

Title	CO ₂ 排出とエネルギーコストの同時削減を実現する“エネルギーシェアリングモデル”の提案
Sub Title	Simultaneous reduction of energy cost & CO2 emission by “energy sharing model”
Author	都倉, 尚吾(Tokura, Shogo) 山形, 与志樹(Yamagata, Yoshiki)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2023
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2023年度システムデザイン・マネジメント学 第557号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002023-0040

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2023 年度

CO₂排出とエネルギーコストの同時削減を実現する
“エネルギーシェアリングモデル”の提案

都倉 尚吾

(学籍番号：82233345)

指導教員 教授 山形 与志樹

2024 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

Master's Dissertation

2023

Simultaneous Reduction of Energy Cost & CO2 Emission by "Energy Sharing Model"

Shogo TOKURA

(Student ID Number : 82233345)

Supervisor Professor Yoshiki Yamagata

March 2024

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論 文 要 旨

学籍番号	82233345	氏 名	都倉 尚吾
論 文 題 目：CO ₂ 排出とエネルギーコストの同時削減を実現する “エネルギーシェアリングモデル”の提案			
脱炭素の実現には、再生可能エネルギー（以下、“再エネ”という）電源の整備拡充が必須であるが主要な再エネ電源である太陽光発電による年間発電量は、世界全体では2020年から2021年への一年間で22.7%伸長したが[4]、日本では21年度の設備導入量は前年比25%の縮小である[5]。世界にくらべ日本は再エネ投資が鈍化しており、2050年温室効果ガス排出ゼロの国際公約達成が危うい。 本研究では日本における再エネ普及の阻害要因を論考し、特に太陽光発電の地産地消に伴い発生する余剰電力の取引価格に着目した。政府による固定買取制度における価格は2018年を境に系統電力価格を著しく下回り、また電力会社による商業ベースでの引取価格は系統からの供給価格を著しく下回っている。従来型電力システムの“一方向性”が関連していると考えられる。 地域コミュニティにおける“エネルギーシェアリングモデル”により、各建物で発生する余剰電力をコミュニティ内で融通することで、余剰電力の取引価格を最適化し、再エネの投資効率が上昇、投資が促進される。 これまでエネルギーシェアリングモデルに関する先行研究は複数存在するが(岩船ら[11]、Yamagataら[12]、Liuら[13]、Rathnayakaら[14]など)、シミュレーションやモデルによる検討であって、社会実装による実測データに基づく研究事例は、きわめて少ない。ステークホルダーが複数にわたるため、システム実装の際の合意形成の困難さ等が原因として考えられる。 地域内の太陽光発電側と需要側双方への経済的メリットとCO₂排出削減を同時にかつ定量的に実現するシステムを、山梨県北杜市の研修保養施設“みらいロッジ”において実装した。エリア内複数棟全てを保有する橋本総業HD株式会社の理解があり、実装が可能となった。 ロッジエリア内の複数棟を自営線でつなぎ、一部の建物に設置した太陽光発電システムからの再エネ余剰電力を、太陽光システムが設置されていない建物にシェアすることで余剰電力取引価格を系統への価格よりも高く、かつ系統からの買電価格より低い取引価格を設定が可能となり、従来の個別契約型でのIRRが1.8%であるのに対し、エネルギーシェアリングモデルでは13.5%に、さらにはエリア内全体で消費後の余剰電力を都市の特定需要地へ託送することで、IRRはさらに上昇し15.3%になることを、実際の投資を伴うシステム実装における発電量、電力融通量などのデータを通じて実証した。 結果、“エネルギーシェアリングモデル”が「エネルギーコスト削減」と「脱炭素」の同時実現をもたらす具体的方法論であり、投資効率も明らかにすることで、再エネ投資促進への道筋を示した。 なお、再エネ普及の“阻害要因”として「日本の平地面積の狭隘さ」や「技術革新の未達」などが挙げられることが多いが、前者は日本の建物の屋根の20%を活用すれば、本州九州の火力発電設備容量に相当し、さらに耕作放棄地を活用すれば日本のエネルギーの自給が可能となること、後者は太陽光発電システムが品質・価格両面において、すでに“コモディティ化”しており、ともに阻害要因にはあたらないことも明らかにした。 エネルギーシェアリングモデルの普及にあたっては、仕組みを構築・運営する専門の事業体の存在と、本モデルがもたらす社会的な利益に対する関係者による理解を通じた合意形成が鍵となる。			
キーワード（5語） 脱炭素、地産地消、余剰電力、電力シェアリング、投資への阻害要因			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	82233345	Name	Shogo TOKURA
Title Simultaneous Reduction of Energy Costs and CO₂ Emissions by "Energy Sharing Model"			
Abstract To achieve decarbonization, it is essential to develop and expand renewable energy power sources. Worldwide annual power generation from solar grew by 22.7% in the year leading up to 2021 [4], but solar power system installed in Japan in FY2021 decreased by 25% compared to the previous year [5]. Compared to the rest of the world, Japan's investment in renewable energy has slowed, and the country's ability to achieve its international commitment to achieve zero emissions by 2050 is in jeopardy. In this study, we discussed the factors inhibiting the spread of renewable energy in Japan, focusing in particular on the transaction price of surplus electricity generated after local production and consumption of solar power generation. The price under the government's feed-in tariff system has fallen significantly below the grid electricity price since 2018, and the purchase price on a commercial basis by electric power companies has also fallen significantly below the supply price from the grid. The "unidirectionality" of conventional power systems is thought to be relevant. Through an "energy sharing model" in local communities, surplus electricity generated by each building is shared within the community, raising price of surplus electricity, increasing the investment efficiency of renewable energy, and promoting investment. There have been several previous studies on energy sharing models (Iwafune et al. [11], Yamagata et al. [12], Liu et al. [13], Rathnayaka et al. [14], etc.), but these studies have been based on simulations and models. There are extremely few research cases based on actual measured data from actual implementation. This is thought to be due to the difficulty of building consensus when implementing the system, as there are multiple stakeholders. By consuming (sharing) surplus electricity within the region with nearby demand areas, we aim to optimize the surplus electricity transaction price, resulting in economic benefits and CO₂ emissions for both the solar power generation side and the demand side within the area. A system that simultaneously and quantitatively achieves reductions was implemented at Mirai Lodge, a training and recreational facility in Hokuto City, Yamanashi Prefecture. The implementation was made possible with the understanding of Hashimoto Sogyo HD Co., Ltd., which owns all the buildings in the area. Multiple buildings in the lodge area are connected with private power lines, and surplus renewable electricity from solar power generation systems installed in some buildings is shared with buildings that do not have solar systems installed, thereby reducing the surplus power transaction price. Higher IRR was realized by energy sharing model, compared to the conventional individual contract type. As a result, the "energy sharing model" is a concrete methodology that simultaneously realizes "energy cost reduction" and "decarbonization," By clarifying IRR, it shows a path to promoting renewable energy investment. Furthermore, while "hindering factors" often include "Japan's limited flat land area" and "unachievement in technological innovation," But only 20% area of the roofs of buildings in Japan is equivalent to the capacity of a thermal power generation facility in Honshu and Kyushu, and solar power system is now already "commodity". The key to popularizing the energy sharing model is specialized business entity to build and operate the system, and the building of consensus through an understanding among stakeholders on social benefits brought by "energy sharing model"			
Keywords (5 words) Decarbonization, Surplus Solar, Local production for local consumption, Energy-sharing, Barrier			

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 気候変動と WB と脱炭素	1
1.1.2 脱炭素化への道	1
1.1.3 政策と実際	2
1.2 本研究の目的	4
1.3 用語の定義	5
1.4 論文の構成	9
第 2 章 先行研究	10
2.1 脱炭素への施策	10
2.2 エネルギーシェアリング 電力融通システム マイクログリッド スマートシティ	10
2.3 WB	11
第 3 章 日本のエネルギー需給構造と再エネ普及ポテンシャル	12
3.1 電力供給の仕組み	12
3.2 発電設備ごとの電力量と需要	12
3.3 建物エネルギー需要と屋根の再エネ供給ポテンシャル	13
第 4 章 再エネ設備の導入への政策と阻害要因	16
4.1 太陽光発電のコスト	16
4.2 脱炭素に向けた政策と電力価格	17
4.3 日本における再エネ導入の阻害要因	19
4.4 電力取引価格と投資インセンティブ	21
第 5 章 エネルギーシェアリングモデル	23
5.1 従来型電力供給構造	23
5.2 エリア内融通モデル(エネルギーシェアリングモデル)の提案	24
5.3 実装へのプロジェクトマネジメントとスケジュール	26

5.4 エネルギーシェアリングモデルの実装.....	26
5.4.1 実施場所.....	26
5.4.2 設備概要.....	27
5.4.3 設備投資に要したコスト	29
5.4.4 運転実績.....	30
第 6 章 エネルギーシェアリングモデルの効果検証	34
6.1 エネルギーシェアリングモデルによる余剰電力の融通量の検証.....	34
6.2 従来モデルとエネルギーシェアリングモデルの投資効率比較	34
6.3 蓄電池の効果	36
第 7 章 結論	40
7.1 本研究の成果	40
7.2 本研究の課題	40
第 8 章 今後の展望	44
おわりに.....	46
参考文献.....	47
謝辞.....	51

図目次

図 1 世界での再エネ増加量(データ出典[4])	2
図 2 事業用太陽光の新規導入量(データ出典[5])	3
図 3 住宅用太陽光(10kW 未満)導入件数 年度別 (データ出典[5])	3
図 4 G7 各国の温室効果ガス排出・吸収量の推移(データ出典[7])	4
図 5 電力供給システム(データ出典[19])	12
図 6 電源別総発電電力量の推移(データ出典[20])	12
図 7 部門別一次エネルギー使用の統計(データ出典[21])	13
図 8 世帯当たり電力消費量(家庭部門関連)(データ出典[22])	14
図 9 太陽光パネルの面積あたりの発電容量([23]より筆者作成)	14
図 10 全国の太陽光発電容量設置ポテンシャル([24]より筆者作成)	15
図 11 日本の火力発電所設備容量(万 kW。ガス、石油、石炭含) ([25]より筆者作成) .	15
図 12 世界の太陽光発電の建設コストと発電コスト([4]より筆者作成)	16
図 13 電源別発電コスト([4]より筆者作成)	17
図 14 事業用太陽光発電 FIT 認定料 年度別 (MW) (データ出典[27])	17
図 15 FIT 買取価格の推移(データ出典[28])	18
図 16 電気料金平均単価の推移(データ出典[29])	18
図 17 FIT 買取価格と系統電力単価の推移(データ出典[28][29])	19
図 18 再エネ導入の阻害要因(環境省)(データ出典[30])	19
図 19 従来モデル 各戸が系統電力と契約(A) (筆者作成)	23
図 20 従来モデル 各戸が系統電力と契約(PV あり)(B) (筆者作成)	23
図 21 エネルギーシェアリングモデル(C) (筆者作成)	24
図 22 域内融通のメリット(筆者作成)	25
図 23 二次余剰電力の託送を含むエネルギーシェアリングモデル(D) (筆者作成)	25
図 24 プロジェクトマネジメントの SCOPE&スケジュール(筆者作成)	26
図 25 清里みらいロッジ地図 (Google マップより)	27
図 26 設置屋根写真1	27
図 27 設置屋根写真 2	28
図 28 清里みらいロッジ 配線図(筆者作成)	28
図 29 エネルギーシェアリングモデル実装図(筆者作成)	29

図 30 設備投資内容(実際の発注にもとづき筆者作成)	29
図 31 14号棟ある日(8/11)の発電・自家消費・余剰電力(筆者作成)	30
図 32 23/10/7 11:00～12:00 の 14 号棟における自家消費、充電、逆潮流の実測値 1(筆者作成)	30
図 33 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の 14 号棟における自家消費、充電、逆潮流の実測値グラフ(筆者作成)	31
図 34 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の太陽光設置 4 棟からの発電状況(筆者作成)...	31
図 35 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の太陽光設置 4 棟からの発電状況グラフ(筆者作成)	31
図 36 発電実績・平均・シミュレーション比較(kWh) (筆者作成)	32
図 37 23 年 5 月 の日別データ(kWh)	32
図 38 23 年 5 月 15 日の時間データ(kW)	33
図 39 23 年 10 月 7 日の時間データ(kW)	33
図 40 エネルギーシェアリングモデルの経済性 1.....	34
図 41 モデルごとの経済性比較(筆者作成)	35
図 42 各パターンごとの IRR および、PAY BACK(筆者作成)	35
図 43 23 年 10 月 7 日晴 放電量:8.93kWh (15:00～21:00) ([37]を用い筆者作成)	36
図 44 23 年 10 月 15 日 雨のち晴 放電量: 3.54kWh (16:30～翌朝 05:30) ([37]を用い筆者作成)	36
図 45 蓄電池による発電電力の夜間へのシフト(筆者作成)	37
図 46 世界の太陽光発電建設費([4]より筆者作成).....	42
図 47 日本での太陽光発電システム費用平均値の推移(データ出典[38])	42

表目次

表 1 低圧 従量電灯 B 単価([33]より筆者作成)	22
表 2 高圧 業務用電力([34]より筆者作成)	22
表 3 清里みらいロッジ 太陽光発電設備概要(筆者作成)	27
表 4 月別発電量(筆者作成)	36
表 5 充放電ロス計算(筆者作成)	38
表 6 蓄電池コストメリット計算(筆者作成)	38

第1章 緒言

1.1 研究の背景

1.1.1 気候変動と人類のウェルビーイングと脱炭素

化石燃料の燃焼によるCO₂排出の増加は気候変動をよびおこし、地球環境に深刻な影響を与え、将来にわたっての人類はもとより生態系全体のウェルビーイング(以下“WB”という)への壊滅的脅威となる。エネルギーコストの高騰も資源を保有する国や企業以外のWBを損なう。経済性に優れ、持続可能な脱炭素手法の実装が急がれる。

COP21においてパリ協定が採択され、CO₂排出削減義務が課され、日本においてもこれまでの”低炭素“から”脱炭素“へと根本的に政策転換が余儀なくされている。さらには2023年ドバイにおいて開催されたCOP28においては”化石燃料からの脱却“が明言された。日本はじめ、国際社会において、再エネへのシフトは不可逆的な責務となっている。

1.1.2 脱炭素化への道

「CO₂排出を大幅削減できる新規技術の多くは未成熟、将来の実用化と普及には大きな不確実性が存在する」(産総研,2022)[1]、「国や地方公共団体、事業者、住民すべてが協力・連携して対応していかなければ、とても達成できるような値ではない」(東大 岩船研究室)[2]と、具体的な方法論構築と実装への困難さを示しているのが現状である。

また、これまでの研究においては”低炭素化“を目標としており、脱炭素化に向けた具体的な施策展開の在り方を検討し、その実現可能性を明らかにしたものは少ない。

一方で、Climate GroupのCOP28を受けての政策発表では、「21世紀は再生可能エネルギー再エネのゴールドラッシュであり、安価な化石燃料の時代は終焉したが、多くの事業者や国、地域においては、その事態に気が付いていない」と警鐘を鳴らしてしている[3]。

Climate Group RE100 COP28 Policy barriers in world's biggest economic block

“Renewables are the gold rush of the 21st century, but many businesses, states, regions, and countries are still missing out. The age of cheap fossil fuels is over, and it's time for governments to take simple steps to open their markets to billions of dollars in corporate investment in cheap,

clean renewable electricity.

