

# カーボンニュートラル達成のための 建築分野の課題

大阪大学 大学院工学研究科 教授 下田 吉之

## 1 カーボンニュートラルへの動き

2021年10月、2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比46%減とする「地球温暖化対策計画」、2050年の温室効果ガス排出量を実質ゼロとする「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」、温室効果ガス排出の大部分を占めるエネルギー需給の将来計画を定める「エネルギー基本計画」の改定が閣議決定された。

2010年代前半までに世界の温暖化対策の目指すべき目標は「2℃目標」、即ち産業革命以来の気

温上昇を2℃以内に抑制することとされており、IPCCの第5次報告書では気温上昇をそれ以下に抑制することは困難とされてきた。2℃目標では2050年の世界全体での排出量を現状からおおよそ半減することが求められる。しかしながら、2015年にパリで開催されたCOP21においては、気温上昇を1.5℃以下に抑える努力をすることとされ、それに従って2018年に発表されたIPCCの1.5℃特別報告書では、気温上昇を1.5℃以下に抑えるための温室効果ガス排出経路として、概ね2050年に正味の温室効果ガス排出量がゼロとなる経路が示された。現在先進国ではこれにあわせて2050年

表1 2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比46%減とする「地球温暖化対策計画」

### ■ 地球温暖化対策推進法に基づく政府の総合計画

「2050年カーボンニュートラル」宣言、2030年度46%削減目標<sup>※</sup>等の実現に向け、計画を改定。

<sup>※</sup>我が国の中期目標として、2030年度において、温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す。さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていく。

温室効果ガス排出量・吸収量 (単位：億t-CO <sub>2</sub> )		2013排出実績	2030排出量	削減率	従来目標
		14.08	7.60	▲46%	▲26%
エネルギー起源CO <sub>2</sub>	産業	4.63	2.89	▲38%	▲7%
	業務その他	2.38	1.16	▲51%	▲40%
	家庭	2.08	0.70	▲66%	▲39%
	運輸	2.24	1.46	▲35%	▲27%
	エネルギー転換	1.06	0.56	▲47%	▲27%
非エネルギー起源CO <sub>2</sub> 、メタン、N <sub>2</sub> O		1.34	1.15	▲14%	▲8%
HFC等4ガス（フロン類）		0.39	0.22	▲44%	▲25%
吸収源		-	▲0.48	-	(▲0.37億t-CO <sub>2</sub> )
二国間クレジット制度（JCM）		官民連携で2030年度までの累積で1億t-CO <sub>2</sub> 程度の国際的な排出削減・吸収量を目指す。我が国として獲得したクレジットを我が国のNDC達成のために適切にカウントする。			-

出典：地球温暖化対策推進本部（第47回）資料1-1 地球温暖化対策計画（案）の概要より

カーボンニュートラルを宣言している。

2016年に策定された地球温暖化対策計画では、各部門の省エネルギーや電源構成の変化について、困難ではあるものの、概ね実現可能な対策を積み上げ、言わば「実現可能な目標」として2030年度に2013年度比26%という目標を設定していた。今回の2050年カーボンニュートラル及び2030年度46%削減の目標は、気温上昇を1.5℃に抑えるために必要な、「達成しなければならない目標」として設定されたものであり、その性格が大きく異なる。

この動きの中で、建築分野は今後どのような対策を取るべきであろうか。よく「非連続なイノベーション」による温室効果ガスの削減ということが言われるが、建築は寿命が長く、おそらく2050年の風景の半分程度は既にできており、すべてのストックを2050年までに更新することができない。これは今後出現するイノベーションの成果を2050年までに十分反映することができないことを意味し、自動車や家電・情報機器等と大きく異なる建築分野の特性である。

以下に、建築分野を含んだ今後期待される様々な取組みについて述べていく。

## 2 脱炭素社会達成の定義

脱炭素社会というと、再生可能エネルギーや原子力、グリーン／ブルー水素などCO<sub>2</sub>フリーのエネルギーによってすべてのエネルギー供給が行われる社会を想像する人が多い。しかし、いかなるエネルギー供給源であってもコストや環境影響、安全性等の制約があり、無尽蔵に利用できるわけではない。本来は同時にエネルギー需要の削減努力を行って、

