

再エネ革命とエネルギー耕作型文明（抜粋）

システム技術研究所 所長 樋屋治紀

2018年 岩波「世界」増刊号 「再エネ革命—日本は変わるか？」

1. はじめに

食糧、水、エネルギーは人類が持続的に生きてゆくのに必要不可欠な資源である。19世紀から20世紀に人口が急激に増加し、これらの資源を人々に豊かに供給するために、多くの開発が行われた。エネルギーについて見てみると、石炭を利用する産業革命から始まって、石油の開発、天然ガスの開発、さらには原子力と、相次ぐ技術革新を通じて広範な利用が進んだ。電力を利用するモータと産業機械、暖冷房、照明、コンピュータ、情報通信などが進展した。石油は輸送用の液体燃料として内燃機関を使う自動車、飛行機、船舶などに利用された。

こうして私たちの生活にエネルギーは欠くことができないものとなった。そして、現在、エネルギーの多くは化石燃料（石油、石炭、天然ガス）によって供給されている。現在では世界で1年間に150億トンもの化石燃料が消費され、330億トンの二酸化炭素を排出している。このうち石油は、特に中東地域や南北アメリカに遍在しており、地政学的な問題を生み出す原因になっている。

このようなエネルギーの大量消費が続いているとき、1972年にMITのメドウズらがコンピュータモデル「システムダイナミクス」を使った「成長の限界」報告を発表した。この報告はヨーロッパに本拠を置くローマクラブからの依頼で行われた研究であったので「ローマクラブ報告」とも呼ばれている。「資源と環境の限界のため無限に続く経済成長はあり得ない」ことを当時の最新の道具であるコンピュータによって示したものであった。

そして「成長の限界」の予言が的中したような事態になった。1973年に第四次中東戦争でイスラエルに対して停戦にこぎつけたアラブ諸国は、OPECを通じて親イスラエル国に対して石油禁輸を宣言した。石油価格は4倍に高騰し、世界は大混乱に陥った。日本もかつてない騒乱に見舞われた。

この石油危機は化石燃料資源の有限性を広く認識させることになり、代替エネルギーの開発が行われるようになった。技術開発は20世紀末を通じて進展して、21世紀になると風力発電や太陽光発電など代替エネルギーのコストが低下してきた。21世紀になってIEA（国際エネルギー機関）は、既存の油田からの石油生産は2006年にピークに達したと発表した。ところが2008年ごろから米国では、既存の油田に高圧水を吹き込んで頁岩を破碎してその中に残っている石油やガスを回収する技術が発展した。このシェール石油の生産増大によって、米国は石油輸入の必要がなくなり、資源の有限性を否定するかのようになった。しかし、シェール石油は既存の油田の残りカスを無理やり掘り出す技術であり、環境への影響が懸念され、また比較的短期間に枯渇する運命にあるので、このような状態は長くは続かないことがわかっている。

2. 地球温暖化

一方、地球の気象の研究者からは、化石燃料の消費に伴って排出される二酸化炭素の堆積に起因する地球大気温度の上昇と、海面上昇の危険が警告されていた。二酸化炭素は地球表面から宇宙空間に向かって放射される赤外線放射を吸収するので、大気温度がわずかだが上昇する。この地球温暖化に対する警告は、19世紀のアレニウスによる研究が発端になっている。彼は当時の産業革命によって生じた石炭の大量消費についての警告を発したのであった。しかし近代文明の便利さを追求する世界ではこうした警告は、長い間、完全に無視されていた。

1988年には、国連とWMO（世界気象機関）によってIPCCが設立された。IPCCは地球温暖化に関する研究をとりまとめて1990年から精度を上げながら繰り返し報告を発表しており、その最新の報告は2013年の第5次報告になっている。報告は、地球温暖化が人間の活動に起因するものであり、すでに過去130年間に大気温度は0.85℃上昇しており、対策を打たなければ2100年には4℃以上の上昇となり、大きな経済損失になり、将来の人類の生存にとって脅威であると述べている。

3. パリ協定

I P C Cの活動の結果、温室効果ガスの排出削減の国際的取り決めに討議する気候変動枠組条約会議として、1995年にベルリンで最初の会議（C O P 1）が開催されることになった。その後1997年には京都で気候変動枠組条約会議（C O P 3）が行われ、京都議定書が成立した。これは1990年比で2010年の温室効果ガスの排出削減を約束するものであった。EUは8%の削減を、日本は6%の削減を約束した。米国のゴア副大統領は7%の削減を約束したが、クリントン大統領に代わったブッシュ大統領はこれを批准せず京都議定書から離脱してしまった。