1.1.3 政策と実際

政府が国際的にコミットした2030年の電源構成[6]によれば、発電電力量の総量9,340億kWhのうち再エネで約3,500億kWh、原子力で約2,000億kWhとしている。現在はずでに2024年であり日本の風力のポテンシャル、原子力発電所の年齢や再稼働の為の現実を考えると、太陽光発電で1,000～2,000億kWh程度の発電電力量の増加が必要で、このためには1億kWレベルの太陽光発電設備の増設が必要になる。しかし具体的で実行可能な方法論は示されていない。

世界の状況をみてみると、順調に再エネ、特に風力と太陽光が伸長しており、世界の太陽光発電量は2020年から2021年で23%伸長している。

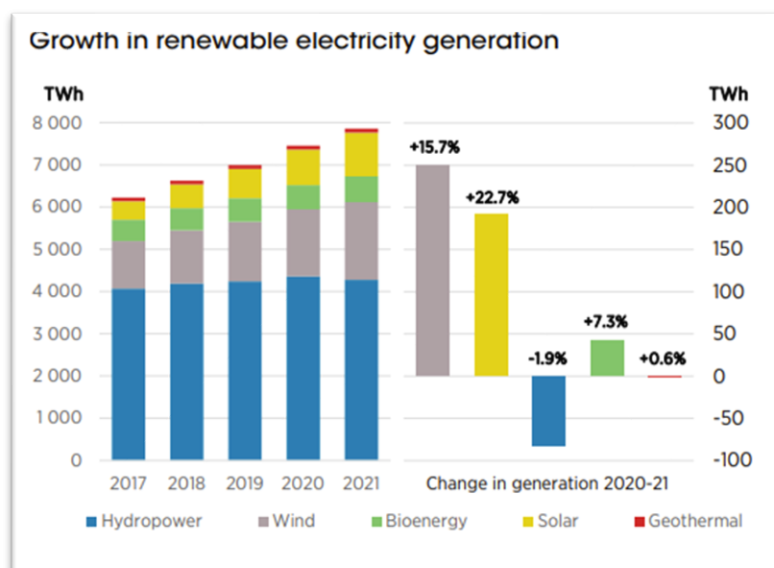


図1 世界での再エネ増加量(データ出典[4])

一方、日本における再エネ発電量の2020年から2021年への伸長は5.5%に留まっており、事業用太陽光発電設備導入量は、同時期で25%減少、住宅用では10年前の半分の水準となっている。

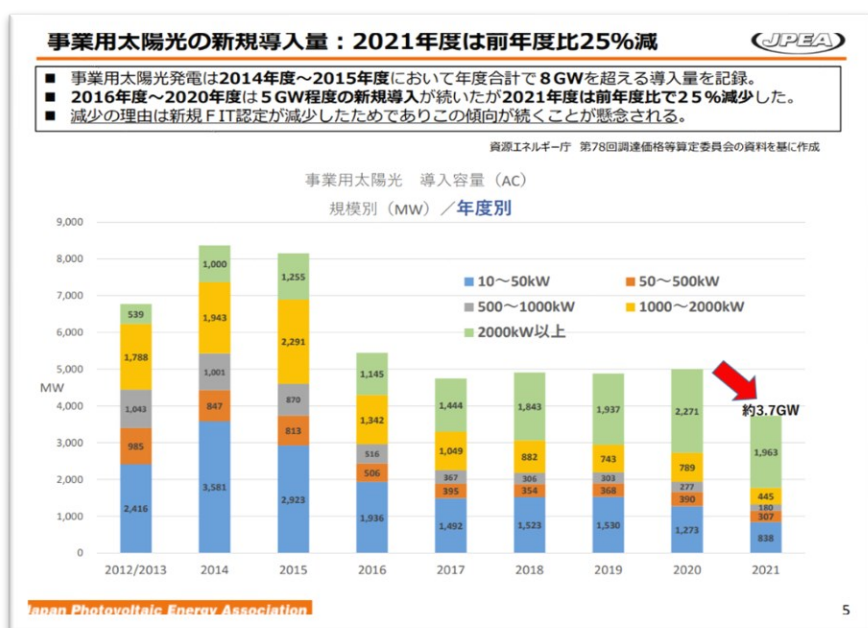


図2 事業用太陽光の新規導入量(データ出典[5])

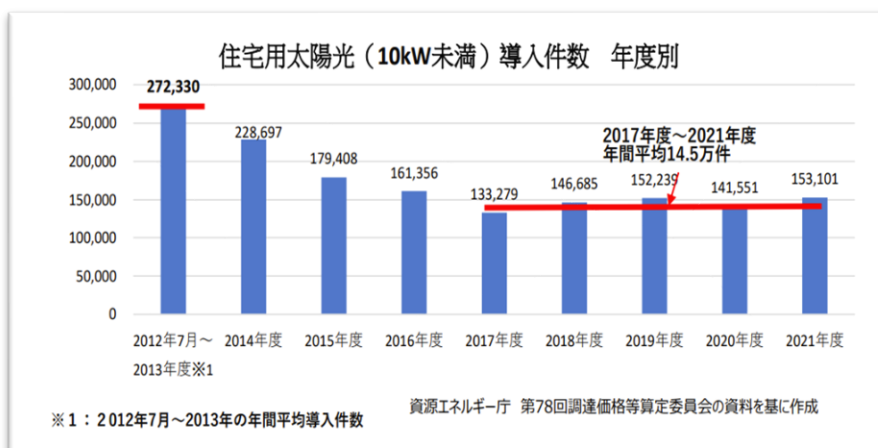


図3 住宅用太陽光(10kW未満)導入件数 年度別(データ出典[5])

日本における阻害要因といわれる因子を検証し、具体的な方法論を示すことは極めて重要で喫緊の課題である。図5の通りこの間、欧州各国は温室効果ガスの排出を着実に減少させてきたが、日米は似たような排出の推移である。

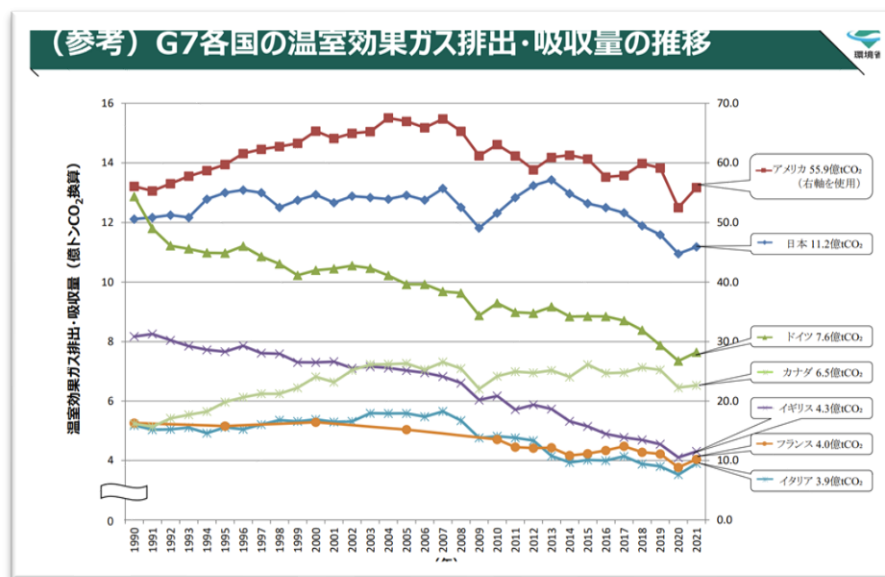


図 4 G7 各国の温室効果ガス排出・吸収量の推移 (データ出典[7])

1.2 本研究の目的

脱炭素への道は“困難である”との見解と“ゴールドラッシュである”との見解がある。脱炭素にむけては、①再エネ電源の整備拡充 ②エネルギー使用効率の向上 ③同時性を持つ電気エネルギーの時間的空間的融通が必要となる。断熱、照明・空調設備の効率化等、エネルギー使用効率を向上させることの意義は大きい(②)、一次エネルギーの供給が化石燃料由来である限り、“低炭素”には資することはあっても、“脱炭素”の達成は不可能である。換言すれば、一次エネルギー供給が脱炭素となっていれば、エネルギー使用効率が多少劣っていたとしても、脱炭素は達成されることになる。一方、電気エネルギーを直接貯蔵することは不可能であり、化学エネルギー(蓄電池)や位置エネルギー(揚水発電など)、あるいは熱エネルギー(給湯、空調等)の形で貯蔵を複合的に考慮することによる総合的なエネルギーマネジメントが重要となる。

本研究では主として①を実現するための阻害要因を論考する。そのなかでも現行の電力供給システムの運用上の問題に着目し、課題解決のためのシステムを構築し、社会実装を踏まえた実証により、ゴールドラッシュへの道を示すことを目的とする。

具体的には、建物間の再エネのシェアリングモデルを実装することで、再エネによる電力の、特に余剰電力の取引価格を最適化し、ユーザーにとっての経済メリットを提供すると同時に、投資のインセンティブとなる原資が存在することを明らかにすることで、同システムを一気に普及さ

せ、社会課題の解決につながる可能性を示す。

本研究では日本における再エネ普及の阻害要因を論考し、特に地産地消に伴い発生する再エネ余剰電力の取引価格の低さと、従来型電力システムが一方向性であることを、普及へのバリアとして着目した。

地域コミュニティにおける“エネルギーシェアリングモデル”により、各建物で発生する余剰電力をコミュニティ内で消費することで、余剰電力の取引価格を上昇させ、再エネの投資効率が上昇し、投資が促進される。

これまでエネルギーシェアリングモデルに関する先行研究は複数存在するが(岩船ら[11]、Yamagata ら[12]、Liu ら[13]、Rathnayaka ら[14]など)、シミュレーションやモデルによる検討であつて社会実装の例は見当たらない。ステークホルダーが複数にわたるため、システム実装の際の合意形成の困難さが原因として考えられる。

地域内での余剰電力を近隣の需要地で消費（シェアリング）することで、余剰電力取引価格の最適化をはかり、地域内の太陽光発電側と需要側双方への経済的メリットと CO₂ 排出削減を同時にかつ定量的に実現するシステムを、山梨県北杜市の研修保養施設“みらいロッジ”において実装した。エリア内複数棟全てを保有する橋本総業 HD 株式会社の理解があり、実装が可能となった。

ロッジエリア内の複数棟を自営線でつなぎ、一部の建物に設置した太陽光発電システムからの再エネ余剰電力を、太陽光システムが設置されていない建物にシェアすることで余剰電力取引価格を系統側買取価格よりも高く、かつ系統からの買電価格より低い取引価格を実現でき、設備投資効率が上昇することを発電量、電力融通量などを測定、経済性も含め効果を実証する。

1.3 用語の定義

【エネルギーマネジメント】

エネルギーの使用と供給を効果的に計画し、制御するプロセス。目的はエネルギーの効率向上と持続可能性。

【実証】

特定の技術やプロセスの有効性を確認する段階。実際の状況での試験や実験が含まれる。

【実装】

計画やアイデアを実際の行動に移すプロセス。具体的なプロジェクトや取り組みを実現する過程をいう。

【カーボンニュートラル (CN)】

発生した二酸化炭素の排出を削減し、残りの排出を吸収することで、純計ゼロの炭素バランスを達成する状態をいう。

【再生可能エネルギー】

地球上で再生する可能性があるエネルギー源をいう。太陽光、風力、水力、地熱などが含まれる。

【スマートグリッド】

情報技術を統合した電力網をいう。需要応答や分散型エネルギー統合が特徴。

【脱炭素化】

炭素排出を削減し、最終的にはゼロにする取り組み、化石燃料に依存しないエネルギーへの移行をいう。

【地域資源活用】

特定の地域の資源を最大限に活用することをいう。例としては、再生可能エネルギーの地域統合などが挙げられる。

【自立分散型】

中央集権的でなく、分散されたエネルギーシステムのことをいう。例としては、地域ごとに自給自足可能な構造などが挙げられる。

【シェアリングエコノミー】

財やサービスを共有・共同利用する経済モデル。所有より使用を重視、全体最適を目指すもの。

【ウェルビーイング（WB）】

個人や集団が身体的、精神的、社会的に健康で幸福な状態にあることをいう。

【温暖化】

地球の平均気温が上昇する現象。人為的な活動による温室効果ガスの排出が影響している。

【気候変動】

長期的な気象パターンの変化をいう。温暖化による影響を含む。

【気象災害】

天候や気象条件によって引き起こされる災害をいう。異常気象により増加している。

【化石燃料高騰】

石油や天然ガスなどの化石燃料の価格が、供給制約、地政学的な緊張、市場の需要増加などの要因により上昇する現象。

【低自給率】

国や地域が自国内で必要な資源を十分に生産できず、外部からの依存が高い状態をいう。

【安全保障】

エネルギー供給の安定的な供給を確保し、エネルギーに関連するリスクから生活や経済活動を守るための政策や戦略。

【快適性】

個人が生活や労働環境において体感する心地よさや満足度で、温度、湿度、照明、騒音レベルなどの物理的要素や、空間デザイン、利便性、健康などの心理的、社会的要素が含まれる。

【健康状態】

個人やコミュニティの身体的および精神的な健康の状態。

【QOL (Quality of Life)】

生活の質を示す指標で個人の幸福度や満足度、健康状態、経済的安定性など、生活における様々な要素を包括的に評価するものをいう。

【系統】

発電・変電・送配電といった電気を生み出し、各家庭や工場といった消費者まで輸送・分配するシステム全体のことをいう。日本には 10 の電力系統を、各送配電会社がそれぞれ運用している。

【グリッドパリティ】

再生可能エネルギーの発電コストが、従来の化石燃料による発電と同等かそれ以下になり、競争力を持つ状態。

【環境取引価値】

環境関連の取引や市場において、環境への影響や価値を定量的・定性的に評価した指標。

【J クレジット】

日本において削減された温室効果ガスの量に基づいて発行され、取引されるクレジット。

【グリーン電力証書】

再生可能エネルギーから生成された電力の起源を示す証書。

【非化石証書】

発電プロセスにおいて化石燃料を使用していないことを証明する証書。

【エネルギー変換効率】

あるエネルギーシステムが入力エネルギーのうち、有用な出力エネルギーへ変換する割合。

【PPA 事業モデル】

太陽光発電システムを設置・運営する事業者が、需要家の土地や建物屋根を借り、太陽光発電設備を設置し、発電した電力を一定期間契約に基づいて需要家に売電するモデル。

【グリーンファイナンス】

環境への影響を考慮し、持続可能性に配慮したプロジェクトや事業への資金提供や金融取引を指す概念。

1.4 論文の構成

ここまで、第1章では、本研究の背景と目的、用語の定義等について述べた。

第2章では、脱炭素への取り組みに関する先行研究をとりあげ、日本における現状を認識し、エネルギーの融通モデルに関する研究について調査し、本研究への展開を検討する。

第3章では、日本のエネルギーの需給構造を再確認し、最終エネルギー消費の3分の1を占め、増加傾向にある民生部門でのエネルギー供給の脱炭素化の重要性を確認し、民生部門で使用されている建物屋根を活用した地産地消による脱炭素ポテンシャル明らかにする。

第4章では、再エネ導入および電力価格の推移、とられた政策と結果、さらには再エネ普及への阻害要因を論考し、阻害要因として再エネ余剰電力の取引価格と、電力供給システムの構造的な問題に言及する。

第5章では第4章での電力需給構造の問題点を解決する方法となるエネルギーシェアリングモデルを提案し、実際に建物への再エネ設備を実装し、建物間での再エネ電力の融通を、隣家間、地域・都市間で行い、データの実測をした。

第6章では、実装による実測データを検証し、経済性を確認した。蓄電池による電気エネルギーの時間的移動に関する経済性も実測データをもとに検証した。

第7章では、本研究の成果とエネルギーシェアリングモデルの展開にあたっての課題を、特にステークホルダー（エネルギー事業者と建物所有者）毎の利益やファイナンス、日本における情報の不完全性や意思決定メカニズムの観点からも論ずる。

第8章では今後の展望について述べる。

第2章 先行研究

2.1 脱炭素への施策

「CO₂排出を大幅削減できる新規技術の多くは未成熟、将来の実用化と普及には大きな不確実性が存在する」(産総研、2022)[1]、「国や地方公共団体、事業者、住民すべてが協力・連携して対応していかなければ、とても達成できるような値ではない」(東大 岩船研究室)[2]と、具体的な方法論構築と実装への困難さを示しているのが現状である。

