

国連大学
SDGs企業戦略フォーラム2019



原料革命と化石 原料のこれから

2019年10月1日
東京大学・経済学研究科・教授

小野塚 知二

概要

- 1.産業革命概念の見直し:⇒「原料革命」
- 2.「原料革命」とは何であったか？
- 3.再生可能エネルギーへの転換後の温暖化ガス排出問題
=「化石原料」
- 4.緊張感と危機感の欠如、ないし決定的な弛緩
- 5.エネルギー問題に矮小化してはいけない

はじめに:「産業革命」

(1)「産業革命」という語の起源

“la révolution industrielle”, “the Industrial Revolution”.

19世紀初頭にフランス北部、ベルギーなどで用いられ始めた。ドウヴァ海峡の対岸(ブリテン)で発生している産業上の大きな変化を、こう呼んだ。

煙を吐き出し、ダイナミックに運転される機械と大工場への驚異と憧憬。

⇒フランス、ベルギーなどはイギリスから機械と機械製造職人を導入=産業革命の移転

産業革命は世界に伝播・伝染してゆく。日本にも。

その結果としての近現代産業社会。「いま」も産業社会。

いまも産業社会であるということは何を意味しているか？

はじめに:「産業革命」

(2)学術的な用法

19世紀末に、英国の歴史家で、セツルメント運動の創始者でもあったトインビー(Arnold Toynbee, 1852-1883)が用い始めた。*Lectures on the Industrial Revolution*, 1908.

そこでは、伝統的社会の解体と産業社会の開始にともなう労働者階級の貧窮など 社会問題への注目に主眼。**社会問題の起点としての産業革命。**

(3)学術的な意味

伝統的(農耕)社会から産業社会への変化の態様と原因・結果。悲観説／楽観説、断絶説／連続説などの論争はありながら、経済学(殊に経済史学と開発経済学)の重要概念。

資本主義経済確立の画期としての産業革命(**欲望充足を、自然的制約から一時的に解放**)。

I 産業革命の諸側面

(1) **機械革命**: 道具・作業場から機械・工場への生産手段の変化

① マルクス『資本論』によって、1860年代には、この側面は指摘されていた。

② 手工業から工場制手工業(マニュファクチュア)を経て、工場制機械工業への変化。

③ 現在の観点から見た機械革命

今後、主たる生産手段が機械から道具に再転換する可能性はないので、機械の時代は今後も継続する。**人類は機械からは卒業しない。**

→IT・AIと結合した"industry4.0"等々。

I 産業革命の諸側面

(2) エネルギー革命＝熱機関の登場。

① 蒸気機関(外燃式往復ピストン機関)から始まって、蒸気タービン、内燃機関(ガソリン機関、ディーゼル機関、ガス・タービン(ジェット機関))まで、多様化。

② 機械革命と結合して機械に原動力を供給し、発電機を駆動して電力のエネルギー源となり、また、交通機関と結合して鉄道・汽船・自動車・航空機をもたらした。

③ 蒸気タービンは現在も火力発電所や原発で用いられている最強の動力源(一基で百万馬力以上)。また、内燃機関は交通機関の原動力として多用されている。

⇒ 熱機関の排気(二酸化炭素、煤煙等)による温暖化効果の問題。

⇒ 地球温暖化問題の原因は熱機関だけか: 今日の主題

I 産業革命の諸側面

(3) エネルギー革命から卒業できる可能性

① 現在、風力・水力に加えて、太陽光・潮汐・地熱などの再生可能な発電で、交通機関(自動車・鉄道・船舶)と工場・都市・家庭が必要とする動力・電力をまかなうことが原理的に可能なことは判明している。火発・原発は不要に。

それが進まないのは政策と業界利権の問題(であって、現在の科学と技術の問題ではない)。

② 化石燃料を用いる熱機関は、長距離・大型の航空機用ガス・タービン(ジェット機関)など限られた領域に今後も残るが(航空機は現在の石油消費量の2%程度)、それらを除けば、人類は産業革命がもたらしたエネルギー革命(=熱機関)から卒業可能なところに到達しつつある。

