

SolarEVシティー構想推進への期待と課題*

Expectations and Challenges for Promoting the SolarEV City Concept

小端 拓郎¹⁾
Takuro Kobashi

Achieving carbon neutrality in 2050 will require decarbonization methods that are economically efficient and scalable. In this regard, there is great potential for the "Solar EV City Concept", which utilizes rooftop solar and EVs as storage at the city level. By linking rooftop PV and EV, which will become increasingly cheaper, buildings can utilize abundant cheap and carbon-free electricity helping accelerate decarbonization of the city. With the spread of EVs, we need to promote V2H (vehicle to home) and V2B (vehicle to building) systems linked to rooftop PV to build the SolarEV City. The issue is whether we can provide sufficient benefits to as many EV owners as possible through the system.

KEY WORDS

Rooftop Photovoltaics, EV, Urban Decarbonization, SolarEV City, Climate Change [A3](#)

1 増加する大気中二酸化炭素濃度と都市の脱炭素化

大気中の二酸化炭素濃度は上昇を続け、今420 ppm⁽¹⁾に達した(図1)。筆者がカリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所にてPh.D.を取得したのが2007年で、当時は380 ppm程度であったから、いかに急速に大気中の二酸化炭素濃度が上昇(年平均2.5 ppmの上昇)しているかがわかる。大気中二酸化炭素濃度の上昇は、化石燃料の使用が最も大きな原因であり、世界的な気温上昇とそれに伴う気候変動を引き起こし、将来の人間社会の持続可能性を著しく脅かす可能性がある⁽²⁾。この人為起源の気候変動を最小限にするには、2050年までに世界全体でカーボンニュートラルを実現する必要がある⁽³⁾。

世界の二酸化炭素排出の67~76%が、都市生活に起因するものであるといわれている⁽⁴⁾。世界の都市人口は現在全人口の55%近くを占めるが、2050年までには都市への移住が進み、世界人口の70%程度まで上昇するといわれている⁽⁵⁾。つまり、都市のエネルギーを、再生可能エネルギーなど二酸化炭素排出ゼロのシステムに変えることが、世界のカーボンニュートラル実現に欠かせない。また、都市における化石燃料の使用は、大気

汚染や騒音など市民の生活を脅かしてきた。化石燃料の使用をPVやEVなどの再エネ技術に置き換えることは、都市に住む住民生活を大幅に改善する可能性を秘めている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2 SolarEVシティー構想とは

土地の限られる日本において、屋根上太陽光発電(PV: photovoltaics)は都市の脱炭素化に最も重要な技術の一つである。変動電源である太陽発電を都市の脱炭素化に十分に利用するためには、都市の屋根を最大限活用できる方法をデザインしなければならない。図2に示すとおり、都市の電力需要において、PVにより直接供給できる割合は限られている。PV導入当初は、容量が小さいため発電量が電力需要を下回り、ほとんどのPV電力を都市内で消費が可能である。しかし、PVの導入が進むと発電量が需要を上回り始め、発電抑制につながってしまう。これがPVの経済性を落とし、それ以上の導入が難しくなる。これを回避するには蓄電池が有効であるが、定置蓄電池は高額であるため、PVシステムの経済性を悪化させる結果となる。われわれの試算では、蓄電池は2030年代までPVの経済性のプラスにはならない。仮にプラスになっても最適蓄電容量は小さいため、屋根上PVの普及拡大にはあまり効果がない。

そこで大きな役割を果たすのがEVである。今後急速な普及が予想されるEVは、大きなバッテリー(20~60 kWh)をもつ。日本の都市は自家用車

* 2023年3月30日受付

1) 東北大学大学院 環境科学研究科
(980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: takuro.kobashi.e5@tohoku.ac.jp

