

# エネルギーのシステム学

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
手塚哲央

2020年7月3日

## 目次

1	エネルギー需給の特徴と「エネルギーシステム学」	2
1.1	エネルギーフロー，1次エネルギーと2次エネルギー	2
1.2	化学エネルギー，機械エネルギー，電気エネルギー，熱エネルギー，そして核エネルギー	2
1.3	エネルギーに関わる3つの分野：「自然科学」、「人文学」、「社会科学」	3
1.4	エネルギーシステム学とは：マイクロとマクロの視点から同時に考えること	4
2	エネルギー需給システムの分析・設計・評価：技術と人間の視点	5
3	エネルギー需給の歴史と価値観の変遷：技術開発と社会における価値観の関係	6
3.1	価値観の変化(1)：「エネルギーと公害」	9
3.2	価値観の変化(2)：「石油危機」	11
3.3	価値観の変化(3)：「地球規模の気候変動」	12
3.4	「エネルギー政策の考え方について」	15
4	エネルギーシステム学について	16
4.1	だまし絵(Trick Art)に見る人間の認知特性	16
4.2	マクロの視点で見る	17
5	エネルギー(システム)学と自律	20
5.1	群盲、象(エネルギー)を撫ず	21
5.2	自律性とフレデリック	22

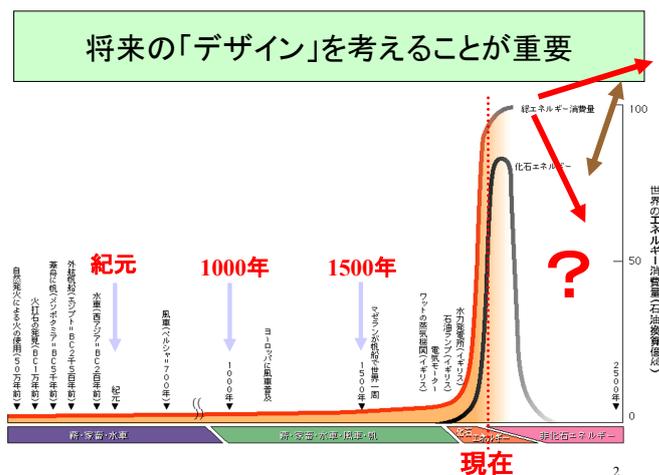
# 1 エネルギー需給の特徴と「エネルギーシステム学」

## 1.1 エネルギーフロー、1次エネルギーと2次エネルギー

(Page.1)

この講義のテーマは「エネルギーシステム学」。特に、エネルギー需給システムが人間の種々の特性と大きく関わっていることについてお話ししたい。まず最初に、エネルギー需給に関する基礎事項をいくつか述べておこう。

(Page.2)



図：Page-2

人類の長い歴史の中で、人類が化石燃料を使用した期間は非常に短い。そして、太陽エネルギーや地熱が化石燃料を作る時間よりも遥かに短い時間で、人類が利用可能な化石燃料を使い切ってしまう可能性が高い。化石燃料が地球からなくなる、というわけではなく、徐々に使いにくくなり、そのうち容易に使えるエネルギー資源ではなくなる、ということである。

そこで、将来、人類が消費するエネルギー量はどのように推移するであろうか、との問いかけが生まれる。図に示すように、増えるというシナリオも減るというシナリオも描くことができる。人類が、どれを選択するか、という問題であろう。

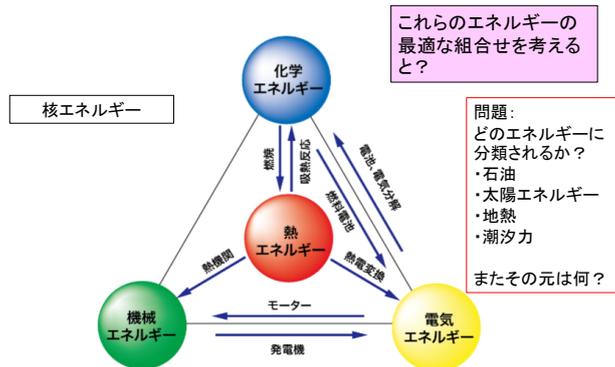
## 1.2 化学エネルギー、機械エネルギー、電気エネルギー、熱エネルギー、そして核エネルギー

(Page.3)

我々の使用できるエネルギーは、大別して、化学エネルギー、熱エネルギー、力学的（機械）エネルギー、電気（磁気）エネルギーに分類される。その種別のエネルギー間で、相互に変換することができる。この他に、核エネルギーについては、例えば、核分裂炉により中性子のエネルギーを熱エネルギーに転換できるものの、未だ核エネルギーを作る方法を知らない。

化石燃料は貯蔵された化学エネルギーに対応し、太陽エネルギーは元は核融合によるものであるが、電磁波として地球に届けられる。地熱は熱エネルギーとして利用できるが、その元は地球が誕生した時の熱と蓄熱された太陽エネルギーによるものとの説が有力である。また、潮汐力は、地球の自転・公転運動、月の公転運動に

# エネルギー形態とエネルギー変換

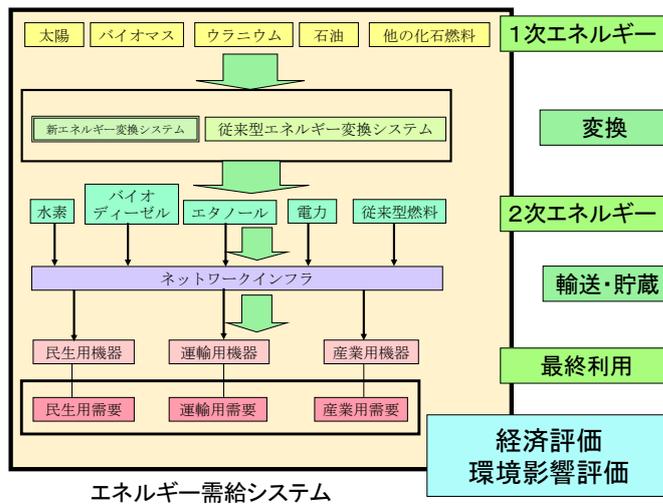


図：Page-3

よるものである。

人類には、今利用可能な、化学エネルギー、電磁エネルギー、核エネルギーなどのエネルギーをどのようにどのような目的に利用するのがいいか、との問題が課せられているといえよう。

(Page.4)

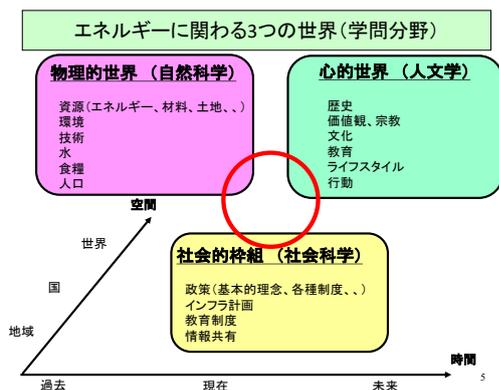


図：Page-4

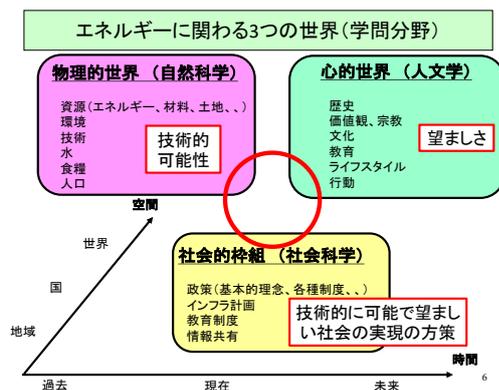
4 ページの図は、エネルギー需給システムにおける「エネルギーの流れ（エネルギーフロー）」を示している。我々が初めてエネルギーとして利用できる資源を一次エネルギーと呼ぶ。この一次エネルギーをエネルギー変換することにより、人類にとって使いやすい、電力、都市ガス、石油製品などの二次エネルギーを得る。もちろん、二次エネルギーから更に別の二次エネルギーを作ることもある。そして、この二次エネルギーを利用者のところに運んで、また必要があれば貯蔵して、多様な目的に利用する。エネルギー需給システムの設計の対象は、まさに、この図の詳細を定量的に決めることにある。

## 1.3 エネルギーに関わる 3 つの分野：「自然科学」、「人文学」、「社会科学」

(Page.5)



図：Page-5



図：Page-6

エネルギーの利用は、通常、技術を取り扱う自然科学、その中の工学と密接な関係を持つと考えられている。しかし、エネルギーを使うのが人間である以上、何のためにエネルギーを使うのか、エネルギーを使うための社会での制度や規則として、どのようなものが必要なのか、についても、エネルギーの利用に際して考える必要がある。

