日本国際経済学会・第 78 回全国大会
企画セッション
「歴史的岐路に直面するエネルギー問題: 将来指針構築の課題」
Energy issues facing historic transformation: Possibility of establishing future guidelines

「エネルギー転換シナリオおよびその評価」
Scenarios of energy transformation and evaluation of those expectations

武石礼司（東京国際大学）

要旨

様々な研究機関等から出されている世界のエネルギー需給の将来シナリオを比較検討した。各々のシナリオは差異が大きく、将来の世界の状況をいかに描くか次第で、エネルギー供給と消費の内容が違っている。問題設定をどのように行なうかは、現状で考えられる主要な課題の認識の仕方に依存している。

本稿では、エネルギー全体、社会全体の変化がどのように生じるか、所要の期間とエネルギー選択を、エネルギー消費量というボリュームワイズの考察に加えて、エネルギー向け支出（エネルギー購入額）およびエネルギー向け投資という金額ワイズの面からの考察も実施した。

近年、気候変動問題に関しても、CO_2 の増大に加えて、自然変動による気候の変化、気温の変化が、大きな作用を及ぼすようになっているとの研究が注目されている。この場合、CO_2 削減に全力をあげて注力するエネルギー政策を採用するのではなく、各種のエネルギーをバランスさせて使用していく必要性、埋蔵量の過多、主要国のエネルギーバランスの動向などにも着目したより広範囲な検討が、必要となることを意味する。再生可能エネルギーの利用拡大に関しても、導入が進むにつれて多くの課題が明らかとなってきている。シナリオを検討する中でも、エネルギー需給を巡る大きな構造変化、エネルギー転換への動きが強まる中、それでは将来に向けた各国間の認識のすり合わせ、さらに市場での競争ルールの形成がどのようにしたら進むのか、検討しておく必要が生じている。世界の各国は、エネルギー自給率の高低、国の脆弱性次第で、政策のポジションに大きな差異があるのではないかという点から検討を行った。OECD 諸国加盟国とそれ以外の発展途上国では大きくポジションが異なり、主張が異なってくる可能性が指摘できる。

キーワード：エネルギー需給、エネルギー供給シナリオ、化石燃料、再生可能エネルギー、地球環境問題

目次

1. はじめに
2. エネルギー供給予測・シナリオ
3. 世界のエネルギー関連投資額
4. 環境問題・再生可能エネルギー導入の課題と政策決定のあり方
５．まとめと課題

1. はじめに

化石エネルギーの多量な消費を脱し、低環境負荷のエネルギー源への転換をすべきだとの要請が高まっているが、世界各国は、経済発展の度合い、産業構造、エネルギー消費構造が各々異なるために、世界的な協調ある方針の提示することは難しい状況がある[1]。しかも、世界の化石エネルギーの消費量は膨大である上に、発展途上国を中心に、また米国等も含んで、世界のエネルギー消費量は現在も増大を続けており、エネルギー供給量の増大に向けた投資が必要とされている。石炭消費量を減らそうとした場合には、天然ガス消費量が石炭を代替する燃料として増える傾向がある。運輸用の石油消費量を減らそうとすると、天然ガスあるいは電力の消費量が増える可能性が高い。石油消費量が今後ピークを示し、その後減少に向かうとした場合、供給量の余剰分が一定程度存在すれば、供給量・消費量がピークをつけて減退が始まるまでの間に、価格の高騰は避けられる可能性が高いが、生産量維持のための投資が進まない場合には、供給不足と価格高騰が生じる可能性が高くなる。再生可能エネルギーの導入量は、インセンティブを与えて増やすことはできるが、いっそうの普及のためには、再度の新たなインセンティブの提供、あるいは、政策として支援が必要となる。エネルギー分野への今後必要となる投資額も考慮しながら適切なエネルギー・トランスフォーメーションに向かう必要があり、しかも、本稿で検討するように、地球環境問題に関しても、人為的に排出される温室効果ガスに加えて、今日では、自然変動が大きいことが指摘されている。エネルギー資源の選択に当たっても、CO_2排出比率で一律に決めるのではなく、コストを比較しつつ検討していく必要が増している[2]。この場合、エネルギーセキュリティの面からの検討も同時に重要となる。

各国が協議を重ねていくに際して、重要なのは、共通の認識を持つことが可能となる立場に各国があるかという点である。本稿では、エネルギーの自給率と、GDP 当りの一次エネルギー供給量の関係を検討するとともに、Polity Program という世界各国の政治的安定性を検討している団体が発表した脆弱性指数（Fragile Index）とエネルギーの自給率との関係も検討し、各国が消費するエネルギー資源の選択を行うにあたって、各国の立場に差異が存在する点を指摘する。

2. エネルギー供給予測・シナリオ

---

[1] 2016 年に発効したパリ協定は、2020 年以降の温室効果ガスの排出削減を目指す国際的な取り決めであるが、あくまで、各国の自主的な取り組みを尊重する内容となっている。

[2] この場合のコストには、会計上にカウントされない費用、さらに将来的に負担となってくるという意味での「社会的コスト」を含めて考えることが必要となる。

2．1　予測シナリオの多様性

中長期のエネルギー予測シナリオが研究機関、企業等により作成されているが、近年発表された主立ったシナリオとしては表1のようなものをあげることができる。それらのシナリオにおける前提事項は、経済成長・人口増加とエネルギー消費動向、技術進歩、温室効果ガス排出量への配慮がある。

シナリオの設定期間は、20年程度から、2100年までのシナリオでは80年程度の期間を予測している。技術進歩については、50年先、あるいは30年先ですら予測しきれないと考えられ、そのため、将来的にどのようになっていてほしいと考えて、その状態を達成するための筋道を考えるというシナリオが作成される場合もある。特に、CO_2排出量を最大限削減しようというシナリオを作成すると、この将来の姿から逆算してシナリオを作成する傾向が強まる場合が多い[3]。

表1　世界エネルギーシナリオ[4]

	発表	期間（まで）	予測／シナリオ名
OECD IEA	2018年11月	2040年まで	NewPolicy Scenario
			Sustainable Development Scenario
			Current Policy Scenario
シェル	2018年初め	2070年あるいは2100年	Sky Scenario
	2017年	2060年	World Energy Model
	2017年	2050年	Energy Scenario Germany
	2017年	2100年	Global Supply Model, Oil & Gas: A View to 2100
	2012年	2060年	Mountain & Ocean Scenarios and Lens
BP	2019年	2040年	Energy Outlook 2019
	2018年	2040年	Energy Outlook 2018
ExxonMobil	2018年	2040年	2018 Outlook for Energy: A View to 2040
DOE EIA	2018年	2040年	International Energy Outlook 2018
	2019年	2050年	Annual Energy Outlook 2019
エネ研	2018年	2050年	IEEJ Outlook 2019
			レファレンス、技術進展、石炭火力新設禁止
IRENA	2019年	2050年	Global energy transformation, a roadmap to 2050

（資料）各シナリオ・ホームページ資料より作成

2．2　OECD IEA シナリオ

---

[3] 表1のシェル社のSky Scenarioは、2075年にはCO_2排出量をネットでゼロとするために、化石燃料の消費量をできるだけ早期に削減するとのシナリオとなっている。IRENAのシナリオもCO_2排出量の削減を目指したエネルギー選択を行うシナリオとなっている。

[4] IRENAは、国際再生可能エネルギー機関でThe International Renewable Energy Agencyの略称。

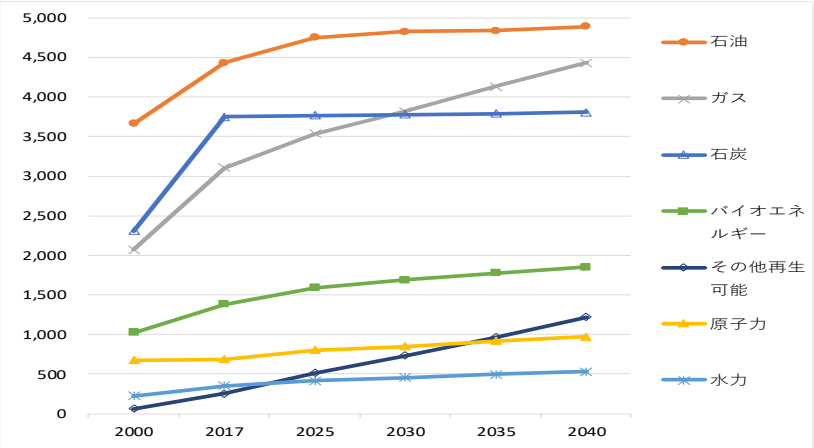
2．2．1　一次エネルギー消費に関する OECD IEA シナリオ

OECD の国際エネルギー機関（IEA）発表の World Energy Outlook 2018 年版は、2040 年までを見通した「New Policy」、「Sustainable Development」、「Current Policy」の 3 つのシナリオを作成し、発表している。

