りです。

■ 神戸製鋼ソリューション

$$5.5 \sim 6.5 \text{kWh}/\text{m}^3 = \frac{(5.5 \sim 6.5) \times 3600 \text{kJ}}{44.6 \text{mol}} = 444 \sim 525 \text{kJ}/\text{mol}$$

■ 東京ガス

$$4.8 \text{kWh}/\text{m}^3 = \frac{4.8 \times 3600 \text{kJ}}{44.6 \text{mol}} = 387 \text{kJ}/\text{mol}$$

以上から、ここでの推定値は妥当な値を推定しているようです。

一方、図 4-1 に示すように、 H_2 のエンタルピー(燃焼熱)は 25°C の環境で 286kJ/mol です。

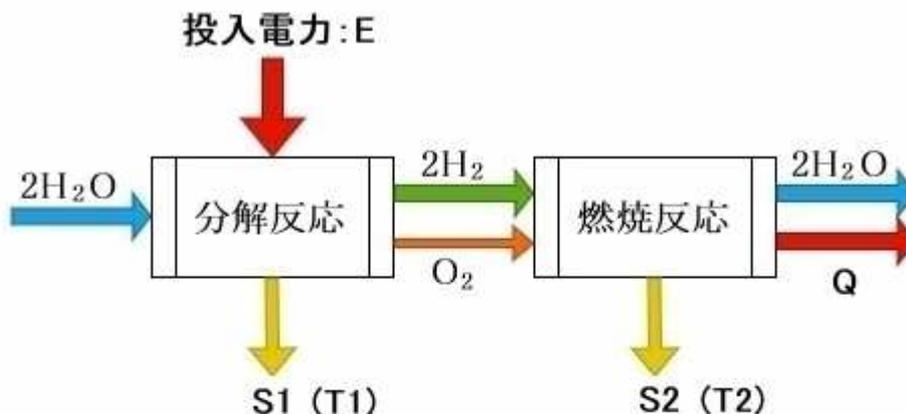
以上から、アルカリ水電解槽で工業的に H_2 を製造する場合の H_2 の燃焼熱のエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{アルカリ水電解槽 } \text{H}_2 \text{ 燃焼熱のエネルギー産出比} = \frac{286 \text{kJ}/\text{mol}}{385.9 \text{kJ}/\text{mol}} = 0.74 < 1.0$$

また、 H_2 は気体のままでは体積当たりのエネルギー量が小さすぎるため、例えば燃料電池車で使用する場合には 350 気圧の高圧水素にしています。製造した標準状態の水素を 350 気圧まで

圧縮するために必要な仕事は、JHFC の試験では $13.79\text{MJ/kg} = 27.6\text{kJ/mol}$ 程度 ($\because \text{H}_2$ は 2g/mol なので $1\text{kg} = 500\text{mol}$) が消費されたとしています。これを考慮するとエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{アルカリ水電解槽 } \text{H}_2 \text{ 燃焼熱のエネルギー産出比} = \frac{(286 - 27.6)\text{kJ/mol}}{385.9\text{kJ/mol}} = 0.67 < 1.0$$



水生成反応のエネルギー (25°C)

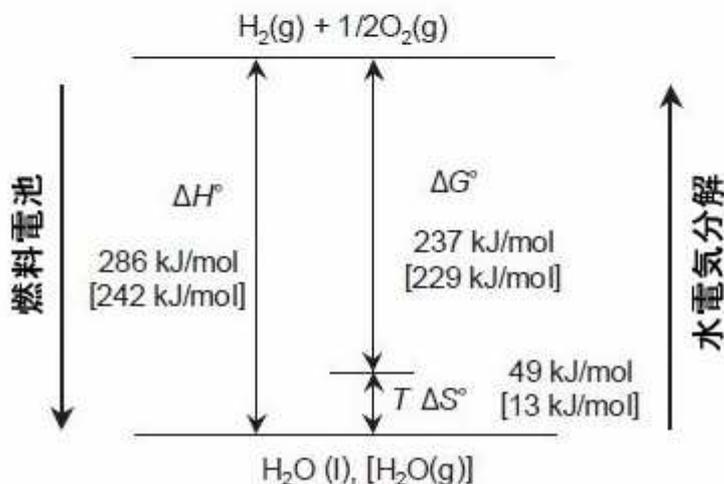


図 4-1 水の電気分解による水素製造

実際に工業的に H_2 を製造するためには製造プラントの製造、運用のために工業的エネルギーが投入されているので、エネルギー産出比はさらに低くなります。図の表記を用いて、