近年話題になっている、電力システム改革は、電力需給に関わる様々な技術的な可能性と限界を踏まえた上での社会科学の分野での議論である。

Page-5の図に示すように、学問の分野は、音楽や美術などの創作に関わるものを除くと、大きく、自然科学、人文学、そして、社会科学に分けられる。

科学とは何か、については、ここでは論じないこととして、エネルギーに関わる問題を、この3つの学術分野と結びつけて考えると、エネルギー資源の採掘、精製、利用などに関わる技術は自然科学の分野、エネルギーをどのように利用するのが人間にとって望ましいのか、という問題は人文学の分野、そして、技術的に可能で、人間にとって望ましい、エネルギー需給システムを、社会で普及させるための方策は社会科学の分野での課題ということになる（Page-6の図参照）。

このように、エネルギー需給の問題を考えることは、広く、自然科学、人文学、そして、社会科学に関係することが理解できよう。この広範な領域にまたがる「エネルギー」に関する学問、すなわち、「エネルギー学」の研究をどのように進めればいいのか、についてはいろいろな提案もなされている、複合領域分野の創設、共同学術研究グループの形成、などはその一例である。ただ、まず何よりも大切なことは、各個人が、種々の学術分野に関する内容に興味を抱くことであろう。

## 1.4 エネルギーシステム学とは:ミクロとマクロの視点から同時に考えること

(Page.7)

ここで、「システム学」について簡単に説明しておこう。

さて、エネルギー需給システムには、いろいろな産業、人間が関係し、そこには、技術、価値観、そして社会制度などの広範な学術分野が絡んでくることを理解して頂いたと思う。

このように、エネルギー需給システムは、どの視点から対象を眺めるか、によって検討すべき課題も変化する。そのような多様性がエネルギーシステムには本質的に存在するといえよう。

Page-7の図に示すように、一般に「システム」とは、種々の構成要素が互いに影響を及ぼすことにより、個々の要素の挙動自体が変化すると同時に、システム全体の挙動も創生・変化する特徴を持っている。この点も、エネルギー需給システムを考える際に忘れてはならないことである。

ここで特に強調したいことは、「個々の要素の視点と全体の挙動の視点、すなわち、「ミクロ」と「マクロ」の視点で同時に対象を眺めることの大切さ」である。ミクロの視点については、要素ごとの視点があり、さらに各要素ごとの視点の中でも、自然科学や人文学、社会科学などで見方は異なるため、その視点は無数にあると言っ

## エネルギーシステム学について

- **システムとは:**  
要素間の相互作用の結果、各要素及び全体の挙動が生まれる。
- **人間を含むシステムの個々(ミクロ)の挙動と全体(マクロ)の挙動**  
に関心がある。
- 異なる視点から同時に眺める

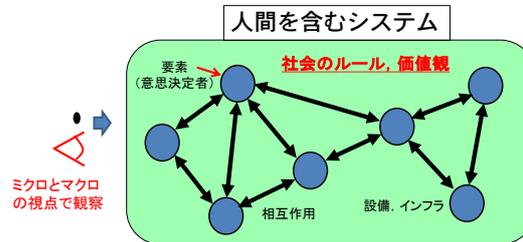


図 : Page-7

て良い。もちろん、そのすべてを考慮する必要はなく、システムの分析や設計に当たる人が必要と考える視点を、自分自身で考えれば良い。

そして、そのときに、選択したいいくつかのミクロとマクロの複数の視点から「同時に」対象システムを眺めることと、複数の視点の中に「マクロの視点」をその中に常に含めておくことを忘れてはならない。そのことが、エネルギー需給システムに取り組もうとする人に、ユニークで効果的な視点をもたらすことになろう。

## 2 エネルギー需給システムの分析・設計・評価：技術と人間の視点

(Page.9-12)

Page-9 から Page-12 には、エネルギー需給システムに対して、技術と人間が多様な形で関わる様子を示す。

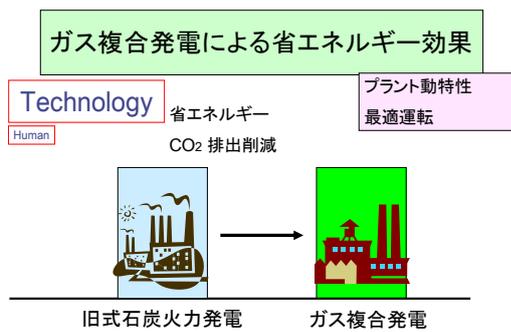
まず、Page-9 は、旧式の石炭火力発電が新型のガス複合火力発電に置き換わった場合の CO2 排出削減効果を推定する場合であるが、この場合には、発電の技術特性が分析の中心であり、電力消費量の変化も起こりうるが、人間の関わりの影響は小さいといえよう。スライドの中の「Technology」と「Human」の字の大きさにより、各スライドの問題における「技術特性」と「人間の特性」の重要性の比較結果を表現している。

Page-10 は、ビルにおける種々のエネルギー機器の導入に関する意思決定を表している。エネルギー変換の過程だけを考えると技術特性を考えていれば良いと思われるが、居住者にどのような住環境を提供するのか、の判断は、居住者の感性やビルのオーナーの経営判断にも関わり、その設計にあたっては、いわゆるステークホルダ（利害関係者）の考え方を検討に含めることが必要となる。Page-9 と比較して、Human の大きさが大きくなっているのは、人間の判断がより必要となる状況を反映している。

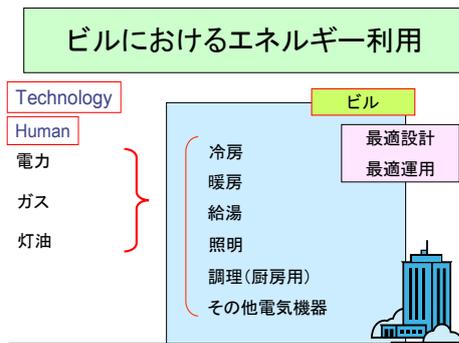
Page-11 は、都市における交通システムの計画問題で、交通機関の組み合わせの最適設計（望ましい設計）を考えるものである。この問題では、各種交通機関（交通モードと呼ばれる）の技術特性の問題よりも、交通機関利用者の選好に依存した交通モード選択行動が重要な役割を担う。その判断基準は、所要時間や費用だけではなく、利便性、快適性、環境負荷など、多岐に及ぶ。「Human」のサイズが大きくなる所以である。人間の判断がより重要となることが理解できよう。

Page-12 はエネルギー税の設計問題の例である。ここでは、例えば、税の導入による製品価格の変化が、国民の商品購入行動に影響を及ぼし、それが各種企業の生産行動に、そして、国内総生産（GDP）などのマクロ経済に影響を及ぼす。その因果関係の連鎖は非常に複雑なものとなる。この例では、人間の巨視的な行動が分析作業の重要な検討対象となる。

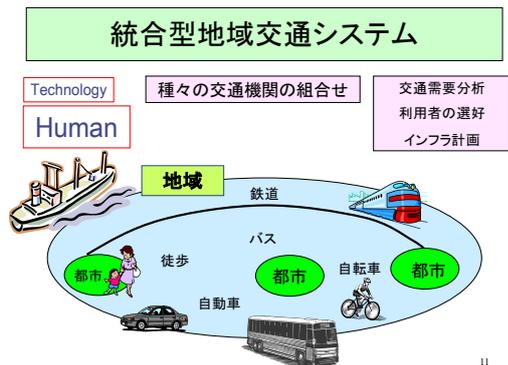
このように、対象とするエネルギー需給システムと、そのシステムに対して考えるべき問題により、考慮すべ



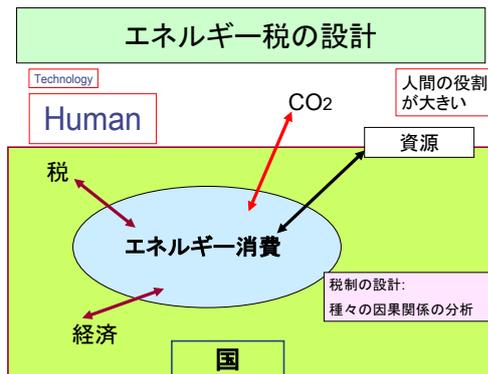
図：Page-9



図：Page-10



図：Page-11

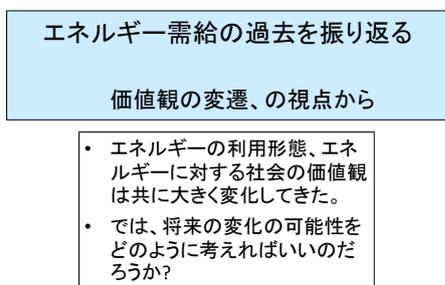


図：Page-12

き内容が、技術特性から人間の特性まで大きく変化することが見て取れる。個々のシステム構成要素とシステム全体の挙動に関わる多様な視点が、システム分析で重要な役割を果たすことが理解できよう。

### 3 エネルギー需給の歴史と価値観の変遷：技術開発と社会における価値観の関係

(Page.13-21)



