

需要側から考えるカーボンニュートラル

下田 吉之

世界は地球温暖化による気温上昇を 1.5℃ に抑えることを目標に、2050 年にカーボンニュートラルを達成することを目指している。カーボンニュートラルの達成のためには、再生可能エネルギー等カーボンフリーエネルギーを増やすだけでなく、エネルギー需要を減らすことと、変動性の再生可能エネルギー発電が増加する中、電力需給の状況に合わせて需要を変化させることが重要になる。本稿ではカーボンニュートラルの定義を示した後、低エネルギー需要社会に関する世界の研究動向、需要家による電化や水素等二次エネルギーの選択の問題、電力システム安定運用のためのエネルギーマネジメントの重要性と電気自動車普及の影響、そして建設施工の分野におけるカーボンニュートラルの課題について概説した。

キーワード：カーボンニュートラル、低エネルギー社会、エネルギーマネジメント

1. カーボンニュートラルとは？

本稿が主題とするカーボンニュートラルとは一般に二酸化炭素だけでなく、温室効果ガス全般にわたってその排出量と吸収量が等しい状況を言う。温室効果ガスには、二酸化炭素以外にもメタン、一酸化二窒素、フロンガスがあり、二酸化炭素にはエネルギーシステムから排出されるもの以外にもセメント製造など工業プロセスや廃棄物処理などで排出される非エネルギー起源二酸化炭素がある。図-1 に世界と日本の温室効果ガスの排出割合を示す。日本では CO₂ 排出の割合が極めて大きく、エネルギー起源の二酸化炭素排出の割合が 84.1% に達するが、世界では 64% であり、

後述するエネルギーシステムの脱炭素化だけでなく、土地利用、メタン、フロンなどその他の温室効果ガス排出に対する対策も重要であることがわかる。

日本をはじめとした先進国の多くが 2050 年、ロシアと世界の最大排出国である中国が 2060 年、インドが 2070 年までにカーボンニュートラルを宣言しているが、この達成のためにはエネルギーシステムからの温室効果ガス排出をゼロにするだけでなく、その他の温室効果ガス排出を抑える努力も必要である。その際、排出抑制が困難なものについては、DACCS（大気中から二酸化炭素を直接回収し、地中に貯留する技術）、あるいは BECCS（バイオ燃料となる植物等を大量に栽培・培養して、その過程では大気から CO₂

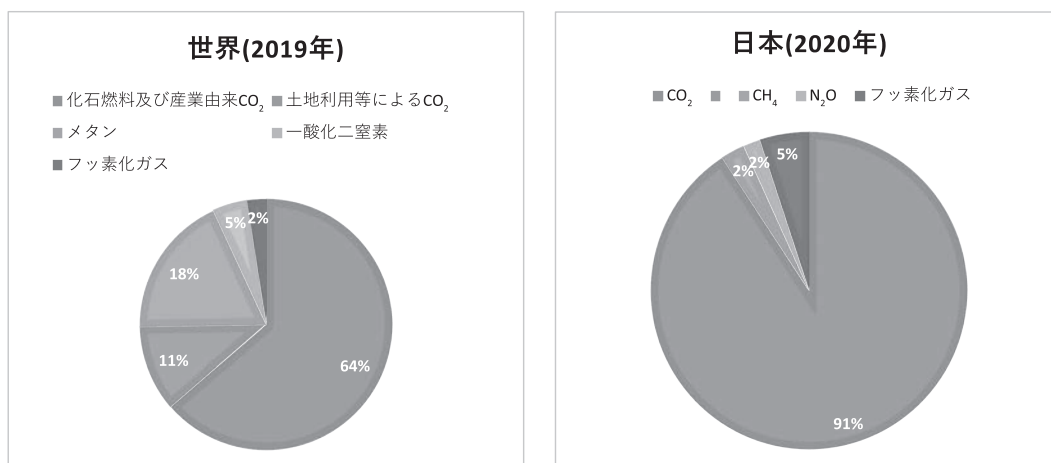


図-1 世界と日本の温室効果ガス排出割合
(世界は IPCC 第 6 次報告書 WG3 SPM, 日本は平成 4 年度環境白書による)

を光合成により固定し、燃料として使用した後の排気ガスから CO₂ を回収して地中に貯留する技術) などネガティブエミッション技術によって排出量を相殺する必要がある。

次に、全体の排出量の中で大きな割合を占めるエネルギーシステムのみを見たときのカーボンニュートラルの達成条件を考える。よく、エネルギー供給側での再生可能エネルギーや原子力発電が話題になることが多いが、筆者は以下に述べる2つの式が成立する状況がカーボンニュートラルであると定義している。