$$\text{アルカリ水電解槽 } \text{H}_2 \text{ 燃焼熱のエネルギー産出比} = \frac{Q}{E} = 0.6 < 1.0$$

程度であるとします。

電気分解によって製造した H₂ の燃料電池による運用を考えます。図 4-1 から、燃料電池の燃料の H₂ から電気への理論的な変換効率は次の通りです。

$$\text{燃料電池の理論変換効率} = \frac{\text{自由エネルギー} \Delta G}{\text{エンタルピー} \Delta H} = \frac{237 \text{kJ/mol}}{286 \text{kJ/mol}} = 0.829 < 1.0$$

実際の運用では環境中に散逸するエネルギーが多く大量のエントロピーが発生するため、燃料電池の実効変換効率は 0.4~0.5 程度とされています。

また、燃料電池システム自体がとても高額であることから、燃料電池の工業的な製造過程で大量の工業的エネルギーが投入されていることが推測されます。これらを考慮すると、

$$\text{燃料電池電力生産のエネルギー産出比} = 0.35$$

程度が妥当ではないかと考えます。

以上の検討結果を用いて、風力発電に投入した化石燃料1単位に対する燃料電池によって供給される電力のエネルギー産出比を推定しておきます。

- 風力発電単体のエネルギー産出比 = 0.5
- アルカリ水電解槽による H₂ 製造のエネルギー産出比 = 0.6
- 燃料電池による電力供給のエネルギー産出比 = 0.35

$$\text{風力発電} \sim \text{電解水素} \sim \text{燃料電池のエネルギー産出比} = 0.5 \times 0.6 \times 0.35 = 0.105 < 1.0$$

つまり、風力発電を実現するために投入した化石燃料のエネルギー量に対して、最終的に燃料電池で供給できる電力量は熱量ベースで 10%程度です。

火力発電電力のエネルギー産出比は 0.35 程度でした。「風力発電～電解水素～燃料電池」システムは火力発電に対して僅か 0.105/0.35 = 30% しか発電できないのです。

それに相反して、「風力発電～電解水素～燃料電池」システムは膨大な工業生産物である装置システムが必要になります。このような愚かなことが、国民に経済的な負担を押し付けながら、今進められようとしているのです。

図 4-2 に電解槽水素製造～燃料電池による電力供給のプロセスを示します。電気分解水素の燃焼による熱供給プロセスの燃焼反応を燃料電池で置き換えたものです。電解槽水素製造～燃料電池による電力供給のエネルギー産出比は次の通りです。

$$\text{水素製造} \sim \text{燃料電池のエネルギー産出比} = \frac{P}{E_1 + E_2} = 0.6 \times 0.35 = 0.21 < 1.0$$

電解水素製造～燃料電池電力供給システムでは、システムに投入するエネルギーとシステムから産出するエネルギーの両方ともに電力です。産出する電力量は、電解水素製造と燃料電池製造・運用に投入した電力量の 2 割程度しか回収できないということです。なんと愚かなことをしているのでしょうか。

使い物にならない不規則変動する風力発電電力を利用するために考えられた電解水素製造～燃料発電システムでしたが、あまりにも回収率が低く、実用にならないのは間違いありません。

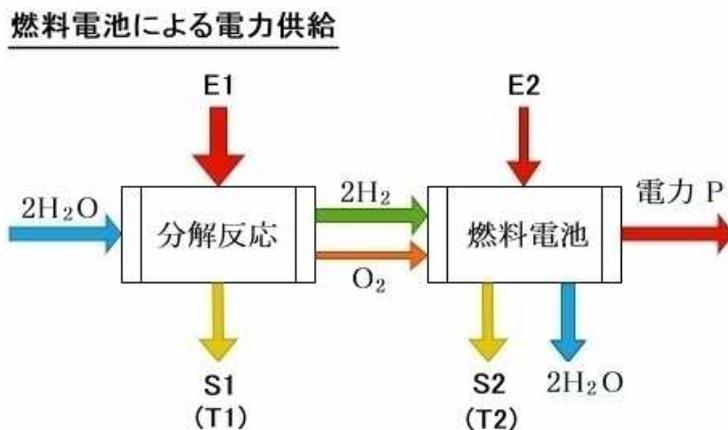


図 4-2 電気分解水素による燃料電池の運用

電解水素を作って燃料電池によって電力を供給するよりも、単純に風力発電電力は蓄電池に直接蓄電したほうがエネルギー回収率は高くなります。エネルギー製造プロセスは単純なほど効率的なのです。