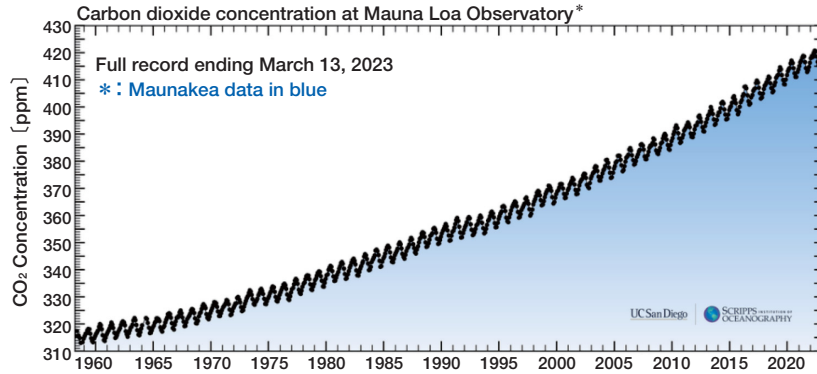


図1 大気中の二酸化炭素濃度の記録(キーリングカーブ)⁽¹⁾

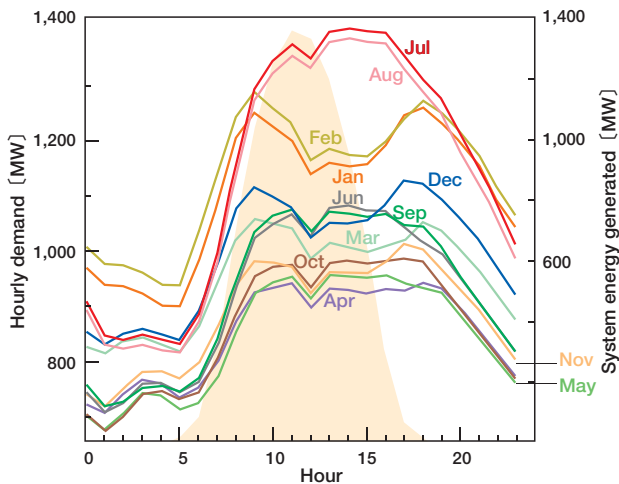


図2 各月時間ごとの平均電力需要と時間ごとの年間平均の一日のPV発電量⁽⁸⁾

の稼働率が特に低いことが知られ、このEVバッテリーを活用することで、低コストで大容量の蓄電池の利用が可能になる。それでは、都市全体で、屋根上PVとEVを蓄電池として活用することで、どの程度電力を都市に供給でき、二酸化炭素排出の削減につながるのであろうか？ 私たちは、技術経済性分析という手法を用いて、九つの都市部（東京都区部、川崎市、広島市、仙台市、岡山市、新潟市、札幌市、郡山市、京都市）の分析を行った⁽⁹⁾。この都市レベルでの屋根上PVとEV (PV + EVシステム) の活用を、私たちは「SolarEV シティ構想」と呼ぶ。分析では、都市の屋根面積の70%に発電効率20%のPVパネルを設置し、家用自動車すべてがEV化し、そのEVバッテリー(40 kWh)容量の半分をPVの蓄電池として利用できると仮定した⁽⁹⁾。また、余剰電力を9円/kWhで売電することを想定している(売電なしでの結果は論文を参照⁽⁹⁾)。シナリオは、2018年の屋根上PVのコストで分析(PV

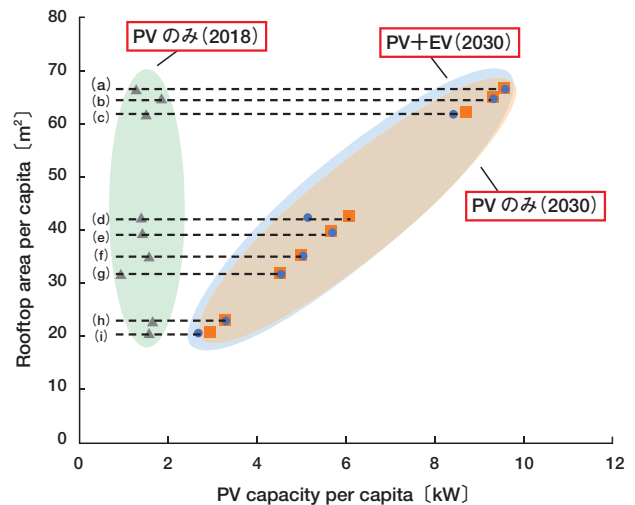


図3 都市の一人当たり屋根面積と最適PV容量⁽⁹⁾。緑は、2018年のコストで屋根上PVのみを設置した場合、赤は2030年のコストで屋根上PVのみを設置した場合、青は屋根上PVとEVを蓄電池として使用した場合。(a)新潟市、(b)岡山市、(c)郡山市、(d)仙台市、(e)広島市、(f)京都市、(g)札幌市、(h)川崎市、(i)東京都区部

