

電動車を用いた再生可能電力の
新たな電力供給システムに関する研究

A novel electric power supply system through the use of
electric vehicles for renewable electricity

2022年3月

岐阜大学大学院 工学研究科 工学専攻

千阪 秀幸

目次

| | |
|---|----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1.地球温暖化の抑止..... | 1 |
| 1.2.カーボンニュートラル社会とモビリティの電動化..... | 2 |
| 1.3.再生可能エネルギーの賦存量..... | 4 |
| 1.4.太陽光発電の供給効率の比較..... | 4 |
| 1.5.様々な電動車と太陽光発電を統合したシステム..... | 7 |
| 1.6.本研究の概要..... | 7 |
| | |
| 第2章 電動車と再生可能電力を統合したシステムの解析手法 | 9 |
| 2.1 サイバーフィジカルシミュレータの構築..... | 9 |
| 2.2 電動車のエネルギー収支モデル..... | 11 |
| 2.2.1 走行消費モデル..... | 11 |
| 2.2.2 空調消費モデル | 12 |
| 2.2.3 電動車のエネルギー収支モデルの検証..... | 14 |
| 2.3 ヒートポンプモデル..... | 16 |
| 2.3.1 空調機モデル..... | 18 |
| 2.3.2 給湯機モデル..... | 17 |
| 2.3.3 ヒートポンプモデルの検証..... | 19 |
| 2.4 統合マネジメントモデル..... | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 第3章 産業部門への適用 | 22 |
| 3.1 工場内のフォークリフトと太陽光発電の統合化..... | 22 |
| 3.1.1 工場の流通・エネルギー消費機器..... | 22 |
| 3.1.2 工場のCO ₂ 排出量とエネルギーコスト..... | 23 |
| 3.1.3 太陽光発電と産業用移動機器の統合化..... | 24 |
| 3.2 工場へのエネルギーシステムの導入実績..... | 24 |
| 3.2.1 電動フォークリフトの電力消費量..... | 24 |
| 3.2.2 PV発電量..... | 25 |
| 3.2.3 電動車の条件..... | 27 |
| 3.2.4 工場の電力消費量..... | 28 |
| 3.3 新エネルギーシステムの評価..... | 29 |
| 3.3.1 解析結果..... | 29 |
| 3.3.2 考察..... | 31 |
| 3.4 まとめ..... | 33 |
| | |
| 第4章 公共交通機関への適用 | 34 |
| 4.1 ローカル鉄道線における太陽光発電と蓄電池電車の統合化..... | 34 |
| 4.1.1 太陽光発電と蓄電池電車の統合化システムの概要..... | 34 |
| 4.1.2 空調機統合型蓄電池電車の概要..... | 35 |
| 4.1.3 検討内容と条件..... | 36 |
| 4.1.4 検討結果..... | 38 |
| 4.1.4.1 上り列車と下り列車の走行消費電力..... | 38 |
| 4.1.4.2 総社駅と岡山駅のPV配置面積..... | 39 |
| 4.1.4.3 空調機統合型蓄電池電車の効果..... | 40 |

| | | |
|------------|------------------------------------|-----------|
| 4.1.4.4 | 非接触式ワイヤレス充電方式の効果..... | 42 |
| 4.1.4.5 | 各ケースの CO ₂ 排出量の比較 | 43 |
| 4.1.5 | まとめ..... | 44 |
| 4.2 | 市内バス路線における太陽光発電と電気バスの統合化..... | 45 |
| 4.2.1 | 太陽光発電と電気バスを統合システムの概要..... | 45 |
| 4.2.2 | バスの走行消費エネルギーの推定..... | 46 |
| 4.2.3 | 計算条件..... | 48 |
| 4.2.4 | 計算結果と考察..... | 51 |
| 4.2.4.1 | 電気バスにおける空調消費電力の影響..... | 51 |
| 4.2.4.2 | 統合システムの効果 | 53 |
| 4.2.5 | まとめ..... | 57 |
| 第5章 | 家庭部門への適用..... | 58 |
| 5.1 | 一戸建て家庭における太陽光発電と自家用車、貯湯槽の統合化..... | 58 |
| 5.1.1 | 統合システムの概要..... | 58 |
| 5.1.2 | 検討方法と条件..... | 59 |
| 5.1.3 | 計算結果..... | 60 |
| 5.1.3.1 | 一戸建て家庭における統合システムのエネルギー収支..... | 60 |
| 5.1.3.2 | 時間帯別変動の調整..... | 61 |
| 5.1.3.3 | 季節変動の調整..... | 63 |
| 5.1.3.4 | 経済性..... | 64 |
| 5.1.4 | 考察..... | 65 |
| 5.1.4.1 | PV 電力の供給ルート最適化..... | 65 |
| 5.1.4.2 | 蓄電池利用の高効率化..... | 66 |

| | | |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| 5.1.5 | まとめ | 68 |
| 5.2 | 電動車の高性能化による効果 | 69 |
| 5.2.1 | 空調機統合型電気自動車 | 69 |
| 5.2.2 | 自動車としての性能評価 | 70 |
| 5.2.2.1 | 検討条件 | 71 |
| 5.2.2.2 | 最大航続(連続走行)距離 | 71 |
| 5.2.2.3 | 実用上の往復可能距離 | 72 |
| 5.2.3 | エネルギー需給調整装置としての性能評価 | 74 |
| 5.2.3.1 | 検討方法 | 74 |
| 5.2.3.2 | 検討条件 | 75 |
| 5.2.3.3 | 検討結果 | 77 |
| 5.2.3.4 | 考察 | 79 |
| 5.2.4 | まとめ | 81 |
| 5.3 | 住居形態や居住人数が異なる場合の効果 | 82 |
| 5.3.1 | 検討ケース | 82 |
| 5.3.2 | 検討条件 | 82 |
| 5.3.3 | 検討結果 | 84 |
| 5.3.4 | 考察 | 85 |
| 5.3.4.1 | 自動車での CO2 削減効果 | 85 |
| 5.3.4.2 | 家庭での CO2 削減効果 | 86 |
| 5.3.4.3 | PV 設置出力増加による CO2 削減効果 | 87 |
| 5.3.5 | まとめ | 89 |
| 第 6 章 | バーチャルグリッドを用いたコミュニティの設計と効果 | 90 |

| | | |
|------------|---------------------------------|------------|
| 6.1 | バーチャルグリッド..... | 90 |
| 6.2 | 路線バスと通勤EVを用いたバーチャルグリッドシステム..... | 91 |
| 6.3 | 計算条件..... | 92 |
| 6.4 | 検討結果..... | 95 |
| 6.5 | 考察..... | 98 |
| 6.6 | まとめ..... | 100 |
| | | |
| 第7章 | 結論..... | 101 |
| | | |
| | 参考文献..... | 104 |
| | | |
| | 謝辞..... | 107 |
| | | |
| | 論文目録..... | 108 |

第1章 序論

1.1 地球温暖化の抑止

地球温暖化の抑止は、人類にとって喫緊の課題である。地球温暖化とは、人間活動に伴う二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガスの排出量が増加することにより、地球全体の平均気温が上昇する現象である。2021年8月に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書⁽¹⁾では、2011年～2020年の世界の平均気温が産業革命前(1850年～1900年)と比べて1.09℃増加していることが報告された。これにより、熱波、豪雨、熱帯低気圧(台風)などの自然災害の発生に影響を及ぼし、さらに地球温暖化が進むごとに、海水の減少や海面温度・水位の上昇、自然災害の強度と頻度が増加するとしている。

今後の温暖化について、第6次評価報告書では、図1-1に示す5つのCO₂排出シナリオが提示されており、各シナリオでの地球全体の平均温度の変化を図1-2のように予測している。全てのシナリオにおいて、向こう数十年間にCO₂排出量が大幅に減少しない限り、21世紀中に平均温度は1.5℃及び2℃を超えるとした。シナリオごとに見ると、CO₂排出量が非常に高い最悪シナリオ(SP5-8.5)では2081～2100年に平均気温が4.4℃の増加を推定している一方、2050年にCO₂排出量がゼロとなるシナリオ(SSP1-1.9)では1.5℃に抑えられる可能性が高いとされた。

以上のことを踏まえ、2021年11月に開催された第26回気候変動枠組条約締約国会議(COP26)では、1.5℃目標に向かって世界全体で努力することが合意された⁽²⁾。1.5℃目標を目指すためには、2050年までに世界のCO₂排出量を実質ゼロ(カーボンニュートラル)にする必要がある。我が国の政府は、CO₂排出量を2030年までに、2013年比で46%削減、2050年にゼロにする目標を発表した⁽³⁾。一方、EUでは、2030年までに1990年比で55%削減し、2050年以降にカーボンニュートラルとする欧州気候法が成立している⁽⁴⁾。また、2030年までを目標年限とする持続可能な開発目標(SDGs)の目標13にも、気候変動に対する具体的な対策を立てることが明記されている⁽⁵⁾。このような背景の下、世界として、2050年までにカーボンニュート

ラルを確実に達成できる具体的な方法が求められている。

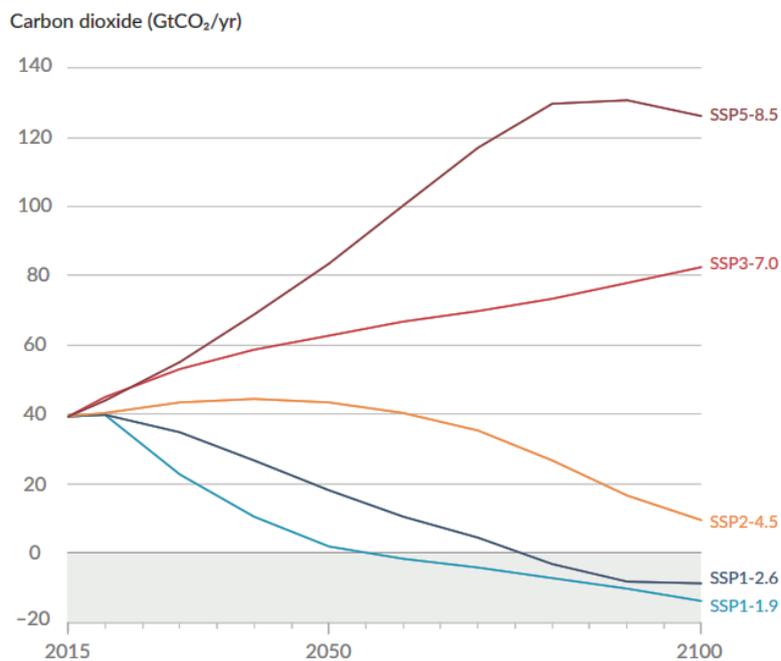


Fig.1-1 Future annual emissions of CO₂ across five illustrative scenarios⁽¹⁾

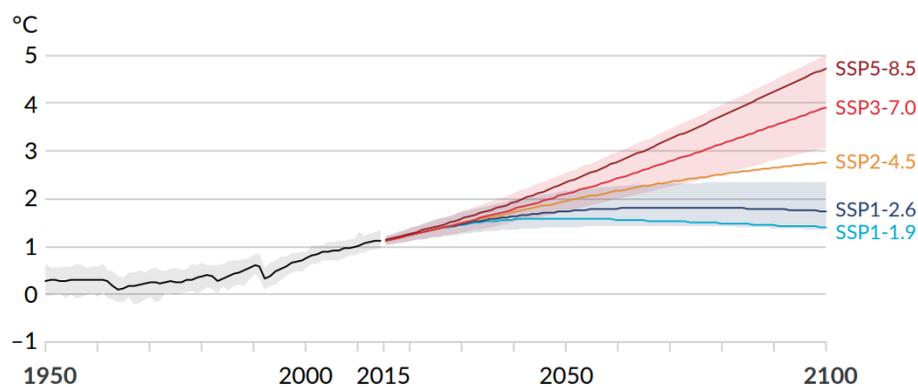


Fig.1-2 Global surface temperature change relative to 1850–1900⁽¹⁾

1.2 カーボンニュートラル社会とモビリティの電動化

カーボンニュートラルとは、人間活動によるCO₂排出量から、植林、森林管理などによるCO₂吸収量を差し引いて、合計を実質ゼロにすることを意味する。カーボンニュートラル社会を实

現するために必要な要素技術として、2017年に国際エネルギー機関(IEA)と国際再生可能エネルギー機関(IRENA)は、2050年までのエネルギー転換の見通しについて報告書を発表した⁶⁾。この報告書では、図3に示すような2050年までのCO₂排出量削減シナリオとして省エネルギー、再生可能エネルギー、CO₂回収・貯留(CCS)、燃料転換、原子力などのエネルギー転換技術のCO₂削減に対する寄与度を示している。これより、IEAとIRENAのどちらのシナリオでも再生可能エネルギーと省エネルギー合わせて7割以上が必要という結果となった。したがって、カーボンニュートラル社会を実現するためには、エネルギー源の再生可能エネルギー化と省エネルギーの推進が重要になる。我が国では、ヒートポンプやエネルギーのカスケード利用などの単体機器への導入を柱とした省エネルギーは進められており、2012年に施行された電力固定価格買い取り制度(FIT)の導入によって、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーも拡大しつつある。

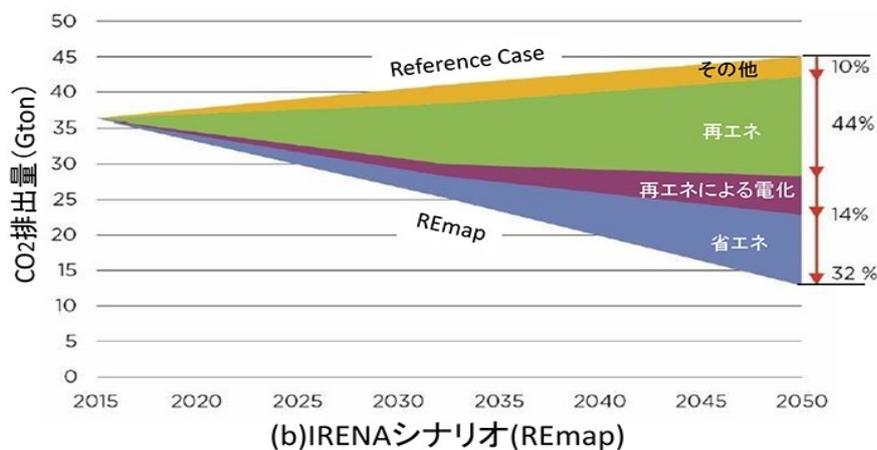
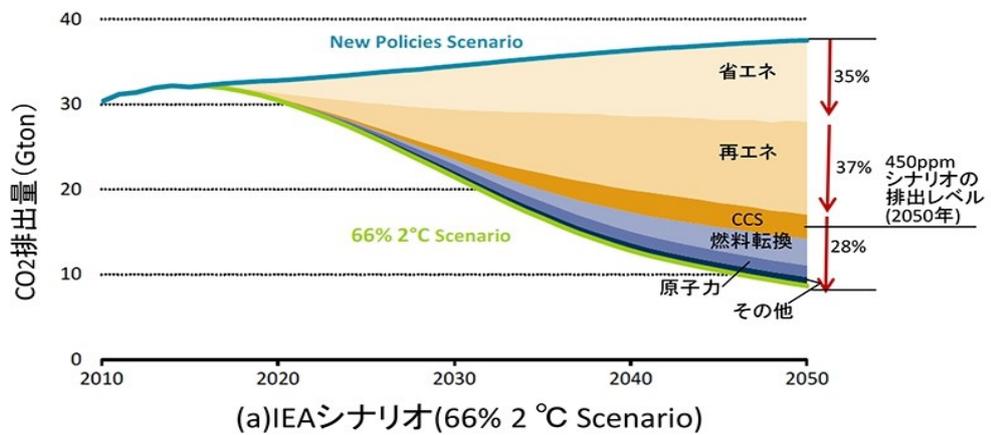


Fig.1-3 Global emissions abatement by technology ⁽⁶⁾

一方、自動車分野では、省エネによる環境負荷低減だけでなく、その機能を生かした新たな技術が求められている。モビリティの歴史を見ると、1900年代初頭に馬車から自動車への大転換があった。技術的には車両と動力機関の統合化で、これによって、馬車の5倍以上の高速移動という新機能が消費者にもたらされた。自動車には、モータ車、蒸気車、エンジン車があったが、セルモータ開発、排ガス浄化などの技術革新によって最終的にエンジン車が残る普及した。そして100年後、エンジン車に変革が迫られており、その候補として、電気自動車、燃料電池車、ハイブリッド車が挙げられている。これらが普及する上での新機能は何かを考えると、すべての候補者には高性能の蓄電池が搭載されている。蓄電池は、電力の貯蔵装置であり、この有効利用によって新機能がもたらされる可能性が高いと考えられる。そこで、自動車と再生可能エネルギーシステムの統合化に着目した。

1.4 再生可能エネルギーの賦存量

我が国の太陽光発電の賦存量は、環境省「令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書」⁽⁷⁾によると、表1-1に示すように、風力と同等の約3兆kWh/年あると報告されている。これは、我が国の2018年の電力需要の約3倍に相当し、地熱や中小水力の60倍である。しかし、事業採算性を考慮した太陽光発電の導入可能量は、設置者利益が11円/kWh(=買取単価18円/kWh-発電単価7円/kWh)とした場合、賦存量の1/6まで低下する。したがって、太陽光発電の更なる導入拡大するためには、設置者利益を拡大する、つまり供給費用を低減する方法を考える必要がある。

供給費用は、運用損失と設備投資に依存する。運用損失は、発電と需要との不整合で発生する余剰損失と、送電や交直変換で発生する供給損失の合計で定義される。従来から、仮想発電所(VPP)やVehicle to Grid(V2G)など既存の配電網を経由する場合の再生可能電力の余剰低減に関する研究は多いが、供給損失を削減する研究は極めて少ない。また、設備投資は、エネルギーの発生から消費までに至るまでの供給設備を少なくすることが重要である。

Table.1-1 Renewable energy potential ⁽⁷⁾

| | 導入ポテンシャル (設置容量) | 導入ポテンシャル (発電量) | 導入可能量* (設置容量) | 導入可能量* (発電量) |
|------|--------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 太陽光 | 27億4,595万kW | 3兆2,216億kWh/年 | 4億622万kW | 5,041億kWh/年 |
| 風力 | 14億478万kW | 3兆9,815億kWh/年 | 6億2,284kW | 2兆123億kWh/年 |
| 中小水力 | 890万kW | 536億kWh/年 | 412万kW | 226億kWh/年 |
| 地熱 | 815万kW | 569億kWh/年 | 602万kW | 422億kWh/年 |

*シナリオ③の場合

1.4 太陽光発電の供給効率の比較

太陽光発電の供給損失と供給設備を低減するために、太陽光発電の発生から消費に至るエネルギー変換効率を制約条件の理論(Theory of constraints)⁽⁸⁾に基づき検討した。制約条件の理論とは、生産管理やプロジェクト管理などで使用されており、ある工程でのボトルネックを探し、そのボトルネックを解消することで、工程全体を改善できる有効な手法である。生産設備のエネルギー効率を考える時、あるプロセスだけの効率だけを向上しても、システム全体の効率が向上するとは限らない。例えば、図 1-4 のようなプロセスの集合体を考える。このプロセスでは、プロセスIでエネルギー変換し、プロセスIで変換したエネルギーをプロセスIIで使うというように、プロセスIIIまで、順次使用する場合を考える。

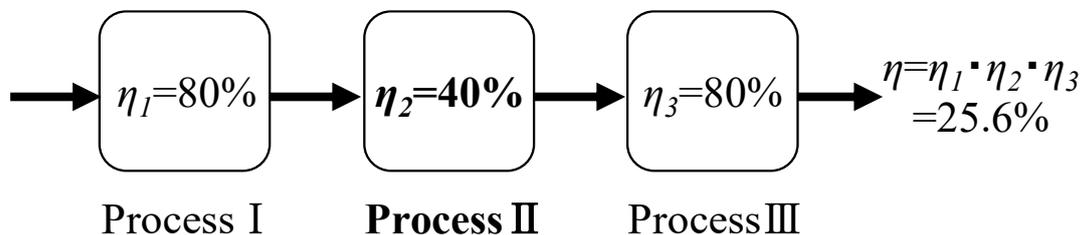


Fig. 1-4 Theory of constraints

図 1-4 から、全体の効率はプロセスIIの効率が制約となっており、プロセスIやIIIの効率を

100%にしても、全体の効率は40%以上にならない。しかし、プロセスIIの効率を80%にすると、全体の効率は50%を超える。つまり、複数のプロセスの集合体である設備のエネルギー効率(以下、 η と記す)を向上するためには、ボトルネックになっているプロセスの効率を改善することが極めて重要になる。

この考え方にに基づき、電動車(EV)を用いて太陽光発電(PV)を家庭に供給した際の供給効率を図1-5に示す。PVの供給方法は、系統経由で供給する場合と、自家消費する場合があります。PV電力は直流のため、系統を経由すると、交流⇔直流変換や電圧の昇降を頻繁に行わなければならないため、PV電力の送電損失が大きい。これらの装置での供給損失は、直接供給する場合でもPV電力の約15%あり、PV出力を蓄電池で調整する場合は23%、更にEVを使って負荷調整した場合、供給損失は約45%に達する。一方、EVでPV電力を調整・輸送する場合の供給損失は、直接供給する場合でも、EVを使って負荷調整する場合でも、大幅に低減できる。この効率差はそのままPV設置出力の差になる。したがって、EVを使った電力輸送はPV電力の供給損失を少なくできる。

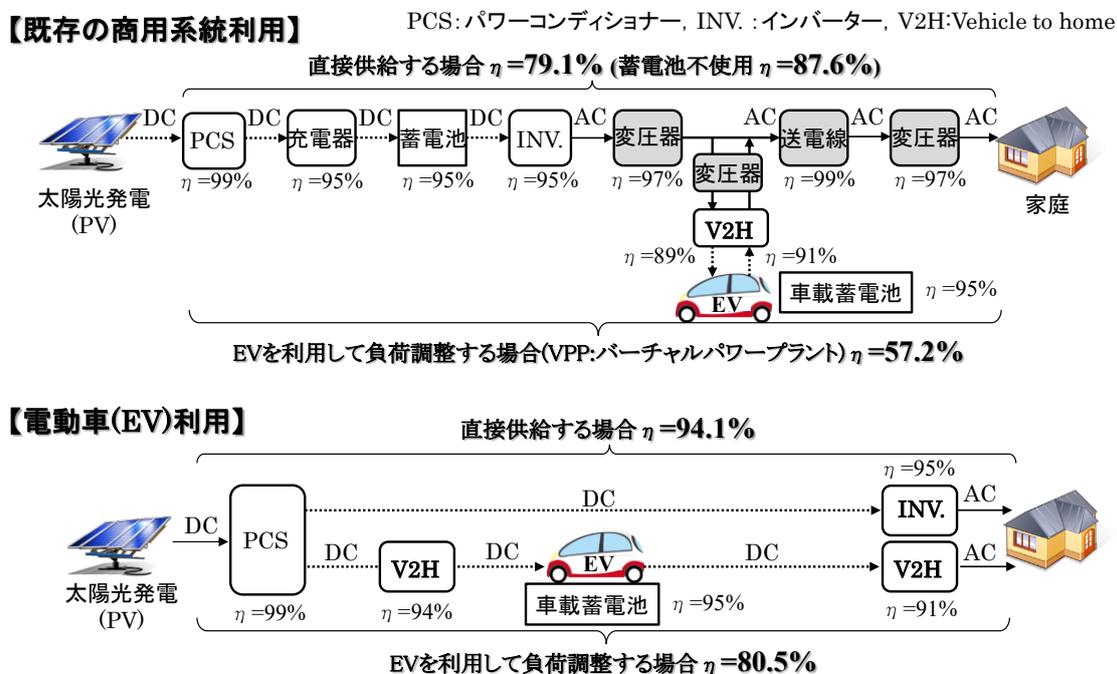


Fig. 1-5 Difference in efficiency the supply way of PV power

1.5. 様々な電動車と太陽光発電を統合したシステム

EV には、産業用途のフォークリフト、農機具、建設機械、運輸用途の電車、バス、トラック、家庭・業務用途の自家用車などがある。何れの EV も搭載蓄電池へ電力を充電し、走行で消費しつつ、移動先で蓄電池から電力を供給できる。それらを用いた PV 電力の供給システムの組み合わせは図 1-6 に示すように無限大である。

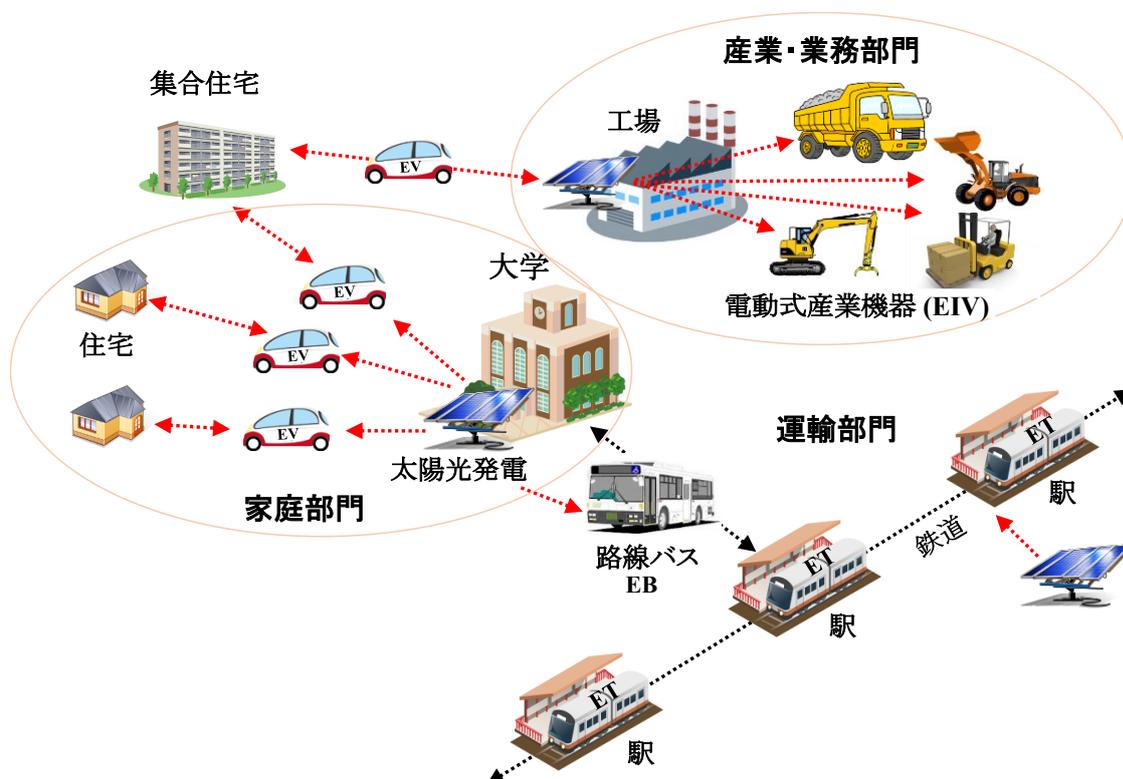


Fig. 1-6 Integrated system for electric vehicles and renewable electricity

1.6 本研究の概要

上記より、本研究では、電動車と太陽光発電を統合化した新たな電力配電システムを提案し、様々な電動車を対象にその効果について検討した。本論文は 8 章で構成される。

第 1 章では、本章でもある序論であり、研究背景と本研究の概要について述べた。

第 2 章では、電動車と再生可能電力を統合化したシステムの解析手法として、走行時のサイ

バー空間での蓄電池の電力量変化を時系列に評価しつつ、電動車が移動先に接続時のフィジカル空間での移動先を含む全体のエネルギー需給状況を総合的に解析できるサイバーフィジカルシミュレータを開発し、シミュレータに構成されるモデルについて述べる。

第 3 章では、産業用途の電動車として、間伐材の処理工場でフォークリフトと太陽光発電を統合化したシステムを検討した。

第 4 章では、公共交通機関の電動車として、JR 吉備線(ローカル鉄道線)における太陽光発電と蓄電池電車の統合化したシステムと、岐阜市内のバス路線における太陽光発電と電気バスの統合化したシステムを検討した。

第 5 章では、家庭用途の電動車として、様々な家庭(一戸建住宅, 集合住宅)における太陽光発電と自家用 EV, 貯湯槽の統合化したシステムを検討した。

第 6 章では、太陽光発電, 電動バスおよび家庭を統合化したコミュニティを岐阜大学の実績データを基に設計した効果について検討した。

第 7 章にて、本論文の結論を示す。

第2章 電動車と再生可能電力を統合したシステムの解析手法

システムの評価は、実験で精度を検証したシミュレーション解析により行った。シミュレータは、EV のエネルギー収支モデルとヒートポンプ(HP)モデルと統合マネジメントモデルで構成され、PV の発電量、各機器の消費電力、EV 蓄電池とHP 貯湯槽のエネルギー貯蔵量などのシステム全体のエネルギー収支をEV のエネルギー収支を基に計算し、CO₂排出量や経済性などの評価する。なお、収支計算のタイムステップは最小 1 秒間で 1 年間分を時系列に逐次計算した。以下に、具体的な計算方法を示す。

2.1 サイバーフィジカルシミュレータの構築

EV は移動する蓄電池であるため、図 2-1 に示すように、例えば A 地点と B 地点を EV が移動する場合、A 地点に停車しているとき、EV は A 地点と接続され蓄電池から充放電する。A 地点から B 地点へ移動するときは、EV はどこの地点からも未接続となり、移動電力のみ使う。B 地点に停車したときは B 地点と蓄電池が接続される。

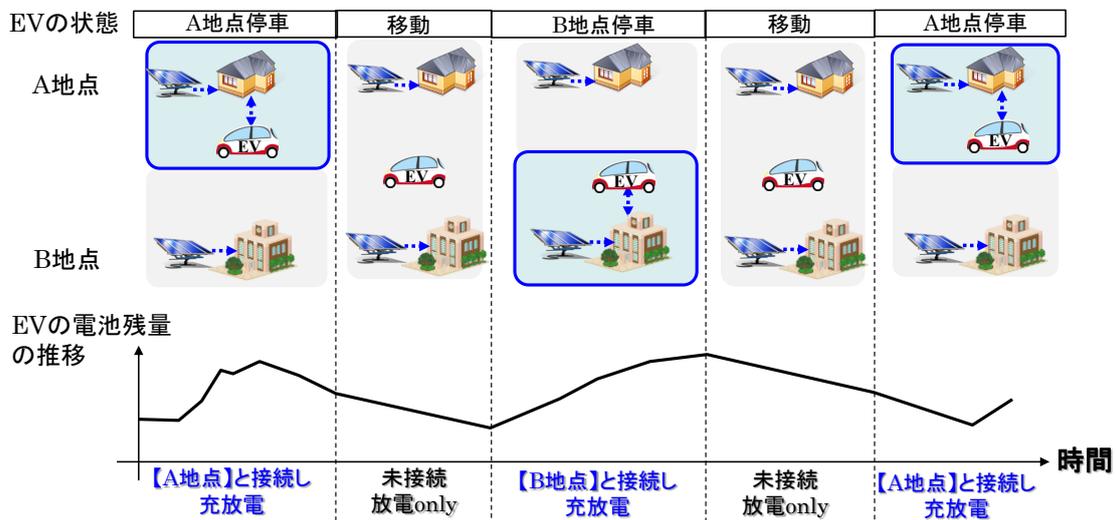


Fig. 2-1 Grid formation by EVs over time

従来の配電網のように使用設備がすべて接続されているのではなく、電動車の場合は未接

続となる場合や蓄電池の位置が時系列で変化するため、連続したエネルギー収支を取ることが難解である。そこで、不連続によるエネルギー収支を時系列に取るため、電動車の走行電力消費や蓄電池残量をサイバー空間で計算し、エネルギー発生や消費先に電動車が接続したときはフィジカル空間でエネルギー収支を取るシミュレータを開発した。シミュレーションモデルの計算フローチャートを図 2-2 に示す。

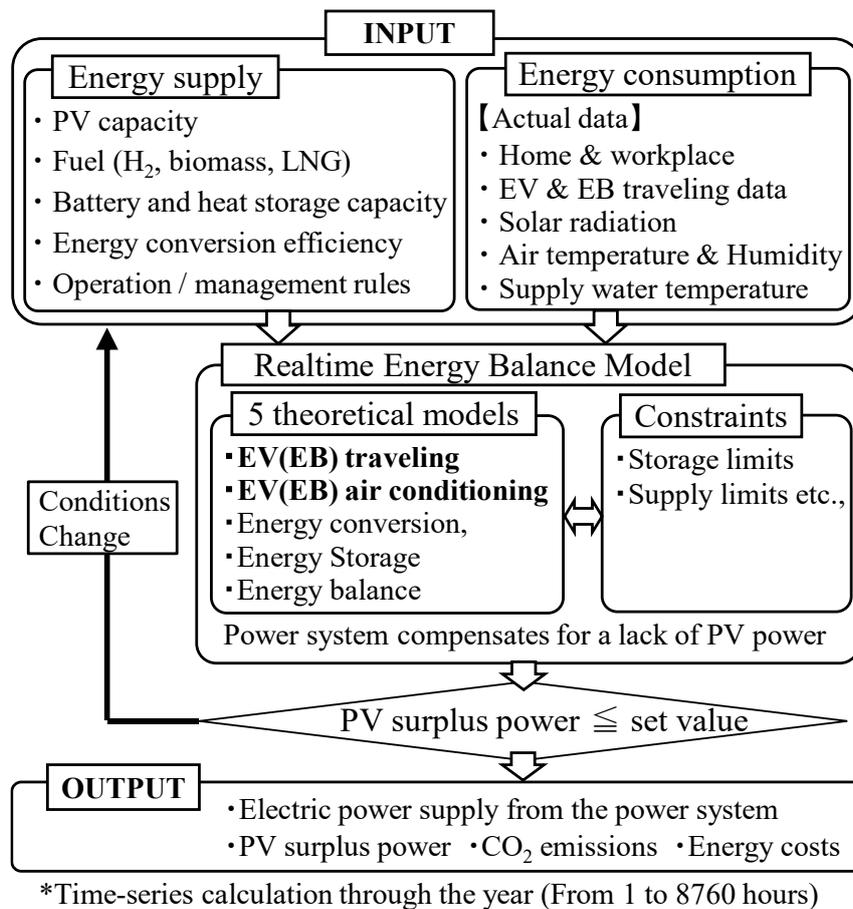


Fig. 2-2 Flow chart of the system integration simulator

シミュレーションでは PV 設置出力, 各効率や EV の蓄電池容量などのエネルギー発生・供給条件とエネルギー消費実績, 気象実績を与条件とする。これらを基に, 5 つの理論モデルと制約条件に基づきエネルギー収支を 1sec~1h 間隔で 1 年間計算する。そして, PV 余剰電力が設定値以上の場合は, 最初のステップに戻って, 発生条件と供給条件の見直しが行われ,

PV の余剰電力が設定値以下となった場合、計算結果としてエネルギーの内訳や系統電力購入量、PV の余剰電力量などが出力される。以下に、本シミュレーションに必要な 5 つの理論モデルについて説明する。

2.2 電動車のエネルギー収支モデル

EV のエネルギー収支では、EV の走行、空調および補器類(ライトなど)の総エネルギーを計算する。

2.2.1 走行消費モデル

EV の駆動力($F \geq 0$)と制動力($F < 0$)は、式(2-1)に示すように、転がり摩擦抵抗と空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗の合計で表される。それぞれの力のつりあいは図 2-3 のようになる。式(2-2)に示す転がり摩擦抵抗は車両の重量に比例し、道路勾配に反比例する。なお、転がり摩擦抵抗係数はタイヤや路面の状態によって変化するが、本検討では一定値とする。式(2-3)に示すように、空気抵抗は走行速度の二乗に比例し、車両の空気抵抗係数は車両の形状によって決定される。式(2-4)に示すように、勾配抵抗は車両の重量と道路勾配に比例する。加速抵抗は、式(2-5)に示すように、車両の重量と駆動機構回転部分の慣性相当重量、加速度に比例する。EV の走行に必要なエネルギーと制動に伴う回生エネルギーは、それぞれ式(2-6)と式(2-7)で求められる。

$$F = Fr + Fw + Fs + Fa \quad \dots(2-1)$$

$$Fr = \mu \cdot M \cdot g \cdot \cos \theta \quad \dots(2-2)$$

$$Fw = \rho \cdot Cd \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \quad \dots(2-3)$$

$$Fs = M \cdot g \cdot \sin \theta \quad \dots(2-4)$$

$$Fa = (M + m) \cdot a \quad \dots(2-5)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} = F \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{1}{\eta_{BAT}} \cdot \frac{1}{\eta_{INV}} \cdot \frac{1}{\eta_{MOT}} \cdot \frac{1}{\eta_{MEC}} \quad \dots(2-6)$$

$$\frac{\partial Erg}{\partial t} = F \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \eta_{REG} \quad \dots(2-7)$$

ただし, t : 時間[s], x : 移動距離[m], F : 駆動力または制動力 [N], F_w : 空気抵抗[N], F_r : 転がり摩擦抵抗[N], F_s : 勾配抵抗[N], F_a : 加速抵抗[N], v : 走行速度 [m/s], a : 加速度 [m/s²], M : 車両重量[kg], m : 駆動機構回転部分の慣性相当重量[kg], ρ : 空気密度 [kg/m³], C_d : 空気抵抗係数[-], A : 車両前面投影面積[m²], μ : 転がり摩擦抵抗係数[-], g : 重力加速度 [m/s²], θ : 道路勾配[deg], E_r : 走行消費エネルギー[kWh], Erg : 回生エネルギー[kWh], η_{BAT} : 蓄電池充放電効率[-], η_{INV} : インバータ効率[-], η_{MOT} : モータ効率[-], η_{MEC} : 動力伝達効率[-], η_{REG} : 回生効率[-].

