



脱化石燃料が文明 社会を激変



エントロピー理論が諫める
エネルギーの使い過ぎ

小森三郎

目次

まえがき

第1章 古くて新しいエネルギー問題

クラウジウスが創始したエントロピー理論 / クラウジウスのみたエネルギー問題
/ クラウジウスの先見性と卓見

第2章 資本主義の登場は産業革命にあり

石炭を動力源として利用した産業革命 / 産業革命から経済学が誕生
/ 大量生産・大量消費・大量廃棄の社会到来

第3章 地球温暖化はエネルギーの使い過ぎ

槌田エントロピー理論 / エントロピー理論からみた地球温暖化 / 遠大なパリ協定

第4章 21世紀のエネルギー問題

右肩上がりの石油需給と価格 / パリ協定を受けた脱炭素の道程
/ 化石燃料に代わる熱・燃料

第5章 エネルギーから考える資本主義

不都合な米国経済 / エネルギーと資本主義と覇権 / 資本主義の行き詰まり

第6章 激変する社会体制

崩壊する石油漬けの経済と社会 / 先行すべき価値観の転換 / 22世紀の社会に向けて

付記

付記1： 海水冷却の原発は稼働中に二酸化炭素を放出

付記2： トリウム溶融塩炉を自然エネルギーのベースロード電源に

あとがき

参考文献

2017年12月17日（日）に放送された、NHKスペシャル『脱炭素社会の衝撃』をユーチューブで偶然見ました。私自身も衝撃を受けた一人であり、NHKスペシャルの反響ツイートも、世界の潮流に逆行する日本に、じくじたる思いの方が大部分です。脱炭素社会は、エネルギー資源に化石燃料を使わず、再生可能エネルギー100%の社会です。再生可能エネルギーの機運は、1973年の第一次石油ショックの翌年に「サンシャイン計画」がありました。しかし、再生可能エネルギーの機運は、なんらかの理由からしりすぼみになりました。代わって、原発がエネルギーの安全保障になるとされ、全国に54基まで建設されました。それでも、原発は震災直前の2010年度の一次エネルギー供給の内、11%占めただけです。その時は、化石燃料が一次エネルギー供給の約82%を占めました。第一次石油ショック後から原発を数多く新設しても、エネルギーの安全保障は実現できません。逆に、最悪の原発事故を起こし、その対処に多額の国富を費やすも、四苦八苦するだけで解決に目途さえつきません。

日本政府は、2015年12月のパリ協定から3年目に突入しても、改憲を叫ぶだけで、脱炭素社会実現の優先度は低いまです。脱炭素社会とは、再生可能エネルギーを100%にするわけで、エネルギー安全保障から言えば理想的です。しかも、原発のような致命的事故も起こらず、化石燃料の輸入に国富を流出することはありません。現在社会の問題は、化石エネルギーの使い過ぎです。エネルギーの使い過ぎか否を判断する理論が、エントロピー理論です。エントロピー理論の創始者であるルドルフ・クラウジウスが、1885年に石炭エネルギーの使い過ぎに警鐘を鳴らしていました。

18世紀初頭のニューコメンの蒸気機関の発明及び1760年代のワットの蒸気機関の改良を経て、英国で産業革命が起こりました。石炭が単なる暖房用の熱源としてだけではなく、強力な活動源としての利用が欧米社会を変えていきました。第二次世界大戦後は、安価で大量の石油が民需用として消費され、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会が後の先進国に広がりました。グローバル資本主義では、化石燃料が世界中で膨大に消費され、便利で快適な生活をしています。しかし、化石燃料の使い過ぎが、地球温暖化の公害を生みました。二酸化炭素による地球温暖化は、1990年の国連気候変動に関する政府間パネルで、最初に公式報告されました。しかし、新自由主義あるいはグローバル資本主義が、経済成長競争を各国に浸透させ、化石燃料の使い過ぎを招き二酸化炭素の排出量を増大させ、温室効果による事態を悪化させました。その結果、地球温暖化の行く末に赤信号が灯り、パリ協定に至ったと思われます。

WWF（世界自然保護基金）ジャパンの『脱炭素社会実現に向けた長期シナリオ概要版』によれば、化石燃料から再生可能エネルギーへのエネルギー転換と、省エネの両方を進めれば、2050年に脱炭素社会が実現します。筆者は、再生可能エネルギーの主力である太陽光発電と風力発電を組み合わせても、共にお天気任せであり、電力の需要に即した安定的な供給は無理と考えます。更に、再生可能エネルギー100%の社会実現に大きな課題があります。それは、75%に及ぶ需要場所における熱・燃料（例ガソリン・ジェット燃料・軽油・重油）です。WWFジャパンは、需要場所における熱・燃料に水素とバイオ燃料の技術革新に期待を寄せています。筆

者は、脱炭素社会に期待しますが、再生可能エネルギーのエネルギー収支比が10未満であることから、大量生産・大量消費・大量廃棄の文明様式を維持することは困難と考えます。その結果、経済成長はできなくなりますが、困ることはありません。現に、普通預金の利子が0.001%、定期預金の利子が0.01%です。預金利子がゼロとは、預金の利子はもとより、資本の増殖ができないことを物語っています。日本は、既に化石燃料を使いながら「定常社会」に入っています。脱経済成長が、脱炭素社会の先行思想であり、産業革命以降に実現した資本主義社会と異なる社会に進みます。

第1章 古くて新しいエネルギー問題

クラウジウスが創始したエントロピー理論

ルドルフ・クラウジウス（1822－1888）は、現在のポーランド出身の熱力学の物理学者です。熱力学とは、蒸気機関の運動に代表される熱機関の学問です。彼は、熱力学第一法則（※1）と熱力学第二法則（※2）を基盤に、諸々の熱機関の熱と力学の相互現象からエントロピー理論を創始しました。エントロピーとは難解な概念ですが、エントロピー学会によるエントロピーの説明を次にします。→A

熱は高温から低温に移動し、その逆は、他に変化を及ぼさずには起こらない。物質は濃度の高いところから低いところに拡散し、その逆は、他に変化を及ぼさずには起こらない。これらの熱と物質をひっくるめての拡散の度合いを定量的に示す量がエントロピーである。

拡散した熱や物質は元の状態に戻すには仕事が必要だから、エントロピーは劣化の度合いを表す指標とも言うことができる。

エントロピー学会の説明にあるように、エントロピーは熱と物質をひっくるめての拡散の度合いであり、直截的に言えば熱エントロピーと物エントロピーの和です。クラウジウスは、理想気体におけるエントロピーを熱容量（＝熱エントロピー）項と体積（＝物エントロピー）項の和で示しています。なお、エントロピー理論で扱う温度は絶対温度です。エントロピー理論は、小さな系（例：人間、もっと小さな系もある）から大きな系（例：地球）まで、熱の入出力が伴うすべての系に適用でき、かつ、系全体の状態を定量的に俯瞰できる優れた理論です。

また、クラウジウスは系（たとえば地球）を含む環境全体のエントロピーが、必然的に増大する熱力学第二法則の発見者でもあります。ただし、地球は開放系であり、太陽からエントロピーが低く質の高いエネルギーである光を受け、物質循環を生起して、夜間に宇宙空間へ赤外線のエントロピーが高く質の悪いエネルギーを捨てる気象動作から「熱的死（＝エントロピー増大）」を免れています。

※1 熱力学第一法則（別名はエネルギー保存の法則）

ある系が獲得したエネルギーは、外界の失ったエネルギーと等しい。

※2 熱力学第二法則

熱はひとりでの温度の低い物体から高い物体に移動しない。

つまり、熱はひとりでの高い物体から低い物体に移動する。なお、温度の低い物体から高い物体に熱を強制的に移動させることはできるが、その為にはエネルギーが必要になる。（例：冷蔵庫）

クラウジウスのみたエネルギー問題

クラウジウスは1885年に一般聴衆者向けに講演を行い、その内容を論考して論文『自然界

におけるエネルギーの諸蓄積と人類の利益にとってのそれらの価値評価』にまとめました。講演録を基にしたこの論文の後半部分の抄訳を次に示します。→B

「力学的エネルギーの消費についていえば、私たちは、今日、すばらしい時代に生きている。経済学には、いかなる商品についてもある一期間におけるその消費量は、同期間におけるその生産量をこえることはできないという一般的な原則がある。それゆえ私たちは、本来なら森林の成長を通じて再生産される燃料のみを消費すべきである。だが実際には、私たちはそれとはまったく違った生活をしている」。

「私たちは、遠い昔に起源のある石炭が地下に埋蔵されていることを承知している。その石炭は、きわめて長い期間にわたって、当時地球上に存在していた植物の成長を通じて大量に蓄積されてものである。その期間に比べれば、人類史の時間などは無限に短いものにさえみえる。私たちはいま、そうした蓄積を消費し、幸福な遺産継承者としてふるまっている。人間の力と技術的な手段が許す限りたくさんのもので大地から採取され、それは、あたかも枯渇することがないかのように消費されている。鉄道や蒸気船や蒸気機関を装備した工場の数は、驚くべき勢いで増加しており、このため、私たちが将来を展望するとき、ひとたび埋蔵石炭が枯渇するとき何がおこるだろうかという問題が不可避免的に浮かび上がってくる」。

「石炭の埋蔵量は豊富であるにもかかわらず、これは決してとるに足らない表面的な問題ではない」。

「私たちは、絶対的な明晰さをもって、可能なことと不可能なことを峻別しなければならない。エネルギーは、エネルギーの使用なしには創出しえない。・・・・科学は、それがいくらか発達しようと、ひとたび資源、すなわち石炭が枯渇してしまえば、新しいエネルギー源を創造することはできないであろう。反対に、人間は、太陽がきわめて長期にわたって放射しつづけるエネルギーとうまくつきあっていくよう運命づけられているのだ」。