図 1 は、「New Policy」シナリオの世界の一次エネルギー消費予測である。2040 年に向けて世界全体のエネルギー消費量は今後も増大し、石油が最も多い状態が続き、石炭消費量をガス消費量が抜き、第 4 位はバイオエネルギーとなり、第 5 位が（その他）再生可能エネルギー（含む、太陽光、風力等）である。最後に第 6 位が水力で、水力の伸び率は小さいと予測されている。

世界の人口は今後もインド、アフリカほかの諸国で増え続け、かつ、経済成長の余地が大きい国も多いため、世界のエネルギー消費量は増大すると見るのが多くのエネルギー問題の研究機関の一致した見方である[5]。この増大する傾向を持つエネルギー消費量を逆転させて、削減を目指す場合には、何らかの強硬な措置を各国政府が導入するなど、大きな政策変更が必要となる。

図 1　世界の一次エネルギー消費の 2040 年までの予測（ニューポリシー・シナリオ）
（単位：石油換算百万トン）



（出所）OECD IEA "World Energy Outlook 2018"データより作成

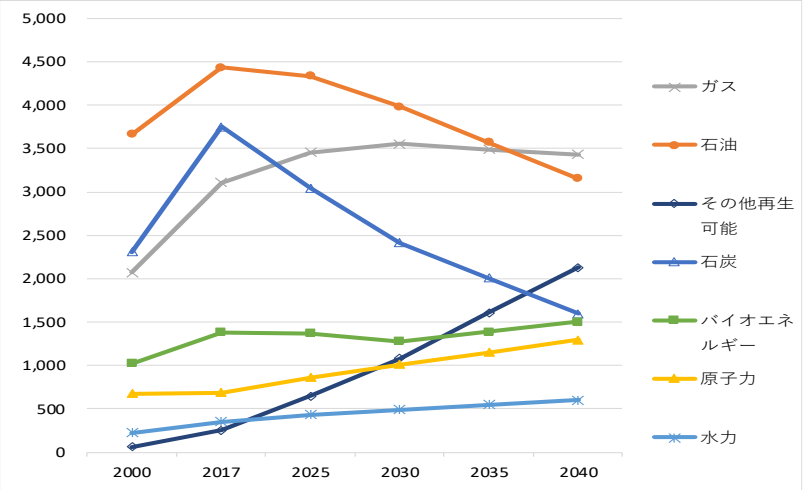
図 2 は OECD IEA が作成した「持続可能シナリオ」で、世界のエネルギー消費量の総量を 2040 年に向けて増大させず、かつ、化石燃料の消費を大幅に抑制するシナリオとなって

[5] 人口に関しては、国連 World Population Prospects が基本資料として引用されて議論が行われている。https://population.un.org/wpp/

いる。

石油と石炭の消費量が 2017 年以降すぐに大幅な削減となっている。エネルギーは、設備が整備された上で供給と消費がなされており、消費量が減るまでには、時間を要するのが普通である。したがって、市場でのコスト競争だけでは、石油、石炭の消費量の急減が生じることは難しい。石油と石炭の消費量を抑え、再生可能エネルギーの競争力を増すための（補助）制度、あるいは、各国政府による強い政策が導入されないと、図 2 のような大きな変化は生じない。

図 2　世界の一次エネルギー消費の 2040 年までの予測（持続可能シナリオ）
（単位：石油換算百万トン）



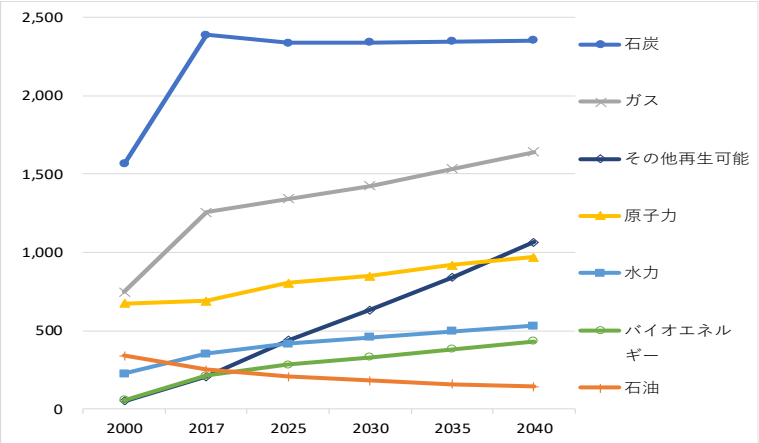
（出所）OECD IEA "World Energy Outlook 2018"データより作成

2．2．2　電力消費に関する OECD IEA シナリオ

電力消費に関する OECD IEA シナリオのうち、図 3 で示すニューポリシー・シナリオでは、2040 年に向けて、石炭火力用の石炭消費が横ばい、ガス火力用のガス消費と、「その他再生可能エネルギー」が大幅増、原子力と水力が増大、石油はいっそうの減少となると予測されている。世界の電力需要の伸びを、ガスとその他再生可能エネルギーでカバーするという構図となっている。

ニューポリシー・シナリオを見ると、世界の電力消費の合計量は年率 1%以上で増大していくと予測され、その増大部分をカバーするのは、ガスと再生可能エネルギーであるとみられている。環境問題で石炭火力の削減が叫ばれる中、2040 年まで、石炭火力の発電量は減らないとの見積もりとなっている点が注目される。発電コストが低いことが、大きなメリットとなっており、導入された石炭火力はできる限りベースロード電源としてフル運転が目指されていくと予想されている。

図 3　世界の電力消費量の 2040 年までの予測（ニューポリシー・シナリオ）
（単位：テラワットアワー）

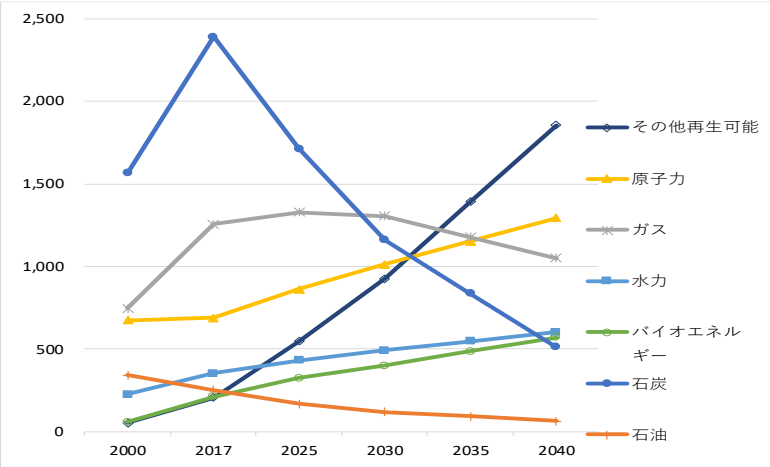


（出所）OECD IEA "World Energy Outlook 2018"データより作成

図 3 のニューポリシー・シナリオに対して、石炭、石油、さらにはガスの消費量も削減していくべきとするのが「持続可能シナリオ」である。このシナリオでは、世界の CO_2 排出量を 2040 年に向けて大幅に削減することを目指している。世界の電力消費量は、今後増大が予測される国が多くあり、石炭、石油、ガス火力の発電量を減らしていく中、発電量を増やすのは、「その他再生可能」、および、原子力、水力、バイオエネルギーである。

現在、経済の好循環過程に入ってきているインドのような途上国が、自国で生産できる石炭の利用を制限されるシナリオを受け入れることは難しいと考えられる。「持続可能シナリオ」は、大幅な変化をもたらす内容であり、実現可能性は大きな課題となる。

図 4　世界の電力消費量の 2040 年までの予測（持続可能シナリオ）
（単位：テラワットアワー）



（出所）OECD IEA "World Energy Outlook 2018"データより作成

以上のように、「ニューポリシー・シナリオ」を目指すことも実際にはなかなか難しい状況があるが、さらに「持続可能シナリオ」を導入するためには、世界的な合意が得られることが必要であり、利害関係者の主張の中から合意点を探る必要がある。

2．3 シェル社のシナリオ

図 5 はシェル社が 2018 年初めに発表したスカイ・シナリオ[6]で、世界全体のエネルギー消費量の 2100 年に向けた予測を示している。CO_2 排出量の削減をパリ協定の合意に従い、その目的に沿うように、石炭・石油の消費量をできる限り減らし、さらに天然ガスの消費量も削減するとの内容となっている。武石（2018b）で示すように、仮にスカイ・シナリオに従った化石燃料の削減が始まった時には、中東をはじめとする発展途上国の経済は致命的なダメージを受けることになる。