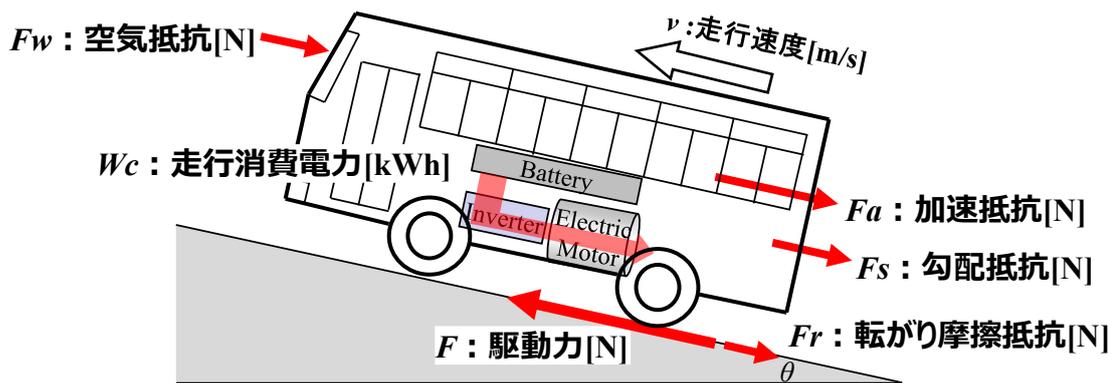


Fig. 2-3 Traveling energy consumption model for electric vehicles

2.2.2 空調消費モデル

EV の空調機の空調能力は, 自動車室内の熱収支モデルに基づき評価できる. 図 2-4 に熱収支モデルの概略図を示し, 基礎式を式(2-8)に示す. 車室内外の伝熱量は式(2-9)~(2-14)で表される. また, 必要な空調負荷は式(2-15)により表され, 空調消費電力は式(2-16)により, 空調負荷と空調機性能(COP), 蓄電池からヒートポンプの圧縮機へのエネルギー変換効率によって求められる⁹⁾.

$$0 = \sum_{k=1}^5 q_k \quad \dots(2-8)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} = u_1 \cdot A_1 \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot T_1 \quad \cdots(2-9)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} = \alpha_2 \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_4) \quad \cdots(2-10)$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial t} = M_3 \cdot c_{pl} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad \cdots(2-11)$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial t} = \alpha_3 \cdot A_3 \cdot (T_3 - T_4) + \beta \cdot Q_{s\gamma} A_{CU} + nQ_p \quad \cdots(2-12)$$

$$\frac{\partial q_4}{\partial t} = -V_4 \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} \quad \cdots(2-13)$$

$$\frac{\partial q_5}{\partial t} = -u_5 \cdot A_5 \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot T_5 \quad \cdots(2-14)$$

$$q_n = q_0 - q_1 \quad \cdots(2-15)$$

$$Ea = \frac{\partial q_n}{\partial t} \cdot \frac{1}{COP} \cdot \frac{1}{\eta_{BAT}} \cdot \frac{1}{\eta_{INV}} \cdot \frac{1}{\eta_{MOT}} \cdot \frac{1}{\eta_{MEC}} \quad \cdots(2-16)$$

ただし、 t :時間[s], q_0 :外気のエンタルピー[kWh], q_1 :空調吹き出し空気のエンタルピー[kWh], q_2 :車室外から車室内への熱量[kWh], q_3 :車室内構造物の熱量[kWh], q_4 :車室内空気の熱量[kWh], q_5 :車室外へ流出する空気のエンタルピー [kWh], q_n :空調負荷[kWh], Ea :必要空調負荷[kW], COP :自動車空調機の成績係数[-], T_1 :空調吹き出し温度 [K], T_2 : 外気温度 [K], T_3 : 車内物体温度 [K], T_4 : 車内空気温度 [K], T_5 : 換気で車外へ排出される空気温度 [K], A_1 :空調吹き出し口断面積 [m²], A_2 : 車室内表面積 [m²], A_3 : 車内物体表面積 [m²], A_{cu} : 日射を受ける車体表面積[m²], n : 乗員数 [-], u_1 : エアコン吹出口からの送風速度 [m/s], u_5 : 室外への排気速度 [m/s], V_4 : 車内容積 [m³], c_{pa} : 空気の比熱 [kJ/(m³·K)], c_{pl} : 車内物体の比熱[kJ/(m³·K)], Q_{sr} : 時刻 t の年間天気に基づく日射量 [W/m²], Q_p : 人発熱量 [W/person], α_2 : 車内空気と外気との総括熱伝達率 [W/(m²·K)], α_3 : 車内空気と車内物体との総合熱伝達率 [W/(m²·K)], β : 日射補正係数 [-]

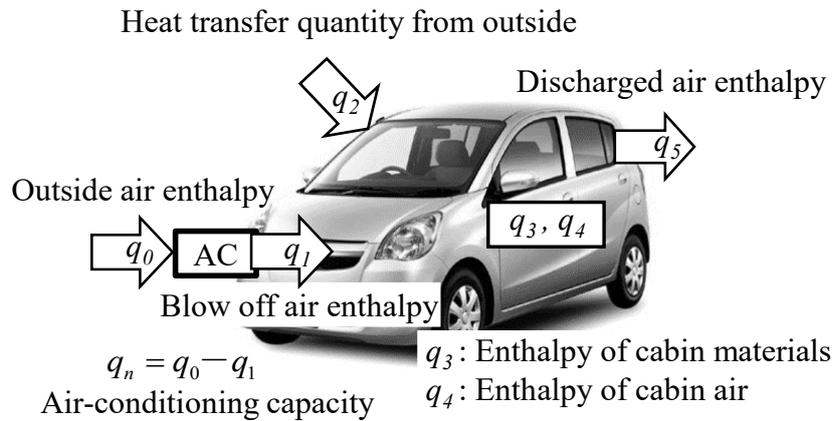


Fig. 2-4 Heat balance model for air-conditioning

2.2.3 電動車のエネルギー収支モデルの検証

EV の走行と空調消費モデルの精度は、日産リーフ 2019 年型 S モデルを用いて市街地走行した際の実消費電力と比較し検証した。空調は暖房(PTC ヒーター)を使用し、外気温度 4.3°C、相対湿度 84%、日射量 0 kW/m²、車室内目標温度 23°C の条件で空調を稼働させた。

構築したモデルと実走行の電力消費傾向を比較した結果を図 2-5 に示す。これより、EV の加速や減速に伴う電力消費や空調消費電力の時系列変化の計算値は、実験で測定された電力消費の時系列変化とよく一致していることが分かる。

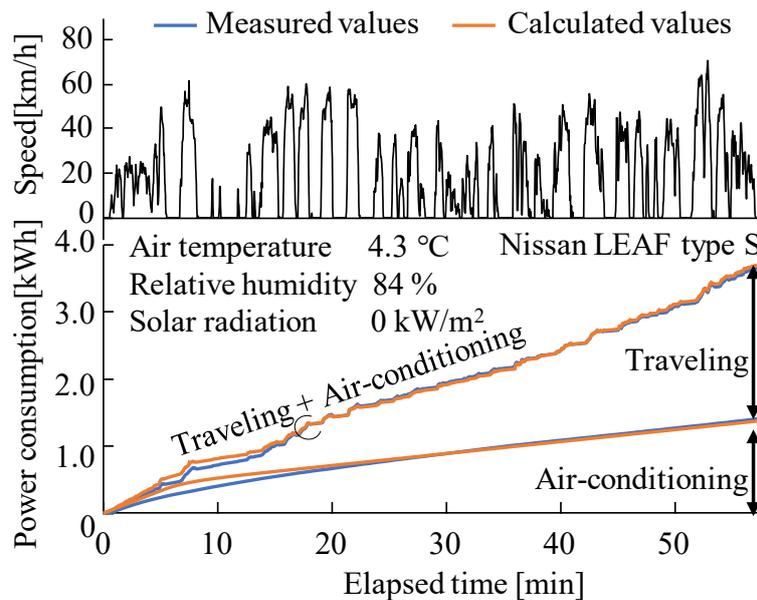


Fig. 2-5 Accuracy of the power consumption model of EV

上記モデルを用いて、夏期、冬期における市街地走行や郊外走行、高速道路走行での EV 消費電力に占める走行と空調消費の比率を検討した。検討では、夏期は外気温 32°Cで相対湿度 60%、日射量 0.8kW/m²で冷房(ヒートポンプエアコン)を使用し COP=3 とした。冬期は、外気温 3°Cで相対湿度 80%、日射量 0kW/m²で暖房(PTC ヒーター)を使用し COP=1 とした。その結果を図 2-6 に示す。

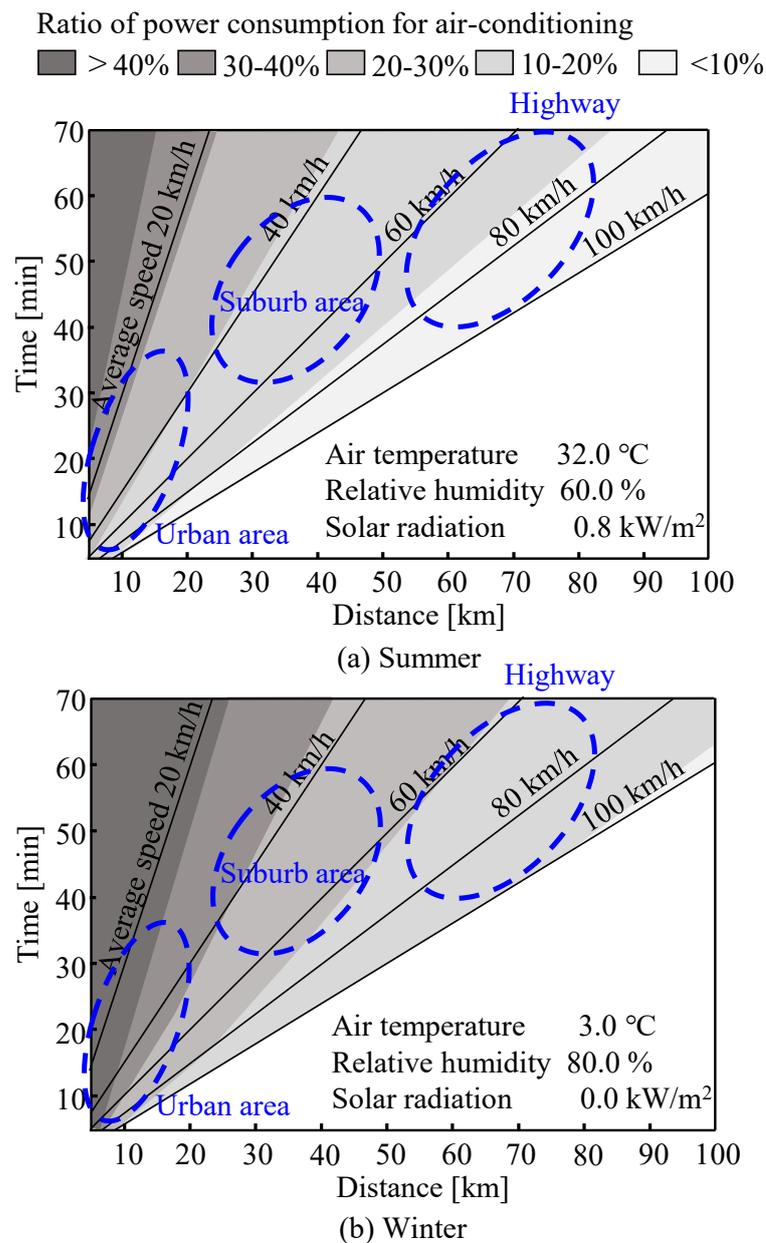


Fig.2-6 The ratio of power consumption for air-conditioning

図 2-6 より, 夏期, 冬期どちらの条件でも走行距離が短いほど EV 全消費電力に占める空調消費の比率が大きく, 走行距離が長くなれば比率が小さくなる. つまり, 空調比率は, 市街地走行では大きく, 郊外や高速道路走行では小さい. これは, 走行消費電力は走行距離に依存し, 空調消費電力は稼働時間に依存するためである. また, 冬期は暖房に PTC ヒータを使用しているため, 冷房にヒートポンプを使用する夏期に比べ空調消費電力の影響が大きくなっている. これより, EV の消費電力を正確に評価するためには, 走行だけでなく空調消費電力の評価も合わせて行うことが必要条件になる. また, この検討結果から EV の航続距離を延長するためには, 空調消費電力の低減が重要であることが分かる.

2.3 ヒートポンプモデル

2.3.1 空調機モデル

車載空調機の性能は, 図 2-7 に示す $p-h$ 線図から, COP (Coefficient of Performance) で評価できる⁽¹⁰⁾.

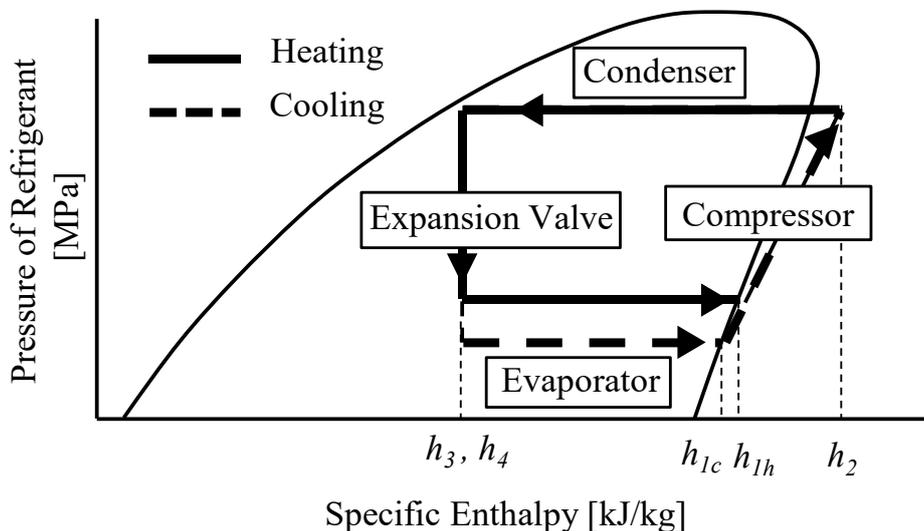


Fig. 2-7 $P-h$ Diagram of refrigerating cycle

COP は, 以下の(2-17)式で計算でき, 凝縮器と蒸発器の伝熱量はそれぞれ(2-18), (2-

19)式を用いて計算できる.

$$COP_C = \frac{h_{1h} - h_4}{h_2 - h_{1h}} \eta_m \eta_p \quad COP_H = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{1c}} \eta_m \eta_p \quad \dots(2-17)$$

$$m_r \cdot (h_2 - h_3) = \eta \cdot \alpha_{c,a} \cdot A_{c,a} \cdot \Delta T_{LMTD,c} \quad \dots(2-18)$$

$$m_r \cdot (h_1 - h_4) = \alpha_{e,a} \cdot A_{e,a} \left(\Delta T_{LMTD,e} + \frac{h_g (w_{e,m} - w_{e,s})}{Le^{2/3} \cdot C_p} \right) \quad \dots(2-19)$$

$$\frac{\alpha_{e,a}}{\alpha_D \cdot C_p \cdot \rho} = Le^{\frac{2}{3}} \quad \dots(2-20)$$

$$\alpha_a = J \cdot \left(\frac{m_a}{A_a} \cdot C_p \right) \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \quad \dots(2-21)$$

$$J = f(Re, La, F_p, F_h, L_h, L_d, \delta, L_p) \quad \dots(2-22)$$

ただし, COP_C :冷房の COP[－], COP_H :暖房の COP[－], η_m :動力伝達効率(=0.95)[－], η_p :ガス断熱圧縮効率(=0.93)[－], m_r :冷媒の質量流量[kg/s], h_1 :蒸発器出側の冷媒エンタルピー[kJ/kg], h_2 :凝縮器入側の冷媒エンタルピー[kJ/kg], h_3 :凝縮器出側の冷媒エンタルピー[kJ/kg], h_4 :蒸発器入側の冷媒エンタルピー[kJ/kg], h_g :潜熱エンタルピー[kJ/kg], $\alpha_{c,a}$:凝縮器空気側熱伝達係数[W/m²K], $\alpha_{e,a}$:蒸発器空気側熱伝達係数[W/m²K], $A_{c,a}$:凝縮器伝熱面積[m²], $A_{e,a}$:蒸発器伝熱面積[m²], $T_{LMTD,c}$:凝縮器対数平均温度差[K], $T_{LMTD,e}$:蒸発器対数平均温度差[K], $w_{e,m}$:蒸発器入出平均絶対湿度[kg_{water}/kg_{dryair}], $w_{e,s}$:蒸発器壁面空気絶対湿度[kg_{water}/kg_{dryair}], Le :レイス数[－], C_p :空気比熱[kJ/kgK], J :コルバーンの J 因子[－], Re :レイノルズ数[－], La :ルーバー角度[degree], F_p :フィンピッチ[mm], F_h :フィン高さ[mm], L_h :ルーバー高さ[mm], L_d :ルーバー厚さ[mm], δ :フィン厚さ[mm], L_p :ルーバーピッチ[mm]

2.3.2 給湯機モデル

HP 給湯機の性能は, 図 2-8 に示す T-S 線図から, COP で評価できる⁽¹¹⁾. HP 給湯機の冷媒として, CO₂ が用いられる. COP は, (2-17)式の COP_H により計算でき, 凝縮器と蒸発器の伝熱量はそれぞれ(2-23), (2-25)式を用いて計算できる.

$$mf_r \cdot (h_2 - h_3) = \alpha_{ct} \cdot A_{c,wi} \cdot (T_{cr,ave} - T_{cw,ave}) \quad \dots(2-23)$$

$$\alpha_{ct} = \left(\frac{1}{\alpha_{c,r}} + \frac{A_{c,wi}}{2\pi\lambda L_n} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{A_{c,wi}}{\alpha_{c,w} \cdot A_{c,wo}} \right)^{-1} \quad \dots(2-24)$$

$$mf_r \cdot (h_1 - h_4) = \alpha_{et} \cdot A_{e,wi} \cdot (T_a - T_{er,ave}) \quad \dots(2-25)$$

$$\alpha_{et} = \left(\frac{1}{\alpha_{er}} + \frac{1}{\alpha_a \cdot \varepsilon} \right)^{-1} \quad \dots(2-26)$$

ただし, mf_r : 冷媒質量流量 [kJ/kg], h : 冷媒エンタルピー [kJ/kg], T_a : 外気温度[K], T_r : 冷媒温度 [K], T_w : 水温 [K], α_{ct} : 温水器凝縮器の熱伝達率 [W/(m²·K)], α_{et} : 温水器蒸発器の熱伝達率 [W/(m²·K)], A : 熱伝達面積 [m²], d_o : 凝縮管外径 [m], d_i : 凝縮管内径 [m], L_n : 凝縮管の長さ [m], λ : 凝縮管の熱伝導率 [W/m·K], ε : 汚れ係数[-]

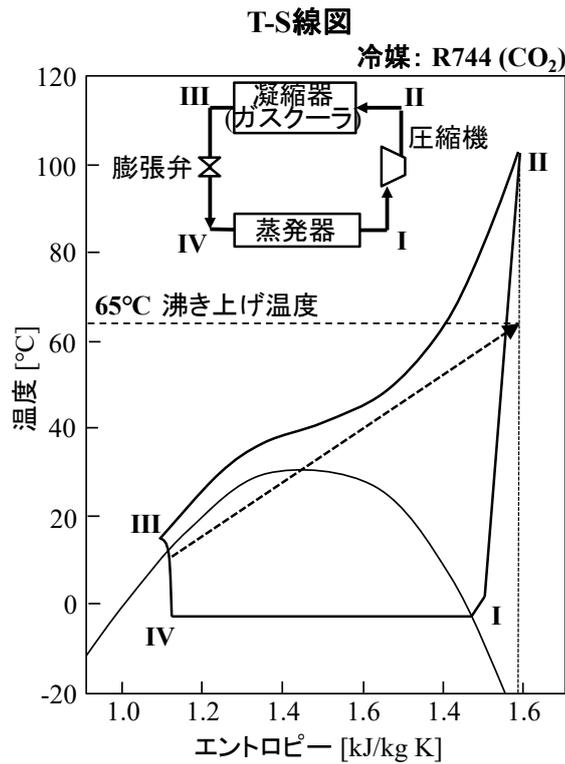


Fig. 2-8 T-S Diagram of CO₂ heat pump cycle

2.3.3 ヒートポンプモデルの検証

2.3.3.1 実験装置

2000年式のダイハツ MIRA に搭載されている空調機を用いて、図 2-9 に示す装置を作成し、数学モデルの検証実験を行った。図 2-9 において、車載時の蒸発器、圧縮機、凝縮器および膨張弁の配置を上図に示す。実験装置では、空気流量を正確に測定するため、ダクトの直管長を取った。蒸発器と凝縮器のそれぞれ左側から空気を送風し、それぞれの熱交換器を通過後、蒸発器側からは冷風、凝縮器側からは温風が排出される。

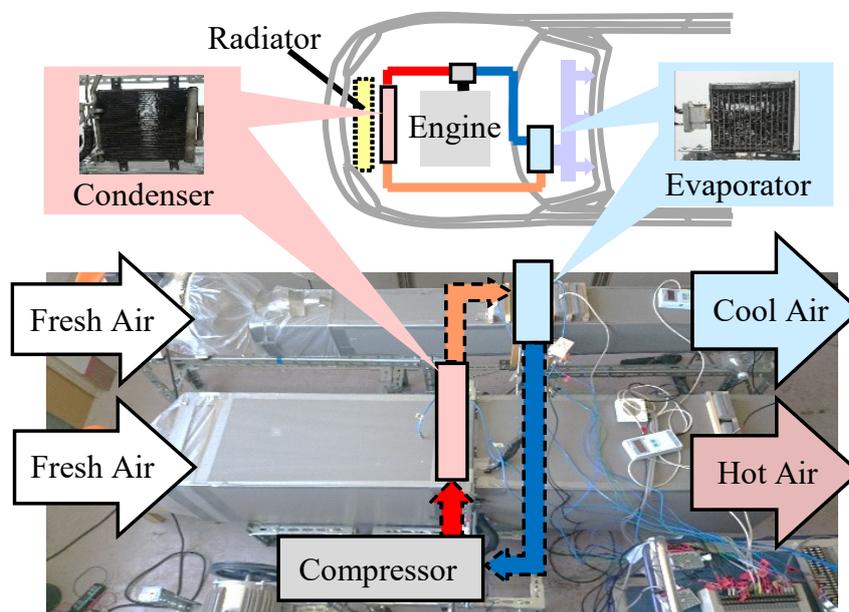


Fig.2-9 Experimental equipment of a car air-conditioner

2.3.3.2 実験条件

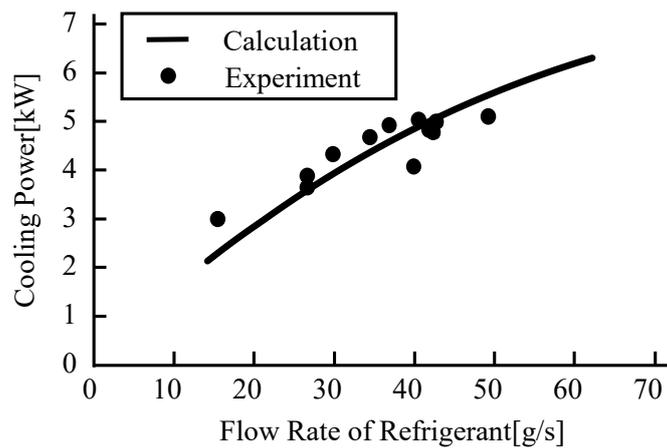
熱交換器のサイズ及び実験で用いた冷媒と圧縮機容量を表 2-1 に示す。室温については冷房実験時は 26～35℃、暖房実験時は 19～20℃の範囲で行い、風量は、冷房時には蒸発器を 0.1Nm³/s、凝縮器を 0.4Nm³/s とし、暖房時には蒸発器を 0.2Nm³/s、凝縮器を 0.1Nm³/s とした。また、冷媒流量は、圧縮機回転数を変化させた。

Table 2-1 Experimental conditions

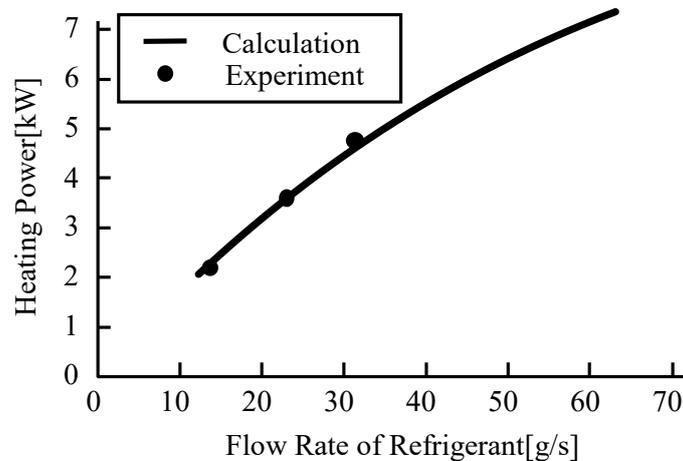
| | | |
|--------------------------|------------------------------|--|
| Heat Transfer Area | Condenser (m ³) | 1.86×10^{-3} ($0.36 \times 0.27 \times 0.016$) |
| | Evaporator (m ³) | 2.31×10^{-3} ($0.32 \times 0.20 \times 0.055$) |
| Compressor Capacity (cc) | | 80 |
| Refrigerant | | R134a |

2.3.3.3 実験結果

実験結果を図 2-10 に示す. 図 2-10(a)は冷房, 図 2-10(b)は暖房の結果である. これらより, 実験結果の COP は, 冷暖房時ともモデルの計算結果と良く一致していることがわかる.



(a) Cooling



(b) Heating

Fig.2-10 Experimental results

2.4. 統合マネジメントモデル

EV 蓄電池や HP 給湯器の貯湯槽のエネルギー収支は、制約条件の理論とエネルギー変換効率に基づき、式(2-27)～(2-30)を時系列に計算した。式(2-27)は PV 発電量の電力収支、式(2-28)は勤務先や家庭の電力収支、式(2-29)は EV 蓄電池の電力収支、式(3-30)は HP 給湯器の貯湯槽の熱収支である。

$$E_{PVi}(t) = \frac{E_{PVACi}(t) + E_{PVHPi}(t)}{\eta_1} + \frac{E_{PVEVij}(t)}{\eta_9} + E_{SURi}(t) \quad \dots(2-27)$$

$$E_{PSi}(t) + E_{PVACi}(t) + \eta_8 \cdot E_{EVDCij}(t) = E_{Ci}(t) + \frac{E_{PSEVij}(t)}{\eta_6} + E_{PVHP}(t) \quad \dots(2-28)$$

$$BE_j(t+1) - BE_j(t) = E_{PVEVij}(t) + E_{PSEVij}(t) - \frac{E_{CEVj}(t) + E_{EVDCij}(t)}{\eta_4} \quad \dots(2-29)$$

$$BH(t+1) - BH(t) = 3.6COP(t) \cdot (E_{PVHP}(t) + E_{PSHP}(t)) - H_w(t) - r \cdot BH(t) \quad \dots(2-30)$$

ただし、 t ：時間[h]($t=0-8760$)、 i ：施設 No.[-]($i=1$ ：家庭、 2 ：勤務先)、 j ：車両 No.[-]($j=1$ ：通勤車、 2 ：日常車)、 E_{PV} ：PV 発電量[kWh]、 E_{PVAC} ：施設への PV 電力供給量[kWh]、 E_{PVHP} ：HP 給湯器への PV 電力供給量[kWh]、 E_{PVEV} ：EV への PV 電力供給量[kWh]、 E_{SUR} ：余裕電力量[kWh]、 E_{PS} ：施設への系統電力供給量[kWh]、 E_{EVDC} ：施設への EV 電力供給量[kWh]、 E_C ：施設の電力需要[kWh]、 E_{PSEV} ：EV への系統電力供給量[kWh]、 E_{PSHP} ：HP 給湯器への系統電力供給[kWh]、 BE ：蓄電池残量[kWh]、 E_{CEV} ：EV 電力需要[kWh]、 BH ：貯湯槽熱量[MJ]、 COP ：HP 給湯器の成績係数[-]、 H_w ：給湯需要[MJ]、 r ：貯湯槽放熱率[-]、 $\eta_1 \sim \eta_9$ ：エネルギー変換効率

第3章 産業部門への適用

本章では、産業部門の電動車としてフォークリフトを例にとり、間伐材の処理工場においてフォークリフトと太陽光発電を統合化し、昼休みや休憩時間にフォークリフトへ太陽光の電力を充電することによるシステムの効果について検討した。

3.1 工場内のフォークリフトと太陽光発電の統合化

3.1.1 工場の流通・エネルギー消費機器

本検討で対象とした間伐材の処理工場である、岡山県の真庭バイオマス拠点を図 3-1 に示す。拠点は、木質チップを製造するチッププラント棟、製品としてのチップを保管するサイロ棟、パークヤード棟、事務室で構成されている。生産された木質チップは、発電用の燃料や製紙原料として利用される。拠点では、間伐材や樹皮、木材チップを運搬する産業車両として、フォークリフト 2 台、ショベルローダ 1 台、グラップル 2 台がディーゼルエンジンで稼働している。また、従業員の通勤には 11 台のガソリン車が使われている。真庭バイオマス拠点では、従来のチップ製造工場に加えて、新たにセルロース・ナノファイバー(CNF)工場を建設された。

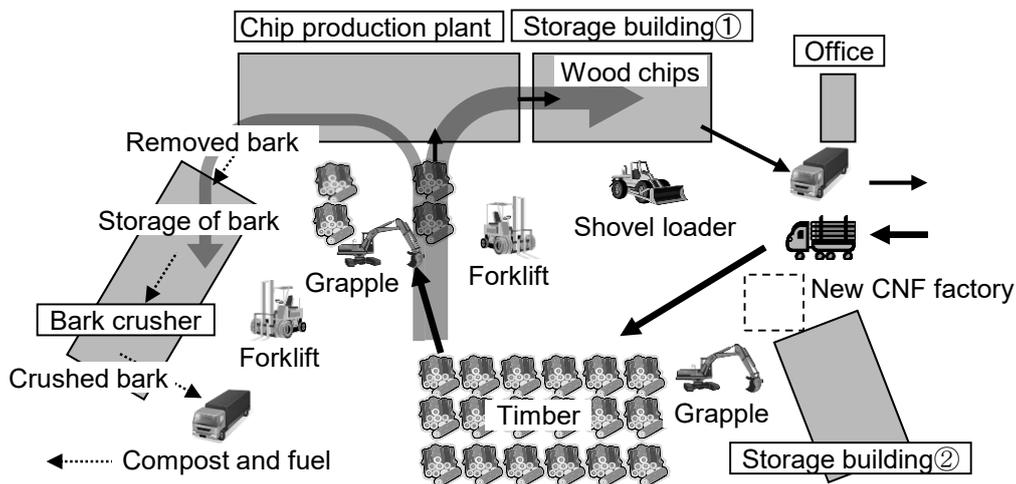


Fig. 3-1 The Maniwa biomass base

3.1.2 工場の CO₂ 排出量とエネルギーコスト

従来の真庭拠点では、エネルギー源として電気、軽油、ガソリンを消費される。電力は主にチップ生産工場、倉庫、バーククラッシャー、事務所で使用する電力として消費される。軽油とガソリンは、車両の燃料として消費される。電力は電力系統から購入している。

真庭拠点でチップ生産量を900トン/月とした場合のCO₂排出量とエネルギーコストの実績値の内訳を図3-2に示す。図3-2において、CO₂排出係数は日本の実績値であり、ガソリン 2.62kg-CO₂/ℓ、軽油 2.805kg-CO₂/ℓ、電力 0.579kg-CO₂/kWh である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

図3-2(a)より、工場からのCO₂排出量の56%は電力によるもので、残りの44%は化石燃料によるものであることがわかる。一方、工場から出るコストの49%は電力によるもので、残りの51%は化石燃料によるものであった。したがって、エネルギー源の単位CO₂排出量あたりのエネルギーコストに着目すると、化石燃料の単位CO₂排出量コストは、電気の約1.3倍 $\{=(51/44)/(49/56)\}$ と大きくなることがわかる。これは、発電所の熱効率がエンジンの熱効率よりも高いためである。つまり、経済的にCO₂を削減するためには、化石燃料と太陽光発電を直接代替する新しい統合システムを開発する必要がある。

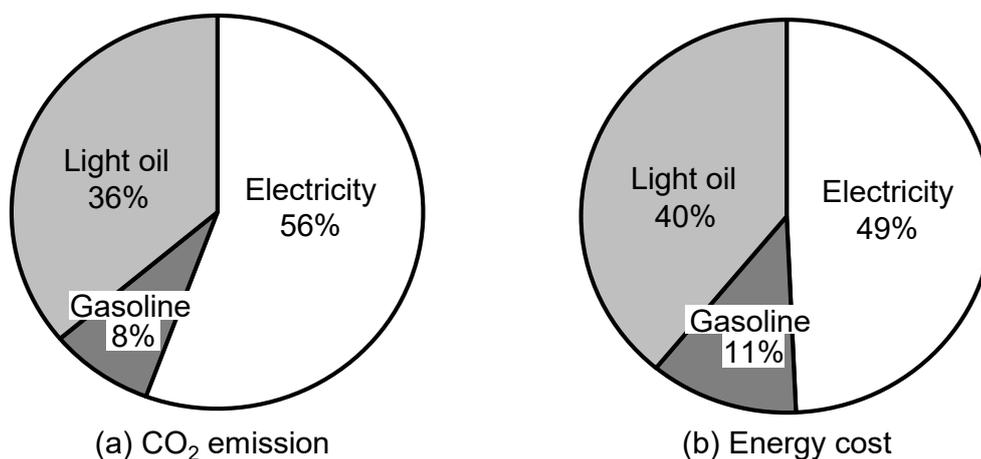


Fig. 3-2 Breakdown of CO₂ emission and energy cost

(Chips production is 900 t/month)

3.1.3 太陽光発電と産業用移動機器の統合化

従来のシステムと比較した新システムの概要を図 3-3 に示す。新システムでは、フォークリフト、ショベルローダ、グラップルなどの産業車両は、エンジン駆動から電気駆動に変更した。また、通勤車両もエンジン駆動から電気駆動に変更した。その結果、図 3-3(b)に示すように、化石燃料の消費がなくなり、工場のエネルギーをすべて電気で賄うことができる。

フォークリフト、ショベルローダ、グラップルなどの電動産業移動機器(EIV)と、通勤車両などの電気自動車(EV)をどう使い分けるかが重要である。本システムでは、効率改善効果の高い順に、太陽光発電からの充電は EIV が最優先、次に EV、最後に工場とした。

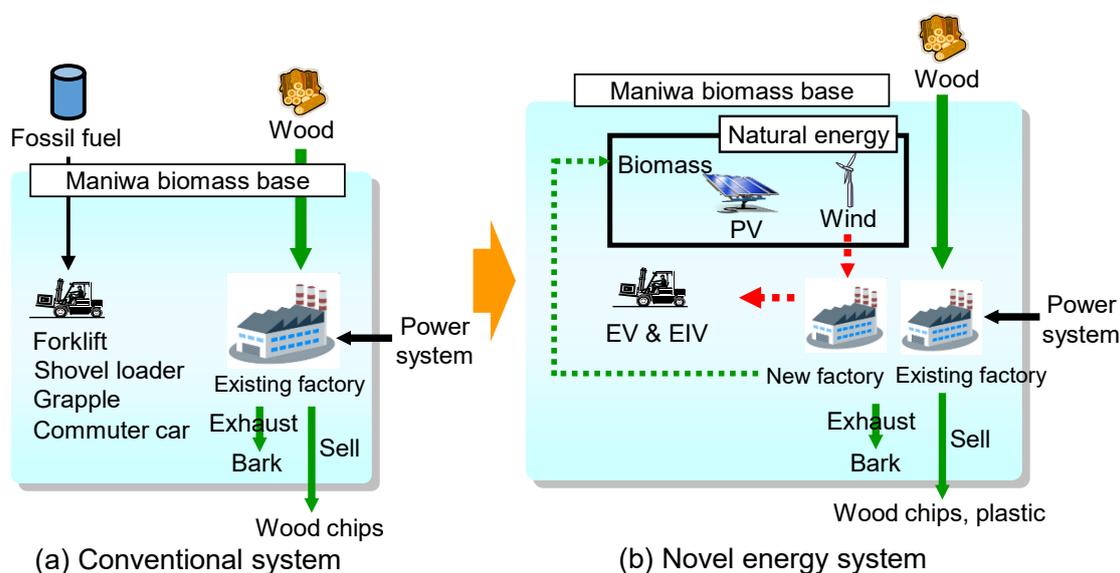


Fig. 3-3 Comparison between the conventional system and the novel system

3.2 工場へのエネルギーシステムの導入実績

3.2.1 電動フォークリフトの電力消費量

産業移動機器の電動化に伴う電力消費量 X_i は式(3-1)で求められる。

$$X_i = C \cdot Y_i \quad \dots(3-1)$$

ただし、 i : 時間[h] ($i = 1-8,760$), Y_i : チップ生産量当たりの軽油消費量[l/t], C : 軽油から電力への換算係数[kWh/l]

式(3-1)より, C が求まれば, 電動化した移動機器の電力消費量が算出できる. この C は実験で求める必要がある.

