

Optimal equipment capacity of a microgrid considering resilience in a school with evacuation shelter function

Shuto KOMURA^{*1}Hironobu MATSUO^{*2‡}

避難所機能を備えた学校におけるレジリエンスを考慮したマイクログリッドの最適設備容量

香村崇斗^{*1}松尾廣伸^{*2‡}

Abstract

To determine the optimal equipment capacity for a school equipped with evacuation shelter functions from both economic and resilience perspectives, power generation and consumption simulations were conducted. Assuming normal and emergency load profiles based on the facility scale, the 20-year economic performance and the ability to supply emergency loads continuously for 72 hours were evaluated. The optimization was carried out with the aim of maximizing resilience while minimizing the total system cost. As a result, the economic optimal equipment capacity was 68 kW of PV and 0 kWh of BESS, while the resilience optimal equipment capacity was 19 kWh of BESS for a school (whole floor area: 5600 m², evacuation shelter (gym): 1000 m², shelter capacity: about 300 people). Integrating both aspects, the overall optimal equipment capacity was 68 kW of PV and 19 kWh of BESS. In addition, an approximate formula for estimating PV capacity and BESS capacity were derived.

Keywords: Microgrid, PV, Battery energy storage system, Economic performance, Resilience, Simulation

キーワード: マイクログリッド, 太陽光発電, 蓄電システム, 経済性, レジリエンス, 電力授受シミュレーション

1. はじめに

近年, カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みを背景に再生可能エネルギーの普及が進められている¹⁾. 一方, 日本は地震や台風などの自然災害が頻発する国であり, それに伴う停電リスクも極めて高い. 実際に 2018 年の北海道胆振東部地震や台風第 21 号・24 号, 2019 年の台風第 15 号・19 号における大規模停電発生など自然災害の頻発に伴うエネルギー供給リスクが顕在化してきている. 特に, 災害時には学校の体育館が避難所として利用されるケースが多く, 停電時でも避難所運営を継続できるための最低限のエネルギーを確保し, レジリエンスを強化することが求められている.

近年では, 避難所を対象に再生可能エネルギー設備の導入効果を経済性やレジリエンスの観点から評価する研究^{2), 3)}も行われつつある. しかし, 実運用に近い条件を考慮

しながら経済性とレジリエンスを両立させる導入容量および運用設定まで検討した例⁴⁾は限られている.

そこで, 本研究では避難所機能を備えた学校を対象に太陽電池 (PV) および蓄電池 (BESS) の設備容量・充電率 (SOC: State of Charge) が経済性とレジリエンスに与える影響を, 電力授受シミュレーションを用いて評価し, 経済性とレジリエンスの両方を考慮したマイクログリッドの最適設備容量を検討する.

なお, 本論文は, 2025 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会における講演論文を精査し, さらに機材の劣化に関しても考慮したものである.

2. シミュレーション概要

2.1 想定地域および想定システム

想定地域として, 静岡県浜松市を選定した. 同市は平均年における水平面全天日射量が 4.2 kWh/m²/d であり, 全国平均の 4.0 kWh/m²/d を上回っている⁵⁾. また, 年間日照

*1 Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University

*2 Associate Professor, Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

‡e-mail: matsuo.hironobu@shizuoka.ac.jp

Received: March 11 2026, Accepted: May 30 2026

*1 静岡大学大学院 総合科学技術研究科

*2 静岡大学大学院 総合科学技術研究科 准教授
(〒432-8561 浜松市中央区城北 3 丁目 5-1)

‡e-mail: matsuo.hironobu@shizuoka.ac.jp

(原稿受付: 2026 年 3 月 11 日, Accepted: 2026 年 5 月 30 日)

時間についても浜松市は 2303 時間⁶⁾であり、全国平均の 2035 時間⁷⁾を上回っていることから、通年日照に恵まれた地域である。一方、災害面では地震や津波の影響を受ける可能性がある地域でもあり、浜松市国土強靱化地域計画⁸⁾においても、PV や BESS の導入推進、ならびに重要負荷に対する 72 時間程度の電力供給確保の必要性が示されている。

マイクログリッドのシステム構成を Fig. 1 に示す。システムは主に PV、BESS、インバータ、および負荷で構成され、現在多くの学校に導入されているものとほぼ同様である。簡便化のため、それらの仕様として用いた固定パラメータを Table 1 に示す。なお、PV は屋上設置を想定して南向き傾斜角 10° とした。

対象として浜松市内の小中学校を想定する。学校規模を設定する指標としては「建物の延床面積」を用いた。全国の小中学校の平均延床面積⁹⁾から学校全体の延床面積を 5600 m² とした。浜松市内の体育館の平均延床面積¹⁰⁾から避難所として使用する体育館の延床面積を 1000 m² とした。負荷は、以上の規模を基に後節で検討するものとする。

2.2 シミュレーション方法

2.2.1 平常時経済性評価シミュレーション

シミュレーション期間は固定価格買取制度 (FIT 制度) に基づき 20 年間とした。気象条件には METPV-20⁶⁾の浜松市平均年データを使用し、長期的な運用かつ一般的な気象条件に基づいた経済性を評価する。