「太陽エネルギーは、一方では、酸化可能で植物の成長を通じて得られる物質の形で、そして他方では、水の運動として私たちに提供されている。水の運動はかなり大量のエネルギーを生産することができるから、急流は大きな炭田の代替（水力発電）となりうる。自然愛好者は、滝すなわち美しい山岳景観の主要な源泉を構成する泡立つ野生が機械に捉えられてしまうことを醜いことだと思うであろう。しかしこれは、急流にとって不可避免的な運命である。それぞれの急流の近くに発達する活発な産業活動が、犠牲となる美観の償いになるであろう」。

「蒸気機関のようなさまざまな機械の発明と改良のおかげで、いま終わろうとしている（十九）世紀は、以前にはまったく知られていなかった規模での天然のエネルギー源の使用によって特徴づけられてきた。来るべき数世紀は、天然の諸資源、それらのうちでも主として私たちが過去の時代の遺産として発見し、再創造できないがゆえに浪費してはならない資源の消費に関して、賢明なる節約の方法を導入することを時代の主要な課題としてになうことになるであろう。速く変化がおこればおこるほどよりよい結果が得られる。最も文明化した諸国は、森林の利用をよく組織化された状態におくための管理と同様なやり方で石炭採掘を管理すべく、共同の行動をとるべきであろう」。

クラウジウスの先見性と卓見

18世紀初頭のニューコメンの蒸気機関の発明及び1760年代のワットの蒸気機関の改良を経て、石炭の有用性が飛躍的に高まりました。石炭は単なる暖房用の熱源としてだけでなく、強力な動力源として利用され始めました。この結果、英国の石炭生産量は、18世紀初頭の300万トン／年から、18世紀末には1000万トン／年に、19世紀半ばには1億トン／年と爆発的に伸び、19世紀末の年間石炭消費量は、薪炭換算で英国全土の森林をわずか4ヶ月で食いつぶす量に達した。→C 英国の産業革命は、たちまちフランス・ドイツなどの西欧に広がり、蒸気機関を動力源とした繊維産業、鉄道、蒸気船などが勃興しました。クラウジウスは、科学技術文明が輝いていた時期に、一般聴衆者向けにエネルギーの行く末の講演をしました。

前項の論文は、蒸気機関が発明されて以降の人類のエネルギー利用による社会変革に触れた後で、論文執筆当時の主なエネルギー資源であった石炭は、いずれ枯渇すると述べています。その前に、滝の落下による水力発電、太陽によって得られる自然エネルギーに移行しなければならないと結論しています。1885年に書かれたこの論文は、クラウジウスのエネルギー問題に対する先見性と卓見を示しています。2018年時点で、この論文の石炭と記している箇所を石炭と石油に置き換えて読んでも、内容が色あせず、いささかの違和感もありません。クラウジウスは、石炭の大量消費による豊かな社会に対する価値評価をしています。石炭が豊富に埋蔵されている間に、エントロピー理論にかなう自然エネルギー（今で言う再生可能エネルギー）への移行が必要だと結論しています。

クラウジウス没後の社会は、クラウジウスの思いとは逆に石炭よりも使い勝手の良い石油を、1859年に米国ペンシルバニアでドレーク大佐が掘り当てました。幸福な遺産継承者の米国は、安価で大量の石油を湯水のごとく消費し、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会を各国に広めました。2018年現在、人類は原油と天然ガスとシェールオイルなどを一日当たり約1億バレル消費しています。その結果、繁栄や富の増大、便利で快適な生活等の恩恵を享受するも、石油の枯渇が近未来にせまり、地球温暖化で呻吟しています。それもこれも、経済成長すれば金持ちになれば、技術進歩により幸せになれるという現在人特有の教条にとらわれ、地球温暖化の加害者兼被害者の立場がエネルギー問題の解決を一層困難にしています。

97%の科学者が認めている気候変動という事実に対し、一部の国・学者・評論家などは地球温暖化に難癖を付けていますが、エントロピー理論による化石燃料の使い過ぎに言及することはありません。人間は、エントロピー理論たる物理法則から免れるかのような経済行為をしています。

第2章 資本主義の登場は産業革命にあり

石炭を動力源として利用した産業革命

16世紀頃に始まった大航海時代がスペイン、イタリアといった西欧南部からオランダ、英国といった北部にその中心を移していきました。その頃、英国では放牧により森が縮小し、人々は木材の代わりに石炭を燃料として使い始めました。18世紀初頭にニューコメンが、炭鉱の排水ポンプ用に蒸気機関を発明しました。それを1760年代にワットが、熱効率の良い蒸気機関に改良しました。蒸気機関を使う前は、牛馬や水車によって、炭鉱の排水を行われていたが、効率が悪くて深い石炭層の採掘はできませんでした。しかし、蒸気機関を使うことで、掘り出した石炭を動力源の燃料とすることで、その何十倍もの石炭を労せずして掘り出せました。エントロピー理論から言えば、石炭が有する低エントロピーのエネルギーが、蒸気機関で熱と物のエントロピーに変化する際に、回転運動なる力学的エネルギーとして取り出し、残りを外部に高エントロピーとして排出します。

一方、17世紀に英国で発明された、石炭を乾溜して炭素純度を高めて、より低エントロピー化したコークスは、18世紀初めには製鉄工程の一部に利用され始めた。→C さらに、18世紀後半に反射炉が発明されてから、石炭／コークスのみで鋼鉄の大量製造ができるようになった。→C この蒸気機関 → 石炭・石炭 → 鋼鉄という再生産の相互効果こそが、産業革命の核心である。→C 以降、蒸気機関は、1807年の米国のフルトンによる蒸気船の実用化、1830年に英国のスティブンスンの蒸気機関鉄道への実用化など、熱機関の応用は加速的に進みました。石炭は、石炭の持つエネルギーだけで自らを拡大再生産できました。蒸気機関を使い石炭を掘り、石炭を蒸気機関で運び、その蒸気機関を動力源にして自動織機を稼働させました。

英国から始まった石炭エネルギーを動力源とする工業経済は、たちまちフランス、ドイツなど西欧に広まりました。クラウジウスの言う、「力学的エネルギーの消費についていえば、私たちは、今日、素晴らしい時代に生きている」を迎えたのです。

産業革命から経済学が誕生

16世紀頃に始まった大航海時代に、株式会社の源になる考えができました。アジアとの貿易を行い巨万の富を得るため、船を作り、船員を雇い入れ大航海に乗り出しました。しかし、ひとりの金持ちが全てを賄うことは可能でしょうが、失敗時の経済的危険は多く、複数の人間で賄う考えが出て来たのです。代わりに、大航海貿易で得られた富は、お金を拠出した仲間に分け合います。ここから、株式会社の組織が芽生えました。そして、会社の経理面を支援する画期的な複式簿記が、イタリアの自由都市で発明されました。マックス・ウェーバーは、近代西欧社会を成立させた原理が、近代科学、資本主義の市場、近代法体系、複式簿記であると述べています。産業革命前に、期せずしてマックス・ウェーバーが述べた近代西欧社会を成り立たせた原理が整い、アダム・スミス（1723－1790）の時代に、近代資本主義の基盤が出来上がりました。

産業革命前は、農業が各国の経済を支えていました。産業革命により、生産力の飛躍的な増加

が実現しました。農業は天候、土地条件等の制約を受けるため、生産量に制限があり、経済は概ね定常状態です。産業革命で出現した工業経済は、自然との繋がりがなく、エネルギーと鉱物原料を投入すれば、製品が生産できます。アダム・スミスは、封建制社会から産業革命を経ての近代資本主義社会の成立という時代に生き、国富を増加させる石炭エネルギーを動力源にした、工業社会特有の経済体制を『国富論』として1776年に発刊しました。『国富論』で有名なのが、商品の需要と供給が事後的に決まる「神の見えざる手」です。そのアダム・スミスの『国富論』から、経済学が誕生しました。ですから、経済学はエネルギーを使った大量生産・大量消費に何ら異議を差し挟みません。逆に、経済学はエネルギーの使い過ぎを問題にせず、「経済成長」なる甘い言葉で更なるエネルギーの消費を助長します。

大量生産・大量消費・大量廃棄の社会到来

19世紀末から20世紀にかけて、電気・科学・内燃機関を中心とする第二次産業革命が発生しました。第二次産業革命は、蒸気機関が発電機や内燃機関に、石炭が電気や石油に支配権を譲ることから成立しました。石油の爆発力を利用した内燃機関は、石炭利用の蒸気機関、すなわち外燃機関に比べると、小型軽量で効率も圧倒的に優れています。この長所は、直ちに兵器に応用され、石油燃料の軍艦、航空機の登場と急速な発展、トラックや戦車の登場など兵器革命を起こしました。現在でも、石油がなければ兵器の製造ができず、石油がなければ兵器を動かすことができません。それも、石油は、石油の持つエネルギーだけで自ら拡大再生産することができたからです。第二次世界大戦前の石油大国の米国は、内燃機関による利便性にて大量生産・大量消費・大量廃棄の経済モデルを確立しました。

第二次世界大戦後は、中東で次々に巨大な油田が発見され、石油は軍需用の希少資源から豊富低廉な民需用資源に代わりました。石油は誠に使い勝手がよく、利用範囲の広いエネルギーであり、火力発電の燃料以外に自動車、飛行機、船舶などの燃料、プラスチック、合成繊維原料、合成ゴム、塗料原料、合成洗剤などに利用され、現在文明を石油文明と形容できるほど重宝しています。安価な石油が大量にあればこそ、大量生産・大量消費・大量廃棄の経済モデルが成立します。2018年現在、人類は原油と天然ガスとシェールオイルなどを一日当たり約1億バレル消費しています。

