

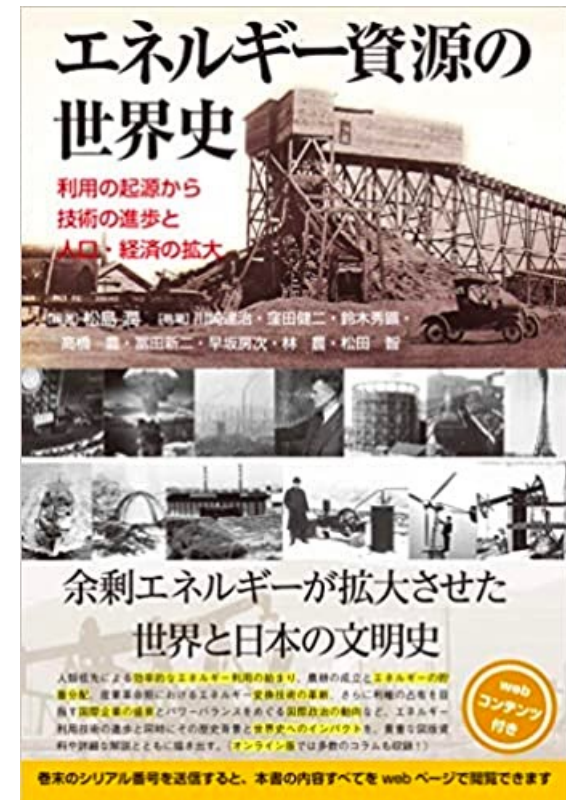
# 身近なエネルギーとエネルギー効率

松島 潤(東京大学大学院新領域創成科学研究科)  
@笠間市(2024.2.4)

## 自己紹介

松島潤の略歴： 東京大学工学部精密機械工学科卒業、通商産業省工業技術院地質調査所（現：産業技術総合研究所）を経て東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。化石燃料の弾性波探査、エネルギー収支比とQoL (Quality of Life)の関係などの研究に従事。

NPO法人もつたいない学会副会長  
「地球は有限、資源は質がすべて」



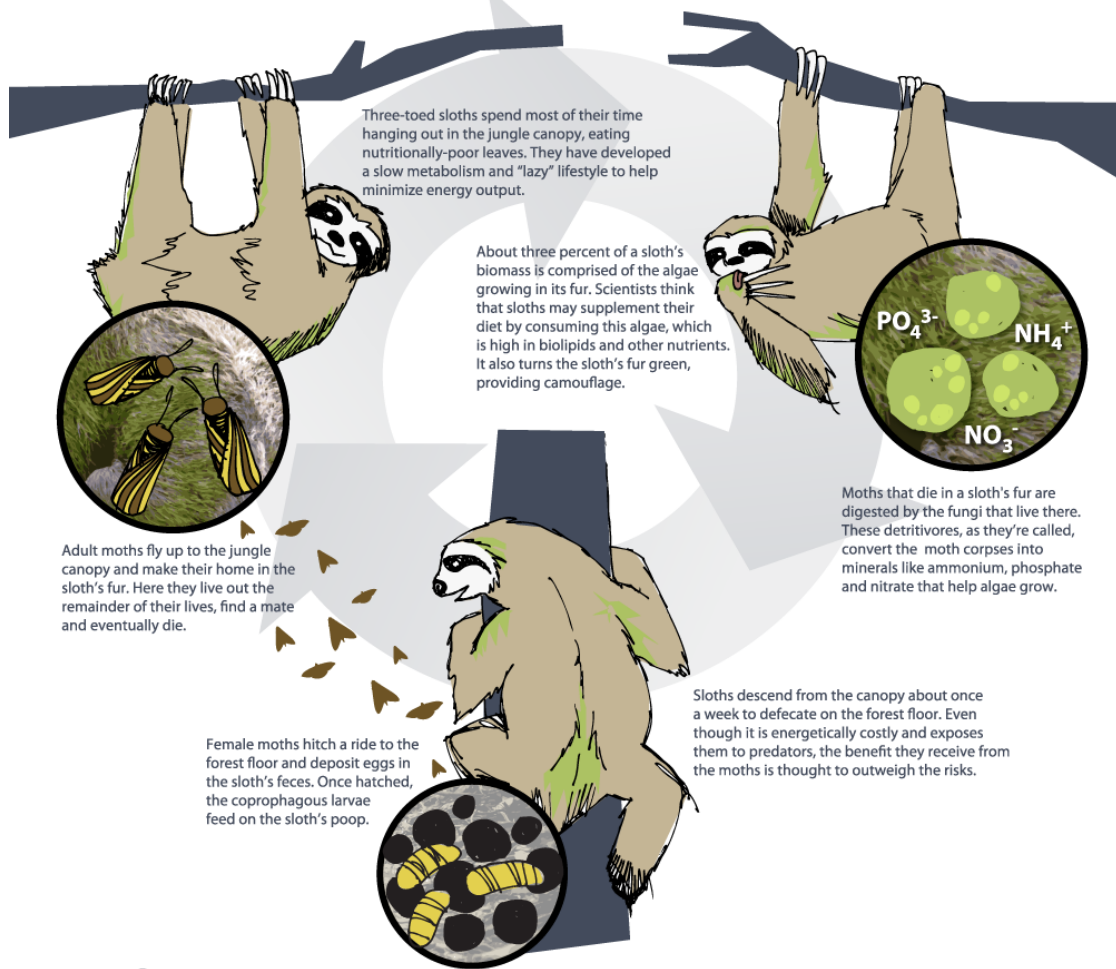
## 本日の内容

1. 生物から学ぶエネルギーの本質
2. 現在のエネルギー転換の行方
3. 芸術とエネルギー

# ナマケモノ(森の小宇宙)のエネルギー戦略:「蛾との共生」

## SLOTHS & MOTHS *A Mutually Beneficial Relationship*

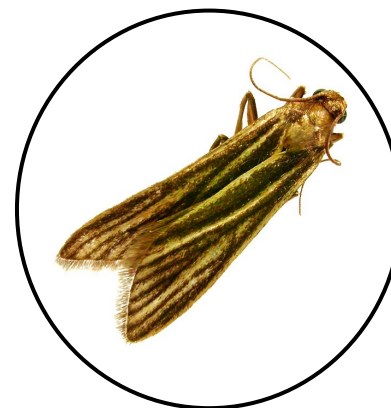
The three-toed sloth (*Bradypus variegatus*) has one of the most nutritionally poor diets of any mammal species. Most of its calories come from jungle leaves, which are tough, rubbery and filled with toxins. Moths living in the sloth's fur are thought to help provide additional sustenance by supporting the growth of algae, which the sloth eats.



