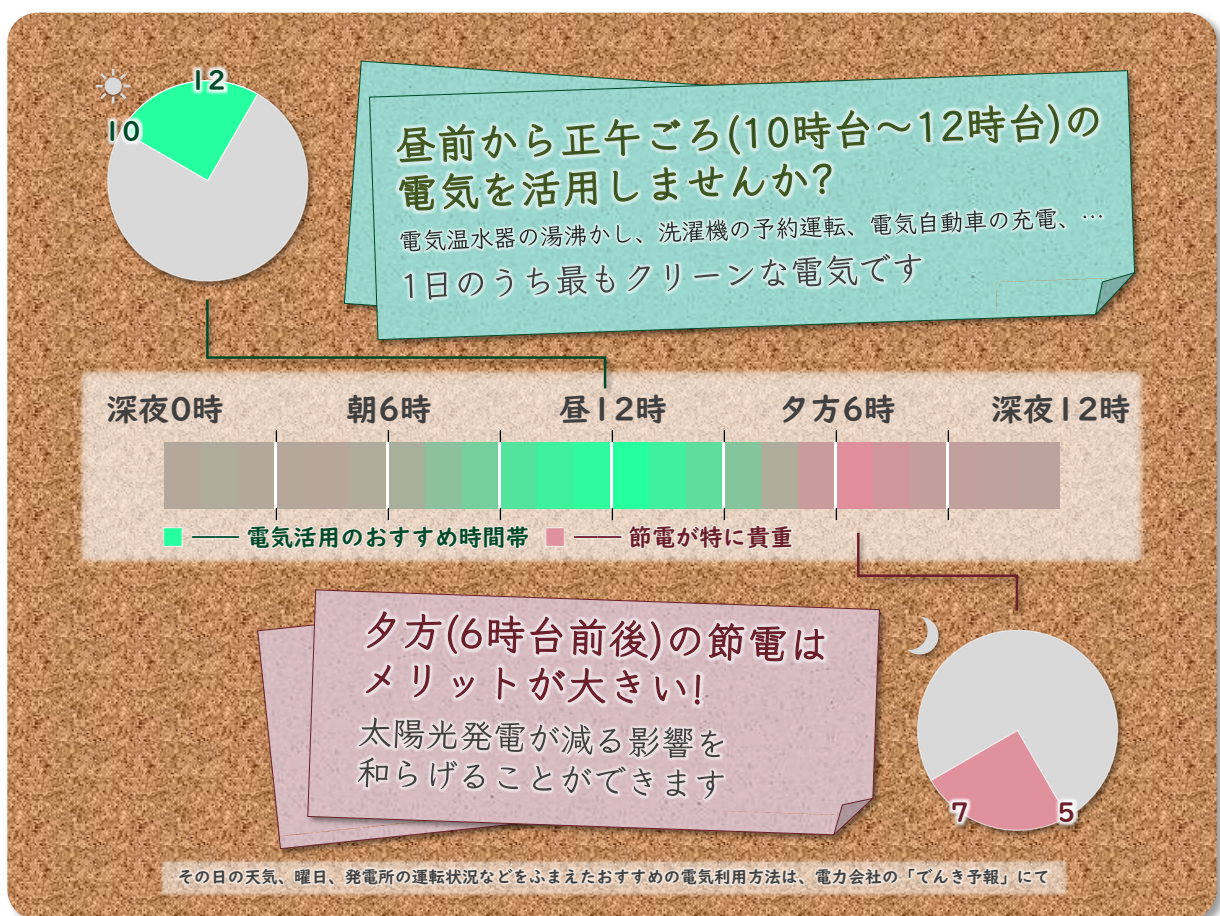


# 昼前から正午ごろの電気活用で 低炭素化と安定供給の一挙両得！

## 節電の価値が特に高いのは夕方

日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 研究主幹 | 柳澤 明

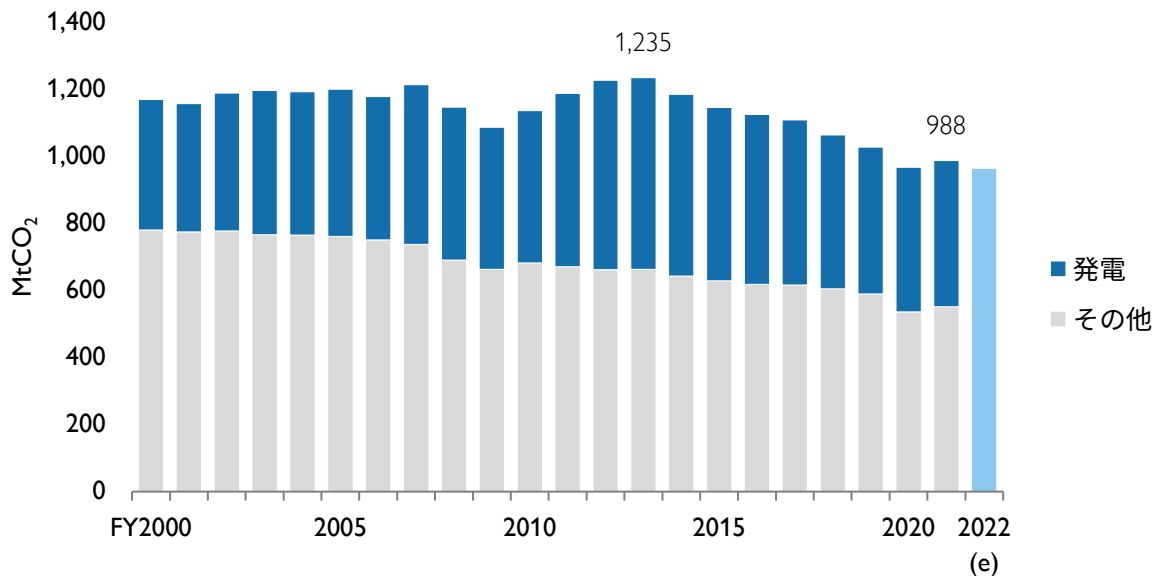


## エネルギー低炭素化への期待と現実

日本のエネルギー起源二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出は、2013年度をピークとして減少傾向に転じた(図1)。2021年度は経済・社会活動が新型コロナウイルス禍から徐々に回復したことで8年ぶりに前年比で増加したが、2022年度半ば

