

ZEB 実現に向けた蓄電池併設屋上・壁面 太陽光発電システムの技術経済性最適化

原井 小太郎*, 前 匡鴻, 浅見 明太, 渡辺 健太郎, 杉山 正和 (東京大学)

Techno-Economic Optimization of Rooftop and Facade Photovoltaic Systems with Battery Storage
Towards Net-Zero Energy Buildings

Kotaro Harai, Masahiro Mae, Meita Asami, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama (The University of Tokyo)

1. 序論

日本政府は 2050 年カーボンニュートラル達成に向け、2030 年度までに温室効果ガス排出量を 2013 年度比 46%削減する目標を掲げている。この実現には建築物分野における省エネルギー化が不可欠であり、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB) の普及が重要な役割を果たす。ZEB 達成には太陽光発電による創エネルギーと蓄電池による需給調整が有効であるが、設備投資コストが課題となる。本論文では、建築物における ZEB 達成率を制約条件としつつ、太陽光パネルと蓄電池の設備容量および蓄電池の充放電計画を、経済性向上のためのコスト最小化を目的関数として最適化する手法を提案する。

2. 手法

<2・1>モデル構成 本論文では、東京大学駒場 II キャンパス 3 号館南棟を対象建物として、以下の設備から構成される電力システムを想定した：南向き屋上太陽光パネル（以下水平面とする）、南向き壁面太陽光パネル、東向き壁面太陽光パネル、西向き壁面太陽光パネル、および蓄電池。電力源は系統買電、太陽光発電、蓄電池放電の 3 種類とし、蓄電池への充電を行ってもなお電力余剰が発生する場合は太陽光発電の出力抑制を行い、売電や電力系統への逆潮流は行わないものとする。

<2・2>データと前提条件 電力価格は 2024 年度 JEPX スポット市場の 30 分毎の取引価格を使用した。電力需要は対象建物の実験設備を除くオフィス部分の 1 時間毎実績データを 2 等分して 30 分解像度とした。太陽光発電量は NEDO 日本国内日射量データベース METPV-20⁽¹⁾の代表年データ (365 日分) に基づく 1 時間毎推定値を 2 等分した。

蓄電池の運転条件として、充電率 (SOC; State of Charge) 範囲を 10~90%、充放電効率を充放電 1 サイクルで 90.25% (充電または放電のみで各 95%)、充放電出力を容量の 1/3~1/6 (3~6 時間で満充放電可能) とした。既存の設備コストを参考に屋上パネル 30 万円/kW、壁面太陽光パネル 60 万円/kW とした。蓄電池コストは、容量 15 万円/kWh、充放電出力 (PCS) 5 万円/kW とした^(2,3)。PCS コストは産業用太陽

光発電用 PCS コスト (3 万円/kW)⁽³⁾を参考に設定した。すべての機器について耐用年数 30 年で均等償却した。

<2・3>最適化問題の定式化

目的関数を以下のように定義した：

$$\text{minimize } C_{total} = C_{grid} + C_{PV} + C_{battery} \quad (1)$$

ここで、 C_{grid} は年間買電コスト、 C_{PV} は太陽光パネル年間償却コスト、 $C_{battery}$ は蓄電池年間償却コストである。

設備容量に関する最適化変数は以下の通り：

- ・各パネル容量 (水平, 南壁, 東壁, 西壁)：各 0~50 kW
 - ・蓄電池容量：制約なし
 - ・充放電出力上限値 (充放電共通)：蓄電池容量の 1/3~1/6
- パワーフローに関する最適化変数は以下の通り：
- ・ $P_{grid}(t)$, $P_{bat}(t)$, $P_{curtail}(t)$ ：17,520 コマ (365 日×48 コマ/日)