クラウジウスが1885年に一般聴衆者向け講演を基に論考した論文は、産業革命前と比べ石炭エネルギーを多量に使った大量生産・大量消費の価値観を批判しています。第二次世界大戦後は、エネルギーの消費が加速し、グローバル資本主義になりエネルギーの消費が更に加速しています。産業革命以降の特徴は、起業家の出現です。起業家は、科学技術を応用し便利な商品を次々と大量に生み出しました。その結果、われわれ人類が湯水のごとく化石燃料を消費して、地球温暖化が叫ばれようとも、人は何とも思っておりません。つまり、大多数の人間は大量生産・大量消費・大量廃棄の価値観を批判しません。大多数の人間は、自分の時代に資源を浪費し、自分の子孫のことあるいは自然環境のことなど少しも考えない、ある種の利己主義に陥っています。この利己主義からの脱却は、市場原理主義の経済にからめとられ、かつ、利便性を手放したくないゆえ非常に困難です。なぜなら、市場原理主義は善悪の価値観ではなく、経済性なる企

業の損得を価値観にしているからです。

第3章 地球温暖化はエネルギーの使い過ぎ

槌田エントロピー理論

地球を巨大な熱機関と見做せば、熱機関を対象にするエントロピー理論が適用できます。槌田敦は、1976年、日本物理学会誌上に論文を発表し、「空気と水を作業物質とする気象エンジンとしての地球」を初めて描出し、人間を含む地球上の動植物の活動により不断に増大するエントロピーを処分する機構を解明することにより、地球が熱死を免れている姿を示した。→A 地球環境にエントロピー理論を適応したこの考え方を、「槌田エントロピー理論」と呼ばれています。

地球を巨大な熱機関と見做せば、地球は低エントロピーで高エネルギーの資源を太陽光（平均 $q = 257 \text{ kcal/cm}^2/\text{年}$ ）で受け取ります。図1は、これを100として、一部は雲で反射されるので地表に47届き、温室効果・植物の光合成・生命活動などに使われます。

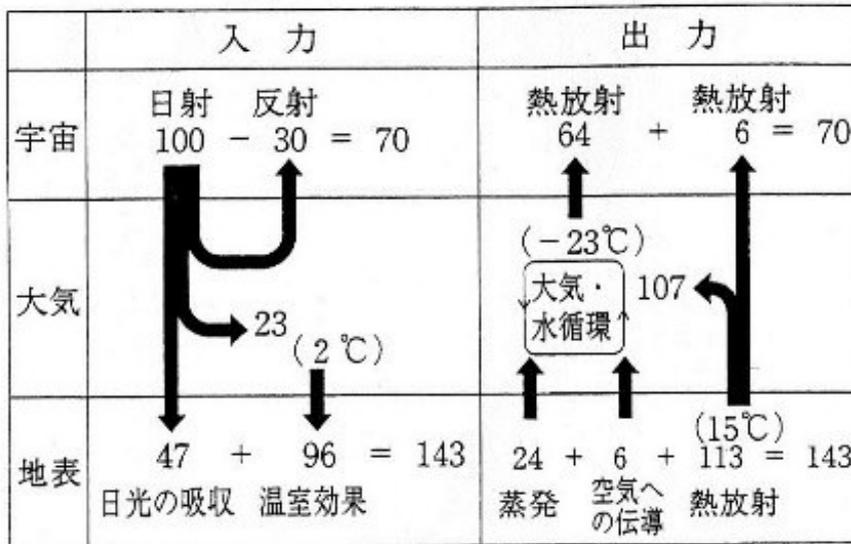


図1：水惑星のエントロピー入出力分析

出典元:エントロピーと物質循環（槌田「熱学概論」）

地表で受け取った低エントロピーで高エネルギーの資源を使い、人間を含む地球上の動植物の活動で生じる高エントロピーで低エネルギーの廃棄は、図1の右側の気象エンジンで宇宙空間に捨てられます。水と大気存在により、温められた水蒸気と大気は上昇し、上空で結露することにより雨となり水が地表に戻ります。一方、結露時に気化熱の放出という形でエントロピーを大気に受け渡し、温められた大気はさらに上昇し、熱放射を通じて宇宙空間にエントロピーを放出し、大気は下降します。気象エンジンが、エントロピーの廃棄を水循環と大気循環で実現しています。

金星は、太陽系で太陽に近い方から二番目の惑星で、大きさと平均密度が最も地球に似ています。しかし、金星の大気は二酸化炭素がほぼ全てを占めており、わずかに窒素を含む程度です。しかも、金星には水がないため、気象エンジンが作動せず、膨大な二酸化炭素の温室効果により、金星の地表温度は平均で464度なる灼熱惑星です。金星は、灼熱状態でエントロピーの入出力が釣り合っており、地球は人間を含む動植物が活動できる状態で、エントロピーの入出力

が釣り合っています。

エントロピー理論からみた地球温暖化

国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC)が、1990年に第1次評価報告書を発表しました。この時は、「人為起源の温室効果ガスが気候変化を生じさせる恐れがある」でした。時は移り、2013年9月のスウェーデン・ストックホルムで発表されたIPCC第5次評価報告書では、「人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の要因である可能性が極めて高い(95%以上)」に変わりました。温室効果ガスによる気候変動は、気候モデルを作り、スーパーコンピュータでシミュレーションします。気候モデルに不確定要素はあるものの、気候モデルの精度は上がっており、人間活動による気候変動の可能性が、95%以上である結果を得ました。

第二次世界大戦後は、中東で次々に巨大な油田が発見され、石油は軍需用の希少資源から豊富低廉な民需用資源に代わりました。20世紀半ば以降に観測された温暖化は、豊富低廉な石油を消費し始めた時期と符合します。グローバリズムの今日、各国はあらそって大量の化石燃料を消費しています。図1を見て下さい。人間は、化石燃料を大量に使うことで、地表において化石燃料のエントロピーが加わります(143を超える)。化石燃料が有する物エントロピー(=低エントロピーで高エネルギー)が熱機関で熱エントロピー(=高エントロピーで低エネルギー)に変化します。入力側では、その差分のエントロピーが増えます。エントロピー廃棄の出力側は、増えた化石燃料のエントロピーも含めて宇宙空間に捨てなければなりません。しかし、温室効果ガスの影響もあり、気象エンジンの能力が低下し大気から宇宙空間への熱放射能力が下がります。(70未満) 槌田敦は、「エントロピーは、単離しては存在せず、熱か物に付着して存存在する」としています。熱エネルギーに付着したエントロピーは蓄積され、地球温暖化になります。

地球の気温は、これからどうなるのか? IPCC第5次評価報告書では、(1)低位安定化シナリオ、(2)中位安定化シナリオ、(3)高位安定化シナリオ、(4)高位参照シナリオの4つのシナリオで気温のシミュレーションをしています。この内、(1)と(4)の二酸化炭素濃度は、2100年までに(1)低位安定化シナリオで約421ppm、(4)高位参照シナリオで約670ppmを予想しています。

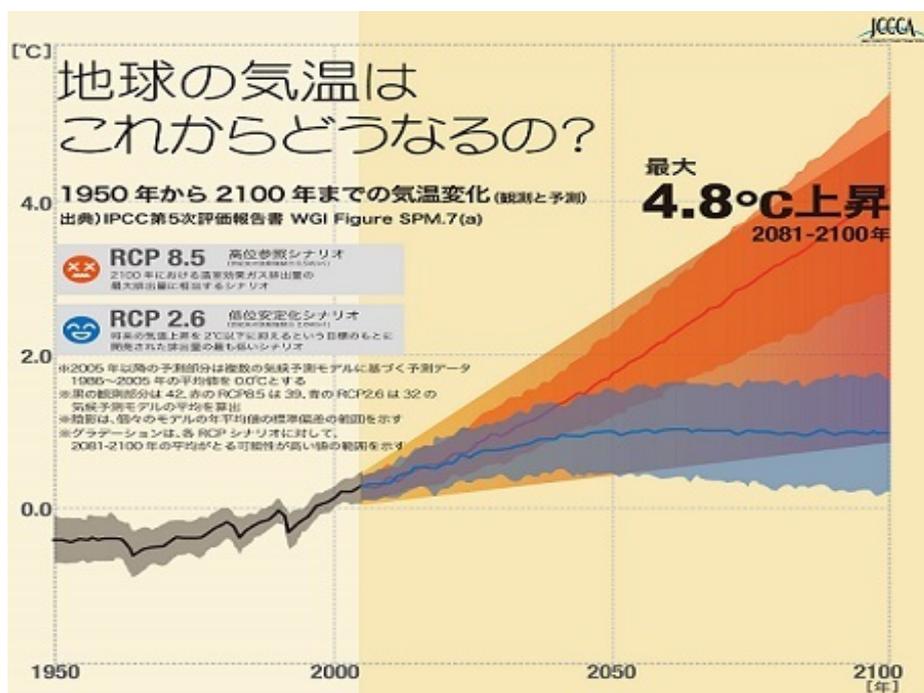


図2：1950年から2100年までの観測と予測の気温変化

出典元：全国地球温暖化防止活動推進センターのウェブ

図2に、(1) 低位安定化シナリオと(4) 高位参照シナリオの1950年から2100年までの観測と予想の気温変化を示します。(1) 低位安定化シナリオ(RCP2.6)では、地球の平均気温の上昇が上振れしても、産業革命前から2度C未満に抑えることができます。温室効果ガスの排出量を現状のままにする高位参照シナリオ(RCP8.5)では、世界の平均気温が21世紀を通じて上昇し続け、最大4.8度C(ブレあり)にもなります。既に、1880~2017年までに世界の平均気温は1.1度C上昇しており、残された気温上昇の余地は少ないです。

遠大なパリ協定

地球温暖化をもたらす温室効果ガスには、二酸化炭素、メタン、オゾン、一酸化二窒素などがあります。温室効果ガスの累積総排出量と世界の平均気温の上昇は、おおむね線形関係にあります。一度排出された温室効果ガスは、減らす手段がなく現状の濃度を保つことだけです。過去の温室効果ガスの累積総排出量と二酸化炭素以外の温室効果ガスを考慮すると、人間に残された二酸化炭素排出量の余地は少ししかありません。それでは、人間に残された執行猶予期間を計算します。なお、排出する二酸化炭素量を3.67で割れば、炭素量換算になります。