中野ら(2022)は、「我が国のカーボンニュートラル政策におけるGHG削減マネジメント上の課題と展望」のなかで「優先する対象と施策、エネルギー転換の脱炭素に係る将来の見通し等が示されていない。」と政策批判を展開している[8]。

2022年4月日本銀行調査統計局においても、「わが国の2030年度に向けた温室効果ガス削減目標は、省エネの着実な持続に加え、電源を中心としたエネルギー源の脱炭素化を急ピッチで進めることを前提としており、その達成は容易ではない。」と悲観的である[9]。

2021年9月株式会社三菱総合研究所は、「2050年カーボンニュートラル実現に向けた提言」のなかで、①電力部門の早期ゼロエミッション化、②戦略的なイノベーションが必須、③需要側の行動変容が重要な役割を持つ、としているが、具体的な方策はみあたらなかった[10]。脱炭素化に向けた具体的な施策を構築し、実装を伴った効果を明らかにしたものは少ない。

2.2 エネルギーシェアリング マイクログリッド スマートシティ

本研究の主題であるエネルギーシェアリングモデルに関しては、複数の戸建住宅において、太陽光発電(PV)、電気自動車(EV)、蓄電池などの導入による電力融通の経済性や環境性に関するシミュレーションおよび評価を行った先行研究は、小嶋ら[11]やYamagataら[12]など複数存在する。しかし、システムを実際に実装し、実測による効果を検証した事例はみあたらなかった。Liuら(2017)は、エネルギーシェアリングモデルにおける、価格決定メカニズムモデルをシミュレーションにて提唱している[13]。Rathnayakaら(2011)は、prosumer(発電・消費者)のcommunityが形成されることの有用性を説いている[15]。下田ら(2019)は、「新規住宅街区におけるスマートコミュニティ開発に関する研究」[39]において、PVの出力変動を含めたエネルギー需要の変化の検討を行っている。菅野ら(2018)は、自立分散制御に基づく電力融通がなされるマイクログリ

ッドにおいて、有効な構成条件の検討を行っている[40]。また、森ら(2008)はマイクログリッド等分散エネルギーネットワークにおいての電源の最適容量の導出を数理計画手法により検討している[41]。しかし、これらすべての研究はシミュレーションやモデルによるものであって、社会実装を伴った実測データに基づく事例は見受けられない。

パシフィックコンサルタンツ[14]によれば、マイクログリッドの重要性は今後増していく。一方でマイクログリッドの規模や構成要素を地域特性に合わせて上手く適用していくことは決して容易ではないとしており、実装を伴ったデータについての報告はみあたらなかった。

また、環境省の委託事業のなかでも、自営線の敷設による地産地消の分散型エネルギーシステムの普及に向けた調査・検討がなされ、ロードマップが示されているが、“地域新電力等による自営線エリアを核とした公共施設等の一体的管理“が2030年ごろから2050年にかけて行われる”と、抽象的で具体性に欠ける記述に留まっている[16]。

国土交通省:スマートシティモデルプロジェクト実行計画[17]においても、多くの都市での計画が記載されているが、太陽光の余剰電力を融通するモデルや、それを実装するといった事例はみられなかった。本研究ではPV、蓄電池を複数の戸建住宅に実際に導入し、建物間で融通し、その経済性および環境性に関する評価をデータ検証を伴い行った。従来の電力供給システムの構造上の問題に着眼し、PVによって生じる余剰電力をエリア内で融通する経済的メリットが高いことを、モデルを実装し効果を検証した。

2.3 WB

本研究の主たるテーマであるWBについて述べる。前野(2022)は、「ウェルビーイングとは何か」のなかで、「”ウェルビーイング産業”の市場規模は人類全GDP規模」と述べるように、WBの定義は広範に及ぶが、本研究では「日常のコストの高騰、エネルギーや食糧への供給不安、ひいては身体の安全への脅威」がWBへの脅威であり、逆にそれらを少しでも緩和することは、WBをもたらすという観点を重視した[18]。”エネルギーコストの高騰“や”地球温暖化による人類の生活環境への脅威“を緩和することが、すなわちWBに資するととらえることとする。

第3章 日本のエネルギー需給構造と再エネ普及ポテンシャル

3.1 電力供給の仕組み

資源エネルギー庁によれば、電力供給の仕組みとして、発電所で発電された電力が送配電システムを経て消費地に届けられる、一方向のシステムとして説明されている。

電力は、以下図の通り、発電所 → 送電線 → 変電所 → 配電線 の経路をたどり、各ご家庭まで供給されています。また、電力の供給システムは、(1) 発電部門、(2) 送配電部門、(3) 小売部門 の大まかに3つの部門に分類されます。

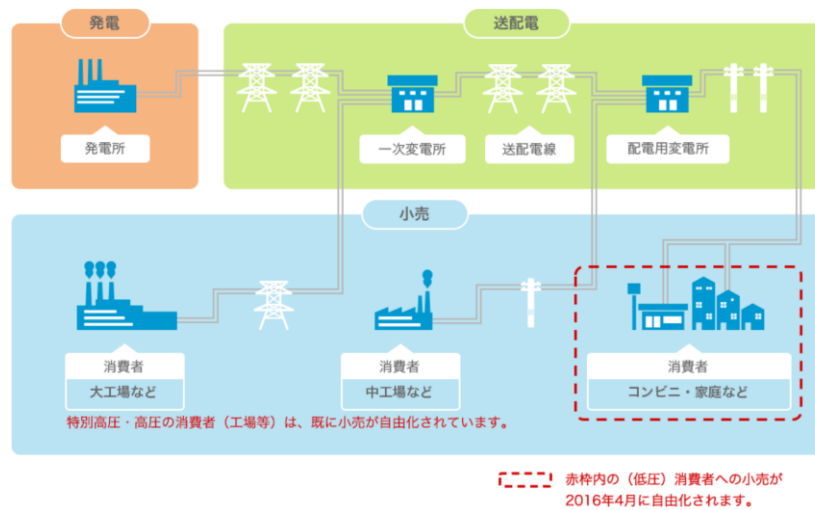


図 5 電力供給システム(データ出典[19])

3.2 発電設備ごとの電力量と需要

電気事業連合会および、資源エネルギー庁のデータ[20]によれば、最近10年の年間総発電量は、約1兆 kWh 強であり、うち化石燃料による発電量は7割を超える。

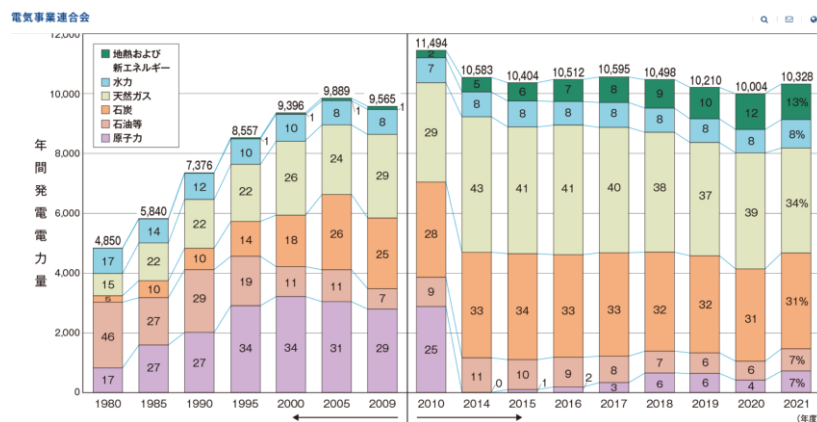


図 6 電源別総発電電力量の推移(データ出典[20])

図 8 に示すように、家庭部門(14.7%)、業務部門(17.9%)による消費は全体の約 1/3 を占め、同部門における脱炭素化は重要課題であるが、従来の電力供給システム、すなわち大規模発電、長距離送電を経て需要地へ供給する方法では、大規模電源の大部分が火力によるため困難である。

民生部門で使用される建物の屋根を活用し、屋根への日射を電力に転換し、地産地消することで脱炭素化へ大きく寄与することができる。

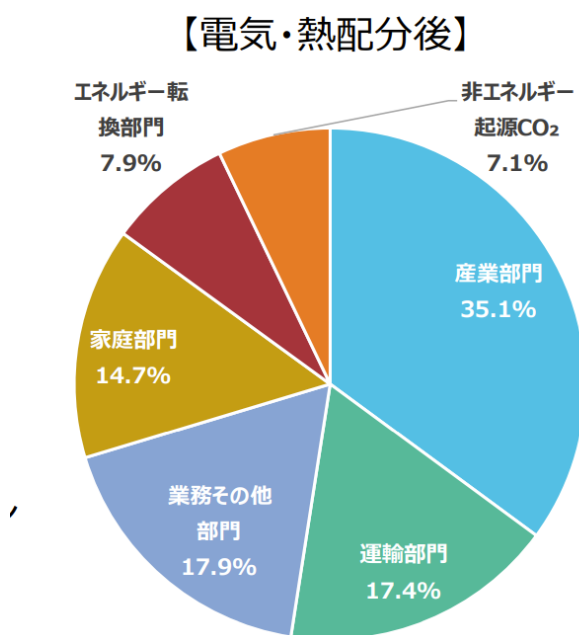


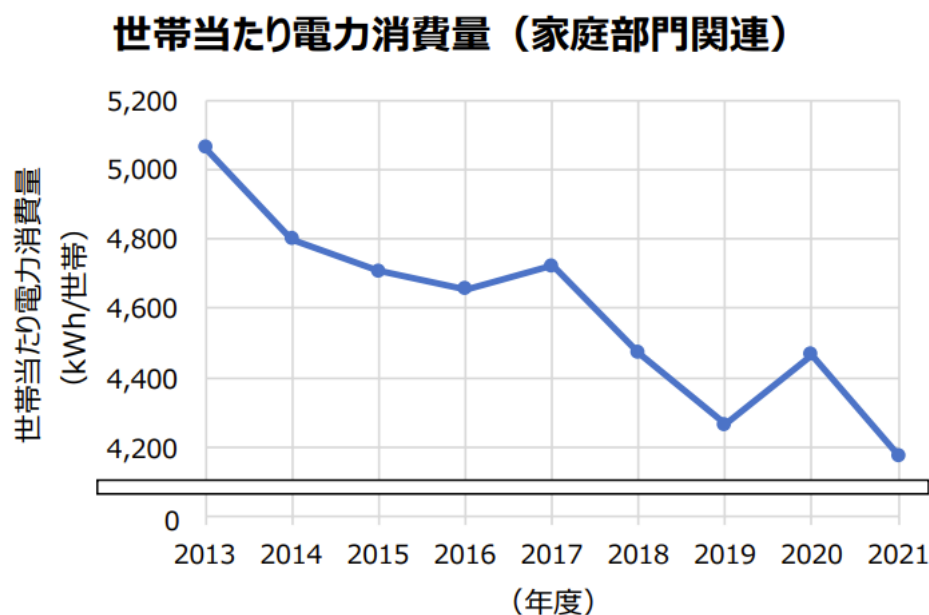
図 7 部門別一次エネルギー使用の統計(データ出典[21])

3.3 建物エネルギー需要と屋根の再エネ供給ポテンシャル

建物の屋根への日射量とエネルギー需給について、標準的な住宅に関するミクロ的なアプローチと、日本のすべての建物の屋根面積を考慮する統計的なアプローチによる考察を行うことで、建物屋根からの再エネ供給のポテンシャルを推計する。

(1)ミクロ的考察(住宅一世帯あたり)

住宅1戸あたりの標準的エネルギー消費と、住宅屋根からの太陽光発電能力は以下のとおりである[22]。家庭部門の世帯あたりの年間電力消費量は、過去 10 年間で、LED 化やエアコンはじめ機器のインバータ化による省エネが奏功したこと、一世帯あたりの人数低下もあり、2013 年の 5,000kWh から 4,200kWh に低下している。



＜出典＞ 総合エネルギー統計（資源エネルギー庁）、住民基本台帳に基づく人口・人口動態及び世帯数（総務省）を基に作成

図 8 世帯当たり電力消費量(家庭部門関連)(データ出典[22])

平均的な家屋の延床面積を 100m²、総二階建てとし、屋根の総面積のうち、太陽光パネル設置に適した有効面積を 80%とした場合、パネル設置可能面積は 40m²となり、設置可能な太陽光パネルの kW と、生み出される電力量は次の通りである。

太陽光パネルの面積あたりの発電容量は現在入手可能なパネルの技術仕様書[23]から推計される平米あたりのパネル発電出力は 213w/m²であり、40m²の屋根に設置可能な PV は 415w x 16 枚= 6.64kW となる。

6.7kW の PV からの年間発電量は、約 7,300kWh であり、平均的な需要の 170%を超える電力を得ることができる。熱利用や電気自動車への充放電を組み合わせることで、ゼロエミッションは十分可能となり、さらには余剰電力の輸出が可能となる。

<https://pd.nextenergy.jp/assets/pdf/gijutsu/NER108M415B-MD.pdf>

ネクストエナジー社	製品仕様書	NER108M415B-MD
サイズ	w1134 h1722 d30	
面積	1.952748 m2	
発電容量	415 w	
w/m2	213 w/m2	

図 9 太陽光パネルの面積あたりの発電容量 ([23]より筆者作成)

(2) マクロ的考察

次に日本全国の建物屋根の総面積を俯瞰する。国土交通省の建築面積のストック統計情報[24]から、太陽光パネル設置可能ポテンシャルを推計する。空き家、建物構造、日射等による導入障壁を考慮し、屋根利用可能率を 20%と仮定し、延床面積と平均階数から全国の設置可能屋根面積は 420km²と推計できる。

太陽光パネルの面積あたりの発電容量は、前述の通り 213w/m²であり、420km²の発電設備容量は、8,900 万 kW となる。

建築物屋根利用可能面積		国土交通省統計データより				
https://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_000785.html						
	延床（億m2）	平均階数	屋根面積	利用可能率	設置可能面積(億m2)	km2
住宅	57	3	19	20%	3.80	380
非住宅	20	10	2	20%	0.40	40
合計	77		21		4.20	420
				太陽光パネル発電容量 w/m2	213 w/m2	
				屋根の発電容量ポテンシャル	8,946 万kw	

図 10 全国の太陽光発電容量設置ポテンシャル ([24]より筆者作成)

日本最大の CO₂ 排出会社である、旧東京電力火力部門と旧中部電力火力部門の合弁会社 JERA[25]の火力発電設備容量に関西、中国、九州といった主要火力発電設備保有会社の設備容量の合計は約 9,000 万 kW であり、すべての屋根の 20%を活用することで同レベルの設備容量が確保できることになる。

日本の火力発電所設備容量 (万kW ガス、石油、石炭含)					
JERA		関西	中国	九州	合計
50Hz (東電)	60Hz (中部)				
3,670	2,437	1456	705	803	9,071

図 11 日本の火力発電所設備容量 (万 kW。ガス、石油、石炭含) ([25]より筆者作成)

太陽光発電設備からの発電量は、NEDO 日射統計[26]より年間 1,100kWh/kW であり、一年間の発電量は 982 億 kWh となる。日本の年間電力需要の約1割を 屋根の総面積の2割を活用することで可能となるが、これは前述の政府コミットメント達成にむけて、有為な施策といえる。

第4章 再エネ設備導入への政策と阻害要因

1.1.3 でも述べた通り、IRENA(国際再エネ機関)のデータ[4]によると、世界の再エネ、特に風力と太陽光は着実に伸長しており、世界の太陽光発電量は 2021 年の太陽光発電量は前年にくらべ 23%増加している。一方、日本における事業用太陽光発電設備導入量は、同時期で逆に 25%減少しており、住宅用では 10 年前の半分の水準となっている[5]。本章では、電力価格の推移、とられた政策と結果、再エネ普及への阻害要因を論考し、阻害要因として再エネ余剰電力の取引価格と、電力供給システムの構造的な問題に言及する。