CO<sub>2</sub>フリーエネルギー＝エネルギー需要<sup>1)</sup>

となる状態をカーボンニュートラルと定義すべきである。

現在、日本の電力供給の中で再生可能エネルギーの比率は水力も含めておよそ20%である。2050年カーボンニュートラルのためには、これを原子力や水素などのカーボンニュートラル電源を含めてほぼ100%にまで高めなければならないが、日本における再生可能エネルギーの主力である太陽光発電は既に国土面積当たりの普及量が世界一となっており、風力など他の再生可能エネルギーを拡大したとしても、今後数倍の発電量を確保することは困難であると言わざるを得ない。しかし、もし電力需要を半分にできれば、現在の再生可能電源量でも比率は40%となり、電源量を倍にすることができれば80%にまで大きくなる。このように、大胆な省エネルギーと、カーボンフリーエネルギーの拡大の両面から攻めていくことが、カーボンニュートラル達成のための鍵であると考えている。

なお、電力システムでは「同時同量の原則」があり、瞬時において需要と供給が釣り合わなければ周波数が規定から外れ、大規模な停電を招く恐れがある。これまでは、建築を始めとする需要側が勝手気ままに電力消費量を変動させても、地域全体の需要変動はそれほど急激なものにならないこと、供給側が大型水力、大型火力、原子力など周波数に合わせて一定の速度で回転する発電機を主体に運用されていることにより、需要変動に対してきめ細やかに供給を調整できる機構が準備されており、大規模災害時のような状況以外では周波数の変動が問題になることはなかった。

しかし、太陽光や風力など出力をコントロールできない変動性再生可能エネルギーが大幅に普及した将来においては、主としてこの変動の調節に対応してきた大型火力発電所が相対的にシェアを下げていることもあり、同時同量のバランスを保つことが極めて難しくなる。このため、電池・揚水発電所・水素等の新たな電力貯蔵システムが必要となるとともに、需要側においても電力供給側の調整要請に応じて需要の大きさをフレキシブル

に調整（デマンドレスポンスと呼ぶ）できるようにする必要があり、脱炭素社会における一つの技術的課題となっている。

### 3 再生可能エネルギーの普及と建築

風況に恵まれた欧州とは異なり、気候・地形の条件から日本における再生可能エネルギー活用は当面太陽光発電を中心に普及すると考えられる。太陽電池の設置方法として大きく分けてメガソーラーのような地上に大規模に設置されるものと、建物の屋根に設置するものがあるが、大規模な架台や電力設備が不要なこと、地上設置型は他の発電所と同様にkWh当たり10円を大きく下回る発電コストが要求されるのに対し、建物に組み込まれた太陽光発電では少なくとも自家消費した場合、建物に供給されている電力の価格15円～25円/kWh程度と同様な価値を持つことから、今後も屋根置き型太陽光発電が増加していくと考えられる。

現在では、初期費用を負担しなくても屋根に事業者が設置した太陽光発電の電力を購入することで太陽光発電の導入が容易となるPPA（Power Purchase Agreement）事業のような新しいビジネスモデルの登場や、フレキシブルで軽量なためこれまで荷重の問題などで設置が困難であった場