① 低位安定化シナリオの累積総排出量は、1兆トンが上限です。ここから、二酸化炭素以外の

温室効果ガス分を引くと、二酸化炭素の排出量は炭素量換算で7900億トンが上限になります。

② 1870~2011年までに排出した二酸化炭素を、炭素量換算すると5150億トン排出

しており、残りの二酸化炭素を炭素量換算すると $7900\text{億トン} - 5150\text{億トン} = 2750\text{億トン}$ です。

- ③ 2012年に317億トン、2013年に322億トン、2014年に324億トン、2015年に321億トン、2016年に330億トンの二酸化炭素を排出しており炭素量換算すると

$$(317 + 322 + 324 + 321 + 330) \div 3.67 \div 440\text{億トン}$$

- ④ 残された二酸化炭素排出量を炭素量換算すると $2750\text{億トン} - 440\text{億トン} = 2310$

億トンです。仮に、2017年以降も2016年と同じ量の二酸化炭素を排出すれば、単純に計算して

$2310\text{億トン} \div (330\text{億トン} \div 3.67) \div 25\text{年}$ つまり、2041年に上限へ達します。

「パリ協定」とは、2015年12月にCOP21（国際気候変動枠組条約21回締約国会議）で採択され、2016年11月に正式に発効となった、地球温暖化対策のための新しい国際協定です。そのパリ協定とは、IPCC第5次評価報告書の低位安定化シナリオを踏まえて、「地球の平均気温の上昇を産業革命前から2度C未満に抑える」自主的な国際協定です。ゆえに、パリ協定には強制力がなく、各国が温室効果ガスの削減目標を掲げて、その達成に向けて努力します。そして、5年ごとに目標を見直し、今世紀後半に温室効果ガスの排出を実質ゼロにする遠大な取り組みです。つまり、パリ協定が世界で採掘される石炭や石油などに消費期限を設けたこととなります。先に示した試算では、現在のペースで化石燃料を使い続ければ、25年後の2041年に上限に達します。上限を過ぎた化石燃料は、採掘しても使えないため、全くの無価値となります。パリ協定前までは、化石燃料の枯渇を問題にしていたが、パリ協定後は枯渇前に化石燃料が使えなくなるわけで、原発（付記1を参照）を含めた発電及び需要場所での熱・燃料（例：ガソリン・軽油など）のエネルギー構造に激変が予想できます。

第4章 21世紀のエネルギー問題

右肩上がりの石油需給と価格

国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が、1990年に第1次評価報告書で、「人為起源の温室効果ガスが気候変動を生じさせる恐れがあると」発表しました。しかし、21世紀になっても、世界の石油消費量と生産量は、図3に示すように右肩上がりです。2008年のリーマンショックによる金融危機で、石油の需給が一時落ち込むも、再び右肩上がりで石油の需給が推移しています。米エネルギー省の見通しでは、2018年4月以降も右肩上がりの石油需給です。化石燃料の使い過ぎが地球温暖化を進行させているにも関わらず、世界は更に化石燃料の消費を増やそうとしています。

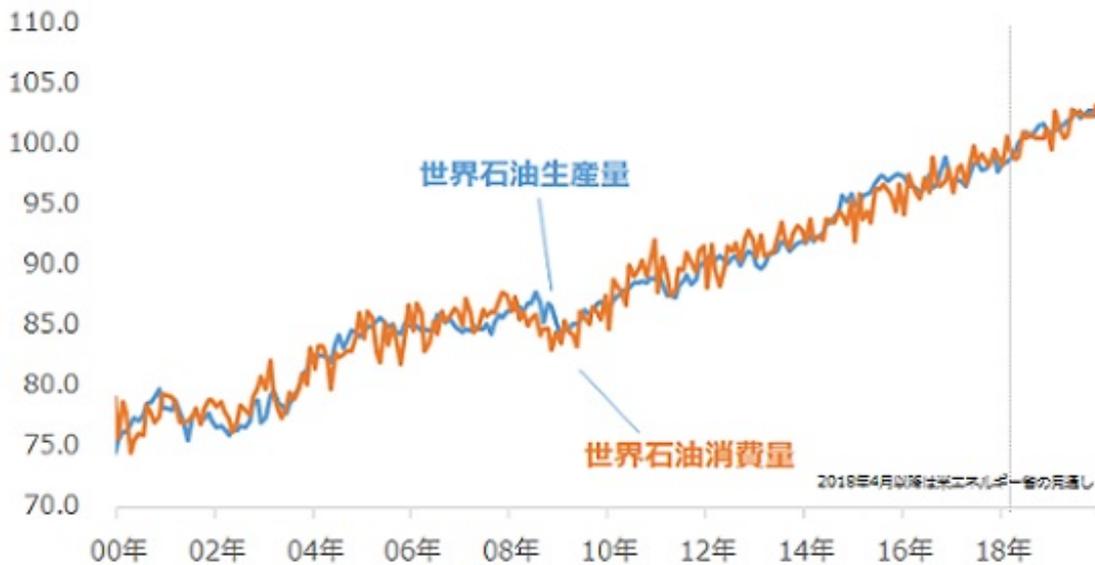


図3：世界の石油消費量と生産量の推移 単位：百万バレル/日量

出典元：米エネルギー省（EIA）のデータをもとに吉田哲氏作成

21世紀になっても、石油の量は確保されていますが、石油の価格はどうでしょうか？ 20世紀末の10年間は、石油価格がバレル20～30ドルで安定していました。2004年頃から石油価格が急上昇し、2008年のリーマンショックによる金融危機の特殊期間を除くと、バレル80ドル前後で推移しました。2015年になると需給の緩みからか、バレル50ドルを挟む不安定な展開が続きました。低迷する石油価格をテコ入れするため、石油輸出国機構（OPEC）は、2016年11月に協調減産を決め、2018年3月まで継続しました。協調減産が奏功したのか、2018年頃から石油価格がバレル60ドル台に上昇しました。

第二次世界大戦後、中東で次々と発見された巨大油田は、少しのエネルギーを投入するだけで原油を採掘できました。その後、新規に開発できる油田は地上では少なくなり、海底に油田を求めるようになりました。深海油田の原油採掘には、多くのエネルギーを投入しなければなりません。当然、石油価格の上昇が伴います。そして今日、採掘費用がかさむ非在来型原油と呼ばれるベネズエラのオリノコ重質油、カナダのオイルサンド、米国のシェールオイルまでが開発対象

です。非在来型原油は、中東の砂漠で採掘される在来型原油とは異なり、採掘自体に多量の化石燃料を使い、採掘場所の森林を広範囲に切り倒し、かつ、輸送（例：パイプライン敷設）において草原と農地を破壊します。非在来型原油は、石油の燃焼による二酸化炭素の排出倍加と緑の破壊による二酸化炭素吸収源縮小の両方で温暖化を促進しています。石油価格は、複雑な要因で決まりますが、原油の採掘費用は確実に上昇しており、決してバレル20～30ドルに戻ることはありません。

パリ協定を受けた脱炭素の道程

パリ協定を受け、脱炭素の動きは世界の潮流になります。ここで、国際気候変動枠組条約事務局に提出された、約束草案から抜粋した各国の温室効果ガス削減目標を表1で示します。

表1：各国の二酸化炭素削減目標

国名	二酸化炭素の削減目標	
中国	2030年までにGDP当りのCO2排出を60～65%削減 ※ 2030年前後にCO2の排出量のピーク	2005年度比
EU	2030年までに40%削減	1990年度比
インド	2030年までにGDP当りのCO2排出を33～35%削減	2005年度比
日本	2030年までに20%削減 ※ 2005年度比では、25.4%削減	2013年度比
ロシア	2030年までに70～75%に抑制	1990年度比
米国	2025年までに26～28%削減	2005年度比

出典元：全地球温暖化防止活動推進センターウェブより

COP21（国際気候変動枠組条約21回締約国会議）に先立ち、各国は2020年以降の削減

目標を国連気候変動枠組条約事務局に提出した。→E 同事務局の分析によれば、各国の約束草案を合計した場合の、2030年の世界の温室効果ガス排出量は、2度C目標達成シナリオから151億トンCO2/年も超過している。→E パリ協定では、5年ごとの目標提出を努力付けており、次は2020年に各国が2030年目標見直しと、それ以降の長期計画を示します。各国が、化石燃料から再生可能エネルギーへ、いかに切り替えを決断するかにかかっています。

2030年の目標見直し時には、2016年11月に国際エネルギー機関（IEA）が発表した「世界エネルギー展望（World Energy Outlook）2016」を参考にしなければなりません。「世界エネルギー展望（World Energy Outlook）2016」は、数年後には石油生産能力が減退し始め、これまで世界の経済発展を支えてきた安価な原油の供給は、2050年には現状から80%程度減少することを示唆している。→D 世界で使用しているエネルギーの約80%が、化石燃料です。化石燃料を使い経済成長をしたいが、基になる石油生産のピークが早くて2019年頃と予測しています。はからずも、気候変動対応から要求される化石燃料の消費削減要求に渡りに船です。各国が、図3に示す右肩上がりの石油消費から脱却できるか試されています。

化石燃料に代わる熱・燃料

2017年のWWFジャパン長期需給見通しでは、2050年に再生可能エネルギー100%を

転換目標にします。目標実現に、WWFジャパンは表2に示す省エネルギー技術の取組を想定しています。表2のエネルギー技術の取組が実行されれば、2050年度のエネルギー供給が、原油換算で291百万klで賄えます。

WWFジャパンでは、エネルギー全体を考えると、電力需要を自然エネルギーで供給すること自体は大きな課題ではなく、むしろ、熱・燃料需要をどのように満たすかを課題にしています。WWFジャパンも、自然エネルギーの一部（特に風力と太陽光）は、発電出力が変動するため、電力需要とのマッチングが難しいとの認識はあります。