4.1 太陽光発電のコスト

世界的には順調に太陽光発電設備の新設が続いている。その理由として太陽光発電設備の建設コストとそれに伴う発電コストの劇的な低下が挙げられる。2015,6 年ごろ、すでに太陽光の発電コストが火力発電の水準 0.1USD/kWh を下回り、以降も太陽光発電コストは下がり続け、2022 年の世界の平均的価格はグリッドパリティを超え、0.049USD/kWh である。

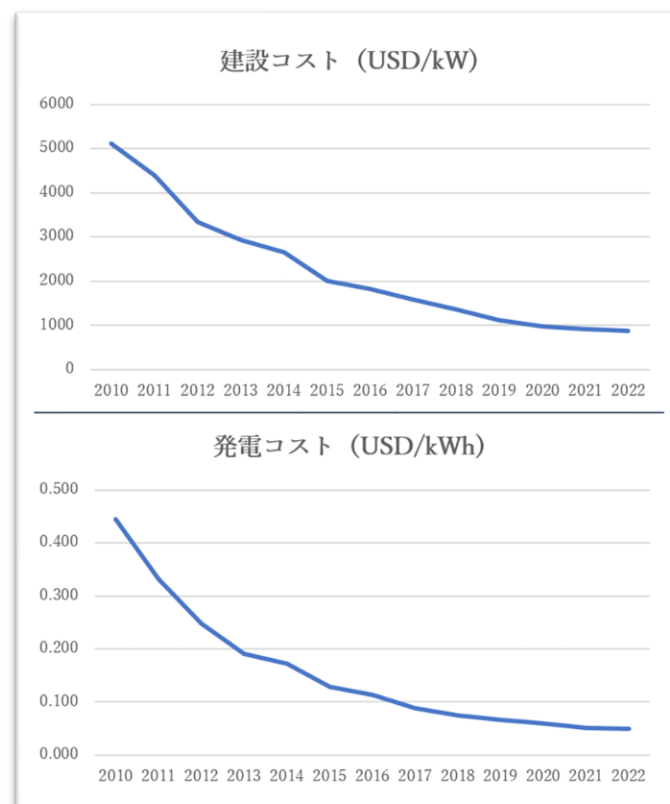


図 12 世界の太陽光発電の建設コストと発電コスト([4]より筆者作成)

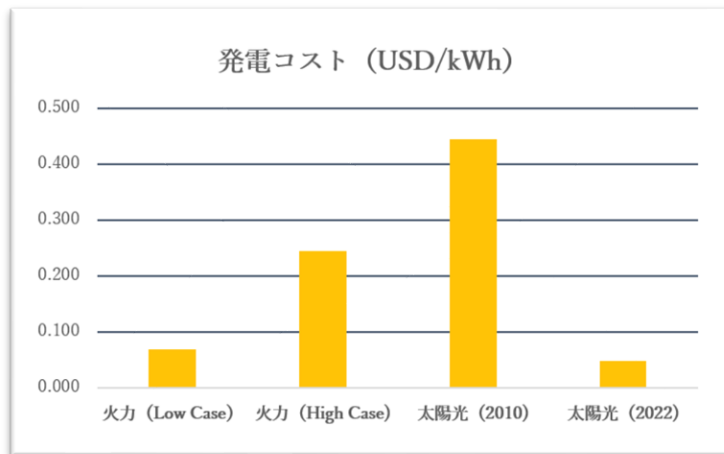


図 13 電源別発電コスト([4]より筆者作成)

公開された情報であるが、日本では、政府をはじめ認識されていない。火力発電の温存政策や再エネへの補助金等、巨額の政府支出が証左である。

4.2 脱炭素に向けた政策と電力価格

日本では 2011 年再エネ促進特措法(いわゆる FIT 法)が施行され、再エネ導入コストを電気料金への賦課金で賄う仕組みにより、高い買取価格を政府が保証することで、急速に普及した。欧州で先行した制度である。

FIT 認定量は 2012 から 2014 にかけて爆発的ともいえる容量が認定されたが、2015 年以降は、急激に減少し、2019 年以降は形骸化といってよい程度である。

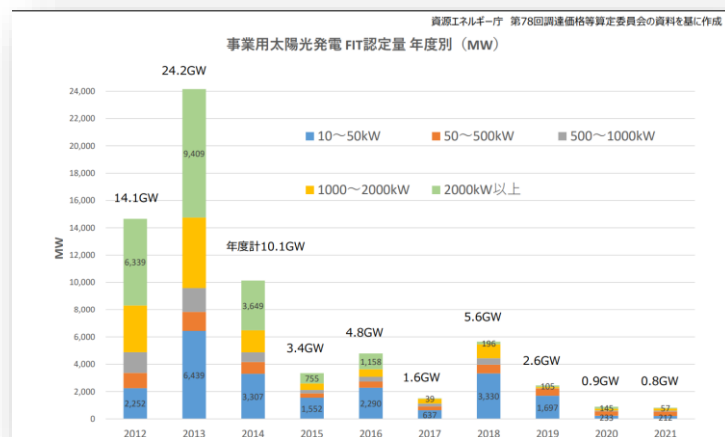


図 14 事業用太陽光発電 FIT 認定量 年度別 (MW) (データ出典[27])

FIT 買取価格は、24 円/kWh を下回った 2016 年度頃から FIT の認定量(申し込み)が激減し、14 円/kWh を下回った 2019 年度以降、FIT 制度は事実上機能していない。

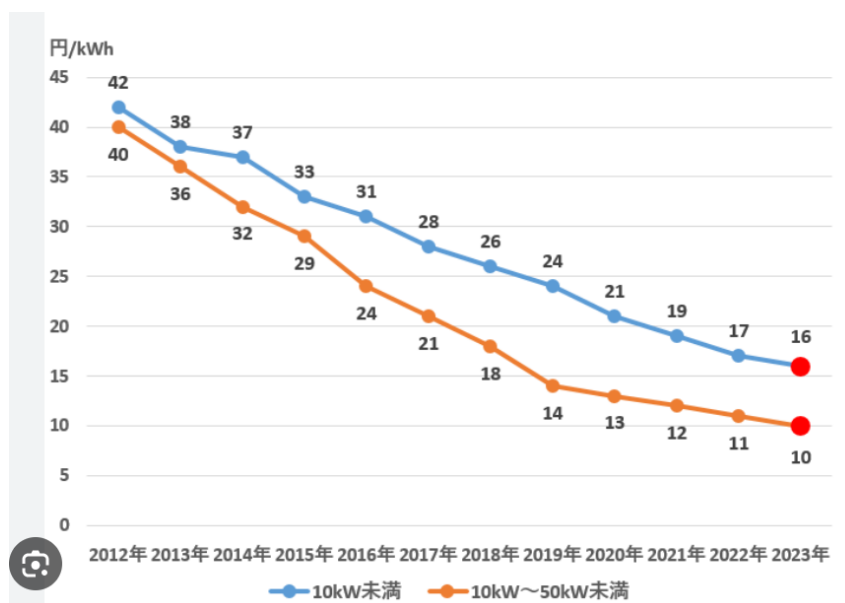


図 15 FIT 買取価格の推移(データ出典[28])

下図は各電力会社の電気料金の推移である。この価格に再エネ賦課金 3 円/kWh 程度、燃料調整費を加えると、産業用でも 20 円/kWh を優に超えている。2017 年以降の FIT 買取価格は、市場価格を大きく下回っており、FIT 制度そのものが形骸化し実効性を失っている。

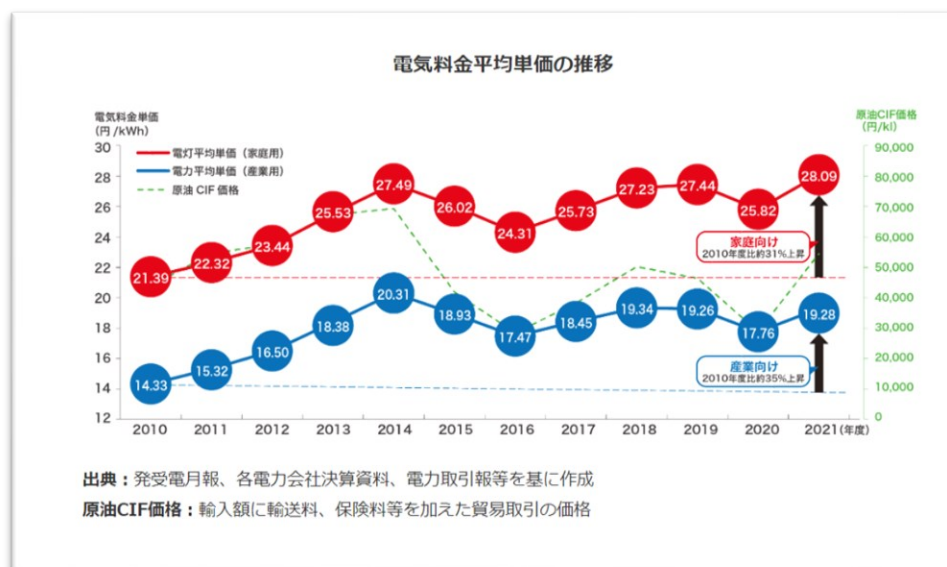


図 16 電気料金平均単価の推移(データ出典[29])

FIT 制度は本来、市場価格よりも高く買取ることにより、投資を促進する制度である。太陽光発電設備導入促進の因子は”電力の取引価格“にあることが明確である。

前述の2つの価格推移を組み合わせると、次の図となる。

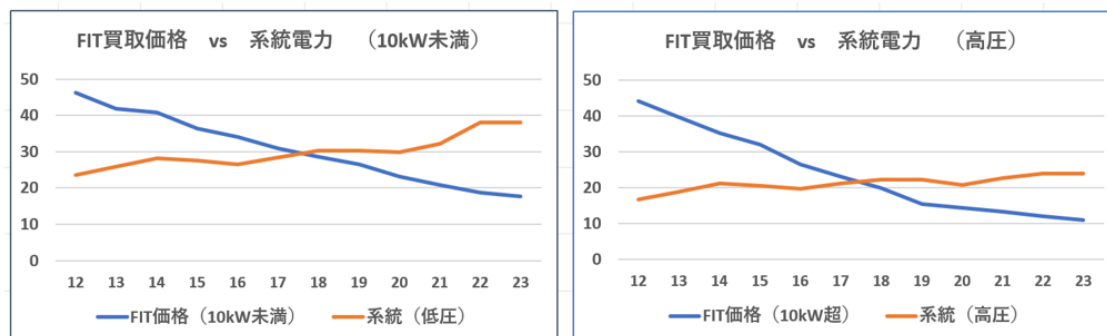


図 17 FIT 買取価格と系統電力単価の推移(データ出典[28][29])

2018 年に、市場価格である系統電力価格は、FIT 制度における政府の買取価格を上回っている。”市場価格より安価で買い取る“という奇妙な現象が続き、その値差が拡大している。投資へのディスインセンティブである。

4.3 日本における再エネ導入の阻害要因

環境省が述べる再エネ導入の阻害要因は下記の通りである。

- 情報の不完全性**
情報不足により、費用対効果に優れた対策実施が見逃される場合がある。
- 資金へのアクセス**
省エネ機器導入の初期費用調達が困難であり、実施が見送られる場合がある。特に中小企業においては、初期費用の調達を重視する傾向にあり、改善が必要とされている。
- 隠れた費用**
対策に関する情報探索や組織内部の手続きに伴う費用等が見落とされ、対策実施の経済性が正しく評価されない場合がある。
- 認識能力の限界**
時間的な制約や情報処理能力の不足により、経済合理的な行動が取れない場合がある。
- リスク**
高度な技術的・財政的リスクや市場の不確実性により、対策実施が見送られる場合がある。
- 便益が表れる期間**
長期的に便益が表れる対策よりも、短期的に便益が表れる対策が優先される傾向がある。

図 18 再エネ導入の阻害要因(環境省)(データ出典[30])

内閣府の令和4年度 年次経済財政報告[31]では、我が国においても「2050 年カーボンニュートラル」と整合的な目標値として、2030 年度の温室効果ガス排出量を 2013 年度比で 46%減、さらに 50%減の高みに向けて挑戦を宣言しており、同報告では、日本の国土は平地に限られることから、大規模太陽光発電や陸上風力発電の導入が進みにくい・カーボンニュートラルを達成するために

は、技術革新が不可欠・必要なノウハウ、人員が不足・再エネの発電が不安定であり、系統安定度に悪影響を与える、といった記述が見られる。これらに対し、項目ごとに考察を加える。

A) 情報の不完全性

IRENA のデータ[4]にあるとおり、世界では火力発電コストにくらべ、太陽光による発電コストより大幅に高くなっているという情報が日本政府や各事業者の間で、認識されていないことなどは、典型的な例である。

B) 資金へのアクセス・便益が現れる期間

コストが安くなり、投資に対するリターンが大きいことが認識されていない。情報の不完全性とも関係する。

C) 隠れた費用・認識能力の限界

これも、情報の不完全性に類する。

D) リスク

高度な技術的・財政的リスクや市場の不確実性により、対策実施が見送られる場合がある。としているが、これも情報の不完全性に包含されと考えられる。

E) 日本の国土は平地が限られており、太陽光発電や陸上風力に不向き

日本の屋根面積の20%の活用で、本州九州の火力発電設備容量に匹敵することや、日本の電力需要の1割を賄うことが可能であることは前述の通りであるが、屋根に加え、拡大する耕作放棄地に着目すると、日本の農地に対する、耕作放棄地の面積は令和4年の農林水産省のデータ[32]によれば、4,200km²であり、この数字は農地の10分の1に相当し、前述の屋根面積の10倍に相当する。エネルギー量の観点からは、建物の屋根と耕作放棄地に降り注ぐ太陽光で日本の電力はすべて自給可能であると結論付けられる。

耕作放棄地と屋根の設置可能な面積は日本の国土面積38万km²の1%強であり、すでに開拓済の安定した平面である。再生可能エネルギー再エネの普及に対し、“日本の国土は利用可能な平地面積が小さいため、不向きである”との政府の見解は、不適當であるといえる。

F) 技術革新が必要

太陽光発電は技術的に完全に自立しており、パネル等必要な機器、システムはすでに”コモディティ化“している。

G) 再エネの発電が不安定であり、系統安定度への悪影響がある

世界では 2021年現在すでに 1000TWh の電力が太陽光によって供給されており[4]、これは日本の火力等を含む総発電量に相当する。日本でもすでに大小数百万か所の太陽光発電設備が系統に接続されているが、系統が不安定になった(周波数や電圧の異常)という報告はみあたらない。日本では過去大規模停電が発生した事例は、台風による送電網の寸断や、地震による火力発電所の停止、津波による原子力発電所のメルトダウンなどが理由である。分散型電源である太陽光発電は、むしろ系統電力に問題ある場合でも、一部電力の供給が可能となるようなメリットがあるが、デメリットは考えにくい。

H) 送電能力(混雑)の問題

山地や洋上など消費のないところに大規模な発電設備を形成しようとすれば、あらたに需要地までの送電ルートを確認する必要がある。既存の送電線があつたとしても容量的に過負荷になることが考えられる。一方、屋根があるということは、建物がある。建物があるということは、そこで電力が消費されるため、消費地での発電により、遠隔地からの送電必要量が減少し、送電線への負荷は減少し、混雑緩和の方向となる。余剰電力の逆潮流により、これまでの電力を送る方向とは反対方向に送る場合、すくなくとも消費地向けの送電容量に相当する量の逆潮流容量はすでに確保されているため、投資なくして、あらたに送電能力が増強されたとみることも可能である。さらに、前述の耕作放棄地に目を向けると、本来農地であり、山林などに比べ、人がアクセスしやすい場所である。すなわち電力の需要地に比較的近い地点であるため、遠隔へ長距離の電力輸送の必要性を減らせる方向となる。

4.4 電力取引価格と投資インセンティブ

再エネ投資への行動変容を促すための因子として、社会性や地球のことを考えることは重要であるが、より実効性のある因子は経済性と自己の快適性といった自己欲求であることは自明である。