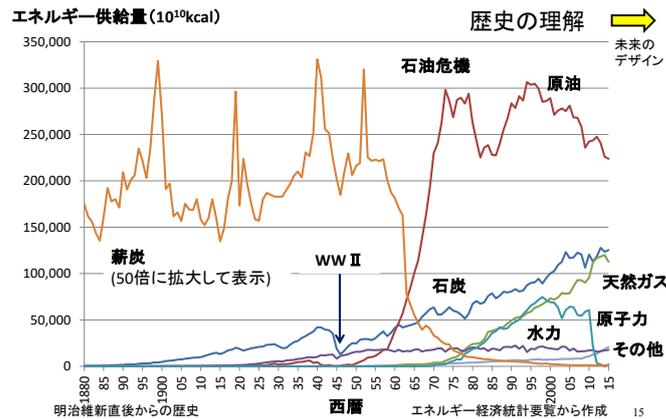
図：Page-13



図：Page-14

ここでは、まず、日本におけるエネルギー利用の歴史を眺め、エネルギー需給の変化が生じた要因を調べてみたい。もちろん、それは、将来のエネルギー需給変化の可能性を考えるためでもある。

## 日本のエネルギー供給構造の推移



図：Page-15

Page-15の図には、日本エネルギー経済研究所が作成しているエネルギー経済統計要覧に記載されている過去約140年間の日本のエネルギー国内供給量（超長期エネルギー統計）をグラフにして示している。ここで薪炭の国内供給量だけは、量が極めて小さいため50倍に拡大して示しているのので、注意されたい。薪炭は、特に第二次世界大戦前の家庭におけるエネルギー消費の様子を知る上で大変重要である。

まず、大まかなエネルギー供給の変化の傾向を見ておこう。

日本の化石燃料利用の歴史は、第二次世界大戦後に始まったと言える。安価な原油の利用技術が開発されるに従い、原油の供給量は指数関数的に上昇することとなった。それに伴い、日本は昭和40年代にアジアの奇跡と呼ばれる経済成長を果たし、国民の生活様式も大きく変化し、薪炭の消費量は指数関数的に激減することとなった。Page-14に炭の写真を掲載しているが、今は、バーベキューやお茶会などの特別な用途にしか利用されていない。

その、いつまでも伸び続けると思われた石油の消費量であったが、1978年の石油危機で石油価格が10倍以上に跳ね上がったことを受けて、その伸びが緊急停止する。その時の社会がうけた精神的なダメージはなかなか想像が難しい。ただ、その石油危機以来、もはや原油の消費量が大きく伸びる現象は見られていない。最もバブル経済期には一時的に伸びが復活はしたけれども、それは正に一時だけのことであった。

石油危機の折に導入が開始されたエネルギーが原子力と（液化）天然ガスである。天然ガスについては、輸入のための液化技術の開発が必要であった。共に、遙か前から技術開発の準備が進められていたもので、石油危機が生じたから導入されたということでは決してないが、そのタイミングが見事に一致しているのは、特に他国と比較したときに興味深く思われる。

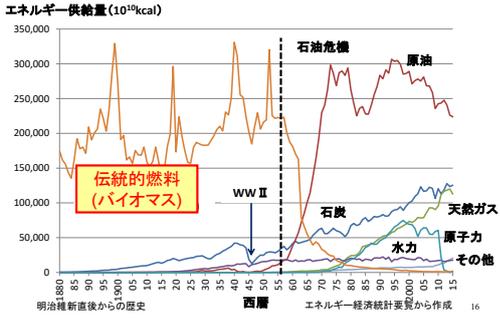
一方、石炭の消費量が着実に増加していることも、日本のエネルギー消費の一つの特徴である。当初は国産の石炭を利用していたが、地下の炭鉱が掘り進むにつれてどんどんと深くなるにつれて、海外石炭との価格差が大きくなり、ついに、すべての炭鉱の商業生産を取りやめざるをえなくなった。

水力発電は、戦後日本経済を支えるエネルギー源として、当初、大規模な開発が進められたが、その後、量的な限界があるとして火力発電に基幹電源の座を譲ることとなった、

この約140年間のエネルギー利用の歴史は、6つの期間に分けることができる。その様子をPage-16～21に示す。すなわち、

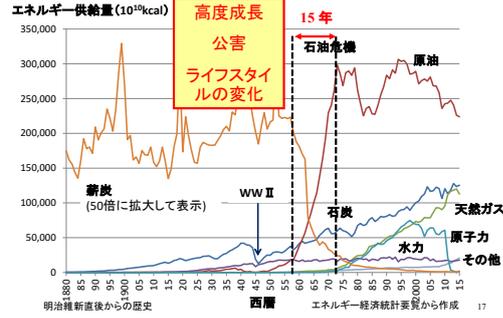
1. 伝統的燃料（薪炭、今の呼び方ではバイオマス）の時代
2. 高度経済成長の時代
3. 省石油の時代
4. バブル経済

### 日本のエネルギー供給構造の推移



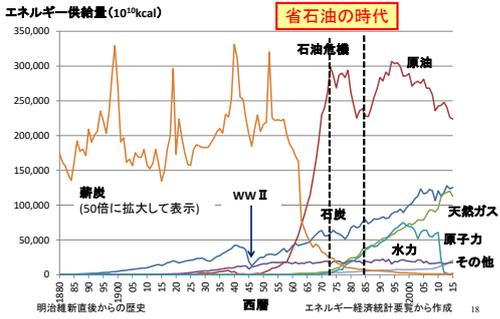
図：Page-16

### 日本のエネルギー供給構造の推移



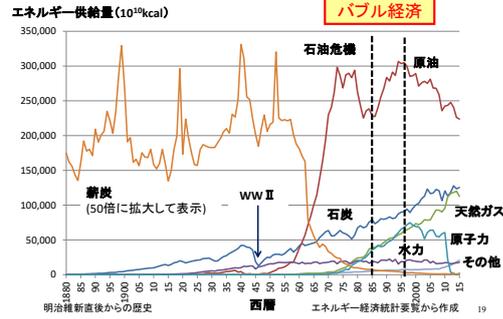
図：Page-17

### 日本のエネルギー供給構造の推移



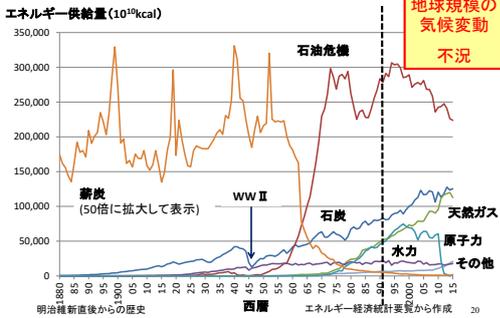
図：Page-18

### 日本のエネルギー供給構造の推移



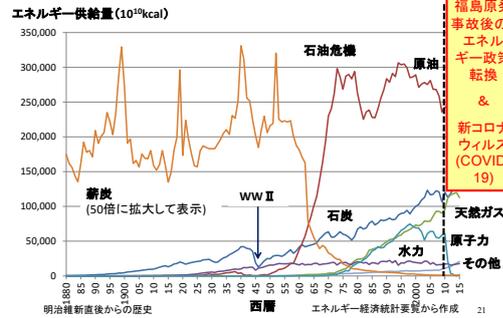
図：Page-19

### 日本のエネルギー供給構造の推移



図：Page-20

### 日本のエネルギー供給構造の推移



図：Page-21

5. 地球規模の気候変動+経済不況、の時代
6. 前項に加えて、福島原発事故後のエネルギー政策転換期

これにコロナウィルスの影響が記されるようになるかどうかは、今後の状況変化次第ということにはなろう。

ただ、今を生きる我々日本人としては、エネルギーシステムの視点から見たときに、温室効果ガス排出削減、原子力政策、そしてウィルス対策の3つの問題に、今まさに直面していることが理解できよう。

さて、以下では石油燃料を対象として、社会の状況に応じて社会での石油に対する価値観が変化していった様子を簡単に眺めてみよう。

### 3.1 価値観の変化 (1) : 「エネルギーと公害」

(Page.22 - 31)

石油化学工業が登場するまでは、その消費量も僅かなものであった。戦後、中東での油田発見を受けて、世界における原油の消費量が急速に伸びることとなる。しかし、原油には硫黄成分が含まれており、当初は脱硫の技術も開発されてはいなかった。その状況を示す写真が Page-24 の左上のものである。三重県四日市市では昭和 36 年に石油コンビナートが完成、運転開始直後から深刻な大気汚染問題が発生することとなった。



図 : Page-24

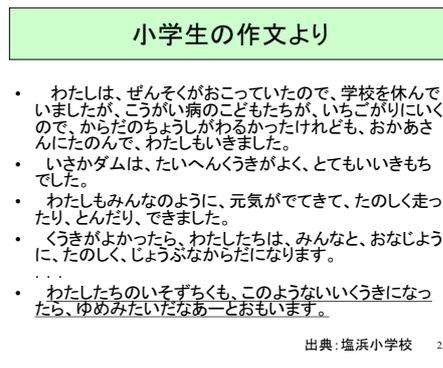


図 : Page-25

大気中に放出された硫黄酸化物により多くの喘息患者が生じたが、戦後復興を第一の目標に掲げている日本では、そのような光景も Page-24 の右下のような絵に変えられてしまう。オレンジ色は将来の夢を表すものと解釈できる。煙の向こうに経済復興の夢を描いていた社会にとっては、硫黄酸化物排出への対策は思いもよらなかったことかもしれない。