まず、1 時間ごとの PV 発電量を、気象条件を基に算出し¹¹⁾、それと平常時負荷データとから時間毎のエネルギーフローを計算する。なお、PV は経年劣化を考慮し、初期容量に対して 1 年毎に 1 % 発電量が低下するものと仮定した。BESS は 1 日毎に放電量に応じて容量劣化するものとして、以下のようにした。総放電量に基づく簡易劣化モデルを用い、式 (1) を用いて計算する¹²⁾。放電量従量劣化モデルは 20 年間の運用において BESS 容量が線形に最大 40 % 劣化することを想定したものであり、蓄電量および SOC はアンペアアワー (Ah) 基準ではなく、エネルギー基準の定格 BESS 容量 (kWh) で計算する。

$$C_r = C \left(1 - 0.4 \times \frac{C_{\text{total}}}{C \times 365 \times 20} \right) \quad (1)$$

ここで、 C_r : 劣化時容量 [Wh], C : 定格 BESS 容量 [Wh], C_{total} : 総放電量 [Wh]。

BESS の制御手法は自家消費制御または従量料金最小化制御を適用し、SOC 10 ~ 100 % の範囲で充放電を行う。

自家消費制御では PV 発電量が平常時負荷を上回る場合、まず平常時負荷に供給し、余剰電力が生じた場合は充電上限電流 (0.5 C レート) を上限として BESS の充電を行い、上限を超える分は売電する。また、BESS が満充電である場合には、余剰電力は売電する。一方、PV 発電量が平常時負荷を下回る場合、BESS からの放電で不足分を賄い、それでも不足する場合には買電する。

従量料金最小化制御では翌日の 24 時間にわたる平常時

負荷・PV 発電量・電気料金価格が既知であるとし、電気料金が安価な時間帯に系統からの買電によって BESS の充電を行い、電気料が高単価な時間帯に BESS から放電を行うことで従量料金の最小化を図る。本研究では平常時負荷を既知としたことで、需要に応じた充放電計画を理想的に設定でき、経済性は実運用よりやや高めに評価される。

これらの手法に基づき 20 年間の電力授受シミュレーションを行い、買電・売電電力量を導出し、電力単価から支出を算出する。

2.2.2 非常時レジリエンス評価シミュレーション

いつ生じるかわからない非常時に関して、様々な価値判断基準を用いて、すべての運用期間に対して計算を行うのは困難である。そこで、安全側で考えることとして、機材劣化後の悪条件下で発生した災害を想定するものとした。まず、PV および BESS の長期運用による劣化を実現するため、平常時シミュレーションを 19 年間実行し、機器が劣化した状態を再現する。その後、20 年目に METPV-20⁶⁾の浜松市寡照年データを用いて平常時負荷でのシミュレーションを行い、任意の時刻に災害が発生するとして、その時点から非常時負荷に対する電力供給能力を 72 時間連続で評価する。この必要最低限の電力供給確保時間を指標にレジリエンスを評価する。

非常時開始時刻は 1/1 0:00 ~ 12/31 23:00 までの 1 時間毎とし、8760 パターンの計算を行う。非常時動作では自家消費制御の下 SOC 0 ~ 100 % の範囲で充放電を行い、非常時負荷を最大限満たすように制御する。

2.3 シミュレーション条件

2.3.1 各料金

Table 2 に各システムの導入コスト、交換コスト、運用・保守コストと交換期間^{13), 14)}を示す。電気料金プランは、Table 3 に示す中部電力が提供する高圧業務用電力向けの

Table 1 Fixed parameters

Max C rate (charging)	0.5 C
Max C rate (purchased power charging)	0.2 C
Charging / discharging efficiency	95 %
Power conversion efficiency (AC/DC)	94 %
Power conversion efficiency (DC/AC)	94 %

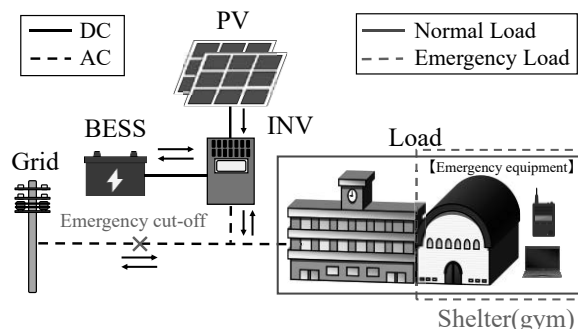


Fig. 1 Microgrid system configuration diagram

業務用タイムプラン¹⁵⁾を使用した。燃料費調整単価、再エネ賦課金単価は2024年の中部電力が適用した値とした。また、売電単価は調達価格等算定委員会が2024年に提示した事業用太陽光発電（屋上設置）の売電単価12円/kWh¹⁶⁾とした。

2.3.2 平常時負荷

平常時負荷パターンは日本サステナブル建築協会（JSBC）が提供する DECC データベース¹⁷⁾を活用し、延床面積当たりの月別電力消費量、学校施設の日負荷パターンを分析し、想定を行った。