電動化した移動機器がフォークリフトの場合, 先の, 式(3-1)の換算係数 C は, 同じ性能を持つエンジン式フォークリフトと電動式フォークリフトに全く同じ動作をさせ, 両車の軽油と電力の消費量を測定することにより, 求めることができる. フォークリフトの動作は昇降と走行があり, この組み合わせで運転される. 実験 I は荷物の昇降と走行が混在する場合で, 具体的には, 1 時間中で可能な動作として, 荷物 600kg の昇降 100 回と走行 3 km を組み合わせた. 実験 II は昇降のみを 144 回, 実験 III は走行のみを 12km 行った. これらは各実験 I -III において, 5 回ずつ実施し, 平均値を求めた. その結果を表 3-1 に示す. これより, フォークリフトの消費エネルギーの電力/軽油の比は, 走行と昇降動作間で小さく, 平均 $C=1.38$ が得られた.

グラップルとショベルローダについては, エンジン出力を力仕事に変換する機構がフォークリフトと酷似していること. また, 表 3-1 より, フォークリフトの効率は仕事と走行で差が殆どないことから, 換算係数はフォークリフトの測定値を用い, 稼働時間あたりの燃料消費量はグラップルとショベルローダでの実測値を用いて電力消費量を求めた.

Table 3-1 Experimental results of the conversion factor C

| | 実験 I | 実験 II | 実験 III | Average |
|----------------------|------|-------|--------|-------------|
| 電動式 X_{ij} [kWh/h] | 3.33 | 3.22 | 3.87 | 3.47 |
| エンジン式 Y_{ij} [ℓ/h] | 2.45 | 2.35 | 2.74 | 2.51 |
| C [kWh/ℓ] | 1.36 | 1.37 | 1.41 | 1.38 |

3.2.2 PV 発電量

富士電機(株)製のアモルファス薄膜太陽電池は, 写真 1 のように屋根の上だけでなく, 敷地境界の傾斜部分にも設置された. 薄膜系太陽電池を使用することで, 単位面積当たりの発電量は少なくなる. しかし, 薄膜太陽電池は軽量であるため, 建物の補強をする必要がない. そのため, 建物の補強を含めた単位発電量あたりの建設費は安価である.

PV の性能は表 3-2 の通りである. 新システムを評価するため, 2014 年の 1 月 1 日から 12 月

31日までの1時間ごとの太陽光発電の実績量を用いて計算を行った。

真庭バイオマスベースにおける太陽光発電の特性を図 3-4 と表 3-3 に示す。図 3-4 では、5月と12月の晴天時のPV発電量を比較した結果である。図 3-4 より、年間最小であった12月のPV発電量は、最大であった5月に比べ、1/5以下に減少している。月別の太陽光発電量を表 3-3 に示す。表 3-3 から、12月のPV発電量は5月の最大値に対して2/11以下に減少していることがわかる。この現象は、真庭基地が山間部に位置していることに起因している。太陽光発電の季節変動が大きいということは、1年を通しての太陽光発電の需給調整が非常に難しいということである。また、年間の太陽光発電量は105MWh/年であった。

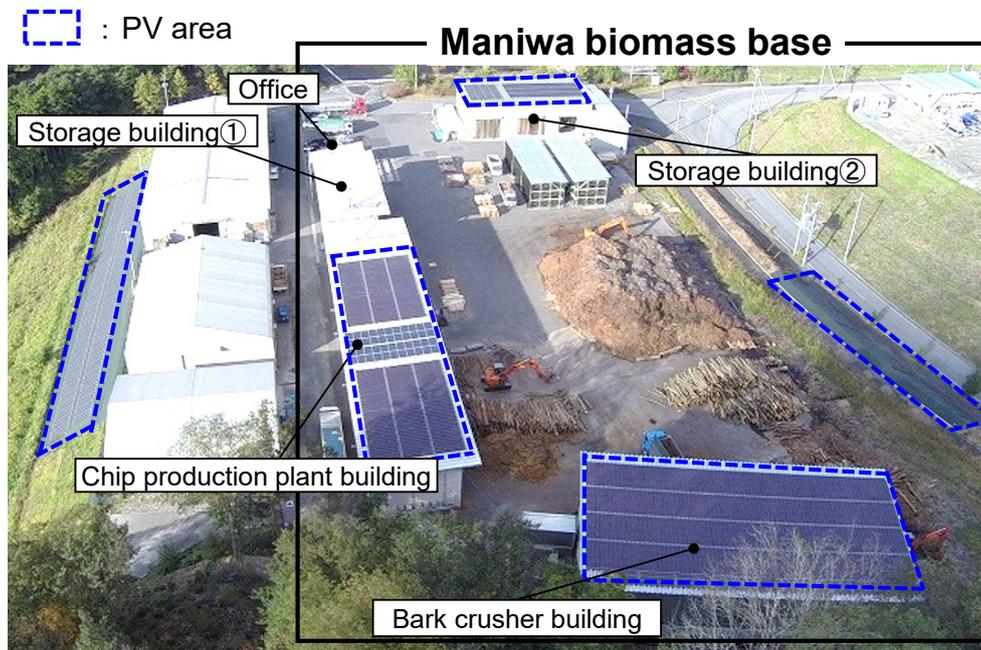


Photo 1. Introduction of the thin-film PV in the Maniwa biomass base

Table 3-2 PV module performance

| | |
|----------------------|------------------------|
| Maximum power | 90.00 W |
| Output per unit area | 58.10 W/m ² |
| Module area | 1.55 m ² |

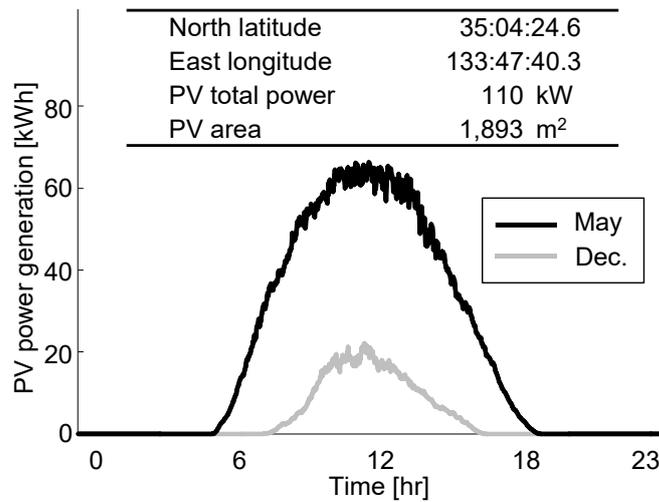


Fig.3-4 Hourly PV power generation each season

Table 3-3 Monthly PV power generation

| (Unit: kWh/year) | | | |
|------------------|--------|------|---------|
| Jan. | 3,858 | Jul. | 12,968 |
| Feb. | 4,971 | Aug. | 8,656 |
| Mar. | 9,205 | Sep. | 11,428 |
| Apr. | 11,937 | Oct. | 7,103 |
| May | 15,479 | Nov. | 4,512 |
| Jun. | 12,296 | Dec. | 2,802 |
| Total | | | 105,215 |

3.2.3. 電動車の条件

評価では、すべての車両が電動であることを想定している。全ての電動車の計算条件を表 3-4 に示す。EV は通勤に使用する。ワーカーの平均通勤距離は 28.2km/日である。PV の電力は EV と EIV のバッテリーに直接充電される。EV の充電時間は 8 時(出勤後)~17 時(帰宅前)である。EIV は昼休みと休憩時間に発電した PV 電力で充電する。ただし、雨天時や曇天時、冬季など太陽光発電で走行に必要な電力を充電できない場合は、従来の電力系統の電力で EV と EIV のバッテリーを充電する。

Table 3-4 Calculation conditions of EV and EIV

| Battery | |
|-----------------------------------|------------------|
| Available capacity of battery | 20-100 % |
| Application limits of battery | 20 % |
| EV | |
| Electricity consumption rate | 8 km/kWh |
| Battery capacity | 24 kWh/unit × 11 |
| EIV | |
| Battery capacity of forklift | 30 kWh/unit × 2 |
| Battery capacity of shovel loader | 80 kWh/unit × 1 |
| Battery capacity of grapple | 110 kWh/unit × 2 |

3.2.4. 工場の電力消費量

チップ工場の 1 時間ごとの電力消費量変動の一例を図 3-5 に示す。図に示すように、操業開始と終了の時間帯の電力消費量は、毎営業日のピーク時の半分以下であるため、変動幅が大きい。また、12:00～13:00 の昼休みの電力消費量は、就業時間中に比べて減少している。一方、休日の施設保存電力は 2～3kW 程度に減少している。

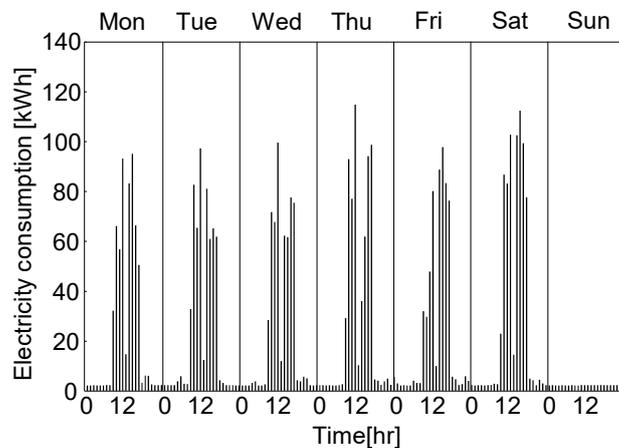


Fig. 3-5 Electricity consumption at the factory

図 3-6 に CNF 工場の 1 時間当たりの電力消費量変動の一例を示す。図に示すように、①～③の生産工程でポンプやモータの起動・停止を繰り返すため、従来のチップ工場と同様に大きな変動があることがわかる。

したがって、PV 電力を逆潮流させずに有効活用するためには、平日や休日が発生する PV

電力の余剰分を削減できるようなシステムを構築する必要がある。そのためには、EV や EIV に搭載されている電池をできるだけ有効活用することが重要である。その結果、両工場の合計で1時間あたり140kWの電力消費を見込んでいる。

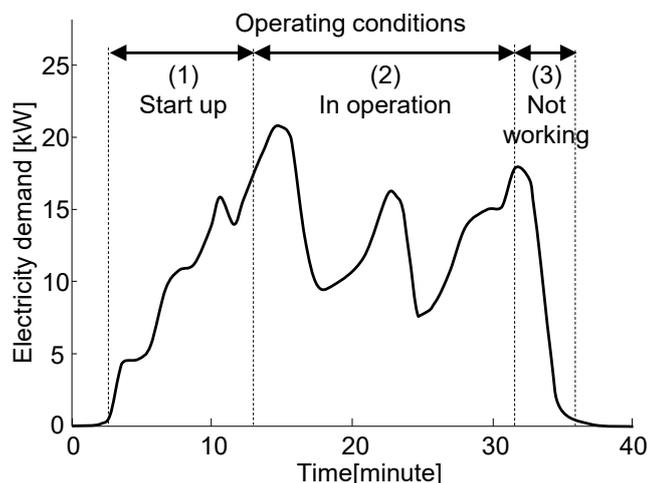


Fig. 3-6 Operating condition of the CNF

3.3 新エネルギーシステムの評価

真庭基地と各電池のエネルギー収支は、8760hの1年間のPV電力と工場電力消費量の時間変動データを用いたシミュレーションにより算出した。

3.3.1 解析結果

図 3-7 は、従来システムと新エネルギーシステムの年間エネルギー収支の結果を示したものである。従来システムのエネルギー収支を図 3-7(a)に、新エネルギーシステムのエネルギー収支を図 3-7(b)に示す。図 3-7(a)に示すように、チップ工場と CNF 工場の消費電力は、それぞれ276MWh/年、30MWh/年である。したがって、拠点の総消費電力は306MWh/年、発電所での電力供給は、送電と変電の電力系統損失を含めて 319MWh/年となる。化石燃料の消費量は、産業用車両の軽油が 37kℓ/年、通勤用車両のガソリンが 9kℓ/年である。

図 3-7(b)に示すように、チップ工場と CNF 工場の消費電力は、それぞれ従来型と同じであ

る。また、EIVとEVの消費電力は、それぞれ58MWh/年(=35+23)、11MWh/年である。したがって、送電や変電などの電力システムの損失を含めると、基地の総消費電力は391MWh/年 $\{=(276+30+58+11)/(0.97 \times 0.99)\}$ となる。太陽光発電の発電量は105MWh/年である。このうち59MWh/年を工場のベース需要に分配されている。EIVとEVにはそれぞれ23MWh/年、11MWh/年を配分されている。したがって、送電や変電などの電力システムのロスを含めた総電力消費量は301MWh/年である。軽油とガソリンの消費量は0ℓ/年となる。さらに、休日の余剰電力として12MWh/年が発生している。ベースとなる年間休日数は約80日のため、逆潮流がなければ、休日の太陽光発電のほぼ全量が余剰電力となる。つまり、工場の電力消費量変動も考慮すると、22%(=80/365×100)以上の余剰電力の発生が確率的に予想される。しかし、余剰電力の発生は半分の11%に抑えられている。その理由は、発電したPV電力の30%以上をEVとEIVに供給しているためである。また、EVの消費電力はほぼ全量、EIVの消費電力は40%以上がPVから供給されている。その結果、EVとEIVに搭載された電池は、電力の逆流がなく、電力需給変動の平準化に寄与していることが明らかになった。

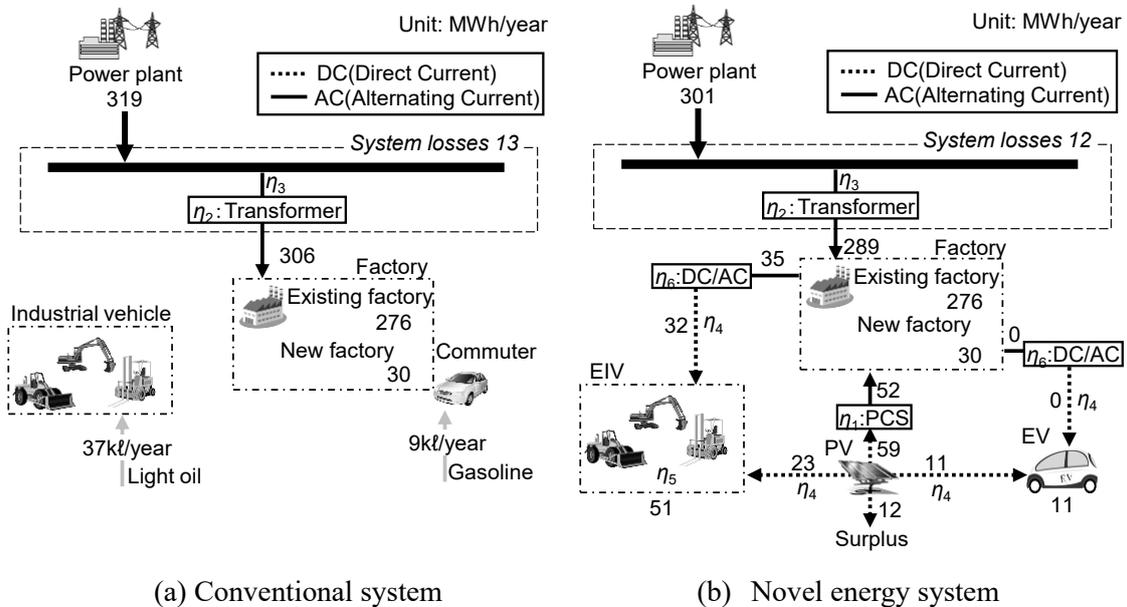


Fig. 3-7 The results of the annual energy balance

3.3.2 考察

3.3.2.1 CO₂ 排出量

図 3-8 に従来システムと新システムの CO₂ 排出量を示す。なお、太陽光発電の発電量の約 10%を占める余剰電力の影響は、図 3-8 に含めていない。CO₂ 排出係数は図 3-2 と同じである。図 3-8 に示すように、本システムは従来システムと比較して、CO₂ 排出量を 45%削減することができた。CO₂ 削減の内訳としては、60%が産業車両の電動化の効果、残りの 40%が電力系統からの電力を太陽光発電に置き換えた効果である。今後は、工場内の産業車両だけでなく、間伐材搬入用トラックや製品出荷用トラックも電動化すれば、その効果はさらに拡大していく。

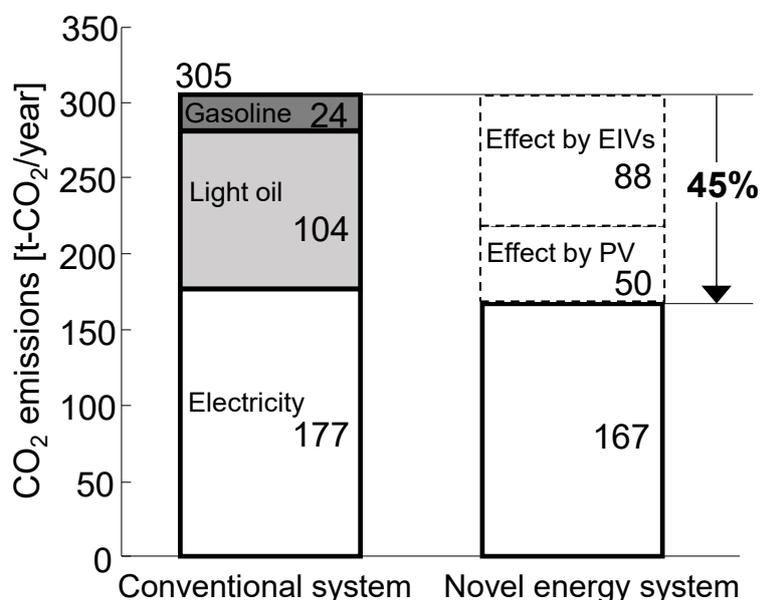


Fig. 3-8 Comparison of CO₂ emissions

3.3.2.2 経済性

日本におけるエネルギー単価と機器単価を表 3-5 に示す。これらの値は、日本における 2014 年の市場価格である⁽¹⁴⁾。また、経済性の評価結果を表 3-6 に示す⁽¹⁵⁾。

Table 3-5 Energy unit price and equipment unit price in Japan

| (a) Energy unit price | | (b) Equipment unit price | |
|-----------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Light oil | 130 yen/ℓ | Lithium battery | 50 thousand yen/kWh |
| Gasoline | 160 yen/ℓ | PV & Primary cost | 200 thousand yen/kW |
| Electricity | 22 yen/kWh | DC/AC Inverter | 40 thousand yen/kW |
| | | Difference of vehicle price | 500 thousand yen/unit × 11 |
| | | Charging control unit (EIV) | 1,000 thousand yen/unit × 5 |
| | | Charging control unit (EV) | 200 thousand yen/unit × 11 |

Table 3-6 The annual energy costs and initial Investment costs

| (a) The annual energy cost | | | (b) Initial Investment cost | |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| | Unit: thousand yen/year | | Unit: thousand yen | |
| | Conventional system | Novel energy system | Novel energy system | |
| Light oil | 4,810 | 0 | PV cost | 26,400 |
| Gasoline | 1,440 | 0 | Charging control unit | 7,200 |
| Electricity | 6,730 | 6,360 | EV update cost | 5,500 |
| Total cost | 12,980 | 6,360 | EIV update cost | 18,000 |
| Profit | | 6,620 | Total investment | 57,100 |

表 3-6(a)において、従来のシステムでは、最終消費者の年間エネルギーコストは 12,980 千円/年であったが、表 3-6(b)のシステムでは、最終消費者の年間エネルギーコストは 5,000 千円/年となった。一方、本システムでは、最終消費者の年間エネルギーコストを 6370 千円/年に削減することができ、従来システムの 50%以上削減することができた。そして、表 3-6(b)に示すように、本システムの初期投資費用は 57,100 千円/年となる。以上の結果より、単純な投資回収年数(=初期投資額/最終消費者の利益額)は約 8.6 年となる。経済性は、減価償却設備の法定耐用年数を 14 年とした場合の IRR(内部収益率)=7.2%という指標で評価される。IRR とは、投資に対する利回りを表す。この経済性は、発電から最終消費者までのエネルギーシステムとしては、極めて高いものである。しかし、CO₂ 削減効果との相反する経済性は、従来のエネルギーシステムと同様である。もし、このシステムで 50%の CO₂ 削減を達成したい場合、PV の能力は 150kW まで上げる必要があるが、経済性は IRR=6%に低下する。

3.4 まとめ

本研究では、特にバイオマス利用分野などの産業用途に展開するために、「太陽光発電(PV)と産業用電気自動車(EIV)を統合したスマートシステム」(PV & EIV スマートシステム)を提案した。PV の電力を直接 EIV のバッテリーに充電し、EIV をエネルギー貯蔵と PV 出力変動の平準化として活用するこのシステムを、数理モデルといくつかの実用実験を通して開発した。そして、新システムの CO₂ 排出量と経済性を評価し、従来システムと比較した。その結果は、以下の通りある。

- ・ 再生可能エネルギーを経済的に拡大するために、「PV & EIV スマートシステム」を真庭バイオマス基地に適用した。
- ・ 数理モデルおよび検証実験に基づき、新規エネルギーシステムの設計手法を構築した。
- ・ EV と EIV に搭載された電池は、電力需給の変動を逆潮流させることなく平準化することに寄与している。
- ・ 木質チップの生産量が 900 トン/月の場合、新システムは従来システムと比較して CO₂ 排出量を 45%削減することができる。経済性の評価として、減価償却設備の法定耐用年数を 14 年とした場合、逆潮流と補助金なしで IRR=7.2%であった。
- ・ 今後、工場内で使用する産業車両だけでなく、間伐材搬入用トラックや製品出荷用トラックも電動化すれば、その効果はさらに拡大していく。

第4章 公共交通機関への適用

本章では、公共交通機関の電動車として蓄電池電車と電気バスを例にとり、太陽光発電との統合化による効果を検討した。

4.1 ローカル鉄道線における太陽光発電と蓄電池電車の統合化

本項目では、JR 吉備線(ローカル鉄道線)における太陽光発電と蓄電池電車を統合化し、起点(岡山)と終点(総社)の両駅の駅舎屋根に設置した太陽光電力を電車へ供給することによるシステムの効果について検討した。

4.1.1 太陽光発電と蓄電池電車の統合化システムの概要

提案する太陽光発電(PV)と蓄電池電車(BEC)の統合化システムを図 1 に示す。

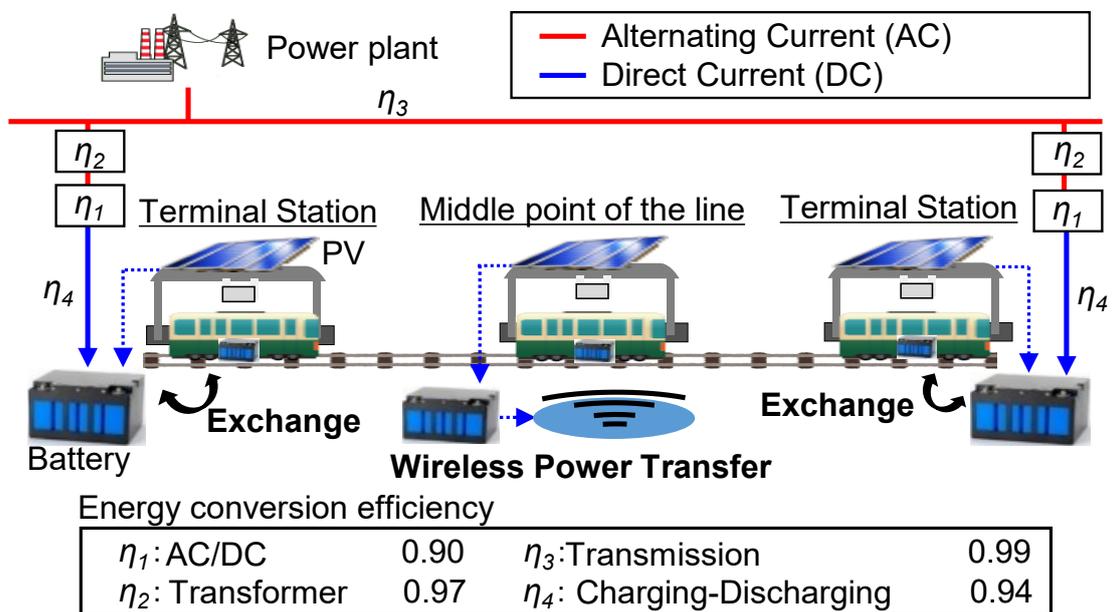


Fig. 4-1 Image of the proposed novel railway system

BECの蓄電池は交換方式とし、BECが終着駅(本検討では、岡山駅または総社駅)に到着した際に、使用済の蓄電池を充電済の蓄電池と交換する。使用済の蓄電池は、路線両端の終

着駅に設置した PV で充電し、曇天、雨天または夜間などで、次の走行に電力が不足する場合には、系統から充電する。

また、岡山⇄総社間の中間地点にあたる備中高松駅で充電する場合についても検討した。備中高松駅での充電方法は、停車時間が短く制約があることから、磁界共鳴方式を用いた非接触のワイヤレス充電方式⁽²¹⁾ (以下、WPTS と記す)を想定した。

4.1.2 空調機統合型蓄電池電車の概要

BEC では、走行に必要な電力に加えて、空調機の駆動電力も蓄電池から供給するため、航続距離を伸ばすには、蓄電池容量を大きくする必要がある。

そこで、図 4-2 と図 4-3 に示すように、小型のエンジンで空調機を一定回転で駆動し、空調の負荷変動に伴う余裕動力を用いて発電を行う空調機統合型蓄電池電車(以下、AI-BEC と記す)が提案されている⁽¹⁷⁾。AI-BEC では、余裕動力で発電した電力を使用することにより、航続距離の増加や蓄電池容量の小型化が可能となる。

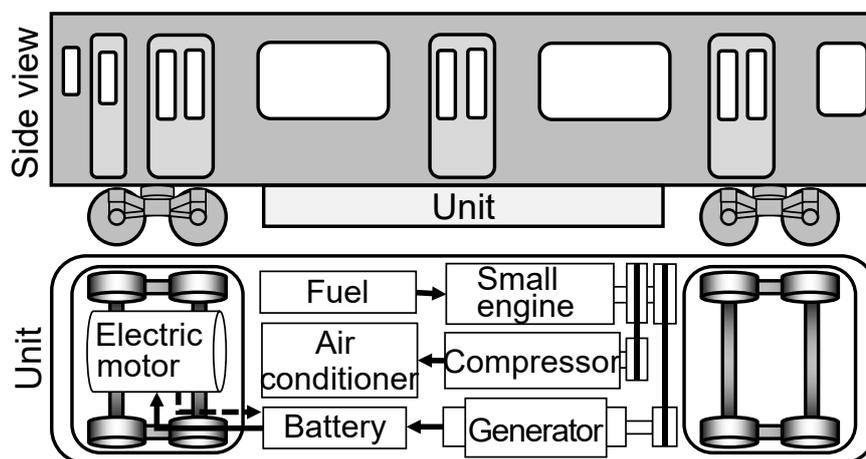


Fig. 4-2 Structure of AI-BEC

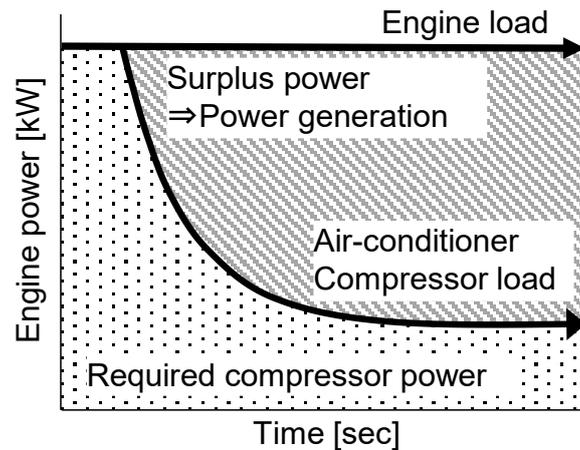


Fig. 4-3 Operation image of AI-BEC

AI-BEC には次のような特徴がある。

- (a)動力系は燃料から電気モータへのエネルギー変換が多いため、動力系で駆動する電気モータ方式よりも空調圧縮機駆動のエネルギー効率が高くなる。
- (b)空調機の駆動に必要なエンジン排気量は、従来のディーゼル車の 1/10 以下である。従って、バイオ燃料のみで駆動すれば、ゼロエミッションを達成できる可能性がある。
- (c)夏場の冷房、冬場の暖房に必要なバッテリー容量が減るため、バッテリーの利用効率上がる。そのため、電池容量全体を削減することができる。
- (d)AI-BEC の自己充電機能により、航続距離の延長が可能である。
- (e)小型エンジンの廃熱を回収し、冬場の暖房熱源とすることができるため、省エネルギー効果がある。

4.1.3 検討内容と条件

BEC と PV を組み合わせた新しい鉄道システムとして、PV の配置や蓄電池の使い方など様々な方法が考えられる。そこで、本検討では、以下の 5 つのケースを比較した。

- (1)Base: ディーゼル気動車による従来のシステム
- (2)Case1: BEC と PV を組み合わせたシステム: BEC の屋根に PV を設置する
- (3)Case2: BEC と PV を組み合わせたシステム: 終着駅に PV を設置し、終着駅に到着後に電

池を交換する.

(4)Case3: AI-BEC と PV を組み合わせたシステム: 終着駅に PV を設置し, 終着駅に到着後に電池を交換する.

(5)Case4: Case3 に加えて, 路線の中間地点に PV と WPTS を設置する. 鉄道車両に搭載された電池は, WPTS を利用して PV から充電される.

具体的な事例として, 日本の非電化ローカル線の一つである JR 吉備線を検討した. この路線は, 岡山と総社を結ぶ約 20km の路線で, 鉄道車両が同じルートを往復する. また, 岡山駅と総社駅の標高差は約 14m ある. 図 4-4 に JR 吉備線のダイヤグラムを示す. 図 4-4 より, 岡山駅と中間地点である備中高松駅間は 1 日 4 往復する.

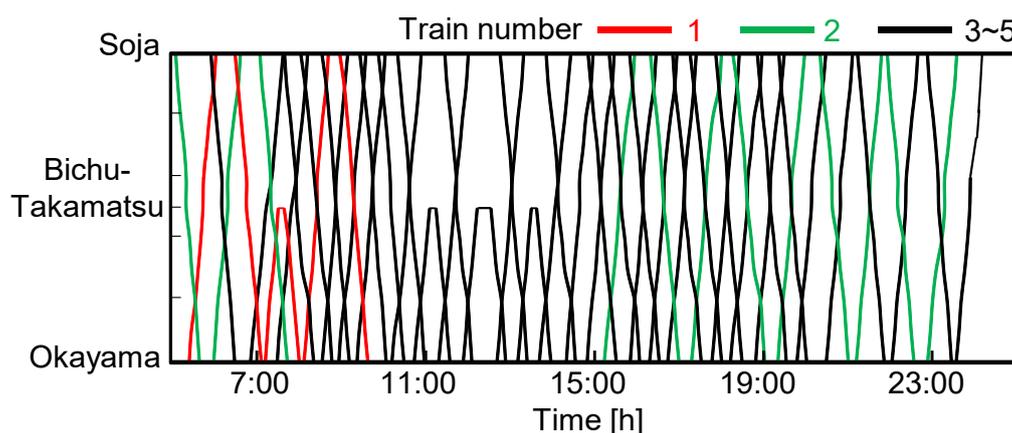


Fig. 4-4 The train traveling diagram of Kibi line

表 4-1 に本研究で使用した各鉄道車両の仕様と機器の性能条件を示す. 本研究では, システム全体において, PV 余剰電力発生率(=PV 余剰電力/PV 発電量)が 10%以下となるように PV 発電容量を決定している. 上り列車と下り列車の走行速度は実測値を使用した. PV 発電量や列車の走行と空調のエネルギー消費の計算に用いた外気温度および日射量は, 2016 年度の 1 時間毎の実績値を用いた. また, 乗客人員は各駅の乗降調査実績に基づき, 時間帯毎で変化させた. 外温度, 日射量, 乗員数等の変化を用いて, シミュレータより充放電, 発電 PV 電力, 消費電力等のエネルギー収支を 1 分間ずつ 1 年間逐次計算した. また, CO₂ 排

出係数は、0.691kg-CO₂/kWh(2016 年中国電力株式会社), 軽油 2.8kg-CO₂/ℓ, LNG2.70kg-CO₂/kg を使用した⁽¹⁸⁾.