Page-25 の小学生の作文も、当時の価値観を如実に表しているものと言えよう。いい空気になることが「夢」であった社会が存在したこと、これを今に置き換えると、「今、叶わぬ夢と我々が考えていることも、将来では、誰からも当然のことと考えられている」ことを意味している。皆、色々と思いが当たることのあるのではないだろうか。

Page-26 に示すように、この事態は昭和 42 年の公害対策基本法の施行によって一変する。何よりも、公害、という概念が、このときに初めて登場したことは、特筆に値する。いまでは誰でもが知っている「公害」が、歴史の浅い概念であったことは、大変興味深い。

技術がなければ公害対策は進めようがない。石油の利用を止めるしか方法がないためである。

ちょうどその頃、Page-27 に示すように、排気ガスの中から硫黄分を除去する排煙脱硫装置の技術が外国で開発された。日本はその技術を輸入、改良して、また、三元触媒などの技術開発とも相まって、Page-28 に見るように、大気中の硫黄酸化物の濃度を人間の健康に問題のないレベルにまで下げることに成功した。このことは世界で稀に見る公害対策の成功例としても知られている。公害対策基本法という法律と排煙脱硫や三元触媒という技術開発とが両輪となって、公害対策に寄与したのであった。

ただ、Page-30 に示すように、最初の基本法には、経済条項と呼ばれる、人命と経済とを天秤にかけても良い、とする文章が含まれていたことも特筆に値する。当時の多くの人の公害問題に対する価値観がここに現れていると言えよう。(コロナウィルスに対する各国政府の対策のことを思い出す方も多いかも。必ずしも昔話ではないのであろう。いや、最近の経済重視の傾向は昔の状況以上かもしれない。経済を無視しろと言っているのではない。どちらを取るか、と言う二者択一ではなく、双方を活かす第3の道を探ることの重要性を認識できないはずはないのであるが。)

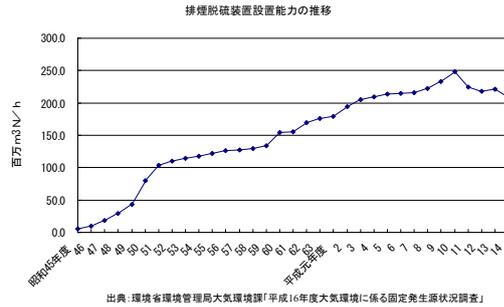
以上をまとめると、公害問題の経験を経て、Page-31 に示すように、「湯水のように使える便利な物」から「大

## 四日市公害の歴史

- 昭和30年
  - 四日市に石油コンビナート建設決定(完成S36)
- 昭和38年
  - この頃より住民運動が活発化
  - 県医学会で亜硫酸ガスと発作の関係を発表
  - 第2コンビナート本格稼働
- 昭和39年
  - 四日市市立小学校、幼稚園に空気清浄機設置(189台)
- 昭和40年
  - コンビナート工場の高煙突化
  - 「四日市公害患者を守る会」結成
- 昭和42年
  - 「三重県公害防止条例」公布
  - 「公害対策基本法」公布、施行

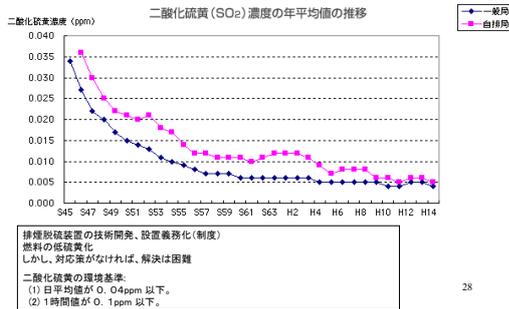
図：Page-26

## 排煙脱硫装置の設置能力



図：Page-27

## 二酸化硫黄濃度の推移



図：Page-28

## 公害対策基本法

- (公害の定義)
- 第2条 この法律において「公害」とは、事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわたる大気の汚染、水質の汚濁(水質以外の水の状態又は水底の底質が悪化することを含む。第9条第1項を除き、以下同じ。)、土壤の汚染、騒音、振動、地盤の沈下(鉱物の掘採のための土地の掘さくによるものを除く。以下同じ。)及び悪臭によって、人の健康又は生活環境に係る被害が生ずることをいう。
- ・放射性物質、二酸化炭素(温室効果ガス)が含まれていないことに注意。

図：Page-29

## 公害対策基本法

- 1967年:「公害対策基本法」制定。
- 国民の健康で文化的な生活を確保するうえにおいて公害の防止がきわめて重要であることを明確化し、公害の定義、国・地方公共団体・事業者の責務、被害者救済、費用負担、などを定めていた。
- 当時の価値観をよく表している条項(経済条項):  
「環境基準とは維持されることが望ましい環境上の条件に関する基準であり、その設定に当たっては産業間の相互調和をはかるよう考慮されなければならない」  
(1970年に削除)
- 地方自治体と企業との公害防止協力が効力
- 1993年:「環境基本法」制定

図：Page-30

## エネルギーに対する価値観の転換

- 石油に対する価値観の変化
  - 湯水のように使える便利なもの
  - ↓
  - 大気汚染の源
    - きれいに(他人の健康に害が及ばないように)使わなくてはならない
- 現在から過去を振り返ること、現在から将来の変化を考えることの本質的な違いを感じ取ることが重要。

図：Page-31

「気汚染の源であり有害物質を輩出しないように使わなければならない物」へと原油に対する価値観の転換があったと言える。

現在から将来を考えるとときには、将来においても大きな変化を考えないことが多いが、過去を眺めると大きな価値観の変化があったことが分かる。例えば、オイルショックの前に戻ったときに、オイルショック後の状況を想定することができたであろうか?そのような想像力が大切なのであろう。

### 3.2 価値観の変化 (2) : 「石油危機」

(Page.32 - 38)

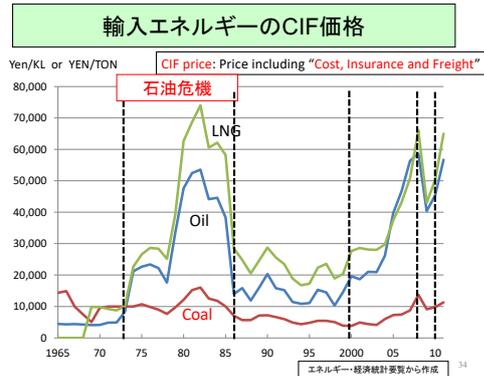
石油危機も石油に対する価値観を大きく変えた出来事の一つである。きれいに使うべきもの、という考え方に、さらに、大切に使うべきもの、という、今では当然ともいえる価値観が加わった (Page-33)。Page-34 に示されているように、第一次、第二次の2回にわたる石油危機により石油価格が10倍以上に跳ね上がったのである。

#### エネルギーに対する価値観の転換

- 石油に対する価値観の変化
  - 大気汚染の源(きれいに使いべきもの)
- ↓
- 高価格(大切に使うべきもの)
  - 石油から石炭の高度利用(液化、ガス化)へ
- エネルギー経済学への注目
  - エネルギー価格とエネルギー消費、GDPとの関係分析

33

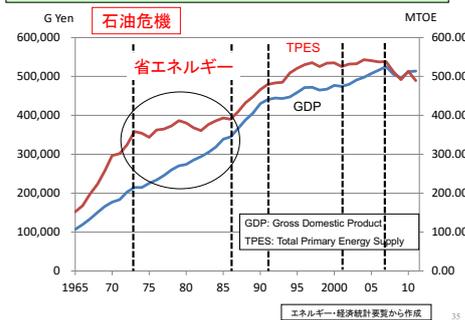
図 : Page-33



34

図 : Page-34

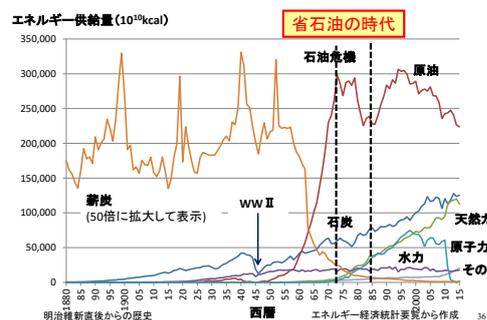
#### 日本のGDPとTPES



35

図 : Page-35

#### 日本のエネルギー供給構造の推移



36

図 : Page-36

#### 石油危機と当時の研究テーマ

- 脱石油: 石炭、天然ガスからの液体燃料(灯油、軽油、ガソリン、メタノール)の合成(直接液化、間接液化)、重油分解、
- 石炭ガス化、1C化学(ガス化+燃料油合成)、水素利用、
- サンシャイン計画(太陽光・熱、地熱、石炭液化・ガス化などの新エネルギー開発)とムーンライト計画(省エネルギー、電池などの開発)、日本での太陽熱利用の失敗の歴史(仁尾町の太陽熱発電、朝日ソーラーによる太陽熱温水器)
- エネルギー利用の高効率化と省エネルギーの概念の登場、それまでは、省エネルギーの必要性がなかった、
- エネルギー価格と経済成長との関係の分析・モデル化研究の流行、大規模最適エネルギー需給計画の登場(計算機技術の発展)
- 石油価格の予測モデルの開発(OPEC(石油輸出国機構)による石油価格の決定構造の分析(1970年代)、後、自由化(、1980年半ば以降))