想定した平常時における平日および休日の日負荷パターンを Fig. 2 に示す。ここでは代表月として1, 4, 7, 10月を示す。いずれの月も学校を使用していない夜間には一部の設備・照明のベース電力が5~10 kWh/h ほど発生する。平日の始業時間には立ち上げ負荷により急激に消費電力が増加し、その後日中は一定または徐々に減少、終業時間以降急激に減少していく。7月と1月は冷暖房の負荷需要増加により他の月と比較して使用電力量は高くなる。休日の日積算電力量は平日の日積算電力量と比較し、顕著に少なくなり1/3程度となる。

2.3.3 非常時負荷

非常時負荷パターンは時間帯ごとに使用する負荷を積み上げて作成する。対象とする体育館の延床面積が1000 m²、避難所収容可能人数が約300人となることからそれに伴う避難所運営に最低限必要とされる設備（特定負荷）の消費電力と稼働時間帯を検討し、災害時の避難所運営マニュアルを参考にしながら実際の避難所運営に即した非常時電力需要モデルを構築する。なお、本研究では災害発生直後からの72時間を評価対象としているが、非常時負荷については立ち上げ時を含めて平均的には同程度の電力が使用されるものと仮定し、代表的な1日負荷パターンが3日間継続するものとした。

避難所運営で必要とされる設備として照明設備（体育館照明）、通信設備（無線LAN、防災無線機、スマートフォン）、情報機器（TV、PC、プリンター）等を想定した。一方、空調設備を非常時負荷として考慮する場合、体育館全体を十分に空調するためには約300 kWの空調能力¹⁸⁾が必要となり、EHP（定格空調能力15 kW、COP=3.0）¹⁹⁾を20台設置した場合でも、定格運転時の消費電力は約100 kWと見積もられる。この規模の電力をPVおよびBESSのみで72時間連続して賄うことは現実的ではなく、導入コストの観点からも費用対効果は低い。さらに、浜松市の避難所指定校では空調設備導入率が0.0%²⁰⁾であり、依然として空調設備が未設置であることから、本研究では「避難所運営に最低限必要とされる設備」を対象とする方針の下に、空調負荷は非常時電力需要モデルには含めないものとした。起床時間7時から消灯時間22時を避難所運営時間とし、各設備の稼働時間帯を設定する。各設備の消費電力と稼働時間帯から想定した非常時の日負荷パターンを Fig. 3 に示す。非常時の日積算電力量は28.1 kWh/d、ピー

ク電力量は2.1 kWh/h となった。

2.4 評価方法

2.4.1 経済性評価

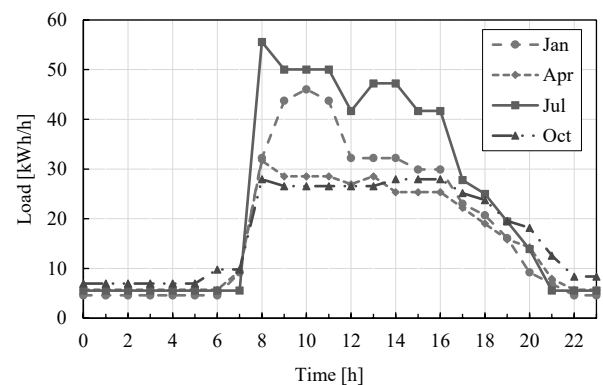
正味現在価値（NPV：Net Present Value）を式（2）から導出し、経済性を評価する。また、均等化発電原価（LCOE：Levelized Cost of Energy）を式（3）で表す。 CF_i は、 i 年におけるキャッシュフローであり、買電削減額および売電収入から運用保守・交換・導入費用を差し引いた値である。

Table 2 Cost and Life time

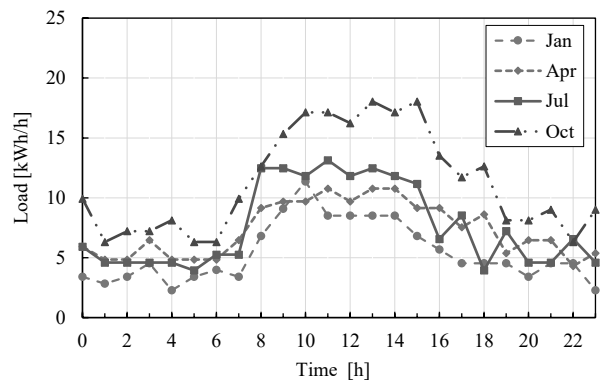
	Initial	Replacement	O&M [/year]	Lifetime
PV	193,000 yen/kW	193,000 yen/kW	1,000 yen/kW	25 years
BESS	149,000 yen/kWh	149,000 yen/kWh	500 yen/kWh	10 years
Inverter	27,000 yen/kW	27,000 yen/kW	1,000 yen/kW	15 years

Table 3 Electricity unit price

Class	Unit	Price (yen)
Basic fee	[/kWh/month]	1716.26
Energy charge	Heavy Load time	24.06
	Daytime	20.96
	Nighttime	17.40



(a) Weekdays



(b) Holidays

Fig. 2 Normal Load profiles

$$NPV = \sum_{i=0}^{y_{\text{grid}}} \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad [\text{yen}] \quad (2)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{i=0}^{y_{\text{grid}}} \frac{Cap_i + Repl_i + O\&M_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^{y_{\text{grid}}} \frac{E_i}{(1+r)^i}} \quad [\text{yen/kWh}] \quad (3)$$

ここで, y_{grid} : 運用年数 (20 年), CF_i : i 年目のキャッシュフロー [yen], r : 割引率 (5%), Cap_i : i 年目の導入コスト [yen], $Repl_i$: i 年目の交換コスト [yen], $O\&M_i$: i 年目の運転・保守コスト [yen], E_i : i 年目の総発電量 [kWh].