Table 4-1 Calculated conditions

| Case | | Base | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------|-----|-----|--------|-----|
| Train type | | Diesel | BEC | | AI-BEC | |
| PV Power | Okayama St. [kW] | - | - | 276 | 205 | 194 |
| | BichuTakamatsu St. [kW] | - | - | - | - | 67 |
| | Soja St. [kW] | - | - | 184 | 156 | 175 |
| | Roofs of trains [kW] | - | 114 | - | - | - |
| Train | The number of composed coaches | 2cars/train × 5train | | | | |
| Battery | Capacity [kWh/unit] | - | 10 | | | |
| | Train [kWh/train] | - | 140 | | 100 | 80 |
| | Station [kWh] | - | 560 | | 560 | 660 |
| Wireless Power Transfer [kW] | | - | | | | |
| Engine | Power [kW] | 195 | - | - | 20 | |
| | Displacement [cc] | 11,040 | - | - | 750 | |
| | Fuel | Light fuel | - | - | LNG | |
| Motor | Power [kW] | - | 300 | | | |
| Air-conditioner | Capacity [kW] | 50 | | | | |
| | COP | 3.0 | | | | |
| Heater | Power [kW] | 15 | | | | |

4.1.4 検討結果

4.1.4.1 上り列車と下り列車の走行消費電力

上り列車(総社→岡山)と下り列車(岡山→総社)の空車時の標高差を考慮した走行消費電力の計算結果を図 4-5 に示す。

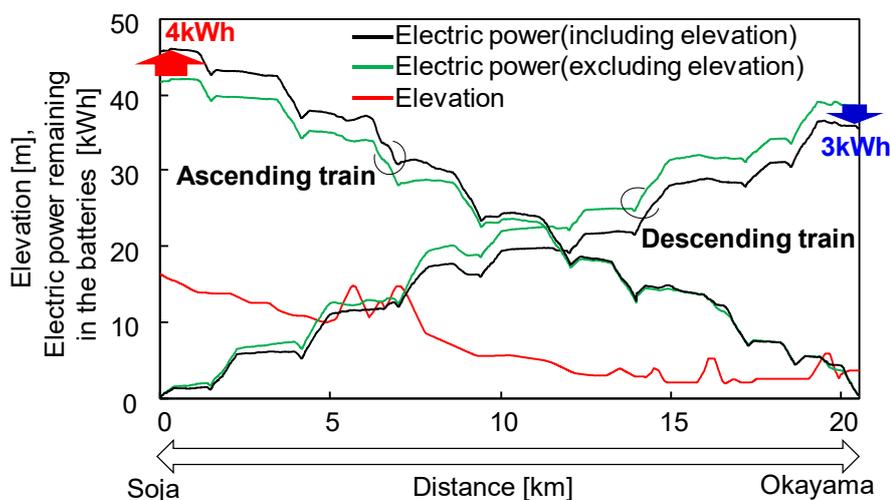


Fig. 4-5 Calculation results for power consumption for traveling of Kibi line

図 4-5 より、総社から岡山にかけて標高が下がっているため、平地走行時と比較して、上り列車は 3kWh 減少し、下り列車は 4kWh 増加する。これは、吉備線の路線特性であり、PV の配置と蓄電池容量に大きな影響がある。

4.1.4.2 総社駅と岡山駅の PV 配置面積

図 4-6 は、Case における各列車の PV 余剰発生率を示している。1 号車、2 号車の BEC は、図 4-5 に示すように昼間は列車本数が少なく、BEC の屋根に設置された PV で一方的に充電しているため、PV 余剰電力が多くなっている。したがって、PV の余剰電力を減らすためには、BEC の走行や空調によって PV の電力をこまめに消費することが重要である。

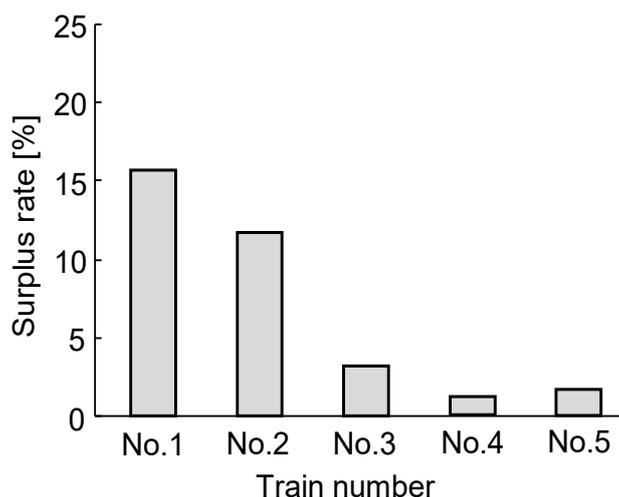


Fig. 4-6 PV surplus rate for each train in Case1

一方、PV 面積が一定の条件下で、岡山駅と総社駅に設置する PV 面積の比率を変化させた場合の 1 年間合計の PV 余裕発生率を図 4-7 に示す。図 4-7 より、PV 面積比率は、岡山駅:総社駅=6:4 近傍で PV 余裕発生率が最小値となる。これは、4.1 項で述べた岡山駅～総社駅間の勾配差に加えて、3.2 項で述べた備中高松駅～岡山駅間の折り返し列車が 1 日 4 本あり、岡山駅での充電量が総社駅より大きいためである。

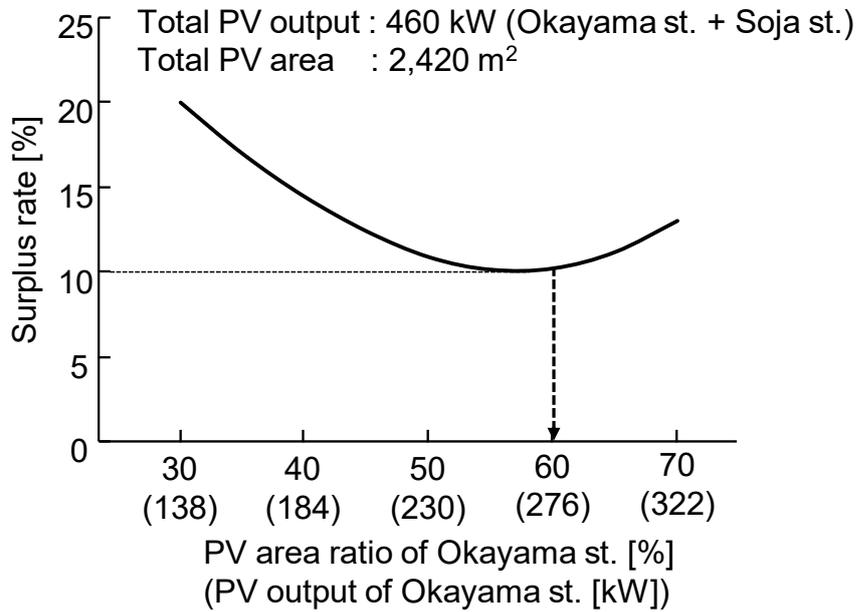


Fig. 4-7 PV layout area at Okayama and Soja stations

4.1.4.3 AI-BEC の効果

Case2 における 1 年間の列車毎の消費電力の分布を, 走行と空調機の要因に分けて図 4-8 に示す.

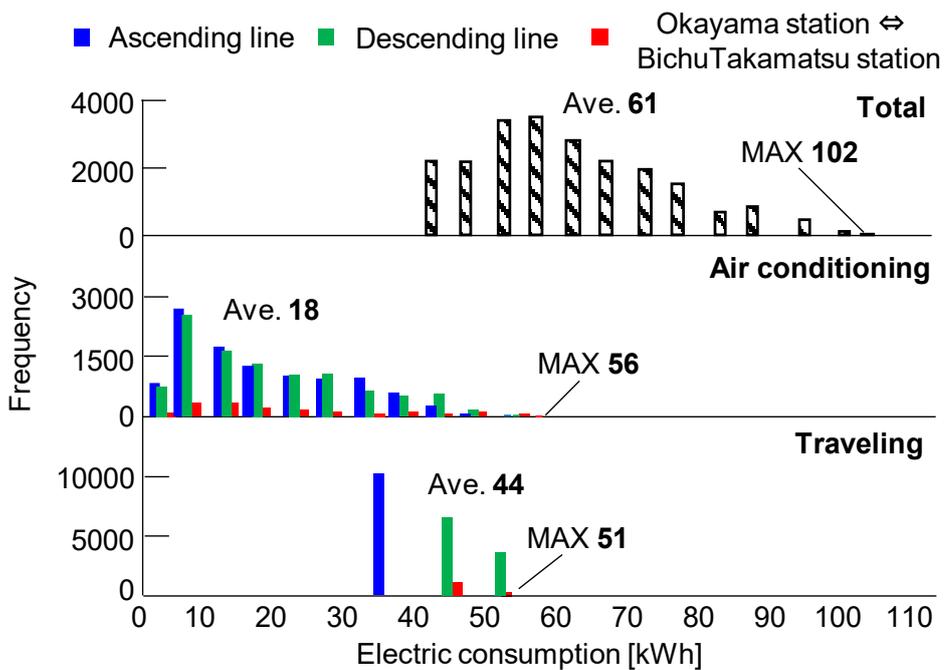


Fig. 4-8 Power consumption distribution for each train in Case 2

図 4-8 より、電力消費の平均値は、走行と空調それぞれ 44kWh/片道と 18kWh/片道であり、走行は空調よりも 2.5 倍大きい、バラツキは空調の方が大きい。走行の電力消費は、最大値と最小値の差が 15kWh/片道以内だが、空調の電力消費の最大値と最小値の差は 56kWh/片道と 3 倍以上ある。その結果、走行と空調の合計の消費電力の最大値は、102kWh/片道であり、蓄電池の有効充放電容量を 20~100%とすると、蓄電池の搭載容量は 130kWh/片道必要になる。

以上のことから、BEC の蓄電池搭載容量を削減するためには、季節と時間帯によって異なる空調機の電力消費のバラツキを低減することが重要になる。

そこで、AI-BEC での運行を想定した場合(Case3)の結果を図 4-9 に示す。図 4-9 では、終点での停車時間における空調稼働時間の短縮も考慮した。

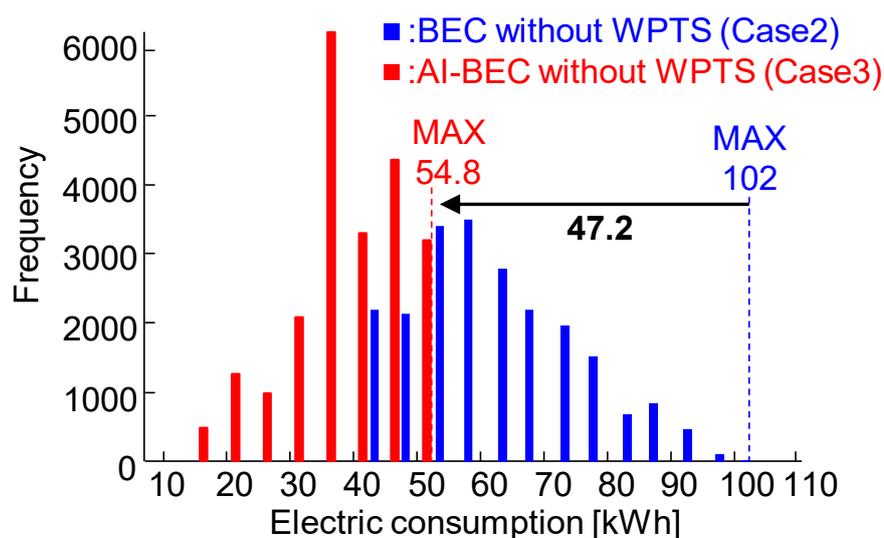


Fig. 4-9 Variations in the total power consumptions in Cases 2 and 3

図 4-9 より、AI-BEC の使用により、走行と空調機の合計の消費電力の最大値は、102 から 55 kWh/片道と約 45%削減できることが分かった。ちなみに、列車の消費電力が最大となる備中高松駅~岡山駅間の折り返し区間における BEC と AI-BEC の消費電力時の系列変化を図 4-10 に示す。図 4-10 より、AI-BEC は、空調使用中に AI-BEC システムで発電した電力を蓄電

池に充電するため、BEC に比べて、走行に必要な電力が 45%減少する、つまり、蓄電池搭載容量を 45%削減できる。

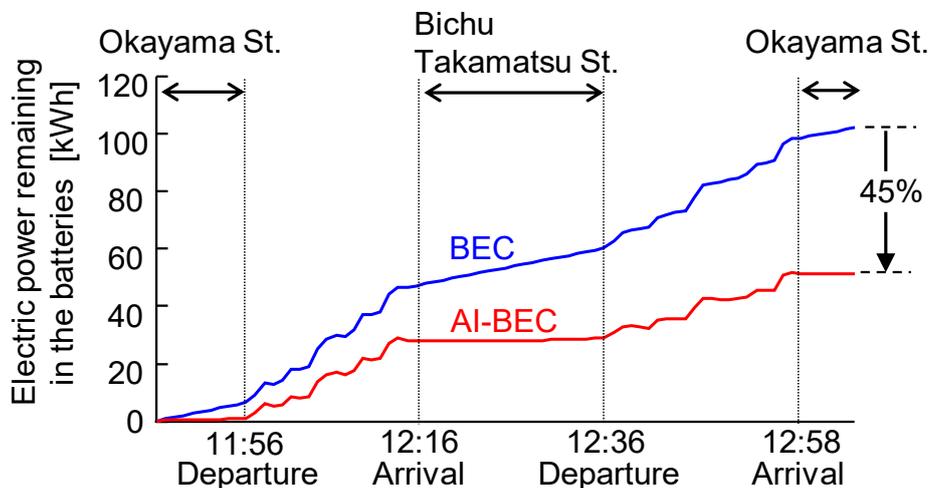


Fig. 4-10 Timeseries changes in BEC and AI-BEC power consumptions

4.1.4.4 WPTS の効果

AI-BEC に加えて、備中高松駅において WPTS で途中充電した場合(Case4)の電力消費のバラツキを図 4-11 に示す。これより、途中充電の効果は、極めて小さい。これは、AI-BEC が空稼働時に発電し、電力を補充するためである。

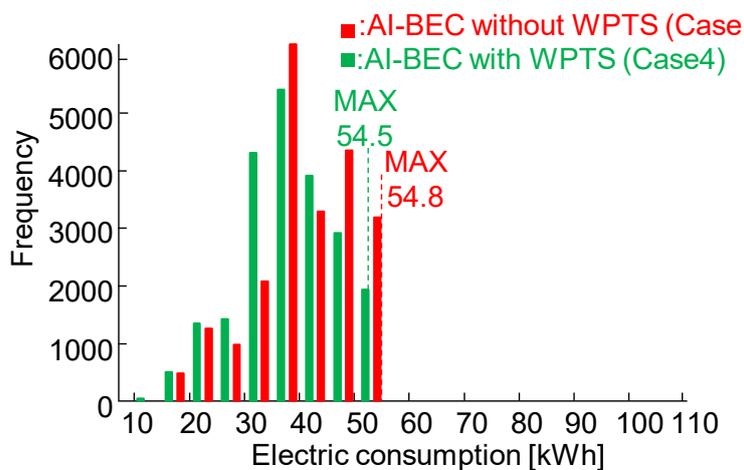


Fig. 4-11 Variations in the total power consumptions in Cases 3 and 4

一方, BECに WPTS を適用した結果を図 4-12 に示す. 図 4-12 より, BEC では WPTS の適用により, 蓄電池からの電力消費量は 14.8kWh/片道だけ低減される. このことから, 吉備線のよ
うな往復 20 km 程度の近距離路線では, WPTS よりも AI-BTC の方が蓄電池容量を低減する
効果が大きいことが分かった.

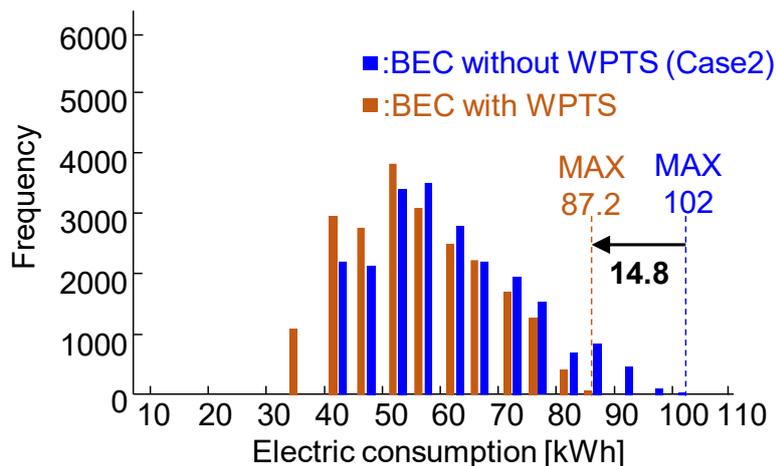


Fig. 4-12 Variations in the total power consumption when applying WPTS to Case 2

4.1.4.5 各ケースの CO₂ 排出量の比較

各ケースの年間 CO₂ 排出量を比較した結果を図 15 に示す.

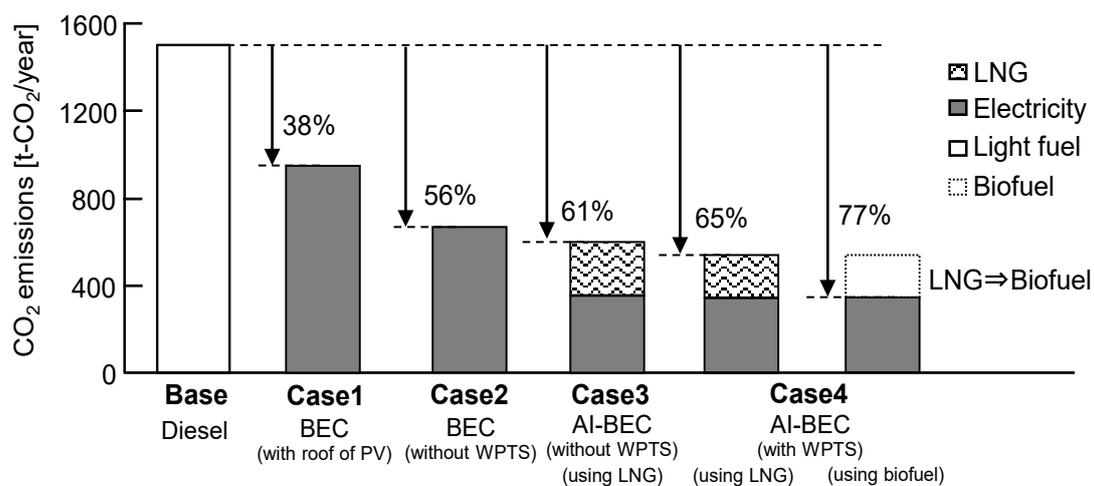


Fig. 4-13 A comparison between experiment results and calculated results

図 4-13 より, Case 2 の CO₂ 排出量は, 従来のディーゼル気動車と比較して 56%以上削減できる. Case3 では, AI-BEC システムは BEC システムに比べ, CO₂ 排出量を $9\% \{=(61-56)/56 \cdot 100\}$ 削減できる. また, WPTS を用いた場合, Case3 と比較して, AI-BEC システムでは合計 $7\% \{=(65-61)/61 \cdot 100\}$ の CO₂ 排出量削減が可能である. これは, AI-BEC システムの発電効率が, 発電所からモータ駆動の空調機までのシステム全体の発電効率より高いためである.

図 4-13 において, AI-BEC システムのエンジンが燃料を使用した場合の CO₂ 排出量は, 従来のディーゼル車の場合の 1/6 以下となる. したがって, 将来, エタノール 10(E10)の生産国など, バイオ燃料のみで駆動できるようになれば, WPTS を用いた将来の AI-BEC システムは, 従来のディーゼル車と比較して 75%以上の CO₂ 排出量削減が可能であることがわかる. さらに, 今回使用したエアコンの COP は 3 であり, この COP を改善することで燃料消費量を削減できるため, 改善の可能性はある.

4.1.5 まとめ

本研究では, 太陽光発電と蓄電池電車の統合化システムにおいて, 太陽光発電の設置場所, 発電出力および蓄電池電車の蓄電池容量や充電方法, 更に, 車載空調機の動力システムを高効率化した場合の効果について検討した. 結果は以下の通り.

- ・ 蓄電池電車(BEC)の蓄電池搭載容量を削減するためには, 季節や時間帯によって異なる空調機の消費電力とそのバラツキを低減する必要がある.
- ・ 空調機統合型電車(AI-BEC)と途中駅でのワイヤレス充電(WPTS)を組み合わせたシステムは, 現行のディーゼル気動車と比較して, CO₂ 排出量を 65%削減できる.
- ・ AI-BEC は, 空調機の消費電力とそのバラツキを大幅に低減でき, BEC に比べて, 蓄電池搭載容量を 45%削減できる.
- ・ WPTS は, AI-BEC で併用する場合に, CO₂ 削減効果は大きい一方で, 搭載蓄電池容量の低減効果は小さい.

4.2 バス路線における太陽光発電と電気バスを統合化

本項目では、岐阜市内のバス路線における太陽光発電と電気バスを統合化し、鉄道と同様に終点の岐阜大学構内に設置した太陽光電力を電動バスへ供給することによるシステムの効果について検討した。

4.2.1 太陽光発電と電気バスを統合システムの概要

統合システムの構成イメージを図 4-14 に示す。本システムは、勤務先を岐阜大学、教職員の通勤車を EV とし、岐阜大学を經由し JR 岐阜駅と岐阜大学病院間を結ぶ岐阜大学・病院路線⁽¹⁹⁾を運航する全てのバスを電動バス (EB) にし、大学に設置した太陽光発電 (PV) から電力を供給する。図 4-14 において、バス路線全体として評価するため、職員 2,300 人の 80% が通勤に自家用車を使用し、各家庭のエネルギー消費は全て同じと仮定した。この理由として、通勤先では通勤車に供給する電力は通勤に必要な分 (一定量) しか供給しないためである。

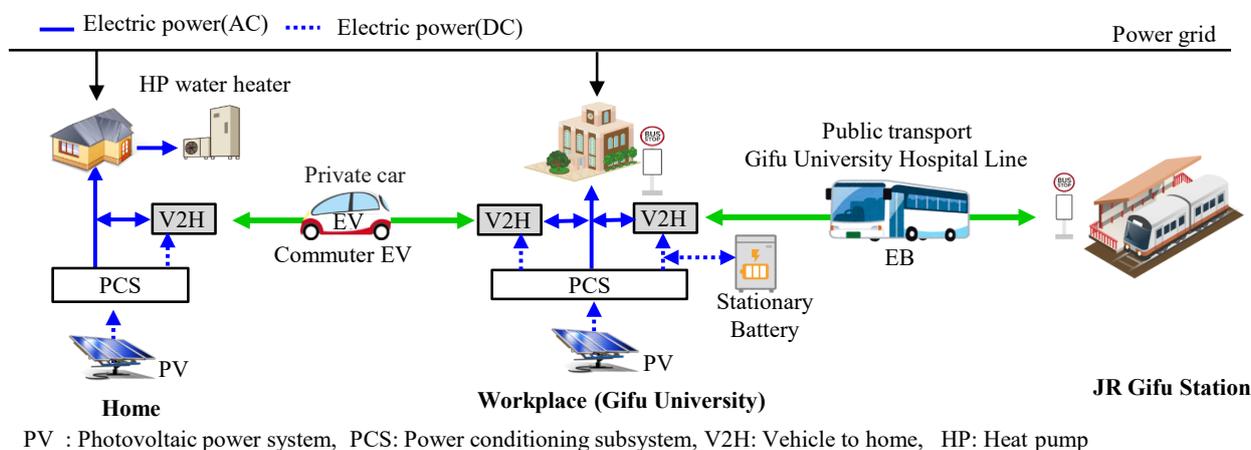


Fig. 4-14 Apparatus configuration of integrated energy system

EB の検討内容は以下の通りである。

- ・臨時便や快速便は、終点の岐阜大学病院に到着後、回送されその運行先が不明なため、これらを除いた定期便 (91 本/日)のみを対象に検討した。これは臨時便や快速便を含む全便

数の 92%に相当する。

- ・EB への充電は岐阜大学内に設置する充電スタンドのみで行い、JR 岐阜駅では行わない前提とした。
- ・充電に必要な電力は大学構内に設置した PV から供給する。バスが大学内に停車していないなどの理由で、充電が必要ない場合は、バッファ用の蓄電池に PV 電力を充電する。
- ・夜間、雨天時および冬季などで、PV 電力だけでは EB の電力需要をまかなえない場合は、系統電力から補う。

なお、シミュレーションを行う上での課題として、EV の消費電力を正しく推定する必要がある。EV の消費電力は走行と空調によって生じる。走行消費電力は EV の車両重量と加減速、つまり、乗車人員、停留所、信号、運転手の個性などの影響を受ける。また、空調消費電力は乗車人員と車内の設定温度の影響を受ける。そこで、実際にバスに乗って、走行と空調の消費電力を推定するために必要なデータを測定した。

4.2.2 バスの走行消費エネルギーの推定

4.2.2.1 実験方法

EB の消費電力を推定するためには、走行消費電力と空調消費電力の両方を正しく推定する必要がある。走行消費電力の推定に必要な情報は、標高と速度、乗車人数の変化であり、空調消費電力の推定では、更に車内温度の変化が必要になる。このため、朝、昼間、夕方(夜間) の 3 つの時間帯別に、これらのデータを数十回に亘って実測した。

測定方法として、速度や標高は GPS ロガー、車内温度は温湿度ロガー、乗車人員はバス停車ごとに目視で記録した。

なお、消費電力の推定に用いたバスの諸元は表 4-2 に示すように、岐阜大学病院路線でも多く使われている車種とした。

Table 4-2 Performances of EB

| | |
|---------------------------|---|
| Curb weight | 10,320 kg |
| Motor max output | 199 kW |
| Battery capacity | 287kWh |
| Air conditioning capacity | Heating 10kW (PTC heater) Cooling 26kW (heat pump) |

4.2.2.2 実験結果

JR 岐阜駅⇒岐阜大学病院間の走行速度、標高、乗車人員の変化例を図 4-15 に示す。これより、加減速が多いことが分かる。乗車人員は、この例では約 20 人だが、混雑時は最大 48 人であり、空車時から約 2.5 t 重量が増加することも分かった。

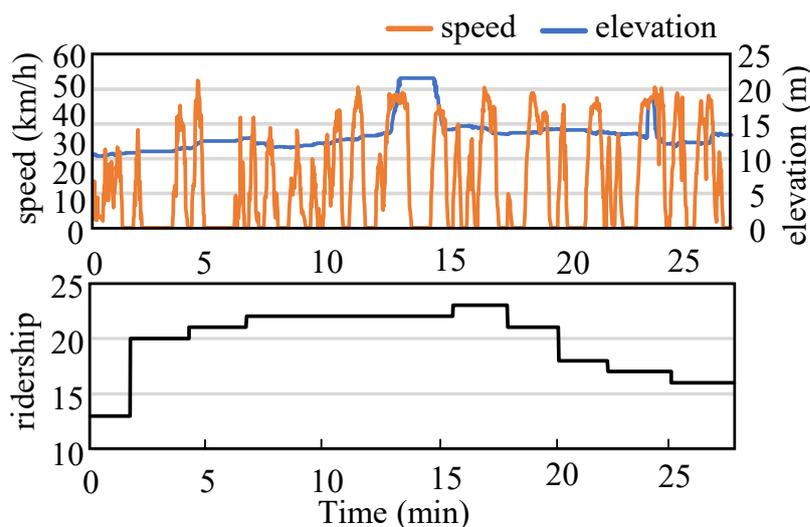


Fig. 4-15 Example of acquired data in the experiment

これらの測定値に基づき、走行消費電力を計算した結果を図 4-16 に示す。図 4-16 は EB の走行距離あたりの消費電力量であり、図中の平均総重量とは、バス空車時の総重量に対して、その時間帯のバス乗員数を加えた値である。図 4-16 より、総重量が増加するにつれて、走行距離あたりの消費電力量が大きくなる。なお、測定値のバラツキは、 ± 0.2 kWh/km である。これは、バスの運転手の個性、バスの停車頻度（混雑状況）の違いによるものと考えられ、シミュレーションでは、図中の点線で示した平均値を用いた。

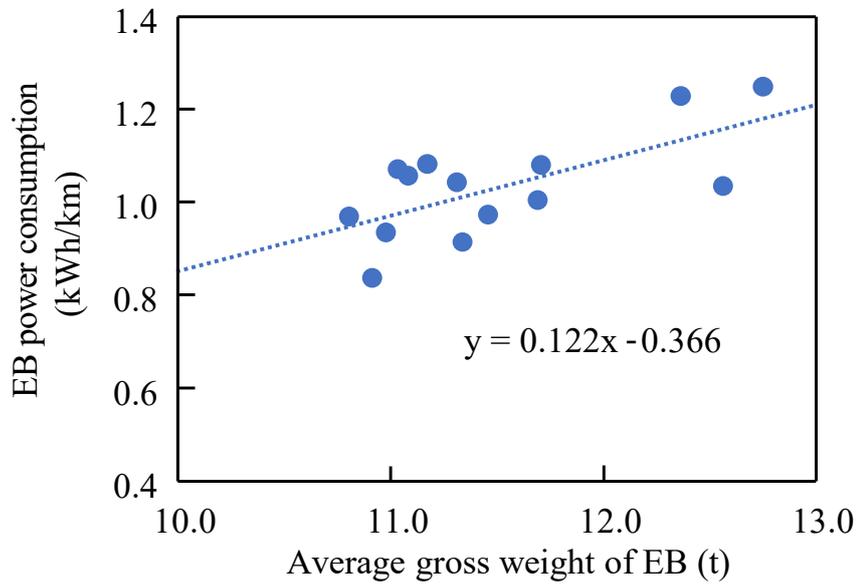


Fig. 4-16 EB power consumption per traveling distance

4.2.3 計算条件

4.2.3.1 気象条件

PV 発電量, 空調機と HP 給湯器の消費電力推定に用いた気温および水温の時系列データを図 4-17 に示す. 2018 年度の 1 時間毎の時系列実績値を用いた.

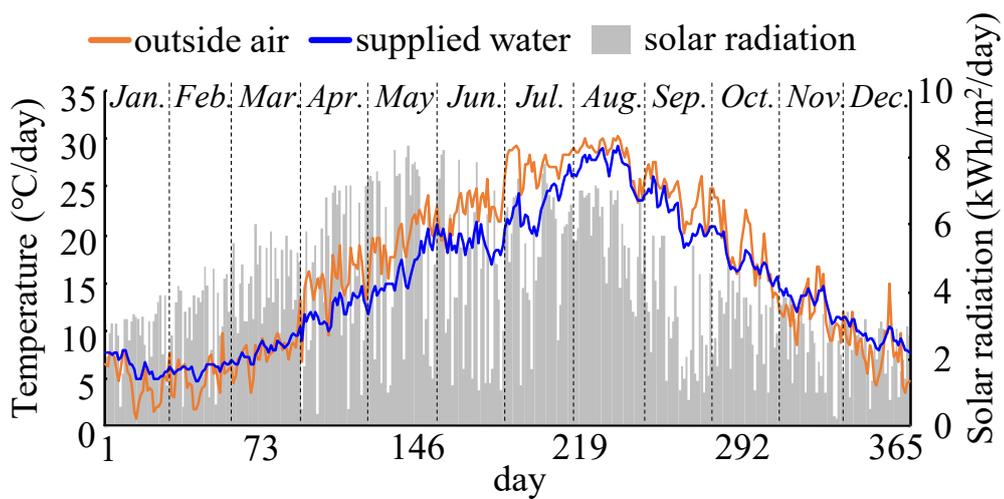


Fig. 4-17 Meteorological data (temperature and solar radiation)

4.2.3.2 各機器の仕様

計算に用いた各機器の性能と諸元を表 4-3 に示す。本検討では、PV はネクストエナジーア
ンドリソース社のパネル、EV 用電池は日産リーフ、電動バスは BYD、バッファ用定置型蓄電
池と V2H はニチコンの製品を想定し、その性能に基づく。

PV の設置出力は、最大で EV1 台あたりの駐車面積 12.5m² (設置出力:2.4kW) とした。ま
た、EB の諸元は、表 4-2 に示す性能のものを使用した。

Table 4-3 Performances of each equipment

| 【Photovoltaic Power Generation】 | |
|---|----------------------|
| Maximum Power | 240 W |
| Output per Unit Area | 190 W/m ² |
| 【EV】 | |
| Battery Capacity Commuting / Daily Use | 40 / 40 kWh |
| Power consumption rate | 0.110 kWh/km |
| Available capacity of battery | 20 ~ 100 % |
| 【Heat Pump Water Heater】 | |
| Heating Capacity | 6.0 kW |
| Storage Tank Capacity | 460 ℓ |
| Boiling-Up Temperature | 65 °C |
| Hot water Supply Temperature | 42 ~ 43 °C |

4.2.3.3 路線の運航条件

JR 岐阜駅⇔岐阜大学間は 7.5km で、岐阜大学⇔岐阜大学病院間は 0.9km であり、路線内
の標高差は 12m である。図 4-18 に、現行のダイヤグラムから臨時便や快速便を除いた、検討
に用いた定期便のダイヤグラムを示す。この本数を満足するため必要な EB の台数は、5 台と
なった。

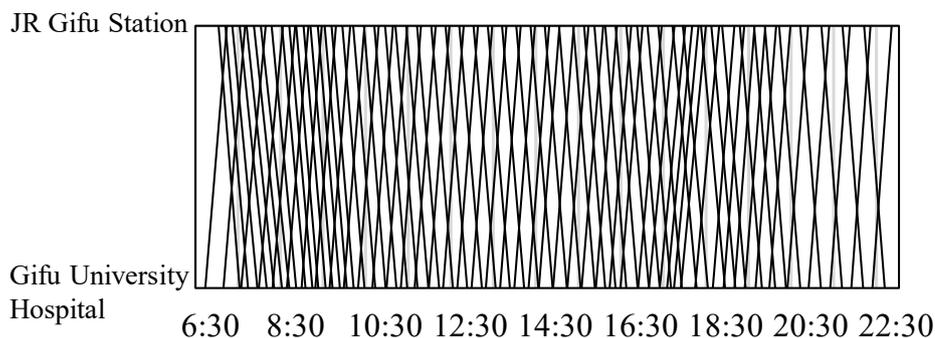


Fig. 4-18 Bus traveling diagram

4.2.3.4 EB への充電方法

充電に必要な電力は大学構内に設置した PV から供給する。バスが岐阜大学内に停車していないなどの理由で、充電が必要ない場合は、バッファ用の蓄電池に PV 電力を充電する。夜間、雨天時および冬季などで、PV 電力だけでは EB の電力需要をまかなえない場合は、系統電力から補う。

充電器の仕様を表 4-4 に示す。充電器の充電出力は 100kW、充電器の接続口は 2 口とし、バッファ用蓄電池容量は最適な容量を 0~1000kWh の中で求めた。充電時間は、最低 15 分以上とし、電源プラグ取り外し等の操作時間は 3 分とした。

Table 4-4 Performances of charging system

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Maximum output power | 100 kW |
| Charger connection port | 2 port |
| Stationary battery capacity | 0 ~ 1,000 kWh |
| Minimum charging time | 15 min |

なお、CO₂ 排出係数は、系統電力 0.431 kg-CO₂/kWh (2019 年度中部電力)⁽²⁰⁾、軽油 2.81kg-CO₂/ℓ、ガソリン 2.62 kg-CO₂/ℓ、LPG 3.48 kg-CO₂/kg、灯油 2.65 kg-CO₂/ℓ を用いた⁽²¹⁾。

4.2.4 計算結果と考察

4.2.4.1 EB における空調消費電力量の影響

EB の空調機消費電力量について、月毎の消費電力量を推定した結果を図 4-19 に示す。これより、走行消費電力量の月間差はなく一定だが、空調消費電力量は季節毎で異なる。また、年間の空調消費電力量は、平均で EB 全体の消費電力量の 3 割程を占めている。特に、冬季の暖房にヒータを使う場合には、EB 全体の消費電力量の約半分が空調機であることから、電動バスの消費電力を評価するには、走行だけでなく空調消費電力の評価も合わせて行う必要がある。

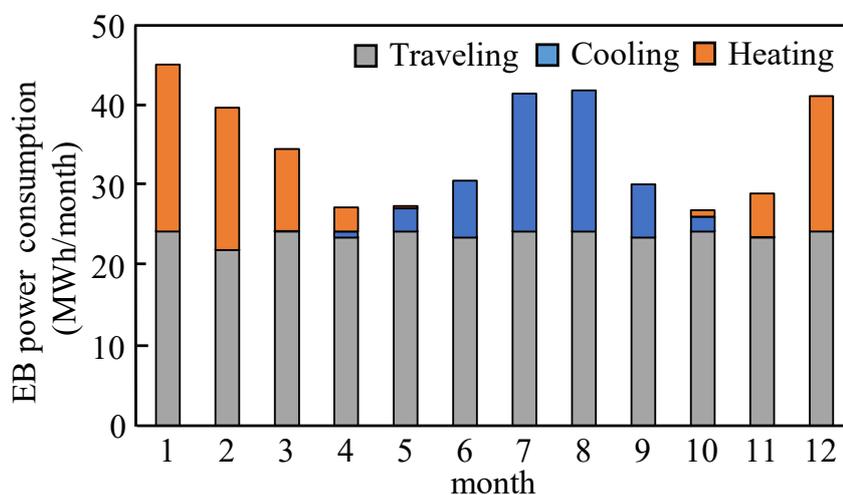


Fig. 4-19 Impact of air conditioners on EB

この消費電力量を基に、EB の運行に必要な PV 設置出力とバス消費電力量の PV 代替率 (=EB の PV 電力消費量/EB の全消費電力量) の関係を図 4-20 に示す。

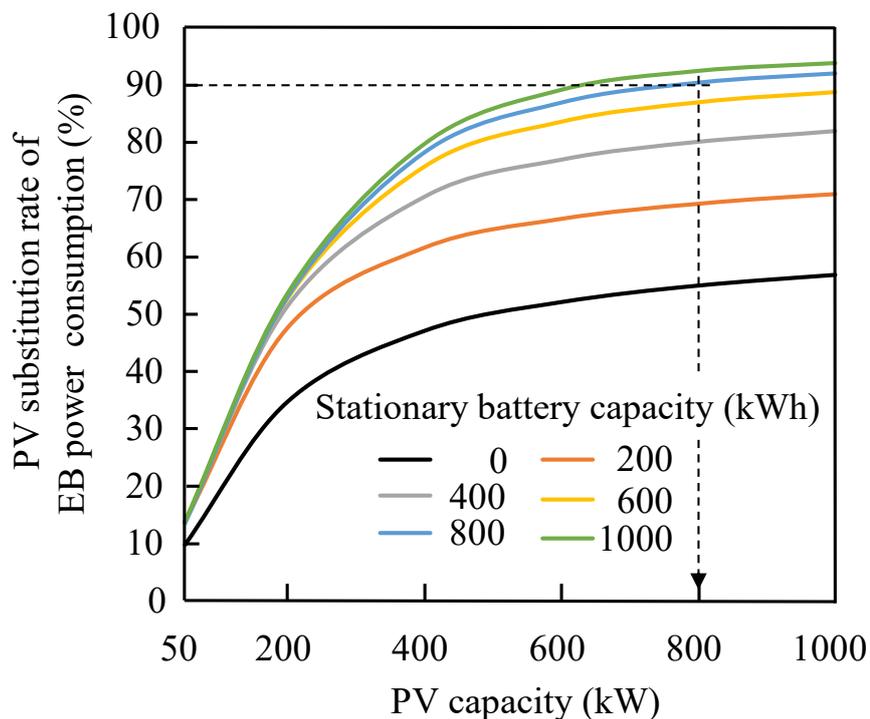


Fig. 4-20 Relationship between PV capacity and PV substitution rate

図 4-20 より, PV 代替率はバッファ用の定置型蓄電池の容量と PV 設置出力が増加に伴って, PV 代替率が増加する. バッファ蓄電池の容量増加に伴う代替率の増加は, バッファ用蓄電池から夜間に電力を充当する率が増えるためと考えられ, 本ケースでは, バッファ用蓄電池が 800kWh 以上にしても PV 代替率が増加しないことが分かる. これは, 太陽が出ていない夜間や早朝に走行する便数に依存していることから, 岐阜大学病院路線ではバッファ用蓄電池容量を 800kWh とした.