(1) 年間のエネルギー収支

年間の合計において

カーボンフリーエネルギーの供給 ≥ エネルギー需要 (1)

が成立すれば、カーボンニュートラルとなる。左辺では、既に普及している電源として太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー、原子力発電があり、燃料としてバイオマスなどがあるが、これらで現在のエネルギー需要を全て賄おうとすればコストや立地などの障壁が大きくなる。したがって、エネルギー供給を1単位増加させるよりもエネルギー需要を1単位削減の方が安価で容易な対策が多く存在し、需要と供給をトータルで見て最適な均衡点を探していく努力がこれから必要になる。例えば現在、日本における再生可能エネルギー電源のシェアは20%であるが、これを100%に近づけていくときに、再生可能エネルギーを4~5倍にするよりも、エネルギー需要を半分にして再生可能エネルギー電源を2倍にする方が容易であるし、再生可能エネルギーのシェアを増やす上では同じ効果が得られる。

需要の削減を考えると、右辺を以下のように分解して考えるとわかりやすい。

$$\text{エネルギー需要} = (\text{エネルギー需要} / \text{サービス}) \times (\text{サービス} / \text{充足度}) \times \text{充足度} \quad (2)$$

すなわち、我々はエネルギーを直接消費しているのではなく、消費しているのは熱・光・動力・情報などのサービスであり、エネルギー効率(如何に少ないエネルギーで最大のサービスを産み出すか)、サービス効率(如何に最適なサービスで我々の充足度を満たすか)に分けて考えると様々な合理的なエネルギー需要の削減対策が見いだされる。2022年4月に発表されたIPCC第6次報告書第3部¹⁾では、「需要側の対策によって世界全体のGHG排出量をベースラインシナ

リオに比べて2050年までに40~70%削減しうる」としており、需要側の対策が重要であることが分かる。

(2) 電力バランス

二次エネルギーの中で電力は「貯められないエネルギー」であり、電力の需給システムの中で需要と供給のバランスが崩れると周波数が乱れたり、大規模停電を引き起こしたりする。したがって、グリッド全体で常に以下の式が成り立っていないといけない。

カーボンフリー電源の供給 = 電力需要 (3)

従来、変動する需要に対して電力供給側は火力発電所と水力発電所を使ってバランスを取ってきたが、カーボンニュートラルを目指せば化石燃料を用いた火力発電所を削減しなければならない一方で、増加していく太陽光発電や風力発電は気象状況に依存して変動し、出力を調整することができないし、原子力発電所は常時一定の出力で運転しなければならない。そこで、水素やそれから転換されたアンモニア合成燃料を用いた火力発電、排気ガス中に含まれるCO₂を吸収して地中に貯留するCCSつき化石燃料火力、バイオマス火力等、CO₂を出さない出力可変の電源を増やす必要があるが、これらはコストが高く、電池や揚水発電による電力貯蔵、更には需要側が供給側の要請により需要を調整するデマンドレスポンスの導入が必要となる。

以下では、カーボンニュートラルを目指す上で、これから需要側において求められる役割を3点に分けて述べていく。

2. エネルギー需要の役割 (1) エネルギー需要の削減

1. で述べたように、エネルギー消費の削減はカーボンフリーエネルギーの拡大と共に脱炭素社会の実現に必要な不可欠な課題である。IPCCの第6次報告書第3部¹⁾では気温上昇を1.5℃以内に抑えることができるとする4つの代表的な排出経路(シナリオ)を示しているが、それらは、1) BECCSなどネガティブエミッション技術を多用するNegシナリオ、2) 太陽光や風力を中心とするRenシナリオ、3) 低エネルギー需要を目指すLDシナリオ、4) これら3つのシナリオを融合し、持続可能な社会を目指すSPシナリオとなっている。3)のシナリオはもともとLow Energy Demand(LED)シナリオと呼ばれ、情報化(デジタル化、テレワークなど)、シェアリングエコノミー、