前述した FIT 政策下での投資実績の経緯(4.2)からも明らかであり、本研究では主として“経済性”を行動変容への重要因子として焦点をあてる。

再エネ投資促進の阻害要因として余剰電力の取引価格が影響していることは前述の通りである。ここで東京電力を例に系統電力価格、太陽光余剰電力の引取価格、および送配電システムの使用量(託送量、接続送電サービス使用量)をみていく。

表 1 低圧 従量電灯 B 単価 ([33]より筆者作成)

第三段階単価	40.69 円/kWh
燃料調整費単価(2024 年 2 月)	-6.06 円/kWh
再エネ賦課金(2024 年度予測値)	3.6 円/kWh
合計	38.23 円/kWh

表 2 高圧 業務用電力 ([34]より筆者作成)

平均単価	23.26 円/kWh
燃料調整費単価(2024 年 2 月)	-2.88 円/kWh
再エネ賦課金(2024 年度予測値)	3.6 円/kWh
合計	23.98 円/kWh

太陽光の余剰買取価格は 8.5 円/kWh である[35]。

ここで電力供給システムの中枢を占める送電システムの使用(託送)料金をみていく[36]。接続送電サービス料金は低圧 7.48 円/kWh 高圧 2.37 円/kWh である。8.5 円/kWh で仕入れた電力に送電託送サービスを用いて消費側に送ることになる。

低圧で $8.5 \text{ 円} + 7.5 \text{ 円 (託送量)} + 3.6 \text{ 円 (再エネ賦課金)} = \text{約 } 20 \text{ 円/kWh}$ の原価の電力を 38 円程度で、高圧で、 $8.5 \text{ 円} + 2.4 \text{ 円 (託送量)} + 3.6 \text{ 円 (再エネ賦課金)} = \text{約 } 14.5 \text{ 円/kWh}$ の原価の電力を 23 円程度で販売されている。

余剰電力価格が著しく低く、小売り供給側の利ザヤが大きいため、地産地消型太陽光発電設備の投資意欲は削がれているといえる。

前述の 2018 年以降の市場価格より政府の買取価格を安く設定するといった政策や、2023 年度に実施された燃料価格高騰に伴う補助金(3.5 円/kWh)はあたかも、化石燃料の消費を促進する政策ともいえ、日本政府の施策が、再エネ投資への阻害要因である。

第5章 エネルギーシェアリングモデル

5.1 従来型電力供給構造

従来の電力供給の方法は、各需要地へ個別に一方向の供給である。

A. 従来モデル 各戸が系統電力と契約

SDM
System Design and Management

系統から個別買電(例: 約35円/kWh 東京電力EP)

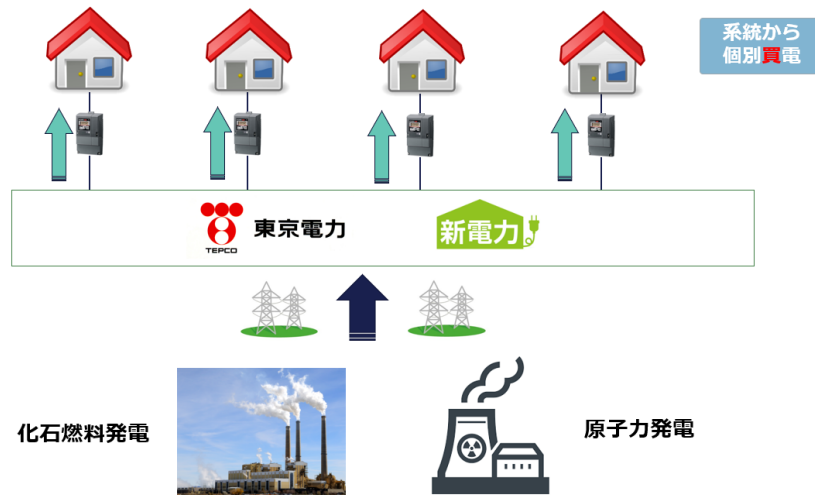


図 19 従来モデル 各戸が系統電力と契約(A) (筆者作成)

これに対し、需要側に太陽光等の発電設備を設置し地産地消するモデルは実装が始まっているが、余剰電力の系統への取引価格は、系統からの供給電力にくらべ、前述のとおり著しく低く設定されている。

B. 従来モデル 各戸が系統電力と契約 (PVあり)

SDM
System Design and Management

太陽光自家消費後の余剰電力個別売電 (8.5円/kWh)。不足分は買電 (例: 35円/kWh)

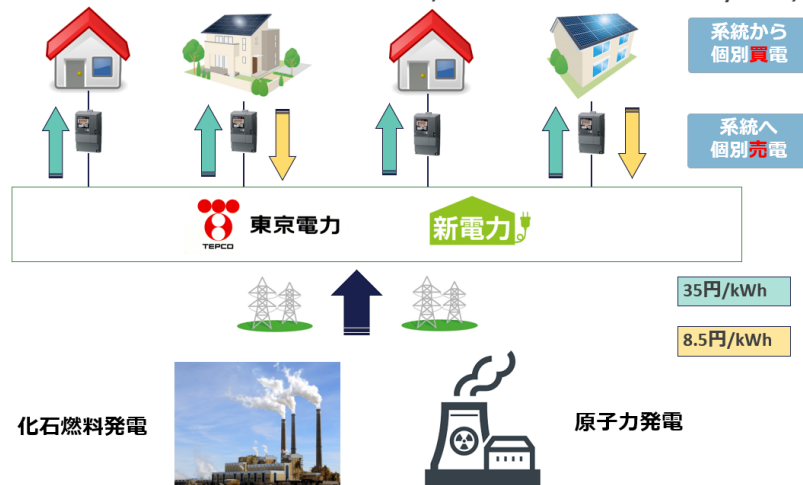


図 20 従来モデル 各戸が系統電力と契約 (PV あり) (B) (筆者作成)

5.2 エリア内融通モデル(エネルギーシェアリングモデル)の提案

エリア内を自営線で結び、太陽光設置地点での余剰電力を太陽光未設置地点に融通することにより、余剰電力の取引価格を上昇させることが可能となる。地域内での余剰電力を近隣の需要地で消費(シェアリング)することで、地域内の太陽光発電側と需要側の双方への経済的メリットを生み出し、CO₂ 排出削減を定量的に、かつ同時実現を加速することが可能となる。

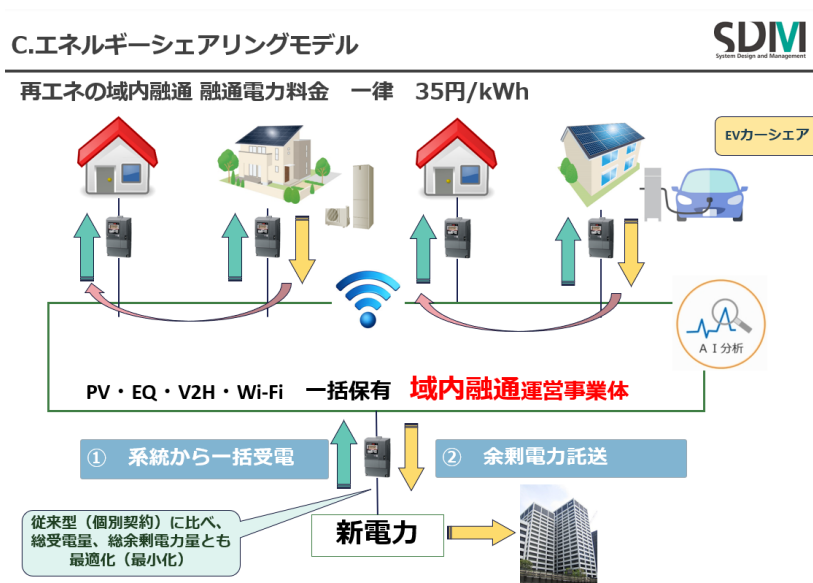


図 21 エネルギーシェアリングモデル(C) (筆者作成)

地産地消後の余剰電力は電気的には、まず最寄りの消費地(例えば隣家)で消費される。需要地点毎に、需要や太陽光発電設備の設置の可否など事情が異なるため、余剰電力の発生と消費が一律でないことに着目すると、一定のエリア内の複数の消費地点を自営線で結び、余剰電力を融通(シェア)し、全体として不足する電力のみを系統側から輸入する仕組みとすれば、再エネのエリア内消費度合が上昇する。太陽光発電による電力単価が系統電力よりも安価であれば(グリッドパリティ)、エリア全体としての経済性が向上し、投資へのインセンティブとなる。

域内融通により、エリア全体としての余剰電力が大きく低減されるため、脱炭素と経済性の両方を達成できる。

域内融通のメリット

～従来型 から 集合モデルへの移行シナリオと合理性～

仮定：住宅3軒でのある時間の発電・消費を次の通り仮定する

- ① 5kWh/hの発電、2.1kWh/hの消費
- ② 3kWh/hの発電、1.8kWh/hの消費
- ③ 0kWh/hの発電、3.2kWh/hの消費

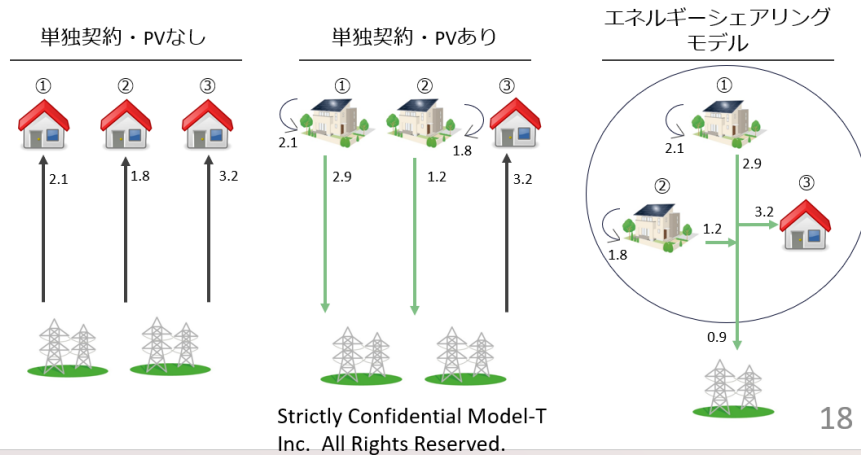


図 22 域内融通のメリット(筆者作成)

さらに、図 23 に示す通り、エリア内全体で消費しきれなかった”2 次余剰電力“を都内の本社等に託送することで、ここでも余剰電力の取引価格を上昇させることが可能となる。

D. 二次余剰電力を日本橋本社へ グループ内脱炭素

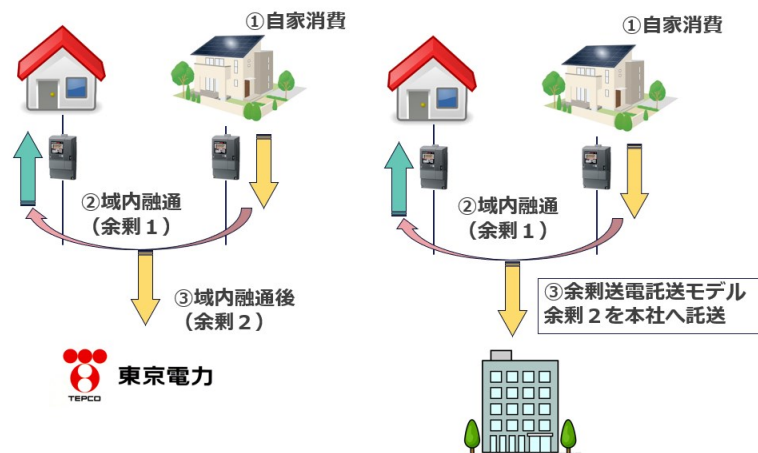


図 23 二次余剰電力の託送を含むエネルギーシェアリングモデル(D) (筆者作成)

5.3 実装へのプロジェクトマネジメントとスケジュール

SCOPE と手順、スケジュールは図 24 の通りである。ほぼこの手順に沿って実行した。

SCOPE & Schedule

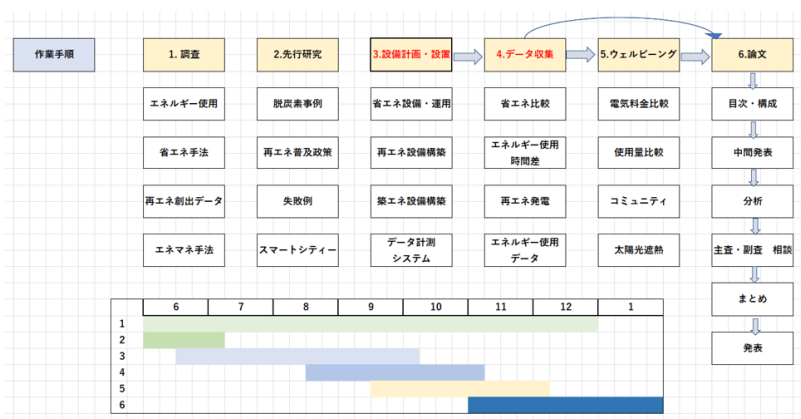


図 24 プロジェクトマネジメントの SCOPE&スケジュール(筆者作成)

5.4 エネルギーシェアリングモデルの実装

山梨県北杜市の研修保養保有施設“みらいロッジ”において、複数棟を自営線でつなぎ、一部の住戸に設置した太陽光発電システムからの再エネ余剰電力を、太陽光設備が設置されていない住戸に融通、さらには蓄電池やエコキュートによる時間シフトなどを組み込み、各戸の電力の輸出入量を計測することで、エリアでの脱炭素と、電力コストの低減を実証した。

5.4.1 実施場所

実施場所は、山梨県北杜市高根町清里 3545-1 清里みらいロッジ(図)である。管理棟1棟、ロッジ 13 棟で構成され、域内で一括受電し、各棟へは自営線で配電されている。



図 25 清里みらいロッジ地図 (Google マップより)

5.4.2 設備概要

管理棟1棟、ロッジ 13 棟で構成され、域内で一括受電し、各棟へは自営線で配電されている。
設置した設備の詳細を表と、設置した屋根の写真を示す。

表 3 清里みらいロッジ 太陽光発電設備概要(筆者作成)

パネル仕様	NER120M375C-MC 各棟 18 枚 6.75kW
PCS	SUN2000-495KTL-JPL1 4.95kW
蓄電池	LUNA2000-5-NHE0
DC-DC コンバーター	LUNA2000-5KW-NHC0_S



図 26 設置屋根写真1



図 27 設置屋根写真 2

配線図は図 28 の通りである。太陽光設備は 8、9、12、14 号棟へ設置し、蓄電池は 12 号棟に 5kWh、14 号棟に 10kWh を設置した。設置は 2023 年 7 月に行った。

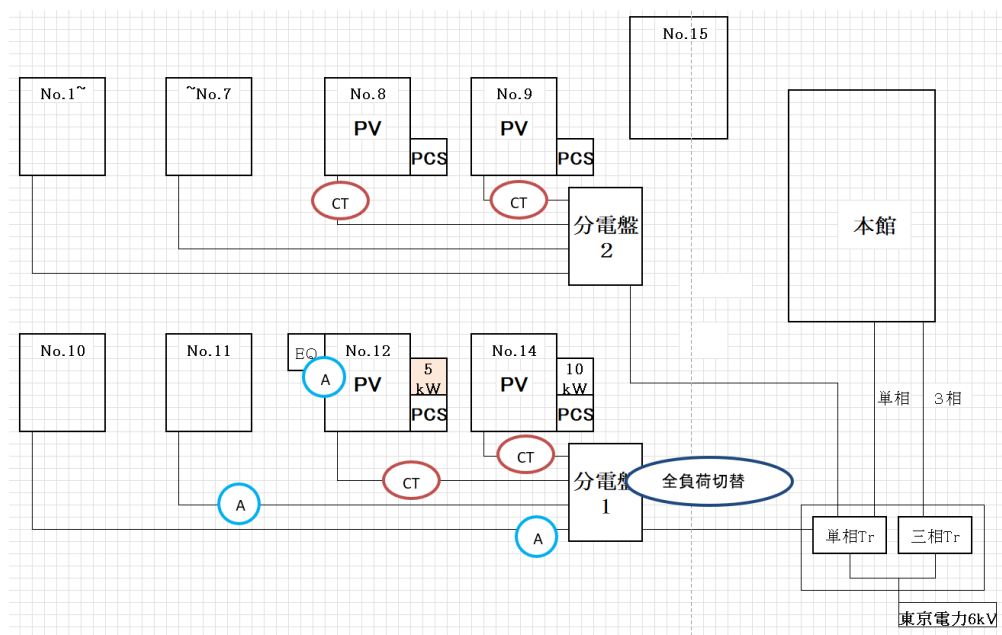


図 28 清里みらいロッジ 配線図(筆者作成)