例えば、移動体の動力として電気を使う電気自動車と燃料電池車の運用費を比較すれば明らかです。電気自動車は物好きな個人消費者が購入できる価格帯ですが、燃料電池車は個人で所有する人はほとんどいないでしょう。

価格が高いということは、それだけ多段階の変換プロセスを含み、大量の工業的なエネルギーを消費していることを反映しています。エネルギー供給技術において高価であることは、利用価値のない技術であることを示していると考えてほとんど間違いありません。

激しく変動する風力発電の供給電力を蓄電池を含めた電力調整システムによって電力需要の変動に同期させて賄うことが技術的に困難なことから、風力発電電力によって電気分解水素を製造し、燃料電池によって電力の供給を行うことを目指したと考えられます。

しかし、蓄電池よりもさらにエネルギー産出比の小さい電解水素製造～燃料電池システムで電力需要を賄うことは不可能であることは当然の帰結です。

科学的・合理的判断能力の欠如した視野狭窄の科学技術者、あるいは企業利益しか眼中にない企業技術者には幻滅させられます。

4-2 電気分解水素とその派生的な利用技術

風力発電等の再生可能エネルギー発電システムはエネルギー産出比が 1.0 を上回ることはなく、化石燃料に替わって工業化社会を成立させることは出来ません。

そればかりではなく、風力発電に代表される再生可能エネルギー発電電力は制御不能、予測不能の出力変動が伴うため、安定して電力需要を賄うためには巨大な蓄電システムと出力調整システムが必要であり、これらの付帯装置システムを含む発電システムは火力発電よりも大量の化石燃料を消費することになるため、化石燃料によって駆動されている現在の工業化社会においても利用価値はありません。

本来ならば、この段階で再生可能エネルギー発電は基幹エネルギー供給システムとして不適格であるという判断を下すべきです。

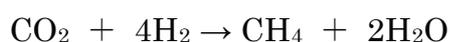
しかし、視野狭窄に陥った科学・技術者はこの本質的な問題を放置したまま、例えば激しく変動する風力発電電力を安定した電源として使う目的で水素製造～燃料電池システムを提案しました。しかし、長大な迂回過程による多段階のエネルギー変換は利用可能なエネルギーを減らすだけでした。

本来ならばこれ以上の検討は不要ですが、もう少し水素社会という妄想のために開発が行われている幾つかの技術について言及しておきます。

(1) 電解水素によるメタネーション、アンモニア合成

都市ガス供給企業において、供給するメタン CH_4 と、その燃焼によって発生する CO_2 とを循環させることで、 CO_2 放出をゼロにすることが出来るとして技術開発が行われています。

具体的な技術の内容は、 CO_2 を風力発電電力によって製造する電解水素 H_2 によって還元することで再びメタン CH_4 を合成する(メタネーション)というものです。 CO_2 の H_2 による還元反応は、形式的に次のように書くことが出来ます。



H_2 の燃焼熱は 286kJ/mol なので、メタネーションに投入された 4mol の H_2 の燃焼熱は 1144kJ です。一方、生産されるメタン CH_4 の燃焼熱は 890kJ/mol です。したがって、形式的にはメタネーションを行わずに H_2 をそのまま燃焼させた方がたくさんのエネルギーを回収することが出来るのです。

メタネーションのエネルギー産出比を反応前の H_2 の持つ燃焼エネルギーに対する生産物である CH_4 の燃焼熱で定義すると次の通りです。

$$\text{メタネーションのエネルギー産出比} = \frac{890\text{kJ/mol}}{1144\text{kJ/mol}} = 0.78 < 1.0$$

実際に工業的にメタネーションを実施するためには生産装置を製造して運用することが必要であり、更にエネルギーを投入することが必要です。したがって、メタネーションのエネルギー産出比