図 4-21 に, バスの PV 代替率が 90%となる時 (PV 設置出力 800kW) に, EB の車載電池容量を変化させた結果を示す.

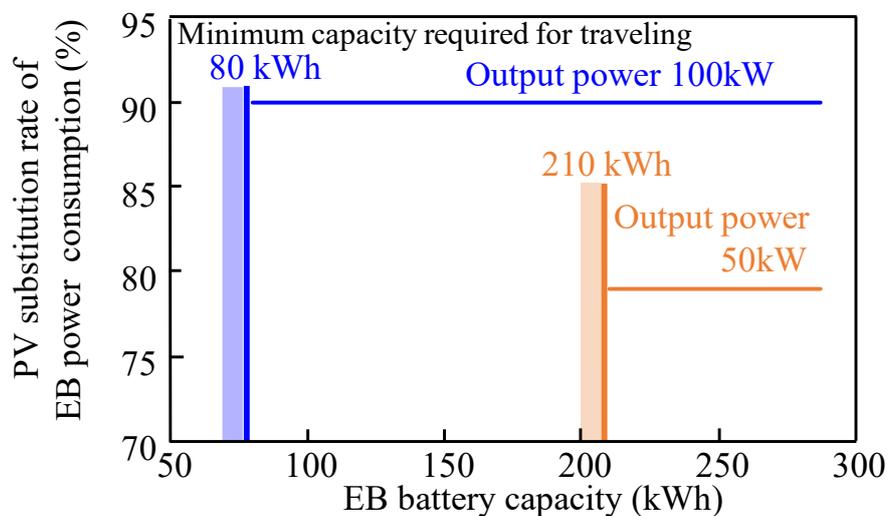


Fig. 4-21 Relationship between EB battery capacity and PV substitution rate

これより、EB の車載蓄電池容量を 287 kWh/台から 80 kWh/台に減少しても、PV の代替率がほとんど変化しないことが分かった。これは、JR 岐阜駅⇄岐阜大学病院間の走行距離が 8.4 km と短く、また、終点の岐阜大学病院に停車している際に 15 分以上 PV 電力を充電できる機会があることから、車載蓄電池の容量が路線長に依存して小さな容量で済むためと考えられる。このことは、充電出力が 100 kW から、50 kW に減少すると、PV 代替率が約 10% 低下することからも裏付けられる。したがって、近距離の路線に EB を導入し、PV から電力供給する場合、充電出力が大きければ、EB の車載蓄電池容量を小さくでき、初期導入コストを抑制できる可能性があることが分かった。

4.2.4.2 統合システムの効果

4.2.4.2 節の検討結果に基づき、EB の車載蓄電池容量を 200 kWh/台、バッファ用蓄電池容量を 800 kWh とし、勤務先 (岐阜大学) に設置した PV、EB、通勤用 EV および家庭を統合したシステムの効果について検討した。

統合システムの効果として、PV を EB に供給するためだけの目的で設置した、バス単独シス

テムの結果を図 4-22 に示す. 図 4-22 より, PV 設置出力を余剰発生率が 10%以下になるようにした場合, EB が受電する全体消費電力量 420 MWh/年の内, PV 電力供給量が 280 MWh/年, 系統電力供給量が 140 MWh/年になるため, PV 代替率は 67% ($=280/420 \times 100$) になる. この理由は, EB 以外に PV 電力の使用先がないためである.

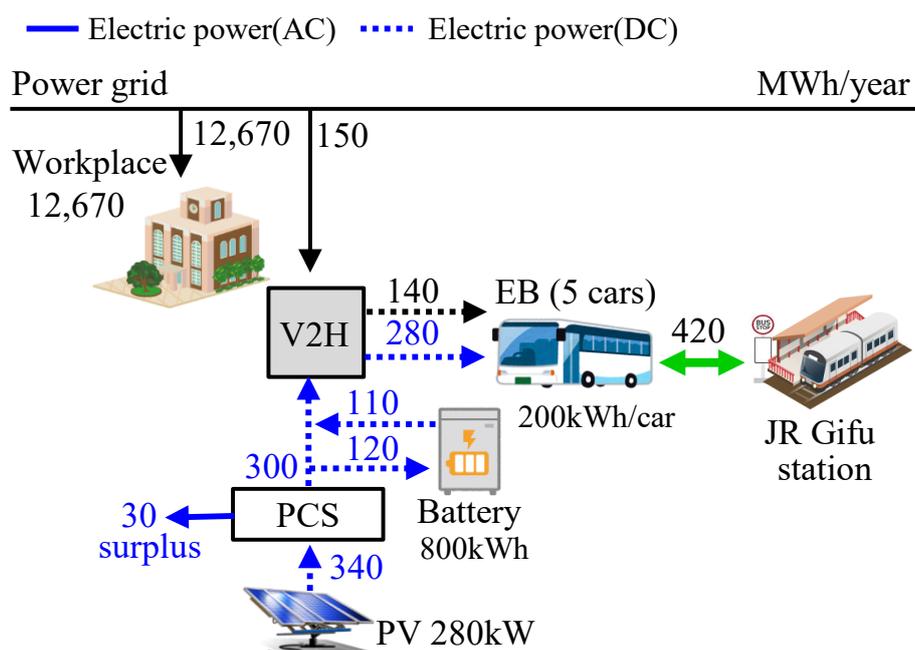


Fig. 4-22 Energy balance of PV&EB system

一方, PV の電力を EB の終点である大学の需要と統合化してマネジメントした場合を図 4-23 に示す. 図 4-23 より, 余剰発生率が 10%以下になるように, PV 出力を設置した場合でも, PV の設置出力は 280 kW から 3,600 kW へ増加できる. この理由は, EB が受電する全体消費電力量 420 MWh/年の内, PV 電力供給量が 400 MWh/年を占めるため, EB の PV 代替率は 95% ($=400/420 \times 100$)になる. なお, 大学は, 特別なことをしなくても大学の年間消費電力量 12,670 MWh/年の内, PV 電力量が 3,120 MWh/年供給されるため, 大学の PV 代替率は 20%以上になる. 更に, 家庭と通勤車を加えて, PV, EB, 通勤用 EV および家庭を統合したシステムの効果を図 4-24 に示す.

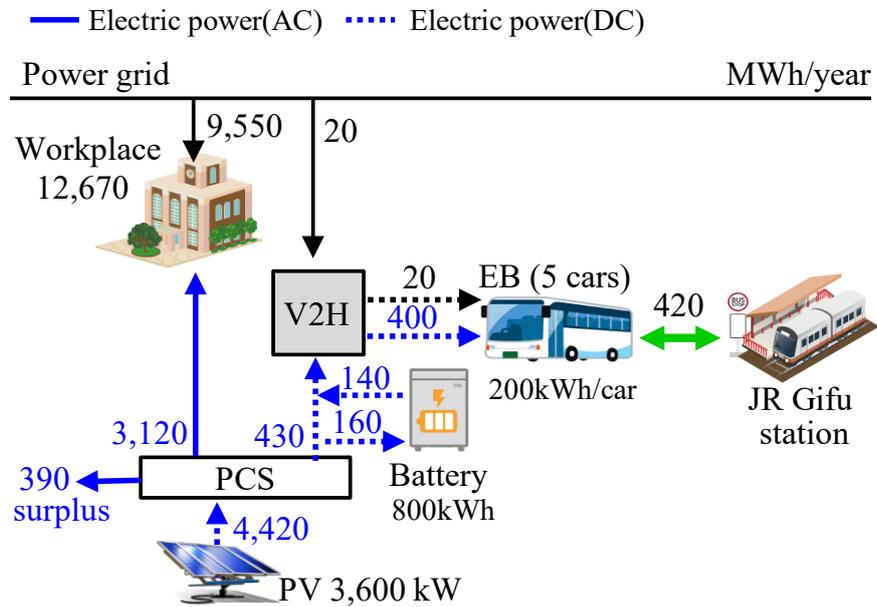


Fig. 4-23 Energy balance of PV, EB & workplace integrated system

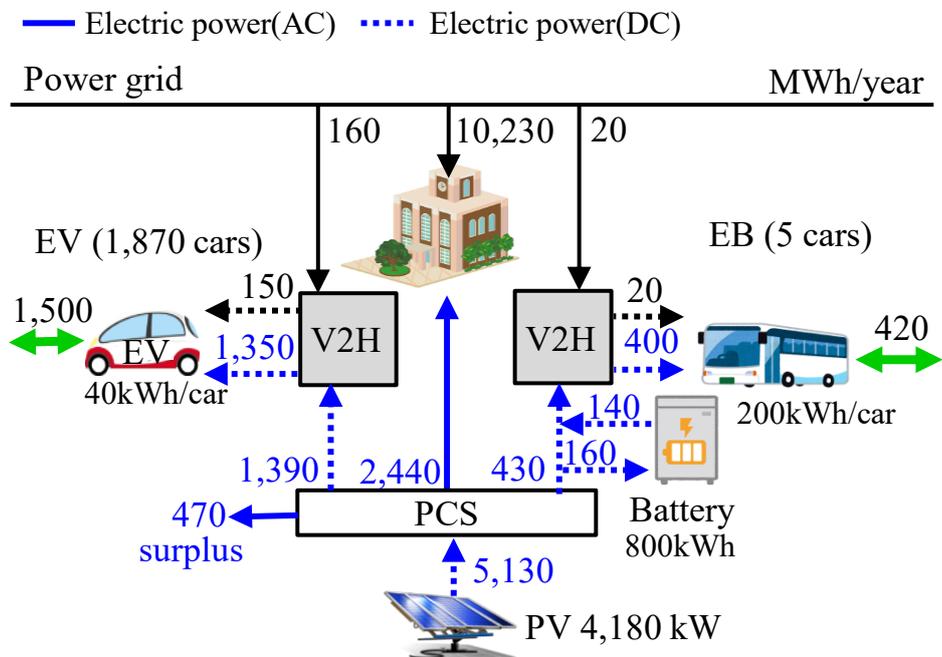


Fig. 4-24 Energy balance of PV, EB, Commuter EV & workplace integrated system

図 4-24 より, この統合化の効果として, 大学における PV の設置出力を図 4-23 の 3,600 kW から 4,180 kW へ $1.16 (=4,180/3,600)$ 倍増加できる. なお, 今後の課題として, 本ケースでは EB の充電に必要な 800 kWh のバッファ用蓄電池が必要だが, 全ての通勤車の蓄電池容量を合計すると, 74,800 kWh ($=40 \text{ kWh/台} \times \text{通勤車 } 1,870 \text{ 台}$) であり, バッファ用蓄電池の 90 倍以上の容量がある. この通勤車の蓄電池を EB の充電調整に使用すれば, 高価なバッファ用蓄電池が不要にでき, 経済性が向上する.

PV&EB 単独システム (図 4-22) , PV, EB および大学統合システム (図 4-23) , PV, 通勤用 EV および大学統合システム, PV, EB, 通勤用 EV および大学統合システム (図 4-24) の各ケースの CO₂ 排出量を図 4-25a~d に示す. これより, PV の余剰発生率が 10%以下でも, 図 4-25a, b, c, d と統合化がより大きくなるに従って, PV の設置出力を大幅に増加することができ, CO₂ 排出量の削減効果を統合システム全体として大きくできる.

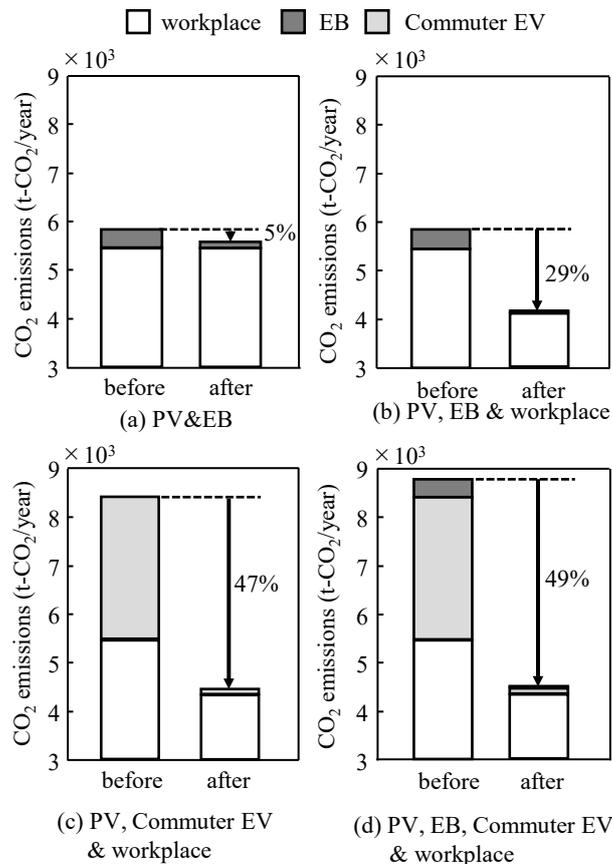


Fig. 4-25 Comparison of CO₂ reduction effect in each case

4.2.5 まとめ

本研究では、岐阜市内のバス路線における太陽光発電と電気バスを統合化し、鉄道と同様に終点の岐阜大学構内に設置した太陽光電力を電動バスへ供給することによるシステムの効果について検討した。得られた結果は以下の通り。

- PVの発電量, EVとEBの走行と空調の電力消費, 家庭と大学の電力消費を組み合わせ、時系列に電力収支を解析する統合シミュレータを構築した。
- JR 岐阜駅⇔岐阜大学病路線 (片道 8.4km, 91 本/日) に対して, PV と組み合わせた EB の導入を検討した結果, 大学の消費電力と統合化したシステムを導入することにより, EB の消費電力量 (走行+空調) の 95%を PV で代替できる。
- PV, EB, EV, 家庭および大学の統合化では, より大きな統合を行うことにより, PV 電力の余剰発生率が 10%以下でも, PV の設置出力を大幅に増加することができ, CO₂ 排出量の削減効果を統合システム全体として大きくできる。

第5章 家庭部門への適用

本章では、家庭部門の電動車として自家用車を例にとり、様々な家庭(一戸建住宅, 集合住宅)における太陽光発電と自家用 EV, 貯湯槽を統合化し、家庭と勤務先に設置した太陽光電力を EV への供給することによるシステムの効果について検討した。

5.1 一戸建て家庭における太陽光発電と自家用車, 貯湯槽の統合化

5.1.1 統合システムの概要

提案するシステムの家庭一戸を対象にした具体的な構成例を図 5-1 に示す。図 5-1 は、家庭に通勤用と日常・レジャー用の 2 台の自家用車を保有する住居形態の例である。エネルギー発生源として、勤務先と家庭に駐車場面積に相当する PV を設置する。エネルギー消費機器として、給湯にはヒートポンプ(HP)給湯器, 厨房には電磁調理器, 冷暖房の空調はエアコン, ホットカーペットを使用する。EV は、勤務先または家庭に駐車している時に、PV から充電される。PV の電力は、EV の蓄電池が満充電, または EV が駐車していない場合には、それぞれ勤務先や家庭で使用される。なお、PV 電力が EV 充電と家庭の需要以上に発生する場合には、HP 給湯器へ供給して電力を温水として蓄える。

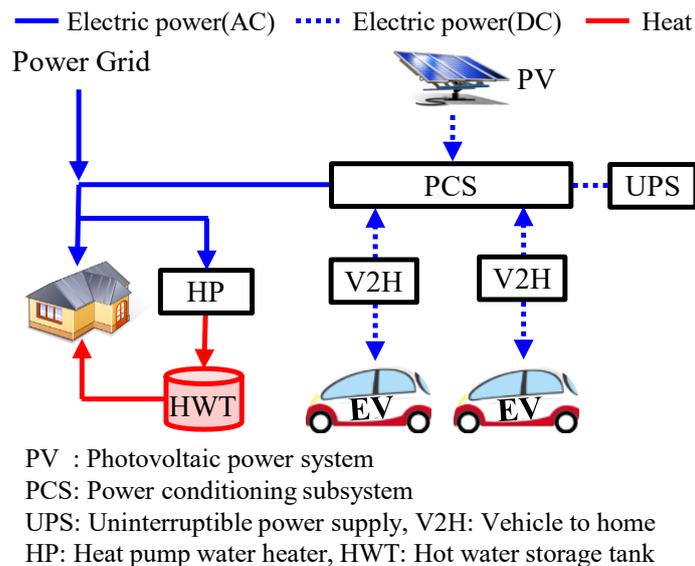


Fig. 5-1 Apparatus configuration of the proposed system

5.1.2 検討方法と条件

ガソリン車を使用する従来のシステムを基準として、本システムの効果を検討した。検討には、第3章で述べたPV発電量、家庭と勤務先の熱と電力の消費量、および空調機の電力消費を含む電動車両の走行電力消費の収支を時系列に計算するサイバーフィジカルシミュレータを用い、CO₂排出量、蓄電池の利用率およびPV電力の余剰発生率(=余剰電力/発電量)を評価した。

計算に用いた各機器の性能と諸元を表5-1に示す。

Table 5-1 Performances of each equipment

| 【Photovoltaic Power Generation】 | |
|---|----------------------|
| Maximum Power | 240 W |
| Output per Unit Area | 190 W/m ² |
| 【EV】 | |
| Battery Capacity Commuting / Daily Use | 16 / 40 kWh |
| Power consumption rate | 9.1 km/kWh |
| Available capacity of battery | 20 ~ 100 % |
| 【Heat Pump Water Heater】 | |
| Heating Capacity | 6.0 kW |
| Storage Tank Capacity | 460 ℓ |
| Boiling-Up Temperature | 65 °C |
| Hot water Supply Temperature | 42 ~ 43 °C |

PV設置面積は、勤務先は駐車場1台あたりの面積12.5m²(設置出力:2.4kW)とし、家庭はシステム全体(家庭と勤務先)のPV余剰発生率が5%となる面積とした。HP給湯器は、湯沸かし時はヒートポンプサイクル(COP=3~5)を使用し、保温・昇温では電気ヒータを使う条件とした。

EVは実使用データを基にした。EVの蓄電池容量は1年間で最も長い連続走行距離を満足するように決定した。通勤車は勤務先と自宅の往復通勤で使用し、通勤距離は往復25km/日である。日常用途車は、ある家庭の1分間隔の時系列走行実績(年間平均17km/日、最大270km/日)を用いた。

また、PV発電量、家庭と勤務先の電力消費、空調機とHP給湯器の電力消費推定に用いた

気温および水温の時系列データは、2016 年度の 1 時間毎の時系列実績値を用いた。なお、PV 電力は系統へ一切逆潮流しない条件とした。

5. 1. 3 計算結果

5. 1. 3. 1 一戸建て家庭における統合システムのエネルギー収支

まず、従来のシステムでの岡山県のある家庭(一戸建て)の 1 年間のエネルギー収支を図 5-2 に示す。勤務先で 9,380kWh/年、家庭で 4,430 kWh/年の系統電力を使用している。また、自動車 2 台でガソリンを 1,230 ℓ/年、家庭の給湯と厨房で LPG を 360 kg/年、暖房で灯油を 160 ℓ/年消費している。系統負荷は 14,380 kWh であり、損失は 570kWh/年の発生する。

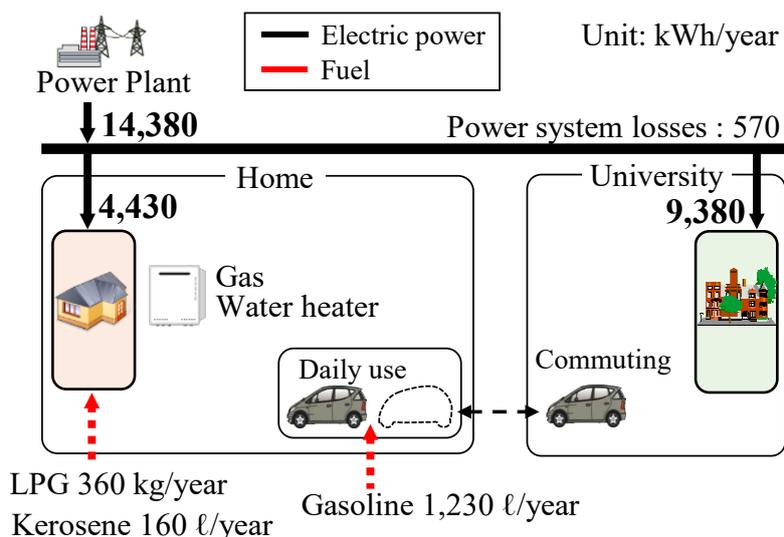


Fig. 5-2 Energy balance of conventional system

次に、統合システムのエネルギー収支を図 5-3 に示す。統合システムの導入により、使用機器が電化されるので、LPG、ガソリンおよび灯油の使用量がゼロになる。また、発電した PV 電力は、約半分が EV へ供給され、その半分以上が家庭へ供給される。その結果、家庭の系統購入電力量が 2,500 kWh/年削減され、CO₂ 排出量は図 5-4 に示すように 85%削減される。

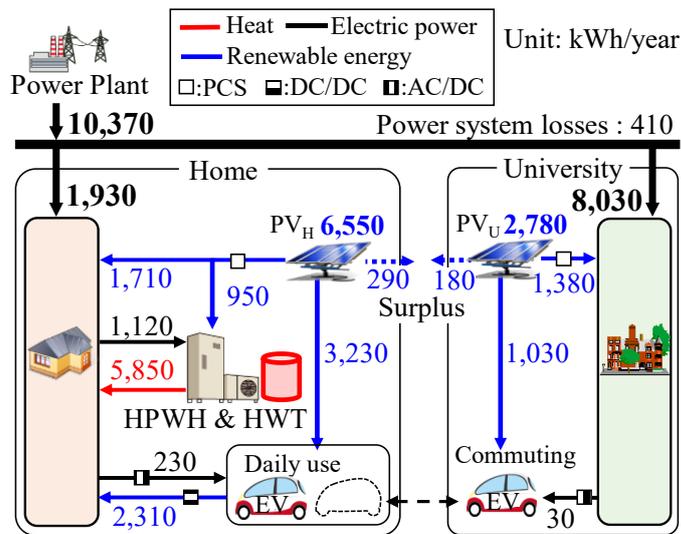


Fig. 5-3 Energy balance of the proposed system

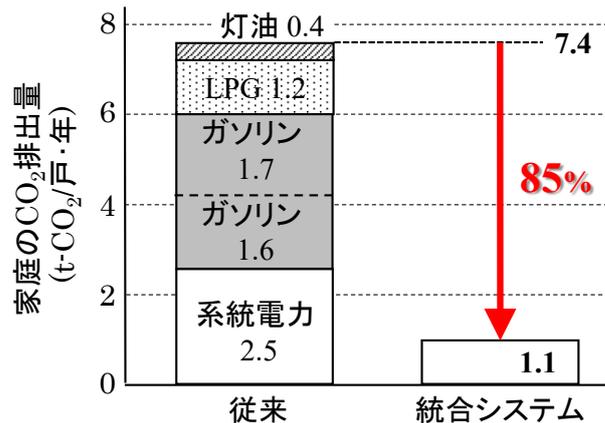


Fig. 5-4 Comparison of CO₂ emissions

5. 1. 3. 2 時間帯別変動の調整

図 5-3 の結果において、2016 年 7 月 16 日～31 日の系統からの電力供給は、図 5-5 に示すように、殆どゼロになる。図 5-5 の期間における PV 発電量と蓄電池残量および湯沸かしと貯湯量の変化をそれぞれ図 5-6 と図 5-7 に示す。

図 5-6 と図 5-7 では、EV の蓄電池残量や貯湯量による使用側の規制や調整を一切していないが、PV 電力が減少時は、EV の蓄電池だけでなく、貯湯量によって家庭の需要が良く調整されている。この理由は、PV 発電が 2 日間ゼロの場合でも、貯湯と EV の蓄電池の容量が

この家庭の2日以上の電力と給湯需要を賄う能力を持っているためである。これと図 5-5 より、電力の時間帯別消費が異なっても(例えば、別の家庭), 1h 当たりの使用量は最大でも EV 蓄電池の 1/10 以下であり、需給調整は容易にできることがわかる。

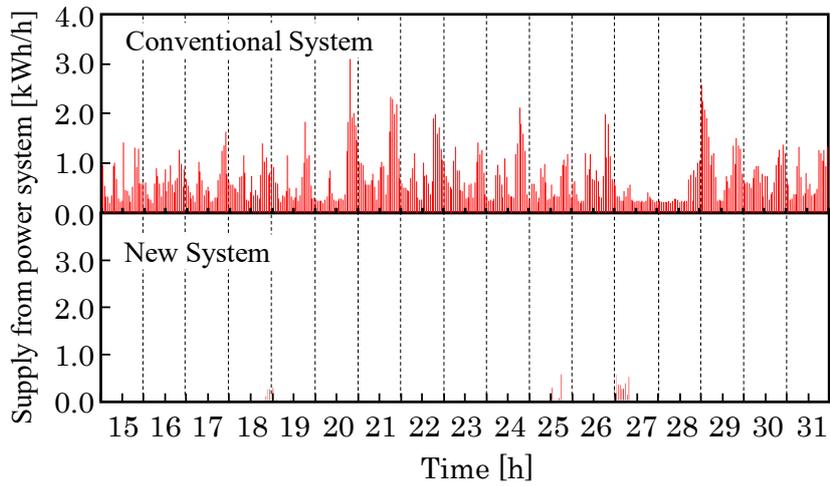


Fig.5-5 Electricity demand of the home

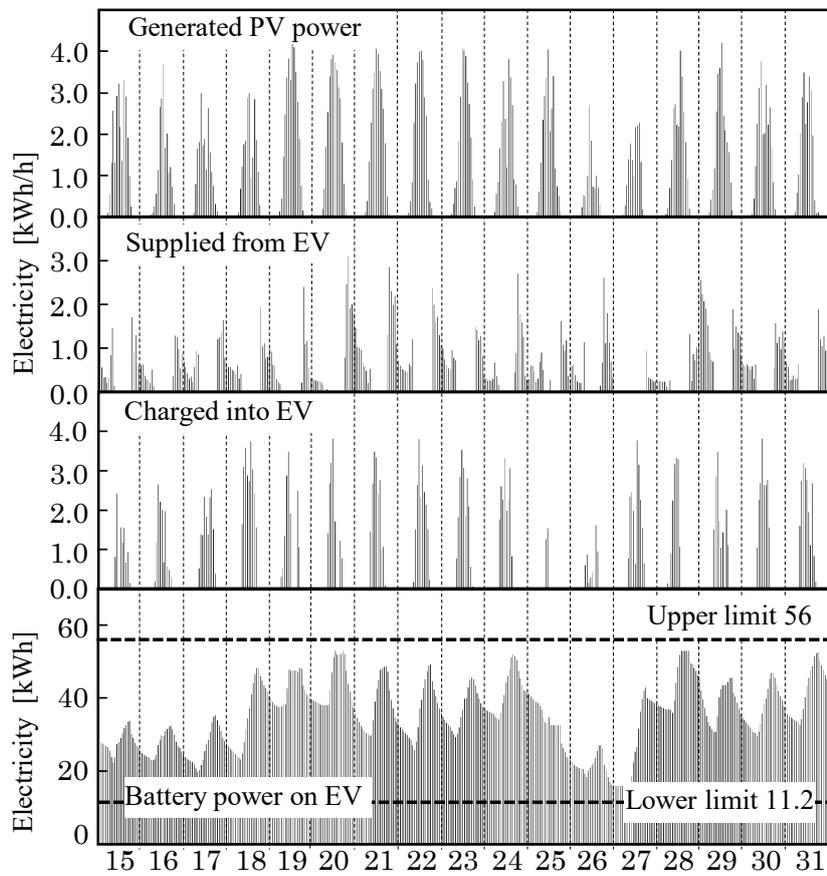


Fig. 5-6 Generated PV power and EV battery level

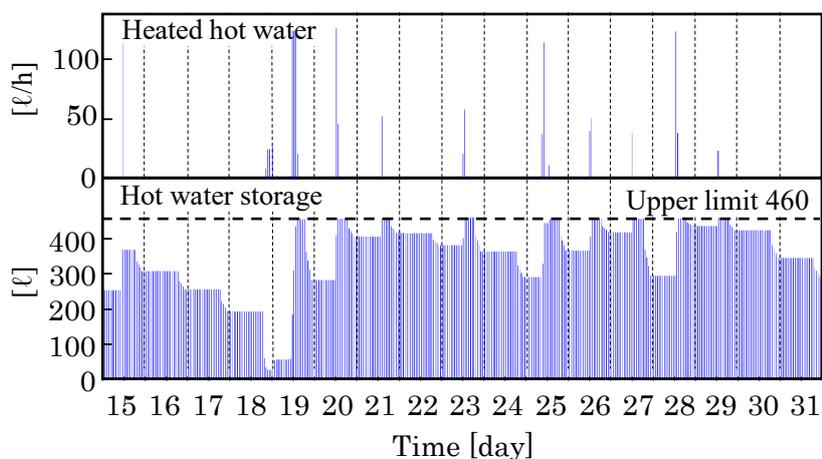


Fig. 5-7 Heated hot water quantity and hot water storage level

5.1.3.3 季節変動の調整

図 5-3 の結果における月毎の電力消費量と PV 電力で充当される電力量を図 5-8 示す. 図 5-8 の電力総需要には EV の走行と車載空調機の駆動に必要な電力量を含んでいる. この季節間の PV 電力充当量の差は, 冬季の PV 発電量が夏季ピーク発電時の半分以下に減少することに起因する. この解決には, 以下の方法が考えられ, 今後の課題である.

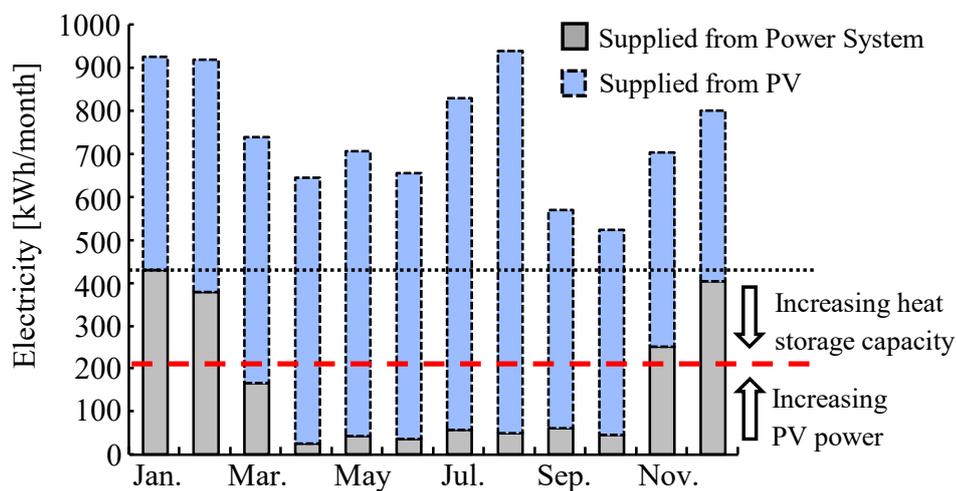


Fig.5-8 Supplied PV power of the monthly

(1)新技術の開発:EV を含む暖房の高効率化や再生可能燃料の活用による冬季の電力消費の削減.

(2)グリッド間融通: PV 設置出力を増加し, 発生した余剰電力は EV を用いてグリッド間で融通するなど.

(3)上記(2)の余剰電力を CO₂ 循環のエネルギー源とする.

5.1.3.4 経済性

本技術の設置費用と経済効果をそれぞれ表 5-2 と表 5-3 に示す.

Table 5-2 Equipment costs (at the time of spread)

| | Unit : thousand yen |
|--|---------------------|
| PV initial Investment (8.0 kW) | 1,870 |
| V2H System (V2H: 2sets, PCS: 1set) | 600 |
| Heat Pump Water Heater | 300 |
| Energy Management System | 50 |
| Installation Construction Work | 780 |
| Difference of Vehicle Price (EV:2 cars)* | 300 |
| Total Investment Costs | 3,900 |

* Included a current subsidies

Table 5-3 Economic effects

| | Unit : thousand yen/year | |
|-------------------------|--------------------------|------------|
| | Base | New System |
| Electricity (Workplace) | 188 | 161 |
| Electricity (Home) | 121 | 53 |
| Gasoline | 197 | 0 |
| LPG & Kerosene | 146 | 0 |
| Total Payments | 652 | 214 |
| Profits | 0 | 438 |

表 5-2 は販売台数が 10 万台を想定した結果であり, 表 5-3 は図 5-3 に示した CO₂ 排出量を 85%削減する場合である. その結果, 単純投資回収は各種の助成なしで 8.9 年と予想される. この理由は, 発電した PV 電力の 80%以上が最終消費に使えることと, 変電所や電線等の設備を経由しないため, PV 電力の流通コストを現状システムの 1/3~1/5 にできることに起因する. なお, PV 発生~消費の総電力コストは家庭では現状の半分以下の 14 円/kWh 以下が可能と試算される.

5.1.4 考察

5.1.4.1 PV 電力の供給ルート最適化⁽²²⁾

PV 電力を、系統経由で EV に供給後に家庭へ供給する場合を図 5-9(a), 直接 EV に充電し、家庭へ供給する場合を図 5-9(b)に示す. PV 電力は直流のため、系統を経由すると、交流⇔直流変換や電圧の昇降を頻繁に行わなければならない、PV 電力の送電損失が大きい. この効率差を表 5-4 に基づき計算すると、図 5-9(a)では $\eta_{PVH}=59\%$ になる. これに対し、図 5-9(b)はこれらの変換が少なく、 $\eta_{PVH}=88\%$ になる. この 1.5 倍(=88/59)の効率差はそのまま PV 設置出力の差になる. つまり、本提案システムは PV 電力を高効率に利用し、PV 設置のコストを大幅に削減する. 加えて、ライフラインのインフラ投資を最小化する.