電化等によって大胆なエネルギー需要の削減を実現するシナリオである。その詳細は Grubler らの論文²⁾に譲るが、特徴的な対策として「機能統合」がある。現在のスマートフォンはかつての電話機、カメラ、目覚まし時計、テレビ、ラジオなどの機能が集約されており、これらの機器を個々に使用するよりも動作時、待機時さらには製造時の排出を含めたライフサイクルのエネルギー消費・温室効果ガス排出量が大幅に削減されている。建設時のエネルギー消費が特に大きい住宅・建築においても、多様な空間機能を集約することでライフサイクル CO₂ を削減することは今後検討すべき課題であると思われる。既に現在のコロナ禍で広く普及したテレワークは、住宅の機能の中にオフィスの機能を統合する試みであるとも言える。その他にもデジタル化は高度な制御によってエネルギー消費効率を高めるだけでなく、AI によって食品等の需要を予測し、売れ残りとなって廃棄される量を抑えることで温室効果ガスの排出量を下げようという効果も期待されている。

その他、LED シナリオの特徴は、世界を大きく Global North (先進国) と、Global South (発展途上国) に分け、熱的快適性 (冷暖房サービス)、消費財、モビリティ、食品、商業・公共建築 (床面積)、貨物輸送など、人間が適切なレベルの生活を送るために必要なサービス水準を明らかにした上で、それをできるだけ少ないエネルギー消費で達成する構成になっていることである。IPCC 第6次報告書第3部では、新しく「需要、サービス、緩和の社会的側面」という章が付け加えられ、需要側からのアプローチの必要性和考え方が取りまとめられている。そこでは、エネルギー消費を不要なサービスの回避、異なるサービスへの転換、サービス提供装置の改善の3種類の手段で削減する Avoid-Shift-Improve のフレームワークで達成するとされており、例えばモビリティ (人の移動) については、Avoid (コンパクトシティ、テレワーク、スマートロジスティクスで人キロを下げる)、Shift (公共交通や自転車の利用、飛行機から高速鉄道への転換で人キロあたりエネルギー消費を下げる)、Improve (水素自動車、電気自動車、エコドライブでエネルギー効率を上げる) 等の対策が掲げられている。

3. エネルギー需要の役割(2) 二次エネルギーの選択

どのような二次エネルギーを選んでいくかも、カーボンニュートラル達成へ向けての需要側の大きな役割である。需要側に供給されている主な二次エネルギー

として電力と燃料があるが、現在燃料は都市ガスが天然ガスを主体とし、ガソリンや灯油などの液体燃料が石油を主体とするなどそのほとんどが化石燃料を起源としており、これをカーボンフリーエネルギーに転換していく必要がある。今後予想される二次エネルギーの転換の姿を図-2に示す。

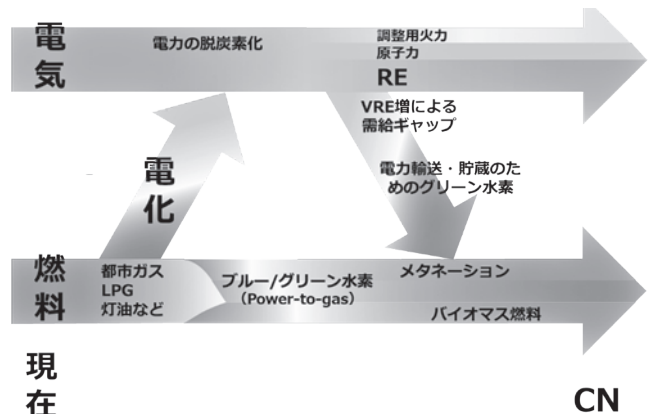


図-2 二次エネルギーの転換

転換の方法として、まず電化がある。代表的なものが自動車の電気自動車への転換である。電力は既に再生可能エネルギーや原子力発電などカーボンフリーの電源が普及しており、今後もカーボンフリー電源100%に向けて拡大していくことが期待できるので、電化とカーボンフリー電源の拡大を進めることはカーボンニュートラルへのわかりやすい有効な方策と言える。米国カリフォルニア州の一部自治体では温暖化対策に積極的な都市で電化政策が進められている。一方で、電力では工業プロセスなど高温での加熱が難しいことや、移動体では電池が必要となるものの、その重量や容積の問題からトラックなど重量車、長距離船舶や飛行機では電化が難しい等の課題がある。また、電化と変動性再生可能エネルギーの普及が同時に進むと、後述する電力需給のアンバランスが生じることになる。

もう一つの二次エネルギーの転換がカーボンフリー燃料の使用である。再生可能エネルギーとしてはバイオ燃料があるが、現在注目されているのは水素である。上で述べたように余剰となった変動性再生可能エネルギーの活用など、再生可能エネルギー電源から得られた電気による電気分解 (グリーン水素)、化石燃料から水素へ転換し発生した CO₂ を CCS により貯留 (ブルー水素) することにより水素を製造したうえで、水素のまま、アンモニアに転換して使用、メタネーションによりメタンに転換して LNG・都市ガスと同様に使用など、様々な使い道が提案されている。水素を用

