

# VPP（バーチャルパワープラント）における

## 家庭用設備機器の運用方法に関する研究

朝日 啓史

### 1. はじめに

近年、IoT を活用して、燃料電池や蓄電池などの分散型エネルギーリソースを統合制御することで、電力の需給バランスを調整するバーチャルパワープラント(以下、VPP)の概念が注目されている。VPP の主要な方法の一つとして、需給バランスに応じて、需要家の需要パターンを変化させるディマンドレスポンス(以下、DR)が挙げられる。系統側の供給量が過大である時は、需要家に対して需要の創出(以下、上げ DR)が指令される。一方、需要家側の需要量が過大である時は、需要家に対して需要の抑制(以下、下げ DR)が指令される。そして、上げ DR や下げ DR の指令によって、調整された電力量(以下、DR 量)に伴い、需要家側に報酬金を支払うことがビジネスモデルとして検討されている。

しかし現状は、各エネルギーリソースに DR 量がどれくらいあるのか、また適切な報酬金がどの程度なのかという知見はほとんどない。そこで本研究では、家庭用の様々な設備機器を対象にシミュレーションを行い、各設備機器の DR 量や DR による家庭側のコストメリットを検討した。さらに既存街区を VPP として運用した時、どのような運用方法が想定され、どれほどの DR 量、コストメリットがあるのかを明らかにする。

### 2. 機器単体での DR 効果検討

#### 2.1 シミュレーションの概要

設備機器ごとに、通常の運転と DR 指令に対応した運転(以下、DR 運転)の二通りを計算した。そして、両方の計算結果を比較することで、機器単体での DR 量・DR によるコストメリットを算出する。

#### 2.2 DR 発生タイミング

現在、九州電力管内の太陽光発電・風力発電接続量はそれぞれ 750 万 kW・50 万 kW であるが、10 年以内にはそれぞれ 1417 万 kW・330 万 kW まで急速に増加すると想定されている。そこで 2017 年の九州電力管内の需給実績をベースに、太陽光発電・風力発電が増加した時の需給量を作成した。その需給量をもとに、上げ DR は再エネ発電抑制が起こる時、下げ DR は石油火力発電が稼働する時に指令がされると仮定し、DR 発生タイミングを決定した。月別時刻別の上げ DR 発

生回数を表 1 に、下げ DR 発生回数を表 2 に示す。上げ DR は中間期の日中に多く発生し、下げ DR は冬期・夏期の夜間・深夜に多く発生する。

### 2.3 家庭内電力給湯需要

計算に用いた家庭内の年積算電力給湯需要を図 1 に示す。様々な世帯規模での DR 効果を算出するために、世帯人数は 2~6 人までを想定し、さらに空調使用、家電使用、調理方法等にそれぞれ水準を設け、各水準を組み合わせて、全 180 世帯分の需要データを作成した。電力需要は 3,169~9,749[kWh/年・世帯]、給湯需要は 2,794~5,308[kWh/年・世帯]の間で分布する。

### 2.4 機器概要

各機器の通常時と DR 時の運転方法を表 3 に、機器仕様一覧を表 4 に示す。DR 運転において、上げ DR 指令時は、可能な限り系統から買電をするように運転をする。一方で、下げ DR 指令時には、可能な限り系統電力から買電をしないように、さらに固体酸化物形燃料(以下、SOFC)や固体高分子形燃料電池(以下、PEFC)、蓄電池、電気自動車パワーステーション(以下、EVPS)

表 1 上げ DR 発生回数 表 2 下げ DR 発生回数

時/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	時/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	2	4	14	21	25	18	7	6	12	16	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	4	10	14	21	25	20	9	7	14	17	15	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	5	11	16	21	25	21	9	9	14	17	18	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	5	8	18	21	25	16	7	6	14	18	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	3	4	16	20	24	16	3	3	9	12	10	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	2	7	19	21	11	2	1	5	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