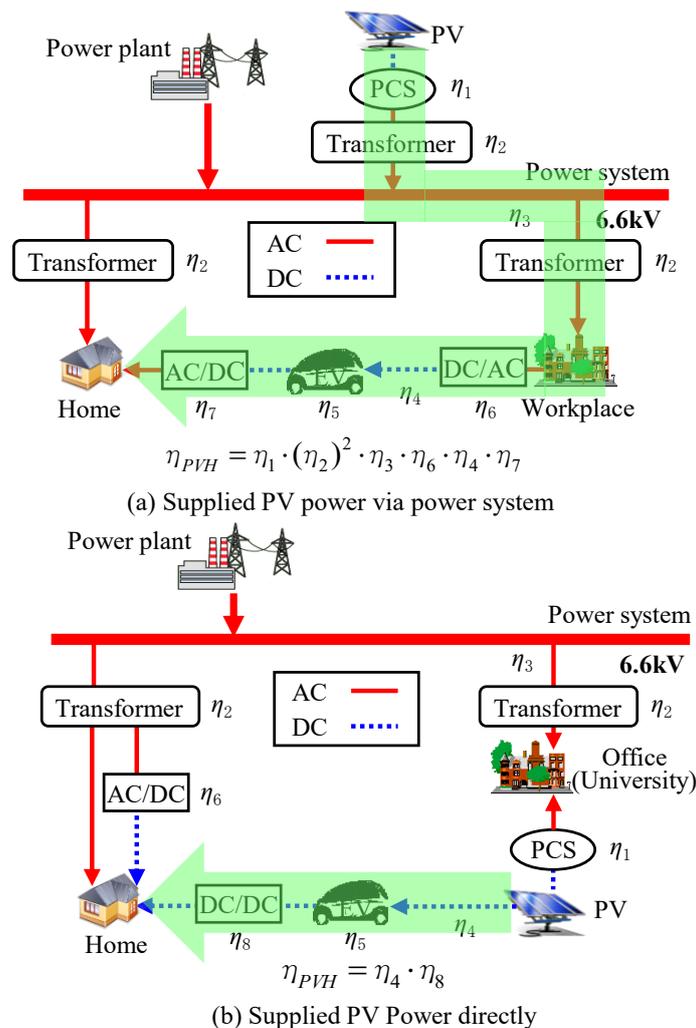


Fig. 5-9 Difference in efficiency the supply way of PV power

Table 5-4 Conversion efficiencies

| | |
|---|------|
| η_1 : PCS effective efficiency | 0.88 |
| η_2 : Transformer efficiency (in the Power System) | 0.97 |
| η_3 : Transmission efficiency | 0.99 |
| η_4 : Charging and discharging efficiency | 0.94 |
| η_5 : Motor efficiency | 0.90 |
| η_6 : AC/DC converter efficiency (charging to EV) | 0.90 |
| η_7 : DC/AC inverter efficiency (supplying from EV) | 0.85 |
| η_8 : DC-DC converter efficiency (supplying from EV) | 0.94 |

5.1.4.2 蓄電池利用の高効率化

図 5-3 における 1 年間の PV 電力発生、家庭と EV の電力消費需給変動を図 5-10 に示す

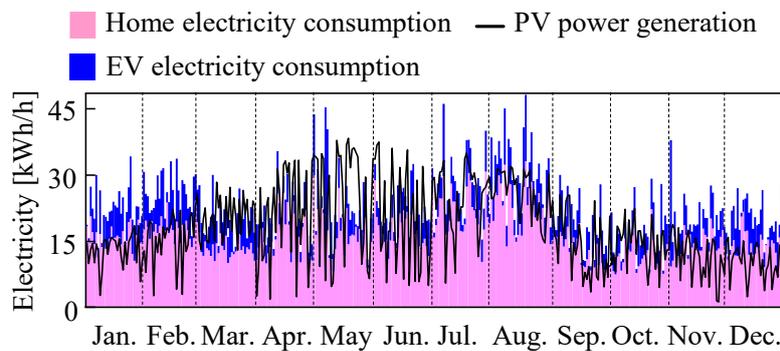


Fig. 5-10 Generated PV power and electricity demand of the home

図 5-10 の需給変動において、本検討で用いた EV に搭載する蓄電池容量の使い方による需給調整能力の差を検討した結果を図 5-11 に示す。

図 5-11 (a)は EV2 台に搭載した合計 56kWh の蓄電池と同容量の需給調整用の定置型蓄電池 56kWh と電動車に搭載する蓄電池 56kWh の合計 112kWh を使い、それぞれの目的に応じて使い分けた場合であり、図 5-11 (b)は EV に搭載した蓄電池を需給調整と EV 用途で兼用した場合である。

図 5-11 (a)より、蓄電池を負荷調整の定置型と EV のそれぞれ単一の用途に使用した場合、定置型では冬場以外満充電が頻発し、一方、EV 用途では常時蓄電池が容量一杯に充電された状態になり、図中の赤で囲った部分の電池容量が有効に使われない。これに対して、需給調整と EV 用途を兼用した図 5-11 (b)の場合は、夏場の満充電頻度が大幅に減少し、蓄

電池が有効に使われている。この理由は、蓄電池は放電しないと、充電できないためである。つまり、定置型は使用先がないので満充電になり負荷調整機能を失うが、車載蓄電池は昼間の走行による放電で需給調整機能を回復しているためである。これより、EV の蓄電池を兼用すれば、高価な蓄電池容量を半分にした上で、更に、蓄電池の利用効率化を高められることが分かる。

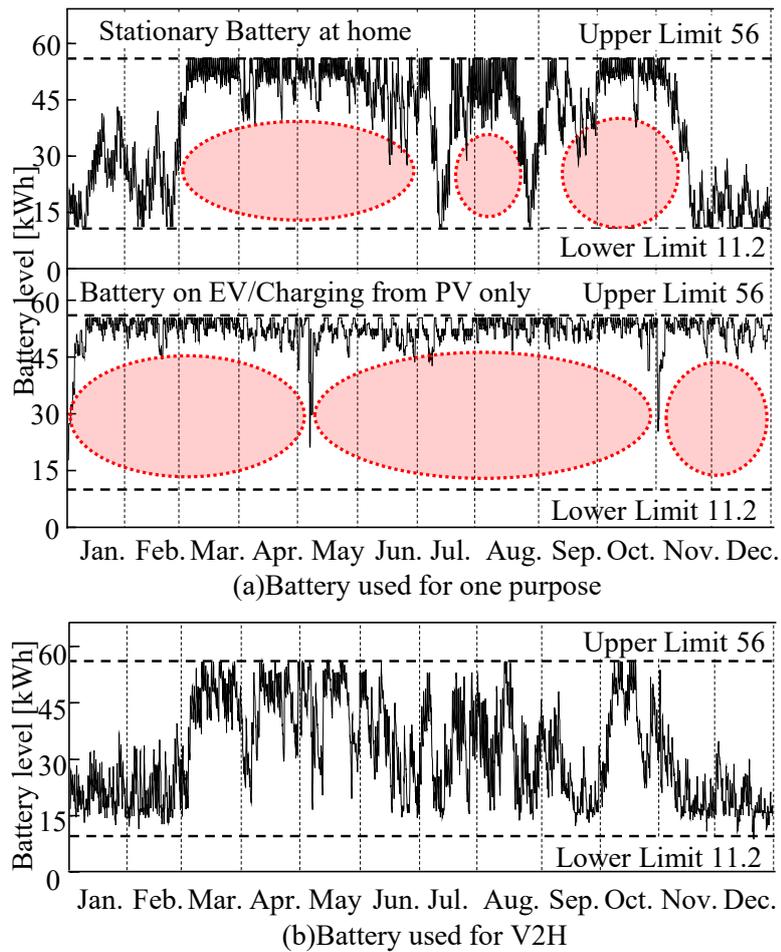


Fig.5-11 Comparison between EV battery and stationary battery

5.1.5 まとめ

一戸建て家庭における太陽光発電と自家用車、貯湯槽の統合化したシステムにおいて、CO₂削減効果および経済性を検討した。その結果は以下の通り。

- 一戸建て家庭の統合システムは、経済的にCO₂排出量を85%削減でき、最適な設計により、CO₂排出量のさらなる削減も可能である。
- 上記において、発生したPV電力の80%以上が最終消費で使用できる。また、PV電力の流通コストを現状システムの1/3～1/5にできるため、家庭向けのPV発生～消費の電力フルコストは14円/kWh以下が可能と試算された。
- この高い経済性は、化石燃料の直接代替、PV電力の送電ルート最適化および蓄電池の高効率利用によって得られる。

5.2 電動車の高性能化による効果

第 5.1 項で述べたシステムを拡大するためには、電動車(EV)の普及が重要になる。しかし、EV は、搭載する蓄電池が高価であり、航続距離が短く、また、電池切れした時のリスクが大きいという課題がある。そこで、これらの課題を解決するために、車載空調機の動力源と走行に必要な電源を統合化した AI-EV(Air-conditioner Integrated Electric Vehicle)が提案されている⁽²³⁾⁽²⁴⁾。AI-EV は車載空調機と走行のエネルギーを総合的に高効率化する電気自動車である。

本項では、AI-EV の自動車としての性能と AI-EV に搭載した蓄電池をエネルギー需給調整装置として使用した場合の CO₂ 削減効果や経済性について検討した。

5.2.1 空調機統合型電気自動車(AI-EV)

AI-EV の装置構成と動力システムの運転イメージを、それぞれ図 5-12 と図 5-13 に示す。

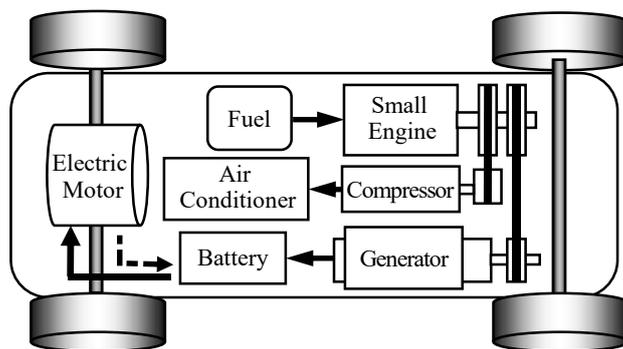


Fig. 5-12 Air-conditioner Integrated Electric Vehicle

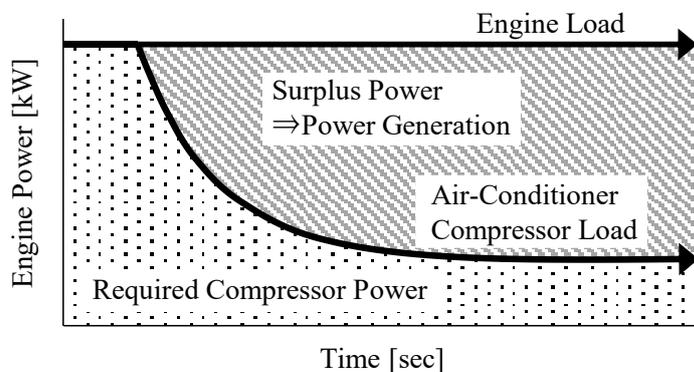


Fig. 5-13 Operation image of AI-EV system

車載空調機にはヒートポンプが用いられており、EV では、その圧縮機を駆動するために電力を用い、蓄電池から供給している。このため、空調機を駆動している時は、走行に使える電力が減少し、航続距離が短くなる。特に、空調負荷が大きい真夏日や冬日では、車載空調機の駆動に蓄電池の約 3 割が使われている。

EV の電力を補う方法として、燃料を用いて発電する Range Extender (以下、RE と記す)⁽²⁵⁾ が提案されている。しかし、RE の搭載車では、発電した電力を空調機に用いる際に、回転動力→発電→充電→回転動力とエネルギー変換を繰り返すため、エネルギー効率が低下する。そこで、AI-EV は、図 5-12 に示すように、空調機を小型エンジンで駆動し、空調負荷の変化に伴う余裕動力を用いて発電も可能な構成にしている。また、EV では、ガソリン車に必要な大型エンジン、ラジエータ、水冷配管、冷却ファンおよび変速機などの代わりに走行用モータを設置する。このため、AI-EV に必要な空冷小型エンジンを設置するスペースは充分確保できると考えられる。

一般に、車載空調機は、図 5-13 に示すように、運転開始直後には最大負荷で運転されるが、車室内の温度が設定温度に近づくに伴いその運転負荷が徐々に低下していく。この空調の運転特性を利用し、AI-EV では、空調機の最大負荷でエンジン出力を設計し、空調負荷が低下する時の余力を用いて発電する。これにより、エンジンを一定負荷で運転でき、高い熱効率が維持できる。勿論、より大きなエンジンを搭載すれば、航続距離の延長効果は大きくなるが、エネルギー効率が低い EV の長所は失われる。

上述した装置構成と運転方法により、空調機の消費電力を削減するとともに、余裕動力で発電した電力を走行に有効利用することができ、航続距離を延長することができる。

5.2.2 自動車としての性能評価

満充電した場合の最大航続距離(連続走行)と実運用を想定した目的地(観光地など)までの実用上の往復可能距離について、EV と AI-EV を比較した。

5.2.2.1 検討条件

検討に用いたEVとAI-EVの条件と共通の空調機の使用条件を表5-5に示す。なお、空調機を起動する際に車室内の最高温度が60°Cを超え、空調負荷が大きい真夏日で検討を行った。

Table 5-5 Calculated conditions

| | | 【EV】 | 【AI-EV】 |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| Battery Capacity | | 24 kWh | |
| Battery Usable Range | | 20~100 % | |
| Power Consumption Rate | | 9.1 km/kWh | 8.9 km/kWh |
| Cruising Speed | | 50 km/h | |
| Engine Displacement | | - | 120cc |
| | | - | 160cc |
| 【Air Conditioning】 | | | |
| | | Cooling | Heating |
| Outside Air | Air Temperature | 32 °C | 5 °C |
| | Relative Humidity | 60 % | 80 % |
| Amount of Solar Radiation | | 800 W/m ² | 0 W/m ² |
| Outlet Temperature | | 10 °C | 50 °C |
| Target Inner Temperature of the Cabin | | 25 °C | 18 °C |
| COP | | 4.4 | 4.7 |

5.2.2.2 最大航続(連続走行)距離

表5-5の条件で、満充電時の連続走行可能距離を図5-14に示す。

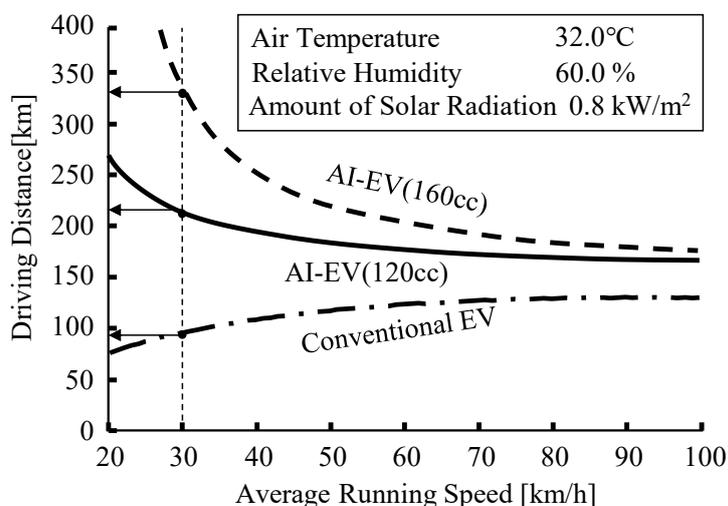


Fig. 5-14 Extend of the maximum driving distance

これより、AI-EV は市街地を想定した平均時速 30 km において、EV の 2 倍以上の最大航続距離を有することが分かった。なお、走行速度が速くなると、最大航続距離は EV では若干延びるのに対して、AI-EV では短くなる。この理由は、走行速度が速くなるほど走行時間が短くなり、それに伴い空調機の運転時間も短くなるためである。つまり、高速走行時は低速走行時に比べて、EV では空調機での消費電力が減少する一方で、AI-EV では空調機の稼働に伴う発電量が減少するためである。

5.2.2.3 実用上の往復可能距離

レジャー用途などを想定して、走行条件として平均車速 50 km/h で、往路 3 時間走行し、観光地などの目的地で 5 時間滞在(自動車は駐車)し、帰りも 3 時間走行する条件とした。

急速充電装置は、その普及に膨大なインフラ投資が必要であり、また、EV が普及した際には、現行のガソリン車に比べて長い充電待ち時間が想定される。そこで、往復に際して、EV も AI-EV も外部装置からの充電は行わない一方で、駐車中に車載装置からの充電は行える条件とした。

EV の走行に伴う蓄電池の残量変化を図 5-15 に示す。これより、EV は行きの 3 時間足らずで電池残量が下限値に達し、120 km 限界であることが分かる。つまり、往復可能な距離は片道約 60 km 以内である。

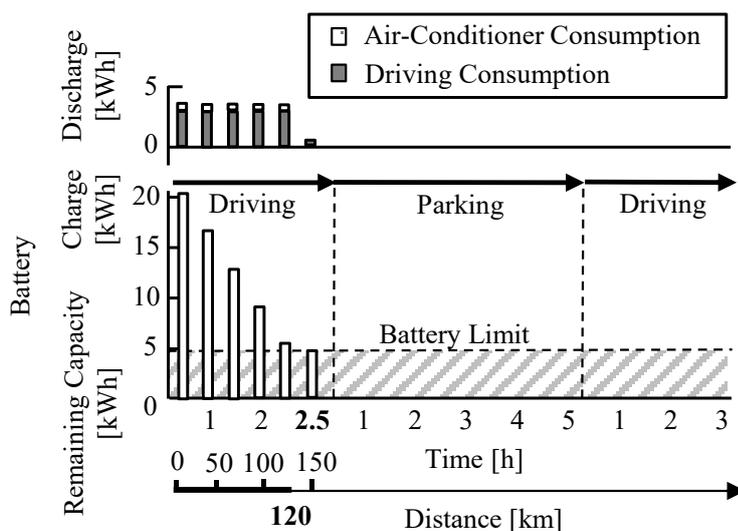


Fig.5-15 Limit driving distance of EV

一方、エンジン排気量 120 cc の小型エンジンを搭載した AI-EV の走行に伴う蓄電池の残量変化を図 5-16 に示す。

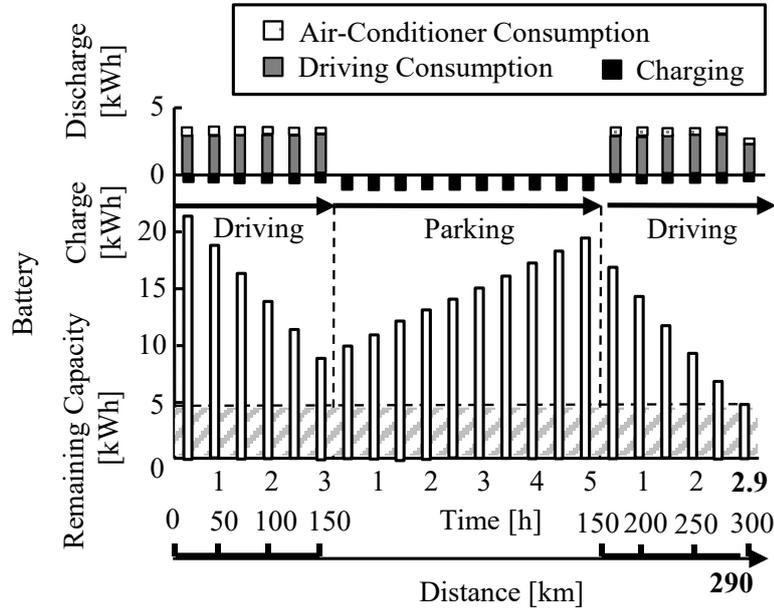


Fig. 5-16 Limit driving distance of AI-EV(120cc)

図 5-16 より、AI-EV は、往復約 300 km、片道約 150km の走行が可能であることが分かる。これは、空調機の圧縮機の動力源が電力から小型エンジンの燃料に置き換わって、空調機の電力消費が削減されたこと、空調機駆動時の余裕動力を用いて走行時に充電できること、更に、駐車時に空調用のエンジンを用いて、発電⇒充電できることの 3 つの理由による。ちなみに、この EV と AI-EV の走行可能距離の違いを、東京を中心とした円で表した結果を図 5-17 に示す。

図 5-17 より、AI-EV は、同じ蓄電池容量を搭載する EV では困難であった東京近郊の主要観光地への日帰りができるようになることが分かる。

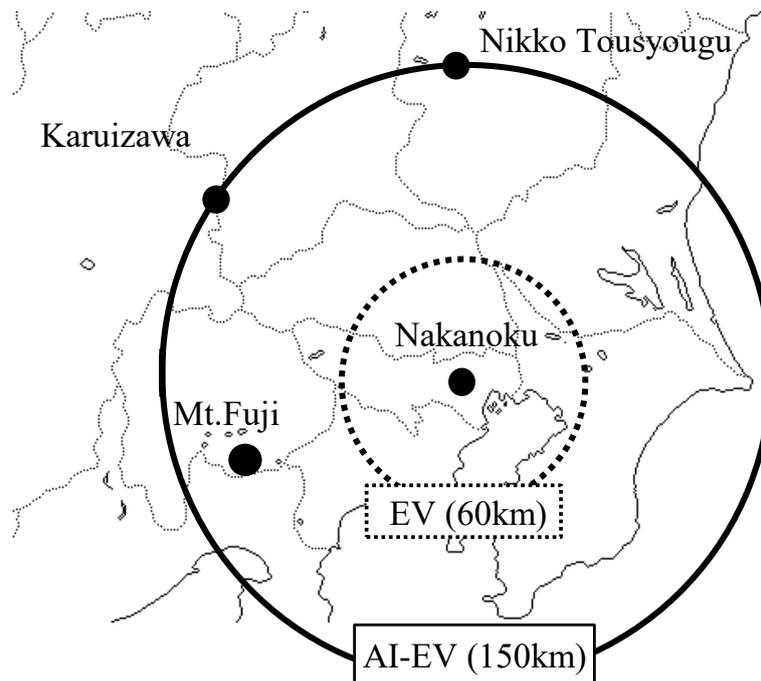


Fig.5-17 Driving Distance from Tokyo(120cc)

5.2.3 エネルギー需給調整装置としての性能評価

EV や AI-EV などの蓄電池を搭載した電動式移動体は走行目的の他に、電力の貯蓄と輸送を行う需給調整装置としての役割が期待できる。また、ヒートポンプ給湯器(以下、HP 給湯器と記す)は給湯タンクが熱需要の調整機能を有する。そこで、PV、HP 給湯器および EV または AI-EV を組み合わせたエネルギーシステムを、大学と家庭のコミュニティへ適用した場合の効果を検討した。

5.2.3.1 検討方法

PV を大学と家庭の両方に設置し、HP 給湯器は家庭のみに設置する。家庭では、通勤車と日常・レジャー用途車(以下、日常車と記す)の 2 台を保有する。PV の電力は通勤者と日常車に搭載した蓄電池を使って、大学と家庭の双方に供給できるものとした。

評価では、サイバーフィジカルシミュレータを用いて、ある家庭と岡山県立大学で実際に使われた1時間毎のエネルギー需要(電力、給湯、自動車を含む燃料消費)を1年間(8,760

時間)に亙り時系列的に満足するように、できるだけ PV 電力を使用し、PV と貯蔵エネルギーで需要を賄えない場合は、系統電力を使用する条件とした。評価指標には、現状のシステムに対する CO₂ 排出量の削減率(=CO₂ 削減量/現状システムの CO₂ 排出量)と新規にシステムを構築する場合の IRR(Internal Rate of Return)を用いた。検討で用いた家庭および大学のエネルギー消費、PV 発電量および気象庁の気温、水温データなどの全てのデータは、2014 年度の1時間毎の実績値を用いた。

なお、PV、HP および EV または AI-EV の効果のみを明確にするため、これら以外の機器(LED 化、その他家電など)の省エネルギー効果は含まない条件とした。

5.2.3.2 検討条件

検討で用いた PV と HP 給湯器の性能条件を表 5-6 に示す。なお、HP 給湯器は湯沸かし時はヒートポンプサイクル(COP=3~5)を使用し、保温・昇温では電気ヒータを使うものとし、COP は外気温と水温で変化する条件とした。

Table 5-6 Performances of Each Equipment

| 【Photovoltaic Power Generation】※ | |
|----------------------------------|----------------------|
| Maximum Power | 240 W |
| Output per Unit Area | 190 W/m ² |
| 【Heat Pump Water Heater】 | |
| Heating Capacity | 6.0 kW |
| Storage Tank Capacity | 460 ℓ |
| Boiling-Up Temperature | 65 °C |
| Reheating Temperature | 90 °C |
| Hot water Supply Temperature | 42 ~ 43 °C |
| Refrigerant | R744 |

EV と AI-EV の性能は表 2 と同じとし、蓄電池容量は、表 5-7 に示すように、走行条件を満足するために必要な容量とした。

Table 5-7 Performances of Vehicle

| 【Vehicles】 | | | |
|---|-------|---------|--------|
| Battery Capacity Commuting / Daily Use | EV | 13 / 40 | kWh |
| | AI-EV | 13 / 21 | |
| Average Commuting Distance | | 28 | km/day |
| Daily Use Maximum Distance | | 260 | km/day |
| Displacement of Engine(AI-EV) | | 120 | cc |
| Fuel of Engine | | LNG | |

表 5-7 より、日常車の最大走行距離は 260km/日であり、通勤車は 28km/日である。このため、EV の日常車は 40kWh 必要だが、AI-EV では 21kWh で良い。一方、通勤車では EV、AI-EV と蓄電池の必要容量は 13kWh である。

搭載する蓄電池容量が変化すると、車両重量が増減するため、走行の電力消費率が変化する。AI-EV は同じ蓄電池容量を搭載する EV に比べて、小型エンジンと LNG 燃料タンクで 30kg 車両重量が増加するが、航続距離が同等の場合には、増加する蓄電池重量で相殺される。このため、日常車では EV の方が AI-EV よりも、60kg 以上車両重量が重くなる。そこで、本検討で対象とした走行条件と車両重量の変化を考慮⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾した電力消費率を理論モデル⁽²⁸⁾で検証した。その結果、日常車の EV は 8.8km/kWh、AI-EV は 9.2km/kWh であり、AI-EV は EV より軽量化されるため、航続距離が延長する。しかし、電力消費率の差を除く AI-EV の効果を分かり易くするため、本検討では、EV も AI-EV も通勤車の電力消費率と同じとした。また、本検討では、PV 電力などの系統への逆潮流は一切行わない条件とし、経済性を左右する PV の余裕電力の発生率(=供給できない電力/PV 発電量)は 3%以下とした。

経済性を評価するための IRR の算出条件を表 5 に示す。なお、表 5-8 は 2014 年の実績値を用いた。

Table 5-8 Calculation Conditions of IRR

| 【Apparatus Unit Price】 | |
|----------------------------------|-----------------------|
| PV & Primary Cost | 250 thousand yen/kW |
| DC/AC Inverter | 40 thousand yen/kW |
| Charging Control Unit | 200 thousand yen/unit |
| Difference of Vehicle Price | 500 thousand yen/unit |
| Difference of Water Heater Price | 450 thousand yen/unit |
| Difference of Cooker Price | 100 thousand yen/unit |
| 【Energy Unit Price】 | |
| Electricity (University Rates) | 20.0 yen/kWh |
| Electricity (Home Rates) | 27.5 yen/kWh |
| Gasoline | 160.0 yen/ℓ |
| Kerosene | 100.0 yen/ℓ |
| LPG | 360.0 yen/kg |
| LNG | 220.0 yen/kg |

5.2.3.3 検討結果

現状システムとの比較結果として、4つのケースの1年間の総CO₂排出量を図5-18に示す。4ケースとは、PVとEVを組み合わせたシステム(PV+EV)、PVとHP給湯器を組み合わせたシステム(PV+HP)、PV、EVおよびHP給湯器を組み合わせたシステム(PV+EV+HP)、PV、AI-EVおよびHP給湯器を組み合わせたシステム(PV+AI-EV+HP)である。図10においてCO₂排出係数は、系統電力0.579 kg-CO₂/kWh(2014年度電気事業者平均値)、LPG 3.48 kg-CO₂/kg、LNG 2.70 kg-CO₂/kg、ガソリン 2.62 kg-CO₂/ℓ、灯油 2.65 kg-CO₂/ℓ、を用いた。

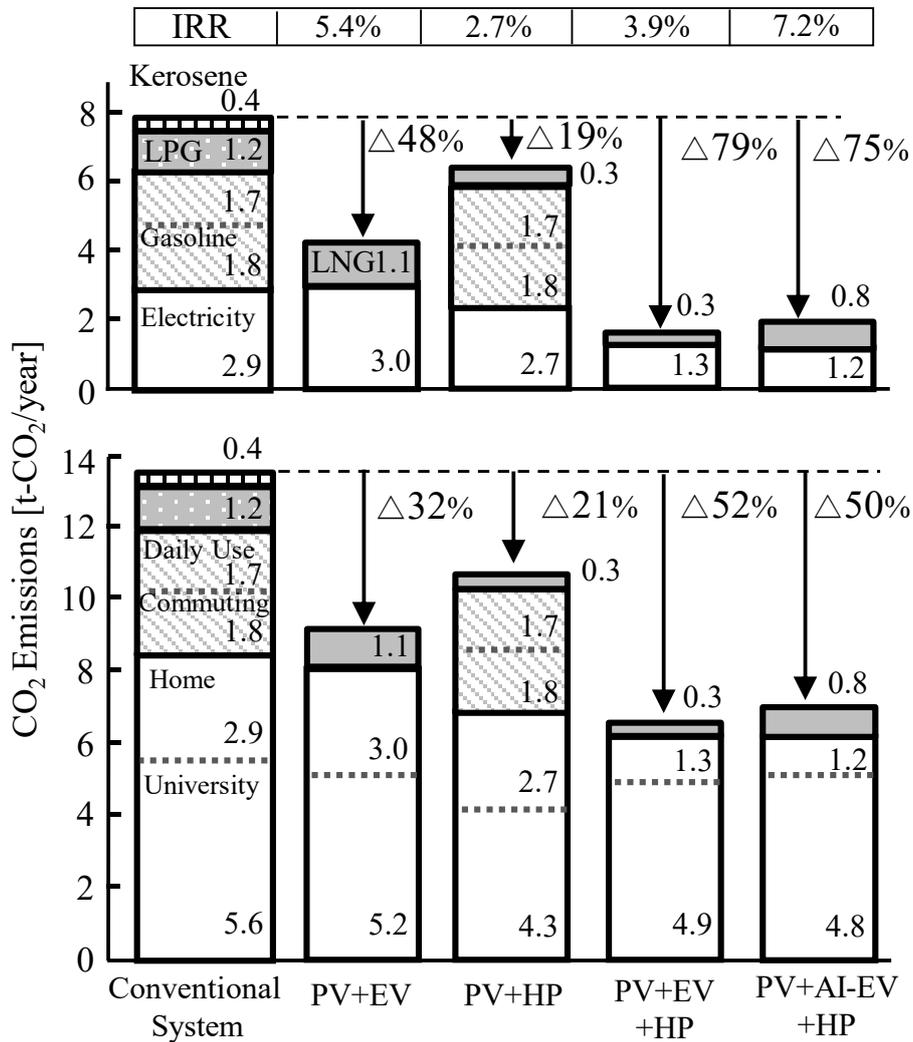


Fig. 5-18 Comparison of CO₂ emissions

図 5-18 より、家庭の CO₂ 排出量の削減率に着目すると、PV+EV と PV+HP それぞれ個別には 48%と 19%で、合計すると 67 %の CO₂ 排出量が削減される。それに対して、3 つを組み合わせると 79 %にその削減効果が拡大される。同様に、PV+AI-EV+HP においてもその効果が 75%へ拡大する。

一方、IRR に着目すると、EV との組み合わせが良くなく、唯一、AI-EV との組み合わせが IRR=7.2%と 6%を超えており、投資可能な仕組みである。この理由として、日常車は、1 回 /1~2 ヶ月に往復 260 km/日の長距離を走行するため、蓄電池の必要容量が 40 kWh と大

きく、蓄電池の初期投資が大きいためである。

この事例から、PV+AI-EV+HP の CO₂ 削減効果は EV との組み合わせよりも若干劣るものの、経済性では優れていることが分かる。その結果、PV+AI-EV+HP の組み合わせは、経済性の高い現実的な手段であり、しかも、家庭の CO₂ 排出量は 75%以上削減でき、コミュニティ全体としては 50%以上の CO₂ を削減できることが分かった。

5.2.4 考察

PV, AI-EV および HP を組み合わせると効果が拡大する理由について、月間別および時間帯別のエネルギー需給バランスと CO₂ 排出量を従来のシステムと比較した結果を図 5-19 に示す。図 5-19 において、従来システムでは、灯油は暖房、LPG は厨房で使用され、新システムでは、LNG は AI-EV と暖房で使用される。なお、電力は系統から供給される量を示した。

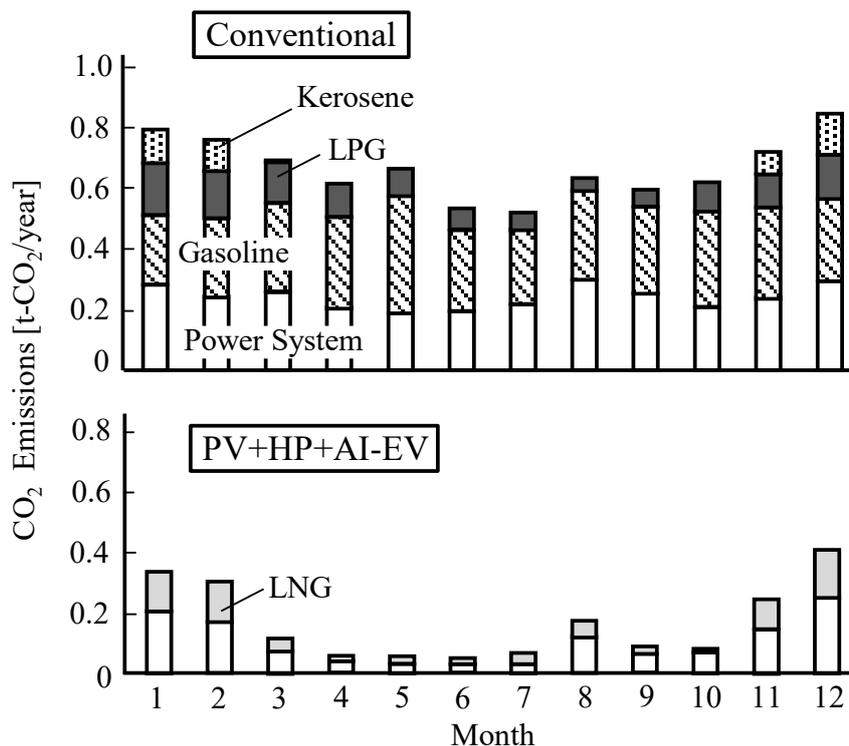


Fig.5-19 CO₂ Emissions of Each Month of HOME

これより、従来システムと比較して、CO₂ 排出量の削減率は 4~6 月に 95%以上に達して

おり、電力以外にガソリンを含む全ての家庭のエネルギー需要の殆どが PV で賄われていることが分かる。その一方で、12月～2月の3ヶ月間は、CO₂排出量の削減率が60～70%程度である。これは、この期間のPV発電量が5月の1/3程度に弱まる一方で、電力や暖房の需要が増大するためである。つまり、このシステムでは、これ以上PV能力を増加すると、発電量が最大になる5月で大量の余裕電力が発生する可能性が示唆される。このことは、図5-20に示す5月の時間帯別の家庭のエネルギー需給バランスから明らかである。

図5-20より、AI-EVに搭載した蓄電池とHP給湯器は昼間のPV発電量を蓄積し、必要な需要に充当しており、家庭の需給調整において、大きな調整能力を有していることが分かる。更に、図5-19の結果と合わせて考えると、家庭の電力需給調整に必要なEVの蓄電池の容量は20kWh以下で充分であり、経済性を高めるためには、EVに搭載する蓄電池をできるだけ小さくする工夫が極めて重要なこともわかった。