※スローモーションではありません。

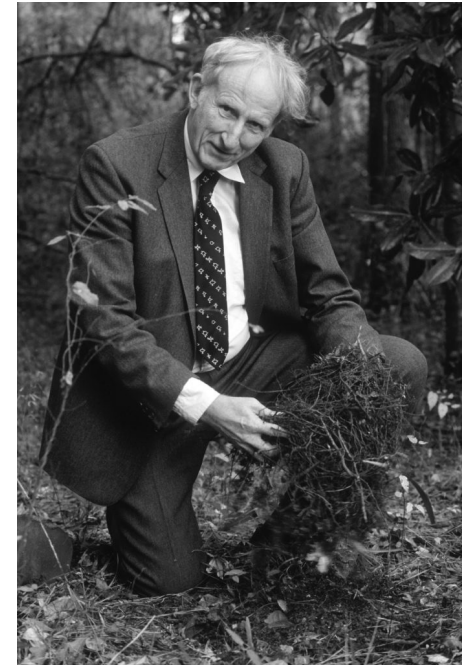
AnimalistToo

## ナマケモノ蛾



## 生態系をエネルギーシステム論的に捉えたパイオニア

- 米国の生態学者であったハワード・オダム(1924-2002年)は、**熱力学的視点を生態学に取り入れ、生態学をシステム論的に捉えたパイオニア的かつ著名な学者である。**フロリダ大学には現在、Howard T. Odum Center for Wetlands が存在する。
- オダムは1970年代にエネルギーの質に関する指摘を多く行い、**エネルギーの質の定性的な表現から定量的な表現へと方向付けを行う貢献をした。**オダムは生態系をつぶさに観察し、生態系が如何に少量の努力で如何に多くのエネルギーを獲得しようとしているのか、**結果として如何に多くの正味エネルギーを獲得できるかという視点を持っていた。**



Wikipedia

## 生態系の進化と正味エネルギー (Hall, 2017)

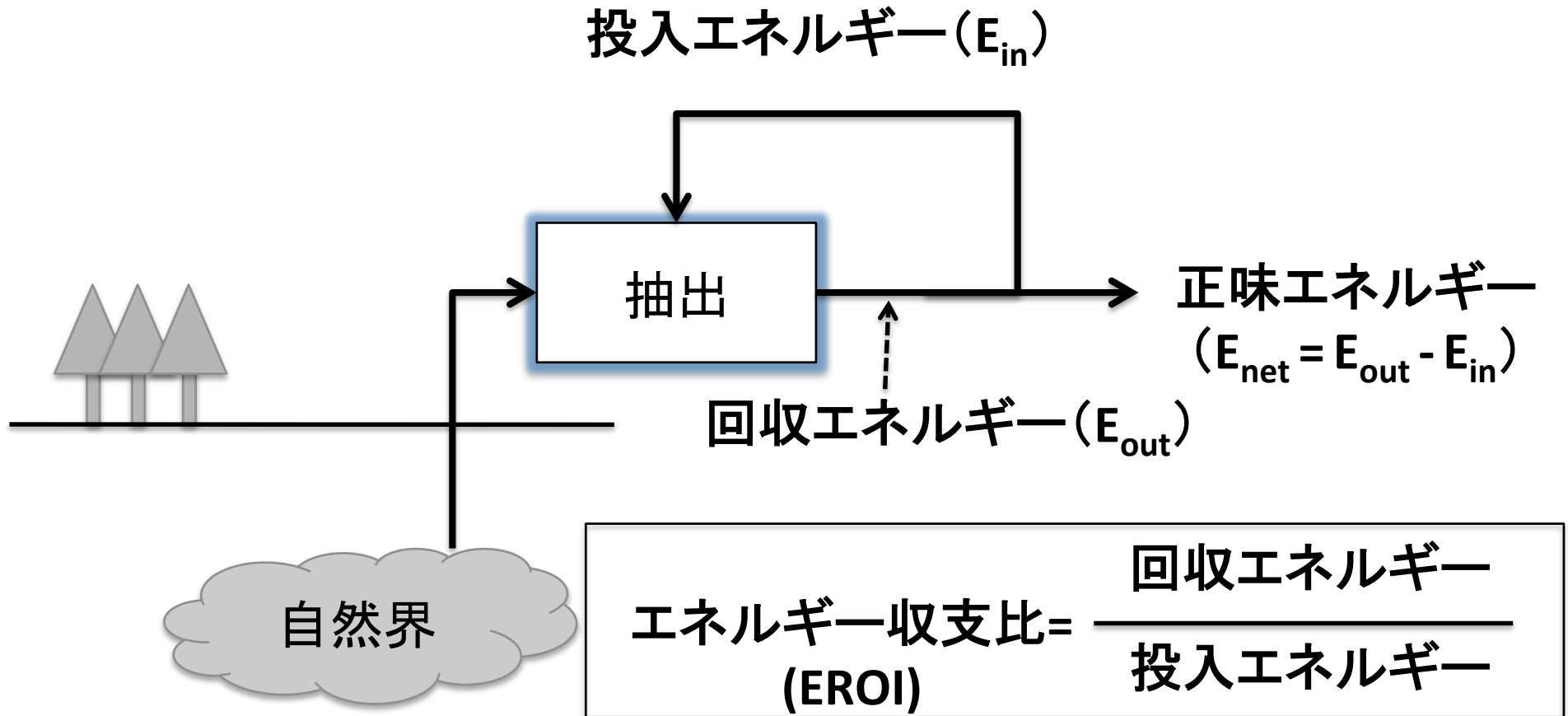
- チャールズ・ダーウィン(1809-1882年)は、1859年に著書「種の起源」において「**自然淘汰によって、生物は常に環境に適応するように変化し、種が分岐して最終的に種の多様性を生じる**」と述べたが、「**環境へ適合する**」という意味が不明であった。
- それぞれの種は、それぞれに適した環境を有しており、環境状態の変化に応じてエネルギーの獲得と消費のバランスをとることによって、生息と再生産にとって最適になるように適合しようとするのである。すなわち、**環境に適合する**ということは、**エネルギーの獲得と消費のバランスを最適化することにより正味エネルギーを最大化すること**である。
- 生命現象は特殊な構成をしており、その設計図は**DNAに刻まれており、決してランダムなものであってはならない**。つまり、エントロピーを増大しないように維持・進化させるためには**エネルギーが必要**である。すなわち、自然淘汰において生存するためには「**長い時間**」をかけて**エネルギーバランスを確立**することが肝。