以降は再び減少している模様である。こうした傾向は、発電以外の部門での排出の安定的な減少に加え、2013年度にかけて急増した発電部門での排出が減少していることによる。

図1 | エネルギー起源二酸化炭素排出



注: 直接排出ベース

出所: 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」([https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/), 2023年9月18日アクセス), 日本エネルギー経済研究所「EDMCエネルギートレンド」から推計[2022年度]

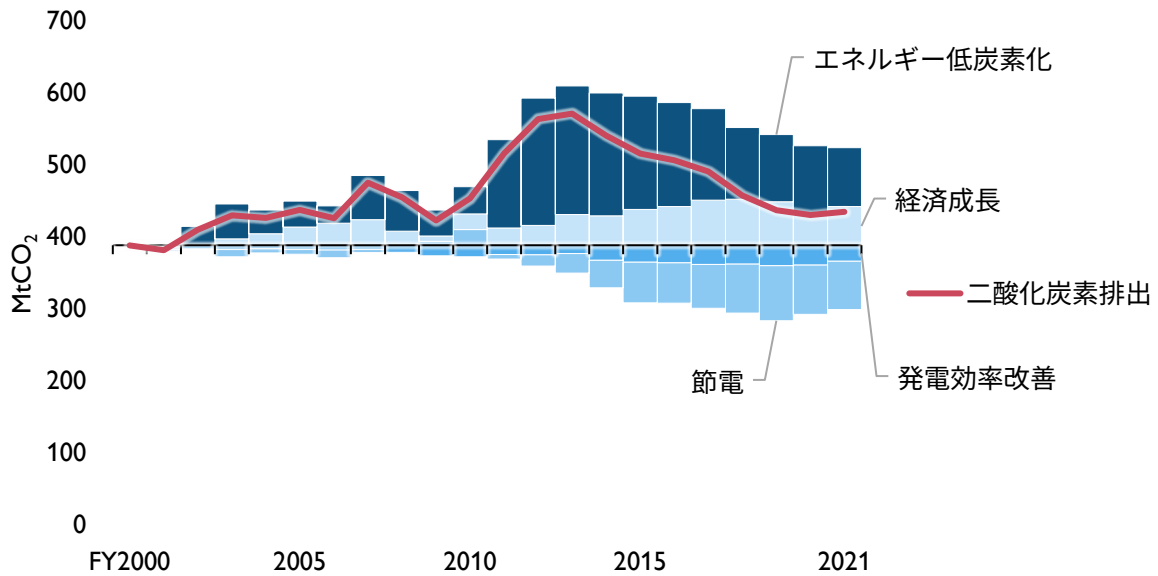
発電以外での二酸化炭素排出の削減は、もっぱら省エネルギーを牽引役としてきた。これに対し、最大の排出部門<sup>1</sup>である発電における削減対策としては、発電量すなわち電力需要の抑制や発電効率の向上もあるが、一般には再生可能エネルギーや原子力などの活用を通じた使用(投入)エネルギー源の低炭素化がはるかに大きな役割を果たすとされている。実際、今まさに、発電におけるエネルギー低炭素化が持ちうる大きな影響力を目の当たりにしている。

しかしながら、日本の発電におけるエネルギー低炭素化は、二酸化炭素排出削減に十分

な役割を果たしているとはまだ評せない。というのも、発電における現下の排出減少は、あくまで2011年の東日本大震災後の原子力発電低迷により跳ね上がった排出量を以前の水準に向けて徐々に戻しているに過ぎないからである。例えば、2000年度と比較すると、エネルギー低炭素化は依然として排出減少に貢献していないばかりか、80 Mtもの増加に寄与している(図2)。この20年強における発電での排出減少の立役者は、国内総生産(GDP)当たりの発電量の継続的な低減、すなわち節電である。

<sup>1</sup> 直接排出ベース

図2 | 発電部門の二酸化炭素排出と増減寄与(2000年度比)



注: 直接排出ベース。寄与は、発電部門二酸化炭素排出 = GDP × GDP当たり発電量 × 発電量当たりエネルギー消費(投入)量 × エネルギー消費量当たり発電部門二酸化炭素排出量 に基づき算出。エネルギー低炭素化はエネルギー消費量当たり発電部門二酸化炭素排出量の減少による寄与、経済成長はGDPの増加による寄与、発電効率改善は発電量当たりエネルギー消費量の減少による寄与、節電はGDP当たり発電量の減少による寄与を指す。  
出所: 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」([https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/), 2023年9月18日アクセス), 内閣府経済社会総合研究所「国民経済計算」(<https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/menu.html>, 2023年9月19日アクセス)から算出

## 広がる太陽光発電の出力抑制

日本は、エネルギー起源二酸化炭素がその大半を占める温室効果ガスの排出を全体として0とするカーボンニュートラルの2050年までの達成、また、国が決定する貢献(NDC)としてその手前2030年度において温室効果ガスの2013年度比46%削減を掲げている。これらに向けて、発電におけるエネルギー低炭素化に寄せられる期待は大きい。しかし、いまだ東日本大震災後の二酸化炭素排出増加分を相殺できていない現状の延長線上に見込まれる電源構成では、目標達成に対して力不足であろう。

その一方で、太陽光発電が年間の発電量構成で8.3%<sup>2</sup>しか占めていない現在でも、その活用に支障が生じている。これは、太陽光、風力といった変動性再生可能エネルギーは、発電量を人為的に調整しがたいためである。電力は需給バランスが崩れると、不安定化して停電や電気機器の故障を引き起こす<sup>3</sup>。太陽光発電は導入が進むにつれ、時間帯によっては供給(発電量)が需要を大きく上回るような過剰な発電が問題となってきている。対応策としては、火力発電の抑制、他エリアへの送電、揚水用動力消費<sup>4</sup>による電力需要創出な