⇒では、地球温暖化問題は早晚解決可能か？

温暖化ガスは熱機関だけが発生しているのではない。

I 産業革命の諸側面

(4)原料革命:土木・建築・造船・機械の原材料、製鉄原料、農業原料の変化

=こうした変化が18～19世紀にあり、現在の産業文明もこの延長上にあることは、これまで明瞭に指摘されてこなかった。

①原始時代から19世紀までの原材料＝森林資源

i 土木・建築・造船・機械の材料:原始時代から木材(石造建築にも木材は不可欠)

ii 製鉄原料:古代より永く木炭と砂鉄・鉄鉱石

iii 農業原料:肥料は人畜の糞尿、緑肥、草木灰、魚肥、農薬は植物農薬、硫黄・石灰・硫酸銅など、農業機械はなく人力・畜力

⇒森林資源を使い尽くした文明は例外なく滅亡している。

ギルガメッシュ:シュメール
を「成長経済」に導いた「英雄」



モアイ:イースター島衰退期の部族抗争の象徴



I 産業革命の諸側面

(4)原料革命：土木・建築・造船・機械、製鉄、農業原料の変化

②19世紀以降の変化=鉄鋼・化石燃料が主たる原材料になる

i 土木・建築・造船・機械の材料は鉄・鋼に変化。現在も鋼が主体。

ii 製鉄原料：木炭からコークスに変化。

iii 農業原料：化学肥料・合成農薬の原料と農業機械の燃料

⇒原材料面でも化石燃料に高度に依存している産業社会さらに、成型・包装・塗装の原材料としてのプラスチックがもたらしている巨大な問題群。

では、「化石燃料が枯渇したらどうなるか？」という問い

ジェヴォンズ(William Stanley Jevons, 1835-82)



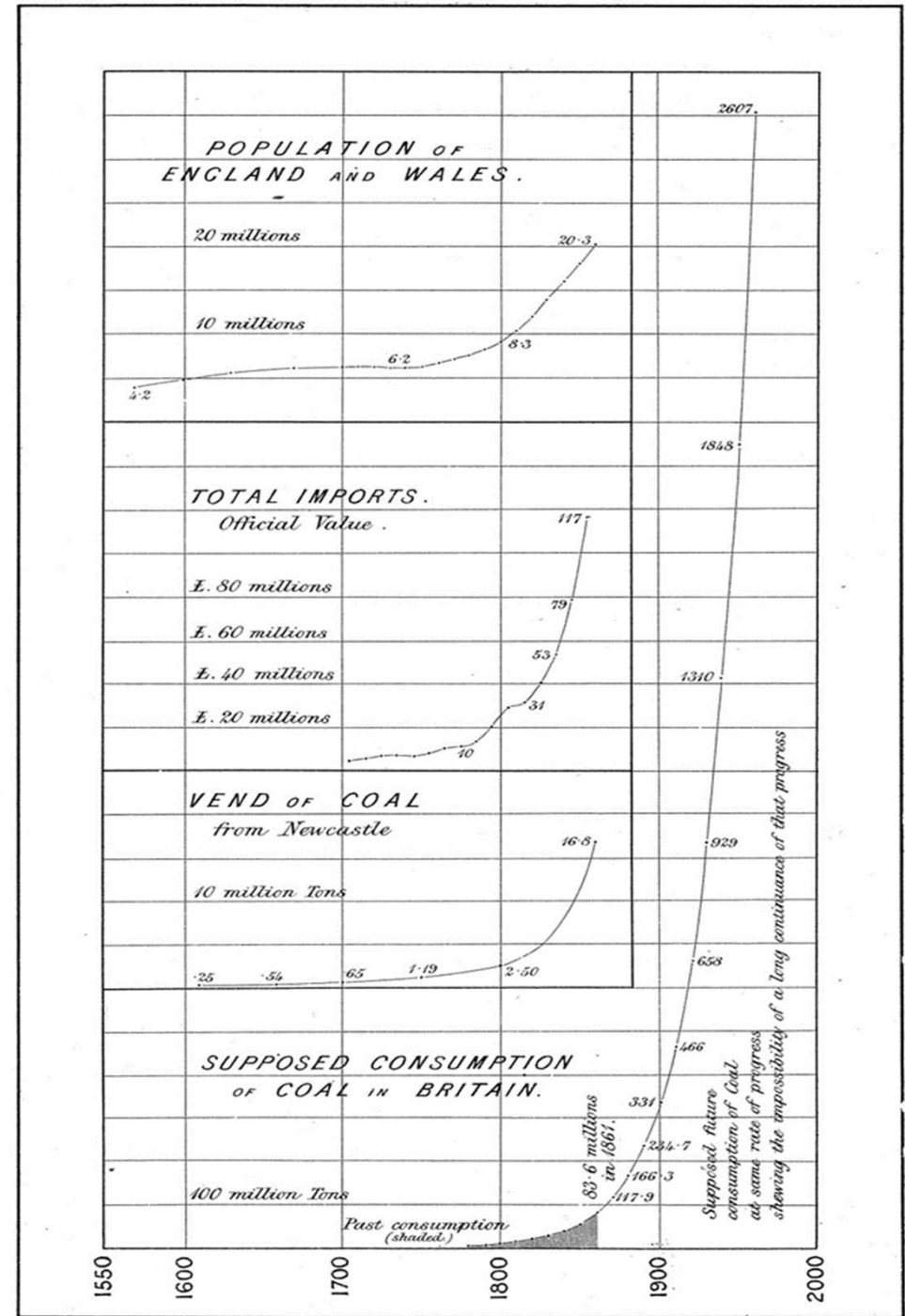
ワルラス、メンガーとともに、経済理論における限界革命の創始者の一人、現代経済学を開拓した人物。