左から 10、11、12、14 号棟(13は欠番)12、14 で自家消費後の余剰電力は 10、11 号棟他で消費される。

エネルギーシェアリングモデル 実装

エリア内ロッジ4棟にPV設置 自家消費後 エリア内他建物に供給



太陽光設備設置号棟
8号 9号 12号 14号棟

パネル仕様
NER120M375C-MC
各棟 18枚 6.75kW

PV設置棟での
自家消費後
PV未設置棟へ融通



図 29 エネルギーシェアリングモデル実装図(筆者作成)

5.4.3 設備投資に要したコスト

設備投資に要したコストは以下の通りである。

設備投資内容

kW単価 122千円

<発電設備内容>		<設備投資費用> (千円)	
パネル		パネル	
w/枚	375 w	Y/w	40
枚数	18 枚	合計	1,080
軒数	4		
合計容量	27 kW		
PCS		PCS	蓄電池 (14号棟)
kW	4.95 kW	Y/台数	100
台数	4	合計	400
合計容量	19.8 kW		10kWh 900
			施工費 150
			合計 1,050
年間経費		計測システム	
保険	0.50%	(ロガー、SI)	160
固定資産税	1.40%	金具・電材	480
管理料	50	施工費	1,180
年間経費	113	EPC TTL	3,300

図 30 設備投資内容(実際の発注にもとづき筆者作成)

5.4.4 運転実績

発電量から消費量を差し引いた量(マイナス側の表示)が余剰電力である。昼間は太陽光発電量に対してほとんどの時間帯で自家消費後の余剰電力が発生している。この日の発電量、余剰電力は、それぞれ 30.4kWh、20.4kWh、太陽光自家消費 10.0kWh、輸入系統電力 5.45kWh であった。

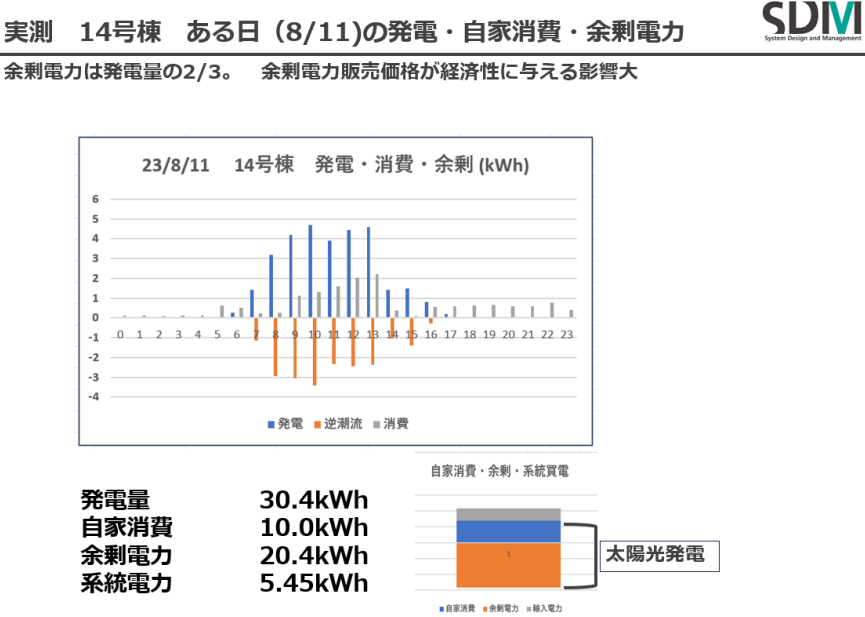


図 31 14号棟ある日(8/11)の発電・自家消費・余剰電力(筆者作成)

次に、ある時間帯における、発電と自家消費、蓄電池への充電、棟からの逆潮流、4棟の発電量合計、みらいログ全体の消費を総合的にみていく。

2023 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の 14 号棟における自家消費、充電、逆潮流の実測値を示す。この時間の 14 号棟への順潮流(系統からの買電)はゼロであり、“自家消費＋充電＋逆潮流”の合計が太陽光発電量である。蓄電池がなければ、“充電量＋逆潮流量”が余剰電力となる。

14号棟 2310071100-1200			(kWh)
自家消費	充電	逆潮流	合計
0.8	1.58	0.58	2.96

図 32 23/10/7 11:00～12:00 の 14 号棟における自家消費、充電、逆潮流の実測値 1(筆者作成)

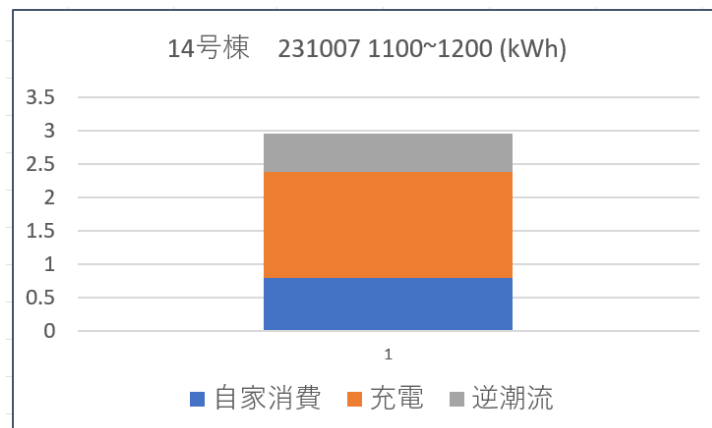


図 33 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の 14 号棟における自家消費、充電、逆潮流の実測値グラフ(筆者作成)

蓄電池がなければ、発電量の7割以上が余剰電力となる。この価格が経済性に与える影響度は大きい。

同じ時間における、太陽光設置 4 棟からの発電の状況を示す。

DC-AC 2310071100-1200				
8号棟	9号棟	12号棟	14号棟	合計
4.67	2.78	1.59	1.38	10.42

図 34 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の太陽光設置 4 棟からの発電状況(筆者作成)

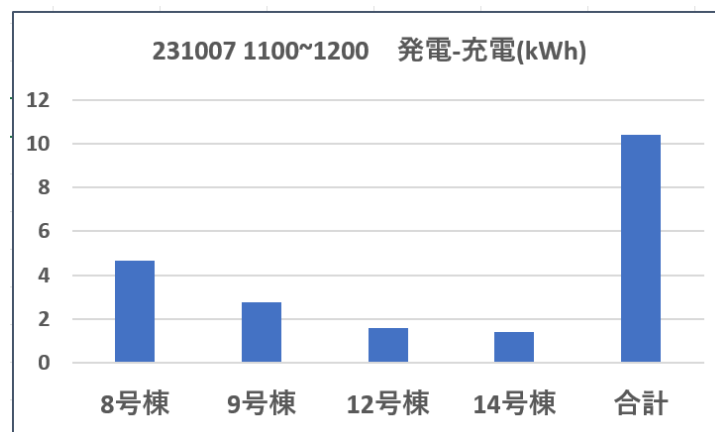


図 35 23 年 10 月 7 日 11:00～12:00 の太陽光設置 4 棟からの発電状況グラフ(筆者作成)

12 号棟、14 号棟には蓄電池が設置されており、この時間、充電がされており、ここでの数字は充電量を除いた量である。4機のインバータからの出力は各棟で消費後、みらいロッジ全体に供給されている。

次に、各棟の月別発電実績と平均 およびシミュレーションを比較する。

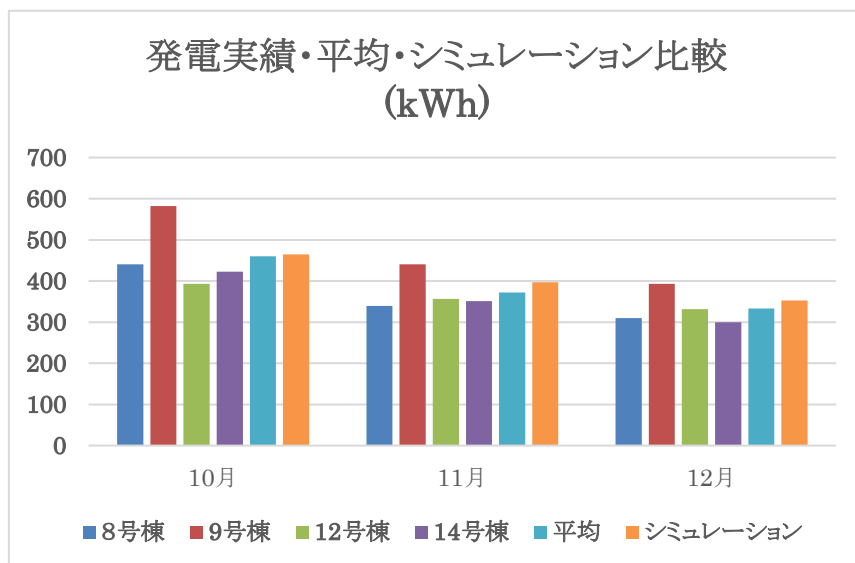


図 36 発電実績・平均・シミュレーション比較(kWh) (筆者作成)

周囲の木立の影響があり、棟により発電量に変化があるが、平均値とシミュレーションがほぼ近似するといえる。また、日当たりのよい建物に優先的に設置し、余剰電力を日当たりの悪い建物に送るといった戦略も有効である。4 棟ともほぼ順調に発電がおこなわれているとみなすことができる。

次にみらいログ全体の電力消費のデータを示す。

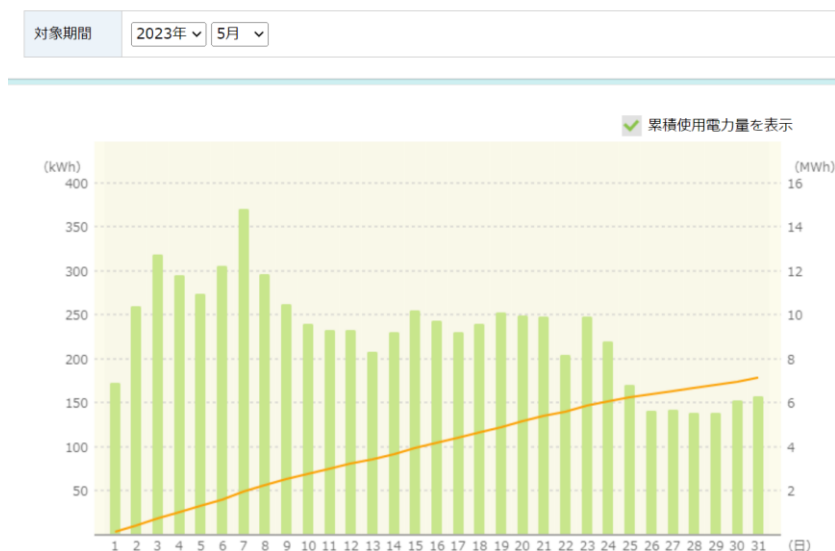


図 37 23 年 5 月 の日別データ(kWh)

太陽光設置前の 5 月の一日の電気使用量の平均的な値として 15 日のデータを参照する。



図 38 23 年 5 月 15 日の時間データ(kW)

下図は太陽光設置後の 10 月 7 日のデータである。11～12 時の各棟からの余剰電力は、エリア内で消費され、系統からの買電量がゼロであった。蓄電池の効果もあり、“発電量-充電量”でロジ全体の消費を賄っている。結果として、この時間における真の余剰電力はほぼゼロとなったといえる。

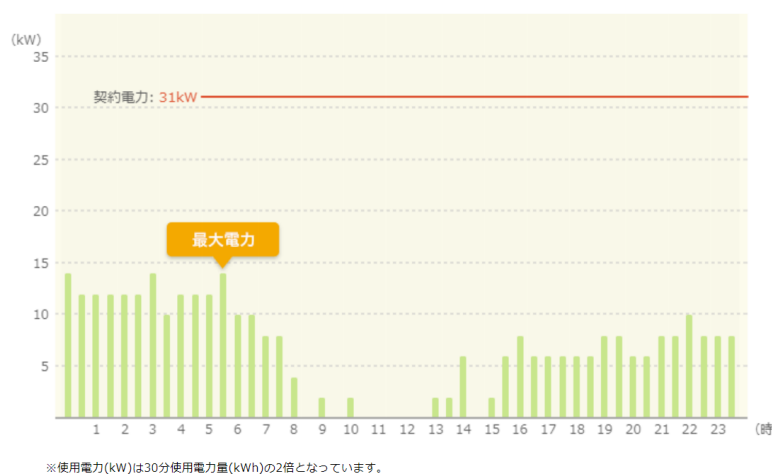


図 39 23 年 10 月 7 日の時間データ(kW)

第6章 エネルギーシェアリングモデルの効果検証

6.1 エネルギーシェアリングモデルによる余剰電力の融通量の検証

PV 設置棟の年間の需要、発電、自家消費、余剰電力、買電量の年間のデータは下図の通りである。また 4 棟の PV 設置棟から、9 棟の非設置棟への融通電力量を同図に示す。

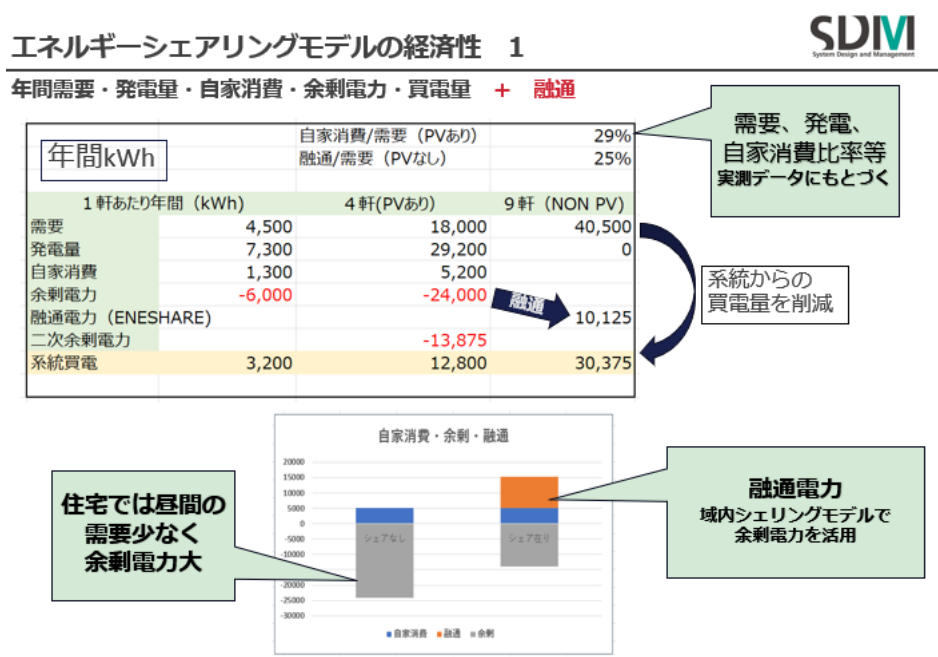


図 40 エネルギーシェアリングモデルの経済性 1

系統に流出する余剰電力をエリア内で使用することが可能となり、この分余剰電力の取引価格の上昇により、投資効率は大幅に上昇する。

6.2 従来モデルとエネルギーシェアリングモデルの投資効率比較

エネルギーシェアリングモデルによる太陽光発電設備の投資効率比較を行う。各棟が別個に電力会社から供給を受けた場合、一次余剰電力の取引価格はすべて 8.5 円/kWh となるが、エネルギーシェアリングモデルでは、域内融通された電力は系統からの購入電力と等価とみなすことができる。系統からの買電単価は 35 円/kWh とする [33]。