のみ：緑)、2030年の屋根上PVのコストで分析(PVのみ：赤)、2030年の屋根上PVとEVのコストで分析(青：PV + EV)した結果である(図3-7)。

図3は、各都市(a)～(i)の一人当たり屋根面積と、シナリオごとの一人当たり最適PV容量をプロットしたものである。2018年におけるPVシステムのコストはまだ高く、一人当たり最適PV容量はどの都市も2kW弱である。しかし、2030年にPVシステムのコストが下がると、最適PV容量は増加し、都市の最大面積(70%)を活用するPV容量に達する。

図4は、図3と同様に各都市の一人当たり屋根面積を縦軸、そして、PVシステムによる電力自給率を横軸に示す。2018年は、最適PV容量が小

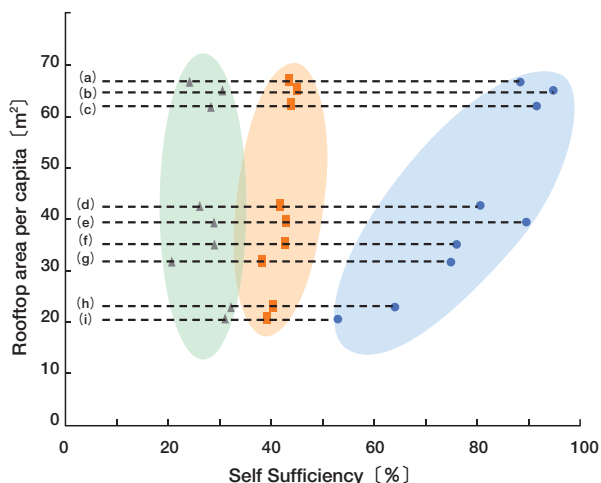


図4 都市の一人当たり屋根面積と電力自給率(self-sufficiency)⁽⁹⁾。条件は図3と同じ。PV + EV は、EVの電力需要も含む

さいため(図3)、PVシステムによる電力自給率も20~30%程度である。2030年にPVのコストが下落すると、最適PV容量が増加し、電力自給率も増加する。しかし、蓄電池などのエネルギー貯蔵がない場合、増加したPV発電がほとんど余剰電力となり、電力自給率の上昇にはあまり寄与しない。そのため、PVのみでは、電力自給率はどの都市も40%程度が最大となる。しかし、PVとEVを組み合わせることで、電力自給率は大幅に上昇し、一人当たり屋根面積の大きい都市では、90%以上の電力をPV + EVシステムにより供給できる。東京都区部や川崎市のように都市化の進んだ都市でも、60%前後の電力を供給することができる。つまり、PV + EVのシステムが特に大きな役割を果たすのは、一人当たり屋根面積が大きく自動車台数の多い地方の都市である。

図5は、各都市の電力消費と自動車の運転(ガソリン燃焼およびEVの電力消費)に伴う二酸化炭素排出の削減率を示したものである。傾向としては、図4の電力自給率と同じとなる。EVは供給電力がクリーンでなければ二酸化炭素排出が増えてしまうという課題があるが、屋根上PVとのカップリングによりEVからの二酸化炭素排出はほぼなくすることが可能となる。また、屋根上PVのみを使った場合に比べ、EVを蓄電池として利用すると、夜間にも二酸化炭素フリー電力を市内に供給できる。これにより、地方の都市においてはPV + EVシステムにより90%以上の二酸化炭素排出の削減となる。