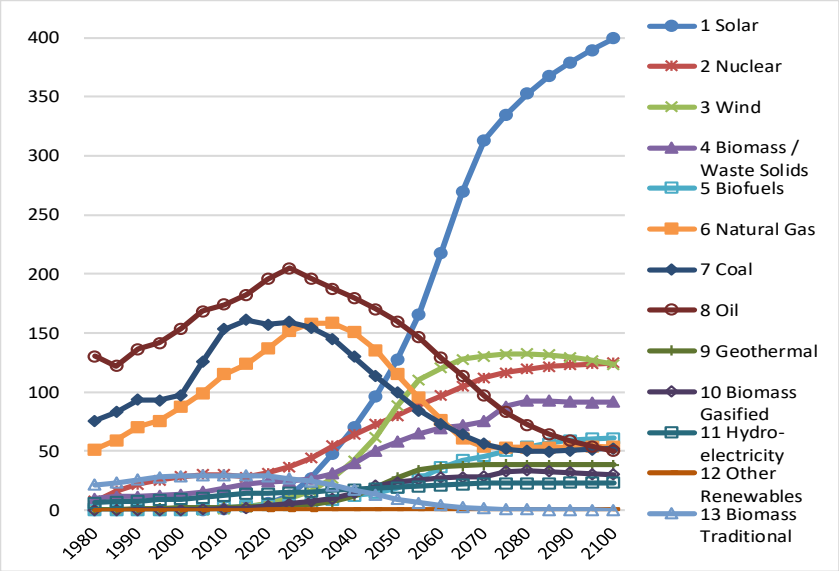
化石燃料による発電量を減らしたことによる不足部分は、第一に、太陽光発電によってカバーする案となっている。太陽光パネルは、設置量を増やせば増やすだけ発電量は増大する。2100 年に向けて太陽光発電に狙いを定めて、できる限り導入量を増大させるという内容のシナリオとなっている。

注目されるのは、太陽光発電を除いた他の再生可能エネルギーの利用は、2060 年あるいは 2070 年までは増大するものの、その後は横ばい傾向を辿り、唯一、太陽光のみが増大を続けると予測されている点である。

これは、風力の導入適地となる風況に優れた地域への導入が進むと、導入量は一定の限度に達すると考えられているためである。バイオマス、地熱、水力に関しても、利用量の増大傾向は鈍化し、一定の限度量が存在すると考えられていることを示している。

図 5　シェル社スカイ・シナリオ：世界全体のエネルギー消費量の 2100 年に向けた予測（単位: EJ / year）

[6] https://www.shell.com/.



（資料）Shell 社発表データ[7]より筆者作成

2012 年にシェル社が発表した、シナリオ（Shell's New Lens Scenarios family: Mountains and Oceans.）[8]のマウンテンシナリオにおいては、石炭を使い続ける国があり（例えば、中国）世界の石炭消費量は増え続けるものの、地下貯留（CCS）の大幅導入により CO_2 排出量の削減を図っていくとしている。

2012 年のシェル社発表のもう一つのシナリオのオーシャンシナリオでは、再生可能エネルギーの導入を、マーケットの役割を重視する中で増やしていくシナリオであり、CO_2 排出量の削減も目指す内容となっている。

2．4　BP 社のシナリオ

BP 社は、2040 年に向けたエネルギー予測を 2018 年に発表している。2040 年に向けては、エネルギー分野で大きな変化が生じるであろうと予測しており、図 6 で示す基本ケースとなる Evolving Transition シナリオにおいては、石油と石炭の需要が頭打ちとなるとの予測を出している。ただし、BP 社の説明によると、予測はあくまで、事象が発生する因果関係を示すのが目的で、BP 社が、将来、世界のエネルギー需要がどうなってほしいと望むのでもなく、また、何パーセントの確率で予測が生じると述べるのでもないと説明している。

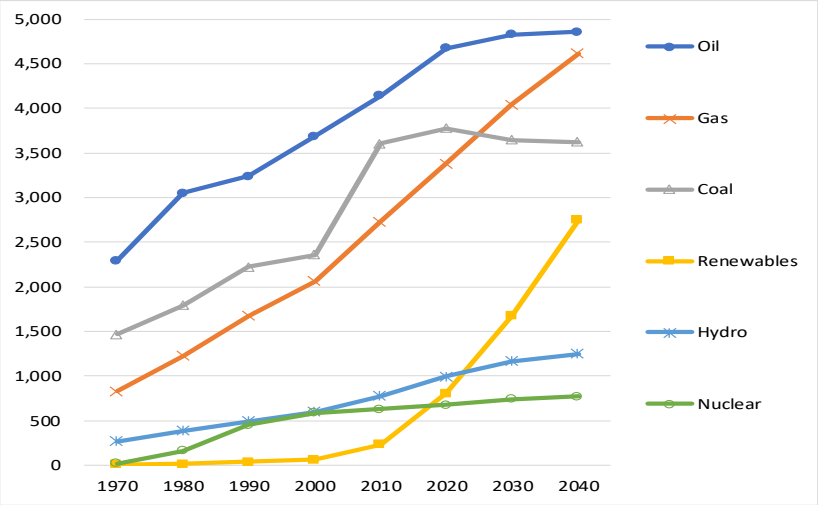
図 6 では 2010 年以降、再生可能エネルギーの増大幅が大きく、また、2040 年に向けて天然ガスの増大幅も大きいと予測されている。

---

[7] https://www.shell.com/

[8] https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/new-lenses-on-the-future.html

図 6　世界のエネルギー需要の予測
BP 予測（単位：石油換算 100 万トン）



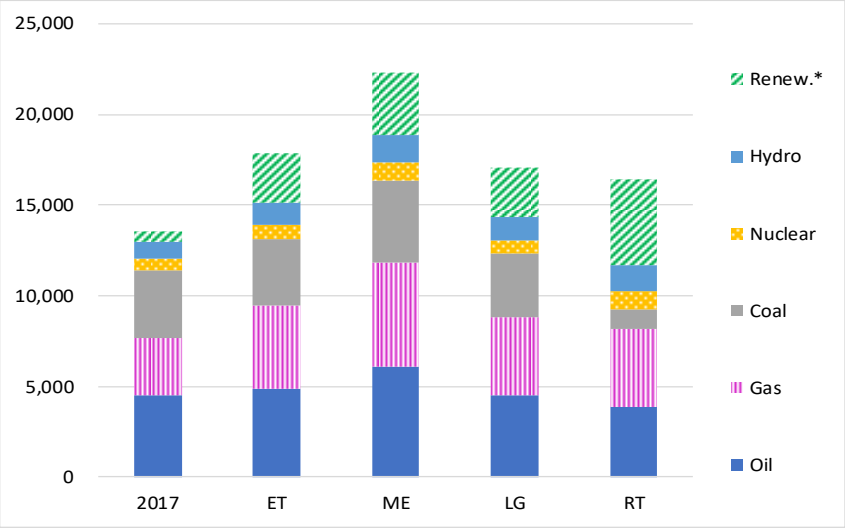
（資料）BP Energy Outlook, 2019 edition　データより作成[9]

次に、図 7 で示すように、BP は Evolving transition (ET), More energy (ME), Less globalization (LG), Rapid transition (RT)の 4 つのシナリオで、政策の差異によりエネルギーの消費量が 2040 年において、エネルギー源ごとに異なってくる可能性があることを示した。

2040 年までの間で見ても、政策として石炭消費量を大幅に削減していく方向性が強く打ち出されるか、石炭消費の減少部分を再生可能エネルギーで補う方向性が採用されるかにより、図 7 の各々のケースにおける大きな差異が生じている。

図 7　BP 社発表の 2040 年における世界のエネルギー需要の複数予測の比較
（単位：石油換算 100 万トン）

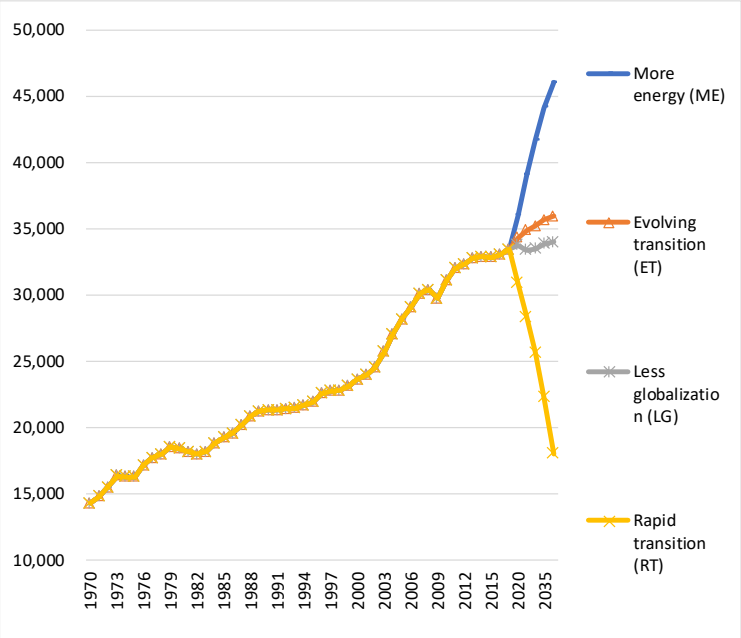
[9] https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html