II 「石炭問題」

(W.S.Jevons, *The Coal Question*, 1865)

(1) ジェヴォンズの主張

産業社会は石炭に依存しているが、石炭の可採量は有限で、消費量は幾何級数的に増加しているから、早目に石炭依存から脱却しないと、産業社会は立ち行かなくなる。



Ⅱ「石炭問題」

(2)「石炭問題」を忘れさせた要因

a 石油、天然ガス、シェールガスなどの新種の化石燃料と原子力の
実用化=エネルギー資源としての石炭の重要性は低下。

b 産業社会に自然的限界があることを見たくない・知りたくない心性。

(3)原料面での化石燃料依存

①石炭消費量(年間約80億トン)

4割:熱源(火力発電所の燃料)

4割:製鉄原料

2割:化学原料(アンモニア合成:ハーバー=ボッシュ法による水素分離(ここで派生する酸素と石炭が化合してCO₂を排出する))

②石油・天然ガス消費量(原油換算約75億トン)

8割:熱源(交通機関と発電・暖房・工業燃料)

2割:化学原料(プラスチックや薬品)。

Ⅱ「石炭問題」

(4)原料革命からの卒業の可能性

石炭消費量：年間約80億トン(8Gt)



石油・液化ガス消費量：年間約75億トン(7.5Gt)



エネルギー革命から卒業する(上図の緑色の部分が二酸化炭素として排出されなくなる)ことによって、石炭の4割、石油の8割弱は不要となる。

しかし、原料革命から卒業できる見通しはない(製鉄原料・化学原料としての用法はなくせない)ので、化石燃料への依存がなくなるわけではない。

燃料の発熱量・CO₂排出係数の一覧表

燃料の種類	単位発熱量	CO ₂ 排出係数	
		発熱量当りCO ₂ 換算	単位量当りCO ₂ 換算
原料炭	29.0 GJ/t	0.0898 tCO ₂ /GJ	2.61 tCO ₂ /t
一般炭	25.7 GJ/t	0.0906 tCO ₂ /GJ	2.33 tCO ₂ /t
無煙炭	26.9 GJ/t	0.0935 tCO ₂ /GJ	2.52 tCO ₂ /t
コークス	29.4 GJ/t	0.1078 tCO ₂ /GJ	3.17 tCO ₂ /t
石油コークス	29.9 GJ/t	0.0931 tCO ₂ /GJ	2.78 tCO ₂ /t
コールタール	37.3 GJ/t	0.0766 tCO ₂ /GJ	2.86 tCO ₂ /t
石油アスファルト	40.9 GJ/t	0.0763 tCO ₂ /GJ	3.12 tCO ₂ /t
コンデンセート(NGL)	35.3 GJ/kl	0.0675 tCO ₂ /GJ	2.38 tCO ₂ /t
原油	38.2 GJ/kl	0.0686 tCO ₂ /GJ	2.62 tCO ₂ /t
ガソリン	34.6 GJ/kl	0.0671 tCO ₂ /GJ	2.32 tCO ₂ /t
ナフサ	33.6 GJ/kl	0.0667 tCO ₂ /GJ	2.24 tCO ₂ /t
ジェット燃料油	36.7 GJ/kl	0.0671 tCO ₂ /GJ	2.46 tCO ₂ /t
灯油	36.7 GJ/kl	0.0678 tCO ₂ /GJ	2.49 tCO ₂ /t
軽油	37.7 GJ/kl	0.0686 tCO ₂ /GJ	2.58 tCO ₂ /t
A重油	39.1 GJ/kl	0.0693 tCO ₂ /GJ	2.71 tCO ₂ /t
B・C重油	41.9 GJ/kl	0.0715 tCO ₂ /GJ	3.00 tCO ₂ /t
液化石油ガス(LPG)*	50.8 GJ/t	0.0590 tCO ₂ /GJ	3.00 tCO ₂ /t
石油系炭化水素ガス	44.9 GJ/千Nm ³	0.0521 tCO ₂ /GJ	2.34 tCO ₂ /t
液化天然ガス(LNG)	54.6 GJ/t	0.0495 tCO ₂ /GJ	2.70 tCO ₂ /t
天然ガス	43.5 GJ/千Nm ³	0.0510 tCO ₂ /GJ	2.22 tCO ₂ /t
コークス炉ガス	21.1 GJ/千Nm ³	0.0403 tCO ₂ /GJ	0.85 tCO ₂ /t
高炉ガス	3.41 GJ/千Nm ³	0.0964 tCO ₂ /GJ	0.33 tCO ₂ /t
転炉ガス	8.41 GJ/千Nm ³	0.1408 tCO ₂ /GJ	1.18 tCO ₂ /t
都市ガス	44.8 GJ/千Nm ³	0.0499 tCO ₂ /GJ	2.23 tCO ₂ /t