2.4.2 レジリエンス評価

レジリエンスは非常時負荷を 3 日間連続で賄えたケース数の割合を指標 R_{case} (式 (4)) として評価する. これは非常時負荷を途切れることなく連続的に供給できるかを評価する指標である. また, BESS 容量とレジリエンス指標 R_{case} の割合を設備導入効率 η_{res} (式 (5)) と定義する.

$$R_{\text{case}} = \frac{N_{\text{res}}}{N_{\text{total}}} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\eta_{\text{res}} = \frac{R_{\text{case}}}{C_{\text{BESS}}} \quad [\%/kWh] \quad (5)$$

ここで, N_{total} : シミュレーションで評価する総パターン数 (8760 パターン), N_{res} : 非常時負荷を 3 日間連続で賄えたケース数, C_{BESS} : BESS 容量 [kWh].

加えて, 非常時負荷を賄えた時間数の観点からレジリエンスを評価するためレジリエンス指標 R_{hour} (式 (6)) を定義する. これは非常時負荷を連続的に維持できたかではなく, 部分的・非連続的であっても負荷を供給できた時間の割合を評価する指標である. エネルギー自給率と考え方は近いものの指標として活動に必要な電力が供給可能な時間割合を示している.

$$R_{\text{hour}} = \frac{H_{\text{res}}}{H_{\text{total}}} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

ここで, H_{total} : シミュレーションで評価する総非常時時間数 (630720 時間), H_{res} : 非常時負荷を賄えた時間数.

3. シミュレーション結果

3.1 電力授受シミュレーションの動作

電力授受シミュレーションの一例として 20 年目の 8/22 からの 4 日間における平常時および非常時の動作を Fig. 4 に示す. 平常時は従量料金最小制御 (MCC) のものである. 条件は, 最低 SOC: 10%, PV: 50 kW, BESS: 30 kWh, 非常時開始時刻は 8/23 の 0:00 とした. (a) 平常時には, 8/22, 23 は重負荷時間の不足電力量を賄うため 0.2 C レートで買電充電を行い, 従量料金の最小化を図っている. 一方, 8/24 は重負荷時間に不足電力が発生しないため前夜間に買電充電を行わず, PV 発電電力によって BESS に充電され, 自家消費で運用された. 8/25 は日曜日であり終日夜間時間の料金が適用されるため, 前夜間に買電充電を行われていない. (b) 非常時動作では平常時終了時点の蓄電量 15

kWh から開始し, 開始直後は BESS の放電により非常時負荷を賄い, その後 PV 発電の余剰電力によって 0.5 C レートで充電が行われ, 満充電に達する. この気象条件においては非常時負荷を 3 日間不足電力なく賄うことができた. R_{case} の導出のためにカウントするのはこのような場合であり, 気象条件や非常時開始時の SOC に依存して, 当然, 満たせない場合もある.

3.2 平常時経済性評価における最適設備容量

非常時における経済性を直接に評価することは困難であるため, 平常時において設備及び運用方法を変化させ, 経済性評価を行った結果を示す. その上で, この結果を用いて次節においてレジリエンスに関して評価を行う.

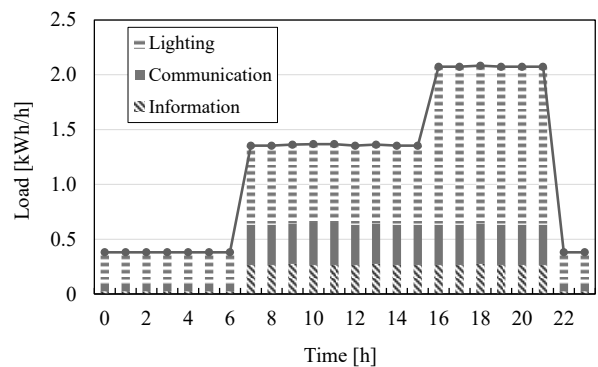
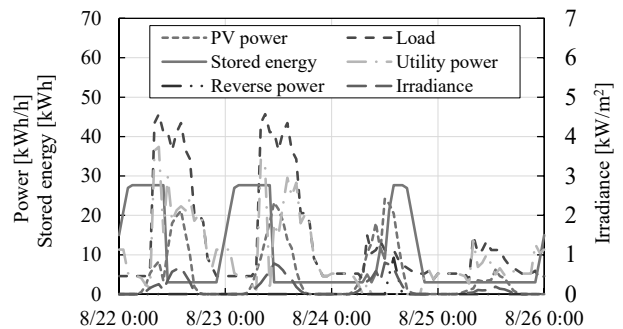
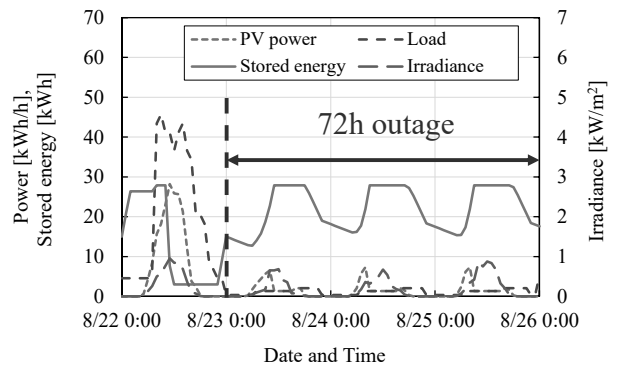