制約条件として、各時刻における電力需給バランス、蓄電池 SOC 範囲、充放電出力制約をそれぞれ課した。電力需給バランスは以下の式で表される：

$$P_{grid}(t) + P_{solar}(t) + P_{bat}(t) = D(t) + P_{curtail}(t) \quad (2)$$

ここで、 $P_{bat}(t)$ は蓄電池の充放電電力 (放電時正, 充電時負) を表す。 $P_{grid}(t)$ は系統買電、 $P_{solar}(t)$ は太陽光発電、 $D(t)$ は需要、 $P_{curtail}(t)$ は出力抑制である。

<2・4>ZEB 達成率 本論文では年間の ZEB 達成率を以下のように定義した：

$$\eta_{ZEB} = \frac{E_{demand} - E_{grid}}{E_{demand}} \quad (3)$$

ここで、 E_{demand} は年間の建物総電力需要、 E_{grid} は年間の系統買電量である。この定義により、蓄電池経由で利用した太陽光由来の電力も自家消費として評価される。

<2・5>分析ケース 線形計画法を用いて、以下のケースで最適化を実施した：

- ・ZEB 達成率 80%制約下での最適設備構成
- ・ZEB 達成率を 0%から 100%まで 10%刻みで変化させた場合の総コストにおける感度分析

3. 結果

<3・1>ZEB 達成率 80%制約下の最適設備構成 最適化

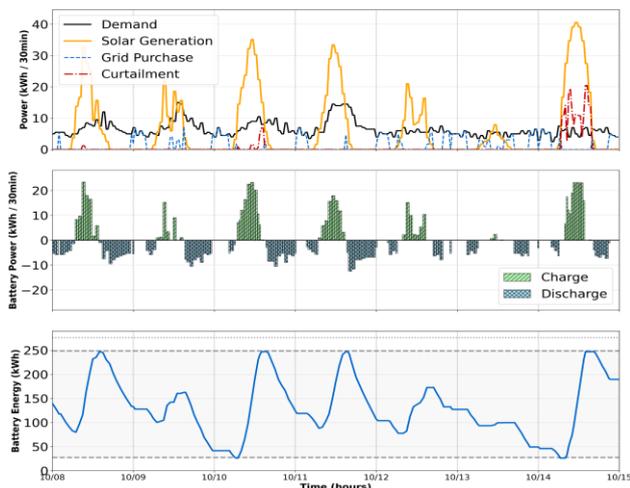


図1 ZEB達成率80%での週間運転パターン(秋季, 10月上旬)
Fig.1. Weekly operation pattern under 80% ZEB achievement rate constraint (Fall, early October)

の結果, 水平面 50 kWp, 南壁面 40 kWp, 東壁面 0 kWp, 西壁面 0 kWp, 蓄電池 276 kWh, 充放電速度 47 kW が最適解として得られた。東西壁面は設置されず, 南壁面と水平面の組み合わせが主体となった。年間総コストは 452 万円であり, 設備投資なし・買電のみのケースの総コスト 148 万円と比較して約 3 倍となった。年間エネルギー収支では, 太陽光発電量 124,351 kWh に対し, 18%にあたる 22,589 kWh が発電抑制され, 自家消費 93,903 kWh, 系統買電 23,500 kWh となり, ZEB 達成率 79.98%を実現した。

図1に秋季(10月上旬)の代表的な週間運転パターンを示す。晴天が連続し太陽光発電が日中に最大 40 kWh/30min 近くに達したが, 蓄電池 SOC が上限に頻繁に到達したため, 昼間に大規模な発電抑制が生じた。特に 10/10, 10/15 では正午前後に SOC が上限に達し, その後の太陽光発電の大部分が抑制された。蓄電池は午前中に急速充電され, 夕方から夜間にかけて放電する典型的な日次サイクルを形成した。買電は主に早朝と夜間に発生し, 日中は 10/9 を除きほぼゼロとなった。なお, 冬季など日射量が少ない時期には買電が増加するが, こうした季節変動を含めて年間 ZEB 制約は満たされている。