表2：省エネルギー技術の取組

部門	省エネルギーの代表的技術と対策
産業	ポンプのインバーター制御、ファンのインバーター制御、鉄鋼のリサイクル
家庭	ゼロエネルギーハウスの普及、電気冷蔵庫の効率化、ヒートポンプの普及、待機電力の減少、LED照明の普及
業務	ゼロエネルギービルの普及、データセンターのハードディスクのフラッシュメモリーによる代替
運輸	エコドライブの普及、カーシェアリングの普及、電気自動車(EV)・燃料電池車(FCV)の普及

出典元：WWFジャパン

しかし、シミュレーションでは、2050年時点の電力需要を、100%自然エネルギーで一年中供給可能との結論です。ただし、その際には、全国の電力系統が一体的に利用できる必要があります。また、太陽光と風力の発電量が2対1になっていることが望ましいとしています。しかし、太陽光発電と風力発電は、共に需要に合わせた発電ができません。筆者は、太陽光発電と風力発電の組み合わせでも安定的な電力供給は無理と考えます。筆者は、原発に代わるトリウム溶融塩炉（付記2を参照）と再生可能エネルギーの組み合わせが解決になると考えます。この場合、すべての火力発電所を停止します。

エネルギー白書2015によると、日本で消費するエネルギーの75%が、需要場所で化石燃料を熱・燃料として消費し、残り25%が電力として消費しています。我々は、圧倒的に化石燃料を熱・燃料として消費しています。再生可能エネルギーは電気を生みますが、熱を生むのは不得意です。しかも、電気は遠くまで簡単に送れますが、熱・燃料の輸送は簡単ではありません。リチウムイオン電池及び全固体電池の出現で電気自動車は、従来の熱・燃料需要から電力需要にエネルギー形態を変えます。今後、熱・燃料として消費するエネルギーが減り、逆に電力として消費するエネルギーが増えます。それでも最後まで、化石燃料を需要場所で熱・燃料として消費する形態が残ります。それらは、高炉鉄生産に用いる石炭、家庭・業務におけるガス、航空機の燃料、船の燃料、長距離トラックや建設重機の燃料、石油由来の製品（例：タイヤ）の代替えなどです。WWFジャパンは、この課題に対してバイオマス利用の大幅な普及と、余剰電力を水素

に転換し、熱・燃料にしたい考えです。

バイオマスは、植物などの生物を由来にした資源です。バイオマスは、バイオ燃料の元になる資源から3種類に分けられます。第一世代のバイオマスは、トウモロコシや大豆、サトウキビなどの食料を資源にします。第二世代のバイオマスは、森林資源や農業廃棄物などが資源です。第三世代のバイオマスは、「藻類（そうるい）」が資源です。

第一世代は、食料と競合するのが難点です。食料輸出国は、トウモロコシや大豆、サトウキビなどをバイオ燃料にしても困らず、日本のようなトウモロコシや大豆を輸入している国は、大打撃です。第二世代は、間伐材を活用してガス化あるいは発電ができます。バイオマス資源の調達で、山がハゲ山になっては本末転倒です。第二世代では、持続的な燃料調達が大きな課題であり、資源量に制約があります。第三世代は、藻類由来のバイオ燃料です。藻類バイオマス生産には、大きく分けて、光合成独立栄養方式（以下、光合成方式）と化学合成従属栄養方式（以下、従属栄養方式）、の2つの方式が存在する。→F 光合成方式は、降り注ぐ太陽光と二酸化炭素を利用して、油成分を藻類に貯蔵させる方式です。従属栄養方式は、有機化合物（多くの場合、糖類など）をエネルギーと炭素の両源としてバイオマスを生産する方式です。→F 例えば、神鋼環境ソリューション製の「神戸ユーグレナ」は、従属栄養方式で生産されたミドリムシの乾燥粉末です。現在、産業利用されている藻類バイオマスの大半は、従属栄養方式です。光合成方式のバイオ燃料が、本当のバイオ燃料です。そのバイオ燃料の持続的な商業生産を実現するには、エネルギー収支比（※3）、炭素収支、経済性を満たす必要があり、研究段階の域を出ていません。

（※3）エネルギー収支比

燃料生産におけるエネルギー収支比とは、燃料として得られるエネルギー量に対する、燃料生産に投じられるエネルギー量の比で表される。→F 燃料生産に投じられるエネルギー量の内、原料が持つエネルギー量は含まれない。→F

『日本再興戦略改訂2014』では、「水素社会の実現に向けたロードマップの着実な実行とフォローアップ」が謳われています。その具体策が、トヨタより2014年12月に世界に先駆け販売された水素ガスを燃料にした量販燃料電池車「MIRAI（ミライ）」です。一回の水素充填で、航続距離650kmを実現しました。この水素燃料電池車の多数走行を念頭に、水素社会の実現を謳っています。トヨタとホンダの燃料電池車の累計国内販売実績は、2017年12月末時点で2322台です。経済産業省が、2020年までの普及目標とする4万台に対して、5.8%にとどまっています。燃料電池車の購入者は、主に官公庁であり、今後もお付き合い程度しか売れません。この結果が、水素ガスの実情を全て物語っており、技術的難問を突破しない限り、水素社会は実現しません。

学校の授業で水を電気分解して陰極に水素、陽極に酸素が分離する実験を経験された方は多いと思います。水の電気分解で水素ガスを得ると同じように、水の電気分解時に超低周波で水を攪拌すると、水素・酸素の混合ガス（OHMASA-GAS：オオマサガス）が小さな泡状となって発生します。通常の電気分解で得られる水素ガスと違い、特許を取得した特殊振動攪拌機で得

られるオオマサガスは、爆発しないことが首都東京大学大学院理工学研究科土屋正彦教授により判明しています。また、オオマサガスは酸素と水素の結合体ガスゆえに、燃える際に空気中の酸素を使わず、使用後水に戻ります。更に、オオマサガスは超高压にせずに実用化できています。筆者は、オオマサガスの方が、水素ガスより優れていると思います。オオマサガスの主な特長を「オオマサガス」公式ホームページから引用します。

- (1) 高エネルギー型燃料電池（小型から大型まで）
- (2) 高性能大型発電装置（ガスタービンを含む）
- (3) ナノテクノロジー分野の製造エネルギー（プラズマ代替品）
- (4) 新しい産業の創生としてのエネルギー
- (5) 航空機、船舶用の動力源
- (6) 難解な廃棄物処理用焼却炉の熱源
- (7) 天然ガスの代替燃料
- (8) 鉄鋼材、その他金属の切断（アセチレンガス代替用）

オオマサガスは、水素ガスに代わる熱・燃料の候補と考えられ、実用の域に達しています。

第5章 エネルギーから考える資本主義

不都合な米国経済

日本と米国の公的債務は、右肩上がりです。公的債務とは、簡単にいえば国の借金であり、国債や借入金などが含まれます。米国の政府総債務残高（公的債務あるいは財政赤字）の推移を図4に示します。2017年の数値は、IMF（国際通貨基金）による2018年4月時点の推計です。米国には、国の借金である米国債の発行枠に上限（法定債務上限）があり、大統領と上下両院が駆け引き議論をしながら、やむなく法定債務上限枠を引き上げてきました。

経済学者は、公的債務の絶対額を議論してもあまり意味がなく、国民総生産（GDP）と比較し、公的債務が持続可能な額ならよかろうと慰めてくれます。2015年の米国の国民総生産に対する公的債務の比率は、106%です。ちなみに、経常収支が黒字の日本の場合には238%です。しかし簡単ではなからうが、経済学者は国民総生産に対する公的債務が〇〇〇%になると経済崩壊すると答えてくれません。

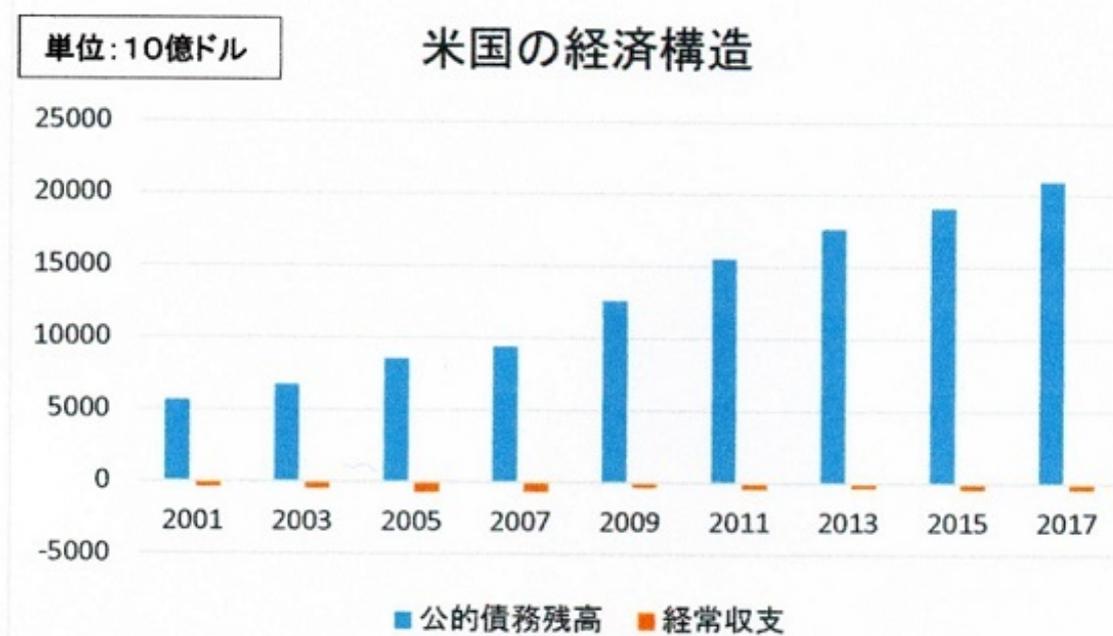


図4：米国の経済構造

データ出典元：世界経済のネタ帳

次に米国の経常収支ですが、赤字がかれこれ30年以上続いています。2001年以降の経常赤字の推移を図4で示します。経常収支は、貿易収支+サービス収支（出入国の収支結果）+所得収支（投資収益の結果）+移転収支の合計で求めます。米国の貿易収支は、いわずもがな赤字です。ちなみに2015年の貿易収支は、貿易輸入額が23,080億ドル（第1位）、貿易輸出額が15,049億ドル（第2位）で8,031億ドルの赤字です。貿易赤字の49%が対中国であり、かつての日本にとって代わっています。貿易赤字を主にサービス収支と所得収支が埋めますが、米国の貿易赤字が巨額ゆえ、経常収支が赤字です。米国の経常収支が赤字であっても、米国債とか米国の株式購入でドルが米国に戻りますが、基軸通貨たるドルが海外に流出している