## 生物学的視点からの正味エネルギーの重要性(鉄の法則)

- (1) チーターが狩りをするには、新陳代謝以上のエネルギーが必要  
(自分が生きていくため)
- (2) 子孫を増やすには、(1)で述べた以上のエネルギーが必要  
(家族を養うため)
- (3) 環境変化に対応(進化)するには、(2)で述べた以上のエネルギーが必要  
(自然淘汰を生き抜き、種を保存するため)



# 自然界からエネルギーを享受するための基本原理

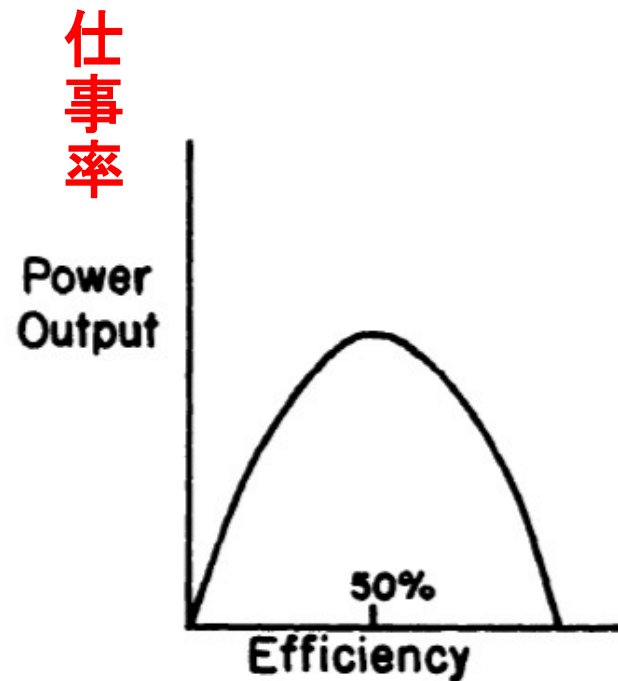
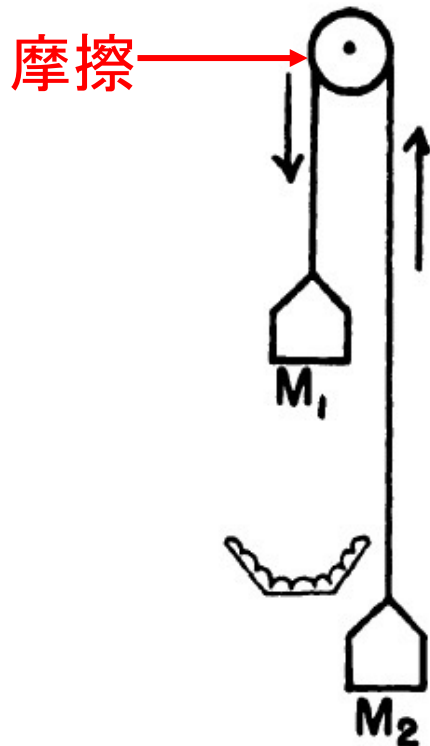


EROI (Energy Return on Investment) は  
経済用語ROI (Return on Investment) のエネルギー版



# 最大能力原理:生態系全体におけるエネルギーフローに関する視点を与える

- 最大能力原理の概念は、自動車を運転する際の速度と燃費の関係から理解できる。すなわち、高速では目標地点に早く到達できるが燃費は良くなく、ほどよい速度で自動車を運転すると燃費を最大化することができる。



エネルギーを消費する効率

## 最大能力原理と生物 (Lotka, 1922)

- 生態系全体におけるエネルギーの流れにおいて、生態系全体の物質の総量を増加させるように、また系全体を循環する物質の速度を増加させるように、さらには系全体を通した全体エネルギーの流れを増加させるように、自然淘汰は機能している。このような全体系を形成するには「長い時間」をかけている(例:フンコロガシによる浄化システムには数十億年)。
- 生態系における自然淘汰の法則は、熱力学法則が提供できない原則を与えている。熱力学法則は、ある物理系における事象の方向性を決定付けることができていない。つまり、それらの熱力学の法則はどのような事象は起こらないと言うことはできても、どのような事象が起こると言うことができない。