どが採られているが、これらで解決できない場合、一部の太陽光・風力発電の出力抑制(出力制御)が実施される。出力抑制は太陽光発電の導入が電力需要に対して大量となっている九州エリアなどでこれまでも行われていたが、2023年には初めて関西エリア、中部エリアでも実施された。近畿圏、中京圏といった電力の大規模需要地を擁し過剰発電問題が顕在化しにくいとされていたエリアでも、太陽光発電の導入が大きく進んだことで出力抑制措置を講じざるをえなくなった。

再生可能エネルギーを効率的に、ひいてはより多く活用するためには、単に太陽光パネルを敷き詰め、風車を林立させて発電設備を野放図に増やすだけではなく、その電力利用においてもふさわしい対応<sup>5</sup>が迫られている。その新たな手立てとしては、地域間連系線の大規模増強や蓄電設備の大量導入などがある——ただし、周波数が異なる東日本・西日本の連系設備や蓄電池は導入コストが高いことが知られている。こうしたハードウェア・供給側による対応のほかに、ソフトウェア・需要側の対応としては電力を使うタイミングをずらす電力需要の時間シフトがある<sup>6</sup>。

<sup>2</sup> 2021年度。資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」([https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/), 2023年9月18日アクセス)

<sup>3</sup> 電力の需給は常に一致していなければならない——究極のJust in timeである。供給不足だけでなく、供給過多もまた電力システムを不安定化させる。電力供給不足に対する問題意識は東日本大震災後に広く共有されるようになったが、供給過多に対してはいまだ理解が乏しい。

<sup>4</sup> 水力発電の一種である揚水発電では、発電のために落下させた水を電動ポンプで上池に汲み上げ再び発電に用いる。この仕組みにより、水の位置エネルギーを媒介した蓄電機能を備える。水を汲み上げるポンプを

動かすために消費する電力を揚水用動力と呼ぶ。揚水発電は、電力供給を短時間増すために発電し、供給力に余裕がある時間帯に水を汲み上げるのがもともとの運用法であった。近年では電力供給が過剰な時間帯に揚水用動力を消費して電力需要を積極的に創出することも重要な役割となっている。

<sup>5</sup> 太陽光で発電した電力を1 kWhたりとも抑制しないという意味ではない。

<sup>6</sup> さらに、水を再生可能電力を用いて電気分解し水素を製造し、その水素を用いて適当なタイミングで発電することで、電力需給を月・季節単位でシフトする試みがされている。

## 春、電力は低炭素に

電力の中でも相対的に低炭素なものの活用による二酸化炭素排出削減を狙い、電力の季節・時間別の炭素排出係数を算定することが2000年代に議論されていた。例えば、2008年に閣議決定された「規制改革推進のための3か年計画(改定)」には、以下のように記されている:

*我が国の発電所が発生させるCO<sub>2</sub>の排出量を削減するためには、需要家が電力消費を昼から夜間へシフトするよう促すインセンティブを与えることが有効である(ただしこれは、昼から夜へのシフトによりCO<sub>2</sub>排出量が減る場合である。逆の場合は、夜から昼へシフトさせる必要がある)。さらに、需要家が、自社の電力消費が発生させるCO<sub>2</sub>排出量を考慮して発電会社を時間帯ごとに選択をするインセンティブを与えることが有効である。そのために、「季時別平均排出係数」を採用することも含めて検討し、結論を得る。*

しかし、電力の炭素排出係数は、①必ずしも季節に応じた一定の傾向を示すとは限らない、②昼夜間の差が限定的<sup>7</sup>、③季節・時間別の正確な算定が困難である、とされたことなどから、季時別排出係数は採用に至らなかった。だが、こんにち、春季には、太陽光発電