Fig. 3 Emergency Load profile



(a) Normal case (MCC)



(b) Emergency case

Fig. 4 Power transfer simulation operation

自家消費制御 (SCC) のもと、PV 容量を 0 ~ 200 kW で 1 kW 刻み、BESS 容量を 0 ~ 100 kWh で 1 kWh 刻みに変化させたときの NPV の変化を Fig. 5 に示す。PV 容量が 0 ~ 70 kW までは容量の増加による発電量の増加に伴う買電電力量の削減により NPV は増加するが、それ以上の容量では安価な売電電力量の増加となるため NPV は減少へ転じた。一方、BESS 容量の増加に伴い、導入コスト・交換コストが増大することに加え、学校の夜間負荷が比較的小さいことから BESS の導入効果が支出を上回らず、NPV は減少する傾向を示した。

経済性評価において NPV が最大となる設備容量を最適設備容量とした場合、自家消費制御および従量料金最小化制御のいずれにおいても PV 容量: 68 kW, BESS 容量: 0 kWh で NPV が最大となる結果が得られた。このとき NPV は 315.3 万円, LCOE は 17.5 円/kWh となった。

3.3 蓄電池容量・最低 SOC によるレジリエンス変化

自家消費制御 (SCC) のもと、平常時の経済性の観点から最適化された PV 容量を 68 kW とし、BESS 容量を 0 ~ 100 kWh で 1 kWh 刻み、平常時の最低 SOC を 0, 10, 20, 40, 60, 100 % と変化させたときの R_{case} と R_{hour} をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。これらの図には併せて、平均年気象データを用いて同様に計算した場合の 1 年目の SOC 0 % の結果も示す。

Fig. 6 より BESS 容量が 10 kWh 未満では夜間の日射量がない時間帯で非常時負荷を連続して賄うための蓄電量を確保できないため R_{case} は 0 % となる。10 ~ 20 kWh では急激に R_{case} が増加し、それ以降はレジリエンス向上の割合が緩やかとなる。また、最低 SOC を増加させると非常時負荷に予め備えるための蓄電量が増加するため R_{case} は向上する。さらに、1 年目・平均年・SOC 0 % の条件では、20 年目・寡照年・SOC 0 % の条件と比べて R_{case} は高い値を示した。これは平均年では寡照年よりも PV 発電量が大きく、かつ 1 年目では設備劣化の影響が小さく、非常時に利用可能な電力量が増加するためである。両者の差は最大で 13.2 ポイントであり、最低 SOC を増加させるに従ってその差は小さくなり、SOC 100 % ではほぼ同等の結果となる。これは SOC 100 % では平常時に蓄電池を活用しないため、蓄電池劣化の影響が小さく、かつ災害発生時に満充電から開始することで、その後の PV 発電量の差のみが結果に影響するためである。

Fig. 7 より BESS 容量が 0 kWh であっても R_{hour} は 46 % あり、BESS 容量が 15 kWh までの範囲で R_{hour} は急激に増加する。これは、Fig. 4(b) で見たように昼間の日射量が多い時間帯では PV 発電のみで非常時負荷を直接賄うことが可能であるためである。BESS 容量が 17 kWh 以上ではすべての最低 SOC の条件下で R_{hour} は 90 % 以上となることが確認された。最低 SOC による順序は Fig. 6 と同様であった。さらに、1 年目・平均年と 20 年目・寡照年の比較では R_{hour} に対する影響は R_{case} と比べて小さかった。非常時負荷を 3 日間連続して賄えたかどうかを評価する場合

(Fig. 6) と非常時負荷を非連続的であっても、供給可能であった時間の割合を評価する場合 (Fig. 7) とではレジリエンスに大きな差異がみられた。前者の場合は日射量がない時間帯における電力供給の継続が求められるため BESS 容量の影響が大きく、最低 SOC によるレジリエンス向上効果も顕著に表れる。一方、後者の場合は PV 発電によって非常時負荷の約半分の時間帯に電力供給が可能のため BESS の影響が相対的に小さくなる。

PV 容量 68 kW, BESS 容量を 0 ~ 100 kWh で 1 kWh 刻み、平常時の最低 SOC を 0, 10, 20, 40, 60, 100 % と変化させたときの設備導入効率を Fig. 8 に示す。同様に併せて 1 年目・平均年・SOC 0 % の結果を示す。同図より、いずれの最低 SOC においても BESS 容量が 18 ~ 20 kWh の範囲で η_{res} が最大となった。これは夕方から翌朝までの非常