京都議定書では温室効果ガスの削減を約束した国々が少なかったため、実質的な効果はなかったと批判する向きもある。しかし、国際的な取り決めとして、2015年にパリで開催されたC O P 2 1へとつながるものとなった。20年もかかってこの程度しかできないのかという気もするが、世界の190ヶ国以上の代表が集まって温室効果ガスの削減にどうにか合意したのである。C O P 2 1で生まれた「パリ協定」は、21世紀末までの温度上昇を2℃未満に、さらにできれば1.5℃未満に抑えようとするもので、190ヶ国以上の参加国が削減努力を実施することになった。これは拘束力のないものだが、途上国を含めた地球上のすべての国が野心的な削減目標を掲げて努力し、その目標を5年ごとにより削減する方向に見直してゆくことになった。途上国を含めた地球上のすべての国が参加することが掲げられ、多くの国々が批准している。

ところが2017年6月になって、米国トランプ大統領は「パリ協定」からの離脱を表明した。トランプ大統領はなにをやるかわからない。とにかくオバマ前大統領のしたことが気にいらぬらしい。しかし、米国の州や都市では「パリ協定」に沿って、温室効果ガスの排出削減を目指す活動を続けている。自然エネルギー100%を目指す「R E 1 0 0」が設立され、大手企業の参加を得て国際的な広がりを見せている。ハワイ、ペンシルバニア、カリフォルニア州などの自治体を始めとして、アップルとグーグルなどの国際的な企業が「We are still in」と、パリ協定にとどまると表明している。

このトランプ大統領のパリ協定離脱表明に対して、フランスのマクロン大統領は、「フランスは、地球温暖化の研究者を支援するので、米国の研究者はフランスに来てほしい」と発言した。7月6日になると、フランスは「2040年までにガソリン車とディーゼル車の販売を禁止する」と発表した。実際にフランス政府は原子力を減らして再生可能エネルギーを増やしていくと宣言している。

すでに欧米やアジアでは太陽光発電と風力発電のコストが劇的に低下して、化石燃料より低コストになる例が報告されている。石炭よりも太陽光発電のコストが安いという衝撃的な例が報告された。

日本は再生可能エネルギーの導入に関して世界のなかでひどく遅れを取っている。それだけでなく、国際的には石炭火力は「座礁資産」になっているのに、それが高効率だと言い張って推進する様子は世界から非難の目で見られている。国際的には、石炭や原子力をベースロード電源だという観念は古いものになっているのに、古い政策に固執している。原子力を極力減らす政策をとると宣言しながら、原発の再稼働のために送電線の余裕がないとして太陽光の導入を阻止している。さらに悪いことには、海外に原発の輸出を行っていることである。政府の政策に統一性が欠けている。日本は進取の気性に富んだ国民性を持ち、世界中から最新の技術や傾向を取り込んでゆく国だったのにどうしたのだろうか。

4. 「100%再生可能エネルギー社会」の研究

地球温暖化問題を解決するには、エネルギーの利用効率を上げ、化石燃料の消費を削減し、再生可能エネルギーを開発して、「100%再生可能エネルギー社会」に移行することが望ましい。日本の社会に各種のエネルギー利用効率向上技術と再生可能エネルギーを大量に導入してゆくとき解決すべき技術的な課題、必要となる対策などを定量的に検討する必要がある。

4-1 海外の類似研究

すでに太陽光や風力などの再生可能エネルギーが1年間の電力供給に占める割合が増加し始めている。

2017年にドイツでは36.1%、デンマークでは43.4%の電力を再生可能エネルギーが供給している。この傾向を伸ばしてゆくと、すべてのエネルギーを再生可能エネルギーで供給することも夢ではなくなってくる。

世界規模またはいくつかの国について、将来、再生可能エネルギーが大量に普及するシナリオの研究が行われている。例として、以下のような研究がある。

- ・スタンフォード大学のジェイコブソン教授は、2010年から、世界全体のすべてのエネルギー需要を水力(W)、風力(W)、太陽エネルギー(S)で供給することを検討している。これをWWSシステムと呼んで、その規模は500億kWを超えるものになる。彼は自動車生産の規模から推定してこのような規模がおよそ30年で建設可能であるとしている。最近では世界139ヶ国で100%再生可能エネルギーが可能とする計算を発表している。日本については太陽光を中心にした供給を考えている。
- ・ロッキーマウンテン研究所のエイモリー・ロビンス所長は「新しい火の創造」(山藤訳、ダイヤモンド社2012年)に、2050年の米国のエネルギー需要を主として再生可能エネルギーで供給する詳細な研究を発表している。

ロビンスは、エネルギー効率の向上と再生可能エネルギーを中心にしたエネルギー戦略、「ソフトエネルギーパス」(室田・槌屋訳、時事通信社1979年)の著者として知られている。当時ホワイトハウスでカーター大統領と対談し、コロラド州アスペンに超断熱性の建造物としてロッキーマウンテン研究所を建設して世界中の注目を浴び、さらにエンパイアステートビルの省エネルギー改修プロジェクトを行って建物のエネルギー効率の改善の可能性をひろく知らせるのに貢献し、アブダビ首長国の「ザイド未来エネルギー賞」などを受賞している。

4-2 将来のエネルギー需要

将来のエネルギー需要が大きければ、必要な再生可能エネルギーの供給量が大きくなり、国内にあるエネルギー資源で供給可能なのかという問題が生じる。しかし幸いなことに、同じ1単位のエネルギーを供給するより、「省エネルギーまたは効率向上」によって減らす方が小さい費用で実現できることが多い。したがって、RE100%を考えると、エネルギー供給より需要の削減をまず検討する必要がある、それは実際的な価値がある。