37

図 : Page-37

#### 省エネルギーとは？

- 何のために省エネルギーをするのか？
  - 有限資源を未来に残す。省エネルギーのため？
- 究極の省エネルギーとは？
  - 寝てればいい？人間がいなくなる？
- エネルギー消費量を減らすと生活の快適さ、充実度は減るのか？
  - 必ずしもそうではない。エネルギー消費は、それ自体が目的ではないから(派生需要)。
  - エネルギー消費の目的が大切！

38

図 : Page-38

石油危機前の石油の価格も衝撃的である。1リットルあたり4円程度という石油価格では石油を節約しようという発想は生まれにくい。誰でも、効率が悪くても安い機械を選ぶであろう。そして、石油危機を契機として省



**地球温暖化における仮説：エネルギー資源学会誌より  
(専門家間でも対立)**

世界の二酸化炭素、メタン及び一酸化二窒素の大気中濃度は、1750年以降の人間活動の結果、大きく増加してきており、氷床コアから決定された、工業化以前何千年にもわたる期間の値をはるかに超えている。世界的な二酸化炭素濃度の増加は、第一に化石燃料の使用及び土地利用の変化に起因する一方、メタンと一酸化二窒素については、農業による排出が主な要因である。

気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。

古気候に関する情報によって、過去半世紀の温暖な状態が、少なくとも最近1300年間において普通ではないとの考察が裏付けられている。

20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が非常に高い。識別可能な人間の影響が、気候の他の側面(海洋の温暖化、大陸規模の平均気温、異常高低温や嵐の分布)にも及んでいる。

温室効果ガスの排出が現在以上の割合で増加し続けた場合、21世紀にはさらなる温暖化がもたらされ、世界の気候システムに多くの変化が引き起こされるであろう。その規模は20世紀に観測されたものより大きくなる可能性が非常に高い。

図：Page-44

**地球温暖化に関する仮説群  
(不確実性を前提とした対策であることを認識)  
(吉田：エネルギー資源学会誌、2009年1月)**

- 大気中の温室効果ガス濃度が上昇している。(Y/N)
- 二酸化炭素濃度上昇は、化石燃料の利用と土地利用変化が主な原因である。(Y/N)
- 地球の気候は温暖化している。(Y/N)
- 温暖化の主要な原因は、人為起源の温室効果ガス排出量の増加である。(Y/N)
- このまま温室効果ガス排出量が増え続けると、さらなる温暖化がもたらされる。(Y/N)

45

図：Page-45

しかし、一方で「環境と開発に関する国際連合会議」におけるリオ宣言の第15原則に、下記の「予防的方策」に関する記述がある (Page-46)。

「環境を保護するため、予防的方策は、各国により、その能力に応じて広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するための費用対効果の大きい対策を延期する理由として使われてはならない。」

温室効果ガスの影響を完全に否定できる場合を除いて、影響に多少の不確実性があっても、温室効果ガス排出が深刻な影響をもたらす可能性のある場合には、排出削減の対策を講じるべきとの結論に至る。

科学的な因果関係の分析の継続は言うまでもなく必要であるが、科学的な議論と政策に関わる議論とは、その目的が異なることに注意すべきである。

特に、気候変動等の議論の前に、Page-49にあるように、まず、貧困問題や公平性の問題を解決すべきであることも忘れてはならない。近年よく議論されているSDGs(Sustainable Development Goals)も基本的理念は、脱貧困、健康、公平、平和にある。

国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) の第3回締約国会議 (COP3) で、京都議定書が採択され (Page-47)、その後、より大きな削減量を目指したパリ協定が採択された (Page-50)。パリ協定では、産業革命以降の温度上昇を摂氏2度、できれば1.5度に抑えることとなっている。これは、コンピュータシミュレーションを援用すると、2050年までに約50%の、そして2100年にはほぼ100%の温室効果ガス排出を世界全体で抑制することに相当することが示される (Page-51)。

このような温室効果ガス排出に関する状況を受けて、種々の研究課題が進行中である (Page-52)。その内容を見ると、石炭に対する考え方などは顕著に変化しており、研究課題が、社会におけるエネルギーに対する考え方の影響を受けていることが理解できよう。

Page-53には、これまでに述べてきた石油に対する社会の価値観がどのように変化してきたかを整理して示している。もちろん、この変化で終わりではなく、さらに次の変化も重要であり、その内容を想定した新たな技術開発に取り組むことが大切である。

**環境と開発に関する国際連合会議(1992年)**  
(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)

- ・ リオ宣言の第15原則:
  - 予防的方策 (Precautionary Approach) について: 「環境を保護するため、予防的方策は、各国により、その能力に応じて広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するための費用対効果の大きい対策を延期する理由として使われてはならない」。
- ・ アジェンダ21: リオ宣言のための行動計画
- ・ 気候変動枠組条約 (UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change) => COP3: 京都議定書 (1997年)
- ・ 生物多様性条約
- ・ 森林原則声明 (南北対立で条約に至らず)
  - 全ての種類の森林経営、保全及び持続可能な開発に関する世界的合意のための原則声明 (熱帯雨林、温帯雨林)

図: Page-46

**京都議定書の内容(1997年)**  
2005年2月16日 発効

- ・ 国連気候変動枠組条約 (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) に関わる第3回会合 (COP3, Conference of the Parties) で採択。
- ・ 既に工業化を遂げた38ヶ国全体で、2008年から2012年にかけての平均年間温室効果ガス排出量を、1990年値に対して、少なくとも5%削減する (国別に決定)。(欧州: 8%、~~米国: 7%~~、日本: 6%)
- ・ 温室効果ガス: 二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>

**世界規模での合意形成が重要**

図: Page-47

**石油危機と地球温暖化の相違**

- ・ 石油危機時代の省エネルギーの考え方
  - エネルギー利用コスト上昇下での経済活動・生活レベルの維持、成長
- ・ 現在の低炭素社会 (あるいはゼロエミッション社会) の考え方
  - 化石燃料消費量の制約の下での経済活動・生活レベルの維持、成長

- ・ 成長の「最大化」と排出の「制約」の違い

図: Page-48

**21世紀への行動指針(1984年)**  
by Aurelio Peccei (ペッチェイ、ローマクラブ会長)

- ・ 人類の定住 (急増する人口の収容)
- ・ 自然保護 (生物多様性の維持)
- ・ 組織の管理 (自己の利益のみ追求するのではない分散国家)
- ・ 人間の開発 (すべての人に教育の機会を)
- ・ 非暴力社会 (上記について: 平和であることが基本的要件)

図: Page-49

**パリ協定 (Paris Agreement at COP21, 2015年)**

- ・ 世界共通の長期目標として2°C目標のみならず1.5°Cへの言及
- ・ 主要排出国を含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新すること、共通かつ柔軟な方法でその実施状況を報告し、レビューを受けること
- ・ JCM (Joint Crediting Mechanism) を含む市場メカニズムの活用が位置づけられたこと
- ・ 森林等の吸収源の保全・強化の重要性、途上国の森林減少・劣化からの排出を抑制する仕組み
- ・ 適応の長期目標の設定及び各国の適応計画プロセスと行動の実施
- ・ 先進国が引き続き資金を提供することと並んで途上国も自主的に資金を提供すること
- ・ イノベーションの重要性が位置づけられたこと
- ・ 5年ごとに世界全体の状況を把握する仕組み
- ・ 協定の発効要件に国数及び排出量を用いるとしたこと
- ・ 「仙台防災枠組」への言及 (COP決定)

図: Page-50

**IPCC第5次評価報告書(2014)から**

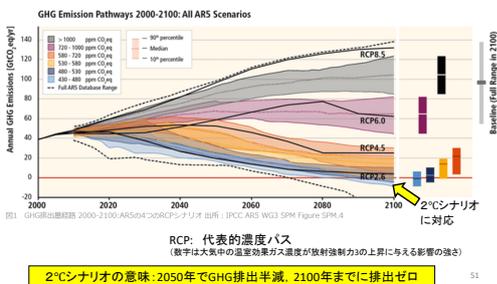


図: Page-51

**地球規模の気候変動問題と研究テーマ**

- ・ 脱化石燃料、石炭、石油から天然ガスへ、電力シフト等
- ・ 再生可能エネルギーの利用
  - 太陽光、風力、地熱、海洋エネルギー、バイオマス (森林、草、藻、廃棄物) の燃焼、液体燃料合成 (アルコール)、ガス化 (CO+H<sub>2</sub>)、水素製造
- ・ 二酸化炭素排出量の削減 (＊)
  - エネルギー消費量の削減、高効率化 (技術、経済インセンティブ)
  - CO<sub>2</sub>市場の創設
  - 大気中への排出抑制、CCS (Carbon Capture and Storage (Sequestration)), 炭素固定 (森林育成、炭素生成)
  - 水素、電力へのシフト (End Useからの排出抑制)
- ・ ライフスタイルの変化、IT技術の利用 (Home Energy Management System等)
- ・ 都市構造の変化 (Community Energy Management System等)

図: Page-52

**石油に対する価値観の変遷と技術開発目標**

1. 爆発しやすい危険な液体
2. 安くて便利なエネルギー源 (高度成長期)
  - ・ 利用技術の開発
3. 公害 (大気、水質汚染) の源 (四日市公害)
  - ・ 硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>)・窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の除去
4. 限りある貴重な資源 (石油危機)
  - ・ 省エネルギー、脱石油、石炭等の代替燃料の利用
5. 限りある大気環境 (地球規模の気候変動)
  - ・ 省エネルギー、二酸化炭素排出削減、脱化石燃料
6. 次は?