（注）2017 年の実績値と、Evolving transition (ET), More energy (ME), Less globalization (LG), Rapid transition (RT)の各ケースの 2040 年の予測値を示す。
（資料）BP Energy Outlook, 2019 edition データより作成

図 8 は、上記の図 7 で示した Evolving transition (ET), More energy (ME), Less globalization (LG), Rapid transition (RT)の 4 つのシナリオによる CO_2 の各年の排出量の予測値を示している。いずれのシナリオとなるか、政策の採用次第で、世界の CO_2 排出量が大きく変わる可能性があることを示している。

図 8　CO_2 排出量の実績と予測（単位：Gt CO_2）

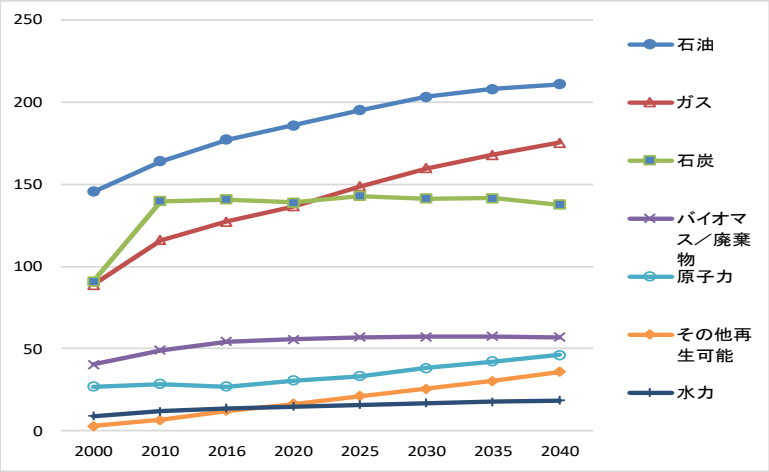


（資料）BP Energy Outlook 2019 edition データより作成

2．5　エクソンモービル社のシナリオ

エクソンモービル社が発表した 2018 年の世界のエネルギー消費予測[10]によれば、図 9 で示すように、石炭は 2025 年でピークアウトし、石油とガスは増大傾向が続くと予測されている。なお、同社のデータによれば世界の CO_2 排出量は 2035 年でピークアウトすると予測されている。

図 9　エクソンモービルの世界のエネルギー消費量予測（2040 年まで）（単位：quadrillion BTU）



（資料）エクソンモービル発表データ Outlook for Energy, 2018

2．6　US DOE EIA のシナリオ

次に米国エネルギー省のエネルギー情報局（EIA）の予測[11]を見ると、2040 年までの間で、世界の石油需要は伸び続けるとの予測となっている。

2018 年現在では石炭は世界第 2 位のエネルギー源であるが、2030 年に向けてはいったん減少するものの、2030 年代には再度若干上昇するとの予測となっている。

大きく伸びるのは天然ガスと再生可能エネルギーであり、天然ガスの消費量は 2030 年代に石炭を抜くと予測されている。原子力発電も緩やかに増えるが、全体に占める比率は低下

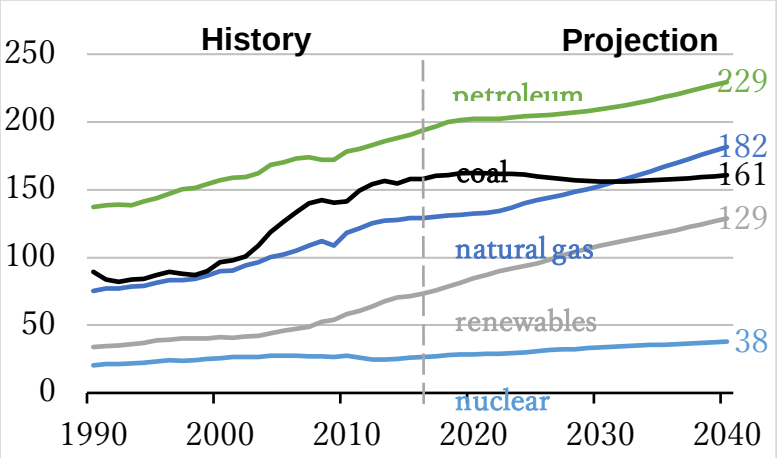
---

[10] ExxonMobil, 2018 Outlook for Energy: A View to 2040.
https://corporate.exxonmobil.com/en/energy/energy-outlook/a-view-to-2040

[11] https://www.eia.gov/outlooks/ieo/.

すると予測している。

図 10　世界のエネルギー消費量の内訳（2040 年まで、米国エネルギー省 EIA 予測）
（単位：quadrillion Btu）



（資料）米国エネルギー省 EIA：International Energy Outlook 2018 (IEO2018), July 24, 2018[12]

2．7　日本エネルギー経済研究所のシナリオ

日本エネルギー経済研究所が 2018 年に作成した「IEEJ Outlook 2019」[13]では、レファランス・シナリオに加えて、技術進展シナリオで、エネルギー安定供給と気候変動対策のために政策が強化され、その政策が一定の効力を発揮するシナリオを作成している。副題が、「エネルギー変革と 3 E 達成への茨の道」と記されているように、CO_2 排出量の抑制と、エネルギー安全保障、それに電力コストの問題を一度に解決することは難しく、トレードオフの関係にあることを示している。

注目されるのは、石炭火力の新設が禁止されるシナリオを作成している点で、予想される課題にどのように対応するかという現実味を帯びたシナリオの作成が行われている。

2．8　IRENA のシナリオ

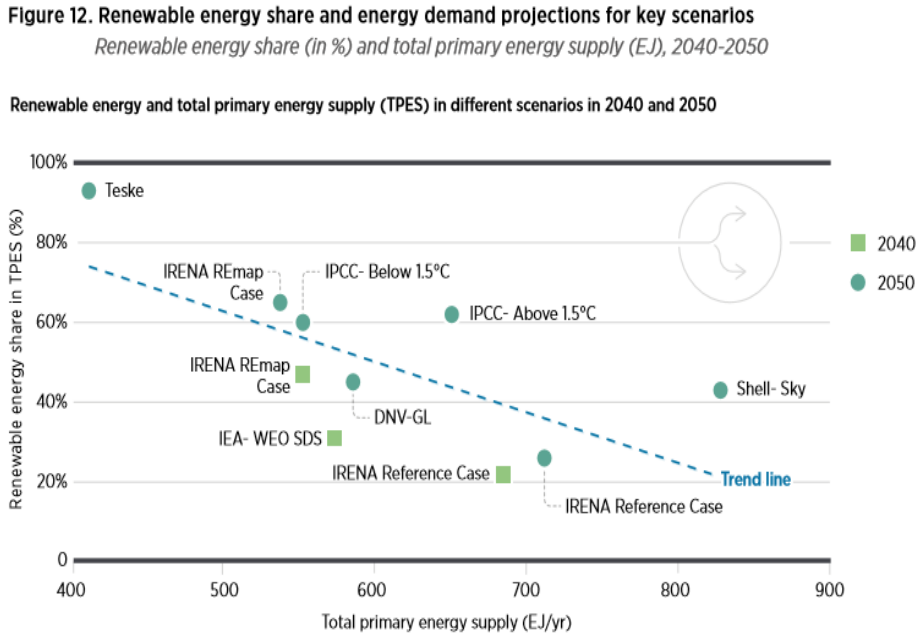
IRENA (国際再生可能エネルギー機関：The International Renewable Energy Agency)は、2011 年に設立された国際機関で、再生可能エネルギーの導入促進を行っており、図 11 で示

[12] https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

[13] https://eneken.ieej.or.jp/press/press181012.pdf

すように、2040 年あるいは 2050 年に向けた再生可能エネルギーの導入可能性についてのシナリオを発表している。再生可能エネルギー向けの世界の投資額の情報の提供、再生可能エネルギー導入促進と経済成長との関係など、積極的な提言に取り組んでいる。