目標年を2050年にするとして、そのころのエネルギー需要はどうなっているのかを検討してみよう。2050年までに生じるもっとも大きな社会的変化は、人口の大幅な減少であり、エネルギー需要に影響する。図1に示すように、2017年に発表された人口予測では、2015年の12,709万人が2050年には10,192万人へ80.2%に減少する。

また最近の5年間のGDP成長率はおおよそ1%であるが、最終エネルギー需要は毎年1.6%の減少、一次エネルギー需要は毎年1.8%の減少であり、すでにデカップリング(エネルギー消費と経済の分離)が進行している。将来にわたって、GDPとエネルギー消費のデカップリングが進行し、2050年までの経済社会の活動度はおおよそ人口に比例して減少すると想定できそうである。

産業の活動度については、人口に比例して生産が減少し、原材料関連の輸出が減少し、機械など高度な製品の輸出が増大するものと考えられる。また情報化とペーパーレスは紙・パルプ産業の規模縮小につながる。鉄鋼業ではリサイクル鉄の割合が増加すると想定できる。

エネルギー利用効率を上げる方法は非常に多い。インバータモータ、電球型蛍光灯、LED照明、ヒートポンプ、ZEH(ゼロエネルギー住宅)、ZEB(ゼロエネルギービル)、高効率冷蔵庫などエネルギー利用効率を大幅に向上させる技術があり、エネルギー消費を大きく削減できる可能性がある。

4-3 再生可能エネルギーの可能性

環境エネルギー政策研究所の「自然エネルギー白書 2017」によると、現在、世界の太陽光は 291GW、風力は 487GW に急成長している。GW（ギガワット）は百万 kW である。日本については、2016 年の電力に再生可能エネルギーが占める割合は、水力 7.5%、太陽光 4.8%、風力 0.6%、地熱 0.2%、バイオマス 1.7% であり、合計で 14.8% になっている。設置容量は、太陽光が 42.8GW、風力が 3.38GW である。政府の見通しでは 2030 年に電力に占める再生可能エネルギーが 22~24% になるとしている。

環境省の「再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性調査」または「再生可能エネルギーに関するゾーニング調査」、あるいは NEDO の「再生可能エネルギー技術白書」などを見ると、日本国内の再生可能エネルギーのポテンシャルと導入見通しを検討することができる。これらの調査によると、ポテンシャルは太陽光 7 億 kW、地上と洋上の風力 17 億 kW、水力 4600 万 kW、地熱 3314 万 kW となっている。

このような検討結果から、日本のエネルギーをすべて再生可能エネルギーでまかなうには、すでにコストが低下し始めている風力発電と太陽光発電を中心にして検討すればよいと考えた。とくに太陽光については、太陽輻射が得られる場所ならどこでもよく、限界はないに等しい。太陽光発電協会のビジョンでは、2100 年に 7 億 kW が可能となっている。2100 年という 80 年以上も先のことであり、どのように計算したのか不明だが、このように再生可能エネルギーの可能性は大きく膨らんでいる。他にも太陽光と風力については以下のような新局面が進行している。

・道路に太陽光発電

オランダ北部のクロメニーでは、2014 年 11 月、自転車道路に、2.5m x 3.5m のコンクリート製発電モジュールを設置している。長さ 70m で 140kW の発電を開始しており、電力網へつないでいる。モジュールは高強度で耐久性が高いガラス材料を利用している。

・外壁に太陽光パネル

商業ビルの屋上に太陽光パネルを設置するのが普通であるが、ドイツでは外壁面（ファサード）に設置する例が始まっている。外見は普通の外壁と変わらないので太陽光パネルがあるようには見えない。薄膜化合物太陽電池（CIGS）が使われており、これを BIPV（ビル統合型 PV）と呼んでいる。3 階建て以上のビルでは、屋上に設置するより多くの太陽光パネルを設置できるという。

・洋上風力と新方式の風力発電

海外では洋上風力発電が低コストの電力を供給するものとして積極的に開発されている。日本でも福島沖で、5000 kW と 7000 kW クラスの浮体式風車が建設されている。洋上風力発電の形式としては浮体式と固定式があり、浮体式は水深の深い海面で風車を浮かべて発電するものであり、固定式は遠浅の海岸で海底に固定して設置する方式である。日本には遠浅の海岸が少ないと言われているが東北の日本の海岸には適地がありそうである。

4-4 気象データとダイナミック・シミュレータ

風力と太陽光の特性を調べる必要があるため、実際の気象データを入手した。日本の気象データは、拡張 AMEDAS 標準 2000 であり、全国 842 地点の 1 時間ごとの 1 年間の太陽輻射と風速データが利用可能である。これを用いて、風力と太陽光の発電量のシミュレータを開発した。ただし、AMEDAS は地上データのみであり、いまのところ洋上風力の計算を行うことはできない。