いることにより電池に比べてエネルギーの貯蔵量が格段に向上するので、建設用の重機などにはこちらの方が適するように思われる。

4. エネルギー需要の役割 (3) エネルギーマネジメント

今後、太陽光発電や風力発電などの変動性再生可能エネルギーの拡大と、需要側の電化が進めば、電力システムの需給が厳しくなり、エネルギーマネジメントの必要性がますます高くなると予想される。特に日本のように再生可能電源の中でも太陽光発電の比率が高くなると昼夜間の発電の変化の影響が極めて大きくなる。その先例が米国カリフォルニア州である。図-3に示すように、昼間（特にオフィスや工場の稼働が少ない休日）には電力需要に対して太陽光発電の出力が大きくなり、火力発電や原子力発電など大型の電源の需要が小さくなる。原子力発電や需給調整用の火力など停止できない大型電源もあるので、この時間帯には余剰電力が発生し、揚水発電や電池への蓄電、他電力システムへの売電がおこなわれ、それでも対応できなければ発電の抑制、すなわち折角作った電力を捨てるを得なくなる。

一方、夕方になると太陽光発電の発電量が日射に合わせて低下していくのに対し、家庭の電力需要が増加するため、大型電源に対する需要が急上昇する。図-3によれば17時から20時までで12百万kW上昇しており、これは100万kWの大型発電所12基を3時間で立ち上げることに相当し、かなり困難な需給調整が必要とされる。カリフォルニアでは2020年には火力発電所の故障に起因して計画停電がおこなわれている。

そのため、電池や揚水発電所等の蓄電施設の整備だ

けでなく、ダックカーブを緩和するような電力需要の調整が必要となる。調整のための技術に蓄熱がある。日本では業務施設や地域冷暖房施設に蓄熱水槽を有する事例が多いほか、家庭用のヒートポンプ給湯器を用いて昼間太陽光発電が余剰となる時間帯に蓄熱し、なるべく夜間に電力を使用しないようにする試みが始まっている。米国エネルギー省（DOE）では、エネルギー効率が高いだけでなく、電力システムと協調できる建物として、Grid-interactive efficient buildings (GEBs)³⁾を提唱している。これは、太陽電池や電池などの分散型電源を活用し、多重に張り巡らされたセンサー・制御システムを駆使して、居住者への熱・光・空気質などのサービスを高いエネルギー効率で実現しつつ、電力システムからの要請に応じて電力需要を調整できる建物である。

この電力マネジメントの必要性を更に高めそうなのが、電気自動車の普及である。電気自動車の充電は、家庭でおこなわれる普通充電では3kW、6kWと一般の住宅の平均的なピーク電力の数倍の電力が消費される。更に急速充電では50kWと極めて大きな電力が消費される。日本では通勤先で充電することはあまり考えられていないため、帰宅途中の急速充電器での充電や帰宅後の普通充電、更に業務車両の終業後の充電が制約無しにおこなわれると、ダックカーブで問題となる夕方の時間帯における電力需要の急上昇を更に加速してしまうことになる。カリフォルニアでは、多くの人が通勤通学に自動車を利用することから、昼間勤務先で充電をおこなうことが推奨されており、そのための施設整備が進んでいる。日本では、昼間自宅に駐車している自動車においては太陽光発電が余剰となる昼間に充電したり、帰宅後充電でも深夜まで充電開始を遅らせるなど夕方の時間帯の充電を避けることが望ましく、そのために充電時間をコントロールできる

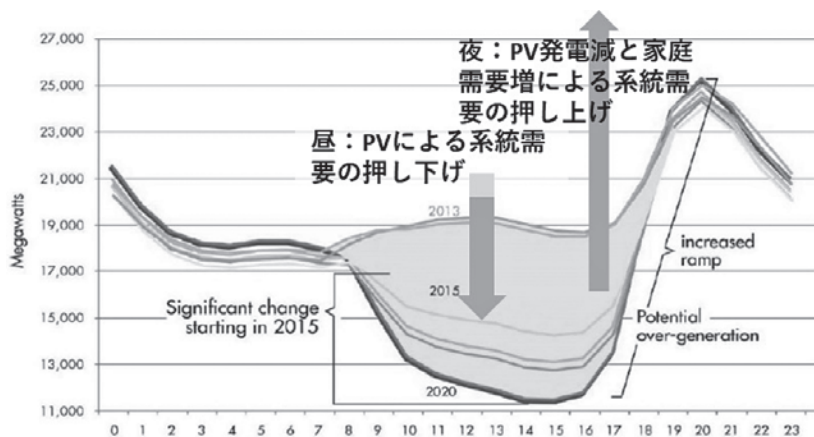


図-3 ダックカーブ (出典: カリフォルニア ISO)