が振るう一方で空調用需要などが低下するため、電力供給過多・需要不足になると同時に、発電において低炭素エネルギーの比率が高まるようになっている。

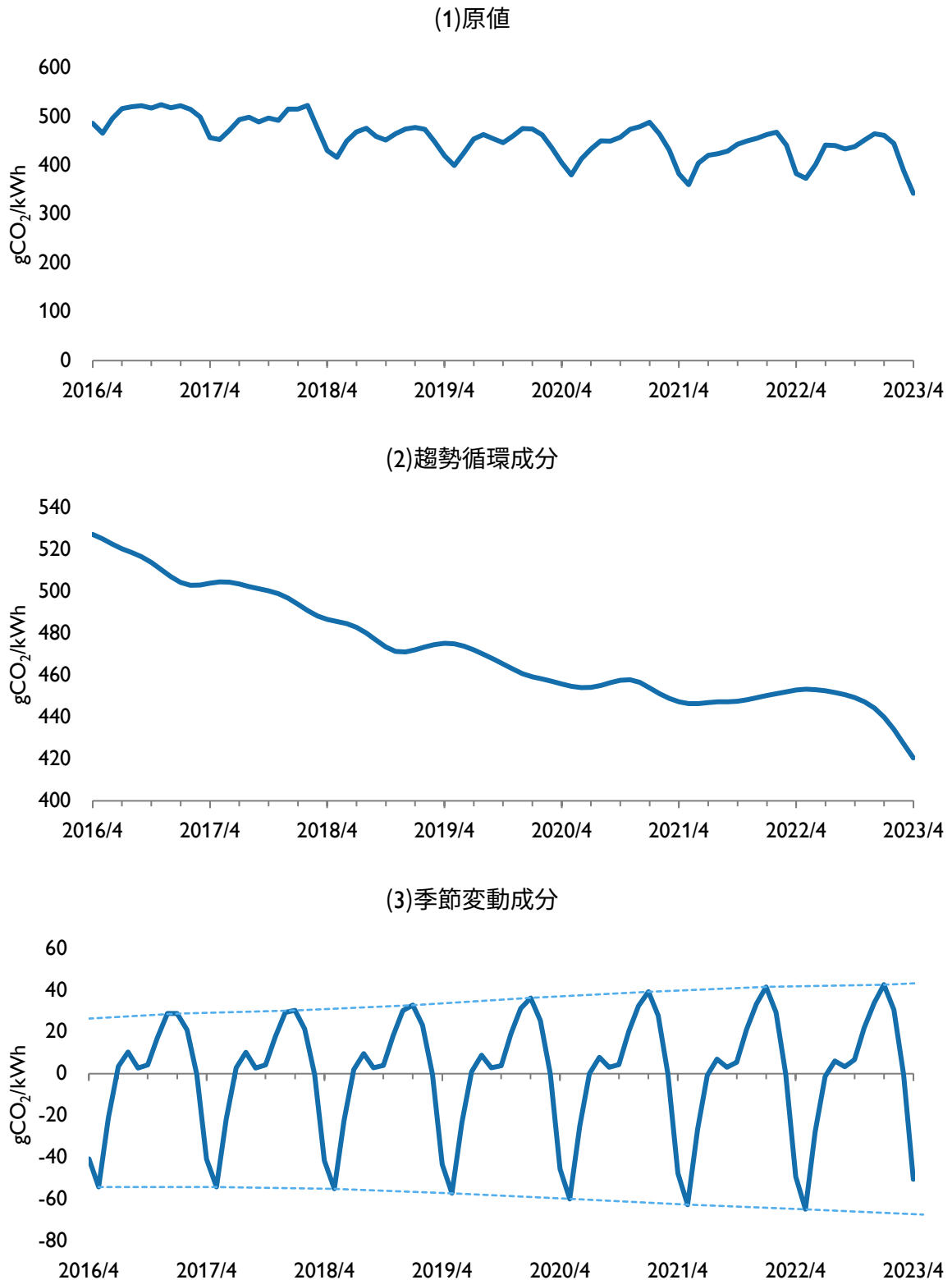
以下、全国ベースで見ると、電力の低炭素度合いを測る指標の1つである二酸化炭素原単位(発電量当たりの二酸化炭素排出量)<sup>8</sup>は、不安定な動きを示す(図3-(1))。しかし、その推移を分解すると、太陽光発電の導入進展やバイオマス発電の拡大などによって、図3-(2)の趨勢循環成分が示すように、トレンド的には低下している。同時に、図3-(3)の季節変動成分が示すように、季節に応じた周期的な振動——5月に低く、1月に高く——の幅が年々拡大している。2016年度に80 gCO<sub>2</sub>/kWh強であったその振幅は、2022年度には110 gCO<sub>2</sub>/kWh弱に達し、今後も太陽光発電の増加に伴いさらに拡大すると見込まれる。

この周期的に発生し、予見可能とも言う電力の低炭素化を有効活用しない手はない。冬季の相対的に高炭素な電力の消費を抑制し、春季の低炭素な電力を積極的に用いるような電力需要のシフトができれば、エネルギー低炭素化を効率的に進める一助となる。

<sup>7</sup> 2007年度の全日平均453 gCO<sub>2</sub>/kWhに対し昼間(8時~22時)が462 gCO<sub>2</sub>/kWh、夜間(22時~8時)が435 gCO<sub>2</sub>/kWh。環境省 温対法に基づく事業者別排出係数の算出方法等に係る検討会事務局「季時別平均排出係数の導入について」([https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calcul/kento\\_j04/mat04.pdf](https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calcul/kento_j04/mat04.pdf), 2023年9月18日アクセス)

<sup>8</sup> 電力調査統計と標準発熱量および炭素排出係数に基づき算定。その他重油はA重油とC重油の消費比率で案分、混合ガスはコークス炉ガス、高炉ガス、転炉ガスの消費比率で案分、その他ガスは都市ガスに準じた扱い、その他の炭素排出係数は0とした。電気事業者以外の事業者からの受電電力については、各火力発電の二酸化炭素原単位は電気事業者の発電と同値とした。温室効果ガスのクレジットは考慮しない。

図3 | 事業用電力の月別二酸化炭素原単位と趨勢循環成分、季節変動成分



出所: 経済産業省「電力調査統計」などから推計



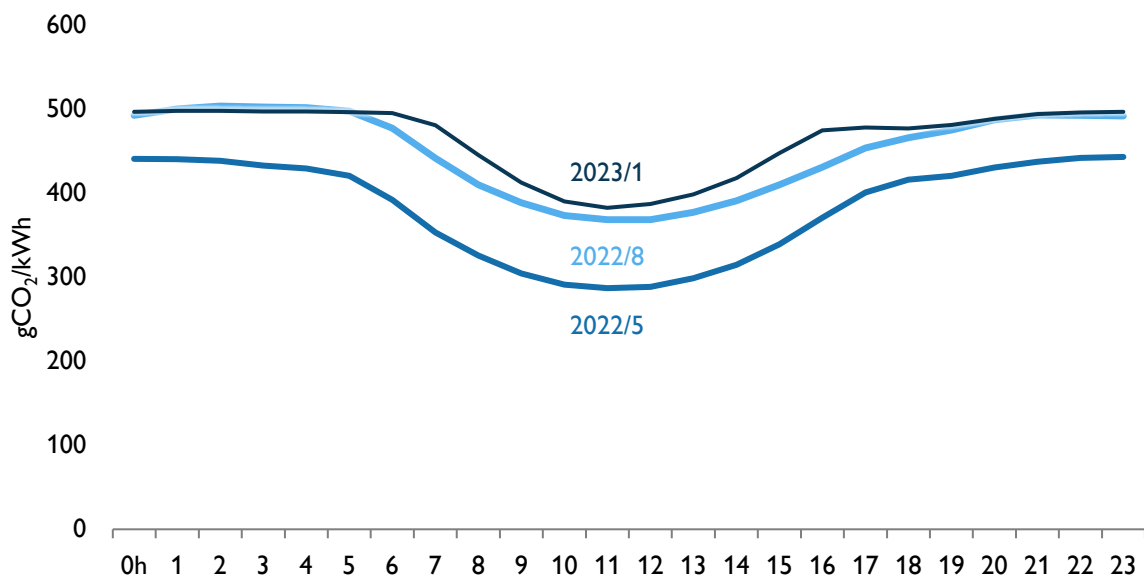
## 昼の電力は夜よりも低炭素

とはいうものの、月あるいは季節単位で電気を使うタイミングをずらすことは、容易ではなかったり機会が限られたりする。そこで、ここではハードルがより低い時間単位でのシフトを考える。