4-5 風力と太陽光の特徴

私は風で走るヨットが大好きである。毎年 8 月の末に東京湾で行われるヨットレースに参加して、レースの最中に気がついたことがある。前日の夕方までに保田港へ集合し、朝 6 時に保田港沖をスタートして午後 3 時頃に羽田沖にフィニッシュするレースである。正午頃には富津沖にさしかかるのだが、ここで風は微風から風状態になり、ヨットのスピードはほとんどゼロになってしまう。空は快晴で真夏の暑い日差しが襲ってくる。毎年このような状態に遭遇した。そのとき考えたのは、太陽光と風力の関係だった。どうやら、好天のときには風は弱く、悪天候のときには風が強いようである。海の上ではいつ

もこのことを味わう。これは太陽光発電と風力発電が互いに補完的な関係にあることを示しているようだった。

そこで、気象データを用いて太陽光と風力発電の1年間の発電シミュレーションを行って、この関係を分析することにした。発電量を1時間単位、1日単位、1ヶ月単位の3段階で調べてみた。電力会社別の9地域の太陽光発電量と風力発電量を相関分析してみると、各地域において両者は逆相関の関係にあり補完性があることがわかった。これより、太陽光と風力を組み合わせることが有効と考えられた。

東北地域の太陽光と風力の、相関係数は -0.4 程度であり、これは逆相関を示している。言い換えれば補完的な関係にある。また風力発電は、東北と北海道を除いて、他の地域と相関性が低く、互いに補完関係にあり、送電網を利用して再生可能な電力の変動を抑制できる可能性がある。

4-6 風力と太陽光の最適比

次は風力と太陽光をどのように組み合わせればよいのか、という問題を検討した。1年間の気象データにもとづくシミュレーションにより、全国発電量を合計すると、太陽光は春から秋にかけて強く、風力は冬季に強くなる特性があることがわかった。

4-7 発電の変動を抑えるための蓄電装置

変動する電力を制御するには、まずは送電線を利用して各地域に生じる過不足を融通して調整することである。図4には、再生可能エネルギーを組合せて供給する3日間の様子を示している。既存の揚水発電が変動の吸収に利用可能である。揚水発電の損失は30%に達するが、昼間の太陽光発電のピーク時には水を汲み上げておき、夕方の需要の大きいときに放出するようにできる。揚水発電は全国で2600万kWあり、10時間分の蓄電が可能である。太陽光と風力の発電変動を揚水発電260GWhとバッテリーで吸収する。水力発電は午後から夜間のピークに当てる。地熱発電は1年中一定の電力を供給する。バッテリーの規模をゼロから増やしてシミュレーションを行ったところ、不足が生じないようにするためには、300GWh程度が必要であった。将来はEVのバッテリーから送電線へ電力を回収できるかも知れない。あるいは、EV用のバッテリーが古くなっても性能は60~70%は維持できるので、これを定置用に再利用するビジネスが成立する可能性がある。

4-8 余剰電力の利用

純粋な電力需要を超える発電量を太陽光と風力から得る予定なので、余剰電力が発生する。この余剰電力を図5に示すように、EV用電力、FCV用水素生産、低温熱用ヒートポンプ、産業用熱需要などに供給することができる。

産業用熱需要のうちの一つの用途で最大のものは鉄鋼生産の高炉に使われる石炭である。高炉に代わる製鉄技術として、ドイツでは電気分解か水素還元が検討されている。電気分解は鉄鉱石をアルカリ溶液中で電気分解するもので水の消費量が大きいようである。高炉で使われている石炭の代わりに水素を利用する水素還元は、すでに海外で行われている天然ガスによる製鉄を発展させればよいので実用化は近いはずである。この場合のエネルギー必要量は、高炉製鉄とそれほど大きく変わらない。石炭の前処理を含めて再生可能電力と比較すると原単位(1トンの製鉄に必要なエネルギー)はむしろ小さくなる。将来は鉄鋼メーカーが本気で取り組むことになると思われる。

熱需要や燃料需要に対してバイオマスと太陽熱の供給可能性について不明の部分があるので、余剰電力をヒートポンプによって低温熱需要の一部に使うことを検討した。

4-9 自動車はどうなるか

エコドライブ、カーシェアリング、自動運転車などの普及が自動車のエネルギー需要を削減することになると予想される。エネルギー効率を検討すると、技術的にはまず車体の軽量化が燃費の向上に効果的である。ガソリンや軽油を爆発的に燃焼させて往復するピストンで動く現状の内燃機関の効率は13%程度だが、EVは95%、FCVでは水を電気分解してつくる水素で発電するときの変換効率を考慮して

も 50%程度である。

F C Vは、水素の充填時間は短く一充填走行距離も長いが、水素供給インフラの整備に時間がかかる。ただし、E Vが増大してくると充電時間が長いことがE V用充電インフラの不足につながるかも知れない。シナリオ研究ではE VとF C Vの割合は半分ずつとしている。いずれも電気駆動になるため損失が少なく、動力回収ブレーキが利用できるので効率がおおよそ 4 倍に向上する。そして 2050 年にはほぼ人口に比例して自動車の台数が減少すると想定した。