ことに代わりありません。基軸通貨の特権がなければ、経常赤字を30年以上も続けることはできません。米国の覇権と変動相場制により基軸通貨を維持しています。

エネルギーと資本主義と覇権

1760年代に、英国のワットが蒸気機関を改良し、蒸気機関を動力源にして産業革命が起きました。産業革命により、農業経済から工業経済に経済形態が移行しました。この生産形態から、資本家と労働者の分離が生じ、資本主義が芽生えたのです。英国の工業経済は製造における優位により、工業品の世界市場を支配し、また、それにより英国が諸国の生産品輸出の世界の工場になりました。貿易では取引決済が必要になります。世界の工場になった英国は、輸出側主導で為替手形による貿易取引決済または英国海外投資金融資産を基礎とする金融手形による貿易取引決済をロンドン資本市場で行いました。→G その結果、ポンドが基軸通貨になりました。かくして、19世紀における英国の覇権は確立されました。

1776年英国の植民地から独立した米国は、急速に工業化を進めました。幸いにして工業化に必要な資源が自国で賄える幸運にも恵まれ、順調に経済発展が続行しました。特に、19世紀末から20世紀初頭にかけて、電気・化学・内燃機関を中心とする第2次産業革命を先頭で実行し、生産の電力化、生産過程の流れ作業化などの新機軸とあいまって生産高が急激に向上しました。米国は、豊富な石油をエネルギーに使い大量生産・大量消費・大量廃棄の社会を構築しました。米国は第一次世界大戦に参入し、漁夫の利を得ると共に、金融の中心はロンドン街からウォール街に移るまでになりました。

米国は、第二次世界大戦において欧州と太平洋を同時に戦えるほど巨大な生産力を有しました。金融においては、第二次世界大戦末期の1944年7月、アメリカ合衆国のニューハンプシャー州ブレトン・ウッズで開かれたれた連合国通貨金融会議（45ヵ国参加）において、ドルが基軸通貨になりました。それを背景に戦後は、戦勝国と敗戦国の復興を米国益のもとに主導し、政治軍事上の覇権国となりました。この時、次々と発見された中東の巨大油田の安価で大量の石油が、工業経済復興に役立ちました。

ドイツ及び日本の製造業は、1973年の石油危機をチャンスに変え米国製造業を追い上げ、米国の製造業の競争力は低下しました。米国の国際収支は1975年頃から年々悪化し、2000年には年間4774億ドルの貿易赤字に及びました。米国は、先進7か国（フランス、米国、英国、ドイツ、日本、イタリア、カナダ）を中心とする貿易では、製造業が立ち行かなくなりました。米国は、多国籍企業のグローバル経済を推進しました。労働賃金の安い良質の労働力が得られる国に工場を建設し、世界中に部品または製品を輸出するのです。これまでの経済の最小の単位は、国民経済でしたが、現在の生産単位は地球規模となり、グローバル経済になりました。工業経済体制を中心とする国は20か国に及び、国内総生産（GDP）を合計すると、世界のGDPの90%ほどを占め、貿易総額は世界の80%です。また、G20加盟国の総人口は世界の3分の2ほどです。

18世紀に英国で芽生えた資本主義は、自国に原材料を輸入し、製品を輸出する「物」の貿易です。今の貿易は低賃金国に工場を作り、製品を輸出するのが主流になり、さらに、人の移動も

お金の移動も縦横無尽に動いています。広井良典著『ポスト資本主義』によれば、資本主義＝「市場経済プラス（限りない）拡大・成長を思考するシステム」と簡明に定義しています。ゆえに資本主義には、工業品の輸出を通じて覇権を求める素地があります。その原動力は、化石燃料による無尽蔵の生産力です。米国は、化石燃料に恵まれた国ゆえ、覇権により世界中を大量生産・大量消費・大量廃棄の社会に変えました。

資本主義の行き詰まり

資本主義は、石炭の熱機関利用から勃興しました。その後、安価で大量の使い勝手の良い石油の熱機関利用から、資本主義は大量生産・大量消費・大量廃棄の社会を構築しました。その石油は、米国の覇権によりドルでしか購入できず、資本主義とエネルギーは切り離せません。

図5は、経済成長と石油消費の関係を示しています。石油を消費すればするほど経済成長します。その経済成長の基になる、石油生産能力に影が生じました。2010年11月に、国際エネルギー機関（IEA）が「世界エネルギー展望（World Energy Outlook）2010」で事後的に、在来型の石油生産量が2006年にピークを迎えたと発表しました。つまり、在来型の天然ガス及び非在来型のシェールガスなどの生産が、伸び続ける石油の消費を補っていました。そのIEAが、2016年11月に「世界エネルギー展望（World Energy Outlook）2016」で、数年後には石油生産能力が減退し始め、これまで世界の経済発展を支えてきた安価な大量の供給は、2050年には現状から80%程度減少することを示唆している。→D 化石燃料を使い経済成長をしたいが、基になる石油生産のピークが早くて2019年と予測しています。石油の黄昏が訪れたわけで、同時に資本主義にも黄昏が訪れました。

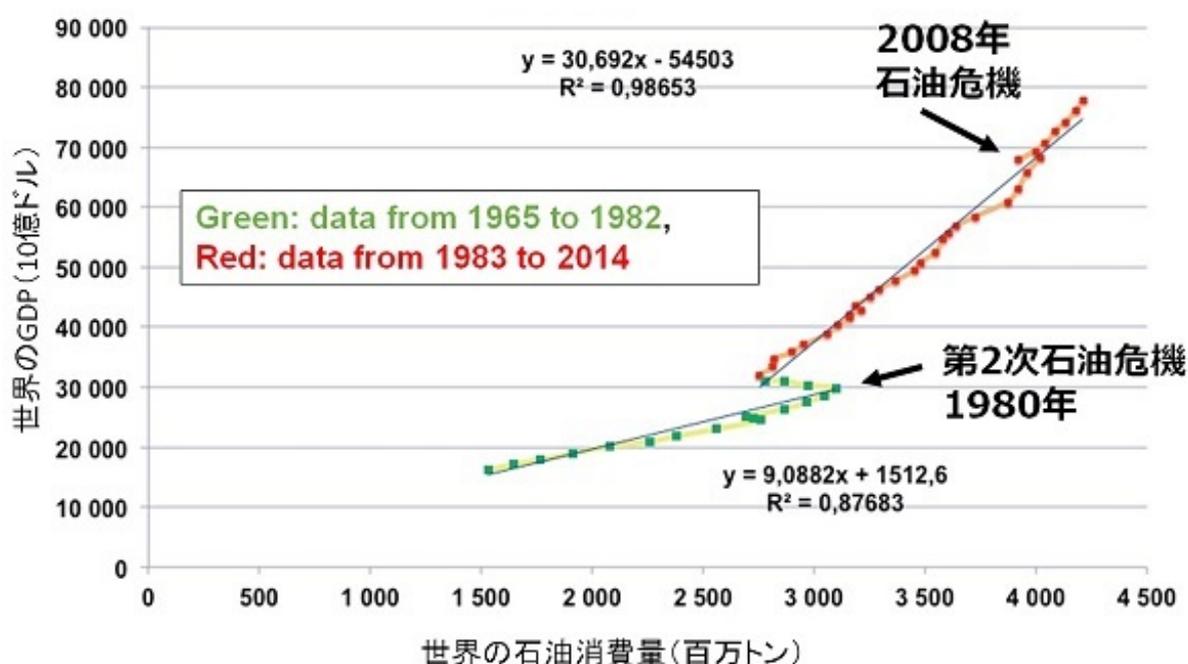


図5：経済成長と石油消費の関係

出典元：1バレル80ドル以上だと経済成長に赤信号

前門の虎が石油生産量の減退なら、後門の狼は地球温暖化です。地球温暖化の目標は、将来の気温上昇を産業革命以前と比べ2度C以下に抑え、対策は2050年までに温室効果ガス排出量を50%削減です。再生可能エネルギーは温室効果ガス対策に有効ですが、ポスト石油にはなりません。拡大・成長を思考する資本主義は、化石燃料に頼っているため早晩行き詰まり、エネルギーに見合った社会体制にならざるを得ません。

第6章 激変する社会体制

崩壊する石油漬けの経済と社会

化石燃料は、産業や暮らしに欠かせないエネルギーです。石油を油種別に消費分野を見ると、ガソリンとして自動車燃料に使用されるのが一番多く、このほか暖房に、重油として発電や工場などのボイラー燃料に、ナフサとしてプラスチックや各種の合成樹脂など石油化学製品の原料にと、その特性を活かし、幅広い分野で利用されています。次に、天然ガスから熱や蒸気、電気の複数のエネルギーを同時に生み出し、ビルや家庭の冷暖房をはじめ、給湯、電力供給などを行うコージェネレーション・システム、さらに自動車用燃料電池の原料など、より幅広い分野での活用が進められています。最後は石炭ですが、火力発電の燃料に一番多く使われ、二番目に溶鉱炉のコークスとして鉄鋼生産に使われています。石炭は、一番目と二番目の用途で大部分を占めます。