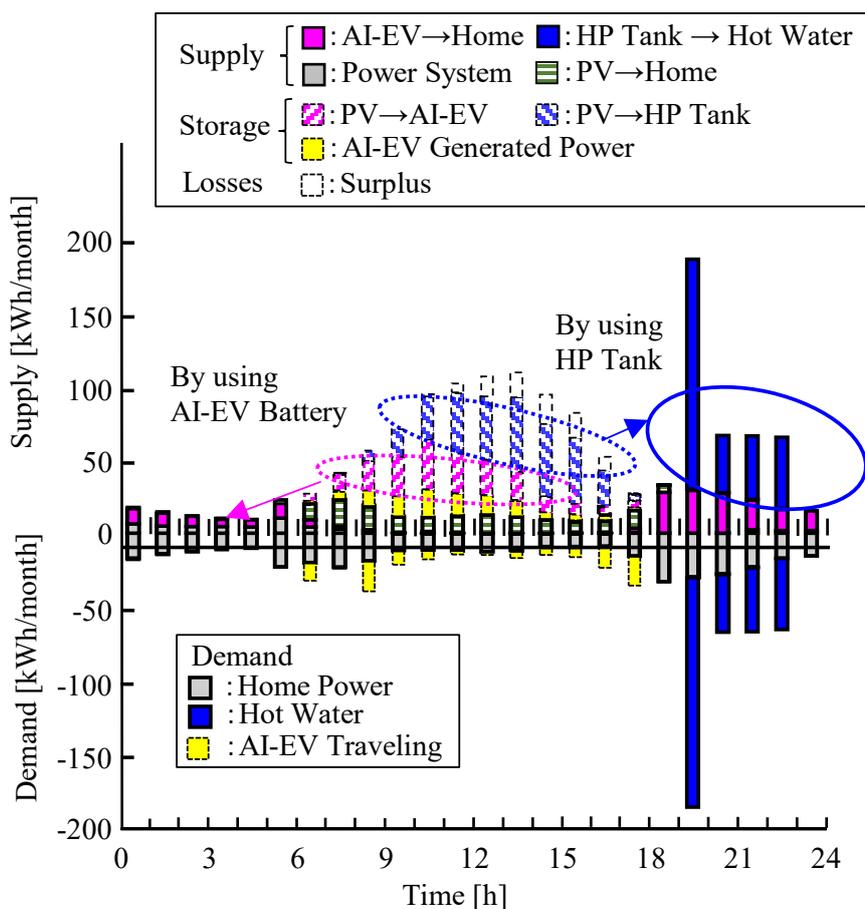


Fig. 5-20 One Day Energy Consumption at Home

ちなみに、5月は休日が多く、休日には大学や家庭に AI-EV が駐車していないため、余裕電力の発生が増加し易い。このため、5月は1年間で発生する余裕電力の約50%が1ヶ月の間に発生する。

したがって、更なる CO₂ 削減を行うためには、季節間の熱需要を調整する機能が必要になる。この点については、図 5-18 より、検討したケースでは、AI-EV の年間の燃料需要は、家庭で使用する化石燃料を 15%以下にできることから、米国のように E10⁽²⁹⁾が達成されている国では、バイオ燃料を用いる方法や、初夏の余裕電力を用いて水素として蓄え、冬に燃料として使う方法などが考えられる。勿論、小型エンジンの熱効率を向上して、燃料自体の消費を削減すれば、これらの燃料消費を更に削減できることは言うまでもない。

5.2.5 まとめ

本項では、AI-EV の自動車としての性能と AI-EV に搭載した蓄電池をエネルギー需給調整装置として使用した場合の CO₂ 削減効果や経済性について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- AI-EV の自動車としての性能は、空調機を駆動するエンジン排気量が 120cc で、満充電した場合、実用上は同じ容量の蓄電池を搭載した EV の 2 倍以上の距離を走行できる。
- PV, HP 給湯器および EV または AI-EV の組み合わせにより、家庭の CO₂ 排出量を 75%以上削減できる。また、コミュニティ全体としては 50%以上の CO₂ を削減できる。
- 更に、AI-EV との組み合わせは IRR=7.2%と、EV との組み合わせの 3.9%に対して、高い経済性を有する。
- 家庭の電力需給調整に必要な EV の蓄電池の容量は 20kWh 以下で充分であり、経済性を高めるためには、EV に搭載する蓄電池をできるだけ小さくする工夫が極めて重要である。

5.3 住居形態や居住人数が異なる場合の効果

一戸建てやマンションなど住居形態が異なる場合の効果について、サイバーフィジカルシミュレータにより検討した。

5.3.1 検討ケース

住居形態の違いは、以下の4ケースについて評価した。

- (1)従来型一戸建住宅:山陽地方の中核都市にあり、住居面積 140m²、2 階建、2 人居住、自家用車 2 台(通勤と日常用)を所有。給湯と厨房はガス燃料を使用し、暖房は灯油を使用。
- (2)オール電化一戸建住宅:山陽地方の中核都市内にあり、住居面積 65m²、平屋、4 人居住、自家用車 2 台(通勤と日常用)所有。給湯と厨房、暖房機器は全て電化されている。
- (3)マンション:首都圏内にあり、住居面積 90m²、14 階建の 6 階、2 人居住、自家用車 1 台(日常用)所有。給湯と厨房はガス燃料を使用し、暖房はエアコンを使用する。駐車場は機械式 2 階建(駐車場の PV 設置面積は他のケースの半分)。
- (4)アパート:東海地方の郊外都市にあり、住居面積 45m²、2 階建の 2 階、1 人居住、自家用車 1 台(通勤用)所有。給湯と厨房はガス燃料を使用し、暖房はエアコンを使用する。

なお、PV の車載ケースは、シミュレーションの結果、PV を必要出力の 1/4~1/10 しか設置できないこと、実使用条件での PV 余裕発生率が高い等の理由から、本検討の対象外とした。

5.3.2 検討条件

5.3.2.1 共通条件

計算に用いた各機器の性能と諸元を表 5-9 に示す。本検討で用いた機器は、高性能 V2H 装置とエネルギーマネジメントシステム以外は全て市販されているものを対象にした。

Table 5-9 Performances of each equipment

| 【Photovoltaic Power Generation】 | |
|---------------------------------|----------------------|
| Maximum Power | 240 W |
| Output per Unit Area | 190 W/m ² |
| 【EV】 | |
| Power consumption rate | 9.1 km/kWh |
| Available capacity of battery | 20 ~ 100 % |
| 【Heat Pump Water Heater】 | |
| Heating Capacity | 6.0 kW |
| Storage Tank Capacity | 460 L |
| Boiling-Up Temperature | 65 °C |
| Hot water Supply Temperature | 42 ~ 43 °C |

5.3.2.2 個別条件

各ケースの検討条件を表 5-10 に示す。PV の設置出力は、勤務先は駐車場 1 台あたりの面積 12.5m² (設置出力:2.4kW)とし、各家庭へは、設置可能スペースを超えない範囲内で、システム全体(家庭と勤務先)の PV 余裕発生率が 5%以下となる条件とした。マンションやアパートの PV 設置可能スペースは、屋上、バルコニー壁面および駐車場とした。EV の蓄電池容量は、1 年間で最も長い連続走行距離を満足するように選定した。通勤車は勤務先と自宅の往復走行、日常車は各家庭の走行実績(1 分値の 1 年分)を測定し、用いた。PV 発電量、空調機と HP 給湯器の電力消費推定に用いた気温および水温の時系列データは、2016 年度の 1 時間毎の時系列実績値を用いた⁽³⁰⁾。また、PV 電力は系統へ逆潮流しない条件とした。なお、CO₂ 排出係数は、系統電力 0.556 kg-CO₂/kWh (2016 年度電気事業者受電端)、LPG 3.48 kg-CO₂/kg、ガソリン 2.62 kg-CO₂/L、灯油 2.65 kg- CO₂/L を用いた^(31,32)。エネルギー単価は、電力 27.5 円/kWh、ガソリン 160 円/L、LPG 360 円/kg、灯油 100 円/L とした。

Table 5-10 Calculation conditions for different housing types

| | | House conventional | House all electricity | Apartment 14 stories | Apartment 2 stories |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Number of residents | [person] | 2 | 4 | 2 | 1 |
| Number of owned vehicles | [vehicle] | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Conventional system | Electricity [kWh/year] | 4,430 | 8,350 | 4,770 | 1,790 |
| | Gasoline [L/year] | 1,230 | 1,270 | 640 | 160 |
| | LPG [kg/year] | 360 | | 340 | 160 |
| | Kerosene [L/year] | 160 | | | |
| New system PV output(PV area) | Home [kW](m^2) | 5.6 (29.5) | 6.0 (31.5) | 5.6 (29.5) | 1.2 (6.2) |
| | Workspace [kW](m^2) | 2.4 (12.5) | 2.4 (12.5) | | 2.4 (12.5) |
| EV battery | Commuting [kWh] | 16 | 16 | | 40 |
| | Daily use [kWh] | 40 | 62 | 40 | |

5.3.3 検討結果

住居形態の違いによる CO₂ 削減量と経済効果を図 5-21 に示す。これより、PV 余裕発生率 $\leq 5\%$ ($< 6\% = \text{PV 電力の EV 輸送効率} - \text{PV 電力の系統送電効率}$) の場合には、全ての住宅で 78~85% の CO₂ 排出量を削減できる。また、図 5 において、エネルギーの種類(化石燃料、電力)とその使用量の比率は各々異なることから、EV を用いた本システムは、家庭で使用される電力、燃料の構成に依存せずに効果が得られることが分かる。

また、家庭のエネルギー支出についても、住居形態に関わらず、全て 80% 以上削減される。例えば、従来型一戸建住宅では、従来の支出は 464 千円/年だが、本システムを導入すれば 53 千円/年になり、従来と比べて 411 千円/年(89%) のエネルギー支出を削減できる。この家計支出の削減は、従来の自動車には無い全く新しい付加価値であり、ユーザにとっては、自動車を購入する際に、他と差別化する大きな判断材料のひとつになると考えられる。

なお、本検討では化石燃料と系統電力を同じ指標で評価するため、CO₂ 排出量を用いた。

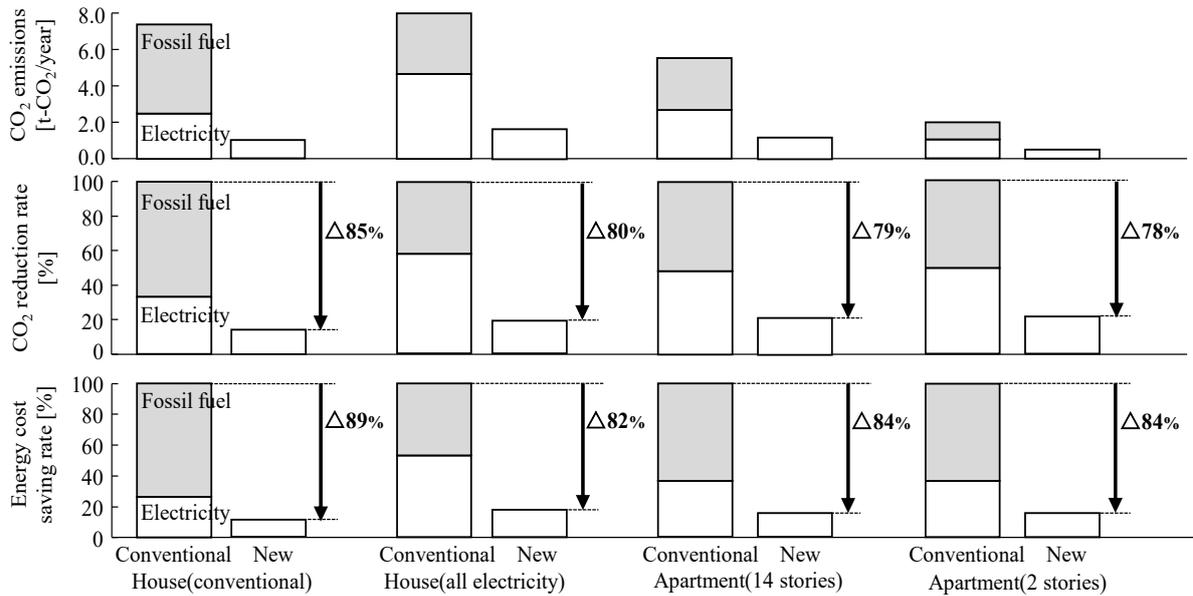


Fig.5-21 Effect of the new system of different housing types

5.3.4 考察

図 5 の CO₂ 削減効果の内訳を大別すると、①EV の PV 電力貯蔵・輸送、②家庭と HP 電力の PV 代替、③EV 走行電力の PV 代替、④エンジン車から EV 導入、⑤HP 給湯器導入の 5 つの効果である。

5.3.4.1 自動車での CO₂ 削減効果

上記で述べた③と④の効果である。ガソリン車と EV 導入による自動車の CO₂ 削減効果を図 5-22 に示す。図 5-22 は、従来型一戸建住宅における自家用車 2 台の合計の CO₂ 排出量である。これより、ガソリン車を EV に代替し、系統電力を用いた場合には CO₂ 排出量が約 60%削減される。更に、本システムでは系統電力の約 90%が PV 電力で代替されるため、CO₂ 排出量はガソリン車に比べて、約 35%削減される。

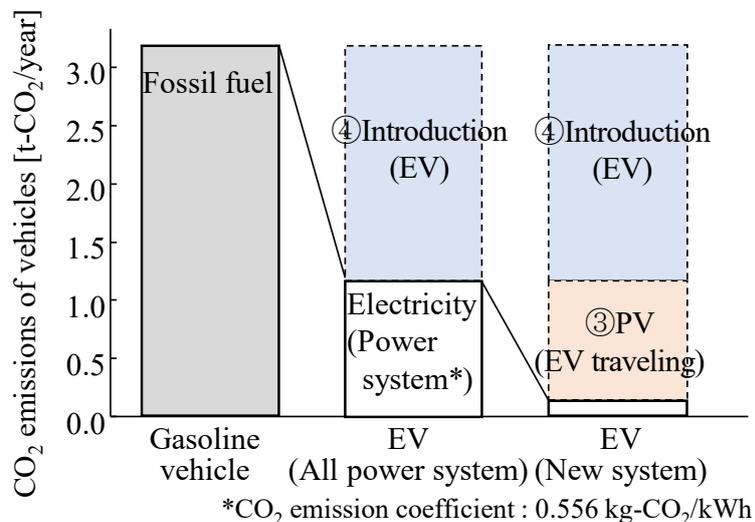


Fig. 5-22 CO₂ reduction effect by vehicle (Conventional house)

5.3.4.2 家庭での CO₂ 削減効果

これは、本節の最初で述べた効果の内、①EV の PV 電力貯蔵・輸送、②家庭と HP 電力の PV 代替、および⑤HP 給湯器導入の 3 つの効果である。

各住居形態における①～⑤の効果の内訳の比率を図 5-23 に示す。これより、どの住宅においても、①と②の合計が、CO₂ 削減効果の約 50%を占めていることが分かる。この理由は、EV に搭載した蓄電池容量が家庭の平均的な 1 時間当たりの電力消費量の 1～2 日分あり、昼夜間では PV 発電に対する調整能力を持っているためである。ちなみに、オール電化一戸建住宅では、HP 給湯器が既に導入されていたため、その効果は内訳に含まれないが、トータルで見ると他の住宅と同じ CO₂ 排出量削減効果が得られている。

マンションでは PV の設置スペースに制約があるが、図 5-21 に示すように、一戸建に比べてベースのエネルギー消費(CO₂ 排出量)が少ない。これは、夏季の冷房と冬季の暖房エネルギーが一戸建に比べて少ないことに起因している。このマンションの家庭では、上下階と片隣りに居住者が居り、居住者が住む面は断熱と同じ状況にあり、冷房と暖房エネルギーが一戸建に比べて小さいためと考えられる。なお、従来型一戸建とマンションの住人は同じで、生活様式は変わらないことから、エネルギー消費の差は、通勤方法の違い(従来型一戸建は自動車

通勤、首都圏マンションは電車通勤)と冷暖房の違いである。したがって、マンションやアパートでは、EV の保有台数が 2 台から 1 台になるが、EV で貯蔵・供給する電力消費量も減少するため、結果として、ほぼ同様の CO₂ 削減効果が得られることが分かった。

以上の結果、EV はガソリン車代替による CO₂ 削減効果だけでなく、搭載した蓄電池を PV と組み合わせて運用すると、EV ユーザに極めて大きな利益をもたらすことが分かった。

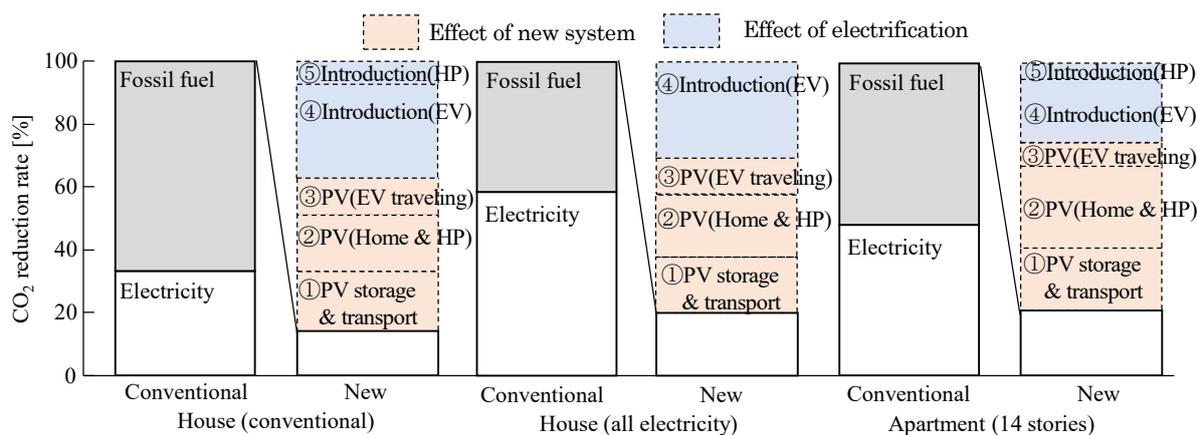


Fig.5-23 CO₂ reduction effect by housing types

5.3.4.3 PV 設置出力増加による CO₂ 削減効果

PV 総設置出力を変化させた場合の家庭の CO₂ 削減率とシステム全体の PV 余裕電力の発生率の関係を図 5-24 に示す。図 8 において、PV 総設置出力は勤務先と家庭の合計とした。また、図 5-24 に示した PV 余裕発生率は以下の式で定義される。

$$\text{PV 余裕発生率} = \frac{\text{余った PV 電力量(他の場所で使用可)}}{\text{勤務先と家庭合計の PV 発電量}}$$

一般に、PV 出力が増加すると、発電した電力は消費に充当できなくなる機会が増加し、余裕電力が発生する。図 8 のマンションのケースでは、通勤車を使用せず、家庭のみに PV を設置するため、この変化に該当する。一方、図 5-24 の他のケースでは、PV を勤務先と家庭の両

方に設置し、通勤車で連携する。勤務先に設置した PV からは、祝休日に電力の使用先がないため、余裕電力が発生する。本検討では、勤務先の PV 設置出力を、通勤車 1 台の駐車場面積で一定とし、家庭の PV 出力のみ変化させた。このため、PV の余裕発生率は、図 5-24 に示すように、PV 出力(勤務先+家庭)の増加に伴い当初は減少していくが、やがて、家庭に設置した PV 電力を充当できなくなる機会が増えるのに従い、増加する。その結果、図 8 のマンション以外のケースでは PV 余裕発生率に最小値ができる。

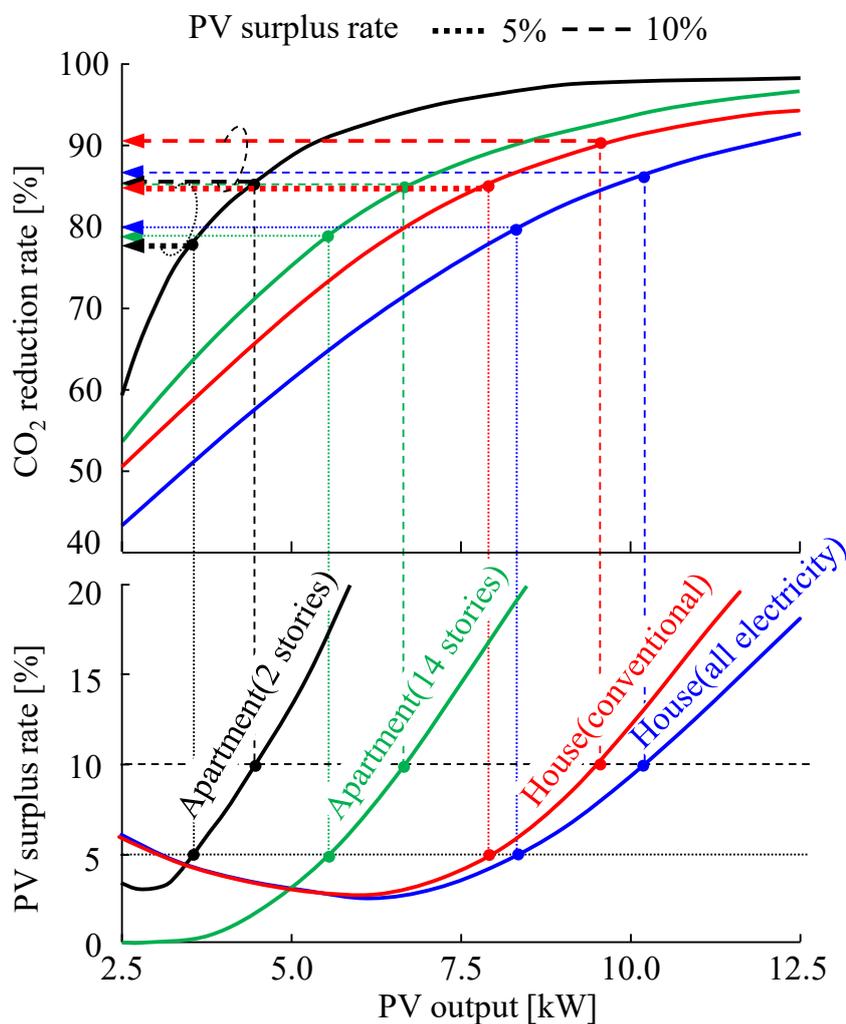


Fig. 5-24 A comparison of CO₂ reduction and surplus rate in each house

ちなみに、CO₂ 削減を優先する場合には、PV 余裕発生率を 10%まで許容すると、余裕発生率が 5%時には 78~85%であった CO₂ の削減率を、図 5-24 のように、85~91%まで拡大で

きる。しかし、PV 設置出力が 15%ほど増加するため、CO₂削減率は経済性とのバランスで考える必要がある。

5.3.5 まとめ

一戸建てやマンションなど住居形態が異なる場合の効果について、サイバーフィジカルモデルシミュレータにより検討した。

- ・ 従来型一戸建住宅, オール電化一戸建住宅, マンション(14階建), アパートの住居形態に関わらず, 本システムの導入によって, 78~85%の CO₂ 排出量を削減し, 家計の支出も 80%(400 千円/年)以上低減できる。これは, 他のタイプの車両では得られない EV 固有の新機能価値である。
- ・ 上記の CO₂ 削減と経済効果の約 50%は①EV の PV 電力貯蔵・輸送と②家庭と HP 電力の PV 代替の効果である。この効果の理由は, 航続距離を満足するための蓄電池容量が PV 電力を調整する上で十分な余力を持っているためである。

第6章 バーチャルグリッドを用いたコミュニティの設計と効果

第3章～第5章まで、様々な電動車と太陽光発電の統合化について検討したが、どれも大きな効果が出る結果になった。我々の研究チームは、電動車を用いた新たな電力供給システムを「バーチャルグリッド(仮想配電網)」と名付けた。本章では、このバーチャルグリッドを用いて太陽光発電、電動バスおよび家庭を統合化したコミュニティを、岐阜大学の実績データを基に設計した効果について検討した。

6.1 バーチャルグリッド(VG)

バーチャルグリッドは、図6-1に示すような、PV電力の自己消費システム(基本的に逆潮流しない)であり、不足する電力は商用系統電力で補う。EVを保有する家庭一戸を最小単位とするナノグリッド、EV数台～数十台がアクセスする事務所や中小規模ビルなどのマイクログリッド、およびEV数百台以上がアクセスする商業施設、工場、大学、役所などのミニグリッドで構成される。

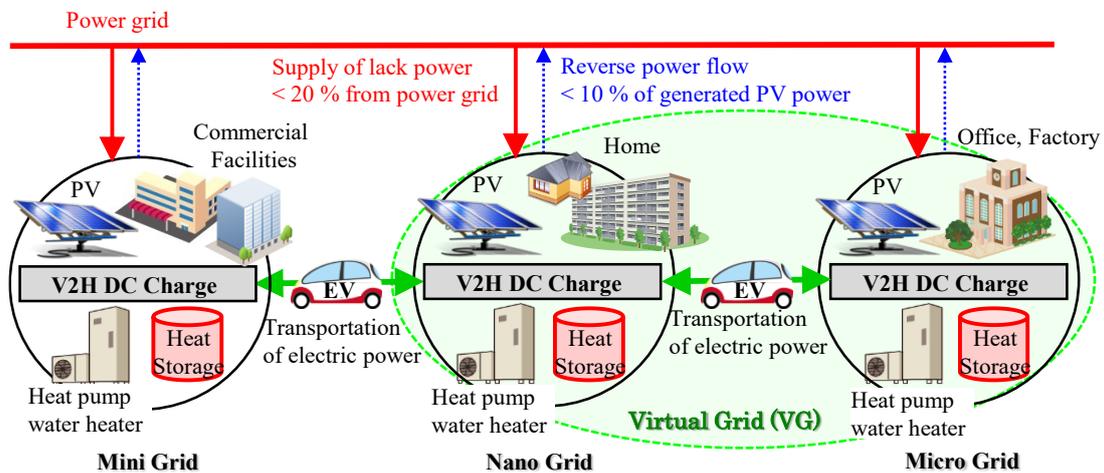


Fig. 6-1 Conceptual Diagram of Virtual Grid

各グリッドは図6-2に示すように、EVの動きに伴って連携グリッドを変化させて形成する。この連携グリッドは、地理的かつ時系列的に変化し、物理的にその連携を可視化できないため、バーチャルグリッド(VG)と呼ぶ。

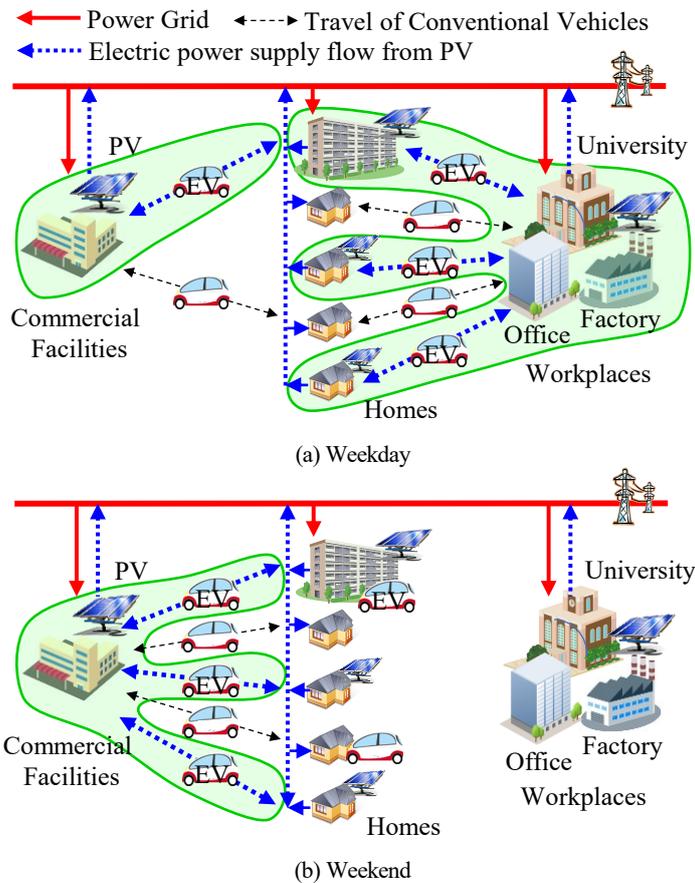


Fig. 6-2 Operation diagram of the VG during the week

6.2 路線バスと通勤 EV を用いた VG システム

本検討で用いたバーチャルグリッドの具体例を図 6-3 に示す。勤務先として岐阜大学、通勤車を使う 2,580 名の教職員が全て EV を使うと仮定する。この通勤車と岐阜大学に乗り入れているバス 4 路線(I. JR 岐阜駅と岐阜大学病院間, II.Iの区間の快速便, III. 岐南町と岐阜病院路間およびIV. コミュニティバス)の合計約 250 回発着/日の EB 化と学内のエネルギー消費を統合化のみを対象にした。図 6-3 に示すエネルギー変換効率は、表 6-1 の値を用いた⁽³³⁾。

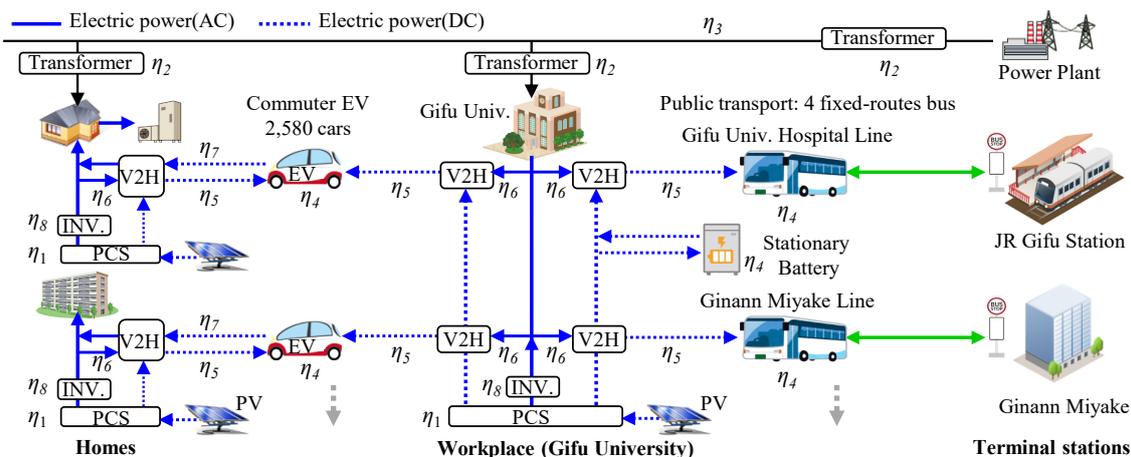


Fig. 6-3 Specific example of Virtual Grid

Table 6-1 Energy conversion efficiencies

| | |
|--|------|
| η_1 :PCS effective efficiency | 0.94 |
| η_2 :Transformer efficiency (in the Power System) | 0.97 |
| η_3 :Transmission efficiency | 0.99 |
| η_4 :Charging and discharging efficiency*4 | 0.95 |
| η_5 :V2H charging efficiency (DC/DC) | 0.93 |
| η_6 :V2H charging efficiency (AC/DC) | 0.89 |
| η_7 :V2H discharging efficiency (DC/AC) | 0.90 |
| η_8 :Inverter efficiency (DC/AC) | 0.95 |

6.3 計算条件

PV と EV のエネルギー収支シミュレーションでは、PV 発電量や冷暖房の電力消費が季節間で異なるため、パターン化したデータの使用、特定期間の解析、空調を含まない解析では正しい情報が得られず、1 年間に亘る時系列解析が必要になる。

6.3.1 気象条件

PV 発電量、空調機と HP 給湯器の電力消費推定に用いた気温および水温の 2020 年度の時系列データを図 6-4 に示す。

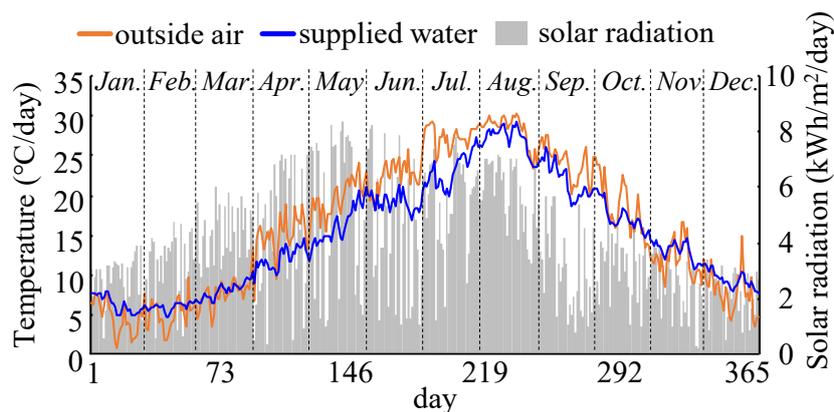


Fig. 6-4 Meteorological data (temperature and solar radiation)

6.3.2 各機器の仕様

計算に用いた各機器の性能と諸元を表 6-2 に示す。

Table 6-2 Performances of each equipment

| | |
|--|----------------------|
| 【Photovoltaic power generation】 | |
| Output per unit area | 190 W/m ² |
| 【EV】 | |
| Battery capacity of EV | 40 kW |
| Power consumption rate | 0.12 kW/kW |
| Available capacity of battery | 20 ~ 100 % |
| 【Heat Pump Water Heater】 | |
| Heating capacity | 6.0 kW |
| Storage tank capacity | 460 ℓ |
| Hot water temperature | 65 °C |
| Hot water supply temperature | 42~43 °C |

PV 設置出力は、EV1 台あたりの駐車面積 12.5m² (出力: 2.4 kW)とし、家庭の消費電力は既報⁽²⁾と同じとした。なお、蓄電池は非常時の走行用に、容量の 10%を常時残す条件とした。

6.3.3 路線の運航条件

運航ダイヤグラム例(JR 岐阜駅⇄岐阜大学)を図 6-5 に示す

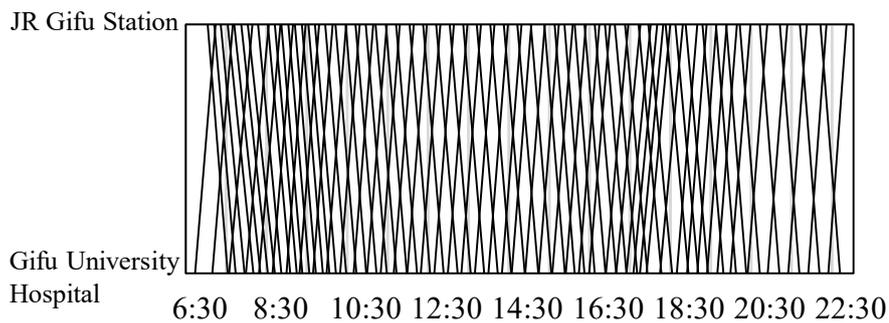


Fig.6-5 Bus traveling diagram

JR 岐阜駅⇄岐阜大学病院間は 8.4 km で 36,439 本/年(普通便), 10,363 本/年(直行便), 岐南三宅⇄岐阜大学病院間は 15.8km で 21,620 本/年, ほっとバス(循環線)は 20km で 1,928 本/年である. 本検討では回送運行(岐阜大学病院と車庫間の 2.8 km)も考慮した. 上記の運行に必要な EB は 30 台になる.

6.3.4 EB への充電方法

EB の電力は岐阜大学構内に設置した PV から供給する.EB が充電しない場合は, バッファの蓄電池に PV 電力を充電する. 夜間, 雨天および冬季などで, EB の必要電力を PV で賄えない場合は, 系統電力から補う.

充電器の仕様を表 6-3 に示す. 充電時間は, 最低 15 分以上とし, 電源プラグ取り外し等の操作時間は 3 分とした.

Table 6-3 Performances of charging system

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Charging speed | 100 kW |
| Charger connection port | 2 port |
| Stationary battery capacity | 0 ~ 1,000 kWh |
| Minimum charging time | 15 min |

CO₂ 排出係数は, 系統電力 0.431 kg-CO₂/kWh (2019 年度中部電力), 軽油 2.81kg-CO₂/ℓ, ガソリン 2.62 kg-CO₂/ℓ, LPG 3.48 kg-CO₂/kg, 灯油 2.65 kg- CO₂/ℓ を用いた.