このとき自動車の屋根に太陽光パネルを設置すると、年間走行用エネルギーのおおよそ 20~30%を太陽光から得ることができる。この自動車をソーラーアシストカーと呼んでその可能性を別途検討している。

4-10 移行の費用

将来の再生可能エネルギーのコストを推定する方法を調査したが簡単ではなかった。米国コロラド州デンバーの再生可能エネルギー研究所（当時は太陽エネルギー研究所）の図書室で文献を調べているときに、学習曲線で太陽熱発電のコストを理論的に推定するという文献を見つけた。学習曲線は累積生産量とコストの関係から大量生産のコスト低下を説明するものである。累積生産量が 2 倍になるときに生じるコスト低下の割合を習熟率または進歩指数と呼んでいる。1989 年に国際太陽エネルギー学会が神戸で開催されたので、それまでの日本の 10 年間の太陽電池のコスト低下を学習曲線で分析した結果を発表した。その後、最近まで繰り返しこの分析を行っている。

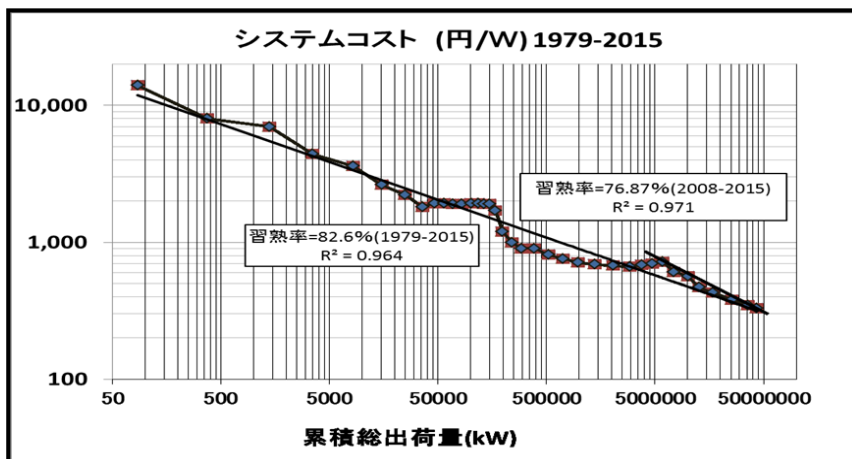


図1 太陽光発電コストの学習曲線

図 1 には 1979~2015 年の期間の実際の太陽光発電システムの価格を縦軸に、累積導入量を横軸に示している。太陽光発電システムの価格の回帰分析結果は学習曲線に乗っていることを示している。習熟率は累積生産量が 2 倍になった時のコスト低下の割合であり、1979-2015 年には 82.6%、最近の 2008-2015 年には 76.9%になっている。この習熟率を将来に延長することにより将来のエネルギー価格を計算できる。

この学習曲線を他の再生可能エネルギーにも適用すると、「100%再生可能エネルギー社会」の設備投資コストを推定できる。省エネルギーと再生可能エネルギーのおおよその設備投資コストは 2010 年から 2050 年までの 40 年間で 300~400 兆円程度である。毎年の GDP の 1~2%程度になる。

この期間の化石燃料価格の上昇を考慮すれば、資金の海外への流出を削減することができ、十分に収益が得られるはずである。コスト負担と考えれば大きな数字であるが、それだけ産業構造の変化を促す新しい需要があるとも考えることもできる。最近多くの企業は新しい投資先を見失っている状態にあり、生み出した利益を内部留保にするしかない状況なので、再生可能エネルギーの開発・普及は日本の産業構造の転換の格好のテーマになるはずと考えている。

5. 100%再生可能エネルギーシナリオの研究

このような構成要素の研究を進めているとき、2011年3月11日に東日本大震災が起こった。福島第一原発はメルトダウンとなった。周辺の多くの人々が仕事と故郷を失うという大惨事になった。このようなことを2度と起こしてはならない。日本のエネルギー政策を根本的に変えるときであると感じられた。

私はパソコンを使って気象データを扱うダイナミック・シミュレータのソフトウェアの開発にとりかかった。するとその1ヶ月後に、国際的な自然保護団体WWF（世界自然保護基金）の日本支部であるWWFジャパンから「2050年の日本の100%再生可能エネルギーシナリオ」を作成してほしいとの依頼があった。WWFジャパンからはCOP3のときにもエネルギーシナリオの作成を依頼されたことがあり、情報交換が続いていた。

個人的にはすでにこの「100%再生可能エネルギー社会」の研究プロジェクトを始めていたので、すぐに引き受けることになった。WWFジャパンからのこの研究依頼は2011年から始まり、2017年まで続いている。以下はその最近の研究の概要である。

2050年の経済社会の活動度は人口減少に比例して2010年のおよそ80%になると予想される。図7に示すように、省エネルギー技術により効率よく需要を削減すれば、再生可能エネルギーの供給を行う場合の問題が減少し、効果的にCO₂削減が実現する。