[出典]

・ 単位発熱量

地球温暖化対策の推進に関する法律
(平成22年3月改正)における設定値

※エネルギーの使用の合理化に関する法律
(省エネ法)での設置値と同等

・ CO₂排出係数

発熱量当り - 同上設定値 × 44/12

単位量当り - 単位発熱量 × 発熱量当りのCO₂排出係数

※ LPガスとは、
プロパン70wt%、ブタン30wt%の
混合ガスであり、個々の数値は
以下のようになります。

内訳)	単位発熱量	CO ₂ 排出係数	
		発熱量当り	単位量当り
プロパン	51.24	0.0585	3.00
n-ブタン	49.64	0.0604	3.00
i-ブタン	49.77	0.0603	3.00

出典:

「2005年度以降適用する標準発熱量
の検討結果と改訂値について」

Ⅲ 温暖化問題

(1) エネルギー革命からの卒業

エネルギー資源としては、化石燃料には依存しない文明の可能性。

(2) 原料革命からの卒業

原料としての化石燃料依存から脱却する目途は立っていない。

i 石炭を用いない鉄製錬法、たとえば水素製錬は実験炉すら完成していない。

ii 化石燃料に依存しない有機化学工業の可能性もほぼ皆無。

iii 化学肥料・合成農薬を用いない食料生産力では約25億人を養えるだけだが、現在すでに、その3倍を超える人口が存在。

⇒問題は、原料資源(化石燃料や燐鉱石)の枯渇・不足だけではない。

Ⅲ 温暖化問題

温暖化と人間活動の影響関係について これまでの報告書における表現の変化

気候変動に関する政府間パネル

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 1988年開始。

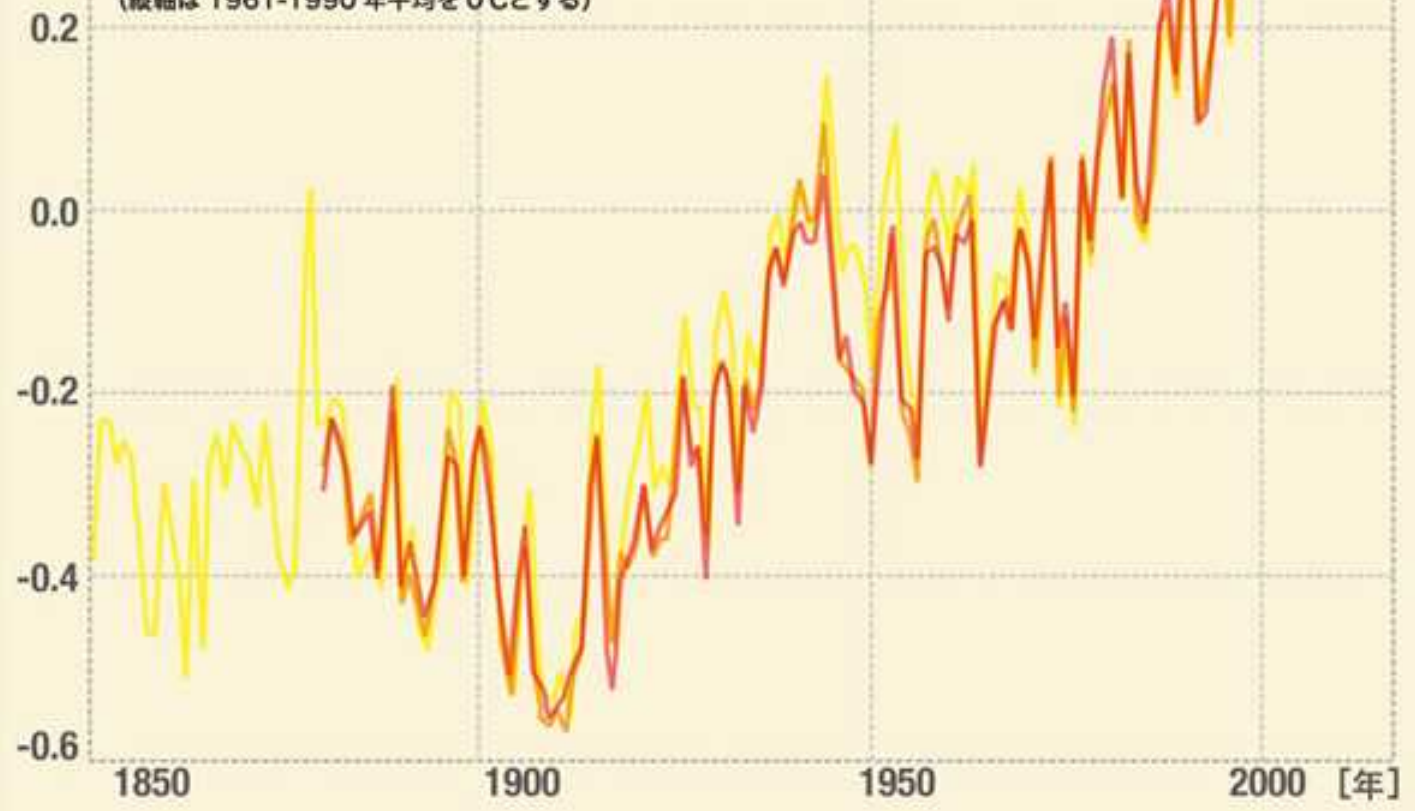
第1次報告書 First Assessment Report 1990	1990年	「気温上昇を生じさせるだろう」 人為起源の温室効果ガスは気候変化を生じさせる恐れがある。
第2次報告書 Second Assessment Report Climate Change 1995	1995年	「影響が全地球の気候に表れている」 識別可能な人為的影響が全球の気候に表れている。