は 0.78 よりも低くなります。ここではメタネーションのエネルギー産出比を 0.6 とすることにします。

風力発電電力のエネルギー産出比が 0.5、メタネーションに投入する H₂ のエネルギー産出比が 0.6、メタネーションによる CH₄ 生産のエネルギー産出比が 0.6 なので、風力発電～電解水素～メタネーションシステムの総合的なエネルギー産出比は

$$\text{風力発電～電解水素～メタネーションのエネルギー産出比} = 0.5 \times 0.6 \times 0.6 = 0.18$$

これは、風力発電のために投入された化石燃料に対して最終生産物である CH₄ で供給するエネルギーが 18% にまで減少することを示しています。これは化石燃料の消費量を増加させることを示しています。

メタネーションによる「CH₄～CO₂ の循環利用によって、外部に CO₂ を放出しない」という主張は、メタネーションに使用する風力発電による電解水素製造や、CH₄ 製造プラントの製造・運用のために外部から化石燃料によって供給されるエネルギーが必要であることを全く考慮していない視野狭窄による妄想の産物です。

あるいは利用可能なエネルギー量が減少しても、取り扱いの難しい H₂ を CH₄ やアンモニア NH₃ にすることで扱いやすくすることに意義があるという主張があります。しかし、それはエネルギー産出比が 1.0 を大きく超えている場合であれば一つの考え方です。風力発電や太陽光発電など、エネルギー産出比が 1.0 に満たない技術はその段階で棄却すべき技術であり、まして再生可能エネルギー発電電力を用いて化学的に燃料を合成することは徒に化石燃料消費を増加させるだけで全く無意味です。

(2) 水素還元製鉄

現在の製鉄は高炉で鉄鉱石という酸化鉄を、石炭を乾留したコークスと呼ばれる炭素 C によって還元することで銑鉄を作ることから始まります。酸化鉄をコークスで還元することによってコークスは酸化されて CO₂ を放出します。

製鉄業からの CO₂ 排出量を削減する目的で H₂ を還元剤として用いる水素製鉄の技術開発が行われています。H₂ が還元剤として利用可能なことは事実ですが、電解水素製造には莫大な化石燃料の投入が必要となります。

水素還元製鉄も、高炉における還元剤として H₂ を使うことで高炉からの CO₂ 放出を無くすことしか見えていない視野狭窄に陥った愚かな発想です。

(3) 水素エンジン車

トヨタ自動車は、自動車における H₂ の利用として燃料電池車を開発し、高価な燃料電池車を国や自治体に売り込み税金を収奪しています。

そして最近では、「長年培ってきた内燃機関技術の継承」として燃料として水素を使用する内燃機関を使った水素エンジン車の実証試験を行っています。

水素エンジンの熱効率がどの程度なのかのデータは把握していませんが、化石燃料を用いる内

燃機関の熱効率を大幅に上回ることはないと考えられるので、恐らく熱効率は 30%程度ではないでしょうか。図 4-3 を参考に、

$$\text{水素エンジンのエネルギー産出比} = \frac{W}{2H_2\text{の燃焼熱}} = 0.3$$

これは燃料電池の電気への変換効率よりもさらに小さい値です。電解水素を使用する水素エンジンの総合的なエネルギー産出比は燃料電池と同等か少し低い程度ではないでしょうか。

$$\text{風力発電} \sim \text{電解水素} \sim \text{水素エンジンのエネルギー産出比} = 0.5 \times 0.6 \times 0.3 = 0.09 < 1.0$$