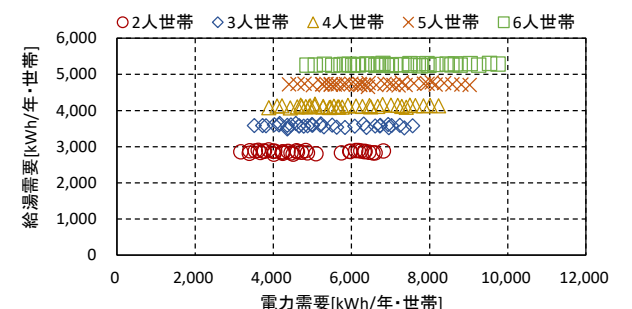


図 1 全 180 世帯の年積算電力給湯需要分布

表 3 機器別運転方法

機器	運転方法	
	通常運転	DR運転
固体酸化燃料電池 (SOFC)	・家庭内消費電力に追従し、0W~700Wで発電。	・上げDR発令時: 発電を停止し、系統から買電。 ・下げDR発令時: 定格700Wで発電し、余剰を逆潮流。
固体高分子形燃料電池 (PEFC)	・家庭内消費電力に追従し、0W~750Wで発電。	・上げDR発令時: 発電を停止し、系統から買電。 ・下げDR発令時: 定格750Wで発電し、余剰を逆潮流。
蓄電池	・22時~8時の間に、充電量が満蓄になるまで、系統から定格で充電。 ・8時~22時の間に、家庭内消費電力に追従して、0W~定格Wで放電。	・上げDR発令時: 充電量が満蓄でない限り、系統から定格で充電。 ・下げDR発令時: 定格で放電し、余剰は逆潮流。
EVパワーステーション (EVPS)	・22時~8時の間に、充電量が満蓄になるまで、系統から定格で充電。 ・8時~22時の間に、家庭内消費電力に追従して、0W~定格Wで放電。 ※ただし、EVの充放電は、EVPSにEVが接続されている時のみに行われる。 EV非接続時間(外出時間): 10:00-12:00、13:45-15:30(平日)	・上げDR発令時: 充電量が満蓄でない限り、系統から定格で充電。 ・下げDR発令時: 定格で放電し、余剰は逆潮流。 ※ただし、EVの充放電は、EVPSにEVが接続されている時のみに行われる。 EV非接続時間(外出時間): 10:00-12:00、13:45-15:30(平日)
ヒートポンプ給湯機 (HP給湯機)	・23時~6時の間で沸き上げ、タンクの蓄熱率92%に達すると沸き上げ停止。 ・6時~23時の間は、タンク最高温度が45℃以下になると追加で沸き上げ。	・23時~6時の間で沸き上げ、タンクの蓄熱率55%に達すると沸き上げ停止。 ・6時~23時の間は、タンク最高温度が45℃以下になると追加で沸き上げ。 ・上げDR発令時: タンクの蓄熱率50%以下の時に沸き上げを開始し、タンクの蓄熱率92%まで沸き上げる。 ・下げDR発令時: 沸き上げ停止。

は余剰電力を逆潮流するように運転する。上げ DR 量は、上げ DR 指令時の通常運転に対する DR 運転の買電増加量と定義し、下げ DR 量は下げ DR 指令時の通常運転に対する DR 運転の買電減少量と逆潮流量の合計と定義した。

2.5 計算結果

(1) 年間 DR 量

各機器の電力需要別の年間上げ DR 量を図 3 に、年間下げ DR 量を図 4 に示す。上げ DR 量に関して、SOFC は 215~449[kWh/年・世帯]、PEFC は 216~470[kWh/年・世帯]、蓄電池は 372~690[kWh/年・世帯]、ヒートポンプ給湯機(以下、HP 給湯機)は 270~469[kWh/年・世帯]、EVPS は 925~1,512[kWh/年・世帯]の間で分布する。全世帯で EVPS が最も大きい。次いで蓄電池が大きく、SOFC、PEFC、HP 給湯機に関しては同等量であった。SOFC や PEFC、蓄電池、EVPS は、電力需要が大きいほど、上げ DR 量も漸増する傾向にある。下げ DR 量に関して、SOFC は 23~308[kWh/年・世帯]、PEFC は 21~148[kWh/年・世帯]、蓄電池は 408~480[kWh/年・世帯]、HP 給湯機は 16~51[kWh/年・世帯]、EVPS は 1,824~2,381[kWh/年・世帯]の間で分布し、EVPS 以外の機器では多くの世帯で、上げ DR 量よりも小さくなった。SOFC と PEFC、EVPS は電力需要が大きいほど、下げ DR 量も漸減する傾向にある。全世帯で、上げ DR 量・下げ DR 量ともに EVPS が最も大きくなった。EVPS は EV 蓄電容量が 40kWh、定格充放電電力が 6.0kW と大きく、他の機器よりも買電・売電の調整がしやすいため、最も大きくなった。