第3次報告書 Third Assessment Report Climate Change 2001	2001年	「可能性が高い」(66%以上) 過去50年に観測された温暖化の大部分は、 温室効果ガスの濃度の増加によるものだった可能性が高い
第4次報告書 Fourth Assessment Report Climate Change 2007	2007年	「可能性が非常に高い」(90%以上) 温暖化には疑う余地がない。 20世紀半ば以降の温暖化のほとんどは、 人為起源の温室効果ガス濃度の増加による可能性が非常に高い。
第5次報告書 Fifth Assessment Report Climate Change 2013	2013年	「可能性がきわめて高い」(95%以上) 温暖化には疑う余地がない。 20世紀半ば以降の温暖化の主な要因は、 人間活動の可能性が極めて高い。

出典: IPCC第5次評価報告書(2013)

[°C] 地球の気温は
どのくらい
上がったの？

0.85°C上昇
1880-2012年

0.4 世界の地上気温の経年変化 (年平均)
出典) IPCC第5次評価報告書 WGI Figure SPM.1
※偏差の基準は 1961-1990 年平均
(縦軸は 1961-1990 年平均を 0°Cとする)



Ⅲ 温暖化問題

(3)地球温暖化という問題

①時間軸の長さ

地球の大気循環・水循環の関わる、時間軸の長い問題なので、当面の温暖化ガス排出量を減らせば、すぐに解決するというわけではなく、その影響は長く続く。

「工業化以前から現在までの人為的なCO₂排出による地球温暖化は、**今後、数百年から数千年にわたって継続し**、さまざまな影響を伴いながら、気候システムにおけるさらなる長期的変化（例えば海面水位の上昇など）を継続的に引き起こす。しかし、これまでの排出量のみで、1.5°Cの地球温暖化をもたらす可能性は低い」（IPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」2018年10月）

Ⅲ 温暖化問題

(4) エネルギー革命から卒業した後のCO2発生源

石炭消費量: 年間約80億トン(8Gt)