増大する石油の需要に対して、在来型原油の採掘減少を非在来型原油のオリノコ重油・オイルサンド・シェールガスが補っています。しかし、非在来型原油採掘は、在来型原油採掘に比べ自然環境への負荷を倍加させています。たとえば、シェールガスは、温暖化に悪影響を及ぼす水圧破碎法で採取しています。水圧破碎法とは、破碎流体（水、砂、および化学物質の混合物）に圧力をかけてガス掘削井戸内へ送り込むことにより頁岩に割れ目を作り、天然ガスを抽出する技術です。そのため、割れ目から二酸化炭素の25倍もの温室効果ガスであるメタンを漏出し、加えて有毒化学物質を含めた多くの水を使い地中及び地上を汚染します。

今後、ガソリン自動車から電気自動車への移行に伴い、電気の需要は増えます。再生可能エネルギーの主力を占める太陽光発電と風力発電は、お天気任せの電力供給であり、時々刻々と変動する電気需要に対応できません。トリウム溶融塩炉があれば、温室効果ガスを排出せずに再生可能エネルギーの弱点を補えます。もし、トリウム溶融塩炉がなければ火力発電に頼らざるを得ません。火力発電の二酸化炭素排出の付けは、今世紀末に大きな影響を及ぼすかもしれません。温暖化対策が進まない原因は、市場原理主義大好きな政治家にあります。市場原理主義は、政府の介入がすべて悪であり、自由貿易に代表されるように規制を撤廃してきました。温暖化対策には、大胆な経済規制と環境規制が必要です。

石油生産能力がIEAの予測通り減退すれば、エネルギー不足を再生可能エネルギーで補うも、電力需給の不一致から、石炭火力の再登板になるかもしれません。いずれ、石油に頼った現在社会は早晩崩壊します。最初は、石油の価格が上昇します。あらゆる商品は値上がりし、人々は省エネルギーと節エネルギーに努めますが、便利さ・快適さ・娯楽などを犠牲にするまでに追い込まれます。企業は、正常な経済活動ができません。しかも、化石燃料から得られる熱・燃料及び原材料の代わりがあるのでしょうか。WWFジャパンは、バイオマス的大幅な利用と水素ガスの利用で、熱・燃料の対応を考えています。筆者は、石油生産能力の減退予測前に、技術的課題を解決できるとは思えません。資本主義は、エネルギーを使った商品開発は得意ですが、地球にやさしいエネルギーを生み出すのは不得意です。地球温暖化対応と化石燃料漬けの経済構造は対立するため、筆者は大量生産・大量消費・大量廃棄の経済社会の崩壊を予想します。再生可能エ

エネルギーを生かすには、エネルギー密度の関係から地方都市とか田舎のような小さな規模には有効です。逆に、都会はエネルギー密度に見合った規模に縮小します。以上、化石燃料に依存しない新しい文明社会への移行は、混乱と痛みが伴います。

先行すべき価値観の転換

1972年、ローマクラブの『成長の限界』が出版されました。この書物は、このまま天然資源を使い続ければ、100年以内に成長は限界に達すると警告しました。『成長の限界』の予測より前に、先進国の経済成長が限界に達し、人々にこれ以上の豊かさは不要だと訴えています。経済成長ができない大きな理由は、化石燃料の余剰エネルギー（※4）が低下したからです。日本など先進国は経済成長ができなく、新興国が経済成長をしています。先進国は、工業国としてのインフラ維持他に、化石燃料の余剰エネルギーを優先的に使い、その分使用価値を高める生産に、化石燃料の余剰エネルギーを使えません。新興国も工業国になると、やがて経済成長が低下します。なお、技術革新が経済成長を促進する言説です。従来の技術革新は、大勢の中間所得者層を必要としていましたが、第三次技術革新以降は、中間所得者層を不要にするゆえ需要が減ります。

化石燃料のエネルギー収支比（※4）は低下傾向にあり、最近発見された大深水の石油・ガスは、エネルギー収支比が8です。現在は、エネルギー収支比10を超える油田が、徐々に枯渇しています。その前に、再生可能エネルギーに切り替えようとしています。再生可能エネルギーのエネルギー収支比は10未満です。これでは、経済成長を望むことはできません。日本は、エネルギー収支比10以上の化石燃料を使っても、1991～2016年の平均経済成長率は1%未満です。むりやりの経済成長を長年した結果、国の借金をダントツの世界一にただけです。経済成長できない現象は、普通預金の利子が0.001%、定期預金の利子が0.01%に表れています。預金利子がゼロとは、預金はもとより資本が増殖できないことを物語っています。惨憺たるありさまから、経済成長はできないと考えるべきです。日本は、政治家・企業家・経済学者他が経済成長をいくら連呼しても、既に定常状態の社会に突入しています。

脱炭素社会は、経済の根底を変えます。今後、脱炭素社会向けの新規製品（例：EV・洋上風力など）の需要はしばらくの間ありますが、同時に多くの職業が消えていくかもしれません。代わりに、今までにない職業が生まれます。ただし、大量生産・大量消費・大量廃棄の文明様式を変えずに、脱炭素社会は迎えられません。先に脱経済成長へ思想が変わり、脱炭素社会が定着すれば、世界は定常状態になります。世界の全ての国が、自国産の再生可能エネルギーとトリウム熔融塩炉でエネルギー供給をバランス良く運営するようになれば、エネルギー資源の奪い合いは起こらなくなります。その時期は、早くて2050年、遅くとも2100年です。その代り、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会構造が大きく変わります。

（※4）エネルギー収支比

燃料生産におけるエネルギー収支比とは、燃料として得られるエネルギー量に対する、燃料生産に投じられるエネルギー量の比で表される。→F 燃料生産に投じられるエネルギー量の内に、原料が持つエネルギー量は含まれない。→F 余剰エネルギーは、燃料として得られるエネ

ルギー量 — 燃料生産に投じられるエネルギー量で求められる。ゆえに、エネルギー収支比が低下すると、余剰エネルギーは自ずと減る。

22世紀の社会に向けて

資本主義は、余剰エネルギーの多い石炭を利用することで発生しました。資本の論理たる「拡大・成長」は、余剰エネルギーの多い石油・ガスの利用により、一段と力を増しました。余剰エネルギーの多い石油・ガスは、需要場所における熱・燃料として優れています。おかげで、人間は便利で豊かな生活ができるようになりました。2006年以降、余剰エネルギーの多い化石燃料は徐々に枯渇してきており、資本の論理が相当無理しています。その証拠に、富裕層が経済格差を作って、自分たちの「拡大・成長」に充てています。筆者は、化石燃料に依存しない新しい文明社会を具体的に構造できず、以下に未来を予想します。

グローバル資本主義は、化石燃料に頼りヒト・モノ・カネが国境を自由に超えさせ、資本の論理たる「拡大・成長」を目指す思想です。ヒト・モノ・カネが国境を自由に超えるには、飛行機や船の力が必要です。再生可能エネルギーが、飛行機や船の燃料の代わりができません。ヒト・モノ・カネの移動は、化石燃料に頼らざるを得ません。いずれ、貿易量は必要最小限になります。その分、各国は自国で多くを賄わねばなりません。化石燃料は遠くから輸入できても、再生可能エネルギーは、エネルギー収支比の関係から輸入しても経済的に引き合いません。化石燃料が安価であればこそ、ヒト・モノ・カネの移動が手軽にできたわけで、再生可能エネルギーでは移動が高価になります。

「拡大・成長」思想は、安価で大量のエネルギーを使い、大量生産・大量消費・大量廃棄の文明様式を作りました。大量生産・大量消費・大量廃棄の象徴が、大都会です。大都会は、化石燃料に浮かぶ人工島です。食料は海外から船及び田舎から高速道路で運ばれ、ビル・家庭のガスは海外から運ばれ、電気は田舎の発電所から送電されます。過去に、福島や新潟の原発の電力が、東京に送られていました。大都会の方が、田舎より余剰エネルギーの多い化石燃料をふんだんに使えたゆえ、便利で豊かです。

大都会は、電力消費及び需要場所における熱・燃料の消費が圧倒的に多いです。消費に比べ、大都会での太陽光発電量は少ないです。また、長距離トラックが食料・工業製品などを高速道路を使い運びますが、石油に代わる水素もしくはバイオ燃料では荷が重いです。田舎の太陽光発電の電力を、大都会まで送電しなければなりません。タンカーで輸入する石油・ガスなら、火力発電所で発電し、大都会まで送電するのが効率的です。再生可能エネルギーは、蓄電したうえで地産地消が原則です。なぜなら、太陽光は平等に降り注ぐが、エネルギー密度が低いです。ゆえに、人口密度の高い大都会は、田舎からの再生可能エネルギーだけで維持できません。エネルギー密度に見合った人口密度にならざるを得ません。大都会から田舎へ、今とは逆に人が移住します。田舎の方が、大都会より生活がしやすくなるからです。そのためには、田舎で食料と電力と熱・燃料を賄えることが条件です。水素とバイオ燃料が、石油・ガスの代わりに勤まるか心もとないです。代わりに、オオマサガスが考えられます。

大量生産・大量消費・大量廃棄は、大切な化石燃料の無駄使いであり、二酸化炭素の排出量を

削減できません。「拡大・成長」をやめれば、化石燃料の消費は増えません。再生可能エネルギーとトリウム溶融塩炉をバランス良く運営すれば、社会は余剰エネルギーに見合うまで縮小し、「定常状態」になります。「拡大・成長」がなくなり、市場にて商品・貨幣の交換のみになります。社会構造が徐々に縮小に向かって変化し、気が付いた時は激変しています。いずれにしても、脱化石燃料は産業革命に匹敵する社会変動をもたらします。