図6は、各都市の一人当たり屋根面積とPVシ

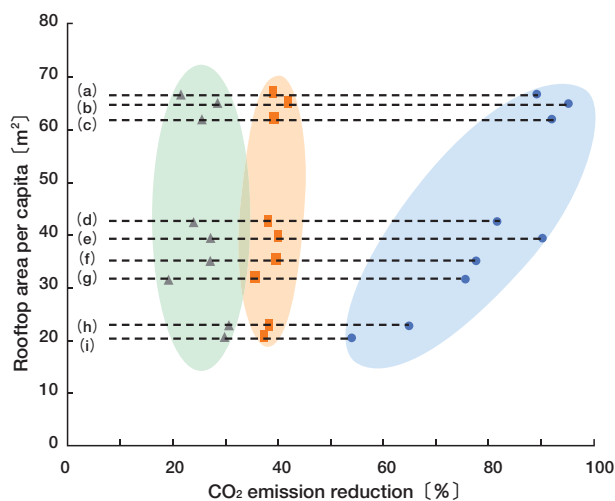


図5 都市の一人当たり屋根面積と二酸化炭素排出削減率⁽⁹⁾。条件は図3と同じ

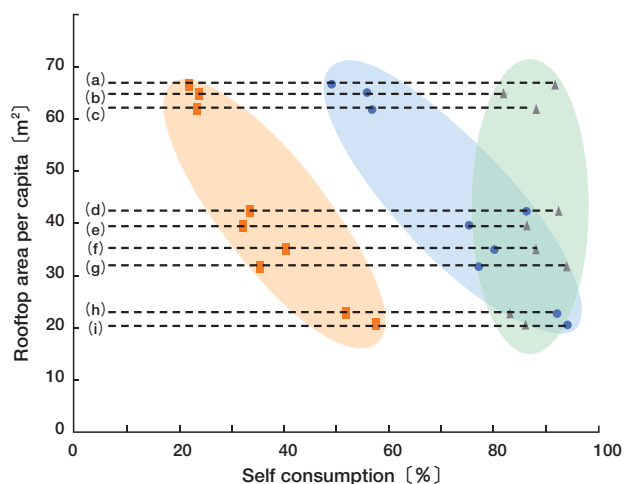


図6 都市の一人当たり屋根面積と都市内消費率(self-consumption)⁽⁹⁾。条件は図3と同じ

ステムの都市内(自家)消費率を示す。2018年はPVの容量が小さいため、高い都市内消費率を示すが、2030年に屋根上PVが最大容量まで拡大すると、PVのみでは都市内消費率は大きく下落する。しかし、EVとカップリングすることで、都市内消費率は30%近く上昇する。特記すべきは、地方都市ではPV+EVを活用しても都市内消費率は50~60%にとどまる。つまり、残り50~40%のPV発電は都市内で消費されないことになる。この余剰電力を、給湯や暖房などの熱供給の脱炭素化に用いることや、水素製造に活用することができる。また、地方都市の余剰電力を東京などエネルギー大消費地に送ることで、地方都市のプラスの歳入とすることができる。

最後に、図7は各都市のエネルギーコストの削

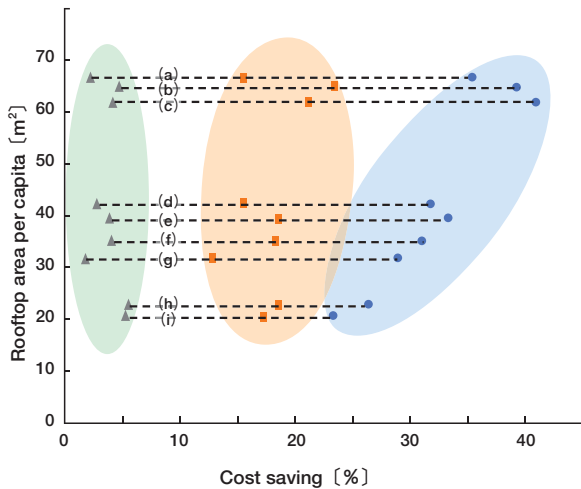


図7 都市の一人当たり屋根面積とエネルギーコスト削減率 (cost saving)⁽⁹⁾。条件は図3と同じ

減率を示す。2018年には、PVのコストが高く最適PV容量も小さいため、PVシステムによるエネルギーコスト削減率は数%程度である。しかし、2030年にはPVシステムのコスト下落により、PVのみでも15~20%程度のエネルギーコストの削減につながる。さらに、PV+EVシステムの場合、ガソリンコストの削減および夜間の系統電力使用の削減にもつながるため、大幅なエネルギーコストの削減につながる。