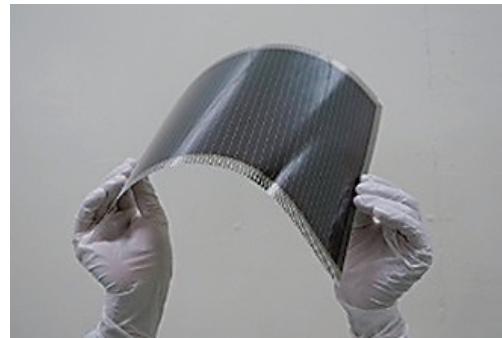


写真1 面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

所にも設置が可能なペロブスカイト太陽電池が日本発の新しいタイプとして登場するなど、今後の更なる普及が期待される。

ところで、太陽光発電が普及すると、晴天の休日には昼間に太陽光発電以外の大型発電装置への負荷が下がる。このとき、発電量を調整できない原子力発電所等以外の発電所をすべて停止させても電力が余る場合は、蓄電池や揚水発電所等を稼働させて電力を貯蔵するか、それでも余る場合には太陽光発電の発電量を抑制しなければならない。一方で、夕方には太陽光発電の低下と家庭における電力需要増加が同時に起こることで大型発電装置への電力需要が急上昇する。朝から夕方にかけての電力需要の変化がアヒルの形に似ていることからこの現象を「ダックカーブ」と呼んでい

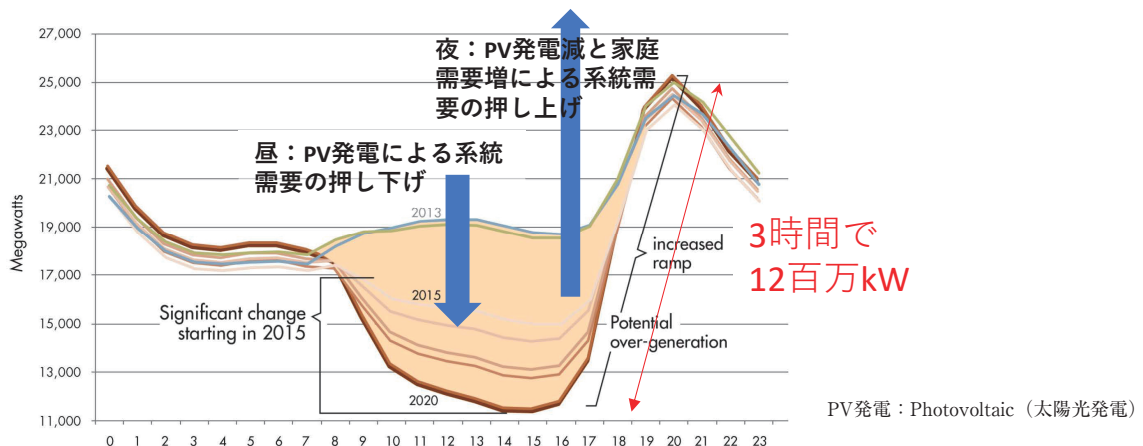


図1 ダックカーブ現象

出典：CAISO

る。既に太陽光発電の普及が進むカリフォルニアでは夕方の3時間で1,200万kW（大型の発電所がおおよそ1ユニット100万kWなので12ユニット分に相当）の急激な電力需要の上昇が起こるようになり、2020年8月にはそれを賄う火力発電所の故障により計画停電に至っている。日本でも九州など太陽光発電が普及した地域で同様のダックカーブが形成されつつあり、建築など需要側では可能な限りこの夕方の電力需要増を緩和する対策、即ち①昼間の余剰電力のヒートポンプ給湯器等による自己消費、②デマンドレスポンスによる夕方の需要急上昇の緩和、③蓄電・蓄熱（海外では躯体蓄熱も検討されている）を検討する必要がある。また、季節的には冬期に暖房の電化進展と日射不足による電力需給逼迫が予想され、建築側ではバイオマスや太陽熱の利用によってこのギャップを緩和することも必要になるだろう。

#### 4 建築の省エネルギー

前述のように、エネルギー消費の削減はCO<sub>2</sub>フリーエネルギーの拡大とともに脱炭素社会実現に重要な課題である。IPCCの1.5℃特別報告書の政策決定者向け要約<sup>2)</sup>では、気温上昇を1.5℃以内に抑えることができるとする四つの代表的なシナリオを示しているが、うち三つはBECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage) 即ちバイオ燃料を大量に栽培して大気中のCO<sub>2</sub>を固定し、その燃焼により生じるCO<sub>2</sub>をCCS技術で地中に貯留することで実質的に大気中のCO<sub>2</sub>を取り除く、いわゆるネガティブエミッション技術に頼ったシナリオである。しかし、そのように大規模にバイオ燃料作物を食糧供給とのコンフリクトを起こさずに栽培できるのか、CCSをこれほど大規模に実施可能なのか等、その実現には大きな課題がある。