## 熱力学の体系化：蒸気機関を効率的に動かすために

- 18世紀後半から19世紀にかけて蒸気機関が発明・改良されたが、蒸気機関を効率的に動かすために、エネルギーを理解することが不可欠となり熱力学に関する2つの法則が19世紀に確立した。
- **熱力学第一法則**：エネルギー保存則、つまりエネルギーはどれだけ使用しても消えることはないことを意味している。エネルギーの「量」に関する概念。つまり、車によるエネルギー消費はできない。
- **熱力学第二法則**：エネルギーを使用すると使用しやすいエネルギーから使用しにくいエネルギーへと変化してしまうことを意味している。エネルギーの「質」(**エントロピー**)に関する概念。
- **不可視なエネルギーの概念を理解していなかったということは、真の社会学や経済学を成立させることが困難であったことを意味する。エネルギーの概念を本質的に理解し、それを経済学に導入しようとする動きに至ったのは20世紀半ばであった。**

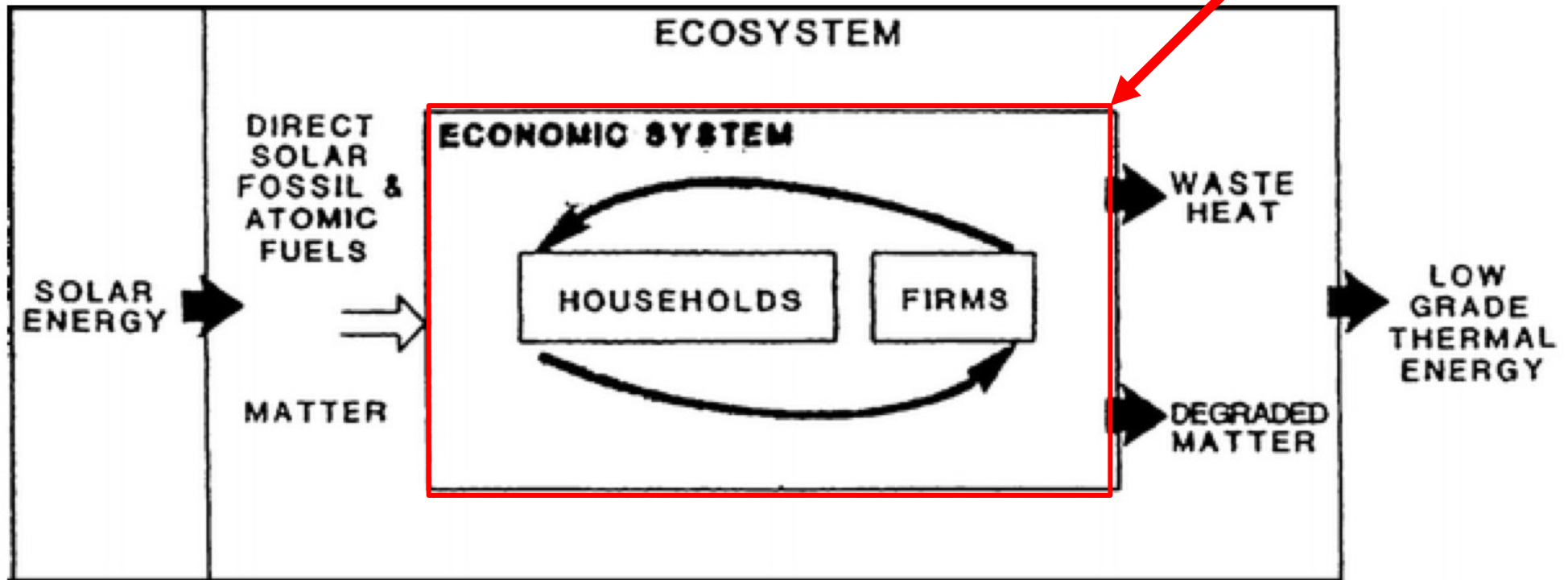
コブ-ダグラス生産関数

技術 資本 労働

$$GDP = Ak^{\alpha}l^{\beta}$$

# 生態学者が描く「Once through」な世界

経済系



Hall and Klitgaard (2011)

我々の経済・社会活動は、物質・エネルギーの生産も消費もせず、ただ質の高いエネルギーを質の低いエネルギーに変換しているだけである。

## 生態系に学ぶエネルギー資源論は社会のあり方や個人の生き方に多くの示唆を与えてくれる

- 道徳的な行動規範である「中庸」:生態系全体におけるエネルギーの流れは**速すぎず遅すぎず**、エネルギー効率が最大になるように程良い流れを作り出している(最大能力原理)。
- 生存するための知恵:生態系では、自身の性能が最大限発揮できる環境を選択し、その環境に適合することに努めている。つまり、**得意分野で勝負**している。

### 【イチロー選手の哲学】

- **ウェイトトレーニングをしない**:持って生まれた体のバランスを崩す。自分の身体の特性を理解することが大事。確かにライオンはしない。
- **最短で行くことは無理**:失敗しないでたどり着いても深みはでない。無駄なことはなく、遠回りすることがむしろ大事。
- **小さい積み重ねでしか遠くにいけない**:長い時間、忍耐強く努力を続けることが大事。
- **結果よりプロセスを重視**:

## 生態系に学ぶエネルギー資源論は社会のあり方や個人の生き方に多くの示唆を与えてくれる

- 道徳的な行動規範である「中庸」:生態系全体におけるエネルギーの流れは**速すぎず遅すぎず**、エネルギー効率が最大になるように程良い流れを作り出している(最大能力原理)。
- 生存するための知恵:生態系では、自身の性能が最大限発揮できる環境を選択し、その環境に適合することに努めている。つまり、**得意分野で勝負**している。