**技術開発が社会における需要を創生。技術開発の目標は社会の価値観に依存。**

図: Page-53

### 3.4 「エネルギー政策の考え方について」

(Page.54 - 59)

長期ゼロエミッションに向けて  
 Toward Strong Weak Target  
 茅 陽一, 山口光恒, 秋元圭吾 著  
 エネルギーフォーラム新書, 2017年発行

- パリ協定で目標としている, 2050年までに世界でのCO2排出を半減, 2100年までにCO2ゼロエミッションを達成するためには, 多大な費用を要することを指摘している。そしてこのような実現困難な厳しい目標(Weak Strong Target)を掲げて対策に苦しむよりは, 実現容易な目標に向かって努力すること(Strong Weak Target)が結果として有効であると主張。
- 問題の難しさを象徴。

図 : Page-54

バイオマスに対する考え方の変化

1. 文明の盛衰に関与
  - メソポタミア文明、クエタ文明、...
2. 工業用利用(製鉄など)による森林破壊
3. 化石燃料による代替(産業革命)
  - 以降、伝統的エネルギーと呼ばれる
4. 再生可能エネルギーとして注目(石油危機)
5. カーボンニュートラル資源として注目(地球環境問題)
6. そして、炭素(有機物)資源？

社会は、技術、価値観とともに  
 変化し続ける。

図 : Page-55

福島第一原子力発電所事故(沸騰水型軽水炉)

手前から1号機~4号機(事故前)

3号機と4号機

概要:

- 地震による外部電源喪失、津波による浸水による直営電源喪失(冷却機能喪失)
- 燃料の損傷(燃料棒)による温度上昇、水位計故障
- 冷却材(水)喪失(ボイルオフ事故、燃料露出)
- 燃料被覆管の温度上昇(~1000度以上)
- ジルコニウム-水反応(発熱酸化反応、水素発生)
- 爆発的溫度上昇による炉心溶融、水素発生
- 水素爆発

参考: [http://www.aec.go.jp/policy/safety\\_security/pdf/120406-5.pdf](http://www.aec.go.jp/policy/safety_security/pdf/120406-5.pdf)

図 : Page-56

福島第一原子力発電所事故に関連して

経験のないことには、人はみな傲慢だ。  
 紙を渡く経験をしてから謙虚になるのでは愚かだ。  
 めったに紙など渡く経験はできないから、  
 そいつは一生傲慢でおしまいになっちゃうだろう。

幸田文「ちぎれ雲」より、文の父 幸田露伴の言葉  
 阿部清治: 原子力のリスクと完全規制, 第一法規

原子力政策の転換点

図 : Page-57

一次エネルギー供給の推移

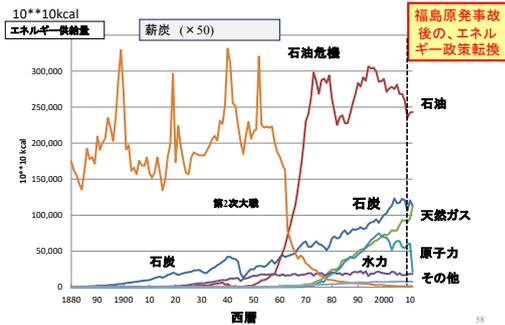


図 : Page-58

一次エネルギー供給の推移



図 : Page-59

さて、ここで、エネルギー需給に関わる種々の目標達成のための、エネルギー政策策定の考え方について、簡単に述べておきたい。前述のパリ協定での摂氏 1.5度 上昇に産業革命以降の温度上昇を抑える、との案については、実現可能性に関わる反対意見も多い。実現不可能な政策を掲げると協力する国が減り、温室効果ガス排出削減に対して逆効果であるとの意見もある (Page-54)。

このような問題については、今後さらに多くの議論が必要であろうが、本当に実現不可能なのかどうかについても、そろそろ真剣に考える時がきているようである。個人的な意見であるが、経済は目的ではなく、あくま

でも幸せな世界を実現するための道具に過ぎない。それが、幸せな世界を実現するための制約となるとすれば、考え方の基本的な前提条件を変えることも検討すべきであろう。

バイオマスについても、いろいろな技術開発の歴史は長い（Page-55）、社会における利用をイメージしたものとはなっていない。このようにエネルギー密度の低い資源の利用は、エネルギーだけを視野に入れてもなかなか社会は動かないものである。バイオマス利用を含めた社会全体の物語性を議論に含める必要があろう。

近年のエネルギー需給システムに大きな影響を及ぼしたのものとして、福島の原子力発電所の事故が挙げられる。Page-56にその説明を掲げておく。避けることのできた事故と言われ、非常に残念ではあるが、Page-57に示す意見から分かるように、経験のないことに対する想像力が求められているのであろう。科学がエビデンス（根拠）に基づくものでなければならないのはその通りであるが、エビデンスの中に想像力による議論も含めるべきなのであろう。Page-58に「示す歴史の考察から、あらゆる知識や経験を総動員してPage-59のように将来を想像することが、今、求められている。その姿はもちろん一つではない。そして、描かれた将来像には、それなりの根拠も求められる。このための合理的な方法論の開発も、システム学の挑戦課題の一つである。その描かれた将来像をどのように活用するかも含めて。

## 4 エネルギーシステム学について

(Page.60 – 81)

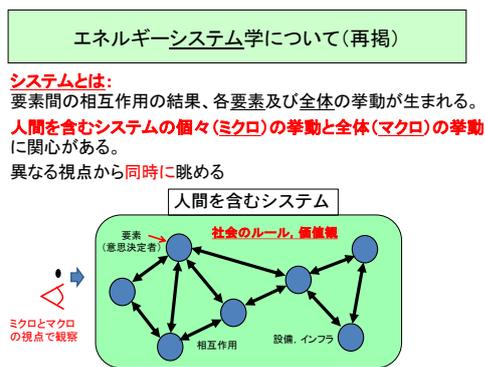


図 : Page-61

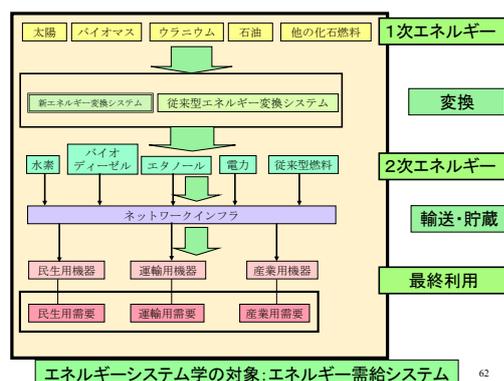


図 : Page-62

### 4.1 だまし絵 (Trick Art) に見る人間の認知特性

ここまで、Page-62に示すエネルギー需給システムを、Page-61に示す「システム」として捉えたときの、いろいろな考え方について説明してきた。

ここで、もう一つ説明しておきたいのは、システムを設計する主体である人間の特性である。

Page-63に示すように、人間には、

- 多様性 (人によって様々)
- あいまい性 (反応を予測できない)
- 思考能力の限界 (複数のことを同時に考えることはできないし、また、考えたことをすぐに忘れる)
- 環境依存性 (周囲の影響を受けやすい)

などの特徴がある。そして、行動規範は基本的には幸せの追求であるが、合理的に判断しているとは言えないところも多い。

いくつかのだまし絵を見ることにより、人間の特性、特に、視覚による認知特性を確認してみよう。

Page-64は、訳のわからない絵ではあるが、Page-65の黄色の部分に注意しながら、Page-66の緑の矢印から

その方向に歩いていくことを想像してみよう。すると、黄色の部分は階段に見えるであろう。

次に Page-67 の緑の矢印の部分からはしごを登っていくことを想像すると、同じ黄色で示した部分は天井につけられたギザギザの装飾に見えるであろう、

このように、人間の視覚による認知特性は、周辺的环境や物語性に大きく依存することが理解される。

Page-68 は、白色に注目すると人間の顔が、黒色に注目すると花瓶が見える。ただ、人間の視覚の生理学的な制約により、その両方を同時には見ることができないと言われている。人間の感覚の限界を示すものである。