(2) DR によるコストメリット

DR 単価別の年間コストメリットを図 5 に示す。需要家側に対して、コストメリットが得られる DR 単価 (DR 量 1kWh に対する需要家への報酬)を検討するために、DR 単価 5[円/kWh]、10[円/kWh]、15[円/kWh]の場合を検討した。DR 単価が 5[円/kWh]の場合は、全機器

表 4 機器仕様一覧(※既往研究<sup>2)3)</sup>をもとに設定)

機器	項目	設定値
固体酸化燃料電池 (SOFC)	定格出力[W]	700
	定格発電効率(HHV)[%]	47.0
	定格排熱効率(HHV)[%]	30.9
	貯湯タンク容量[L]	28.0
固体高分子形燃料電池 (PEFC)	定格出力[W]	750
	定格発電効率(HHV)[%]	35.0
	定格排熱効率(HHV)[%]	45.0
	貯湯タンク容量[L]	150.0
蓄電池	蓄電容量[kWh]	5.6
	残量範囲[%]	25.0~100.0
	定格充電電力[W]	1650
	定格放電電力[W]	1800
EVパワーステーション (EVPS)	EV蓄電容量[kWh]	40.0
	残量範囲[%]	30.0~100.0
	EV電費[km/kWh]	10.0
	定格充電電力[W]	6000
ヒートポンプ給湯機 (HP給湯機)	定格放電電力[W]	6000
	タンク容量[L]	370
	加熱能力[W]	4500
	冬期COP	3.0