### 【イチロー選手の哲学】

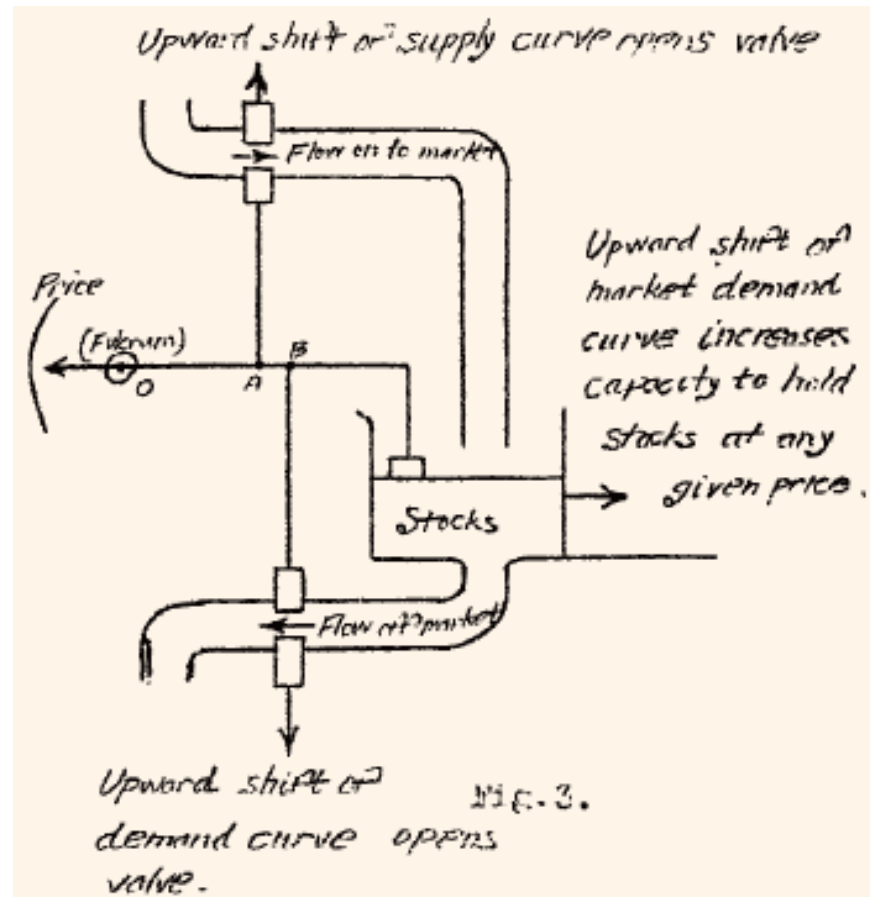
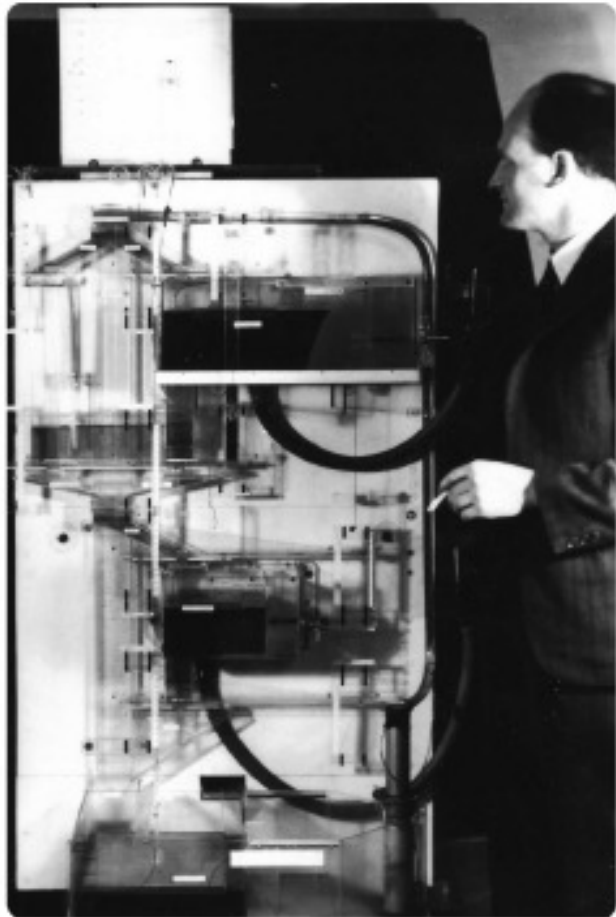
- **ウェイトトレーニングをしない**:持って生まれた体のバランスを崩す。自分の身体の特性を理解することが大事。確かにライオンはしない。
- **最短で行くことは無理**:失敗しないでたどり着いても深みはでない。無駄なことはなく、遠回りすることがむしろ大事。
- **小さい積み重ねでしか遠くにいけない**:長い時間、忍耐強く努力を続けることが大事。
- **結果よりプロセスを重視**:

# 経済を動かす原動力は何？

Moniac

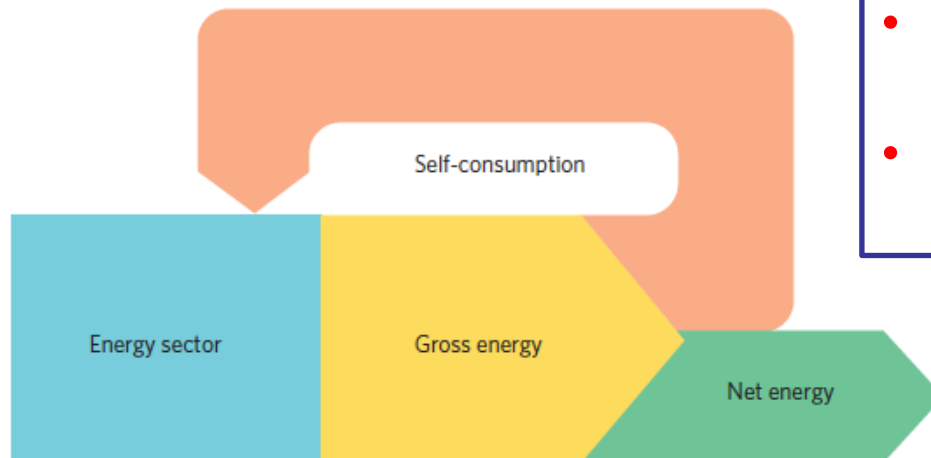
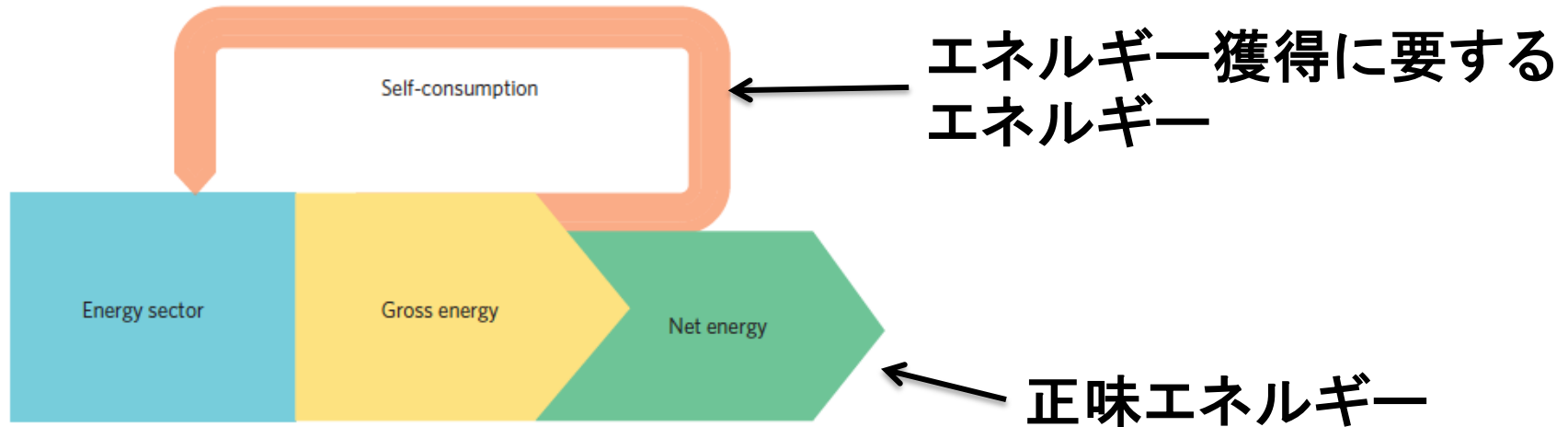
(お金の流れを水の流れで可視化)

※オチはこの機械は電気が無いと動かないが、エネルギーの重要性には皆気付かない。



# 正味エネルギーが経済・人間社会を動かす

**Net energy fuels the economy.**



- この論文はStanford大学の石油工学科メンバによるものである。
- エネルギーが社会に実質的な影響を与えてきたことを示唆する。



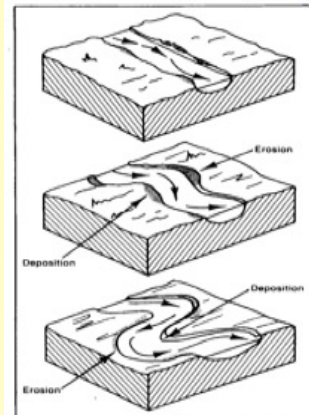
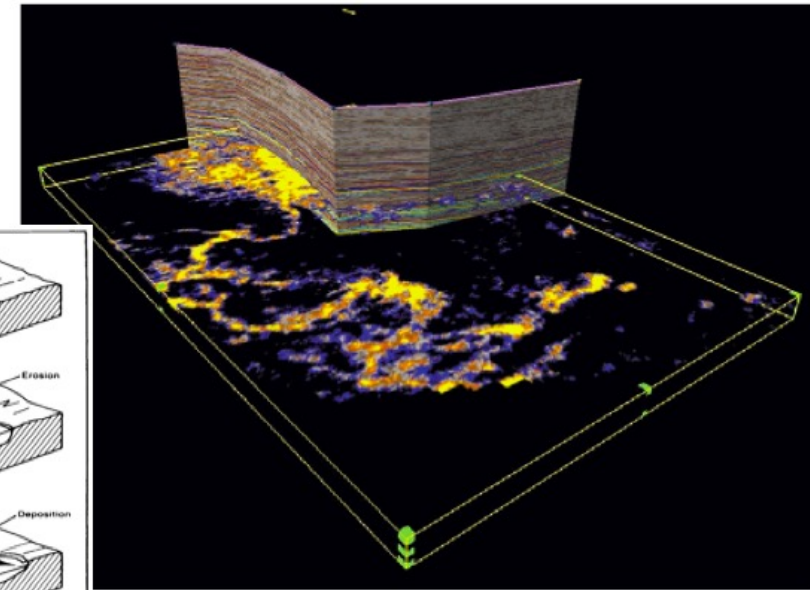
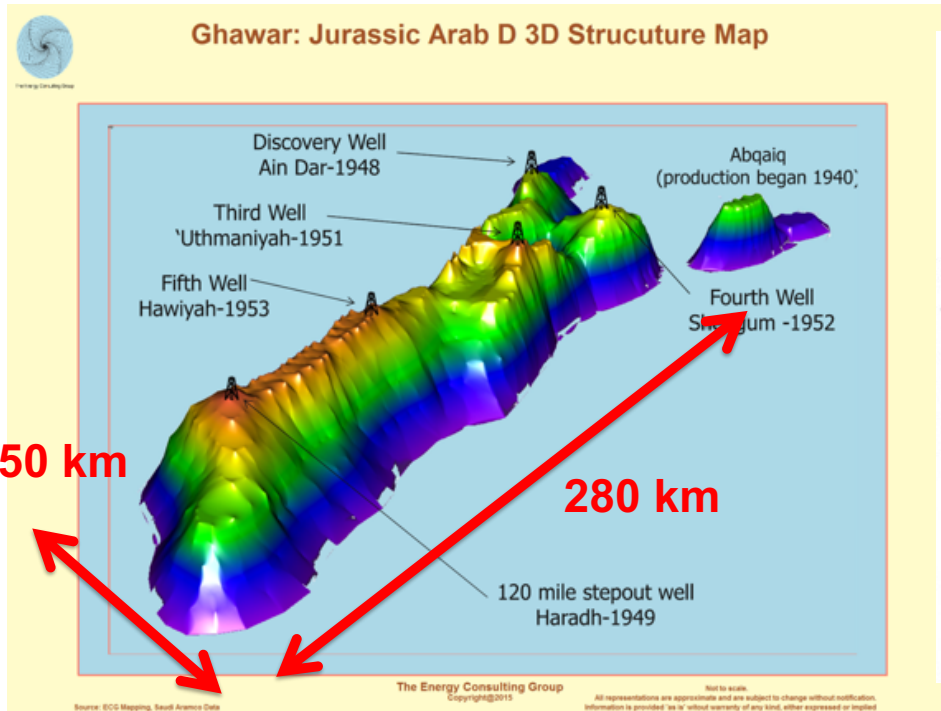
## 「Best first」の原理