水素エンジン車は化石燃料消費を大幅に増大させることになります。内燃機関を使うのであれば、化石燃料をそのまま使うことが最も効率的です。

【参考】 燃料電池車、水素エンジン自動車に対する考察は、レポート「工業文明の持続可能性について」

https://www.env01.net/d_count/download.php?download=5

の「移動体駆動に蓄電池を利用することは不合理(p36)」と「水素 H₂ の利用について(p38)」をご覧ください。

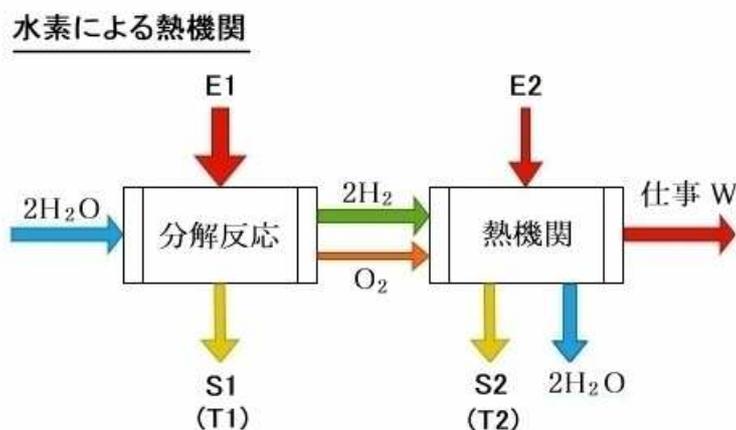


図 4-3 電気分解水素による熱機関の駆動

5 総括

これまで、化石燃料がなぜ工業化社会を成立させることができるのかについて考察しました。有限の地下資源である化石燃料は必然的に有限の期間で枯渇しますが、化石燃料に替わって工業化社会を成立させることのできるエネルギー供給システムが存在するのか検討してきました。概要をまとめておきます。

5-1 工業化社会を成立させるエネルギー供給技術の最低必要条件

$$\text{エネルギー産出比} = \frac{\text{産出エネルギー量}(J)}{\text{投入エネルギー量}(J)} > 1.0$$

5-2 化石燃料が工業化社会を成立させる唯一のエネルギー資源

(1) 鉱物資源

なぜ化石燃料が工業化社会を成立させることができるのか？それは、化石燃料は鉱物資源として存在しており、工業的に手を加えることなく、そのままエネルギーを供給するポテンシャルを有しているからです。人間がこれを利用するにはただ掘り出して、多少精製するだけでよいからです。現状では、化石燃料は少なくともエネルギー産出比が 10 を超える、極めて優れたエネルギー資源です。

鉱物資源を利用可能な状態にするために投入するエネルギー量が産出するエネルギー量を上回り、エネルギー産出比が 1.0 を下回れば利用価値はありません。化石燃料資源が希少化し、採掘条件が悪化すると次第にエネルギー産出比は低下し、1.0 に近づいた段階で化石燃料の利用価値は消失します。

化石燃料以外でエネルギー資源と考えられる鉱物資源は核分裂性のウランです。

しかし、核分裂性ウランの利用技術である原子力発電は、化石燃料の投入エネルギー量に対して、得られる電力量のエネルギー産出比の推定値は 0.21 未満です。火力発電を代替して化石燃料消費量を削減する能力はありません。

投入エネルギーを化石燃料から電力に変更することでエネルギー産出比は 0.21 よりも多少改善するかもしれませんが、1.0 を上回ることとは不可能であり、原子力工業文明は成立しません。

原子力発電はただ単に化石燃料を浪費するだけのシステムです。このような無駄な技術によって放射能汚染という激甚な環境汚染のリスクを負うなど狂気の沙汰です。即刻廃止する以外に選択肢はありません。

(2) 自然エネルギー

自然エネルギーは予測不能の不規則変動を伴い、これを制御することが出来ません。自然エネルギー発電電力を工業的に利用するためには莫大な装置システムが不可欠です。巨大な再生可能エネルギー発電システムを構築・運用するために投入する化石燃料に対する再生可能エネルギー発電電力のエネルギー産出比は火力発電電力よりも低くなります。

したがって、化石燃料に替わって再生可能エネルギー発電によって化石燃料消費を減らすことは出来ません。また、原子力発電同様、再生可能エネルギー発電電力による工業化社会は成立しません。

(3) 化学的な燃料製造

熱力学の基本法則である「エネルギー保存則」と「エントロピー増大側」から、

化学的な燃料製造のエネルギー産出比 <1.0

すべての工業的生産プロセスはエントロピーを増大させるため、産出したエネルギーないし燃料から投入したエネルギー以上のエネルギーを回収することは理論的に不可能です。これは技術の改良によって克服できる問題ではありません。工業的に製造した燃料に工業化社会を支える能力はありません。

したがって、電解水素製造、メタネーション、アンモニア製造などに類した燃料は工業化社会を成り立たせる基本エネルギーにはなり得ません。

(4) 水素社会

何らかの発電システムと水素や化学合成燃料の「組み合わせ」によるエネルギー供給システムは、エネルギー産出比が 1.0 未満のシステムをシリーズで組み合わせることであり、総合的なエネルギー産出比は個別システムのエネルギー産出比の積で表されるため、更にエネルギー産出比が指数関数的に低下します。水素社会は成立しません。