一方、残りの一つのシナリオはLow Energy Demand (LED) シナリオという、徹底した省エ

ネルギーを追求するシナリオである。これは情報化（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省エネルギーを実現するシナリオである。その詳細は論文<sup>3)</sup>に譲るが、一つ紹介しておきたいキーワードが「機能統合」である。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、更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を大幅に削減させている。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CO<sub>2</sub>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。既にコロナ禍で一般的になったテレワークは、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。

筆者らは、ボトムアップシミュレーションによる日本の民生部門のエネルギー消費／温室効果ガス排出の将来予測を研究している<sup>4)</sup>が、これまでの検討から家庭部門、業務部門いずれも2050年頃には現在利用可能な技術を最大限普及させることでエネルギー消費を現在の半分程度に抑制することは可能との見通しを得ている。これら技術、特にエネルギー需要の大きなシェアを占める冷暖房に関係する高性能な建築外皮の早期の普及が望まれる。

#### 5 電気自動車の普及と建築

日本で消費されている化石燃料のうち、石炭と天然ガスは過半が電源として利用されており、再生可能エネルギー等の増加によりそれらへの依存度を減らしていくことができるが、石油は過半が輸送用燃料として利用されているので、その削減のためには自動車などモビリティの電動化が必要となる。電気自動車の特徴は充電時間が長いこと

で、40kWhの電池を搭載した車において普通充電（200V、3kW）で満充電に16時間、急速充電（3相200V、50kW）で80%充電に40分程度を要する。したがって、ガソリン車のように急速充電スタンドに出向いて給電することは、時間の関係から現実的ではなく、自宅で昼夜の駐車時に充電するか、通勤先や出先で昼間に充電することが一般的になる可能性が高い。いずれの場合でも建築のエネルギーシステムに電気自動車加わることになる。集合住宅の駐車場などではどのような充電メニューを提供するのがよいか、今後検討が必要であろう。

自宅で充電する場合、平均的な住宅のピーク電力が1kW程度であるところに3kWの負荷の増加は、それがあがる程度普及すると配電システムへの影響を考えなければならない。また、「5月の晴れた休日に遠出して帰宅後充電」とすると前述のダックカーブを更に急峻にしてしまうことになる。そこで、充電時間をシステムの負荷に応じて調整するスマート充電や、太陽光発電の電力が余剰になりがちな昼間に先（勤め先や商業施設など）での充電を誘導する仕組みなどが必要になる。後者の場合には1台50kW規模の負荷がぶら下がることになるので、今後の電気設備の設計において留意点となるだろう。一方で電気自動車には災害時・停電時において電気自動車から建物への電力供給に使用できるメリットもあることも忘れてはならない。

## 6 建物自体のエネルギーの選択

自動車の場合と同様、建物の使用するエネルギーもカーボンニュートラルなエネルギーに転換していく必要がある。

電化には、既に電力に再生可能エネルギーや原子力などカーボンフリー電源のオプションが存在することから、カリフォルニアでは電化政策が進められている。一方で、燃料ならではのサービス

として、①調理など高温の加熱、②電化が進むと住宅・建築分野からの電力需要のピークは現在の夏から冬へ移行することが予想されるが、冬は太陽光発電や風力発電からの電力供給が天候の関係で不足する可能性があり、その不足をカバーするピークカット効果、③災害時など電力供給が途絶した場合のバックアップの3点があり、化石燃料利用を水素利用やバイオマス燃料に転換する手段もある。水素をカーボンニュートラルな形で製造する方法として、再生可能エネルギー由来の電力より製造する（グリーン水素）のほか、化石燃料から水素を製造し、その際発生するCO<sub>2</sub>をCCSにより地中へ貯留する（ブルー水素）方法があり、実用化への実証実験が進んでいる。また、水素の建築への供給方法として、水素をそのまま供給するだけでなく、CO<sub>2</sub>と合成して現在の都市ガスと同じメタンとして従来と同じように利用できるようにする手法についても開発が進められている。