電力の二酸化炭素原単位は、時間ごとにも異なっていると推量される。ただし、時間帯別・

発電種別の発電・燃料消費状況にかかるデータは公表されていないため、その値を正確に算定することはできない。そこで、データの利用可能性を鑑みた大胆な簡略化、すなわち火力発電の二酸化炭素原単位はそれぞれの月内においては前節で得た値で一定であるとのみなしを置くことにより、電力の時間帯別二酸化炭素原単位を概算した(図4)。

図4 | 系統電力の時間帯別二酸化炭素原単位の例



注: 火力発電の二酸化炭素原単位は、各月内では時間によらず図3-(1)に示した値であるとした  
出所: 一般送配電事業者の需給実績データから推計

電力は、深夜から昼にかけて低炭素化してゆき、その後、昼から真夜に向けて再び高炭素化する。そして、各時間帯の二酸化炭素原単位の月推移には、日中12時台、夕刻18時台、深夜0時台いずれの時間帯でも季節変動が認められる(図5)。趨勢循環成分は、太陽光発電が活発な12時台の二酸化炭素原単位が年々、特に急減していることを明瞭に示す。そして、趨勢循環成分と季節変動成分を足した、いわ

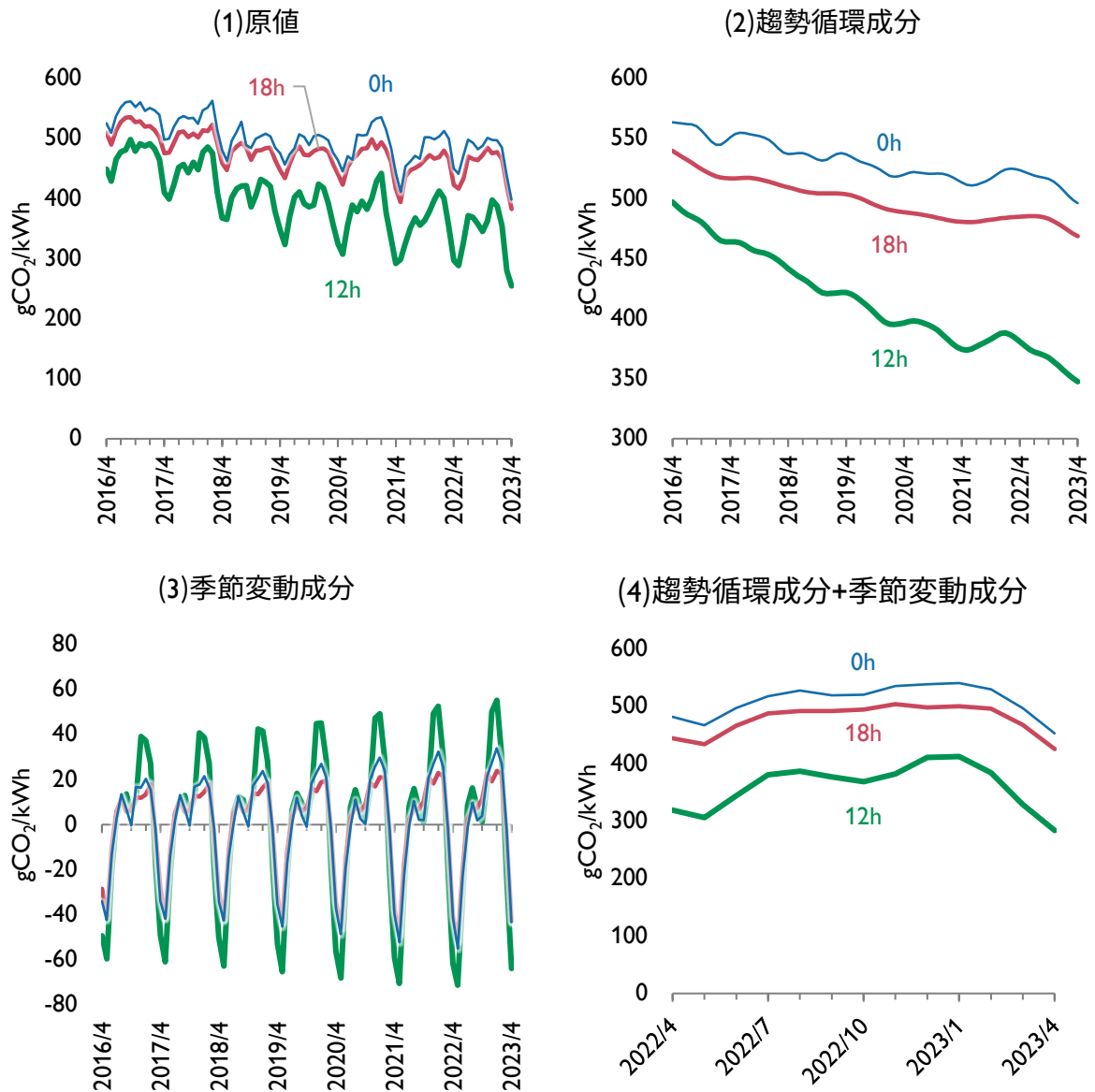
ば予見しやすい系列は、12時台は年末年始にやや大きく上昇する傾向があるものの、それでも以前とは異なり<sup>10</sup>、恒常的に0時台を下回る。すなわち、低炭素電力の活用という見地からは、夜から昼に電力需要をシフトさせるのが効果的と言える。なお、18時台も0時台よりは若干低位にあり、夜から夕刻へのシフトも一定の効果を持つ。ただし、これで結論としてはならない。