以上から、化石燃料に替わって工業化社会を成立させることのできるエネルギー供給システムは存在しません。

5-3 一次エネルギーについての覚書

エネルギー統計における現在の「一次エネルギー」とは実に曖昧で無意味な数値です。一次エネルギーの定義は「自然界に存在する形のままで利用可能なエネルギー源。人間の手による加工や変換を受けていない、自然界に存在するそのままのエネルギー」とされています。

(1) 原子力

一次エネルギーの定義に従えば原子力は一次エネルギーの定義から外れています。

天然ウランに含まれる核分裂性の²³⁵Uは自然界に存在するままでは決して核燃料にはなりません。長大な工業的加工工程で莫大なエネルギーを投入することによってはじめて核燃料という「工業製品」になり、エネルギー源として利用可能になります。この意味で核燃料は二次エネルギーに分類すべきです。

エネルギー技術として原子力は、民生的には、電力だけを供給する発電技術の一つです。加工工程で投入した化石燃料の熱量に対する核燃料が供給する電力量のエネルギー産出比は1.0を大きく下回り、火力発電電力のエネルギー産出比よりも低くなります。原子力発電を行わずに、原子力発電に投入する化石燃料を火力発電で利用したほうが得られる電力量が多くなります。

現在、一次エネルギーに原子力という項目が計上されています。一次エネルギー量が増加すれば、電力を含む最終エネルギー量も増加するのが自然です。実際には原子力が大きくなるほど同一の化石燃料によって供給できる電力量は減少します。原子力発電とは低効率の間接火力発電というべき発電方式であり、火力発電と同様の二次エネルギーに分類すべきです。

(2) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーの中核と目されている自然エネルギーである太陽光と風力は、前者は「放射エネルギー」であり後者は「運動エネルギー」です。しかし、自然エネルギーは予測・制御不能な不規則変動を伴うため、不偏的で事実上無尽蔵に存在するが、工業的には無価値なエネルギーであり、それ故「自由財」なのです。

太陽放射や風力に価値を与えているのは化石燃料で製造・運用されている発電装置とそれに付帯する装置システムという工業製品です。したがって、自然エネルギーも原子力同様に二次エネルギーに分類すべきです。

エネルギー技術としての再生可能エネルギー発電は、発電装置システムの製造・運用で投入した化石燃料の熱量に対して供給する電力量のエネルギー産出比は1.0を大きく下回り、火力発電電力のエネルギー産出比よりも低くなります。原子力同様、再生可能エネルギーが大きくなるほど同一の化石燃料によって供給できる電力量は減少します。再生可能エネルギー発電も低効率の間接火力発電というべき発電方式であり、火力発電と同様の二次エネルギーに分類すべきです。

(3) 一次エネルギーに対する提案

勿論、一次エネルギーという科学的ではない経済的な指標はどのように定義することも可能です。しかし出来れば物理的な意味のある数値にすべきだと考えます。既に少し触れましたが、一次エネルギーは最終エネルギーに対して幾ばくかでもプラスになる量を計上すべきであろうと考えます。

本質的な問題は、現在の一次エネルギーとしての原子力や再生可能エネルギーは、それを利用するために消費されている莫大な化石燃料の消費を無視しているために無意味な指標になっているのです。化石燃料を基本エネルギー資源とする工業化社会では、あらゆる工業的生産過程において化石燃料が消費されていることを銘記しておかなければなりません。

これまで見てきたように、火力発電を原子力発電や再生可能エネルギー発電で置き換えることで、同一の電力量を得るために化石燃料消費量を増加させます。逆に化石燃料消費量を固定すると、原子力発電や再生可能エネルギー発電を増やすほど、供給可能な電力量が減少します。この場合、原子力発電や再生可能エネルギー発電はマイナスの効果なので、一次エネルギーはゼロとすべきです。

一次エネルギーとは、そもそも工業化社会を動かしている基本的なエネルギーが化石燃料であることを前提として消費された化石燃料の持つ熱量で定義されたものと考えます。したがって、あるエネルギー資源 X を導入することで、その価値が化石燃料の熱量に換算してどの程度のプラスの効果を持つかを一次エネルギーの定義とするのが妥当ではないでしょうか？

思考実験です。

資源 X による電力供給技術のエネルギー産出比が火力発電よりも大きい場合を考えます。火力発電のエネルギー産出比を α 、資源 X 発電の投入した化石燃料に対するエネルギー産出比を $(\alpha + \delta)$ とします。この二つの発電システムに要求される発電量を E を得るために必要な化石燃料を求めると次の通りです。