石油・液化ガス消費量: 年間約75億トン(7.5Gt)



エネルギー革命から卒業できた(上図の緑色が二酸化炭素として排出されなくなった)後に、残るCO2排出源は、製鉄原料と化学原料。化学原料のうち、石油・ガスの多くはプラスチックに加工されており、CO2排出量は多くない。

しかし、現在の水準で、製鉄原料・化学原料として化石燃料(殊に石炭)を用いるなら、年間約5GtCの炭素を含むCO2が、排出され続ける。

Ⅲ 温暖化問題

(5)「累積排出量」

産業革命以降の累積排出量が地球温暖化を決定する。

「CO₂以外の効果も考慮すると、産業化前からの世界平均気温上昇を最も高い確率(66%以上)で2°C以内に抑えるためには、790GtCの累積排出量が上限になるが、2011年までに、既におよそ515GtC排出している」(IPCC第5次報告書、2013年)。

現在、年間約14GtCを排出しているので、2019年までに**627GtC**が排出されている。

残り163GtC.⇒あと12年で790GtCに達する。**パリ協定の意義。**

原料だけで年間約5GtCを排出⇒あと35年で790GtCに。

可採埋蔵量は石炭900Gt、石油・ガスは300Gt。

IV 「際限のない欲望」は明るい社会創造に有用か？

「際限のない欲望」が作用する時間のスケールの問題

- (1)超長期：狩猟採集経済から農耕牧畜経済への移行に要した**数万年間**。その過程(農耕牧畜への移行の完了期)で、森林の最後の一本の樹木を切り倒した文明は、過去にいくつも崩壊している。
- (2)長期：土木・建築・造船・機械製造の主材料が木材から鉄材に変わり、鉄鉱石の製錬原料が木炭からコークスに変わり、肥料・農薬・農業機械に化石燃料を用いて農業生産性を飛躍的に高めた産業革命(原料革命+エネルギー革命+機械革命)では、「際限のない欲望」はおよそ**百～二百年**ほどの長さは持続した。
- (3)短期：農耕牧畜への移行(最初の農業革命)と産業革命(原料革命と第二の農業革命)を経て、際限のない欲望を当面は満たし続ける技術的基礎を獲得してしまうと、欲望が作用する時間は**数年～十年**に短縮
- (4)この時間スケールの縮小は、**将来への夢や想像力の希薄化と、目先の当面のことしか考えない近視眼的思考をもたらした。**
＝**温暖化問題の主體的側面：想像力の希薄化と近視眼化**

むすびにかえて

- (1) エネルギー革命からは卒業可能だが、実際には、まだ卒業しているわけではない。いまでもCO₂を排出し続けている。
- (2) 原料革命からの卒業は、その見通しすら、まだ立っていない。鉄鋼、農業、プラスチック。再利用。
- (3) 温暖化問題に加えて、マイクロ・プラスチック問題(これも原料革命の一結果)。

⇒近現代の産業文明の次代を、特にモノの原材料という点から、構想するという大きな課題が眼前にある。

残された時間は、短ければ12年、長くても35年。

ただし、12～35年後に気温が2度上昇するわけではない。上昇はずっと後。

⇒意外に喫緊の課題なのだが、「世界はそれほど危機感に満ちていない」(?): パリ協定から離脱する大国すらある。

滅びの前夜、諦め、切迫感の希薄さ(「ずっと先の問題など知らない」)

世界を認識する哲学自体が衰弱している。見たくないものは見ないで済みます。これでは、持続性ある社会に移行する可能性は乏しい。

参考文献

小野塚知二『経済史：いまを知り、未来を生きるために』(有斐閣、2018年).

岡村定矩ほか編『人類の住む宇宙』(シリーズ現代の天文学[第2版] I、日本評論社、2017年).

山賀進『君たちの地球はどうなっているのか そして、どうなっていくのか —かけがえのない地球— 』(第2版、麻布文庫、2011年、麻布学園で頒布)。その内容を更新した情報は以下のサイトで閲覧可能。

<https://www.s-yamaga.jp/kankyo/kankyo-hyoushi.htm>

石見徹『地球温暖化問題は解決できるか：実現可能な方向を求めて』(岩波書店、2009年).

IPCC特別報告書「1.5°Cの地球温暖化」(2018年)

<https://www.env.go.jp/press/files/jp/110087.pdf>

IPCC第5次評価報告書(2013年)

<https://www.jccca.org/ipcc/about/index.html>

https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf#search='ipcc第5次評価報告書'