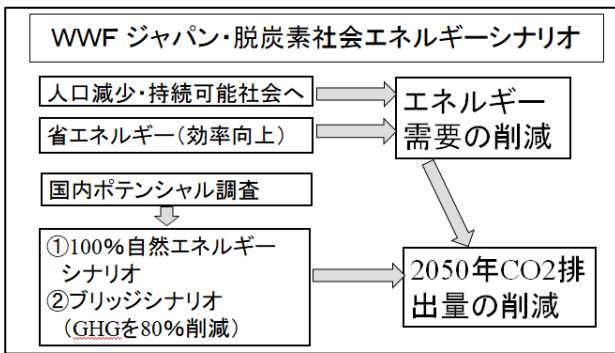


図2 WWFシナリオの基本的なコンセプト

このとき、2種類のシナリオを検討した。

第1は「ブリッジシナリオ」とよび、2050年の温室効果ガス排出量は1990年比で80%の削減を目標とした。石油、石炭、天然ガスの化石燃料の消費が主として産業向けに残ることを想定したものである。純粋電力需要（照明、モータ、情報機器など既存の電力需要）の130%に相当する電力を太陽光と風力で発電し、純粋電力需要だけでなく、EV用電力、FCV用水素を供給する。日本国内にある太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスから供給する電力について1時間ごとの1年間のダイナミック・シミュレーションを行った。これは、省エネルギーがあまり進まずに2050年を迎えた場合のシナリオであり、閣議決定した政府の80%削減の目標に沿ったものである。大きな問題はなく実現できると考えている。

第2は「100%自然エネルギーシナリオ」であり、太陽光と風力の発電量を増やし、バイオマスと太陽熱を加えて、すべてのエネルギー需要（純粋電力需要、自動車用需要、熱・燃料需要）に再生可能エネルギーを供給する。ダイナミック・シミュレーションを行うと、発電量は純粋電力需要の160%に達し、このときおおよそ太陽光4億kW、風力1億kWの規模になった。余剰電力をEV用電力、FCV用水素だけでなく、ヒートポンプを利用して低温熱需要に、水の電解で得た水素を高温熱需要や水素製鉄に供給する。そしてバイオマスと太陽熱によって低温から中温度の熱需要と燃料需要を満たすものとした。

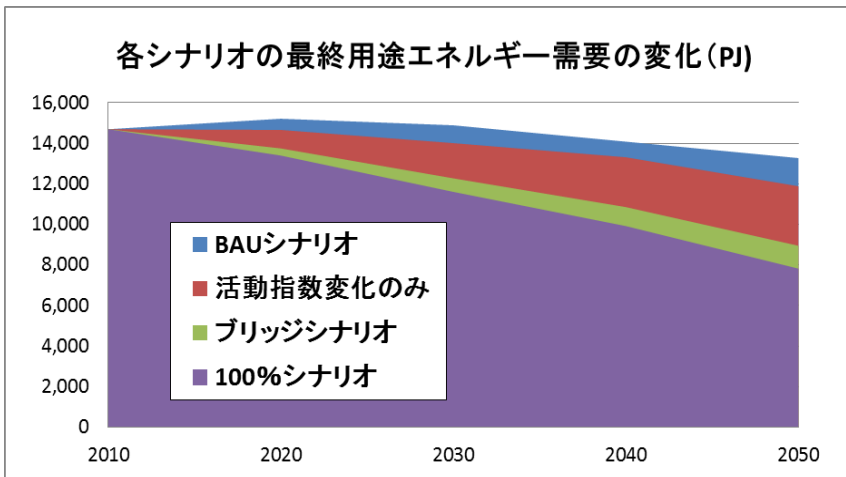


図3 各シナリオの最終用途エネルギー需要の変化

2050年の最終エネルギー需要は、図3に示すように、BAUシナリオと比較して、2010年比で81%（人口減少による活動指数の変化のみ）、61%（ブリッジシナリオ）、53%（100%自然エネルギーシナリオ）に減少する。

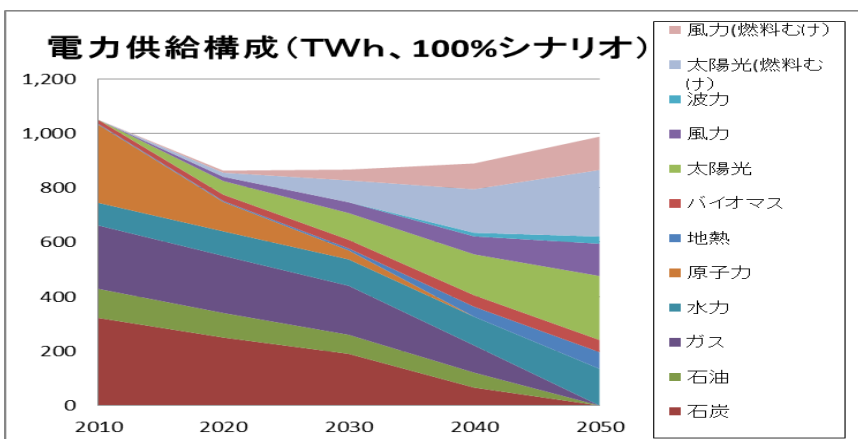


図4 「100%自然エネルギーシナリオ」の電力の供給構成

「100%自然エネルギーシナリオ」の電力供給構成をみると、図4に示すように2030年ごろから、燃料用に供給する余剰電力が増加し始める。変動する太陽光と風力から生じる余剰電力を、EVの電力とFCVなどの水素を供給し、高温熱需要への供給やヒートポンプによる低温熱供給に向けられる。