6.4. 検討結果

現状の職員のエネルギー消費推定値と岐阜大学のエネルギー消費実績(2020年)を図 6-6 に、解析に用いた 2020 年度の時系列の電力消費実績データを図 6-7 に示す。なお、大学の電力消費は COVID-19 の影響で年間総量は約 1 割増加したが、緊急事態宣言下の 4 月と 5 月はオンライン講義と在宅勤務で例年よりも減少したため、4 月と 5 月は 2018 年と 2019 年の年間使用量に対する月間比率で補正した。

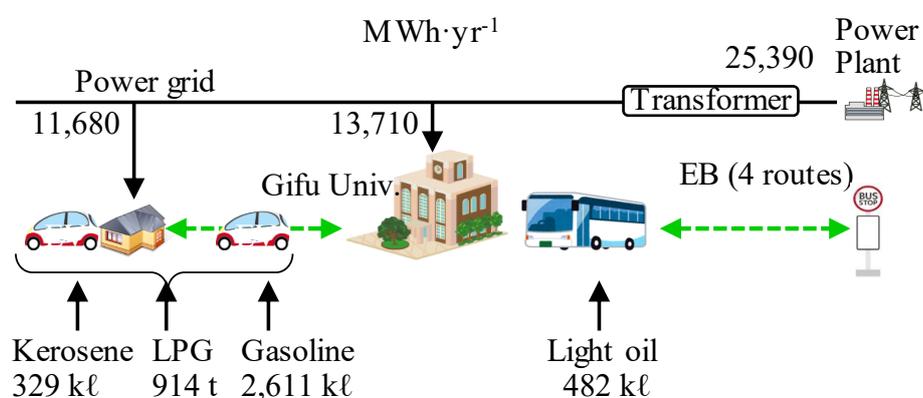


Fig.6-6 Total energy consumption of base

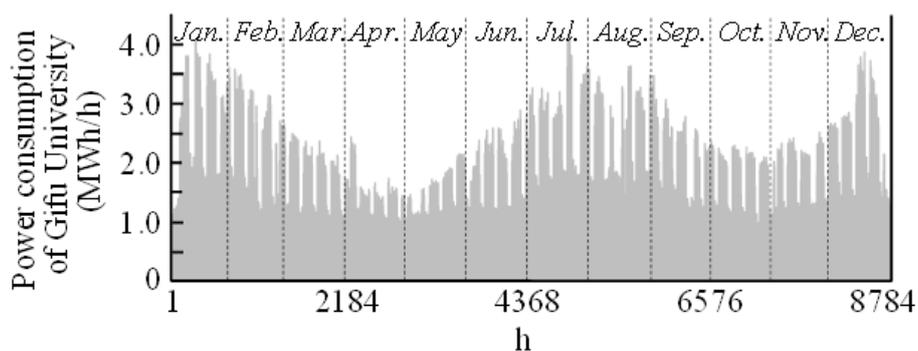
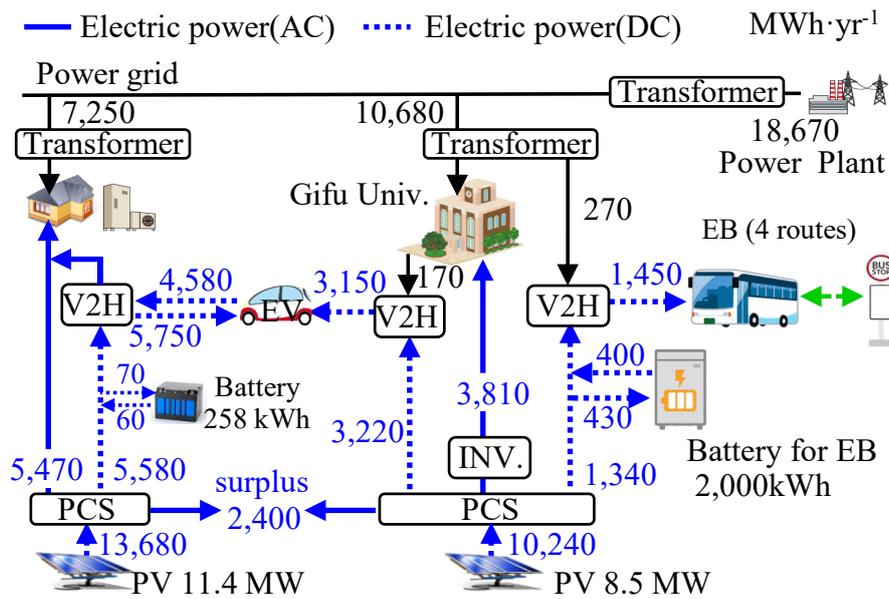


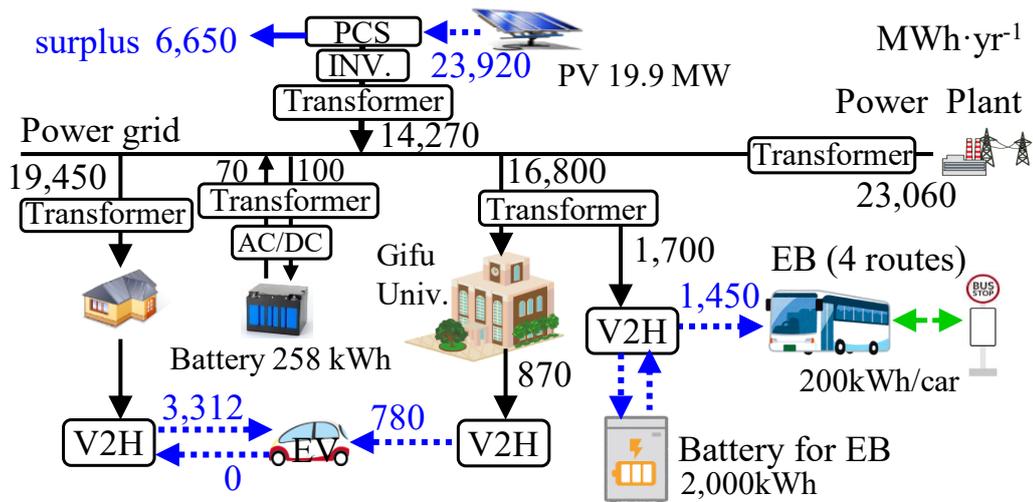
Fig. 6-7 Power consumption of Gifu University

図 6-6 を基に、通勤 EV、路線バスの EB および岐阜大学のエネルギー需要に PV 電力をバーチャルグリッドで供給したケースを図 6-8(a)、系統経由で供給した場合を図 6-8(b)に示す。図 6-8(b)の系統経由は、PV 電力の余剰が発生しないように、家庭や大学に駐車する EV へ

理想的に充電した場合である. なお, 図 6-8(a)および(b)とも, 岐阜県の世帯当たりの自動車保有台数 1.71 台/世帯(2017 年度)より, 1,830 世帯は日常車と通勤車の 2 台/世帯を保有し, 750 世帯は通勤車 1 台のみを保有する前提とした. PV や V2H などの性能(出力, 容量, 効率)は同じであり, バーチャルグリッドは系統経由に比べて, 系統電力を約 24%(=23,060-18,670)/18,670)削減できることが分かった.



(a) Effects of Gifu Univ. Virtual Grid



(b) Supply of the PV power via the power grid (V2G, VPP)

Fig. 6-8 Comparison of the effect of the PV power supply system

図 6-6 と図 6-8 から、CO₂ 排出量を比較した結果を図 6-9 に示す。

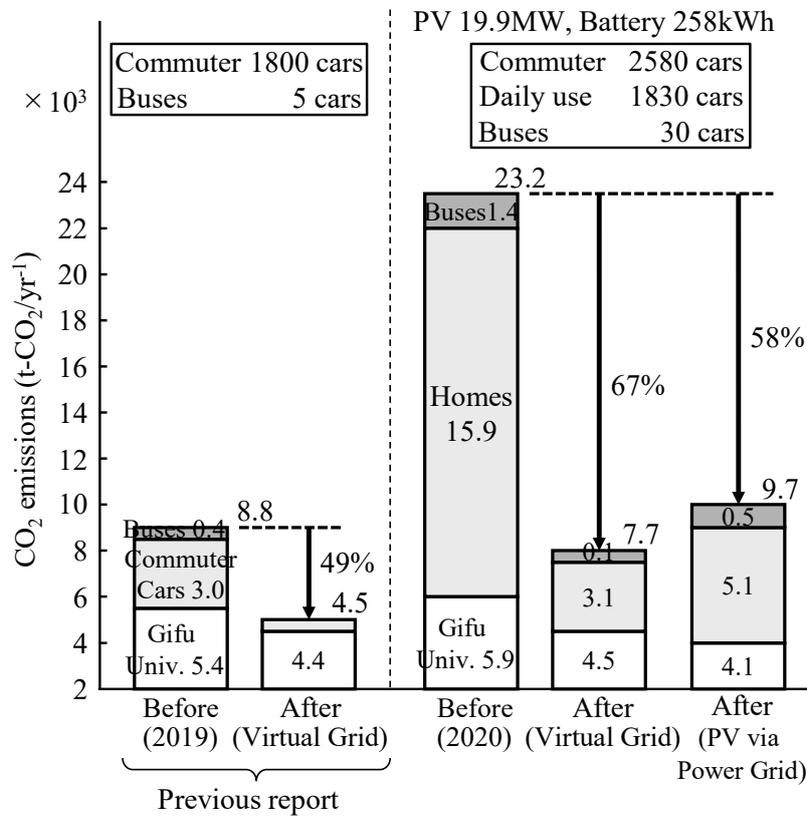


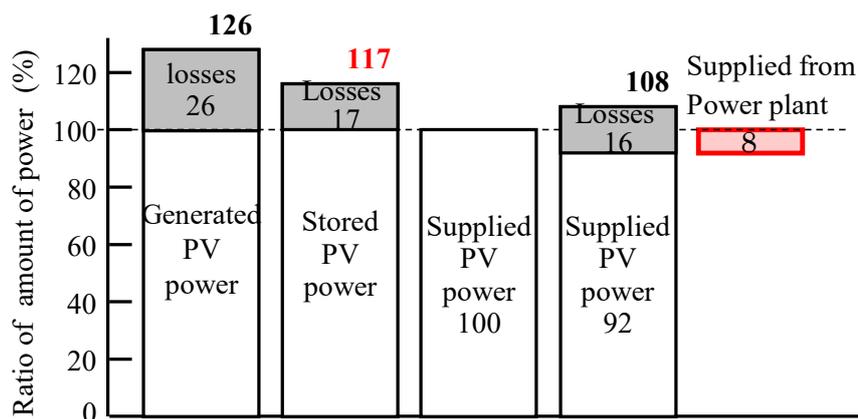
Fig.6-9 Comparison of the effects

図 6-9 より、図 6-8(a)の岐阜大学をベースにしたバーチャルグリッドでは、全体として CO₂ 排出量を 67%削減できる。一方、図 6-8(b)のように PV 電力を系統経由のみで供給した場合は、同じ能力の機器を用いても、余剰発生と供給損失が大きく、PV と EV 導入による CO₂ は 58% の削減になる。しかも、図 6-8(b)は理想的な制御を実施した場合であり、実際には、個人所有の EV の充放電は価格インセンティブで促すため、現実的にはこの効果を十分に得ることは極めて難しい。

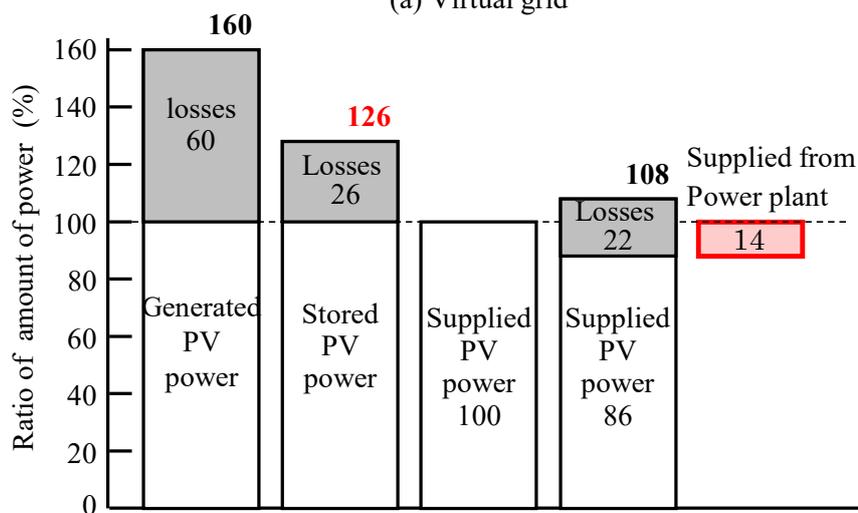
なお、図 6-9 より、バーチャルグリッドに加わる EV や EB の台数が増加すると、全体と大学の CO₂ 削減効果が大きくなる。この結果より、EV のアクセス台数が多い施設ほどバーチャルグリッドを適用する効果が大きくなることが分かる。

6.5 考 察

PV 電力のバーチャルグリッドと商用系統経由供給でこのような CO₂ 削減量に差が生じた理由は、図 6-3 と表 6-1 に示した機器効率に伴う PV 電力の供給効率の違いに起因する。



(a) Virtual grid



(b) Supply of the PV power via the power grid

Fig. 6-10 Difference of battery load by the PV power supply route

例えば、図 6-10 において、電力需要量を 100 とすると、バーチャルグリッドでは、蓄電池からの電力供給時に、蓄電池効率 η_4 の 95%と V2H での直流⇒交流変換効率 η_7 の 90%が加わるため、消費需要の 100 に対して 17 の損失が発生し、117 の蓄電量が必要になる。必要な PV 発電量(PCS 出側)は、充電時に V2H での PV と蓄電池間の直流⇒直流変換効率 η_5 の

93%が加わり、 $126(=117/0.93)$ が必要になる。一方、系統経由では、蓄電池からの電力供給時に、蓄電池効率 η_4 の 95%と直流⇒交流変換損失 η_7 の 90%に加えて、系統効率 93%(変圧効率 $97\% \times 97\% \times 99\%$)が加わるため、消費需要の 100 に対して 26 の損失が発生し 126 の充電量が必要になる。更に、必要な PV 発電量は、系統に併入時に PCS 出側での直流⇒交流変換効率 η_8 と充電時に V2H での PV と蓄電池間の交流⇒直流変換効率 η_6 の 89%が加わり、 $160(=126/(0.95 \times 0.89 \times 0.99 \times 0.97 \times 0.97))$ が必要になる。

以上の結果、系統経由で PV 電力の調整、供給に蓄電池を使うと、供給経路に電力変換損失が多発し、バーチャルグリッドに比べて、必要な PV 発電量が約 $1.3(=160/126)$ 倍になる。加えて、経路の効率差は PV 電力の余剰発生の原因になる。例えば、図 6-10(a)において、実際には 108 しか充電できない場合を考えると、このような場合には、損失が $16(=108 - 108/117 \times 100)$ 発生するため、需要 100 に対して 92 しか供給できない。その結果、需要 100 に対する不足分の 8 は PV 以外の電力(原子力や風力などの電力)で補うことになる。同様に、図 6-10(b)の系統経由で PV を EV に充電し、供給する場合は、108 の充電量に対して、損失が $22(=108 - 108/126 \times 100)$ 発生するため、需要 100 に対する不足分 14 は、PV 以外の電力で補うことになる。年間の電力消費量と PV 発電量は変わらないため、ある瞬間に PV 以外から電力供給が増加すると、PV 電力の年間ベースでの供給量が減少し、損失だけでなく、余剰発生も増加する。図 6-10 の解析は図 6-8(a)と(b)の結果差と良く一致しており、装置配置と供給経路の違いは、PV 電力の利用効率に大きな差を発生させる。

更に、EV にとって大きな問題として、供給経路の効率が悪いと、充電した電力が効率良く使われず、電力消費量に対する蓄電池の負荷が増加することを図 6-10 は示している。図 6-10 のケースでは、系統経由による蓄電池の充放電負荷がバーチャルグリッドよりも $8\%(=(126 - 117)/117 \times 100)$ 増加する。これは EV の蓄電池寿命に影響を与えられらる。

以上のことから、バーチャルグリッドは PV 電力を系統経由よりも効率良く使用でき、EV としての視点でも、蓄電池の充放電負荷を原理的に軽減できることが分かった。

6.6 まとめ

岐阜大学に乗り入れている全バス路線(4路線)の電動バス(EB)化, 学内全職員の通勤車のEV化, および学内のエネルギー消費をバーチャルグリッドで統合管理した効果を検討するとともに, PV電力を既存の商用系統経由で供給するシステムが異なる場合について, 変圧, 交直変換などの機器効率から検討した. その結果は以下の通り.

- PVを自家消費するバーチャルグリッドの具体例として, 岐阜大学への適用を想定した場合, 通勤, 通学に必要な交通手段を含むCO₂排出量を60%以上削減できることが分かった.
- 上記において, 岐阜大学を想定したバーチャルグリッドにアクセスする自動車の電動化台数が多いほど, 大学のPV使用量も向上し, CO₂削減効果が増加することが分かった.
- バーチャルグリッドはPV電力を系統経由で供給し, EVでの蓄電池で調整するよりも, PV電力の供給損失が少なく, EVの蓄電池の充放電負荷を軽減できる.

第7章 結論

本研究では、太陽光発電を事例に、発生から消費に至るコスト要因として、供給効率と設備コストを考えた。供給効率は供給設備で発生する変換損失、発生と消費の不整合による余剰損失の合計損失で評価するとともに、設備コストについては、供給設備の簡素化を追求した。これらの基礎研究に基づき、電動車(EV)と太陽光発電を統合化した新たな電力配電システムを提案し、様々な電動車を対象にその効果について検討した。

第2章では、EVの走行時のサイバー空間での蓄電池の時系列の電力量変化を評価しつつ、電動車が移動先に接続時のフィジカル空間での移動先を含む全体のエネルギー需給状況に応じて時々刻々状況が変化するエネルギー収支を総合的に解析し、評価するサイバーフィジカルシミュレータを開発した。また、シミュレーションモデルは、実験で精度を検証した。

第3章から第5章は、様々なEVを用いたシステムの研究を行った。

第3章では、産業用途のEVについて述べた。間伐材の処理工場でフォークリフトと太陽光発電を統合化し、昼休みや休憩時間にフォークリフトへ太陽光の電力を充電することにより、CO₂排出量を45%削減できることを明らかにした。

第4章では、運輸用途のEVについて述べた。JR吉備線(ローカル鉄道線)における太陽光発電と蓄電池電車の統合化では、起点(岡山)と終点(総社)の両駅の駅舎屋根に設置した太陽光電力を電車へ供給することにより、CO₂排出量を65%削減できることを明らかにした。また、岐阜市内のバス路線における太陽光発電と電気バスの統合化では、鉄道と同様に終点の岐阜大学構内に設置した太陽光電力を電動バスへ供給することにより、CO₂排出量を49%削減できることを明らかにした。

第5章では、家庭用途のEVについて述べた。様々な家庭(一戸建住宅、集合住宅)における太陽光発電と自家用EV、貯湯槽の統合化では、家庭と勤務先に設置した太陽光電力をEVへの供給することにより、CO₂排出量を80%以上削減できることを明らかにした。

以上より、様々な電動車を用いたシステムについて、太陽光の余剰発生率<10%としたときのCO₂削減率と需要側、供給側の条件を表7-1に示す。表7-1より、電動車や統合するシステム

に応じて需要側，供給側の条件が大きく異なっている。これらの条件から CO₂ 削減を決定する因子を抽出するために重回帰解析をおこなった。

Table 7-1 Demand and supply conditions for each system

| | CO ₂ 削減率 | 年間エネルギー使用量 (kWh/年) | 1日あたりのエネルギー使用量 (kWh/日) | PV設置出力 (kW) | 蓄電容量 (kWh) | 電動車へのPV充電量 (kWh/日) | PVとの接続可能時間 (h/日) | 充電速度 (kW) |
|-------------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|--------------------|------------------|-----------|
| フォークリフトと工場 | 45% | 372,000 | 1,320 | 110 | 624 | 91 | 1.98 | 50 |
| 蓄電池電車単体 | 56% | 1,744,000 | 4,780 | 460 | 1,260 | 1,610 | 3.35 | 50 |
| 電動バス単体 | 83% | 420,000 | 1,150 | 280 | 1,800 | 767 | 1.71 | 100 |
| 電動バスと大学 | 26% | 13,090,000 | 40,120 | 3600 | 1,800 | 1,096 | 1.71 | 100 |
| 一戸建て住宅 (通勤車+日常車) | 85% | 8,320 | 23 | 8.0 | 70 | 14 | 8.10 | 6 |
| オール電化住宅 (通勤車+日常車) | 80% | 10,080 | 28 | 8.4 | 92 | 15 | 8.10 | 6 |
| マンション(日常車) | 79% | 7,270 | 20 | 5.6 | 54 | 11 | 8.10 | 6 |
| アパート(通勤車) | 78% | 2,750 | 8 | 3.6 | 54 | 5 | 8.46 | 6 |

需要側の条件

供給側の条件

表 7-2 に示すように目的変数は CO₂ 削減率，説明変数は異なるシステムの条件を統一評価するために，PV 発電量比，蓄電池容量比，PV との接続可能時間，電動車への PV 充電量比とした。これらを回帰分析すると，表 7-3 より，決定係数 R² は 0.9 以上であり，それぞれの変数の影響度は PV 発電量比が一番大きく，次に電池容量比だった。

Table 7-2 Objective and explanatory variables used in multiple regression analysis (Example)

| | 目的変数 | | 説明変数 | | |
|-----------------|---------------------|---------|---------|------------------|--------------|
| | CO ₂ 削減率 | ①PV発電量比 | ②蓄電池容量比 | ③PVとの接続可能時間(h/日) | ④電動車へのPV充電量比 |
| フォークリフトと工場 | 45% | 0.25 | 0.47 | 1.98 | 0.15 |
| 蓄電池電車単体 | 56% | 0.29 | 0.26 | 3.35 | 1.28 |
| 電動バス単体 | 83% | 0.74 | 1.56 | 1.71 | 0.43 |
| 電動バスと大学 | 26% | 0.27 | 0.04 | 1.71 | 0.61 |
| 一戸建て住宅(通勤車+日常車) | 85% | 1.07 | 3.07 | 8.10 | 0.20 |
| アパート(通勤車) | 78% | 1.46 | 7.17 | 8.46 | 0.09 |

【定義】①= 1日あたりのPV発電量/1日あたりのエネルギー使用量 ②=蓄電容量/1日あたりのエネルギー使用量
④=電動車へのPV充電量/蓄電容量

Table 7-3 Result of multiple regression analysis

| | 回帰係数 | 標準誤差 | t | P-値 |
|------------|---------|--------|-------|--------|
| PV発電量比 | 0.926 | 0.219 | 4.23 | 0.0242 |
| 蓄電池の容量比 | -0.116 | 0.0371 | -3.13 | 0.0522 |
| PVとの接続可能時間 | 0.00141 | 0.0141 | 0.100 | 0.926 |
| 電動車へのPV充電量 | 0.0314 | 0.0804 | 0.391 | 0.722 |
| 切片 | 0.259 | 0.0958 | 2.71 | 0.0733 |

したがって、CO₂削減するためには、需要に対して、十分なPV設置出力と蓄電池容量が必要であることが定量的に分かった。また、家庭(一戸建て、アパート)は需要に対して3倍以上の蓄電容量を持っているため、CO₂削減率が80%以上となった。家庭以外のシステムではEVに搭載した蓄電池しか使用していないが、家庭のシステムではEV蓄電池40kWh/台に加え、熱として14kWhの蓄電容量(ヒートポンプ給湯機のCOP=3の場合)が使用できる点である。EVが家庭に接続されていない時に、ヒートポンプ給湯機で電力を熱に変換して蓄える効果が大い。

また、EVの駐車時間は自家用EVが最も大きく、実測結果や国内の自家用車平均の走行実績からその殆どが95%以上であり、自家用EVは定置型蓄電池と同様に使用できることが分かった。提案する家庭システムの最大の特徴は、走行の電力消費によって充電余力を生じるため、太陽光発電の調整力が高い点と、従来の配電網での供給に比べて、供給損失を最大30%低減できる点である。特に、後者は、太陽光発電の供給をPCS(Power conditioning system)、EVおよびV2H(Vehicle to home)のみで構成でき、定置型蓄電池、変電設備、送電設備を全て省くことができ、供給設備の最小化を図れる。この効率向上と設備の最小化によって、太陽光発電から消費に至る電力コストを現状の半分以下にできることを明らかにした。

第6章では、太陽光発電、電動バスおよび家庭を統合化したコミュニティを、岐阜大学の実績データを基に設計した。その結果、コミュニティ全体としてCO₂を60%以上削減できることが分かった。

今後の課題は、発生する余剰電力の活用であり。余剰電力をCO₂回収有効利用技術(CCU)やH₂製造などの電力源にできれば、カーボンニュートラル社会の実現が飛躍的に進むと考えられる。

参考文献

- (1) AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>
- (2) 環境省: 国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議 (COP26) の結果について
<http://www.env.go.jp/earth/26cop2616cmp16cma10311112.html>
- (3) 外務省: 気候変動, 日本の排出削減目標
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html
- (4) EU: European Climate Law
https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_en
- (5) 外務省: 持続可能な開発目標 SDGs
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>
- (6) 外務省: エネルギーをめぐる国際的議論 Vol.2, IEA・IRENA 共同発行「エネルギー転換の見通し」に関する分析レポートの概要
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ecm/es/page25_001139.html
- (7) 環境省: 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書(2019)
<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/report/r01.html>
- (8) 稲垣公: TOC 革命, 日本能率協会マネジメントセンター(1997)
- (9) Tsuguhiko Nakagawa, Yu Notoji, Seishiro Shibata, A Novel Concept of AI-EV (Air-Conditioner Integrated Electric Vehicle) for the future Smart Community, Heat Transfer Engineering, 37(17), 1498-1506, (2016).
- (10) J. Dong, J. Chen, Z. Chen, W. Zhang, Y. Zhou, Heat transfer and pressure drop correlations for the multi-louvered fin compact heat exchanger, Energy Conversion and Management, Vol.48, No. 5, pp. 1506-1515, (2007).

- (11)横山ら,CO2 ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析(第1報), 日本機械学会論文集, 71 巻 707 号 p.1885-p.1892, (2005).
- (12)Agency for Natural Resources and Energy of Japan, Standard calorific value,carbon emission factors table. http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf.
- (13)Ministry of the Environment of Japan, Publication of electric power companies-specific emission factors. (2014).<https://www.env.go.jp/press/101746.html>.
- (14)The institute of Energy Economics of Japan, Survey of Petroleum Products Price, 2014. http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/.
- (15)New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan, Development Roadmap of Secondary Battery Technology, 2010. <http://www.nedo.go.jp/content/100153876.pdf>.
- (16)DAIHEN:”D-Broad EV”, <https://www.daihen.co.jp/products/wireless/ev/>
- (17)白髪直樹, 中川二彦:空調機統合型蓄電池電車(AI-BET)と太陽光発電(PV)を組み合わせたシステム, 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2017.
- (18)The Chugoku Electric Power Co., Inc., “Energia Group Environmental Report 2019”.
- (19)岐阜乗合自動車(株):岐阜バス 岐阜大学・病院線, <https://www.gifubus.co.jp/rosen/timetable/>
- (20)中部電力(株):「地球温暖化対策の推進に関する法律」に基づく2019年度のCO2排出実績の報告について, https://miraiz.chuden.co.jp/info/topics/1202053_1939.html
- (21)資源エネルギー庁:2013年度以降適用する標準発熱量・炭素排出係数一覧表, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf
- (22)能登路裕, 中川二彦: 化学工学論文集, 42(1), 1-8 (2016)
- (23)Seishiro Shibata, Tsuguhiko Nakagawa:“A Novel Concept of AI-EV (Air-Conditioner Integrated Electric Vehicle) for the Advanced Smart Community”, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, No.11, pp.1933-1941, (2015).
- (24)Masashi Shimamura, Tsuguhiko Nakagawa:Evaluation of advanced AI-EV (air-conditioner

- integrated electric vehicle), Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15, ICOPE-15-1067, pp.1~8, Yokohama, (2015).
- (25)清水律治ほか:”ロータリエンジンを用いたレンジエクステンダユニットの紹介”, マツダ技法, No.32 pp.191-196, (2015).
- (26)H. Noyama, K. Umezu : "Air-Conditioning System for Electric Vehicle (i-MiEV)." SAE Automotive Refrigerant & System Efficiency Symposium 2010,pp.4, (2010).
- (27)日産自動車株式会社 : Specifications| 日産リーフ主要諸元 , http://history.nissan.co.jp/LEAF/ZE0/1012/PDF/leaf_specification.pdf,(2012)
- (28)Seishiro Shibata, Tsuguhiko Nakagawa : “Mathematical Model of Electric Vehicle Power Consumption for Traveling and Air-Conditioning”, Journal of Energy and Power Engineering, Vol9, No.3, pp.269-275, (2015).
- (29)将来燃料高度利用技術グループ:自動車燃料の多様化と高効率利用に関する研究開発～バイオ基材混合がガソリン車性能に及ぼす影響の検討～, 石油エネルギー技術センター技術開発・調査事業成果発表会要旨集, pp.357-367, (2011).
- (30)気象庁:気象統計情報, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (31)資源エネルギー庁:2013 年度以降適用する標準発熱量・炭素排出係数一覧表, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf.
- (32)資源エネルギー庁:全電源・限界電源の排出係数算定結果, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/green_energy/newenergy/geco2_iinnkai/25doc4-1.pdf
- (33)中川 二彦, 千阪秀幸:電動車両を用いた革新的エネルギーシステム, 自動車技術会 2020 秋季学術講演会講演予稿集, 217(2020).

謝辞

本研究は、中川二彦教授のご指導のもとに行われたものであります。中川二彦教授には終始丁寧なご指導を賜りました。ここに、多大な敬意を表し、心より深く感謝申し上げます。中川二彦教授には、私が学部4年生のときから様々な経験をさせていただきました。私が不安になったり困ったりしたときは、熱心にご助言をしていただきました。私の様々な面を非常に我慢強く見守っていただき、時には励ましてくださったおかげで、ここまで来ることができたのだと思います。ありがとうございます。

また、本論文を作成するにあたり、板谷義紀教授ならびに上宮成之教授には、有益なご助言を賜りました。ここに、謹んで深く感謝申し上げます。

この研究を進めるにあたり、岡山県立大学の中川研の卒業生の皆様には、多大な協力をいただきました。ここに、謹んで深く感謝申し上げます。

さらに、日々有意義な研究をともに行いました中川・板谷・小林・須網研究室の皆様
に厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、博士課程に進むにあたり、温かい目で見守り、応援してくれた家族に深く感謝いたします。

2022年3月

千阪秀幸

論文目録

(1) 学位論文の基礎となる学術論文 Research Papers that Form the Basis of Thesis

1. ◎Hideyuki Chisaka, Tsuguhiko Nakagawa, "A Novel Energy System Integrated with Solar Power, Advanced Electric Vehicle and Heat Pumps," Proceedings of the ASME 2016 10th International Conference on Energy Sustainability, ES2016-59267, pp.1-8, 2016.
2. 広瀬 拓, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, "空調機とエンジン発電機を統合した電気自動車の評価", 自動車技術会論文集, **48**(3), 679-685, 2017.
3. Nakagawa Tsuguhiko, ◎Chisaka Hideyuki, Notoji Yu, "A novel SMART energy system for using biomass energy effectively", RENEWABLE ENERGY, **116**, 492-499, 2018.
4. ◎千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "再生可能エネルギーの利用を拡大する車載蓄電池の運用方法", 自動車技術会論文集, **51**(1), 113-119, 2020
5. ◎千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "様々な住宅への電動車両による再生可能電力の輸送の評価", 自動車技術会論文集, **52**(3), 726-731, 2021.
6. ◎千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "電動車(バスと自家用車)を用いた統合エネルギーシステム", 自動車技術会論文集, **52**(5), 1033-1039, 2021.
7. 中川 二彦, ◎千阪 秀幸, 古矢 勝彦, "電動車を用いた太陽光電力の高効率利用システムーバーチャルグリッドー", 自動車技術会論文集, **53**(1), (2022 年 1 月掲載決定).

(2) 参考論文 Other Publications

【国際発表】

1. ◎**Hideyuki Chisaka**, Tsuguhiko Nakagawa, "Advanced Energy System of Solar Power Combined Electric Vehicle and CO₂ Heat Pump Water Heater," Proceedings of International Conference on Information Science and Management Engineering, ICISME-S052, pp.154-158, 2015.
2. ◎**Hideyuki Chisaka**, Takashi Tetsui, Yu Notoji, Tsuguhiko Nakagawa, "A Novel Smart Energy System for Using Biomass Energy Effectively", Proceedings of Venice 2016 Symposium, pp.1-11, 2016.
3. ◎**Hideyuki Chisaka**, Naoki Shiraga, Nobusuke Kobayashi, Yoshinori Itaya, Tsuguhiko Nakagawa, "A NOVEL RAILWAY ENERGY SYSTEM INTEGRATED WITH PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION," Proceedings of 11th International Conference on Applied Energy(ICAE2019), Paper ID: 0251, pp. 1-4, Sweden, 2019.
4. ◎ **Hideyuki Chisaka**, Nobusuke Kobayashi, Yoshinori Itaya, Tsuguhiko Nakagawa, "MANAGEMENT STRATEGY OF ENERGY STORAGE AND SUPPLY FOR EXPANDING THE USE OF RENEWABLE ENERGY," Extended Abstracts of The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference(PRTEC2019), PRTEC-24166, pp.1-5, USA, 2019.
5. ◎**Hideyuki Chisaka**, Tsuguhiko Nakagawa, "Innovative Solar Power Utilization System Using Electric Vehicles," Proceedings of 12th International Conference on Applied Energy(ICAE2020), Paper ID: 209, pp. 1-4, Virtual, 2020.

【国内学会】

1. ◎**千坂 秀幸**, 中川 二彦, "太陽光発電と電気自動車およびヒートポンプ給湯器を組み合わせたエネルギーシステム", 第32回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 23-2, 東京, 2016年2月2日.
2. 神坂 太朗, ◎**千坂 秀幸**, 中川 二彦, "蓄電池電車と太陽光発電を組み合わせたシステム," 第21回動力・エネルギー技術シンポジウム, E132, pp.1-2, 2016年6月.

3. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”自然エネルギーを利用した双方向エネルギーシステム”, 第25回日本エネルギー学会大会論文集”, 124-125, 東京, 2016年8月9日.
4. 広瀬 拓, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”空調機統合型電動移動体(AI-EV)の特性”, 化学工学会 第48回秋季大会, O117, 2016年9月.
5. 広瀬 拓, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”空調機統合型電気自動車の評価”, 自動車技術会 2016年秋季大会, 362, pp.1902-1907, 2016年10月.
6. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”自然エネルギーを利用した産業向けスマートシステム”, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016, G215, 愛媛, 2016年10月22日.
7. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”太陽光発電システムにおける蓄電池の高効率利用方法”, 第28回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 8-1-3, pp.224-225, 大阪, 2019年8月7日.
8. ◎千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, ”再生可能エネルギーの利用を拡大する車載蓄電池の運用方法”, 自動車技術会 2019年秋季大会 学術講演会講演予稿集, 講演番号 060, pp. 1-6, 宮城, 2019年10月9日.
9. ◎千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, ”太陽光発電と蓄電池電車を統合した鉄道システムの評価”, 第26回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019) 講演論文集, S3-3-4, pp. 518-521, 東京, 2019年12月6日.
10. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”電動車と蓄熱槽を組み合わせた再生可能エネルギー利用システム”, 化学工学会 第51回秋季大会, J119, オンライン開催, 2020年9月24日.
11. 中川 二彦, ◎千阪 秀幸, ”電動車両を用いた革新的エネルギーシステム -バーチャルグリッド-”, 自動車技術会 2020年秋季大会 学術講演会講演予稿集, 講演番号 217, pp. 1-6, オンライン開催, 2020年10月23日.
12. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”様々な住宅への電動車両による再生可能電力の輸送の評価”, 自動車技術会 2020年秋季大会 学術講演会講演予稿集, 講演番号 218, pp.

- 1-6, オンライン開催, 2020年10月23日.
13. ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ” 電動車(バスと自家用車)を用いた統合エネルギーシステム”, 自動車技術会 2021 年春季大会 学術講演会講演予稿集, 講演番号 229, pp. 1-6, オンライン開催, 2021 年 5 月 28 日.
 14. 福田 光起, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”PV&電動バス統合システムのバス路線への導入検討”, 第 25 回動力・エネルギー技術シンポジウム, C131, pp.1-4, オンライン開催, 2021 年 7 月 26 日.
 15. 島田 大暉, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”太陽光発電と電気自動車の統合化システムにおけるエネルギー消費状況の影響評価”, 化学工学会 第 52 回秋季大会, LB115, オンライン開催, 2021 年 9 月 22 日.
 16. 山本 太郎, 福田 光起, ◎千阪 秀幸, 中川 二彦, ”太陽光発電&電動バス統合システムのバス路線への導入検討”, 化学工学会 第 52 回秋季大会, LB116, オンライン開催, 2021 年 9 月 22 日.
 17. 中川 二彦, ◎千阪 秀幸, 古矢 勝彦, ”電動車を用いた太陽光電力の高効率利用システム バーチャルグリッド”, 自動車技術会 2021 年秋季大会 学術講演会講演予稿集, 講演番号 198, pp. 1-6, オンライン開催, 2021 年 10 月 15 日.