<3・2> ZEB 達成率変化に伴うコストと設備構成の変動
図2に ZEB 達成率 0~100%における年間総コストと最適設備構成の推移を示す。年間総コストは ZEB 達成率 30%までは約 154 万円ではほぼ横ばいだが, 40%で 183 万円, 60%で 261 万円, 80%で 452 万円と急増し, 100%では 1,426 万円に達した。ZEB 達成率 60%付近を境に限界費用が顕著に増大する傾向が確認された。設備構成比の変化として, ZEB 達成率 40%未満では水平面パネル (11~28 kWp) のみで対応可能であり, 蓄電池もほとんど不要であった。40%で蓄電池が 33 kWh と初めて経済的に導入され, 50%で 90 kWh, 60%で 148 kWh, 80%で 276 kWh と増加した。壁面太陽光パネルは 60%で初めて南壁面に 2.2 kWp 導入され, 70%で 18

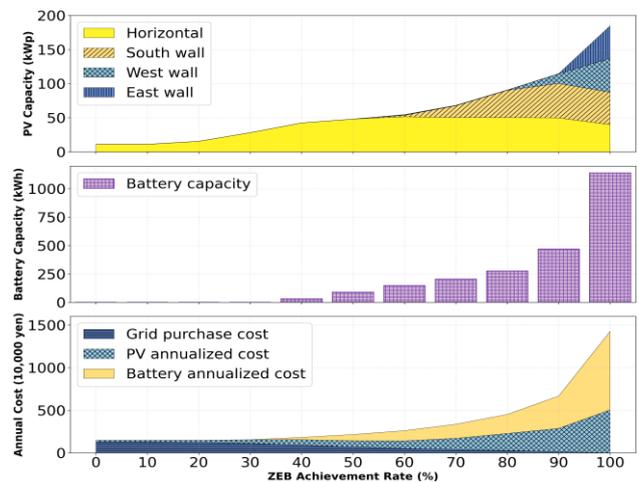


図2 ZEB達成率に対するPV・蓄電池容量および年間コスト内訳
Fig.2. PV and battery capacity and annual cost breakdown as a function of the ZEB achievement rate

kWp, 80%で 40 kWp と急増した。90%以上では水平面が上限 50 kWp に達し, 南壁面も上限到達後は西壁面や東壁面にも導入される。100%達成には全方位への設置と 1,139 kWh の大容量蓄電池が必要となった。方位別の優先順位は, 南壁面→西壁面→東壁面の順であり, これは年間日射量と発電ピーク時刻の電力価格を反映したものと考えられる。

4. 結論

本論文では, 太陽光パネルと蓄電池の設備容量および蓄電池の充放電計画を, 経済性の観点からコスト最小化する検討を行った。ZEB 達成率 80%制約下では, 南壁面 40 kWp, 水平面 50 kWp, 蓄電池 276 kWh が最適解となり, 年間総コスト 452 万円を要した。ZEB 達成率の増加に伴う設備構成を分析した結果, 40%未満では水平面パネルのみで対応可能であるが, 60%を超えると蓄電池が導入される。壁面太陽光パネルは 60%以上で経済的に導入され, 方位別優先順位は南, 西, 東の順であった。ZEB 達成率 70%までは系統買電コストと太陽光パネルコストの合計がほぼ一定であり, 総コストの増加は主に蓄電池償却コストに起因する。これは蓄電池コストの低減により高い ZEB 達成率の経済性が改善される可能性を示唆している。

文 献

- (1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, "NEDO 日射量データベース閲覧システム (METPV-20)," https://www.nedo.go.jp/seika_hyoka/ZZFF_100041.html (閲覧日: 2026年1月7日)
- (2) 経済産業省, "2024年度定置用蓄電システム普及拡大検討会 結果とりまとめ," 2025年3月。
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/20250307_1.pdf (閲覧日: 2026年1月7日)
- (3) 経済産業省 資源エネルギー庁 調達価格等算定委員会, "令和6年度以降の調達価格等に関する意見," 2024年2月。
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/20240207_1.pdf (閲覧日: 2026年1月7日)