5.2 で挙げた次の 4 パターンにおいての IRR を算出する。
 期間は法定償却期間の 17 年間とする。

- A 個別 太陽光なし
- B 個別 太陽光あり
- C エネルギーシェアリングモデル 域内融通
- D エネルギーシェアリングモデル 域内融通＋二次余剰を本店に託送

電気料金	単価	A. 個別 (PVなし)	B. 個別 (PVあり)	C. エネシア (PVあり4軒)	エネシア (PVなし9軒)	D. 二次余剰本店託送
系統	35	157,500	112,000	448,000	1,063,125	
太陽光自家消費	35	-	45,500	182,000	-	182,000
太陽光融通	35	-	-	-	354,375	354,375
余剰 (系統へ)	8.5	-	51,000	117,938		
融通 (本店へ)	12	-	-	-	-	166,500
ユーザー支出合計【一軒あたり】		157,500	157,500	157,500	157,500	

太陽光発電設備に関する収入	B	C	D
収入(千円/年)	386	654	702
NET (千円/年)	273	542	590
IRR(17years)	1.8%	13.5%	15.3%
PAY BACK	12.1	6.1	5.6

図 41 モデルごとの経済性比較(筆者作成)

各パターンごとの太陽光発電設備投資に対する IRR および、PAY BACK Period を示す。

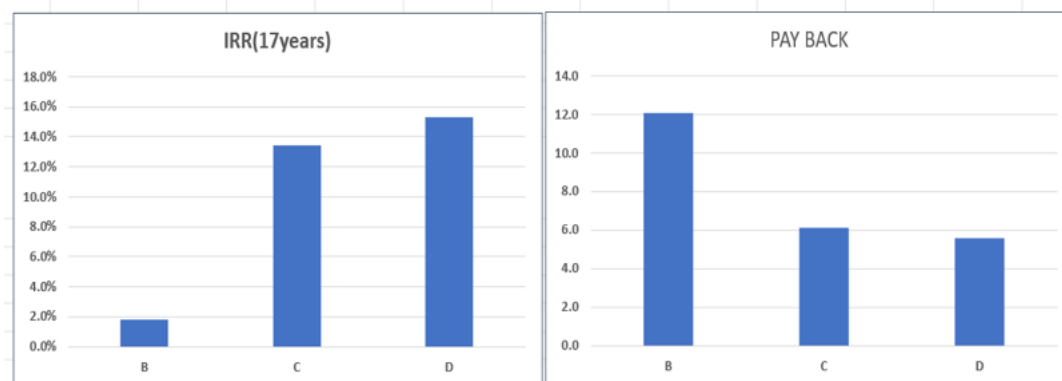


図 42 各パターンごとの IRR および、PAY BACK(筆者作成)

エネルギーシェアリングモデルによる余剰電力の域内融通により、経済性が大幅に上昇することが確認された。さらに、二次余剰電力の域外での特定需要家への融通(D)により、更に経済性の上昇が見込める。”再エネゴールドラッシュ“への道順を示した。

6.3 蓄電池の効果

14 号棟に Huawei 製蓄電池 10kWh を実装した。昼間の余剰電力を充電し、夜間に 14 号棟だけでなく、エリア内他建物にも供給している。晴天、曇天の日の充放電履歴データは次の通りである。オレンジの部分で充電された電力がその日の日没から翌朝の時間帯で放電される(ブルーの部分)。グレーの部分は棟内で消費された電力と余剰として棟外に逆潮流した電力である。

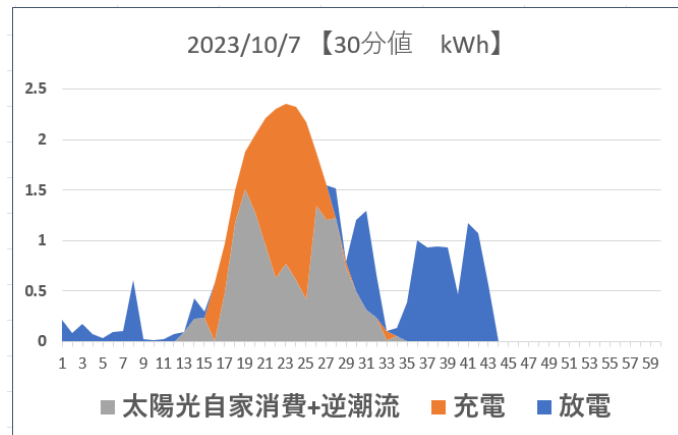


図 43 23 年 10 月 7 日晴 放電量:8.93kWh (15:00～21:00) ([37]を用い筆者作成)

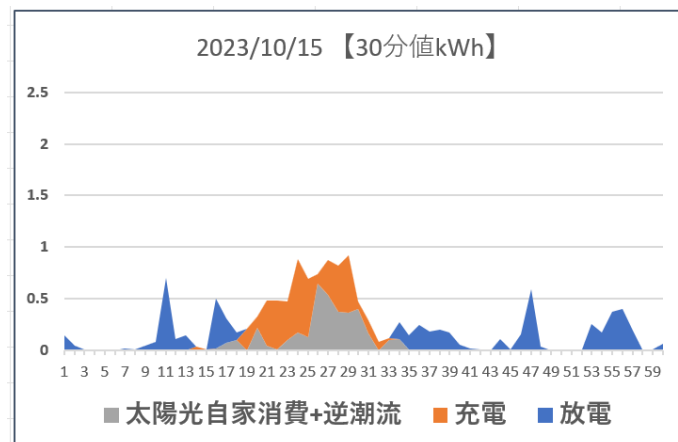


図 44 23 年 10 月 15 日 雨のち晴 放電量: 3.54kWh (16:30～翌朝 05:30) ([37]を用い筆者作成)

月ごとの放電量は次の通りである。

表 4 月別発電量(筆者作成)

月	昼間の自家消費と余剰 (kWh)	夜間へシフト (kWh)	コストメリット (円/月)
10	311.06	111.63	2,934
11	291.56	59.78	1,571
12	260.91	38.64	1,016

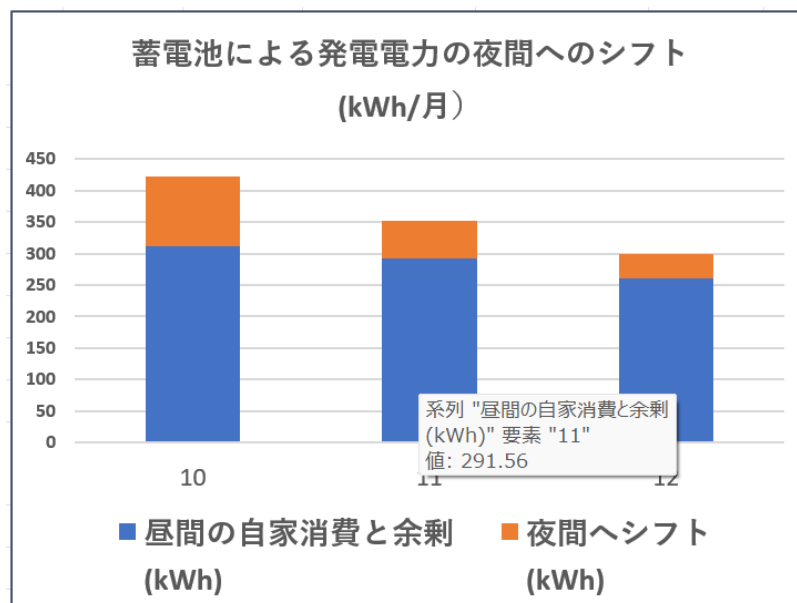


図 45 蓄電池による発電電力の夜間へのシフト(筆者作成)

(1)コストメリット計算の前提

充電のための原資となる電力は太陽光の余剰電力で、本来であれば系統側に安く買い取られるが、蓄電池に充電し、夜間放電により利用することで、系統からの買電価格相当を節約できるという考え方にに基づき、コストメリットを計算する。昼間の余剰電力を 8.5 円/kWh で調達し、夜間、系統電力からの買電と同じ効果とみなし、35 円/kWh で販売することで、差分をメリットとする。

(2)変換効率(ロス率)について

表 5 充放電ロス計算(筆者作成)

充放電ロス計算				変換効率
			カタログ	97.5%
	運転開始	総充電量(kWh)	総放電量(kWh)	
14号棟	230709	585	570	97.4%
H邸	211201	3,518	3,399	96.6%
T邸	230409	2,074	2,036	98.2%

充放電に際し電力の一部は損失となる。メーカーのカタログ値(JIS)は 97.5%である。モデル・ティ社で実装した、みらいロジ 14 号棟および他 2 件での運転開始からの総充放電量の実測値と照合すると、公称変換効率がほぼ正しいことが検証された。

充放電ロスに相当する電力は系統への東京電力引き取り価格 8.5 円/kWh が消費されたものとして、コストメリットを計算した。

今回の測定期間は 10 月～12 月であり、日照時間が弱くなる時期である。10 月を平均的な月と仮定し、一年間の放電量を 10 月の値の 12 倍として計算した。

(3)コストメリット

実測値をもとにした蓄電池の稼働率(実際の放電量/(10kWh*365 日))は 37%で、年間コストメリットは 35 千円。蓄電池の設置費用の回収期間は 30 年、稼働率が 50%に上がったとしても 22 年である。

表 6 蓄電池コストメリット計算(筆者作成)

10月を"平均的な月"と捉え12倍して年間の夜間シフト量を推計			
	昼間の自家消費と余剰 (kWh)	夜間へシフト (kWh)	コストメリット (円/年)
年間	3,733	1,340	35,214
蓄電池設置コストとメリット			
	蓄電池コスト (千円)	コストメリット (千円/年)	回収期間 (年)
	1,050	35	30.0
蓄電池稼働率		37%	10kWhx365回を100%として
稼働率		50%	の場合
	昼間の自家消費と余剰 (kWh)	夜間へシフト (kWh)	コストメリット (円/月)
年間	3,247	1,825	47,975
蓄電池のコストとの比較			
	蓄電池コスト (千円)	コストメリット (千円/年)	回収期間 (年)
	1,050	48	21.9

蓄電池の劣化を考慮すると、経済性は期待できない。仮に 6 年で回収しようとする蓄電池の設置費用は現在の kWh 単価が 1/5、すなわち 20 千円/kWh となる必要がある。もともと、蓄電池には”系統電力停電時の電力供給“といった、単純な価格計算とは異なる価値が期待される。”保険”的な価値としての考え方である。

第7章 結論

7.1 本研究の成果

従来モデルでの投資回収期間は 12 年であるが、エネルギーシェアリングモデルにより、6 年に短縮できることを、机上のシミュレーションではなく、実際にシステムを実装し、データの取得を通じて示した。さらには二次余剰電力の都心等での域外活用により、さらに経済性の向上が期待できることも明らかにした。

WB な脱炭素実現への施策として、従来の電力供給システムの構造に着目したエネルギーシェアリングモデルの実装を通じ、屋根のもつエネルギーポテンシャルを活用し、自家消費とともに太陽光余剰電力の“地域内融通”（シェアリング）することで、大幅な経済性向上が実現できる。

WBな脱炭素を良好な経済性を伴って実現できるエネルギーシェアリングモデルの導入により 2050 年を待たずに脱炭素を WB に実践できることを明らかにした。

また、エネルギーシェアリングモデルは、CO₂とエネルギーコストの同時削減が一義的な目的であるが、収益性があるため、収益を原資として、たとえば災害等非常時の対策、モビリティや通信などのシェアリングなど、地域コミュニティ活動の活性化につながり、様々な分野において地域としてのWB向上が期待できる。

さらには、本モデルが国産エネルギーへのシフトであり、エネルギー安全保障問題への貢献を伴うものでもある。

7.2 本研究の課題

(1)ステークホルダー毎の経済とプロジェクトマネジメント

まず、エネルギーシェアリングモデルにおいては、複数の需要地点がエリア内で連系する必要があるため、関係者（ステークホルダー）が複数となるが、各ステークホルダーが本モデルの利得を認識する必要がある。また、設備投資が複数棟におよぶため、全体の管理（エネルギー及び経理

等)が必要となるが、これらをマネージする事業体の参画が不可欠である。

設備投資にあたってはバラバラに行うのではなく、一括して、PPA 事業者が行い、各ユーザー、ステークホルダーの負担感を減らすことが肝要となる。PPA 事業者が関連設備を保有し、将来の電気料金収入から投資回収を行う。設備の調達建設、ファイナンス、運営とプロジェクトマネジメントを総合的に行う必要がある。

事業モデルに十分な利益が上がることが期待されるため、融資家、投資家にとり魅力ある投資対象となると同時に、政府・自治体などが理解し、啓発することで、補助金等の予算をより効果的に使用できる可能性が高い。

社会実装にあたっては、本事業モデルが複数のステークホルダーが関与することから、関係者の合意形成が重要となる。今回、複数の建物すべてを保有する橋本総業 HD 株式会社の理解があったため、実装が可能になったが、今回の実装を通じ、効果を実証できたことから、今後の展開にあたり、関係者の合意形成の構築を促す要因となると考えられる。

(2)ファイナンス

再エネ導入には追加的費用の支出が必要で、だれかが負担しなければ推進できないという考え方が常識となっている。年々増加する補助金などがそれを物語っている。しかし、本モデルの結論が示すとおり、利益が産まれるため、持続可能性の確保は容易である。仕組みの構築と、関係者の相互理解が重要となる。

PPA 事業モデルに対するグリーンファイナンスの供与はすでに実績があり、資金調達における道は開かれている。地域に降り注ぐ太陽エネルギーを源泉に地域で自立できるシステムとなるため、地域住民他からの投資対象としてのファイナンススキームの確立も重要なテーマとなる。

(3) 自営線敷設のコスト

送配電事業者の 6600V 配電網は日本全国にすでに張り巡らされており、その下流への配電線敷設もこれまで電力会社により行われてきた。新築の分譲地においても同様に敷設される。すなわち物理的な配電線は必ず敷設されるのであって、その運営を自営で行うか、送配電事業者が行うかの違いはあれども、コストとしての差異は基本的になく、むしろ自営線の方が安くなる可能性がある。

たとえば、新規の分譲住宅地の開発の際、送配電会社から各戸へ配電するよりも、分譲住宅敷地内のインフラ整備の際に同時に自営線の施工も行うことで、分譲地内の配電網構築費用は大きく低減できる可能性もある。

(4) 建設コスト

世界的な建設費の推移と、日本での太陽光発電システム費用平均値の推移を示す。

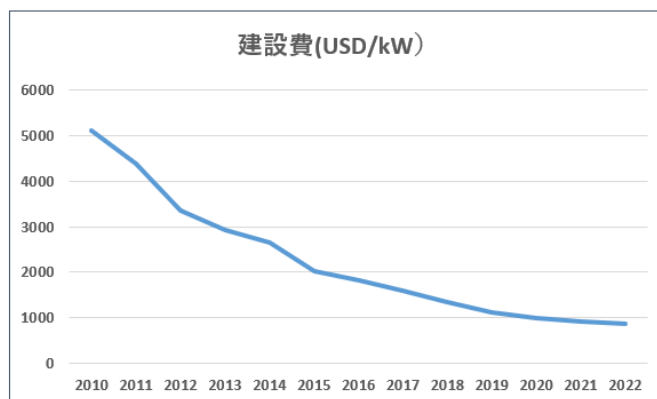


図 46 世界の太陽光発電建設費([4]より筆者作成)