図 11　IRENA 作成のシナリオの位置づけ



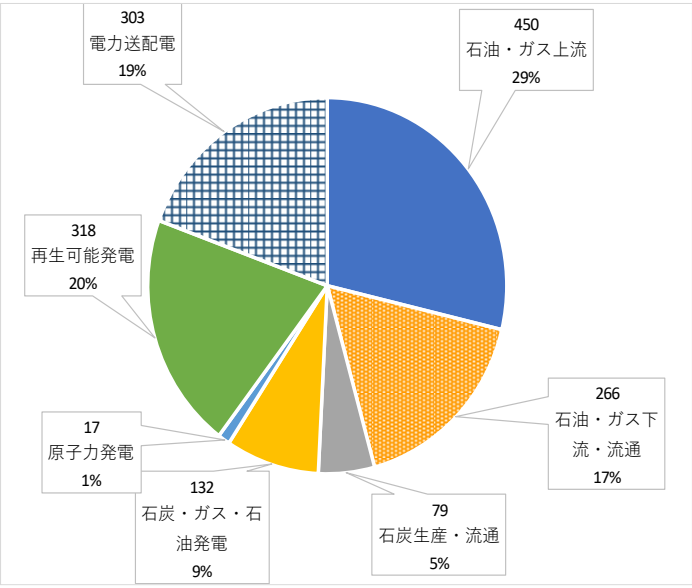
（出所）IRENA,” A Roadmap to 2050,” 2019 Edition, p.34

3. 世界のエネルギー関連投資額

世界のエネルギー関連投資額は、OECD IEA の積算によれば 2017 年で総額 3 兆ドルを超えている。図 12 で示すように、投資額の半分近くが石油ガス関連で、石炭等の化石燃料関連、および化石燃料を用いた発電関連の投資額も含めると、化石燃料を生産・利用するための投資額は、世界の総投資額の 6 割に達する。

再生可能エネルギー関連の投資額は増大中であり、2017 年ではエネルギー関連の総投資額の 2 割に達しており、金額も世界全体で 3 千億ドルを超えている。

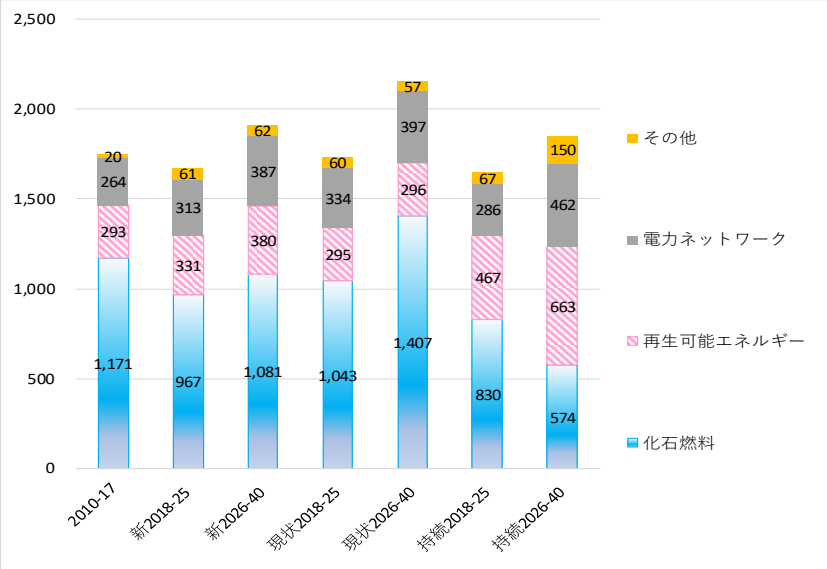
図 12　世界のエネルギー関連投資額（2017 年）（単位：10 億ドル）



（出所）OECD IEA, World Energy Investment 2018, p.26, Table 1.1 データより作成

図 13 で見るように、シナリオごとに投資額は大きく異なっている。政策として、再生可能エネルギーへの投資額を増やす仕組み作りが、世界主要国の合意の下、実現するのかどうか、この点が注目される。既に導入済みの発電所等の設備は、コスト競争力が強い。また、再生可能エネルギーの導入コストが下がったのみでは、安価な石炭、安価なシェールガスを用いた発電との競争力でも、再生可能エネルギーの導入量には、将来的にも、一定の限界があると考えられる。

図 13　世界のエネルギー向け年間平均投資額予測（単位：10 億ドル）

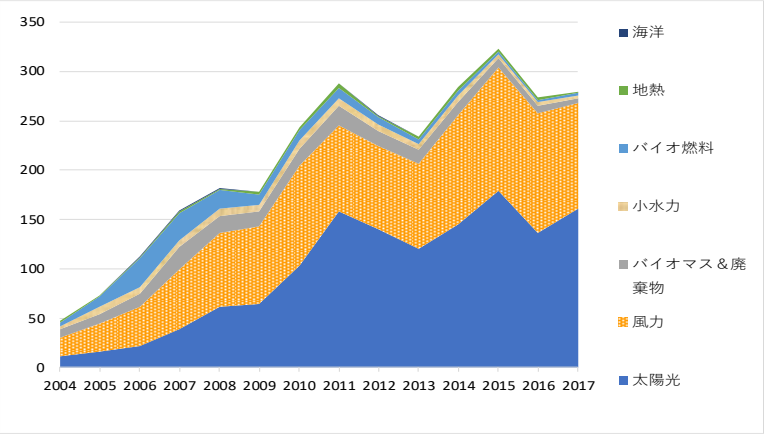


（注）図中の「新」はニューポリシー・シナリオを意味し、「現状」は現状維持シナリオを

意味する。「持続」は持続可能シナリオを意味する。
（資料）OECD IEA "World Energy Outlook 2018" p.50 データより作成

図 14 で示すように、世界の再生可能エネルギー向けの投資は、投資回収が早い太陽光に集中した傾向がある。風力も、風況が良い場所に設置すると利益を出せるので、投資が行われてきた。太陽光と風力以外の再生可能エネルギーへの投資額は、規模が小さいままで推移してきた。

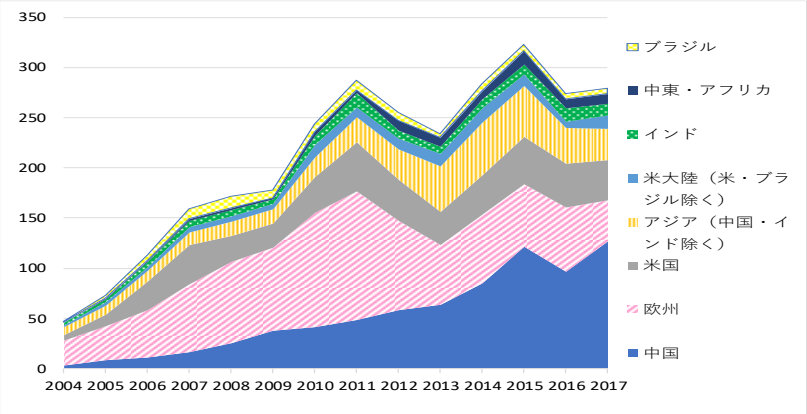
図 14　世界の再生可能エネルギー向け投資額（単位：10 億ドル）



（資料）UN Environmental Program, "Global Trends in Renewable Energy Investment 2018" データより作成

国別投資額では、2000 年代初めにおいては欧州の合計が第一位を占めていたが、中国が急増して、2013 年以降欧州の合計を抜いて一位となっている。2017 年では世界の投資額の 45%を中国が占めている。

図 15　世界の再生可能エネルギー向け国別投資額（単位：10 億ドル）



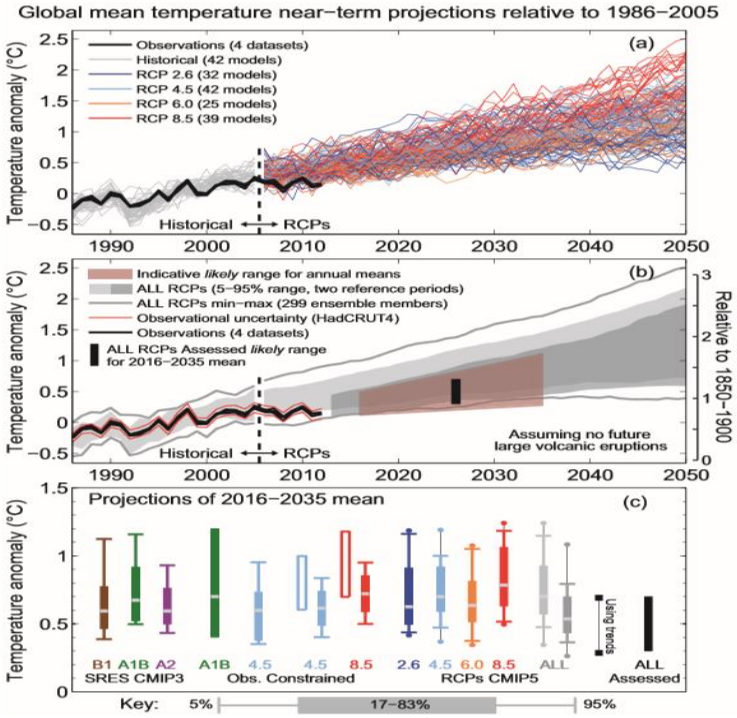
（資料）UN Environmental Program, "Global Trends in Renewable Energy Investment 2018" データより作成