<sup>9</sup> 一般送配電事業者の需給実績データ、電力調査統計に基づき推計。月内当該時間帯の平均。

<sup>10</sup> 例えば、「規制改革推進のための3か年計画(改定)」(2008年閣議決定)の検討時は、東日本大震災や太陽光

発電の爆発的導入の契機となった固定価格買取制度の導入(2012年)より前であり、電力は原子力発電の構成比が高まる夜に低炭素化するというのが普通の間接であった。

図5 | 系統電力の時間別二酸化炭素原単位(0時台、12時台、18時台)と趨勢循環成分、季節変動成分、趨勢循環成分+季節変動成分



注: 火力発電の二酸化炭素原単位は、各月内では時間によらず図3-(1)に示した値であるとした

出所: 一般送配電事業者の需給実績データから推計



## 二酸化炭素至上主義の落とし穴にはまってはならない

低炭素化のみを基準として電力需要をシフトしてしまうことは危険である。場合によっては、電力系統を不安定状態へと向かわせるおそれがあるためである。昨今のように、電力供給不足が夏季・冬季といった高需要期に頻繁に危ぶまれるような状況ではなおさらである。そこで、電力需給逼迫・緩和状況のバロメーターとして揚水発電および揚水用動力<sup>11</sup>を取り上げる。時間別の揚水発電<sup>12</sup>は、二酸化炭素原単位とは異なり、月・季節に応じた変動パターンが時間帯によりさまざまである(図6)。

この時間帯ごとの値の月推移を二酸化炭素原単位と同様に分解し、安定供給の見地から電力需要のシフトについて評価する材料とする。12時台は、冬から春にかけては揚水用

動力として電力を大量消費している。一方、夏は高負荷時間帯に発電を行っていたものが、揚水用動力を消費するように徐々に変化してきた。0時台はおおむね揚水用動力を消費する——ただし、その量は概して12時台より少ない——運用である。これらに対し、18時台は月・季節を問わず発電を行っている。こうしたことから一点のみ状況を強調するとすれば、18時台は年間を通じて供給が需要に対して不足しうる時間帯ということになる<sup>13</sup>。電力の安定供給という評価軸では、低炭素化の尺度からの結論とは異なり、夕刻への電力需要のシフトはむしろ避けるべきである。需要シフト先の時間帯としては、季節を問わず需要創出が求められている/供給力に相対的に余裕がある10時台から12時台が好ましい。

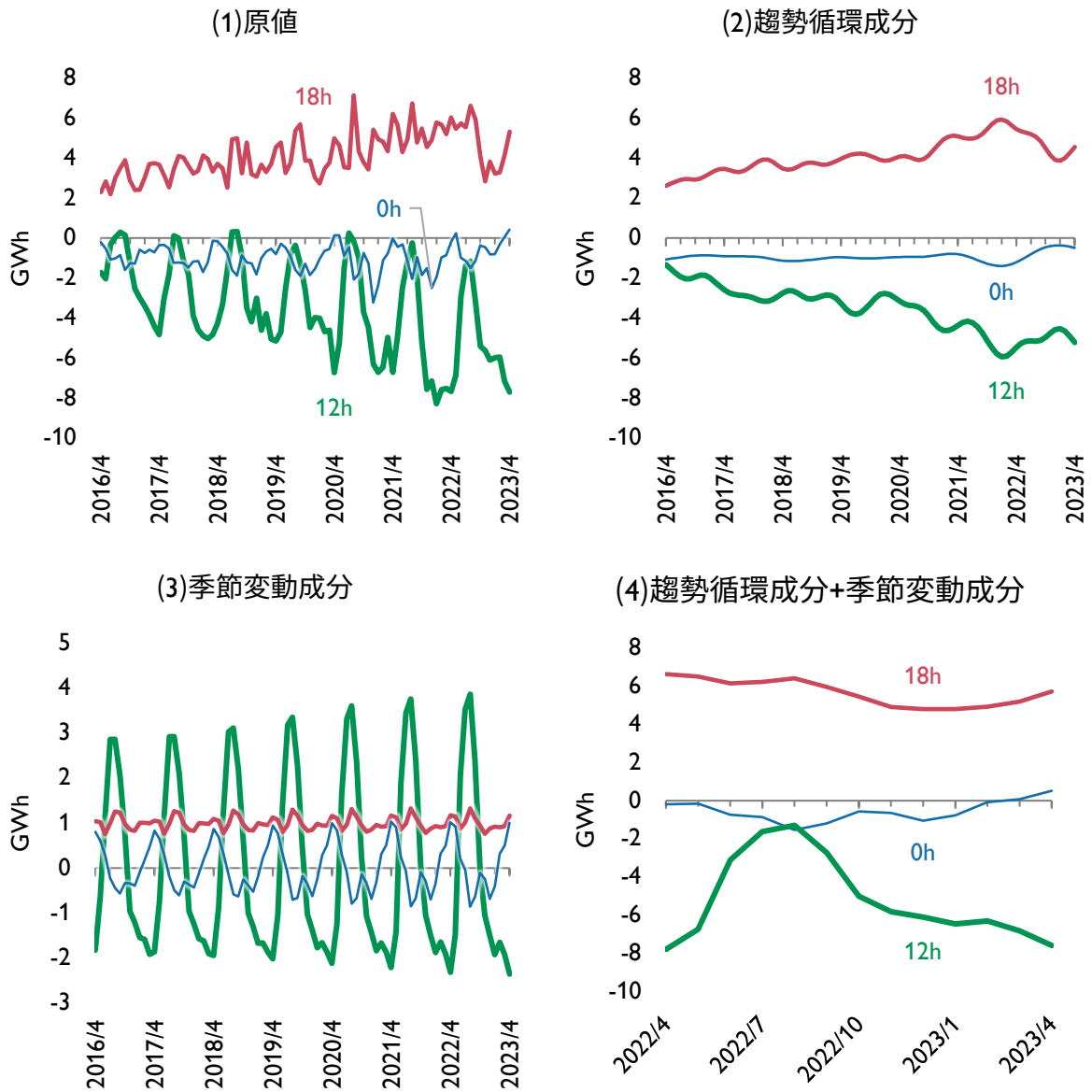
<sup>11</sup> 揚水発電では発電エネルギーである水を上池に汲み上げる必要がある。水の汲み上げは電力を消費する。昨今では、太陽光による過剰な発電を消費するために、水を汲み上げることで積極的に電力需要を創出する側面も強くなっている。いずれにしても、水の汲み上げを行う時間帯は、供給力に相対的に余裕があるとみなすことができる。逆に、揚水発電は、上池にみみなみと溜まった水を処分することも狙いつつという