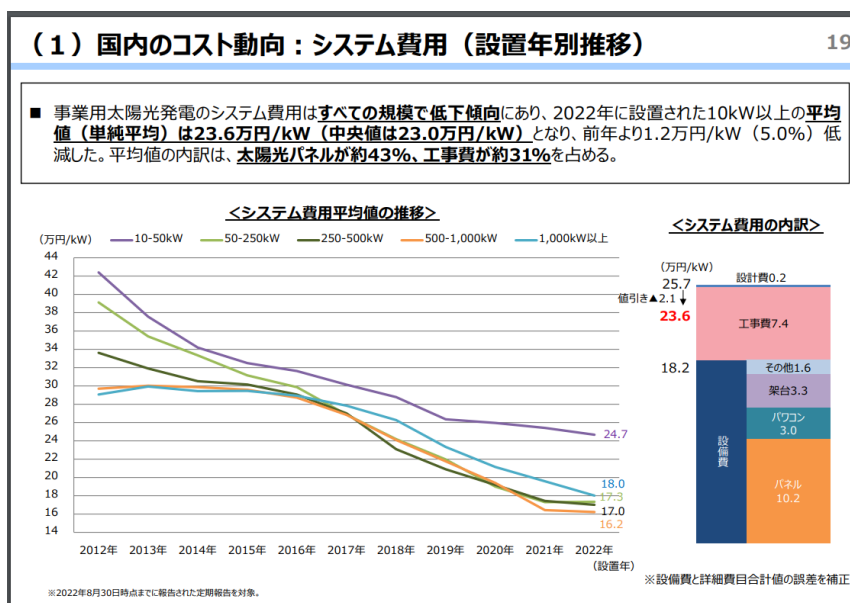


図 47 日本での太陽光発電システム費用平均値の推移(データ出典[38])

日本では設置業者による値付けがバラバラになっており、競争力ある価格の実現が重要である。本研究用の実装に関しては、施工の工夫により、本表の数値よりも、競争力ある価格を実現している。施工方法の合理化とノウハウの共有、施工に携わる職人等の処遇を適正化することが肝要である。

(5)EV との関係

余剰電力の融通先として EV は重要である。系統電力停電時にも、レジリエンスを発揮できる。ただし、中山間部などでは、冬季走行時の不安、高低差のため、移動エネルギーが大きいことなど課題がある。

(6)エコキュートの寒冷地対策

EV 同様、エコキュートによる昼間の太陽光余剰電力の活用は脱炭素の観点から極めて有力である。EV とともに、エコキュートとの組み合わせによる効果検証は、喫緊の課題であり、今後の実装、普及への仕組みの構築が期待される。

今回のシェアリングモデルでは、電力に焦点を当てたが、ガス・灯油など給湯に使用される化石燃料の節減は、脱炭素のための必須のテーマである。

(7)過疎化による空き家の発生(需要が消える)

少子高齢化による潜在、顕在リスクとして、建物使用の永続性の問題がある。PPA 事業者にとって、ユーザーが消滅することが最大のリスクである。持続可能なコミュニティの形成が重要であるが、エネルギーシェアリングモデルによる地域への利益還元により、コミュニティの持続可能性へのメリットが期待できる。

第8章 今後の展望

前章でも挙げたとおり、様々な課題が存在するが、解決可能か、解決済である。最大の課題は、「電力は個別に電力会社から供給されるものである」とか「日本は平地がないので、太陽光には不向き」とか「設備や設置費用が高い」といった“常識”に疑問をもたないことではないだろうか。

本研究では、エネルギーシェアリングモデルが①物理的にかつ②経済的に実現できるかの検証を行い、①についても②についても可能であることを示した。施工費の合理化、エコキュート・EV・蓄電池によるエネルギーシフト、バイオマス発電による夕方から夜間の供給などと組合せなどにより、さらに進化したエネルギーシェアリングモデルが展開されることが考えられる。

さらには、エネルギーシェアリングモデルとの相乗効果を期待できる施策について、例を述べる。本論での主たるテーマである【WB の観点】からも重要である。次のような視点において、本モデルとの相乗効果により、より高い効果が見込める。

(1) 再エネ余剰電力託送モデル

本社機能を日本橋地域にもち、地域における拠点(支店、工場など)ネットワークを有する企業を対象に、各地域拠点建物において、PPA モデルによる太陽光発電設備を設置し、①当該拠点での自家消費、②使いきれなかった余剰電力を公共財である東京電力パワーグリッドによる託送サービスを活用し送電、③日本橋本社でカーボンフリーな電力を利用することで、グループ全体のCN 率を向上。同モデルを同様の企業に展開することで、エリア全体のCNを達成することが可能である。

(2) 系統停電時にも特定重要負荷に再エネ電力供給を持続するモデル

事業継続(BCP)は、WB という観点においても重要である。たとえば、実験用資機材を供給する池田理化において、一部の商品の温度を保つことは事業継続に不可欠であるが、停電した場合の対策が求められていた。

PPA モデルに蓄電池(EV または定置式)を組みあわせ、昼間の太陽光余剰電力による蓄電を行い、夜間は蓄電池からの供給により、系統遮断時の持続可能な RE100%電力の供給を達成する。たとえば、系統電力が停電しても冷蔵庫への給電が確保されることの安心感とリスク回避はまさに、WB といえる。

(3) 系統電力よりも安価に供給が可能

価格が高いことは WB に反する。

(4) 遮熱効果

屋根に設置されたパネルは、再エネの供給にとどまらず、直射日光を遮り、建物内の空調需要を低減する効果があり、WB と脱炭素に寄与する。

(5) デマンド削減効果

夏の昼間の冷房需要期の電力を屋根からの太陽光発電による供給で基本料金を下げることが期待できる。kWh だけでなく、kW を下げる効果がある。電力システムは最大電力 (kW) に合わせて設備形成されるが、最大需要電力 (kW) に比例して基本料金が課される。これらを低減できる効果がある。基本料金の削減が期待できる。電力系統の停電リスクの低減にもつながる。

(6) 化石燃料価格高騰リスクのヘッジ

経営上、原料価格の変動はリスクである。リスクを低減できることは WB につながる。

(7) エネルギー安全保障

日本国内に天から供給される太陽光エネルギーをフルに活用することで、エネルギー供給の海外依存度を低下させることにより、エネルギー安全保障問題の解決にも寄与する。

おわりに

本研究を通して、WB な脱炭素への施策として、簡素に導入可能な方法があることを示した。

手が届く社会的利益がそこにあり、その利益が「地域コミュニティの持続可能性」や「エネルギー安全保障」、もちろん本研究の本題である「脱炭素」と「WB」につながるにもかかわらず、「情報の不完全性」のために、享受できる機会を逃すのは、社会としての損失である。政府はもとより、ひとりでも多くの方々再エネへのシフトが、足枷ではなく”ゴールドラッシュ“への道であることを実感する日の到来が近いことを期待するものである。

なお、本研究とビジネスの関係であるが、社会課題を特定し、課題解決の方法を見出し、具体的にシステムを構築・実践し、効果検証するというプロセスにおいて共通である。特にその方法が有効であるかどうかについては、経済性が成り立つかが重要となる。経済性がなりたち、投資が実行されなければ、課題解決には至らない。

エネルギーシェアリングモデルは、CO₂とエネルギーコストの同時削減が一義的な目的であるが、収益性があるため、収益を原資として、たとえば災害等非常時の対策、モビリティや通信などのシェアリングなど、地域コミュニティ活動の活性化につながり、様々な分野において地域としてのWB向上が期待できる。

本研究の成果が、社会のWB向上に直結することを心から願うものである。

参考文献

- [1] 産相研 HP「日本の 2050 年カーボンニュートラル実現に向けたシナリオ分析」2022 年 10 月 5 日
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2022/nr20221005/nr20221005.html (最終閲覧日 2024/1/20)
- [2] 内閣府 次期戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築」東京大学 岩船由美子 大阪大学 山口容平 電力中央研究所 上野剛
- [3] IESR Climate Group「Tripling of Renewable Electricity, New Report Finds」2023/12/6
<https://iesr.or.id/en/cop28-policy-barriers-in-worlds-biggest-economies-block-tripling-of-renewable-electricity-new-report-finds> (viewed 2024/1/20)
- [4] IREANA「Renewable energy hlights」2023/7/3
https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/Renewable_energy_highlights_July_2023.pdf?rev=61160fc74ada4f0daa670f5003820602(viewed 2024/1/20)
- [5] 経済産業省 第 79 回調達価格等算定委員会 資料 1「太陽光発電の現状と自立化・主力化に向けた課題(一般社団法人太陽光発電協会)」2022 年 11 月 1 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/079_01_00.pdf (最終閲覧日 2024/1/20)
- [6] 経済産業省 資源エネルギー庁「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」2021 年 10 月
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [7] 環境省・国立環境研究所「2021 年度温室効果ガス排出・吸収量(確報値)概要」2023 年 4 月
<https://www.env.go.jp/content/000128749.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [8] 中野 健太郎, 永井 祐二, 岡田 久典, 小野田 弘士. “我が国のカーボンニュートラル政策における GHG 削減マネジメント上の課題と展望.” 国際 P2M 学会研究発表大会予稿集 (2022): 161-175.
- [9] 日本銀行調査統計局 「わが国の 2030 年度に向けた温室効果ガス削減目標は、省エネの着実な持続に加え、電源を中心としたエネルギー源の脱炭素化を急ピッチで進めることを前提としており、その達成は容易ではない。」
- [10] 三菱総合研究所「2050 年カーボンニュートラル実現に向けた提言」2021 年 9 月 7 日
<https://www.mri.co.jp/knowledge/insight/dia6ou000003k49g-att/er20210907pec.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [11] 小嶋 祐輔, 荒井 綾希子, 阿部 力也, 岩船 由美子. “電気自動車・蓄電池を用いた戸建て住宅地域の電力融通システムの設計方法の確立およびその評価.” エネルギー・資源学会論文誌 44.2 (2021): 50-57.
- [12] Daisuke Murakami, Yoshiki Yamagata. “Micro grids clustering for electricity sharing: an approach considering micro urban structure.” Energy Procedia 142. (2017): 2748-2753.
- [13] Nian Liu, Xinghuo Yu, Cheng Wang, Chaojie Li, Li Ma, Jinyong Lei. “Energy-Sharing Model With Price-Based Demand Response for Microgrids of Peer-to-Peer Prosumers.” IEEE 32.5 (2017): 3569-3583.
- [14] パシフィックコンサルタンツ「地方都市におけるゼロカーボンシティの実現に向けて」2021 年 2 月
<https://www.pacific.co.jp/magazine/fa6cfc9c8ac5f68ea952b8f3661672ebc1bb0c2d.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [15] Rathnayaka, A.J.D., Potdar, V.M., Hussain, O. and Dillon, T. “Identifying Prosumer’s Energy Sharing Behaviours for Forming Optimal Prosumer-Communities.” International Conference on Cloud and Service Computing, Hong Kong, 12-14 (2011): 199-206.
- [16] パシフィックコンサルタンツ HP「自営線の敷設による地産地消の分散型エネルギーシステムの普及に向けた調査・検討」<https://www.pacific.co.jp/service/new137.html> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [17] 国土交通省 HP「先進地域のスマートシティ実行計画・取り組み内容」

- https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000051.html (最終閲覧日 2024/1/20)
- [18] 前野 隆司. “ウェルビーイングとは何か.” 情報の科学と技術 72.9 (2022) : 328-330.
- [19] 経済産業省 資源エネルギー庁 HP「料金の仕組みと料金メニュー例のご紹介」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/supply/ (最終閲覧日 2024/1/20)
- [20] 電気事業連合会 HP「発電設備と発電電力量」
<https://www.fepc.or.jp/smp/nuclear/state/setsubi/index.html> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [21] 部門別一次エネルギー使用の統計 経済産業省資料
- [22] 世帯当たり電力消費量(家庭関連部門) 経済産業省資料
- [23] NEXT Energy NER1108M415B-MD 製品仕様書
<https://pd.nextenergy.jp/assets/pdf/gijutsu/NER108M415B-MD.pdf>(最終閲覧日 2024/1/20)
- [24] 国土交通省「建築物ストック統計の公表について」2022 年 9 月 7 日
<https://www.mlit.go.jp/common/001254410.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [25] JERA ほかに火力発電設備容量 経済産業省資料
- [26] NEDO 日射統計より
- [27] 事業用太陽光発電 FIT 認定量 経済産業省資料
- [28] 省エネ・創エネ.com 「【2023 年最新】太陽光発電の売電価格と推移を解説」2023 年 4 月 10 日
<https://www.sc-energy.com/column/sc-energy/1161.html> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [29] 経済産業省資源エネルギー庁 HP「日本のエネルギー2022 年度版」エネルギーの今を知る 10 の質問”
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2022/002/> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [30] 環境省「阻害要因を除去する対策の重要性の共有」
<https://www.env.go.jp/content/900497804.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [31] 内閣府 HP「令和 4 年度 年次経済財政報告」
<https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je22/h03-02.html> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [32] 農林水産省 HP「令和 4 年 耕地面積 (7 月 15 日 現在)」
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/menseki/r4/kouti/index.html (最終閲覧日 2024/1/20)
- [33] 東京電力エナジーパートナー HP「料金単価表・電灯」
<https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/chargelist01.html> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [34] 東京電力エナジーパートナー HP「業務用電力(契約電力 500kW 未満)」
https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/plan06.html (最終閲覧日 2024/1/20)
- [35] 東京電力エナジーパートナー HP「再エネ買取余剰プラン」
https://www.tepco.co.jp/ep/renewable_energy/plan/standard.html (最終閲覧日 2024/1/20)
- [36] 東京電力エナジーパートナー「接続送電サービス料金」
<https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/retailservice/pdf/ryoukin0406.pdf> (最終閲覧日 2024/1/20)
- [37] 国土交通省 気象庁 HP「過去の気象データ検索」
https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php?prec_no=49&block_no=47638&year=2023&month=10&day=&view= (最終閲覧日 2024/1/20)
- [38] 資源エネルギー庁「太陽光発電について」2022 年 12 月
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/082_01_00.pdf (最終閲覧日 2024/1/20)
- [39] 北川 友葵, Gondokusuma Monica I.C., 下田 吉之. “新住宅街区におけるスマートコミュニティ開発における研究:エネルギーシミュレーションによるエネルギー性能評価” 都市計画論文集 54.3 (2019) : 486-492.
https://www.istage.ist.go.jp/article/journalcpj/54/3/54_486/pdf-char/ja
- [40] 吉田 哲雄, 菅野 正嗣. “自律分散制御に基づく電力融通がなされるマイクログリッドの構成手法に関する研究

” 情報処理学会 第 80 回全国大会 (2018) : 95-96.

https://www.istage.ist.go.jp/article/tisai/28/1/28_77/_pdf

- [41] 石田 武志, 森 俊介. “都市街区内におけるマイクログリッド等の分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築” エネルギー・資源学会論文誌 29.1 (2008) : 8-14.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjser/29/1/29_8/_pdf/-char/ja

謝辞

本研究の実施および論文の執筆にあたり、多くの方々からご支援を承りました。

慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科教授 山形 与志樹先生には、主査として本論文の執筆に至るまで多大なるご指導とご鞭撻をいただき、心より感謝を申し上げます。

副査を担当していただいた小木 哲朗教授には、ご多忙中にも関わらずご相談のお時間をいただき、心より感謝を申し上げます。

山形研究室関係者の方々には、日ごろのゼミや個別ご指導で、大変お世話になり有難うございました。心から感謝を致します。

本研究の要諦は電力システムへの理解、モデルの実装と計測でしたが、これらに深い理解と実際に実装、計測、分析にあたり、多くの方々に多大なご協力をいただきました。まず、場所と機会の提供をいただいた橋本総業の橋本会長、実装とデータ分析、研究の構成に協力いただいた株式会社モデル・ティの吉武宗浩君、阿部佑真君、中村圭吾君、田原弘之君、大見愛彩君、斎藤和彦君各氏に心よりの感謝を申し上げます。

最後に、慶應義塾大学大学院SDM研究科22年春入学同期の皆さまといっしょに2年間を乗り越えられたことを誇りに思います。皆さまに心より感謝申し上げます。