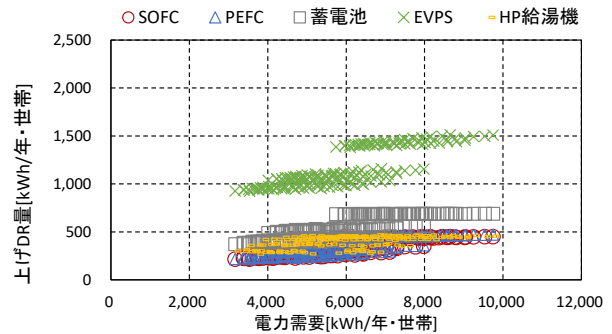


図 3 年間上げ DR 量

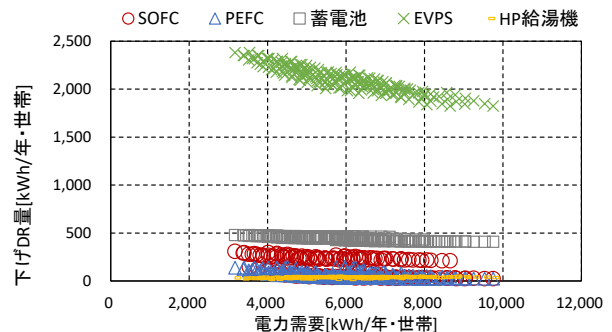


図 4 年間下げ DR 量

ともほとんどコストメリットを得られず、HP 給湯機、EVPS においては、全世帯で DR をすることでコスト

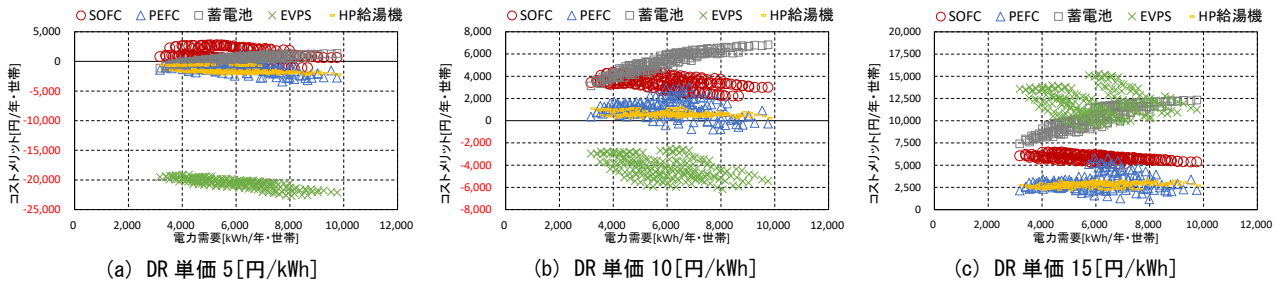


図5 DR単価別年間コストメリット

※注 DRコストメリット[円/年]=通常運転光熱費[円/年]-DR運転光熱費[円/年]+(上げDR量[kWh/年]+下げDR量[kWh/年])×DR単価[円/kWh]

増となった。蓄電池やHP給湯機、EVPSはDR運転をすることで安価な夜間電力よりも高価な昼間の電力を多く使用してしまうため、DR運転時の光熱費が通常運転時よりも大きく増加してしまうことが原因である。全機器・全世帯でコストメリットが得られるのはDR単価が15[円/kWh]の場合のみで、DR単価は少なくとも15[円/kWh]以上とする必要があることが明らかになった。

### 3. 街区でのVPP運用方法検討

#### 3.1 シミュレーションの概要

本章では、既存街区をVPPとして運用した場合の効果について検討する。対象街区の概要を表5に示す。対象とした照葉街区は全住戸に燃料電池(以下、FC)と太陽光発電(以下、PV)が導入されており、VPPとしてのポテンシャルが高い。本検討では全住戸の設備機器でDR運転を行った際の総DR量、コストメリットを算出することに加え、PVの街区内消費量を向上させることを目的とする。2019年度から、固定価格買取制度が順次終了し、10kW未満のPV売電価格は26円(2018年価格)から5円~10円程度まで、低下することが予想され、需要家側としては、PV電力をなるべく売電せずに、自家消費をすることが望ましいためである。

#### 3.2 代表日街区総電力需要・PV発電量

各季節代表日の街区総電力需要・PV発電量推移を図6に示す。全季節とも6時~8時と18時~24時頃の電力需要が高い。一方で、PV発電量が多く発生する10時~18時頃の間の電力需要は比較的に低いため、現状の街区では、PV発電をあまり自家消費できずに、多く売電する傾向にあるといえる。

#### 3.3 検討ケース

検討ケースを表5に示す。Case1は現状の街区を再現するケースで全住戸のFCは通常運転をする。Case2は現状導入されているFCのみを活用してVPPを運用するケースで、全住戸のFCでDR運転を行う。さらに街区のDR量を増加させるために、FCに加え、蓄電池を導入するCase3、Case4を検討する。Case3では各

表5 対象街区概要

項目	概要
対象街区	照葉スマートタウン画地 (福岡市香椎照葉7丁目1、7丁目2)
住戸数[戸]	99(戸建て住宅)
延床面積[m <sup>2</sup> ]	114~240
Q値[W/m <sup>2</sup> ・K]	1.43~2.70
世帯人数[人]	3~6
導入設備機器	PV、SOFC or PEFC