3 戸建て住宅における「PV+EV」の役割

都市には、住宅街や高層ビル街など、さまざまな特徴を備えた地域が存在する。これは、屋根上面積、駐車自動車の数、エネルギー需要の違いとなり、PV+EVシステムの脱炭素化ポテンシャルに大きく影響する。その特徴を整理すると、住宅街は比較的小さなエネルギー需要の割に屋根面積が大きく、自動車の台数も多いため、PV+EVシステムの効果が大きく将来仮想発電所(VPP: Virtual Power Plant)として活用するポテンシャルが大きい。一方、市中心街はエネルギー需要が大きいが屋根面積が小さく、駐車される自動車の台数も少ないため、PV+EVによる電力供給の役割は限られる。

また、今後予想されるPV+EVのコストの下落による、地域ごとのPV+EV脱炭素化ポテンシャルの変化は地域によって異なる。図8は、PVとEVの脱炭素化ポテンシャルを住宅街(青線)と市中心街(赤線)で比較したものであ

り、2020年から2040年までの経済指標の時間変化を示している⁽¹⁰⁾。屋根上PVと定置蓄電池(PV+Battery)を設置した場合(破線)と、屋根上PVとEVを蓄電池(PV+EV)として組み合わせた場合(実線)も示している。定置蓄電池は、屋根上PVに追加的な経済性が生じる場合のみ分析に加えられ、2030年以前はPVのみのシステムとして計算されている。2030年後半になってようやく定置蓄電池経済性向上でPVシステムへの導入となる。

分析結果を見ると、2020年はまだPVのコストが高いため、経済最適な屋根上PV容量が小さく、脱炭素化ポテンシャルは低い。特に2020年のPV+EVは、PVとEVの両技術とも高価であるため、PVのみを設置する場合に比べ、内部収益率、投資回収期間、エネルギーコスト節約率、が低い(図8c, d, g)。ただし、二酸化炭素排出削減率を見ると、2020年の時点ですでに、PV+EVはPVのみに比べて削減率が大幅に高い(図8f)。特記すべきは、V2Hで屋根上PVをEVに連結することで、経済最適な戸建て屋根上PVの容量が4~5kW大きくなることである。これにより、戸建て住宅において、屋根上PVのみに比べ、EVを蓄電池として使う価値が飛躍的に高まる。一方、市中心街では高層ビルが多く、建物の単位体積当たりの屋根面積が小さい。つまり、屋根上PVによって発電された電気は、当該建物によって多くが消費される。つまり、余剰電力が少ないので、蓄電システムの果たす役割が小さくなる。これは、図8(e)で電力自給率が、市中心街では「PVのみ」と「PV+EV」において、比較的差が小さいことでわかる。また、市中心街では駐車スペースも限られるため、EVをエネルギー資源として活用することが難しい。

興味深いのは、PV+EVシステムの経済性が2020年代に急速に伸びることである(図8(c, d, g))。2020年にはPVのみのシステムのほうがPV+EVシステムより経済性が高かったのが、この10年間にPV+EVの経済性は急速に改善し、ほぼすべての指標においてPVのみより経済性が高くなる(図8(c, d, g))。その中でも、戸建て住宅における経済性の高まりが非常に大きい。2030年には、戸建て住宅におけるPV+EVシステムの投資回収期間は6年程度まで減少し、