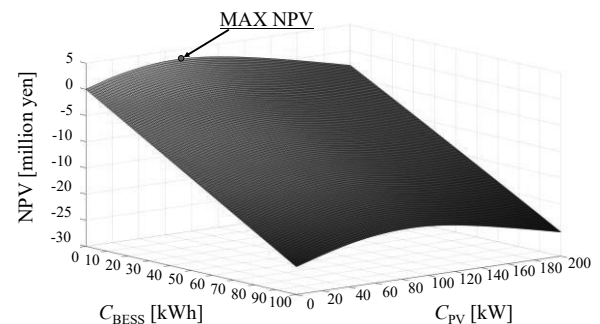


Fig. 5 NPV of equipment capacity (SCC)

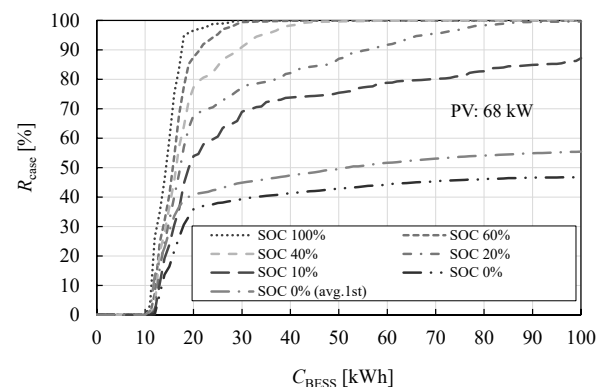


Fig. 6 Dependencies of R_{case} on BESS capacity (SCC)

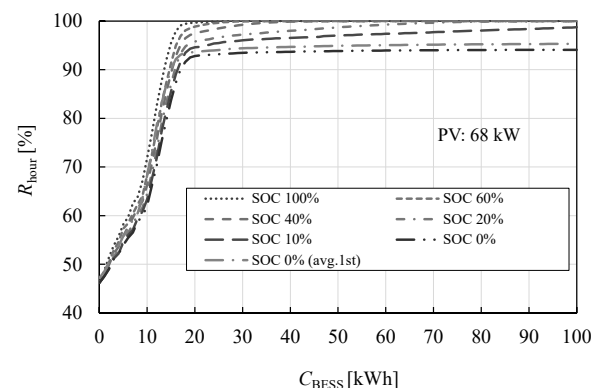


Fig. 7 Dependencies of R_{hour} on BESS capacity (SCC)

時負荷約 20 kWh を確保できる BESS 容量があれば 72 時間連続で電力供給を維持できる割合が急激に向上するためであると考えられる。一方、20 kWh を超える BESS 容量では活用機会が少なく、 η_{res} が低下していくため過剰な BESS 容量の追加はコスト面や η_{res} を考慮すると費用対効果が大幅に悪化する。以上より、本研究では η_{res} が最大となる 18 ~ 20 kWh の中間値 19 kWh をレジリエンスの観点での最適な BESS 容量とした。もっとも Fig. 6 からわかる通り、蓄電池の容量が大きいほどレジリエンス性能は高まるため、この値は BESS の最低容量と考えるのが適切である。さらに、1 年目・平均年の条件では、20 年目・寡照年の条件と比べて、全体として η_{res} は高い値を示した。また、 η_{res} のピーク位置は若干 BESS 容量の小さい側にシフトした。これは PV 発電量の増加と設備劣化の減少により、非常時に利用可能な電力量が増加し、比較的小さい BESS 容量でもレジリエンスが向上したためである。

また、従量料金最小化制御においても、それぞれのグラフはほぼ同様であり、ほとんど差が見られなかった。従量料金最小化制御では電力単価に応じて蓄電池の充放電タイミングが変化するものの、非常時の供給可能電力量に大きな差が生じないためである。

4. 経済性とレジリエンスを考慮した最適設備容量および SOC 設定に関する考察

経済性の観点から最適化された PV 容量 68 kW とそのときのレジリエンスの観点から最適化された BESS 容量 19 kWh を設定し、自家消費制御 (SCC) のもと、平常時の最低 SOC を 0 ~ 100 % の範囲で 1 % 刻みに変化させたときの NPV および設備導入効率を Fig. 9 に示す。最低 SOC を増加させると非常時に対する負荷供給可能性が増加し、設備導入効率が向上する一方、平常時の BESS の放電可能量が制限され、経済的には悪化する。特に最低 SOC を 2 ~ 3 % 引き上げることで夜間の日射量がない時間帯 (18 ~ 6 時) の非常時負荷を賄える時間数が 1 時間増加するため、レジリエンスが段階的に増加することが確認された。

設備導入効率の推移に着目すると、最低 SOC の増加に伴う η_{res} の変化の割合は SOC が 21 % で顕著に低下する。これは、非常時負荷を賄う時間が必要最低限の供給条件をほぼ満たす閾値に到達し、それ以降は追加的な最低 SOC 確保によるレジリエンス向上効果が低減し始めるためだと考える。経済性の観点では、すでに PV 容量 68 kW、BESS 容量 0 kWh のときに NPV が最大となることを確認し、最低 SOC による NPV の変動幅は限定的であることから、最適な最低 SOC は η_{res} の変曲点である 21 % とした。このとき NPV: -124.6 万円, LCOE: 22.1 円/kWh, R_{case} : 66.4 %, R_{hour} : 95.7 % となった。一方、従量料金最小化制御では最適な最低 SOC は 18 % となり、NPV: -122.9 万円, LCOE: 22.1 円/kWh, R_{case} : 62.8 %, R_{hour} : 95.7 % となり、両制御方式の差は僅かではあった。