付記1： 海水冷却の原発は稼働中に二酸化炭素を放出

原発は、運転中において二酸化炭素を排出しないと言われていました。確かに、二酸化炭素は原子炉の中で生成されませんが、高温高圧の水蒸気がタービンと発電機を回した後に海水で冷やされます。7度C温められた大量（100万kwの原発1基で毎秒70トン）の海水は、海に戻ります。大気と海洋の間では、常に二酸化炭素のやり取りが行われています。気象庁のホームページには、次の説明があります。

海洋による二酸化炭素の吸収・放出を変動させる主な要因は、大気中の二酸化炭素分圧と表面海水中の二酸化炭素分圧の差、及び風速の変動です。表面海水中の二酸化炭素分圧が大気よりも高いと海洋は大気へ二酸化炭素を放出し、逆に表面海水中の二酸化炭素の分圧が大気よりも低いと海洋は大気から二酸化炭素を吸収します。また、風速が大きいほど吸収・放出が多くなります。表面海水中の二酸化炭素分圧は、水温、海水の鉛直混合や湧昇、生物活動といったさまざまな影響を受けて大きく変動します。例えば、水温が高くなると、二酸化炭素の水に対する溶解度が減少し、溶けきれなくなった二酸化炭素は表面海水中の二酸化炭素分圧を高くします。また、海水の鉛直混合や湧昇で二酸化炭素を多く含む下層の水と混ざると、表面海水中の二酸化炭素分圧は高くなります。生物活動が盛んになると、植物プランクトンが二酸化炭素を消費することで、表面海水中の二酸化炭素の分圧は低くなります。

海水の二酸化炭素の吸収・放出の仕組みと、大量の海水が7度C温められて海に戻される原発の実情を組み合わせると、原発周辺の海より二酸化炭素が立ち上っていると考えざるをえません。ですから、海水冷却の原発は、運転中において二酸化炭素を排出しないというのは誤りではないのでしょうか。ただし、海外の原子力発電所の場合は、巨大な冷却塔を導入しています。原発は川の水を汲み上げて高温高圧の水蒸気を冷却した後、そのまま川に戻してしまうと様々な問題が発生するので、冷却塔が一度温かくなった川の水を空気で冷やす「空冷」をしてから河川に戻しています。この場合は、真水で冷却していますから、原発運転中でも二酸化炭素を排出しません。

付記2： トリウム溶融塩炉を自然エネルギーの出力変動追従電源に

お天気任せで出力の安定しない太陽光発電と風力発電だけで、電力を安定的に供給できません。原子力村は、原発をベースロード電源にと情宣していますが、致命的欠陥を多く抱える原発は運用できません。原発の代わりになるのが、トリウム溶融塩炉です。燃料はトリウムで、着火剤はプルニウムです。1960年代に米国で稼働した実績がありますが、原爆の原材料を生成できないため中止の憂き目にあいました。日本では、元原発技術者が中心になり、ベンチャー企業が

民間人の募金を資金に研究しています。既に、概念設計は完成しています。トリウム溶融塩炉は、負荷追従できるので、お天気任せで出力の安定しない再生可能エネルギーとの相性が良好です。また、トリウム溶融塩炉は「核のゴミ」を完全に燃焼し、消滅するなど数多くの特徴があります。詳しくは、株式会社トリウムテックソリューション（TTS）のホームページを見て下さい。

トリウム溶融塩炉は、優れた原理の発電ですが、燃料はトリウムゆえ石油のように多量に消費すべきではありません。図1から理解できるように、入力側の地表にてトリウムの核エネルギーが熱エネルギーに変換され、エントロピーが増加します。すると、入力側が $143 \text{ cal/cm}^2/\text{年}$ を超えるかもしれません。出力側は、トリウムの核エネルギーが熱エネルギーに変換されることで、廃棄すべきエントロピーが増えます。その結果、気象エンジンが有するエントロピー廃棄能力内に収まる必要があります。トリウムの核エネルギー消費で増えるエントロピーが、地球にたまると地球温暖化になるからです。

槌田氏は、地球の熱機関のエントロピー廃棄能力を年間 $41 \text{ cal/cm}^2/\text{度}$ と計算されています。人間を含め生物が活動すると、エントロピーを作っています。片一方でエントロピーを作るけれど、地球が41単位のエントロピーを宇宙に捨てているから、その分までは問題がありません。この分だけ余分にエントロピーを作ってもよいわけで、これを上限に人間を含めた生物が活動できます。

資本主義は、西欧の近代思想から誕生しました。産業革命以降、工業国はエネルギーが国力の源と考え化石燃料を消費してきました。20世紀末頃から新興国も工業化に邁進し、先進国を上回る勢いで化石燃料を消費しています。エネルギーの効率的工夫はこれからもなされますが、化石燃料の絶対消費量が増え続けるため、化石燃料の消費量は右肩上がりです。槌田エントロピー理論は、エネルギー消費量の上限を示唆しています。エネルギーの使い過ぎが地球温暖化の原因ゆえ、エネルギーが国力の源の考えに固執する限り解決は困難です。それでも、パリ協定により、各国は自主的に温室効果ガスの削減目標を掲げて、その達成に向けて努力します。その手段として、再生可能エネルギーが脚光を浴びています。

日本には、脱炭素社会に向けての優れた技術があります。たとえば、戸田建設には台風にも耐える洋上風力発電の技術があります。しかし、発注がないので宝の持ち腐れです。ですから、資源エネルギー庁の平成27年5月資料『長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告』でも、洋上風力の発電コストがありません。再生可能エネルギー100%社会は、国策にしなければ実現しません。なお、平成30年度までの予定で、福島沖で浮体式洋上風力発電の実証実験中です。

今後各国は、自動車のエネルギーを化石燃料から電気に切り替えようと規制を強めています。電気自動車へ切り替えつつ、並行的に太陽光発電や風力発電を増やし、再生可能エネルギー100%社会へ進もうとしています。インフラの再構築であり、化石燃料社会に比する再生可能エネルギー社会のグラウンドデザインが必要です。優れた技術があるので、国は再生可能エネルギー社会のグラウンドデザインが可能です。脱炭素社会に背を向ける、政治家・官僚・電力会社など原子力村が、邪魔をしています。再生可能エネルギーには、固定価格買取制度が付随しています。再生可能エネルギーの普及を図る目的ですが、貧富差の国民に不平等な経済的負担を強いる制度です。

再生可能エネルギーの主力である太陽光発電と風力発電は、お天気任せの発電であり、需要に合わせた電力の供給ができません。出力変動追従電源がなければ電力の供給が偏り、停電になるかもしれません。原発は、致命的欠陥を抱えているため出力変動追従電源に適用できません。今まで、原発の開発と維持につぎ込んだお金と、原発の後始末につぎ込むお金を累積すると、莫大な金額（数百兆円？）です。トリウム熔融塩炉と再生可能エネルギーの進展に、原発の一部の金額を投入すれば、エネルギーの安全保障が実現します。

資本主義は、産業革命後の石炭の余剰エネルギーにより実現しました。第二次世界大戦後は、石炭より石油が有する多量の余剰エネルギーが、近代社会の原則である「より速く」・「より遠く」・「より合理的に」を加速させ、グローバル資本主義へと進展しました。グローバル資本主義は、経済成長を隠れ蓑に、地球を命のない機械と見做し、主に金持ちをその操縦者とみなす破壊的思想です。温室効果ガス公害による脱炭素社会が、グローバル資本主義が促進した化石燃料の消費を減退させます。原油はドルでしか買えませんが、その原油の消費が減退すれば、いずれ基軸通貨が不要になるかもしれません。更に、化石燃料の消費減退が、近代社会の原則である

「より速く」・「より遠く」・「より合理的に」を崩壊に導くかもしれません。再生可能エネルギーは、近代社会の根底に変革を及ぼします。

2018年7月2日

参考文献

第1章 古くて新しいエネルギー問題

- ・ 中澤明著 エントロピーと物質循環 ー地球環境問題への一つの視座ー ←A
- ・ 室田武著 エネルギー経済とエコロジー 晃洋書房 ←B
- ・ 石井彰著 石油がエネルギー・チャンピオンになった理由 ←C

第2章 資本主義の登場は産業革命にあり

- ・ 中澤明著 エントロピーと物質循環 ー地球環境問題への一つの視座ー ←A
- ・ 石井彰著 石油がエネルギー・チャンピオンになった理由 ←C

第3章 地球温暖化はエネルギーの使い過ぎ

- ・ 中澤明著 エントロピーと物質循環 ー地球環境問題への一つの視座ー
- ・ ウィキペディア
- ・ 地球の抱える環境問題ウェブ

第4章 21世紀のエネルギー問題

- ・ 吉田 哲著 世界の石油消費量は増えているか！
- ・ 石油経済研究会 中田雅彦著 採算性低下が原因で、石油生産は減衰する ←D
- ・ WWFジャパン 脱炭素社会に向けた長期シナリオ概要版
- ・ COP21を踏まえた石炭火力発電の今後の可能性 三井物産戦略研究所 ←E
- ・ 資源エネルギー庁 エネルギー白書
- ・ 星野孝仁著 そのバイオ燃料、エネルギー量が減っていないか？ JBpress
←F
- ・ OHMASA-GASホームページ
- ・ 日本再興戦略改訂2014 平成26年6月24日閣議決定

第5章 エネルギーから考える資本主義

- ・ 石油経済研究会 中田雅彦著 採算性低下が原因で、石油生産は減衰する ←D
- ・ 成城大学経済学部共同研究室 著 第五章 英国の覇権 ←G
- ・ ウィキペディア

第6章 激変する社会

- ・ 田村八州男著 第29回縮小研究会資料
- ・ 石油経済研究会 中田雅彦著 採算性低下が原因で、石油生産は減衰する ←D
- ・ 星野孝仁著 そのバイオ燃料、エネルギー量が減っていないか？ JBpress
←F

付記

- ・ 山本義隆著 原子・原子核・原子力 岩波書店
- ・ 気象庁ホームページ
- ・ 株式会社トリウムテックソリューション (TTS) ホームページ
- ・ 柴田篤弘 槌田敦著 エントロピーとエコロジー 創樹社