## 人間の面白さ

- 人間の存在 → 意思決定(物事の判断)の主体
  - その特徴
    - 多様性(人によって様々)
    - あいまい性(反応を予測できない)
    - 思考能力の限界(複数のことを同時に考えることはできないし、また、考えたことをすぐに忘れる)
    - 環境依存性  
(周囲の影響を受けやすい)
- しかし、人間の幸せが社会の目的
  - どのような社会を作るかが問題、しかし当の人間は？
    - ちゃんと幸せを目指して行動していますか？
    - 夏のクーラーは気持ちいいですか？
    - 夜、明るい部屋で暮らしたいですか？
    - 木を植えることは嫌いですか？

63

図 : Page-63



図 : Page-64

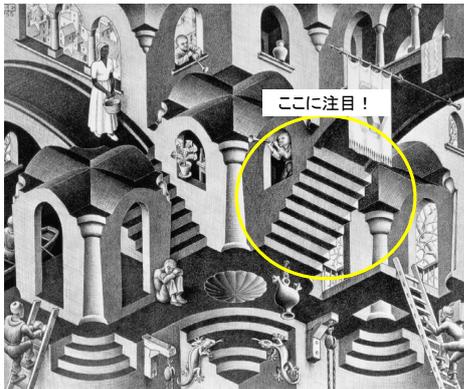


図 : Page-65

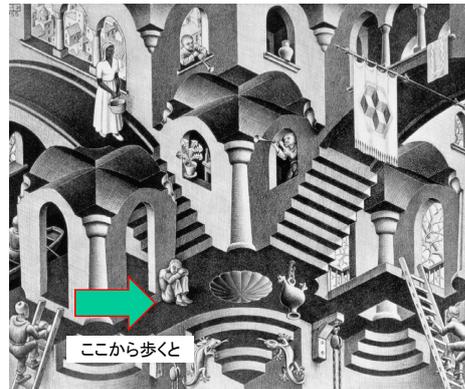


図 : Page-66



図 : Page-67

## 人間の特性 -2-



複数のものを同時に見たときに、それぞれを同時に認識できない場合がある。

68

図 : Page-68

## 4.2 マクロの視点で見る

次に Page-69 の絵を見ていただきたい。見方によって、若い女性(らしき人)の横顔と、おとぎ噺に出てくるような老婆の横顔が見えるであろう。ただ、見えたからといってこの絵が、そのような人(?)の絵であると



人間の特性-3-  
婦人と老婆

- 2人を同時に見ると何が見えるか？
- 婦人でも老婆でもない何か？
- エネルギー学との関係：  
まだ、その全体像を誰も知らない。従来の学問分野からの類推のみでとらえてはならない。

図：Page-69

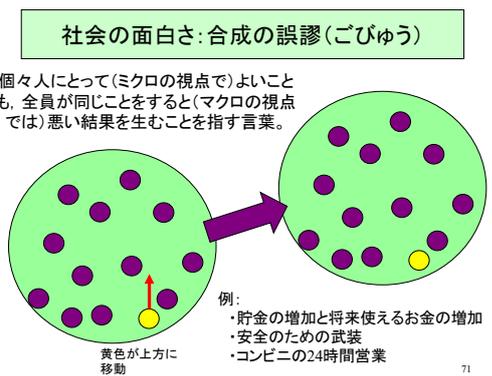


人間の特性-4-  
部分と全体

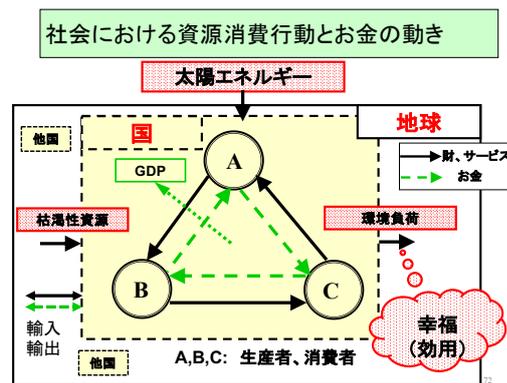
個々の要素と全体システムの関係は認識することは不得意。

M.C. ESCHER  
THE OFFICIAL WEBSITE

図：Page-70



図：Page-71



図：Page-72

は限らない。人間は、何か知っているものが見えたときに、安心して、見ているものがそのようなものであると考えてしまう傾向にある。

この特性があるから、それほど苦勞しなくてもいろいろな複雑な環境を認識できるのであるが、今まで見たことのないものを見るときには、十分に注意しなければいけない。ある瞬間に見えたものと、実は全く異なったものである可能性があるからである。

今まで、既存の学術分野を勉強してきた人がエネルギーについて新たに勉強しようとするとき、それと同様の危険性が生じる。今まで勉強し養ってきた目で、エネルギーを見てしまうためである。エネルギー独自の問題を見落としてしまうかも知れない。

Page-70の絵は、永久機関もどきのだまし絵である。どこかがおかしいことはすぐに分かるが、どこがおかしいと言い当てることは結構難しい。これは、人間にとって全体の構造をマクロ的に理解することが難しいことを物語っている。人間とはそのような生き物なのである。

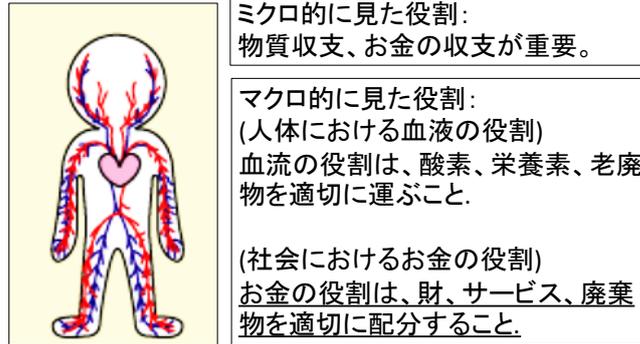
よく知られた言葉に「合成の誤謬(ごびゅう)」がある(Page-71)。個々人にとって(ミクロの視点で)よいことも、全員が同じことをすると(マクロの視点では)悪い結果を生むことを指す言葉であり、

- 貯金の増加と将来使えるお金の増加
- 安全のための武装
- コンビニの24時間営業

などは、その典型的な例である。一人が実行する時と全員が実行する時とで、その帰結が大きく異なることがある。でも、うっかりすると、ミクロの考え方をそのままマクロに当て嵌めてしまう人間は、やはり、マクロ的に考えることが苦手なのであろう。

このミクロとマクロの視点の違いは、お金の動きを見るときに特に顕著に現れる。

## お金の流れと血液の流れ



<http://www.blackrabbittours.com/refa/entry7.html>

73

図：Page-73

Page-72 は国におけるお金の動きと財・サービスの動きを描いたものである。A,B,C は国における人や企業を表している。たとえば B さんに注目すると、収入は多いほど、支出は少ないほどありがたく感じるかもしれない。それは個人の視点から見ると自然な感覚である。

一方、国全体でのお金の動きを見ると、誰かの支出は必ず別の人の収入となる。お金は循環することが大切なので、国全体の視点で見ると、お金がうまく循環することが望ましく、誰かの利益が増えることは問題ではない。いや、むしろ誰かにお金が集まることは、Page-73 に示すようにお金の動きを血液の流れで例えると、誰かにお金が集まることは鬱血に相当し、体全体（国全体）から見ると決して望ましいことではない。

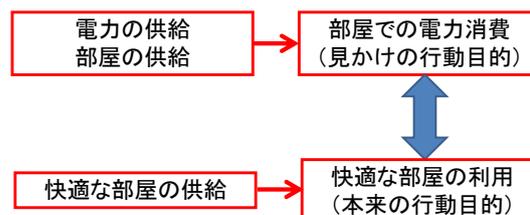
これも、ミクロとマクロの視点の違いが対象システムの評価結果に大きな影響を及ぼす、好個の例といえよう。

エネルギーシステムをとらえるもう一つの重要な点として、「エネルギー需要が常に派生需要である」ことが挙げられる。

電力を例にとろう。エアコンで電力を消費するのは、電力が好きだからではなく、部屋を快適にしたいからである。いろいろなエネルギー消費を考えても、エネルギーが好きだから、エネルギーを使いたいから、と言う理由でエネルギーを使うことはない。そのほかの目的に派生して生じるのがエネルギー需要なのである (Page-74)。