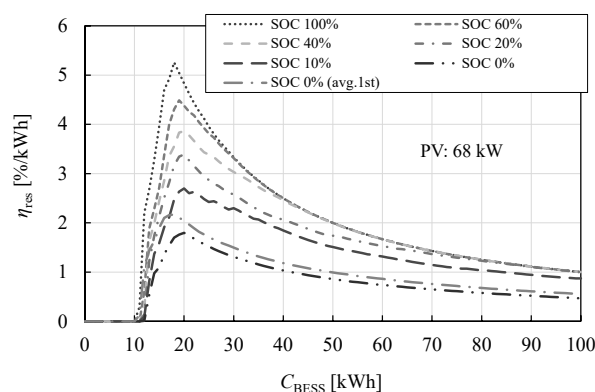


Fig. 8 Dependencies of η_{res} on BESS capacity (SCC)

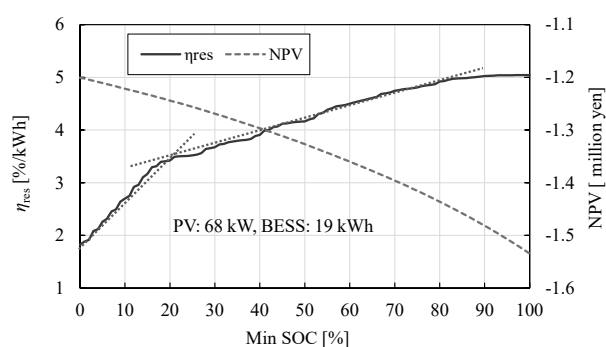


Fig. 9 Dependencies of NPV and η_{res} on minimum SOC (SCC)

現在、多くの学校では、BESS を積極的に活用しない最低 SOC 100 % 近傍での運用がなされている。このように BESS を非常時専用として、PV および BESS が適正容量導入するのであれば、 R_{case} : 95.8 %, R_{hour} : 99.6 % と高い値を示す一方、NPV は -153.4 万円となり、平常時の経済性は低下することになる。最低 SOC を最適化し、平常時から BESS を活用する運用においても、 R_{hour} は 95 % 以上を維持しており、供給可能時間の信頼性は十分に確保されている。したがって、レジリエンスを維持しつつ、平常時の経済性を改善できることが示された。

BESS 容量を 19 kWh とした場合に、Fig. 5 から最大 NPV となる点を確認すると、PV 容量は 73 kW となるが、大きな違いではなく、経済的な最適 PV 容量の下で BESS 容量を求めても問題はないと考える。

これらの値を、月毎の平日および休日の負荷データを加重平均して求めた年平均標準日負荷 334.9 kWh/d および非常時負荷の夜間電力 (PM6-AM6) 想定値 11.4 kWh/d で規格化²¹⁾ すると、以下の式となる。

$$P_{\text{PV}} = 0.218 \times W_{\text{day}} \quad (7)$$

$$W_{\text{BESS}} = 1.67 \times W_{\text{night}} \quad (8)$$

ここで、 P_{PV} は最適 PV 容量 [kW], W_{day} は年平均標準日負荷 [kWh/d], W_{BESS} は最低限の最適 BESS 容量 [kWh], W_{night} は想定非常時夜間消費電力 [kWh/d]。

なお、式(7)および式(8)は本研究で設定した気象条件、負荷条件もとで得られた近似式であり、無条件に一般化で

きるものではないが、浜松市と同様に通年日照に恵まれ、かつ施設条件が大きく異なる場合においては、年間の消費電力量および非常時の想定負荷がわかれば、PV および BESS の容量が簡易に推定でき、概算導入量の目安となると考える。

5. まとめ

本研究では、浜松市の避難所機能を備えた学校（延床面積：5600 m²（学校全体）、1000 m²（避難所：体育館）、避難所収容人数：約 300 人）を対象に経済性とレジリエンスの両方を考慮した最適設備容量を検討するため、電力授受シミュレーションを用いて設備容量および平常時の最低 SOC を変化させたときの経済性とレジリエンスを評価した。その際、文献調査に基づき、対象モデルの規模に伴う負荷要件から実際の運用条件に適した平常時および非常時の負荷パターンを作成した。経済性の観点から最適設備容量を求めた結果、PV 容量 68 kW、BESS なしが最適であり、このとき NPV は 315.3 万円、LCOE は 17.5 円/kWh となった。レジリエンスの観点では BESS が日射量の少ない時間帯における非常時負荷を十分に賄える容量を有し、かつ PV 発電による余剰電力を有効に活用できる範囲でその導入効果が最大化されることが示され、設備導入効率が最大となる 19 kWh を最低限の最適な BESS 容量とした。