4. 環境問題・再生可能エネルギー導入の課題と政策決定のあり方

4. 1　環境問題における動向

図 16 は IPCC 発表の第 5 次報告書（2013 年）に記載された図であるが、温暖化予測と世界の温度の実測値との乖離が 2000 年代に生じたことを示している。多くのモデル計算上の予測値が、予測の下方修正と再計算を強いられている。この気温上昇の停止（ハイエイタス：Hiatus）という現象を巡って、人為的な温暖化と自然変動による温暖化の関係、およびそのそれぞれの影響の割合が、どの程度であると考えるべきかが議論されているところである[14]。

図 16　IPCC 発表の温暖化予測と実績値（第 5 次報告書、2013 年）



[14] 田中（2015）は、自然変動を過小評価して、人為起源の温暖化を過大評価している可能性を指摘している。

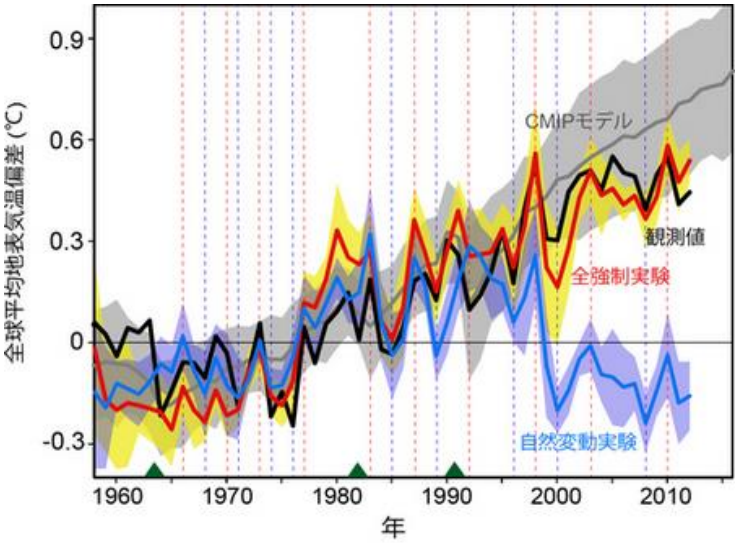
（出所）IPCC AR5 WG1, 2013, Figure TS.14｜Synthesis of near-term projections of global mean surface air temperature (GMST).　P.87[15]

図 17 は、渡辺ほか（2014）により行われた研究の結果であるが、2000 年以降は、自然変動はむしろマイナス値を示しており、温室効果により、結果としてプラスが維持されており、気温上昇は停止した状態が出現したとされている。この研究によれば、1980 年代、1900 年代、2000 年代の 10 年ごとの内部変動[16]の寄与はそれぞれ 47%、38%、27%のであると算出されている。

近年、中川（2017）が述べるように、地球上で 1 万年ほど安定した温度が続いた時期が終わり、自然変動が大きくなり、例えば、わずか数年で地球の温度が大きく変化する厳しい気候が出現する時代に入る可能性が示唆されている。

以上のような指摘が出てくるようになった現状から考えると、エネルギー分野においても、温室効果ガスの削減努力は続けるとしても、温暖化と寒冷化が頻繁に生じる可能性に備えて、エネルギーの供給の世界的なレベルでの強靱化、協力体制の整備、気候変化に対して脆弱な地域に住み、保護されるべき人々のことを考えて資金を振り向けて行く必要がよりいっそう強く意識されるべきであると考えられる。

図 17　気温変化の再現実験の結果



（出所）渡辺ほか（2014）東京大学大気海洋研究所[17]

---

[15] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_TS_FINAL.pdf

[16] 同論文によれば、人間活動とは無関係に生じる自然の変動のうち、気候システムの外部要因（太陽活動や火山噴火など）によらない現象を内部変動と呼ぶとしている。

[17] https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2014/20140901.html

4．2　再生可能エネルギー導入の課題

武石（2017）では、再生可能エネルギーの大量導入が生じるに際しては、価格設定においてインセンティブが整備されるなど何かの方法で導入が促進されていることを指摘している。中国においては、送電網会社による電力購入価格が、石炭火力発電ではコスト割れするほどの安価に設定され、再生可能エネルギーについては高く設定されることで、発電会社は、利益を確保するために、太陽光、風力の導入に会社の存立をかけることになり、一方石炭火力をできるだけ動かさないようにしたために、再生可能エネルギーの導入量の急増が生じた。

米国の場合は、税額控除の制度により再生可能エネルギーに対する国内投資の活発化が生じた。

欧州においては、固定価格買取制度（FIT）の導入により再生可能エネルギーの急増が生じ、いったん導入が沈静化した後、再度、北海とバルト海での洋上風力の導入促進策により、北海に面した諸国での再度の導入量の増大が生じている。

このようにインセンティブを提供する政策が導入されることで、再生可能エネルギーの急拡大が生じた。

太陽光発電は設備導入が容易で、日射量に恵まれた地域では、大量導入も生じた。しかし、ダックカーブと呼ばれる、日中の時間に、太陽光による発電量の急増と、午後遅くに、太陽光発電量の急減が生じてしまう場合が生じるようになった。日本では、特に日射量に恵まれた九州地域において、このダックカーブが生じることとなった[18]。太陽光発電を除いた、その他の火力等の発電設備は、朝方の電力需要の急増に備えるとともに、夕方のさらに急速な需要増大に備える必要が生じた。太陽光発電量の変動をカバーするための発電容量を、それら太陽光以外の発電設備が、自らの設備が発電を行っていないときでも保有しておく必要性が生じている。

このように、太陽光発電の広義のコストは、太陽光設備以外でも必要となることがわかってきた[19]。

ガス、石炭、石油等の化石燃料による発電では、燃料代がかかるが、再生可能エネルギーでは太陽光、風力、水力など燃料代がかからないために、発電コストが安価となる。ただし、設備稼働率が低く、また、発電量が変動する電源であるために必要となる蓄電・バックアップ等のコストも必要であり、導入量を増やすためには、追加コストが必要となる。

設備稼働率は、太陽光発電は 10%台から 20%程度、風力発電で 20%（陸上）から 30%

---

[18] 九州電力、2017 年度 経営計画の概要〔詳細版〕　2017 年 6 月、
http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0076/5472/iyr09lk3.pdf

[19] Andor ほか（2017）では、ドイツで家庭用の電力価格が上昇した事例を分析している。

（洋上）程度となっており、設備投資コストの負担が、設備利用率が低い分だけ生じると言える。

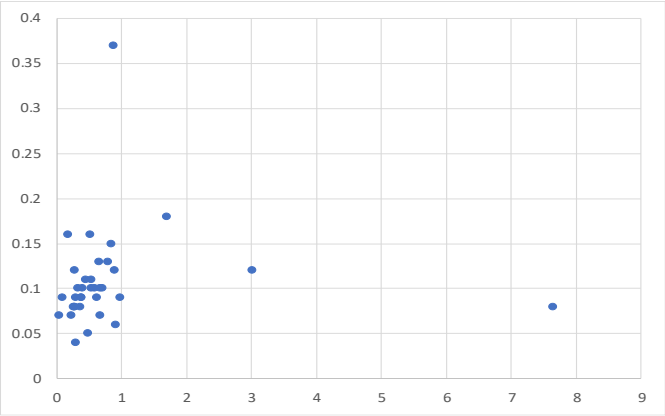
4．3　エネルギー問題に対するコンセンサスの形成の可能性

各国のエネルギー問題に対するポジションが大きく異なる場合、エネルギー転換を図ろうとしても、同じ政策を導入することが困難になる可能性が生じる。

OECD 諸国（35 カ国）のエネルギー問題に対する立場が、一致を見る可能性があるかにつき、以下で検討してみる。

重要な指標として、エネルギー自給率を見るとともに、一次エネルギー供給（TPES）が各国の経済において負担となっているかどうかを知るために、TPES を GDP（購買力平価（PPP）換算による US ドル額）で除した比率を算出し考察を行った。