場合もあるが、基本は供給力の追加が求められている時間帯に行われる。そうしたことから、ここでは揚水発電と揚水用動力を電力需給状況の簡易な代理指標として用いることとする。

<sup>12</sup> 月内当該時間帯の平均

<sup>13</sup> いわゆる「ダックカーブ現象」のアヒルの頭部に相当する時間帯である。

図6 | 時間別揚水発電(0時台、12時台、18時台)と趨勢循環成分、季節変動成分、趨勢循環成分+季節変動成分



注: 月内当該時間帯の平均。負値は揚水用動力消費を表す。

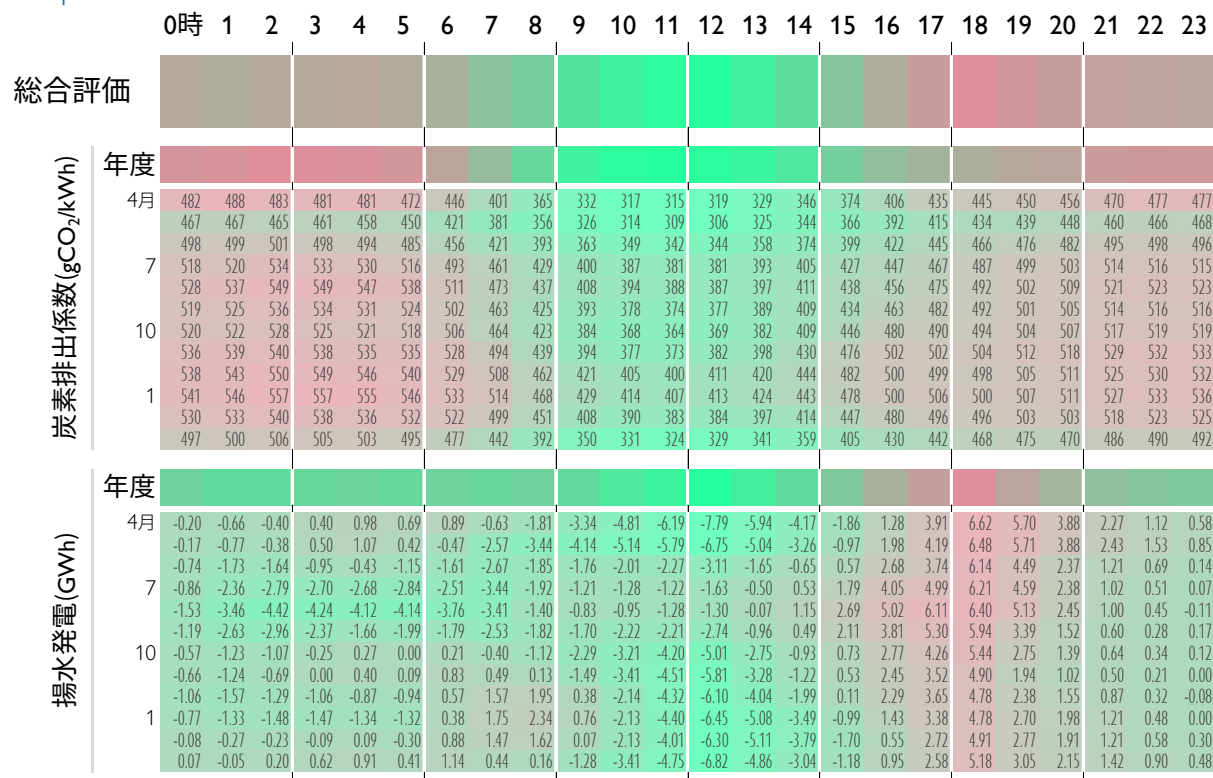
出所: 一般送配電事業者の需給実績データから推計

## 昼10時台から12時台の電力活用で低炭素化と安定供給の両方に貢献

これらが示唆するのは、電力の低炭素化と安定供給の双方に寄与するためには、典型的には夜の電力需要を昼前から正午ごろ(10時台～12時台)にシフトするのが良いということである(図7)<sup>14</sup>。対して、電力需要を増加させることを最も避けるべき、逆に言えば電力需要のシフト元の重点とすべき時間帯は、18時台前後である。

ある(図7)<sup>14</sup>。対して、電力需要を増加させることを最も避けるべき、逆に言えば電力需要のシフト元の重点とすべき時間帯は、18時台前後である。

図7 | 系統電力の需要シフト先評価



注: 需要シフト先として ■ は好ましく、■ は好ましくない。二酸化炭素原単位と揚水発電は、趨勢循環成分+季節変動成分[2022年度値]。揚水発電の負値は揚水用動力消費を表す。