- 人間の経済活動の動機は、最も経済価値の高い(すなわち最も開発が安価な)エネルギー資源から開発されるというものである(デヴィッド・リカード)。
- 現在では、easy oilから、これまで開発対象にならなかった条件の悪い油田の開発に目が向けられているが、これは「Best first」の原理が指摘している通り、人間の経済活動の行動原理に起因するものである。
- 一般的な経済原理では、価格高騰が技術革新を促し価格が低下すると理解されるが、このような経済原理はBest first原理のもとでは成り立ちにくい。
- すなわち、これまで探査・開発できなかつた油田において、技術革新によりそれが可能になるがエネルギー収支的には低下する傾向にある。

# 石油の探査・開発から見たエネルギー問題

世界最大の油田  
(サウジアラビア・ガワール油田・70歳)

先端的探査ターゲットになっている油田  
(太古の河川が地下数kmに埋没)



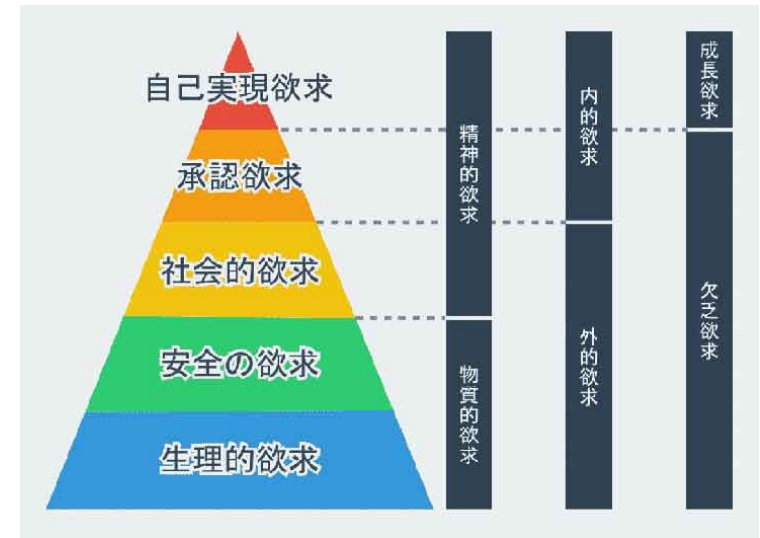
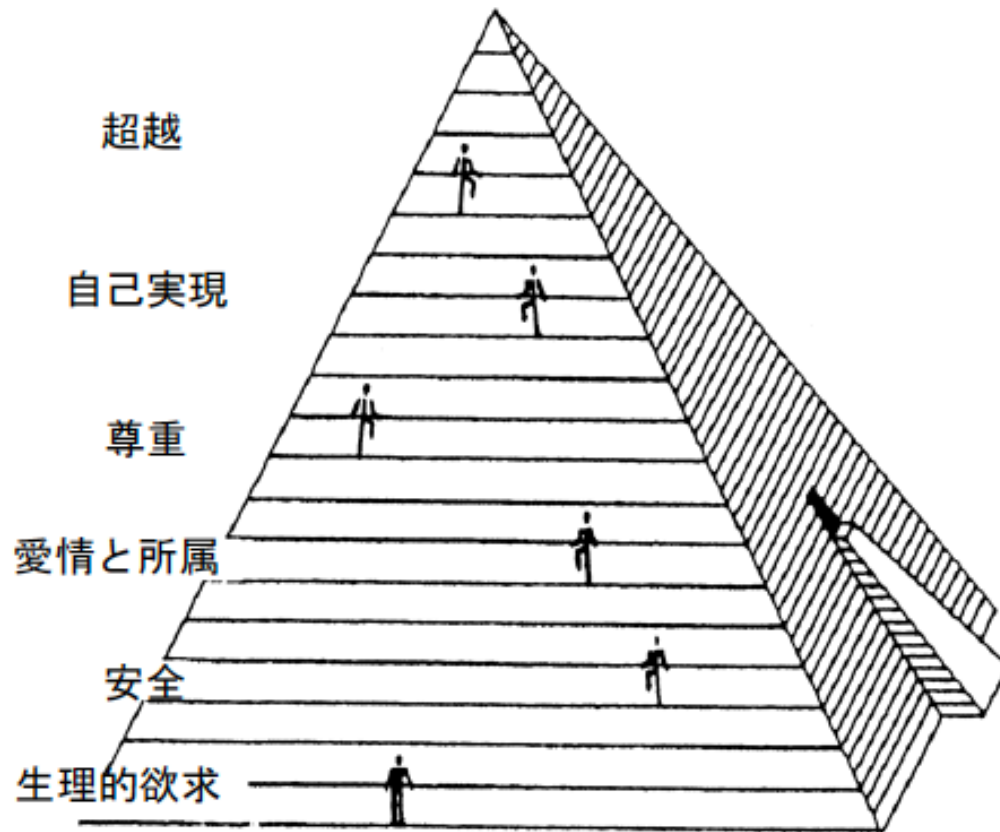
Sheffield(2000)