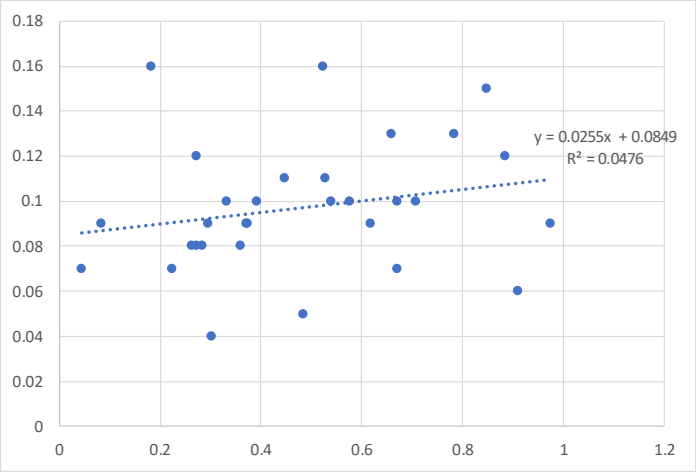
図 18　OECD 諸国（35 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP 比率（toe per thousand 2010 USD）　（縦軸）の関係



（資料）OECD IEA, World Energy Balances, 2018 データより作成

上記の図 18 では、エネルギー自給率（横軸）が特異値であるオーストラリア、カナダ、ノルウェーを除き、また、縦軸の数値が 0．35 を超えているアイスランドを除くと図 19 が作成できる。

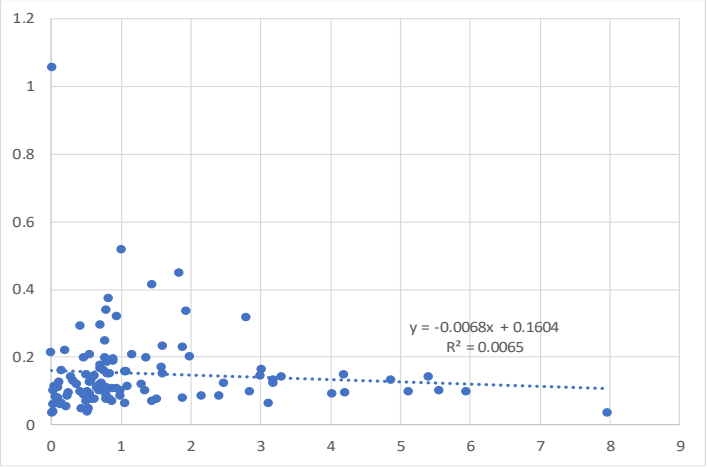
図 19　OECD 諸国（31 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP 比率（toe per thousand 2010 USD）　（縦軸）の関係
（図 18 よりオーストラリア、カナダ、ノルウェー、アイスランドを除いた図）



（出所）図 18 と同じ

次に、OECD 非加盟国 109 カ国による非 OECD 諸国（109 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP 比率（toe per thousand 2010 USD）（縦軸）の関係を図 20 で示す。

図 20　非 OECD 諸国（109 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP 比率（toe per thousand 2010 USD）（縦軸）の関係



（出所）図 18 と同じ

図 20 において、横軸の自給率が 8 倍に近い値を取る国は南スーダンである。5 倍以上の値をとっている国はアンゴラ、ブルネイ、コンゴ、カタールである。1 倍を超えて、エネルギー自給が達成されている国が、109 カ国中に 40 カ国（37%）あり、自給率 100%以上の国の数は比較的多いと言える。エネルギー（特に化石燃料）の輸出に経済が大きく依存している発展途上国が一定数あることを示している。

また、縦軸で 1 を超える値をとっているのは、南米のオランダ領のキュラーソである。

これら特別に大きな値を取る国はあるものの、数の上ではエネルギーの自給が出来ていない国の方が多い（109 カ国中 69 カ国）。

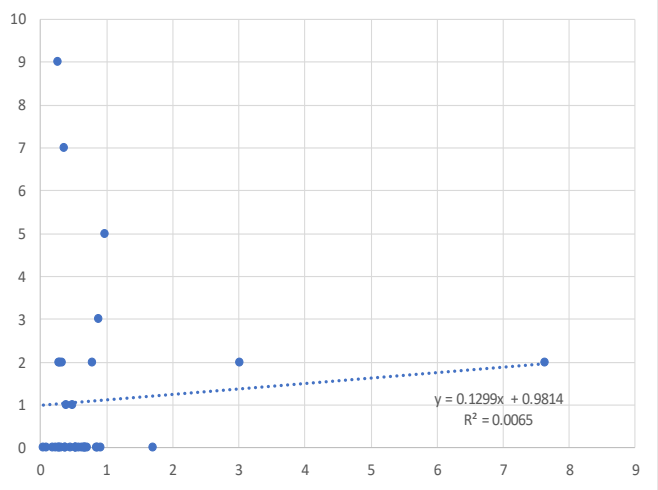
その一方、一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP の比率（縦軸）が、一定のレベル（特に 0．2）以下に止まる国が多い。多くの国が、自国の GDP 額に見合ったエネルギーの支出をしていると見ることができる。したがって、自国財政には余裕がなく、補助金等の援助を得てからでないと、再生可能エネルギーを含めた新規投資をなかなか実施できない国が多いことも示されている。したがって、石炭が安価であれば、石炭火力を選択し、導入しようとする国が出現することになる。

4．4　政治の安定性（脆弱性指数）および政治民主化度（Polity 指標）とエネルギー供給

政治の安定性を The Center for Systemic Peace[20]が発表している脆弱性指数（Fragility Index）で示し、エネルギー自給度との関係を見ると、OECD 諸国の中で脆弱性指数（0 から 24 の値をとる）が高いのは、トルコが 9、イスラエルが 7、メキシコが 5、米国が 3 となっている。

エネルギー自給率が高いのはノルウェー7.6、オーストラリア 3.0 である。

図 21　OECD 諸国（35 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と国の脆弱性指数（0 から 24）（縦軸）の関係

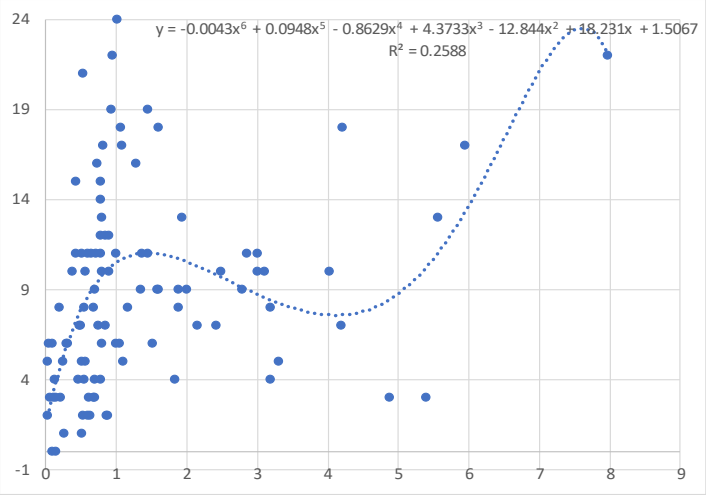


（出所）横軸データは図 19 と同じく OECD IEA, World Energy Balances, 2018 より。縦軸は Polity Program データより

[20] https://www.systemicpeace.org/

非 OECD 諸国について見ると、自給率と比べても、脆弱性に関しては、同じ程度の自給率でも、縦に大きく広がっており、統治がうまく働かない等の現象は、比較的容易に発生しているとみることができる。

図 22　非 OECD 諸国（102 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と国の脆弱性指数（0 から 24）　（縦軸）の関係

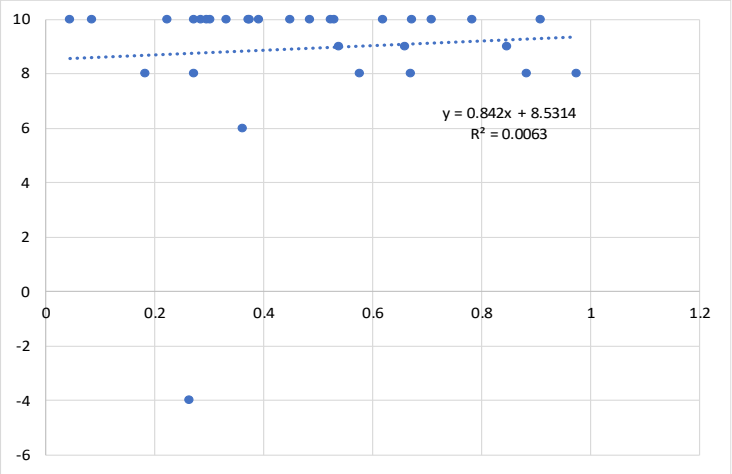


（出所）横軸データは図 19 と同じく OECD IEA, World Energy Balances, 2018 より。縦軸は Polity Program データより