出所: 一般送配電事業者の需給実績データから推計

<sup>14</sup> ただし、電力供給設備の負荷平準化という見地からは、これとは別の推奨となるかもしれない。

## 広範な行動様式変容の導きを

電力需要の時間シフトという考えは昔から存在する。そのための経済的インセンティブとして、夜の電力を割安にしたり、夏の電力を割高にしたりといった料金メニューがある。近年では、電力供給の経済効率化・需給安定化を目的として、より短時間を狙った積極的なデマンドレスポンス制度が用意されている。しかし、経済的インセンティブのみで電力需要のシフトを引き出そうとする制度では、運用にあたり小さからぬ規模の誘導費用と、それを無駄なものとしなないための正確な電力需給予測が求められる。ところが、事前の正確な予測はそれほど容易なものではない。また、かつての季時別排出係数が結局は取り上げられなかったのも、温室効果ガス算定・報告・公表制度などのような制度の一部を構成するには厳密さが足りないと言われたのも一因と推量される。

ここまで定量的な算定を示しつつ展開してきたが、それらは電力供給の日々の運用方法に何らかの示唆を与えようとするためのものではない。また、地域、曜日、天気、気温、発電所の運転・故障状態など日ごとの状況に応じた節電や電力需要のシフトについての細かなガイドでもない。そういった情報は電力各社の“でんき予報”が発信している。本稿で強調するのは、上に記したようなあらかじめ見込みうる典型的な周期パターンを多くの人が認識することの重要性である。そうした認識の広まりが、電力消費者の活動・行動様式のより好ましい方向への、自発的・習慣的な変化を導けば、高コストなハードウェアやシステムへの依存を抑えつつ、電力の低炭素化と安定供給をともに後押しすることができる。

電力消費者の活動・行動様式がもたらしうる影響の一例として、電気による給湯を挙げる。かつては夜の電力は昼よりも低炭素とされていた。そのため、夜の電力で湯を沸かす

ヒートポンプ給湯器は、その高いエネルギー効率も相まって、効果的な二酸化炭素削減対策とされてきた。ところが、こんにちでは月・季節を問わず、昼の電力が夜よりも低炭素になっている。変化した状況に対応して沸き上げ時間設定を夜から昼に変更すれば、追加投資することなく、電気給湯の二酸化炭素削減効果を増すことができる。電力需給バランスの側面では、昼に電気で湯を沸かすことは、供給過多になりがちな時間帯に電力需要を創出することで、安定供給の一助となりうる。なお、夜に電気で湯を沸かすことは、かつてほどは歓迎されなくなっている。というのも、東日本大震災後は原子力発電が減り、夜も安定的に稼働する(低炭素)ベースロード電源が減少したためである。

電気給湯器同様に、いや、はるかに重要になってゆくと見込まれるのが、電気自動車やプラグインハイブリッド自動車である。電気自動車の充電に際し、普通充電で長時間にわたりプラグを差し込んだ状態であれば、システムの力を借りて、実際の充電を電力の低炭素化や安定供給から見て好ましい時間帯に自動的に行うこともできよう。しかし、急速充電器による短時間充電ではプラグを差し込んでいる時間がそもそも短く、例えば、帰宅途中の夕刻に急速充電すると、その限られた時間の中で最適時間帯を選択して充電したとしても低炭素化と安定供給への貢献効果は薄いばかりか、かえって悪い方向に作用しかねない。すなわち、電気自動車の所有者が、どの時間帯にふだん充電するのが良いのかおぼろげにも認知し、習慣的に実践しているか否かが結果のよしあしを大きく左右する。電気自動車は消費電力量(kWh)が多く、急速充電の場合はその電力も数十kWあるいはもっと大きいことから、影響力は電気給湯器の比ではない。

適切な理解の広まりは、多数の電力消費者の活動・行動の変容をまとまりとして緩く誘発することの礎である。そのためには、正しい情報が明快な形で提供されることが欠かせない。すなわち、ある地域のある日時に特化した詳細だが頻繁に受け取り、更新しなければならぬような情報の提供ではなく、おおむねこうであるという認識の醸成に資する整理・集約された簡明な情報の提供である。厳密さや正確性を重んじるあまり、伝えるべきことが複雑・膨大になることも、理解の広まりを阻害しかねないので注意が必要である<sup>15</sup>。

また、情報の広い共有は、基本的には早いほど良いと考えられる。電気自動車であれば、普及が拡大し始めていることから、一日も早い展開が望まれる。ひとたび広まった誤解やもはや適合しなくなった古い情報——例えば、電気自動車は二酸化炭素をいっさい排出しないと、バッテリーの継ぎ足し充電は良

くない<sup>16</sup>など——は、後にこれを覆すのはなかなか容易ではない。そして、適正ではない理解の固着は、エネルギー低炭素化や安定供給を損なうことにつながりかねない。

電力をはじめとするエネルギーは、経済・社会活動や日常生活に欠かせないものであるにもかかわらず、インフラストラクチャー関連でしばしば見受けられるように理解はあまり浸透していない。例えば、昨今では節電の呼び掛けが電力供給能力不足などを理由に頻発するが、残念なことに、その要請内容——ピーク時を避けた電力使用か、期間使用総量の削減か——が広範に正確に伝わっているかはあやしい限りである。こうした知る人ぞ知るといった状況の改善ももちろんであるが、たとえ詳細な/専門的な理論が根付いていなくても、消費者が自然と良い方向に行動できるような導きが求められる。それにより、高コストなハードウェアやシステムが節減できるのであれば、メリットは大きい。

お問い合わせ: [report@tky.iej.or.jp](mailto:report@tky.iej.or.jp)

<sup>15</sup> 例えば、本稿で取り上げている二酸化炭素原単位は平均値であり、電力需要シフトが生じたときの変化を表す限界値ではない。しかし、限界値は統計から知ることではできないうえ、増減する電源種は状況次第でさまざまであることから大きく異なる値を取りうると思われる。「〇〇の場合は△△」「□□の場合は×

×」といった前提条件と対応の多数の組み合わせは、平明な情報提供にはあまりふさわしくない。

<sup>16</sup> 継ぎ足し充電が良くないのは、メモリー効果があるニッカド電池やニッケル水素電池での話であり、リチウムイオン電池は該当しない。