## 7 電力システムと協調する建築

ここまで見てきたように、これからの建築にはエネルギー消費者としてその消費量を削減するだけでなく、今後再生可能エネルギー電源の拡大によって生じる電力需給の不安定化を積極的に緩和する役割が求められる。2021年5月には、米国エネルギー省から『A National Roadmap for Grid Interactive Efficient Building』<sup>5)</sup>が刊行されている。この中で、Grid Interactive Efficient Building (GEBs) とは、「分散型エネルギー資源の積極的使用に特徴づけられる、スマート技術を用いて電力グリッドへのサービスと居住者のニーズ、コストを最適化する、エネルギー効率の高いビル」と定義されている。即ち、電池、電気自動車、太陽光、燃料電池など分散発電システムを活用し、電力システムの要求と、居住者に対するサービスの要求の両者を両立させる最適制御をビル、ビル群を対象に実行するシステムと考えられ、今後の

スマートビルの目標となるコンセプトである。

## 8 エネルギー以外の課題

建築分野におけるエネルギー以外の温室効果ガス排出抑制の課題として、以下の2点がある。

一つは木材の利用である。日本の森林は現在全体として成熟した状況にあり、CO<sub>2</sub>の吸収量が2013年から2030年で減少すると言われている。これを食い止めるためには木材利用を促進し、伐採した後にエリートツリーと言われる成長が早くCO<sub>2</sub>吸収能力の高い樹木を植樹することが必要であり、木造建築の普及拡大はその効果が大きい。

もう一つはエアコンの使用にかかるフロンの問題である。エアコン使用時におけるフロンの漏洩防止は地球温暖化対策計画で挙げられている対策の中でも現在その進捗が遅れている分野であり、ネットワーク等を用いて運転状態を監視して漏洩検知を行うことは同時にエネルギー管理の面でもメリットが期待できる。もちろん温室効果の少ない冷媒を開発することも重要な課題である。

## 9 まちの重要性

以下は筆者の私見となるが、このように見ると、日本で今後重要となってくるのは建築単体でなく街区・まちの単位となるのではないかと考えている。これから世界中で始まるカーボンニュートラル社会への転換の競争において、日本が世界に対して貢献でき、産業を伸ばしていく可能性の高い分野の一つとして、建築・住宅・家電・設備・自動車などその要素技術において世界をリードしているまちづくりの分野があること、また前述のような電力グリッドに貢献できる建築の技術は、VPP（仮想発電所）と言われるように多数の住宅・建築から構成される大きな単位にまとめることでその効果が発揮されること、今後カーボンニュートラル社会への移行ではすべての国民

や中小事業者の参画が必須であり、「明るく豊かなカーボンニュートラル社会」の姿を提示することがそのために必要なこと等が理由である。

既に海外ではカーボンニュートラルのまちづくりの実験が進み、日本でも「脱炭素先行地域」の構想が進んでいる。ここでの日本の課題は、要素を組み合わせることで大きなシナジー効果を生み出すシステム化力と、単に温室効果ガスを排出しないというだけでなく、景観のよさ、快適さ、SDGs全体の課題に配慮できるデザイン力であると考えている。

(参考文献)

- 1) Shimoda et al (2020), Energy demand science for a decarbonized society in the context of the residential sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, 110051
- 2) 『IPCC1.5℃特別報告書』政策決定者向け要約 (2018)
- 3) Grubler et al (2018), A low energy demand scenario for meeting the 1.5℃ target and sustainable development goals without negative emission technologies, *Nature Energy*, vol. 3, Issue 3, pp. 515-527
- 4) Shimoda et. al. (2021) Evaluating decarbonization scenarios and energy management requirement for the residential sector in Japan through bottom-up simulations of energy end-use demand in 2050, *Applied Energy*, 117510
- 5) US-DOE (2021) A National Roadmap for Grid-Interactive Efficient Buildings  
<https://gebroadmap.lbl.gov/>