スマート充電システムの開発が望まれる。

また、一日の中での時間変化だけでなく、一年間の中での季節変動も課題である。日本では梅雨前の初夏に最も日射が大きくなるが、まだ冷房需要がそれほど大きくないため太陽光発電の電力は余剰となりがちである。一方で暖房需要の電化が進むと、冬季には電力需要が増加するのに対し、曇天の多い日が続くために太陽光発電の発電量が少なく、電力の不足が生じる。特に、日本のように室毎に間欠空調がおこなわれる住宅や建物では、冷え切った建物を温めるために朝の暖房負荷が大きくなる。すなわち、これまで夏期の昼間に問題とされていた電力需要のピークが冬季の朝に生じるようになる。このような季節間の電力需給のアンバランスを解消するためには、水素など長期間の蓄電システムを用いることも考えられるが、電気を水素に変えて、また水素に戻すサイクルでは蓄電効率が3～4割程度と低いことが課題である。

5. 2050年に向けての建築（施工／機械）の役割

以上、カーボンニュートラルに向けた一般的なエネルギー需要側の役割について述べてきた。最後に、本誌が対象とする建築・土木施設や、施工機械の分野におけるカーボンニュートラルに対する課題について、筆者の私見を述べさせて頂きたい。

まず、建築・土木施設が2050年までの約二十数年に比べて寿命の長い財であることが挙げられる。今から新築される建築・土木施設は必ず2050年のカーボンニュートラル達成時にも存在すると考えて良い。したがって、省エネルギー性能が優れていることはもとより、現在存在しなくても2050年には取り付けられなければならない設備、例えば電気自動車の充電装置、太陽光発電設備、蓄熱・蓄電設備等が取り付けられるようなスペースの確保が必要となる。

次に、建築や土木構造物を構成する素材が変わる。コンクリートはセメント製造時におけるCO₂排出があるので特に課題が大きい。最近では設置後に大気中のCO₂を吸収するようなコンクリートも開発されている。鉄は高炉で製造された高炉鋼でなく、できる限りスクラップから電炉で製造されたりサイクル品である電炉鋼を使用することが求められる。また、今後は木材の積極的な使用が求められる。木材は他の建設資材に比べて製造時のCO₂排出量が小さいだけでなく、

現在日本の森林のCO₂吸収量が森林の老齢化に伴って大きく減少していることから、国産材を建設材として利用し、伐採後の土地にCO₂吸収量の大きな「エリートツリー」を植林することでCO₂吸収量を増加させることにもつながることから木材使用の効果は大きい。

さらに、施工対象としては建築のリニューアルが増加すると考えられる。現在存在している建築ストックは現在の省エネルギー基準を満たしていないものが多く、それらの多くが2050年以降も使用され続けると考えられることから、外壁や窓などの断熱強化、再生可能エネルギー設備の設置等の工事は今後増加して行くであろう。特に設備の電化や太陽光発電設備の設置においては新たにスペースを確保しなければならないという課題がある。

最後に、建設機械のエネルギー源の問題がある。今後、化石燃料を使用している機械のエネルギー源を、電化あるいは水素等に転換していく必要がある。空港等では既にフォークリフトなど作業車を水素化している例も見受けられるが、都市内や、市街地から離れた山林など異なる現場毎にどのようなエネルギーを使い、そのエネルギーを現場にどのように運んでくるのかは、これから大きな課題になると思われる。更に電力消費の大きな機械では、電力ピークやダックカーブ回避のため運転・充電時間を調整することが求められる。今後、建築や土木施設の環境影響評価では運用時だけでなく施工時の排出を含めたライフサイクル評価が一般的になると思われるので、施工機械の脱炭素化には大きな期待が寄せられている。

JICMA

《参考文献》

- 1) IPCC AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
- 2) Grubler et. al: A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy (2018) 3 (6) 515-527
- 3) USDOE: A National Roadmap for Grid-Interactive Efficient Buildings, <https://gebroadmap.lbl.gov/>

【筆者紹介】

下田 吉之（しもだ よしゆき）
（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）
理事・研究所長