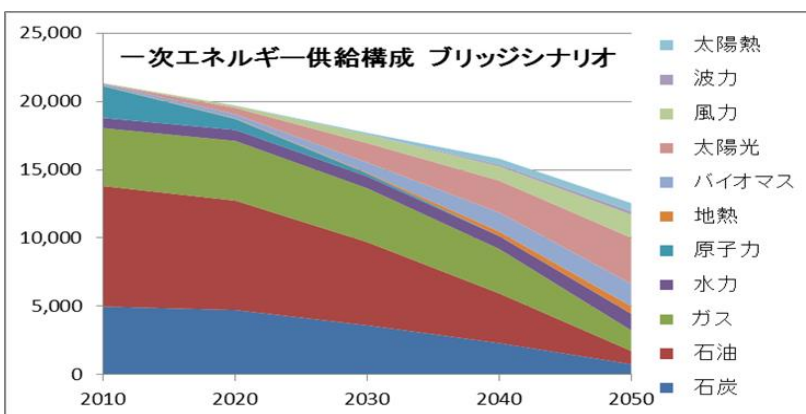


図5 「ブリッジシナリオ」の一次エネルギー供給構成（単位PJ）

「ブリッジシナリオ」では、図5に示すように、2050年においても石油、石炭、天然ガスが残り、1990年比で20%の温室効果ガスの排出がある。その他は、太陽光、風力、バイオマスが主要な供給源になる。

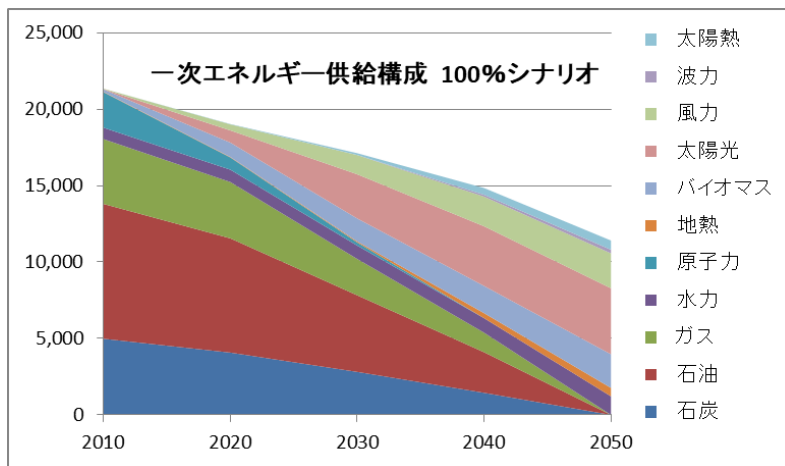


図6 「100%自然エネルギーシナリオ」の一次エネルギー供給構成(単位：PJ)

「100%自然エネルギーシナリオ」の一次エネルギー供給構成の推移は図6に示すようになり、需要の減少にともなって供給量が次第に減少する。原子力は増大せず早期にゼロとなり、2050年には化石燃料はゼロとなっている。

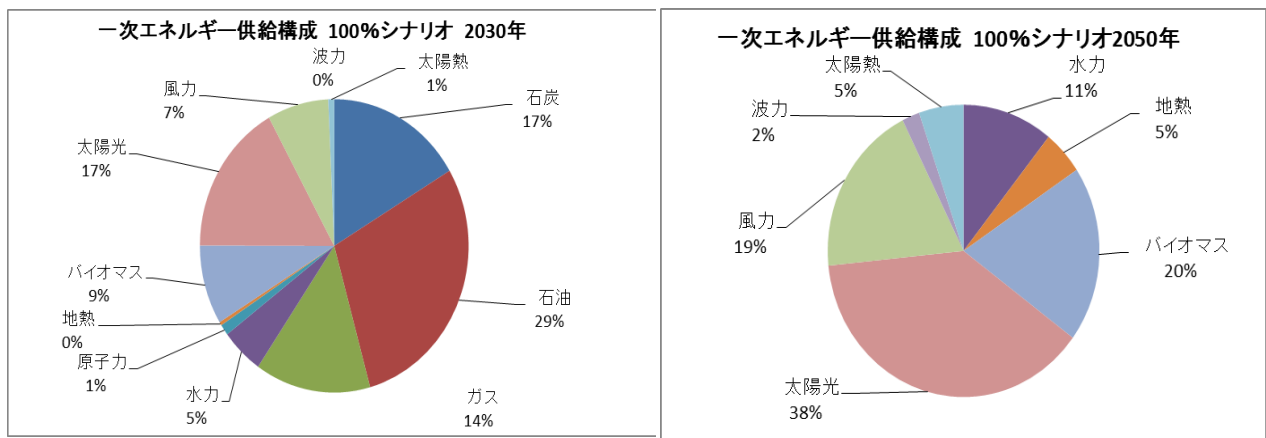


図7 「100%自然エネルギーシナリオ」の一次エネルギー供給構成(2030年、2050年)