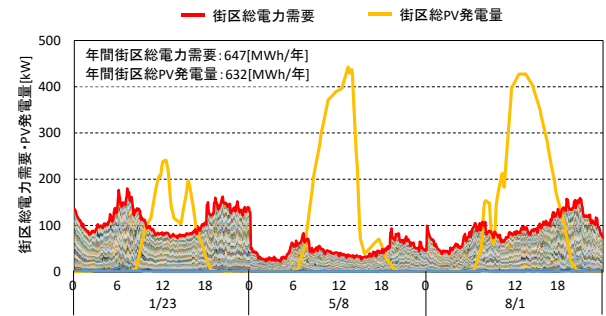


図6 代表日街区総電力需要・PV発電量推移

表5 検討ケース

ケース名	導入設備機器	運転方法
Case1	Case1_SO: SOFC×99台	通常運転
	Case1_PE: PEFC×99台	通常運転
Case2	Case2_SO: SOFC×99台	DR運転
	Case2_PE: PEFC×99台	DR運転
Case3	Case3_SO: SOFC×99台+蓄電池5kWh×99台	DR運転
	Case3_PE: PEFC×99台+蓄電池5kWh×99台	DR運転
Case4	Case4_SO: SOFC×99台+蓄電池495kWh×1台	DR運転
	Case4_PE: PEFC×99台+蓄電池495kWh×1台	DR運転

表6 蓄電池運転方法

項目	制御方法
通常運転	・充電方法: 太陽光発電の余剰分を蓄電量が満蓄になるまで充電。 ・放電方法: 太陽光発電が発生しない時間帯(夜間・夜中等)に電力不足分(家庭内消費電力-FC発電量)に追従して放電。
DR運転	基本的には通常運転と同様。以下が通常運転と異なる。 ・上げDR発令時: 太陽光発電がある場合は、発電量余剰分を充電。太陽光発電が発生しない時間帯は、充電量が満蓄でない限り、系統・下げDR発令時: 定格で放電し、余剰は逆潮流。

住戸にFCと蓄電池5kWhを一台ずつ導入し、DR運転を行う。PVの街区内消費量を高めるために、蓄電池は表6に示す方法で運転を行う。Case4では、街区に大容量蓄電池495kWhを一台導入し、DR運転を行う。Case3よりもPV街区内消費量を高めるために、大容量蓄電池を街区内電力網と系統側電力網との間に設置することで、住戸間でPV電力を融通させ、融通後の



PV 余剰電力を大容量蓄電池に充電する。各ケースについて、全住戸に SOFC が導入されている場合と全住戸に PEFC が導入されている場合を計算した。

### 3.4 計算結果

#### (1) 街区総年間 DR 量

各ケースの年間街区総上げ DR 量を図 7 に、年間街区総下げ DR 量を図 8 に示す。Case2 に関して、上げ DR 量の方が下げ DR 量よりも、Case2\_SO では 3 倍以上、Case2\_PE では 1.5 倍以上大きく、両 FC とも下げ DR よりも上げ DR に対応できることが分かった。一方で、Case3、Case4 については、蓄電池が FC より大きな下げ DR 量となり、FC の小さい下げ DR 量を補填できている。FC と蓄電池を組み合わせ運用することで、上げ DR 指令・下げ DR 指令の両方に対して、より対応可能な街区になることが分かった。Case3\_SO が上げ DR 量、下げ DR 量ともに最も高く、上げ DR 量は 54.0[MWh/年] となり、これは出力 50kW 程度の PV システムの年間発電量に相当する。下げ DR 量は 51.1[MWh/年] となり、これは一般家庭約 10 世帯分の年間電力需要に相当する。

#### (2) 街区 PV 消費割合

各ケースの街区 PV 消費割合を図 9 に示す。街区 PV 消費割合は、SOFC、PEFC ともに Case4 が最も高くなり、Case4\_SO で 36%、Case4\_PE で 50% となった。大容量蓄電池をシェアリングすることで、各住戸の PV 電力を融通したため、各住戸に蓄電池に導入する Case3 よりも、より PV 電力を街区内で消費することができたことが要因である。