[http://energy-cg.com/OPEC/SaudiArabia/OPEC\\_SaudiArabia\\_Ghawar.html](http://energy-cg.com/OPEC/SaudiArabia/OPEC_SaudiArabia_Ghawar.html)

## 現在のエネルギー転換の行方

- ◆ 「Energy transition」ではなく、「Energy diversification」あるいは「Energy additive」と指摘され始めている。
- ◆ 「Energy poverty」という用語も現れている。化石燃料に対する性急なダイベストメント（投資引き揚げ）による化石燃料の高騰化により人々の生活はスタグフレーション状態。また、昨年来、EUは天然ガスの爆買いをしており、買い剥がされている発展途上国は多い（そういった国々は石炭・薪を利用）。
- ◆ 鉱物資源リスク。再生可能エネルギー、自動車の電動化、省エネ技術の普及・拡大は、特定の鉱種の鉱物資源の需要を増大させ、世界的な需給逼迫が実際に起きている状況。
- ◆ エネルギー安定供給とのバランスをいかに達成させるかという視点の重要性が指摘されている。

# マズローの基本的欲求の階層図

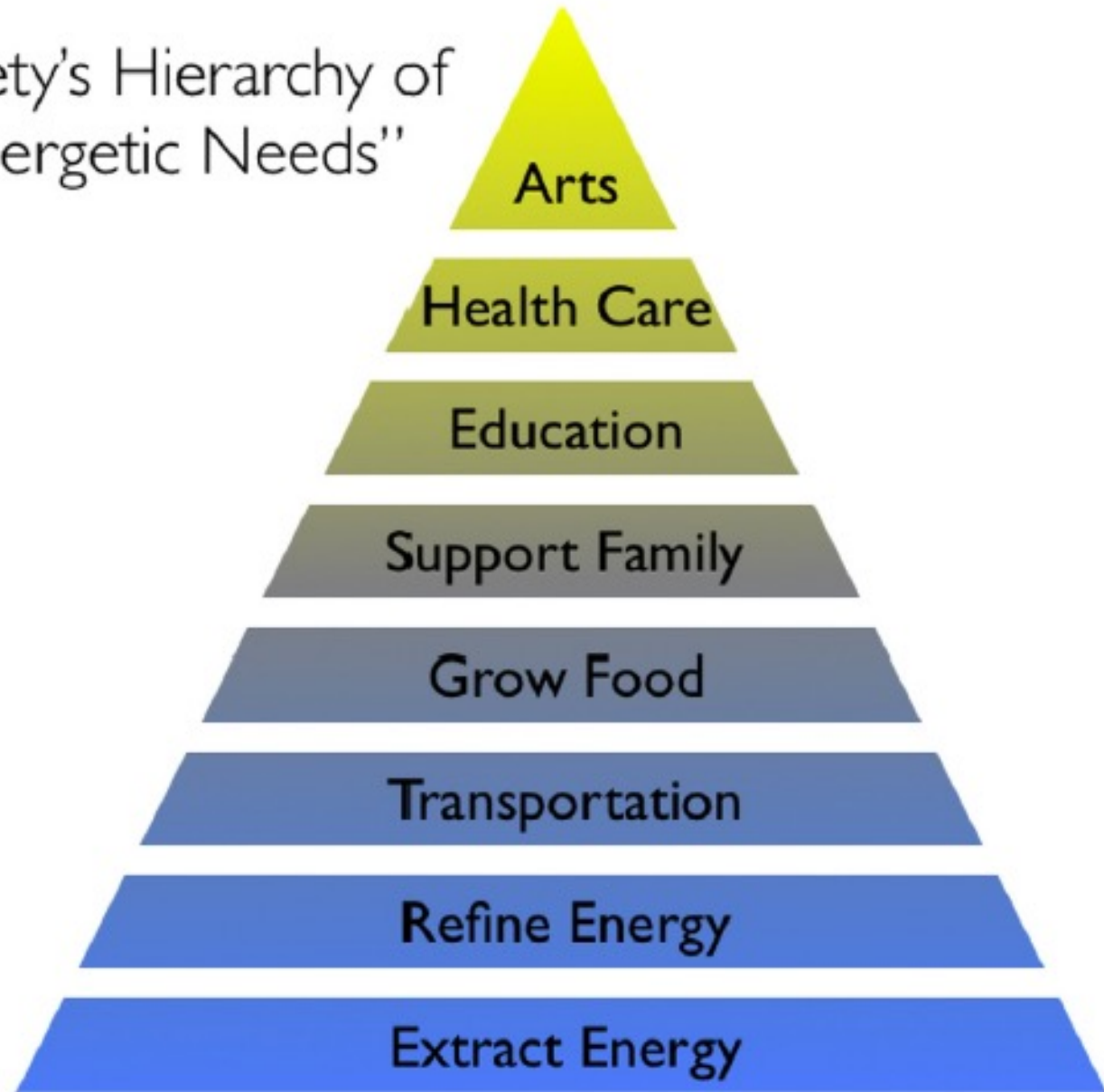


マズローによれば、階層の低い水準の欲求は、充足されない間は優勢を保つ。しかし、ひとたびそれが十分に充足されると、より高水準の欲求が個人の注意と努力を占有する。

(Zimbardo P, 古畑和孝, 平井久監訳, 1983, 『現代心理学』  
p.448より引用)

# エネルギー需要の社会的階層

Society's Hierarchy of  
"Energetic Needs"



## まとめ

- 生物から学ぶエネルギーの本質→エネルギー効率の考え方
- エネルギー転換の行方→身近なエネルギー
- 芸術とエネルギー→これから生きる道