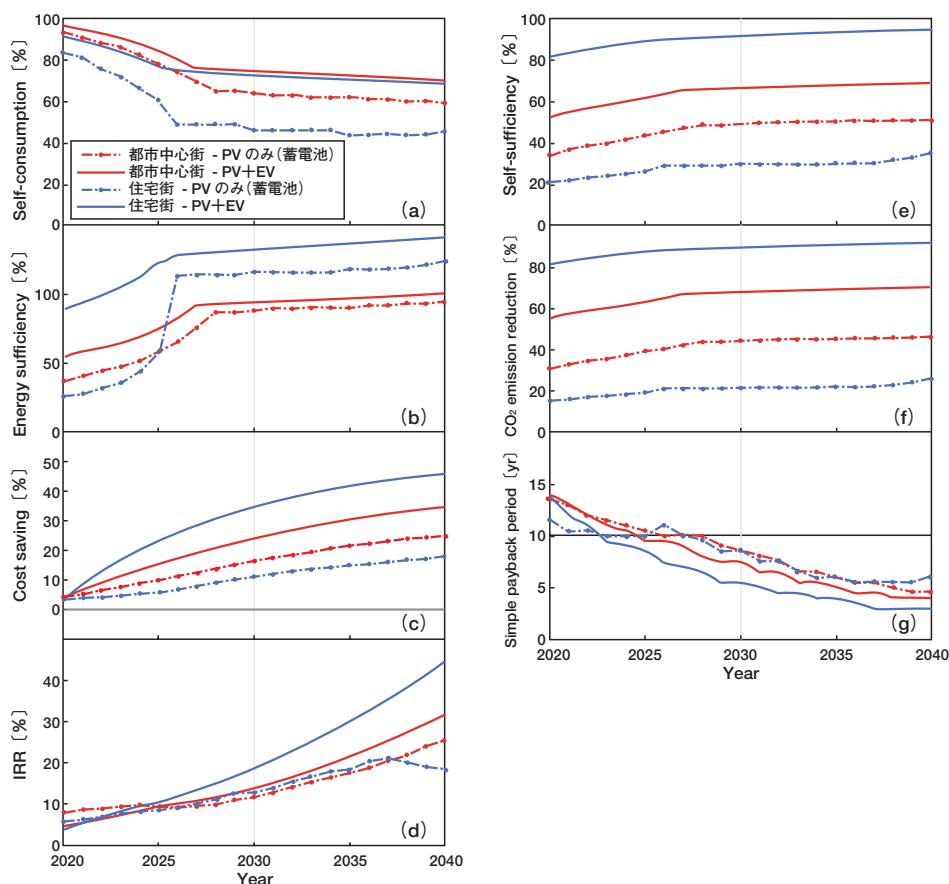


図8 住宅街と市中心街における PV + EV システムのコスト下落に伴う今後の脱炭素化ポテンシャルの推移(2020~2040)⁽¹⁰⁾。青線：住宅街，赤線：市中心街，実線：PV + EV，破線：屋根上 PV+(蓄電池)。(a)Self-consumption は都市内消費率，(b)Energy sufficiency はエネルギー充足率，(c)Cost saving はエネルギーコスト節約率，(d)IRR は内部収益率，(e)Self-sufficiency は電力自給率，(f)CO₂ emission reduction は二酸化炭素排出削減率，(g)Simple payback period は投資回収期間

エネルギーコストの節約率も 40% 近くまで高まる。内部収益率は 20% 近くになり、その後も上昇を続ける。一方、二酸化炭素排出削減率は、20 年間ゆっくり上昇する(図 8f)。2030 年に向けて、PV + EV の普及を進めるためには、少なくとも 2020 年代は補助金などの優遇措置が必要になる。しかし、2030 年頃には自律的に普及が期待できる。また、PV + EV により、安価でいつでも供給可能な電気が市内で大量に使用可能となれば、都市内で給湯や暖房などの電化(脱炭素化)を進めることも容易になるであろう。

4 世界の都市における SolarEV シティの可能性

屋根上 PV や PV + EV システムはさまざまな条件によって、その経済性が変化する。そのため、世界の都市における PV + EV システムの経済性を知るには分析を各都市ごとに行う必要がある。

これまで、私たちは世界の研究者らと、SolarEV シティ構想の共同研究を行ってきた。2022 年には韓国の研究者と協力して、韓国の都市の研究結果を発表した。韓国の都市は、日本の都市に比べ高層ビルが多いため、PV + EV の脱炭素化ポテンシャルが日本の都市に比べて少ないことがわかった⁽¹¹⁾。2023 年には、インドネシアの研究者と協力し、ジャカルタの分析結果を発表した。ジャカルタは、低緯度地帯に位置し太陽の正中高度が一年にわたって高いため、屋根の角度にかかわらず PV の経済性が高い。また、インドネシアでは電気料金が日本に比べて安い一方、PV システムのコストも安いいため、日本と同様にすでに PV システムの経済性が成り立ち、今後、PV + EV により経済性の高い脱炭素化が可能になることがわかった⁽¹²⁾。また、中国の深圳⁽¹³⁾、タイのバンコク⁽¹⁴⁾の分析も行い、PV + EV がど