また、平常時の最低 SOC を増加させると非常時の供給可能電力量が増加し、レジリエンスも向上するが同時に経済性が悪化することを示した。上記の PV および BESS 容量において、最低 SOC を 0~100 % の範囲で変化させた結果、設備導入効率 η_{res} が最低 SOC 21 % において大きく変化することを明らかにした。このとき NPV: -124.6 万円、LCOE: 22.1 円/kWh、 R_{case} : 66.4 %、 R_{hour} : 95.7 % となった。したがって、平常時に BESS を活用する運用を行っても、非常時における供給可能時間の信頼性は十分に確保されることが示された。自家消費制御および従量料金最小化制御を比較した結果、両者の差は僅かであった。本研究の対象地域である浜松市は比較的日照条件に恵まれた地域であるため、日照条件が厳しい地域では同一設備容量であっても経済性とレジリエンスの両面で、本研究で得られた結果より低い結果となる可能性がある。

以上より、経済性とレジリエンスのトレードオフを考慮した場合、本研究条件下における最適設備容量は PV 68 kW、BESS 19 kWh、最低 SOC 21 % と結論付けた。さらに、日射条件に基づく規格化を行った結果、国内の通年日照に恵まれた地域においては、(7)式および(8)式で示される値が最適導入容量の概算値の目安となることを示した。

参考文献

1) 経済産業省, 第 6 次エネルギー基本計画 (accessed Mar. 3rd 2025), <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>

2) 竹居直紀, 松本慎喜, 秋元祐太郎, 岡島敬一, 「PV・蓄電池システム導入のための施設特性を考慮した低炭素レジリエンス複合評価」, 第 33 回日本エネルギー学会大会講演要旨集 (2024 年 8 月), 190-191, 東京都 新宿区 (DOI: 10.20550/jietaikaiyoushi.33.0_190)

3) 白倉遼太郎, 雀錦丹, 植田謙, 「GIS と気象データを活用した避難所における PV 発電ポテンシャルと電力自給率の定量評価」, 令和 8 年度電気学会全国大会講演論文集, (2026 年 3 月), 7-013, 21-22, 宮城県 仙台市.

4) Hasan Masrura, Optimal and economic operation of microgrids to leverage resilience benefits during grid outage, *Electrical Power and Energy Systems* **132**, 107137 (2021) (DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107137)

5) NEDO, MONSOLA-20, (accessed May. 12th 2026), <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html>

6) NEDO, METPV-20 (accessed Mar. 3rd 2025), <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html>

7) 総務省統計局, 統計でみる都道府県のすがた 2026, (accessed May. 11th 2026), https://www.stat.go.jp/data/k-sugata/pdf/all_ken2026.pdf

8) 浜松市ホームページ, 浜松市国土強靱化地域計画, (accessed Apr. 20th 2026), https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/documents/82039/kokudokyojinka_202602.pdf

9) 文部科学省, 文部科学省統計要覧 (accessed Mar. 3rd 2025), https://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/002/002b/1417059_00008.htm

10) 浜松市公式ホームページ, 緊急避難場所・避難所 (accessed Mar. 3rd 2025), <https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/documents/94622/hinanjo.pdf>

11) JIS C 8907 : 2005, 太陽光発電システムの発電電力量推定方法 (accessed Jan. 26th 2026), <https://kikakurui.com/c8/C8907-2005-01.html>

12) R. Ishikawa and H. Matsuo, Evaluation of energy and economy of battery system installation in residential PV system after FIT expiration, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **46** (5), 63-70 (2020) (DOI: 10.24632/jses.46.5_63).

13) 経済産業省, 太陽光発電について (accessed Feb. 17th 2025), https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/100_01_00.pdf

14) 三菱総合研究所, 定置用蓄電システムの普及拡大策の検討に向けた調査 (accessed Feb. 17th 2025), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/2024_005_03_00.pdf

15) 中部電力, 業務用プラン (accessed Feb. 17th 2025), https://miraiz.chuden.co.jp/business/electric/menu/office/hi_under/fr/

16) 経済産業省, 令和 6 年度以降 (2024 年度以降) の調達価格等について (accessed Feb. 17th 2025), https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/093_b01_00.pdf

17) JSBC, DECC 公開用データベース (accessed Feb. 17th 2025), <https://www.jsbc.or.jp/decc/index.html>

18) ReAir, 業務用エアコン運用ノウハウ (accessed Dec. 11th 2025), <https://re-air.jp/blog/39104/>

19) 文部科学省, 屋内運動場空調設備設置に係る断熱化事例集 (accessed Dec. 11th 2025), https://www.mext.go.jp/content/20250711-mxt_sisetujo-000010164_1.pdf

20) 文部科学省, 公立学校の体育館等における空調 (冷房) 設備の設置状況について, (accessed Apr. 28th 2026), https://www.mext.go.jp/content/20250623-met-sisetujo-000043167_02.pdf

21) Hironobu Matsuo, Yash Pandey, Md Imtiaz Kabir, and Sourasis Chattopadhyay, "Bridging complexity and accessibility: A novel model for PV and BESS capacity estimation in rural microgrids near the equatorial region", *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* **14**, 101107 (2025) (DOI: 10.1016/j.prime.2025.101107)