## 「派生需要」としてのエネルギー需要

- エネルギー消費行動にはエネルギー消費以外の目的がある。
  - エアコンで電力を消費するのは、部屋を快適にしたいため。電気が好きだからではない。



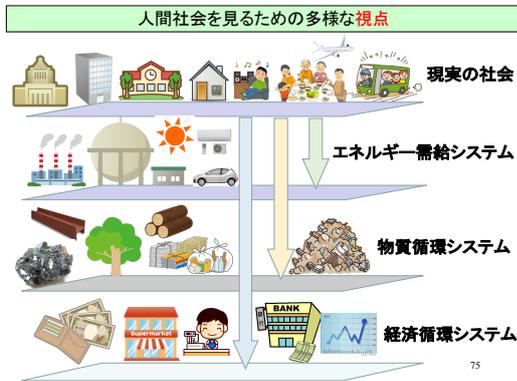
74

図：Page-74

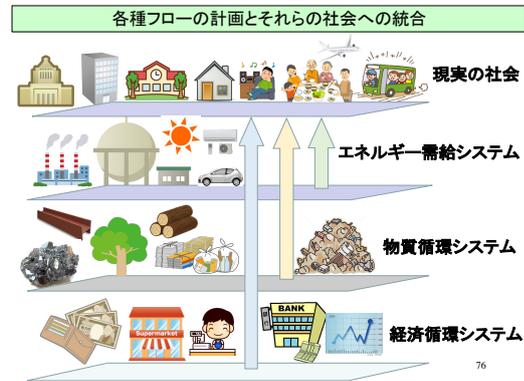
それゆえ、エネルギー需給システムをデザインしようとするときには、エネルギーが常にほかの目的により派生した需要であることを忘れてはならない。Page-75,76 を見ていただきたい。

エネルギー需給は、現実の世界をエネルギーという視点で切り取ったシステムである。これ以外にも、いろいろな物質資源に興味がある場合には物質循環システムが、お金に興味がある場合には経済循環システムが、分析・デザインの対象となる。

いうまでもなく、種々のデザインの結果は全て一つの現実世界に集約されなければならない。最後に現実世界に戻す過程が、エネルギーシステム学を考える際に非常に重要なのである。



図：Page-75



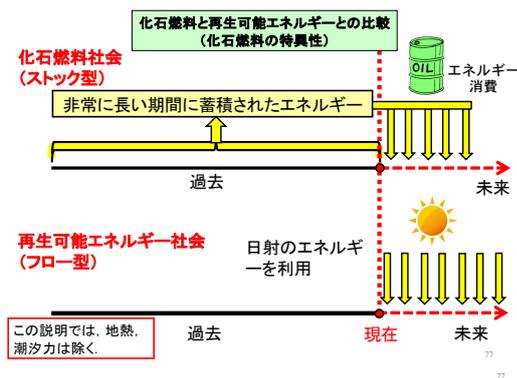
図：Page-76

最後に、再生可能エネルギーのシステム的視点についても述べておこう。

Page-77 に示すように、化石燃料は過去の太陽エネルギーが蓄積されたものであり、巨大なエネルギー貯蔵そのものである。だから、いつ何時であっても、それを燃やすことによって我々はエネルギーを使うことができ、その利便性の存在が現在の世界構築の前提条件になっているといえよう。

一方、太陽に代表される再生可能エネルギーは、太陽からのエネルギーの流れであり、何らかの貯蔵手段のない限り、いつでも使えるという性質のものではない。この対比を整理したものが、Page-78 であるが、このように本質的に異なるエネルギーに切り替えようとする以上、エネルギーを使う社会そのものを変える必要のあることは、明らかなことであろう。

それはエネルギーシステム学に求められる、非常に興味深いチャレンジなのである。



図：Page-77

化石燃料(原油)と再生可能エネルギー(太陽光)の比較(発電設備を想定)	
<b>原油</b>	<b>太陽光</b>
① 過去の太陽・地熱エネルギーの蓄積(ストック型)	① 太陽から届くエネルギーの流れ(フロー型)
② エネルギー貯蔵装置不要	② エネルギー貯蔵装置必要
③ 所有者(国)の存在 燃料費、市場価格の存在	③ 皆の共有物 限界費用(燃料費)ゼロ
④ 発電設備費用が小 (エネルギー密度大)	④ 発電設備費用が大 (エネルギー密度小)
⑤ 発電出力可制御	⑤ 発電総量不可制御
⑥ 従来型市場で取引可	⑥ 太陽光発電100%の場合、 新市場制度が必要?

図：Page-78

## 5 エネルギー(システム)学と自律

最後に、エネルギーシステム学研究にとって不可欠な、自律性について述べておきたい。

## 5.1 群盲、象（エネルギー）を撫ず

Page-79 は、葛飾北斎の描いた「群盲、象を撫ず」と題した絵である。目の見えないお坊さんが、手探りで目の前にいるものが何か言い当てるように言われている、というものである。触る場所によって、柱だ、とか、ロープだ、とか、壁だ、とかいろいろな答えが返ってくるが、誰一人として象であることを言い当てることができない。人間の能力の限界を示すものであるが、象であることを知るには、お坊さん同士の情報交換が不可欠であることも理解できる。象をエネルギーに置き換え、お坊さんを各種学術分野の専門家、その手を各専門家の持っている専門知識と考え、と、「群盲象を撫ず」とは、エネルギー研究における共同研究の姿を描いているものと解釈できる。



図 : Page-79

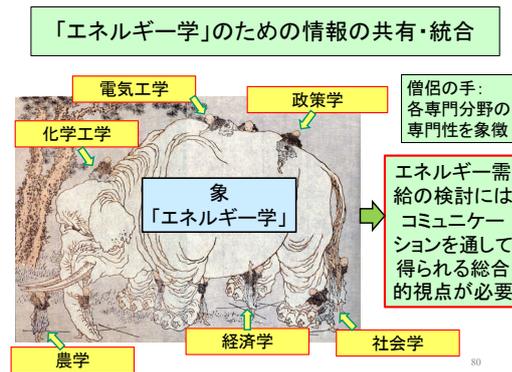


図 : Page-80

では、そのためには、何をどのように勉強すればいいのであろうか。エネルギーの共同研究の秘訣は何であろうか。情報交換の重要性、他者の考えていることに興味を持つ、などは当然のこととして、もう一つの重要なこととして、ここでは「自律性」を上げておきたい。

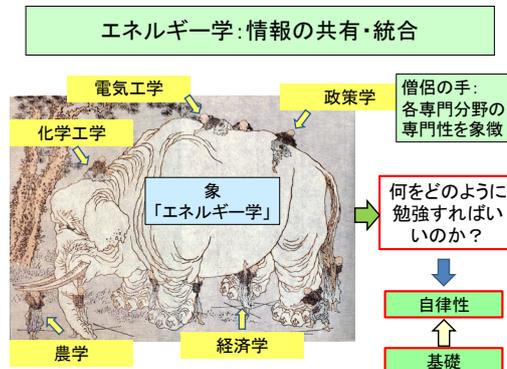
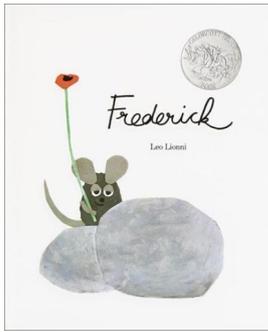


図 : Page-81

何を学び、何を研究するか、を自分の判断で決めること、それが自律性である。自立、ではなく、自律、である。自分一人でするのではなく、自分で考えて行動することを意味する。もちろん、必要があれば他者の助けをも借りる。その判断の自分で行うのである。もちろん、必要に応じて誰かに相談しても良い。

この「自律性」が今、強く求められているのであろう。

「自律性」の大切さを  
童話から学ぶ！



最後に  
ちょっと変わった  
ネズミの話

“フレデリック” レオ=レオニ作

図：Page-82

図：Page-83

## 5.2 自律性とフレデリック

厳しい冬に備えてねずみの仲間たちがせっせと食べ物を集めている。しかしフレデリックだけは一向に働こうとしない仲間たちが「どうして働かないの」とフレデリックに尋ねると、フレデリックは、あるときは「寒い冬のために『おひさまのひかり』を集めているんだ」と答え、あるときは『いろ』を集めているんだ」と答え、あるときは『ことば』を集めているんだ」と答える。ねずみの仲間たちは再び仕事に戻っていく。

やがて冬になる。最初のうちは、食べ物も豊富にあり、楽しく生活していた。しかし、そのうち、蓄えた食べ物も残り少なくなってしまう。寒く暗い冬の生活。

その閉ざされた寒い灰色の世界の中でフレデリックは話を始める。

すると、彼の『おひさまのひかり』はみんなを温かくし、『いろ』はみんなの心の中に花を咲かせ、『ことば』はみんなに尽きることのない楽しさを与えてくれた。

これを「エネルギー資源の冬」と考えると、次のような解釈ができよう。

1. エネルギーの冬は近づいてきている。
2. エネルギーの獲得は重要である（技術）。
3. しかし、人間の視点からの生活様式の見直しも別の次元の問題として大切である（心）。
4. 世界中の「フレデリック」がエネルギー危機を迎えつつある社会を救う可能性がある。
5. エネルギー問題の解決に向けた自律的行動を実行できる多様な人材を育て、またその自律的（勝手な行動ではない）行動を受け入れる社会環境を創生する必要がある。

### おわりに:「フレデリック」と「エネルギー」

- エネルギーの冬は近づいてきている。
- エネルギーの獲得は重要である(技術)。
- しかし、人間の視点からの生活様式の見直しも別の次元の問題として大切である(心)。
- 世界中の「フレデリック」がエネルギー危機を迎えつつある社会を救う可能性がある。
- エネルギー問題の解決に向けた自律的行動を実行できる多様な人材を育て、またその自律的(勝手な行動ではない)行動を受け入れる社会環境を創生する必要がある。

図：Page-88