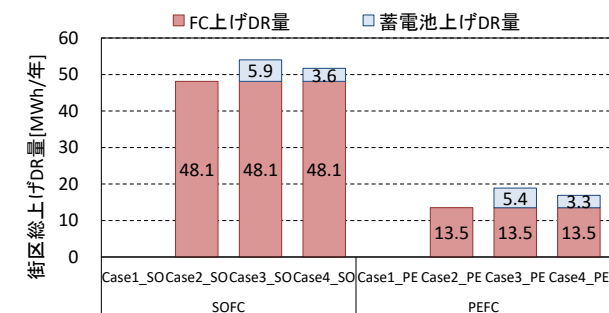


図 7 街区総年間上げ DR 量

#### (3) 街区総年間光熱費

各ケースの街区総年間光熱費を図 10 に示す。光熱費算出に際し、FIT 終了後の PV 売電価格を 5[円/kWh] になると仮定した。DR 単価に関しては 15[円/kWh] とした。SOFC の街区総年間光熱費に関しては、Case1\_SO よりも、Case2\_SO では 144[万円/年]、Case3\_SO では 249[万円/年]、Case4\_SO では 265[万円/年] 減少した。PEFC に関しては、Case1\_PE よりも、Case2\_PE では 24[万円/年]、Case3\_PE では 146[万円/年]、Case4\_PE では 170[万円/年] 減少した。SOFC、PEFC ともに、Case4 が最も光熱費削減効果が高くなり、FC と蓄電池の DR 運転と PV 消費量向上を目的とした大容量蓄電池導入によるコスト面の優位性が確認された。

#### 4. おわりに

本研究では、設備機器ごとの DR 量、コストメリット、適切な DR 単価が 15[円/kWh] 以上であることを明らかにし、さらに街区での VPP 運用方法について検討を行った。今後は、戸建て住宅で構成される街区のみならず、集合住宅や非住宅建築を含む広域的なエリアでの様々な設備機器を活用した VPP の運用方法・効果について検討する必要がある。

#### 【参考文献】

- 九州電力株式会社：再生可能エネルギーの接続可能量(2017年度算定値)算定結果について、総合資源エネルギー調査会(省エネルギー・新エネルギー分科会)新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ(第12回)2017.10
- 山本高広ほか：家庭用燃料電池の集合住宅への導入方法に関する研究 その1 蓄電池モデルの構築 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1437-1438 2017.9
- 胡内裕翔ほか：電源安定化に寄与するエネルギー循環型住宅の検討(その4)蓄電池・燃料電池・太陽光発電を備えた戸建住宅の効果検証と導入支援ツールの検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1405-1406 2018.9

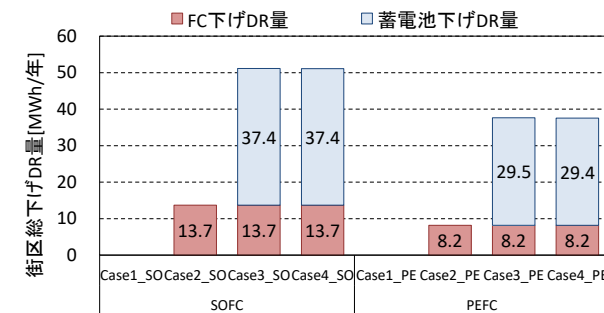


図 8 街区総年間下げ DR 量

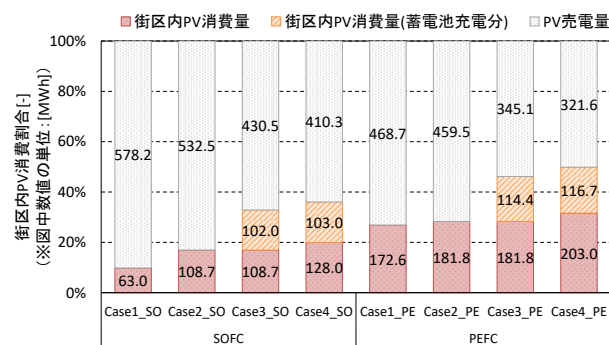


図 9 街区内 PV 消費割合

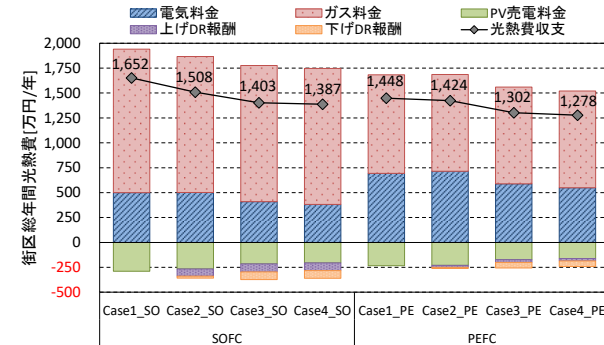


図 10 街区総年間光熱費