火力発電化石燃料消費量: E/α

資源 X 発電化石燃料消費量: $E/(\alpha + \delta)$

資源 X の導入で削減できる化石燃料消費量 ΔE は以下の通りです。

$$\Delta E = \frac{E}{\alpha} - \frac{E}{\alpha + \delta} = \frac{\delta \cdot E}{\alpha(\alpha + \delta)}$$

$\delta < 0$ の場合は ΔE がマイナスになります。 $\Delta E > 0$ の場合、これを資源 X の一次エネルギーとして計上するのが妥当だと考えます。

δ が負の値となる化石燃料の利用効率の低い発電方式は、そもそも存在意義がありませんから、廃止すべきです。したがって、「本来ならば」そのような発電方式は存在しないはずですが、残念

ながら有用なエネルギー資源である化石燃料の効率的な利用以外の目的で、例えば金儲けをたくらむ人たちによって、原子力発電や再生可能エネルギー発電が利用されているのが現状です。

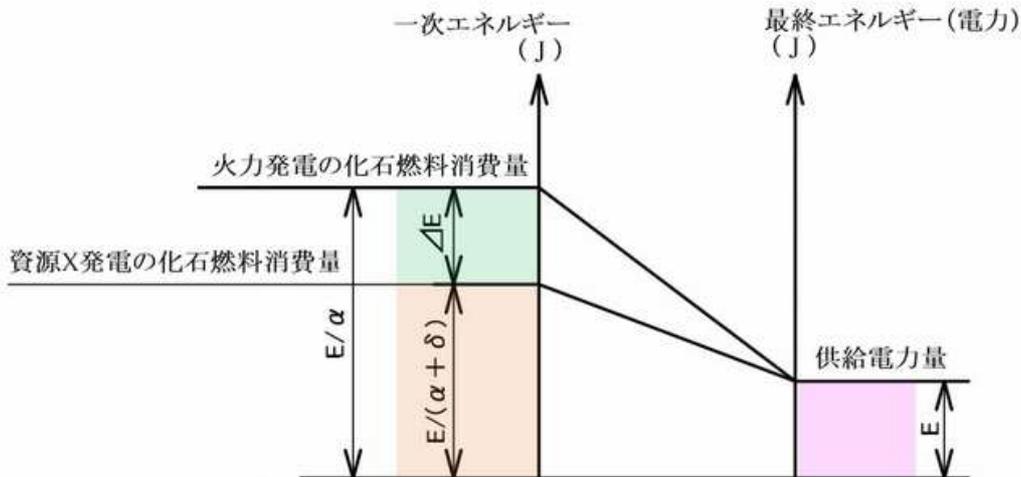


図 5-1 発電による一次エネルギー供給量の算出

5-4 結論

以上、エネルギー供給技術について検討してきた結果、現在の工業生産レベルを維持することのできるエネルギー供給技術は、化石燃料以外にないことが分かりました。これは、化石燃料の枯渇によって、工業化社会という人類史上において特異な社会システムは終焉を迎えることを意味します。

現在、人為的 CO₂ 地球温暖化対策として進められている「脱炭素化政策」や SDG's の主張は、エネルギー技術に対する自然科学的な検証を怠った結果、完全に誤ったものになっています。脱炭素化政策や SDG's の目指す「エネルギー・資源浪費社会」は、工業化社会の終焉を早めるだけでなく、自然環境を著しく破壊することになります。SDG's の妄想するバラ色の未来像とは裏腹に、人類の生活の本源的基盤を破壊し、有用な化石燃料資源を浪費し、飢餓と貧困を蔓延させることになります。

人類史において、工業的エネルギーや工業生産物があふれた時代は最近の 200 年間程度の短期間に限られています。人類史の大部分は、生態系から得られる更新性の生物資源に依拠したつつましい農耕文明が連綿と続いていたのです。

ただし、この 200 年間余りの化石燃料による豊富なエネルギー供給によって、比較的良好な自然環境を維持したまま人口は爆発的に増加しました。この状況で突然化石燃料が枯渇すれば、燃料生産と食料生産のために自然環境は一気に破壊されることになるでしょう。

我々は、化石燃料の枯渇を見据えて、ポスト工業化社会へ「軟着陸」出来るように、時間をかけて周至な準備を始めるべき段階を迎えていると考えます。更に検討を進めたいと思います。