次に、民主化度を示すポリティ・データ[21]でエネルギー自給度との関係を見ると、民主化度がマイナスで－4 であるトルコを除いては、エネルギー自給率が高いか低いかに大きな影響を受けずに、OECD 諸国はいずれも民主化が進んでいると言える。

図 23　OECD 諸国（35 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と民主化度（Polity 指標）（縦軸）の関係

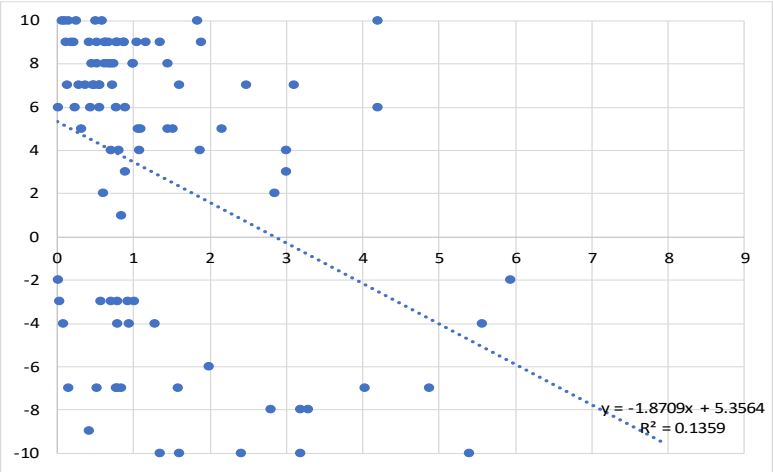
[21] ポリティ・データで、10 は完全な民主制、－10 は完全な独裁制を表す。



（出所）横軸データは図 19 と同じく OECD IEA, World Energy Balances, 2018 より。縦軸は Polity Program IV, 2016 年データより

一方、非 OECD 諸国においては、民主化度が低い諸国も多くあり、しかも傾向としてエネルギー輸出国で、輸出比率が高くなるとともに、民主化度は低下する傾向が見られる。ロス（2017）が指摘した「石油の呪い」の状況が、エネルギー輸出国には出現する可能性が高いことが図 24 から確認できる。

図 24 非 OECD 諸国（99 カ国）のエネルギー自給率（横軸）と民主化度（Polity 指標）（縦軸）の関係



（出所）横軸データは図 19 と同じく OECD IEA, World Energy Balances, 2018 より。縦軸は Polity Program IV, 2016 年データより

5. まとめと課題

本稿で行ってきた複数のシナリオの検討から、2040 年以降に向けた中長期予測を行う際には、各国政府の方針がどのように定まるか次第で、世界全体として見たエネルギー需給の状況が全く異なった様相を見せる可能性があることが示された。

エネルギー分野における投資額に関しては、エネルギーの高効率利用、温室効果ガス排出削減のための努力も継続しつつ、より強力に、エネルギー供給の世界的なレベルでの強靱化、協力体制の整備、気候変化に対して脆弱な地域に住み、保護されるべき人々に対する資金の支出が重視されるべきことを指摘することができた。

再生可能エネルギーの導入量に関しても、日本など国土面積が広大でない国では、一定程度まで導入されると、伸び率が低下することは不可避である。Bohringer ほか（2017）がドイツの事例で述べるように、失敗に学んで制度を変更してきた教訓を、日本でも活かしていく必要がある。

次に、途上国においては、エネルギー支出が GDP に占める比率が、OECD 諸国に比べ大きい傾向があり、エネルギー輸出量が自国消費量に対して増えていくことで、国内エネルギー向けの支出が経済に与える負担は軽減されていく傾向がある。

OECD 加盟の 35 カ国のうち、エネルギーの輸出国であるオーストラリア、カナダ、ノルウェーを除いた 32 カ国は、エネルギーのネット輸入のポジションにある。先進国であって、製造業が活発に輸出を行っている国が多い OECD 加盟国においては、一次エネルギー供給（TPES）/GDP PPP 比率が小さい。つまり、OECD 加盟国においては、途上国と比べて、エネルギー輸入が、それほど大きな経済的負担となっていない状況がある。

各国の国としての脆弱性の検討を行ったことで、OECD 諸国と非 OECD 諸国の間に明らかな格差が存在することが指摘できる。さらに、エネルギー輸出依存国、エネルギー非輸出国との間で、異なった立場があり得ることも分析から確認できた。立場が異なれば、主張内容も異なり、合意を得ようとしても利害が一致しない可能性が生じる。

民主化度とエネルギー自給率の関係を見ても、OECD 諸国のように、トルコを除いては完成度が高い政治システムが確立されていると見ることができる欧州地域がある。

その一方で、非 OECD 諸国においては、エネルギー輸出比率が高くなるとともに、民主化度は低下する傾向が見られる。独裁度が高い場合に、大きな決断を要する政策が導入できる場合があり得るが、しかし、国そのものの発展が阻害されてしまう場合も生じ得るために、国際的なコンセンサスが必要な問題に、合意を取り付けることができるかどうかは、事案ごとに異なる可能性がある。

さらにもう 1 件重要なのが、エネルギー供給の持続性である。例えば、中国では多量に石炭を消費しているが、自国生産の可採年数は 2019 年現在で 38 年分である（BP statistics 2019[22]）。年々、可採年数が低下しており、ガス生産を増大させ、ガス輸入量を増やしても、

[22] https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

石炭の消費量を代替することは困難な量である。

エネルギー供給に関する安全保障の観点から考慮も重要である。土肥ほか（2018）で試みられているように、数量化して効果を検討していく必要がある。

将来のエネルギー供給の問題に関するコンセンサスを得ていくためには、それぞれの国の置かれた立場、地球環境問題も含めた主張とその根拠の把握に努め、各国の発展戦略にも配慮しつつ、エネルギー需給に関する大きな転換期への対応を促していくことが必要となる。技術の後押しもあって、エネルギー転換が世界的に強く意識されているだけに、変わるものと変わらないもの、変化がなかなか現れないものなど、様々な事項が出現する状況に、各種シナリオを踏まえながら、対応して行く必要が生じている。

参考資料

武石礼司（2018a）,「エネルギー供給シナリオ分析とその評価」日本国際経済学会第 77 回全国大会, 2018 年度発表論文集.

武石礼司（2018b）,「低炭素社会と中東産油国経済の将来」日本中東学会第 34 回年次大会、2018 年度発表論文集.

武石礼司（2017）,「固定価格買取（FIT）制度による再生可能エネルギー導入効果」日本国際経済学会第 76 回全国大会、2017 年度発表論文集.

田中博（2015）,「地球温暖化のハイエイタスが自然変動によるものならば人為起源の温暖化の将来予測は過大評価となる」(特集 今,地球はどうなっているのか?「地球規模の 環境問題」）『伝熱』54 巻,226 号,12-15 頁.

土肥 英幸, 杉村 丈一（2018）,「エネルギーセキュリティの費用化手法の検討」『日本エネルギー学会誌』97 巻 2 号 23-30 頁.

中川毅（2017）,『人類と気候の 10 万年史』講談社.

ロス、マイケル・L（2017）『石油の呪い』吉田書店

渡辺雅浩ほか（2014）,「地球温暖化の停滞現象（ハイエイタス）の要因究明～2000 年代の気温変化の 3 割は自然の変動～」.

Bohringer, Christoph, Florian Landis, Miguel Angel Tovar Reanos. (2017), Economic Impacts of Renewable Energy Promotion in Germany, *The Energy Journal*, Vol. 38, SI1: 189-209.

Andor, Mark A., Manuel Frondel, Colin Vance,(2017), Germany's Energiewende: A Tale of Increasing Costs and Decreasing Willingness-To-Pay, *The Energy Journal*, Vol. 38, SI1: 211-228

シナリオ参考資料

OECD IEA New Policy Scenario, Sustainable Development Scenario, Current Policy Scenario https://www.iea.org/

Shell, Sky Scenario, World Energy Model, Energy Scenario Germany, Global Supply Model, Oil & Gas: A View to 2100, Mountain & Ocean Scenarios and Lens Scenario, https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios.html

BP, Energy Outlook 2019, and, Energy Outlook 2018, https://www.bp.com/

ExxonMobil, 2018 Outlook for Energy: A View to 2040, https://corporate.exxonmobil.com/

US DOE EIA, International Energy Outlook 2018, Annual Energy Outlook 2019, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

日本エネルギー経済研究所, IEEJ Outlook 2019, https://eneken.ieej.or.jp/press/press181012.pdf

IRENA, Global energy transformation, a roadmap to 2050, https://www.irena.org/

The Center for Systemic Peace (CSP)　http://www.systemicpeace.org/inscrdata.html
（2019 年 8 月 30 日アクセス）