「100%自然エネルギーシナリオ」の一次エネルギー供給構成は、図7に示すように、2030年には石炭、石油、天然ガスが合計で60%を占めていて、太陽光と風力は合計で24%とシェアは大きくない。しかし2050年になると、化石燃料はゼロとなり、太陽光38%、風力19%、バイオマス20%、地熱が5%となる。

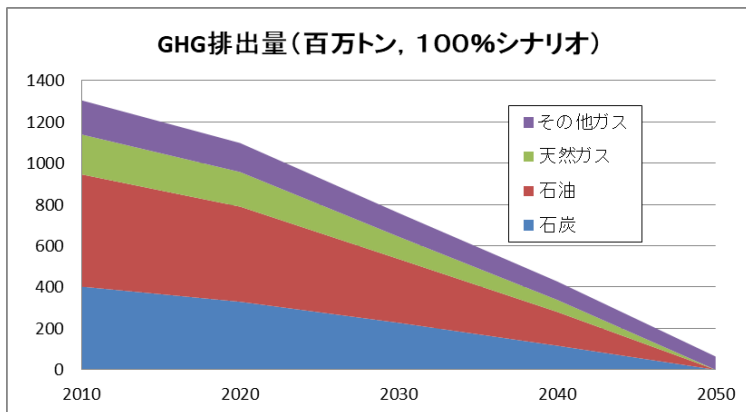


図 8 100%シナリオの温室効果ガスの排出量

「100%自然エネルギーシナリオ」における温室効果ガス（GHG）の排出量は、図 8 に示すように、2050 年には化石燃料からの排出はゼロ、「メタンなどその他ガス」からの排出 6400 万トン（環境省推定）が残り、1990 年の排出量の 5%に相当する。ただし、2050 年に鉄鋼業の水素製鉄や電気分解製鉄が、実用化されなければ約 5%は残るかもしれない。

6. おわりに

現在、私の研究所では再生可能エネルギーのコンピュータ・シミュレータの開発やエネルギー分析の活動を行っている。私の研究テーマは、「日本のエネルギーをすべて再生可能エネルギーで供給するにはどうすればよいか」ということである。このことを最初に考えたのは、もう 30 年以上も前のことで、「エネルギー耕作型文明」（東洋経済、1980）という本にまとめたことがある。

現状は、地下から掘り出す化石燃料や核物質に依存する「エネルギー狩猟型文明」である。化石燃料の利用によって大気中に排出した二酸化炭素の濃度上昇のため、地球温暖化が生じて異常気象が頻発するようになった。この問題を解決するために必要なのは、人類史のなかで生じた食糧に関する大転換に類似した転換、地上で農業のように太陽エネルギーを捕獲する「エネルギー耕作型文明」への転換である。これは二酸化炭素を排出しない「100%再生可能エネルギー社会」への転換であり、気象に依存するが、気候に影響を与えることがない文明への転換である。いまやこのような転換が始まっているのである。

参考文献

- 1) 『脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案』 第1部～第4部、WWF ジャパン、2012～2013
- 2) 『脱炭素社会に向けた長期エネルギーシナリオ2017』、WWF ジャパン、2017
（これらの報告は、WWF ジャパンのサイトから自由にダウンロードできる）

注：

1) 自然エネルギーと再生可能エネルギー

太陽光や風力などを意味する「再生可能エネルギー」は Renewable Energy の直訳であり堅苦しい表現である。代わりに同じ意味の言葉として「自然エネルギー」が使われている。しかし、人間は石油や石炭などの化石燃料も自然界から得ているので、正確とは言えないが、わかりやすいのでこの言葉を使用している。英語では Natural Energy という表現は使われていない。

2) 温室効果ガス

温暖化を引き起こす気体には、二酸化炭素（CO₂）だけでなく、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）、フロンガス（HFC、PFC）、六フッ化硫黄（SF₆）がある。このうち二酸化炭素の影響が最も大きい。

3) エネルギーの単位

1 J(ジュール)は、1 W (ワット) × 1 秒である。1 kWh は $1000\text{W} \times 3600 \text{ 秒} = 3.6\text{MJ}$ (メガジュール)である。単位系の表現は、K(キロ)、M(メガ)、G(ギガ)、T(テラ)、P(ペタ)と 1000 倍ごとになっている。1 PJ(ペタジュール)は、10 の 15 乗ジュールであり、石油換算では 2.389 万トンになる。