の国においてもメリットがあることが示された。しかし、そのメリットの大きさは、都市の形状、気候、エネルギー価格、その国の経済状況などによって異なる。

5 SolarEVシティー実現に向けた今後の課題

SolarEVシティー実現には、EVから都市への電力供給を可能とするV2HやV2Gシステムの普及が欠かせない。災害対策としてもPV+EVシステムは大きな役割を果たすため、日本では充電規格であるCHAdeMOを通じてV2Hの普及が進んでいる。V2Hの課題としては、車が一台しかない住宅において通勤などで車を利用する場合、EVの蓄電機能を使えないことである。V2Hと蓄電池の併設などもすでに商品化されているが価格が非常に高価になってしまう。今後、街区レベルでの電力融通および蓄電池・EVバッテリーのシェアを可能とするビジネスモデルを開発し、配電系統における負荷を最小限にしつつ余剰電力を街区レベルで最大限消費することを可能とするシステムを構築する必要がある。これにより、EVの動性の課題が軽減し、PV+EVシステムの普及がより加速しやすくなる。また、電力ひっ迫時に、EVバッテリーから都市に電力供給を可能とする規

制改革が必要である。これにより、PV+EVシステムを広域で活用できれば、EVオーナーにさらなる収入をもたらすPV+EVシステムの普及につながる。

世界に目を向けると、現在のところEVのバッテリーを活用したV2H、V2Gの市場はCHAdeMOを使う日本に限られている。都市の脱炭素化を世界的に加速するには、SolarEVシティー構想が世界で活用されることが期待される。特に、発展途上国の多い低緯度地帯は太陽光エネルギーに恵まれておりPV+EVによる脱炭素化効果が大きく、経済的メリットを考えてもPV+EVの役割が非常に大きいと考えられる。ぜひ、日本の自動車メーカーはSolarEVシティー構想をビジネスチャンスと捉え、日本はもちろん、世界、特に低緯度地帯の途上国でその活用に取り組んでもらいたい。

フェイス



小端拓郎

参考文献

- (1) Scripps Institution of Oceanography, Keeling Curve, <https://keelingcurve.ucsd.edu/> (2023)
- (2) IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (2021)
- (3) IPCC, AR6 synthesis report: Climate change 2023, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (2023)
- (4) IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf (2022)
- (5) V. Gaigbe-Togbe, L. Bassarsky, D. Gu, T. Spoorenberg, L. Zeifman : World Population Prospects 2022 (2022)
- (6) 小端拓郎 (編著) : 都市の脱炭素化, 大河出版 (2021)
- (7) 小端拓郎 (編著) : 都市の脱炭素化の実践, 大河出版 (2023)
- (8) T. Kobashi, et al. : On the potential of "Photovoltaics + Electric vehicles" for deep decarbonization of Kyoto's power systems: Techno-economic-social considerations, *Appl. Energy* 275, 115419 (2020)
- (9) T. Kobashi, P. Jittrapirom, T. Yoshida, Y. Hirano, Y. Yamagata : SolarEV City concept: Building the next urban power and mobility systems, *Environ. Res. Lett.*, 16, 024042 (2021)
- (10) T. Kobashi, Y. Choi, Y. Hirano, Y. Yamagata, K. Say : Rapid rise of decarbonization potentials of photovoltaics plus electric vehicles in residential houses over commercial districts, *Appl. Energy* 306, 118142 (2022)
- (11) S. Chang, J. Cho, J. Heo, J. Kang, T. Kobashi : Energy infrastructure transitions with PV and EV combined systems using techno-economic analyses for decarbonization in cities ☆, *Appl. Energy* 319, 119254 (2022)
- (12) R. Gumilang, et al. : Equitable, affordable, and deep decarbonization pathways for low-latitude developing cities by rooftop photovoltaics integrated with electric vehicles, *Appl. Energy* 332, 120507 (2023)
- (13) J. Liu, M. Li, L. Xue, T. Kobashi : A framework to evaluate the energy-environment-economic impacts of developing rooftop photovoltaics integrated with electric vehicles at city level, *Renew. Energy* 200, 647-657 (2022)
- (14) T. Jittayasotorn, M. Sadidah, T. Yoshida, T. Kobashi : On the adoption of rooftop photovoltaics integrated with electric vehicles toward sustainable Bangkok City, Thailand, *Energies* 16, 3011 (2023)